

115-011-7E11

MOTC-IOT-114-H1CA001e

# 114 年臺灣地區金屬材料腐蝕 環境調查與銅金屬關聯性研究



交通部運輸研究所

中華民國 115 年 3 月

115-011-7E11  
MOTC-IOT-114- H1CA001e

# 114 年臺灣地區金屬材料腐蝕 環境調查與銅金屬關聯性研究

著 者：謝幼屏、蔡立宏、黃焜宏

交通部運輸研究所

中華民國 115 年 3 月

114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

交通部運輸研究所

GPN : 1011500172

定價 200 元

臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性  
研究. 114 年 / 謝幼屏, 蔡立宏, 黃烟宏著. --  
初版. -- 臺北市 : 交通部運輸研究所, 民  
115.03  
面 ; 公分  
ISBN 978-986-531-745-4(平裝)  
1.CST: 金屬材料 2.CST: 浸蝕 3.CST: 管理  
資訊系統 4.CST: 臺灣

440.35

115001235

114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

著者：謝幼屏、蔡立宏、黃烟宏

出版機關：交通部運輸研究所

地址：105004 臺北市敦化北路 240 號

網址：[www.iot.gov.tw](http://www.iot.gov.tw) (中文版>數位典藏>本所出版品)

電話：(04)2658-7200

出版年月：中華民國 115 年 3 月

印刷者：

版(刷)次冊數：初版一刷 45 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所網站

定價：200 元

展售處：

交通部運輸研究所運輸科技及資訊組•電話：(02)2349-6789

國家書店松江門市：104472 臺北市中山區松江路 209 號•電話：(02) 2518-0207

五南文化廣場：400002 臺中市中山路 6 號•電話：(04)2226-0330

GPN：1011500172 ISBN：978-986-531-745-4 (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。

## 交通部運輸研究所自行研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究			
國際標準書號(或叢刊號) ISBN 978-986-531-745-4 (平裝)	政府出版品統一編號 1011500172	運輸研究所出版品編號 115-011-7E11	計畫編號 MOTC-IOT-114-H1CA001e
本所主辦單位：運輸技術研究中心 主管：蔡立宏 計畫主持人：謝幼屏 研究人員：黃焜宏 參與人員：陳亭廷、陶德勇、陳育齊、王培源 聯絡電話：(04)2658-7200 傳真號碼：(04)2657-1329			研究期間 自 114 年 1 月  至 114 年 12 月
關鍵詞：金屬腐蝕、腐蝕因子、腐蝕環境			
摘要： <p>臺灣地處亞熱帶，屬高溫、高濕、高鹽的海島型氣候，金屬構件甚易腐蝕。為此，有必要建置本土之腐蝕環境資料及腐蝕因子資料庫，以利做為結構物防蝕設計與維護管理應用依據。本計畫主要工作項目包括：1.臺灣大氣腐蝕因子調查與金屬材料現地暴露試驗；2.港區水下腐蝕暴露試驗與海水水質調查；3.精進及擴充腐蝕資料庫；4.銅金屬與腐蝕因子關聯性分析。</p> <p>研究結果顯示，氣鹽沉積速率在北部至西部沿海地區以秋、冬2季數值較高，在東部沿海地區則以秋季、夏季數值較高，垂直海岸試驗線的平均氣鹽沉積速率，以花蓮港試驗線的秋、夏2季數值特別高；二氧化硫沉積速率除陽明山硫磺區、陽明山國家公園與北十八王公橋外，較高的二氧化硫沉積速率大多發生在臺中電廠、彰濱、官田、大發、臨海、龍德等產業園區，特定試驗點以彰濱產業園區冬季值最高，大發、臨海、龍德等產業園區夏季值次之。</p> <p>金屬腐蝕速率各垂直海岸試驗線之比較，碳鋼金屬在北部、西部試驗線的秋季腐蝕速率較高、4季差異較大；鋅金屬在秋、冬2季以中部臺中港、台塑六輕2條試驗線最高，在春、夏2季則以桃園試驗線最高；銅金屬以臺中港、台塑六輕2條試驗線在秋、冬2季的腐蝕速率最高；鋁金屬以西部的台塑六輕、臺中港、桃園等3條試驗線的腐蝕速率較高。</p> <p>銅金屬與腐蝕因子關聯性分析，運用迴歸分析法建立腐蝕因子與銅金屬腐蝕速率間的迴歸模式，結果顯示銅金屬腐蝕速率主要受到溫度、相對濕度、氣鹽沉積速率、二氧化硫沉積速率等4項腐蝕因子影響，兩者間為對數線性關係，模式為：<math>\ln(\text{Cu}_{\text{corr}}) = -6.085 + 0.116T + 0.042RH + 0.333\ln(\text{Cl}) + 0.267\ln(\text{SO}_2)</math>。依據模式進行銅金屬腐蝕速率預測與驗證，確認模式可供做銅金屬腐蝕環境分級之推估方式。</p> <p>研究成果效益及應用：</p> <p>調查成果擴增於腐蝕資料庫，並發行年報、公開於網站，具有提供相關單位瞭解構造物所處之腐蝕環境趨勢，以及選用金屬材料與防蝕工法之效益。可提供臺灣港務公司、中華民國防蝕工程學會、經濟部產業發展署、臺塑企業、中國鋼鐵公司、工程顧問公司等產官學界參考應用。</p>			
出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
115 年 3 月	231	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。
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: Investigation of Corrosive Environments for Metal Materials in Taiwan Region in 2025 and Correlation Analysis of Copper Metal and Corrosion Factors.			
ISBN (OR ISSN) 978-986-531-745-4 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1011500172	IOT SERIAL NUMBER 115-011-7E11	PROJECT NUMBER MOTC-IOT-114-H1CA001e
DIVISION: Transportation Technology Research Center DIVISION DIRECTOR: Li-Hung Tsai PRINCIPAL INVESTIGATOR: Yu-Ping Hsieh RESERACH FELLOW: Yan-Hong Huang PROJECT STAFF: Ting-Ting Chen, Te-Yung Tao, Yu-Chi Chen, Pei-Yuan Wang PHONE: 04-2658-7200 FAX: 04-2657-1329			PROJECT PERIOD FROM January 2025 TO December 2025
KEYWORDS: Metal Corrosion, Corrosion Factor, Corrosive Environment			
<p><b>Abstract:</b></p> <p>Taiwan, situated in the subtropics, experiences a hot, humid, and saline island climate, making metal components highly susceptible to corrosion. Therefore, it is essential to establish a local corrosion database to serve as a basis for corrosion-resistant design and maintenance management of structures. The main tasks of this project include: 1. Investigation of atmospheric corrosion factors in Taiwan and exposure testing of metal materials; 2. Underwater corrosion exposure testing and seawater quality investigation; 3. Refinement and expansion of the corrosion database; 4. Correlation analysis between Zinc metal corrosion and corrosion factors.</p> <p>The study results show that chloride deposition rates are higher in autumn and winter along the northern and western coastal areas, and higher in autumn and summer along the eastern coastal areas. The average chloride deposition rate along the vertical coastline test lines is particularly high in autumn and summer at the Hualien Port test line. Sulfur dioxide deposition rates, except in the Yangmingshan sulfur area, Yangmingshan National Park, and the Beishibawangong Bridge, are mostly found in industrial parks such as Taichung Power Plant, Changbin, Guantian, Dafa, Linhai, and Longde. At specific test sites, the Changbin Industrial Park has the highest values in winter, followed by the Dafa, Linhai, and Longde Industrial Parks in summer.</p> <p>A comparison of corrosion rates across different coastal test lines revealed that carbon steel showed higher corrosion rates in autumn on the northern and western test lines, with significant seasonal variations. Zinc corrosion rates were highest on the Taichung Port and Formosa Plastics Group's Sixth Naphtha Cracker test lines in central Taiwan during autumn and winter, and highest on the Taoyuan test line in spring and summer. Copper corrosion rates were highest on the Taichung Port and Formosa Plastics Group's Sixth Naphtha Cracker test lines in autumn and winter. Aluminum corrosion rates were highest on the Formosa Plastics Group's Sixth Naphtha Cracker, Taichung Port, and Taoyuan test lines in western Taiwan.</p> <p>Correlation analysis between copper corrosion rates and corrosion factors was conducted. Regression analysis was used to establish a regression model between corrosion factors and copper corrosion rates. The results showed that copper corrosion rates were mainly affected by four corrosion factors: temperature, relative humidity, chloride deposition rate, and sulfur dioxide deposition rate. The relationship between these factors was logarithmically linear, with the model: <math>\ln(\text{Cucorr}) = -6.085 + 0.116T + 0.042RH + 0.333\ln(\text{Cl}) + 0.267\ln(\text{SO}_2)</math>. The corrosion rate of copper metal was predicted and verified based on the model, confirming that the model can be used as a method for estimating the corrosion environment classification of copper metal.</p> <p><b>Benefits and Applications:</b></p> <p>The survey results are expanded into the corrosion database, and annual reports are issued and made public on the website, which can help relevant units understand the corrosion environment trends of the structures, as well as the benefits of selecting metal materials and anti-corrosion methods. The results can be provided as reference for all industrial, governmental and academic entities such as the Taiwan International Ports Corporation, the Corrosion Engineering Association of ROC, the Industrial Development Administration of MOEA, Formosa Plastics Group, China Steel Corporation, engineering consultants.</p>			
DATE OF PUBLICATION March 2026	NUMBER OF PAGES 231	PRICE 200	
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

# 114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查 與銅金屬關聯性研究

## 目 錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
目 錄.....	III
圖目錄.....	VII
表目錄.....	IX
第一章 前言.....	1-1
1.1 計畫目的.....	1-1
1.2 計畫之重要性.....	1-1
1.2.1 大氣腐蝕.....	1-1
1.2.2 水下腐蝕.....	1-2
1.3 國內腐蝕研究概況.....	1-3
1.3.1 大氣腐蝕研究概況.....	1-3
1.3.2 水下腐蝕研究概況.....	1-7
1.4 計畫工作項目.....	1-13
第二章 文獻回顧.....	2-1
2.1 大氣腐蝕測試規範.....	2-1
2.1.1 國外 ISO 大氣腐蝕環境分類.....	2-1
2.1.2 中華民國國家標準 CNS 規範.....	2-4
2.2 大氣腐蝕因子介紹.....	2-5

2.3	影響大氣腐蝕的因子 .....	2-7
2.4	鋼材在海水之腐蝕 .....	2-9
2.5	影響鋼板樁腐蝕之因子 .....	2-10
2.5.1	暴露區域 .....	2-10
2.5.2	海水的性質 .....	2-12
2.6	大氣腐蝕環境因子之參數建立 .....	2-20
2.7	迴歸分析於大氣腐蝕應用 .....	2-21
第三章	研究方法與試驗點位置資料圖表 .....	3-1
3.1	大氣暴放環境 .....	3-1
3.1.1	氯鹽沉積速率試驗調查 .....	3-1
3.1.2	氯鹽沉積速率計算 .....	3-6
3.1.3	二氧化硫沉積速率調查 .....	3-7
3.1.4	二氧化硫沉積速率計算 .....	3-11
3.1.5	現地暴露試驗 .....	3-12
3.1.6	試片腐蝕速率計算 .....	3-15
3.1.7	試片腐蝕生成物清除與測試 .....	3-15
3.2	腐蝕因子環境分類 .....	3-18
3.3	海洋暴放環境 .....	3-21
3.3.1	研究方法與規劃 .....	3-21
3.3.2	各港區海水下金屬暴露試驗 .....	3-22
3.3.3	試片腐蝕速率分析方法 .....	3-29
3.3.3.1	試片定期採樣之處理分析方法 .....	3-29
3.3.3.2	試片腐蝕分析步驟 .....	3-29

3.3.3.3 腐蝕速率計算 .....	3-30
第四章 大氣腐蝕因子與現地暴露試驗.....	4-1
4.1 氯鹽沉積速率調查結果.....	4-1
4.2 二氧化硫沉積速率調查結果.....	4-6
4.3 現地暴露試驗結果.....	4-12
4.3.1 垂直海岸試驗線各金屬腐蝕速率之比較 .....	4-26
4.3.2 特定試驗點各金屬腐蝕速率之比較 .....	4-26
第五章 銅金屬腐蝕關聯性統計分析.....	5-1
5.1 關聯性統計分析方法.....	5-2
5.2 迴歸分析.....	5-5
5.3 大氣腐蝕環境分級預測.....	5-17
5.4 小結.....	5-18
第六章 結論與建議.....	6-1
6.1 結論.....	6-1
6.2 建議.....	6-3
6.3 研究成果之效益.....	6-4
6.4 提供政府單位應用情形.....	6-4
參考文獻.....	參-1
附錄一 腐蝕生成物清除檢量線、腐蝕速率等位線分布圖及腐蝕環境分類圖.....	附錄 1-1
附錄二 專家學者座談會會議紀錄.....	附錄 2-1
附錄三 第 1 次工作會議紀要.....	附錄 3-1
附錄四 第 2 次工作會議紀要.....	附錄 4-1
附錄五 第 3 次工作會議紀要.....	附錄 5-1

附錄六 期末審查意見及辦理情形說明表..... 附錄 6-1

附錄七 期末報告簡報資料..... 附錄 7-1

## 圖 目 錄

圖 2.1	ISO 9223:2012 大氣腐蝕環境分類 .....	2-2
圖 2.2	大氣腐蝕環境分類規範制訂歷程.....	2-4
圖 2.3	水溶液系統之腐蝕程序示意圖.....	2-9
圖 2.4	鋼板樁暴露區域與腐蝕速率之關係.....	2-11
圖 2.5	海水含鹽量與溶氧量、pH 值、溫度、水深之關係.....	2-13
圖 2.6	鋼材腐蝕速率與 pH 值之關係.....	2-14
圖 2.7	鋼材腐蝕速率與溶氧量之關係.....	2-15
圖 2.8	鋼材腐蝕速率與海水流速之關係.....	2-17
圖 2.9	碼頭鋼板樁遭受雜散電流之情形.....	2-18
圖 3.1	氯鹽沉積速率調查位置.....	3-5
圖 3.2	濕燭法燭心構造示意圖(CNS 13754).....	3-6
圖 3.3	濕燭法裝置構造圖(CNS 13754).....	3-6
圖 3.4	氯鹽沉積量採集裝置.....	3-7
圖 3.5	二氧化硫沉積速率調查位置圖.....	3-10
圖 3.6	二氧化硫沉積量採集裝置構造圖(CNS 13754).....	3-11
圖 3.7	二氧化硫沉積量採集裝置.....	3-11
圖 3.8	螺旋狀試片構造圖(CNS 13753:1996).....	3-13
圖 3.9	螺旋狀試片暴露試驗.....	3-13
圖 3.10	現地暴露試驗(碳鋼、鋅、鋁、銅螺旋狀試片)試驗點分佈圖 .....	3-14
圖 3.11	腐蝕生成物清除法作業流程圖.....	3-17
圖 3.12	水下腐蝕研究方法與規劃.....	3-21

圖 3.13	水下金屬腐蝕試驗架示意圖.....	3-27
圖 3.14	基隆港水下金屬暴露試驗架安裝.....	3-28
圖 3.15	水下金屬腐蝕生成物清除作業流程圖.....	3-29
圖 4.1	垂直海岸試驗線之氯鹽平均沉積速率.....	4-5
圖 4.2	特定試驗點之二氧化硫沉積速率.....	4-11
圖 4.3	垂直海岸試驗線碳鋼金屬腐蝕速率比較圖.....	4-28
圖 4.4	垂直海岸試驗線鋅金屬腐蝕速率比較圖.....	4-28
圖 4.5	垂直海岸試驗線銅金屬腐蝕速率比較圖.....	4-29
圖 4.6	垂直海岸試驗線鋁金屬腐蝕速率比較圖.....	4-29
圖 4.7	特定測站碳鋼金屬腐蝕速率比較圖.....	4-30
圖 4.8	特定測站鋅金屬腐蝕速率比較圖.....	4-30
圖 4.9	特定測站銅金屬腐蝕速率比較圖.....	4-31
圖 4.10	特定測站鋁金屬腐蝕速率比較圖.....	4-31
圖 5.1	迴歸分析的步驟.....	5-3
圖 5.2	3 變數線性迴歸模式的常態機率圖.....	5-10
圖 5.3	3 變數線性迴歸模式的殘差圖.....	5-10
圖 5.4	對數線性模式的常態機率圖.....	5-14
圖 5.5	對數線性模式的殘差圖.....	5-15

## 表 目 錄

表 1-1	國內大氣腐蝕試驗相關研究歷程 .....	1-4
表 1-2	國內水下腐蝕試驗相關研究歷程 .....	1-9
表 2-1	大氣腐蝕性分級對比 .....	2-3
表 3-1	氯鹽沉積速率調查試驗點規劃分類表 .....	3-3
表 3-2	二氧化硫沉積速率調查試驗點分佈表 .....	3-9
表 3-3	化學清洗法使用藥品及條件 .....	3-16
表 3-4	濕潤環境等級分類表 .....	3-19
表 3-5	氯鹽腐蝕環境等級分類表 .....	3-19
表 3-6	二氧化硫腐蝕環境等級分類表 .....	3-19
表 3-7	大氣腐蝕環境分類-以各種標準金屬最初第 1 年之腐蝕速率區分 .....	3-20
表 3-8	各港區金屬材料水下腐蝕試片尺寸與安裝取樣期程(1/4) ..	3-23
表 3-9	各港區金屬材料水下腐蝕試片尺寸與安裝取樣期程(2/4) ..	3-24
表 3-10	各港區金屬材料水下腐蝕試片尺寸與安裝取樣期程(3/4) ..	3-25
表 3-11	各港區金屬材料水下腐蝕試片尺寸與安裝取樣期程(4/4) ..	3-26
表 4-1	氯鹽沉積速率表.....	4-3
表 4-2	二氧化硫沉積速率表 .....	4-8
表 4-3	特定試驗點之二氧化硫沉積速率表 .....	4-10
表 4-4	碳鋼金屬之腐蝕速率表 .....	4-14
表 4-5	鋅金屬之腐蝕速率表 .....	4-17
表 4-6	銅金屬之腐蝕速率表 .....	4-20
表 4-7	鋁金屬之腐蝕速率表 .....	4-23

表 5-1	迴歸模式變數說明 .....	5-6
表 5-2	線性迴歸模式.....	5-7
表 5-3	3 變數線性迴歸模式 .....	5-8
表 5-4	對數線性模式.....	5-12
表 5-5	對數線性模式之標準化迴歸係數 .....	5-16
表 5-6	以模式進行預測時之解釋變數應用範圍 .....	5-17

# 第一章 前言

## 1.1 計畫目的

臺灣地處亞熱帶，屬高溫、高濕、高鹽的海島型氣候，又因工業蓬勃發展及車輛急劇成長，依據國際標準組織(ISO)的大氣腐蝕環境分類準則(分為 C1 到 CX 等級)，臺灣沿岸區域幾乎全為嚴重腐蝕等級 C5，部分地區甚至達到最高的 CX 等級。有鑑於腐蝕環境品質影響交通建設及工業發展甚鉅，本所本於交通部之權責支援交通基礎設施設計、維護事宜，進行大氣腐蝕因子調查與金屬腐蝕試驗，目前為國內提供產官學各界完整長期金屬材料腐蝕環境分類應用之唯一單位。為利公共工程之防蝕設計，延長結構物之使用壽齡及降低維護成本，爰廣續辦理本研究。

## 1.2 計畫之重要性

### 1.2.1 大氣腐蝕

臺灣為一海島，四面環海，高溫、高濕與高鹽份的環境，加上空氣污染的結果，腐蝕環境嚴重。歷年來公共工程建設常引用國外大氣腐蝕數據進行腐蝕速率評估與防蝕設計，結果常有未及設計年限就已銹蝕損壞的情形；有鑑於此，大氣腐蝕因子的調查與掌握，對金屬與鋼筋混凝土結構物耐久性防蝕設計的影響，有其重要性。

然而臺灣缺乏完整的本土化大氣腐蝕因子資料庫。自 1971 年起，國內各研究單位曾陸續以試片腐蝕速率的量測方式，進行臺灣大氣腐蝕環境分類，然而因試驗場址維護不易，各地區鮮少有持續 10 年以上的腐蝕數據，且大部份的研究亦止於 1995 年。隨著氣候變遷與工業的發展，為達到結構物耐久性防蝕設計的目的，目前若仍引用過去腐蝕因子之調查數據，腐蝕速率的估算恐會產生過與不及的疑慮；有鑑於此，本所乃自 2007 年起迄今規劃並辦理臺灣地區大氣腐蝕試驗相關研究，長期針對臺灣全島區域進行大氣腐蝕劣化因子調查，完成臺灣大氣腐

蝕環境的分類工作，並根據調查結果建立大氣腐蝕環境分類資料庫，規劃一適合國內環境需求的大氣腐蝕劣化因子查詢系統，做為日後新建與既有金屬及鋼筋混凝土結構物辦理防蝕設計與維護管理之依據。

### 1.2.2 水下腐蝕

臺灣四面環海，沿海除了有海港碼頭、防波堤等港工設施外，鑽油平臺、跨海大橋等皆處於海洋環境中。常因颱風來襲造成重大損失，如民國 83 年提姆、道格颱風過境，造成花蓮港、蘇澳港、龍洞遊艇港及高雄港等，多處港工設施破壞、沈陷等重大損害。顯示出相當部分的港工設施，已面臨或提早到達設計年限，究其原因，各港工結構面臨險惡之海洋環境而被腐蝕、侵襲，造成材料彈性疲乏，強度損失，以致使用年限大為縮短，應為重要因素之一。

港工結構所使用的材料，除了石料之外、主要為鋼構材料及混凝土或鋼筋混凝土材料為主。其中鋼構材料如鋼板樁、鋼管樁及配合使用之拉縴鋼纜等各型鋼料，材質均有不同。其腐蝕之現象，由於在不同海域環境、季節、深度會產生不同腐蝕速率。根據本所過去所做相關研究報告，在臺灣各大港口使用鋼構材料的碼頭大多為鋼板樁式。發現其鋼板樁有嚴重破損、穿孔之腐蝕現象，以致部分碼頭壁後砂石掏空，岸肩沈陷，嚴重影響碼頭之結構安全。如蘇澳港之駁船碼頭，鋼板樁年腐蝕率超過 0.2 mm/yr，其他各港口亦有類似現象。隨著時空、氣候變遷，為達到結構物耐久性與防蝕設計需求，若仍引用過時且不完整之調查數據，對結構物之耐久性與腐蝕速率的估算，恐會產生過與不及的疑慮；臺灣近 10 年來並無任何單位進行完整性全島區域之水下腐蝕因子之調查與研究，因此，本計畫延續過去相關研究，進行水下環境腐蝕因子與金屬材料水下長期暴放試驗與資料庫建置計畫，做為新建與既有結構物耐久性與防蝕設計及維護管理之參考。

## 1.3 國內腐蝕研究概況

### 1.3.1 大氣腐蝕研究概況

國內從事大氣腐蝕試驗的眾多研究單位中以台灣電力公司最早，自 1971 年起先後於金山、鹽寮、七美風力發電廠址等地，進行 2 年期的金屬材料及塗料塗裝耐蝕性基本資料調查。金屬工業研究所(目前已併入工業技術研究院)在 1971 年左右亦曾在彰濱一帶從事塗裝耐蝕性暴露試驗調查。工業技術研究院工業材料研究所自 1983 年起與台電公司合作在林口、澎湖、陽明山、大屯山及其它多處地點，從事 1~5 年不等的金屬材料及塗裝系統之暴露試驗。臺灣大學自 1987 年起與台灣電力公司合作探討腐蝕因子與金屬腐蝕率之關係。中華電信研究所在 1984 年曾進行為期 2 年之暴露試驗，探討保安盒外殼中密度聚丁烯、及鍍鋅、鍍鋁、55% 鍍鋁鋅鋼絞線的耐久性及其耐蝕性。中國鋼鐵公司約自 1990 年起配合鋼材開發需求，開始從事較有系統之鋼鐵材料大氣耐蝕性試驗。中山科學研究院於 1987~1990 年在臺北市各區利用 A.C.I、M.C.I、I.C.I 等 3 種腐蝕指標試驗裝置，廣泛調查臺北市各地大氣腐蝕類性變化。綜合言之，2000 年以前各單位從事現地大氣腐蝕暴露試驗的研究頗多，可惜無系統性的調查，數據多為定性或半定量且較無長期試驗數據，以致在試驗結果上整合困難，難以轉化成基本資料。

2001 年，工業技術研究院材料與化工研究所(以下簡稱工研院材化所)受內政部國土管理署委託執行「臺灣地區結構物腐蝕潛勢分區研擬」計畫，主要工作內容為協助規劃全國大氣腐蝕試驗(含試驗項目、試驗場址選擇等)，惟 1 年後因經費問題而未執行相關試驗工作。2004~2005 年，工研院材化所協助台灣高鐵公司進行高鐵沿線大氣腐蝕調查工作，評估熱浸鍍鋅鋼材與軌道碳鋼扣件之大氣腐蝕狀況並進行服務壽命計算；有別於現地大氣腐蝕暴露試驗，工研院材化所於計畫執行期間首次採用 ISO 9223<sup>[1]</sup>環境因子分類方法，依據中央氣象署公佈之相對濕度資料、環境部公佈之 SO<sub>2</sub> 濃度與過去各單位調查研究之氯離子沉積速率，進行臺灣本島大氣腐蝕環境分類，並比較過去現地暴露試驗之結果。惟估算時使用之氣象與空氣污染資料僅止於 2000 年，且無 SO<sub>2</sub> 與

氣鹽沉積量之實際量測數據，因此，多數地區僅推估出一概括性的大氣腐蝕環境分類。

本所於 2007 年 3 月至 2008 年 10 月委託工研院材化所執行「臺灣地區大氣腐蝕劣化因子調查研究」<sup>[2-3]</sup>，針對臺灣全島地區進行大氣腐蝕劣化因子調查，並持續執行大氣腐蝕因子調查及腐蝕環境分類研究<sup>[4-15]</sup>迄今。目前，建置氣鹽沉積量調查 65 個試驗點，二氧化硫沉積量調查 55 個試驗點，現地暴露試驗調查 90 個試驗點，進行試驗取樣與分析工作。相關國內大氣腐蝕研究歷程，如表 1-1 所示。

表 1-1 國內大氣腐蝕試驗相關研究歷程

研究單位	研究方向	測試地點	研究期間
台灣電力公司	金屬材料耐蝕性基本資料調查(碳鋼、不銹鋼、鍍鋅鋼、鋁、鋁合金、銅、銅合金等)	金山 (核一廠)	1971.12-1974.7
		澎湖	1984.9-1985.8
		土城	1984.7-1986.6
		林口發電廠	1988.5-1990.4
	金屬塗裝耐蝕性調查(在碳鋼上塗裝鋅、鋁、銅、鋅/鋁、銅/鋅等不同塗料)	澎湖,陽明山,林口發電廠	1989.1-1990.12
工業技術研究院	金屬材料及塗裝系統暴露試驗(碳鋼上漆與不上漆)	林口發電廠	1983.7-1987.6
		澎湖	1984.7-1987.6
		金山- 汐止	1984.7-1985.6
	金屬材料及塗裝系統暴露試驗(碳鋼和耐候鋼上漆與不上漆)	臺西	1984.11-1987.6

研究單位	研究方向	測試地點	研究期間
	金屬材料及塗裝系統暴露試驗(碳鋼、304 與 316 不銹鋼、銅、鋁、鋅，以及碳鋼上塗裝鋁、鋁/鋅(5/95))	陽明山	1986.7-1987.6
	金屬材料及塗裝系統暴露試驗(碳鋼、不鏽鋼、耐候鋼、鍍鋅鋼、鋁合金、銅合金等)	陽明山、頭城、樹林、新竹、臺中港、奮起湖、興達電廠、高雄、花蓮、澎湖	1987.7-1992.6
	金屬材料暴露試驗 (ISO 9226 規範之碳鋼、鋅、銅、鋁)	竹東、小港、佳洛水、麥寮、枋山、斗南、臺東、大武、新營、土城、以及 1987 至 1992 之測試地點	1992.7-1995.6
	依據 ISO 9223 環境因子分類方法，使用中央氣象署公佈之相對濕度資料、環保署公佈之 SO <sub>2</sub> 濃度與過去各單位調查研究之氣離子沉積速率數據，進行臺灣本島大氣腐蝕環境分類		2004-2005
中華電信研究所	鍍鋅、鍍鋁、55% 鍍鋁鋅鋼絞線的耐久性耐蝕性	澎湖、基隆、北投、高雄、屏東、臺東	1984-1986
臺灣大學	金屬材料試驗(SS41、鍍鋅鋼、鍍鋅/鋁鋼、304 不鏽鋼、銅、953 銅合金、鋁、356 鋁合金)	蘇澳港、臺北市、頭城、宜蘭、高雄、臺中港、林口發電廠、興達電廠、通霄發電廠	1987.5-1990.1
成功大學	金屬材料試驗(SS440、耐候鋼、304 不鏽鋼、430 不鏽鋼、鍍鋅鋼、鍍鋅/鋁鋼、銅和銅合金)	臺南市、安平工業區	1998.4-2001.4
中國鋼鐵公司	鋼鐵材料大氣耐蝕性試驗(碳鋼、耐候鋼)	中山大學、中鋼、新竹	1990.8-present
	鋼鐵材料大氣耐蝕性試驗(碳鋼、耐候鋼、鍍鋅鋼)	中山大學、中鋼、新竹、樹林、林口電廠	1993.12-present
交通部運輸研究所與工業技術研究院合作辦理	臺灣地區大氣腐蝕劣化因子調查研究(1/2) <sup>[2]</sup>	氣鹽沉積量調查 77 個試驗點，二氧化硫沉積量調查 54 個試驗點，現地暴露試驗調查 88 個試驗點	2007.03-2007.10
	臺灣地區大氣腐蝕劣化因子調查研究(2/2) <sup>[3]</sup>		2008.02-2008.10

研究單位	研究方向	測試地點	研究期間
交通部運輸研究所	大氣腐蝕因子調查及腐蝕環境分類之研究(1/4) <sup>[4]</sup>	氯鹽沉積量調查 61 個試驗點， 二氧化硫沉積量調查 51 個試驗點， 現地暴露試驗調查 87 個試驗點	2010.07- 2011.12
	大氣腐蝕因子調查及腐蝕環境分類之研究(2/4) <sup>[5]</sup>	氯鹽沉積量調查 61 個試驗點， 二氧化硫沉積量調查 51 個試驗點， 現地暴露試驗調查 87 個試驗點	2012.01- 2012.12
	大氣腐蝕因子調查及腐蝕環境分類之研究(3/4) <sup>[6]</sup>	氯鹽沉積量調查 60 個試驗點， 二氧化硫沉積量調查 49 個試驗點， 現地暴露試驗調查 87 個試驗點	2013.01- 2013.12
	大氣腐蝕因子調查及腐蝕環境分類之研究(4/4) <sup>[7]</sup>	氯鹽沉積量調查 61 個試驗點， 二氧化硫沉積量調查 50 個試驗點， 現地暴露試驗調查 88 個試驗點	2014.01- 2014.12
交通部運輸研究所	金屬材料腐蝕環境調查研究(1/2) <sup>[8]</sup>	氯鹽沉積量調查 61 個試驗點， 二氧化硫沉積量調查 50 個試驗點， 現地暴露試驗調查 88 個試驗點	2015.01- 2015.12
	金屬材料腐蝕環境調查研究(2/2) <sup>[9]</sup>	氯鹽沉積量調查 61 個試驗點， 二氧化硫沉積量調查 50 個試驗點， 現地暴露試驗調查 90 個試驗點	2016.01- 2016.12
交通部運輸研究所	臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查研究 (1/4) <sup>[10]</sup>	氯鹽沉積量調查 61 個試驗點， 二氧化硫沉積量調查 57 個試驗點， 現地暴露試驗調查 94 個試驗點	2017.01- 2017.12
交通部運輸研究所	臺灣沿岸地區金屬材料腐蝕環境調查研究 <sup>[11]</sup> 水下金屬試驗暴露試驗第 1 年	氯鹽沉積量調查 61 個試驗點， 二氧化硫沉積量調查 57 個試驗點， 現地暴露試驗調查 94 個試驗點	2018.01- 2018.12
交通部運輸研究所	108 年臺灣沿岸地區金屬材料腐蝕環境調查研究 <sup>[12]</sup> 水下金屬試驗暴露試驗第 2 年	氯鹽沉積量調查 61 個試驗點， 二氧化硫沉積量調查 57 個試驗點， 現地暴露試驗調查 94 個試驗點	2019.01- 2019.12

研究單位	研究方向	測試地點	研究期間
交通部運輸研究所	109 年臺灣沿岸地區金屬材料腐蝕環境調查研究 <sup>[13]</sup>	氯鹽沉積量調查 61 個試驗點，二氧化硫沉積量調查 57 個試驗點，現地暴露試驗調查 94 個試驗點	2020.01-2020.12
交通部運輸研究所	110 年臺灣沿岸地區金屬材料腐蝕環境調查研究 <sup>[14]</sup>	氯鹽沉積量調查 66 個試驗點，二氧化硫沉積量調查 55 個試驗點，現地暴露試驗調查 91 個試驗點	2021.01-2021.12
交通部運輸研究所	111 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與工業區關聯性研究 <sup>[15]</sup>	氯鹽沉積量調查 64 個試驗點，二氧化硫沉積量調查 54 個試驗點，現地暴露試驗調查 89 個試驗點	2022.01-2022.12
交通部運輸研究所	112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究 <sup>[16]</sup> 水下金屬試驗暴露試驗第 5 年後	氯鹽沉積量調查 65 個試驗點，二氧化硫沉積量調查 55 個試驗點，現地暴露試驗調查 90 個試驗點	2023.01-2023.12
交通部運輸研究所	113 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與鋅金屬關聯性研究 <sup>[76]</sup>	氯鹽沉積量調查 65 個試驗點，二氧化硫沉積量調查 55 個試驗點，現地暴露試驗調查 90 個試驗點	2024.01-2024.12
交通部運輸研究所	114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究	氯鹽沉積量調查 65 個試驗點，二氧化硫沉積量調查 55 個試驗點，現地暴露試驗調查 90 個試驗點	2025.01-2025.12

### 1.3.2 水下腐蝕研究概況

自 1986 年第 3 屆全國科技會議之決議，將腐蝕防蝕工程技術之研究列為國家重點科技，並整體規劃國內相關技術研究能力，以達到更有效處理國內所遭遇到之問題，因此，本所運輸技術研究中心(改隸前為臺灣省政府交通處港灣技術研究所)與工業技術研究院工業材料研究所，中鋼公司及中華民國防蝕工程學會等單位，自 1986 年 7 月至 1991 年 6 月共同合作研究臺灣海域腐蝕特性防蝕設計材料選用及開發特性<sup>[17]</sup>，各發揮所長共同尋求有效發展防蝕材料與方法。在海洋結構物與

鋼筋混凝土材料於各海域腐蝕特性研究，陰極防蝕工程開發設計、防蝕塗料材料、表面被覆構件之腐蝕偵測技術及各種金屬，如碳鋼、不銹鋼、鋁合金等水下腐蝕速率比較，並邀請相關國內外學者專家來講述防蝕技術及推廣教育工作並協調各施工單位，擬定長期合作計畫。另外自1986年7月至1991年6月，針對港灣 R.C 結構物之耐久性提供良好之設計與施工規範，提出港灣鋼筋混凝土結構物耐久性研究計畫<sup>[25]</sup>，並對各港之 RC 結構物之腐蝕特性做一通盤性之瞭解<sup>[19]</sup>，並提供防蝕良策以為進行維修工作之參考，做為日後建港之參考。於1988年展開澎湖跨海大橋腐蝕問題研究調查<sup>[20]</sup>，剖析跨海大橋腐蝕原因，建立腐蝕調查及研究之邏輯，以澎湖跨海大橋中間段在改建路堤工程未完工前，原橋梁應作修補工作之建議並提供新建工程防蝕對策，提供國內交通橋梁及主要公共措施定期腐蝕調查與安全評估偵測之參考。

從早期的調查研究發現，各港口鋼板樁碼頭腐蝕狀況差異極大，因此於1989年7月至1994年6月進行港灣鋼結構物耐久性研究<sup>[21-24]</sup>，了解港灣鋼結構物能在設計使用年限內安全發揮功能，建立定期檢查制度及優先考慮裝設適當之防蝕措施。通盤了解及建立現有各港口鋼結構物耐久性之完整資料，以利日後新建鋼結構或維修現有鋼結構物之規範。但由於海洋結構物修理較為困難，修理後常感效果不彰，經常需要再做重複之修理，浪費人力、物力，於1992年7月至1993年6月進行港灣鋼筋混凝土結構物修理系統評估研究<sup>[25]</sup>，各大港口鋼筋混凝土結構物之現況做一調查，並對其修理方法進行通盤瞭解並檢討優劣點。在1995年6月至1996年7月港灣構造物腐蝕機理與維修防制之研究<sup>[26]</sup>為延續港灣鋼結構物之耐久性研究進行高雄港與基隆港之鋼板(管)樁腐蝕調查，探討水文及污損生物對陰極保護、防污塗料、混凝土、不銹鋼、裸鋼等材料腐蝕之影響。1996年6月至2001年7月現有結構物安全評估及維護研究<sup>[27-30]</sup>，調查基隆港、蘇澳港、高雄港區內港工結構材料之海生物附著種類<sup>[31-33]</sup>，並檢討其對港灣常用材料，如碳鋼及混凝土等之腐蝕及海生物附著影響，以及探討添加飛灰之混凝土與安裝犧牲陽極材料對於防制海生物附著或材料腐蝕之效果。計畫中建立

R.C.結構物劣化非破壞性檢測技術、電化學維修技術工法、港區內水文與海生物附著對結構體(鋼構物)腐蝕之相互關係，並完成港灣結構物陰極防蝕準則草案之訂定(R.C.結構物部份)，建立完善之維護制度，提供各港務局使用，2000年後持續進行之水下腐蝕研究計畫甚多，相關國內水下腐蝕試驗研究歷程，整理如表 1-2 所示。

表 1-2 國內水下腐蝕試驗相關研究歷程

研究單位	研究方向	研究說明	研究期間
臺灣省交通處港灣技術研究所、中國鋼鐵公司、工業技術研究所工材所合作辦理	臺灣海域之腐蝕特性、防蝕設計、材料之選用及開發研究 <sup>[17]</sup>	海洋結構物與鋼筋混凝土材料於各海域腐蝕特性研究，陰極防蝕工程開發設計、防蝕塗料材料、表面被覆構件之腐蝕偵測技術，及各種金屬如碳鋼、不銹鋼、鋁合金等水下腐蝕速率比較，並邀請相關國內外學者專家講述防蝕技術及推廣教育工作，並協調各施工單位，擬定長期合作計畫。	1986.07-1991.06
臺灣省政府交通處港灣技術研究所	基隆港碼頭鋼板樁腐蝕調查研究 <sup>[18]</sup>	由於碼頭鋼板樁經年累月浸泡在海水中，會受沖蝕、水溫、溶氧、PH 值、鹽度、海流速率、海生物、汙染、風、相對濕度等因素影響而腐蝕，使鋼材厚度變薄，若腐蝕速率超過設計規範(0.20mm/yr)，就會影響其碼頭之安全性。本研究基隆港務局委託本所調查東 2 號~東 4 號、東 6 號~東 8 號、及西 27 號碼頭鋼板樁現況並研提改善對策。	1990.03-1990.06

研究單位	研究方向	研究說明	研究期間
臺灣省政府 交通處港灣 技術研究所	澎湖跨海大橋腐蝕調 查研究 <sup>[20]</sup>	1986 年中美聯合防蝕研討會會議結 論，指出我國交通橋梁及主要公共設 施應定期辦理腐蝕調查及安全性評 估。會後行政院科技顧問組即指示進 行初步調查研究。成果如下： 1. 充份瞭解澎湖跨海大橋腐蝕劣化現 況及機理，做為新建工程設計及施 工人員應注意防範事項，及使用 者之維修參考，以提高施工技術及工 程品質，減少因腐蝕所造成之損失。 2. 增進對鋼筋混凝土等營建材料耐久 性之認知，俾提供國內各單位做更 進一步相關研究之基礎與方向。 3. 使用之調查及研究方法，可做為偵 測鋼筋混凝土腐蝕狀況之參考，以 求事先加以防範，減少修護或重建 之浪費。 4. 提供修補及防蝕對策，以延續橋梁 之服務效能。	1987.01- 1987.12
臺灣省政府 交通處港灣 技術研究所	港灣鋼構造物耐久性 研究 <sup>[21-24]</sup>	瞭解港灣鋼結構物能在設計使用年限 內安全發揮功能，建立定期檢查制度 及優先考慮裝設適當之防蝕措施。 建立現有各港口鋼結構物耐久性之完 整資料，以利日後新建鋼結構或維修 現有鋼結構物之規範。	1989.07- 1994.06
臺灣省政府 交通處港灣 技術研究所	港灣鋼筋混凝土結構 物耐久性研究 <sup>[25]</sup>	調查各大港口鋼筋混凝土結構物之現 況，並對其修理方法進行通盤瞭解並 檢討優劣點。	1986.07- 1991.06
臺灣省政府 交通處港灣 技術研究所 與海洋大學 合作辦理	港灣構造物腐蝕機理 與維修防制之研究 <sup>[26]</sup>	延續港灣鋼結構物之耐久性研究進行 高雄港與基隆港之鋼板(管)樁腐蝕調 查，探討水文及污損生物對陰極保護、 防污塗料、混凝土、不銹鋼、裸鋼等材 料腐蝕之影響。	1995.06- 1996.07

研究單位	研究方向	研究說明	研究期間
交通部運輸研究所	現有結構物安全評估及維護研究 <sup>[27-30]</sup>	調查基隆港、蘇澳港、高雄港區內港工結構材料之海生物附著種類，並檢討其對港灣常用材料如碳鋼及混凝土等之腐蝕及海生物附著影響以及探討添加飛灰之混凝土與安裝犧牲陽極材料對於防制海生物附著或材料腐蝕之效果。計畫中建立 R.C.結構物劣化非破壞性檢測技術、電化學維修技術工法、港區內水文、海生物附著對結構體(鋼構物)腐蝕之相互關係，並完成制定港灣結構物陰極防蝕準則草案之 R.C.結構物部份，建立完善之維護制度，提供各港務局使用。	1996.06-2001.07
臺灣省政府交通處港灣技術研究所	水文及污損生物對材料腐蝕之探討 <sup>[31]</sup>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 本研究在基隆港東 2、西 21、西 22、西 26、西 27 號碼頭現場擺放試架觀察海生物種類，探討材料(AISI 1015 碳鋼、AISI 304 不銹鋼，防止海生物附著油漆塗料，犧牲陽極)，水深(低潮位線上 1 公尺及低潮位線下 1.0,3.0,5.0 公尺)與水文及污損生物之關係。</li> <li>2. 經過 3 及 6 個月之現場浸漬後，發現(1)犧牲陽極及防污塗料均能使鋼料防蝕，裸鋼之腐蝕速率則因水深而異，不銹鋼易因海生物附著而產生孔蝕，且易在海水中造成間隙腐蝕；(2)海生物種類因不同碼頭而異；(3)西 21、22、26、27 號碼頭，第二次附著生物採樣所採獲種類，均較第一次採樣之種類多；(4)東 2 碼頭的兩次附著生物採樣，採獲種類與優勢種則沒有明顯的變化；(5)防污塗料之試片上，附著生物之種類與數量都遠多於其他材料試片；且優勢種都為線蟲與苔蘚蟲；(6)陰極防蝕、不銹鋼、混凝土與裸鋼等四種試片之附著生物種類皆無明顯不同；(7)4 種深度的附著生物種類與數量也有所不同，以中間兩層深度之種類與數量較多。</li> </ol>	1994.07-1995.06

研究單位	研究方向	研究說明	研究期間
交通部運輸研究所與中山大學合作辦理	高雄港工結構材料海生物附著與對策研究 <sup>[32]</sup> 高雄港港工結構腐蝕與海生物附著研究 <sup>[33]</sup>	調查高雄港區內港工結構材料之海生物附著種類，並檢討其對港灣常用材料，如碳鋼及混凝土等之腐蝕及附著影響，以及探討添加飛灰之混凝土與安裝犧牲陽極材料對於防制海生物附著或材料腐蝕之效果。	1997.01-1999.12
交通部運輸研究所	碼頭鋼板樁現況調查與腐蝕防治研究 <sup>[34]</sup>	進行基隆、花蓮、臺中、高雄、蘇澳等五大港口之碼頭鋼板(管)樁調查，藉由對碼頭鋼板(管)樁腐蝕現況之長期監測，得以提供相關之本土資訊，做為設計及維護參考，並整理歸納影響鋼板(管)樁腐蝕之因子探討適用於本島碼頭鋼板(管)樁腐蝕防治方法。	2001.01-2001.12
交通部運輸研究所	金屬材料腐蝕環境調查研究(1/2) <sup>[8]</sup> 金屬材料水下腐蝕調查研究(2/2) <sup>[9]</sup>	建立臺灣地區長期金屬材料水下腐蝕資料庫，以做為新建及既有結構物耐久性與防蝕設計及維護管理之應用參考，安裝水下金屬暴露試驗架於基隆港、蘇澳港、花蓮港、臺中港、高雄港、安平港、布袋港、馬祖福澳港、金門水頭與料羅港區、澎湖龍門尖山港等國內商港，藉此瞭解在不同環境、金屬材料、海洋生物附著、海水水質等對港區金屬材料腐蝕之影響。	2015.01-2016.12
交通部運輸研究所	臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查研究(1/4) <sup>[10]</sup> 臺灣沿岸地區金屬材料腐蝕環境調查研究 <sup>[11]</sup>	進行基隆港、蘇澳港、花蓮港、臺中港、高雄港、安平港、布袋港、馬祖福澳港、金門水頭與料羅港區、澎湖龍門港等國內商港水下試驗架試片第 1 年取樣作業及水質化學試驗相關分析。	2017.01-2018.12
交通部運輸研究所	108 年臺灣沿岸地區金屬材料腐蝕環境調查研究 <sup>[12]</sup>	進行基隆港、蘇澳港、花蓮港、臺中港、高雄港、安平港、布袋港、馬祖福澳港、金門水頭與料羅港區、澎湖龍門港等國內商港水下試驗架試片第 2 年取樣作業及水質化學試驗相關分析。	2019.01-2019.12

研究單位	研究方向	研究說明	研究期間
交通部運輸研究所	112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究 <sup>[16]</sup>	進行基隆港、蘇澳港、花蓮港、臺中港、高雄港、安平港、布袋港、金門水頭與料羅港區、澎湖龍門港等國內商港水下試驗架試片第 5 年取樣作業及水質化學試驗相關分析。	2023.01-2023.12

## 1.4 計畫工作項目

本計畫係延續型計畫，主要持續辦理大氣腐蝕與水下腐蝕的現地調查及試驗工作，彙整調查與研究成果，建置臺灣腐蝕環境分類資訊系統及發行大氣腐蝕資料年報，此外，今年並探討銅金屬腐蝕與大氣腐蝕因子之關聯性。本年度辦理之工作項目如下：

### 1. 持續辦理大氣腐蝕劣化因子調查及金屬材料現地暴露試驗

依據中華民國國家標準(CNS)，就金屬及合金之大氣腐蝕性污染測定方法，進行臺灣全島之大氣腐蝕劣化因子調查及金屬材料現地暴露試驗與腐蝕速率量測。

2025 年 1 月辦理前(2024)年全年與第 4 季的金屬酸洗試驗及腐蝕因子化學分析工作，並於 2~3 月、5~6 月及 8~9 月進行今年第 1、2、3 季的大氣腐蝕劣化因子調查與金屬材料現地暴露試驗之取樣與維護工作，接續於 4 月、7 月及 10 月進行今年第 1、2、3 季的金屬酸洗試驗及腐蝕因子化學分析工作，並於 11~12 月辦理今年第 4 季的大氣腐蝕劣化因子調查，以及今年第 4 季與全年的金屬材料現地暴露試驗之取樣與維護工作。

### 2. 持續辦理水下金屬材料現地暴露試驗與海水水質調查分析

在水下金屬材料現地暴露試驗方面：本所自 2015 年起，針對港工結構材金屬材料進行 10 年期暴露試驗，於基隆港、蘇澳港、花蓮港、臺中港、高雄港、安平港、布袋港、馬祖福澳港、金門水頭與料羅港區、澎湖龍門港等國內商港水下進行金屬暴露試驗。

研究規劃辦理 5 次水下試片取樣，暴露時間分別為第 1 年、2 年後、5 年後、8 年後、10 年後，至今已完成前 4 次水下試片取樣、分析工作。第 1 年的取樣成果彙整在「臺灣沿岸地區金屬材料腐蝕環境調查研究」<sup>[11]</sup>報告；2 年後的取樣成果彙整在「108 年臺灣沿岸地區金屬材料腐蝕環境調查研究」<sup>[12]</sup>報告；5 年後的取樣成果彙整在「112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究」<sup>[16]</sup>報告；在今(2025)年辦理全臺及外島的 8 年後水下金屬試片現地取樣及化學試驗分析工作，預計將成果彙整在明年研究報告。

在海水水質調查分析方面：持續每季於基隆港、蘇澳港、花蓮港、臺中港、高雄港、安平港、布袋港、馬祖福澳港、金門水頭與料羅港區、澎湖龍門港等商港碼頭進行海水導電度、溶氧量、酸鹼度、溫度、氯鹽、硫酸鹽等水質環境因子項目之現場調查與試驗分析工作，海水水質調查分析成果將與下一次的水下試片取樣成果一併呈現。

### 3. 持續擴增精進「臺灣腐蝕環境分類資訊系統」資料庫

彙整各試驗站現地調查結果，進行大氣腐蝕環境分類，建置於資料庫網站提供外界查詢。

### 4. 發行 2024 年臺灣大氣腐蝕劣化因子調查年報

彙整並撰寫 2024 年臺灣大氣腐蝕劣化因子調查年報，提供相關單位瞭解每年金屬構造物在各腐蝕環境中的耐久性與防蝕之需求。

### 5. 辦理大氣腐蝕及防蝕技術應用研習會

與中華民國防蝕工程學會合辦「大氣腐蝕及防蝕技術應用研習會」，以推廣宣導臺灣腐蝕環境調查資訊系統至產官學研各界應用。並透過研習會與防蝕學者專家互動，蒐集專家與業界代表的建議，納入未來研究應用方向，提升研究實用性。

### 6. 進行銅金屬與腐蝕因子關聯性統計分析

彙整臺灣銅金屬材料與腐蝕劣化因子及氣象因素等環境因子進行關聯性統計分析，提供工程人員管理、規劃、設計及維護之參考。



## 第二章 文獻回顧

### 2.1 大氣腐蝕測試規範

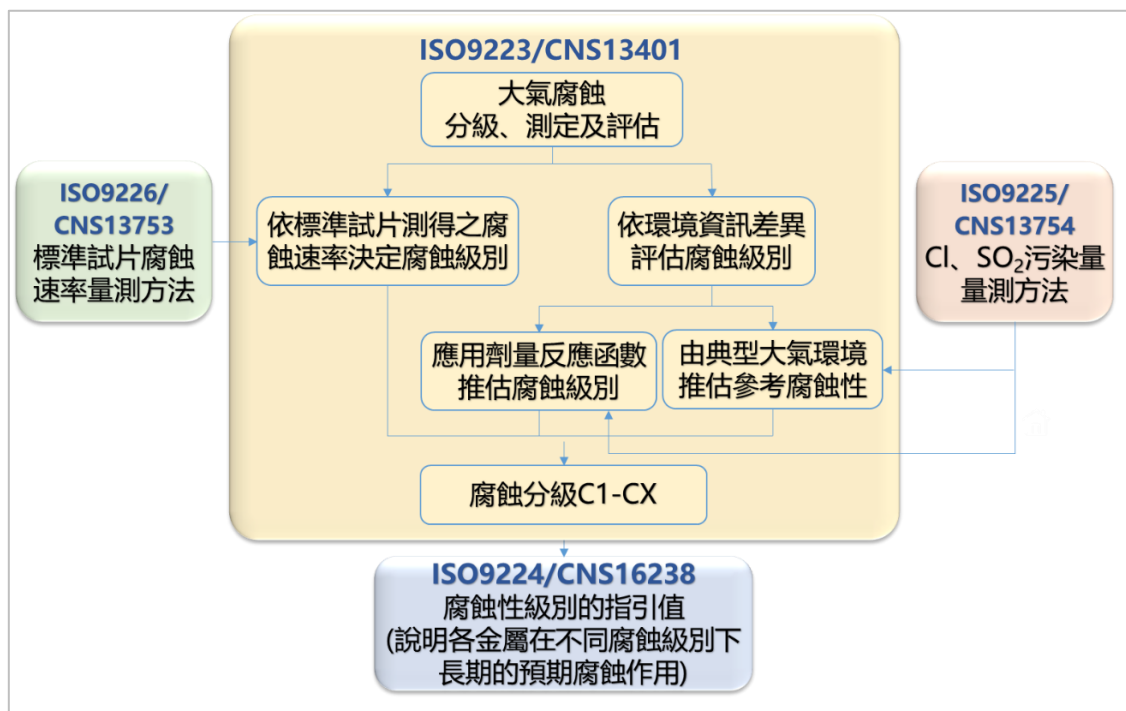
#### 2.1.1 國外 ISO 大氣腐蝕環境分類

大氣腐蝕測試工作有系統之進行，最早可溯及美國材料和試驗協會(American Society for Testing and Materials, ASTM)的 D-1 及 A-1 兩委員會自 1906 年起分別測試塗料塗裝及金屬被覆之鋼鐵產品，自此開始美國便陸續展開數個 20 年計畫分別測試當時最新產品的大氣腐蝕耐蝕性及耐久性。國際標準組織(ISO)於 1985 年起於全球 13 國 47 處地點進行大氣腐蝕暴露試驗，根據這試驗工作成果，於 1992 年發佈 ISO 9223<sup>[1]</sup> (大氣腐蝕性分類)、ISO 9224<sup>[35]</sup> (各腐蝕環境中腐蝕率指引值)、ISO 9225<sup>[36]</sup> (污染量量測方法)、及 ISO 9226<sup>[37]</sup> (標準試片腐蝕率量測方法) 4 項標準規範。根據這 4 項規範，只要在欲工作地點從事 1 年期之標準試片腐蝕率量測，或潤濕時間量測及總污染量量測，根據量測結果對照各層級之腐蝕率指標值，即可得到該處的腐蝕環境分類。

換句話說，依據 1992 年發佈的 ISO 9223，大氣腐蝕性分類標準是根據金屬標準試片在某環境中進行自然暴露試驗所得之腐蝕速率，或綜合某環境中大氣污染物濃度和金屬表面潤濕時間而進行分類。其中，潤濕時間( $\tau$ , Time of Wetness)是以全年中溫度高於 0°C，相對濕度大於 80%之小時數或百分比來區分，環境中大氣污染物濃度的嚴重性則是以 SO<sub>2</sub> 沉積速率與氯化物(海鹽)沉積速率分別進行區分。之後，將環境之腐蝕性依污染量或最初第 1 年之腐蝕率大小，分為 C1, C2, C3, C4 與 C5 等 5 個等級，C1 表示腐蝕性非常低(very low)，C2 表示腐蝕性低(low)，C3 表示腐蝕性中等(medium)，C4 表示腐蝕性高(high)，C5 表示腐蝕性非常高(very high)。

但國外學者對熱帶潮濕氣候區（加勒比海地區的古巴、墨西哥、委內瑞拉等）的大氣腐蝕性進行了評估，發現濱海的大氣腐蝕性高於 ISO 標準的 C5 等級<sup>[38-39]</sup>。Morales 等人的研究表明在加那利群島西部的一些島嶼上碳鋼、銅和鋅的腐蝕速率超過了 ISO 9223<sup>[1]</sup> 標準中規定的 C5 等級<sup>[40-41]</sup>。因此，國際標準組織(ISO)於 2012 年發佈的第 2 版 ISO 9223<sup>[42]</sup> (以下在規範後加年別區分版本，例：2012 年版 ISO 9223 以 ISO 9223:2012 表示)，將大氣腐蝕性分為 6 類，在前 5 類的基礎上增加了一級 CX：應用於特定海洋和海洋/工業環境。具體的大氣腐蝕性分級對比以及典型環境示例，如表 2-1 所示。

此外，ISO 9223:2012 的分類方法新增可依現場腐蝕試驗結果迴歸所得之計算公式(劑量-反應函數(dose-response function))，將環境參數平均值代入公式，計算出金屬腐蝕損失量，推估腐蝕環境分類等級。ISO 9223:2012 的整體分級、測定與評估流程如圖 2.1 所示。



