NAMR-113-083 (委託研究報告)

鹼性電解海水製氫技術研製發展研究

正式研究報告

中華民國　113 年 12 月

「本研究報告僅供海洋委員會施政參考，並不代表該會政策，該會保留採用與否之權利。」

NAMR-113-083 (委託研究報告)

鹼性電解海水製氫技術研製發展研究

正式研究報告

受委託單位：國立中山大學

研究主持人：陳軍互

研究員：Mariel Tecson

研究助理：劉昀佩

研究期程：中華民國 113 年 6 月至 113 年 12 月

研究經費：新臺幣 300 萬元

國家海洋研究院委託研究

中華民國 113 年 12 月

「本研究報告僅供國家海洋研究院施政參考，並不代表該院政策，該院保留採用與否之權利。」

「本研究報告絕無侵害他人智慧財產權之情事，如有違背願自負民、刑事責任。」

NAMR-110-083 鹼性電解海水製氫技術研製發展研究 正式研究報告 國家海洋研究院

目錄

目錄.....4
圖目錄.....6
表目錄.....9
摘要.....11
第一章、 前言.....16
第一節、 研究緣起與背景.....16
第二節、電解製氫.....17
第三節、台灣海水電解製氫技術應用前景.....21
第四節、海水電解.....23
第五節、鹵水的生成.....25
第二章、 計畫工作項目.....27
第一節、 計畫需求說明書.....27
第二節、 各工作項目的研究方法及過程.....28
第三節、 各工作項目的章節對照表.....38
第四節、 計畫工作進度甘特圖.....39
第三章、 重要文獻回顧.....40
第一節、 元件組件材料的設計對 AEM 水分解元件性能的影響.....40
第二節、 鹵水處理.....47
第三節、 去年成果.....57
第四章、 研究結果之不同材質元件成本分析與海水電解產氫的長期穩定性測試 62
第一節、催化劑在電極表面完全包覆效果的分析.....62
第二節、 研究成果之成本與效能比較-不同材質的水分解單元件的鹼性海水中穩定性測試.....64
第三節、 100 cm^2 鈦單元件在鹼性海水中一周穩定性測試.....76
第五章、 研究成果之鹵水處理的水質分析結果.....79
第一節、催化劑在電極表面完全包覆效果的分析.....79
第二節、水質分析初步結果.....80

第三節、不同產氫實驗進流與出流水中離子質量平衡.....86
第四節、排放水進入承受水體之擴散模擬.....91
第六章、　計畫結論與建議事項.....102
第七章、　參考資料.....104
附錄一.....110

圖目錄

圖 1、各種電解水系統，(a) 鹼性水電解槽 AWE，(b) 陰離子交換膜電解水系統 AEMWE，(c) 陽離子交換膜電解水系統 PEMWE，(d) 高溫電解系統，又稱固態氧化物電解槽 SOEC。 17
圖 2、海水中雜質引起的 DSE 各種挑戰示意圖。 24
圖 3、水分解的電位- pH 圖。 24
圖 4、(a) 抗腐蝕良率測試架設圖，(b) 催化劑實際測試圖。 30
圖 5、元件組裝示意圖。 31
圖 6、電解設備配置圖。 31
圖 7、臨場電化學-質譜儀的組裝及操作流程示意圖。質譜圖中的紅色虛線標示了水分解反應的起始和終止。 32
圖 8、顯示了平行流場、指叉流場和蛇形流場的示意圖和前視圖。在示意圖中，通道部分以白色呈現，屏障則以黑色標示，而電極則以點狀表示。..41
圖 9、電解液的三種供給方式示意圖，Both wet, Cathode dry, Anode dry。 42
圖 10、ARD 技術實驗步驟。 (a) 將電極板浸入水性反應槽中，(b) 在特定時間內進行反應，最後 (c) 在電極板上形成完整的薄膜。 43
圖 11、 ARD 法能夠在任意基板上沉積薄膜催化劑，包括 (i) 金屬多孔結構; (ii) 複雜表面; (iii) 有機高分子 (PET); (iv)，薄膜催化劑經過摺疊後，結構並無碎裂; (v)木質曲面; (vi) 金屬表面銅箔。 44
圖 12、無晶向薄膜催化劑、具有晶向薄膜催化劑以及貴金屬的 (a) OER 活性比較，縮圖為放大圖。 (b) Tafel 斜率計算。 (c) 穩定性測試。顯示無晶向薄膜催化劑表現出優異的穩定性，能夠長時間運作。 44
圖 13、薄膜催化劑經過透明膠帶重複 100 次黏與撕的附著力測試。 45
圖 14、捲送製程進行試量產薄膜催化劑的過程。 46
圖 15、大金門海水淡化廠排水管線設置。 49
圖 16、臺南海水淡化廠興辦計畫排水管線設置。 50
圖 17、臺南海水淡化廠興辦計畫多點式排放豎管設計。 50
圖 18、(a) 鹽霧測試後，我們的催化劑無腐蝕現象，但 SEM 觀察到紅框處顯示泡沫鎳有腐蝕。(b) 在 1 M KOH 鹼性海水中進行的穩定性測試顯示，電壓無明顯上升，且 SEM 圖像證實我們的催化劑具有良好的抗腐蝕能力。(c)

在高電流密度 5 A/cm² 下進行的 6 小時穩定性測試顯示，催化劑未剝落且電壓無上升，證明其穩定性。(d) 我們利用 ARD 技術成功大規模製作了 10 x 10 cm² 的催化劑。(e) 質譜儀分析表明，鹼性海水電解過程中僅生成氫氣和氧氣。.....58
圖 19、鹼性水電解產氫原型機實際機組。插圖為時運作 10 分鐘後的人機介面。.....59
圖 20、不鏽鋼流道板經長期海水電解後，表面逐漸被腐蝕損壞。.....59
圖 21、在極端海水環境下，催化劑進行抗腐蝕測試的結果。分別為 (a, b) 測試前催化劑的正面與反面照片，(c, d) 為測試後催化劑的正面與反面照片。 63
圖 22、催化劑進行極端海水環境抗腐蝕測試前後的 LSV 數據。 63
圖 23、鈦單元件在固定電流 2.5 A 進行 150 小時鹼性海水穩定性測試。(a) 電壓隨時間變化，縮圖為催化劑測試前後之照片。(b) 電解 150 小時後的電解液。.....65
圖 24、氫氣、氧氣、氯氣的高解析質譜即時檢測。.....66
圖 25、鈦流道板 (a) 初始狀態，(b) 進行電解 150 小時後，鈦流道板中間的反應區塊呈現黑色。.....67
圖 26、鈦流道板表面沉積催化劑的流程示意圖。.....68
圖 27、鈦/催化劑單元件在固定電流 2.5 A 下，進行 150 小時鹼性海水穩定性測試。(a) 電壓隨時間變化。(b) 電解 150 小時後的電解液。.....69
圖 28、鈦/催化劑流道板 (a) 初始狀態，(b) 進行電解 150 小時後，鈦流道板中間的反應區塊仍呈現黑色。.....70
圖 29、石墨單元件在固定電流 2.5 A 下進行 48 小時鹼性海水穩定性測試後的電解液。(a) 0 hours。(b) 24 hours。(c) 48 hours。 72
圖 30、電解 48 小時後，蠕動泵管中具有黑色殘留物。.....73
圖 31、氫氣、氧氣、氯氣和 CO_2 氣體的質譜即時檢測。 73
圖 32、顯示了未塗佈催化劑的電極進行鹼性海水穩定性測試的結果。 (a) 顯示了測試前後催化劑的照片。 (b) 在電解過程中，電解質顯示出粉紅色變化。.....76
圖 33、100 cm² 鈦單元件的實際照片。 77
圖 34、100 cm² 鈦單元件在固定電流 2.5 A 下，進行 334 小時 (約兩周) 鹼性海水穩定性測試。(a) 電壓隨時間變化，其中縮圖為催化劑測試前後之照片。(b)

電解 334 小時後的電解液。 78
圖 35、400 mL 的鹼性海水連續電解 160 小時，在 (a) 管子內部、(b) 電解液中、(c) 抗海水腐蝕催化劑及 (d) 陽極流道板皆發現沉澱物。經過過濾並乾燥後的沉澱物如 (e) 所示。對於所得沉澱物進行 XRD 分析，其結果如 (f) 所示。 79
圖 36、第一次海水製氫實驗產出濃排水之水質質量平衡。 87
圖 37、第二次海水製氫實驗產出濃排水之水質質量平衡。 88
圖 38、第三次海水製氫實驗產出濃排水之水質質量平衡。 89
圖 39、三次不同操作條件下高鹽度濃排水的離子變化。 90
圖 40、不同排放鹽度下之濃排水模擬擴散結果(擴散係數 10^{-2} m^2/s)。 93
圖 41、不同排放鹽度下之濃排水模擬擴散結果(擴散係數 10^{-3} m^2/s)。 94
圖 42、不同排放鹽度下之濃排水模擬擴散結果 (擴散係數 10^{-4} m^2/s)。 94
圖 43、高鹽度濃排水 (20 M) 在不同擴散係數下之鹽度變化 (監測點距離排放口 0.1 m)。 95
圖 44、中鹽度濃排水 (10 M) 在不同擴散係數下之鹽度變化(監測點距離排放口 0.1 m)。 96
圖 45、低鹽度濃排水 (1 M) 在不同擴散係數下之鹽度變化 (監測點距離排放口 0.1 m)。 96
圖 46、高鹽度濃排水 (20 M) 在不同擴散係數下之鹽度變化 (監測點距離排放口 1 m)。 97
圖 47、中鹽度濃排水 (10 M) 在不同擴散係數下之鹽度變化 (監測點距離排放口 1 m)。 98
圖 48、低鹽度濃排水 (1 M) 在不同擴散係數下之鹽度變化 (監測點距離排放口 1 m)。 98
圖 49、高鹽度濃排水排放後在不同監測距離下之鹽度變化。 99
圖 50、高鹽度濃排水排放後在不同監測距離下之 pH 值變化。 100

表目錄

表 1、四種水電解技術的技術資訊。.....18
表 2、112 年第四季馬公第一海水淡化廠營運期環境監測報告放流水水質監測結果。.....26
表 3、離子層析儀之相關參數。.....36
表 4、各工作項目的章節對照表。.....38
表 5、工作預定進度甘特圖。.....39
表 6、臺灣海水淡化廠放流水水質項目及限值 (全國法規資料庫)。.....52
表 7、各國鹵水排放後承受水體之鹽度變化容許限值.....53
表 8、金門地區海水淡化環境影響說明書環境監測成果海域水質第一階段營運期間。.....54
表 9、112 年第四季馬公第一海水淡化廠營運期環境監測報告海域水質監測結果。.....55
表 10、ICP 檢測分析電解後之海水中的不鏽鋼成分。.....60
表 11、鈦單元件固定電流 2.5 A 時，每經過 50 小時所記錄的電壓。並以此評估系統的能源轉換效率及海水電解的穩定性。.....66
表 12、鈦/催化劑單元件在固定電流 2.5 A 時，每經過 50 小時所記錄的電壓隨時間變化。並以此評估系統的能源轉換效率及海水電解的穩定性。.....69
表 13、小尺寸鈦板表面結構中，層 1、層 2、層 3 與層 4 的 EDS 元素分析結果。.....**錯誤! 尚未定義書籤。**
表 14、石墨單元件在固定電流 2.5 A 時，每經過 24 小時所記錄的電壓隨時間變化。並以此評估系統的能源轉換效率及海水電解的穩定性。.....72
表 15、鈦與石墨材料在單位成本、能源轉換效率及鹼性海水的穩定性方面的綜合比較評估。.....75
表 16、100 cm^2 鈦單元件在固定電流 2.5 A 時，隨時間變化所記錄的電壓。....78
表 17、第一次海水產氫實驗產出鹵水之基本水質分析.....80
表 18、第一次海水產氫實驗產出鹵水之各離子濃度分析。.....81
表 19、第二次海水電解產氫實驗產出鹵水之基本水質分析。.....81
表 20、第二次海水電解產氫實驗產出鹵水之水質分析結果。.....82
表 21、第三次海水電解產氫實驗產出鹵水之基本水質分析。.....83

表 22、第三次海水電解產氫實驗產出鹵水之水質分析結果。.....83
表 23、第一次海水電解製氫實驗前後各離子之毫莫耳數。.....86
表 24、第二次海水電解製氫實驗前後各離子之毫莫耳數。.....87
表 25、第三次海水電解製氫實驗前後各離子之毫莫耳數。.....88
表 26、高斯機率分佈函數於三維空間中，位置及化學物質濃度。.....92

摘要

關鍵詞： 綠氫、鹼性海水電解製氫、抗海水腐蝕薄膜催化劑、鹵水處理

一、 研究緣起

全球在實現淨零碳排的目標下，將各式低碳能源視為關鍵發展方向。綠氫作為儲能載體和發電的角色，被認為是實現負碳技術的最佳解決方案。台灣擁有豐富的黑潮能源，但若透過電纜將所產生的綠電運輸至本島，將面臨巨大的建設成本、維護費用及長距離電能損耗等挑戰。利用黑潮綠電進行海水分解製氫，藉由氫氣作為能源載體進行運輸，是一條可行的途徑。然而，海水電解技術的複雜性及氯氣的產生仍是技術上的重大挑戰。

112 年的「海洋能源浮動平台與繫纜暨設計人才培育 鹼性電解海水製氫技術前期研製」已經驗證了鹼性海水製氫的可行性。然而，為實現更高效且低成本的氫氣生產，我們仍需進一步加強鹼性海水電解產氫技術的研發。基於多年來的專業知識與經驗，我們將持續優化水分解產氫元件的成本、效能及抗腐蝕性，以確保技術在市場中的競爭力。

同時，我們也將深入分析海水產氫過程中水質變化及濃排水質的改變，並研究其中重要水質組成的種類與濃度。這些研究將有助於評估直接排放方式對海洋水體的潛在影響，並確認整體水電解產氫技術的可持續發展，為未來的海洋能源利用與綠氫產業奠定堅實的基礎。

二、 研究方法及過程

本計畫在前期研究基礎上，進一步優化水分解產氫元件的成本、效能及抗腐蝕性，並針對鹵水 (即濃縮海水) 排放提出可行方案。研究策略分為三大部分進行。

首先，我們將以 ARD 技術製備，並經極端海水環境抗腐蝕測試之低成本抗海水腐蝕催化劑應用於單元件中。在鹼性海水環境下進行固定電流密度的長期穩定性測試，並即時監測和記錄單元件的電壓變化及氣體產物生成情況。最後，我們將對 100 cm^2 單元件在鹼性海水中的一周運行進行實測驗證。

其次，本計畫將透過研究並比較不同材質的水流道之成本、能量轉換效率

及其在海水中的穩定性。我們將基於這些分析結果，提出最適合的材質與設計方案，以提升整體系統的性能和可靠性，並實際建製 100 cm^2 單元件作為驗證。

第三，我們將收集在各種實驗參數下電解後的鹵水樣本，並進行全面的水質分析。根據分析結果，提出適合的鹵水直接排放方案，確保排放過程對環境影響最小化。

三、 重要發現

(一) 成功完成了長達 334 小時 (約兩週) 的鹼性海水穩定性測試。測試結果顯示，100 cm^2 的鈦單元件在鹼性海水環境中表現出極佳的穩定性，並在整個測試過程中保持幾乎無電壓變化，充分展現其卓越的耐蝕性和穩定性能。

(二) 由於蠕動幫浦的運作方式及所使用水管材質的限制，我們觀測到隨著長時間的使用，水管逐漸出現破損現象。特別是在鹵水濃度超過 5.3 M 時，管材中的塑化劑成分開始滲入電解液中，進一步降低了電解系統的穩定性並加速了管材的劣化。因此，本研究確定鹵水的濃度極限為 5.3 M，以確保電解系統的穩定運行與設備的長期耐用性。

(三) 根據本研究技術規模的水質分析與擴散模擬結果發現，海水電解產氫過程中，由於添加電解質 (如 KOH) 及水體揮發等因素，濃排水的導電度、鹽度、pH 值及部分離子濃度有所升高。然而，目前尚無針對此類濃排水制定直接的管制標準，現行放流水標準對其離子濃度亦無明確規範。模擬結果顯示，即使在低擴散係數或高鹽度的情況下，濃排水排放後的鹽度仍能迅速恢復至背景水平，對海洋環境的影響相對有限。未來可根據實際操作條件採取適當的處理策略，例如降低產氫操作電壓以延長反應時間從而減少濃排水量；採用批次排放方式，或實施多點排放策略，以分散排放負荷並減輕單一排放源的壓力。

Abstract

Keywords: Green Hydrogen, Alkaline Seawater Electrolysis for Hydrogen Production, Seawater Corrosion-Resistant Thin-Film Catalyst, Brine Treatment

I. Purpose

Various low-carbon energy sources are crucial development directions for achieving global net-zero carbon emissions. Green hydrogen, serving as an energy storage medium and a power generation solution, is considered the optimal approach for realizing negative carbon technologies. Taiwan possesses abundant Kuroshio current energy; however, transporting the generated green electricity to the main island via cables presents significant challenges, including high construction and maintenance costs and energy loss over long distances. Using Kuroshio green electricity for seawater electrolysis to produce hydrogen, with hydrogen serving as an energy carrier for transportation, is a feasible approach. However, the complexity of seawater electrolysis technology and the generation of chlorine gas remain significant technical challenges.

The "Preliminary Research on Alkaline Electrolysis Seawater Hydrogen Production Technology for Ocean Energy Floating Platforms and Cable Design Talent Development" project conducted in 2023 has already validated the feasibility of seawater hydrogen production via alkaline electrolysis. However, further development of seawater electrolysis hydrogen production technology is necessary for more efficient and cost-effective hydrogen production. Based on years of expertise and experience, we will continue to optimize the cost, performance, and corrosion resistance of water-splitting hydrogen production components to ensure the technology's competitiveness in the market.

Simultaneously, we will thoroughly analyze the changes in water quality during the seawater hydrogen production process and the variations in brine quality. This research will focus on the types and concentrations of key water quality components, aiding in evaluating the potential environmental impact of direct brine discharge into the ocean. Ultimately, this will ensure the sustainable development of the overall water electrolysis hydrogen production technology, laying a solid foundation for the future

utilization of ocean energy and the green hydrogen industry.

II. Methods and Procedures

Based on previous research, this project aims to further optimize the cost, performance, and corrosion resistance of water-splitting hydrogen production components and propose feasible solutions for brine (i.e., concentrated seawater) discharge. The research strategy has three main parts.

First, we will apply low-cost, seawater corrosion-resistant catalysts prepared using ARD technology, which has undergone extreme seawater corrosion resistance testing, to the electrolysis device. We will conduct long-term stability tests under fixed current density in an alkaline seawater environment while continuously monitoring and recording the electrolysis device's voltage changes and gas product generation. Finally, we will perform practical verification of a 100 cm^2 unit's operation for one week in alkaline seawater.

Second, the project will investigate and compare the cost, energy conversion efficiency, and stability of different materials used for water flow channels in seawater environments. Based on the analysis results, we will propose the most suitable materials and design solutions to enhance the system's performance and reliability and build a 100 cm^2 unit for verification.

Third, we will collect brine samples produced under various experimental parameters and conduct comprehensive water quality analysis. Based on the results, we will propose an appropriate brine discharge solution to ensure minimal environmental impact during the discharge process.

III. Results

(1) Successful Stability Testing: Successfully completed a 334 hour (approximately two-week) alkaline seawater stability test. The data show that the 100 cm^2 titanium device exhibited excellent stability in an alkaline seawater environment, maintaining virtually no voltage change throughout the testing period, showcasing its exceptional corrosion resistance and stability.

(2) Due to the peristaltic pump's operational characteristics and the limitations of the tubing material, we observed gradual deterioration of the tubing with extended use. Notably, when the brine concentration exceeds 5.3 M, plasticizer components from the tubing begin to leach into the electrolyte, further reducing the stability of the electrolysis system and accelerating tubing degradation. Therefore, this study identifies 5.3 M as the brine concentration limit to ensure stable system operation and long-term equipment durability.

(3) Based on the water quality analysis and diffusion simulation results for the technical scale of this study, it was found that during the seawater electrolysis hydrogen production process, factors such as the addition of electrolytes (e.g., KOH) and water volatilization lead to increases in the conductivity, salinity, pH, and concentrations of certain ions in the concentrated brine. However, there are currently no specific regulatory standards directly governing this type of concentrated brine, and existing effluent discharge standards do not clearly specify ion concentration limits. Simulation results indicate that even under conditions of low diffusion coefficients or high salinity, the salinity of discharged concentrated brine can quickly return to background levels, suggesting a relatively limited impact on the marine environment. In the future, appropriate treatment strategies can be adopted based on actual operating conditions. These strategies may include lowering the hydrogen production operating voltage to extend reaction time and reduce the volume of concentrated brine, employing batch discharge methods, or implementing multi-point discharge strategies to distribute the discharge load and alleviate the pressure on a single discharge source.

第一章、 前言

第一節、 研究緣起與背景

隨著全球氣候變遷問題日益嚴峻，化石燃料所帶來的碳排放和環境污染引起了廣泛關注，這些問題不僅危及生態環境，還對全球經濟及人類健康造成深遠影響。與此同時，未來高碳排放企業將面臨日益嚴格的碳稅政策(Commission, 2022)，碳稅將成為企業面臨的主要挑戰之一，此舉將迫使各國及企業積極尋求可行的替代能源，以達成減碳目標並緩解環境壓力。在眾多替代能源中，氫能作為一種創新的能源載體，憑藉其環境友好、高效以及高度靈活性的特點，逐漸成為全球關注的焦點。氫能具有極高的應用潛力，能夠根據市場需求靈活啟動或停止生產，並且在可再生能源發電過程中能有效解決其間歇性與不穩定性問題。因此，氫能不僅能推動產業的綠色轉型，還有望在未來逐步取代傳統的碳循環路徑，實現更為可持續的能源結構。

根據行政院國家發展委員會於 2022 年發布的「臺灣 2050 淨零轉型策略」(中華民國國家發展委員會, 2022)，氫能的發電比例將逐年提高，至 2050 年，氫能發電應占總發電量的 9 至 12%。這一策略不僅顯示出台灣對氫能未來發展的規劃，也彰顯了氫能在實現淨零排放目標中的關鍵角色。

依據不同製造過程或來源，國際上將氫氣分為不同顏色，其中綠氫被視為實現淨零碳排放的唯一理想選擇。綠色氫的製造方式包括熱化學水分解法 (以核能廢熱或地熱驅動)、電解水及水光分解等。然而，鑒於台灣的廢核政策、地理條件 (Tang et al., 2023; 綠色和平氣候與能源專案小組, 2021) 及日照長度 (徐天佑、曾鴻陽, 2007)，熱化學水分解及水光分解技術在台灣的應用受到顯著限制，發展相對困難。相比之下，電解水技術因具備優異的大規模化潛力和通用性，成為台灣更可行的綠氫製造途徑，且隨著技術的持續精進，已經在淡水製氫領域中實現商業化應用，為推動淨零排放目標提供了關鍵支持。

第二節、電解製氫

水電解是一種利用再生能源的電力將水分解成氫氣和氧氣，如以下化學方程式所示，理論上需要達 1.23 V 即可將水分解成氫氣和氧氣。

HER：$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$	E^0_{HER} = -0.83 V vs. RHE	[1]
OER：$4OH^- \rightarrow O_2 + 2H_2O + 4e^-$	E^0_{OER} = -0.40 V vs. RHE	[2]
Over all：$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$	$E^0_{OER} + E^0_{HER}$ = -1.23 V vs. RHE	[3]

水電解裝置由陽極、陰極、分隔層和電解質組成，可根據不同的電解質和離子傳輸機制分為四大類型 (International Energy Agency, 2019): 鹼性水電解槽 (Alkaline Water Electrolyzer, AWE)、陰離子交換膜電解水系統 (Anion Exchange Membrane Water Electrolyzer, AEMWE)、陽離子交換膜電解水系統 (Proton Exchange Membrane Water Electrolyzer, PEMWE)、固態氧化物電解槽 (Solid Oxide Electrolyzer Cell, SOEC)，如圖 1 所示，這些技術在結構和材料上有所差異，而其技術資訊在下表 1 中進行了詳細整理。

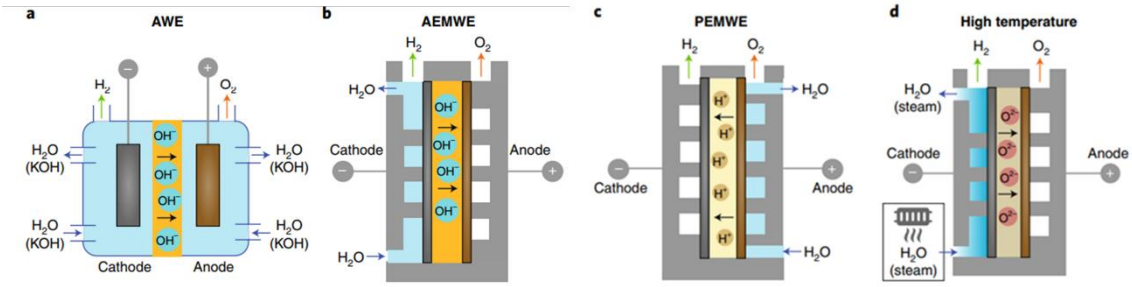

圖 1、各種電解水系統，(a) 鹼性水電解槽 AWE，(b) 陰離子交換膜電解水系統 AEMWE，(c) 陽離子交換膜電解水系統 PEMWE，(d) 高溫電解系統，又稱固態氧化物電解槽 SOEC。(Wenming Tong etc al., 2020)

表 1、四種水電解技術的技術資訊 (IRENA, 2020)。

	AWE	PEM	AEM	SOEC
Operating temperature	70-90 °C	50-80 °C	40-60 °C	700-850 °C
Electrolyte	KOH/NaOH (5 M)	PFSA membranes	DVB polymer support with 1 M KOH or NaOH	Yttria-stabilized Zirconia (YSZ)
Separator	Asbestos/ Zirfon/Ni	Nafion ®	Fumatech	Solid electrolyte YSZ
Catalyst	Ni coated perforated stainless steel	noble meta (IrO_2、Pt/c)	transition metal oxide	Ni/YSZ、Perovskites (LSCF, LSM) (La,Sr,Co,FE) (La,Sr,Mn)
Current density (a/cm^2)	0.2–0.8	0.2–2	1–2	0.3–1
H_2 purity (%)	99.5-99.9998	99.9-99.9999	99.9–99.9999	99.9
Efficiency (%)	50–78	57–59	50–83	89 (laboratory)
Lifetime of stack (h)	60 000	30 000	50 000–80 000	20 000

AWE 作為水電解技術中最成熟的技術，已實現商業化並被廣泛應用於工業領域。其主要優勢在於不含貴金屬的電催化劑，這有效降低了整體成本，使其在大規模應用中具有經濟可行性。然而，AWE 也面臨一些技術挑戰。由於高濃度鹼性電解質的使用，系統易受腐蝕，電流密度相對受限，且長期運行可能生成 K_2CO_3，進而影響電解系統的穩定性 (IRENA, 2020)。此外，在操作電壓和電流不當的情況下，氫氣和氧氣可能通過 AWE 中石棉隔膜的微孔發生混合，從而增加了系統的安全風險。為了克服這些挑戰，水電解技術逐漸向酸性電解質和高分子分隔膜的方向發展。

PEMWE，或稱為零間隙電池 (Zero gap) (Phillips & Dunnill, 2016) ，採用全氟磺酸 (Perfluorinated Sulfonic Acid, PFSA) 與聚四氟乙烯 (Polytetrafluoroethylene, PTFE) 的共聚物 (Nafion™, online) 作為電解質及氣體阻隔層，取代了 AWE 中系統中的石棉隔膜，從而顯著降低了兩極之間的電阻。目前，PEMWE 已經實現

商業化，展現出多項優勢，包括能在較低溫度下運行、支持更高的電流密度，以及提供更高的氣體純度，使其在應用上更具靈活性。然而，PEMWE 也面臨一些限制。酸性電解質環境要求 PEMWE 系統僅能使用較耐酸的貴金屬電催化劑，這對催化劑的選擇造成限制。大部分貴金屬如銥 (Ir) 和釕 (Ru)，由於稀缺性及供應受限於地緣政治因素 (如戰爭) 等，進一步加劇了獲取的困難。此外，2023 年 1 月，歐盟聯合擬定了一項 PFAS 限制提案 (經濟部產發署，2023)，旨在廣泛限制超過 10,000 種全氟/多氟烷基物質 (PFAS) 的使用，該提案推動了對 Nafion 替代材料的需求，促使 PEMWE 技術的研發方向逐漸轉向發掘新的無 PFAS 電解質材料，藉此達到兼具效能與環保要求的雙重目標。這些複合因素共同導致 PEMWE 系統的生產成本急劇上升，成為該技術邁向大規模應用的主要障礙之一。

SOEC 利用水蒸氣進行分解反應生成氫氣和氧氣，顯著降低了相較於直接水電解的功耗，從而提高了能源轉換效率。然而，SOEC 的高效運行需要極高的工作溫度，這對系統的穩定性提出了挑戰。目前常用的電解質材料，如 YSZ (釔安定氧化鋯，Yttria-stabilized zirconia)，其穩定壽命約為 20,000 小時 (Stolten, 2017)，限制了 SOEC 在長期應用中的可靠性。此外，SOEC 需要一段預熱時間才能達到最佳工作溫度和性能，若在短暫運行後立即關閉可能會導致能量效率低下。總而言之，總的來說，SOEC 的高操作溫度要求、熱循環效率問題以及長期穩定性等挑戰，對於將其與波動性再生能源整合應用時帶來一定的限制，因此該技術仍需要在材料、系統設計和運行策略等方面進一步創新和優化，以克服上述技術瓶頸。

AEMWE 結合 AWE 及 PEMWE 的優勢，其低溫運行、高分子分隔膜技術以及不使用貴金屬的特點，使得整體系統更加節能並且降低了成本，同時能夠生產出高純度的氫氣，進一步降低氫氣生產的成本並提高其品質。AEMWE 系統使用的低濃度 (1 M KOH) 液體電解質，不僅減少了操作和維護成本，還有助於提升系統的經濟性。此外，AEMWE 具有極好的適應性，能夠承受高低起伏的電壓，這是 AWE 所不具備的特性，這使得 AEMWE 能夠有效應對來自再生能源波動性所帶來的電力負載變化。這種能力使 AEMWE 能夠將不穩定的能源轉化為穩定的氫氣儲存，為綠色能源的儲存和使用提供了解決方案。因此，AEMWE 系統成為當前實現大規模綠電應用的最佳選擇，並且是未來能源轉型的關鍵技術之一。

當前，國內外在AEM 電解製氫技術的研究與應用領域正快速發展，隨著技術不斷進步，各種電解技術的效率差異逐漸顯現。這些技術的選擇和應用也受到能源來源、操作環境和經濟性等因素的影響。尤其在氫氣生產的效率方面，不同技術間的差距仍然是該領域關注的焦點。

台灣工業技術研究院 (ITRI) 在高效能 AEM 電解槽的開發上有顯著進展。ITRI 所開發的 1 kW 高壓電解槽的能源轉換效率已經達到 65% (工業技術研究院, online)，這顯示出其在高效能電解氫技術中的潛力。相比之下，德國 Enapter 公司所開發的 AEM 電解槽能源轉換效率為 62.5% (Enapter, online)，儘管略低於 ITRI 的數據，但該技術已經實現商業化並投入市場，顯示出其在商業化應用中的可行性。另一方面，中國穩石氫能公司開發的 2.5 kW AEM 電解槽能源轉換效率為 66.6%，也展示出其在大規模氫氣生產中的潛力 (穩石氫能, online)。然而，這些技術目前僅限於純水系統的應用，這使得其在水資源短缺或鹽水環境中的應用受到限制。尤其是在像台灣這樣的地區，常年面臨缺水的問題。因此，如何突破這一限制，開發能夠在鹽水或低品質水源環境下穩定運行的 AEM 電解技術，成為未來 AEM 技術發展的關鍵挑戰之一。

隨著本研究團隊技術的不斷改進，AEM 電解槽系統的設計和材料選擇已經克服了水源限制，進一步提升了其在非純水環境中的可操作性。這一創新使得 AEM 技術能夠突破傳統的淡水依賴，擴展到更廣泛的應用領域，尤其是能夠與可與黑潮能相結合，提供穩定且高效的氫氣生產方案。在面對水資源挑戰的地區，如台灣及其他受水資源短缺影響的地區，這一突破將能夠為未來的氫氣能源供應提供更加可靠和可持續的解決方案。

第三節、台灣海水電解製氫技術應用前景

台灣位處於亞熱帶海洋氣候帶，四面環海，擁有豐富的海水資源，多種因素使得台灣在能源轉型的道路上有著獨特的海洋優勢。尤其是黑潮，作為台灣重要的海洋資源，已經被利用於發電技術中，並且在台灣取得了一定的成熟度(民報, 陳俊廷, 2016)。但以現今技術來說，依賴於電纜運送電力，長距離的傳輸會遇到能量損失的問題，這會降低系統的總效率。此外，建設和維護高效能輸電網絡的成本也非常高。其次，儲存設備的成本極具昂貴且處理對環境有一定的影響 (能源教育資源總中心, 陳建宏, 2020)。

因此，在這樣的背景下，海水電解製氫技術提供了一個突破性的方案。將海水直接轉化為氫氣並儲存，不僅能有效避免長距離電力傳輸和電池儲存的問題，還可以將氫氣作為一種高密度的能量載體，進行儲存和運輸。這樣一來，氫氣不僅能在需要時提供能量，還能有效解決能源儲存和運送過程中的損耗問題。所以，海水電解製氫技術不僅具有能源生產的優勢，還能減少對傳統電力傳輸和儲能技術的依賴，成為未來能源系統的重要組成部分。當氫氣應用於燃料電池技術時，還可以產生淡水，進一步解決乾旱地區的水資源不足問題。這樣一來，海水不僅成為了能源的來源，也能夠在一定程度上解決水資源不足的問題，實現了能源與水資源的雙重利用。將海水電解製氫技術與黑潮發電技術結合起來，可以實現更低成本、環保和持續的能源利用模式，將揭開海洋能源發展的新篇章。

此外，台灣的海洋資源優勢，成為開發和應用海水電解技術的理想場所，可以使其成為全球海水電解製氫技術的領先者。隨著技術的進步，海水電解技術不僅能夠減少對昂貴純水資源的依賴，還能提升氫氣生產的效率和穩定性。結合台灣的再生能源發展，特別是在風能、太陽能及黑潮能領域的進步，為海水電解製氫技術的應用提供了有力的支援。海水電解製氫技術未來有望成為台灣能源轉型中的關鍵一環，推動綠色能源與可持續發展的實現。

