

離岸風機金屬腐蝕調查研究

溫志中 弘光科技大學環境與安全衛生工程系教授
林鳳嬌 國立成功大學水利試驗所研究員
羅建明 交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員
柯正龍 交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長
葉秀貞 弘光科技大學環境與安全衛生工程系專任助理

摘要

臺灣西部沿岸蘊藏高離岸風力發電之潛能，然因位處亞熱帶，海上結構物腐蝕程度更甚於歐洲國家。現臺灣離岸風電仍處初步發展階段，故本文針對國內外離岸風電基樁與金屬構件之腐

蝕防治、海洋附著生物作用等議題進行相關資料蒐集與彙整，期許提供台灣本土離岸風機相關金屬材料選用、海洋生物附著、腐蝕觀測調查等相關研究之參考。

一、前言

因應全球環境劇烈變遷及資源衰竭等問題，各國皆積極尋找替代能源，朝永續再生能源(Sustainable Energy)方向發展。全球風力發電市場自 1980 年代興起，至今發展已近四十年，成為技術成熟、最具經濟規模，且富價格競力的再生能源。根據全球風能協會(Global Wind Energy Council, GWEC)，2018 年 2 月所發佈的統計數據，截至 2017 年底，全球風機總裝置容量達到 539,291MG，占全球電力需求的 5% 以上。其中離岸風力發電累計裝置量由 2011 年的 4,117 MW，大幅提升至 2017 年的 18,814 MW，如圖 1 所示。現今，

全球前三大離岸風力裝置量國，分別為英國(36%)、德國(28.5%)及中國(15%)。

依據經濟部能源局委託工業技術研究院所進行之臺灣地區風力潛能分布模擬結果顯示，臺灣西部沿海於 80 m 高之年平均風速約達 5~6 m/s 以上；風能密度約可達到 750~850 W/m²，且風向穩定；隨著離岸風電技術發展逐步成熟，其建置成本相對大幅降低，使風能成為臺灣再生能源的優勢選項。

2012 年，行政院經濟部核定「千架海陸風力機」計畫，著手推動綠能低碳環境的國家能源政策，並於 2015 年 7 月 3 日，公告「離岸風力發電場址規劃

作業要點」，藉以公布 36 個離岸風機開發潛力場址(圖 2)，逐步將風力發電

由陸地向海洋推展。

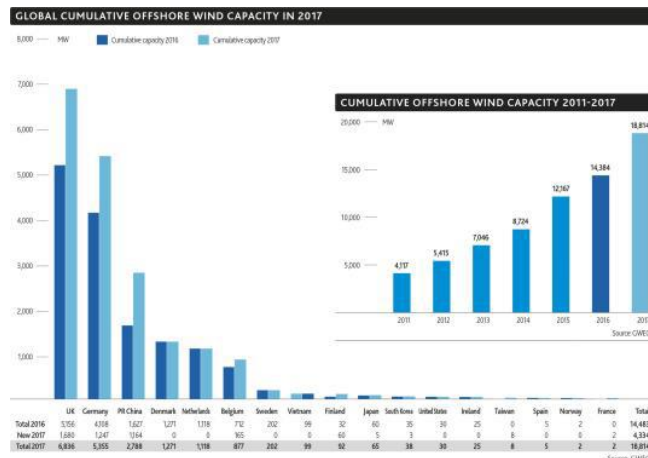


圖 1 2011~2017 年全球離岸累計裝置容量變化圖

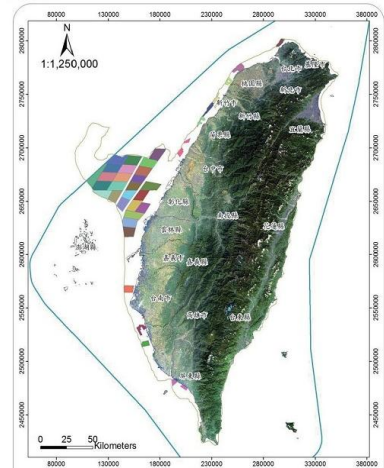


圖 2 台灣離岸風力規劃場址海域圖

臺灣位處熱帶與亞熱帶交界處，相較於較先發展風力發電的丹麥、英國等國家，臺灣日照強度大、海水溫度高、海洋生物多樣性豐富、相對濕度與空氣中含鹽量均偏高，故環境對海上結構物(Offshore Structures)如：海上平台(Offshore Platforms)、海上儲槽及海上風機等構材之腐蝕耐久性影響甚鉅，除

需尋找高效耐腐蝕策略；亦需配合臺灣抗震、抗颱、防腐蝕及海象條件作為重點研究考量，建立腐蝕監控、風力發電機資產管理分析技術，有效評估材料使用特性及維護改善週期，節省元件破損、停機之更換費用，方可增強風力發電機組結構使用之穩定性，提昇運轉效率，增進經濟效益與關鍵技術之發展。

二、研究目的

離岸風機裝構件需面對海洋嚴苛腐蝕環境之考驗，其結構物腐蝕防治設計與機組構件等，皆為機組日後運轉維護的重要項目。考量各離岸風機裝設之氣候環境與海域差異，且臺灣地區尚缺乏風機設置區域海洋附著生物的分佈情況，故透過國外離岸風電之腐蝕防治

技術等相關資訊蒐集與彙整，並持續採樣調查臺中、彰化水域現地環境資訊，透過金屬暴露試驗規劃與觀測，充實臺灣腐蝕環境資料庫，評估相關腐蝕防治技術於國內環境之適用性，藉以建立本土化基樁及金屬構件可行之防蝕對策；提供國內風電產業發展相關施政、

規劃、設計、施工，維護管理單位針對離岸風機基樁之防蝕規劃、設計與施作

之應用。

三、文獻回顧

本研究針對國內外離岸風機基樁水下腐蝕防治及監測技術、海洋附著生物腐蝕影響及防蝕文獻進行蒐集與彙整。

3.1 離岸風機結構型式

離岸風機依功能與受力，分為上部結構、下部結構與基礎，如圖 3 所示。離岸風機高度一般介於 80~110m 之間，上部結構包括風機本體及塔柱 (Tower)，主要承受風力；下部結構包括工作平臺及聯結塔柱與基礎的轉接段 (Transition piece)，主要承受波浪力；基礎部分則支撐結構並承受海水流動力。水下支撐及基礎安裝型式又概分為著床式基座 (fixed foundation) 與漂浮式基座 (floating foundation) 兩大類。

