



離岸浮動式光電系統之海域海象數值模擬與應用研究

Applied Numerical Modeling of Marine Conditions for Offshore Floating Photovoltaic System

陳祈彰 C. C. Chen¹、黃朝揚 C. Y. Huang²、楊証皓 C. H. Yang³、
王啓竑 C. H. Wang⁴

工研院(ITRI) 綠能與環境研究所 ¹資深工程師、²副組長、³副經理
西灣海環科技股份有限公司(Bay Tech) ⁴技術長

摘要/Abstract

本研究探討離岸浮動式光電系統於澎湖海域的可行性與海象影響，針對2015年蘇迪勒颱風進行三維波潮流耦合模擬。透過SCHISM與WWM-III模型整合風場、潮位與波浪資料，驗證模擬結果與觀測數據高度吻合，誤差約15公分。結果顯示，大菓葉與二崁場址因地形遮蔽具良好減波效果，有助於離岸浮式光電系統初步條件評估與系統穩定性關鍵依據。數值模擬提供科學依據，協助浮式光電設計、壽命評估與颱風應對策略，對離岸型浮動式光電系統發展具重要應用價值。

This study evaluates the feasibility and oceanographic impacts of offshore floating photovoltaic systems in Penghu, Taiwan. A 3D wave-circulation coupled model, integrating SCHISM and WWM-III, simulates conditions during Typhoon Soudelor (2015). The model shows high agreement with observations, with a maximum error of 15 cm. The findings indicate that the Daguoyeh and Erkan sites benefit from topographic sheltering, exhibiting favorable wave reduction effects, which aids in the preliminary condition assessment and key stability criteria for offshore floating photovoltaic systems. The simulation provides critical insights for design, lifespan assessment, and typhoon resilience planning, demonstrating the applicability of numerical modeling in offshore solar energy development.

關鍵字/Keywords

離岸浮動式光電系統(Offshore Floating Photovoltaic System; OFPVS)、海象(Marine Conditions)、波潮流耦合模型(Wave-Circulation Coupled Model)

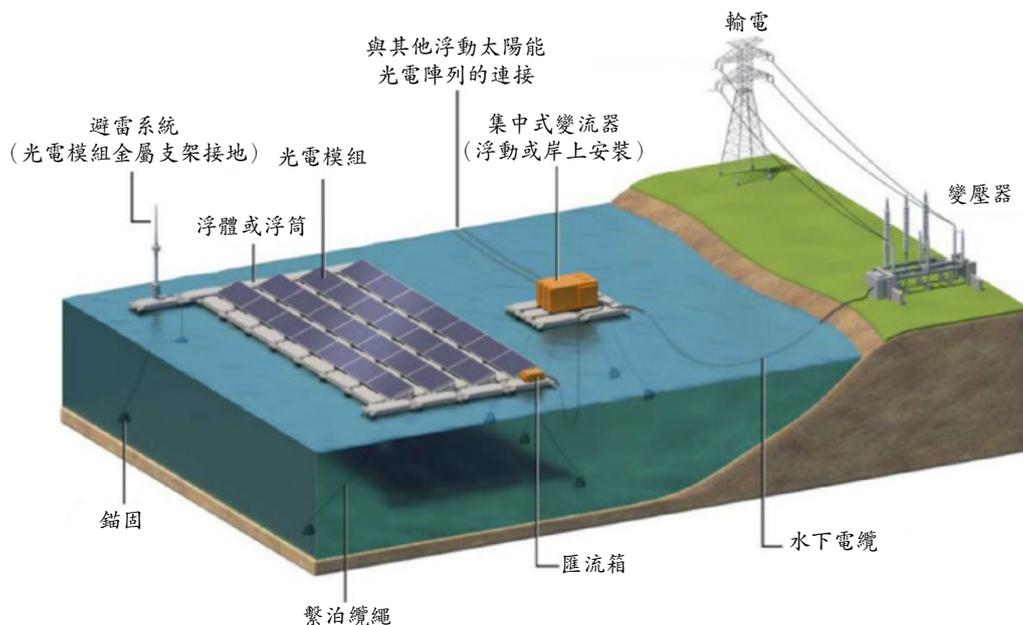


前言

隨著全球氣候變遷挑戰日益嚴峻，對於再生能源需求不斷地增加，經濟部於2025年1月23日公告《六大部門減碳行動計畫》，訂定2030年短中期目標為太陽光電裝置容量達31.2 GW、離岸風電10.9 GW、地熱1.2 GW、小水力195 MW，積極推動綠能全面發展。臺灣能源高度依賴進口，對國家能源安全構成潛在風險；同時，受限於土地狹小、人口密集等地理條件，陸域型太陽能電廠在開發上面臨土地競爭與環境保護等諸多挑戰。傳統太陽光電系統多設置於山坡地或平地，需占用大量土地，顯著增加建置成本。現有陸域型太陽光電系統，每建置1 MW容量的太陽光電系統約需1公頃土地面積⁽¹⁻⁴⁾。此外，陸域型系統亦面

臨高溫、局部遮蔽、灰塵堆積等問題，進一步降低發電效率⁽⁵⁻⁷⁾。

臺灣周邊海域擁有穩定的風力與良好的日照條件，具備發展海上型光電的潛力，尤其澎湖、金門、馬祖等離島地區，海象(Marine Conditions)條件優越，有助於提供穩定的發電環境。發展海上型光電可提升綠能穩定性，並在面對國際市場波動或供應鏈中斷時，強化我國能源自主與供應彈性。圖一顯示為浮動式光電系統(Floating Photovoltaic System; FPVS)示意圖，主要架構為將太陽光電模組建置於浮台上，浮台固定於湖泊、水庫、水處理廠或近海水域。其主要組成包括浮體、繫泊系統、太陽能模組、變流器與電纜等，模組安裝於不同浮體組成的平台上⁽⁸⁾。與陸域型系統相比，FPVS不僅節省土地，亦提升光照利用



