

重要鋼廠 DRI 獲取模式分析

壹、前言

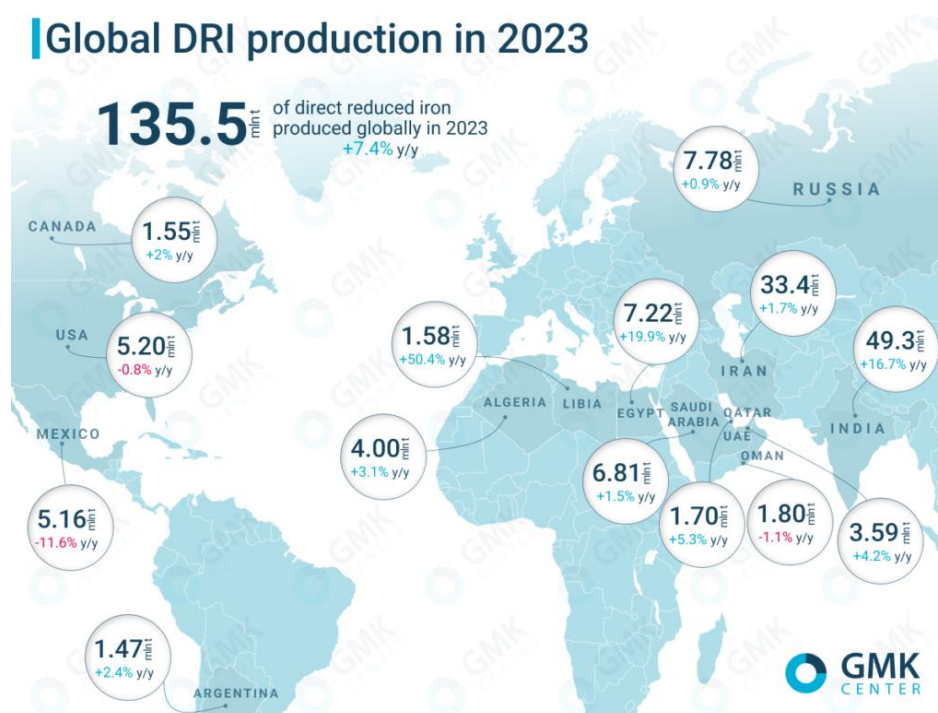
根據巴黎協定，全球淨累積碳排放量於 2015~2100 年，不應超過 1,978 Gt CO₂，但以目前排放水平，可能在 2054 年就耗盡，而往後 46 年要零排放，因此這是一個極大的挑戰。

鋼鐵業主要的兩種生產，是高爐/轉爐技術，以及電爐技術。高爐使用煤礦會產生碳排，電爐若使用廢鋼熔煉，相對碳排比較少，因此從高爐-轉爐煉鋼，轉為電爐煉鋼是很直覺的一種作法。但廢鋼的總量並不充足，且品質參差不齊。

此時，經過低碳製程的直接還原鐵，便是許多國家開始研究的其中一條道路。直接還原鐵已經去除氧原子，不論是投入高爐或電爐，都可以有減碳的效果。然而，在初步鐵還原的階段，所使用還原劑的含碳量，及供給的能源是否為綠能，也應一併考慮。

貳、直接還原鐵技術（Direct-Reduced Iron, DRI）簡介

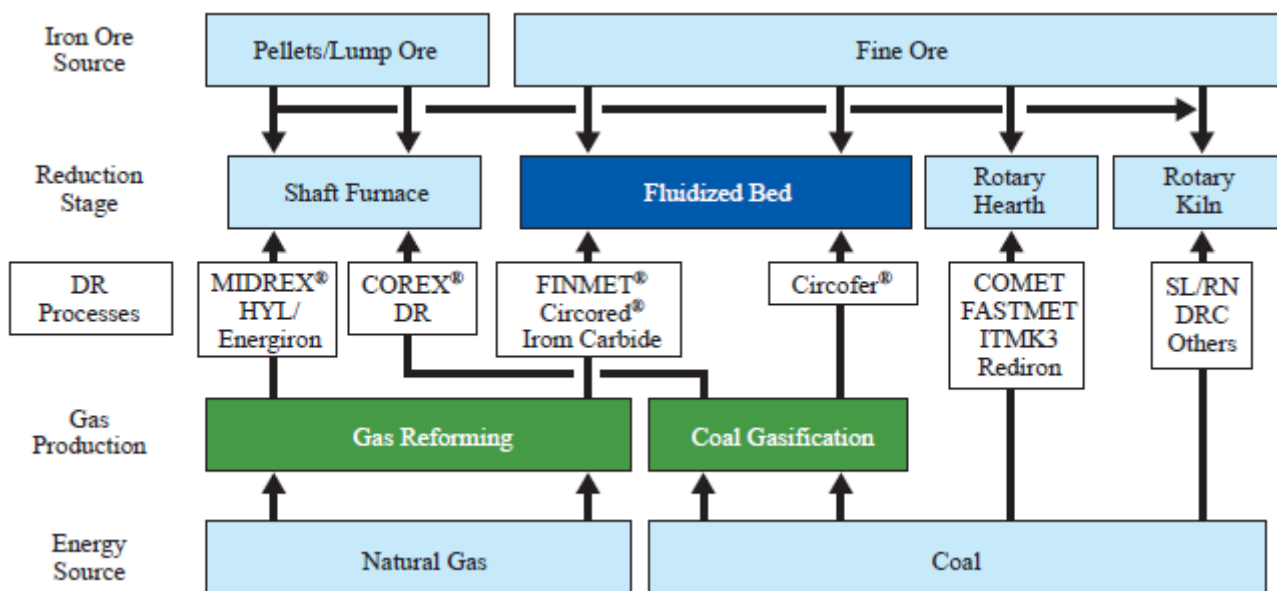
DRI 是指一種在低溫下將鐵礦石直接還原成金屬鐵的技術，未使用焦炭，不造渣。若使用的還原劑是低碳，甚至於零碳原料，碳排放量可降低，更為環保。預計到 2030 年，全球 DRI 產量將增長達 1.75 億噸，預期產量增長最快地區為歐盟和中東國家，2023 年全球生產量請參考圖一。



圖一、2023 年全球 DRI 生產量

圖片來源：GMK CENTER

DRI 按照還原劑的種類不同，可分為氣基直接還原和煤基直接還原，全球以氣基直接還原為主流，產量比例約為 7:3，其製程分類請參考圖二。



圖片來源：工業材料雜誌

圖二、直接還原鐵製程分類

氣基直接還原使用的氣體，可以是天然氣、氫氣、COG 等。目前實際生產近八成以使用天然氣為能源，天然氣資源豐富如中東、南美等地，因此當地常見 DRI 工廠（例如 JFE 與阿聯酋鋼鐵合作）。理論上使用綠氫生產 DRI 最為環保，但受限於技術、成本，還正在發展中。

