

全球氫能轉型潛力報告

一、氫氣製備方式比較

氫氣依原料來源和碳捕集方式可分為灰氫、藍氫、綠氫等類型。**灰氫**通常由天然氣蒸汽重整（SMR）或煤氣化製取，是當前規模最大的製氫方式，技術成熟。IEA-ETSAP指出，大型天然氣重整廠效率可達70–85%¹，但其碳排放高，每公斤氫約產生10–12公斤CO₂，煤制氫更高達22–26公斤CO₂²。**藍氫**是在蒸氣重整或煤氣化過程中加入二氧化碳捕集儲存（CCS），可大幅減少製程排放。現有捕集技術對SMR氫的捕捉率一般60–90%，捕捉後每公斤氫排放可降至數公斤CO₂；但高捕集率下效率下降，SMR+CCS模式能效約65–75%³。IEA指出僅靠CCS不夠，還需解決天然氣上游甲烷洩漏和管道排放²。**綠氫**以再生能源（如風光電）驅動水電解制得，製程本質上**無直接CO₂排放**⁴。其效率受電解槽性能影響，鹼性或質子交換膜電解槽效率約62–82%⁵（電能消耗約50 kWh/kg H₂³）。目前綠氫技術仍在擴建中，但因電力成本較高，使得綠氫生產成本居高不下；BloombergNEF報告估計，當前綠氫成本約每公斤4–12美元⁶，若要在2030年前實現與化石路徑競爭，需降至約2美元/kg^{7 8}。

製氫方式	技術原理	技術成熟度	CO ₂ 排放強度 (kg CO ₂ /kg H ₂)	能源效率 (電/燃料→氫)
灰氫	天然氣SMR或煤氣化	成熟商用	約10–12 (天然氣) 22–26 (煤)	70–85% ¹
藍氫	SMR/煤氣化 + CCS	示範/初期	大幅減少 (~1–3)，視捕捉率而定 ²	~65–75% (含CCS能耗) ³
綠氫	再生能源電解水	發展中	製程零排放；排放取決於能源強度 (若再生電力則近0) ⁴	62–82% ⁵

綜合來看，灰氫成本最低但碳排放最高；藍氫可利用現有基礎設施減排，但CCS能力和上游排放是挑戰²；綠氫清潔但成本與效率需改善。IEA-ETSAP報告指出，化石燃料製氫若無有效碳捕集無法大規模可持續發展；而電解雖成本高卻幾乎無製程排放⁹。

二、氫氣儲存與運輸技術

氫能存取的主要挑戰在於低體積能量密度和運輸難度。目前常見儲運方式包括：**高壓氣態儲存**（350–700 bar壓縮氣態）可實現較高體積能量密度，技術成熟但需耗費壓縮能量10–15%¹⁰；根據IEA-ETSAP，氫氣壓縮成本約0.9–1.75歐元/公斤¹¹。**液態儲氫**需極低溫（-253°C）使氫液化，液化能耗30–40%¹⁰，並須防止低溫蒸發損失；雖能獲得高體積密度，但設備與絕熱成本昂貴。**液態有機載氫**（LOHC，如甲基環己烷MCH）在常溫下儲運安全便捷，但需氫化與脫氫反應，過程能效約50–60%¹²，仍在研發示範階段。**氫管網**可長距離、大規模輸送氫氣：IEA指出全球現有專用氫管線約5,000公里¹³。然而，新建氫管造價高，每1000公里約需0.12–0.22美元/公斤¹⁴；即便以BNEF估計100–1000公里範圍，輸送成本介於0.10–0.58美元/公斤¹⁵，遠高於天然氣。改造天然氣管線輸氫則成本僅為新管的10–35%¹⁴，但仍需解決氫致脆與密封問題。IEA並提醒，跨越1500公里長距離運輸時，將氫轉化為氨或LOHC再運輸更經濟¹⁶。

