

出國報告（出國類別：訪問）

「淨零排放專案計畫(氫能)」研究團隊赴德國
科研機構進行國際合作交流案

服務機關：國科會

姓名職稱：李志鵬處長、莊慶安副研究員

派赴國家/地區：德國

出國期間：113 月 3 月 2 日至 113 年 3 月 10 日

報告日期：113 月 4 月 8 日

國家科學及技術委員會補助專題研究計畫執行出國參訪及考察

心得報告

日期：113 年 03 月 02 日

計畫名稱	淨零減碳專案計畫(氫能)		
出國人員 姓名	<ol style="list-style-type: none"> 1. 蕭述三 2. 曾重仁 3. 丁志明 4. 蔡豐羽 5. 楊東翰 6. 蘇威年 7. 洪緯璿 8. 楊重光 9. 陳立業 10. 林育正 11. 李志鵬 12. 莊慶安 	服務機 構及職 稱	<ol style="list-style-type: none"> 1. 國立中央大學機械工程學系教授 2. 國立中央大學能源工程研究所教授 3. 國立成功大學材料科學及工程學系教授 4. 國立臺灣大學材料科學與工程學系暨研究所教授 5. 教授國立清華大學化學工程學系(所)助理教授 6. 國立臺灣科技大學應用科技研究所教授 7. 國立中央大學材料科學與工程研究所教授 8. 國立臺北科技大學化學工程與生物科技系(所)教授 9. 國立中央大學化學工程與材料工程學系教授 10. 國立清華大學化學工程學系助理教授 11. 工程技術研究發展處處長 12. 工程技術研究發展處副研究員
出國時間	113 月 3 月 2 日 至 113 年 3 月 10 日	出國地 點	德國

一、目的

為了達成淨零碳排之目標，世界各國陸續公布前瞻能源開發相關政策，德國很早就開始布局氫能作為未來的燃料，以促擺脫對化石燃料的依賴，2000年生效的《再生能源法》(EEG)，使德國成為第一個大推再生能源的主要經濟體。德國更在2020年6月通過「國家氫能戰略」，積極推展氫能科技。我國「2050淨零排放路徑及策略總說明」已於111年3月30日公布，並輔以「十二項關鍵戰略」來整合跨部會資源，制定行動計畫，氫能即為其中之重要關鍵戰略；國科會淨零排放專案亦於112年7月1日正式執行，針對氫生產、氫儲存、氫應用領域，補助學界執行氫能研究計畫。

112年2月德國聯邦教育研究部(BMBF)部長Bettina Stark-Watzinger訪台，並與台灣簽署「科學及技術合作協議」(STA)，將氫能列為雙方科技合作研究重點之一。台德STA簽訂後，正是我們國家積極與德方進行氫能科技交流的最佳時機，以取得更多的經驗和知識，加速我國在氫能科技的發展，並強化我國在國際上的能見度。此行亦安排回訪BMBF，以了解德國總體氫能政策和發展方向，推動後續雙邊共同研究計畫之進行。

本參訪團由國科會「淨零排放專案計畫」氫能領域召集人蕭述三教授率隊，並召集氫能專案計畫主持人/共同主持人，以及氫能相關之前瞻技術聯盟合作計畫共同主持人一同參與。此行參與之教授/專家在氫能領域中擁有不同的專長，並也已在許多關鍵技術上有豐碩的研發成果，透過此行的參訪交流提升國際競爭力，有更好的未來規劃與發展。本參訪團參訪機構，包含：

1. Forschungszentrum Jülich GmbH
 - Institute of Fundamental Electrochemistry (IEK-9)
 - Institute of Process and Plant Engineering for Chemical Hydrogen Storage (INW-4)
2. Fraunhofer Institute for Environmental, Safety and Energy Technology UMSICHT
3. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
4. Thyssenkrupp groups, Carbon2Chem Project.
5. Forschungscampus Flexible Elektrische Netze, RWTH Aachen

本次參訪的主要目的是與德國 BMBF 進行洽談雙邊國際合作研究事項，透過學術交流和訪問，尋求更深入了解雙邊研發量能與切適的合作主題。

二、參訪及考察過程

1. 3/2-3/3，出發前往目的地(台灣至德國)

2. 3/4(一)：Forschungszentrum Jülich GmbH 研討會

本日行程為拜訪 Forschungszentrum Jülich 進行首日的研討會(圖 1、2)。Forschungszentrum Jülich GmbH 是歐洲最大的研究中心之一，研究聚焦於能源、氣候、生物循環經濟、量子電腦與超級電腦等主題。研究中心裡的基礎電化學研究所(IEK-9)和新成立的永續氫能研究所(INW)於近年大量投入氫能相關之研究，其研究範圍含蓋綠氫的製造、發電與儲存，電化學合成燃料 P2X。

本次的會議開場由臺德兩方的代表輪流報告交流討論，並在會後，安排大家分組參觀 Jülich 的氫能研究相關設施。

首先是荷蘭籍學者 Dr. Bert de Haart 教授介紹“Solid proton conduction electrolysis”工作。整體使用的固態質子傳導電解質 - Y/Yb doped Ba(Ce, Zr)O₃₋₆，系統的工作溫度在 400 - 600 °C。相較於其他低溫的電解系統，其中的一個特點是此系統產生的氫氣是乾燥不帶水氣，對於後續的氫氣儲存、利用有其便利性。目前技術的挑戰在於要有穩定的氧氣極觸媒材、漏電流(leakage current)仍高、還有著放大製程等後續的研究挑戰等。對此，目前 De Haart 的研究團隊的作法是變更設計，使用比較厚的燃料極(陽極)作為結構的支撐以解決。

09:00-09:05	Welcome reception and opening Prof. Eichel Director Institute of Energy and Climate Research (IEK-9: Fundamental Electrochemistry) Forschungszentrum Jülich
09:05-09:10	Greetings from FZJ Dr. Norbert Drewes Head of Corporate Development
09:10-09:30	Dr. Bert de Haart (SPCC)
09:30-09:50	Prof. Chung-Jen Tseng 曾重仁 (SOFC/SOEC)
09:50-10:10	Dr. Lucy Nohl (SOFC/NH ₃)
10:10-10:30	Prof. Chung-Kuang Yang 楊重光 (NH ₃ SOFC/SOEC) Coffee break to 10:50
10:50-11:10	Dr. Dominik Schäfer (SOEC)
11:10-11:30	Prof. Wei-Hsuan Hung 洪緯瑋 (sea water electrolysis)
11:30-11:50	Dr. Hermann Tempel (P2X)
11:50-12:10	Prof. Wei-Nien Su 蘇威年 (P2X/NH ₃)(H ₂ -NH ₃) Lunch to 13:00
13:00-13:20	Dr. Christoph Scheurer (simulation)
13:20-13:40	Prof. Sammy Lap-Ip Chan 陳立業 (H ₂ storage/Simulation)
14:00-17:00	Lab tour—IEK-9, INW (SOFC, NMR, SOEC, Membrane center)

表 1. 台德雙邊研討會議程 (Day 1)

中央大學曾重仁老師報告的題目是“Intermediate temperature solid oxide water electrolyzer for H₂ production (p-SOEL)”，其中包含四個子計畫的內容-其中包含(1) LaSrCoFeO (LSCF)奈米纖維與 NiO 奈米粒子結合的 hierarchical 電極結構。儘管目前仍有漏電流的問題，但正也是未來臺德合作的時可以共同藉由技術的合作交流所解決的題目之一。(2)分子動力模擬(molecular dynamics simulation)，曾教授使用 ANSYS 進行電腦流體模擬(CFD)以及 10kW 的水電解系統性能分析。

