

高爐富氫操作技術發展現況

壹、前言

傳統鋼鐵生產是高能源消耗及高二氧化碳排放之產業，目前煉鋼過程中產生的溫室氣體排放量占全球工業排總量的 9%，儘管過去十年來鋼鐵業一直努力減少煉鋼過程中的溫室氣體排放，但如果要跟上巴黎協定的減排要求，仍然需要重大的技術突破。根據巴黎協定，全球淨累計排放量為 2015~2100 年不應超過 1,978 Gt CO₂，但按照目前的排放水準，總碳預算將在 2054 年耗盡，並且在此之後所有的技術皆要完全無碳化。

為因應持續增加的減碳壓力，全球主要鋼廠皆致力於朝向低碳煉鋼轉型。2024 年 4 月 worldsteel 理事會特別例會簡報「Ready for Reduction: On course for 2050」指出，鋼鐵展業低碳轉型主要分為三個階段：最佳化(現有製程優化、提升能源效率)、轉型過渡時期(CCS、CCUS、碳循環、高爐噴氫、生物質取代煤及焦炭)、綠色煉鋼(電爐產能增加、高爐及電爐提高廢鋼比、氫氣直接還原)。目前鋼鐵業位於「最佳化」末端，即將進入「轉型過渡」時期(如圖 1)。

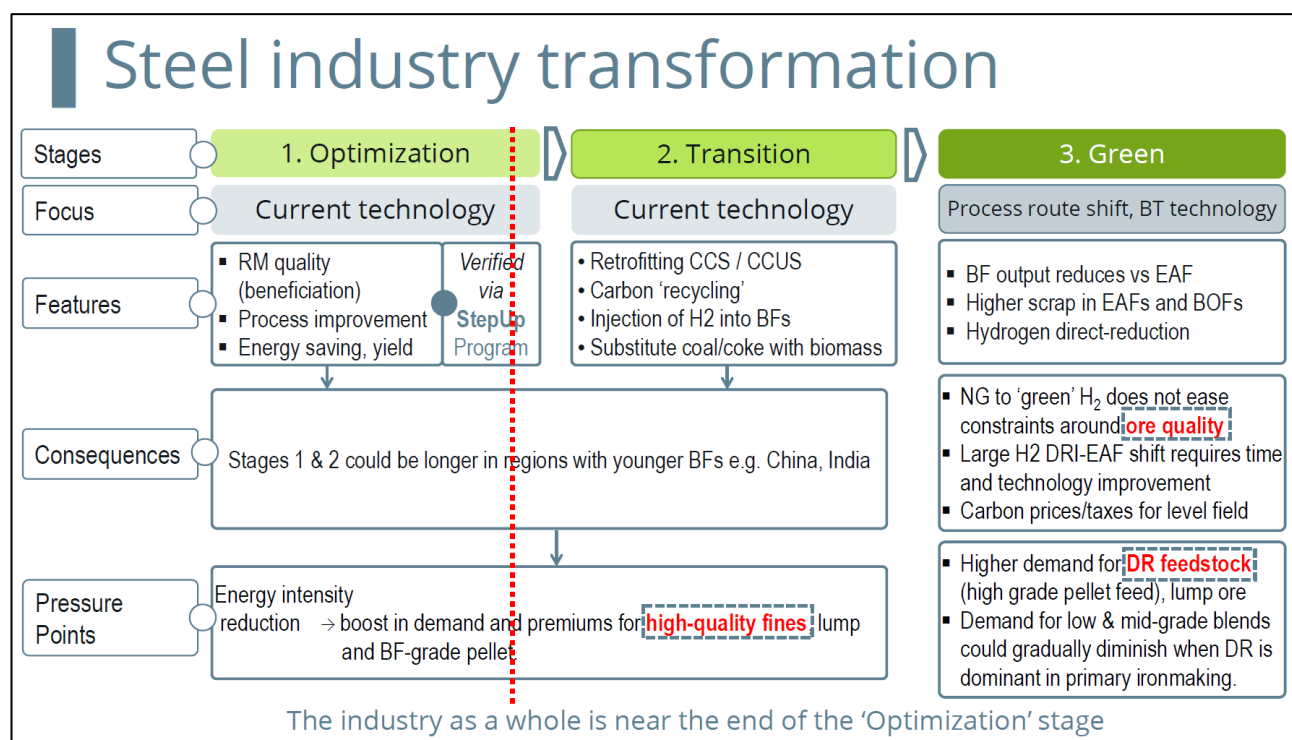


圖 1 worldsteel 將全球鋼鐵業低碳轉型分為三大階段

目前傳統高爐-轉爐製程約占全球粗鋼產量 70%(如圖 2)，由於成本效益、技術成熟度、及生產高級鋼種需求等因素，現階段在多數地區高爐產能仍難以立即改用電爐，故在轉型過渡期仍以現有製程技術為主，worldsteel 將「高爐噴氫」列為該階段特色之一，可見該技術對於中期減碳進程具有相當高之重要性。

