

近年直接還原設備與技術之專利趨勢分析

目 錄

1	引言	1
2	H-DR 技術主要內涵與基本原理	1
2.1	基本熱力學與動力學原理.....	1
2.2	兩大主流還原系統.....	1
3	近年發展現況.....	2
3.1	歐洲.....	2
3.2	亞洲.....	2
3.3	市場趨勢.....	3
4	近期關鍵技術發展.....	3
5	H-DR 規模化挑戰與潛在風險	4
5.1	原料挑戰：高品位礦石短缺與粉化問題.....	4
5.2	製程技術挑戰：吸熱效應與黏結.....	4
5.3	產品性質與後續熔煉問題.....	4
5.4	經濟與供應鏈風險.....	5
6	DR 相關專利之整體趨勢與高價值專利家族分析（2013–2025）	5
6.1	高價值專利家族（家族成員 ≥ 2 ）的時間分布	6
6.2	高價值專利家族的還原劑技術路線.....	7
6.3	高價值專利家族的爐型與系統架構.....	8
6.4	主要趨勢比較（高價值專利家族 2020 年前 vs. 2020 年後）	8
7	結論	9

1 引言

傳統的鋼鐵生產主要依賴高爐將鐵礦石還原為鐵水，此過程不僅消耗大量能源，且因使用煤炭和焦炭作為還原劑與熱源，導致大量的二氧化碳排放。相較之下，直接還原（DR：Direct Reduction）技術在固態下將鐵礦石還原，傳統上多使用天然氣或煤氣。然而，為了達到碳中和，將還原氣體轉向使用氫氣的 H-DR(Hydrogen Direct Reduction)技術已成為產業轉型的焦點。若搭配使用綠氫與再生能源電力的電弧爐（EAF），H-DR 路線理論上可減少高達 97%的二氧化碳排放。

2 H-DR 技術主要內涵與基本原理

2.1 基本熱力學與動力學原理

H-DR 的核心機制是利用氫氣在高溫下奪取鐵氧化物中的氧。其還原過程通常經歷以下階段：赤鐵礦(Fe_2O_3)→磁鐵礦(Fe_3O_4)→氧化亞鐵(FeO)→金屬鐵(Fe)。與傳統的一氧化碳（CO）還原相比，氫氣還原具有顯著的熱力學差異：

- 吸熱反應：氫氣還原鐵氧化物的總反應是強烈的吸熱反應（Endothermic），而 CO 還原則是放熱反應。這意味著 H-DR 製程必須額外提供大量的熱能來維持爐內溫度，否則爐料溫度會迅速下降，導致反應速率降低。
- 反應速率與溫度：當溫度高於 820°C 時，氫氣的還原能力優於 CO；但在較低溫下則相反。因此，為了發揮氫氣反應速率快的優勢，H-DR 的還原溫度通常需控制在 820°C 以上，甚至建議在 $900-1000^\circ\text{C}$ 之間。
- 氣體利用率：由於熱力學平衡的限制，氫氣單次通過爐體的利用率較低（約 33%左右），因此必須設置氣體循環系統，將未反應的含氫頂氣經冷凝除水後重新加熱循環使用。

2.2 兩大主流還原系統

目前 H-DR 技術主要分為兩大類：豎爐（Shaft Furnace）還原系統、流體化床（Fluidized Bed）還原系統。

(1) 豎爐還原系統是目前技術最成熟、商業化程度最高的 H-DR 形式，代表技術包括 Midrex 和 HYL/Energiron。

- 運作原理：球團礦或塊礦從爐頂加入，在重力作用下緩慢下降；高溫還原氣從爐身中下部注入，與固體礦料逆流接觸進行氣固反應。
- Midrex 技術：傳統 Midrex 使用天然氣重組氣。在邁向 H-DR 的過程中，Midrex 開發了 Midrex FLEX/ H_2 技術，可使用高達 100%的氫氣。該製程特點是爐內壓力相對較低（約 1.5-2bar），並需配備氣體加熱器以補償氫還原的吸熱效應。