第三位 Dr. Lucy Nohl 介紹了使用氫作為燃料的固態燃料電池，或是將氫進行裂解脫氫的相關工作(NH₃ SOFC/SOEC)。另外她也介紹了從氫氣利用或合成上，質子傳導或氧離子傳導固態電解質在燃

料電池上與電解器的操作差異：前者約 500-700 °C 後者則需 700-900 °C。在燃料電池的操作中，前者不會有負反應的發生，但後者在使用氨作為燃料時，會有 NO 等負反應發生。目前都先使用鈕扣型的電解質進行評估，之後再放大為 4x4 (cm²)，或更大的 cell。最後也有提到以海水進行高溫電解產綠氫的構想，其中一般海水中常見的異質陽離子是否會形成沉積、對電極與系統結構產生鈍化、或對於離子傳導過程生何種影響與機制，也將留待後續探討與觀察。上午第四位報告的是北科大楊重光副校長，主要也是關於發展一套中溫可使用氨氣為進料的質子傳導 SOFC 系統。比較特別的是，有形成所謂的 Heusler alloy (X₂YZ)。楊老師團隊過去也有豐富的經驗，早已在多年前成立一家陶瓷材料新創公司，並技轉相關塗層技術。相關工作於今年(2024) 剛發表於 Journal of Power Sources。楊老師團隊擅長於氨氣合成、直接氨氣燃料電池(DAFC, Direct ammonia Fuel cell)、固態離子傳導電解質的 MEA 與 GDE 的設計製備。整體而言，考慮將 NH₃ 作為燃料選擇可以兼顧氨本身的低碳排放與廣泛可用的特性，同時，氨本身也是一種高能量密度的氫源，每單位體積或質量的氨都包含大量的氫。這意味著在相對較小的儲存空間中可以存儲大量的氫，這對於應用於移動應用或需要高能量密度的場合具有優勢，但其中對於負反應的控制與相應的系統構成需要更深入的研究與探討。

IEK-9 的 Dominic Shaefer 博士報告了高溫固態電解器的工作。儘管目標是希望使用海水為原料，但是實際上就目前的進度而言尚未測試過使用真實海水的條件下運行，並實際遇到對於海水中不純物、鹽類等因素對於電解器的後續影響，或是否需要另外搭配海水純化裝置。該團隊主要設計了兩種單電池架構，並分別設計了相應的電堆。值得一提的是，電池使用的鋼材、高溫玻璃陶瓷密封材都是特別開發出來的密封材料，此密封材料在 600 °C 時會出現熔融的現象，並在更高的溫度進行相轉變，同時在電堆壓力下，形成緻密的封裝結構。堆疊壓力約在 1 噸。另外，實際應用中因為 top gas 的組成不確定性，這個團隊的研究重心頗著重於探討操作條件對於電解器效能、穩定性長時間影響。無論是穩態或動態的操作，以及不同的負載條件下，電解器系統的表現。最後，Shaefer 有提到一些在水蒸氣中不純物(carryover)對於電解器的影響，其中又以矽對於觸媒的影響最為巨大。此項研究的潛在核心研究問題是在於是否可以省去海水純化裝置，但能保障電解器與 BOP 系統（例如 steam generator）不至於受到“太嚴重的”劣化。同時建議從材料與電池、steam generator、系統測試端分別測試並對結果進行分別探討。中央大學洪瑋璿教授報告“Advanced catalysis for seawater splitting”，報告中考慮了真實海水與模擬海水中分別對氯化鈉濃度(0.5 M)對於系統的腐蝕影響。同時也運用高熵合金催化劑以提高水電解器系統在實際大電流操作下的穩定性。其中牽涉到電催化反應的優良活性表現以及在長時間運作中各項觸媒元素的損耗狀況與反應中的步驟機制。包含了其中牽涉到水體本身的處理、pH 值得影響，電極表面的表徵以及催化活性觸媒的系統研究。

IEK-9 的 Dr. Hermann Tempel 的簡報介紹了 CO₂ 還原為 CO（或 formic acid）的電解器(flow cell) 設計，此研究中使用銀作為催化劑，同時強調反應器的操作可靠性與可放大性。其中也強調 flow cell 中陰極端電解液的 KHCO₃ 濃度、pH 值、操作條件（流速 sweep gas 壓力）等諸多變因對於系統效能的影響，相關的工作結果也發表在 Green chemistry, 2023, 25, 7794-7806。另外，也探討了薄膜厚度的影響，團隊在此強調如何將 H-cell 的經驗轉移或在 flow cell 中驗證，同時也相當重視系統如何可以穩定操作。簡言之，對於類似電化學電解裝置的實際放大與操作有相當不錯的經驗，也是與我們有所互補的地方。國立臺灣科技大學蘇威年教授則介紹了團隊在加值化陽極氧化反應（例如 IOR, EGOR 等反應）與水電解產氫或 CO₂ 還原反應結合的效率優勢、觸媒設計、以及相應的薄膜材料開發、同步輻射臨場鑑定技術的應用、理論計算在材料篩選與反應機制的應用。最後也有提到 N₂ 還原產氨的初步結果。可以在未來氫的儲存與運輸中實現一種相對安全而且便利的儲存方式，特別是在長距離和大規模運輸方面具有應用價值。此外藉由氨氫之間的能源轉換過程有助於平衡能源供應和需求

之間的時間和空間差異，同時，氮本身也是屬於一種廣泛應用的化合物除了作為氮的儲存和運輸媒介外，它還是一種重要的化學品原料，用於製造肥料、化肥、合成物質等。因此，氮的生產和使用基礎相對豐富，有助於推動氮能技術的應用和普及。陳立業教授介紹了關於儲氮的相關研究。目前用於儲氮的技術包括約 70 MPa 的高壓壓縮、低溫(20 K)下的液化以及固態化合物的吸收。在三種類型的儲氮技術中，固態化合物儲氮似乎是最可行的解決方案，因為與高壓壓縮和液化技術相比，它是一種更安全、更方便的方法。在這方面，金屬氮化物是用於固態儲氮的潛在化合物，並且已經進行了大量的研究來合成具有低吸收/解吸溫度、高重量和體積儲氮密度、良好的性能的低成本金屬氮化物。抗氧化性、良好的可逆性和循環能力、快速的動力學和反應活性以及中等的熱力學穩定性。我們希望藉由氮本身高能量密度的特性，藉由氮能本身來達成可再生能源整合，其中包含運輸和儲存靈活性以及對於清潔能源的發展和可持續能源系統的構建。



圖 1. 台德雙邊研討會 Forschungszentrum Jülich GmbH



圖 2. 台德雙邊研討會(Jülich 入口處合照)

3. 3/5(二)：Fraunhofer UMSICHT 研討會

早上首先前往位於德國 Oberhausen 的 Fraunhofer UMSICHT。

Fraunhofer UMSICHT 為德國的著名的研究機構，該機構性質類似於我國的工研院，著重於市場技術的研發應用。Fraunhofer UMSICHT 致力於可持續能源、環境保護和資源管理等領域的創新研究。而這次參訪主要聚焦於他們的綠氫冶煉技術。

