

知識物件上傳表

計畫名稱： 113 年度「風電運維產業創新技術開發與產業應用推廣計畫」(3/3)

上傳主題： 離岸風電水下基座防護設計與腐蝕因素

提報機構： 財團法人金屬工業研究發展中心

提報時間： 113 年 8 月 29 日

與計畫相關	<input checked="" type="checkbox"/> 1. 是 <input type="checkbox"/> 2. 否
國別	<input checked="" type="checkbox"/> 1. 國內 <input type="checkbox"/> 2. 國外：
能源業務	<input type="checkbox"/> 1. 能源政策(包含政策工具及碳交易、碳稅等) <input type="checkbox"/> 2. 石油及瓦斯 <input type="checkbox"/> 3. 電力及煤碳(包含電力供應、輸配、煤炭、核能等) <input type="checkbox"/> 4. 新及再生能源 <input type="checkbox"/> 5. 節約能源(包含工業、住商、運輸等部門) <input checked="" type="checkbox"/> 6. 其他
能源領域	<input type="checkbox"/> 1. 能源總體政策與法規 <input type="checkbox"/> 2. 能源安全 <input type="checkbox"/> 3. 能源供需 <input type="checkbox"/> 4. 能源環境 <input type="checkbox"/> 5. 能源價格 <input type="checkbox"/> 6. 能源經濟 <input checked="" type="checkbox"/> 7. 能源科技 <input type="checkbox"/> 8. 能源產業 <input type="checkbox"/> 9. 能源措施 <input type="checkbox"/> 10. 能源推廣 <input type="checkbox"/> 11. 能源統計 <input type="checkbox"/> 12. 國際合作
決策知識類別	<input type="checkbox"/> 1. 建言（策略、政策、措施、法規） <input checked="" type="checkbox"/> 2. 評析(先進技術或方法、策略、政策、措施、法規) <input type="checkbox"/> 3. 標竿及統計數據：技術或方法、產業、市場等趨勢分析 <input type="checkbox"/> 4. 其他：
關鍵字 (熱門標籤)	水下基座、防護系統、腐蝕
重點摘述	隨著國內離岸海事工程的發展，海上設施不僅只有離岸風機，其中還包含海上氣象站、海上變電站等設施，隨著場域建設逐年成長，這些設施在水下段的防蝕裝置如表1所示犧牲陽極(GACP)或外加電流(ICCP)等設計與年度維護及預測將顯得重要。

詳細說明

在水下防蝕系統中，以台灣風電場域所適合的基樁結構為Jacket型式，其抗風浪強度較比Monopile強，然而Jacket構造較為複雜且管徑較小，因此外加電流方式裝設較為困難，此外電流較難以均衡分布在陰極鋼樁表面，這使得多數的Jacket型式的水下基座結構採用犧牲陽極(GACP)方式建立防蝕系統。

表1. 防蝕系統差異

犧牲陽極 (GACP)	介紹	採用相對陰極金屬相對氧化活性較高的金屬作為犧牲陽極裝設於陰極表面形成提高陰極氧化電位壁壘。
	應用場景 (使用案例)	GACP 通常適用於較小型或無法提供外部電力的結構，如一些海洋基礎設施或較小的離岸風電場結構。由於 GACP 系統在安裝和運營中較為簡單，適合那些不易進行複雜監控或維護的情況。
	優勢	可因應結構較複雜、裝設方式簡單、自我節電流
	劣勢	重量負荷、不易更換、無法調整、壽命相對較短
外加電流 (ICCP)	介紹	使用外部電源，通常是直流電（DC）來源，如變壓器/整流器，將交流電（AC）轉換為直流電。這個電流源用來向金屬結構提供一個連續的電子流。
	應用場景 (使用案例)	ICCP 適用於大型、長期運行的基礎設施，如離岸風電場的大型基礎結構、石油平台等。ICCP 系統特別適合需要持續監控和精確控制的情況，並且在環境保護和長期運行成本方面具有優勢。
	優勢	壽命較長、可進行調整、長期成本低
	劣勢	建置成本高、技術複雜、依賴電源

離岸風機水下基座鏽蝕成因，在建置環境中，常面臨嚴峻的自然環境挑戰如表 2 所述，特別在離岸風力發電設施，其暴露在海水鹽分以及高濕環境中，是造成金屬材料加速氧化的關鍵因素，以外海生物附著、表面沉積以及海水溫度電導度變化等皆是影響因素。