註：本研究依據 CNS 13401:2019 整理。

圖 2.1 ISO 9223:2012 大氣腐蝕環境分類

表 2-1 大氣腐蝕性分級對比<sup>[43]</sup>

ISO 9223:1992		ISO 9223:2012			
腐蝕性 等級	腐蝕性	腐蝕性 等級	腐蝕性	典型環境示例	
				室內	室外
C1	很低	C1	很低	乾燥清潔的室內場地，如辦公室、學校、博物館。	乾旱寒冷地區、極低的污染和潤濕時間的大氣環境，如特定的沙漠、北極、南極。
C2	低	C2	低	低頻凝結、低污染的常溫室內場地，如倉庫、體育場。	溫帶、低污染物濃度 ( $\text{SO}_2 \leq 5\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 的大氣環境，如鄉村、小鎮。乾旱寒冷地區、潤濕時間短的大氣環境，如沙漠、亞北極區。
C3	中	C3	中	產品生產過程中產生中頻凝結和中度污染的場地，如食品加工廠、洗衣房、啤酒廠、乳製品廠。	溫帶、中等污染物濃度 ( $5\mu\text{g}/\text{m}^3 \leq \text{SO}_2 \leq 30\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 或低鹽度的大氣環境，如城市、低鹽度海濱地區。亞熱帶和熱帶地區、低污染的大氣環境。
C4	高	C4	高	產品生產過程中產生高頻凝結和重度污染的場地，如工業加工廠、游泳池。	溫帶、高污染物濃度 ( $30\mu\text{g}/\text{m}^3 \leq \text{SO}_2 \leq 90\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 或高鹽度的大氣環境，如污染較重的城市、工業區、中等鹽度海濱地區或暴露於除冰鹽的區域。亞熱帶和熱帶地區、中度污染的大氣環境。
C5	很高	C5	很高	產品生產過程中產生極高頻凝結和重度污染的場地，如礦井、工業洞穴、亞熱帶和熱帶地區不通風工作間。	溫帶和亞熱帶、極高污染物濃度 ( $90\mu\text{g}/\text{m}^3 \leq \text{SO}_2 \leq 250\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 或極高鹽度的大氣環境，如工業區、海濱地區、沿海遮蔽處。
		CX	極端	產品生產過程中產生持續凝結或長期暴露於高濕環境和重度污染的場地，如濕熱帶地區室外有污染物進入的不通風工作間。	亞熱帶和熱帶（非常高的潤濕時間）、極高污染物濃度 ( $250\mu\text{g}/\text{m}^3 \leq \text{SO}_2$ ) 和極高鹽度的大氣環境，如極端工業區、海濱和近海地區、偶爾接觸鹽霧。

## 2.1.2 中華民國國家標準 CNS 規範

我國有鑑於大氣腐蝕測試的重要，經濟部標準檢驗局於民國 83 年起依據國際標準組織 ISO 規範，制定一系列之「金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕性」國家標準 CNS 規範，包括 CNS 13401<sup>[47]</sup> (對應 ISO 9223 國際標準) 金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕性-分級、測定與評估，CNS16238<sup>[48]</sup> (對應 ISO 9224 國際標準) 金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕性-腐蝕性級別的指引值，CNS13754<sup>[49]</sup> (對應 ISO 9225 國際標準) 金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕性(污染之測定)，CNS13753<sup>[50]</sup> (對應 ISO 9226 國際標準) 金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕性(測定標準試片之腐蝕速率以評估腐蝕性)，CNS14122<sup>[51]</sup> (對應 ISO 8407<sup>[75]</sup> 國際標準) 金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕-試片腐蝕生成物清除法，CNS14123<sup>[52]</sup> (對應 ISO 8565<sup>[53]</sup> 國際標準) 金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕測試(現場測試之一般要求)等 6 項規範。

CNS 規範主要依據國際標準 ISO 規範，不變更技術內容修訂而成，部分規範並隨國際標準 ISO 規範更新而修訂，制訂歷程如圖 2.2。

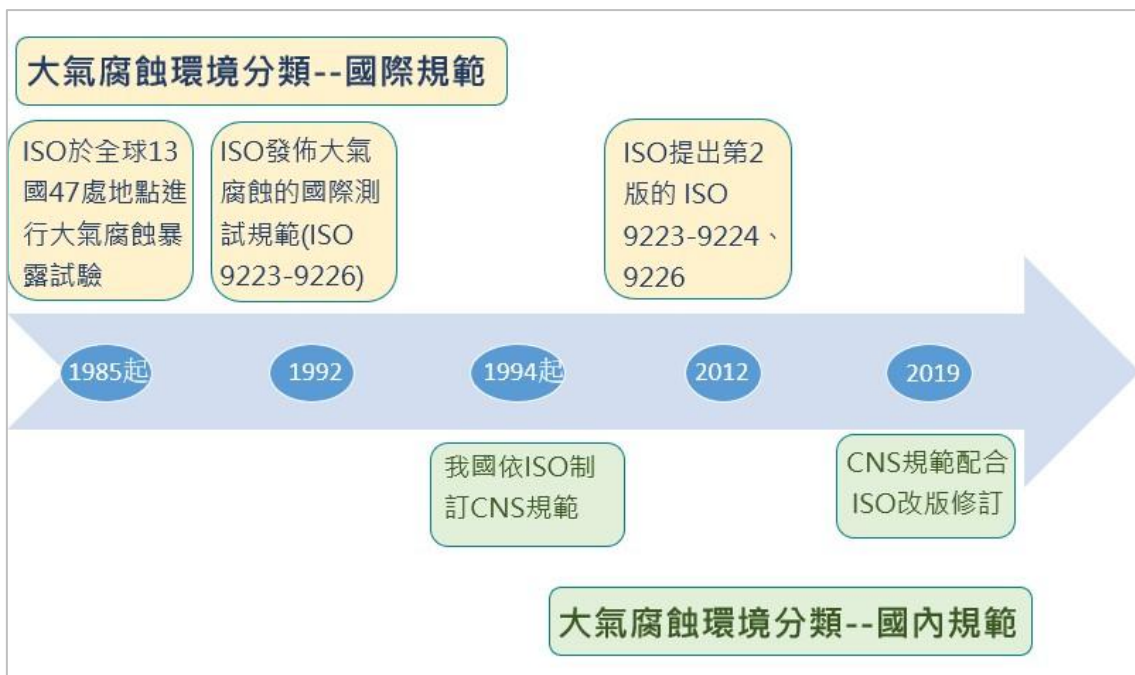
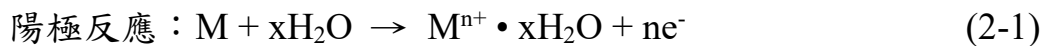


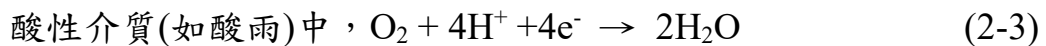
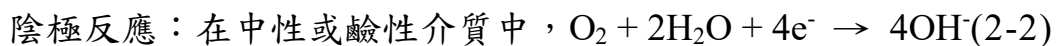
圖 2.2 大氣腐蝕環境分類規範制訂歷程

## 2.2 大氣腐蝕因子介紹

大氣腐蝕依腐蝕反應可分為化學與電化學反應。在乾燥無水的大氣環境中，金屬表面因氧化、硫化而造成變色或失去金屬光澤等，是為化學腐蝕，而其它劣化行為，則多為電化學反應。即金屬表面為薄層電解液下的腐蝕過程，電解液薄膜是由空氣中的水分於金屬表面吸附、凝聚、及溶有空氣中污染物質所形成，陽極反應為金屬的溶解和水化反應，陰極反應為氧的還原反應，其反應過程如下：



式中，M 代表金屬， $M^{n+}$  為 n 價金屬離子， $M^{n+} \cdot xH_2O$  為金屬離子化水合物。



由於水、氧在水膜間的擴散率、大氣中的氧離子含量、以及空氣中的污染物質如  $SO_2$ 、灰塵等，均會影響金屬在大氣中的腐蝕速率，這些腐蝕因子在金屬大氣腐蝕過程中所扮演的角色如下<sup>[54]</sup>：

### 1. 水

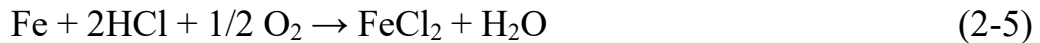
水是引起大氣腐蝕最重要的因素。經驗顯示，唯有當大氣的相對濕度高於某一臨界值時，大氣腐蝕才會發生；因此大氣腐蝕也是一種電化學腐蝕，在特別乾燥地區，大氣腐蝕幾乎不會發生，但在熱帶潮濕地區，腐蝕速率相對較高。大氣腐蝕中，水是以液狀薄膜附著於金屬表面，水固化成冰時，大氣腐蝕便停止。由於雨水、霧氣等是液膜的主要來源，但雨水扮演的角色較複雜，它可能會帶來高溶解度物質而加速腐蝕速率，但也可能沖走一些附著的腐蝕性物質而抑制腐蝕；同時，它亦可能沖走一些具有保護作用的腐蝕生成物，進而加速腐蝕。由霧氣所生成的液膜雖薄，但因氧氣及其他腐蝕性物質的飽和性，反而具有較強的腐蝕性。

## 2. 氧

當金屬發生大氣腐蝕時，表面液膜很薄，氧氣容易到達陰極表面，且氧的平衡電位較氫為正，所以，金屬在有氧存在的溶液中，首先發生的反應為氧的還原反應。此外，在大氣腐蝕的條件下，氧通過液膜到達金屬表面的速度很快，所以液膜愈薄，擴散速度愈快，陰極氧的還原反應將促使陽極反應繼續進行；但當液膜未形成時，氧的陰極還原反應將無法進行。

## 3. 氯離子

氯化物在金屬表面上有助於在較低的相對濕度形成液膜，其在腐蝕過程中會阻止氧化膜(oxide films)的形成，進而有助於陰極上氧的還原反應；然而當金屬表面已有氧化膜或鈍態膜存在時，氯離子會破壞鈍態膜，造成孔蝕。Cl<sup>-</sup>與鐵的作用較特別，由於 FeCl<sub>2</sub> 不是緊密結合之化合物，所以 Cl<sup>-</sup>很容易從氯化亞鐵中釋放出來，再與其他金屬作用，進而加速腐蝕反應。過程如下：



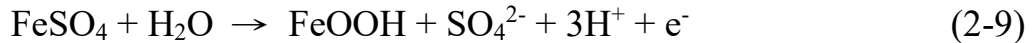
## 4. 空氣中的污染物質 SO<sub>2</sub>

SO<sub>2</sub> 在水溶液中具有極高的溶解度(16.2g SO<sub>2</sub>/100g H<sub>2</sub>O)，且 SO<sub>2</sub> 與 O<sub>2</sub> 作用形成 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>再和鐵循環作用，將會加速腐蝕反應。Odnevall 等人指出<sup>[55]</sup>，在固定電極電位時，陽極溶解電流是[OH<sup>-</sup>]與[SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>]的共同函數，在含 SO<sub>2</sub> 的大氣中，腐蝕反應步驟如下：



由於 FeSO<sub>4</sub> 會與 H<sub>2</sub>O 作用生成 FeOOH，而釋放出來的 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>則

再次與 FeOH 作用：



因而加速腐蝕反應。

## 5. 灰塵

不同地區的灰塵有不同的成份，在鄉村地區通常是來自地表的有機或無機物質，而在都市或工業地區則含有高濃度的工業污染物質及水溶性無機物質，如  $\text{SO}_2$ ， $\text{NO}_2$  等。灰塵將有助於液膜在較低相對濕度下於金屬表面生成。

## 2.3 影響大氣腐蝕的因子

### 1. 大氣的相對濕度

大氣腐蝕是一種水膜下的電化學反應，空氣中水分在金屬表面凝聚生成水膜，與空氣中氧氣通過水膜進入金屬表面，是產生大氣腐蝕的基本條件。水膜的形成與大氣中的相對濕度密切相關，相對濕度的定義是指在某一溫度下，空氣中的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。由於不同物質或同一物質的不同表面狀態，對於大氣中水分的吸附能力不同，因此，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，如鐵的腐蝕臨界相對濕度為 65%<sup>[56]</sup>。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。

### 2. 表面潤濕時間

依國際標準 ISO 9223 的定義，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。而金屬表面的潤濕，則是由露水、雨水、高

濕度水分凝聚、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

溫度的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，溫度對大氣腐蝕的影響很小，即無論氣溫多高，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 $10^{\circ}\text{C}$ ，反應速率增加為原來之2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 $\text{SO}_2$ 、 $\text{Cl}^-$ 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3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。

## 2.4 鋼材在海水之腐蝕

金屬發生腐蝕為一自然的反應程序，大多數的金屬材料暴露於宇宙大氣環境下，都會自然發生物質退化，逐漸被腐蝕的現象，尤其是在酸、鹼或海水等環境下，腐蝕更趨嚴重。腐蝕是電化學反應之行為，其間涉及電子的轉移，如金屬由原子狀態因放出電子而變成金屬離子，或金屬離子因獲得電子而成為金屬，因而構成氧化(陽極)及還原(陰極)反應之發生。因此，任何腐蝕的發生，必須具有陽極反應和陰極反應以及能使電子或離子流動轉移之導電途徑(亦即電解質)，形成一封閉的導電迴路，如圖 2.3 所示。

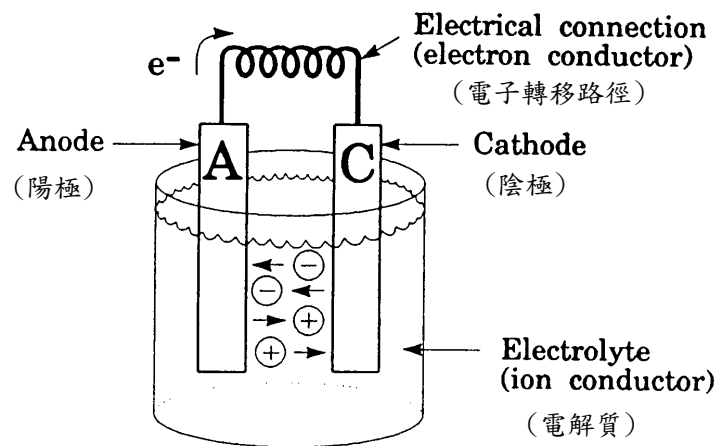
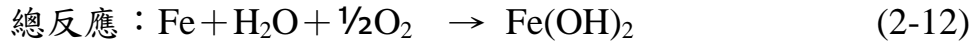
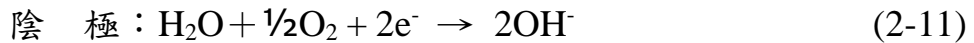
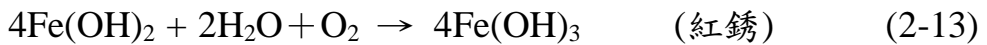


圖 2.3 水溶液系統之腐蝕程序示意圖<sup>[57]</sup>

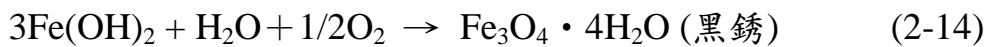
海水中之鋼材如鋼板樁之表面，因同時具有許多高活性區域(陽極反應)與鈍化區域(陰極反應)所形成之許多小腐蝕電池(corrosion cell)系統，導致鋼材發生表面腐蝕現象。鋼材在海水中發生腐蝕之電化學反應程序如下：



總反應式中之  $\text{Fe(OH)}_2$  繼續反應，生成  $\text{Fe(OH)}_3$  或  $\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  產物，其化學反應式如下：



或



## 2.5 影響鋼板樁腐蝕之因子

### 2.5.1 暴露區域

從許多調查研究發現，由於彼此接觸(暴露)環境不同，海洋結構物腐蝕的部位及速率有很明顯的差異，其腐蝕形態不同。因此，為方便區分與探討，特將海洋環境區分成 5 個暴露區域，各區域與腐蝕速率之關係如圖 2.4 所示。

#### 1. 大氣帶

這部份之鋼結構物不接觸海水，表面完全暴露接觸大氣中之各種介質，諸如氣體、日照……等大自然介質，由於海洋大氣中含有較高濃度之海鹽粒子，加上濕度大、日照、溫度之變化，致使碳鋼材料外表很容易受到侵蝕，其腐蝕速率為一般內陸地區大氣腐蝕的 2~5 倍<sup>[58]</sup>。

#### 2. 飛沫帶

自平均高潮位以上至海面大氣帶下端，屬於海洋大氣與海水交界面，鋼板樁暴露於此範圍內時，由於不斷反覆地受到海浪的潑濺以及日曬乾燥，產生乾濕循環作用，致使附著鋼材表面之鹽份及氧氣濃度

不斷增濃，腐蝕最為嚴重，腐蝕速率很大，為 5 個暴露區域中，腐蝕最嚴重的部位。一般低碳鋼如沒有任何防蝕處理時，其腐蝕速率可達 0.5~1.0mm/yr.，約為海中帶（海水全浸區）的 5~10 倍<sup>[58]</sup>。

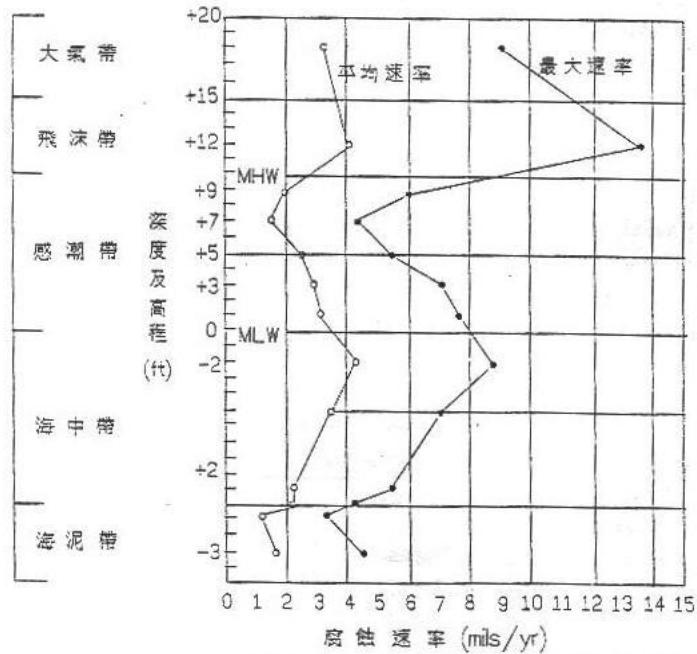


圖 2.4 鋼板樁暴露區域與腐蝕速率之關係<sup>[58]</sup>

### 3. 感潮(潮汐)帶

此區域介於高低潮位之間，由於受到海水漲退潮之變化，鋼板樁表面週期性的接觸海水浸泡及暴露於大氣中，猶如進行乾濕循環作用。由於空氣與海水波浪之交互作用，致使海水中之溶氧濃度高，因而在感潮帶下方緊鄰海中帶之部份，恰可形成一個氧濃度差異電池作用之現象。因此，溶氧量高之感潮帶中之鋼板，可視為一陰極反應面積，腐蝕速率低，而低潮位下約 1 公尺處(亦即海中帶部份)，因溶氧量低，故可將海中帶內之鋼板當成陽極反應部位，因此腐蝕量較大。由於受到氧濃度差異電池作用，感潮帶中之腐蝕速率為 5 個暴露區域中最低者。

### 4. 海中帶

自低潮位下端至海泥(床)帶間，在此範圍內整個結構體完全浸泡於海水中。此區域之上端邊緣與最低潮位緊鄰的部位，因氧濃度差異電池之作用，暴露於海中帶之鋼板可視為一陽極反應區域，因此，海中帶上端部位之鋼板腐蝕速率很大，極需採用適當的防蝕保護措施。在此區域中，海生物之附著、海流之沖擊、水溫及溶氧量等因素，亦會影響腐蝕速率。海水中鋼鐵之腐蝕速率一般為 0.1~0.2mm/yr. [58]。

## 5. 海泥(床)帶

鋼板(管)樁埋入於海底土層之部份，由於與海水接觸面較小，鋼材之腐蝕速率相對很小。但是在污染的海域中，如有硫化氫(H<sub>2</sub>S)或海泥中有硫酸鹽還原菌存在的話，則鋼材的腐蝕性會增加，腐蝕速率變大。

### 2.5.2 海水的性質

海水是一個極複雜的水溶液，為大自然環境下一個包容性非常大的緩衝溶液，碼頭鋼板(管)樁絕大部份(約 80%)都浸泡於海水溶液下，其間金屬材料發生腐蝕之變化很大，因此，有關海水之化性、物性及相關影響因素都必須深入探討之。

#### 1. 含鹽量

海水與其它水溶液最大的不同點，即海水含有很高的鹽份(以氯離子濃度或鹽度表示之)，亦是鋼鐵材料最易發生電化學腐蝕反應之環境。在廣闊的大海中，海水中大約含有 3.5%(重量百分比)之氯化鈉(NaCl)或鹽度(Salinity)約介於 32~36 之間。在封閉的海灣水域，由於蒸發作用致使海水鹽度較高，例如：紅海其鹽度約為 41，而在有河川流入之海口附近，因受陸地淡水溪流之稀釋，則鹽度較低。

海水中之 Cl<sup>-</sup>能穿透破壞鋼鐵表面之鈍化性質或阻止鈍態保護膜之生成，因而使鋼鐵表面發生腐蝕。據美國海軍研究人員在太平洋海域所做試驗發現<sup>[57]</sup>，海水含鹽量之多寡與溶氧量、pH 值、溫度、水深等均有相互關係，如圖 2.5 所示。

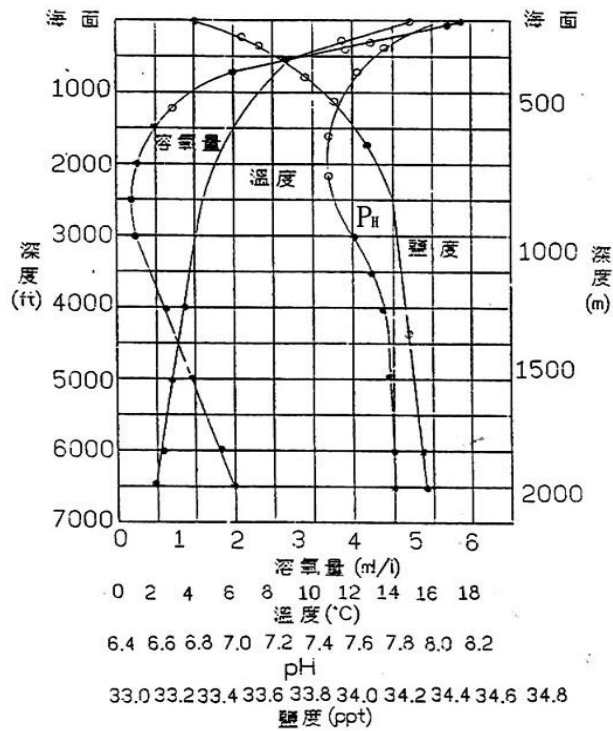


圖 2.5 海水含鹽量與溶氧量、pH 值、溫度、水深之關係<sup>[57]</sup>

## 2. 溫度

海水之表面溫度，通常受到地球上緯度之影響而有所變化。其變化範圍從極地 $-2^{\circ}\text{C}$ 至赤道 $35^{\circ}\text{C}$ 之間。溫度之變化，對海水之化性、物性及海洋（微）生物滋長等都有相當密切關係。因此，從金屬材料腐蝕反應觀點下，海水溫度之變化就變成一個極複雜的變數。一般而言，溫度是影響動力學上之反應速率及質量傳送。在動力學理論控制下，溫度每上昇 $10^{\circ}\text{C}$ ，腐蝕速率則增加一倍。當海水溫度升高時，致使鋼材變成為較不貴重電位之金屬，此時鋼材之腐蝕電位開始移向電位更負之方向，亦即鋼材更容易進行腐蝕反應。港灣結構物等開放系統，隨溫度上升，鋼鐵之腐蝕速率變大，而如海水管線等密閉系統，雖然沒有溶氧量減少之發生，腐蝕速率仍隨溫度之上升而遞增。

## 3. pH 值

海水通常為一含鹼性之水溶液，海水之 pH 值是表示海水中多種基本離子與大氣層中之二氧化碳( $\text{CO}_2$ )進入海水之量，達成平衡狀況

之數值。一般海水之 pH 值正常情況下是介於 8.1 至 8.3 之間。但在停滯不流動之港灣海域中或是海水中之有機物體分解，一方面消耗海水中之溶氧量，一方面受到厭氧細菌作用產生大量之  $H_2S$  下，亦可能使海水變成較酸性，海水之 pH 值降低至 7.0 以下。但在較接近海水表面之部位，當海水中之植物進行光合作用時，將會消耗海水中之  $CO_2$  量，此時海水之 pH 值可能增高而超過 9.0 以上。又 pH 值之變化隨著海水之深度、溫度、溶氧量…等因素之不同而異，如圖 2.6 所示<sup>[58]</sup>。

一般金屬材料在水溶液之腐蝕反應速率與 pH 值有密切關係<sup>[59]</sup>，但是當 pH 值介於 4~10 之間時，金屬維持一定腐蝕速率如圖 2.6 所示，而僅與氧氣擴散至金屬表面之速率有關。

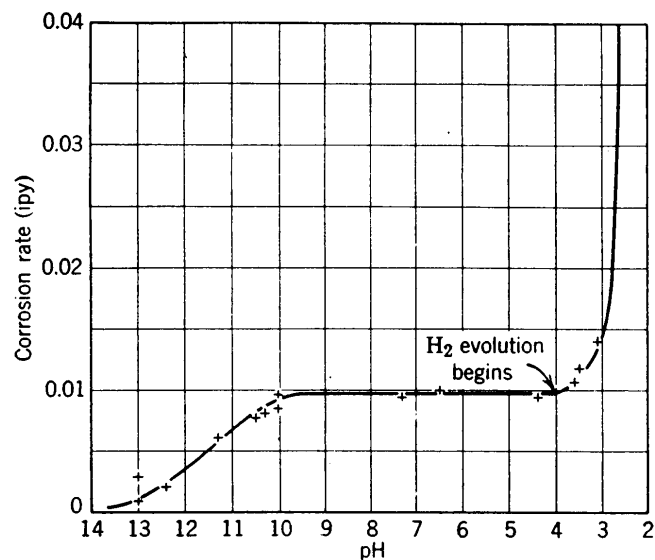


圖 2.6 鋼材腐蝕速率與 pH 值之關係<sup>[59]</sup>

通常鋼材在海水中極易發生腐蝕，金屬表面生成一層阻礙氧氣擴散之  $Fe(OH)_2$  膜，隨著腐蝕之進行，此膜不斷的更新滋長，並與鹼性海水接觸，因此，鋼鐵表面之 pH 值約為 9.5。當海水 pH 值低於 4 時，鋼材表面之  $Fe(OH)_2$  鈍態保護膜被溶解，鋼鐵表面之 pH 值降低。鋼材之次表面層不斷地析出且更能直接與海水接觸，腐蝕速率增大約等於氫氣生成與氧氣去極化作用所產生之腐蝕速率。而 pH 值大於

10 時，增加環境之鹼性，亦增加鋼鐵表面之 pH 值，因此鋼鐵表面之鈍態保護膜不易溶解，腐蝕速率大幅降低。

#### 4. 溶氧量

氧是海水中金屬發生腐蝕最主要的催助劑。主要原因乃是鋼材腐蝕電化學反應過程中，氧在陰極半反應部份中與水作用生成  $\text{OH}^-$ ， $\text{OH}^-$  再與陽極半反應部份中溶解出之  $\text{Fe}^{+2}$  作用，形成  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  之腐蝕生成物，如果氧氣供應充足時，則  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  繼續繁衍生成各種不同之鐵銹生成物。海水中鋼鐵腐蝕速率依其表面之溶氧量而定，若海水之溶氧量增加時，則接觸鋼鐵表面之氧量增加，其腐蝕速率增大，相對關係如圖 2.7 所示<sup>[59]</sup>。在正常的大氣壓下，海水之溶氧量與溫度及鹽度維持一平衡關係。

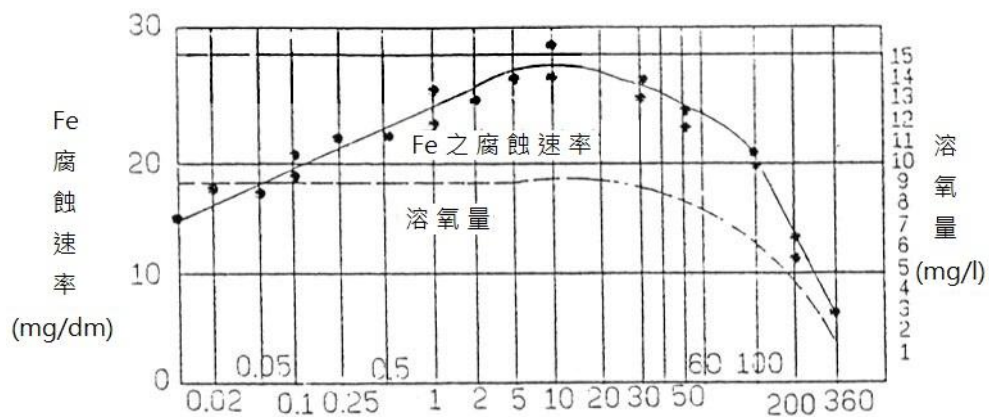


圖 2.7 鋼材腐蝕速率與溶氧量之關係<sup>[60]</sup>

溶氧量亦隨海水深度而有所差異，主要受到海中植物進行光合作用或有機生物體之分解作用，而致使溶氧量有所消長。在深海處溶氧量低，對大多數之金屬而言，其腐蝕速率相對亦低。溶氧量亦受海水流速之增大而增濃，但受某些好氧細菌之作用(消耗)而降低濃度。

## 5. 導電度(conductivity)

海水之導電度是決定金屬腐蝕量多寡之一個重要因素，尤其是在有伽伐尼偶合作用(Galvanic coupling)及金屬表面局部有間隙存在的地方。從腐蝕工程師之觀點來看，海水與其它水溶液比較時，最主要的特徵是海水具有很高的比導電度，約比一般水溶液高 250 倍以上。海水之高比導電度容易造成金屬表面大面積的發生腐蝕反應，尤其是金屬表面之陽極面積小而陰極面積大時，腐蝕更是嚴重，最後形成局部孔蝕或間隙腐蝕。導電度之倒數謂之比電阻(resistivity)，為陰極防蝕設計上，陽極材料放電(消耗)大小之主要影響因子之一。

## 6. 深度

海水深度對金屬腐蝕之影響，現有公開的研究調查資料並不多。美國海軍試驗站研究人員於 1966 年，曾在太平洋的試驗站做深海腐蝕試驗，結果顯示：腐蝕速率隨著深度之增加而呈遞減趨勢，但亦有例外。如深至海床泥土時，若有硫化物存在時，更能助長厭氧性之硫酸還原菌之滋長，最後更可能加速金屬之腐蝕反應速率。

## 7. 流速

海水流速對金屬腐蝕速率有多方面的影響，它不但能增加較易到達接觸金屬表面之溶氧量，又能因海流衝擊之機械效應，去除金屬表面鈍態保護膜，更促使氧氣較易對金屬表面進行擴散及濃度極化，造成金屬發生腐蝕<sup>[61]</sup>。圖 2.8 為腐蝕速率與海水流速之關係。

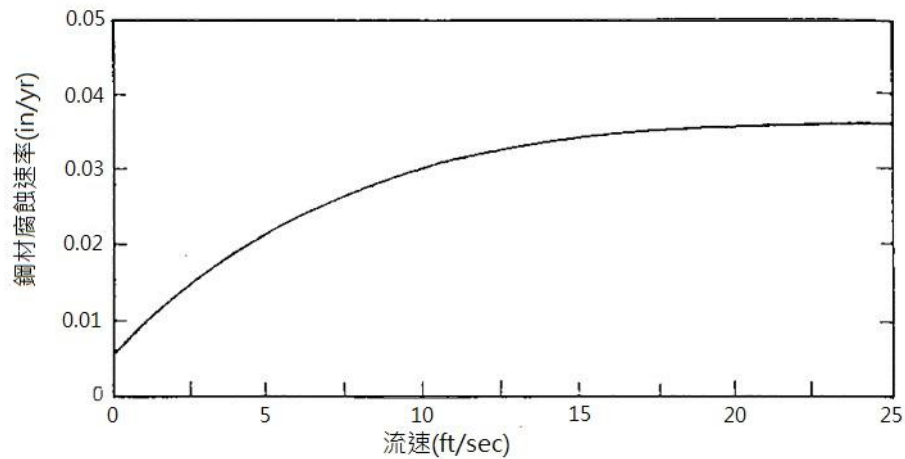


圖2.8 鋼材腐蝕速率與海水流速之關係<sup>[61]</sup>

## 8. 雜散電流

雜散電流乃指不沿正規路徑，而走其它路徑流通之電流謂之。一旦這種雜散電流進入金屬結構物時，在離開結構物之處，會發生電蝕現象並加速腐蝕速率。海洋結構物諸如碼頭鋼板樁、油井平臺，船舶停泊港口卸貨或進行電焊維修工程時或安裝防蝕系統(外加電流)時，其供電設備，諸如發電機，直流電源供應器等，可能發生斷路或漏電，這些電流可能經由船殼或直接流入海水中，由於海水是良好之電解質，更容易將這些電流傳導至鋼板樁等金屬結構物，雜散電流一旦進入結構物，則會加速腐蝕速率，碼頭鋼板樁遭受雜散電流襲擊的過程如圖 2.9 所示<sup>[62]</sup>。通常一片金屬表面，在陽極部位(金屬溶解釋出離子)由於受到雜散電流的影響，所造成腐蝕量可由法拉第定律計算出。例如：1 安培直流電之雜散電流，流經鋼鐵結構物至海水中，每年將可腐蝕損失結構物約 9.1 kg 之鋼鐵。

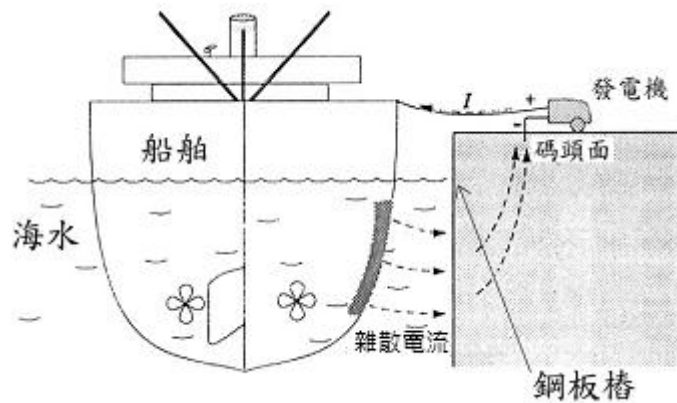


圖 2.9 碼頭鋼板樁遭受雜散電流之情形<sup>[62]</sup>

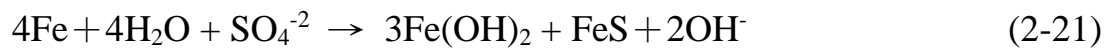
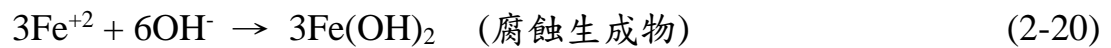
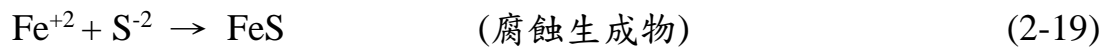
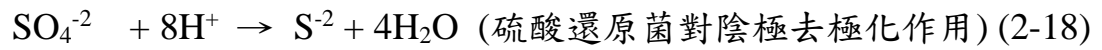
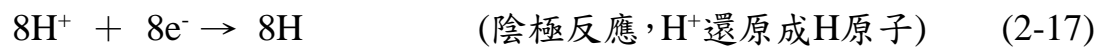
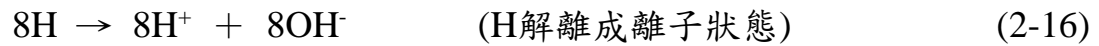
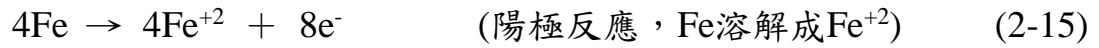
## 9. 海生物附著

海生物附著對鋼鐵之腐蝕，並不是一般腐蝕型態之一。它是一種因海生物有機體附著，致使金屬劣化。海水中包含有許多各種不同的有機生物體等，這些有機生物體有微污生物諸如細菌等，及巨污生物諸如海藻、藤壺、貝類等。海洋結構物浸泡海水中常受到海生物附著所困擾<sup>[62]</sup>。由於海生物所排放之黏液(slime)容易附著於結構物表面上，接著形成生物黏液膜，萌芽的固著微生物體持久大量的附著，最後繁殖形成巨大的附著生物體，造成結構體局部的腐蝕劣化及荷重增加。海生物之種類及繁殖受到海水深度、溫度、光度及滋養等因素影響，同時亦因季節、潮汐等變化而異。海生物附著於鋼板樁，其發生腐蝕行為之過程，有下列幾種方式：

- (1) 直接對陰極或陽極產生去極化作用，影響腐蝕之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) 破壞金屬表面鈍態保護膜。
- (4) 形成金屬表面有氧濃度差異電池作用。

(5) 在金屬表面附近因有硫化物生成，使硫酸還原菌更具腐蝕侵蝕。

硫酸還原菌對鋼材之腐蝕機理如下：(厭氧性細菌)



## 2.6 大氣腐蝕環境因子之參數建立

雖然利用上述調查的數據可對照 ISO 9223 之大氣腐蝕性分類，但對照之腐蝕性分類僅為一等級範圍。若能利用調查結果確立腐蝕因子與現地暴露之金屬腐蝕速率的關係，則將來也可透過腐蝕因子的調查即可預測金屬大氣腐蝕速率，免去現地暴露試驗耗費的龐大資源。過去許多專家學者對於大氣腐蝕環境劣化因子與金屬效應皆有評估，如 Roberge (2002)<sup>[63]</sup>認為大氣腐蝕最基本的要求為電解質薄膜的存在，因此相對濕度、大氣中的氣溶膠粒子如氣鹽、灰塵和污染物如二氧化硫等為主要的影響因子。文中顯示國際標準組織(ISO)基於簡化的原則來做分類，影響腐蝕的因子只考慮濕潤時間、二氧化硫和氣鹽；不包括一些其他可能具有影響力的因子，如環境溫度、風速等以及各種腐蝕機制。因此 ISO 提出的大氣腐蝕分類標準在精度和準度方面有限。

Corvo (2008)<sup>[64]</sup>在古巴之亞熱帶海洋氣候區不同的暴露條件下，進行室內和室外的長期大氣腐蝕試驗。探討降雨、氣鹽等腐蝕因子對於鋁、銅、碳鋼等金屬的腐蝕暴露情況。結果顯示，金屬暴露於室內雖有遮蔽與室外通風的環境下相比，室內腐蝕速率較高，推測原因是室內相對濕度和其他氯化物等污染物會附著於金屬表面造成腐蝕加劇的現象；反而在室外，雨水會直接洗滌金屬表面，使腐蝕性污染物不會持續殘留於在金屬表面，造成進一步的腐蝕。若日照時間長，將使金屬表面水膜消失，降低表面潤濕時間，腐蝕總量減少。此外，若降雨增加，大氣中的相對濕度增加，延長了金屬表面的潤濕時間，由於日照及降雨反覆交互作用，破壞了金屬表面腐蝕產物的保護性，加速大氣腐蝕。因此亦將降雨時數與日照時數列入影響參數中。另外 Luo (2011)<sup>[65]</sup>發現空氣中氣鹽含量傳送到內陸的分佈、受到風速、風向、局部地形的影響，距海岸線愈遠，氣鹽沉積速率愈小。所以環境中風速、風向參數也納入考量評估。

## 2.7 迴歸分析於大氣腐蝕應用

迴歸分析是一種統計分析方法，它利用一組解釋變數 (independent variable) 對某一反應變數 (dependent variable) 建立關係式以便做為預測的依據，也可以做為評估自變數對依變數的效用。其應用於大氣腐蝕研究主要目的在於瞭解金屬材料與大氣環境腐蝕因子間之數值關係。利用此關係可以由大氣腐蝕因子調查，預測金屬腐蝕速率。在過去國外文獻以迴歸分析進行大氣腐蝕速率評估，如 Mendoza(1999)<sup>[66]</sup> 於不同氣候條件及區域如沿海、城市工業區、農村等，進行碳鋼大氣腐蝕速率評估。結果顯示，由於二氧化硫與氯鹽及濕潤時間之間存在相互作用，使碳鋼腐蝕速率增加；碳鋼腐蝕速率與氯鹽在沿海區域明顯高於其他地區。並與 ISO 9223 標準比較，發現碳鋼腐蝕率與 ISO 標準並不相同，ISO 標準無法套用在全球各地區。Legault(1978)<sup>[67]</sup>、Pourbaix(1993)<sup>[68]</sup> 與 Morales(2007)<sup>[69]</sup> 等人，也證實金屬材料腐蝕速率與暴露時間存在雙對數線性迴歸模式關係。Su (1988)<sup>[70]</sup> 利用迴歸分析探討大氣環境中各因子對金屬腐蝕率之影響程度，結果得到不同暴露地點與環境因子分別影響金屬腐蝕速率，驗證出迴歸模式地域性限制的問題。Tsai (1993)<sup>[71]</sup> 進行環境腐蝕因子迴歸分析，討論溫度、相對溼度、氯鹽沉積量與二氧化硫沉積量對碳鋼和耐候鋼之腐蝕速率的影響，針對高腐蝕速率區域須分別處理數據，再進行迴歸分析。Chou(2011)<sup>[72]</sup> 以迴歸分析建立鋅金屬腐蝕速率預測模式研究結果，針對氯鹽、二氧化硫與濕潤時間等 3 項環境因子對臺灣地區鋅金屬的腐蝕速率，以氯鹽的影響最為顯著。Lo(2014)<sup>[73]</sup> 探討臺灣碳鋼與大氣腐蝕環境因子之關聯性，結果得知工業區以二氧化硫與濕潤時間有顯著相關。沿海區以氯鹽與濕潤時間，季節性以冬季與秋季與 1 年期碳鋼腐蝕有顯著相關。經由上述文獻發現在不同試驗區域環境腐蝕分類標準，其腐蝕等級往往超越 ISO 9223 提出的環境腐蝕性分類之等級。故利用迴歸分析建立專屬於該地區之腐蝕速率與環境因子之數值關係，應可提升預測金屬材料腐蝕的準確性。



## 第三章 研究方法與試驗點位置資料圖表

### 3.1 大氣暴放環境

#### 3.1.1 氯鹽沉積速率試驗調查

本計畫以垂直海岸線落鹽量之調查，自距離海岸線 3 km 為邊界，即垂直海岸線試驗點的佈設以離海岸線距離，朝內陸沿一條直線設置，每條測線以離海岸線算起，分別約於臨海 0m、100m、300m、1 km、3 km 之距離處設置試驗點，並依借用場地可行性決定設站。設置站址如下：

1. 東北季風海域(基隆)：基隆試驗線，包括碧砂安檢所 1 處、海洋大學 1 處共 2 處。
2. 北部地區海域(桃園)：桃園試驗線，包括大潭電廠 1 處與觀音產業園區 1 處，共 2 處。
3. 中部地區海域(臺中)：臺中港試驗線，包括臺中港區內 1 處、本所運輸技術研究中心 1 處與市區民宅 1 處，共 3 處。
4. 中部產業園區海域(雲林)：台塑六輕試驗線，包括六輕產業園區內 5 處。
5. 西南部地區海域(高雄)：高雄港試驗線，包括高雄港區內 4 處。
6. 南部地區海域(恆春)：核三廠試驗線，包括核三廠區內 3 處。
7. 東北部地區海域(宜蘭)：蘇澳港試驗線，包括蘇澳港區內 2 處。
8. 東部地區海域(花蓮)：花蓮港試驗線，包括花蓮港區內 2 處、市區加油站 1 處共 3 處。

另外為使試驗點之數據可進行內插推算，於上述調查路線之垂直方向，即沿臺灣南北向再規劃西部 2 條、東部 1 條試驗線。臺灣西部之試驗線一為西部濱海沿線，另一則為臺灣高鐵沿線；西部濱海沿線試驗點包括：石門十八王公橋、臺北港監測站、桃園永安安檢所、桃園平

鎮產業園區、新竹漁港安檢所、台電通霄電廠、苗栗外埔安檢所、臺中五甲安檢所、台電臺中電廠、彰濱產業園區、彰化王功安檢所、嘉義東石安檢所、臺南成大安南校區水工試驗所、高雄興達火力電廠、中鋼公司，共 15 個試驗點；高鐵沿線車站試驗點則包括高鐵臺中站、嘉義站、左營站，共 3 個試驗點。臺灣東部濱海公路沿線之試驗點包括：東北角風景區福隆遊客中心、宜蘭梗枋安檢所、宜蘭南澳安檢所、宜蘭龍德產業園區、花蓮太魯閣國家公園管理處、花蓮橄仔樹安檢所、花蓮石梯安檢所、臺東成功安檢所、臺東東河金樽安檢所、臺東富崗伽蘭安檢所、臺東尚武安檢所，共 11 個試驗點。

在對照組方面，選擇臺灣距離海岸線較遠之山區或公路佈設試驗點，規劃之試驗點包括臺北市陽明山國家公園管理處、北部山區(公路局北區養護工程分局處復興工務段)、中部山區(公路局中區養護工程分局新中橫監工站、埔里工務段、霧社監工站、谷關工務段)、南部山區(公路局雲嘉南區養護工程分局阿里山工務段與石卓監工站)等 8 個試驗點。此外，都會地區於臺北市設置 1 個試驗點及外島地區之金門水頭商港、馬祖福澳港、澎湖馬公市共 3 個試驗點。

綜而言之，氣鹽沉積速率的調查位置共有 65 個試驗點，相關涵蓋區域與試驗點所屬環境分類，如表 3-1 所示，分佈如圖 3.1 所示。圖 3.1 中，紅色字樣表示垂直海岸線規劃的調查路線共 24 個試驗點，藍色字樣為 29 個平行海岸線之試驗點，綠色字樣則表示 12 個參考對照試驗點。

表 3-1 氣鹽沉積速率調查試驗點規劃分類表

	試驗線(點)規劃	所在地區	環境分類
垂直海岸線之試驗線	基隆試驗線	基隆市	海洋環境、鄉村環境
	桃園試驗線(大潭電廠)	桃園市觀音區	海洋環境、鄉村環境
	臺中港試驗線	臺中市梧棲區	海洋環境、鄉村環境
	台塑六輕試驗線	雲林縣麥寮鄉	海洋環境、工業環境
	高雄港試驗線	高雄市	海洋環境、都市環境
	核三廠試驗線	屏東縣恆春鎮	海洋環境、鄉村環境
	蘇澳港試驗線	宜蘭縣蘇澳鎮	海洋環境、鄉村環境
	花蓮港試驗線	花蓮市	海洋環境、鄉村環境
西部濱海沿線規劃試驗點	十八王公橋	新北市石門區	海洋環境
	臺北港監測站	新北市淡水區	海洋環境
	永安安檢所	桃園市新屋區	海洋環境、鄉村環境
	平鎮產業園區	桃園市平鎮區	工業環境
	新竹安檢所	新竹市	海洋環境、鄉村環境
	台電通霄電廠	苗栗縣通霄鎮	海洋環境、工業環境
	外埔安檢所	苗栗縣後龍鎮	海洋環境
	五甲安檢所	臺中市大安區	海洋環境、鄉村環境
	台電臺中電廠	臺中市龍井區	海洋環境、工業環境
	彰濱產業園區	彰化縣鹿港鎮	海洋環境、工業環境
	王功安檢所	彰化縣芳苑鄉	海洋環境
	東石安檢所	嘉義縣東石鄉	海洋環境
	成大水工試驗所	臺南市安南區	海洋環境、鄉村環境
	興達火力電廠	高雄市永安區	海洋環境、工業環境
中鋼公司	高雄市小港區	工業環境	
東部濱海沿線規劃試驗點	高鐵臺中站	臺中市烏日區	都市環境
	高鐵嘉義站	嘉義縣太保市	鄉村環境
	高鐵左營站	高雄市左營區	都市環境
	東北角風景區福隆遊客中心	新北市貢寮區	海洋環境
	梗枋安檢所	宜蘭縣頭城鎮	海洋環境
	龍德產業園區	宜蘭縣冬山鄉	海洋環境、工業環境
	南澳安檢所	宜蘭縣南澳鄉	海洋環境
太魯閣國家公園管理處	花蓮縣秀林鄉	鄉村環境	
檄仔樹安檢所	花蓮縣壽豐鄉	海洋環境	
石梯安檢所	花蓮縣豐濱鄉	海洋環境	

	試驗線(點)規劃	所在地區	環境分類
驗 點	金樽安檢所	臺東縣東河鄉	海洋環境
	伽藍安檢所	臺東市	海洋環境
	尚武安檢所	臺東縣大武鄉	海洋環境
	成功安檢所	臺東縣成功鎮	海洋環境
對 照 組 試 驗 點	陽明山國家公園管理處	臺北市	鄉村環境
	臺北自來水事業處	臺北市	都市環境
	公路局雲嘉南區養護工程分局阿里山工務段	嘉義縣番路鄉	鄉村環境
	金門水頭商港	金門縣	海洋環境
	馬祖福澳港碼頭	連江縣(馬祖)	海洋環境
	公路局南區養護工程分局澎湖工務段	澎湖縣	海洋環境
	公路局中區養護工程分局新中橫監工站	南投縣信義鄉	鄉村環境
	公路局中區養護工程分局埔里工務段	南投縣埔里鎮	鄉村環境
	公路局中區養護工程分局霧社監工站	南投縣仁愛鄉	鄉村環境
	公路局中區養護工程分局處谷關工務段	臺中市和平區	鄉村環境
	公路局北區養護工程分局復興工務段	桃園市復興區	鄉村環境
公路局雲嘉南區養護工程分局石卓監工站	嘉義縣阿里山鄉	鄉村環境	



圖 3.1 氣鹽沉積速率調查位置

### 3.1.2 氣鹽沉積速率計算

本研究參考 CNS 13754 (對應 ISO 9225 國際標準) 金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕性(污染之測定)規範，安裝氣鹽採集裝置。氣鹽沉積量採集裝置是以濕燭法進行(如圖 3.2 至圖 3.4)，其原理為使用一個濕纖維織物表面，在已知面積的條件下暴露一段時間，再以化學分析法測定其氣鹽沉積量。計算所得之氣鹽沉積率，以  $\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$  表示。

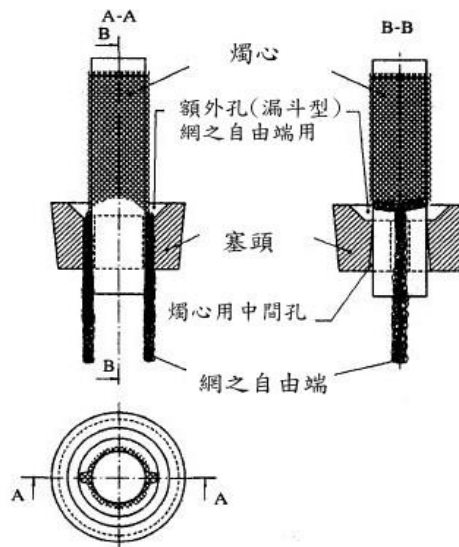


圖 3.2 濕燭法燭心構造示意圖(CNS 13754)

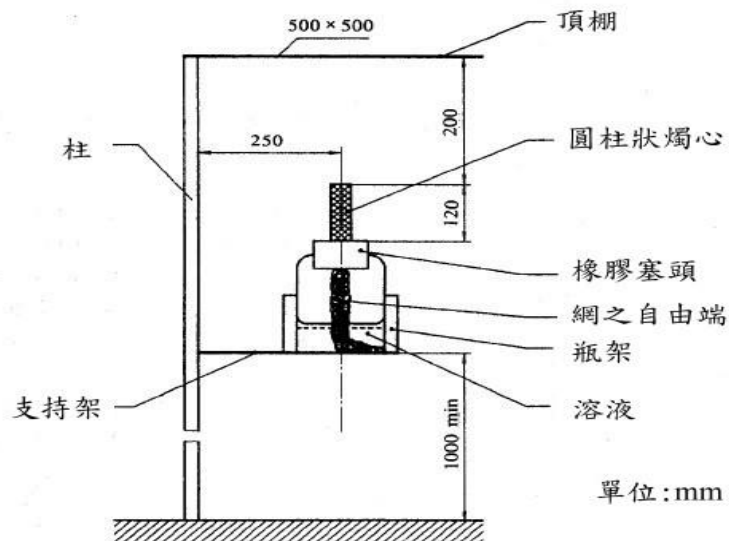


圖 3.3 濕燭法裝置構造圖(CNS 13754)



圖 3.4 氯鹽沉積量採集裝置

各試驗點暴露後回收的紗布以定量的去離子水(約 50 ml)沖洗，再依環境部水中陰離子檢測方法—離子層析法(NIEA W415.52B)之離子層析儀測定水中之氯離子含量。氯鹽之沉積速率依下式計算：

$$R(\text{Cl}^-) = \frac{m}{A \times t} \quad (3-1)$$

式中， $R(\text{Cl}^-)$  = 氯化物沉積速率( $\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ )

$m$  = 試樣溶液之氯離子總質量( $\text{mg}$ )

$A$  = 暴露網表面積( $\text{m}^2$ )

$t$  = 暴露時間，天( $\text{day}$ )

### 3.1.3 二氧化硫沉積速率調查

大氣中廢氣的污染程度決定了當地大氣的腐蝕性，若排放的廢氣中含有大量的  $\text{SO}_2$  與  $\text{H}_2\text{S}$ ，這些氣體在大氣中會形成酸雨，且當這些硫化物溶於水以水膜形式存在時，將會形成強腐蝕介質，加速金屬腐蝕。一般在石化廠、煉鋼廠、火力電廠等產業園區與都市地區，大氣中均可

能存在相當程度的硫化物；因此，本研究針對二氧化硫沉積速率調查試驗點的佈設，主要以都市地區、工業地區、石化與火力電廠附近為主，並設置對照組，建置如下：

1. 都市地區：臺北市，選取交通頻繁處，共 1 個試驗點。
2. 工業地區：於臺灣各縣市產業園區設置試驗點，共 29 個試驗點。
3. 石化與火力電廠：林園煉油廠、大潭電廠(桃園試驗線 500m)、通霄火力電廠、臺中火力電廠、興達火力電廠，共 5 個試驗點。
4. 臺灣西部南北縱向：高鐵沿線車站，地點包括高鐵臺中站、嘉義站、左營站，共 3 個試驗點。
5. 沿海地區：東北角風景區福隆遊客中心、十八王公橋、永安安檢所、臺中港試驗線 300m，共 4 個試驗點。
6. 離島地區：金門金城鎮(水頭商港)、澎湖馬公市(公路局南區養護工程分局澎湖工務段)及馬祖南竿鄉(福澳港) 各設 1 個試驗點，共 3 個試驗點。
7. 對照組：選擇距離海岸線較遠之山區或公路佈設試驗點，包括臺北市陽明山國家公園管理處、太魯閣國家公園管理處、北部山區(公路局北區養護工程分局處復興工務段)、中部山區(公路局中區養護工程分局新中橫監工站、埔里工務段、霧社監工站、谷關工務段)、南部山區(公路局雲嘉南區養護工程分局阿里山工務段與石卓監工站)等 9 個試驗點。此外，在硫磺溫泉區(陽明山硫磺區) 設 1 個試驗點。

二氧化硫沉積速率調查位置共有 55 個試驗點，包括都市地區 1 個試驗點，全臺產業園區 29 個試驗點，石化與火力電廠 5 個試驗點，高鐵沿線 3 個試驗點，沿海地區 4 個試驗點，離島地區 3 個試驗點，10 個參考對照試驗點。綜整如表 3-2 與圖 3.5。

表 3-2 二氧化硫沉積速率調查試驗點分佈表

縣(市)	試驗點位置
臺北市	臺北市自來水事業處、陽明山國家公園管理處、陽明山硫磺區
新北市	十八王公橋、樹林產業園區、東北角風景區福隆遊客中心
桃園市	觀音產業園區、平鎮產業園區(服務中心、力鋼公司)、桃園試驗線 500m(大潭電廠)、桃園試驗線 2Km、公路局北區養護工程分局復興工務段、永安安檢所
新竹縣	新竹產業園區、工業技術研究院
苗栗縣	頭份產業園區、竹南產業園區、通霄火力電廠
臺中市	大里產業園區、臺中港關連產業園區、臺中產業園區、高鐵臺中站、臺中火力電廠、臺中港試驗線 300m、公路局中區養護工程分局處谷關工務段
南投縣	南崗產業園區、公路局中區養護工程分局新中橫監工站、公路局中區養護工程分局埔里工務段、公路局中區養護工程分局霧社監工站
彰化縣	彰濱產業園區、田中產業園區
雲林縣	斗六產業園區
嘉義縣	朴子產業園區、高鐵嘉義站、公路局雲嘉南區養護工程分局阿里山工務段、公路局雲嘉南區養護工程分局石卓監工站
臺南市	安平產業園區、興達火力電廠、成大水工試驗所、官田產業園區
高雄市	永安產業園區、鳳山產業園區、大發產業園區、中油林園廠、中鋼公司、高鐵左營站
屏東縣	屏東產業園區
宜蘭縣	龍德產業園區
花蓮縣	和平產業園區、太魯閣國家公園管理處
花蓮市	美崙產業園區
臺東市	豐樂產業園區
金門縣	金門水頭商港
澎湖縣	公路局南區養護工程分局澎湖工務段
連江縣	馬祖福澳港

