

107-087-7A81
MOTC-IOT-106-H0BB001

離岸風電水下技術研發



交通部運輸研究所
中華民國 107 年 08 月

107-087-7A81
MOTC-IOT-106-H0BB001

離岸風電水下技術研發

著者：朱金元、謝明志、羅建明、王俊欽、溫志中、
林鳳嬌、周偉龍、葉秀貞

交通部運輸研究所

中華民國 107 年 08 月

離岸風電水下技術研發

著 者：朱金元、謝明志、羅建明、王俊欽、溫志中、周偉龍、
林鳳嬌、葉秀貞

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：10548 臺北市敦化北路 240 號

網 址：www.ihmt.gov.tw (中文版 > 中心出版品)

電 話：(04)26587176

出版年月：中華民國 107 年 08 月

印 刷 者：

版(刷)次冊數：初版一刷 60 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所網站

定 價：全套 冊 元

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸資訊組 • 電話：(02)23496880

國家書店松江門市：10485 臺北市中山區松江路 209 號 F1 • 電話：(02) 25180207

五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號 • 電話：(04)22260330

GPN：1010701351 ISBN：978-986-05-6639-0 (全套:平裝)

著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部份內容者，
須徵求交通部運輸研究所書面授權。

離岸風電水下技術研發

交通部運輸研究所

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：離岸風電水下技術研發			
國際標準書號(或叢刊號) ISBN(平裝) 978-986-05-6639-0	政府出版品統一編號 1010701351	運輸研究所出版品編號 107-087-7A81	計畫編號 MOTC-IOT-106-H0BB001
本所主辦單位：港研中心 主管：朱金元代理主任 計畫主持人：朱金元代理主任 研究人員：謝明志、羅建明 聯絡電話：04-26587110 傳真號碼：04-26564418		合作研究單位：弘光科技大學 計畫主持人：王俊欽 研究人員：溫志中、林鳳嬌、周偉龍、葉秀貞 地址：臺中市沙鹿區台灣大道6段1018號 聯絡電話：04-26318652 分機4000	
研究期間 自106年12月至107年06月			
關鍵詞：離岸、風力發電、腐蝕			
<p>摘要：</p> <p>本研究針對國內外離岸風機基樁與金屬構件腐蝕防治技術進行探討，藉以建立本土化基樁及金屬構件之可行性防蝕決策評估，年度內針對國內外離岸風電基樁與金屬構件腐蝕等相關資料進行蒐集及彙整。並於臺中港區及彰化風機預定海域進行水質、底泥等環境調查，於彰化風機預定水域拋放金屬試架進行試驗初探，進而研擬相關金屬材料腐蝕現地暴露試驗與海洋生物附著、腐蝕觀測調查等相關研究規劃。</p> <p>國內外水下腐蝕防治多採用陰極防蝕搭配塗層工法施作，國外離岸風機塗層一般依循ISO 20340:2009 規範施行塗裝，而近年國外研究也顯示，某些海洋附著性生物之生物膜可達抑制腐蝕、保護金屬之作用，故除傳統防蝕工法外，未來亦可輔以相關微生物自然機制進行防蝕處理。另考量水下監測系統觀測品質及生物污損影響，應規劃適宜週期定期維護、檢修。</p> <p>研究發現，冬季臺中海域水質符合乙類水質標準，底泥整體以砂質為主，以次世代定序三個沉降底泥深度(0~10cm, 10~20cm, 30~36cm)的微生物分子序列分析，分別定出112,784、255,400、203,433 條序列，皆有約72%可依分類法辨別至屬，並各鑑別出838、1013和994 個物種，且出現與腐蝕硫酸還原菌同屬的物種，而相鄰深度之菌種較為接近。另春季彰化海域之葉綠素a 濃度大幅提升(1.48~8.29 $\mu\text{g/L}$)，可能是受季節、溫度變化影響，底泥之砂與粉砂不同海域比例變化大。各海域水質、流況及海洋生物物種及密度等，容易受到潮汐、季節、颱風等多重自然因素交互影響，因此應持續進行長期監測，以深入瞭解海域環境特性。</p>			
出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
107年08月	137	150	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
<p>機密等級：</p> <p><input type="checkbox"/>限閱 <input type="checkbox"/>機密 <input type="checkbox"/>極機密 <input type="checkbox"/>絕對機密</p> <p>(解密【限】條件：<input type="checkbox"/>年 月 日解密，<input type="checkbox"/>公布後解密，<input type="checkbox"/>附件抽存後解密， <input type="checkbox"/>工作完成或會議終了時解密，<input type="checkbox"/>另行檢討後辦理解密)</p> <p><input checked="" type="checkbox"/>普通</p>			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

**PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS
INSTITUTE OF TRANSPORTATION
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS**

TITLE: Research and develop underwater technique on offshore wind turbines			
ISBN(OR ISSN) ISBN 978-986-05-6639-0	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010701351	IOT SERIAL NUMBER 107-087-7A81	PROJECT NUMBER MOTC-IOT-106- H1EB024
DIVISION: HARBOR & MARINE TECHNOLOGY CENTER DIVISION CHIEF: Jin-Yuan Jhu PRINCIPAL INVESTIGATOR: Jin-Yuan Jhu PROJECT STAFF: ,Chien-Ming Lo PHONE: +886-4-26587110 FAX: +886-4-26564418			PROJECT PERIOD FROM 12/ 2017 TO 06/2018
RESEARCH AGENCY: Hungkuang University of Science and Technology PRINCIPAL INVESTIGATOR: Chun-Chin Wang PROJECT STAFF: Chih-Chung Wen, Wei-Lung Chou, Feng-Jiau Lin, Hsiu-Chen Yeh ADDRESS: No.1018, Sec. 6, Taiwan Blvd., Shalu Dist., Taichung City 43302, Taiwan (R.O.C.). PHONE: +886-4-26318652			
KEY WORDS: offshore 、 wind turbine 、 corrosion			
<p>This project aims on investigating the metal components corrosion prevention and control technology of the domestic and international offshore wind power piles. It also evaluates the feasibility of foreign technologies in the domestic environment to establish anti-corrosion, planning, and monitoring of localized, offshore piles and metal components. In the first years, we collect the technical documents on prevention and control of underwater corrosion of offshore wind power plants domestically and internationally. In the meantime, the water quality and sediment analysis tests were investigated in coastal areas of Taichung (St1) and Changhua (St2 & St3). The prevention and control of underwater anti-corrosion corrosion are mostly carried out by the cathodic anti-corrosion coating method all over the world.</p> <p>The coating of foreign offshore wind turbines is generally applied according to the ISO 20340:2009 specification. In recent years, studies have shown that the biofilm of marine microorganisms can inhibit corrosion. Protecting the role of metal, in addition to transmitting the anti-corrosion method, in the future, it can be supplemented with the natural mechanism of related microorganisms for anti-corrosion treatment. Considering the quality of the underwater monitoring system and the impact of biofouling, it should be planned to maintain and repair regularly.</p> <p>In the preliminary-selected area of Changhua sea area, the metal frame is dropped for preliminary test. The on-site tests on metal-erosion, biofoulings, and corrosion of metal materials are planned. The water quality was within the Class B standard in winter, the sediment size is dominated by sand, and the microorganisms of sediment were analyzed in St1. The microbial analysis of three sedimentation depths (0~10cm, 10~20cm, 30~36cm) was carried out by the next generation sequencer, and 112784, 255400, 203433 sequences were read, respectively. About 72% of them were discernible to genus by categorization, and each identified 838, 1013, and 994 species, including the presence of the same genus of sulfate-reducing bacteria that were known to corrode metals. The bacteria diversity at adjacent depths is similar. The concentration of chlorophyll a in the sea areas of Changhua increased significantly (1.48~8.29μg/L) in spring, and the reason for it may be affected by seasonal and temperature changes. The proportion of sand and silt in the sediments varies greatly on different sea areas. The water quality, flow condition, marine organism, and density of each sea area is affected by many factors such as tides, seasons, and typhoons. Long-term monitoring should be continued to better understand the environmental characteristics of the sea area.</p>			
DATE OF PUBLICATION Aug, 2018	NUMBER OF PAGES 137	PRICE 150	CLASSIFICATION <input type="checkbox"/> RESTRICTED <input type="checkbox"/> CONFIDENTIAL <input type="checkbox"/> SECRET <input type="checkbox"/> TOP SECRET <input checked="" type="checkbox"/> UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

目 錄

中文摘要	I
英文摘要	II
目 錄	III
圖 目 錄	V
表 目 錄	IX
第一章 前 言	1-1
1.1 計畫目標	1-1
1.2 研究內容及工作項目	1-3
1.3 預期目標	1-4
第二章 離岸風機基樁水下腐蝕防治及監測技術	2-1
2.1 水下腐蝕研究概況	2-2
2.2 腐蝕成因與機制	2-8
2.3 海水腐蝕區域分類	2-11
2.4 水下腐蝕防治	2-14
2.5 水下監測技術	2-23
第三章 離岸風機基樁海洋生物腐蝕影響及防蝕	3-1
3.1 海洋附著生物腐蝕與污損	3-1
3.2 厭氧環境的微生物腐蝕	3-5
3.3 海洋附著生物防蝕與防污技術	3-7
第四章 研究內容與方法	4-1
4.1 研究內容與進行步驟	4-1

4.2 離岸風機基樁防蝕系統規劃.....	4-2
4.3 離岸風機現地腐蝕試驗規劃.....	4-8
第五章 水質與底泥分析調查.....	5-1
5.1 水域調查試驗點.....	5-1
5.2 採樣與分析方法.....	5-3
5.2.1 採樣方法.....	5-3
5.2.2 海域環境測定項目.....	5-4
5.2.3 海洋環境品質標準.....	5-6
5.2.4 底泥微生物分析.....	5-8
5.3 分析結果與討論.....	5-9
5.3.1 海域水質分析.....	5-10
5.3.2 海床底泥分析.....	5-15
5.3.3 底泥微生物分析.....	5-25
第六章 結論與建議.....	6-1
6.1 結論.....	6-1
6.2 建議.....	6-3
第七章 參考文獻.....	7-1
附錄一 期中審查處理情形表.....	附錄 1-1
附錄二 期末審查處理情形表.....	附錄 2-1
附錄三 期末報告簡報資料.....	附錄 3-1

圖 目 錄

圖 2.1	2001~2016 年全球風力發電累計裝置容量變化圖	2-1
圖 2.2	水溶液系統之腐蝕程序示意圖	2-8
圖 2.3	鋼筋腐蝕機理示意圖	2-9
圖 2.4	鋼板在海水中產生之微小腐蝕電池示意圖	2-10
圖 2.5	鋼板樁暴露區域分類與腐蝕速率關係圖	2-11
圖 2.6	離岸風機基座構件示意圖	2-14
圖 2.7	離岸風力機水下基礎結構型式圖	2-15
圖 2.8	外加電流法示意圖	2-17
圖 2.9	犧牲陽極法示意圖	2-17
圖 2.10	2001-2017 年間離岸風機建構水深與離岸距離變化圖	2-25
圖 2.11	風機結構健康監測系統安裝示意圖	2-26
圖 3.1	海洋附著生物群聚消長變化圖	3-2
圖 3.2	離岸風機樁體海洋附著生物依附情況	3-3
圖 3.3	生物附著介面示意圖	3-7
圖 3.4	相對附著力隨表面自由能之變化-- Baier 曲線	3-9
圖 3.5	海洋附著生物脫落方式	3-9
圖 3.6	相對附著力與彈性模量關係圖	3-10
圖 4.1	研究方法及流程圖	4-1
圖 4.2	離岸風電專區發展規劃圖	4-2
圖 4.3	臺中港海氣象觀測樁設計草圖	4-4
圖 4.4	海洋暴露暴露區域示意圖	4-5
圖 4.5	基樁與試架安裝俯視圖	4-7
圖 4.6	金屬試片分佈圖	4-7
圖 4.7	現場觀測系統示意圖	4-8
圖 4.8	現地金屬試架設計圖	4-9
圖 5.1	彰化外海離岸風電風場分佈圖	5-1
圖 5.2	臺中港區採樣位置圖	5-2

圖 5.3	彰化離岸風機場址採樣位置圖.....	5-3
圖 5.4	採樣斷面示意圖.....	5-4
圖 5.5	底泥採樣岩心管.....	5-4
圖 5.6	臺灣沿海海域範圍與海域分類圖.....	5-7
圖 5.7	107 年 1 月 16 日臺中港區採樣情況(St1).....	5-12
圖 5.8	107 年 3 月 2 日彰化離岸風機預定地採樣情況(St2).....	5-13
圖 5.9	107 年 4 月 14 日彰化離岸風機預定地採樣情況(St3).....	5-14
圖 5.10	沉降後底泥深度圖.....	5-15
圖 5.11	St1 40cm 採樣管底泥 5cm 深底泥粒徑分佈曲線及組成百分比	5-16
圖 5.12	St1 40cm 採樣管底泥 20cm 深底泥粒徑分佈曲線及組成百分比	5-16
圖 5.13	St1 60cm 採樣管底泥 5cm 深底泥粒徑分佈曲線及組成百分比	5-16
圖 5.14	St1 60cm 採樣管底泥 15cm 深底泥粒徑分佈曲線及組成百分比	5-17
圖 5.15	St1 60cm 採樣管底泥 25cm 深底泥粒徑分佈曲線及組成百分比	5-17
圖 5.16	St1 60cm 採樣管底泥 35cm 深底泥粒徑分佈曲線及組成百分比	5-17
圖 5.17	St2 40cm 採樣管底泥 5cm 深底泥粒徑分佈曲線及組成百分比	5-19
圖 5.18	St2 40cm 採樣管底泥 20cm 深底泥粒徑分佈曲線及組成百分比	5-19
圖 5.19	St2 60cm 採樣管底泥 5cm 深底泥粒徑分佈曲線及組成百分比	5-19
圖 5.20	St2 60cm 採樣管底泥 15cm 深底泥粒徑分佈曲線及組成百分比	5-20
圖 5.21	St2 60cm 採樣管底泥 25cm 深底泥粒徑分佈曲線及組成百分比	5-20
圖 5.22	St2 60cm 採樣管底泥 35cm 深底泥粒徑分佈曲線及組成百分比	

	5-20
圖 5.23	St2 60cm 採樣管底泥 45cm 深底泥粒徑分佈曲線及組成百分比5-21
圖 5.24	St3 40cm 採樣管底泥 5cm 深底泥粒徑分佈曲線及組成百分比5-21
圖 5.25	St3 40cm 採樣管底泥 15cm 深底泥粒徑分佈曲線及組成百分比5-21
圖 5.26	St3 40cm 採樣管底泥 25cm 深底泥粒徑分佈曲線及組成百分比5-22
圖 5.27	St3 底泥內的底棲生物多毛綱 sp.....	5-24
圖 5.28	底泥採樣管底泥 DNA 樣本分層收集示意圖.....	5-24
圖 5.29	底泥 DNA 萃取實驗進行狀況.....	5-25
圖 5.30	PCR 產物檢視.....	5-28
圖 5.31	Soil1 底泥微生物 DNA 序列各分類位階鑑別結果之比例	5-29
圖 5.32	Soil2 底泥微生物 DNA 序列各分類位階鑑別結果之比例	5-29
圖 5.33	Soil4 底泥微生物 DNA 序列各分類位階鑑別結果之比例	5-30
圖 5.34	底泥微生物 DNA 階層分析圖.....	5-30

表 目 錄

表 2-1	臺灣地區歷年水下腐蝕試驗相關研究歷程表	2-5
表 2-2	海洋環境腐蝕特性表	2-13
表 2-3	陰極防蝕系統選擇表	2-18
表 2-4	鋼板(管)樁在海洋環境中的防蝕方法及防蝕效果之比較表	2-19
表 2-5	離岸風機推薦使用之高耐蝕膜層系統	2-20
表 2-6	離岸風機塗層技術規範標準	2-22
表 2-7	離岸風機塗層系統彙整表	2-23
表 4-1	99-103 年臺中港區板狀金屬試片腐蝕速率彙整表	4-3
表 5-1	水域調查點位資料	5-2
表 5-2	水質檢測項目與方法	5-6
表 5-3	規範 ASTM D2487-92 之土壤粒徑特性分類法	5-6
表 5-4	海域水體分類表	5-7
表 5-5	海洋環境品質標準	5-8
表 5-6	採樣資訊彙整表	5-10
表 5-7	水質分析資料表	5-11
表 5-8	臺中港 St1 底泥粒徑分析結果	5-22
表 5-9	彰化海床 St2 底泥粒徑分析結果	5-23
表 5-10	彰化海床 St3 底泥粒徑分析結果	5-23

第一章 前 言

1.1 計畫目標

本研究整體規劃為期四年，計畫目標針對國內外離岸風機基樁與金屬構件腐蝕防治技術進行探討，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性之防蝕決策。本年度(106年)為第一年計畫執行，重點著墨於國內外離岸風機基樁於「水下腐蝕防治」、「腐蝕防治監測技術」、「海洋附著生物腐蝕作用」及「海洋附著生物防蝕技術」等四大類相關文獻之蒐集與彙整，提供臺灣發展離岸風機基樁防蝕之對策。透過相關資料蒐集並結合本土現有資源，進行離岸風機基樁防蝕系統選擇與現地大氣與水下金屬暴露試驗規劃，同步進行臺中港區及彰化離岸風機預定地之海域水質及底泥分析調查，瞭解區域生物、地質與其化學特性(生地化特性)，規劃選擇本土適宜利用於離岸風電機具之金屬材料、監測儀器，提供相關防蝕對策，利於協助離岸風機相關企業、技術等發展。

臺灣地處亞熱帶太平洋沿岸，雖有著高離岸風力發電潛能，然氣候環境對離岸風機及海上結構物腐蝕構材耐久性影響甚鉅，腐蝕嚴重性更甚於歐洲國家。故當臺灣公共工程建設引用國外大氣腐蝕數據進行腐蝕速率評估與防蝕設計時，常有未及設計年限便已產生銹蝕損壞之情況。有鑑於此，交通部運輸研究所自 2007 年規劃「臺灣地區大氣腐蝕劣化因子調查研究」計畫，長期針對臺灣全島區域進行大氣腐蝕劣化因子調查，完成臺灣大氣腐蝕環境之分類工作，並根據調查結果建立「臺灣腐蝕環境分類資料庫 (ct.ihmt.gov.tw/Atmosphere/ACT.aspx)」，規劃一適合國內環境需求的大氣腐蝕劣化因子查詢系統，相對大氣環境因子，水下腐蝕資料較為缺乏，故本計畫將針對臺中港區及彰化離岸風機預定海域進行水下腐蝕與防治等相關資料蒐集彙整與研究，強化臺灣腐蝕環境分類資料庫，作為日後新建與既有金屬及鋼筋混凝土結構物之防蝕設計與維護管理之依據。

本研究將以金屬防蝕技術為基礎，結合臺中及彰化離岸風機預定海域現場觀測相關成果，研發適合臺灣地區之防蝕工法，做為國內離岸風機基礎結構維護管理、防蝕應用等計畫研擬參考，提供相關單位針對國內離岸風機金屬材料防蝕工法之選用、維管計畫研擬及防災決策支援應用。

1.2 研究內容及工作項目

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，陸續開發陸域風場與離岸風力發電，另於 2015 年 7 月 3 日公告「離岸風力發電場址規劃作業要點」，藉此公布 36 個離岸風機開發潛力場址，使離岸風機後續區塊開發區位逐步明朗。臺灣離岸風力系統設備應以產業特色與發展立基，依臺灣環境條件，如抗震、抗颱、防腐蝕及海象條件作為重點研究考量，規劃關鍵技術之發展。離岸風機裝設位置與離岸的氣候條件、海上結構物的腐蝕防治設計、大氣中高鹽份環境及相關零件、海洋結構物等，皆需面對海洋嚴苛的腐蝕環境的考驗，亦為機組日後運轉維護的重要項目。故本研究將針對腐蝕特性及影響腐蝕速率之環境因素加以探討，期許能對腐蝕控制法及材料選用上有所助益。計畫工作項目如下：

1. 國內外離岸風機基樁水下腐蝕防治及監測技術文獻蒐集與彙整：蒐集國內外離岸風機基樁水下腐蝕防治及監測技術，研發適宜防蝕技術。
2. 國內外離岸風機基樁海洋生物腐蝕影響及防蝕文獻蒐集與彙整：蒐集國內外海洋附著生物對離岸風機基樁腐蝕情況及防蝕相關文獻，提供基樁防蝕對策。
3. 離岸風機基樁防蝕系統選擇與現地大氣與水下暴露試驗規劃與調查：藉由現地大氣與水下金屬暴露試驗，規劃與防蝕系統選擇。
4. 離岸風機基樁海洋附著生物附著暴露試驗規劃與調查：調查附著基樁之海洋附著生物，並規劃常用金屬材料其對基樁之腐蝕及附著影響。
5. 離岸風機基樁現地腐蝕監測試驗規劃：規劃安裝監測儀器或陰極防蝕系統，瞭解金屬材料腐蝕或海洋附著生物造成之影響。
6. 離岸風電現地水質及底泥分析試驗調查。每季調查離岸風場現地水質及底泥分析，瞭解水質及底泥造成基樁腐蝕之影響。

1.3 預期目標

1. 完成國內外離岸風機基樁水下腐蝕防治及監測技術文獻蒐集與彙整。
2. 完成國內外離岸風機基樁海洋附著生物腐蝕影響及防蝕文獻蒐集與彙整。
3. 完成離岸風機基樁防蝕系統選擇與現地大氣與水下金屬暴露試驗規劃。
4. 完成國內外離岸風機基樁海洋附著生物附著暴露試驗規劃。
5. 完成離岸風機基樁現地腐蝕監測試驗規劃。
6. 完成離岸風場現地水質及底泥分析試驗調查。

第二章 離岸風機基樁水下腐蝕防治及監測技術

1981年，丹麥興建了世界第一座離岸風力發電場，並於1991年啟用白令海峽的 Vindeby 風場進行發電，是為全球第一座商用離岸風力發電廠。隨著環境意識提升與風力發電相關技術的進步，歐洲鄰海各國皆陸續發展風力再生能源的相關政策與計畫，其累積裝置容量由2001年的23,900 MW 大幅提升至2016年的486,749 MW。2001~2016年全球風力發電累計裝置容量變化如圖2.1所示。

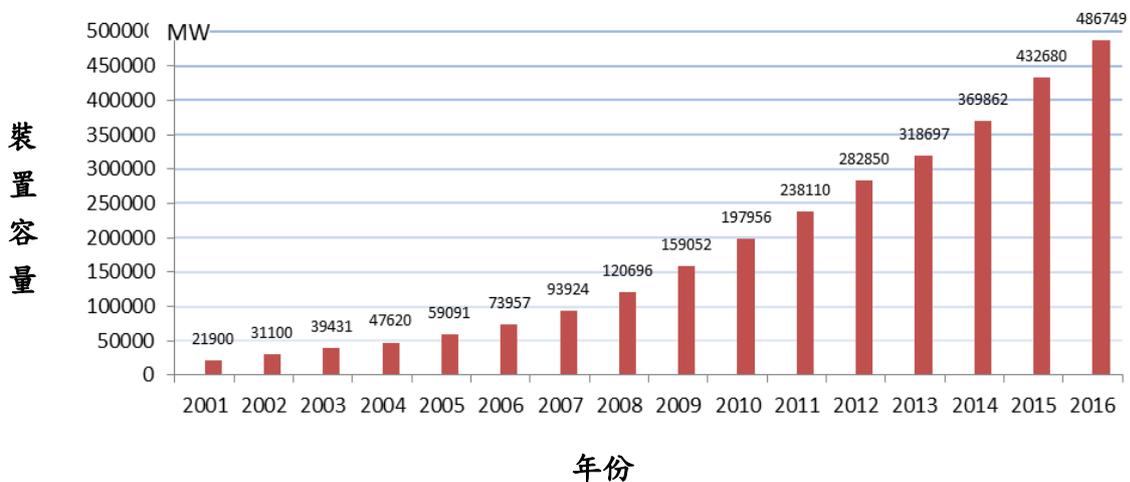


圖 2.1 2001~2016 年全球風力發電(陸域及離岸)累計裝置容量變化圖
(數據來源：Global Wind Energy Council, GWEC)

根據全球風能協會(Global Wind Energy Council, GWEC, <http://gwec.net/global-figures/global-offshore/>)統計顯示，至2016年底，全球離岸風力發電累計裝置量達14,353 MW，其中88%(12,631 MW)裝置量分布於歐洲地區，如北海、愛爾蘭海和波羅的海等地。前三大累計裝置量國，分別為英國(36%)、德國(29%)及中國(11%)。

臺灣位處熱帶與亞熱帶交界處，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高，故環境對離岸風機及海上結構物(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，故需尋找高效耐腐蝕策略，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，增進經濟效益與結構安全，延長機組材料的使用壽命及可靠度。

2.1 水下腐蝕研究概況

鋼材因強度高、美觀、易切割搬運，且結構體具耐震性等多項優點常用於海洋結構物之中^[1]，如：鋼管樁、鋼版樁、型鋼、厚鋼板、拉桿、欄杆、鋼筋及海底管線等，型式眾多。

1986 年，第三屆全國科技會議中，「腐蝕防蝕工程技術」成為國家重點發展科技。對此，各有關單位邀集相關專家學者共同規劃，針對臺灣沿岸港區結構物進行一連串的調查與研究，希冀透過陰極防蝕、防蝕塗料、表面被覆構件之腐蝕偵測技術等作法，研擬有效的防蝕技術。

1986 年 7 月至 1991 年 6 月間，前臺灣省交通處港灣研究所、工業技術研究院、中國鋼鐵公司及中華民國防蝕工程學會等單位，共同合作進行「臺灣海域腐蝕特性防蝕設計、材料選用及開發研究」^[1]，針對基隆、臺中、高雄、花蓮、蘇澳五大港口進行腐蝕環境評估，並透過試架安裝試驗，蒐集五大港區現地資訊，建立腐蝕研究基本能力，提出臺灣結構物防腐蝕設計與材料選用方案。

為確保碼頭營運安全、延長港灣構造物的使用年限，前臺灣省交通處港灣研究所於 1987 年，進行「澎湖跨海大橋腐蝕調查」^[2]，蒐集跨海大橋歷年海況、氣象資料，透過非破壞性試驗，如：保護層厚度、混黏土強度、腐蝕電位測定等多項觀測，交互探討混凝土腐蝕成因。1990 年，「基隆港碼頭鋼板樁腐蝕調查」^[3]，調查基隆港碼頭結構設計、板樁型式、防蝕處理、使用年限、施工等建構基本資料，另針對水下潮差帶與海中帶進行腐蝕觀測，建立腐蝕調查及研究之邏輯，提供國內交通橋樑及主要公共措施定期腐蝕調查與安全評估偵測之參考。

延續上述基隆、臺中、高雄、花蓮、蘇澳五大港口之腐蝕環境評估研究，1991年7月至1994年6月期間，執行「港灣 R.C. 結構物修理系統評估研究」^[4]針對各大港口鋼筋混凝土(Reinforced Concrete, R.C.) 結構物腐蝕進行修復，並持續觀察陰極防蝕與面漆塗裝施工之防蝕效果，作為日後建港、維修之參考。

由早期調查研究發現，各港口鋼板樁碼頭腐蝕狀況差異甚大，因此臺灣省交通處港灣研究所自1989年7月至1993年6月，持續四年進行「港灣鋼結構物耐久性研究」^[5-8]，瞭解港灣鋼結構物於設計使用年限內可安全發揮之功能，建立定期檢查制度，優先考慮裝設適當之防蝕措施，通盤瞭解及建立現有各港口鋼結構物耐久性之完整資料，以利日後新建鋼結構或維修現有鋼結構物之規範。

1995年6月至1996年7月「港灣構造物腐蝕機理與維修防制之研究」^[9]延續港灣鋼結構物之耐久性研究，進行高雄港與基隆港之鋼板(管)樁腐蝕調查，探討水文及海洋附著生物對陰極保護、防污塗料、混凝土、不銹鋼、裸鋼等材料腐蝕之影響。

1995年，「水文及污損生物對材料腐蝕之探討研究」^[10]、1996年至2000年，「現有結構物安全評估及維護研究」^[11-15]、1997年，「高雄港工結構材料海生物附著與對策研究」^[16]以及1999年，「高雄港港工結構腐蝕與海生物附著研究」^[17]調查基隆港、蘇澳港、高雄港區內港工結構材料之海洋附著生物種類，分別探討港灣常用材料，如：碳鋼、混凝土等海洋附著生物與腐蝕情況之影響；以及安裝犧牲陽極材料對於防制海洋生物附著或材料腐蝕效果。

2001年1月至2001年12月，「碼頭鋼板樁現況調查與腐蝕防治研究」^[18]，進行基隆、花蓮、臺中、高雄、蘇澳等五大港口之碼頭鋼板(管)樁調查，藉由對碼頭鋼板(管)樁腐蝕現況之長期監測，提供作為相關本土設計及維護參考資訊，並整理歸納影響鋼板(管)樁腐蝕因子，探討適用於臺灣碼頭鋼板(管)樁腐蝕防治方法。

2014至2015年為建立臺灣地區長期金屬材料水下腐蝕資料庫，本所於基隆港、臺中港、花蓮港、蘇澳港、高雄港、金門港區、馬祖港

區等國內商港安裝水下金屬暴露試驗架，藉以瞭解港區於不同環境、金屬材料、海洋附著生物、海水水質等條件下，水下金屬材料腐蝕之長期觀測與研究。2016年，「金屬材料腐蝕環境調查研究」^[19]，分別於臺中及金門港區進行水下金屬暴露試驗，充實臺灣地區金屬材料水下腐蝕資料庫，做為新建及既有結構物耐久性與防蝕設計及維護管理之參考。

沿岸海港碼頭、鑽油平台、跨海大橋等結構物，皆位處海洋環境之中，然相關腐蝕研究，多針對結構材料組成、使用情況進行安全評估調查與維護討論，除陸續進行維修、腐蝕防治外，研究內容稍有擴及海洋生物附著與腐蝕情況之影響，但仍缺乏全島海域完整的水下腐蝕因子調查與研究，故本計畫將針對水下腐蝕與防治等相關資料蒐集與彙整，強化水下腐蝕與防治資訊，作為日後新建與既有金屬及鋼筋混凝土結構物之防蝕設計與維護管理之依據。臺灣地區歷年水下腐蝕試驗相關研究歷程，如表 2-1。

表 2-1 臺灣地區歷年水下腐蝕試驗相關研究歷程表^[19]

研究期間	研究單位	研究方向	研究說明
1986.07-1991.06	前臺灣省交通處港灣研究所 中國鋼鐵公司 工業技術研究所 中華民國防蝕工程學會	臺灣海域腐蝕特性防蝕設計材料選用及開發特性	海洋結構物與鋼筋混凝土材料於各海域腐蝕特性研究，陰極防蝕工程開發設計、防蝕塗料材料、表面被覆構建測量技術及各種金屬如碳鋼、不鏽鋼、鋁合金等水下腐蝕比較。
1986.07-1991.06	前臺灣省交通處港灣研究所	港灣 R.C 結構物之耐久性研究	針對港灣 R.C 結構物耐久性提供設計與施工規範，提出港灣鋼筋混凝土結構物耐久性研究計畫。
1987.01-1987.12	前臺灣省交通處港灣研究所	澎湖跨海大橋腐蝕問題研究調查	瞭解澎湖跨海大橋腐蝕惡化現象之機理，增進對鋼筋混凝土等營建材料耐久性之認知。
1989.07-1994.06	前臺灣省交通處港灣研究所	港灣鋼結構物耐久性研究	瞭解港灣結構物於設計使用年限可發揮之功能，建立定期檢查制度及防蝕措施選用條件。
1992.07-1993.06	前臺灣省交通處港灣研究所	港灣 R.C 結構物修理系統評估研究	針對各大港口 R.C 結構物進行現況調查，研擬適宜維護方法，並探討其優劣點。
1995.06-1996.07	前臺灣省交通處港灣研究所 國立海洋大學	港灣構造物腐蝕機理與維修防制之研究	延續「港灣鋼結構物之耐久性研究」，進行高雄港與基隆港之鋼板樁腐蝕調查，探討水文及污損生物對陰極保護、防污塗料、混凝土、不鏽鋼、裸鋼等材料腐蝕之影響。
1995.01-1995.12	前臺灣省交通處港灣研究所	水文及污損生物對材料腐蝕之探討研究	調查基隆港碼頭現場試架海洋附著生物種類，並探討材料、水深及污損生物間之關係。
1996.06-2001.07	交通部運研所港灣技術研究中心	現有結構物安全評估及維護研究	調查基隆港、蘇澳港、高雄港區內港工結構材料之海洋附著生物種類，檢討海洋附著生物對港灣常用材料之腐蝕狀況，探討安裝犧牲陽極與其他添加物對防治海洋附著生物腐蝕之效果。

2000.01-2000.12	交通部運研所港灣技術研究中心 國立中山大學	高雄港港工結構材腐蝕與海生物附著研究	調查高雄港區內港工結構材料之海洋附著生物種類，檢討海洋附著生物對港灣常用材料腐蝕狀況，探討安裝犧牲陽極與其他添加物對防治海洋附著生物腐蝕之效果。
2001.01-2001.12	交通部運研所港灣技術研究中心	碼頭鋼板樁現況調查與腐蝕防治研究	進行基隆、花蓮、臺中、高雄、蘇澳等五大港口之碼頭鋼板樁調查，探討適用於本島碼頭鋼板樁腐蝕防治之方法。
2002.01-2002.12	交通部運研所港灣技術研究中心	臺灣五大港區海水水質調查分析	進行基隆、花蓮、臺中、高雄、蘇澳等五大港口碼頭之海水水質調查分析。
2005.01-2008.12	交通部運研所港灣技術研究中心	港灣構造物耐久性與維護機制之研究	澎湖馬公港之鋼管樁碼頭及基隆港鋼板樁碼頭腐蝕現況調查、探討新材料與新施作工法之耐用性，建置鋼板樁碼頭簡易安全檢測系統，進行維護管理系統建置研究。
2006.01-2007.12	交通部運研所港灣技術研究中心	港灣構造物劣損診斷與腐蝕防治之研究	臺中港及基隆港數座碼頭現況調查與資料庫維護，結合港灣工程單價資料庫，整合及驗證建置碼頭本體設施維護管理系統，(三)大氣環境腐蝕因子調查與資料庫建置。
2008.01-2008.12	交通部運研所港灣技術研究中心	高雄港碼頭鋼板樁腐蝕特性研究	瞭解高雄碼頭鋼板樁腐蝕速率與環境因子，如流速、水溫等與腐蝕速率之關係。
2008.01-2009.12	交通部運研所港灣技術研究中心	港灣構造物之現況調查研究	針對蘇澳港、花蓮港、高雄港及臺北港等九座碼頭設施現況調查檢測，以儀器進行非破壞性採樣至室內試驗、進行地震結構安全分析、建立碼頭檢測評估標準作業程序、設施維護補強工法與碼頭維護管理系統等項目。

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。2010年，Mühlberg, K. [20]針對離岸風機設計、製造與塗層系統進行探討。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。

2011年，Momber, A. [21]彙整離岸風機設備(offshore wind energy device, OWEA)腐蝕作用類型，並針對鋼材餘量(steel allowances)、陰極防護、塗裝塗層等防蝕方法進行討論。

2011年，Shi *et al.* [22]，針對風機鋼材(錳矽合金鋼)腐蝕情況進行研究，觀測鋼材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。

2015、2016年，Mombe *et al.* [23-26]觀察低溫北極海域(低溫可達-60°C)六種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。同年，Momber, A. W. [27]針對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進行研究。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。風機葉片等組件應適時維護、更換，以延長離岸風電機組件於酷寒環境的使用期限 [28、29]。Valaker *et al.* [29]研究則指出，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。

2.2 腐蝕成因與機制

金屬構件常因暴露於大氣環境中而發生物質退化，逐步產生腐蝕現象，海水中富含多種鹽類。當金屬或合金結構物置於海水之中，金屬化學活性高低差異將導致腐蝕電流產生，在相對高活性之陽極區產生腐蝕情況。因此，腐蝕須經陽極與陰極反應使電子或離子於電解質中流動轉移，形成一封閉的導電迴路，在任何時間內，兩電極間之電壓差決定其腐蝕電流，其電壓差將隨所產生之電流量及電池運轉時間而變，而漸趨於穩定值，故海水腐蝕是為典型的電化學腐蝕。腐蝕系統程序示意圖，如圖 2.2 所示。

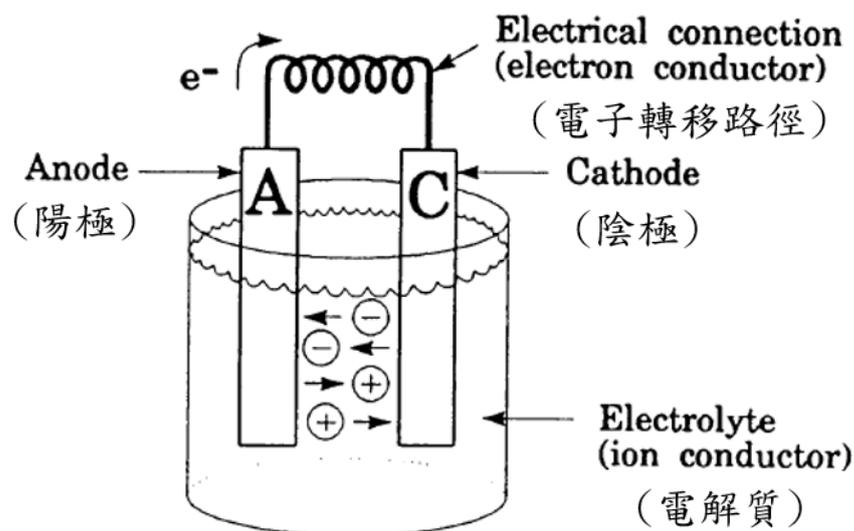


圖 2.2 水溶液系統之腐蝕程序示意圖^[30]

