

中華民國第 62 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 地球與行星科學科

第三名

051910

偷電不著蝕把鋁?海洋環境因子與防腐

學校名稱：南投縣立旭光高級中學

作者： 高二 洪珮珊 高二 李苡禎 高二 陳思勤	指導老師： 李佩樺 陳英田
---	-----------------------------

關鍵詞：氧化還原電位、海洋環境腐蝕、Tafel 曲線

摘要

臺灣海洋環境因子與腐蝕速率相關重要性依序應為流速、鹽度、溫度、溶氧量及酸鹼值。流速以台中港數值較大且變動大；溶氧量以基隆港溶氧最低，其餘四港口溶氧量在水深 6m 內為正常值；海水溫度以高雄港均溫為最高與其緯度位置有關；海水之 pH 值與腐蝕速率較無關係；海水鹽度以花蓮港變動較大，其它港口變化約為 21~32 ‰。金屬腐蝕速率以碳鋼最快且大於銅、鋅、鋁，碳鋼腐蝕速率應為台中港、基隆港 > 花蓮港、高雄港 > 金門港。海洋環境的防腐蝕法可利用太陽能板之陰極保護法及考量天候狀況與加裝合適電子元件之線路設計來得到一合適電流不致使造成電解水而生成 O₂。抗腐蝕實驗中其電解質溶液顏色變化及沉澱物一併考量可為腐蝕速率之另一種新型測量方式。

壹、研究動機

台灣所處在四面環海的狀態，不管是風力發電的底座還是橋墩，都會因為腐蝕的問題變得不堅固，易倒塌。從以前到現在很常在新聞上看到大橋因為被腐蝕掉而因此斷掉，造成嚴重的傷害，慶幸的是傷亡很少。因此我們對腐蝕的成因與抗腐蝕的方法有更多的好奇，我們參與科研社二年的時間裡，共同參與了海洋環境腐蝕的探究，今年想更加深加廣判讀更多海洋環境資料，上網查詢了臺灣海域（台中港、基隆港、花蓮港、高雄港、金門港）的港灣資料，包含了與海水性質相關的溶氧量、鹽度、流速、腐蝕因子、pH 值及水溫等以及將我們在社團中所學習到的高中電化學基礎與地球科學海洋水文資料做結合，並希望能跨領域、跨科結合運用在台灣海洋環境防腐蝕工程領域，在未來中能對臺灣離岸風電能源與橋樑工程做出一點貢獻（圖 1）。



圖 1、腐蝕速率調查之研究動機。（參考文獻 4）

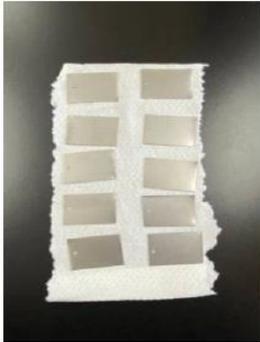
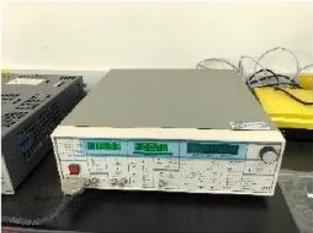
貳、研究目的

- 一、 臺灣港區海水水質調查資料彙整與分析。
- 二、 臺灣港區海水化性及物性與腐蝕電位之關係探討。
- 三、 比較臺灣港區海水環境因子與腐蝕速率之權重關係。
- 四、 利用電極氧化及還原電位原理來設計海洋環境防腐蝕之嘗試。

參、研究設備與器材

- 一、 實驗器材與藥品：鐵絲、鐵片、鱈魚夾、電線、KCl、熱熔膠、鐵氟龍膠帶、五口瓶、金屬片、點滴瓶、三向閥、塑膠管、漏斗、透明壓克力箱、各式電極、五金工具、雙氧水、二氧化錳、氯化亞錫、NaCl、HCl 與電子零件。
- 二、 儀器設備：恆溫水槽、恆電位儀、光譜儀、個人電腦及相關軟體。
- 三、 測量工具儀器：電子天平、數字型三用電表、溶氧機、溫度計、尺（表 1 為部分儀器及設備）。

表 1、部份實驗儀器及設備。

			
電磁加熱攪拌器	超音波振盪器	金屬鐵片	太陽能板
			
DO-600 溶氧計	EC-301 恆電位儀	氯化亞錫	鋁罐

肆、研究步驟與方法

我們確立要探究臺灣海洋環境因子、腐蝕速率與利用氧化還原電位(ORP... Oxidation-Reduction Potential)來嘗試抗腐蝕實驗之關聯性這個主題之後，便開始著手蒐集相關資料，我們根據此次的研究目的與所欲探討之主題，設計實驗步驟與流程圖(圖2)如下：

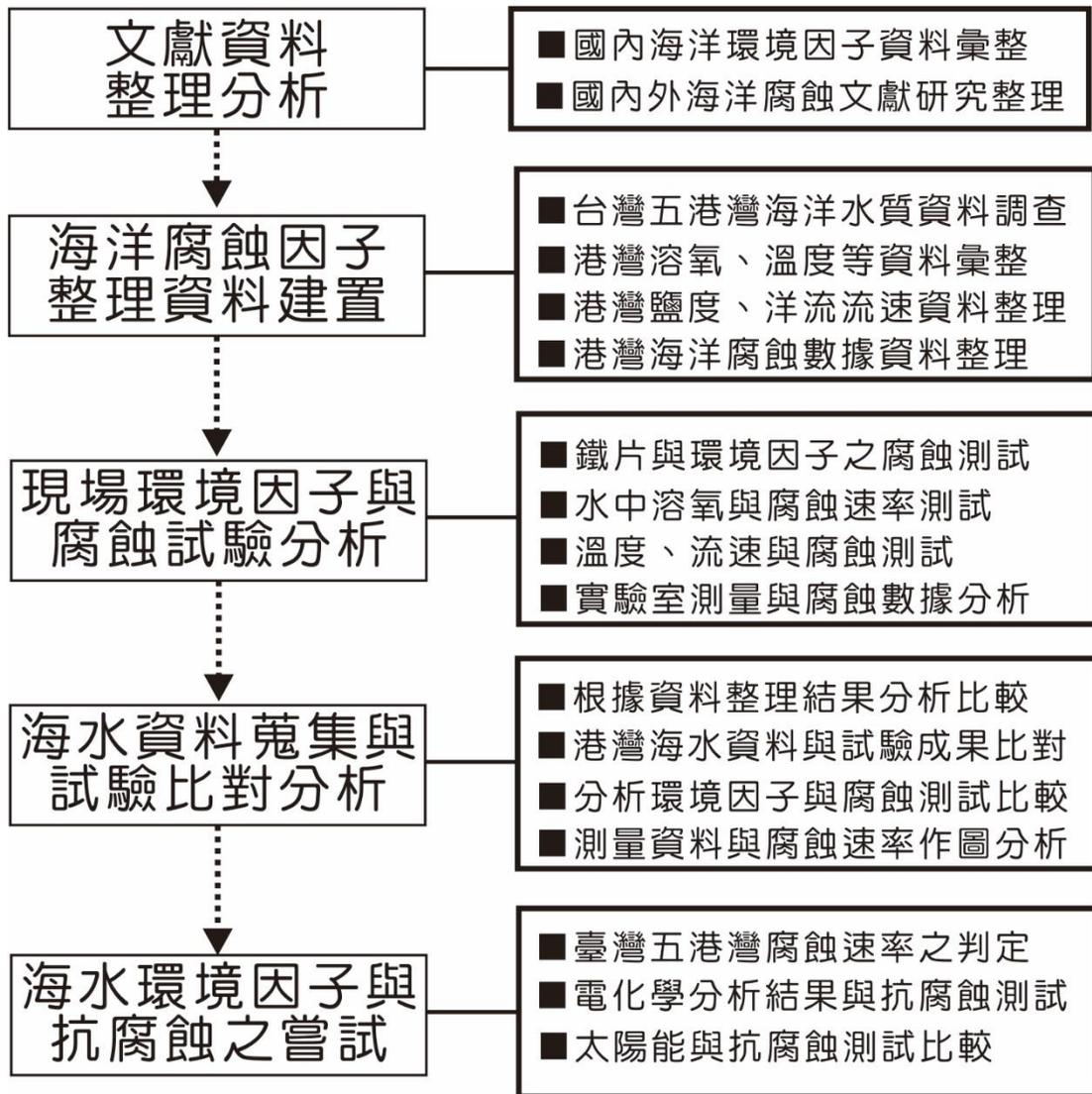


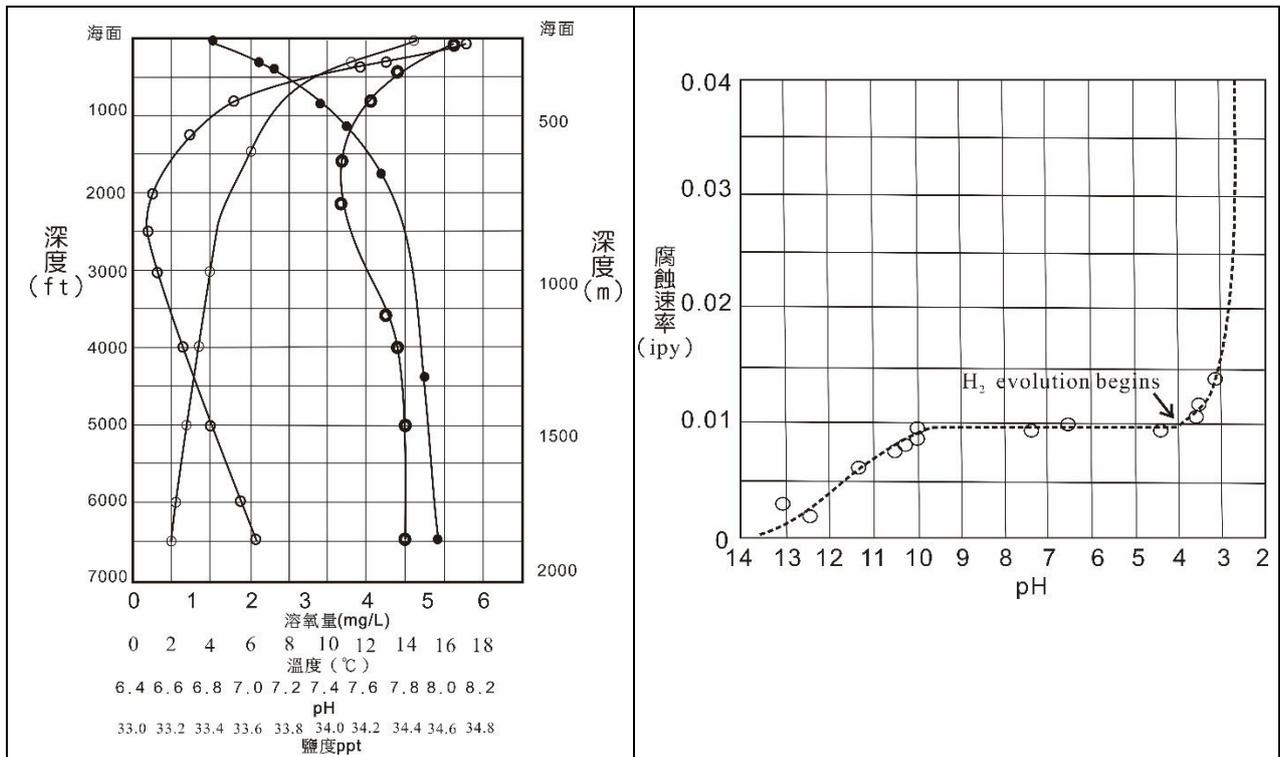
圖 2、實驗流程圖。

一、 研究原理。

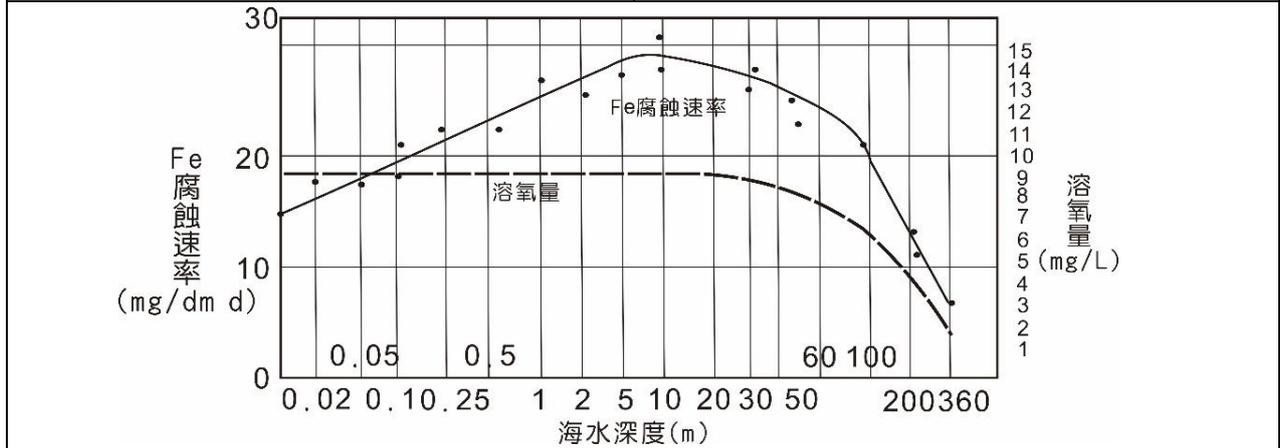
(一) 蒐集分析海流與腐蝕速率之相關物理與化學資料。

1. 海洋物理特性與腐蝕速率的關係。

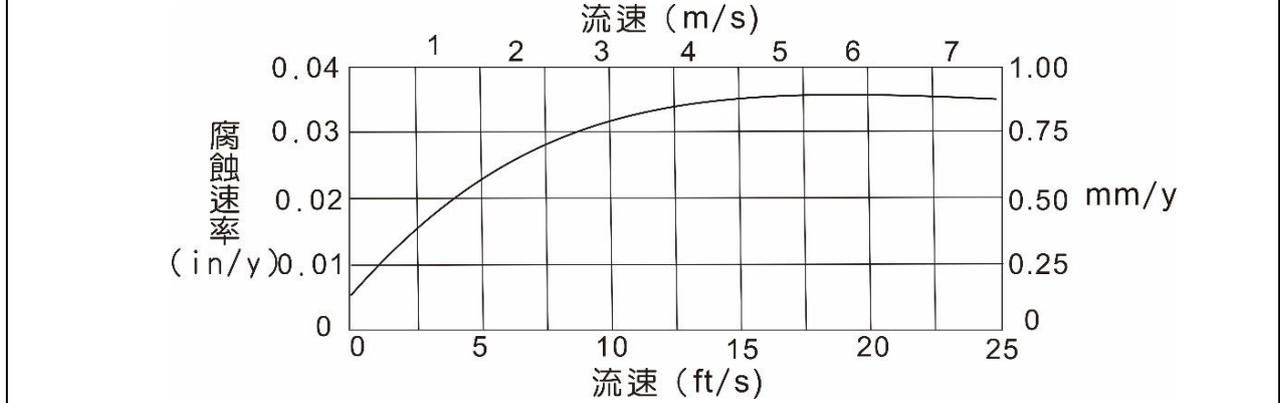
- (1) 在科研社團中已知溫度和鹽度是衡量海水特性的兩大物理量，又溫度和鹽度共同決定了海水的密度，除了海水表面的海流受盛行風影響之外，海水的密度差即是影響深層海流之主因。而除了溫度、鹽度之外，溶氧量與 pH 是影響腐蝕速率之重要因素，且這些海洋環境因子皆會隨深度而有所不同(圖 3A)。
- (2) **海洋環境因子之探討**：海水水中大約含有 3.5%(重量百分比)之氯化鈉(NaCl)或鹽度(Salinity)約介於 32~36 ppt(千分之一)，即海水含有很高的鹽分(以離子濃度或鹽度表示之)，亦是鋼鐵材料最易發生電化學腐蝕反應的環境，而海水中氯化物在腐蝕過程中亦可在金屬表面上幫助在較低的相對濕度形成液膜，而此液膜會阻止氧化膜的形成，進而有助於陰極上氧氣的還原反應，且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進而加速腐蝕反應。在封閉的海灣水域而言，溫度之影響，對海水之化性、物性及海洋微生物等都有相當密切關係，一般而言，溫度是影響反應速率及質量傳送之重要因素，在化學動力學理論中，溫度每上升 10°C，腐蝕速率則增加一倍。一般海水之 pH 值 正常情況下是在 8.2 上下左右，而一般金屬材料在水溶液之腐蝕反應速率雖與 pH 值有密切關係，但是當 pH 值介於 4~10 之間時，金屬維持一定腐蝕速，而僅與氧氣擴散至金屬表面之速率有關(圖 3B)。而溶氧量(DO)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 OH⁻，OH⁻再與陽極半反應部份中溶解出之 Fe⁺² 作用，形成 Fe(OH)₂之腐蝕生成物，而 Fe(OH)₂ 會繼續繁衍生成各種不同之鐵銹生成物。海水中鋼鐵之腐蝕速率依其表面之溶氧量而定，而在正常的大氣壓下，海水之溶氧量與溫度及鹽度維持一平衡關係(圖 3C)。海水之導電度亦是決定金屬腐蝕量多寡之一個重要因素，海水具有很高的比導電度(mhos/cm)，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。海水流速對金屬腐蝕速率有多方面的影響(圖 3D)，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(由參考文獻資料總整理如圖 3 所示)。



A、海洋深度與海水溶氧量、pH 值以及鹽度關係。
 B、海水 pH 值以及金屬腐蝕速率之關係。



C、海水深度與海水溶氧量與金屬鋼材之腐蝕速率關係圖。

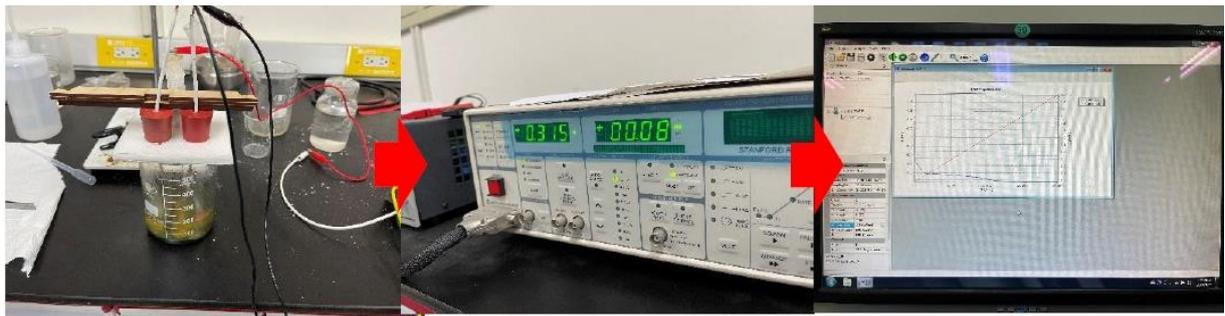


D、金屬鋼材之腐蝕速率與海水流速之關係圖。

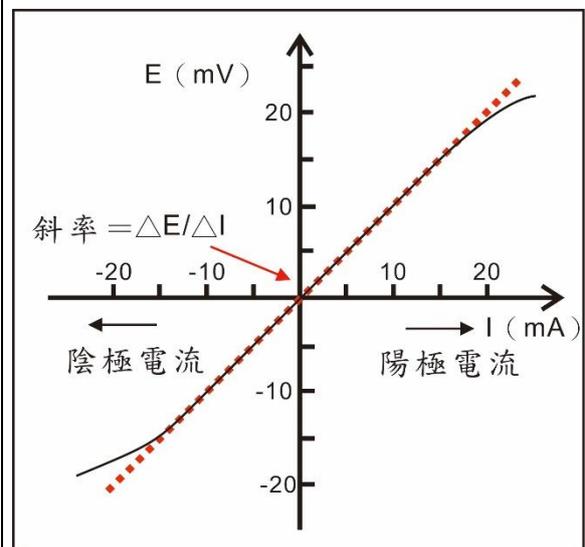
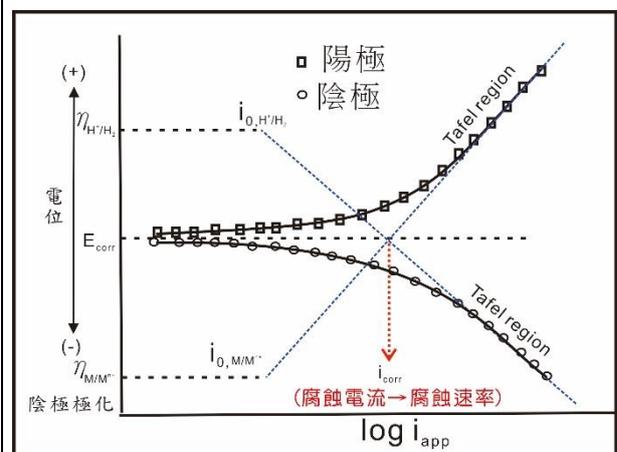
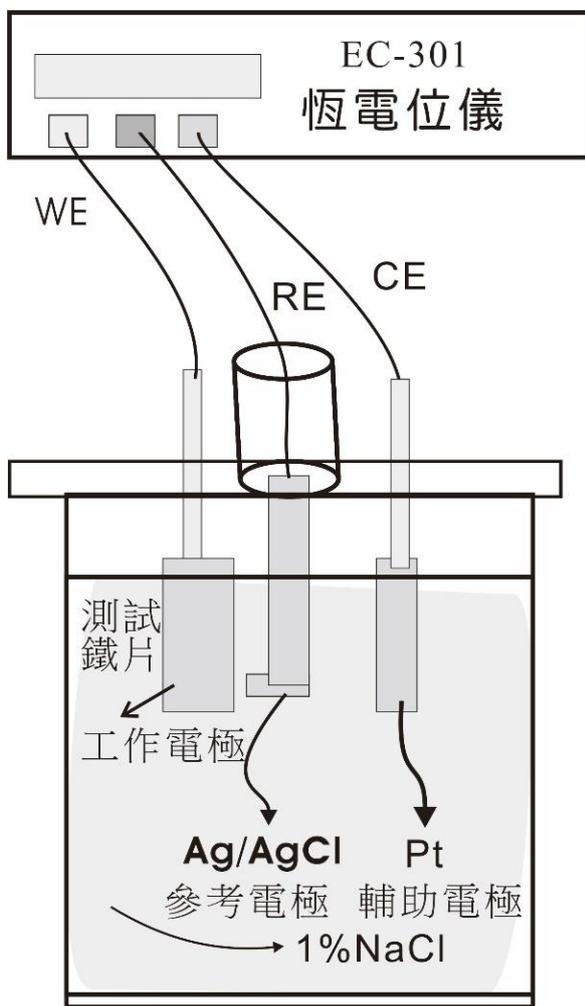
圖 3、海洋環境因子相互關係以及其與腐蝕速率之關係圖。

2. 電化學與腐蝕速率之關係。

- (1) 腐蝕電化學原理：金屬材料在水溶液中或含水分的大氣環境下的腐蝕程序本質是電化學反應，腐蝕反應涉及帶電離子通過金屬-電解質溶液之間界面的電子轉移反應，在水溶液中離子當作導體。在腐蝕過程中，金屬先被氧化成為帶正電的離子，然後或進入水溶液，或成為金屬鹽而留在金屬表面，此即陽極反應過程；至於被氧化的金屬所失去的電子，則通過金屬而流向金屬表面的另一位置，在那裡由水溶液中的陽離子吸收而成還原反應，此即陰極反應過程，由此可知金屬的腐蝕乃是金屬的陽極氧化，及環境中氧化劑在陰極還原的偶合電化學反應的結果。在電化學腐蝕中，金屬本身起著陽極和陰極的短路作用，所以不會產出可用的電能，但陽極反應則會造成金屬被破壞，又其中氧化及還原反應的化學能乃全部以熱能的形式散失。所以在自然腐蝕的情況下，金屬上的陽極反應和陰極反應的速率乃是相等的，所以金屬保持電中性狀態，而不同金屬具有不同的電化學電位。
- (2) 恆電位法(potentiostatic)極化法是目前最常被使用的電化學分析技術(圖 4A)。設備包括恆電位儀(potentiostat)、工作電極(working electrode, WE)、參考電極(reference electrode, RE)、輔助電極(counter electrode, CE)。工作原理為工作電極為欲測量的試片(鐵片)，參考電極的功用是量測試片在目前環境下的電位，我們是使用銀/氯化銀電極(Ag/AgCl , $E_{\text{Rd}}^0=0.197\text{V}$)，而輔助電極功用為與試片形成迴路供電流導通，通常是鈍態的材料，我們使用白金電極(Pt)，整個實驗的過程中，輸出的電流、電壓大小，由恆電位儀(EC-301)來控制(圖 4B)。
- (3) 由恆電位法或動電位極化法紀錄實驗過程中，電位值或電流值之變化情形，可得一典型的極化曲線(Tafel 曲線)，圖 4C 中曲線可分為陰極極化曲線(cathodic polarization)與陽極極化曲線(Anodic polarization)，陰極極化曲線代表整個實驗過程中，氫氣的還原： $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$ ，而陽極極化曲線為金屬的氧化(金屬試片) $\text{M} \rightarrow \text{M}^{n+} + n\text{e}^-$ 。
- (4) 圖 4C 中 E_{corr} 即為金屬開始發生腐蝕的電位；而塔弗外插法(Tafel extrapolation)在腐蝕電位 $\pm 50\text{mv}$ 區域附近，可得一線性區域，稱為塔弗直線區(Tafel region)，陰極與陽極極化曲線的塔弗直線區切線(β_a 、 β_c)外插交於橫軸，即為腐蝕電流(I_{corr})，可代表腐蝕速率。線性極化法，在低電流時，電壓與電流的對數有塔弗公式的線性關係，而在電流更低時，大約在腐蝕電位 $\pm 10\text{mv}$ 的範圍內，外加電壓與電流密度也會呈線性關係(如圖 4C)亦可求得腐蝕電流(I_{corr})。