▲圖一 離岸型浮動式光電系統示意圖⁽⁸⁾



率與發電效率，整體能量轉換效益可提升約10%⁽⁸⁻⁹⁾。

自2015年日本建置全球首座商業化FPVS電廠以來，此技術逐步於中國、美國、韓國、日本、法國、印度、西班牙、新加坡及義大利等國推廣，展現良好的經濟與環境效益。除內陸水域應用外，近年來離岸型浮動式光電系統(Offshore Floating Photovoltaic System; OFPVS)亦成為國際綠電發展重點。其建置方式與海上風電相似，將模組安裝於抗風浪能力強的浮台上，可與風電形成互補，提升整體系統穩定性與發電效率⁽¹⁰⁾。對於土地有限或多島嶼國家而言，OFPVS具發展成主力再生能源的潛力⁽¹¹⁾。預估至2030年，浮動式光電系統全球建置量將超過710 TWh⁽¹²⁾。

浮動式光電具備龐大潛力與市場需求，在實際推動上，需克服嚴峻的海洋環境挑戰。面對鹽霧與海水腐蝕問題，需採用抗腐蝕與防污設計，搭配高耐蝕材料或表面處理技術，以延長設備壽命⁽¹³⁾。此外，模組與浮台需長期承受波浪、風速、海流與潮汐等動態載荷，同時需承受颱風、巨浪與強流等極端海況，結構設計須具備抗衡強風巨浪的動態載荷⁽¹⁴⁾，可結合海洋工程知識與高精度模擬工具，於建置初期導入高解析度海象模擬分析，以確保系統在多變且劇烈的海象條件下能穩定運行，有效預測結構受力與響應行為，作為後續強度設計與穩定性驗證之重要依據⁽¹⁵⁻¹⁶⁾。

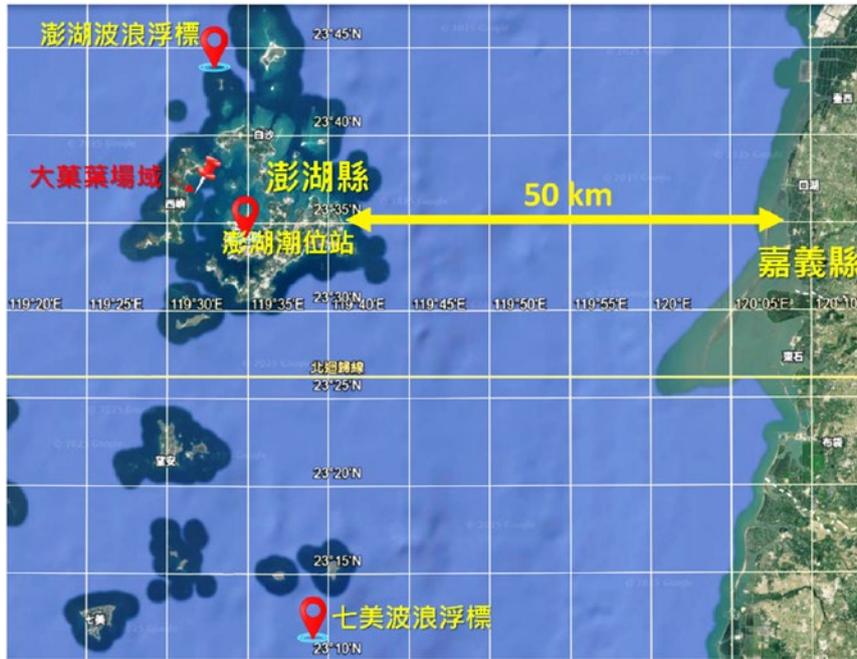
澎湖觀測資料蒐集與分析

澎湖群島位於臺灣海峽中央，東距臺

灣本島約50公里，由90個大小島嶼組成，其地理位置優越，具備發展離岸光電的潛力。澎湖地區年平均日照時數約為1,800小時，為全臺日照量最高區域之一，極具發展太陽光電之優勢。本研究擬於大菓葉漁港外海建置海面型太陽能示範場域，並進行前期模擬與測試。為此，本研究蒐集澎湖近海之長期氣象與海象觀測資料，並針對颱風時期進行三維波潮流數值模擬，藉以掌握大菓葉場域之海域動態特性，提供光電系統設置之參考依據。大菓葉位於澎湖本島北部近岸海域，距離陸岸約0.5至1公里，屬於內海瀉湖型地形，封閉性高、水深較淺、水流緩慢，具備有利於施工與後續維運之條件。由於大菓葉場域目前尚無長期觀測站，本文取用鄰近之澎湖波浪浮標（經濟部水利署）、七美波浪浮標（中央氣象署）及澎湖潮位站等三處長期觀測資料進行統計分析，以掌握該區域之波浪與潮汐特性。

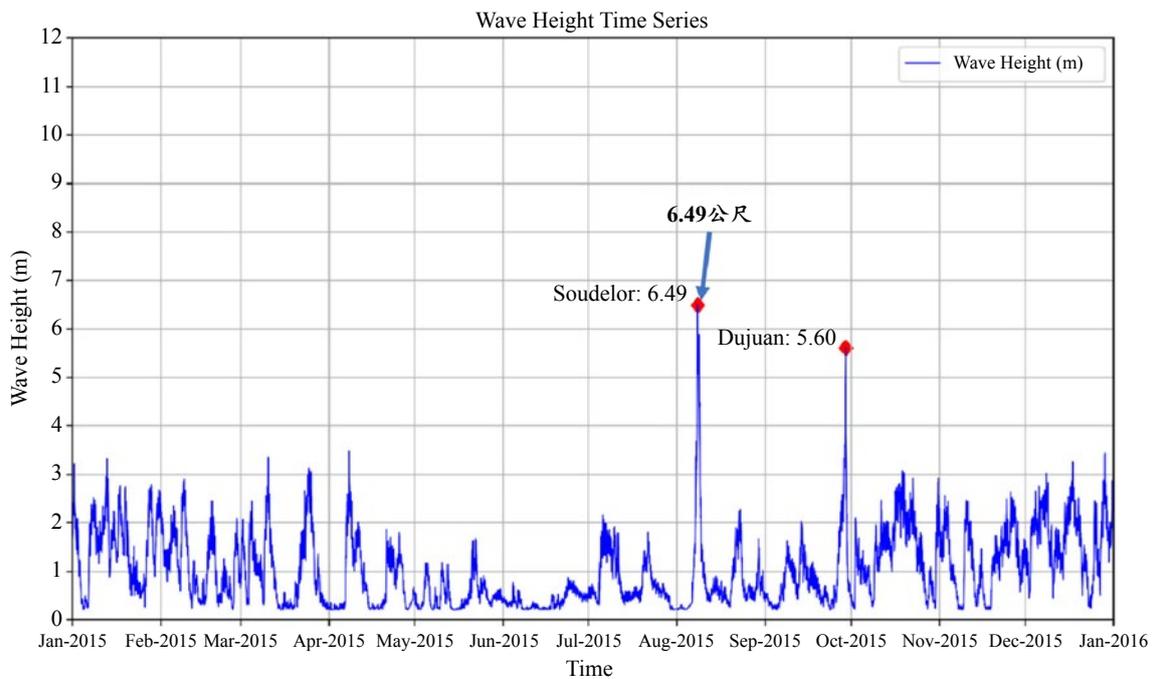
圖二所示為大菓葉場域與澎湖各長期觀測站之相對位置圖，透過分析澎湖與七美兩測站歷年波高時序資料，可瞭解其變化趨勢與極端波浪事件特徵。圖三與圖四分別顯示該年度示性波高變化情形，當年受蘇迪勒颱風(Typhoon Soudelor)影響，澎湖浮標觀測到最大波高達6.49公尺，七美浮標則達8.48公尺，結果顯示2015年為兩站皆出現高波高紀錄之年分，具有代表性與模擬參考價值，因此本文選定2015年之颱風事件作為數值模擬案例。