海水中發生腐蝕之電化學反應程序如下：

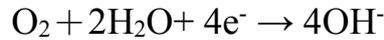
1. 在陽極上：

由於海水為強溶劑，對多數物質均有溶解作用，結晶中之鐵昇華為鐵原子，被取走二個電子而生成二價鐵離子，即：

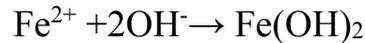


2. 在陰極上：

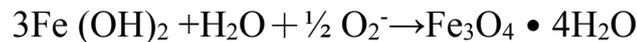
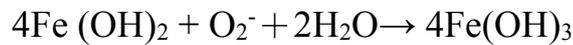
陰極為水還原反應之處，在有氧氣供應之情況下，海水吸收游離之電子作用形成氫氧根離子，即：



氫氧根離子再與鐵離子作用形成氧化鐵，即：



上式為鐵變為氧化鐵，將再次反應產生四氧化三鐵水化物(紅鏽)，即：



由於氧氣之作用可能形成紅棕色 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 鐵鏽，許多常見的變化形態如 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ($\alpha\text{-FeO} \cdot \text{OH}$, Goetwite) 及 r-FeOOH (lepidocrocite)，氧氣供應受限之情況下則可能形成生成物，其鋼筋腐蝕機理示意圖，如圖 2.3 所示。

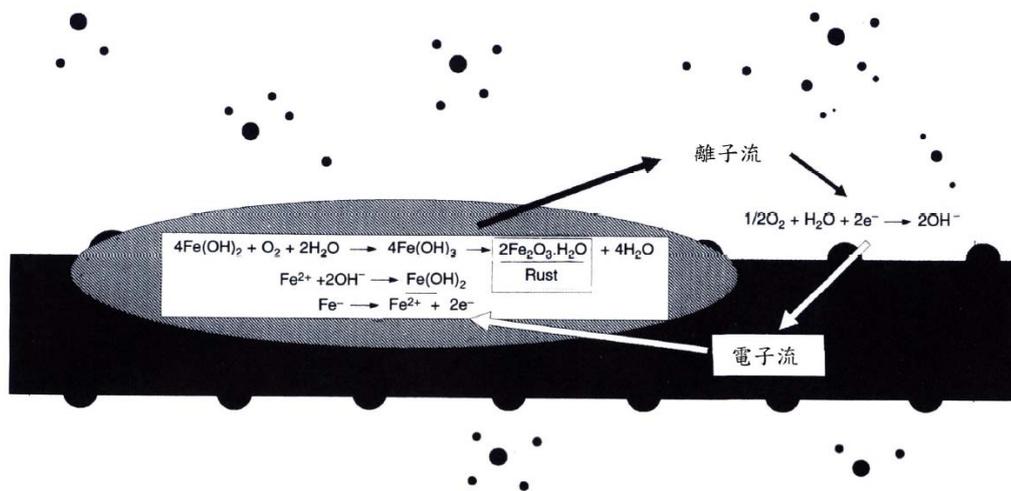


圖 2.3 鋼筋腐蝕機理示意圖^[31]

當金屬材料表面成分及應力等分佈不均、浸漬於海水中時，受海水 pH 值、氯離子含量、溶氧濃度、溫度、流速等因素影響，或埋設於土壤內，受到土壤中含水量、含氧量、氯離子濃度、硫酸根離子濃度等因素之影響，將導致金屬表面同時出現許多高活性陽極區及低活性陰極區，形成無數腐蝕電池(corrosion cell)系統，致使金屬材料產生表面腐蝕現象，如圖 2.4 所示。

腐蝕過程中，這些局部陽極與陰極區可隨意並持續更換位置，使金屬表面產生粗糙度；若局部活性區並未變換位置，則會因局部侵蝕而產生點蝕(Pitting Corrosion)。

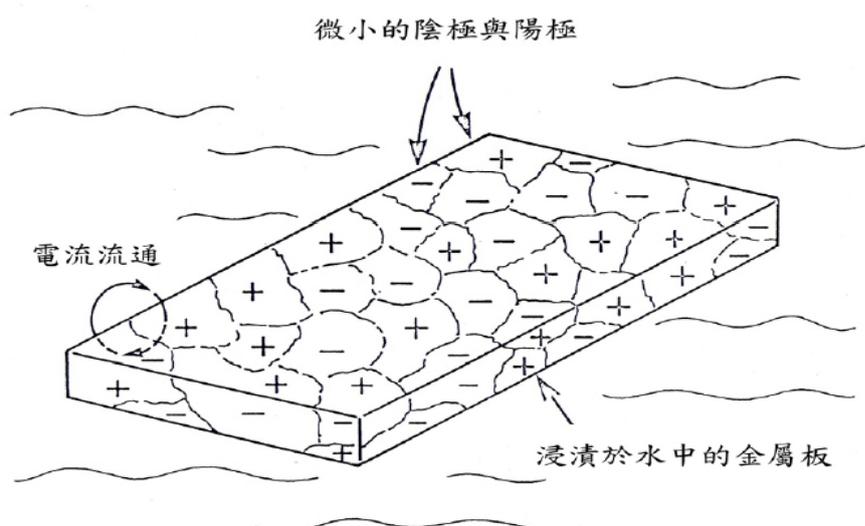


圖 2.4 鋼板在海水中產生之微小腐蝕電池示意圖^[32]

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、沖蝕所致。造成金屬腐蝕環境因素眾多，如：溫度、濕度、土壤、廢氣、海水、化學溶液及流速等。一般而言，溫度愈高時，化學反應之速率愈高，腐蝕也愈快；若濕度偏高，即水氣愈多，其腐蝕亦隨之增加。土壤內含大量水分、有機及無機物質等，故埋於地下之管線易造成嚴重的腐蝕現象。

2.3 海水腐蝕區域分類

海水富含大量氯化鈉、鉀、溴、碘等元素之鹽類；亦溶入氧氣、氯氣與二氧化碳等氣體，故海洋環境成為水上結構物腐蝕性測試最為嚴酷的自然環境之一。經調查研究發現，海洋結構物腐蝕速率與其腐蝕區域具顯著差異。一般海洋接觸環境可分為大氣帶、飛沫帶、感潮帶、海中帶及海泥帶等五大腐蝕區域^[33]，鋼板樁暴露區域與腐蝕速率之關係如圖 2.5 示。

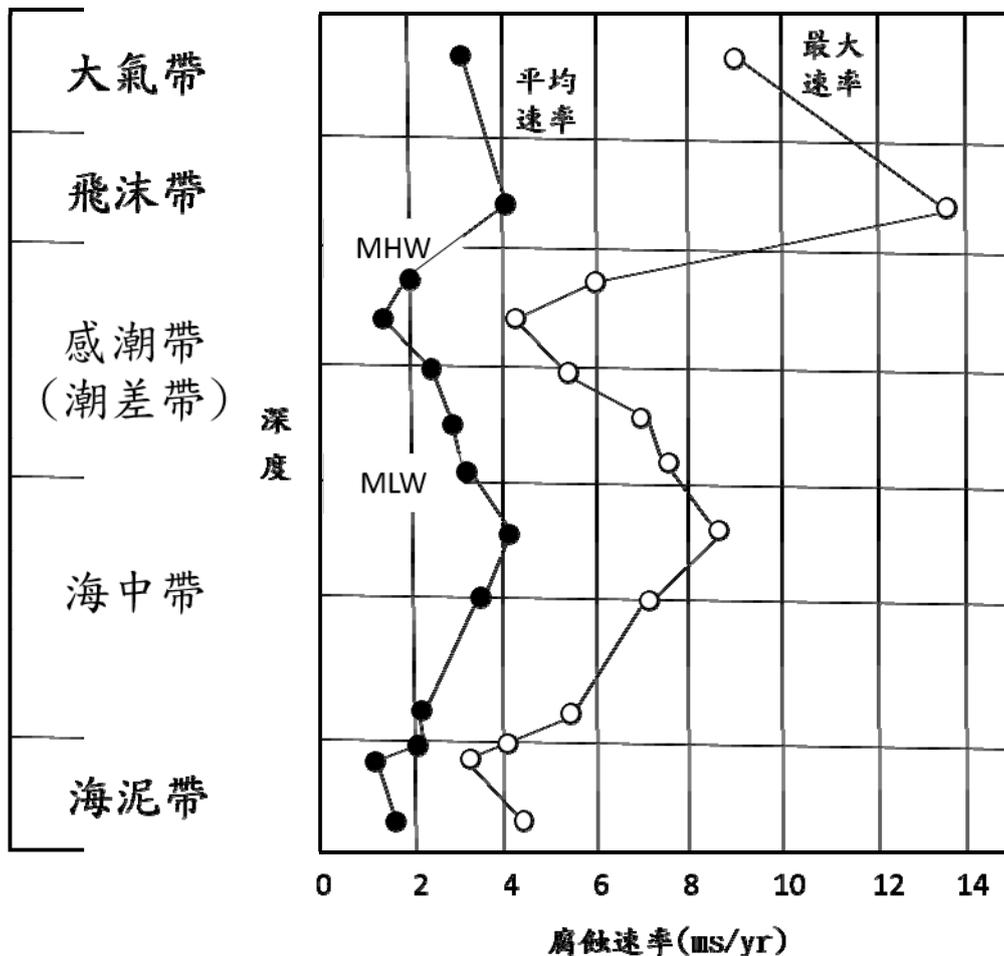


圖 2.5 鋼板樁暴露區域分類與腐蝕速率關係圖^[34]

1. 大氣帶(Atmospheric Zone)：

海洋大氣風機組件無直接與海水接觸，然因大氣紫外線輻照強烈，且金屬材料暴露於高鹽份的大氣環境，溼度與晝夜溫差大，金屬表面易形成電解液薄膜，此電解液膜易結合大氣污染氣體及懸浮微粒等，致使碳鋼材料外表受到侵蝕。

2. 飛沫帶(Splash Zone)：

自平均高潮位以上至大氣帶下方，屬海洋大氣與海水交界面(通常包括塔架下部和部份基礎支撐處)。此區域反覆受到海浪潑濺及日照曝曬，乾濕交替循環加上風浪沖擊，使結構物表面鹽份及氧氣濃度增高，為五暴露區域中腐蝕最嚴重的區域。

3. 潮差帶/感潮帶(Tidal Zone)：

潮差帶介於高低潮位之間，此區結構物周期性浸泡海水並暴露於大氣之中，受到海域潮汐推動與水中結構物的拍擊攪動，使海水溶氧偏高，除鏽蝕現象，在潮差帶緊鄰海中帶處則會形成「氧氣濃淡電池」，進而發生「腐蝕集中」之情況，誘發局部腐蝕破壞等問題，(溶氧量高之感潮帶中可視為一陰極反應面積，腐蝕速率低，而低潮位下約 1 米處之海中帶，溶氧量低，是為陽極反應部位。)受到氧氣濃淡電池作用，相對而言是五個區域中腐蝕速率最為和緩之區段。

4. 海中帶(Full Immersion Zone)：

海中帶總體概括淺水區、陸棚區及深水區等三部分，隨著海水深度增加，壓力、pH 值、鹽度、海洋生物和溶氧量皆有顯著差異，整體而言，腐蝕速度因溶氧隨深度遞減而有所減緩，直至深水區溶氧、水溫與海水流速皆低，腐蝕速度趨平穩。

5. 海泥帶(Mud Zone)：

海泥帶與海水接觸面積較小，腐蝕速率通常因溶氧而隨之降低，但仍須考慮沉積物表層及沉積物中之腐蝕微生物，如有硫化氫(H₂S)或海泥中若有硫酸還原細菌存在，則鋼材腐蝕性增加，腐蝕速率亦隨之提

高。各海洋環境區域腐蝕特性彙整，詳見表 2-2。

表 2-2 海洋環境腐蝕特性表

腐蝕區域	海洋環境特徵	腐蝕特性
大氣帶	風攜帶微細海鹽粒子影響因子包含風速、風向、降雨量、氣溫、日照亮、季節、污染物等	大氣中含高鹽粒子，因溼度及日照溫差變化大，鋼鐵腐蝕速率大
飛沫帶	材料表面受海水衝擊、潮濕、供氧充足	位處平均高潮位以上至海面大氣帶下方，受海水飛濺，乾濕交替錯用，腐蝕情況嚴重，鋼材腐蝕率大
潮差帶	材料週期性浸沒，供氧充足	介於高低潮位之間，發生腐蝕及生物污損，腐蝕效率相對較低
海中帶	影響因子包含鹽度、壓力、溶氧、水溫、海洋生物、細菌等)	介於低潮位下端至海泥帶間，上端邊緣腐蝕速率較大發生腐蝕及海洋附著生物污損，腐蝕效率隨溫度、壓力、深度等因素變化
海泥帶	海床區沒入海底土層部分，腐蝕速率非常小，存在大量厭氧微生物(如硫酸鹽還原菌等)	如含有硫酸還原菌，腐蝕發生機率增加，會發生典型厭氧微生物腐蝕

2.4 水下腐蝕防治

離岸風力機組結構由上到下可分為：轉接段 (Transition piece)、水下結構及基礎(Substructure and Foundation)等三部份，其中轉接段為連接風機塔架與支撐結構與基礎之過渡結構；支撐結構基礎則為轉接段以下，將風機組荷重傳遞至海床的支撐結構，基礎部分則為將支撐結構固定於海床上的地下構造物^[35、36]。離岸風機構件如圖 2.6 所示。

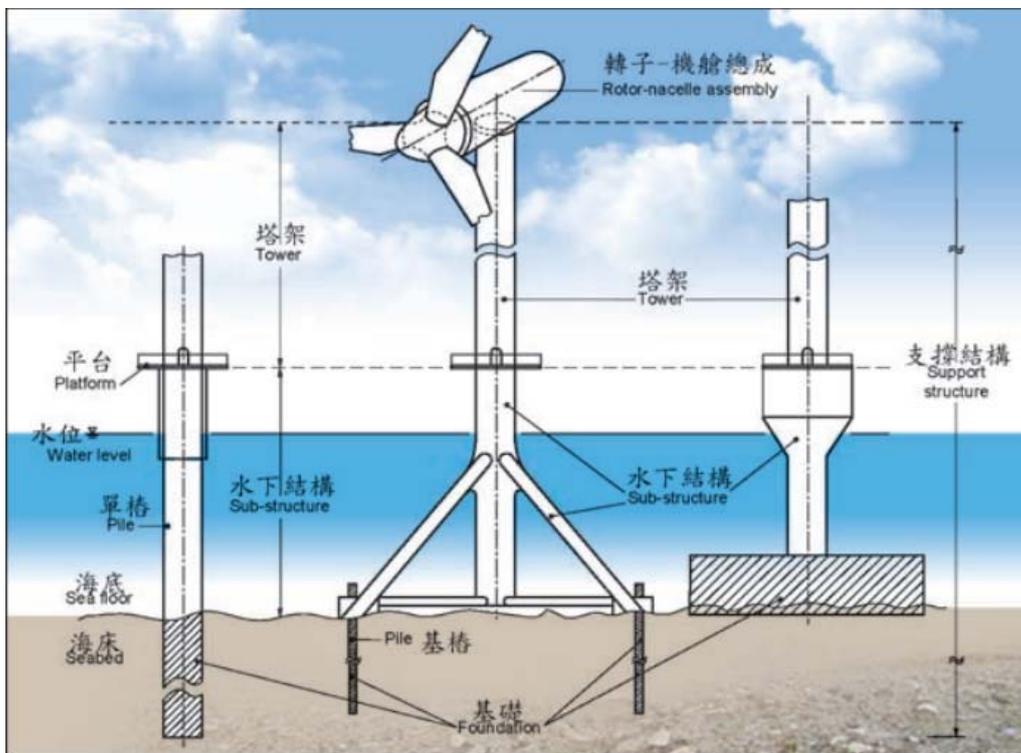


圖 2.6 離岸風機構件示意圖^[37、38]

水下基礎安裝型式可分為著床式基座(fixed foundation)與漂浮式基座(floating foundation)兩大類，其中著床式基座為目前離岸風機基座安裝之主流，透過打樁工程將基座固定於海床上，通常適用於水深 50m 以內之海域。

離岸風場之水下基礎結構多以單樁式(Monopile)、三腳管式(Tripod)、管架式/鼎狀式(Jacket)及重力式(Gravity)四大類為主流，基座

設計上，則視不同水深、洋流、地質條件決定基座之種類與尺寸。離岸風場水下基礎結構型式如所圖 2.7 示。

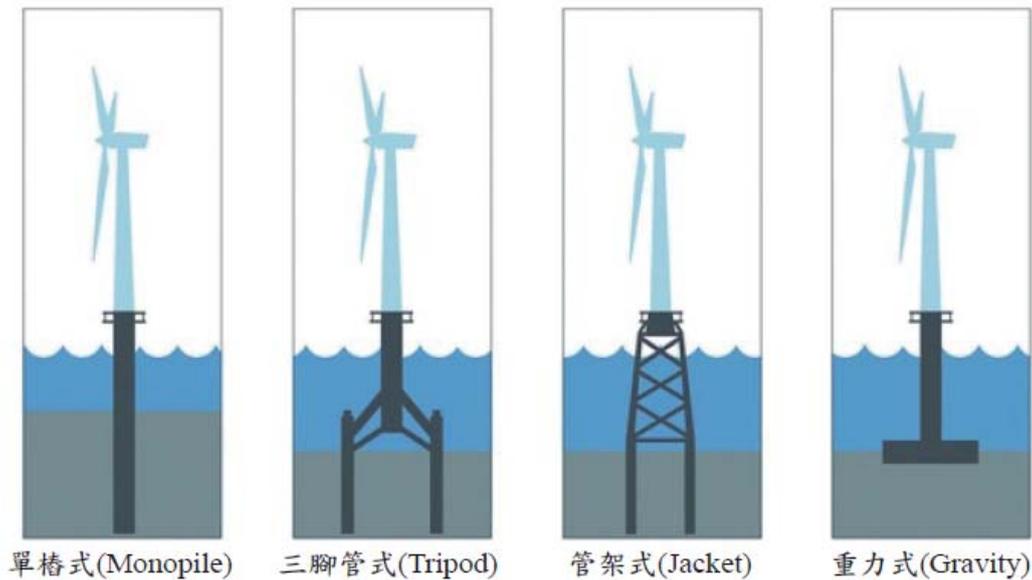


圖 2.7 離岸風力機水下基礎結構型式圖^[39]

1. 單樁式(Monopile)：單樁基座設計簡單、施工容易且成本相對低，於離岸風場相當常見，通常作為位於淺水或中等深度水域離岸風力發電機的下部結構，適合水深 30m 以內、搭載 1-2MW 風力機。
2. 三腳管式/鼎狀式(Tripod)：鼎狀基座是標準的三腳形式，以三支鋼管支撐中間連接風機鋼軸，適合水深介於 25-50m 之間，整體鋼性較單樁式強，側邊穩定度高；但其結構體大，運送較為複雜。
3. 管架式/套筒式(Jacket)：套筒基座概念類似鼎狀式，不同的是省去軸心鋼管的設計，可大量減少鋼材使用，但複雜製程使其成本仍較傳統單樁基座高。可運用於水深 20-50m 間、能搭載 5MW 以上的風力機。
4. 重力式(Gravity)：重力基座承载力大、穩定性佳且不須打樁，適合建置於水深 10m 以內沖刷力低的堅硬岩質地型海域。

以歐洲地區為例，離岸風機水下基礎多採「單樁式」或「套筒式」為主。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；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^[40]。

離岸風力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)

陰極防蝕屬電化學防蝕，係指應用電化學電池原理，將金屬材料表面塑造成陰極環境，以達防蝕之功效；另可分「外加電流法」與「犧牲陽極法」兩類進行施作。

以碼頭鋼板(管)樁為例，「外加電流法」促使陽極放電，電流自陽極經過海水介質到達鋼板管樁表面，再經導線回到電源，如此鋼板(管)樁便可達防蝕功效^[32]，如圖 2.8 所示。

「犧牲陽極法」多選用高活性金屬(如鋅、鋁等作為陽極材料，銲接於鋼板(管)樁上，陽極金屬將被消耗形成保護電位差，致使陰極鋼板(管)樁達防蝕功效，如圖 2.9 所示。上述方法均需介質作為導電回路，須施用於海中帶及海泥帶中。

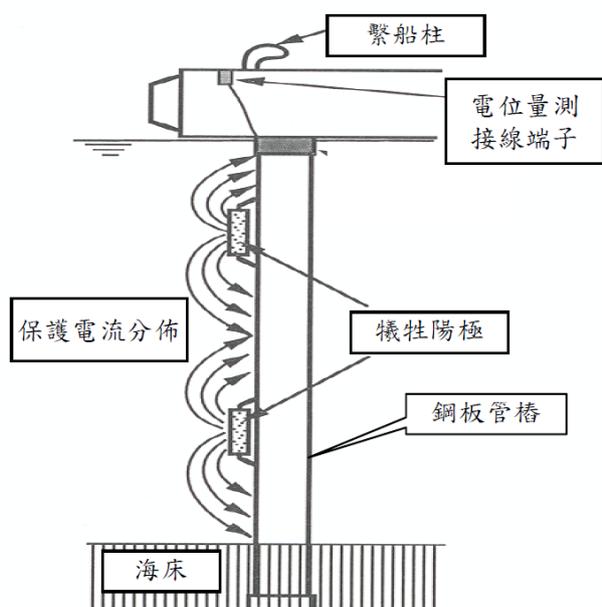


圖 2.8 外加電流法示意圖^[41]

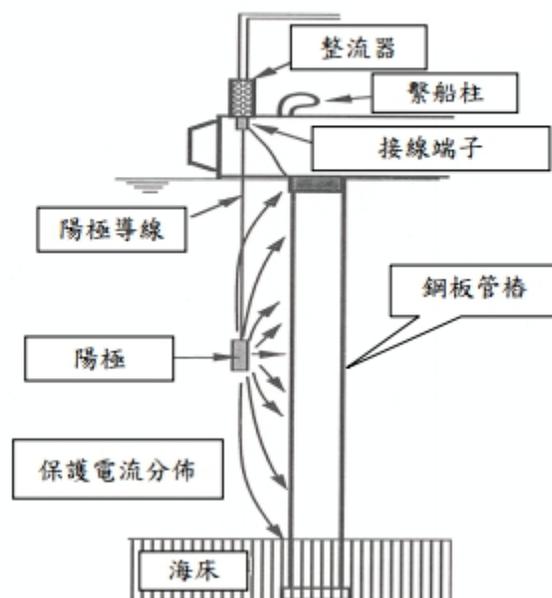


圖 2.9 犧牲陽極法示意圖^[41]

「陰極防蝕」之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，亦獲得聯邦公路管理局 (Federal Highway Administration, FHWA) 評為「唯一能有效抵制混凝土中鋼筋受氯離子侵害之對策」的美稱，是常見且有效的防蝕方法之一。

鎂、鋅、鋁等金屬或合金在工程上常被應用為犧牲陽極的材料。鎂具高活性、低極化之特性，其合金常被應用於土壤或純水等環境中。然鎂陽極於海水環境中，會造成過保護現象，致使防蝕效率與使用年限降低，故不常用於海水環境。鋅，具適中腐蝕電位、低極化、高陽極效率等優點，在陰極防蝕設計上可應用於海洋環境中，純鋅可達到降低極化之目的，已被廣泛應用。

近年來，鋁及其合金亦被發展成為海水環境中「犧牲陽極」之材料。然純鋁在淡水中由於金屬表面薄膜的形成，會使自然電位往正值 (noble) 方向進行，並且產生過度的極化，因此常在合金中添加微量的鋅、汞、銻等元素以保持其活性，使鋁合金電位更負且電流效率更高。再者由於鋁本身低密度、高電價的特性，每單位質量的發生電量大，

故各國港灣構造物之陰極防蝕多採用鋁合金作為陽極^[42]。為因應各式海洋暴露環境之需求，陰極防蝕系統之選用可參照表2-3。

於海水環境進行陰極防蝕，金屬表面將產生鈣質沉澱(Calcareous deposits)，此效應可有效減少陰極保護所需供給之保護電流，及減少犧牲陽極之消耗。然此沉積物生成之影響因素，如水流、溫度、鹽度及海水成分等與期是否能有效抑制因海洋附著生物產生之腐蝕，由於在此方面研究仍較缺乏，故有必要探討其相關性。

表 2-3 陰極防蝕系統選擇表^[42]

環境	環境分析	陰極防蝕系統選擇
大氣帶	構造物完全暴露於大氣中之各種介質，如氣體、日照....等；構造物多處於較乾燥的環境中	<ol style="list-style-type: none"> 1. 鈦網陽極-外覆混凝土 2. 鋅熔射(適用於潮濕環境) 3. 鋅板導電凝膠(適用於乾燥環境)
潮間帶	範圍不僅包含高、低潮位間的潮汐帶，更包括平均高潮位以上至海面大氣帶下端之潮差帶區域；構造物受乾濕循環交替作用	<ol style="list-style-type: none"> 1. 鈦網陽極-外覆保護夾層 2. 鋅熔射(僅適用於潮差帶) 3. 鋅網-外覆保護夾層方式
水下帶	構造物長期浸泡在海中	<ol style="list-style-type: none"> 1. 鋅、鋁塊犧牲陽極式防蝕系統 2. 鈦網陽極-外覆保護夾層 3. 鋅網-外覆保護夾

現今陰極防蝕技術已發展利用於水中、土壤與鋼筋混凝土中，另與塗裝技術結合，以達相輔相成之效果。

2. 防腐塗層法

防腐塗層一般在預製場地先行預製，接續送入噴砂廠區進行表面處理，達到表面粗糙度要求後，再依塗裝設計程式逐次完成設計厚度之底漆、中層漆、面漆噴塗，各層塗料分別採用環氧富鋅底漆、聚醯胺環氧中間漆、聚氨酯面漆等，不同廠商的漆型號各有不同，使用方法、配比亦也有所差異。每一塗層完成，皆須使用測厚儀測量乾膜厚度，並進行附著力試驗，用以驗證設計及噴塗設計之準確性^[43]。以港灣設施為例，鋼板(管)樁結合不同防蝕塗層之防蝕效果，如表2-4所示。

表 2-4 鋼板(管)樁在海洋環境中的防蝕方法及防蝕效果之比較表^[32]

防蝕方法		海洋環境、鋼樁情況及防蝕效果												
		大氣帶		飛沫帶		感潮帶		海中帶		海泥帶		樁型應用		
		新樁	舊樁	新樁	舊樁	新樁	舊樁	新樁	舊樁	新樁	舊樁	鋼管樁	鋼板樁	
												直線型	Z型	
有機 被覆	塗料	◎	◎	○	△	△	△	△	—	△	—	可	可	可
	PE包覆	◎	—	○	△	○	△	○	—	—	—	可	可	可
	PU(聚氨酯)包覆	◎	—	◎	△	◎	△	◎	—	—	—	可	可	可
	水中硬化環氧樹脂	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	—	—	可	可	可
無槽 被覆	水泥包覆	○	○	△	△	△	△	○	—	—	—	可	否	否
	中性石油脂防蝕帶	◎	◎	◎	◎	◎	◎	△	△	—	—	可	否	否
金屬 包覆	不鏽鋼包覆	◎	○	◎	△	◎	—	○	—	—	—	可	可	否
	低合金抗蝕鋼鐵	○	—	○	△	○	—	○	—	○	—	可	可	否
	金屬熔射	◎	◎	○	○	○	△	—	—	—	—	可	可	可
	陰極防蝕	—	—	—	—	○	○	◎	◎	◎	◎	可	可	可

◎：防蝕效果理想；○：施工可行，防蝕效果良好；△：施工困難，防蝕效果不佳；—：超出評估範圍

隨著臺灣逐步邁向離岸風電技術發展，高耐蝕技術亦轉植至離岸風機之防蝕運用。2010年，金屬工業發展中心，根據實驗室塗鍍測試、海上掛片試驗並參考海上平臺防蝕作法，針對離案風機防蝕塗層系統提出相關建議^[44]，如表2-5所示。

表 2-5 離岸風機推薦使用之高耐蝕膜層系統^[44]

離岸風機部位	膜層材料	乾膜厚度(μm)
塔筒外部	環氧富鋅/無機富鋅	60
	環氧雲鐵中間漆	160
	脂肪族聚氨酯/聚矽氧烷	80
	環氧富鋅底漆/環氧底漆	30~50
	環氧玻璃鱗片	200
	脂肪族聚氨酯	80
塔筒內部	環氧富鋅	50
	高固成分環氧塗料	200
	環氧底漆	50
甲板平臺	環氧玻璃鱗片	400
	脂肪族聚氨酯面漆	50
	環氧底漆	50
潮差帶—潮差帶	環氧玻璃鱗片	400
海中帶—海泥帶	環氧底漆	50
	環氧玻璃鱗片	300

針對離岸風機塗層系統建議，文中指出於大氣環境中，如塔筒外壁，可採常用之富鋅底漆/環氧雲鐵/脂肪族聚氨酯面漆。採用玻璃鱗片塗料系統時，底漆不宜過厚，可選用環氧塗料或耐久性更佳的聚矽氧烷塗料。採用金屬熱噴塗系統則可得更為長效的防蝕效果。塔筒內壁不受陽光直射，腐蝕環境相對外壁弱，可採用環氧富鋅及高固成分環氧塗料。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，如需面漆調色，則可以選用聚氨酯面漆。潮差帶及潮差帶為防蝕重點區域，採用環氧玻璃鱗片系統，乾膜厚度至少需 800 μm 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 μm 為佳。由於玻璃鱗片塗料在控制塗膜下的腐蝕蔓延要差一些，因此採用具有良好陰極保護性能的環氧底漆打底，較直接做玻璃鱗片塗料效果更佳。海泥帶，可不作防蝕塗膜，單純依靠陰極保護，亦可兩者相結合使用。

2017年，Seth *et al.*^[45]彙整各國離岸風機塗層技術規範，如表2-6所示。一般而言，離岸風機塗層依循ISO 20340:2009^[46]規範施行塗裝防蝕，另須考量設置環境差異，進而選用不同的塗層材料及技術規範，其中NORSOK，M-501及ISO 20340 亦為重要的塗層技術規範標準。

陰極防蝕搭配塗料選用，可提升金屬之防蝕保護，塗層系統須考量其保護性、附著性、可塑性、耐久性等因子，國外選用之塗層系統如表 2-7 所示。另塗料須選擇適當的塗層系統與工法，並適時進行維護與品質管制，以減低劣化、機械性損傷、剝落等狀況產生。

表 2-6 離岸風機塗層技術規範標準^[45]

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

^a 塗層系統必須與陰極防蝕同時使用。

表 2-7 離岸風機塗層系統彙整表^[45]

大氣帶
乙烯基玻璃鱗片漆 Vinyl system (3-4 層) 雙液型環氧磷酸鋅底漆 Zn phosphate pigmented two-pack epoxy primer (1 層) 雙液型環氧樹脂 Two-pack epoxy (2 層) 無機矽酸鋅底漆 Inorganic zinc silicate primer (1 層)
氯化橡膠漆 Chlorinated rubber system (3-4 層)
海中帶
海中帶以陰極防蝕為主。底漆應選用可與陰極防蝕兼容之塗膜，當使用底漆時，加入陽極處理，可延長使用時間，加長防腐蝕效果。
潮差帶和潮差帶
飛濺和潮差帶使用之塗層與大氣區相似，加厚即可施用於此區。

2.5 水下監測技術

海洋儀器設備是進行海洋調查觀測、科學研究、以及海洋環境保護等活動之重要工具，海洋儀器設備於使用過程中將面對沖刷、振動、碰撞、水壓等物理問題，另需考量環境腐蝕、污染物及生物活動等因素對監測儀器穩定性及準確度所造成之影響。

對海洋監測儀器而言，以海洋附著生物所導致之「生物污損」影響最為嚴重，海洋附著生物附著於監測儀器表面，可能導致儀器性能降低、信號飄移、訊息傳遞失靈等問題，嚴重可能破壞監測儀器結構，縮短使用壽命^[47]。多數水下監測儀器皆須進行定期維護，維護周期一般介於 10~60 天之間^[48]，故儀器維護及其品質穩定度皆直接影響調查或設備施用期間之人力與物力等資源運用及準確度。依據海洋儀器設備設計原理之不同，可簡易分為光學式、電子式、聲學式儀器等不同類型，其生物污損的影響方式及儀器維護方式亦不盡相同，各式儀器污損及維護如表 2-8 所示。

表 2-8 生物污損對各類海洋監測儀器之影響與維護^[49]

儀器種類	代表儀器	偵測原理	生物污損之影響	維護方式
光學式	濃度偵測、葉綠素螢光儀、水下浮游生物影像儀、光合作用測量系統、水下攝影機等。	經不同特徵波長的光激發與光譜檢測。	初期：生物膜阻礙光吸收、散射影響儀器性能。 後期：大型生物附著於表面，嚴重阻礙光信號傳輸，損壞儀器結構。	毛刷機械清除、銅網防護等。
電子式	溫度、電導度、pH計等。	電磁、電阻、電流信號等。	生物活動影響測物質電子信號向偵測器表面擴散。	銅網防護、電解海水等。
聲學式	聲學海流計、超音波式測波儀、聲學督普勒流速剖面儀等。	聲波、脈衝、頻率變化等。	影響聲波傳輸，破壞儀器結構。	超音波殺菌、機械清除。
自動進樣式	營養鹽原位分析儀、海氣二氧化碳測量儀、總磷總氮監測儀等。	自動注射式進樣，內部反應後分析監測。	內部生物附著、繁殖，新陳代謝，影響流路及檢測系統；外部大型生物覆蓋進樣口，間接影響水質。	新型結構設計、流路清洗、紫外線防護。

相較於陸上風電機組，離岸風機場域規劃與建構更為複雜。國際可再生能源機構 (International Renewable Energy Agency, IRENA) 統計彙整2001-2017年間，離岸風機尺寸及其建構水深與離岸距離之變化，如圖2.10所示。離岸風機尺寸以圓點大小表示，隨著離岸風機技術發展逐步成熟，離岸風機的離岸距離逐漸增加，且風機尺寸亦逐漸朝大型化發展，現以4~6MW機組為離岸風機之主流。

圖2.10，由紅至藍的顏色變化，分別代表2001~2015年間之離岸風機建造時間，相對而言，2009年前(偏紅色)，離岸風機建構水深至多為

15m，離岸距離多介於10-30km之間；2016年後，歐洲離岸風機組件建構水深可達29m，離岸距離平均可達44 km^[50]，離岸風機機組尺寸於建置水深、建構之離岸距離皆有顯著發展。

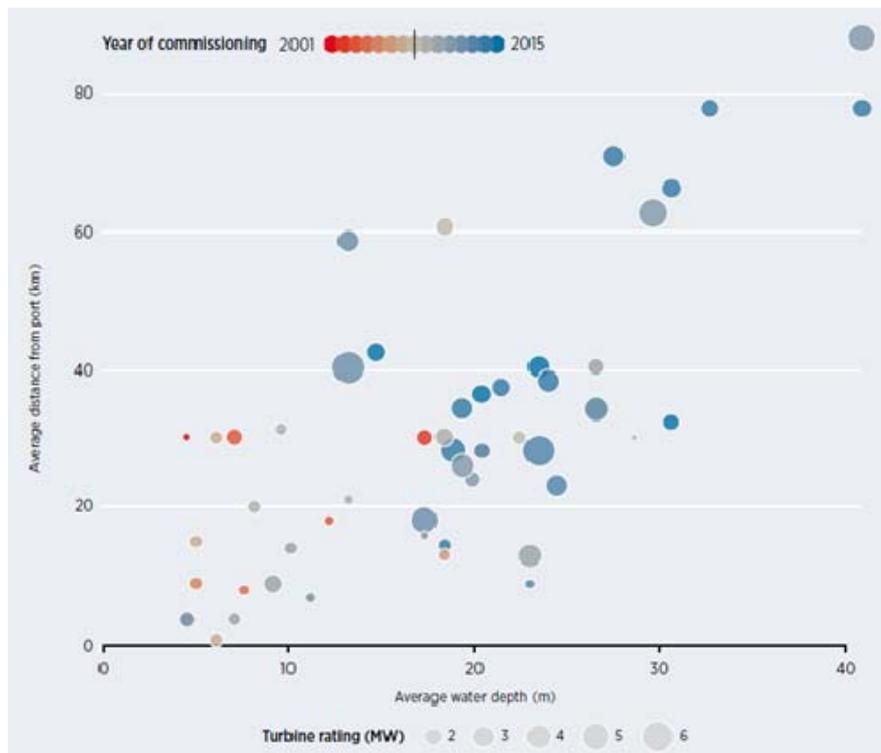


圖 2.10 2001-2017 年間離岸風機建構水深與離岸距離變化圖^[51]

隨著離岸風機建造之離岸距離逐漸增加，象徵著海上維護成本亦將相對提升，2015 年，李等人使用腐蝕監測儀器(ElectraWatch Coating Health Monitor, CHM)進行研究^[52]，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。

2016 年，Wang et al.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^[53]，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，減少停機的損失，透過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^[50]。離岸風機結構健康監測系統安裝示意圖，如圖 2.11 所示。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。