A、本實驗研究之實際恆電位儀裝置以及三電極裝置實際圖。



B、本實驗研究之實際恆電位儀裝置以及三電極裝置示意說明圖。

C、利用 Tafel 曲線求腐蝕速率及線性極化法求腐蝕電流說明圖。

圖 4、本實驗之恆電位儀裝置與所利用 Tafel 曲線求腐蝕速率說明圖。

二、 蒐集海洋環境因子與腐蝕速率資料整理與分析。

(一) 下載臺灣五大港口海洋環境因子(溶氧量、溫度與 pH 值)數據資料整理分析。

1. 登入交通部運輸研究所-台灣腐蝕環境分類資訊系統網站(參考文獻 5)。
2. 在左列選擇溶氧量(DO)後，再選擇台中港按下 OK 鍵，即有年度當季最新水深 0m、3m 及 6m 之溶氧量資料。
3. 將滑鼠移到圖檔中即可顯示溶氧量最大、最小以及平均值，我們選擇平均值鍵入試算表整理數據資料。
4. 再依上步驟選擇酸鹼值(pH)以及水溫(°C)後再選擇不同港口，我們採台中港、基隆港、花蓮港、高雄港以及金門港五大港口為探究對象(圖 5)。
5. 酸鹼值以及水溫數據處理步驟同上步驟 1~4。

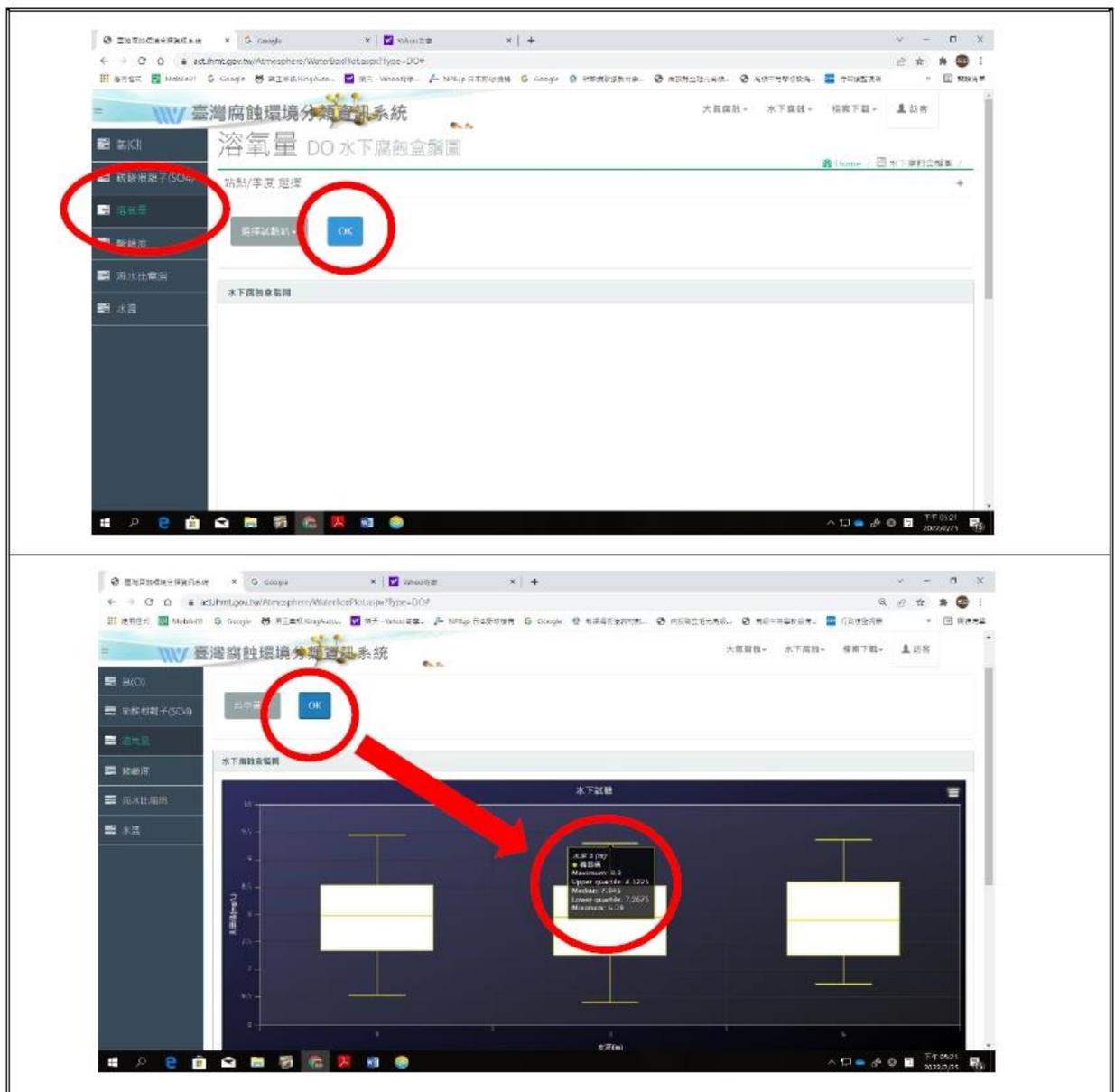


圖 5、下載臺灣五大港口海洋環境因子(溶氧量、溫度與 pH 值)數據資料圖示。

(二) 由我們自己從網路上向博客來書店訂購之金屬材料腐蝕環境調查研究(2/2)書籍中，關於海洋環境因子(鹽度)數據資料整理與分析。

1. 將所擇定之五大港口（台中港、基隆港、花蓮港、高雄港以及金門港）之 2016 年各港口區所測得之鹽度數據資料（水面下 0m、3m 及 6m）鍵入試算表中。
2. 重複以上步驟，取各港口數個測樣點鍵入試算表再求其平均值（圖 6A）。

(三) 下載臺灣 2019 年港灣海象觀測資料統計年報彙整五大港口海洋洋流速率數據資料整理分析。

1. 登入交通部運輸研究所港灣技術研究中心網頁，點選左列中心出版品，下載 2019 年港灣海象觀測資料統計年報（12 港域海流觀測資料）。並將其資料列印出為書面資料以方便閱讀及統計（圖 6B）。
2. 選取每月 5 港口海域主要測站每日流速平均值/蒐集率統計表，將其數據資料鍵入試算表再取其平均值，可得到 5 大港口之歷年各月份海流流速平均資料。

Figure 6A illustrates the process of collecting salinity data. It begins with the book cover for "Metal Corrosion Environment Investigation (2/2)". A red arrow points to a table titled "表 5-11 花蓮港區水質測測分析結果(1985 年)" which lists salinity data for different ports and depths. Another red arrow points to a screenshot of a Microsoft Excel spreadsheet where this data is being entered into columns for salinity at 0m, 3m, and 6m depths for various ports.

A、整理臺灣五大港口海洋環境因子-鹽度數據資料。

Figure 6B illustrates the process of collecting ocean current velocity data. It starts with a screenshot of the "Marine Technology Research Center" website. A red arrow points to a printed document titled "表 4-11 2019 年 12 月 12 港域主要測站時最大流速/蒐集率統計表". Another red arrow points to a screenshot of an Excel spreadsheet where this data is being entered into columns for different ports and months.

B、整理臺灣五大港口海洋環境因子-海流流速數據資料。

圖 6、整理臺灣五大港口海洋環境因子(鹽度與海流流速)數據資料。

(四) 下載臺灣五大港口海洋環境腐蝕速率資料整理及分析。

1. 登入港灣環境資訊網頁，點選網頁上方港區腐蝕，再選取 5 大港口（台中港、花蓮港、高雄港基隆港及金門港）後挑選年份（2010~2020）。
2. 將網頁所呈現之各四季以及對應之四種金屬材料之腐蝕速率鍵入試算表，統計分析之(圖 7)。

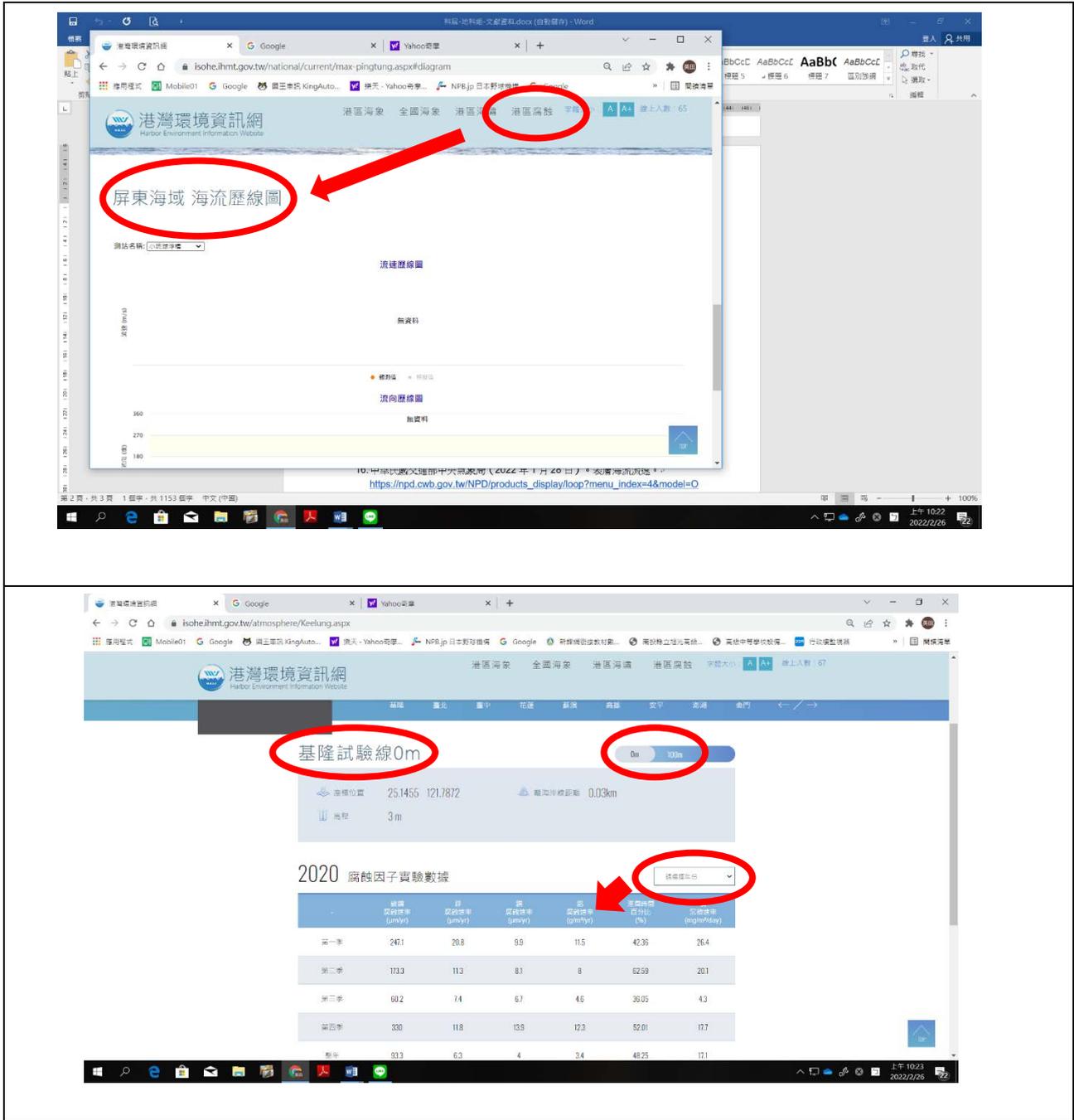


圖 7、整理臺灣五大港口腐蝕速率之數據資料。

三、實驗室現場操作環境因子模擬海流變因與腐蝕速率之實驗分析。

(一) 模擬海流鹽度變因與流速之關係。

1. 依據我們在之前的初步研究果已知道水質鹽度差、溫度差以及流速與腐蝕速率之相對應關係，例如鹽度差愈大則流速確實愈快，水：食鹽的重量比愈高時，時間的差異愈小，彼此流速更相近。且可發現溫差所造成的流動顯然比鹽度差所造成的流動較快，亦可知道溫度所造成的密度差比鹽度所造成的密度來得小，但是溫差所造成之流速還是比較快，或許這還有因為熱量傳遞所造成之對流會影響著密度差或濃度差所造成之流速差異。
2. 依據以上，我們擇一鹽度差所造成水流流速之試驗嘗試比較實驗再現性。設計了如圖 8 的控制變因如玻璃管柱長 120cm、直徑約 5cm，並固定度角。
3. 固定溫度之下改變鹽水比例，在室溫 25°C 下，調配固定 100g 的水分別加上食鹽 2、10、15、20、25 及 30g 等不同比例之水溶液並加入藍墨水增加辨識度。
4. 將玻璃管柱內加入一般室溫水至固定高度，再以燒杯分別取 50ml 調配好之鹽水（藍墨水），從刻度開始輕輕瞬間倒下，紀錄到底部刻度（60cm）之時間。

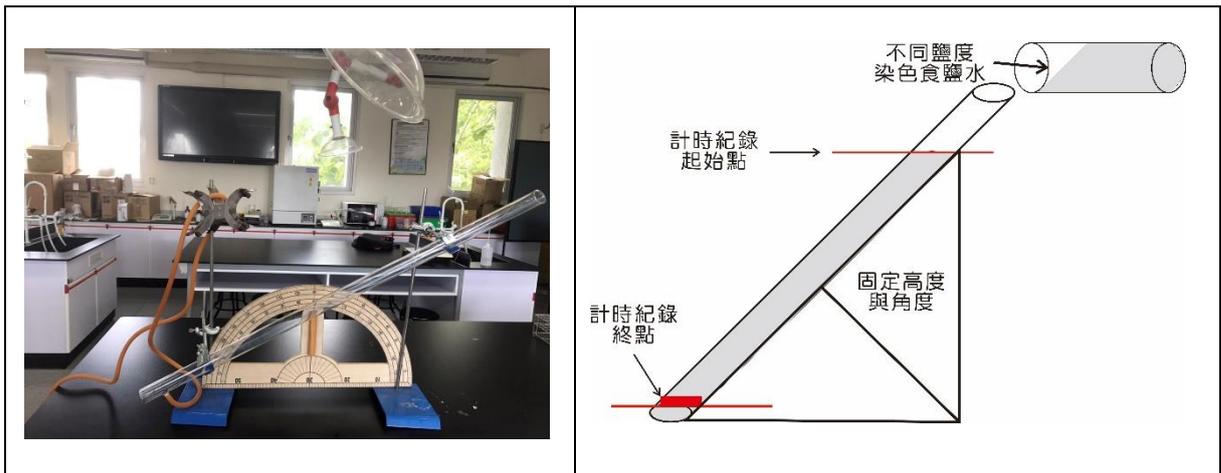


圖 8、鹽度大小差異所造成液體流動之實驗再現性裝置圖。

(二) 利用恆電位儀測量金屬試片在靜止水與流動水流之腐蝕速率實驗再現性。

1. 海流流速已被證實與海洋腐蝕速率有關，而我們在之前的實驗亦證明實驗室之恆電位儀 EC-301 確實可以證明流動水之流速與腐蝕電流之關係。已經得到驗證之結果如水流速愈快則金屬之腐蝕電流越大意即金屬腐蝕速率越快。
2. 為了證明實驗再現性以及水流動快慢與腐蝕速率之對應關係，我們亦嘗試測量此次實驗鐵片試樣在靜止與流動 3% 鹽水之腐蝕電位及電流之差異(如圖 9)。
3. 進水口在輔助電極處、出水口在工作電極處，流動時是為順流方向。一樣將滾動流量控制閥分成快、中、慢三個段次，並將流速以流量計算定量化流速值。
4. 恆電位儀從 -0.9V 線性動電位掃瞄至 +0.5V，由 Tafel 曲線找出其腐蝕速率值。

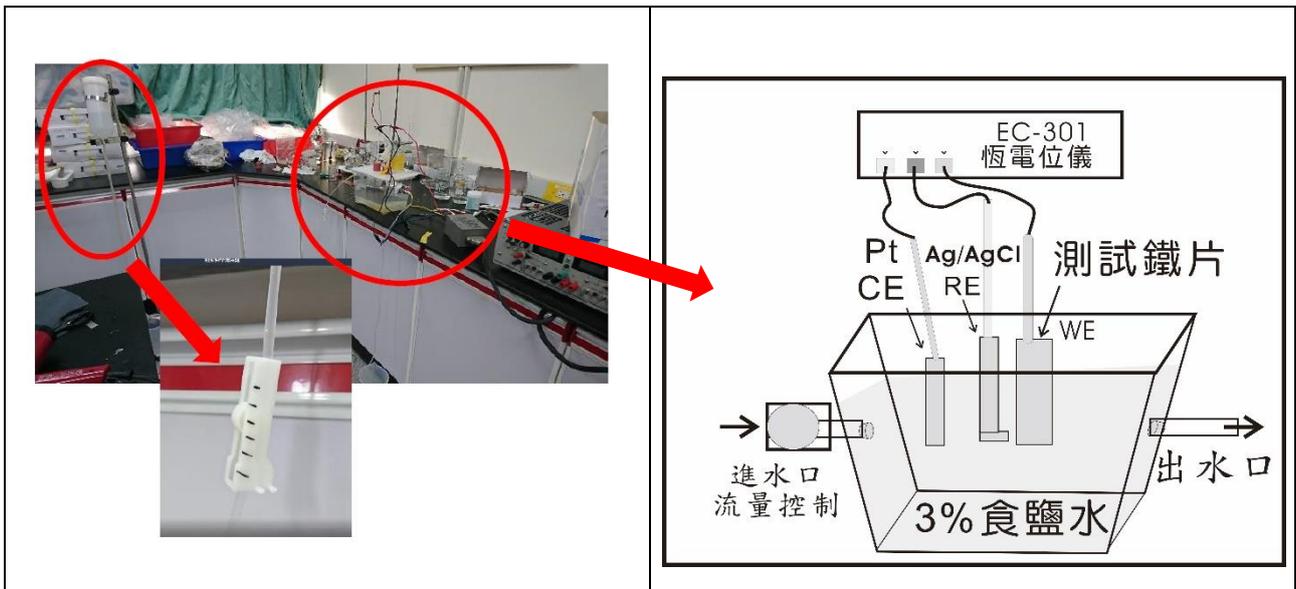


圖 9、流量分段大小（流速）差異所造成腐蝕電流之實驗再現性裝置圖。

(三) 溶氧量與腐蝕電流之關係測試。

1. 除了鹽度、溫度與流速跟海洋環境之腐蝕速率有關之外，海水 pH 值以及溶氧量亦會影響金屬之腐蝕速率，而海水之 pH 值因為變化不大且金屬腐蝕即是金屬氧化，因此我們嘗試測試溶氧量與 EC-301 所測得腐蝕速率之相對應關係。
2. 利用雙氧水加二氧化錳所產生之氧氣以不同時間（0、5、10、15 及 20 分鐘）灌入水中，製作其 Tafel 曲線測量其交換電流意即腐蝕速率（加氧裝置如圖 10）。
3. 腐蝕電流之實驗裝置亦如圖 4 恆電位儀實驗測量裝置。以 LSV 法，從 -0.9V 線性動電位掃描至 +0.5V，製作 Tafel 曲線嘗試找出其溶氧與腐蝕速率之關係。

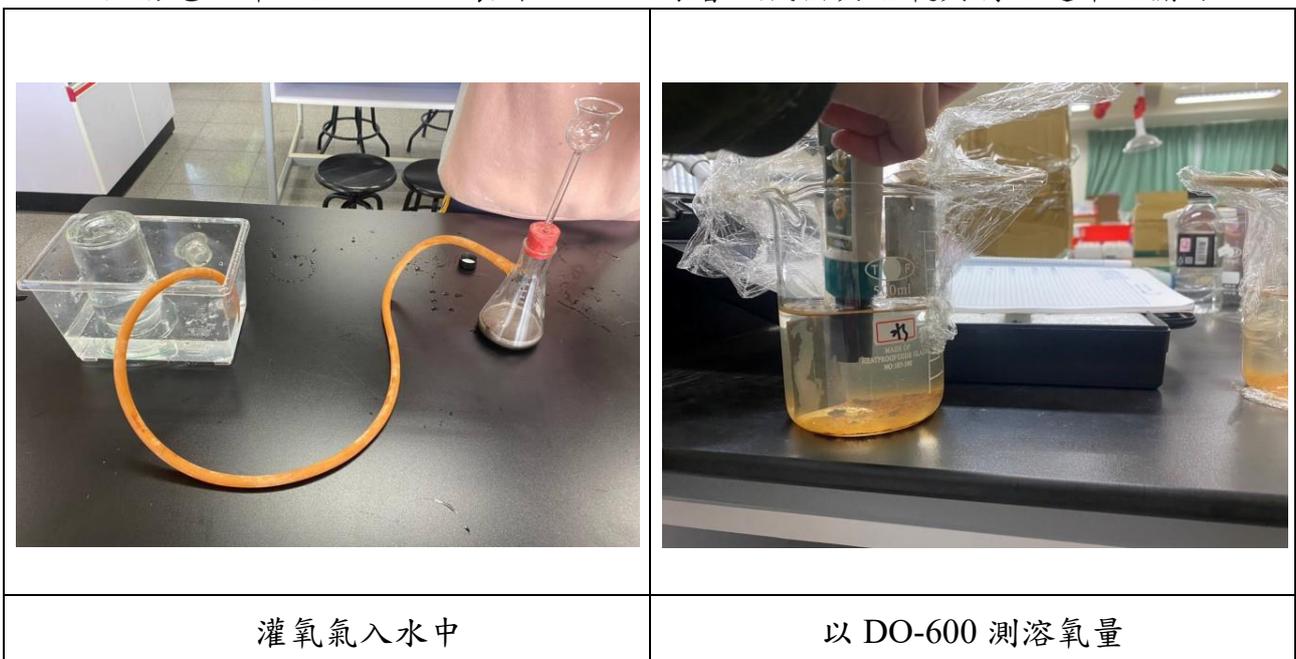


圖 10、以不同時間灌氧氣入水中，測量溶氧量之實驗裝置圖。

(四) 溫度與腐蝕電流之關係以及重量損失之測定。

1. 高中化學反應動力學告訴我們溫度每增高 10°C (10K) 反應速率會加快為 2 倍，因此我們亦決定設計一實驗測試，看看溫度每升高 10K 其金屬腐蝕速率之關係為何？嘗試測試溫度改變與 EC-301 所測之腐蝕速率的相對應關係。
2. 將前處理好之鐵片，分別放入不同 $3\%\text{NaCl}$ 水的燒杯中，分為水上鐵片與水下鐵片之 2 試樣，再分別放入不同溫度之恆溫水槽 (30 、 40 、 50 、 60 及 70°C) 放置 10 天，10 天後取出，測試其 Tafel 曲線測量其交換電流意即腐蝕速率(圖 11)。
3. 腐蝕電流之實驗裝置亦如圖 4 恆電位儀實驗測量裝置。以 LSV 法，從 -0.9V 線性動電位掃描至 $+0.5\text{V}$ ，製作 Tafel 曲線嘗試找出其溫度與腐蝕速率關係。
4. 我們也嘗試以 4 位數天平測量氧化(腐蝕)前後之鐵(試)片的重量損失。
5. 測量前之試片先以清水洗再擦拭乾淨，以 40g 氯化亞錫+ 1000ml 的水混合後，再加 560ml 的 6M 鹽酸成一測量前處理溶液，將清洗好的鐵片各自放入溶液中前處理溶液，浸泡 5 分鐘，連續重複三次，將其用清水清洗乾淨，擦乾備用。