本文亦蒐集澎湖潮位站自2015年至2024年共10年之潮位時序資料，以瞭解區



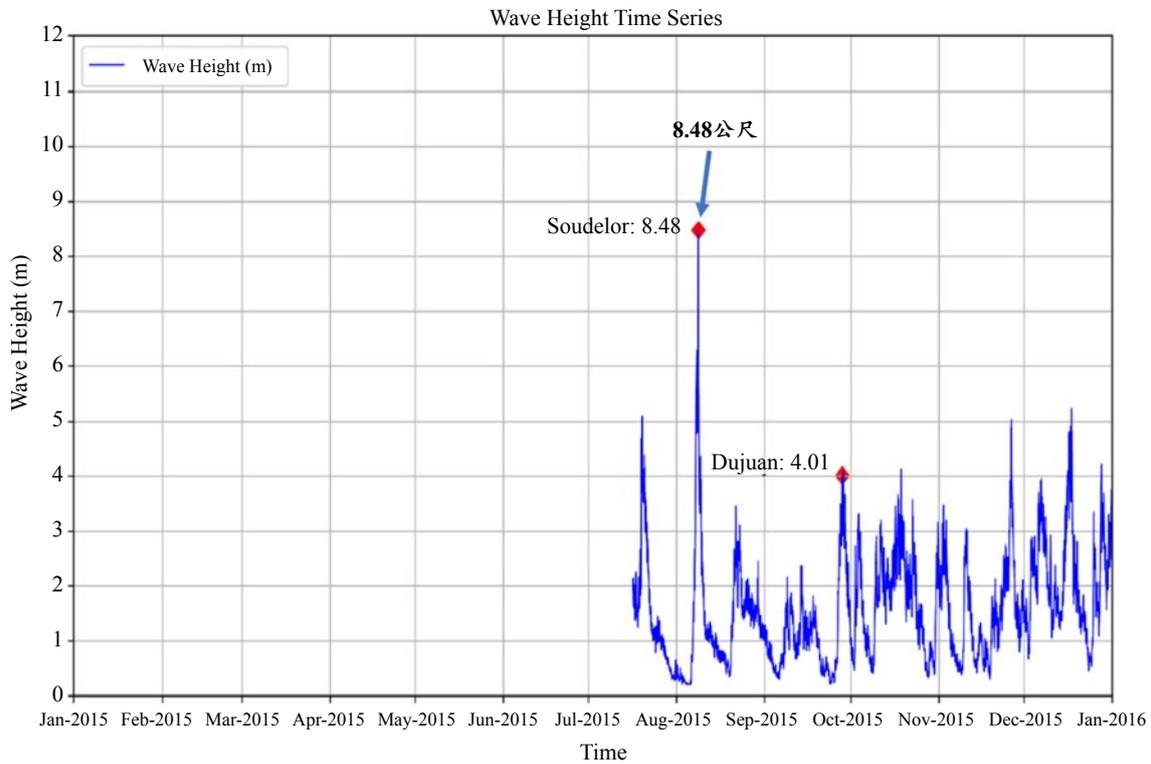
資料來源：Google Earth

▲圖二 大菓葉場域與澎湖長期海氣象觀測站位置圖



資料來源：本研究繪製

▲圖三 澎湖浮標2015年波高時序圖



資料來源：本研究繪製

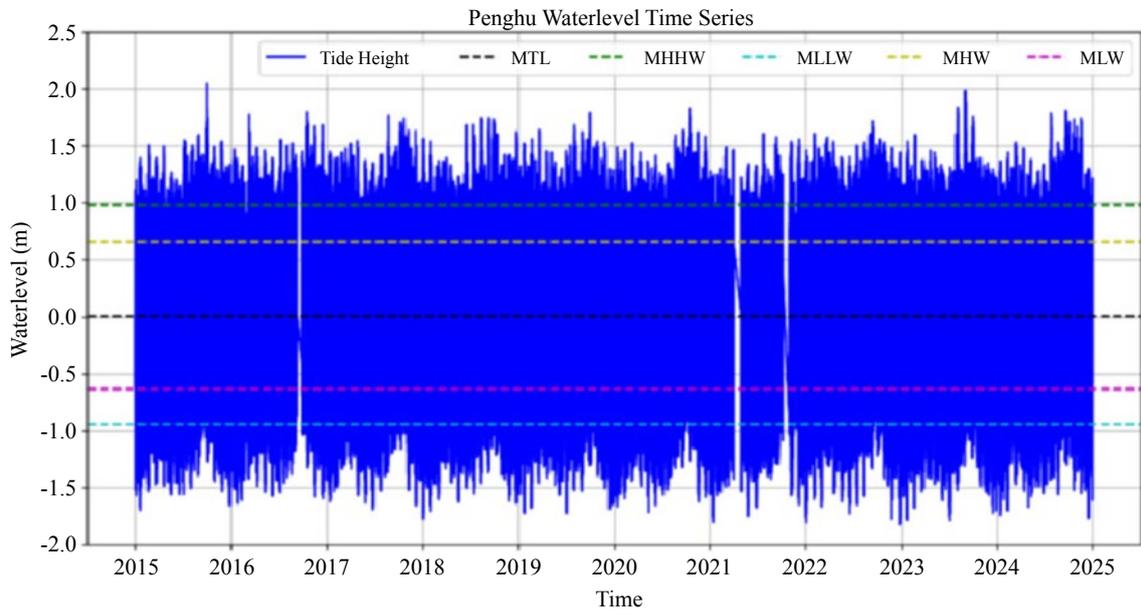
▲圖四 七美浮標2015年波高時序圖

域的潮位變化特性與其對波浪動力環境之潛在影響，如圖五所示；統計分析結果如表一所示。該測站之平均潮差約為1.922公尺，顯示澎湖海域屬於中潮差區域，潮位變化受天文與氣象因素交互影響。