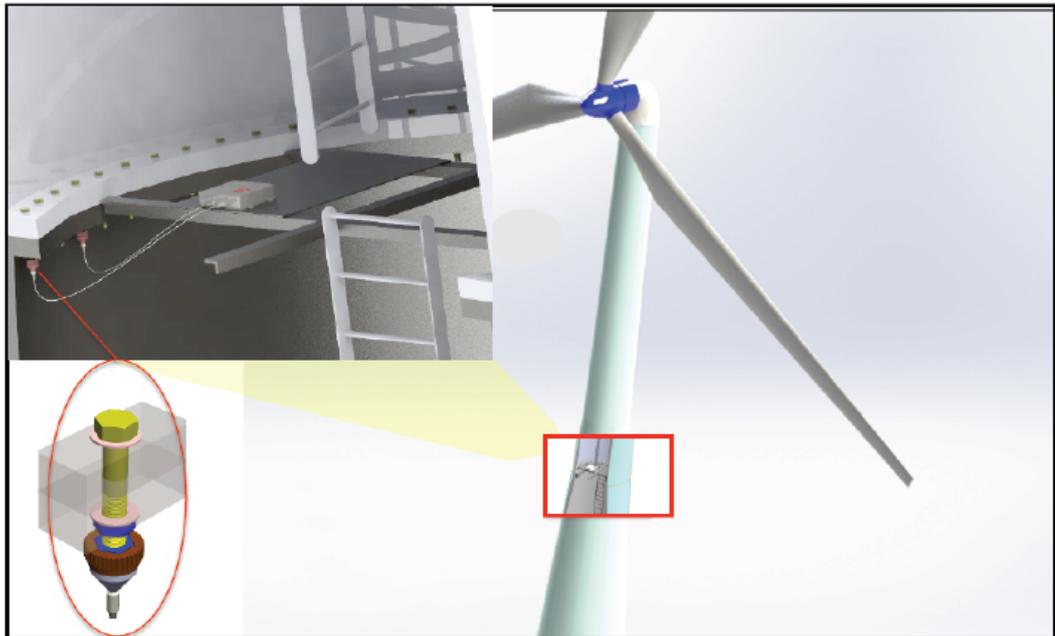


圖 2.11 風機結構健康監測系統安裝示意圖^[41]

第三章 離岸風機基樁海洋生物腐蝕影響及防蝕

海洋生存著多種有機生物體，其生長及附著對水下腐蝕作用有著不可忽視的影響。1940 年代起，英、美、俄、日、等國與大陸地區即有許多相關附著生物與材料侵蝕方面之研究，1970 年代，Frank LaQue 研究金屬於海水中之腐蝕行為，研究發現同種金屬在天然海水中腐蝕速率較於人工海水的腐蝕速率高出許多^[54]，當時即懷疑自然海水中的細菌或微生物，在金屬腐蝕過程，可能扮演著相當重要的角色。

長久以來，細菌、微生物與金屬腐蝕常被視為兩獨立過程。然金屬所在之環境、水溶液的化學性質、溫度、壓力、水流以及金屬本身之化學特性皆決定了細菌或微生物附著至金屬表面之能力。故細菌、微生物腐蝕(Microbiologically Influenced Corrosion, MIC) 被視為一「活參數」，進而影響金屬與周遭環境之電化學行為。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。

3.1 海洋附著生物腐蝕與污損

海洋結構物常因海洋附著生物(fouling organism)導致水下材料及設施加速腐蝕或局部破壞，嚴重則造成毀損，進而影響海洋結構物性能、耐久性與安全性，上述現象即稱之為生物污損(biofouling)^[55,56]。

當海洋結構物建立，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)^[57]，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^[58]，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現象。Wahl (1989)將此過程劃分為四個階段^[59]，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 3.1 所示。

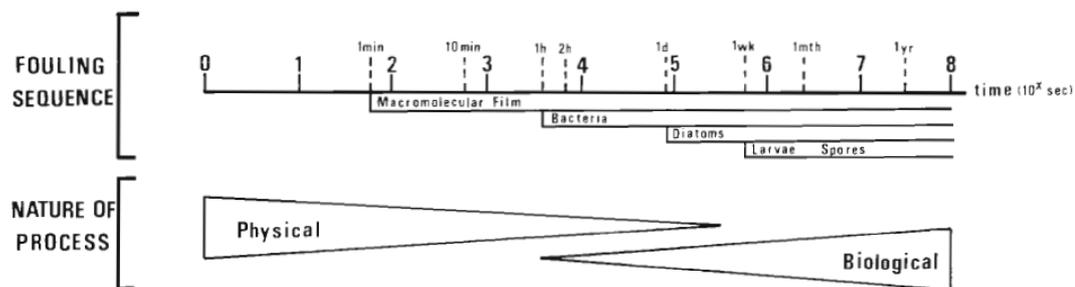


圖 3.1 海洋附著生物群聚消長變化圖^[59]

各類海洋附著生物有著不同生態習性的規律變化，故其海域結構物設計與防蝕對策亦需採取不同的防護措施。臺灣因位處亞熱帶，海洋生物繁殖旺盛，資源豐富，其中包括了多樣性的海洋附著生物；這些海洋附著生物一般附著在海底或岩岸的岩石、漂流木、船殼或其他生物外殼等表面上。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^[60]。

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。故生物污損與海域、季節、溫度及附著生物本身等環境生物因素具密切關係。離岸風機樁體海洋附著生物依附情況如圖3.2所示。

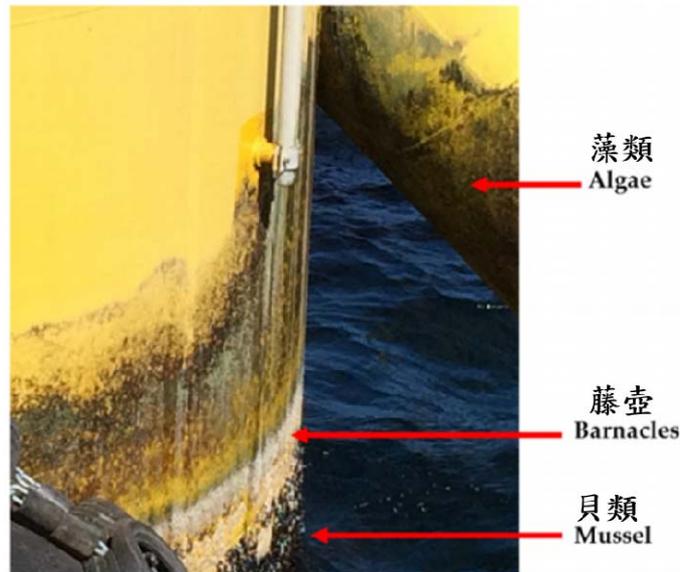


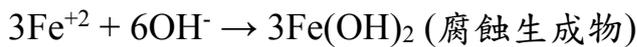
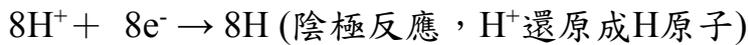
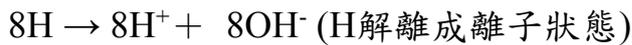
圖 3.2 離岸風機樁體海洋附著生物依附情況^[45]

海洋附著生物附著後，其金屬腐蝕過程如下^[18]：

1. 對陰極或陽極產生去極化作用，影響腐蝕特性或加速腐蝕速率。
2. 由於生物新陳代謝作用或分泌物釋出有機酸液，製造具腐蝕性之環境，鋼材更易與酸性反應，造成嚴重局部孔蝕。孔蝕是一種局部性的腐蝕，會生成小孔而貫穿構件，屬於化學電池或濃淡電池式侵蝕，有時兩者合併發生。除一般鋼鐵外，也常發生在不鏽鋼、鎳合金、銅、鋁及其合金上。
3. 破壞金屬表面鈍態保護膜。
4. 形成金屬表面有氧氣濃淡電池作用。
5. 在金屬表面附近因有硫化物生成，使硫酸還原菌更具腐蝕侵蝕。

硫酸還原菌對鋼材之腐蝕機理如下：(厭氧性細菌)





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，自1981年，海軍海洋測量局便針對左營軍港、高雄及基隆港等海洋附著生物進行附著研究^[61]。1988年，台電調查紀錄南部興達電廠進水涵道，即使採用防污塗料，經半年後仍有藤壺、管棲多毛蟲、苔蘚蟲等海洋附著生物附著^[62]。其餘各大港口，如基隆港、蘇澳港、臺中港、高雄港等皆有相關調查報告^[10,16,17,19,63,64]。海洋附著生物種類與分布受其週邊環境因子變遷不停改變，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^[65]。此外亦須考量季節性消長與生物群特徵等相關影響，故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。

目前離岸風電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^[66-69]，關於海洋附著生物對離岸風機機組之腐蝕研究則仍闕如。

3.2 厭氧環境的微生物腐蝕

微生物腐蝕(Microbiologically Influenced Corrosion, MIC)是指由於微生物的影響可能發生的各種材料腐蝕^[70]，腐蝕與碳、氮、鐵、硫等元素循環息息相關，腐蝕微生物多為環境中鐵、硫循環的參與者，根據細菌種類及作用可分類如下^[71]：

1. 硫酸鹽還原菌(sulfate-reducing bacteria, SRB)
2. 硫氧化菌(Sulfur-oxidizing bacteria, SOB)
3. 產酸菌(Acid-producing bacteria, APB)
4. 鐵氧化菌(Iron-oxidizing bacteria, IOB)
5. 鐵還原菌(Iron-reducing bacteria, IRB)
6. 硝酸鹽還原菌(Nitrate-reducing bacteria, NRB)
7. 產黏液菌(Slime-forming bacteria, SFB)

硫酸鹽還原菌(sulphate-reducing bacteria, SRB)生長能力強、生存環境廣泛，是引起鋼鐵、金屬等材料腐蝕的重要原因之一^[72]，於深海厭氧環境下，更是扮演腐蝕的主導地位。1994-2016年間，多篇研究顯示，SRB 對碳鋼^[72-76]、不鏽鋼^[77-86]、銅合金^[87-91]、鎳合金^[91,93]、鈦^[82,94]等多種金屬，皆會造成局部腐蝕。

SRB 利用硫酸鹽(sulfate)作為最終的電子接受者，進而產生大量硫化物(sulfides)，這些硫化物可將金屬的陽極去極化產生硫化鐵(iron sulfide)沉積在陽極表面。由於陽極去極化的過程，在陰極表面產生的氫氣會被 SRB 消耗，加速陰極去極化，造成金屬腐蝕，亦對部分非金屬材料產生降解作用，所造成之腐蝕作用對經濟的衝擊亦相當大^[71]。

2013年，Yuan et al.^[95]探究海水培養基中 SRB 以及 SRB 代謝產物與無機硫化物對 304 不鏽鋼的腐蝕對照，發現 SRB 所產生的硫化物對

304 不鏽鋼有較顯著的腐蝕現象，且 SRB 所產生的生物膜，亦會促進不鏽鋼表面之腐蝕作用。

2012 年，Liu *et al.*^[96]發現 SRB 對海洋沉積層 Al-Zn-In-Sn 犧牲陰極造成點蝕。材料腐蝕速率隨 SRB 的生長而加速。由於陰極氫的消耗，導致陰極去極化，進而加速金屬材料之腐蝕速率。對於耐腐蝕性佳的 2205 雙相不鏽鋼，SRB 也造成其表面明顯的點蝕並形成 Cr₂O₃、FeS、FeS₂、Fe(OH)₂ 和 FeO 等腐蝕產物。

多數 SRB 為厭氧菌，但已有研究顯示，SRB 並非嚴格的絕對厭氧菌，有些屬能耐受低濃度的氧氣，並可於低濃度氧氣中生長^[97-99]，但整體而言，SRB 對氧仍是相當敏感，故於研究培養及檢測技術上仍須採用嚴格的厭氧技術。現 SRB 檢測主要依據中國石油天然氣總公司行業標準 SY/T5329294 「碎屑岩油藏注水水質推薦指標及分析方法」進行分析。將欲測定水樣使用無菌注射器注入測試瓶中接種稀釋，接續送入研究室進行細菌培養，根據細菌瓶陽性反應與稀釋倍數計算出水樣中的細菌數目^[100]。結合異硫氰酸鹽螢光素(fluorescein isothiocyanate, FITC)和間接螢光抗體技術(indirect fluorescence assay, IFA)，即可定量檢測細菌總數與 SRB 含量^[101]。

為免除傳統檢測培養之繁瑣流程，SRB 直接測定法亦衍生而出。如：李婉義利用「三碘化亞甲基藍法」^[101]，進行 SRB 之代謝產物定量；王佳等人發明了「SRB 傳感器」，可原位現地藉測定海水中 SRB 含量^[103]；Odom *et al.*曾利用「免疫測定法」檢測 SRB 數量^[104]，美國 Conoco 公司以此原理開發出 SRB 快速檢測系統^[104]，此法對 SRB 具有專一性，檢測快速可靠；「螢光原位雜交法(fluorescence *in situ* hybridization, FISH)」，不依賴微生物培養^[104、106]，即能檢測出比傳統培養法更多的 SRB 種類與數量，其分析結果具良好重覆性；馬放等發明了 SRB 倍比稀釋的「PCR 快速定量檢測法」^[108]，Ben-Dov 等利用即時 PCR 技術，引入螢光標記分子，使 PCR 於反應中產生螢光信號，針對信號進行即時檢測，故「即時 PCR 法」^[109]是為環境微生物定量高靈敏度之方法。

3.3 海洋附著生物防蝕與防污技術

早期多以經濟利益觀點處理生物污損問題，廣泛採用毒料滲出型的防生物附著塗料，透過塗附塗料毒素逐漸向海水擴散，維持漆膜表面毒料濃度，以達防止海洋污損生物附著之目的^[109,110]，如：氧化亞銅防生物附著塗料^[109-113]。然此類型塗料存在著毒素滲出率不穩定、及表面粗糙等缺點^[111-115]。70 年代歐洲發展出有機錫自拋光型防生物附著塗料^[55,58,113,114,116]此類型塗料浸於海水時，會發生水解反應，在水流的作用下漆膜持續釋放出有機錫於新的表面再溶於海水中，由於塗膜凹處，水流作用小而水解速度慢，導致塗膜日趨光滑，其有機錫滲出率非常平穩，作用時間更長、維修簡便^[115]。然而有機錫的溶出卻對海洋生物的生長和繁殖產生嚴重影響因而危害海洋生態環境。以生態環境永續之觀點來看，已不容許劇毒化學漆料之使用^[58,117]，故聯合國於 1994 年發表「21 世紀宣言」，明確提出發展無公害的海洋防腐蝕和防生物附著技術^[117]，希望在防生物污損之餘亦同時降低對海域生態環境影響^[55,117,119,121]。

海洋附著生物附著過程同時受到物理及生化機制影響，物理機制受到水流、流速等因素影響；生化機制則指其聚合物分泌與依附作用。生物附著過程是由污損生物、黏液以及各代謝產物組成的“混凝土”式的黏液與物體表面的膠結之過程，生物附著介面示意圖，如圖 3.3 所示。

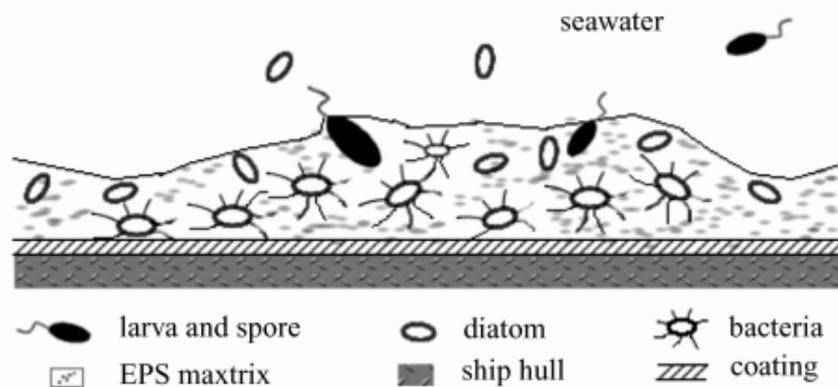


圖 3.3 生物附著介面示意圖^[122]

防污技術正朝著無毒、環保、長效、功能化等綜合性技術發展，先進防生物附著塗料不採用生物殺菌劑，而是特過透過調節材料表面機能、粗糙度等物理特徵即可間接抑制或延緩後續的海洋附著生物發展。簡易而言，防污塗料依其原理可分為物理性、機械性及化學性三大類：

1. 物理性防治生物污損塗料主要原理為使用有機矽或鐵氟龍等低表面張力之聚合物當作防污塗料，形成光滑表面，使水中生物不易附著^[122-126]。
2. 機械防治生物污損塗料係以鋅、鋁等微溶之金屬、金屬氧化物或金屬鹽等，混合於塗料中，微溶性塗料使塗層不斷地剝落，海洋附著生物也會跟著塗層一起剝落，以達防治生物污損之效果^[128]。
3. 化學性防治生物污損塗料是使用由海綿或珊瑚等天然生物所萃取出具有防止生物附著效能之脂肪酸^[129]，或者使用酸性化學物質，利用一般附著性生物不易生存於酸性物質表面之特徵，而達到防污之效果^[130]。

理想的海洋防污塗料應該對植物和動物性海洋附著生物有防腐作用，並有較長的防污期效^[131]。防污塗料表面工程之影響因子如下：

- (1) 表面能：表面能是影響防污塗料性能的重要因素，由圖 3.4，Baier 曲線^[132]可知，污損生物附著力於隨表面自由能的降低先減小再增加的變化趨勢，於表面能 23-25mJ/m² 時附著力最低，維持此區間表面能，可降低生物附著量，相對提高防污效果。

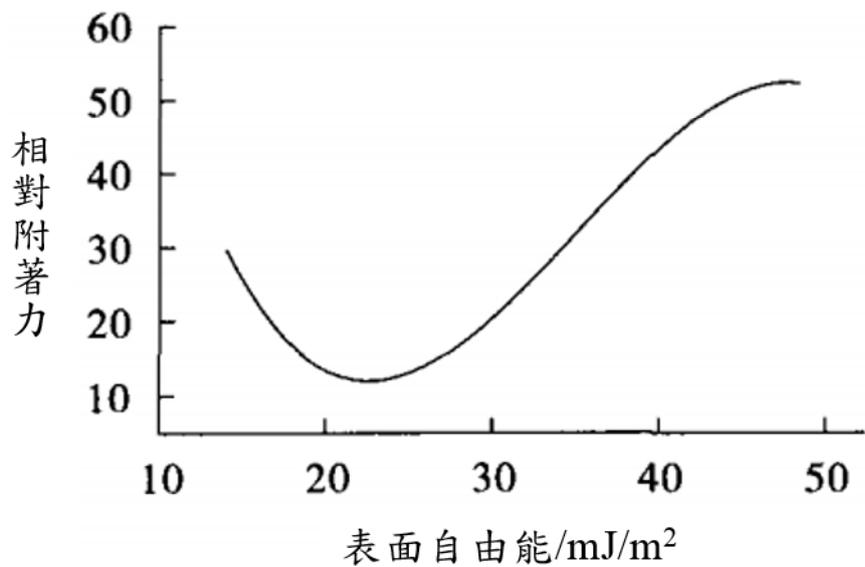


圖 3.4 相對附着力隨表面自由能之變化-- Baier 曲線^[132、133]

(2) 彈性模量：彈性模量影響污損生物從塗層脫落之方式，海洋附著生物脫落方式包含撥離、平面剪切及非平面剪切，如圖 3.5 所示，其中撥離脫落所需能量最小。

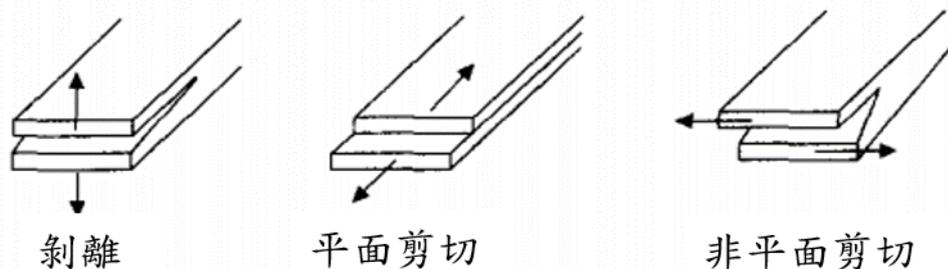


圖 3.5 海洋附著生物脫落方式^[133]

污損生物剝離所需的功為表面張力(γ) 和彈性模量(E) 乘積的 $1/2$ 次方^[131、134]，即 $W = \sqrt{\gamma \cdot E}$ 。彈性模量低的塗層，海洋附著生物可在較小的外力下被剝除。相對附着力與彈性關係，如圖 3.6 所示。

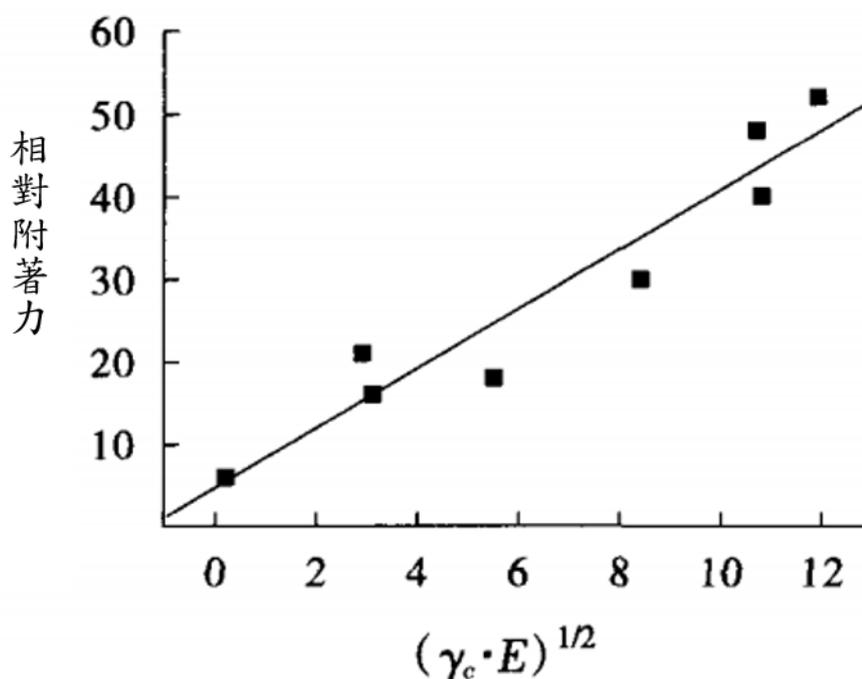


圖 3.6 相對附著力與彈性模量關係圖^[133]

- (3) 塗層光滑度：塗層表面越光滑，摩擦阻力越小，海洋附著生物越不易附著，故光滑性塗料亦同時可延長塗料的壽命與清潔週期^[131]。
- (4) 塗層疏水性：疏水性由表面化學組成和微觀形貌共同決定，其防污塗料有較明顯的防污效果，目前已有研究將超疏水性(表面與水的接觸角大於 150°) 的表面應用於海洋防污^[131]。
- (5) 塗層 pH 值：海洋附著生物適宜 pH 環境介於 7.5-8.0 間，故若塗層與海水 pH 值相差越大，海洋附著生物將越不易附著。如矽酸鹽防污塗料便可於船體表面形成長期穩定之高鹼性塗層，以達防污之目標^[131]。

生物膜的形成和生長往往引發微生物腐蝕，進而加速金屬的腐蝕過程，傳統防治方法的多利用重金屬或揮發性有機物之塗料用以作為防腐蝕材料之途，其塗料雖具良好防腐效果且易於運用，然同時亦具有為害人體健康與環境污染之潛在風險。1891 年，Garrett 發表了第一

篇關於微生物腐蝕之文章^[135]；其後，多數研究人員主要致力於微生物腐蝕機制及其控制方法研究^[135-138]。然而近年來新的研究發現，某些生物膜不僅沒有加劇金屬的腐蝕，反而起到了抑制腐蝕、保護金屬之作用^[139]。

2008 年，Stadler *et al.* 研究發現，細菌分泌的胞外聚合物 (extracellular polymeric substances, EPS) 中含有葡聚糖，可防止金屬腐蝕，並通過實驗驗證 *Desulfovibrio vulgaris* 之 EPS 能透過抑制微生物附著和生物膜消耗氧氣兩方面作用來抑制低碳鋼之腐蝕^[140]。同年，Molino *et al.* 歸納整理近 40 篇金屬塗層研究結果，皆顯示矽藻 (Diatoms) 分泌之生物膜，可有效降低其微生物附著量^[141]。2010 年，Roux *et al.* 研究發現，胞外多糖 EPS180 對混凝土中鋼筋腐蝕之影響，結果顯示於在水泥中添加 EPS180 後，鋼筋抗腐蝕性能增強^[142]。2011 年，Finkenstadt *et al.* 研究發現，經處理後 *Leuconostoc mesenteroides* 之 EPS 對低碳鋼具有保護作用^[143]。同年，Dong *et al.* 研究提出：由嗜熱硫酸鹽還原菌分泌之 EPS 吸附在碳鋼表面，可減緩腐蝕作用之發生^[144]。故未來除傳統塗裝與殺菌，亦可考慮輔以相關微生物自然機制進行防蝕處理。

第四章 研究內容與方法

4.1 研究內容與進行步驟

本計畫研究範圍與對象為臺灣具開發離岸風力發電潛力之鄰近場域，依臺灣環境與海象條件作為研究考量，參考國內外相關文獻與調查報告後，依計畫內容與實際需求擬訂適當之調查方法與試驗，於臺中港區進行離岸風機基樁及金屬試片水下暴露試驗，定期觀測紀錄基樁與金屬材料試片之暴露情況，藉以提升結構物耐久性、防蝕設計與建立，計畫作業流程，如圖4.1所示。

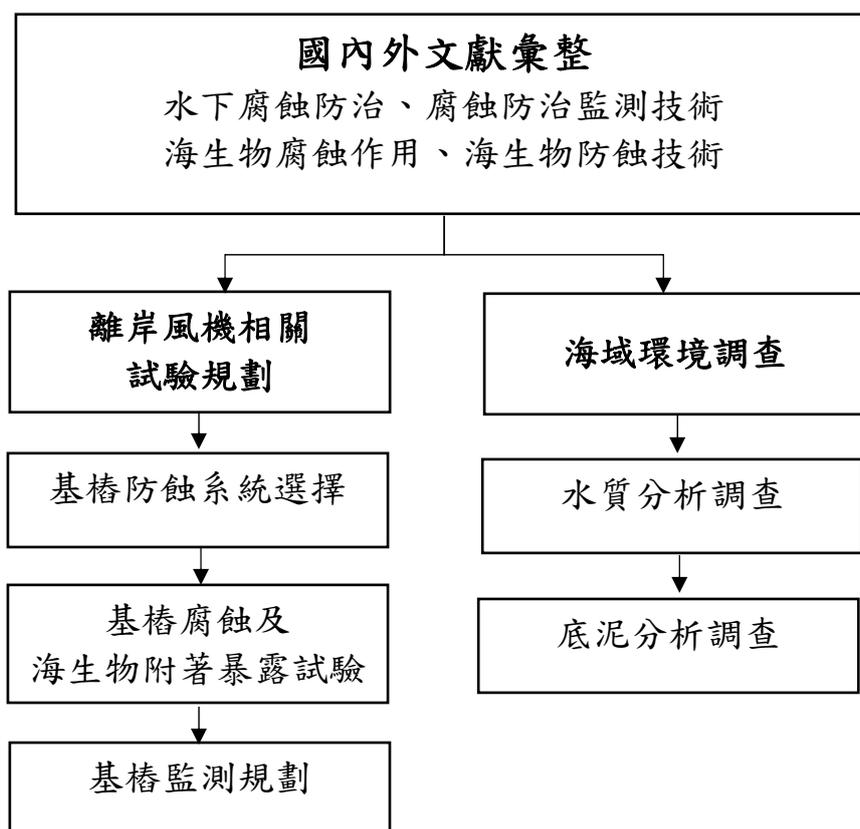


圖 4.1 研究方法及流程圖

4.2 離岸風機基樁防蝕系統規劃

配合國家推動離岸風力發電政策之推動目標，於「國際商港未來發展及建設計畫 106-110 年」中，考量港埠發展定位、經營環境、及整體規劃配置檢討後，「臺中港離岸風電作業碼頭興建工程」納入「前瞻基礎建設計畫」執行。

離岸風電產業園區以臺中港作為作業基地，辦理臺中港風機重件裝卸作業碼頭興(整)建工程，(整建 5A 碼頭、興建 5B 碼頭及 106 號碼頭)，綜括能源、電力、鋼鐵、石化等廠商進駐，結合港埠合作經營，港務公司更可提供拖船、起重船、測量船、潛水工作船以及平台船等服務，以合作經營方式參與營運，作為離岸風電發展產業專區。

臺中港區同時配合離岸風機相關研究，進行離岸風電金屬基樁及金屬試片水下暴露試驗與觀測，風電專區發展規劃如圖 4.2 所示。

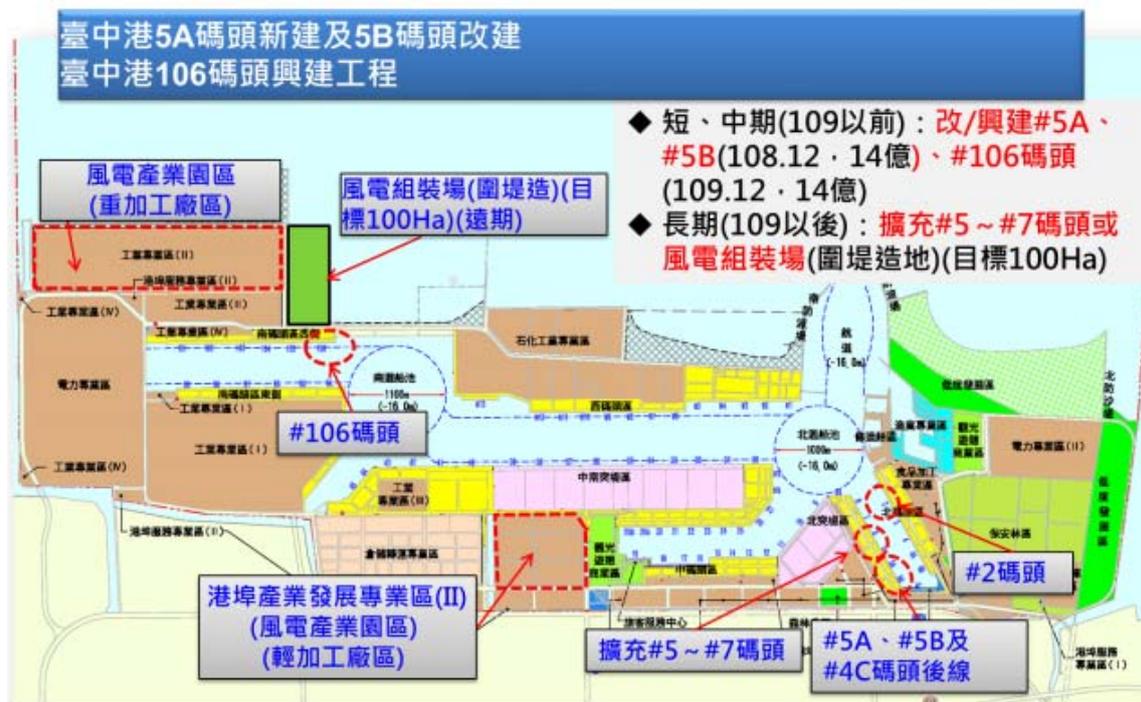


圖 4.2 離岸風電專區發展規劃圖^[145]

為建立完整「本土化」大氣腐蝕因子資料庫，本所自 99 年起，選用碳鋼、鋅、銅、鋁四大金屬，陸續於臺灣全島進行大氣腐蝕因子調查與研究。99-103 年間，臺中港區板狀金屬試片腐蝕速率彙整，如表 4-1 所示。

表 4-1 99-103 年臺中港區板狀金屬試片腐蝕速率彙整表

年期/年份	碳鋼 年均腐蝕率 ($\mu\text{m}/\text{yr}$)	鋅 年均腐蝕率 ($\mu\text{m}/\text{yr}$)	銅 年均腐蝕率 ($\mu\text{m}/\text{yr}$)	鋁 年均腐蝕率 ($\mu\text{m}/\text{yr}$)
第一年期 99 年	105.3	9.03	3.57	7.43
第二年期 100 年	55.7	4.75	10.08	1.61
第三年期 101 年	45.2	1.3	3.2	0.1
第五年期 103 年	41.5	3.16	--	1.5

(資料來源：臺灣腐蝕環境分類資訊系統)

離岸風機基樁防蝕規劃與海洋暴露試驗，將同步搜集大氣與水下不同暴露環境條件之金屬腐蝕資訊，配合本所於「臺中港海氣象觀測樁」之基樁條件進行試驗規劃與設計，臺中港氣象觀測樁設計草圖如圖 4.3 所示。

臺中港海氣象觀測樁依暴露區域進行不同防腐蝕措施，大氣暴露區參考環境狀況，選用適宜塗料進行塗裝防蝕，考量基樁暴露於海洋潮濕環境建議採用鋅熔射(Thermal spray)塗層技術施作^[42]，以達多相膜層材料之結合 (如：耐刮、耐磨耗等功能性塗層)；潮間帶擬採用玻璃纖維強化塑膠 (Fiber-reinforced plastic, FRP) 或聚氯乙稀 (Polyvinylchloride, PVC)保護套施行包覆防蝕，增強潮間帶及海水衝擊之環境防護；水下區擬選用防蝕效果安定，且施工簡易之「陰極防蝕工法」，海洋環境中建議採用鋁合金陽極施作，以達到鋼材”電位極化”防蝕之目的。

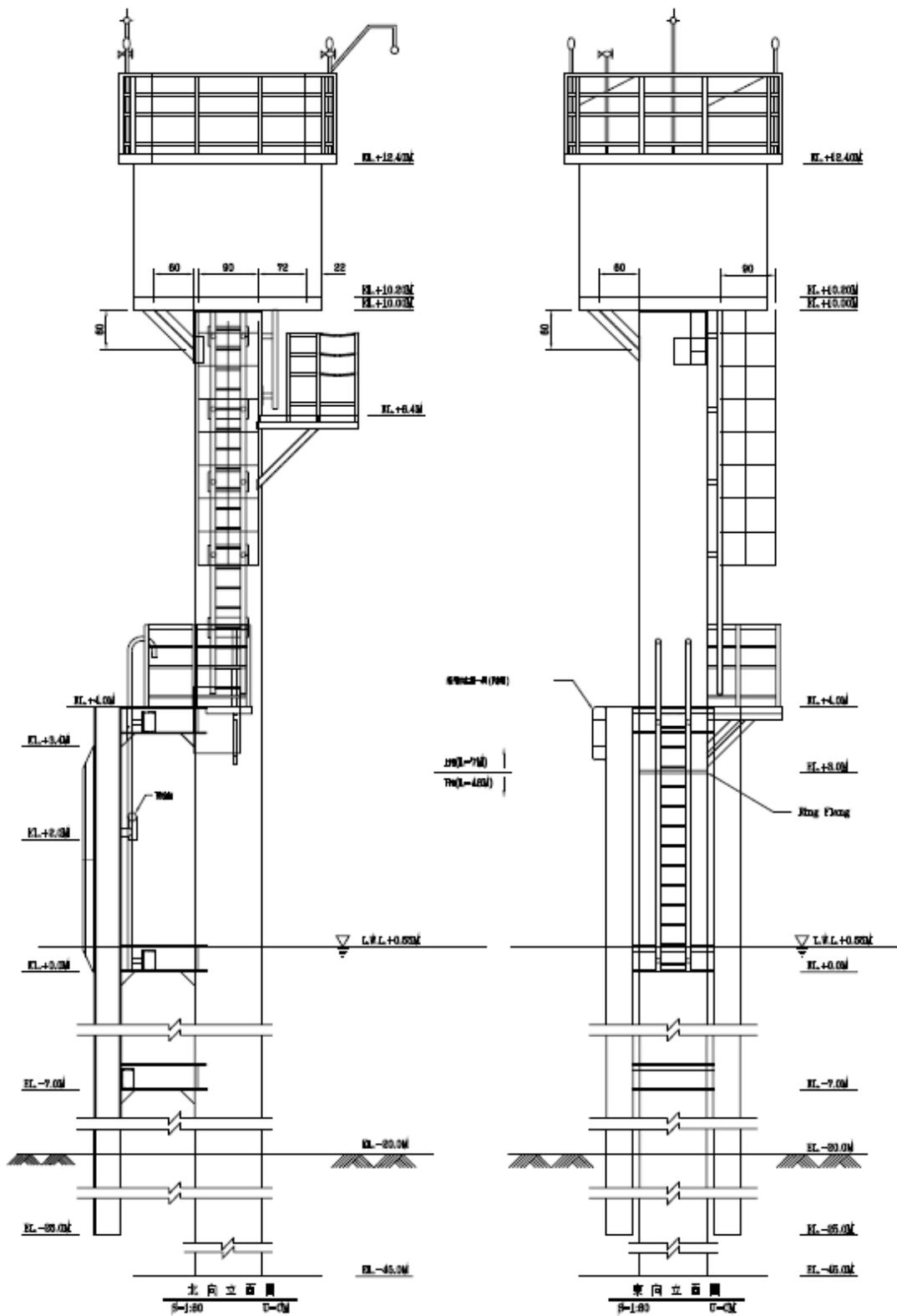


圖 4.3 臺中港海氣象觀測塔設計草圖

為模擬離岸風機於海上使用之防腐蝕情況，海洋暴露試驗分別規劃於大氣帶、潮差帶、海中帶及底層四區進行基樁與金屬試片材料腐蝕之觀測與調查，暴露區域示意圖，如圖 4.4 所示。