表 2. 腐蝕原因與因素分析

鏽蝕原因	影響因素	描述
海水溫度	➤ 高溫環境加速腐蝕反應 ➤ 其他腐蝕介質	溫暖的海水環境有助於氧化反應
溶氧量	➤ 溫度低、高鹽度；溫度高、低鹽度	溶氧量的變化直接影響海水中金屬的氧化速度
導電度	➤ 與鹽度、溫度相關影響反應	導電度影響電化學反應速度，高電導度會加速金屬結構腐蝕
鹽分	➤ 氯鹽與硫酸鹽	鹽分中的氯鹽與硫酸鹽會促進金屬產生氧化反

		應
海流及潮汐	➤ 增加氯離子的流通性以及帶來懸浮的腐蝕介質	海流與鋼樁形成摩擦，處此之外將提高表面腐蝕所需反應物質如鹽分，同時也會沖刷帶走表面沉積保護物質。
海洋生物附著	➤ 藤壺、海藻等可能附著在鋼體結構上。 ➤ 附著生物形成生物膜包覆包含有機、無機物質，同時生物代謝所產生的物質同樣具有腐蝕性	生物膜的有機物質可能成為腐蝕介質，加速金屬腐蝕，此外生物代謝會釋放有機酸與酶同樣會與其他化學物質參與腐蝕反應
淺層土壤細菌	➤ 土壤中厭氧細菌的含量	細菌常造成埋地鋼樁的腐蝕現象發生，厭氧微生物如硫酸還原菌、硝酸還原菌(脫硝菌)、鐵還原菌及產酸菌等
其他因素	➤ 材料選擇 ➤ 塗層品質 ➤ 結構設計	風機塔架結構設計，對於塗層區域考量與環境變化搭配性，此外鋼體結構負載所產生的應力分布差異是影響腐蝕電位平衡的因素之一，是綜合考慮的關鍵因素。

如何完善防範離岸風電水下基座結構腐蝕：

1. 選擇適合的材料對應區域與結構位置。

離岸風電的塗料須通過 NORSOK M-501 的標準，取得 DNV-GL 的認證才能用在整個塔柱的塗裝。目前 NORSOK M-501 是參照 ISO 20340 來制定標準，詳細說明每個部位的塗裝系統及所需通過的實驗。在 2018 年時，ISO 制定 ISO 12944-9 來取代 ISO 20340，為離岸風機新增了 CX 與 Im4 區域，腐蝕環境更為嚴苛。而依據 DNV-RP-0416 將腐蝕區域進行分類如表 3 所示

表 3. 離岸風基支撐結構腐蝕級別區分

離岸風基支撐結構腐蝕級別分類例示		
區域	結構內部環境	結構外部環境
大氣區	C4	C5 或 CX
飛濺區-平均潮位以上	CX 或 Im2	
飛濺區-平均潮位以下	Im2 或 Im4	

浸沒區	Im2 或 Im4
海泥區	Im3 或 Im4

其中 C1~CX 系列為 ISO 12944-2 規範所定義，其主要為定義在具有腐蝕大氣環境中的界定，數值越大表示該環境區域定義為腐蝕速率越高。

而 Im1~4 系列為該規範所定義與腐蝕介質實際接觸下的環境分類，同樣數值越高表示環境越為嚴苛。依照國外 DNV-RP-0416 所建議之防蝕策略在離岸結構的區域與防蝕措施參考如下表 4 所示

表 4 風機鋼樁的建議採取防蝕措施

區域	結構的內外部表面	可採取的防蝕措施
大氣區	內部	塗樁系統、腐蝕容許量
飛濺區→浸沒區	外部	陰極保護、塗樁系統、腐蝕容許量
海泥區	外部	陰極保護、塗樁系統、腐蝕容許量

其中要注意在大氣區與浸沒區所適用之塗樁系統性質要求不同，在大氣區受陽光紫外線照射所導致塗層脆裂需考量在其中，而浸沒區則需考量在相對高腐蝕環境中對於鋼材與塗層之間的密合性，需防止局部鋼材的析氫反應導致塗層開裂，同時採用磨耗係數相對較高的塗裝系統，其中氧化處理保護層為其中一種方法，而有機塗裝如環氧或聚酯漆為例，無機塗層則為富鋅底漆系統為例，各廠家有其獨門的搭配方式，如最常見的富鋅底漆(最小膜厚 60 μm) 環氧中間漆+聚氨酯面漆. 280 μm 之搭配。

