

綠氫產業鏈推動永續工業發展的政策工具

研析《綠氫促進永續工業發展：發展中國家的政策工具包》之政策建議



林韋廷 Wei-Ting Lin 2024 / 03 / 29

工業技術研究院 綠能與環境研究所 能源及政策推動組



目錄

一、 前言	2
二、 綠氫與發展中國家	3
三、 綠氫產業角色與挑戰.....	5
(一) 自然稟賦.....	9
(二) 成本	9
(三) 缺乏生產綠氫所需的技術知識、基礎建設、與市場.....	10
(四) 其他挑戰，如政治不穩定、監管框架薄弱、官僚障礙.....	11
四、 綠氫價值鏈之提升策略	11
(一) 法規、政策與監管框架.....	12
(二) 國產化與在地外溢效果.....	13
(三) 促進下游應用.....	14
(四) 資金	14
(五) 國際合作.....	14
(六) 公民參與及公正轉型議題	15
五、 結語	17
參考文獻	18



一、前言

綠氫，即源自再生能源的氫，在未來達成全球淨零的目標上具有重要角色，被譽為未來的燃料，預計到 2050 年，綠氫將在實現 1.5°C 氣候目標的能源轉型中發揮重要作用。綠氫擁有改造多個產業的潛力，包括重工業、航運和航空等，從減少溫室氣體排放到加強能源安全和為綠色工業化創造機會。綠氫具有以下特性：

- 潔淨 (燃燒與氧氣結合時產生水並釋放熱量，而不排碳)、可儲存、便攜。
- 具高能量密度，非常適合為難以電氣化的領域提供燃料，包括：
 - **重工業**：目前多使用來自化石燃料的氫氣，特別是在煉油以及氨、甲醇和鋼鐵的生產中；使用綠氫作為高級熱燃料可以有助於這些產業和其他難以減排的產業、能源密集型工業流程的脫碳。
 - **航空和海運**：由於低碳燃料替代品的供應有限，航運和航空等難以減少排放的運輸業很難脫碳。
 - **能源**：可以在穩定依賴太陽能和風能的電網方面發揮關鍵作用，透過減輕這些再生能源間歇性造成的波動，氫氣可以幫助確保持續可靠的電力供應。
- 可做為許多工業應用的原料使用。
- 是一種高效潔淨能源載體，綠氫可以長期儲存且損失最小。
- 與併網的再生電力相比，它能更靈活遠距離輸送到距離再生能源更遠的應用場所；可以整合到現有的天然氣網路中，並用於區域供暖系統或用於住宅供暖系統的氫氣鍋爐和燃料電池。
- 對於擁有豐富太陽能和風能潛力的國家來說，綠氫生產是可行的選項，並提供加強能源安全和減少外部衝擊脆弱性的機會；參與綠氫生產有可能增強整體經濟韌性 (尤其發展中國家)，並促進多元化和知識型經濟的發展。

此外，若與經由化石燃料和碳捕獲利用封存(CCUS)而產生的藍氫相比，雖然藍氫可作為能源轉型早期階段氫市場的初始催化劑，只是藍氫仍有一定限制，包括：依賴有限的資源，容易受到化石燃料價格波動的影響，且與二氧化碳運輸和儲存的成本和監控有關、也不能增強能源安全，目前 CCUS 的效率仍不理想，因為它與一些殘餘二氧化碳排放有關；在 CCS 中使用甲烷可能會導致上游的碳排放洩漏，



使藍氫與淨零排放目標並不完全相容。因此，綠氫仍是未來最重要的氫氣種類。

綠氫對永續發展的三個層面都具有潛在的正面效益，尤其對於發展中國家：

- 經濟：例如綠色工業化、能源獨立、可促進參與全球貿易市場。
- 環境：例如加速脫碳，特別是難以減少的產業。
- 社會：例如創造就業機會、提供可靠的能源來源。

本文主要研析與整理《綠氫促進永續工業發展：發展中國家的政策工具包》，並運用新的觀點來看待綠氫，對於具綠氫潛力的國家不僅是出口，而是考量其整體價值鏈。雖然著眼於發展中國家，但其討論之政策架構或策略並不限於發展中國家參考。

二、 綠氫與發展中國家

2022 年，電解氫氣產量不足 10 萬噸，遠低於 2050 年的預期需求；如果所有已宣布的電解計畫（包括處於開發早期階段的項目）都得以實現，到 2030 年綠氫產量可能達到 2,700 萬公噸左右。其中，拉丁美洲，特別是智利、巴西和阿根廷，可能佔近 600 萬噸的產量；而非洲國家，包括肯亞、茅利塔尼亞、摩洛哥、納米比亞和南非，到 2030 年可生產約 200 萬噸。