由圖二可看出氣基直接還原可分為豎爐 (Shaft Furnace) 技術和流化床 (Fluidized Bed) 技術，目前豎爐技術以 MIDREX 為國際領導廠商，每年生產低碳 DRI 產量佔全球約 80%，詳細技術請參閱後方「神戶製鋼」介紹。

流化床技術較知名為 FINMET 技術，固體顆粒於特定的條件將會變得如流體般，使用原料與豎爐不同，使用鐵礦粉進行還原反應，使用礦粉粒徑大小為 10 μ m~6.3mm，而豎爐必須造粒使用球團礦 (Pellet)，大小約為 9~13mm。

FINMET 基本製程如圖三所示，其中包含四個流化床，且前端需要一個 Shift Reaction 重整器，將天然氣轉換為 CO 和 H₂ 還原氣體，每個流化床有各自的反應溫度和氣體含量，每個流化床負責一個反應，其反應式如下所示，而重整後的還原氣體，經由 R1 內部反應產生還原鐵。

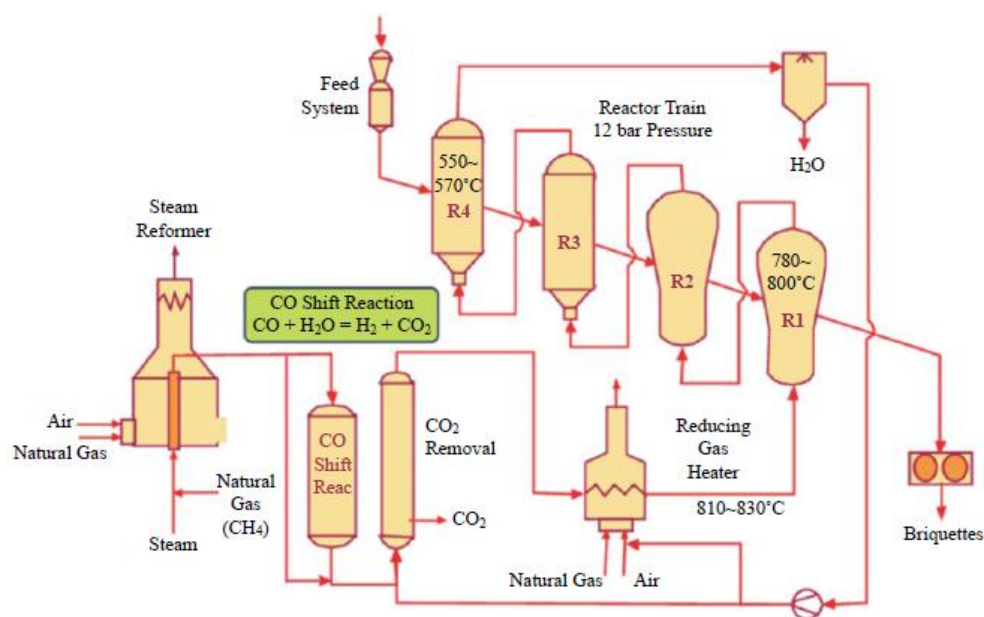
R4 : $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$;

R3 : $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO}$;

R2 : $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$;

R1 : $\text{Fe} \rightarrow \text{FeC}$

前西門子奧鋼聯(Siemens VAI Metals Technologies)為現普銳特冶金技術(Primetals Technologies)開發了 FINMET 技術，而後來的 FINEX 技術是與韓國 POSCO 共同開發，製程本質上是 FINMET 的流體化床和 COREX 的熔融氣化器的組合。兩個過程看起來有相似的地方，不同的是特定的操作條件，如壓力、DRI 的目標狀態(Metallization)。POSCO 於 2007 年投入 FINEX F-1.5M 設備後，再於 2014 年投入優化的 FINEX-F2.0M 設備，提高鐵水技術與環保要求。然而 POSCO 在 FINEX 技術的基礎上，開發 HyREX 技術，開始朝 2050 年淨零排碳的目標前進。



圖三、FINMET 技術流程圖

DRI 因為在不融化的狀態下受到還原，從鐵質裡面去除氧，因此表面會有許多氣孔狀，也稱為海綿鐵。依照成品的不同型態，可以分為常溫還原鐵(CDRI)、熱還原鐵(HDRI)、熱壓鐵塊(HBI)。其中 HDRI 是熱裝熱送，適合廠內運輸直接使用；CDRI 為還原後冷卻形成，若長時間接觸空氣可能再次氧化，產生高溫燃燒；HBI 為還原鐵經過壓製，通常在 650°C 以上進行，成品能

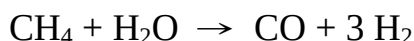
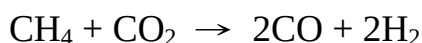
降低表面積和反應活性，不易再氧化，因此可用於長途運輸。

參、重要鋼廠 DRI 開發

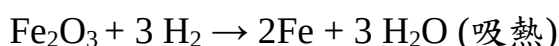
一、神戶製鋼

由前述可以知道氣基直接還原，以豎爐(Shaft Furnace)技術為近幾年各鋼廠常見的研發技術，因此一定會提到國際領導廠商 MIDREX。MIDREX 製程由神戶製鋼子公司 MIDREX Technologies. Inc.開發並擁有，MIDREX 工廠遍布全球，每年生產低 CO₂ DRI 佔全球約 80%。獨特之處為靈活性，從排碳到氫經濟的轉變，MIDREX 可在這一轉變中發揮橋樑作用。

其反應流程如圖四，天然氣經過 MIDREX 重整器(Reformer)，轉化為還原氣體 CO 與 H₂，反應式如下：

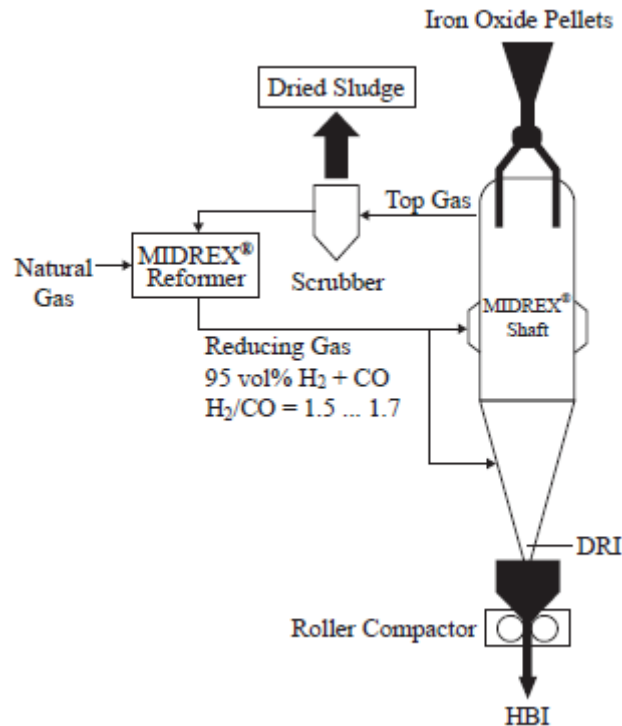


為了最大幅度提升重整效率，豎爐排出的廢氣被回收與新鮮天然氣混合，送入重整器中。重整器內是一個內襯耐火材，包含填充催化劑的合金管，氣體經過管道時被加熱與重整。新轉化的氣體含有 90~92% H₂ 與 CO。鐵礦石透過重力下降，同時被加熱，還原氣體進入反應室，與球團礦(Pellet)及塊礦(Lump)進行反應，還原出金屬鐵，反應式如下：



