



海上型太陽光電系統的技術與挑戰

The Technologies and Challenges of Floating Photovoltaic Systems in the Ocean

謝建俊 C. C. Hsieh¹、黃朝揚 C. Y. Huang²、林福銘 F. M. Lin³
工研院(ITRI) 綠能與環境研究所 ¹副工程師、²經理、³正研究員/組長

摘要/Abstract

隨著氣候變遷與節能減碳的議題逐漸受到國際重視，再生能源已成為全球科技發展的重點。台灣屬海島型國家，四面環海，未來有機會發展海上型太陽光電系統。光電系統常建置於濱海區等嚴苛環境，對系統可靠度影響甚遠，最著名的案例是2013年澎湖的低碳島專案計畫議題，可知目前國內業者對嚴苛環境建置系統經驗不足。本文前半段將回顧目前海上光電系統技術發展現況，後半段將探討系統面臨的問題與挑戰，最後給予建議方向。

In light of the growing global attention towards climate change, energy conservation, and carbon reduction, there is a significant shift towards renewable energy as the focal point of scientific and technological development worldwide. As an island country surrounded by the sea, Taiwan stands at a unique vantage point to explore the potential of offshore photovoltaic systems in the future. However, constructing photoelectric systems in challenging environments like coastal areas poses a considerable impact on system reliability. A prominent example of this concern is evident in the well-known case of the low-carbon island project in Penghu back in 2013, which highlighted the challenges faced in such locations. Moreover, the domestic industry players in Taiwan also lack sufficient experience in building systems under such harsh environmental conditions. The first half of this paper aims to provide an overview of the current state of offshore optoelectronic system technology. Meanwhile, the second half delves into the various problems and challenges encountered by these systems and proposes potential solutions and suggestions to address these issues.

關鍵字/Keywords

浮漂(Float)、腐蝕(Corrosion)、剛性結構(Rigid Structure)、撓性結構(Flexible Structure)



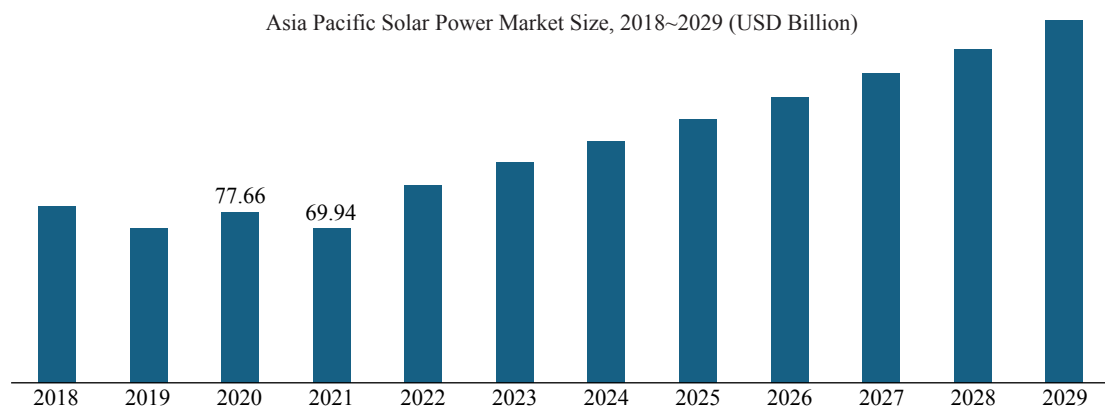
前言

隨著氣候變遷與節能減碳的議題逐漸受到國際重視，再生能源已成為全球科技發展的焦點。太陽光電產品雖然已存在達四十年，但產業開始興起是由2000年開始，2004年在德國通過固定費率躉購電力制度(Feed-in Tariff; FIT)後開始爆炸性成長。2009年時雖因金融海嘯而成長趨緩，但2010年達到產業最興盛的高峰，由於產業發展快速，投入擴廠動作也加快，反而造成供過於求的現象；此現象也導致2011年起太陽光電產業政府補助銳減，進入轉型重整時期。根據Fortune Business Insights市場報告指出，2021年全球太陽光電市場規模為1678.3億美元，預計2029年將達到3738.4億美元；台灣所在的亞太地區太陽光電市場規模亦呈現同樣成長趨勢，如圖一所示。