- HYL/Energiron 技術：技術特徵為高壓操作（6-8bar），有利於提高反應動力學效率並縮小反應器體積。其 ZR（Zero Reformer）製程允許在爐內進行原位重組（In-situ reforming），且已證實可使用高比例氫氣操作。
 - 特性：豎爐技術成熟，產能大（單模組可達 200 萬噸/年以上），但對原料要求高，必須使用高品位的球團礦（DR-grade pellets），以避免在後續電弧爐冶煉中產生過多爐渣。
- (2) 流體化床還原系統技術旨在直接使用粉狀鐵礦（Fine ore），可投入較豎爐系統所需品位低的鐵礦，且省去球團造粒成本。
- 運作原理：利用氣體流速將粉狀礦石懸浮流體化，使氣固接觸面積最大化，熱傳質傳效率高。通常採用多級反應器串聯（如 3-4 級），逐步提高還原度。
 - 代表技術：歷史上有 Finmet 和 Circored（唯一曾商業化運轉的純氫流體床）。近年最受矚目的是韓國 POSCO 開發的 HyREX 技術。
 - HyREX 特性：HyREX 結合了 FINEX 的流體化床經驗，使用多級流體化床反應器將粉礦還原成直接還原鐵粉（Hot DRI fines），然後直接熱裝入電熔爐（Electric Smelting Furnace, ESF）進行熔煉與渣鐵分離。這種設計解決了傳統 DRI-EAF 路線難以使用低品位礦石的問題，因為 ESF 具有類似高爐的排渣能力。

3 近年發展現況

全球鋼鐵業正加速 H-DR 的示範與商業化進程，如表 1。

3.1 歐洲

- HYBRIT(瑞典)：由 SSAB、LKAB 和 Vattenfall 合作，於 2021 年成功試產出世界上第一批使用非化石燃料海綿鐵製成的鋼材。該項目使用 100% 氫氣豎爐技術。
- H2 Green Steel(瑞典)：計劃建設大規模的綠氫工廠與 DRI 豎爐，目標在 2025 年開始生產，展示了從零開始設計的綠色鋼鐵廠模式。
- SALCOS(德國)：Salzgitter 集團的項目，旨在利用風電製氫逐步取代高爐工藝。

3.2 亞洲

- POSCO(韓國)：積極推動 HyREX 技術，目標在 2050 年實現碳中和。POSCO 已完成實驗室與中導工廠測試，正在進行示範工廠的工程設計，並與 Primetals 合作開發。
- COURSE50(日本)：雖然早期側重於高爐改進，但日本亦在開發利用氫氣還原的技術(GI Fund)，並結合碳捕捉（CCS）。

- 中國：河鋼集團（HBIS）與 Tenova 合作，建設了 60 萬噸級的氫基豎爐示範工廠，使用富氫氣體（約 70% 氫氣）。

技術持有者	技術名稱	主要原料	核心設備	出爐狀態	相關採用
MIDREX	MIDREX Flex	球團礦、NG、H ₂	豎爐	球狀 DRI	黑德蘭港 HBI 計畫 2025 啟動
MIDREX	MIDREX H ₂	球團礦、H ₂	豎爐	球狀 DRI	瑞典 Stegra 預計 2026 年啟用
河鋼集團	HyMEX	球團礦、COG	豎爐 (Energiron - ZR)+CCU+EAF	球狀 DRI	河鋼宣鋼廠 2024 年啟用
Tenova	Energiron-ZR (HYL-ZR)	球團礦、COG	豎爐	球狀 DRI	湛江鋼 2024 年啟用
POSCO	HyREX	粉礦、H ₂	多級流體化床+ESF	液態鐵水	浦項廠 2025 年開工
Primetals	HYFOR (Hy4Smelt)	粉礦、H ₂	多級流體化床 (+ESF)	粉狀 DRI (液態鐵水)	奧鋼聯林茲廠預計 2027 年啟用
鞍鋼	HIFRI	粉礦、H ₂	電解製氫+非內擴散流化床	粉狀 DRI	鞍鋼鮫魚圈 2022 年啟用
SMS Group	Circored	粉礦、H ₂	循環流化床+鼓泡流體化床	粉狀 DRI	法蘭克福先導工廠 2025 年啟用

表 1 近年主要直接還原技術整理

3.3 市場趨勢

2023 年全球 DRI 市場規模達到 522.7 億美元，預計將以 9.2% 的複合年增長率增長。亞太地區佔據了最大的市場份額，顯示出新興市場對 DRI 的強勁需求。