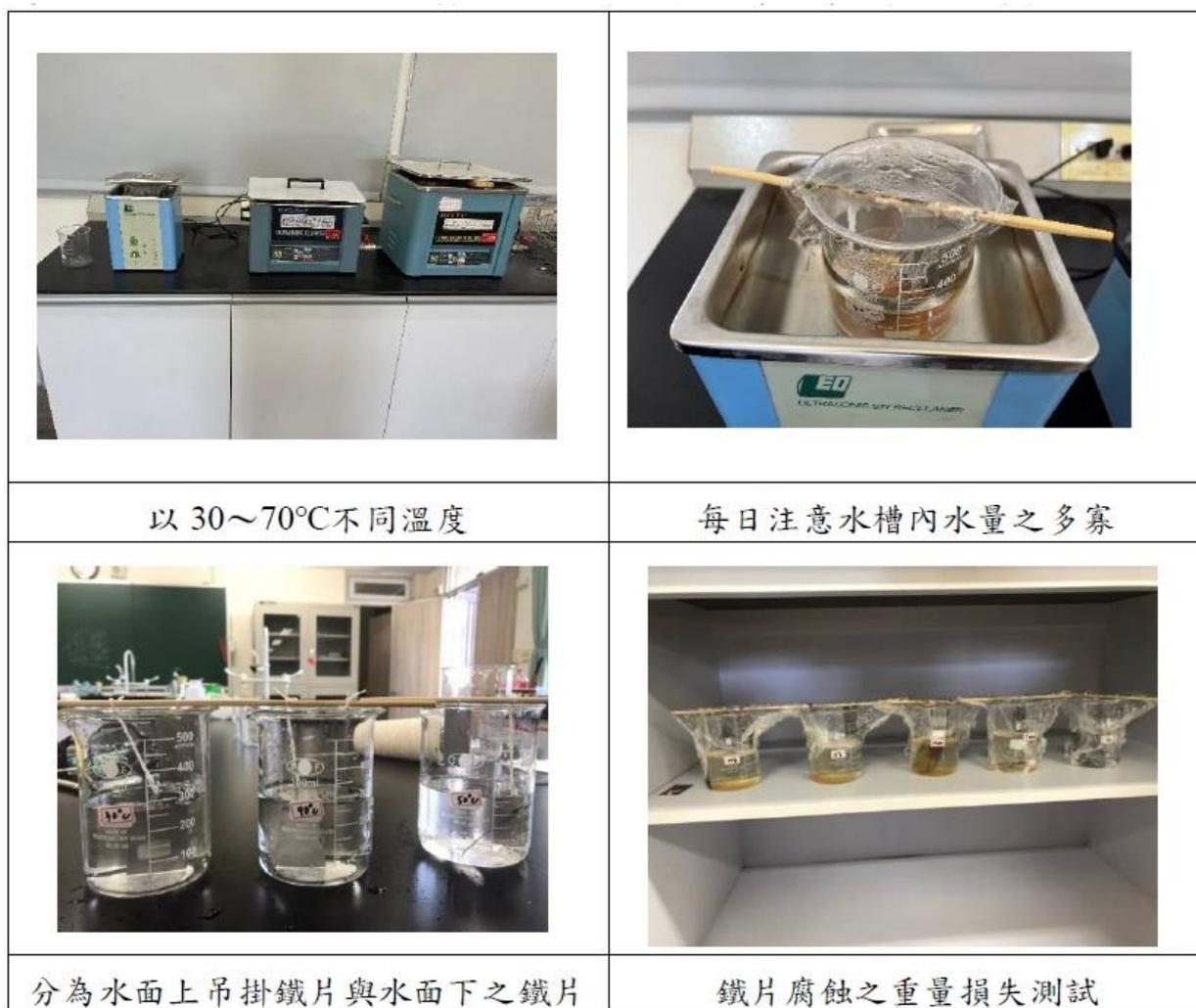


圖 11、試片放入不同溫度 $30\sim 70^{\circ}\text{C}$ 之恆溫水槽，10 天後測其腐蝕速率。

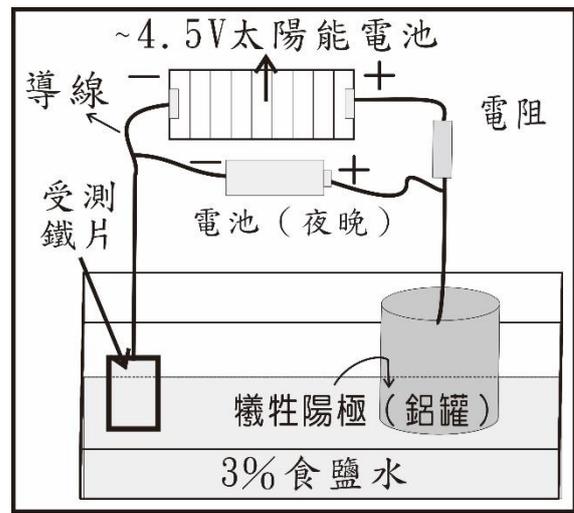
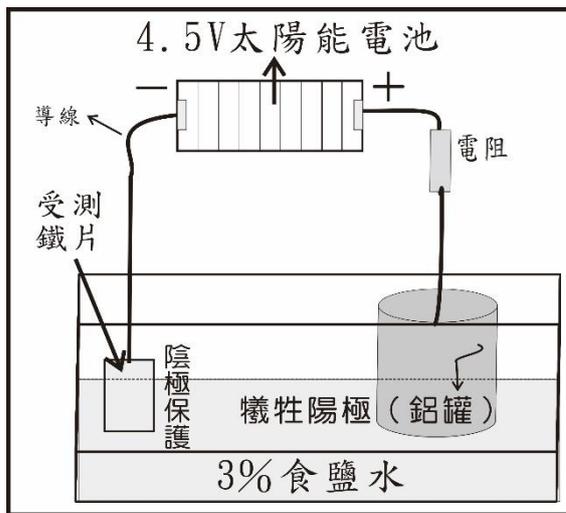
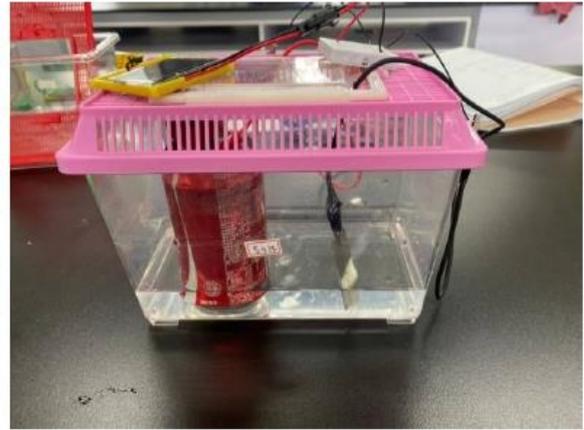
四、海流環境因子資料分析與模擬海流變因與腐蝕速率之實驗比對。

- (一) 將網路以及書本所蒐集整理之數據與實驗數據做比較，嘗試找出海水環境因子與腐蝕速率之相對應關係。
- (二) 從實際觀測紀錄以及實驗分析結果嘗試找出影響最甚之海洋環境因子，繼而藉由電化學相關技術嘗試設計抗腐蝕之實驗測試。

五、海洋環境因子與抗腐蝕之實驗嘗試。

- (一) 我們臺灣是一個海島型國家，海洋環境的腐蝕確實有深入研究之必要，期盼我們的初步研究可以為臺灣社會做一些實際的貢獻，爾後類似南方澳單拱肋鋼橋的斷橋事件可以不再發生，腐蝕只能發生在金屬的表面，所以任何可改變金屬表面或其所處環境的措施，皆可改變腐蝕反應的速率，這是腐蝕防治的思維基礎。藉加入添加劑以減緩腐蝕是為抑制，其根本是降低環境對金屬的攻擊作用。腐蝕抑制的機制或為減低腐蝕反應發生的可能性，或為降低腐蝕的速率，或是兩者兼具，故腐蝕抑制劑是一種化學物質，其以小量、低濃度加入水溶液環境中，即可和金屬表面起反應，而使金屬表面獲得某種程度的保護，從而降低腐蝕速率，有些時候也將能和金屬所處環境中的特定成分起作用，從而達成抑制腐蝕效果的添加劑也稱為腐蝕抑制劑，但是通常此類添加劑的用量頗大，而且一般並不和金屬表面起作用，但在海洋環境中以上辦法不可行，故只能考慮電極防腐蝕方法。
- (二) 海洋環境的防腐蝕法因為現實環境的限制，腐蝕抑制劑等添加劑並不可行；鎂、鋁等高氧化電位之活性金屬犧牲陽極法數據及其實際實驗觀察已有初步達到降低腐蝕速率之效，而太陽能電池在有太陽之陰極保護加上沒有太陽的犧牲陽極法之雙重保護受測鐵片之嘗試方法，確實可以降低受測金屬之腐蝕速率。
- (三) 依據以上理由與原因，我們設計水面上及水面下陰極保護金屬試片以及犧牲陽極法裝置如圖 12(A)所示，我們將一般直流電池改採用實驗室之 4.5V 太陽能板當作外加電源，期盼可以利用太陽能之日常供電來達到防腐蝕之效果。
- (四) 在電池的正極端接上不同電阻為操作變因（空白組、 0.5Ω 、 1.0Ω 、 1.5Ω 、 2Ω 以及 $10K\Omega$ ）之串聯電路，以達到不同電流之效用，另加設計一組為並聯一外接乾電池線路於晚上供電(夜晚陰極保護)測試並與對照組做比較。
- (五) 經過 10 天後，取下受測水面上及下之受測鐵片，再以前處理溶液處理試片後，測試其 Tafel 曲線嘗試比較其腐蝕速率之差異。
- (六) 另在以太陽能電池之陰極保護與犧牲陽極法之基本線路基礎上，再加上光敏電阻與 NPN 三極體之線路設計如圖 12(B)，藉由參考 Tafel 曲線交換電流值而獲得較小之電流供給不至於產生電解水而依然可以供給達到金屬防腐蝕之效果。

(A)



(B)

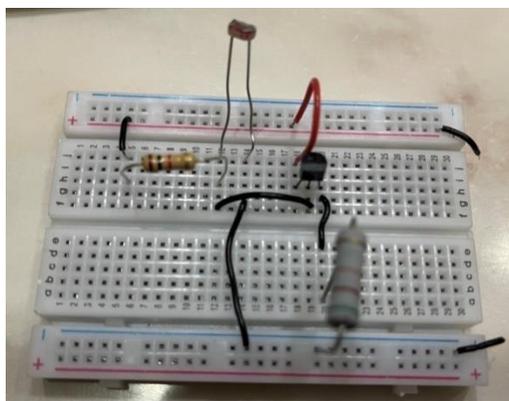
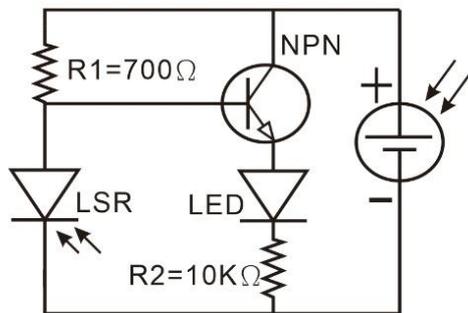


圖 12、太陽能之陰極保護及犧牲陽極法之雙重保護水面上及下受測鐵片實驗。

伍、結果與討論

一、臺灣五大港口海洋環境因子（溶氧、溫度以及 pH 值）整理與比較結果。

(一) 海水溶氧量資料整理結果與討論：

1. 臺灣附近海域各港口海洋物理及化學調查紀錄資料非常齊全，如果都可以深入了解且善加利用，相信對我們寶島附近的海域可以有更好及完善之掌握，我們將可以對未來臺灣海域有更多的防腐蝕策略以及相關的應用。
2. 依據所搜尋之資料整理後可得到高雄港、基隆港、花蓮港、台中港、金門港…等數筆各港口之水文資料，決定爾後皆聚焦臺灣花蓮港（東）、台中港（西）、高雄港（南）、基隆港（北）及金門港（離島）等五大港口為探究之目標。
3. 文獻指出水中溶氧是金屬發生氧化即腐蝕很重要之因子，我們將臺灣五大港口最近當季溶氧資料彙整結果如圖 13 所示，顯示在海水所有深度中基隆港溶氧都是最低，而其他四港口溶氧水面 0~6m 都約為 7.5~8.3ppm 之間屬於正常溶氧範圍（與圖 3C 比較），研判此四港口海水溶氧與腐蝕速率較無重要之相關。

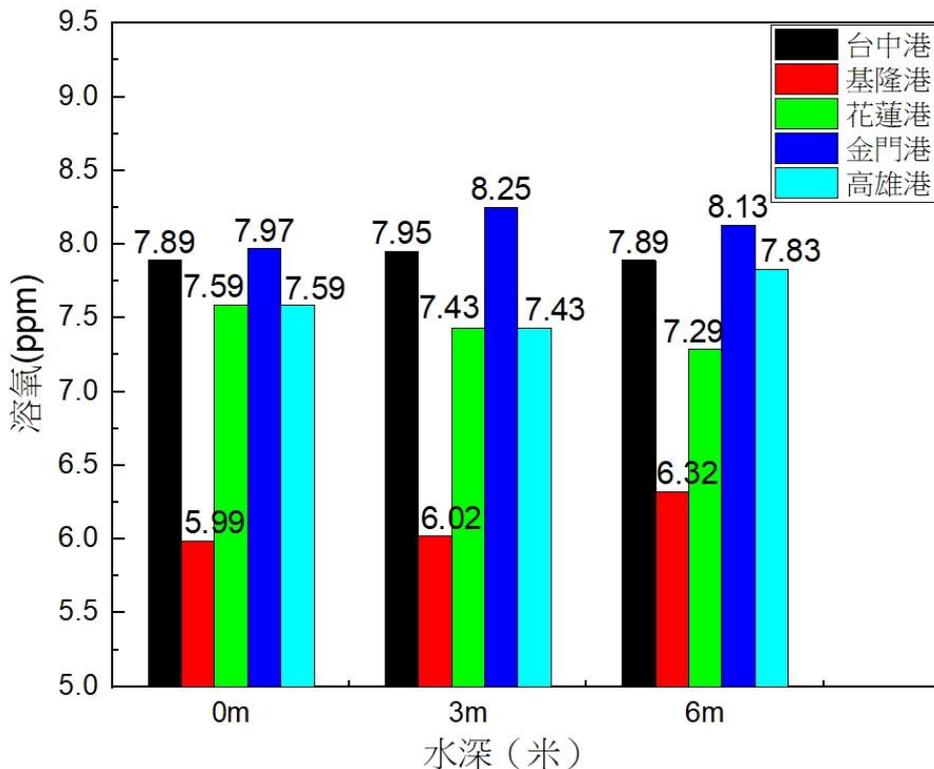


圖 13、五大港口最近一季海水溶氧量平均值比較結果。

(二) 海水溫度資料整理結果與討論：

1. 五大港口最近一季海水溫度比較如圖 14，顯示南部高雄港均溫為最高（~27 度 $^{\circ}\text{C}$ ），研判應與相對地理位置（緯度）有相關。
2. 五港口海水溫度在水深 0~6m 為 23.4~27 $^{\circ}\text{C}$ 之間，且 6m 深度內其深度與溫度變化並無絕對相關，如此依此數據比較研判海水溫度與腐蝕速率相關性亦不高。

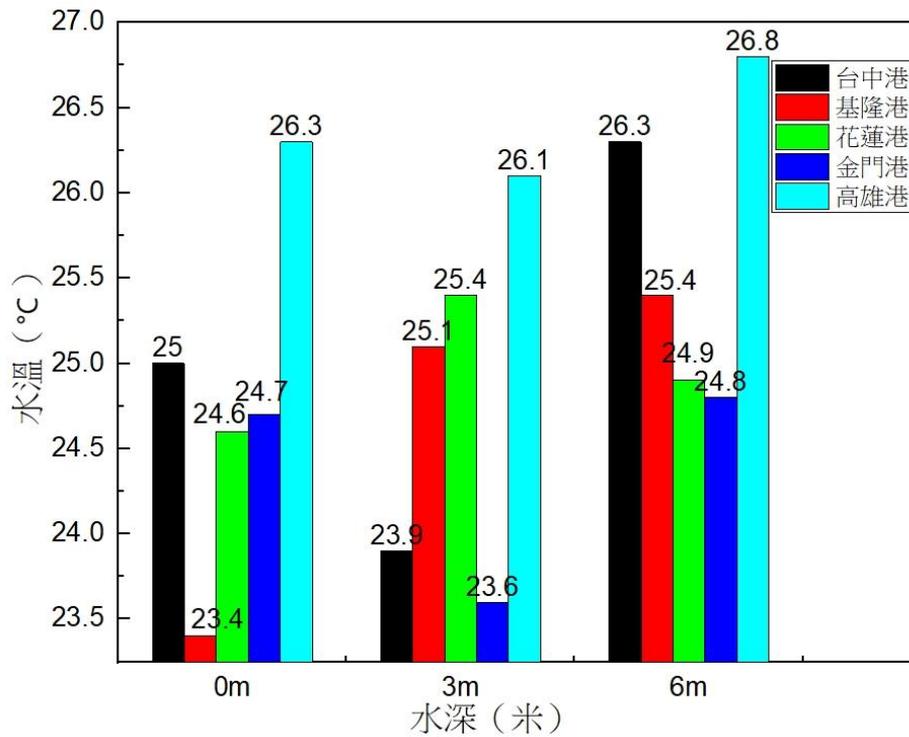


圖 14、五大港口最近一季海水溫度平均值比較結果。

(三) 海水酸鹼度 (pH) 整理資料 結果與討論：

1. 五大港口最近一季 pH 值比較如圖 15，顯示皆在 7.6~8.0 之間，略低於一般海水 8.1~8.3 之間。
2. 比較圖 3 B 海水 pH 值以及金屬腐蝕速率之關係，可知 pH 值在 4~10 間金屬維持一定之腐蝕速率，故可研判海水之 pH 值與腐蝕速率應無重大關係。

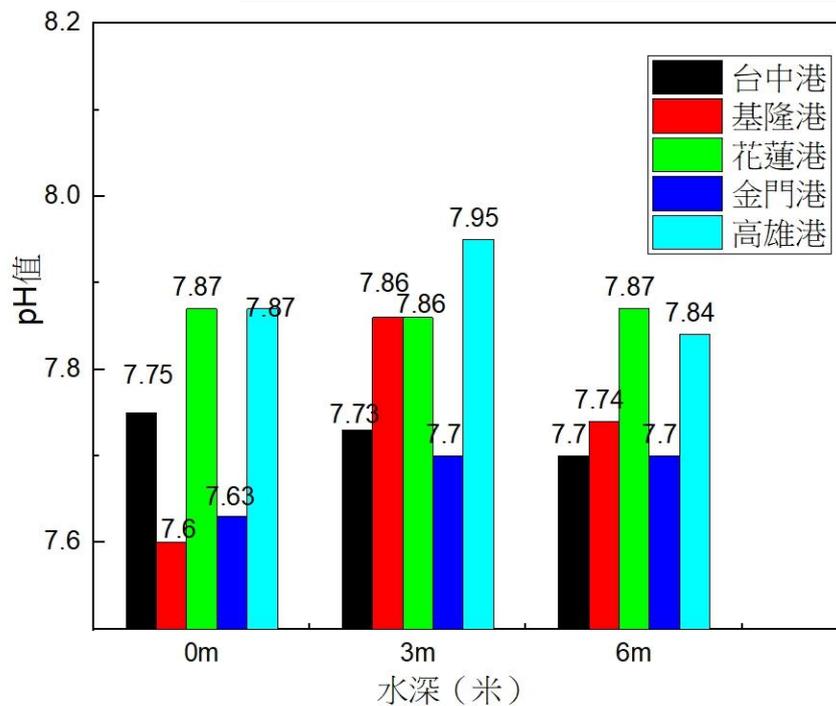


圖 15、五大港口最近一季海水 pH 值比較結果。

(四) 海水鹽度整理資料結果與討論：

1. 五大港口鹽度最低至最高值如圖 16 所示。
2. 顯示除了花蓮港變動較大之外(24.4~39.4 ‰)，其餘港口變化不大大約為 21~32 ‰之間變動，且各港口鹽度平均值在 27.8~30.6 ‰之間，差異不大。

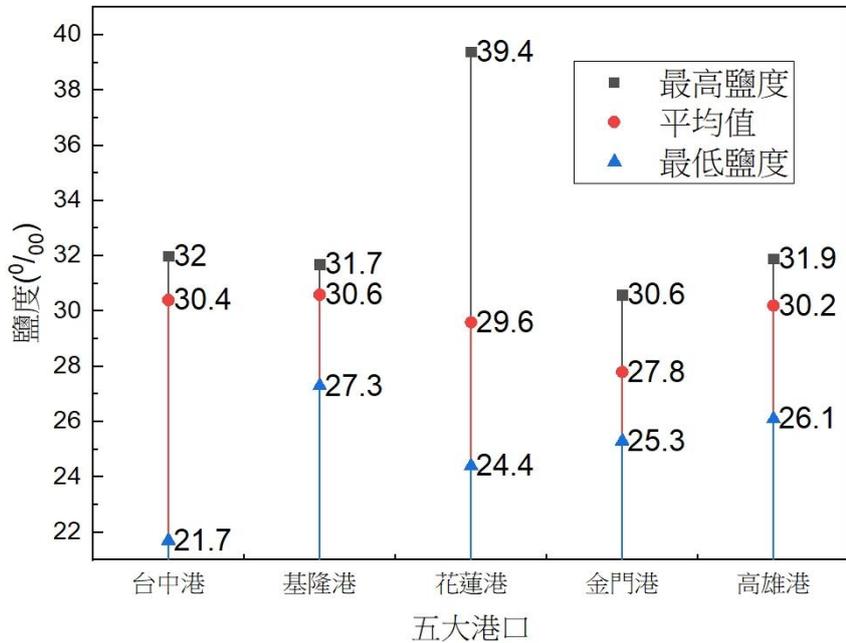


圖 16、五大港口 2016 年鹽度調查比較結果。

(五) 海水流速整理資料結果與討論：

1. 五大港口歷年海流流速整理比較如圖 17。顯示以台中港變動較大、高雄次之。
2. 除台中、高雄及花蓮以外，其餘 2 港口流速整年每月變動不大。

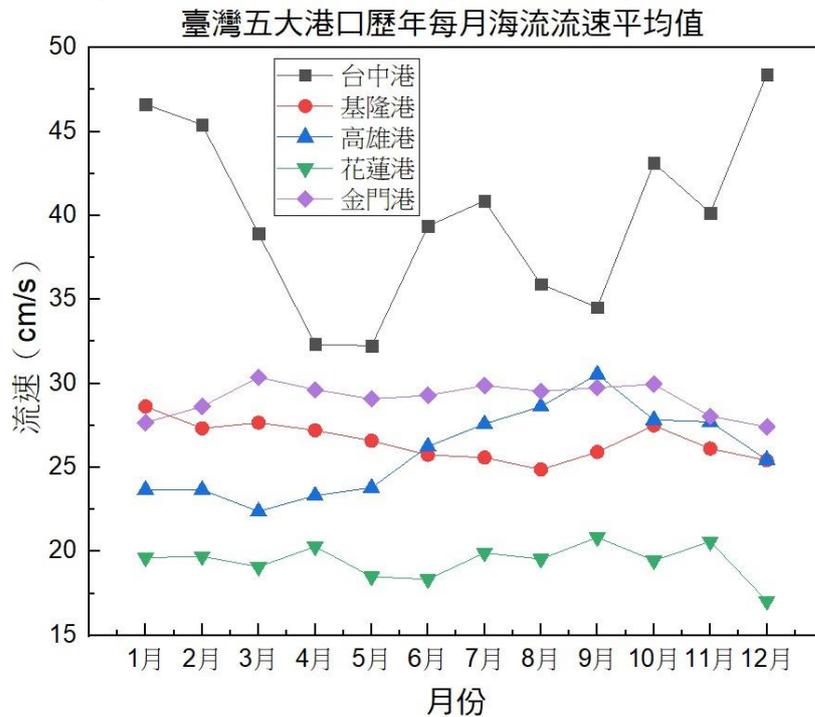


圖 17、五大港口歷年每月海流流速平均值調查比較結果。

二、臺灣港口海洋腐蝕速率資料調查與比較結果。

(一) 五大港口 2020 年四季之四種金屬腐蝕速率之比較結果與討論：

1. 2020 年之四種金屬腐蝕速率整理如圖 18。顯示均為碳鋼腐蝕速率最大，其餘三種金屬腐蝕速率明顯較小且較不受季節影響。
2. 而碳鋼腐蝕以基隆港與台中港受季節影響為最大，且趨勢相當一致。意即從另做圖備註 A 比較中也可以知道以春冬 2 季腐蝕速率較大，其餘季節較趨緩。