還原溫度落在 800°C 到 1000°C 之間，因此溫度控制是很重要的因素，正好兩者反應式，一則吸熱，一則放熱，熱平衡使得 MIDREX 製程易於控制。而未來以零碳排為目標，則需改以純氫氣為還原氣體，反應將變成只以吸熱為主，需額外提供熱能，因此如何保持反應室的溫度，是必須克服的條件之一。

在電爐煉鋼中，短距離的熱運輸可減少電力，是降低每噸鋼液成本的有效手段，進而可縮小電爐熔煉的電器規模。最有效的途徑是，DRI 可以熱排放送入壓塊機生產 HBI，或以 HDRI 熱送入 EAF。

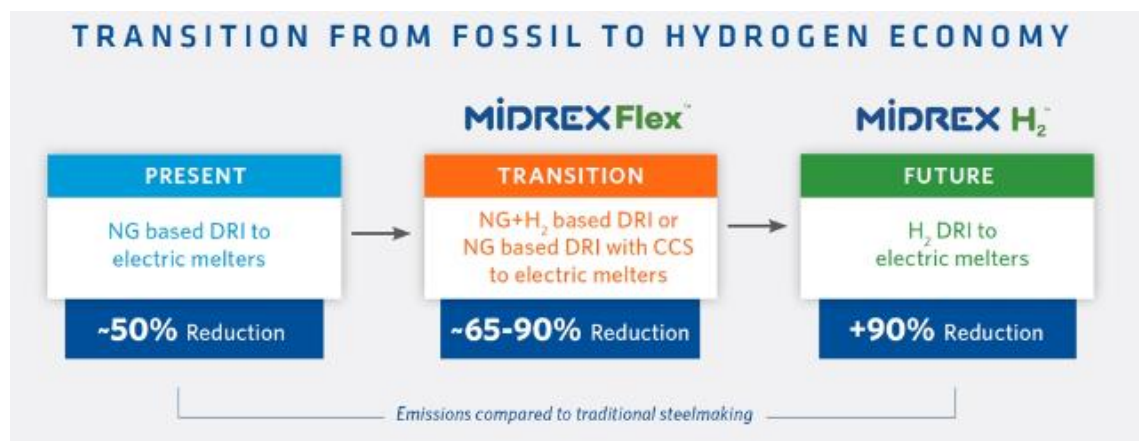


圖四、MIDREX 直接還原技術簡圖

圖片來源：工業材料雜誌

MIDREX 的主要技術，分為 MIDREX FLEX[®]、MIDREX H₂[™]、MxCoL[®]。MxCoL[®]是以合成氣為還原氣體，或含碳燃料產生由氫氣、一氧化碳、二氧化碳組成的混和氣。

如圖五，MIDREX FLEX[®]可看作 MIDREX H₂[™]的過渡期。乾淨的天然氣(NG)或重整氣含 50%以上的 H₂，可用於 MIDREX FLEX[®]工廠。目前較為矚目的即 MIDREX Technologies 與 Paul Wurth (屬西馬克集團)合作，為蒂森克魯伯建造 MIDREX FLEX[®]工廠，預計 2026 年底啟用。



圖片來源：MIDREX 官網

圖五、MIDREX 自石化經濟轉為氫經濟

MIDREX H₂TM 系統中，還原氣體約含 55~75% H₂，與 Paul Wurth 被選定供應瑞典 H₂ Green Steel 新創公司，將用於生產 HDRI 和 HBI，預計於 2025 年啟用。MIDREX H₂ 的另一個應用案例，為荷蘭的 Blastr Green Steel 公司，由 MIDREX 和 Primetals Technologies 合作建立。目前正在研究 100% 的氫氣作為還原劑，其 HDRI 與 HBI 工廠的綜合產能預計達 200 萬噸/年。(Blaster Green Steel 成立於 2021 年，為促進北歐鋼鐵業脫碳，目標是生產汽車和建築的高級鋼材)

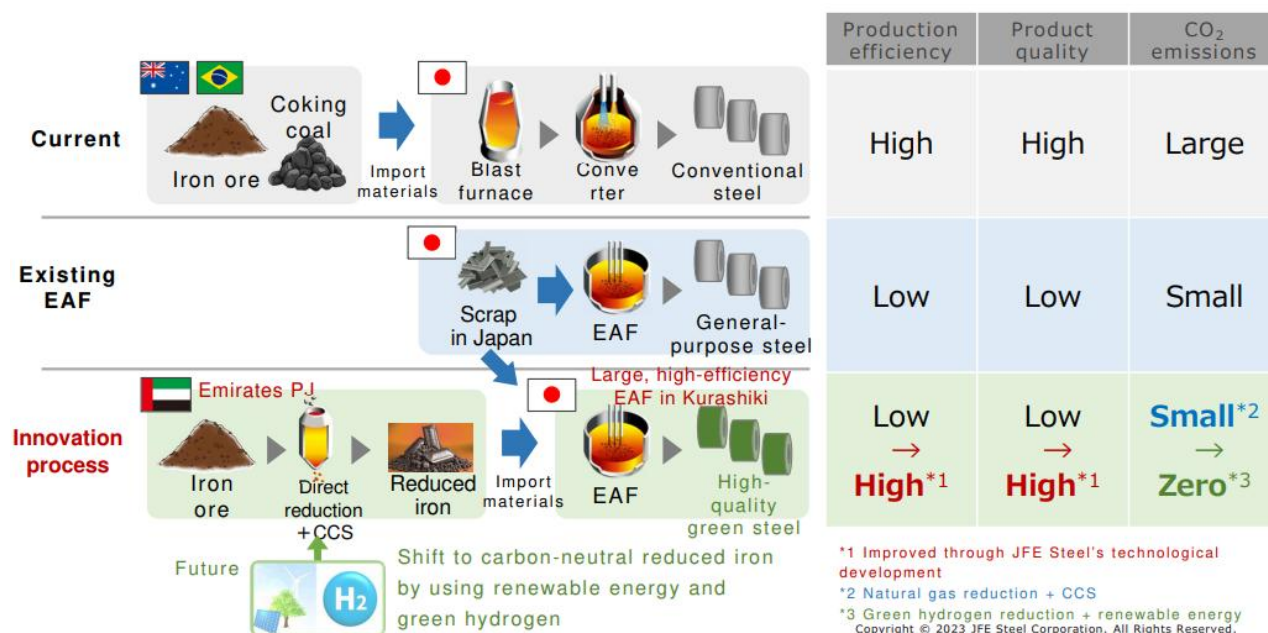
除了 MIDREX 技術已提供給許多鋼廠使用，神戶製鋼自己也有開發案進行中：神戶製鋼、三井物產株式會社與 Oman 國家經濟特區自由區域(OPAZ)合作，將在 Oman 港口生產和銷售 DRI。Oman 位於阿拉伯半島東南沿海，是天然氣豐富的地區，將使用 MIDREX 技術，初步目標為生產 500 萬噸/年 DRI，並考慮使用氫氣與 CCUS。

