

# 碳邊境治理下的氫經濟安全：

## 離岸風電製綠氫的跨國比較與臺灣監理<sup>\*</sup>

林士清<sup>\*\*</sup>

### 摘 要

離岸風電擴張使能源轉型瓶頸由發電能力轉向系統消納與外送能力，離岸風電製氫因而成為兼具能源安全、產業減碳與基礎設施韌性的治理議題。本文以「氫經濟安全」為核心概念，並以「政策目的－系統配置－制度成熟度」作為比較架構，分析德國、荷蘭、英國、丹麥、法國、澳洲、中國與越南之離岸風電製氫路徑。研究發現各國差異主要不在技術本身，而在其將離岸風電製氫定位為工業脫碳與系統整合工具、出口導向能源商品，或示範驗證與制度建構手段，並可歸納為北海型、能源樞紐型與追趕型三類。本文認為臺灣現階段較接近追趕型中的系統消納導向次型，政策上宜優先補強示範治理、程序性安全、港口儲運規範、認證與第三方驗證制度，並採取「先示範、後認證、再基建」之推動順序。

**關鍵詞：**氫經濟安全、離岸風電製氫、程序性安全治理、港口治理、  
關鍵基礎設施韌性

<sup>\*</sup> 感謝匿名審稿人與編輯委員會細心提供之寶貴意見，惟一切文責仍由作者自負。

<sup>\*\*</sup> 中央研究院經濟研究所博士後研究員；國立臺灣大學國際企業學系暨研究所博士。

Email: maxlin007@as.edu.tw

收件：2026 年 2 月 27 日；修正：2026 年 4 月 20 日；通過：2026 年 4 月 28 日；接受：2026 年 6 月 22 日。

# Hydrogen Economic Security and Offshore Wind-to-Hydrogen: A Transnational Comparison and Regulatory Design for Taiwan

Shih-Ching Lin<sup>\*\*\*</sup>

## Abstract

As offshore wind expands, the key bottleneck of the energy transition is shifting from generation capacity to system absorption and transmission. Offshore wind-to-hydrogen has thus become a governance issue linking energy security, industrial decarbonization, and infrastructure resilience. This study develops the concept of hydrogen economic security and applies a comparative framework based on policy purpose, system configuration, and institutional maturity to examine eight countries: Germany, the Netherlands, the United Kingdom, Denmark, France, Australia, China, and Vietnam. The findings show that national differences are shaped less by technology itself than by how offshore wind-to-hydrogen is positioned: as a tool for industrial decarbonization and system integration, an export-oriented energy commodity, or a vehicle for demonstration and institution-building. These pathways can be grouped into three types: the North Sea model, the energy hub model, and the catch-up model. Taiwan is best understood as a system-absorption-oriented subtype within the catch-up model. Policy priorities should therefore focus on demonstration governance, process safety, port and storage regulation, certification, and third-party verification, following a staged sequence of demonstration first, certification next, and infrastructure later.

Keywords: hydrogen economic security, offshore wind-to-hydrogen, process safety governance, port governance, critical national infrastructure resilience

---

<sup>\*\*\*</sup> Postdoctoral Fellow, Institute of Economics, Academia Sinica; Ph.D., Department of International Business, National Taiwan University. Email: maxlin007@as.edu.tw

## 壹、前言

近年離岸風電持續擴張，能源轉型的瓶頸亦逐漸由發電能力轉向系統消納與外送能力。全球風能協會（Global Wind Energy Council, GWEC）發布 *Global Wind Report 2025* 指出儘管年度新增裝置容量持續成長，至 2030 年再生能源擴張所需之年增量仍有顯著缺口，而電網基礎設施不足、許可程序遲滯與政策不確定性，已成為拖慢風電部署的重要因素（GWEC, 2025）。在此情況下，若離岸風電規模持續擴張，單純依賴海纜將電力回送陸域，將更易面臨輸配電壅塞、併網排隊與調度成本上升等限制。是以，將部分離岸電力轉化為可儲存、可運輸之能源載體如綠氫，已不再只是技術創新選項，而是回應外送瓶頸與系統韌性問題的重要政策工具。

氫能在當前國際政策語境中的定位亦快速改變。世界能源理事會（World Energy Council）對各國氫能戰略之比較顯示，多數國家已將氫能納入供應安全、產業轉型、基礎設施、標準認證與國際合作等系統性規劃，而非僅視為單一部門之研發議題。Calado 與 Castro（2021）亦指出離岸風電製氫可被理解為回應海纜成本、外送損耗及系統整合限制的替代方案。換言之，離岸風電製氫之意義，不僅在於增加綠電利用方式，更在於其可能連結離岸能源資源、港口、工業聚落及危機情境下之能源供應保障。基於此，本研究認為離岸風電製氫不宜僅被理解為單一能源技術，而應視為同時涉及能源安全、產業競爭、基礎設施韌性與制度設計的跨領域治理議題。

本研究以「離岸風電製氫」作為統一用語，指涉以離岸風電供電為基礎之製氫系統；在需特別強調其再生能源來源與低碳屬性時，則使用「離岸風電製綠氫」。對臺灣而言，此議題尤具戰略意義，因我國高度仰賴能源進口，且產業結構以出口導向及高耗能、高附加價值製造業為主，因而離岸風電製氫可能同時牽動能源自主與經濟安全兩條政策主線：前者涉及在地供給與危機韌性，後者則涉及產業脫碳、低碳原料供應與未來市場競爭力。國際碳治理制度化固然構成外部壓力，例如歐盟碳邊境調整機制（Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM）與相關低碳驗證要求，正逐步強化出口產業對碳資料揭露、來源追溯及制度可信度之需求（Magacho

et al., 2023)。然而，本研究並不將 CBAM 視為臺灣離岸風電製氫發展之驅動因素，而是將其理解為外部制度背景之一，用以凸顯未來低碳供應鏈與驗證治理的重要性。

另一方面，離岸風電製氫亦須放回臺灣既有離岸風電治理脈絡中理解。Chung (2021) 指出臺灣離岸風電政策推動過程中，常伴隨政策兩難與非預期後果，其核心爭點涉及成本分配、社會接受度、環境影響與產業利益之權衡。當離岸風電進一步與製氫、港口儲運、工業用氫及關鍵基礎設施 (critical national infrastructure, CNI) 安全相互耦合時，相關治理張力勢必更為複雜。因此，離岸風電製氫所涉及者不僅是能源配置問題，亦包括海域治理、程序性安全、港口基礎設施、標準認證、第三方驗證，以及國防－民生協調等制度課題。

基於此，本研究將「氫經濟安全」界定為一國在推動氫能發展過程中，圍繞供給穩定、系統韌性、產業競爭力與制度可信度所形成之綜合治理能力。具體而言，至少包含四項相互連動之構面：（一）能源供應安全，即氫作為低碳能源載體能否提升在地供給與危機調度能力；（二）產業競爭與低碳轉型安全，即氫能是否有助於支撐出口導向產業面對脫碳與規則調適；（三）基礎設施與程序性安全，即製氫、儲運、港口與海域設施是否具備可持續運作之風險治理架構；（四）制度可信度，即氫之環境屬性、碳資料、認證與第三方驗證能否形成可被市場接受之治理基礎。本研究之學術貢獻不在於單純羅列及比較各國政策，而在於以「政策目的－系統配置－制度成熟度」作為比較架構，將離岸風電製氫由政策倡議提升為可供分析之制度比較問題。

基於前述問題意識，本研究聚焦以下三個研究問題：第一，各國發展離岸風電製氫的核心政策目的為何？第二，不同政策目的如何對應不同系統配置與治理工具？第三，在臺灣脈絡下何種發展路徑與監理順序較具可行性？本研究最後將跨國比較結果對接臺灣情境，檢視臺灣在能源進口依賴、離岸風電擴張、港口與工業區配置、國防－民生協調及制度建構需求下，應採取何種離岸風電製氫發展路徑，以及如何安排示範治理、驗證制度與基礎設施建構之推動順序。

## 一、氫能源之分類與政策語境

氫並非一次能源，而是可將能量加以儲存、轉換與運輸的能源載體。因此，氫能在淨零轉型中的政策價值，不取決於氫分子本身，而取決於其上游製程、供電來源與全生命週期排放。在當前政策與產業討論中，常以顏色區分不同來源與排碳結構的氫，包括灰氫、藍氫與綠氫。灰氫多指以天然氣或其他化石燃料進行蒸汽重組（steam methane reforming, SMR）產氫，其排放結構與化石燃料消耗高度綁定；藍氫則是在 SMR 或類似製程中導入碳捕捉、封存與再利用（carbon capture and storage, CCS / carbon capture, utilization and storage, CCUS）以降低碳排放；綠氫則透過再生能源供電進行水電解，理論上可顯著降低化石能源依賴與直接排放，因此常被視為較符合淨零政策方向的產氫模式之一（Howarth & Jacobson, 2021）。

氫經濟作為一種政策與技術想像，其歷史並非近年才出現。上世紀兩次石油危機之後，能源供應風險、資源有限性與國家安全之間的連結日益受到重視，學界遂提出以氫作為核心能源載體的長期構想，期望透過製氫、儲運與燃料電池等技術，使氫逐步承擔工業、運輸與電力調度功能（Bockris, 2013）。不過，早期氫經濟論述多停留於陸域電網、集中式製氫與管線配送的制度想像，尚未處理當前離岸再生能源擴張、海上製氫、港口治理與跨境供應鏈所帶來的治理問題。也因此氫經濟今日已不宜僅被理解為單一技術願景，而應置於能源轉型、產業政策與制度建構的交會脈絡中加以分析。