Fraunhofer UMSICHT 在綠氫冶煉技術方面之研究，包括開發高效的電解製氫技術、優化氫氣的儲存和運輸方法，以及將綠氫應用於金屬冶煉等領域的技術。

Fraunhofer UMSICHT 在碳捕捉技術方面也進行了多項研究，探索了各種捕捉方法，其中包括化學吸收、物理吸收、膜分離等技術，以及如何將捕獲的二氧化碳進行安全儲存或進行再利用的方法。

Time	Schedule
09:00	Welcome & organizational remarks about the day @ UMSICHT
09:15	Departure to thyssenkrupp Steel in Duisburg
09:45	Visit @ thyssenkrupp Steel in Duisburg
09:45	Transformation strategy in steel industry @ thyssenkrupp Steel tbd
10:15	Dr. Andreas Menne Presentation of the project Carbon2Chem®
10:45	Lab tour @ Carbon2Chem®-Technology Center
12:00	Departure to Oberhausen
12:30	Lunch
13:30	Presentation of scientific topics for MacGyver Proposal
13:30	H ₂ @ UMSICHT
13:45	H ₂ Project @ Taiwan
14:00	Dr. Andreas Menne NH ₃
14:15	Prof. Jyh-Ming Ting 丁志明 PEM electrolyzer / NH ₃ /P2X
14:30	Q&A, Discussion on working packages
14:45	Coffee break
15:00	Prof. Ulf-Peter Apfel Electrolysis / CO ₂ reduction
15:15	Prof. Tung-Han Yang 楊東翰 Sea water electrolyzer
15:30	Prof. Feng-Yu Tsai 蔡豐羽 H ₂ storage / CCU
15:45	Q&A, Discussion on working packages
16:00	Coffee break
16:15	Dr. Christian Geitner Simulation of Transformation path in Steel Industry
16:30	Prof. Yu-Jeng Lin 林育正 H ₂ for steel/CCU
16:45	Q&A, Discussion on working packages
17:00:	Lab tour @ UMSICHT

表 2. Fraunhofer UMSICHT 參訪及研討會議程

到達 Fraunhofer UMSICHT 之後，便前往位於 Duisburg 的 Thyssenkrupp AG 鋼鐵公司(圖 3)，Thyssenkrupp 參與 BMBF 的 Carbon2Chem 計畫，Carbon2Chem 旨在將工業製程中的二氧化碳轉化為有價值的化學產品。該計畫的目標是將二氧化碳排放轉化為有用的產品，從而實現碳循環利用和減少碳排放的目標。此示範場域中由許多規模實驗室進行測試並在為了在之後投入大規模的生產，而進行各種模擬與測試。其中包含鋼鐵廢氣的處理，將其作為化學品生產的原料以及研究利用鋼廠氣體發電，因為鋼廠氣體中含有大量的 N₂、CO、CO₂ 以及 CH₄、H₂ 等成分，而這些正是許多化學產品的基礎元素。同時，也致力於廢棄鋼材的回收以及製成的改良，希望能夠藉由技術的革新減少在生產過程中碳的用量從根本處降低近似重工業中高汙染以及高碳排放的問題。在此我們了解德國煉鋼廠的能源轉換策略和如何計畫達到最終的淨零排放冶煉。利用合成天然氣進行甲烷化回收 CO₂，透過甲烷化的製程讓 CO₂ 被捕獲，並讓生產之產物氣體可以直接用於我們現有的天然氣管網。此技術目前屬於一項熱門的技術，近似的研究在法國的 IFPEN 和 SINTEF 研究中心也有展開。其意義在於可以也透過使用再生能源節省成本和二氧化碳，更甚者還有利用再生能源或是化學方法發展大氣二氧化碳捕捉技術，期望將日益上升的溫室氣體捕捉並生成近似於石蠟般的多碳燃料原料，再利用易構化製程視用途將分子鏈被切割成正確的長度達成新生的零探排石化燃料。綠色氫對於解決生產足夠的糧食來養活不斷增長的全球人口和產生無 CO₂ 能源的生存挑戰至關重要。氫主要用於製造肥料。全球年產量超過 1.7 億噸，其 80% 都是以這種方式使用的。氫也可以燃燒發電，而空氣和水是唯一的排放物，或用作再生能源產生的能源的儲存介質。相關的研究在第一天中已有所敘述，氫本身即為一高氫產物，

我們可將其作為儲存或是運輸的介質並有效利用氨氫之間的轉化機制達成再生能源的整合。同時，除了化肥的生產外，氨也可用冷卻劑、清潔劑的製造或是於一些金屬加工以及熱處理的製程中做應用。甚至在製藥以及化學工界中也有廣泛的應用，像是中間體化合物的合成，或作為調節劑和 pH 調節劑。



圖 3. 參與 BMBF Carbon2Chem 計畫的 Thyssenkrupp AG 鋼鐵公司



圖 4. 台德雙邊研討會 Fraunhofer UMSICHT

下午回到 Fraunhofer UMSICHT 進行第 2 天的研討會(圖 4)，首先由 Dr. Andreas Menne 介紹氨的分解會面臨的挑戰。這種反應通常在高溫高壓條件下進行。在這樣的環境中，這些材料和催化劑可能

會受到腐蝕、磨損或其他形式的損害，因此需要具有高耐受性的特性。因為氫氣、氫氣和氫氣可能會對材料和催化劑產生毒化的影響，最終導致催化劑的失能及損害，所以在選擇和設計這些材料和催化劑時，必須考慮到這些挑戰，以確保其在高溫高壓環境下的穩定性和性能。目前的技術主要針對大規模的裂解廠，這些工廠可以處理大量的原料，並生產大量的氫氣。然而，有時也可能需要在不同的場景下進行分散的氫氣生產，例如在某些地方或特定應用場景下，大型工廠可能不切實際或不經濟。因此，需要一些中小規模的氫氣生產設施，以滿足分散的、小規模的氫氣需求。

丁志明教授實驗室建立了大面積的自動噴霧器以供 AEM 系統觸媒噴塗使用，並成功合成出 NiMo 基氧化物異質結構在 HER 反應展現優秀的性能及獲得良好的穩定性。

楊東翰教授主要開發非貴金屬高熵合金奈米催化劑用於電解海水製氫，其 Ni₁₆Co₁₅Mo₁₇Cu₃₂Pt₂₀ 奈米催化劑的質量和比活性均顯著優於商業 Pt/C 催化劑。並超過 100 小時的穩定性測試證實了此奈米催化劑在 100 mA/cm² 的電流密度下具有優異的耐久性。

蔡豐羽教授實驗室生產了低成本且快速的大規模鎂基儲氫合金粉末，顯示出高 H₂ 儲存密度 >6 wt% 且穩定性 >200 次循環。而在用於水電解的 MOF 基電催化劑上也有亮眼的表現，在小面積(5x5 cm²)單電池 AEMWE 氫氣模組，採用自主研发的 NiCo MOF 電極，能耗僅為 4.69 kWh/Nm³@500 mA/cm²。

4. 3/6(三) 拜訪 Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

本日前往波昂拜訪 Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)，BMBF 為德國聯邦政府教育與研究部。此行拜會 BMBF 為了解德國總體氫能政策和發展方向。在台德雙方簡報後，兩方專家學者進行分組討論合作事項，包含各組別的詳細合作主題、研究方向，並討論在雙邊研究合作上計畫書如何撰寫，研究上如何分工合作、人員和實驗交流等(圖 5、6)。早上的會議由國科會工程處李志鵬處長與德國 BMBF 代表 Mr. Armin Reinartz 主持雙邊國際合作會議，並由蕭述三說明臺灣國家氫能戰略/零排放(Presentation of National Hydrogen Strategy/Zero Emission in Taiwan)，德國方面由 Prof. Eichel 詳細說明雙邊合作研究與發展規劃，並由德國代表 Mr. Martin Lochner 簡介德國國家氫能戰略介紹(Presentation of National Hydrogen Strategy in Germany)，最後由雙方提出合作專案並定義其具體的工作內容。