2. 定期維護與監測

以國外廠商為例，在離岸風機水下基座於定期維護過程中除了透過 ROV 對水下防蝕系統進行量測(如陽極電流、陰極電位等)，還會進行海生物清除，防止過多海生物附著造成防護系統失效，除此之外這些定期檢測結果會與當初設計防護系統所模擬推衍結果進行時因階段比對，其主要意義在於對照是否依照防護設計規格進行消耗是否有區塊腐蝕速率異常，評估未來補強或汰換時機以及對於防護系統設計商的驗證反饋數據以利防護設計商的設計迭代。

3. 進行防蝕系統建置 如 ICCP、GACP。

以國外分享案例為依據，在歐洲挪威風場多半採用 Monopile 形式的水下基座，其單樁柱設計因此在防蝕系統上有 ICCP 與 GACP 兩種選擇，其中若以 GACP 為例其陽極犧牲塊採以籠式設計(CP cage)如圖 1 所示。



圖 1. 歐洲離岸風基犧牲陽極籠設計

圖片來源:Manora UK Ltd

而陽極籠的犧牲目前在以歐洲的 GACP 技術最高年限可達到 20 年左右，其限制與可安裝的重量位置，其牽涉到陽極防護有效係數通常為 0.8，意即理論上可為鋼樁提供 20 年的電流與電容量其因傳導過程中受到海水微量離子(Ca^+ 、 Mg^+)與陰極接觸電內阻等影響實際上可供應約為 16 年左右。

近年來隨著技術發展，ICCP 逐漸在歐洲離岸風電防蝕系統中拔得頭籌，其優勢在於可產生較低的碳排足跡，較低的系統重量負載等，其往往會搭配 SACDA 系統介面作為監控，如圖 2 所示為 Corrosion UK Ltd 在歐洲 Monopile 安裝 ICCP 系統，其黑色圓盤突出物為外加電流保護之陽極電極多採用混合金屬氧化物鈦或鍍鉑鈦製成 MMO/Ti 的電極

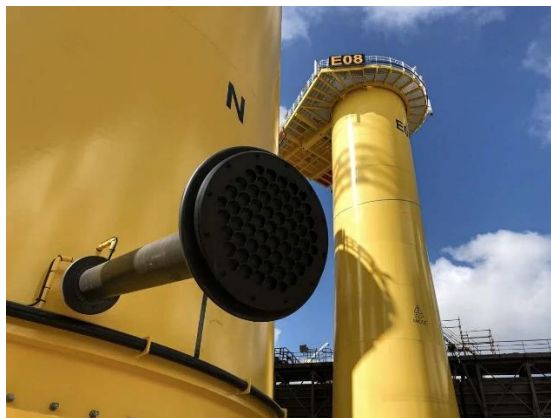


圖 2. Corrosion UK Ltd 在歐洲 Monopile 安裝 ICCP 系統

其通常將保護電流導線安置於鋼樁內部進行保護電流供應，因此在安裝過程中，對於內部的線路布局需要詳盡設計，且需要避開內部其他電機設備的干擾，而其最大的優勢在於若設計安裝得當可持續進行長達 25 年以上的防護，且維護成本較低，但安裝過程較為複雜且需要多次進行檢驗以確保防護電流有效以外，對於較為複雜的結構其防護設計成本將相對提高許多。

4. 在設計初期考量完整的腐蝕因素，並納入設計範疇。

設計初期對於防護系統設計商來說，為十分重要的環節，有效且得當地分布 CP 位置與大小將可降低成本與其最佳化防護設計，GACP 在陽極佈局上依據 DNV-RP-B401 作為依據，規範對於陽極規格與安裝方式其也界定防護有效電位範圍為-0.8~-1.15V，但 RP-B401 的範圍不包括用於結構完整性的陽極固定裝置的詳細設計(條項 1-2-4)，目前國內設計商多以空間平均分布作為布局陽極犧牲的依據，其中透過簡易的方式計算陽極位置與其對應的陰極保護面積範圍，以此來設計，其中往往會設計腐蝕裕度通常係數約為 1.2 倍，意即 5 年防護需求設計 6 年的 CP 壽命，這是歐洲的較常見的 CP 設計引入台灣，然而全球各地區的海洋溫度與鹽度環境不同，以台灣為例海水溫度較高海潮強度較強，這致使設計商為求確保防護年限可達到需求將腐蝕裕度上調至 1.5 倍，以國外 Imenco 與 Deepwater 廠商服務模式分享，其在對於歐洲防護系統設計過程中會藉由模擬方式進行防護設計的壽命預測以及陰極有效防護範圍檢視如圖 3 所示，其目的在於最佳化陽極設置布局同時可以藉由模擬結果產生 CP 報告，這份報告可提供運維商日後進行防護系統維運健檢之依據，該項服務不僅適用於新建項目，還適用於基座中期改造直至退役，服務內容包括 1. 已安裝的陰極保護系統的性能評估 2. 系統配置最佳化 3. ICCP&GACP 概念設計 4. 方案的成本效益評估，

