

光電化學產氫技術之成本分析

廖偉辰

國家原子能科技研究院 綜合企劃處研發策略室

2023/10

隨著溫室氣體排放問題日益嚴重，開發新能源以取代化石燃料使用是重要課題，氫用於電力部門可減少碳排，還可大規模且長時間儲存，於需要時可即時提供電力，以提高電網於間歇性發電占比高時的可靠度，也可用於運輸、工業、住商等需求部門之減碳行動，因此被視為達成 2050 淨零排放之關鍵角色。傳統的煤、天然氣重組產氫會造成大量碳排，因此逐漸被零排放技術，如利用風能、光能等再生能源於電解水產氫技術取代，光電化學(Photoelectrochemical, PEC)產氫技術是一種使用光能的零排放技術，原理是利用太陽光照射可吸收光子的半導體電極，進而產生電化學反應產氫，近幾年逐漸受到重視，本文就其成本進行分析。

壹、比較 PEC 均化產氫成本及成本結構分析

PEC 是利用太陽光照射可吸收光子的半導體電極產生電化學反應，該反應發生於 PEC 電池中，PEC 電池是該技術最核心的組件，目前常見的設計有三種[1]，分別為 Zero liquid-solid-junction、One liquid-solid-junction、Two liquid-solid-junctions，Wouter A. de Jong (2018)[2]及 Alexa Grimm 等人(2020)[3]以 One liquid-solid-junction 型式的電池進行 PEC 產氫技術的成本分析，One liquid-solid-junction 型式如下圖 1 所示。電池中間之分隔膜(membrane)將陰(cathode)、陽(anode)兩極分開，陰極光敏感層(photoactive layers)與空氣接觸並吸收太陽光子，於陽極產生氧，陰極產生氫。

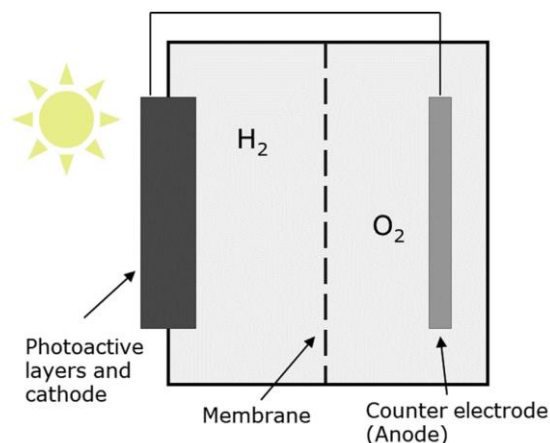


圖 1 One liquid-solid-junction 型式電池示意圖[3]

根據文獻技術經濟分析結果顯示，太陽幅照度、STH(solar to hydrogen)效率、電池成本、電池年限是影響 PEC 成本重要因素。PEC 產氫需要吸收太陽光子，因此若要降低成本除了提高將太陽能轉為氫能的 STH 效率外，提高太陽幅照度也是重要因素，此外 PEC 產氫使用酸或鹼做為電解質會影響 PEC 電池的年限，所以抗腐蝕的技術與最核心組件 PEC 電池成本有重要關係。

Wouter A. de Jong (2018))[2]結果顯示，2020 年 PEC 的均化產氫成本(LCOH)為 10.14 美元/kgH₂(太陽幅照度 6.19kWh/m²/day、STH 效率 10%、電池年限 7 年、電池成本 154 美元/m²年等條件下)，光電產氫(PV-E)的 LCOH 為 7.75 美元/kgH₂。PEC 未來在樂觀條件下，如 STH 效率 15%、電池年限 12 年、電池成本 88.5 美元/m²等，其未來成本有機會降為 4.64 美元/kgH₂。

Alexa Grimm 等人(2020))[3]計算出 PEC 之 LCOH 8.43 美元/kgH₂ (太陽幅照度 6.19kWh/m²/day、STH 效率 10%、電池年限 7 年、電池成本 154 美元/m²等條件下)，PV-E(太陽光電產氫)之 LCOH 6.22 美元/kgH₂，成本結構如圖 2。在 PEC 成本結構中，最高為電池成本，4.61 美元/kgH₂ 約占總成本的 55%(成本結構於圖 2 藍色柱狀)，其中又以分隔膜(Membrane)和光敏物質(Photoactive)占比最大，兩者總和約占電池成本的 60%。占比第二(27%)為與硬體設備無關的 Soft-BOS，包含意外事件、PEC 電池安裝費等。運維成本(OPEX)占 10%，包含氣體壓縮機、