蕭述三院長首先介紹臺灣 2050 年淨零途徑，從 2020 – 2030 – 2050 年有關於碳排與非電力/電力產業逐步減少的具體目標和規劃，其中包含 2025 年起不再新建燃煤電廠，2035 年起智慧電表普及率達 100% 以及 2050 年後再生能源發電佔比超過 60%、智慧變電站部署率達 100%。此外，對於 2050 年須達成主要發展計畫包含太陽能發電、離岸風電與氫能發電效能須分別達到 40-80 GW、40-55 GW 與 7.3 GW，以及在碳捕捉、節能方面之探討等，並解釋氫氣供應/基礎設施/電力/運輸/工業對於促進氫能發展的相關性與重要性。目前，基於價值鏈規劃永續低碳氫化合物技術佈局，提出了七種大方向的策略，如產業 – 政府 – 學校合作協調機制、下一代氫能關鍵技術研發、開發並加速低碳氫化合物創新技術、永續低碳氫化合物技術開發中心示範、建立可持續低碳氫化合物初步市場形成機制、推動天然氣電廠低碳轉型以及連結國際產學資源，利用這些具體規劃逐步邁向淨零減碳目標。而對於當前臺灣氫能發展之研究投資項目，詳細解釋了在供應/應用/基礎設施的現況並提出未來改善建議。最後，介紹了有關目前我國之氫能技術應用，如工研院的沙崙綠色能源技術示範場氫能平臺，還有國內諸多教授對於氫能技術之開發與豐碩成果，如固體氧化物水電解製氫材料開發及系統分析、新型陰離子交

換膜電解多模態陰極生產技術與壓電催化劑在海水淡化中製氫的研究、水電解製氫綜合解決方案於探討酸性、鹼性和海水環境中的應用等。

同樣地，Mr. Martin Lochner 也簡報德國目前氫能現況與未來發展策略。現今德國高度重視「綠色氫能源」，將綠氫視為德國能源轉型與淨零碳排不可或缺的角色之一，發佈了投資金額高達 90 億歐元的《國家氫能戰略》，並推出 38 項對於，氫的製造、儲存、運輸和應用等多個方面的具體措施。德國希望能藉由太陽能 and 風能作為電解水產氫的能量來源，大量普及和工業化綠色氫能技術，並分析利用陸運和海運作為氫氣運輸方式之可行性。此外，對於氫能的終端應用更能遍布多種產業中，如工業、建築和交通行業等。德國在氫能發展上設立了許多具體目標，像是 2030 年起期望年氫需求能夠介於 95 至 130 TWh 之間，而其製程大部分源自於綠氫技術，因此，德國至少需有 10 GW 的自主電解產氫能力，同時搭配進口方式以滿足年氫需求的 50 至 70%。

最後，經過兩方的密集交流與深入討論後，臺灣和德國提出專案合作與具體的工作內容及建議，希望能藉由臺德合作加速雙方的氫能發展，同時促進淨零碳排之目標。



圖 5. 國科會工程處李志鵬處長、蕭述三院長與德方 BMBF 代表交換禮物，臺德雙邊研究人員針對氫能發展展開討論交流



圖 6. 蕭述三院長與德方代表 Prof. Eichel 進行報告

5. 3/7(四)：拜訪 BMBF 資助成立的電解水產氫公司 WEW GamH 以及 Duisburg 的港口

本日上午拜訪 BMBF 德國聯邦教育研究部資助成立的電解水產氫的新創公司 WEW GamH(圖 7)。該公司於 2021 年成立，專注於鹼性電解技術，製造低溫高效率的電解系統，致力於開發和提供高效、可持續的水電解系統，用於將水分解成氫和氧氣。WEW GamH 的技術在能源轉換和儲能方面具有潛在的重要性，特別是在可再生能源集成和能源轉型方面，專門生產鹼性電解堆並供應綠色氫氣，利用再生能源驅動的創新電解技術，從而最大限度地減少原材料，避免昂貴的資源，並採用全新的堆設計，實現高效、高度自動化的生產(圖 8)。水電解是一種將水分解成氫氣和氧氣的過程，其中使用電力通過電解質來進行水的分解。這些氫氣可以用作清潔的燃料，並且在許多應用中具有潛在的用途，包括用於氫燃料電池、工業生產和交通運輸。WEW GamH 致力於開發先進的水電解技術，以提高效率、降低成本並擴大應用範圍。他們的系統通常包括電解質、電極和儲存設備，並且可以根據客戶的需求進行定制。參訪 WEW GamH 可以了解德國工業界電解系統之發展，商業化過程中可能面對的挑戰。



圖 7. WEW GmbH 公司

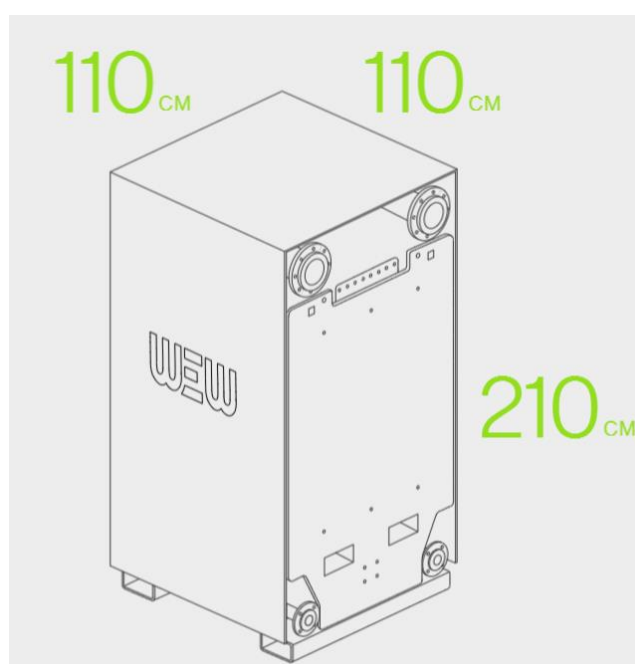


圖 8. WEW 生產之電解設備體積概念圖

創辦人之一 Dr. Wiebke Luke 首先為我們介紹德國目前能源使用結構(圖 9)，指出氫能在德國未來的潛力及可能貢獻。德國目前的發電來源，包括 16%燃氣、26%燃煤化石燃料、1%核能、52%再生能源。傳統的化石燃料(42%)仍然是德國的主要發電來源之一。然而政府計畫逐步淘汰燃煤發電，2038 年前完成停止使用燃煤。自從福島核災後，德國政府已經在 2022 年淘汰核能。可再生能源：德國在可再生能源方面取得了顯著進展，尤其是風能和太陽能。風力和太陽能發電已成為德國的主要可再生能源來源，並且在德國能源轉型中扮演著關鍵角色。

