

## 本月專題

### 綠氫的發展與許諾

謝智宸<sup>1</sup>

#### 摘要

我國《溫室氣體減量及管理法》(簡稱「溫管法」)實施五年以來，面對全球暖化議題持續增溫及國際氣候行動之緊急呼籲，原法內容已顯不足因應，而於去(2020)年底由環保署提出修法草案並將於今年啟動修法程序。其中眾所矚目，呼應國際間已有逾百國家提出淨零碳排的目標與期程，我國刻正積極評估並凝聚共識，希冀研訂符合我國國情及國際趨勢之減排路徑與目標。

無論入法與否，零碳排將是各國因應氣候變遷問題善盡世界公民責任的終極目標，電力部門的零排碳並非零碳社會的最終結果，而僅是最起碼的要求，也是路徑中最重要首站，運輸部門的動力及工業部門的熱能才是真正未來零碳社會達成與否的關鍵。由於氫原子在自然界存量非常豐富，其質輕、易燃、儲運可行且零排碳的特性，遂成為可以作為目前在技術上碳排放減量相對困難部門的替代燃料或原料，甚至可做為儲存能量的介質，世界主要先進國家政府及產業廠商皆已陸續投入研發資源甚至小規模商業應用，似乎已看到了氫能對於未來貢獻於零碳社會的許諾。本文也將藉由德國及南韓政府與民間對於綠氫技術發展策略之介紹，提供我國綠氫未來發展路徑之參考與借鏡。

#### 一、前言

氫雖然是潔淨能源，但製造氫的過程卻是耗能且排碳的。灰氫(grey hydrogen)係透過目前最常見的生產方式—甲烷蒸氣重組法(Steam methane reforming, SMR)得到，由於甲烷屬於化石能源，故製造過程亦伴隨二氧化

<sup>1</sup>財團法人台灣綜合研究院 研究員

碳的排放；棕氫(或褐氫，brown hydrogen)是經由煤炭氣化產生，由於煤較天然氣含碳量更多，製造過程排放更多的二氧化碳；藍氫(blue hydrogen)即是灰氫的製程中加上碳捕捉封存或利用的技術(CCUS)，雖減少了二氧化碳的排放，但現行碳捕捉技術尚未能 100%補集碳排放，且封存的碳也有洩漏的風險。而本文漫談的主角—綠氫(green hydrogen)，係利用再生能源例如風力及太陽能等所產生的電力電解水所產生，過程中完全不排碳。

## 二、氫能的用途與運輸

氫或氫基燃料(hydrogen-based fuels)提供所有不容易有去碳化替代方案的產業及能源服務需求，例如化工製程、鋼鐵製程、長程運輸等一個許諾的未來；同時在現今大量間歇性再生能源電力併網導致供需平衡不確定的環境中，透過再生能源電力電解水以產製氫，生產氫的水電解工廠因可快速起停運作，故可配合再生能源間歇性發電的特性，在太陽光或風力較強時，消費系統內過多的發電量，減緩再生能源併網的衝擊而使電網穩定，所以也是極少數可以大量地、長時間調節供需的儲能技術。目前常見的儲能設備主要以化學電池為主，尚不及能大量且長時間儲存電能，例如今(2021)年 2 月德州酷寒氣候造成大規模停電事件，儲能電池即無法發揮有效的緩解功能。

除了輸電網路外，經由油氣管線甚至越洋船運，再生資源較豐沛地區所生產的能源可以透過轉換成氫或氫基燃料的形式，長距離運送至再生資源較稀少地區。氫能可以從不同的能源類別轉換得之，包括傳統的煤炭、石油、天然氣及核能等，但現今最具效益的應屬再生能源電力的轉換；氫也是重要的石化進料，並且已經在化學工業中大規模使用，可以衍生出許多不同的次級產品(secondary products)之基本原料，例如氨、甲醇甚至是塑料等，另在與二氧化碳結合後，成為合成烷基燃料以提供運輸載具尤其是長程且負重運輸如長程客運及貨運卡車和船舶等作為能源使用，可以說氫既是能量載體，也可以是化學形式的能量存儲。