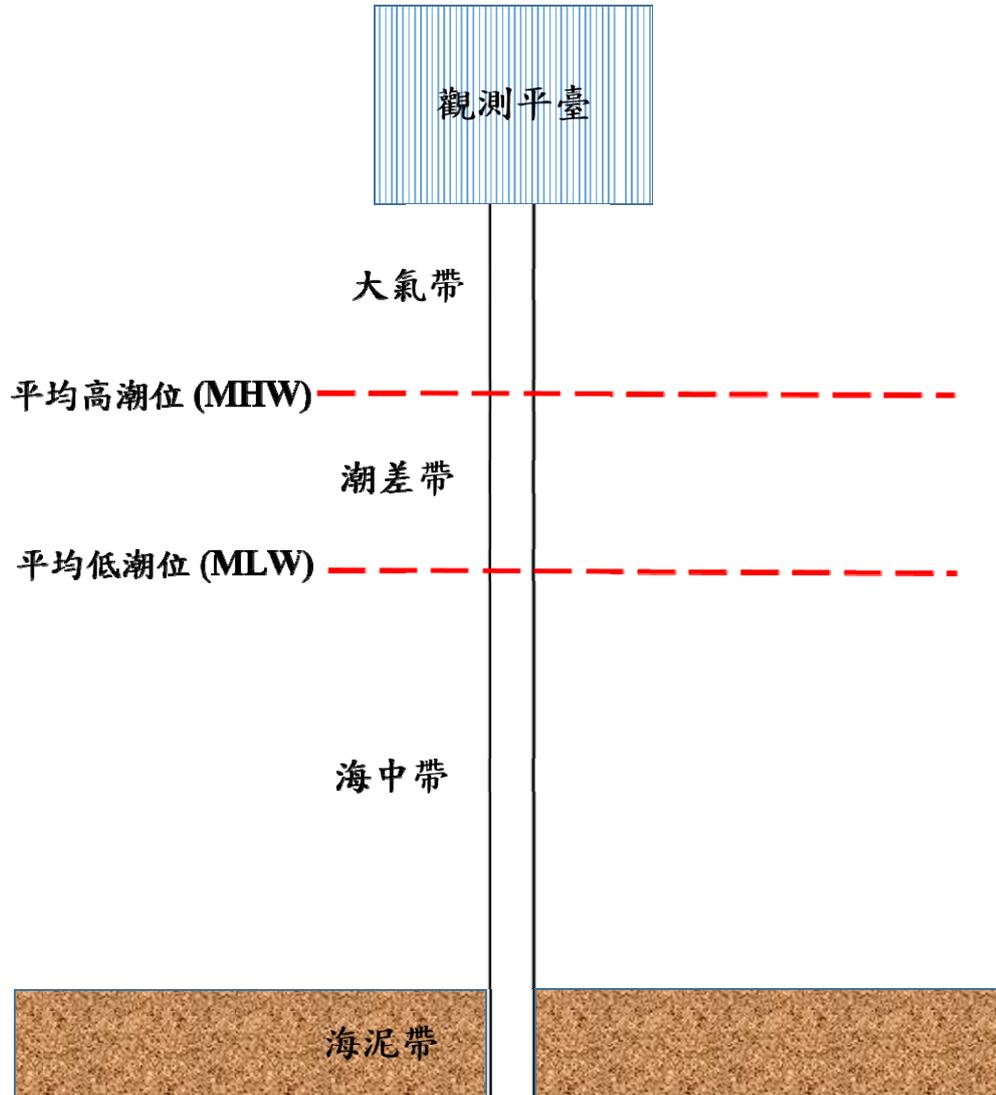


圖 4.4 海洋暴露區域示意圖

考量施工及價格因素，金屬試片架建議搭配基樁試驗規劃接續進行安裝，金屬試片安裝前於須完成試片之磨光、浸漬、稱重等基本性質實驗並重量記錄，後續配合潛水人員進行施作。水下施工除技術性問題，另須考量海況、海流、漲退潮等因素條件配合施工，以臺中港區基樁場址為例，其水深約 20 米，水下試架安裝工作須於高潮時，海面無昇降現象之停潮時段(Stand)才可進行，每次平均作業時間約為 1~1.5 小時。

試片架安裝及各階段分批取樣時程，詳述如下：

1. 試驗期程:擬以 10 年期進行規劃，預計於第 3、6、12、24、60、72、96、120 個月時進行採樣工作，共計八次。
2. 試片材質種類:擬採用現中鋼開發用於離岸風電機組構件之金屬材質，(A)S690Q 合金鋼、(B)A36 碳鋼、(C)EN40 鉻鉬合金鋼及 (D)A572 低合金鋼，作為金屬試片之材料，作為水下金屬試片之材料，以利後續本土化應用。
3. 試片之大小: 為觀測比較海洋生物附著情況，鋼材試片大小皆為 15*10cm，厚度為 1 cm。
4. 試片架設計：配合臺中港海氣象觀測樁結構條件、試片置放、取樣難易度及穩定性等因素，金屬試片架將依樁體外徑製成半圓形支架，於試驗深度將半圓形支架以螺栓與螺帽將兩片弧狀支架固定於基樁之上，試片皆以雙通孔固定於試架之上，螺栓與螺帽皆使用絕緣材質墊片，以防止電化學腐蝕效應。試片與試架安裝工作皆於陸上安置完成。基樁與試架安裝俯視圖及金屬試片分佈圖，如圖 4.5、圖 4.6 所示。
5. 試架暴露區域：試架暴露區域分別規劃於大氣帶、潮差帶、海中帶及底泥帶四區進行安裝，相關水下安裝工作將委請專業潛水人員協助完成。

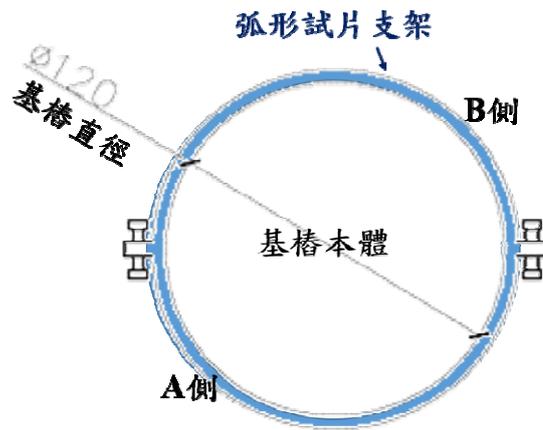
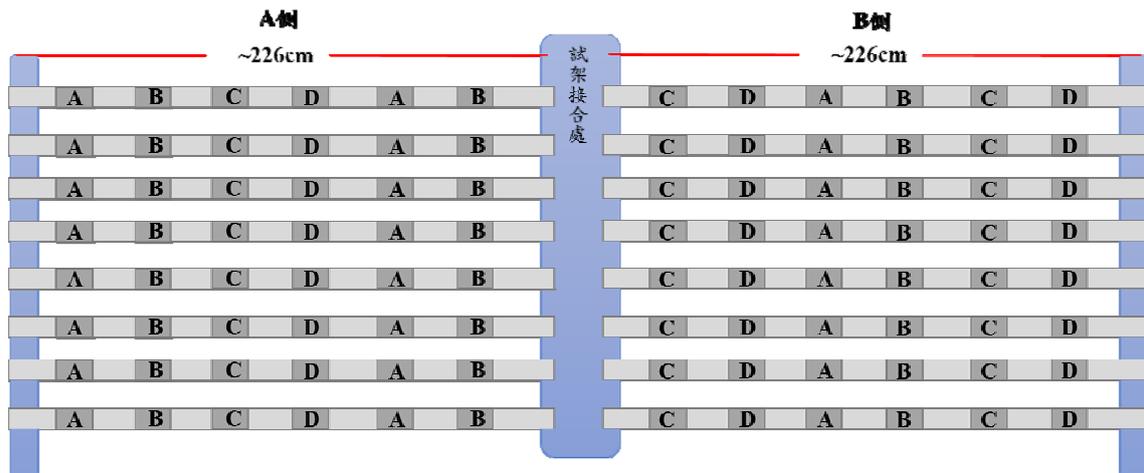


圖 4.5 基樁與試架安裝俯視圖



A-S690Q、B-A36、C-EN40、D-A572

圖 4.6 金屬試片分佈圖

為使基樁腐蝕與生物附著等試驗調查順利進行，應配合建置現場觀測系統，進行海洋環境、下部基礎等項目監測，如圖 4.7 所示。透過長期資料蒐集與彙整，將可深入瞭解各環境變化參數之影響；另臺灣位處亞熱帶區域，海洋附著生物之附著程度均較歐洲風場嚴峻，應配

合檢測計畫定期派員觀測，適時控制監測儀器之海洋附著生物附著與相關檢修等查驗工作。

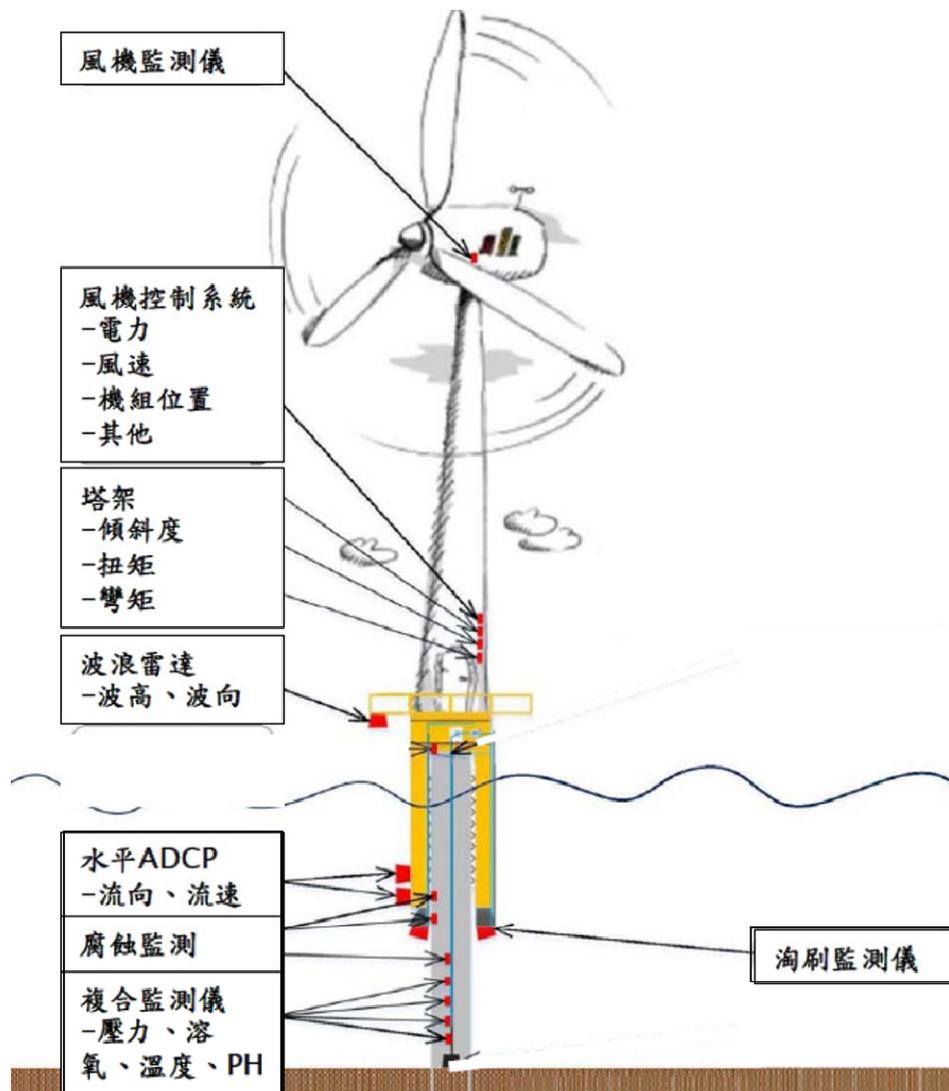


圖 4.7 現場觀測系統示意圖^[147]

4.3 離岸風機現地腐蝕試驗規劃

為瞭解彰化離岸風機預定地金屬材料腐蝕與海洋附著生物附著情況，本研究於彰化離岸風機預定海域進行環境採樣，並拋放金屬試架試驗，進行初步觀測與瞭解。

試片架安裝及各階段分批取樣時程，詳述如下：

1. 試驗期程:以 2 年期進行規劃，擬於第 3、6、12、24 個月時進行採樣工作，共計四次。
2. 試片材質種類:採用 A36 碳鋼、及 A572 低合金鋼二種金屬試片進行試驗，藉以瞭解彰化離岸風機現地金屬材料腐蝕與海洋附著生物之附著情況。
3. 試片之大小: 為觀測比較海洋生物附著情況，鋼材試片大小皆為 15*10cm，厚度為 1 cm。
4. 試片架設計:彰化現地金屬試架基座以長方體灌漿，上部試架以雙斜面支撐於基座，增加試架底部穩定度，減低勾網之機率。試片皆以雙通孔固定於試架之上，螺栓與螺帽皆使用絕緣材質墊片，以防止電化學腐蝕效應。試片與試架安裝工作皆於陸上安置完成。彰化現地金屬試架示意圖，如圖 4.8 所示。

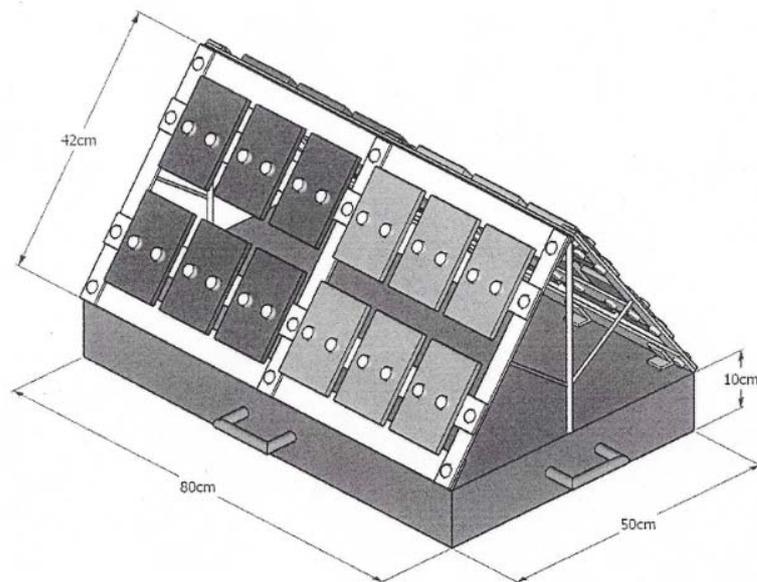


圖 4.8 現地金屬試架設計圖

第五章 水質與底泥分析調查

臺灣自2006年起開始規劃先導型離岸風場開發，於2011年公布新
能源政策，積極推動「千架海陸風力機」計畫，經濟部能源局於2012
年7月公告實施「風力發電離岸系統示範獎勵辦法」，帶動風能開發重
心由陸域逐步推向離岸。彰化外海離岸風電風場分佈示意圖，如圖5.1
所示。

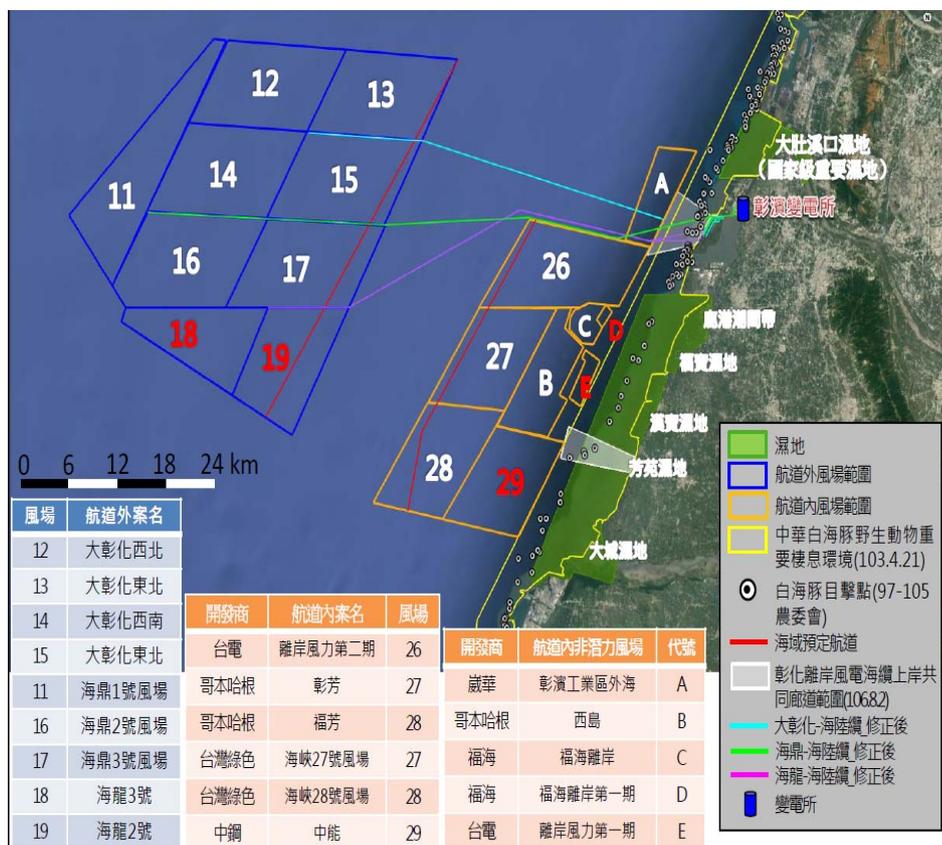


圖 5.1 彰化外海離岸風電風場分佈圖

5.1 水域調查試驗點

本計畫依需求分別於臺中港區、彰化離岸風季預定水域進行水質
與底泥取樣，並於計畫期間在彰化風機預定區域佈設金屬試架試驗，
觀察彰化風機現地金屬材料腐蝕與海洋附著生物之附著情況，藉以瞭

解水域環境之生物、地質與其化學特性。水域調查點位資料及位置圖，如表5-1、圖5.2、圖5.3所示。

表 5-1 水域調查點位資料

區域/站位	TWD97經緯度座標		說明
臺中/ St1	120°30'30"E	24°19'15"N	臺中港北防沙堤外
彰化/ St2	120°19'49"E	24°06'02"N	「離岸風力發電第二期」 26-1點位
彰化/ St3	120°11'24"E	24°03'36"N	「離岸風力發電第二期」

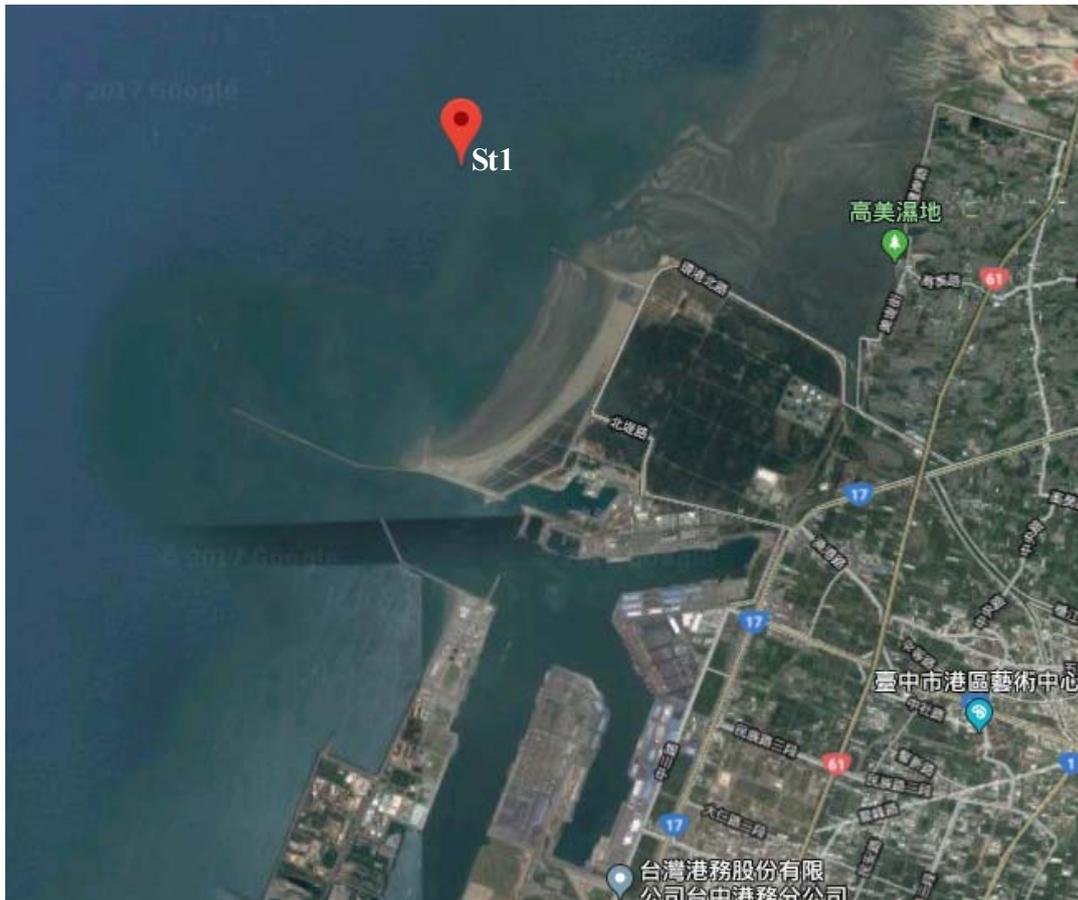


圖 5.2 臺中港區採樣位置圖



圖 5.3 彰化離岸風機場址採樣位置圖

5.2 採樣與分析方法

5.2.1 採樣方法

環境樣品分別針對底泥與海水進行樣品採集，各點位皆以 GPS 系統定位後進行採樣工作，採集研究點位底泥，及底深向上 10m 水樣進行分析。採樣斷面示意圖如圖 5.4 所示。

底泥以直徑 7cm，管長分別為 40 及 60 cm 之岩心管進行樣品採集(如圖 5.5)。將岩心管直立置於底泥表層，藉鐵槌敲擊之重力方式使岩心管緩緩向底泥深部進行樣品採集，直至深達預定深度後(滿管)，手動將旁側底泥挖開，以鏟子抵住岩心管底部，快速於底部及上部加上蓋子密封，接縫處以防水膠帶封口後返回船隻，全程遮光、4°C 低溫保存，並保持樣品直立避免擾動，攜回實驗室進行後續項目分析。

海水樣本委託專業潛水人員，下潛至預定深度(底床向上 10m 處)，以 PE 廣口採水瓶收取水樣，樣品採集返回船隻後，以封口膜(Parafilm)密封，遮光、4°C 低溫保存，攜回實驗室進行後續分析工作。

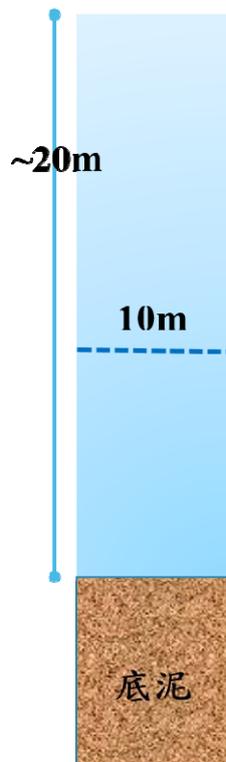


圖 5.4 採樣斷面示意圖



圖 5.5 底泥採樣岩心管

5.2.2 海域環境測定項目

水質測定項目包含：溫度、鹽度、pH、溶氧、葉綠素 a、總磷、總氮、氯鹽、硫酸鹽；重金屬鋅、鎘、鉛、銅、總鉻、汞。其中溫度、鹽度採現場測定，其餘項目分析主要依循「水質檢驗方法」辦理，相關檢驗項目與方法如表 5-2 所示。

底泥測定項目包含：粒徑分析與海洋附著生物特性觀察分析。

(1)本計畫以雷射粒徑分析儀(LISST-100X, Submersible Particle Size Analyzer)觀測樣點底泥含砂粒徑分布，藉由所得之粒徑分佈曲線結果以內差法求得中值粒徑(median diameter) D_{50} 、有效粒徑(effective size) D_{10} ，以及平均粒徑(mean diameter) D_m ，而平均粒徑則取幾何平均值，常用砂樣參數計算式如下：

$$D_m = \sum_{p=0}^{100} D_i \cdot p_i / \sum_{p=0}^{100} p_i$$

$$C_u = D_{60} / D_{10}$$

$$C_u = D_{60} / D_{10}$$

D_n =粒徑分佈曲線上累積通過百分比為 $n\%$ 所對應之粒徑，其中 D_i 為兩相鄰篩號之幾何平均粒徑， P_i 為所對應留篩部份佔全部重量之百分比， C 為均勻係數(coefficient of uniform)， C_u 為曲率係數(coefficient of curvature)。

依粒徑分佈將底泥粒徑顆粒予以分類，分類方法則依據美國統一土壤分類系統(unified soil classification system, USCS)所採用的美國材料與試驗協會(American society for testing and materials, ASTM)，規範 ASTM D2487-92 之分類法，將所分析粒徑分類為:0.005mm 以下為黏土 (clay)；粒徑大小介於 0.005mm~0.075mm 為粉土(silt)；粒徑大小介於 0.075mm~4.75mm 之間者視為砂粒(sand)；而粒徑介於 4.75mm~76.2mm 者則為礫石(gravel)。以上粒徑分類整理於表 5-3 所示。

(2) 海洋生物觀察分析非本計畫工作項目，然為使後續實驗計畫能順利規劃，本計畫嘗試將檢視研究點位底泥採樣是否有海洋生物，分別以解剖顯微鏡觀察、比對鑑定生物種類，與 DNA 分子序列實驗分析微生物種類，微生物種類實驗方式於 5.2.4 節中詳述。

表 5-2 水質檢測項目與方法

檢測項目	檢測方法編號	檢測項目	檢測方法編號
溫度	NIEA W217.51A	鹽度	NIEA W447.20C
pH(25°C)	NIEA W424.52A	溶氧	NIEA W422.52B
葉綠素 a	NIEA E508.00B	總磷	NIEA W427.53B
總氮	NIEA W423.52C	氯鹽	NIEA W407.51C
硫酸鹽	NIEA W430.51C	汞	NIEA W330.524A
鋅、鎘、鉛、 銅、總鉻	NIEA W306.55A		

表 5-3 規範 ASTM D2487-92 之土壤粒徑特性分類法

粒徑分類	粒徑大小界定
礫石	粒徑在 76.2mm 至 4.75mm (#4 篩)之間
砂	粒徑在 4.75mm (#4 篩)至 0.075mm (#200 篩) 之間
粉土(粉砂)	粒徑在 0.075mm (#200 篩)至 0.005mm 之間
黏土	0.005mm 以下

5.2.3 海洋環境品質標準

依據臺灣沿海海域範圍與海域分類，水區包含臺灣本島及澎湖群島、蘭嶼、綠島等離島由海岸向外延伸之領海範圍。海域水體分類如表 5-4 及圖 5.6 所示。本計畫採樣試驗點皆隸屬於王功漁港向西延伸線至鼻頭角向彭佳嶼延伸線間之乙類海域。海洋環境品質標準，如表 5-5 所示。

表 5-4 海域水體分類表

海域範圍	水體分類
鼻頭角向彭佳嶼延伸至高屏溪口向琉球嶼延伸線間海域	甲
高屏溪口向琉球嶼延伸至曾文溪口向西延伸線間海域	乙
曾文溪口向西延伸線至王功漁港向西延伸線間海域	甲
王功漁港向西延伸線至鼻頭角向彭佳嶼延伸線間海域	乙
澎湖島海域	甲

「海域環境分類及海洋環境品質標準」環保署係於 90 年 12 月 26 日以(90)環署水字第 0081750 號布。

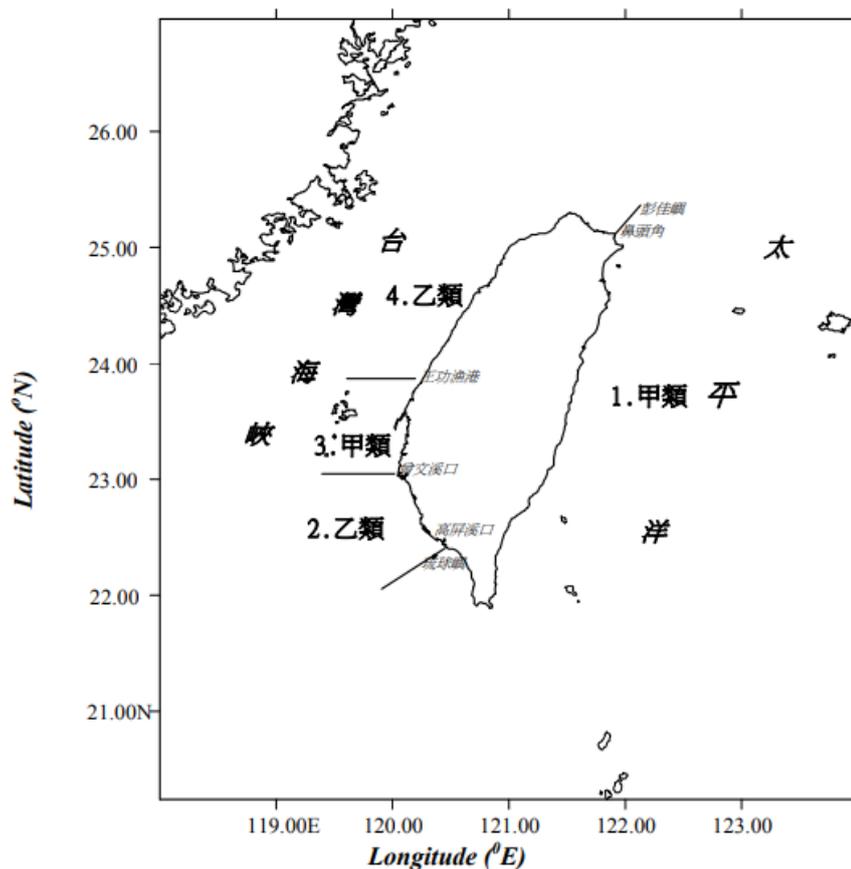


圖 5.6 臺灣沿海海域範圍與海域分類圖^[148]

表 5-5 海洋環境品質標準

保護人體健康的海洋環境品質標準 (適用於甲、乙、丙三海域環境)			各類海域海洋環境品質標準			
水質項目(µg/L)		標準值	類別	標準值		
重 金 屬	水質項目			甲類	乙類	丙類
	鎘	5.0	水質項目			
	鉛	10.0	氫離子濃度指數(pH)	7.8~8.5	7.8~8.5	7.0~8.5
	六價鉻	50.0	溶氧量	5.0 以上	5.0 以上	2.0 以下
	砷	50.0	生化需氧量	2 以下	3 以下	6 以下
	汞	1.0	大腸桿菌群(CFU/100mL)	1,000 個以下	--	--
	硒	10.0	氨氮	0.30	--	--
	銅	30.0	總磷	0.05	--	--
	鋅	500.0	氰化物	0.01	0.01	0.02
	錳	50.0	酚類	0.005	0.005	0.005
銀	50.0	礦物性油脂	2.0	2.0	--	

5.2.4 底泥微生物分析

為使後續年度腐蝕之底泥微生物鑑定順利進行，嘗試採用分子序列比對方式，針對底泥之微生物種類進行分析與鑑定。期能先行建立有效實驗條件，以利後續研究進行。傳統底泥微生物萃取分析步驟如下：

1. 底泥岩心採樣完畢攜回實驗室後冰凍於-20°C 保存，依沉降後之深度每 10cm 體積的底泥攪拌均勻後，取出 3 個適量之底泥樣本備用。
2. 底泥樣本 DNA 萃取：以土壤適用的 Mobio DNeasy PowerSoil DNA 萃取試劑套組，利用其專利抑制劑去除技術(IRT)從環境樣品中分離基因組 DNA，萃取底泥樣品中的 DNA。
3. 以聚合酶鏈式反應(Polymerase Chain Reaction; PCR) 放大目標 16S rDNA。
4. 利用變性梯度凝膠電泳法 (denaturing gradient gel electrophoresis;

DGGE) 分離 PCR 擴增之微生物群體的 16SrDNA 混合物。

5. 在轉殖後進一步定序，以鑑別樣品中的菌種，從而瞭解菌群中個別微生物的菌種及親緣關係。
6. 利用定量 PCR 反應來定量樣品中的菌種的相對數量。

傳統海洋生物觀察分析步驟經濟，卻耗工費時，所得之序列資料分析亦有限。為加速 DNA 定序，近年發展出不需經由細菌質體進行複製，且允許大規模同步讀取大量小片段 DNA 序列的高通量 (High-throughput) 次世代定序 (Next Generation Sequencing, NGS)；可有效地縮短定序時間，獲得龐大 DNA 序列資料進行分析整合，價格亦相對提高。底泥樣本 DNA 萃取後，如以 NGS 進行分析，通過檢測 16SrDNA 序列變異，瞭解底泥菌相。以 Illumina MiSeq 儀器進行定序，獲得序列資訊後利用相似度將序列分群，稱之為 OTU Analysis (operational taxonomic units)，將序列與資料庫進行比對，以獲得該樣品菌種的組成概況與各菌種之數量。

5.3 分析結果與討論

研究期間，針對臺中及彰化離岸風機預定海域進行環境採樣工作，並於彰化風機預定區域拋放金屬試驗架，觀察彰化風機預定海域金屬材料腐蝕與海洋附著生物之附著情況，藉以瞭解水域環境的生化特性。

船隻海上座標定位偏差約為 5km，為使金屬試架拋放至風機預定海域中，故船隻由 St2 西南方距離 10 km 處進行金屬試架拋放。待金屬試架拋放完畢後，再次進行座標定位，是為 St3，故 St2 及 St3 之站位距離約 15 km。計畫期間採樣區域、座標、時間及作業項目如表 5-6 所示。

表 5-6 採樣資訊彙整表

區域/站位	TWD97 試驗點座標		採樣時間	作業項目
臺中/ St1	120°30'30"E	24°19'15"N	107.01.16 (二) 8:30	水質及底泥採集
彰化/ St2	120°19'49"E	24°06'02"N	107.03.02 (五) 9:00	水質及底泥採集
彰化/ St3	120°11'24"E	24°03'36"N	107.04.14 (六) 8:00	水質及底泥採集 金屬試架拋放

5.3.1 海域水質分析

研究期間，臺中港區及彰化離岸風機預定海域水質分析結果，如表5-7所示。

臺中港區於107年1月16日(冬季)進行採樣工作(St1)，測得水溫為19℃，鹽度為31.7。本次水樣分析項目與乙類海洋環境品質標準值之pH、溶氧、總磷及重金屬鋅、鎘、鉛、銅、鉻、汞等九項參數加以比較，皆符合標準，顯示採樣當日臺中港區水質情況良好。

彰化離岸風機預定海域，於研究期間共進行了兩次採樣工作。觀測期間，溫度介於21.3-26℃之間，推測海域溫度主要受到季節變化而增高，鹽度依離岸距離增加逐漸提升，整體介於33.7-34.9之間，故推測離岸約15km之St2仍受到沿岸淡水注入之影響。

其他水文參數，pH介於8.0-8.1；溶氧介於7.9-8.2 mg/L；總磷介於0.011-0.012 mg/L；水中重金屬鋅、鎘、銅、鉻、汞皆低於方法偵測極限。就分析項目與乙類海洋環境品質標準值之pH、溶氧、總磷及重金屬鋅、鎘、銅、鉻、汞等八項參數加以比較，皆符合標準，唯重金屬鉛介於0.047-0.11mg/L之間，明顯高於標準值(0.01mg/L)。整體而言，除重金屬鉛超標，彰化離岸風機預定海域於研究期間，水質參數並無顯著異常值出現。

表 5-7 水質分析資料表

項目	臺中/ St1	彰化/ St2	彰化/ St3	
採樣日期	107.01.16	107.03.02	107.04.14	
採樣時間	8 : 30	9 : 00	8 : 00	
溫度(°C)	19	21.3	26	
鹽度	31.7	33.7	34.9	
pH	8.1	8.1	8.0	
溶氧(mg/L)	8.8	8.2	7.9	
葉綠素 a (µg/L)	0.296	1.48	8.29	
總磷(mg/L)	0.025	<0.02 (0.012)	<0.02 (0.011)	
總氮(mg/L)	0.65	0.79	0.6	
硫酸鹽(mg/L)	---	1160	1210	
氯鹽(mg/L)	---	20300	19800	
鋅(mg/L)	<0.02	N.D.	N.D.	MDL=0.012
鎳(mg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	MDL=0.005
鉛(mg/L)	N.D.	<0.10 (0.047)	0.11	MDL=0.029 QDL=0.10
銅(mg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	MDL=0.015
鉻(mg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	MDL=0.017
汞(mg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	MDL=0.0004

方法偵測極限 (Method detection limit, MDL), 檢驗值低於方法偵測極限之測定以 "N.D." 表示
 定量偵測極限值(Quantitation Detection Limit, QDL)

值得注意的是，此海域葉綠素 a(Chlorophyll a, Chl-a) 由三月初的 1.48µg/L 大幅提升至四月中旬的 8.29µg/L，顯示此期間浮游植物具大幅成長之趨勢，然同時期營養鹽氮、磷與溶氧皆無顯著變化，由此僅可推測季節變換致使光照強度增強，可能是促進此海域浮游植物生長的主要因素之一，隨著浮游植物增長，同時可能吸引各式水中生物覓食而來，故建議仍需持續進行長期觀測，以瞭解此海域浮游植物變化情況及相關主導因子。