二、JFE

在日本，有一個 Green Innovation (GI) Fund 基金，作為贊助「新能源產業技術綜合開發機構」(簡稱 NEDO)於鋼鐵生產使用氫氣之計畫。JFE 藉由 GI Fund 的金援，開展了一系列計畫，包含：高爐 Carbon recycling、氫氣直接還原鐵、電爐、CCUS。

一系列的計畫中，針對直接還原鐵的佈局，JFE Steel 與阿聯酋鋼鐵公司、日本伊藤忠商事株式會社合作，三間公司於 2022 年簽署協議，共同建立低排放綠色煉鐵技術(圖六)。JFE 的高爐，使用巴西與澳洲鐵礦與煤礦，但此製程屬於較高排碳量的煉製。目前既有的電爐使用廢鋼冶煉，產出的產品品質較為一般。因此 JFE 計畫將阿聯酋鋼鐵的鐵礦石，利用再生能源或綠氫生產直接還原鐵，再進口至日本倉敷的電爐，製作高品質鋼鐵，並將低排碳量。

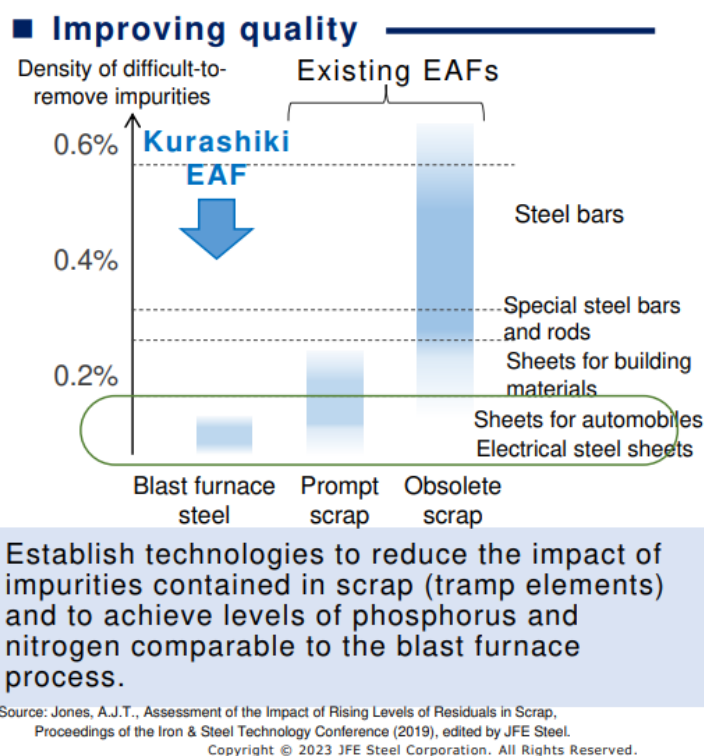
阿聯酋直接還原鐵項目，初始階段使用天然氣為還原氣體，預期未來將還原氣體改為氫氣。再搭配 CCS，將 CO₂ 注入油田，同時可提高石油開採率。規劃 2025 下半年開始，年產量 250 萬噸 DRI。日本倉敷電爐，將採用最新型的設備，使用高效率燃燒器、高速融熔技術等。



圖片來源：JFE Environmental Vision 2050

圖六、三間公司合作生產低碳鋼

JFE 現有電爐在製造鋼筋、特殊棒材或建築材料，難處理的雜質密度的極限約莫在 0.3~0.6%，而倉敷電爐預期可以達到 0.2%以下的汽車用板，達到與高爐製程相當的氮、磷水平(圖七)。