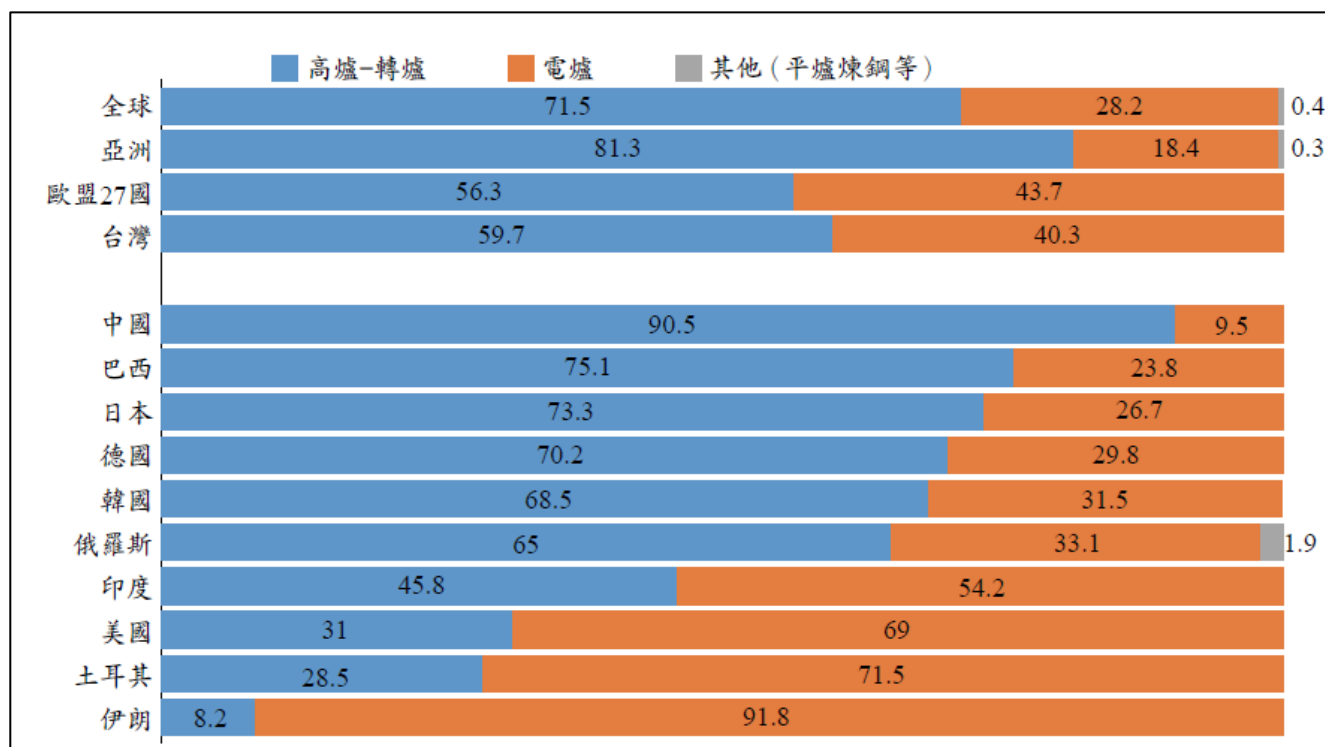


圖 2 2021 年主要國家鋼鐵製造技術 (依粗鋼產量比重)

貳、全球重要高爐噴氫專案介紹

一、歐盟 ULCOS (Ultra-low CO₂ Steelmaking)

歐盟鋼鐵業於 2003 年成立了歐洲鋼鐵技術平台(ESTEP)，並於 2004 年啟動 ULCOS(超低碳排放冶金)計畫，由安賽樂米塔爾領頭，成員包含歐洲全部主要鋼廠、相關供應鏈以及研究單位，目標為在 2050 年使噸鋼二氧化碳排放量較最低水準再減少 50%，即從噸鋼排放 2tCO₂ 減少到噸鋼排放 1tCO₂。在此背景下，歐盟鋼鐵業針對不同低碳冶金技術方向進行研發，高爐爐頂煤氣循環技術(Top Gas Recycling-Blast Furnace, TGR-BF 或 ULCOS-BF)即為其中之一(如圖 3)，做法為捕捉高爐塔頂爐氣中的 CO₂ 後，其餘還原氣再導回高爐，可大幅降低排碳量及提升產能。主要技術特點如下：

- (一)在捕捉高爐塔頂爐氣的 CO₂ 後，將其餘還原氣導回高爐，降低碳排量並提升產能約 25%；
- (二)使用全氧代替傳統預熱空氣，因去除了氮氣，故降低 CO₂ 分離成本；
- (三)利用 VPSA (vacuum press swing adsorption) 真空變壓吸附技術和

CCS 技術將 CO₂ 分離並儲存於地下；

(四)回收 CO 作為還原劑循環使用，減少 35%焦炭率。

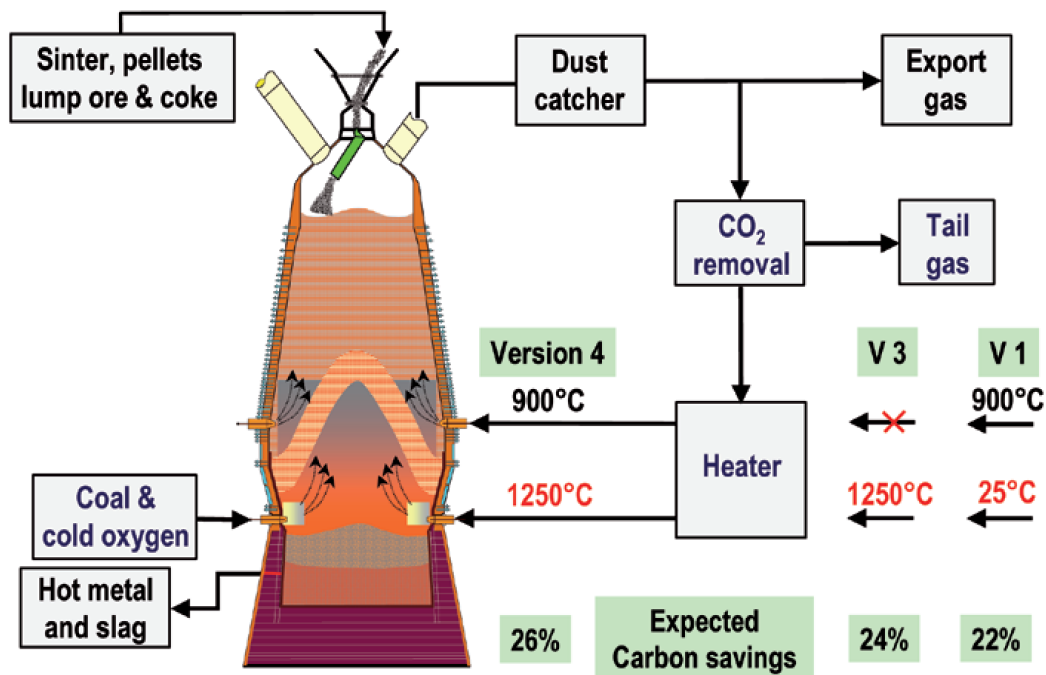


圖 3 ULCOS-BF 製程圖

ULCOS-BF 共開發出三種操作模式(如圖 4)，其中 Version 4 顯示出最大的減排潛力，將成為下一輪工業規模高爐測試的重點。其製程為：部分脫除 CO₂ 的爐頂煤氣被預熱至 900°C，透過位於爐身的風口注入高爐。另一部分脫除 CO₂ 的爐頂煤氣被預熱至 1250°C，與氧氣和粉煤同樣經由位於爐床的風口注入高爐。