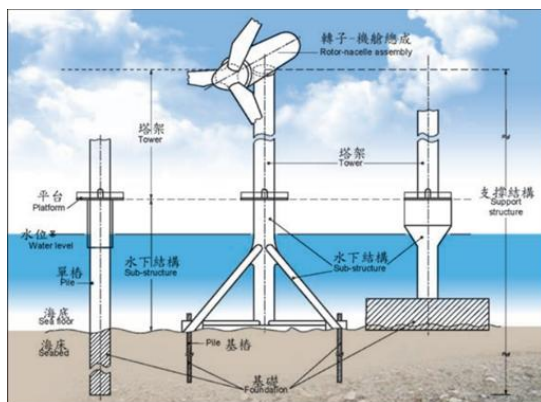


圖 3 離岸風機固定式支撐構造概略圖

著床式基座透過打樁工程將基座固定於海床上，為目前離岸風機基座安裝之主流，通常適用於水深<50m 以內之海域^[6,7]。離岸風場之水下基礎結構水多以單樁式 (Monopile)、三腳管式 (Tripod)、管架式/套筒式 (Jacket) 及重力式 (Gravity) 四大類型為主，基座設計則視不同水深、洋流、地質條件以選擇其種類與尺寸。歐洲地區離岸風機水下基礎多採「單樁式」或「套筒式」為主。單樁式基礎設計、施工簡易、相對成本低，於離岸風場相當常見，通常作為位處淺水或中等深度水域離岸風力發電機的下部結構，以歐洲地區而言，該型式基礎多應用於水深<20m 之水域，是為歐洲主流的水下基礎低成本方案。臺灣地處亞太地震帶，於潛力風場地質鑽探結果分析，普遍認為可以苗栗做為分界。苗栗以北因有岩層且地震影響較輕微，可選用單樁式作為離岸風機之水下基礎，其施作成本隨水深而增加，運用於砂質海床或具漂砂問題之海域具較高之優勢；「套筒式基礎」結構較為複雜，其製造成本與其穩定度亦隨之提升，臺灣地區苗栗以南，相對泥土質地較鬆軟、地震影響程度較大，建議採用穩定度較佳之套筒式基礎施作，以提高其安全性。

離岸風力較陸域風力發電機組面臨之環境條件更為嚴苛，考量海上維護、營運便利性及維護成本，各組件之防腐防蝕技術與相關監測規劃設計，嚴然成為離岸風機發展的重要環節之一。現臺灣海上結構物之基礎結構多以「套筒式(Jacket)」進行規劃。綜觀國外之離岸風機等海洋結構物與腐蝕作用之關聯性，多以大氣區、飛濺區、浸沒區等曝露區域進行探討，各曝露區域環境條件特徵如下：

1. 大氣區(Atmospheric zone)

大氣區之海上結構物暴露於大氣各種介質中，如氣體、日照…等；結構物整體多處於乾燥環境。

2. 飛濺區(Splash zone)

飛濺區包含潮汐帶(高、低潮位之間)與潮差帶區(平均高潮位以上至海面大氣帶下端)，此區反覆受到海浪潑濺及日照曝曬；結構物受乾濕循環交替作用影響。

3. 浸沒區(Submerged zone)

浸沒區包含海中帶及海泥帶，海中帶受水深、鹽度、pH、溶氧等參數影響；海泥帶則需考慮沉積物環境是否有腐蝕性微生物存在；此區結構物整體皆長期浸泡於海水之中。

3.2 金屬腐蝕

金屬材料與所處環境介質相互作用，於其介面發生化學、電化學和(或)生化反應所引起的變質和破壞，稱之為金屬腐蝕，其中以電化學腐蝕最為常見，故成為金屬腐蝕研究的重要對象。廣義而言，金屬腐蝕作用過程必然涉及金屬和環境中單一或多種成分之化學反應，從而導致新化合物(亦即腐蝕產

物)形成，亦可能因磨損、沖蝕導致等物理作用所造成。金屬構件表面常因化學成分不均、合金之晶界電位差異、加工過程的應力不均或金屬表層不完整及空隙、裂縫等因素，進而產生表面微型腐蝕現象。金屬腐蝕過程中，這些微小的陽極或陰極將持續交替更換位置，此時，當微小腐蝕作用大面積均勻分布於金屬表面，將使金屬整體逐漸減薄，此腐蝕形態稱為全面腐蝕或均勻腐蝕(Uniform or general corrosion)。在均勻腐蝕的情況下，金屬表面各處的消耗速率均一致，於金屬表面出現明顯大面積的腐蝕情況，逐步減低金屬的各項性能，並無明顯肉眼可見的腐蝕深度，對此，一般透過「腐蝕質量」及「腐蝕深度」定期檢測所得知的腐蝕速率進行腐蝕餘裕量推估與設計，以防止金屬產生過早腐蝕之情況產生。

若金屬腐蝕過程中，局部活性區因應力不均，如：表面缺陷、濃度差異、環境介質不均等情況，腐蝕作用將局限在金屬的某一部位，此腐蝕形態稱為「局部腐蝕」其腐蝕強度大與危害性皆高於全面腐蝕。廣義而言，金屬腐蝕作用過程必然涉及金屬和環境中單一或多種成分之化學反應，從而導致新化合物(亦即腐蝕產物)形成。常見電化學腐蝕，如：點蝕(Pitting corrosion)、縫隙腐蝕(Crevise corrosion)、加凡尼腐蝕(Galvanic corrosion)、絲狀腐蝕(Filiform corrosion)及晶間腐蝕(Intergranular corrosion)等；物理性腐蝕，如：應力腐蝕劣化(Stress corrosion cracking, SCC)、腐蝕疲勞(Corrosion fatigue)及氫蝕(hydrogen damage)等。

臺灣位處亞熱帶，海洋生物繁殖旺盛，海洋結構物常因海洋附著生物(fouling organism)的依附生長，加速水下材料、設施腐蝕或局部破壞。海洋結構物建立的初始時期，海洋附著生物會於結構物表面分泌胞外代謝產物(extracellular polymeric substance, EPS)形成生物膜(biological film or biofilm)或黏液(Slime)，隨後吸引大型海洋附著生物之幼生或孢子(Embryonic sessile organism)大量附著，陸續繁殖形成巨大的生物群聚、污損生物層(macrofoulers)，使海洋結構體局部荷重增加，產生腐蝕

劣化情形。故瞭解海洋附著生物、腐蝕作用與相關防治是為海洋工程中的重要課題。海洋附著生物有著生態群聚消長之過程，當物體進入海水，即開始進行連串的演替過程。Wahl (1989)將此過程劃分為四個階段，微生物瞬時吸附於結構物之上，快速增生形成菌落；第二天起，矽藻和原生動物陸續定居；根據緯度和季節等差異，大型海洋動物的幼生和藻類孢子將會陸續開始附著，各階段演替之速度與過程中物理作用及生物作用參與之強度整理如圖 4 所示。

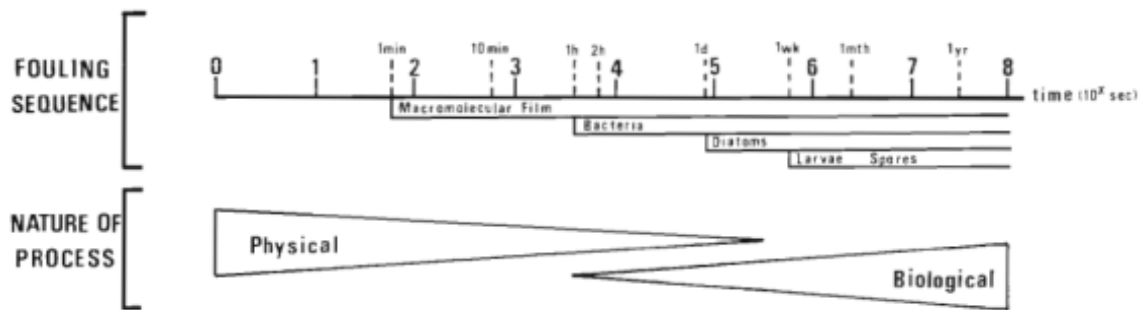


圖 4 海洋附著生物群聚消長變化圖

亞熱帶海域常見之海洋附著生物約有海綿、水螅、海筆、多毛類、蔓足類(藤壺和鵝荖荷)、苔蘚蟲、軟體動物類(含貽貝、牡蠣、鮑貝和船蛆等)、海蛸等動物，以及石蓴、綠藻、紅藻和褐藻等植物。根據過往相關研究與調查，臺灣各港區碼頭均有海洋附著生物問題產生，海洋附著生物種類及繁殖受到海水深度、溫度、光度及營養等因素影響，同時亦因季節、潮汐等變化而異。如高雄港主要海洋附著生物以管蟲為主，其他如：藤壺、紫孔雀蛤、多毛類、