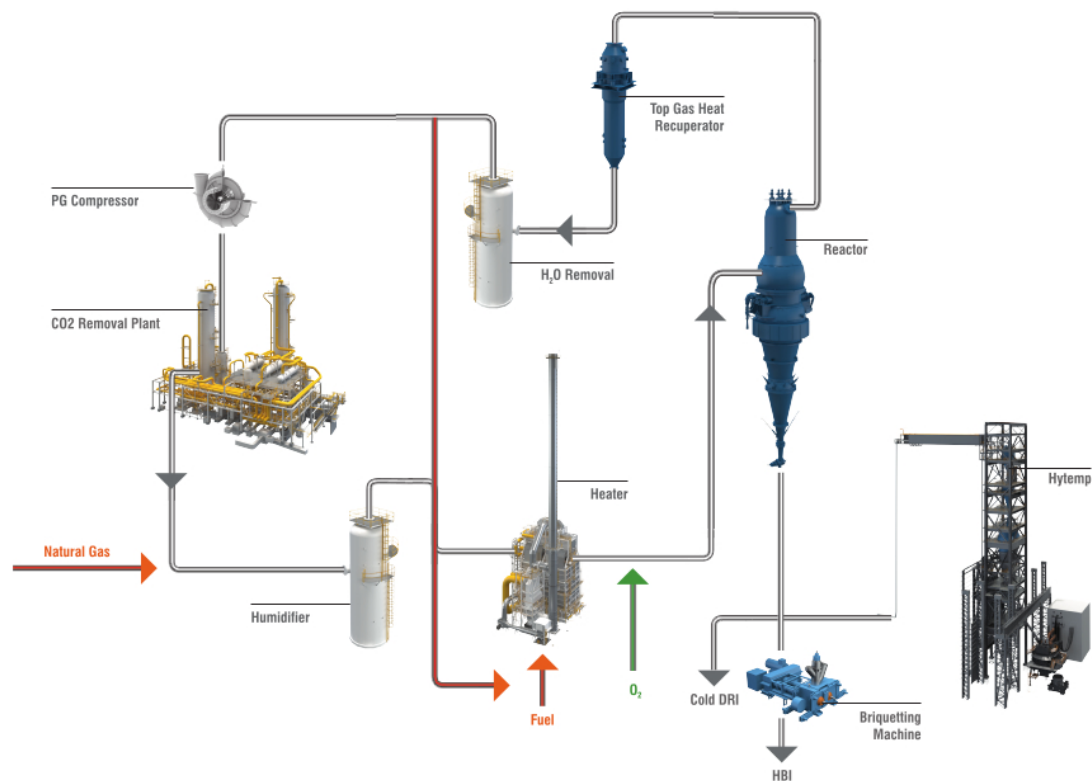


圖片來源：JFE Environmental Vision 2050

圖七、倉敷電爐提高煉鋼品質

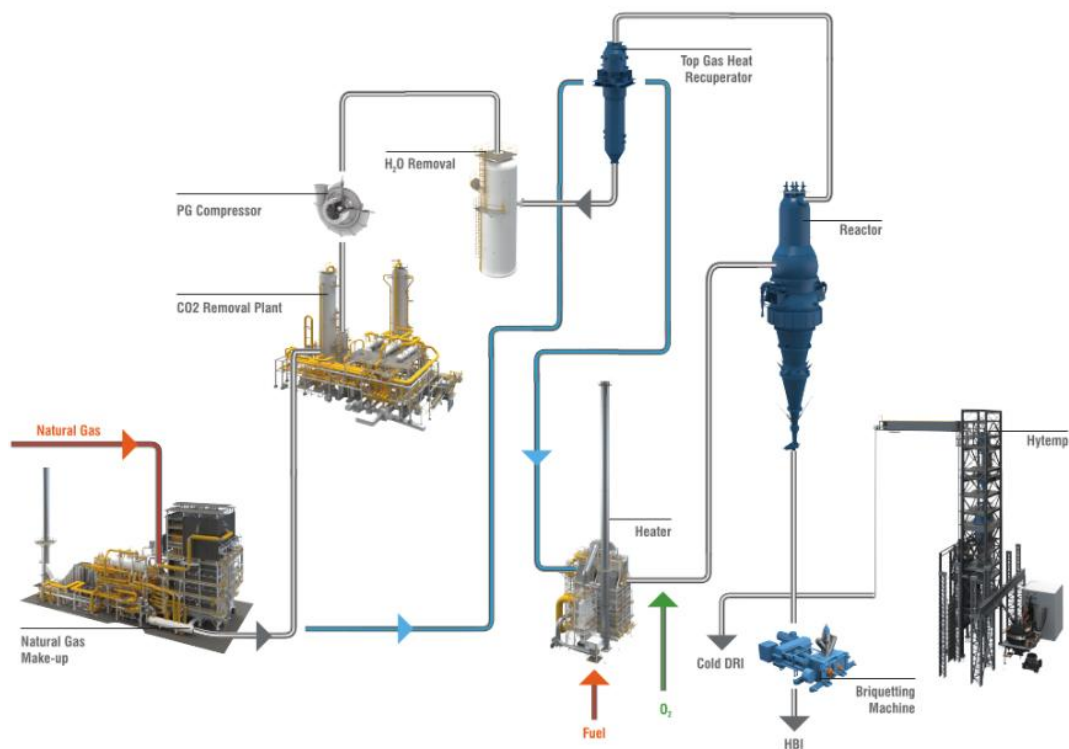
三、Nippon Steel 日本製鐵

Tenova 向日本製鐵提供 ENERGIION[®]技術的實驗級直接還原裝置，此裝置能使用氫氣作為還原氣體，以及組成任意比例的不同氣體。2024 年宣布將建置小型豎爐於日本製鐵波崎(Hasaki)研發中心，容量為 10 噸，並於 2025 年開始實驗。



圖片來源：ENERGIION 官網

圖八、ENERGIION[®] ZR 流程圖



圖片來源：ENERGIION 官網

圖九、ENERGIION[®] III 流程圖

ENERGIRON®技術，最早在 2006 年，由 Tenova、Danieli 開發直接還原鐵技術，位於阿聯酋第一個小型 DRI 工廠。於 2010 年提供紐柯鋼鐵公司，當時世界最大單一模組 DR 設備。

ENERGIRON®的 ZR 技術，稱為零重整器，即是不需要重整器。假設還原氣體以天然氣為主，甲烷與額外添加的氧氣透過豎爐中，在原本的位置被重整，因此無需另安裝重整器。天然氣在添加氧氣後，經過豎爐本身的 DRI (Fe 元素)為催化劑，重整為 $H_2 + CO$ 。若還原氣體來源含有重碳氫化合物(Heavy Hydrocarbon)，則可以選擇 ENERGIRON® III 技術，天然氣則會經過蒸氣重整器，內含鎳基催化劑，將天然氣轉化為 H_2 和 CO 。分離的重整器使得在還原迴路中，容易添加其他還原劑的混和比例，也不會受到製程氣體中異常的影響。(流程圖如圖八、圖九)

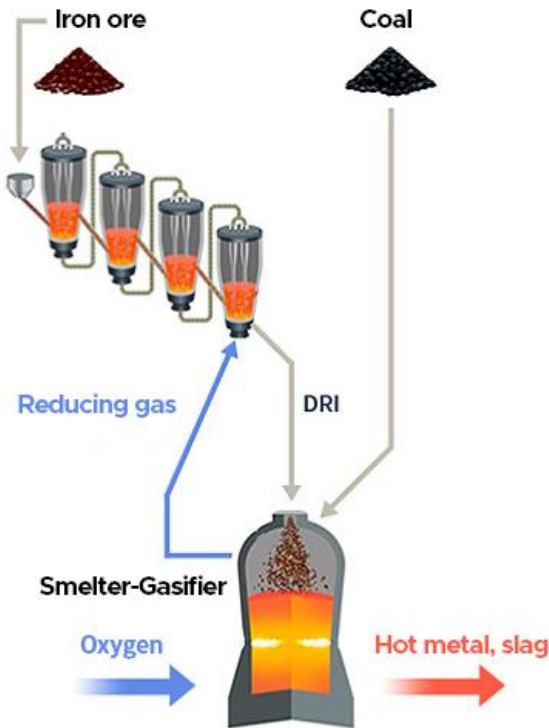
四、POSCO 浦項鋼鐵

普銳特冶金技術(Primetals Technologies)與 POSCO 在早期共同開發 FINEX 技術，於 2007 年便開始於工廠使用。FINEX 是將鐵礦，經由多座流體化床反應器，產出 DRI。DRI、煤炭(Coal)與氧氣，再進入融熔氣化爐(Smelter-Gasifier)產出鐵水。有煤炭的參與，作用在於產生還原氣體，前往流體化床反應器的製程。(見圖十)