## 二、產氫途徑與成本結構：從技術可行到制度可行

就當前全球產氫結構而言，灰氫仍占主流，原因在於既有化工產業鏈與化石燃料基礎設施已相對成熟，使其具備成本與供應穩定性上的優勢。然而，在淨零政策與低碳轉型趨勢下，灰氫的碳成本將逐步內部化；相較之下，綠氫的擴散更仰賴再生能源供電成本下降、水電解效率提升與系統整合能力的成熟。相關研究指出，隨著技術進步與供應鏈擴張，綠氫在中長期具有逐步提升競爭力的可能（Rezaei et al., 2024）。

然而，綠氫能否擴張，關鍵並不只在技術上能否生產，而在制度上能否形成可投資、可擴散的條件。水電解雖屬低碳途徑，卻同時具有高度耗電與資本密集特性，因此往往需要長期採購合約、補貼、差價契約或其他風險分攤工具，才能降低投資不確定性。換言之，氫能政策真正面對的問題，不只是「能不能做」，而是「在何種制度條件下做得起、做得大、做得久」。此外，國際合作與制度協調的重要性，在於同時推進資本投入、基礎設施建置與市場形成，使氫能由示範階段逐步走向跨境供應鏈與貿易網絡（林士清，2023a）。

在此脈絡下，Balaji 與 You（2024）以情境分析方式估計離岸風電驅動綠氫在特定沿岸地區的供應潛力、成本區間與政策支持條件，其價值不在於直接移植個別數值，而在於提供一套可比較的分析方法：將氫能可行性拆解為資源條件、系統整合路徑、成本敏感因子與政策支持強度等構面。此一研究取徑對本研究的重要啟示在於，離岸風電製氫之分析不宜停留於技術想像或政策宣示，而應進一步進入制度可行性與比較分析的層次。

### 三、離岸風電製氫的政策吸引力與分析意義

近年離岸風電成本下降、裝置容量擴張與海事工程能力提升，使離岸風電製氫由邊緣方案逐步成為多國政策評估的重點。其核心吸引力在於，氫具備可儲存、可運輸與可跨部門使用的特性，有助於回應再生能源間歇性與離岸電力外送限制問題，並可進一步對接工業燃料、化工原料、航運與長期儲能等需求。Oni 等人（2025）指出離岸製氫的可行性不僅取決於電解技術本身，更受到海上運維可及性、儲運形態與安全治理要求等系統性因素的制約，顯示其本質上是一項技術、基礎設施與監理制度相互交織的複合議題。

同樣地，離岸風電製氫亦可被視為回應離岸電力外送瓶頸的系統選項。當海纜容量、併網排程或陸域電網擴建受限時，將部分離岸電力就地轉化為氫，再透過管線、船運或港口樞紐輸送，可能降低對單一路徑外送的依賴。Jiang 等人（2026）即指出離岸風電製氫由示範走向規模化部署，仍須克服電解技術適應性、全生命週期成本與儲運瓶頸等挑戰。此亦意味著離岸風電製氫的分析重點，不在於將其視為單一技術突破，而在於辨識其如何在不同政策目的下形成不同的系統配置與治

理安排。

此外，歐洲氫能戰略的發展亦顯示，氫政策正逐步由單點補助轉向制度化政策組合。FleishmanHillard（2022）整理歐洲各國氫能政策後，指陳常見政策工具包括直接或間接補貼、長期價格支持、基礎設施投資，以及標準與認證制度建置。上述經驗的重要性不在於直接移植個別政策工具，而在於顯示離岸風電製氫的推動，關鍵在能否建立兼顧投資風險、市場信任與基礎設施整合的治理架構。基於此，本研究將離岸風電製氫視為一項需要以跨國比較加以分析的制度問題，而非僅是再生能源利用方式的延伸。

#### 四、離岸風電製氫的戰略意涵

綜合前述，離岸風電製氫的政策意義不宜被限縮為再生能源的附屬利用方式，而應被理解為一項同時牽動能源安全、產業競爭、基礎設施韌性與制度治理的戰略配置：其一，從能源安全角度觀之，海上就地製氫使部分離岸電力得以轉化為可儲存、可移動的能源載體，有助於降低對單一路徑海纜外送與陸域併網排程的依賴；其二，從產業政策角度觀之，氫能是否能支撐出口導向產業之低碳轉型，取決於其是否能與標準、認證及第三方驗證等制度安排相互銜接，形成可被市場接受的低碳證明；其三，從安全與韌性角度觀之，風場、電解設備、儲氫設施、海底管線與港口樞紐共同構成新的關鍵節點，亦使離岸風電製氫同時具備韌性提升與風險外溢之雙重特性；其四，從制度工具角度觀之，離岸風電製氫能否由示範走向規模化，取決於國家能否提供一致且長期的政策訊號，並透過補貼、需求端拉動、基礎設施投資與認證制度建立可持續的市場機制。

因此，本研究以下將不再從抽象技術願景出發，而是進一步從系統路徑、國家類型與監理設計等面向，分析離岸風電製氫如何在不同政策目的下展現差異化的治理邏輯，並據以評估其對臺灣制度建構的啟示（表1）。

表 1

氫經濟安全之分析構面與離岸風電製氫的治理意涵

| 分析構面        | 核心內涵                   | 離岸風電製氫治理風險                   | 對應制度重點                       |
|-------------|------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 能源供應安全      | 提升在地供給能力、調度彈性與危機應變能力   | 外送瓶頸、海纜或海上設施受損、維運中斷          | 輸電／輸氫路徑配置、備援調度、應急與維保規範       |
| 產業競爭與低碳轉型安全 | 支撐高耗能產業減碳與低碳原料供應       | 低碳屬性不可驗證、碳資料不可追溯、需求端不足       | 標準、認證、第三方驗證、碳資料治理、需求端長約      |
| 基礎設施與程序性安全  | 確保製氫、儲運、港口與海域設施可持續安全運作 | 電解系統失效、氫洩漏與燃爆、港口與儲運事故、極端天候風險 | 程序性安全治理、設計標準、作業程序、監測與異常通報    |
| 制度可信度       | 建立可被市場與社會接受之監理與驗證基礎    | 法制定位不清、權責分散、跨部門協調不足、社會信任不足   | 法規整合、權責分工、第三方驗證、國防－民生協調與韌性治理 |

## 貳、氫作為能源載體之系統效益、風險與離岸風電製氫路徑比較

氫常被稱為「潔淨能源」，但更精確地說乃能源載體（energy carrier），而非一次能源。換言之，氫的環境價值與戰略意義，並不取決於氫分子本身，而取決於其上游製程、全生命週期排放，以及儲運與使用方式的系統設計。就離岸風電製氫而言，關鍵不在於技術上能否製氫，而在於是否能在完整系統中回答若干核心問題：應採取何種製氫路徑、主要瓶頸為何、成本如何分布、儲運如何配置，以及制度設計如何降低不確定性。也因此離岸風電製氫不宜被視為單一路徑的技術方案，而應被理解為包含離岸分散式電解、集中式平台電解、上岸集中電解，以及「輸電」與「輸氫」等不同外送方式的多方案組合（Jiang et al., 2026）。

### 一、氫能的系統性優勢：從替代燃料到部門耦合

首先，氫能最常被強調的優勢，在於其可作為再生能源與終端用途之間的轉換媒介。當再生能源電力與電解水製氫結合時，氫可將原本不易儲存的間歇性電力轉化為可儲存、可運輸的燃料，並在燃料電池或其他終端應用中重新釋放能量。因此，

在綠氫使用的情境下，氫不僅可作為低排放替代燃料，也可能成為支撐難電氣化部門減碳的重要媒介。相關國內研究亦指出，氫在能源轉型中的政策吸引力，在於其能承接部分傳統化石燃料之終端功能，並提供減碳路徑上的替代選項（徐韶徽、洪崧富，2023）。

其次，氫具備跨部門應用特性，使其不只是一種燃料，而是促成「部門耦合」（sector coupling）的重要工具。氫可同時用於工業製程、交通運輸、長期儲能與電力調度，從而在能源系統中扮演連結供給端與需求端的中介角色。Jiang 等人（2026）即指出氫之所以在能源轉型中受到重視，關鍵在於其可轉換性與跨部門配置能力，而非僅是單一終端用途；在低碳氫情境下，其應用亦可能同時帶來城市空污改善與公共環境治理上的附加效益。

## 二、氫能的關鍵限制：儲運基礎設施、成本與安全風險

氫能的擴張並非沒有明顯限制。第一，氫的儲存與運輸條件相對嚴苛，仍是其規模化應用的主要瓶頸之一，壓縮氣態儲氫雖為常見方式，但涉及高壓容器成本、場址配置與安全規範；加以氫分子體積小、易滲漏，且以體積計算之能量密度偏低，使其儲運成本與安全要求均高於一般燃料。這也是為何即便氫燃料電池被視為具潛力的低碳方案，基礎設施不足仍常被視為推廣上的決定性限制（許雅喬，2022）。此外，加氫站與配套網路不足，亦限制了氫能在交通與分散終端的擴散。由於加氫站資本密集，且需依賴車輛與終端需求規模才能形成經濟誘因，常出現「先有站或先有車」的協調困境；再加上各國對設置、安全與作業監理架構尚未完全一致，投資者仍面臨一定的合規不確定性。尤甚，氫能供應鏈在初期往往呈現高度去中心化，若要支撐終端應用，仍須同步補強儲運節點、運輸方式、站點布建與資料治理（林士清，2023b）。