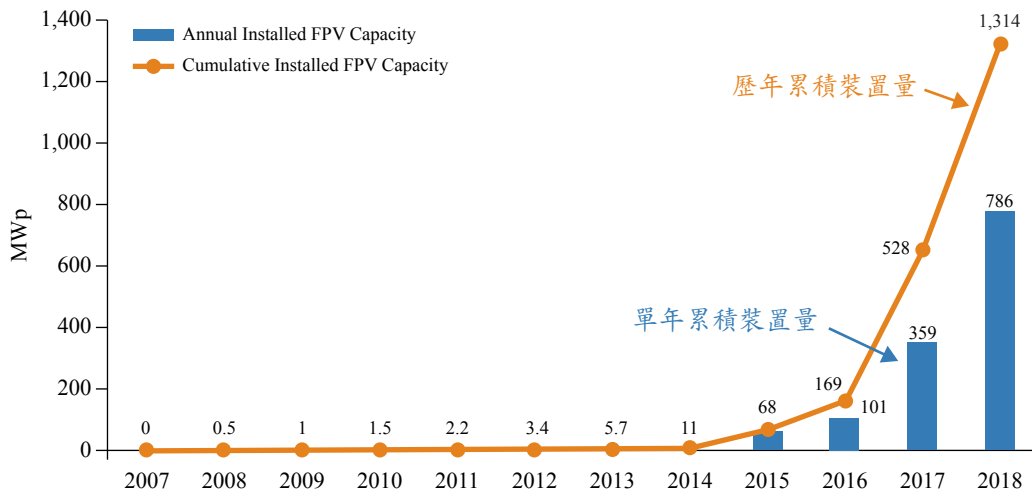
全球除了陸域型太陽光電系統蓬勃發展外，水域型太陽光電系統也慢慢斬露頭角。2007年第一座浮動型太陽光電安裝

於日本地區，法國、義大利、南韓、西班牙、美國、印度、台灣與中國也相繼投入浮動型電廠建置(圖二)。早期浮動型光電結合原有水力發電的饋線，提升整體水壩的發電效率(淡水生態系)；近期發展則利用離岸風力的原有饋線，透過太陽光電與風電同時競標(海水生態系)，以降低平均發電成本，同時達成各國的再生能源目標。可以預期未來耐候與抗腐蝕材料將持續發光發熱。

台灣因屬海島型國家，地狹人稠，考量土地利用與政策、財政支出等原因，政府採取「逐步發展、先屋頂後地面」的推動策略，預計2025年達到太陽光電20 GW的設置目標。為達成政府2025年如此大的太陽光電設置目標量，政府除應持續努力健全國內太陽光電設置環境外，亦需積極鼓勵地方政府、國/公營機構、相關機關及民間企業、廠商等，共同參與設置太陽光電系統。且為推動土地上大容量利用，考慮將嚴重地層下陷區、污染場址、湖泊、水



▲圖一 亞太地區太陽光電市場規模⁽¹⁾



▲圖二 全球浮動型太陽光電裝置量⁽²⁾

庫、埤塘及行政院專案土地做為優先許可設置區域，以達到土地充分利用及綠能應用之雙重功效。

能源局於2013年補助新台幣3.6億元，在澎湖推行低碳島專案計畫，其中馬公機場與第一漁港太陽光電系統，部分支架在5年內即受鹽害腐蝕斷裂，遠遠低於系統保障發電20年期限，可知目前國內業者對嚴苛環境建置系統經驗不足。本文前半段將回顧現行海上光電系統技術現況，後半段探討系統面臨的問題與挑戰，最後給予建議方向，提供產業建置系統時參考，期望有助於產業永續發展之效益。