目前 POSCO 有兩座 FINEX 生產 DRI，在此基礎上，POSCO 繼續研發「HyREX」技術，採用更成熟的流體化床反應器，並往 100%氫氣還原方向努力。HyREX 的還原與熔化設備同樣是分離的，為四座流化還原爐與一座電熔爐(Electric Smelting Furnace)。氫氣將被注入四個連接的還原爐進行還原，生產出 DRI，再產生鐵水。(見圖十一) HyREX 不再藉由 CO 作為主要還原劑，改以氫氣為還原劑，而綠氫的來源至關重要，POSCO 也聲明正在努力探索再生能源。

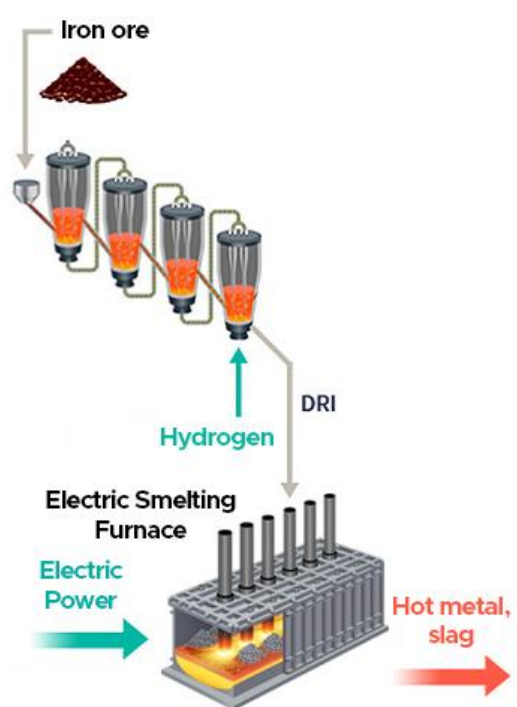
HyREX 的流體化床，有多個開口分配版，均勻地流入，在特定的條件下，還原氣體使固體像流體般漂浮，使細礦顆粒均勻。因此這種特性能使用細鐵礦石，無需進行額外造粒。另外，氫還原的本質是吸熱，因此反應需要額外供給熱能，HyREX 流體化床反應器以多個順序構成，可以對每個反應器進行有效控溫。

POSCO 計畫於 2027 年完成年產能 30 萬噸的 HyREX 氫試驗工廠，目標是到 2030 年完成製程商業化，2050 年將浦項廠與光陽廠全部轉為 HyREX。



圖片來源：POSCO 官網

圖十、FINEX 流程圖



圖片來源：POSCO 官網

圖十一、HyREX 流程圖

五、ArcelorMittal 安賽樂米塔爾

ArcelorMittal 於不同國家都有設立 DRI 工廠的計畫(如表一)：

(一) ArcelorMittal Dofasco 工廠

自 2022 年起，於加拿大的 Dofasco 工廠，動工建造直接還原鐵工廠，預期於 2026 年完工。此工廠計畫從高爐-轉爐生產路線過渡到 DRI-EAF 生產路線。Dofasco 工廠選擇使用 ENERGIRON ZR 技術，由 Tenova 與 Danieli 設計，新的工廠使用天然氣為還原劑，再加上捕捉二氧化碳的設備，進一步減少排碳量。

(二) ArcelorMittal Gijón 工廠

ArcelorMittal 於 2021 年與西班牙政府簽訂一份備忘錄，計畫的核心是於 Gijón 工廠建置一座 230 萬噸/年的綠氫 DRI，以及一座 110 萬噸

的混和電爐，理念也是從高爐-轉爐生產路線過渡到 DRI-EAF 生產路線。2023 年 7 月時，宣布新電爐的前端工程部分設計已完成，預計 2025 年下半年可投入使用，將 DRI 供給給 250 公里遠的 Sestao 工廠。

(三) ArcelorMittal Bremen & Eisenhuttenstadt 工廠

自 2021 年宣布於德國 Bremen 和 Eisenhuttenstadt 工廠建造大型 DRI-EAF 工廠，預計於 2030 年可生產 350 萬噸 DRI。ArcelorMittal 最初計劃於 Bremen 使用天然氣生產 DRI，後續使用電解製氫。Bremen 直接還原鐵生產的 DRI 海綿鐵，最初將供應 Bremen 和 Eisenhuttenstadt 的鋼廠，直到氫氣足夠供應 Eisenhuttenstadt 工廠。

(四) ArcelorMittal Hamburg 工廠

ArcelorMittal 在 2019 年，與 MIDREX 簽署合作協議，於德國 Hamburg 鋼鐵廠，設計一座用氫生產鋼鐵的示範工廠，並進行多個研發項目。2021 年德國政府提供部分資金，支持工業規模氫基 DRI 工廠，預計於 2025 年投入營運。最初使用鋼廠捕捉廢氣中產出的灰氫進行測試，後續需要乾淨的能源製氫，能源可能來自德國北部海岸的風電廠。

(五) ArcelorMittal Dunkirk & For-sur-mer 工廠

ArcelorMittal 在法國政府的支持下，進行投資以加速 Dunkirk 和 For-sur-mer 鋼廠的脫碳。ArcelorMittal 將在 For-sur-mer 建造一座電爐，打造成回收鋼品的低碳循環基地，再於 Dunkirk 建造一座年產 250 萬噸的 DRI 工廠。預期於 2027 年開始營運，到 2030 年將逐步取代在法國五個高爐中的三個。重點的摘要結果如表一所示。

(六) ArcelorMittal Gent 工廠

ArcelorMittal 於 2019 年，宣布與比利時政府簽署意向書，在 Gent 工廠建造一座年產 250 萬噸的 DRI 工廠，以及兩座新的電爐，來取代位於 Gent 的兩座高爐之一，預計於 2026 年開始營運。最初 DRI 使用天然氣，最終希望換成氫氣。留存下來的高爐將與 DRI 工廠相互經營，高爐將使用廢木材與塑膠作為化石碳的替代品，減少碳排。重點的摘要結果如表一所示。

表一、ArcelorMittal 整理

鋼廠	DRI Mtpa	還原氣體	預計年份	備註
ArcelorMittal Canada (Dofasco)	2.5	NG→H ₂	2026	使用 ENERGITON ZR 技術
ArcelorMittal Spain (Asturias)	2.3	NG→H ₂	2025	DRI 將供應 Sestao 工廠
ArcelorMittal Germany(Bremen & Eisenhuttenstadt)	3.5	NG→H ₂	2030	為確保未來氫氣供給，兩個地點都將整合到歐洲氫氣網路中
ArcelorMittal Germany (Hamburg)	0.1	NG→H ₂	2025	使用 MIDREX 技術
ArcelorMittal France (Dunkirk)	2.5	NG→H ₂	2027	2030 年將取代在法國五個高爐中的三個。
ArcelorMittal Belgium (Gent)	2.5	NG→H ₂	2026	DRI 工廠將與更新過的高爐一起營運