4 近期關鍵技術發展

為了提升 H-DR 的效率與經濟性，近年來出現了一項項關鍵的技術創新方向：

- 高溫電解整合技術：為了提高能源效率，有研究提出將固態氧化物電解槽（SOEC）與 H-DR 廠整合。SOEC 可在與 DRI 爐頂氣相似的高溫下運作，直接電解水蒸氣（甚至共電解 CO₂）。這種熱整合（Thermal Integration）與化學整合（Chemical Integration）可將製氫與還原過程的總能耗從傳統天然氣 DRI 的 10.4 GJ/tDRI 降低至 8.0 GJ/tDRI，並減少 96% 的直接 CO₂ 排放。SOEC 的高效率在於利用廢熱降低了電力需求。
- 電熔爐（ESF）技術：針對流體化床產出的 DRI 粉末或低品位 DRI，傳統電弧爐（EAF）難以處理大量爐渣。ESF 技術（如 POSCO 的 HyREX 所採用）成為關鍵突破，它能像高爐一樣處理低

品位礦石產生的爐渣，使得 H-DR 技術不再受限於稀缺的高品位球團礦。

- 液態有機氫載體（LOHC）供應鏈：對於缺乏廉價再生能源的鋼鐵生產國（如德國、日本），進口氫氣是必然選擇。利用二苯基甲苯（DBT/PDBT）等 LOHC 進行長距離氫氣運輸，並在鋼廠端利用廢熱進行脫氫（Dehydrogenation），被視為極具潛力的突破性供應鏈技術。研究顯示，利用鋼廠廢熱驅動 LOHC 脫氫，可顯著降低氫氣進口成本，使其在經濟上更具競爭力。
- 爐內流場與反應控制優化：針對豎爐內部氫氣分佈不均的問題（特別是中心死區），提出了雙層氣體注入、中心氣體分佈器等創新設計，以及調整冷卻氣流量來優化爐內熱化學狀態，以實現高金屬化率。

5 H-DR 規模化挑戰與潛在風險

儘管前景看好，H-DR 技術的大規模推廣仍面臨多重挑戰。

5.1 原料挑戰：高品位礦石短缺與粉化問題

- 球團礦短缺：豎爐 H-DR 需要高品質的 DR 級球團。隨著全球對綠色鋼鐵需求的增加，DR 級球團預計將出現嚴重短缺。
- 還原粉化（Disintegration）：赤鐵礦在氫還原過程中比含針鐵礦的礦石更容易發生還原粉化（RDI 高）。這是因為赤鐵礦還原為磁鐵礦時晶格膨脹較大，導致顆粒破碎。雖然細粉有助於最終還原度，但也增加了粉塵夾帶流失（Elutriation losses）的風險，增加了旋風分離器的負擔。

5.2 製程技術挑戰：吸熱效應與黏結

- 吸熱效應：氫氣還原強烈吸熱，這與傳統 CO 還原（放熱）截然不同。在豎爐中，這會導致爐料溫度迅速下降，影響反應速率。必須通過提高進氣溫度（需加熱器）、增加氫氣流量（Overblowing）或引入熱載體（如 N₂）來補償熱量。
- 黏結（Sticking/Clustering）：在流體化床中，高溫下金屬鐵顆粒容易發生黏結，導致床層「失流」（Defluidization），這是流體化床操作的致命問題。雖然研究顯示氫氣還原的 DRI 相比 CO 還原較不易產生鐵鬚（Iron whiskers），黏結傾向較低，但仍需嚴格控制溫度與氣體成分。豎爐中同樣需要塗層（Coating）來防止球團黏結。
- 氣體利用率低：氫氣還原的平衡限制導致氣體利用率低（33%），這意味著必須有龐大且高效的頂氣循環與純化系統，增加了設備資本支出與操作複雜度。

5.3 產品性質與後續熔煉問題

- **缺乏碳源（Zero-Carbon DRI）**：使用純氫還原的 DRI 含碳量極低。然而，下游的電弧爐通常需要 DRI 含有 1.5-3% 的碳，以便利用碳氧反應產生泡沫渣（Foamy Slag）來保護爐壁並提高熱效率。缺乏碳會導致 EAF 熔煉能耗增加、電極消耗加快。因此，H-DR 製程往往需要額外步驟（如在冷卻區注入天然氣或碳氫化合物）來進行「滲碳」，或者在 EAF 中添加碳源。
- **再氧化風險**：氫還原的 DRI 孔隙度極高，比表面積大，極易與空氣中的氧氣反應而再氧化（甚至自燃），這對儲存與運輸構成安全風險。通常需要將其壓製成熱壓塊鐵（HBI）以鈍化其活性。