在推動氫能政策方面，日本是第一個制定國家氫能戰略的國家（2017 年），此後陸續有超過 45 個國家（主要是歐洲已開發國家）也發布了其國家氫能戰略；發展中國家正在迅速迎頭趕上，目前公布的國家氫能戰略約 40% 屬於發展中國家。越來越多的南半球國家已加入計畫生產和使用綠氫的經濟行列。德國、日本和韓國是未來氫氣主要進口中心，他們也與發展中國家建立了許多合作夥伴關係。

表 1、國家氫能戰略的重點議題與國家案例

議題	方法、領域	國家案例
關鍵趨動力	參與氫及其衍生物的國際貿易	烏拉圭、納米比亞
	經濟脫碳	智利、土耳其
	加強能源安全	中國、印度
	能源供應多角化	德國
	創新與工業發展	納米比亞、烏拉圭



識別「無悔」 領域	環境與社會（共同）效益	智利、南非
	化肥氮生產	肯亞、土耳其
	作為原料的甲醇生產	烏拉圭
	鋼鐵產量	南非
	海運	智利
優質基礎設施	安全標準	智利、中國
	儲氫監管	印度
	採用國際氫氣技術標準	哥倫比亞
財政支援機制	直接激勵、延長補貼、費用減免、補助金	印度
環境永續性 參與	水土資源平衡利用，循環經濟	智利
	國家綠氫諮詢小組由來自學術和研究機構、工業界和民間社會的專家組成	印度
時程框架	綠氫使用的發展到 2035 年，預計分三波；國家氫能戰略每三年更新一次	智利
國際合作	國際合作	中國
	區域合作	智利

再生能源豐富的發展中國家積極參與綠氫生產和貿易，將有幾個好處：

- 對於全球難以實現電氣化的產業，要脫碳將須依賴擁有豐富再生資源的發展中國家參與，如透過國際氫貿易以支持出口國和進口國的脫碳。
- 出口收入可增強貿易平衡並促進獲得外幣。預計到 2050 年，綠氫區域間貿易額將達到 2,800 億美元，其中超過一半的經濟活動來自發展中國家，並有機會對經濟發展產生連鎖效應，促進當地活動和創造就業機會。
- 氫貿易為生產國提供更大的自主權，可加強其經濟網路、並提升其政治重要性。
- 綠氫出口可透過將再生能源納入國家能源網絡來促進國內能源轉型，不僅降低生產國再生能源的成本，還改善當地居民的能源取得和負擔能力。
- 綠氫及其衍生物的貿易可以防止出口國和進口國的「資產擱淺」與「碳鎖定」：透過支持出口國當地的工業脫碳，綠氫出口可以



幫助避免使用化石燃料的計畫，而這些計畫可能在未來成為擱淺資產（例如，鋼鐵生產中的煤基高爐技術組件的使用壽命為 40 至 60 年，到 2040 年將面臨碳鎖定和資產擱淺風險）。

- 對於再生能源稀缺的綠氫進口國，因其自產綠氫相對不具成本競爭力，因此從具綠能優勢的發展中國家進口綠氫、或直接還原鐵(DRI)等綠色的反應中間產物，更有助於防止依賴成本更高且永續性較差的替代品。
- 國際綠氫貿易可以促進知識轉移和外溢擴散，從而加速綠氫出口國的社會經濟發展。綠氫貿易正在創造新的全球分工，並為再生資源豐富的地區創造就業機會和價值。雖然電解槽等某些關鍵技術可能由已發展國家提供，但技術能力和工業能力的整體擴張將促進綠氫出口國的國內研發和創新。

如欲成功擴大發展中國家的溫室氣體生產規模，需要在多個方面進行調整，包括基礎設施、監管架構、財政激勵和技能發展。為了抓住機會並有效應對諸多挑戰，必須採取協調一致的政策行動。與僅生產和出口綠氫相比，這種多元化有可能創造更多就業機會並增強高價值綠色產品的出口潛力。

但這也必須要以更上位、廣泛的觀點，採取全面的國家氫策略，透過參與上游和下游活動來擴大國內綠氫生產規模及提升整體產業鏈。此外，建立紮實而穩健的商業案例也相當重要。

三、 綠氫產業角色與挑戰

綠氫價值鏈包含七個主要活動類別或機會，但不限於以下順序，可同時或以任何擇優的順序進行。

● 再生能源發電和電解：

- 綠氫生產需要對太陽能、風能、地熱能、水力等再生能源發電裝置初步投資，這取決於區域資源稟賦情形。
- 需要開發電網，安裝電解槽，並建立水和氫運輸的管道和儲存槽；缺水地區可能還需要建造和運作海水淡化廠。
- 這些活動是資本密集的，通常需要大規模生產，使得新來者進入市場具有挑戰性。在大多數發展中國家，外資和進口技術可能主導這些活動，然而在施工階段可能會出現大量就業機會（但在營運和維護領域創造的就業機會可能仍然有限）。