氫可以透過現有的天然氣管等油氣管線系統輸送到需求端，是氫能在應用面上具有的優勢，甚至在燃料轉型的過程中，現有某些型式的天然氣管和

基礎設施也可以將氫氣與天然氣高達 20% 的混合比例同時輸送，在化石能源逐漸退場之際，既有的油氣管線運輸業與製造業因此嗅到了新的商機。

### 三、工業部門的氫能應用

#### (一)石化業

傳統的化學工業係以化石能源如石油或天然氣作為原料及製程中所需熱能或壓力來源的能源，長久以來被視為無可取代的排碳能源必要之惡。然近來已有眾多學研機構如美國勞倫斯柏克萊國家實驗室(Lawrence Berkeley National Laboratory)、加州理工學院(Caltech)、丹麥科技大學(Technical University of Denmark in Kongens Lyngby)等及石化業跨國企業如德國西門子(Siemens)、荷蘭皇家殼牌(Shell)石油、美國雪佛龍(Chevron)石油、法國道達爾(Total)石油等投入技術研發，將理論可行之分子分離(split molecules)方法，將水分子(H<sub>2</sub>O)、二氧化碳分子(CO<sub>2</sub>)、氧分子(O<sub>2</sub>)及氮分子(N<sub>2</sub>)…等分解為個別的碳(C)、氫(H)、氧(O)、氮(N)…等原子，再將各類原子合成為所需之化學原料。前端電解所需的電力係來自太陽能及風力等再生能源所產生，後端化學合成製程所需之熱能與壓力等能量來源亦皆來自綠氫及其所衍生之氫基燃料。因此，氫能確實可以在全球能源轉型至淨零排碳以抗暖的進程中扮演遊戲改變者(game changer)的角色。

#### (二)鋼鐵業

在鋼鐵製程方面，目前世界主流鋼廠主要以氫能加上碳捕捉及利用(CCUS)技術作為其達成碳中和之規劃重點，開發及引進氫能煉鐵包括「高爐噴吹氫氣」與「氫氣直接還原鐵」等技術。德國 Thyssenkrupp 鋼鐵公司利用氫氣做為燃料及還原劑，減少高爐碳的使用及 CO<sub>2</sub> 排放，達到低碳高爐生產鐵水的目的，已於 2019 年 11 月成功啟動高爐單支鼓風嘴氫氣噴吹測試，取代傳統的粉煤噴吹，預定於 2023 年完成 3 座高爐氫氣噴吹的改造；其他德國同業如 SALZGITTER、ArcelorMittal 也都有類似氫能運用在鋼鐵製程的試驗及實踐時程。

### (三) 小結

由於目前綠氫的應用尚未普及，因此相關生產、運輸、儲存等技術雖已有小規模商業化，然規模經濟效果尚未臻達成(IEA, 2020)，導致成本仍居高不下，較難以取代既有的化石能源系統；然而，一如電動載具的推廣具有的雞生蛋迷思(Chicken and Egg Riddle)，充電基礎設施的建設必須與電動車的普及率相互搭配，充電設施不足將阻礙電動車的使用和行銷與推廣，延長電動車研發與製造所需的規模經濟時程；反之，電動車普及率不足亦將影響充電基礎設施的投資意願。職是之故，綠氫的應用與發展由於攸關淨零排碳目標達成甚鉅，如前所述是能源轉型終極的遊戲改變者(game changer)，更有時程上的急迫性，尤其應當在產業鏈之供給側和需求側之原物料、產品、設施、技術及商業模式的共伴效應縝密擘劃和實踐以共享其所創造的價值。