氫能在再生能源發展中扮演著重要的角色，尤其是在解決可再生能源波動性和間歇性的挑戰方面。氫能被用作一種儲能形式，可以將再生能源多餘的電力轉化為氫氣，然後將氫氣儲存在儲氫設施中，等到需要時再將其轉化為電力。這種儲氫技術可以幫助解決太陽能和風能等不穩定可再生能源的間歇性。氫氣可以通過管道或氣體罐車進行長距離運輸，因此它可以作為一種有效的能源轉運介質。這意味著通過氫氣將再生能源豐富的地區產生的能源輸送到其他地方使用，從而實現能源的有效利用和分享。從今年的新聞中可以之知道，德國建構了全球第一臺兆瓦級的 AEM 電解槽，配合當地的風力、太陽能設備、生物能源園區的結合。以貝克市舉例，十五年來透過再生能源的設備投資下，總發的電量已經超過該地區整體用電的 4 倍，並向外販售。

德國的鋼鐵業發達，目前的主要煉鋼方法仍為高碳排的焦炭高爐。在減碳規劃中，氫氣扮演種要角色。可用於取代部分傳統的碳基燃料，例如焦炭，以減少二氧化碳排放。氫氣可以用於直接還原金屬礦石，或者作為熱源在煉鋼過程中取代天然氣。同時，氫氣也可用於金屬的熱處理應用，減少鋼材的表面氧化層，從而改善鋼材的性能。

工業界使用氫能作為還原氣體用於鋼鐵業，因此氫能扮演重要角色。德國的鋼鐵業正在積極進行減碳規劃，氫能作為清潔能源，被視為鋼鐵業減碳的關鍵技術之一。如前文所言，德國鋼鐵業正在探索使用氫氣取代焦炭等傳統能源來源，以減少碳排放。這涉及到開發氫氣生產技術、建設氫氣基礎設施以及推動氫能在鋼鐵生產過程中的應用。



圖 9. WEW GamH 創辦人 Dr. Wiebke Luke 解說德國氫能技術發展需求

Dr. Gregor Polycn 接著為我們介紹 WEW GamH 目前正在發展的水電解技術及研究重點方向(圖 10)。電解水產氫的成本分為設備成本與操作成本，操作成本約為 1 歐元/kg H₂，設備成本依每年可運作時間而定，約為 1.5 歐元/kg H₂ 當每年操作 2,000 小時，至 0.5 歐元/kg H₂ 如果每年可操作 8,000 小時。其中減少 stack 的成本具有最大潛力，因此 WEW GamH 的技術發展重點在於將鹼性水電解裝置以模組化方式生產以期減少裝置成本。WEW GamH 的發展裝置一個 stack 為 0.5MW，

大小為 2.1m x 1.1m x 1.1m，重約 2 噸。可生產氫氣流量為 100 Nm³/hr。發展方向為自動化生產模組，依客戶需求以模組方式放大製造。WEW GamH 的技術目前亦在進行先導工廠測試，測試規模最大電流為 4,000A，功率 150kW，測試重點在於最適化操作策略，觀察操作動態反應，以及設備的生命週期。參觀行程最後帶我們進入生產工廠，雖然還有很多設備尚未進駐，但可見生產員在組裝設備。



圖 10. WEW 創辦人 Dr. Gregor Polycn 解說德國氫能技術發展需求



圖 11. 國科會工程處李志鵬處長贈送紀念禮物（左: Dr. Gregor Polycn，右: Dr. Wiebke Luke）

下午拜訪位於 Duisburg 的港口杜伊斯堡港(Duisport)。由 Johannes Eng 為我們講解杜伊斯堡港在面臨未來以氫氣作為新能源運輸及物流分配上訂定的策略(圖 12)。杜伊斯堡港是德國杜伊斯堡的一個重要物流中心，也是歐洲最大的內陸港口之一。杜伊斯堡港位於德國西部的魯爾區，鄰近萊茵河和魯爾河之交匯處，地理位置優越，便於與歐洲內陸和國際市場連接。作為歐洲最大的內陸港口之一，杜伊斯堡港是一個重要的物流中心，集貨運、倉儲、配送、加工等功能於一身。杜伊斯堡港以其現代化的港口設施、全面的物流服務和國際貿易網絡，成為德國和歐洲重要的物流和貿易中心之一，對於推動未來進口氫氣運輸及德國國內物流發展將扮演重要角色。在 2023 年時，杜伊斯堡港與荷蘭鹿特丹港通過了一項研究計畫，雙方將合作開發氫能運輸的相關建設，範圍涵蓋從北萊茵-威斯特法倫州等範圍，預計在建成後將會每年運輸超過三百萬噸的氫氣與兩百五十萬噸的甲醇。

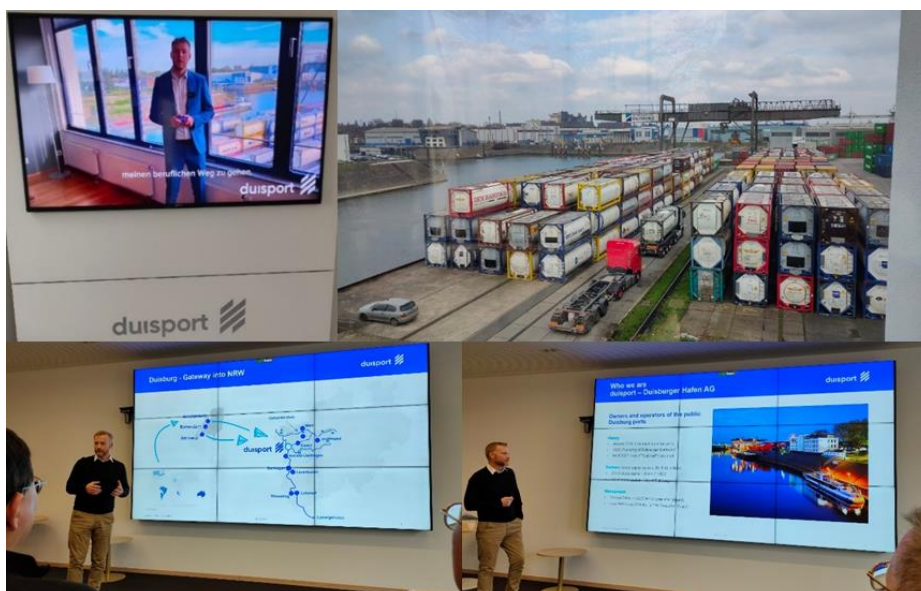


圖 12. Duisburg 實景與未來規劃發展

未來有可能將以氫氣、氨、及甲醇作為能源媒介，杜伊斯堡港在新能源運輸上已做出多項規劃。杜伊斯堡港可以開展氫氣生產和供應鏈建設，包括設立氫氣生產廠和相關基礎設施，例如氫氣製造廠、氫氣存儲設施以及配套的物流和運輸系統。發達的物流將有助於氫氣應用推廣，有助於氫氣在工業、運輸、等領域的應用，作為清潔能源用於交通運輸、工業生產和能源儲存等方面。杜伊斯堡港亦重點投資於氫氣技術研究和發展，包括提升氫氣生產技術、儲存技術和利用技術的效率，並不斷推動氫氣產業的創新和進步。

除此之外，杜伊斯堡港本身亦致力於能源轉型。能源規劃包括在港口區域建設太陽能 and 風能發電設施，利用可再生能源資源發電，為港口提供清潔電力。港口腹地內亦規劃建設氫能生產設施，利用水電解技術將水分解為氫和氧氣，並將氫氣用於港口內的交通運輸、裝卸作業等場景。為了有效率使用再生能源，在港口內建設能源儲存和管理系統，包括電池儲能、氫氣儲存等設施，以便將可再生能源的產能平穩地融入港口的能源系統中。最後，通過更新和改進港口內部設施和設備，提高能源利用效率，減少能源消耗和碳排放。杜伊斯堡港的再生能源規劃擔任未來新能源運輸輸入的重要港口，並擔任國內物流的種要角色。港口本身亦同時推動可持續發展和綠色轉型，在推動氫氣產業的發展，實現能源轉型和環境保護的目標。