其次，氫的跨域運輸與大宗出貨在經濟性上仍具挑戰。相較於天然氣與石油長期形成之管線與航運規模經濟，氫在密度、材料相容性與運輸形態上具有特有障礙。即使大規模輸送理論上可透過管線進行，氫脆、材料相容性及既有管線改造成本等問題，仍可能限制既有能源網路之直接沿用。因此，氫的跨域運輸往往更依賴新建基礎設施，或轉化為氨、液態有機載體等替代形式（Niermann et al., 2021）。

整體而言，氫能的限制不僅是技術成本問題，更涉及儲運基礎設施、安全規範與市場部署條件能否同步成熟。

### 三、離岸風電製氫的系統抉擇

在離岸風電製氫情境下，上述優勢與限制將進一步具體化為「系統路徑選擇」問題。其核心抉擇在於：究竟應將離岸電力透過海纜送回陸域，再於岸上集中電解製氫；抑或在離岸端就地電解製氫，再透過氫管、船運或港口樞紐輸送回陸域。Hydrogen Networks Operators of the Northern Seas（2026）所整理的北海經驗指出，離岸能源上岸路徑不必然僅依賴海纜，氫管與氫網亦可能成為可擴張部署的重要選項。因此，此一抉擇的關鍵不只是成本高低，更涉及能源安全、系統韌性與基礎設施依賴程度的重新配置。

具體而言，輸電方案高度依賴海纜容量與陸域電網承載能力；輸氫方案則將系統挑戰轉移至離岸電解、儲氫、安全與管網規劃，但可能降低對電網瓶頸的直接暴露。Ramakrishnan 等人（2024）亦認為場址選擇、電解規模配置，以及是否採用海水直接製氫或免去離子水處理等技術方向，都將影響離岸製氫的技術與經濟可行性。對臺灣而言，此一系統抉擇更須納入臺灣海峽之水深、距岸、施工與維運環境、港口與工業區配置，以及海域治理與安全監理要求。基於此，本研究採取兩組系統配置作為分析核心：其一為「岸上電解／離岸電解」，其二為「電力外送／氫氣外送」，以將離岸風電製氫轉化為具體可比的政策方案組合。

### 四、成本不確定性與風險治理

若從戰略研究所關心的「可行性」出發，離岸風電製氫的核心問題，不只是列舉其優缺點，而是如何將成本不確定性轉譯為可治理的政策問題。Albalawi 等人（2025）以蒙地卡羅分析呈現離岸風電製氫之成本分布與敏感因子，其啟示在於成本並非單點估計，而是由水深、距岸、平台形式、運維條件、設備壽命與資金成本等因素共同構成之風險集合。這使政策設計的焦點，從單純追求最低成本，轉向如何透過制度安排進行風險分配與去風險化。

當離岸風電製氫面對高資本投入、長回收期與技術不確定性時，政府是否透過長期合約、差價機制、補貼或基礎設施投資吸收部分風險，便成為能否促成規模化投資的關鍵。Jang 等人（2022）比較分散式、集中式與岸上製氫模式之技經結果後，顯示不同系統配置下的成本結構與風險承擔方式並不相同。對臺灣而言，這意味著離岸風電製氫之政策可行性，不能停留在願景式論述，而須進一步對接既有能源科技專案、風力發電與氫能技術研發重點，將示範場域、制度設計與政策工具之補強路徑具體化。換言之，其可行性必須建立在系統路徑可比較、成本風險可辨識，以及制度工具可介入的前提上，後續對各國政策類型與監理設計的比較方能由技術想像進一步進入制度分析層次。

## 參、離岸風電－綠氫一體化方案：系統設計與風險治理

離岸風電製綠氫（offshore wind-to-green hydrogen）近年成為多國能源轉型政策的優先議程，原因不僅在於其「綠氫」的減碳屬性，更在於該方案具備將離岸再生能源由「電力型資源」轉化為「可儲存、可運輸」能源載體的系統價值。對於離岸風場而言，若僅依賴海纜把電力回送陸域，往往會遇到併網限制、電網承載與尖離峰調度成本等瓶頸；相較之下，把部分離岸電力在海上直接用於電解水製氫，可視為一種減輕外送壓力、提升能源調度彈性與跨部門應用能力的替代路徑。然而，離岸製氫並非「把電解槽搬到海上」如此簡單，它更像是一套把能源、海事工程、工安與環境治理綁在一起的複合系統，其可行性高度取決於風險控制與制度配套是否能同步成形。

### 一、離岸風電製氫原理

離岸製氫方案的政策價值之一，是把再生能源的「間歇性」轉化為可管理的「儲能與出貨」；但同時也把原本集中在陸域電網的風險，轉移到海上製程、儲運安全與海事運作的風險治理。離岸風電製綠氫的基本邏輯可概括為「風能－電能－化學能（氫）－儲運與終端應用」。其流程雖可拆解為數個環節，但真正的難點在於上述環節在海上空間中高度耦合：電力品質、設備耐候、海事施工、維運可達性，

以及安全、環境及法律等監理要求，會共同決定方案能否規模化，涉及離岸風電製氫原理及其方式如表 2。

表 2

離岸風電製氫之系統流程、配置選項與治理意涵

| 分析面向    | 主要内容                    | 治理意涵                  |
|---------|-------------------------|-----------------------|
| 發電端     | 離岸風機將風能轉換為電能，輸出具間歇性與波動性 | 影響電解設備負載管理、備援設計與調度穩定性 |
| 電解端     | 可採岸上電解或離岸電解             | 牽涉海纜依賴、維運難度、設備耐候與安全隔離 |
| 儲運端     | 氫可採高壓氣態、液氫、氨或其他載體形式儲運   | 影響能量損耗、設施投資、港口安全與事故應變 |
| 外送與運轉模式 | 可採併網或離網運行，並與輸電／輸氫路徑相互搭配 | 牽涉外送瓶頸、終端用途配置與整體系統韌性  |

## 二、從「示範」到「可擴張」：主要國家的政策路徑類型

### （一）比較對象之選取與分析架構

現階段離岸風電製氫多仍處於示範、試點或規劃階段，國際上尚缺乏一致且成熟的國別產量排名資料。故本研究不以一般氫能發展規模或總產量作為選案標準，而聚焦於離岸風電製氫之系統路徑與監理設計，並以岸上／離岸電解、輸電／輸氫、港口樞紐、標準認證與程序性安全治理等面向作為比較重點。基於此，本研究納入德國、荷蘭、英國、丹麥、法國、澳洲、中國與越南等 8 國作為比較對象。這些國家雖分屬不同發展階段，但均已在離岸風能資源運用、離岸風電製氫示範、港口與工業區銜接，或認證與驗證制度建構等面向展現一定程度的政策實作。

相較之下，美國、日本、韓國及沙烏地阿拉伯雖具國家級氫能戰略與多元示範，但其主軸多不以離岸風電製氫作為核心政策路徑，且制度安排較難與本研究樣本形成同質比較，故未納入分析範圍。為補充比較對象選取之量化依據，本研究另參考國際能源總署（International Energy Agency, IEA）之氫能生產專案資料庫

(Hydrogen Production Projects Database) 於 2025 年 9 月版發布之各國氫能專案資料。由於 IEA 提供者為氫能專案總庫，而非離岸風電製氫單一路徑之國別產量排名。故本研究不以單一產量排序作為選案依據，而改以專案數量、已投產規模與已公告專案總量作為輔助判準，以檢視各比較國在氫能專案布局上的相對位置（表 3）

表 3  
主要比較國家之氫能專案概況

| 國家 | 專案數量<br>(件) | 已投產專案數<br>(件) | 已投產產能<br>(kt H <sub>2</sub> /y) | 已公告專案總量<br>(kt H <sub>2</sub> /y) |
|----|-------------|---------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| 澳洲 | 160         | 13            | 6                               | 169,984                           |
| 中國 | 152         | 38            | 1,681                           | 56,064                            |
| 荷蘭 | 106         | 10            | 9                               | 27,585                            |
| 德國 | 229         | 61            | 180                             | 25,602                            |
| 丹麥 | 61          | 16            | 99                              | 19,156                            |
| 英國 | 159         | 18            | 16                              | 16,326                            |
| 法國 | 138         | 24            | 28                              | 10,689                            |
| 越南 | 6           | 0             | 0                               | 5,224                             |

註：資料依國際能源總署 Hydrogen Production Projects Database 2025 年 9 月版彙整，並採其 normalised capacity 指標。「已投產產能」係狀態屬 Operational 之專案產能加總；「已公告專案總量」係非除役 (non-decommissioned) 專案之產能加總，包含已投產、建設中、已作最終投資決定 (Final Investment Decision, FID)、概念規劃、可行性研究與示範項目。越南目前雖無已投產專案，故「已投產產能」為 0，但其已公告專案總量仍為正值。

資料來源：本研究彙整自 “Hydrogen production and infrastructure projects database,” by International Energy Agency, 2025.