海鞘、苔蘚蟲及海葵等零星分布。如以垂直深度進行探討，由淺至深，主要生物變化分別為藤壺、紫孔雀蛤、多毛類等。此外亦須考量季節性消長與生物群特徵等相關影響，欲掌握各港區海洋附著生物現況，應持續推動相關調查工作。然國內關於海洋附著生物研究甚少，雖曾有初步的附著生物分佈與防污塗層與附著生物關係之研究；但僅有初步鑑定，並無法提供完整海洋附著生物與防污間之相關訊息。另離岸風機與海洋生物相關研究，多專注在風機機組對

生物生態影響評估及漁業生產等議題，關於海洋附著生物對離岸風機機組之腐蝕研究則仍闕如。離岸風機樁體海洋附著生物依附情況，如圖 5 所示。

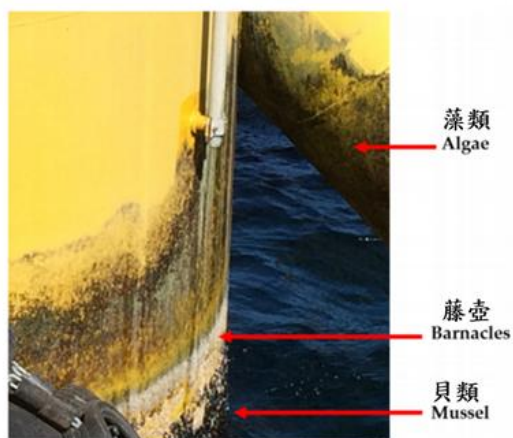


圖 5 離岸風機樁體海洋附著生物依附情況

過去，人們多以非生物的腐蝕機制進行腐蝕現象之觀察，隨著分析技術的進步與發展，研究指出腐蝕乃是由傳統電化學腐蝕與生物交互作用下所導致[20]，故微生物於腐蝕過程中之作用機制，愈發受到重視。這些於金屬及非金屬材料表面之微生物作用，所導致或促進材料的腐蝕或破壞，稱之為微生物腐

蝕 (Microbiologically Influenced Corrosion, MIC)。故微生物腐蝕並非一種獨特的腐蝕形式，因其主要是由微生物生物膜或相關代謝產物相互作用而產生。

腐蝕微生物多為環境中鐵、硫循環的參與者，其中硫酸鹽還原菌 (sulphate-reducing bacteria, SRB) 是為一種厭氧的微生物，可在-5~75℃條件下生存，並可快速適應新的溫度環境。某些種可在-5℃以下生長，具有芽孢的種，可耐受至 80℃之高溫，環境 pH 值 5~9.5 的範圍皆可生存，其中以 pH 值 7.0~7.8 生存條件最佳，亦可於高鹽環境中生存，故其生長能力強，可廣泛生存於土壤、海水、河水、地下管道以及油氣井等缺氧環境中，是引起鋼鐵、金屬等材料腐蝕的重要原因之一，於深海厭氧環境下，更是扮演腐蝕的主導地位。1994-2016 年間，已多篇研究顯示，硫酸鹽還原菌對於碳鋼(Carbon steel)、不鏽鋼(Stainless steel)、鈦(Titanium)、銅合金、鎳合金等多種金屬，皆會造成局部腐蝕現象，歷年硫酸鹽還原菌對金屬腐蝕之相關研究，彙整於表 1。

表 1 厭氧微生物金屬腐蝕相關研究彙整表

作者/年分	研究主題與摘要
Corrosion of stainless steel by sulfate-reducing bacteria total immersion test-results	
Ringas, C., & Robinson, F. P. A. (1988)	研究針對一系列不鏽鋼及低碳鋼進行浸泡腐蝕試驗，並以掃描電子顯微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM) 觀察硫酸還原菌對於各式金屬腐蝕之情況進行觀測。研究結果顯示，硫酸還原菌會對研究金屬產生點蝕及晶粒間的晶間腐蝕，整體而言，以 304L 不鏽鋼受硫酸還原菌腐蝕影響程度最小，低碳鋼腐蝕表面則有獨特蝕刻亮面出現。
Corrosion of stainless steel by sulfate-reducing bacteria electrochemical techniques	
Ringas, C., & Robinson, F. P. A. (1988)	研究選用 304L、316L、316、430、409 等多種不鏽鋼，於硫酸還原菌腐蝕作用下之化學電位變化觀測。研究結果顯示，腐蝕凹洞位置與金屬電位變化具有相關性。
Impact of sulfate-reducing bacteria on welded copper-nickel seawater piping systems/ Evaluation of microbiologically induced corrosion in an estuary	
Little, B. J. et al. (1988)	研究針對銅/鎳材質製成之海水管道系統焊縫之硫酸鹽還原菌腐蝕作用影響進行調查與研究。研究結果顯示，管道系統焊接於加熱過程中可能產生金屬偏析、焊縫中硫化物細菌沉降、硫化物衍生物等情況，進而破壞金屬表面，形成無數微小的腐蝕電池，致使局部腐蝕發生。
Little, B. J. et al. (1989)	
Study of parameters implicated in the biodeterioration of mild steel in the presence of different species of sulphate-reducing bacteria	
Beech, I. B. et al. (1994)	研究針對 Desulfovibrio desulfuricans subspecies desulfuricans 中的兩種硫酸鹽還原菌特性進行研究，研究內容包含菌種群落的代謝活性觀察、碳鋼基質的表面平整度與硫酸鹽還原菌附著情況，以及兩種酸鹽還原菌生物膜於碳鋼表面之作用情況等進行觀測，透過重量損失量測估算碳鋼之腐蝕速。研究結果顯示，兩種硫酸鹽還原菌於相同生長條件下對碳鋼腐蝕性有異，不同硫酸鹽還原菌皆有各自之優勢生長及腐蝕條件。