儲運方式	特性	儲能損耗	挑戰/成本
高壓氣態儲存	氣態壓縮至350–700 bar；技術成熟	壓縮耗能≈10–15% ¹⁰	壓縮與加注成本高（約0.9–1.75€/kg ¹¹ ），儲罐及管線需耐高壓
液態儲存	低溫液化（-253°C），獲得高體積密度	液化耗能30–40% ¹⁰	需昂貴保溫絕熱設備、蒸發損失高；技術成熟但成本高
有機載氫(LOHC)	常溫液態載體（如MCH）；安全穩定	脫氫反應需高溫，加氫設施複雜	目前多為示範階段

管道輸送高/低壓專用管網；可改造天然氣管維護耗能低、效率高建設成本高（專管約0.12–0.22\$/kg/1000km¹⁴）；需解決氫致脆與密封等問題

此外，大規模基礎設施如加氫站網絡的建設需求龐大。截至2024年，全球氫加注站部署僅約1,150座¹⁷。相比之下，電動車充電樁普及速度快得多。整體而言，氫的儲存運輸技術成熟度參差不齊：氣態/液態儲存商用可行但成本高、LOHC與管道技術需進一步開發與標準化。

三、氫能主要應用領域

氫能可用於工業、交通與電力等多個領域：

- **工業用途：**傳統上煉鋼、化工（製氨、合成甲醇）等高排放行業對氫有穩定需求。目前全球煉鋼約占總排放7-9%¹⁸。氫直接還原鐵(DRI)技術正被研發替代焦炭冶煉，例如瑞典Stegra計畫已於2023年啟動首座2.5百萬噸/年全氫DRI示範廠¹⁹。丹麥Yara在2023年投入5千噸/年綠氨示範項目¹⁹，以測試電解氫製氨。高溫工業加熱（玻璃、水泥）也在考慮用氫替代天然氣熱源，但成本與爐具改造是挑戰。氫還可用於石化加氫與提質，降低煉油廠CO₂排放。
- **交通運輸：**燃料電池車(FCV)可使用氫氣發電行駛。目前日本、韓國、中國等國積極推廣燃料電池汽車和公交車。韓國政府規劃2030年前推廣30萬輛燃料電池商用車、建立660座加氫站^{20 21}；日本也推動燃料電池汽車技術輸出²²。截至2024年5月，全球累計燃料電池車約9萬輛¹⁷，主要分布在亞洲。氫能在重型卡車、巴士和火車等領域潛力更大，因其續航能力優於電池車且充注時間短，但目前部署仍屬早期階段²³。氫也被研究用於船舶（液氫或液態氫燃料）及飛機（合成燃料）等，但因能量密度和成本問題尚需突破。
- **電力備援與儲能：**氫可作燃氣輪機燃料或混燒。例如德國西門子已演示12MW燃機可100%燃燒氫氣²⁴；日本電力公司也在燃煤機組加入氫混燒實驗²⁴。氫能長期儲存大量能源，理論上可協助可再生能源平抑供需波動，但能量往返效率低（如壓縮液化損耗高達45–70%¹²），目前主要用作季節儲能或後備電源。儘管具有清潔燃料潛力，氫在發電市場面臨效率與成本競爭，目前電池儲能技術在大部分儲能應用上更具成本效益。

總體而言，氫能在工業供給端具有減碳優勢，特別是煉鋼和化工領域；在運輸端，氫燃料電池車適合長途重載場景，但與日益成熟的電池車競爭下，成長較為緩慢²³。各種應用的限制多來自基礎設施不足、氫氣生產和儲運成本高，以及整體效率不及替代技術。