5.4 經濟與供應鏈風險

- **氫氣成本**：綠氫的生產成本（電解水）遠高於天然氣重組氫。H-DR 的經濟可行性高度依賴於廉價的綠電與氫氣供應。
- **供應鏈依賴**：對於依賴進口氫氣的國家，供應鏈的穩定性與運輸成本（如 LOHC 或氨的轉化效率）是潛在風險。若採用 LOHC，其脫氫過程需要大量熱能，若無廢熱可用，將大幅增加能耗與成本。

6 DR 相關專利之整體趨勢與高價值專利家族分析（2013 - 2025）

本次直接還原煉鐵相關專利分析，涵蓋 2013 年至 2025 年間之 CN、EP、KR、JP、US、WO 專利資料，從專利申請時間、還原劑類型、爐型配置與專利家族結構等面向，觀察全球鋼產業在低碳煉鐵與氫能轉型背景下之技術布局演變。

在整體專利數量上(參見圖 1)，2013 - 2018 年間 DR 相關專利呈現穩定申請。2019 - 2021 年間申請量出現短暫下降，顯示既有技術路線已接近成熟，或產業處於轉換與觀望階段。2022 年以後，隨著氫能政策、碳中和承諾與氫基煉鐵示範計畫逐漸實現，直接還原煉鐵相關專利亦快速成長，尤其集中於氫還原、碳含量控制與還原—熔融系統整合等技術。

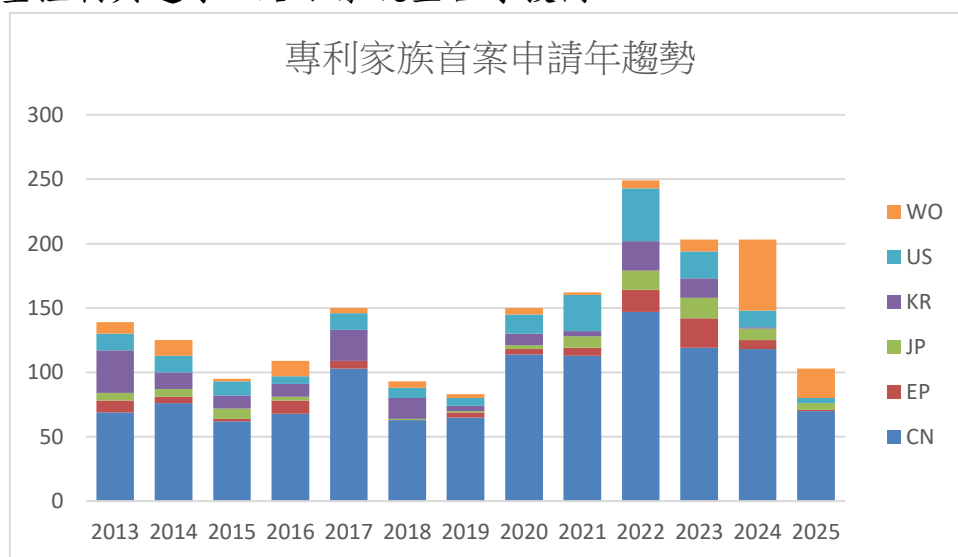


圖 1 專利申請趨勢

註：2024-2025 年專利尚未全部公開，該年度相關圖表數量(含後續)僅供參考。另因同一專利可能同時進行多國布局，故本圖以專利家族之首次申請來進行數量計算。

然而，比對圖 2、3，中國(CN)申請人從佔據 11 位，變成僅佔據 2 位，而來自歐美地區的申請人佔據前 20 的絕大多數。可顯示 CN 申請人不論其規模，鋼廠與設備商皆鮮少向海外布局。因此，這類專利在國際市場的技術與商業影響力相對有限。基於此，本分析進一步聚焦於「專利家族件數大於等於 2」(高價值專利)之家族，即以申請多國專利作為判斷全球主要技術路線與產業投入重點的依據。