作者/年分	研究主題與摘要
Corrosion of stainless steels in marine conditions containing sulphate reducing bacteria	
Neville, A., & Hodgkiess, T. (2000)	研究透過陽極極化、陰極極化、電偶耦合實驗、顯微鏡和微量分析等方式，觀察硫酸鹽還原菌於海水環境中對奧氏體不鏽鋼及雙相不鏽鋼之腐蝕行為。研究結果證實，硫酸鹽還原菌可在無電化學監測干擾之低氧環境產生顯著的腐蝕情況。
Microbiologically influenced corrosion of carbon steel exposed to anaerobic soil	
Li, S. Y. et al. (2001)	研究透過電化學極化技術、電化學阻抗譜(Electrochemical impedance spectroscopy, EIS)，掃描電子顯微鏡(Scanning electron microscopy, SEM)與能量色散譜(Energy-dispersive spectroscopy, EDS)、薄膜電阻(Electrical resistance, ER)探頭和電流測量等相互搭配，研究厭氧土壤中微生物對碳鋼之腐蝕情況。(Microbiologically influenced corrosion, MIC)。調查結果顯示，透過環境參數分析，如土壤電阻率、含水量、總有機碳含量、還原氧化電位和硫酸鹽含量等，可藉以評估微生物腐蝕之風險。 地下金屬結構使用壽命約為 30 至 50 年，然缺氧的土壤環境將出現硫酸鹽還原菌腐蝕作用之產生，欲維持地下金屬之使用情況，應定期檢查和維護，輔以有機塗層和陰極防蝕工法進行防蝕工作，以確保地下金屬結構使用壽命及安全性。
Microbially initiated pitting on 316L stainless steel	
Geiser, M. et al. (2002)	研究觀察低鹽度環境下，錳氧化細菌(<i>Leptothrix discophora</i>)對 316L 不鏽鋼造成之點蝕情況。研究結果顯示， <i>Leptothrix discophora</i> 的確會對 316L 不鏽鋼造成點蝕，且氯離子將促進腐蝕之發生，顯微鏡下所觀察之腐蝕凹洞形狀與微生物形狀非常相似，故推測點蝕應由微生物所導致。
Microbiologically induced corrosion of 70Cu-30Ni alloy in anaerobic seawater	
Huang, G. et al. (2004)	研究以顯微鏡和電化學方法研究硫酸鹽還原菌於厭氧海水中對 70Cu-30Ni 合金的腐蝕情況。透過雷射掃描共軛焦顯微鏡(confocal laser scanning microscopy,

作者/年分	研究主題與摘要
	LSCM) 觀察，可發現硫酸鹽還原菌於厭氧條件下之合金表面形成斑點生物膜；銅鎳合金金屬於含有酸鹽還原菌之海水浸泡七日後，即可發現晶間腐蝕現象。微生物生長濃度與其代謝物濃度具有對應變化關係，故推論銅鎳合金之腐蝕現象與硫酸鹽還原菌作用具有一定程度之影響。
Pitting corrosion of titanium by a freshwater strain of sulphate reducing bacteria (<i>Desulfovibrio vulgaris</i>)	
Rao, T. et al. (2005)	研究將 2.0×1.5cm 之鈦金屬暴露於硫酸鹽還原菌 <i>Desulfovibrio vulgaris</i> 環境中，以接種及未接種 <i>Desulfovibrio vulgaris</i> 作為對照組，進行為期 90 天的硫酸鹽還原菌培養及點蝕腐蝕情況之研究觀察。研究顯示，未接種 <i>Desulfovibrio vulgaris</i> 之鈦金屬無點蝕現象發生；暴露於接種 <i>Desulfovibrio vulgaris</i> 之鈦金屬表面出現直徑約 2mm 之半圓形凹洞與許多微小凹洞，凹洞中皆可發現硫酸鹽還原菌，顯示硫酸鹽還原菌的確能對鈦金屬造成點蝕之腐蝕作用。
Influence of thermal aging on sulfate-reducing bacteria (SRB)-influenced corrosion behaviour of 2205 duplex stainless steel	
Antony, P. J. et al. (2008)	研究將 2205 雙相不鏽鋼暴露於含有硫酸鹽還原菌的氯化物培養基介質中，進行為期 40 天之暴露腐蝕對照組觀察研究。研究顯示，暴露於硫酸鹽還原菌中之 2205 雙相不鏽鋼出現陰極腐蝕電位急劇下降，陽極電流增加之現象，顯示硫酸鹽還原菌對 2205 雙相不鏽鋼具有腐蝕作用。
Biocorrosion characteristics of the copper alloys BFe30- 1-1 and HSn70-1AB by SRB using atomic force microscopy and scanning electron microscopy	
Li, J., Yuan, W., & Du, Y. (2010)	研究針對銅合金(HSn70-1AB 和 BFe30-1-1)在含有硫酸鹽還原菌培養基中之腐蝕情況，藉由顯微鏡觀察硫酸鹽還原菌對於兩不同之銅合金之附著力及表面的生物膜特性。兩銅合金於相同浸置時間後進行比較，結果顯示，於兩金屬皆有腐蝕現象產生，其中硫酸鹽還原菌較易於 BFe30-1-1 附著，故金屬合金的化學成分，會影響硫酸鹽還原菌生物之膜形成與表面附著的

作者/年分	研究主題與摘要
	化學特性。
Effect of sulphate reducing bacteria on corrosion of Al-Zn-In-Sn sacrificial anodes in marine sediment	
Liu, F. <i>et al.</i> (2012)	研究針對海洋沉積物中 Al-Zn-In-Sn 犧牲陰極進行腐蝕觀察。研究顯示，硫酸鹽還原菌對海洋沉積物中之 Al-Zn-In-Sn 犧牲陰極造成點蝕，金屬材料腐蝕速率隨硫酸鹽還原菌生長而提升。且對耐腐蝕性佳的 2205 雙相不鏽鋼亦具有腐蝕作用，於其表面明顯出現點蝕現象，並形成 Cr ₂ O ₃ 、FeS、FeS ₂ 、Fe(OH) ₂ 和 FeO 等腐蝕產物。
Surface chemistry and corrosion behaviour of 304 stainless steel in simulated seawater containing inorganic sulphide and sulphate-reducing bacteria	
Yuan S. J. <i>et al.</i> (2013)	研究探討海水培養基中硫酸鹽還原菌以及相關代謝產物與無機硫化物對 304 不鏽鋼的腐蝕情況。透過對照組研究觀察發現，硫酸鹽還原菌產生之硫化物對 304 不鏽鋼有顯著的腐蝕現象，且硫酸鹽還原菌所產生之生物膜，亦會促進不鏽鋼表面之腐蝕作用。
Influence of sulfate reducing bacterial biofilm on corrosion behavior of low-alloy, high-strength steel (API-5L X80)	
Al Abbas, F. M. <i>et al.</i> (2013)	研究針對硫酸鹽還原菌對 API 5L X80 管線碳鋼之微生物腐蝕影響進行調查。透過能量色散光譜儀 (Energy Dispersive Spectroscopy, EDS) 觀察發現，硫酸鹽還原菌之腐蝕產物中含有各式硫化物和氧化物成分，故金屬表面上所形成的生物膜和硫化物層，將促使硫酸鹽還原菌產生顯著的局部腐蝕作用。
Evaluation of the effects of seawater ingress into 316L lined pipes on corrosion performance	
Machuca, L. L. <i>et al.</i> (2014)	研究針對 316L 管道受海水滲入對腐蝕之影響進行研究，觀察海水中的氧和微生物於海水環境中對 316L 的腐蝕情況。結果顯示，氧氣對化學方法之生物去除效率有負面影響，且會促進腐蝕之發生，增高局部腐蝕風險。
Microbially influenced corrosion and inhibition of nickel–zinc and nickel–copper coatings by <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	

