

108-053-7A91

MOTC-IOT-107-H1DBB002c

離岸風機基樁 與金屬構件腐蝕防治之研究



交通部運輸研究所

中華民國 108 年 2 月

108-053-7A91

MOTC-IOT-107-H1DBB002c

離岸風機基樁 與金屬構件腐蝕防治之研究

著者：羅建明、溫志中、林鳳嬌、王俊欽、

周偉龍、葉秀貞

交通部運輸研究所

中華民國 108 年 2 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

離岸風機基樁與金屬構件腐蝕防治之研究 / 羅建明等著. -- 初版. -- 臺北市 : 交通部運研所, 民
108.02

面 ; 公分

ISBN 978-986-05-8582-7(平裝)

1.港埠工程 2.港埠管理

443.2

108001043

離岸風機基樁與金屬構件腐蝕防治之研究

著者：羅建明、溫志中、林鳳嬌、王俊欽、周偉龍、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)26587110

出版年月：中華民國 108 年 2 月

印刷者：采峰實業有限公司

版(刷)次冊數：初版一刷 70 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所臺灣技術研究中心網站

定價：200 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：1010800163 ISBN：978-986-05-8582-7 (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。

108

離岸風機基樁與金屬構件腐蝕防治之研究

交通部運輸研究所

GPN: 1010800163

定價: 200 元

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：離岸風機基樁與金屬構件腐蝕防治之研究			
國際標準書號（或叢刊號） 978-986-05-8582-7	政府出版品統一編號 1010800163	運輸研究所出版品編號 108-053-7A91	計畫編號 MOTC-IOT-107-H1DBB002c
本所主辦單位：港研中心 主管：朱金元主任 計畫主持人：朱金元主任 研究人員：柯正龍、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：溫志中 研究人員：林鳳嬌、王俊欽、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 107 年 06 月 至 107 年 12 月			
關鍵詞：離岸、風力發電、腐蝕速率、水下腐蝕、微生物腐蝕			
摘要： <p>本計畫主要針對離岸風機基樁與金屬構件腐蝕防治進行研究，計畫期程為期四年，內容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，並瞭解各離岸風機基樁與金屬構件腐蝕防治技術於國內環境之適用性。</p> <p>本年度延續「106 年度離岸風電水下技術研發」之計畫現地調查方式，於臺中港及彰化離岸風電第二期海域增設金屬試片水下暴露試驗站點，並同步採集 106 年度拋放之水下金屬試片、海水水樣與底泥。並進行金屬腐蝕試驗及水域環境檢測分析，瞭解金屬試片海洋附著生物、水下腐蝕速率等情況。</p> <p>依據本年度調查分析結果顯示，臺中港區海域於冬、夏兩季之鹽度與 pH 變化並無顯著差異，水溫受季節影響呈現夏高冬低之趨勢，夏季浮游植物生長繁盛，但其溶氧並無同步提升。彰化離岸風電預定海域，近岸測站(彰化#1)於夏季則調查出 pH 值明顯低於一般海水之 pH 值。整體而言，彰化海域於春、夏兩季浮游植物生長最為繁盛，春季葉綠素 a 濃度可達 8.29$\mu\text{g/L}$。兩海域上部 60 cm 之底泥經次世代定序，約 70% 之微生物可辨別至屬(Genus)，均比對出與腐蝕金屬材料之硫酸還原菌同屬之微生物。</p> <p>在水下金屬暴露試驗方面，本計畫於 107 年 4 月 14 日至 107 年 6 月 30 日間，在彰化海域採集水下金屬暴露試片，並分析金屬受海水及生物等因子作用下之腐蝕速率。依據分析所得之腐蝕速率結果顯示，A36 碳鋼平均腐蝕速率(187.3$\mu\text{m/yr}$)小於 A572 低合金鋼(205.1$\mu\text{m/yr}$)。在生物附著度方面，兩金屬所觀察到的附著生物種類相似，附著生物以群體出現的苔蘚蟲為主，其次有藤壺、纓鰓蟲類及少數的二枚貝附著。金屬試片正面生物量較反面多，但附著生物種類數相近，正面生物分布均勻則高於反面。</p> <p>研究成果效益及應用單位：本計畫針對離岸風機基樁與金屬構件腐蝕防治進行現地調查及實驗分析，所得之結果可建立本土化之資料及金屬腐蝕之速率，可提供相關單位作為未來離岸風機基樁與金屬構件腐蝕防治研究之參考。如：台灣電力、中國鋼鐵、經濟部工業局等。</p>			

出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
108年2月	252	200	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) 978-986-05-8582-7	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010800163	IOT SERIAL NUMBER 108-053-7A91	PROJECT NUMBER MOTC-IOT-107- H1DBB002c
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 06/ 2018 TO 12/2018
RESEARCH AGENCY: Hungkuang University of Science and Technology PRINCIPAL INVESTIGATOR: Chih-Chung Wen PROJECT STAFF: Chun-Chin Wang, 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			
KEYWORDS: offshore, wind turbine, corrosion rate, under water corrosion, microbial corrosion			
<p>The main of this project is for Corrosion prevention of offshore wind turbine foundation piles and metal components. The periods of this project is four years, aims at 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 this study, we continue the previous research structure and add the sample station in Taichung and Changhua sea area. In addition, we gather samples of underwater metal panels, sea water, and sediments for metal-corrosion and water-environmental analysis to understand the impact of corrosion of metal materials or sea creatures attached.</p> <p>Salinity and pH are insignificant difference between winter and summer, and temperature affected by the seasons. Changhua#1 was a nearshore station, the pH lower than the general seawater, and the reason for it may be caused by pollution from land-based sources. On the whole, chlorophyll an increased significantly (3.85~8.29µg/L) in spring and summer in the sea areas of Changhua. Microbial analysis of sedimentation was carried out by the next generation sequencer, and about 70% of them were discernible to genus. Both of Taichung and Changhua sea area including the presence of the same genus of sulfate-reducing bacteria that were known to corrode metals.</p> <p>The underwater metal exposure test was conducted in the Changhua Sea area from April 14 to June 30, 2017. The results show that the average corrosion rate of A36 carbon steel (187.3µm/yr) is lower than that of A572 low alloy steel (205.1µm/yr). The attached organisms observed in the two metal materials aware similar, mainly in the group of bryozoans, followed by barnacles, sabellid polychaetes, and a few bivalves. The amount of biomass attached to the front side of the metal sheet is more than that of the reverse side, but the number of species is similar, and the front Pielou's evenness Index is higher than the reverse side.</p> <p>Benefit and application of research units: This project is based on investigation and experimental analysis to understand the Corrosion prevention of offshore wind turbine foundation piles and metal components. The analysis results can be used to establish localized data and the rate of metal corrosion and provide as a reference for future research on corrosion prevention of piles and metal components of offshore wind turbines. Such as: Taiwan Power Company, China Steel Company, National Expressway Engineering Bureau and developer of wind turbines.</p>			
DATE OF PUBLICATION February, 2019	NUMBER OF PAGES 252	PRICE 200	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.....	III
目 錄	IV
圖 目 錄.....	VII
表 目 錄.....	XII
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.....	1-4
1.3 預期效益.....	1-5
第二章 文獻回顧.....	2-1
2.1 離岸風機結構型式.....	2-3
2.2 金屬腐蝕成因.....	2-6
2.2.1 電化學腐蝕機制.....	2-6
2.2.2 物理性腐蝕機制.....	2-14
2.2.3 生化腐蝕機制.....	2-16
2.3 厭氧微生物腐蝕.....	2-19
2.4 海洋結構物暴露區域.....	2-29
2.4.1 大氣區 (Atmospheric Zone).....	2-31
2.4.2 飛沫區 (Splash Zone).....	2-33
2.4.3 潮差區/感潮區 (Tidal Zone).....	2-33
2.4.4 浸沒區 (Submerged zone).....	2-35

2.5 離岸風機金屬腐蝕及防治.....	2-38
2.6 離岸風機經驗參考與借鏡.....	2-47
2.6.1 中國離岸風電發展近況	2-47
第三章 研究內容與規劃.....	3-1
3.1 研究區域.....	3-3
3.2 環境採樣與分析.....	3-5
3.2.1 採樣方法.....	3-5
3.2.2 海域環境測定項目	3-6
3.2.3 底泥微生物分析.....	3-8
3.2.4 海洋環境品質標準.....	3-9
3.3 金屬水下暴露試驗採樣與分析	3-11
3.3.1 金屬水下暴露試驗規劃	3-11
3.3.2 金屬試片採集.....	3-13
3.3.3 金屬試片海洋附著生物觀察分析	3-14
3.3.4 金屬試片腐蝕速率分析	3-15
第四章 海域特性調查.....	4-1
4.1 臺中港區海域特性調查.....	4-2
4.1.1 臺中港區水質分析(臺中#1).....	4-2
4.1.2 臺中港區海域底泥分析(臺中#1).....	4-4
4.1.3 臺中港區海域底泥微生物分析(臺中#1).....	4-12
4.2 彰化離岸風電第二期海域特性調查	4-16
4.2.1 彰化海域水質分析.....	4-16
4.2.2 彰化海域底泥分析.....	4-19

4.2.3 彰化海域底泥微生物分析(彰化#2).....	4-35
4.3 金屬試片調查分析.....	4-41
4.3.1 附著生物調查.....	4-45
4.4 彰化海域金屬試片腐蝕速率分析	4-64
第五章 臺中港區基樁腐蝕監測系統規劃.....	5-1
5.1 基樁防蝕系統規劃.....	5-2
5.1.1 腐蝕監測系統配置.....	5-5
5.1.2 腐蝕監測系統簡介.....	5-8
第六章 結論與建議.....	6-1
6.1 結論.....	6-1
6.2 建議.....	6-3
6.3 預期效益與應用情形.....	6-3
參考文獻.....	參-1
附錄一、期中報告審查意見處理情形表.....	附錄 1-1
附錄二、期末報告審查意見處理情形表.....	附錄 2-1
附錄三、期末報告簡報.....	附錄 3-1

圖 目 錄

圖 1.1	計畫研究流程圖.....	1-3
圖 2.1	2011~2017 年全球離岸累計裝置容量變化圖.....	2-2
圖 2.2	離岸風機固定式支撐構造概略圖.....	2-3
圖 2.3	離岸風機設置水深發展趨勢圖.....	2-4
圖 2.4	水溶液系統之腐蝕程序示意圖.....	2-6
圖 2.5	鋼筋腐蝕機理示意圖.....	2-8
圖 2.6	腐蝕電池示意圖.....	2-8
圖 2.7	不鏽鋼金屬之點蝕現象.....	2-9
圖 2.8	不鏽鋼的縫隙腐蝕現象.....	2-10
圖 2.9	絲狀腐蝕現象.....	2-11
圖 2.10	加凡尼腐蝕現象.....	2-12
圖 2.11	晶間腐蝕現象.....	2-13
圖 2.12	應力腐蝕劣化現象.....	2-15
圖 2.13	腐蝕造成之劣化現象.....	2-15
圖 2.14	氫蝕造成之劣化現象.....	2-16
圖 2.15	海洋附著生物群聚消長變化圖.....	2-17
圖 2.16	離岸風機樁體海洋附著生物依附情況.....	2-18
圖 2.17	微生物導致造成之金屬腐蝕.....	2-20
圖 2.18	顯微鏡記錄 <i>Leptothrix discophora</i> 造成之金屬腐蝕.....	2-20
圖 2.19	海洋結構物暴露區域圖.....	2-29
圖 2.20	碼頭鋼樁飛沫區之腐蝕情況.....	2-34
圖 2.21	陰極防蝕法示意圖.....	2-38
圖 2.22	犧牲鋁陽極水下使用情況.....	2-39
圖 2.23	犧牲鋁陽極的重量損失情況.....	2-39
圖 2.24	江蘇如東潮間帶風電場風機塔架裝載運輸至潮間帶之情況.....	2-48
圖 2.25	江蘇如東潮間帶風電場塔架吊裝情況.....	2-49
圖 2.26	上海東海大橋海上風電風機基座示意圖.....	2-50

圖 2.27	上海東海大橋海上風電場風機吊裝作業情況.....	2-51
圖 2.28	上海東海大橋海上風電場俯視圖.....	2-51
圖 2.29	復層礦脂包覆防蝕技術示意圖.....	2-53
圖 2.30	鋼樁包覆防蝕技術結構示意圖.....	2-53
圖 2.31	礦脂防蝕帶纏繞施作.....	2-54
圖 2.32	防蝕保護罩安裝.....	2-55
圖 3.1	金屬水下暴露試驗研究流程圖.....	3-1
圖 3.2	環境採樣研究流程圖.....	3-2
圖 3.3	臺中港區採樣位置圖.....	3-4
圖 3.4	彰化離岸風電第二期計畫場址採樣位置圖.....	3-4
圖 3.5	採樣斷面示意圖.....	3-5
圖 3.6	底泥採樣岩心管.....	3-5
圖 3.7	底泥 DNA 樣本分層收集示意圖.....	3-8
圖 3.8	臺灣沿海海域範圍與海域分類圖.....	3-10
圖 3.9	金屬試架設計圖.....	3-12
圖 3.10	金屬水下暴露試驗架與試片配置圖.....	3-12
圖 3.11	手持式 GPS 定位座標.....	3-13
圖 3.12	兩臺 GPS 系統同步定位.....	3-13
圖 3.13	金屬試片現場採集記錄.....	3-13
圖 3.14	金屬試片冷凍冰存.....	3-13
圖 3.15	解剖顯微鏡.....	3-14
圖 3.16	顯微鏡觀察情況.....	3-14
圖 3.17	附著生物分類計數.....	3-14
圖 3.18	附著生物保存.....	3-14
圖 3.19	水下金屬防蝕生物生成處理清除作業流程圖.....	3-15
圖 4.1	臺中港區海域底泥沉降記錄.....	4-4
圖 4.2	臺中#1 測站 30cm 採樣管-5cm 處粒徑分佈曲線.....	4-6
圖 4.3	臺中#1 測站 30cm 採樣管-5cm 處粒徑組成百分比.....	4-6
圖 4.4	臺中#1 測站 30cm 採樣管-20cm 處粒徑分佈曲線.....	4-7

圖 4.5	臺中#1 測站 30cm 採樣管-20cm 處粒徑組成百分比	4-7
圖 4.6	臺中#1 測站 60cm 採樣管-5cm 處粒徑分佈曲線	4-8
圖 4.7	臺中#1 測站 60cm 採樣管-5cm 處粒徑組成百分比	4-8
圖 4.8	臺中#1 測站 60cm 採樣管-15cm 處粒徑分佈曲線	4-9
圖 4.9	臺中#1 測站 60cm 採樣管-15cm 處粒徑組成百分比	4-9
圖 4.10	臺中#1 測站 60cm 採樣管-25cm 處粒徑分佈曲線	4-10
圖 4.11	臺中#1 測站 60cm 採樣管-25cm 處粒徑組成百分比	4-10
圖 4.12	臺中#1 測站 60cm 採樣管-35cm 處粒徑分佈曲線	4-11
圖 4.13	臺中#1 測站 60cm 採樣管-35cm 處粒徑組成百分比	4-11
圖 4.14	Soil1 底泥微生物 DNA 序列各分類位階鑑別結果之比例 .	4-14
圖 4.15	Soil2 底泥微生物 DNA 序列各分類位階鑑別結果之比例 .	4-14
圖 4.16	Soil4 底泥微生物 DNA 序列各分類位階鑑別結果之比例 .	4-15
圖 4.17	臺中港區#1 測站底泥微生物 DNA 分類階層相似性分析圖	4-15
圖 4.18	彰化海域底泥沉降記錄(彰化#2).....	4-20
圖 4.19	彰化#2 測站 30cm 採樣管-5cm 處粒徑分佈曲線	4-23
圖 4.20	彰化#2 測站 30cm 採樣管-5cm 處粒徑組成百分比	4-23
圖 4.21	彰化#2 測站 30cm 採樣管-10cm 處粒徑分佈曲線	4-24
圖 4.22	彰化#2 測站 30cm 採樣管-10cm 處粒徑組成百分比	4-24
圖 4.23	彰化#2 測站 30cm 採樣管-20cm 處粒徑分佈曲線	4-25
圖 4.24	彰化#2 測站 30cm 採樣管-20cm 處粒徑組成百分比	4-25
圖 4.25	彰化#2 測站 30cm 採樣管-25cm 處粒徑分佈曲線	4-26
圖 4.26	彰化#2 測站 30cm 採樣管-25cm 處粒徑組成百分比	4-26
圖 4.27	彰化#2 測站 30cm 採樣管-28cm 處粒徑分佈曲線	4-27
圖 4.28	彰化#2 測站 30cm 採樣管-28cm 處粒徑組成百分比	4-27
圖 4.29	彰化#2 測站 60cm 採樣管-5cm 處粒徑分佈曲線	4-28
圖 4.30	彰化#2 測站 60cm 採樣管-5cm 處粒徑組成百分比	4-28
圖 4.31	彰化#2 測站 60cm 採樣管-10cm 處粒徑分佈曲線	4-29
圖 4.32	彰化#2 測站 60cm 採樣管-10cm 處粒徑組成百分比	4-29
圖 4.33	彰化#2 測站 60cm 採樣管-20cm 處粒徑分佈曲線	4-30

圖 4.34	彰化#2 測站 60cm 採樣管-20cm 處粒徑組成百分比	4-30
圖 4.35	彰化#2 測站 60cm 採樣管-30cm 處粒徑分佈曲線	4-31
圖 4.36	彰化#2 測站 60cm 採樣管-30cm 處粒徑組成百分比	4-31
圖 4.37	彰化#2 測站 60cm 採樣管-40cm 處粒徑分佈曲線	4-32
圖 4.38	彰化#2 測站 60cm 採樣管-40cm 處粒徑組成百分比	4-32
圖 4.39	彰化#2 測站 60cm 採樣管-50cm 處粒徑分佈曲線	4-33
圖 4.40	彰化#2 測站 60cm 採樣管-50cm 處粒徑組成百分比	4-33
圖 4.41	彰化#2 測站 60cm 採樣管-56cm 處粒徑分佈曲線	4-34
圖 4.42	彰化#2 測站 60cm 採樣管-56cm 處粒徑組成百分比	4-34
圖 4.43	L41Tim 底泥微生物 DNA 序列各分類位階鑑別結果之比例	4-37
圖 4.44	L42Tim 底泥微生物 DNA 序列各分類位階鑑別結果之比例	4-37
圖 4.45	L43Tim 底泥微生物 DNA 序列各分類位階鑑別結果之比例	4-38
圖 4.46	L44Tim 底泥微生物 DNA 序列各分類位階鑑別結果之比例	4-38
圖 4.47	L45Tim 底泥微生物 DNA 序列各分類位階鑑別結果之比例	4-39
圖 4.48	L46Tim 底泥微生物 DNA 序列各分類位階鑑別結果之比例	4-39
圖 4.49	彰化#2 測站底泥微生物 DNA 分類階層相似性分析圖	4-40
圖 4.50	金屬試架水下佈放情況.....	4-41
圖 4.51	107 年 6 月 30 日彰化第一場址(彰化#1)金屬試片回收情況	4-42
圖 4.52	107 年 8 月 5 日臺中港區(臺中#1)試架拋放情況.....	4-43
圖 4.53	107 年 8 月 6 日彰化第二場址(彰化#2)試架拋放情況.....	4-44
圖 4.54	金屬試片船隻現地採集記錄---A 36 碳鋼(A1)	4-47
圖 4.55	金屬試片船隻現地採集記錄---A 36 碳鋼(A2)	4-48
圖 4.56	金屬試片船隻現地採集記錄---A 36 碳鋼(A3)	4-49
圖 4.57	金屬試片船隻現地採集記錄--- A572 低合金鋼(B1)	4-50
圖 4.58	金屬試片船隻現地採集記錄--- A572 低合金鋼(B2)	4-51
圖 4.59	金屬試片船隻現地採集記錄--- A572 低合金鋼(B3)	4-52
圖 4.60	金屬試片研究調查記錄---A 36 碳鋼(A1)	4-53
圖 4.61	金屬試片研究調查記錄---A 36 碳鋼(A2)	4-54
圖 4.62	金屬試片研究調查記錄---A 36 碳鋼(A3)	4-55

圖 4.63	金屬試片研究調查記錄--- A572 低合金鋼(B1).....	4-56
圖 4.64	金屬試片研究調查記錄--- A572 低合金鋼(B2).....	4-57
圖 4.65	金屬試片研究調查記錄--- A572 低合金鋼(B3).....	4-58
圖 4.66	金屬試片上苔蘚蟲之外部形態.....	4-61
圖 4.67	膜孔苔蟲科和 <i>Amathia verticillata</i> 之附著情況.....	4-62
圖 4.68	各金屬試片海洋生物附著之相似性分析圖.....	4-62
圖 4.69	金屬試片清洗記錄--- A36 碳鋼(A1)	4-65
圖 4.70	金屬試片清洗記錄--- A36 碳鋼(A2)	4-66
圖 4.71	金屬試片清洗記錄--- A36 碳鋼(A3)	4-67
圖 4.72	金屬試片清洗記錄--- A572 低合金鋼(B1).....	4-68
圖 4.73	金屬試片清洗記錄--- A572 低合金鋼(B2).....	4-69
圖 4.74	金屬試片清洗記錄--- A572 低合金鋼(B3).....	4-70
圖 4.75	彰化海域 A36 碳鋼金屬試片腐蝕速率.....	4-71
圖 4.76	金屬試片排列示意圖.....	4-71
圖 5.1	臺中港離岸風電專區發展規劃圖.....	5-1
圖 5.2	臺中港海氣象觀測樁之焊接作業.....	5-2
圖 5.3	臺中港海氣象觀測樁之立面配置圖.....	5-3
圖 5.4	陰極防蝕處理圖.....	5-4
圖 5.5	雙晶探頭.....	5-5
圖 5.6	金屬氧化層量測波形顯示界面.....	5-6
圖 5.7	腐蝕監測系統配置示意圖.....	5-7
圖 5.8	腐蝕速率監測系統架構圖.....	5-8

表 目 錄

表 2-1	常見離岸風機水下基礎結構型式資料表	2-5
表 2-2	厭氧微生物金屬腐蝕相關研究彙整表	2-22
表 2-3	海洋結構物暴露區域環境特性表	2-30
表 2-4	大氣區海洋結構物之腐蝕形式與防蝕工法	2-33
表 2-5	飛沫區和潮差區海洋結構物之腐蝕形式與防蝕工法	2-35
表 2-6	浸沒區海洋結構物之腐蝕形式與防蝕工法	2-37
表 2-7	離岸風機塗層技術規範標準	2-40
表 2-8	離岸風機腐蝕區域及對應防蝕工法選用彙整表	2-42
表 2-9	2010-2016 年間相關塗層防蝕研究彙整表	2-44
表 3-1	採樣點位座標.....	3-3
表 3-2	水質檢測項目與方法	3-6
表 3-3	規範 ASTM D2487-92 之土壤粒徑特性分類法	3-7
表 3-4	海域水體分類表.....	3-9
表 3-5	海洋環境品質標準	3-10
表 4-1	季節月份對照表.....	4-1
表 4-2	海域調查與試驗項目資料表	4-1
表 4-3	臺中港區基礎水質參數分析表	4-2
表 4-4	臺中港區營養鹽類參數分析表	4-3
表 4-5	臺中港區重金屬參數分析表	4-3
表 4-6	臺中港區底泥粒徑分析表(臺中#1).....	4-5
表 4-7	臺中港區底泥微生物 DNA 序列分析結果彙整表.....	4-13
表 4-8	彰化第一場址基礎水質參數分析表	4-16
表 4-9	彰化第一場址營養鹽類參數分析表	4-17
表 4-10	彰化第一場址重金屬參數分析表	4-17
表 4-11	彰化第二場址基礎水質參數分析表	4-18
表 4-12	彰化第二場址營養鹽類參數分析表	4-18
表 4-13	彰化第二場址重金屬參數分析表	4-19

表 4-14	彰化海域 30cm 採樣管之底泥粒徑分析表(彰化#2).....	4-21
表 4-15	彰化海域 60cm 採樣管之底泥粒徑分析表(彰化#2).....	4-22
表 4-16	彰化海域底泥微生物 DNA 序列分析結果彙整表.....	4-36
表 4-17	彰化#1 測站 A 36 碳鋼金屬試片之海洋生物附著狀況	4-59
表 4-18	彰化#1 測站 A572 低合金鋼金屬試片之海洋生物附著狀況	4-60
表 4-19	彰化#1 測站金屬試片之海洋附著性生物與腐蝕速率相關性分 析	4-63
表 4-20	彰化海域金屬試片分析結果	4-64
表 5-1	臺中港海氣象觀測樁潮位資料表	5-4
表 5-2	銀/氯化銀電極參考電極外觀規格表	5-10
表 5-3	高內阻抗數位電表外觀規格表	5-10
表 5-4	腐蝕速率監測記錄器及腐蝕探頭規格	5-10
表 5-5	腐蝕速率監測系統傳輸訊號格式與介面範例	5-12

第一章 前言

1.1 計畫目標

臺灣地亞熱帶區域，夏季期間受颱風及西南氣流吹拂，冬季受東北季風之影響，全年風資源豐富，全臺共有 1,369 公里的海岸線，沿海地區受到強大季風的吹襲，海域風力資源非常可觀，使離岸風力發電成為臺灣的綠色能源發展的重要項目。本計畫整體規劃為期四年，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，進而評估相關腐蝕防治技術於國內環境之適用性，年度研究規劃重點工作項目如下：

第一年(106 年度)：

1. 國內外離岸風機基樁水下腐蝕防治及監測技術、海洋附著生物腐蝕影響及防蝕文獻蒐集與彙整。
2. 離岸風機基樁海洋附著生物附著暴露試驗規劃。
3. 離岸風機基樁現地腐蝕監測試驗規劃。
4. 離岸風場現地水質及底泥分析試驗調查。

第二年(107 年度)：

1. 臺中港基樁預定地離岸風機基樁現地金屬材料腐蝕現地暴露試驗安裝佈放。
2. 臺中港基樁預定地離岸風機基樁現地水質、金屬材料海生物附著及腐蝕暴露試驗分析調查。
3. 臺中港區海上試驗基樁腐蝕監測系統規劃設計。

第三年(108 年度)：

1. 臺中港海氣象觀測樁及離岸風機現地水質、金屬材料海生物附著及腐蝕暴露試驗分析調查。
2. 臺中港海氣象觀測樁腐蝕監測系統佈放及現地防蝕系統成效探討。
3. 臺中港海氣象觀測樁金屬材料腐蝕現地暴露試驗安裝與佈放。

第四年(109 年度)：

1. 臺中港海氣象觀測樁及離岸風機現地水質、金屬材料海生物附著及腐蝕暴露試驗成果綜合討論。
2. 臺中港海氣象觀測樁腐蝕監測探討。
3. 離岸風機金屬材料、防蝕工法、監測設備選用與建議。
4. 擬定離岸風機基樁防蝕規劃指引。

本研究透過國外離岸風電之腐蝕防治技術等相關資訊蒐集與彙整，並持續採樣調查臺中、彰化水域現地環境資訊，透過金屬暴露試驗規劃與觀測，充實臺灣腐蝕環境資料庫，評估相關腐蝕防治技術於國內環境之適用性，藉以建立本土化基樁及金屬構件可行之防蝕對策；提供國內風電產業發展相關施政、規劃、設計、施工，維管單位針對離岸風機基樁之防蝕規劃、設計與施作之應用。計畫研究流程，如圖 1.1 所示。

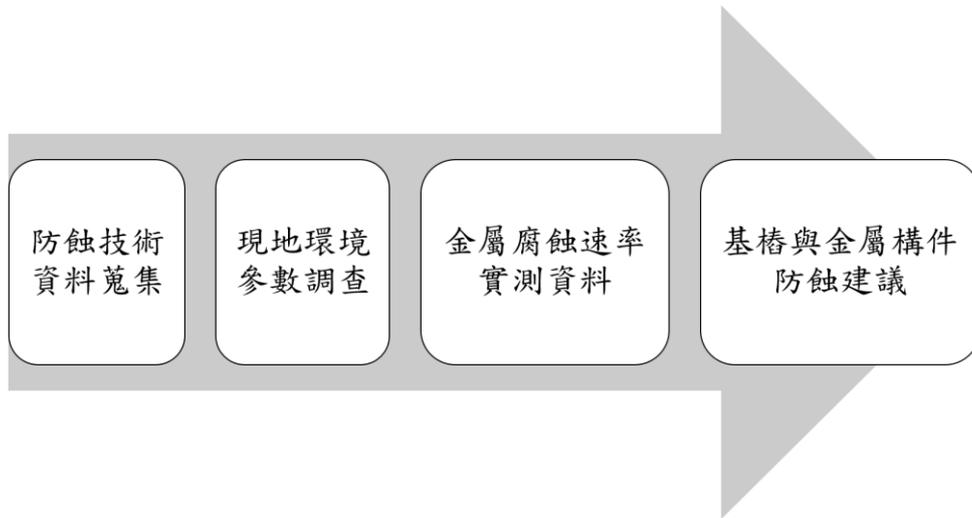


圖 1.1 計畫研究流程圖

1.2 研究內容及工作項目

離岸風機裝構件需面對海洋嚴苛腐蝕環境之考驗，其結構物腐蝕防治設計與機組構件等，皆為機組日後運轉維護的重要項目。106 年度「離岸風電水下技術研發」蒐集國內、外水下腐蝕防治與監測技術等相關文獻。在水下腐蝕防治方面，多採用陰極防蝕與防腐塗層工法兩大類，其種以陰極防蝕最為常見，另視結構物設置環境需求，搭配各類塗膜系統，以提高水下防蝕效果。此外，臺灣地區尚缺乏風機設置區域海洋附著生物的分佈情況，故本計畫將持續推動相關海域環境與海洋附著生物之調查工作，期能透過相關資料蒐集，結合現地資料採集及分析，以瞭解區域生物、地質與化學特性，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，提供相關海洋結構物之防蝕對策，利於離岸風機相關企業、技術等發展。

本年度「離岸風機基樁與金屬構件腐蝕防治之研究」，以 106 年度研究成果作為基礎，考量彰化離岸風機預定海域幅員廣大且底泥粒徑差異度高等因素，於彰化離岸風機預定海域新增一採樣點；另臺中及彰化離岸風機預定海域皆各增設一「水下金屬暴露試驗」試架組；持續進行兩海域之環境採樣及水下金屬暴露試驗觀測，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。

107 年度計畫工作項目如下：

1. 於臺中港基樁預定地及彰化海域離岸風場預定地底泥表層金屬材料腐蝕現地暴露試驗安裝佈放。
2. 進行臺中港區海上試驗基樁腐蝕監測系統規劃設計。
3. 執行臺中港區基樁預定地與彰化兩處海域底泥表層金屬材料海生物附著及腐蝕暴露試驗分析(各點位採樣調查各 1 次)。
4. 進行臺中港區基樁預定地與彰化海域底床拋放試架之金屬試片採樣及附著生物調查 (3 地點)。
5. 進行臺中港區基樁預定地與彰化海域兩處水質採樣調查分析。
6. 進行彰化海域離岸風場預定地底泥微生物菌種採樣及試驗分析。

1.3 預期效益

本研究針對離岸風機預定場地進行環境分析調查，以現地採樣及金屬試片水下佈放方式蒐集現地環境對試驗鋼材之腐蝕影響。另針對海域底泥，進行微生物 DNA 鑑定分析，調查離岸風機預定場地是否存在致使鋼材腐蝕之菌種，提供做為未來現地風機構件選材，防蝕計畫之研擬依據。相關研究成果可提供政府部門、產業界及相關研究機構制定相關政策之參考。

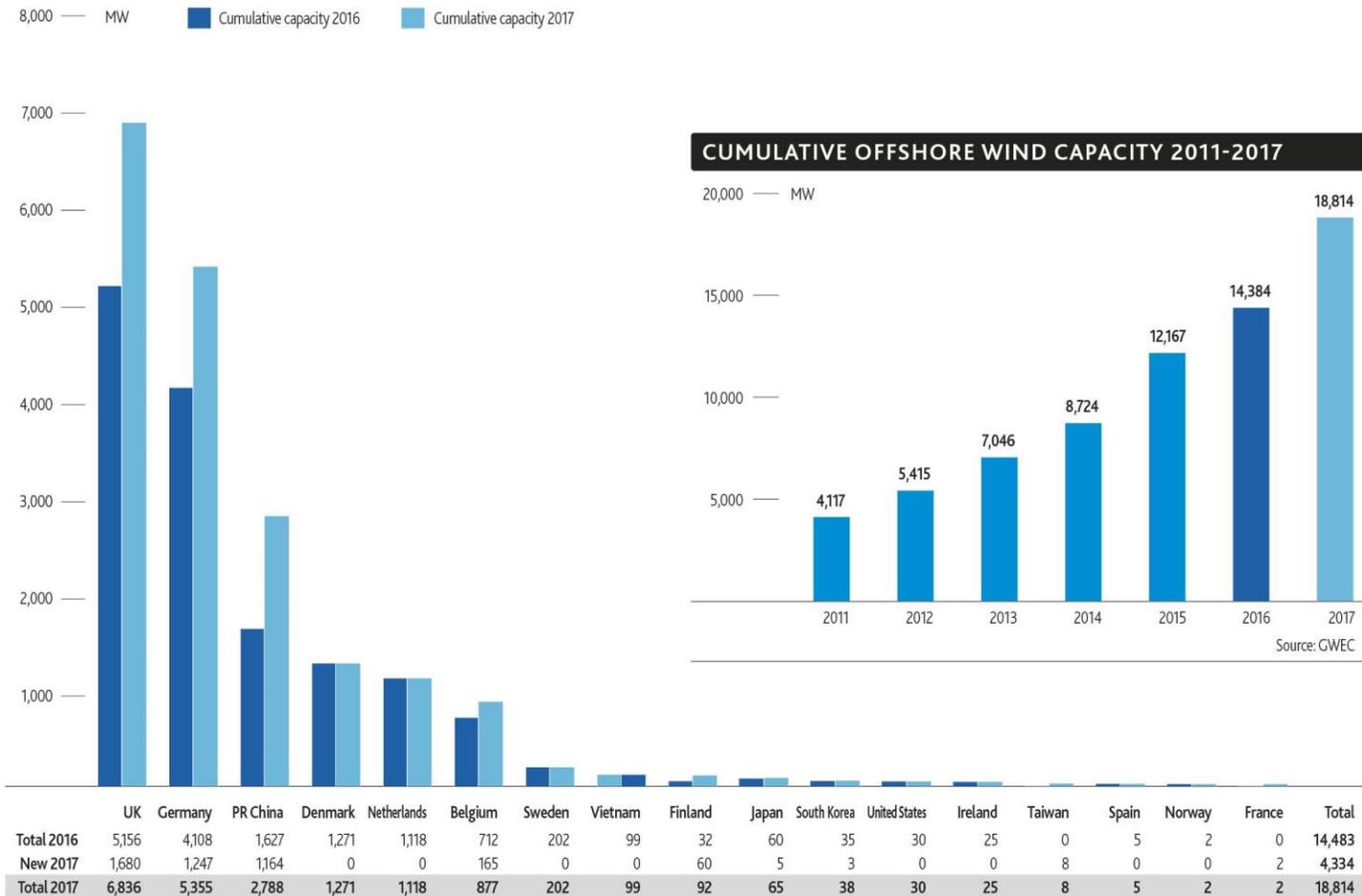
第二章 文獻回顧

為因應全球環境劇烈變遷及資源衰竭等問題，各國皆積極尋找替代能源，朝永續再生能源(Sustainable Energy)方向發展，全球風力發電市場自 1980 年代興起，發展至今近 40 年，成為技術成熟、最具經濟規模，富價格競力的再生能源重要選項。

1991 年，丹麥啟用白令海峽的 Vindeby 風場進行發電，是為全球第一座商用離岸風力發電場。隨著環境意識提升與風力發電相關技術進步，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。根據全球風能協會(Global Wind Energy Council, GWEC)統計^[1]，2018 年 2 月所發佈的統計數據，截至 2017 年底，全球風機的總裝置容量達到 539,291MW，占全球電力需求的 5% 以上。其中，離岸風力發電累計裝置量於 2011 年為 4,117 MW，直至 2017 年底，其累計裝置量大幅提升至 18,814 MW，如圖 2.1 所示。現今，全球前三大離岸風力裝置量國，分別為英國(36%)、德國(28.5%)及中國(15%)。

海上風能不受建築物或山坡等地形阻礙，可比陸上風能提供較多的能源。整體而言，全球離岸風力發電累計裝置量近 84%(15,780 MW) 分布於歐洲國家，其餘 16% 裝置量主要分佈於中國，其次則為越南、日本、韓國、美國及臺灣^[1]。離岸風電發展概念已於北歐、北美、東亞、印度等地區逐步蔓延，截至 2018 年 9 月，英國 Walney Extension 是為全球發電裝置容量最大的離岸風場(659 MW)^[2]；美國首座離岸風場 Block Island Wind Farm 位在羅德島州(Rhode Island)，於 2016 年 12 月正式啟用；中國亦積極推動離岸風電發展，著眼於潮間帶與近海地區，初步完成規劃風場主要以江蘇(27%)、山東(20%)、浙江(11%)與河北(9%) 四個省份為主。澳洲預計於吉普斯蘭(Gippsland)南部海岸，建設首座離岸風場(2GW)；巴西及土耳其皆欲陸續加入離岸風電推展，離岸風電能源推行將成為再生能源市場中的重要標的。

GLOBAL CUMULATIVE OFFSHORE WIND CAPACITY IN 2017

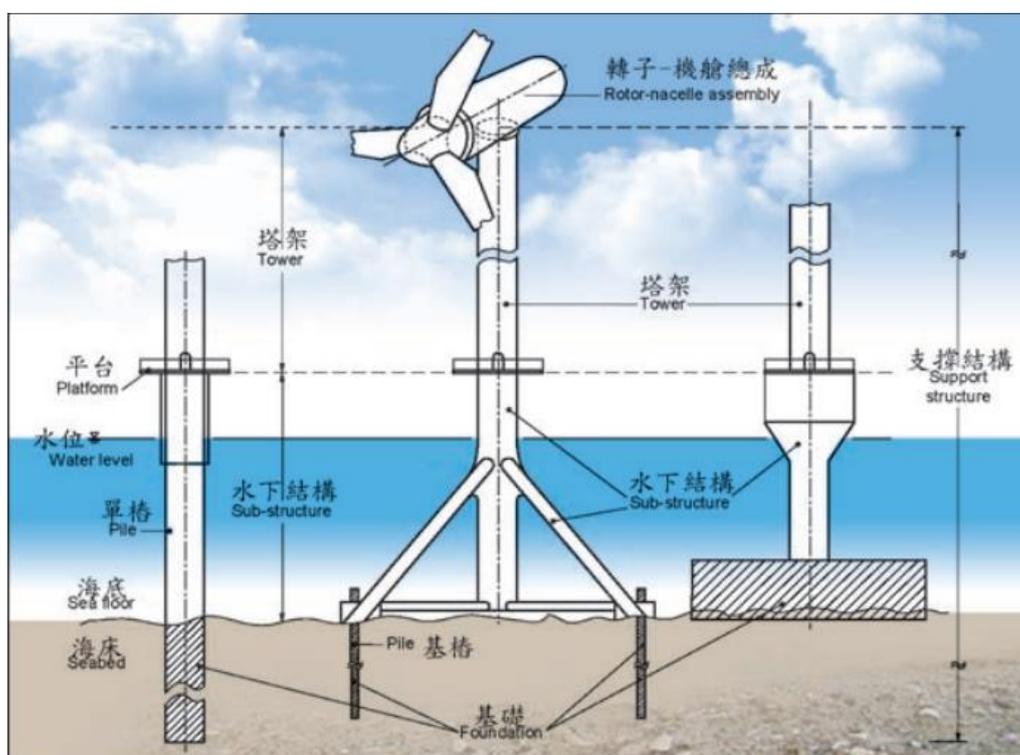


(圖片資料來源：Global Wind Energy Council, GWEC,2017)

圖 2.1 2011~2017 年全球離岸累計裝置容量變化圖^[1]

2.1 離岸風機結構型式

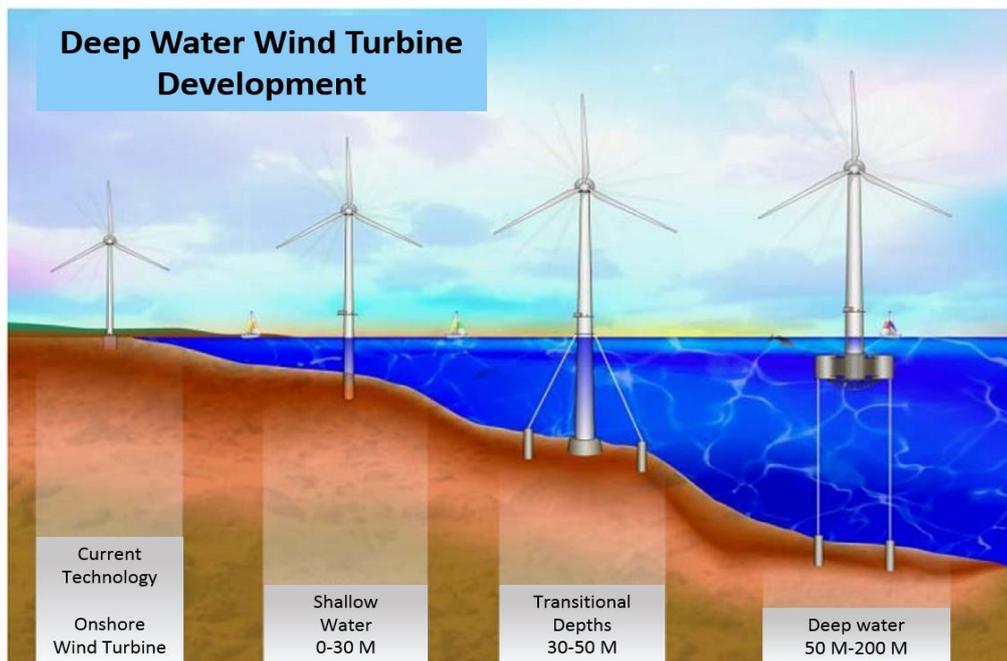
離岸風機依功能與受力不同，分為上部結構、下部結構與基礎^[3]，如圖 2.2 所示，海上風機高度一般介於 80 - 110m 間，上部結構包括風機本體及塔柱 (Tower)，主要承受風力；下部結構包括工作平臺及聯結塔柱與基礎之轉接段 (Transition piece)，主要承受波浪力；基礎部分則支撐結構並承受海水流動力。水下支撐及基礎安裝型式可概分為著床式基座(fixed foundation)與漂浮式基座(floating foundation)兩大類 [4,5]。



(圖片資料來源：冀等，2014)

圖 2.2 離岸風機固定式支撐構造概略圖^[3]

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，安裝適用於水深小於 50m 內之海域^[6,7]，未來，漂浮式基座可能成為深水區得設置首選，離岸風機設置距離與安裝水深將隨海事技術發展而逐步提升，離岸風機設置水深發展趨勢，如圖 2.3 所示^[8]。



(圖片資料來源：Richard, 2010)

圖 2.3 離岸風機設置水深發展趨勢圖^[8]

離岸風機水下基礎結構可分為單樁式(Monopile)、三腳管式(Tripod)、管架式/套筒式(Jacket)及重力式(Gravity)四類，基座設計會依據不同水深、洋流、地質條件決定其種類與尺寸。常見離岸風機水下基礎結構型式資料，如表 2-1 所示^[9,10]。歐洲地區離岸風機水下基礎多採「單樁式」或「套筒式」為主^[11]。單樁式基礎設計、施工簡易、相對成本低，於離岸風場相當常見，通常作為位處淺水或中等深度水域離岸風力發電機的下部結構，以歐洲地區而言，該型式基礎多應用於水深小於 20m 之水域，是為歐洲主流的水下基礎低成本方案。

臺灣地處亞太地震帶，於潛力風場地質鑽探結果分析，普遍認為可以苗栗做為分界。苗栗以北因有岩層且地震影響較輕微，可選用單樁式作為離岸風機之水下基礎，其施作成本隨水深而增加，運用於砂質海床或具漂砂問題之海域具較高之優勢；「套筒式基礎」結構較為複雜，其製造成本與其穩定度亦隨之提升，臺灣地區苗栗以南，相對泥土質地較鬆軟、地震影響程度較大，建議採用穩定度較佳之套筒式基礎施作，以提高其安全性^[11]。

表 2-1 常見離岸風機水下基礎結構型式資料表^[9,10]

結構示意圖				
基礎型式	單樁式 (Monopile)	三腳管式 (Tripod)	管架式/套筒式(Jacket)	重力式 (Gravity)
適用水深	5-35 m	20-50 m	30-70 m	0-10 m
特性	基座設計簡易，施工容易，故相對成本較低，不適用於過於堅實之土層。	鋼性較單樁式強，縮短三支基樁個別長度，側邊穩定度高；結構體大，運送較為複雜。	鋼材量少，製程複雜，故成本仍較單樁基座高。基樁斷面小，掏刷效應低，承受彎矩小。	重力基座承載力大、穩定性佳，不須打樁，然土層須具一定程度承載力，並進行整地。
典型重量	600-700 噸	900-1000 噸	700-900 噸	1000-3000 噸

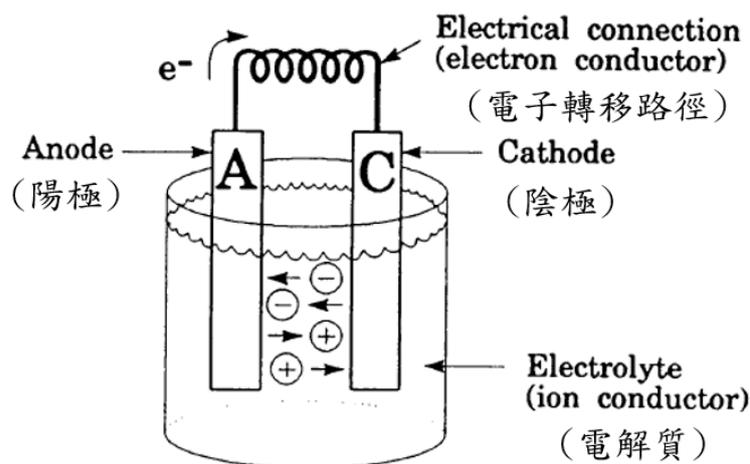
(參考資料：European Wind Energy Association, 2015)

2.2 金屬腐蝕成因

金屬材料與所處環境介質相互作用，於其介面發生化學、電化學和(或)生化反應所引起的變質和破壞，稱之為金屬腐蝕^[12]，其中以電化學腐蝕最為常見，故成為金屬腐蝕研究的重要對象。廣義而言，金屬腐蝕作用過程必然涉及金屬和環境中單一或多種成分之化學反應，從而導致新化合物(亦即腐蝕產物)形成，亦可能因磨損、沖蝕導致等物理作用所造成。

2.2.1 電化學腐蝕機制

電化學腐蝕是金屬表面與介質發生電化學作用而引起，於大自然基礎腐蝕環境包含大氣、水及土壤。海洋結構物的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放置於海水之中，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 2.4 所示^[13]。



(圖片資料來源：Bradford, 1994)

圖 2.4 水溶液系統之腐蝕程序示意圖^[13]

鋼材於海水中發生腐蝕之電化學反應程序如下：

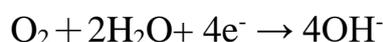
1. 在陽極上：

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：

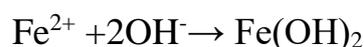


2. 在陰極上：

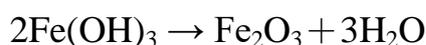
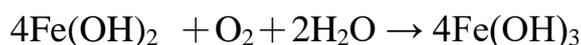
被釋放的電子流過鋼，如同電子穿過電池的電線，到陰極區域，在有氧氣供應之情況下，海水吸收游離之電子作用形成氫氧根離子：



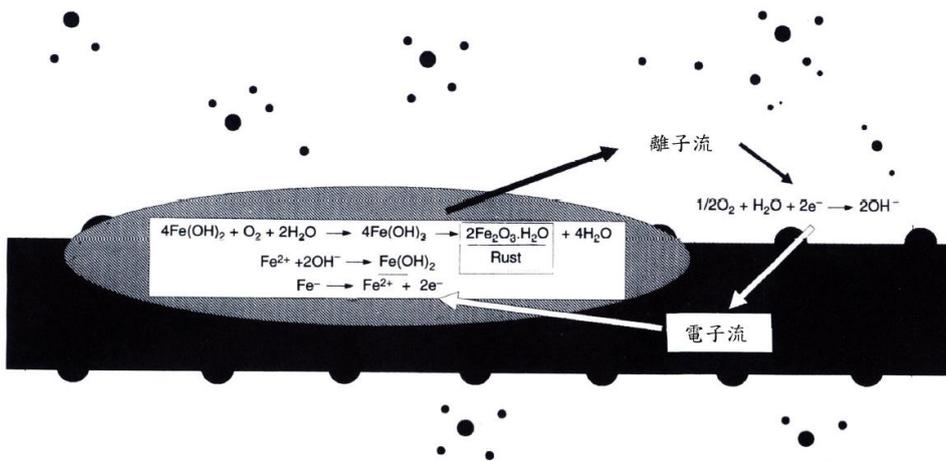
兩電極生成之產物結合形成 $\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{s})$ 淡綠色固體，



若水中氧氣充足， $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 將再與水中氧氣反應，快速轉化生成褐色鐵銹 $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s})$ 或 $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s})$ ，其化學反應如下：



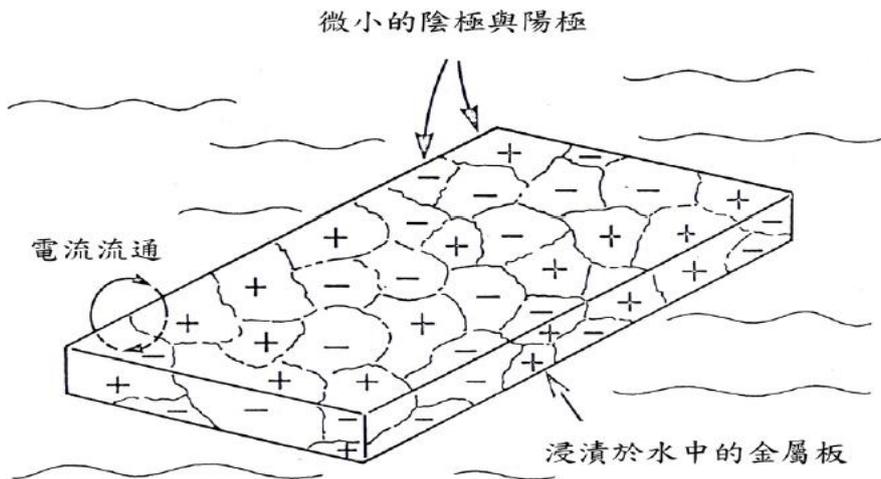
在氧氣作用下，鋼材外層可能形成紅棕色 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 鐵鏽，許多常見的變化形態如 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ($\alpha\text{-FeO} \cdot \text{OH}$, Goetwite) 及 r-FeOOH (lepidocrocite)，其鋼筋腐蝕機理示意圖，如圖 2.5 所示^[14]。



(圖片資料來源：Broomfield J. P., 1997)

圖 2.5 鋼筋腐蝕機理示意圖^[14]

金屬構件表面常因化學成分不均、合金之晶界電位差異、加工過程的應力不均或金屬表層不完整及空隙、裂縫等因素，進而產生表面微型腐蝕現象。於海洋環境，受海水 pH 值、氯離子含量、溶氧、溫度、流速等因素影響，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 2.6 所示^[12]。



(圖片資料來源：羅等，2007)

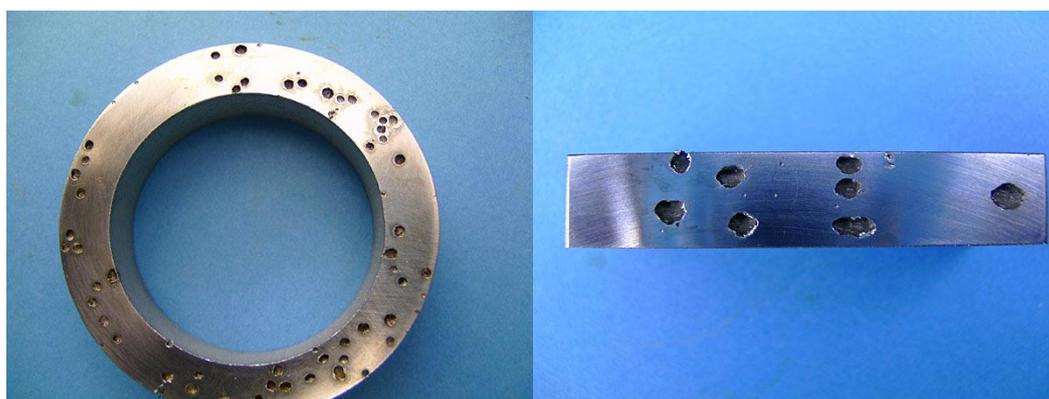
圖 2.6 腐蝕電池示意圖^[12]

金屬腐蝕過程中，這些微小的陽極或陰極將持續交替更換位置，此時，當微小腐蝕作用大面積均勻分布於金屬表面，將使金屬整體逐漸減薄，此腐蝕形態稱為全面腐蝕或均勻腐蝕(Uniform or general corrosion)^[15]。在均勻腐蝕的情況下，金屬表面各處的消耗速率均一致，於金屬表面出現明顯大面積的腐蝕情況，逐步減低金屬的各項性能，並無明顯肉眼可見的腐蝕深度，對此，一般透過「腐蝕質量」及「腐蝕深度」定期檢測所得知的腐蝕速率進行腐蝕餘裕量推估與設計，以防止金屬產生過早腐蝕之情況產生。