歷次樣品採集情況如圖 5.7-圖 5.9 所示：

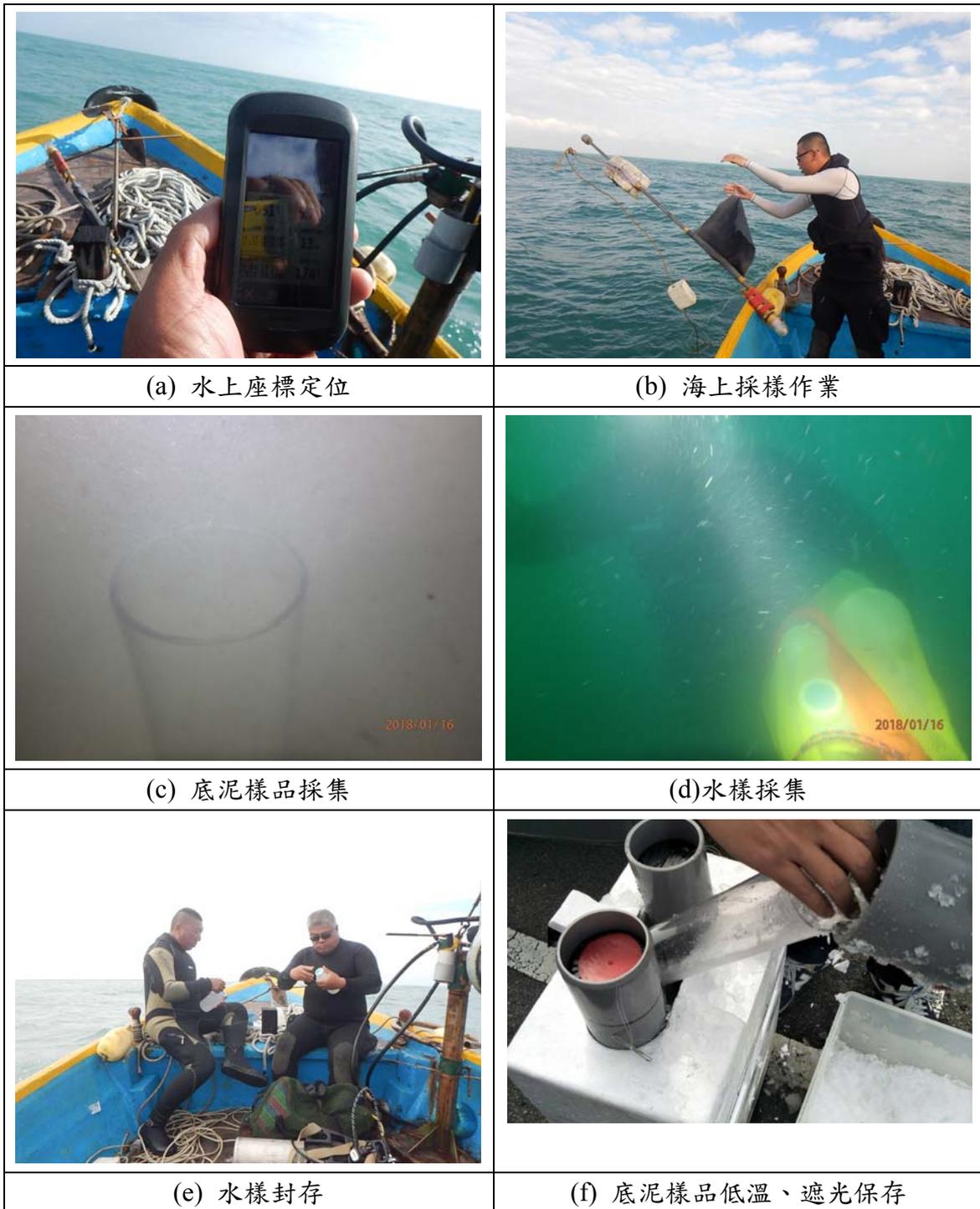


圖 5.7 107 年 1 月 16 日臺中港區採樣情況 (St1)

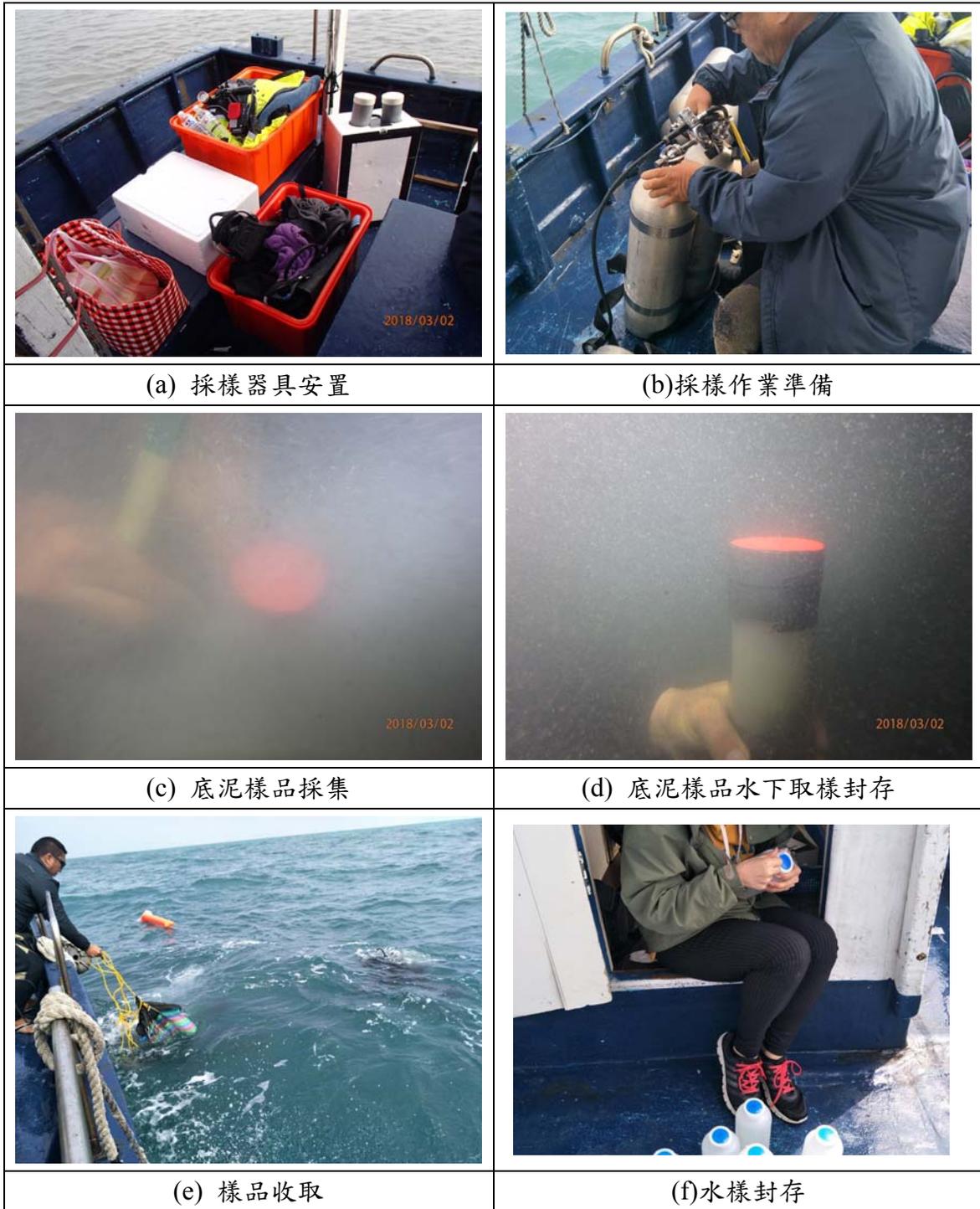


圖 5.8 107 年 3 月 2 日彰化離岸風機預定地採樣情況 (St2)

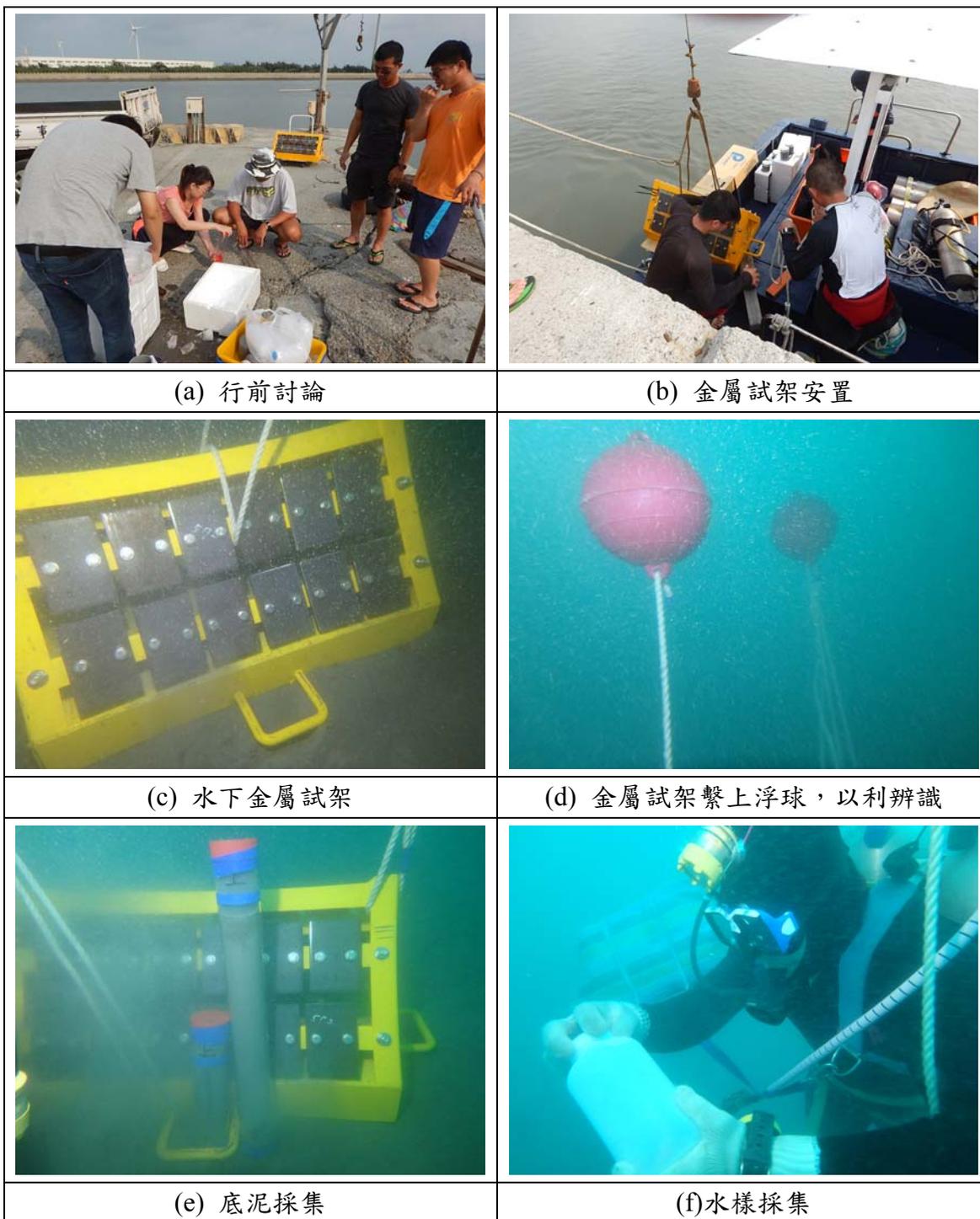


圖 5.9 107 年 4 月 14 日彰化離岸風機預定地採樣情況 (St3)

5.3.2 海床底泥分析

本計畫分別在臺中港區測點(St1)、彰化離岸風機預定地二測點(St2, St3)進行底泥採樣，其中 St1 和 St2 均有 40cm 和 60cm 採樣管的底泥採樣(圖 6.1)，St3 僅有 1 支 40cm 採樣管底泥採樣；靜置沉降後，原 40cm、60cm 底泥樣品，分別沉降至約 20~25cm 和 32~45cm 深度(圖 5.10)；故底泥分層粒徑以沉降後之深度檢測。



(a) 40cm 底泥採集管



(b) 60cm 底泥採集管

圖 5.10 沉降後底泥深度(上層海水已倒掉)

臺中港 St1 之底泥中值粒徑(D_{50})介於 94.921~117.399 μm ，平均粒徑(D_m) 介於 96.430~116.975 μm ，各深度皆無礫石，底泥的砂含量比例皆超過 66%，粉砂的比例皆低 34%，如圖 5.11~圖 5.16 所示。

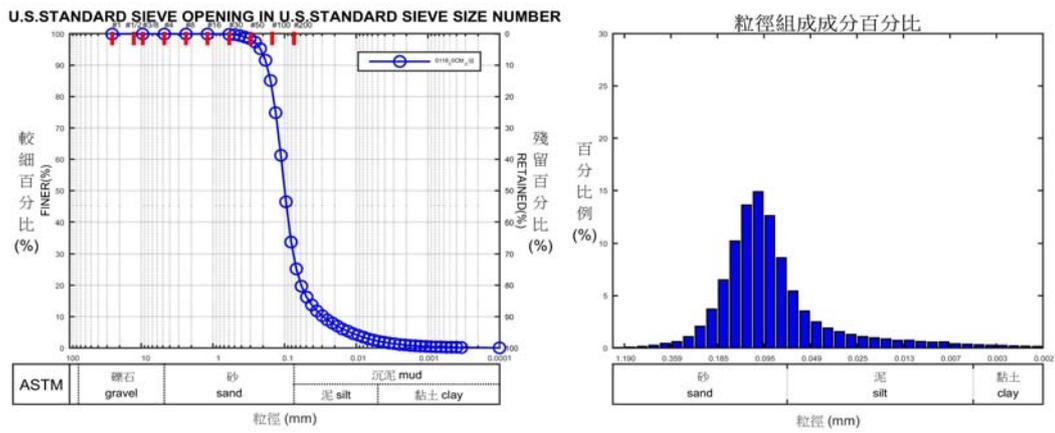


圖 5.11 St1 40cm 採樣管底泥 5cm 深底泥粒徑分佈曲線及組成百分比

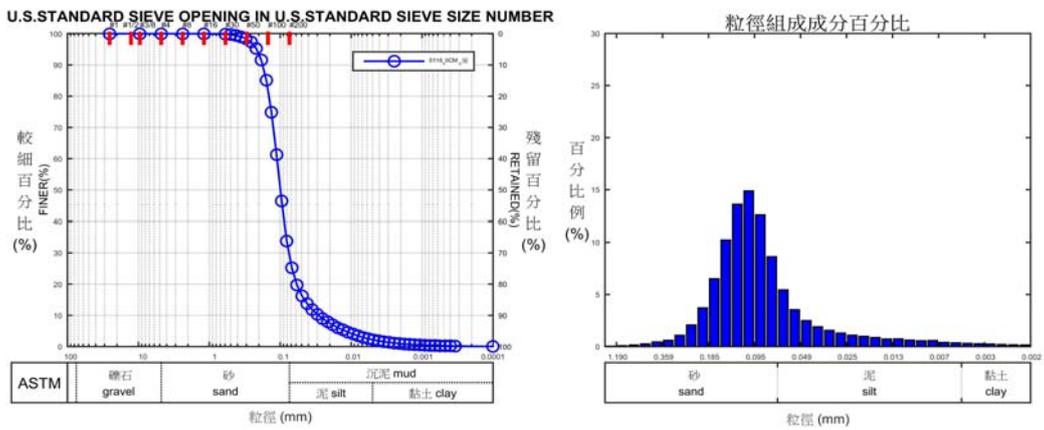


圖 5.12 St1 40cm 採樣管底泥 20cm 深底泥粒徑分佈曲線及組成百分比

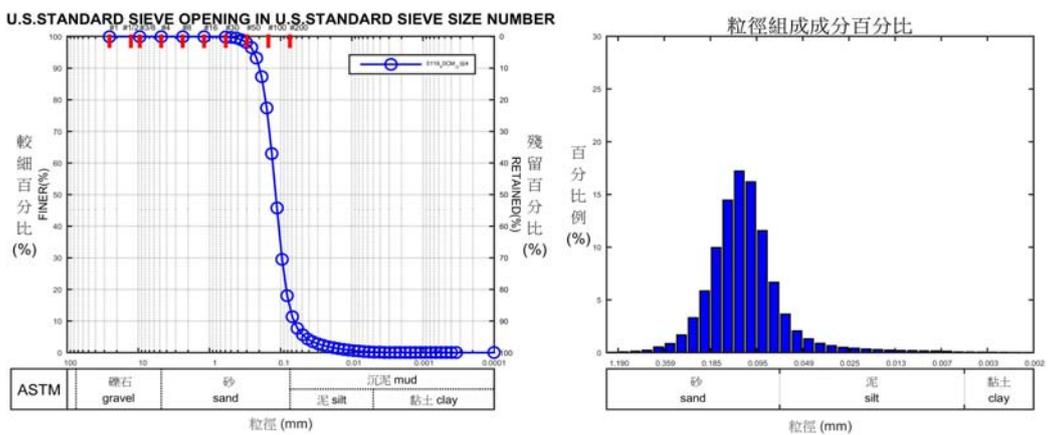


圖 5.13 St1 60cm 採樣管底泥 5cm 深底泥粒徑分佈曲線及組成百分比

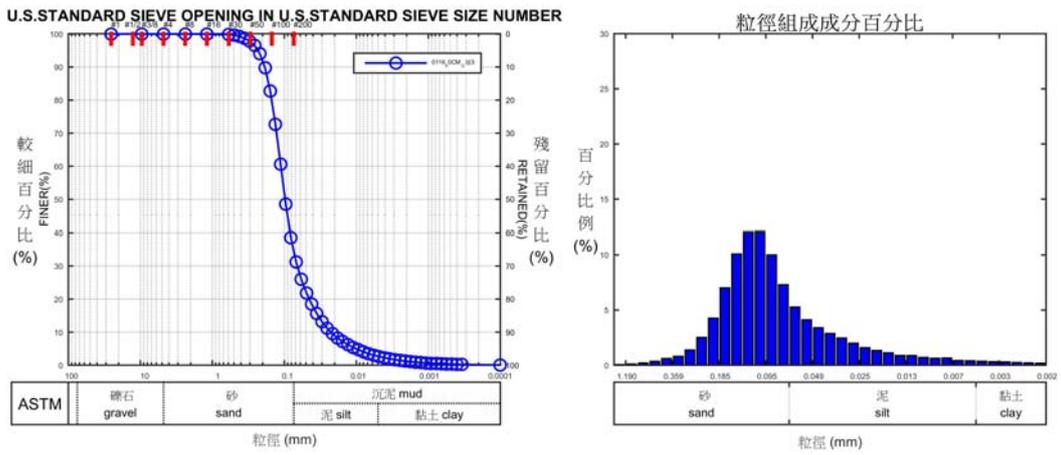


圖 5.14 St1 60cm 採樣管底泥 15cm 深底泥粒徑分佈曲線及組成百分比

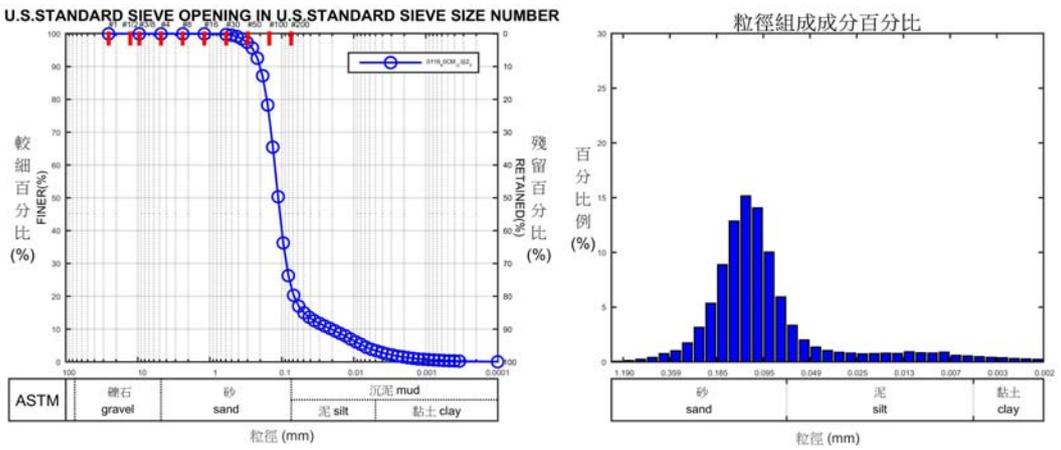


圖 5.15 St1 60cm 採樣管底泥 25cm 深底泥粒徑分佈曲線及組成百分比

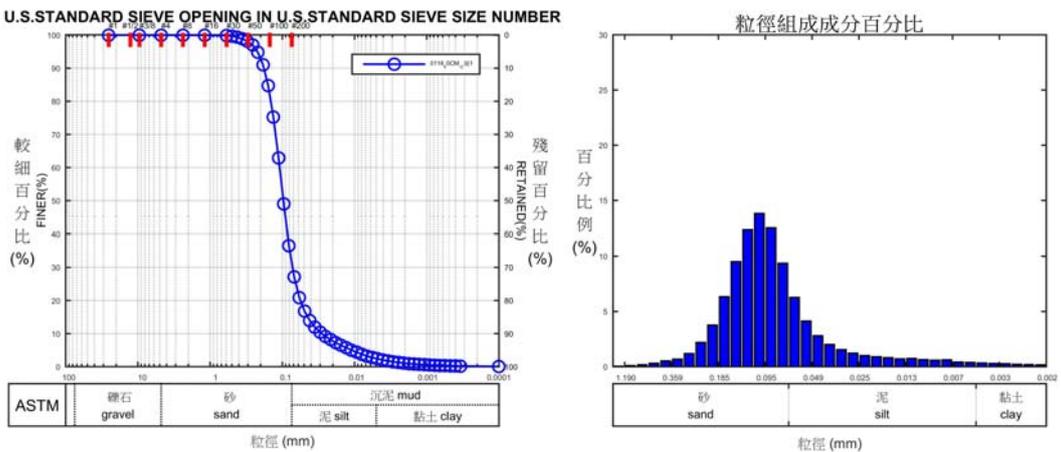


圖 5.16 St1 60cm 採樣管底泥 35cm 深底泥粒徑分佈曲線及組成百分比

彰化離岸風機預定地 St2 和 St3 之底泥中值粒徑(D_{50})介於 10.461~187.210 μm 和 10.312~12.015 μm ，平均粒徑(D_m)分別介於 16.174~176.268 μm 、29.129~50.471 μm ，各深度皆無礫石；St2 底泥的砂含量介於 2.60~83.73%，粉砂的比例介於 16.27~84.60%，兩種含量的比例變化相當大(圖 5.17~圖 5.23)。

St3 底泥的砂含量介於 6.14~15.47%，粉砂的比例介於 84.53~93.86%，各深度粉砂所佔比例超過八成以上(圖 5.24~圖 5.26)。各測點底泥粒徑分析結果如表 5-8~表 5-10 所示。

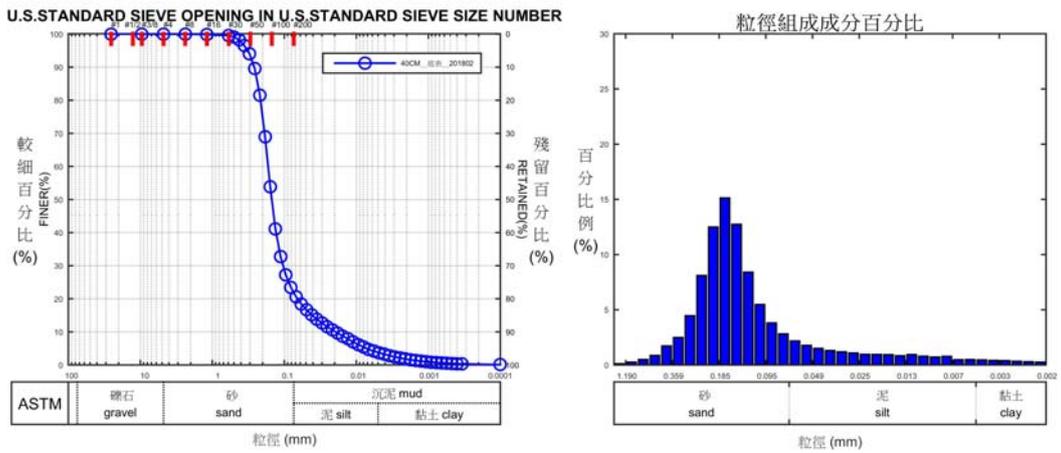


圖 5.17 St2 40cm 採樣管底泥 5cm 深底泥粒徑分佈曲線及組成百分比

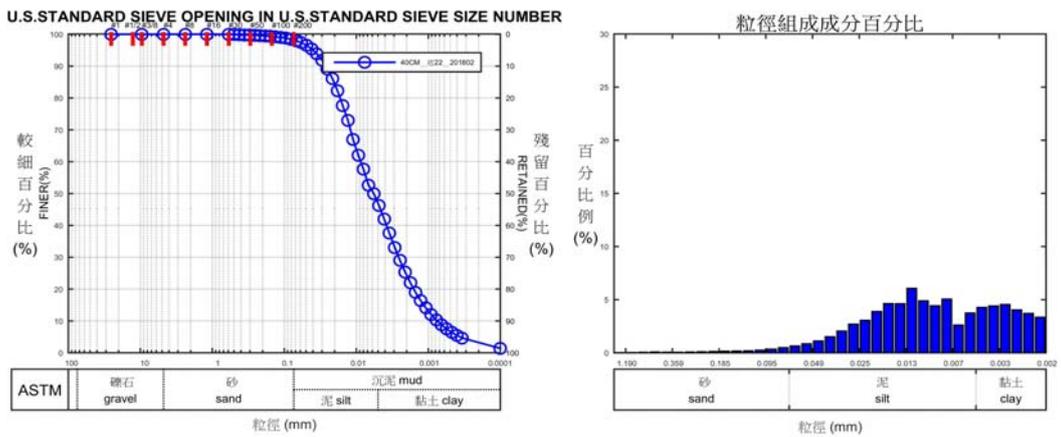


圖 5.18 St2 40cm 採樣管底泥 20cm 深底泥粒徑分佈曲線及組成百分比

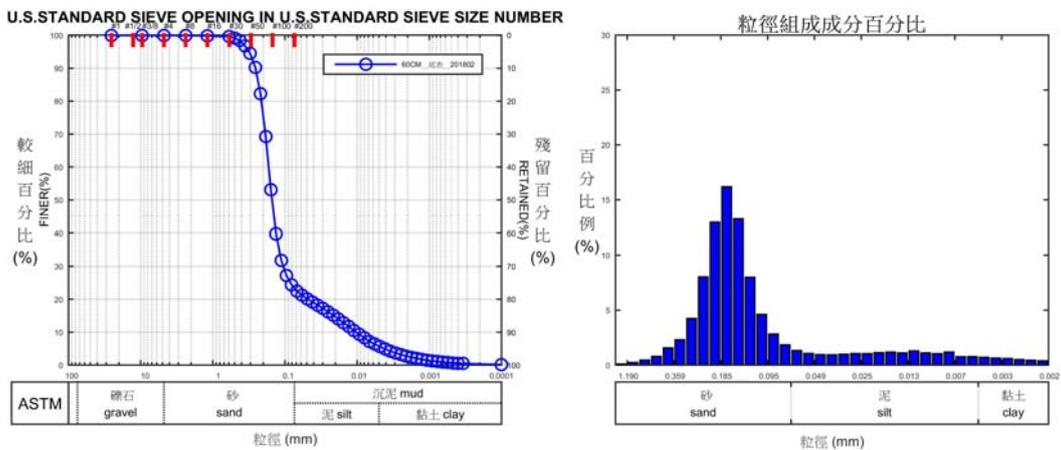


圖 5.19 St2 60cm 採樣管底泥 5cm 深底泥粒徑分佈曲線及組成百分比

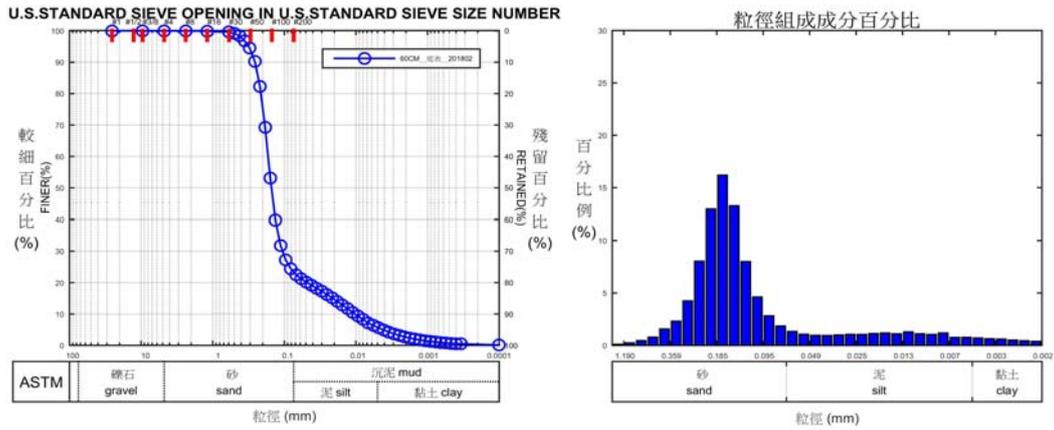


圖 5.20 St2 60cm 採樣管底泥 15cm 深底泥粒徑分佈曲線及組成百分比

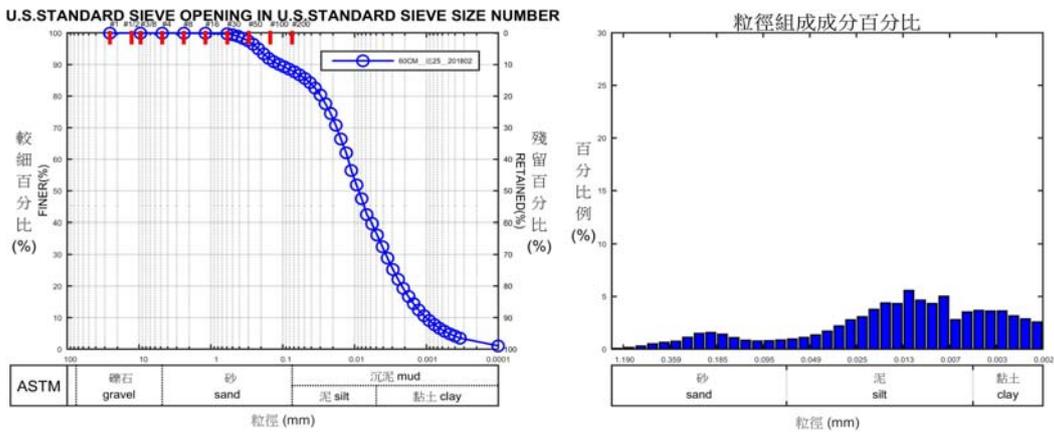


圖 5.21 St2 60cm 採樣管底泥 25cm 深底泥粒徑分佈曲線及組成百分比

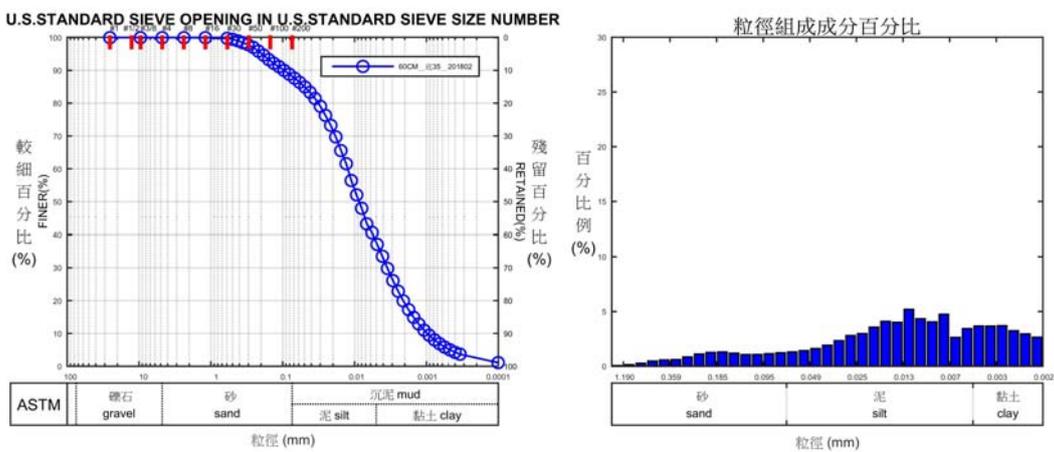


圖 5.22 St2 60cm 採樣管底泥 35cm 深底泥粒徑分佈曲線及組成百分比

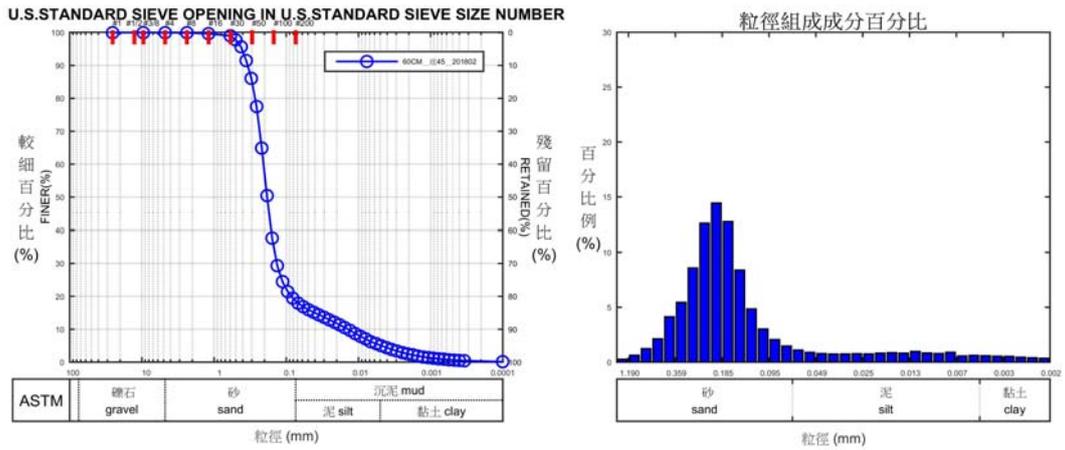


圖 5.23 St2 60cm 採樣管底泥 45cm 深底泥粒徑分佈曲線及組成百分比

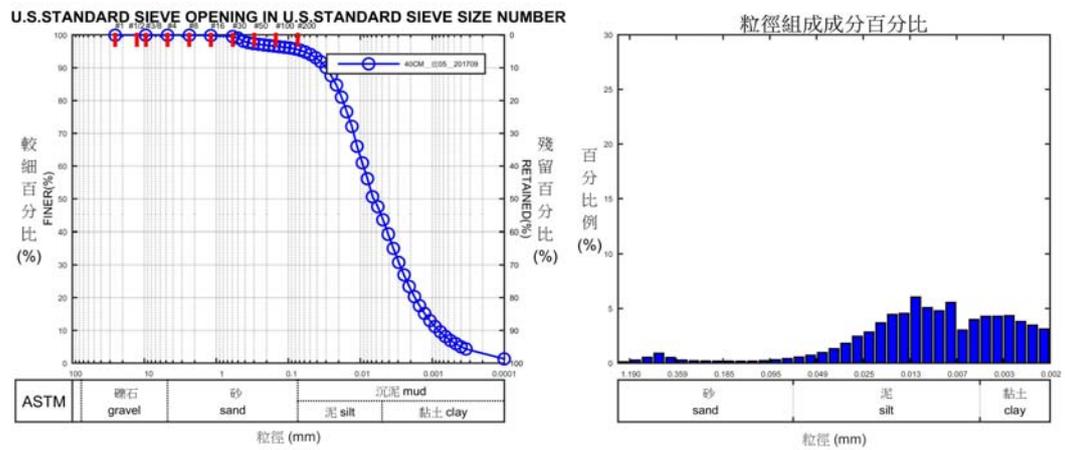


圖 5.24 St3 40cm 採樣管底泥 5cm 深底泥粒徑分佈曲線及組成百分比

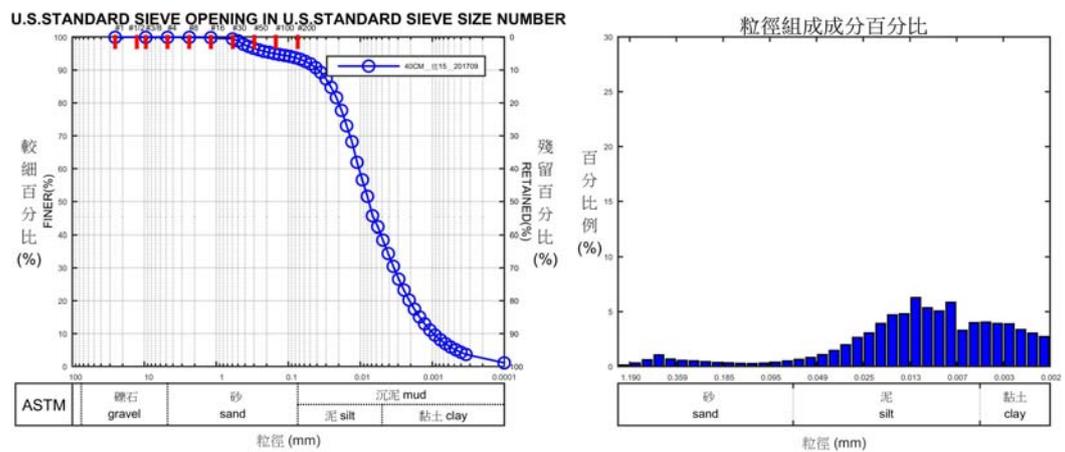


圖 5.25 St3 40cm 採樣管底泥 15cm 深底泥粒徑分佈曲線及組成百分比

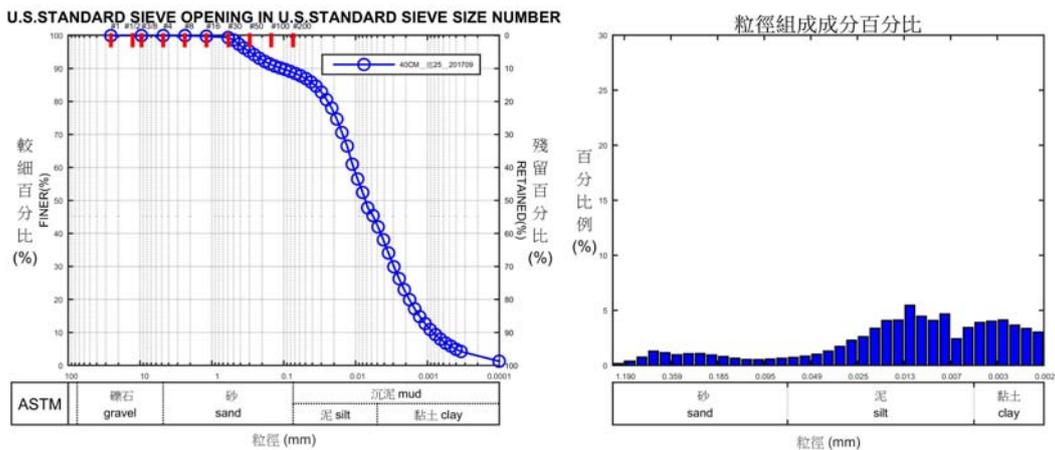


圖 5.26 St3 40cm 採樣管底泥 25cm 深底泥粒徑分佈曲線及組成百分比

表 5-8 臺中港 St1 底泥粒徑分析結果

樣站		St1						
實際採樣深度		40cm		60cm				
沉降後測粒徑深度		<5cm	20cm	<5cm	15cm	25cm	32cm	
107/1/16	累積通過粒徑大小百分比所對應之	D_{10}	31.987	42.550	65.347	25.381	28.286	32.110
		D_{16}	50.821	53.066	77.771	38.632	59.440	49.671
		D_{25}	69.418	65.881	90.228	58.082	80.828	66.565
		D_{30}	76.747	72.173	96.019	67.935	88.507	73.639
		D_{50}	100.065	94.921	117.399	98.490	113.274	97.291
		D_{60}	111.515	106.851	129.059	112.521	125.907	109.372
		D_{75}	133.628	129.898	152.062	138.329	150.369	133.108
		D_{84}	154.051	151.020	173.532	161.506	173.746	155.178
		D_{90}	176.756	173.810	197.321	187.231	200.777	179.736
		D_m	98.405	96.430	116.975	98.281	111.170	97.921
分累積百分比	礫石	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	砂	71.69	68.34	85.77	66.41	78.32	69.50	
	粉砂	28.31	31.66	14.23	33.59	21.68	30.50	