本計畫將根據 112 年國海院的「NAMR112035 海洋能源浮動平台與繫纜暨設計人才培育_鹼性電解海水製氫技術前期研製」計畫成果，從技術層面深入探討了如何在成本、效能及抗腐蝕性方面進行綜合優化。對單元件 (單一個 cell) 的轉換效能和成本進行深入優化，以提升海水製氫技術的可持續性。此外，海水電解技術所面臨的一個重大挑戰是鹵水的處理。鹵水中的鹽分及其對環境的

潛在危害，需要科學的處理方案。本計畫將依據最新的鹵水處理方法學和檢測分析，提出具體且可行的處理方案，這不僅有助於提升技術的環保性，還能為海洋能源開發提供更為穩定和可靠的解決方案，最終實現綠色能源的可持續發展。

第四節、海水電解

在海水電解技術中，通常分為直接電解海水和間接電解海水兩種方法，各有其優缺點及適用情境。間接電解海水是指將海水進行淡化處理 (Liu, T. et al., 2024)，去除大部分的離子，再對處理後的水進行電解反應。預處理過程可以顯著降低氯離子的濃度，減少對電解設備的腐蝕，從而延長設備的壽命和提高穩定性。然而需要增加水處理設備和流程。因此投資、運營成本較高。若要實際應用在近岸或海上平台，間接電解海水受到需要更大的空間存放海水淡化設備、更高的電力消耗以及增加維護和更換頻率的限制。

而直接電解海水是指將海水直接引入電解槽中，進行電解反應以產生氫氣的技術。這種技術的最大優勢在於簡化了過程，省去了海水淡化等額外步驟，使得操作更加簡單和便利。然而海水環境太過複雜，存在著各種離子 (Fei et al., 2024; Strasser, 2019)，例如氯、鈉和鎂等離子，這些離子可能會引發負面影響 (圖 2)，會提升技術難度。像是氯及氯離子衍生物導致催化劑失去活性與電解元件腐蝕，皆會顯著降低電解效率、設備的壽命和穩定性。若在酸性環境中進行電解，可能會產生高毒性氯氣，需要額外的安全處理設備。為避免生成氯氣，可透過提高陽極對 OER 相較於氯化物氧化的選擇性來解決此問題。為此，OER 必須在低於氯化物氧化的電位下進行。儘管 OER 在整個 pH 範圍內的過電位較低 (見圖 3)，在 pH = 0 的酸性條件下，OER 與氯化物氧化的電位僅相差約 130 mV；但在鹼性介質中，此電位差可增至 480 mV (Strasser, 2016)，如方程式[4]所示。因此，將海水的 pH 調控至鹼性，是保持兩者電位差的重要方法，有助於抑制氯氣生成並提高電解效率。而在鹼性環境中，氯離子容易被氧化生成次氯酸根。雖然次氯酸根具有強氧化性，可以有效殺死水中的有機物和細菌，從而具有一定的消毒效果，但也可能對電解設備造成損害。

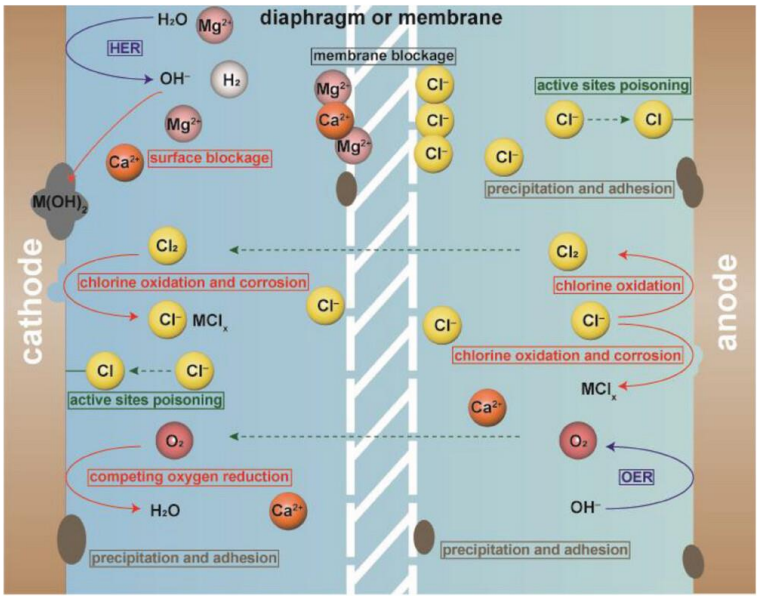

圖 2、海水中雜質引起的 DSE 各種挑戰示意圖。 (Fei et al., 2024)

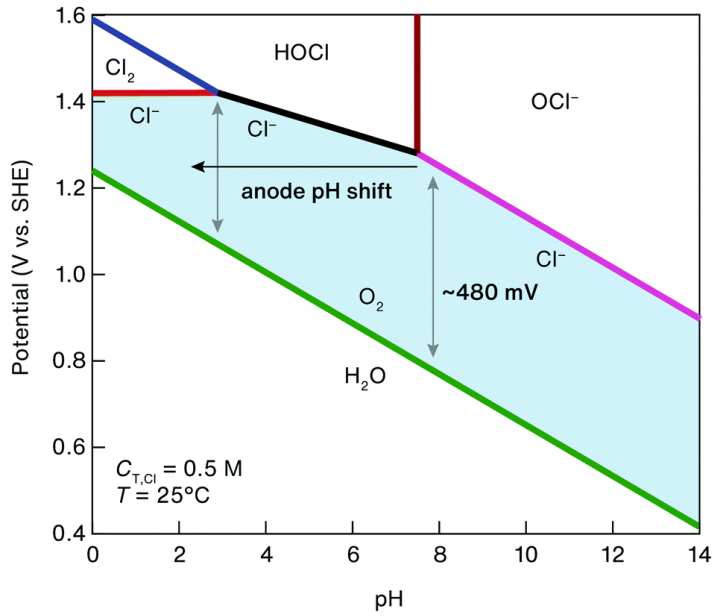

圖 3、水分解的電位- pH 圖。(Strasser, 2016)

$$Cl^- + 2OH^- \leftrightarrows OCl^- + H_2O + 2e^- \quad E_0 = 1.72\ V \text{ in pH} = 14 \qquad [4]$$

第五節、鹵水的生成

鹵水，廣泛定義又稱含有高濃度鹵素之水體，為海水電解產氫及海水淡化技術所產生的副產物，其鹽度常高於 55,000 mg/L TDS (Panagopoulos, Haralambous, & Loizidou, 2019)。海水富含鹽類，海水淡化在將海水中的固體顆粒、微生物、鹽類等雜質經不同的技術去除後形成淡水的過程會產生鹵水。國內海水淡化廠常使用的技術為蒸餾法及逆滲透法 (Reverse osmosis, RO)，蒸餾法是將海水加熱汽化成水蒸氣再經過冷凝回收，逆滲透法則是利用加壓將海水通過半透膜，將海水中的鹽類及雜質分離，產生淡水。海水淡化過程所產生的鹵水通常含有高濃度鹽類、礦物質及微生物。

與海水淡化相似， 海水進行電解產氫的過程中，會產生鹵水與一些液態及氣態的副產物，如氯氣及氯化物等，主要取決於所取用的海水成分而定，由於氯氣與氯化物可能對環境及人體的危害，因此在電解海水製氫的過程中必須謹慎處理。因鹵水的鹽類濃度比海水高，因此不論是海水電解製氫或海水淡化所產生的鹵水，都需要經過預先處理或挑選合適的排放方法，以降低對環境及生態可能造成的影響。

鹵水的成分及濃度決定鹵水處理及排放方式的規劃。為符合法規上的要求以及降低對環境及生態的影響，需要嚴格控制鹵水排放時的水質成分、濃度及排放量。由於海水製氫技術尚在開發階段，沒有實際營運的鹵水水質分析結果可供參考，本次報告暫引用國內海水淡化廠環境監測報告中的放流水水質監測結果做為參考 (表 2)，結果顯示，使用 RO 產生之鹵水在一般常見濃縮比例在 40%~60% 的範圍下，產出之鹵水水質成分因各成分濃度皆低，對環境之負面影響有限。若本計畫使用之海水電解技術在產氫過程產生鹵水之濃縮比例與 RO 相似，在產氫過程不影響水質之假設前提下，產出之鹵水水質可能與 RO 鹵水相似，將待後續實驗確認此推論。

表 2、112 年第四季馬公第一海水淡化廠營運期環境監測報告放流水水質監測結果。

監測項目	監測結果
水溫	27.5℃
pH	7.9
生化需氧量	ND
含高濃度鹵離子化學需氧量	27.7 mg/L
懸浮固體	7.9 mg/L
大腸桿菌群	<10 CFU/100mL
油脂	ND
酚類	0.0036 mg/L
鋅(Zn)	ND
鎘(Cd)	ND
鉛(Pd)	ND
銅(Cu)	ND
總鉻(Cr)	ND
總汞(Hg)	<0.0005 mg/L
砷(As)	0.0026 mg/L
鎳(Ni)	<0.05 mg/L

說明：以上放流水水質各項目測值均符合《海洋放流管線放流水標準》之附表一甲類海域規定限值。

第二章、 計畫工作項目

第一節、 計畫需求說明書

一、海水分解產氫的長效穩定度測試: 達成連續一星期的電解海水產氫的運轉測試與條件優化

(一) 根據 112 年本院「NAMR112035 海洋能源浮動平台與繫纜暨設計人才培育_鹼性電解海水製氫技術前期研製」計畫成果上，在鹼性海水下運作電解優化後之產氫元件達一週(含)以上，針對電解海水的穩定性測試，將評估適用的定電流條件，並觀測電壓隨時間變化。

(二) 元件、電堆及鹼性海水電解產氫機進行海水電解過程中，須提供對氣體產物的即時檢測內含物，含氯氣、氫氣、氧氣以及其他氣體的檢測 (可使用質譜儀或相關設備)，每個採樣數據點間應隔於 5 秒(含)以內。

二、成本與效能優化

依據 112 年本院「NAMR112035 海洋能源浮動平台與繫纜暨設計人才培育_鹼性電解海水製氫技術前期研製」計畫成果再進行相關單元件(單一個 cell)轉換效能與成本優化，須包含:

1. 水流道設計優化。
2. 水流道板材質(例:高緻密石墨板、不鏽鋼，不侷限上述材質)。
3. 在海水電解運作過程中，針對單元件中各部件進行抗腐蝕評估及材質優化
4. 計算不同材質所需成本與效能，並提出最適合的單元件設計。

三、鹼性鹵水的處理方法與排放評估:

針對鹼性海水電解後產生的鹵水，進行現地處理與排放標準的法規與方法學評估。在與鹼性海水電解產氫原型機或本期計畫中優化後之水分解單元件結合的前提下，提出具體可行的處理方案。

第二節、 各工作項目的研究方法及過程

本計畫根據前一節中的需求說明書，詳細描述了各個執行計畫的方法。我們將完成單元件 (單一個 cell) 的轉換效能和成本優化，並提出具體可行的鹵水處理方案。

工作項目一、海水分解產氫的長效穩定度測試: 達成連續一星期的電解海水產氫的運轉測試與條件優化: (一) 優化後之產氫元件在鹼性海水下電解運作達一週(含)以上。(二)元件、電堆及鹼性海水電解產氫機進行海水電解過程中，須提供對氣體產物的即時檢測內含物，含氯氣、氫氣、氧氣以及其他氣體的檢測。

本研究團隊依據前期研究成果，將利用我方所開發之酸性氧化還原輔助沉積技術 (ARD)，合成 25 cm^2 及 100 cm^2 的催化劑，並將這些催化劑與各種材質元件組裝成為不同的電解系統。為了深入了解這些元件在實際使用條件下的性能，我們進行了電化學穩定性分析以及即時質譜檢測，並對其在鹼性海水環境中的穩定性進行了詳細的測試與評估。

1. 催化劑製備:

須將 25 cm^2 及 100 cm^2 的高表面積鎳泡沫電極 (商業產品) 依序浸泡在水、有機溶劑及酸液中，以超聲波震盪洗淨，最後再以水移除酸液。接續調配所需的各式金屬反應鍍液，並藉由 ARD-Bubble 方法，在鎳泡沫電極表面沉積均勻連續的抗腐蝕多元金屬薄膜。最後經由水清洗多餘的反應液，乾燥後即可獲得抗腐蝕多元金屬薄膜催化劑。

2. OER 反應活性分析:

使用 CH Instruments 的電化學儀器及三電極系統對催化劑進行線性掃描伏安法 (LSV) 測試。三電極系統由產氧端的工作電極 (本計畫使用的抗腐蝕多元金屬薄膜催化劑)，產氫端使用白金電極作為輔助電極，以及校正電位的參考電極 (Hg/HgO)。我們使用了 KOH 水溶液作為電解液。首先，以 5 mV/s 的掃描速度在室溫下對催化劑進行了測試，並將測得的電位轉換為可逆氫電極 (RHE) 的值。接著，利用 Nernst 方程式分析 LSV 數據，以分析催化劑的反應活性。

3. 結構分析:

在本研究中，我們採用了多種先進的顯微技術，以深入解析催化劑的結構與組成。使用掃描電子顯微鏡 (Scanning electron microscopy, SEM) 觀察催化劑表面形貌和微觀結構的變化。感應耦合電漿 (Inductively Coupled Plasma, ICP) 是一種高靈敏度的分析技術，能夠準確測定催化劑中各種元素的含量，從而了解電解後海水的化學組成。雙鎗型離子束顯微鏡 (Dual beam Focus Ion Beam System, FIB) 具有高性能聚焦離子束、高分辨率場發射電子顯微鏡及低能量氬離子束薄化功能，能夠精確切割材料試片，製備出高品質的薄片試樣供後續分析使用。這一技術讓我們能夠更細緻地剖析材料內部的結構。穿透式電子顯微鏡 (Transmission electron microscope, TEM) 搭配 X 光能量分散光譜 (Energy Dispersive Spectroscopy, EDS)， TEM 提供超高分辨率的影像，可觀察催化劑的精細結構，例如晶體缺陷和原子級結構。搭配 EDS，則能對材料內部元素進行定性分析，確認催化劑中各種金屬元素的分佈和均勻性。

4. 極端海水環境抗腐蝕良率測試:

在元件組裝之前，我們會對合成的催化劑進行嚴格的海水環境抗腐蝕良率測試，以確保其能完全覆蓋並有效保護電極。如圖 4。在鹼性海水環境中，我們會將催化劑處於極端條件下，施加高電壓 (5 V) 和高電流 (11-13 A)，並進行 30 分鐘的電解測試。這一操作模擬了催化劑在實際運行中可能面臨的極端腐蝕環境。測試的評估標準是，在過程中是否觀察到電極表面有分解或沉澱物生成。如果催化劑在此條件下依然保持穩定，未出現任何分解現象或沉澱，則可確認該催化劑具備良好的抗腐蝕性能，能夠有效保護電極。通過這一測試的催化劑，才會進一步用於元件組裝和後續的性能測量，以確保電解能源轉換效率與系統穩定性。

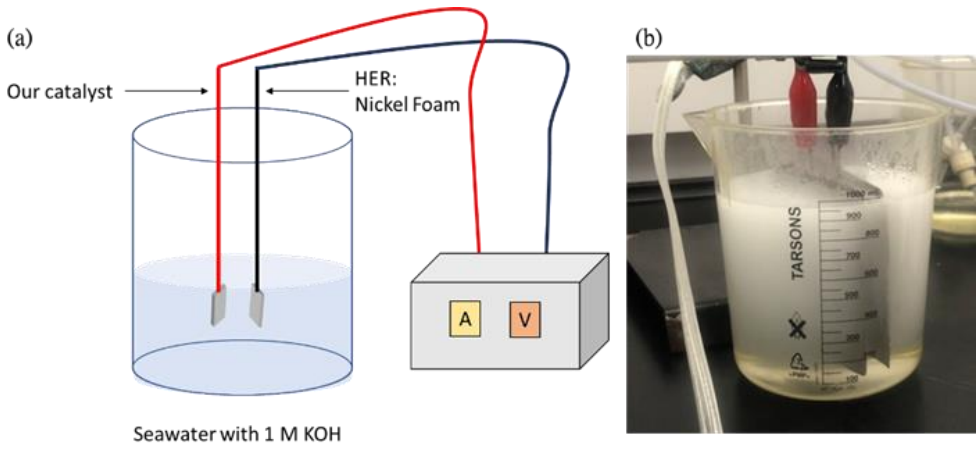

圖 4、(a) 抗腐蝕良率測試架設圖，(b) 催化劑實際測試圖。

5. 元件長效穩定度測試:

我們從西子灣取用海水，首先對海水中的砂石進行過濾，然後加入 1~3 M 的固態氫氧化鉀 (KOH) 顆粒以提高其鹼度。KOH 的加入會促使海水中的鈣離子和鎂離子分別生成氫氧化鈣和氫氧化鎂的沉澱，這些沉澱物透過重力過濾去除。過濾後的上層澄清液即為鹼性海水，隨後使用蠕動幫浦將鹼性海水輸送至電解元件，進行電解製氫的測試。

水分解裝置的核心零件包括端板、集電板、流道板、陽極 (5x5 cm^2 或 10x10 cm^2 抗腐蝕多元金屬薄膜催化劑) 、陰極 (鉑碳催化劑) 與陰離子交換膜，並按照圖 5 順序裝設。後續將電源供應器、蠕動幫浦、溫度計、加熱板與氣體緩衝區依據圖 6 佈局進行安裝，構建完整的電解系統。同時，我們使用全自動監控設備來檢測實驗中的異常狀況，這一措施能大幅提升操作安全性，確保整個實驗過程的穩定運行。

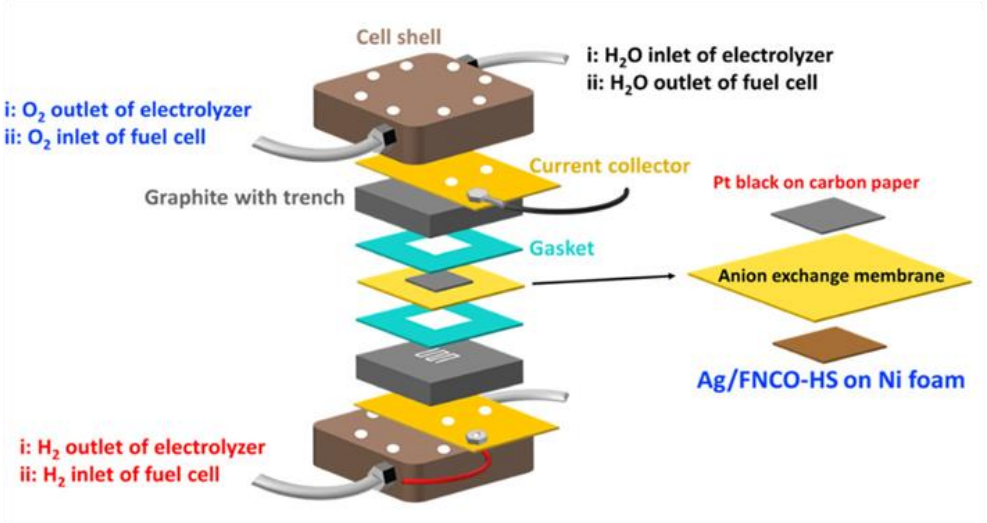

圖 5、元件組裝示意圖。 (Liao et al., 2021)

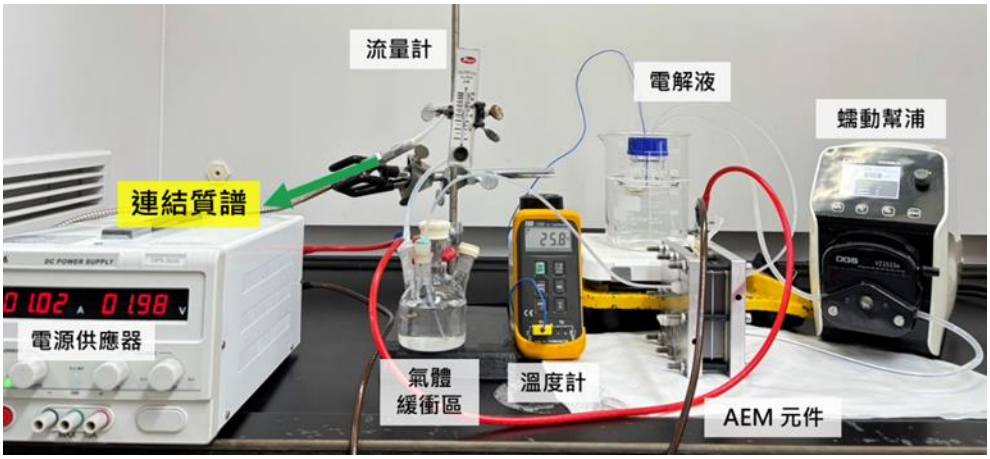

圖 6、電解設備配置圖。

在評估催化劑的穩定性之前，首先使用電源供應器向 AEM 元件提供直流電源，並以 1 A 的電流進行 40 分鐘的活化處理。活化後，於固定溫度下，固定施加電流 2.5 A，進行為期一週或更長穩定性測試，觀察電壓隨時間的變化。若催化劑、零件或水分解元件發生腐蝕或失效，通常會導致電壓逐漸上升。因此，穩定的電壓表現顯示元件的耐久性與催化劑的抗腐蝕能力良好。

$$\text{穩定性} = \frac{\text{電壓}_{\text{結束}}(\text{V}) - \text{電壓}_{\text{初始}}(\text{V})}{\text{電壓}_{\text{初始}}(\text{V})} \times 100\% \qquad \text{公式 [1]}$$

根據公式 [1]，若結束電壓達到原始電壓的 10% 時，則表明該單元件在海水

中的穩定性不理想。為了全面監控反應過程，我們將連接質譜儀進行氣體即時分析，以測定生成的氫氣、氧氣和氯氣等氣體產物。這種監測方式不僅有助於評估氫氣產生的效率和純度，還能夠即時檢測副反應的發生，例如氯氣的生成。若發現有害副反應，我們可以及時調整反應條件，如改變溫度、電流密度或添加抑制劑，以減少副產物並提升系統穩定性。

6. 氣體產物的即時檢測分析:

元件本身無法直接分析和顯示產生的氣體種類與含量。因此，為了更深入地了解氣體產物的性質和組成，本團隊將使用高解析質譜儀進行更精確的分析。這項技術能幫助我們準確測定氣體產物 (如氫氣、氧氣及氯氣) 的種類與含量，從而進一步改進技術，提升其效能和可行性。在實驗過程中，將會將電解水元件的氣體排放管連接至質譜儀，並在程式中設定氫氣、氧氣與氯氣的 m/z 值 (荷質比)。而載流氣體氬氣將氣體產物輸送至質譜儀中進行氧氣、氫氣和氯氣的同時監測，見圖 7。

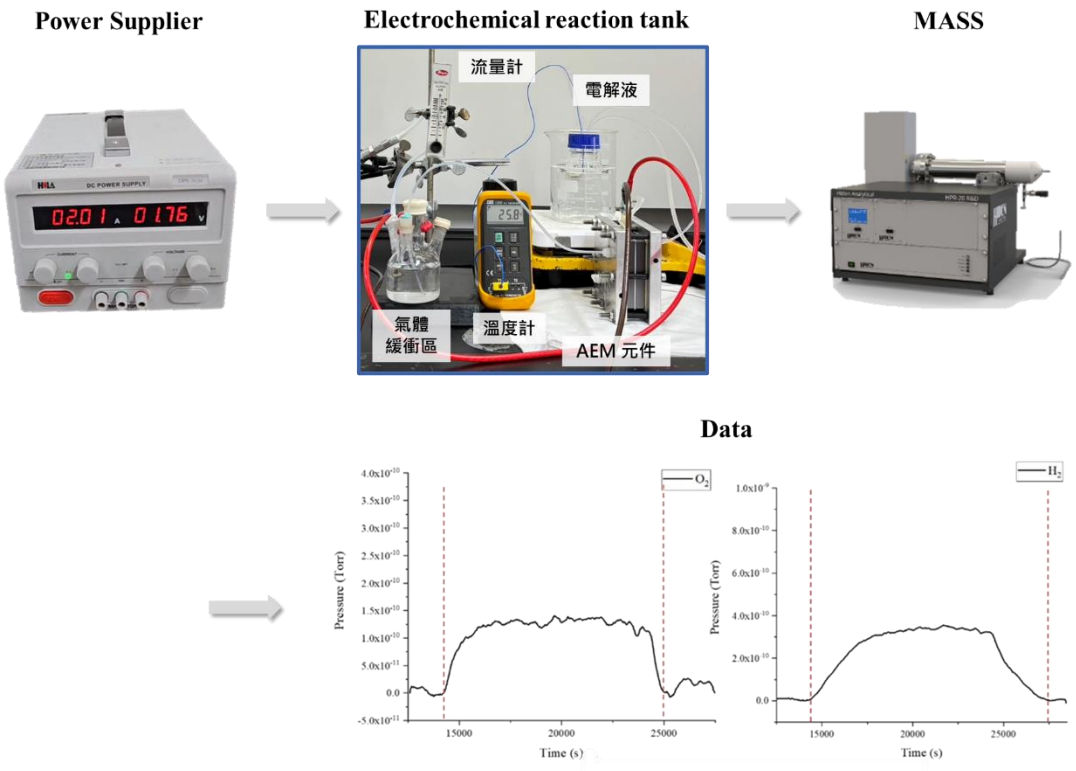

圖 7、臨場電化學-質譜儀的組裝及操作流程示意圖。質譜圖中的紅色虛線標示了水分解反應的起始和終止。

工作項目 二、海水電解單元件(單一個 cell)轉換效能與成本優化: (1) 水流道設計優化。(2) 水流道板材質(例:高緻密石墨板、不鏽鋼，不侷限上述材質)。(3) 在海水電解運作過程中，針對單元件中各部件進行抗腐蝕評估及材質優化。(4) 計算不同材質所需成本與效能，並提出最適合的單元件設計。

本計畫的海水電解單元件轉換效能與成本優化將從水流道板的材質選擇及流道設計著手。優先測試的水流道材質包括石墨和鈦板，而水流道設計方面，將針對指叉流場與蛇形流場進行比較研究。由於時程限制，本計畫將首先實施蛇形流場設計，而指叉流場設計將持續進行研究。

在選擇最優水流道板材質時，我們將綜合評估鹼性海水環境下的穩定性測試結果、單位成本 (以每平方公克的價格衡量) 及能源轉換效率。目標是提升現有文獻記載的能源轉換效率約 5% (Xu et al., 2013)。考量成本因素，初步測試將使用反應面積為 25 cm^2 的元件，進行不同水流道材質在海水環境中的穩定性比較。隨後，我們將選擇最適合鹼性海水環境的水流道板材料，並搭配蛇形流場設計，研製出反應面積為 100 cm^2 的單元件，進行為期一週的海水穩定性測試。在報告內文中，若測試時所使用的流道板為石墨材質，將會編號為「石墨單元件」; 若測試時所使用的流道板為鈦材質，則將會編號為「鈦單元件」。

1. 元件能源轉換效率測試:

在評估催化劑的催化活性之前，使用電源供應器向 AEM 元件提供直流電源，並先以 1 A 進行 40 分鐘來活化元件。之後，將電流從 0 A 起逐步增加，每次增加 0.1 A 直至達到 0.5 A，再將電流以 0.5 A 增量進一步提高，直到達到 10 A。在每個步驟中，保持每個電流強度持續運行 1 分鐘，並記錄對應的電壓值。通過逐步增加電流並記錄電壓值，我們能夠繪製出電壓 (y 軸) 對電流 (x 軸) 的極化曲線，並根據公式 [2]計算能源轉換效率。

$$\text{能源轉換效率} = \frac{1.23\ \text{V}}{\text{元件電壓 V}} \times 100\% \qquad \text{公式 [2]}$$

而能源轉換效率是將輸入的電能轉換為實際產生的氫氣能量的比例。因此若能提高能源轉換效率，意味著在相同的能量消耗下，可以產生更多的氫氣，從而使製氫過程更加高效和經濟。

在前一期的研究中，我們的 25 cm^2 陰離子交換膜單電池在鹼性海水環境下達到了58.5% (以理論電位 1.23 V 計算；若考慮電力在內電阻產生的熱量，則以 1.48 V 計算，為 70.4%) 的能源轉換效率。然而，當我們將電極面積擴大到 100 cm^2 時，由於內部阻抗增加，理論上效率可能會有所下降。因此，通過對以下幾個方面的優化，我們預期將能將效率提高至 63.5% (若以 1.48 V 計算，為 75.0%) 以上，並進一步提升系統的整體性能和穩定性。

首先，我們對海水流道進行了精細設計。優化的流道設計有助於均勻分布電解液，減少局部濃度差異，從而提高電解反應的效率。這種設計還能有效改善反應物的供應和產物的移除，進一步提升整體性能，確保反應過程中的每一部分都能保持最佳的反應條件。其次，我們選用了抗腐蝕性更強的流道板材質，這不僅延長了電池的使用壽命，還減少了由於腐蝕所引起的性能下降。在鹼性海水環境中，流道板的腐蝕會顯著影響系統的穩定性，因此選擇耐腐蝕材料是提高系統長期運行穩定性的關鍵。通過系統地改變這些參數並分析其對效率的影響，我們找出了最佳組合，顯著提升了能源轉換效率。這些優化不僅增強了催化劑的穩定性，也大大提高了整體電解效率。

2. 腐蝕分析:

石墨板及鈦板的腐蝕分析，我們將使用 SEM 觀察材料的腐蝕形態，從而更詳細地了解其耐蝕性能。同時，我們將利用 ICP 分析鹼性海水電解液中是否含有析出的金屬元素，進一步了解腐蝕過程中可能涉及的化學反應。TEM 可用來研究腐蝕後材料的內部結構變化，特別是對薄層或微觀區域的深入觀察。EDS 能夠測量材料表面或內部的元素分布和濃度，幫助我們確定在腐蝕過程中是否有金屬元素的析出，並揭示腐蝕產物的化學成分。

工作項目三、鹼性鹵水的處理方法與排放評估: 在與鹼性海水電解產氫原型機或本期計畫中優化後之水分解單元件結合的前提下，提出具體可行的處理方案。

本計畫目前針對初期電解產氫產生之鹵水進行分析，以下簡述使用之儀器種類與其相關原理說明。

1. 離子層析

離子層析 (Ion Chromatography, IC) 是用於分離和分析溶液中陰離子和陽離子的高效液相色譜技術，藉由不同離子在離子交換樹脂上的吸附和脫附行為的差異達到離子的分離和準確定量。IC 包括陰離子交換和陽離子交換兩種類型，通過溶液中的離子在移動相 (通常是含有緩衝溶液的水) 的帶動下進入色譜柱，並利用不同離子與固定相的相互作用力不同分離，經分離的離子依次通過電導檢測器，檢測器根據離子的電導率變化轉化為電信號並記錄生成色譜圖。離子層析技術在環境監測、食品分析和工業控制等領域有廣泛應用，如檢測水樣中的陰陽離子、分析食品中的無機離子含量以及監測工業廢水中的離子成分 (Michalski, 2018)。

樣品準備需過濾去除顆粒雜質並進行稀釋處理，本研究使用之儀器為 Shimadzu 之 HIC-ESP 離子層析儀，儀器採自動注射系統，每次注入體積為 20 μL。配置陽離子管柱為 Shodex IC YS-50 (125mm × 4.6 mm I.D.)，流洗液為 4 mM 甲基磺酸 (methanesulfonic acid)，流速為 0.5 mL/min，管柱分析溫度為 40 ℃，分析時間為 25 分鐘；陰離子管柱為 Shodex IC SI-52 4E (250 mm × 4.0 mm I.D.)，流洗液 3.6 mM 碳酸鈉 (sodium carbonate)，流速為 0.8 mL/min，管柱分析溫度為 40 ℃，分析時間為 35 分鐘。表 3為 IC 之相關參數。

表 3、離子層析儀之相關參數。

Ion chromatograph (Shimadzu HIC-ESP)	
Cation Column	Shodex IC YS-50 (125mm × 4.6 mm I.D.)
Eluent	4mM methanesulfonic acid aq.
Column Temperature	40℃
Flow Rate	0.5 mL/min
Injection volume	20 μL
Detector	Non-suppressed conductivity
Limit of detection	0.1 mg/L
Anion Column	Shodex IC SI-52 4E (250mm × 4.0 mm I.D.)
Eluent	3.6 mM sodium carbonate aq.
Column Temperature	45℃
Flow Rate	0.8 mL/min
Injection volume	20 μL
Detector	Suppressed conductivity
Limit of detection	0.1 mg/L

2. 氫離子濃度

水中氫離子濃度檢測係使用 HACH-HQ 4300 水質分析儀之 IntelliCAL®PHC101 數位複合型水中 pH 分析電極，並依照國家環境研究院公告之 NIEA W424.53A 檢測方法，利用電極法進行 pH 值測定。在此方法中，使用玻璃電極與參比電極 (通常為銀/氯化銀電極) 組成的複合電極測量溶液的 pH 值。測量過程中，將電極浸入水樣中，並讀取 pH 計上的穩定讀數。為了保證測量準確性，測量前需使用標準緩衝溶液對 pH 計進行 3 點校正。每一樣品皆執行重複分析，兩次測值差異小於 0.3 pH 單位。校正參數須符合下列管制範圍：(1)零點電位應介於 -25 mV 至 25 mV 之間或零電位 pH 值應介於 6.55 至 7.45 間。(2)斜率應介於 -56 mV/pH 至 -61 mV/pH 之間或 % 靈敏度應介於 95% 至 103% 之間。

3. 導電度

導電度 (Conductivity) 是衡量水中溶解鹽類離子總量的指標。導電度表示溶液傳導電流的能力，通常以微西門子每厘米 (μS/cm) 或毫西門子每厘米 (mS/cm) 為單位。本研究使用儀器為 HACH-HQ 4300 水質分析儀之 Intellical® CDC401 水中導電度分析電極，其量測範圍為 0.0 μS/cm - 200 mS/cm。儀器使用前以 0.01

M 標準氯化鉀溶液進行校正。水中導電度檢測係依照國家環境研究院公告之 NIEA W203.52C 檢測方法。導電度測量基於電導率的原理，即溶液中的離子在電場作用下移動，產生電流。導電度計通過測量溶液的電導率來計算其導電度。

4. 鹽度

鹽度 (Salinity) 表示水中溶解鹽類總量，通常以克每千克 (g/kg) 或千分之 (‰) 為單位，是海洋學和環境科學中的重要參數。本研究使儀器為 HACH-HQ 4300 水質分析儀之 Intellical® CDC401 水中導電度分析電極，其量測範圍為 0 - 42 ppt or ‰。儀器使用前以 0.01 M 標準氯化鉀溶液進行校正。水中鹽度檢測係依照國家環境研究院公告之 NIEA W447.20C 檢測方法，導電度法通過測量水溶液的導電率來推算其鹽度，因為溶液中的鹽類電解質能使水導電，導電率越高，鹽度也越高。導電度計利用電極在溶液中施加電壓，測量產生的電流，然後通過轉換公式或標準曲線將導電率轉換為鹽度值。