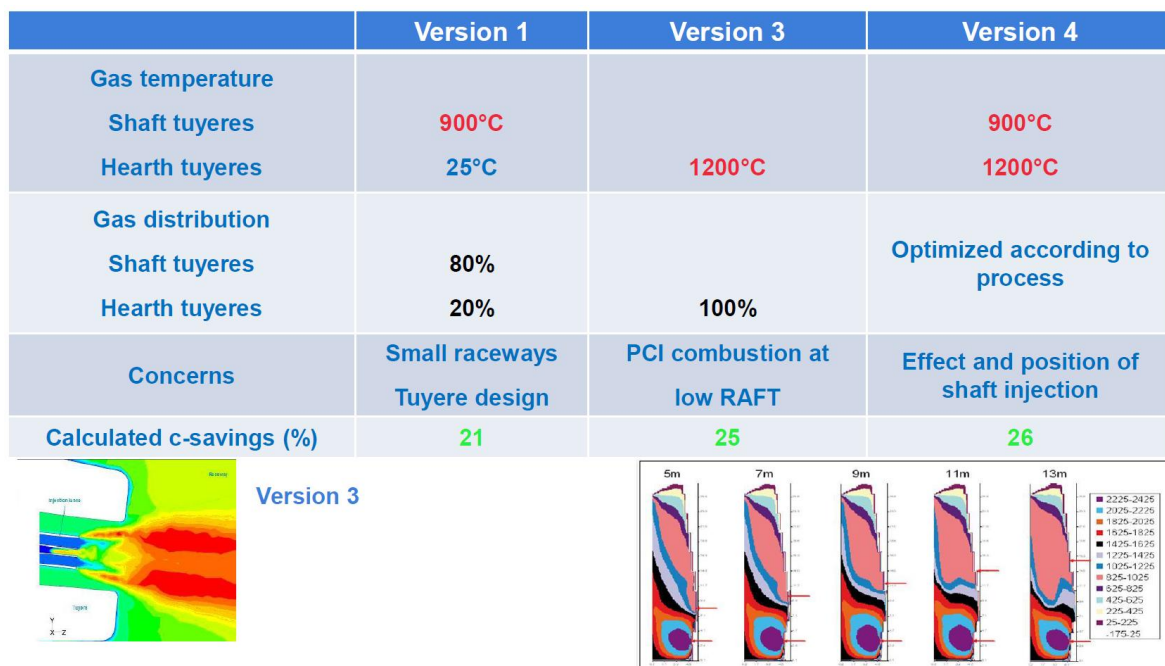


圖 4 ULCOS-BF 的三種操作模式

根據在瑞典 LKAB 的 8.2 m³ 試驗高爐(如圖 5)上進行的結果，在爐頂氣回收率 90%的情況下，在高爐階段可減少碳排放約 25%。若應用 CCS 技術，生產每噸熱軋鋼捲的碳排放可降低 55-60%，若未應用 CCS，則為降低至 15%。測試並指出，傳統的燒結礦、球結礦和焦炭可投用於 ULCOS 高爐，故該技術有較高的可推廣性。在邁向商業規模應用時，塔塔鋼鐵指出須特別注意鼓風嘴(爐氣+氧氣+粉煤)、爐氣噴吹與爐氣分佈、爐氣加熱三項技術，並於 2024 年 1 月的國際綠色永續煉鐵論壇透露未來計畫以商業高爐規模建立示範工廠。



LKAB Experimental Blast Furnace: EBF

Production: 36 tHM/day
 Fuel rate: ~540 kg/tHM
 Injectants: Coal, oil, gas, etc.
 Top pressure: 1,2 barG
 Blast temperature: 1200°C
 Oxygen in blast: 21-40%

Tuyeres: 3
 Hearth diameter: 1,2 m
 Working volume: 9 m³

Flexible sampling possibilities

- In-burden probes
- Basket samples
- Quench and Excavation

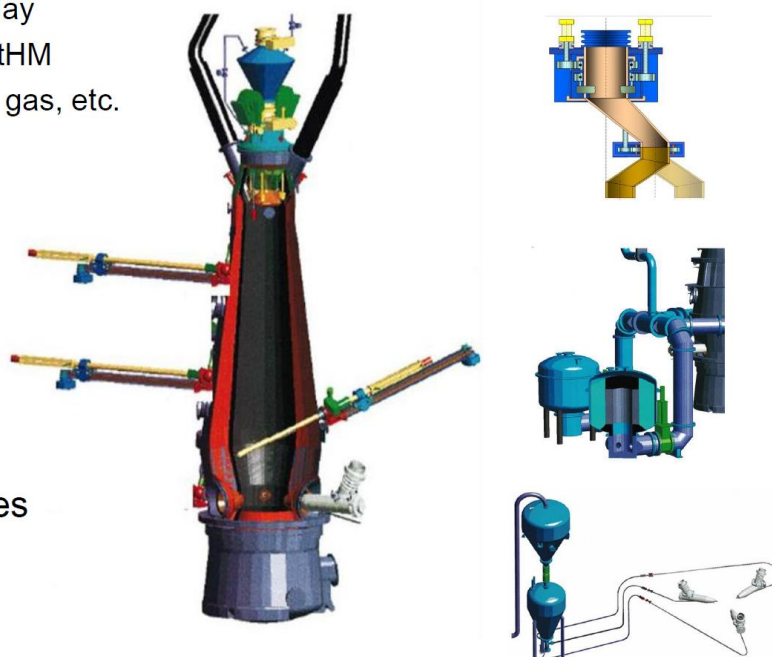


圖 5 瑞典 LKAB 實驗高爐設備規格及操作條件

二、日本 COURSE50 (CO₂ Ultimate Reduction in Steelmaking Process by Innovative Technology for Cool Earth 50)

日本新能源產業技術綜合開發機構 NEDO 於 2008 年委託新日鐵、新日鐵工程公司、住友金屬、JFE 鋼鐵、神戶製鋼以及日新製鋼共 6 家公司共同合作研發創新低碳計畫 COURSE50，目標是開發減少高爐 CO₂ 排放的新製程，以及從高爐煤氣中捕集、分離和回收 CO₂ 的相關技術，使 2050 年日本噸鋼 CO₂ 排放量與傳統高爐生產相比減少約 30%。