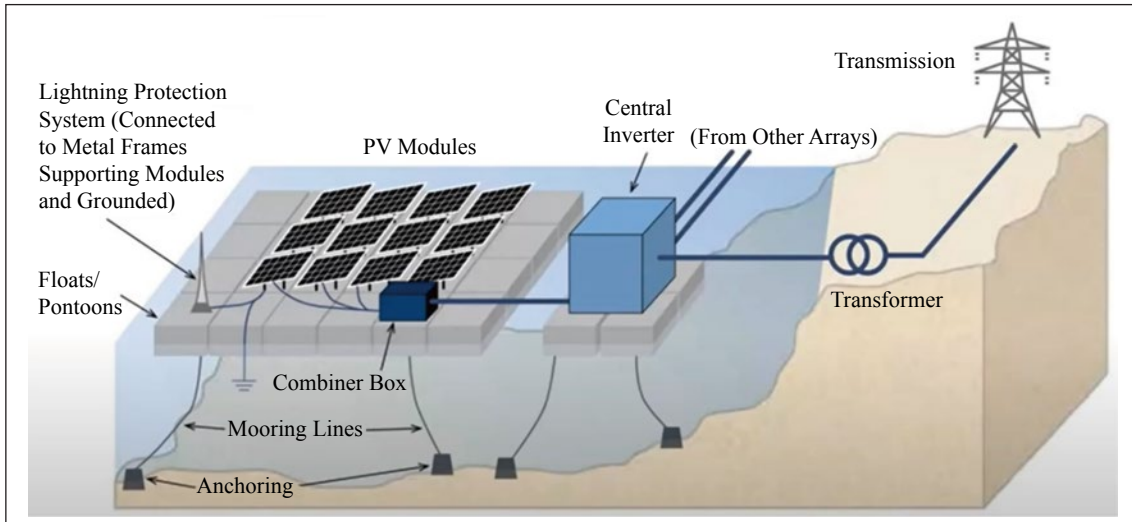
海上型太陽光電系統設計多元 產品百家爭鳴

依據National University of Singapore (NUS)的Solar Energy Research Institute of Singapore (SERIS)提出的典型大面積浮動型

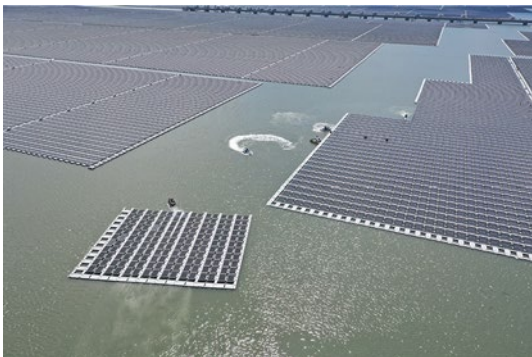
太陽光電(示意圖如圖三)，從環境條件、PV技術、浮台技術、變流器選擇、直流/交流箱設計、電纜設計等等都需要多方考量。目前市場投入海上型太陽光電系統設計主要分為剛性(Rigid)結構與撓性(Flexible)結構兩種，其中剛性結構設計有Ciel & Terre、SolarDuck、Oceans of Energy、Heli float、Moss Maritime、Swimsol與Seavolt等公司之產品；而撓性結構設計有MIRARCO、DNV KEMA的SUNdy，以及Ocean Sun等之產品。分述如下。

Ciel & Terre產品：該公司開發浮動光電Hydelio技術，以浮台來支撐太陽光電系統，使用夾具或固定件方式固定PV發電設備(圖四)，全球超過280個浮動太陽能案場，設置容量超過800 MWp。

SolarDuck產品：為一家荷蘭公司，以浮台來支撐太陽光電系統，結構可以承載多個太陽光電模組，同時可以支撐線纜、



▲圖三 典型大面積浮動太陽光電示意圖⁽²⁾



▲圖四 Ciel & Terre浮動太陽光電場域⁽³⁾



▲圖五 SolarDuck浮動太陽光電示意圖⁽⁴⁾

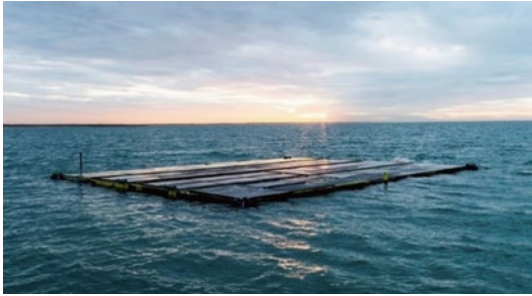
直流箱與變流器，系統架構如圖五所示。

Oceans of Energy產品：亦為荷蘭公司，專門從事海上太陽能及相關的錨定技術和環境影響研究。圖六為Oceans of Energy在外海的測試場，設置容量17 kW。

Heliofloat產品：維也納科技大學(TU Wien)開發的Heliofloat是使用桶建造的，以提供漂浮作用，每個Heliofloat桶均由柔性

材料製成(圖七)。這種底部開放的柔性材料可將空氣截留在每個桶的頂部，在惡劣天氣下發揮減震器的作用。當受到波浪沖擊時，桶的柔軟側面也會彎曲，從而使系統能夠在海中保持穩定。