從 IEA 資料庫觀之，若以已投產專案計，中國目前氫能產能規模最高；若納入建設中與規劃中專案，則澳洲、中國、荷蘭與德國之公告總量較大。此一結果顯示本研究所選取之比較國家，雖不必然皆為當前已投產產量最高者，但多數已在氫能專案布局、政策路徑與制度規劃上具一定代表性。故本研究選案並非單純依已投產產量高低排序，而是結合專案規模、政策目的與制度成熟度進行制度代表性取樣。

本研究之比較對象選取，並非依全球離岸風電製氫產量高低進行排序。其原因

在於現階段離岸風電製氫多仍處於示範、試點或制度建構階段，若僅以實際產量作為選案標準，反而可能忽略那些雖尚未形成大規模產出，但已在政策文件、港口治理、認證制度、第三方驗證或基礎設施整合上具代表性的國家。因此，本研究採取的是「制度代表性取樣」而非「產量排名取樣」：亦即優先納入在政策目的、系統配置與制度成熟度上已呈現清楚路徑差異的國家，以利進行類型化比較。換言之，所選 8 國並非意在代表全球離岸風電製氫產量最高者，而是代表當前較具辨識度的三種制度路徑。

為避免跨國比較流於個案並列或政策清單式描述，本研究以四項觀察面向整理各國經驗：第一，核心政策目的，即各國推動離岸風電製氫，究竟主要著眼於工業脫碳、能源系統整合、出口導向，抑或制度建構；第二，主要系統配置，即其偏向岸上或離岸電解、輸電或輸氫，以及是否以港口－工業區－管網作為整合節點；第三，政策工具與基礎設施安排，即其如何透過補貼、示範、長約、法規沙盒、港口建設或輸氫骨幹管網等工具推進商轉條件；第四，標準、認證與驗證制度，即其是否已建立低碳屬性證明、第三方驗證與跨境互認等制度基礎。透過上述四項面向，提供案例比較的基礎資訊，後續再進一步歸納其政策路徑類型（表 4）。

#### 1. 德國：工業需求拉動的「離岸製氫－管線網絡」整合路徑

德國作為歐洲離岸風電與氢能政策的領先國之一，其離岸風電製氫之核心政策目的，在於支撐工業脫碳、提升能源安全並強化供應韌性。其政策特色不在單一示範專案本身，而在於嘗試將離岸再生電力、近岸或離岸電解、輸氫管線、港口儲運與工業區用氫需求整合為可延伸的制度路徑。換言之，德國較具代表性的地方，在於其以工業需求端為牽引，並透過補貼、法規沙盒與投資去風險化工具，逐步推動由示範走向商轉制度化之條件形成。此外，AFRY Management Consulting（2022）以 AquaVentus 願景比較不同系統變體時即指出，德國發展離岸風電製氫的關鍵不僅在於製氫位置選擇，而在於如何將離岸電解、輸氫管線與工業需求端整合為可擴張的系統方案。

表 4

離岸風電製氫主要國家之政策目的、系統配置與制度安排

| 國家 | 核心政策目的                | 主要系統配置                        | 政策工具與基礎設施                                | 標準認證                         |
|----|-----------------------|-------------------------------|------------------------------------------|------------------------------|
| 德國 | 工業脫碳、能源安全、供應韌性        | 近岸／離岸電解並行；輸電與輸氫並進             | 補貼、法規沙盒、投資去風險化、工業需求端拉動；輸氫管線、港口儲運、工業區用氫導入 | 認證制度、第三方驗證、氫品質與安全規範          |
| 荷蘭 | 港口樞紐建構、工業聚落減碳、跨境供應鏈整合 | 以港口／工業區周邊電解為核心，並評估能源島；外送偏輸氫   | 國家能源網絡規劃、示範專案、需求端牽引；港口－工業聚落－管網一體化        | 港口安全規範、認證互認、第三方驗證            |
| 英國 | 電力系統彈性、終端導入、難减排部門脫碳   | 多點試點；風場附近或港口周邊分散式電解；輸電與用氫鏈並行  | 試點計畫、產業聯盟、終端需求政策；港口與工業區周邊示範鏈             | 安全規範、氫品質標準、認證驗證制度化           |
| 丹麥 | 大型化系統整合、跨境互聯、能源樞紐建構   | 能源島／樞紐整合多風場；海上或近岸電解；跨境輸電／輸氫協同 | 去風險化工具、市場設計；能源島、跨境互聯、港口與輸運配套             | 高強度安全／海域治理規範；標準與互聯規則         |
| 法國 | 示範驗證、制度建構、產業承接        | 多點示範；多偏岸上整合與終端導入              | 公共投資、研發補助、示範計畫；逐步建立港口／工業／交通用氫銜接          | 安全、環評、儲運規範與認證準備              |
| 澳洲 | 出口導向、跨境供應鏈、市場信任建立     | 大型再生能源驅動電解；偏輸氫與港口出貨           | 基礎設施投資、補貼、長約、出口合約；港口鏈條核心                 | 低碳屬性證明、第三方驗證、認證互認            |
| 中國 | 示範擴張、地方產業帶動、航運燃料應用    | 離岸風電直連電解優先示範；輸電與就地製氫並行        | 示範專案推動、地方產業園模式；沿海示範點逐步連結港口與航運燃料需求        | 安全規範先行；綠氫屬性證明、第三方驗證與跨區互認仍待完善 |
| 越南 | 淨零目標牽引、國際合作導入、制度完善    | 偏岸上整合；外送仍在規劃，未來可能朝出口延伸        | 國際合作、示範計畫、公共投資；海域使用、電網、港口與工業銜接仍在建構       | 工安、儲運、港口安全與認證互認制度建構中         |

## 2. 荷蘭：港口樞紐型的「北海能源島－工業聚落」耦合模式

荷蘭推動離岸風電製氫的特色，在於其以港口、工業聚落與管線網絡作為系統整合核心，將北海離岸風電視為上游供給來源，並藉由港口儲運與氫管網將綠氫導入化工、煉油、鋼鐵與發電等部門。荷蘭的重點不僅在技術示範，而在其透過國家能源網絡規劃、示範專案與需求端牽引，逐步形成港口－工業聚落－管網一體化的治理結構。其能源島構想更進一步將離岸風電與能源轉換節點整合，凸顯其路徑具有明顯的港口樞紐與跨境交易導向。此外，Clean Hydrogen Partnership（2023）指出港口在氫經濟中不只是物流節點，而是連結儲運、轉運與工業需求之制度接口；就此而言，荷蘭以港口、工業聚落與管網協同推進離岸風電製氫，最能體現其港口樞紐型治理邏輯。

## 3. 英國：多點試點推進的「電力彈性－終端導入」路徑

英國近年在離岸風電快速擴張下，將離岸風電製氫視為兼具電力系統彈性與終端應用導入的雙重政策工具。其路徑特色在於透過多點試點、風場附近或港口周邊分散式電解，以及工業、航運與儲能等多元終端用途驗證離岸風電與製氫之整合模式。相較於德國與荷蘭偏向基礎設施整合，英國更強調由試點專案、產業聯盟及終端需求政策逐步累積制度化經驗，再進一步推進標準、認證與驗證框架。此外，Calado 與 Castro（2021）指出離岸風電製氫的政策可行性往往與場址條件、外送限制及終端用途配置密切相關；英國以多點試點與終端導入累積制度經驗，正符合此一由示範逐步推進整合模式的路徑。

## 4. 丹麥：能源島驅動的「跨境能源樞紐－出口導向」模式

丹麥作為離岸風電技術的先驅，其離岸風電製氫策略常以大型化、系統化及跨境互聯作為核心想像。丹麥政策的代表性，在於其將能源島視為整合多風場發電、電解製氫與能源轉換之樞紐，試圖將離岸風電由單點電力供給提升為可支撐區域供應鏈的能源平台。與德國、荷蘭相比，丹麥更強調跨境基礎設施協同、市場設計與商轉速度之間的制度連動，因此其案例介於北海型與能源樞紐型之間，但整體仍以

大型系統整合為主要特徵。此外，Hydrogen Networks Operators of the Northern Seas（2026）強調北海地區未來離岸能源上岸路徑不必然僅依賴海纜，而可能朝輸氫骨幹網、跨境互聯與大型整合區域發展；丹麥能源島構想即體現此類以跨境能源樞紐為核心的系統整合邏輯。

#### 5. 法國：示範導向的「追趕型制度建構」路徑

法國雖具海上風能潛力，但其離岸風電製氫發展較北海領先國家晚進，因此目前較呈現示範驗證與制度建構並進的追趕型路徑。法國政策的重點，在於透過政府支持的示範與研發型計畫，測試離岸風電供電之電解製氫可行性，並逐步建立安全規範、環境監理與港口／工業區銜接條件。其代表性不在短期形成大規模供應，而在於如何藉由示範累積監理經驗，為後續商轉鋪路。此外，World Energy Council（2021）指出各國氫能戰略之制度成熟度差異甚大，部分國家仍以示範、研發與制度建構作為政策重點；法國目前較偏向透過示範累積監理與產業承接經驗，即可置於此一脈絡下理解。

#### 6. 澳洲：出口導向的「綠氫／載體－港口出貨」供應鏈模式

澳洲推動氫能的特色，在於將其置於能源出口與區域供應鏈的戰略框架之中。雖其氫能布局不完全以離岸風電為唯一供給來源，但在本研究比較架構中，澳洲代表的是出口導向、港口鏈條核心與低碳屬性認證先行的政策邏輯。其治理焦點不在單純擴產，而在於建立可被國際買方市場接受的低碳屬性證明、第三方驗證與認證互認機制，並透過港口儲運設施、長期合約與去風險化工具支撐商轉條件。此外，Taylor 等人（2025）指出澳洲離岸再生氫之發展潛力除取決於資源與成本條件外，亦與法制許可、海域治理及基礎設施安排密切相關，顯示其出口導向路徑之形成並非僅是技術或市場問題，而需以制度設計與法律配套作為支撐。

#### 7. 中國：以廣東、海南沿海示範擴張綠電制氫擴大規模

中國近年沿海地區已出現多個離岸風電直連製氫與氫基燃料示範，顯示其正由概念驗證走向工業級試點。其政策路徑的特徵，在於以地方產業園、沿海示範點

及航運燃料需求作為擴張支點，透過示範專案帶動系統整合與地方產業承接。整體而言，中國已具示範擴張動能，但在港口氫治理、第三方驗證與跨區域輸運制度方面仍處於補強階段，因此較符合追趕型、制度補課中的發展特徵。此外，World Energy Council（2021）指出部分後進國家之氫能發展仍以示範推進、政策引導與制度建構作為主要特徵；中國沿海地區目前由示範點帶動離岸風電製氫整合擴張的路徑，可視為此一發展階段的具體表現。