- 技術先進的國家可以發展本土能力，並在服務業(例如建築和專案開發)以及製造業(例如用於風力渦輪機和太陽能板的鋼管) 中建立當地價值鏈。

● **Power-to-X :**

- 氫氣的運輸和儲存成本高昂，因為它需要在極高壓力或極低溫度下儲存。商業上可行的替代方案是將氫轉化為更容易儲存和運輸的衍生物，例如氨、甲醇或合成燃料。
- 衍生物的選擇取決於特定的最終用途 (例如用於化肥生產的氨和作為航空燃料的電子煤油)和運輸要求。利用綠氫與有機碳源 (例如專用能源作物或農業殘留物) 生產永續燃料，在能源和農業部門之間建立聯繫，從而可以創造更多就業機會。
- 氨用於燃氣渦輪機時具有增強電力系統靈活性的潛力，係因氨能量密度高、便於儲存和長程運輸、易於轉換為氫氣等特性，且有助於減少燃煤電廠的排放。

● **綠氫、Power-to-X 產物的出口：**

- 出口氫及其衍生物為各國增加外匯收入和創造稅收提供了重要機會。透過開拓國際能源市場，各國可以吸引更多外資投入當地工業和運輸部門脫碳所需金額。
- 出口國的運輸方式依其與主要進口市場的遠近而有所不同：距離較近的國家可以透過管道出口氫氣，而管道距離超過 3,000 公里的國家則只能依靠海運作為唯一選擇。在這種情況下，與分子氫相比，利用氨或甲醇等 PtX 啟動出口經濟可能是更具成本效益的選擇，因為以液態氫或液態有機氫載體 (LOHC) 的形式運輸將顯著增加總成本。
- 出口商品的選擇直接影響當地經濟外溢的潛力。

● **再生能源設備製造：**

- 圍繞綠氫生產的核心活動涉及與潔淨能源技術上游供應商的後端聯繫，例如太陽光電(太陽能電池、組件和鋼框架...等); 風能 (塔架、葉片和齒輪箱...等); 地熱 (渦輪機、泵浦、冷凝器...等); 電解槽 (電極、電解質材料、膜、電堆...等)。此外，能源計畫需要儲存解決方案。
- 再生能源發展對就業產生重大影響：2021 年，僅中國太陽光電價值鏈就創造了 160 萬個就業崗位，超過了建築和安裝產業的就業崗位 (100 萬個) 以及太陽能發電廠運營和維護業的就業崗位 (80 萬個)。



● 國內產業脫碳：

- 許多當地產業，如化學、鋼鐵、水泥、航空、海運和重型貨物運輸業，都可以透過使用綠氫重新設計其營運而受益。在這些難以減排的產業中使用綠氫(無論是作為原料還是能源)的動力受到國家脫碳目標、全球供應鏈領先企業執行的企業標準、及歐盟碳排放等國際貿易法規 (如 **CBAM**) 的支持。
- 向綠氫的轉變對於重工業強勁的經濟體尤其重要，特別是如果它們出口到脫碳標準較高的市場。
- 此外，擁有重要採礦業的國家可以透過採用綠氫來調整其能源密集型業務比重，以及出口到具有嚴格脫碳要求的市場，從而大大減少其碳足跡。

● 運輸脫碳：

- 在許多低收入和中低收入國家，交通運輸是溫室氣體排放的主要來源，甚至超過了工業排放。
- 雖然電池電動技術是輕型車輛的未來，但長途客車和重型貨物運輸等其他領域可能會受益於燃料電池或氫內燃機作為潛在的替代品。
- 然而，從柴油車向低排放或零排放車輛的過渡需要對現有公共汽車和卡車行業進行成本高昂的調整。
- 儘管有這些挑戰，仍有可行的途徑將脫碳工作與當地經濟價值結合。市場規模大、產業多元化的國家在發展低碳交通技術方面具有競爭優勢，例如中國和印度的城市軌道運輸技術，以及智利和南非的燃料電池礦用運輸卡車。
- 另一種可能也適合較小經濟體的可行途徑是用低碳引擎 (例如電池電動、燃料電池或直燃引擎) 改造傳統車輛，例如柴油公車。