若金屬腐蝕過程中，局部活性區因應力不均，如：表面缺陷、濃度差異、環境介質不均等情況，腐蝕作用將局限在金屬的某一部位，此腐蝕形態稱為「局部腐蝕(Local corrosion)」，其腐蝕強度大與危害性皆高於全面腐蝕^[15]。局部腐蝕依破壞型態分類如下^[16]：

1. 點蝕(Pitting corrosion)

點蝕又稱孔蝕，腐蝕集中在金屬表面的小範圍內，並深入到金屬內部的小孔狀腐蝕形態，常發生在易鈍化金屬或合金中，即便使用較耐蝕之合金，如不鏽鋼、鋁合金等，仍易有點蝕情況發生，如圖 2.7 所示^[17]。



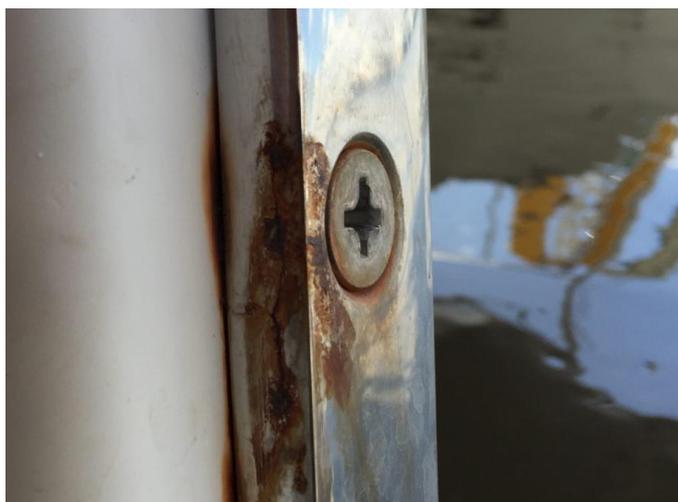
(圖片資料來源：Corrosion Resistance Testing, LMATS, AU)

圖 2.7 不鏽鋼金屬之點蝕現象^[17]

點蝕腐蝕孔徑小，若點蝕發生的距離相近，金屬表層即呈現粗糙表層，整體而言，腐蝕總量雖占比不高，但點蝕腐蝕處常因腐蝕產物遮蔽而不易察覺，欲測量點蝕腐蝕變化程度不易且局部腐蝕速度快，往往導致突發性的事故產生，除經濟損失外，亦可能造成災難性事故產生，是為破壞性及隱憂最大的腐蝕形態。於海洋環境下，建議選用含硫與含碳量低之不鏽鋼材，以提高耐蝕性。

2. 縫隙腐蝕(Crevice corrosion)

金屬表面與其他金屬或非金屬因結構(如焊縫、墊片、螺絲接點等)產生狹縫，縫隙內因腐蝕介質滯留，進而引發的金屬腐蝕，稱之為縫隙腐蝕。若縫隙介於 25~100 μm 並存有腐蝕介質，幾乎所有金屬或合金都會發生縫隙腐蝕^[18]，尤其於海洋高鹽度環境下，螺絲與狹縫所產生之縫隙腐蝕相當常見，如圖 2.8 所示。



(圖片資料來源：<http://dirigomaritime.com/stainless-steel-crevice-corrosion/>)

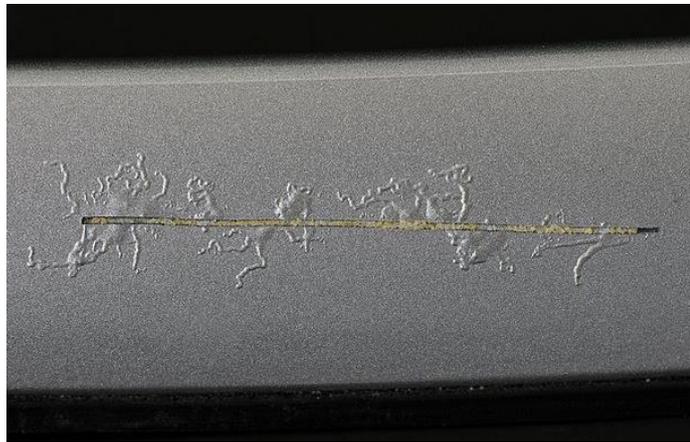
圖 2.8 不鏽鋼的縫隙腐蝕現象

氧濃度差電池的出現是為縫隙腐蝕的開始，當腐蝕性介質(如：海水)流入縫隙時，內外溶液氧濃度皆為一致，受到滯留影響，氧將以擴散方式向縫隙內傳遞，此時，縫隙內的氧消耗完後將難以得到補充，進而與外部形成氧濃度差電池，二次腐蝕產物又在縫隙入口逐步形成閉塞電池，顯示腐蝕進入發展階段。閉塞電池形成後，縫隙內陽離子難以向外擴散遷移，造成正電荷過剩，促使縫隙外陰離子遷入內，以保持電中性，這使得催化過程發生，加速縫隙腐蝕作用之產生。

為防止縫隙腐蝕，海上結構物設計應盡量避免形成縫隙，容器設計應避免死角與尖角，便於液體排除，墊片應選用非吸濕材料，以減低腐蝕介質條件之產生^[19]。

3. 絲狀腐蝕(Filiform corrosion)

絲狀腐蝕是發生在色漆、清漆或其他塗膜下的一種外觀為頭髮細絲狀的腐蝕現象(圖 2.9)，腐蝕主要發生在有機塗層下的金屬鋼、鋁或鎂上。由於絲狀腐蝕多數情況下主要發生在塗膜下，且在金屬表面呈線性不斷向前延伸生長，一般向基體金屬縱向生長的深度很淺，腐蝕深度約在 2-10 μm 之間，因此又被稱為膜下腐蝕^[20]。



(圖片資料來源：https://www.reddit.com/r/corrosion/comments/713noy/filiform_corrosion_on_a_painted_aluminium_sample)

圖 2.9 絲狀腐蝕現象

絲狀腐蝕是為一種典型陽極破壞的電化學腐蝕現象，腐蝕一般從塗膜的切割邊緣或局部損傷處等缺陷部位開始，由於塗層的微觀缺陷、基體金屬表面的不均勻性，以及塗層與金屬基體之間產生的剝離介面的前區與後端的氧氣含量差異等綜合因素的協同作用，使得電化學反應的陰極區和陽極區得以形成，而形成氧濃差電池，如此一來，結構物的塗層附著力將被破壞，使塗層失去防護作用，致使金屬更容易被腐蝕^[21]，絲狀腐蝕的生長環境需要同時滿足電解質、水分和氧氣能源源不斷供應，尤其在空氣相對濕度範圍為 65%-95%，溫度 15.5-26.5 $^{\circ}\text{C}$ ，塗膜表面或環境中有吸濕性鹽類作為電解質時，絲狀腐蝕極易發生。隨著腐蝕不斷地向前延伸生長，腐蝕產物累積，塗膜拱

起，形成一條猶如頭髮絲狀的腐蝕痕跡，腐蝕絲的寬度主要取決於引發或活化階段初期電解液滴的大小，在延伸生長過程中寬度變化不大，主要是長度的增加，一般大約以 0.15-0.4mm/d 的速度由引發點向前延伸發展，縱向寬度一般為 0.1-0.5mm^[21]。欲防止絲狀腐蝕，可採用厚膜型塗層降低水分與溼氣滲透率，改善環境、降低濕度、防止鹽類對金屬底材依附等措施^[19]。

4. 加凡尼腐蝕(Galvanic corrosion)

加凡尼腐蝕又稱電偶腐蝕或接觸腐蝕，指不同金屬在同一介質中接觸，由於腐蝕電位不相等，又有電偶電流流動，使電位較低的金屬溶解速度增加，造成接觸處的局部腐蝕，簡易而言，當兩耦合金屬對位差值越大，陽極金屬(電位較負者)之腐蝕程度便會顯著增加，另於潮濕海洋環境，於高濕度及高鹽分皆易促使加凡尼腐蝕情況產生，如圖 2.10，為大氣區因金屬鋼材選用不當所產生之加凡尼腐蝕現象。加凡尼腐蝕作用中，不同的陰極與陽極面積比，有著相當的影響效應。當陽極金屬面積大於陰極金屬面積時，陰極金屬腐蝕速率較弱，反之，當陰極金屬面積大於陽極金屬面積時，腐蝕電流將加速侵襲陰極金屬，較易造成連結構件之破壞^[19]



(圖片資料來源：https://www.reddit.com/r/corrosion/comments/713noy/filiform_corrosion_on_a_painted_aluminium_sample)

圖 2.10 加凡尼腐蝕現象

防止加凡尼腐蝕，應盡量避免電位差懸殊之異金屬做導電接觸，避免出現「陰極金屬面積大於陽極金屬面積」之規劃設計，面積較小的部位零件，宜選用腐蝕電位較正之金屬，電位差懸殊之異金屬組裝，輔以絕緣墊片進行隔絕保護；設計時，選用異更換之陽極部件，可加厚以延長使用壽命，適時添加緩衝劑以減輕介質腐蝕，或加上第三塊金屬進行音及保護等措施，皆有助於減緩加凡尼腐蝕之發生^[19]。

合金中呈現不同電極電位的金屬相、化合物、組分元素的貧化或富集，以及氧化膜等也都可能與金屬間發生加凡尼腐蝕，鈍化與濃度效應亦會形成電偶型的腐蝕現象，然此微小的電偶型腐蝕現象，屬腐蝕微電池，不屬加凡尼腐蝕現象。

5. 晶間腐蝕(Intergranular corrosion)

晶間腐蝕係指金屬材料在特定的腐蝕介質中沿著材料的晶粒邊界或晶界附近發生腐蝕，使晶粒之間喪失結合力的一種局部腐蝕。晶間腐蝕的危害性很大，宏觀上可能沒有任何明顯變化，但其實材料的強度已經幾乎完全喪失，所以經常導致設備的突然破壞。如圖 2.11，便為金屬材料在特定的腐蝕介質中沿著材料的晶粒邊界或晶界附近發生腐蝕。通常藉由降低碳含量(低碳不鏽鋼、超低碳不鏽鋼)、合金化或適當的熱處理 (1050-1100°C)以防範晶間腐蝕之產生。



(圖片資料來源：<https://www.duncanaviation.aero/intelligence/2017/April/corrosion-does-not-discriminate>)

圖 2.11 晶間腐蝕現象

6. 選擇性腐蝕(Dealloying)

選擇性腐蝕又稱為脫成分腐蝕，通常是多元合金中的某些成分或某些組織不按原合金比例溶解的金屬腐蝕，例如黃銅脫鋅(表面呈紅色或棕色)、青銅脫錫、灰口鑄鐵的石墨化及矽青銅的脫矽等腐蝕。

選擇性腐蝕的災害，輕則使合金損失強度，重則造成穿孔、破損，釀成嚴重事故。選擇性腐蝕只發生在二元或多元固體合金中，可分組織選擇性腐蝕和成分選擇性腐蝕。合金表面的電化學不均勻性構成腐蝕電池，較活潑的組織或成分優先溶解，電位較正部分作為陰極保持穩定或重新沉澱。合金的選擇性腐蝕性能和成分有很大關係。合金的耐蝕性隨含較貴金屬組分增加而增加。影響選擇性腐蝕的因素有合金成分、腐蝕介質性質、熱處理或機械加工和焊接等。防止選擇性腐蝕的途徑有正確選材、合理選擇腐蝕環境、採用電化學保護等。

2.2.2 物理性腐蝕機制

環境所造成之開裂 (Environmentally assisted cracking)，包含應力腐蝕劣化(Stress corrosion cracking, SCC)、腐蝕疲勞(Corrosion fatigue)、氫蝕(hydrogen damage)等。

(1) 應力腐蝕劣化

金屬材料在應力和腐蝕介質的聯合作用下，經過一定時間後出現低於材料強度極限的脆性開裂現象，致使金屬結構物材料失效，稱之為應力腐蝕。金屬應力腐蝕破裂只在對應力腐蝕敏感的金屬上發生，純金屬極少發生。合金的化學成分、熱處理對其應力腐蝕破裂有很大的影響，如組織應力、焊接應力或工作應力等外力作用^[19]。圖 2.12 即為金屬材料在應力和腐蝕介質的聯合作用下，造成的脆性開裂現象。



(圖片資料來源：[https://www.nace.org/Corrosion-Central/Corrosion-101/Stress-Corrosion-Cracking-\(SCC\)/](https://www.nace.org/Corrosion-Central/Corrosion-101/Stress-Corrosion-Cracking-(SCC)/))

圖 2.12 應力腐蝕劣化現象

(2) 腐蝕疲勞

腐蝕疲勞，意指金屬在腐蝕介質和應力反覆共同作用下引起的破壞，材料疲勞伴隨腐蝕加重而引起材料發生斷裂。圖 2.13 即為金屬構件因交替循環的應力作用而產生之腐蝕疲勞現象。



(圖片資料來源：<http://www.axiomndt.co.uk/services/derrick-services>)

圖 2.13 腐蝕造成之劣化現象

(3) 氫蝕

原子氫擴散進金屬的晶格而引起的損傷稱為氫蝕。易受氫蝕影響的金屬有碳鋼、低合金鋼、鐵素體鋼和馬氏體不鏽鋼，甚至在低於常溫以及常壓以下的金屬。圖 2.14 即為氫原子擴散進金屬晶

格而引起之損傷。



(圖片資料來源：<https://mechasource.blogspot.com/2018/05/an-introduction-to-hydrogen-damage.htm>)

圖 2.14 氫蝕造成之劣化現象

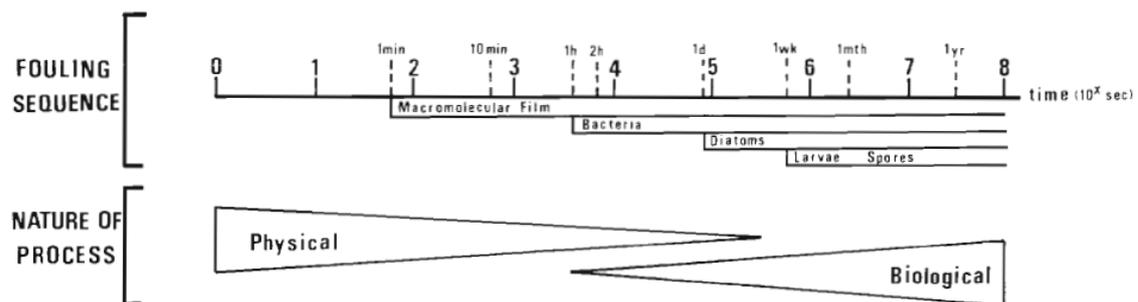
2.2.3 生化腐蝕機制

臺灣位處亞熱帶，海洋生物繁殖旺盛，海洋結構物常因海洋附著生物(fouling organism)的依附生長，導致水下材料及設施加速腐蝕或局部破壞，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)^[22,23]。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^[24]，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。

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)^[25]，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^[26]，陸續繁殖形成巨大的生物群聚、污損生物層(macroulcers)，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^[27]，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 2.15 所示。



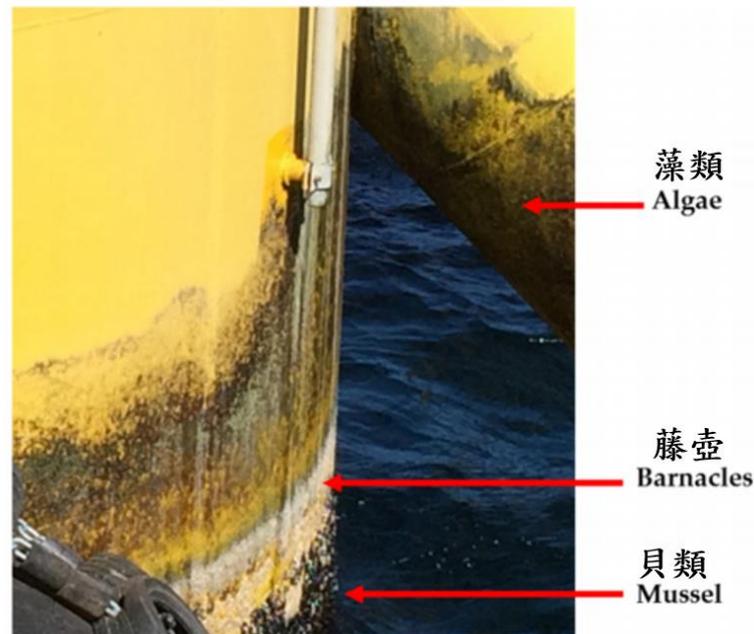
(圖片資料來源：Wahl, 1989)

圖 2.15 海洋附著生物群聚消長變化圖^[27]

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(藤壺和鵝茗荷)、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^[28]。根據過往相關研究與調查，臺灣各港區碼頭均有海洋附著生物問題產生，海洋附著生物種類及繁殖受到海水深度、溫度、光度及營養等因素影響，同時亦因季節、潮汐等變化而異。如高雄港主要海洋附著生物以管蟲為主，其他如：藤壺、紫孔雀蛤、多毛類、海鞘、苔蘚蟲及海葵等零星分布。如以垂直深度進行探討，由淺至深，主要生物變化分別為藤壺、紫孔雀蛤、多毛類等^[29]。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。

然國內關於海洋附著生物研究甚少，雖曾有初步的附著生物分佈與防污塗層與附著生物關係之研究；但僅有初步鑑定，並無法提供完整海洋附著生物與防污間之相關訊息。另離岸風機與海洋生物相關研究，多專注在風機機組對生物生態影響評估及漁業生產等議題^[30-33]，

關於海洋附著生物對離岸風機機組之腐蝕研究則仍闕如。離岸風機樁體海洋附著生物依附情況，如圖2.16所示^[34]。

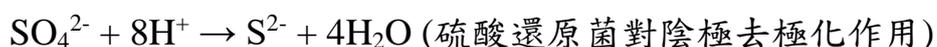
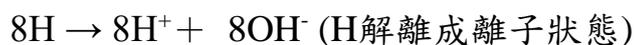
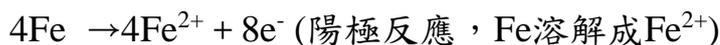


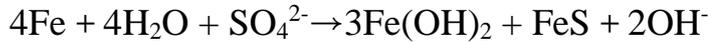
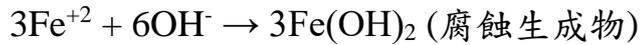
(圖片資料來源：Seth, 2017)

圖 2.16 離岸風機樁體海洋附著生物依附情況^[34]

海洋附著生物附著後，其金屬腐蝕過程如下^[35]：

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。
3. 形成金屬表面有氧氣濃淡電池作用。
4. 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。
5. 硫酸還原菌對鋼材之腐蝕機理如下：(厭氧性細菌)



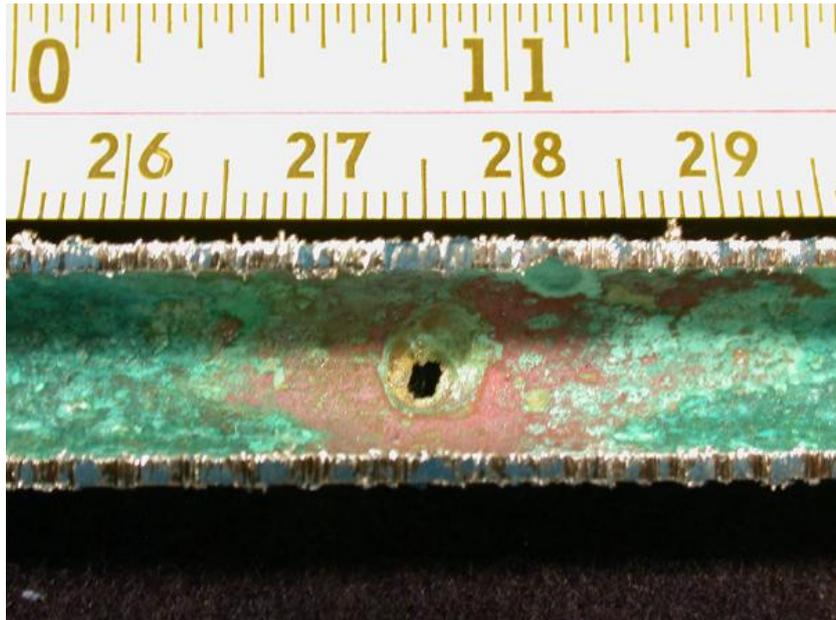


2.3 厭氧微生物腐蝕

過去，人們多以非生物的腐蝕機制進行腐蝕現象之觀察，隨著分析技術的進步與發展，研究指出腐蝕乃是由傳統電化學腐蝕與生物交互作用下所導致^[36]，故微生物於腐蝕過程中之作用機制，愈發受到重視。這些於金屬及非金屬材料表面之微生物作用，所導致或促進材料的腐蝕或破壞，稱之為微生物腐蝕(Microbiologically Influenced Corrosion, MIC)。故微生物腐蝕並非一種獨特的腐蝕形式，因其主要是由微生物生物膜或相關代謝產物相互作用而產生腐蝕，故多以「局部腐蝕」型態出現^[37]，其腐蝕作用與顯微鏡下之觀測情況如圖 2.17、圖 2.18 所示。

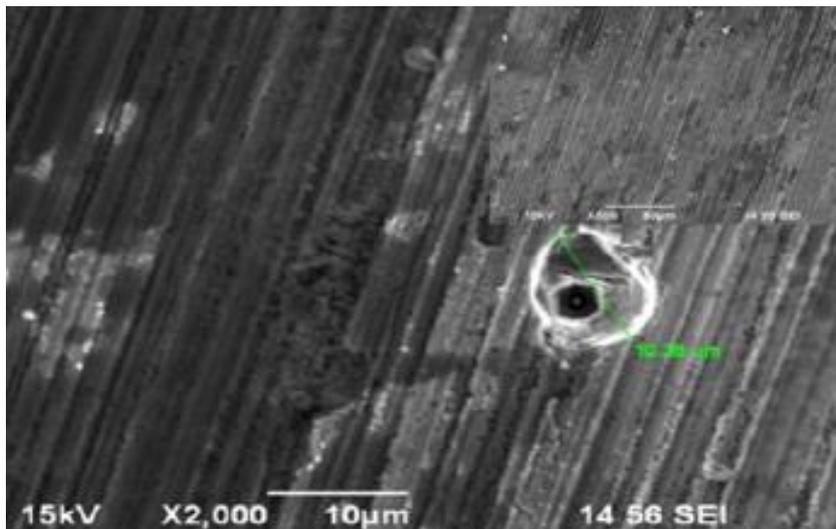
腐蝕微生物多為環境中鐵、硫循環的參與者，根據細菌種類及作用可分類如下^[38]：

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)



(圖片資料來源：Nicklin, 2008)

圖 2.17 微生物導致造成之金屬腐蝕^[39]



(圖片資料來源：Zhang *et al.*, 2008)

圖 2.18 顯微鏡記錄 *Leptothrix discophora* 造成之金屬腐蝕^[40]

硫酸鹽還原菌(sulphate-reducing bacteria, SRB) 是為一種厭氧的微生物，可在 $-5\sim 75^{\circ}\text{C}$ 條件下生存，並能很快適應新的溫度環境。某些種可在 -5°C 以下生長，具有芽孢的種，可耐受至 80°C 之高溫，環境 pH 值 $5\sim 9.5$ 的範圍皆可生存，其中以 pH 值 $7.0\sim 7.8$ 生存條件最佳

[41]，亦可於高鹽環境中生存，故其生長能力強，可廣泛生存於土壤、海水、河水、地下管道以及油氣井等缺氧環境中，是引起鋼鐵、金屬等材料腐蝕的重要原因之一^[42]，於深海厭氧環境下，更是扮演腐蝕的主導地位。

硫酸鹽還原菌利用利用金屬表面的有機物作為碳源，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硫酸鹽還原菌消耗，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^[38]。1994-2016年間，已多篇研究顯示，硫酸鹽還原菌對於碳鋼(Carbon steel)、不鏽鋼(Stainless steel)、鈦(Titanium)、銅合金、鎳合金等多種金屬，皆會造成局部腐蝕現象，歷年硫酸鹽還原菌對金屬腐蝕之相關研究，彙整於表 2-2。

表 2-2 厭氧微生物金屬腐蝕相關研究彙整表

作者/年分	研究金屬	研究主題與摘要
Ringas, C., & Robinson, F. P. A. (1988) ^[43]	不鏽鋼 低碳鋼	Corrosion of stainless steel by sulfate-reducing bacteria total immersion test-results
		研究針對一系列不鏽鋼及低碳鋼進行浸泡腐蝕試驗，並以掃描電子顯微鏡(Scanning Electron Microscope, SEM) 觀察硫酸還原菌對於各式金屬腐蝕之情況進行觀測。研究結果顯示，硫酸還原菌會對研究金屬產生點蝕及晶粒間的晶間腐蝕，整體而言，以 304L 不鏽鋼受硫酸還原菌腐蝕影響程度最小，低碳鋼腐蝕表面則有獨特蝕刻亮面出現。
Ringas, C., & Robinson, F. P. A. (1988) ^[44]	不鏽鋼	Corrosion of stainless steel by sulfate-reducing bacteria electrochemical techniques
		研究選用 304L、316L、316、430、409 等多種不鏽鋼，於硫酸還原菌腐蝕作用下之化學電位變化觀測。研究結果顯示，腐蝕凹洞位置與金屬電位變化具有相關性。
Little, B. J. <i>et al.</i> (1988) ^[45]	銅、鎳	Impact of sulfate-reducing bacteria on welded copper-nickel seawater piping systems/ Evaluation of microbiologically induced corrosion in an estuary
Little, B. J. <i>et al.</i> (1989) ^[46]		研究針對銅/鎳材質製成之海水管道系統焊縫之硫酸鹽還原菌腐蝕作用影響進行調查與研究。研究結果顯示，管道系統焊接於加熱過程中可能產生金屬偏析、焊縫中硫化物細菌沉降、硫化物衍生物等情況，進而破壞金屬表面，形成無數微小的腐蝕電池，致使局部腐蝕發生。
Beech, I. B. <i>et al.</i> (1994) ^[47]	低碳鋼	Study of parameters implicated in the biodeterioration of mild steel in the presence of different species of sulphate-reducing bacteria
		研究針對 <i>Desulfovibrio desulfuricans</i> subspecies <i>desulfuricans</i> 中的兩種硫酸鹽還原菌特性進行研究，研究內容包含菌種群落的代謝活性觀察、碳

作者/年分	研究金屬	研究主題與摘要
		鋼基質的表面平整度與硫酸鹽還原菌附着情況，以及兩種酸鹽還原菌生物膜於碳鋼表面之作用情況等進行觀測，透過重量損失量測估算碳鋼之腐蝕速。研究結果顯示，兩種硫酸鹽還原菌於相同生長條件下對碳鋼腐蝕性有異，不同硫酸鹽還原菌皆有各自之優勢生長及腐蝕條件。
Neville, A., & Hodgkiess, T. (2000) ^[48]	奧氏體不鏽鋼 雙相不鏽鋼	Corrosion of stainless steels in marine conditions containing sulphate reducing bacteria
		研究透過陽極極化、陰極極化、電偶耦合實驗、顯微鏡和微量分析等方式，觀察硫酸鹽還原菌於海水環境中對奧氏體不鏽鋼及雙相不鏽鋼之腐蝕行為。研究結果證實，硫酸鹽還原菌可在無電化學監測干擾之低氧環境產生顯著的腐蝕情況。
Li, S. Y. <i>et al.</i> (2001) ^[49]	地下金屬結構	Microbiologically influenced corrosion of carbon steel exposed to anaerobic soil
		研究透過電化學極化技術、電化學阻抗譜 (Electrochemical impedance spectroscopy, EIS)，掃描電子顯微鏡 (Scanning electron microscopy, SEM) 與能量色散譜 (Energy-dispersive spectroscopy, EDS)、薄膜電阻 (Electrical resistance, ER) 探頭和電流測量等相互搭配，研究厭氧土壤中微生物對碳鋼之腐蝕情況。(Microbiologically influenced corrosion, MIC)。調查結果顯示，透過環境參數分析，如土壤電阻率、含水量、總有機碳含量、還原氧化電位和硫酸鹽含量等，可藉以評估微生物腐蝕之風險。地下金屬結構使用壽命約為 30 至 50 年，然缺氧的土壤環境將出現硫酸鹽還原菌腐蝕作用之產生，欲維持地下金屬之使用情況，應定期檢查和維護，輔以有機塗層和陰極防蝕工法進行防蝕工作，以確保地下金屬結構使用壽命及安全性。
Geiser, M. <i>et al.</i>	不鏽鋼	Microbially initiated pitting on 316L stainless steel

作者/年分	研究金屬	研究主題與摘要
(2002) ^[50]		<p>研究觀察低鹽度環境下，錳氧化細菌(<i>Leptothrix discophora</i>)對 316L 不鏽鋼造成之點蝕情況。研究結果顯示，<i>Leptothrix discophora</i> 的確會對 316L 不鏽鋼造成點蝕，且氯離子將促進腐蝕之發生，顯微鏡下所觀察之腐蝕凹洞形狀與微生物形狀非常相似，故推測點蝕應由微生物所導致。</p>
Huang, G. et al. (2004) ^[51]	銅鎳合金	<p style="text-align: center;">Microbiologically induced corrosion of 70Cu-30Ni alloy in anaerobic seawater</p> <p>研究以顯微鏡和電化學方法研究硫酸鹽還原菌於厭氧海水中對 70Cu-30Ni 合金的腐蝕情況。透過雷射掃描共軛焦顯微鏡 (confocal laser scanning microscopy, LSCM) 觀察，可發現硫酸鹽還原菌於厭氧條件下之合金表面形成斑點生物膜；銅鎳合金金屬於含有酸鹽還原菌之海水浸泡七日後，即可發現晶間腐蝕現象。微生物生長濃度與其代謝物濃度具有對應變化關係，故推論銅鎳合金之腐蝕現象與硫酸鹽還原菌作用具有一定程度之影響。</p>
Rao, T. et al. (2005) ^[52]	鈦	<p style="text-align: center;">Pitting corrosion of titanium by a freshwater strain of sulphate reducing bacteria (<i>Desulfovibrio vulgaris</i>)</p> <p>研究將 2.0×1.5cm 之鈦金屬暴露於硫酸鹽還原菌 <i>Desulfovibrio vulgaris</i> 環境中，以接種及未接種 <i>Desulfovibrio vulgaris</i> 作為對照組，進行為期 90 天的硫酸鹽還原菌培養及點蝕腐蝕情況之研究觀察。研究顯示，未接種 <i>Desulfovibrio vulgaris</i> 之鈦金屬無點蝕現象發生；暴露於接種 <i>Desulfovibrio vulgaris</i> 之鈦金屬表面出現直徑約 2mm 之半圓形凹洞與許多微小凹洞，凹洞中皆可發現硫酸鹽還原菌，顯示硫酸鹽還原菌的確能對鈦金屬造成點蝕之腐蝕作用。</p>

作者/年分	研究金屬	研究主題與摘要
Antony, P. J. <i>et al.</i> (2008) ^[53]	雙相 不鏽鋼	Influence of thermal aging on sulfate-reducing bacteria (SRB)-influenced corrosion behaviour of 2205 duplex stainless steel
		研究將 2205 雙相不鏽鋼暴露於含有硫酸鹽還原菌的氯化物培養基介質中，進行為期 40 天之暴露腐蝕對照組觀察研究。研究顯示，暴露於硫酸鹽還原菌中之 2205 雙相不鏽鋼出現陰極腐蝕電位急劇下降，陽極電流增加之現象，顯示硫酸鹽還原菌對 2205 雙相不鏽鋼具有腐蝕作用。
Li, J., Yuan, W., & Du, Y. (2010) ^[54]	銅合金	Biocorrosion characteristics of the copper alloys BFe30- 1-1 and HSn70-1AB by SRB using atomic force microscopy and scanning electron microscopy
		研究針對銅合金(HSn70-1AB 和 BFe30-1-1)在含有硫酸鹽還原菌培養基中之腐蝕情況，藉由顯微鏡觀察硫酸鹽還原菌對於兩不同之銅合金之附著力及表面的生物膜特性。兩銅合金於相同浸置時間後進行比較，結果顯示，於兩金屬皆有腐蝕現象產生，其中硫酸鹽還原菌較易於 BFe30-1-1 附著，故金屬合金的化學成分，會影響硫酸鹽還原菌生物之膜形成與表面附著的化學特性。
Liu, F. <i>et al.</i> (2012) ^[55]	雙相不鏽 鋼	Effect of sulphate reducing bacteria on corrosion of Al-Zn-In-Sn sacrificial anodes in marine sediment
		研究針對海洋沉積物中 Al-Zn-In-Sn 犧牲陰極進行腐蝕觀察。研究顯示，硫酸鹽還原菌對海洋沉積物中之 Al-Zn-In-Sn 犧牲陰極造成點蝕，金屬材料腐蝕速率隨硫酸鹽還原菌生長而提升。且對耐腐蝕性佳的 2205 雙相不鏽鋼亦具有腐蝕作用，於其表面明顯出現點蝕現象，並形成 Cr ₂ O ₃ 、FeS、FeS ₂ 、Fe(OH) ₂ 和 FeO 等腐蝕產物。
Yuan S. J. <i>et al.</i> (2013) ^[56]	不鏽鋼	Surface chemistry and corrosion behaviour of 304 stainless steel in simulated seawater containing inorganic sulphide and

作者/年分	研究金屬	研究主題與摘要
		<p>sulphate-reducing bacteria</p> <p>研究探討海水培養基中硫酸鹽還原菌以及相關代謝產物與無機硫化物對 304 不鏽鋼的腐蝕情況。透過對照組研究觀察發現，硫酸鹽還原菌產生之硫化物對 304 不鏽鋼有顯著的腐蝕現象，且硫酸鹽還原菌所產生之生物膜，亦會促進不鏽鋼表面之腐蝕作用。</p>
Faisal, M.A. <i>et al.</i> (2013) ^[57]	碳鋼	<p>Influence of sulfate reducing bacterial biofilm on corrosion behavior of low-alloy, high-strength steel (API-5L X80)</p> <p>研究針對硫酸鹽還原菌對 API 5L X80 管線碳鋼之微生物腐蝕影響進行調查。透過能量色散光譜儀(Energy Dispersive Spectroscopy, EDS)觀察發現，硫酸鹽還原菌之腐蝕產物中含有各式硫化物和氧化物成分，故金屬表面上所形成的生物膜和硫化物層，將促使硫酸鹽還原菌產生顯著的局部腐蝕作用。</p>
Machuca, L. L. <i>et al.</i> (2014) ^[58]	不鏽鋼	<p>Evaluation of the effects of seawater ingress into 316L lined pipes on corrosion performance</p> <p>研究針對 316L 管道受海水滲入對腐蝕之影響進行研究，觀察海水中的氧和微生物於海水環境中對 316L 的腐蝕情況。結果顯示，氧氣對化學方法之生物去除效率有負面影響，且會促進腐蝕之發生，增高局部腐蝕風險。</p>
Nalan O. S. <i>et al.</i> (2014) ^[59]	鎳鋅合金 鎳銅合金	<p>Microbially influenced corrosion and inhibition of nickel-zinc and nickel-copper coatings by <i>Pseudomonas aeruginosa</i></p> <p>研究針對革蘭氏陰性之銅綠假單胞菌 (<i>Pseudomonas aeruginosa</i>) 對鎳鋅合金及鎳銅合金之腐蝕速率影響。研究結果顯示，銅綠假單胞菌作用會促進鎳銅合金腐蝕，但對鎳鋅合金具有保護作用。</p>

作者/年分	研究金屬	研究主題與摘要
Javed, M.A. <i>et al.</i> (2015) ^[60]	碳鋼	<p data-bbox="651 286 1343 421">Corrosion of carbon steel by sulphate reducing bacteria: Initial attachment and the role of ferrous ions</p> <p data-bbox="651 452 1343 824">研究針對在亞鐵離子影響下，硫酸鹽還原菌的初始附著與碳鋼腐蝕影響情況進行研究。研究發現，最初始細菌附著過程最為複雜，附著的早期階段（≤60 分鐘），硫酸鹽還原菌對培養基中鐵的具有依賴性；60 分鐘後，與缺鐵培養基相比，在富含鐵的培養基中，具有較高附著性及聚合物產生。顯示觀察亞鐵離子濃度之變化，可能有助於監測硫酸鹽還原菌對腐蝕作用之影響。</p>
Dawei, Z. <i>et al.</i> (2015) ^[61]	不鏽鋼 鈦	<p data-bbox="651 882 1343 1016">Microbially Influenced Corrosion of 304 Stainless Steel and Titanium by <i>P. variotii</i> and <i>A. niger</i> in Humid Atmosphere</p> <p data-bbox="651 1043 1343 1464">多數微生物腐蝕研究著重於原核細菌，如硫酸鹽還原菌上，在真菌對金屬腐蝕行為之影響尚未有充分的研究。故此篇研究將 304 不鏽鋼和鈦暴露於高濕度環境中，採常見的擬青黴(<i>Paecilomyces variotii</i>)、黑曲霉(<i>Aspergillus niger</i>)兩種真菌進行金屬腐蝕觀察。經暴露 60 天後，進行相關腐蝕評估，真菌降低了 304 不鏽鋼和鈦金屬的耐腐蝕性，相對而言，鈦金屬對真菌的抗腐蝕性較 304 不鏽鋼高。</p>
Zhang, P. <i>et al.</i> (2015) ^[62]	不鏽鋼	<p data-bbox="651 1514 1343 1688">Electron mediators accelerate the microbiologically influenced corrosion of 304 stainless steel by the <i>Desulfovibrio vulgaris</i> biofilm</p> <p data-bbox="651 1715 1343 1989">研究培養 <i>Desulfovibrio vulgaris</i>，使之生物膜覆蓋於 304 不鏽鋼，接續進行相關微生物腐蝕試驗觀察。研究進行為期七日之厭氧測試實驗。研究結果顯示，<i>Desulfovibrio vulgaris</i> 生物膜將加速點蝕作用，明確指出生物膜與微生物腐蝕具有重要的協同作用影響。</p>

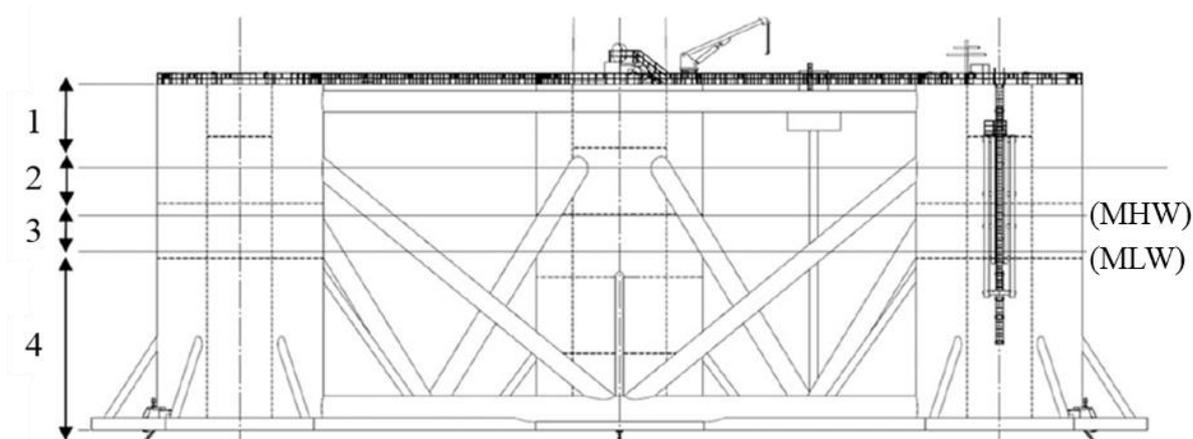
作者/年分	研究金屬	研究主題與摘要
Xia J. <i>et al.</i> (2015) ^[63]	雙相 不鏽鋼	<p>Laboratory investigation of the microbiologically influenced corrosion (MIC) resistance of a novel Cu-bearing 2205 duplex stainless steel in the presence of an aerobic marine <i>Pseudomonas aeruginosa</i> biofilm</p>
		<p>研究針對新型含銅 2205 雙相不鏽鋼(2205 Cu-DSS) 以及綠膿桿菌 (<i>Pseudomonas aeruginosa</i>)之生物膜所導致之微生物腐蝕作用進行觀察。研究發現，2205 Cu-DSS 鋼材對綠膿桿菌生物膜具有良好的耐受性，主要是因為 2205 Cu-DSS 釋放之銅離子，可降低綠膿桿菌之腐蝕，有助減緩微生物腐蝕之發生。</p>
Huabing, L. <i>et al.</i> (2016) ^[64]	超雙相 不鏽鋼	<p>Microbiologically influenced corrosion of 2707 hyper-duplex stainless steel by marine <i>pseudomonas aeruginosa</i> biofilm</p>
		<p>2707 超雙相不鏽鋼(2707 HDSS)具優異的耐化學腐蝕性，已被用於海洋環境。故於此研究，以綠膿桿菌(<i>Pseudomonas aeruginosa</i>)及 2707 超雙相不鏽鋼之微生物腐蝕行為進行觀察。研究過程發現，綠膿桿菌生物膜下的 Cr 含量降低，培養至第十四天後，最大腐蝕凹恆深度為 0.69μm，顯見即是高耐受性之 2707 超雙相不鏽鋼，仍受到綠膿桿菌的微生物腐蝕作用影響。</p>
Shehdeh J. <i>et al.</i> (2016) ^[65]	銅	<p>Sulfate-reducing bacteria impact on copper corrosion behavior in natural seawater environment</p>
		<p>研究針對了阿加迪爾沿海四處污染程度不同之海域進行海水採集，進一步觀察不同污染物下，水中硫酸鹽還原菌對銅金屬之腐蝕影響。研究結果顯示，海洋硫酸鹽還原菌的生長周期與細菌代謝所產生的硫和胞外聚合物(EPS)對銅腐蝕速率間，具有相當程度之關聯性，腐蝕速率與浸泡時間有顯著關聯性。</p>

2.4 海洋結構物暴露區域

海洋結構物腐蝕部位與速率與其暴露環境具有顯著差異，故離岸風機之金屬構件應依曝露環境條件選擇適宜之鋼材種類，以有效減低腐蝕損壞風險；搭配塗層、陰極防蝕等防蝕工法，亦須定期進行相關操作維護工作，方可延長離岸風機使用壽命及運轉周期。

綜觀國內外之離岸風機等海洋結構物與腐蝕作用之關聯性，多以海洋結構物之暴露區域進行探討。故本研究以海洋環境之暴露區域進行區分，以利各區環境特色、腐蝕防治等進行相關彙整與探討，各暴露區域腐蝕防治法詳述於 2.4.1-2.4.4。

由圖 2.19 可知，大氣區(Atmospheric Zone)之海上結構物整體皆暴露於大氣介質中，如日照、降雨…等，結構物整體多處於乾燥環境；飛沫區(Splash zone)及潮差區(Tidal zone)則反覆受到海浪潑濺及日照曝曬；結構物受乾濕循環交替作用影響甚大；浸沒區 (Submerged zone) 之結構物整體皆長期浸泡於海水之中，然海水中存在大量氯離子，易造成金屬鈍化之破壞，故海洋環境是為高腐蝕之腐蝕環境^[34]。海洋結構物暴露區域環境特性，如表 2-3 所示。



1. 大氣區(Atmospheric Zone) 2. 飛沫區(Splash zone) 3. 潮差區(Tidal zone) 4. 浸沒區(Submerged zone)

(圖片資料來源：Seth, 2017)

圖 2.19 海洋結構物暴露區域圖^[34]

表 2-3 海洋結構物暴露區域環境特性表^[35]

腐蝕區域	大氣區 Atmospheric zone	飛沫區 Splash zone	潮差區 Tidal Zone	海中區 Full Immersion Zone	海泥區 Mud Zone
區域範圍	大氣區位處飛沫區之上，是為海洋結構物最上端之頂部結構，與海水無直接接觸。	飛沫區介於平均高潮位以上至海面大氣帶下方。	潮差區介於平均高潮位與平均低潮位之間。	海中區指長期浸泡於海水中，但未沒入底泥沉積物之區域。	海泥區係指海洋結構物被底泥沉積物包圍之區域。
海洋環境特徵	無海水直接接觸，整體多處於乾燥環境。結構物主要暴露於大氣介質中，如日照量、溫度、降雨量、風速、風向、大氣污染物等變化。	材料表面受海水衝擊、潮濕、供氧充足	材料週期性浸沒，供氧充足	影響因子包含鹽度、壓力、溶氧、水溫、海洋生物、細菌等	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)
腐蝕特性	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	受海水飛濺，乾濕交替作用，腐蝕情況嚴重	發生腐蝕及生物污損，腐蝕效率相對較低	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	如含有硫酸還原菌，腐蝕發生機率增加，會發生典型厭氧腐蝕
常用防蝕法	塗層防蝕	塗層防蝕	塗層防蝕	陰極防蝕結合塗裝	陰極防蝕結合塗裝

2.4.1 大氣區 (Atmospheric Zone)

大氣區位處飛濺區之上，結構物整體皆高於海面，與海水無直接接觸。然海洋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，結構物受大氣介質影響甚大，金屬結構物表面易因高溼度水滴結合大氣污染氣體及懸浮微粒形成電解液薄膜依附於上，致使金屬表層造成侵蝕。各大氣腐蝕機制詳述如下^[66]：

1. 大氣的相對濕度

相對濕度意指某一溫度下，空氣中水蒸氣含量與在該溫度下空氣中所能容納的水蒸氣最大含量之比值。當空氣中相對濕度到達某一臨界值時，水分將在金屬表面形成水膜，促使電化學反應產生、腐蝕速率增加，此時的相對濕度值稱為金屬腐蝕臨界相對濕度。潔淨的鋼鐵表面，於乾淨大氣中之臨界相對濕度接近 100%；於受污染物質的大氣中，臨界相對濕度則降至 65%，加速腐蝕產生。

此外，空氣中相對濕度還影響金屬表面水膜厚度與乾濕交替的頻率；如金屬表面有較薄的水膜存在時，大氣中的氧容易擴散至金屬表面，加速腐蝕；當水膜變厚時，氧的擴散阻力增加，腐蝕速率下降。此外，海洋大氣水膜中之氯離子具有穿透作用，它能加速鋼鐵點蝕、應力腐蝕、晶間腐蝕和縫隙腐蝕等局部腐蝕，使得鋼鐵表面難以形成長期穩定的致密繡層，亦會促使導致腐蝕速率上升^[67]。

2. 表面潤濕時間

依國際標準組織 ISO 9223 定義^[68]，表面潤濕時間是指產生大氣腐蝕的電解質膜，以吸附或液態膜型式覆蓋在金屬表面上的時間；潤濕時間愈長，腐蝕總量愈大。而金屬表面潤濕，則是由露水、雨水、高溼度水分凝聚、甚至溶化的雪水所引起。

3. 日照時間

日照的紫外光會促使高分子材料及塗層老化，因此日照時間對於高分子材料及塗層，關係較為密切；但對金屬材料而言，日照時間長，

將使金屬表面水膜消失，降低表面潤濕時間，腐蝕總量減少。

4. 氣溫

溫度變化能影響金屬表面水蒸氣的凝聚、水膜中各腐蝕氣體和鹽類的溶解度、水膜電阻、以及腐蝕過程中陰、陽極的反應速度。一般而言，當相對濕度低於金屬臨界相對濕度時，溫度對大氣腐蝕影響很小，無論氣溫多高，因環境乾燥，金屬腐蝕輕微；但當相對濕度達到金屬臨界相對濕度時，溫度每升高 10 °C，其反應速率增加為原來之二倍。

5. 降雨

降雨對大氣腐蝕有兩種影響，一方面因降雨增加，大氣中的相對濕度增加，延長了金屬表面的潤濕時間，同時也因降雨的沖刷，破壞了金屬表面腐蝕產物的保護性，加速大氣腐蝕；但另一方面，因降雨沖洗掉金屬表面的污染物與灰塵，減少了液膜的腐蝕性，減緩大氣腐蝕。此外，工業大氣中的雨水溶解了空氣中的污染物，如 SO₂、Cl 等，亦加速大氣腐蝕的產生。

6. 風速與風向

風速對表面液膜的乾濕交替頻率有一定的影響，在風沙環境中，風速過大對金屬表面會有磨耗作用。而在污染源的環境中(如工廠的排煙、海邊的鹽粒子)，風向會影響污染物的傳播，直接關係到大氣腐蝕速率。

7. 降塵

固體塵粒對腐蝕的影響可分為三類：(1)塵粒本身具有可溶性與腐蝕性，當溶解於液膜中時，成為腐蝕性介質，(2)塵粒本身無腐蝕性，亦不溶解(如碳粒)，但它能吸附腐蝕物質，當溶解於液膜中時，加速腐蝕反應，(3)塵粒本身無腐蝕性與吸附性(如沙粒)，但落在金屬表面，可能使沙粒與金屬表面間形成縫隙，易於水分凝聚，產生局部腐蝕。

如表 2-4 所示，大氣區之海洋結構物表層易產生全面腐蝕、沖刷腐蝕、應力腐蝕劣化等腐蝕形式，普遍以「塗層」及腐蝕餘裕估算進行防蝕作業，另於螺栓等連結構件接縫處則易見縫隙腐蝕發生，建議可選用不鏽鋼作為金屬材料之選擇^[69,70]，藉以降低腐蝕情況之發生。

表 2-4 大氣區海洋結構物之腐蝕形式與防蝕工法^[69,70]

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

2.4.2 飛沫區 (Splash Zone)

飛沫區屬海洋大氣與海水交界面(通常包括塔架下部，以及部份基礎支撐處)。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，使結構物防腐塗層易剝落、且其結構表面鹽份及氧氣濃度增高，是為海洋暴露區域中腐蝕最嚴重的區域。飛沫區腐蝕情況，如圖 2.20 所示^[71]。

2.4.3 潮差區/感潮區 (Tidal Zone)

潮差區位處高、低潮位間之乾濕交替區，從高潮位到低潮位的區域。潮差區因介於高低潮位間，受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，相對而言是海洋暴露區域中，腐蝕速率最和緩之區段；此區會出現海洋生物污損及好氧菌附著之腐蝕現象，腐蝕生物會藉由氧氣濃淡電池等多種方式加速金屬腐蝕，致使局部腐蝕發生^[40]。



(圖片資料來源：麻等，2017)

圖 2.20 碼頭鋼樁飛沫區之腐蝕情況^[71]

飛沫區及潮差區反覆受到海浪潑濺及日照曝曬；結構物受乾濕循環交替作用影響甚大。如表 2-5 所示，結構物表層及連結構件接縫處，易產生全面腐蝕、縫隙腐蝕、點蝕等腐蝕形式，一般以塗層法結合腐蝕餘裕量進行防蝕工作；低於平均水位之潮差區，則可能進一步出現微生物腐蝕現象，多選擇塗層及陰極防蝕進行相關腐蝕防治^[69,70]。

表 2-5 飛沫區和潮差區海洋結構物之腐蝕形式與防蝕工法^[69,70]

飛沫區和潮差區		
腐蝕區域	可選用之防蝕工法	腐蝕形式
結構物外部	塗層法	全面腐蝕 縫隙腐蝕、點蝕 微生物腐蝕
連結構件與組件	塗層法結合腐蝕餘裕量	
連結構件內部	腐蝕餘裕量或塗層法	全面腐蝕、 縫隙腐蝕、點蝕
低於平均水位 之結構與組件	陰極防蝕	
低於平均水位 1 公尺 之結構與組件	塗層法	全面腐蝕 微生物腐蝕
低於平均水位之潮差區	陰極防蝕	

2.4.4 浸沒區 (Submerged zone)

海水浸沒區意指完全隱沒於海水之中之區域，通常使用陰極防蝕 (Cathodic protection, CP) 並結合塗裝進行腐蝕防治。此區包含海中帶 (Full Immersion Zone) 及海泥帶 (Mud Zone) 兩部分^[12]。

1. 海中帶 (Full Immersion Zone)：

海中帶的定義為：海洋平臺處於水位下海泥以上的部分。海中帶總體概分為淺水區(水深<50m 之水域)、陸棚區(水深介於 50~200m 之水域)及深水區(水深>200 m 之水域)等三部分。一般而言，淺水區的溶氧高、生物作用活躍，腐蝕速率較深水區快速；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。海水表層因有良好的氧氣交換，其腐蝕速率與溶氧量有著正比關係，當海水含氧量達一定值可滿足擴散所需時，含氧量變化便不足以對腐蝕速率產生顯著影響。海水溫度升高，氧擴散速率加快，電導度隨之提升，將加速腐蝕之進行；此外，海洋波浪及流速除影響氧之擴散，更可能引起金屬表層保護膜之破壞^[19]，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。

另海洋存在多種動植物與微生物，他們的生命活動亦會改變金屬與海水界面之狀態，海生物附著會引起附著層內外之氧濃度差電池腐蝕；部分海生物生長會破壞金表層之塗層保護，加上波浪與水流作用，致使塗層剝落產生。

2. 海泥帶 (Mud Zone)：

海泥帶由海底沉積物構成，與海水接觸面積較小，同時具有土壤及海水之腐蝕特性，其腐蝕速率通常因溶氧而隨之降低，相對而言，腐蝕速率並不高；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)或缺氧環境中有硫酸還原細菌存在時，鋼材腐蝕性及其腐蝕速率皆將隨之提高。