COURSE50 針對高爐碳減排開發了部分使用 H_2 代替焦炭作為還原劑的氫還原煉鐵法，預期可降低減排約 10%。日本製鐵利用君津廠 12 m^3 試驗高爐(如圖 6)進行氫冶金技術研究，並在 2016-2017 年達成 CO_2 減排 10% 的實績。為進一步最佳化 CO_2 減排技術，2018 年開始使用氣態富氫氣體作為高爐還原劑進行試驗。2018-2020 年間共進行了 5 組試驗，在試驗高爐中噴入高含量的 H_2 。隨著 H_2 輸入量的增加， CO_2 減排量呈線性增長的趨勢，當 H_2 噴入量為 $359\text{ m}^3/\text{t}$ 時， CO_2 減排約為 16%。

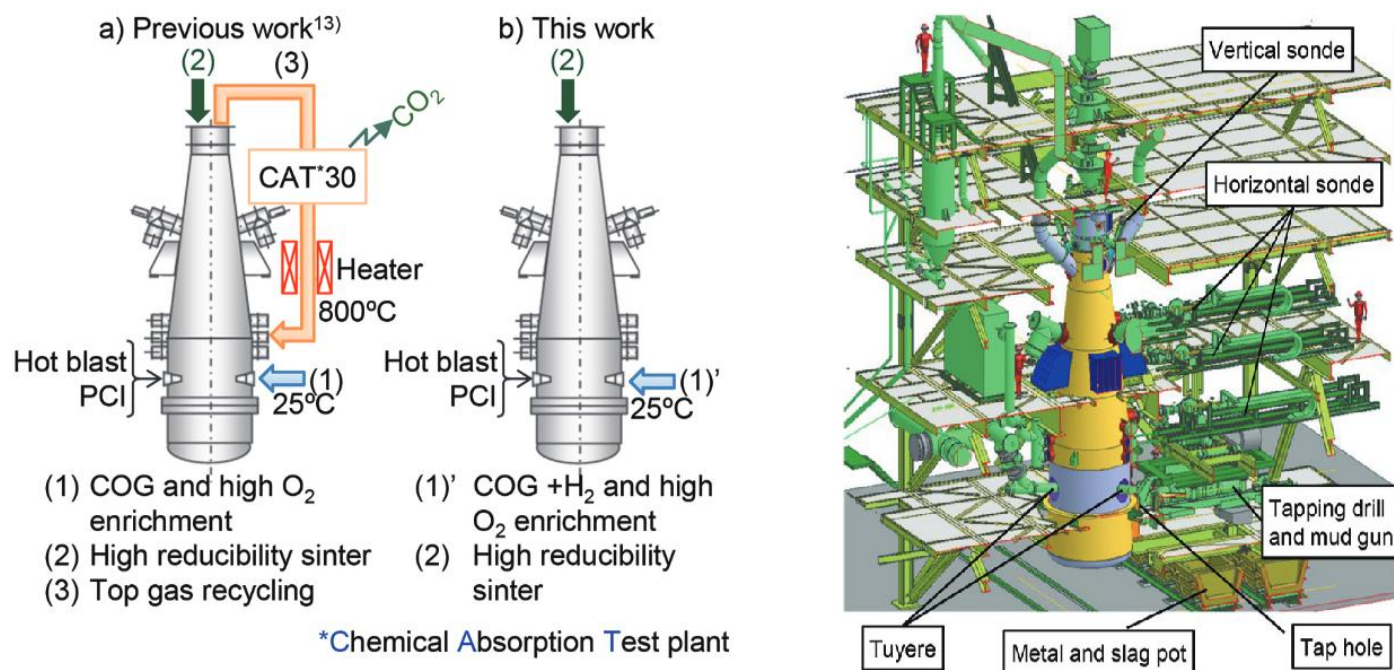


圖 6 日本製鐵君津廠 12 m^3 試驗高爐示意圖

2020 年 10 月，日本政府提出 2050 年實現溫室氣體零排放的目標。因此，日本製鐵於 2022 年推動 Super COURSE50 技術開發，透過引進預先加热的鋼廠外部氫氣，計畫減少 50% 高爐碳排，並搭配 CCS/CCUS 在 2050 年達成碳中和。試驗於 2022 年 5 月起在君津廠 12 m^3 試驗高爐進行，初步達成 22% 高爐減碳成效；在 2023 年 11-12 月的試驗中，達到了 33% 的 CO_2 減排。日鐵更於 2024 年 12 月公布，在 2024 年 11-12 月的試驗中， CO_2 減排成效已達到 43%。

傳統的碳還原是放熱反應，而氫氣還原是吸熱反應，導致使還原反應難以進行，且鐵礦石難以熔化。在近期試驗中，日鐵改善了使用加熱氫氣時高爐內部的熱平衡，因此在提升氫氣還原代替碳還原成效的同時達到了 43% 的 CO₂ 減排。日鐵計劃在 2026 年 4 月於君津廠二號 4500m³ 高爐開始進行實機規模的實證試驗，目前正在進行氫氣注入設備的施工作業，期望在 2040 年建立 Super COURSE50 商業化技術。日本低碳減排過程高爐的演變方向如圖 7。