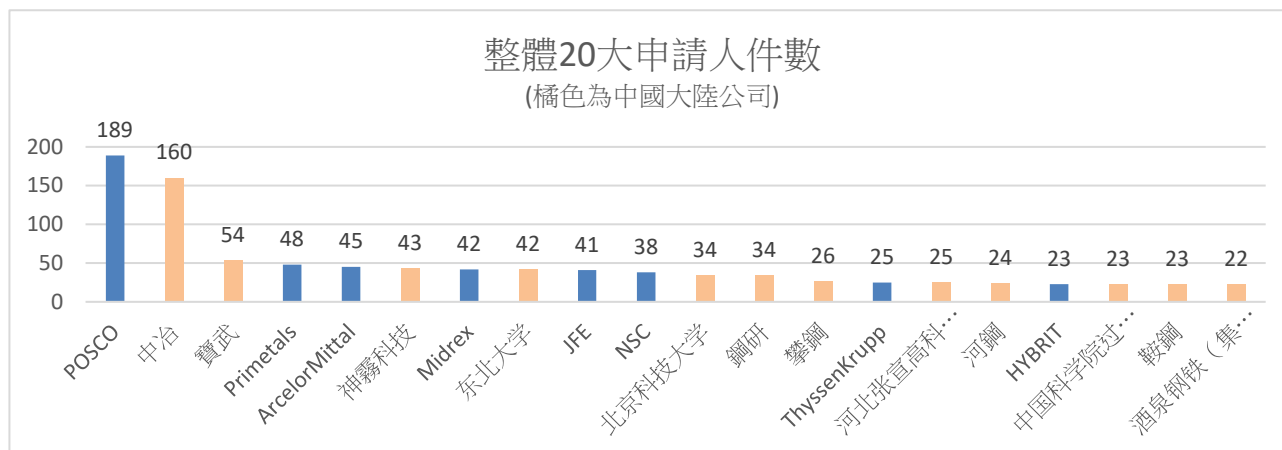


圖 2 專利主要申請人

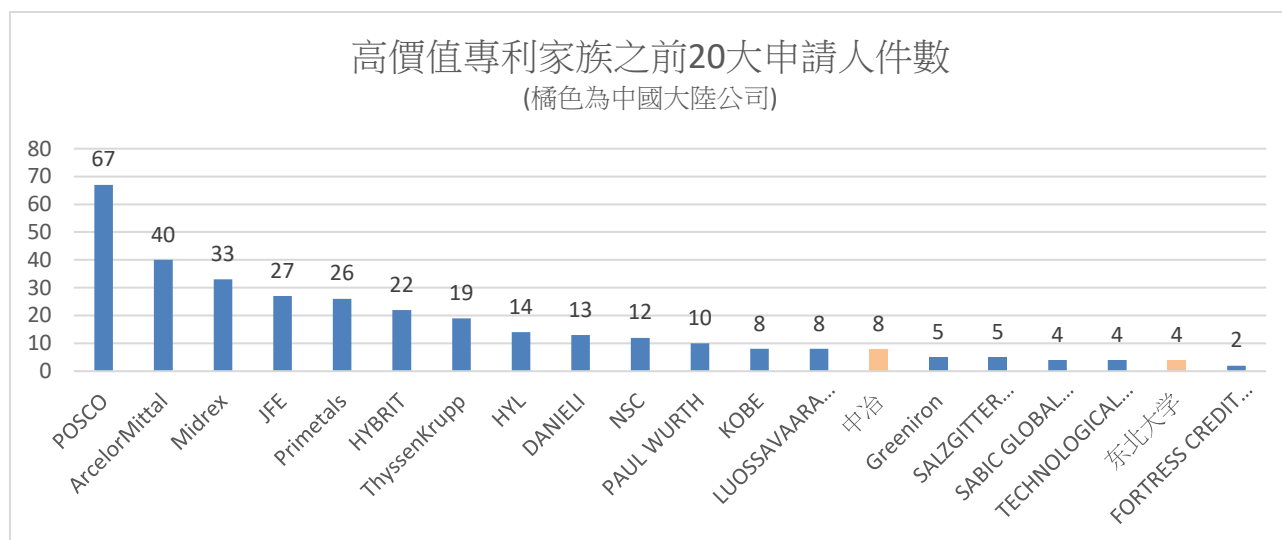


圖 3 高價值專利主要申請人

6.1 高價值專利家族（家族成員 ≥ 2 ）的時間分布

依據整理資料顯示(參見圖 4)，高價值專利家族在 2013 - 2016 年間維持相對穩定的申請量，2017 - 2019 年略為下降，2020 - 2022 年達到低點，之後自 2023 年起再度快速增加。此一趨勢顯示，具有跨國布局意圖的直接還原煉鐵技術，主要集中於近年氫基煉鐵與低碳煉鐵路線逐步明朗化之後。