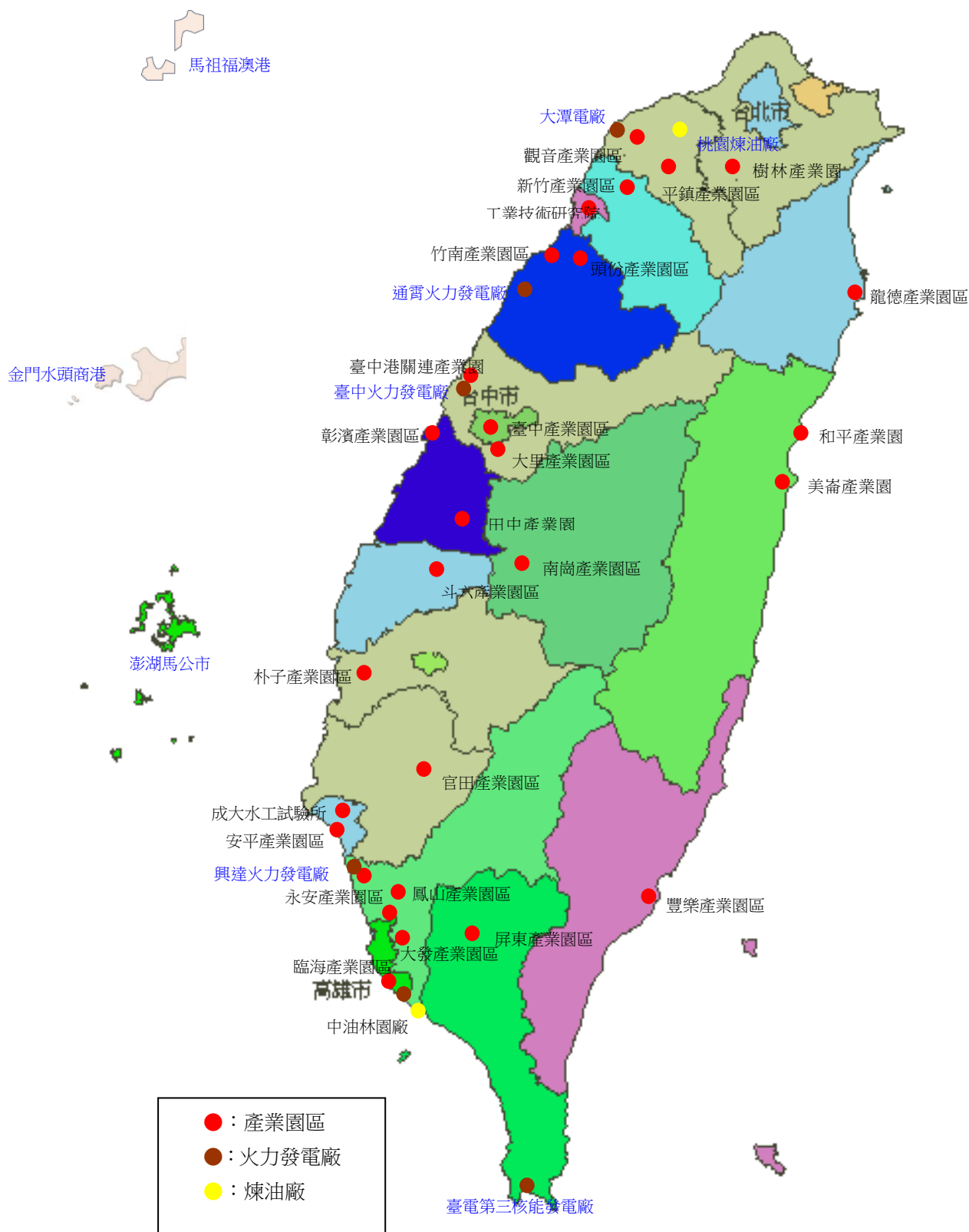


圖 3.5 二氧化硫沉積速率調查位置圖

### 3.1.4 二氧化硫沉積速率計算

本計畫參考 CNS 13754(對應 ISO 9225 國際標準)金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕性(污染之測定)規範，二氧化硫沉積量採集裝置是以二氧化硫在二氧化鉛硫酸化平板之沉積速率測定(如圖 3.6 與圖 3.7)，其原理為大氣中二氧化硫與二氧化鉛會反應形成硫酸鉛，暴露一段時間後回收該平板，並針對平板上的附著物進行硫酸鹽分析以測定二氧化硫之含量，二氧化硫的沉積量以  $\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$  表示。

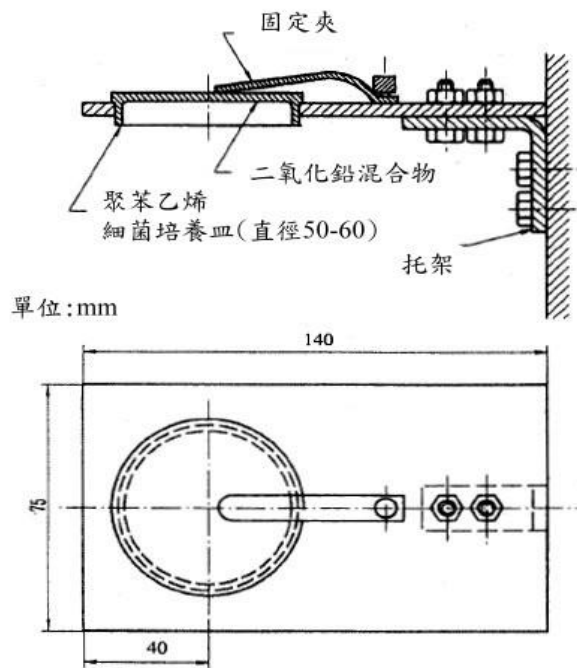


圖 3.6 二氧化硫沉積量採集裝置構造圖(CNS 13754)



圖 3.7 二氧化硫沉積量採集裝置

各試驗點暴露後回收的硫酸化平板依環境部水中陰離子檢測方法—離子層析法(NIEA W415.52B)測定，即使用碳酸鈉溶液先移出並溶解硫酸化平板之內容物，然後以離子層析儀檢測硫酸鹽含量。二氧化硫之沉積速率之計算如下：

$$R(\text{SO}_2) = \frac{(m_1 - m_0) \times 16.67}{A \times t \times 1000} \quad (3-2)$$

式中， $R(\text{SO}_2)$  = 二氧化硫沉積速率( $\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ )

$m_0$  = 空白平板(未暴露)測試之硫酸鹽質量( $\mu\text{g}$ )

$m_1$  = 每一平板之硫酸鹽質量( $\mu\text{g}$ )

$A$  = 平板面積( $\text{m}^2$ )

$t$  = 暴露時間，天(day)

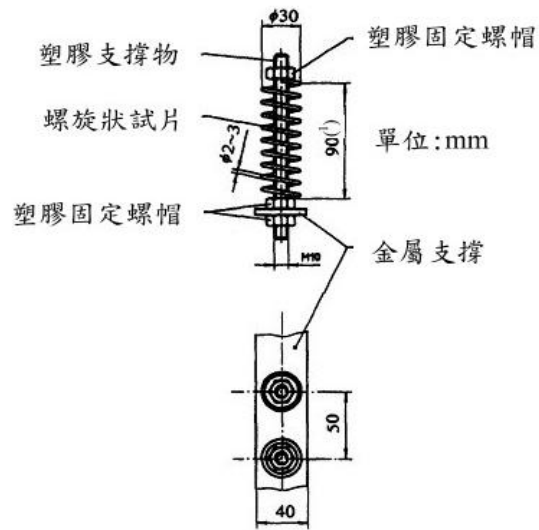
### 3.1.5 現地暴露試驗

本研究針對螺旋試樣碳鋼、鋅、銅、鋁 4 種金屬，選擇適當位置進行現地暴露試驗並以重量損失法計算其腐蝕速率。

現地暴露試驗試片的製作方式參考 CNS 13753(對應 ISO 9226 國際標準)，因本研究從 2007 年開始建置試驗點，當時 CNS 13753:1996 規範的標準試片有螺旋狀及平板狀兩種形態，本研究選用螺旋狀標準試片(如圖 3.8 與圖 3.9)，並沿用迄今。雖與目前 CNS 13753:2019 規範的標準試片為平板狀標準試片不同，但試驗結果仍可供參考比較。

螺旋狀標準試片的材料如下：(1)碳鋼：非合金碳鋼( $\text{Cu}=0.03\sim 0.10\%$ ,  $\text{P} < 0.07\%$ )，(2)鋅：98.5%以上之純度，(3)銅：99.5%以上之純度，(4)鋁：99.5%以上之純度；將以上金屬之線材(線材直徑 2.6 mm)剪取約 1000 mm 長度，纏繞在直徑為 24 mm 的圓棒上，製成螺旋狀試片。

現地暴露試驗點建置的數量以涵蓋氣鹽沉積量與二氧化硫沉積量調查位置之 75% 為原則，全國合計共有 90 個螺旋試樣試驗點。設置站址如圖 3.10 所示。



註1 線材兩端插入支撐物間之距離

圖 3.8 螺旋狀試片構造圖(CNS 13753:1996)



圖 3.9 螺旋狀試片暴露試驗

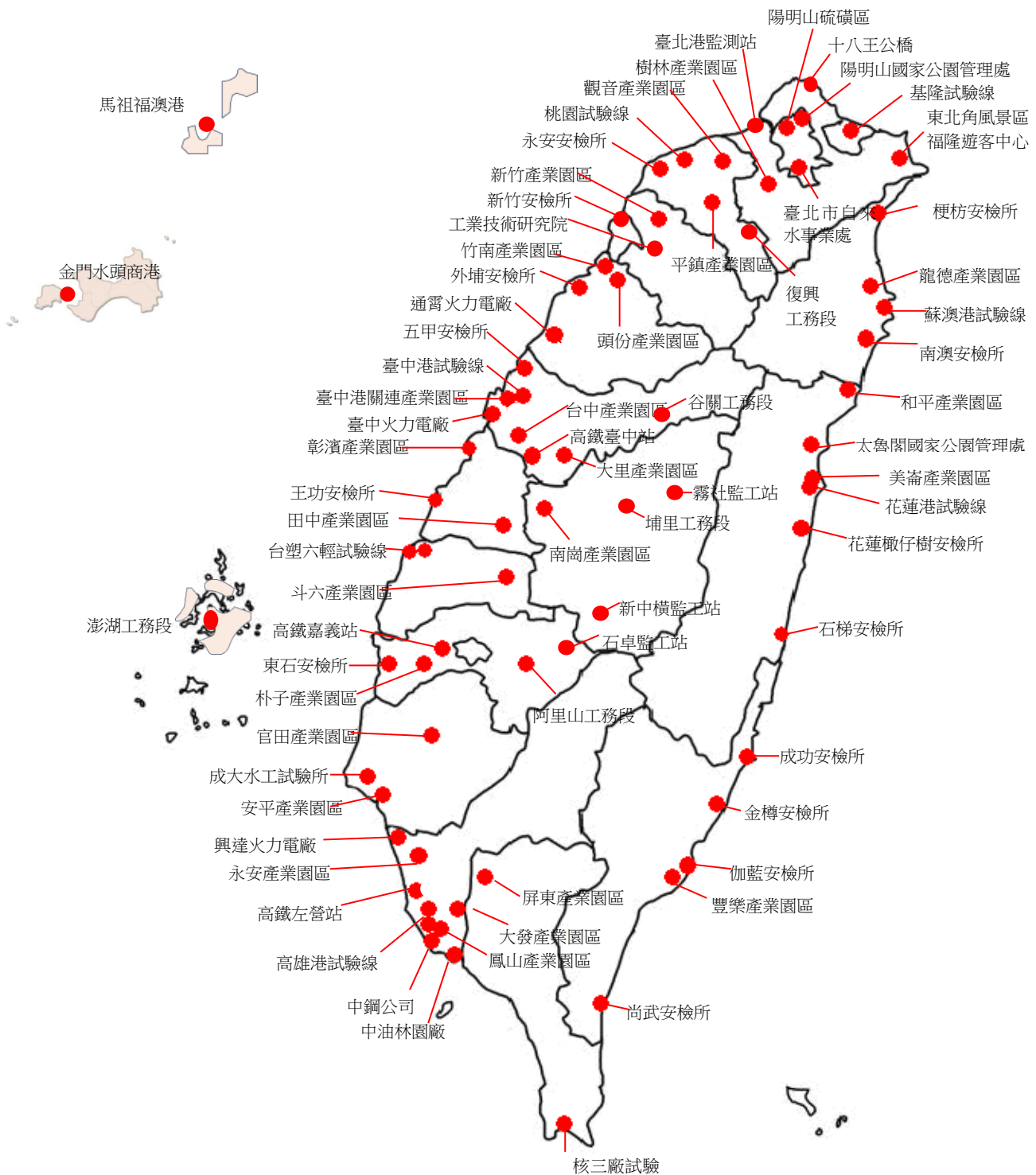


圖 3.10 現地暴露試驗(碳鋼、鋅、鋁、銅螺旋狀試片)試驗點分佈圖

### 3.1.6 試片腐蝕速率計算

將各試驗點測試後每季回收的試片進行腐蝕速率量測。碳鋼、鋅、鋁、銅四種螺旋狀金屬試片之大氣腐蝕速率量測，依照 CNS 14122(對應 ISO 8407 國際標準)金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕-試片腐蝕生成物清除法，以適當的清洗方式除去試片表面腐蝕生成物，量測其重量損失，並依金屬材料的暴露時間，計算其大氣腐蝕速率。螺旋狀金屬試片之腐蝕速率單位以  $\mu\text{m}/\text{y}$  表示，計算公式依據 CNS 13753:1996 規範，如下：

$$R_{\text{corr}} = 0.25(\Delta m \cdot d / m \cdot t) \quad (3-3)$$

式中，  $R_{\text{corr}}$  = 腐蝕速率( $\mu\text{m}/\text{y}$ )

$\Delta m$  = 質量損失(mg)

$d$  = 線材直徑(mm)

$m$  = 試片原始質量(g)

$t$  = 暴露時間，年(y)

### 3.1.7 試片腐蝕生成物清除與測試

碳鋼、鋅、鋁、銅 4 種螺旋狀金屬線材之大氣腐蝕速率量測，依照 CNS 14122 金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕-試片腐蝕生成物清除法，以適當的清洗方式除去試片表面腐蝕生成物，量測其重量損失，並依金屬材料的暴露時間，計算其大氣腐蝕速率。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，先依照 CNS 14122 規範，使用腐蝕試片進行重複清洗，以制定檢量標準，作業流程如圖 3.11 所示。針對不同金屬，化學清洗法使用的化學藥品及各項條件，如表 3-3 所示。

表 3-3 化學清洗法使用藥品及條件(CNS 14122)

材 料	化學藥品	時間 (min)	溫度 (°C)	備註
碳 鋼	以 500mL HCl ( $\rho=1.19\text{g/mL}$ ) 與 3.5g 六亞甲四胺 (Hexamethylene tetramine), 加入蒸餾水配成 1000mL	10	室溫 (23.5)	—
鋅	100g 氯化銨 ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ), 加入蒸 餾水配成 1000mL	2~5	70	—
銅	以 100mL 硫酸 ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ , $\rho=1.84$ g/mL), 加蒸餾水至 1000mL	1~3	室溫 (23.5)	在處理之前, 先移 除表面的塊狀腐蝕 生成物, 可使銅的 二次沉積產物量減 到最少
鋁	硝酸 ( $\text{HNO}_3$ , $\rho=1.42$ g/mL)	1~5	室溫 (23.5)	去除額外之沉積物 及塊狀之腐蝕生成 物, 以免造成基底金 屬過度流失

## 大氣腐蝕試片- 腐蝕生成物清除法作業流程

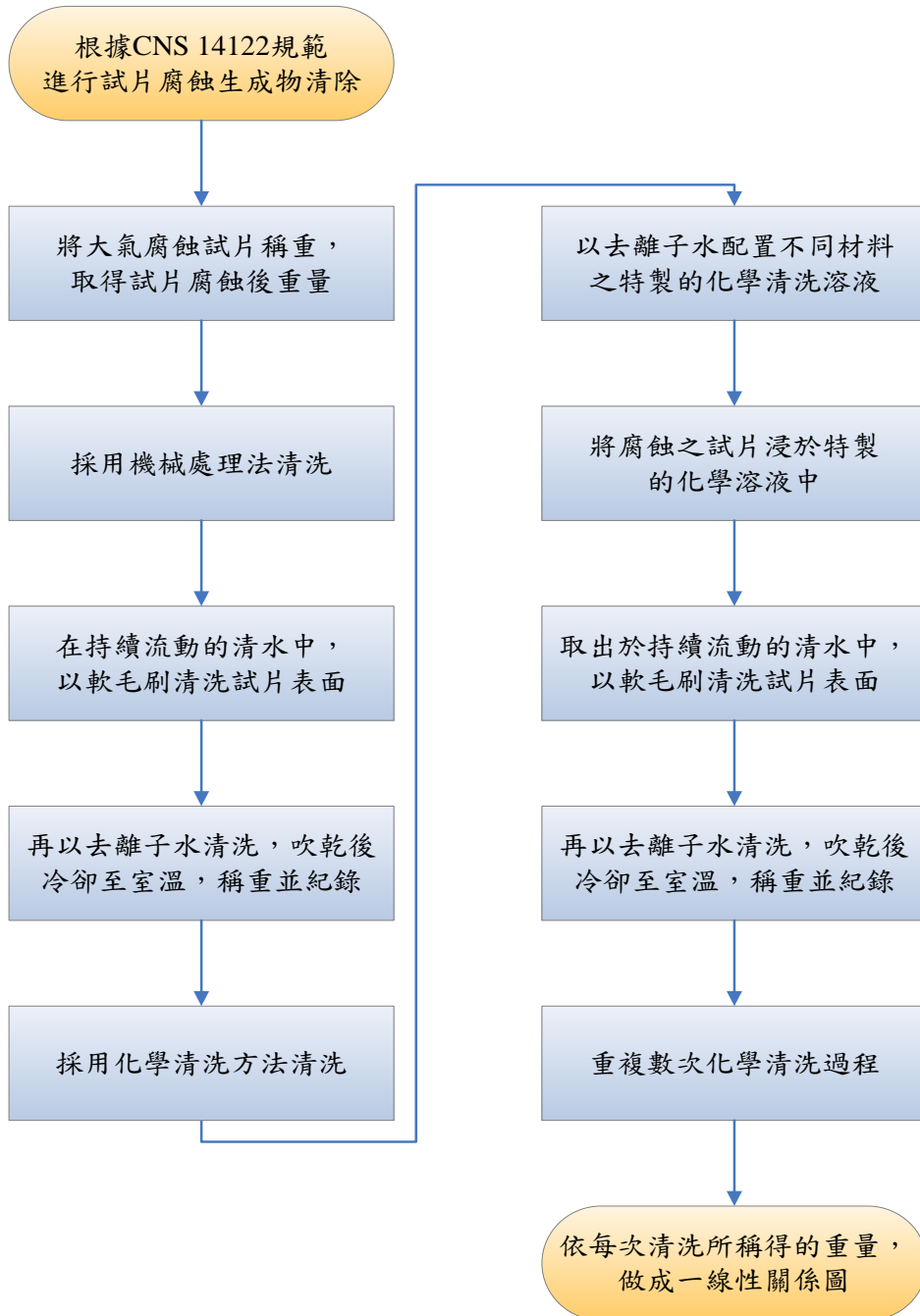


圖 3.11 腐蝕生成物清除法作業流程圖

### 3.2 腐蝕因子環境分類

表 3-4 至表 3-6 分別為 CNS 13401 (對應 ISO 9223:2012 國際標準) 規範中對濕潤時間、氯鹽沉積速率與 SO<sub>2</sub> 沉積速率或濃度的分類。參考 CNS 13401 (對應 ISO 9223:2012 國際標準)，大氣腐蝕環境的分類可採用試片腐蝕速率量測與環境因子進行區分，若採用環境因子進行分類，選擇的參數則包括濕潤時間( $\tau$ )、空氣中的氯鹽沉積速率( $S_d$ )與二氧化硫沉積量( $P$ )。其中，濕潤時間是以全年中溫度高於 0 °C，相對濕度大於 80%之小時數計算，氯鹽沉積速率( $\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ )是以 CNS 13754 (對應 ISO 9225 國際標準)濕燭法測量，二氧化硫沉積量則是以 CNS 13754 (對應 ISO 9225 國際標準)規定之二氧化鉛硫酸化平板量測的沉積速率( $\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ )測定或是空氣中的 SO<sub>2</sub> 濃量( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 計算；其中，各參數的量測時間均至少為 1 年以上。依據 CNS 與 ISO 規範，若要以腐蝕因子進行大氣腐蝕環境分類，濕潤時間、氯鹽與二氧化硫的沉積速率至少應經過 1 年以上的連續量測，若測點所在位置無實測的腐蝕因子數據，則以鄰近的腐蝕因子資料推估。

表 3-7 為各種標準金屬最初第 1 年之腐蝕速率區分，金屬的腐蝕速率在初期暴露時最大，隨後會逐漸下降而最終到達一穩定值；表中除鋁金屬外，碳鋼、鋅、銅金屬的腐蝕速率單位均可以  $\mu\text{m}/\text{yr}$  表示；主要原因是因碳鋼、鋅、銅金屬在大氣環境中的腐蝕現象為均勻腐蝕，但鋁金屬則為局部腐蝕，所以鋼、鋅、銅金屬的腐蝕速率可以  $\mu\text{m}/\text{yr}$  表示，但鋁的腐蝕速率須以  $\text{g}/\text{m}^2/\text{yr}$  表示。

上述分別將大氣腐蝕環境區分為 C1、C2、C3、C4、C5 與 CX 6 個等級，C1 表示腐蝕性非常低(very low)，C2 表示腐蝕性低(low)，C3 表示腐蝕性中等(medium)，C4 表示腐蝕性高(high)，C5 表示腐蝕性非常高(very high)，CX 表示腐蝕性極端高(extra high)，應用於特定海洋和海洋工業環境。

表 3-4 濕潤環境等級分類表

濕潤時間 (hour/year)	級別
$\tau \leq 10$	$\tau_1$
$10 < \tau \leq 250$	$\tau_2$
$250 < \tau \leq 2,500$	$\tau_3$
$2,500 < \tau \leq 5,500$	$\tau_4$
$5,500 < \tau$	$\tau_5$

資料來源：CNS 13401 (對應 ISO 9223:2012 國際標準)。

表 3-5 氯鹽腐蝕環境等級分類表

氯鹽沉積速率 (mg/m <sup>2</sup> /day)	等級
$S_d \leq 3$	S <sub>0</sub>
$3 < S_d \leq 60$	S <sub>1</sub>
$60 < S_d \leq 300$	S <sub>2</sub>
$300 < S_d \leq 1,500$	S <sub>3</sub>

資料來源：CNS 13401 (對應 ISO 9223:2012 國際標準)。

表 3-6 二氧化硫腐蝕環境等級分類表

SO <sub>2</sub> 沉積速率 (mg/m <sup>2</sup> /day)	SO <sub>2</sub> 濃度 ( $\mu$ g/m <sup>3</sup> )	等級
$P_d \leq 4$	$P_c \leq 5$	P <sub>0</sub>
$4 < P_d \leq 24$	$5 < P_c \leq 30$	P <sub>1</sub>
$24 < P_d \leq 80$	$30 < P_c \leq 90$	P <sub>2</sub>
$80 < P_d \leq 200$	$90 < P_c \leq 250$	P <sub>3</sub>

註：P<sub>d</sub>：測定方法以沉積速率量測 SO<sub>2</sub>；P<sub>c</sub>：測定方法以體積濃度量測 SO<sub>2</sub>。

資料來源：CNS 13401 (對應 ISO 9223:2012 國際標準)。

表 3-7 大氣腐蝕環境分類-以各種標準金屬最初第 1 年之腐蝕速率區分

腐蝕性 級別	金屬的腐蝕速率( $\gamma_{\text{corr}}$ )				
	單位	碳鋼	鋅	銅	鋁
C1	$\text{g/m}^2/\text{yr}$ $\mu\text{m}/\text{yr}$	$\gamma_{\text{corr}} \leq 10$ $\gamma_{\text{corr}} \leq 1.3$	$\gamma_{\text{corr}} \leq 0.7$ $\gamma_{\text{corr}} \leq 0.1$	$\gamma_{\text{corr}} \leq 0.9$ $\gamma_{\text{corr}} \leq 0.1$	可忽略 —
C2	$\text{g/m}^2/\text{yr}$ $\mu\text{m}/\text{yr}$	$10 < \gamma_{\text{corr}} \leq 200$ $1.3 < \gamma_{\text{corr}} \leq 25$	$0.7 < \gamma_{\text{corr}} \leq 5$ $0.1 < \gamma_{\text{corr}} \leq 0.7$	$0.9 < \gamma_{\text{corr}} \leq 5$ $0.1 < \gamma_{\text{corr}} \leq 0.6$	$\gamma_{\text{corr}} \leq 0.6$ —
C3	$\text{g/m}^2/\text{yr}$ $\mu\text{m}/\text{yr}$	$200 < \gamma_{\text{corr}} \leq 400$ $25 < \gamma_{\text{corr}} \leq 50$	$5 < \gamma_{\text{corr}} \leq 15$ $0.7 < \gamma_{\text{corr}} \leq 2.1$	$5 < \gamma_{\text{corr}} \leq 12$ $0.6 < \gamma_{\text{corr}} \leq 1.3$	$0.6 < \gamma_{\text{corr}} \leq 2$ —
C4	$\text{g/m}^2/\text{yr}$ $\mu\text{m}/\text{yr}$	$400 < \gamma_{\text{corr}} \leq 650$ $50 < \gamma_{\text{corr}} \leq 80$	$15 < \gamma_{\text{corr}} \leq 30$ $2.1 < \gamma_{\text{corr}} \leq 4.2$	$12 < \gamma_{\text{corr}} \leq 25$ $1.3 < \gamma_{\text{corr}} \leq 2.8$	$2 < \gamma_{\text{corr}} \leq 5$ —
C5	$\text{g/m}^2/\text{yr}$ $\mu\text{m}/\text{yr}$	$650 < \gamma_{\text{corr}} \leq 1,500$ $80 < \gamma_{\text{corr}} \leq 200$	$30 < \gamma_{\text{corr}} \leq 60$ $4.2 < \gamma_{\text{corr}} \leq 8.4$	$25 < \gamma_{\text{corr}} \leq 50$ $2.8 < \gamma_{\text{corr}} \leq 5.6$	$5 < \gamma_{\text{corr}} \leq 10$ —
CX	$\text{g/m}^2/\text{yr}$ $\mu\text{m}/\text{yr}$	$1,500 < \gamma_{\text{corr}} \leq 5,500$ $200 < \gamma_{\text{cor}} \leq 700$	$60 < \gamma_{\text{cor}} \leq 180$ $8.4 < \gamma_{\text{corr}} \leq 25$	$50 < \gamma_{\text{corr}} \leq 90$ $5.6 < \gamma_{\text{corr}} \leq 10$	$10 < \gamma_{\text{cor}}$ —

資料來源：CNS 13401 (對應 ISO 9223:2012 國際標準)。

### 3.3 海洋暴放環境

本計畫為持續建立臺灣地區長期金屬材料水下腐蝕資料庫，以做為新建及既有結構物耐久性與防蝕設計及維護管理之參考需要，自 103 年起陸續安裝水下金屬試驗架於基隆港、臺北港、蘇澳港、花蓮港、臺中港、布袋港、安平港、高雄港、金門水頭、金門料羅港、馬祖福澳港、澎湖龍門港等國內商港，藉此了解港區在不同環境、金屬材料、海洋生物附著、海水水質等對金屬材料腐蝕之長期研究。

#### 3.3.1 研究方法與規劃

本計畫水下腐蝕研究方法與規劃如圖 3.12 所示。

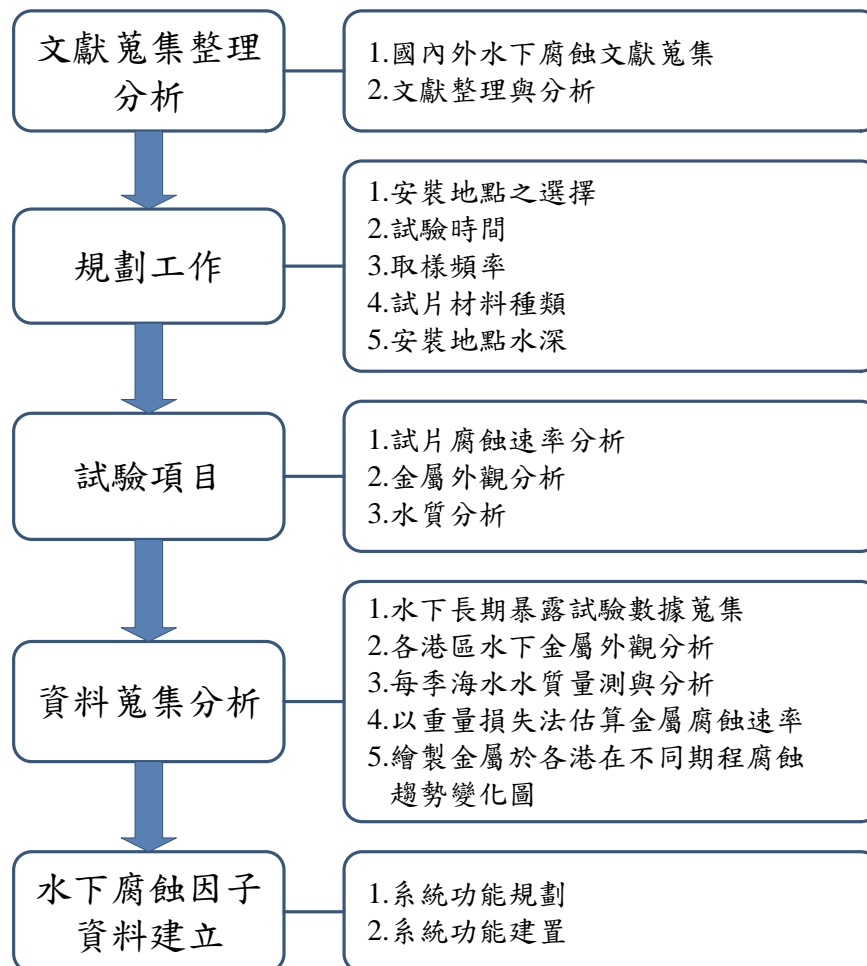


圖 3.12 水下腐蝕研究方法與規劃

### 3.3.2 各港區海水下金屬暴露試驗

各港區試片設計、屬性與安裝與試驗期程，如表 3-8 至表 3-11 所示，試片大小，試片架之設計，試片架之安放工作以及各階段分批取樣時程，詳述如後：

1. 材質型式: 試片採用港工結構材使用之試片，分 3 種型式為碳鋼 (SM490A)、不鏽鋼(SS316L)、低碳鋼(SS400)。
2. 試片之大小: 為適合海中附生物之附著。軋鋼材質料試片大小均為 15cm×10cm，厚度則分別為碳鋼 (SM490A)1.0cm、不鏽鋼 (SS316L)1.0cm、低碳鋼(SS400)1.0cm。
3. 試片架設計: 為配合當地港工結構之條件，設計須考慮穩定性、試片置放及取樣難易程度等每一試片皆有兩只通孔，使用不鏽鋼螺栓及螺帽，固定於承載試片主架上，螺栓與螺帽使用絕緣材質墊片，以防止電化學腐蝕效應。
4. 試片架的暴露位置: 分別安放於飛沫帶、潮汐帶、水中帶 3 個位置每層架置 45 個試片，共 135 片，如圖 3.13 所示，以膨脹螺絲接合施作於混凝土牆面固定，現場安裝如圖 3.14 所示。
5. 試驗期程: 依實際需求規劃或 10 年期。
6. 取樣頻率: 第 1、2、5、8、10 年期等。

研究至今已完成前 4 次水下試片取樣、分析工作，第 1~3 次水下取樣分析的成果已整理在前期報告中：第 1 年的取樣成果彙整在「臺灣沿岸地區金屬材料腐蝕環境調查研究」<sup>[11]</sup>報告；2 年後的取樣成果彙整在「108 年臺灣沿岸地區金屬材料腐蝕環境調查研究」<sup>[12]</sup>報告；5 年後的取樣成果彙整在「112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究」<sup>[16]</sup>報告；今(114)年辦理 8 年後之水下金屬試片現地取樣及化學試驗分析工作，取樣成果預計彙整在明(115)年報告。

表 3-8 各港區金屬材料水下腐蝕試片尺寸與安裝取樣期程(1/4)

放置地點	放置位置	試片材質	試片大小(cm)	安裝日期 (年/月/日)	取樣期程
基隆港 西33B碼頭	飛沫帶	SM490A	15×10×1.0	2016/09/26	1、2、5、 8、10年等5 個期程
		SS316L			
		SS400			
	潮汐帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
	水中帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
臺北港 北#2碼頭	飛沫帶	SM490A	15×10×1.0	2016/09/26	1、2、5、 8、10年等5 個期程
		SS316L			
		SS400			
	潮汐帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
	水中帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
蘇澳港 公務船渠	飛沫帶	SM490A	15×10×1.0	2016/06/23	1、2、5、 8、10年等5 個期程
		SS316L			
		SS400			
	潮汐帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
	水中帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
花蓮港 西防波堤 燈塔	飛沫帶	SM490A	15×10×1.0	2016/10/03	1、2、5、 8、10年等5 個期程
		SS316L			
		SS400			
	潮汐帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
	水中帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			

表3-9 各港區金屬材料水下腐蝕試片尺寸與安裝取樣期程(2/4)

放置地點	放置位置	試片材質	試片大小 (cm)	安裝日期 (年/月/日)	取樣期程 (年)
臺中港 #1 碼頭西側	飛沫帶	SM490A	15×10×1.0	2014/10/28 (2017 毀損)  2019/03/26 (重新安裝)	1、2、5、8、 10 年等 5 個 期程
		SS316L			
		SS400			
	潮汐帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
	水中帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
布袋港 東#3碼頭	潮汐帶	SM490A	15×10×1.0	2016/09/05	1、2、5、 8、10年等5 個期程
		SS316L			
		SS400			
	水中帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
安平港 #7碼頭	飛沫帶	SM490A	15×10×1.0	2016/09/06	1、2、5、 8、10年等5 個期程
		SS316L			
		SS400			
	潮汐帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
	水中帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			

註：臺中港原於 2014 年 10 月 28 日安裝的試片架於 2017 年因外力撞擊毀損，之後於 2019 年 3 月 26 日重新安裝。

表 3-10 各港區金屬材料水下腐蝕試片尺寸與安裝取樣期程(3/4)

放置地點	放置位置	試片材質	試片大小(cm)	安裝日期 (年/月/日)	取樣期程
高雄港 #10碼頭	飛沫帶	SM490A	15×10×1.0	2016/09/08	1、2、5、 8、10年等5 個期程
		SS316L			
		SS400			
	潮汐帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
	水中帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
高雄港 #40碼頭	飛沫帶	SM490A	15×10×1.0	2016/09/07	1、2、5、 8、10年等5 個期程
		SS316L			
		SS400			
	潮汐帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
高雄港 #75碼頭	飛沫帶	SM490A	15×10×1.0	2016/09/07	1、2、5、 8、10年等5 個期程
		SS316L			
		SS400			
	潮汐帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
	水中帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			

註：高雄港#75 碼頭飛沫帶試架於完成取樣 2 年後毀損試片遺失。

表 3-11 各港區金屬材料水下腐蝕試片尺寸與安裝取樣期程(4/4)

放置地點	放置位置	試片材質	試片大小 (cm)	安裝日期 (年/月/日)	取樣期程 (年)
金門 料羅港區	潮汐帶	SM490A	15×10×1.0	2015/11/16	1、2、5、 8、10年等5 個期程
		SS316L			
		SS400			
	水中帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
金門 水頭商港	潮汐帶	SM490A	15×10×1.0	2015/11/16	1、2、5、 8、10年等5 個期程
		SS316L			
		SS400			
	水中帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
馬祖福澳港 浮動碼頭	飛沫帶	SM490A	15×10×1.0	2016/08/15	1、2、5、 8、10年等5 個期程
		SS316L			
		SS400			
	潮汐帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
	水中帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
澎湖龍門港 #9碼頭	潮汐帶	SM490A	15×10×1.0	2016/09/12	1、2、5、 8、10年等5 個期程
		SS316L			
		SS400			
	水中帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
運技中心 循環水槽	潮汐帶	SM490A	15×10×1.0	2016/09/22 (2022終止 試驗)	1、2、5、 8、10年等5 個期程
		SS316L			
		SS400			

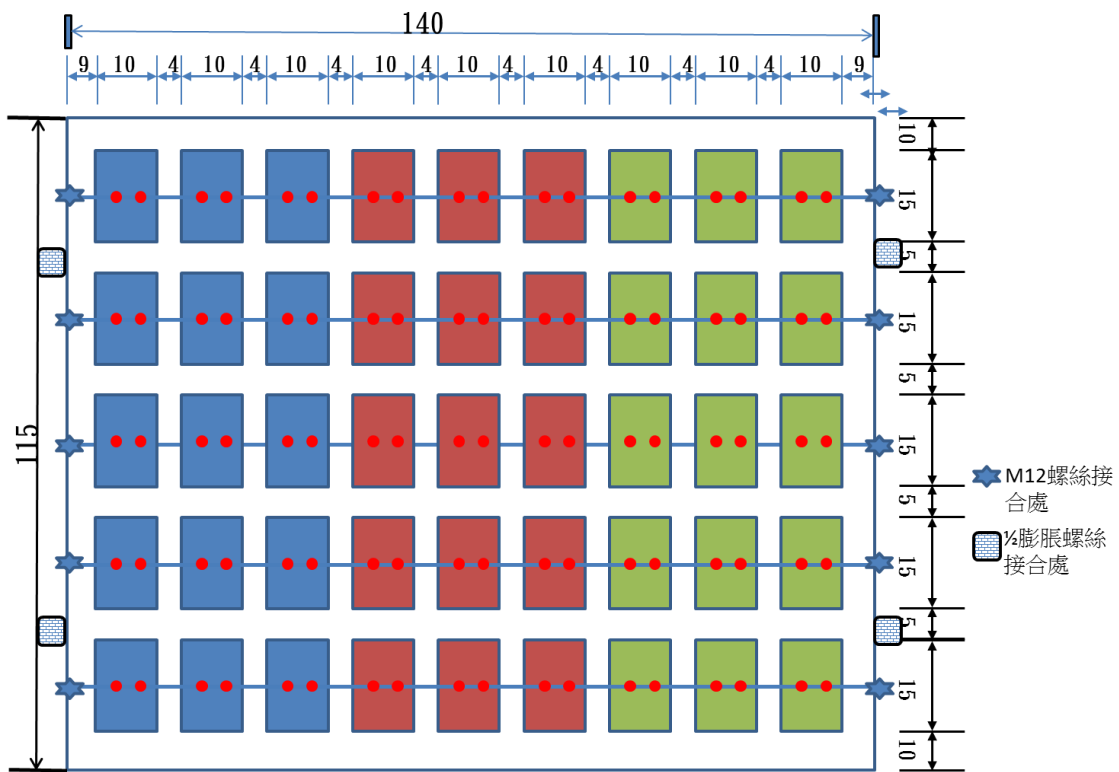


圖 3.13 水下金屬腐蝕試驗架示意圖

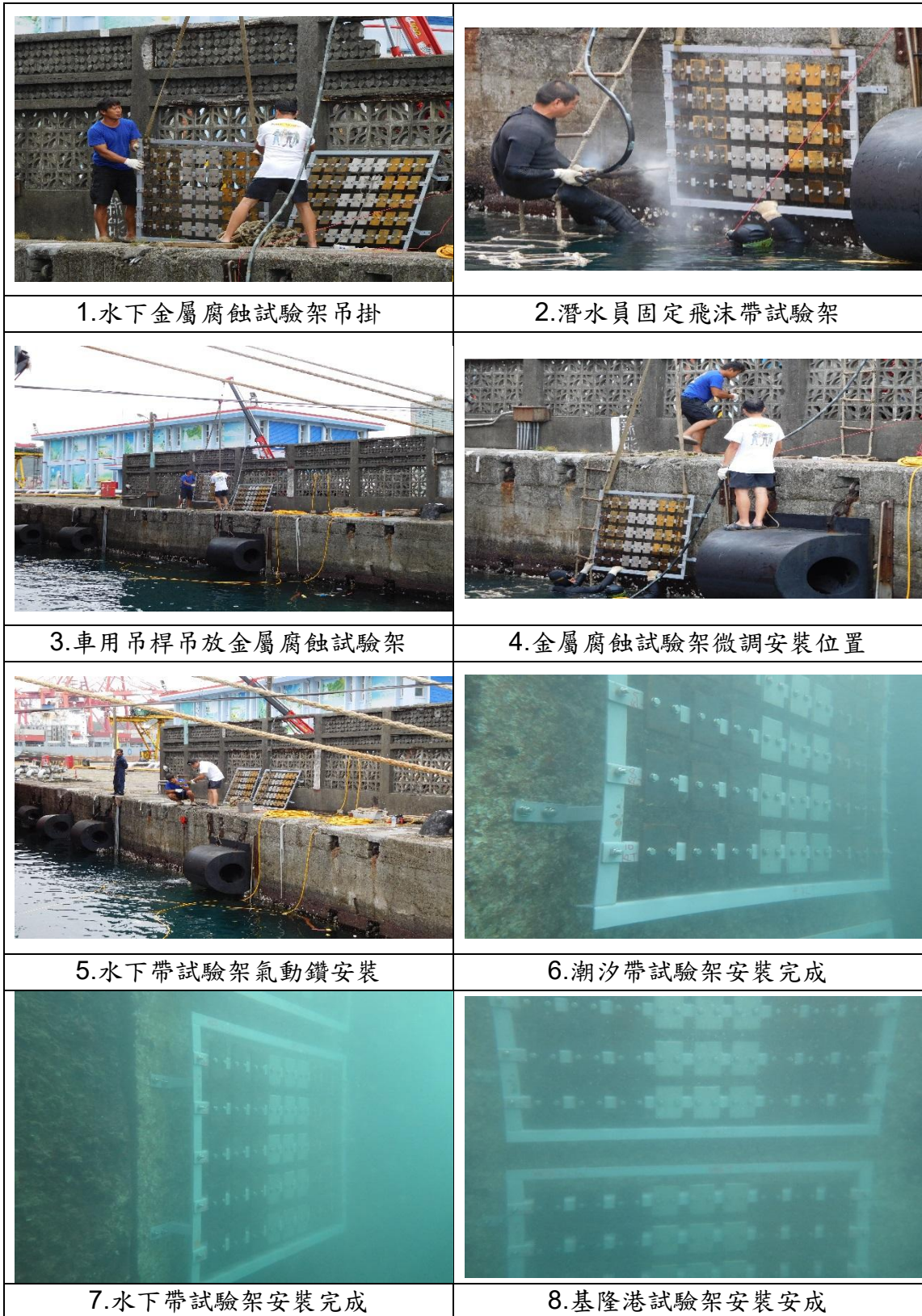


圖 3.14 基隆港水下金屬暴露試驗架安裝

### 3.3.3 試片腐蝕速率分析方法

#### 3.3.3.1 試片定期採樣之處理分析方法

依規劃時間至安裝現場請潛水人員將試片取出，將樣品收集分類及拍照後，帶回實驗室做進一步海生物清除與腐蝕清洗分析。

#### 3.3.3.2 試片腐蝕分析步驟

採樣後試片於實驗室進行腐蝕分析，作業流程如圖 3.15，先將附著海生物刮去處理後，依據 NACE Standard TM-01-69 方法，以濃鹽酸 + 40 g/l SnCl<sub>2</sub> 溶液，在室溫下浸泡試片，達到除銹效果，並稱重以量測其平均腐蝕速率（重量損失法）。將試驗點暴放後取回之試片進行腐蝕速率量測。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到一穩定值）。



圖 3.15 水下金屬腐蝕生成物清除作業流程圖

### 3.3.3.3 腐蝕速率計算

板狀試片的腐蝕速率( $R_{\text{corr}}$ )單位以  $\mu\text{m}/\text{yr}$  表示，計算公式如下：

$$R_{\text{corr}} = \Delta m / (A \cdot \rho \cdot t) \quad (3-4)$$

式中， $\Delta m$  = 質量損失(g)

$A$  = 試片暴露面積( $\text{m}^2$ )

$t$  = 暴露時間，年(year)

$\rho$  = 金屬材料之密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

## 第四章 大氣腐蝕因子與現地暴露試驗

### 4.1 氯鹽沉積速率調查結果

各試驗點採樣之氯鹽沉積速率計算結果如表 4-1。採樣的調查期間分別為 2024.10-2024.12(秋季)、2025.01-2025.03(冬季)、2025.04-2025.06(春季)、2025.07-2025.09(夏季)。

2024.10-2024.12 秋季期間，氯鹽沉積速率介於 0.3 mg/m<sup>2</sup>/day (谷關工務段)至 783.8 mg/m<sup>2</sup>/day(伽蘭安檢所)之間，其餘相對較高的沉積速率依序為十八王公橋、花蓮港試驗線 0m、橄仔樹安檢所、金樽安檢所、外埔安檢所，所測得的氯鹽沉積速率超過 100 mg/m<sup>2</sup>/day。在新中橫監工站、埔里工務段、谷關工務段、石卓監工站，所測得的氯鹽沉積速率皆低於 1.0 mg/m<sup>2</sup>/day。

2025.01-2025.03 冬季期間，氯鹽沉積速率介於 0.1 mg/m<sup>2</sup>/day (新中橫監工站、埔里工務段、石卓監工站)至 130.6 mg/m<sup>2</sup>/day (十八王公橋)之間，其餘相對較高的沉積速率為馬祖福澳港碼頭、新竹安檢所、台塑六輕試驗線 300m、外埔安檢所，所測得的氯鹽沉積速率超過 60 mg/m<sup>2</sup>/day。在新中橫監工站等 8 個山區試驗點、高鐵 3 站、太魯閣國家公園、興達火力電廠、成大水工所、永安安檢所，所測得的氯鹽沉積速率皆低於 1.0 mg/m<sup>2</sup>/day。

2025.04-2025.06 春季期間，氯鹽沉積速率介於 0.1 mg/m<sup>2</sup>/day (新中橫監工站、霧社監工站、陽明山國家公園)至 138.5 mg/m<sup>2</sup>/day (十八王公橋)之間，其餘相對較高的沉積速率依序為外埔安檢所、花蓮港試驗線 0m 及新竹安檢所，所測得的氯鹽沉積速率介於 20~40 mg/m<sup>2</sup>/day。在新中橫監工站等 8 個山區試驗點、高鐵 3 站、太魯閣國家公園、臺北市區，以及蘇澳港試驗線 300m、興達火力電廠、成大水工所等部分沿海試驗線、工業區，所測得的氯鹽沉積速率皆低於 1.0 mg/m<sup>2</sup>/day。

2025.07-2025.09 夏季期間，氯鹽沉積速率介於 0.1 mg/m<sup>2</sup>/day (石卓

監工站、成大水工所、霧社監工站、陽明山國家公園、新中橫監工站、復興工務段)至 281.8 mg/m<sup>2</sup>/day (花蓮港試驗線 0m)之間，其餘相對較高的沉積速率依序為十八王公橋、金樽安檢所、伽蘭安檢所、外埔安檢所、檳仔樹安檢所，所測得的氯鹽沉積速率介於 30~140 mg/m<sup>2</sup>/day。在新中橫監工站等 8 個山區試驗點、高鐵 3 站、太魯閣國家公園、臺北市區，以及蘇澳港試驗線 300m、成大水工所、台塑六輕試驗線 3km 等部分沿海試驗線、工業區，所測得的氯鹽沉積速率皆低於 1.0 mg/m<sup>2</sup>/day。

整體而言，4 季中以秋季的氯鹽沉積速率較高、變異較大，冬季次之，春、夏 2 季較低，且秋、冬 2 季的氯鹽沉積速率在北部至西部沿海地區較高，推測是秋、冬 2 季在北部至中部沿海地區受強烈東北季風影響，空氣中氯鹽顯著增加所致；另東部沿海地區則在秋、夏 2 季的氯鹽沉積速率較高。沿海地區多個試驗點測得 60 mg/m<sup>2</sup>/day 以上的數值，特別在伽蘭安檢所、十八王公橋、花蓮港試驗線 0m、檳仔樹安檢所、金樽安檢所、外埔安檢所等試驗點更測得 100 mg/m<sup>2</sup>/day 以上的數值；在距離海岸線較遠山區的氯鹽沉積速率最低，多在 3 mg/m<sup>2</sup>/day 以下，除秋季數值較高外，其餘 3 季在 0.3 mg/m<sup>2</sup>/day 以下，另在距離海岸線有一段距離的高鐵沿線 3 個車站，氯鹽沉積速率同樣不高，多在 5 mg/m<sup>2</sup>/day 以下，且同樣以秋季較高，其餘 3 季在 1 mg/m<sup>2</sup>/day 以下；外島地區的氯鹽沉積速率介於 1.6~83.2 mg/m<sup>2</sup>/day 之間，其中，金門水頭商港、馬祖福澳港以冬季氯鹽沉積速率較高，澎湖工務段以春季氯鹽沉積速率較高。

圖 4.1 為垂直海岸試驗線的平均氯鹽沉積速率圖。圖中顯示：花蓮港試驗線的氯鹽沉積速率在秋、夏 2 季(分別為 106.1、97.3 mg/m<sup>2</sup>/day)遠高於其他季節與其他垂直海岸試驗線。此外，各垂直海岸試驗線在秋季的氯鹽沉積速率明顯高於其他季節，其中基隆試驗線、臺中港試驗線及高雄港試驗線氯鹽沉積速率皆超過 40 mg/m<sup>2</sup>/day。

表 4-1 氣鹽沉積速率表

單位：mg/m<sup>2</sup>/day

項次	試驗地點	試驗期間	2024.10 - 2024.12	2025.01 - 2025.03	2025.04 - 2025.06	2025.07 - 2025.09
1	基隆試驗線 0m		74.5	22.5	11.4	5.2
2	基隆試驗線 100m		33.9	21.8	14.1	7.1
3	梗枋安檢所		-	7.3	4.2	10.3
4	龍德產業園區		5.5	2.7	1.3	2.9
5	蘇澳港試驗線 0m		17.3	3.6	1.4	3.2
6	蘇澳港試驗線 300m		-	3.2	0.8	0.6
7	南澳安檢所		-	4.3	1.6	11.3
8	太魯閣國家公園		10.7	0.3	0.2	0.3
9	花蓮港試驗線 0m		265.3	51.2	32.6	281.8
10	花蓮港試驗線 100m		12.7	10.3	3.5	4.4
11	花蓮港試驗線 500m		40.2	7.2	5.3	5.6
12	橄仔樹安檢所		202.4	37.6	13.3	25.6
13	石梯安檢所		-	7.3	2.9	3.6
14	成功試驗線 0m		-	29.9	10.7	3.4
15	金樽安檢所		165.7	8.4	10.2	84.2
16	伽蘭安檢所		783.8	8.2	7.5	46.7
17	尚武安檢所		14.8	5.4	3.2	5.5
18	核三廠試驗線 0m		-	11.5	9.5	12.9
19	核三廠試驗線 100m		9.4	6.8	2.5	3.7
20	核三廠試驗線 300m		7.5	2.4	1.6	3.2
21	中鋼公司		-	1.5	2.6	1.9
22	高雄港試驗線 0m		72.1	5.2	2.4	6.9
23	高雄港試驗線 300m		9.1	2.9	1.8	5.1
24	高鐵左營站		4.3	0.8	0.8	0.8
25	興達火力電廠		4.9	0.8	0.7	1.8
26	成大水工所		15.6	0.9	0.3	0.1
27	東石安檢所		-	9.1	5.6	2.7
28	高鐵嘉義站		2.8	0.8	0.6	0.5
29	台塑六輕試驗線 0m		16.3	18.1	5.1	5.1
30	台塑六輕試驗線 300m		74.6	68.8	13.5	13.7
31	台塑六輕試驗線 800m		51.3	33.9	11.4	10.0
32	台塑六輕試驗線 2km		19.6	3.9	2.2	2.7

項次	試驗地點	試驗期間			
		2024.10 - 2024.12	2025.01 - 2025.03	2025.04 - 2025.06	2025.07 - 2025.09
33	台塑六輕試驗線 3km	4.4	3.2	0.9	0.5
34	王功安檢所	20.2	25.1	1.2	9.5
35	彰濱產業園區	-	17.9	4.1	3.5
36	高鐵臺中站	1.1	0.8	0.6	0.6
37	臺中火力電廠	55.9	42.5	6.0	7.8
38	臺中港試驗線 0m	77.2	24.2	5.3	5.0
39	臺中港試驗線 300m	24.2	3.8	1.5	2.0
40	臺中港試驗線 2km	-	8.6	2.0	0.5
41	五甲安檢所	38.1	23.4	8.8	7.6
42	通霄火力電廠	7.4	1.1	1.8	1.9
43	外埔安檢所	138.3	63.4	35.4	32.4
44	平鎮產業園區	1.8	1.3	0.5	0.5
45	桃園試驗線 500m	20.8	12.8	6.9	5.7
46	桃園試驗線 2km	17.4	8.6	4.5	3.1
47	臺北市區	8.3	1.3	0.6	0.7
48	陽明山國家公園	3.2	0.7	0.1	0.1
49	公路局雲嘉南區養護工程分局 阿里山工務段	2.1	0.3	0.3	0.2
50	東北角風景區福隆遊客中心	22.7	5.9	2.3	2.2
51	臺北港監測站	-	3.7	1.3	1.0
52	永安安檢所	18.0	0.2	2.6	6.4
53	新竹安檢所	-	71.8	25.9	21.9
54	金門水頭商港	6.5	33.3	1.7	1.6
55	高雄港 39 號碼頭	-	1.4	0.8	3.0
56	高雄港 75 號碼頭	13.7	1.1	1.0	2.6
57	公路局南區養護工程分局 澎湖工務段	6.7	6.2	14.3	3.6
58	馬祖福澳港碼頭	8.5	83.2	2.0	3.7
59	公路局中區養護工程分局 新中橫監工站	0.4	0.1	0.1	0.1
60	公路局中區養護工程分局 埔里工務段	0.8	0.1	0.2	0.2
61	公路局中區養護工程分局 霧社監工站	2.3	0.2	0.1	0.1

項次	試驗地點	試驗期間			
		2024.10 - 2024.12	2025.01 - 2025.03	2025.04 - 2025.06	2025.07 - 2025.09
62	公路局中區養護工程分局谷關工務段	0.3	0.3	0.2	0.2
63	公路局北區養護工程分局復興工務段	2.6	0.3	0.3	0.1
64	公路局雲嘉南區養護工程分局石卓監工站	0.5	0.1	0.2	0.1
65	十八王公橋	393.2	130.6	138.5	131.6

註：- 表示試體遺失或試驗地點施工暫停試驗。其中 2024.10-2024.12 因颱風侵臺，致採集棒被強風吹落遺失數量增加。

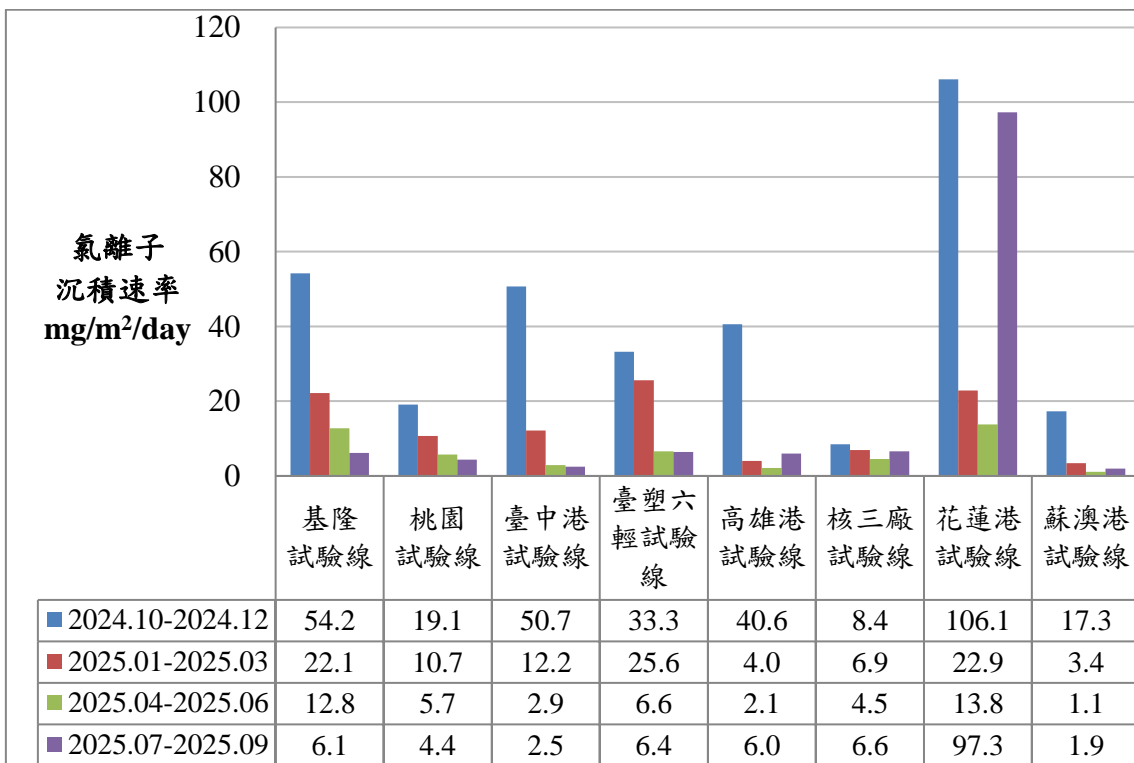


圖 4.1 垂直海岸試驗線之氯鹽平均沉積速率

## 4.2 二氧化硫沉積速率調查結果

表 4-2 為各試驗點二氧化硫沉積速率計算結果。採樣的調查時間與氣鹽沉積速率調查的時間相同，分別為 2024.10-2024.12(秋季)、2025.01-2025.03(冬季)、2025.04-2025.06(春季)、2025.07-2025.09(夏季)。