● 吸引能源密集產業的外國直接投資—再生能源的拉動：

- 「再生能源拉動」效應是指在再生能源資源豐富的國家或地區，對其能源密集產業的吸引力和新增產能的投資，這可以導致這些國家增加再生能源的部署、創造就業機會和增加附加價值。未來可能從中 (至少部分) 受益的行業包括鋼鐵和化學工業，因為中間產品(例如 **DRI**、氨、鹼性碳氫化合物) 和(半) 成品 (例如鋼鐵、鑄鐵、尿素、乙烯) 的長距離運輸到這些產業的成本將比氫氣運輸的成本便宜。當貿易夥伴之間存在 50 歐元/MWh (約每度電新台幣 1.7 元) 的顯著電價差異時，進



口鋼鐵的搬遷成本可節省約 20%，尿素和乙烯的搬遷成本可節省 50%。

- 許多產業的目標是在未來二十年實現全球價值鏈脫碳。另由於更嚴格的氣候政策或更高的二氧化碳價格導致化石燃料成本上升，再生能源成本降低（例如透過技術進步、補貼、政策誘導的激勵措施）；對綠色材料和產品的需求不斷增加（如碳邊境調整機制 **CBAM**），將推動未來再生能源的發展。
- 在再生能源和綠氫資源有限的國家，越來越有動力從擁有豐富的再生低碳能源的國家進口鋁、碳纖維零件、綠色鋼鐵和能源密集型化學品等能源密集零件。這為貿易夥伴帶來了雙贏的局面，就像鋼鐵的情況一樣，再生能源資源豐富的國家可以出口綠色鐵，而不是鐵礦石、氫氣及其 **PtX**，從而使當地就業增加約 16%，增加數值成長 18%。透過轉向直接還原鐵進口，再生能源稀缺地區可以外包能源密集型鐵礦石加工，同時保留鋼鐵生產的最後步驟，增強其在綠色鋼鐵行業的競爭力並保護 90% 以上的就業機會。
- 隨著材料消耗脫碳壓力的增加、碳價上漲以及再生能源和綠氫產能的增加，能源密集製程的搬遷預計將大幅增加。這為發展中國家擁抱綠色工業化、進一步推動永續發展目標提供了良好的機會。

IRENA 的《2023 年世界能源轉型展望》預計到 2050 年，全球綠氫產量將大幅增加，將達到約 4.92 億噸（相較之下，部份藍氫作為轉型策略的一部分，仍有其需求，產量約 3,150 萬噸）。但目前氫氣來源主要仍是來自天然氣和煤炭等化石燃料的灰氫。2022 年，全球生產約 9,500 萬噸氫氣，其中大部分是灰氫，主要用於原油精煉、氨生產和甲醇合成等工業應用，這些應用合計佔氫消耗總量的近 93%。

要促進採用更多氫應用，仍有諸多關鍵決定因素，包括成本競爭力和基礎設施可用性等，例如：氫燃料電池汽車和卡車的使用將取決於燃料電池成本和加氫站的可用性。與再生能源和電解擴張相關的高資本成本，加上與政治穩定、監管框架和官僚程序（例如許可和土地徵用）相關的風險，將影響氫能計畫的融資能力、甚至可能阻礙其及時實施，特別是在發展中國家：

- **技術風險**：與工程品質和所用設備的可靠性有關。
- **政治風險**：若專案生命週期內監管架構發生意外變化，政治風險可能會出現。
- **商業風險**：指長期承購協議和價格的不確定性。



以下小節分別整理主要影響因素及產生之挑戰。

(一) 自然稟賦

再生電力在綠氫生產中發揮著至關重要的作用，每生產 1 Mtpa（每年百萬噸）綠氫就需要約 20 GW 的電力。因此綠氫生產在很大程度上取決於再生能源等自然稟賦。

- **再生能源**：太陽能和風速等潛力之因素是低成本製氫的關鍵決定因素之一。電力成本佔氫氣總成本的 90%。擁有豐富再生能源和水源的國家在生產低成本綠氫氣方面具有顯著優勢。
- **水**：的可用性和品質對於氫氣生產和冷卻太陽光電模組等上游製程至關重要。與海水相比，淡水資源的滲透率往往更高，從而降低了綠氫生產的成本。
- **礦物**：金屬礦物如太陽光電模組中使用的矽和銅、風力渦輪機中使用的稀土、鹼性和固體氧化物電解槽(SOEC)中使用的鎳、質子交換膜(PEM)電解槽與燃料電池使用的鉑族金屬(PGM)等礦物質的可用性，在氫相關技術的生產中發揮關鍵作用。國內鐵礦石供應也有利於直接還原鐵的生產。
- **選址因素**：包括用於儲存大量氣態氫的地下鹽穴的存在，以及靠近進口市場，因為運輸可能會顯著增加氫氣的成本。