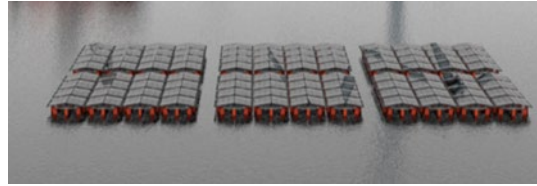
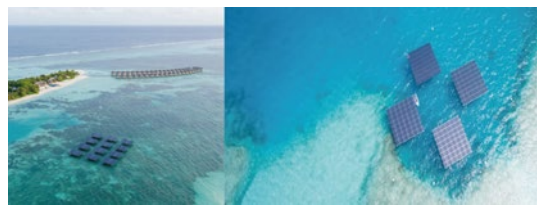
Moss Maritime產品：Moss Maritime為

▲圖六 Oceans of Energy在外海的測試場⁽⁵⁾▲圖七 Heli float產品示意圖⁽⁶⁾

海上能源行業公司，與Equinor合作開發浮動型光電系統，該技術正處於專利申請中（圖八）。

Swimsol產品：與維也納科技大學合作開發獨特的浮動太陽能平台，透過數值模擬、測試和試驗，該平台可以承受熱帶淺水潟湖的波浪，以及海流、潮汐、極端紫外線、濕度，並且可防腐蝕。圖九為Swimsol在馬爾地夫推出之海上浮動系統，設置容量191 kW⁽⁹⁾。

Seavolt產品：比利時公司與Tractebel、DEME和Jan De Nul Group匯集了太陽能、海洋能源和水產養殖領域的專家，打造開創性的海上太陽能系統，該技術正在申請

▲圖八 Moss Maritime產品示意圖⁽⁷⁾▲圖九 Swimsol在馬爾地夫推出了海上浮動系統⁽⁸⁾▲圖十 Seavolt產品示意圖⁽⁹⁾

專利（圖十）。

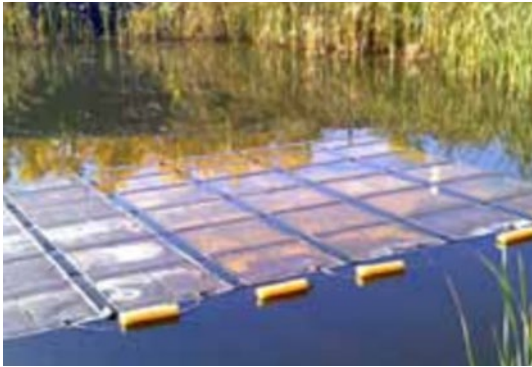
MIRARCO產品：由加拿大礦業公司開發，浮力設計在浮筒與薄膜光電帶有層壓氣穴以維持浮在水面上，並透過面板與水直接接觸增加冷卻與自潔效果，增益發電與降低維運成本（圖十一）。