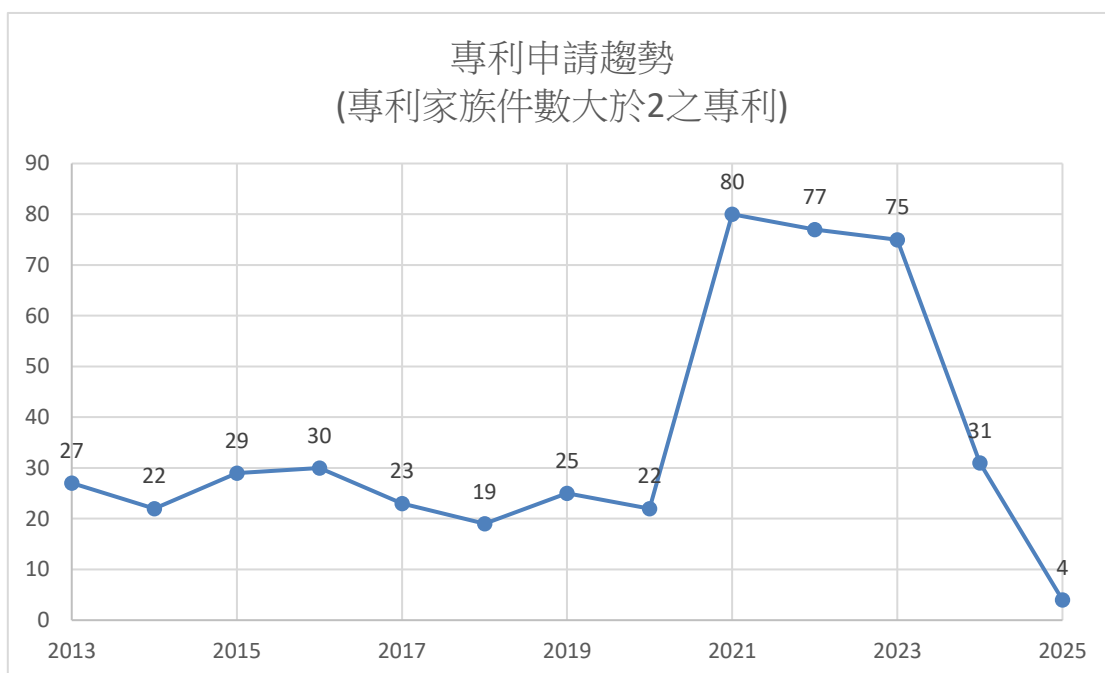


圖 4 高價值專利申請趨勢

6.2 高價值專利家族的還原劑技術路線

在高價值專利家族中(參見圖 5)，還原劑類型呈現明顯的結構性轉變。2013–2020 年間，CO 與合成氣 (Syngas) 仍為主流，天然氣亦占有一定比例，反映既有氣體還原體系仍為產業核心。純氫相關專利在此期間雖有出現，但多未形成跨國家族，顯示其當時尚未被主流產業廣泛視為可行方案。