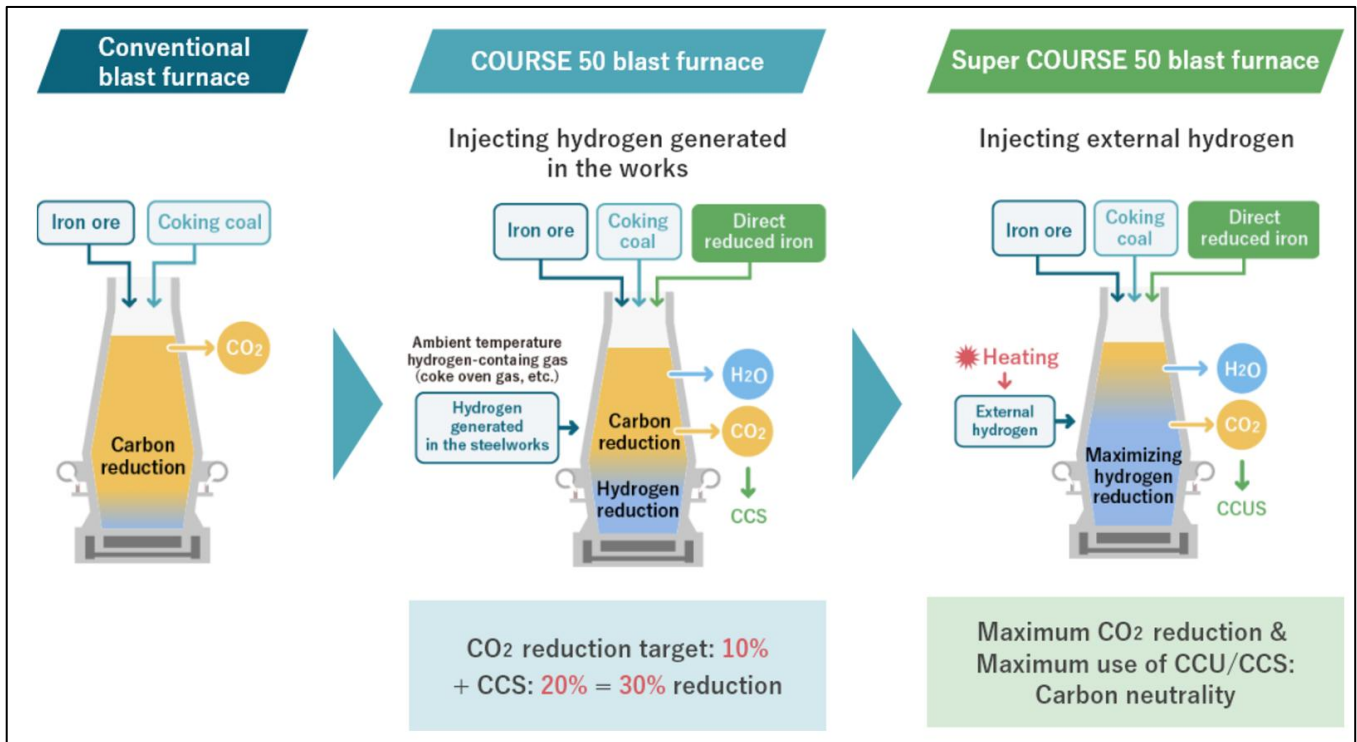


圖 7 日本低碳減排過程高爐的演變方向

三、寶武富氫碳循環氧氣高爐 (Hydrogen-Enriched Carbonic Oxide Recycling Oxygenate Furnace , HyCROF)

富氫碳循環指在全氧條件下，富氫結合爐頂煤氣循環噴吹的操作模式，高爐製程如圖 8。寶武開發新型高爐和冶金煤氣回收裝置，高爐煤氣經回收裝置進行 CO₂ 脫除成為高還原勢煤氣，並採用多介質(煤氣、粉煤及焦炭)複合噴吹技術，將高溫加熱後的煤氣送入高爐作為冶煉還原劑，脫碳產生的 CO₂ 則藉由 CCUS 技術進行捕集。由於爐頂煤氣的循環利用使 CO 分壓提高，煤氣還原勢增強，強化了含鐵爐料的還原，使煉鐵生產效率提高、燃料消耗降低、碳排放減少。採用全氧冶煉使燃燒後尾氣成分較為單純，故降低了脫除 CO₂ 的難度與成本。

2020 年寶武利用新疆八一鋼鐵原有 430 m³ 高爐建立 HyCROF 試驗平台，研究共分 3 個階段：

- (一)結合高爐綜合鼓風技術，實現 35%高富氧冶煉目標；
- (二)引入歐冶爐(Corex) 脫除後 CO 的煤氣，開發 50%的超高富氧技術；
- (三)完成高爐爐型改造和煤氣加熱配套工程，實現煤氣循環。

2023 年寶武突破高還原勢煤氣安全高效加熱、基於煤氣、粉煤及焦炭競爭燃燒的風口噴吹裝置設計，及全氧鼓風煤氣循環等技術難題，並應用冶金氣體高效低成本碳捕捉技術，取得固體燃料消耗降低 30%、碳排放減少 21%的技術能力。該技術已擴展到八鋼 2500 m³高爐，於 2023 年 9 月運行後，初步使化石燃料消耗降低 27%、產量提高 19%、碳排放降低 16%。「HyCROF 商業示範項目」並於 2024 年獲得 worldsteel Steelie 獎的低碳生產卓越成就獎。

2024 年 9 月，八鋼取得脫碳系統作業率 100%及 19.5 萬 m³/h 脫碳煤氣量的供應能力之成果，且脫碳煤氣中 CO₂ 含量穩定控制在 3%以下。八鋼表示，無論理論還是實作，八鋼 2500 立方米 HyCROF 商業示範線工業化應用已無太大問題，但與傳統高爐相比還需要在鐵水成本控制上繼續鑽研，使其更有競爭力。特別是在八鋼當目前產量不飽合、原燃料品質不高的情況下，如何確保爐況穩定以及鐵水成本進一步降低，將是八鋼 HyCROF 研究團隊當前著力探索的最重要課題。