2024.10-2024.12 秋季期間，二氧化硫沉積速率介於十八王公橋 1585.5 mg/m<sup>2</sup>/day 至臺中港試驗線 300m 2.0 mg/m<sup>2</sup>/day 之間。其餘相對較高的二氧化硫沉積速率為陽明山硫磺區、臺中火力電廠(以上值超過 200 mg/m<sup>2</sup>/day，高於 CNS 13401 的最高分類標準 P<sub>3</sub>(等級 80 < P<sub>3</sub> ≤ 200 mg/m<sup>2</sup>/day))、陽明山國家公園管理處、大發產業園區、官田產業園區(以上值超過 80 mg/m<sup>2</sup>/day，屬於 P<sub>3</sub> 等級)。

2025.01-2025.03 冬季期間，陽明山硫磺區的二氧化硫沉積速率最大 957.5 mg/m<sup>2</sup>/day，其餘介於新中橫監工站 3.2 mg/m<sup>2</sup>/day 至十八王公橋 697.4 mg/m<sup>2</sup>/day 之間。其餘相對較高的二氧化硫沉積速率依序為彰濱產業園區、陽明山國家公園管理處(以上值超過 200 mg/m<sup>2</sup>/day，高於 P<sub>3</sub> 等級)、官田產業園區、觀音產業園區、永安安檢所、大潭電廠、大發產業園區、澎湖工務段(以上值超過 80 mg/m<sup>2</sup>/day，屬於 P<sub>3</sub> 等級)。

2025.04-2025.06 春季期間，陽明山硫磺區的二氧化硫沉積速率最大 2568.9 mg/m<sup>2</sup>/day，其餘介於新中橫監工站 4.6 mg/m<sup>2</sup>/day 至十八王公橋 607.2 mg/m<sup>2</sup>/day 之間。較高的沉積速率依序為陽明山國家公園、官田產業園區、龍德產業園區、中鋼公司，其值皆超過 80 mg/m<sup>2</sup>/day，屬於分類標準 P<sub>3</sub> 等級。

2025.07-2025.09 夏季期間，陽明山硫磺區的二氧化硫沉積速率最大 1441.8 mg/m<sup>2</sup>/day，其餘介於谷關工務段 4.9 mg/m<sup>2</sup>/day 至十八王公橋 324.1 mg/m<sup>2</sup>/day 之間。較高的沉積速率發生在大發產業園區、龍德產業園區、中鋼公司、官田產業園區及陽明山國家公園，其值皆超過 80 mg/m<sup>2</sup>/day，屬於分類標準 P<sub>3</sub> 等級。

整體而言，除了陽明山硫磺區、靠近硫磺區的陽明山國家公園外，

較高的二氧化硫沉積速率發生在北部濱海的十八王公橋與特定幾個產業園區，包括中部的臺中火力電廠、彰濱產業園區，南部的官田產業園區、大發產業園區、臨海產業園區(中鋼公司)，以及宜蘭的龍德產業園區。

表 4-3 及圖 4.2 為二氧化硫沉積速率在特定試驗點沉積速率。在特定產業園區部分，以彰濱產業園區冬季的二氧化硫沉積速率最高，達  $384.1 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ ，超過最高分類標準  $P_3$  等級，另南部的大發產業園區、臨海產業園區(中鋼公司)、東部龍德產業園區在夏季時有較高的二氧化硫沉積速率，分別為  $267.3 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 、 $153.5 \text{ mg/m}^2/\text{day}$  及  $183.6 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ ，達到或超過  $P_3$  等級，官田產業園區 4 季數值均超過  $80 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ ，屬  $P_3$  等級。

在火力電廠方面，4 個電廠中以臺中電廠冬季的二氧化硫沉積速率最高，達  $255.8 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ ，超過  $P_3$  等級，另 3 季的數值則介於  $24.6\sim 63.0 \text{ mg/m}^2/\text{day}$  之間，屬  $P_2$  等級；其次是大潭電廠，4 季數值介於  $36.0\sim 87.2 \text{ mg/m}^2/\text{day}$  之間，屬  $P_2$ 、 $P_3$  等級；興達電廠、通霄電廠的 4 季數值較低，介於  $20.6\sim 44.7 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ ，屬  $P_1$ 、 $P_2$  等級。

高鐵 3 個車站的二氧化硫沉積速率介於  $16.1\sim 40.5 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ ，屬  $P_1$  或  $P_2$  等級；臺北市的二氧化硫沉積速率介於  $5.1\sim 19.9 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ ，屬  $P_1$  等級。

表 4-2 二氧化硫沉積速率表

單位：mg/m<sup>2</sup>/day

項次	試驗地點	試驗期間			
		2024.10 - 2024.12	2025.01 - 2025.03	2025.04 - 2025.06	2025.07 - 2025.09
1	龍德產業園區	41.8	48.1	124.0	183.6
2	和平產業園區	10.0	12.5	12.0	7.5
3	太魯閣國家公園管理處	6.3	11.0	8.0	7.6
4	美崙產業園區	12.1	14.1	10.5	11.4
5	豐樂產業園區	14.8	17.2	18.0	16.0
6	屏東產業園區	18.7	23.2	8.0	23.8
7	中油林園廠	47.7	36.3	35.2	26.9
8	中鋼公司	39.3	39.7	120.4	153.5
9	鳳山產業園區	26.2	36.6	28.1	13.3
10	大發產業園區	91.4	85.8	47.3	267.3
11	高鐵左營站	16.1	38.8	33.4	23.9
12	永安產業園區	-	47.8	48.9	22.1
13	興達火力電廠	28.5	44.7	41.7	18.1
14	安平產業園區	29.2	41.0	73.0	26.7
15	成大水工試驗所	25.3	33.7	40.0	-
16	官田產業園區	83.8	191.3	152.5	91.0
17	朴子產業園區	43.7	40.9	55.6	23.8
18	高鐵嘉義站	24.9	37.4	25.7	20.6
19	斗六產業園區	27.4	37.8	43.0	30.8
20	彰濱產業園區	-	384.1	74.7	43.7
21	田中產業園區	17.6	22.2	40.4	29.9
22	南崗產業園區	13.4	23.5	21.7	16.4
23	大里產業園區	15.6	23.0	15.6	9.1
24	高鐵臺中站	16.8	25.7	24.4	40.5
25	臺中產業園區	15.2	28.2	36.1	23.0
26	臺中港關連產業園區	52.5	40.7	48.1	38.2
27	臺中火力電廠	255.8	24.6	63.0	49.0
28	臺中港試驗線 300m	2.0	24.2	43.4	28.6
29	通霄火力電廠	22.1	36.6	30.4	20.6
30	竹南產業園區	19.2	10.1	37.8	18.0
31	頭份產業園區	15.2	16.3	21.3	16.6

項次	試驗地點	試驗期間			
		2024.10 - 2024.12	2025.01 - 2025.03	2025.04 - 2025.06	2025.07 - 2025.09
32	工業技術研究院	16.9	22.7	27.2	24.6
33	新竹產業園區	17.0	22.2	24.2	14.0
34	平鎮產業園區	15.6	19.1	19.0	13.9
35	桃園試驗線 500m(大潭電廠)	58.6	87.2	61.4	36.0
36	桃園試驗線 2km	30.8	28.6	64.3	44.8
37	樹林產業園區	18.2	16.7	17.8	15.7
38	臺北市自來水事業處	5.1	12.5	19.9	12.2
39	陽明山國家公園管理處	112.5	228.6	198.8	86.7
40	陽明山硫磺區	1336.5	957.5	2568.9	1441.8
41	公路局雲嘉南區養護工程分局阿里山工務段	8.7	11.2	10.1	7.8
42	平鎮產業園區(服務中心)	22.4	22.9	27.8	20.2
43	觀音產業園區(服務中心)	78.2	93.1	58.1	33.9
44	東北角風景區福隆遊客中心	23.9	15.0	16.9	28.6
45	永安安檢所	66.1	89.0	55.8	38.0
46	金門水頭商港	31.8	33.7	33.5	25.3
47	公路局南區養護工程分局澎湖工務段	-	80.4	56.4	9.9
48	馬祖福澳港碼頭	11.4	21.0	28.3	17.8
49	公路局中區養護工程分局新中橫監工站	3.8	3.2	4.6	9.0
50	公路局中區養護工程分局埔里工務段	23.1	21.1	49.1	32.0
51	公路局中區養護工程分局霧社監工站	5.8	3.3	7.7	5.2
52	公路局中區養護工程分局谷關工務段	4.1	3.7	6.5	4.9
53	公路局北區養護工程分局復興工務段	10.6	4.6	8.2	5.8
54	公路局雲嘉南區養護工程分局石卓監工站	4.2	4.3	6.7	5.0
55	十八王公橋	1585.5	697.4	607.2	324.1

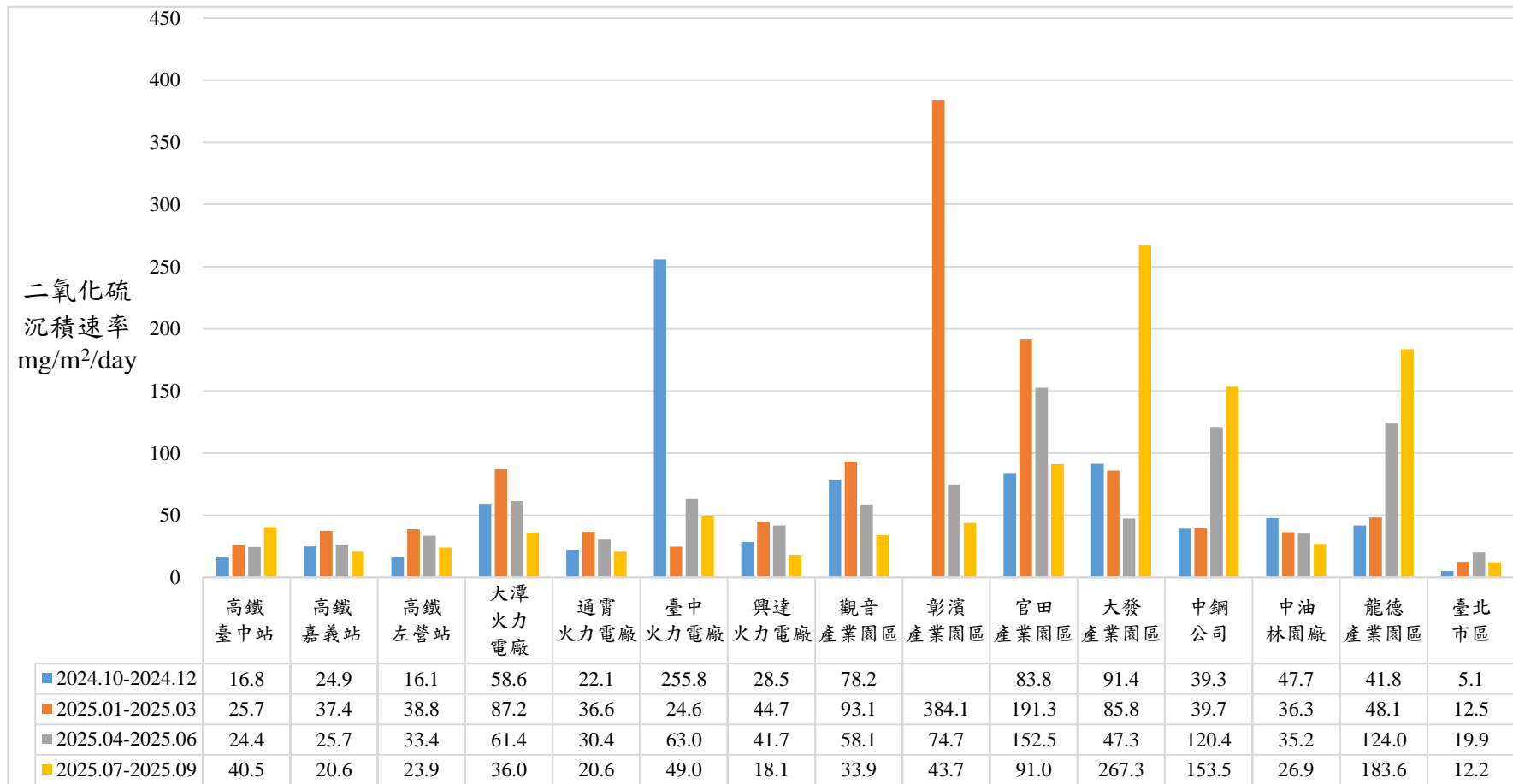
註：- 表示試體遺失或試驗地點施工暫停試驗。

表 4-3 特定試驗點之二氧化硫沉積速率表

單位：mg/m<sup>2</sup>/day

試驗地點 \ 試驗期間	2024.10 - 2024.12	2025.01 - 2025.03	2025.04 - 2025.06	2025.07 - 2025.09
高鐵臺中站	16.8	25.7	24.4	40.5
高鐵嘉義站	24.9	37.4	25.7	20.6
高鐵左營站	16.1	38.8	33.4	23.9
大潭火力電廠	58.6	87.2	61.4	36.0
通霄火力電廠	22.1	36.6	30.4	20.6
臺中火力電廠	255.8	24.6	63.0	49.0
興達火力電廠	28.5	44.7	41.7	18.1
觀音產業園區	78.2	93.1	58.1	33.9
彰濱產業園區	-	384.1	74.7	43.7
官田產業園區	83.8	191.3	152.5	91.0
大發產業園區	91.4	85.8	47.3	267.3
中鋼公司	39.3	39.7	120.4	153.5
中油林園廠	47.7	36.3	35.2	26.9
龍德產業園區	41.8	48.1	124.0	183.6
臺北市區	5.1	12.5	19.9	12.2

註：- 表示試體遺失或試驗地點施工暫停試驗。



註：表格空白表示試片遺失或試驗地點施工暫停試驗。

圖 4.2 特定試驗點之二氧化硫沉積速率

### 4.3 現地暴露試驗結果

碳鋼、鋅、銅、鋁 4 種金屬 4 季在各試驗點採樣之腐蝕速率計算結果，分別彙整於表 4-4 至表 4-7，以下分別說明各季各金屬試驗結果。(試驗之腐蝕生成物清除檢量線、腐蝕速率等位線分布圖、腐蝕環境分類圖詳見附錄一)

秋季調查期間 2024.10-2024.12，碳鋼金屬大氣腐蝕速率介於 36.0  $\mu\text{m}/\text{yr}$  (阿里山工務段)至 855.4  $\mu\text{m}/\text{yr}$  (陽明山硫磺區)之間；其他依序以 779.2  $\mu\text{m}/\text{yr}$  (十八王公橋)、711.1  $\mu\text{m}/\text{yr}$  (王功安檢所)試片腐蝕速率較大。鋅金屬介於 4.8  $\mu\text{m}/\text{yr}$  (陽明山國家公園)至 62.1  $\mu\text{m}/\text{yr}$  (陽明山硫磺區)之間；其他依序以 56.7  $\mu\text{m}/\text{yr}$  (外埔安檢所)、40.6  $\mu\text{m}/\text{yr}$  (臺中港試驗線 2km)及 36.2  $\mu\text{m}/\text{yr}$  (臺中港試驗線 0m)試片腐蝕速率較大。銅金屬介於 0.6  $\mu\text{m}/\text{yr}$  (新中橫監工站)至 79.5  $\mu\text{m}/\text{yr}$  (陽明山硫磺區)之間；其他依序以 46.1  $\mu\text{m}/\text{yr}$  (王功安檢所)、33.5  $\mu\text{m}/\text{yr}$  (台塑六輕試驗線 800m)、30.9  $\mu\text{m}/\text{yr}$  (台塑六輕試驗線 300m)試片腐蝕速率較大。而鋁金屬則介於 0.1  $\text{g}/\text{m}^2/\text{yr}$  (新中橫監工站、和平產業園區、復興工務段、石卓監工站) 至 44.0  $\text{g}/\text{m}^2/\text{yr}$  (五甲安檢所)之間，其他依序以 38.6  $\text{g}/\text{m}^2/\text{yr}$  (新竹安檢所)、38.0  $\text{g}/\text{m}^2/\text{yr}$  (台塑六輕試驗線 2km)、37.7  $\text{g}/\text{m}^2/\text{yr}$  (王功安檢所)及 36.4  $\text{g}/\text{m}^2/\text{yr}$  (臺中港試驗線 0m)。

冬季調查期間 2025.01-2025.03，碳鋼金屬大氣腐蝕速率介於 14.8  $\mu\text{m}/\text{yr}$  (谷關工務段)至 438.0  $\mu\text{m}/\text{yr}$  (王功安檢所)之間；其他依序以 373.7  $\mu\text{m}/\text{yr}$  (十八王公橋)、368.5  $\mu\text{m}/\text{yr}$  (陽明山硫磺區)及 337.2  $\mu\text{m}/\text{yr}$  (台塑六輕試驗線 300m)、330.7  $\mu\text{m}/\text{yr}$  (彰濱產業園區)試片腐蝕速率較大。鋅金屬介於 4.3  $\mu\text{m}/\text{yr}$  (埔里工務段)至 42.6  $\mu\text{m}/\text{yr}$  (台塑六輕試驗線 800m)；其他依序以 42.1  $\mu\text{m}/\text{yr}$  (王功安檢所)、36.5  $\mu\text{m}/\text{yr}$  (新竹安檢所)、34.7  $\mu\text{m}/\text{yr}$  (彰濱產業園區)試片腐蝕速率較大；銅金屬介於 0.8  $\mu\text{m}/\text{yr}$  (新中橫監工站)至 75.5  $\mu\text{m}/\text{yr}$  (陽明山硫磺區)之間；其他依序以 29.0  $\mu\text{m}/\text{yr}$  (王功安檢所)、21.9  $\mu\text{m}/\text{yr}$  (伽蘭安檢所)及 21.5  $\mu\text{m}/\text{yr}$  (台塑六輕試驗線 800m) 試片腐蝕速率較大；而鋁金屬則介於 2.0  $\text{g}/\text{m}^2/\text{yr}$  (石卓監工站)至 68.1

g/m<sup>2</sup>/yr(澎湖工務段)之間，其他依序以 34.1 g/m<sup>2</sup>/yr (台塑六輕試驗線 2km)、33.8 g/m<sup>2</sup>/yr (王功安檢所)、27.3 g/m<sup>2</sup>/yr (台塑六輕試驗線 300m) 及 27.0 g/m<sup>2</sup>/yr (花蓮港試驗線 0m)試片腐蝕速率較大。

春季調查期間 2025.04-2025.06，碳鋼金屬大氣腐蝕速率介於 25.8 μm/yr (新中橫監工站)至 758.1 μm/yr (陽明山硫磺區)之間；其他依序以 453.4 μm/yr (澎湖工務段)、271.4 μm/yr (十八王公橋)及 265.9 μm/yr (王功安檢所)試片腐蝕速率較大。鋅金屬介於 5.0 μm/yr (埔里工務段)至 45.6 μm/yr (陽明山硫磺區)；其他依序以 33.1 μm/yr (澎湖工務段)、31.2 μm/yr (外埔安檢所)及 30.4 μm/yr (桃園試驗線 500m)試片腐蝕速率較大；銅金屬介於 0.6 μm/yr (新中橫監工站)至 28.2 μm/yr (澎湖工務段)之間；其他依序以 25.0 μm/yr (伽蘭安檢所)、17.9 μm/yr (王功安檢所)及 16.0 μm/yr (陽明山國家公園管理處)試片腐蝕速率較大；而鋁金屬則介於 0.7 g/m<sup>2</sup>/yr (霧社監工站)至 20.2 g/m<sup>2</sup>/yr (陽明山硫磺區)之間，其他依序以 13.5 g/m<sup>2</sup>/yr (王功安檢所)、10.4 g/m<sup>2</sup>/yr (東石安檢所)及 10.2 g/m<sup>2</sup>/yr (十八王公橋)試片腐蝕速率較大。

夏季調查期間 2025.07-2025.09，碳鋼金屬大氣腐蝕速率介於 29.0 μm/yr (新中橫監工站)至 626.6 μm/yr (陽明山硫磺區)之間；其他依序以 371.3 μm/yr (十八王公橋)及 241.8 μm/yr (南澳安檢所)、223.0 μm/yr (伽蘭安檢所)試片腐蝕速率較大。鋅金屬介於 4.9 μm/yr (平鎮產業園區)至 64.4 μm/yr (陽明山硫磺區)；其他依序以 29.8 μm/yr (十八王公橋)、29.4 μm/yr (五甲安檢所)及 24.9 μm/yr (新竹安檢所)試片腐蝕速率較大；銅金屬介於 0.7 μm/yr (新中橫監工站)至 47.8 μm/yr (陽明山硫磺區)之間；其他依序以 24.7 μm/yr (伽蘭安檢所)、23.9 μm/yr (十八王公橋)及 18.6 μm/yr (馬祖福澳港碼頭)試片腐蝕速率較大；而鋁金屬則介於 1.0g/m<sup>2</sup>/yr (新中橫監工站)至 8.9 g/m<sup>2</sup>/yr (馬祖福澳港碼頭)之間，其他依序以 8.4 g/m<sup>2</sup>/yr (十八王公橋)、7.7 g/m<sup>2</sup>/yr (桃園試驗線 500m)、7.2 g/m<sup>2</sup>/yr (金門水頭商港)及 7.1 g/m<sup>2</sup>/yr (陽明山硫磺區)試片腐蝕速率較大。

表 4-4 碳鋼金屬之腐蝕速率表

單位：μm/yr

項次	試驗地點	試驗期間			
		2024.10 - 2024.12	2025.01 - 2025.03	2025.04 - 2025.06	2025.07 - 2025.09
1	基隆試驗線 0m	396.4	162.3	173.4	57.5
2	基隆試驗線 100m	366.0	297.3	208.6	92.8
3	梗枋安檢所	302.6	171.4	150.0	204.2
4	龍德產業園區	195.1	142.4	99.0	169.5
5	蘇澳港試驗線 0m	149.7	157.7	126.2	143.3
6	蘇澳港試驗線 300m	150.5	138.1	153.9	118.8
7	南澳安檢所	183.5	116.0	116.0	241.8
8	和平產業園區	82.6	67.5	122.5	102.7
9	太魯閣國家公園管理處	74.8	59.4	149.8	101.0
10	美崙產業園區	174.1	142.1	128.1	126.8
11	花蓮港試驗線 0m	323.0	307.6	137.2	193.6
12	花蓮港試驗線 100m	222.1	178.9	110.8	113.0
13	花蓮港試驗線 500m	203.0	179.4	97.6	92.5
14	橄仔樹安檢所	314.3	293.1	185.6	222.9
15	石梯安檢所	269.5	218.5	106.3	104.5
16	成功安檢所	274.1	183.1	146.0	147.4
17	金樽安檢所	260.2	174.1	132.2	162.2
18	伽藍安檢所	334.7	176.9	130.6	223.0
19	豐樂產業園區	124.2	62.8	63.9	167.5
20	尚武安檢所	298.7	180.2	131.1	219.4
21	核三廠試驗線 0m	247.5	134.9	162.6	137.7
22	核三廠試驗線 100m	221.9	108.4	107.0	167.0
23	核三廠試驗線 300m	235.0	129.6	155.3	149.7
24	屏東產業園區	73.0	55.0	77.0	84.8
25	中油林園廠	164.9	69.0	86.6	156.5
26	中鋼公司	115.1	93.4	102.1	159.7
27	鳳山產業園區	81.8	58.9	59.6	78.6
28	大發產業園區	116.2	73.0	89.1	175.9
29	高雄港試驗線 0m	163.8	62.1	79.1	121.6
30	高雄港試驗線 300m	140.7	74.6	81.9	111.9
31	高鐵左營站	72.8	55.9	51.1	157.6
32	永安產業園區	105.1	73.3	75.6	103.6
33	興達火力電廠	125.7	119.3	111.7	131.7

項次	試驗地點	試驗期間			
		2024.10 - 2024.12	2025.01 - 2025.03	2025.04 - 2025.06	2025.07 - 2025.09
34	安平產業園區	99.8	141.9	112.7	109.4
35	成大水工試驗所	104.5	122.7	119.1	-
36	官田產業園區	91.8	122.4	173.8	104.7
37	東石安檢所	470.6	229.8	147.3	144.9
38	朴子產業園區	163.0	149.8	82.0	101.6
39	高鐵嘉義站	88.5	119.1	45.8	59.2
40	斗六產業園區	40.3	49.4	41.7	39.3
41	台塑六輕試驗線 0m	546.2	261.8	142.8	140.2
42	台塑六輕試驗線 300m	615.4	337.2	151.7	181.7
43	台塑六輕試驗線 800m	576.9	326.3	142.8	134.2
44	台塑六輕試驗線 2km	465.4	221.5	159.4	137.1
45	台塑六輕試驗線 3km	418.7	212.9	115.6	140.4
46	王功安檢所	711.1	438.0	265.9	170.6
47	彰濱產業園區	-	330.7	126.3	152.8
48	田中產業園區	79.4	68.1	41.9	58.7
49	南崗產業園區	77.0	71.9	43.0	90.1
50	大里產業園區	57.9	73.0	35.2	74.9
51	高鐵臺中站	57.9	65.3	39.9	62.8
52	臺中產業園區	125.2	139.8	54.0	92.8
53	臺中港關連產業園區	208.1	255.8	64.4	95.1
54	臺中火力電廠	405.6	214.0	138.7	68.4
55	臺中港試驗線 0m	247.0	173.2	67.7	61.3
56	臺中港試驗線 300m	269.8	205.5	67.0	80.7
57	臺中港試驗線 2km	358.3	243.6	59.3	64.4
58	五甲安檢所	531.2	254.7	125.7	76.3
59	通霄火力電廠	175.1	115.9	-	54.9
60	外埔安檢所	628.0	282.6	138.6	131.9
61	竹南產業園區	107.8	125.6	116.2	54.2
62	頭份產業園區	120.0	109.5	52.5	60.3
63	工業技術研究院	107.1	119.0	96.4	52.2
64	新竹產業園區	102.0	105.9	106.0	53.7
65	平鎮產業園區	148.0	102.4	64.5	68.7
66	桃園試驗線 500m	275.9	180.8	183.6	151.6
67	桃園試驗線 2km	212.7	128.4	157.2	85.4
68	樹林產業園區	96.1	90.0	116.4	62.4
69	臺北市自來水事業處	120.9	96.0	66.7	40.4

項次	試驗地點	試驗期間			
		2024.10 - 2024.12	2025.01 - 2025.03	2025.04 - 2025.06	2025.07 - 2025.09
70	陽明山國家公園管理處	87.1	68.4	69.2	56.7
71	陽明山硫磺區	855.4	368.5	758.1	626.6
72	公路局雲嘉南區養護工程分局阿里山工務段	36.0	61.4	39.6	54.1
73	東北角風景區福隆遊客中心	256.8	213.5	142.8	143.7
74	臺北港監測站	158.0	170.3	189.4	46.6
75	平鎮產業園區(服務中心)	178.8	173.2	146.7	97.6
76	觀音產業園區(服務中心)	329.3	178.3	123.2	82.9
77	永安安檢所	265.1	169.1	154.1	-
78	新竹安檢所	527.7	252.2	158.3	184.1
79	金門水頭商港	82.5	78.6	108.0	169.6
80	高雄港 39 號碼頭	106.9	81.8	75.4	88.7
81	高雄港 75 號碼頭	99.0	62.3	70.3	97.7
82	公路局南區養護工程分局澎湖工務段	314.0	302.7	453.4	152.7
83	馬祖福澳港碼頭	169.5	99.4	102.0	222.6
84	公路局中區養護工程分局新中橫監工站	44.6	15.0	25.8	29.0
85	公路局中區養護工程分局埔里工務段	68.7	40.3	57.4	59.7
86	公路局中區養護工程分局霧社監工站	47.2	33.0	32.5	31.3
87	公路局中區養護工程分局谷關工務段	52.9	14.8	34.4	33.1
88	公路局北區養護工程分局復興工務段	72.0	54.9	61.9	31.7
89	公路局雲嘉南區養護工程分局石卓監工站	46.9	19.9	41.6	33.4
90	十八王公橋	779.2	373.7	271.4	371.3

註：- 表示試體遺失。

表 4-5 鋅金屬之腐蝕速率表

單位：μm/yr

項次	試驗地點	試驗期間			
		2024.10 - 2024.12	2025.01 - 2025.03	2025.04 - 2025.06	2025.07 - 2025.09
1	基隆試驗線 0m	10.0	21.1	9.6	5.8
2	基隆試驗線 100m	15.9	18.1	20.1	9.3
3	梗枋安檢所	14.6	12.6	18.1	21.6
4	龍德產業園區	14.3	20.9	10.1	16.7
5	蘇澳港試驗線 0m	8.8	16.6	7.3	13.4
6	蘇澳港試驗線 300m	8.2	15.3	9.6	15.0
7	南澳安檢所	12.4	13.1	8.0	16.1
8	和平產業園區	9.3	12.1	9.1	10.2
9	太魯閣國家公園管理處	8.5	14.5	9.8	12.7
10	美崙產業園區	16.2	16.3	11.6	14.2
11	花蓮港試驗線 0m	14.4	23.7	15.5	13.5
12	花蓮港試驗線 100m	10.5	15.0	7.1	8.2
13	花蓮港試驗線 500m	11.1	11.7	7.0	20.1
14	橄仔樹安檢所	12.7	26.7	18.3	13.0
15	石梯安檢所	9.7	13.6	12.4	9.9
16	成功安檢所	19.8	17.9	11.9	11.7
17	金樽安檢所	14.2	14.7	13.6	14.9
18	伽藍安檢所	21.0	22.5	14.8	12.9
19	豐樂產業園區	12.3	9.4	7.7	15.7
20	尚武安檢所	29.3	22.9	9.8	18.3
21	核三廠試驗線 0m	17.9	20.1	11.6	11.7
22	核三廠試驗線 100m	9.9	17.0	12.6	10.2
23	核三廠試驗線 300m	22.8	17.1	18.7	12.8
24	屏東產業園區	11.8	5.2	6.9	11.2
25	中油林園廠	11.4	11.1	6.1	16.0
26	中鋼公司	6.7	9.2	8.8	17.9
27	鳳山產業園區	8.6	9.0	6.8	10.2
28	大發產業園區	8.9	10.6	9.9	17.9
29	高雄港試驗線 0m	11.2	8.0	7.0	12.9
30	高雄港試驗線 300m	12.5	11.1	9.9	13.6
31	高鐵左營站	8.9	5.6	7.0	8.3
32	永安產業園區	8.4	15.1	6.2	10.8
33	興達火力電廠	6.0	10.8	8.9	9.0

項次	試驗地點	試驗期間			
		2024.10 - 2024.12	2025.01 - 2025.03	2025.04 - 2025.06	2025.07 - 2025.09
34	安平產業園區	7.0	9.1	8.5	9.0
35	成大水工試驗所	5.9	14.3	15.5	-
36	官田產業園區	5.4	13.6	12.8	8.6
37	東石安檢所	29.9	23.9	23.1	8.9
38	朴子產業園區	9.2	21.7	6.9	12.7
39	高鐵嘉義站	11.0	12.4	5.4	11.3
40	斗六產業園區	10.0	19.3	9.8	16.3
41	台塑六輕試驗線 0m	30.9	18.0	11.9	13.9
42	台塑六輕試驗線 300m	25.8	17.9	11.4	9.9
43	台塑六輕試驗線 800m	35.0	42.6	12.0	8.4
44	台塑六輕試驗線 2km	12.7	15.1	6.6	8.1
45	台塑六輕試驗線 3km	20.3	21.0	7.3	9.8
46	王功安檢所	21.0	42.1	28.5	9.5
47	彰濱產業園區	-	34.7	16.8	9.7
48	田中產業園區	8.6	19.3	12.5	9.1
49	南崗產業園區	9.3	10.6	6.0	8.8
50	大里產業園區	11.7	12.7	8.1	14.3
51	高鐵臺中站	14.3	9.4	7.1	6.0
52	臺中產業園區	11.5	18.1	7.0	8.2
53	臺中港關連產業園區	18.5	17.3	7.5	8.5
54	臺中火力電廠	31.2	18.3	10.3	11.5
55	臺中港試驗線 0m	36.2	26.2	15.3	15.8
56	臺中港試驗線 300m	33.0	19.6	10.5	7.2
57	臺中港試驗線 2km	40.6	18.6	12.9	7.1
58	五甲安檢所	24.2	28.2	11.8	29.4
59	通霄火力電廠	14.9	19.5	-	8.6
60	外埔安檢所	56.7	26.4	31.2	10.0
61	竹南產業園區	13.4	7.8	16.3	9.5
62	頭份產業園區	11.3	11.4	13.8	6.5
63	工業技術研究院	10.9	10.5	14.7	12.9
64	新竹產業園區	8.5	9.2	12.7	8.8
65	平鎮產業園區	8.7	9.7	13.3	5.2
66	桃園試驗線 500m	16.0	15.9	30.4	13.1
67	桃園試驗線 2km	9.9	18.3	22.5	22.4
68	樹林產業園區	10.2	8.3	14.7	7.6
69	臺北市自來水事業處	7.5	21.1	24.9	7.4

項次	試驗地點	試驗期間			
		2024.10 - 2024.12	2025.01 - 2025.03	2025.04 - 2025.06	2025.07 - 2025.09
70	陽明山國家公園管理處	4.8	10.9	21.6	6.2
71	陽明山硫磺區	62.1	17.6	45.6	64.4
72	公路局雲嘉南區養護工程分局阿里山工務段	6.3	11.1	9.6	6.2
73	東北角風景區福隆遊客中心	13.8	12.8	8.0	19.1
74	臺北港監測站	16.1	10.7	16.2	10.5
75	平鎮產業園區(服務中心)	8.4	18.4	13.3	4.9
76	觀音產業園區(服務中心)	17.3	16.9	18.7	9.6
77	永安安檢所	20.0	13.2	22.8	-
78	新竹安檢所	31.7	36.5	17.3	24.9
79	金門水頭商港	8.7	9.3	8.7	8.0
80	高雄港 39 號碼頭	6.3	12.9	6.2	12.1
81	高雄港 75 號碼頭	10.4	7.7	5.4	12.1
82	公路局南區養護工程分局澎湖工務段	13.2	30.0	33.1	7.4
83	馬祖福澳港碼頭	8.5	11.9	6.5	12.5
84	公路局中區養護工程分局新中橫監工站	7.6	8.4	8.8	7.3
85	公路局中區養護工程分局埔里工務段	5.7	4.3	5.0	7.0
86	公路局中區養護工程分局霧社監工站	6.6	5.9	6.7	7.4
87	公路局中區養護工程分局谷關工務段	7.2	5.3	9.3	9.1
88	公路局北區養護工程分局復興工務段	8.7	4.8	8.7	5.2
89	公路局雲嘉南區養護工程分局石卓監工站	6.5	10.2	6.7	6.7
90	十八王公橋	23.3	24.4	24.9	29.8

註：- 表示試體遺失。

表 4-6 銅金屬之腐蝕速率表

單位：μm/yr

項次	試驗地點	試驗期間			
		2024.10 - 2024.12	2025.01 - 2025.03	2025.04 - 2025.06	2025.07 - 2025.09
1	基隆試驗線 0m	14.5	7.2	5.7	4.9
2	基隆試驗線 100m	12.3	9.4	7.4	6.9
3	梗枋安檢所	10.1	8.2	8.9	16.4
4	龍德產業園區	12.6	8.2	9.9	11.3
5	蘇澳港試驗線 0m	10.7	5.5	4.5	7.5
6	蘇澳港試驗線 300m	6.3	6.3	1.8	1.7
7	南澳安檢所	7.0	6.1	6.9	10.5
8	和平產業園區	2.4	2.3	1.6	1.5
9	太魯閣國家公園管理處	1.6	1.7	1.5	1.3
10	美崙產業園區	7.7	8.3	5.9	3.2
11	花蓮港試驗線 0m	14.2	12.9	11.3	10.8
12	花蓮港試驗線 100m	8.4	8.7	7.5	5.1
13	花蓮港試驗線 500m	9.2	8.9	7.8	5.0
14	橄仔樹安檢所	13.3	15.1	12.7	14.0
15	石梯安檢所	10.4	8.5	7.5	6.6
16	成功安檢所	12.1	12.2	13.8	9.7
17	金樽安檢所	11.4	9.1	11.6	12.2
18	伽藍安檢所	17.1	21.9	25.0	24.7
19	豐樂產業園區	6.6	2.6	2.2	2.3
20	尚武安檢所	11.9	9.6	10.1	6.4
21	核三廠試驗線 0m	11.4	11.0	13.7	7.6
22	核三廠試驗線 100m	9.6	10.6	11.0	6.3
23	核三廠試驗線 300m	10.4	9.9	11.4	7.3
24	屏東產業園區	3.6	3.0	2.5	3.1
25	中油林園廠	4.5	2.9	4.1	5.1
26	中鋼公司	5.2	3.4	6.3	7.3
27	鳳山產業園區	3.7	2.0	2.1	3.0
28	大發產業園區	5.2	2.5	4.2	4.6
29	高雄港試驗線 0m	9.4	2.1	3.6	4.8
30	高雄港試驗線 300m	7.8	4.8	10.8	7.7
31	高鐵左營站	4.4	2.2	2.6	3.1
32	永安產業園區	5.8	3.0	3.7	4.7
33	興達火力電廠	-	4.4	5.1	7.1

項次	試驗地點	試驗期間			
		2024.10 - 2024.12	2025.01 - 2025.03	2025.04 - 2025.06	2025.07 - 2025.09
34	安平產業園區	5.7	2.9	7.2	4.6
35	成大水工試驗所	8.1	4.9	4.3	-
36	官田產業園區	7.6	8.4	8.2	6.3
37	東石安檢所	2.3	17.9	14.7	8.2
38	朴子產業園區	29.7	6.2	3.7	2.7
39	高鐵嘉義站	7.2	5.1	2.3	2.5
40	斗六產業園區	2.2	2.0	3.0	1.5
41	台塑六輕試驗線 0m	26.4	17.2	11.3	9.3
42	台塑六輕試驗線 300m	30.9	19.2	12.7	12.7
43	台塑六輕試驗線 800m	33.5	21.5	10.9	7.7
44	台塑六輕試驗線 2km	19.1	14.9	5.8	4.7
45	台塑六輕試驗線 3km	21.3	12.5	11.0	9.6
46	王功安檢所	46.1	29.0	17.9	17.5
47	彰濱產業園區	-	17.4	9.4	6.4
48	田中產業園區	9.6	3.1	2.5	3.5
49	南崗產業園區	3.3	2.5	2.4	2.8
50	大里產業園區	2.0	1.6	1.2	1.7
51	高鐵臺中站	3.0	2.5	2.7	3.4
52	臺中產業園區	12.7	5.6	2.2	3.2
53	臺中港關連產業園區	24.9	11.5	3.5	3.3
54	臺中火力電廠	21.4	14.7	5.9	4.3
55	臺中港試驗線 0m	21.3	13.4	4.0	4.2
56	臺中港試驗線 300m	21.3	11.4	3.6	3.6
57	臺中港試驗線 2km	24.6	14.4	3.5	4.0
58	五甲安檢所	29.6	19.0	8.1	7.2
59	通霄火力電廠	17.1	11.0	-	3.1
60	外埔安檢所	24.8	18.6	8.7	9.5
61	竹南產業園區	14.7	8.3	3.8	4.4
62	頭份產業園區	8.2	6.0	2.8	2.8
63	工業技術研究院	7.4	5.9	3.2	3.3
64	新竹產業園區	5.8	5.1	2.5	1.9
65	平鎮產業園區	5.5	4.5	2.5	2.2
66	桃園試驗線 500m	8.9	6.8	6.1	16.5
67	桃園試驗線 2km	8.8	6.5	3.7	3.1
68	樹林產業園區	2.0	1.9	2.1	1.5
69	臺北市自來水事業處	7.0	6.5	3.2	2.8

項次	試驗地點	試驗期間			
		2024.10 - 2024.12	2025.01 - 2025.03	2025.04 - 2025.06	2025.07 - 2025.09
70	陽明山國家公園管理處	13.6	8.8	16.0	13.7
71	陽明山硫磺區	79.5	75.5	9.7	47.8
72	公路局雲嘉南區養護工程分局阿里山工務段	2.4	4.7	2.2	2.0
73	東北角風景區福隆遊客中心	10.8	6.5	4.9	6.6
74	臺北港監測站	6.8	6.8	3.9	2.1
75	平鎮產業園區(服務中心)	10.6	9.4	3.6	2.7
76	觀音產業園區(服務中心)	11.3	9.0	3.9	3.2
77	永安安檢所	12.1	8.6	8.7	-
78	新竹安檢所	25.3	16.2	8.3	14.9
79	金門水頭商港	7.5	5.0	3.6	9.4
80	高雄港 39 號碼頭	5.2	5.2	4.8	3.6
81	高雄港 75 號碼頭	5.1	2.5	4.0	4.4
82	公路局南區養護工程分局澎湖工務段	4.5	18.4	28.2	8.7
83	馬祖福澳港碼頭	10.1	12.1	5.7	18.6
84	公路局中區養護工程分局新中橫監工站	0.6	0.8	0.6	0.7
85	公路局中區養護工程分局埔里工務段	15.5	3.2	4.9	6.2
86	公路局中區養護工程分局霧社監工站	0.8	1.1	1.2	0.8
87	公路局中區養護工程分局谷關工務段	1.8	1.4	1.4	1.5
88	公路局北區養護工程分局復興工務段	2.0	2.0	3.3	1.8
89	公路局雲嘉南區養護工程分局石卓監工站	1.4	1.7	1.9	1.3
90	十八王公橋	26.5	20.8	12.3	23.9

註：- 表示試體遺失。

表 4-7 鋁金屬之腐蝕速率表

單位：g/m<sup>2</sup>/yr

項次	試驗地點	試驗期間			
		2024.10 - 2024.12	2025.01 - 2025.03	2025.04 - 2025.06	2025.07 - 2025.09
1	基隆試驗線 0m	7.6	7.8	1.9	2.4
2	基隆試驗線 100m	5.4	9.8	6.1	3.4
3	梗枋安檢所	3.1	9.3	2.8	5.4
4	龍德產業園區	2.1	7.3	2.7	4.1
5	蘇澳港試驗線 0m	-	7.7	2.6	3.4
6	蘇澳港試驗線 300m	8.6	7.1	1.9	1.7
7	南澳安檢所	2.3	5.5	2.6	4.7
8	和平產業園區	0.1	4.3	1.7	2.0
9	太魯閣國家公園管理處	0.3	7.3	2.5	2.3
10	美崙產業園區	1.7	7.9	2.4	2.8
11	花蓮港試驗線 0m	7.5	27.0	6.7	3.8
12	花蓮港試驗線 100m	2.7	7.5	3.2	1.7
13	花蓮港試驗線 500m	1.4	8.6	4.4	3.3
14	橄仔樹安檢所	5.5	20.4	5.6	3.0
15	石梯安檢所	5.6	14.8	3.9	2.1
16	成功安檢所	5.6	8.5	4.8	3.3
17	金樽安檢所	4.8	7.8	4.6	2.1
18	伽藍安檢所	5.7	12.3	6.0	4.9
19	豐樂產業園區	1.2	3.8	1.8	2.7
20	尚武安檢所	3.2	11.2	2.6	5.4
21	核三廠試驗線 0m	2.4	5.5	4.0	2.4
22	核三廠試驗線 100m	2.7	6.5	3.7	2.3
23	核三廠試驗線 300m	4.5	7.1	3.7	2.9
24	屏東產業園區	0.2	3.3	1.8	1.7
25	中油林園廠	2.4	4.9	3.2	3.6
26	中鋼公司	5.6	5.7	4.3	4.2
27	鳳山產業園區	1.7	6.1	2.6	1.8
28	大發產業園區	2.1	6.1	3.3	2.7
29	高雄港試驗線 0m	4.3	4.0	4.8	6.1
30	高雄港試驗線 300m	4.0	5.1	5.8	3.0
31	高鐵左營站	2.1	4.2	2.4	2.2
32	永安產業園區	2.6	3.7	3.3	2.8
33	興達火力電廠	5.1	5.2	3.7	2.9

項次	試驗地點	試驗期間			
		2024.10 - 2024.12	2025.01 - 2025.03	2025.04 - 2025.06	2025.07 - 2025.09
34	安平產業園區	0.8	3.7	3.3	2.5
35	成大水工試驗所	2.9	4.6	4.7	-
36	官田產業園區	0.6	3.4	3.6	2.0
37	東石安檢所	20.3	19.4	10.4	5.1
38	朴子產業園區	8.0	8.5	6.1	1.9
39	高鐵嘉義站	8.0	5.4	5.6	2.3
40	斗六產業園區	1.2	4.0	3.3	2.0
41	台塑六輕試驗線 0m	8.6	12.8	6.0	4.5
42	台塑六輕試驗線 300m	33.4	27.3	9.9	5.7
43	台塑六輕試驗線 800m	22.7	26.2	8.1	4.2
44	台塑六輕試驗線 2km	38.0	34.1	8.0	3.3
45	台塑六輕試驗線 3km	12.5	12.7	5.2	2.6
46	王功安檢所	37.7	33.8	13.5	5.4
47	彰濱產業園區	-	20.6	9.8	3.5
48	田中產業園區	3.7	5.0	3.5	2.4
49	南崗產業園區	1.2	4.2	1.7	2.4
50	大里產業園區	0.7	3.5	1.8	1.5
51	高鐵臺中站	4.2	3.2	6.3	2.3
52	臺中產業園區	5.5	12.6	2.5	2.8
53	臺中港關連產業園區	6.9	18.7	3.6	3.5
54	臺中火力電廠	16.0	11.3	4.5	2.3
55	臺中港試驗線 0m	36.4	12.9	4.5	3.3
56	臺中港試驗線 300m	8.3	9.4	4.8	2.1
57	臺中港試驗線 2km	-	-	5.7	2.6
58	五甲安檢所	44.0	25.2	7.0	4.7
59	通霄火力電廠	5.9	7.1	-	2.8
60	外埔安檢所	20.6	21.4	9.4	4.1
61	竹南產業園區	1.9	8.3	3.1	2.6
62	頭份產業園區	6.4	7.7	5.9	3.1
63	工業技術研究院	3.8	6.8	3.8	3.1
64	新竹產業園區	3.7	5.9	2.6	2.4
65	平鎮產業園區	1.4	5.8	2.4	2.0
66	桃園試驗線 500m	12.0	16.0	8.4	7.7
67	桃園試驗線 2km	5.0	8.2	5.3	3.6
68	樹林產業園區	1.4	3.4	3.2	1.6
69	臺北市自來水事業處	3.4	3.7	4.0	1.3

項次	試驗地點	試驗期間			
		2024.10 - 2024.12	2025.01 - 2025.03	2025.04 - 2025.06	2025.07 - 2025.09
70	陽明山國家公園管理處	3.6	5.0	4.8	1.6
71	陽明山硫磺區	32.7	22.2	20.2	7.1
72	公路局雲嘉南區養護工程分局阿里山工務段	2.5	3.2	6.1	2.2
73	東北角風景區福隆遊客中心	1.4	8.2	2.8	2.1
74	臺北港監測站	3.1	8.4	3.7	1.9
75	平鎮產業園區(服務中心)	5.8	8.5	5.8	2.1
76	觀音產業園區(服務中心)	7.8	19.7	3.8	2.0
77	永安安檢所	20.2	13.9	6.4	-
78	新竹安檢所	38.6	26.6	7.0	5.4
79	金門水頭商港	3.1	6.0	4.7	7.2
80	高雄港 39 號碼頭	3.8	8.0	4.7	2.9
81	高雄港 75 號碼頭	2.8	3.0	4.6	2.4
82	公路局南區養護工程分局澎湖工務段	8.3	68.1	4.1	3.8
83	馬祖福澳港碼頭	3.2	12.6	5.4	8.9
84	公路局中區養護工程分局新中橫監工站	0.1	3.0	1.8	1.0
85	公路局中區養護工程分局埔里工務段	0.3	3.4	0.9	1.7
86	公路局中區養護工程分局霧社監工站	0.9	5.0	0.7	1.5
87	公路局中區養護工程分局谷關工務段	0.2	5.0	1.0	1.6
88	公路局北區養護工程分局復興工務段	0.1	2.9	1.7	1.7
89	公路局雲嘉南區養護工程分局石卓監工站	0.1	2.0	1.8	1.5
90	十八王公橋	32.0	23.1	10.2	8.4

註：- 表示試體遺失。

#### 4.3.1 垂直海岸試驗線各金屬腐蝕速率之比較

圖 4.3 至圖 4.6 分別顯示碳鋼、鋅、銅、鋁 4 種金屬於垂直海岸試驗線試驗點腐蝕速率平均值之比較。

碳鋼金屬(圖 4.3)，以台塑六輕、基隆 2 試驗線的秋季腐蝕速率最高、4 季差異最大，腐蝕速率平均值分別介於 75.2~381.2  $\mu\text{m}/\text{yr}$  及 142.4~524.5  $\mu\text{m}/\text{yr}$ ；而蘇澳港試驗線 4 季的腐蝕速率差異較緩和，介於 131.0~1501  $\mu\text{m}/\text{yr}$  之間。此外，在北部、中部試驗線的秋季腐蝕速率較高、4 季差異較大，南部、東部試驗線的腐蝕速率略低、4 季差異較小。

鋅金屬(圖 4.4)，以臺中港、台塑六輕 2 試驗線的秋、冬 2 季數值，以及桃園試驗線的夏季數值較高。而 4 季的腐蝕速率以臺中港試驗線差異最大介於 10.0~36.6  $\mu\text{m}/\text{yr}$ ；南部及東部的試驗線差異較緩和，其中高雄港試驗線差異最小介於 8.4~13.2  $\mu\text{m}/\text{yr}$ 。

銅金屬(圖 4.5)，以中部臺中港、台塑六輕 2 試驗線在秋、冬 2 季的腐蝕速率較高；而在腐蝕速率季節差異上同樣以臺中港試驗線及台塑六輕試驗線 4 季差異最大，數值分別介於 3.7~22.4  $\mu\text{m}/\text{yr}$  及 8.8~26.2  $\mu\text{m}/\text{yr}$ ，而花蓮港試驗線的 4 季差異最小，數值介於 6.99~10.63  $\mu\text{m}/\text{yr}$ 。

鋁金屬(圖 4.6)，以台塑六輕試驗線在秋、冬 2 季的腐蝕速率最高，其次以臺中港試驗線秋季數值、花蓮港試驗線冬季數值較高；另外，在北部、中部試驗線以秋、冬 2 季的腐蝕速率較高，在東部的花蓮港、蘇澳港 2 試驗線以冬季的腐蝕速率較高，而在南部的高雄港、核三廠 2 試驗線則 4 季數值較低且差異較小。

#### 4.3.2 特定試驗點各金屬腐蝕速率之比較

圖 4.7 至圖 4.10 顯示石化廠、火力電廠、產業園區、高鐵沿線與都市地區等特定測站各金屬之腐蝕速率比較。

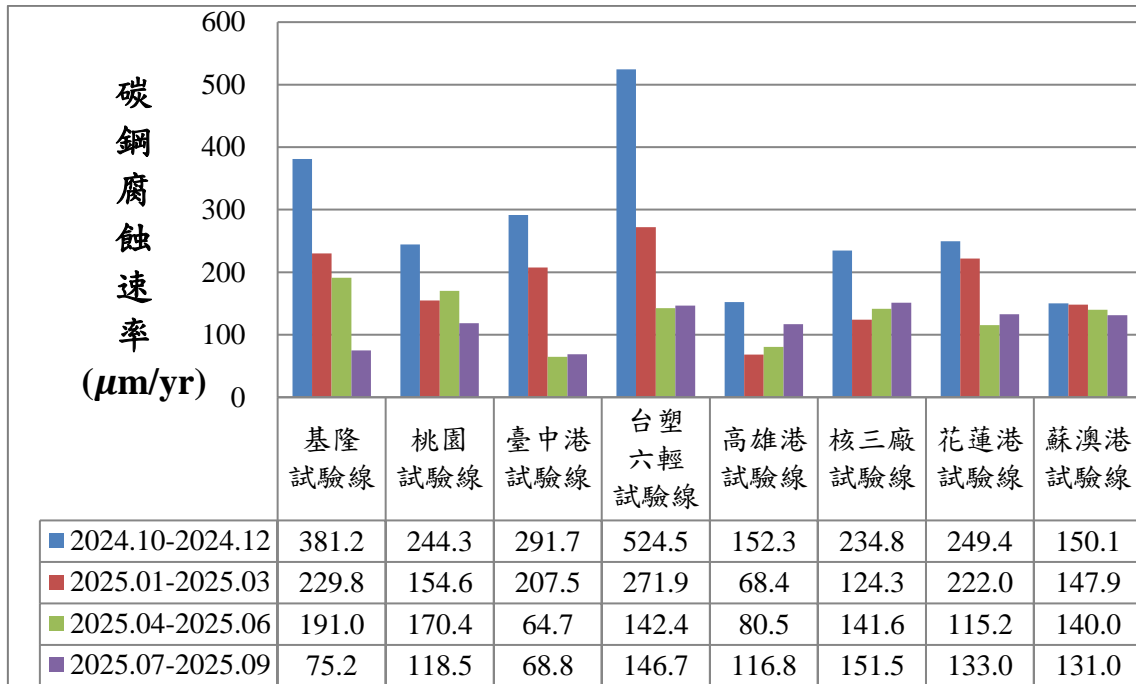
碳鋼金屬(圖 4.7)以台塑六輕、臺中火力電廠的秋季腐蝕速率最高，達 400  $\mu\text{m}/\text{yr}$  以上。其中，在各產業園區中以台塑六輕產業園區的腐蝕

速率最高，其次是觀音產業園區與彰濱產業園區；在 4 個電廠中以臺中火力電廠的腐蝕速率較高且 4 季的腐蝕速率差異較大；臺北市區與高鐵 3 個車站的腐蝕速率，以高鐵左營站在夏季腐蝕速率達  $157.6 \mu\text{m/yr}$  較高。

鋅金屬(圖 4.8)在各產業園區的腐蝕速率以彰濱產業園區在冬季的腐蝕速率最高，其次是台塑六輕產業園區在秋、冬季的腐蝕速率次高，均達  $20 \mu\text{m/yr}$  以上，另觀音產業園區秋、冬、春 3 季的腐蝕速率亦高，達  $15 \mu\text{m/yr}$  以上；4 個電廠在秋冬 2 季以臺中火力電廠腐蝕速率最高，春、夏 2 季以大潭電廠的腐蝕速率最高；臺北市區與高鐵 3 個車站的腐蝕速率，除臺北市區冬季、春季腐蝕速率最高達  $20 \mu\text{m/yr}$  以上外，其他介於  $5.4 \sim 14.3 \mu\text{m/yr}$  之間。