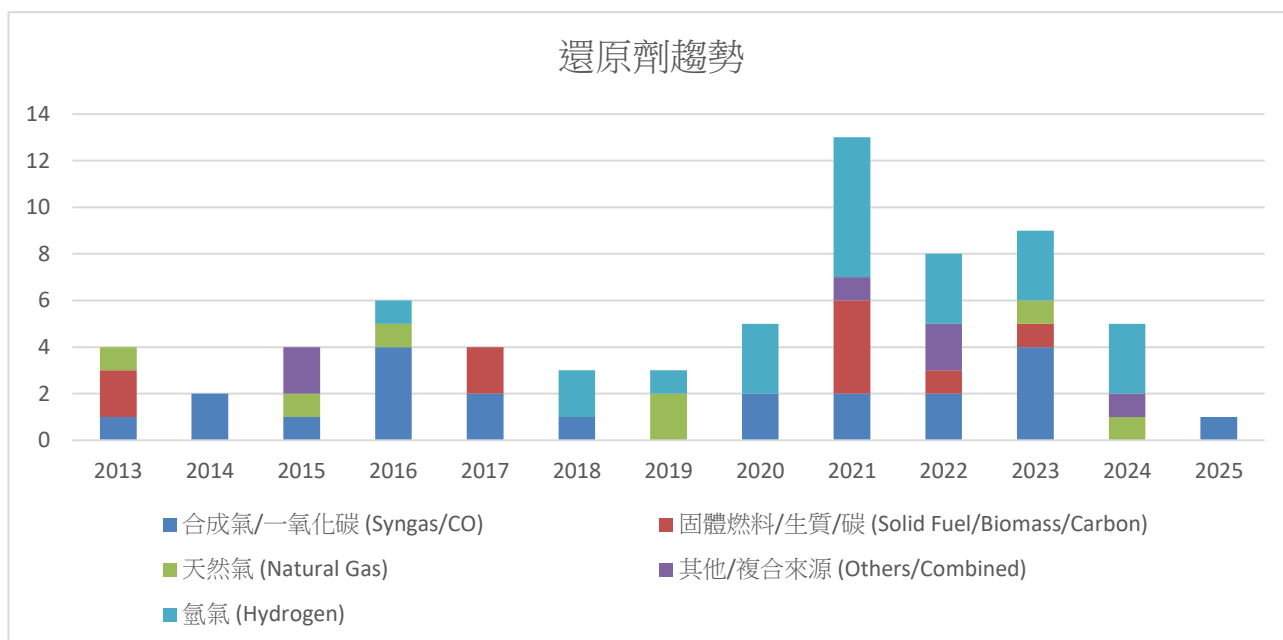


圖 3 還原劑技術路線專利申請狀況

自 2021 年以後，氫氣在高價值專利家族的專利中明顯增加，代表大型鋼鐵企業與設備商開始以實際產業化為前提，投入氫基還原技術的國際專利布局。同時，CO 與合成氣相關專利並未完全消失，但其來源為鋼廠副產氣。

6.3 高價值專利家族的爐型與系統架構

圖 6 呈現近年之還原爐類型，在高價值專利家族中，豎爐長期維持為核心爐型。流動床爐在 2013 - 2020 年間仍具有一定比重，主要對應 FINEX 體系；而旋轉窯與轉底爐類型則邊緣化。