波浪分析結果顯示，2015年為澎湖與七美浮標皆觀測到最大波高的年度，本文特選該年度進行潮位組成分析與暴潮(Storm Surge)特性探討。根據澎湖潮位站資料，該區主要呈現半日潮(Semi-diurnal Tide)型態，即每日出現兩次漲潮與兩次退潮，顯示天文潮為主要驅動因子。平均潮差為1.922公尺，對於浮動式海洋設施之設計具備結構適應性考量。

▼表一 澎湖潮位站潮位統計資料表

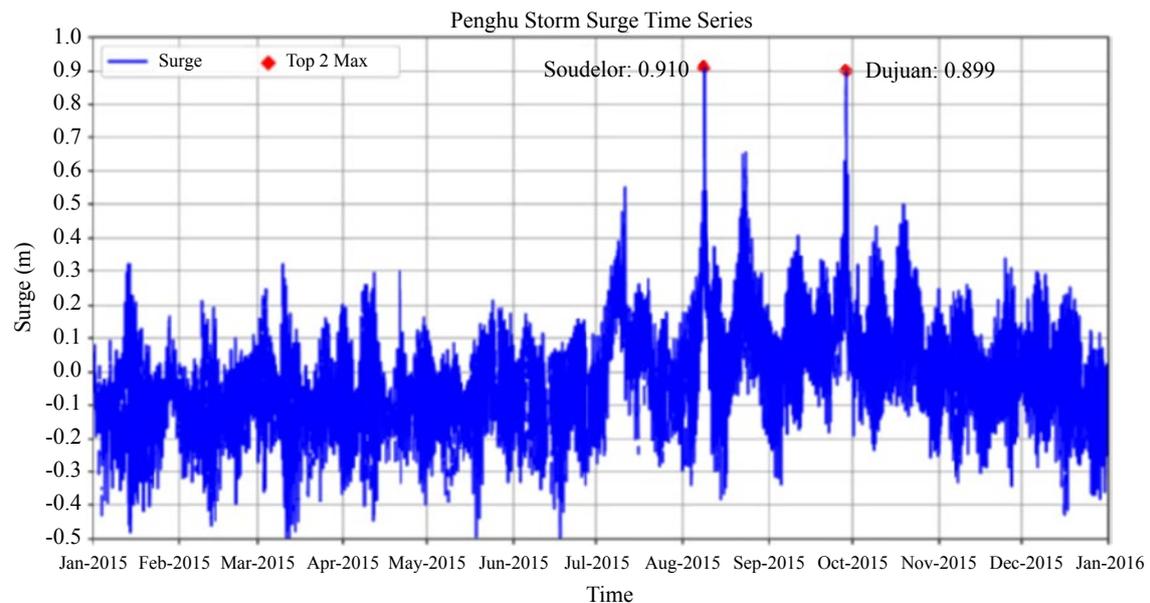
名稱	統計資料(公尺)
最高高潮位	2.053
最低低潮位	-1.826
平均潮位(MTL)	0.009
平均高高潮位(MHHW)	0.981
平均低低潮位(MLLW)	-0.941
平均高潮位(MHW)	0.651
平均低潮位(MLW)	-0.633
潮差	1.922