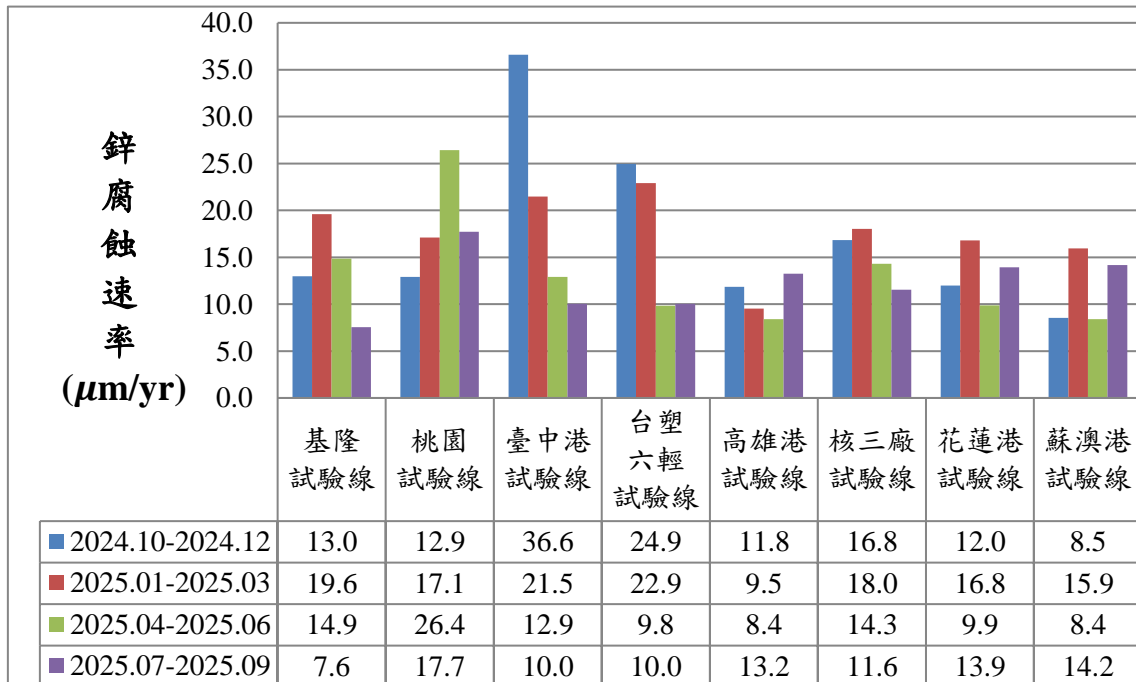
銅金屬(圖 4.9)在各產業園區中以台塑六輕產業園區、彰濱產業園區在秋、冬 2 季的腐蝕速率較高，皆超過  $15 \mu\text{m/yr}$ ；在 4 個電廠中以臺中火力電廠、通霄火力電廠秋、冬 2 季的腐蝕速率，以及大潭電廠夏季的腐蝕速率較高，皆超過  $10 \mu\text{m/yr}$ ；臺北市區與高鐵 3 個車站的腐蝕速率相對較低，介於  $2.2 \sim 6.5 \mu\text{m/yr}$ 。

鋁金屬(圖 4.10)在各產業園區中以台塑六輕產業園區在秋季的腐蝕速率達  $23.0 \text{g/m}^2/\text{yr}$  最高，冬季以台塑六輕產業園、觀音產業園區及彰濱產業園區較高，南部的中油林園廠及中鋼公司腐蝕速率相對較低；在 4 個電廠中以大潭電廠和臺中火力電廠在秋冬的腐蝕速率較高；臺北市區的腐蝕速率相對較低，腐蝕速率介於  $1.3 \sim 4.0 \text{g/m}^2/\text{yr}$  之間，而高鐵 3 個車站以高鐵左營站的腐蝕速率介於  $2.1 \sim 4.2 \text{g/m}^2/\text{yr}$  相對較低。



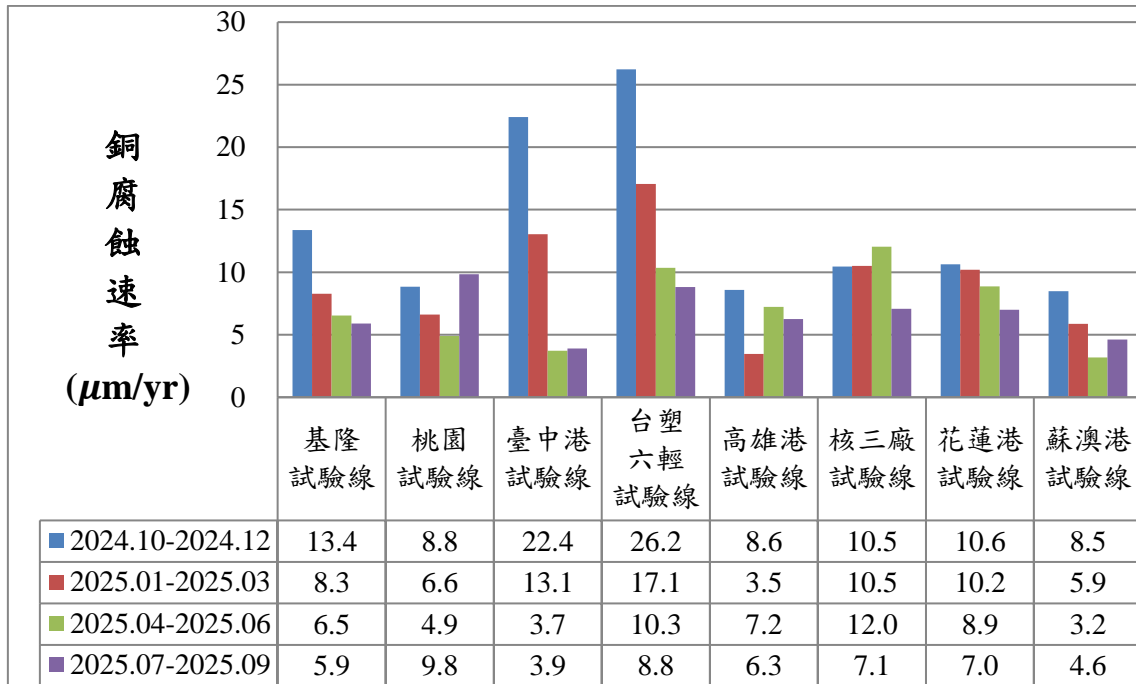
註：腐蝕速率為試驗線測站平均值

圖 4.3 垂直海岸試驗線碳鋼金屬腐蝕速率比較圖



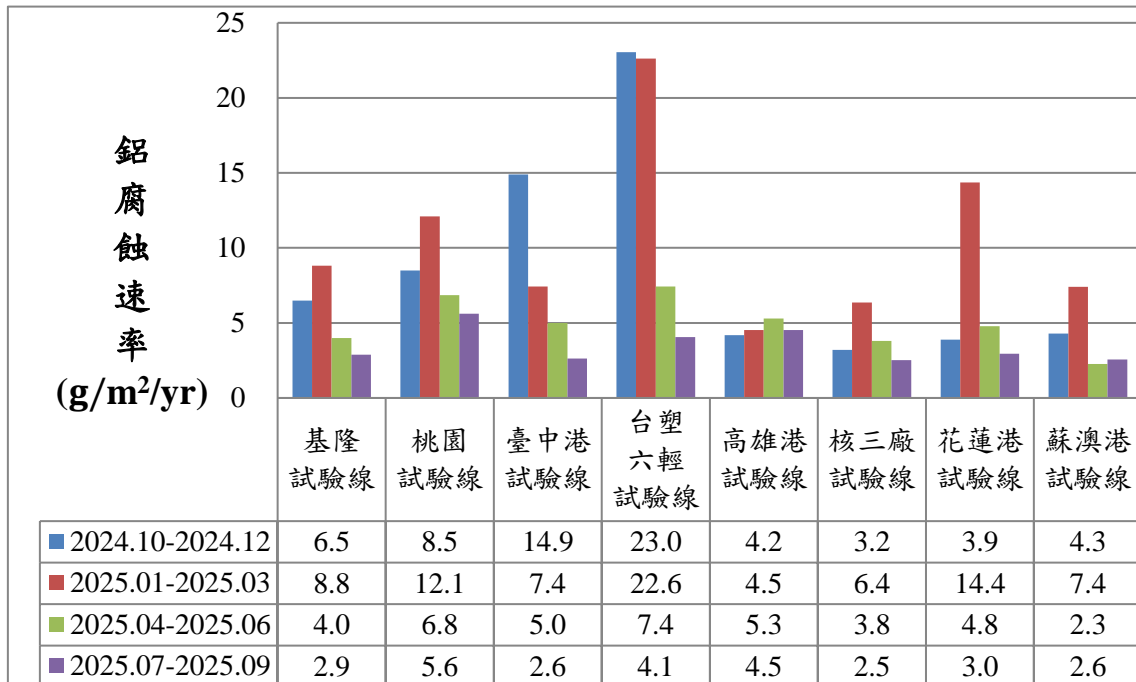
註：腐蝕速率為試驗線測站平均值

圖 4.4 垂直海岸試驗線鋅金屬腐蝕速率比較圖



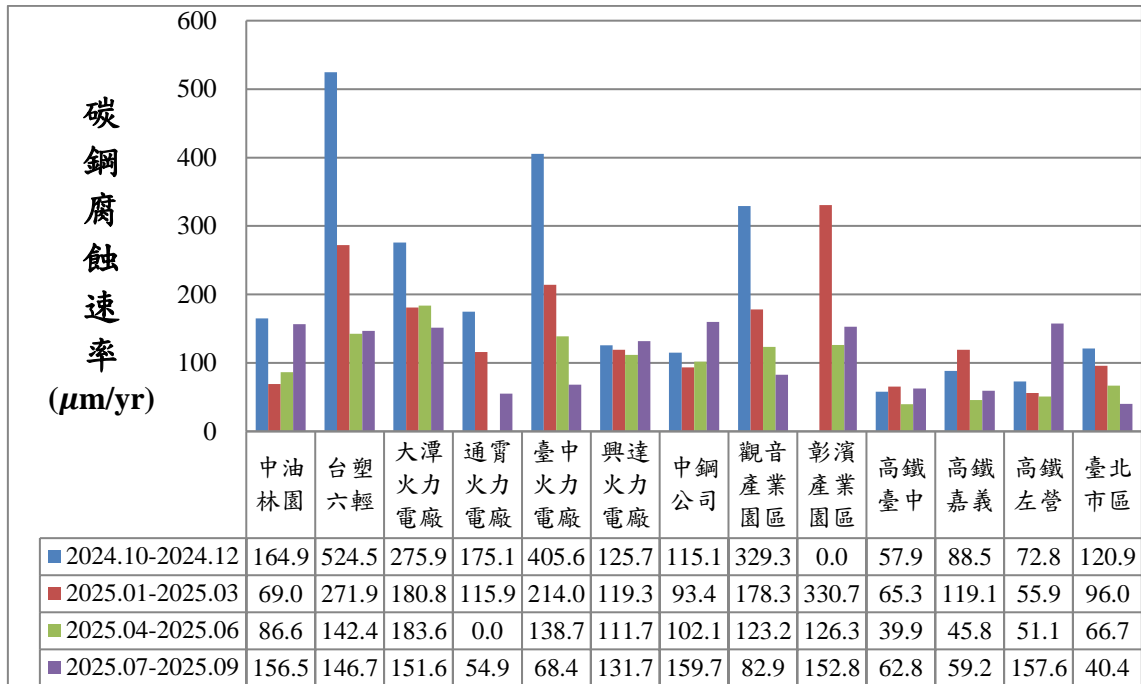
註：腐蝕速率為試驗線測站平均值

圖 4.5 垂直海岸試驗線銅金屬腐蝕速率比較圖



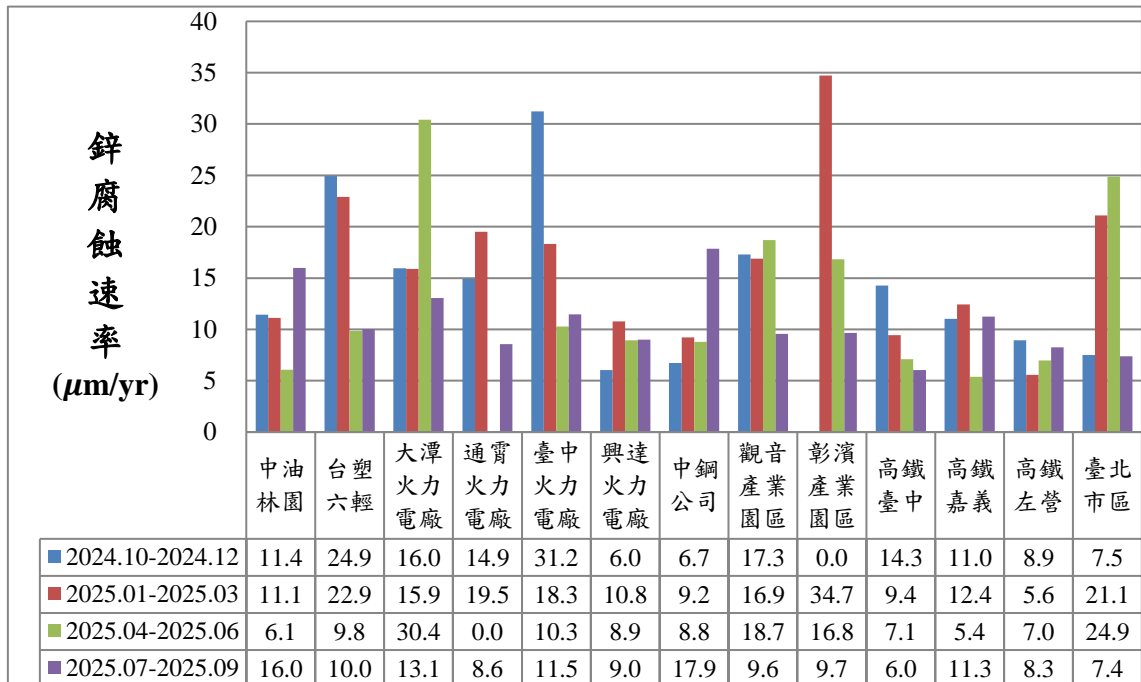
註：腐蝕速率為試驗線測站平均值

圖 4.6 垂直海岸試驗線鋁金屬腐蝕速率比較圖



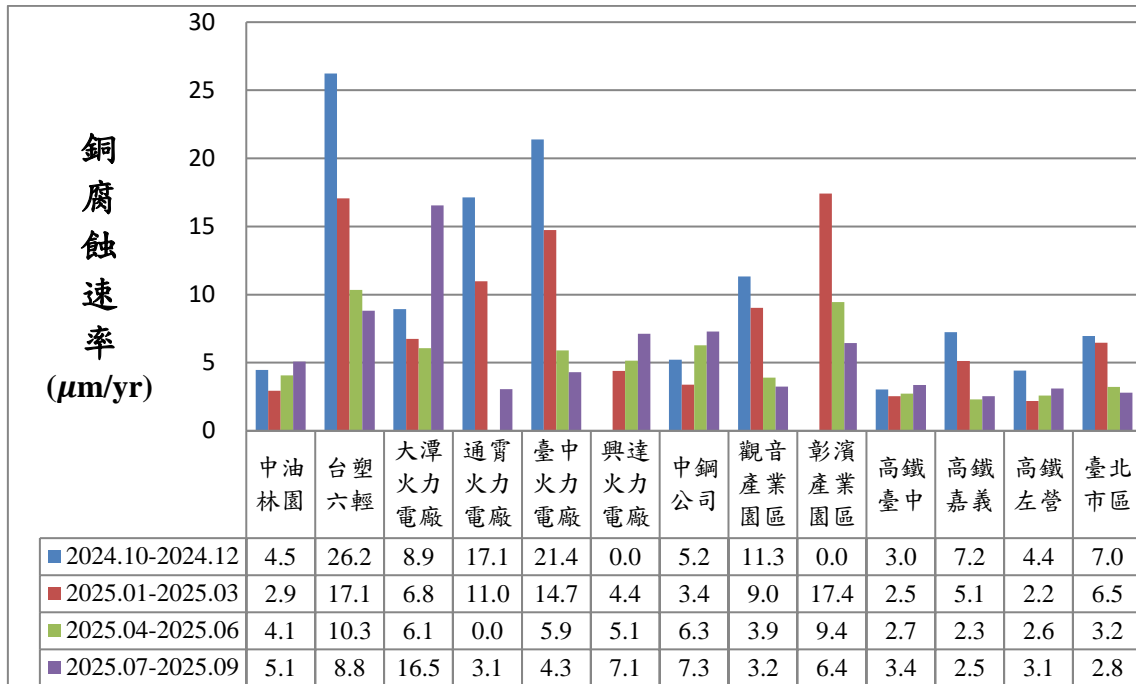
註：台塑六輕腐蝕速率為測站平均值

圖 4.7 特定測站碳鋼金屬腐蝕速率比較圖



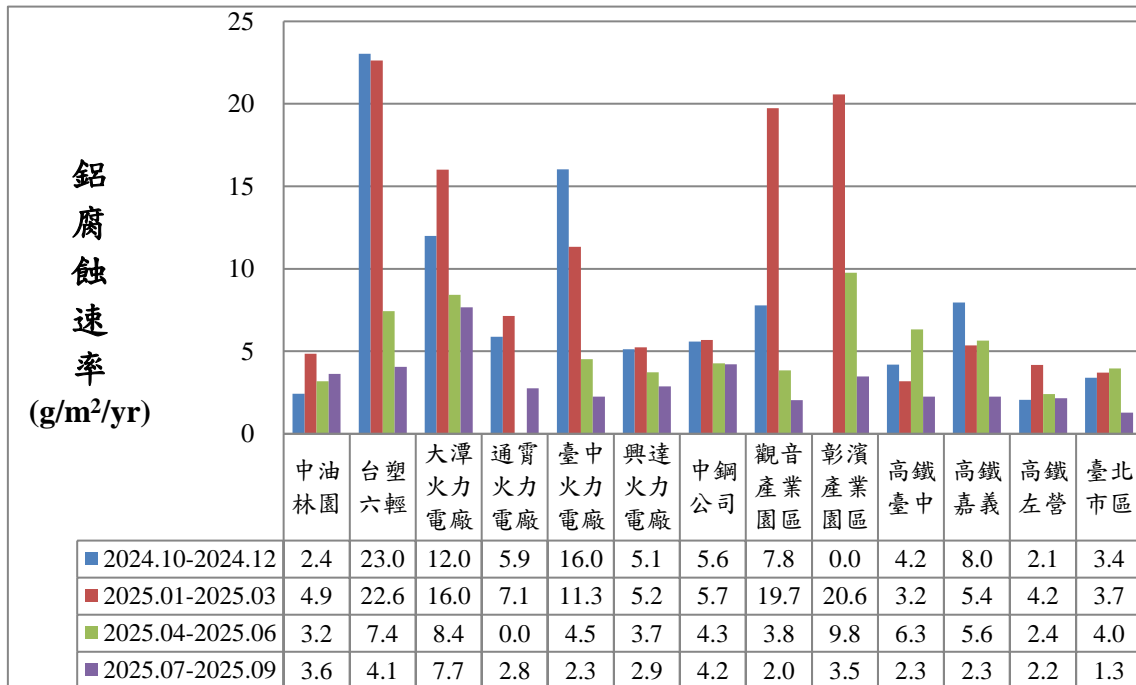
註：台塑六輕腐蝕速率為測站平均值

圖 4.8 特定測站鋅金屬腐蝕速率比較圖



註：台塑六輕腐蝕速率為測站平均值

圖 4.9 特定測站銅金屬腐蝕速率比較圖



註：台塑六輕腐蝕速率為測站平均值

圖 4.10 特定測站鋁金屬腐蝕速率比較圖



## 第五章 銅金屬腐蝕關聯性統計分析

臺灣為一海島，地處熱帶、亞熱帶，高溫、高濕與高鹽份的環境，造成金屬在大氣中容易腐蝕劣化。金屬材料的大氣腐蝕機制主要是受大氣中所含水分、氧氣及腐蝕性物質聯合作用而產生的破壞；因此，為瞭解臺灣地區大氣腐蝕狀況，本所自 96 年起進行臺灣地區大氣腐蝕劣化因子與金屬材料腐蝕之調查與研究，做為辦理公共工程設計與維護管理之參考。

大氣腐蝕調查內容包括：(1)依據中華民國國家標準(以下簡稱 CNS)，就金屬及合金之大氣腐蝕性污染測定方法，進行臺灣全島及澎湖、金門與馬祖等地區之大氣腐蝕劣化因子調查，(2)依據 CNS 製作碳鋼、鋅、銅、鋁標準試樣，並進行現地暴露試驗與腐蝕速率量測，(3)彙整調查試驗結果，進行大氣腐蝕環境分類與建立網站，提供外界查詢及應用。

基於全球各地氣候條件受緯度、地形、距離海洋遠近及當地或附近腐蝕污染物質排放等因素影響，大氣腐蝕具有強烈地域性，為評估臺灣地區大氣腐蝕劣化因子對於金屬材料腐蝕的影響，本研究分期探討 4 種標準金屬材料(CNS 規定之碳鋼、鋅、銅、鋁)與腐蝕因子間的關聯性，前期(112-113 年)已完成碳鋼與鋅金屬材料與腐蝕因子之關聯性分析，今年(114 年)研析銅金屬材料與腐蝕因子之關聯性。

銅具有高導電性、高導熱性、耐腐蝕性、適宜的強度、易加工成形等特性，其實在日常生活中銅金屬與銅合金非常常見。例如：純銅顏色偏紅(又稱紅銅、紫銅)，具有導電、導熱佳，延展性好等特性，常用來做電線與電纜內芯、冷氣與冰箱內銅管、水管(老屋或工業用)、電路板上的銅箔等；黃銅(銅鋅合金)呈金黃色，具有耐腐蝕、好加工、價格相對低之特性，常用來做水龍頭、鑰匙、閥門、門把、門鎖、樂器(小號、長號)、螺絲、五金零件等；青銅(銅錫合金)顏色呈深褐色或帶綠鏽，具有硬度高、耐磨特性，常見物品有雕像、藝術品、鐘、鈴、軸承、齒輪、

硬幣(部分國家)等；白銅(銅鎳合金)呈銀白色，具耐蝕、外觀接近銀金屬顏色等特性，常見物品有硬幣、餐具等。

本章進行銅金屬腐蝕關聯性分析，將運用前期調查得到的數據，以迴歸分析法(Regression Analysis)建立大氣腐蝕劣化因子與銅金屬腐蝕速率間的迴歸模式，據以說明在臺灣地區目前的氣候條件與污染情境下，各項大氣腐蝕劣化因子對於銅金屬腐蝕之影響。

接下來在 5.1 節先說明研究方法，在 5.2 節進行迴歸分析，在 5.3 節以構建的迴歸模式進行預測，最後在 5.4 節做一個小結。

## 5.1 關聯性統計分析方法

研究方法採用迴歸分析法，迴歸分析是社會科學研究方法中最基本也是最重要的統計分析技術以及假說驗證方法，是常用來研究多個變數關係的一種方法，可依據統計數據配適一條合適的直線或曲線，找出解釋變數(或稱自變數、影響變數)與反應變數(或稱應變數、依變數)間的函數關係，據以說明變數間的關聯性。迴歸分析法在大氣金屬腐蝕與腐蝕因子關聯性分析上經常使用，例如：Mendoza (1999)<sup>[65]</sup>、Legault(1978)<sup>[66]</sup>、Pourbaix(1993)<sup>[67]</sup>、Morales(2007)<sup>[68]</sup>、Su (1988)<sup>[69]</sup>、Tsai (1993)<sup>[70]</sup>、Chou(2011)<sup>[71]</sup>、Lo (2014)<sup>[72]</sup>等。

迴歸分析的步驟如圖 5.1 所示。以下分別說明各步驟的主要內容：

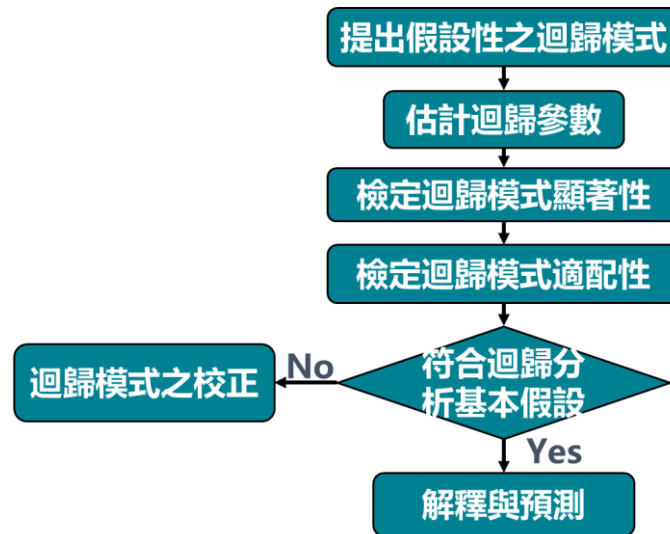


圖 5.1 迴歸分析的步驟

### 1. 提出假設性之迴歸模式

依照變數與變數之間的關係，針對問題選擇適當的反應變數與解釋變數，提出假設性的迴歸模式。

### 2. 估計迴歸參數

整理各變數的統計數據，據以配適一條迴歸方程式，估計模式中的迴歸參數。

### 3. 檢定迴歸模式的顯著性

顯著性檢定係在確定解釋變數與反應變數之間是否有顯著的線性關係，通常以 F 檢定值來檢定整個模式的顯著性，以 t 檢定值來檢定常數項與各解釋變數參數值的顯著性，並以 95% 為判斷是否具顯著性的顯著水準。

### 4. 檢定迴歸模式的適配性

適配性檢定係在確定模式具有說明能力，通當檢視迴歸模式的判定係數  $R^2$  (coefficient of determination ; R squared) 或調整後判定係數  $R^2_{adj}$  (Adjusted R squared)。判定係數  $R^2$  表示模式可說明反應變數的變異比

例，數值愈高代表模式可說明反應變數的變異量愈大，模式的配適度愈好。一般而言，判定係數 0.5 就算可以接受。

在進行多元迴歸分析時，以檢視調整後判定係數  $R^2_{adj}$  較適當。因為判定係數  $R^2$  值會有隨著自變數增加，但模式解釋能力不增之高估現象，而調整後判定係數  $R^2_{adj}$  經過調整後，可避免此一問題。

## 5. 確認迴歸模式的基本假設

在確認迴歸模式的顯著性與適配性之後，必須進一步確認迴歸模式是否符合迴歸分析之基本假設，包含常態性、均質性、獨立性和線性重合等基本假設。

- (1) 常態性：可利用常態機率圖(又稱 P-P 圖)作為判斷方法，當數據來自一個常態分配的母體時，在常態機率圖上殘差值的累積機率會約略呈現一條左下至右上的  $45^\circ$  直線。
- (2) 均質性：可由殘差與反應變數預測值之殘差圖(以下簡稱殘差圖)檢視。因為殘差是不可解釋的部分，如果模式符合均質性，則殘差圖應是沒有規則性的散佈，若殘差有一規則性，則應再將它抽離放在可解釋的部分。若殘差圖呈現非線性狀，表示模式中解釋變數與反應變數間的關係可能是非線性關係，若殘差圖呈現外張喇叭狀或大小不一狀，表示殘差可能不具有相同的變異數，違反均質性。
- (3) 獨立性：亦透過檢視殘差圖來判斷，如果模式符合獨立性，殘差彼此獨立、無自我相關問題，殘差圖應是沒有規則性的散佈，若數據是時間序列資料，則可再進行 DW 檢定，以判斷誤差項是否具有自我序列相關(autocorrelation)的特性。
- (4) 線性重合：當 2 個(或以上)的自變數互不獨立(即彼此相關)時，就是具有共線性(collinearity)，共線性會使迴歸模式中存在著重複的解釋變數，提高某一解釋變數的解釋力與預測力，使得理論的建構不正確。線性重合問題可由變異數波動因數(variance inflation factor, VIF)檢視，通常 VIF 值愈小愈好，當 VIF 值大於 10 時，表示解釋變數間可能有高度線性重合的問題。

- (5) 離群值：在以殘差圖確認迴歸模式的基本假設時，亦會同時檢視離群值，避免模式受到極端值的影響而產生不妥當的迴歸模式，一般視 3 個標準差以上的數值為離群值。

## 6. 校正迴歸模式

若模式不符合迴歸分析的基本假設，則需進行迴歸模式之校正，重新檢視模式的特性，進行模式轉換或調整。

## 7. 解釋與預測

若確認模式符合迴歸分析的基本假設，則完成模式的建置工作，可進行後續的解釋與預測工作。

## 5.2 迴歸分析

以下將運用本所大氣腐蝕調查得到的數據，以迴歸分析法建立大氣腐蝕劣化因子與銅金屬腐蝕速率間的迴歸模式。

### 1. 提出假設性之迴歸模式

#### (1) 確定反應變數與解釋變數

建立迴歸模式的目的是在說明大氣腐蝕劣化因子與銅金屬腐蝕速率間的關聯性，因此，模式中的反應變數為銅金屬腐蝕速率，解釋變數為大氣腐蝕劣化因子。

關於解釋變數的選擇，參考 CNS 13401<sup>[47]</sup> (對應 ISO 9223 國際標準)<sup>[42]</sup> 規範中劑量-反應函數以溫度、相對濕度、二氧化硫與氯鹽等 4 項為大氣腐蝕因子，爰本文選擇此 4 項因子為解釋變數。因此，本文提出之假設性迴歸模式中的反應變數為銅金屬腐蝕速率，解釋變數 4 項，分別是溫度、相對濕度、氯鹽沉積速率、二氧化硫沉積速率，各變數說明如表 5-1。

表 5-1 迴歸模式變數說明

變數名稱	變數代號	單位	說明
銅金屬腐蝕速率	$Cu_{corr}$	$\mu m/yr$	反應變數
溫度	T	$^{\circ}C$	解釋變數
相對濕度	RH	%	解釋變數
氯鹽沉積速率	Cl	$mg/m^2/day$	解釋變數
二氧化硫沉積速率	$SO_2$	$mg/m^2/day$	解釋變數

## (2) 資料說明

為探討目前大氣環境下臺灣地區銅金屬腐蝕速率與 4 項大氣腐蝕劣化因子間的關聯性，將以本所進行臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查之 112 年 90 個大氣腐蝕試驗站年資料為分析基礎。資料扣除 6 處試樣站施工或試體遺失無數據，以及陽明山硫磺區的二氧化硫沉積速率相對應於一般地區過高，為離群值不納入分析外，共計有 83 筆數據。

各試驗站均有銅金屬腐蝕速率的現地試驗資料；部分試驗站無調查氯鹽沉積速率或二氧化硫沉積速率，在分析時引用鄰近試驗站的調查數據；另各試驗站的溫度、相對濕度以中央氣象署鄰近氣象站的溫度、相對濕度數據計算。

## (3) 模式假設

假設在真實情況下臺灣地區銅金屬腐蝕速率，主要受到溫度、相對濕度、氯鹽、二氧化硫等 4 項大氣腐蝕劣化因子影響；銅金屬腐蝕速率與 4 項大氣腐蝕劣化因子之間的關係是線性關係模式；且此一關係模式可以用本所在臺灣各地試驗站的數據來推估。

令臺灣地區銅金屬腐蝕速率與 4 項大氣腐蝕劣化因子溫度、

相對濕度、氯鹽、二氧化硫之迴歸模式為：

$$Cu_{corr} = b_0 + b_1T + b_2 RH + b_3 Cl + b_4SO_2 + e \quad (5-1)$$

式中  $b_0$  為常數項， $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 、 $b_4$  為各大氣腐蝕劣化因子的迴歸參數， $e$  是誤差項。

## 2. 配適迴歸模式

### (1) 估計迴歸參數

以 112 年全臺各試驗站的年資料 83 筆，應用統計軟體 SPSS 29 進行迴歸分析、估計迴歸參數。配適得到線性迴歸模式如下：

$$Cu_{corr} = -32.073 + 0.616T + 0.261RH + 0.149Cl + 0.014SO_2 \quad (5-2)$$

線性迴歸模式的摘要表、變異數分析表與參數估計表，彙整如表 5-2。

表 5-2 線性迴歸模式

#### (a) 摘要表

模式	R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>
線性模式	0.695	0.484	0.457

註：R 為皮爾森積差相關係數，是 R<sup>2</sup> 開根號；R<sup>2</sup> 為判定係數；R<sup>2</sup><sub>adj</sub> 為調整後判定係數。

#### (b) 變異數分析表

模式	平方和	自由度	平均平方和	F	顯著性(P)
迴歸	540.403	4	135.101	18.267	0.001*
殘差	576.873	78	7.396	-	-
總計	1117.276	82	-	-	-

註：符號「\*」表示顯著性  $P \leq 0.05$ ，達統計上 95% 顯著水準。

(c) 參數估計表

模式	b	標準誤差	t	顯著性(P)	VIF
(常數)	-32.073	10.028	-3.198	0.002*	-
T	0.616	0.163	3.770	0.001*	1.420
RH	0.261	0.093	2.797	0.006*	1.579
Cl	0.149	0.026	5.682	0.001*	1.150
SO <sub>2</sub>	0.014	0.007	1.877	0.064	1.024

註：符號「\*」表示顯著性  $P \leq 0.05$ ，達統計上 95% 顯著水準。

## (2) 檢定模式顯著性

由模式的 F 檢定值=18.267( $P=0.001$ ) 達 95% 顯著水準，可知模式顯著；檢視各參數的 t 檢定值，由常數項  $b_0$ 、解釋變數 T、RH、Cl 參數  $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$  的 t 檢定值達 95% 顯著水準，解釋變數 SO<sub>2</sub> 參數  $b_4$  的 t 檢定值未達 95% 顯著水準(t 檢定未通過)，可知常數項  $b_0$  不為 0，且解釋變數 T、RH、Cl 的影響顯著，但解釋變數 SO<sub>2</sub> 的參數  $b_4$  可能為 0，解釋變數 SO<sub>2</sub> 的影響不顯著。

因解釋變數 SO<sub>2</sub> 的參數  $b_4$  的 t 檢定未通過，在此，將解釋變數減為 T、RH、Cl 等 3 項，以同樣 83 筆數據配適得到 3 變數線性模式如下：

$$Cu_{\text{corr}} = -33.793 + 0.652T + 0.279RH + 0.152Cl \quad (5-3)$$

3 變數線性迴歸模式的摘要表、變異數分析表與參數估計表，彙整如表 5-3。

表 5-3 3 變數線性迴歸模式

(a) 摘要表

模式	R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>
3 變數線性模式	0.687	0.460	0.440

註：R 為皮爾森積差相關係數，是 R<sup>2</sup> 開根號；R<sup>2</sup> 為判定係數；R<sup>2</sup><sub>adj</sub> 為調整後判定係數。

(b)變異數分析表

模式	平方和	自由度	平均平方和	F	顯著性(P)
迴歸	514.350	3	171.450	22.465	0.001*
殘差	602.925	79	7.632	-	-
總計	1117.276	82	-	-	-

註：符號「\*」表示顯著性 $P \leq 0.05$ ，達統計上 95%顯著水準。

(c)參數估計表

模式	b	標準誤差	t	顯著性(P)	VIF
(常數)	-33.793	10.144	-3.331	0.001*	-
T	0.652	0.165	3.957	0.001*	1.400
RH	0.279	0.094	2.957	0.004*	1.562
Cl	0.152	0.027	5.695	0.001*	1.147

註：符號「\*」表示顯著性 $P \leq 0.05$ ，達統計上 95%顯著水準。

由 3 變數線性模式的 F 值=22.465( $P=0.001$ )，常數項與 3 解釋變數參數的 t 值均達 95%顯著水準，可知模式顯著、各解釋變數的影響亦顯著。

### (3)檢定模式適配性

3 變數線性模式的  $R^2_{adj}=0.440$ ，表示模式中解釋變數能說明銅金屬腐蝕速率變異的 44.0%，基於本研究試驗站是設置在戶外，較易受地區環境不可控制因素影響，一般而言， $R^2_{adj}$  達到 0.5 即可接受，惟此一  $R^2_{adj}$  值未達 50% 以上，模式解釋能力略有不足。

### (4)確認模式的基本假設

進一步確認迴歸模式是否符合迴歸分析之基本假設，包含常態性、均質性、獨立性和線性重合等基本假設，並一併檢視離群值。

常態性：由 3 變數線性模式常態機率圖(圖 5.2)上各點分佈情形來看，圖形均略有偏離直線，判斷模式可能違反常態分配之假設。

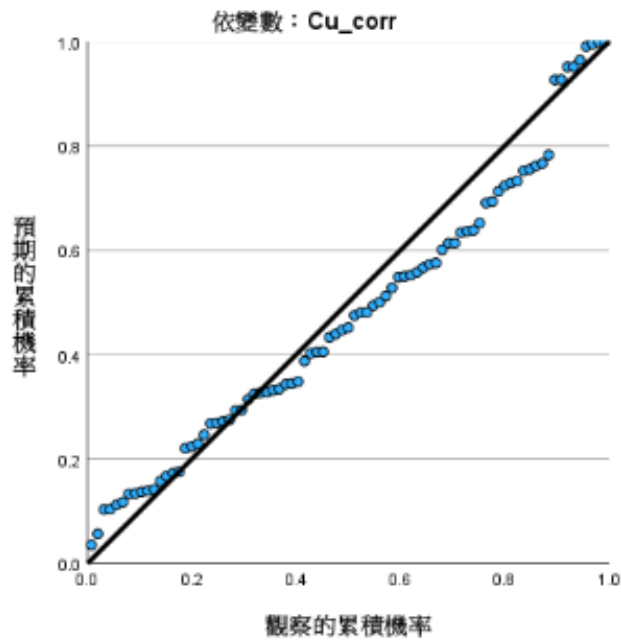


圖 5.2 3 變數線性迴歸模式的常態機率圖

均質性：由 3 變數線性模式的殘差圖(圖 5.3)上各點分佈情形來看，殘差圖無顯示特定圖型，判斷模式可能無違反變異數相同之均質性假設。

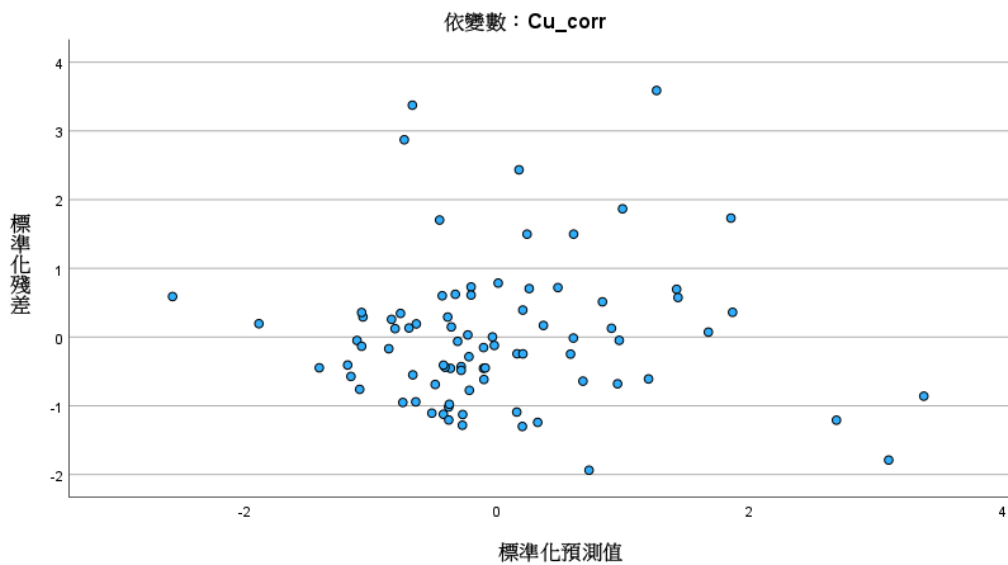


圖 5.3 3 變數線性迴歸模式的殘差圖

獨立性：由模式的殘差圖(圖 5.3)上各點分佈情形來看，殘差值均隨機分布在 0 的中心線周圍，無明顯規律性，判斷殘差可能彼此獨立，無自我相關問題，另基於資料非時間序列資料，不再進行 DW 檢定。

線性重合：由模式中各解釋變數的 VIF 值均小於 10，判斷解釋變數間無高度線性重合問題。

離群值：模式有 2 個反應變數預測值在 3 個標準差之外。

### (5)綜合判斷

綜而言之，3 變數線性模式的顯著性檢定通過，但模式適配性略低，且模式可能均違反迴歸分析常態性的基本假設。依此分析結果判斷配適的線性迴歸模式可能不太妥適，有需要進行模式校正，重新配適一個新的模式。

## 3.校正迴歸模式

經檢定模式適配性與檢視殘差圖，判斷建立的 3 變數線性模式適配性略低且可能違反常態性基本假設，在此嘗試進行模式轉換。

### (1)提出對數線性模式

考慮到大氣金屬腐蝕是一種水膜下的電化學反應，空氣中水分子在金屬表面凝聚生成水膜，與空氣中氧氣通過水膜進入金屬表面，是產生金屬腐蝕的基本條件；溫度與相對濕度可反應在金屬表面上產生水膜而發生腐蝕的時間，而氯鹽、二氧化硫等環境因子是在水膜產生後加速金屬腐蝕的因子。

並考慮到 CNS 13401<sup>[47]</sup> (對應 ISO 9223<sup>[42]</sup>國際標準)中建議由環境條件與暴露情境，計算出適用於銅金屬腐蝕速率的劑量-反應函數為：

$$r_{\text{corr}} = 0.0053P_d^{0.26}\exp(0.059RH+f_{\text{Cu}})+0.01025S_d^{0.27}\exp(0.036RH+0.049T)$$

$$f_{\text{Cu}} = 0.126(T-10) \text{ 當 } T \leq 10^\circ\text{C} ; \text{ 除此之外 } f_{\text{Cu}} = -0.008(T-10) \quad (5-4)$$

式中  $r_{\text{corr}}$  是銅金屬腐蝕速率； $P_d$  是二氧化硫沉積速率； $S_d$  是氯鹽沉積速率； $RH$  是相對濕度； $T$  是溫度。

此一公式顯示：在溫度與相對濕度為定值時，銅金屬腐蝕速率與氯鹽、二氧化硫沉積速率間的關係是線性關係；在氯鹽、二氧化硫沉積速率為定值時，銅金屬腐蝕速率與溫度、相對濕度間的關係是指數關係。

參考大氣金屬腐蝕理論與上述劑量-反應函數所顯示銅金屬腐蝕速率與溫度、相對濕度、氯鹽沉積速率、二氧化硫沉積速率之關係，嘗試將腐蝕速率取對數值為反應變數，以氯鹽、二氧化硫等 2 項腐蝕因子各取對數值為解釋變數，加上溫度、相對濕度 2 項既有解釋變數，建立一個新的對數線性迴歸模式，轉換後的模式如下：

$$\ln(\text{Cu}_{\text{corr}}) = b_0 + b_1 T + b_2 RH + b_3 \ln(\text{Cl}) + b_4 \ln(\text{SO}_2) + e \quad (5-5)$$

式中  $b_0$  為常數項， $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 、 $b_4$  為各解釋變數的迴歸參數， $e$  是誤差項。

估計迴歸參數後，配適得到對數線性模式如下：

$$\ln(\text{Cu}_{\text{corr}}) = -6.085 + 0.116T + 0.042RH + 0.333\ln(\text{Cl}) + 0.267\ln(\text{SO}_2) \quad (5-6)$$

對數線性模式的摘要表、變異數分析表與參數估計表，彙整如表 5-4。

表 5-4 對數線性模式

(a)摘要表

模式	R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>
對數線性模式	0.797	0.635	0.616

註：R 為皮爾森積差相關係數，是 R<sup>2</sup> 開根號；R<sup>2</sup> 為判定係數；R<sup>2</sup><sub>adj</sub> 為調整後判定係數。

(b)變異數分析表

模式	平方和	自由度	平均平方和	F	顯著性(P)
迴歸	35.612	4	8.903	33.930	<0.001*
殘差	20.467	78	0.262	-	-
總計	56.079	82	-	-	-

註：符號「\*」表示顯著性  $P \leq 0.05$ ，達統計上 95% 顯著水準。

(c)參數估計表

模式	b	標準誤差	t	顯著性(P)	VIF
(常數)	-6.085	1.959	-3.107	0.003*	-
T	0.116	0.034	3.391	0.001*	1.741
RH	0.042	0.018	2.373	0.020*	1.636
ln(Cl)	0.333	0.044	7.495	<0.001*	1.220
ln(SO <sub>2</sub> )	0.267	0.087	3.069	0.003*	1.134

註：符號「\*」表示顯著性  $P \leq 0.05$ ，達統計上 95% 顯著水準。

## (2)檢定模式的顯著性

由模式的 F 檢定值=33.930 ( $P < 0.001$ )，可知模式顯著；檢視各參數的 t 檢定值，由常數項  $b_0$ 、解釋變數 T、RH、ln(Cl)、ln(SO<sub>2</sub>) 參數  $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 、 $b_4$  的 t 檢定值均達 95% 顯著水準，可知各解釋變數的影響均顯著，且常數項不為零。

## (3)檢定模式適配性

由模式的  $R^2_{adj} = 0.616$ ，表示模式中解釋變數能說明銅金屬腐蝕速率變異的 61.6%，基於本研究試驗站是設置在戶外，較易受地區環境不可控制因素影響，因此，此一模式的  $R^2_{adj}$  值達 50% 以上，模式解釋能力尚可接受。

## (4)確認迴歸分析的基本假設

接下來確認無常數項對數線性模式的常態性、均質性、獨立性和線性重合等迴歸分析之基本假設。在常態性方面，由常態機率圖(圖 5.4)上各點分佈情形來看，圖形接似直線，推論模式無嚴重違反常態分配之假設；在均質性方面，由殘差圖(圖 5.5)上各點

分佈情形來看，殘差隨機分布無明顯圖形，推論模式無嚴重違反變異數相同之假設；在獨立性方面，由殘差與預測值散佈圖(圖 5.5)上各點分佈情形來看，殘差隨機分布在 0 的中心線周圍，無明顯規律性，推論殘差可能彼此獨立，無自我相關問題；在線性重合方面，由各解釋變數的 VIF 值 $<10$ ，顯示解釋變數間無高度線性重合問題。此外，模式中沒有反應變數預測值在 3 個標準差之外的離群值。

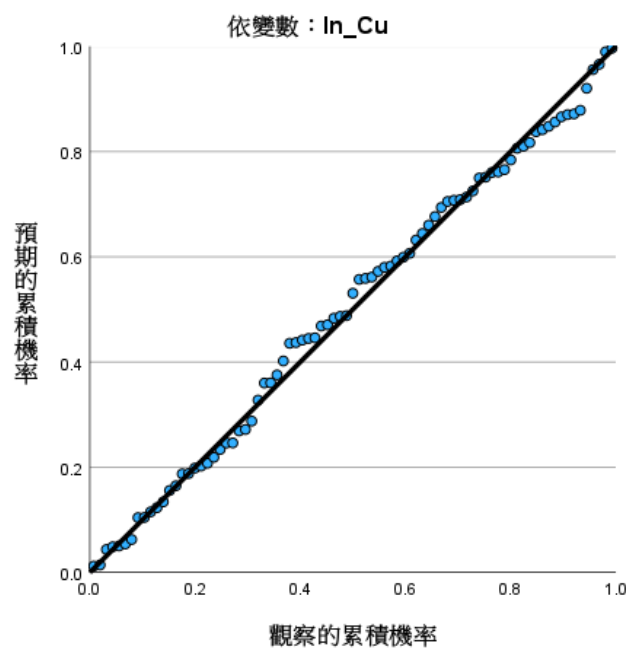


圖 5.4 對數線性模式的常態機率圖

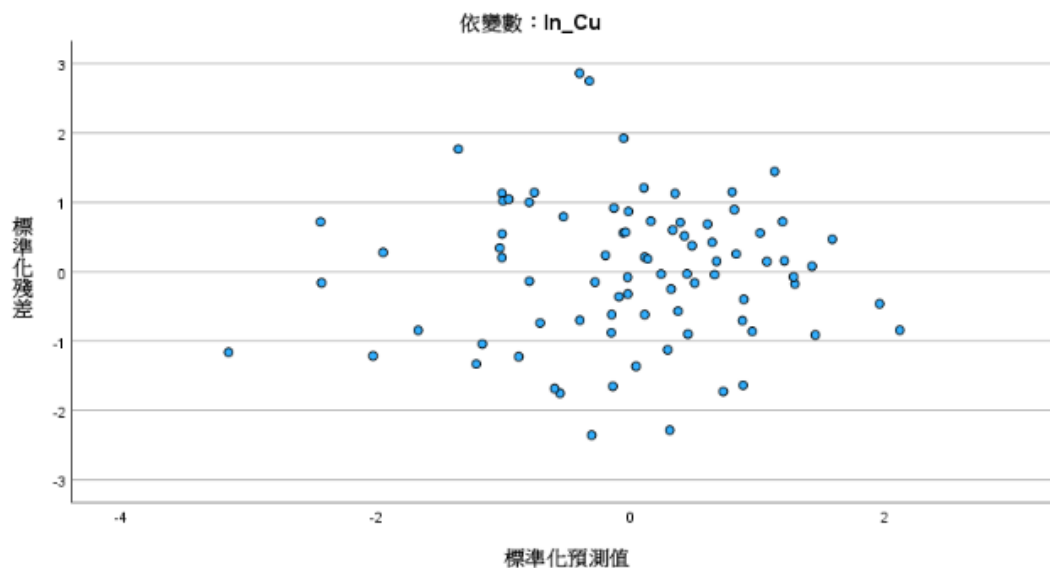


圖 5.5 對數線性模式的殘差圖

#### (5)綜合判斷

綜而言之，對數線性模式的顯著性檢定通過，適配性達可接受範圍，並確認模式沒有嚴重違反迴歸分析基本假設的問題。

### 4.迴歸分析結果說明與討論

#### (1)結果說明

迴歸分析結果顯示在臺灣地區目前的氣候條件與污染情境下，銅金屬腐蝕速率主要受到溫度、相對濕度、氯鹽沉積速率、二氧化硫沉積速率等 4 項腐蝕因子的影響。銅金屬腐蝕速率與 4 項腐蝕因子間的關係是對數線性關係，關係模式如下：

$$\ln(\text{Cu}_{\text{corr}}) = -6.085 + 0.116T + 0.042RH + 0.333\ln(\text{Cl}) + 0.267\ln(\text{SO}_2) \quad (5-7)$$

依此關係模式，4 項腐蝕因子的變動可說明銅金屬腐蝕速率變動的 61.6%。

模式中任一解釋變數迴歸係數的意義是，當排除了其他解釋變數對反應變數的影響後，該解釋變數對反應變數的影響關係。

例如：模式中腐蝕因子溫度(T)的迴歸係數為 0.116，表示當相對濕度(RH)、氯鹽沉積速率(Cl)、二氧化硫沉積速率(SO<sub>2</sub>)等 3 項腐蝕因子為定值時，溫度(T)每增加 1°C，銅金屬腐蝕速率(Cu<sub>corr</sub>)會增加  $e^{0.116} \mu\text{m/yr}$ ；同理，其他 3 項腐蝕因子的迴歸係數 0.042、0.333、0.267 也是同樣的意義：當其他 3 項腐蝕因子為定值時，相對濕度(RH)每增加 1%，銅金屬腐蝕速率(Cu<sub>corr</sub>)會增加  $e^{0.042} \mu\text{m/yr}$ ；當其他 3 項腐蝕因子為定值時，氯鹽沉積速率(Cl)每增加 1 mg/m<sup>2</sup>/day，銅金屬腐蝕速率(Cu<sub>corr</sub>)會增加 0.333  $\mu\text{m/yr}$ ；當其他 3 項腐蝕因子為定值時，二氧化硫沉積速率(SO<sub>2</sub>)每增加 1 mg/m<sup>2</sup>/day，銅金屬腐蝕速率(Cu<sub>corr</sub>)會增加 0.267  $\mu\text{m/yr}$ 。

在此模式中，4 項腐蝕因子均對銅金屬腐蝕速率有顯著影響，各項腐蝕因子的相對重要性，可以用各腐蝕因子在迴歸模式中的標準化迴歸係數大小來判斷(Ryan, 2009<sup>[76]</sup>; Tabachnick and Fidell, 2007<sup>[77]</sup>)。由模式中各解釋變數的標準化迴歸係數值(如表 5-5)，可知腐蝕因子中以氯鹽沉積速率的相對重要性最高(0.566)，其次是溫度(0.306)，二氧化硫沉積速率(0.224)與相對濕度(0.208)等 2 項腐蝕因子的相對重要性較低。

**表 5-5 對數線性模式之標準化迴歸係數**

解釋變數	標準化迴歸係數
T	0.306
RH	0.208
ln(Cl)	0.566
ln(SO <sub>2</sub> )	0.224

## (2) 討論

本文以迴歸分析法建立銅金屬腐蝕速率與腐蝕因子間的關聯性模式，在分析方法上除建立線性迴歸模式外，亦可考慮建立非線性迴歸模式或機器學習模式，另可應用多變量分析技術評估

腐蝕因子間的交互作用。

此外，本研究在構建迴歸模式時，係依據 CNS 13401 規範，選擇以溫度、相對濕度、氯鹽沉積速率、二氧化硫沉積速率等 4 項因子為解釋變數，後續可考慮將風速、風向、降雨、日照等氣象因子納入考量，探討降雨沖刷效應對氯鹽、二氧化硫累積量的影響，以及探討季風氣流對腐蝕的影響。

### 5.3 大氣腐蝕環境分級預測

依據已構建完成的迴歸模式，可由大氣腐蝕劣化因子溫度(T)、相對濕度(RH)、氯鹽(Cl)與二氧化硫(SO<sub>2</sub>)的沉積速率，進行銅金屬腐蝕速率(Cu<sub>corr</sub>)預測，再依按腐蝕環境分級標準，推估銅金屬的大氣腐蝕環境分級。

惟進行預測時，應考慮到迴歸模式係為推論母體情況而以樣本資料建立，當針對原始樣本資料以外的數據進行預測時，其解釋變數的數據應以不超過原始數據的範圍為限，如表 5-6。此外，基於模式是以迴歸分析法配適得到，預測值具有統計上的不確定性，通常預測值在接近樣本資料平均值時的誤差比較小，而在距離平均值愈遠時的誤差愈大，因此在進行腐蝕環境分級預測時，在中段的腐蝕性級別(相當於 C4)之不確定較低，而在兩端的腐蝕性級別(相當於 C2、C6)有較高不確定性。

表 5-6 以模式進行預測時之解釋變數應用範圍

變數名稱	變數代號	範圍	單位
溫度	T	13.73~27.38	°C
相對濕度	RH	69.76~92.84	%
氯鹽沉積速率	Cl	0.29~58.86	mg/m <sup>2</sup> /day
二氧化硫沉積速率	SO <sub>2</sub>	8.65~237.8	mg/m <sup>2</sup> /day

註：應用範圍依原始數據範圍決定。

令某一地點的溫度、相對濕度、氯鹽沉積速率、二氧化硫沉積速率分別是 T<sub>h</sub>、RH<sub>h</sub>、Cl<sub>h</sub> 與 SO<sub>2h</sub> 時，若令 Cu<sub>corr-h1</sub> 表示該地銅金屬腐蝕速

率的點預測值，且以  $\ln(\text{Cu}_{\text{corr-h1}})$  表示該值的對數值，則運用 5.2 節構建的迴歸模式(式 5-7)，可計算出銅金屬腐蝕速率的點預測值，計算式為：

$$\ln(\text{Cu}_{\text{corr-h1}}) = -6.085 + 0.116T_h + 0.042RH_h + 0.333\ln(\text{Cl}_h) + 0.267\ln(\text{SO}_{2h}) \quad (5-8)$$

考慮到預測的不確定性，本文參考 CNS 16238(對應 ISO 9224 國際標準)<sup>[16-17]</sup>提出一種保守預測法，即將預測值加上 2 倍標準估計誤差值，以達到 95%信賴區間，若令  $\text{Cu}_{\text{corr-h2}}$  表示該地銅金屬腐蝕速率之保守點預測值，由模式的標準估計誤差值為 0.51224717，則  $\text{Cu}_{\text{corr-h2}}$  的計算式為：

$$\ln(\text{Cu}_{\text{corr-h2}}) = -5.06051 + 0.116T_h + 0.042RH_h + 0.333\ln(\text{Cl}_h) + 0.267\ln(\text{SO}_{2h}) \quad (5-9)$$

在此，以 113 年試驗站的年資料(扣除離群值與無數據試驗站後為 86 筆)進行預測正確率測試；亦即將 113 年 86 筆大氣腐蝕劣化因子數據代入迴歸模式，進行銅金屬腐蝕速率預測，分別計算 86 個試驗站的  $\text{Cu}_{\text{corr-h1}}$  與  $\text{Cu}_{\text{corr-h2}}$  等 2 項預測值，進而查表得到各項預測值的腐蝕環境分級，然後，與 113 年各試驗站以金屬試片測得的銅金屬腐蝕環境分級相比較，確認預測等級是否等於或高於實際等級，據以計算出預測正確率。計算結果顯示： $\text{Cu}_{\text{corr-h1}}$  的預測正確率為 30.2%， $\text{Cu}_{\text{corr-h2}}$  的預測正確率為 89.5%；其中的  $\text{Cu}_{\text{corr-h2}}$  的預測正確率近 90%的水準，應可提供做為臺灣銅金屬腐蝕環境分級的一種推估方式；而  $\text{Cu}_{\text{corr-h1}}$  的預測正確率過低，可能是模式的解釋能力較低所致，後續將再重新檢討影響因子、優化模式，據以提高模式的解釋能力。

## 5.4 小結

臺灣屬於高腐蝕環境，本文採用臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查之數據，以迴歸分析法建立銅金屬腐蝕速率與大氣腐蝕劣化因子間的迴歸模式。

迴歸分析以銅金屬腐蝕速率為反應變數，參考 CNS 13401 (對應 ISO 9223 國際標準)規範中的劑量-反應函數，以溫度、相對濕度、氯鹽沉積速率、二氧化硫沉積速率等 4 項因子為解釋變數；並採用本所 112

年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查年資料為分析基礎，依循統計推論應遵循之程序，完成迴歸模式顯著性、配適度檢定及基本假設符合，以確立分析得到的迴歸模式為具意義之模式。然後依據已構建完成的迴歸模式提出 2 項銅金屬腐蝕速率點預測值與保守點預測值，可據以進行腐蝕環境分級。