六、Thyssenkrupp 蒂森克魯伯

Thyssenkrupp 將透過 MIDREX 和 Paul Wurth 一起合作，建設一座 250 萬噸/年的 MIDREX FLEX[®] DRI 工廠。最初會使用重整後的天然氣進行反應，再過渡到使用 100% 氫氣，工廠預計於 2026 年底啟動。

今年初，Thyssenkrupp 從 Düsseldorf 區政府獲得批准，可以提前開始建設 DRI 工廠，目前準備工作已完成，可以開始進行基礎工程。

七、HYBRIT Development AB

2017 年，SSAB 鋼廠、LKAB(瑞典礦業公司)與 Vattenfall(瑞典跨國電力公司)成立一間合資公司 HYBRIT Development AB，以推動 HYBRIT 計畫，目標於 2026 年市面上能有 fossil-free 鋼鐵。

2020 年啟動一個全氫氣的試驗工廠，位於瑞典 Luleå，由 ENERGIRON[®] 提供關鍵設備，初期由天然氣測試，後轉為氫氣。開發的下一步 LKAB 也與 Tenova、Danieli 簽屬合約，負責 LKAB 位於 Gällivare 的 100% 氫基 DRI 工廠的基礎工程。預計使用的電力來源，取自 Vattenfall 產生的綠能。該工廠 DRI 產能為 135 萬噸/年，將基於 HYBRIT 技術，並結合 ENERGIRON 知識與 DRI 工廠經驗。

後續產生的 DRI 海綿鐵，將交由 SSAB 配合的電爐、軋延廠接續處理，最後供應給合作夥伴。

八、H₂ Green Steel

H₂ Green Steel 是一間新創公司，成立於 2020 年，成立的目的是使歐洲鋼鐵進行脫碳。於 2024 年宣布，透過融資、歐盟資助等，已獲得近 65 億歐元(約 2300 億台幣)的資金。自 2022 年開始規劃，將使用 MIDREX 技術，在瑞典 Boden 建立 DRI-EAF 工廠。預期於 2025 年開始營運，初始產能為 250 萬噸/年。

H₂ Green Steel 與蒂森克魯伯 Nucera 公司簽署協議，確保 Boden 的大型電解廠容量能超過 700MW，產生的氫氣將用於 DRI。決定在瑞典北部設廠，也因為此處是歐洲電力成本最低的地區，且綠色能源約占當地能源結構 90%。

肆、結語

直接還原鐵是一種有效大幅降低碳排的方式，高爐-轉爐的每噸鋼碳排為 1968kg，若使用基於天然氣製作的 DRI 與電爐，每噸鋼碳排為 260kg。使用綠氫與再生能源，理論上可以達到零碳排。一般鋼鐵產業的製造模式轉換，需要很長的時間，而在 2050 年碳中和的緊迫目標下，是挑戰也是機會，各國家已投入非常大量的研發能量，但要達到零碳排放，仍需要很多的研究與試驗。

本次集結了數家鋼廠，針對 DRI 直接還原鐵的規劃與進展，所做的資料彙整。發現各主要鋼廠，傾向以自建工廠的形式，或是與其他企業合資建廠，來獲取 DRI 的料源，因此從廠址的選擇、採用的技術、需要的資金、電力的來源等，皆逐漸開始規劃。建廠完工約落在 2025 年~2027 年，最遲也到 2030 年能有一個較明確的里程碑。初步的規模約在 2~5Mtpa，除了北歐新創公司，直接以 100%氫氣為研究對象，其餘傾向由天然氣開始，逐步轉換為氫氣。主要的應用技術，除了 POSCO 獨自開發的 HyREX 技術，或鋼廠未公開之外，MIDREX 與 ENERIRON 目前仍為市占率較高的技術。簡易摘要如表二。

表二、各家鋼廠整理

鋼廠	DRI Mtpa	還原氣體	預計年份	備註
KOBE Steel & Mitsui&Co. (Oman)	5	NG→H ₂	2027	工廠位於 Oman，使用 MIDREX 技術
JFE, Emirates Steel Arkan, ITOCHU	2.5	NG→H ₂	2025	生產 DRI 用於倉敷電爐
Nippon Steel	小型豎爐 (10 噸規模)	NG→H ₂	2025	於 Hasaki 研究中心進行試驗
POSCO	0.3	(25→100%)H ₂	2027	發展 HyREX 技術
ArcelorMittal Canada (Dofasco)	2.5	NG→H ₂	2026	ENERGITON ZR 技術
ArcelorMittal Spain (Asturias)	2.3	NG→H ₂	2025	DRI 將供應 Sestao 工廠
ArcelorMittal Germany(Bremen & Eisenhüttenstadt)	3.5	NG→H ₂	2030	為確保未來氫氣供給，兩個地點都將整合到歐洲氫氣網路中
ArcelorMittal Germany (Hamburg)	0.1	NG→H ₂	2025	MIDREX 技術
ArcelorMittal France (Dunkirk)	2.5	NG→H ₂	2027	2030 年將取代在法國五個高爐中的三個
ArcelorMittal Belgium (Gent)	2.5	NG→H ₂	2026	DRI 工廠將與更新過的高爐一起營運
Thyssenkrupp	2.5	NG→H ₂	2026	MIDREX 技術
HYBRIT Development AB (Gällivare)	1.35	H ₂	2026	結合本身 HYBRIT 基礎與 ENERGIRON 技術
H ₂ Green Steel	2.5	H ₂	2025	MIDREX 技術