第三節、 各工作項目的章節對照表

表 4、各工作項目的章節對照表。

工作項目	對應的章節名稱及具體內容說明	頁數
工作項目一、海水分解產氫的長效穩定度測試: 達成連續一星期的電解海水產氫的運轉測試與條件優化: (一) 優化後之產氫元件在鹼性海水下電解運作達一週(含)以上。(二)元件、電堆及鹼性海水電解產氫機進行海水電解過程中，須提供對氣體產物的即時檢測內含物，含氯氣、氫氣、氧氣以及其他氣體的檢測。	第四章第三節	76-78
工作項目 二、海水電解單元件(單一個 cell)轉換效能與成本優化: (1) 水流道設計優化。(2) 水流道板材質(例:高緻密石墨板、不鏽鋼，不侷限上述材質)。(3) 在海水電解運作過程中，針對單元件中各部件進行抗腐蝕評估及材質優化。(4) 計算不同材質所需成本與效能，並提出最適合的單元件設計。	第四章第二節	64-75
工作項目三、鹼性鹵水的處理方法與排放評估: 在與鹼性海水電解產氫原型機或本期計畫中優化後之水分解單元件結合的前提下，提出具體可行的處理方案。	第五章	79-101

第四節、 計畫工作進度甘特圖

以甘特圖呈現本計畫之執行進度，請見下表 5。整體工作時程: 113 年 6 月至 113 年 12 月。

表 5、工作預定進度甘特圖。

工作項目	準備過程	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	備 註
工作計畫書與文獻蒐集									
優化海水產氫單元件材質及流道設計									
各部件進行抗腐蝕評估									
期中報告初稿			※						7 月 30 日前提送 1 式 10 份及電子檔 1 份
完成製造 100 cm^2 海水產氫單元件									
優化後之產氫元件達成連續一星期的電解海水穩定性測試									
穩定性的衰退率應<10%									
鹼性鹵水的處理方法									
期末報告初稿							※		11 月 15 日前提送 1 式 10 份及電子檔 1 份
成果報告書								※	
工作進度估計百分比(累積數)	5	30	50	65	80	90	95	100	

預定查核點	113 年 5 月完成工作計畫書與文獻蒐集、6-9 月產出及優化抗海水產氫單元件，並提出適用鹼性海水環境中，最適合的單元件設計。
	113 年 7 月期中報告初稿
	113 年 11 月期末報告初稿、12 月繳交成果報告

說明:(1)工作項目請視計畫性質及需要或依研究/計畫綱要說明訂定。預定進度以粗線表示其起訖日期。
(2)「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比為工作量之比重。
(3)每季之「預定查核點」，請在條形圖上標明※號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。

第三章、　重要文獻回顧

第一節、 元件組件材料的設計對 AEM 水分解元件性能的影響

電解水技術為了追求商業化、高能源效率和耐用性，除了推進不同技術之外，還需要克服多種障礙，包括氣泡覆蓋導致降低電極的有效表面積、元件能源轉換效率的提升以及元件的海水穩定性。元件組件從外側至內側依序為端板、集電板、流道板、催化劑與分隔膜，如圖 5 所示。若要在海水中應用電解技術，與海水直接接觸的部分需進行特別研發和探究，主要包括：(一) 催化劑的開發與優化，(二) 水流道板的設計與材料選擇。在催化劑方面，前期研究已經取得一定成果，為後續的技術推廣奠定了基礎。因此，本計畫將重點放在水流道板的設計與材料選擇上，以深入研究這一關鍵領域。

一、流道板

流道板的材質可分為三類，石墨、碳複合物與金屬。主要具有兩個功能，首先是將集電板的電子傳遞給陰極或陽極催化劑，形成穩定的電流路徑，使催化劑能夠正常與水進行氧化還原反應，從而產生氫氣和氧氣。其次為提供電解質的流動通道，促進電解反應的順利進行。

由於石墨具有出色的加工性，且容易與其他材料結合，因此在製造和安裝過程中具有高度的靈活性。此外，由於其原料較容易獲得、製程簡單及成本相對較低，這使其在經濟效益上具有優勢。石墨是純碳無機物，對氯具有高穩定性，且具有良好的導電性，適合應用海水電解。然而，由於石墨是多孔性材料，而氫氣及電解液容易滲漏。因此，在加工之前，石墨板會添加高分子，以封閉細微孔洞 (Zhou & Chen, 2015)。所以本計畫須研究及測試碳高分子複合物在鹼性海水中的穩定性，以確保其長期運行的可行性。

金屬流道板具有許多優點，如高導熱性、良好的導電性、優異的機械強度、抗衝擊性及低透氣性，並且能夠將流道板厚度縮小至 0.3-1 mm，從而減少重量和材料消耗。金屬材質可能因為氯離子而產生腐蝕，這不僅增加了電阻，還可能釋放金屬或腐蝕性離子，導致分隔膜受到汙染 (Zhou & Chen, 2015)。而鈦具有優異的耐腐蝕性能，能夠在極端環境下形成穩定的鈍化層，抵抗海水和其他腐蝕性介質的侵蝕。此外，鈦具有高度的機械強度，因此非常適合作為流道板的材料。然而，考慮到鈦的生產成本相對較高，因此在材料的選擇上需要

權衡成本和性能之間的平衡。

流道結構的設計對於電解水系統的效能有著深遠的影響。圖 8 顯示三種不同的流道結構，平行流場 (PFF)、指叉流場 (IDFF) 和蛇形流場 (SFF)，這些結構的設計影響了電解質與催化劑的接觸時間及質量傳遞的效率，進而影響整體反應效率。PFF 的設計使得電解液沿流道平行流動，並與催化劑表面的接觸時間相對較短。IDFF 與 PFF 結構相似，但其進口和出口交替封閉，以強迫電解質通過催化劑區域，這樣的設計能在一定程度上改善電解質與催化劑的接觸，從而增強質量傳遞效果，改善反應的均勻性。雖然指叉流場的結構較為簡單，但其有效的流動控制可顯著提高反應效率 (Macdonald & Darling, 2019)。SFF 具有複雜的流動路徑，能顯著延長電解質與催化劑的接觸時間。這樣的設計特別有助於增加電解質與催化劑之間的有效接觸面積，使氧化還原反應更為完全，進一步提升電解效能。

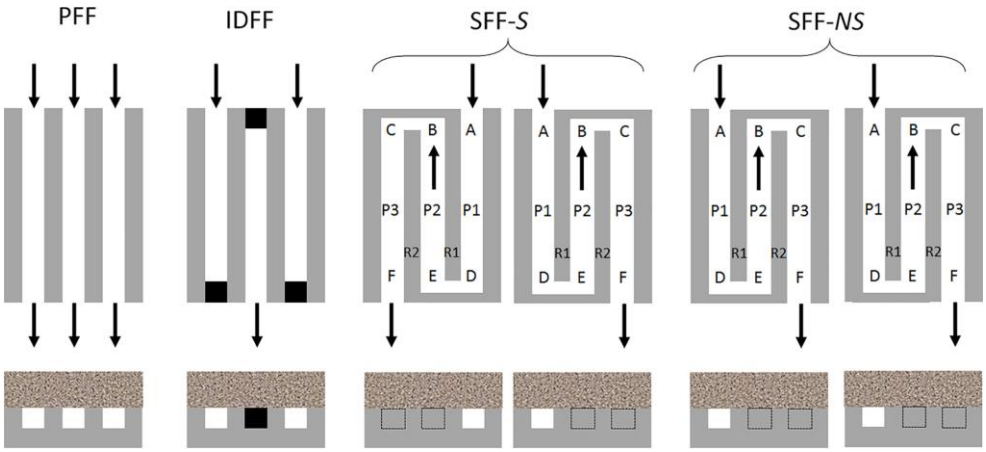

圖 8、顯示了平行流場、指叉流場和蛇形流場的示意圖和前視圖。在示意圖中，通道部分以白色呈現，屏障則以黑色標示，而電極則以點狀表示 (Macdonald & Darling, 2019)。

二、AEM 系統電解液供給模式

電解液供給有三種模式，分別為 Both wet、Cathode dry 和 Anode dry，如圖 9。Both wet 是將電解液同時供給兩個電極，研究發現 Both wet 的方式提升 OH^- 的傳輸，進而增加整體元件電導率，因此表現出最好的性能，然而產出的氫氣含有水，與 Cathode dry 相比之下，氫氣純度較低。Cathode dry 則為僅向陽極供給電解液，僅靠分隔膜傳遞 OH^- 至陰極端，因此反應速率相較 Both wet 慢，然

而由於未通任何電解液至陰極，因此所產生的氫氣純度相對較高。Anode dry 為僅供給電解液至陰極，然而陽極的 OER 反應本身就相較 HER 反應在動力學上更緩慢，需要更大的電壓才能驅動來克服反應能障，並且在電解液未能充分與陽極催化劑接觸的情況下，導致 Anode dry 的效率是三種模式中最差 (Kang et al., 2022; Park et al., 2019)。

綜合考量產氫純度和電解效能，本計畫將選擇 Cathode dry 模式進行測試，旨在平衡氫氣純度與系統的性能表現，確保實驗的可靠性並提升結果的應用價值。

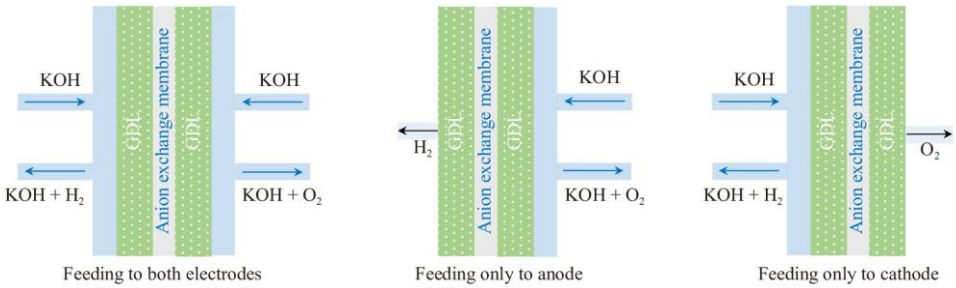

圖 9、電解液的三種供給方式示意圖，Both wet, Cathode dry, Anode dry (Ling, 2023)。

三、 氣泡的影響

隨著電解過程的進行，氫氣和氧氣氣泡會分別在陽極和陰極表面形成。然而，這些氣泡僅在其達到足夠大時才會從表面脫離 (Vogt & Balzer, 2005)。在氣泡脫落之前，電極表面被氣泡覆蓋的區域無法與電解質接觸，這會阻礙電子轉移過程。這不僅使得水的分解變得更加困難，還會造成電極和電解質之間的氣體界面，進一步增加水電解過程的阻力，從而顯著提高系統的能源損耗。為了解決這一問題，通過促進電解液的循環流動，能夠有效地幫助氣泡脫離電極表面，從而減少氣泡對水分解的影響。然而，僅僅提高流速並不能產生最佳的轉換效能，還需要考慮電解液與催化劑之間的接觸時間。此外，通過修飾電極表面使其更具親水性 (Shi et al., 2023)，可以降低氣泡的附著力，進而促使氣泡更快速地脫離。在本計畫中，我們選擇使用蠕動幫浦來促進電解液的循環流動，這樣可以有效促進氣泡的脫離，減少能源損耗並提高系統的效率。

四、電催化劑設計

本實驗室在多年研究的基礎上，發展並應用 ARD (Jhang et al., 2018)，並取得了顯著成果。如圖10所示。該技術利用強氧化劑的高反應性，使第一周期中的豐富過渡金屬發生氧化還原反應。以 Co 和 Mn 為例，其反應過程如方程式[5]所示。ARD 技術能夠在各種基板上形成連續且緻密的金屬氧化物薄膜 (見圖 11)。在電解水過程中，催化劑中不同金屬的電子特性及其相互作用會導致原子級的結構缺陷，從而展現出卓越的反應活性。實驗結果顯示，這種薄膜催化劑在 OER 中的活性極為優異，可與目前市售的貴金屬催化劑媲美 (Jhang et al., 2018)，如圖 12 (a, b) 所示。此外，該催化劑能夠牢固地附著於基板上，即使經過18小時的運行後，仍能保持穩定的電流密度，見圖 12 (c)。

與稀有且昂貴的貴金屬催化劑相比，ARD 技術成功地將電解水催化劑的材料成本降低了千分之一，為該領域提供了一個嶄新的選擇方向。通過這項技術，不僅能實現高效且穩定的電解水反應，還能顯著降低成本。，對實現更廣泛的商業應用具有重要意義。

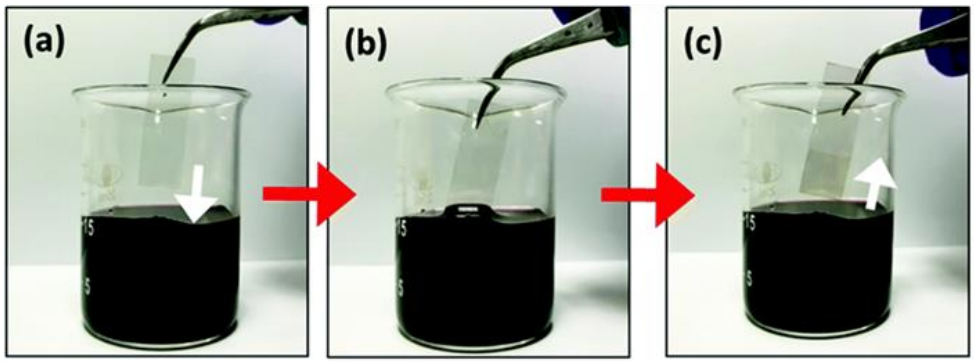

圖 10、ARD 技術實驗步驟。 (a) 將電極板浸入水性反應槽中，(b) 在特定時間內進行反應，最後 (c) 在電極板上形成完整的薄膜。 (Jhang et al., 2018)

$$9\ Co^{2+}_{(aq)} + 3\ MnO_4^-{}_{(aq)} + 14\ H_2O_{(l)} \rightarrow Co_9Mn_3O_{26}H_{13(s)} + 15\ H^+_{(aq)} \qquad [5]$$

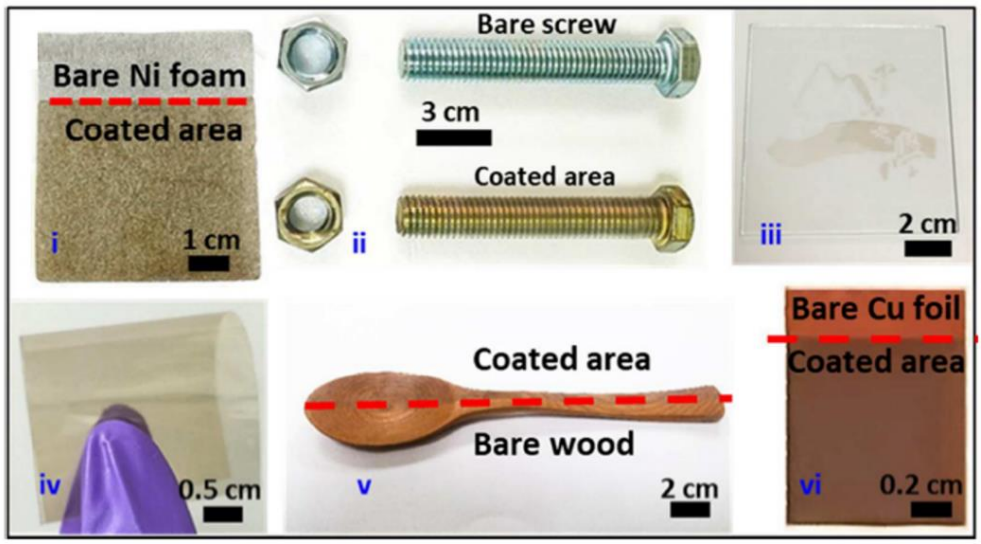

圖 11、 ARD 法能夠在任意基板上沉積薄膜催化劑，包括 (i) 金屬多孔結構; (ii) 複雜表面; (iii) 有機高分子 (PET); (iv)，薄膜催化劑經過摺疊後，結構並無碎裂; (v)木質曲面; (vi) 金屬表面銅箔。 (Jhang et al., 2018)

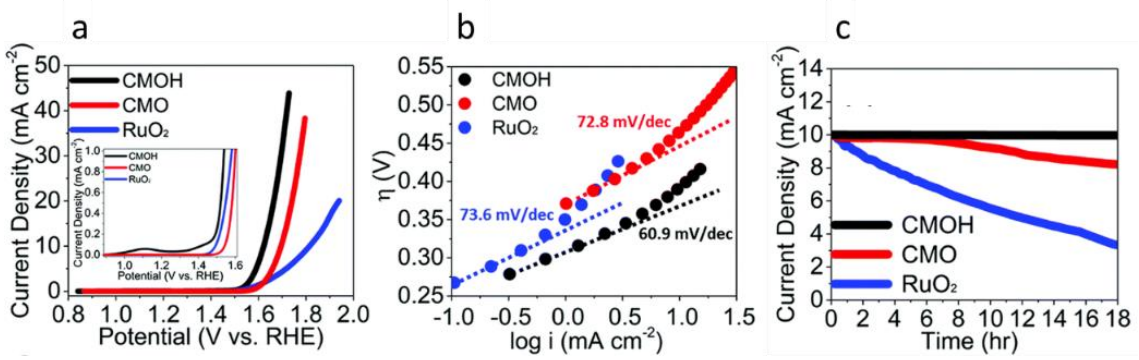

圖 12、無晶向薄膜催化劑、具有晶向薄膜催化劑以及貴金屬的 (a) OER 活性比較，縮圖為放大圖。 (b) Tafel 斜率計算。 (c) 穩定性測試。顯示無晶向薄膜催化劑表現出優異的穩定性，能夠長時間運作。 (Jhang et al., 2018)

ARD 技術還可根據不同需求摻雜特定金屬元素，並促進多種金屬元素的氧化還原反應。例如: 摻雜金屬元素可增加催化的反應面積 (Dong et al., 2018; Wu et al., 2018)、強化催化活性 (Feng et al., 2020)、提升催化劑的導電度 (Sun et al., 2021)、改變電子結構 (Bates et al., 2015) 與具有抗腐蝕能力 (Vos et al., 2018)。本實驗室成功將多種金屬元素 (如 Co、Mn、Fe、Ag、Ce、V、Zn 及 Cu) 摻雜至薄膜催化劑中(Yeh et al., 2021; Zegeye et al., 2022)。大幅提升了催化劑性能，為電解水技術提供了更具經濟性和高效的解決方案。

而 ARD 技術利用高錳酸鉀的強氧化力，使催化劑具有優異的附著性，牢固黏附在電極表面。即使經過 100 次的 3M 膠帶撕貼測試，薄膜催化劑依然完好無損 (見圖 13)，且於水分解過程中，能穩定運行超過 720 小時，展現其長效和經濟性。在高電流水分解中，此過程中生成的大量氣泡會產生極強壓力，攻擊催化劑與基板交界處，常導致催化劑從基板剝離。然而由於本團隊催化劑具有完整包覆且高附著力的能力，即便在 5 A/cm² 的高電流密度下依然能穩定運行，相比之下，市售的粉體貴金屬催化劑在運行時逐漸脫落至電解液中，顯示出較差的耐久性。

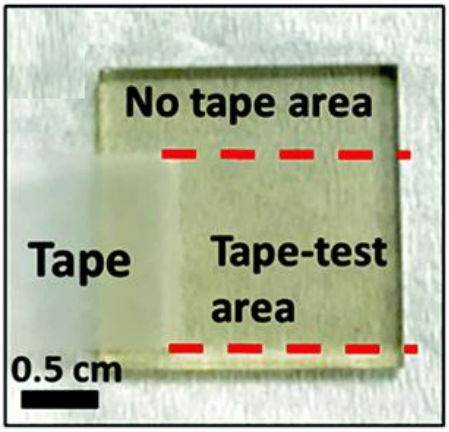

圖 13、薄膜催化劑經過透明膠帶重複 100 次黏與撕的附著力測試。 (Jhang et al., 2018)

另外本研究團隊透過選擇特定陰離子配位基，成功調節薄膜催化劑的最大厚度。若需要更精確的調整，則可改變反應時間和濃度。例如，縮短反應時間或降低濃度能減少薄膜厚度。根據以往的經驗，薄膜厚度可以控制在 1 nm 至 400 μm 之間。文獻指出，當薄膜厚度小於 100 nm 時，會出現量子穿隧效應 (Quantum tunneling effect) (Simmons, 1963)，這有助於電子更快地與催化劑表面上的水分子反應，從而有效提升催化活性。

利用氧化還原鍍膜技術結合捲送製程 (見圖 14)，我們只需將電極基材浸泡在特定的金屬反應液中，無需精密的參數設置或大型設備，即可大規模地製備催化劑。實踐證明，每小時可製備 5 m x 0.25 m 的催化劑，捲送製程減少了人工成本，成功實現了催化劑的試量產，並邁向商業化規模的發展。

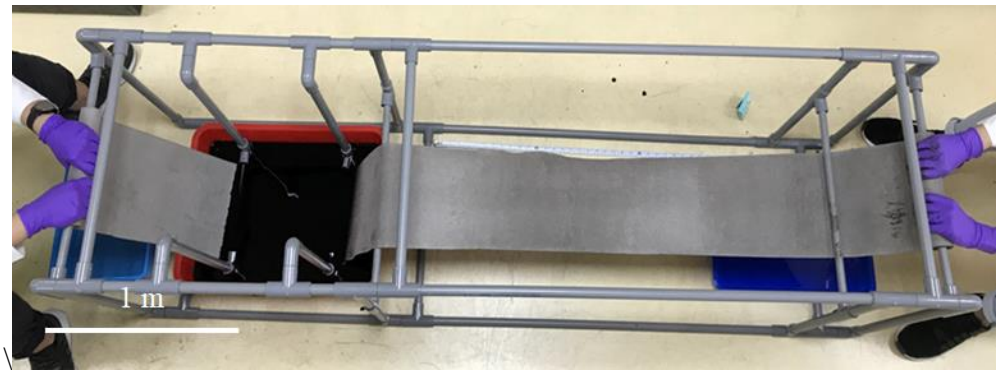

圖 14、捲送製程進行試量產薄膜催化劑的過程。 (Devi et al., 2023)

我們團隊透過特定抗腐蝕金屬元素的結合，開發出具抗 ClO^- 離子腐蝕特性的薄膜催化劑。此外，該催化劑在電極表面形成一層緻密完整的保護層，有效阻擋了金屬電極與 ClO^- 的反應，從而保護電極並確保其持續穩定運轉。這層催化與保護層的組合，不僅延長了電極的壽命，還提升了整體性能。透過 ARD 技術開發的薄膜催化劑具有大面積製備、高產量、低成本、強附著力等特點，並展現出卓越的活性，使其成為抗海水腐蝕水分解催化應用的理想選擇。

第二節、 鹵水處理

由海水淡化技術所產生的鹵水，其處理方式有直接排放、地下注入、土壤再利用、蒸發處理、薄膜處理、離子交換、電透析等，目前全球最常使用的鹵水處理方式為透過地表水排放系統直接排放進入海洋中。鹵水中因含有高濃度鹽類、微生物、固體顆粒及預先處理的化學物質 (如混凝劑、阻垢劑等)，為避免對排放區域之海水鹽度、溫度、pH 值，或甚至底棲生物群落、海洋滲透平衡受到影響，產出之鹵水需經過完整水質分析，並根據分析結果進行適當的排放規劃或進一步處理，後續執行長期監測，以確保對環境生態無顯著影響。以下簡述常見直接排放的做法及規劃注意事項。

一、直接排放方式

將鹵水直接排放至海洋、河流、湖泊或下水道中，是目前最常見的鹵水處理方式，而將鹵水直接排放至海洋中在海岸附近地區更是常見的海上鹵水排放技術之一，船舶和海上平台則可以通過排放管道將處理過或未處理的鹵水直接排放到海洋中 (Panagopoulos, Haralambous, & Loizidou, 2019)。這種技術的優點是簡單易行，但如果未確認水質成份與濃度範圍或未經適當規劃即直接排放到海洋中，可能因鹵水排放至水中造成局部營養化對生態平衡造成影響，因此這種處理方式需要嚴格遵守當地及國際上的排放法規和標準，以降低對環境生態的影響及破壞 (Julian, 2000)。本計畫目前規劃海水電解產氫產出之鹵水直接排放為一可能做法，惟須後續每次電解產氫產出鹵水之水質分析結果，並根據結果比對法規、模擬承受水體之影響、與配套可能排放方式確認，以下簡述鹵水直接排放需注意事項。

(一) 預先處理：鹵水在排放前需要先經過預先處理，像是利用過濾、沉澱、酸鹼中和或氧化等方法，降低污染物質濃度或調整鹵水 pH 值等，確保鹵水符合法規標準才能進行排放，如國內《放流水標準》中針對海水淡化廠將排放水直接排放於海洋者及《海洋放流管線放流水標準》。

(二) 點位選擇：排放點位的選擇對於排放的影響很大。當選擇排放至海洋時通常要綜合評估排放海域的海流、潮汐、深度、水質等水文特性，選擇混和作用強的海域為佳，能快速稀釋鹵水；另外，為減少對海洋環境生態的影響，因此排放點位也應選擇遠離海岸、漁場等重要生態區域為佳。當選擇

排放至其他淡水水體時則應該選擇在對環境生態影響較小的區域進行，須注意排放的流速、流量和擴散情況，避免對附近水體和生態系統造成嚴重影響。另國內法規《海域環境分類及海洋環境品質標準》亦可能影響此部分做法。

(三) 排放操作：若有控制排放或緊急情況需要時，可利用調整排放量、排放速率、排放時間等方式配合。

(四) 監測與調整：實施排放後，需長期觀測排放對海洋環境生態及水質的影響，並依據監測結果進行排放措施的調整及修改。

二、海底、浮動式、以及分批排放方式

海底排放 (submarine outfall) 技術是將鹵水通過管道排放到海底深處，以減少對水面和沿岸地區的影響，海底排放通常用於需要將鹵水排放到遠離岸邊的地區。浮動式排放 (floating outfall) 技術則為其中一種排放方法，其通常用於遠離岸邊的區域，將處理過的污水通過浮標或浮筒結構排放到海洋表面。這可以減少對海底生態系統的影響，但需要注意避免對海洋表面造成污染。浮動式排放可進一步分為浮標式與浮筒式排放：浮標式排放 (buoyant outfall) 將排放管道的末端連接到浮標上，使排放口處於水面以上，浮標可以是單獨的浮筒或具有固定結構的浮標系統，此排放方式使得污水能夠在接近水面的地方排放，有助於減少對水底生物的影響；浮筒式排放 (floating outfall) 將排放管道的末端連接到浮筒上，使排放口浮在水面上。浮筒可以是單個大型浮筒或多個小型浮筒組合而成的浮動平台，此排放方式具有穩定性高、適用於深水區域等優點。

分批排放 (batch discharge) 技術是將污水排放分為多個批次進行，以減少單次排放對水體的衝擊 (Lin et al., 2013)。分批排放通常用於需要控制排放量和頻率的情況下，並分為下列不同排放方法：

(一) 時間間隔排放：將排放活動分為多個時間段，每個時段間有一定間隔，例如將一個大型排放活動分為幾個小時，每小時進行一次排放。

(二) 區域分區排放：將排放活動分為不同的區域或位置進行排放，以便降低單個區域的負荷和影響，此方法可以幫助減少排放對特定區域的壓力。

(三) 容量分配排放：根據水體的容量和特性，將排放活動分為多個批次進行排放，例如根據水體的流量和混合度，調整每批次的排放量。

(四) 數量控制排放：根據排放源的特性和要求，將排放活動分為多個相等的數量進行排放，藉此提高排放穩定性和一致性。

(五) 梯度排放：將排放活動分為多梯度進行排放，即從低濃度或低水量到高或從高到低進行排放。這可以減少排放對水體的突然衝擊，有利於水體的自然調節。

三、排放管線及噴頭

鹵水排放可利用不同長度、管徑、材質的排放管線搭配不同規格的噴頭進行排放，通常會依排放海域或鹵水排放量的不同而有所調整，由於海水製氫技術尚在開發階段，沒有實際運營的排放管線及噴頭可作為參考，且目前亦尚未確認未來將採何種設置模式，本次報告暫先說明國內海水淡化廠部分排放管線設計，並將這些資訊作為後續規劃海水產氫技術鹵水排放方式之參考。

大金門海水淡化廠排水管線設置如圖 15。排水口位於料羅東南岸砂石場附近，利用管溝埋設，自大金門海淡廠沿伯玉路，轉環島南路後再轉折向東約 300 公尺，至東南方海岸邊，屬礁岩岸特性，現場最高潮位與最低潮位差約 7.1 公尺左右，與取水口相距約 300 公尺，外管徑 400 mm，內管徑 370 mm。

圖 15、大金門海水淡化廠排水管線設置。

臺南海水淡化廠興辦計畫中的排水管線設置如圖 16。排水管線路線規劃為沿青山漁港北防波堤北側 50 公尺範圍線，管線採平行佈設，避開南側青山漁港航道、台江國家公園海域範圍及外海電纜、油管管線等可能限制條件，另離岸

500 公尺，水深約 5 公尺，排放位置另須考慮海域流向、流速與環境敏感區位。排水管管材為高密度聚乙烯管，管徑為 1,500 毫米，海域段管線長度第一期為 1.5 公里，第二期延伸至 2 公里，排水口高程至少高於 -9.3 公尺，離近灘地管線埋設深至少 2 公尺，碎波帶管路埋深至少海床下深度 1.0 公尺以下，排水口埋設深度則需高於海床 2.2 公尺。排水方式考慮分散鹵水排放，加速擴散平衡，故規劃採用多點擴散方式如圖 17，以 15 公尺為豎管間距，設置四個豎管，排列方式分為東西向及南北向兩種，將依據施工狀況做調整，架高排放豎管管徑為 350 毫米。

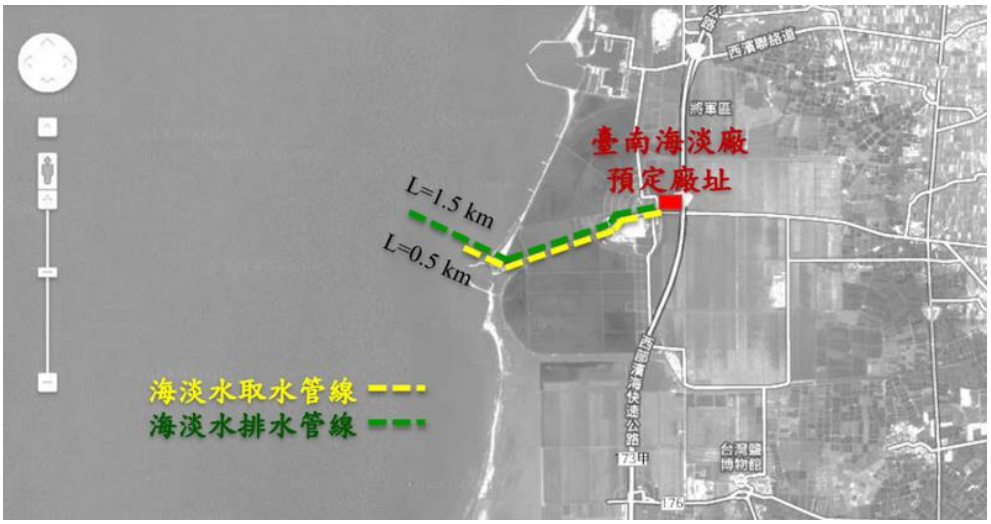

圖 16、臺南海水淡化廠興辦計畫排水管線設置。

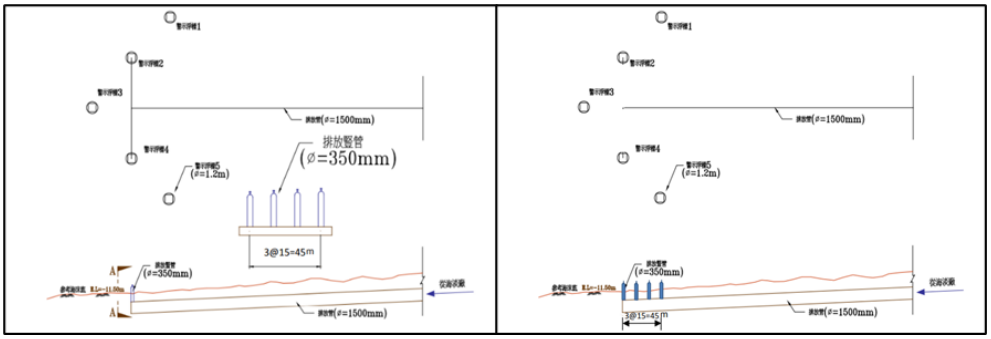

圖 17、臺南海水淡化廠興辦計畫多點式排放豎管設計。

擴散器的安裝也是近年來鹵水排放設計所關注的重點之一。有研究指出安裝擴散器後加速了鹵水與海水的混合，得使得鹽水羽流消失 (dela-Ossa-Carretero et al., 2016)。另有研究在為期八年的觀測中發現，在安裝擴散器前，因鹵水鹽

度過高使得底棲生物群落受到嚴重的破壞，在安裝擴散器後，鹵水快速與海水混合，底棲生物群落則因此漸漸恢復至排放鹵水前的狀態 (Del-Pilar-Ruso et al., 2015)。另一研究利用模擬結果及現場觀測數據的映證，證明了安裝擴散器能夠有效混合海水並縮小鹵水影響範圍，並計算出了擴散器的最佳安裝角度 (60 度) 及速度 (>3.5 m/s) (Lizaso et al., 2018)。由此可看出安裝擴散器對於鹵水與海水的混合有極大的益處，不僅可以加速混合，從而減少鹽度帶來的影響，還可以使鹽水羽流消失，減少對底棲生物帶來的衝擊。本案在後續海水製氫鹵水排放系統的規劃及設計上，若因水質濃度偏高，亦可將擴散器的安裝納入規劃之中，以降低鹵水排放可能對環境之負面影響。

四、海放法規

《海域環境分類及海洋環境品質標準》第 2 條至第 3 條定義了三種用水：一級水產用水、二級水產用水及工業用水，而依照海域環境可適用之用水種類將海域分成甲類、乙類及丙類；第 4 條至第 7 條則歸納出各海域適用的水質標準；第 8 條針對臺灣地區將沿海海域進行海域環境分類。