作者/年分	研究主題與摘要
Nalan O. S. <i>et al.</i> (2014)	研究針對革蘭氏陰性之銅綠假單胞菌(<i>Pseudomonas aeruginosa</i>)對鎳鋅合金及鎳銅合金之腐蝕速率影響。研究結果顯示，銅綠假單胞菌作用會促進鎳銅合金腐蝕，但對鎳鋅合金具有保護作用。
Corrosion of carbon steel by sulphate reducing bacteria: Initial attachment and the role of ferrous ions	
Javed, M. A. <i>et al.</i> (2015)	研究針對在亞鐵離子影響下，硫酸鹽還原菌的初始附著與碳鋼腐蝕影響情況進行研究。研究發現，最初始細菌附著過程最為複雜，附著的早期階段（≤60 分鐘），硫酸鹽還原菌對培養基中鐵的具有依賴性；60 分鐘後，與缺鐵培養基相比，在富含鐵的培養基中，具有較高附著性及聚合物產生。顯示觀察亞鐵離子濃度之變化，可能有助於監測硫酸鹽還原菌對腐蝕作用之影響。
Microbially Influenced Corrosion of 304 Stainless Steel and Titanium by <i>P. variotii</i> and <i>A. niger</i> in Humid Atmosphere	
Zhang, D.. <i>et al.</i> (2015)	多數微生物腐蝕研究著重於原核細菌，如硫酸鹽還原菌上，在真菌對金屬腐蝕行為之影響尚未有充分的研究。故此篇研究將 304 不鏽鋼和鈦暴露於高濕度環境中，採常見的擬青黴(<i>Paecilomyces variotii</i>)、黑曲霉(<i>Aspergillus niger</i>)兩種真菌進行金屬腐蝕觀察。經暴露 60 天後，進行相關腐蝕評估，真菌降低了 304 不鏽鋼和鈦金屬的耐腐蝕性，相對而言，鈦金屬對真菌的抗腐蝕性較 304 不鏽鋼高。
Electron mediators accelerate the microbiologically influenced corrosion of 304 stainless steel by the <i>Desulfovibrio vulgaris</i> biofilm	
Zhang, P. <i>et al.</i> (2015)	研究培養 <i>Desulfovibrio vulgaris</i> ，使之生物膜覆蓋於 304 不鏽鋼，接續進行相關微生物腐蝕試驗觀察。研究進行為期七日之厭氧測試實驗。研究結果顯示， <i>Desulfovibrio vulgaris</i> 生物膜將加速點蝕作用，明確指出生物膜與微生物腐蝕具有重要的協同作用影響。
Laboratory investigation of the microbiologically influenced corrosion (MIC) resistance of a novel Cu-bearing 2205 duplex stainless steel in the presence of an aerobic marine <i>Pseudomonas aeruginosa</i> biofilm	

作者/年分	研究主題與摘要
Xia J. <i>et al.</i> (2015)	研究針對新型含銅 2205 雙相不鏽鋼(2205 Cu-DSS)以及綠膿桿菌(<i>Pseudomonas aeruginosa</i>)之生物膜所導致之微生物腐蝕作用進行觀察。研究發現，2205 Cu-DSS 鋼材對綠膿桿菌生物膜具有良好的耐受性，主要是因為 2205 Cu-DSS 釋放之銅離子，可降低綠膿桿菌之腐蝕，有助減緩微生物腐蝕之發生。
Microbiologically influenced corrosion of 2707 hyper-duplex stainless steel by marine pseudomonas aeruginosa biofilm	
Li, H. <i>et al.</i> (2016)	2707 超雙相不鏽鋼(2707 HDSS)具優異的耐化學腐蝕性，已被用於海洋環境。故於此研究，以綠膿桿菌(<i>Pseudomonas aeruginosa</i>)及 2707 超雙相不鏽鋼之微生物腐蝕行為進行觀察。研究過程發現，綠膿桿菌生物膜下的 Cr 含量降低，培養至第十四天後，最大腐蝕凹恆深度為 0.69μm，顯見即是高耐受性之 2707 超雙相不鏽鋼，仍受到綠膿桿菌的微生物腐蝕作用影響。
Sulfate-reducing bacteria impact on copper corrosion behavior in natural seawater environment	
Khadija E <i>et al.</i> (2016)	研究針對了阿加迪爾沿海四處污染程度不同之海域進行海水採集，進一步觀察不同污染物下，水中硫酸鹽還原菌對銅金屬之腐蝕影響。研究結果顯示，海洋硫酸鹽還原菌的生長周期與細菌代謝所產生的硫和胞外聚合物(EPS)對銅腐蝕速率間，具有相當程度之關聯性，腐蝕速率與浸泡時間有顯著關聯性。

3.3 離岸風機金屬腐蝕及防治

離岸風場之營運規劃多歷時 20 年以上，較陸域風力發電機組面臨的環境更為嚴苛，考量海上維護、營運便利性及維護成本，各組件之防腐防蝕技術與相關監測規劃設計，嚴然成為離岸風機發展的重要環節之一。針對鋼鐵結構物之腐蝕防治，目前以陰極防蝕及防腐塗層法最為常見。

1. 陰極防蝕(Cathodic protection, CP)

陰極防蝕可以「外加電流法」與「犧牲陽極法」兩類進行施作，其技術發展與應用已有百餘年歷史，為金屬構造物在水下與土壤環境中最有效的防蝕方法。其中「犧牲陽極法」選用高活性金屬作為陽極材料，銲接於鋼鐵材料表面，透過陽極金屬將持續消耗形成保護電位差，進而使陰極鋼鐵材料表面達到

防蝕之功效；因防蝕效果安定、施工簡易且維護成本較低等優點，成為臺灣及各國港灣構造物最常採用之防蝕方法。

2. 塗層法(Coating)

陰極防蝕搭配塗料選用，可提升金屬之防蝕保護，塗膜系統須考量其保護性、附著性、可塑性、耐久性等因子，另塗料須配合曝露區域等腐蝕條件，選

擇適當的塗膜系統與工法，分別參照 ISO 20340:2009、NORSOK，M-501 及 ISO 12944 三種規範標準(表 2)，選用目前運用最為廣泛的「環氧樹脂」及「聚氨酯」兩種塗膜系統施行塗裝防蝕工作，另配合適時的維護與品質管制，以減低劣化、機械性損傷、剝落等狀況產生。

表 2 離岸風機塗層技術規範標準

底漆	層數	總乾膜厚度(μm)	規範標準
大氣區			
Ethylene Propylene, EP (環氧樹脂底漆)	3-5	320	EN ISO 12944
Polyurethane, PU (聚氨酯底漆)	2	500	
EP, PU (含鋅)	4-5	320	ISO 20340
EP (含鋅)	≥3	>280	
EP	≥3	>350	—
EP (含鋅)	≥3	>280	NORSOK M-501
EP	≥2	>1000	
飛濺帶與海中帶			
EP (含鋅)	3-5	540	EN ISO 12944
EP, PU	1-3	600	
EP	1	800	
EP (含鋅)	≥3	>450	ISO20340
EP, PU	≥3	>450	—
EP	≥2	>600	—
EP	≥2	≥350 ^a	NORSOK M-501