浸沒區結構物整體皆長期浸泡於海水之中。如表 2-6 所示，結構物內外部皆常見全面腐蝕、沖刷腐蝕、微生物腐蝕，連結組件則易發現點蝕、微生物腐蝕、應力腐蝕劣化之現象，此暴露區域通常以塗層與陰極防蝕措施共同施用，由於整體浸泡於水下，連結構件之腐蝕餘裕量應符合腐蝕速率 ≥ 0.10 mm /年進行設計，並考量海洋生物可能導致之腐蝕情況產生^[69,70]。

整體而言，海平面下金屬結構之平均腐蝕速率為 0.2 mm/year，飛濺與潮差帶之腐蝕速率約介於 0.4-1.2 mm/year 之間^[72,73]，最高可達 2.5 mm/year，腐蝕速率主要受不同海洋暴露環境條件影響所致^[74]。

表 2-6 浸沒區海洋結構物之腐蝕形式與防蝕工法^[69,70]

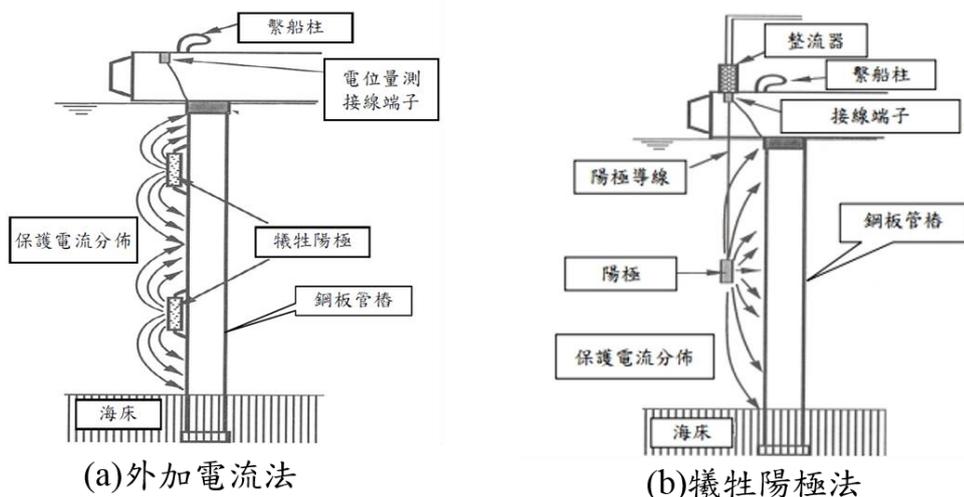
浸沒區		
腐蝕區域	可選用之防蝕工法	腐蝕形式
結構物外部	陰極防蝕與塗層法並用	全面腐蝕 沖刷腐蝕 微生物腐蝕
結構物內部	陰極防蝕或腐蝕餘裕量	全面腐蝕 縫隙腐蝕、點蝕 微生物腐蝕
連結構件和組件	腐蝕餘裕量符合 腐蝕速率 ≥ 0.10 mm/年 海洋生物作用須列為腐蝕速率 之考慮因子	全面腐蝕 點蝕 微生物腐蝕 應力腐蝕劣化

2.5 離岸風機金屬腐蝕及防治

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

1. 陰極防蝕(Cathodic protection, CP)

針對鋼鐵結構物之腐蝕防治，目前以陰極防蝕及防腐塗層最為常見。陰極防蝕屬於電化學防蝕，可以「外加電流法」與「犧牲陽極法」兩類進行施作，其技術發展與應用已有百餘年歷史，為金屬構造物在水下與土壤環境中最有效的防蝕方法。如圖 2.21(a)所示，「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；圖 2.21(b)，「犧牲陽極法」選用高活性金屬作為陽極材料，銲接於鋼鐵材料表面，透過陽極金屬將持續消耗形成保護電位差，進而使陰極鋼鐵材料表面達到防蝕之功效；因防蝕效果安定、施工簡易且維護成本較低等優點，成為臺灣及各國港灣構造物最常採用之防蝕方法^[75]。



(圖片資料來源：陳等，2004)

圖 2.21 陰極防蝕法示意圖^[12]

近年來，鋁合金(添加微量的鋅、汞、銻等元素)因低密度、高電價，每單位質量的發生電流大等優點，取代過往常用的「鋅」，成為海水環境中「犧牲陽極」的主流材料^[76]，水下使用與消耗情況，如圖 2.22、圖 2.23 所示^[77]。



(圖片資料來源：強言企業有限公司)

圖 2.22 犧牲鋁陽極水下使用情況^[77]



(圖片資料來源：強言企業有限公司)

圖 2.23 犧牲鋁陽極的重量損失情況(原 160 公斤，25 年保護)^[77]

2. 塗層法(Coating)

陰極防蝕搭配塗料選用，可提升金屬之防蝕保護，塗膜系統須考量其保護性、附著性、可塑性、耐久性等因子，另塗料須配合曝露區域等腐蝕條件，選擇適當的塗膜系統與工法，分別參照 ISO 20340:2009^[78]、NORSOK, M-501^[79] 及 ISO 12944^[80] 三種規範標準(表 2-7)，選用目前運用最為廣泛的「環氧樹脂」及「聚氨酯」兩塗膜系統施行塗裝防蝕工作，另配合適時的維護與品質管制，以減低劣化、機械性損傷、剝落等狀況產生。

表 2-7 離岸風機塗層技術規範標準^[81]

塗膜系統	層數	總乾膜厚度 (μm)	規範標準
大氣區			
環氧樹脂 (Ethylene Propylene, EP)	3-5	320	EN ISO 12944
聚氨酯 (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
飛沫區至海中帶			
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 塗膜系統必須與陰極防蝕同時使用。

隨著臺灣逐步邁向離岸風電技術發展，臺灣金屬工業發展中心(2010)^[82]，根據實驗室塗鍍測試、海上掛片試驗及海上平臺防蝕作法，將高耐蝕技術轉植至離岸風機之防蝕運用，針對本土離岸風機防蝕膜提出相關建議：

- (1) 離岸風機塔筒外層，建議採用富鋅底漆/環氧雲鐵/脂肪族聚氨酯面漆。普遍而言，多以環氧富鋅作為底漆，乾膜厚度 60 μm ，接續選用環氧雲鐵中間漆，乾膜厚度 80 μm ；兩者至少進行雙層塗覆後，再使用環氧面漆進行最外層之塗覆，總乾膜厚度皆達 300 μm 以上。若採用玻璃鱗片塗料系統，底漆不宜過厚，建議選用環氧塗料或耐久性更佳的聚矽氧烷塗料塗覆，多層與基材近似平行排列的玻璃鱗片顏料構成的魚鱗效應，可增加腐蝕介質滲透距離，提升防蝕效果。搭配金屬熱噴塗系統則可得更為長效的防蝕效果。
- (2) 離岸風機塔筒內壁，因無陽光直射，腐蝕環境相對塔筒外層減弱多，建議採用環氧富鋅及高固成分環氧塗料進行塗覆。
- (3) 甲板平臺為工作場所，且受海浪沖刷，故與潮差帶同採環氧玻璃鱗片方案塗覆，如有調色需求，則可以選用聚氨酯面漆進行面漆調色。
- (4) 飛濺帶及潮差帶是為防蝕重點區域，採用環氧玻璃鱗片系統，乾膜厚度至少需 800 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，因此採用具有良好保護性能的環氧底漆打底。
- (5) 浸沒區的海中帶多採用聚氨酯塗料塗覆；海泥帶可單純依靠陰極保護，若輔以塗層塗覆，則可延長其防蝕保護時間。

表 2-8，綜整離岸風機腐蝕區域與其常見之腐蝕型態類型對照表，並清楚彙整相對應之防蝕工法，期能作為各暴露區域有效防蝕資訊之參考^[69,70]。

表 2-8 離岸風機腐蝕區域及對應防蝕工法選用彙整表^[69,70]

大氣區		
腐蝕區域	可選用之防蝕工法	腐蝕形式
結構物外部	塗層法	全面腐蝕 沖刷腐蝕 應力腐蝕劣化
結構物內層 (無法控制濕度處)	腐蝕餘裕量	全面腐蝕、點蝕 應力腐蝕劣化
結構物樑柱	腐蝕餘裕量符合 腐蝕速率 ≥ 0.10 mm/年	
連結構件與組件 (如：螺栓)	選用不鏽鋼 作為抗腐蝕材料	縫隙腐蝕 點蝕、電偶腐蝕 應力腐蝕劣化
飛沫區和潮差區		
結構物外部	塗層法	全面腐蝕 縫隙腐蝕、點蝕 微生物腐蝕
連結構件與組件	塗層法結合腐蝕餘裕量	
連結構件內部	腐蝕餘裕量或塗層法	全面腐蝕、 縫隙腐蝕、點蝕
低於平均水位 之結構與組件	陰極防蝕	
低於平均水位 1 公尺 之結構與組件	塗層法	
低於平均水位之潮 差區	陰極防蝕	全面腐蝕 微生物腐蝕
浸沒區		
結構物外部	陰極防蝕與塗層法並用	全面腐蝕 沖刷腐蝕 微生物腐蝕
結構物內部	陰極防蝕或腐蝕餘裕量	全面腐蝕 縫隙腐蝕、點蝕 微生物腐蝕
連結構件和組件	腐蝕餘裕量符合 腐蝕速率 ≥ 0.10 mm/年 海洋生物作用 須列為腐蝕速率之考慮因子	全面腐蝕 點蝕 微生物腐蝕 應力腐蝕劣化

歐洲是全球離岸風電發展起步最早的地區，瑞典於 1990 年在 Nogersund 安裝了世界首座離岸風電機組，之後，無論於離岸風場建設或風電機組研發，歐洲皆走在世界的前端。歐洲離岸風電發展歷程大致可分為三個階段^[83]：

- (1) 1980-1990 年間，歐洲各國開始大範圍進行海上風能資源評估與相關之技術研究；
- (2) 1991-2000 年間，逐步進行小規模的 研究試驗及示範工作，研製 500~600 kW 級之風電機組；
- (3) 2001 年後，風電產業進入商業化階段，開始陸續興建中大型之海上風場。

國外離岸風電發展雖早於臺灣，然離岸風電機組“現場防蝕”相關研究仍為數不多。Mühlberg, K. (2010)^[84]針對離岸風機設計、製造與塗膜系統進行探討。由於離岸風電機組多以金屬組件配合塗裝進行防蝕，故金屬焊接技術、塗層施作方式及塗料特性、壽命等，皆對離岸風電機組件防蝕成效影響甚鉅。Shi *et al.* (2011)^[85]，觀測風機鋼材(錳矽合金鋼)使用環氧富鋅塗料後之防蝕效果。觀測發現，鋅腐蝕產物會由塗層向鋼材方向生長，建議鋼材塗裝前，應縮短裸鋼暴露時間，以減低環境腐蝕媒介對鋼材之腐蝕影響。3M Wind Energy (2015)^[86]研究指出，風機葉片塗層若出現凹凸坑洞、氣泡等情況，皆會降低塗裝之防蝕能力。風機葉片等組件應適時維護、更換，以延長離岸風機組件於酷寒環境的使用期限。Black (2015)^[87]指出，多數海洋結構物無人常駐，其維修與維護費用皆偏高，故應針對暴露區域防蝕弱點進行強化，以減低維護成本之損失。Mombe *et al.* (2015, 2016)^[88-91]觀察低溫北極海域(低溫可達-60°C)有機塗料的塗層附著力、低溫耐受性、塗層累積磨損等防蝕研究。結果顯示，塗層方式及厚度是為抗腐蝕、耐磨損的主要因子。Momber, A. W. (2016)^[92]觀測北海及波羅的海海上風機塗層保護與暴露金屬表層劣化情形。研究結果顯示，塗層及暴露金屬表層劣化等損失，主要受機組設計及其部件承載量影響。2010-2016 年間相關塗層防蝕研究彙整，如表 2-9。

表 2-9 2010-2016 年間相關塗層防蝕研究彙整表

作者/年分	研究主題與摘要
Mühlberg, K. (2010) ^[84]	<p style="text-align: center;">Corrosion protection of offshore wind turbines-a challenge for the steel builder and paint applicator</p> <p>研究針對離岸風機設計、製造與塗膜系統進行探討。研究結論指出，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。</p>
Shi, H. <i>et al.</i> (2011) ^[85]	<p style="text-align: center;">The corrosion behavior of zinc-rich paints on steel: Influence of simulated salts deposition in an offshore atmosphere at the steel/paint interface</p> <p>研究觀測風機鋼材(錳矽合金鋼)使用環氧富鋅塗料後之防蝕效果。觀測結果發現，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。</p>
3M Wind Energy (2015) ^[86]	<p style="text-align: center;">Wind Protection Tapes: Wind turbine blade repair: 3M Renewable energy</p> <p>研究針對風機葉片塗層維護進行探討。探討結果指出，風機葉片塗層若出現凹凸坑洞、氣泡等情況，會降低塗裝之防蝕能力。風機葉片等組件應適時維護、更換，以延長離岸風機組件之使用期限。</p>
Black, A.R. Mathiesen, T. Hilbert, L.R. (2015) ^[87]	<p style="text-align: center;">Corrosion protection of offshore wind foundations</p> <p>文中描述近十年間離岸風電之發展概況，並探討常用陰極防蝕系統於歐洲國家實際使用上所面臨之問題。如於潮差區將受到潮汐作用反覆拍打而降低其防護效果；再隱沒之底泥區可能受硫化物腐蝕影響，然多數海上結構物無人常駐，故需針對防蝕較弱區域進行加強，以減低維護成本之損失。</p>
Momber, A.W. <i>et al.</i> (2015) ^[88]	<p style="text-align: center;">Performance and integrity of protective coating systems for offshore wind power structures after three years under offshore site conditions</p>

作者/年分	研究主題與摘要
	<p>研究觀察北海地區之離岸風機，使用不同防蝕塗膜系統於飛濺區，潮差區和浸沒區使用之防蝕效果。防腐系統包含單層、多層有機塗層，金屬噴塗塗層和雙相塗層等六種，測試樣品皆於海洋環境暴露三年，分別針對結構強度、抗腐蝕效果、塗層附著力、塗層完整性、法蘭腐蝕、焊縫塗層性能等項目進行觀測。研究結果顯示，Zn / Al金屬噴塗之顆粒可增強環氧塗層和聚氨酯面漆之防蝕效果，有效防蝕系統可大幅提升鋼材之抗腐蝕能力；法蘭是為飛濺區關鍵的結構零件，部分區域發現有顯著縫隙腐蝕產生。</p>
<p>Momber, A.W. <i>et al.</i> (2016)^[89,90]</p>	<p style="text-align: center;">Performance characteristics of protective coatings under low-temperature offshore conditions. part 1: Experimental set-up and corrosion protection performance. /Performance characteristics of protective coatings under low-temperature offshore conditions. Part 2: Surface status, hoarfrost accretion and mechanical properties</p> <p>研究觀察北海地區離岸風機，使用不同防蝕塗膜系統之防蝕效果差異，塗料皆為有機塗料體系，施作過程硬化劑、層數、乾膜厚度和塗佈方法有異，以進行比較。由於北極海低溫可達-60°C，故研究項目包含塗層防腐性能測試、劣化測試、塗層附著力測試、積雪附著量測試、抗衝擊性測試、磨損測試等。第 1 部分，描述測試程序並討論防腐性能測試結果；第 2 部分，進行面表面厚度測量、潤濕性評估，積雪附著量測試等。測試結果以兩層玻璃鱗片加上環氧塗層和聚氨酯面漆，厚度 1400µm 之塗膜系統保護性最佳。</p>
<p>Momber, A.W. Plagemann, P. Stenzel, V. (2016)^[91]</p>	<p style="text-align: center;">The adhesion of corrosion protection coating systems for offshore wind power constructions after three years under offshore exposure</p> <p>研究觀察北海地區之離岸風機，使用噴塗有機塗層和雙相塗層，於海洋環境暴露三年後，加以評估各防護塗層性能。研究針對水下區域進行塗層附著性測試，測試結果顯示，各式塗層皆符合塗層劣化標準。</p>

作者/年分	研究主題與摘要
Momber, A. W. (2016) ^[92]	Quantitative performance assessment of corrosion protection systems for offshore wind power transmission platforms
	研究觀測北海及波羅的海海上風機塗層保護與暴露金屬表層劣化情形，參閱各式觀察報告，提出簡易金屬表層劣化之評估公式，並指出多數塗層損壞可歸因於不當的結構設計和機械負載所導致，建議可參照實際觀測情況修訂相關設計規範，以降低塗層損壞與損失。

2.6 離岸風機經驗參考與借鏡

臺灣係屬海島型國家，地狹人稠，陸域風場發展難具經濟規模，國際知名離岸風電諮詢顧問公司4C Offshore，透過NASA六架衛星蒐集之高解析度數據，進行風場分析研究，結果顯示，全球離岸風場前25位中，臺灣海峽沿岸便占了16處，平均風速介於12.01-12.05 m/s 之間(數據來源<https://www.4coffshore.com/windfarms/windspeeds.aspx>)，強勁的海上風能資源，使臺灣擁有發展離岸風力發電的潛力與優勢。

2.6.1 中國離岸風電發展近況

中國位處臺灣海峽彼岸，相較於歐洲國家，其氣候與環境條件皆與臺灣較為近似。政策方面，中國離岸風電發展與政策制定歷程大體相符。2005年，通過「中華人民共和國可再生能源法」；2006年，提出「可再生能源發展“十一五”規劃」，積極推動陸域風電，藉由優惠上網電價與保障收購政策，使得風電市場快速成長；另一方面對於產品推行限定最低自製率政策，有效帶動產業發展皆有利促進再生能源之發展。在離岸風電方面，目前中國大陸裝置量雖落後英國、丹麥等國，然而中國大陸訂出相當積極的裝置目標，除了在於開發離岸風能資源之外，並希望帶動離岸風電產業之發展。中國廠商生產之陸域風電產品已開始外銷全球各地，加上政府的積極推動，可望使得中國離岸風電產業，逐步趕上歐美先進國家^[93]。

近年，中國風力發電市場成長迅速，至2010年風機總裝機容量已超過30GW，提前10年完成2020年裝置容量達30GW之目標。中國對離岸風電發展，著眼於潮間帶與近海地區^[93]。

1. 江蘇如東潮間帶風電場

「江蘇如東潮間帶風電場」是為世界首個潮間帶試驗風場，故無前例可做參考，風場整體囊括陸域、潮間帶及近岸三區，水深<3m是為潮間帶，水深<5m則為近岸海域，70m高之年平均風速為7.2 m/s。受潮水漲退影響，潮間帶漲潮之平均水深約1.5m；全日，高水位持續

時間僅二至三個小時，為因應陸域、潮間帶及近岸三區所需，風場採用八種國內外廠牌，九種不同機型，總計 167 臺風機進行架設；潮間帶採單樁基礎，高約 50m、直徑 5 m。預估陸地裝置容量 172MW、海上風場裝置容量 250MW^[93]。

於施工部分，因潮間帶地區海水僅 5m 深，故施工船本身重量不可過重，否則將會壓斷船隻龍骨；其次，處理鋼結構多角架、大直徑單樁風機基礎，重達四百多噸的單樁以及直徑達百米的風機葉片，施工船隻力量亦不可過低，由於潮間帶之地質鬆軟，重型機械無法運作，故船隻選用相當重要，常成為潮間帶風電開發的重要瓶頸。塔架裝載運輸至潮間帶之情況^[94]，如圖 2.24 所示。



(圖片資料來源：吳，2011)

圖 2.24 江蘇如東潮間帶風電場風機塔架裝載運輸至潮間帶之情況^[95]

「江蘇如東潮間帶風電場」於 2009 年 6 月 15 日開工，2009 年 10 月 11 日完成首部風機吊裝，10 月 18 日完成第二部風機吊裝，2009 年 10 月 20 日正式併聯運轉，其餘十四部機組於 2010 年 9 月 28 日全部投

入發電，約歷時 2 年 4 個月完工，期間塔架吊裝情況，如圖 2.25 所示 [93]。



(圖片資料來源：吳，2011)

圖 2.25 江蘇如東潮間帶風電場塔架吊裝情況^[95]

2. 上海東海大橋海上風電場

「上海東海大橋海上風電場(Shanghai Donghai Bridge Offshore Wind Farm)」，位處上海浦東新區，臨港新城至洋山深水港的東海大橋兩側，平均水深 10m，風機 90m 高，平均 8.4 m/s，總計興建 34 座離岸風機，總裝機容量為 102 MW。

風機基礎設計原擬按 VESTAS 公司之建議採用「單樁」或「三腳管式」基座，若採單樁基座，重約 800 噸、長約 70 m；三腳管式基座各樁即重達 200 噸左右，然中國無如此大型之打樁設備、搬運船及吊裝設備，且航道受限，經分析水流沖刷等各式狀況後，研發採用 1.7 m

直徑、6:1 斜度之鋼管樁 8 支，樁體採用陰極防蝕法，鋼管樁打樁深度約 70 m，打樁後再在鋼管樁之頂部澆注成一個混凝土承臺，分為兩節，下節為直徑 14 m、高度 3 m 之圓型座，上節為上直徑 6.5 m、下直徑 14 m 之圓臺體，方克服風機組件過大且重之困難^[95]。風機基座，如圖 2.26 所示。



(圖片資料來源：中國國家能源局，2012)

圖 2.26 上海東海大橋海上風電風機基座示意圖^[96]

2008 年 9 月 28 日，東海大橋海上風電場基礎工程開始打樁，2009 年 3 月成功安裝第一臺 SL3000 海上風電機組，2010 年 2 月 27 日全部三十四部風機安裝完成，並於同年 6 月 8 日，併聯全部風機進行發電，自基礎施工至併聯發電歷時約 1 年 8 個月，是為亞洲首座大型海上風電場^[93]，其施工作業與風場俯視圖，如圖 2.27、圖 2.28 所示。



(圖片資料來源：吳，2011)

圖 2.27 上海東海大橋海上風電場風機吊裝作業情況^[95]



(圖片資料來源：<https://baike.so.com/doc/6666649-6880479.html>)

圖 2.28 上海東海大橋海上風電場俯視圖^[97]

中國國務院，政府特貼專家—揭敢新，以自身於海洋腐蝕與防護研究經驗指出，中國離岸風機設備防蝕主要參照國外成熟應用經驗級標準進行設計，防腐塗料亦多選擇國外公司產品，現階段已完成之離岸風電設備防蝕狀況良好，但是否適合國內海域環境應用，還需長時間驗證較佳。另依中國現階段離岸風機各組件之使用經驗，提出下列防蝕建議事項：

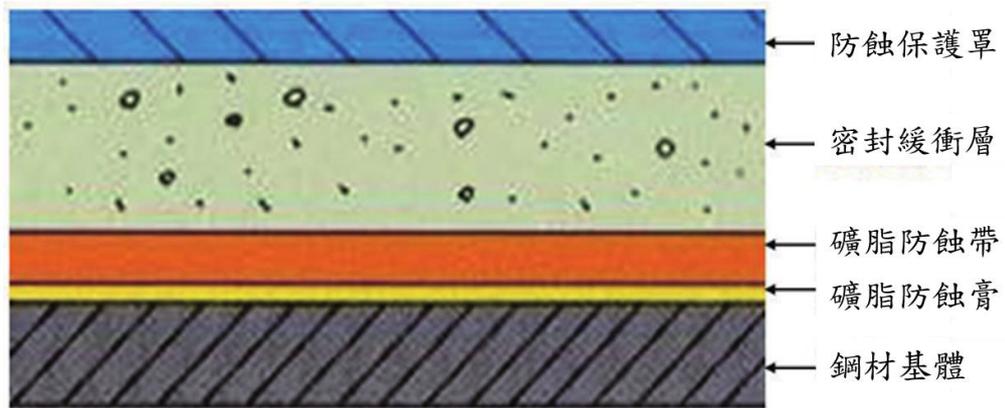
1. 塔架防蝕

鋼構塔架位處海洋大氣環境，長期暴露高濕、鹽霧、紫外線等環境，腐蝕性強，通常採用重防蝕塗層，或熱噴塗鋅鋁合金加塗料等進行防蝕保護；內部因無陽光直射，腐蝕性相對較低，多以環氧富鋅及高固成分環氧塗料進行塗覆，並可搭配腐蝕餘裕量估算，加強防蝕保護。方案設計時可借鑑海上平臺；船舶等經驗與相關標準，同時考量離岸風電機組維護之難度與使用時限較長之特殊性。

2. 風電基座防蝕

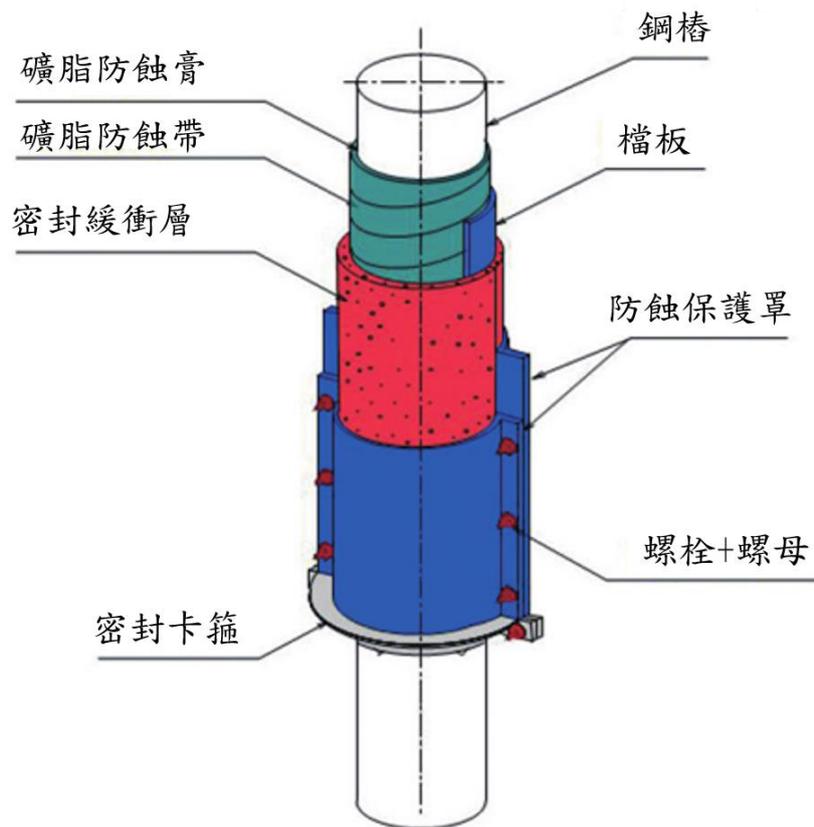
風電基座之鋼材施用於飛濺區、潮差區及全浸區，其中飛濺區的腐蝕情況最為嚴重，採用重防蝕塗層或復層礦脂包覆防蝕 (Petrolatum Tape and Covering system, PTC)；潮差區之下，普遍採用防蝕塗層搭配陰極防蝕，亦可單獨使用陰極防蝕。針對一般單樁基座，樁體外壁與海水接觸，一般採用防蝕塗層搭配陰極防蝕，樁體內部常被忽略，然從實際觀察結果顯示，樁體內部亦會出現嚴重腐蝕，建議使用重防蝕塗層搭配犧牲陽極共同進行防蝕作業。

復層礦脂包覆防蝕系統由內而外，分別由礦脂防蝕膏、礦脂防蝕帶、密封緩衝層和玻璃防蝕保護罩緊密相連組成，其包覆防蝕技術與結構示意圖，如圖 2.29、圖 2.30 所示^[71]。



(圖片資料來源：麻等，2017)

圖 2.29 復層礦脂包覆防蝕技術示意圖^[71]



(圖片資料來源：麻等，2017)

圖 2.30 鋼樁包覆防蝕技術結構示意圖^[71]

復層礦脂包覆防蝕系統亦可施用於現行使用中之樁體，為達最佳防蝕效果，若鋼樁外部已出現鏽蝕或海生物附著現象，需於施工前進行樁體表面處理，使表面殘留物厚度 $<10\text{mm}$ ，接續均勻塗抹礦脂防蝕膏，單位面積 $300\text{g}/\text{m}^2$ ，鏽蝕嚴重處則提高至 $400\text{-}500\text{g}/\text{m}^2$ 。

礦脂防蝕帶由鋼樁底部螺旋向上包覆，纏繞時須保持 55% 礦脂防蝕帶重疊並擠出多餘空氣，如此才可確保鋼樁整體皆有雙層以上防蝕帶覆蓋(圖 2.31)。密封緩衝層預先與外層防蝕保護罩黏合，保護罩由底向上對準法蘭位置進行安裝，並使用耐腐蝕性佳之 316L 不鏽鋼螺栓固定(圖 2.32)，同時於法蘭接縫處安裝檔板，保護罩下部安裝支撐卡箍，避免玻璃外殼下滑，縫隙處以固化型環氧樹脂填充，以達密封作用。



(圖片資料來源：麻等，2017)

圖 2.31 礦脂防蝕帶纏繞施作^[71]



(圖片資料來源：麻等，2017)

圖 2.32 防蝕保護罩安裝^[71]

復層礦脂包覆防蝕系統施工簡易，對於基材表面處理要求低，且可用運用於大直徑之離岸風電基樁之潮間帶與飛濺帶，若遇爬梯、纜線等亦可與預先製作開口因應，是為離岸風機防蝕法之選項之一。

3. 風機葉片與機艙防蝕

風機葉片會因海洋大氣微小液滴衝擊而造成損傷，建議塗層可使用環氧底漆；聚氨基酯面漆等。目前中國多採用國外公司風機葉片專用塗料。

機艙和輪轂內部包含了風機的關鍵零件，是防蝕工作重要的核心區域。然因零件眾多，若分別針對各零件進行防蝕工作成本將大幅提升，為此，風機廠商皆以整體防護並加強重點零件之防蝕處理。機艙和輪轂採質輕、成本低之玻璃鋼材製作，外殼盡可能設計成密閉空間，透過空壓機使內部對外界形成正壓，阻止腐蝕性大氣直接進

入，或透過特殊過濾裝置，篩除大氣腐蝕性離子，以降低機艙和輪轂內部零件之腐蝕產生。

4. 其它附屬構件防蝕

針對其他附屬構件，應採用與主體相當之防蝕方案，甚或更高級之防蝕處理。如固定塔架與基座之螺栓通常採用達克羅技術(Dacromet)即片狀鋅基鉻鹽防護塗層處理，在允許條件下，可使用包覆技術將其與外部環境隔絕，以避免腐蝕發生。平臺柵欄、鋼構階梯、爬梯護籠、法蘭等則建議採用熱噴鋅施作。

相較歐洲國家，臺灣離岸風電發展尚處於初步階段，離岸風電場發展涉及風機基礎設計、塔架安裝、工作船隊組合、港埠安排，到整體方案設計規劃，以及風機營運與維護環節等系列環節。除汲取各國政策、設備技術等發展經驗外，尚需考量全球區域環境差異，因應臺灣抗震、抗颱風、防腐蝕及海象條件等需求，發展適宜之防蝕系統評估、規劃與監測之研究，選擇適合之防蝕工法，重新檢視或修正相關設計規範，結合國內業者，共同開發最適合臺灣地理環境的離岸風力機組，以加強離岸風電機組運作之安全性、穩定性及耐久性，增加風機之使用壽命並提升其營運效益。

第三章 研究內容與規劃

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，瞭解離岸風機設施於水下環境可能受到之腐蝕情況。接續「106年度離岸風電水下技術研發」計畫中，針對水質底泥等環境分析後，107年度擬於「臺中港基樁預定地」及「彰化離岸風電第二期計畫場址」進行金屬水下暴露試驗安裝與調查，同時進行海域環境檢測分析，瞭解兩海域金屬試片腐蝕與及海洋附著性生物附著情況，選擇適合之防蝕工法，以加強離岸風機於施工維護時之安全性、穩定性及耐久性，增加離岸風機使用壽命並提升其營運效益。暴露試驗及環境採樣研究流程，如圖3.1及圖3.2所示。

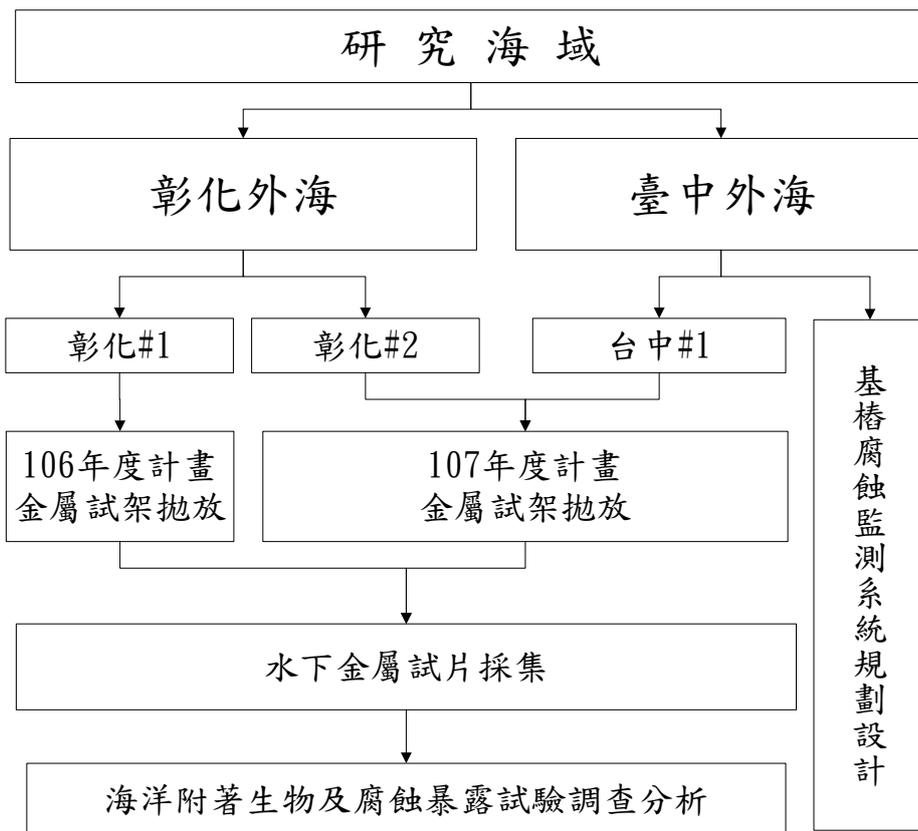


圖 3.1 金屬水下暴露試驗研究流程圖

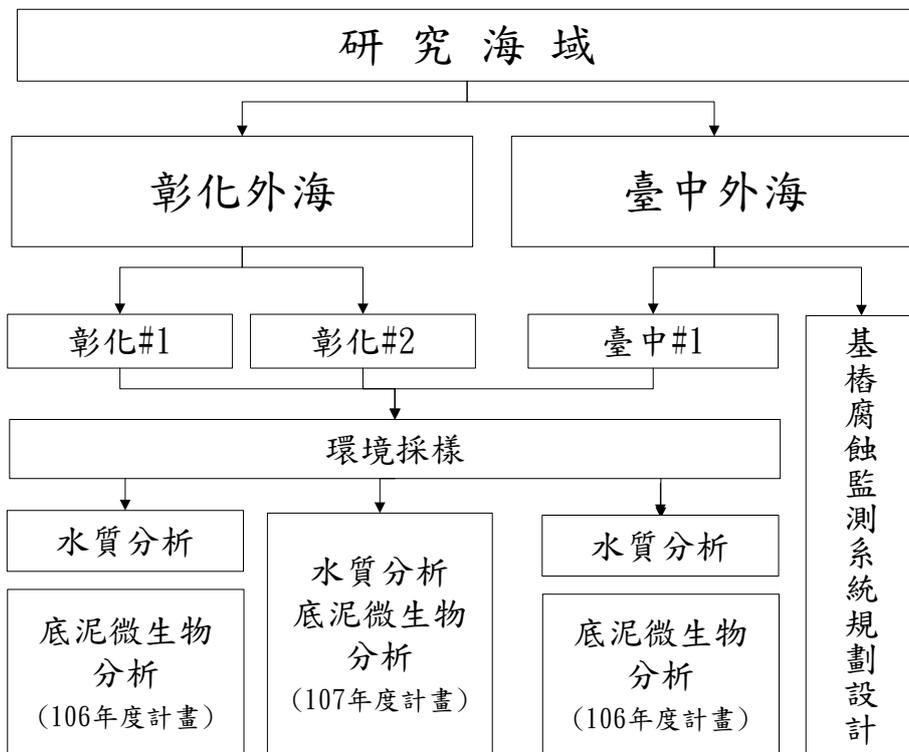


圖 3.2 環境採樣研究流程圖

3.1 研究區域

本研究延續 106 年度「離岸風電水下技術研發」計畫，持續針對彰化離岸風電第二期計畫場址及臺中港區海域進行離岸風電金屬基樁及金屬試片水下暴露試驗與觀測之研究。各採樣點位座標資料及位置圖，如表 3-1、圖 3.3、圖 3.4 所示。

表 3-1 採樣點位座標

區域/站位	TWD97經緯度座標		說明
臺中#1	120°30'30"E	24°19'15"N	臺中港北防沙堤外
彰化#1	120°19'30"E	24°06'01"N	「離岸風力發電第二期」
彰化#2	120°10'38"E	24°07'30"N	「離岸風力發電第二期」 26-7點位



圖 3.3 臺中港區採樣位置圖



圖 3.4 彰化離岸風電第二期計畫場址採樣位置圖

3.2 環境採樣與分析

3.2.1 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，由專業潛水人員至預定深度進行採樣工作，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 3.5 所示。

底泥以直徑 7cm，管長分別為 30 及 60 cm 之岩心管進行樣品採集(如圖 3.6)。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蓋密封，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。

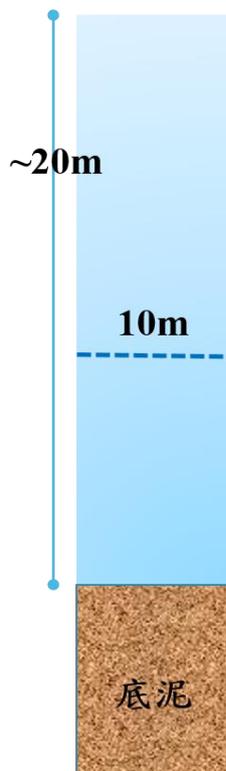


圖 3.5 採樣斷面示意圖



圖 3.6 底泥採樣岩心管

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。

3.2.2 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、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及偵測極限，如表 3-2 所示。

表 3-2 水質檢測項目與方法

檢測項目	檢測方法編號	偵測極限
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	MDL=0.007；QDL=0.020
總氮	NIEA W423.52C	
氯鹽	NIEA W407.51C	
硫酸鹽	NIEA W430.51C	MDL=0.007
鋅	NIEA W306.55A	MDL=0.012
鎘	NIEA W306.55A	MDL=0.005
鉛	NIEA W306.55A	MDL=0.029；QDL=0.10
銅	NIEA W306.55A	MDL=0.015
總鉻	NIEA W306.55A	MDL=0.017
汞	NIEA W330.524A	MDL=0.0004

註：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)

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：

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

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

$$C_c = (D_{30} / D_{30}) / (D_{60} / D_{10})$$

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_u 為均勻係數(coefficient of uniform)， C_c 為曲率係數(coefficient of curvature)，用為描述累計曲線整體形狀之指標。

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)。以上粒徑分類彙整於表 3-3。

表 3-3 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(Gravel)	粒徑在 76.2mm 至 4.75mm (#4 篩)之間
砂(Sand)	粒徑在 4.75mm (#4 篩)至 0.075mm (#200 篩) 之間
粉土/粉砂 (Silt)	粒徑在 0.075mm (#200 篩)至 0.005mm 之間
黏土(Clay)	0.005mm 以下

3.2.3 底泥微生物分析

底泥岩心採樣完畢後，攜回實驗室冰凍於-20°C保存，依沉降後之深度，每 10cm 體積的底泥攪拌均勻後，取出三個適量之底泥樣本進行 DNA 萃取，底泥 DNA 樣本分層收集示意圖，如圖 3.7 所示。

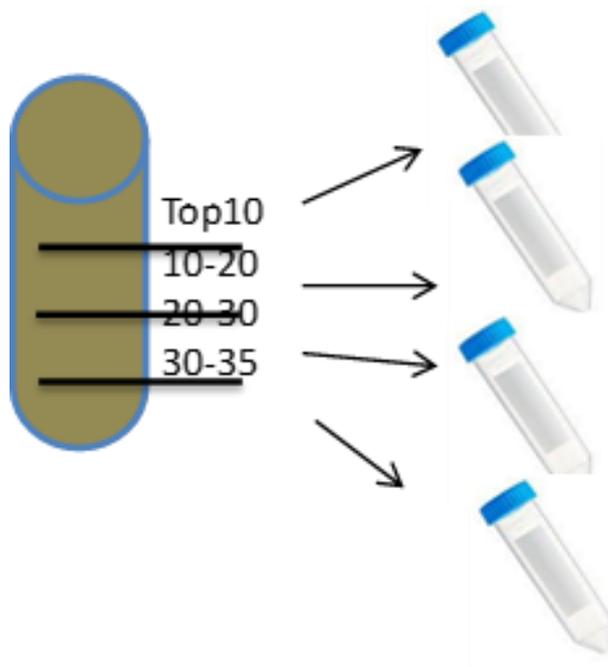


圖 3.7 底泥 DNA 樣本分層收集示意圖

底泥 DNA 萃取步驟如下：

1. 底泥樣本 DNA 萃取:以土壤適用的 Mobio DNeasy PowerSoil DNA 萃取試劑套組，利用其專利抑製劑去除技術(IRT)從環境樣品中分離基因組 DNA，萃取底泥樣品中的 DNA。
2. 以聚合酶鏈式反應(Polymerase Chain Reaction; PCR) 放大目標 16S rDNA。
3. 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。

4. 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。
5. 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。

3.2.4 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 3-4 及圖 3.8 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 3-5 所示。

表 3-4 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

註：「海域環境分類及海洋環境品質標準」環保署於 90 年 12 月 26 日以(90)環署水字第 0081750 號公布。

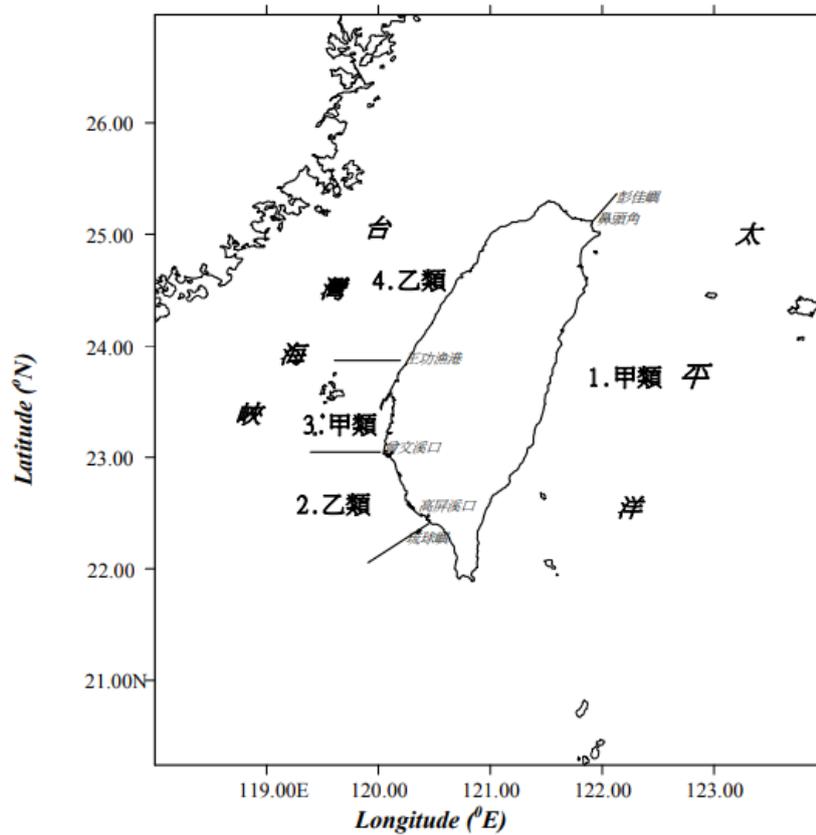


圖 3.8 臺灣沿海海域範圍與海域分類圖^[98]

表 3-5 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			
			甲類	乙類	丙類	
重金屬	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	--	

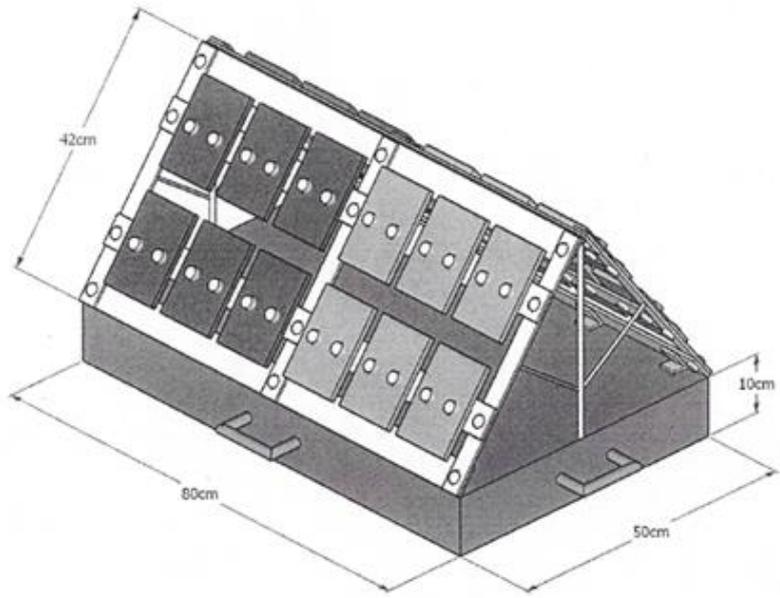
3.3 金屬水下暴露試驗採樣與分析

3.3.1 金屬水下暴露試驗規劃

為掌握水下環境變動情況，金屬水下暴露試驗規劃，先行針對 106 年度首次佈放之試驗試片進行回收作業，除觀測現地生物附著、腐蝕情況，亦可確認首次佈設的金屬試架之結構及規模是否會受潮流影響而產生位移，以做為後續試架微調、規劃之參考。

為瞭解金屬材料於研究海域之腐蝕與海洋附著生物附著情況，106 年度選用臺灣本土可生產之金屬材質進行水下金屬暴露試驗。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。金屬試片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產生。相關金屬試架設計與取樣規劃時程如下所示：

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。金屬試架設計及試片配置圖，如圖 3.9、圖 3.10 所示。



A36碳鋼

A572低合金鋼

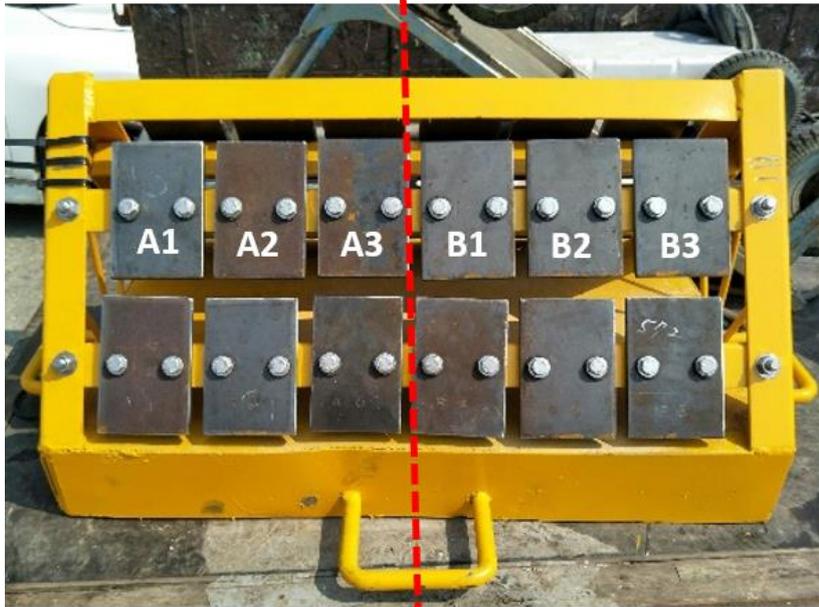


圖 3.10 金屬水下暴露試驗架與試片配置圖

3.3.2 金屬試片採集

金屬試片委託專業潛水人員，以 GPS 系統(圖 3.11)定位後進行採樣工作，定位工作皆以兩臺 GPS 系統同步進行，以減低座標誤判之可能(圖 3.12)。採樣時，將金屬試片後方主支條與試架本體之螺帽旋開，即可取下整列試片樣品，返回船隻後，依序單獨針對各金屬試片拍照記錄(包含正反面，圖 3.13)，輔以瞭解結構物附著生物之分佈；接續緩緩將金屬試片拆下，逐一分裝至裝有海水之夾鏈袋當中，以冷凍冰存(圖 3.14)攜回實驗室鑑別其種類。全程應保持動作輕柔，以減低金屬試片表面之碰撞，以利後續海洋附著生物分佈情況之觀測。



圖 3.11 手持式 GPS 定位座標



圖 3.12 兩臺 GPS 系統同步定位



圖 3.13 金屬試片現場採集記錄



圖 3.14 金屬試片冷凍冰存

3.3.3 金屬試片海洋附著生物觀察分析

待測金屬試片於常溫退冰後，接續進行拍照記錄工作(包含正反面)，同時須注意夾鏈袋中是否包含遺漏之附著生物，避免影響後續生物種類之計數。先以肉眼初步觀察金屬試片上之附著生物之分布情況；另使用Zeiss Stemi 2000-C 解剖顯微鏡(圖3.15)輔以照相系統(Axiocam ERc 5s)，細部觀察附著生物於金屬試片表面之附著形貌與特徵，以利海洋附著生物之種類辨識(圖3.16)。各海洋附著生物分別計數(圖3.17)，並以95%酒精浸泡保存(圖3.18)。



圖 3.15 解剖顯微鏡



圖 3.16 顯微鏡觀察情況



圖 3.17 附著生物分類計數



圖 3.18 附著生物保存

3.3.4 金屬試片腐蝕速率分析

最終，取刮刀刮除金屬試片上剩餘之表面附著生物後，依循 NACE Standard TM-01-69 法，於室溫以濃鹽酸 + 40 g/L SnCl₂ 溶液浸泡，進行金屬表面腐蝕生成物之清除作業，透過量測試片重量損失，以計算其平均腐蝕速率(重量損失法)，並針對除鏽之後試片進行拍照記錄，以利於瞭解材料腐蝕情況。為確保除去腐蝕生成物的化學清洗方法不會損壞底材金屬，先使用腐蝕試片進行重複清洗，以制定檢量線(俟重複清洗後之試片淨重達穩定值)，作業流程如圖 3.19 所示。

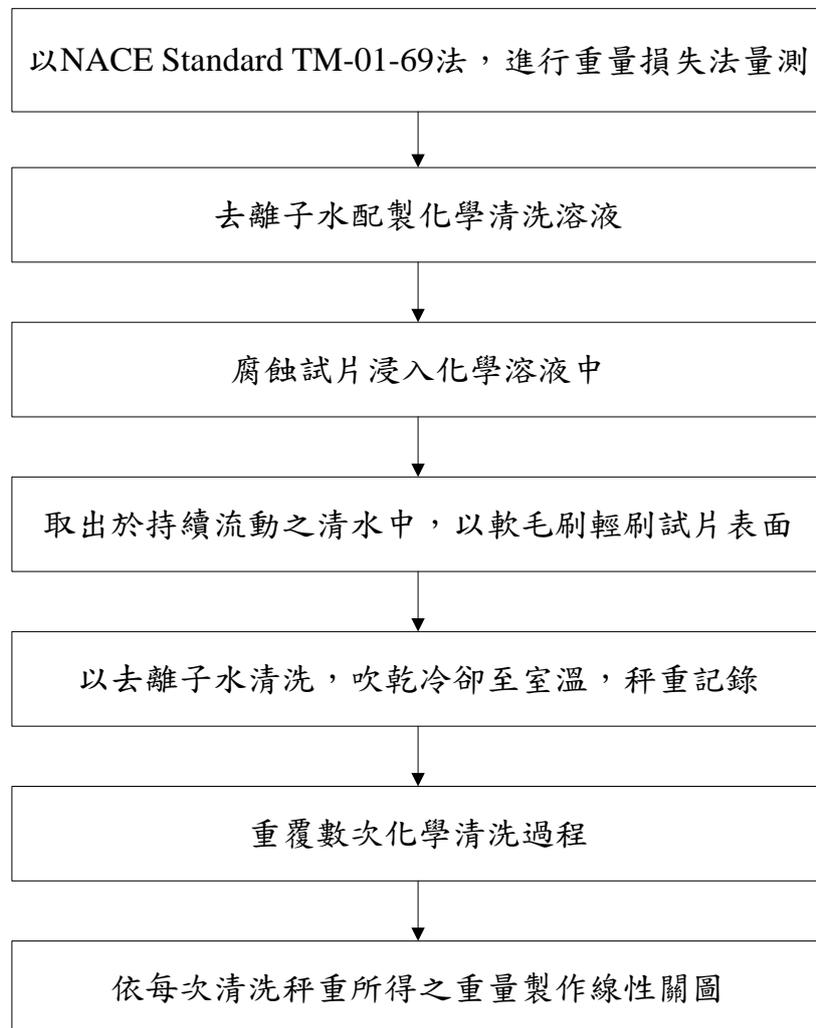


圖 3.19 水下金屬防蝕生物生成處理清除作業流程圖

板狀試片腐蝕速率計算公式如下：

$$R_{\text{corr}} = \Delta m / (A \cdot \rho \cdot t)$$

R_{corr} 為金屬試片腐蝕速率(cm/yr)； Δm 代表試片前後之質量流失(g)； A 為試片暴露面積(cm^2)； ρ 為金屬材料密度(g/cm^3)； t 則為試片暴露時間(year)。