《放流水標準》係依水污染防治法第七條第二項規定訂定，第 2 條訂定了適用於不同類型的事業、污水下水道系統及建築物污水處理設施的放流水標準，須依附表規定之水質項目及限值辦理；第 2-1 條特別說明了海水淡化廠排放之廢 (污) 水適用之放流水標準、排放鹵水及過濾反洗廢水、薄膜清洗廢水或其他與海水淡化有關作業廢水混合排放者的相關規定，包含水溫、氫離子濃度、化學需氧量、懸浮固體、總餘氯及各類重金屬等；而採海洋放流管線排放於海洋者，適用《海洋放流管線放流水標準》。

《海洋放流管線放流水標準》係依水污染防治法第七條第二項規定訂定，第 2 條訂定了適用對象為廢 (污) 水以海洋放流管線排放於海洋之事業或污水下水道系統；第 3 條則說明海洋放流管線放流水標準須依附表所規定之限值辦理，分別適用於甲類海域與乙類海域，包含氫離子濃度、生化需氧量、化學需氧量、懸浮固體、各類重金屬及有害物質等。

依據《海域環境分類及海洋環境品質標準》之分類標準，黑潮發電海域位於臺東外海，屬於甲類海域，須依據此法規第 5 條所規範之甲類海域水質標準，以及《海洋放流管線放流水標準》附表一之甲類海域水質標準進行本案鹵水排放水質管理。隨著海水淡化廠陸續建成並投入運營，以及海水製氫技術的開發，

鹵水排放的議題逐漸受到重視，成為環境監管機構的關注重點，在訂定受納水域排放標準時，將重點放在鹵水量的最小化以及鹵水品質的監測和報告，由於世界各地的環境法規差異甚大，本次報告整理臺灣及部分國家鹵水排放標準，如表 6 與表 7 所示。

表 6、臺灣海水淡化廠放流水水質項目及限值 (全國法規資料庫)。

項目	限值 (mg/L)
水溫(排放於非海洋之地面水體者)	< 38ºC（適用於五月至九月） < 35ºC（適用於十月至翌年四月）
水溫(直接排放於海洋者)	放流口水溫< 42ºC，且距排放口五百公尺處之表面水溫差不得超過 4ºC
氫離子濃度指數	6.0-9.0
化學需氧量	100
懸浮固體	50
總餘氯（或氯生成氧化物）	0.5
氨氮	20
陰離子界面活性劑	10
油脂（正己烷抽出物）	10
溶解性鐵	10
溶解性錳	10
鎘	0.03
鉛	1.0
總鉻	2.0
六價鉻	0.5
總汞	0.005
銅	3.0
鋅	5.0
銀	0.5
鎳	1.0
硒	0.5
砷	0.5

表 7、各國鹵水排放後承受水體之鹽度變化容許限值

國家/機構	鹽度（ppt）	合格排放點距離（m）
美國環保署	≤4	-
美國加州	≤40	304.8
西班牙	≤2	混合區
澳洲黃金海岸	≤1	50-75
南澳洲	≤2	120
日本沖繩	≤1	混合區

*混合區為廢水排放前進行初步稀釋處

資料來源：(Ogunbiyi et al., 2021)

五、鹵水排放環境監測

鹵水的排放除了需要注意海放法規上的限制外，還需要進行長期的環境監測結果來觀察對環境及生態是否造成影響，觀測結果若有異常，也可即時修正排放方式，像是預先處理鹵水、改變排放濃度、調整排放量及排放時間間隔，或是調整噴頭及放流管設計等，降低對環境的影響及傷害。

由於海水製氫技術尚在開發階段，沒有實際的環境監測結果，本報告暫先討論國內海水淡化廠環境監測報告中的海域水質監測結果 ，如表 8 及表 9 所示。

表 8、金門地區海水淡化環境影響說明書環境監測成果海域水質第一階段營運期間。

監測項目	監測結果	說明
水溫	13.1~32.9℃	
pH	7.8~8.2	符合乙類海水標準
鹽度	29.9~34.8 psu	
懸浮固體	6.2~136.0 mg/L	
油脂	<0.1~0.7 mg/L	符合乙類海水標準
溶氧	5.60~8.30 mg/L	符合乙類海水標準
總溶解固體	33,200~41,800 mg/L	
生化需氧量	<0.1~2.6 mg/L	符合乙類海水標準
砷	N.D.~0.0080 mg/L	符合乙類海水標準
汞	N.D.~0.0018 mg/L	
鎘	N.D.	符合乙類海水標準
鉻	N.D.	
銅	N.D.~0.0078 mg/L	符合乙類海水標準
鉛	N.D.~0.0080 mg/L	符合乙類海水標準
鋅	N.D.~0.0376 mg/L	符合乙類海水標準

表 9、112 年第四季馬公第一海水淡化廠營運期環境監測報告海域水質監測結果。

監測項目	監測結果	監測結果
海流流速	1.14~22.89 cm/sec	海域水質各測站項目測值均符合甲類海域海洋環境品質標準，且無異常現象發生。
流向	多偏東北向，介於 3.5~358.0°	
pH	均 8.2	
溫度	26.1~26.9℃	
鹽度	31.6~31.8 psu	
溶氧	6.2~6.4 mg/L	
懸浮固體量	ND~8.7 mg/L	
次氯酸鹽	0.02~0.06 mg/L	
生化需氧量	均為 ND	
大腸桿菌群	<10 CFU/100mL	
礦物性油脂	均為 ND	
硝酸鹽氮	0.04~0.10 mg/L	
總磷	<0.020~0.027 mg/L	

國內海水淡化廠的環境監測結果顯示排放水均符合法規標準且無異常狀況，說明鹵水直接排放對國內海水淡化技術而言為一常見且可行做法。除國內海水淡化廠有持續進行環境監測外，國外也有許多文獻研究海水淡化廠對環境及生態的影響狀況及因素。

在西班牙的逆滲透法海水淡化廠周圍海域，有研究利用鹵水影響海域及對照組海域互相對比觀察，發現大洋海神草 (*Posidonia Oceanica, P.oceanica*) 這種特有海草及棘皮動物在鹵水影響區域中的豐度相對穩定，魚類的豐度及物種豐富度則有所提升 (Sola et al., 2020)。在澳洲，有為期七年的研究指出在海水淡化鹵水排放期間，在排放口附近區域的魚類豐度增加了 279%，而在停止排放的期間，則會恢復至與運營前差不多的狀態 (Kelaher et al., 2019)；另有研究在實際採樣觀察後發現，海水淡化之鹵水對當地的環境生態並無造成明顯影響，有所影響的部分推測是由於擴散器使周圍海水流速增加，因而造成無游泳能力的物種受到影響 (Clark et al., 2018)。在阿拉伯半島的海水淡化廠，其鹵水有預先經過

與冷卻水的混合稀釋後才進行排放，有研究採集了取水口及排水口的海水水樣作為對比，發現其鹽度、溫度、pH 值皆相差甚小，也對當地魚類及蝦類進行毒性測試，皆為無毒性，顯示其經過妥善處理的鹵水毒性非常微弱，對環境生態的衝擊有相當程度的降低。

第三節、 去年成果

陳軍互教授團隊於 112 年進行國家海洋院的海洋能源浮動平台與繫纜暨設計人才培育_鹼性電解海水製氫技術前期研製研究，並於此節總結了去年所取得的成果。團隊運用獨創的 ARD 技術 (Jhang et al., 2018)，成功製作出具高附著力並能完全包覆的海水電解催化劑。這種催化劑包含抗海水腐蝕的金屬，能防止金屬元素與氯的反應 (見圖 18 a)，並均勻且緻密地覆蓋在電極基材上，為電極提供了雙重功能的保護與催化效果。這種薄膜催化劑在鹼性海水環境下表現出卓越的穩定性，可穩定運行超過 4 小時 (圖 18 b)。此外，與傳統商業貴金屬粉體催化劑相比，ARD 製備的催化劑具有優異的附著力，即使在 5 A/cm^2 的嚴苛條件下運行時，也無催化劑剝落現象，例圖 18 c。此技術不僅提升了耐久性，還顯著降低了製造成本，使得 100 cm^2 規模的催化劑得以成功實現大規模製造，如圖 18 d。

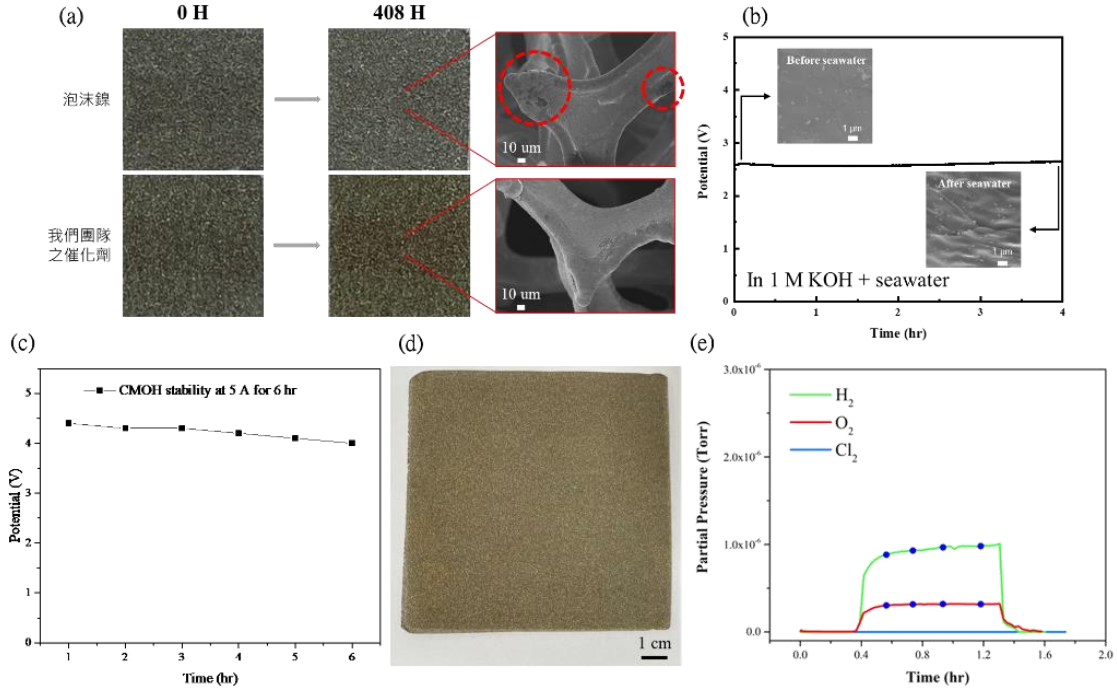

圖 18、(a) 鹽霧測試後，我們的催化劑無腐蝕現象，但 SEM 觀察到紅框處顯示泡沫鎳有腐蝕。(b) 在 1 M KOH 鹼性海水中進行的穩定性測試顯示，電壓無明顯上升，且 SEM 圖像證實我們的催化劑具有良好的抗腐蝕能力。(c) 在高電流密度 5 A/cm² 下進行的 6 小時穩定性測試顯示，催化劑未剝落且電壓無上升，證明其穩定性。(d) 我們利用 ARD 技術成功大規模製作了 10 x 10 cm² 的催化劑。(e) 質譜儀分析表明，鹼性海水電解過程中僅生成氫氣和氧氣。

後續，我們將抗海水腐蝕催化劑組裝成反應面積為 25 cm² 的陰離子交換膜單電池。在鹼性海水環境下，該電池的能源轉換效率達到 58.5% (以理論電位 1.23 V 計算；若考慮電力在內電阻產生的熱量，則以 1.48 V 計算，為 70.4%)。圖 18 e 顯示，通過高解析質譜即時分析，我們觀察到鹼性海水分解過程中未生成任何氯氣，法拉第效率接近 100%，顯示出該抗海水腐蝕催化劑在水分解反應中的優異性能。

最後，我們成功將 100 cm² 的催化劑與其他零組件整合，開發了一套鹼性水電解產氫機 (圖 19)。在 1 M KOH 的環境下運行，該裝置每小時的發電量為 1.610 瓩，能源轉換效率為 29.89%，且氫氣純度達到 96.24% (含有水氣)。此外，在低溫海水和 14 伏電壓條件下，該系統也能只生產氫氣，不生成氯氣，能源轉換效率 25.25%。這些研究結果表明，電解制氫技術已達到技術成熟度等級 (TRL) 6，顯示出其在實驗和操作環境中的穩定性和有效性。

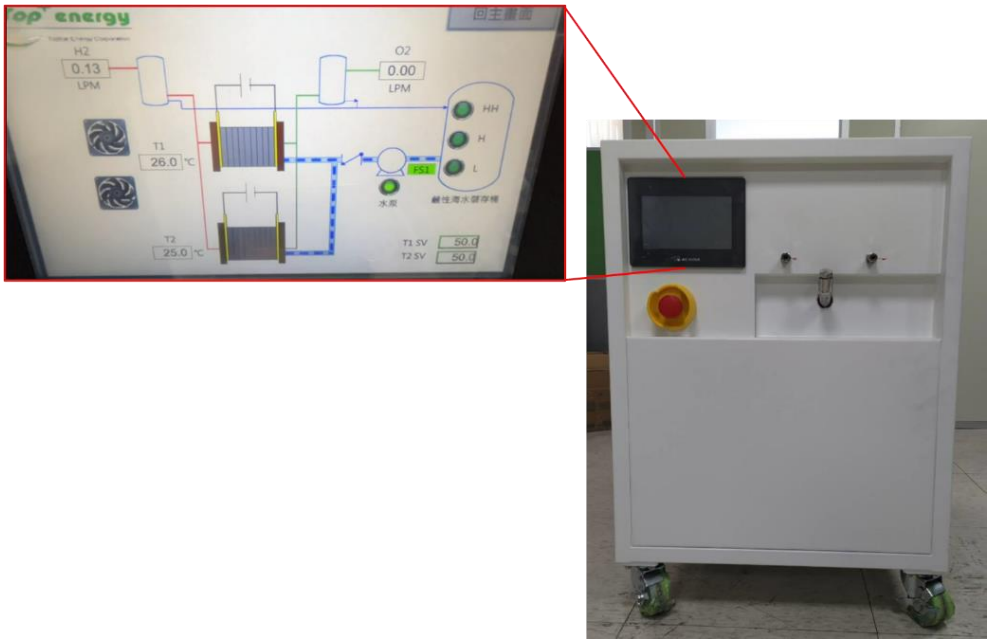

圖 19、鹼性水電解產氫原型機實際機組。插圖為時運作 10 分鐘後的人機介面。

然而，我們對於電堆及機組的研究仍需更深入，尤其是在實際應用於海水的環境中，仍然需要積累更多經驗和知識基礎，以有效解決前期所遇到的挑戰。我們初步選擇了具有標榜抗腐蝕性能的不鏽鋼作為流道板材料。然而，由於海水中含有腐蝕性的氯離子，經長期運轉後 (如圖 20) ，仍觀察到該不鏽鋼流道板受到了腐蝕，並且海水電解液中通過 ICP 檢測確認有不鏽鋼成分的析出，如表 10。因此，為提高系統的耐久性與穩定性，我們需進一步探討能真正有效抵抗海水中氯離子腐蝕的材料。

圖 20、不鏽鋼流道板經長期海水電解後，表面逐漸被腐蝕損壞。

表 10、ICP 檢測分析電解後之海水中的不鏽鋼成分。

元素	ppm
Cr	7.91
Fe	54.06
Mn	1.01
Ni	7.06

在之前的海水電解實驗中，我們發現經過一天的電解後，系統中仍保有 80-90% 的水量。由於水量保持穩定，我們推測海水的濃度並未顯著上升，因此尚未深入研究鹼性海水電解後的鹵化物濃度及有機成分的變化。基於此，我們決定在本次計畫中深入探查這些因素，以更全面地了解海水電解過程中的變化並提升系統的效率和穩定性。

海水的導電性會引發歧路電流問題，電流往往會偏向於沿最短路徑流動，繞過單元件間的設計路徑，導致電堆中央和兩端的單電池電壓形成微笑曲線。這使得中央電池的電壓偏低，可能低於水分解反應的電壓，而最外部的電池電壓則已超過設定的分電壓。這種電壓不均衡直接導致供給的電能以放熱形式浪費掉，從而大幅降低能源轉換效率。在從元件發展到原型機的過程中，這一問題尤為明顯，並且隨著電堆效率的下降，機組內部溫度快速上升，可能會對內部零組件的使用壽命產生不利影響。

先前的原型機採用 10 個元件組成一組，共兩組，因此出現了上述問題。然而，雖然單個元件的能源轉換效率較高，但從經濟效益的角度來看並不理想。為了提高能源轉換效率並延長系統壽命，建議未來研究可從 3 至 5 個單元件組成的微型電堆開始。這樣的設計有助於更有效地控制並觀察歧路電流的生成及其影響，同時可結合過去在液流電池研究中的相關經驗，進一步優化電流傳導路徑，以減少不必要的能量損耗並提升整體效能。

在本研究中，我們將探討石墨、鈦或複合材料流道板在海水中的穩定性，旨在找到最適合海水環境下使用的材料。除了對材料穩定性進行評估，我們還將通過流道設計來優化海水系統下 100 cm^2 單電池的效率。未來的研究將進一步探索電堆中電池的面積、數量以及電堆數量等參數的最佳配置，以提升系統的整體效能。更重要的是，我們將致力於開發具有更高活性的抗海水腐蝕催化

劑，以進一步提升能源轉換效率。

也將專注於了解電解過程中海水中各元素的變化。我們將運用各種檢測方法來分析海水中主要元素 (鈉、鉀、鎂、鈣、氯等) 及微量元素 (如銅、鋅、銀等) 的含量變化。尤其在微量元素分析中，我們將特別注意基質效應的影響，確保測量結果的準確性和可靠性，從而為未來的優化設計提供數據支持。

第四章、 研究結果之不同材質元件成本分析與海水電解產氫的長期穩定性測試

第一節、催化劑在電極表面完全包覆效果的分析

我方運用獨創的 ARD 技術 (Jhang et al., 2018)，成功製作出具高附著力且抗海水腐蝕的電解催化劑，並以均勻、緻密的薄膜形式包覆在電極基材上，提供了電極保護功能。為了確保每次合成的催化劑能夠達到預期的效果，並保持其穩定性與效能，本節將對催化劑完全包覆電極的效果進行詳細分析。

我們通過極端海水環境抗腐蝕測試，評估催化劑在電極表面的分布均勻性和附著力，確保其在極端海水環境中的性能穩定性。在鹼性海水環境下，對反應面積 25 cm^2 及 100 cm^2 催化劑施加高電壓 (5 V) 和高電流 (11-13 A) 進行電解 30 分鐘。在這樣的極端條件下，高電壓不僅能驅動水的分解反應，還能促使氯離子的氧化反應，模擬了催化劑在實際海水環境中的工作狀況。

以反應面積 100 cm^2 的催化劑為例，圖 21 展示了在極端海水環境下進行抗腐蝕測試的結果。通過對比測試前後的照片，我們可以觀察到，鎳泡沫電極在催化劑覆蓋下，測試後並未出現明顯的腐蝕現象，且氯離子未與鎳泡沫反應生成副產物。這一結果顯示，催化劑在測試後仍然均勻地覆蓋在電極表面，並未出現顯著的剝落或腐蝕跡象，這表明其具有優異的抗腐蝕性能和穩定性。此外，我們進行了線性掃描伏安法 LSV 分析，以進一步評估催化劑的活性在極端環境下的活性是否受到影響。結果如圖 22 所示，的活性曲線在測試前後未顯示出顯著差異，這表明催化劑在經歷極端海水環境的電解測試後，其催化性能未受到顯著影響。這些初步結果強調了我們所開發的催化劑在極端環境下的優異抗腐蝕能力及穩定性，並使其能夠在海水電解系統中作為關鍵材料，進一步提高系統的穩定性和效率。

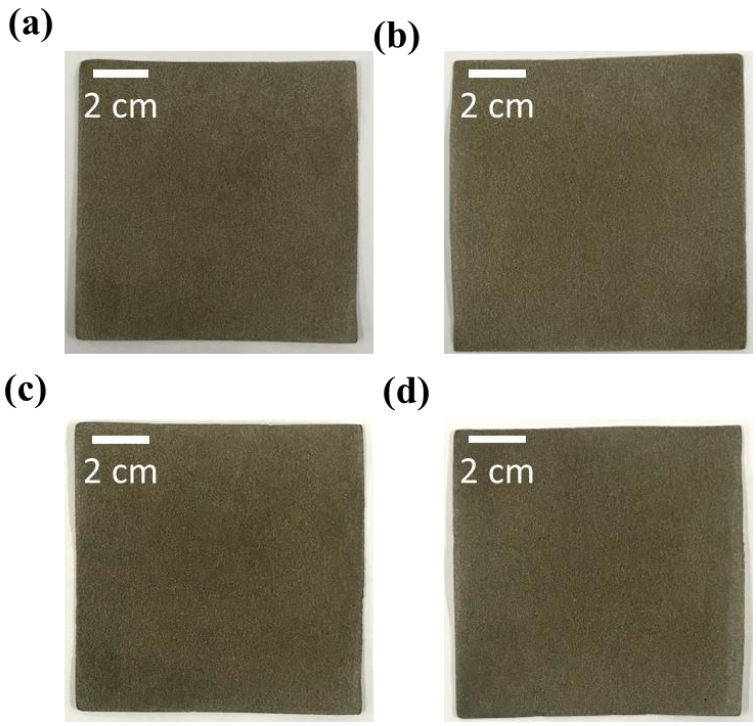

圖 21、在極端海水環境下，催化劑進行抗腐蝕測試的結果。分別為 (a, b) 測試前催化劑的正面與反面照片，(c, d) 為測試後催化劑的正面與反面照片。

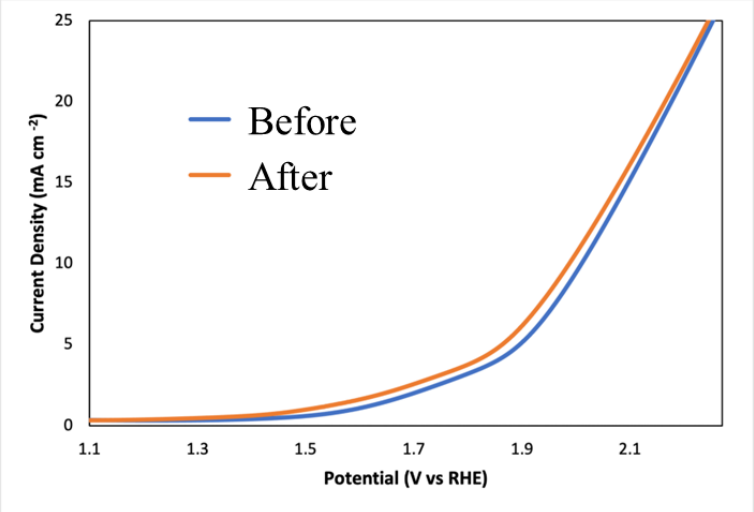

圖 22、催化劑進行極端海水環境抗腐蝕測試前後的 LSV 數據。

第二節、 研究成果之成本與效能比較-不同材質的水分解單元件的鹼性海水中穩定性測試

根據相關電池文獻，本研究將優先選擇石墨和鈦作為材質進行分析。石墨因具備低成本、良好的導電性和優異的機械強度，而鈦則具有卓越的耐腐蝕性和長期穩定性。在水流道設計方面，將針對指叉流場與蛇形流場進行比較研究。考量到計畫時程，本階段將優先實施蛇形流場設計，以確保關鍵試驗的進度與成果。針對指叉流場的設計與優化，則將持續進行深入研究，為後續開發提供改進依據。

一、鹼性海水的穩定性及能源轉換效率測試

本研究將首先探討不同材質的流道板在海水電解過程中的穩定性表現。重點關注流道板在長時間運行下的耐腐蝕性、結構完整性。評估其在海水環境中的適應性和長期穩定性，為後續的材料選擇和流道設計提供依據。我們經過極端海水環境抗腐蝕測試的催化劑，與端板、集電板、鈦或石墨流道板、陰極 (鉑碳催化劑) 以及陰離子交換膜一起組裝成單元件，並進行長效穩定度測試。

長效穩定度測試的電解配製如圖 6 所示。使用實際從西子灣撈取的海水，並加入 3 M KOH 顆粒，使鈣離子 (Ca^{2+}) 和鎂離子 (Mg^{2+}) 以氫氧化鈣 ($Ca(OH)_2$) 和氫氧化鎂 ($Mg(OH)_2$) 的形式沉澱，後續再過濾氫氧化鈣和氫氧化鎂，所收集的澄清液即為鹼性電解。接著，使用蠕動幫浦以固定流速將經處理的鹼性海水從電解液收集瓶輸送至陽極 (anode)，並最終將其導回電解液收集瓶中，形成持續循環系統。蠕動幫浦在運行期間不斷循環電解液，並通過溫度計和加熱板來固定反應溫度。為了實時監控反應過程中的氣體生成情況，陰極和陽極所產生的氣體出口管連接至質譜儀，此質譜儀每秒偵測數據點，因此可進行氫氣、氧氣和氯氣的即時分析。這樣的設置能夠幫助我們實時跟踪氫氣、氧氣及氯氣的生成量和濃度變化，從而評估系統運行的效率和反應特性。當環境條件設定完畢後，將電源供應器設定為 1 A 電流，對 AEM 元件進行 40 分鐘的活化。活化完成後，固定施加電流 2.5 A，並在一週的運作時間內，持續供電給 AEM 元件。全自動監控系統將實時監測並記錄整個運作過程中的電壓變化。

(一) 鈦單元件的鹼性海水中穩定性測試

我們對鈦單元件在鹼性海水中的穩定性進行了系統的測試，結果如圖 23、表 11 與圖 24。圖 23 (a) 展示了在電流 2.5 A (電流密度為 100 mA/cm^2) 的條件下，鈦單元件在鹼性海水中的電壓穩定性測量結果。我們觀察到，從測試開始到 150 小時，電壓保持非常穩定，沒有出現明顯的波動。而圖 23 (b) 電解液無觀察到任何改變，後續將會進行水質分析以確認其化學成分的變化 (結果詳見第五章)。將圖 23 (a) 的數據彙整為表 11，其中每 50 小時的電壓變化範圍僅為 0.01 V 至 0.05 V，顯示電壓變化非常小。為了量化穩定性，在將初始的 1.71 V 與 150 小時的 1.78 V 帶入公式 [1]，計算得到穩定性 4.09%，這一結果顯著低於標準上限 10%。這表明鈦單元件在鹼性海水環境中的電壓上升非常緩慢，顯示出極好的穩定性和耐用性。再根據公式 [2] ，可將所量測的電壓換算成能源轉換效率，電解 150 小時後，鈦單元件的效率 69.1% 較前一案的 25 cm^2 不鏽鋼元件 58.5% 提高了 10.6% (以理論電位 1.23 V 計算)，同時也高於 Enapter 62.5% 效率的 AEM 電解槽 (適用淡水系統)，提升了 6.6% (Enapter, online)。

圖 24 顯示了電解過程中氣體生成的情況。當單元件停止運轉時，檢測到的氫氣和氧氣壓力迅速下降，這與電解停止後反應的中止相符。且在連續三個循環中均觀察到相同的趨勢，顯示這些結果具有良好的重複性和可靠性。更重要的是，在所有測試過程中，質譜儀未檢測到氯氣的生成，證實了電能主要用於水分解反應，並未發生析氯反應。這一結果進一步表明鈦單元件能夠有效避免副反應，從而提高系統的效率和安全性，尤其是在鹼性海水環境中。

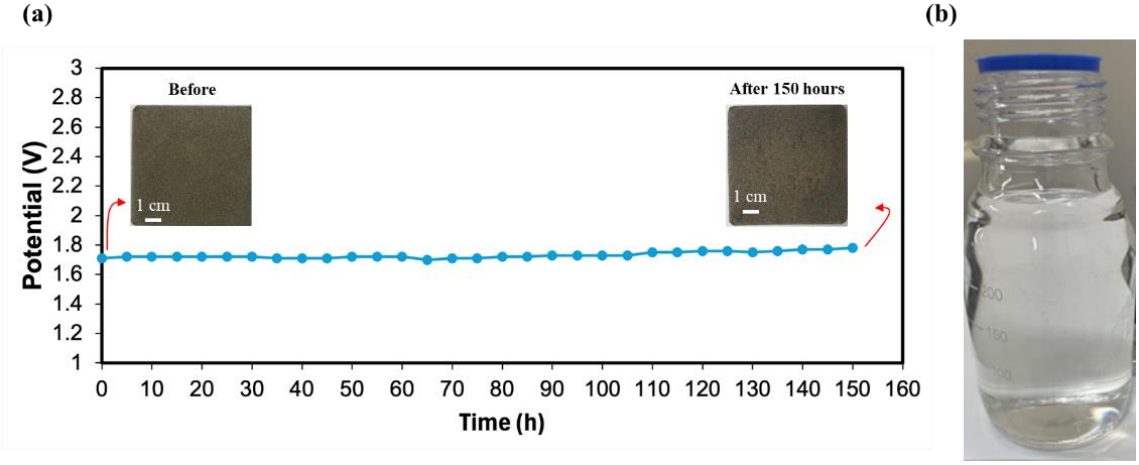

圖 23、鈦單元件在固定電流 2.5 A 進行 150 小時鹼性海水穩定性測試。(a) 電壓隨時間變化，縮圖為催化劑測試前後之照片。(b) 電解 150 小時後的電解液。

表 11、鈦單元件固定電流 2.5 A 時，每經過 50 小時所記錄的電壓。並以此評估系統的能源轉換效率及海水電解的穩定性。

Time (h)	0	50	100	150
Potential (V)	1.71	1.72	1.73	1.78
能源轉換效率 (%)	71.9	71.5	71.1	69.1
穩定性 (%)	4.09			

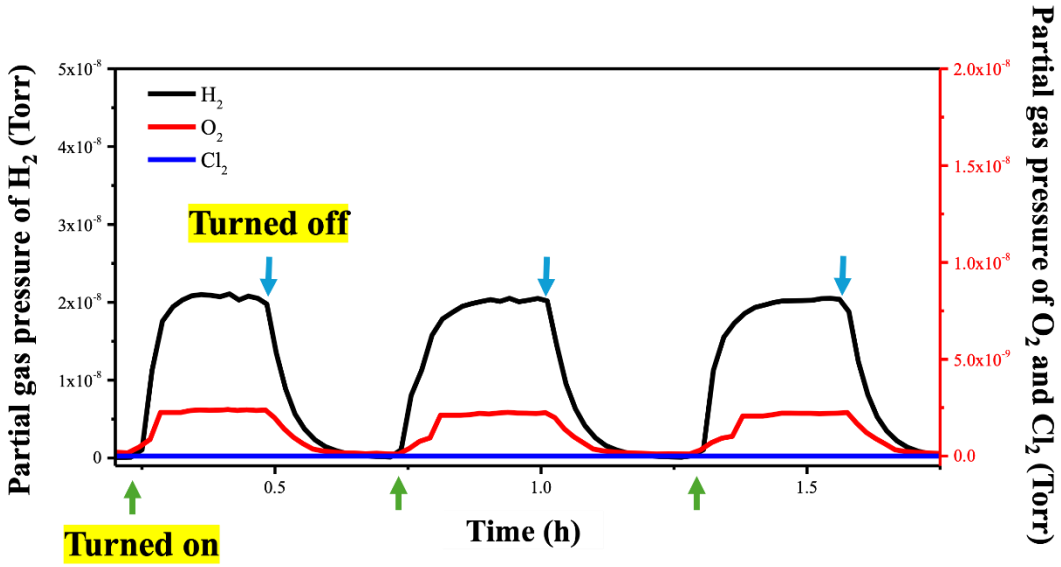

圖 24、氫氣、氧氣、氯氣的高解析質譜即時檢測。

然而，圖 25 顯示了鈦流道板在不同階段的狀態。圖 25 (a) 顯示了鈦流道板在電解過程開始前的初始狀態，此時流道板表面無異常顯示。而圖 25 (b) 展示了在進行了 150 小時的電解後的狀態。可以觀察到鈦流道板中間的反應區塊呈現黑色。這種顏色變化可能與鈦本身的化學反應與腐蝕有關，將需要進一步分析以確定其具體原因。

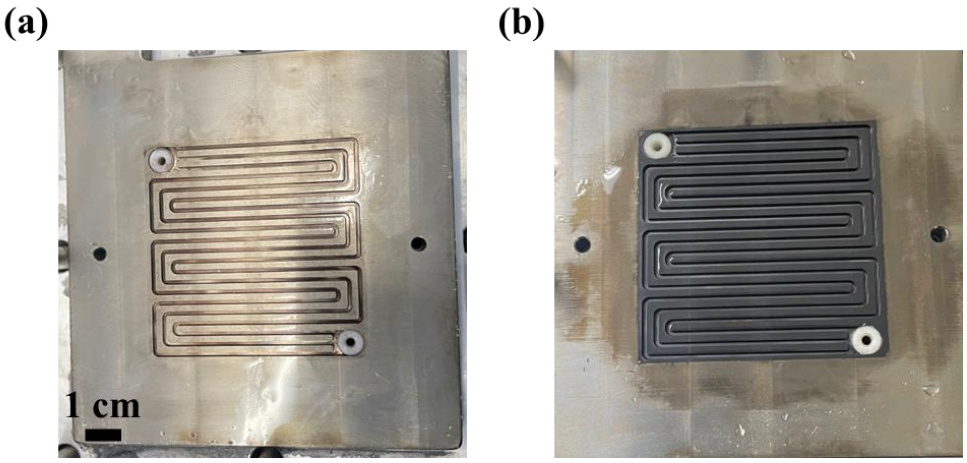

圖 25、鈦流道板 (a) 初始狀態，(b) 進行電解 150 小時後，鈦流道板中間的反應區塊呈現黑色。

(二) 鈦/催化劑單元件的鹼性海水中穩定性測試

基於鈦流道板在長時間電解過程中出現變黑的現象，我們計劃在其表面鍍上一層薄薄的催化劑，以期望達到保護鈦流道板，減少鈦金屬的化學反應和腐蝕。首先，使用膠帶將不需鍍催化劑的區域精確遮蔽，只保留中間的反應區塊。這樣可以確保催化劑僅沉積於預定的反應區域。將處理過的鈦流道板浸入金屬反應鍍液中，進行催化劑的沉積過程。通過控制沉積時間和鍍液組成，可以在選定的反應區塊上均勻地沉積催化劑，形成保護層。完成催化劑沉積後，對鈦流道板進行徹底的清洗，以去除多餘的鍍液。隨後，輕輕去除膠帶，揭露處理後的催化劑層，完成表面處理。即可得鈦/催化劑流道板，如圖 26。