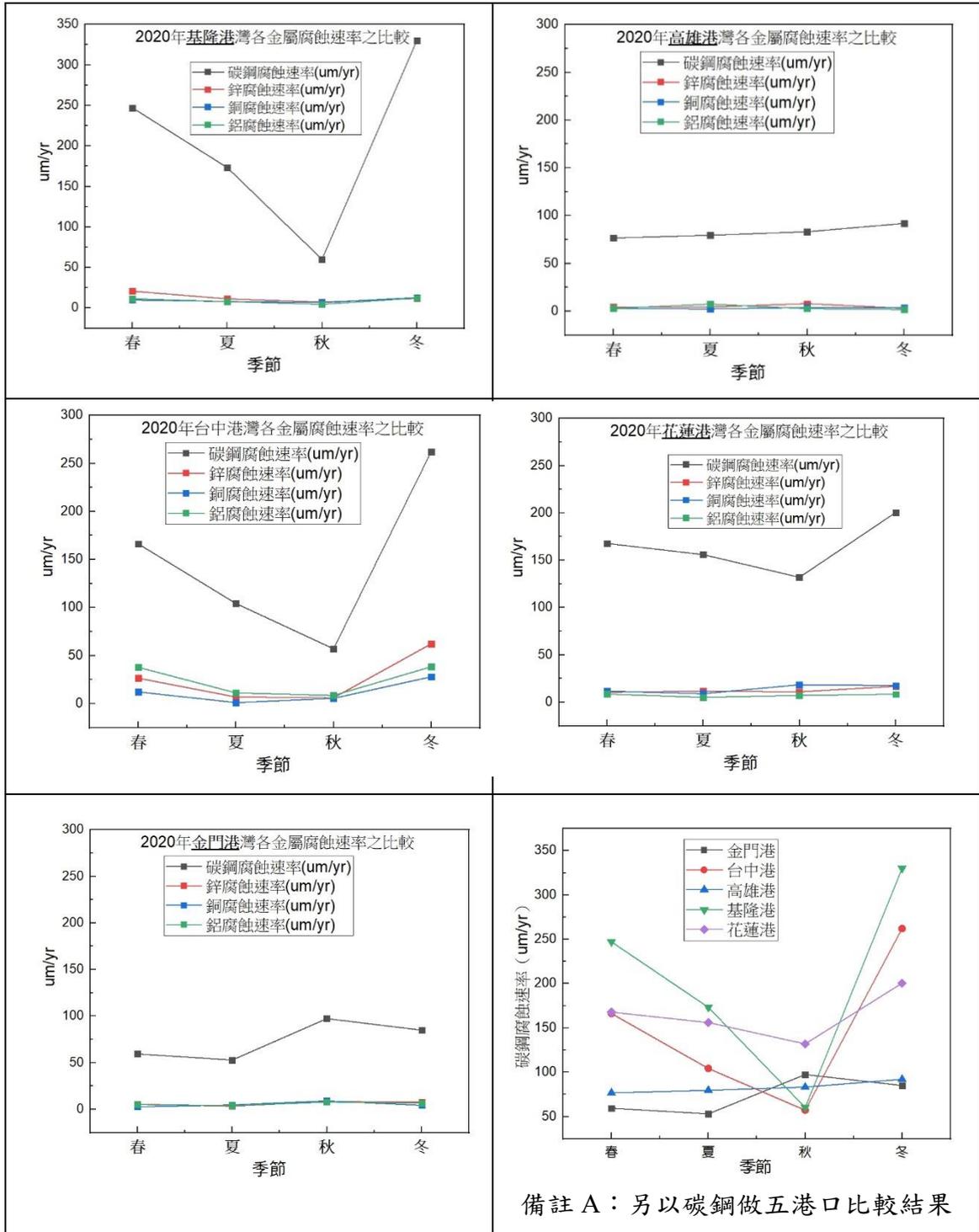


圖 18、五大港口 2020 年四季之四種金屬腐蝕速率之比較結果。

(二) 五大港口歷年來 (2010~2020) 四季碳鋼腐蝕速率之比較結果與討論。

1. 因碳鋼腐蝕速率最明顯不同且在實際應用面最廣，且將鄰近之台中港 2018 與 2020 年四種金屬腐蝕速率作一比較發現趨勢呈現一致，故將 2010~2020 年五港口之碳鋼腐蝕速率四季平均值做一比較(如圖 19 備註 A)所示。
2. 歷年來發現基隆與台中腐蝕速率趨勢最相似，而以金門腐蝕速率最慢。

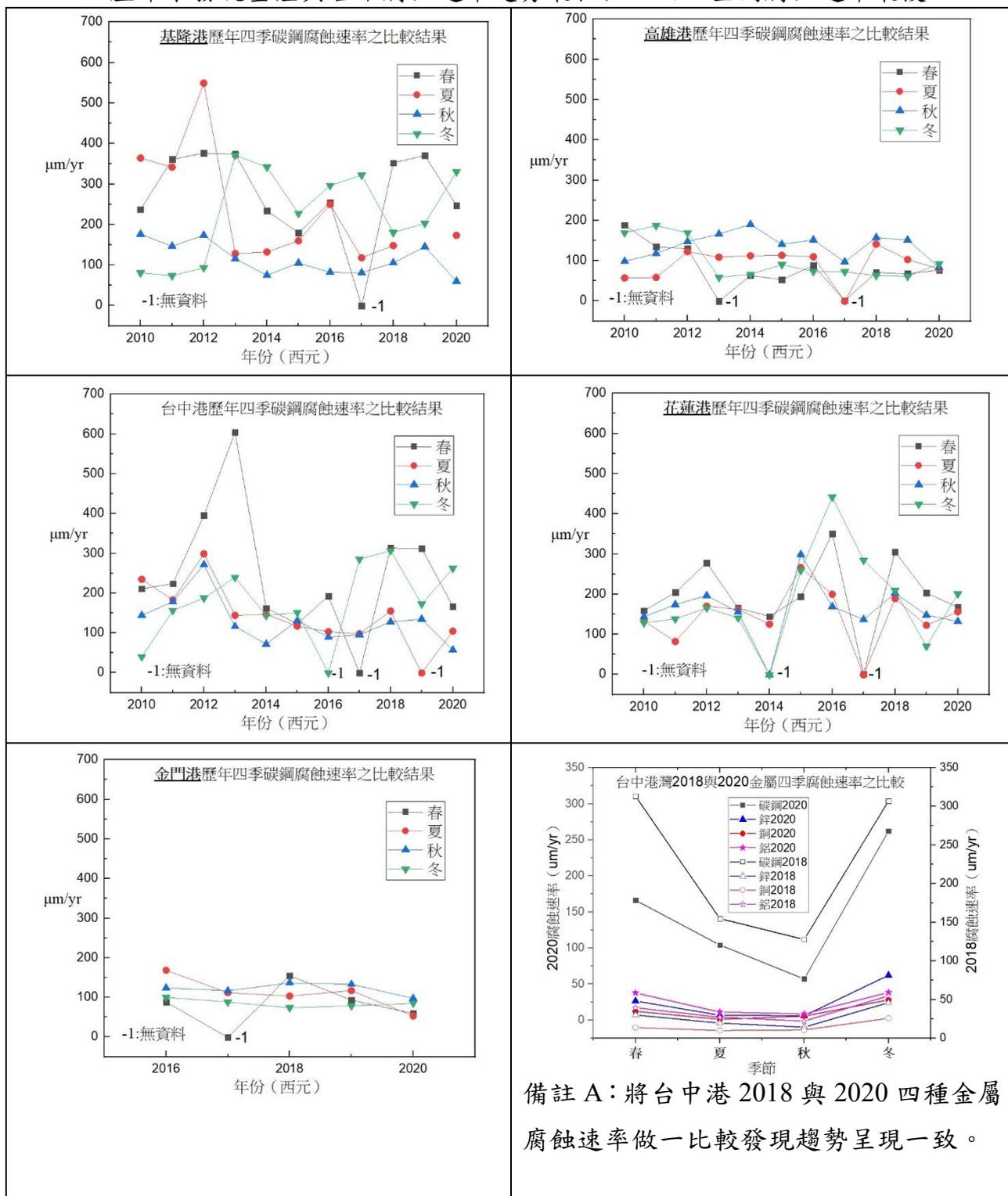


圖 19、五港口 2010~2020 年歷年之碳鋼金屬腐蝕速率之比較結果。

(三) 基隆港與台中港之碳鋼腐蝕速率與其歷年每月海洋流速比較分析結果。

1. 碳鋼腐蝕速率以基隆港與台中港受季節影響為最大，且趨勢相當一致。我們再將基隆港與台中港之碳鋼腐蝕速率與其歷年每月海洋流速做比較如圖 20。
2. 圖中可知海流流速均值以台中港 > 基隆港，但是二港口之腐蝕速率趨勢均與流速有很大的一致趨勢，或許海流流速是影響碳鋼腐蝕速率很大的因素之一。

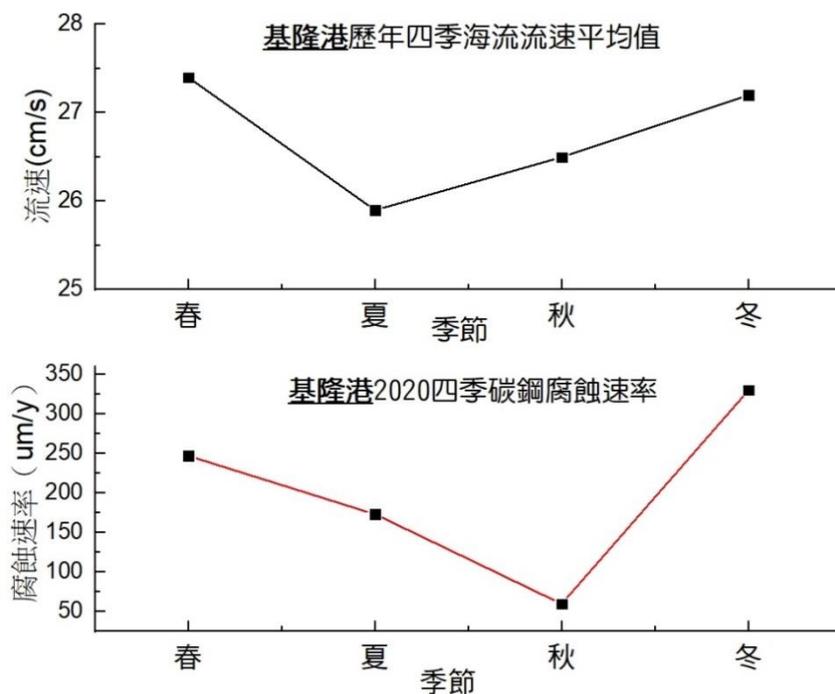


圖 20A、基隆港碳鋼金屬腐蝕速率與海流流速之比較結果。

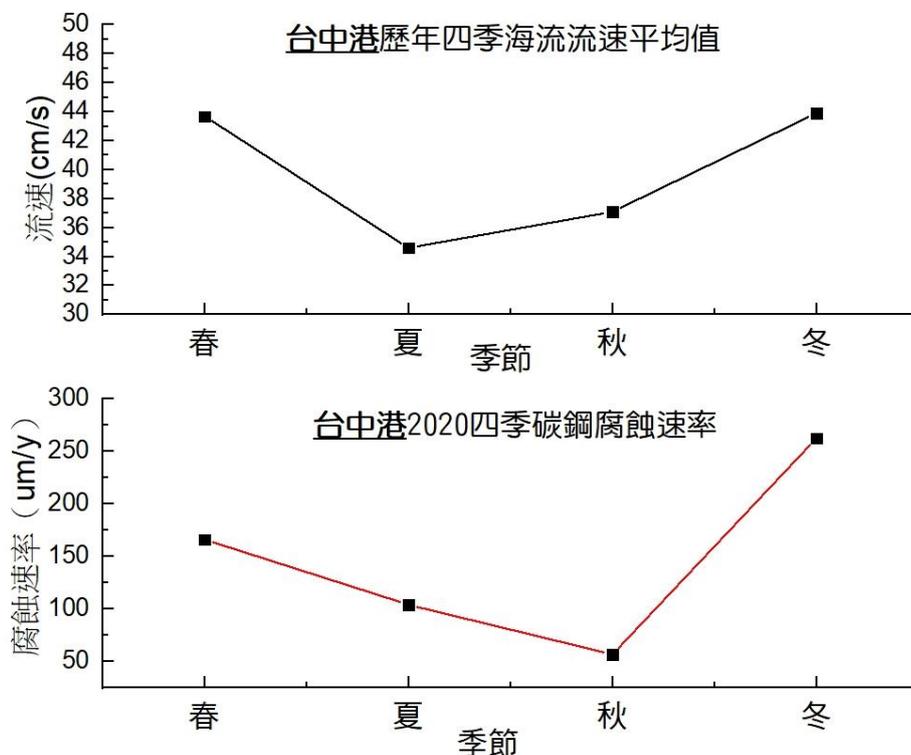


圖 20B、台中港碳鋼金屬腐蝕速率與海流流速之比較結果。

三、實驗室現場環境因子與腐蝕速率實驗結果與討論。

(一) 鹽度差與流速實驗再現性結果比較。

1. 鹽度差對水流動之影響：固定溫度改變鹽水比例結果如表 1 及圖 21。
2. 結果顯示鹽度差愈大流速確實愈快，水：食鹽的重量比愈高時，時間的差異愈小，彼此流速更相近，實驗再現性極高。

表 1、固定溫度改變鹽水比例實驗結果。

水：食鹽(重量比)	1.時間(秒)	1.流速(cm/秒)	2.時間(秒)	2.流速(cm/秒)
100：2	26.65	2.3	24.54	2.4
100：10	13.65	4.4	16.42	3.7
100：15	11.08	5.4	13.33	4.5
100：20	9.75	6.2	10.36	5.8
100：25	9.48	6.3	10.15	5.9
100：30	9.06	6.6	9.17	6.5

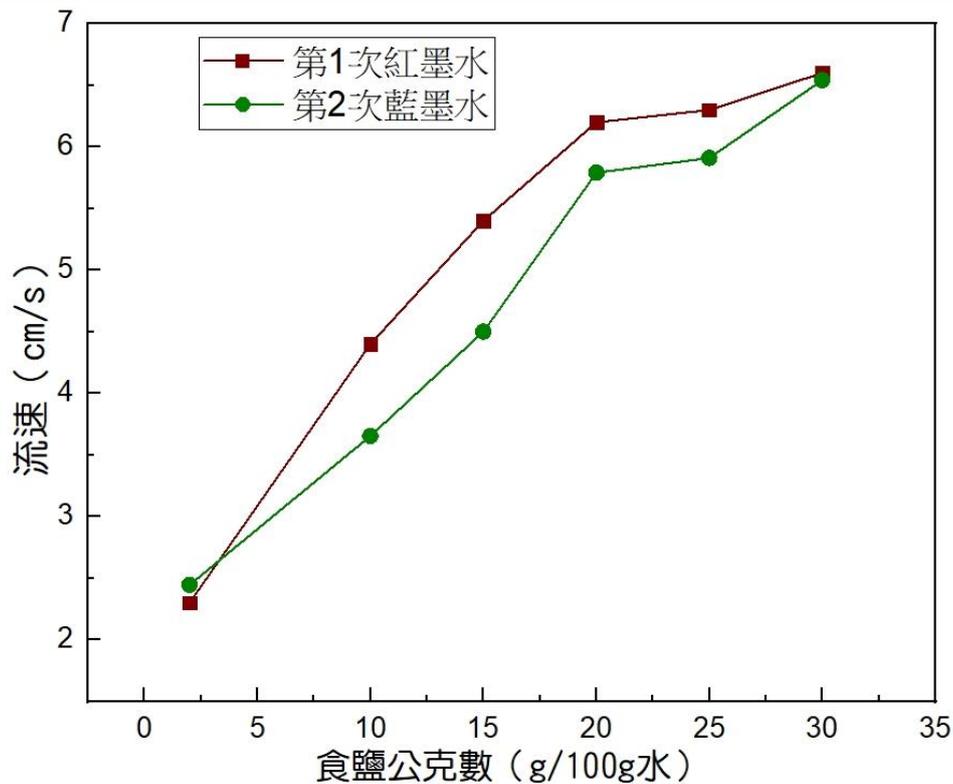


圖 21、改變鹽水比例流速比較結果。

(二) 流速與腐蝕速率實驗再現性與結果比較。

1. 極化曲線圖如圖 22，可製作 Tafel 曲線圖計算得到腐蝕電位與腐蝕電流整理可得到如表 2 以及圖 23 (爾後腐蝕電位與電流測量皆以此法獲得一見實驗紀錄本)。
2. 從結果來看無論電極相對位置的擺放(順流或逆流)，流速快腐蝕速率都是增大的，或許跟離子游動速度有關，因為陰、陽離子要流動維持水溶液之電中性。因此，有可能流速快腐蝕速率就會越快，故帶電粒子需越快達到電荷平衡。

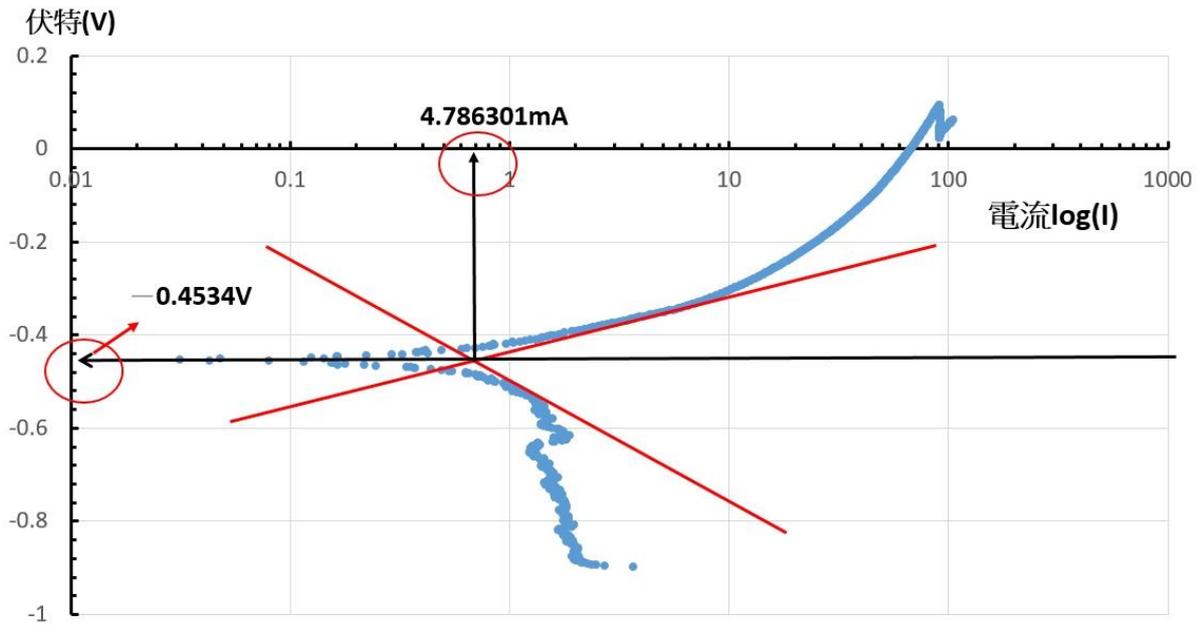


圖 22、水流量段數 1 (快:1.5 ml/s) 之極化曲線圖。

表 2、固定溫度改變鹽水比例實驗結果。

編號	流速(ml/s)	腐蝕電位(V)	腐蝕電流(mA/cm ²)	備註
1	0	-0.5665	2.39	流速以流量表示，以流100ml除以所耗時間秒數計算。
2	0.3	-0.6246	2.63	
3	0.6	-0.6171	2.52	
4	1.5	-0.4534	4.79	

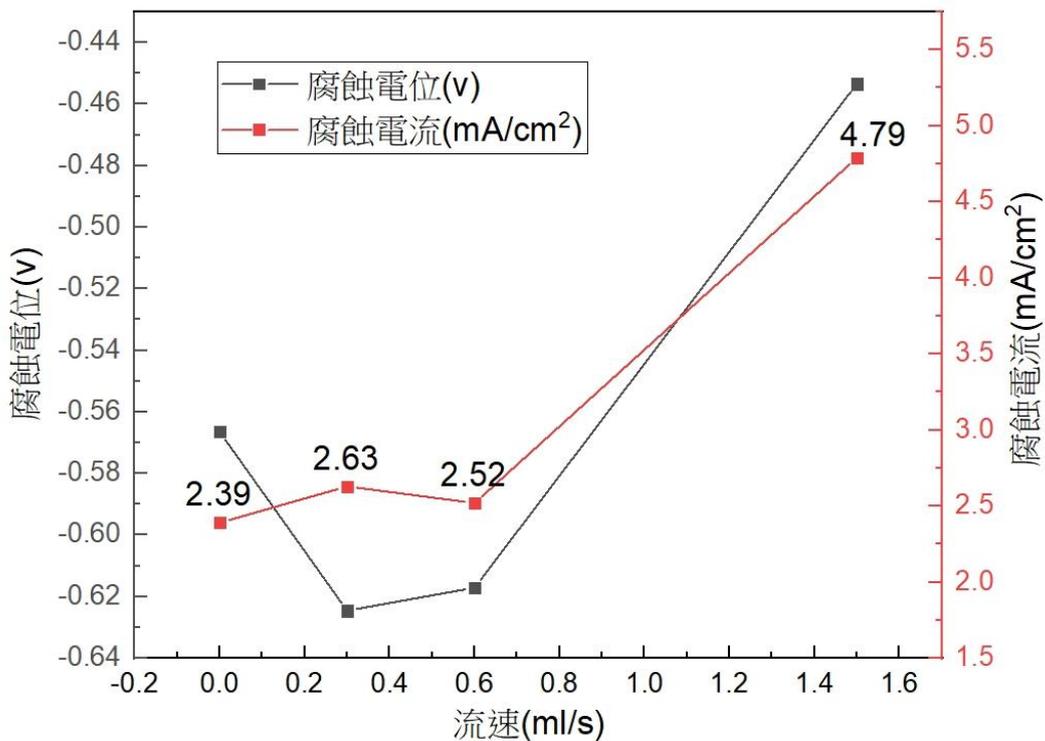


圖 23、流速差異之腐蝕速率測量實驗數據結果比較。

(三) 溶氧量與腐蝕速率之比較結果。

1. 以 Tafel 曲線圖計算可得整理如表 3，分成水面上及下之試片組重量損失比較如圖 24，腐蝕速率比較如圖 25 可知水面下試片腐蝕速率大於水面上。
2. 一般來說溶氧愈多腐蝕速率愈大。由我們的實驗結果可知氧是會讓鐵氧化生成綠色 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 或紅棕色 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 及黑色 Fe_3O_4 等，因而防蝕能力提高，但氧化層到一定厚度後會剝落以至於後來腐蝕電流又上升，因為有氧化層所以腐蝕電位會往正電位方向走，代表氧化層越來越緻密，即是水溶液中如果過多的 Fe^{+2} 及 Fe^{+3} ，因為氧化鐵附著性很差等到試片上氧化物夠厚時會掉落造成鐵片阻抗又變小，而恆電位儀無法立即做調整故造成後段 LSV 掃瞄電壓會在一定區間震盪(圖 26)，而由重量損失有時有增重之情形亦可知有氧化層生成之情形。
3. 而通氧時間愈長一開始測量溶氧量亦是最高 (~15ppm/20 分鐘)，但經過水溫降溫實驗與溶氧量變化結果可知當溫度越高溶氧愈低 (~4.23ppm/70°C)，但是當水慢慢降溫至室溫時，溶氧又會增加 (~6.44ppm/30°C)。而依據參考文獻一般室溫溶氧量約為 8.23ppm/25°C，故研判當通氧 20 分鐘溶氧可達 ~15ppm 應該是屬於暫時性溶氧，時間一久應該會恢復到 8ppm 左右，而我們再測試一次結果亦確實經過 60 分鐘後即會達到正常氧氣溶解量(圖 25D)。
4. 而海水中之溶氧量一般室溫約為 7~8ppm，依據 p.5 之圖 3C 所示海水在水深 20m 以內溶氧亦均達 8ppm 左右且與金屬之腐蝕速率無絕對重要相關，意即在此深度內溶氧量為一定值並不影響金屬腐蝕速率。

表 3、通氧氣時間 (溶氧量) 與水面上及下試片其腐蝕電流 (速率) 實驗結果。

編號	通氧時間 (分)	試片位置	腐蝕電位 (V)	腐蝕電流 (mA)	開路電位(V)	開路電流(mA)
1	0	水面上	-0.5736	1.995262	-0.588	0.08
2	0	水面下	-0.6802	4.073802	-0.553	0.07
3	5	水面上	-0.455	2.290867	-0.619	0.07
4	5	水面下	-0.455	2.454708	-5.77	0.07
5	10	水面上	-0.4761	1.90546	-0.48	0.06
6	10	水面下	-0.2653	1.862087	-0.511	0.08
7	15	水面上	-0.3448	1.479108	-0.478	0.07
8	15	水面下	-0.2436	1.90546	-0.471	0.07
9	20	水面上	-0.4602	1.995262	-0.41	0.07
10	20	水面下	-0.5454	2.570395	-0.59	0.08