第四章 海域特性調查

本研究延續106年「離岸風電水下技術研發」計畫，持續針對彰化離岸風電第二期計畫場址及臺中港區海域進行相關環境採樣，並分別於臺中港區(臺中#1)及彰化離岸風電第二期海域(彰化#2)增設金屬水下暴露試驗、持續觀察，藉以瞭解兩海域環境之生地化特性與季節性差異。本研究之季節月份與氣象局標準一致，如表4-1所示；海域調查與試驗項目資料，如表4-2所示。

表 4-1 季節月份對照表

季節	冬季	春季	夏季	秋季
月份	12、1、2	3、4、5	6、7、8	9、10、11

表 4-2 海域調查與試驗項目資料表

區域/站位	TWD97經緯度座標		試驗項目	
			106年度	107年度 (本研究)
臺中#1	120°30'30"E	24°19'15"N	環境採樣	水質採樣 金屬試片水下暴露試驗
彰化#1	120°19'30"E	24°06'01"N	環境採樣 金屬試片 水下暴露 試驗	水質採樣 金屬試片水下暴露試驗
彰化#2	120°10'38"E	24°07'30"N	---	水質、底泥採樣 金屬試片水下暴露試驗

4.1 臺中港區海域特性調查

4.1.1 臺中港區水質分析(臺中#1)

107年度臺中港區海域總計進行兩次採樣工作，相關基礎水質、營養鹽類及重金屬參數分析結果，如表4-3~表4-5所示。

臺中港區分別於107年01月16日(冬)與107年08月05日(夏)進行採樣工作(臺中#1)。如表4-3，受到冬、夏兩季之季節交替影響，水溫顯著提高，整體介於19-29.7°C；鹽度則介於31.7-32.5，冬、夏兩季pH皆為8.1，溶氧介於8.6-8.8 mg/L，氯鹽則為19100 mg/L。

營養鹽類參數如表4-4所示，總磷介於0.014-0.25 mg/L；總氮介於0.65-0.76 mg/L；硫酸鹽為2570 mg/L；Chl-a則介於0.296-3.26µg/L之間。臺中港區海域重金屬濃度，如表4-5所示，研究期間，水中重金屬僅「鋅」於冬季測得<0.02 mg/L，其餘鎘、鉛、銅、鉻、汞等重金屬，不論冬夏季節，其濃度值皆低於方法偵測極限。

研究期間，臺中港區海域水質冬、夏兩季之分析項目與乙類海洋環境品質標準值：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，顯示採樣時，臺中港區水質情況良好，海域水質變化情況並不顯著。

表 4-3 臺中港區基礎水質參數分析表

採樣日期	季節	溫度(°C)	鹽度	pH (25°C)	溶氧 (mg/L)	氯鹽 (mg/L)
107.01.16 ^a	冬	19	31.7	8.1	8.8	---
107.08.05	夏	29.7	32.5	8.1	8.6	19100

表 4-4 臺中港區營養鹽類參數分析表

採樣日期	季節	總磷 (mg/L)	總氮 (mg/L)	硫酸鹽 (mg/L)	葉綠素 a ($\mu\text{g/L}$)
107.01.16 ^a	冬	0.025	0.65	---	0.29
107.08.05	夏	<0.02 (0.014)	0.76	2570	3.26

表 4-5 臺中港區重金屬參數分析表

採樣日期	季節	鋅(mg/L)	鎘 (mg/L)	鉛(mg/L)	銅 (mg/L)	鉻(mg/L)	汞(mg/L)
107.01.16 ^a	冬	<0.02	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
107.08.05	夏	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

檢驗值低於方法偵測極限之測定以" N.D."表示
a為106年度計畫執行

由上列數據可知，臺中港區海域測站，冬、夏兩季之鹽度與pH變化皆為平緩，水溫明顯受季節影響呈現夏高冬低之趨勢；Chl-a由冬季0.29 $\mu\text{g/L}$ 大幅提升至3.26 $\mu\text{g/L}$ ，推測主要是因夏季光照充裕，利於水中浮游植物生長而導致，然冬、夏溶氧部分並無同步顯著提高，顯示研究期間「溫度」與「浮游植物生長」並非主導此海域溶氧之主要因子，因研究數據，皆為107年度進行採樣，若欲瞭解此海域浮游植物變化情況及相關主導因子，仍建議持續進行分析與觀察，以深入探討臺中港區海域之生地化特徵與季節性差異。

4.1.2 臺中港區海域底泥分析(臺中#1)

臺中港區海域底泥分別以管長 30cm 與 60cm 之底泥採樣管進行樣品採集(臺中#1)。底泥採樣管經靜置沉降後，原 30cm、60cm 底泥樣品，分別沉降至約 25cm 和 45cm 深度之間，沉降情況如圖 4.1 所示。



(a) 30cm 底泥採集管



(b) 60cm 底泥採集管

圖 4.1 臺中港區海域底泥沉降記錄

如表 4-6 可知，臺中#1 測站 30cm 之底泥採樣管分別選取沉降深度 5cm 及 20cm 兩處進行底泥粒徑分析；60cm 之底泥採樣管因沉降深度較高，故分別於 5、15、25 及 35cm 處進行底泥粒徑分析工作。

整體而言，臺中#1 測站之底泥粒徑(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%，各深度試樣之粒徑分佈曲線及組成百分比，如圖 4.2~圖 4.13 所示。

表 4-6 臺中港區底泥粒徑分析表(臺中#1)

樣站		臺中#1						
實際採樣深度		30cm		60cm				
沉降後測粒徑深度		<5cm	20cm	<5cm	15cm	25cm	35cm	
107/1/16	累積 通過 百分比 所對應之 粒徑大小(μm)	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	
	比 積 百分 (%)	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

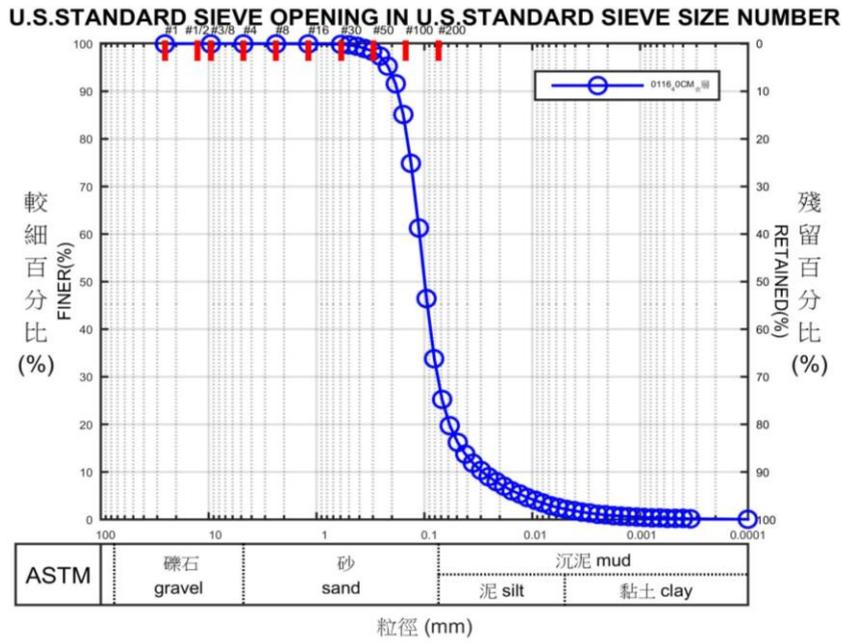


圖 4.2 臺中#1 測站 30cm 採樣管-5cm 處粒徑分佈曲線

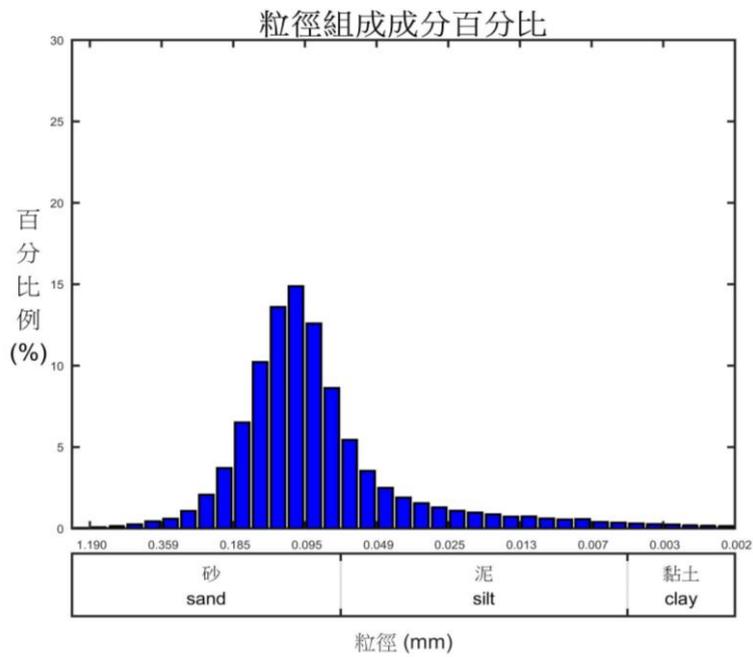


圖 4.3 臺中#1 測站 30cm 採樣管-5cm 處粒徑組成百分比

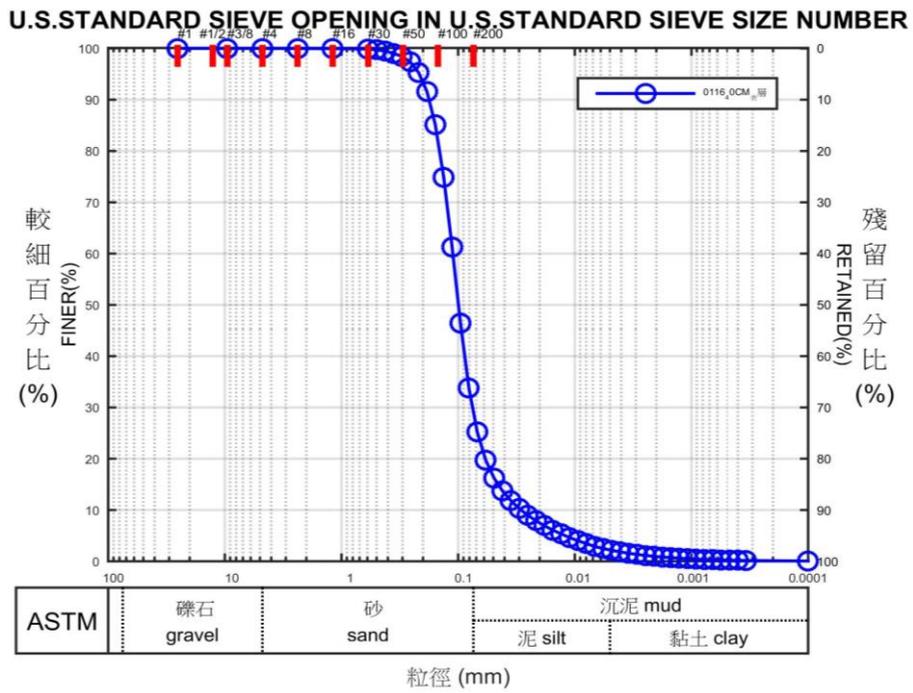


圖 4.4 臺中#1 測站 30cm 採樣管-20cm 處粒徑分佈曲線

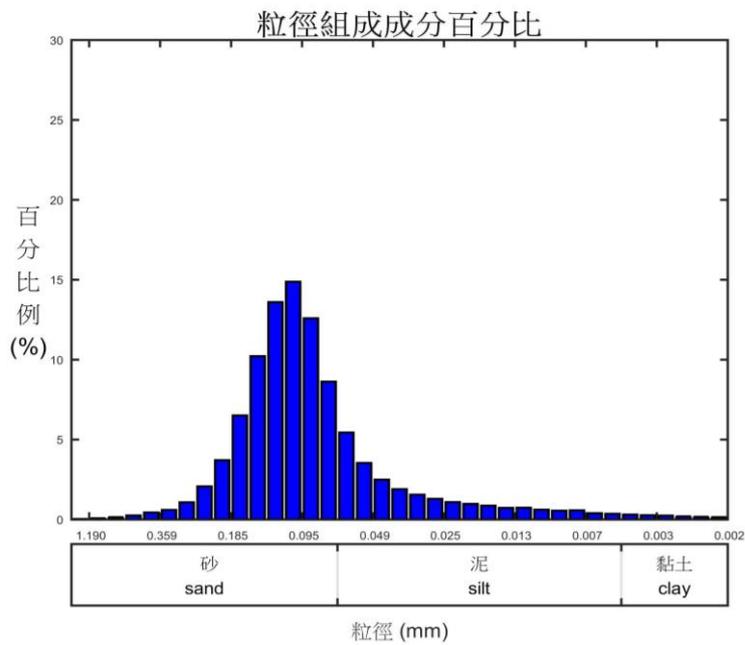


圖 4.5 臺中#1 測站 30cm 採樣管-20cm 處粒徑組成百分比

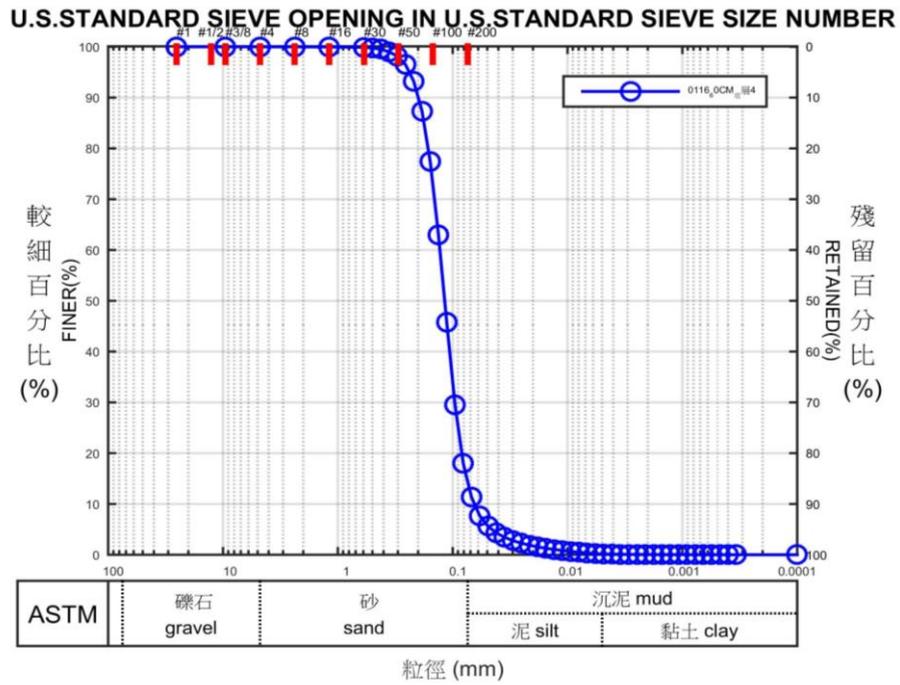


圖 4.6 臺中#1 測站 60cm 採樣管-5cm 處粒徑分佈曲線

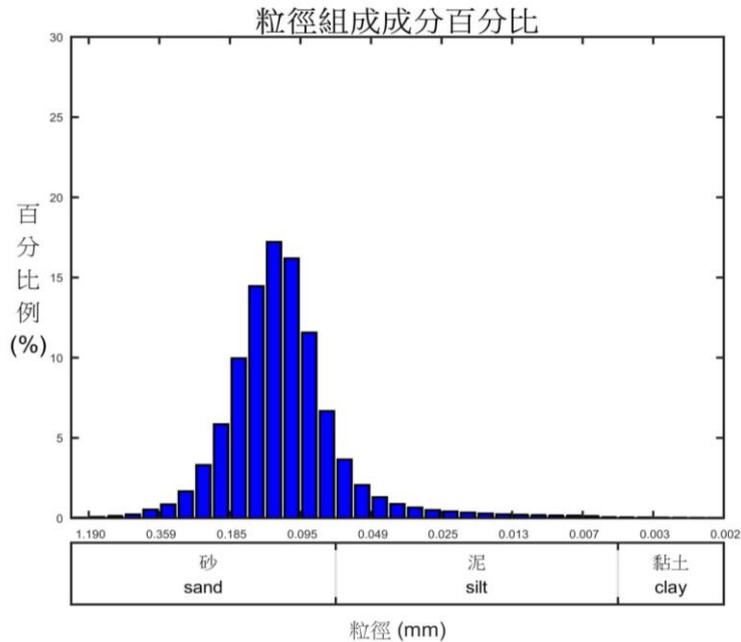


圖 4.7 臺中#1 測站 60cm 採樣管-5cm 處粒徑組成百分比

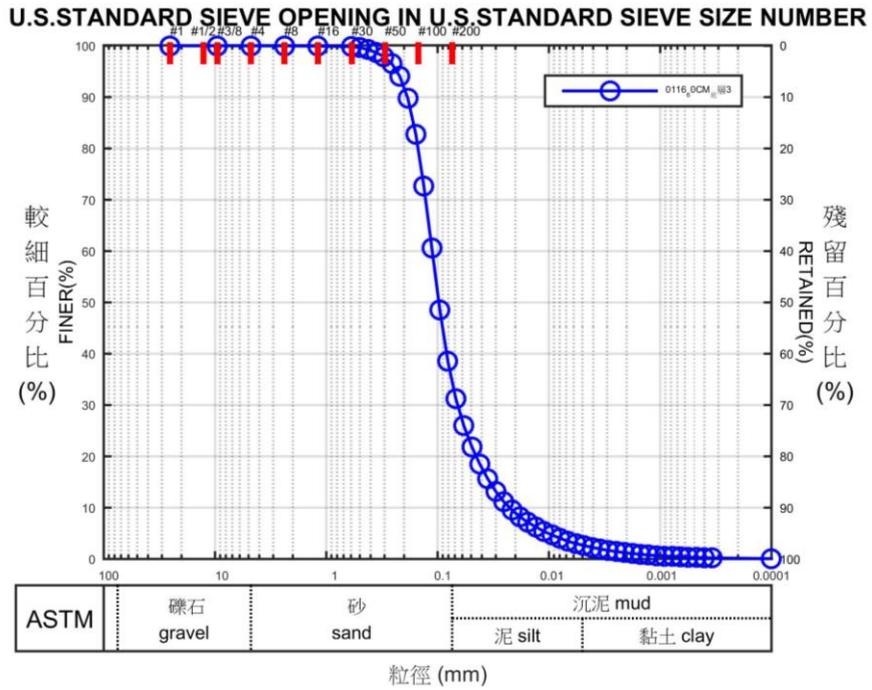


圖 4.8 臺中#1 測站 60cm 採樣管-15cm 處粒徑分佈曲線

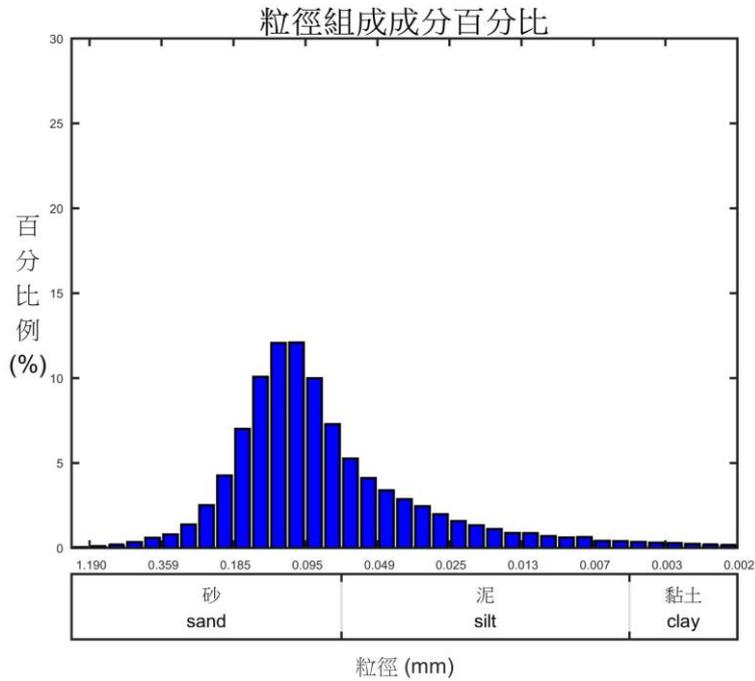


圖 4.9 臺中#1 測站 60cm 採樣管-15cm 處粒徑組成百分比

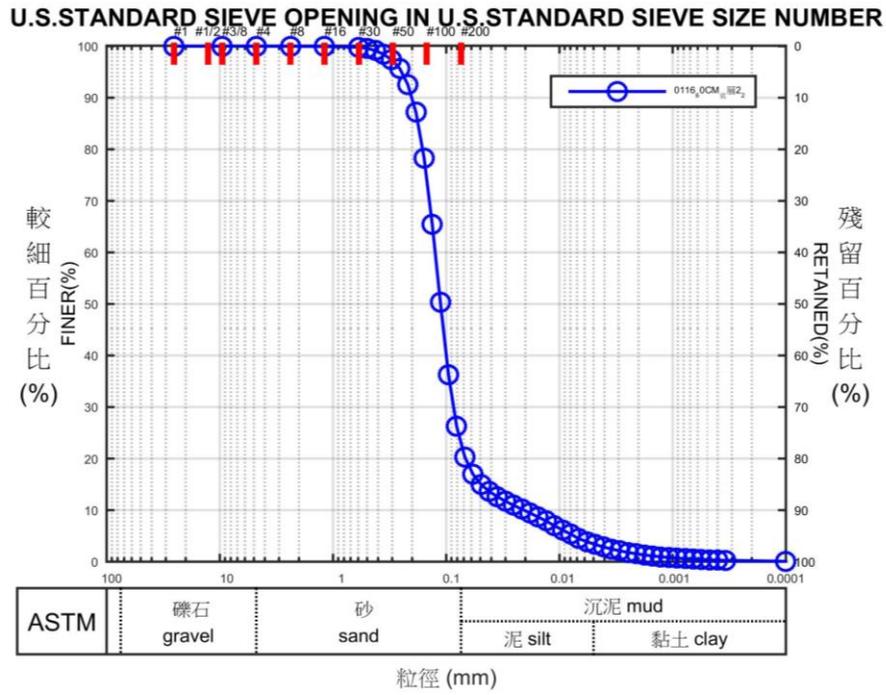


圖 4.10 臺中#1 測站 60cm 採樣管-25cm 處粒徑分佈曲線

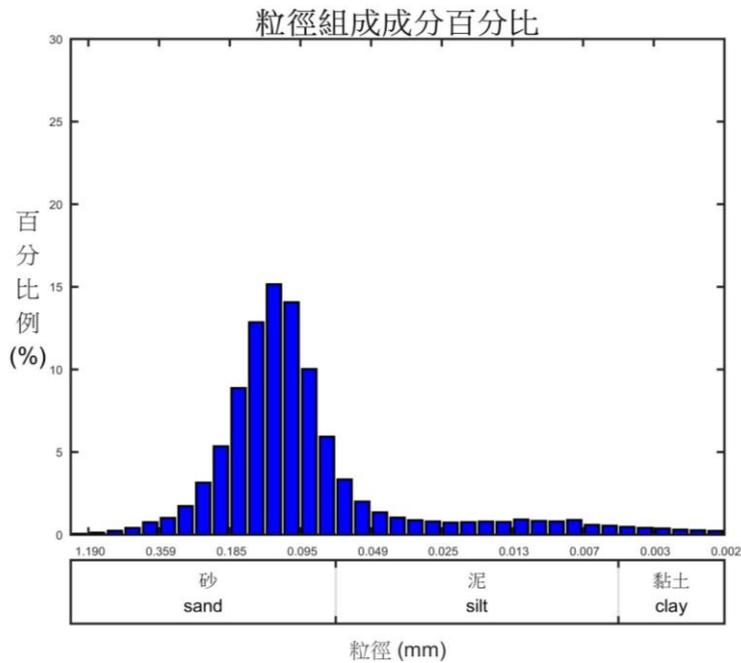


圖 4.11 臺中#1 測站 60cm 採樣管-25cm 處粒徑組成百分比

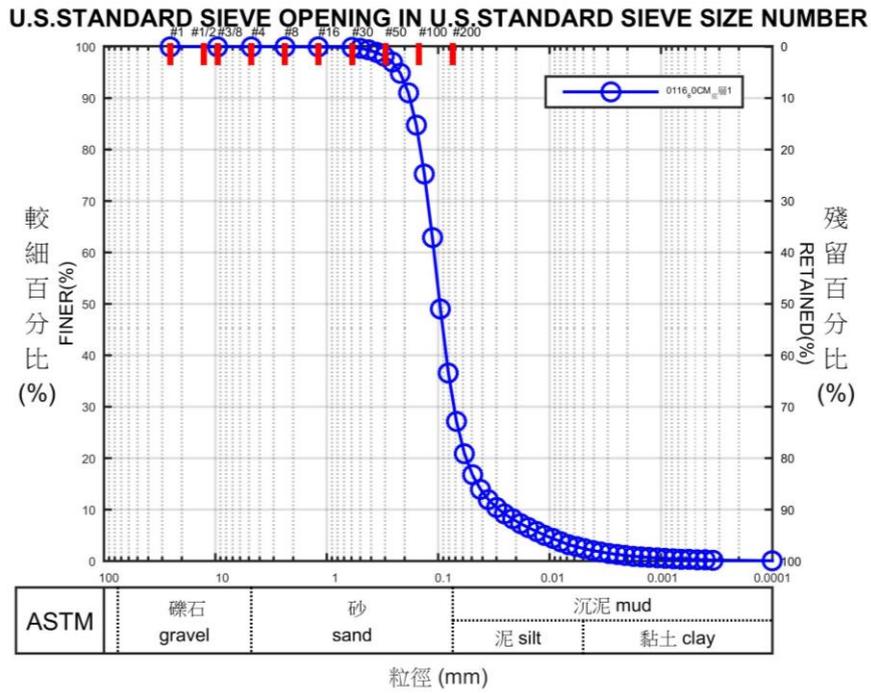


圖 4.12 臺中#1 測站 60cm 採樣管-35cm 處粒徑分佈曲線

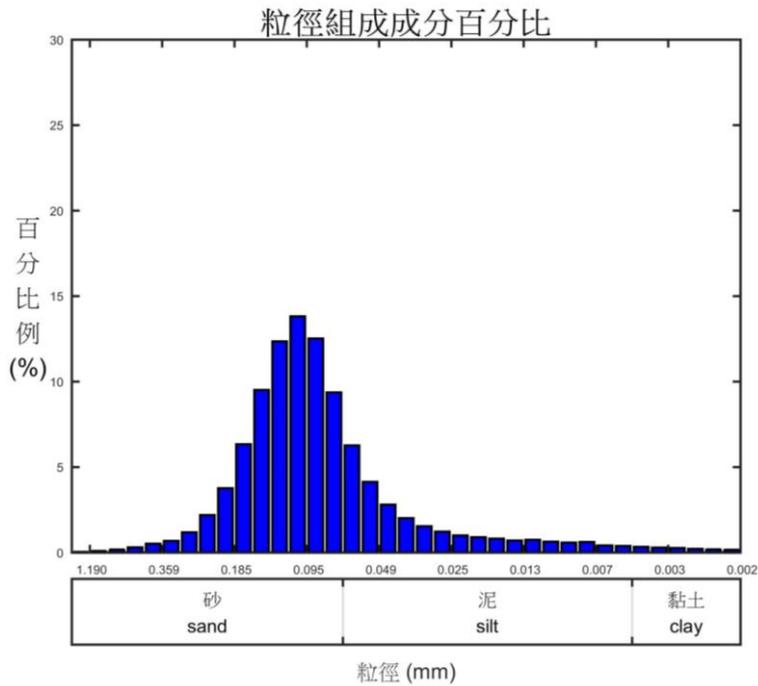


圖 4.13 臺中#1 測站 60cm 採樣管-35cm 處粒徑組成百分比

4.1.3 臺中港區海域底泥微生物分析(臺中#1)

臺中港區#1 測站 60cm 長之底泥採樣管，靜置沉降後之深度為 36 cm，進行 NGS 的底泥深度樣品分別有 Soil1(0~10cm)、Soil2(10~20cm) 和 Soil4(30~36cm)。

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 4.14~圖 4.16 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(genus)；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^[9]同屬(genus)之微生物，如：*Desulfovibrio* sp. (脫硫弧菌屬)，*Desulfobacterium* sp. (脫硫桿菌屬)，*Desulfotomaculum* sp. (脫硫腸狀菌)，*Thiobacillus* sp. (硫桿狀菌屬)，*Sulfurospirillum* sp. (硫磺單胞菌屬)，*Leptothrix* sp. (纖毛菌屬)，*Crenothrix* sp. (繡菌屬菌)，*Clostridium* sp. (梭菌屬)，*Flavobacterium*(sp.黃桿菌屬) *Bacillus* sp. (芽孢桿菌屬)，and *Pseudomonas* sp. (假單胞菌屬)等。臺中港區底泥微生物 DNA 序列分析結果彙整於表 4-7。

另以屬(genus)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 4.17)。圖 4.17 中不同顏色與高度代表不同屬內種類的豐富程度。

表 4-7 臺中港區底泥微生物 DNA 序列分析結果彙整表

樣品編號	Soil1	Soil2	Soil4
底泥深度(cm)	0~10	10~20	30~36
DNA 序列定出數量(條)	112,784	255,400	203,422
無法鑑定至界(Kingdom) 之百分比(%)	0.33	0.34	0.41
細菌界(Bacteria Kingdom) 百分比(%)	9.10	99.34	98.96
古菌界(Archaea Kingdom) 百分比(%)	0.57	0.32	0.62
鑑定至屬(genus)之百分比(%)	47.91	47.89	47.58
可鑑別之物種數 (species)	838	1013	994

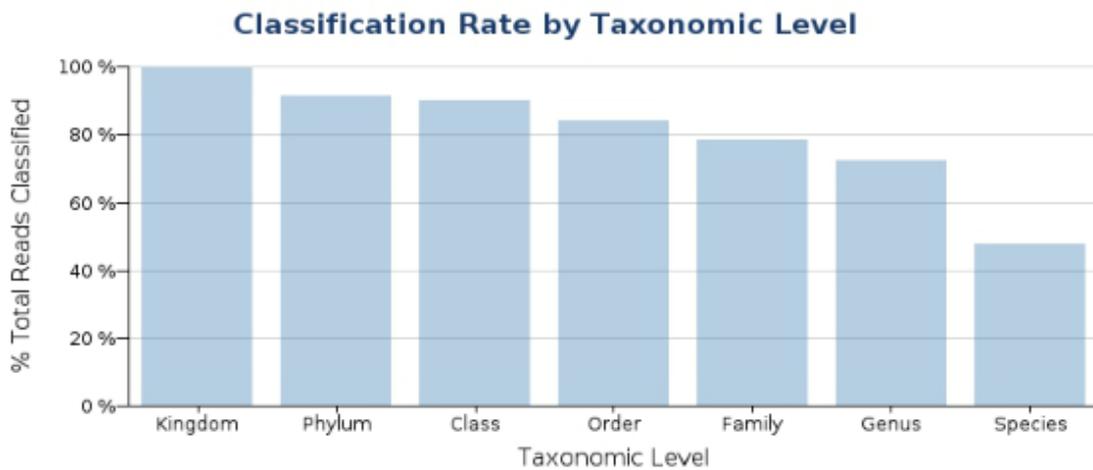


圖 4.14 Soil1 底泥微生物 DNA 序列各分類位階鑑別結果之比例

(Kingdom: 界; Phylum: 門; Class: 綱; Order: 目; Family: 科; Genus: 屬; Species: 種)

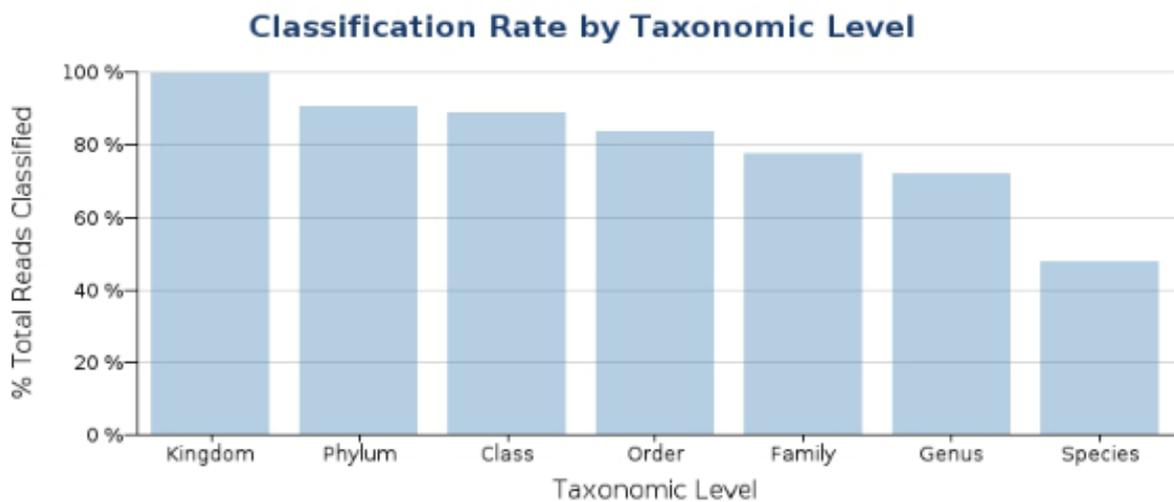


圖 4.15 Soil2 底泥微生物 DNA 序列各分類位階鑑別結果之比例

(Kingdom: 界; Phylum: 門; Class: 綱; Order: 目; Family: 科; Genus: 屬; Species: 種)

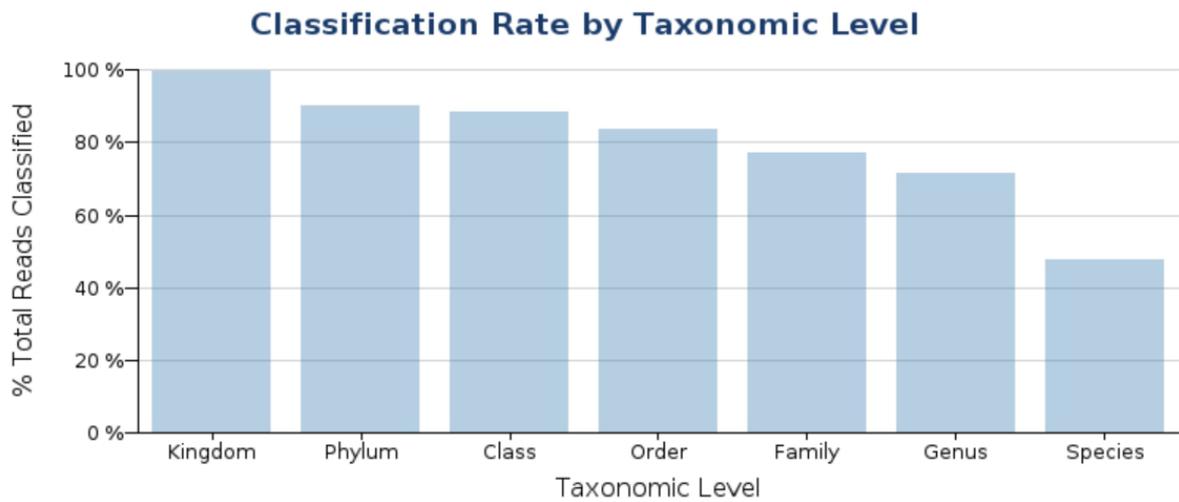


圖 4.16 Soil4 底泥微生物 DNA 序列各分類位階鑑別結果之比例

(Kingdom: 界; Phylum: 門; Class: 綱; Order: 目; Family: 科; Genus: 屬; Species: 種)

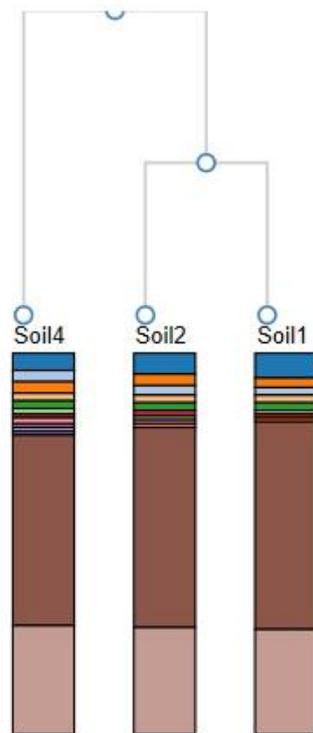


圖 4.17 臺中港區#1 測站底泥微生物 DNA 分類階層相似性分析圖

4.2 彰化離岸風電第二期海域特性調查

4.2.1 彰化海域水質分析

1. 彰化第一場址水質分析(彰化#1)

107年度彰化離岸風電第二期海域，第一場址(彰化#1)總計進行三次水樣採樣工作，相關基礎水質、營養鹽類及重金屬參數分析結果，如表4-8~表4-10所示。

彰化第一場址分別於107年04月14日(春)、107年08月05日(夏)及107年10月21日(秋)進行採樣工作。如表4-8，春、夏兩季水溫差異不高，水溫介於26-27°C，直至秋季水溫顯著降至22.9°C，整體水溫介於22.9-27°C之間；鹽度介於32.6-34.9之間；pH介於6.7-8.0之間，溶氧介於7.9-9.8 mg/L，氯鹽則介於19100-25800mg/L間。

營養鹽類參數如表4-9所示，總磷介於N.D-0.021 mg/L；總氮介於0.6-1.00 mg/L；硫酸鹽介於1210-2190 mg/L；Chl-a則介N.D.-8.29µg/L之間。彰化第一場址海域重金屬濃度，如表4-10所示，研究期間，水中重金屬僅「鉛」於春季測值(0.11 mg/L)高於乙類海洋環境品質標準之規範；夏季測得濃度為<0.1 mg/L；其餘鎘、鉛、銅、鉻、汞等重金屬，不論春、夏、秋季，重金屬濃度皆低於方法偵測極限。

表 4-8 彰化第一場址基礎水質參數分析表

採樣日期	季節	溫度(°C)	鹽度	pH (25°C)	溶氧 (mg/L)	氯鹽 (mg/L)
107.04.14 ^a	春	26	34.9	8	7.9	19800
107.08.05	夏	27	32.6	6.7	9.8	19100
107.10.22	秋	22.9	34.2	8.0	8.4	25800

表 4-9 彰化第一場址營養鹽類參數分析表

採樣日期	季節	總磷 (mg/L)	總氮 (mg/L)	硫酸鹽 (mg/L)	葉綠素 a (µg/L)
107.04.14 ^a	春	<0.02 (0.011)	0.6	1210	8.29
107.08.05	夏	N.D.	0.62	1680	N.D.
107.10.22	秋	0.021	1.00	2190	0.89

表 4-10 彰化第一場址重金屬參數分析表

採樣日期	季節	鋅(mg/L)	鎘(mg/L)	鉛(mg/L)	銅(mg/L)	鉻(mg/L)	汞(mg/L)
107.04.14 ^a	春	N.D.	N.D.	0.11.	N.D.	N.D.	N.D.
107.08.05	夏	N.D.	N.D.	<0.1 (0.037)	N.D.	N.D.	N.D.
107.10.22	秋	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

檢驗值低於方法偵測極限之測定以"N.D."表示
a為106年度計畫執行

依行政院環境保護署規定，事業、污水下水道系統及建築物污水處理設施之pH放流水標準應介於6.0-9.0之間。由此推測，夏季彰化#1測站可能因夏季降雨量增，淡水逕流亦隨之增加，致使水溫於春夏兩季變化並不顯著，僅於秋季出現相對低值；鹽度則呈現夏低春高至秋季再回升之趨勢，夏季pH明顯低至6.7，故推測夏季彰化#1測站「低鹽低pH」之水質特徵，極可能受到陸源污染影響所致。

此外，春、夏、秋溶氧介於7.9-9.8 mg/L；Chl-a介於N.D.-8.29 mg/L；推測浮游植物可能因春季來臨而大量增長，隨夏季轉換後逐漸遞減，至秋季仍維持在0.889 mg/L，並無顯著之提升。浮游植物增長時，可能吸引各式水中生物覓食而來，故建議持續進行長期觀測，以瞭解此海域浮游植物變化情況及相關主導因子。就現有觀測情況而言，可視需求於「春季」加強相關海上結構物之維護觀測與除污定檢等工作，以延長海上結構物使用年限與相關監測儀器之穩定度。

2. 彰化第二場址水質分析(彰化#2)

107年度彰化離岸風電第二期海域，第二場址(彰化#2)總計進行兩次水樣採樣工作，相關基礎水質、營養鹽類及重金屬參數分析結果，如表4-11~表4-13所示。

彰化第二場址分別於107年08月06日(夏)及107年10月22日(秋)進行採樣工作。如表4-11可清楚發現，受季節作用影響，夏、秋兩季水溫整體介於23.3-29.2℃之間；鹽度介於32.6-34.3之間；pH變化範圍不大，整體介於8.0-8.2之間，溶氧介於8.5-8.8 mg/L，氯鹽則介於26100-26900mg/L間。

營養鹽類參數分析結果如表4-12所示，總磷介於<0.02-0.024 mg/L；總氮介於0.015-0.76 mg/L；硫酸鹽介於2560-2690 mg/L；Chl-a則介1.18-3.85µg/L之間。彰化第二場址海域重金屬濃度，如表4-13所示，研究期間，水中重金屬不論夏、秋季節，其檢測分析濃度皆低於方法偵測極限。

表 4-11 彰化第二場址基礎水質參數分析表

採樣日期	季節	溫度(°C)	鹽度	pH (25°C)	溶氧 (mg/L)	氯鹽 (mg/L)
107.08.06	夏	29.2	32.6	8.2	8.8	26900
107.10.22	秋	23.3	34.3	8.0	8.5	26100

表 4-12 彰化第二場址營養鹽類參數分析表

採樣日期	季節	總磷 (mg/L)	總氮 (mg/L)	硫酸鹽 (mg/L)	葉綠素 a (µg/L)
107.08.06	夏	<0.02	0.015	2690	3.85
107.10.22	秋	0.024	0.76	2560	1.18

表 4-13 彰化第二場址重金屬參數分析表

採樣日期	季節	鋅(mg/L)	鎳(mg/L)	鉛(mg/L)	銅(mg/L)	鉻(mg/L)	汞(mg/L)
107.08.06	夏	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
107.10.22	秋	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

檢驗值低於方法偵測極限之測定以"N.D."表示
a為106年度計畫執行

由觀測數據可知，彰化第二場址海域測站，夏、秋兩季 pH 變化平緩，水溫明顯受季節影響呈現夏高秋低之趨勢；Chl-a 由夏季 3.85 $\mu\text{g/L}$ 降低至秋季 1.18 $\mu\text{g/L}$ ，推測主要是因夏季光照充裕，利於水中浮游植物生長而導致，然夏、秋兩季之溶氧並無同步顯著提高，顯示「溫度」與「浮游植物生長」並非主導此彰化第二場址溶氧之主要因子，因研究數據，皆為 107 年度進行採樣，若欲瞭解此海域浮游植物變化情況及相關主導因子，仍建議持續進行分析與觀察，以深入探討彰化海域之生地化特徵與季節性差異。

4.2.2 彰化海域底泥分析

彰化海域底泥分別以管長 30cm 與 60cm 之底泥採樣管進行樣品採集(彰化#2)。底泥採樣管經靜置沉降後，原 30cm、60cm 底泥樣品，分別沉降至約 28cm 和 56cm 深度之間，沉降情況如圖 4.18 所示。

由表 4-14 及表 4-15 可知，彰化海域測站 30cm 之底泥採樣管分別選取沉降深度 5、10、20、28cm 四處進行底泥粒徑分析；60cm 之底泥採樣管因沉降深度較高，故分別於 5、10、20、30、40、50 及 56cm 處進行底泥粒徑分析工作。整體而言，彰化海域測站之底泥粒徑(D_{50})介於 336.766~367.769 μm ，平均粒徑(D_m)介於 296.757~323.797 μm ，各深度皆無礫石；底泥的砂含量比例皆超過 95%，粉砂的比例皆低 5%；30cm 以淺的砂含量隨深度減少，超過 30cm 以深則砂含量隨深度增加，而粉砂含量則反之；各深度試樣之粒徑分佈曲線及組成百分比，如圖 4.19~圖 4.42 所示。



(a) 30cm 底泥採集管



(b) 60cm 底泥採集管

圖 4.18 彰化海域底泥沉降記錄(彰化#2)

表 4-14 彰化海域 30cm 採樣管之底泥粒徑分析表(彰化#2)

樣站		彰化#2					
實際採樣深度		30cm					
沉降後測粒徑深度		<5cm	10cm	20cm	25cm	28cm	
107/8/6	累積通過百分比所對應之粒徑大小(μm)	D_{10}	217.664	206.002	207.926	186.536	181.611
		D_{16}	246.486	238.301	240.500	220.545	220.282
		D_{25}	279.376	272.510	275.901	254.769	258.765
		D_{30}	295.028	289.023	293.074	271.597	276.756
		D_{50}	348.002	346.318	353.090	329.931	339.826
		D_{60}	373.601	376.243	381.707	357.424	370.591
		D_{75}	412.925	424.495	424.569	405.200	418.411
		D_{84}	440.839	452.165	451.246	436.967	447.507
		D_{90}	461.767	470.318	469.328	459.650	467.074
		D_m	313.776	312.223	314.552	297.905	302.115
	累積百分比(%)	礫石	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		砂	99.67	98.97	98.81	98.72	97.44
		粉砂	0.33	1.03	1.19	1.28	2.56

表 4-15 彰化海域 60cm 採樣管之底泥粒徑分析表(彰化#2)

樣站		彰化#2							
實際採樣深度		60cm							
沉降後測粒徑深度		<5cm	10cm	20cm	30cm	40cm	50cm	56cm	
107/8/6	累積通過百分比所對應之粒徑大小(μm)	D_{10}	213.886	181.721	182.279	163.844	201.007	212.699	205.441
		D_{16}	246.126	218.453	223.008	206.314	237.722	246.303	238.409
		D_{25}	282.664	256.088	264.714	248.897	275.315	284.146	273.827
		D_{30}	300.451	274.034	284.399	268.519	292.883	302.427	291.026
		D_{50}	364.847	336.766	352.839	337.555	356.730	367.769	349.879
		D_{60}	397.545	367.021	385.079	370.609	387.421	399.903	379.281
		D_{75}	441.021	414.422	431.109	420.158	431.691	442.212	424.590
		D_{84}	464.142	444.280	456.949	449.257	457.019	464.860	451.704
		D_{90}	478.466	464.786	473.561	468.441	473.465	478.892	469.801
		D_m	323.009	300.236	308.747	296.757	313.424	323.797	313.404
	累積百分比 (%)	礫石	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		砂	98.94	97.65	96.94	95.93	96.78	98.77	99.03
		粉砂	1.06	2.35	3.06	4.07	3.22	1.23	0.97