藉由剔除天文潮成分後，可獲得暴潮時序變化，如圖六所示。潮位及其異常變化除具風暴潮預警與災害防範應用價值



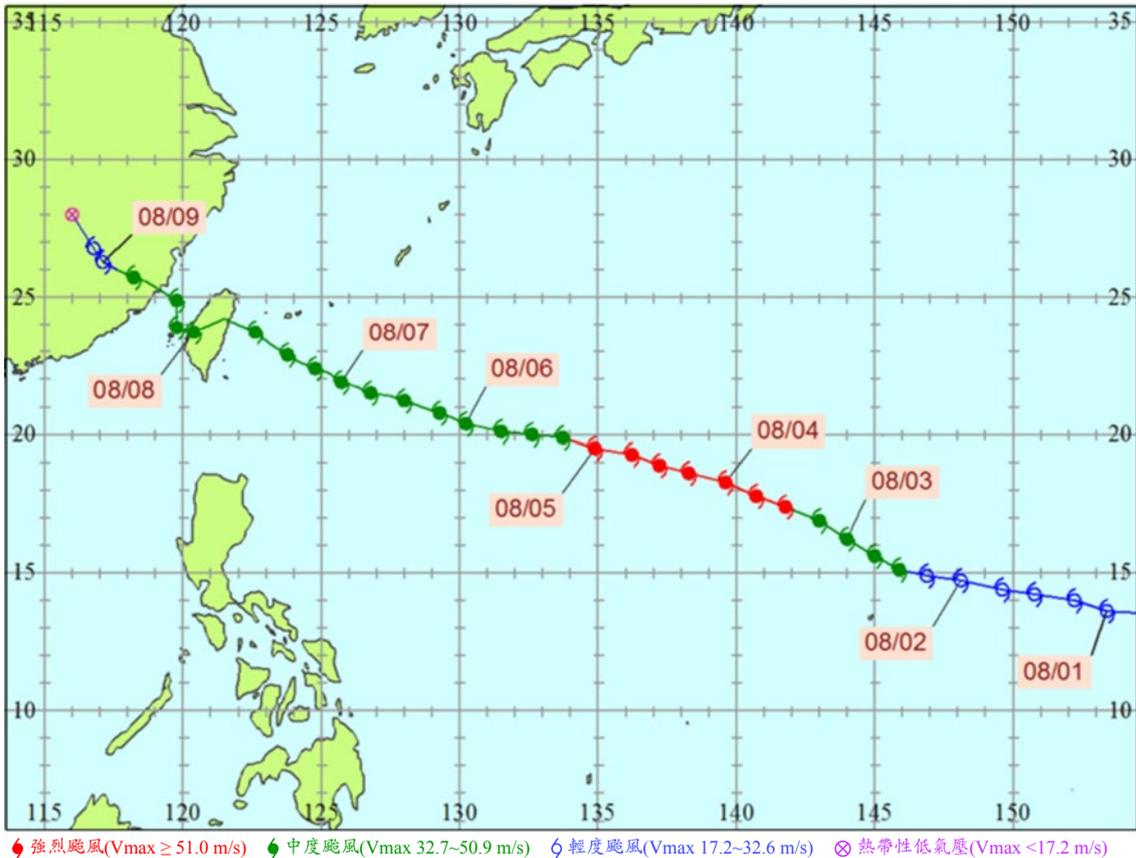
資料來源：本研究繪製

▲圖五 澎湖潮位站潮位時序圖(2015~2024年)(彩圖請見材料世界網)



資料來源：本研究繪製

▲圖六 澎湖潮位站2015年暴潮時序圖



資料來源：國家災害防救科技中心

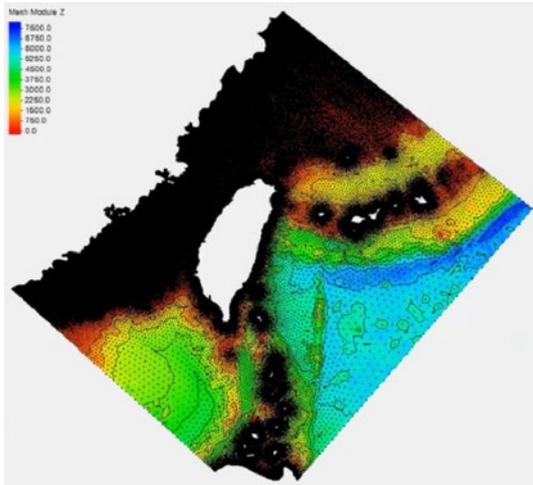
▲圖七 2015年蘇迪勒颱風路徑圖 (彩圖請見材料世界網)

外，亦為海洋工程規劃、沿岸設施設計及離岸浮式光電系統初步條件評估之關鍵依據。例如，潮位資訊可作為堤防高度設計與沿岸淹水潛勢評估之參考依據；對於海上太陽能平台則可用於基礎設計與錨定系統配置評估。暴潮所造成的極端水位升高應納入颱風期間的模擬分析，避免因波浪上升與浪基抬升造成設施損壞。

圖七顯示2015年蘇迪勒颱風之路徑，該颱風於8月8日最接近澎湖地區，其中心位於澎湖北方海域，並維持中度颱風強

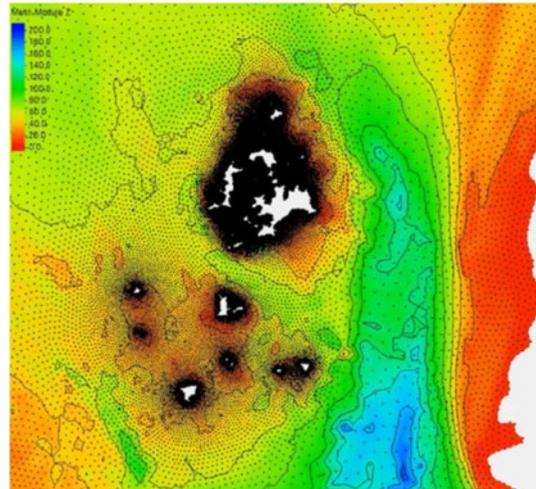
度。雖然澎湖浮標設置位置靠近颱風中心，但因位於鄰近淺水區域，波浪受到淺化效應(Shoaling Effect)影響，導致實測波高低於七美浮標。相對而言，七美浮標位於較深水域，波浪能量傳遞較佳，因此觀測波高顯著偏高。

綜合上述，本文選定2015年8月1日至8月10日為模擬時段，進行波潮流數值模型建置，並蒐集該期間相關氣象與海象資料作為模型邊界與初始條件。根據觀測數據，蘇迪勒颱風期間，澎湖與七美浮標



資料來源：本研究繪製

▲圖八 臺灣網格範圍圖(彩圖請見材料世界網)



資料來源：本研究繪製

▲圖九 澎湖海域網格與水深圖(彩圖請見材料世界網)

皆觀測到超過6公尺之波高，顯示該事件對澎湖周邊海域具有顯著衝擊。此外，透過潮位調和分析可知，蘇迪勒颱風期間澎湖潮位站出現最高暴潮偏差(Storm Surge Deviation)達0.91公尺，明確反映氣象因子對潮位異常之驅動效應。

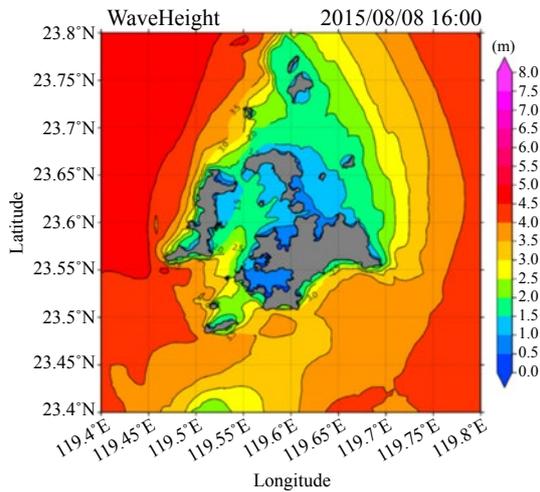
場域波潮流模擬與分析

本研究選用SCHISM水動力模型，結合WWM-III波浪模型(Wind Wave Model III)進行雙向耦合模擬，以呈現颱風期間波潮流相互作用之動態行為。本文採用三維波潮流耦合模型(Wave-Circulation Coupled Model)，整合天文潮、海洋背景條件、波浪頻譜以及颱風期間之氣象場等關鍵因素，以模擬颱風期間澎湖海域之波浪與潮流變化情形。該耦合機制可即時交換波浪輻射應力(Radiation Stress)、水位變化、底