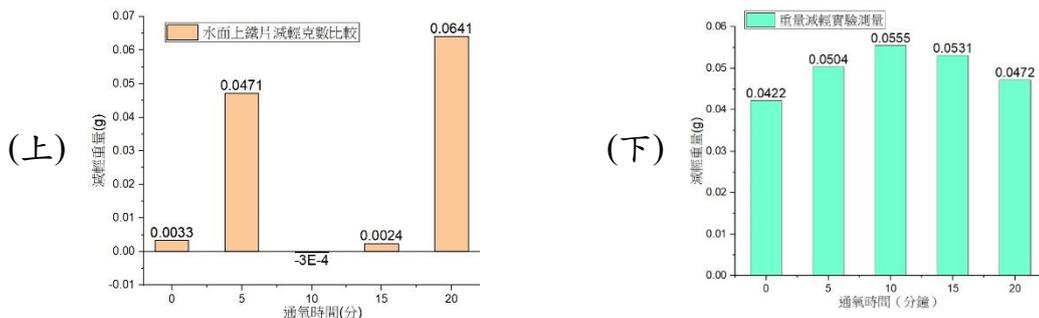


圖 24、重量損失實驗-水面上 (左圖) 及下 (右圖) 之鐵片增減重結果比較。

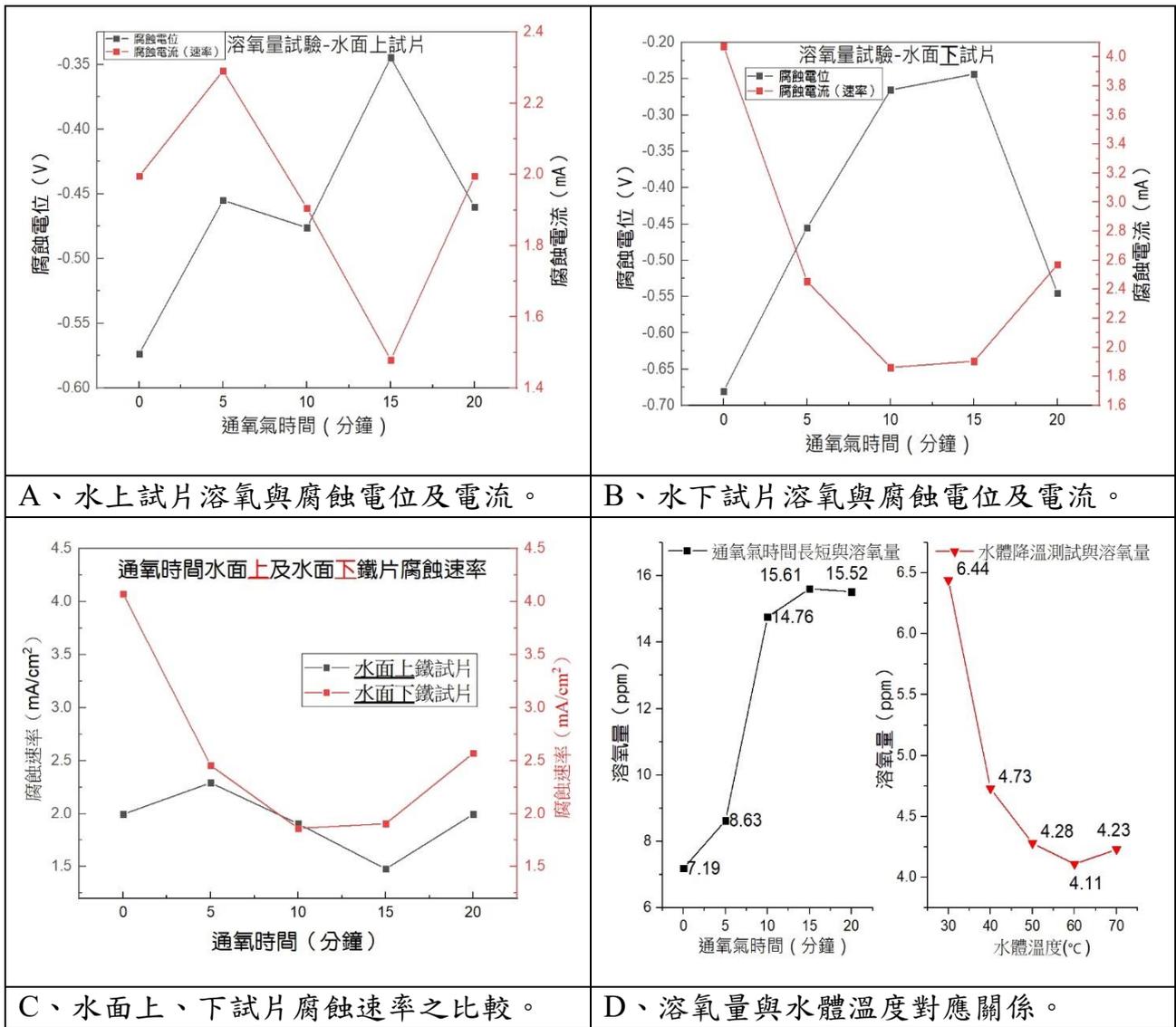


圖 25、溶氧量差異之腐蝕速率測量實驗數據結果比較。

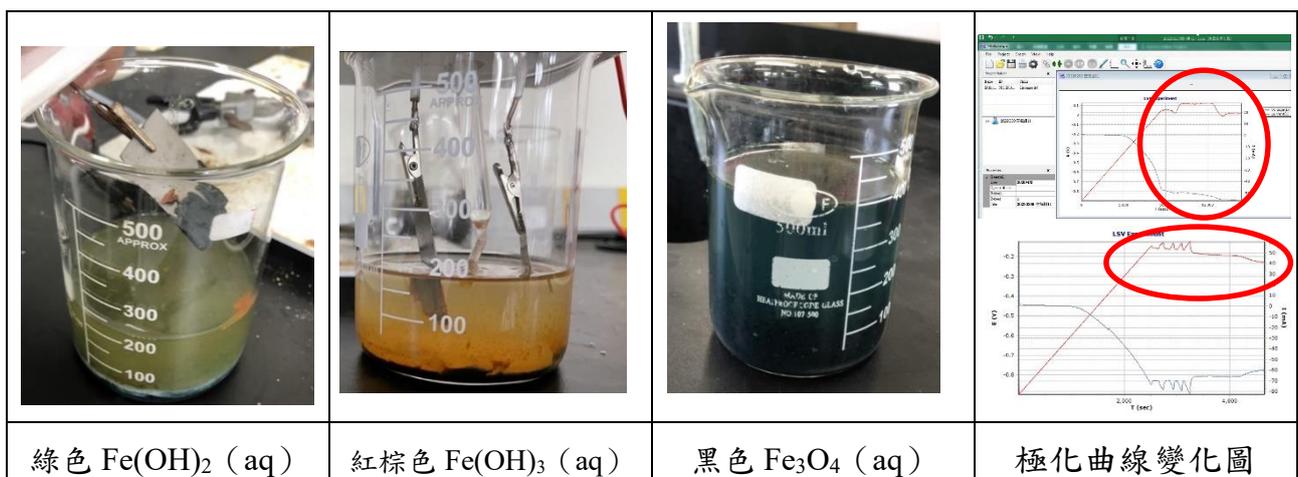


圖 26、試片氧化生成 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 及 Fe_3O_4 等溶液與極化曲線後段影響結果。

(四) 溫度與腐蝕速率之結果比較。

1. 以 Tafel 曲線圖計算可得整理如表 4，分成水面上及下之試片組比較如圖 27，可知亦是明顯水面下試片腐蝕速率大於水面上之金屬試片。
2. 由結果可知溫度越高腐蝕速率皆越快，但是並無如我們高二化學所述反應動力學而言每增高 10K 反應增加為 2 倍（圖 27D 說明），且由水溶液顏色變化觀察與腐蝕電壓結果來看，金屬試片表所形成之氧化膜也是會影響實驗之結果。

表 4、水體溫度與水面上下試片一段時間後腐蝕電流（速率）實驗結果。

編號	水溫 (°C)	試片位置	腐蝕電位 (V)	腐蝕電流 (mA)	開路電位 (V)	開路電流 (mA)
A	30	水面上	-0.6068	1.361444	-0.576	0.08
B	30	水面下	-0.6323	1.396368	-0.589	0.08
C	40	水面上	-0.6444	1.374041	-0.567	0.08
D	40	水面下	-0.6129	2.398832	-0.533	0.08
E	50	水面上	-0.574	2.187761	-0.548	0.08
F	50	水面下	-0.5842	2.290867	-0.573	0.07
G	60	水面上	-0.6398	2.398832	-0.547	0.07
H	60	水面下	-0.6531	2.691534	-0.625	0.07
I	70	水面上	-0.5781	2.290867	-0.535	0.09
G	70	水面下	-0.6543	2.754228	-0.597	0.07

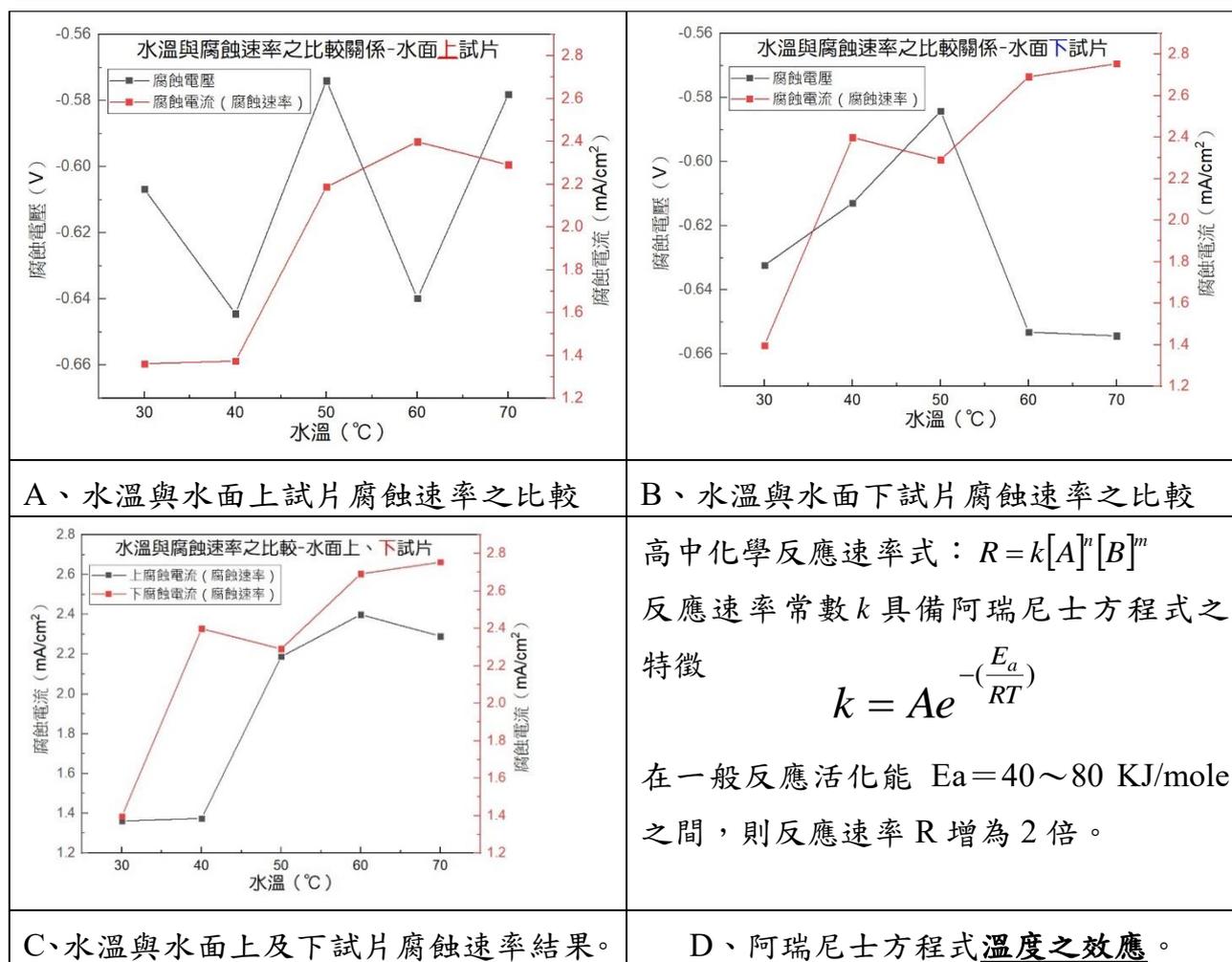


圖 27、不同水體溫度水面上及下之金屬試片腐蝕速率之比較。

四、探討海洋環境因子資料整理、實驗測試結果與腐蝕速率之關係比對結果。

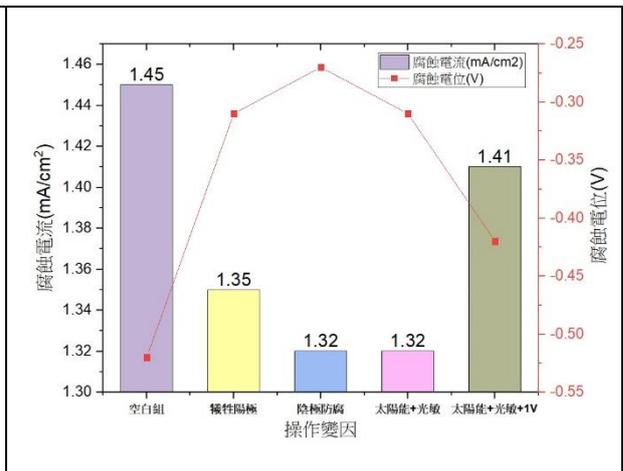
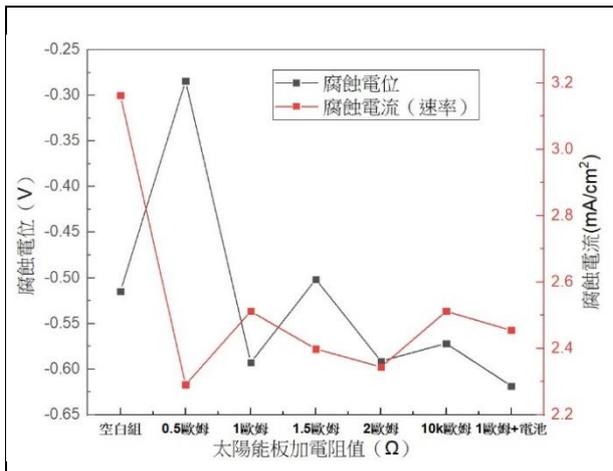
(一) 環境因子資料腐蝕速率比對結果與討論。

1. **溶氧量**變因：圖 13 資料整理各港口溶氧約在 8ppm 上下間小範圍變動，除了基隆港約為 6-7ppm，而依據圖 3C 顯示海洋深度 20m 以內溶氧量約為 8ppm，且圖 24~25 顯示溶氧量會因為金屬表面氧化膜之生成狀況而與腐蝕速率並無正相關。
 2. **溫度**因子：圖 14 資料整理各臺灣港口 6m 深以內溫度值約在 23.5~27°C 間變動，而依據圖 26 實驗結果顯示，水溫度變化確實與**金屬腐蝕速率呈現正相關**，但是沒有與化學反應動力學每升高 10K 反應增為 2 倍之情形發生。
 3. **pH 值**因子：圖 15 資料整理各臺灣港口 pH 值約在 7.6~8 間小範圍變動，圖 3B 亦知 pH 值在 4~10 間金屬腐蝕速率為均一值，故研判此**與腐蝕速率關係不大**。
 4. **鹽度**因子：圖 16 資料整理各臺灣港口鹽度約在 24.4~39.4 ‰ 間之範圍，除了花蓮港口變化較大，而依圖 21 實驗結果顯示**鹽度差與海洋流速有正相關**。
 5. **流速**變因：圖 17 資料整理各臺灣港口流速以台中港數值較大且變動大，而依實驗結果圖 23 亦可知**流速愈快腐蝕速率愈快**，圖 20 比較結果亦可知海洋流速與腐蝕速率**有較重要的正相關**。
 6. 總結以上實際與實驗之海洋環境因子與腐蝕速率之關係，我們覺得應該是有以下重要之依序相關性：**流速、鹽度、溫度、溶氧量及酸鹼值**。
- (二) 由圖 18 及 19 金屬腐蝕速率資料之整理亦可知道在各大港口無論歷年來或是一年四季之相互比較皆為**碳鋼之腐蝕速率最快 (>銅、鋅、鋁)**，而各港口的碳鋼腐蝕速率由快至慢則是依序應為**台中港、基隆港>花蓮港、高雄港>金門港**。

五、利用電化學探討海洋環境防腐蝕之探究結果。

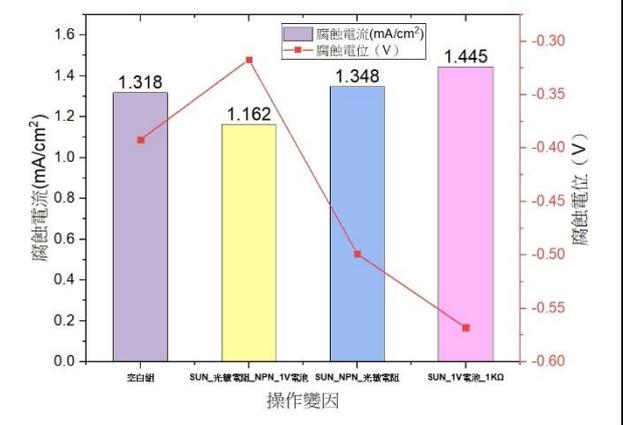
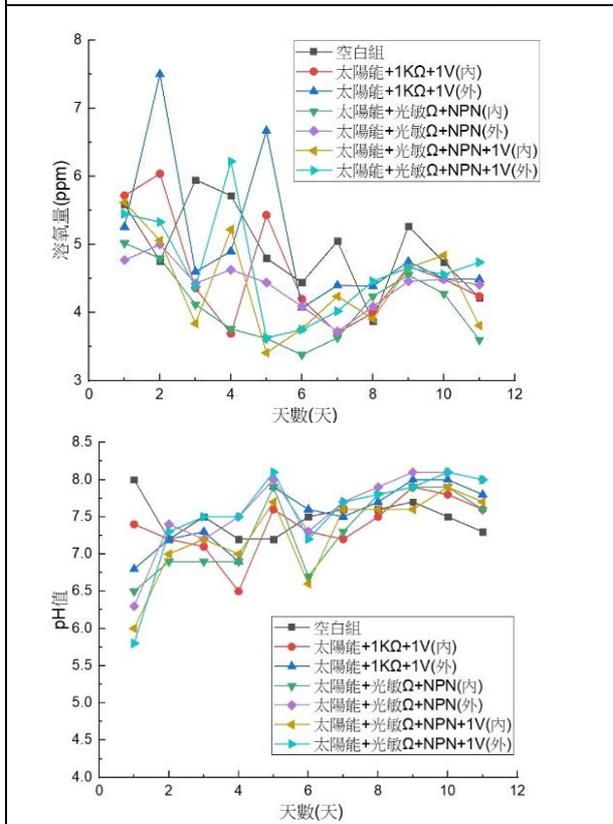
(一) 利用犧牲陽極以及太陽能陰極保護法之結果與討論。

1. 由 Tafel 作圖分析結果整理如圖 28A，可知太陽能板之陰極保護法確實有防腐蝕之效果，且加裝 1Ω 以上電阻即有效果，而如太低電阻怕電流太大有電解水之情況生成，在實驗觀察時亦有發現鋁罐(陽極)處有氣泡(氧氣)生成，如此鐵氧化層或鈍化膜生成即會造成腐蝕電位增高(越難腐蝕)，而腐蝕電流降低之情形。
2. 利用太陽能電池及加裝光敏電阻之線路為控制電流避免電解水之生成結果如圖如圖 28B，可發現防腐蝕效果非常顯著有高腐蝕電位且低腐蝕速率之效用。
3. 加上光敏電阻與 NPN 三極體之實驗記錄與結果如圖 28(C)，溶氧逐日減少與試片氧化有關，而 pH 逐日升高與金屬氧化物溶於水為鹼性亦是符合。但發現防腐蝕效果不如預期，疑是因為精密計算交換電流所配得之加裝線路電阻值(700Ω 及 10KΩ)未考慮到 3% 食鹽水之電阻值有關，而導致在逐日測量電流值約為 0.1 μA。



A、太陽能板之腐蝕電流(速率)比較。

B、加裝光敏電阻腐蝕電流比較。



C、實驗過程溶氧及酸鹼度記錄結果與加裝三極體之腐蝕電流(速率)比較。

圖 28、太陽能板及簡單電子線路設計之陰極保護法與犧牲陽極的實驗結果比較。

(二) 將實驗水槽之腐蝕水溶液以 PS-2600 光譜分析之結果。

- 經過 10 天之測量觀察發現是以定量水溶液為控制變因，因此當鐵片逐日氧化後，可觀察到 3% 食鹽水之顏色亦隨之變化，故取此溶液以光譜分析如圖 29。
- 取鐵 Fe^{3+} 特徵波長 450 nm 比較其溶液中 Fe^{3+} 濃度之觀察可得到其吸收度比較圖，由圖中可發現其趨勢隨 1.5Ω 以前確實如電化學之方法，而在 2Ω 以後不若電化學方法，亦可發現溶液顏色確實如 Fe^{3+} 之顏色表現，而底層沉澱物亦是符合離子沉澱表氫氧化鐵之溶解度較低之情況，因此如果定量實驗設計之下，將

光譜比較結果與沉澱物的量一起計算或許亦可為創新另一定量腐蝕速率或腐蝕程度之表示方式，意即一起考慮水溶液中鐵離子濃度以及沉澱物之氫氧化鐵或氧化鐵或許可行。

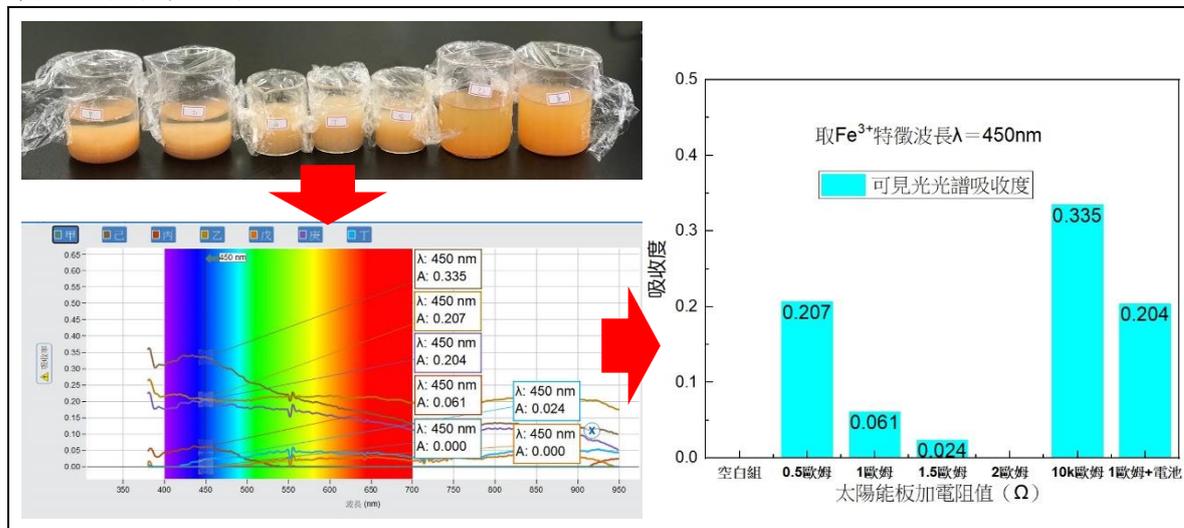


圖 29、嘗試利用光譜法測量實驗水溶液中鐵離子濃度判斷其腐蝕速率。

陸、結論

- 一、水中溶氧量以基隆港溶氧最低，其他四港口溶氧量在水深 6m 內約為 7.5~8.3ppm 屬於正常海水溶氧範圍，依據實驗結果顯示溶氧量會因為金屬表面氧化膜之生成狀況而與腐蝕速率無正相關，研判臺灣港口海水溶氧量與腐蝕速率較無相關。
- 二、臺灣港口海水溫度以高雄港均溫為最高 (~27 度 $^{\circ}\text{C}$)，研判應與相對地理位置 (緯度) 有相關。而五港口海水溫度在水深 6m 內為 23.5~27 $^{\circ}\text{C}$ 之間，實驗結果知水溫度變化確實與金屬腐蝕速率呈現正相關，但並無與化學反應動力學每升高 10K 反應增加 1 倍之情形發生，故研判海水溫度與腐蝕速率相關性亦不高。
- 三、臺灣港口海水 pH 值皆在 7.6~8.0 之間，略低於一般海水 8.1~8.3 之間。而海水 pH 值在 4~10 間金屬維持一定之腐蝕速率，故可大膽研判臺灣海水之 pH 值與腐蝕速率無重大關係。
- 四、港口海水鹽度以花蓮港變動較大之外(24.4~39.4 ‰)，其餘港口變化不大大約為 21~32 ‰ 之間變動，而實驗結果顯示鹽度差會與海洋流速有正相關。
- 五、臺灣港口流速以台中港數值較大且變動大，亦可知流速愈快腐蝕速率愈快，圖 20 比較結果亦可知海洋流速與腐蝕速率有較重要的正相關，依據資料分析與實驗之結果知道以下海洋環境因子與腐蝕速率有以下由大至小之依序重要相關性：流速、鹽度、溫度、溶氧量及酸鹼值。
- 六、在各大港口無論歷年來或是一年四季之相互比較皆為碳鋼之腐蝕速率最快 (> 銅、鋅、鋁)，且依序應為台中港、基隆港 > 花蓮港、高雄港 > 金門港。而碳鋼又是海