SUNDy產品：DNV KEMA能源開發SUNDy產品。整體設計如圖十二所示，由一系列連接在一起的薄膜太陽電池板組成，

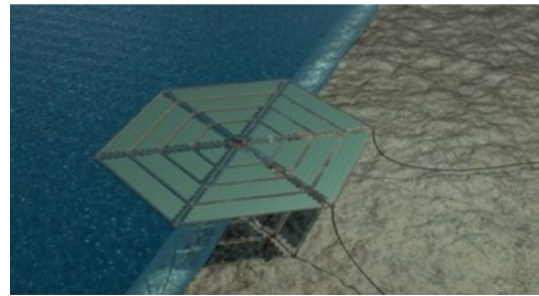


然後連接到穿過六邊形頂點的電氣總線上。預計面板本身將被層壓並黏附到柔性泡沫表面，為面板提供浮力和結構。

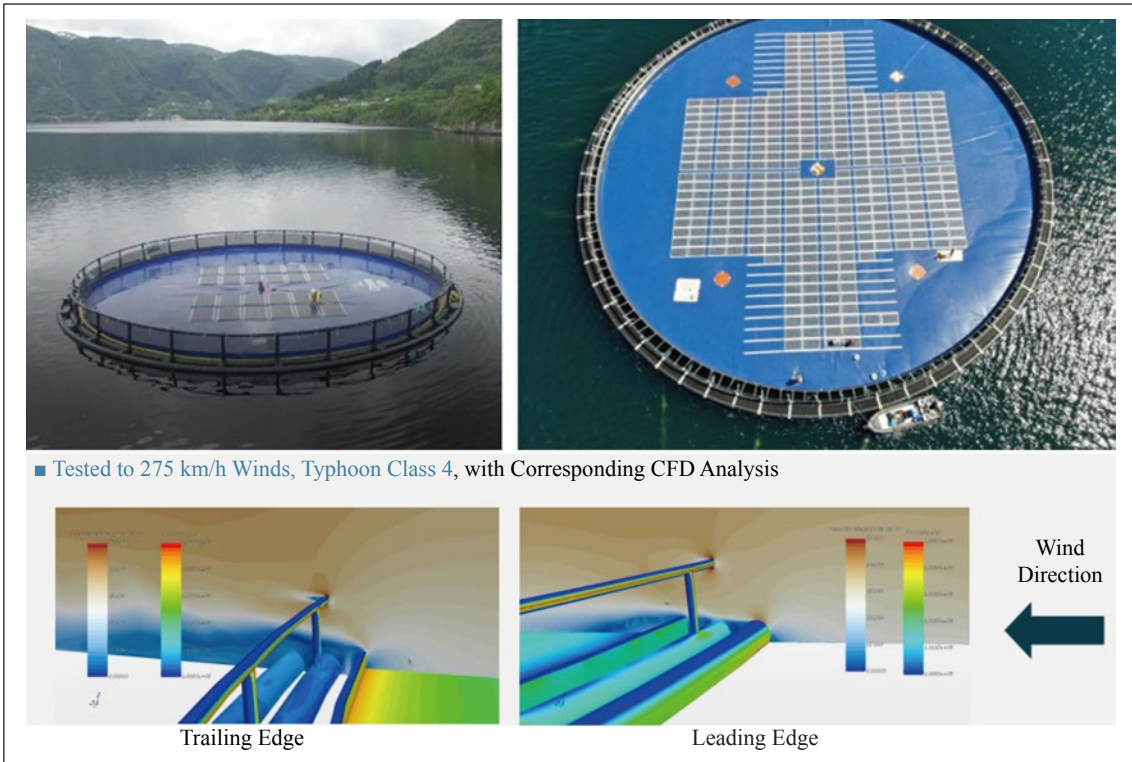
Ocean Sun產品：發源於挪威公司，將PV發電設備設置在可支撐的水彈性強化膜片中，例如提供浮力支撐的管狀環，再利用抽水馬達將流入強化膜中的水抽出，系統架構如圖十三所示。



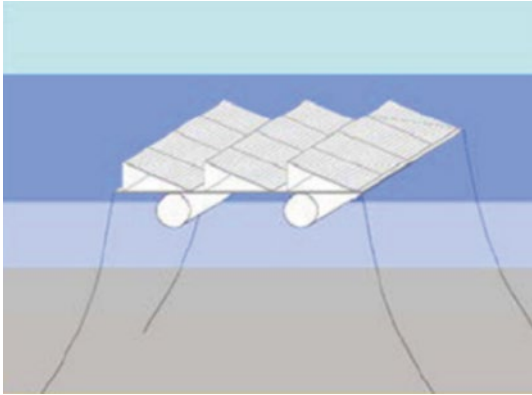
▲圖十一 MIRARCO產品於加拿大測試研究⁽¹⁰⁾



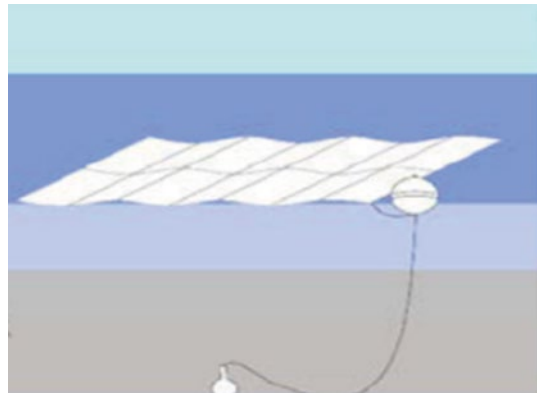
▲圖十二 SUNdy產品示意圖⁽¹¹⁾



▲圖十三 Ocean Sun浮動太陽光電示意圖⁽¹²⁾ (彩圖請見材料世界網)



▲圖十四 剛性結構設計浮動型太陽光電系統示意圖⁽¹³⁾



▲圖十五 撓性結構設計浮動型太陽光電系統示意圖⁽¹³⁾

海上型太陽光電系統的技術與挑戰

剛性結構設計浮動型太陽光電系統(圖十四)之優/缺點如下:

優點: 透過模組化浮台設計, 配合連接器相互連接的浮動陣列結構, 模組化浮台可有效縮短施工時間。

缺點: 近/離岸海域環境條件對於大規模剛性浮台陣列將導致連接器和繫纜系統受力增加, 對應之材料及發電成本提高。

撓性結構設計浮動型太陽光電系統(圖十五)之優/缺點則如下:

優點: 浮台可藉由彈性體變形機制傳遞受力及運動, 以降低波浪浮台兩者的交互影響, 亦可降低纜繩及材料強度的規格。另外, 面板溫度受益於與水直接接觸可有效降低溫度。

缺點: 模組放置海上會有海洋附著物生成, 比如貽貝、藤壺、管蟲、水螅。而因可動件較多, 材料易疲勞且較難失效



▲圖十六 浮動型太陽光電系統電纜固定設計不良⁽¹⁴⁾

分析。此外, 撓性結構特性, 抗颱風能力較低。

當浮動型太陽光電系統設計不良時, 比如電纜沒有好的固定方式, 電纜與連接器有可能泡在水中, 如圖十六所示, 長期系統將發生問題。



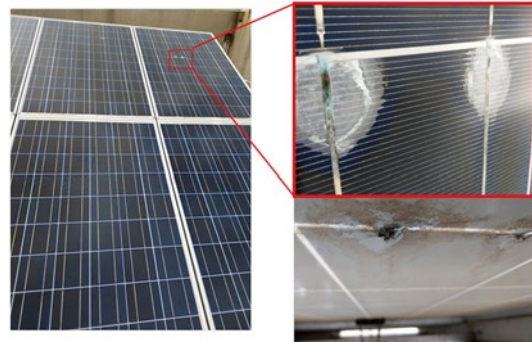
▼表一 金屬氧化電位表

金屬	標準氧化還原反應	電位(V)
鐵(Iron)	$\text{Fe} = \text{Fe}^{3+} + 3\text{e}$	0.771
鐵(Iron)	$\text{Fe} = \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}$	-0.44
鋅(Zinc)	$\text{Zn} = \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}$	-0.763
鋁(Aluminum)	$\text{Al} = \text{Al}^{3+} + 3\text{e}$	-1.662
鎂(Magnesium)	$\text{Mg} = \text{Mg}^{2+} + 2\text{e}$	-2.363
鈉(Sodium)	$\text{Na} = \text{Na}^{+} + \text{e}$	-2.714



▲圖十七 白鐵螺絲與太陽能模組鋁框產生伽凡尼腐蝕

如表一金屬氧化電位表所示，雖然鋁的活性很高，容易釋放出電子形成氧化，但是實際鋁合金在大氣中有著優良的耐蝕特性，原因是鋁合金表面總會形成約5 nm厚度的保護性氧化膜，這也是太陽能模組能夠維持保固20年不腐蝕的原因。當浮動型太陽光電系統設計不良時，比如太陽光電系統安裝中，固定模組的組件往往不是相同的材質，會產生電位差形式的電化學腐蝕，最常見的就是使用白鐵螺絲或鋼鐵螺絲固定模組所造成的電化學腐蝕，也稱作伽凡尼腐蝕現象，如圖十七所示。伽凡尼腐蝕的程度除了受電位差大小影響外，還與另外四個因素有關：①兩金屬之間的接觸電阻；②溶液的導電性；③陰極/陽極



▲圖十八 水氣進入太陽光電模組中造成材料腐蝕現象

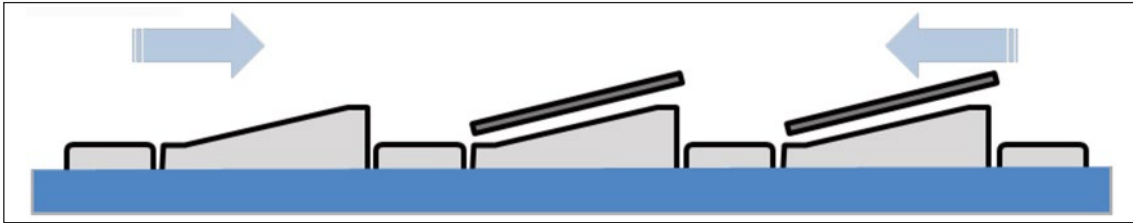
的接觸面積比；④兩金屬的極化特性。

商用太陽光電模組選擇很多，如果選用不適合的光電模組在海上應用，可能會因為水氣進入造成電壓誘發衰退(PID)現象或腐蝕行為加劇(圖十八)，縮短光電模組壽命。

太陽光電模組材料與浮台的材質不同，其熱膨脹係數(Coefficient of Thermal Expansion; CTE)亦不同，玻璃CTE = $8.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、白鐵螺絲304的CTE = $11.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、鋁合金CTE = $23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、HDPE的CTE = $150 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，隨著日夜熱脹冷縮，浮台與模組間隙變大，長期會有安全疑慮(圖十九)。