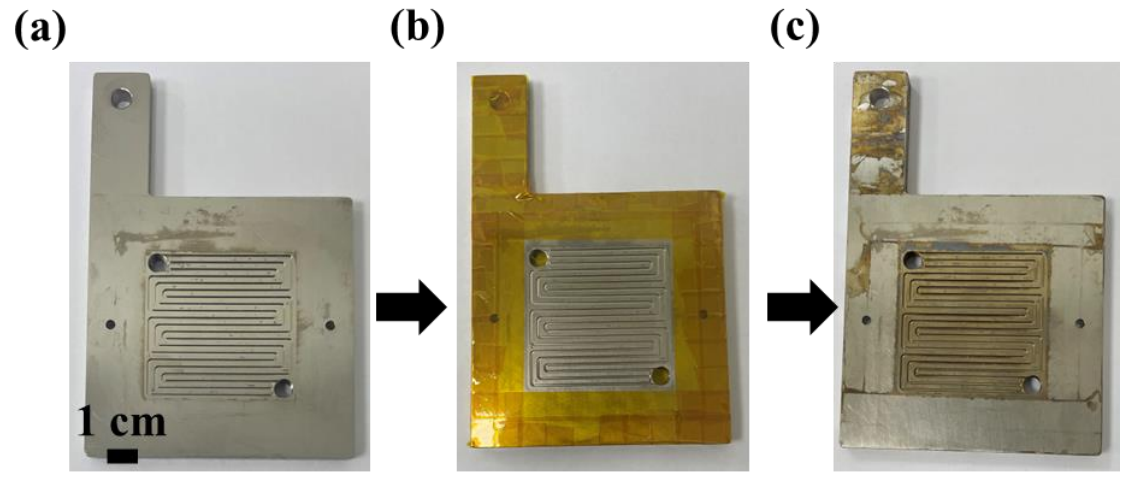

圖 26、鈦流道板表面沉積催化劑的流程示意圖。

之後，我們將鈦/催化劑流道板與其他零組件組合成完整的鈦/催化劑單元件，並在電流 2.5 A (電流密度為 100 mA/cm^2) 的條件下進行鹼性海水中的穩定性測試，結果如圖 27、表 12 與圖 28。圖 27 (a) 顯示了鈦/催化劑單元件在鹼性海水環境中的電壓變化情況。從測試開始到 150 小時，電壓從 1.95 V 上升至 2.16 V。相較於僅使用鈦的單元件，鈦/催化劑單元件的電壓上升幅度較大，表明其穩定性較差。而圖 27 (b) 電解液仍無觀察到任何改變，未來計劃進行水質分析，以確定其化學成分是否發生了變化。將圖 27 (a) 的數據彙整為表 12，並將初始的 1.95 V 與 150 小時的 2.16 V 帶入公式 [1]，計算得到穩定性 10.76%，此結果高於標準上限 10%。這些結果表明，在鹼性海水環境中，鈦/催化劑單元件的穩定性較鈦單元件差。根據公式 [2]，將測得的電壓換算為能源轉換效率。經過 150 小時的電解，鈦單元件的效率為 56.9%，較前一案 25 cm^2 不鏽鋼元件的

58.5%下降了 1.6%（以理論電位 1.23 V 計算）。顯示，再鈦板表面鍍上一層催化劑對穩定性和效率的提升作用並不顯著。

但是圖 28 (a, b) 仍顯示即便經過催化劑處理的鈦流道板在進行了 150 小時的電解後，中間的反應區塊仍然變成黑色。這表明，雖然催化劑層對鈦流道板提供了一定程度的保護，但在長時間的電解過程中，反應區域仍然發生了變色現象。

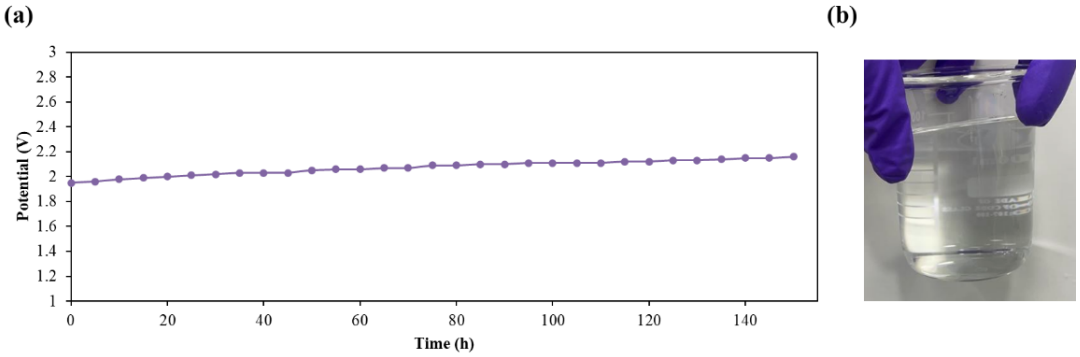

圖 27、鈦/催化劑單元件在固定電流 2.5 A 下，進行 150 小時鹼性海水穩定性測試。(a) 電壓隨時間變化。(b) 電解 150 小時後的電解液。

表 12、鈦/催化劑單元件在固定電流 2.5 A 時，每經過 50 小時所記錄的電壓隨時間變化。並以此評估系統的能源轉換效率及海水電解的穩定性。

Time (h)	0	50	100	150
Potential (V)	1.95	2.05	2.11	2.16
能源轉換效率 (%)	63.1	60.0	58.3	56.9
穩定性 (%)	10.76			

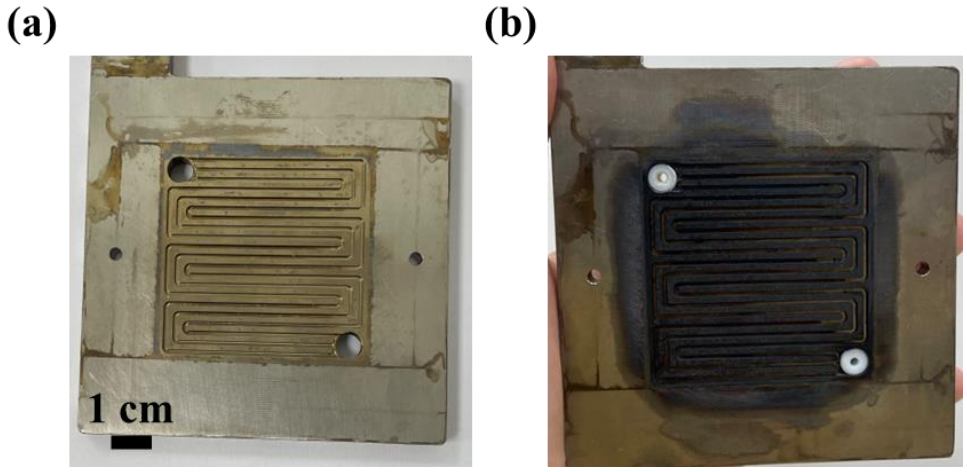

圖 28、鈦/催化劑流道板 (a) 初始狀態，(b) 進行電解 150 小時後，鈦流道板中間的反應區塊仍呈現黑色。

(三) 石墨單元件的鹼性海水中穩定性測試

最後，我們對石墨單元件在電流 2.5 A (電流密度為 100 mA/cm^2) 進行鹼性海水中的穩定性測試，結果如圖 29、表 13、圖 30 與圖 31。可藉由圖 29 每次間隔 24 小時的螢幕錄像發現，電解液的顏色逐漸顯著變黃，經與供應廠商確認後，我們了解到石墨內部的高分子填充材料在鹼性環境中不具耐久性，因此在長時間電解過程中，這些高分子材料逐漸分散溶於鹼性溶液中。這種分散現象隨著電解時間的增加而加劇，導致石墨結構逐步退化並最終損壞。這一結果表明，石墨單元件在鹼性海水電解環境中存在材料耐久性方面的顯著問題，不適合作為長期穩定性要求的應用。表 13 數據呈現，運作 48 小時，電壓從 1.72 V 上升至 1.78V ，並帶入公式 [1]，計算得到穩定性 3.4%。將所量測的電壓代入公式 [2]，可計算出能源轉換效率。電解 48 小時後，石墨單元件的效率已下降為 69.1%，顯示相較於鈦板，石墨板無法長時間穩定電解。

然而於圖 30 中發現，蠕動幫浦的管線中具有黑色粉末，我們推測這些粉末是從石墨流道板剝離下來的。基於對石墨流道板在電解過程中可能會氧化產生 CO_2 的擔憂，我們特別於質譜中增加了 CO_2 的偵測。圖 31 說明了電解開始時，質譜能即時檢測到氫氣和氧氣的生成；停止運轉後，氫氣和氧氣的壓力迅速下降。這一現象在連續兩個循環中均保持一致。此外，運作過程中，質譜儀未檢測到 CO_2 的生成，表明在測試過程中，這表明石墨在測試過程中並未產生 CO_2。

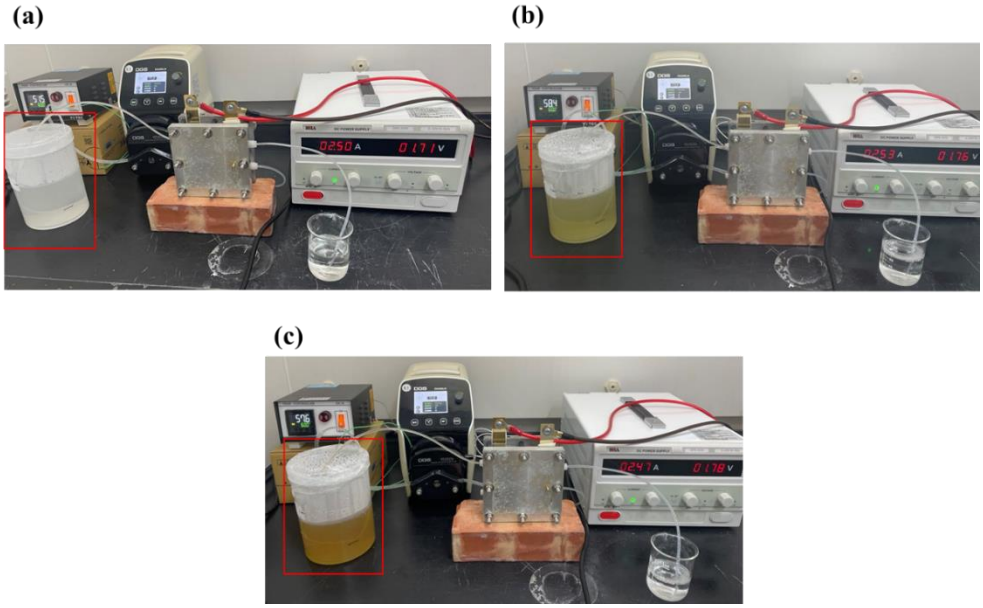

圖 29、石墨單元件在固定電流 2.5 A 下進行 48 小時鹼性海水穩定性測試後的電解液。(a) 0 hours。(b) 24 hours。(c) 48 hours。

表 13、石墨單元件在固定電流 2.5 A 時，每經過 24 小時所記錄的電壓隨時間變化。並以此評估系統的能源轉換效率及海水電解的穩定性。

Time (h)	0	24	48
Potential (V)	1.72	1.76	1.78
能源轉換效率 (%)	71.5	69.8	69.1
穩定性 (%)	3.40		

圖 30、電解 48 小時後，蠕動泵管中具有黑色殘留物。

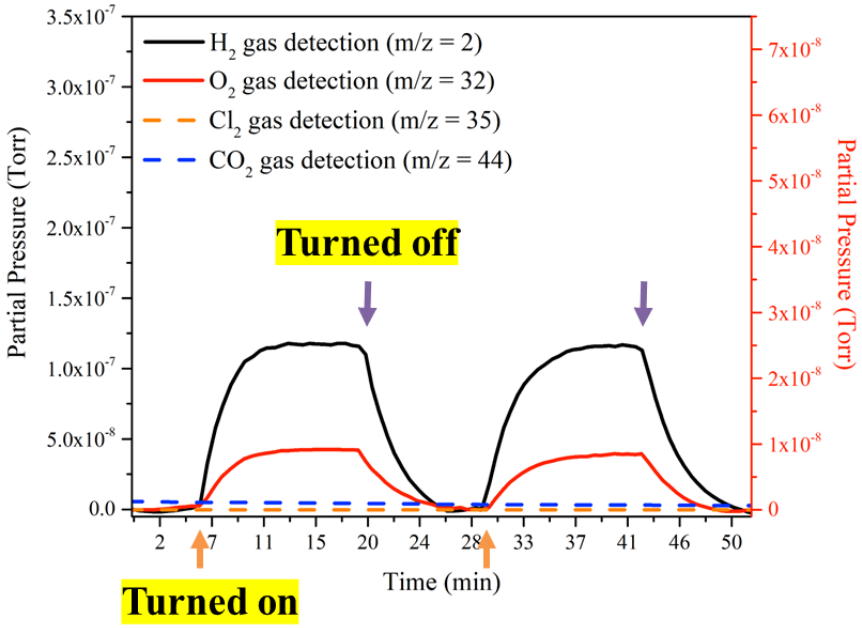

圖 31、氫氣、氧氣、氯氣和 CO_2 氣體的質譜即時檢測。

總而言之，雖然鈦流道板或石墨流道板的初始效率相同，但在經過長時間電解後，鈦單元件的效率表現更為優越。例如，在相似的電解時間下，鈦單元件在 50 小時的效率為 71.5%，而石墨單元件在 48 小時的效率為 69.1%。這顯示鈦單元件在長時間運行中的效率較石墨單元件具有更大的優勢。

二、成本評估

由於鈦單元件及石墨單元件的端板、集電板、陽極 (5x5 cm^2 抗腐蝕多元金屬薄膜催化劑)、陰極 (鉑碳催化劑) 與陰離子交換膜皆使用相同的尺寸和相同的材質，因此本段僅對比了鈦板與石墨板的單位成本和總成本。至於 100 cm^2 整體機組的成本明細，詳見第 77 頁。

經過詳細的成本評估，可得單片的鈦板單位成本 (包含材料、加工及運輸費) 為 34.12 元/克 (總價為 9300 元；總重 272.6 g)，而單片的石墨板單位成本 (包含材料、加工及運輸費) 為 13.2 元 (總價為 2600 元；總重 195.6 g)。由此可見，以成本來說，石墨板相較於鈦板具有明顯的優勢。

三、不同水流道板材質的綜合評估

基於單位成本、能源轉換效率及電壓穩定性等關鍵數據，我們對不同材料進行了綜合評估，以選擇最適合的水流道板材質。考量到未來機組需在海上或近岸環境中長期運作，評估基準的優先順序為，鹼性海水中的電解累積運行時間與電壓穩定性，其次為能源轉換效率，最後為成本。

表 15 顯示了評估結果。於鹼性海水中的電解累積運行時間及電壓穩定性，在電壓穩定性方面，石墨流道板與鈦流道板的表現相當，兩者的電壓波動幅度均小於 10%。然而，當比較電解累積運行時間時，石墨板的耐久性問題逐漸顯現，石墨板內部的高分子填充材料會隨時間在鹼性海水逐漸分散溶出，導致黑色石墨粉末的析出，影響了流道板的結構穩定性，更使其僅運作 48 小時。因此，石墨流道板不適合長期穩定性的應用。相較之下，鈦流道板在測試中展現出更高的穩定性和耐久性，能穩定運作 150 小時。雖然觀察到鈦板在電解過程中表面逐漸氧化並呈現黑色，但這一變化並未影響電壓穩定性或運行時間，證明其在長期穩定性方面擁有更高的應用潛力。此外，鈦流道板的能源轉換效率也高於石墨板，意味著在相同電解條件下，鈦板的氫氣產量更高，能耗更低。

儘管石墨流道板的成本較低，但考量到長期運行的耐久性及運行穩定性，鈦流道板為最佳選擇。其在長期耐久性、電壓穩定性及能源轉換效率方面的綜合優勢，使其成為在海上或近岸環境中使用的最具潛力的流道板材質。

表 14、鈦與石墨材料在單位成本、能源轉換效率及鹼性海水的穩定性方面的綜合比較評估。

材質	於鹼性海水的電壓穩定性 (%)	鹼性海水電解累積運行時間 (小時)	單位成本 (元/克)	在電解 50 小時的能源轉換效率 (%)
鈦	4.09	運行時間長 (150 h)	成本高 (34.12 元/克)	優異 (71.5%)
石墨	3.40	運行時間短，結構不穩定 (48 h)	成本低 (13.2 元/克)	較差 (69.1%)

第三節、 100 cm^2 鈦單元件在鹼性海水中一周穩定性測試

根據第四章第二節的結果，我方選擇鈦作為 100 cm^2 單元件中流道板的材質，並實際組裝如圖 33 所示。之前在使用 RO 幫浦輸送電解液時，內部金屬部件會接觸到電解液，導致金屬逐漸受到海水腐蝕。所以，改用蠕動幫浦以避免金屬與電解液的直接接觸。然而，由於蠕動幫浦透過機械方式推動液體，隨著持續運轉，管子的結構會逐漸疲乏並產生破裂。因此，在每測試一天後，需更換一次管子。另外，當電解液濃度接近 5.3 M 時，發現沉澱物 (如 NaCl 及管中的塑化劑) 容易堵塞催化劑及分隔膜的孔隙。規劃每兩天更換一次電解液 (3M KOH 海水)。

首先先探討純電極 (無催化劑時) 的在 3 M KOH 海水的穩定測試。我們發現當電壓從 1.8 V 增加到 2.6 V 時，電解過程中電解液逐漸轉變為粉紅色。同時，根據測試結果，催化劑的質量從 0.4332 克減少至 0.3286 克。這表明在電解過程中，催化劑中的成分會逐漸溶出並進入電解液。

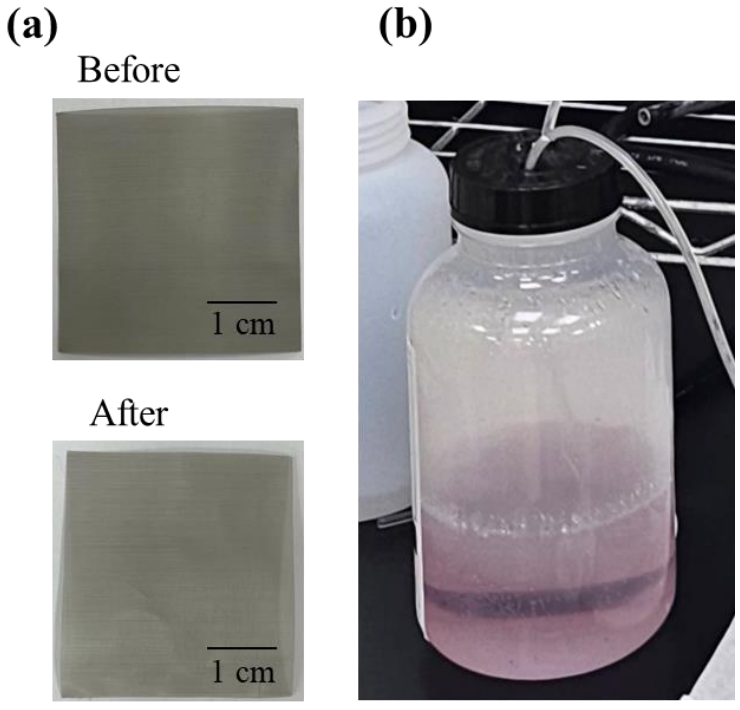

圖 32、顯示了未塗佈催化劑的電極進行鹼性海水穩定性測試的結果。 (a) 顯示了測試前後催化劑的照片。 (b) 在電解過程中，電解質顯示出粉紅色變化。

因此後續將電極塗佈抗海水腐蝕催化劑，並在電流 2.5 A (電流密度為 25 mA/cm^2) 及室溫的條件下，進行鹼性海水中的穩定性測試。如圖 34 與表 15 所示。經過 334 小時測試，觀察到催化劑無腐蝕現象，且電解液沒有顏色變化或沉澱物。後續將進行水質分析，以確認其化學成分是否發生變化 (詳見第五章的結果)。將圖 34 (a) 的數據彙整為表 15，顯示電壓保持於 1.9 V。結果顯示電壓保持非常穩定。這說明該 100 cm^{2}單元件在鹼性海水中可穩定運行 334 小時，電壓未見任何下降，表現出卓越的穩定性和優異的性能。而能源效率根據公式 [2] 計算得為 64.73%，較前一案的 25 cm^2 不鏽鋼元件 58.5% 提高了 6.23% (以理論電位 1.23 V 計算)。

一組 10×10 cm^2 電解系統包含以下組件：一個 10×10 cm^2 鈦單元件、電源供應器、幫浦、membrane、HER 催化劑、OER 催化劑，總成本約為 27 萬元。

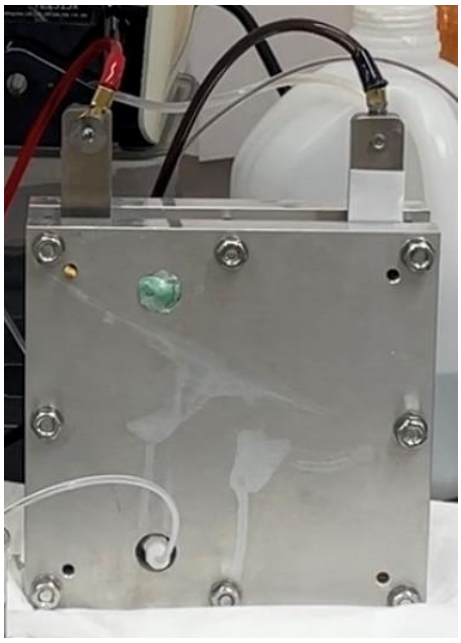

圖 33、100 cm^2 鈦單元件的實際照片。

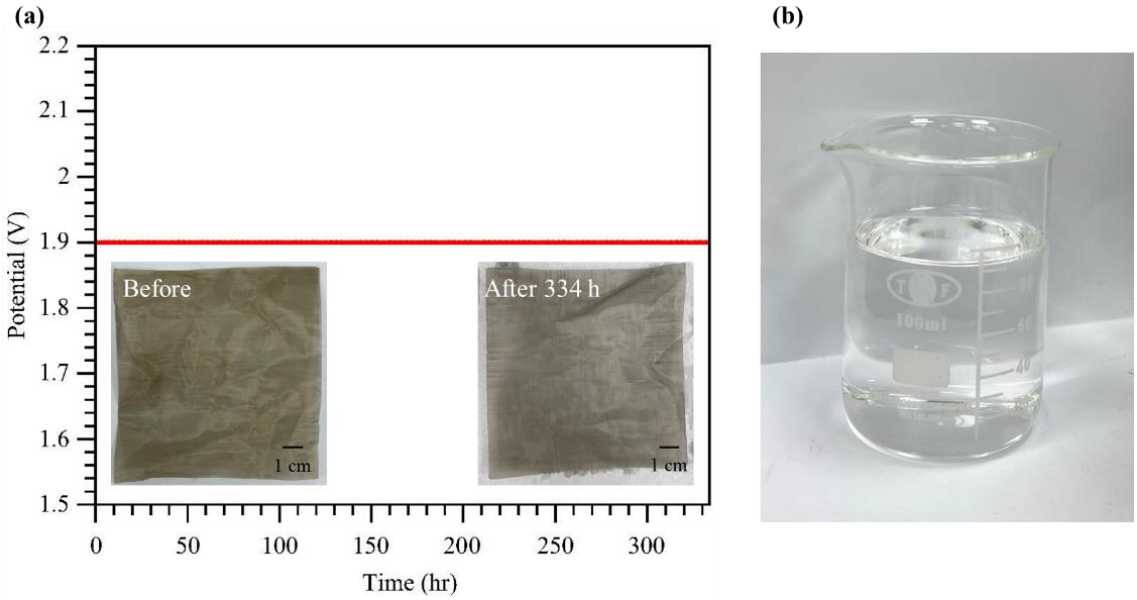

圖 34、100 cm^2 鈦單元件在固定電流 2.5 A 下，進行 334 小時 (約兩周) 鹼性海水穩定性測試。(a) 電壓隨時間變化，其中縮圖為催化劑測試前後之照片。(b) 電解 334 小時後的電解液。

表 15、100 cm^2 鈦單元件在固定電流 2.5 A 時，隨時間變化所記錄的電壓。

Time (h)	0	168	334
Potential (V)	1.9	1.9	1.9
Efficiency (%)	64.73	64.73	64.73
穩定性 (%)	Stable, no voltage changes		

第五章、 研究成果之鹵水處理的水質分析結果

第一節、催化劑在電極表面完全包覆效果的分析

為探討電解元件系統對鹵水濃度的耐受極限，本實驗使用 25 cm^2 的鈦單元件，直接將 400 mL 鹼性海水進行連續電解 160 小時，最終剩餘體積減至 150 mL，過程中不更換電解液。圖 35 (a-d) 顯示在電解過程中，隨著水分被電解轉化為氫氣與氧氣，溶液中的離子濃度逐漸上升，當鹽濃度增至 5.3 M 時，管子內部、電解液中、抗海水腐蝕催化劑表面以及流道板上均出現沉澱物。

這些沉澱物經過濾乾燥，結果如圖 35 (e) 所示。通過 XRD 分析，發現沉澱物中含有 NaCl 及 $C_8H_4Na_2O_4$ (Disodium phthalate)，後者通常作為塑化劑添加於 PVC 和矽膠管材中。由於蠕動幫浦的持續運作，管子隨著長時間的使用會逐漸疲乏，當鹵水濃度達到 ≧5.3 M 時，管材中的塑化劑成分開始滲入電解液，進一步降低電解系統的穩定性並加速管材劣化。為了確保系統在長時間運行中的穩定性與高效性，建議實施批次換水或持續補充新鮮海水，以控制離子濃度，減少沉澱的生成並延長設備壽命，從而達到更持久的運行穩定性和效率。

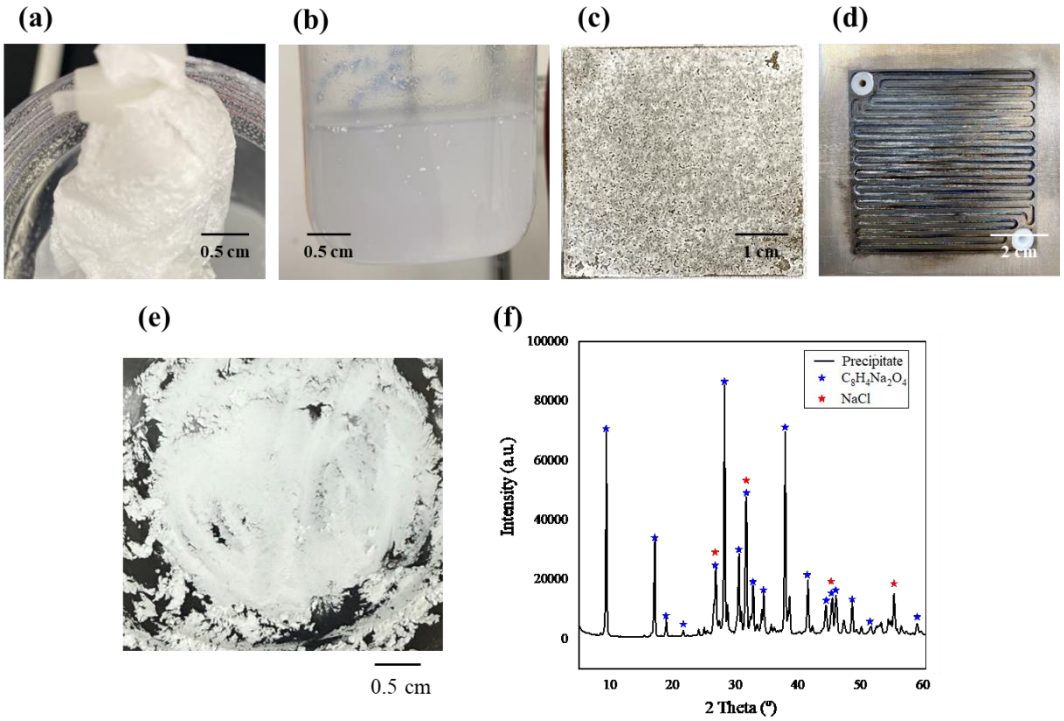

圖 35、400 mL 的鹼性海水連續電解 160 小時，在 (a) 管子內部、(b) 電解液中、(c) 抗海水腐蝕催化劑及 (d) 陽極流道板皆發現沉澱物。經過過濾並乾燥後的沉澱物如 (e) 所示。對於所得沉澱物進行 XRD 分析，其結果如 (f) 所示。

第二節、水質分析初步結果

本計畫針對三次較具代表性之海水製氫實驗產出之濃排水進行分析，三次實驗皆採乾濕式設計 (dry-wet alkaline system)，並使用陰離子交換膜 (AEM)，分析結果如表 16 至表 21 所示。

一、第一次實驗水質分析結果

第一次海水電解製氫實驗，流道板材質為鈦/催化劑 (5*5 cm^2)，操作電流為 2.5 A，操作電壓為 1.8-2.1 V，連續操作 150 小時後收集濃排水進行分析，分析結果如表 16 與表 17 所示。

表 16 表 16 為第一次海水製氫實驗之水質分析結果，原始海水、海水+電解質、製氫實驗後之 pH 分別為 8.2、14、14；導電度分別為 46.9±0.2、687±3.0、1170±7.2 mS/cm；鹽度分別為 30.4±0.1、345±3.6、540±5.1‰。

表 16、第一次海水產氫實驗產出鹵水之基本水質分析

	pH	導電度 (mS/cm)	鹽度(‰)
原始海水	8.2	46.9±0.2	30.4±0.1
海水+電解質	14	687±3.0	345±3.6
製氫 150 小時	14	1170±7.2	540±5.1

結果顯示，原始海水之 pH 值為 8.2，在加入 KOH 後，pH 值升高至 14，在製氫實驗後則維持不變；導電度在加入電解質後升高約 14 倍，製氫實驗後則因濃縮導致導電度再升高近 2 倍；鹽度則在加入電解質後升高約 10 倍，在製氫實驗後同樣因濃縮而再次升高約 1.5 倍。

表 17 為第一次海水製氫實驗之離子層析儀 (IC) 分析各階段水中離子成分之結果，原始海水、海水+電解質、製氫實驗後之鈉離子濃度分別為 10078±12、9599±48、17157±67 mg/L，鉀離子濃度分別為 403±8.1、105312±98.5、200090±141.4 mg/L，鈣離子濃度分別為 273±1.1、81±5.5、2975±1.1 mg/L，鎂離子濃度分別為 807±4.8、227±2.3、ND(<1) mg/L，氯離子濃度為 24658±13.8、22102±28.1、45804±13.2 mg/L，溴離子濃度分別為 73.3±0.4、ND(<1)、1456±3.5 mg/L，硫酸根離子濃度分別為 2752±1.4、2413±3.5、3427±14.3 mg/L。

表 17、第一次海水產氫實驗產出鹵水之各離子濃度分析。

	Na^+ (mg/L)	K^+ (mg/L)	Ca^{2+} (mg/L)	Mg^{2+} (mg/L)	Cl^- (mg/L)	Br^- (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)
原始海水	10078±12	403±8.1	273±1.1	807±4.8	24658±13.8	73.3±0.4	2752±1.4
海水+電解質	9599±48	105312±98.5	81±5.5	227±2.3	22102±28.1	ND(<1)	2413±3.5
製氫 150 小時	17157±67	200090±141.4	2975±1.1	ND(<1)	45804±13.2	1456±3.5	3427±14.3

結果顯示，鈉離子、氯離子及硫酸根離子濃度在加入電解液後濃度無顯著變化，但在製氫實驗後鈉離子及氯離子濃度因濃縮而上升約 2 倍，硫酸根離子濃度則上升近 1.5 倍；鉀離子濃度在加入電解液後上升約 260 倍，在製氫實驗後則因濃縮再上升 2 倍；鈣離子濃度在加入電解液後下降約 3 倍，在製氫實驗後則上升約 35 倍；鎂離子濃度在加入電解液後下降 3.5 倍，在製氫實驗後量測值近於 0；溴離子濃度在加入電解液後量測值近於 0，在製氫實驗後則上升至原始海水之 20 倍。

二、第二次實驗水質分析

第二次海水電解製氫實驗，流道板材質為石墨，操作電流為 2.5 A，操作電壓為 1.8 V，連續操作 48 小時後收集濃排水進行分析，分析結果如表 18 及表 19 所示。

表 18 為第二次海水製氫實驗之水質分析結果，原始海水、海水+電解質、製氫實驗後之 pH 分別為 8.1、14、14；導電度分別為 45.2±0.3、640±2.7、677±7.1 mS/cm；鹽度分別為 29.2±0.2、375±4.3、382±4.3‰。

表 18、第二次海水電解產氫實驗產出鹵水之基本水質分析。

	pH	導電度 (mS/cm)	鹽度(‰)
原始海水	8.1	45.2±0.3	29.2±0.2
海水+電解質	14	640±2.7	375±4.3
製氫 48 小時	14	677±7.1	382±4.3

結果顯示，原始海水之 pH 值為 8.1，在加入 KOH 後，pH 值升高至 14，在製氫實驗後則維持不變；導電度在加入電解液後升高約 14 倍，製氫實驗後則無明顯變化；鹽度則在加入 KOH 後升高約 12 倍，在製氫實驗後同樣無明顯變化。

表 19 為第二次海水電解製氫實驗之離子層析儀 (IC) 分析各階段水中離子成分之結果，原始海水、海水+電解質、製氫實驗後之鈉離子濃度分別為 9836±10、9791±22、11589±22.5 mg/L，鉀離子濃度分別為 732±6.8、108676±44.2、124317±75.3 mg/L，鈣離子濃度分別為 459±1.7、402±3.1、445±3 mg/L，鎂離子濃度分別為 725±2.2、ND(<1)、ND(<1) mg/L，氯離子濃度為 24600±10.3、16453±13.1、18327±15.2 mg/L，溴離子濃度分別為 71.1±0.1、ND(<1)、ND(<1) mg/L，硫酸根離子濃度分別為 2840±3.8、2439±2.7、2851±6.7 mg/L。

表 19、第二次海水電解產氫實驗產出鹵水之水質分析結果。

	Na^+ (mg/L)	K^+ (mg/L)	Ca^{2+} (mg/L)	Mg^{2+} (mg/L)	Cl^- (mg/L)	Br^- (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)
原始海水	9836±10	732±6.8	459±1.7	725±2.2	24600±10.3	71.1±0.1	2840±3.8
海水+電解質	9791±22	108676±44.2	402±3.1	ND(<1)	16453±13.1	ND(<1)	2439±2.7
製氫 48 小時	11589±22.5	124317±75.3	445±3	ND(<1)	18327±15.2	ND(<1)	2851±6.7