表 5-9 彰化海床 St2 底泥粒徑分析結果

樣站		St2							
實際採樣深度		40cm		60cm					
沉降後測粒徑深度		~5cm	~20cm	~5cm	15cm	25cm	35cm	45cm	
107/3/2	累積通過百分比所對應之粒徑大小(mm)	D_{10}	26.219	3.137	6.686	3.353	3.287	3.269	23.110
		D_{16}	54.299	3.387	9.862	4.123	3.760	3.707	71.938
		D_{25}	92.847	4.330	17.118	7.548	6.533	6.488	124.388
		D_{30}	108.903	6.253	25.331	8.989	7.516	7.524	141.331
		D_{50}	151.654	10.461	139.999	17.053	12.739	13.116	187.210
		D_{60}	169.282	12.743	168.793	26.490	17.010	17.937	208.952
		D_{75}	200.474	18.458	210.295	156.128	30.434	33.876	250.839
		D_{84}	229.396	24.919	247.383	270.316	67.501	69.292	293.064
		D_{90}	262.375	32.758	291.714	363.327	161.596	136.476	343.982
		D_m	141.599	16.174	127.125	89.839	42.734	41.142	176.268
	比積百分比(%)	礫石	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		砂	79.74	2.60	61.41	29.98	15.40	15.40	83.73
		粉砂	20.26	97.41	38.59	70.02	84.60	84.60	16.27

表 5-10 彰化海床 St3 底泥粒徑分析結果

樣站		St3			
實際採樣深度		40cm			
沉降後測粒徑深度		~5cm	~15cm	25cm	
107/4/14	累積通過百分比所對應之粒徑大小(mm)	D_{10}	3.166	3.243	3.191
		D_{16}	3.443	3.609	3.503
		D_{25}	4.628	5.762	5.778
		D_{30}	6.322	6.907	7.134
		D_{50}	10.312	11.005	12.015
		D_{60}	12.671	13.560	15.671
		D_{75}	18.838	20.726	27.613
		D_{84}	26.705	30.837	66.809
		D_{90}	39.396	54.042	204.621
		D_m	29.129	34.815	50.471
	分比積百分比(%)	礫石	0.00	0.00	0.00
		砂	6.14	8.45	15.47
		粉砂	93.86	91.55	84.53

三個測點，共計五支底泥樣品採樣，除分析底泥粒徑外，亦同步檢視是否有大型底棲生物，僅在彰化海床 St3 的 40cm 採樣管底泥中發現一隻多毛綱(Polychaeta)部份身體，如圖 5.27 所示。



圖 5.27 St3 底泥內的底棲生物沙蠶 sp.

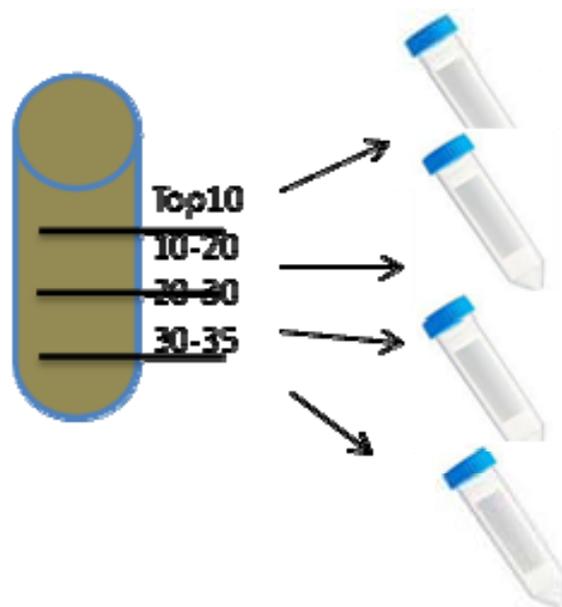


圖 5.28 底泥採樣管底泥 DNA 樣本分層收集示意圖

5.3.3 底泥微生物分析

因本次分析之微生物棲息於海洋底泥中，故於土壤試劑類型中選用 Mobio DNeasy PowerSoil DNA 萃取試劑套組，以增加底泥樣本 DNA 萃取成功機率。試驗方式如下：

1. 將採集的海洋底泥管依每 10cm 分別收集 50cc 至離心管(圖 5.28)。
2. 利用 DNeasy PowerSoil DNA 萃取不同深度樣本之底泥 DNA(圖 5.29)。

因萃取出之 DNA 溶液跑膠看不出濃度，故利用 PCR 反應產物來驗證從底泥萃取的 DNA 是否含微生物 DNA。設計引子(515F：GTGCCAGCMGCCGCGGTAA；1492R (s): ACCTTGTT ACGACTT)來偵測微生物 16S rDNA 的存在^[149]。以引子(515F；1492R)來進行 PCR，以 Taq polymerase 在溫度循環機上複製所欲片段。

在總體積 25 μ l 的反應液中加入 0.5 μ l 聚合酵素 (Taq polymerase)、2.5 μ l 10X PCR 緩衝溶液、2.5 μ l 的 dNTP (8mM)、濃度 2pmole 的引子各 2.5 μ l、2.5 μ l 的 MgCl₂ (10mM)、最後加入 2.5 μ l DNA (2ng/ μ l)，並以無菌水補足 25 μ l。

反應在溫度循環機內進行，共進行 35 個循環，每個循環的流程為：94 $^{\circ}$ C，30 秒，將 DNA 的雙股變性打開(denaturation)；53 $^{\circ}$ C，30 秒，使 DNA 與引子黏合(annealing)；72 $^{\circ}$ C，1 分 20 秒，進行 DNA 延伸反應(extension)；最後在 72 $^{\circ}$ C 作用 10 分鐘，反應完成後，溫度循環機維持在 4 $^{\circ}$ C。取 5 μ l 的 PCR 產物 加上 1 μ l 6 倍的染色溶液，在 0.8% 瓊脂凝膠(agarose gel) 中以 135 伏特電壓跑電泳約 30 分鐘，經過溴化乙啶螢光染劑經過 SafeViewDNA 螢光染劑處理後，配合所選用的 DNA ladder 當標幟 (Bio 100 DNA Ladder of 100bp-3kbp, PROtech)，最後於紫外光燈台下拍照。經多次實驗修正，成功自底泥中萃取出萃取微生物 DNA。

針對研究海域是否存在具腐蝕之硫酸還原菌。因此以可辨識硫酸還原菌 DSR 基因的引子對 (DSRp2060F : CAACATCGTYCAYACCCAGGG ; DSR4R: GTG TAG CAG TTA CCG CA)^[150]進行 PCR 偵測，以 Taq polymerase 在溫度循環機上複製所欲片段。

在總體積 25 μ l 的反應液中加入 0.5 μ l 聚合酵素 (Taq polymerase)、2.5 μ l 10X PCR 緩衝溶液、2.5 μ l 的 dNTP (8mM)、濃度 2pmole 的引子各 2.5 μ l、2.5 μ l 的 MgCl₂ (10mM)、最後加入 2.5 μ l DNA (2ng/ μ l)，並以無菌水補足 25 μ l。

反應在溫度循環機內進行，共進行 35 個循環，每個循環的流程為：94 $^{\circ}$ C，30 秒，將 DNA 的雙股變性打開(denaturation)；47~60 $^{\circ}$ C，30 秒，使 DNA 與引子黏合(annealing)；72 $^{\circ}$ C，1 分鐘，進行 DNA 延伸反應(extension)；最後在 72 $^{\circ}$ C 作用 10 分鐘，反應完成後，溫度循環機維持在 4 $^{\circ}$ C。取 5 μ l 的 PCR 產物 加上 1 μ l 6 倍的染色溶液，在 1.2%瓊脂凝膠(agarose gel) 中以 135 伏特電壓跑電泳約 30 分鐘，經過 SafeViewDNA 螢光染劑處理後，配合所選用的 DNA ladder 當標幟 (Bio 100 DNA Ladder of 100bp-3kbp, PROtech)，最後在紫外光燈台下拍照。由電泳結果看出在不同黏合(annealing) 52~60 $^{\circ}$ C 溫度下有出現介於 300~400 bp 的 band，其結果與預期目標(~350 bp)接近。跑膠結果證實 54~58 $^{\circ}$ C 間的黏合(annealing) 溫度效果較佳(圖 5.30B)。且於 30~36 cm 之底泥有硫酸還原菌存在。

3. 進行 NGS 定序。

臺中港 St1 的 60cm 長海洋底泥管中底泥沉降後(36cm 深)，進行 NGS 的底泥深度樣品分別有 Soil1(0~10cm)、Soil2(10~20cm)和 Soil4(30~36cm)。此三個底泥深度分別定出 112,784、255,400 和 203,422 條 DNA 序列，僅有 0.33%、0.34%和 0.41%無法鑑定至界(Kingdom)。各底泥深度能鑑別出分類結果之比例如圖 5.31~圖 5.33 所示；各有 99.10%、99.34%和 98.96%的序列為細菌界(Bacteria Kingdom)；各有 0.57%、0.32%和 0.62%的序列為古菌界(Archaea

Kingdom)；有 81,548(71.51%)、183,833(71.98%)和 145,466 (72.30%) 條序列能鑑定到 623、657 和 654 個屬；有 54,033 (47.91%)、122,323(47.89%)和 96,785(47.58%)條序列能鑑別出 838、1013 和 994 個物種，並比對出與具腐蝕金屬材料之硫酸還原菌^[71,151]同屬的種類 (如:*Desulfovibrio*, *Desulfobacterium*, *Desulfotomaculum*, *Thiobacillus*, *Sulfurospirillum*, *Leptothrix*, *Crenothrix*, *Thiobacillus*, *Clostridium*, *Flavobacterium*, *Bacillus*, and *Pseudomonas* 等)。

另以屬為單位，利用階層群聚(Hierarchical Clustering)分析法探討不同深度微生物之相似性，結果顯示 Soil1 和 Soil2 相鄰兩深度間微生物特性具有較大的相似性，與 Soil4 的相似性則較小(圖 5.34)。圖 5.34 中不同顏色與高度代表不同屬內種類的豐富程度。

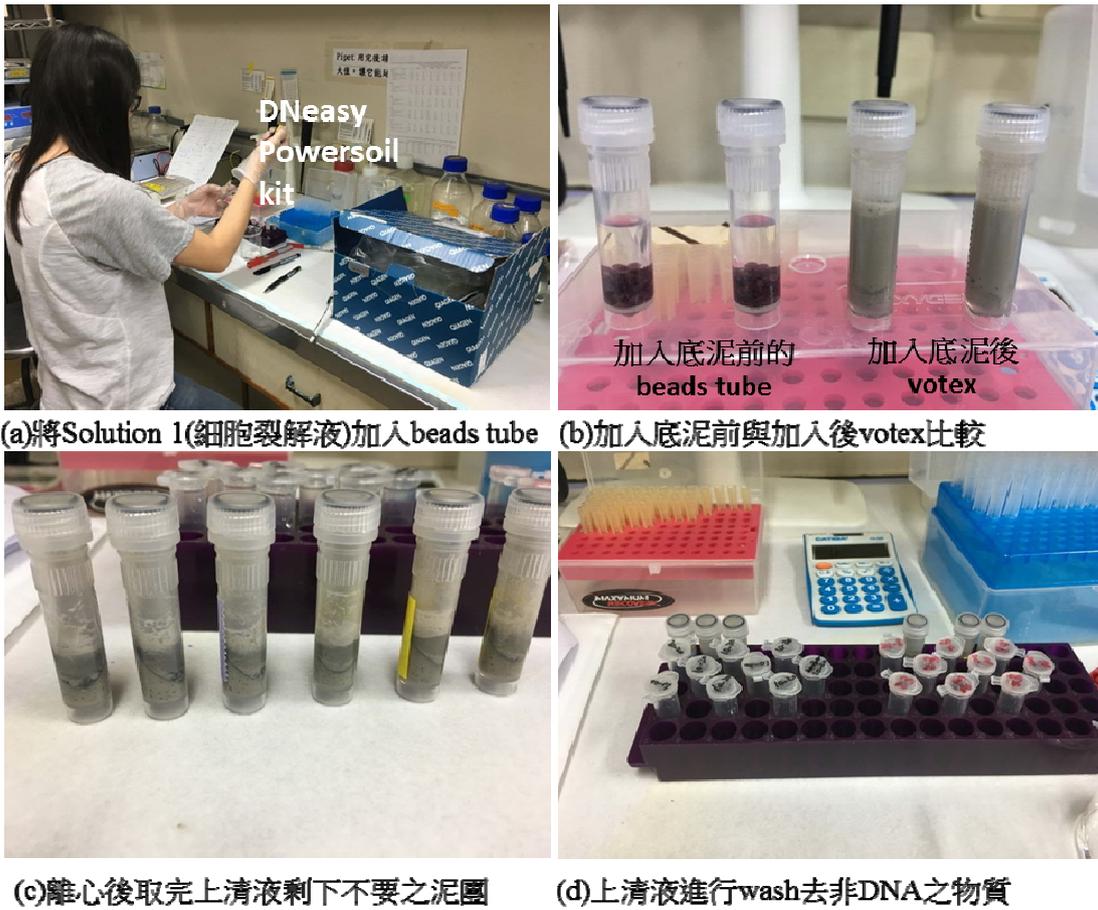


圖 5.29 底泥 DNA 萃取實驗進行狀況

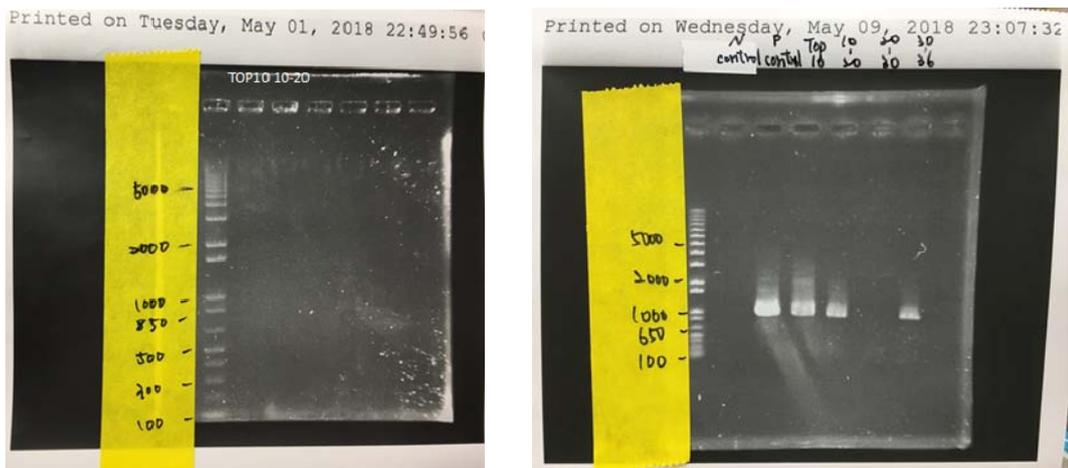


圖 5.30 PCR 產物檢視

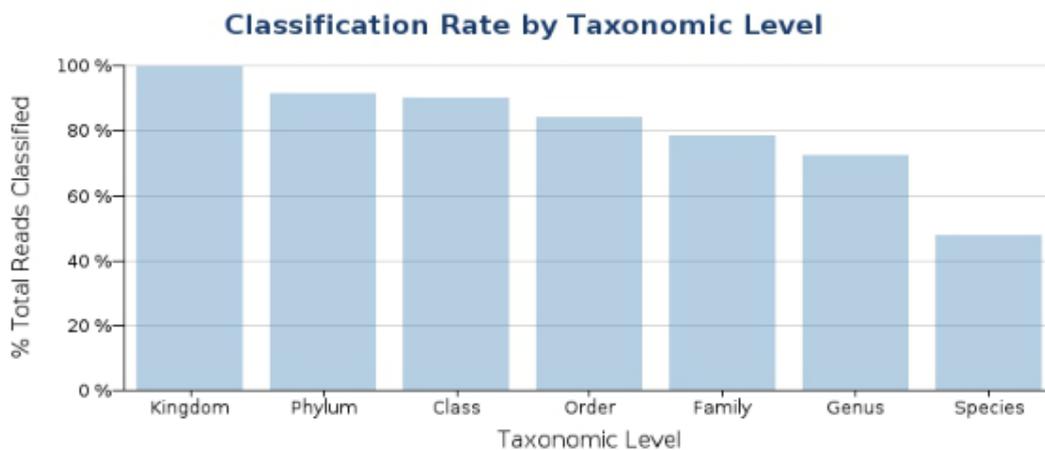


圖 5.31 Soil1 底泥微生物 DNA 序列各分類位階鑑別結果之比例

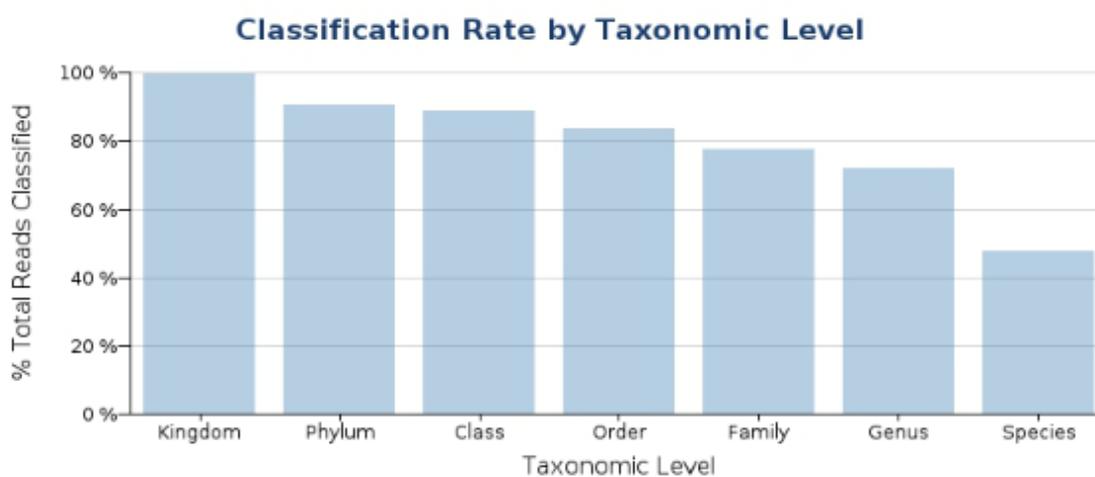


圖 5.32 Soil2 底泥微生物 DNA 序列各分類位階鑑別結果之比例

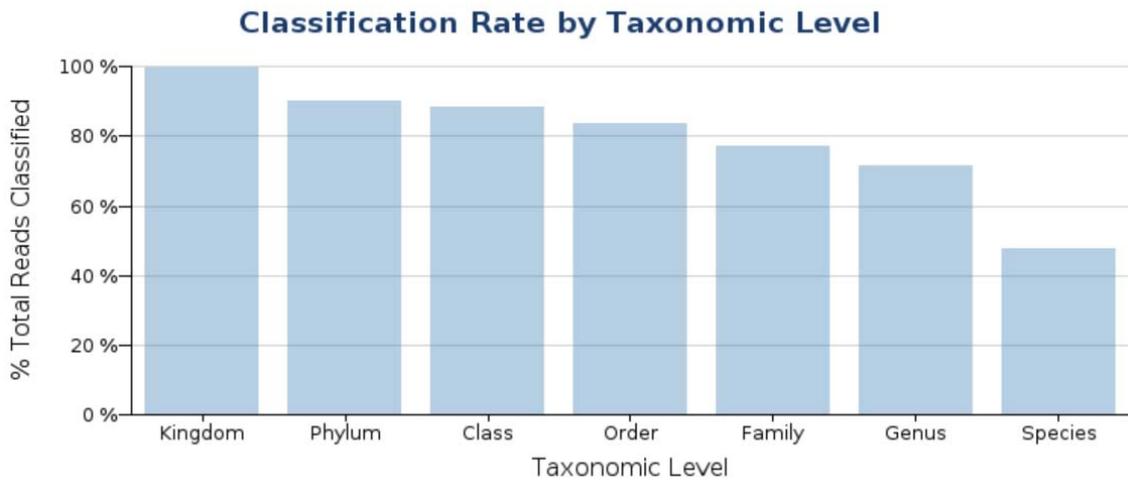


圖 5.33 Soil4 底泥微生物 DNA 序列各分類位階鑑別結果之比例

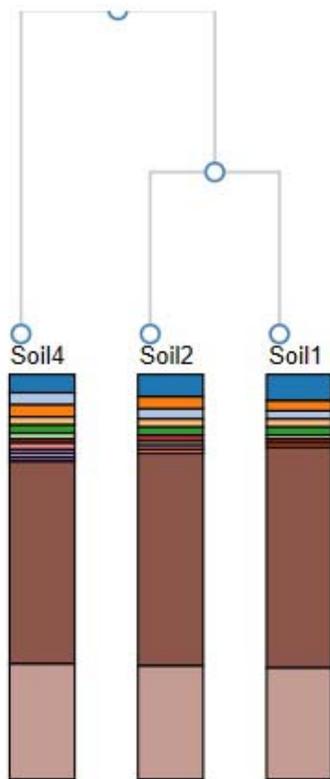


圖 5.34 底泥微生物 DNA 階層分析圖

第六章 結論與建議

本研究針對國內外離岸風機基樁與金屬構件腐蝕防治技術進行探討，計畫目標包括：1. 國內外離岸風機基樁水下腐蝕防治及監測技術文獻蒐集與彙整；2. 國內外離岸風機基樁海洋附著生物腐蝕影響及防蝕文獻蒐集與彙整；3. 離岸風機基樁防蝕系統選擇與現地大氣與水下暴露試驗規劃與調查；4. 離岸風機基樁海洋附著生物附著暴露試驗規劃與調查；5. 離岸風電現地腐蝕監測試驗規劃；6. 離岸風電現地水質及底泥分析試驗調查。

6.1 結論

1. 本研究蒐集國內外水下腐蝕防治與監測技術等相關文獻，水下腐蝕防治多採用陰極防蝕與防腐塗層工法兩大類，又以陰極防蝕為主，另視結構物設置環境需求，搭配各式塗料塗層系統，以提高水下防蝕效果；現國外離岸風機塗層一般依循 ISO 20340:2009 規範施行塗裝防蝕，其他 NORSOK, M-501 及 ISO 20340 亦為重要的塗層計術規範標準。腐蝕防治監測設備如：腐蝕監測儀及離岸風機結構健康監測系統等，皆可提高機組使用效能，減低勞動成本與風險，考量水下儀器監測品質與生物污損等影響，應規劃適宜週期定期維護、檢修。
2. 本研究蒐集海洋附著生物腐蝕影響及防蝕等相關文獻，其分佈受海域、溫度、季節等多重環境因子影響，欲掌握特定區域海洋附著生物分佈情況，應持續推動相關調查工作。由於海洋附著生物族群消長受到季節、深度等多重因素影響，應延長觀測週期，瞭解各時期之主導海洋附著生物，選用最佳之防蝕方法；另外過往認為生物膜是為造成生物腐蝕之重要成因，然現已發現部分生物膜，如 *Desulfovibrio vulgaris*、*Leuconostoc mesenteroides* 之生物膜，可達抑

制腐蝕、保護金屬之作用，故除傳統塗層工法，未來亦可輔以相關微生物自然機制進行防蝕處理。

3. 離岸風機基樁防蝕系統依暴露區域選用不同防蝕措施。大氣暴露帶採塗裝系統防護，海中帶域採犧牲陽極之陰極防蝕工法，潮間帶可加裝 FPR 或 PVC 保護套包覆，增強海水沖擊之抵禦能力。
4. 基樁海洋附著生物與海洋暴露試驗配合「臺中港海氣象觀測樁」進行規劃，可於大氣帶、潮差帶、海中帶及底層四區進行基樁與金屬試片材料腐蝕之觀測與調查。
5. 離岸風機現地腐蝕監測因彰化風機預定海域並無設置基樁，故規劃以金屬試架拋放方式進行試驗(107 年 4 月 14 日拋放完成)，試片選用 A36 與 A572 兩種金屬，試驗期程為期兩年，擬於第 3、6、12、24 個月時進行採樣工作，共計四次。未來可結合現地暴露試驗結果及環境檢測數據，推估其海域之生物地質化學機制。
6. 研究期間，冬季臺中海域水質符合乙類水質標準，春季彰化海域進行兩次採樣，期間代表浮游植物之葉綠素 a 濃度顯著提升，季節變化可能是影響彰化海域浮游植物濃度變化之重要因素。臺中海床底泥粒徑介於 96.430-116.975 μm ，整體以砂質為主(可達 66%)，然彰化海床兩測站粒徑、砂與粉砂比例變化大，顯見風機預定海域中底泥變化仍大，可持續進行觀測，以釐清各環境條件，如季節、深度、潮流變化等對其海域環境之影響。
7. 研究期間，臺中港區底泥表層(60 公分以內深度)微生物經 NGS 定序比對後，有發現與具腐蝕金屬材料之硫酸還原菌同屬的微生物分布(如: *Desulfovibrio*、*Desulfobacterium*、*Desulfotomaculum*、*Thiobacillus*、*Sulfurospirillum*、*Leptothrix*、*Crenothrix*、*Thiobacillus*、*Clostridium*、*Flavobacterium*、*Bacillus* and *Pseudomonas* 等)。

6.2 建議

1. 海洋附著生物、現地腐蝕之海洋暴露試驗未來亦將持續進行，建議優先選用本土可生產之金屬材質進行試驗，另本年度首次進行金屬試架拋放，建議可擇時回收此金屬試片，以瞭解金屬試架於水下佈放情況與穩定度，作為未來金屬試架之設計參考。
2. 受限於計畫期程，本年度僅可蒐集冬、春兩季之海域環境參數，然各海域水質、流況及微生物物種及密度等，受潮汐、季節、颱風等多重自然因素交互影響，應持續進行長期觀測，以深入瞭解海域環境特性。
3. 本次以人工方式進行底泥採樣工作，故採樣深度僅可達 60 公分，如欲進一步探討基樁於深部之腐蝕情況，建議向更深處進行樣本採集，以利探究深部底泥粒徑與微生物之分佈情況。

第七章 參考文獻

- [1] 林維明、陳桂清、饒正、周祖望、黃永光、吳信昇、柯正龍、何木火、林隆貞、洪健龍、楊淵洲、蔡克群、毛維雲、高志勇，「臺灣海域之腐蝕特性防蝕設計及材料選用與開發」，港灣技術研究所研究報告，1991。
- [2] 林維明、饒正，「澎湖跨海大橋腐蝕調查研究」，港灣技術研究所專刊第 41 號，1987。
- [3] 林維明、饒正，「基隆港碼頭鋼板樁腐蝕調查研究」，港灣技術研究所專刊第 59 號，1990。
- [4] 饒正、林維明、陳桂清，「港灣 R.C. 結構物修理系統評估研究」，港灣技術研究所研究報告，1994。
- [5] 林維明、饒正，「港灣鋼構造物耐久性研究第一年報告」，港灣技術研究所，1990。
- [6] 饒正、柯正龍，「港灣鋼構造物耐久性研究第二年報告」，港灣技術研究所，1991。
- [7] 陳桂清、饒正、柯正龍，「港灣鋼構造物耐久性研究第三年報告」，港灣技術研究所，1992。
- [8] 陳桂清、饒正、柯正龍，「港灣鋼構造物耐久性研究第四年報告」，港灣技術研究所，1993。
- [9] 饒正、林維明，「港灣構造物腐蝕機理與維修防制之研究」，港灣技術研究所研究報告，1996。
- [10] 饒正、柯正龍，「水文及污損生物對材料腐蝕之探討研究」，港灣技術研究所，1995。
- [11] 饒正、陳桂清、柯正龍、羅建明，「現有結構物安全評估及維護研究

- (一) 」 港灣技術研究所，1997。
- [12] 陳桂清、饒正、張道光、羅建明，「現有結構物安全評估及維護研究(二)」，港灣技術研究所，1998。
- [13] 饒正、李賢華、宋克義、羅俊雄，「現有結構物安全評估及維護研究(三)」，港灣技術研究所，1999
- [14] 饒正、陳桂清、李釗、李賢華，「現有結構物安全評估及維護研究(四)」交通部運輸研究所，2000。
- [15] 張道光、陳桂清、饒正、柯正龍，「港灣鋼筋混凝土結構物耐久性研究」，港灣技術研究所技術研究報告，1996。
- [16] 饒正、陳桂清、李賢華、羅俊雄，「高雄港工結構材料海生物附著與對策研究」，港灣技術研究所，1997。
- [17] 饒正、陳桂清、李賢華、羅俊雄，「高雄港港工結構腐蝕與海生物附著研究」，港灣技術研究所，1999。
- [18] 饒正、陳桂清、柯正龍、張道光，「碼頭鋼板樁現況調查與腐蝕防治研究」，港灣技術研究所研究報告，2002。
- [19] 羅建明、陳桂清、柯正龍，「金屬材料腐蝕環境調查研究(1/2)」，交通部運輸研究所，2016。
- [20] 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.
- [21] Momber, A. (2011). Corrosion and corrosion protection of support structures for offshore wind energy devices (OWEA). *Materials and Corrosion*, 62, 391-404.
- [22] 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.

- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Momber, A. W. (2016). Quantitative performance assessment of corrosion protection systems for offshore wind power transmission platforms. *Renewable Energy*, 94, 314-327.
- [28] 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_Tapes/](http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en_US/Wind/Energy/Products/Wind_Protection_Tapes/) (accessed on 28 September 2016).
- [29] Valaker, E. A., Armada, S., & Wilson, S. (2015). Droplet Erosion Protection Coatings for Offshore Wind Turbine Blades. *Energy Procedia*, 80, 263-275.
- [30] Bradford, S. A. (1993). *Corrosion Control*. New York, U.S.A.: Nostrand Reinhold.

- [31] Broomfield J. P. (1997). *Corrosion of Steel in Concrete, Understanding, investigation and repair*. London, England: Taylor & Francis.
- [32] 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。
- [33] Fink, F. W., & Boyd, W. K. (1970). The Corrosion of Metals in Marine Environment. *DMIC Report 245*, Defense Metals Information Center, Battelle Memorial Institute, Columbus, OH.
- [34] Edwards, W. E. (1963). Marine Corrosion: Its Cause and Cure, Proceedings of the Eighth Annual Appalachian Underground Short Course, *Technical Bulletin 69*, West Virginia University Bulletin.
- [35] 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。
- [36] 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。
- [37] 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。
- [38] IEC 61400-3.(2009) International Standard Wind turbines - Part 3: Design requirements for offshore wind turbines.
- [39] 廖學瑞、丁金彪、林俶寬、劉育明，「離岸風機基礎設計技術初探」，中華技術，第 103 期，第 86~95 頁，2014。
- [40] 周建宇，「離岸風力變電站之基礎設計與施工研習」，台灣電力公司輸工處中區施工處出國報告，2018。
- [41] Kim K. (2002) Corrosion Protection of Port Structures in Korea and Some Lessons in Underwater Cathodic Protection. Keynote Lecture, Ocean Engineering Conference, Taiwan.
- [42] 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。
- [43] 鄭錦榮，「離岸風機海上結構物腐蝕監測及風機資產管理」，台灣電力公司綜合研究所，2015。
- [44] 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。
- [45] 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.
- [46] ISO 20340:2009. Paints and Varnishes—Performance Requirements for Protective Paint Systems for Offshore and Related Structures.
- [47] Lehaître, M., Delauney, L., & Compère, C. (2008). Biofouling and underwater measurements. *Oceanographic Methodology series*, 12, 463-493.
- [48] Gray, G. B., & Heitsenrether, R. (2013). NOAA's recent field testing of coastal water quality monitoring systems-quantifying impacts of biofouling and investigating chloride measurement techniques, Oceans-San Diego.
- [49] 孔祥峰、姜源慶、張婧、褚東志、鄒妍、彭新，「生物污損對海洋監測儀器的影響及其防護措施」，腐蝕科學與防護技術，第 29 卷，第 6 期，第 664~668 頁，2017。
- [50] WindEurope (2017), Annual Offshore Statistics, Brussels.
- [51] IRENA (2018), Renewable Power Generation Costs in 2017, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- [52] 李忠縈、沈宗翰、鄭錦榮、林輝政、林招松、李岳聯，「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，2015。

- [53] Martinez, L. M., Kolios, A., & 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.
- [54] LaQue, F. L. (1975). *Marine corrosion: cause and Prevention*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- [55] Fusetani, N. (2004). Biofouling and antifouling. *Natural Product Reports*, 21, 94-104.
- [56] Flemming, H. C., Murthy, P. S., Venkatesan, R., & Cooksey, K. E. (2009). *Marine and Industrial Biofouling*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- [57] 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.
- [58] 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.
- [59] Wahl, M. (1989). Marine epibiosis. I. Fouling and antifouling: some basic aspects. *Marine Ecology Progress Series*, 58, 175-189.
- [60] Railkin, A. I. (2004). *Marine biofouling: colonization process and defenses*. London, England: Taylor & Francis.
- [61] 海軍海洋測量局，「台海海洋環境研究」，海軍海洋測量局，1981。
- [62] 鄭錦榮、白書禎、陳瑤湖，「防污塗料之效果評估研究試驗」，台電工程月刊，第 484 期，第 59~80 頁，1988。
- [63] 楊盛行、洪秀掙、林義宗，「海生物之吸附調查研究」，第二十九屆中國農化年會，1991。
- [64] 楊盛行、黃哲崇、王瑋龍、林義宗，「臺灣地區港區之海生物研究」，

中華生質能源學會會誌，第 11 期，第 42~66 頁，1992。

- [65] 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、王嫻文，「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。
- [66] 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.
- [67] 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*.
- [68] 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.
- [69] 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 .
- [70] 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.
- [71] 黃燁、劉雙江、姜成英，「微生物腐蝕及腐蝕機理研究進展」，微生物學通報，第 44 卷，第 7 期，第 1699~01713 頁，2017。
- [72] 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.