#### 8. 越南：國際合作驅動的「淨零目標牽引－完善制度」路徑

越南近年在淨零目標帶動下，開始積極評估以離岸風電結合製氫之可能性。其路徑特色在於由國際合作與外部資金、技術及制度標準導入作為主要驅動力，藉此同步推進再生能源發展、制度建構與基礎設施升級。然而，越南目前在海域使用、環境監理、工安規範、港口銜接與認證互認等面向仍屬建構階段，因此其案例更適合被理解為以淨零目標牽引、國際合作驅動的追趕型制度完善路徑。此外，Inn2POWER（2022）顯示綠氫制度化推進往往仰賴跨國合作、標準導入與基礎設施協調；就此而言，越南目前由淨零目標與國際合作共同牽引的發展方式，可視為典型的追趕型制度完善路徑。

### （二）離岸風電製氫國家類型區分

在前述案例比較基礎上，本研究進一步將各國離岸風電製氫政策加以類型化，其目的不在簡化個別差異，而在於從政策文件與示範專案中提取較具共通性的制度邏輯，以利後續比較與臺灣政策對照。本研究主要依據三項維度進行分類：第一，核心政策目的，亦即各國係以工業脫碳與能源系統整合為主軸，抑或以出口導向與跨境供應鏈建構為重點；第二，主要系統配置，亦即其重心在風場－港口－工業區的區域整合，抑或港口出貨與國際運輸鏈條之安排；第三，制度成熟度，亦即其是否已形成由示範、商轉至標準認證的較完整體系，或仍處於示範擴張與監理建構階段。

在制度比較上，本研究進一步將認證制度成熟度、第三方驗證、碳屬性追蹤／資料治理與國際互認作為觀察變項，以辨識各國在低碳屬性證明、查驗安排、資

料可追溯性與跨境市場對接方面的制度化程度。此外，Inn2POWER（2022）也指出北海區域之綠氫發展已逐步由單一國家政策推進，轉向以港口、工業聚落與跨境氫網為核心的區域協作模式，並將歐洲氫能骨幹網視為支撐產業群聚與港口節點連結的重要基礎設施。就此而言，北海型國家較具體系化與區域協調特徵；能源樞紐型較強調出口市場導向的驗證與互認；追趕型則仍處於示範驗證與制度建構並進階段。基於此，本研究將樣本國歸納為北海型、能源樞紐型與追趕型三類，並據以評估臺灣之政策定位（表 5）。

表 5

離岸風電製氫國家類型與政策特徵

| 類型                   | 政策目標            | 系統配置                   | 認證制度                  | 資料治理                | 國際互認                         | 港口治理                     |
|----------------------|-----------------|------------------------|-----------------------|---------------------|------------------------------|--------------------------|
| 北海型<br>（德國、荷蘭、丹麥、英國） | 工業脫碳、系統整合、供應韌性  | 輸電／輸氫並行，風場港—口—工業區—氫網整合 | 高：綠氫認證、第三方驗證、碳追溯逐步制度化 | 高：重視碳追蹤、資料揭露與供應鏈可信度 | 高：跨境互認與區域協調推進中；納入制度化與第三方查驗安排 | 港口為集散樞紐，重視氫網、能源島、跨境互聯    |
| 能源樞紐型<br>（澳洲）        | 綠氫／氫載體出口、建立市場信任 | 大型再生能源電解，港口出貨與載體轉換並重   | 中高：偏出口導向之低碳證明與第三方驗證   | 較高：依出口市場要求建立資料格式    | 高：重視與進口國市場標準對接；重視買方市場之第三方驗證  | 港口為出口核心，重視儲運、轉換、長約與物流安全  |
| 追趕型<br>（法國、中國、越南）    | 示範驗證、制度建構、技術導入  | 多點示範，岸上整合或局部離岸電解       | 中低：安全規範先行，認證制度建構中     | 中低：碳資料治理與追溯仍待補強     | 較低：互認體系尚未成熟；第三方驗證尚在試行階段      | 重點在示範治理、港口安全、環評協調與基礎設施起步 |

註：就臺灣政策借鏡而言，北海型可借鏡其「由示範走向商轉」的制度設計，特別是港口—工業區能—源基礎設施整合、程序性安全治理，以及跨部門協調機制；能源樞紐型對臺灣短期內未必適合直接複製出口型模式，但可借鏡其「認證先行、合約驅動、基建配套同步」的市場形成邏輯；追趕型對臺灣最具直接參考價值。臺灣現階段較接近此型，宜優先建立示範治理、監理框架、驗證機制與分階段推動順序，而非過早以出口導向為政策主軸。

上述 8 國發展離岸風電製氫的核心政策目的並不相同。整體而言，可大致區分為三類：第一，以工業脫碳與能源系統整合為主軸，典型如德國、荷蘭、英國與丹麥，其重點在於回應離岸風電外送瓶頸、支撐高耗能產業減碳，並提升供應韌性；第二，以出口導向、市場信任與跨境供應鏈建構為主軸，典型如澳洲，其政策焦點在於將氫塑造為可交易之低碳能源商品；第三，以示範驗證、制度建構與技術導入為主軸，典型如法國、中國與越南，其重點在於透過示範累積監理經驗與產業承接能力。換言之，各國雖皆以淨零轉型為共同背景，但在實際政策目的上，離岸風電製氫更常被定位為工業脫碳與系統整合工具、出口導向之能源商品，或制度建構與示範驗證手段，而非單純追求綠氫產量擴張。是以，涉及離岸風電製氫國家類型區分敘明如下：

#### 1. 北海型：以系統整合為核心的區域能源路徑

北海型的共同特徵，在於將離岸風電製氫視為區域能源系統整合工程，而非單一技術專案。其政策重心不僅在離岸風場本身，更在於如何將風場、港口、工業區與氫網納入同一治理架構，以形成可複製、可擴張的制度模板。德國、荷蘭、丹麥與英國雖在具體配置上各有差異，但整體均強調工業脫碳、能源系統整合與供應韌性，並逐步推進港口儲運、輸氫骨幹網、能源島、跨境互聯及標準認證／第三方驗證等制度安排。就此而言，北海型的代表性不在單一示範案規模，而在其已具備由示範走向商轉的制度延伸能力。對臺灣而言，此一路徑最具借鏡之處，在於港口－工業區－能源基礎設施整合、程序性安全治理，以及跨部門協調機制之制度化。

#### 2. 能源樞紐型：以出口與跨境供應鏈為核心的市場形成路徑

能源樞紐型的核心在於將氫視為可進入跨境市場之能源商品，而不僅是國內能源轉型工具。此一路徑通常以大規模再生能源供給建立成本優勢，並同步投資港口、儲運、轉換設施與長期合約安排，以形成由生產、轉化、儲存至出貨的一體化物流鏈條。澳洲即具代表性，其政策關鍵不只在擴產，而在於如何建立可被國際買方市場接受的低碳屬性證明、第三方驗證與認證互認機制，使綠氫的環境價值轉化為交易價值。相較於北海型偏重區域能源系統整合，能源樞紐型更強調出口導向、

市場信任與港口出貨能力。對臺灣而言，此一路徑短期內未必適合作為主導模式，但其「認證先行、合約驅動、基建配套同步」的市場形成邏輯，仍具政策啟發之參考價值。

### 3. 追趕型：以示範擴張與制度建構為核心的發展路徑

追趕型的特徵在於當離岸風電仍處於起步或加速擴張階段時，即同步評估並補齊海上製氫所需的制度條件與產業承接能力。法國、中國與越南雖發展背景不同，但其共通之處，在於目前仍以示範驗證、制度建構、技術導入與地方或產業承接作為主要政策重心。此一路徑通常尚未形成完整的輸氫骨幹網、跨境互聯或高度成熟的認證互認體系，而較著重於法規定位、工安與危險物質管理、環境影響評估、海域使用規範、港口儲運與終端用氫銜接等基礎制度補課。其政策價值不在短期內形成大規模供應，而在於透過示範與制度建構降低後續商轉與擴散時的治理成本。

### 4. 評估臺灣定位：追趕型中的系統消納導向次型

綜合上述類型比較，臺灣現階段較接近「追趕型」中的「系統消納導向次型」，亦即以國內能源韌性、產業減碳與示範監理建構為主，而非出口導向之能源樞紐型。此一類型化處理的意義在於將原本分散於能源政策、產業策略與監理制度中的個別作法，提升為可供比較之制度分析架構。換言之，各國差異不僅表現在是否發展離岸風電製氫，更表現在其究竟是將其定位為工業脫碳與系統整合工具、出口導向的能源商品，抑或制度建構與示範驗證之治理手段。就此而言，北海型強調風場、港口、工業區與氫網之整體整合；能源樞紐型則以出口鏈條、國際認證與港口出貨能力為核心；追趕型則著重於示範擴張、監理補課與制度建構。此一比較結果亦顯示臺灣在政策上應優先處理示範場域治理、程序性安全、港口儲運規範與驗證制度等基礎問題，而不宜過早以出口導向模式作為主要政策想像。

## （三）從許可到程序性安全治理

離岸風電製氫的監理課題，核心不在單一設施之設置許可，而在跨流程風險的制度化治理。相較於傳統能源設施，離岸風電一氫一體化方案所面對的風險，涉

及電解系統失效、氫氣洩漏與點火、儲運與轉化過程之安全隔離、極端天候下之應急處置，以及對海洋環境與周邊社會之影響管理。換言之，其風險結構並非單一技術面向，而是技術、經濟、環境與安全條件相互交織之複合體系。因此，監理思維不宜僅限於建設許可或個案審查，而應導入「程序性安全治理」（process safety）取向，將事故預防、風險分級、持續監測、運轉維保與異常通報納入制度設計之中（Mudhifar et al., 2025）。