分析結果顯示：在臺灣地區目前的氣候條件與污染情境下溫度、相對濕度、氯鹽沉積速率、二氧化硫沉積速率等 4 項腐蝕因子是影響銅金屬腐蝕速率的顯著影響因子，銅金屬腐蝕速率與 4 項腐蝕因子間的關係是對數線性關係，關係模式為： $\ln(\text{Cu}_{\text{corr}}) = -6.085 + 0.116T + 0.042RH + 0.333\ln(\text{Cl}) + 0.267\ln(\text{SO}_2)$ ；模式顯示此 4 項腐蝕因子的變動可說明銅金屬腐蝕速率變動的 61.6%，其對銅金屬腐蝕速率影響之相對重要性以氯鹽沉積速率最高，溫度次之。依模式提出的銅金屬腐蝕速率保守點預測值計算式，以 113 年各試驗站的實際數據進行驗證，確認模式的預測正確率達到標準，可供做為進行臺灣銅金屬腐蝕環境分級之另一種推估方式。



## 第六章 結論與建議

臺灣為一海島，四面環海，高溫、高濕與高鹽份的環境，腐蝕環境嚴重。歷年來公共工程建設常引用國外腐蝕數據進行腐蝕速率評估與防蝕設計，結果常有未及設計年限就已銹蝕損壞的情形；有鑑於此，腐蝕因子的調查與掌握對金屬與鋼筋混凝土結構物耐久性防蝕設計的影響，有其重要性。

本計畫目標包括：1.臺灣大氣腐蝕因子調查與金屬材料現地暴露試驗；2.港區水下腐蝕長期暴露試驗與海水水質調查；3.精進及擴充大氣與水下腐蝕資訊系統資料庫；4.銅金屬腐蝕與環境因子關聯性分析之工作。

在此目標下，本計畫調查分析全臺各大氣腐蝕試驗站之氯離子、二氧化硫沉積量等大氣腐蝕劣化因子沉積速率、金屬螺旋試樣腐蝕速率，並調查分析各港區水下腐蝕試驗站各季海水水質與各年期金屬材料腐蝕速率，歸納整理數據並繪製比較圖，建置於臺灣腐蝕環境分類資訊系統，提供工程單位做為材料設計選用及防救災決策支援使用。

### 6.1 結論

1. 在氯鹽沉積速率調查結果發現，4季中以秋季的氯鹽沉積速率較高、變異較大，冬季次之，春、夏2季較低，且秋、冬2季的氯鹽沉積速率在北部至西部沿海地區較高，推測是秋、冬2季在北部至中部沿海地區受強烈東北季風影響，空氣中氯鹽顯著增加所致；另東部沿海地區則在秋、夏2季的氯鹽沉積速率較高。
2. 沿海地區多個試驗點測得  $60 \text{ mg/m}^2/\text{day}$  以上的數值，特別在伽蘭安檢所、十八王公橋、花蓮港試驗線 0m、檳仔樹安檢所、金樽安檢所、外埔安檢所等試驗點更測得  $100 \text{ mg/m}^2/\text{day}$  以上的數值；在距離海岸線較遠山區的氯鹽沉積速率最低，多在  $3 \text{ mg/m}^2/\text{day}$  以下，除秋季數值較高外，其餘3季在  $0.3 \text{ mg/m}^2/\text{day}$  以下，另在距離海岸線有一段距離的高鐵沿線3個車站，氯鹽沉積速率同樣不高，多在  $5 \text{ mg/m}^2/\text{day}$  以下，且同樣以秋季較高，其餘3季在  $1 \text{ mg/m}^2/\text{day}$  以下；外島地區的氯鹽沉積速率介於  $1.6\sim 83.2 \text{ mg/m}^2/\text{day}$  之間，其中，金門水頭商港、馬祖福澳港

以冬季氯鹽沉積速率較高，澎湖工務段以春季氯鹽沉積速率較高。

3. 在垂直海岸試驗線平均氯鹽沉積速率之比較，花蓮港試驗線的氯鹽沉積速率在秋、夏 2 季(分別為 106.1、97.3 mg/m<sup>2</sup>/day)遠高於其他季節與其他垂直海岸試驗線。此外，各垂直海岸試驗線在秋季的氯鹽沉積速率明顯高於其他季節，其中基隆試驗線、臺中港試驗線及高雄港試驗線氯鹽沉積速率皆超過 40 mg/m<sup>2</sup>/day。
4. 二氧化硫沉積速率調查結果發現，除了陽明山硫磺區、靠近硫磺區的陽明山國家公園外，較高的二氧化硫沉積速率發生在北部濱海的十八王公橋與特定幾個產業園區，包括中部的臺中火力電廠、彰濱產業園區，南部的官田產業園區、大發產業園區、臨海產業園區(中鋼公司)，以及宜蘭的龍德產業園區。
5. 在特定試驗點二氧化硫沉積速率之比較，以彰濱產業園區冬季的二氧化硫沉積速率最高，達 384.1 mg/m<sup>2</sup>/day，超過最高分類標準 P<sub>3</sub> 等級，另南部的大發產業園區、臨海產業園區(中鋼公司)、東部龍德產業園區在夏季時有較高的二氧化硫沉積速率，達到或超過 P<sub>3</sub> 等級，官田產業園區 4 季數值均超過 80 mg/m<sup>2</sup>/day，屬 P<sub>3</sub> 等級；4 個電廠中以臺中電廠冬季的二氧化硫沉積速率最高，達 255.8 mg/m<sup>2</sup>/day，超過 P<sub>3</sub> 等級，另 3 季的數值則介於 24.6~63.0 mg/m<sup>2</sup>/day 之間，屬 P<sub>2</sub> 等級；其次是大潭電廠，4 季數值介於 36.0~87.2 mg/m<sup>2</sup>/day 之間，屬 P<sub>2</sub>、P<sub>3</sub> 等級；興達電廠、通霄電廠的 4 季數值較低，介於 20.6~44.7 mg/m<sup>2</sup>/day，屬 P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub> 等級。
6. 垂直海岸試驗線各金屬腐蝕速率之比較，碳鋼金屬以台塑六輕、基隆 2 試驗線的秋季腐蝕速率最高。鋅金屬以臺中港、台塑六輕 2 試驗線的秋、冬 2 季數值，以及桃園試驗線的夏季數值較高。銅金屬以臺中港、台塑六輕 2 試驗線的秋、冬 2 季數值較高。鋁金屬以台塑六輕試驗線的秋、冬 2 季數值最高，其次以臺中港試驗線秋季數值、花蓮港試驗線冬季數值較高。
7. 在特定試驗點各金屬腐蝕速率之比較，碳鋼金屬以台塑六輕、臺中火力

電廠在秋季時的腐蝕速率最高，達  $400 \mu\text{m/yr}$  以上。鋅金屬在各產業園區的腐蝕速率以彰濱產業園區在冬季的腐蝕速率最高，其次是台塑六輕產業園區在秋、冬季的腐蝕速率次高，均達  $20 \mu\text{m/yr}$  以上；4 個電廠在秋冬 2 季以臺中火力電廠腐蝕速率最高，春、夏 2 季以大潭電廠的腐蝕速率最高。銅金屬在各產業園區中以台塑六輕產業園區、彰濱產業園區在秋、冬 2 季的腐蝕速率較高，皆超過  $15 \mu\text{m/yr}$ ；在 4 個電廠中以臺中火力電廠、通霄火力電廠秋、冬 2 季的腐蝕速率，以及大潭電廠夏季的腐蝕速率較高，皆超過  $10 \mu\text{m/yr}$ 。鋁金屬在各產業園區中以台塑六輕產業園區在秋季的腐蝕速率達  $23.0 \text{g/m}^2/\text{yr}$  最高，冬季以台塑六輕產業園、觀音產業園區及彰濱產業園區較高；在 4 個電廠中以大潭電廠和臺中火力電廠在秋冬的腐蝕速率較高。

8. 在銅金屬與大氣腐蝕因子關聯性分析，運用迴歸分析法建立腐蝕因子與銅金屬腐蝕速率間的迴歸模式，結果顯示銅金屬腐蝕速率主要受到溫度、相對濕度、氯鹽沉積速率、二氧化硫沉積速率等 4 項腐蝕因子影響，銅金屬腐蝕速率與 4 項腐蝕因子間的關係是對數線性關係，關係模式為：
$$\ln(\text{Cu}_{\text{corr}}) = -6.085 + 0.116T + 0.042RH + 0.333\ln(\text{Cl}) + 0.267\ln(\text{SO}_2)$$
；模式顯示此 4 項腐蝕因子的變動可說明銅金屬腐蝕速率變動的 61.6%，其對銅金屬腐蝕速率影響之相對重要性以氯鹽沉積速率最高，溫度次之。依模式提出的銅金屬腐蝕速率保守點預測值計算式，以 113 年各試驗站的實際數據進行驗證，確認模式的預測正確率達到標準，可供做為進行臺灣銅金屬腐蝕環境分級之另一種推估方式。

## 6.2 建議

1. 未來持續建立臺灣地區構造物腐蝕環境潛勢分析之完整數據資料庫，並針對前期累積量測與試驗分析資料，進行統計與大數據分析，研析大氣腐蝕因子與金屬材料之關聯性。
2. 持續藉由辦理教育訓練、研討會及出版年報，推廣「臺灣腐蝕環境分類資訊系統」於交通部、公路局、高速公路局、港務公司及顧問公司等選用金屬材料及防蝕工法參考應用，確保公共工程如橋梁、碼頭等構造

物，能達到或超過設計使用年限。

### 6.3 研究成果之效益

#### 1. 學術效益:

- (1) 114 年發行交通部運輸研究所專刊，出版「2024 年臺灣大氣腐蝕劣化因子調查研究資料年報」1 冊。
- (2) 在防蝕工程第 39 卷第 3 期(114 年 9 月出版)發表論文「臺灣地區鋅金屬大氣腐蝕速率與腐蝕因子之關聯性分析」。
- (3) 在 114 年 8 月 29-30 日 114 年防蝕工程年會暨論文發表會上發表論文「臺灣銅金屬大氣腐蝕環境分級模式之建構」。
- (4) 在 114 年 6 月 18 日「大氣腐蝕及防蝕技術應用研習會」中簡報「臺灣腐蝕環境分類資訊系統介紹」。
- (5) 在 114 年 11 月 5 日「114 年度港灣環境資訊網使用者說明會」中簡報「臺灣腐蝕環境分類資訊系統介紹」。

2. 社會環境安全影響：本計畫建立臺灣大氣腐蝕環境分類資訊系統，目前全島建置 90 個金屬暴露試驗點與 14 個水下金屬長期腐蝕試驗，藉由環境因子調查，瞭解金屬構造物劣化情形及探討其發生機理，並依腐蝕環境分類特性，選用適當之維修材料與工法，以提升我國之整體防災能力及環境之安全與資源之永續利用。

3. 資料庫建置效益：逐年完成臺灣地區構造物腐蝕環境分類數據資料庫的建立且發行臺灣大氣腐蝕劣化因子調查資料年報，提供工程單位瞭解金屬構造物在臺灣各腐蝕環境中的耐久性與其防蝕策略研擬之參考依據。

### 6.4 提供政府單位應用情形

1. 本計畫建置「臺灣腐蝕環境分類資訊系統」網站並出版年報，提供公、民營機關(構)營運安全防護採用。例如，公路局橋梁養護與設計塗裝分級選用、維護頻率訂定及經費補助順序考量，套疊橋梁位址篩選高鹽害

潛勢橋梁，據以加強巡檢及採取補強措施。

2. 國內大氣腐蝕環境分類成果提供中華民國防蝕工程學會、台塑企業、中國鋼鐵、公路局、國道新建工程局、經濟部工業局、台灣高鐵、臺灣世曦工程顧問公司、中興工程顧問公司等產官學研各界參考應用。



## 參考文獻

1. ISO 9223/1992: Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Classification.
2. 陳桂清、柯正龍、羅建明、羅俊雄，「臺灣地區大氣腐蝕劣化因子調查研究(2/2)」，交通部運輸研究所，2009。
3. 陳桂清、柯正龍、羅俊雄、羅建明、陳新北、劉益雄、翁榮洲，「臺灣地區大氣腐蝕劣化因子調查研究(1/2)」，交通部運輸研究所，2008。
4. 羅建明、陳桂清、柯正龍，「大氣腐蝕因子調查及腐蝕環境分類之研究(1/4)」，交通部運輸研究所，2012。
5. 羅建明、陳桂清、柯正龍，「大氣腐蝕因子調查及腐蝕環境分類之研究(2/4)」，交通部運輸研究所，2013。
6. 羅建明、陳桂清、柯正龍，「大氣腐蝕因子調查及腐蝕環境分類之研究(3/4)」，交通部運輸研究所，2014。
7. 羅建明、陳桂清、柯正龍，「大氣腐蝕因子調查及腐蝕環境分類之研究(4/4)」，交通部運輸研究所，2015。
8. 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。
9. 羅建明、陳桂清、柯正龍，「金屬材料腐蝕環境調查研究(2/2)」，交通部運輸研究所，2017。
10. 羅建明、陳桂清、柯正龍，「臺灣沿岸地區金屬材料腐蝕環境調查研究(1/4)」，交通部運輸研究所，2017。
11. 羅建明、黃宇謙，「臺灣沿岸地區金屬材料腐蝕環境調查研究」，交通部運輸研究所，2019。
12. 羅建明、黃宇謙，「108年臺灣沿岸地區金屬材料腐蝕環境調查研究」，交通部運輸研究所，2020。
13. 羅建明、莊凱迪、黃宇謙，「109年臺灣沿岸地區金屬材料腐蝕

環境調查研究」，交通部運輸研究所，2021。

14. 羅建明、蔡立宏、張道光、莊凱迪、黃宇謙，「110 年臺灣沿岸地區金屬材料腐蝕環境調查研究」，交通部運輸研究所，2022。
15. 羅建明、蔡立宏、賴俊呈、黃宇謙，「111 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與工業區關聯性研究」，交通部運輸研究所，2023。
16. 謝幼屏、蔡立宏、羅建明，「112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究」，交通部運輸研究所，2024。
17. 林維明、陳桂清、饒正、周祖望、黃永光、吳信昇、柯正龍、徐如娟、洪健龍、楊淵洲、蔡克群、毛維雲、高志勇、魏豐義，「臺灣海域之腐蝕特性、防蝕設計、材料之選用及開發研究」，臺灣省政府交通處港灣技術研究所研究報告，1991。
18. 林維明、饒正，「基隆港碼頭鋼板樁腐蝕調查研究」，臺灣省政府交通處港灣技術研究所專刊第 59 號，1990。
19. 饒正、林維明、陳桂清，「港灣 R.C 結構物修理系統評估研究」，臺灣省政府交通處港灣技術研究所研究報告，1994。
20. 林維明、饒正，「澎湖跨海大橋腐蝕調查研究」，臺灣省政府交通處港灣技術研究所專刊第 41 號，1987。
21. 林維明、饒正等，「港灣鋼構造物耐久性研究第一年報告」，臺灣省政府交通處港灣技術研究所，1990。
22. 饒正、柯正龍等，「港灣鋼構造物耐久性研究第二年報告」，臺灣省政府交通處港灣技術研究所，1991。
23. 陳桂清、饒正、柯正龍等，「港灣鋼構造物耐久性研究第三年報告」，臺灣省政府交通處港灣技術研究所，1992。
24. 陳桂清、饒正、柯正龍，「港灣鋼構造物耐久性研究第四年報告」，臺灣省政府交通處港灣技術研究所，1993。
25. 林維明、陳桂清、饒正、黃永光、吳信昇、柯正龍、徐如娟、陳正義、何木火、王培源、林隆貞，「港灣鋼筋混凝土結構物耐久性研究」，臺灣省政府交通處港灣技術研究所研究報告，1991。

26. 饒正、林維明，「港灣構造物腐蝕機理與維修防制之研究」，臺灣省政府交通處港灣技術研究所研究報告，1996。
27. 饒正、陳桂清、柯正龍、羅建明，「現有結構物安全評估及維護研究(一)」臺灣省政府交通處港灣技術研究所，1997。
28. 陳桂清、饒正、張道光、羅建明，「現有結構物安全評估及維護研究(二)」臺灣省政府交通處港灣技術研究所，1998。
29. 饒正、李賢華、宋克義、羅俊雄，「現有結構物安全評估及維護研究(三)」臺灣省政府交通處港灣技術研究所，1999。
30. 饒正、陳桂清、李釗、李賢華，「現有結構物安全評估及維護研究(四)」交通部運輸研究所，2000。
31. 饒正、柯正龍，「水文及污損生物對材料腐蝕之探討」，臺灣省政府交通處港灣技術研究所，1995。
32. 饒正、陳桂清、李賢華、羅俊雄，「高雄港工結構材料海生物附著與對策研究」，臺灣省政府交通處港灣技術研究所，1997。
33. 饒正、陳桂清、李賢華、羅俊雄，「高雄港港工結構腐蝕與海生物附著研究」，臺灣省政府交通處港灣技術研究所，1999。
34. 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」，交通部運輸研究所，2002。
35. ISO 9224/1992: Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres –Guiding values for the corrosivity categories.
36. ISO 9225/1992: Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Measurement of pollution.
37. ISO 9226/1992: Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of corrosivity.
38. Corvo F. Haces C, Betancourt N., et al., Atmospheric corrosivity in the Caribbean Area. Corrosion Science, 1997, 39(5): 823-833.
39. Veleva L., Pérez G., Acosta M., Statistical analysis of the

temperature-humidity complex and time of wetness of a tropical climate in the Yucatán Peninsula in Mexico. *Atmospheric Environment*. 1997, 31(5): 773-776.

40. Morales J., Martin-Krijger S., Diaz F., et al., Atmospheric corrosion in subtropical areas: influences of time of wetness and deficiency of the ISO 9223 norm[J]. *Corrosion Science*, 2005, 47: 2005-2019.
41. Morales J., Diaz F., Hernandez-Borges J., et al., Atmospheric corrosion in subtropical areas: Statistic study of the corrosion of zinc plates exposed to several atmospheres in the province of Santa Cruz de Tenerife (Canary Islands, Spain)[J]. *Corrosion Science*, 2007, 49:526-541.
42. ISO 9223/2012: Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres – Classification, determination and estimation.
43. 孫飛龍、蔣荃、劉婷婷、劉玉軍、趙春芝、馬麗萍，「ISO 9224 大氣腐蝕性等級的指導值標準更新解讀」，*環境技術*，2015 年第 2 期，74-76 頁，2015。
44. ISO 9224/2012: Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres –Guiding values for the corrosivity categories.
45. ISO 9225/2012: Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Measurement of pollution.
46. ISO 9226/2012: Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of corrosivity.
47. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 13401 金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕性-分級、測定與評估，2019。
48. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 16238：2024 金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕性-腐蝕性級別의指引值，2024。
49. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 13754 金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕性(污染之測定)，1996。

50. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 13753 金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕性-測定標準試片之腐蝕速率以評估腐蝕性，2019。
51. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 14122 金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕 - 試片腐蝕生成物清除法，1997。
52. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS14123 金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕測試-現場測試之一般要求，2020。
53. ISO 8565/2011: Metals and alloys - Atmospheric corrosion testing - General requirements for field tests.
54. Metals Handbook- Corrosion, Metals Handbook Ninth Ed., Vol. 13, ASM International, Ohio, 1988.
55. Odnevall I., and C. Laygraf, "Atmospheric corrosion", ASTM STP 1239, W.W. Kirk and Herbert, H. Lawson, Eds., Philadelphia, 1995.
56. "Outdoor atmospheric corrosion", ASTM STP 1421, H. E. Townsend Ed., West Conshohocken, PA, 2002.
57. Gray K.O., "Environment of Deep Ocean Test Site, U. S. Naval Civil Engineering Laboratory, Technical Note, N-657", p.41, 1965.
58. Whitman W., R. Russell, V. Altieri, "Industrial Engineering Chemistry", Vol.16, p.665, 1924.
59. Fink F.W., "Corrosion of Metals in Seawater", U.S. Department of the Interior, Office of Saline Water, Research and Development Progress Report, No.46, 1960.
60. Uhlig H. H., "The Corrosion Handbook", (La Que), John Wiley and Sons, Inc., New York, p. 387-388, 1948.
61. Samuel A. Bradford H. H., "Corrosion Control", Van Nostrand Reinhold, New York, U.S.A., 1993.
62. LaQue, F. L., Marine Corrosion cause and Prevention, John Wiley & Sons, New York, 1975.

63. Roberge P.R., R.D. Klassen, & P.W. Haberecht, Atmospheric corrosivity modeling-a review. *Materials and Design*, 23, p.321-330, 2002.
64. Corvo, F., Perez, T., Dzib, L. R., Martin, Y., Castañeda, A., Gonzalez, E., & Perez, J. Outdoor–indoor corrosion of metals in tropical coastal atmospheres. *Corrosion Science*, 50(1), p.220-230, 2008.
65. Luo J. S., Y. H. Liu , H. P. Chen , Y. F. Chiu , K. C. Chen , J. L. Ko Comparison of Seasonal Atmospheric Corrosion in Taiwan *Journal of Chinese Corrosion Engineering*, Vol. 25, No. 2, p.55 - 68, 2011.
66. Mendoza, A.R., & Corvo, F., Outdoor and indoor atmospheric corrosion of carbon steel. *Corrosion Science*, 41, p.75-86, 1999.
67. Legault R.A., and V.P. Pearson, in: *Atmospheric factors affecting the corrosion of engineering metals* ASTM STO, 646, ASTM, Philadelphia, 1978.*engineering metals* ASTM STO, 646, ASTM, Philadelphia, 1978.
68. Pourbaix M., *The Linear Bilogarithmic Law for Atmospheric Corrosion in Atmospheric Corrosion*, W.H. Ailor, Ed., John Wiley & Sons, 1982.
69. Morales J., F. Diaz, J. Hernandez-Borges, S. Gonzalez and V. Cano, *Corrosion Science*, No. 49, p.526-541, 2007.
70. Su F.R., Investigate the corrosion relationship of atmosphere and metal, National Taiwan University Department of Environmental Engineering Master's Thesis, 1988.
71. Tsai K.J., Electricity atmospheric corrosion testing and related materials database set up summary report, Industrial Technology Research Institute, Taiwan Power Research Institute, 1993.
72. Chou S.F., C.J. Wang, J.S. Luo, Y.F. Chiu, K.C. Chen, J.L. Ko, A Regression Model for Predicting the Corrosion Rate of Zinc in Taiwan *Journal of Chinese Corrosion Engineering*, Vol. 25, No. 4, p.219-230, 2011.

73. Lo C.M., L.H. Tsai, M.D. Lin, Correlation between carbon steel corrosion and Atmospheric factors in Taiwan, in: Proceedings of the 19th International Corrosion Congress, Jeju Korea, 2014.
74. ISO 8407/2009: Corrosion of metals and alloys —Removal of corrosion products fromcorrosion test specimens, 2009.
75. 謝幼屏、蔡立宏、鄭登鍵，「113 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與鋅金屬關聯性研究」，交通部運輸研究所，2025。
76. Ryan, T. P., Modern Regression Methods, New York, NY: Wiley-Interscience, 2009.
77. Tabachnick, B., and L. Fidell, Using Multivariate Statistics (5th ed.), Boston, MA: Pearson/Allyn & Bacon, 2007.



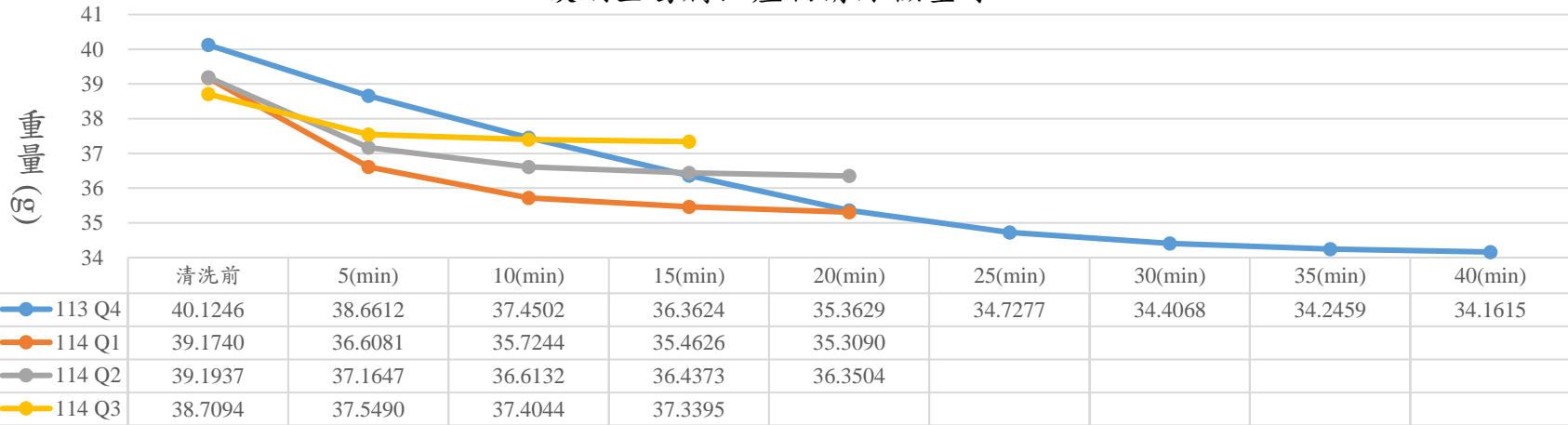
## 附錄一

腐蝕生成物清除檢量線、腐蝕速率等  
位線分布圖及腐蝕環境分類圖

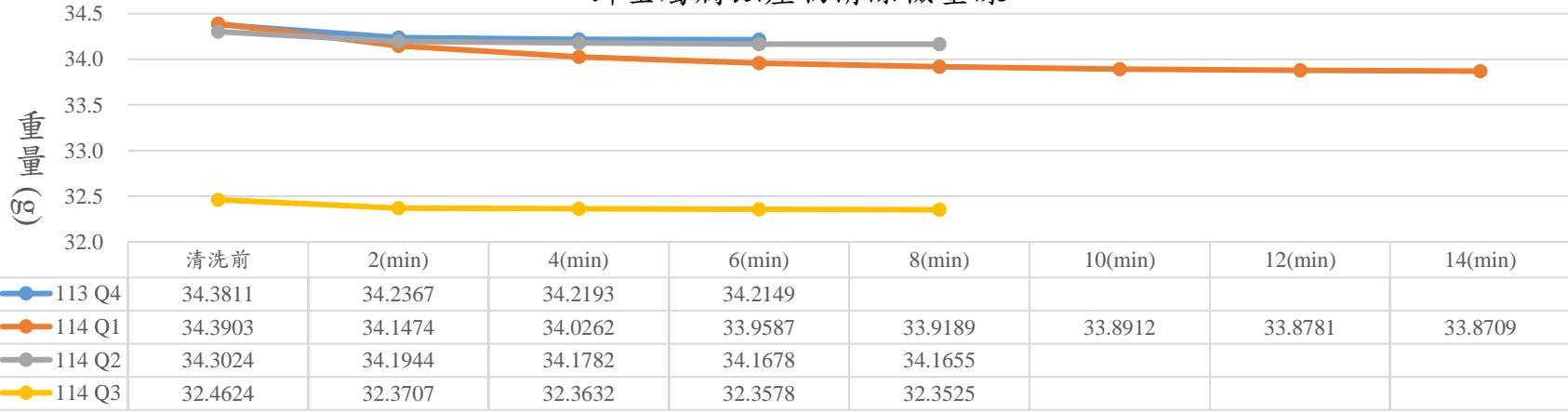


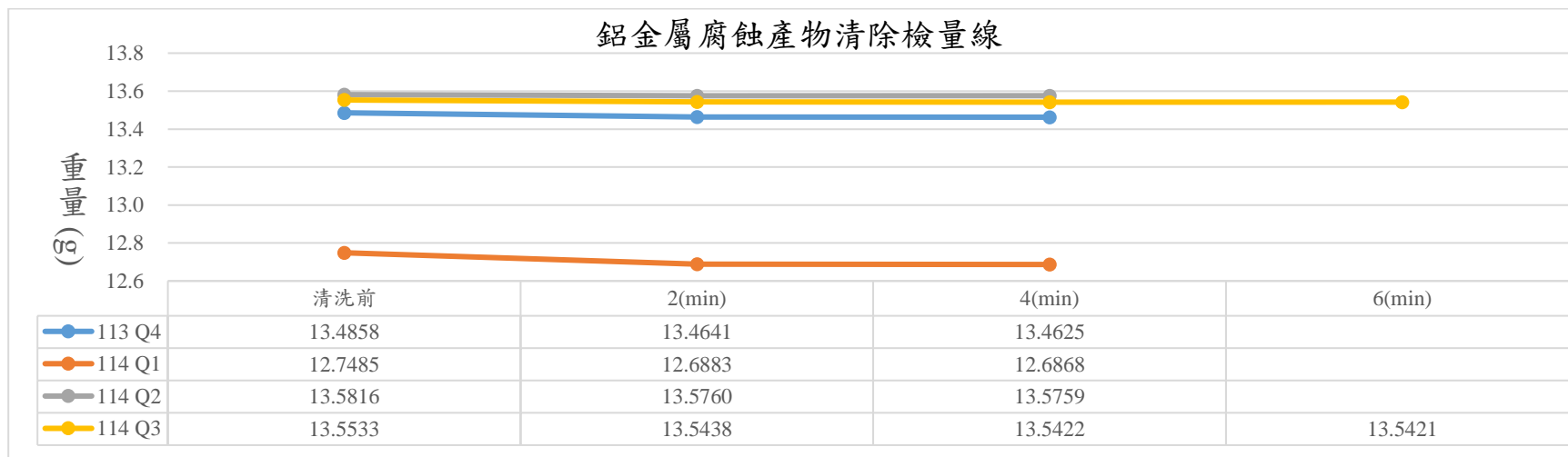
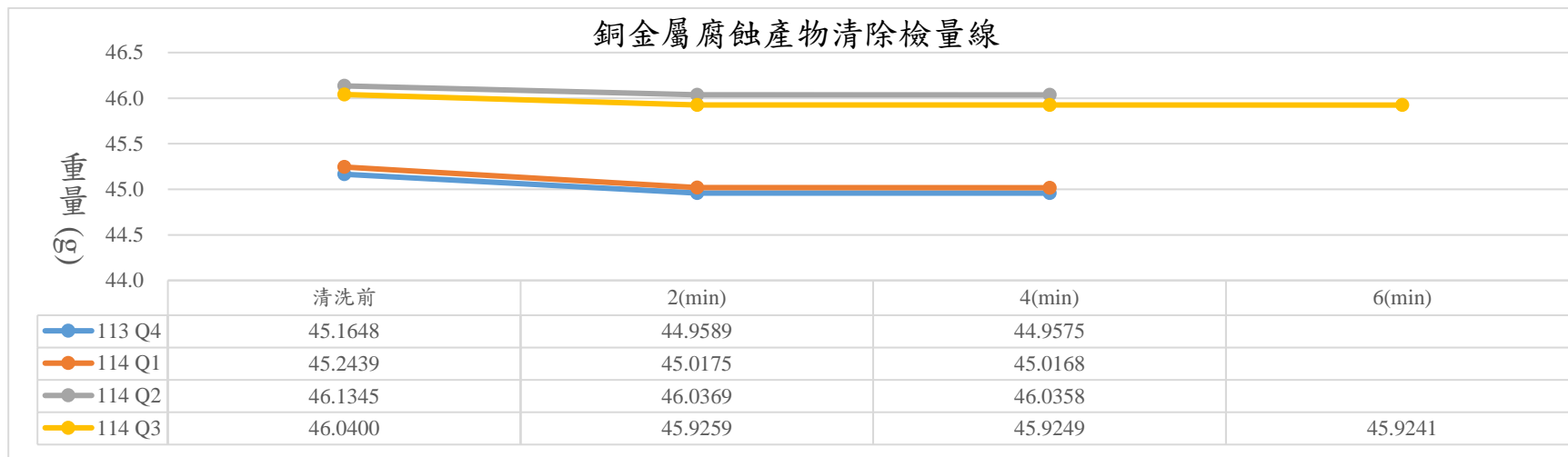
## 腐蝕生成物清除檢量線