四、成本效益分析

製氫成本：傳統天然氣SMR成本相對低廉，IEA-ETSAP估算SMR制氫成本約0.05–0.10歐元/Nm³（依燃料與規模），而水電解成本高達0.16–0.30歐元/Nm³²⁵。以公斤計算，BloombergNEF估計當前綠氫成本約4–12美元/kg⁶；隨著電解槽和可再生電價下降，預測2030年可降至1.8–4美元/kg⁸。IEA曾樂觀推估歐洲2030年綠氫成本1.6歐元/kg，但在更現實假設下，該成本可能落在3–5歐元/kg⁸。對比而言，煤制氫或天然氣氫在無捕集時成本更低，但其碳排放未計價。研究顯示，要使綠氫在鋼鐵等行業與化石路徑競爭，需達到每公斤約2美元的成本水平²⁶，前提是相應的碳定價支持到位。氫氣使用成本（到加氫站）目前仍遠高於汽油或電池電動車；例如美國加州的實測資料顯示，加氫站每公斤氫價超過13美元²⁷（約為理想競爭水平的3倍以上），反映基礎設施與稀缺供應的成本壓力。

基礎設施投資：氫能大規模推廣需要巨額投入。IEA數據顯示，全球已公佈約1000億美元公共資金投入氫能項目，主要集中在先進經濟體²⁸；截至2024年，已投資氫相關基礎設施約65億美元，主要在中東地區，用於管線和加氫站建設²⁹。目前全球專用氫管線長度約5,000公里²⁹，加氫站1150座¹⁷，遠低於天然氣和電網基礎。以投資成本而言，新建每公里氫管線約為天然氣管路的數倍（專管0.12–0.22\$/kg·1000km¹⁴），且加氫站建設造價高昂，每座須數百萬美元。對比之下，電動車充電樁和天然氣網路已有較成熟商業模式和規模經濟優勢。

與其他能源選項比較：相較於電動車，氫燃料電池車的整體能效較低（氫氣從生產到車輪約30–40%的能量損失¹²，而電池充電效率常超過80%），且加氫站尚未普及，故在乘用車市場上成長較慢²³。在運輸之外，天然

氣作為現有管網燃料成本低廉且分佈廣泛，替代路徑成熟，使得氫在熱電和工業燃料上的競爭力需要通過碳定價或政策強制來提升。總體而言，當前氫能仍高成本，對比天然氣和電能，尚需大幅度成本下降與配套政策支持才能達到與其他選項相當的經濟效益^{6 8}。