此一轉向對臺灣尤具意義，臺灣離岸風電發展本即與海域治理、公共安全及國防空間存在高度政策張力；當海上製氫進一步疊加儲運、港口與工業使用等環節後，相關風險更難由單一主管機關或單一法規加以吸收。也因此，離岸風電製氫所涉之「安全」，不應被限縮為狹義工業安全，而應理解為涵蓋公共安全、供應韌性與關鍵基礎設施保護的廣義治理問題。制度設計必須同時處理能源轉型的民生需求與國防安全的空間、資訊與基礎設施保護要求，使原本可能在個案審查中反覆出現的衝突，轉化為可預期、可協調且可監理的制度安排。

基於前述分析，臺灣在離岸風電製氫的監理上，至少應聚焦兩項關鍵課題：其一，如何在「輸電」與「輸氫」兩種外送路徑之間，依技術成熟度、全生命週期成本、供應中斷風險與監理可行性進行權衡與配置；其二，如何以程序性安全治理為核心，整合環境影響評估、公共安全管理、港口儲運規範與國防—民生協調機制，建構可持續運作且具社會信任基礎的監理架構。換言之，離岸風電製氫若要由試點示範邁向規模化部署，其關鍵不僅在技術突破，更在於能否形成跨流程、跨部門且可稽核的治理體系。

#### **肆、海上製綠氫之監理架構：環境法規、技術標準、港口治理與國防安全之整合**

離岸風電製氫涉及離岸發電、電解、儲運與終端使用之一體化系統，其監理不可能由單一法規或單一主管機關完成。相較於傳統能源設施，其治理重點不在單點設施合法化，而在海域使用、環境影響、製程安全、港口儲運、標準認證、第三方驗證及關鍵基礎設施韌性之整合。就國際經驗而言，相關監理大致可分為環境治理

與海域使用、技術標準與程序性安全治理、市場與基礎設施治理三個層次。基於此，本章將依序討論環境治理、技術標準、港口治理與國防安全，說明其如何共同構成臺灣離岸風電製氫的監理架構。

## 一、環境治理與海域規範：從環評要求至海洋空間治理

在離岸風電製氫的監理起點，首先是環境治理與海域使用問題。就國際制度經驗而言，離岸風電及其衍生設施通常優先納入嚴格的环境監理框架，要求開發者於選址、施工、運轉與除役各階段，提出具可追溯性的環境影響評估與長期監測機制，以降低對海洋生態系統、漁業資源、航運秩序及海域利用秩序之不利影響。也就是說，海上能源設施的環境治理，並不只是對單一工程進行事前審查，而是將其置於整體海洋空間與多元使用衝突之中進行制度化管理。

若進一步從離岸風電製氫的特性來看，其環境治理需求較一般離岸風電更為複雜。原因在於離岸風電製氫並非僅增加一項附屬設備，而是將風場與製氫、儲氫、運輸等製程環節相互耦合，使原本集中於風機、海床擾動、噪音與棲地干擾的環境議題，進一步延伸至化學品管理、儲運安全、事故外溢與應急處置等面向。換言之，當離岸風電由單純的發電設施轉變為包含製程與儲運功能的一體化系統，其環評對象也不應再僅限於風場本體，而須擴大至整體系統流程與事故情境。

因此，臺灣若要推動離岸風電製氫，環境法制不宜僅沿用既有離岸風電審查架構，而應將評估範圍由風場設置進一步延伸至「製氫－儲氫－運輸－港口銜接」等系統性環節。具體而言，至少應納入三項制度考量：（一）海域空間治理，亦即如何在風場設置、航道安全、漁業活動、生態敏感區與國防使用之間進行協調，避免海域使用衝突在個案審查階段反覆出現；（二）環境影響評估，亦即除既有噪音、海床擾動與棲地影響外，亦須評估製氫製程、危險物質管理、儲運風險及事故情境可能帶來之外部影響；（三）長期監測與適應性治理，亦即針對運轉期間之海洋生態變化、設備異常、事故通報與環境回復責任建立持續性制度安排，而非僅止於開發許可前之一次性審查。

從臺灣脈絡而言，此一環境治理轉向尤其重要。臺灣離岸風電發展經驗已顯示海域使用、社會接受度、環境影響與產業利益之間常存在高度張力；若再疊加海

上製氫、儲運與港口轉運等新環節，原有審查架構可能不足以回應更複雜的風險組合。是以，離岸風電製氫的環境治理不應被理解為既有離岸風電審查制度的附帶延伸，而應被視為一種由環評要求逐步走向海洋空間治理的制度升級。唯有如此，環境監理方能與後續的程序性安全治理、港口治理與國防韌性保護形成一致的風險管理架構，為離岸風電製氫由示範走向制度化部署奠定基礎。

## 二、技術標準與安全監理

離岸風電製氫的監理難題之一，在於其主要風險來源並非單點設備故障，而是跨流程的複合風險。具體而言，電力波動可能影響電解系統穩定運作，海事環境將直接左右維修可及性與作業安全，而氫之儲運形態又將影響事故情境、隔離要求與應急處置模式。換言之，離岸風電製氫所面對的，不是傳統單一設施之靜態風險，而是製氫、儲運、海事作業與終端銜接彼此交織的動態風險結構。因此，若監理仍僅停留在設置許可或個案審查，往往不足以涵蓋運轉、維保與異常事件處理階段的高頻不確定性。相較之下，國際監管趨勢已逐步轉向更強調程序、操作與失效管理的安全治理思維，亦即由「是否准許設置」進一步轉向「如何持續安全運作」。

在此脈絡下，Clean Hydrogen Partnership（2023）以「港口中的氫」為情境，具體指出氫若作為港口集散與轉運節點之能源載體，其監理要求不能僅限於設備規格或危險物品管理，而須同時涵蓋安全規範、基礎設施標準、作業流程、災害演練與跨機關協調等制度條件。此一觀點對離岸風電製氫尤具啟發性，因為其規模化部署終將與港口、儲運及工業使用相銜接，而港口場域本身即屬高密度人流、物流與危險物質並存的複合空間。也因此，「安全標準－設施規格－作業程序－災害演練」必須形成一套可稽核、可追溯且可持續更新的監理體系，而非僅由單一機關透過事前許可予以切割管理（Clean Hydrogen Partnership, 2023）。

若從臺灣的制度需求來看，離岸風電製氫之技術標準與安全監理，至少應涵蓋四項核心面向：（一）製氫端安全，包括電解槽系統、電力品質管理、防爆與隔離設計，以及失效模式與風險評估；（二）儲運端安全，包括高壓氣態、液氫或載體轉換之安全規範、站區分區、裝卸作業與事故情境下之應急處置；（三）海事與職安管理，包括海上平台作業、維運船舶、承攬管理、人員訓練與天候窗口下的作業

安全；（四）資料與監測治理，包括即時監測、事故通報、稽核機制與第三方檢驗，以確保設施運轉與異常事件處理具備可追溯性。換言之，離岸風電製氫的技術監理不應僅以個別設備安全為中心，而須建立由製氫、儲運、海事作業至資料治理相互銜接的流程型監管架構。其主要監理範疇與制度工具整理（表 6）。

表 6

離岸風電製氫之技術標準與程序性安全治理架構

| 監理面向  | 核心風險                             | 主要監理要件                                 | 制度工具                                    |
|-------|----------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|
| 製氫端安全 | 電解槽系統失效、電力輸入波動、防爆與隔離不足           | 設計與選型標準、電力品質保護邏輯、失效模式與風險評估、例行檢修與维保規程   | 設計審查、型式認證、風險評估報告、運轉 SOP、第三方檢驗           |
| 儲運端安全 | 高壓氣態、液氫或載體轉換過程中之洩漏、燃爆、裝卸事故       | 儲存型態安全標準、站區分區與動線管制、裝卸作業規範、事故情境應變與消防計畫  | 港口／儲運設施設計規範、危害辨識清單、裝卸 SOP、緊急應變計畫、演練紀錄   |
| 海事與職安 | 海上平台作業風險、維運船舶安全、承攬管理失當、極端天候下作業中斷 | 海上施工與維運規程、承攬安全界面管理、人員訓練與證照要求、撤離與救援規劃   | 作業許可制度、承攬安全管理計畫、訓練紀錄、海事通報與救援 SOP        |
| 資料與監測 | 壓力、洩漏、溫度與電力品質異常未即時掌握，事故資訊不可追溯    | 監測項目與頻率、異常告警與停機門檻、事故通報時限與格式、稽核與第三方驗證機制 | SCADA／監測系統、異常事件資料庫、通報平台、稽核報告、第三方檢驗／驗證證明 |

### 三、能源市場與基礎設施治理

離岸風電製氫之所以具有戰略意涵，不僅在於其可作為低碳能源載體，更在於其最終必須嵌入市場與基礎設施網絡之中，方能由技術示範轉化為可持續運作的供應體系。換言之，離岸風電製氫的治理不會在製氫完成時結束，而是必須進一步面對儲存、運輸、轉運、終端使用與交易驗證等制度問題。相較於單純將電力交由電網吸收，氫能體系要求更高程度的基礎設施整合，亦即由風場、港口、工業區、儲