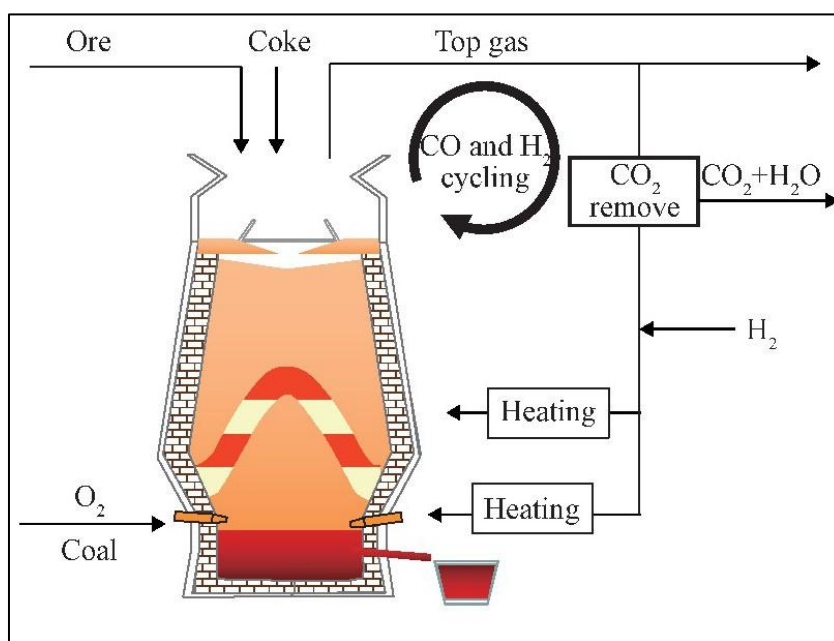


圖 8 寶武富氫碳循環氧氣高爐(HyCROF)製程圖

此外，寶武指出「還原煤氣的加熱」是實現煤氣循環的關鍵技術之一，目前 HyCROF 碳循環、富氫碳循環試驗中採用的煤氣加熱方式是蓄熱式加熱煤氣，工業試驗中爐頂煤氣循環比大部分還不到 70%。HyCROF 還可以繼續提高煤氣循環的比例來增加減碳能力，而煤氣高溫加熱需要採用清潔能源來實現。HyCROF 試驗平台將進行煤氣高溫電加熱工業規模試驗裝置的初步測驗，包含煤氣電阻高溫加

熱及煤氣等離子體超高溫加熱(如圖 9)。HyCROF 的適宜富氫量與煤氣加熱溫度息息相關，如果能夠將煤氣加熱到更高的溫度，適宜的富氫量亦會相應增加。

根據寶武論文估算，若以當前先進高爐操作為基礎，HyCROF 搭配碳循環可減碳 24%、結合富氫可減碳 39%、採用電加熱技術可減碳 52%、若應用超高溫煤氣電加熱技術，則最高可達到減碳 86%，詳如表 1。

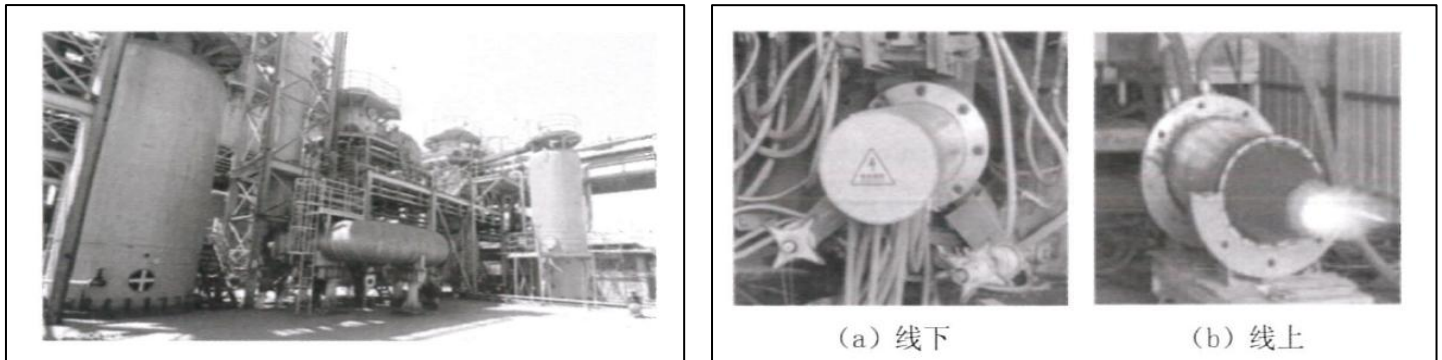


圖 9 HyCROF 工業級試驗平臺煤氣高溫電阻加熱裝置(圖左)及煤氣等離子體加熱裝置(圖右)

表 1 寶武估算 HyCROF 不同操作模式下的碳減排能力

操作模式	碳減排能力
富氫、碳循環 煤氣超高溫電加熱	86%
碳循環 煤氣超高溫電加熱	55%
富氫、碳循環 電加熱	52%
富氫、碳循環	39%
碳循環、電加熱	30%
碳循環	24%

四、上海大學以純氫為噴吹氣源進行高爐富氫冶煉技術開發

2021 年底上海大學與興國鑄業公司合作，開發以純氫為噴吹氣源的高爐富氫冶煉技術，並建構車載高壓供氫-卸壓噴吹-氫冶金聯用平台，主要研究內容如下：

- (一)於 40 m³ 試驗高爐中每小時注入 1800 m³ 純氫氣(噸鐵 250 m³)，研究氫氣噴吹量變化對高爐冶煉過程的影響；
- (二)以氫氣快速冷凍試驗高爐並將進行解剖，藉此瞭解富氫對高爐內爐料結構和性狀的變化；

(三)試驗結果顯示，焦炭比降低約 10%，碳排放量減少約 10%，產量增加約 13%；

(四)開發供氫、富氫冶煉、爐頂煤氣循環噴吹和 CO₂ 捕集分離等技術。

興國鑄業現有 450m³ 高爐已完成富氫噴吹技術改造，並結合 30 萬 m³/d 綠電電解水製氫與儲氫系統，建成工業化示範專案項目。該項目於 2024 年 12 月投運，噸鐵噴吹純氫量達到 103 m³，每小時純氫噴入量達到 8700 m³，固體燃料置換比達 0.36~0.5 kg/Nm³，高爐煉鐵碳排放降低 8%~11%，電解水製氫過程中同時得的純氧用於高爐鼓風富氧。在先前的基礎上，目前已進入「製氫-儲氫-高爐富氫冶煉」全流程關鍵參數的調配優化的新階段。資料顯示，高爐噴吹純氫冶煉能夠顯著降低過程煤焦消耗和鐵水中雜質元素含量，可為開發清潔低碳生鐵等先進鋼鐵材料生產技術奠定基礎。

目前影響高爐富氫冶煉技術產業化推廣應用的瓶頸是大規模經濟清潔低碳氫的製備與輸送。研究團隊認為，結合區域資源特點，「就地製備、就地利用」是解決問題的有效解方。上海大學聯合其他產學單位，正在進行綠電、谷電等多元化電力供給，搭配電解水製氫-氫儲輸-高爐富氫冶煉等製程的多介面銜接之技術研究開發，計畫利用多元電力、儲能、儲氫等多種方式，實現鋼鐵製程的清潔低碳氫的穩定供應。