6. 3/8(五)：拜訪 RWTH Aachen (Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen) 亞琛大學

本日的行程上午為拜訪 Forschungscampus Flexible Elektrische Netze (FEN), RWTH Aachen, Forschungscampus Flexible Elektrische Netze (FEN)是位於德國亞琛工業大學 (RWTH Aachen) 的一個研究中心(圖 13)。專注於研究開發靈活的電力網絡技術，以因應不斷變化的能源需求和再生能源的增長。其研究範疇涵蓋智能電網、能源儲存系統、分散式發電和能源管理系統等多個領域。透過創新技術和解決方案，FEN 致力於構建更可靠、高效和可持續的電力系統，推動能源轉型和實現碳中和目標。當日由該中心的代表 Dr. Rik W. De Doncker 為我們進行詳細的介紹。

Dr. Rik W. De Doncker 在介紹中有提到，該中心成立的一項主要目的即開發柔性電網，旨在

控制對應發電和負載之間的波動與區間影響。然而，由於目前中壓交流電網的基礎結構，通過這些交流電網實現靈活的電力傳輸並不可行。因此，為增加傳統交流電網系統的靈活性，該中心希望可以通過直流電網連接不同的電網節點，以實現靈活電力與能量轉移。涉及四個相互連接的項目，主題包括：混合交流-直流及純直流電網的設計、中壓直流系統元件的開發、控制和自動化概念在中壓直流網絡中的整合及中壓直流研究電網的設計和實現。這其中近乎全面性的涵蓋了傳統的電網強化以及加入了自動化以及再生能源的位置，確保了未來再生能源具有一定程度的占比和分散式的應用。同時，電網的研究也將在未來的能源供應上除了穩定度外在價格上也能使經濟上承受的負荷降低。對我國而言，本次於 FEN 研究中心將科學研究成果轉化為實際產品和解決方案是一項很好的經驗，我們或許可以仿效 FEN 研究中心的合作模式，建立與產業界的緊密聯繫，促進科技創新和產業升級，同時加速推動臺灣的能源轉型和產業發展。

之後，我們前往 Center for Wind Power Drives (CWD；風力發電驅動中心)，CWD 為亞琛大學風力渦輪機研究的重點中心，配備了創新的 4MW 風力渦輪機系統測試臺，用於組織和引導風力渦輪機傳動系統領域的跨學科研究活動(圖 14)。其中包括了基礎科學分析、先進系統研究和開發專案。從中我們發現了一項有趣的事實，其實德國在整體能源以及再生能源所處的位置以及所面臨的問題其實與我國十分的近似—幾乎採取全面廢核的發展方向，並且仰賴一些外國的燃料進口，並急需建置氫氣運輸的管道系統。CWD 近年在風力電能系統的累積的研究成果對於臺灣的離岸風電以及利用風力發電驅動產生氫反應上提供了一個借鏡。亞琛工業大學領導和組織了風力渦輪機傳動系統領域的跨學科研究主題，這些研究包括基礎科學分析和前期競爭性研究和開發項目。專注於風力渦輪機系統技術，並規劃、使用和操作風力渦輪機系統測試臺，以利轉化研究成果至實際工業應用。而令人印象深刻的是，該中心的風力渦輪機系統測試臺，這項設施可以用於風力渦輪機系統的性能和效率。可以模擬不同風速和風向條件下的風力發電情況，從而幫助研究人員評估風力發電系統的性能和可行性。對於臺灣來說，可以借鑑這種測試臺的設計和運作模式，建立自己的風力發電系統測試臺，用於評估和優化風力發電系統，並進一步探索利用風力發電驅動產氫的可能性。



圖 13. 德方代表 Dr. Rik W. De Doncker 介紹 FEN 研究中心與柔性電網的研究發展方向與目標



圖 14. 亞琛大學風力發電驅動中心 Center for Wind Power Drives (CWD)

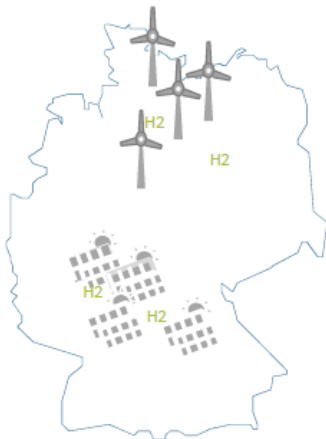
7. 3/9-10 搭機返台

三、心得

在德國與 Forschungszentrum Jülich GmbH 與 Fraunhofer UMSICHT 的研究人員以及氫能業界進行交流的過程中，可以深切地感受到德國政府對於氫能科技研發的雄心壯志，而德國在氫能領域中所投入的人力物力也是令人佩服，藉由政府方的經費投入，由研究機構做為主要的領導，結合大學、企業共同投入氫能科技的研發。這樣的規畫使得德國在 2020 年即訂定「國家氫能戰略」(The National Hydrogen Strategy)，俄烏戰爭後，歐洲對俄國實施經濟制裁，而俄國在 2022 年 6 月以維修為由降低北溪一號輸往歐洲的天然氣，德國受到衝擊相當嚴重，因為俄烏戰爭前德國約有 55% 的天然氣由俄羅斯輸入，俄國切斷歐洲天然氣，使得德國更加注重氫能轉型的重要性。在能源危機和烏克蘭戰爭的背景下，從國家安全政策角度重新檢視 2020 制定的氫能戰略變得更加重要。因此在 2023 年 7 月德國再次更新「國家氫能戰略」(National Hydrogen Strategy update)內容，將 2030 年的綠氫需求量提升為 130 TWh (2020 年「國家氫能戰略」原本預估值為 90-110 TWh)，2030 年電解自產綠氫將大於 10 GW，約占需求量的 30-50%，其餘 50-70% 的綠氫缺口還是得從國外進口(圖 15)。2023 年 7 月再次更新「國家氫能戰略」，將加強德國作為商業和工業中心的地位，並創造未來氫能領域的就業機會。



Prospect for 2030



- Annual H2 demand: **95-130 TWh**, predominantly green
- Annual production of green H2 : min. **10 GW** electrolysis capacity producing **30-50%** of the demand
- Annual import : **50-70%** of the demand

圖 15. 德國 2030 年氫能策略目標

德國為了發展氫能，在國家氫能戰略目標亦訂定行動計畫(Action Plan)，並針對氫生產、氫應用、基礎設施及供應面、研究與教育與創新、歐洲地區氫能需求，以及國際氫能市場等 6 個面向，制定 38 個執行措施(measures)，能夠整體性考量，利用政策鼓勵學研單位投入相關研究，帶動民間企業及早布局，並開始進行發展氫能之基礎建設，目標明確，作法積極，值得借鏡。(圖 16)