^a 塗層系統必須與陰極防蝕同時使用。

隨著臺灣逐步邁向離岸風電技術發展，臺灣金屬工業發展中心(2010)，根據實驗室塗鍍測試、海上掛片試驗及海上平臺防蝕作法，將高耐蝕技術轉植

至離岸風機之防蝕運用，針對本土離岸風機防蝕提出相關建議：

1. 離岸風機塔筒外層，建議採用富鋅底漆/環氧雲鐵/脂肪族聚氨酯面漆

。普遍而言，多以環氧富鋅作為底漆，乾膜厚度 $60\mu\text{m}$ ，接續選用環氧雲鐵中間漆，乾膜厚度 $80\mu\text{m}$ ；兩者至少進行雙層塗覆後，再使用環氧面漆進行最外層之塗覆，總乾膜厚度皆達 $300\mu\text{m}$ 以上。若採用玻璃鱗片塗料系統，底漆不宜過厚，建議選用環氧塗料或耐久性更佳的聚矽氧烷塗料塗覆，多層與基材近似平行排列的玻璃鱗片顏料構成的魚鱗效應，可增加腐蝕介質滲透距離，提升防蝕效果。搭配金屬熱噴塗系統可有更長效的防蝕效果。

2. 離岸風機塔筒內壁，因無陽光直射，腐蝕環境相對塔筒外層減弱多，建議採用環氧富鋅及高固成分環氧塗料進行塗覆。
3. 甲板平臺為工作場所，且受海浪沖

刷，故與潮差帶同採環氧玻璃鱗片方案塗覆，如有調色需求，可選用聚氨酯面漆進行面漆調色。

4. 飛濺帶及潮差帶是為防蝕重點區域，採用環氧玻璃鱗片系統，乾膜厚度至少需 $800\mu\text{m}$ 以上。如欲達到 30 年以上之使用壽命，根據現有的海洋平臺方面的經驗，乾膜厚度在 $1500\mu\text{m}$ 為佳，並搭配環氧底漆打底。
5. 浸沒區的海中帶多採聚氨酯塗料塗覆；海泥帶可單純依靠陰極保護，若輔以塗層塗覆，則可延長其防蝕保護時間。

表 3 綜整離岸風機腐蝕區域與其常見之腐蝕型態類型對照表，並列舉對應之防蝕工法，期能作為各暴露區域有效防蝕資訊之參考。

表 3 離岸風機腐蝕區域及對應防蝕工法選用彙整表

大氣區		
腐蝕區域	選用之防蝕工法	腐蝕形式
結構物外部	塗層法	全面腐蝕 沖刷腐蝕 應力腐蝕劣化
結構物內層 (無法控制濕度處)	腐蝕餘裕量	點蝕 全面腐蝕 應力腐蝕劣化
結構物樑柱	腐蝕餘裕量符合 腐蝕速率 $\geq 0.10\text{ mm/年}$	
連結構件與組件 (如：螺栓)	選用不鏽鋼 作為抗腐蝕材料	縫隙腐蝕 點蝕、電偶腐蝕 應力腐蝕劣化

表 3 離岸風機腐蝕區域及對應防蝕工法選用彙整表(續)

飛沫區和潮差區		
結構物外部	塗層法	全面腐蝕 縫隙腐蝕、點蝕 微生物腐蝕
連結構件與組件	塗層法結合腐蝕餘裕量	
連結構件內部	腐蝕餘裕量或塗層法	全面腐蝕 縫隙腐蝕、點蝕
低於平均水位 之結構與組件	陰極防蝕	
低於平均水位 1 公尺 之結構與組件	塗層法	全面腐蝕 微生物腐蝕
低於平均水位之潮差區	陰極防蝕	
浸沒區		
結構物外部	陰極防蝕與塗層法並用	全面腐蝕 沖刷腐蝕 微生物腐蝕
結構物內部	陰極防蝕或腐蝕餘裕量	全面腐蝕 縫隙腐蝕、點蝕 微生物腐蝕
連結構件 和組件	腐蝕餘裕量符合 腐蝕速率≥ 0.10 mm /年 海洋生物作用 須列為腐蝕速率之考慮因 子	全面腐蝕 點蝕 微生物腐蝕 應力腐蝕劣化

3.4 現地防蝕研究與監測

國外離岸風電發展雖早於臺灣，然離岸風電機組“現場防蝕”相關研究仍為數不多。Mühlberg, K. (2010)針對離岸風機設計、製造與塗膜系統進行探討。由於離岸風電機組多以金屬組件配合塗裝進行防蝕，故金屬焊接技術、塗層施作方式及塗料特性、壽命等，皆對離岸風電機組件防蝕成效影響甚鉅。Shi et al. (2011)，觀測風機鋼材(錳矽合

金鋼)使用環氧富鋅塗料後之防蝕效果。觀測發現，鋅腐蝕產物會由塗層向鋼材方向生長，建議鋼材塗裝前，應縮短裸鋼暴露時間，以減低環境腐蝕媒介對鋼材之腐蝕影響。3M Wind Energy (2015)研究指出，風機葉片塗層若出現凹凸坑洞、氣泡等情況，皆會降低塗裝之防蝕能力。風機葉片等組件應適時維護、更換，以延長離岸風機組件於酷寒環境的使用期限。Black (2015) 指出，

多數海洋結構物無人常駐，維修與維護費用偏高，故應針對暴露區域防蝕弱點進行強化，以減低維護成本之損失。Mombe et al. (2015, 2016)觀察低溫北極海域(低溫可達-60°C)有機塗料的塗層附著力、低溫耐受性、塗層累積磨損等防蝕研究。結果顯示，塗層方式及厚度是為抗腐蝕、耐磨損的主要因子。Momber, A. W. (2016)觀測北海及波羅的海海上風機塗層保護與暴露金屬表層劣化情形。研究結果顯示，塗層及暴露金屬表層劣化等損失，主要受機組設計及其部件承載量影響。

依國際可再生能源機構(International Renewable Energy Agency, IRENA)統計，2009~2016年間，離岸風機建構水深約由15m提升至30m，離岸距離則由<30km約提升至45km，由此可知，離岸風機組件之建構水深與離岸距離皆有顯著發展。隨著離岸風機建

造之離岸距離逐漸增加，象徵海上維護成本亦將相對提升，李(2015)等人使用腐蝕監測儀器(ElectraWatch Coating Health Monitor, CHM)進行研究，CHM可藉量測交流阻抗來評估塗層優劣的能力，相對適合用於監測較高阻抗之塗層。實驗結果顯示CHM在準確性、腐蝕環境中的靈敏度與偵測毀損距離上都有相當程度的表現。Martinez et al.(2016)研究指出，透過上離岸風機結構健康監測系統(Structural Health Monitoring System, SHM)的發展與優化，有助於海上風機機組設備資產管理及操作維護，提高機組可用率，減少停機損失，先進的狀態監測系統，可預知設備故障，非破壞檢測系統則可提高維修時效，減低不必要的人力海上定檢的勞動成本與風險。顯見離岸風機監測系統監測品質與建置是為重要技術發之一。

四、結論

綜觀歐洲各國離岸風場開發案例，從風機基礎設計、塔架安裝、工作船隊組合、港埠安排，到整體方案設計規劃，以及風機營運與維護等，各環節皆已累積豐富實績。然臺灣海域之季節性環境條件與地質特性，與歐洲已開發風場條件不盡相同，仍難以直接將經驗複製至臺灣。臺灣2016年10月於竹南外海完成首座離岸風力發電示範機組架設，相較歐洲國家，離岸風電發展尚處於初步階段，除汲取各國政策、設備