結果顯示，鈉離子、鈣離子、氯離子及硫酸根離子濃度在加入電解質後及製氫實驗後均無顯著變化；鉀離子濃度在加入電解液後上升約 150 倍，製氫實驗後則無顯著變化；鎂離子及溴離子濃度在加入電解液後及製氫實驗後量測值均近於 0。

三、第三次實驗水質分析結果

第三次海水電解製氫實驗，流道板材質為鈦/催化劑 (10*10 cm^2)，操作電流為 2.5 A，操作電壓為 1.9 V，連續操作 213 小時後收集濃排水進行分析，分析結果如表 20 及表 21 所示。

表 20 為第三次海水電解製氫實驗之水質分析結果，原始海水、海水+電解質、製氫實驗後之 pH 分別為 8.1、14、14；導電度分別為 45.2±0.3、640±2.7、1302±2.4 mS/cm；鹽度分別為 29.2±0.2、375±4.3、603±1.1‰。

表 20、第三次海水電解產氫實驗產出鹵水之基本水質分析。

	pH	導電度 (mS/cm)	鹽度(‰)
原始海水	8.1	45.2±0.3	29.2±0.2
海水+電解質	14	640±2.7	375±4.3
製氫 213 小時	14	1302±2.4	603±1.1

結果顯示，原始海水之 pH 值為 8.1，在加入 KOH 後，pH 值升高至 14，在製氫實驗後則維持不變；導電度在加入電解液後升高約 14 倍，製氫實驗後則因濃縮導致導電度再升高近 2 倍；鹽度則在加入電解液後升高約 12 倍，在製氫實驗後同樣因濃縮而再次升高約 1.5 倍。

表 21 為第三次海水製氫實驗之離子層析儀 (IC) 分析各階段水中離子成分之結果，原始海水、海水+電解液、製氫實驗後之鈉離子濃度分別為 9836±10、9791±22、14717±47 mg/L，鉀離子濃度分別為 732±6.8、108676±44.2、274021±48.2 mg/L，鈣離子濃度分別為 459±1.7、402±3.1、516±2.3 mg/L，鎂離子濃度分別為 725±2.2、ND(<1)、ND(<1) mg/L，氯離子濃度為 24600±10.3、16453±13.1、15316±10.1 mg/L，溴離子濃度分別為 71.1±0.1、ND(<1)、ND(<1) mg/L，硫酸根離子濃度分別為 2840±3.8、2439±2.7、2177±4.7 mg/L。

表 21、第三次海水電解產氫實驗產出鹵水之水質分析結果。

	Na^+ (mg/L)	K^+ (mg/L)	Ca^{2+} (mg/L)	Mg^{2+} (mg/L)	Cl^- (mg/L)	Br^- (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)
原始海水	9836±10	732±6.8	459±1.7	725±2.2	24600±10.3	71.1±0.1	2840±3.8
海水+電解質	9791±22	108676±44.2	402±3.1	ND(<1)	16453±13.1	ND(<1)	2439±2.7
製氫 213 小時	14717±47	274021±48.2	516±2.3	ND(<1)	15316±10.1	ND(<1)	2177±4.7

結果顯示，鈉離子及鈣離子濃度在加入電解液後無顯著變化，在製氫實驗後鈉離子濃度因濃縮而上升約 1.5 倍，鈣離子濃度則略為上升；鉀離子濃度在加入電解液後上升約 150 倍，製氫實驗後則因濃縮再上升 2.5 倍；鎂離子及溴離子濃度在加入電解液後及製氫實驗後量測值均近於 0；氯離子濃度在加入電解液後略微下降約 1.5 倍，製氫實驗後再略為下降一些；硫酸根離子濃度在加入電解液後及製氫實驗後皆略為下降。

綜合以上三次海水電解製氫實驗之水質分析結果顯示，在海水中加入電解質 (KOH) 會使 pH 值上升至 14，在製氫實驗後維持不變；導電度在加入電解質後均升高約 14 倍，在第一次及第三次製氫實驗時，製氫時長分別為 150 小時及 213 小時，導電度因濃縮而再升高近 2 倍，第二次製氫實驗推測因製氫時長較短，僅製氫 50 小時，導電度無明顯變化；鹽度在加入電解液後均升高約 10~12 倍，在第一次及第三次製氫實驗時，鹽度因濃縮而再升高近 1.5 倍，第二次製氫實驗推測同樣因製氫時長較短，鹽度無明顯變化。

離子層析儀 (IC) 分析之各階段水中離子成分分析結果則進一步顯示，鈉離子濃度在加入電解液後均無顯著變化，在第一次及第三次實驗時，因濃縮而升高約 2 倍，第二次實驗時推測因製氫時長較短，無顯著變化；鉀離子在三次實驗中加入電解液後之濃度皆急遽上升，分別為 260 倍、150 倍及 150 倍，在第一次及第三次實驗時，濃度因濃縮而升高約 2~2.5 倍，第二次實驗時推測因製氫時長較短，濃度無顯著變化；鈣離子在三次實驗中之變化較無規律，僅在第一次及第三次實驗中濃度有升高之趨勢，分別為 35 倍、無顯著變化及略為上升；鎂離子除在第一次實驗中加入電解液後濃度下降外，第二次及第三次實驗均無顯著變化，在製氫實驗後量測值均近於 0；氯離子在三次實驗中之變化無明顯規律，第一次實驗時僅在製氫實驗後上升 2 倍，第二次實驗時均無顯著變化，第三次實驗時則在加入電解液後下降 1.5 倍，在製氫實驗後又略為下降；溴離子在第一次實驗中加入電解液後量測值近於 0，在製氫實驗後上升至原始海水之 20 倍，而在第二次及第三次實驗中加入電解液及製氫實驗後之量測值均近於 0；硫酸根離子在三次實驗中之變化亦無明顯規律，第一次實驗時僅在製氫實驗後上升近 1.5 倍，第二次實驗時均無顯著變化，在第三次實驗中加入電解液及製氫實驗後濃度皆略為下降。

整體而言，在海水電解產氫的實驗中，由於添加電解質以及水樣體積揮發

等因素，導致濃排水中部分離子濃度有所升高。目前《海洋污染防治法》主要規範對海洋環境的污染，包括直接排放或通過其他途徑 (如河流或排放管線) 進入海洋的污染物，以本案之濃排水為例，應檢視排放量、濃度及其影響範圍是否符合該法中對水質保護的規定，如排放符合可承受水體標準即不致違規。《防止船舶污染國際公約(MARPOL)》則涉及船舶在運行過程中對海洋的污染控制，主要針對油污、化學物質、垃圾、污水、廢氣等污染物，因高鹽度濃排水是從固定設施 (如沿海產氫裝置) 排放，而非船舶運行所致，通常不屬於 MARPOL 的管轄範圍。另從放流水標準角度，現行法規尚無針對此類排放的直接管制標準，且這些離子並未在現行放流水標準或各國接受水體的水質允收標準中被特別規範。因此，針對本案中海水電解產氫後產生的高鹽度濃排水，較適合之評估角度可參考相關承受水體的水質管制標準，同時配合如本報告書後續說明之擴散模擬，進行必要的水質監測和管理。

接下來的討論將著重於確認實驗過程中進流海水與濃排水的水質變化，並評估這些變化是否會導致特定離子濃度累積，或因儀器釋放而影響海水產氫設備的穩定性與使用壽命。本研究將在第五章第三節中分析海水電解製氫實驗的水質成分質量平衡，並於第五章第四節模擬濃排水直接排放至承受水體中的擴散結果，進一步探討濃排水直接排放至海水中的可行性。

第三節、不同產氫實驗進流與出流水中離子質量平衡

本節針對三次海水電解製氫實驗產出之濃排水進行水質質量平衡評估，其分析如表 22~表 24 及圖 36~圖 38 所示。

一、第一次實驗之質量平衡分析

表 22 為第一次海水電解製氫實驗前後各離子之毫莫耳數，海水+電解質及製氫實驗後之水樣體積分別為 500 mL 及 250 mL；鈉離子毫莫耳數分別為 208.7 及 186.5 mmole；鉀離子毫莫耳數分別為 1350.2 及 1282.6 mmole；鈣離子毫莫耳數分別為 6.01 及 18.6 mmole；鎂離子毫莫耳數分別為 4.67 及 0 mmole；氯離子毫莫耳數分別為 311.3 及 322.6 mmole；硫酸根離子毫莫耳數分別為 14.33 及 8.92 mmole。

表 22、第一次海水電解製氫實驗前後各離子之毫莫耳數。

	體積 (mL)	Na^+ (mmole)	K^+ (mmole)	Ca^{2+} (mmole)	Mg^{2+} (mmole)	Cl^- (mmole)	SO_4^{2-} (mmole)
海水+電解質	500	208.7	1350.2	6.01	4.67	311.3	14.33
製氫 150 小時	250	186.5	1282.6	18.6	0	322.6	8.92

圖 36 為第一次海水電解製氫實驗產出濃排水之水質質量平衡。結果顯示，鈉離子與氯離子濃度變化與濃縮比例 (2 倍) 吻合，偏差小於 5%。鉀離子濃度在濃縮比例基礎上略有額外升高 (實測增加 2.1 倍，理論應為 2 倍)。除了分析誤差導致之原因外，可能也與連續實驗過程中電解液成分積累於系統釋放所致。鎂離子濃度降為零，推測因沉澱形成氫氧化鎂 ($Mg(OH)_2$) 累積於系統內。硫酸根離子濃度下降約 37.7%，可能是部分與鈣離子生成硫酸鈣 ($CaSO_4$) 沉澱所致。

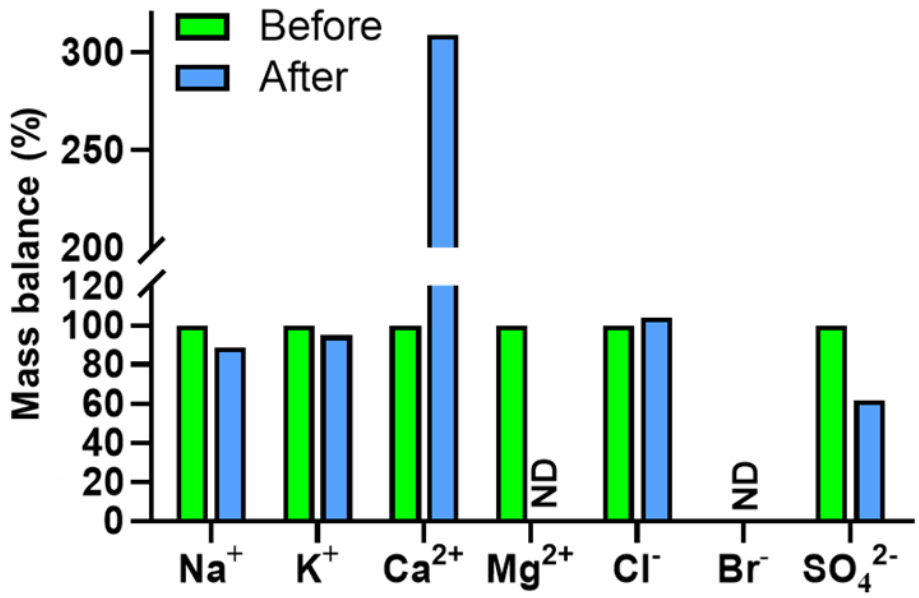

圖 36、第一次海水製氫實驗產出濃排水之水質質量平衡。

二、第二次實驗之質量平衡分析

表 23 為第二次海水電解製氫實驗前後各離子之毫莫耳數，海水+電解液及製氫實驗後之水樣體積分別為 500 mL 及 350 mL；鈉離子毫莫耳數分別為 212.9 及 176.4 mmole；鉀離子毫莫耳數分別為 1393.3 及 1115.7 mmole；鈣離子毫莫耳數分別為 5.03 及 3.89 mmole；氯離子毫莫耳數分別為 231.7 及 180.7 mmole；硫酸根離子毫莫耳數分別為 12.7 及 10.39 mmole。

表 23、第二次海水電解製氫實驗前後各離子之毫莫耳數。

	體積 (mL)	Na^+ (mmole)	K^+ (mmole)	Ca^{2+} (mmole)	Cl^- (mmole)	SO_4^{2-} (mmole)
海水+電解質	500	212.9	1393.3	5.03	231.7	12.7
製氫 48 小時	350	176.4	1115.7	3.89	180.7	10.39

圖 37 為第二次海水電解製氫實驗產出濃排水之水質質量平衡。結果顯示，鈉離子與氯離子濃度隨濃縮比例 (約 1.43 倍) 呈一致性變化，偏差均小於 3%。鉀離子濃度在加入電解液後急劇上升，濃縮後僅小幅增加 (實測值為 1115.7 mmol，對比理論值 1120 mmol，偏差約 0.4%)。硫酸根離子濃度在濃縮過程中

上升幅度低於預期，推測部分與鈣離子反應生成硫酸鈣 ($CaSO_4$) 沉澱，導致實測值低於理論值 (偏差約 18.2%)，各項離子均有累積殘留於系統內的可能性。

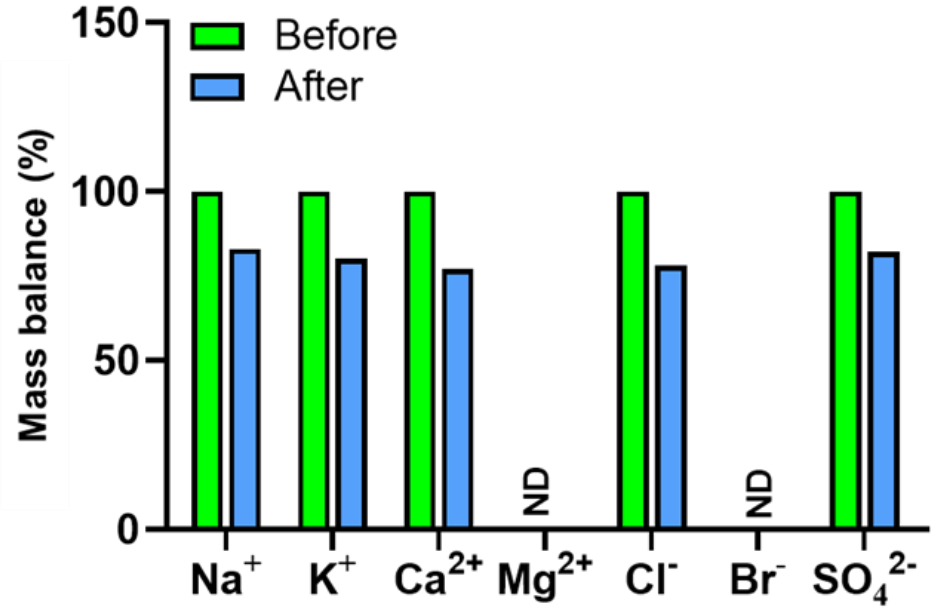

圖 37、第二次海水製氫實驗產出濃排水之水質質量平衡。

三、第三次實驗之質量平衡分析

表 24 為第三次海水電解製氫實驗前後各離子之毫莫耳數，海水+電解質及製氫實驗後之體積分別為 1900 mL 及 1605 mL；鈉離子毫莫耳數分別為 808.8 及 1027 mmole；鉀離子毫莫耳數分別為 5294.5 及 11277 mmole；鈣離子毫莫耳數分別為 19.1 及 20.7 mmole；氯離子毫莫耳數分別為 880.6 及 692.5 mmole；硫酸根離子毫莫耳數分別為 48.27 及 36.4 mmole。

表 24、第三次海水電解製氫實驗前後各離子之毫莫耳數。

	體積 (mL)	Na^+ (mmole)	K^+ (mmole)	Ca^{2+} (mmole)	Cl^- (mmole)	SO_4^{2-} (mmole)
海水+電解質	1900	808.8	5294.5	19.1	880.6	48.27
製氫 213 小時	1605	1027	11277	20.7	692.5	36.4

圖 38 為第三次海水電解製氫實驗產出濃排水濃排水之水質質量平衡。結果顯示，鈉離子和鉀離子在製氫實驗後其質量上升，推測為先前實驗中所累積之 NaOH 和 KOH，在本次實驗中釋放導致質量增加。硫酸根離子濃度的下降相對應，推測部分硫酸根離子與鈣離子反應生成硫酸鈣沉澱。

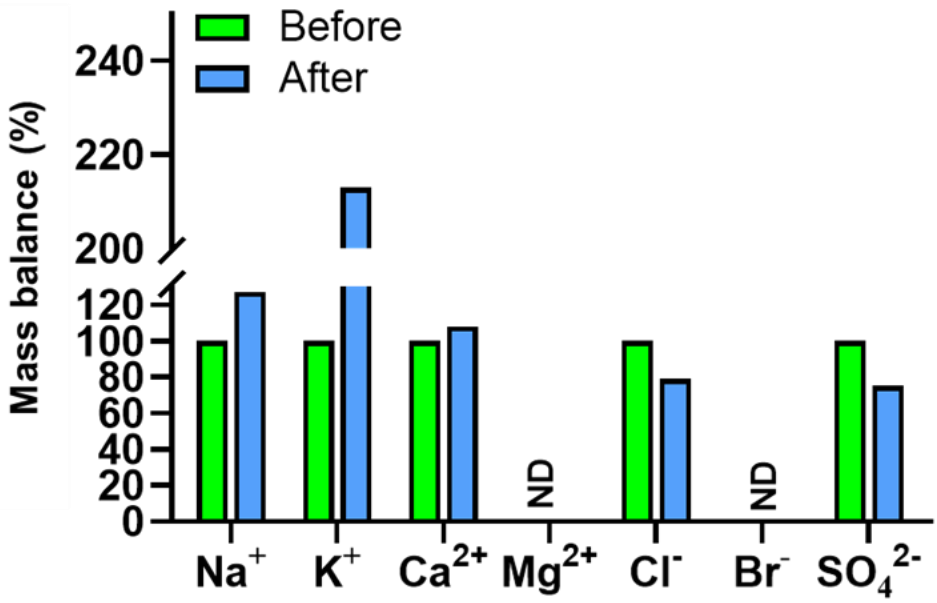

圖 38、第三次海水製氫實驗產出濃排水之水質質量平衡。

圖 39 為三次不同操作條件下高鹽度濃排水的離子變化，結果顯示在三次不同實驗條件下，濃排水中各項離子濃度的平均變化情形。由於每次實驗的操作條件存在差異，且產生的濃排水量也有所不同，導致各離子濃度變化的標準差較大。

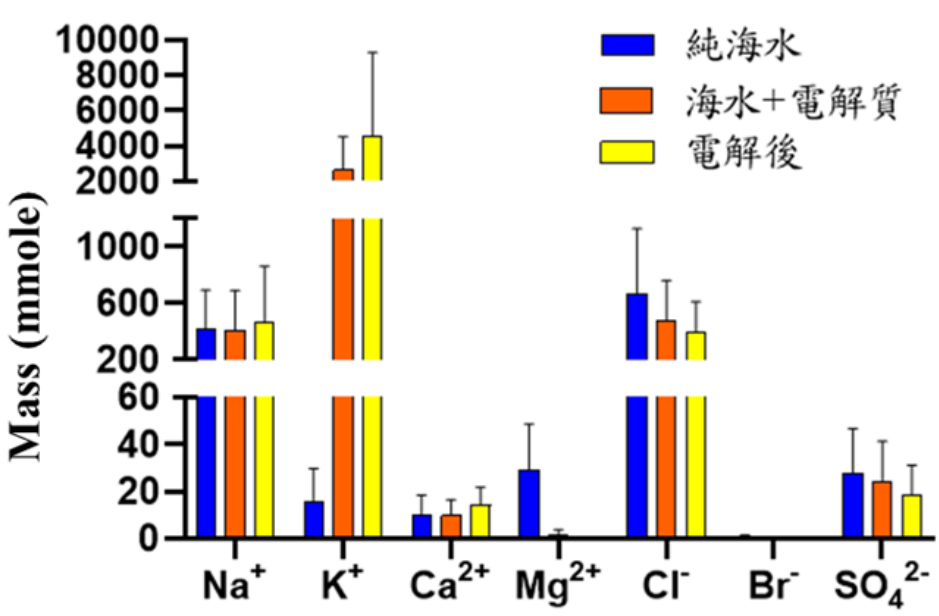

圖 39、三次不同操作條件下高鹽度濃排水的離子變化。

綜合三次實驗中對進出流水的離子質量平衡分析，主要觀察結果與推測如下：(1) 濃縮水樣體積對出流水濃度的影響：鈉離子與鉀離子的濃度變化基本與濃縮比例相符，偏差均小於 5%。尤其鉀離子在濃縮後濃度顯著上升。(2) 陽離子氫氧化物沉澱析出影響：以鎂離子為例，出流水中的鎂離子濃度在所有實驗中均接近未檢出。推測是在高 pH 環境下生成氫氧化鎂沉澱，並沉積於系統內。反之，以第一次實驗的鈣離子結果為例，濃度上升可能是因為連續實驗中氫氧化物累積，導致後續析出影響出流水濃度。(3) 系統操作穩定性與效率考量：整體而言，產氫實驗前於海水中添加鹼液使水中鉀離子大幅增加，雖然在系統內質量變化相對穩定，但未來可再評估是否減少添加氫氧化鉀濃度，進而降低後續濃排水中濃度；實驗前後之離子質量平衡結果顯示，需特別注意鈣、鎂離子濃度變化對系統穩定性的潛在影響。考量不同操作情境間的離子質量平衡結果差異不大，從原則上來看，最佳操作條件應優先考量產氫效率。

第四節、排放水進入承受水體之擴散模擬

海洋中的擴散速度受多種因素影響，常因溫度、壓力、鹽度及分子性質而有所不同，例如前述第三章第二節第二項提及，排放口位置可選擇海底或海面排放，這類排放條件差異可藉由模擬不同排放速度或擴散速度評估之。一般來說，擴散速度可透過擴散係數(diffusion coefficient)來衡量。

在海洋中，擴散係數的範圍約為 10^{-9} 至 10^{-5} m^2/s，主要可分為以下兩種擴散機制 (Knauss & Garfield, 2016; Ledwell, Watson, & Law, 1993; Siedler, Gould, & Church, 2001):

1.分子擴散 (Molecular diffusion)：指微小分子在液體中自發移動的現象，其擴散係數通常介於 10^{-9} 至 10^{-10} m^2/s 。此擴散機制對於溶解氧、二氧化碳、鹽分等分子較為緩慢，主要作用於靜止或低動能的水層中。

2.湍流擴散 (Turbulent diffusion)：由海洋中的水流、波浪及湧流運動所形成的混合現象，會加速物質的傳輸與擴散。其擴散係數通常較大，約為 10^{-5} 至 10^{-3} m^2/s，尤其在海表層或洋流較強的區域，擴散速度更為快速。

本節擴散模擬使用三維高斯擴散公式 (如表 25 所示)，該方程式考慮同時平流 (如海水流速) 與擴散 (如海水擾動造成濃度擴散) 影響，模擬高鹽度濃排水排放至承受水體後的濃度變化。本次模擬過程以本計畫實驗實際產出之濃排水量與濃度為例，模擬不同監測距離、不同排放濃度、與不同擴散係數 (模擬不同海水擾動情形)，海水流速先假設為 0 m/s，模擬最保守情境之擴散結果。若此模擬結果指出無顯著影響，可預期在實際情境下對環境影響可降至最低。

表 25、高斯機率分佈函數於三維空間中，位置及化學物質濃度。

三維高斯擴散公式
$$C(x,y,z,t) = M \times pdf(x,y,z)$$ $$= \frac{M}{\sigma_x \sigma_y \sigma_z (\sqrt{2\pi})^3} exp\left[-\frac{1}{2}(\frac{x-\bar{x}}{\sigma_x})^2\right] exp\left[-\frac{1}{2}(\frac{y-\bar{y}}{\sigma_y})^2\right] exp\left[-\frac{1}{2}(\frac{z-\bar{z}}{\sigma_z})^2\right]$$ C(x, y, z, t)：在特定位置 (x、y、z)和時間 t 的污染物濃度；x、y、z 是在三維空間中的坐標位置（m）；t 為時間（s）；$\bar{x}$、$\bar{y}$、$\bar{z}$：是位置的平均值；σ_x、σ_y、σ_z是 x、y、z 方向上位置的標準偏差；M 是化學物質釋放量；對於僅由分子擴散引起的傳輸：$\bar{x} = \bar{y} = \bar{z} = 0$，且$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \sqrt{2D_m t}$，其中$D_m$是分子擴散係數，t 為瞬時點源釋放後的時間。若在具有平均流速 u 的條件下沿 x 軸發生平流，則$\bar{x} = ut$，$\bar{y} = \bar{z} = 0$，且$\sigma_x = \sqrt{2D_x t}$，$\sigma_y = \sqrt{2D_y t}$ $\sigma_z = \sqrt{2D_z t}$，其中，D_x、D_y、D_z分別是 x、y、z 方向上的擴散係數。

針對海水電解製氫實驗後產出之濃排水鹽度變化，進行在承受水體中排放之擴散模擬分析，分別設定不同情境之模擬條件進行模擬，模擬結果如圖 40~圖 47 所示。

一、不同擴散情境之影響

圖 40 為不同濃排水鹽度在海表層或洋流較強區域之可能影響。模擬條件設定為：濃排水濃度分別為 1、10 及 20 M (鹽度約 58.5~1169‰)，擴散係數為 10^{-2} m^2/s，監測點距離排放口 0.1 m。模擬結果顯示，高濃度濃排水 (20 和 10 M) 在排放初期濃度達到高峰，但隨時間迅速稀釋，約 20 分鐘內濃度明顯下降；低濃度濃排水 (1 M) 初始濃度較低，且在短時間內稀釋至接近零，環境影響相對較小。稀釋過程有效地降低了濃排水對環境的長期影響，尤其是在排放後 60 分鐘內。須注意此濃度變化位置僅在排放口旁 10 cm 位置。

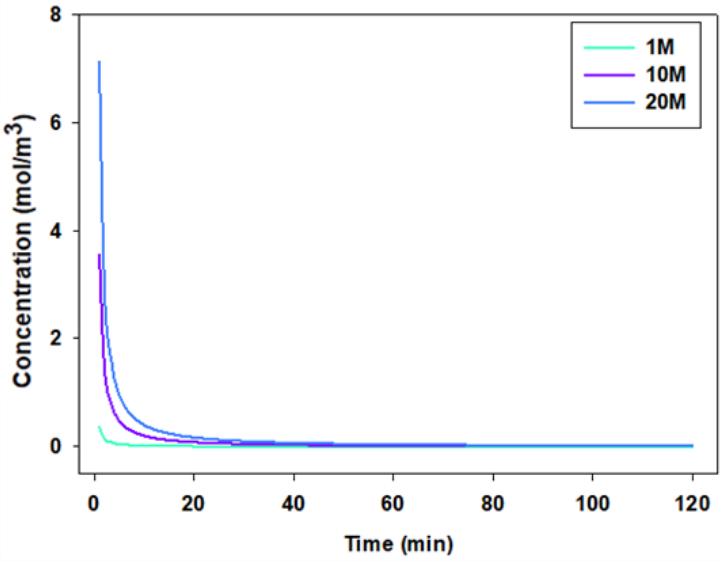

圖 40、不同排放鹽度下之濃排水模擬擴散結果(擴散係數 10^{-2} m^2/s)。

圖 41 為不同濃排水鹽度在海表層或洋流較溫和區域之可能影響。模擬條件設定為：濃排水濃度分別為 1、10 及 20 M (鹽度約 58.5~1169‰)，擴散係數為 10^{-3} m^2/s，監測點距離排放口 0.1 m。模擬結果顯示，20 M 濃排水在排放後濃度迅速達到高峰，約 12 M，隨後緩慢下降，表明高濃度濃排水在低擴散條件下持續對環境造成影響；1 M 濃排水在排放後濃度迅速下降並達到穩定狀態 (約 1 mol/m^3)，稀釋速度較高濃度濃排水更快。1 M 濃排水在排放後濃度在短時間內趨於穩定並保持在較低的水平 (小於 0.1 mol/m^3)，環境影響較小。須注意此濃度變化位置僅在排放口旁 10 cm 位置。

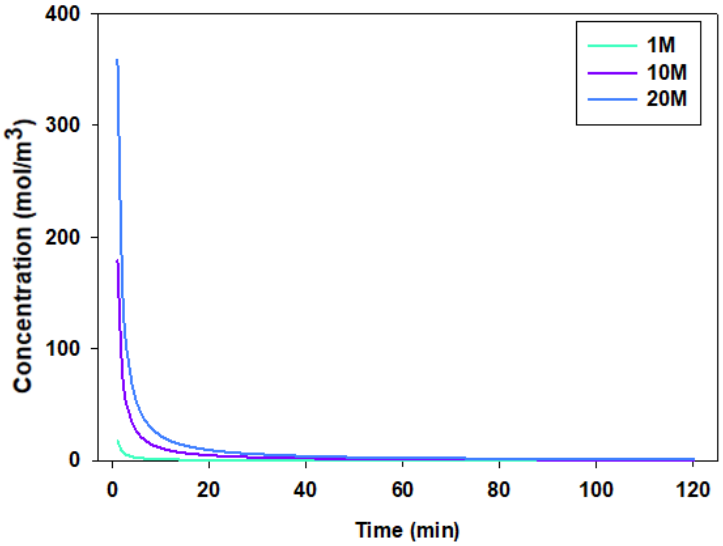

圖 41、不同排放鹽度下之濃排水模擬擴散結果(擴散係數 10^{-3} m^2/s)。

圖 42 為不同濃排水鹽度在靜止或低動能的水層中之可能影響。模擬條件設定為：濃排水濃度分別為 1、10 及 20 M (鹽度約 58.5~1169‰)，擴散係數為 10^{-4} m^2/s，監測點距離排放口 0.1 m。模擬結果顯示高濃度濃排水 (10 與 20 M)，其初始濃度高峰達 12 M (監測點距離 0.1 m)，稀釋需約 20 分鐘降至 1 M 以下。若在擴散係數較低 (10^{-4} m^2/s) 的近岸環境中，高濃度濃排水可能在排放點附近形成局部高鹽區，改變海水密度與滲透壓環境，影響底棲生物的生存條件。反之，低濃度濃排水 (1 M) 能在排放後短時間內迅速達到背景濃度 (小於 0.1 mol/m^3)，對環境影響更可控。須注意此濃度變化位置僅在排放口旁 10 cm 位置。

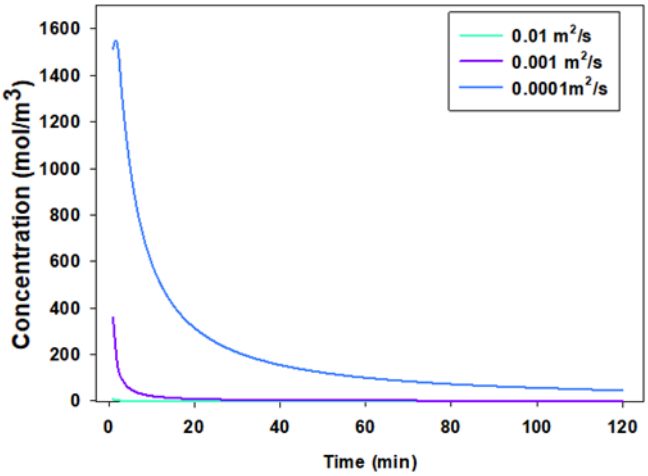

圖 42、不同排放鹽度下之濃排水模擬擴散結果 (擴散係數 10^{-4} m^2/s)。

二、不同濃排水鹽度之影響

圖 43 為高鹽度濃排水不同水體擾動條件下之可能影響。模擬條件設定為：濃排水濃度為 20 M (鹽度約 1169‰)，擴散係數分別為 10^{-2}、10^{-3} 及 10^{-4} m^2/s，監測點距離排放口 0.1 m。

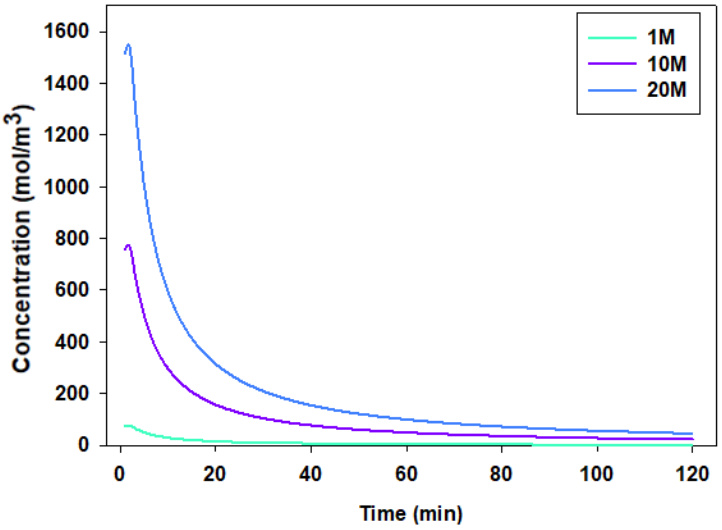

圖 43、高鹽度濃排水 (20 M) 在不同擴散係數下之鹽度變化 (監測點距離排放口 0.1 m)。

圖 44 為中鹽度濃排水不同水體擾動條件下之可能影響。模擬條件設定為：濃排水濃度為 10 M (鹽度約 487‰)，擴散係數分別為 10^{-2}、10^{-3} 及 10^{-4} m^2/s，監測點距離排放口 0.1 m。

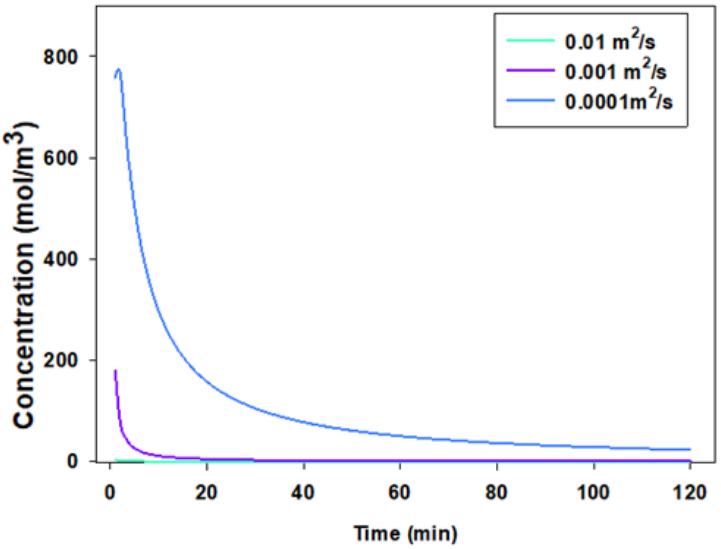

圖 44、中鹽度濃排水 (10 M) 在不同擴散係數下之鹽度變化(監測點距離排放口 0.1 m)。

圖 45 為低鹽度濃排水不同水體擾動條件下之可能影響。模擬條件設定為：濃排水濃度為 1 M (鹽度約 58.5‰)，擴散係數分別為 10^{-2}、10^{-3} 及 10^{-4} m^2/s，監測點距離排放口 0.1 m。