National Hydrogen Strategy – an overview

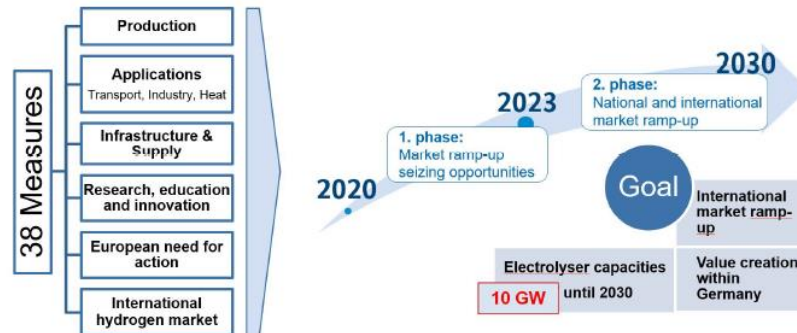


圖 16. 德國推動氫能之具體措施

在氫能研究計畫方面，德國推動包含氫能旗艦型計畫(The Hydrogen Flagship Projects)以及基本氫能研究計畫(Basic Hydrogen Research)，簡述如下：

德國氫能旗艦型計畫(The Hydrogen Flagship Projects)，預計在 2020-2025 年期間投入超過 770,000,000 歐元進行 3 項氫能旗艦型計畫(圖 17)：

1. H₂Giga：發展大容量、高效率、耐用、堅固、兼顧成本效益的電解槽。
2. H₂Mare：直接利用離岸風電生產綠氫以降低成本，H₂Mare 旗艦計畫將探索利用離岸風電直接生產綠氫和其他 power-to-X 產品。
3. TransHyDE：氫輸儲技術之開發、評估和示範。

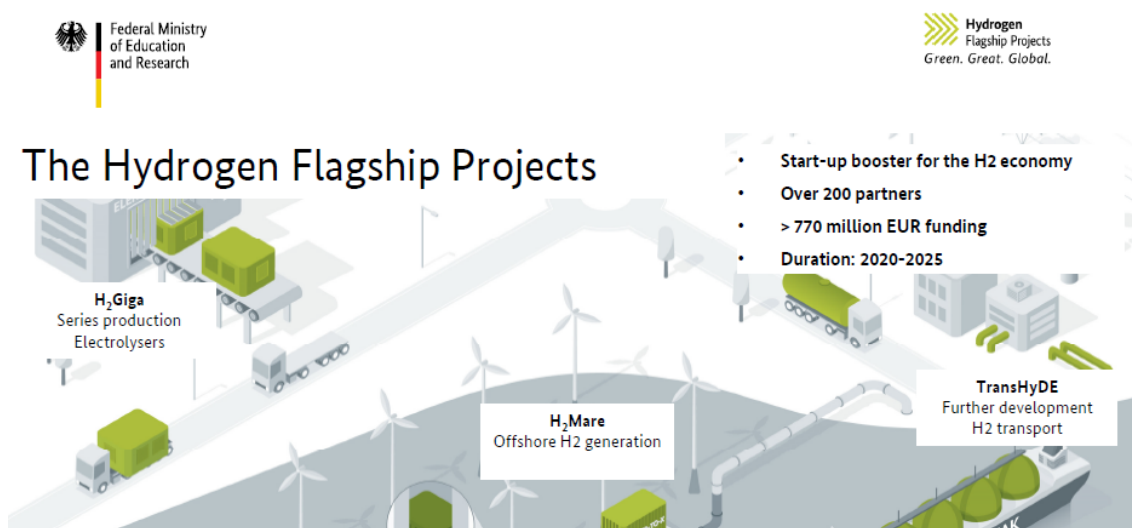


圖 17. 德國氫能旗艦型研究計畫(The Hydrogen Flagship Projects)

德國基本氫能研究計畫(Basic Hydrogen Research)：使綠色氫成為市場商品，並建立工業級規模的產氫、氫運輸和氫應用。包含 36 個專案計畫，其中產氫計畫 14 件，氫輸儲計畫 5 件，氫應用 13 件，以及跨領域氫能科技 4 件，投入經費 104,000,000 歐元(圖 18)。

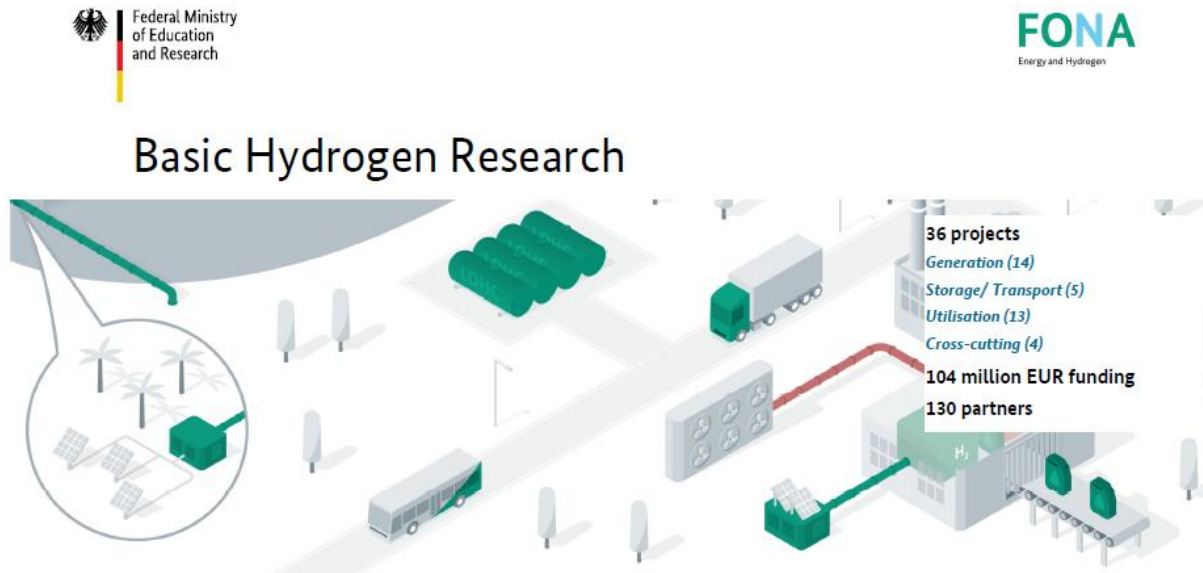


圖 18. 德國基本氫能研究計畫(Basic Hydrogen Research)

四、建議

德國對於氫能研究相當重視，將氫能視為未來能源不可或缺的项目之一，依據 2023 年更新版的「國家氫能戰略」(National Hydrogen Strategy update)，2030 年時綠氫需求量提升將達到 130 TWh，但是估計 2023 年德國自產綠氫約占需求量的 30-50%，其餘 50-70% 的缺口還是得從國外進口，基於上述政策規劃，德國氫能科技研發目標極為明顯，一方面必須研發創新科技增加國內綠氫能源產量，另一方面則是研發進口綠氫相關科技(氫能輸儲科技)。

台灣目前氫氣大部分來源係仰賴天然氣，但是國內天然氣主要來源又都是從國外進口，而且天然氣接收站與儲槽量能亦有其限制，更何況目前台灣天然氣主要用於發電及民生用途，扣除發電後所剩之氫氣供應規模相當有限，如果未來氫氣將作為國內重要的能源，如何取得綠氫，將是台灣發展氫能科技無可避免的重要議題，台灣四面環海，如果能夠善用我們所擁有離岸風力發電進行海水產氫，將能大大提升我國綠氫的產能，也可以在離峰用電區間將能源儲存起來，待尖峰用電時可以發電使用，而要利用海水產氫，必須解決海水中氯化物腐蝕的問題，目前各國正極力研發海水產氫相關技術以搶佔先機。德國大部分國土都在歐陸，僅有北方部分地區臨海(圖 19)，但是德國對於再生能源之取得錙銖必較，依然相當積極發展離岸風機(圖 20)，並且希望利用離岸風機的綠能發展海水電解製氫技術。