五、晉南鋼鐵高爐富氫低碳冶煉

山西晉南鋼鐵於 2021 年利用該廠兩座 1860 m³ 高爐進行風口噴吹焦爐煤氣和工業副產氫氣的研發、設計及工業化試驗。在噸鐵富氫氣體噴吹量為 65 m³ 時，富氫氣體與固體燃料置換比為 0.49 kg/m³；噴吹富氫氣體之後，爐內氫氣的利用率平均為 37.3%，CO 的利用率約為 43.2%；噸鐵 CO₂ 排放量可降低 80kg 左右，高爐 CO₂ 排放量降低 5.6%。該集團已在中國構建鋼化聯產和氫能冶金低碳產業鏈，整體減碳成效約 30%，其主要技術重點如下：

- (一)利用集團本身鋼鐵、焦化、化工的能源互補優勢，將焦爐、轉爐、高爐煤氣等載碳能源送到化工廠，經自有煤氣淨化技術(如氧化偶聯法生產乙二醇等)提純分離 LNG、一氧化碳和氫氣，催化合成乙二醇；
- (二)在化工提純氫氣過程中輸出富氫解析氣體，再送回鋼廠進行高爐富氫低碳冶煉，降低高爐製程的煤炭消耗，噸鐵噴吹 30 m³ 氫氣可置換 12 公斤焦炭；
- (三)建構 1860 m³ 高爐大規模噴吹化工富氫氣體工業化應用工程，並開發高爐噴氫「物理自保護+製程自保護智能聯鎖+緊急自保護切斷」智

能安全控制技術，使高爐可長期穩定高效噴吹；

(四)進行轉爐煤氣提質研究，將轉爐汽化冷卻煙道的高溫餘熱，用於把焦炭煙氣中 CO₂ 轉化為 CO；

(五)規劃使用 1300 兆瓦光能綠電-儲能系統製作綠氫，並用於廢鋼加熱製程。

參、結語

面對日漸嚴峻的全球暖化議題，為配合國家減碳政策、碳費及碳關稅等相關議題，全球鋼鐵業逐漸朝積極朝向減碳轉型，並於近十年開始研發創新減碳煉鐵技術，以求於 2050 年達成鋼廠營運的淨零排放。

在中程減碳路徑方面，自 2004 年起，歐洲、日本、中國等主要多家鋼廠積極開發高爐富氫技術，包含歐盟 ULCOS 的爐頂煤氣循環技術、日本 COURSE50 及 Super COURSE50 的噴吹外部來源加熱氫氣、中國寶武的 HyCROF 富氫碳循環系統等，可以看出這些專案各具特色(整理如表 2)，其中 ULCOS 高爐及寶武 HyCROF 皆採用了全氧冶煉及爐頂煤氣循環噴吹技術。高爐富氫技術的減碳效果也逐步提升，從早期 10-20%的減碳，到近期日本製鐵 Super COURSE50 實現 43%碳減排，寶武 HyCROF 更宣稱最多可達 86%碳減排，為鋼鐵業實現 2050 年碳中和目標帶來曙光。

高爐富氫技術的規模化應用正在穩定推進，從實驗室級(8-12m³)到中等規模(400-450m³)，再到工業示範(1860-4500m³)，技術成熟度不斷提升。然而，要實現大規模商業化應用仍面臨諸多挑戰，包括爐氣複合噴吹、爐氣分佈、爐內熱平衡、煤氣高溫加熱、綠氫的穩定供應及成本問題、氫氣噴吹的安全控制等難題有待克服。

另一方面，由於高爐減碳潛力有限，因此多家鋼廠將高爐富氫技術搭配其他減碳技術輔助運行，如 CCS、CCUS、餘熱發電、鋼化聯產等，並積極結合綠電、儲能系統等清潔能源及節能措施，以求將減碳效益最大化。

表 2 國外主要高爐富氫噴吹研發專案特點與配套減碳措施

專案名稱	技術要點	減碳成效	配套措施
歐 ULCOS-BF 盟	1. 捕捉高爐塔頂爐氣中的 CO ₂ 後，將其餘還原氣導回高爐。 2. 使用純氧代替預熱空氣，降低 CO ₂ 分離難度與成本。 3. 利用真空變壓吸附技術和 CCS 技	高爐階段 26% 每噸熱軋鋼捲 15% (未應用 CCS)	CCS

專案名稱	技術要點	減碳成效	配套措施
	術將 CO ₂ 分離並儲存於地下。 4. 回收 CO 作為還原劑循環使用，減少 35% 焦炭率。	每噸熱軋鋼捲 55-60% (應用 CCS)	
日本 COURSE50 高爐	<u>COURSE50</u> 1. 利用廠內產生的煤氣。 2. 開發高爐煤氣中 CO ₂ 的分離、回收技術及餘熱回收。 <u>Super COURSE50</u> 高爐注入預熱的鋼廠外部氫氣。	<u>Course50</u> 1. 高爐 10% 2. 高爐搭配 CCUS 30% <u>Super Course50</u> 1. 高爐 50% (2050) 2. 高爐搭配 CCUS 100% (2050)	CCUS 餘熱回收 CCUS
寶武 HyCROF	1. 與 ULCOS-BF 同樣採用全氧冶煉、爐頂煤氣循環噴吹技術。 2. 突破全氧冶煉、煤氣加熱、煤氣循環、複合噴吹等技術難題。 3. 應用冶金氣體高效低成本碳捕捉技術。 4. 開發煤氣高溫加熱技術，進一步提升減碳潛力至 86%。	16-21%	CCS
上海大學純 氫氣源富氫 高爐噴吹	1. 以純氫為氣源的高爐富氫冶煉。 2. 建構車載高壓供氫-卸壓噴吹-氫冶金聯用平台。 3. 完成實驗後將高爐冷凍並解剖，以了解富氫冶煉對高爐之影響。	10%	綠電製氫 儲氫
晉鋼高爐富 氫低碳冶煉	1. 爐氣送到化工廠，提純分離為 LNG、一氧化碳和氫氣，催化合成乙二醇載碳化工產品。 2. 化工提純氫氣過程中輸出富氫解析氣體，再送回鋼廠進行高爐富氫低碳冶煉。 3. 利用轉爐汽化冷卻煙道高溫餘	高爐 5.6% 全廠 30%	鋼化聯產 餘熱回收 綠電製氫