技術等發展經驗外，尚需考量全球區域環境差異，因應臺灣抗震、抗颱、防腐蝕及海象條件等需求，發展適宜之防蝕系統評估、規劃與監測之研究，選擇適合之防蝕工法，並發展本土化之防蝕、定檢等相關規範，結合國內業者，共同開發最適合臺灣地理環境的離岸風力機組，加強離岸風電機組運作之安全性、穩定性及耐久性，增加風機之使用壽命並提升其營運效益。

參考文獻

1. Global Wind Energy Council (2017), GWEC Global wind 2017 report, A snapshot of wind markets in 2017 : Offshore wind.
2. 離岸風力發電場址作業申請要點 (2015)。經濟部能源局。
3. 冀樹勇、王天佑、譚志豪，「離岸風機基礎設計實務」，大地工技術，第 142 期，第 17~24 頁，2014。
4. 張欽森、林俶寬、張景程，「離岸風場電場設計技術準則初擬與引用」，中華技術，第 103 期，第 50~61 頁，2014。
5. IEC 61400-3 (2009). International standard wind turbines - part 3: design requirements for offshore wind turbines.
6. 廖學瑞、丁金彪、林俶寬，「離岸風場電場開發之海事工程施工船機與安裝技術初探」，中華技術，第 103 期，第 96~109 頁，2014。
7. 林俶寬、廖學瑞、連永順，「離岸風電專用碼頭規劃研究」，第 37 屆海洋工程研討會論文集，2015。
8. 周建宇，「離岸風力變電站之基礎設計與施工研習」，臺灣電力公司輸工處中區施工處出國報告，2018。
9. 羅俊雄、饒正，「公共工程腐蝕及陰極防護現況探討」，防蝕工程，第 21 卷，第 1 期，第 1~20 頁，2007。
10. 山東奧科防腐，腐蝕與防腐蝕工程技術的定義和分類，取自：<https://kknews.cc/zh-tw/news/ae5nj3x.html>，2017 年 3 月 31 日。
11. Molino, P. J., & Wetherbee, R. (2008). The biology of biofouling diatoms and their role in the development of microbial slimes. *Biofouling*, 24(5), 365-79.
12. Schmidt, D. L., Brady, R. F., Lam, K., Schmidt, D. C., & Chaudhury, M. K. (2004). Contact angle hysteresis, adhesion, and marine biofouling. *Langmuir*, 20, 2830-2836.
13. Wahl, M. (1989). Marine epibiosis. I. Fouling and antifouling: some basic aspects. *Marine Ecology Progress Series*, 58, 175-189.
14. Railkin, A. I. (2004). *Marine biofouling: colonization process and defenses*. London, England: Taylor & Francis.
15. 林維明、饒正、柯正龍、羅建明、張道光、陳正義、李昭明、何木火、王培源、林隆貞、吳建國、黃然、林志洋、邵廣昭、林幸助、蘇易男、李賢華、宋克義、羅俊雄、余宗鴻、王珮文，「港工結構材海生物附著與對策研究」，港灣技術研究所研究報告，2007。
16. Buck, B. H., Krause G., & Rosenthal, H. (2004). Extensive open ocean

- aquaculture development within wind farms in Germany: the prospect of offshore co-management and legal constraints. *Ocean and Coastal Management*, 47(3), 95-122.
17. Larsen, J. H. M., Soerensen, H. Christiansen, C. E., Naef, S., & Volund, P. (2005). Experience from middelgrunden 40 MV offshore wind farm. *Copenhagen Offshore Wind*.
 18. Bergström, L., Kautsky, L., Malm, T., Rosenberg, R., Wahlberg, M., Capetillo, N. A., & Wilhelmsson, D. (2014). Effects of offshore wind farms on marine wildlife - a generalized impact assessment. *Environmental Research Letters*, 9(034012), 12 .
 19. Hal, R. V., Couperus, B., Fassler, S., Gastauer, Griffioen, S. B., Hintzen, Teal, N. L., Keeken, O. V., & Winter, E. (2012). Monitoring- and evaluation program near shore , wind farm. IMARES report.
 20. Gu, J. D. (2009). *Encyclopedia of Microbiology*, United Kingdom, Elsevier.
 21. Seth, J. P., & Rita, F. B. (2017). Corrosion protection systems and fatigue corrosion in offshore wind structures: current status and future perspectives. *Coatings*, 7(2), 25.
 22. 鄢衛東，「關於硫酸還原菌的特性及運用」，環境工程論文，2002，取自 <http://big.hi138.com/gongxue/huanjinggongcheng/200603/58703.sp>
 23. Beech, I. B., Sunny Cheung, C. W., Patrick Chan, C. S., Hill, M. A., Franco, R., & Lino, A. R. (1994). Study of parameters implicated in the biodeterioration of mild steel in the presence of different species of sulphate-reducing bacteria. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 34, 289-303.
 24. Ringas, C., & Robinson, F. P. A. (1988). Corrosion of stainless steel by sulfate-reducing bacteria total immersion test-results. *Corrosion*, 44, 678.
 25. Ringas, C., & Robinson, F. P. A. (1988). Corrosion of stainless steel by sulfate-reducing bacteria electrochemical techniques. *Corrosion*, 44, 386-396.
 26. Little, B. J., Wagner, P., & Jacobus, J. (1988). Impact of sulfate-reducing bacteria on welded copper-nickel seawater piping systems. *Materials Performance*, 27, 57-61.
 27. Little, B. J., Wagner, P., Jacobus, J., & Janus, L. (1989). Evaluation of microbiologically induced corrosion in an estuary. *Estuaries*, 12, 138-41.
 28. Beech, I. B., Sunny Cheung, C. W., Patrick Chan, C. S., Hill, M. A., Franco, R., & Lino, A. R. (1994). Study of parameters implicated in the biodeterioration of mild steel in the presence of different species of sulphate-reducing bacteria.