太陽光電系統發電時有一定的工作溫度($40\sim 70^{\circ}\text{C}$)，適合候鳥在遷徙中的生活環境，海鷗、沙鴨與候鳥有可能在這溫度較高的海上光電系統棲息築巢，形成鳥糞堆積，造成光電模組系統遮陰的問題(圖廿)。

當浮動型太陽光電系統設計不良，比



▲圖十九 系統組件各材料熱膨脹係數不同，長期造成浮台與模組間隙變大



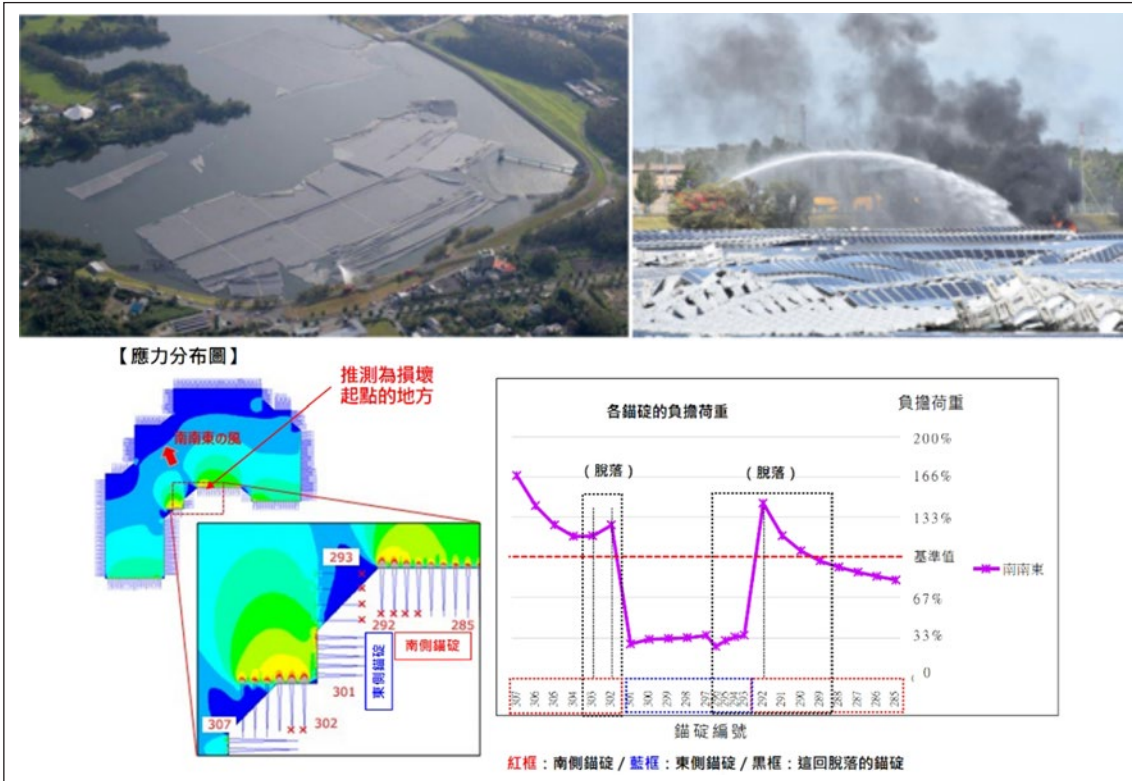
▲圖廿 候鳥棲息環境，可能有鳥糞堆積造成系統遮陰的問題

如抽水馬達發生故障時，系統無法順利將水排出，有可能就此沉入海中。或比如錨碇裝置無法承受強風或強浪時，將會造成錨碇裝置脫離、浮台捲起等問題。2019年9月9日第15號颱風來襲，位於日本千葉山倉大壩，全日本最大的水上型太陽光電發電廠發生了火災事故，因為強風造成，整體一裂為三，錨碇脫離、浮台捲起，如圖廿一所示。