床剪力等關鍵物理參數，有效提升模型對真實海象條件之模擬能力。

本研究以澎湖大菓葉漁港鄰近海域作為評估場址，為確保波潮流影響自外部邊界能有效傳遞至模擬區域，須建立涵蓋廣泛範圍之數值模擬網格，涵蓋鄰近主要海域之流場與波浪條件，以提供完整且準確的邊界驅動。模擬網格範圍與邊界條件如圖八所示，整體數值網格涵蓋範圍為：南北向自北緯18°至29°，東西向自東經115°至127°。此範圍納入南海、太平洋及臺灣北方海域，有助於完整捕捉區域內外海流與波浪動力的傳遞與影響，確保邊界條件對場址模擬具代表性與動態連貫性。

澎湖海域網格與水深分布如圖九所示，模擬網格節點於澎湖內灣區域分布特別密集，以提升內海模擬之空間解析度與精度。澎湖外海水深多介於80公尺~120公



資料來源：本研究繪製

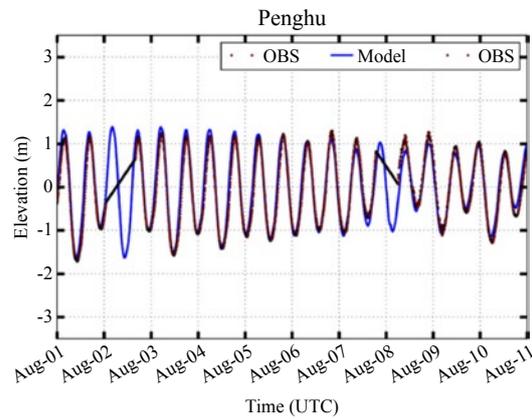
▲圖十 澎湖海域波高分布平面圖(彩圖請見材料世界網)

尺，其中東側之澎湖水道(Penghu Channel)為最深處，水深可達200公尺。透過詳細地形建模，能充分考慮地形地貌對波浪與潮流交互作用之影響，提升模擬結果與實際海況之吻合度。

澎湖內灣整體水深普遍偏淺，場址鄰近海域，水深多小於15公尺。藉由高解析度網格配置，可清晰辨識海岸線輪廓與大菓葉漁港位置，進一步強化對場址周邊環境模擬的準確性與可靠性，作為後續工程設計與風險分析的重要依據。

本研究選定2015年8月1日至8月10日為模擬期間，採用三維波潮流耦合模型進行數值模擬，並與實際觀測資料進行比對，以評估模型之準確性與應用可行性。

圖十顯示2015年8月8日16:00澎湖海域最大波高之空間分布。可見到於澎湖外圍海域，由於水深較深，波浪能量傳遞較為



資料來源：本研究繪製

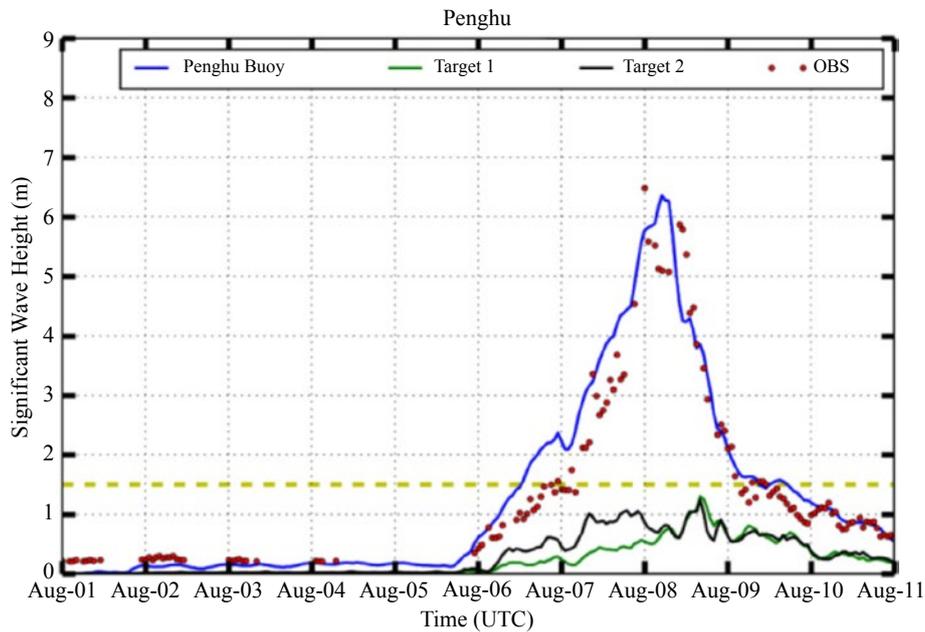
▲圖十一 澎湖潮位站觀測與模型水位時序圖(彩圖請見材料世界網)

完整，大部分區域波高可達4公尺以上；相對地，澎湖內灣因水深較淺，波浪傳遞受地形限制，導致波高增長受抑，大部分區域波高低於3公尺。

圖十一為澎湖潮位站之實測水位(紅色圓點)與模型模擬之全水位(藍色實線)時序變化對照圖，證明模擬結果與觀測值整體趨勢一致，顯示模型具備良好的再現能力。然而，在颱風最接近期間(8月8日至8月9日)，模擬水位略低於觀測值，最大誤差約為15公分。

此偏差可能來自以下兩個因素：首先，潮位站鄰近地形與模型所採用的地形資料存在差異，可能影響局部水位模擬的精確度；其次，WRF (Weather Research and Forecasting)氣象場資料在颱風模擬過程中，預報路徑與實際颱風路徑可能存在位置偏差，進而影響風場與壓力場之模擬結果，對波潮流場模擬產生連鎖影響。