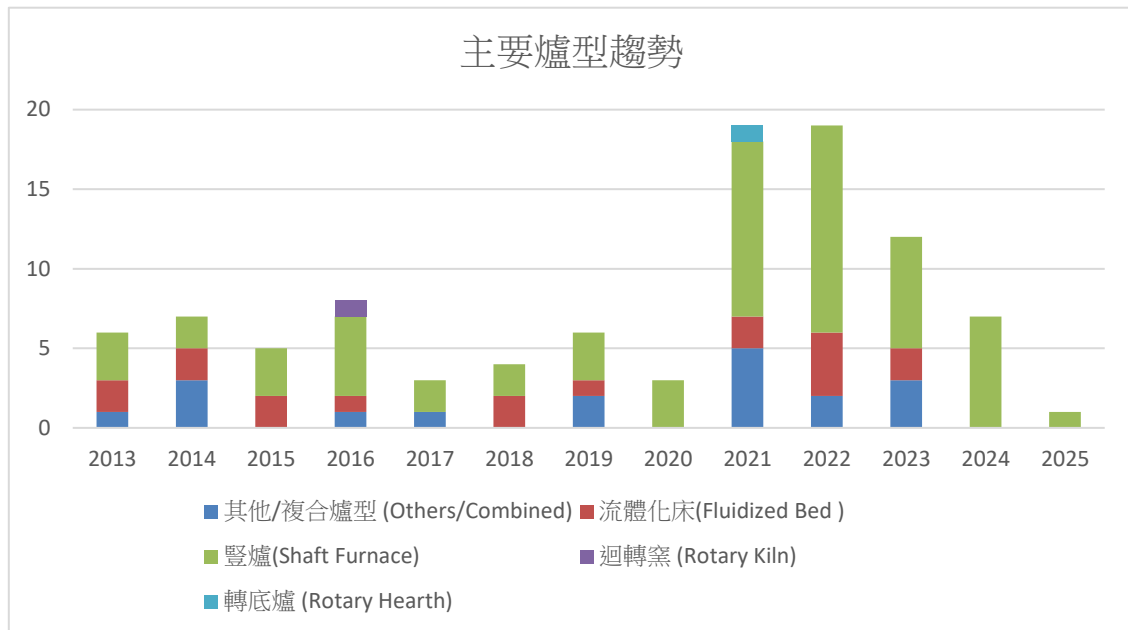


圖 6 還原爐類型趨勢

6.4 主要趨勢比較（高價值專利家族 2020 年前 vs. 2020 年後）

表 2 整理，專利中主要關聯之技術類型，涵蓋 DRI 的應用、還原爐之氣體設備、DRI 滲碳等技術。相關趨勢分析如下：

表 2 以 2020 年為分野技術類型比較表

專利主要技術	2020 年前 (件數)	2020 年後 (件數)
DRI 投電弧爐	40	67
DRI 投電熔爐	23	50
DRI 投高爐	7	13
產氫設備	5	21
氣體加熱設備	5	21
氣體循環	12	19
滲碳	9	12
其他效率改進	35	27

- **氫氣技術主導低碳化：**2020 年後，與氫氣生產相關的專利從 5 件增至 21 件，顯示技術焦點已從傳統碳基氣體還原轉向以氫氣為基礎的還原劑技術。
- **氣體相關的系統效率優化：**與「氣體加熱設備」和「氣體循環」相關的專利數均顯著增長，代表研發相當注重整個 DRI 製程的能源效率和資源循環利用，以實現更低成本和更低碳排放的目標。
- **熔融還原相關大幅成長：**將 DRI 應用於 ESF 的專利件數成長約一倍，結合 DRI 與新型電熔爐或熔融還原技術的製程，其受到 POSCO 極大的關注，與其被視為長期淨零的關鍵路徑之一呼應。
- **EAF 與高爐的應用：**DRI 投電弧爐仍然是最多的項目，顯示電弧爐仍是 DRI 的主流去向。同時，對 DRI 投高爐的關注度增加，則反映了對現有高爐設施漸進式減碳趨勢，惟其增長幅度相較緩慢。

7 結論

從製程物理與專利結構的雙重視角來看，H-DR 已不再只是減碳的理想路徑，而是全球鋼鐵產業實際押注的下一代煉鐵平台。其核心意義不僅在於用氫氣取代碳，還進一步包含在於重構整鐵水產出之體系。傳統高爐與天然氣直接還原列鐵的競爭重點是單位鐵成本，而 H-DR 則轉化為能源效率、氫氣供應與設備整合能力的系統競賽。

在國際布局方面，中國大量單件專利雖使總量居高，但高價值專利家族偏少，顯示其多數仍停留在國內試驗或政策導向研發，而未進入國際設備與工程體系的競爭。相對地，美國、歐洲、日本與韓國鋼廠及設備商，才是實際布局 H-DR 商業化能力的核心廠家。

在技術發展趨勢上，2020 年前的高價值專利仍集中於合成氣、豎爐操作與局部效率提升，反映產業仍在既有技術框架內優化；而 2021 年後，跨國專利快速聚焦於氫還原、氣體加熱、循環系統、DRI 碳控制以及 DRI 與電爐 (EAF/ESF) 整合，說明產業已將氫基煉鐵視為長期主流路線。

其次，豎爐與流體化床並非單純競爭，而是對應不同資源結構的雙軌發展。高品位球團短缺使得 POSCO 大力支持 HyREX 流體化床+ESF 路線，而這一趨勢在 2020 年後 ESF 相關專利件數倍增中已獲明確反映。這代表未來低品位礦與細粉的利用能力，將可能成為 H-DR 成本的差異化因素。

然而，氫氣成本、供應鏈穩定性、DRI 含碳控制與再氧化安全性，仍是產業化的實際門檻。專利所呈現的氣體循環/加熱、產氫設備、滲碳技術，正是為了回應這些瓶頸。除了上述技術的開發與突破，對鋼廠來說，在淨零的壓力下，未來的競爭力不僅在直接還原煉鐵技術本身的創新與突破，也在能源效率、熔煉的鐵水生產體系。