### 碳鋼金屬腐蝕產物清除檢量線



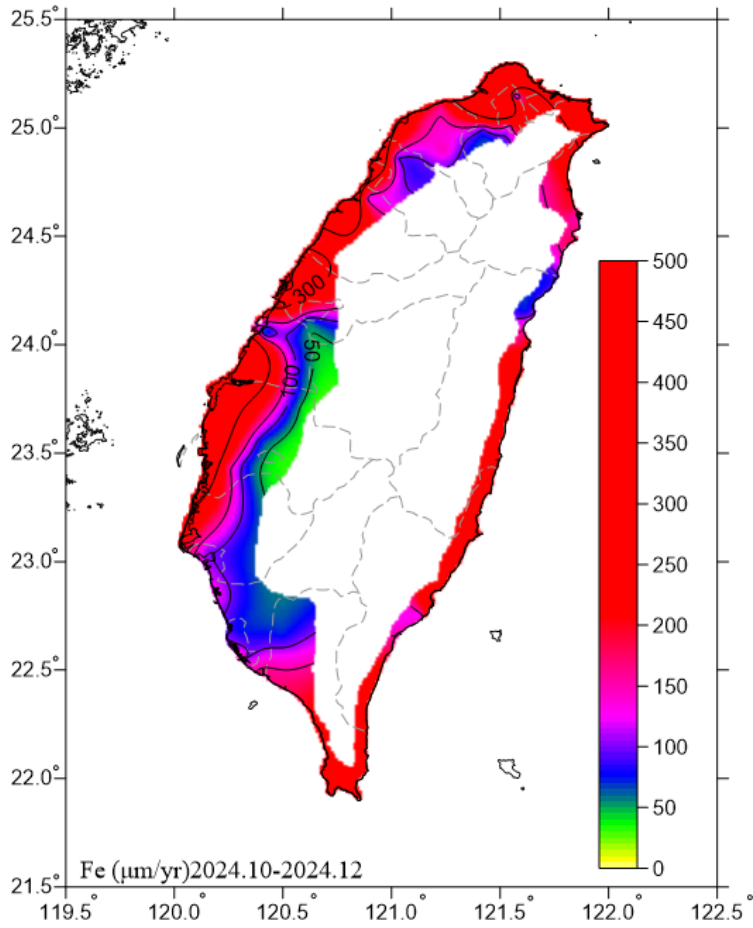
### 鋅金屬腐蝕產物清除檢量線



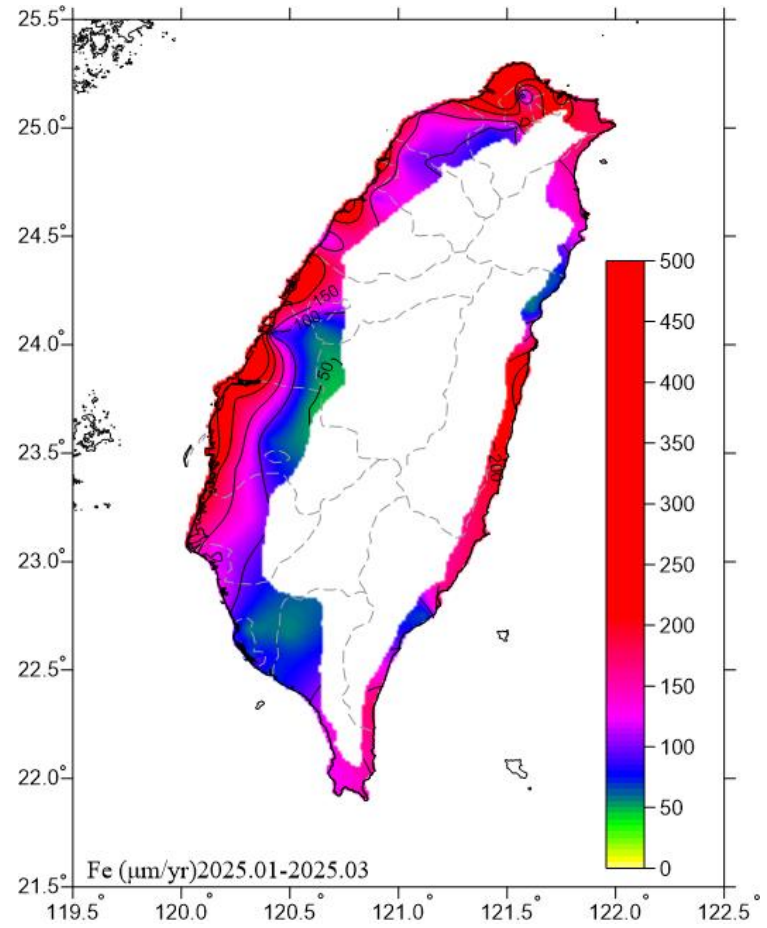


### 腐蝕速率等位線分布圖

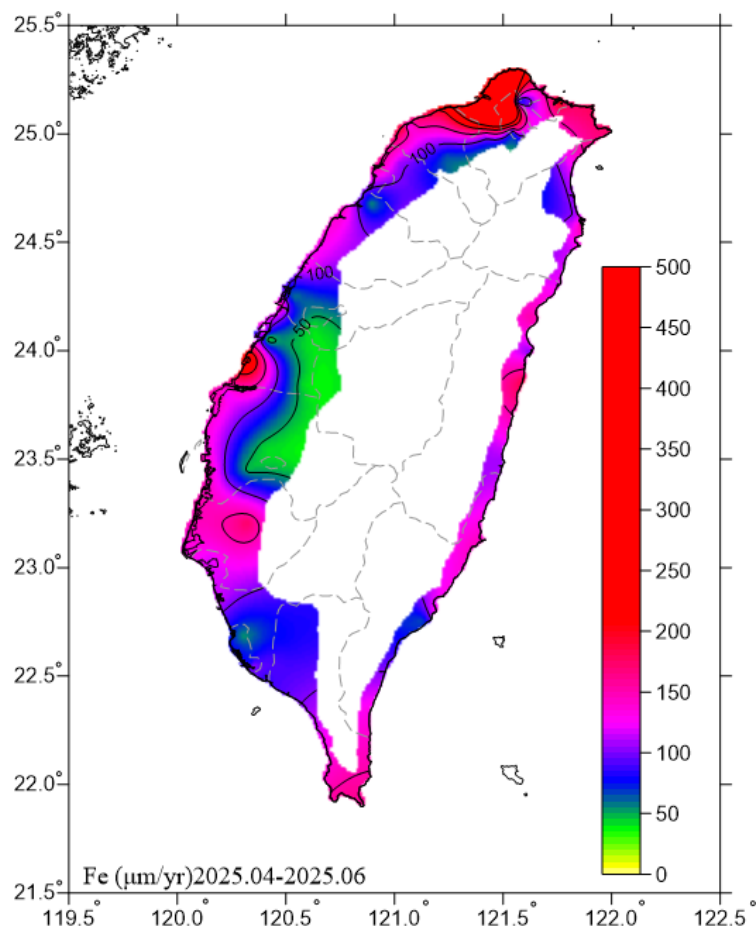
附錄 1-3



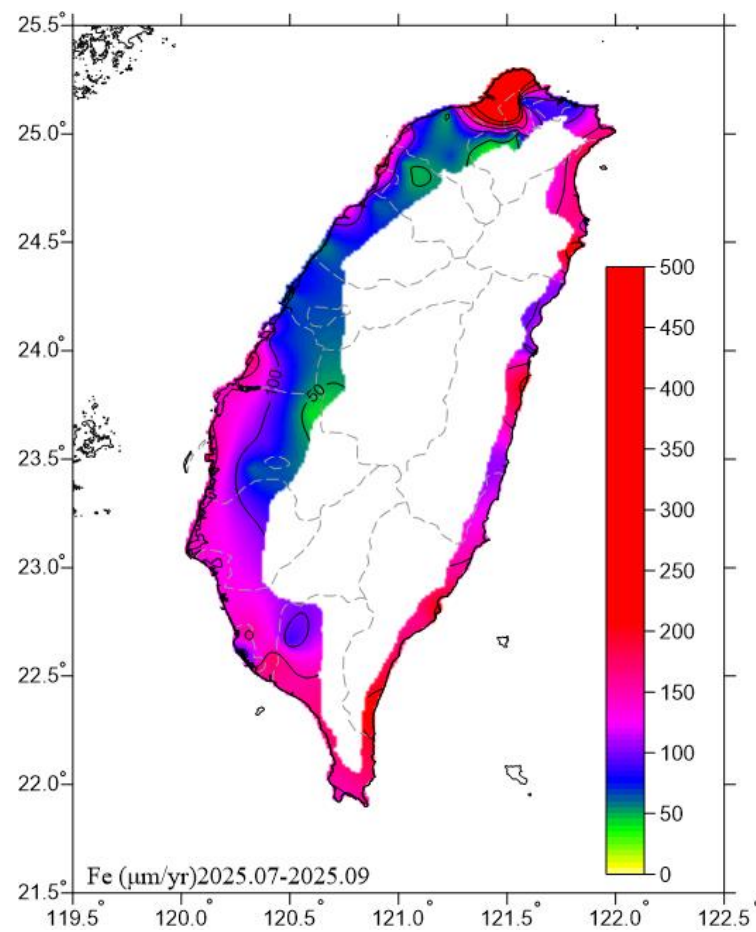
2024.10-2024.12 碳鋼腐蝕速率圖



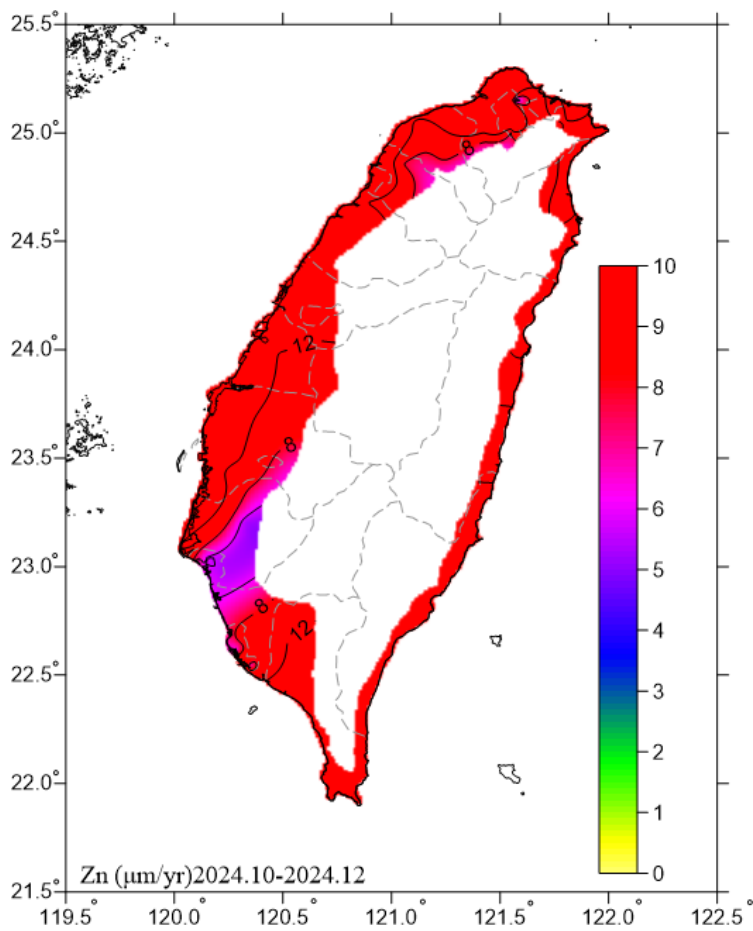
2025.01-2025.03 碳鋼腐蝕速率圖



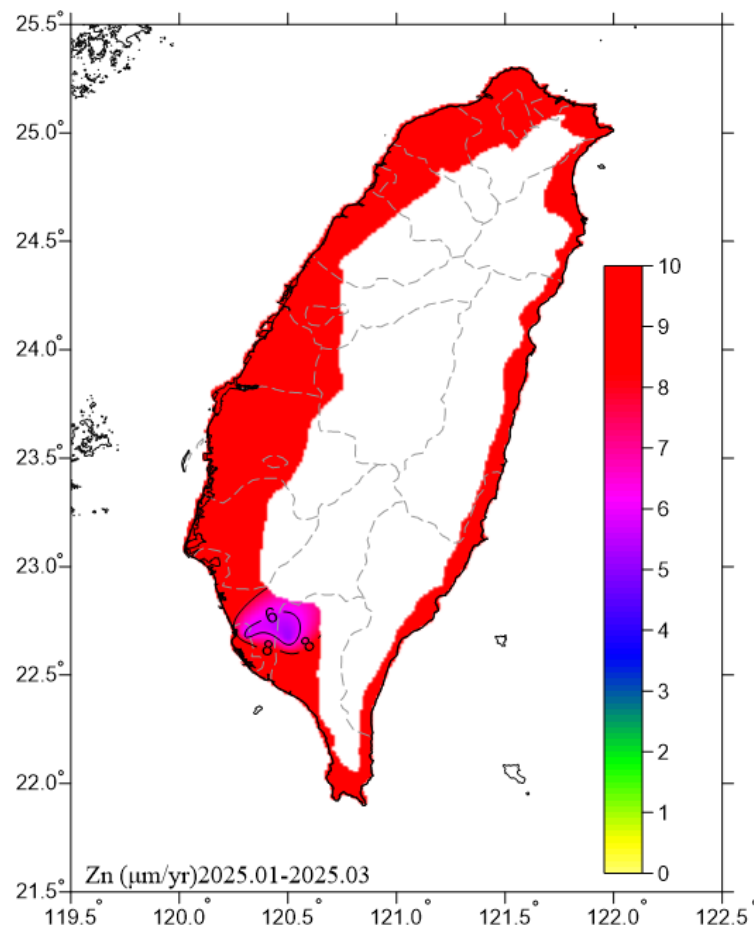
2025.04-2025.06 碳鋼腐蝕速率圖



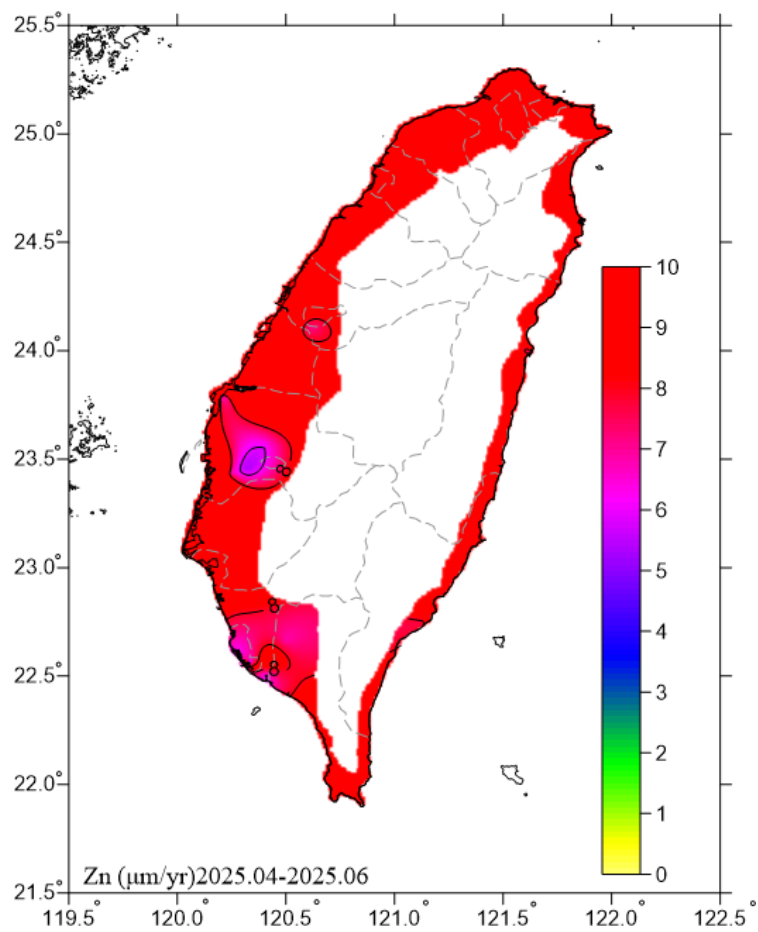
2025.07-2025.09 碳鋼腐蝕速率圖



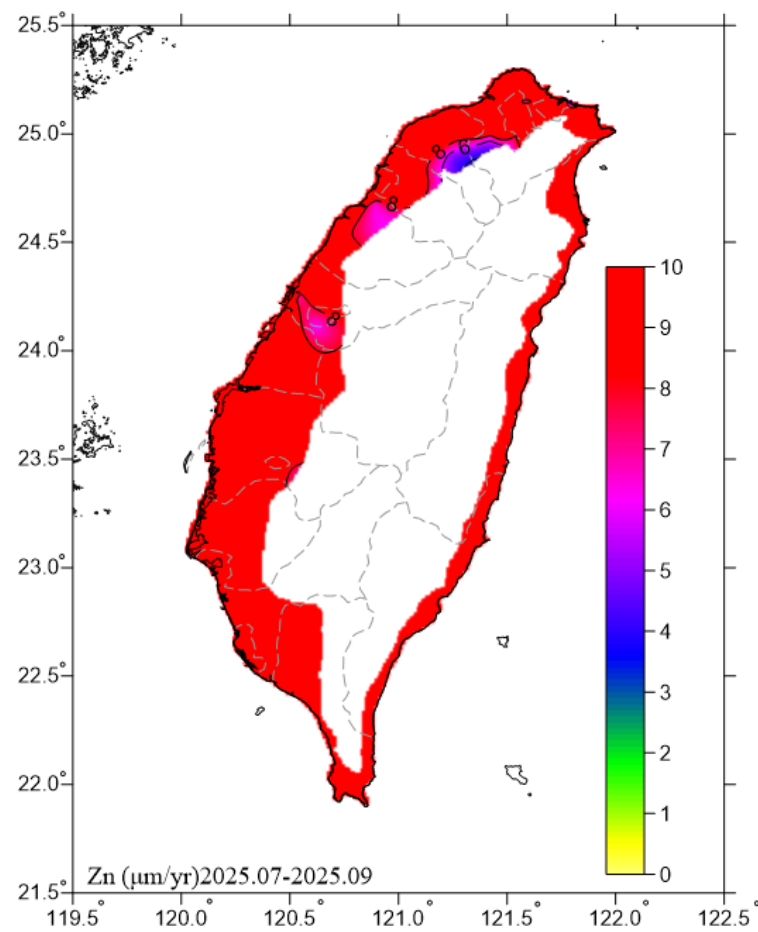
2024.10-2024.12 鋅腐蝕速率圖



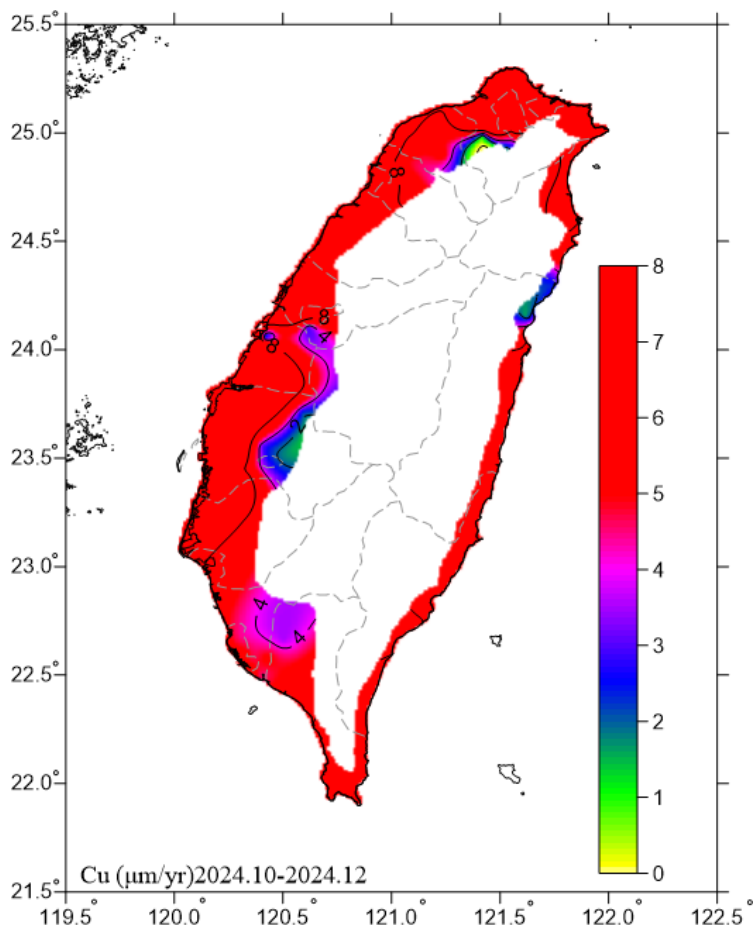
2025.01-2025.03 鋅腐蝕速率圖



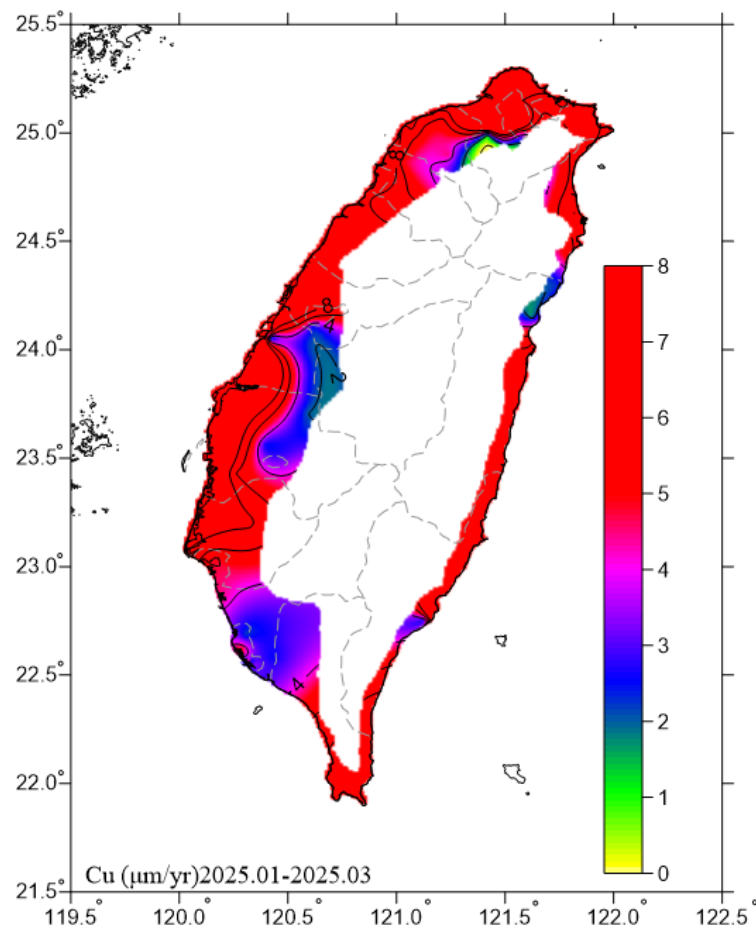
2025.04-2025.06 鋅腐蝕速率圖



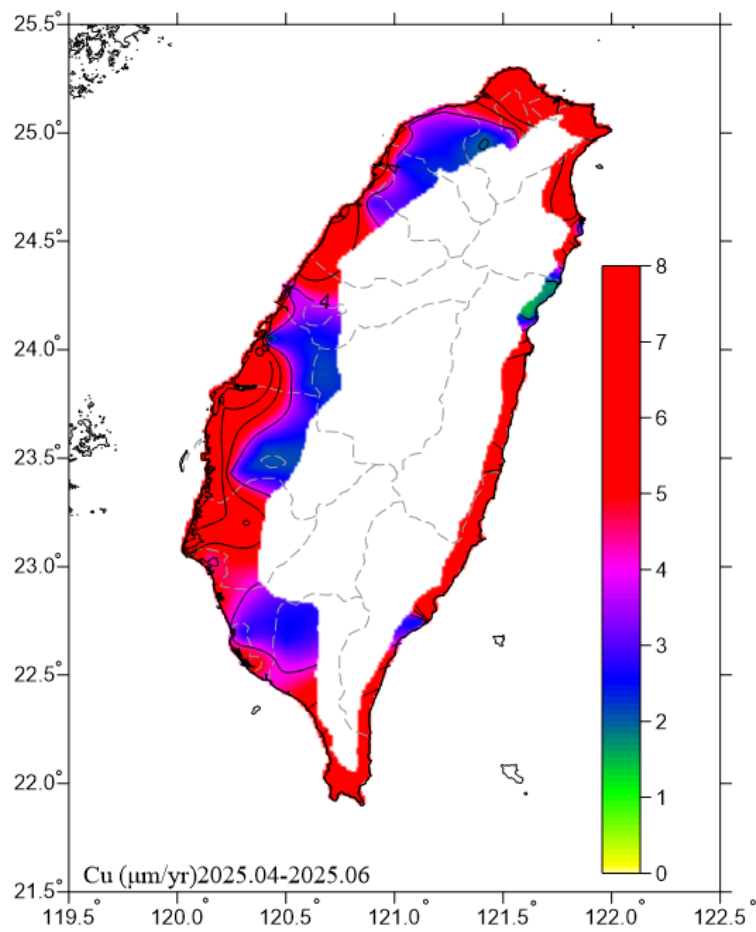
2025.07-2025.09 鋅腐蝕速率圖



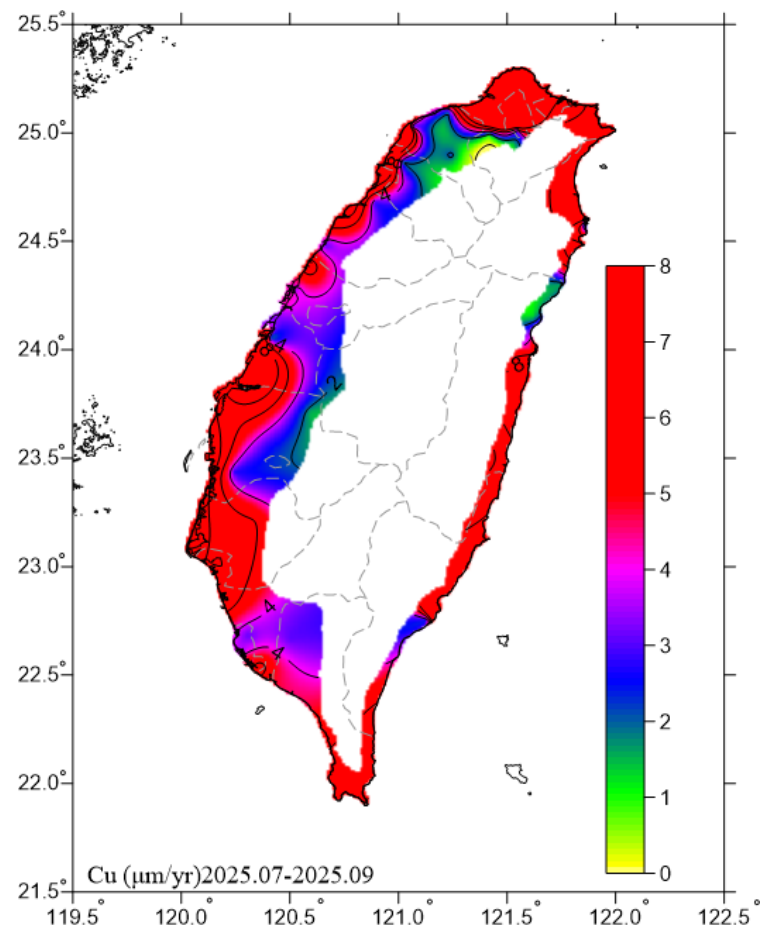
2024.10-2024.12 銅腐蝕速率圖



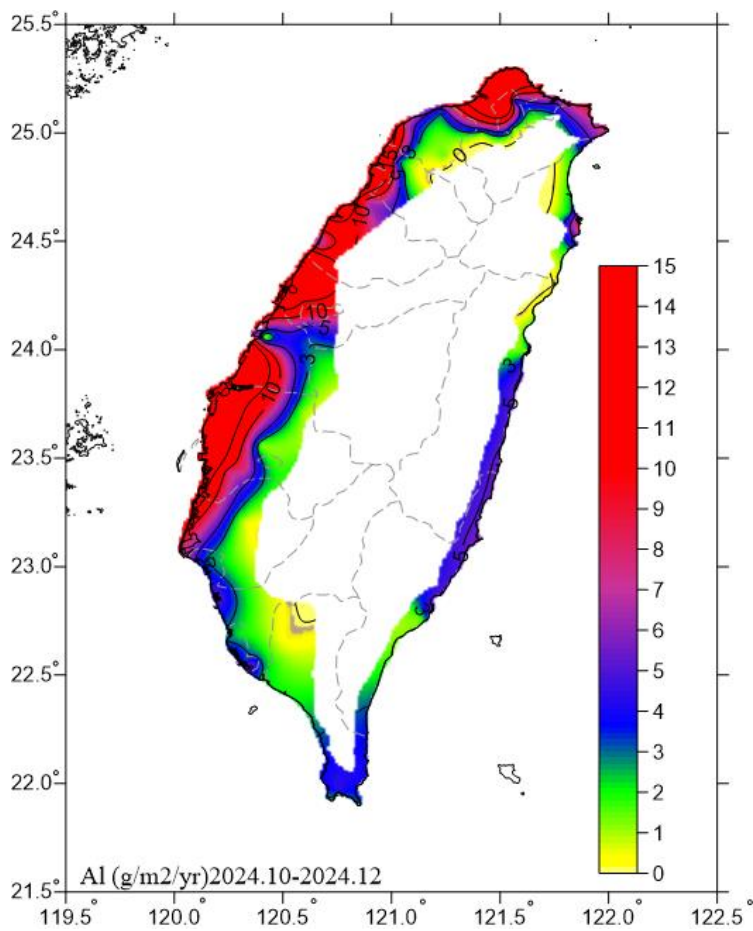
2025.01-2025.03 銅腐蝕速率圖



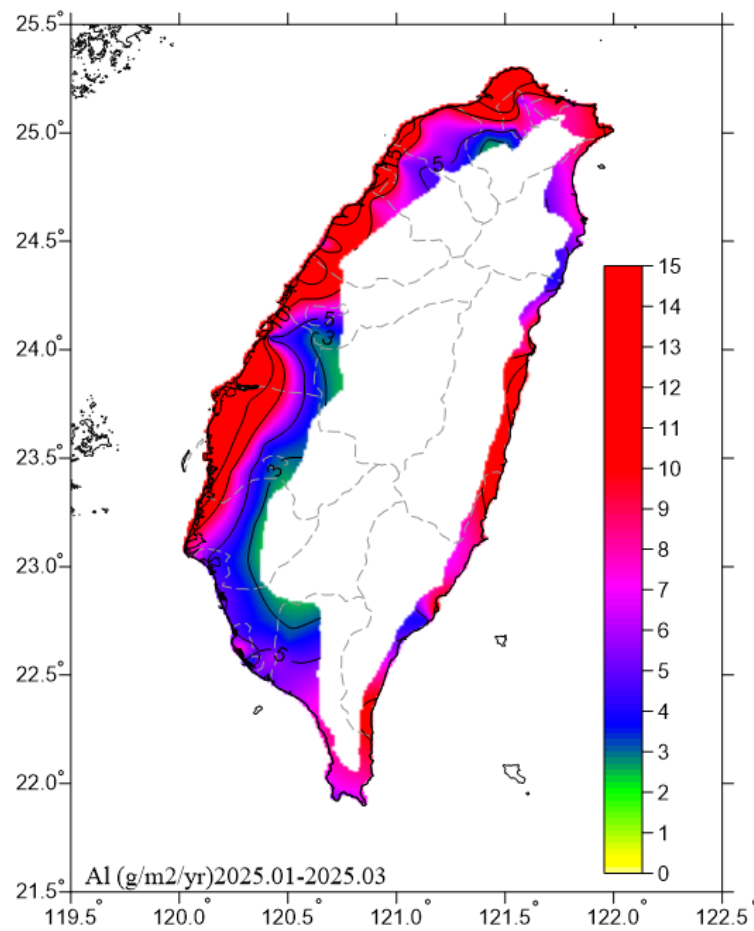
2025.04-2025.06 銅腐蝕速率圖



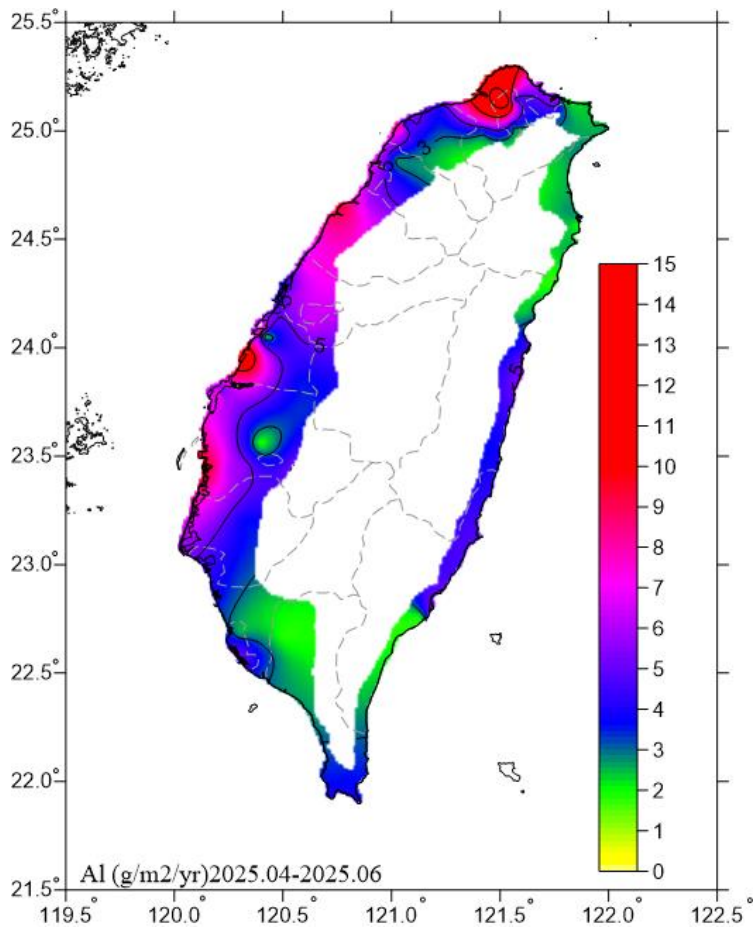
2025.07-2025.09 銅腐蝕速率圖



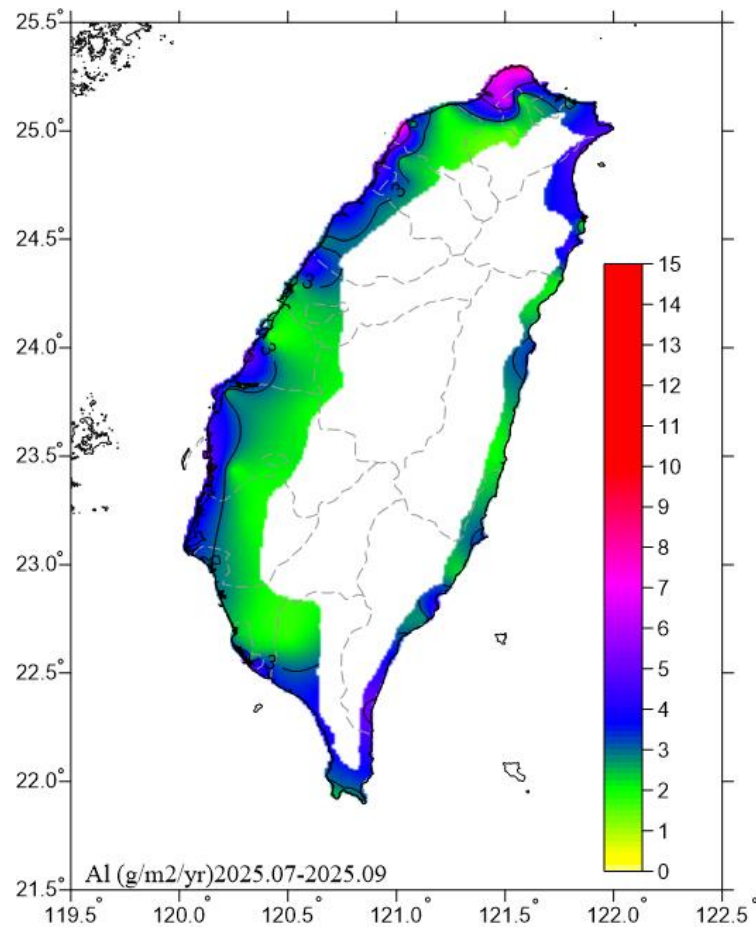
2024.10-2024.12 鋁腐蝕速率圖



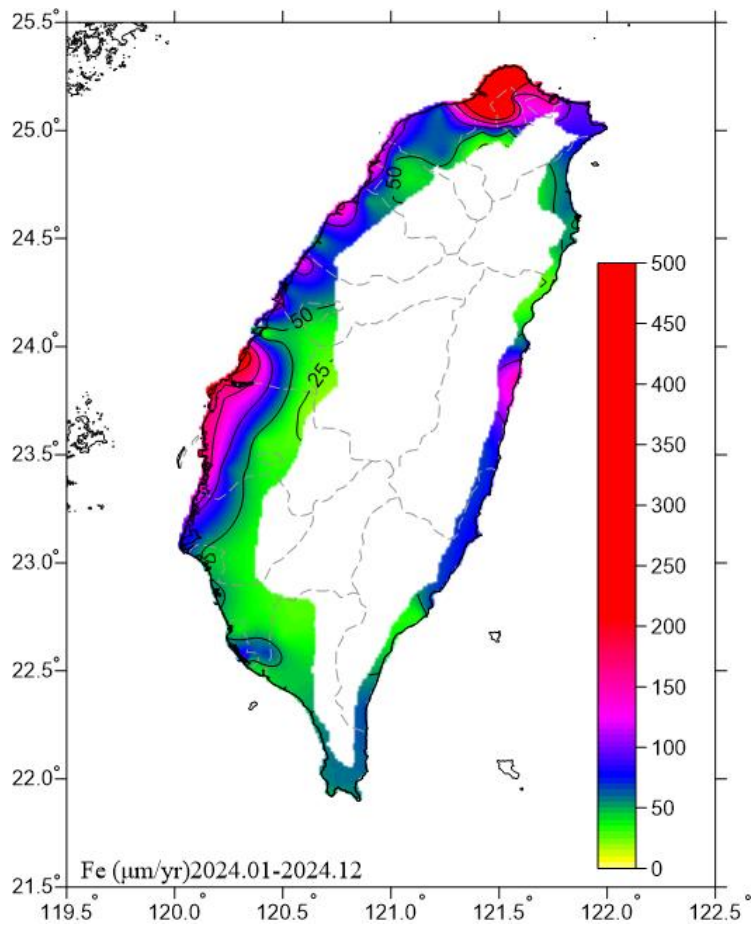
2025.01-2025.03 鋁腐蝕速率圖



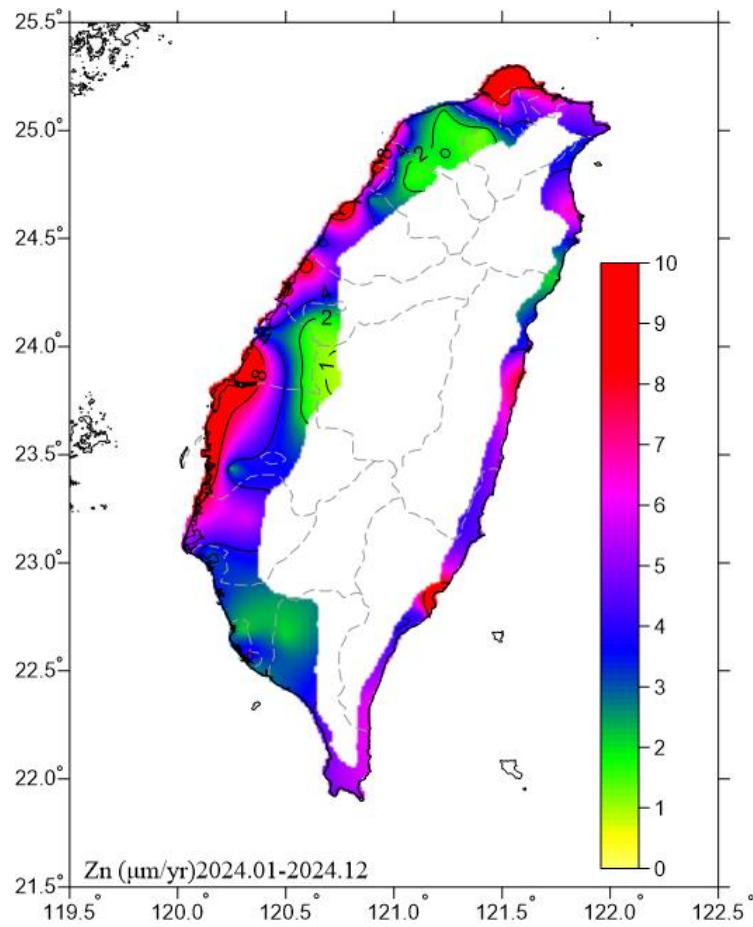
2025.04-2025.06 鋁腐蝕速率圖



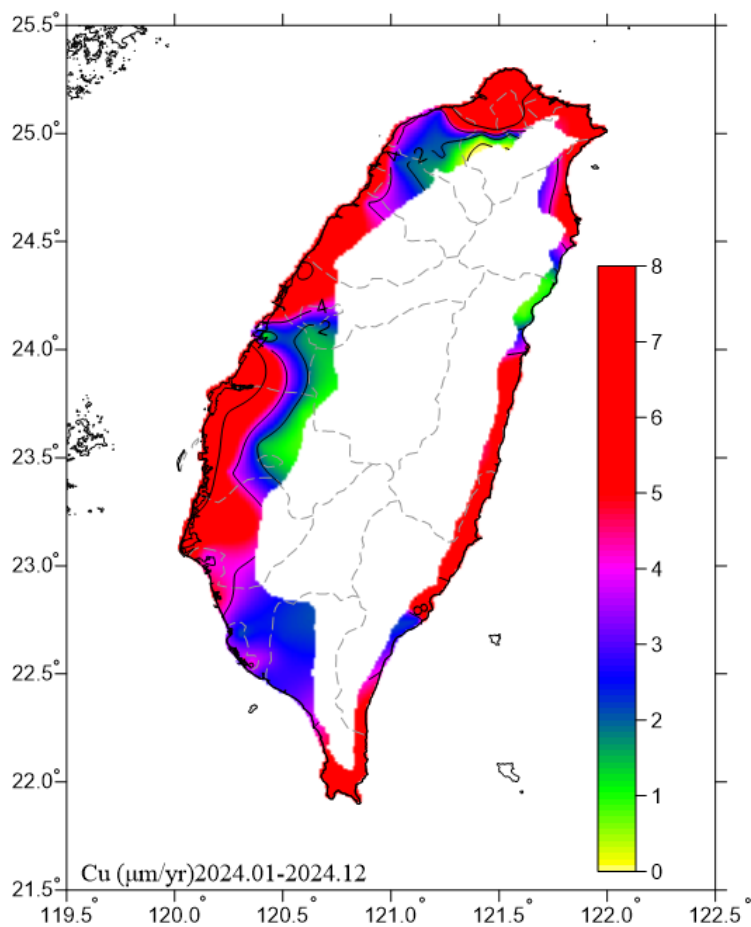
2025.07-2025.09 鋁腐蝕速率圖



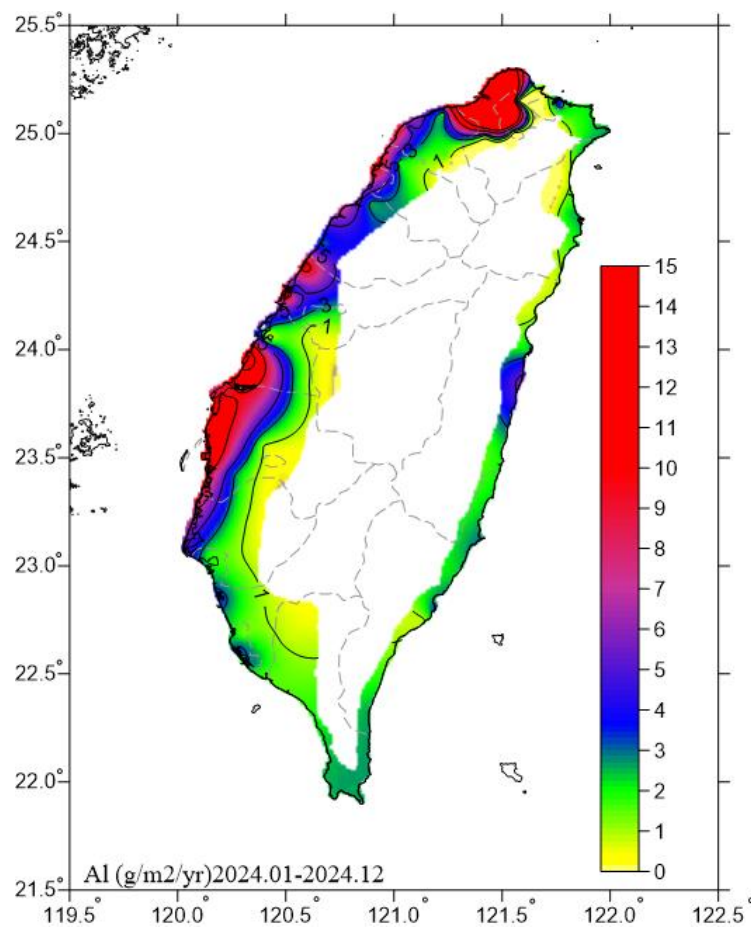
2024 年一年期碳鋼腐蝕速率



2024 年一年期鋅腐蝕速率



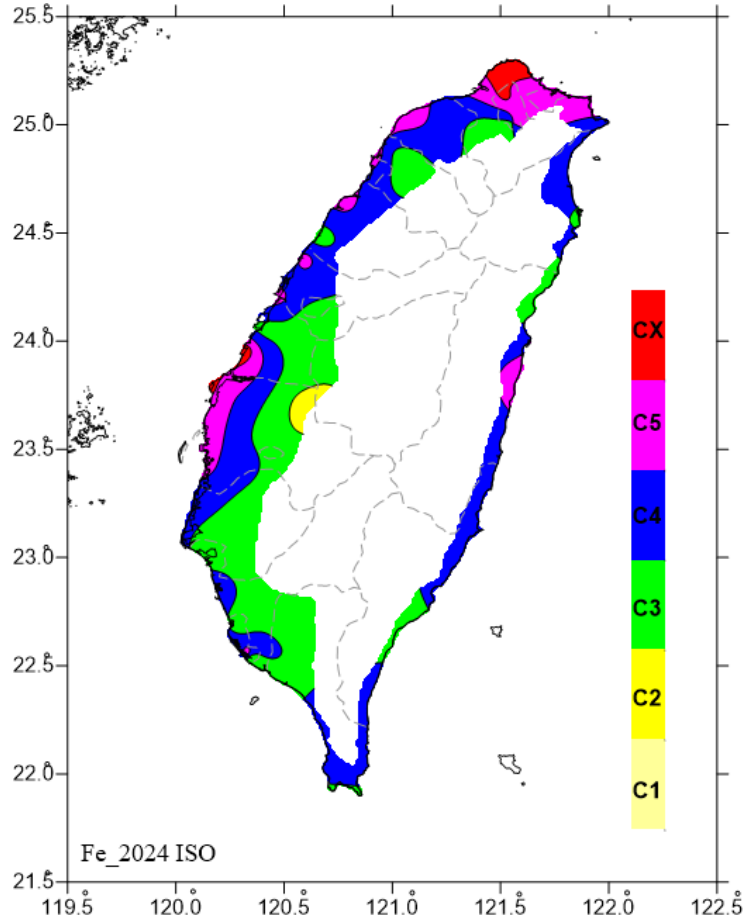
2024 年一年期銅腐蝕速率



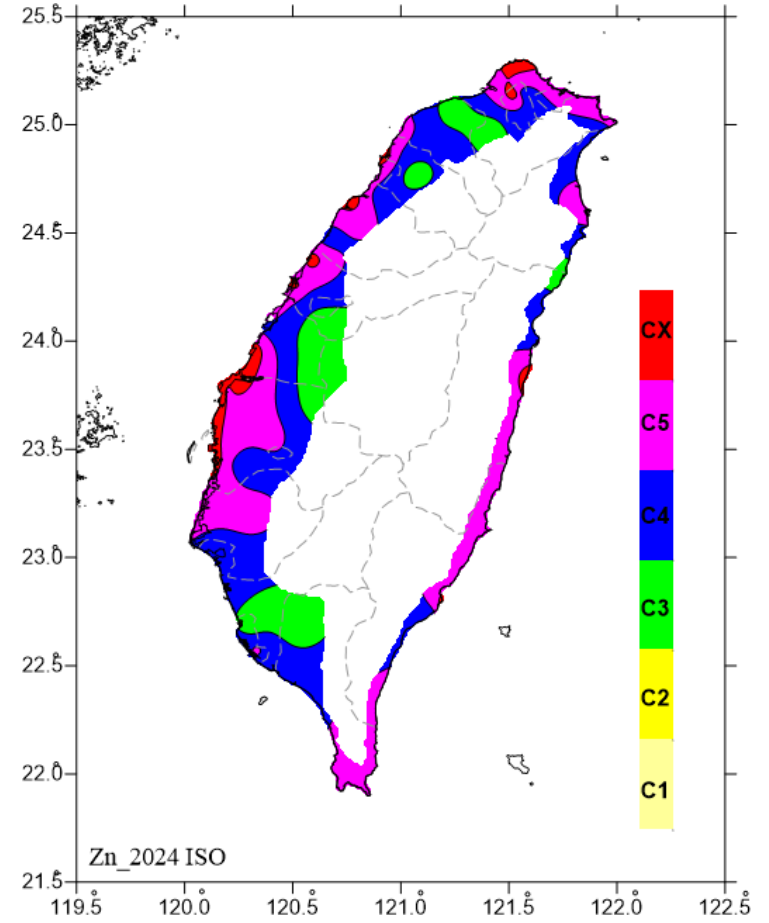
2024 年一年期鋁腐蝕速率

註：臺灣山區試驗站屬鄉村地區，與沿海地區、工業區之地區特性差距大，不適合一併繪製等位線圖，爰圖中以空白表示。

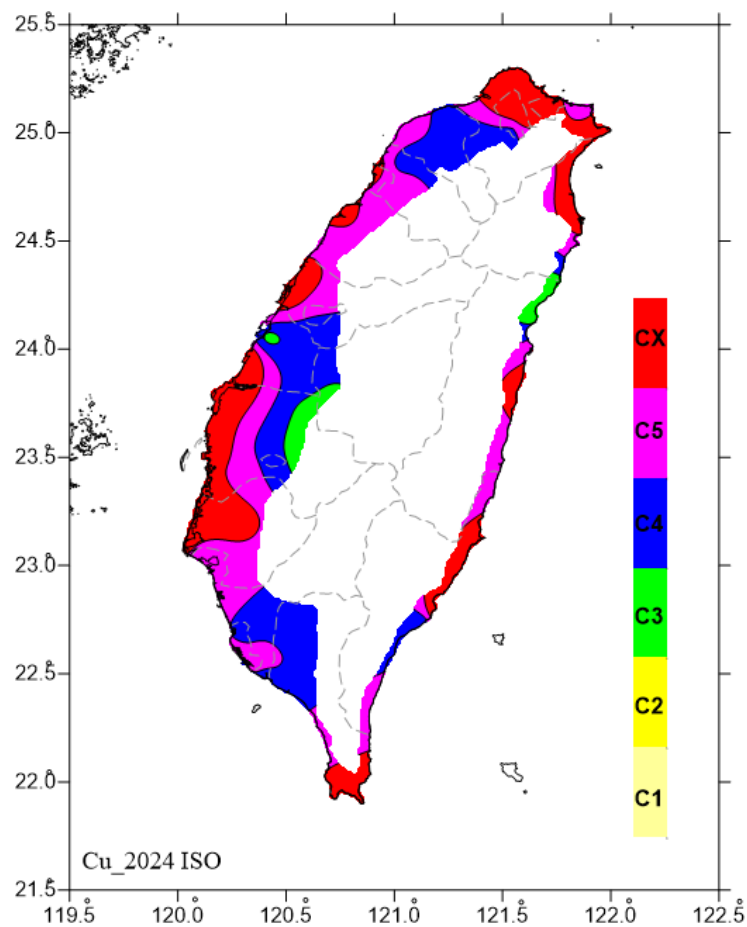
### 腐蝕環境分類圖



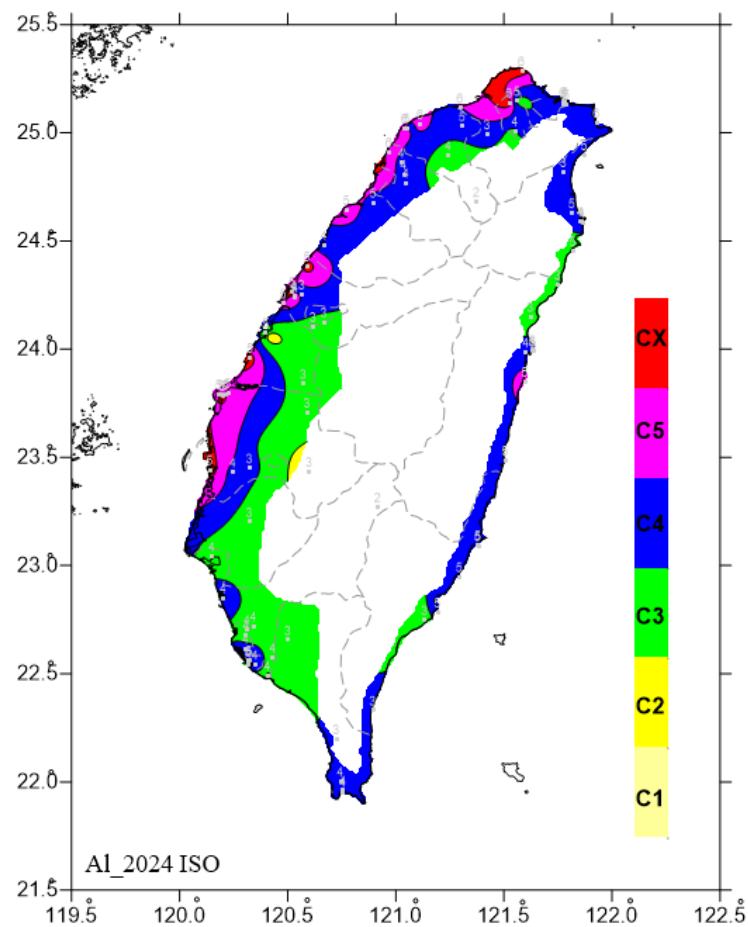
2024年碳鋼年腐蝕速率 ISO 分類



2024年鋅年腐蝕速率 ISO 分類圖



2024 年銅年腐蝕速率 ISO 分類圖



2024 年鋁年腐蝕速率 ISO 分類圖

註：臺灣山區試驗站屬鄉村地區，與沿海地區、工業區之地區特性差距大，不適合一併繪製腐蝕環境分類圖，爰圖中以空白表示。

## 附錄二

### 專家學者座談會會議紀錄



## 交通部運輸研究所運輸技術研究中心會議紀錄

壹、會議名稱：本所運技中心第一科 114 年度自行研究計畫專家學者  
座談會議

貳、時間：114 年 5 月 12 日(星期一)上午 9 時 30 分

參、地點：本所運輸技術研究中心 2 樓簡報室

肆、主持人：蔡立宏主任 紀錄：鄭登鍵

伍、出單位及人員：如簽到表

陸、與會委員意見：

### 一、吳委員松旺

(一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護  
成效評估及技術推廣

1. 本工法適用於如大甲溪此類卵礫石河床，而臺灣的河川環境及地質具多樣性，在感潮區河川、泥砂或泥岩等環境是否可用其他的方式來保護橋基，建議後續可規劃針對相關的場域下橋基保護之研究。
2. 建議可建立本工法之 SOP 做為施工說明書，提示施工細節、步驟，以利後續推廣執行。

(二) 橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估

目前箱內檢測還是以人力為主，無法用機器取代，本工務段可安排本案研究人員參與箱內檢測作業，實際參與執行體會實務困難及盲點。

(三) 114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

本工務段轄區國道 3 號竹南西至後龍段，因近海盤式支承鏽蝕嚴重，目前預計以手動或噴砂方式除鏽，若有研究參考需求可安排至現場案例蒐集。

### 二、柯委員永彥

(一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護  
成效評估及技術推廣

1. 現場驗證使用 UAV 進行拍攝，如何針對水下沖刷部分進行觀察？
2. 本研究大甲溪河床屬於卵礫石，若針對不同性質之河床應如何調整或可直接適用？建議後續規劃相關延續性之研究。
3. 本研究建議可將計畫施作經驗回饋修正，如於現場工法之最佳配置、注意事項、步驟等補充說明。

#### (二) 橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估

橋梁檢測方法相當多，包涵目視檢測及非破壞性檢測，建議透過訪談及現場觀摩，聚焦於實務需求。

#### (三) 114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

本案之研究場域是否有機會擴增至離岸風電之範圍？

#### (四) 港灣構造物巡查檢測作業精進(4/4)-新興科技應用於其他設施巡查檢測作業

港灣構造物之管理相當重要，本研究今年度為最後一年，建議後續研究可從巡查檢測提升到監測，可節省人力並獲得更全面之資料。

#### (五) 港區地震液化風險評估模式精進(4/5)-花蓮港及安平港模式精進

本研究今年做花蓮港即可蒐集 2018、2024 年震災之案例，做實際案例之對照。

#### (六) 氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響

本研究可與臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查研究搭配，將 RC 構件佈放於各實驗場域做測試。

### 三、林委員健明

#### (一) 港灣構造物設計基準(草案)修訂之盤點

1. 須因應氣候劇烈所生颱風豪雨，造成既有排水設施無法消退之積水及淹水。
2. 因應船舶大型化，碰墊規格尺寸需變大，是否影響碼頭結

構？

(二) 114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

碼頭水下構造物為鋼板樁或鋼管樁結構，海水腐蝕劣化因子是否有針對各港海氣候條件分別研究？

(三) 港區地震液化風險評估模式精進(4/5)-花蓮港及安平港模式精進

1. 本研究為 5 年期研究之第 4 年，相關的資料蒐集，主要以生成式 AI 蒐集國內外液化評估之文獻，請注意 AI 工具使用之實際性。
2. 花蓮港於 113 年 0403 地震中受創嚴重，相關研究資料陸續產出，請貴中心針對潛勢液化高之碼頭，提出具體建議以減少地震所帶來之災損。

四、王委員朝正

1. 8 個計畫包括基本資料建立、資料運用方法及管制檢測技術評估與應用，符合運技中心設立之目的。
2. 建議研究成果每年發表，依查核點審查並分享研究成果。
3. 建議貴中心持續讓工作同仁接受 AI 之相關訓練。

(一) 114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

碳鋼及鋅去年已建立關聯性，建議今年成果能帶入進行確認，並進行 AI 學習。

(二) 氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響

鋼筋混凝土之劣化，鹽份、水份不可或缺，但若水量夠大是能沖掉鹽份，建議水量、時雨量及次數列入參數。

五、楊委員秉順

(一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護成效評估及技術推廣

1. 橋基沖刷涉及河床質種類、河床斷面、河床高程、基礎形式等狀況有不同影響，本案經歷多年試驗與現地驗證具有效益性，建議可載明本案適用性範圍。

2. 可研議採用檢核表方式，對於有橋基沖刷之機關，只要針對檢核表內容勾選，即可知道是否可採用本方法，並於表中針對不同狀況提供織布配置建議方式，以方便依循。

## (二) 橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估

1. 目前箱內檢測面臨人員安全、設備限制，狀況甚多，建議可先針對不同箱內情況了解。
2. 因為箱內狀況不同，有混凝土橋、鋼構，且隔梁人孔有管線或是箱內有錨頭等狀況甚多，建議後續歸納各種狀況之適用性方式。
3. 無管線、阻礙物或高低差等影響隔梁人孔之箱內環境，可研議採自動軌道之可行性。
4. 如屬較複雜有阻礙物之箱內環境，可研議採人員先蒐集箱內高解析之照片與影片，事後採用影像標註及檢測評分等方式可行性，減少人員停留時間。

## (三) 港灣構造物設計基準(草案)修訂之盤點

本草案有規範相關土壤液化計算方式，建議可研議將港區地震液化風險評估模式精進等相關案例納入。

## (四) 鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討

1. 邊坡情況甚多，有落石、土石流、倒懸、危木或節理開裂等問題，建議收集資料後先研擬預計 AI 判釋之方向。
2. 以公路局而言，RHRS 已有相關檢核表與評分機制，未來如能導入 UAV 等自動判釋相關邊坡分級數值，將可迅速分類。

## (五) 114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

1. 本案歷年對於橋梁設計具有相當的助益，惟目前僅能以腐蝕等級由設計單位採用膜厚設計或耐久性設計等考量，建議本案後續可建立各區域相關設計參數，讓設計單位更能直接採用。
2. 因關渡橋與未來淡江大橋皆位於淡水河出海口，建議可於該處新增相關試驗。

(六) 氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響

1. 目前採用4種不同溫室氣體情境來研究鋼筋腐蝕速率模型計算，未來於不同現地上如何採用相關設計參數？
2. 本案提及選取一座鋼筋混凝土橋梁評估鋼筋腐蝕，是否已有選定？未來如何與模型相互驗證？

六、李委員坤哲

(一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護成效評估及技術推廣

1. 沖刷因子涉及流量、水深、福祿數、河床質..等等，本案目前採大甲溪案例，未來可擴充其他條件下之探討，如砂土、粉土質粒料，並據以調整織布，提升保護工耐久性。
2. 建議後續年度如繼續執行，可增加沖刷計算與水工試驗及現地試驗之比較，可推求不同條件下之成效。
3. 水利機關近年有辦理大甲溪疏濬工程，請注意地形及流況改變之影響。

(二) 橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估

1. 目前橋梁箱內檢測時，人員進出人孔之墜落風險及箱內局限空間為高風險等級。
2. 國內之前嘗試過之案例包括 UAV、Lidar、橋梁檢測機器人，因箱內構件複雜、管線遮蔽物、人孔位置不一、定位等困難，有諸多問題待克服。
3. 本案研究員後續將實際進入箱內查訪，對發掘問題及工具之開發應有極大幫助。

(三) 鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討

目前邊坡主管單位之邊坡分級制度有定性及定量兩部分，其分級需要大量人力進行資料之判讀及更新，如能在適當點導入 AI，並配合邊坡監測系統，將對邊坡預警及防災大有裨益。

柒、結論：

感謝各位委員提供本所相當寶貴之專業建議，請案關業務同仁將委員意見納入參採，以符合實際應用面，並提升研究成果之廣度及實用性。

捌、散會：上午 11 時 30 分

### 會議簽到表

壹、會議名稱：本所運技中心第一科 114 年度自行研究計畫專家學者座談會議

貳、時間：114 年 5 月 12 日(星期一)上午 9 時 30 分

參、地點：本所運輸技術研究中心2樓簡報室

肆、主持人：蔡主任立宏 蔡立宏

伍、出席單位及人員：

所外委員	簽名
林委員健明	林健明
楊委員秉順	楊秉順
吳委員松旺	吳松旺
柯委員永彥	柯永彥
李委員坤哲	李坤哲
王委員朝正	王朝正
第一科	賴瑞蓮 顏麗香 張道光 曾文傑 王浩源 胡俊文 鄭登建 賴俊呈 黃子強 謝幼梅 黃煜辰
第二科	李信穎
第三科	林雅雯



## 附錄三

### 第 1 次工作會議紀要



# 114 年 6 月工作會議紀要

會議名稱：「本所運輸技術研究中心第一科 114 年自行研究計畫」第 1 次工作會議

時間：114 年 6 月 30 日(星期一)上午 10 時至 13 時

地點：本所運輸技術研究中心 5 樓第一會議室

主持人：賴瑞應科長

出席者：如後附簽到表

紀錄：鄭登鍵

## 壹、討論議題/計畫名稱

### 一、工作進度說明

- (一)鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護成效評估及技術推廣
  - 1. 相關三維數值水理分析文獻資料之蒐集。
  - 2. 本工法施工說明書撰擬、現場觀測執行及三維數值分析模型建置情形。
  - 3. 階段性成果應用說明。
- (二)橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估
  - 1. 國內橋梁箱型梁結構型式分類介紹。
  - 2. 橋梁箱內檢測規定及實務問題說明。
  - 3. 6 月專家學者諮詢及實務單位訪談內容說明。
- (三)港灣構造物設計基準(草案)修訂之盤點
  - 1. 彙整及回顧臺灣港灣構造物設計基準發展歷程。
  - 2. 彙整及回顧日本「港灣の施設の技術上の基準・同解説」之變遷。
  - 3. 調查及蒐集「港灣構造物設計基準(草案)」所參考引用國內

外標準或規範之最新版本。

(四)鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討

1. 已蒐集之國內外 AI 於邊坡相關研究文獻說明。
2. 專家學者諮詢及實務單位訪談規劃。
3. 國營臺灣鐵路股份有限公司邊坡分級制度介紹。

(五)114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

1. 完成第 1~2 季大氣腐蝕因子調查與金屬材料現地暴露試驗工作，持續辦理第 3~4 季工作。
2. 完成出版年報與辦理研習會工作，後續工作重點在進行銅金屬關聯性分析工作。

(六)港灣構造物巡查檢測作業精進(4/4)-新興科技應用於其他設施巡查檢測作業

1. 各港區其他設施之巡檢項目與維護管理制度彙整與研析。
2. 其他設施常見之劣化項目探討。

(七)港區地震液化風險評估模式精進(4/5)-花蓮港及安平港模式精進

1. 彙整液化評估法相關文獻，並蒐集花蓮港及安平港近 10 年新建设工程所增加之地質鑽探資料。
2. 初步完成花蓮港及安平港地質鑽探資料盤點。

(八)氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響

1. AR6 統計降尺度資料之篩選及資料處理流程。
2. 鋼筋混凝土腐蝕劣化評估模型之選用。

二、針對目前研究方向與執行情形進行討論

(一)鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護成效評估及技術推廣

1. 討論所蒐集文獻之適用性。

2. 三維數值模型分析流程與可列入檢定及驗證事件探討。

(二) 橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估

1. 依橋梁箱型梁結構分類，討論橋檢輔助工具之適用模式。

2. 專家學者諮詢及實務訪談所蒐集之橋檢實務問題討論。

(三) 港灣構造物設計基準(草案)修訂之盤點

討論本案盤點檢討「港灣構造物設計基準(草案)」參考引用國內外標準或規範之最新版本及取得的情形。

(四) 鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討

1. 蒐集文獻有 AI 結合數位孿生此類較為新穎之整合應用，建議針對目前 AI 於邊坡之新應用案例加強蒐集，以做為未來研究課題之發想。

2. 建議持續前往案關單位進行諮詢，以瞭解實務運作及 AI 應用所在。

(五) 114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

1. 討論關聯性研究的建模數據、主要影響因子、依區域特性建模等相關課題。

2. 討論水下試片取樣分析與研究重點。

(六) 港灣構造物巡查檢測作業精進(4/4)-新興科技應用於其他設施巡查檢測作業

1. 討論其他設施維護管理機制、巡查檢測項目與劣化判定標準。

2. 討論各港之其他設施構件劣化項目。

(七) 港區地震液化風險評估模式精進(4/5)-花蓮港及安平港模式精進

1. 討論 111-113 年成果與港灣構造物維護管理系統介接的內容。

2. 討論後續報告內容的加強與補充。

(八) 氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響

1. 選用之腐蝕劣化評估模型於臺灣地區的適用性。

2. 既有文獻上其他腐蝕劣化評估模型之差異性。

## 貳、重點紀要/主要結論

### 一、鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護成效評估及技術推廣

(一)高公局大甲工務段已於今年汛期前採用本工法完成 P25L~P26L 橋基保護工作，並已據此完成今年度現場試驗區第 1 次 UAV 觀測航拍記錄初始地形，後續請持續注意降雨情形適時進場拍攝，以及注意航拍活動申請之期限。

(二)三維模型建置驗證事件之選取，考量降雨量、石岡壩放流量、試驗區影響性及觀測資料完整性，可採 113 年凱米颱風事件。

### 二、橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估

(一)建議增加橋梁箱內檢測之檢測項目相關論述，以利聚焦並評估橋檢工具應具備之功能及實用性。

(二)建議報告蒐集並統計呈現各種類箱型梁之數量，以利評估未來橋檢工具研發之效益。

### 三、港灣構造物設計基準(草案)修訂之盤點

(一)有些標準或規範需要付費購買才能取得，建議先以已經蒐集取得的最新版本之標準或規範進行盤點檢討。

(二)有關本計畫鈞長提示：「港灣構造物設計基準複審一案，涉及原提報交通部複審時未納入之新增議題，惟該等議題尚未經初審即納入複審程序，為確認其程序之適切性及實務可行性，請與綜合規劃司研商後續處理方式。」在經與綜合規劃司討論後，其建議先進行盤點，俟盤點後評估修訂內容多寡，再決定逕行辦理複審作業，還是交通部函文將基準(草案)退回本所，重新辦理基準編修及初審作業。故請於 8 月 31 日前，提供盤點資料予綜合規劃司參辦。

### 四、鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討

- (一)建議後續再持續蒐集臺灣高速鐵路股份有限公司(簡稱高鐵公司)及農業部林業與自然保育署阿里山林業鐵路及文化資產管理處(簡稱阿里山林鐵)邊坡分級相關規定,以做相互參照比較。
- (二)應依照本計畫研究目的及對象,逐步收斂課題、以終為始,故建議初步蒐整鐵公路邊坡分級制度後,應歸納並分類出適合AI介入輔助之情境,俾後續提供實務單位參考應用。

#### 五、114年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

- (一)後續可分區進行關聯性分析,探討臺灣不同大氣環境、不同腐蝕因子特性區域間的腐蝕差異性。
- (二)後續可比較各年期、各港區水下金屬腐蝕差異性,以及水下金屬腐蝕與腐蝕因子間的關聯性。

#### 六、港灣構造物巡查檢測作業精進(4/4)-新興科技應用於其他設施巡查檢測作業

- (一)統計並分類各個港區其他設施構件之劣化項目,以瞭解設施常見損壞構件,提供後續設施維護之參考數據。
- (二)建議再加強蒐集新興科技可應用在其他設施的巡檢作業案例。

#### 七、港區地震液化風險評估模式精進(4/5)-花蓮港及安平港模式精進

- (一)請提供歷年各港液化相關研究成果予港灣設施維護管理系統介接,提供臺灣港務股份有限公司未來的應用。
- (二)今年度進行花蓮港及安平港模式精進,建議運用國內、外的液化分析方法,推估花蓮港及安平港液化範圍及震陷量,提供地震速報簡訊之應用。

#### 八、氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響

- (一)建議測試比較不同腐蝕劣化評估模型之差異。
- (二)建議搜尋是否有臺灣本土的相關溫度及濕度等修正因子試驗資料,以利建立臺灣本土之修正因子。

### 會議簽到表

壹、會議名稱：「本所運輸技術研究中心第一科 114 年自行研究計畫」第 1 次工作會議

貳、時間：114 年 6 月 30 日(星期一) 上午 10 時

參、地點：本所運輸技術研究中心5樓第一會議室

肆、主持人：賴瑞應科長 賴瑞應

伍、出席單位及人員：

出席單位	職稱	姓名
本所運輸技術研究中心第一科	副研員 副研員 副研員 副研員 副研員 副研員 副研員 副研員	黃怡辰 胡宇子 謝幼屏 張道光 曹文偉 鄭登健 賴俊星 黃亨瑞
本所運輸技術研究中心第二科	科長	李俊翔
本所運輸技術研究中心第三科	科長	林雅雯

## 附錄四

### 第 2 次工作會議紀要



# 114 年 8 月工作會議紀要

會議名稱：「本所運輸技術研究中心第一科 114 年自行研究計畫」第 2 次工作會議

時間：114 年 8 月 28 日(星期四)上午 9 時至 12 時 40 分

地點：本所運輸技術研究中心 5 樓第一會議室

主持人：賴瑞應科長

出席者：如後附簽到表

紀錄：鄭登鍵

## 壹、討論議題/計畫名稱

### 一、工作進度說明

(一)鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護成效評估及技術推廣

1. 文獻資料蒐集及本工法施工說明書撰擬說明。
2. 數值分析流程及三維數值分析模型檢定與驗證情形說明。
3. 階段性成果應用說明。

(二)橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估

1. 蒐整橋梁箱內部檢測之檢測項目及缺失樣態說明。
2. 箱梁內部檢測作業現地觀摩內容說明。

(三)港灣構造物設計基準(草案)修訂之盤點

1. 初步盤點並檢討草案內容。
2. 與臺灣世曦工程顧問股份有限公司討論盤點結果及後續編修方向討論。

(四)鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討

1. 蒐整國內外 AI 應用於邊坡相關研究文獻。
2. 實務單位訪談紀要說明。

3. 我國鐵公路邊坡分級制度現況說明。

(五) 114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

1. 完成第 1~2 季大氣腐蝕因子調查與金屬材料現地暴露試驗工作，持續辦理第 3~4 季工作。
2. 初步完成銅金屬關聯性分析工作，後續將持續精進與優化模式。

(六) 港灣構造物巡查檢測作業精進(4/4)-新興科技應用於其他設施巡查檢測作業

1. 探討各港區其他設施經常及特別巡查設施之劣化項目。
2. 無人機與行動應用程式應用於其他設施巡檢作業。

(七) 港區地震液化風險評估模式精進(4/5)-花蓮港及安平港模式精進

1. 建置花蓮港及安平港地質鑽探資料，並盤點、篩選液化風險評估可用資料，花蓮港共 36 筆、安平港共 193 筆地質鑽探資料。
2. 完成不同地震情境下液化潛勢比較。

(八) 氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響

1. 氯離子擴散係數之溫度及時間影響修正。
2. 需考量鹽害影響縣市之使用年限損失比較。

二、針對目前研究方向與執行情形進行討論

(一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護成效評估及技術推廣

1. 文獻引用資料之適用性。
2. 三維數值模型檢定與驗證情形，及後續可列入模擬分析之事件探討。

(二) 橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估

1. 依不同箱內環境適用之檢測輔助工具模式討論及比較。

2. 國外箱內檢測技術應用及現地試驗成果文獻討論。

### (三) 港灣構造物設計基準(草案)修訂之盤點

1. 討論初步盤點檢討之結果，特別針對氣候變遷對於港灣影響，草案所參考引用之國外規範，於更新之版本皆已修訂相關方針、措施及策略等來調適因應。後續草案辦理修訂時，建議參考更新版之國外規範進行更新修訂，以因應氣候變遷之挑戰。
2. 討論草案參考引用之國內外規範更新版本，有關需付費才能取得之新版規範是否需進行採購。

### (四) 鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討

1. 目前蒐集之邊坡結合 AI 應用案例及文獻，仍是以較常見之情境，例如：邊坡滑動風險評估及災害預測、劣化辨識及結構弱面分析等，建議蒐集生成式 AI 於邊坡之應用案例，以拓展思路。
2. 建議國外鐵公路邊坡分級制度可考量納入蒐整，相互比較。

### (五) 114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

1. 討論關聯性研究於校正迴歸模式時之主要考量因素。
2. 討論關聯性模式與前期模式差異，以及未來精進模式之方向。

### (六) 港灣構造物巡查檢測作業精進(4/4)-新興科技應用於其他設施巡查檢測作業

1. 討論其他設施巡檢劣化項目之探討。
2. 討論新興科技應用於其他設施之巡檢作業。

### (七) 港區地震液化風險評估模式精進(4/5)-花蓮港及安平港模式精進

1. 討論花蓮港及安平港不同地震情境下液化潛勢分析。
2. 討論後續報告內容之加強與補充。

### (八) 氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響

1. 納入溫度修正氯離子擴散係數造成提前發生初始腐蝕。

2. 各縣市使用年限損失差異不大，可能是因為需考量鹽害影響之各縣市年均溫相差不大。

## 貳、重點紀要/主要結論

### 一、鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護成效評估及技術推廣

- (一)請檢視高公局大甲工務段應用本工法之時間，以及更新引用水利署之斷面流速及水位資料。
- (二)後續以水利署演算之大甲溪不同重現期流量進行分析模擬，評估本工法之耐洪性。

### 二、橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估

- (一)建議規劃至不同型式之箱梁進行現地觀摩，以較全面了解國內箱梁內部型態及狀況。
- (二)依據箱內空間及相關構件佈設，檢測輔助工具選擇除固定軌道式、攀爬及自走式機器人外，複雜之箱內空間可研發穿戴式設備方案，輔助人員紀錄以減少檢測人員待於箱內時間。

### 三、港灣構造物設計基準(草案)修訂之盤點

- (一)需要付費購買才能取得之新版國內外規範，建議後續以草案參考引用較多或較常用之新版規範優先採購。
- (二)經初步盤點結果，因應氣候變遷、船舶大型化、耐震規定及材料規格等因素，本草案所參考引用之國內外規範或標準，均已大幅更新，爰刻正辦理函文請交通部辦理退回草案相關事宜。俟退回後，本所將重新進行編修及初審相關作業，完成更新後再陳送交通部辦理複審。

### 四、鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討

- (一)針對所盤點之鐵公路邊坡分級制度和現況，後續如何結合 AI 應用，應在報告後面章節詳加描述兩者之間的關聯性。
- (二)本案所提出適合 AI 輔助鐵公路邊坡之應用情境，後續可歸納及

分類，提供其他實務單位參考應用。

#### 五、114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

後續進行關聯性研究，可嘗試應用 AI 技術，分析金屬腐蝕速率與腐蝕因子間之關聯性。

#### 六、港灣構造物巡查檢測作業精進(4/4)-新興科技應用於其他設施巡查檢測作業

- (一)建議補充新興科技 UAV 應用於其他設施巡檢案例之說明。
- (二)建議加強新興科技應用於其他設施之運用與維護管理巡檢作業之精進說明。

#### 七、港區地震液化風險評估模式精進(4/5)-花蓮港及安平港模式精進

- (一)下次工作會議請補充液化風險評估之機率分析與定值分析之差異處。
- (二)本計畫前期成果臺北、臺中、高雄等 3 港區之鑽探熱點圖及土壤液化潛勢圖，提供港灣設施維護管理系統介接，相關使用權限設定要慎重，以免影響航商選擇該港埠之停靠意願。

#### 八、氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響

- (一)建議再搜尋文獻是否有其他影響氯離子擴散係數之因子。
- (二)後續腐蝕防治策略應朝實務應用提供建議。
- (三)建議詳細列出各氣候變遷模擬情境之使用年限損失。

### 會議簽到表

壹、會議名稱：「本所運輸技術研究中心第一科 114 年自行研究計畫」第 2 次工作會議

貳、時間：114 年 8 月 28 日(星期四) 上午 9 時

參、地點：本所運輸技術研究中心 5 樓第一會議室

肆、主持人：賴瑞應科長 賴瑞應

伍、出席單位及人員：

出席單位	職稱	姓名
本所運輸技術研究中心第一科	副研員 副研員 研員 " " " 副研究員 助理研究員	賴俊杰 鄭登建 胡悠了 曹文偉 謝維厚 黃亨謙 張道光 顏麗香 黃煥長 王浩祥
本所運輸技術研究中心第二科	科長	李俊翰
本所運輸技術研究中心第三科	科長	林雅雯

## 附錄五

### 第 3 次工作會議紀要



# 114 年 10 月工作會議紀要

會議名稱：「本所運輸技術研究中心第一科 114 年自行研究計畫」第 3 次工作會議

時間：114 年 10 月 27 日(星期一)上午 9 時至 12 時 50 分

地點：本所運輸技術研究中心 5 樓第一會議室

主持人：賴瑞應科長

出席者：如後附簽到表

紀錄：鄭登鍵

## 壹、討論議題/計畫名稱

### 一、工作進度說明

- (一)鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護成效評估及技術推廣
  - 1. 本工法施工說明書撰擬說明。
  - 2. 數值分析流程及三維數值分析模型 Q5、Q10、Q20、Q50、Q100 模擬評估情形說明。
  - 3. 階段性成果應用及技術推廣規劃說明。
- (二)橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估
  - 1. 鋼箱梁內部檢測作業現地觀摩內容說明。
  - 2. 橋梁箱內檢測輔助工具可行方案及橋檢工具開發評估說明。
- (三)港灣構造物設計基準(草案)修訂之盤點
  - 1. 宇泰工程顧問有限公司視訊訪談盤點及後續編修方向討論。
  - 2. 撰寫期末報告初稿。
- (四)鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討
  - 1. 鐵公路邊坡分級制度綜整說明。
  - 2. 邊坡分級制度結合 AI 之應用場景剖析。

(五) 114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

1. 完成第 1~3 季大氣腐蝕因子調查與金屬材料現地暴露試驗工作，持續辦理第 4 季工作。
2. 完成第 4 次水下試片取樣工作，持續辦理水下腐蝕試驗之金屬試片腐蝕生成物清除、秤重工作。
3. 規劃辦理板狀標準試片之大氣腐蝕暴露試驗。

(六) 港區地震液化風險評估模式精進(4/5)-花蓮港及安平港模式精進

1. 完成花蓮港及安平港不同地震情境下液化潛勢分析。
2. 完成花蓮港及安平港不同地震情境下地震沉陷潛勢分布。

(七) 氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響

1. 臨界氯離子濃度、氯離子擴散係數計算公式修正。
2. 設計年限內鋼筋腐蝕量計算。
3. 氯離子擴散係數縮減率計算。
4. 抗氯鹽腐蝕策略分析及彙整。

二、針對目前研究方向與執行情形進行討論

(一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護成效評估及技術推廣

1. 三維數值模擬時間及其與二維分析結果轉為邊界條件之討論。
2. 本工法於不同重現下保護成效及保護工法鋪設方法再改良之討論。

(二) 橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估

1. 依橋梁箱內環境討論檢測輔助工具可行方案。
2. 箱梁內部環境需求急迫性討論研發可能性及優先順序。

(三) 港灣構造物設計基準(草案)修訂之盤點

1. 討論宇泰工程顧問有限公司建議基準後續編修的方式。

2. 依據盤點檢討之初步成果，討論後續編修方式及初審工作。

(四)鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討

1. 建議多加蒐集並整理我國邊坡養護單位已實際應用 AI 輔助於邊坡之案例，以提供其他單位參考發展。
2. 建議針對巡查、監測及地錨檢測等各邊坡管理手段，探討可能結合 AI 輔助應用之應用場景，並說明適用性。