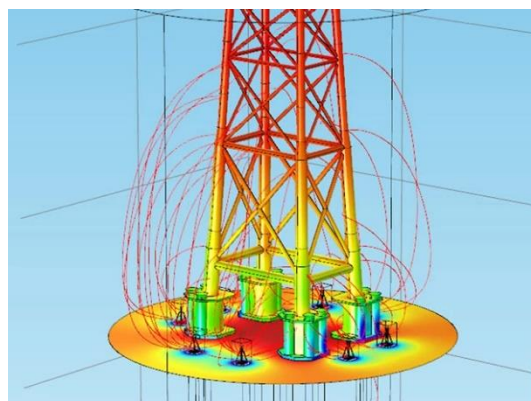
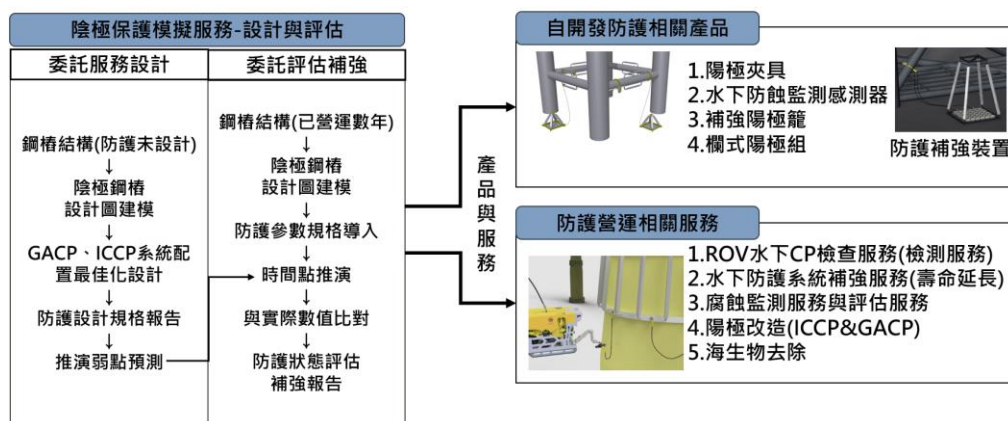


圖 3. GACP&ICCP 複合系統概念設計模擬

資料來源: Deepwater Corrosion Services Inc.

其國外模擬服務之流程有分為已設計防護之評估與新概念設計評估，分為委託服務設計其對於新的鋼樁結構進行防護系統設計需求與已施行下水營運中的鋼樁結構，對其防護系統設計進行模擬評估補強同時該廠商順勢可推出其他產品與服務。



總結

對於防護系統設計與後端運維技術開發之目標有五大項目，其 1. 減少防護成本 2. 使防護系統最佳化 3. 使防護系統檢查具備可依循性 4. 對於新的防護技術概念進行驗證。而在台灣海域環境與國外相異的前提下，台灣設計商廠商若可依循有效的模擬方式進行設計，除了可減少設計成本使防護系統有效最佳化以外，對於風場運維商也可提供可進行比對的設計報告。

設計商在防護設計中外在影響腐蝕速率的因素往往考量較少，通常以極值作為考量因素，例如海水溫度設定與 30°C、海水流速設定在 1m/s 等極端數值來進行設計考量，除了會提高成本，這也致使陽極設計重量過高增加基樁的負載，除此之外腐蝕因素考量不僅只有外在環境因素，塔架基座的結構設計與其載重所影響的應力分布也將影響各機構部位的平衡電位差異。

- 註：1. 請計畫執行單位上傳提供較具策略性的知識物件，不限計畫執行有關內容。
2. 請計畫執行單位每季更新與上傳一次，另有新增政策建議可隨時上傳。
3. 文字精要具體，量化數據盡量輔以圖表說明。