## 四、綠氫的國際觀

近年來，由於主要國家及大型跨國企業廠商積極投入資源，使得綠氫技術成本可行已逐漸露出曙光，然迄今主要綠氫發展策略仍偏重於供給端，績效指標表現在電解槽的佈建數量(電功率單位 MW 或 GW)或綠氫的年產能(重量單位 t 或 Mt)，需求端除了氫燃料電池技術研發投入較多而相對成熟外，在石化業及鋼鐵業等原料及製程的創新轉換則仍處於萌芽階段。

顯而易見，透過政府間或國際組織間之國際合作及私部門商業之經營連結，擴散氫能技術應用深度及廣度，將是綠氫發展的全球策略。全球知名的能源智庫伍德麥肯錫(Wood Mackenzie)預測，由於成本陡降趨勢下愈顯規模經濟效益的再生能源發電技術，將使得綠氫的技術及商業發展在 2040 年之前符合其成本效益，看來雖仍有一段長遠的路要走，但各先進國家政府及民間相關企業不乏積極推動綠氫發展策略者，以迎接氫經濟時代的來臨。以下簡約介紹歐洲的德國及亞洲的南韓綠氫發展現況及其規劃策略藍圖的思維及作法，做為我國擬定氫能發展策略之參考。



### (一)德國推動綠氫發展的作法與啟示

德國於 2010 年時提出能源轉型政策(Energiewende Policy)，宣示將於 2050 年達成溫室氣體減量相較於 1990 年減少 80-95%的水準，並設定了每十年一期的減量目標，但並無類似英國碳預算般相對完備的檢核、調整與執行的機制，多僅強調強化電網的現代化以利大力發展的再生能源電力的併網。2011 年日本發生福島核災，德國政府斷然提出 2022 年前將全數核能機組除役的政策，但並無修正上述能源轉型政策的減碳時程與目標，而為填補當時立即停役核能機組的電力，大量使用褐煤發電而導致無法達成原預定時程的減碳目標。由於燃煤發電比重持續居高不下，也影響了德國作為全世界發展再生能源先驅的典範地位，德國朝野、中央及地方各界開始了減煤、除煤的討論及諮詢程序，其中重要的議題除了煤礦及電廠相關產業及就業生態現況的衝擊因應外，取代燃煤發電的電力來源也是焦點議題，近來爭議不斷攸關美、德雙邊關係之北溪二號天然氣輸送管(Nord Stream 2)事件，就是此一能源轉型架構下的替代方案之一，雖然也有能源地緣政治的考量，仍不啻為德國再次展現減碳決心的表現。

由於憂心於自詡居全球領先地位的氫能技術，在亞洲國家如中國大陸、日本和南韓近年的大力發展下，原有優勢逐漸式微。德國自 2019 年開始密集討論基於現況基礎下的國家氫能發展策略，此發展策略主要揭示德國在近期的未來將以「藍氫」為非電力部門脫碳化的主要途徑，該年 11 月正式公布國家氫能策略架構及內容，其後在隔年(2020)第一版草案出爐，重點放在氫能在工業技術與應用和研發相關領域之主張，尚未涉及政策議題，而氫能的範疇卻超脫了當初僅有「藍氫」的範疇，首次包括了「綠氫」的應用與技術發展的主張，甚至此版草案討論到最後，竟有提出「綠氫」才是德國未來氫能發展唯一選項之主張。

2020 年 6 月德國內閣會議正式通過《國家氫策略》(The Federal Government's National Hydrogen Strategy)，旨在為德國氫能的生產和使用制定一個整體的架構，雖然對於氫能的發展路徑仍存在爭議，但公布的策略內

容仍堅持強調來自再生能源的「綠氫」是促進其能源轉型目標達成，以及確保德國卓越的工業技術水準可以維持全球市場競爭優勢的必要選項，而搭配 CCUS 技術來自天然氣轉化的「藍氫」，只是過渡時期的替代途徑。今(2021)年 1 月德國修訂再生能源法(Renewable Energy Act, EEG)除了強調促進再生能源發電以符合歐盟新修之 2030 年減排目標外，也將綠氫生產免除再生能源附加稅 (renewables levy)繳納義務，以利綠氫市場的發展。預期德國將陸續全面性地在能源及財政相關政策及法規上，擬訂更多的鼓勵措施，給予相關企業及利害關係人具體明確的發展承諾，以降低綠氫產業投資風險。