- International Biodeterioration & Biodegradation, 34, 289-303.
29. Neville, A., & Hodgkiess, T. (2000). Corrosion of stainless steels in marine conditions containing sulphate reducing bacteria. *British Corrosion Journal*, 35, 60-69.
 30. Li, S. Y., Kim, Y. G., Jeon, K. S., Kho, Y. T., & Kang, T. (2001). Microbiologically influenced corrosion of carbon steel exposed to anaerobic soil. *Corrosion*, 57, 815-828.
 31. Geiser, M., Avci, R., & Lewandowski, Z., (2002). Microbially initiated pitting on 316L stainless steel. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 49, 235-243.
 32. Huang, G., Chan, K.Y., & Fang, H. H. P. (2004). Microbiologically induced corrosion of 70Cu-30Ni alloy in anaerobic seawater. *Journal of the Electrochemical Society*, 151, B434.
 33. Rao, T., Kora, A. J., Anupkumar, B., Narasimhan, S., & Feser, R. (2005). Pitting corrosion of titanium by a freshwater strain of sulphate reducing bacteria (*Desulfovibrio vulgaris*). *Corrosion Science*, 47, 1071-1084.
 34. Antony, P. J., Singh Raman, R. K., Mohanram, R., Kumar, P., & Raman, R. (2008). Influence of thermal aging on sulfate-reducing bacteria (SRB)-influenced corrosion behaviour of 2205 duplex stainless steel. *Corrosion Science*, 50, 1858-1864.
 35. Li, J., Yuan, W., & Du, Y. (2010). Biocorrosion characteristics of the copper alloys BFe30-1-1 and HSn70-1AB by SRB using atomic force microscopy and scanning electron microscopy. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 64, 363-370.
 36. Liu, F., Zhang, J., Zhang, S., Duan, J., & Hou, B. (2012). Effect of sulphate reducing bacteria on corrosion of Al-Zn-In-Sn sacrificial anodes in marine sediment. *Materials and Corrosion*, 63(5), 431-437.
 37. Yuan S. J., Liang, B., Zhao Y., & Pehkonen, S. O. (2013). Surface chemistry and corrosion behaviour of 304 stainless steel in simulated seawater containing inorganic sulphide and sulphate-reducing bacteria. *Corrosion Science*, 74, 353-356.
 38. Al Abbas, F. M., Williamson, C., Bhola, S. M., Spear, J. R., Olson, D. L., Mishra, B., & Kakpovbia, A. E. (2013). Influence of sulfate reducing bacterial biofilm on corrosion behavior of low-alloy, high-strength steel (API-5L X80). *International Biodeterioration & Biodegradation*, 78, 34-42.
 39. Machuca, L., Murray, L., Gubner, R., & Bailey, S. (2014). Evaluation of the effects of seawater ingress into 316L

- lined pipes on corrosion performance. *Materials and Corrosion*, 65, 8-17
40. Nalan O. S., Hasan N., & Gönül D. (2014). Microbially influenced corrosion and inhibition of nickel–zinc and nickel–copper coatings by *Pseudomonas aeruginosa*. *Corrosion Science*, 79, 177-183
 41. Javed, M. A., Stoddart, P. R., & Wade, S. A., (2015). Corrosion of carbon steel by sulphate reducing bacteria: initial attachment and the role of ferrous ions. *Corrosion Science*, 93, 48-57.
 42. Zhang, D., Zhou, F., Xiao, K., Cui, T., Qian, H., & Li, X. (2015). Microbially influenced corrosion of 304 stainless steel and titanium by *P. variotii* and *A. Niger* in humid atmosphere. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24, 2688-2698.
 43. Zhang, P., Xu, D., Li, Y., Yang, K., & Gu, T. (2015). Electron mediators accelerate the microbiologically influenced corrosion of 304 stainless steel by the *Desulfovibrio vulgaris* biofilm. *Bioelectrochemistry*, 101, 14-21.
 44. Xia, J., Yang, C., Xu, D., Sun, D., Nan, L., Sun, Z., Li, Q., Gu, T., & Yang, K. (2015). Laboratory investigation of the microbiologically influenced corrosion (MIC) resistance of a novel Cu-bearing 2205 duplex stainless steel in the presence of an aerobic marine *Pseudomonas aeruginosa* biofilm. *Biofouling*, 31, 481-492
 45. Li, H., Zhou, E., Zhang, D., Xu, D., Xia, J., Yang, C., Feng, H., Jiang, Z., Li, X., & Gu, T. (2016). Microbiologically influenced corrosion of 2707 hyper-duplex stainless steel by marine *Pseudomonas aeruginosa* biofilm. *Scientific Reports*, 6, 20190
 46. Khadija E., Shehdeh J., Chaouay A., El Mouaden, K., & Mustaphz H., (2016). Sulfate-reducing bacteria impact on copper corrosion behavior in natural seawater environment. *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, 6(1), 36-46.
 47. 陳桂清、饒正、柯正龍、羅俊雄、翁榮洲、王瑞坤、張英傑、劉益雄、江淑慈，「港灣構造物陰極防蝕準則訂定研究」，交通部運輸研究所，2004。
 48. ISO 20340:2009. Paints and varnishes - Performance requirements for protective paint systems for offshore and related structures.
 49. M-501 Norsok Standard (2012). Surface preparation and protective coating; Standards Norway: Lysaker, Norway.
 50. ISO 12944-5:2007. Paints and varnishes - Corrosion protection of steel structures by protective paint systems - part5: protective paint

- systems; ISO: Geneva, Switzerland.
51. 陳仲宜，「高耐蝕技術在離岸風機應用之發展動向」，ITIS 產業評析，金屬工業發展中心，2010。
 52. DNV-OS-J101 (2014). Design of offshore wind turbine structures; DNV GL-Energy: Arnhem, The Netherlands.
 53. DNV-OS-J201 (2009). Offshore substations for wind farms; DNV GL-Energy: Arnhem, The Netherlands.
 54. Mühlberg, K. (2010). Corrosion protection of offshore wind turbines - a challenge for the steel builder and paint applicator. *Journal of Protective Coatings and Linings*, 27(3), 20-32.
 55. Shi, H., Liu, F., & Han, E. H. (2011). The corrosion behavior of zinc-rich paints on steel: Influence of simulated salts deposition in an offshore atmosphere at the steel/paint interface. *Surface and Coatings Technology*, 205(19), 4532-4539.
 56. Wind Protection Tapes: Wind turbine blade repair: 3M Renewable energy. Available online: [http:// solutions. 3m.com/wps/portal/3M/en_US /Wind /Energy/Products/Wind_Protection_T apes/](http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en_US/Wind/Energy/Products/Wind_Protection_Tapes/) (accessed on 28 September 2016).
 57. Black, A. R., Mathiesen, T., & Hilbert, L. R. (2015). Corrosion protection of offshore wind foundations, NACE International: Houston, TX, USA.
 58. Momber, A. W., Plagemann, P., & Stenzel, V. (2015). Performance and integrity of protective coating systems for offshore wind power structures after three years under offshore site conditions. *Renewable Energy*, 74, 606-617.
 59. Momber, A. W., Irmer, M., & Glück, N. (2016). Performance characteristics of protective coatings under low-temperature offshore conditions. part 1: Experimental set-up and corrosion protection performance. *Cold Regions Science and Technology*. 127, 76-82.
 60. Momber, A. W., Irmer, M., & Glück, N. (2016). Performance characteristics of protective coatings under low-temperature offshore conditions. Part 2: Surface status, hoarfrost accretion and mechanical properties. *Cold Regions Science and Technology*, 127, 109-114.
 61. Momber, A. W., Plagemann, P., & Stenzel, V. (2016). The adhesion of corrosion protection coating systems for offshore wind power constructions after three years under offshore exposure. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 65, 96-101.
 62. Momber, A. W. (2016). Quantitative performance assessment of corrosion protection systems for offshore wind power transmission platforms. *Renewable Energy*, 94, 314-327.
 63. 李忠榮、沈宗翰、鄭錦榮、林輝政、林招松、李岳聯(2015)離岸風機防

蝕塗層性質監測技術之開發及應用
，臺灣風能學術研討會暨 NEP-II
離岸風力及海洋能源主軸中心成果
發表會。

64. Martinez, L.M., Kolios, A. and Wang,
L. (2016) Structural health

monitoring of offshore wind turbines:
A review through the Statistical
Pattern Recognition Paradigm.
Renewable and Sustainable Energy
Reviews, 64, 91-105.