五、主要國家氫能政策與進展

- **美國**：2023年發布《全國潔淨氫戰略與路線圖》，設定2030年潔淨氫產量10百萬噸、2040年20百萬噸、2050年50百萬噸的目標³⁰。通過2022年通過的《降低通貨與就業法案》（IRA），設立最高3美元/公斤的氫生產稅收抵免（視碳強度等級而定）³¹；並撥款約\$7億/個支持7個「氫樞紐」示範項目（其中兩個專注於綠氫）³²。拜登政府承諾到2026年將綠氫成本降至2美元/kg、2030年降至1美元/kg³³，並於2024年通過17億美元補貼六項工業示範計畫³⁴。美國現階段已無商業運營藍氫廠，但相關技術研發與示範持續推動。
- **中國**：將氫能列為「未來六大產業」之一。政府提出2030年氫氣需求35百萬噸（約佔能源供應5%）的展望，2050年達60 Mt³⁵；並發布《氫能產業中長期發展規劃(2021–2035)》，要求2025年前形成配套政策制度，2035年前建立完整的氫能產業鏈和應用體系³⁶。各省市相繼出臺扶持措施，截至2024年底已有24個省市發佈33項地方氫能政策（涵蓋制氫補貼、加氫站建設、燃料電池車補貼等）。但中國製氫依然以煤氣化為主（約佔60%）³⁷，轉向低碳綠氫仍需巨額投資與清潔電力配套。中石油、中石化等央企正大舉投資電解槽與加氫設施，並推動燃料電池車商用化試點。
- **德國（及歐盟）**：2020年公布《國家氫能戰略》，重點推動綠氫與工業應用。歐盟層面已批准多個IPCEI計畫，總金額近19億歐元用於製氫和燃料電池技術³⁸；德國政府另自行撥款約40億歐元，對工業部門燃料替換和綠氫示範給予差價合約補貼³⁸。2024年4月，歐盟成立「氫能銀行」，首次拍賣補貼綠氫生產價格³⁸。此外，德國目標在全國範圍內建立數百座加氫站，但近期新政府已在財政預算中大幅削減部分氫能資金（尚待最終立法）。總體而言，德國與歐盟強調技術創新和工業減碳示範，政策工具包括補貼、競價和碳定價等。
- **日本**：世界最早發布國家氫策略的國家之一（2017年）。2023年修訂策略將重心轉向工業減碳，設定2040年氫產量目標為1,200萬噸²²。政府承諾利用「綠色轉型債券」籌資約3兆日圓（約203億美元）補貼氫的生產、儲運和利用³⁹；另透過「綠色創新基金」未來10年投入約140億美元加速氫能技術研發⁴⁰。日本還設立了對低碳氫的差價合約（CfD）補貼機制，彌補綠氫成本與灰氫的差價⁴¹。在需求端，日本早先推廣氫燃料電池乘用車和住宅燃料電池，也正積極發展氫能在發電、運輸和工業中的應用。
- **韓國**：自2020年《氫能經濟推進法》生效後，提出雄心勃勃的目標：2030年氫氣供應3.9百萬噸、2050年達27.9百萬噸²¹。計畫到2030年部署30萬輛燃料電池車，建設660座加氫站^{42 20}（確保90%以上人口20分鐘內可達站點）。韓國政府出台多項補貼與激勵：包括燃料電池車購車補貼、加氫站建設補貼，以及將氫電納入電力市場配額制（清潔氫上網競價）^{43 42}。此外，政府在2023年底推出「清潔氫認證」制度，對低於4 kg CO₂/kg H₂的氫給予獎勵⁴⁴。韓國努力扶植氫能產業鏈，培育300家氫能企業，到2040年希望實現80%零部件本土化^{45 21}。

各國政策雖差異明顯，但普遍認為氫能是實現長期碳中和的重要途徑。歐美主要着眼於本土綠氫產業和工業示範，亞洲國家在發展初期則兼顧氫技術輸出與能源進口布局。不同政策模式的組合可分為直接補貼、稅收抵免、差價合約以及市場機制等，效果將取決於成本下降速度及下游需求培育成效。

六、可行性與前景觀察

綜合各種技術路徑和政策模式，不同方案各有利弊：**綠氫**環保但需廉價再生電力；**藍氫**可平滑過渡卻受限於天然氣和CCS技術；**電解質子交換膜（PEM）電解槽**效率高但成本高；**高溫電解和熱化學循環**等尖端技術仍處原型階段。政策上，高額補貼與碳定價可加速早期部署，但長期需要依靠市場機制形成有效需求。IEA提醒，單靠碳捕集無法完全解決化石製氫的排放問題，上游天然氣開採的甲烷洩漏等也必須同步管理²。在成本方面，除電解降本外，氫的壓縮、儲運和使用設備等重型工程成本亦需大幅降低。

國際展望方面目前仍充滿挑戰。IEA估計，全球現有低碳氫年產量不到1 Mt⁴⁶，2030年前要達到宣告的49 Mt目標，意味產業須以90%以上的年增率快速成長⁴⁷。然而現行政策支持下的氫需求成長遠遠跟不上供給目標：IEA分析指出，到2030年可實際觸發的氫需求僅約6 Mt⁴⁸，僅為既定生產目標的一小部分，顯示需求端推動不足⁴⁸。BloombergNEF亦發現，迄今全球僅約1.5 Mt清潔氫項目達成最終投資決策⁴⁹，市場化仍非常初期。技術上，氫路徑的能源效率普遍低於直接用電或天然氣路徑（例如將氫轉換為運輸載體即損失45–70%能量¹²），未來需更高效的儲存和轉換技術。