洋環境中最廣為應用在船舶、橋樑以及建築之金屬材料，因此，海洋水文資料之調查與碳鋼材料之防腐蝕研究相互關係實為爾後重要之研究課題。

- 七、海洋環境的防腐蝕法因為現實環境的限制，腐蝕抑制劑等添加劑並不可行；我們利用鋁等高氧化電位金屬以及太陽能板、光敏電阻等電子元件線路設計陰極保護法確實有防腐蝕之效果，而需注意天候狀況以及防止所產生之電流太大會有電解水會有氧氣之生成疑慮，故加裝高電阻電路設計例如 2Ω 以上，或可改善此高電流而產生電解水氧氣生成之情形，但是電阻值亦不宜太高，否則會變成無電流保護致使無法達到防腐蝕之效果。而抗腐蝕實驗中其電解質溶液顏色變化及沉澱物亦可為腐蝕程度（速率）之另一種新型測量方式，或許可在傳統重量損失實驗法再新添一佐證之法，故在定量實驗條件設計之下，將光譜比較結果與沉澱物的質量一起計算與考量，或許亦可為創新另一定量腐蝕速率或腐蝕程度之表示方式。我們臺灣是一個海島型國家，海洋環境因子的腐蝕確實有深入研究之必要，期盼我們的初步研究可以為臺灣社會做一些實際的貢獻，可以為爾後離岸風電海洋環境選址為參考或希望南方澳單拱肋鋼橋的斷橋事件可以不再發生。

柒、參考資料

1. 「與日爭光—橋樑防腐大作戰」，第 61 屆中三區高級中等學校科學展覽化學科佳作，莊景程、李榮峻、黃馨瑩。
2. Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications, 2nd Edition Allen J. Bard, Larry R. Faulkner, John Wiley & Sons Inc, December 2000.
3. Woo Hyoung Lee, Jin-Hwan Lee, Woo-Hyuck Choi, Ahmed A Hosni, Ian Papautsky, Paul L Bishop.(2018).Needle-type environmental microsensors: design, construction and uses of microelectrodes and multi-analyte MEMS sensor arrays.
4. 羅建明、陳桂清、柯正龍（2016-2017）。金屬材料腐蝕環境調查研究(1/2)與(2/2)，交通部運輸研究所。<https://www.ihmt.gov.tw/>
5. Guofu Qiao, Bingbing Guo, Jinping Ou. "Numerical Simulation of the Impressed Current Cathodic Protection System for a Reinforced Concrete Structure", 2015 Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control, p832~839.。
6. 蘇青和等，交通部運輸研究所。2019 年港灣海氣象觀測資料統計年報(12 港域觀測海流資料) <https://www.ihmt.gov.tw/periodical/pdf/B1100290.pdf>
7. 林英斌、陳建宏、李謁霏、楊文昌、呂宜潔。2018 年臺灣海域海流觀測資料月統計年報。國家海洋研究院。<https://www.namr.gov.tw/ebook/1100517/Current/files/basic-html/page233.html>
8. 羅建明、陳桂清(2003)。台灣五大港區海水水質調查分析。2021/02/20 <http://www.tsoe.org.tw/downloads/thesis/2003H4.pdf>

【評語】 051910

本研究進行臺灣港區海水水質調查資料彙整與分析。臺灣港區海水化性及物性與腐蝕電位之關係探討，比較不同港區海水環境因子與腐蝕速率之權重關係。

利用電化學，設計了腐蝕水箱實驗，進行環境因子的測試，資料分析詳實，實驗設計有些創意，成果具參考價值。

投影片圖文並茂，特別是在圖文敘述中，穿插了幾個”結果的精華提要“，很有提綱挈領的功效，值得嘉許。

報告摘要稍嫌突兀，該介紹背景問題，而既然是延續研究，也該簡單說明之前的成果，然後敘述這次的結果。

作品簡報

偷電不著蝕把鋁？ 海洋環境因子與防腐

組別：高級中等學校組

科別：地球與行星科學科

研究動機

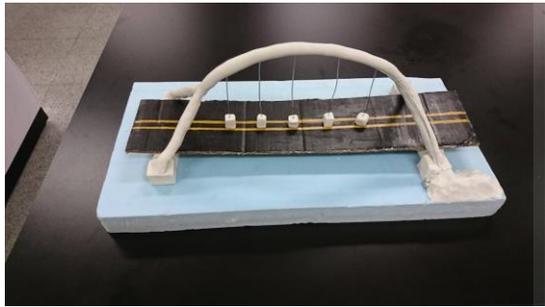


Fig1.南方澳單拱吊橋模型。 Fig2.南方澳斷橋(維基百科資料)。

由南方澳斷橋的新聞事件引發我們對於台灣海洋腐蝕環境之注重，欲藉由整理港灣海水性質相關的溶氧量、鹽度、流速、腐蝕因子、pH值及水溫等以及社團中所學習到的電化學基礎與地球科學海洋水文資料做結合希望能跨領域、跨科結合運用在台灣海洋環境防腐蝕工程領域，能夠在未來對離岸風電能源以及海洋環境之橋樑工程做出一點貢獻。

研究目的

- (一) 臺灣港區海水水質調查資料彙整與分析。
- (二) 臺灣港區海水化性及物性與腐蝕電位之探討。
- (三) 比較臺灣港區海水環境因子與腐蝕速率之權重關係。
- (四) 利用電化學原理來設計海洋環境防腐蝕之嘗試。

研究步驟與實驗原理

訂定研究主題 → 資料蒐集 → 整理分析 → 實驗探究 → 抗腐蝕試驗 → 討論

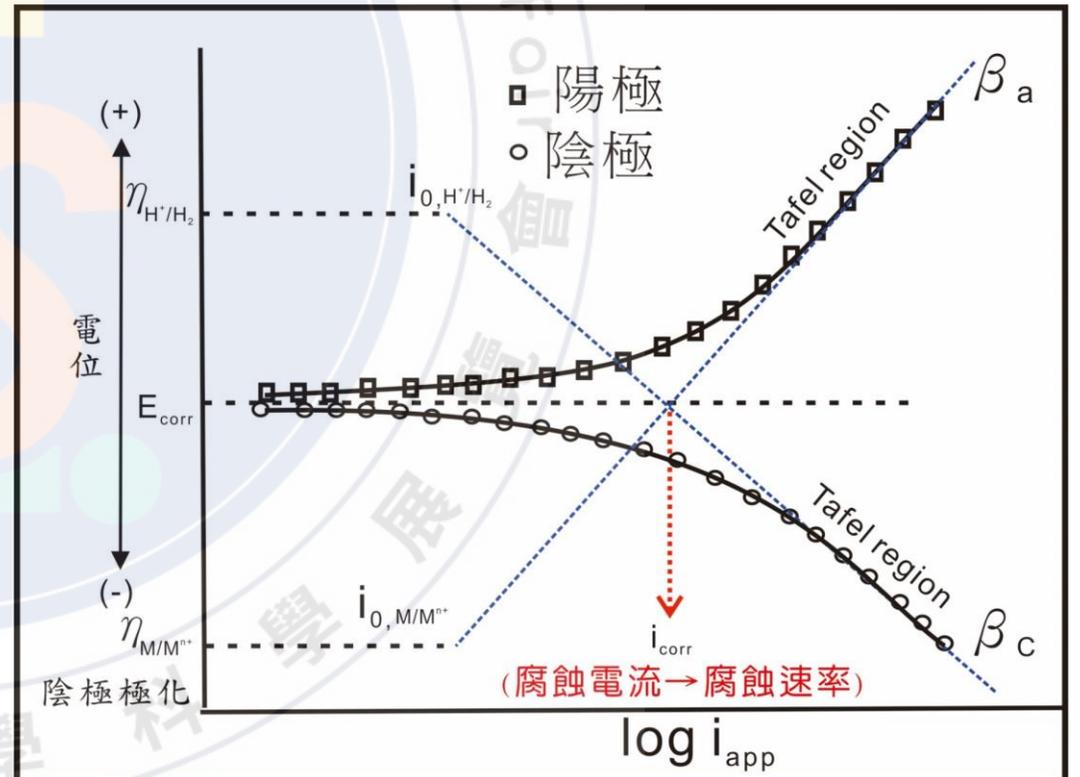
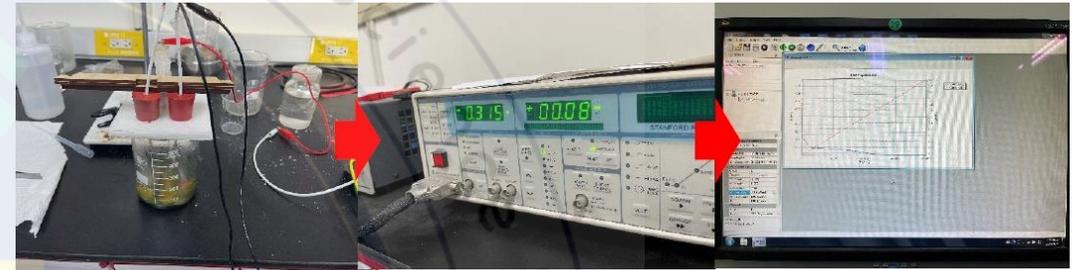


Fig3.利用恆電位儀 (EC-301) 跑Tafel曲線求腐蝕速率圖示。

結果與討論

結果1-1：各港口溶氧量差異不大且數值大部份都落在正常海水溶氧範圍內 (~8ppm)，研判海水溶氧與各港口之金屬腐蝕速率較無重要之相關性。

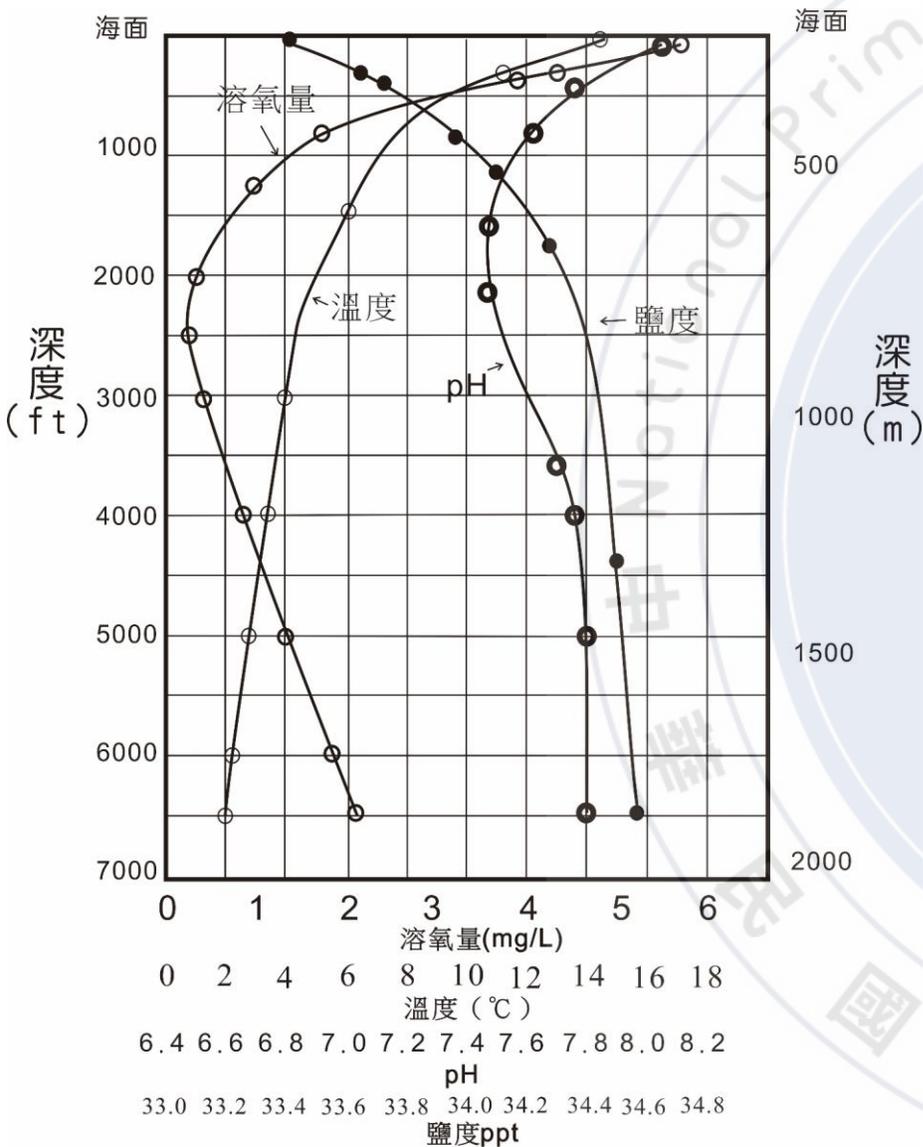


Fig4.海洋各參數因子與深度之關係。

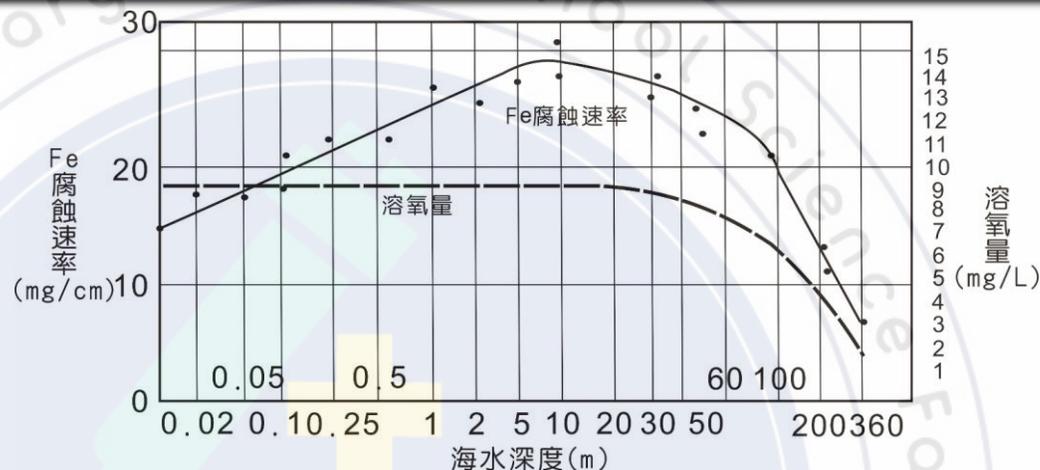


Fig5.海水深度與溶氧量及鐵之腐蝕速率關係。

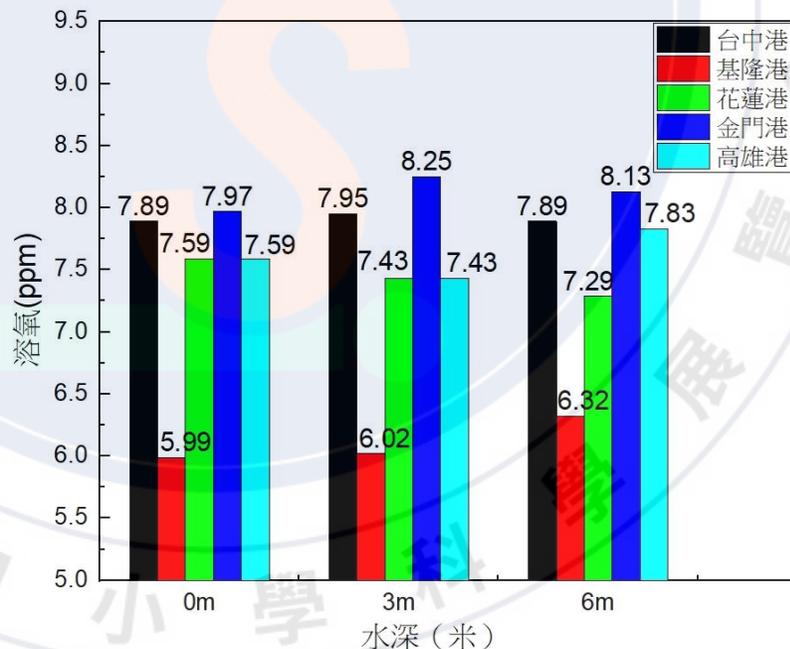


Fig6.各港口海水溶氧量平均值比較。

水中溶氧是金屬發生氧化很重要之因子，我們將臺灣五大港口最近當季溶氧資料彙整結果如Fig6所示，顯示在海水所有深度中基隆港溶氧都是最低，而其他四港口溶氧在水面下0~6m都約為7.5~8.3ppm之間屬於正常溶氧範圍，與Fig5來比較，研判此臺灣港口海水溶氧與腐蝕速率較無重要之相關。

結果1-2：五港口水溫在水深0~6m為23.4~27°C之間，依據動力學研判海水溫度與腐蝕速率相關性較高些；五港口最近一季pH值顯示皆在7.6~8.0之間，而比較海水pH值以及金屬腐蝕速率之關係，可知pH值在4~10間金屬維持一定之腐蝕速率，故研判海水之pH值與腐蝕速率應無重大相關。

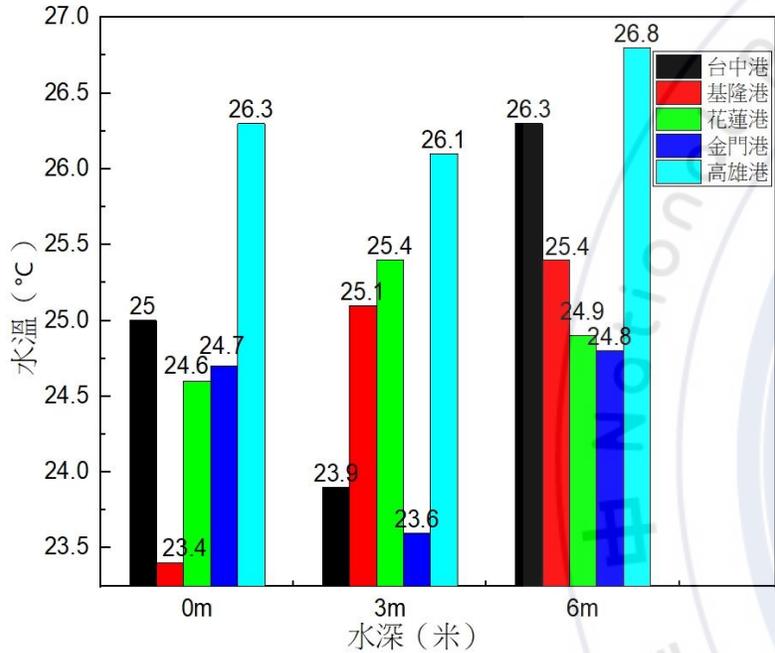


Fig7.五港口海水深度與均溫之關係。

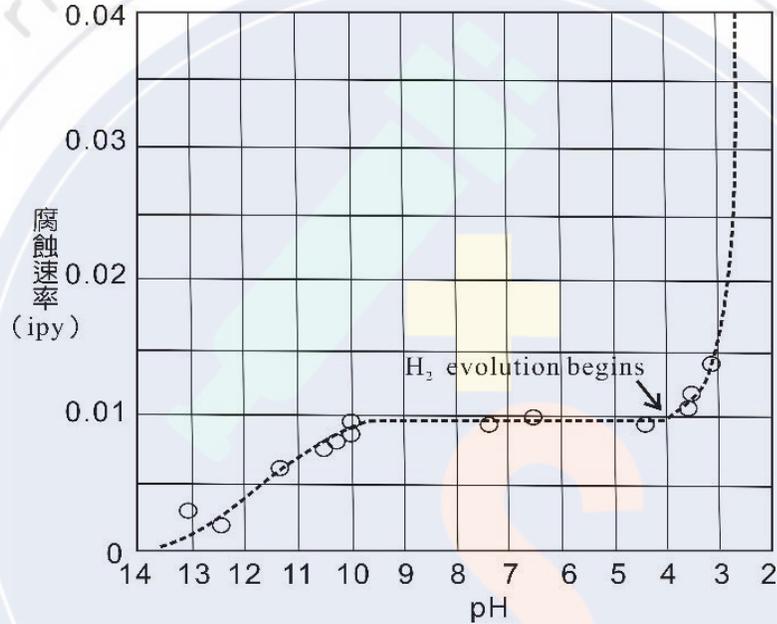


Fig8.海水pH與腐蝕速率之關係。

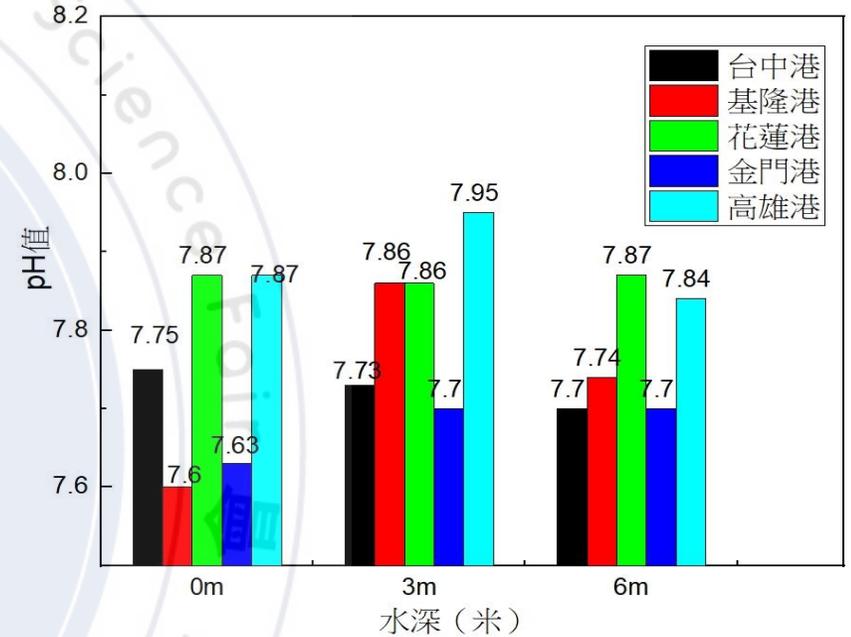


Fig9.各港口海水深度與pH值比較。

由Fig7資料整理各臺灣港口6m深以內溫度值約在23.5~27 °C間變動，而Fig7中也顯示南部高雄港均溫為最高 (~27 °C)，研判應與相對地理位置 (緯度) 有相關，而依據化學反應動力學而言溫度愈高反應速率愈快；而由Fig9可知各臺灣港口pH值資料整理分析可知約在7.6~8間小範圍變動，而參考文獻Fig8亦知pH值在4~10間金屬腐蝕速率為均一值，故研判pH值與腐蝕速率關係不大。

結果1-3：五港口鹽度除了花蓮港變動較大之外(24.4~39.4 ppt)，其餘港口變化不大大約在21~32 ppt之間變動，且各港口鹽度平均值在27.8~30.6 ppt之間，差異不大，而鹽度差與海洋流速有正相關。五大港口歷年每月海流流速平均值以台中港變動較大、高雄次之，而台中、高雄及花蓮以外，其餘2港口流速整年每月變動不大，而海洋流速與腐蝕速率有較重要的正相關。