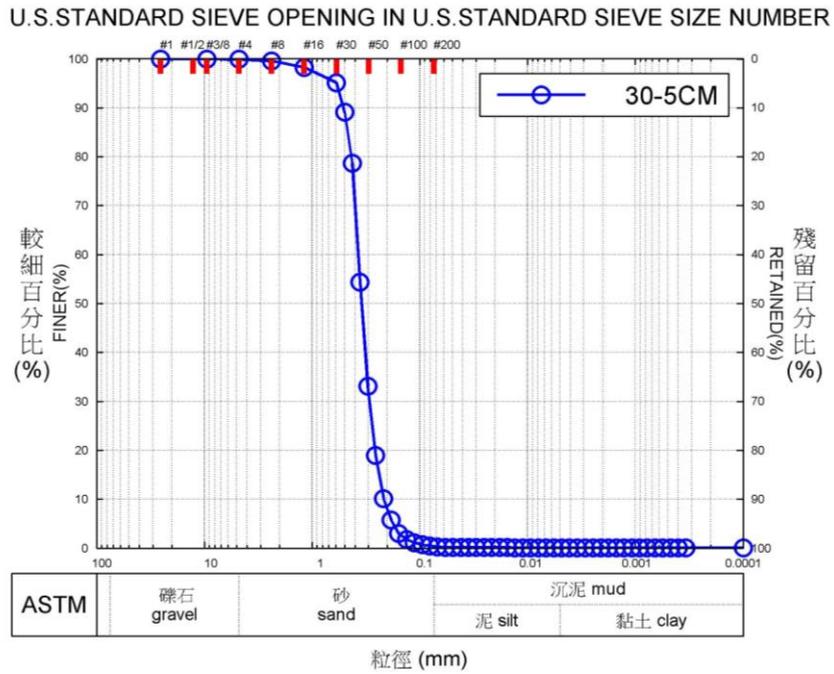


圖 4.19 彰化#2 測站 30cm 採樣管-5cm 處粒徑分佈曲線

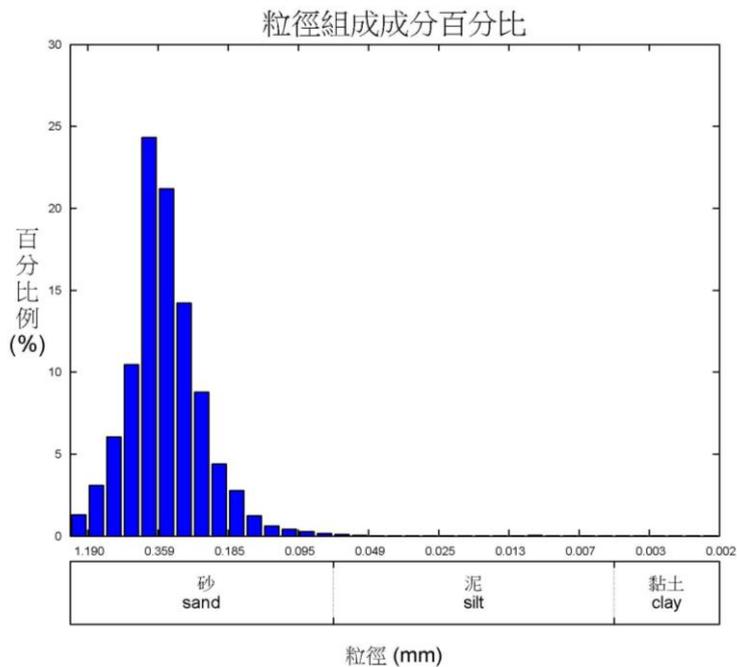


圖 4.20 彰化#2 測站 30cm 採樣管-5cm 處粒徑組成百分比

U.S. STANDARD SIEVE OPENING IN U.S. STANDARD SIEVE SIZE NUMBER

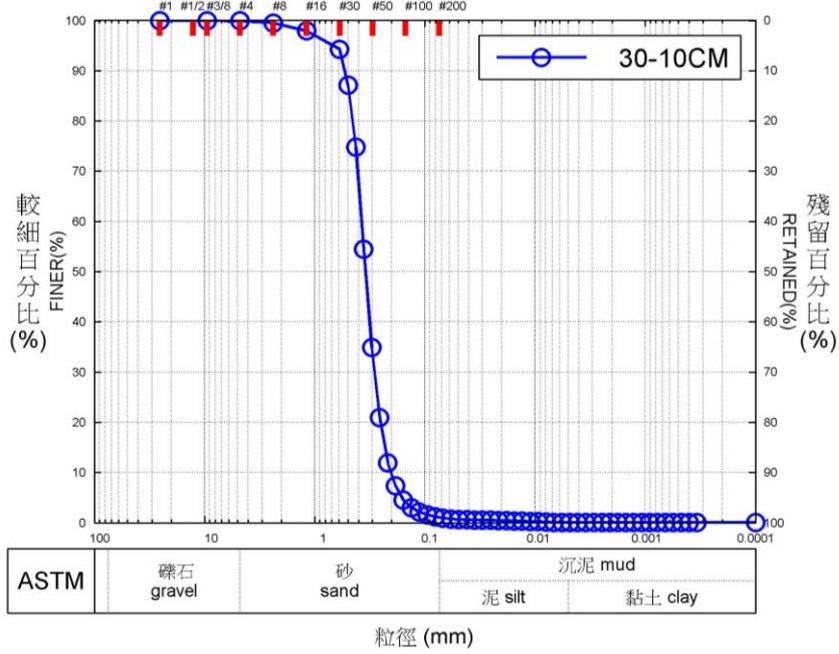


圖 4.21 彰化#2 測站 30cm 採樣管-10cm 處粒徑分佈曲線

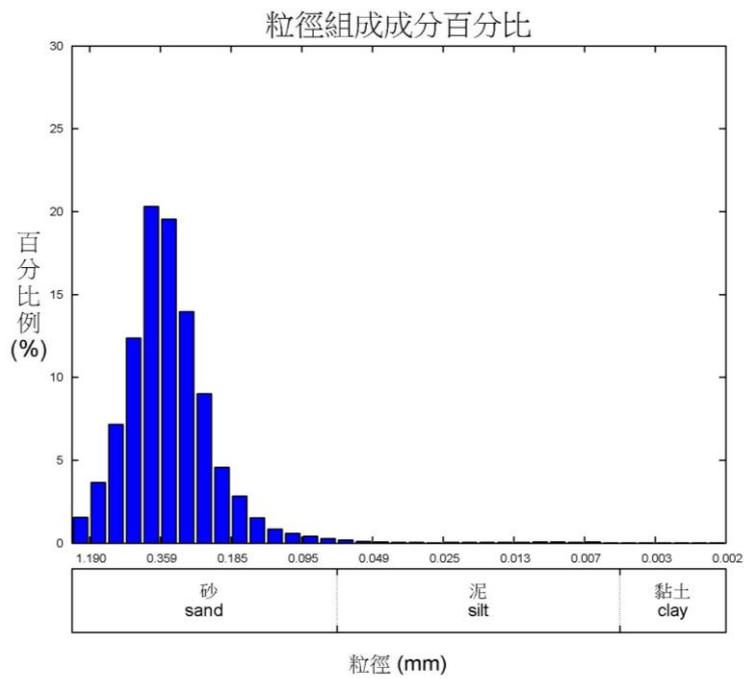


圖 4.22 彰化#2 測站 30cm 採樣管-10cm 處粒徑組成百分比

U.S. STANDARD SIEVE OPENING IN U.S. STANDARD SIEVE SIZE NUMBER

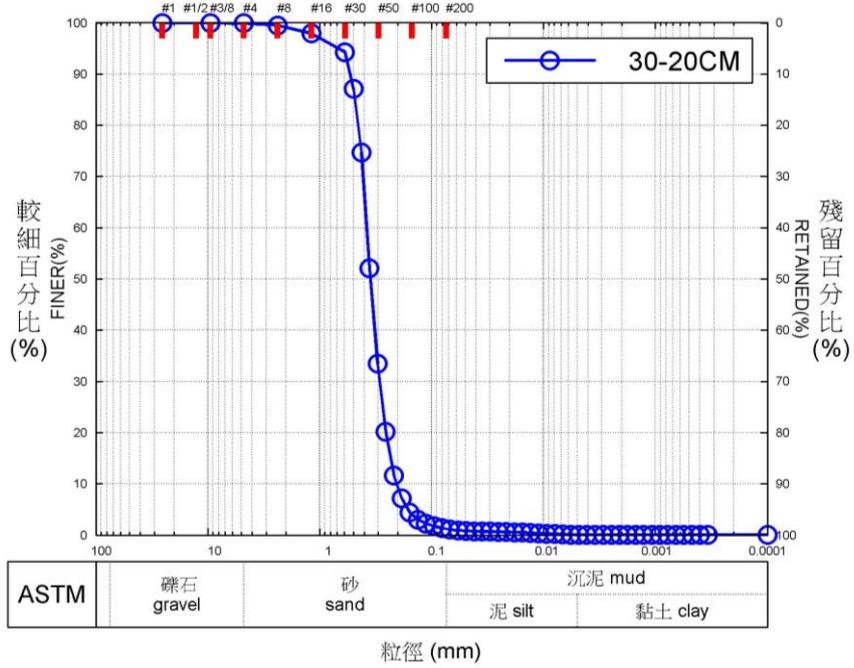


圖 4.23 彰化#2 測站 30cm 採樣管-20cm 處粒徑分佈曲線

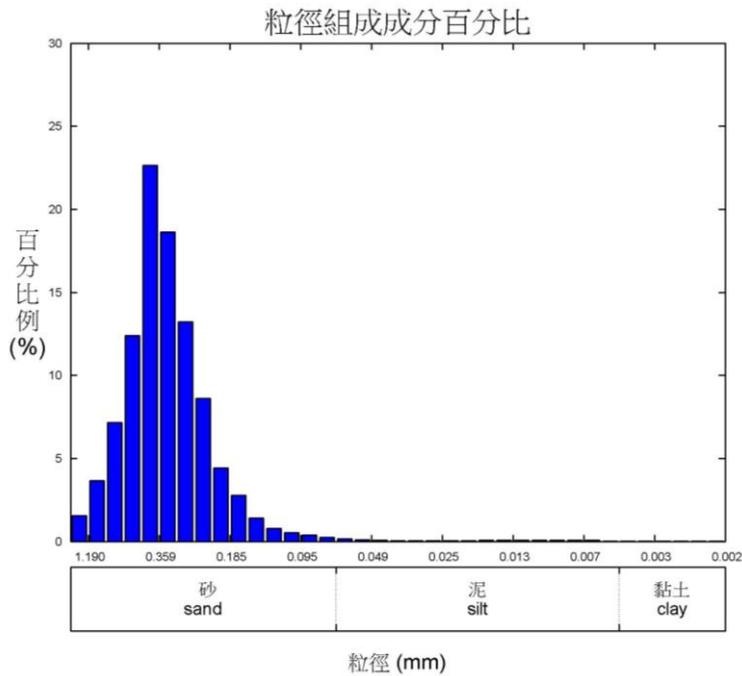


圖 4.24 彰化#2 測站 30cm 採樣管-20cm 處粒徑組成百分比

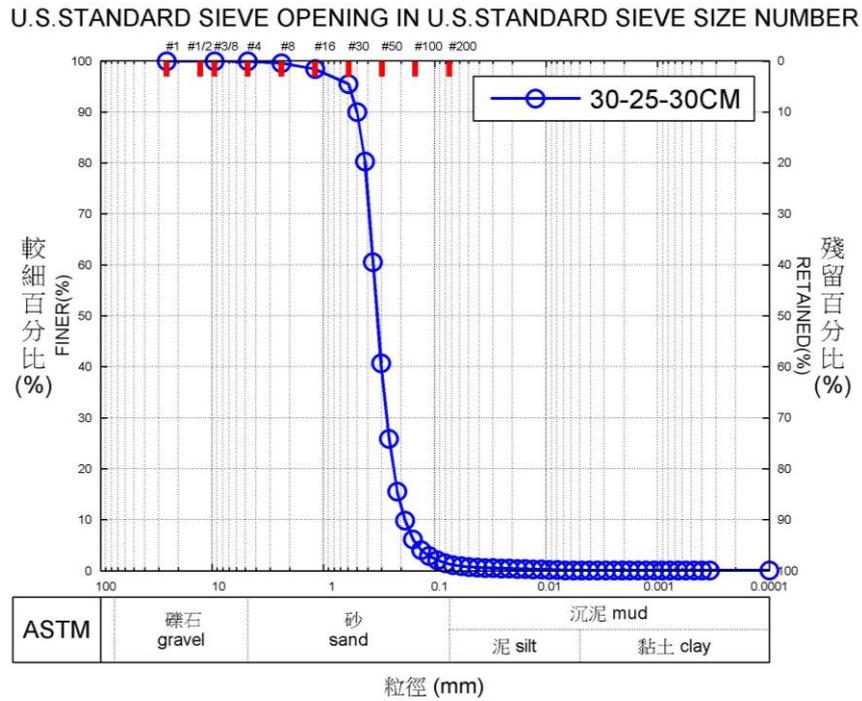


圖 4.25 彰化#2 測站 30cm 採樣管-25cm 處粒徑分佈曲線

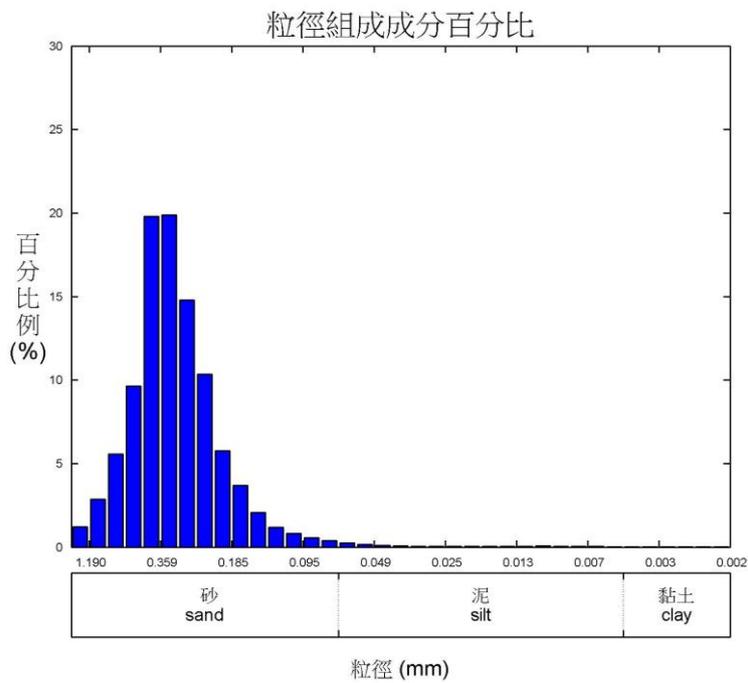


圖 4.26 彰化#2 測站 30cm 採樣管-25cm 處粒徑組成百分比

U.S. STANDARD SIEVE OPENING IN U.S. STANDARD SIEVE SIZE NUMBER

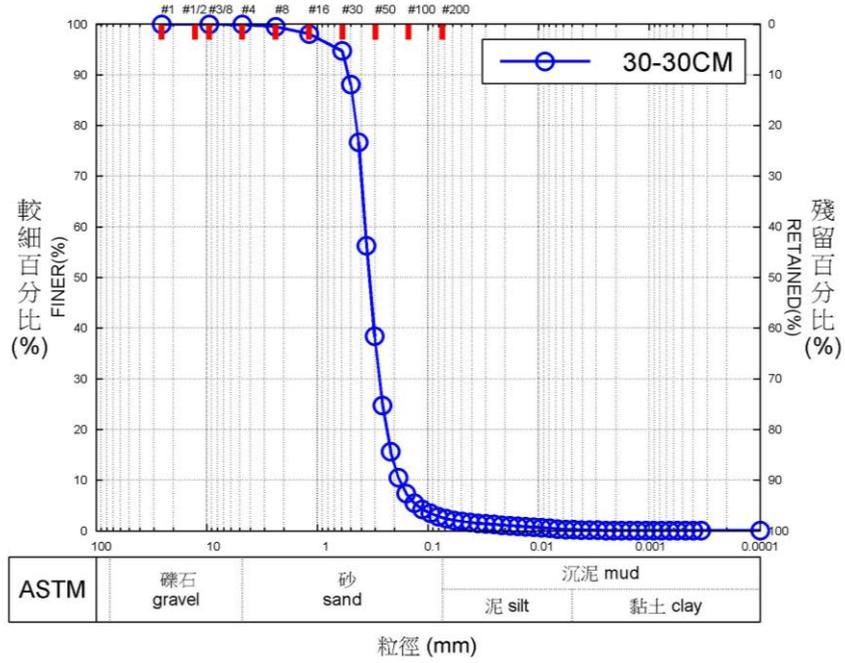


圖 4.27 彰化#2 測站 30cm 採樣管-28cm 處粒徑分佈曲線

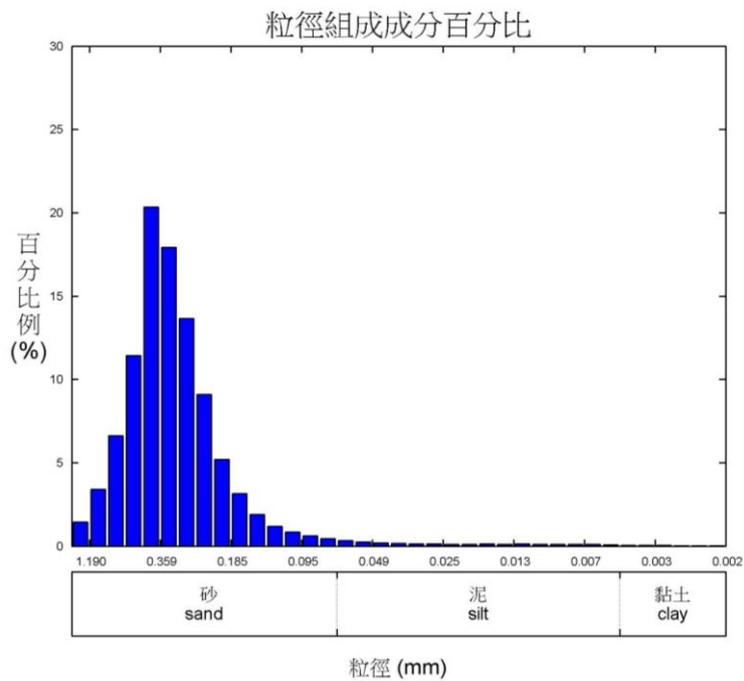


圖 4.28 彰化#2 測站 30cm 採樣管-28cm 處粒徑組成百分比

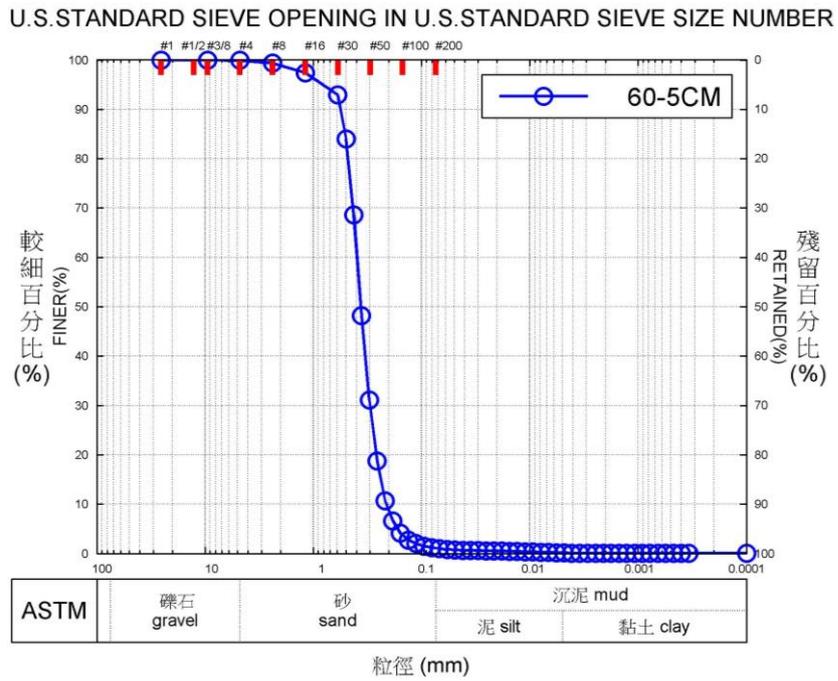


圖 4.29 彰化#2 測站 60cm 採樣管-5cm 處粒徑分佈曲線

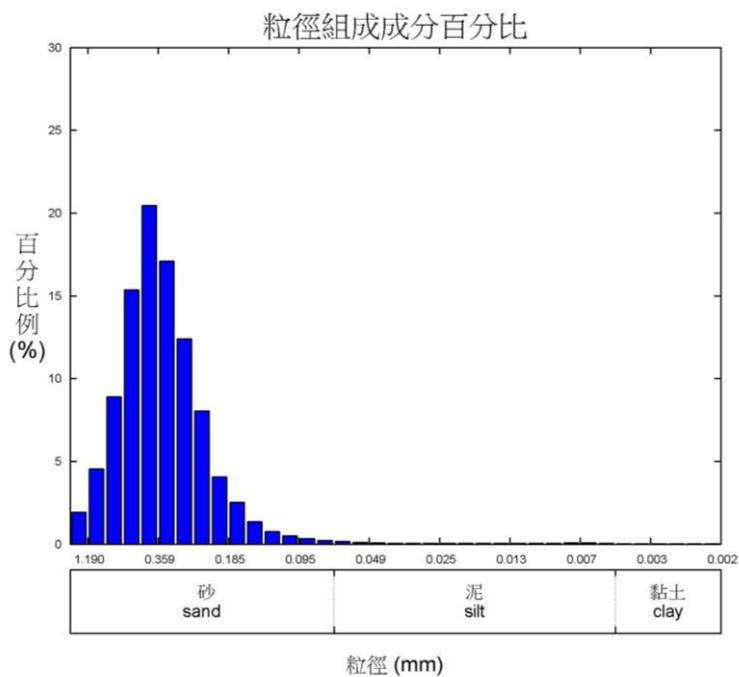


圖 4.30 彰化#2 測站 60cm 採樣管-5cm 處粒徑組成百分比

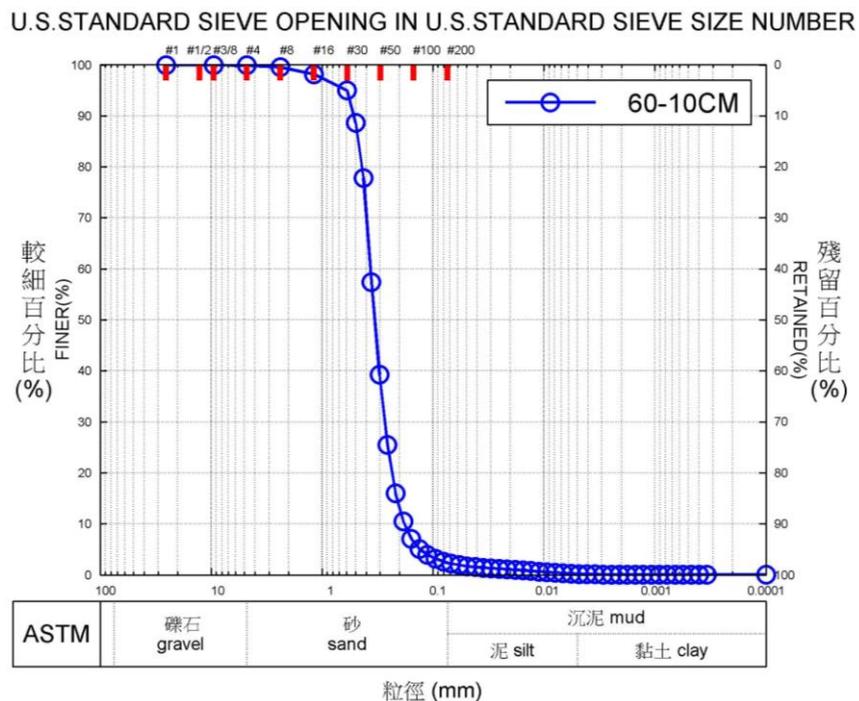


圖 4.31 彰化#2 測站 60cm 採樣管-10cm 處粒徑分佈曲線

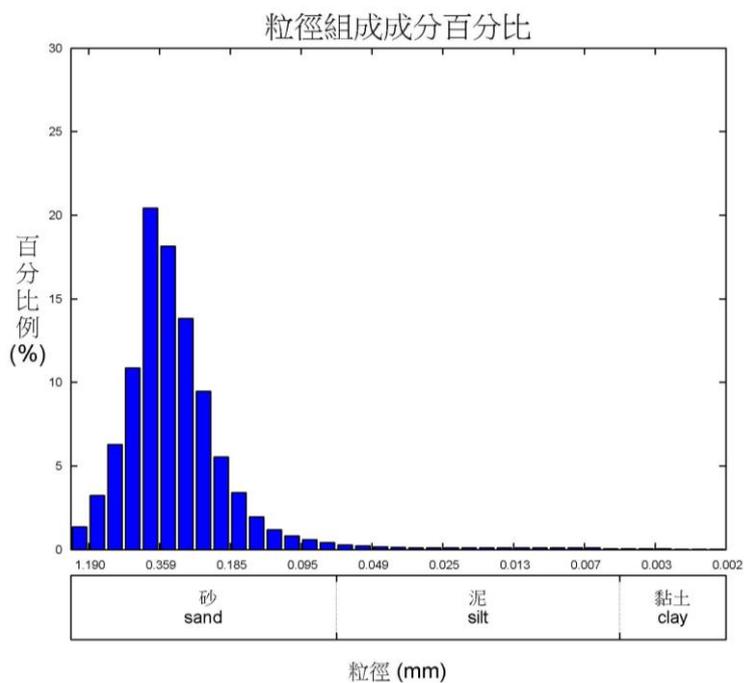


圖 4.32 彰化#2 測站 60cm 採樣管-10cm 處粒徑組成百分比

U.S. STANDARD SIEVE OPENING IN U.S. STANDARD SIEVE SIZE NUMBER

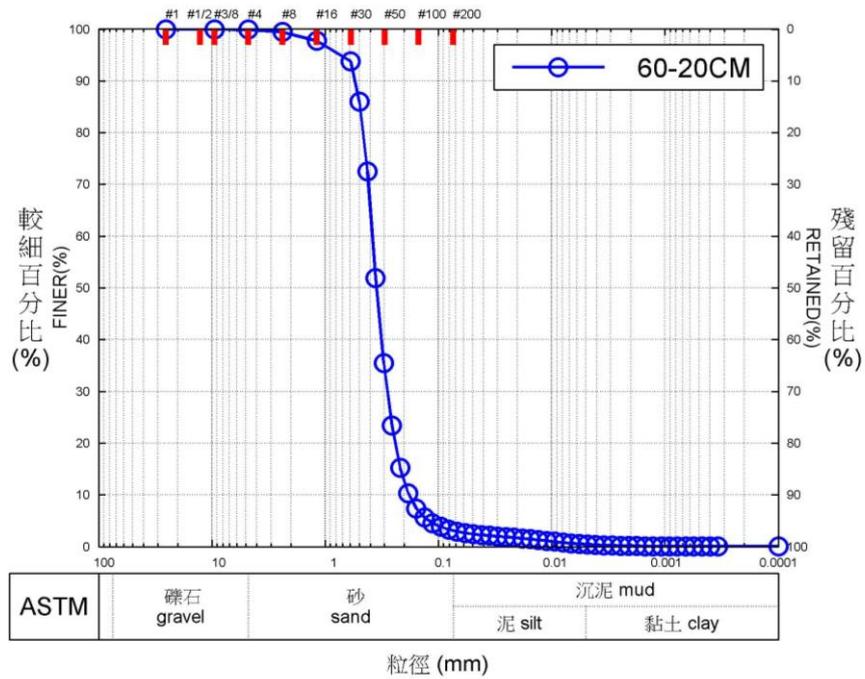


圖 4.33 彰化#2 測站 60cm 採樣管-20cm 處粒徑分佈曲線

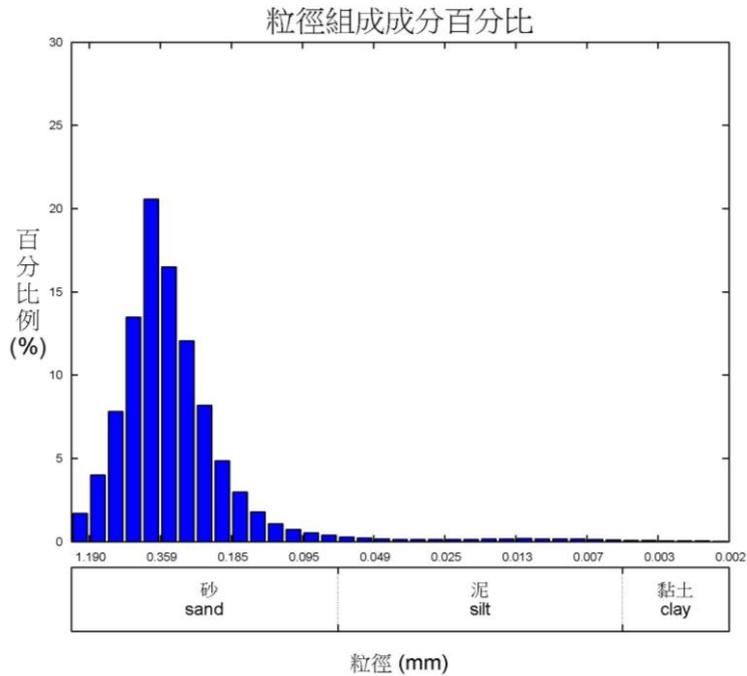


圖 4.34 彰化#2 測站 60cm 採樣管-20cm 處粒徑組成百分比

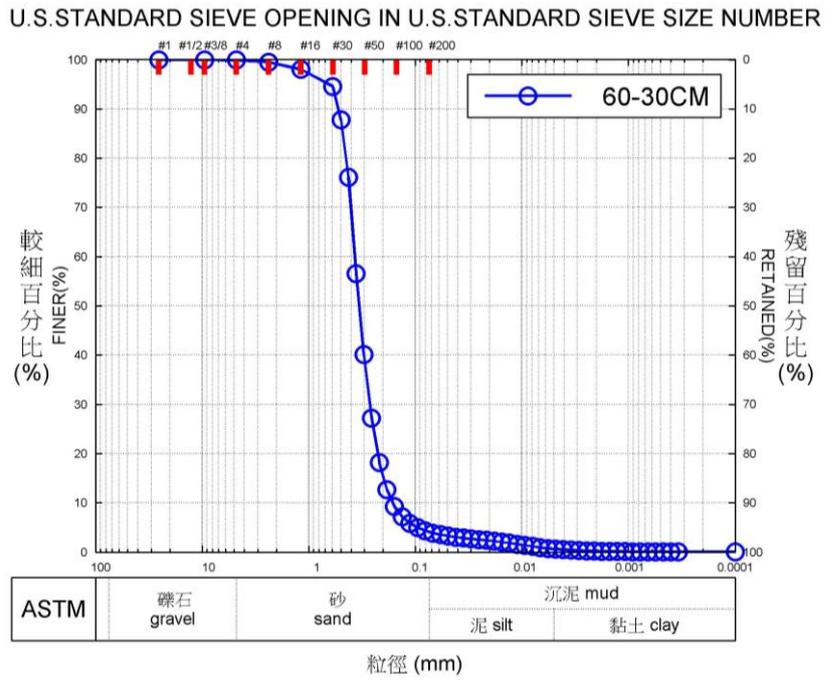


圖 4.35 彰化#2 測站 60cm 採樣管-30cm 處粒徑分佈曲線

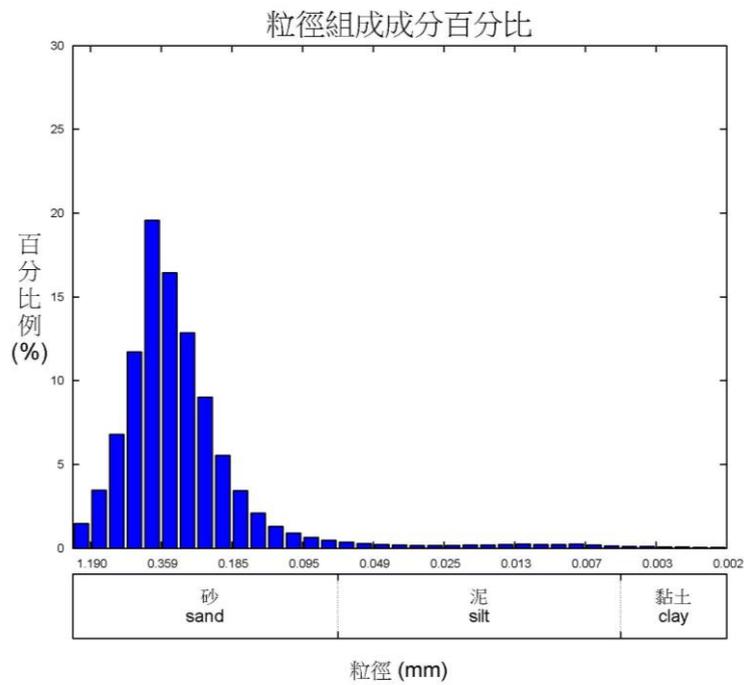


圖 4.36 彰化#2 測站 60cm 採樣管-30cm 處粒徑組成百分比

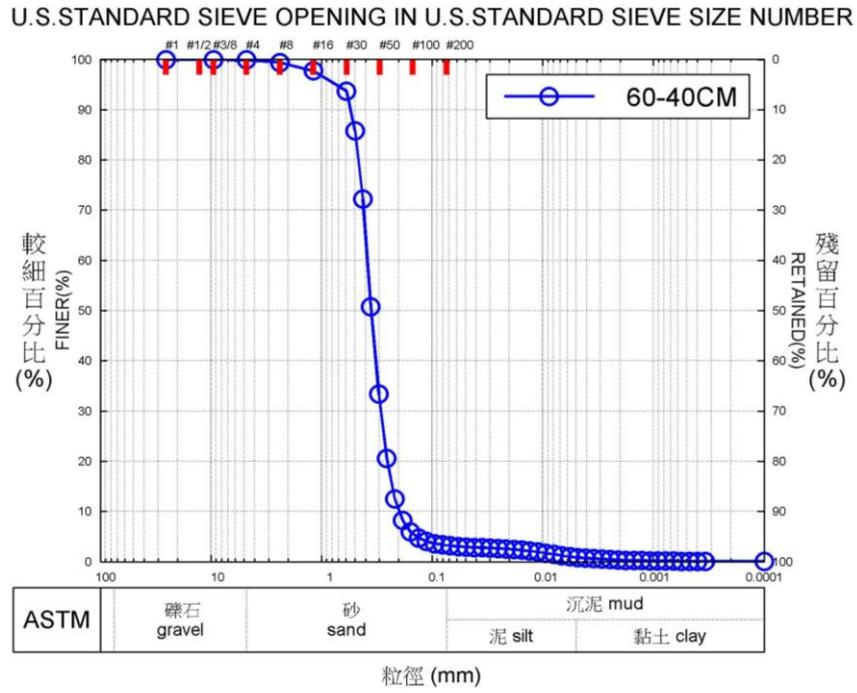


圖 4.37 彰化#2 測站 60cm 採樣管-40cm 處粒徑分佈曲線

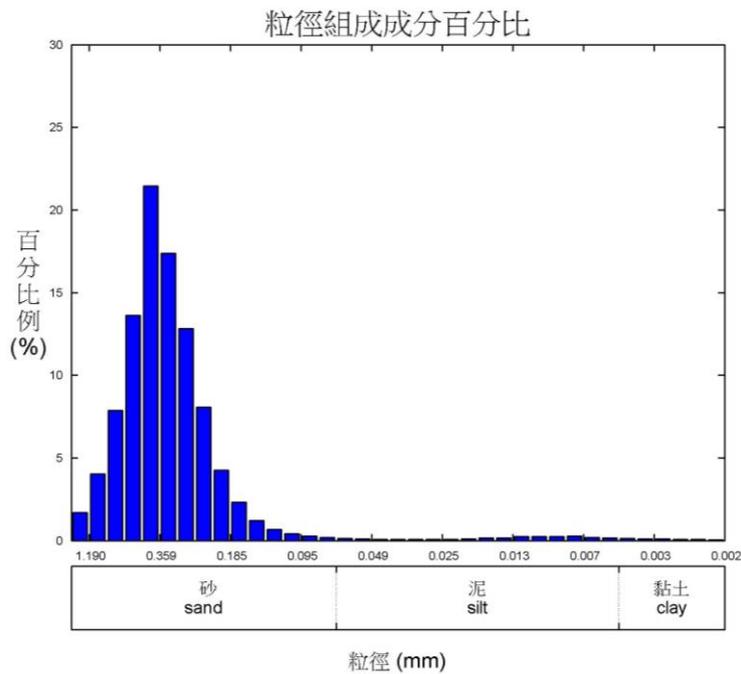


圖 4.38 彰化#2 測站 60cm 採樣管-40cm 處粒徑組成百分比

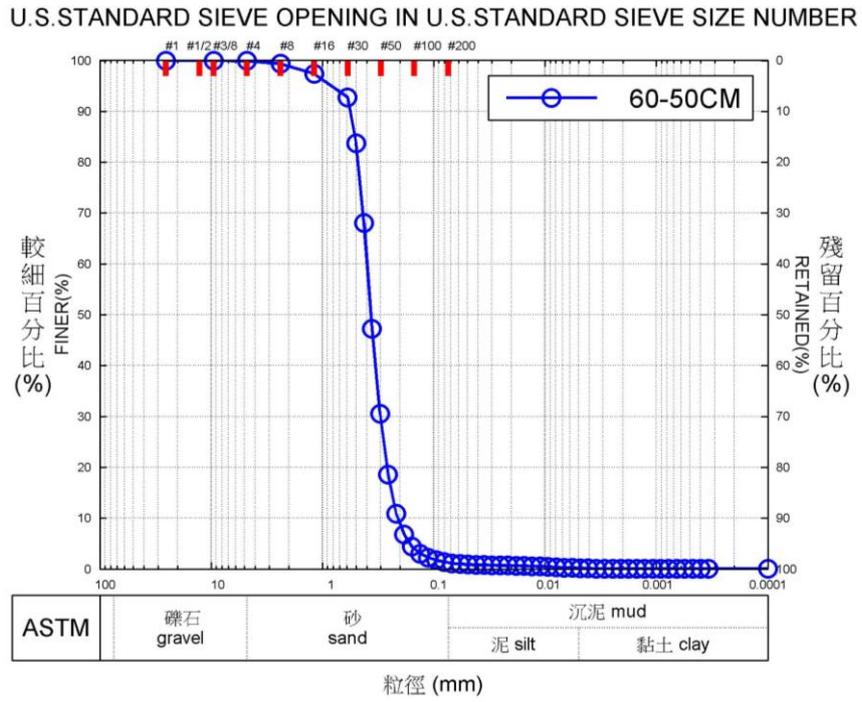


圖 4.39 彰化#2 測站 60cm 採樣管-50cm 處粒徑分佈曲線

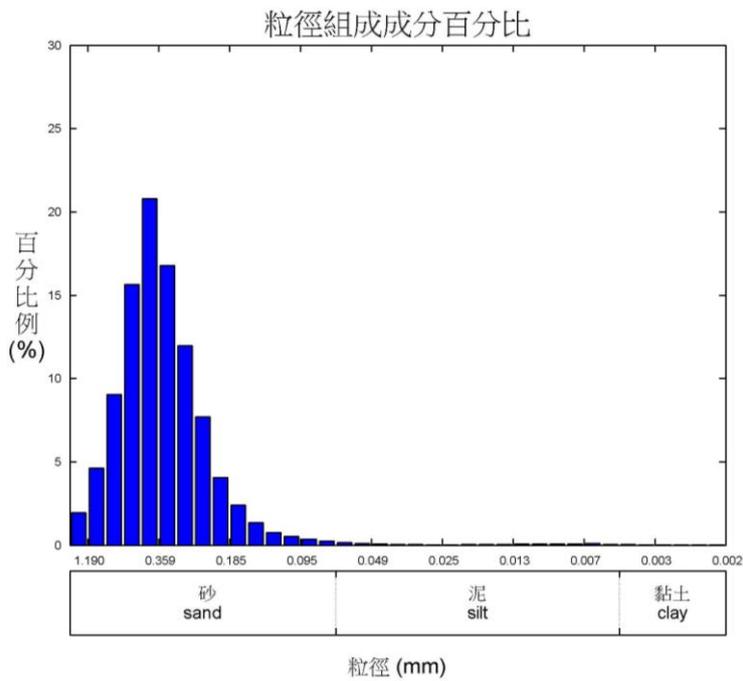


圖 4.40 彰化#2 測站 60cm 採樣管-50cm 處粒徑組成百分比

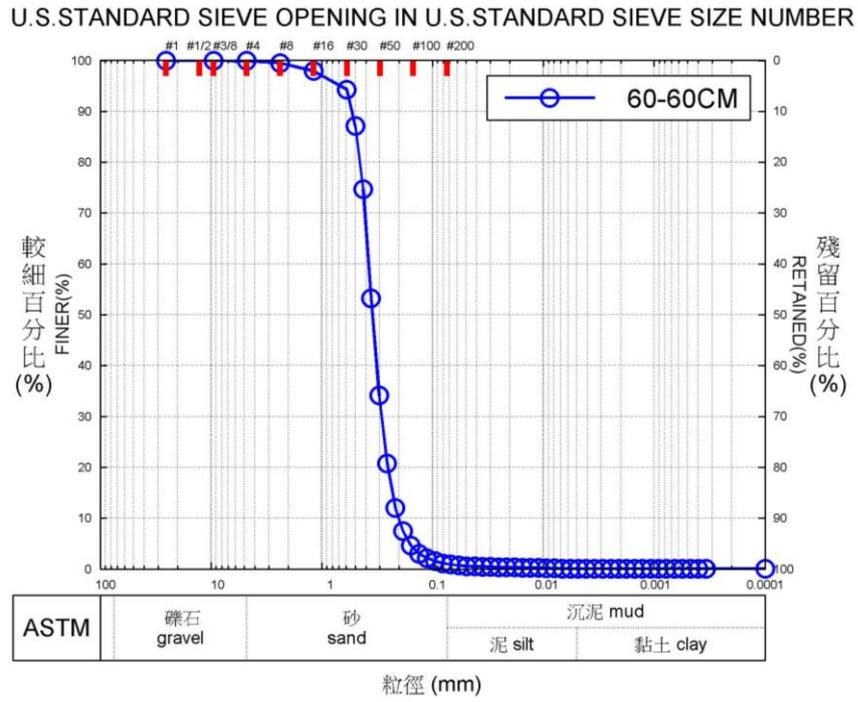


圖 4.41 彰化#2 測站 60cm 採樣管-56cm 處粒徑分佈曲線

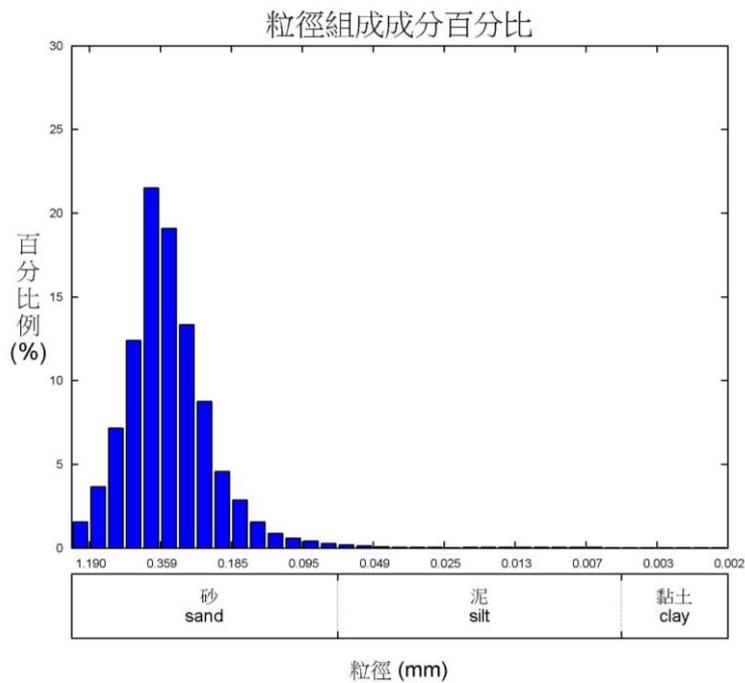


圖 4.42 彰化#2 測站 60cm 採樣管-56cm 處粒徑組成百分比

4.2.3 彰化海域底泥微生物分析(彰化#2)

彰化#2 測站 60cm 長之底泥採樣管，靜置沉降後之深度約為 58 cm，進行 NGS 的底泥深度樣品分別有 L41Trim(0~10cm)、L42Trim(10~20cm)、L43Trim(20~30)cm、L44Trim(30~40cm)、L45Trim(40~50cm)和 L46(50~56)。

六個底泥深度分別定出 118,943、159,813、141,800、193,016、115,224 和 168,383 條 DNA 序列，僅有 0.75%、0.92%、1.05%、0.85%、0.54%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 4.43~圖 4.48 所示；各有 99.09%、98.60%、98.95%、98.89%、99.09%和 99.45%的序列為細菌界(Bacteria Kingdom)；各有 0.16%、0.47%、0.34%、0.26%、0.37%和 0.14%的序列為古菌界(Archaea Kingdom)；有 79,246(66.63%)、107,854(67.49%)、96,424(68%)、129,720(67.21%)、76,023(65.98%)和 115,970(68.87%)條序列能鑑定到 623、657 和 654 個屬；有 53,799(45.23%)、74,026(46.32%)、66,375(46.81%)、88,804 (46.01%)、51,568(44.75%)和 76,434(45.396%)條序列能鑑別出 750、804、744、855、804 和 942 個物種，並比對出與具腐蝕金屬材料之硫酸還原菌^[99]同屬(Genus)之微生物，如：*Desulfovibrio* sp. (脫硫弧菌屬)，*Desulfobacterium* sp. (脫硫桿菌屬)，*Desulfotomaculum* sp. (脫硫腸狀菌)，*Thiobacillus* sp. (硫桿狀菌屬)，*Sulfurospirillum* sp. (硫磺單胞菌屬)，*Leptothrix* sp. (纖毛菌屬)，*Crenothrix* sp. (繡菌屬菌)，*Clostridium* sp. (梭菌屬)，*Flavobacterium*(sp. 黃桿菌屬) *Bacillus* sp. (芽孢桿菌屬)，and *Pseudomonas* sp. (假單胞菌屬)等。彰化海域底泥微生物 DNA 序列分析結果彙整，如表 4-16 所示。

表 4-16 彰化海域底泥微生物 DNA 序列分析結果彙整表

樣品編號	L41Trim	L42Trim	L43Trim
底泥深度(cm)	0~10	10~20	20~30
DNA 序列定出數量(條)	118,943	159,813	141,800
無法鑑定至界(Kingdom) 之百分比(%)	0.75	0.92	1.05
細菌界(Bacteria Kingdom) 百分比(%)	99.09	98.60	98.95
古菌界(Archaea Kingdom) 百分比(%)	0.16	0.47	0.34
鑑定至屬(genus)之百分比(%)	66.63	67.49	68
可鑑別之物種數 (species)	750	804	744

樣品編號	L44Trim	L45Trim	L46Trim
底泥深度(cm)	30~40	40~50	50~56
DNA 序列定出數量(條)	193,016	115,224	168,383
無法鑑定至界(Kingdom)之百分比(%)	0.85	0.54	0.41
細菌界(Bacteria Kingdom) 百分比(%)	98.89	99.09	99.45
古菌界(Archaea Kingdom) 百分比(%)	0.26	0.37	0.14
鑑定至屬(genus)之百分比(%)	67.21	65.98	68.87
可鑑別之物種數 (species)	855	804	942

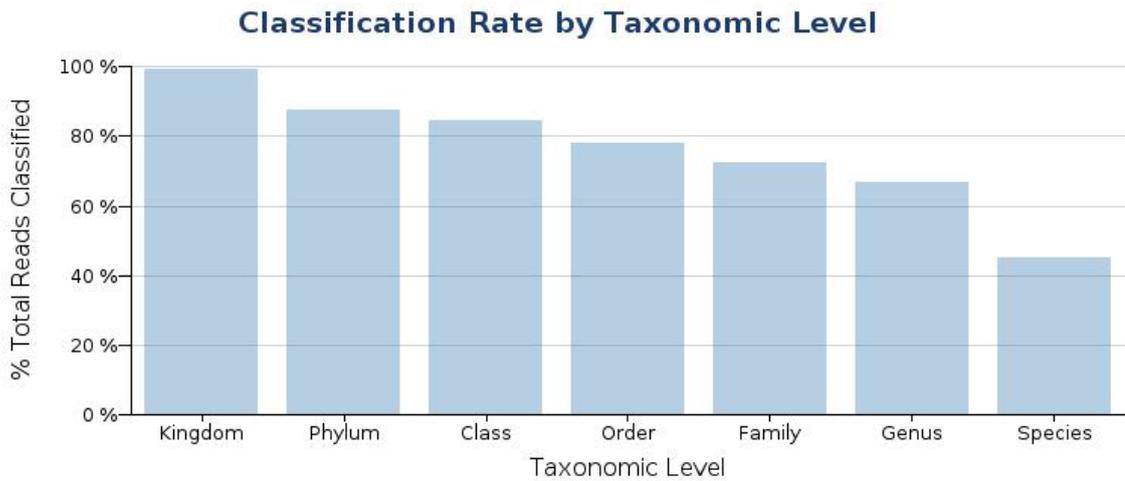


圖 4.43 L41Tim 底泥微生物 DNA 序列各分類位階鑑別結果之比例

(Kingdom: 界; Phylum: 門; Class: 綱; Order: 目; Family: 科; Genus: 屬; Species: 種)

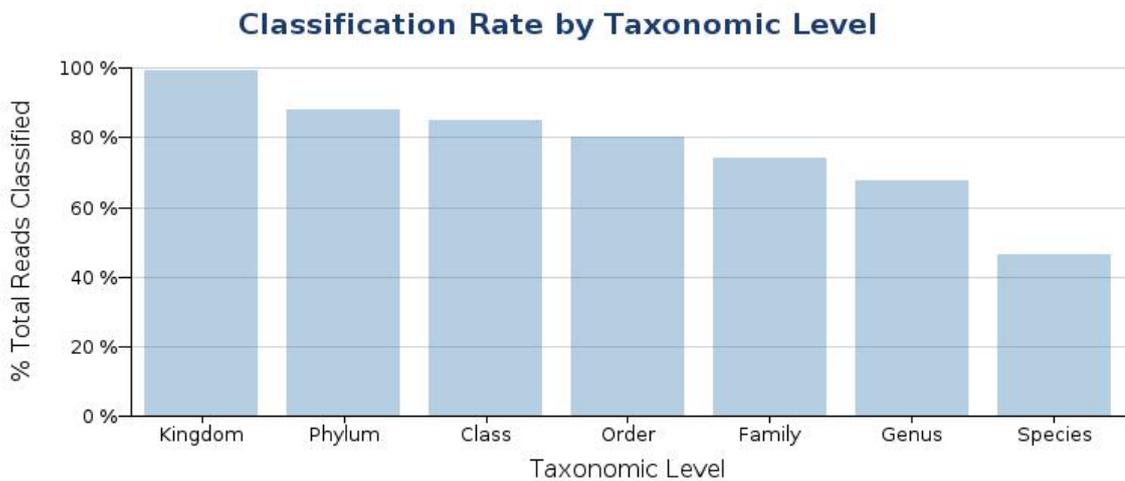


圖 4.44 L42Tim 底泥微生物 DNA 序列各分類位階鑑別結果之比例

(Kingdom: 界; Phylum: 門; Class: 綱; Order: 目; Family: 科; Genus: 屬; Species: 種)

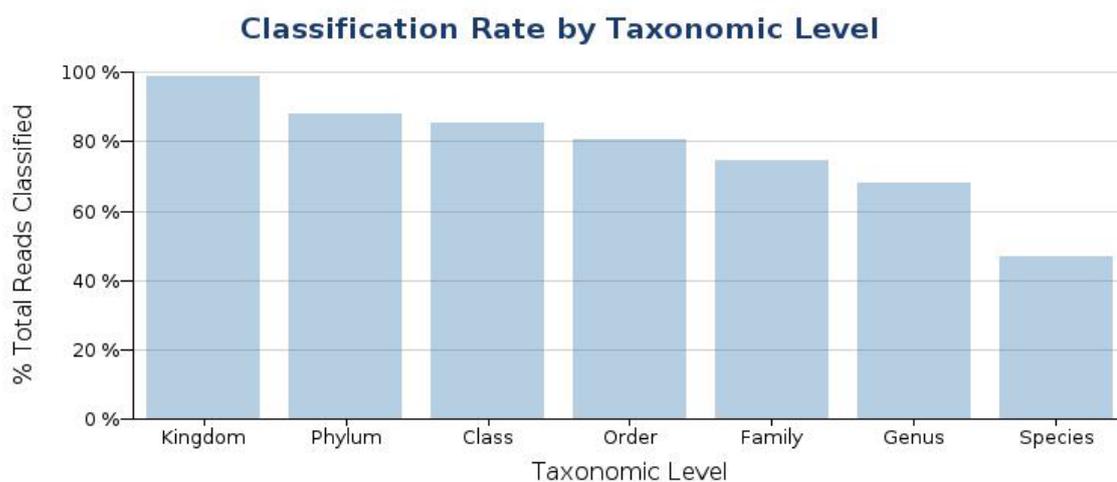


圖 4.45 L43Tim 底泥微生物 DNA 序列各分類位階鑑別結果之比例

(Kingdom: 界; Phylum: 門; Class: 綱; Order: 目; Family: 科; Genus: 屬; Species: 種)

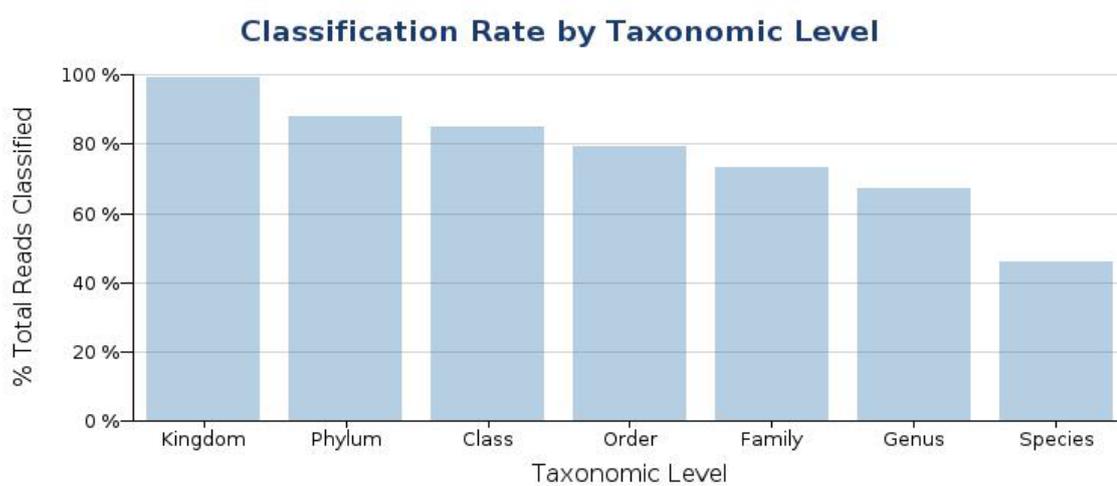


圖 4.46 L44Tim 底泥微生物 DNA 序列各分類位階鑑別結果之比例

(Kingdom: 界; Phylum: 門; Class: 綱; Order: 目; Family: 科; Genus: 屬; Species: 種)

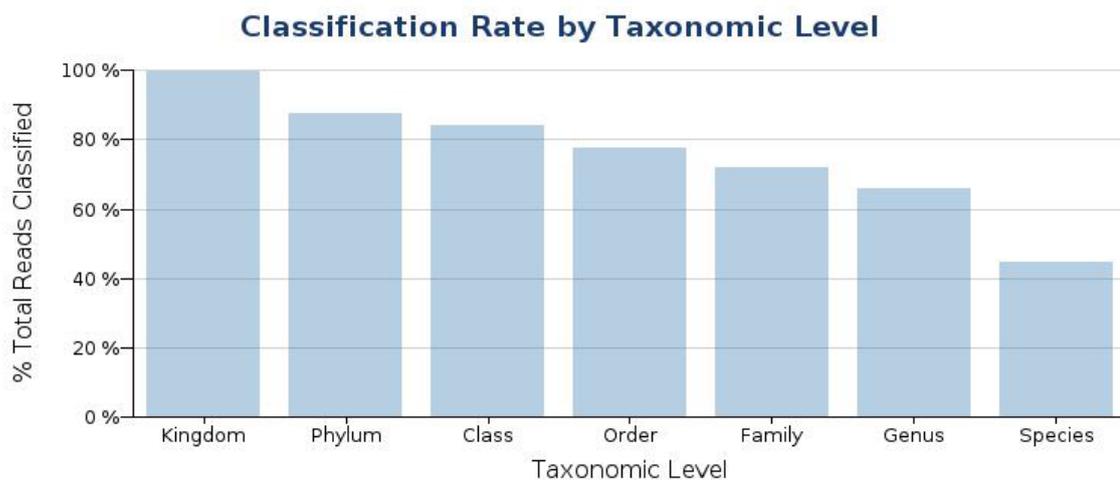


圖 4.47 L45Tim 底泥微生物 DNA 序列各分類位階鑑別結果之比例

(Kingdom: 界; Phylum: 門; Class: 綱; Order: 目; Family: 科; Genus: 屬; Species: 種)

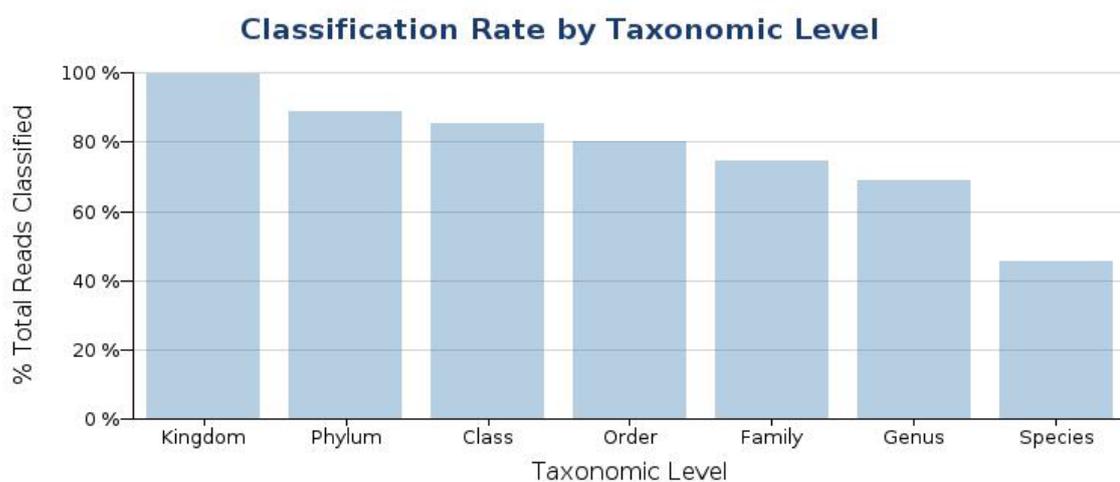


圖 4.48 L46Tim 底泥微生物 DNA 序列各分類位階鑑別結果之比例

(Kingdom: 界; Phylum: 門; Class: 綱; Order: 目; Family: 科; Genus: 屬; Species: 種)

另以屬(genus)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，結果分別顯示深度 10~20cm (L42Trim) 和 20~30cm (L43Trim)、0~10cm(L41Trim) 和 40~50cm (L45Trim) 各自兩個深度間微生物具有較大的相似性，其次為 0~10cm(L41Trim) 、 30~40cm(L44Trim) 和 40~50cm(L45Trim) ， 10~20cm(L42Trim)和 20~30cm(L43Trim)則與其他四個深度底泥微生物的屬組成差異最大，如圖 4.49。圖 4.49 中不同顏色與高度代表不同屬內種類的豐富程度。