德國政府甚至稱《國家氫策略》為德國無論在能源轉型抑或抗暖政策上的「量子躍進」("quantum leap")(更甚於傳統慣稱之「蛙跳」"frog leap")，氫能的發展與應用將使得再生能源電力生產及溫室氣體減排，從"量"的觀點及績效衡量，躍升至兼顧"質"的層次。尤其德國深切了解淨零排碳社會及氫經濟應具全球視野與行動，才能共同解決無法地域切割的全球氣候暖化問題，故在擬訂相關氫能發展策略時，不惟僅側重其國內市場供需及產業鏈的建立，亦兼具國際產業分工及貿易市場思維佈局，策動國際聯合發展機制讓參與國家分享技術研發成果以創造共榮。

## (二)南韓的策略與作法

南韓自 1988 年即開始進行氫能相關基礎科技研究，並於 2000 年導入系統工程，2007 年南韓浦項鋼鐵 (POSCO)成立 Korea Fuel Cell Co., Ltd，為其燃料電池製造之濫觴；2009 年提出「綠色新政 (Green Deal)」計畫；2012 年的再生能源配額制度(Renewable Portfolio Standard, RPS)；2017 年作為 RPS 配套措施的再生能源憑證(Renewable Energy Certificate, REC)制度，均明確將氫能產業發展列為低碳策略重要之一環。在民間企業方面，除了前述浦項鋼鐵成立燃料電池製造廠外，現代汽車(Hyundai Motor Company)於 2013 年即成為世界上首家商業化生產氫燃料電池汽車的公司，2019 年並宣布「Fuel Cell Vision 2030」計畫，與日本豐田(TOYOTA)汽車爭鋒目標 2030 年搶佔 25%全球氫燃料電池車 (Fuel Cell Electric Vehicles, FCEV) 市場。斗山(Doosan)集團

接替浦項鋼鐵在固定型(stationary)之電廠級燃料電池市場成為南韓的領導品牌，當今在全球約有 35% 的市占率，其他固定型燃料電池應用於住宅及商業部門的領域也逐漸擴大當中，可以說氫燃料電池技術在南韓正處於蓬勃發展的階段，也是作為南韓在發展其他更先進氫能燃料技術的奠基石。

為了達成南韓 2015 年在巴黎協議中承諾的國家排放減量目標，文在寅總統在 2017 年推出「新及再生能源 2030 年」(New and Renewable Energy 2030)計畫，欲將新及再生能源電力提升至佔總發電量配比 20% 之目標，南韓遂將氫列為主要的新及再生能源。為了有系統、有效率地促進氫工業的發展，南韓政府於 2019 年公布氫經濟藍圖(the Hydrogen Economy Roadmap)，宣示南韓將戮力成為全球氫能技術領導國家，包括 2040 年前讓燃料電池汽車 590 萬輛、及氫燃料電池巴士 6 萬輛上路，並且建置 1,200 座加氫站；也在 2040 年前達成 1,500 萬瓩電廠級的燃料電池發電設備，和 210 萬瓩應於與住宅及商業部門的燃料電池。

去(2020)年 2 月南韓國會正式通過《促進氫經濟和氫安全管理法》(以下簡稱「氫法」)，並於頒布一年後的今(2021)年年初正式生效。去(2020)年 7 月因應新冠疫情影響所提出的經濟刺激方案「綠色新政(Green New Deal)」，匡列了 74 兆韓圓(約 660 億美元)，預備在 2025 年前投入包含綠氫在內的綠色公、私合作發展專案計畫，使南韓大步邁向能源轉型的長程目標。「氫法」的實施可以確保政府對氫能產業和氫經濟的發展在行政和財政上提供合法的資源，包括針對氫能新創企業的育成、補助、人才培育等，以及在國家氫能產品、設施標準化制訂等產業基礎建設奠定法律基礎。