伍、參考資料

1. DRI 產量，<https://gmcenter/en/news/global-dri-production-increased-by-7-y-y-in-2023/>
2. DRI 產業發展現況，https://tks.m.mysteel.com/a/23102418/6AB49E2AE52A99C2_abc.html
3. 直接還原鐵市場
<https://www.fortunebusinessinsights.com/zh/direct-reduced-iron-market-107381>
4. 鋼鐵產業低碳製程技術發展趨勢，徐銘鏊，呂春福，李文錦，工業材料雜誌 446 期，p.37~49，2024/02
5. Plaul, f. J., Böhm, C., & Schenk, J. L. (2009). Fluidized-Bed Technology for the Production of Iron Products for Steelmaking. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 108, 121–128. <http://saimm.org.za/Journal/v109n02p121.pdf>
6. FINEX® - PRIMETALS
<https://www.primetals.com/cn/%E4%BA%A7%E5%93%81%E5%88%86%E7%B1%BB/%E7%82%BC%E9%93%81/finexr>
7. FINEX® - WIKIPEDIA
[https://en.wikipedia.org/wiki/FINEX_\(steelmaking_process\)](https://en.wikipedia.org/wiki/FINEX_(steelmaking_process))
8. MIDREX
Lohmeier, L., Wollenberg, R., & Schröder, H. (2020). Investigation into the Hot Briquetting of Fine-Grained Residual Materials from Iron and Steel Production. *Steel Research International*, 91(12): 2000237.
9. MIDREX，<https://www.kobelco.co.jp/english/products/ironunit/dri/>
10. MIDREX Process，<https://www.midrex.com/technology/midrex-process/>
11. MxCoL，<https://www.midrex.com/technology/midrex-process/mxcol/>
12. MIDREX FLEX，<https://www.midrex.com/technology/midrex-process/midrex-flex/>
13. MIDREX H₂，<https://www.midrex.com/technology/midrex-process/midrex-h2/>
14. MIDREX、Paul Wurth、H₂ GREEN STEEL
<https://www.midrex.com/tech-article/h2-green-steel-story-the-quest-for-earths-sustainable-future/>
15. MIDREX Brochure
https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MRX-059_Tech_Brochure_phase2_r3_digital.pdf

16. MIDREX H₂ 、Blast , https://www.kobelco.co.jp/releases/1214999_15541.html
17. KOBELCO 、Mitsui & Co. , https://www.kobelco.co.jp/english/releases/1211747_15581.html
18. KOBELCO 、Mitsui & Co.
<https://www.fastmarkets.com/insights/mitsui-kobe-steel-joint-venture/>
19. JFE , https://www.jfe-steel.co.jp/en/company/pdf/en_carbon-neutral-strategy_231108_1.pdf
20. Emirates Steel Arkan, ITOCHU and JFE
<https://gmk.center/en/news/emirates-steel-arkan-itochu-and-jfe-steel-have-joined-forces-to-produce-dri-products/>
21. Nippon Steel
<https://www.nipponsteel.com/en/csr/env/warming/future.html>
22. ENERGIRON achievements , <https://www.energiron.com/pioneering-achievements/>
23. ENERGIRON Nippon Steel , <https://tenova.com/newsroom/press-releases/tenova-provide-first-hydrogen-experimental-dri-plant-japan>
24. ENERGIRON ZR , <https://www.energiron.com/energiron-zr/>
25. ENERGIRON III , <https://www.energiron.com/energiron-iii/>
26. FINEX 、POSCO , <https://www.primetals.com/portfolio/ironmaking/finexr>
27. POSCO 、HyREX , <https://www.posco.co.kr/homepage/docs/eng7/jsp/hyrex/>
28. POSCO 、HyREX
<https://newsroom.posco.com/en/posco-takes-a-significant-step-towards-realizing-the-dream-of-hydrogen-reduction-steelmaking-with-the-inauguration-of-its-development-center/>
29. POSCO 、HyREX
<http://www.worldmetals.com.cn/viscms/bianjituijianxinwen1277/20240709/264868.html>
30. POSCO 、HyREX , <https://www.koreaherald.com/view.php?ud=20240626050485>
31. ArcelorMittal in Canada
https://www.danieli.com/en/news-media/news/arcelormittal-relies-energiron-dri-technology_37_776.htm
32. ArcelorMittal in Canada
<https://www.cbc.ca/news/canada/hamilton/arcelormittal-dofasco-green-steel-1.6615570>
33. ArcelorMittal in Spain

<https://corporate.arcelormittal.com/media/press-releases/arcelormittal-signs-mou-with-the-spanish-government-supporting-1-billion-investment-in-decarbonisation-technologies>

34. ArcelorMittal in Spain

<https://eurometal.net/arcelormittal-to-construct-new-electric-arc-furnace-at-gijon-steel-plant/>

35. ArcelorMittal in Spain

https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_849

36. ArcelorMittal in Germany (Bremen and Eisenhuttenstadt)

<https://corporate.arcelormittal.com/media/news-articles/arcelormittal-plans-major-investment-in-german-sites-to-accelerate-co2-emissions-reduction-strategy-and-leverage-the-hydrogen-grid>

37. ArcelorMittal in Germany (Hamburg)

<https://corporate.arcelormittal.com/media/cases-studies/hydrogen-based-steelmaking-to-begin-in-hamburg>

38. ArcelorMittal in Germany (Hamburg)

<https://corporate.arcelormittal.com/climate-action/decarbonisation-technologies/hamburg-h2-working-towards-the-production-of-zero-carbon-emissions-steel-with-hydrogen#>

39. ArcelorMittal in French (Dunkirk)

<https://corporate.arcelormittal.com/media/press-releases/arcelormittal-accelerates-its-decarbonisation-with-a-1-7-billion-investment-programme-in-france-supported-by-the-french-government#>

40. ArcelorMittal in French (Dunkirk)

https://www.gem.wiki/ArcelorMittal_Dunkerque_steel_plant

41. ArcelorMittal in Belgium (Gent)

https://automotive.arcelormittal.com/news_and_stories/news/2022_DecarbonizationInvestments

42. ArcelorMittal in Belgium (Gent)

<https://gmh.center/en/news/the-eu-approved-state-aid-to-belgium-in-the-amount-of-e280-million-for-the-arcelormittal-project/>

43. Thyssenkrupp

<https://www.midrex.com/press-release/thyssenkrupp-steel-selects-midrex-flex-for-immediate-co2-emissions-reduction/>

44. Thyssenkrupp

<https://www.midrex.com/company-news/thyssenkrupp-steel-receives-construction-approval-for-hydrogen-ready-dri-smelter-project/>

45. HYBRIT

https://www.danieli.com/en/news-media/news/lkab-selects-energiron-demonstration-plant-north-sweden_37_870.htm

46. HYBRIT

<https://lkab.com/en/press/hybrit-ssab-lkab-and-vattenfall-to-begin-industrialization-of-future-fossil-free-steelmaking/>

47. HYBRIT

Martin Pei, Markus Petäjäniemi, Andreas, Regnell Olle Wijk (2020). Toward a Fossil Free Future with HYBRIT: Development of Iron and Steelmaking Technology in Sweden and Finland. *Metals*, 10(7), 972. <https://www.mdpi.com/2075-4701/10/7/972>

48. H₂ Green Steel

<https://gmk.center/en/posts/h2-green-steel-a-startup-shaping-the-future-of-green-steel-industry/>

49. H₂ Green Steel

<https://www.h2greensteel.com/latestnews/h2-green-steel-raises-more-than-4-billion-in-debt-financing-for-the-worlds-first-large-scale-green-steel-plant>

50. H₂ Green Steel

<https://gmk.center/en/posts/h2-green-steel-a-startup-shaping-the-future-of-green-steel-industry/>