專案名稱	技術要點	減碳成效	配套措施
	熱，將焦炭除塵灰煙氣中 CO₂ 轉化為 CO。 4. 開發高爐噴氫「物理自保護+製程自保護智能聯鎖+緊急自保護切斷」智能安全控制技術，達到長期穩定噴吹。 5. 規劃光能綠電-儲能系統製作綠氫，並用於廢鋼加熱製程。		

參考資料

[1] 鋼鐵產業低碳製程技術發展趨勢，材料世界網，2024-02-05

<https://www.materialsnet.com.tw/DocView.aspx?id=53766>

[2] 鋼鐵工業減碳與 CO₂ 資源化利用技術的研究進展，鋼鐵 2024 年第 2 期(CNKI)，2023-09-26

https://tra.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2024&filename=GANT202402002&uniplatform=OVERSEA&v=wwtej91h0VZNE81KKUSgeF73aCNYVhzL1x6jbyCzwDVLiNHbzeLUCYpfZirmWu__

[3] ULCOS top gas recycling blast furnace process (ULCOS TGRBF) Final report，Publications Office of the European Union，2014-01-31

<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/0371a7f6-3e10-40aa-a8ec-16c1bfabdc38>

[4] Top gas recycling blast furnace for low CO₂ ironmaking - final results of ULCOS trials，Steel Times International，2013-04

<https://www.proquest.com/docview/1462031756/1D2A7BAEBDA64E36PQ/1?accountid=28272&source=Scholarly%20Journals>

[5] Developments of Top Gas Recycle Blast Furnace For Green and Clean Steel Production: The ULCOS-BF developments in Europe，2024 International Conference Green & Sustainable Ironmaking (塔塔鋼鐵會議簡報)，2024-01-17

[6] Development of Technology for Reduction of CO₂ Emission from Blast Furnace Using 12 m³ Experimental Blast Furnace，日本製鐵技報 No.127，2022-01

<https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/pdf/127-06.pdf>

[7] 富氫高爐冶煉探索和實踐之日本 COURSE50 新技術，世界金屬導報，2021-12-07

<http://www.worldmetals.com.cn/viscms/bianjituijianxinwen1277/20211207/256867.html>

[8] Establishment of technology to reduce CO2 emissions in blast furnaces using hydrogen Achieved world's first 43% reduction in CO2 emissions in a test furnace, reaching the development goal ahead of schedule, 日本製鐵官網, 2024-12-20
https://www.nipponsteel.com/en/news/20241220_100.html

[9] 日本製鐵、試験炉で高炉水素還元 世界初 CO2 削減 40%超, 日本經濟新聞, 2024-12-20
<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUC202Z80Q4A221C2000000/>

[10] 富氫碳循環氧氣高爐工藝開發與實踐, 鋼鐵 2024 年第 9 期(CNKI), 2024-09
<https://tra.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2024&filename=GANT202409005&uniplatform=OVERSEA&v=wwtej9lh0VaiW4Ce2YVVC1xLiWfYpsVW7uulMqlWdJVOWZ-xfe0stkxF0VENMUqF>

[11] 富氫碳循環氧氣高爐碳減排能力及工業實證, 鋼鐵 2024 年 43 卷第 3 期(CNKI), 2024-06
https://tra.oversea.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&filename=TIEN202403001&dbname=CJFDLAST2024&uid=WEEvREcwS1JHS1dSdmVqMDh6d1doSmxuOFh0azhxMzN4YkdneXpyRkZQND0%3D%249A4hF_YAuvQ5obgVAqNKPCYcEjKensW4IQMovwHtwkF4VYPoHbKxJw

[12] 富氫碳循環氧氣高爐低碳冶金技術, 世界金屬導報, 2024-07-09
<http://www.worldmetals.com.cn/viscms/bianjituijianxinwen1277/20240709/264857.html>

[13] 八鋼 2500 立方米 HyCROF 商業示範線脫碳能力實現預定目標
https://www.sohu.com/a/816223152_121123911

[13] 上海大學-興國鑄業“以氫代碳”富氫冶煉試驗項目正式啟動！並向試驗爐成功注入純氫氣, 上海大學省部共建高品質特殊鋼冶金與製備國家重點實驗室, 2022-02-18
<https://sklass.shu.edu.cn/info/1042/2664.htm>

[14] 打開高爐黑箱！首例富氫試驗高爐解剖順利完成, 上海大學氫冶金與低碳技術團隊, 2022-07-16
<https://hmlct.shu.edu.cn/info/1012/1456.htm>

[15] 上海大學氫冶金團隊助力高爐噴吹純氫低碳煉鐵技術進入工業化應用階段, 上海大學, 2024-12-19
<https://www.shu.edu.cn/info/1055/362735.htm>

[16] 晉南鋼鐵高爐噴吹富氫氣體工業化實踐, 鋼鐵 2022 年第 9 期(CNKI), 2022-09-15
https://tra.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2022&filename=GANT202209004&uniplatform=OVERSEA&v=GLFRJOWpsBrwgC3Sg_DzPMuxXFdQQhnQEUvZPWVMZN-0tYv8fZGt-YNkyGTu30jt

[17] 晉南鋼鐵打造極致能效綠色鋼鐵基地 爭當近零碳鋼鐵企業先行者，格蘭鋼鐵網，2023-12-07

<https://info.lgmi.com/html/202312/07/0982.htm>

[18] 晉鋼集團：做深做細氫能產業鏈條 探索綠色低碳高品質發展新路徑，新華網，2023-09-09

<http://big5.news.cn/gate/big5/sx.news.cn/20230908/c52864f939c24961b4333a76bb18dde9/c.html>

[19] 晉南鋼鐵集團：用綠色鋼鐵創造行業美好未來，新華網山西頻道，2024-07-31

<http://big5.news.cn/gate/big5/sx.xinhuanet.com/20240731/1800e2936e284d1281c502d0ace6502d/c.html>

[20] 高爐富氫冶煉發展現狀與展望，中國冶金 2024 年第 5 期，2024-02-26

<https://tra.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2024&filename=ZGYE202405001&uniplatform=OVERSEA&v=80sUKFfqYWUzbzOdM3N8da9QUJmcc8huMYiN3um6DrfnG07yclrXBvaVfAw6ZS1WR>