(二) 成本

要充分發揮綠氫的潛力，就必須大幅降低綠氫的生產成本。目前，即使在最有利的生產基地，其生產成本(3-6 美元/公斤)也比灰氫(1-2 美元/公斤) 高出 3 至 6 倍。主要的成本因素是**電解槽所需的再生電力**。在再生資源豐富的地區生產綠氫可以增強其成本競爭力；太陽光電和風能技術的成本壓縮，也將有助於降低與綠氫氣生產相關的成本。

另一要素是**電解槽的成本**。從長遠來看，這可幫助投資成本降低 80%。可透過增加電解廠的規模以實現規模經濟、自動化製造以提高效率、提升材料之採購、減少對鈱和鉑等稀缺材料的依賴、增強耐用性、提高營運效率和靈活性、為特定工業用途客製化電解系統，並利用學習率來降低成本。

開創性計畫往往可能需要額外的成本因素，例如當地供應鏈、物流和監管框架不發達。這些挑戰可以透過具有成本效益的工具(例如



上網電價補貼或稅收激勵)以及透過建立專門的政府機構(例如一站式服務中心)來解決。

(三) 缺乏生產綠氫所需的技術知識、基礎建設、與市場

取得技術是綠氫產業發展的關鍵因素，而氫相關技術專利領域的領導者已經出現，其中歐洲佔 28%，其次是日本(24%)和美國(20%)，韓國和中國也在之後跟隨腳步。對新技術的依賴可能會給南半球國家帶來挑戰，因為這種依賴可能會阻礙經濟成長並阻礙綠色經濟的轉型。若缺乏技術主權，將可能無法在未來適應或創新。

IEA 視非洲、中東、南亞和南美洲西部地區的許多低收入和中等收入國家有產綠氫的極高潛力，因為它們擁有豐富的太陽能 and 風能，預計到 2050 年，這些國家參與國際氫貿易市場將佔氫總需求的 25% 左右；然而，這些國家中的大多數目前再生能源生產能力非常有限，因此在進入綠氫生產之前，需要付出巨大努力來提高其生產能力並使其二氧化碳密集型電網脫碳。

再生能源電力與電解領域，皆可能有技術知識或產業鏈不足的障礙，包括：

- **風能、太陽能供應市場的進入障礙高**：例如，太陽光電晶片產能高度集中在中國，2021 年中國產能占全球產能的 97%，剩餘產能主要分佈在亞洲地區(韓國、馬來西亞、越南和泰國)；儘管風能市場分散度較高，但中國在風機製造方面處於領先地位，其次是歐洲、美國、印度和拉丁美洲。
- **太陽光電、風力、和電解槽等核心技術主要由少數工業化國家製造**。目前，太陽能、風能以及電池儲能的全球技術供應鏈主要集中在中國，其次是北半球國家。
- **電解槽**：中國擁有全球水力電解槽製造能力的最大市占率，約 40%，而歐盟和美國各佔 20%。

政策應考量吸引投資加速再生能源的部署，制定為綠氫生產提供再生電力的策略，促進必要技術進口，鼓勵製造業再生能源技術和設備的發展，及為上游供應鏈發展創造有利環境。

另外，綠氫的需求和供應必須同時促進，三分之二的預計出口能力仍然缺乏潛在買家，僅少數計畫簽署具約束力的承購協議。



(四) 其他挑戰，如政治不穩定、監管框架薄弱、官僚障礙

例如綠氫國際運輸，就充滿技術和監管方面的不確定性。

來自國際運輸的不確定性以及對清潔氫貿易規模和動態的擔憂，包括藍氫作為過渡期技術的角色。藍氫可能會加速綠氫的使用並促進中期內向綠氫未來的過渡，但它並非完全零排放，並且存在「鎖定」風險；依賴海運進行國際貿易的出口商，可能會發現很難與藍氫的價格競爭。這可能會給嚴重依賴綠氫出口的發展中國家帶來挑戰，可能會危及這些國家綠氫倡議的可行性，失敗的綠氫計畫可能會導致政治挫折和社會對進一步脫碳計畫的強烈抵制，從而推遲這些國家的整體綠色產業轉型。