在氫能輸儲科技方面，由於氫氣本身的重量能量密度高，但是常溫常壓時體積能量密度卻相當低，

導致氫的運送在現實情況下是一大問題。為了解決此問題，以往是將氫氣直接加高壓，或是降低溫度使氫氣液化後，利用高壓氫或是液態氫進行輸儲，雖然氫氣液化後即可運輸，但是需要超低溫裝置及基礎設施維護的高成本令人卻步，更何況液氫輸儲的金屬管路需要特殊處理以避免氫脆現象(因為氫原子相當小，容易進入金屬材料的結晶之中，而降低金屬的延展性或最大負荷承受性能，造成造成金屬材料變脆，塑性降低，甚至斷裂)，而且還有氫氣蒸發耗損等因素。目前產學研各界極力研究利用儲氫材料將氫氣進行化學轉化成其他較穩定或是便於運輸的化合物，以便儲存與運送。而利用氨儲氫的技術是目前相當熱門的研究議題，氨的化學式為 NH_3 ，每個氨分子裡頭的就包含 1 個氮原子以及 3 個氫原子，所以氨分子具有很高的含氫量，此外，氨的液化溫度在攝氏零下 33 度，氫的液化溫度在攝氏零下 253 度，所以氨比氫更容易液化，耗能也更少。目前氨已有成熟的輸儲技術，因此以氨儲氫技術相當具有可行性，研發重點在於氨裂解脫氫的相關相關技術、能耗、以及研發直接氨燃料電池。

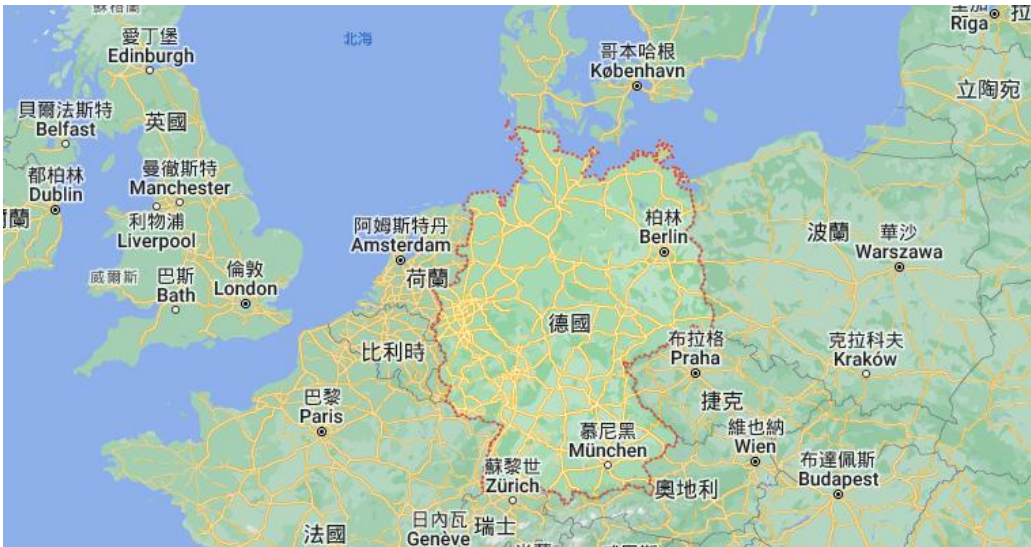


圖 19. 德國地理位置圖(google map)

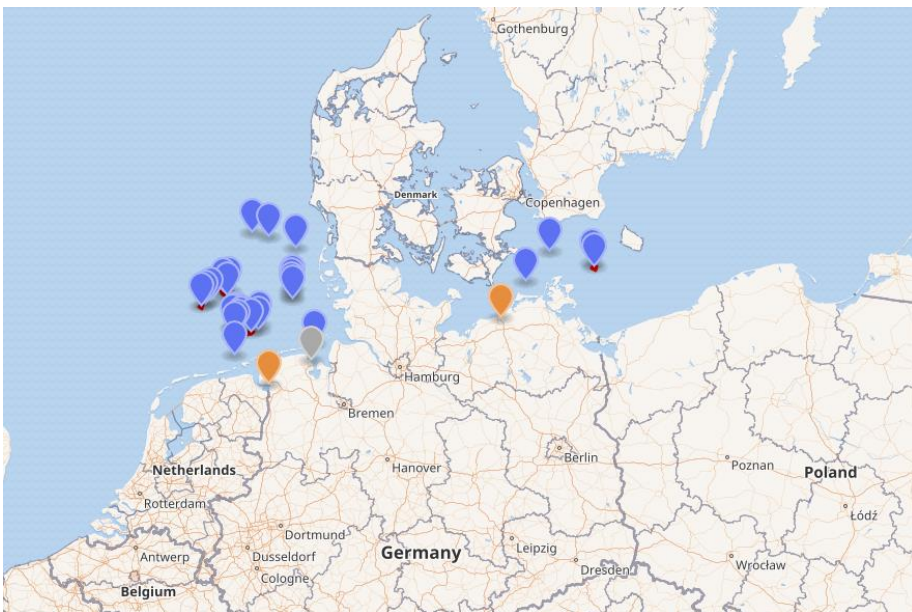


圖 20. 德國離岸風力發電位置

(https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_offshore_wind_farms_in_Germany)

台灣與德國研擬雙邊氫能共同研究主題：

(1) Green Hydrogen Production from Sea Water

(i.e. Direct Saltwater-Electrolysis)

(2) Green Hydrogen Logistics by Ammonia as Hydrogen Carrier

(i.e. Storage, Transportation & Distribution of Hydrogen and Combined De-Hydrogenation & Re-Electrification by Direct Ammonia Fuel Cells)

(3) Green Hydrogen Usage for the De-Carbonization and De-Fossilization of Industrial Key Sectors

(i.e. Green Steel Production and electrochemical Valorization of Industrial Flue Gases)

此次透過台德雙方專家學者的努力探討、積極交流和共同合作，初步規劃未來台德氫能科技三個合作方向：(1)海水製氫、(2)氨氫轉化技術的研究應用和(3)綠色煉鋼科技的發展。鋼鐵業過往仰賴化石燃料且為製造業中減碳難度與成本最高的產業之一，發展綠色煉鋼科技對於達成工業減碳尤其重要；德國和台灣都須仰賴進口能源，對於如何增加自產綠能以及進口能源的經濟及安全性，這些研究主題對於臺灣和德國都相當急切，而且對於能源轉型都有非常重要的影響。

另外，透過觀察德國對於推展氫能的模式，係針對氫能生產、氫能應用、基礎設施及供應面、研究資源投入與教育、考量歐洲地區氫能需求，以及放眼國際氫能市場一起推動，我國在規劃相關前瞻科技策略時，也可以借鏡德國作法，從研究教育、社會需求、經濟產業、國家安全..等系統性的角度切入，給予學研界更多的研究資源，並引領產業界共同投入研發。

德國「更新版國家氫能戰略 2023」(National Hydrogen Strategy update) 網站：

https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/national-hydrogen-strategy-update.pdf?__blob=publicationFile&v=2

德國「國家氫能戰略 2020」(The National Hydrogen Strategy)網站：

<https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/the-national-hydrogen-strategy.html>