- [73] 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.
- [74] Al Abbas, F. M., Williamson, C., Bholra, 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.
- [75] Ghafari, M. D., Bahrami, A., Rasooli, I., Arabian, D., & Ghafari, F. (2013). Bacterial exopolymeric inhibition of carbon steel corrosion. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 80, 29-33.
- [76] 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.
- [77] Ringas, C., & Robinson, F. P. A. (1988). Corrosion of stainless steel by sulfate-reducing bacteria total immersion test-results. *Corrosion*, 44, 671-678.
- [78] Ringas, C., & Robinson, F. P. A. (1988). Corrosion of stainless steel by sulfate-reducing bacteria electrochemical techniques. *Corrosion*, 44, 386-396.
- [79] Neville, A., & Hodgkiess, T. (2000). Corrosion of stainless steels in marine conditions containing sulphate reducing bacteria. *British Corrosion Journal*, 35, 60-69.
- [80] Geiser, M., Avci, R., & Lewandowski, Z., (2002). Microbially initiated pitting on 316L stainless steel. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 49, 235-243.
- [81] 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.

- [82] 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.
- [83] 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.
- [84] 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.
- [85] 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.
- [86] 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.
- [87] 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.
- [88] Little, B. J., Wagner, P., Jacobus, J., & Janus, L. (1989). Evaluation of microbiologically induced corrosion in an estuary. *Estuaries*, 12, 138-41
- [89] Nicklin, G. (2008). Living with the Threat of Microbiologically Influenced Corrosion in Submarine Seawater Systems: the Royal Navy's Perspective (UK Ministry of Defence, London).
- [90] 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.

- [91] Elmouaden, K., Jodeh, S., Chaouay, A., Oukhrib, R., Salghi, R., Bazzi, L., & Hilali, M. (2016). Sulfate reducing bacteria impact on copper corrosion behavior in natural seawater environment. *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, 6, 36.
- [92] 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.
- [93] San, N. O., Nazir, H., & Donmez, G. (2014). Microbially in fluenced corrosion and inhibition of nicklezinc and nickelecopper coatings by *Pseudomonas aeruginosa*. *Corrosion Science*, 79, 177-183.
- [94] 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.
- [95] Yuan S. J., Liang, B., Zhao Y., & Pehkonencet, 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, 353-36.
- [96] 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.
- [97] Cypionka, H., Widdel, F., & Pfennig, N. (1985). Survival of sulfate-reducing bacteria after oxygen stress, and growth in sulfate-free oxygen-sulfide gradients. *FEMS Microbiology Letters*, 31(1), 39-45.
- [98] Mogensen G. L., Kjeldsen K. U., & Ingvorsen, K. (2005). *Desulfovibrio aerotolerans* sp. nov., an oxygen tolerant sulphate reducing bacterium isolated from activated sludge. *Anaerobe*, 11(6), 339-49.

- [99] Brioukhanov, A. L., & Netrusov, A. I. (2007). Aerotolerance of strictly anaerobic microorganisms and factors of defense against oxidative stress: a review. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 43(6), 567-582.
- [100] 王丹、賈貞、游松，「硫酸鹽還原菌的培養及檢測方法的研究進展」，瀋陽醫藥大學學報，第 26 卷，第 6 期，第 502~506 頁，2009。
- [101] Galbraith, J. M., & Lofgren, K. L. (1987). Update on monitoring microbial corrosion in Prudhoe Bay's produced water and seawater floods. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(9), 47.
- [102] 李婉義，「三碘化亞基藍法測定硫酸鹽還原菌菌量」，油田化學，第 8 卷，第 3 期，第 249~253 頁，1991。
- [103] 王佳、黃彥良、嚴莉、李相波，「一種測量硫酸鹽還原菌含量的傳感器」，中國專利：CN1451959，2004。
- [104] Odom, J. M., Jessie, K., Knodel, E., & Emptage, M. (1991). Immunological Cross-Reactivities of Adenosine-5'-Phosphosulfate Reductases from Sulfate-Reducing and Sulfide-Oxidizing Bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, 57(3), 727- 733.
- [105] Song, Y. C., Piak, B. C., Shin, H. S., & La, S. J. (1998). Influence of electron donor and toxic materials on the activity of sulfate reducing bacteria for the treatment of electroplating wastewater. *Water Science and Technology*, 38 (4-5), 187-194.
- [106] Wagner, M., Horn, M., & Daims, H. (2003). Fluorescence in situ hybridisation for the identification and characterisation of prokaryotes. *Current Opinion in Microbiology*, 6, 302- 309.
- [107] Lücker, S., Stegera, D., Kjeldsen, K. U., MacGregor, B. J., & Wagner, M. (2007). Improved 16S rRNA-targeted probe set for analysis of sulfate-reducing bacteria by fluorescence in situ hybridization. *Journal of Microbiological Methods*, 69(3), 523 - 528.

- [108] 馬放、魏利，「一種硫酸鹽還原菌直接倍比稀釋 PCR 快速定量檢測方法」，中國專利：CN 1769472，2008。
- [109] Ben-Dov, E., Brenner, A., & Kushmaro, A. (2007). Quantification of sulfate-reducing bacteria in industrial wastewater, by real-time polymerase chain reaction (PCR) using *dsrA* and *apsA* genes. *Microbial Ecology*, 54(3), 439-451.
- [110] Katranitsas, A., Castritsi-Catharios, J., & Persoone, G. (2003) "The effects of a copper-based antifouling paint on mortality and enzymatic activity of a non-target marine organism," *Marine Pollution Bulletin*, 46, 1491-1494.
- [111] Schiff, K., Diehl, D., & Valkirs, A. (2004). Copper emissions from antifouling paint on recreational vessels. *Marine Pollution Bulletin*, 48, 371-377.
- [112] Claisse, D., & Alzie, C. (1993). Copper Contamination as a Result of Antifouling Paint Regulations. *Marine Pollution Bulletin*, 26(7), 395-397.
- [113] Knox-Holmes, B. (1993). Biofouling control with low levels of copper and chlorine, *Biofouling*, 7, 157-166.
- [114] Fusetani, N. (2004). Biofouling and antifouling. *Natural Product Reports*, 21, 94-104.
- [115] Jelic-Mrcelic, G., Sliskovic, M., & Antolic, B. (2006). Biofouling communities on test panels coated with TBT and TBT-free copper based antifouling paints. *Biofouling*, 22(5-6), 293-302.
- [116] Pelletier, J. D., Engelder, T. M., Comeau, D., Hudson, A., Leclerc, M., Youberg, A., & Diniega, S. (2009). Tectonic and structural control of fluvial channel morphology in metamorphic core complexes: The example of the Catalina-Rincon core complex, Arizona. *Geosphere*, 5(4), 363-384.
- [117] 黃宗國，「海洋污損生物及其防除」，海洋出版社，2008。

- [118] Henrikson, A. A., & Pawlik, J. R. (1995). A new antifouling assay method: results from field experiments using extracts of four marine organisms. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 194, 157-165.
- [119] Ayoub, M. M. H., Malek, M. M. A., & Messiha, N. N. (1990). Laboratory and ships test of modern antifouling paint formulation. *Pigment and Resin Technique*, 4-6.
- [120] Chambers, L. D., Stokes, K. R., Walsh, F. C., & Wood, R. J. K. (2006). Modern approaches to marine antifouling coatings, *Surface and Coatings Technology*, 201, 3642-3652.
- [121] Dobretsov, S., Dahms, H. U., & Qian, P. Y. (2006). Inhibition of biofouling by marine microorganisms and their metabolites. *Biofouling*, 22, 43-54.
- [122] 周文木、王孝杰、胡碧茹、吳文健，「海洋污損生物黏附機制及防污塗層表面工程」，應用化學，第 27 卷，第 9 期，第 993~997 頁，2010。
- [123] Hodson, S. L., Burke, C. M., & Bissett, A. P. (2000). Biofouling of fish-cage netting: the efficacy of a silicone coating and the effect of netting colour. *Aquaculture*, 184, 277-290.
- [124] Lee, S., & Vörös, J. (2005). An Aqueous-Based Surface Modification of Poly(dimethylsiloxane) with Poly(ethylene glycol) to Prevent Biofouling. *Langmuir*, 21(25), 11957-11962.
- [125] Kumar, S. A., Balakrishnan, T., Alagar, M., & Denchev, Z. (2006). Development and characterization of silicone/phosphorus modified epoxy materials and their application as anticorrosion and antifouling coatings. *Progress in Organic Coatings*, 55, 207-217.
- [126] Akesso, L., Pettitt, M. E., Callow, J. A., Callow, M. E., Stallard, J., Teer, D., Liu, C., Wang, S., Zhao, Q., D'Souza, F., Willemsen, P. R., Donnelly, G. T., Donik, C., Kocijan, A., Jenko, M., Jones, L. A., & Guinaldo, P. C. (2009). The potential of nano-structured silicon oxide type coatings

- deposited by PACVD for control of aquatic biofouling. *Biofouling*, 25(1), 55-67.
- [127] Bennett, S. M., Finlay, J. A., Gunari, N., Wells, D. D., Meyer, A. E., Walker, G. C., Callow, M. E., Callow, J. A., Bright, F. V., & Delly, M. R. (2010). The role of surface energy and water wettability in aminoalkyl / fluorocarbon / hydrocarbon-modified xerogel surfaces in the control of marine biofouling. *Biofouling*, 26, 235-246.
- [128] Thomas, K. V. (1998). Determination of selected antifouling paint booster biocides by high performance liquid chromatography-atmospheric pressure chemical ionization mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 825, 153-158.
- [129] Ralston, E., & Swain, G. (2009). Bioinspiration: the solution for biofouling control. *Bioinspiration and Biomimetics*, 4(1), 015007.
- [130] Pérez, M., García, M., Blusten, G., & Stupak, M. (2007). Tannin and tannate from the quebracho tree: an eco-friendly alternative for controlling marine biofouling. *Biofouling*, 23(3/4), 151-159.
- [131] 王斌、郝紅、王凱、趙亞玲、韋雄雄、曹亞虹，「環境友好型海洋防污塗料的研究現狀及展望」，材料保護技術，第44卷，第8期，第56-1頁，2011。
- [132] Baire, R. E. (1973). Proc 3ed Int Congr Marine Corrosion and Fouling. Gaithersburg, 633.
- [133] 桂泰江、王科，「低表面能海洋防污塗料的現狀與發展趨勢」，現代塗料與塗裝，第13卷，第11期，第32~35頁，2010。
- [134] Brady, R. F., & Singer, I. L. (2000). Mechanical Factors favouring release from Fouling Release coatings. *Biofouling*, 15(1-3), 73-81.
- [135] Garrett, J. H. (1891). *The Action of Water on Lead Lewis*. London.
- [136] 樊友軍、皮振邦、華萍，「微生物腐蝕的作用機制與研究方法現狀」，材料保護技術，第34卷，第5期，第18~20頁，2001。

- [137] 劉宏芳、汪梅芳、許立銘，「微生物腐蝕中生物防治措施的研究」，材料保護技術，第 23 卷，第 12 期，第 519~522 頁，2002。
- [138] 趙莉、葛紅花、申晶，「三種不同體系的微生物腐蝕及控制」，材料保護技術，第 32 卷，第 3 期，第 200~205 頁，2011。
- [139] Videla, H. A., & Herrera, L. K. (2009). Understanding microbial inhibition of corrosion. A comprehensive overview. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 63(7), 896-900.
- [140] Stadler, R., Wei, L., Fürbeth, W., Grooters, M., & Kuklinski, A. (2010). Influence of bacterial exopolymers on cell adhesion of *Desulfovibrio vulgaris* on high alloyed steel: Corrosion inhibition by extracellular polymeric substances. *Materials and Corrosion*, 61(12), 1008.
- [141] Molino, P. J., & Wetherbee, R. (2008). The biology of biofouling diatoms and their role in the development of microbial slimes. *Biofouling*, 24(5), 365-379.
- [142] Roux, S., Bur, N., & Ferrari, G. (2010). Influence of a biopolymer admixture on corrosion behaviour of steel rebars in concrete, *Materials and Corrosion*, 61(12), 1026.
- [143] Finkenstadt, V. L., Cote, G. L., & Willett, J. L. (2011). Corrosion protection of low-carbon steel using exopolysaccharide coatings from *Leuconostoc mesenteroides*, *Biotechnology Letters*, 33(6), 1093.
- [144] Dong, Z. H., Liu, T., & Liu, H. (2011). Influence of EPS isolated from thermophilic sulphate-reducing bacteria on carbon steel corrosion, *Biofouling*, 27(5), 487.
- [145] 「前瞻基礎建設計畫--臺中港離岸風電產業專區」，交通部，2017。
- [146] 林明華、彭國源、蔡同宏、葉錦璋，「棧橋碼頭與沉箱碼頭施工實務探討」，中華技術，第 108 期，第 212~229 頁，2015。
- [147] 吳念祖，「離岸風機下部基礎結構營運期間之結構安全議題探討」，中興工程顧問股份有限公司，2016。

- [148] 蔡立宏、徐如娟、劉大綱、許弘莒、陳平「鄰港水質環境調查研究(4/4)」，交通部運輸研究所，2003。
- [149] Ghosh, A., Dey, N., Bera, A., Tiwari, A., Sathyanirajan, K. B, Chakrabarti, K., & Chattopadhyay, D. (2010). Culture independent molecular analysis of bacterial communities in the mangrove sediment of Sundarban, India, *Saline Systems*, 6, 1-1.
- [150] Dar, S. A., Yao, L., van Dongen, U., Kuenen, J. G., & Muyzer G. (2007). Analysis of diversity and activity of sulfate-reducing bacterial communities in sulfidogenic bioreactors Using 16S rRNA and *dsrB* genes as molecular markers, *Applied and Environmental Microbiology*, 73(2), 594.
- [151] Kip, N., & van Veen, J. A. (2015). The dual role of microbes in corrosion, *The ISME Journal*, 9, 542

附錄一

「離岸風電水下技術研發」 期中報告審查意見處理情形

交通部運輸研究所合作研究計畫（具委託性質）

期中 期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：離岸風電水下技術研發

執行單位：弘光科技大學

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
陳武雄委員		
1. 對本計畫工作項目中，在短時間所蒐集及彙整國內外技術文獻成效不錯。	感謝委員肯定，將持續進行相關文獻、資訊蒐集供相關研究參考之用。	同意辦理方式。
2. 海洋結構物腐蝕部位對應 p2-7 頁中飛沫帶腐蝕為海中帶 2~10 倍，碳鋼速度 0.32mm/y；潮間帶 0.24mm/y；海床區 0.08mm/y 此數據來自何文獻紀載，或為何處實測實績？	感謝委員意見，海洋腐蝕區域分類資料已於 p2-12~p2-14 頁中修訂，並註明出處。	同意辦理方式。
3. p2-9 基座有好幾種，目前台電第一期離岸風電流標四次後，提高金額至 250 億後，再公告國內兩家廠商都退出，僅剩國外比利時和日立聯芳一家，其基座之鋼構造 800 噸，每艘供運輸設備三座，空位及再打樁，這此 800 噸鋼構防蝕採何種方式最佳？	感謝委員意見，離岸基樁防蝕仍以陰極防蝕為主，另視暴露區域搭配適宜之塗裝系統，以達最佳防蝕成效。相關資料請參閱 p2-17 至 p2-24。	同意辦理方式。
4. p 3-6 海生物海蠣子是否類似貝殼類海生物？台電在日月潭繁殖相當快，附著三座電廠進水口攔污柵，堵住水流影響運轉，海蠣子是否類似日月潭貝殼類。	海蠣子學名為牡蠣，是海洋中常見的貝類，與日月潭台電電廠進水口所見外來種河殼貽貝不同。	同意辦理方式。
5. p4-1，今年一月十六日已在臺中港進行水質及底泥採樣及樣品分析，並已安排彰化風場採樣，建議加速進行，若預算不足可辦理追加預算，同時做水質、底泥	感謝委員建議，本研究計畫期間，已完成臺中港區及彰化風機預定海域之採樣，各海域水質與底泥分析調查結果，詳見第五章。	同意辦理方式。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
分析及金屬試片試驗。因離岸風場多分佈在彰化風場，如此才有實證幫忙風電發展。		
許書王委員		
<p>1. 報告內容</p> <p>(1) p 4-1 第一行系統「工藝」請統一以國內用語為主。</p> <p>(2) p4-6 圖 4.7 內缺多字，請補正。</p> <p>(3) p 4-6 圖 4.8 內文字請以繁體字表達。</p> <p>(4) 第六章 p6-1 倒數第一行及倒數第四行文字等錯誤，請修正。</p>	<p>感謝委員提醒，已檢視報告錯別字與缺漏字，並統一使用繁體中文與國內詞彙撰寫、修正。</p>	<p>同意辦理方式。</p>
<p>2. 第五章 p5-2 照片不清楚。</p>	<p>此照片為水下作業紀錄，然因海況不佳導致下層水體混濁，期末報告將以彩色印製，提升清晰度。</p>	<p>同意辦理方式。</p>
<p>3. 本案有關風電設備，除本身之耐久性考量外，對於海生物是否會造成影響，建議應予探討(如噪音、風場等)。</p>	<p>感謝委員建議，本年度計畫針對國內外離岸風電基樁與金屬構件腐蝕等相關資料進行蒐集、彙整，同步於臺中港區及彰化風機預定海域進行水質、底泥等環境調查；並於彰化風機預定水域拋放金屬試架進行試驗初探。未來將與計畫單位共同討論，視研究目標考量是否納入相關研究規劃中。</p>	<p>同意辦理方式。</p>
<p>4. 採樣計畫屬於夏冬各一次，唯本案共五個半月，可能夏季未到合約已結束，應有應對之策。</p>	<p>感謝委員意見，受限於計畫工期，本年度僅可蒐集冬、春兩季之海域環境參數，然</p>	<p>同意辦理方式。</p>

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
	各海域水質、流況及微生物物種及密度等，受潮汐、季節、颱風等多重自然因素交互影響，已於建議事項提出應持續進行長期觀測，以深入瞭解海域環境特性。	
5. 參考文獻之註記方式請與所方洽辦，宜與所方其他報告方式統一為佳。	感謝委員提醒，已遵照港研中心報告格式修訂。	同意辦理方式。
王韡蒨委員		
1. 本計畫為四年期計畫，建議於Chap1 說明時，能規劃整體架構及第一期研究內容等，以瞭解研究計畫全貌及今年執行情況，以供檢核今年執行的適切性。	感謝委員建議，已於前言中描述本年度之研究重點與目標。	同意辦理方式。
2. Chap2 國內外文獻彙整，但內容集中在國內文獻缺乏國外文獻，且國外對此方面技術較國內純熟，建議多參考。文獻引用不確實，且許多圖未說明出處。建議多增加文獻蒐集的彙整資訊，以提升本研究對社會的貢獻度。	感謝委員建議，已於期末報告充實國內外水下腐蝕技術相關資料與文獻，並註明圖文出處，請參見第二章。	同意辦理方式。
3. 缺乏海生物對基樁的影響文獻與論述，建議多增加及更新相關文獻資料整理。	感謝委員建議，已於期末報告充實海洋附著生物污損、厭氧微生物菌種及近年發現部分生物膜可有效抗腐蝕等相關文獻，請參見第三章。	同意辦理方式。
4. Chap4 說明全案的研究方法及實驗規劃，各年度及今年的研究，要使人能瞭解本報告的定位	感謝委員建議，已補充說明研究方法與執行流程，請見第四章。	同意辦理方式。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
與內容，才能據以評估內容的適切性。		
5. Chap5 水質與底泥調查的季節性、取樣點是否合宜極具代表性，須再思考。	感謝委員建議，受限於計畫期程，本年度僅可蒐集冬、春兩季之海域環境參數，然各海域水質、流況及微生物物種及密度等，受潮汐、季節、颱風等多重自然因素交互影響，已於建議事項提出應持續進行長期觀測，以深入瞭解海域環境特性。	同意辦理方式。
6. 文獻寫法須統一加強。	感謝委員提醒，已遵照港研中心報告格式修訂。	同意辦理方式。
7. 題目中的水下技術研發針對方向為何？(題目與內容稍有些模糊)。	感謝委員意見，本計畫題目由港研中心訂定，研究內容與方向依據服務項目進行。	同意辦理方式。
8. 建議防蝕技術及監測技術的效益評估整合才會更有意義。	感謝委員建議，已邀請滙茂實業團隊合作，結合業界實作經驗以提升防蝕與監測技術之研究效益。	同意辦理方式。
9. 試片安裝檢測的規劃可再詳述，避免做虛工。	感謝委員建議，相關暴露試驗之試片安裝檢測規劃，請見 p4-5 致 p4-9。	同意辦理方式。
10. 文中寫法邏輯性需加強，語意不清。內文須再嚴謹檢核。	感謝委員提醒，已檢視報告加強文句描述與撰寫。	同意辦理方式。
11. 腐蝕的協和作用是否有考量。	感謝委員建議，本次研究針對金屬腐蝕及相關環境腐蝕因子進行探討，未來將視研究目的考量列入腐蝕協和作用之研究。	同意辦理方式。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
陳桂清委員		
1. 國內外相關文獻蒐集太少，請研究團隊積極蒐集相關資訊。國內有哪些單位正在進行此項風機腐蝕研究。	感謝委員建議，已於期末報告充實國內外水下腐蝕技術相關資料與文獻，並註明圖文出處，請參見第二章。	同意辦理方式。
2. 舉例國外一個現有運轉風機的防蝕案例。	感謝委員意見，國外離岸風電組件防蝕相關研究請見p2-8。	同意辦理方式。
3. 請說明現地曝放試驗規劃情形。	感謝委員意見，彰化現地腐蝕試驗已於107年4月14日完成，試驗規劃請見p4-8。	同意辦理方式。
4. 報告內容 (1) p 1-4, 1.4 小節標題，建議將「預期效益」改為「預期目標」。 (2) p 2-1, 2.1 節，文獻彙整時，有些段落上下語意敘述無法連貫及一致性，請適度修飾之。 (3) p 4-5, 2.1 節，監測儀器是否適當請說明之。 (4) p 4-10, 表 4-1, 經費估算請說明之。 (5) 4-12, 第八行，試片大小10*20cm。	感謝委員提醒，已檢視報告進行修訂並補強文字論述。	同意辦理方式。
柯正龍委員		
1. 本研究為四年期計畫之第一年，工作重點為蒐集彙整離岸風機「水下腐蝕防治」、「腐蝕防治監測」、「海生物腐蝕作用」、「海生物防蝕技術」等四大類相關文	感謝委員建議，將持續蒐集國內外相關文獻與資訊，以供後續研究參考應用。	同意辦理方式。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
<p>獻與規劃選用適用於臺灣本土之金屬材料、監測儀器及相關防蝕對策；建議研究團隊可再增加蒐集國內外相關產業新近之應用實績與研究報告，俾符計畫目的與利提供本所後續研究參考應用。</p>		
<p>2. 水質與底泥調查工作項目，建議增加與金屬腐蝕相關之因子，如海水氯離子與硫酸根離子濃度分析...等分析項目。</p>	<p>感謝委員建議，海水氯離子與硫酸根離子濃度分析已列入水質分析項目中。</p>	<p>同意辦理方式。</p>
<p>3. 「離岸風電基樁」，建議修改為「離岸風機基樁」。</p>	<p>感謝委員建議，已於報告中修訂。</p>	<p>同意辦理方式。</p>
<p>4. 報告內容</p> <p>(1) 第一章第二段第五行「我國」，請修改為「交通部運輸研究所」；倒數第三行「臺中港區及彰化現地」，建議修改為「臺中港區及彰化附近海域」。</p> <p>(2) 第二章 2.1(p2-1)第一段第三行「港灣研究中心」，請修改為「前臺灣省交通處港灣技術研究所」。</p> <p>(3) 圖 2.3(p2-6)，建議於圖下方加註原文出處，俾利查閱。</p> <p>(4) 第四章研究方法與實驗規劃，建議增加流程圖，俾利瞭解各工作項目關聯性與掌握實驗期程。</p>	<p>感謝委員提醒，已檢視報告圖文進行修訂，並加強相關論述與圖表等資料出處，俾利查閱。</p>	<p>同意辦理方式。</p>
<p>5. 圖 4.2(p4-2)，海域底質可否修改</p>		

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
為海床底泥，另粒徑改為級配分佈，生物特性改為海生物特性，是否較佳？		
謝明志委員		
1. 報告請依本所格式編輯。	感謝委員提醒，已遵照港研中心報告格式修訂。	同意辦理方式。
2. 請搜集國外海上風機設計、使用年限為多少，若上部結構損壞，有否規劃考慮續用下部結構，而可置換上部風機，因這會影響防蝕設計年限。	感謝委員建議，離岸風機設計多以二十年為期，但期間仍須視風機實際使用情況陸續進行組件維護與更換，故各部位結構之置換時機應視實際使用情況而定。	同意辦理方式。
3. 海上風機佈設密度，相關的規劃推估資料文獻，也請搜集。	感謝委員建議，隨著離岸風機逐步發展，其機組發電容量、離岸距離及深度皆逐步增加，相關資料請見 p2-24 至 p2-25。	同意辦理方式。
4. 海生物影響分析如何定量化，請惠予規劃並提出建議。	感謝委員建議，海洋附著生物生物會隨季節、潮汐、波浪等多重自然因素交互影響，故無法以短期或少量樣品進行量化，建議應長期觀測，深入瞭解徵後，再行規劃量化之研究方法。	同意辦理方式。
5. 底泥生物菌種分析，一般需要時間培養，整個過程約需多久，在計畫執行期間若無法完成，其樣本保留及後續作業應如何處理，也請預作規劃	感謝委員提問，底泥生物依菌種類別或條件，由培養到萃取至少需兩周，NGS 分析約四十個工作天，總計約為期二個月時間。 待測樣品皆以-20°C 低溫冷凍	同意辦理方式。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
	保存，但考量微生物生命週期，仍建議盡速分析為宜。	

附錄二

「離岸風電水下技術研發」 期末報告審查意見處理情形

交通部運輸研究所合作研究計畫（具委託性質）

□期中 期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：離岸風電水下技術研發

執行單位：弘光科技大學

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
陳武雄委員		
1. 期中會議建議在彰化風機場址做試驗，在 P5-9,P5-10 已列出在 st1 st2 及 st3 進行水質及底泥採集及 st3 之金屬試架拋放，貴團隊很用心、辛苦。	感謝委員肯定。	同意辦理方式。
2. 在 P6-2 試驗架安裝及各階段分批取樣，已在 107 年 4 月 14 拋放，規劃 2 年完成監測為何在 P4-6 又有分 8 次，到底是 2 年或 10 年。	感謝委員意見，計畫暴露試驗分為兩類：(1)小型試架拋放皆以兩年進行短期規劃；(2)基樁金屬暴露試驗擬以十年進行長期試驗規劃。	同意辦理方式。
3. P6-2 離岸風機基樁防蝕系統，已建議選用防蝕措施，提供台電第一期風力防蝕規範供參考。	感謝委員提供寶貴資訊，將應用相關資訊做為後續研究參考。	同意辦理方式。
許書王委員		
1. P5-7 表 5-4「海域.....標準」係建議加入「環保署」90 年 12 月 26 日.....發布。	感謝委員提醒，已於表 5-4 加註。	同意辦理方式。
2. P5-10 倒數第 11 行...兩次採樣工作，又 P5-10 倒數第 7 行進行三次採樣工作，若署同一事，請修正。	感謝委員建議，本研究期間分別於臺中進行一次、彰化進行二次，總計三次採樣工作。已於報告中註明。	同意辦理方式。
3. P5-3(f)水樣封存之水樣請參考 P5-12 撰述，以期一致。	感謝委員建議，已於報告中統一撰述。	同意辦理方式。
4. P6-2 用紙與他頁不一致。	感謝委員建議，將加強檢視列印品管。	同意辦理方式。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
5. P6-2 倒數第 5 行「我們」及倒數第 3 行「我們」建議修正。	感謝委員提醒，已遵照修正。	同意辦理方式。
6. P6-3 建議 3 建議修正。	感謝委員提醒，已遵照修正。	同意辦理方式。
7. 報告建議加入期中、期末委員意見及回覆。	感謝委員提醒，已將期中、期末委員意見及回覆加入報告附件。	同意辦理方式。
8. 彰化測點底泥大小差異大，建議再觀察(含環境因素)。	感謝委員建議，彰化海域已規劃增設測站，加強觀察環境、生物等變化。	同意辦理方式。
王韡蒨委員		
1. 離岸風電為目前積極推動的能源項目，而風電基樁在水下的耐久性，將影響離岸風電的能源生產成本及穩定性。本研究為四年期計畫的第一年研究成果，因此呈現的重點在資訊的蒐集與分析，至於相關試驗規劃以離岸風電預設場域為試驗區，確實可讓研究成果反應未來離岸風電的實際腐蝕行為。目前試驗數據尚在蒐集階段，期待未來有更多成果可呈現。	感謝委員肯定，將與研究單位共同研商相關研究事宜，期能產出具參考價值之成果。	同意辦理方式。
2. 1.2 節計畫工作項目包含了相關試驗規劃與調查，但於 1.3 節預期目標並未包含調查項目，請確認。	感謝委員建議，調查項目列於 1.3 節第六點，完成離岸風場現地水質及底泥分析試驗調查。	同意辦理方式。
3. 表 2.1 臺灣地區歷年水下腐蝕試驗相關研究歷程表： (1) 僅匯整至 2009 年資料，是否	感謝委員建議，已修訂說明欄位敘述，將持續蒐集更新資訊做為相關研究參考之	同意辦理方式。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
<p>有更新資料可納入提供資訊。</p> <p>(2) 在研究內容說明欄：大多以研究內容介紹為主，但有部分僅說明研究成果，請配合修訂一致。</p> <p>(3) 除內容外，各研究成果的呈現是有需要的，若能將各年度重要成果摘列，更佳。</p>	用。	
4. 圖文字與內文不同請更正(全文)：(EX)P2-12 感潮帶？(潮差帶)，海泥帶？(海床帶)。P2-15 P2-16 三樁式、套筒式與 P4-5 圖 4-4 圖 2.7 等寫法不同。	感謝委員建議，已修訂相關內容、圖文，如 2.3 節及 2.4 節所示。	同意辦理方式。
5. 全文許多圖並不清楚，或文字與內文不同，或簡體字，建議可繪製重製示意圖。	感謝委員建議，已視情況重製部分示意圖。	同意辦理方式。
6. 文中太多錯別字、漏字、字體大小不一等，請全文詳加檢查更正	感謝委員提醒，已加強檢視並修正。	同意辦理方式。
7. 在臺中港海氣象觀測樁進行暴露試驗規劃，考慮大氣帶...等四區進行材料腐蝕觀測與調查，值得肯定，辛苦了。在樣本的數量與取樣頻率，須再思考，以達到實驗最佳效益。	感謝委員肯定，未來研究將省慎思考經費運用及天候等自然因素進行採樣規劃，期達實驗最佳效益。	同意辦理方式。
8. 海生物腐蝕文獻若有更多資訊可再統整完整，以提供防蝕技術選擇更佳評估。	感謝委員建議，將持續蒐集相關資訊及研究，作為防蝕技術選擇與參考。	同意辦理方式。
9. 四年期計畫是否可分列各年計畫	感謝委員建議，由於本年度	同意辦理方

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
執行目標。	為首年執行，故計畫內容與試驗設計皆隨實際情況而變動，未來將與研究單位詳加探討各年度之執行目標與重點。	式。
陳桂清委員		
1. 本計畫要探討的範圍很大，建議在報告前言中，簡述全程計畫規劃的時程與主要的重點、目標，以便易於瞭解。	感謝委員建議，已於前言中描述本年度之研究重點與目標。	同意辦理方式。
2. 本年度曝放試驗規劃僅有金屬材質，對於塗裝(層)材料之選定尚無規劃，另腐蝕監測系統與防蝕系統亦尚未明確。	感謝委員建議，海洋暴露試驗僅針對金屬腐蝕進行研究，故金屬試片皆無塗裝規劃。腐蝕監測系統與防蝕系統皆須搭配臺中港氣象觀測樁體規劃，然現僅有初步草圖，故先行以暴露區域進行相關系統規劃。	同意辦理方式。
3. 2-1 僅規劃海水下試驗，並無大氣帶曝放試驗之金屬材質之選定，請說明之，並應於報告中列出其化性成分。	感謝委員建議，海洋暴露試驗分別搭配未來臺中港區之氣象樁體於大氣帶、潮差帶等四區進行；另彰化海域因無基樁設置，故拋放金屬試架進行暴露試驗，海洋暴露試驗規劃見 p4-6 至 p4-9。金屬試片由港研中心統一提供，皆為現中鋼開發用於離岸風電機組構件之金屬材質。	同意辦理方式。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
4. 彰化海域水質報告中，含鉛量過高？有何看法？	本研究水質採樣僅針對單一點位之單一深度進行採樣工作，故無法判別污染來源與成因，已規劃於彰化海域增設測站，期能對此海域進行瞭解。	同意辦理方式。
<p>(1) 報告內容</p> <p>(2) P2-3. 15 行，行高雄港→「進」高雄港，(增→進)</p> <p>(3) P2-4. 2 行，礙於基隆港，...→於基隆港，(刪掉→礙)</p> <p>(4) P2-12. P2-13，名詞應統一，諸如：「感潮帶」與「潮差帶」，「海床區」與「海泥帶」...</p> <p>(5) P2-21. 1 行，離「案」→離「岸」</p> <p>(6) P2-25. 圖 2.10，____說明不清楚</p> <p>(7) P4-1. 圖 4.1，版面編排應適當調整。</p> <p>(8) P4-3. 表 4-1，標題名稱請刪除「臺中市與」，建議本表刪除總平均欄位及數據。同時刪除第 3 行至第 5 行之敘述。因為四種不同金屬之腐蝕數率大小，並不能以其數據大小排序。</p> <p>(9) P4-5. 圖 4.4，刪除「暴露」二字</p> <p>(10) P4-6. 6 行，何謂停潮時？9 行</p>	感謝委員提醒，已檢視報告進行修訂並補強相關文字論述。	同意辦理方式。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
<p>~10 行 敘述有誤？請修正之。</p> <p>(11)P4-6. 11 行，材質與期中報告相異，請說明之，並應列出其化學成分為何？</p> <p>(12)P5-2. 1 行，生地化？</p> <p>(13)P5-4.倒 2 行，D10→D10(下標)，請修正。</p> <p>(14)P6-2.倒 4 行.2 行.1 行、P6-3. 1 行，「降硫菌」？請修正之</p> <p>(15)P7-1 參考文獻格式不一，諸如：title 出現每一 word 之字首，大小寫不一等。</p>		
柯正龍委員		
<p>1. 本研究為四年期計畫之第一年，工作重點為蒐集彙整離岸風機「水下腐蝕防治」、「腐蝕防治監測」、「海生物腐蝕作用」、「海生物防蝕技術」等四大類相關文獻與規劃選用適用於臺灣本土之金屬材料、監測儀器及相關防蝕對策；建議研究團隊可再增加蒐集國內外相關產業新近之應用實績與研究報告，俾符計畫目的與利提供本所後續研究參考應用。</p>	<p>感謝委員建議，將持續蒐集國內外相關文獻與資訊，以供後續研究參考應用。</p>	<p>同意辦理方式。</p>
<p>2. 本研究蒐集國內外文獻達 67 篇之多，建議應列表敘述文獻名稱、出版日期與內容摘要，俾利查閱參考。</p>	<p>感謝委員建議，將依防蝕塗層運用、厭氧微生物對金屬腐蝕之相關研究、海洋附著生物等類別進行列表彙整，以俾利查閱。</p>	<p>同意辦理方式。</p>

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
3. 水質與底泥調查工作項目，建議增加與金屬腐蝕相關之因子，如海水氯離子與硫酸根離子濃度分析...等分析項目。	感謝委員建議，海水氯離子與硫酸根離子濃度分析已列入水質分項目中。	同意辦理方式。
4. 「離岸風電基樁」，建議修改為「離岸風機基樁」。	感謝委員建議，已於報告中修訂。	同意辦理方式。
5. 第一章第二段第五行「我國」，請修改為「交通部運輸研究所」；倒數第三行「臺中港區及彰化現地」，建議修改為「臺中港區及彰化附近海域」。	感謝委員提醒，已檢視報告圖文進行修訂，並加強相關論述與圖表等資料出處，俾利查閱。	同意辦理方式。
6. 章節 2.1(p2-1)第一段第三行「港灣研究中心」，請修改為「前臺灣省交通處港灣技術研究所」。	感謝委員建議，已於報告中修訂。	同意辦理方式。
4. 圖 2.3(p2-6)，建議於圖下方加註原文出處，俾利查閱。	感謝委員建議，已加註原文出處，俾利查閱。	同意辦理方式。
5. 第四章研究方法與實驗規劃，建議增加流程圖，俾利瞭解各工作項目關聯性與掌握實驗期程。	感謝委員建議，研究方法與流程圖請見 p4-1。	同意辦理方式。
6. 圖 4.2(p4-2)，海域底質可否修改為海床底泥，另粒徑改為級配分佈，生物特性改為海生物特性，是否較佳？	感謝委員建議，已統一修訂海床底泥、海生物特性等名詞；考量一般海域生態環境調查皆以「粒徑」表示，並無「級配分佈」之用詞，故本文仍採「粒徑」撰寫。	同意辦理方式。
7. 第五章水質與底泥調查，建議增加說明採樣設備與方法。	感謝委員建議，採樣設備與方法請見 p5-3 至 p5-4。	同意辦理方式。
謝明志委員		
1. 海生物一詞，請導入正確名稱「海	感謝委員建議，已遵照修訂	同意辦理方式。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
洋附著性生物」。	定。	
2. 報告請增中英文摘要，並依本所格式編輯。	感謝委員提醒，已遵照港研中心報告格式修訂。	同意辦理方式。
3. 彰化 st2 及 st3 兩點，水質採樣相隔 1.5 月，其葉綠素 a 含量增約 5 倍，若對附著性生物量也會有連帶影響，應如何來進行後續調查。	感謝委員意見，葉綠素 a 是為水域浮游植物之指標，當浮游植物濃度提升，相對可能吸引更多生物群聚，故建議持續性監測與觀察，以瞭解此海域之變化狀況。	同意辦理方式。
4. 臺中港外 st1 試驗點的底泥採樣，目前已發現含有硫酸還原菌，後續應如何進一步探討，請提出建議。	臺中港區上部 60 公分底泥已發現硫酸還原菌，接續將進行菌種鑑別，藉以研討後續腐蝕防治方法。 如欲探究基樁於底泥深部之腐蝕情況，建議參考實體基樁沒入底泥之深度作為基準，進行取樣工作，以探究深部底泥與微生物等變化與分佈情況。	同意辦理方式。