運設施、管網或替代運輸方式共同構成可運作的供應鏈架構。

在此脈絡下，港口治理成為離岸風電製氫由示範走向擴張部署的關鍵節點。Clean Hydrogen Partnership（2023）指出港口在氫經濟中往往不只是物流場域，而是集散、儲運、轉運與產業耦合的樞紐，其功能在於串接上游離岸再生能源供給與下游工業、交通及發電需求。就離岸風電製氫而言，港口同時承擔三項制度角色：其一，作為氫與氫載體的實體轉運節點；其二，作為安全規範、危險物質管理與作業程序的落實場域；其三，作為市場形成與交易驗證的重要接口。職此，港口治理的核心已不僅是交通或物流管理，而是能源轉型、產業競爭與制度可信度的交會點。

就評估現階段臺灣發展離岸風電製氫的政策價值而言，未必在短期內形成獨立之氫經濟體系，而更可能體現在其作為天然氣替代與補充能源載體的過渡功能。亦即，在高耗能產業、工業燃料與長期儲能需求仍高度依賴天然氣之情況下，離岸風電製氫可被視為降低化石燃料依賴、提升低碳原料供應與危機調度彈性的制度選項。就基礎設施層面而言，臺灣未來可進一步評估既有天然氣儲槽、港口儲運設施與相關工業區能源基礎設施，是否可在安全、材料相容性與法規許可條件下，作為氫能導入或氫載體轉換的過渡性支撐。此一思考的重點，不在假設既有天然氣設施可直接等同於氫基礎設施，而在於將離岸風電製氫與既有能源體系銜接，作為降低初期制度成本與基礎設施投資門檻的過渡路徑。

對臺灣而言，能源市場與基礎設施治理的政策意義，在於是否能逐步形成「港口－風場－工業區」的供應鏈縱深，使離岸風電製氫不只是孤立的示範專案，而能與既有高耗能產業、工業燃料需求與低碳轉型壓力形成制度性對接。具體而言，若港口能承接氫的安全轉運與合規管理，並將氫供應導入鋼鐵、石化、發電或其他關鍵製造業，則離岸風電製氫方可能由工程方案轉化為產業政策工具。反之，若缺乏儲運設施、轉運規範、需求端長約、標準認證與第三方驗證等制度條件，則離岸風電製氫仍可能停留在示範展示，而難以形成可擴張的市場結構。

進一步言之，能源市場與基礎設施治理亦是離岸風電製氫與後續韌性治理相銜接的關鍵。當港口、輸氫管網、海底電纜、儲運設施與工業用氫節點逐步形成網絡時，其治理邏輯便不再只是效率與成本配置，而同時涉及供應中斷、設施破壞、灰色地帶干擾與關鍵節點保護等問題。換言之，市場形成愈成功，基礎設施的重要性

與脆弱性也將同步上升。這意味著離岸風電製氫的市場與基礎設施治理，不能與國防安全、關鍵基礎設施韌性及國防－民生協調切割理解，而必須作為同一監理架構下的不同層次加以整合。

#### 四、灰色地帶風險：離岸風電製氫如何納入國防－民生協調

離岸風電製氫之所以必須納入國安脈絡加以思考，主因在於離岸風電及其衍生基礎設施具有明顯的國防－民生雙重屬性。風場配置、海底電纜與管線路徑、雷達回波、海上交通秩序及港口轉運節點，均可能與國土防衛、海域監控及海上通道安全相互交織。也因此，離岸風電製氫的治理問題，不僅是能源開發與產業轉型問題，同時也是海域安全與關鍵基礎設施保護問題。

就國內制度脈絡而言，李淑瓊（2024）已指出離岸風電推動需同步納入國防安全考量，並應透過法制與行政協調機制處理風場開發與防務需求之界面；黃景裕（2026）亦指出風機葉片可能造成雷達雜訊或形成假目標，進而影響防空與監偵判讀；海底電纜、海上平台與港口設施則可能成為灰色地帶行動中的脆弱目標。此一觀察對離岸風電製氫具有更強的制度意涵，因為一旦製氫、儲運與港口轉運等功能疊加於既有離岸風電設施之上，相關設施的重要性與脆弱性亦將同步提升。

基於此，本研究認為離岸風電製氫至少涉及三項國防－民生協調課題：（一）風場與製氫設施之選址不只是能源規劃問題，亦涉及防務敏感區、演訓空域、航道秩序與海域使用界面的協調；（二）海纜、管線、海上平台與港口節點不只是工程資產，而可能成為騷擾、破壞或資訊操作之標的，故應納入關鍵基礎設施保護、監測與通報體系；（三）資訊透明與跨部門協調機制必須制度化，避免能源開發與防務需求在個案審查中反覆衝突，進而降低治理不確定性與社會信任成本。換言之，離岸風電製氫若要成為可擴張部署的能源基礎設施，其監理架構即不能僅處理環評、工安與港口管理，而須同步納入灰色地帶風險與國防－民生協調機制。

#### 五、臺灣制度推動順序：由示範治理走向制度化部署

綜合前述環境治理、程序性安全治理、市場與基礎設施治理，以及國防－民生協調等面向，臺灣推動離岸風電製氫較適合採取分階段制度建構路徑，而非一開始

即以大規模商轉或出口導向作為政策起點。其原因在於臺灣目前較接近追趕型中的系統消納導向次型，政策重點應先放在示範治理、監理補課與制度協調，逐步累積工程、法制與跨部門治理能力，再進一步推進認證、基礎設施與韌性部署。

第一階段為示範場域治理。此階段重點在於建立離岸風電製氫之基本制度入口，包括環境影響評估、海域使用協調、電解設備安全審查、港口危險物管理及跨部會協調機制。此階段之核心目的，不在立即追求規模化，而在透過示範計畫釐清許可流程、風險責任與機關分工，避免制度空白成為後續推動之障礙。

第二階段為基礎設施與驗證治理。當示範場域逐步累積技術與監理經驗後，政策重點應轉向建立來源證明、碳屬性資料格式、第三方驗證機制，以及港口儲運與轉運作業標準。此階段之關鍵，在於將離岸風電製氫由示範專案提升為可被市場接受與制度辨識的低碳供應選項，使技術路徑與制度可信度得以同步形成。

第三階段為商轉與韌性治理。當基礎設施與驗證制度具備一定基礎後，方可進一步將離岸風電製氫納入關鍵基礎設施保護、國防－民生協調、備援供應設計與危機情境演練之中，推動由試點示範走向制度化部署。此一階段的重點不僅在市場擴張，更在於提升供應中斷情境下之韌性與可調度性，使離岸風電製氫真正成為兼具能源安全、產業減碳與危機韌性的治理工具。換言之，臺灣現階段較適合採取「先示範、後認證、再基建」的制度推進順序，而不宜直接以出口型氫經濟作為政策起點。

上述路徑既較符合臺灣當前制度條件，也較能回應離岸風電製氫所涉及之多重風險與治理需求。從臺灣現行制度基礎觀之離岸風電製氫並非全然缺乏法制依據，而是現有規範多分散於不同主管領域之中。就既有基礎而言，離岸風電開發、環境影響評估、海域使用協調、港口危險物管理、職業安全與消防應變等面向，已可作為離岸風電製氫示範治理的初步制度入口。然而，現行規範仍主要以離岸風電、危險物管理或港口作業為對象，對於離岸電解製氫、儲氫、氫載體轉換、第三方驗證、碳屬性資料治理，以及跨部門事故通報與國防－民生協調等事項，尚未形成完整而一致的監理架構。

就主管機關分工而言，未來制度推動至少需涵蓋三個層次：（一）能源與產業主管機關應負責示範政策、技術標準、需求端導入與驗證制度規劃；（二）環境、

港務與海域治理主管機關應處理環評、海域空間協調、港口儲運作業與危險物管理；（三）國防與安全相關機關則應就敏感海域、關鍵節點保護、灰色地帶風險與國防－民生協調建立固定協商機制。換言之，臺灣推動離岸風電製氫的關鍵並不在新增單一專法，而在於如何以跨部門協調方式，將現有法制基礎逐步轉化為可銜接示範治理、驗證制度與基礎設施部署的整合型監理架構。

## 伍、結論與政策意涵：建構臺灣「氫經濟安全戰略」

### 一、研究結論

本研究主張離岸風電製氫不宜僅被理解為單一能源技術，而應視為牽動能源安全、經濟安全、基礎設施韌性與制度可信度的綜合治理議題。隨著離岸風電持續擴張，能源轉型的關鍵問題已由發電能力逐步轉向系統消納、外送能力與風險治理。也因此離岸風電製氫的政策意義，不在於增加一項綠能利用方式，而在於其能否作為回應外送瓶頸、支撐產業減碳與提升能源韌性的制度選項。

本研究以「政策目的－系統配置－制度成熟度」作為比較架構，分析不同國家如何透過離岸風電製氫回應其能源、產業與安全需求。研究結果顯示各國路徑差異並非主要來自技術條件，而是取決於政策定位與制度安排：北海型國家強調風場、港口、工業區與氫網的整體整合，並已逐步形成由示範走向商轉的制度延伸能力；能源樞紐型則以出口導向、市場信任與跨境供應鏈為核心；追趕型則著重於示範驗證、監理補課與制度建構，尚在逐步補齊認證、驗證與基礎設施條件。換言之，離岸風電製氫的發展路徑，本質上是制度路徑的差異，而非單純技術路徑的差異。

對臺灣而言，本研究認為現階段較接近追趕型中的「系統消納導向次型」，亦即以國內能源韌性、產業減碳與示範監理建構為主，而非以出口導向之能源樞紐型作為發展起點。其關鍵不在單點技術是否成熟，而在於能否建立兼顧環境治理、程序性安全、港口儲運、驗證制度與國防－民生協調的監理架構。若缺乏此一制度化配置，離岸風電製氫即可能停留於示範層次，而難以轉化為可擴張的能源基礎設施與產業政策工具。