(五)114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

1. 討論進行板狀試片暴露試驗的作業困難與因應方案。
2. 討論進行板狀試片暴露試驗的後續執行工作內容。

(六)港區地震液化風險評估模式精進(4/5)-花蓮港及安平港模式精進

1. 花蓮港及安平港不同地震情境下地震沉陷潛勢討論。
2. 後續報告內容的加強與補充討論。

(七)氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響

1. 臨界氯離子濃度計算公式的適用條件。
2. 既有混凝土橋梁抗腐蝕策略。

## 貳、重點紀要/主要結論

### 一、鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護成效評估及技術推廣

- (一)本年度僅於年初進行一次現場拍攝作業，請儘速規劃第二次現場觀測作業，做為成效評估之依據。
- (二)本計畫為第 4 年期之研究，後續請儘速規劃本工法成效總評估之說明暨技術推廣活動，以供相關橋管機關參用。

### 二、橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估

- (一)建議蒐集現行橋梁箱內檢測之檢測作業執行成本，以利比較研發相關輔助工具之成本效益。

(二)橋檢人員穿戴式輔助工具可納入勞安有關議題之相關探討，提升本工具之需求及必要性。

### 三、港灣構造物設計基準(草案)修訂之盤點

臺灣世曦工程顧問股份有限公司及宇泰工程顧問有限公司之意見可提供辦理編修及初審作業之參考，以完備基準的內容、調整編修的方式等，俾利於基準更具實用性。

### 四、鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討

(一)邊坡養護單位完成之巡查工作紀錄、各項表單及蒐集大量災害及損傷影像，皆保存於其建置之邊坡全生命週期管理系統或資料庫，而目前 AI 發展日新月異，大語言模型如 ChatGPT 已蓬勃發展，使用者透過一問一答方式即能請 AI 協助判識影像、撰寫程式碼並建構專屬之 AI 模型等等，相較過往，專業門檻已降低不少，使用者僅需著重於資料之蒐集、品管、標註和處理等工作。本研究之目的應定位在盤點邊坡養護單位可供 AI 訓練之資料，協助其發想自身之 AI 應用。

(二)建議統整各邊坡養護單位之維護管理機制中，共通性之工作、項目及流程，並提供具泛用性之 AI 輔助應用場景。

### 五、114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

(一)後續安裝大氣腐蝕暴露試驗之板狀試架時，建請按 CNS 規範進行安裝。

(二)試驗裝置多安裝在樓頂，易受颱風、狂風影響，建議於試架側邊增加螺栓鎖緊、底部增加水泥加固，以強化穩定性。

### 六、港區地震液化風險評估模式精進(4/5)-花蓮港及安平港模式精進

請依據觸發門檻加速度及高潛勢區面積分析成果，推估花蓮港及安平港區之分區地震沉陷量，並說明與花蓮港 0403 地震災況之差異。

### 七、氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響

(一)應補充耐久性設計評估公式引用依據。

(二)補充既有混凝土橋梁因應氣候變遷抗腐蝕策略。

會議簽到表

壹、會議名稱：「本所運輸技術研究中心第一科 114 年自行研究計畫」第 3 次工作會議

貳、時間：114 年 10 月 27 日(星期一) 上午 9 時

參、地點：本所運輸技術研究中心5樓第一會議室

肆、主持人：賴瑞應科長 賴瑞應

伍、出席單位及人員：

出席單位	職稱	姓名
本所運輸技術研究中心第一科	副研室長 副研究員 助理研究員 副研究員 副研究員 副研究員	胡怡了 謝少偉 黃煥良 鄭登輝 黃宇謙 賴俊呈 曾文傑
本所運輸技術研究中心第二科	科長	李信穎
本所運輸技術研究中心第三科	科長	林雅雯

## 附錄六

### 期末審查意見及辦理情形說明表



## 期末審查意見及辦理情形說明表

審查意見	處理情形
<b>李岳聯委員</b>	
1. 本報告針對氣鹽沉積速率及二氧化硫沉積速率之調查與計算，涵蓋臺灣多個具代表性的測點；惟對於各測點實際配置之試片數量及其統計方式，相關說明仍較為有限，建議於報告中加以補充說明。	1. 遵照辦理，補充說明詳 3.1 節。
2. 建議作者進一步說明量測銅金屬大氣腐蝕速率之研究背景與實務重要性，以利讀者理解本研究之研究動機與應用價值。	2. 遵照辦理，補充說明詳 P.5-1。
3. 以迴歸分析法建立大氣腐蝕因子與銅金屬腐蝕速率之關係具有參考價值，惟建議於最終建立之迴歸關係式中，補充說明各項迴歸係數所代表之物理或環境意義。	3. 遵照辦理，補充說明詳 P.5-15~P.5-16。
4. 本文之迴歸公式係基於既有資料所建立，建議作者補充說明該公式於原始資料範圍以外進行預測時之適用條件與不確定性，以避免外插應用時之解讀疑慮。	4. 遵照辦理，補充說明詳 5.3 節。
5. 本研究聚焦於溫度、相對濕度、氣鹽及二氧化硫等 4 項大氣腐蝕因子對銅金屬腐蝕速率之影響，然而一般認為銅金屬對酸性環境亦相對敏感，且臺灣地區酸雨可能對銅之腐蝕行為造成影響，建議作者進一步說明本研究中未將 pH 值或酸雨因素納入分析之理由。	5. 本研究選擇溫度、相對濕度、氣鹽及二氧化硫等 4 項大氣腐蝕因子為解釋變數，係參考 CNS 13401 規範以此 4 項因子為劑量-反應函數之銅金屬腐蝕速率的解釋變數；此外，酸雨形成係因二氧化硫和氮氧化物排放進入大氣而引起，因此，酸雨與二氧化硫 2 者間具高

審查意見	處理情形
	相關性，不宜同時納入模式。
<b>李家順委員</b>	
<p>首先非常肯定研究團隊長期自行辦理本研究案的勇氣與耐心，這是耗心力與體力之工作，工作成果長期提供給設計與養護單位執行工作之參考，功不可沒。這已是長期持續的工作，已有相當成熟的 SOP，雖然本次增加了銅金屬關聯性研究，團隊還是用心執行值得嘉許，對本計畫後續之執行，對於從事橋梁檢測及維護多年實地經驗之本人，提供以下幾點建議供研究團隊參考：</p>	<p>感謝肯定。</p>
<p>1. 由表 4-1 氯鹽沉積速率表及圖 4.1 垂直海岸試驗線之氯鹽沉積量，花蓮港試驗線及伽蘭安檢所對比其他臨海岸線之基隆、蘇澳、六輕、桃園等地高出很多，但以碳鋼及鋅金屬腐蝕速率，卻沒基隆、六輕高，而在垂直海岸試驗線之氯鹽沉積量相對低的基隆試驗線、六輕試驗線、桃園試驗線、觀音產業園區及新竹安檢所其碳鋼及鋅金屬腐蝕速率卻很高、當然碳鋼及鋅金屬腐蝕速率與二氧化硫沉積速率也有很大關係，所以建議是否考量除原有採集腐蝕因子及試樣佈設位置繼續執行外，建議再增加幾處位置，因由本人所親歷檢視的橋梁及附屬設施腐蝕現況，位於基隆、北部石門、桃園竹圍、大園觀音、彰濱工業區、王功、六輕、東石嘉義等地區相較於其他地方腐蝕嚴重，雖這腐蝕現況與 4.3 章-現地暴露試驗表 4-4 及表 4-5 內容還算吻合，惟可能試樣佈點關係，部分特別嚴重地</p>	<p>1. 非常感謝委員就各實驗點腐蝕速率與腐蝕因子間關聯性提出具體的比較分析，讓研究團隊更理解試驗調查與實務上的落差。關於增設試驗站的建議，後續會納入考量，惟因本所全臺各地試驗場地係請相關單位無償提供，多數單位腐蝕環境分級意識不高，提供場地意願低，後續增設試驗站將以腐蝕環境惡劣，且有相關單位願意提供場地者優先考量。</p>

審查意見	處理情形
<p>點無法完整呈現，讓部分地區有腐蝕等級偏低疑慮。</p>	
<p>2. 表 4-2 二氧化硫沉積速率表項次 55 十八王公橋的二氧化硫沉積速率在 10~12 月卻異常的高，甚比陽明山硫磺區高，實不合理，而其他季節也有極高的二氧化硫沉積速率，以每季都會採集試驗，而 4 個季節都發生人為試驗誤差的機率更低，因本測站是新設點位，尚無以往數據比對，而十八王公橋橋址距陽明山硫磺區不遠，或許風向地形關係，比對該橋的腐蝕現況(為本局鋼橋腐蝕最嚴重橋梁)，有極高二氧化硫沉積速率可能性，所以建議本點位為後續的二氧化硫沉積速率的採集與試驗，需更加謹慎。也建議在本石門地區再增加試驗點位，以釐清陽明山硫磺區影響範圍或有新的二氧化硫污染源未被發現。</p>	<p>2. 感謝建議，後續會謹慎辦理十八王公橋的二氧化硫沉積速率採集與試驗。</p>
<p><b>羅建明委員</b></p>	
<p>本計畫承續十餘年之本土腐蝕環境調查，累積珍貴數據，作業程序嚴謹依循 CNS/ISO 標準，數據可信度高，並已建置資訊系統供各界應用，成果豐碩。惟為確保長期數據價值最大化並精進應用效益，針對試片標準轉換、模型解釋力、數據視覺化及效益論述等方面，提出下列建議：</p>	<p>感謝肯定。</p>
<p>1. 試片型式與新舊標準接軌：計畫現仍採 CNS 13753:1996 螺旋狀試片與現行 CNS 13753:2019 平板試片之規範有所差異。建議：於代表性試驗站規劃「螺旋/平板平行比對試驗」。利用累積之螺旋金屬大數據與新式板狀試片數據建立「校正或轉換關係」，以避免長期資料庫在標準轉換時產生斷層，確保數據之連續性與可比較性。</p>	<p>1. 感謝建議，納入後續研究。</p>

審查意見	處理情形
2. 結果呈現方式精進：現有圖表多呈現平均值，較難辨識腐蝕熱點或極端狀況。建議於關鍵指標增列盒鬚圖(Box Plot)等統計分佈圖，以揭示數據範圍、四分位數及離群值(Outliers)。此舉能更清晰呈現數據的變異程度，供工程單位進行差異化防蝕設計參考。	2. 感謝建議，納入後續研究。
3. 統計模型解釋力提升：目前銅腐蝕速率對數線性模型之調整後判定係數(Adj-R <sup>2</sup> )約為 0.616，對工程設計參考而言解釋力仍偏低。因此建議納入降雨、風速風向、日照等潛在氣候腐蝕劣化因子進行分析。並評估導入非線性模型，以整合大氣中環境因子間的交互作用，提升預測準確度。	3. 感謝建議，納入後續研究。
4. 效益論述具體化：現行效益敘述較為概略，缺乏具體且有感的應用情境。建議具體說明例如：某濱海橋梁依本系統判定屬高腐蝕等級，故將塗裝維護週期由 5 年縮短為 3 年，有效避免嚴重鏽蝕與高額後續修復成本。藉此具體量化本計畫在防災、節省全生命週期成本上之實質貢獻。	4. 感謝建議，後續會加強效益論述的具體化、量化。
5. 本計畫做為長期基礎研究，數據價值極高，建議研究團隊參酌上述意見，重點強化數據之標準校正、模型精進及應用效益之具體論述，以提升本計畫在學術界與工程實務界之影響力。	5. 感謝建議，納入後續工作執行重點。
<b>本所運輸技術研究中心第一科賴瑞應科長</b>	
1. 本報告延續本所自 2007 年以來的長期研究，為臺灣交通基礎設施的耐久性設計和維護管理提供不可或缺的本土化數據，予以肯定。	1. 感謝肯定。
2. 雖然銅腐蝕關聯性模型的預測能力已達標，但其 R <sup>2</sup> 值為 0.635，仍有約 38.4% 的變異量未能解釋。	2. 感謝建議，納入後續研究。

審查意見	處理情形
建議後續研究可考慮將其他影響大氣腐蝕的因子納入模型進行多變量分析，例如：風速、風向、降雨量(對腐蝕性物質的沖刷效應)和日照時間(影響水膜消失速度)。	
3. 本計畫持續進行港區水下金屬材料的 10 年期暴露試驗，並已完成第 5 年的取樣。由於水下腐蝕機制複雜(涉及海生物附着、雜散電流、流速、水質等)，建議下一階段應如同銅金屬大氣腐蝕分析一樣，積極針對不同港區、不同暴露區域的水下腐蝕速率(如飛沫帶、潮汐帶、海中帶)與海水特性因子(如導電度、溶氧量、pH 值、溫度、海生物)建立多因子關聯性模式。	3. 感謝建議，納入後續研究。
<b>本所運輸技術研究中心第二科李俊穎科長(書面意見)</b>	
1. 本研究為最完整本土化大氣腐蝕因子資料庫，其成果具有高度應用參考性。	1. 感謝肯定。
2. 建議未來可放入歷年的資料，加以分析討論。	2. 感謝建議，納入後續研究。
<b>本所運輸技術研究中心第三科劉清松副研究員</b>	
1. 本計畫成果相當豐碩，投入大量人力與物力辛苦採樣、檢驗，提供相關數據供大眾參考與使用，是本所對外之重要成果。	1. 感謝肯定。
2. 經比對 113 年計畫與 114 年計畫相關數值，如 4-3 頁 2024/10~2024/12 (1 基隆試驗線 0m) 74.5，其與 113 年數值 1.3 差異大。4-9 頁第 55 項十八王公橋 1585.5，其與 113 年數值 155.0 差異大，尚有其它地方數據也呈現此現象，是何原因造成的呢？建議未來可對此離群值做進一步分析與研究。	2. 氯鹽與二氧化硫沉積量調查結果受大氣與環境因子影響很大，同 1 季調查結果可能因氣候與環境條件變化而有很大差異。感謝建議，納入後續研究考量。

審查意見	處理情形
3. 本報告尚未說明資料品管的方式，如有，建議補充說明。	3. 本計畫在測定標準試片的腐蝕速率，均依照CNS14122 規範進行腐蝕生成物清除，並依規定繪製檢量線以進行品管，本年度各標準金屬之腐蝕生成物清除檢量線補充說明在附錄一。

## 附錄七

### 期末報告簡報資料





114年度一科自辦研究計畫

# 114年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查 與銅金屬關聯性研究

研究人員：謝幼屏、黃烟宏  
研究助理：陳亭廷、陶德勇、陳育齊、王培源



運輸技術研究中心  
114.12.19

1

## 大綱

- 01 前言
- 02 金屬材料腐蝕環境調查研究
- 03 銅金屬腐蝕關聯性統計分析
- 04 結論與建議

2

# 01 前言

3

01

研究緣起與目的

研究緣起  
與目的  
(WHY)

- 本所為國內目前可提供臺灣地區長期金屬材料**腐蝕環境調查資訊**之唯一單位。本於支援交通基礎設施維護管理權責，直持續進行**本土化腐蝕環境調查研究**。
- 本計畫係**延續型計畫**，主要持續辦理**現地調查及試驗工作**，另針對腐蝕環境調查資料進行**統計與大數據分析**。
  - 採分期探討4種**標準金屬試片**(CNS規定之**碳鋼、鋅、銅、鋁**)與**腐蝕因子**間的**關聯性**，
  - 前期(112-113年)已完成**碳鋼與鋅金屬材料關聯性分析**，今年(114年)研析**銅金屬材料**與腐蝕因子之關聯性。
- 提供公共工程金屬結構物**防蝕設計**，**延長使用壽齡**及**降低維護成本**之應用。

研究範圍  
與應用單位  
(WHO)

- 本所自**96年起**，著手進行大氣腐蝕因子調查與金屬暴露試驗研究，目前於臺灣各地共佈放**210處大氣腐蝕試驗站**，另自**104年起**，增設**14處水下腐蝕試驗站**，進行長期水下腐蝕調查試驗。
- 提供**公路局、高速公路局**等公務部門，以及**防蝕工程學會、工程顧問公司**等相關產學單位應用，並做為本所相關研究重要參考資料。

4

本計畫係延續型計畫，本年度(114)辦理之工作項目如下：

➤ 例行性工作

• 1. 辦理金屬材料暴露試驗與腐蝕劣化因子調查

依據中華民國國家標準(CNS)，在全臺各地進行大氣腐蝕金屬材料暴露試驗與腐蝕劣化因子調查；並在各港區進行水下腐蝕調查試驗。

• 2. 擴增臺灣腐蝕環境調查資訊系統資料庫

彙整調查與試驗結果，精進及擴充腐蝕環境調查資料庫。

• 3. 發行2024年臺灣大氣腐蝕劣化因子調查年報

提供相關單位選用金屬材料與防蝕工法應用。

• 4. 推廣宣傳臺灣腐蝕資訊系統

辦理大氣腐蝕及防蝕技術應用研習會，並推廣宣導臺灣腐蝕環境分類資訊系統於相關人員參酌採用。

➤ 非例行性工作

• 進行銅金屬與腐蝕因子關聯性統計分析

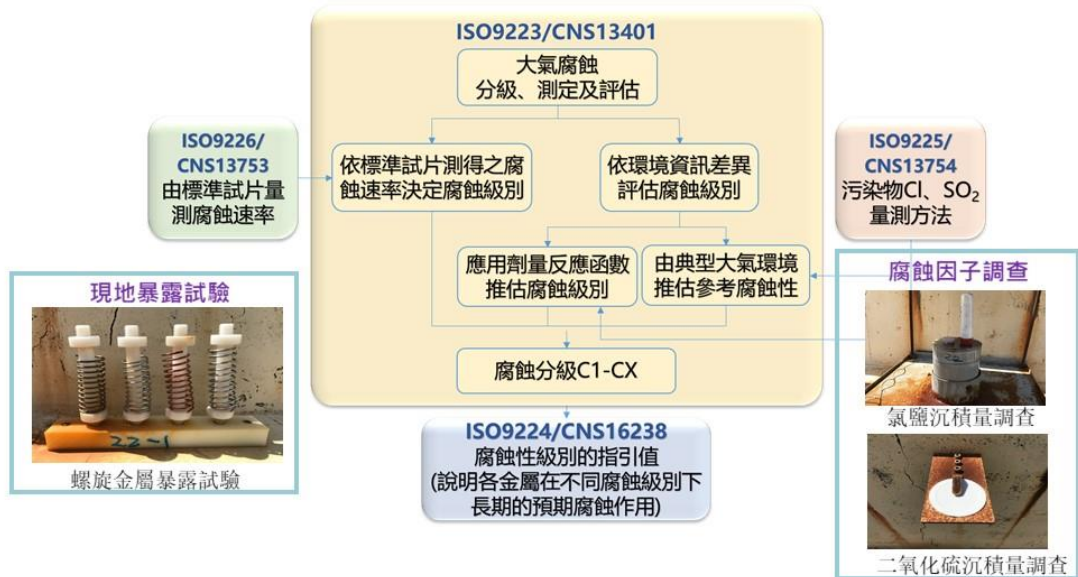
以腐蝕調查數據建立迴歸模式，評估臺灣腐蝕劣化因子對於銅金屬腐蝕的影響。

5



## 02 金屬材料腐蝕環境調查研究

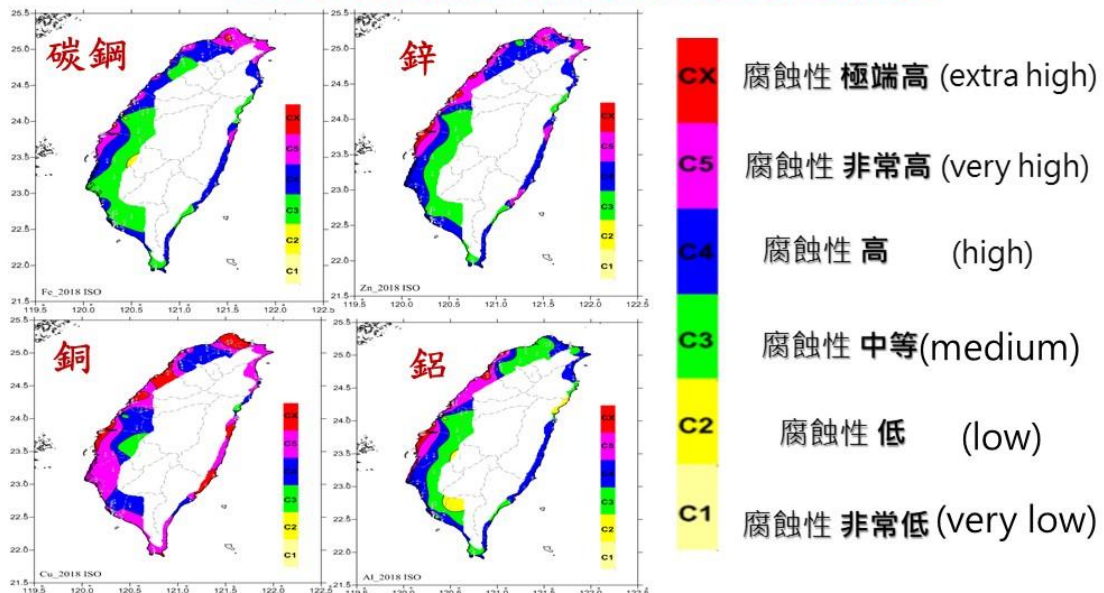
6



- 依據國際標準組織規範(ISO)及中華民國國家標準規範(CNS)
- 進行腐蝕因子調查及碳鋼、鋅、銅、鋁等標準試片現地暴露試驗，提供大氣腐蝕環境分類查詢。

7

## 金屬材料大氣腐蝕環境分類-依金屬腐蝕速率



- 大氣腐蝕環境分類-以各種標準金屬最初第一年之腐蝕速率區分
- 金屬腐蝕性環境分類數值依序類推區分為C1、C2、C3、C4、C5、CX 6個等級。資料來源：ISO 9223-2012

02 執行內容<sup>(1/5)</sup>  
建立與維護長期試驗站

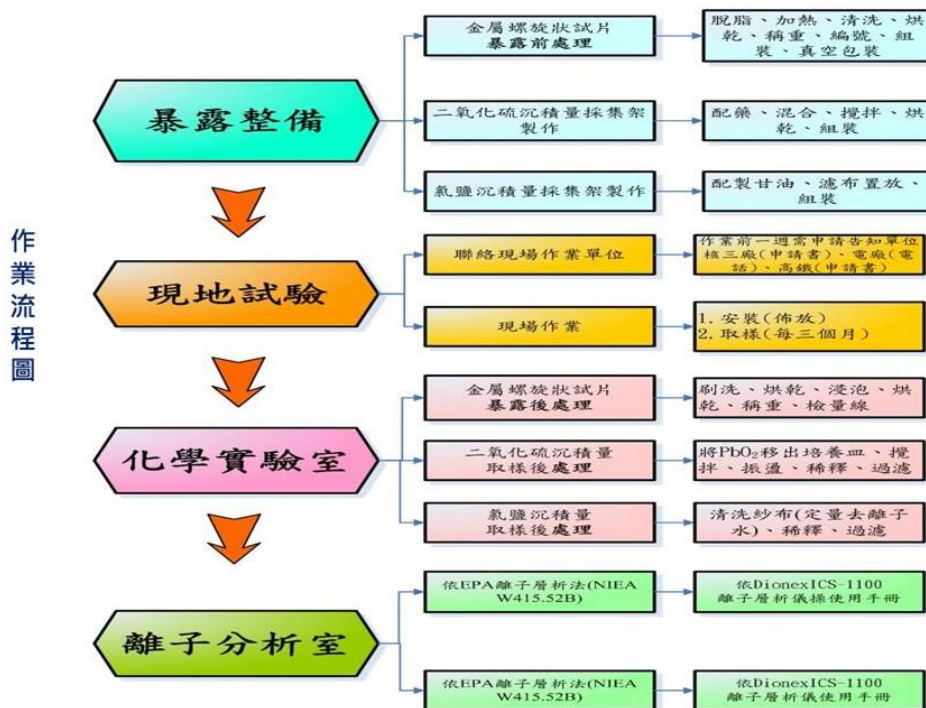
大氣腐蝕 (96年開始執行)



水下腐蝕 (104年開始執行)



02 執行內容<sup>(2/5)</sup>  
進行大氣腐蝕因子調查與金屬材料現地暴露試驗





螺旋金屬試樣秤重包裝



氯鹽沉積量採集器製作



二氧化硫沉積量採集器  
製作

大氣腐蝕試驗材料整備作業  
 (每年2,5,8,11月初辦理)

11



螺旋金屬暴露試驗



氯鹽沉積量調查



二氧化硫沉積量調查

大氣腐蝕取樣維護作業  
 (每年2~3,5~6,8~9,11~12月辦理)

12

02 執行內容<sup>(5/5)</sup>  
大氣腐蝕試驗取樣後處理作業



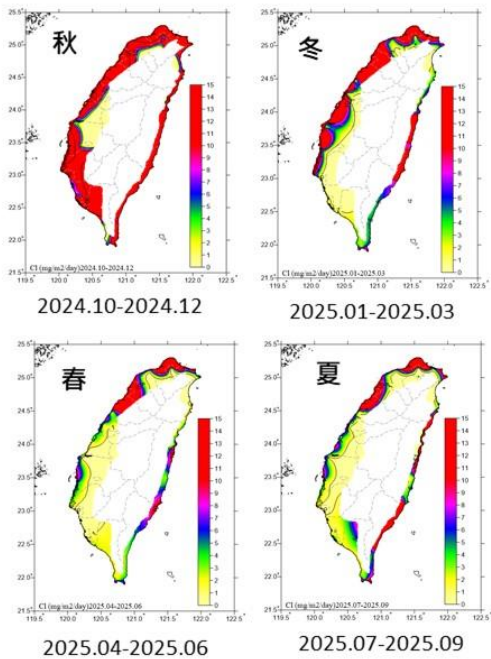
金屬腐蝕生成物清除

氯鹽沉積量分析檢測

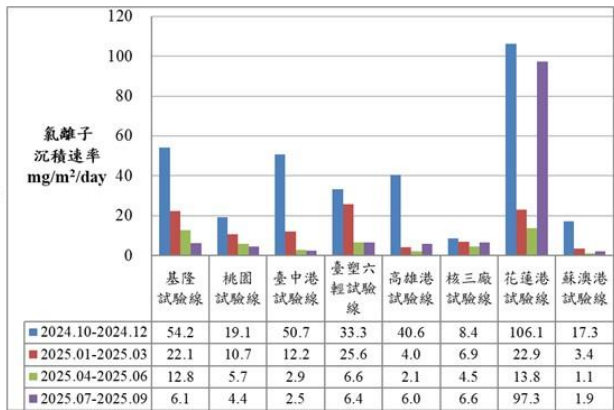
二氧化硫沉積量分析檢測

大氣腐蝕試驗取樣後處理作業  
(每年1,4,7,10月辦理)

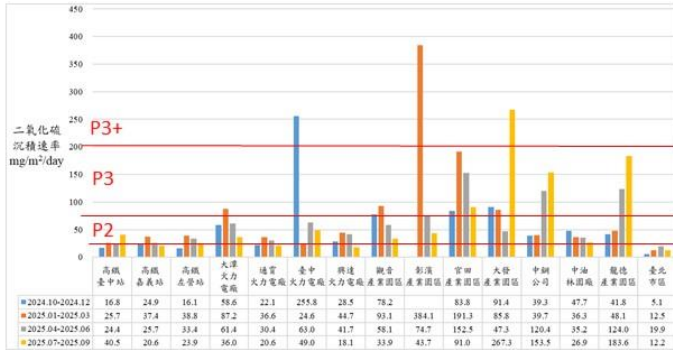
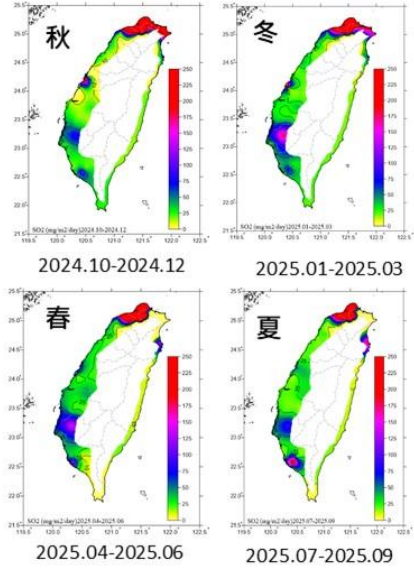
02 調查與試驗結果<sup>(1/5)</sup>  
氯鹽沉積速率調查



氯鹽沉積速率-季節性差異

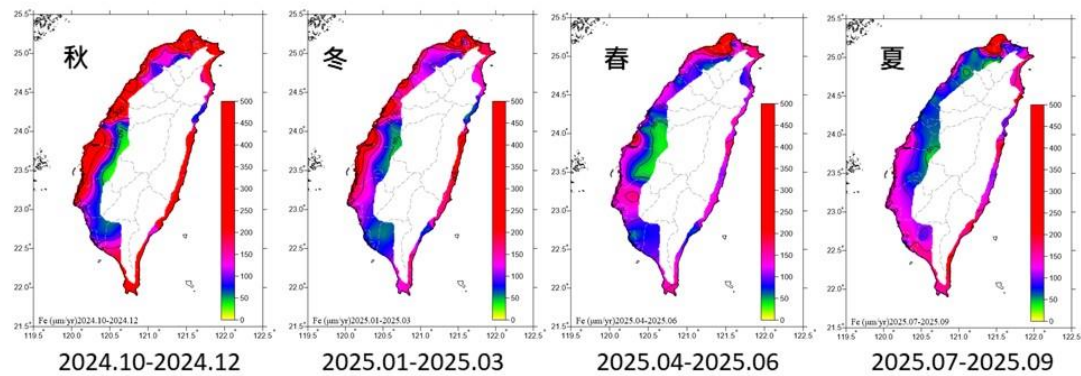


垂直海岸試驗線之氯鹽平均沉積速率

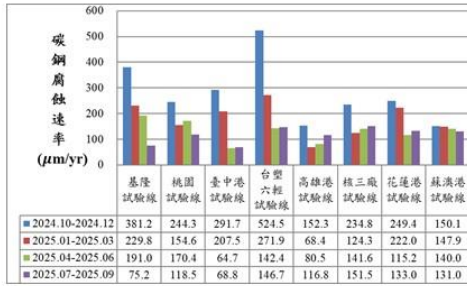


特定試驗點之二氧化硫沉積速率

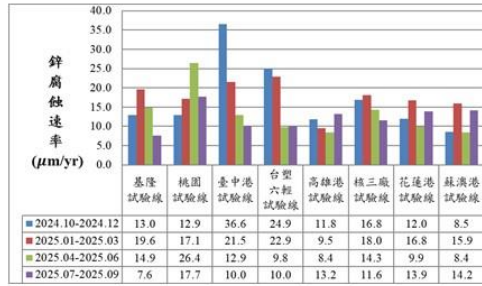
二氧化硫沉積速率-部分試驗點較高



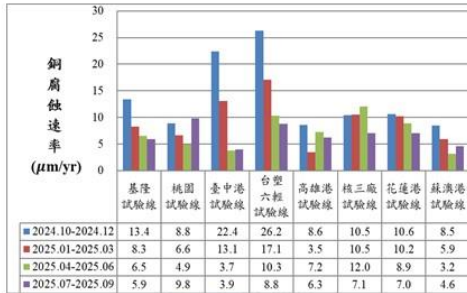
各金屬腐蝕速率-季節性差異  
 (以碳鋼金屬為例)



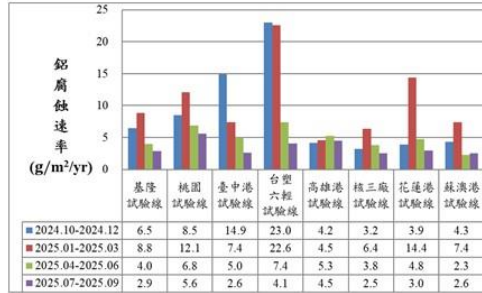
碳鋼金屬腐蝕速率



鋅金屬腐蝕速率

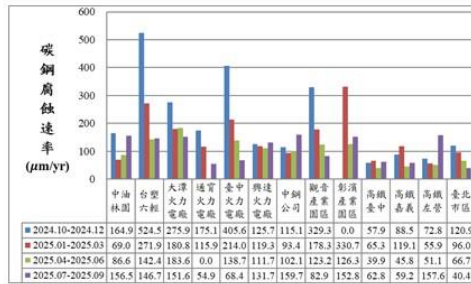


銅金屬腐蝕速率

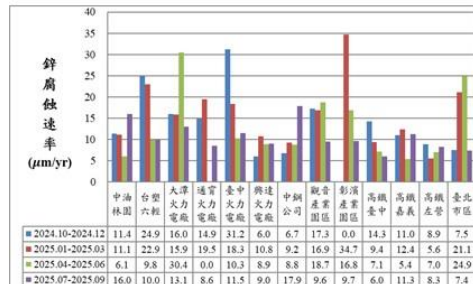


鋁金屬腐蝕速率

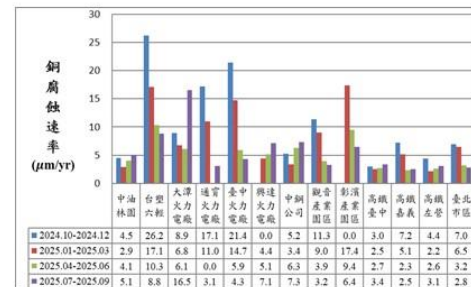
垂直海岸試驗線之金屬腐蝕速率比較圖



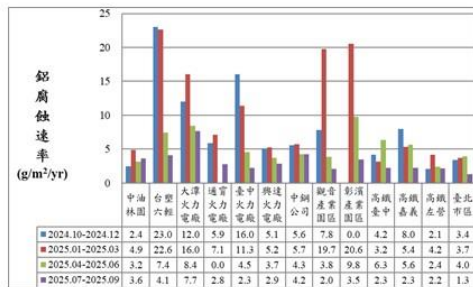
碳鋼金屬腐蝕速率



鋅金屬腐蝕速率



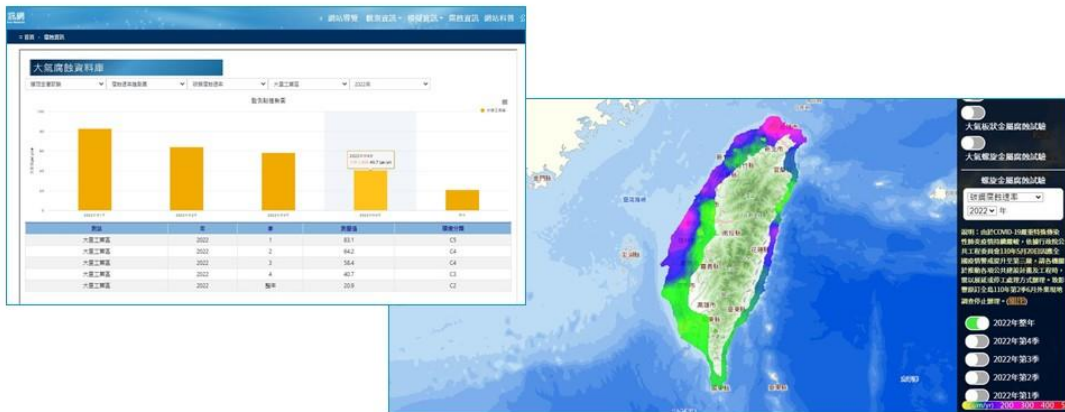
銅金屬腐蝕速率



鋁金屬腐蝕速率

特定測站之金屬腐蝕速率比較圖

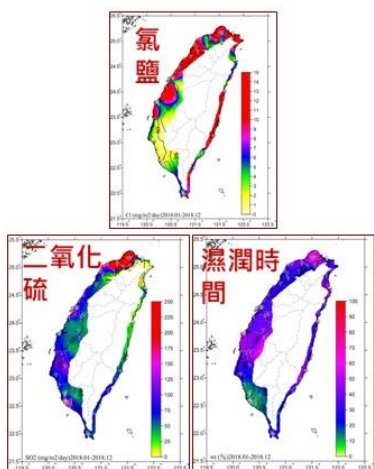
➤ 研究成果擴增於「臺灣腐蝕環境分類資訊系統」資料庫，並公開於本中心網站供外界查詢。



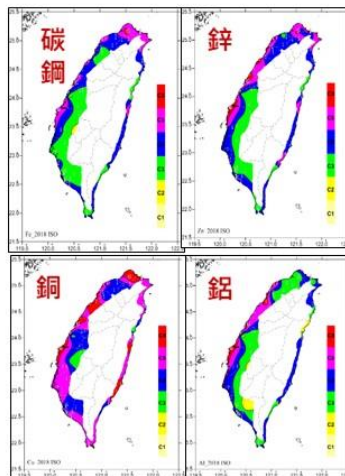
研究成果公開於本中心港灣環境資訊網

➤ 出版「2024年臺灣大氣腐蝕劣化因子調查研究資料年報」，提供完整數據做為相關單位選用金屬材料與防蝕工法應用。

依-環境因子分類



依-金屬腐蝕速率分類



## ▶ 舉辦研習會

- ✓ 6月18日在集思臺中新烏日會議中心與防蝕工程學會合辦「大氣腐蝕及防蝕技術應用研習會」，推廣宣傳臺灣腐蝕資訊系統。



會中介紹本所「臺灣腐蝕環境分類資訊系統」



與會人數達75人

21

## ▶ 推廣活動

- ✓ 11月5日，在本所「114年度臺灣環境資訊網使用者說明會」，主講「臺灣腐蝕環境分類資訊系統」課程，推廣宣傳臺灣腐蝕資訊系統。
- ✓ 12月24日，在臺中港務分公司「防蝕技術交流與應用論壇」，主講「熱浸鍍鋅防蝕設計參據—大氣腐蝕環境分級介紹」課程，推廣宣傳臺灣腐蝕環境分級在防蝕上的應用。

臺灣港務股份有限公司臺中港務分公司			
防蝕技術交流與應用論壇			
114年12月24日(三)農大國際會議中心107會議室			
◎講課時間與內容			
時間	講題	主講人	主持人
08:30-09:00		報到	
09:00-09:20	開幕與貴賓致詞	張欽聰 總工程司 蕭勝彥 理事長	臺中港務分公司 中華民國熱浸鍍鋅協會
09:20-10:10	熱浸鍍鋅防蝕工法與應用	蔡明達 秘書長 中華民國熱浸鍍鋅協會	羅建明總經理 歐力智慧科技公司
10:10-11:00	臺中市光竹橋改建工程	宋昌國 總經理 亞盛工程顧問有限公司	羅建明總經理 歐力智慧科技公司
11:00-11:10		休息時間	
11:10-12:00	液化天然氣接收站巡槽—以三接工程為例	洪博勝 經理 台灣世耀工程顧問(股)公司	羅建明總經理 歐力智慧科技公司
12:00-13:00		午餐	
13:00-13:50	熱浸鍍鋅防蝕設計參據—大氣腐蝕環境分級介紹	謝幼屏 副研究員 交通部運輸研究所運輸技術研究中心	林佑任研究員 臺中港務分公司
13:50-14:20		茶歇及交流時間	
14:20-15:10	熱浸鍍鋅實際案例分享	石建倫 協理 黎明工程顧問(股)公司	林佑任研究員 臺中港務分公司
15:10-15:30	問題與討論		蕭勝彥理事長 中華民國熱浸鍍鋅協會
15:30		散會	

22



- 發表期刊論文
  - ✓ 題目：臺灣地區鋅金屬大氣腐蝕速率與腐蝕因子之關聯性分析
  - ✓ 發表處：防蝕工程，第39卷，第3期，第32 ~ 42頁，2025年9月
  - ✓ 作者：謝幼屏、蔡立宏、賴瑞應、賴俊呈



- 發表研討會論文
  - ✓ 題目：臺灣銅金屬大氣腐蝕環境分級模式之建構
  - ✓ 發表處：114年防蝕工程年會暨論文發表會，民國114年8月29-30日，臺南
  - ✓ 作者：謝幼屏、蔡立宏、賴瑞應、黃焜宏

← 03 銅金屬腐蝕關聯性統計分析

## 高腐蝕環境

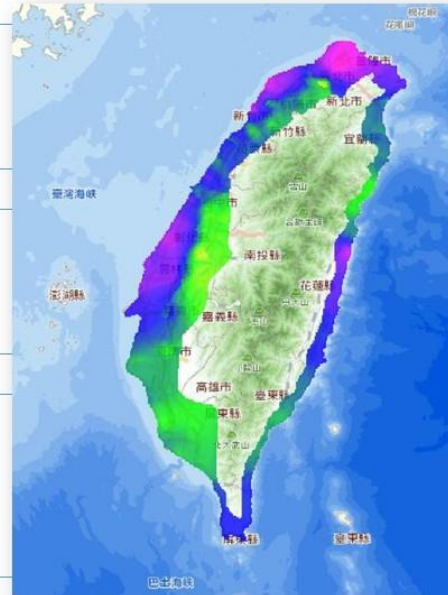
- 臺灣四面環海—高溫、高濕與高鹽份
- 金屬材料在大氣中容易腐蝕劣化

## 大氣腐蝕機制

- 受水分、氧氣、和腐蝕性物質聯合作用而產生破壞
- 大氣腐蝕具有強烈地域性

## 關聯性分析

- 以臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查數據，建立迴歸模式
- 評估臺灣大氣腐蝕劣化因子對於銅金屬腐蝕的影響

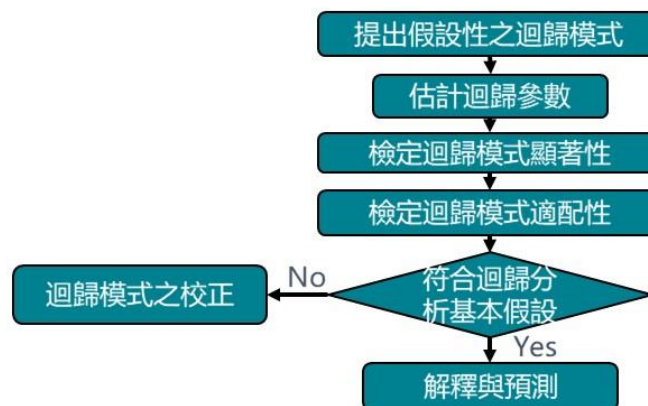


25

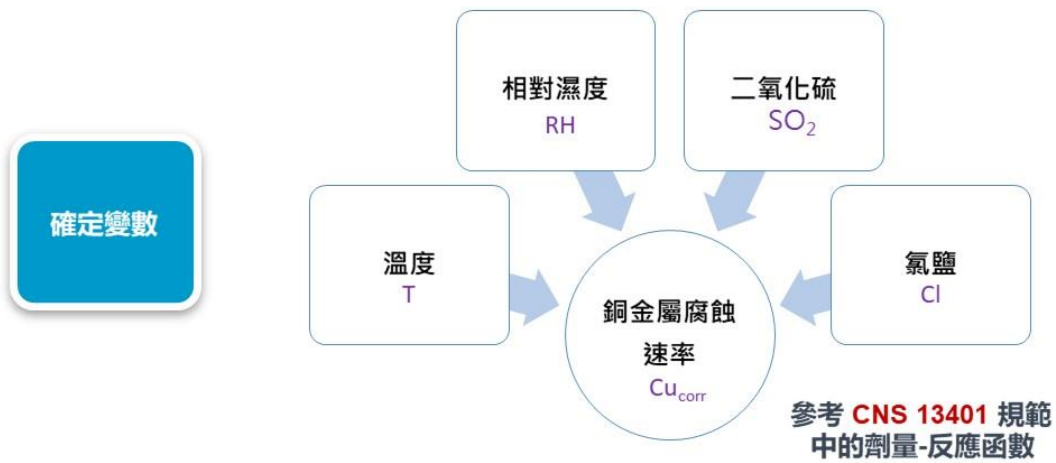
## 迴歸分析法(Regression Analysis)

- 應用統計分析技術以及假說驗證之方法
- 依統計數據配適一條合適的直線/曲線，找出變數間的函數關係

## 迴歸分析步驟



26



迴歸模式變數

變數名稱	變數代號	單位	說明
銅金屬腐蝕速率	$Cu_{corr}$	$\mu\text{m}/\text{yr}$	反應變數
溫度	T	$^{\circ}\text{C}$	解釋變數
相對濕度	RH	%	解釋變數
氯鹽沉積速率	Cl	$\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$	解釋變數
二氧化硫沉積速率	$\text{SO}_2$	$\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$	解釋變數

27

## 資料說明

## 原始數據：90筆

- 採用本所進行臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查之112年全臺90個大氣腐蝕試驗站的年資料

## 分析數據：83筆

- 扣除施工或試體遺失無數據6處，離群值1處(陽明山硫磺區)

## 相關資料引用

- T、RH：以鄰近氣象站的溫度、濕度數據計算
- 試驗站無調查Cl/SO<sub>2</sub>值：引用鄰近試驗站的調查數據



臺灣地區腐蝕環境調查試驗站

28

提出假設性  
之迴歸模式

## ➤ 模式假設

1. 真實情況：**銅金屬腐蝕受溫度、相對濕度、氯鹽、二氧化硫** 4 腐蝕因子影響
2. 兩者關係：**線性關係**
3. 此一關係可用試驗站數據來推估

➤ 提出假設性之迴歸模式：**線性模式**

$$Cu_{corr} = b_0 + b_1 T + b_2 RH + b_3 Cl + b_4 SO_2 + e$$

29

## ➤ 模式 1：線性模式

- 應用統計軟體SPSS 進行迴歸分析、估計迴歸參數。
- 配適得到**線性模式**如下：

$$Cu_{corr} = -32.073 + 0.616 T + 0.261 RH + 0.149 Cl + 0.014 SO_2$$

## 模式檢定與診斷

項目	檢定結果		診斷
顯著性	F檢定	F=18.267(P=0.001) → 模式顯著。	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 解釋變數SO<sub>2</sub>影響不顯著</li> <li>• 調整模式：將解釋變數減為T、RH、Cl 3項</li> </ul>
	t 檢定	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 常數項b<sub>0</sub>、參數b<sub>1</sub>、b<sub>2</sub>、b<sub>3</sub>的 t 檢定值達 95%顯著水準 →常數項b<sub>0</sub>不為0，解釋變數T、RH、Cl的影響顯著。</li> <li>• 參數b<sub>4</sub>的 t 檢定值未達95%顯著水準 →SO<sub>2</sub>影響不顯著，b<sub>4</sub>可能為0。</li> </ul>	

30

➤ 模式 2：3 變數線性模式

$$Cu_{corr} = -33.793 + 0.652 T + 0.279 RH + 0.152 CI$$

模式檢定與診斷

項目	檢定	診斷								
顯著性	<ul style="list-style-type: none"> <li>F檢定：F=22.465(P=0.001) → 模式顯著。</li> <li>t檢定：各參數 t 值均達95%顯著水準 → 各解釋變數影響顯著。</li> </ul>	檢定通過								
適配性	$R^2_{adj} = 0.440$	解釋力不佳								
基本假設	常態性：X 均質性：OK 獨立性：OK 線性重合：OK  常態機率圖  殘差圖 <table border="1" data-bbox="943 831 1134 1014"> <thead> <tr> <th>解釋變數</th> <th>VIF</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>T</td> <td>1.400</td> </tr> <tr> <td>RH</td> <td>1.562</td> </tr> <tr> <td>CI</td> <td>1.147</td> </tr> </tbody> </table> VIF值	解釋變數	VIF	T	1.400	RH	1.562	CI	1.147	<ul style="list-style-type: none"> <li>模式可能違反常態性基本假設</li> <li>進行模式校正，重新配適</li> </ul>
解釋變數	VIF									
T	1.400									
RH	1.562									
CI	1.147									

31

調整  
模式假設

➤ 大氣腐蝕原理

- 大氣腐蝕：水膜下的電化學反應
- 溫度、相對濕度：發生腐蝕的基本條件
- 氯鹽、二氧化硫：水膜產生後加速大氣腐蝕的因子

➤ CNS 13401 劑量-反應函數：顯示  $Cu_{corr}$  與 T/RH/CI/SO<sub>2</sub>之關係

- $Cu_{corr}$  與 CI/SO<sub>2</sub>：線性關係 (T/RH=定值)
- $Cu_{corr}$  與 T/RH：指數關係 (CI/SO<sub>2</sub>=定值)

➤ 變數轉換

- 反應變數：銅腐蝕速率取對數值  $\ln(Cu_{corr})$
- 解釋變數1：溫度 T
- 解釋變數2：相對濕度 RH
- 解釋變數3：氯鹽取對數值  $\ln(CI)$
- 解釋變數4：二氧化硫取對數值  $\ln(SO_2)$

➤ 轉換後的模式：對數線性模式

$$\ln(Cu_{corr}) = b_0 + b_1 T + b_2 RH + b_3 \ln(CI) + b_4 \ln(SO_2) + e$$

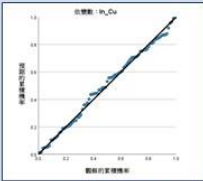
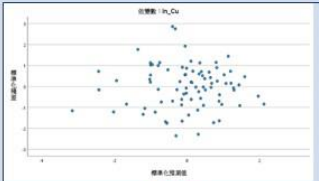
32

➤ 模式3：對數線性模式

• 配適得到：

$$\ln(\text{Cu}_{\text{corr}}) = -6.085 + 0.116 T + 0.042 \text{RH} + 0.333 \ln(\text{Cl}) + 0.267 \ln(\text{SO}_2)$$

模式檢定與診斷

項目	檢定	診斷										
顯著性	<ul style="list-style-type: none"> <li>F檢定：F值=33.930(P&lt;0.001)→模式顯著。</li> <li>t檢定：常數項與各參數t值均達95%顯著水準→各解釋變數影響顯著，常數項不為0</li> </ul>	檢定通過										
適配性	$R^2_{\text{adj}} = 0.616$	可接受										
基本假設	常態性：OK    均質性：OK    獨立性：OK    線性重合：OK   <table border="1" data-bbox="932 842 1139 1021"> <thead> <tr> <th>模式</th> <th>VIF</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>T</td> <td>1.741</td> </tr> <tr> <td>RH</td> <td>1.636</td> </tr> <tr> <td>ln(Cl)</td> <td>1.220</td> </tr> <tr> <td>ln(SO<sub>2</sub>)</td> <td>1.134</td> </tr> </tbody> </table>	模式	VIF	T	1.741	RH	1.636	ln(Cl)	1.220	ln(SO <sub>2</sub> )	1.134	模式無嚴重違反基本假設 33
模式	VIF											
T	1.741											
RH	1.636											
ln(Cl)	1.220											
ln(SO <sub>2</sub> )	1.134											

迴歸分析  
結果

➤ 依循統計推論程序，確認銅金屬腐蝕與主要腐蝕因子之關係為**對數線性模式**：

$$\ln(\text{Cu}_{\text{corr}}) = -6.085 + 0.116 T + 0.042 \text{RH} + 0.333 \ln(\text{Cl}) + 0.267 \ln(\text{SO}_2)$$

解釋與說明

- 銅金屬腐蝕的顯著影響因子：**溫度、相對濕度、氯鹽、二氧化硫**
- 4 腐蝕因子的變動可說明銅金屬腐蝕速率變動的**61.6%**
- 影響因子相對重要性：**氯鹽** > **溫度** > **二氧化硫** > **相對濕度**  
(由各解釋變數的標準化迴歸係數值判定)

環境分級  
預測方法

- 依據構建的迴歸模式，由大氣腐蝕劣化因子，預測銅金屬腐蝕速率( $Cu_{corr}$ )
- 按腐蝕環境分級標準，推估銅金屬的大氣腐蝕環境級別

提出  
預測模式

- 模式1：點預測模式( $Cu_{corr-h1}$ ) → 以模式的銅金屬腐蝕速率期望值為預測值

$$\ln(Cu_{corr-h1}) = -6.085 + 0.116 T_h + 0.042 RH_h + 0.333 \ln(Cl_h) + 0.267 \ln(SO_{2h})$$

- 模式2：保守預測模式( $Cu_{corr-h2}$ ) → 以模式的銅金屬腐蝕速率期望值加上2倍標準估計誤差值為預測值

$$\ln(Cu_{corr-h2}) = -5.06051 + 0.116 T_h + 0.042 RH_h + 0.333 \ln(Cl_h) + 0.267 \ln(SO_{2h})$$

35

預測正確率  
測試

- 測試資料
  - 113年臺灣大氣腐蝕試驗站的年資料86筆(扣除離群值與無數據者)。
- 測試方法
  1. 依各站腐蝕因子數據，求得2種模式的大氣腐蝕預測級別
  2. 比較預測級別與實際級別
  3. 令 預測正確=預測等級≥實際等級，計算2模式的預測正確率
- 測試結果
  - 模式1的預測正確率為30.2%，模式2的預測正確率為89.5%。
  - 模式2的預測正確率近90%的水準，可供為臺灣銅金屬腐蝕環境分級的一種推估方式。

## 討論

- 模式1的預測正確率過低，可能是模式的解釋能力較低所致，後續將再重新檢討影響因子、優化模式，據以提高模式的解釋能力。
- 可考慮建立非線性迴歸模式、機器學習模式，應用多變量分析技術評估腐蝕因子間的交互作用。
- 或可將風速、風向、降雨、日照等氣象因子納入考量，探討降雨沖刷效應、季風氣流的影響。

36

## 04 結論與建議

37

04

結論<sup>(1/3)</sup>

大氣腐蝕  
因子  
調查結果

### ➤ 氯鹽沉積速率

- 4季中以**秋季**數值較高、變異較大，**冬季**次之，**春、夏2季**較低
- 較高值大多發生在秋、冬2季**北部至西部沿海地區**

### ➤ 垂直海岸試驗線

- **花蓮港試驗線**的平均數值在**秋、夏2季**遠高於其他季節與其他試驗線。

### ➤ 二氧化硫沉積速率

- 除了靠近硫磺區的**陽明山國家公園**外，較高值發生在**北部濱海十八王公橋**與**特定產業園區、火力電廠**

### ➤ 特定試驗點

- **彰濱、大發產業園區**與**臺中火力電廠**、各有1季數值**超過P3等級(非常高度污染)**
- **官田產業園區**4季數值、**臨海、龍德產業園區**的**春、夏2季**數值**達到P3等級(非常高度污染)**

38

大氣金屬  
腐蝕速率  
試驗結果

➤ 垂直海岸試驗線

- 碳鋼金屬：以台塑六輕、基隆2試驗線秋季數值最高、4季差異最大
- 鋅金屬：以臺中港、台塑六輕2試驗線的秋、冬2季數值，以及桃園試驗線的夏季數值較高
- 銅金屬：以台塑六輕、臺中港2試驗線的秋、冬2季數值最高、4季差異最大
- 鋁金屬：以台塑六輕試驗線的秋、冬2季數值最高，其次以臺中港試驗線秋季數值、花蓮港試驗線冬季數值較高

➤ 特定試驗點

- 碳鋼金屬：以台塑六輕及臺中電廠秋季值最高
- 鋅金屬：以彰濱產業園區冬季值最高，臺中電廠秋季值、大潭電廠春季值次高
- 銅金屬：以台塑六輕秋季值最高，臺中電廠秋季值次高
- 鋁金屬：以台塑六輕秋、冬季值最高；彰濱、觀音產業園區秋季值次之

39

銅金屬  
關聯性分析

1

- 本計畫運用迴歸分析法建立銅金屬腐蝕速率與大氣腐蝕劣化因子間的迴歸模式。

2

- 並依統計推論應遵循程序，完成迴歸模式顯著性、配適度檢定及確認基本假設符合，確立分析結果為具意義之模式。

3

- 結果顯示：在臺灣地區，溫度、相對濕度、氯鹽、二氧化硫是影響銅金屬腐蝕的顯著影響因子，兩者間為對數線性關係模式：

$$\ln(\text{Cu}_{\text{corr}}) = -6.085 + 0.116 T + 0.042 RH + 0.333 \ln(\text{Cl}) + 0.267 \ln(\text{SO}_2)$$

4

- 據以提出的保守預測模式，經以實際數據驗證，預測正確率近90%，可做為進行臺灣銅金屬腐蝕環境分級之另一種推估方式。

40

## 建議

1. 未來持續建立臺灣地區構造物腐蝕環境潛勢分析之**完整數據資料庫**，並針對前期累積量測與試驗分析資料，進行**統計與大數據分析**，研析大氣腐蝕因子與金屬材料之關聯性。
2. 持續藉由**辦理教育訓練、研討會及出版年報**，推廣「臺灣腐蝕環境分類資訊系統」於交通部、公路局、高速公路局、港務公司及顧問公司等選用金屬材料及防蝕工法參考應用，確保公共工程如橋梁、碼頭等構造物，能**達到或超過設計使用年限**。

41



# THANK YOU

簡報完畢  
敬請指教



42