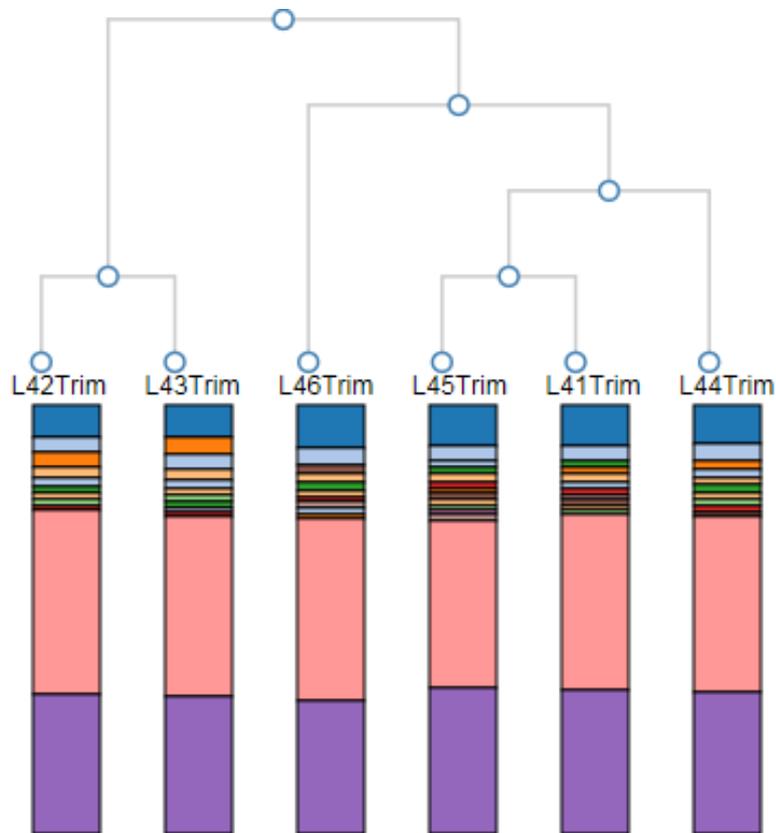


圖 4.49 彰化#2 測站底泥微生物 DNA 分類階層相似性分析圖

4.3 金屬試片調查分析

為深入了解金屬試片於現地水下環境之腐蝕情況，106 度「離岸風電水下技術」計畫，於 107 年 4 月 14 日，進行首次金屬水下暴露試驗架佈放工作，由潛水人員確認試架平穩放置，並繫上紅色浮球，以利未來採樣回收辨識，水下佈放情況如圖 4.50 所示。

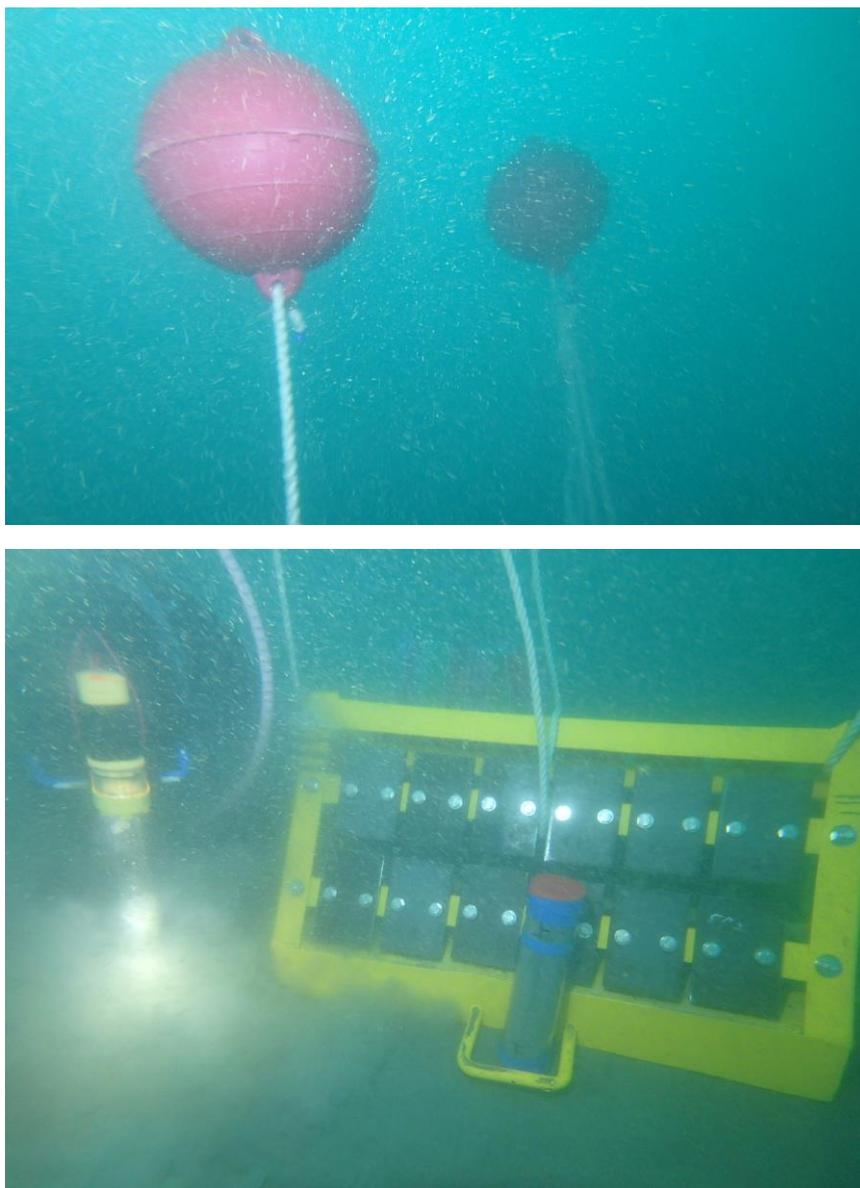


圖 4.50 金屬試架水下佈放情況

(金屬試架繫上浮球，以利辨識)

106 年度金屬水下暴露試驗架佈放於彰化離岸風電第二期海域(彰化#1 測站， $120^{\circ}19'30''E$; $24^{\circ}06'01''N$)，採「(A)A36 碳鋼」、「(B)A572 低合金鋼」兩金屬材質進行試驗，於 107 年 4 月 14 日(春季)進行拋放；並於 107 年 6 月 30 日(夏季)順利完成金屬試片回收作業(圖 4.51)，水下暴露歷時約 2.5 月。

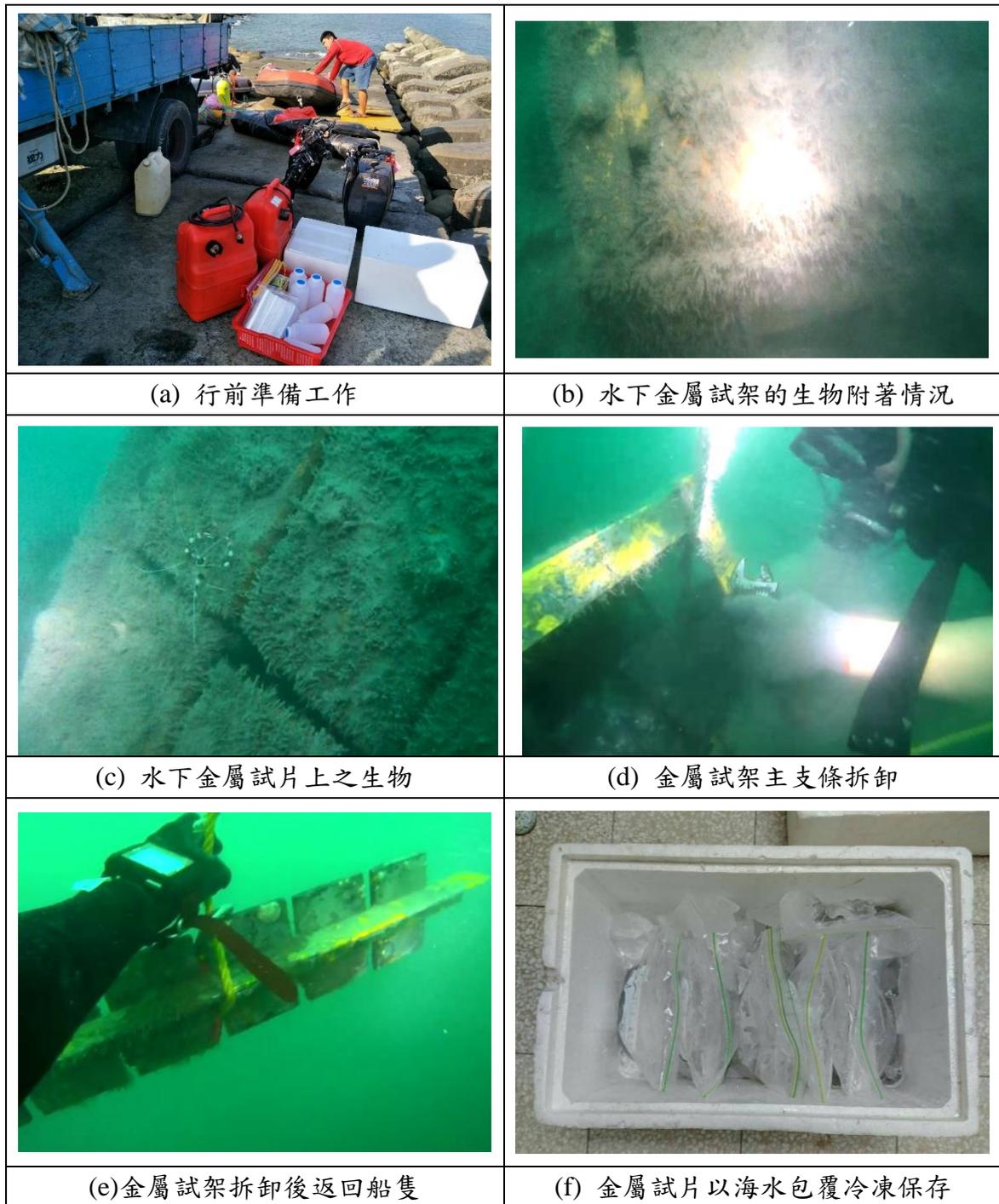


圖 4.51 107 年 6 月 30 日彰化第一場址(彰化#1)金屬試片回收情況

因順利尋獲初探拋放之金屬試架，故 107 年度臺中與彰化海域新增之金屬試架皆沿用相同金屬試架設計製作，臺中及彰化海域分別於 107 年 8 月 5 日及 107 年 8 月 6 日拋放完畢，兩研究海域拋放作業記錄分別如圖 4.52 及圖 4.53 所示。

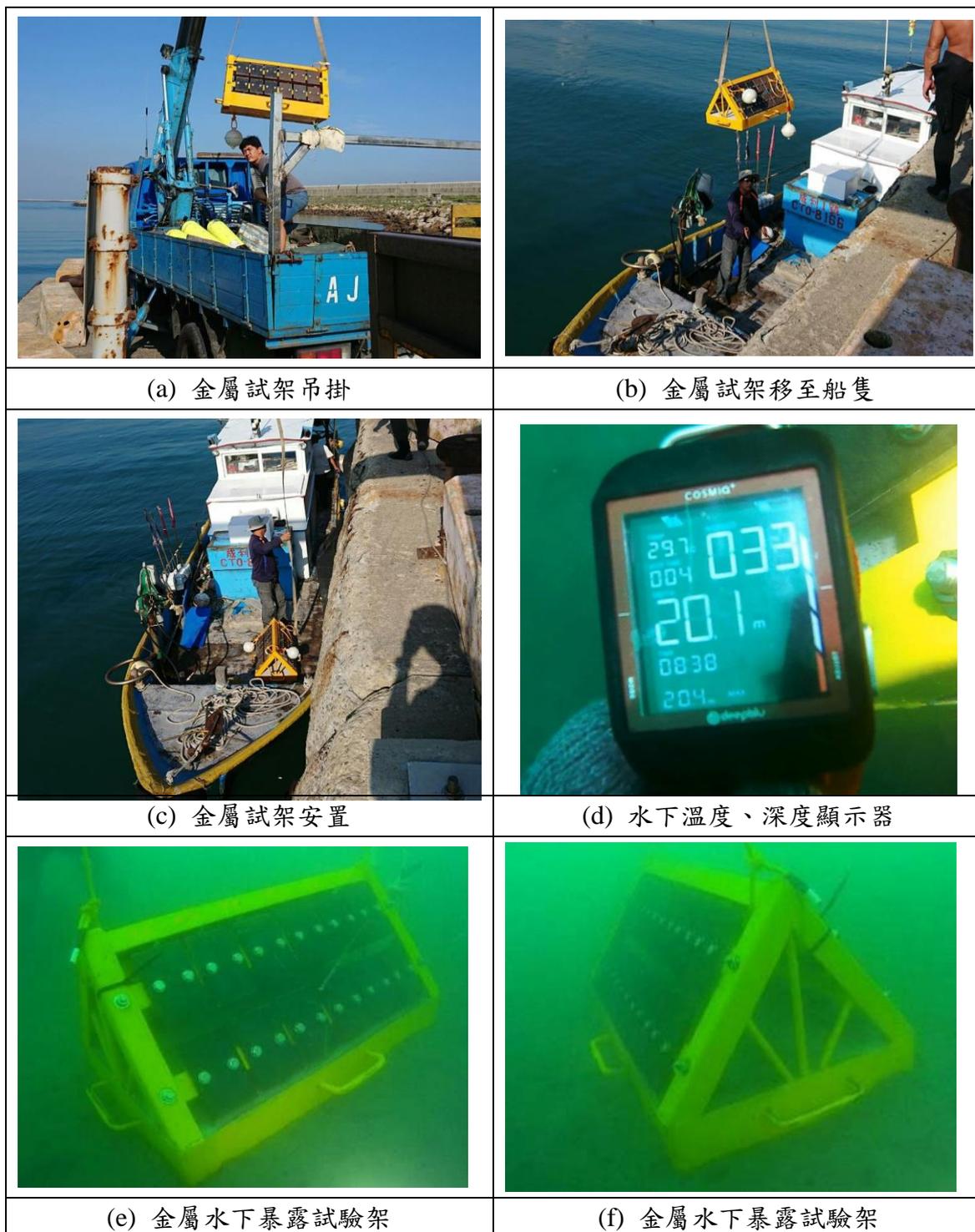


圖 4.52 107 年 8 月 5 日臺中港區(臺中#1)試架拋放情況

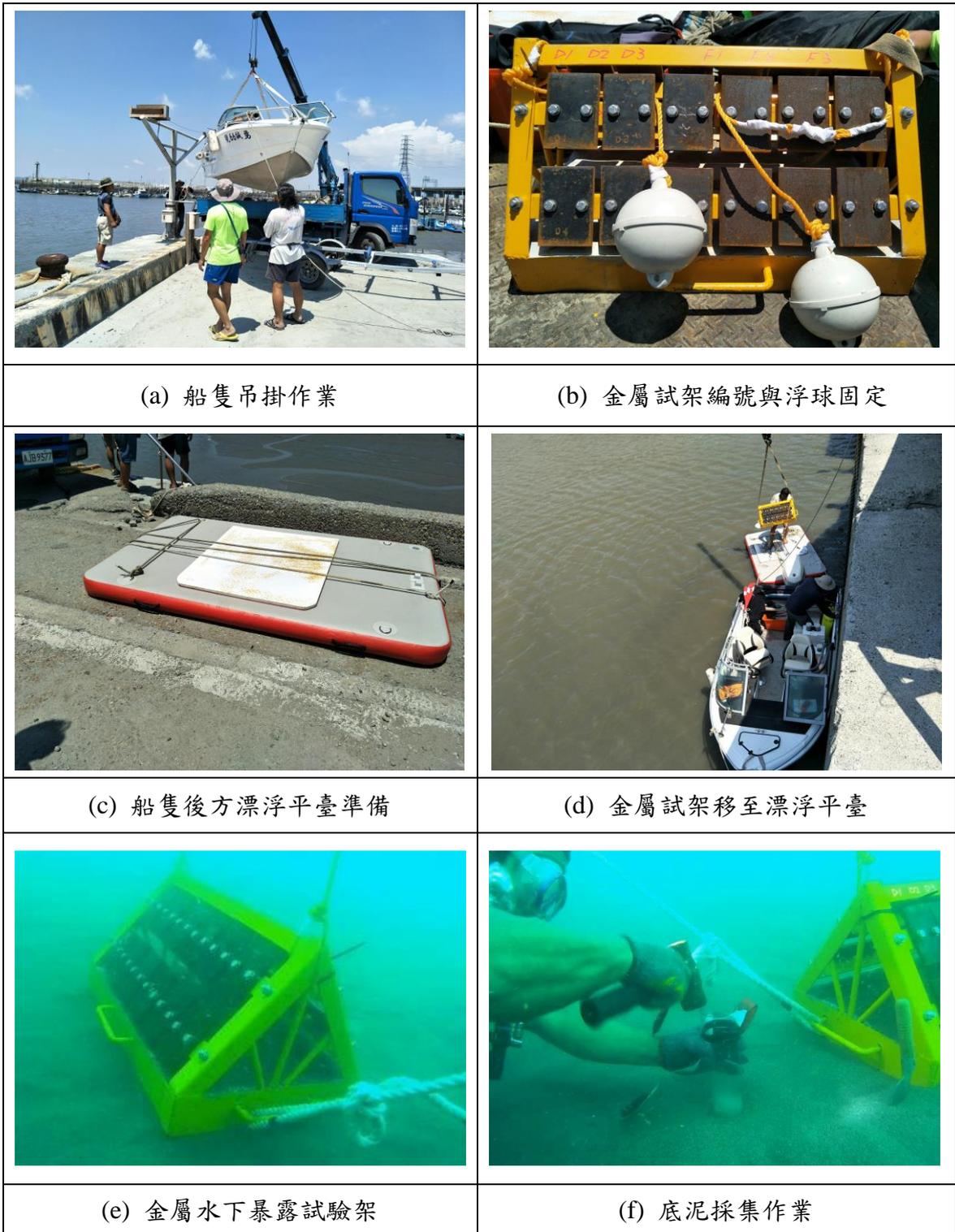


圖 4.53 107 年 8 月 6 日彰化第二場址(彰化#2)試架拋放情況

4.3.1 附著生物調查

彰化第一海域測站，位於 120°19'30"E; 24°06'01"N 處，離岸距離約 4 公里，A 36 碳鋼及 A572 低合金鋼兩金屬材質試片於水下暴露時間約 2.5 月 (107.04.14~ 107.06.30)。船隻現地採集金屬試片記錄如圖 4.54~圖 4.59 所示；攜回實驗室後金屬試片上附著生物分析之研究調查記錄如圖 4.60~圖 4.65 所示。

調查結果顯示，兩金屬材質試片所觀察到的附著生物種類相似，其中苔蘚動物門之種類皆以群體出現，個體數難以計數，故以覆蓋面積(cm^2)代表之。由表 4-17 可知，A 36 碳鋼金屬試片上膜孔苔蟲科 sp. 之附著面積介於 74~109 cm^2 ，血苔蟲科 sp. 附著面積介於 0~53 cm^2 ，*Amathia verticillata* 之附著面積介於 15~42 cm^2 。金屬試片正面藤壺數量為 35~69 個；反面藤壺數量僅 1~20 個。二枚貝類僅出現 0~2 顆，數量並不多。纓鰓蟲類介於 0~10 隻。金屬試片正面可見 3~5 種生物，生物總量為 153~197；試片反面可見 5~6 種生物，生物總量介於 126~189。

由表 4-18 可知，A572 低合金鋼金屬試片上膜孔苔蟲科 sp. 之附著面積介於 76~101 cm^2 ；血苔蟲科 sp. 附著面積介於 0~47 cm^2 ；*Amathia verticillata* 之附著面積介於 25~44 cm^2 。金屬試片正面之藤壺數量為 49~68 個；反面藤壺數量僅 17~31 個。二枚貝類僅出現 0~2 顆，纓鰓蟲類正、反面分別發現為 7~47 隻及 5~7 隻。A572 低合金鋼發現非附著性生物端足類 sp. 有 1 隻在 B3 反面及槍蝦科 sp. 有 2 隻在 B1。金屬試片正、反兩面可見 6~7 種生物，生物總量介於 158~240，正、反兩面的生物總數及種類數差異並不大。

金屬試片上以苔蘚動物門(Phylum Bryozoa)為主，有平鋪大面積的苔蘚蟲如圖 4.66 之白色格狀與紅棕色片狀，及樹枝狀等外部形態，苔蘚蟲通常成群相鄰出現；有關臺灣苔蘚蟲的文獻非常稀少，Gluhak *et al.* (2007)^[100]才發表第一篇關於臺灣苔蘚蟲的期刊論文，Dan *et al.* 於 2016 才又發表了一種臺灣新記錄種^[101]。白色格狀苔蘚蟲應屬於窄唇綱(Class Stenolaemata) 唇口目(Order Cheilostomata)膜孔苔蟲科(Family

Membraniporidae)的種類，紅棕色片狀苔蘚蟲屬於唇口目的血苔蟲科 (Family Watersiporidae)，而樹枝狀的苔蘚蟲應是廣泛分布於大西洋、太平洋海域與地中海的櫛口目 (Order Ctenostomata) Vesiculariidae (科) 的 *Amathia verticillata* [101]。以解剖顯微鏡觀察發現膜孔苔蟲科和血苔蟲科彼此沒有重疊附著的現象，二者相鄰處有發現明顯界線；而膜孔苔蟲科和 *A. verticillata* 則可附著在藤壺、貝類和多毛類的鈣化殼上(圖 4.67)；膜孔苔蟲科的苔蘚蟲出現在各試片之機率最大且會覆蓋在，*Amathia verticillata* 次之；血苔蟲科之苔蘚蟲僅出現在 A36 碳鋼的 A2 和 A3 反面，以及和 A572 低合金鋼 B1 和 B2 反面，試片正面並未有分布情況出現。

藤壺則發現紋藤壺和網紋藤壺兩種，以紋藤壺數量較多，紋藤壺繁殖期長達 5~10 個月，附著後 2~3 個月可長成最大體積；藤壺附著於兩種金屬材質正面的數量皆明顯高於反面。另有會形成石灰質外殼多毛類的纓鰓蟲類出現，纓鰓蟲類在 A36 碳鋼的 A3、A572 低合金鋼的 B1 和 B3 附著的數量正面明顯高於反面，其餘則不明顯。只有少數的二枚貝附著，其中多為牡蠣，部份二枚貝脫落，只觀察到明顯附著痕跡。大致上看來，兩種材質的正面生物量較多，正、反面種類數差異不大，反面的豐富度較高；A572 低合金鋼的生物優勢指數和歧異度指數較高，顯示 A572 的生物多樣性較高；兩種材質的生物分布均勻度正面皆高於反面。

分析各金屬試片上之相似性，如圖 4.68 所示。以 A1 正面和 A2 正面的相似性最高；四組相似性為次高，分別為 A1、A2、B2 和 B3 正面，A1 反面和 A3 正面，A3 和 B3 反面，以及 A2 和 B1 反面等；而 A1 反面、A3 正面、A3 反面、B3 反面和 B2 反面相似性居第三。由目前分析結果來看，附著生物棲息在碳鋼和低合金兩種材質並未有差異。

另分析金屬試片之各海洋附著性生物與金屬腐蝕速率之相關性如表 4-19 所示。根據目前的 6 塊金屬試片分析，並未發現腐蝕速率與附著性生物有明顯相關性；僅發現僅膜孔苔蟲科 sp.與血苔蟲科 sp.有明顯負相關，與觀察到此二者均平鋪於試片表面且有明顯分界之特性符合。



(a) A 36 碳鋼，A1，正面



(b) A 36 碳鋼，A1，反面

圖 4.54 金屬試片船隻現地採集記錄---A 36 碳鋼(A1)



(a) A 36 碳鋼，A2，正面



(b) A 36 碳鋼，A2，反面

圖 4.55 金屬試片船隻現地採集記錄---A 36 碳鋼(A2)



(a) A 36 碳鋼，A3，正面



(b) A 36 碳鋼，A3，反面

圖 4.56 金屬試片船隻現地採集記錄---A 36 碳鋼(A3)



(a) A572 低合金鋼，B1，正面



(b) A572 低合金鋼，B1，反面

圖 4.57 金屬試片船隻現地採集記錄--- A572 低合金鋼(B1)



(a) A572 低合金鋼，B2，正面



(b) A572 低合金鋼，B2，反面

圖 4.58 金屬試片船隻現地採集記錄--- A572 低合金鋼(B2)



(a) A572 低合金鋼，B3，正面



(b) A572 低合金鋼，B3，反面

圖 4.59 金屬試片船隻現地採集記錄--- A572 低合金鋼(B3)



(a) A 36 碳鋼，A1，正面



(b) A 36 碳鋼，A1，反面

圖 4.60 金屬試片研究調查記錄---A 36 碳鋼(A1)



(a) A 36 碳鋼，A2，正面



(b) A 36 碳鋼，A2，反面

圖 4.61 金屬試片研究調查記錄---A 36 碳鋼(A2)



(a) A 36 碳鋼，A3，正面



(b) A 36 碳鋼，A3，反面

圖 4.62 金屬試片研究調查記錄---A 36 碳鋼(A3)



(a) A572 低合金鋼，B1，正面



(b) A572 低合金鋼，B1，反面

圖 4.63 金屬試片研究調查記錄--- A572 低合金鋼(B1)



(a) A572 低合金鋼，B2，正面



(b) A572 低合金鋼，B2，反面

圖 4.64 金屬試片研究調查記錄--- A572 低合金鋼(B2)



(a) A572 低合金鋼，B3，正面



(b) A572 低合金鋼，B3，反面

圖 4.65 金屬試片研究調查記錄--- A572 低合金鋼(B3)

表 4-17 彰化#1 測站 A 36 碳鋼金屬試片之海洋生物附著狀況

Plate Type	A 36 碳鋼(正面)			A 36 碳鋼(反面)		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
試片編碼	A1	A2	A3	A1	A2	A3
*膜孔苔蟲 科 sp.	103	102	89	88	74	109
*血苔蟲科 sp.	0	0	0	0	53	15
* <i>Amathia verticillata</i>	17	23	17	15	15	42
藤壺	69	58	35	13	1	20
二枚貝類	2	0	2	1	0	1
纓鰓蟲類	6	0	10	9	1	2
非附著性生物						
總和	197	183	153	126	144	189
種類數	5	3	5	5	5	6
豐度指數 (SR)	0.76	0.38	0.80	0.83	0.80	0.95
優勢性指數 (1/D)	0.60	0.57	0.59	0.48	0.59	0.60
歧異度指數 (H')	1.07	0.95	1.13	0.97	1.01	1.17
均勻度指數 (J')	0.67	0.87	0.70	0.60	0.63	0.65

*苔蘚動物個體數難以計數，故以覆蓋面積(cm²)表示

表 4-18 彰化#1 測站 A572 低合金鋼金屬試片之海洋生物附著狀況

Plate Type	A572 低合金鋼(正面)			A572 低合金鋼(反面)		
	B1	B2	B3	B1	B2	B3
試片編碼						
*膜孔苔蟲科 sp.	97	95	94	76	96	101
*血苔蟲科 sp.	0	0	0	47	23	0
* <i>Amathia verticillata</i>	44	38	25	25	36	32
藤壺	49	68	58	19	31	17
二枚貝類	2	0	0	1	1	2
纓鰓蟲類	47	7	19	5	7	5
非附著性生物						
端足類 sp.	0	0	0	0	0	1
槍蝦科 sp.	1	0	0	1	0	0
總和	240	208	196	174	194	158
種類數	7	6	6	7	6	6
豐度指數 (SR)	0.91	0.56	0.57	1.16	0.95	0.99
優勢性指數 (1/D)	0.72	0.65	0.66	0.70	0.68	0.54
歧異度指數 (H')	1.38	1.15	1.20	1.40	1.35	1.05
均勻度指數 (J')	0.72	0.83	0.87	0.72	0.76	0.58

*苔蘚動物個體數難以計數，故以覆蓋面積(cm²)表示



(a) 白色鈣化格狀



(b) 紅棕色片狀



(c) 樹枝狀

圖 4.66 金屬試片上苔蘚蟲之外部形態



圖 4.67 膜孔苔蟲科和 *Amathia verticillata* 之附着情況

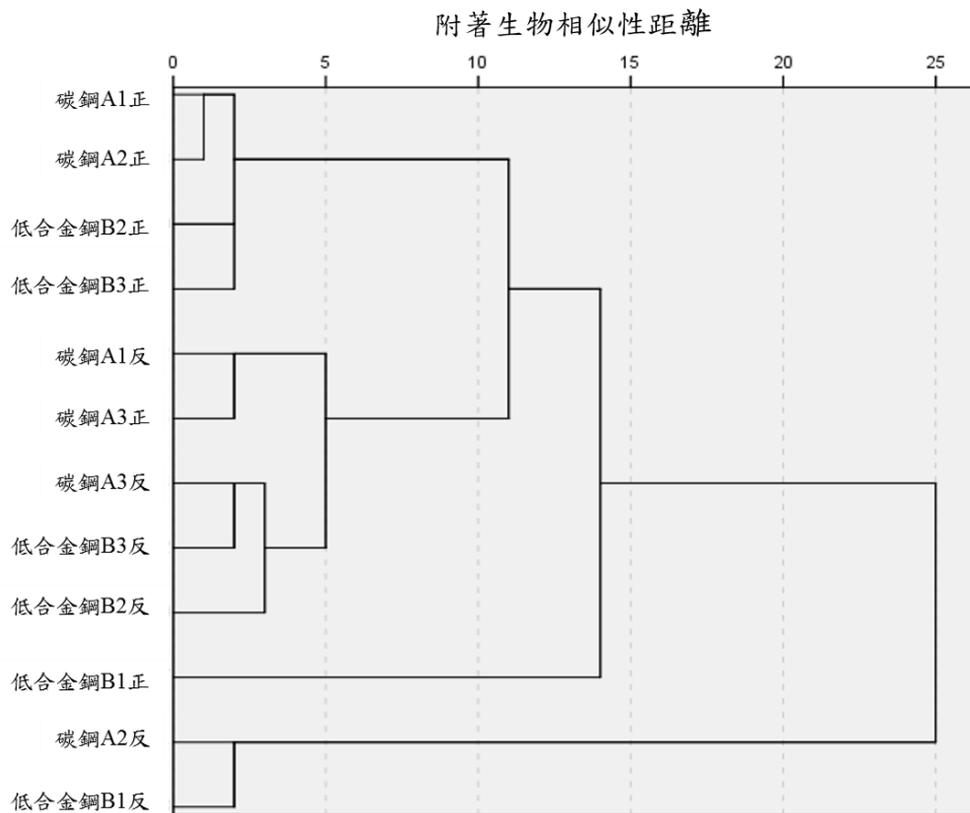


圖 4.68 各金屬試片海洋生物附着之相似性分析圖

表 4-19 彰化#1 測站金屬試片之海洋附著性生物與腐蝕速率相關性分析

	膜孔苔蟲科 sp.	血苔蟲科 sp.	<i>Amathia verticillata</i>	藤壺	二枚貝類	纓鰓蟲類	腐蝕速率
膜孔苔蟲科 sp.	1						
血苔蟲科 sp.	-0.875*	1					
<i>Amathia verticillata</i>	.041	.146	1				
藤壺	.218	-.352	.287	1			
二枚貝類	.291	-.465	.095	-.117	1		
纓鰓蟲類	-.375	.143	.513	.040	.570	1	
腐蝕速率	.126	-.485	-.617	.306	.431	-.019	1

*在顯著水準為 0.05 時，為相關顯著。

4.4 彰化海域金屬試片腐蝕速率分析

早期研究報告指出，金屬在海水中的腐蝕行為，會因海水中的 pH 值、氯離子濃度、溫度、溶氧量、水流速度、海生物附著、菌類活動、以及污染程度等參數的影響而產生不同的腐蝕現象。故本次水下金屬暴露試驗之金屬試片，經表面附著生物調查分析後，接續進行金屬試片腐蝕速率分析。

彰化海域金屬試片分析結果，如表 4-20 所示，由金屬試片暴露前後之重量變化可知，A36 碳鋼試片之原始重量介於 1137.8-1155.9 g 之間；經水下暴露 2.5 個月後，重量遞減至 1124.9-1145.3 g，經計算，A36 碳鋼腐蝕速率介於 188.1-407.9 $\mu\text{m}/\text{yr}$ 。A572 低合金鋼試片之原始重量介於 1138.2-1143.9 g；經水下暴露 2.5 個月後，重量遞減至 1126.0-1132.3g，A572 低合金鋼平均腐蝕速率介於 196.9-214.5 $\mu\text{m}/\text{yr}$ 。各金屬試片清洗記錄，如圖 4.69~圖 4.74 所示。

表 4-20 彰化海域金屬試片分析結果

試片編號	A36 碳鋼			A572 低合金鋼		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3
原始重量(g)	1148.1	1137.8	1155.9	1138.2	1142.6	1143.9
試驗後重量(g)	1124.9	1127.1	1145.3	1126.0	1131.4	1132.3
重量變化(g)	23.2	10.7	10.6	12.2	11.2	11.6
表面積(cm^2)	350	350	350	350	350	350
密度(g/cm^3)	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8
腐蝕速率(mm/yr)	0.408	0.188	0.186	0.215	0.197	0.204
腐蝕速率($\mu\text{m}/\text{yr}$)	407.9	188.1	186.4	214.5	196.9	204.0



(a) A36 碳鋼，A1，正面



(b) A36 碳鋼，A1，反面

圖 4.69 金屬試片清洗記錄--- A36 碳鋼(A1)



(a) A36 碳鋼，A2，正面



(b) A36 碳鋼，A2，反面

圖 4.70 金屬試片清洗記錄--- A36 碳鋼(A2)



(a) A36 碳鋼，A3，正面



(b) A36 碳鋼，A3，反面

圖 4.71 金屬試片清洗記錄--- A36 碳鋼(A3)



(a) A572 低合金鋼，B1，正面



(b) A572 低合金鋼，B1，反面

圖 4.72 金屬試片清洗記錄--- A572 低合金鋼(B1)



(a) A572 低合金鋼，B2，正面



(b) A572 低合金鋼，B2，反面

圖 4.73 金屬試片清洗記錄--- A572 低合金鋼(B2)



(a) A572 低合金鋼，B3，正面



(b) A572 低合金鋼，B3，反面

圖 4.74 金屬試片清洗記錄--- A572 低合金鋼(B3)

由圖 4.69 (a)可發現，A1 金屬試片邊緣有著顯著不平滑現象出現，且同與 A36 碳鋼之 A2、A3 金屬試片相比，其腐蝕速率高達兩倍之多(圖 4.75)，然 A1 金屬試片之附著生物，多大面附著於金屬試片表面，且 A1 金屬試片之附著生物量並無顯著高於 A2 及 A3，由此可知，附著生物並非影響 A1 金屬試片腐蝕之主要成因。由於 A1 金屬試片邊緣呈現明顯不規則狀，其試片安裝於試架最外側之處(圖 4.76)，推測可能因外力碰撞衝擊、磨損所導致。為避免外力因素影響金屬試片之腐蝕速率評估，故 A36 碳鋼取 A2 及 A3 進行平均腐蝕速率計算，計算後，A36 碳鋼之平均腐蝕速率為 $187.3\mu\text{m}/\text{yr}$ ；A572 低合金鋼平均腐蝕速率為 $205.1\mu\text{m}/\text{yr}$ 。歷時 2.5 月之水下金屬暴露實驗顯示，A36 碳鋼平均腐蝕速率小於 A572 低合金鋼。

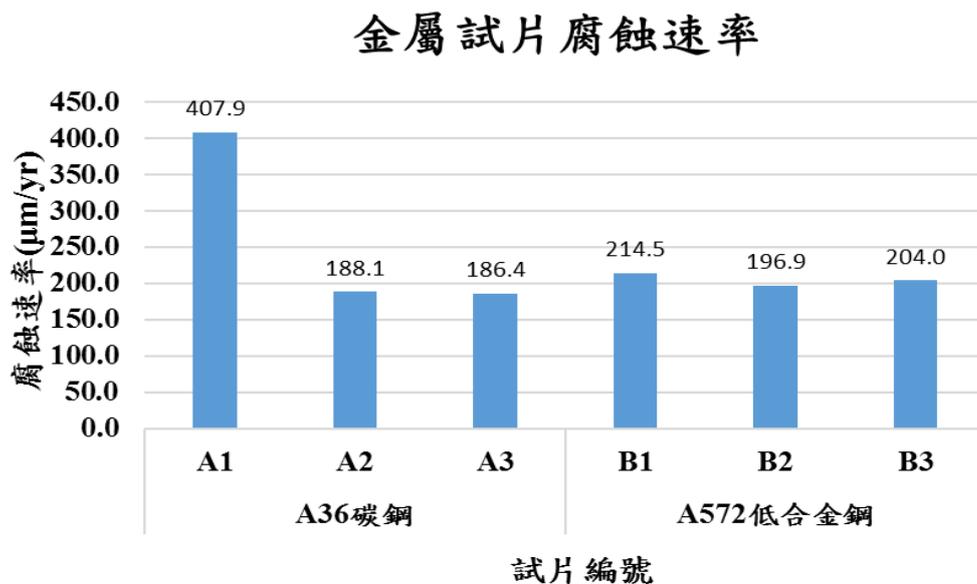


圖 4.75 彰化海域 A36 碳鋼金屬試片腐蝕速率

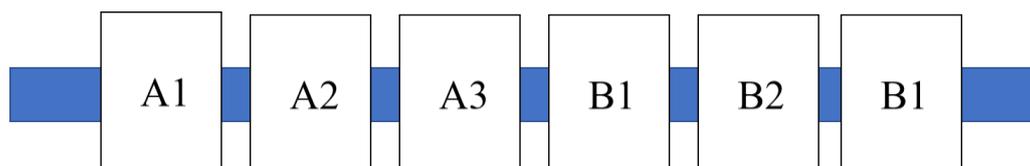


圖 4.76 金屬試片排列示意圖

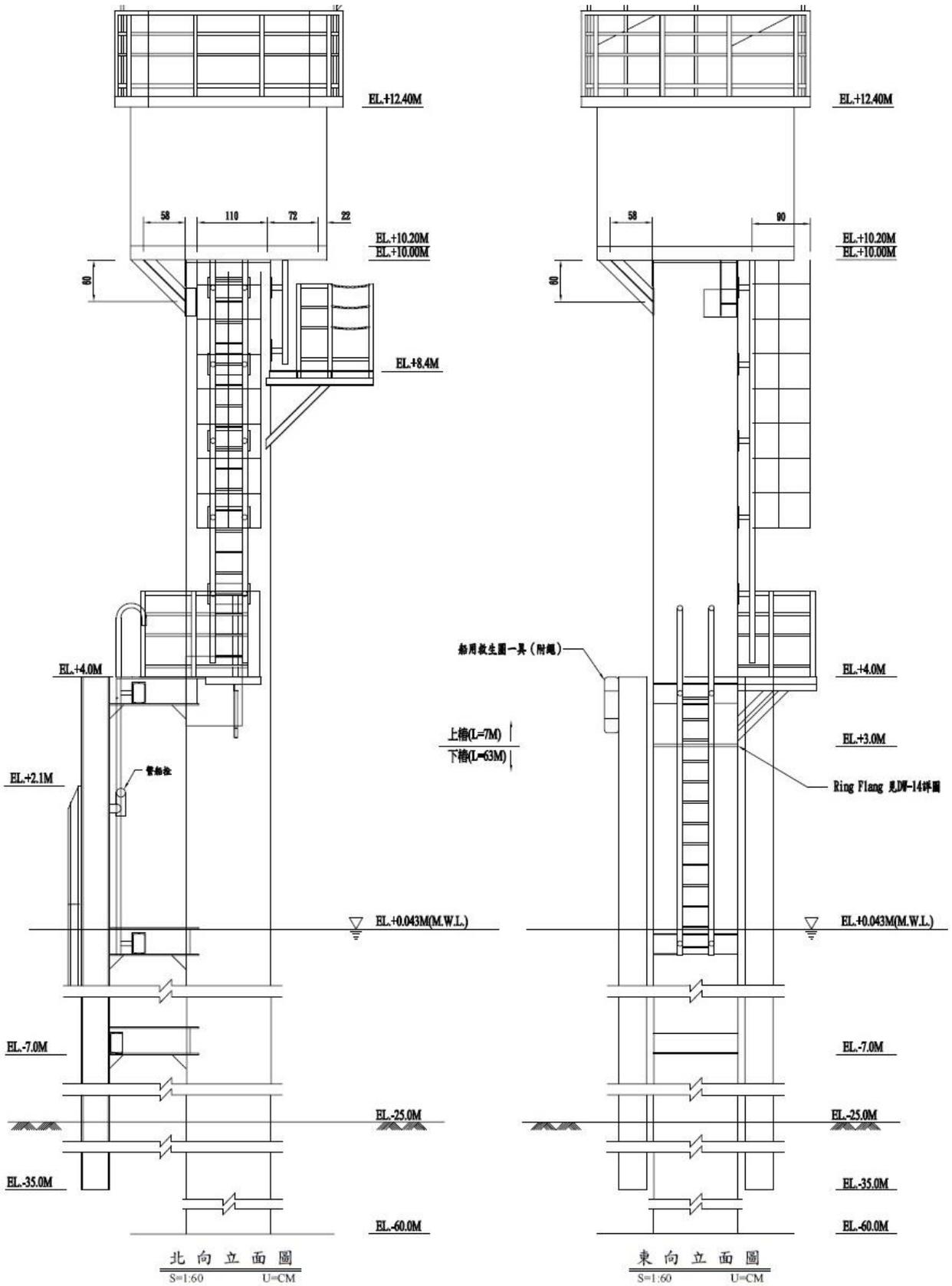
5.1 基樁防蝕系統規劃

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，為使試驗調查順利進行，本計畫於「臺中港海氣象觀測樁」之條件進行基樁腐蝕監測系統規劃與設計，透過監測設備安裝，依據現地量測之海水相關環境參數建立數值模型，以現地量測之電位變化情況推估防蝕系統成效，藉以建立基礎基樁腐蝕監測系統，供後續維運之參考及應用。本研究於 107 年 8 月 29 日，至 106 號碼頭進行相關環境現勘，瞭解海氣象觀測樁體施工作業流程，以利相關監測系統之規劃作業。臺中港海氣象觀測樁現場作業情況，如圖 5.2 所示。



圖 5.2 臺中港海氣象觀測樁之焊接作業

依「臺中港海氣象觀測樁製作及打設工程」之規劃，海氣象觀測樁依暴露分別選用陰極防蝕、塗層塗覆及防蝕帶工法相互搭配，以強化海氣象觀測樁之防蝕效能。臺中港海氣象觀測樁之立面配置如圖 5.3 所示；潮位資料如表 5-1 所示。



(圖片資料來源：：交通部，臺中港海氣象觀測樁細部設計圖說，2017)

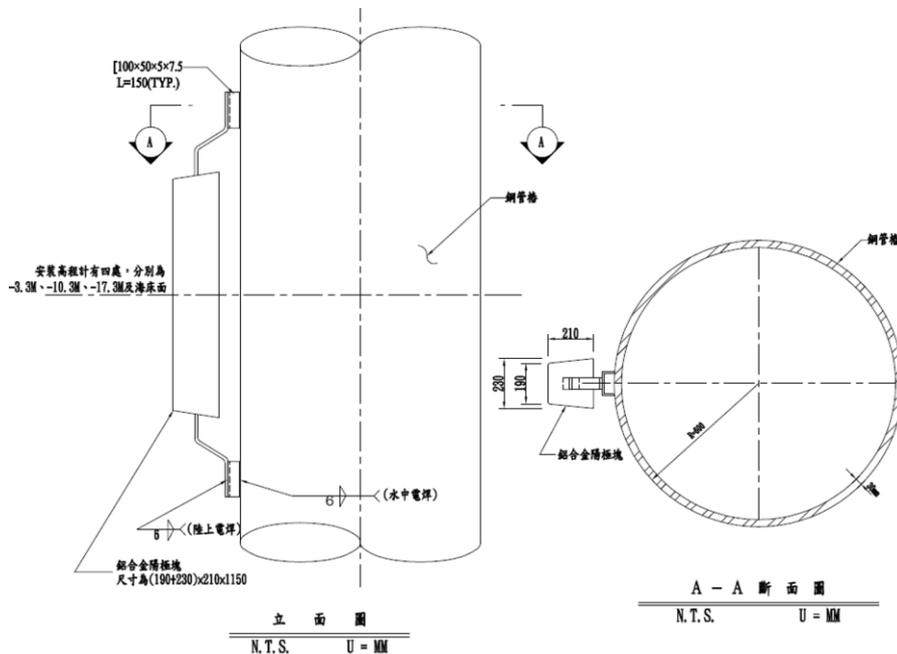
圖 5.3 臺中港海氣象觀測樁之立面配置圖

表 5-1 臺中港海氣象觀測樁潮位資料表

潮位	高度(m)
最高高潮位	+3.338
平均高潮位	+2.083
平均潮位	+0.043
平均低潮位	-2.012
最低低潮位	-3.187

測量成果採用中潮系統
(資料來源：交通部，臺中港海氣象觀測樁細部設計圖說，2017)

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，選用高固值厚塗柏油環氧漆塗覆，水下環境選用防蝕效果安定之陰極防蝕施作，選用鋁合金作為陽極金屬塊，分別安裝於-3.3m、-10.3 m、-17.3 m 及海床面(圖 5.4)，飛濺區與潮間區則採用玻璃纖維強化塑膠 (Fiber-reinforced plastic, FRP) 或聚氯乙稀 (Polyvinylchloride, PVC)保護套包裹，減緩海水衝擊，強化海氣象觀測樁之防蝕效能。



(圖片資料來源：交通部，臺中港海氣象觀測樁細部設計圖說，2017)

圖 5.4 陰極防蝕處理圖

5.1.1 腐蝕監測系統配置

根據氣象觀測樁體之環境特性，擬以沒水區作為分界，區分為沒水區上部(包含大氣區、飛濺區及潮差區)及沒水區兩大區域進行腐蝕監測規劃。

沒水區上部，因位處水位之上，多依循監測週期，定期進行相關腐蝕量測。為瞭解海氣象觀測樁之防蝕系統保護情況，沒水區以上之大氣區、飛濺區及潮差區還可藉由腐蝕區域厚度變化來瞭解金屬腐蝕之情況。為避免不規則表面干擾，腐蝕監測採用雙晶探頭(圖 5.5)，其中包含一組發射晶片及一組接收晶片，搭配超音波測厚儀之波形顯示(圖 5.6)進行量測與紀錄。



(圖片資料來源：<https://www.olympus-ims.com/zh/applications/corrosion-gaging-dual-element-transducers/>)

圖 5.5 雙晶探頭



(圖片資料來源：：<https://www.olympus-ims.com/zh/applications/corrosion-gaging-dual-element-transducers/>)

圖 5.6 金屬氧化層量測波形顯示界面

沒水區，因整體結構物皆浸泡於海水介質中不易觀察，故多透過水下機器人探針或成像技術監測，透過直觀拍攝照片及錄影觀察水下金屬結構之腐蝕狀況。考量臺中港區海域現地波浪、輸砂、水下擾動等多種因素皆可能導致濁度不佳，影響紀錄品質，故建議設置連續水下監測系統，持續監測金屬電位變化以推估其水下腐蝕情況。

臺中港海氣象觀測樁防蝕系統規劃所需之儀器包含：腐蝕速率監測記錄器、高內阻抗數位電表、參考電極及腐蝕探頭等，相關系統配置示意圖，如圖 5.7 所示。

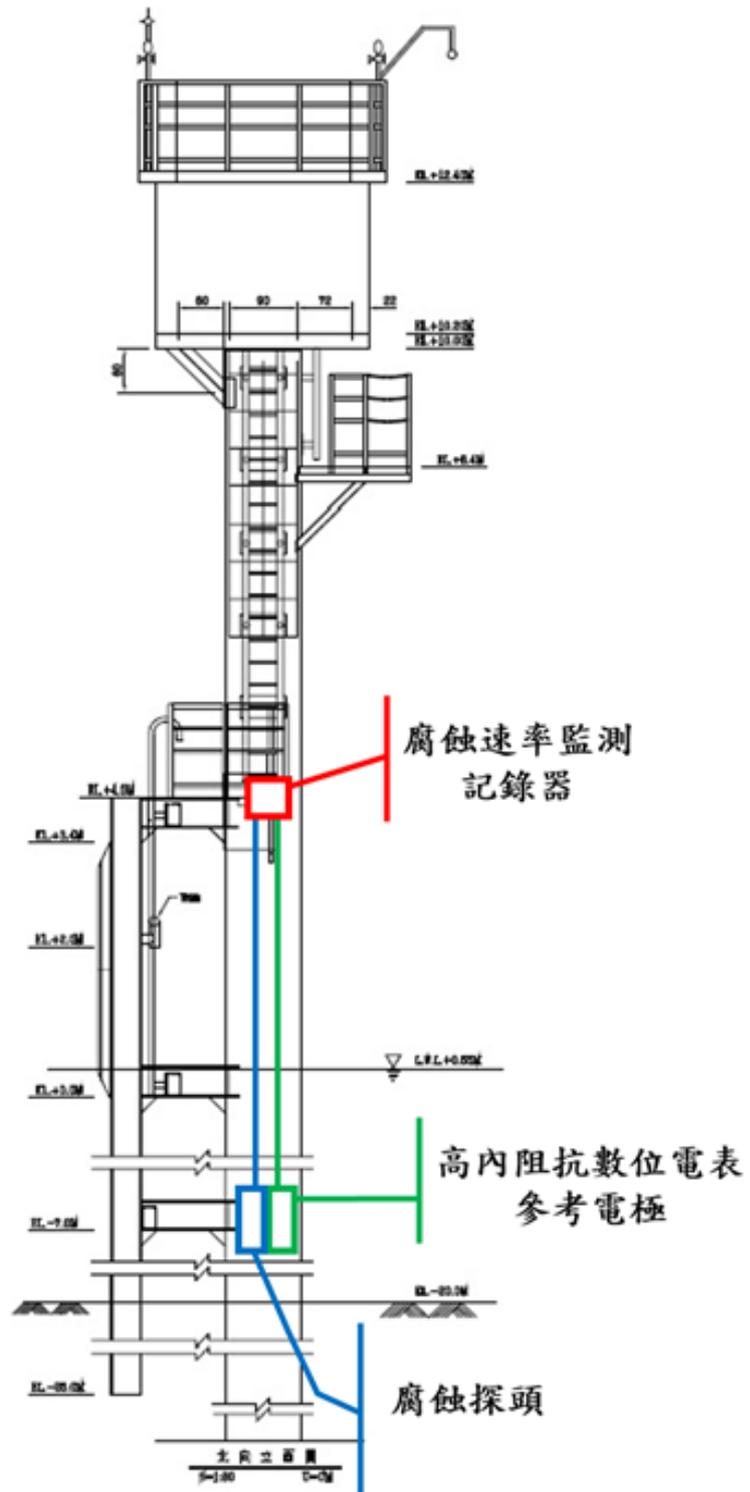
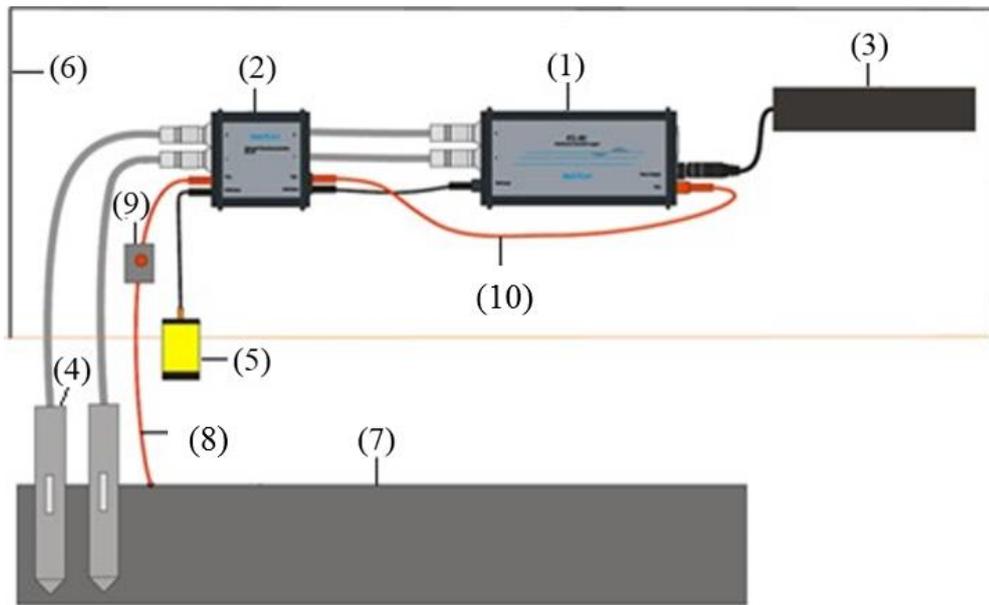


圖 5.7 腐蝕監測系統配置示意圖

5.1.2 腐蝕監測系統簡介

1. 腐蝕速率監測記錄器(Metricorr ICL-02i)：須放置於水面上，乾燥通風良好之環境中，其設備包含 Metricorr 記錄器、腐蝕探頭(ER Probe)、以及量測電位用之參考電極，腐蝕速率監測系統架構如圖 5.8 所示。



(1)	記錄器	(6)	防水保護盒
(2)	擴充瞬間保護模組	(7)	結構物(氣象觀測樁)
(3)	電池或電源	(8)	測試引線
(4)	腐蝕試片	(9)	訊號傳輸器
(5)	參考電極	(10)	訊號傳輸線

圖 5.8 腐蝕速率監測系統架構圖

腐蝕監測系統中，僅有「腐蝕速率監測記錄器」需用電源，可採 6428 mAh 電力之蓄電池，此電量可維持一年期之運作，另可結合太陽能板進行供電，若如氣象觀測樁具電力轉換設備，即可使用專屬變壓器(12V)，連接 110V 插頭以供給電源運作。

2. 測量電位之銀/氯化銀參考電極(STAPERM Model AG-4-PT2, 表 5-2) 需與高內阻抗數位電表(FLUKE-177, 表 5-3)搭配使用, 預計放置於平均低潮位下 1m 處, 其導線穿配進腐蝕速率監測記錄器內。
3. 腐蝕速率監測記錄器中之腐蝕探頭(ER Probe), 預計置放於平均低潮位下 1m 處, 其導線穿配進腐蝕速率監測記錄器內, 進行連續性監測, 腐蝕速率監測記錄器及腐蝕探頭規格, 詳見表 5-4。後續訊號傳輸器將透過海底電纜光纖將訊號傳回陸地, 其電位相對「參考電極」作為標準進行記錄, 接續再以腐蝕速率監測記錄器之附屬軟體(M-Config PC Software)加以分析。

腐蝕速率監測記錄器於安裝前, 先以 M-Config PC Software 軟體設定監測起始時間、紀錄頻率以及監測參數...等, 待實地安裝後, 即可啟動數據記錄功能, 定期利用網路, 以 e-mail 形式將監測數據回傳。傳輸訊號格式與相關介面, 如表 5-5 所示。

腐蝕監測系統觀測氣象觀測樁之保護電位與原始腐蝕電位進行比較, 即可推估防蝕系統成效; 透過持續觀測與數據蒐集, 可預先察覺系統設備異常等問題, 得以及早評估適宜之維修處理方式, 以減少人力與經費耗損。此外, 彙整長期監測資料, 輔以現地水溫、鹽度、pH、導電度等數據, 進行基樁腐蝕電位模擬, 逐步進行參數修正, 將可提出更適宜現地防腐蝕系統規劃之建議, 有助於海上結構物安全與使用壽命之延長。

表 5-2 銀/氯化銀電極參考電極外觀規格表

	項目	規格描述
	尺寸	1" dia. × 8" long
	重量	1.0 Lbs
	工作範圍	中等~輕微電位

表 5-3 高內阻抗數位電表外觀規格表

	
項目	規格描述
交流電電壓 (True-RMS)	0.1 mV ~ 1000 V [1 kHz]
直流電電壓	0.1 mV ~ 1000 V
連續性	beeper guaranteed on < 25Ω, guaranteed off > 250Ω; detects opens or shorts of 250μs or longer.
電阻	0.1Ω ~ 50.00 MΩ
二極體試驗	2.400 V
電容	1 nF ~ 9999 uF
交流電電流 (True-RMS)	0.01 mA ~ 10.00 A [20.00 A over-range for 30 seconds]
直流電電流	0.01 mA ~ 10.00 A [20.00 A over-range for 30 seconds]
頻率	2 Hz ~ 50 kHz
溫度(179 型)	-40°C ~ +400°C / -40°F ~ +752°F
直流電電壓準確率	0.09%
交流電電壓準確率	1.0 %

表 5-4 腐蝕速率監測記錄器(Metricorr)及腐蝕探頭(ER Probe)規格

Technical data

@ 23°C ± +/- 3°C

ER resistance	
TCR, -20°C – +60°C	< ±1 ppm/°C
Drift	< ±1 ppm/y
Range	0 – 80 mΩ
Repeatability (2σ)	0.4 μΩ
Precision (4σ)	0.8 μΩ



Extended Transient Protection



Current	
Range	300 mA _{rms}
Resolution	1 μA
AC accuracy	±4 μA ± 1% rdg.
DC accuracy	±1 μA ± 1% rdg.
Shunt resistance	20 Ω

Voltage	
Input resistance	2.2 MΩ
Range	100 V
Resolution	1 mV
AC accuracy	± 1 mV ± 1% rdg.
DC accuracy	± 1 mV ± 1% rdg.