## 二、政策建議

基於前述研究發現，本研究建議臺灣推動離岸風電製氫，應以「策略定位－制度設計－基礎設施」作為治理主軸：

首先，在策略定位上，離岸風電製氫應被定位為能源自主、產業減碳與經濟安全的政策工具，而非單純的能源技術計畫。臺灣現階段較適合將其作為支撐國內低碳原料供應、提升系統消納能力與強化能源韌性的制度選項，而不宜過早以出口型氫經濟作為主要政策想像。

其次，在制度設計上，監理思維應由傳統的許可導向，進一步升級為結合程序性安全治理、標準認證與第三方驗證的整合框架。其重點包括：擴大環境影響評估之系統性範圍、建立技術標準與異常通報機制，以及將國防－民生協調、灰色地帶風險與關鍵基礎設施韌性納入監理體系。

第三，在基礎設施上，港口治理與儲運體系將是離岸風電製氫由示範走向擴張部署的關鍵。未來應逐步建立「風場－港口－工業區」的基礎設施縱深，並同步發展來源證明、碳屬性資料格式、第三方驗證與港口轉運作業標準。就推動順序而言，臺灣較可行的路徑仍是「先示範、後認證、再基建」，亦即先釐清制度入口與機關分工，再逐步推進驗證制度與基礎設施部署。

總言之，臺灣推動離岸風電製氫的核心並非追求單點技術突破，而是在於能否建構一套可擴張、可稽核且可協調的氫經濟安全治理體系。唯有在策略定位清晰、制度設計完整與基礎設施逐步到位的前提下，離岸風電製氫方可能由示範專案轉化為兼具減碳、產業競爭與國家韌性的關鍵能源基礎設施。

## 參考文獻

- 李淑瓊（2024）。離岸風電跨機關協調機制之問題研析。立法院法制局。[Lee, S. C. (2024). *A study on issues in the inter-agency coordination mechanism for offshore wind power*. Legislative Yuan Legal Affairs Bureau.]
- 林士清（2023a）。四方乾淨氫戰略倡議：以美國、日本、澳洲及印度發展氫能源合作促淨零碳排為例。臺灣能源期刊，10（4），333-349。[Lin, S. C. (2023a). Quad clean hydrogen strategic initiative: A case study of hydrogen energy cooperation between the United States, Japan, Australia, and India to promote net-zero carbon emissions. *Journal of Taiwan Energy*, 10(4), 333-349.]
- 林士清（2023b）。朝向碳中和與氫經濟：國家氫能源發展模式之比較研究。科技管理學刊，28（2），243-271。[Lin, S. C. (2023b). Moving toward the carbon neutrality and hydrogen economy: An comparative study of national energy policy for hydrogen resources. *Journal of Technology Management*, 28(2), 243-271.]
- 徐韶徽、洪崧富（2023）。氫經濟產業趨勢與氫能源產出方式。化工，70（2），46-55。  
[https://doi.org/10.29803/CE.202304\\_70\(2\).0006](https://doi.org/10.29803/CE.202304_70(2).0006) [Hsu, S. H., & Hung, S. F. (2023). Qing jingji chanye qushi yu qing nengyuan chanchu fangshi. *Chemical Engineering*, 70(2), 46-55.]
- 黃景裕（2026）。離岸風電開發與國土防衛之戰略權衡。國防安全雙週報，（105），57-61。  
[Huang, C. Y. (2026). Balancing offshore wind ambitions with national security needs. *Guofang Anquan Shuangzhoubao*, (105), 57-61.]
- 許雅喬（2022）。2050 淨零碳排之能源新星－氫燃料電池產業。臺灣經濟研究月刊，45（8），104-112。  
[https://doi.org/10.29656/TERM.202208\\_45\(8\).0014](https://doi.org/10.29656/TERM.202208_45(8).0014) [Hsu, Y. C. (2022). 2050 Jingling tanpai zhi nengyuan xinxing: Qing ranliao dianchi chanye. *Taiwan Economic Research Monthly*, 45(8), 104-112.]
- AFRY Management Consulting. (2022). *Comparison of system variants for hydrogen production from offshore wind power: Short study based on the AquaVentus vision: 10 GW offshore electrolysis capacity in the German exclusive economic zone by 2035*. <https://aquaventus.org/downloads/studien/aqueductus-short-study-en.pdf>
- Albalawi, A. A., Hasan, S., & Elshurafa, A. M. (2025). The economics of off-shore wind-based hydrogen production in Saudi Arabia. *International Journal of Hydrogen Energy*, 170, Article 151225. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.151225>
- Balaji, R. K., & You, F. (2024). Sailing towards sustainability: Offshore wind's green hydrogen potential for decarbonization in coastal USA. *Energy & Environmental Science*, 17, 6138-6156. <https://doi.org/10.1039/D4EE01460J>
- Bockris, J. O'. M. (2013). The hydrogen economy: Its history. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(6), 2579-2588. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.12.026>
- Calado, G., & Castro, R. (2021). Hydrogen production from offshore wind parks: Current situation and future perspectives. *Applied Sciences*, 11(12), Article 5561. <https://doi.org/10.3390/app11125561>
- Chung, H.-S. (2021). Taiwan's offshore wind energy policy: From policy dilemma to sustainable development. *Sustainability*, 13(18), Article 10465. <https://doi.org/10.3390/su131810465>
- Clean Hydrogen Partnership. (2023). *Study on hydrogen in ports and industrial coastal areas*. <https://www.>

- clean-hydrogen.europa.eu/system/files/2023-09/EN%20PDF%20-%20H2%20in%20Ports%20-%20Report%20%20-%20September%202023.pdf
- FleishmanHillard. (2022). *National hydrogen strategies in the EU member states*. <https://fleishmanhillard.eu/wp-content/uploads/sites/7/2022/02/FH-National-Hydrogen-Strategies-Report-2022.pdf>
- Global Wind Energy Council. (2025). *Global wind report 2025*. <https://26973329.fs1.hubspotusercontent-eu1.net/hubfs/26973329/2.%20Reports/Global%20Wind%20Report/GWEC%20Global%20Wind%20Report%202025.pdf>
- Howarth, R. W., & Jacobson, M. Z. (2021). How green is blue hydrogen? *Energy Science & Engineering*, 9(10), 1676-1687. <https://doi.org/10.1002/ese3.956>
- Hydrogen Networks Operators of the Northern Seas. (2026). *Integrated offshore wind and hydrogen production in the Northern Seas: An expert paper describing a pathway to scalable renewable energy deployment*. <https://www.natrangroupe.com/sites/default/files/hy/hynos-rapport-expert-production-hydrogene-offshore-janvier2026.pdf>
- Inn2POWER. (2022). *Green hydrogen state of the nations summary report: All nations summary*. [https://www.waterstofnet.eu/\\_asset/\\_public/publicaties/INN2POWER-All-notions-Summer-online.pdf](https://www.waterstofnet.eu/_asset/_public/publicaties/INN2POWER-All-notions-Summer-online.pdf)
- International Energy Agency. (2025, September). *Hydrogen production and infrastructure projects database*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-production-and-infrastructure-projects-database>
- Jang, D., Kim, K., Kim, K.-H., & Kang, S. (2022). Techno-economic analysis and Monte Carlo simulation for green hydrogen production using offshore wind power plant. *Energy Conversion and Management*, 263, Article 115695. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115695>
- Jiang, H., Xiong, L., Chen, W., Geng, D., & Xu, B. (2026). Offshore wind-to-hydrogen production: Technical pathways, challenges, and prospects. *Applied Sciences*, 16(1), Article 211. <https://doi.org/10.3390/app16010211>
- Magacho, G., Espagne, E., & Godin, A. (2023). Impacts of the CBAM on EU trade partners: Consequences for developing countries. *Climate Policy*, 24(2), 243-259. <https://doi.org/10.1080/14693062.2023.2200758>
- Mudhifar, M. A. H., Zayed, M. E., & Rehman, S. (2025). Offshore wind-to-green hydrogen: A comprehensive review on current challenges, techno-economic analyses, environmental implications, and potential risks. *Process Safety and Environmental Protection*, 201, Article 107631. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.107631>
- Niermann, M., Timmerberg, S., Drünert, S., & Kaltschmitt, M. (2021). Liquid organic hydrogen carriers and alternatives for international transport of renewable hydrogen. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, Article 110171. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110171>
- Oni, B. A., Sanni, S. E., & Misiani, A. N. (2025). Green hydrogen production in offshore environments: A comprehensive review, current challenges, economics and future-prospects. *International Journal of Hydrogen Energy*, 125, 277-309. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.03.429>
- Ramakrishnan, S., Delpisheh, M., Convery, C., Niblett, D., Vinothkannan, M., & Mamlouk, M. (2024). Offshore green hydrogen production from wind energy: Critical review and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 195, Article 114320. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114320>

- Rezaei, M., Akimov, A., & Gray, E. M. (2024). Economics of renewable hydrogen production using wind and solar energy: A case study for Queensland, Australia. *Journal of Cleaner Production*, 435, Article 140476. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140476>
- Taylor, M., Strezov, V., Best, R., Pettit, J., Cho, H., Hammerle, M., & Beringen, E. (2025). Offshore renewable hydrogen potential in Australia: A techno-economic and legal review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 152, Article 149923. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.06.113>
- World Energy Council. (2021). *Working paper: National hydrogen strategies*. [https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Working\\_Paper\\_-\\_National\\_Hydrogen\\_Strategies\\_-\\_September\\_2021.pdf](https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Working_Paper_-_National_Hydrogen_Strategies_-_September_2021.pdf)