圖十二顯示澎湖浮標波高的觀測值



資料來源：本研究繪製

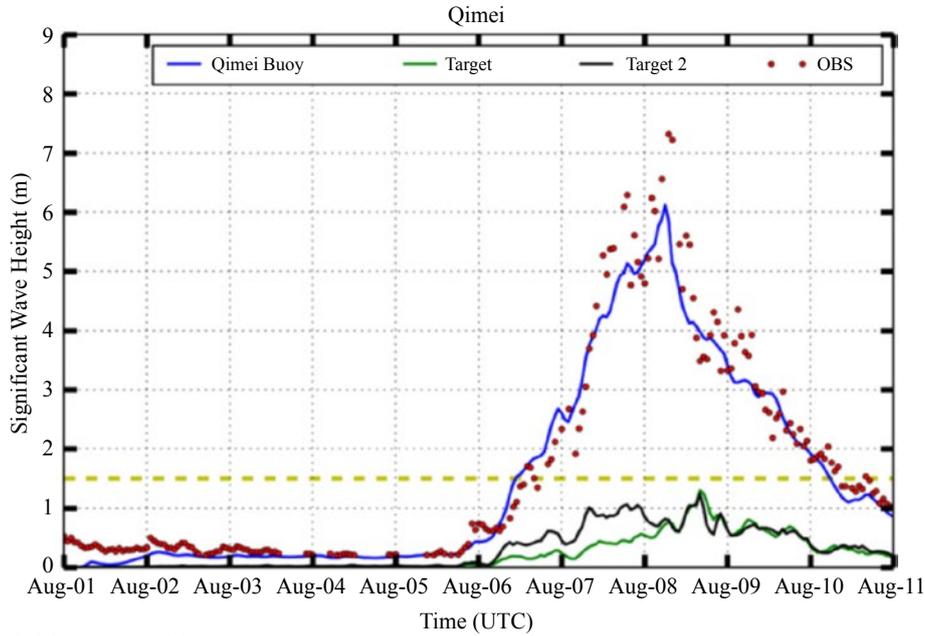
▲圖十二 澎湖浮標波高時序圖(彩圖請見材料世界網)

與模型模擬結果。紅色圓點為觀測波高(OBS)，藍色實線為模型模擬波高(Model)；綠色實線與黑色實線分別表示大菓葉場域(Target 1)與二崁聚落場域(Target 2)的波高時序變化，黃色虛線則標示一般背景波高範圍(1.5公尺)。結果顯示，模型在澎湖浮標處的波浪模擬具良好準確性，波高上升趨勢與觀測資料高度一致。模擬之最大波高約為6.5公尺，與實測值相符，整體波形變化趨勢亦具一致性，顯示模型對澎湖浮標位置之波浪再現能力佳。颱風遠離後，波高快速下降至1.5公尺以下，而模擬與觀測皆呈現一致的遞減趨勢。

針對兩個場域(大菓葉與二崁)的模擬結果，波高在整個模擬期間皆低於1.5公尺，顯示颱風所引發的高波浪進入場址區

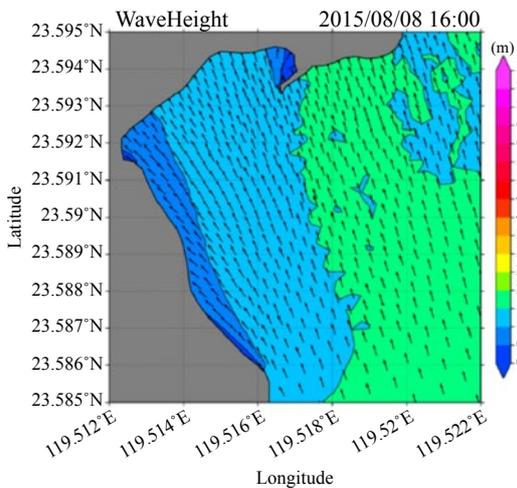
域後已明顯衰減。雖二崁場域波高略高於大菓葉，但整體差異不大，顯示場域地形具備良好的波浪遮蔽效果，有助於未來系統設置的穩定性評估。圖十三為七美浮標波高之觀測與模擬結果對比。觀測資料顯示最大波高達7.3公尺，模型模擬值則約為6.1公尺，顯示有一定程度之低估。此誤差可能來自於氣象場模擬中對颱風路徑、半徑及強度之偏差，以及海底地形與實際情況的落差，進而影響波浪模擬精度。儘管最大波高略有低估，模型的波高上升與下降趨勢與觀測數據一致，表示模型對颱風影響的時間動態模擬仍具良好準確性與參考價值。

圖十四顯示大菓葉場址之波高空間分布情形。颱風通過期間，風場轉為西南



資料來源：本研究繪製

▲圖十三 七美浮標波高時序圖(彩圖請見材料世界網)



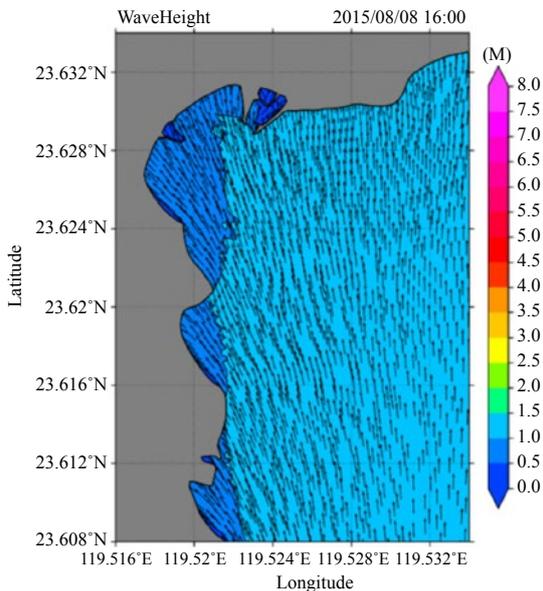
資料來源：本研究繪製

▲圖十四 大菓葉海域波高分布平面圖(彩圖請見材料世界網)

風，導致波浪主方向轉為東南向，波浪以近垂直方式向岸傳遞。由圖十四中可見，

波浪在靠近岸際過程中受到地形影響，產生明顯折射與衰減現象。場址外海波高約為2公尺，沿岸逐漸衰減至1公尺以下，顯示地形對波浪傳遞具良好削減效果。大菓葉漁港防波堤發揮顯著的減波效應，港內波高明顯下降，有助於提升港區內設施的穩定性與安全性。場址周邊其他海域波高多落於1公尺至1.5公尺之間。此模擬結果顯示，未來場址設施在規劃與設計階段，應充分考量颱風期間可能出現的極端波高與流場變化，以降低結構受損風險，並提升系統整體耐久性。