總之，氫能在全球能源轉型中具**戰略潛力**，尤其對難以電氣化的重工業和長距離運輸領域。然而其全面商用仍面臨降本、增效、基礎設施及市場需求等多重考驗。國際社會普遍認為，要實現氫能規模化，必須持續技術創新、提供穩定政策支持，並建立統一標準和跨境供應鏈。觀察目前發展趨勢，未來幾年氫能產業有望加速成長，但其長期角色最終取決於成本競爭力與與其他能源技術的協同整合（如電網儲能、燃料電池、CCS等）的成效⁹⁴⁷。只有當氫氣生產、運輸和使用各環節的經濟性與可靠性齊頭並進時，氫能才有可能在全球能源系統中占據舉足輕重的地位。

參考資料：以上分析引用國際能源署（IEA）、氫能理事會（Hydrogen Council）、彭博新能源財經（BNEF）等機構之最新報告和技術簡報，以確保資訊權威可靠²⁵⁰⁸⁴⁷⁴⁸等。

¹ ⁵ ⁹ ¹⁰ ¹¹ ²³ ²⁵ ⁵⁰ Microsoft Word - P12_H2_Feb2014_FINAL 3_CRES-2a-GS Mz GSOK
https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/P12_H2_Feb2014_FINAL%203_CRES-2a-GS%20Mz%20GSOK.pdf

² ⁴ ¹² GHG emissions of hydrogen and its derivatives – Global Hydrogen Review 2024 – Analysis - IEA
<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024/ghg-emissions-of-hydrogen-and-its-derivatives>

³ Comparison of the emissions intensity of different hydrogen production routes, 2021 – Charts – Data & Statistics - IEA
<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/comparison-of-the-emissions-intensity-of-different-hydrogen-production-routes-2021>

⁶ ⁷ ²⁶ BNEF
<https://assets.bbhub.io/media/sites/25/2024/01/Scaling-Up-Hydrogen-The-Case-For-Low-Carbon-Steel-Bloomberg-New-Economy.pdf>

⁸ ⁴⁹ Liebreich: Clean Hydrogen's Missing Trillions | BloombergNEF
<https://about.bnef.com/insights/clean-energy/liebreich-clean-hydrogens-missing-trillions/>

¹³ ¹⁷ ²⁹ Hydrogen Insights September 2023
<https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2024/09/Hydrogen-Insights-2024.pdf>

¹⁴ ¹⁵ ¹⁶ ²⁷ betterenergy.org
<https://betterenergy.org/wp-content/uploads/2024/06/Hydrogen-Transportation-Issue-Brief.pdf>

¹⁸ hydrogencouncil.com
https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness_Full-Study-1.pdf

¹⁹ ²⁴ ³⁴ ³⁸ Hydrogen - IEA
<https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/hydrogen>

²⁰ ²¹ ⁴² ⁴³ ⁴⁴ ⁴⁵ Hydrogen Developments | South Korea | Global Hydrogen Policy Tracker | Baker McKenzie Resource Hub
<https://resourcehub.bakermckenzie.com/en/resources/hydrogen-heat-map/asia-pacific/south-korea/topics/hydrogen-developments>

22 30 31 32 33 39 40 41 Japan' s carbon neutrality strategy relies heavily on hydrogen – and North America could provide it | DLA Piper

<https://www.dlapiper.com/en/insights/publications/2024/05/japans-carbon-neutrality-strategy-relies-heavily-on-hydrogen>

28 48 Policies – Global Hydrogen Review 2024 – Analysis - IEA

<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024/policies>

35 36 37 China' s Hydrogen Energy Industry: State Policy, Investment Opportunities - China Guide | Doing Business in China

<https://www.china-briefing.com/doing-business-guide/china/sector-insights/china-s-hydrogen-energy-industry-state-policy-investment-opportunities>

46 47 Executive summary – Global Hydrogen Review 2024 – Analysis - IEA

<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024/executive-summary>