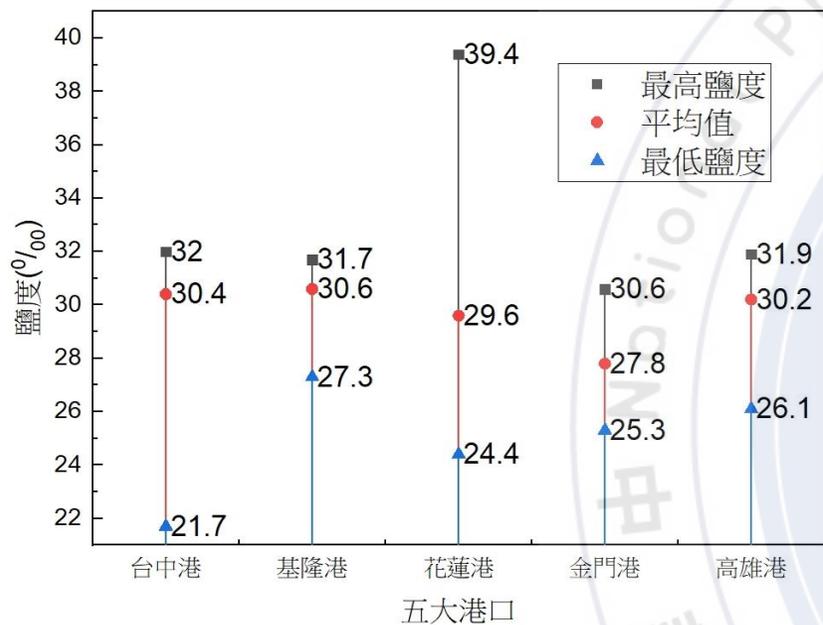


Fig10.五港口鹽度調查結果比較。

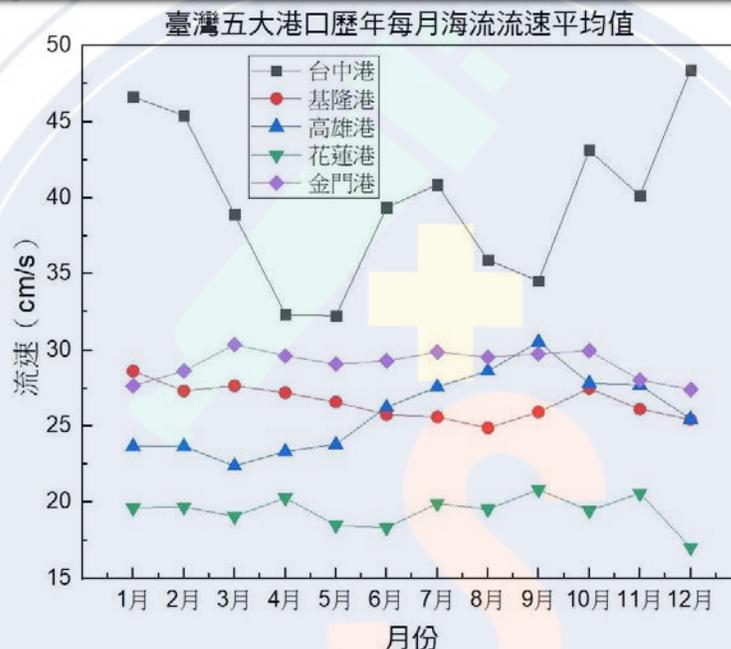


Fig11.五港口海流流速調查比較。

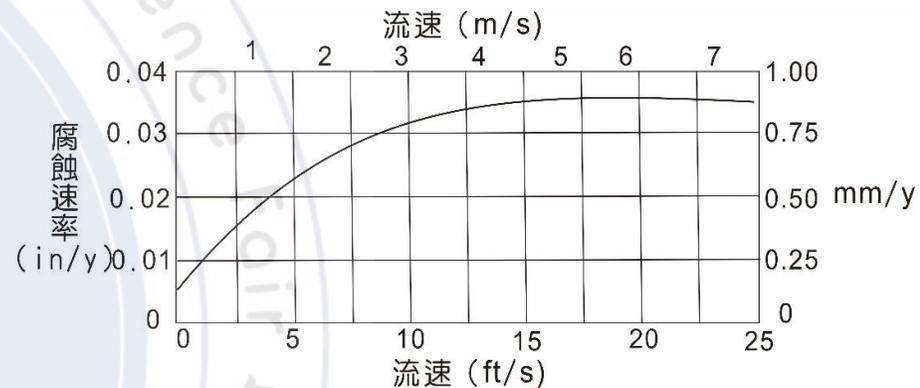


Fig12.金屬鋼材之腐蝕速率與海水流速之關係圖。

五大港口鹽度最低至最高值如Fig10所示，顯示除了花蓮港變動較大之外(24.4~39.4 ppt)，其餘港口變化不大大約為21~32 ppt之間變動，且各港口鹽度平均值在27.8~30.6 ppt之間，差異不大。整理臺灣五大港口歷年每月海流流速整理比較如Fig11，顯示以台中港海流流速變動較大、高雄次之。除台中、高雄及花蓮以外，其餘2港口流速平均值整年每月變動不大，而由Fig12資料可知流速愈大則腐蝕速率越快。

結果2-1：2020年之四種金屬腐蝕速率整理比較均為碳鋼腐蝕速率最大，其餘三種金屬腐蝕速率明顯較小且較不受季節影響，而碳鋼腐蝕以基隆港與台中港受季節影響為最大，且趨勢相當一致。

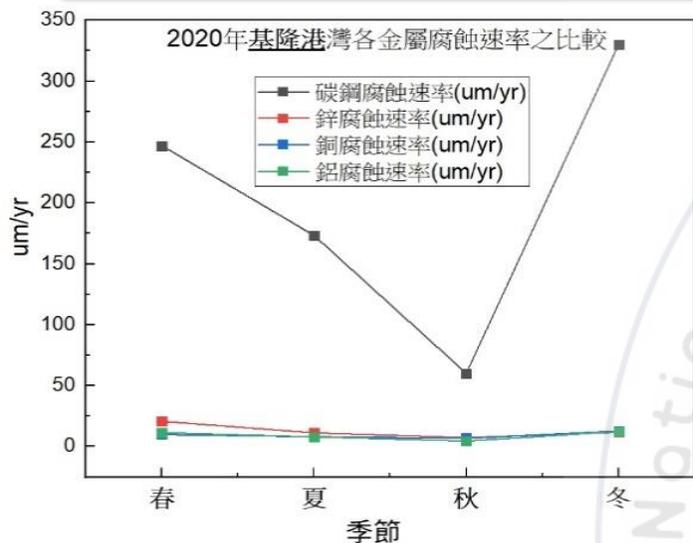


Fig13-1.基隆港灣之金屬腐蝕速率。

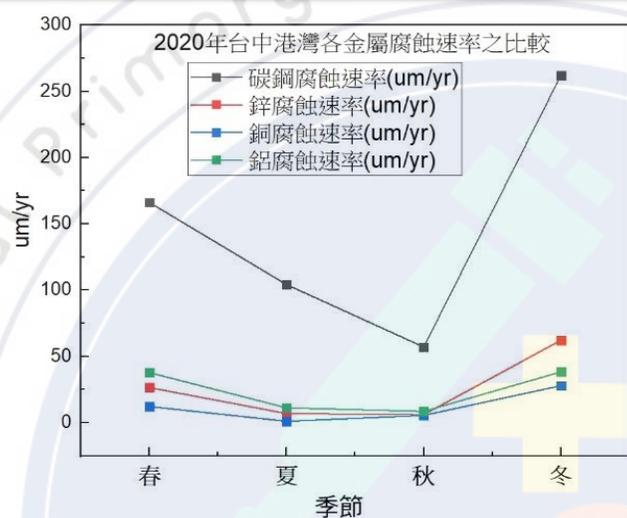


Fig13-2.台中港灣之金屬腐蝕速率。

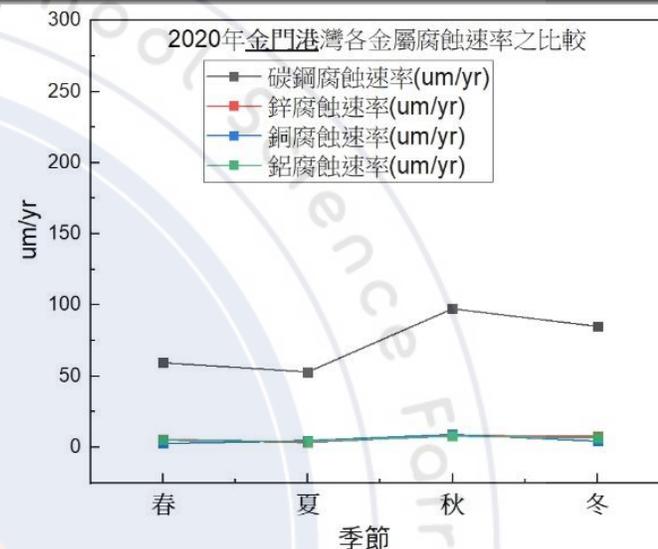


Fig13-3.金門港灣之金屬腐蝕速率。

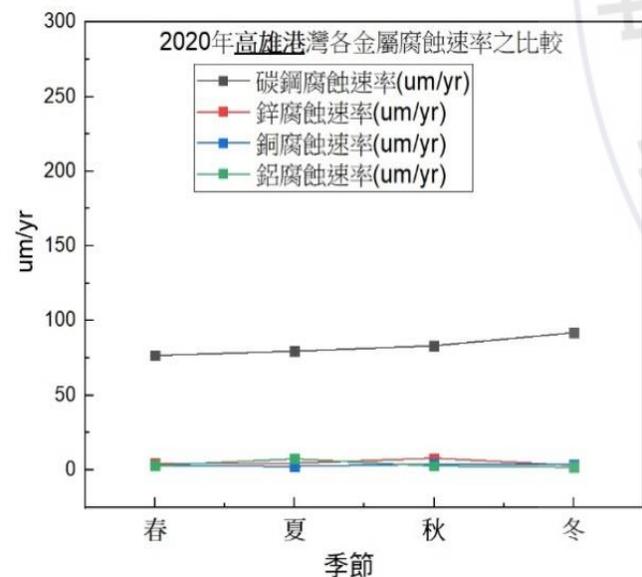


Fig13-4.高雄港灣之金屬腐蝕速率。

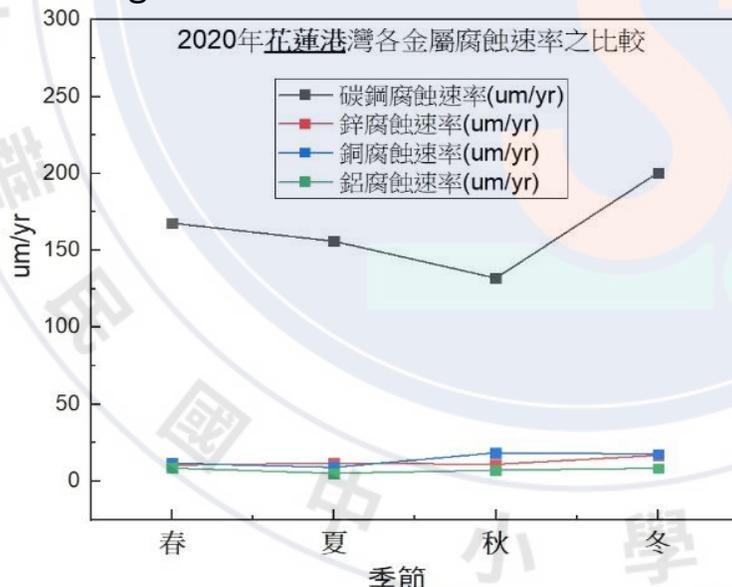


Fig13-5.花蓮港灣之金屬腐蝕速率。

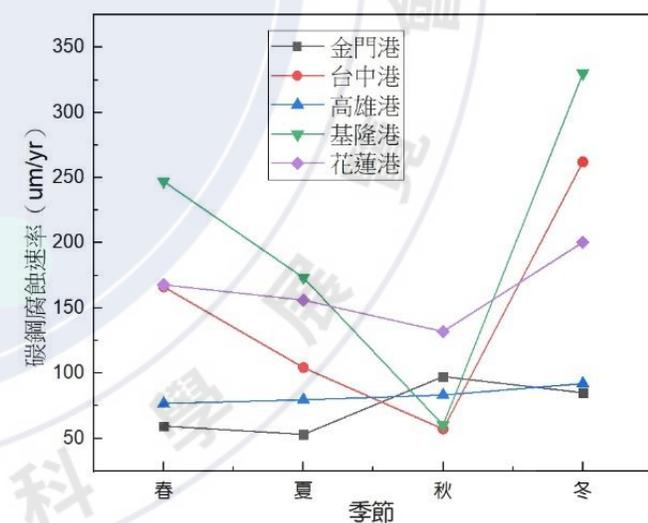


Fig13-6.五港灣之四季碳鋼腐蝕速率。

我們將腐蝕速率較大之臺灣五大港口的碳鋼腐蝕速率另做一比較也可以知道基隆港、台中港以及花蓮港等3港口均是以春冬二季腐蝕速率較大，而高雄港及金門港則是四季節都是較趨緩。

結果2-2：將2010~2020年五港口之碳鋼腐蝕速率四季平均值做一比較來發現基隆與台中腐蝕速率趨勢最相似，而以金門腐蝕速率最慢。

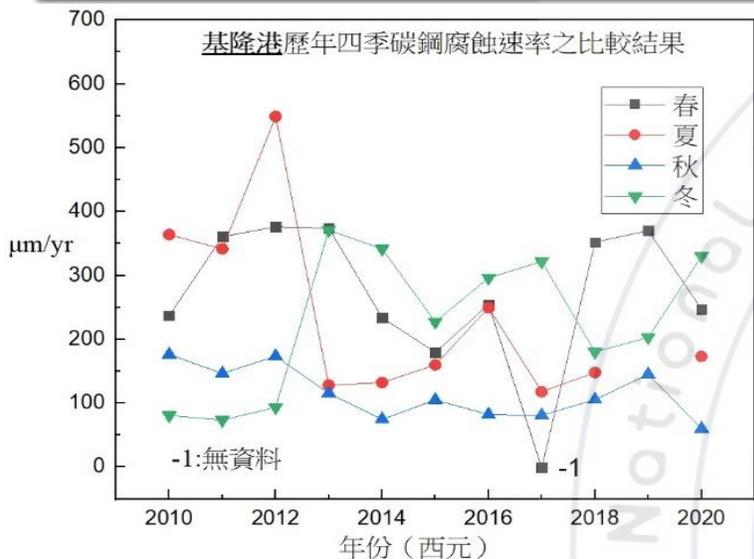


Fig14-1.基隆港灣之碳鋼腐蝕速率。

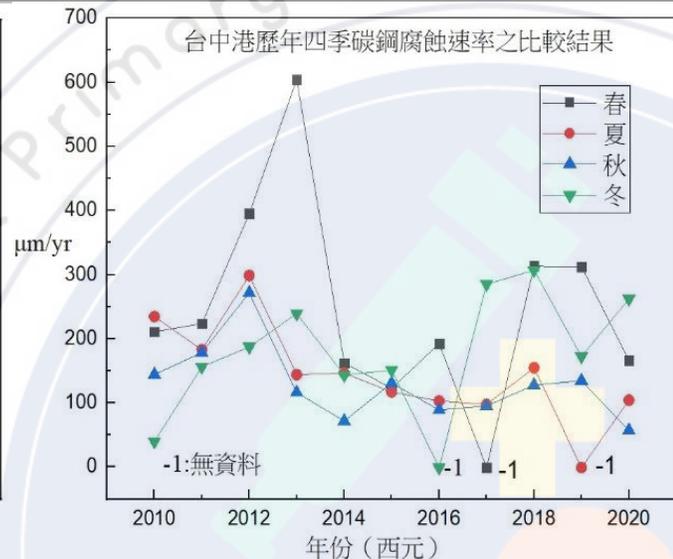


Fig14-2.台中港灣之碳鋼腐蝕速率。

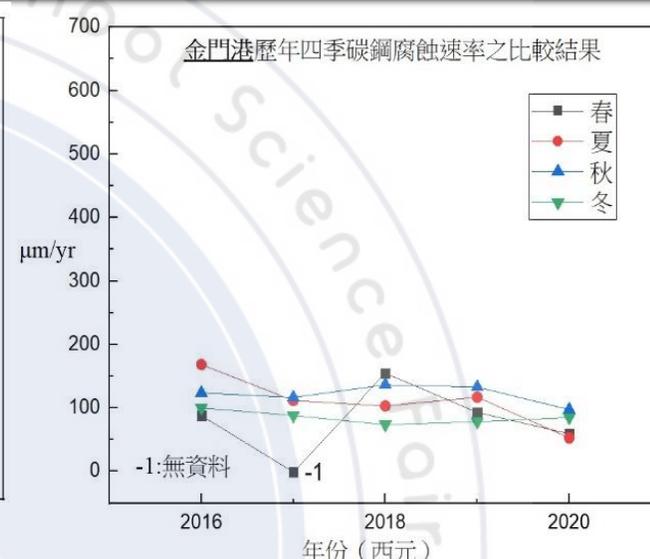


Fig14-3.金門港灣之碳鋼腐蝕速率。

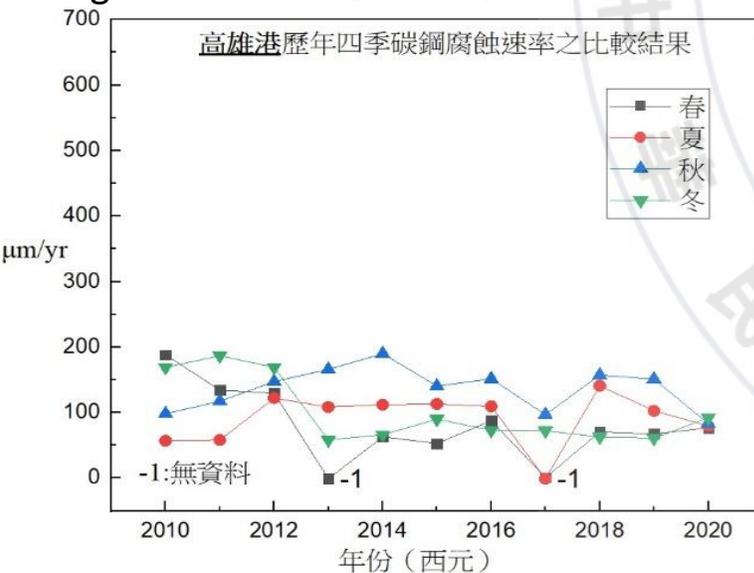


Fig14-4.高雄港灣之碳鋼腐蝕速率。

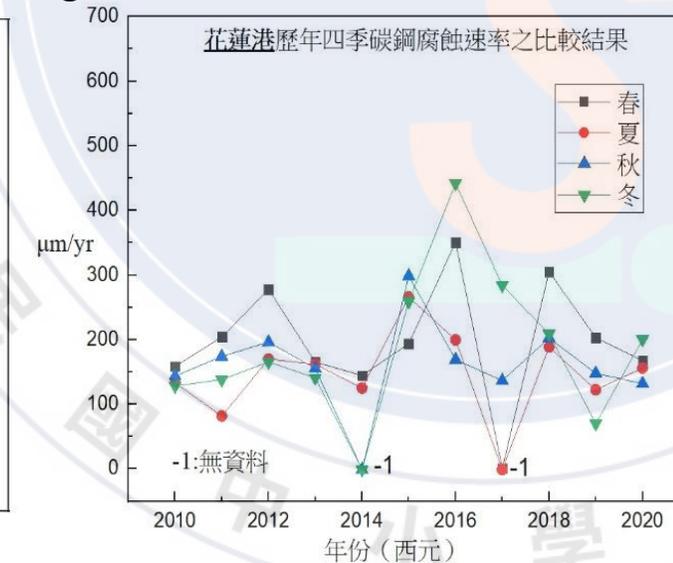


Fig14-5.花蓮港灣之碳鋼腐蝕速率。

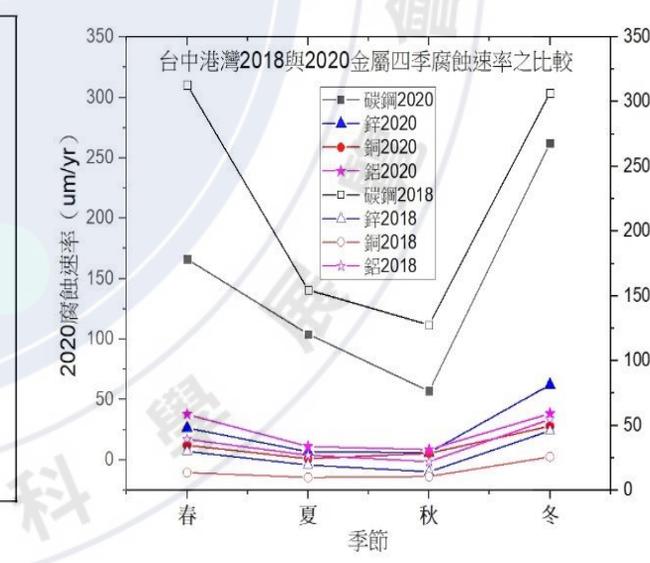


Fig14-6.台中港灣二年度之比較。

碳鋼腐蝕速率較快亦變化最明顯不同且在實際應用面最廣；另將台中港2018與2020年四種金屬腐蝕速率作一比較發現趨勢呈現一致，意即發現台中港灣二年度之四季變化趨勢一致。

結果2-3：將海流流速與腐蝕速率做一比較，可知海流流速均值以台中港 > 基隆港，但是二港口之腐蝕速率趨勢均與流速有很大的一致趨勢，或許海流流速是影響碳鋼腐蝕速率很大的因素之一。

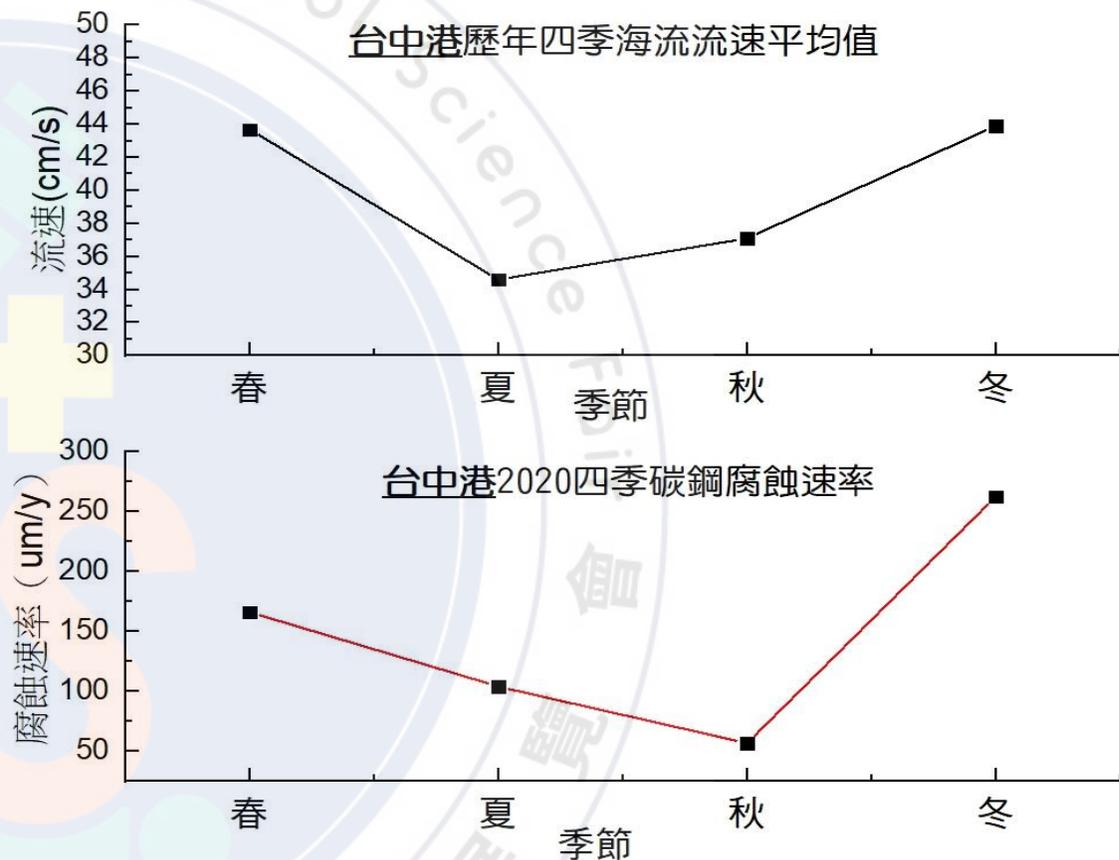
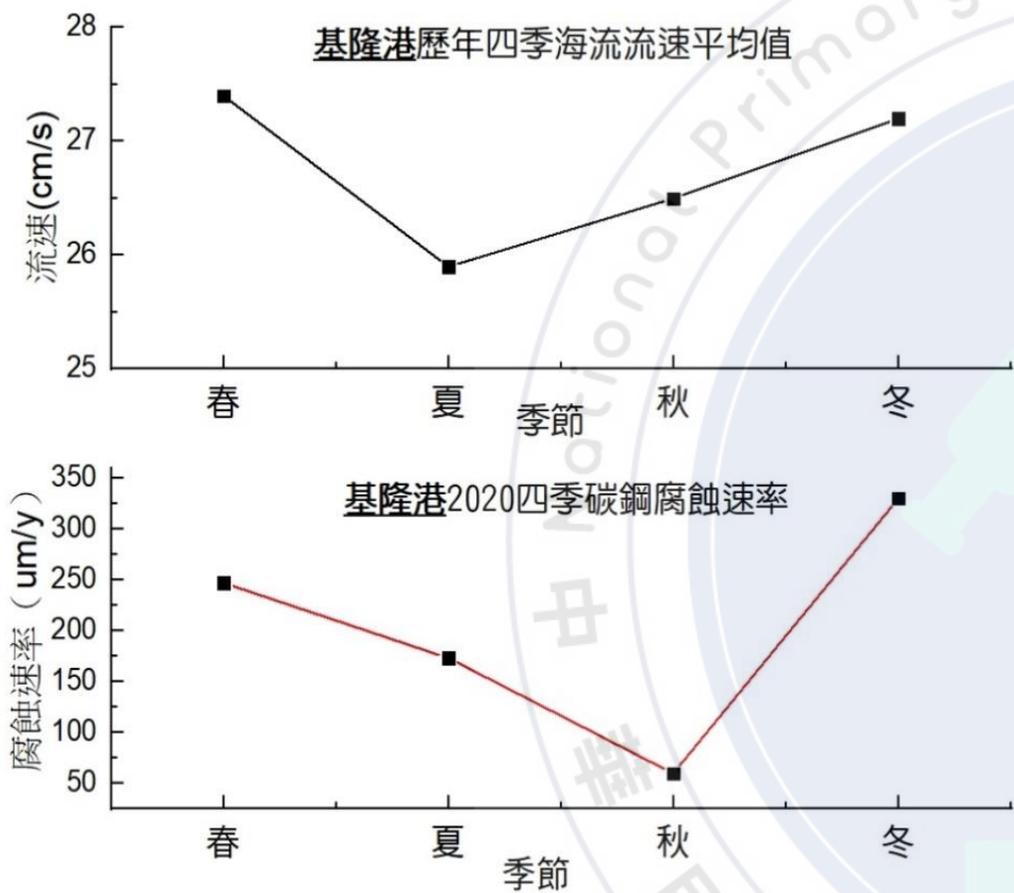