圖十五為二崁場址之波高分布。颱風期間，風場轉為西南西風，波浪由南向北傳遞，並以垂直方式撞擊沿岸地形。整體波高分布多低於1.5公尺，最大波高約為1.5



資料來源：本研究繪製

▲圖十五 二崁聚落海域波高分布平面圖(彩圖請見材料世界網)

公尺，靠近岸際後遞減至1公尺以下，呈現與大菓葉場址相似之地形衰減特徵。此外，竹灣漁港的防波堤亦展現明顯的減波效果，港區內部波高顯著下降，顯示該地具備良好的避風與減波條件。周邊海域波高大致維持在1公尺以內，整體流場與風場方向皆朝向北方，呈現一致性的動力傳遞模式。

本模擬結果可作為大菓葉與二崁場址未來離岸設施規劃與結構設計之依據，提供颱風期間波浪條件的重要參考，有助於提升工程設施於極端環境下的韌性與安全性。

結語

本研究之波潮流耦合模型模擬結果整體與觀測數據高度吻合，僅於颱風期間水位略有低估(約15公分)，推測與地形解析

度及氣象場誤差有關。澎湖浮標模擬波高表現良好，最大波高(6.5公尺)與觀測數值一致，呈現良好的時序變化對應。七美浮標之模擬結果略低(模擬值為6.1公尺，觀測為7.3公尺)，但波高趨勢相符，顯示模型在動態模擬方面具備參考價值。澎湖海域波高分布分析顯示，外海區域波高多超過4公尺，內灣因水深較淺則低於3公尺。大菓葉場址因地形遮蔽效應，波高顯著衰減，自外海約2公尺遞減至岸際1公尺以下；二崁場址波高整體較低，內灣小於1公尺，外海約1.5公尺，漁港防波堤發揮良好的減波效果。此模擬結果可為大菓葉與二崁場址的設施規劃與結構設計提供具體參考，協助強化系統面對颱風與極端海象的耐受力與穩定性。

海域海象數值模擬可有效分析場址風浪環境條件，為海上型光電系統長期穩定營運提供科學依據，並協助判定最適設置區域。模擬成果不僅支持系統設計與運維策略，亦為防災應變與壽命評估提供關鍵資料。未來研究可進一步提升模擬精度，特別針對浮動式光電系統於極端條件下的結構響應行為進行深入探討。同時，結合人工智慧與機器學習技術於海象預測與光電系統效能優化，也將成為未來智慧綠能發展的重要方向。

誌謝

研究工作承蒙經濟部能源署研究計畫(契約編號114-S0302)及工業技術研究院綠能所支持，謹此致謝。



參考文獻

1. E. Kabir, P. Kumar, S. Kumar, A. A. Adelodun, K.H. Kim, Solar energy: Potential and future prospects, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, (2018), 82, 894–900.
2. A. Sahu, N. Yadav, K. Sudhakar, Floating photovoltaic power plant: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, (2016), 66, 815–824.
3. S. Sreenath, K. Sudhakar, Y. Af, 7E analysis of a conceptual utility-scale land-based solar photovoltaic power plant, *Energy*, (2021), 219, 119610.
4. H. Liu, V. Krishna, J. Lun Leung, T. Reindl, L. Zhao, Field experience and performance analysis of floating PV technologies in the tropics, *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, (2018), 26, 957–967.
5. J. C. Teo, R. H. G. Tan, V. H. Mok; V. K. Ramachandaramurthy, C. Tan, Impact of Partial Shading on the P-V Characteristics and the Maximum Power of a Photovoltaic String. *Energies*, (2018), 11, 1860.
6. H. Zitouni, A. Azouzoute, C. Hajjaj, M. El Ydrissi, M. Regragui, J. Polo, A. Oufadel, A. Bouaichi, A. Ghennioui, Experimental investigation and modeling of photovoltaic soiling loss as a function of environmental variables: A case study of semi-arid climate. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, (2021), 221, 110874.
7. R. Cazzaniga, M. Cicu, M. Rosa-Clot, P. Rosa-Clot, G. M. Tina, C. Ventura, Floating photovoltaic plants: Performance analysis and design solutions. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, (2018), 81, 1730–1741.
8. N. Lee, U. Grunwald, E. Rosenlieb, H. Mirlletz, A. Aznar, R. Spencer, S. Cox, Hybrid floating solar photovoltaics-hydropower systems: Benefits and global assessment of technical potential. *Renew. Energy*, (2020), 162, 1415–1427.
9. G. Liu, J. Guo, H. Peng, H. Ping, Q. Ma, Review of Recent Offshore Floating Photovoltaic Systems, *J. Mar. Sci. Eng.*, (2024), 12, 1942–1958.
10. 楊証皓，謝建俊，黃朝揚，林福銘，離岸太陽光電系統全球發展與挑戰，營建知訊，(2024)，499，202408。
11. D. Keiner, O. Salcedo-Puerto, E. Immonen, W. G. J. H. M. van Sark, Y. Nizam, F. Shadiya, J. Duval, T. Delahaye, A. Gulagi, C. Breyer, Powering an island energy system by offshore floating technologies towards 100% renewables: A case for the Maldives, *Appl. Energy*, (2022), 308, 118360.
12. R. Cazzaniga, M. Rosa-Clot, The booming of floating PV, *Sol. Energy*, (2021), 219, 3–10.
13. K. Trapani, M. R. Santafé, A review of floating photovoltaic installations: 2007–2013, *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, (2014); 23:524–532.
14. S. M. Choi, G. R. Lee, C. D. Park, S. H. Cho, B. J. Lim, Wind load on the solar panel array of a floating photovoltaic system under extreme hurricane conditions. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, (2021), 48, 101616.
15. J. Selj, S. Wieland, I. Tsanakas, Floating Photovoltaic Power Plants: A Review of Energy Yield, Reliability, and Maintenance, (2025), Report IEA-PVPS T13-31:2025.
16. J. Song, H. Imani, J. Yue, S. Yang, Hydrodynamic Characteristics of Floating Photovoltaic Systems under Ocean Loads, *J. Mar. Sci. Eng.*, (2023), 11, 1813.