氫感測器等電池周遭硬體設備的 Hard-BOS 占 7%。若與 PV-E 之成本結構相比較，PEC 總成本較高是由於 PEC 電池 4.61 美元/kgH₂ 遠高於 PV-E 電解槽(Electrolyzer) 的 1.8 美元/kgH₂ 所致，而前述腐蝕問題影響電池年限是造成差異大的主要原因。

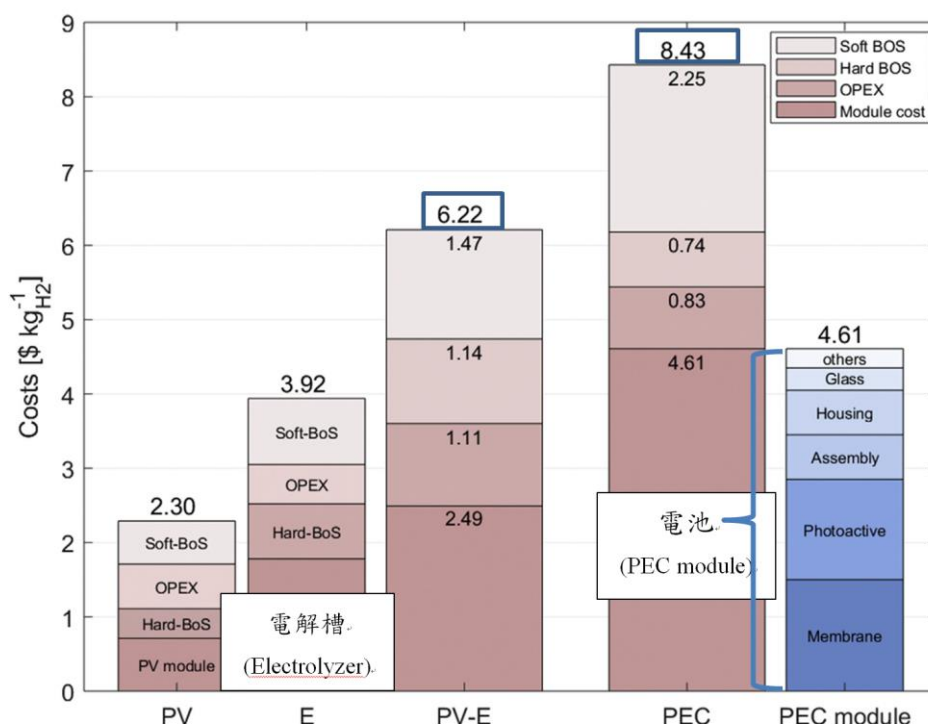


圖 2 PEC 與 PV-E 產氫 LCOE 成本結構圖[3]

Laurens S.F. Frowijn, Wilfried G.J.H.M. van Sark(2021)[4]計算出荷蘭 PEC 之 LCOH 18.98 美元/kgH₂ (太陽幅照度 3.61kWh/m²/day、STH 效率 10.6%、電池年限 5 年等條件下)，未來若太陽幅照度提高到 4.94kWh/m²/day，同時在 STH 效率 16%、電池年限 7 年等條件下，LCOH 可下降至 6.05 美元/kgH₂。Laurens S.F. Frowijn, Wilfried G.J.H.M. van Sark, (2021)[4]有將成本(18.98 美元/kgH₂)和上述 Alexa Grimm 等人(2020)[3]的成本 8.43 美元/kgH₂ 比較，說明荷蘭成本較高是因為荷蘭太陽幅照度僅 3.61kWh/m²/day，低於文獻[3]中的 6.19 kWh/m²/day，由此可知太陽幅照度是影響成本重要因素。

貳、與其他產氫成技術成本比較

比較國際報告產氫技術成本，IRENA(2019)[5]2020 年太陽光電產氫平均是 6.6 美元/kgH₂，最佳案例是 3.2 美元/kgH₂；風電產氫(含陸域及離岸)平均是 4.2 美元/kgH₂，最佳案例是 2.6 美元/kgH₂，整體再生能源產氫平均為 5.5 美元/kgH₂，化石燃料產氫介於 1.5-2.5 美元/kgH₂(配備 CCS)。IEA(2022)[6]結果顯示，2021 年風電(含陸域及離岸)及光電產氫 LCOH 平均約為 6 美元/kgH₂，化石燃料產氫介於 1.8-3 美元/kgH₂(配備 CCS)。雖然目前 PEC 成本高於其他技術，但未來若可降為 4.64 美元/kgH₂(也就是太陽幅照度 6.19kWh/m²/day 下、STH 效率 15%、電池年限 12 年、電池成本 88.5 美元/m² 等條件下)，則接近部分再生能源產氫技術成本。