而當浮動型太陽光電系統施工品質不良時，比如水底泥與樹枝無事前整頓，於退潮時，有可能浮台會緊貼在泥灘地上或被樹枝刺穿，如圖廿二所示。另外，比如電纜串接接錯，或連接器沒裝好，光電板可能會開路，線纜長期會有腐蝕老化或電弧效應問題，將有產生火災之機率，如圖廿三所示。

海上型太陽光電系統的設計、施工與運維建議

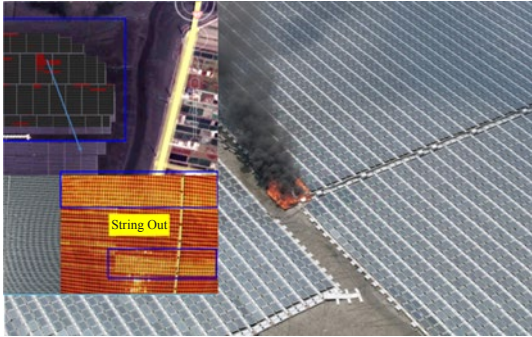
- ①台灣北回歸線以北為副熱帶季風氣候，以南為熱帶季風氣候，長期氣旋對流旺盛，致使腐蝕行為加劇，設計系統時需考量耐腐蝕組件材料。
- ②台灣長期有颱風且潮流變化大，系統設計需考量錨碇裝置。
- ③海上光電系統若裝置量過大，猶如冰山的外形，需有明顯標示，避免船隻發生碰撞。
- ④若施工場地的水底泥與樹枝過多，則需要安排事前整頓，避免退潮浮台緊貼在泥灘地上或被樹枝刺穿。
- ⑤現場施工廠商需要行前說明與施工教育訓練，避免施工中發生意外、電纜錯



▲圖廿一 日本千葉山倉大壩火災事故⁽¹⁵⁾ (彩圖請見材料世界網)



▲圖廿二 浮動型太陽光電系統在退潮時有可能緊貼泥灘地⁽¹⁶⁾



▲圖廿三 浮動型太陽光電系統線纜施工品質不良，長期會有腐蝕老化或電弧效應問題，將有可能產生火災

接或浮台被強風吹翻等問題。

⑥現場施工廠商製作直流用連接器，應採用與太陽能模組連接器之相同廠牌與型號。

⑦海鷗、沙鴨與候鳥有可能在這溫度較高的海上光電系統棲息築巢，產生有鳥糞遮陰系統的問題，需要增加運維頻率。

⑧現場運維檢查項目應包含接地系統、接地連續性檢查。

⑨現場運維檢查採用熱影像定期巡檢找出熱異常處，如發現有過熱處，則須檢查確認是否電阻過大，並且進行更換與維護。🔍

誌謝

本研究工作承蒙經濟部能源局研究計畫(契約編號112-S0302)及工業技術研究院綠能所支持，謹此致謝。

參考文獻

1. Fortune Business Insights, Industry reports/solar power market, 2022.
2. World Bank Group, ESMAP, and SERIS, Where Sun Meets Water : Floating Solar Handbook for Practitioners, 2019.
3. The Ciel-et-Terre company official website.
4. The official press release from SolarDuck company, 2021.
5. Amir Garanovic, Offshore Energy News, Dutch meld offshore floating solar with seaweed cultivation, 2020.
6. Kelly Hodgkins, Emerging Tech News, Heli float is a flexible, football-field-sized solar panel that floats in the ocean, 2016.
7. The Moss Maritime company official website.
8. The solar projects press release from Swimsol company, 2018.
9. The Environment + Energy Leader News, Offshore Floating PV Technology, 2023.
10. Kim Trapani, Flexible floating thin film photovoltaic (PV) array concept for marine and lacustrine environments, 2014.
11. The DNV KEMA Energy & Sustainability News, The SUNdy concept for a large scale floating offshore solar field.
12. The Ocean Sun company official website.
13. Mario López, Noel Rodríguez and Gregorio Iglesias, Journal of Marine Science and Engineering, Combined Floating Offshore Wind and Solar PV, 2020.
14. Thomas REINDL, Solar Energy Research Institute of Singapore (SERIS), Key Learnings from the World's largest Testbed for Floating PV, 2020.
15. 林育如，日本太陽能發電系統火災案例評析，能源知識庫，2020。
16. 台灣綠能專案推動辦公室新聞，全球最大「彰濱崙尾東一號暨二號海上型太陽能電廠」啟用，2021。