CE conformance	
	EN61326-1: 1997
	Amendment A1: 1998
	Amendment A2: 2001

ICL-02i basic pack includes	
ICL-02i	
Extended Transient Protection, ETP, 20 kA – 8/20 μsec	
Test certificate	
DC power cable	

ICL-02i accessory pack includes	
CD rom with M-Config	
Printed Operating manual	
USB – RS232 converter	
RS232 cable, 2 m	
AC/DC adaptor 100–240 V AC / 12 V DC	

Connections	
Communication	Serial RS232 subD (f) 9 pin
Pipe / Reference	Safety socket 4 mm
ER probe	ODU mini snap socket, 10 pin
Power	2.5 x 5.5 mm DC socket



Sockets for ER coupons

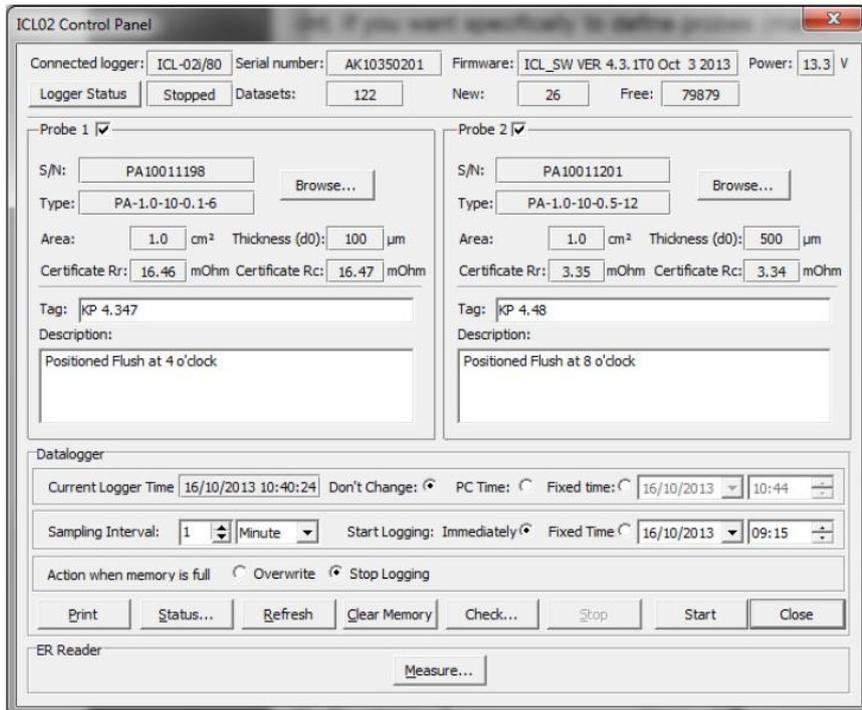
Communication and power



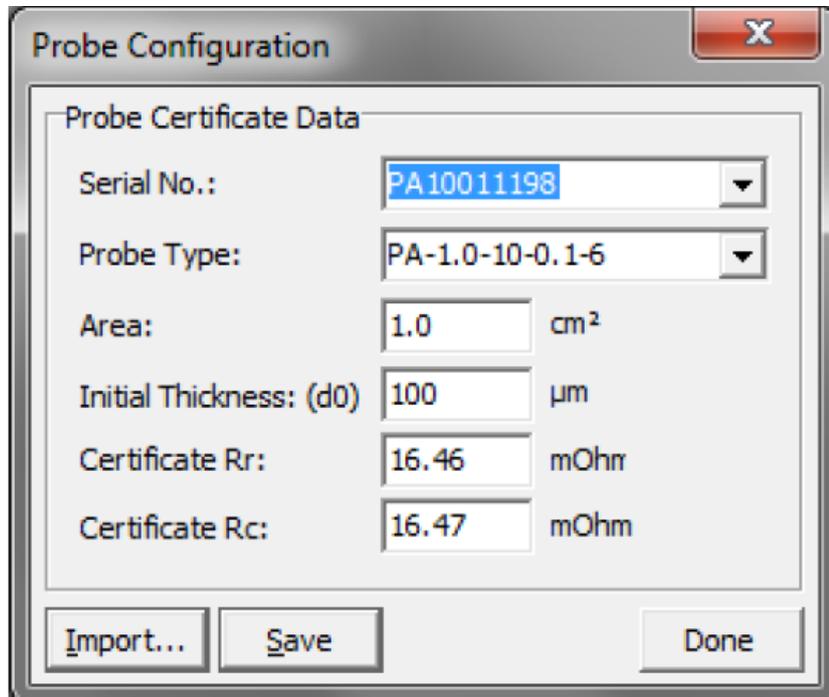
General	
Storage capacity	80,000 readings
Logging interval	10 min – ∞, Recommended 1 hour
Power requirement	11 – 15 V, 1A
Operating conditions	-40 – +60°C 0 – 95 % RH non condensing
Transient protection	1100 V for 150 ms
Extended Transient Protection, ETP	20 kA – 8/20 μsec
Weight (ICL / ETP)	400 / 350 g
Size (ICL) LxWxH	185 x 85 x 35 mm
Size (ETP) LxWxH	95 x 85 x 35 mm

Options	
Skywave – Wireless communication, GSM/GPRS	
Web service – data presentation	
M-Report Presentation SW, included with Web Service	
Test post with solar power system	
Primary battery 15 V – 16 Ah	
AC/DC power 100–240 V AC / 12 V DC for DIN rail	
DIN rail fixture - N35	

表 5-5 腐蝕速率監測系統傳輸訊號格式與介面範例

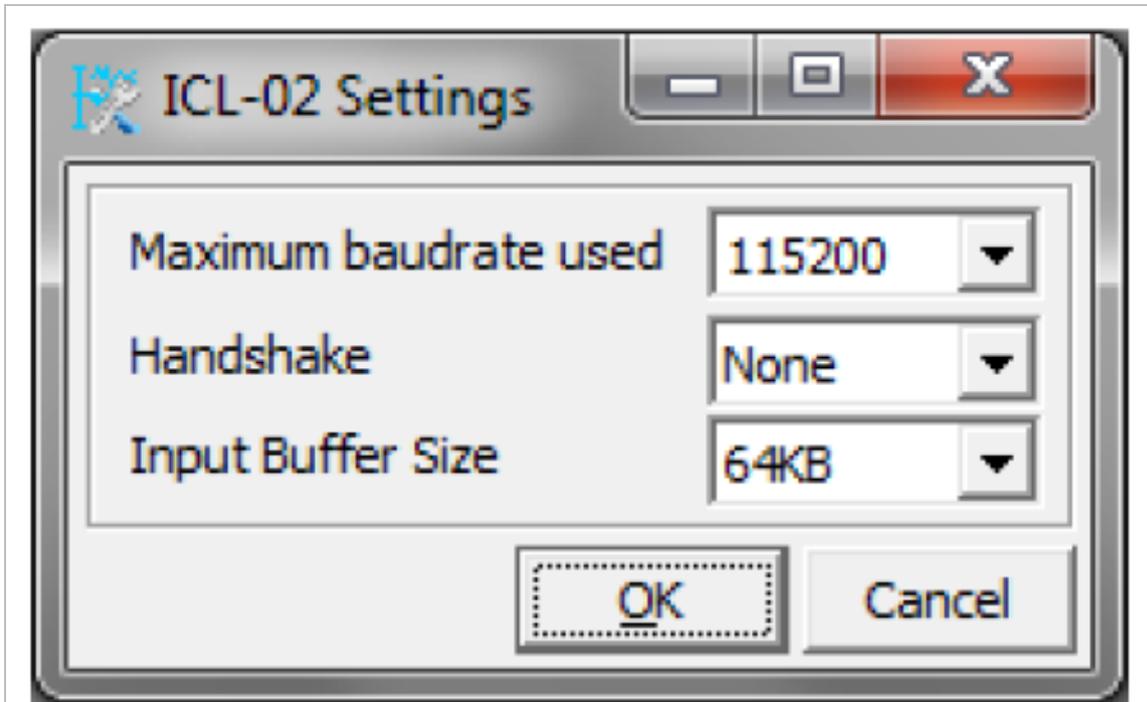


(a) 腐蝕監測系統控制介面

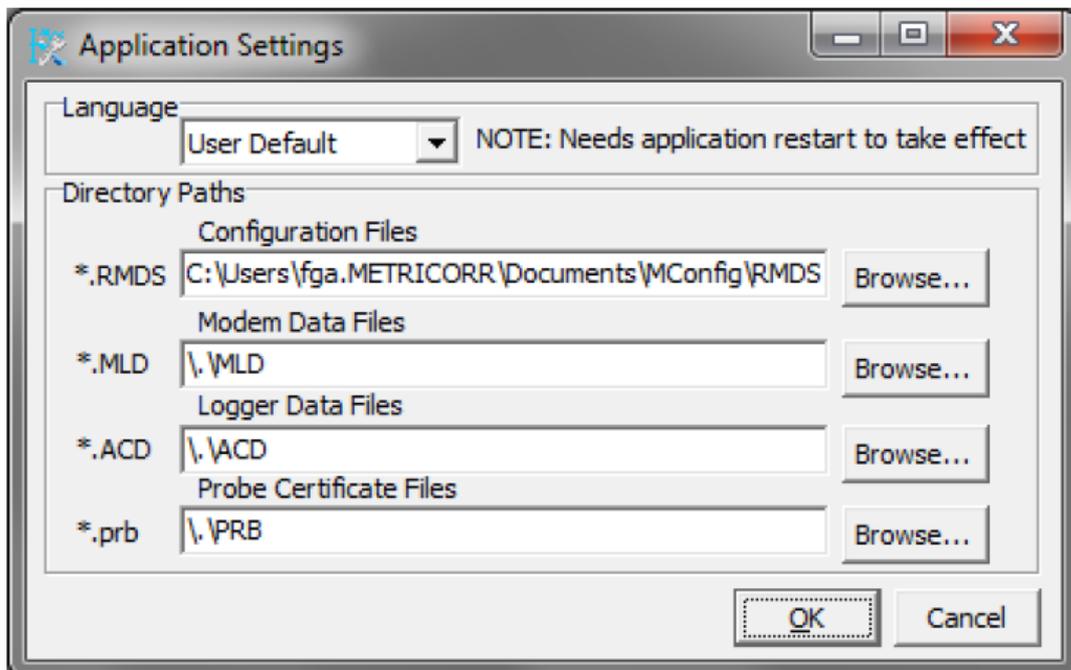


(b) 腐蝕監測系統參數設定介面(1)

表 5-5 腐蝕速率監測系統傳輸訊號格式與介面範例(續)



(c) 腐蝕監測系統參數設定介面(2)



(d) 腐蝕監測系統訊號傳輸格式(*.ACD 檔)

第六章 結論與建議

本計畫針對臺中港區及彰化離岸風場預定海域進行「金屬水下暴露試驗」，調查金屬材料水下腐蝕與及海洋附著生物附著情況；同時延續 106 年度「離岸風電水下技術研發」計畫，持續進行現地海域水質、底泥粒徑、底泥微生物調查與分析，建立離岸風電基樁海域之生地化特性資料。此外，並依臺中海氣象觀測樁之設置條件，規劃與設計腐蝕監測系統。

6.1 結論

1. 經 107 年調查結果顯示，臺中港區海域，冬、夏兩季之鹽度與 pH 變化並無顯著差異，水溫則因季節呈現夏高冬低之趨勢，夏季浮游植物生長繁盛，但其溶氧並無同步提升，彰化離岸風電預定海域於近岸測站(彰化#1)春季鉛濃度(0.11 mg/L) 高於乙類海洋環境品質標準之規範，夏季 pH 值為 6.7，其值明顯低於一般海水之 pH 值。整體而言，彰化海域於春、夏兩季浮游植物生長最為繁盛，推測是因陽光充裕，利於水中浮游植物生長而導致，春季葉綠素 a 濃度可高達 8.29 μ g/L。
2. 臺中及彰化海域底泥表層 60cm 之採樣調查與粒徑分析結果顯示，臺中港區海域底泥平均粒徑(D_m)介於 96.430 μ m ~116.975 μ m，調查之海床底下各深度皆無礫石，整體大致以砂質為主(可達 66%)；彰化海域泥平均粒徑(D_m)介於 296.757 μ m ~323.797 μ m，各深度皆無礫石；底泥的砂含量高於 95%，於垂直深度 30cm 處之砂含量最低。

3. 臺中港區海域和彰化海域底泥經微生物菌種分析後，均比對出與具腐蝕金屬材料之硫酸還原菌同屬 (Genus) 之微生物，如：*Desulfovibrio* sp. (脫硫弧菌屬), *Desulfobacterium* sp. (脫硫桿菌屬), *Desulfotomaculum* sp. (脫硫腸狀菌), *Thiobacillus* sp. (硫桿狀菌屬), *Sulfurospirillum* sp. (硫磺單胞菌屬), *Leptothrix* sp. (纖毛菌屬), *Crenothrix* sp. (繡菌屬菌), *Clostridium* sp. (梭菌屬), *Flavobacterium*(sp. 黃桿菌屬) *Bacillus* sp. (芽孢桿菌屬), and *Pseudomonas* sp. (假單胞菌屬)等，然部分微生物之 DNA 序列並不存在於現有資料庫中，可能為臺灣尚未發表之微生物新種。
4. 彰化海域金屬水下暴露試驗之海洋生物附著調查結果顯示，A36 碳鋼及 A572 低合金鋼二種金屬試片所觀察到的附著生物種類相似，無明顯差異。金屬試片附著生物以苔蘚蟲為主，其次有藤壺、纓鰓蟲類及少數的二枚貝附著。兩種材質之金屬試片正面生物量較多，金屬試片反面背向潮流，故反面豐富度較高，正、反面種類數差異不大，血苔蟲科之苔蘚蟲只出現在金屬試片反面；A572 低合金鋼的生物多樣性較高；兩種材質的生物分布均勻度正面皆高於反面(107 年 4 月 14 日至 107 年 6 月 30 日間)。
5. 彰化海域金屬水下暴露試驗，金屬腐蝕速率分析結果顯示，A36 碳鋼平均腐蝕速率為 187.3 $\mu\text{m}/\text{yr}$ ；A572 低合金鋼平均腐蝕速率則為 205.1 $\mu\text{m}/\text{yr}$ ，A36 碳鋼平均腐蝕速率小於 A572 低合金鋼(107 年 4 月 14 日至 107 年 6 月 30 日間)。
6. 配合臺中港海氣象觀測樁規劃腐蝕監測系統，沒水區上部(包含大氣區、飛濺區及潮差區)因位處水位之上，多依循監測週期，定期進行相關腐蝕量測，可藉由腐蝕區域厚度變化來瞭解金屬腐蝕情況；沒水區因整體結構物皆浸泡於海水介質中不易觀察，建議設置連續水下監測系統，持續監測金屬電位變化，推估其水下腐蝕情況。

6.2 建議

1. 本研究之海水水質、海床底泥等環境調查皆於 107 年度進行採樣工作，然海洋環境與生物分布受海域、洋流、季節等多重因子交互影響，故欲掌握特定海域之生地化特性，建議以「季」作為估測週期，持續進行 2-3 年之現地觀察，以進立基礎海域背景參數值。
2. 臺中與彰化海域，可於「春季」加強相關海上結構物之維護觀測與除污定檢等工作，以延長海上結構物使用年限，以及相關監測儀器之穩定度。
3. 臺中港區及彰化海域底泥經微生物菌種分析後發現，部分微生物 DNA 序列並未出現於現有資料庫中，可能為臺灣特有之微生物，若須深入了解海域底泥與微生物特性，建議進一步進行後續「種 (species)」之分析。
4. 本研究透過金屬試架建置、拋放進行水下金屬暴露試驗，然水下環境受颱風、或冬季季風所造成之強勁水流影響，甚或淤沙掩埋、拖網勾拉等因素而造成位移，故建議將試驗金屬依附於固定樁體上進行試驗，即可大幅減低遺失風險。

6.3 預期效益與應用情形

本計畫針對離岸風機基樁與金屬構件腐蝕防治進行現地調查及實驗分析，成果可建立本土化之資料及金屬腐蝕之速率，提供相關單位作為未來離岸風機基樁與金屬構件腐蝕防治研究之參考。如：台灣電力、中國鋼鐵、經濟部工業局等。

參考文獻

- [1] Global Wind Energy Council (2017), GWEC Global wind 2017 report, A snapshot of wind markets in 2017 : Offshore wind.
- [2] Adam V. (2018). World's largest offshore windfarm opens off Cumbrian coast. The Guardian. Retrieved from <https://www.theguardian.com/environment/2018/sep/06/worlds-largest-offshore-windfarm-opens-cumbrian-coast-walney-extension-brexit>.
- [3] 冀樹勇、王天佑、譚志豪，「離岸風機基礎設計實務」，大地工技術，第 142 期，第 17~24 頁，2014。
- [4] 張欽森、林俶寬、張景程，「離岸風場電場設計技術準則初擬與引用」，中華技術，第 103 期，第 50~61 頁，2014。
- [5] IEC 61400-3 (2009). International standard wind turbines - part 3: design requirements for offshore wind turbines.
- [6] 廖學瑞、丁金彪、林俶寬，「離岸風場電場開發之海事工程施工船機與安裝技術初探」，中華技術，第 103 期，第 96~109 頁，2014。
- [7] 林俶寬、廖學瑞、連永順，「離岸風電專用碼頭規劃研究」，第 37 屆海洋工程研討會論文集，2015。
- [8] Richard M. G. (2010). Offshore wind and wave farms should be designed to create artificial reefs, Natural Sciences , Retrieved from <https://www.treehugger.com/natural-sciences/offshore-wind-and-wave-farms-should-be-designed-to-create-artificial-reefs.html>
- [9] European Wind Energy Association (2015). The European offshore wind industry - key trends and statistics 2014, EWEA report.
- [10] 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。
- [11] 周建宇，「離岸風力變電站之基礎設計與施工研習」，臺灣電力公司

輸工處中區施工處出國報告，2018。

- [12] 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。
- [13] Bradford, S. A. (1993). *Corrosion Control*. New York, U.S.A.: Nostrand Reinhold.
- [14] Broomfield J. P. (1997). *Corrosion of Steel in Concrete, Understanding, investigation and repair*. London, England: Taylor & Francis.
- [15] 山東奧科防腐，腐蝕與防腐蝕工程技術的定義和分類，取自：
<https://kknews.cc/zh-tw/news/ae5nj3x.html>，2017 年 3 月 31 日。
- [16] Davis, J. R. (2000). *Corrosion: Understanding the Basics*, Ohio, U.S., ASM International: Materials Park.
- [17] LMATS (2018, Oct. 22). Corrosion resistance testing, Retrieved from <https://lmats.com.au/services/chemical-testing/corrosion-resistance-testing>.
- [18] 陳貝貝、許芳芳，范曉寧，「絲狀腐蝕測試簡介」，塗層與防護，第 2 期，2018。
- [19] 劉新，「防蝕塗料塗裝技術」，化學工業出版社，北京，2016。
- [20] 張皓玥、王津梅，「金屬縫隙腐蝕的成因及實驗驗證」，表面技術，第 46 卷，第 2 期，第 204~207 頁，2017。
- [21] 王過之，「塗膜下的絲狀腐蝕研究」，中國兵器工業第 59 研究所，2006。
- [22] Fusetani, N. (2004). Biofouling and antifouling. *Natural Product Reports*, 21, 94-104.
- [23] Flemming, H. C., Murthy, P. S., Venkatesan, R., & Cooksey, K. E. (2009). *Marine and industrial biofouling*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

- [24] LaQue, F. L. (1975). *Marine corrosion: cause and prevention*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Wahl, M. (1989). Marine epibiosis. I. Fouling and antifouling: some basic aspects. *Marine Ecology Progress Series*, 58, 175-189.
- [28] Railkin, A. I. (2004). *Marine biofouling: colonization process and defenses*. London, England: Taylor & Francis.
- [29] 林維明、邵廣昭、李賢華等，「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。
- [30] 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.
- [31] 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*.
- [32] 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.
- [33] 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 .
- [34] 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.

- [35] 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。
- [36] Gu, J. D. (2009). *Encyclopedia of Microbiology*, United Kingdom, Elsevier..
- [37] Little, B. J., & Lee, J. S., (2007). *Microbiologically Influenced Corrosion*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- [38] 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1699~1713頁，2017。
- [39] Nicklin, G. (2008). Living with the threat of microbi : biologically influenced corrosion in submarine seawater systems: Royal Navy's Perspective. (UK Ministry of Defence, London).
- [40] 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.
- [41] 鄒衛東，「關於硫酸還原菌的特性及運用」，環境工程論文，2002，取自 <http://big.hi138.com/gongxue/huanjinggongcheng/200603/58703.sp#.9qo4HszaUk>。
- [42] 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.
- [43] Ringas, C., & Robinson, F. P. A. (1988). Corrosion of stainless steel by sulfate-reducing bacteria total immersion test-results. *Corrosion*, 44, 671-678.

- [44] Ringas, C., & Robinson, F. P. A. (1988). Corrosion of stainless steel by sulfate-reducing bacteria electrochemical techniques. *Corrosion*, *44*, 386-396.
- [45] 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.
- [46] Little, B. J., Wagner, P., Jacobus, J., & Janus, L. (1989). Evaluation of microbiologically induced corrosion in an estuary. *Estuaries*, *12*, 138-41.
- [47] 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.
- [48] Neville, A., & Hodgkiess, T. (2000). Corrosion of stainless steels in marine conditions containing sulphate reducing bacteria. *British Corrosion Journal*, *35*, 60-69.
- [49] 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.
- [50] Geiser, M., Avci, R., & Lewandowski, Z., (2002). Microbially initiated pitting on 316L stainless steel. *International Biodeterioration & Biodegradation*, *49*, 235-243.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] 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.
- [56] 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, 353-356.
- [57] Al Abbas, F. M., Williamson, C., Bhola, S. M., Spear, J. R., Olson, D. L., Mishra, B., & Kakpovbia, A. E. (2013). Influence of sulfate reducing bacterial biofilm on corrosion behavior of low-alloy, high-strength steel (API-5L X80). *International Biodeterioration & Biodegradation*, 78, 34-42.
- [58] 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
- [59] Nalan O. S., Hasan N., & Gönül D. (2014). Microbially influenced corrosion and inhibition of nickel–zinc and nickel–copper coatings by *Pseudomonas aeruginosa*. *Corrosion Science*, 79, 177-183
- [60] 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.
- [61] 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.
- [62] 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.
- [63] 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
- [64] 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
- [65] Khadija E., Shehdeh J., Chaouay A., El Mouaden, K., & Mustaphz H., (2016). Sulfate-reducing bacteria impact on copper corrosion behavior in natural seawater environment. *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, 6(1), 36-46.
- [66] 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。
- [67] 曲政，「海上風電的腐蝕與防護」，中國腐蝕與防護網，應用案例，2016年10月10日，取自 http://www.ecorr.org/news/app_ca/2016-10-10/150172.html。
- [68] ISO 9223:2012. Corrosion of metals and alloys — Corrosivity of atmospheres — Classification, determination and estimation.
- [69] DNV-OS-J101 (2014). Design of offshore wind turbine structures; DNV GL–Energy: Arnhem, The Netherlands.
- [70] DNV-OS-J201 (2009). Offshore substations for wind farms; DNV GL–Energy: Arnhem, The Netherlands.

- [71] 麻福斌、付相可、王靜、侯保榮，「海上風電浪花飛濺區長效防腐技術-復層礦脂包覆防腐技術(PTC)」，中國腐蝕與防護網，應用案例，2017年08月14日，取自 http://www.ecorr.org/news/app_ca/2017-08-14/166639.html。
- [72] Higgins, P., & Foley, A. (2014). The evolution of offshore wind power in the United Kingdom. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 599-612.
- [73] Dong, W., Moan, T., & Gao, Z. (2012). Fatigue reliability analysis of the jacket support structure for offshore wind turbine considering the effect of corrosion and inspection. *Reliability Engineering and System Safety*, 106, 11-27.
- [74] Ault, J. P. (2006). The use of coatings for corrosion control on offshore oil structures. *Journal of protective coatings & linings*, 23, 42-47.
- [75] 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。
- [76] Shibli, S. M. A., Archana, S. R., & Muhamed Ashraf, P. (2008). Development of nano cerium oxide incorporated aluminium alloy sacrificial anode for marine applications. *Corrosion Science*, 50(8), 2232-2238.
- [77] 強言企業有限公司，「鋼樁犧牲鋁陽極防蝕工程」，陰極防蝕系統及工程設計，取自 http://www.cycptw.com/steel_pile_sacrificial_anode_demo。
- [78] ISO 20340:2009. Paints and varnishes — Performance requirements for protective paint systems for offshore and related structures.
- [79] M-501 Norsok Standard (2012). Surface preparation and protective coating; Standards Norway: Lysaker, Norway.
- [80] ISO 12944-5:2007. Paints and varnishes — Corrosion protection of

steel structures by protective paint systems — part5: protective paint systems; ISO: Geneva, Switzerland.

- [81] 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.
- [82] 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。
- [83] 黃東風,「歐洲海上風電的發展」,能源工程,第二卷,24-27頁,2008。
- [84] 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.
- [85] 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.
- [86] 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).
- [87] Black, A. R., Mathiesen, T., & Hilbert, L. R. (2015). Corrosion protection of offshore wind foundations, NACE International:Houston, TX, USA.
- [88] 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.
- [89] 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.
- [90] 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.
- [91] 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.
- [92] Momber, A. W. (2016). Quantitative performance assessment of corrosion protection systems for offshore wind power transmission platforms. *Renewable Energy*, 94, 314-327.
- [93] 康志堅，「中國大陸離岸風電發展近況」，工研院 IEK ITIS 計畫，ITIS 智網，2011。
- [94] 龍源電力集團股份有限公司，「龍源電力：做海上風電領軍者」，2014 年 2 月 25 日，取自 <http://www.clypg.com.cn/big5/news/ttxw/295523.shtml>。
- [95] 吳飛虎，「兩岸離岸風場發展探討」，Wind energy Research，2011 年 1 月 27 日，取自 <http://www.iaa.ncku.edu.tw/~aeromems/Wind.htm>。
- [96] 中國國家能源局，「大型風機組實現自主設計製造」，取自 http://www.nea.gov.cn/2012-11/05/c_131951508.htm，2012。
- [97] 360 百科，「上海東海大橋海上風電場」，取自 <https://translate.google.com.tw/?hl=zh-TW>，2013。
- [98] 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。
- [99] Kip, N., & van Veen, J. A. (2015). The dual role of microbes in

- corrosion, *The ISME Journal*, 9, 542.
- [100] Gluhak, T., Lewis, J. E. & Popijac, A., (2007). Bryozoan fauna of Green Island, Taiwan: First indications of biodiversity, *Zoological Studies*. 46 (4), 397-426.
- [101] Dan, M., Liu, T. K., & Cheng, M. (2016). First record of bryozoan *Amathia* (= *Zoobotryon*) *verticillata* (Bryozoa: Vesiculariidae) from Taiwan. *Pacific Science*, 70(4), 509-517.
- [102] 「前瞻基礎建設計畫--臺中港離岸風電產業專區」，交通部，2017。

附錄一

期中報告審查意見處理情形表

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：離岸風機基樁與金屬構件腐蝕防治之研究

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
王朝正委員		
1. 試片取樣後立即冷凍，是否依標準程序進行？是否有表面附著物不完整而產生間隙腐蝕？	感謝委員意見，試片取樣後依生物觀測採樣標準流程，以冷凍冰存攜回實驗室鑑別其種類。本次金屬試片僅為原金屬材質，未有任何塗層處理，故無因表面附著物不完整而產生間隙腐蝕之現象出現。	同意辦理方式。
2. 鋼板連結螺栓建議使用不鏽鋼乃為岸上常用的方式，但在海底大量常態電解質的環境是否又會產生加凡尼腐蝕？建議應製作鎖不鏽鋼螺栓鋼板的樣品進行水下試驗。	感謝委員意見，本次試驗拋放之金屬試架之鋼板連結螺栓皆採不鏽鋼材質，另試驗金屬片與螺栓間皆使用絕緣材質墊片隔絕，以防止加凡尼腐蝕情況產生。	同意辦理方式。
3. 試片布放最大的成本是人工，相對而言，試片架及試片的成本不是很高，建議可徵求風電廠商製作試片由計劃布放，共享成果。	感謝委員意見，將與港灣研究中心共同尋找風機製作廠商，共同參與實驗進行佈放。	同意辦理方式。
許書王委員		
1. 文獻註記，建議循序註記，例如有(1)，之後接(4)。 2. P5-1 第六行，「如表 5-1」是否引誤，請在核。 3. P5-5，5-1-1 內文第六行，「皆符合標準」，是否將該標準述明更妥，請卓參。	感謝委員意見，關於 1-4 項提及之文句撰寫及排版編輯將加以檢核修訂。	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
4. P5-6, 5.3 倒數第二行,「如圖 5-1 所示」, 是否引誤, 請復核。		
5. 第五章所提之調查結果, 建議在期末報告時加強分析部分。	感謝委員意見, 將於期末報告針對實驗結果加強分析與探討。	同意辦理方式。
6. 第六章初步結果與後續工作, 建議分兩部分〈兩節〉敘述, 另如第六章 1. 所述似較屬工作項目, 似應摘述成果更佳。	感謝委員意見, 期末報告成果將以「結論」、「建議」方式呈現。	同意辦理方式。
王韡蒨委員		
1. 本研究為四年期計畫案第二年, 建議在報告內可以加入對全研究案的架構及本研究在全案中的定位, 並需詳述與第一年期(106 年)計畫的差異與期末預期成果。	感謝委員意見, 將於期末報告加入四年研究期程規劃與目標。	同意辦理方式。
2. 文獻回顧部分稍顯薄弱, 建議如下: (1) 在 2.1 節方面 a. 建議可探討較易造成腐蝕的結構型式為何? b. 加入討論曝露區域與腐蝕的程度關係為何? (2) 在 2.2~2.3 節方面 a. 金屬腐蝕分類中, 可適當加入成因, 再對應到相關的防蝕方法。 b. 各種防蝕技術如何應用等, 建議可在文獻回顧中納入討論。 c. 文獻中有提到丹麥的第一座	感謝委員建議, 將參酌委員建議, 加強文獻回顧之總整與分類, 並增強文獻豐富度。章節架構將以腐蝕曝露區域為主軸, 衍伸討論各區重點腐蝕成因及對應防蝕技術等。同步蒐集各國相關離岸風場資訊, 針對各國離岸風電之材料選用、防蝕工法、監測系統等資訊蒐集, 做為參考之用。 基樁腐蝕監測系統, 將針對儀器設備之耐久性、穩定性及經濟性進行相關評估, 以	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>離岸風電用了 26 年除役，現在的防蝕技術除了陰極防蝕及犧牲陽極外，其他的防蝕有效年限為何？</p> <p>d. 文獻引用出處標示要加強。</p> <p>e. P2-3 最後一段，建議可補充離岸風機材質及易產生的腐蝕或破壞形式。</p> <p>f. 除表 2-2 外，p2-9 的內容可再補充這些腐蝕的描述。</p> <p>g. P2-14，表 2-3 有無相關使用年限的資訊。</p> <p>(3)表 3-1 中 26-7 點位有無特別意義？</p> <p>(4)期中彙整資料及分析初步成果較弱，希望期末能將本計畫的精神成果詳述展現出來。</p> <p>(5)水質環境變化、海生物附著、金屬腐蝕之間的相關性為何？如何由成果選擇適宜金屬材料及有效防蝕工法。</p> <p>(6)海上試驗基樁腐蝕監測系統規劃設計，並未真正說明清楚如何規劃設計，才能達到功效。</p> <p>(7) 內文謹慎度需加強。</p>	<p>利系統設備之選擇。</p> <p>另於期末成果詳盡描述基樁腐蝕監測系統陳設及監測數據蒐集回傳方式；加強分析結果探究與討論。</p>	
<p>1. P3.9，金屬試片的位置是否可模擬出離岸風機的構造物位置？</p>	<p>本年度研究尚針對水下金屬腐蝕情況進行實測觀察，未來配合將配合臺中港海氣象觀測樁於風機曝露區域進行腐蝕模擬，以得知離岸風機構造物之腐蝕狀況。</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
2. P5-4, 彰化的海水 pH 較低? 是否正當? pH 值對金屬腐蝕的影響有沒有納入研究的討論因素?	感謝委員意見, 將持續針對彰化海域持續取樣觀測, 以釐清 pH 變動原因是否為單一特殊事件導致, 或為其海域常態。	同意辦理方式。
3. 圖 3-4 採樣斷面標註需修正〈直徑〉〈10m 部分〉, 表 5-5 請對表內符號數字做詳解說明。	感謝委員意見, 採樣斷面 10m 為水深, 以於文中註明, 表 5-5 之苔蘚蟲附著情況, 未來將以附著面積表示。	同意辦理方式。
陳桂清委員		
1. 無全程計畫內容說明, 各年期相關性與執行流程請說明之。	感謝委員意見, 將於期末報告加入四年研究期程規劃與目標。	同意辦理方式。
2. 文獻蒐集仍然不足, 國內相關研究報告應可提供寶貴參考。具參考價值的文獻, 應做成摘要或簡述其重點及成果, 以俾後續參酌。報告部分內容, 諸如 2-1、2-2 及 3-2 節, 於 106 年度報告中已有陳述, 建議刪除, 本年度內容應陳述其他相關資訊〈內容〉, 較為妥適。	感謝委員意見, 將加強相關文獻收集與彙整俾利後續參酌。	同意辦理方式。
3. 尚無腐蝕監測系統之規劃與設計, 文中僅述及監測儀器介紹, 如何於觀測樁進行監測未予說明?	感謝委員意見, 關於基樁腐蝕監測系統, 將針對儀器設備之耐久性、穩定性及經濟性進行相關評估, 以利系統設備之選擇。	同意辦理方式。
4. 底泥粒徑分析目的為何? 與海生物附著有何關係?	初始環境觀測即包含水質與底泥分析兩類, 透過底泥粒徑分析可建立基礎底質背景, 同步觀察分析底泥中所含之生物或微生物(如底泥中	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
	之厭氧菌即會加速金屬腐蝕)。	
5. 水質分析三個試驗點為何採集調查時間不一致，數據如何與季節變化比較？	考量天候與海上作業成本，水樣配合金屬試架拋放進行採集，將盡量汲取四季數據，以利季節性探討。	同意辦理方式。
6. 海生物附著至今採樣僅一次，曝放時間僅 2.5 月，請說明原來規劃採樣時程及次數？	海生物附著觀察原規劃 3 個月進行第一次回收作業，然考量天候因素，及水下金屬試架之穩定性，故於 2.5 個月時進行首次採樣與可行性評估。以利未來其他測站水下試架拋放順利進行。	同意辦理方式。
7. P5-6，圖 5.3，圖示說明有誤，低合金鋼應更正為 A572。	感謝委員意見，已於 P5-6，圖 5.3 修正。	同意辦理方式。
8. P5-7，表 5-3 與表 5-4 有何差異，請說明之。	感謝委員意見，表 5-3 為現地採集之現場記錄；表 5-4 為冷凍保存實驗室之觀察記錄，將於文中補充說明。	同意辦理方式。
9. P5-9，表 5-5，++++表示為何？不能量化嗎？	感謝委員意見，因苔蘚蟲群落個體數可觀，未來將以覆蓋面積表示。	同意辦理方式。
10. Ch7 參考文獻格式不一，諸如 title 之英文大小寫不一致，請修正之。	感謝委員意見，已於參考文獻修訂。	同意辦理方式。
賴瑞應委員		
1. 報告第 2-6 頁圖 2.3 提到腐蝕區域分四區，但報告第 2-7 頁提到潮差區/感潮區為五個區域中腐蝕速率最緩和之區段，請釐清修正。	感謝委員意見，已於內文第 2-7 頁修正。	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
2. 本計畫彰化之水質取樣 pH 值變異很大，pH 值對未來彰化風場之基樁防蝕對策會有很大影響，建議後續持續取樣觀測，釐清原因。	感謝委員意見，將持續針對彰化海域持續取樣觀測，以釐清 pH 變動原因是否為單一特殊事件導致，或為其海域常態。	同意辦理方式。
3. 第四章腐蝕監測系統規劃設計部分，建議後續針對系統耐久性、穩定性及經濟性做簡要評估說明，以支持本計畫研提之監測系統是經過審慎評估所規劃之系統。	感謝委員意見，關於基樁腐蝕監測系統，將針對儀器設備之耐久性、穩定性及經濟性進行相關評估，以利系統設備之選擇。	同意辦理方式。
4. 報告格式請研究團隊再檢視是否符合出版品之規定。	感謝委員意見，將檢視報告格式，以符合出版規定。	同意辦理方式。
柯正龍委員		
1. 本計畫需於 11 月 15 日前提送期末報告書初稿，請研究團隊注意期程控管。	感謝委員意見，將依計畫期程進度進行。	同意辦理方式。
2. 有關海生物底泥菌種分析，期中報告著墨甚少，建議應增加此部分之文獻蒐集與相關試驗方法說明。	感謝委員意見，將加強海洋底泥微生物等相關文獻。	同意辦理方式。
3. 目前大陸在離岸風機施作與營運實績甚多，以其風機所處地理位置與環境特性與我國較為相近，建議文獻蒐集部分，應補充將其納入。	感謝委員意見，將蒐集內地離岸風機相關發展資訊，作為台灣之參照資料。	同意辦理方式。

附錄二

期末報告審查意見處理情形表

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：離岸風機基樁與金屬構件腐蝕防治之研究

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
王朝正委員		
4. P2-12 金屬腐蝕應改為加凡尼腐蝕。	感謝委員意見，已將 P2-12，Galvanic corrosion 之中文修訂為加凡尼腐蝕。	同意辦理方式。
5. 文獻回顧請增加各種微生物對腐蝕的作用。	感謝委員意見，因硫酸鹽還原菌生長能力強、生存環境廣泛，是海洋環境中引起鋼鐵、金屬等材料腐蝕的重要成因，故多數微生物腐蝕皆以硫酸鹽還原菌對各類金屬腐蝕狀況進行研究，相關研究摘要彙整於表 2-2。	同意辦理方式。
6. 依取得之數據現況，請系統化整理出正、反面差異。例如：沉積物量的差異，而從沉積量及物種討論腐蝕模式，或將現況作更詳細之描述。	感謝委員意見，金屬試片之附著生物計數成果彙整於表 4-17 及表 4-18，兩金屬試片正、反面差異及附著生物分布與附著生物特性之探討請見 4.3.1 節。 本研究之金屬腐蝕以片為單位，並無分別針對正面、反面進行推算，未來將考慮委員建議，期能藉以推估各附著生物可能對金屬腐蝕速率之影響。	同意辦理方式。
7. 試架有無可能被海泥覆蓋。	感謝委員意見，金屬試架搜尋期間，受東北季風作用影	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
	響水下濁度高，能見度不佳，不利搜尋。另拋放期間遇山竹颱風，於颱風前後期間(9月6日起)，皆有較高波高及流速發生，故推測可能因東北季風和颱風作用而導致試驗架位移或海泥覆蓋之情況產生。	
8. 第 5.1.2 節，裝置於外海監測系統預計將如何自我保護。	感謝委員意見，外海監測系統之安裝配置皆位於樁體內部以減低或腐蝕影響，相關設備配置位置請見 5.1.2 節。	同意辦理方式。
9. 圖 4.68 的橫軸代表甚麼？	感謝委員意見，圖 4.68 為金屬試片海洋生物附著之相似性分析圖，其橫軸為海洋附著生物相似性距離，已於圖片補註。	同意辦理方式。
10. 圖 4.56 等，反面照片為何右側都很黑？	感謝委員意見，圖 4.45 至圖 4.56 為現地採集金屬試片後，即於船隻進行拍照記錄工作，因金屬試片背面皆固定於金屬橫桿支架上，受當日陽光照射方向影響產生陰影而導致。	同意辦理方式。
許書王委員		
7. 本研究各期計畫之工作項目，請考量條列化，並將已完成之工作項目相比，做為參考。	感謝委員意見，研究各期計畫之工作項目已改為條列化呈現，以利檢核。	同意辦理方式。
8. 本研究之結果請連結本研究主題，以較完整呈現成果。	感謝委員意見，已描述研究海域之水質特性調查、海洋附著生物與金屬水下腐蝕情	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
	況之相關探討與研究主題連結。	
9. 本次為期末報告，例如 P1-3 頁等文字敘述仍停留在期初計畫說法，全文請一併改善。	感謝委員意見，已檢視報告進行修訂並補強相關文字論述。	同意辦理方式。
10. 報告中，所述摘要應以期末成果角度進行呈現，以符合期末報告之樣式，另摘要內容宜簡述成果。	感謝委員意見，已修訂期末報告論述，並於摘要內容簡述研究成果。	同意辦理方式。
11. P6-1 建議延長觀測週期，應明確量化。	感謝委員意見，為避免沿岸污水注入、颱風擾動等非常態事件發生，建議以「季」為單位，進行 2-3 年之現地觀察，以建立區域性海域之背景資料。	同意辦理方式。
林佑任委員		
2. 感謝港研中心及弘光科大辦理如此有意義的研究題目，除了對於離岸風電基樁防蝕有貢獻，對於以往港灣設施設備使用之鋼材防蝕也會有助益，另外由於極端氣候造成的影響，世界有很多地區原來不會接觸到海水的，因為異常的颱風颶風暴潮造成海水溢淹，例如本期(201 期)的科學人月刊報導美國紐澤西州於 2010 年至 2012 年，木橋鎮連續三年淹三次水，尤其是 2012 號稱 500 年僅見的桑迪颶風造成之暴潮，也讓美國開始強調韌性城市設計，而建築相關的鋼構或其他鋼材之設施設備等既然都變成可能接觸海水，金屬結構防蝕的基礎研究將為極受關心的	感謝委員肯定，並提供相關現況資訊。	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
課題。		
3. P2-7 頁有關腐蝕電化學反應內容，請再確認。	感謝委員意見，已修訂相關內容，並於期末報告呈現。	同意辦理方式。
4. P2-12 與 p2-13 有關大陰極-小陽極等之敘述似有矛盾請確認。	感謝委員意見，已修訂相關內容，並於期末報告呈現。	同意辦理方式。
5. 有關 p2-31 中 1.大氣的相對濕度中，臨界相對濕度為 65%似為論述”因空污影響”而非”於潮濕大氣中”。	感謝委員意見，已修訂相關內容，並於期末報告呈現。	同意辦理方式。
6. P2-33 及其他處，有關壓力腐蝕名稱宜改為應力腐蝕。 7.	感謝委員意見，已修訂相關內容，並於期末報告呈現。	同意辦理方式。
8. p2-55 輪殼請修正為輪轂(hub)	感謝委員意見，已修訂相關內容，並於期末報告呈現。	同意辦理方式。
9. p3-7 均勻係數 Cu 與曲率係數 Cd 符號誤植，公式重複。	感謝委員意見，已修訂均勻係數及曲率係數之代號與公式。	同意辦理方式。
10. P2-34 及 P 2-35 有關低於平均潮位之飛沫區之敘述，可能會與前面有關大氣區、飛沫區、潮差區、水下區中之潮差區混淆。	感謝委員意見，已修訂海洋暴露區域之區位描述，避免混淆。	同意辦理方式。
11. P2-40 表 2-7 缺少飛沫區，是否已由大氣區涵蓋，請釐清。	感謝委員意見，大氣區位處飛濺區之上與海水無直接接觸，故飛濺區及潮差區同劃分於「飛濺區至海中帶」，已於表 2-7 進行修訂。	同意辦理方式。
12. 離岸風機從水下基礎、轉接段到塔筒均為金屬，若之間無絕緣，則用於水下之陰極防蝕工法理應有向外擴散保護之效果，是否宜納入整體防蝕考量。	感謝委員意見，離岸風機整體依暴露區域選用適宜防蝕保護措施，其中陰極防蝕需透過海水做為介質傳遞，故	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
	僅可施用於沒水區，大氣區主要仍以塗裝進行防蝕保護。	
13. P2-47 有關全球離岸風場前 25 位中臺灣海峽佔了 16 處，請問所稱佔幾處有關一”處”的定義為何？	感謝委員意見，4C Offshore 根據各潛力風場開發海域進行評估排名，各處皆以經緯度表示，並記錄風場評估面積。	同意辦理方式。
14. P2-48 江蘇如東風場有關 16 臺風機之數量似與所述裝置容量無法搭配。	感謝委員意見，原風機數量有誤，已更正風機總數為 167 台，預估陸地裝置容量 172MW、海上風場裝置容量為 250MW。	同意辦理方式。
15. P2-50 有關上海東海大橋風場之基礎型式，建議以圖示俾清楚瞭解。	感謝委員意見，上海東海大橋海上風電風機基座示意圖如圖 2.26 所示。	同意辦理方式。
16. P2-52 有關 1.塔架防蝕只敘述內部防蝕，外部請補充。	感謝委員意見，塔架防蝕部分，外部多以重防蝕塗層，或熱噴塗鋅鋁合金加塗料等進行防蝕保護；內部因無陽光直射，腐蝕性相對較低，多以環氧富鋅及高固成分環氧塗料進行塗覆，並可搭配腐蝕餘裕量估算，加強防蝕保護，已於文中補述。	同意辦理方式。
17. P2-54 第二行有關”進行表面處理，使表面殘留物厚度<10mm”之意思為何？	感謝委員意見，復層礦脂包覆防蝕系統亦可施用於現行使用中之樁體，為達最佳防蝕效果，若此鋼樁外部已出現鏽蝕或海生物附著現象，需於施工前進行樁體表面處	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
	理，使表面殘留物厚度<10mm，再均勻塗抹礦脂防蝕膏，已於文中補充。	
18. 有關水質調查分析本研究所選定項目之選擇考量因素為何?	感謝委員意見，為充分調查台中及彰化海域之區域水質特性，故參考海洋環境品質標溫度、鹽度、pH、溶氧、總磷及鋅、鎘、鉛、銅、汞、總鉻進行觀測，建立氯鹽、硫酸鹽之鹽類背景資料，另藉由葉綠素 a、總氮項目搭配溫、鹽等資料，推知海域營養鹽及浮游植物之季節性變化特性。	同意辦理方式。
19. P 4-2 及 P 4-3 表 4-3 與 4-4 今年 1 月 16 日氯鹽與硫酸鹽無資料之原因。	感謝委員意見，台中港區 1 月 16 日為去年度研究數據，為考量海水中氯鹽與硫酸鹽之作用影響，故後續採樣分析增列氯鹽與硫酸鹽之量測，以利基礎水質數據建立。	同意辦理方式。
20. 感謝辦理外海底泥之泥質粒徑分析，讓我們瞭解到北淤沙區最北側的底質分布情形。	感謝委員肯定。	同意辦理方式。
21. 有關結論 2 表示各深度皆無礫石部分，由於採樣深度有限(最深 60 公分)，是否宜以較保守的寫法來描述，畢竟各深度感覺可無限深度。	感謝委員意見，已於文中補述底泥採樣深度與粒徑分析之結果，避免混淆。	同意辦理方式。
22. 有關臺中港外海之碳鋼金屬腐蝕速率達 260.81µm/yr，低碳鋼 205.13µm/yr，與以往港內資料比較甚高，建議探討其可能原因。	感謝委員意見，比較 105 年「金屬材料腐蝕環境調查研究」，台中港區三中金屬年平均腐蝕速率界於	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
	27.2 $\mu\text{m}/\text{yr}$ ~440.53 $\mu\text{m}/\text{yr}$ ，故本研究之金屬腐蝕速率仍在合理區間，然本次研究為期僅 2.5 個月，建議延長水下暴露時間，以得更準確的金屬試片腐蝕速率。	
陳桂清委員		
11. 參考文獻內容已有明顯改進，具參考價值文獻以簡述摘要完成彙整列表。	感謝委員肯定，期末報告彙整國外塗層防蝕研究、厭氧微生物金屬腐蝕研究等彙整表，期能作為相關研究參考。	同意辦理方式。
12. 使用名詞應謹慎、正確，不能混用。諸如 P4-2 中，「水質」與「水文」意義不同。	感謝委員意見，已依建議於文中更正。	同意辦理方式。
13. 報告中圖是若有引用文獻出處，則建議於圖表下方註明資料來源等文字說明。	感謝委員意見，已依建議於圖片下方註明資料來源。	同意辦理方式。
14. P2-18，倒數第 2 行，請將 8OH^- ，更正為 8e^- 。 15. P2-19，第 1 行，於平衡式右邊補加「 $+4\text{e}^-$ 」。	感謝委員意見，已依建議於報告中修訂。	同意辦理方式。
16. P4-12，台中海域底泥微生物分析結果，建議以表格陳列，以利對照 DNA 序列與菌種兩著間之關係。 17. P4-34，彰化海域#2，比照上述建議方式處理。	感謝委員意見，台中及彰化海域底泥微生物分析結果，分別彙整於表 4-7 及表 4-16，以利對照及探討。	同意辦理方式。
18. P4-16，表 4-9 第 2 次採樣時間不一致，請查核更正。另表中 N.D. 之說明不易瞭解，建議改用適當方式表達。	感謝委員意見，已統一更正採樣日期，並於表 3-2 水質檢測項目與方法表格補註各分析項目之偵測極限。	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
19. P5-2, 請說明 5.1 節的 規劃內容為何? 諸如採用何種系統? 監測方式等, 試片佈放為何? 另觀測樁是否已建置完成?	感謝委員意見, 台中港區海氣觀測樁尚未建置完成, 本計畫依海氣觀測樁之設計規劃防蝕監測系統, 監測系統規劃與規格請見 5.1.1~5.1.2 節。	同意辦理方式。
20. P5-4, 5.1.2 節腐蝕探頭規格? 如何操作、監控?	感謝委員意見, 腐蝕探頭規格及監控見面請見表 5-4 及表 5-5。	同意辦理方式。
21. P5-7, 表 5-2, 參考電極之電位工作範圍表示不清?	感謝委員意見, 參考電極置於水下一米處, 並作為腐蝕探頭(ER probe)電位之參考標準, 相關數據與操作界面如表 5-5 所示。	
22. P6-2, 建議 6.3 小節移至 P1-5, 1.3 小節。	感謝委員意見, 已依委員建議修訂。	同意辦理方式。
賴瑞應委員		
5. 本計畫在有限的經費及期程下, 研究團隊能如期完成契約工作項目, 研究團隊的努力給予肯定。	感謝委員肯定。	同意辦理方式。
6. 本計畫題目為「離岸風機基樁與金屬構件腐蝕防治之研究」, 為 4 年期的研究計畫, 今年為第 2 年, 惟依 4 年的規劃工作項目, 似乎僅著重於臺中及彰化海域不同金屬腐蝕速率量測與腐蝕速率監測之技術研究, 無法提供國內外相關腐蝕防治技術應用於國內之環境適用性評估, 誠如報告第二章文獻回顧提及的金屬構件常見的防蝕工法, 包括陰極防蝕與塗層法, 以及中國大陸的離岸風機防蝕的案例, 建議後	感謝委員意見, 未來將視計畫需求及經費規劃, 參考委員建議於金屬試片施作保護措施, 進行現地試驗, 驗證保護效果。	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>續經費許可下，可以進行相關金屬試片以相關防蝕工法施作保護後，進行現地試驗，驗證保護效果，並進行施工性及經濟性比較，以提出適用於國內風機防蝕的對策。</p>		
<p>7. 報告第 3-16 頁，腐蝕速率計算公式之乘除先後表示方式請再確認。</p>	<p>感謝委員意見，已確認腐蝕速率計算公式，並加以修訂。</p>	<p>同意辦理方式。</p>
<p>8. 本所「臺中港海氣象觀測樁」因風浪等因素，似乎還未打設，若明年年初尚未打設，建議是否可以幫本所規劃觀測樁防蝕工法，供本所施作，以現地試驗方式，驗證離岸基樁防蝕工法之成效。另外，所規劃之腐蝕監測系統，建議經費及技術許可下，盡可能將有線傳輸改為無線傳輸，因外海風浪因素，有線傳輸可能不易維護。</p>	<p>感謝委員意見，「臺中港海氣象觀測樁」於設樁規劃時即有防蝕系統規劃，故本研究依原觀測樁設計，於大氣區、大氣區、飛濺區、潮差區、沒水區進行腐蝕監測與調查，希望透過持續觀測與數據蒐集，預先察覺系統設備異常等問題，未來將視腐蝕監測系統技術、經費及現地佈放情況，多方考量是否將傳輸系統改為無線傳輸。</p>	<p>同意辦理方式。</p>
<p>9. 本計畫針對海生物對金屬構件的腐蝕影響，建議未來四年計畫完成後，能具體提出海生物對金屬構件之腐蝕影響數據，以提供未來風機腐蝕防治設計之參考數據。</p>	<p>感謝委員意見，未來將綜整四年現地調查資訊，釐清海生物對金屬構件之腐蝕影響效應，提供作為風機腐蝕防治設計之參考應用。</p>	<p>同意辦理方式。</p>
<p>10. 報告格式請修正，另外，請加強錯別字的校訂工作。</p>	<p>感謝委員意見，已檢視報告進行修訂並補強相關文字論述。</p>	<p>同意辦理方式。</p>
<p>柯正龍委員</p>		
<p>11. 請補充計畫英文摘要。</p>	<p>感謝委員意見，已遵照港研中心報告格式修訂。</p>	<p>同意辦理方式。</p>
<p>12. 表 2-7 塗膜系統或塗層系統請統</p>	<p>感謝委員建議，塗層系統已</p>	<p>同意辦理方</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
一。	統一修訂定為塗膜系統。	式。
13. 圖表註記請與參考文獻之編號一致。	感謝委員建議，已檢視報告內容，修訂文中圖片及表格編碼。	同意辦理方式。