Figure 14: Hydrogen production costs from solar and wind vs. fossil fuels

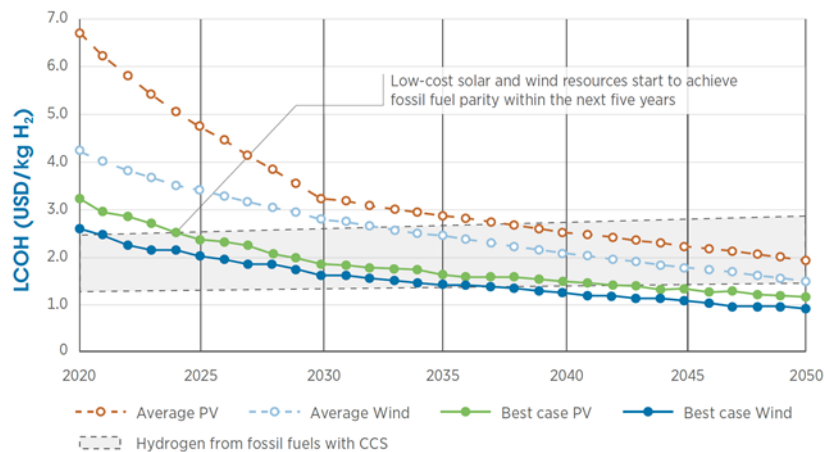


圖 3 IRENA 各種產氫技術成本推估

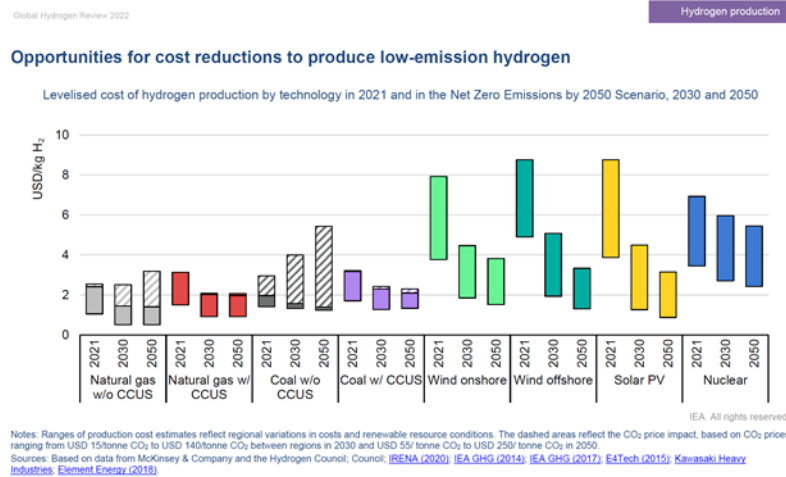


圖 4 IEA 各種產氫技術成本推估

參、結論

太陽幅照度、STH 效率、電池年限、電池成本是影響 PEC 成本重要因素。太陽幅照度 3.61kWh/m²/day 條件下，目前 PEC 之 LCOH 18.98 美元/kgH₂ (STH 效率 10.6%、電池年限 5 年等條件下)。太陽幅照度較高 6.19kWh/m²/day 下，LCOH 約 8.43-10 美元/kgH₂ (STH 效率 10%、電池年限 7 年、電池成本 154 美元/m² 等條件下)，未來在樂觀條件下，如 STH 效率 15%、電池年限 12 年、電池成本 88.5 美元/m² 等，有機會降為 4.64 美元/kgH₂。

IEA 與 IRENA 國際報告指出，2020 及 2021 年再生能源產氫(含太陽光電與風電等) LCOH 平均約 5.5-6 美元/kgH₂，化石燃料產氫(配備 CCS)介於 1.5-3 美元/kgH₂。雖然目前 PEC 成本高於其他技術，但未來若可降為 4.64 美元/kgH₂，則接近部分再生能源產氫技術成本。

參考文獻:

1. Bugra Turan, Jan-Philipp Becker, Felix Urbain, Friedhelm Finger, Uwe Rau, Stefan Haas. (2016). Upscaling of integrated photoelectrochemical water-splitting devices to large areas. *Nature Communications*,7, 12681-12689
2. Wouter A. de Jong . (2018). PEC versus PV-E A Future Potential Comparison. Master Thesis
3. Alexa Grimm, Wouter A. de Jong, Gert Jan Kramer. (2020). Renewable hydrogen production: A technoeconomic comparison of photoelectrochemical cells and photovoltaic-electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*,45, 22545-22555
4. Laurens S.F. Frowijn , Wilfried G.J.H.M. van Sark. (2021). Analysis of photon-driven solar-to-hydrogen production methods in the Netherlands . *Sustainable Energy Technologies and Assessments*,48,101631-101647
5. HYDROGEN: A RENEWABLE ENERGY PERSPECTIVE. IRENA(2019)
6. Global Hydrogen Review 2022.IEA(2022)