以「氫法」的實施為契機，南韓民間領域的投資將更加活躍。根據英國國貿部(The UK's Department for International Trade, DIT)今(2021)年 1 月公布的評估報告，南韓氫法實施將促進南韓氫能市場規模從 2020 年的 125 億美元兩倍成長至 2030 年的 239 億美元，成長的動能主要來自民間企業如現代(Hyundai)集團及斗山集團等的投資；各級政府藉由氫法的實施，可透過財

政預算編列以及設置專責機構，更積極並系統性地開發與建立氫氣生產、輸送及加氫站等氫能產業基礎建設。

南韓的綠氫發展在短、中、長期策略上有其務實且漸進規畫的特色，雖然南韓可以說是當前世界上發展及應用氫能最積極的國家，但無論是工業熱能或發電及燃料電池汽車所需的氫氣，基於成本效益的考量其來源依然絕大多數來自於灰氫，在符合當前成本效益的前提下超前部署，先精進及擴大氫能在各領域的應用技術及普及性，以縮短未來綠氫所需規模經濟的預計時程；中、長期循序透過大量資源的投入與其他利害關係人的極積參與，漸次發展綠氫產、運、儲技術及標準，最終完成氫經濟的實現。南韓務實與漸進式的氫能發展藍圖，值得我國推動相關策略參考與借鏡。

### (三)小結

由於今(2021)年 COP26 召開在即，歐盟、德國、荷蘭、挪威、葡萄牙及西班牙等國紛紛在去年公布國家的具體氫能發展策略細節，希望在未來 10 年內可以將氫能的生產達到規模經濟的境界。若以 2030 年氫能的生產規模為發展目標，全球最大規模生產國家分別是歐盟 40GW、法國 6.5 GW、德國 5 GW 及英國的 5 GW，但英國尚未提出具體的發展策略與藍圖。上述國家甚至在一年前都尚未有具體的氫能策略，中國大陸雖已在再生能源技術及應用發展上卓有成就，然迄今年也才正式提出 2060 年之前達成碳中和目標；美國拜登總統年初上任後才 180 度翻轉前任川普政府漠視氣候議題的態度，積極投入龐大資源於振興受新冠疫情影響而萎靡不振的經濟與就業外，也宣示美國將重返包含綠能在內先進科技全球領導的地位，積極建立美國在國際氣候政治舞台上從未有的典範及牛耳。然氣候暖化影響所及為全球性範疇，氫能技術雖將創造或翻轉現況成為一個全新的經濟活動型態，但淨零排碳成敗攸關人類文明存續，遊戲改變者氫能技術的國際合作發展與共享模式終將成為巴黎協議成敗之重要關鍵。



## 五、結論

氫經濟將是未來淨零排碳願景達成時的實踐情境，而綠氫是終極實踐者。然而在實踐的過程，成本與技術因素將使得藍氫成為過渡時期不可或缺的替代技術，而現今已存在的灰氫製程與技術，可以做為過渡至藍氫階段前重要的技術精進試驗場域，讓氫能在綠氫技術尚未臻成熟前，逐步擴大其應用領域諸如氫燃料電池和其他減排不易的工業製程等，促使各項氫能技術研發學習曲線陡升和經濟規模早日達成，以順利銜接綠氫時代的來臨。

從德國及南韓的經驗與策略給我國的啟示，應是其將「氫能」視作一項可以引發一連串新經濟活動並創造價值的經濟生態系統，包括氫的生產與運輸和儲存之上、下游垂直產業鏈技術、各項氫基產品橫向應用網(發電、石化、煉鋼、運輸載具、其他商業及住宅能源服務需求等)、安全標準與法規制度，甚至增進其經濟效益的商業模式(business module)等，均係此一生態系統不可或缺的元素，並且有其相互間的關聯性，必須結合政府與民間產、官、學、研、立法者以及各預期利害關係人(stakeholder)集思擘劃發展路徑，鼓勵創新並勇於推動試行或示範計畫，從做中學(learning by doing)過程中累積經驗，才能逐步達成氫經濟的實現，這也是綠氫對於未來零碳社會的許諾。