四、 綠氫價值鏈之提升策略

政府在規劃國家氫能戰略，應納入以下四個關鍵面向：

- **雙軌制**：優先本地使用再出口，以釋放連動效應、向低碳經濟轉型，更有可能實現國內價值創造、產業連結、技術學習和永久就業。
- **整合方法**：將綠氫發展對應到國家目標、永續發展目標、公正轉型等。對於綠氫如何為潔淨能源轉型、實現永續發展目標、建立有彈性的經濟做出貢獻，應該要有一個清晰的願景。如投資再生能源和電網基礎設施是一個「無悔」的選擇，有利於當地產業和社區，同時也為氫能產業的發展創造有利條件。另也要透過區域合作創造影響力，對小國尤其有利，可制定聯合教育和培訓計畫，及透過合作機會來開發高品質的基礎設施，從而簡化綠氫產業的實施。
- **循序漸進**：從小到中型專案、本地承購專案開始實施，試點和示範計畫可以實現邊做邊學、尤其伴隨研發投資與國際知識移轉；建立氫能學習中心，避免過度依賴國外投資。例如小規模氨生產的創新有望實現當地綠色肥料生產，甚至適用於小農農業；農村社區的現場氨生產可以降低成本和排放，透過減少進口依賴來增強糧食安全，並使偏遠地區受益。在支持大型出口計畫時，防止形成具有各自政治和社會經濟風險的飛地至關重要。



- **分階段實施**：循序漸進綠氫生產與應用，例如在現有應用中取代化石燃料氫，並擴展到新應用與產業。
- **現有的綠色應用**：供需匹配(在市場早期階段特別具挑戰性)，可利用現有基礎設施，將綠氫納入當前基礎設施系統，而無需改造和使用現有流程，將可加速市場成長；原本依賴灰氫的產業，可逐步導入綠氫來取代。
- **充分利用新興市場機會**：擁有主要機場樞紐或大型貨櫃港口的國家應考慮從事合成噴射燃料和船用燃料的生產，作為進入氫市場的切入點；依賴氨或化肥進口的國家可以透過生產綠色氨來顯著減少國際價格衝擊的風險並節省外匯。
- **推進綠色工業化**：許多發展中國家，特別是非洲國家的人口強勁成長、及城市移民趨勢將增加對鋼鐵和水泥等基本材料的需求。根據 IEA 數據，2020 年至 2030 年間，這些工業產品的需求將增加 50%。南半球國家可從建立綠色重工業和避免碳基「擱淺資產」中受益，減少依賴系統相關材料的進口，並挖掘其在綠色商品國際貿易中的先發潛力。

以下分別就制度面、產業面、金融面、國際面等討論綠氫的推動策略：

(一) 法規、政策與監管框架

為了確保成功的綠色轉型，各國政府必須為其再生能源產業制定較具野心的長期願景，這個願景應包括跨越數十年的產能擴張和減排的具體目標。

為了降低風險並吸引投資者，政策制定者必須優先考慮建立長期、透明的監管框架，應包含氫價值鏈發展的明確指導方針、未來監管的總體框架、政府機構的明確角色和未來的支持措施。主要目標包括建立最有利的環境，並制定符合國際標準的明確長期法規。應建立如：

- 發展 NHS 並建立國家氫治理法規。
- 建立基於租賃機制的長期土地分配框架，這對於尋找電解所需的再生能源尤其重要。
- 制定符合國際標準和慣例的技術標準系統和監管框架（包括許可程序、資料存取等），以實施大型投資計畫。



- 引進國家氫能作為能源載體的法規，這不僅需要與國際標準化組織/國際電工委員會 (ISO/IEC) 等現有國際標準保持一致，還需要積極參與新標準的制定。
- 創建符合綠氫生產國際標準的國家綠色融資體系 (分類法)。
- 國家製氫碳足跡認證系統與國際慣例接軌；由於缺乏普遍認可的標準，有必要進行協商以確定最佳方法。
- 對於電解槽來說，實施氫計畫的詳細監管架構是必要的。這包括制定氫谷專門法規 (監管沙盒)、本地內容政策 (用於建立綠氫生產資產和營運與維護) 以及實施研發和教育計畫。

一站式服務的建立對於增強該地區對外國直接投資的吸引力具有重要意義。

- 減少了官僚障礙/繁文縟節並節省時間。
- 為投資者提供全面的幫助，涵蓋廣泛的服務如幫助投資者滿足監管要求、提供金融資源以及尋找當地合作夥伴和供應商等。
- 向投資者提供易於獲取和清晰的資訊、透明度，在投資過程中建立信任和信心、減少溝通不良或誤解的可能性，而有利於投資，例如：透明和有競爭力的再生能源發電框架來吸引投資者參與新計畫，可以促進對再生能源的投資。

在標準與認證面，制定氫排放、安全和營運的國際標準和認證將促進市場成長，採用統一的綠色融資和綠色產品標準則將增強綠氫專案的融資能力。

(二) 國產化與在地外溢效果

再生資源豐富的綠氫生產將為實現淨零工業發展和創造當地附加價值開闢新途徑，從而創造就業機會、提升技能、動員投資和創造財富。

而生產灰氫的經驗不一定對擴大綠氫生產有用，因為所需的技術本質上是不同的 (就投入要求而言)。綠氫生產需要開發專用基礎設施，用於向電解槽輸送電力和水，以及需要考量土地供應情況、特定的技能組合...等。