附錄三

期末報告簡報

MOTC-IOT-107-H1DB002c



離岸風機基樁與 金屬構件腐蝕防治之研究 期末報告

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

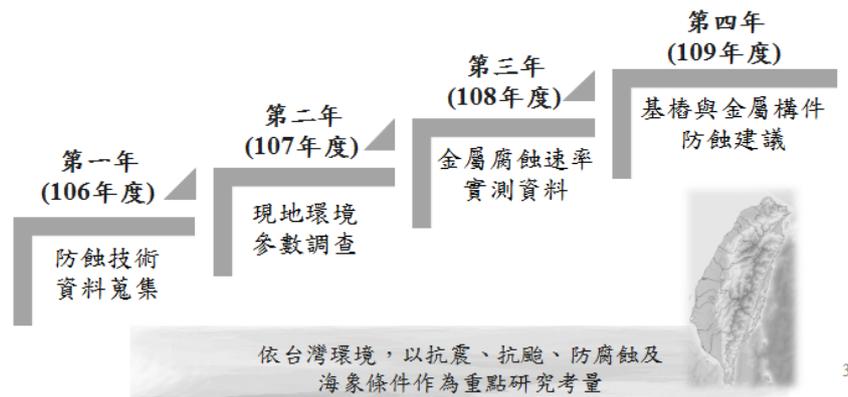
目 錄



- 一. 前言
- 二. 文獻回顧
- 三. 研究內容與規劃
- 四. 海域特性調查
- 五. 臺中港區基樁腐蝕監測系統規劃
- 六. 結論與建議

計畫目標及重要性

- 本研究規劃為期四年，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。



106年度重點工作與結論(第一年)

文獻彙整

水下腐蝕防治、海生物腐蝕與防蝕、腐蝕防治監測技術

- 水下腐蝕防治多以陰極防蝕為主，搭配各式塗料塗層系統，提高水下防蝕效果；現國外離岸風機塗層依循ISO 20340:2009、NORSOK，M-501及ISO 12944作為塗層計術規範標準。
- 腐蝕防治監測設備，可提高機組使用效能，減低勞動成本與風險，應規劃適宜週期定期維護、檢修。
- 現已發現部分生物膜，可達抑制腐蝕、保護金屬之作用，故除傳統工法，未來亦可輔以相關微生物自然機制進行防蝕處理。

106年度重點工作與結論(第一年)

環境分析

水質調查、底泥調查

1. 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，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。
2. 臺中海床底泥粒徑介於96.430-116.975 μm ，整體以砂質為主(66%)，彰化兩測站粒徑、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。

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。

5

離岸風機基樁與 金屬構件腐蝕防治之研究

107年度 重點工作項目

107年度重點工作項目

以106年度研究成果作為基礎，重點工作項目：

1. 於彰化離岸風機預定海域新增一採樣點
2. 臺中及彰化海域皆各增設一「水下金屬暴露試驗」試架組
3. 臺中港區海上試驗基樁腐蝕監測系統規劃設計



7

107年度重點工作項目

1. 於臺中港基樁預定地及彰化海域離岸風場預定地底泥表層金屬材料腐蝕現地暴露試驗安裝佈放(各點位採樣調查各1次)。
2. 進行臺中港區海上試驗基樁腐蝕監測系統規劃設計。
3. 執行臺中港區基樁預定地與彰化兩處海域底泥表層金屬材料海生物附著及腐蝕暴露試驗分析(各點位採樣調查各1次)。

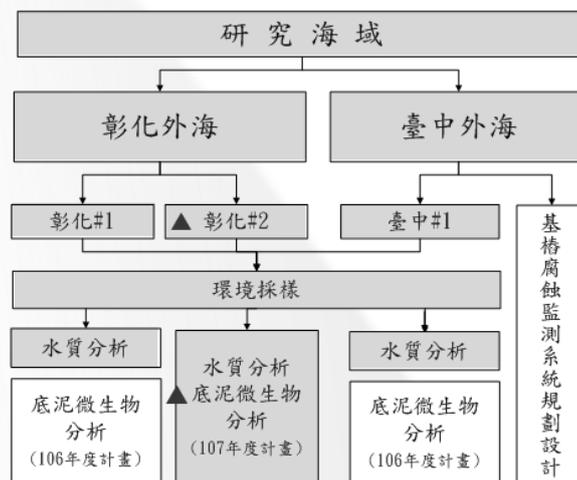
8

107年度重點工作項目

4. 進行本所臺中港區基樁預定地與彰化海域底床拋放試架之金屬試片採樣及附著生物調查 (3地點)。
5. 進行臺中港區基樁預定地與彰化海域兩處水質採樣調查分析。
6. 進行彰化海域離岸風場預定地底泥微生物菌種採樣及試驗分析，(依據本所規劃之採樣標準作業執行)。

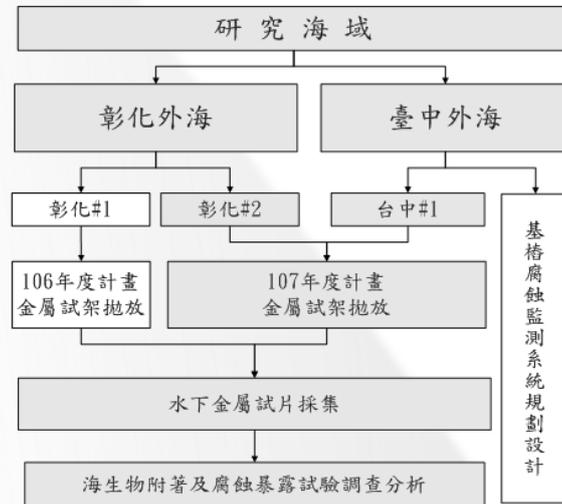
9

107年度工作項目(環境採樣)



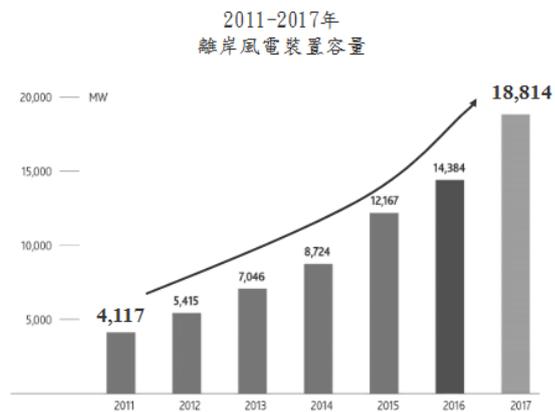
10

107年度工作項目(金屬暴露試驗)



11

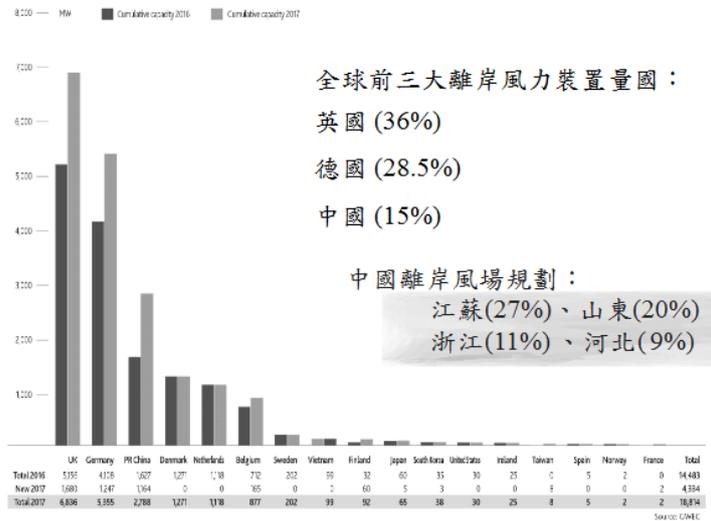
CUMULATIVE OFFSHORE WIND CAPACITY 2011-2017



12

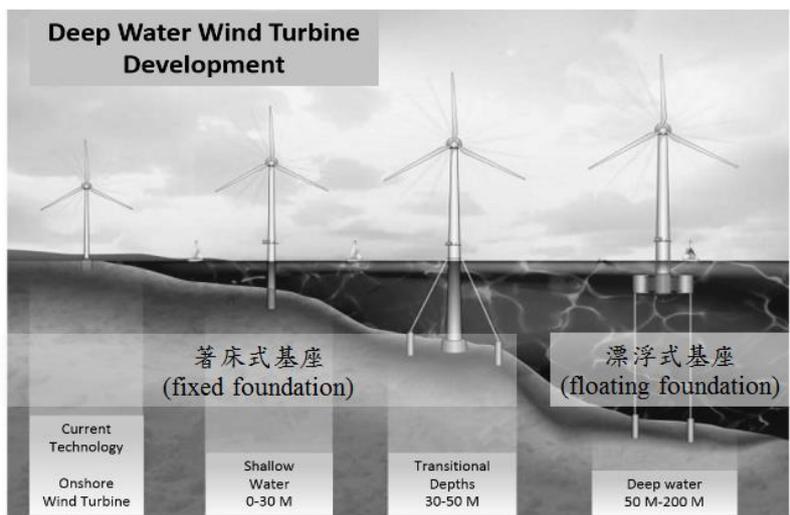
資料來源：全球風能協會(Global Wind Energy Council, GWEC), 2017

GLOBAL CUMULATIVE OFFSHORE WIND CAPACITY IN 2017



資料來源：全球風能協會(Global Wind Energy Council, GWEC), 2017

風機水下安裝型式

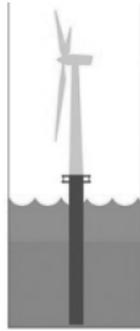


(Richard, 2010)

常見離岸風機水下基礎結構型式

單樁式(Monopile)

底座設計簡單
施工易，成本低



適用水深 5-35m

三腳管式(Tripod)

穩定度高
結構體大，運送繁雜



20-50m

管架式/套筒式(Jacket)

鋼材量少
製程較複雜



30-70m

重力式(Gravity)

穩定性佳
不須打樁



0-10m

歐洲地區離岸風機水下基礎多採「單樁式」或「套筒式」為主

15

局部腐蝕(Local corrosion)

腐蝕過程中，局部陽極與陰極區可隨意並持續更換位置，若局部活性區並未變換位置，腐蝕作用局限在金屬的某一部位，此腐蝕形態稱為局部腐蝕，其腐蝕強度與危害性皆高於均勻腐蝕。

點蝕

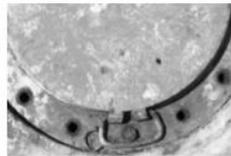
(Pitting corrosion)



不鏽鋼金屬因腐蝕集中所形成之點蝕

縫隙腐蝕

(Crevice corrosion)



銅材構件縫隙因水分產生縫隙腐蝕

電偶腐蝕

(Galvanic corrosion)



不同腐蝕電位之金屬接觸造成之電偶腐蝕

16

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

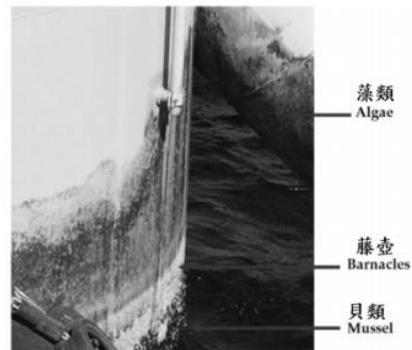
最終繁殖形成巨大的生物群聚，造成結構體局部的腐蝕劣化及荷重增加。

17

海生物腐蝕與污損

亞熱帶海域常見之海洋附著生物

- 海綿、水螅、海筆
- 多毛類、苔蘚蟲
- 石蓴、綠藻、紅藻和褐藻等植物
- 蔓足類：
如藤壺、鵝荖荷
- 軟體動物類：
含貽貝、牡蠣、鮑貝和船蛆等



(Seth, 2017)

(Raikina, 2004)

18

海生物腐蝕與污損

微生物腐蝕(Microbiologically Influenced Corrosion, MIC)

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：

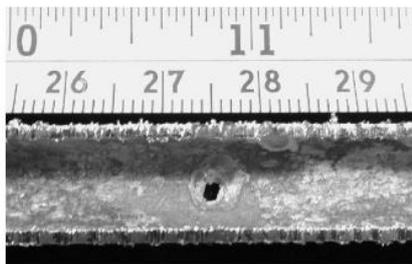
- 硫酸鹽還原菌(sulfate-reducing bacteria, SRB)
- 硫氧化菌(Sulfur-oxidizing bacteria, SOB)
- 產酸菌(Acid-producing bacteria, APB)
- 鐵氧化菌(Iron-oxidizing bacteria, IOB)
- 鐵還原菌(Iron-reducing bacteria, IRB)
- 硝酸鹽還原菌(Nitrate-reducing bacteria, NRB)
- 產黏液菌(Slime-forming bacteria, SFB)

19

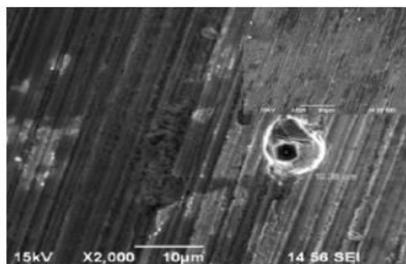
海生物腐蝕與污損

硫酸鹽還原菌(sulphate-reducing bacteria, SRB)

為一種厭氧微生物，可在-5~75°C條件下生存，生長能力強，
是引起鋼鐵、金屬等材料腐蝕的重要原因，
於深海厭氧環境下，更是扮演腐蝕的主導地位。



(Nicklin, 2008)



(Zhang et al., 2008)
20

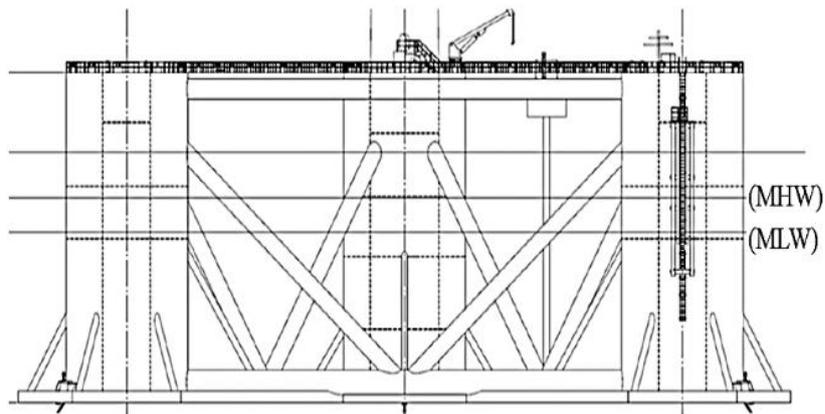
國外離岸結構物腐蝕區域分類

離岸風機之金屬構件應依曝露環境條件選擇適宜之鋼材種類，以有效減低腐蝕損壞風險；搭配塗層、陰極防蝕等防蝕工法，亦須定期進行相關操作維護工作，方可延長離岸風機使用壽命及運轉周期。

離岸結構物曝露區域分類	
國內	國外
1.大氣區 (Atmospheric Zone)	1.大氣區 (Atmospheric Zone)
2.飛沫區 (Splash zone)	2.飛沫區 (Splash zone)
3.潮差區 (Tidal zone)	3.潮差區 (Tidal zone)
4.海中帶 (Full Immersion Zone)	4.浸沒區 (Submerged zone)
5.海泥帶 (Mud Zone)	◆ 海中帶 (Full Immersion Zone) ◆ 海泥帶 (Mud Zone)

21

海洋結構物暴露區域



海洋結構物暴露區域圖

22

(Seth, 2017)

離岸風機腐蝕區域及對應防蝕工法選用

腐蝕區域	可選用之防蝕工法	腐蝕形式
大氣區		
結構物外部	塗層法	全面腐蝕、沖刷腐蝕、 壓力腐蝕劣化
結構物內層 (無法控制濕度處)	腐蝕餘裕量	全面腐蝕、點蝕、 壓力腐蝕劣化
結構物樑柱	腐蝕餘裕量符合 腐蝕速率 ≥ 0.10 mm /年	
連結構件與組件 (如：螺栓)	不銹鋼是可用之抗腐蝕材料	縫隙腐蝕、點蝕、 電偶腐蝕、壓力腐蝕劣化

23

離岸風機腐蝕區域及對應防蝕工法選用

腐蝕區域	可選用之防蝕工法	腐蝕形式
飛沫區和潮差區		
結構物外部	塗層法	全面腐蝕、縫隙腐蝕 點蝕、微生物腐蝕
連結構件與組件	塗層法結合腐蝕餘裕量	
連結構件內部	腐蝕餘裕量或塗層法	全面腐蝕、縫隙腐蝕、 點蝕
低於平均水位 之結構與組件	陰極防蝕	
低於平均水位1公尺 之結構與組件	塗層法	全面腐蝕、微生物腐蝕
低於平均水位之飛沫區	陰極防蝕	

24

離岸風機腐蝕區域及對應防蝕工法選用

腐蝕區域	可選用之防蝕工法	腐蝕形式
浸沒區		
結構物外部	陰極防蝕與塗層法並用	全面腐蝕、沖刷腐蝕、微生物腐蝕
結構物內部	陰極防蝕或腐蝕餘裕量 (有無塗層法)	全面腐蝕、縫隙腐蝕 點蝕、微生物腐蝕
連結構件和組件	腐蝕餘裕量符合 腐蝕速率 ≥ 0.10 mm /年。 海洋附著(性)生物 可能影響平均腐蝕速率， 須列為考慮項目	全面腐蝕、微生物腐蝕 點蝕、壓力腐蝕劣化

25

海生物防蝕與防污

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，鑲接於銅板(管)樁上，陽極金屬將被消耗形成保護電位差，使陰極銅板(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)

http://www.cycptw.com/steel_pile_sacrificial_anode_demo

26

中國離岸風電發展近況

中國風力發電市場於2010年風機總裝機容量已超過30GW，提前10年完成2020年裝置容量達30GW之目標。中國對離岸風電發展，著眼於潮間帶與近海地區。

江蘇如東潮間帶風電場

「江蘇如東潮間帶風電場」是為世界首個潮間帶試驗風場。



風場整體囊括：

陸域

潮間帶(水深<3m)

近岸三區(水深<5m)

潮間帶地質鬆軟，重型機械無法運作，故船隻選用相當重要。

27

中國離岸風電發展近況

上海東海大橋海上風電場

位處上海浦東新區的東海大橋兩側，平均水深10m，風機90m高，平均8.4 m/s，總計興建34座離岸風機，總裝機容量為102 MW。



- 風機基礎設計原擬按VESTAS公司之建議，採用「單樁式」或「三腳管式」基座。
- 單樁基座，重約800噸、長約70 m三腳管式基座各樁即重達200噸左右。
- 然中國無如此大型之打樁設備、搬運船及吊裝設備，航道受限。

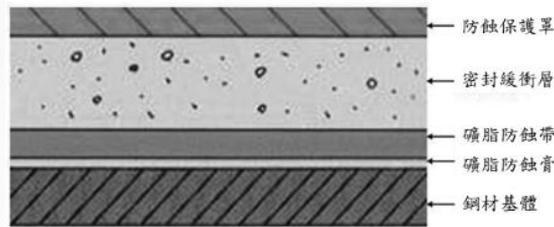
28

中國離岸風電發展近況

中國離岸風機設備防蝕主要參照國外成熟應用經驗級標準進行設計，防腐塗料亦多選擇國外公司產品，現階段已完成之離岸風電設備防蝕狀況良好，但是否適合國內海域環境應用，還需長時間驗證較佳。

風電基座防蝕技術

復層礦脂包覆防蝕(Petrolatum Tape and Covering system, PTC)



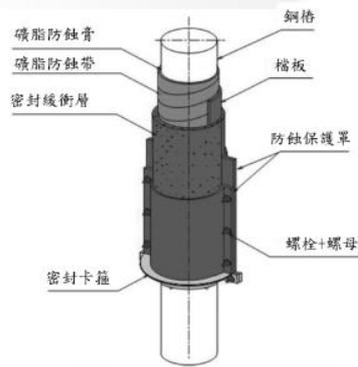
(麻等, 2017)

29

中國離岸風電發展近況

風電基座防蝕技術

復層礦脂包覆防蝕(Petrolatum Tape and Covering system, PTC)



鋼格包覆防蝕技術結構示意圖



礦脂防蝕帶纏繞施作

30

環境採樣調查

區域/站位	TWD97 試驗點座標		工作項目	
			106年度	107年度
臺中#1	120°30'30"E	24°19'15"N	環境採樣	水質採樣 金屬水下暴露試驗
彰化#1	120°19'30"E	24°06'01"N	環境採樣 金屬水下暴露試驗	水質採樣 金屬水下暴露試驗
彰化#2	120°10'38"E	24°07'30"N	-----	環境採樣 金屬水下暴露試驗



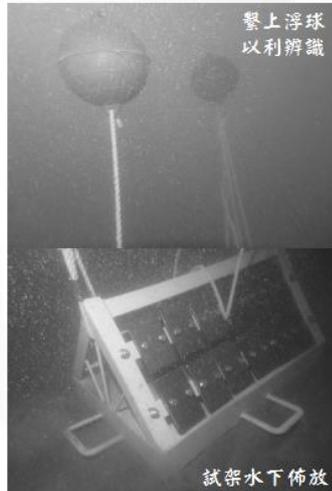
水質、底泥採樣調查分析



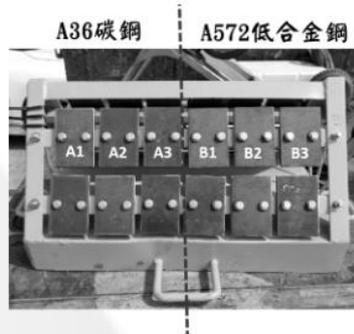
採樣深度：40/60cm



金屬水下暴露試驗規劃



A36碳鋼 / A572低合金鋼



- 106年度金屬試片回收(彰化#1)
- 107年4月14日拋放
- 107年6月30日回收

33

海域特性調查

- 本研究延續106年「離岸風電水下技術研發」計畫，持續針對彰化離岸風電第二期計畫場址及臺中港區海域進行相關環境採樣。
- 另分別於臺中港區(臺中#1)及彰化離岸風電第二期海域(彰化#2)增設金屬水下暴露試驗、持續觀察，藉以瞭解兩海域環境之生地化特性與季節性差異。

季節月份對照表

季節	冬季	春季	夏季	秋季
月份	12、1、2	3、4、5	6、7、8	9、10、11

(本研究之季節月份與氣象局標準一致)

34

海域特性調查

臺中港區水質分析(臺中#1)

夏季Chl-a濃度較冬季大幅提升，
然冬、夏溶氧部分並無同步顯著提高

採樣日期	季節	溫度(°C)	鹽度	pH (25°C)	溶氧 (mg/L)	氯鹽 (mg/L)
107.01.16 ^a	冬	19	31.7	8.1	8.8	---
107.08.05	夏	29.7	32.5	8.1	8.6	19100

採樣日期	季節	總磷 (mg/L)	總氮 (mg/L)	硫酸鹽 (mg/L)	葉綠素a (µg/L)
107.01.16 ^a	冬	0.025	0.65	---	0.29
107.08.05	夏	<0.02 (0.014)	0.76	2570	3.26

「溫度」與「浮游植物生長」
並非主導此海域溶氧之主要因子

a為106年度計畫執行 35

海域特性調查

臺中港區水質分析(臺中#1)

採樣日期	季節	鋅 (mg/L)	鎘 (mg/L)	鉛 (mg/L)	銅 (mg/L)	鉻 (mg/L)	汞 (mg/L)
107.01.16 ^a	冬	<0.02	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
107.08.05	夏	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

檢驗值低於方法偵測極限之測定以"N.D."表示
a為106年度計畫執行

冬、夏兩季重金屬濃度多低於偵測極限
皆符合乙類海洋環境品質標準值

36

海域特性調查

臺中港區水質分析(臺中#1)



30cm底泥採集管

沉降後約25cm



60cm底泥採集管

沉降後約45cm

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%

37

臺中港區海域 底泥粒徑分析結果

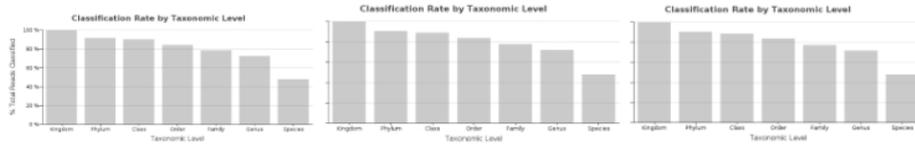
樣站		臺中#1						
實際採樣深度		40cm		60cm				
沉降後測粒徑深度		<5cm	20cm	<5cm	15cm	25cm	32cm	
107/1/16	累積通過百分比所對應之粒徑大小(μm)	D ₁₀	31.987	42.550	65.347	25.381	28.286	32.110
		D ₁₆	50.821	53.066	77.771	38.632	59.440	49.671
		D ₂₅	69.418	65.881	90.228	58.082	80.828	66.565
		D ₃₀	76.747	72.173	96.019	67.935	88.507	73.639
		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
		百分比(%)	累積百分比	礫石	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

38

海域特性調查

99.59% 之底泥微生物可進行鑑定分析

臺中港區海域底泥微生物分析



	Soil1	Soil2	Soil4
樣品深度	0~10cm	10~20cm	30~36cm
DNA序列	112,784條	255,400條	203,422條

底泥微生物DNA序列分類位階鑑別

無法鑑定至界 (Kingdom)	0.33%	0.34%	0.41%
------------------	-------	-------	-------

發現與腐蝕金屬材料之硫酸還原菌同屬之微生物

39

海域特性調查

行政院環境保護署規定，
事業、污水下水道系統及建築物污水處理設施
之pH放流水標準應介於6.0-9.0之間

彰化水質分析(彰化#1)

採樣日期	季節	溫度(°C)	鹽度	pH (25°C)	溶氧 (mg/L)	氯鹽 (mg/L)
107.04.14a	春	26	34.9	8	7.9	19800
107.06.30	夏	27	32.6	6.7	9.8	19100
107.10.22	秋	22.9	34.2	8.0	8.4	25800

採樣日期	季節	總磷 (mg/L)	總氮 (mg/L)	硫酸鹽 (mg/L)	葉綠素a (µg/L)
107.04.14a	春	<0.02 (0.011)	0.6	1210	8.29

春季Chl-a濃度最高，相對而言
海域溶氧變化幅度較小

0.62	1680	N.D.
1.00	2190	0.89

40

海域特性調查

彰化水質分析(彰化#1)

採樣日期	季節	鋅 (mg/L)	鎘 (mg/L)	鉛 (mg/L)	銅 (mg/L)	鉻 (mg/L)	汞 (mg/L)
107.04.14a	春	N.D.	N.D.	0.11.	N.D.	N.D.	N.D.
107.06.30	夏	N.D.	N.D.	<0.1 (0.037)	N.D.	N.D.	N.D.
107.10.22	秋	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

檢驗值低於方法偵測極限之測定以"N.D."表示
a為106年度計畫執行

研究期間，水中重金屬僅「鉛」於春季測值
高於乙類海洋環境品質標準之規範
推測可能受陸源污染影響所致

41

海域特性調查

彰化水質分析(彰化#2)

夏季Chl-a濃度較冬季大幅提升，
然冬、夏溶氧部分並無同步顯著提高

採樣日期	季節	溫度(°C)	鹽度	pH (25°C)	溶氧 (mg/L)	氯鹽 (mg/L)
107.01.16 ^a	冬	19	31.7	8.1	8.8	---
107.08.05	夏	29.7	32.5	8.1	8.6	19100

採樣日期	季節	總磷 (mg/L)	總氮 (mg/L)	硫酸鹽 (mg/L)	葉綠素a (µg/L)
107.01.16 ^a	冬	0.025	0.65	---	0.29
107.08.05	夏	<0.02 (0.014)	0.76	2570	3.26

「溫度」與「浮游植物生長」
並非主導此海域溶氧之主要因子

a為106年度計畫執行

42

海域特性調查

彰化水質分析(彰化#2)

採樣日期	季節	鋅 (mg/L)	鎘 (mg/L)	鉛 (mg/L)	銅 (mg/L)	鉻 (mg/L)	汞 (mg/L)
107.08.06	夏	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
107.10.22	秋	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

檢驗值低於方法偵測極限之測定以"N.D."表示
a為106年度計畫執行

研究期間，彰化#2測站，水中重金屬濃度
皆符合乙類海洋環境品質標準之規範

43

海域特性調查

彰化水質分析(彰化#2)



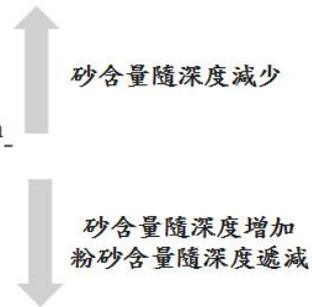
30cm底泥採集管

沉降後約28cm



60cm底泥採集管

沉降後約56cm



44

彰化海域 底泥粒徑分析結果

樣站		彰化#2							
實際採樣深度		60cm							
沉降後測粒徑深度		<5cm	10cm	20cm	30cm	40cm	50cm	56cm	
107/8/6	累積通過百分比所對應之粒徑大小 (um)	D10	213.886	181.721	182.279	163.844	201.007	212.699	205.441
		D16	246.126	218.453	223.008	206.314	237.722	246.303	238.409
		D25	282.664	256.088	264.714	248.897	275.315	284.146	273.827
		D30	300.451	274.034	284.399	268.519	292.883	302.427	291.026
		D50	364.847	336.766	352.839	337.555	356.730	367.769	349.879
		D60	397.545	367.021	385.079	370.609	387.421	399.903	379.281
		D75	441.021	414.422	431.109	420.158	431.691	442.212	424.590
		D84	464.142	444.280	456.949	449.257	457.019	464.860	451.704
		D90	478.466	464.786	473.561	468.441	473.465	478.892	469.801
		Dm	323.009	300.236	308.747	296.757	313.424	323.797	313.404
		累積百分比 (%)	礫石	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
砂	98.94		97.65	96.94	95.93	96.78	98.77	99.03	
粉砂	1.06		2.35	3.06	4.07	3.22	1.23	0.97	

海域特性調查

彰化海域底泥微生物分析

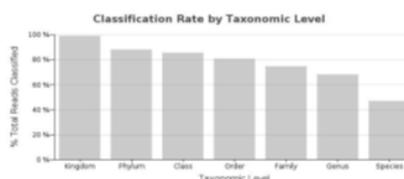
分析樣品深度：

- L41Trim, 0~10cm
- L42Trim, 10~20cm
- L42Trim, 20~30cm
- L44Trim, 30~40cm
- L45Trim, 40~50cm
- L46Trim, 50~56cm

DNA序列：115,224條~ 193,016條

無法鑑定至界 (Kingdom) 0.41% ~ 1.05%

以L46Trim為例



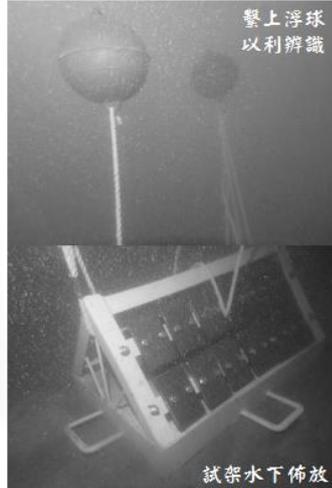
DNA序列：168,383條

無法鑑定至界：0.41%

98.95% 之底泥微生物可進行鑑定分析

發現與腐蝕金屬材料之硫酸還原菌同屬之微生物

金屬試片附着生物調查分析



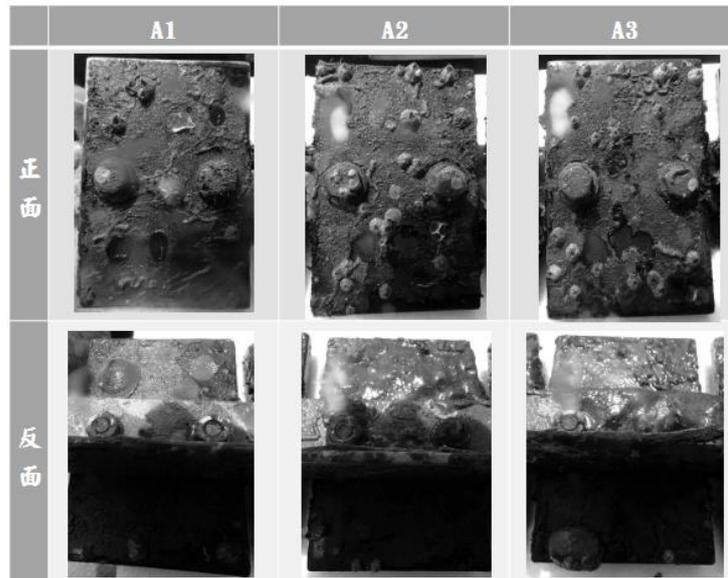
A36碳鋼 / A572低合金鋼



- 106年度金屬試片回收(彰化#1)
- 107年4月14日拋放
- 107年6月30日回收

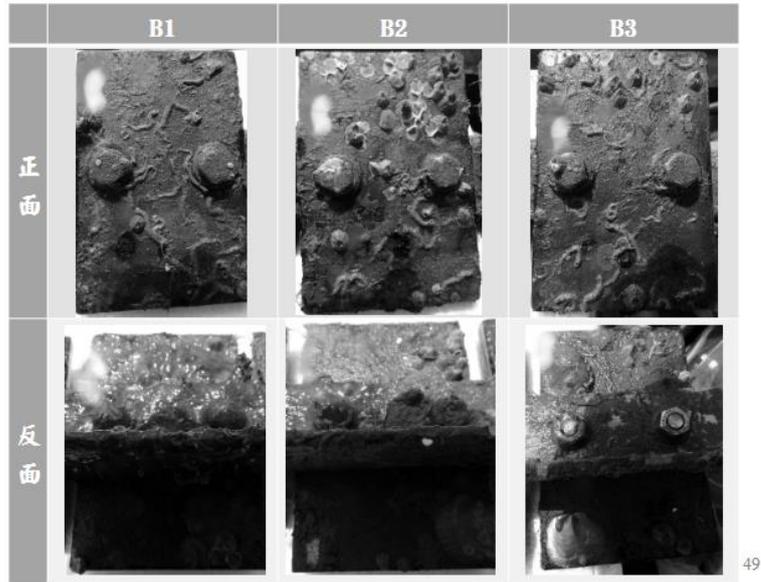
47

A36碳鋼現地採集記錄

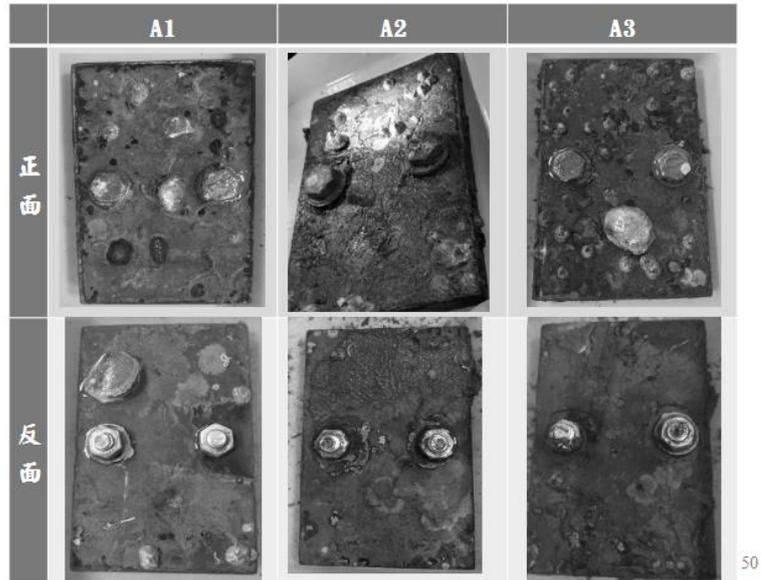


48

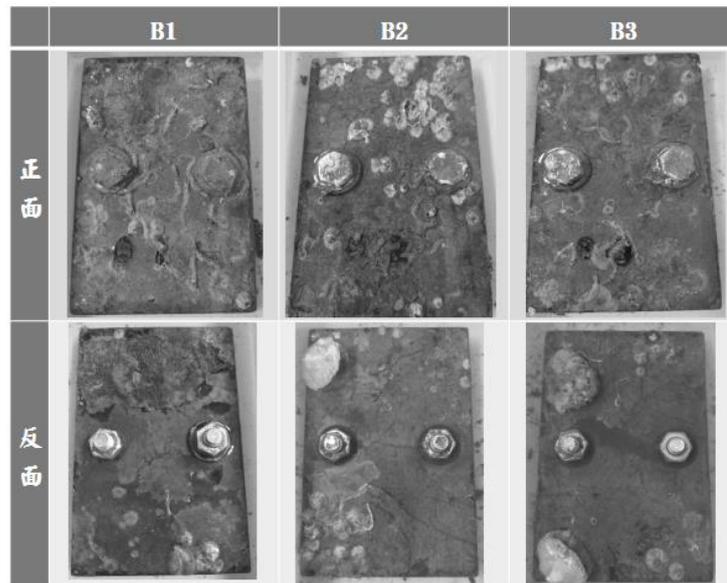
A572低合金鋼現地採集記錄



A36碳鋼研究調查記錄



A572低合金鋼研究調查記錄



51

金屬試片附著生物調查分析



試片材質：A36碳鋼/A572低合金鋼
暴露時間：約2.5月
(107.04.14~ 107.06.30)

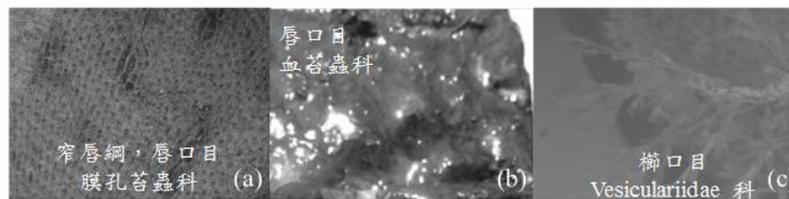
兩試片所觀察到的附著生物種類相似

金屬試片上以苔蘚動物門
(Phylum Bryozoa) 為主

白色鈣化格狀

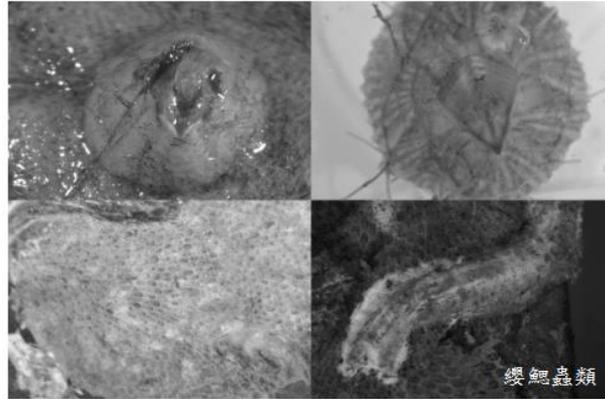
紅棕色片狀

樹枝狀



52

金屬試片附着生物調查分析



膜孔苔蟲科和*Amathia verticillata*
可附着在藤壺、貝類和多毛類的鈣化殼上

53

金屬試片附着生物調查分析

Plate Type	A 36碳鋼						A572低合金鋼					
	A1		A2		A3		B1		B2		B3	
試片編碼												
Species\ Side	正	反	正	反	正	反	正	反	正	反	正	反
*膜孔苔蟲科 sp.	103	88	102	74	89	109	97	76	95	96	94	101
*血苔蟲科 sp.	0	0	0	53	0	15	0	47	0	23	0	0
* <i>Amathia verticillata</i>	17	15	23	15	17	42	44	25	38	36	25	32
藤壺	69	13	58	1	35	20	49	19	68	31	58	17
二枚貝類	2	1	0	0	2	1	2	1	0	1	0	2
纓鰓蟲類	6	9	0	1	10	2	47	5	7	7	19	5

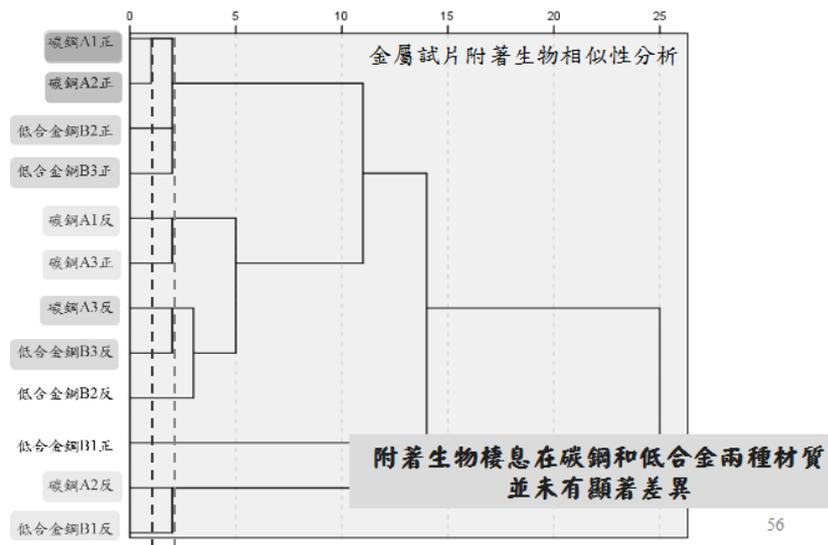
*苔蘚動物個體數難以計數，故以覆蓋面積(cm²)表示

54

金屬試片附着生物調查分析

Plate Type	A 36碳鋼						A572低合金鋼					
試片編碼	A1		A2		A3		B1		B2		B3	
Species\ Side	正	反	正	反	正	反	正	反	正	反	正	反
非附着性生物												
端足類 sp.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
槍蝦科 sp.	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
總和	197	126	183	144	153	189	240	174	208	194	196	158
種類數	5	5	3	5	5	6	6	7	4	6	4	6
豐度指數 (SR)	0.76	0.83	0.38	0.80	0.80	0.95	0.91	1.16	0.56	0.95	0.57	0.99
優勢性指數 (1/D)	0.60	0.48	0.57	0.59	0.59	0.60	0.72	0.70	0.65	0.68	0.66	0.54
歧異度指數 (H')	1.07	0.97	0.95	1.01	1.13	1.17	1.38	1.40	1.15	1.35	1.20	1.05
均勻度指數 (J')	0.67	0.60	0.87	0.63	0.70	0.65	0.77	0.72	0.83	0.76	0.87	0.58

金屬試片附着生物調查分析



彰化海域金屬試片腐蝕速率分析

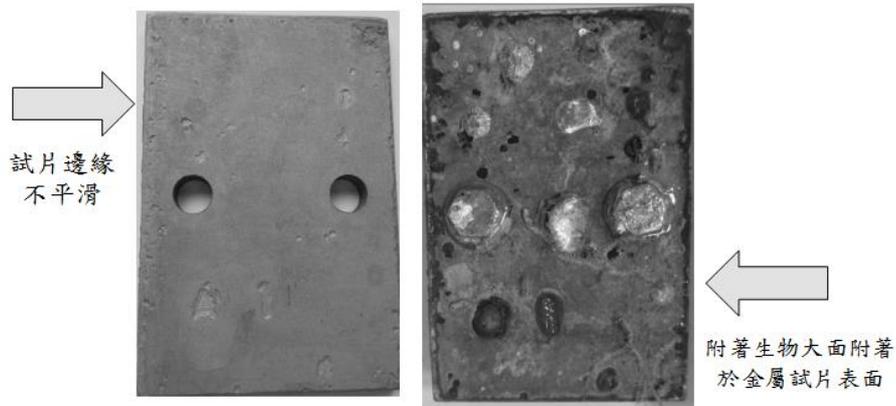
試片編號	A36碳鋼			A572低合金鋼		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3
原始重量(g)	1148.1	1137.8	1155.9	1138.2	1142.6	1143.9
試驗後重量(g)	1124.9	1127.1	1145.3	1126.0	1131.4	1132.3
重量變化(g)	23.2	10.7	10.6	12.2	11.2	11.6
表面積(cm ²)	350	350	350	350	350	350
密度(g/cm ³)	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8
腐蝕速率(mm/yr)	0.408	0.188	0.186	0.215	0.197	0.204
腐蝕速率(μm/yr)	407.9	188.1	186.4	214.5	196.9	204.0

平均腐蝕速率為
187.3μm/yr

平均腐蝕速率為
205.1μm/yr

57

彰化海域金屬試片腐蝕速率

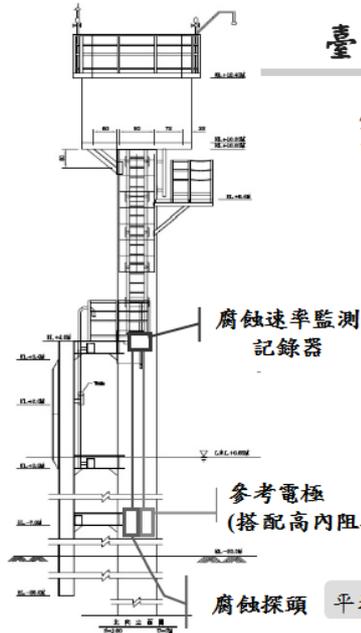


A1金屬試片之附着生物量並無顯著高於A2及A3，
由此可知，附着生物並非影響A1金屬試片腐蝕之主要成因。

推測可能因外力碰撞衝擊、磨損所導致

58

臺中港區基樁腐蝕監測系統規劃



臺中港海氣象觀測樁防蝕系統規劃所需之儀器包含：

- 腐蝕速率監測記錄器
- 高內阻抗數位電表、參考電極
- 腐蝕探頭

放置於水面上，乾燥通風良好之環境中

紀錄頻率為週，若有光纖網路，可連續進行資料回傳

平均低潮位下1m處

參考電極
(搭配高內阻抗數位電表)

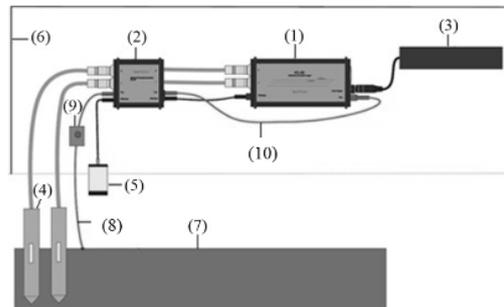
導線穿配進腐蝕速率監測記錄器內進行連續性監測

平均低潮位下1m處

腐蝕探頭

59

腐蝕速率監測記錄器示意圖



(Metricorr ICL-02i)

(1)	記錄器	(6)	防水測箱或防水保護盒
(2)	擴充瞬間保護模組	(7)	結構物(氣象觀測樁)
(3)	電池或電源	(8)	測試引線
(4)	腐蝕試片	(9)	訊號傳輸器
(5)	參考電極	(10)	訊號傳輸線

60

結論與建議

結論

- 臺中港區海域，冬、夏兩季之鹽度與pH變化並無顯著差異，水溫則因季節呈現夏高冬低之趨勢，顯見近岸淡水對此海域影響程度偏弱，夏季浮游植物生長繁盛，但其溶氧並無同步提升。

「溫度」與「浮游植物生長」並非主導臺中港區海域溶氧之主要因子。

- 彰化離岸風電預定海域於近岸測站夏季pH值為6.7，其值明顯低於一般海水之pH值，與事業、污水下水道系統及建築物污水處理設施之pH放流水標準6.0-9.0之標準下限相近，離岸較遠的彰化#2測站則無此情況出現。彰化海域於春、夏兩季浮游植物生長最為繁盛。

近岸受到陸源污染影響，pH值明顯偏低。

61

結論與建議

結論

- 臺中港區海域底泥平均粒徑(Dm)介於96.430~116.975 μm ，各深度皆無礫石，整體大致以砂質為主(可達66%)。
- 彰化海域泥平均粒徑(Dm)介於296.757~323.797 μm ，各深度皆無礫石；底泥的砂含量高於95%。於垂直深度30cm處之砂含量最低。
- 臺中港區海域和彰化海域底泥經微生物菌種分析後，均發現與腐蝕金屬材料之硫酸還原菌同屬(Genus)之微生物；然部分微生物之DNA序列並不存在於現有資料庫中，可能為臺灣尚未發表之微生物新種。

文獻提及之硫酸還原菌屬如：*Desulfovibrio*, *Desulfobacterium*, *Desulfotomaculum*, *Thiobacillus*, *Sulfurospirillum*, *Leptothrix*, *Crenothrix*, *Clostridium*, *Flavobacterium*, *Bacillus*, and *Pseudomonas*等。

62

結論與建議

結論

- 歷A36碳鋼及A572低合金鋼二種金屬試片所觀察到的附著生物種類相似，並無明顯差異。金屬試片上以群體出現的苔蘚蟲為主，其次有藤壺、纓鰓蟲類及少數的二枚貝附著。兩種材質的金屬試片通常正面生物量較多，正、反面種類數差異不大，其中血苔蟲科之苔蘚蟲只出現在反面；反面的豐富度較高；A572低合金鋼的生物多樣性較高；兩種材質的生物分布均勻度正面皆高於反面。
- 經金屬暴露試驗後之腐蝕速率分析，A36碳鋼平均腐蝕速率為187.3 $\mu\text{m}/\text{yr}$ ；A572低合金鋼平均腐蝕速率則為205.1 $\mu\text{m}/\text{yr}$ 。

A36碳鋼平均腐蝕速率低於A572低合金鋼。

63

結論與建議

建議

- 本研究之水質、底泥等環境調查皆於107年度進行採樣工作，然海洋環境與生物分布受海域、洋流、季節等多重因子交互影響，故欲掌握特定海域之生地化特性，建議以「季」作為估測週期，持續進行2-3年之現地觀察，以建立基礎海域背景參數值。
- 臺中與彰化海域，可於「春季」加強相關海上結構物之維護觀測與除污定檢等工作，以延長海上結構物使用年限，以及相關監測儀器之穩定度。
- 本研究透過金屬試架建置、拋放進行水下金屬暴露試驗，然水下環境受颱風、或冬季季風所造成之強勁水流影響，甚或淤沙掩埋、拖網勾拉等因素而造成位移，故建議將試驗金屬依附於固定樁體上進行試驗，即可大幅減低遺失風險。

64