附錄三

「離岸風電水下技術研發」

期末報告簡報資料

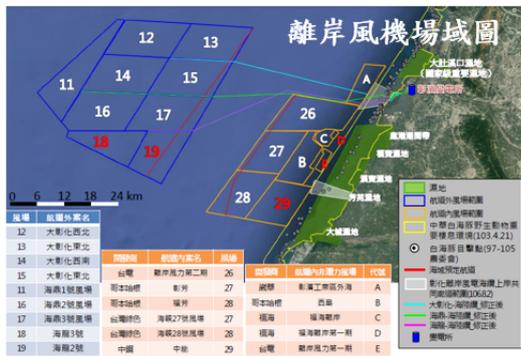


離岸風電水下技術研發 期末報告

計畫主持人：王俊欽 副教授
 協同主持人：周偉龍 教授
 溫志中 副教授
 林鳳嬌 研究員

計畫目標及重要性

- 整體計畫針對國內外離岸風電基樁與金屬構件腐蝕防治技術進行探討，研究其於國內環境適用性，藉由本研究建立本土化基樁及金屬構件之可行性防蝕決策評估。



依台灣環境，以抗震、抗颱、防腐蝕及海象條件作為重點研究考量

工作項目

1. 國內外離岸風電基樁水下腐蝕防治及監測技術文獻蒐集與彙整
2. 國內外離岸風電基樁海洋生物腐蝕影響及防蝕文獻蒐集與彙整
3. 離岸風電基樁防蝕系統選擇與現地大氣與水下暴露試驗規劃與調查

2

工作項目

4. 離岸風電基樁海生物附着暴露試驗規劃與調查
5. 離岸風電基樁現地腐蝕監測試驗規劃
6. 離岸風電現地水質及底泥分析試驗調查

目 錄



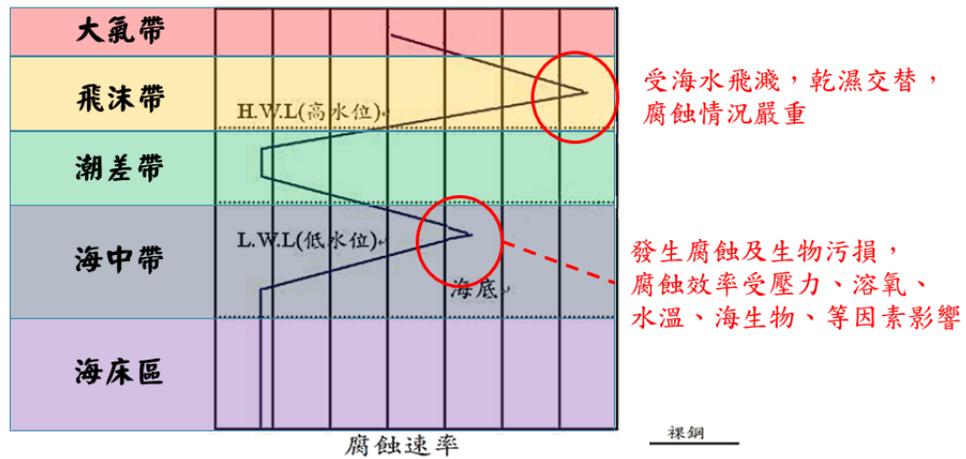
- 離岸風機基樁水下腐蝕防治及監測技術
- 離岸風機基樁海洋生物腐蝕影響及防蝕
- 研究內容與方法
- 水質與底泥分析調查
- 結論與建議

4

二、離岸風電基樁 水下腐蝕防治及監測技術

- 水下腐蝕研究概況
- 腐蝕區域分類
- 水下腐蝕防治
- 水下監測技術

腐蝕區域分類



6

水下腐蝕防治

單樁式：

基座設計簡單
施工易，成本低
適用水深：30m內

三腳管式：

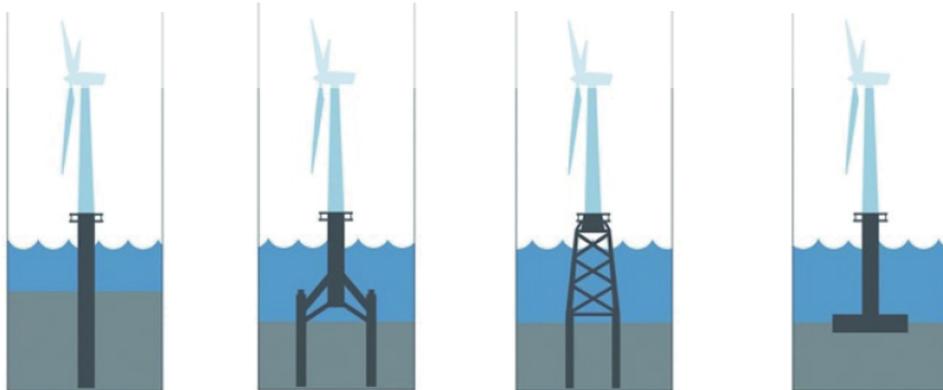
穩定度高
結構體大，運送繁雜
適用水深：5m~50m

管架式：

鋼材量少
製程較複雜
適用水深：20-50m之間

重力式：

穩定性佳
不須打樁
適用水深：10m內



飛沫帶、潮差帶及海中帶，皆以基座腐蝕防治作為首要監測與技術研發項目之一。

(廖等，2014)

7

水下腐蝕防治—陰極防蝕 (Cathodic protection, CP)

陰極防蝕屬電化學防蝕，多選用高活性金屬(如鋅、鋁等作為陽極材料，銲接於鋼板(管)樁上，陽極金屬將被消耗形成保護電位差，使陰極鋼板(管)樁達防蝕功效。



犧牲鋁陽極使用與消耗 (原160公斤，25年保護)

資料來源：http://www.cycptw.com/steel_pile_sacrificial_anode_demo

依暴露環境搭配各式陰極防蝕系統

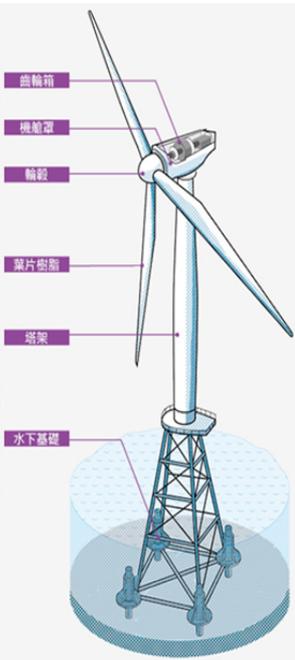
環境	環境分析	陰極防蝕系統選擇
大氣帶	構造物完全曝露於大氣中之各種介質，構造物多處於較乾燥的環境中	<ol style="list-style-type: none"> 1. 鈦網陽極 - 外覆混凝土 2. 鋅熔射 (適用於潮濕環境) 3. 鋅板導電凝膠 (適用於乾燥環境)
潮間帶	範圍包含潮汐帶與飛沫帶；構造物受乾濕循環交替作用	<ol style="list-style-type: none"> 1. 鈦網陽極 - 外覆保護夾層 2. 鋅熔射 (僅適用於飛沫帶) 3. 鋅網 - 外覆保護夾層方式
水下帶	構造物長期浸泡在海中	<ol style="list-style-type: none"> 1. 鋅、鋁塊犧牲陽極式防蝕系統 2. 鈦網陽極 - 外覆保護夾層 3. 鋅網 - 外覆保護夾

(陳等，2004)

結合塗裝技術，為目前應用最廣的防蝕方法之一

10

離岸風機防蝕塗層系統建議表(國內)



離岸風機部位	膜層材料	乾膜厚度 (μm)
塔筒外部	環氧富鋅/無機富鋅	60
	環氧雲鐵中間漆	160
	脂肪族聚氨酯/聚矽氧烷	80
	環氧富鋅底漆/環氧底漆	30~50
	環氧玻璃鱗片	200
塔筒內部	脂肪族聚氨酯	80
	環氧富鋅	50
	高固成分環氧塗料	200
甲板平臺	環氧底漆	50
	環氧玻璃鱗片	400
	脂肪族聚氨酯面漆	50
潮差區—飛濺區	環氧底漆	50
	環氧玻璃鱗片	400
全浸區—海泥區	環氧底漆	50
	環氧玻璃鱗片	300

經濟部工業局
金屬工業發展中心，ITIS產業評析，2010

離岸風機防蝕塗層系統建議表(國外)

底漆	層數	總乾膜厚度 (μm)	規範標準
大氣區			
環氧樹脂底漆 (Ethylene Propylene, EP)	3-5	320	EN ISO 12944
聚氨酯底漆 (Polyurethane, PU)	2	500	
EP, PU (含鋅)	4-5	320	
EP (含鋅)	≥3	>280	ISO 20340
EP	≥3	>350	-
EP (含鋅)	≥3	>280	NORSOK M-501
EP	≥2	>1000	M-501

底漆	層數	總乾膜厚度 (μm)	規範標準
水下與飛濺區			
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	NORSOK M-501

離岸風機塗層規範

- 常用標準
- ◆ ISO 20340:2009
 - ◆ NORSOK, M-501
 - ◆ ISO 20340

陰極防蝕搭配適宜塗料，
提升金屬防蝕效能

1. 塗層系統選擇
2. 施作工法
3. 定期維護

(Seth et al., 2017)



Momber et al. (2015, 2016)

- 塗層方式及厚度是為抗腐蝕、耐磨損的主要因子。



Momber, A. W. (2016)

- 塗層及曝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。
- 風機葉片等組件應適時維護、更換，以延長風機組件於酷寒環境中的使用期限。

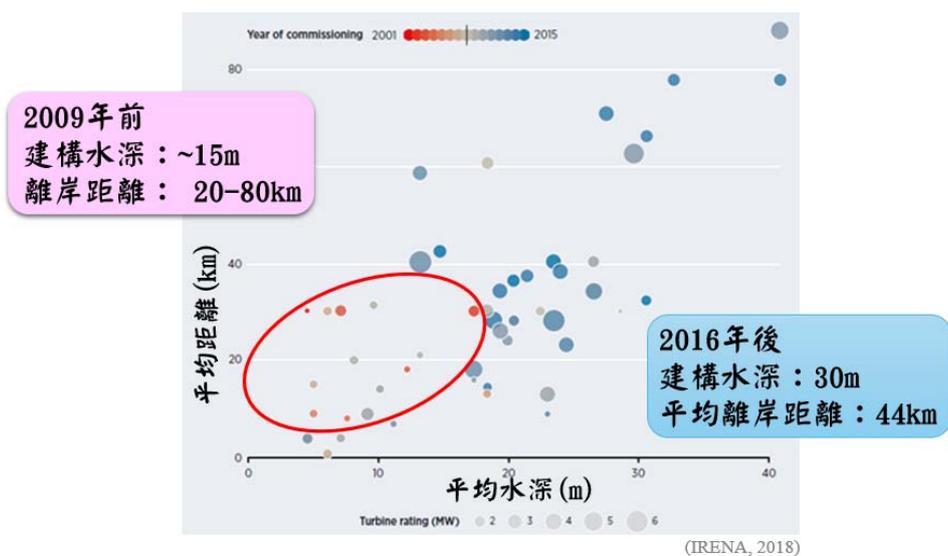


Valaker et al. (2015)

- 塗層若出現凹凸坑洞、氣泡皆會降低塗裝之防蝕能力。

12

離岸風機建構水深與離岸距離變化(2001-2017年)



離岸風電技術發展逐步成熟，離岸風機的離岸距離逐漸增加，風機逐漸朝大型化發展，現以4-6MW機組為離岸風力機之主流。

13

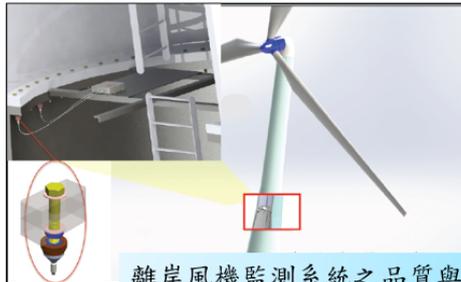
離岸風機監測系統

隨著風機建造之離岸距離增加，象徵著海上維護成本亦相對提升。



Wang et al. (2016)

離岸風機結構健康監測系統
(Structural Health Monitoring System, SHM)



離岸風機監測系統之品質與建置是為重要發展技術之一

- 有助海上風機機組設備資產管理及操作、維護。
- 減低海上勞動成本與風險。

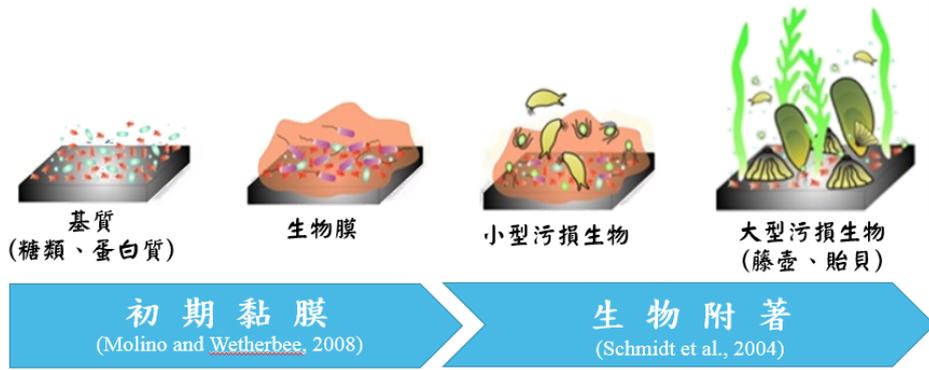
14

三、離岸風電基樁 海洋生物腐蝕影響及防蝕

- 海生物腐蝕與污損
- 海生物防蝕與防污技術

海生物腐蝕與污損

當海洋結構物浸泡海水於，會經歷下列過程：



腐蝕劣化

最終繁殖形成巨大的生物群聚，
造成結構體局部的腐蝕劣化及荷重增加。

15

海生物自然防蝕與防污

- 2008年起，陸續有研究提出細菌分泌的胞外聚合物(ESP)中含有葡聚糖，可防止金屬腐蝕，並通過實驗驗證*Desulfovibrio vulgaris*之EPS能透過抑制微生物附著和生物膜消耗氧氣兩方面作用來抑制低碳鋼之腐蝕。
- 2010年，Roux等於研究，發現胞外多糖EPS180對混凝土中鋼筋腐蝕之影響，結果顯示於在水泥中添加EPS180後，鋼筋抗腐蝕性能增強。
- 2011年，Finkenstadt等，也發現經處理後*Leuconostoc mesenteroides*之EPS對低碳鋼具有保護作用。
- 2011年，Dong等研究提出：由嗜熱硫酸鹽還原菌分泌之EPS吸附在金屬表面，可減緩金屬腐蝕之發生。

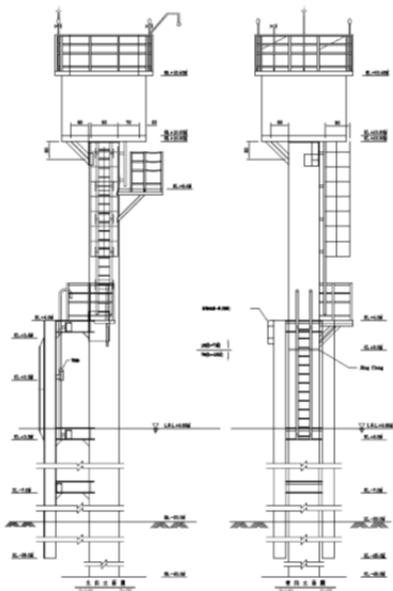
故未來除傳統塗裝與殺菌，
亦可考慮輔以相關微生物自然機制進行防蝕處理

17

四、研究方法與實驗規劃

- 離岸風機基樁防蝕系統規劃
- 離岸風機現地腐蝕試驗規劃

基樁腐蝕監測系統規劃設計

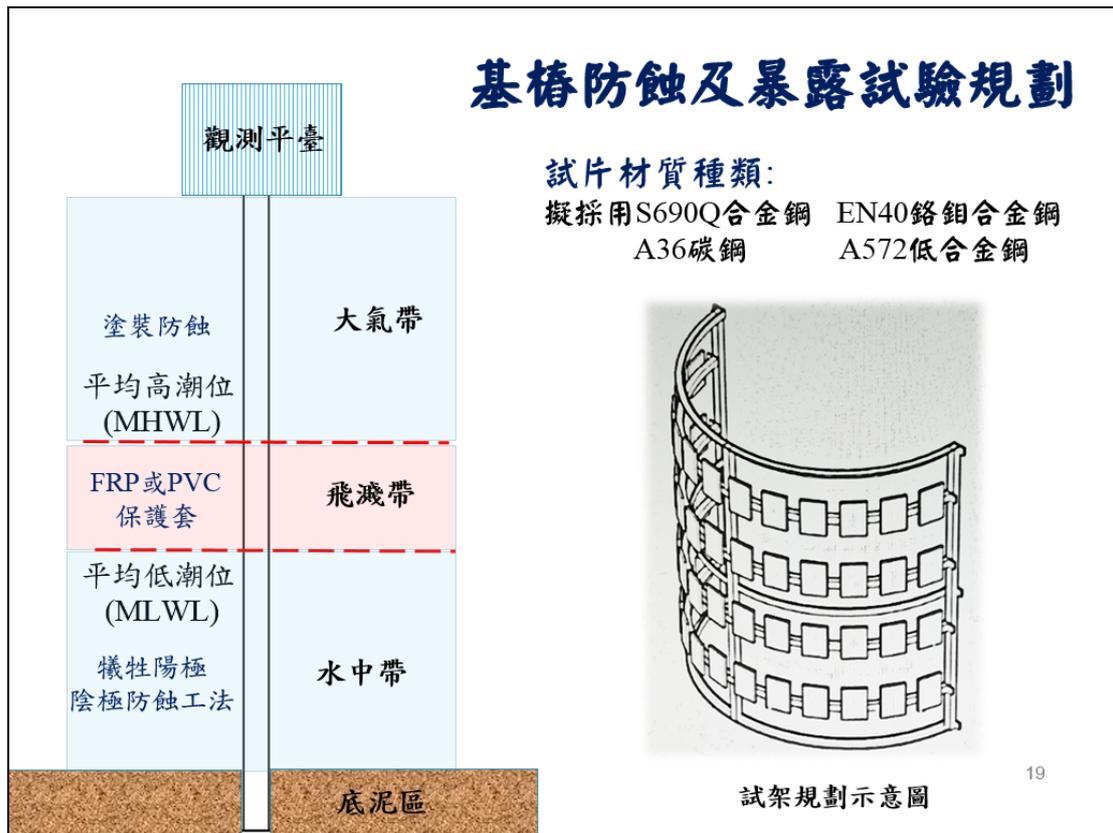


臺中港海氣象觀測樁設計草圖



配合「臺中港海氣象觀測樁」
之基樁條件進行規劃設計

基樁防蝕及暴露試驗規劃



19

金屬試片採樣 附着生物及腐蝕暴露試驗調查分析



106年度試驗期程:
 以2年期進行規劃，
 擬於第3、6、12、24個月時進行採樣工作

107年度試片材質種類:
 擬採用S690Q合金鋼 EN40鉻鉬合金鋼
 A36碳鋼 A572低合金鋼



試片尺寸:
 為適合海中附生物之附着，鋼材試片大小皆為15*10cm、厚度為1 cm。

20

五、水質與底泥分析調查

- 水域調查試驗點
- 採樣與分析方法
- 分析結果與討論

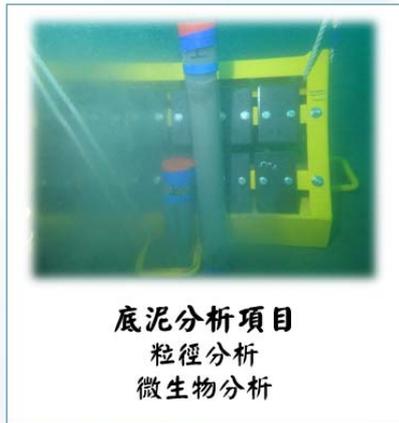
環境採樣調查

區域/站位	TWD97 試驗點座標		採樣時間	作業項目
臺中/St1	120°30'30"E	24°19'15"N	107.01.16 (二) 8:30	水質及底泥採集
彰化/St2	120°19'49"E	24°06'02"N	107.03.02 (五) 9:00	水質及底泥採集
彰化/St3	120°11'24"E	24°03'36"N	107.04.14 (六) 8:00	水質及底泥採集 金屬試架拋放

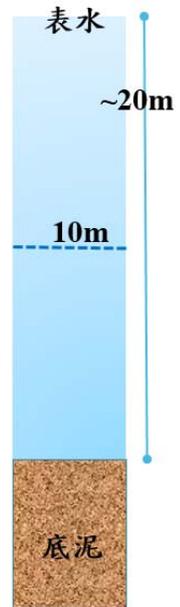
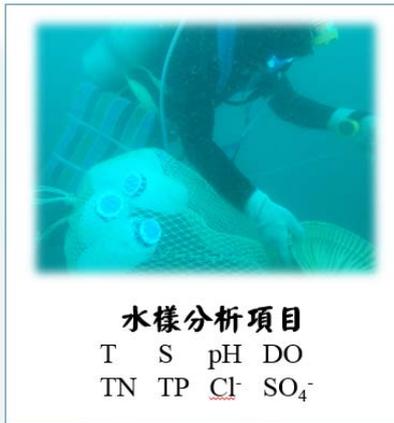


21

水質、底泥採樣調查分析



採樣深度：40/60cm



22

環境採樣調查



(a) 水上座標定位



(b) 海上預備作業



(c) 底泥樣品採集



(d) 海水樣品採集



(e) 收樣後之樣品封存



(f) 底泥樣品低溫、遮光保存

22

金屬材料腐蝕現地暴露試驗安裝佈放



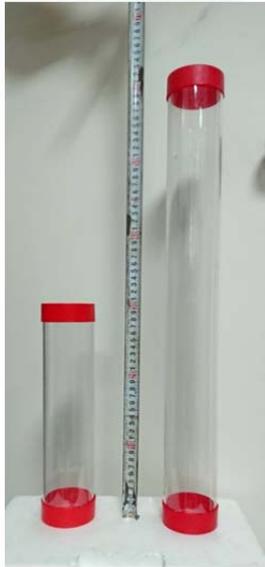
- 彰化離岸風場預定海域 (St3)
- 106年4月14日拋放
- A36碳鋼 / A572低合金鋼

23

水質分析結果

項目	冬季	乙類海洋環境 季		
	臺中/ St1	彰化/ St2	彰化/ St3	
採樣日期	107.01.16	107.03.02	107.04.14	
採樣時間	8:30	9:00	8:00	
溫度(°C)	19	21.3	26	▲
鹽度	31.7	33.7	34.9	
▲ pH	8.1	8.1	8.0	
▲ 溶氧(mg/L)	8.8	8.2	7.9	
葉綠素a (µg/L)	0.296	1.48	8.29	▲
▲ 總磷(mg/L)	0.025	<0.02 (0.012)	<0.02 (0.011)	
總氮(mg/L)	0.65	推測季節溫度、光照影響 使浮游植物增生		
硫酸鹽(mg/L)	---			
氯鹽(mg/L)	---	20300	19800	
▲ 鋅(mg/L)	<0.02	N.D.	N.D.	MDL=0.012
▲ 鎘(mg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	MDL=0.005
▲ 鉛(mg/L)	N.D.	<0.10 (0.047)	0.11	MDL=0.029 QDL=0.10
▲ 銅(mg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	MDL=0.015
▲ 鉻(mg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	MDL=0.017
▲ 汞(mg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	MDL=0.0004

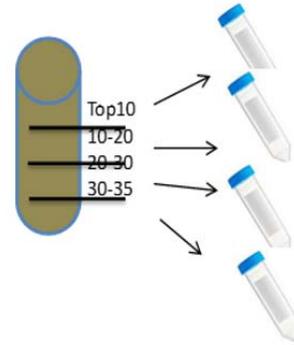
24



底泥採樣岩心管
(40/60cm)



底泥靜置沉降
(60cm)



分層取樣示意圖

臺中海域 St1底泥粒徑分析結果

樣站		St1						
實際採樣深度		40cm		60cm				
沉降後測粒徑深度		<5cm	20cm	<5cm	15cm	25cm	32cm	
107/1/16	累積通過百分比所對應之粒徑大小(mm)	D ₁₀	31.987	42.550	65.347	25.381	28.286	32.110
		D ₁₆	50.821	53.066	77.771	38.632	59.440	49.671
		D ₂₅	69.418	65.881	90.228	58.082	80.828	66.565
		D ₃₀	76.747	72.173	96.019	67.935	88.507	73.639
		D ₅₀	100.065	94.921	117.399	98.490	113.274	97.291
		D ₆₀	111.515	106.851	129.921	107.231	120.777	111.736
		D ₇₅	133.628	129.898	152.021	127.231	141.777	131.736
		D ₈₄	154.051	151.020	173.021	147.231	161.777	151.736
		D ₉₀	176.756	173.810	197.321	187.231	200.777	179.736
		D _m	98.405	96.430	116.975	98.281	111.170	97.921
分比(%)	累積百	礫石	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		砂	71.69	68.34	85.77	66.41	78.32	69.50
		粉砂	28.31	31.66	14.23	33.59	21.68	30.50

粒徑(D₅₀) : 94.921~117.399μm
平均粒徑(D_m) : 96.430~116.975μm

各深度皆無礫石，底泥的砂含量比例皆超過66%，粉砂的比例皆低於34%²⁶

彰化海域 St2底泥粒徑分析結果

樣站		St2							
實際採樣深度		40cm			60cm				
沉降後測粒徑深度		~5cm	~20cm	~5cm	15cm	25cm	35cm	45cm	
107/3/2	累積通過百分比所對應之粒徑大小(μm)	D ₁₀	26.219	3.137	6.686	3.353	3.287	3.269	23.110
		D ₁₆	54.299	3.387	9.862	4.123	3.760	3.707	71.938
		D ₂₅	92.847	4.330	17.118	7.548	6.533	6.488	124.388
		D ₃₀	108.903	6.253	25.331	8.989	7.516	7.524	141.331
		D ₅₀	151.654	10.461	139.999	17.053	12.739	13.116	187.210
		D ₆₀	169.282	12.743	168.000	20.125	16.174	16.174	217.125
		D ₇₅	200.474	18.458	210.000	29.980	22.998	22.998	283.839
		D ₈₄	229.396	24.919	247.000	38.590	30.460	30.460	338.590
		D ₉₀	262.375	32.758	291.000	42.734	34.600	34.600	404.600
		D _m	141.599	16.174	127.125	89.839	42.734	41.142	176.268
%	累積百分比	礫石	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
		砂	79.74	2.60	61.41	29.98	15.40	15.40	83.73
		粉砂	20.26	97.41	38.59	70.02	84.60	84.60	16.27

粒徑(D₅₀) : 10.461~187.210μm
平均粒徑(D_m) : 16.174~176.268μm

底泥的砂含量介於2.60~83.73%，粉砂的比例介於16.27~84.60%

彰化海域 St3底泥粒徑分析結果

樣站		St3			
實際採樣深度		40cm			
沉降後測粒徑深度		~5cm	~15cm	25cm	
107/4/14	累積通過百分比所對應之粒徑大小(μm)	D ₁₀	3.166	3.243	3.191
		D ₁₆	3.443	3.609	3.503
		D ₂₅	4.628	5.762	5.778
		D ₃₀	6.322	6.907	7.134
		D ₅₀	10.312	11.005	12.015
		D ₆₀	12.671	13.560	15.671
		D ₇₅	18.838	20.726	27.613
		D ₈₄	26.705	30.837	66.809
		D ₉₀	39.396	54.042	204.621
		D _m	29.129	34.815	50.471
%	累積百分比	礫石	0.00	0.00	0.00
		砂	6.14	8.45	15.47
		粉砂	93.86	91.55	84.53

粒徑(D₅₀) : 10.312~12.015μm
平均粒徑(D_m) : 29.129~50.471μm

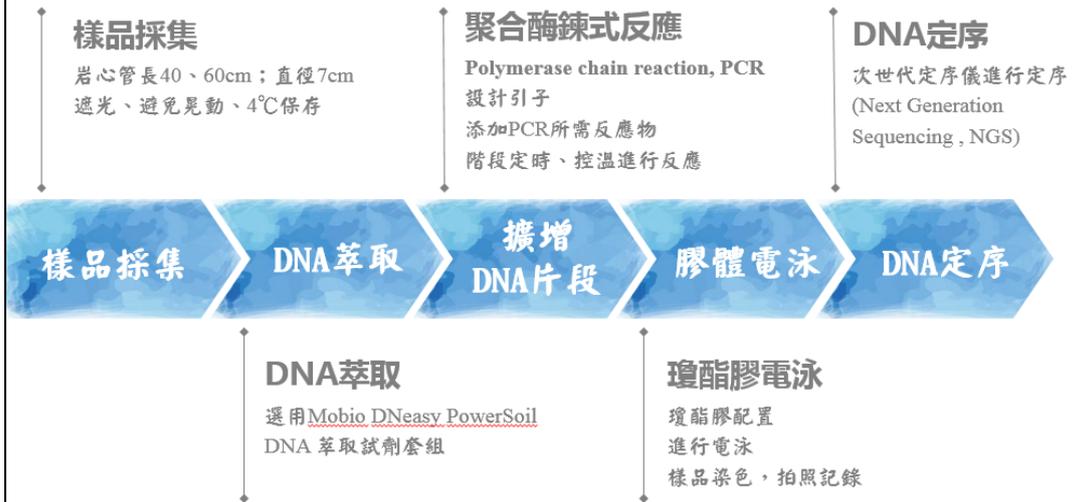
底泥的砂含量介於6.14~15.47%，粉砂的比例介於84.53~93.86%，各深度粉砂所佔比例超過八成。

發現生物



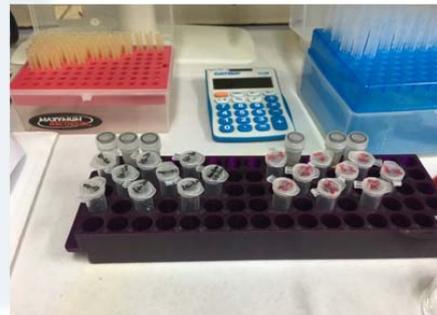
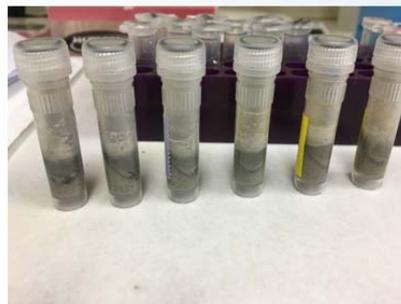
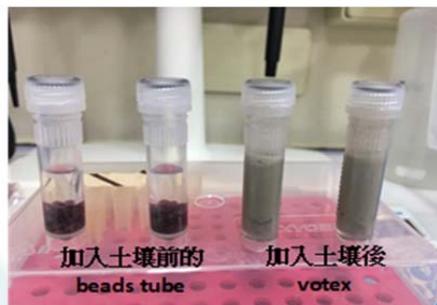
底泥內的底棲生物沙蠶sp.₂₈

底泥微生物分析



29

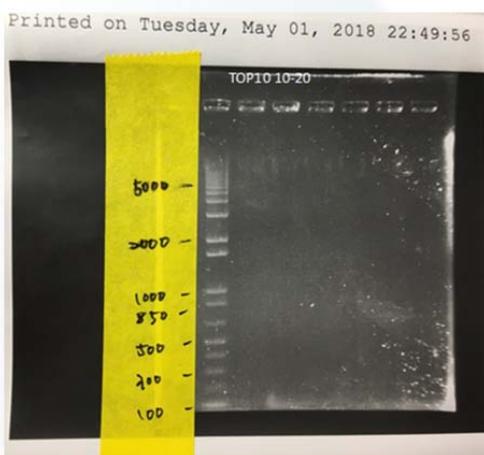
底泥DNA萃取實驗



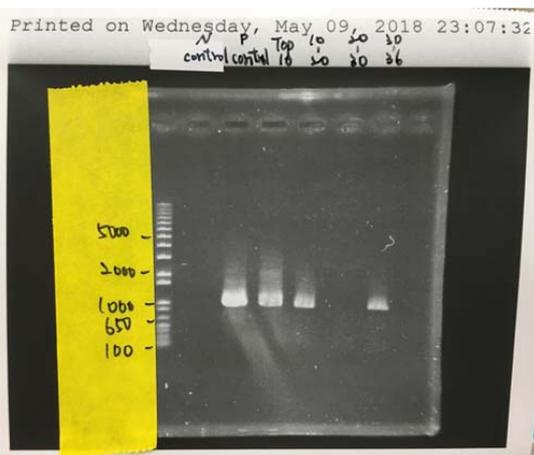
30

PCR產物檢視

檢視PCR產物，以確保後續DNA實驗品質



PCR實驗失敗



PCR實驗成功

台中海域底泥，30-36 cm處發現硫酸還原菌存在，已接續進行NGS定序。

31

六、結論與建議

結 論

- 本研究蒐集國內外水下腐蝕防治與監測技術等相關文獻，**水下腐蝕防治**多採用陰極防蝕與防腐塗層工法兩大類，又以**陰極防蝕為主**，另視結構物設置環境需求，搭配各式塗料塗層系統，以提高水下防蝕效果。
- 現國外**離岸風機塗層**一般依循ISO 20340:2009規範施行塗裝防蝕，其他NORSOK，M-501及ISO 20340 亦為重要的塗層技術規範標準。
- 過往認為生物膜是為造成生物腐蝕之重要成因，然現已發現**部分生物膜**，如 *Desulfovibrio vulgaris*、*Leuconostoc mesenteroides*之生物膜，**可達抑制腐蝕、保護金屬之作用**，故除傳統塗層工法，未來亦可輔以相關微生物自然機制進行防蝕處理。

32

結 論

- 離岸風機基樁防蝕系統依暴露區域選用不同防蝕措施。大氣暴露區採塗裝系統防護，水下區域採犧牲陽極之陰極防蝕工法，潮間區可加裝FPR或PVC保護套包覆，增強海水沖擊之抵禦能力。
- 基樁海生物附着與海洋暴露試驗配合「臺中港海氣象觀測樁」進行規劃，可於**大氣帶、飛沫帶、水中帶及底層四區**進行基樁與金屬試片材料腐蝕之觀測與調查。
- 離岸風機現地腐蝕監測因彰化風機預定海域並無設置基樁，故規劃以**金屬試架拋放方式**進行試驗(107年4月14日拋放完成)，試片選用A36與A572兩種金屬，試驗期程為期兩年，擬於第3、6、12、24個月時進行採樣工作，共計四次。未來可結合現地暴露試驗結果及環境檢測數據，推估其海域生地化機制。

33

結 論

- 研究期間，冬季臺中海域水質符合乙類水質標準，春季彰化海域進行兩次採樣，期間代表浮游植物之葉綠素a濃度顯著提升，季節變化可能是影響彰化海域浮游植物濃度變化之重要因素。
- 臺中海域底泥粒徑介於96.430-116.975 μm ，整體以砂質為主(可達66%)，然彰化海域兩測站粒徑、砂與粉砂比例變化大，顯見風機預定海域中底質變化仍大，可持續進行觀測，以釐清各環境條件，如季節、深度、潮流變化等對其海域環境之影響。
- 研究期間，臺中港區底泥表層(60公分以內厚度)微生物經NGS定序比對後，發現與已知具腐蝕金屬材料之硫酸還原菌同屬(*Desulfovibrio*, *Desulfobacterium*, *Desulfotomaculum*, *Thiobacillus*, *Sulfurospirillum*, *Leptothrix*, *Crenothrix*, *Thiobacillus*, *Clostridium*, *Flavobacterium*, *Bacillus*, and *Pseudomonas*)的微生物分布。

34

建 議

- 現地腐蝕、海生物附着之海洋暴露試驗未來亦將持續進行，應優先選用本土可生產之金屬材質進行試驗，另本年度首次進行金屬試架拋放，建議可擇時回收此金屬試片，以瞭解金屬試架於水下佈放情況與穩定度，作為未來金屬試架之設計參考。
- 本年度僅蒐集冬、春兩季之海域環境參數，然各海域水質、流況及微生物物種及密度等，受潮汐、季節、颱風等多重自然因素交互影響，應持續進行長期觀測，以深入瞭解海域環境特性。
- 本次以人工方式進行底泥採樣工作，故採樣深度僅可達60公分，如欲進一步探討基樁於深部之腐蝕情況，建議向更深處進行樣本採集，以利探究深部底泥粒徑與微生物之分佈情況。

35

MOTC-IOT-106-H0BB001



離岸風電水下技術研發 期末報告

報告完畢