再者，我國在構建淨零排碳策略及規畫路徑同時，亦可透過區域經濟合作組織或產業同盟途徑，甚至可能在 COP26 後形成之淨零排碳技術擴散相關倡議與機制，積極開拓共同參與開發的機會。

## 參考文獻

1. 「韓國氫經濟發展概況—氫氣產輸儲、氫能車與燃料電池的發展目標、策略與現況，林韋廷、邱虹儒」，工業技術研究院綠能與環境研究所
2. 「氫也有藍綠惡鬥，何謂藍氫何為綠氫話從頭」，科技新報 2020/7/14，連結網址：<https://technews.tw/2020/07/14/what-exactly-is-green-hydrogen/>
3. 「Can the world make the chemicals it needs without oil? 」，Robert F. Service, 2019/9/19, <https://www.sciencemag.org/news/2019/09/can-world-make-chemicals-it-needs-without-oil>
4. 「Energy Technology Perspectives 2020」，IEA，February 2021
5. 「German hydrogen strategy aims for global leadership in energy transition」，Sören Amelang, 2020/6/10, <https://www.cleanenergywire.org/news/german-hydrogen-strategy-aims-global-leadership-energy-transition>
6. 「German steelmakers embark on decarbonisation course」，2021/3/27, <https://www.hellenicshippingnews.com/factbox-german-steelmakers-embark-on-decarbonisation-course/>
7. German parliament passes renewables reform, paves way for hydrogen ramp-up, 2020/11/17, <https://www.cleanenergywire.org/news/german-parliament-passes-renewables-reform-paves-way-hydrogen-ramp>
8. 「Germany's National Hydrogen Strategy」，17 Jun 2020, Sören Amelang, <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/germanys-national-hydrogen-strategy>
9. Green hydrogen: an alternative that reduces emissions and cares for our planet, <https://www.iberdrola.com/sustainability/green-hydrogen>, 2021/3/9
10. 「Hydrogen in the German Energy System (I): The National Hydrogen Strategy」，[https://energycentral.com/c/gn/hydrogen-german-energy-system-i-national-hydrogen-strategy?utm\\_medium=eNL&utm\\_campaign=gen\\_net&utm\\_content=334775&utm\\_source=2021\\_03\\_16](https://energycentral.com/c/gn/hydrogen-german-energy-system-i-national-hydrogen-strategy?utm_medium=eNL&utm_campaign=gen_net&utm_content=334775&utm_source=2021_03_16)
11. 「Hydrogen production costs to 2040: Is a tipping point on the horizon?」，<https://www.woodmac.com/our-expertise/focus/transition/hydrogen-production-costs-to-2040-is-a-tipping-point-on-the-horizon/>
12. 「The Colors of Hydrogen – Brown, Grey, Blue and Green – Think About It」，<https://utilityanalytics.com/2020/10/the-colors-of-hydrogen-brown-grey-blue-and-green-think-about-it/>

13. 「The National Hydrogen Strategy」, Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, June 2020
14. The Hydrogen Economy South Korea Market Intelligence Report, January 2021, DIT Seoul, British Embassy Seoul,  
<https://www.intralinkgroup.com/Syndication/media/Syndication/Reports/Korean-hydrogen-economy-market-intelligence-report-January-2021.pdf>
15. 「What's the biggest role for hydrogen in a clean energy economy? It depends who you ask」, 2021/3/25, <https://www.utilitydive.com/news/whats-the-biggest-role-for-hydrogen-in-a-clean-energy-economy-it-depends/597316/>
16. 「WoodMac on Green Hydrogen: It's Going To Happen Faster Than Anyone Expects」, 2021/2/5, <https://www.greentechmedia.com/articles/read/woodmac-on-green-hydrogen-its-going-to-happen-faster-than-anyone-expects>