政府有較大影響力來提升綠氫生產的初始需求，如綠色產品 (例如綠色鋼鐵)。透過在公共採購活動中優先考慮綠色產品而不是傳統產品，政府可以刺激需求、支持綠氫生產商並為其他國家樹立榜樣。



這種方法可以補充對綠氫生產的綠色產品的直接補貼，政府資金可以作為市場塑造者而不僅僅是施捨。

另外，可透過推動國產化以支持國內製造業，並利用長期研發投資來鼓勵本地創新和技術進步。為了提高新建電解和再生發電廠的國產化，應針對設備、勞動力和服務中的國產化占比引入強制性和可衡量的要求。這些要求可以代表參與補貼計畫或獲得額外支持資格的強制性條件。可要求最低國產化比例的門檻，作為開發商參與再生能源拍賣的資格要求，監管機制可以確保投資者遵守這些要求，亦可採取長期稅收減免和補貼等激勵措施，以促進在特定國家設立工廠，以吸引外國供應商與當地投資者合作。

惟國產化要求可能會增加專案成本，且僅僅建立國產化要求並不能保證創造一個有競爭力的製造業，仍要視當地的技術與產業發展潛力，否則會出現國產化製造力不足的風險，反而導致延宕、成本增加。

(三) 促進下游應用

為促進綠氫在下游產業的使用，可採取價格溢價、退稅等激勵措施。另也應解決市場扭曲問題，特別是那些對綠氫部門產生影響的化石燃料補貼所造成的市場扭曲。

(四) 資金

國際氣候融資勢在必行，其中很大一部分專門用於綠氫計畫。全球政策制定者應致力於降低綠氫計畫的資本成本，讓開發金融機構參與進來，並建立透明且可預測的監管框架。工發組織和世界銀行正在制定開發銀行為氫能計畫提供的財務支持。

透明的金融體系、穩定的銀行和有利的投資條件，例如創投的可用性、市場自由化和貿易開放，也有利於綠氫融入國內經濟。

在政府明確致力於永續發展的情況下，可以引入低利率貸款和國家綠色債券，以利用額外的資金來源並為綠氫計畫籌集外國資金。

(五) 國際合作

知識共享對於拉進氫技術知識的差異和促進政策制定者做出明智的決策至關重要。可利用國際合作機制來促進各國之間的合作並促進綠氫計畫。



截至 2023 年 5 月，全球已達成 40 多項氫貿易政府間協議，為各國政府、企業和學術界參與聯合計畫實施奠定了堅實的基礎。

(六) 公民參與及公正轉型議題

綠氫轉型將對能源、水和糧食安全產生重大影響。發展強大的綠氫價值鏈需要仔細考慮公共政策，並將公共資源分配給有前途的途徑和計畫，尤其能讓整個社會廣泛而公平地分配氫氣生產的利益。為了確保公平的能源轉型，至關重要的是實施策略，納入基於現實預測的利益共享和風險共享機制。

綠氫生產的包容性和永續發展必須建立在：

- 民間社會，確保公平獲得綠氫技術和社區參與決策。
- 熟練勞動力，投資教育和培訓並支持工人從化石燃料產業轉型。
- 透過吸引對永續專案和綠氫技術開發的投資來提高生產力和創新。
- 環境，解決與綠氫生產相關的潛在環境不公平問題：大規模綠氫生產對農業、水和糧食安全的潛在影響不容忽視，並且需要在對有限自然資源的競爭需求之間取得微妙的平衡，全面的環境和社會影響評估至關重要；另根據 IRENA 的 1.5°C 情境，國際間氫的貿易約有 55% 將透過管道輸送；從氫氣產量來看，則有 25% 是透過國際貿易進行，其中約一半同樣須透過管道運輸，這些管道經過的區域也可能受到影響。

雖然大規模出口計畫可以改善國際收支，但它們可能只能刺激有限的工業能力，並可能產生意想不到的後果，例如：荷蘭病效應（指一個國家嚴重依賴其天然資源產業，導致該國出口、外匯收入大幅增加，帶動匯率快速升值，使其他產業出口到其他國家的產品變得更昂貴、失去競爭力，而造成衰退）、房地產投資者的意外收益、及利益相關者的尋租行為。