Fig15.基隆港碳鋼金屬腐蝕速率與海流流速之比較結果。

Fig16.台中港碳鋼金屬腐蝕速率與海流流速之比較結果。

已知碳鋼腐蝕速率以基隆港與台中港受季節影響為最大，且趨勢相當一致。而將基隆港與台中港之四季碳鋼腐蝕速率與其歷年每月洋流整理成四季數據互相做比較，也可知道流速與腐蝕速率有很大之相關性。

結果3：鹽度差愈大流速確實愈快；而流速快腐蝕速率都是增大的，或許也跟離子游動速度有關；海水中之溶氧量一般室溫約為7~8ppm，各地港口溶氧亦約8ppm故與金屬腐蝕速率無重要相關。

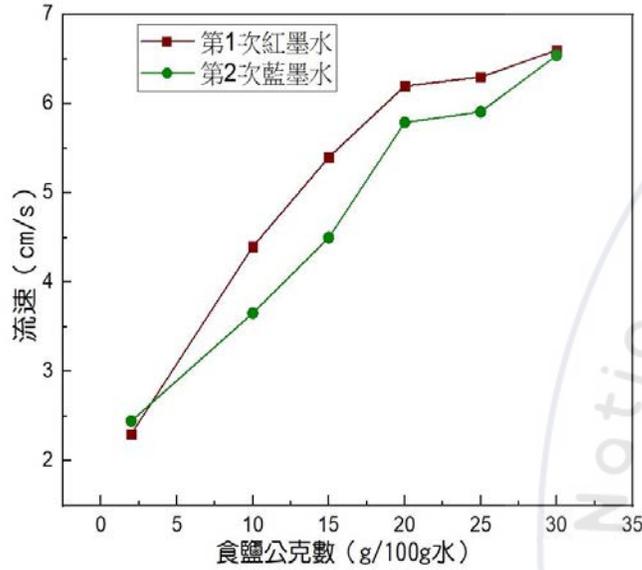


Fig17. 鹽度與水流流速實驗結果。

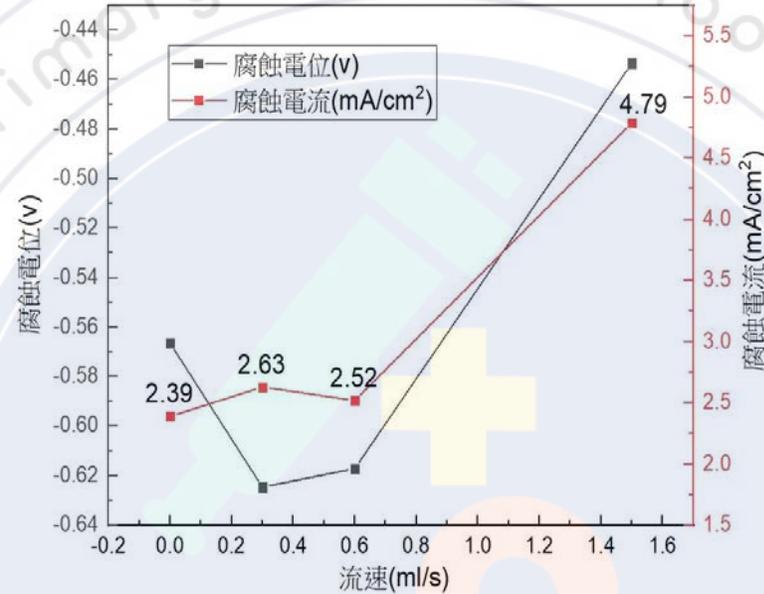


Fig18. 流速差異之腐蝕速率實驗數據。

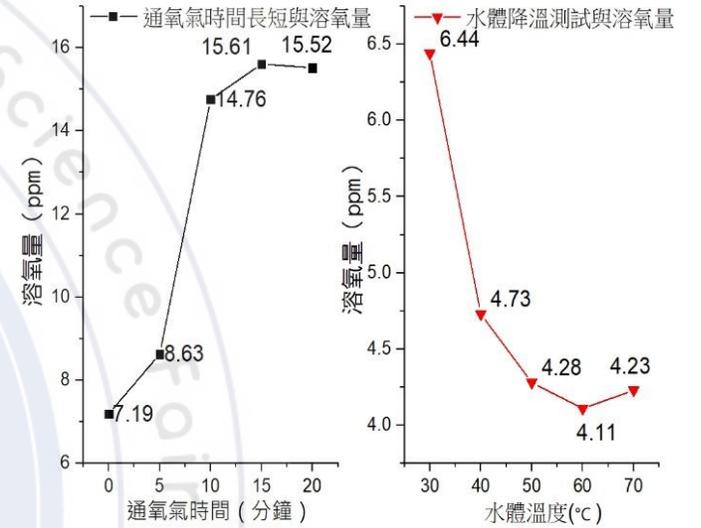


Fig19. 溶氧量與水體溫度對應實驗。

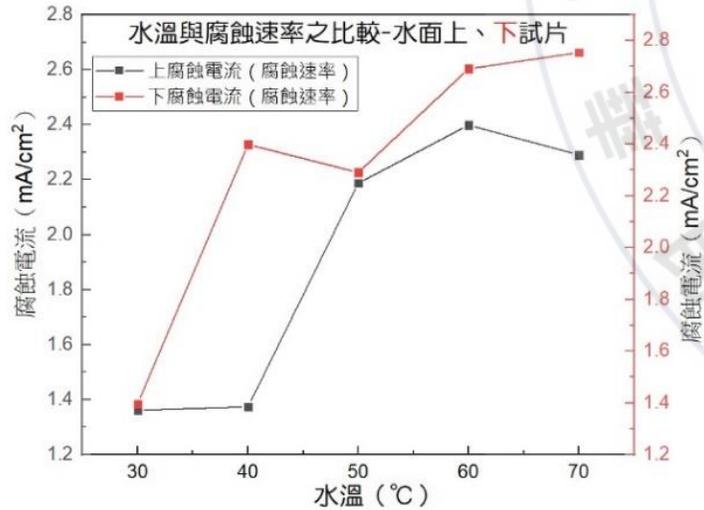


Fig20. 水溫與水面上及下腐蝕速率。

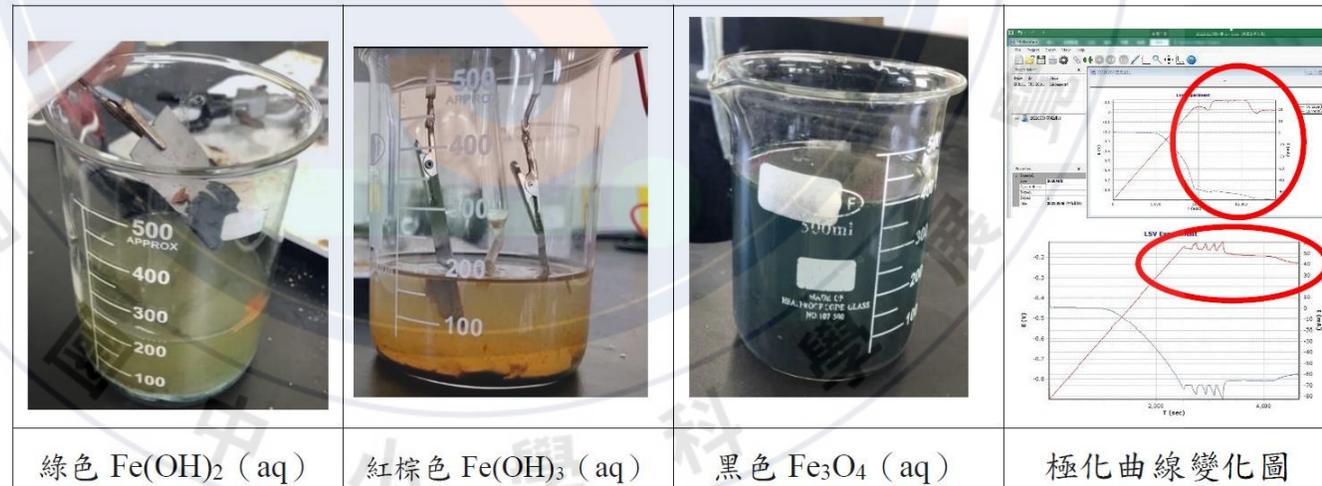


Fig21. 金屬試片氧化生成各氫氧化物等溶液與極化曲線關係。

氫氧化物附着性很差等到試片上氧化物夠厚時會掉落造成鐵片阻抗又變小，而恆電位儀無法立即做調整故造成後段LSV掃描電壓會在一定區間震盪。

結果4-1：利用鋁及太陽能板、光敏電阻等電子元件線路設計陰極保護法確實有防腐蝕之效果，而需注意天候狀況以及防止所產生之電流太大會有電解水會有氧氣之生成疑慮。

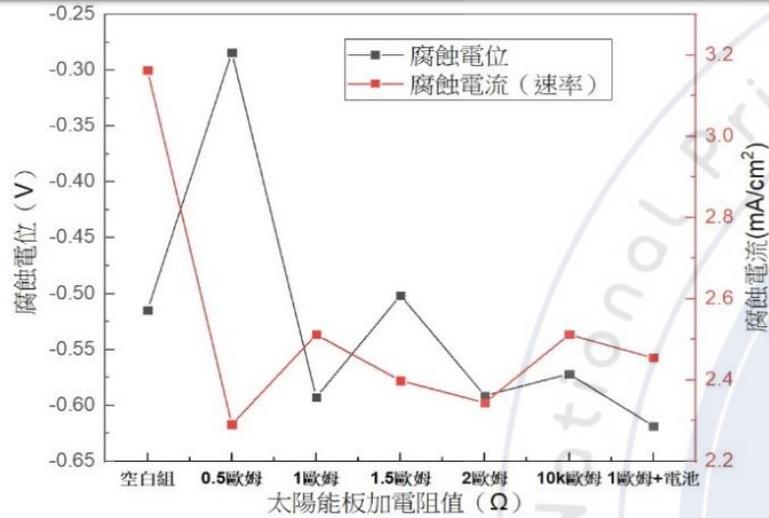


Fig22. 太陽能板之腐蝕電流比較。

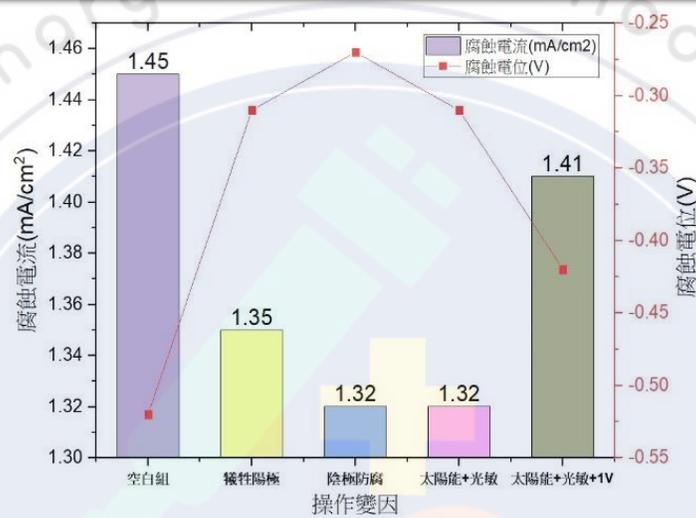


Fig23. 加裝光敏電阻腐蝕電流比較。



Fig24. 利用電子元件防腐蝕實驗裝置。

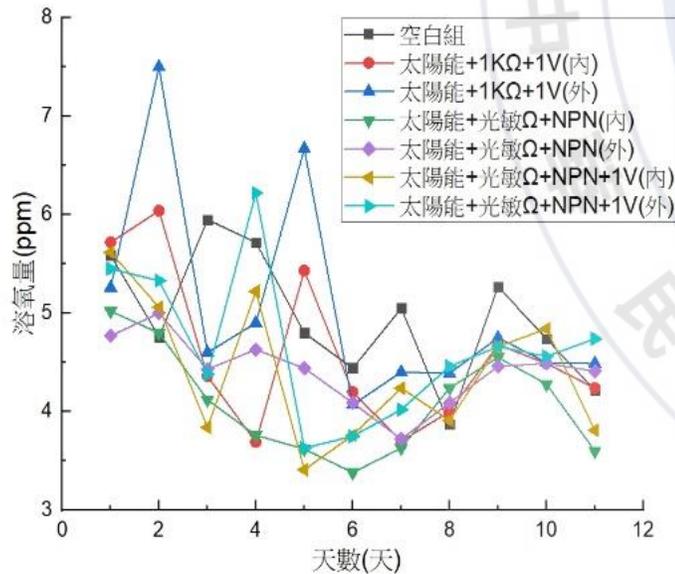


Fig25. 實驗過程逐日溶氧記錄結果。

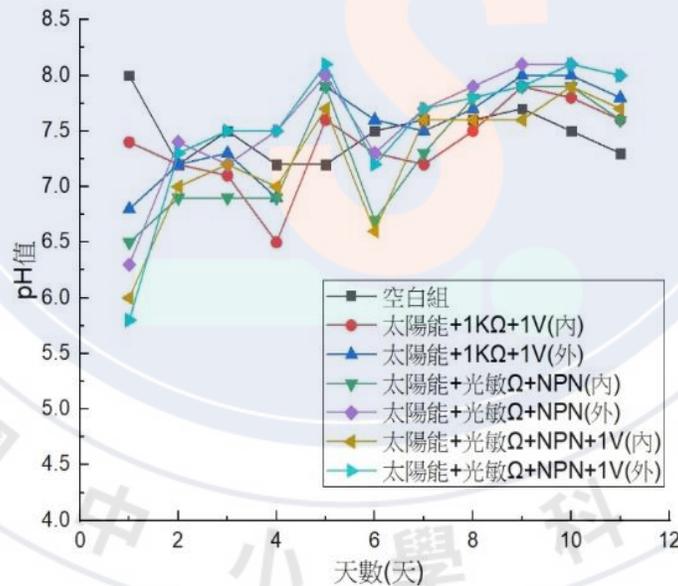


Fig26. 實驗過程pH逐日記錄結果。

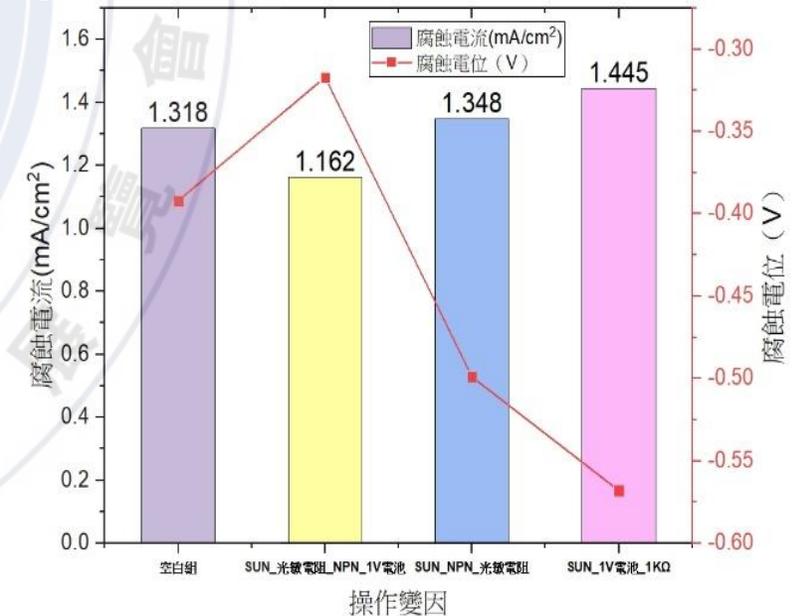


Fig27. 腐蝕速率與腐蝕電位之結果。

結果4-2：定量實驗設計之下，將光譜比較結果與沉澱物的量一起計算或許亦可為創新另一定量腐蝕速率或腐蝕程度之表示方式。

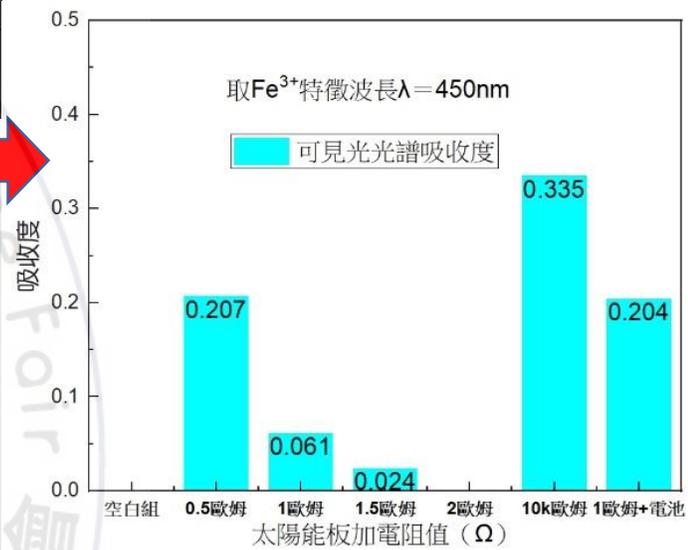
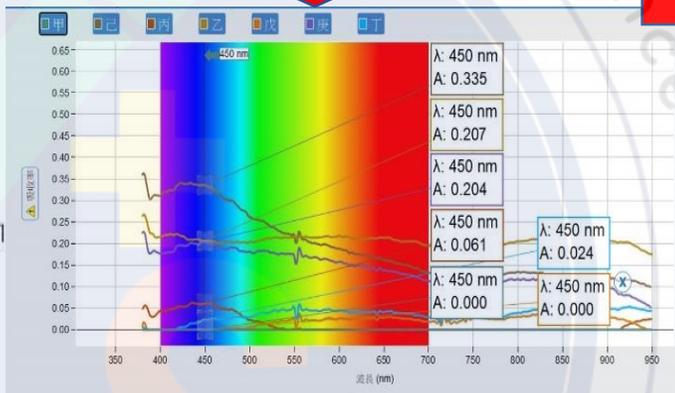
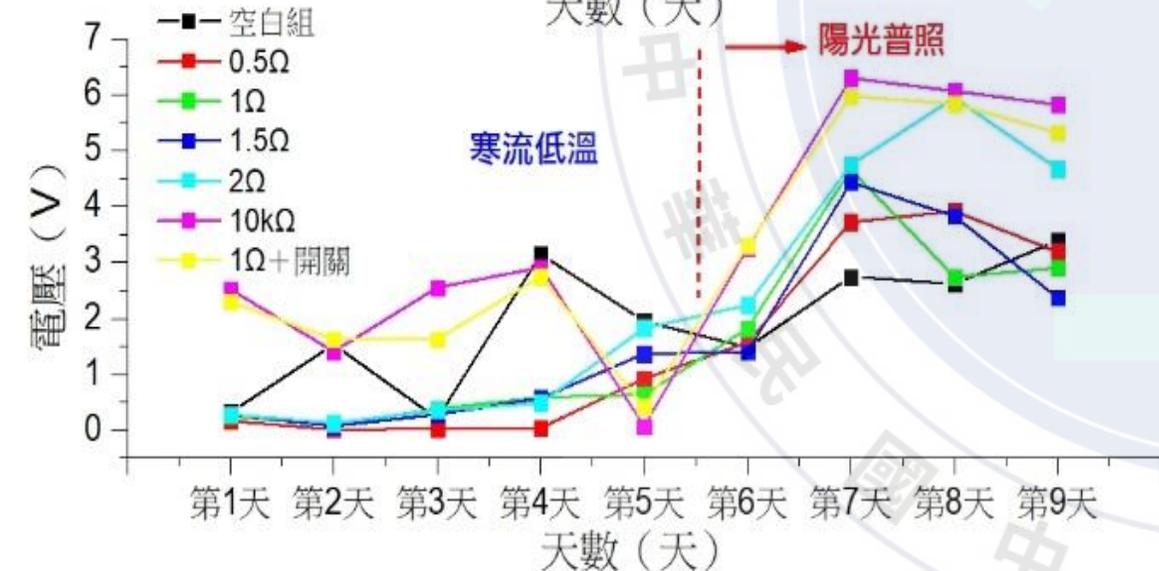
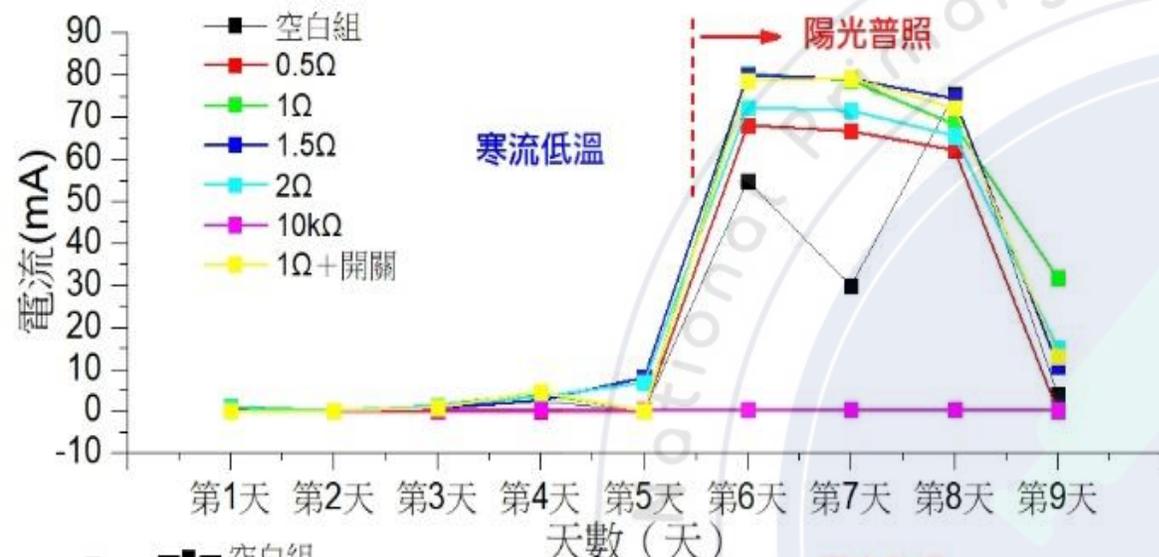


Fig29.光譜法測量水溶液中鐵離子濃度判斷其腐蝕速率。

取鐵 Fe^{3+} 特徵波長450 nm比較其溶液中 Fe^{3+} 濃度之觀察可得到其吸收度比較而知其濃度大小來估其氧化的數量，而底層沉澱物亦是符合離子沉澱表氫氧化鐵之溶解度較低的情況，因此定量實驗設計之下，將光譜比較結果與沉澱物的量一起計算或許亦可為創新另一定量腐蝕速率或腐蝕程度之表示方式。

Fig28.實驗裝置其紀錄值深受日常天候之影響。

結論

由以上資料分析與實驗結果可以得出以下重要結論：

- 一. 臺灣海洋環境因子與腐蝕速率相關重要性依序應為流速、鹽度、溫度、溶氧量及酸鹼值。
- 二. 流速以台中港數值較大且變動大；溶氧量以基隆港溶氧最低，其餘四港口溶氧量在水深6m內為正常值；海水溫度以高雄港均溫為最高與其緯度位置有關；海水之pH值與腐蝕速率較無關係；海水鹽度以花蓮港變動較大，其它港口變化約為21 ~ 32 ‰。
- 三. 金屬腐蝕速率以碳鋼最快且大於銅、鋅、鋁，碳鋼腐蝕速率應為台中港、基隆港 > 花蓮港、高雄港 > 金門港。
- 四. 海洋環境的防腐蝕法可利用太陽能板之陰極保護法及考量天候狀況與加裝合適電子元件之線路設計來得到一合適電流不致使造成電解水而生成氧氣。抗腐蝕實驗中其電解質溶液顏色變化及沉澱物一併考量可為腐蝕速率之另一種新型測量方式。

參考文獻

- 一. 莊景程、李榮峻、黃馨瑩. (2021) .與日爭光—橋樑防腐大作戰.第61屆中三區高中組科展化學科作品說明書。
- 二. Edition Allen J. Bard, Larry R. Faulkner.(2000). Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications, 2nd . John Wiley & Sons Inc .