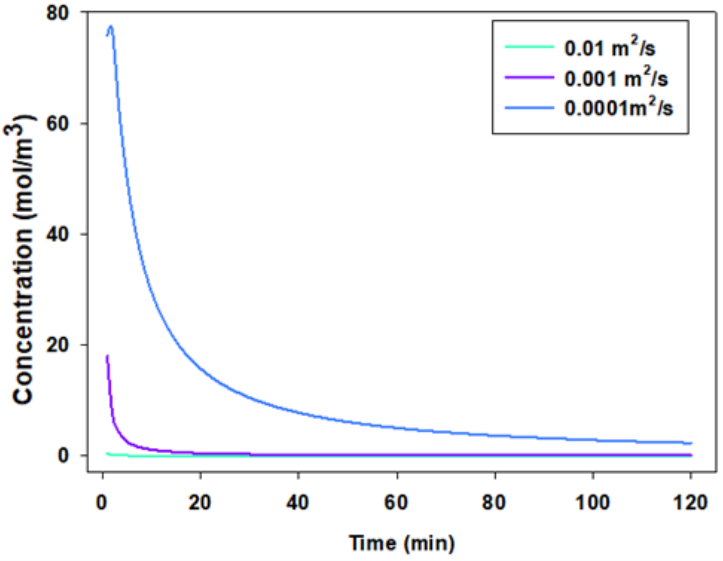

圖 45、低鹽度濃排水 (1 M) 在不同擴散係數下之鹽度變化 (監測點距離排放口 0.1 m)。

由圖 43~圖 45 之模擬結果顯示，在三種濃度假設條件下，初始幾分鐘內濃度快速下降，顯示高濃度濃排水在排放初期於高濃度區域內迅速稀釋和擴散；圖 43 之濃度下降的幅度最大且時間最短，顯示高濃度濃排水具有更強的驅動力促進混合；圖 44 及圖 45 則顯示隨著初始濃度降低，濃度下降的速率逐漸減緩。須注意此濃度變化位置僅在排放口旁 10 cm 位置。

三、不同承受水體距離之影響

圖 46 為高鹽度濃排水於距離排放口較遠 1 m 處不同水體擾動條件下之可能影響。模擬條件設定為：濃排水濃度為 20 M (鹽度約 1169‰)，擴散係數分別為 10^{-2}、10^{-3} 及 10^{-4} m^2/s，須注意此濃度變化位置僅在排放口旁 1 m 位置。

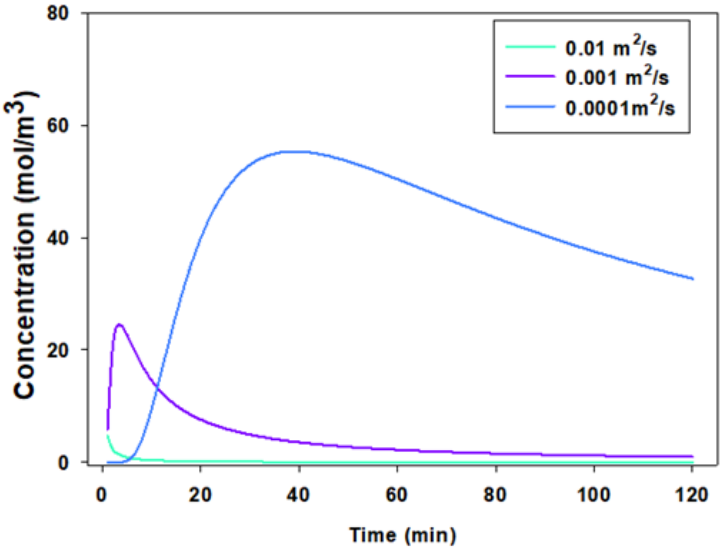

圖 46、高鹽度濃排水 (20 M) 在不同擴散係數下之鹽度變化 (監測點距離排放口 1 m)。

圖 47 為中鹽度濃排水於距離排放口較遠 1 m 處不同水體擾動條件下之可能影響之模擬條件設定為：濃排水濃度為 10 M (鹽度約 487‰)，擴散係數分別為 10^{-2}、10^{-3} 及 10^{-4} m^2/s，須注意此濃度變化位置僅在排放口旁 1 m 位置。

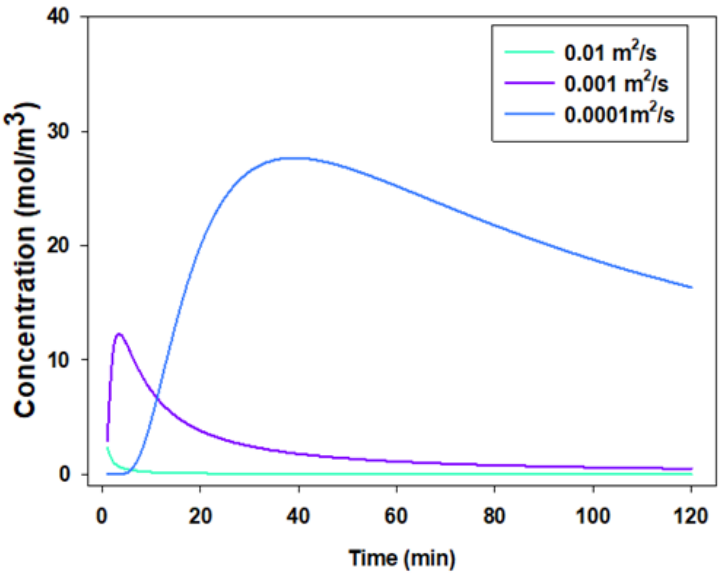

圖 47、中鹽度濃排水 (10 M) 在不同擴散係數下之鹽度變化 (監測點距離排放口 1 m)。

圖 48 為低鹽度濃排水於距離排放口較遠 1 m 處不同水體擾動條件下之可能影響。模擬條件設定為：濃排水濃度為 1 M (鹽度約 58.5‰)，擴散係數分別為 10^{-2}、10^{-3} 及 10^{-4} m^2/s，須注意此濃度變化位置僅在排放口旁 1 m 位置。

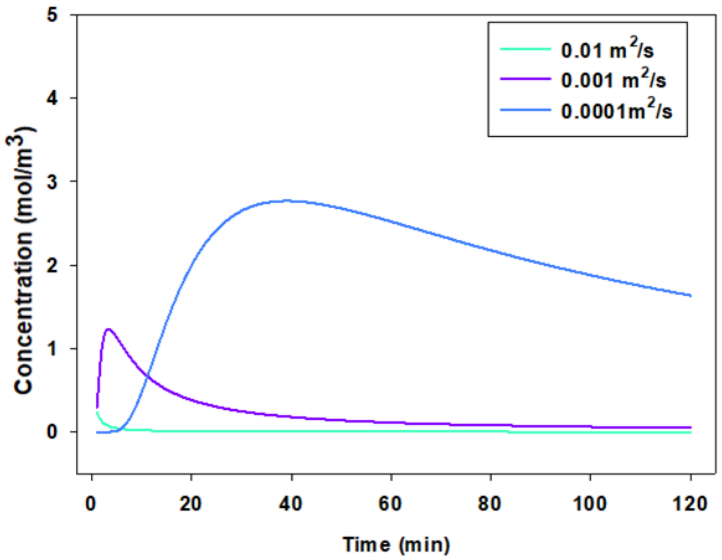

圖 48、低鹽度濃排水 (1 M) 在不同擴散係數下之鹽度變化 (監測點距離排放口 1 m)。

圖 49 為高鹽度濃排水於距離排放口不同位置處之可能影響。擴散模擬為不同監測距離下之濃排水濃度變化，擴散條件設定為：濃排水濃度 20 M (鹽度約 1169‰)，擴散係數分別為 10^{-2}、10^{-3} 及 10^{-4} m^2/s。

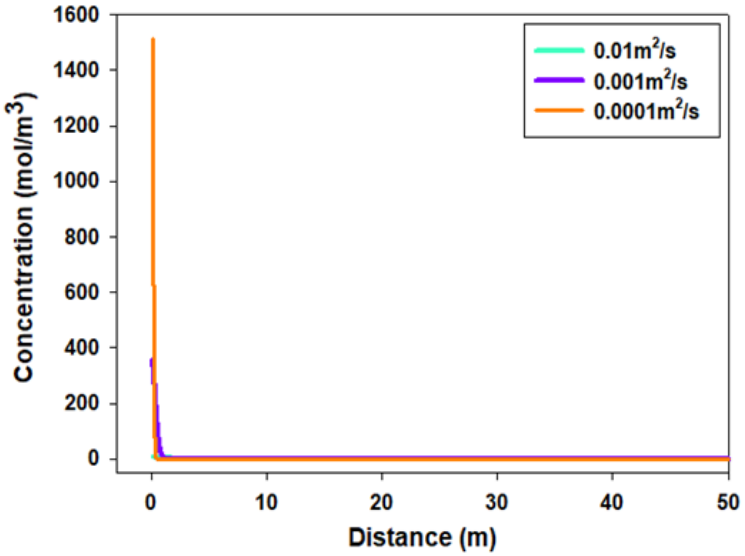

圖 49、高鹽度濃排水排放後在不同監測距離下之鹽度變化。

由圖 49 之模擬結果可發現，在較小的擴散係數 (例如 10^{-4} m^2/s) 下，濃排水在源頭附近的初始濃度明顯較高，但隨著距離的增加，其濃度迅速下降，且在短距離內 (約 1 至 3 公尺) 就能被稀釋到低於背景濃度。

四、承受水體在不同監測距離之 pH 值變化

本計畫除了評估濃排水中鹽度對承受水體的可能影響外，亦模擬了高 pH 濃排水的潛在影響。模擬採用高斯擴散模式並調整為一維擴散公式，計算在 1 平方公尺截面積內，排放口下游流線上的水中 pH 變化情形 (如圖 50 所示)。模擬條件設定為濃排水 pH 值為 14，擴散係數分別為 10^{-2}、10^{-3} 和 10^{-4} m^2/s，監測點範圍距排放口 50 公尺內，並分析排放後 1 分鐘內的 pH 變化。

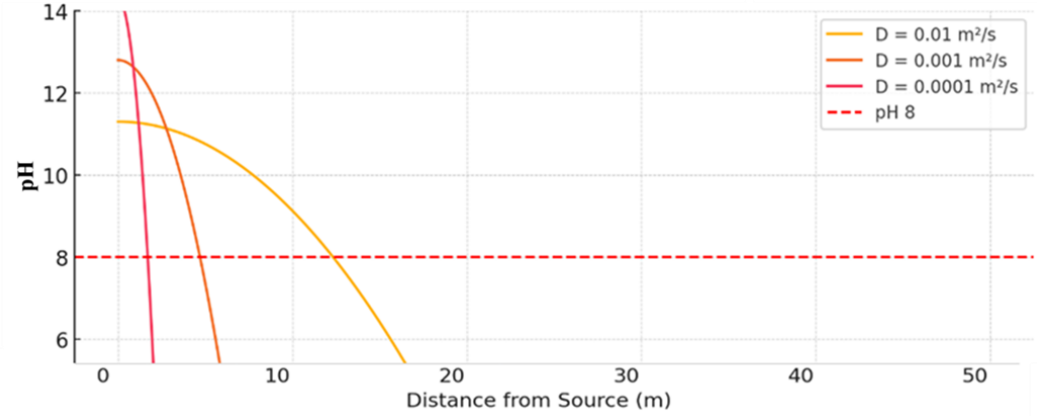

圖 50、高鹽度濃排水排放後在不同監測距離下之 pH 值變化。

圖 50 模擬結果指出，在低擴散係數 (如 10^{-4} m²/s) 條件下，濃排水對排放源附近 pH 較有影響但範圍有限，水中 pH 值短距離內迅速降至背景濃度；當擴散係數提高較接近環境常見範圍 (如 10^{-2} m²/s)，濃排水的 pH 值隨距離快速下降，對環境影響有限。若考量一般海水的流速及擾動擴散情形，其影響範圍將更為有限，幾乎可忽略不計。未來於實場操作中，排放濃度與水量可能因操作條件的變化而有所不同，需依據實際情況進行全面評估。此外，可採用如批次排放等策略，進一步降低濃排水對環境的影響，確保對承受水體的衝擊降至最低。由上述不同設定條件之模擬結果顯示，濃排水的稀釋速度與鹽度、擴散係數及距離排放口的距離雖然相關。但不論在水體穩定低擴散係數或高鹽度排放條件下，承受水體之鹽度皆在短時間內快速降至接近背景濃度，對環境影響有限。實際情境中，臺灣東部黑潮海域的湍流擴散係數約為 10^{-3} 至 10^{-2} m²/s，在近岸排放點，雖然流速與擴散能力可能低於此範圍，但須注意本次濃度變化位置僅在排放口旁 0.1 或 1 m 位置。若考量前述表 7 中各國考量承受水體鹽度允收標準之位置，根據本研究之分析與模擬評估，可預期本計畫海水電解製氫所產出之濃排水鹽度直接排放於承受水體中，其對海洋環境之影響將不顯著。

整體而言，在海水電解產氫的實驗中，由於添加電解液以及水樣體積揮發等因素，導致濃排水中部分離子濃度有所升高。目前《海洋污染防治法》主要規範對海洋環境的污染，包括直接排放或通過其他途徑 (如河流或排放管線) 進入海洋的污染物，以本案之濃排水為例，應檢視排放量、濃度及其影響範圍是否符合該法中對水質保護的規定，如排放符合可承受水體標準即不致違規。《防止船舶污染國際公約 (MARPOL)》則涉及船舶在運行過程中對海洋的污染控

制，主要針對油污、化學物質、垃圾、污水、廢氣等污染物，因高鹽度濃排水是從固定設施 (如沿海產氫裝置) 排放，而非船舶運行所致，通常不屬於 MARPOL 的管轄範圍。另從放流水標準角度，現行法規尚無針對此類排放的直接管制標準，且這些離子並未在現行放流水標準或各國接受水體的水質允收標準中被特別規範。因此，針對本案中海水電解產氫後產生的高鹽度濃排水，較適合之評估角度可參考相關承受水體的水質管制標準，同時配合如本計畫執行之擴散模擬，進行必要的水質監測和管理。

因此本研究著重於評估進流海水與濃排水的水質變化及其對系統穩定性與使用壽命的影響，以及擴散模擬了解隊承受水體之可能影響。離子質量平衡分析顯示，鈉、鉀離子的濃度變化與濃縮比例基本一致，鉀離子顯著上升；鎂離子則因高 pH 環境生成沉澱而未檢出，鈣離子濃度變化則與氫氧化物累積析出有關。不同操作情境下，需注意鈣、鎂離子對系統穩定性的潛在影響，但最佳操作條件應以產氫效率為優先考量。此外，濃排水的擴散模擬顯示，即使在低擴散係數或高鹽度條件下，排放後鹽度會迅速降至背景值，環境影響有限。因此，本研究預期海水電解製氫產出的濃排水直接排放至海洋環境中，其影響將不顯著。未來實場操作的排放濃度與水量可能因操作條件的變化而有所不同，需根據實際情況進行評估，降低濃排水亦可採用多種作法，包括：降低產氫操作電壓以延長反應時間，從而減少濃排水量；以批次排放方式處理濃排水；或採用多點排放策略，降低單一排放源的負荷。這些方法均有助於將濃排水濃度維持在容許範圍內。

第六章、 計畫結論與建議事項

本研究成功應用先進的 ARD 技術，製備出具有高附著力並能有效抵抗海水腐蝕的電解催化劑。經在極端鹼性海水環境中進行高電壓 (5 V) 及高電流密度 (11-13 A) 的電解測試，觀察到催化劑層均勻覆蓋於電極基材表面，無明顯腐蝕或剝落現象，證實了其在苛刻環境下的穩定性與優異的抗腐蝕性能。

接著，我們將此催化劑應用於三種不同材質的電解單元件進行性能評估。結果顯示，在鹼性海水條件下，鈦製單元件的電壓變動範圍僅有 4.09%，表現出極佳的穩定性。在 150 小時電解測試中，鈦單元件的效率仍維持在 69.1%，顯示出優異的耐用性與穩定性。相較之下，石墨製單元件在電解 48 小時後，效率便快速下降至 69.1%，難以持續運行超過一週，因此不適合作為長期使用的參考材質。質譜分析進一步確認鈦單元件在反應過程中正常產生氫氣和氧氣，且未檢測到氯氣生成，支持了鈦材質在鹼性海水中的穩定性及適用性。

基於上述結果，我們將鈦製作為流道板，並組裝於 100 cm^2 鈦單元件中，實際進行鹼性海水電解測試。經過 334 小時的測試，該單元件的起始與結束電壓均穩定在 1.9 V，無電壓下降現象，也未觀察到催化劑腐蝕，顯示出其優異的穩定性和出色的電解性能，為在鹼性海水環境中應用的理想選擇。

根據水質分析結果，海水電解產氫過程中添加電解質 (如 KOH) 及水體揮發等因素，導致濃排水中的導電度、鹽度和 pH 值及部分離子濃度有所升高。然而，目前相關法規尚未對此類濃排水設置直接管制規範，現行放流水標準對濃排水中的離子濃度亦無明確限制。根據擴散模擬結果，即使在低擴散係數或高鹽度條件下，排放後鹽度可迅速恢復至背景水平，對海洋環境影響較為有限。因此，本研究建議參考承受水體的水質允收標準，結合必要的監測與管理進行評估。

此外，在適當的排放規劃和技術輔助下，濃排水直接排放至海洋具可行性。亦可根據實際操作條件選擇合適的處理策略，例如降低產氫操作電壓以延長反應時間，從而減少濃排水量；以批次排放方式處理濃排水；或採用多點排放策略，降低單一排放源的負荷。這些方法均能有效控制濃排水濃度，使其維持在容許範圍內，最大程度減少對海洋生態系統的影響。

在本次計畫，以下為研究過程中發現的問題及主要建議事項：

一、在本研究中，我們觀察到除了電解元件，整體系統中各組件的材質選擇對於抵抗海水腐蝕的耐久性具有關鍵影響。因此，建議持續深入探索不同材料在高鹽、高鹼性環境下的抗腐蝕性能，特別是針對幫浦、管路及密封材料等關鍵部件。進一步的材料篩選與測試可協助確保系統長期運行的穩定性和效率，同時降低維護頻率與成本。

二、雖然目前鈦流道板在經過電解處理後，表面呈現黑化現象，在經過 334 小時的運行後，尚未觀察到顯著影響系統的穩定性和電解效率，但仍需要注意以下幾個問題。黑化的多孔結構可能會影響流道板的長期性能。儘管目前尚未發現穩定性或效率顯著下降，但我們無法排除在更長時間或更嚴苛的運行條件下，這些變化會對電解效率和系統穩定性產生潛在影響。因此，為了確保鈦流道板在長期使用中的穩定性和高效運行，我們建議對表面進行處理，以提升其抗腐蝕性和耐久性。可考慮的化學鍍層表面處理方法。

三、為了確保電解系統的長期穩定運行，避免因高濃度鹵水所引起的沉澱與管材劣化，建議採取定期批次更換電解液或持續補充新鮮海水的策略，以維持系統運行的穩定性並提升效率。此外，應對電解過程中的水質進行嚴格監控，特別是鹵水濃度、pH 值及沉澱物的生成情況。為了實時掌握運行狀況，建議安裝監控系統，對關鍵運行參數進行實時監測，這樣可及早發現並解決問題，如鹵水濃度過高或沉澱物積聚過多，並在必要時進行調整，從而保證系統的穩定與高效運行。

第七章、 參考資料

依中英文分列，中文參考資料列於前，依作者姓名筆劃順序排列。英文參考資料列於後，依姓氏字母順序排列每條文獻書目。

1. 工業技術研究院，〈高壓電解槽技術〉。https://www.itri.org.tw/ListStyle.aspx?DisplayStyle=13_content&SiteID=1&MmmID=1036233405427625204&Trt_idx=10505
2. 中華民國國家發展委員會，〈臺灣2050淨零排放路徑及策略總說明〉，(2022年)。
3. 台灣自來水公司，〈澎湖馬公第一海水淡化廠 112 年第四季環境監測〉，(2024年)。
4. 金門縣自來水廠，〈金門地區海水淡化環境影響說明書〉，(2015年4月)。
5. 徐天佑、曾鴻陽，〈台灣地區有關太陽能日照量之環境時空因素研究探討〉，《環境教育學刊》第六期(2007年6月)：21-32。
6. 陳俊廷，〈黑潮發電取代核能！中山大學陳陽益團隊「世界第一」民報〉，(2016 年 8 月 31 日)。<https://news.nsysu.edu.tw/p/16-1120-155755.php?Lang=zh-tw&fbclid=IwAR365vF0PBOogSf6UpC0u-V5V0T5OfVblIC9GhuBPslqA9xah9VU8-WgyH8>。
7. 陳建宏，〈海洋能源開發所面臨的挑戰〉，能源教育資源總中心網頁，(2020年5月18)。<https://learnenergy.tw/index.php?inter=knowledge&caid=4&id=516>。
8. 綠色和平氣候與能源專案小組，〈三大原因，告訴你為何臺灣不適合核能發電〉，ESG 永續台灣網頁，(2021 年 8 月 5 日)。<https://esg.businesstoday.com.tw/article/category/209404/post/202108050031>。
9. 經濟部水利署水利規劃試驗所，〈臺南海水淡化廠興辦計畫檢討與環境生態補充監測〉，(2016年2月)。
10. 經濟部產發署，〈歐盟展現野心，公布迄今地表最全面 PFAS 限制提案〉，(2023 年 3 月)。<https://www.chemexp.org.tw/content/news/NewsDetail.aspx?id=4621>。
11. 穩石氫能，〈AEM 電解水製氫系統 WS600L-1〉。<

https://www.wenshiqingneng.com/wsaemcpws600l>。

12. Al-Amshawee, S., Yunus, M. Y. B., Azoddein, A. A. M., Hassell, D. G., Dakhil, I. H., Abu Hasan, H. (2020). Electrodialysis desalination for water and wastewater: A review. Chemical Engineering Journal, 380, 122231.
13. Bates, M. K., Jia, Q., Doan, H., Liang, W., Mukerjee, S. (2015). Charge-Transfer Effects in Ni–Fe and Ni–Fe–Co Mixed-Metal Oxides for the Alkaline Oxygen Evolution Reaction. *ACS Catalysis*, *6*, 155-161.
14. Clark, G. F., Knott, N. A., Miller, B. M., Kelaher, B. P., Coleman, M. A., Ushiama, S., & Johnston, E. L. (2018). First large-scale ecological impact study of desalination outfall reveals trade-offs in effects of hypersalinity and hydrodynamics. *Water Research*, *145*, 757-768.
15. Devi, Y., Huang, P. J., Chen, W. T., Jhang, R. H., Chen, C. H. (2023). Roll-to-Roll Production of Electrocatalysts Achieving High-Current Alkaline Water Splitting. ACS Appl Mater Interfaces, 15, 9231-9239.
16. de-la-Ossa-Carretero, J. A., Del-Pilar-Ruso, Y., Loya-Fernández, A., Ferrero-Vicente, L. M., Marco-Méndez, C., Martinez-Garcia, E., ... & Sánchez-Lizaso, J. L. (2016). Bioindicators as metrics for environmental monitoring of desalination plant discharges. *Marine pollution bulletin*, *103*(1-2), 313-318.
17. Del-Pilar-Ruso, Y., Martinez-Garcia, E., Giménez-Casalduero, F., Loya-Fernández, A., Ferrero-Vicente, L. M., Marco-Méndez, C., ... & Sánchez-Lizaso, J. L. (2015). Benthic community recovery from brine impact after the implementation of mitigation measures. *water research*, *70*, 325-336.
18. Dong, C., Han, L., Zhang, C., Zhang, Z. (2018). Scalable Dealloying Route to Mesoporous Ternary CoNiFe Layered Double Hydroxides for Efficient Oxygen Evolution. *ACS Sustain. Chem. Eng.*, *6*, 16096-16104.
19. Dionigi, F.; Reier, T.; Pawolek, Z.; Gliech, M.; Strasser, P. (2016). Design Criteria, Operating Conditions, and Nickel-Iron Hydroxide Catalyst Materials for Selective Seawater Electrolysis. *ChemSusChem*, *9*, 962-972.
20. Enapter. What is the overall efficiency of Enapter's electrolyser? https://www.enapter.com/faqs/
21. European Commission (13 Dec. 2022). Carbon Border Adjustment Mechanism.

https://taxation-customs.ec.europa.eu/green-taxation-0/carbon-border-adjustment-mechanism_en

22. Fei, H., Liu, R., Liu, T., Ju, M., Lei, J., Wang, Z., Wang, S., Zhang, Y., Chen, W., Wu, Z., Ni, M., Wang, J. (2024). Direct Seawater Electrolysis: From Catalyst Design to Device Applications. *Adv Mater*, *36*, e2309211.
23. Feng, C., Faheem, M. B., Fu, J., Xiao, Y., Li, C., Li, Y. (2020). Fe-Based Electrocatalysts for Oxygen Evolution Reaction: Progress and Perspectives. *ACS Catalysis*, *10*, 4019-4047.
24. International Energy Agency. *The Future of Hydrogen: Seizing Today's Opportunity; Report Prepared by the IEA for the G20, Japan; IEA: Paris, France.* (2019).
25. IRENA (2020). *Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5ºC Climate Goal*. I. R. E. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
26. Jhang, R.-H., Yang, C.-Y., Shih, M.-C., Ho, J.-Q., Tsai, Y.-T., Chen, C.-H. (2018). Redox-assisted Multicomponent Deposition of Ultrathin Amorphous Metal Oxides on Arbitrary Substrates: Highly Durable Cobalt Manganese Oxyhydroxide for Efficient Oxygen Evolution. *Journal of Materials Chemistry A*, *6*, 17915-17928.
27. Kang, S. Y., Park, J. E., Jang, G. Y., Kim, O.-H., Kwon, O. J., Cho, Y.-H., Sung, Y.-E. (2022). High-Performance and Durable Water Electrolysis Using a Highly Conductive and Stable Anion-Exchange Membrane. *International Journal of Hydrogen Energy*, *47*, 9115-9126.
28. Kelaher, B. P.; Clark, G. F.; Johnston, E. L.; Coleman, M. A. (2020). Effect of Desalination Discharge on the Abundance and Diversity of Reef Fishes. *Environ Sci Technol*, *54*, 735-744.
29. Knauss, J. A.; Garfield, N. *Introduction to physical oceanography*; Waveland Press, 2016.
30. Ledwell, J. R.; Watson, A. J.; Law, C. S. (1993). Evidence for Slow Mixing Across the Pycnocline from an Open-ocean Tracer-release Experiment. *Nature*, *364*, 701-703.

31. Liao, P.-C., Jhang, R.-H., Chiu, Y.-H., Valinton, J. A. A., Yeh, C.-H., Ebajo, V. D., Wang, C.-H., Chen, C.-H. (2021). Rock Salt Oxide Hollow Spheres Achieving Durable Performance in Bifunctional Oxygen Energy Cells. *ACS Appl. Energy Mater.*, *4*, 3448-3459.
32. Lin, Y.-C., Chang-Chien, G.-P., Chiang, P.-C., Chen, W.-H., & Lin, Y.-C. (2013). Potential Impacts of Discharges from Seawater Reverse Osmosis on Taiwan Marine Environment. *Desalination*, *322*, 84-93.
33. Zhang, X.; Li, Y.; Zhao, W. Guo, J.; Yin, P.; Ling, T. (2023). Technical Factors Affecting the Performance of Anion Exchange Membrane Water Electrolyzer. *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, *30*, 2259-2269.
34. Liu, T.; Zhao, Z.; Tang, W.; Chen, Y.; Lan, C.; Zhu, L.; Jiang, W.; Wu, Y.; Wang, Y.; Yang, Z.; Yang, D.; Wang, Q.; Luo, L.; Liu, T.; Xie, H. (2024) In-situ Direct Seawater Electrolysis Using Floating Platform in Ocean with Uncontrollable Wave Motion. *Nat. Commun.*, 15, 5305.
35. Loya-Fernández, Á., Ferrero-Vicente, L. M., Marco-Méndez, C., Martínez-García, E., Vallejo, J. J. Z., & Sánchez-Lizaso, J. L. (2018). Quantifying the efficiency of a mono-port diffuser in the dispersion of brine discharges. *Desalination*, *431*, 27-34.
36. Macdonald, M., Darling, R. M. (2019). Comparing Velocities and Pressures in Redox Flow Batteries with Interdigitated and Serpentine Channels. *AIChE Journal*, *65*, e16553 .
37. Michalski, R. (2018). Ion Chromatography Applications in Wastewater Analysis. *Separations*, *5*.
38. Nafion™. Nafion™ Sulfonic Membranes. https://www.nafion.com/en/products/sulfonic-membranes.
39. Ogunbiyi, O., Saththasivam, J., Al-Masri, D., Manawi, Y., Lawler, J., Zhang, X., Liu, Z. (2021a). Sustainable Brine Management from the Perspectives of Water, Energy and Mineral Recovery: a Comprehensive Review. *Desalination*, *513,* 115055.
40. Panagopoulos, A., Haralambous, K. J., & Loizidou, M. (2019). Desalination Brine Disposal Methods and Treatment Technologies - a Review. *Science of the Total*

Environment, *693*, 133545.

41. Park, J. E., Kang, S. Y., Oh, S.-H., Kim, J. K., Lim, M. S., Ahn, C.-Y., Cho, Y.-H., Sung, Y.-E. (2019). High-performance Anion-exchange Membrane Water Electrolysis. *Electrochimica Acta*, *295*, 99-106.
42. Phillips, R.; Dunnill, C. W. (2016). Zero Gap Alkaline Electrolysis Cell Design for Renewable Energy Storage as Hydrogen Gas. *RSC. Adv.*, 6, 100643-100651.
43. Shi, H., Wang, T., Liu, J., Chen, W., Li, S., Liang, J., Liu, S., Liu, X., Cai, Z., Wang, C., Su, D., Huang, Y., Elbaz, L., Li, Q. (2023). A Sodium-ion-conducted Asymmetric Electrolyzer to Lower the Operation Voltage for Direct Seawater Electrolysis. *Nat. Commun.*, *14*, 3934.
44. Simmons, J. G. (1963). Electric Tunnel Effect between Dissimilar Electrodes Separated by a Thin Insulating Film. *Journal of Applied Physics*, *34*, 2581-2590.
45. Siedler, G.; Gould, J.; Church, J. A. (2001). Ocean Circulation and Climate: Observing and Modelling the Global Ocean. *Eos Trans.*, 82, 517–517.
46. Fang, Q.; Blum, L.; Menzler, N. H.; Stolten, D. (2017). Solid Oxide Electrolyzer Stack with 20,000 h of Operation. *ECS Trans.*, *78*, 2885.
47. Sola, I., Fernández-Torquemada, Y., Forcada, A., Valle, C., del Pilar-Ruso, Y., González-Correa, J. M., & Sánchez-Lizaso, J. L. (2020). Sustainable desalination: Long-term monitoring of brine discharge in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, *161*, 111813.
48. Dresp, S.; Dionigi, F.; Klingenhof, M.; Strasser, P. (2019). Direct Electrolytic Splitting of Seawater: Opportunities and Challenges. *ACS Energy Lett.*, 4, 933-942.
49. Sun, C.; Wang, H.; Ji, S.; Wang, X.; Linkov, V.; Tian, X.; Yao, L.; Zhao, J.; Wang, R. (2021). Layer-structured FeCo bihydroxide as an ultra-stable bifunctional electrocatalyst for water splitting at high current densities. *Sustainable Energy & Fuels*, 5, 2747-2752.
50. Tang, M.-L., Tsuang, B.-J., Kuo, P.-H., Wang, Y.-S., Liu, X.-Y., Ku, K.-C. (2023). Dose Assessment on the Impact of Accidents with Fukushima Nuclear Meltdown Emission Levels at the Four Nuclear Power Plants in Taiwan. *Energy and Climate Change*, *4*, 100090.

51. Tong, W.; Forster, M.; Dionigi, F.; Dresp, S.; Sadeghi Erami, R.; Strasser, P.; Cowan, A. J.; Farràs, P. (2020). Electrolysis of Low-grade and Saline Surface Water. *Nature Energy*, *5*, 367-377.
52. Vogt, H., Balzer, R. J. (2005). The Bubble Coverage of Gas-evolving Electrodes in Stagnant Electrolytes. *Electrochimica Acta*, *50*, 2073-2079.
53. Vos, J. G., Wezendonk, T. A., Jeremiasse, A. W., Koper, M. T. M. (2018). $MnO_{(x)}/IrO_{(x)}$ as Selective Oxygen Evolution Electrocatalyst in Acidic Chloride Solution. *J. Am. Chem. Soc.*, *140*, 10270-10281.
54. Wu, Z., Wang, X., Huang, J., Gao, F. (2018). A Co-doped Ni–Fe Mixed Oxide Mesoporous Nanosheet Array with Low Overpotential and High Stability towards Overall Water Splitting. *Journal of Materials Chemistry A*, *6*, 167-178.
55. Xu, Q., Zhao, T. S., Leung, P. K. (2013). Numerical Investigations of Flow Field Designs for Vanadium Redox Flow Batteries. *Applied Energy*, *105*, 47-56.
56. Yeh, C. H., Hsu, W. Y., Hsu, C. C., Valinton, J. A. A., Yang, C. I., Chiu, C. C., Chen, C. H. (2021). Cobalt Iron Oxides Prepared by Acidic Redox-Assisted Precipitation: Characterization, Applications, and New Opportunities. *ACS Appl, Mater. Interfaces*., *13*, 52181–52192.
57. Zegeye, T. A., Chen, W.-T., Hsu, C.-C., Valinton, J. A. A., Chen, C.-H. (2022). Activation Energy Assessing Potential-Dependent Activities and Site Reconstruction for Oxygen Evolution. *ACS Energy Letters*, *7*, 2236-2243.
58. Zhou, T.-Y., Chen, Y.-S. (2015). Effect of Channel Geometry on Formability of 304 Stainless Steel Bipolar Plates for Fuel Cells—Simulation and Experiments. *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, *12*, 051001.