在制定政策措施時，需要注意按照公正轉型的原則實施，有助於綠氫生產計畫更具永續性和長期性。挑戰在於最大限度地減少負面外部性，同時確保整個國家分享採用綠氫所帶來的效益和收入。此外，必須預測對土地利用、生態系統和生物多樣性的影響。

對於在地的利益，可透過提供再生電力和供水、刺激當地工業以及促進教育和研發來實現。以下就不同資源有對應之可行策略：



- **能源**：在許多潛在的綠氫生產國，很大一部分人口仍無法連接電網和/或依賴化石燃料來滿足能源需求。尤其是許多非洲國家的情況尤其如此。因此，向綠氫市場的過渡為解決這些問題提供了一個獨特的機會，透過同時加強當地能源取得和安全，在擴大再生能源的基礎上加速脫碳工作，以確保普遍的能源供應，以及任何剩餘清潔能源都可以用於綠氫生產。為了實現這一目標，自願能源契約和企業社會責任(CSR)措施可以在實現人人享有清潔且負擔得起的能源 (SDG7) 方面發揮關鍵作用。
- **水**：綠氫是透過電解過程產生的，利用再生能源將水分解成氧氣和氫氣。雖然水是綠氫生產的主要投入，但考慮整體水消耗量也很重要。在 IRENA 的 1.5°C 情境下，綠氫生產將每年消耗約 120 億立方公尺的水 (IRENA and Bluerisk, 2023) (相對低於其他部門，如農業每年的消耗量就高達 27,690 億立方公尺)；儘管如此，它仍然可能對已經面臨當地水資源壓力的地區構成挑戰，尤其大多數太陽能潛力較高的地區都是乾旱的，並且常受水資源短缺影響。氣候變遷未來將嚴重加劇這個問題，特別是在非洲國家。雖然處理廢水或海水淡化可以提供額外的淡水資源，但後者需要大量的能源投入；因此，在綠氫生產和已經感受到氣候變遷影響的區域，如何在用水需求的競爭下取得平衡至關重要。此外，當地社區的用水不僅限於飲用水消耗，還包括農業需求，直接影響糧食安全。
- **土地與糧食安全**：以太陽光電電解水產氫的情況下，通常需要相當大的土地面積，例如，一個 1 GW 的電解槽需要大約 2 GW 的太陽能光電發電，假設每平方公里可設置 75 MW 的太陽光電設備，那麼總體需要的土地面積約 26 平方公里 (2,600 公頃)。雖然技術進步可以減輕對土地的影響，但這仍然是一個關鍵問題，土地需求可能與農業活動競爭，可能影響當地糧食供應和糧食安全；其他可能會出現與流離失所、財產貶值或環境退化有關的土地衝突，不僅影響公民個人，也影響旅遊業等產業。然而，建立綠氫部門也會為糧食安全帶來助益，例如氫氣用於低碳化肥生產，從而提高糧食產量與安全。

包容性和利益共享：鑑於已經概述的安全問題，政府在規劃綠氫生產時考慮當地社區的復原力和生計至關重要。雖然就業機會和出口收入等潛在利益是重要的考慮因素，但它們不應以犧牲能源、水或糧食安全為代價。而公眾與當地社區參與是策略制定的組成部分，以確保所有利害關係人的聲音都能被聽到，並考慮公眾對損失和不公正的看法(Upham et al., 2022)。產業公正轉型的管理需要接受並在正義、



公平和參與的不同維度之間進行權衡，而不是專注於所有維度上預定的「勝利」。此外，永續能源發展的不同面向（環境、社會和經濟）可能會相互衝突（同上）；例如，雖然加速向再生能源過渡可能會導致人們更公平地獲得電力，但也可能導致某些當地社區不公正地離開其農田。為了防止霸權行為佔據主導地位、或在決策過程中形成根深蒂固的多數觀點，讓代表性不足的群體擁有發言權至關重要，尤其是讓婦女和青年參與，對於成功和包容性的綠氫轉型至關重要。他們同樣受到其後果的影響，並將越來越多地為推動這一轉變的勞動力做出貢獻。

五、 結語

本文研析整理《綠氫促進永續工業發展：發展中國家的政策工具包》之概況分析與政策建議，雖然其主要著眼於發展中國家，但其討論的挑戰、策略等態樣，對於我國仍具有參考價值，尤其在技術、稟賦、監管框架、資金、國際合作、公正轉型與公民參與等面向之間，都涉及多元的權衡議題。

在未來氫能在地落實，勢必也要預先準備好相關的因應措施，本文應可作為政策未來研擬的參考。



參考文獻

UNIDO, IRENA, & IDOS (2023). Green Hydrogen for Sustainable Industrial Development: A Policy Toolkit for Developing Countries.



懂能源



工業技術研究院
Industrial Technology
Research Institute