附錄一

NAMR113083「鹼性電解海水製氫技術研製發展」案

執行工作報告書審查及第一次工作會議紀錄

壹、日期：113年6月19日14時00分

貳、地點：線上會議

參、主持人：廖主任建明　　**紀錄：**鄭明宏

肆、出列席單位及人員：本院(李助理研究員傳宗、余助理研究員采倫、陳助理研究員沛宏)、國立中山大學(陳軍互教授、劉昀佩研究助理)；書面審查意見(本院余助理研究員采倫、海委會科文處孫科長嘉良)

伍、主席致詞：（略）

陸、國立中山大學簡報：（略）

柒、委員及各單位意見：

一、孫委員嘉良(書面)

(一)、成本與效能優化方面，須包含水流道設計優化、水流道板材質優化、各部件抗腐蝕及材質優化、最適合的單元件設計等，建議及早明確各優化之選擇項目及優化目標及標準。例如，水流道設計優化究竟有哪幾種選項，以及依據何種標準來確認最優設計。

回覆: 謝謝委員建議，已新增至第 33 頁第二章的第二節之工作項目二，修正處為「本計畫的海水電解單元件轉換效能與成本優化，將從水流道板材質及水流道板的流道圖形著手。優先測試的水流道材質包括石墨和鈦板。而水流道設計有兩個選項為指叉流場與蛇形流場，但目前因時程關係，在此計畫無法執行。因此本計畫在時程內優先採用蛇形流場，而指叉流場會持續進行研究」

(二)、鹼性鹵水的處理方法與排放評估，請與主管機關詢問，明確適用之法令，尤其是否涉及《海洋污染防治法》建議詢問本會海保署，或者涉及《防止船舶污染國際公約(MARPOL)》建議詢問交通部航港局等主管機關。

回覆: 謝謝委員建議，目前無涉及其他法令。我們會保持與相關部門的聯繫，並根據最新法規更新合規策略，以確保業務符合環保標準。

(三)、前次委員詢問應有妥適回應與修正。

回覆: 謝謝委員建議，有於此次報告中，進行更清楚詳細的修正及回覆。

二、余助理研究員采倫(書面)

(一)、報告內容修正紀錄表請補上修訂後內容。雖貴單位有提供頁數，但仍強烈建議將審查意見回覆在同一表上，讓審查委員易於確認修訂後內容正確性。如項次1，審查意見為能耗提升多少？60%~70%?修訂後內容:將電極面積擴大到100cm^{2}時，預期將效率提高至75%(含)以上。這是我參看貴單位提供頁數所找到的答案，未免有誤導之可能，後續請補上修訂後內容。

回覆: 謝謝委員建議，此次報告已覆上修正處之章節、頁數與修正內容。

(二)、工作計畫書內容有許多需要修訂的部分，尤其是文獻引用的格式，請貴單位可再重新檢視計畫書內容。如:p5(二)第3行引用文獻有2個陳俊廷 ；p7(四)第2行 引 用 文 獻 有2個 Panagopoulos；p7(四)第6行 有2個(Panagopoulos, 2022)；p9第3行有2個(Lin et al., 2013)；p19第12行(Huang et al., 2021)為上標…。幾乎每頁文獻引用都有問題，請修正。

回覆: 謝謝委員建議，已將文獻引用的格式進行修正。

三、李助理研究員傳宗

(一)、請再行補充說明當前鹵水排放標準。

回覆: 謝謝委員建議，已新增至第三章第二節第 52 頁至 53 頁的表 6與表 7所示。

(二)、有關執行工作計劃書中目錄第三章次標與內文不相同，請再行修正。

回覆: 謝謝委員建議，已進行修正。

四、鄭副研究員明宏

(一)、本案報告請依照需求書的工項以各章節表示，以利後續檢驗之用。

回覆: 謝謝委員建議，已進行修正。

(二)、就本執行工作計畫書中針對製氫相關經費不無列表說明，請再行補充以利後續針對所提成本優化有佐證之資料。

回覆: 謝謝委員建議，已於第 77 頁新增「一組 10×10 cm² 電解系統包含以下組件：一個 10×10 cm² 鈦單元件、電源供應器、幫浦、membrane、HER 催化劑、OER 催化劑，總成本約為 27 萬元。」計畫書中第五章原件效率將從71.4%提升到75%(p.42)，請補充說明當前國內外相關技術的效率(須含佐證資料)，與是否可以再行提升或是可在改善的地方。

回覆: 謝謝委員建議，國內外相關技術的效率已新增至第一章第一節第20頁，修正處為「台灣工業技術研究院 (ITRI) 在高效能 AEM 電解槽的開發上有顯著進展。ITRI 所開發的 1 kW 高壓電解槽的效率已經達到 65%，這顯示出其在高效能電解氫技術中的潛力。相比之下，德國 Enapter 公司所開發的 AEM 電解槽效率為 62.5% ，儘管略低於 ITRI 的數據，但該技術已經實現商業化並投入市場，顯示出其在商業化應用中的可行性。另一方面，中國穩石氫能公司開發的 2.5 kW AEM 電解槽效率為 66.6%，也展示出其在大規模氫氣生產中的潛力。然而，這些技術目前僅限於純水系統的應用，這使得其在水資源短缺或鹽水環境中的應用受到限制。尤其是在像台灣這樣的地區，常年面臨缺水的問題。因此，如何突破這一限制，開發能夠在鹽水或低品質水源環境下穩定運行的 AEM 電解技術，成為未來 AEM 技術發展的關鍵挑戰之一。」

而可在改善的地方於為第 60 頁「在本研究中，我們將探討石墨、鈦或複合材料流道板在海水中的穩定性，旨在找到最適合海水環境下使用的材料。除了對材料穩定性進行評估，我們還將通過流道設計來優化海水系統下 100 cm^2 單電池的效率。未來的研究將進一步探索電堆中電池的面積、數量以及電堆數量等參數的最佳配置，以提升系統的整體效能。更重要的是，我們將致力於開發具有更高活性的抗海水腐蝕催化劑，以進一步提升能源轉換效率。」

(三)、請再後續補充進行一周以上之長期測試證明文件與進行方式。

回覆: 謝謝委員建議，已新增研究方法至第二章的第二節之工作項目一，修正處為第 30 頁的「我們從西子灣取用海水，首先對海水中的砂石進行過濾…」至第31頁的「根據公式 [1]，若結束電壓達到原始電壓的10%，則表明該單元件在海水中的穩定性不理想。」，而測試結果更新於第四章第三節第77頁至78頁。

(四)、就計畫書中提到要採用四種不同材料 (p.40) 進行測試，請注意後續需提供相關測試說明。

回覆: 謝謝委員建議，已新增研究方法至第二章的第二節之工作項目二，為第33頁至第34頁，而測試結果更新於第四章第64頁至75頁。

五、廖主任建明

(一)、請補充本次預計規劃鹼性鹵水處理的可行方案。

回覆: 謝謝委員建議，已新增至第五章第79頁至101頁。

(二)、可以補充目前所進行的研究已達 TRL 多少?以及後續如何再行提升，以加速技術可商業化的可能性。

回覆: 謝謝委員建議，已新增至第三章第三節第58頁，修正處為「這些研究結果表明，電解制氫技術已達到技術成熟度等級 (TRL) 6，顯示出其在實驗和操作環境中的穩定性和有效性。」

以及"後續如何再行提升"修正為第60頁「在本研究中，我們將探討石墨、鈦或複合材料流道板在海水中的穩定性，旨在找到最適合海水環境下使用的材料。除了對材料穩定性進行評估，我們還將通過流道設計來優化海水系統下 100 cm^2 單電池的效率。未來的研究將進一步探索電堆中電池的面積、數量以及電堆數量等參數的最佳配置，以提升系統的整體效能。更重要的是，我們將致力於開發具有更高活性的抗海水腐蝕催化劑，以進一步提升能源轉換效率。」

(三)、再補充說明如何進行一周以上之長期測試。

回覆: 謝謝委員建議，已新增研究方法至第二章的第二節之工作項目一，修正處為第30頁的「我們從西子灣取用海水，首先對海水中的砂石進行過濾，然後加入 1~3 M 的固態氫氧化鉀 (KOH) 顆粒以提高其鹼度」至第31頁的「根據公式 [1]，若結束電壓達到原始電壓的10%，則表明該單元件在海水中的穩定性不理想。」而測試結果更新於第四章第三節第77頁至78頁。

捌、結論

一、執行工作計畫書經本會議審查後原則通過。

二、請執行單位依據各委員審查意見修正，納入期中報告中，並回復辦理情形，另請團隊注意後續工作檢核時程。

玖、散會（時間）：下午 14 時 45 分

「NAMR113083 鹼性電解海水製氫技術研製發展」

期中報告書審查會議紀錄

壹、日期：113 年 8 月 14 日 10 時 00 分

貳、地點：本院第一會議室

參、主持人：廖主任建明　　**紀錄：**鄭明宏

肆、出列席單位及人員：林委員柏亨、洪委員緯璿、本院(廖主任建明、鄭副研究員明宏、李助理研究員傳宗、余助理研究員采倫)、國立中山大學(陳教授軍互、劉昀佩助理、陳毓霖助理)

伍、主席致詞：（略）

陸、國立中山大學簡報：（略）

柒、委員及各單位意見：

一、洪委員緯璿

(一)、建議可以於是驗後嘗試將兩種機板黑化斷面進行材料分析 (註: 委員原意思為將測試後兩種鈦板的黑化部分進行分析)，以確定其成分，以擬定後續解決方式。

回覆: 謝謝委員建議，後續會進一步分析。

(二)、在報告書中提及單電池整體轉換效率可達 71%，但在電堆時能源轉換時有僅有 29.89%，請補充說明這兩種的差異。

回覆: 已新增說明至第三章的第三節，修正處為第 60 頁的「海水的導電性會引發歧路電流問題…」至「以進一步優化電流傳導路徑，從而減少不必要的能量損耗。」

(三)、為能了解所進行的長期穩定測試，請補充所採用電堆的電流密度為何?請補充以利評估整體效益。

回覆: 謝謝委員建議，目前 25 cm^2 單元件的鹼性海水 150 小時穩定測試所設定的電流為 2.5 A，因此電流密度為 100 mA/cm^2。而 100 cm^2 單元件的鹼性海水 334 小時穩定測試所設定的電流為 2.5 A，則電流密度為 25 mA/cm^2，電流密度皆已新增至第四章的第 65、68、71 與 77 頁。

(四)、目前現有的 AEM 商用機型相比轉換效能仍有差異，請補充進海水與不進海水 (註: 委員原意思為請補充說明報告中所使用的海水是否已經過 RO 處理？)，跟單電池與組成電堆的差異，和計算方式。

回覆: 關於電解液的處理，我們的技術確實不需要使用 RO 處理，而是通過將海水鹼化後即可直接進行電解，這使得系統更加簡便且具成本效益。相比之下，市售的 AEM 商用機需要使用純水，無法直接將海水引入，因此仍需進行海水的純化處理。

至於單電池與組成電堆之間的效率差異，主要原因確實是歧路電流。這一現象會在電堆中造成電流偏向最短路徑流動，導致一部分電能以熱的形式浪費掉，從而降低整體的能源轉換效率。詳細的討論可參見第三章第三節第 60 頁。此外，關於能源轉換效率的計算，我們在第 33 頁的公式 [2]中有詳細的說明。

二、林委員柏亨

(一)、如何結合催化劑的防腐蝕與之前的薄膜催化劑應用?請補充(註: 委員的原想法為，前一期計畫中採用 ARD 方法搭配 Roll to Roll 技術進行催化劑製作，而在本報告中則是利用 ARD 技術將催化劑鍍覆於鈦流道板上，請問此部分是否屬於前一計畫的延續？)

回覆: 謝謝委員建議，此案中，我們將催化劑鍍在鈦板上，期望抗腐蝕性的催化劑能夠保護鈦板，並賦予其抗腐蝕性能。然而，目前效果不太理想，因此我們計劃在後續階段採用另一種保護方式。同時，Roll to Roll 技術在本案中仍然適用。根據最新的研究成果，將催化劑鍍在分隔膜上已顯示出不錯的效果，因此我們將繼續開發 Roll to Roll 的進階技術，以實現催化劑在分隔膜上的快速塗佈。

(二)、催化過程加鹼，排出鹵水的酸鹼度影響為何?請補充

回覆: 由於海水電解過程中需要添加鹼性物質以提高系統效能並抑制氯氣生成，這會導致排放的鹵水呈現較高的酸鹼值。刻正評估是否可藉由調整電解質的添加方式，在維持系統效能之前提，下降所排出鹵水的酸鹼值。另一方面，亦可藉由降低鹼液添加量，同時量測並計算每單位產氫量之鹵水產出量，由於根據目前實驗結果預期產出鹵水量可能不高，後續可藉由設計適當的排放方式，在承受海洋水體允收標準下直接排放。

(三)、放大化後鹼，應考慮鹼對於整個設備的腐蝕影響為何?

回覆: 在電解過程中，由於水量逐漸減少，系統的鹼度會隨之逐步上升。此次系統配置的蠕動幫浦，透過機械方式輸送電解液，因此提高了管材的耗損率，再隨著鹼度的增加，管材中的塑化劑成分逐漸滲入電解液，不僅降低了電解系統的穩定性，還加速了管材的老化。在觀察到鹼度上升對水管壽命的負面影響後，我們認為有必要尋找其他適合的幫浦類型，或使用不含塑化劑且具有抗腐蝕性能的管材 (例如 Tygon)，以提升系

統的耐用性和穩定性。

(四)、針對鹵水排放部分，應透過試驗結果，進行不同參數比較找出最佳化的排放方式。

回覆: 謝謝委員的建議。根據目前的實驗結果，我們發現在電解過程中，當濃度濃縮至 5.3 M 時，會產生鹽類，並且設備中的管材會持續釋放塑化劑。考量到系統的穩定性及能量轉換效率，我們計劃在濃度達 5.3 M 時更換水體。在鹵水處理方面，根據目前的實驗數據，我們預計產出的鹵水量較少，因此未來可以設計適當的排放方式，並在確保符合海洋水體的接受標準下進行直接排放。

三、李助理研究員傳宗

(一)、報告第 28 頁工作甘特圖中，僅顯示預定進度，無顯示實際進度，無法了解目前進度是否有落後，請補充說明。

回覆: 謝謝委員建議，第 39 頁甘特圖已新增「穩定性的衰退率應 <10%」、「優化海水產氫單元件材質及流道設計」與「完成製造 100 cm^2 海水產氫單元件」

(一)、有關鹵水處理中，文中僅說明排放，請補充(報告第 37 頁)是否可透過回收循環使用之方案評估。(註: 委員的原想法為，目前報告中僅提及鹵水處理將以排放方式進行，建議補充說明是否有其他選項，例如透過技術回收或循環利用)

回覆: 關於濃縮鹵水永續循環使用，濃縮鹵水可直接輸送至工業製鹽設施，回收作為工業鹽原料，這在工業製鹽中具有實際應用價值。而鹼度的部分也可以灌入 CO_2 進行固碳作用，可回收碳酸鹽類。

我們目前正在積極尋求與下游工業製鹽廠的合作機會，以便有效地處理和利用電解過程中產生的鹵水。然而，由於合約時間的限制，本案範圍內尚未涵蓋具體的製鹽工藝規劃。我們將繼續追蹤潛在合作伙伴的反饋，並在後續的研究或專案中，探索將鹵水再利用於製鹽的可能性。

(二)、提醒運作一週以上前都顯示 150 小時，未達 7 日 (168小時) 以上，未達合約要求，請再補足時數。

回覆: 謝謝委員提醒，我們已經完成了 150 小時的初步測試，以確認設備的穩定性。此外，在第四章第三節的第 77 至 78 頁，記錄了設備超過168小時運行後的測試結果，以提供更完整的穩定性評估數據。

(三)、目前機組都在固定式，有無評估未來將機組放在船上的穩定性的問題。

回覆: 目前推測，輕微的搖晃可以加速機組內氣泡的離去。輕微搖晃可能

有助於加速氣泡從機組內部逸出，從而提升整體運行效率。然而，這樣的運行條件下存在氫氣洩漏的潛在風險，建議在搖晃過程中進行氫氣洩漏監測，以確保安全操作。而根據中國 Liu 等人的研究 (Liu, T. et al., 2024)，波浪運動能有效增強水的傳質，並且適度的波浪波動對電解槽的核心組件 (如膜和催化劑) 的穩定性無明顯負面影響，表明此類動態環境可能對直接海水電解應用是可行的。

四、**余助理研究員采倫**

(一)、請注意需求說明書中所規定的一週與每個採樣數據點間應隔於 5 秒(含)以內之規定。

回覆: 謝謝委員提醒，首先關於運作一週的問題進行回覆，在第四章第三節的第 77 至 78 頁，記錄了設備超過 168 小時運行後的測試結果，以提供更完整的穩定性評估數據。

再來回覆關於每個採樣數據點的問題，目前即時檢測分析是透過高解析質譜技術進行，該解析度能夠每秒偵測數據點，也已註明於期末報告第 64 頁「為了實時監控反應過程中的氣體生成情況，陰極和陽極所產生的氣體出口管連接至質譜儀，此質譜儀每秒偵測數據點，因此可進行氫氣、氧氣和氯氣的即時分析。」。

(二)、請補充鹵水內容物，在試驗中進行單純鈦板及上面有塗層時是否會造成鹵水的差異，及對整體的穩定性差異。

回覆: 謝謝委員的建議。根據目前的觀察，當單純的鈦板與塗層鈦板進行比較時，發現塗層會導致整體穩定性和效率的降低，所以後續會使用單純鈦版。然而，目前實驗中並未觀察到塗層對鹵水成分的顯著影響。

(三)、若與 RO 淡化結果比較，本計畫的結果均高於前述倍率，請再補充說明造成的差異。

回覆: 海水產氫與海水 RO 淡化原理不同。海水產氫藉由電解海水輔以催化劑利用，使海水經電解產生氧氣與氫氣，過程中水體濃縮倍率可能受到電極、半透膜、與催化劑等選擇而有所差異；海水 RO 淡化則是利用滲透作用，將清水 (低滲透壓溶液) 和海水 (高滲透壓溶液) 置於系統中，中間以只允許水通過的半透膜分隔，使水從滲透壓低的地方流向滲透壓高的方向。由於兩者操作原理不同，使海水產氫與海水 RO 淡化之濃縮倍率也不相同。

五、 鄭副研究員明宏

(一)、請注意報告內的排板，請統一文字與行距。

回覆: 謝謝委員提醒，已修正。

(二)、標題"提要"請調整為"摘要' (註:委員的原意思為第11頁的標題，應將"提要"改為"摘要")

回覆: 謝謝委員提醒，已於第11頁修正。

(三)、報告內文中有些誤繕的文字 (如第15頁中"SOEC" 與"SOFC")，請修正。

回覆: 謝謝委員提醒，已於第17、18 及 19 頁修正。

(四)、請補充製氫過程中相關的成本資料，以做後續評估之用。

回覆: 已於第 77 頁新增。「一組 100 cm^2 電解系統包含以下組件：一個 100 cm^2 鈦單元件、電源供應器、幫浦、membrane、HER 催化劑、OER 催化劑，總成本約為 27 萬元。」

(五)、請補充更新機組後，效能提升比例為何?

回覆: 謝謝委員，已於第 65 頁「再根據公式 [2] ，可將所量測的電壓換算成能源轉換效率，電解 150 小時後，鈦單元件的效率 69.1% 較前一案的 25 cm^2 不鏽鋼元件 58.5% 提高了 10.6% (以理論電位 1.23 V 計算)，同時也高於 Enapter 62.5% 效率的 AEM 電解槽 (適用淡水系統)，提升了 6.6% (Enapter, online)。」 及 77 頁修正，修正處為「而能源效率根據公式 [2] 計算得為 64.73%，較前一案的 25 cm^2 不鏽鋼元件 58.5% 提高了 6.23%（以理論電位 1.23 V 計算）。

六、廖主任建明

(一)、表5是指國家放流水水質標準嗎?若是，第六章之排放鹵水是否應比照此標準進行檢測?

回覆: 後續排放鹵水檢測將參考相關海洋法規 (含國家放流水標準)，針對本案海水產氫技術可能影響之水質參數優先檢測，其它預期與本案較無直接關聯之水質參數將視後續分析量能適時納入分析。另說明由於海水產氫與海水 RO 淡化兩者操作原理不同，海水產氫並不適宜直接套用國家放流水標準中針對海水淡化廠所設置之標準 (放流水標準第二條第一項第一點，事業、污水下水道系統及建築物污水處理設施之放流水標準，其水質項目及限值之規定，第七條，海水淡化廠適用附表七)。惟因本案鹵水最終排放位置仍為海洋，故本團隊仍會參考相關法規包含放流水標準，規劃最適排放方案，將本案鹵水可能對環境之影響降至最低。

捌、結論

一、本案期中報告書原則審查通過。

二、請執行團隊將各委員審查意見納入後續執行參考；須修正部分，請納入

期末報告書一併修正，亦請團隊注意後續工作時程。

玖、散會（時間）：上午 12 時 00 分

「NAMR113083 鹼性電解海水製氫技術研製發展」

期末報告書審查會議紀錄

壹、日期：113年12月02日14時00分

貳、地點：本院第一會議室

參、主持人：廖主任建明　　**紀錄：**鄭明宏

肆、出列席單位及人員：洪委員緯璿(線上)、本院(廖主任建明、鄭副研究員明宏、李助理研究員傳宗、余助理研究員采倫)、國立中山大學(陳教授軍互、劉昀佩助理、陳毓霖助理)、[海洋委員會孫科長嘉良提供書面意見]

伍、主席致詞：(略)

陸、國立中山大學簡報：(略)

柒、委員及各單位意見：

一、洪委員緯璿

(一) 可否說明測試時的濃度，與一般相同實驗差異。(委員的原意是指出，根據文獻，電解水實驗通常使用 0.5 M 或 1 M 的濃度，而本次實驗結果是基於 3 M 的設定。如果將濃度調整為 0.5 M 或 1 M，可能會對實驗結果產生什麼樣的影響？)

回覆: 由於提升 KOH 濃度可以增加電解質濃度，從而提升海水的導電性，因此電解的能源轉換效率會顯著提升。然而，當 KOH 濃度低於 1 M 時，Cl^- 離子的相對濃度較高，會導致腐蝕現象的發生。目前實驗結果顯示，將 KOH 濃度控制在 1 M 至 3 M 的範圍內，能夠確保海水電解過程的穩定運行，並具備良好的能源轉換效率。

(二) 報告所提到的沉澱物分析，是否有針對各項離子進行分析，請補充說明。(委員的原意是想探討，在排除了管路問題的情況下，是否仍然會生成沉澱物？)

回覆: 目前，在進行電解之前，會先對海水進行鹼化處理，此過程中鈣和鎂的氫氧化物會一同沉澱。在後續的電解過程中，我們日後計劃會進一步分析，在排除管路問題的情況下，是否仍然會生成沉澱物。目前的推測是，可能由於塑化劑中的 Disodium phthalate 溶解量過多，導致鈣的二價離子為了維持離子平衡，與 Disodium phthalate 結合生成沉澱。

(三) 效能部分，從原始5*5cm 到10*10cm，變化是如何，請說明。

回覆: 當我們從 25 cm^2 擴展到 100 cm^2 的元件時，發現催化劑的平整度對效能有顯著影響。在實驗過程中，我們發現原有的電極基板在擴大尺寸後，平整度不佳會影響催化劑的分佈和接觸效率。為了解決這一問題，我們更換了平整度更高的電極基板，結果顯示，轉換效率得到了顯著提升。

(四) 在鹵水分析章節請用系統性呈現，僅利用表格有些離子增加，有些離子減少，很難理解是何種反應產生。

回覆: 感謝委員提醒，相關說明已補充說明於第五章第二節第84至85頁，修正處為「綜合以上三次海水電解製氫實驗之水質分析結果顯示...，進一步探討濃排水直接排放至海水中的可行性。」

(五) 在排放部分，原則上是以多少量的水體進行分析，若實際操作上是否會產生對環境問題。

回覆: 以報告書中提供的第三次實驗操作結果為例，反應進行 213 小時共產出高鹽度濃排水 1,605 毫升，排放流量約為 0.18 L/day。根據模擬結果，此濃排水進入受納水體後，鹽度能迅速稀釋至背景濃度，對周圍環境無顯著影響。未來實場操作的排放濃度與水量可能因操作條件的變化而有所不同，需根據實際情況進行評估；同時，可導入批次排放等策略，以確保對環境影響降至最低。

(六) 進一步若是採用1MW 的發電量，若以現有濃度擴散分析是否還會在容許範圍內，請補充。

回覆: 採用 1 MW 的發電量可選擇短時間操作以產生大量濃排水，或長時間操作以降低濃排水量的策略進行。根據本計畫的濃排水分析與擴散模擬結果，若欲在容許範圍內提高發電量，可採用多種可行作法，包括：降低產氫操作電壓以延長反應時間，從而減少濃排水量；以批次排放方式處理濃排水；或採用多點排放策略，降低單一排放源的負荷。這些方法均有助於將濃排水濃度維持在容許範圍內。

二、孫委員嘉良

(一)、成本與效能優化方面，須包含水流道設計優化、水流道板材質優化、各部件抗腐蝕及材質優化、最適合的單元件設計等，於第五章(p.73~75)中之內容是否足夠?建議應能包含需求書所列各部件抗腐蝕及材質優化，目前尚未見各部件是有哪些不同部件(似乎僅有一種元件)，另外尚須計算不同材質所需的成本與效能，並提出最適合的單元件設計，其計算是否應包含成本、效能取捨之權重，表17僅列出綜合比較，尚缺”評估”基準與結果。

回覆: 謝謝委員的建議，針對各部件的抗腐蝕與材質優化，我們的回覆如下：

由於元件中的零組件為端板、集電板、流道板、陽極、陰極與陰離子交換膜，在這些部件中，僅有流道板、陽極和陰離子交換膜會直接接觸海水電解液。而陽極使用本團隊自研發的抗海水腐蝕催化劑，在長期穩定性測試中已證明具有良好的抗腐蝕性能，因此不會產生海水腐蝕問題。陰離子交換膜：由於其材質為高分子材料，不會發生氯腐蝕問題，因此也不需要額外的抗腐蝕優化措施。然流道板常用金屬材質，因此作為與海水直接接觸的部件，目前已鎖定為重點優化的對象。

而關於提出最適合的單元件設計，我方在表15僅列出成本、能源轉換效能及在鹼性海水的電壓穩定性，綜合考量長期耐久性、電壓穩定性、耐腐蝕性能及能源轉換效率等因素，鈦流道板為在海上或近岸環境中使用的最佳選擇。該材質具備長時間運行的穩定性與耐久性，適合應用於鹼性海水製氫裝置中。

(二)、鹼性鹵水的處理方法與排放評估，前次請團隊與主管機關詢問，明確適用之法令，尤其是否涉及《海洋污染防治法》建議詢問本會海保署，或者涉及《防止船舶污染國際公約(MARPOL)》建議詢問交通部航港局等主管機關，獲復目前無涉及其他法令。惟鹵水處理一節(p.46~p.54)尚表示涉及放流水標準、海洋放流管線放流水標準、海域環境分類及海洋環境品質標準、海域環境分類及海洋環境品質標準、台灣海水淡化廠放流水水質項目及限值。至計劃總結 p.85又表示目前對鹵水排放尚無明確法規，是否有矛盾，請說明。

回覆: 感謝委員的提醒，已在第五章第二節第84、100 與 101頁中補充了相關說明。簡單概述如下：在海水電解產氫的實驗中，由於添加電解液以及水樣體積揮發等因素，導致濃排水中部分離子濃度有所升高。目前《海洋污染防治法》主要規範對海洋環境的污染，包括直接排放或通過其他途徑 (如河流或排放管線) 進入海洋的污染物，以本案之濃排水為例，應檢視排放量、濃度及其影響範圍是否符合該法中對水質保護的規定，如排放符合可承受水體標準即不致違規。《防止船舶污染國際公約(MARPOL)》則涉及船舶在運行過程中對海洋的污染控制，主要針對油污、化學物質、垃圾、污水、廢氣等污染物，因高鹽度濃排水是從固定設施 (如沿海產氫裝置) 排放，而非船舶運行所致，通常不屬於 MARPOL 的管轄範圍。另從放流水標準角度，現行法規尚無針對此類排放的直接管制標準，且這些離子並未在現行放流水標準或各國接受水體的水質允收標準中被特別規範。因此，針對本案中海水電解產氫後產生的高鹽度

濃排水，較適合之評估角度可參考相關承受水體的水質管制標準，同時配合如本計畫執行之擴散模擬，進行必要的水質監測和管理。

(三)、鹵水直接排放之可行性評估應依法令規定及本案排放預估設定相關邊界條件、初始條件、排放假設等，而非僅交代設定值，該評估顯得較為簡略，建請補充。

回覆: 感謝委員建議，已將內容補充在期末報告之第五章第四節排放水進入承受水體之擴散模擬。

三、李助理研究員傳宗

(一)、若是將來機組移到海上時，波浪造成載台上下波動時，機組反映條件與穩定性是否會影響到電解效率，請補充。

回覆: 針對機組在海上載台受波浪影響產生上下波動的情境，我們推測這種情況對電解效率的影響應該不大。由於電解裝置內水壓變化幅度有限，對電解反應的穩定性影響不明顯。可能需要關注的部分是海水儲存筒的設計，避免因波動導致水位不穩，可能出現取水不順暢的情況。因此就需優化儲水系統的結構設計。

(二)、實驗中得到鹵水的最大濃度5.3M，鹽度上升的過程效率是否變化，此是否為最適合的限制，請說明。

回覆: 在高 KOH 濃度及當前的時間尺度下，尚未觀察到其對效率和穩定性有明顯的影響。關於鹵水的最大濃度 5.3 M 是否為最佳限制，目前的觀點是，沉澱物中 NaCl 的峰值不明顯，反而塑化劑中的 Disodium phthalate 成分對沉澱的影響更為顯著。因此，鹵水濃度的限制可能與管材 (是否含有塑化劑) 及膜對該濃度的耐受性相關。如果能解決管路材料的問題，避免塑化劑的影響，並選用耐高濃度鹵水的高性能膜，則鹵水的最大可操作濃度可能進一步提升。

四、余助理研究員采倫

(一)、實驗中所產生的白色粉末，應為氫氧化鎂的沉澱，此可由鹵水分析中可以看出鎂離子到後面幾次幾乎不存在。

回覆: 謝謝委員建議，我們會再針對實驗中產生的白色粉末進行 XRD 分析，以進一步確認其成分是否為氫氧化鎂沉澱。

(二)、在鹵水分析是否可以將三次結果進行平均，並繪製成圖，以利讀者可以知道各項離子變化。

回覆: 感謝委員建議，已補充說明在第 89 至 90 頁中。修正處為「圖 39為三次不同操作條件下高鹽度濃排水的離子變化...，考量不同操作情境間的離子質量平衡結果差異不大，從原則上來看，最佳操作條件應優先考

量產氫效率。」

(三)、在整體製氫試驗的流程再詳細說明，俾利瞭解各步驟方式。

回覆: 謝謝委員建議，我們已修正在第 30 頁第二章中的工作項目一，修正處為「我們從西子灣取用海水，首先對海水進行砂石過濾...進行電解製氫的測試。」

五、鄭副研究員明宏

(一)、請補充說明報告 p.75中穩定度代表的意思。

回覆: 謝謝委員建議，第74及75頁已修正為電壓穩定性，詳細資訊於第二章第二節工作項目一之31頁。

(二)、在成本分析部分請再補充，整體機組加入後所需經費，以利後須規劃之用。

回覆: 由於第四章第二節的成本評估僅涉及流道板材質的改變，其他零件皆使用相同的配置，因此在第74及75頁僅比較了不同材質流道板的成本差異，而100 cm^2 整體機組的經費則於第77頁進行說明，修正處為「一組 100 cm^2 電解系統包含以下組件：一個 100 cm^2 鈦單元件、電源供應器、幫浦、membrane、HER 催化劑、OER 催化劑，總成本約為 27 萬元。」

(三)、請將今日現場所提供鹵水的內容補充到修正版。

回覆: 感謝委員建議，已配合辦理。

(四)、在報告中請定義清楚"效益"是指哪何種，俾利清楚是指機組或是產氫等。

回覆: 謝謝委員建議，謝謝委員建議，已將報告中的效益進行更清楚的解釋，另外電解的效益，意旨能源轉換效率，並在第33頁詳細說明能源轉換效率。

(五)、擴散模擬請再清楚補充整體理論與假設，以利評斷所得結果。令是否有考慮到因是不間斷製氫時，排放源逐漸累積的問題。

回覆: 擴散模擬之整體理論與假設，已補充至第五章第四節排放水進入承受水體之擴散模擬中。在排放源逐漸累積方面，以報告書中提供的第三次實驗操作結果為例，反應進行 213 小時共產出高鹽度濃排水 1,605 毫升，排放流量約為 0.18 L/day。根據模擬結果，此濃排水進入受納水體後，鹽度能迅速稀釋至背景濃度，對周圍環境無顯著影響，指出若每天持續排放 0.18 L，對環境影響相對有限，亦無牌排放源逐漸累積之問題。進行模擬結果顯示，濃排水排放至承受水體後，能迅速稀釋至接近背景濃度。由於每小時的高鹽度濃排水量僅 7.5 mL，未來若排放至承受水體，預期不會造成排放源逐漸累積的情形，對環境影響相對有限。未

來實場操作的排放濃度與水量可能因操作條件的變化而有所不同，需根據實際情況進行評估；同時，可導入批次排放等策略，以確保對環境影響降至最低。

六、廖主任建明

(一)、報告的架構與撰寫請依合理的方式安排，輔以章節對照說明各項工作已符合需求。

回覆: 謝謝委員建議，我們已重新調整內容的順序，並新增章節對照表於38 頁。

(二)、P.62 圖24無縱軸說明，第五章是否可合併至第四章，第七章與第八章可合併為結論與建議。

回覆: 謝謝委員建議，我們已將報告中的章節進行合併，並重新調整內容的順序。

此外，圖表部分已補充縱軸的項目標示及單位，詳見 64頁。

(三)、擴散是如何模擬?應說明清楚，鹵水的 ph 值約為14，是否有影響。

回覆: 感謝委員建議，已將擴散模擬之整體理論與假設內容補充在期末報告之第五章第四節排放水進入承受水體之擴散模擬中。另於報告書中新增第五章第四節第四項 99 至 101 頁，說明承受水體在不同監測距離下的 pH 值變化。結果顯示，在海洋低流速、低擴散速率的穩定條件下，本計畫產出之 pH 14 的濃排水，在1平方公尺截面積內，於數公尺範圍內即可使背景水質 pH 回復至法規常見之 pH 9 以下。若考量一般海水的流速及擾動擴散情形，其影響範圍將更為有限，幾乎可忽略不計。未來於實場操作中，排放濃度與水量可能因操作條件的變化而有所不同，需依據實際情況進行全面評估。此外，可採用如批次排放等策略，進一步降低濃排水對環境的影響，確保對承受水體的衝擊降至最低。

捌、結論

一、本案期末報告書原則審查通過。

二、請執行單位將各委員審查意見進行修正，並於113年12月11日前將修正版期末報告(3本)含公文提送至本院檢視確認。

玖、散會（時間）：下午15時30分