

出國報告（出國類別：開會）

參加 2018 國際熱浸鍍鋅研討會
及風電塗層壽命評估

服務機關：台灣電力公司綜合研究所

姓名職稱：鄭錦榮、化學監主任

派赴國家：德國

出國期間：107 年 06 月 16 日至 107 年 06 月 24 日

報告日期：107 年 08 月 24 日

出國報告審核表

出國報告名稱：參加 2018 國際熱浸鍍鋅研討會及風電塗層壽命評估		
出國人姓名 <small>(2人以上,以1人為代表)</small>	職稱	服務單位
鄭錦榮	綜合研究所化學監主任	台灣電力公司
出國類別	<input type="checkbox"/> 考察 <input type="checkbox"/> 進修 <input type="checkbox"/> 研究 <input type="checkbox"/> 實習 <input checked="" type="checkbox"/> 其他開會 (例如國際會議、國際比賽、業務接洽)	
出國期間：107年06月16日至107年06月24日		報告繳交日期：107年08月24日
出國人員自我審核	計畫主辦機關審核	審核項目
<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 依限繳交出國報告 2. 格式完整 (本文必須具備「目地」、「過程」、「心得及建議事項」) 3. 無抄襲相關資料 4. 內容充實完備。 5. 建議具參考價值 6. 送本機關參考或研辦 7. 送上級機關參考 8. 退回補正，原因： <ol style="list-style-type: none"> (1) 不符原核定出國計畫 (2) 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容 (3) 內容空洞簡略或未涵蓋規定要項 (4) 抄襲相關資料之全部或部分內容 (5) 引用相關資料未註明資料來源 (6) 電子檔案未依格式辦理 (7) 未於資訊網登錄提要資料及傳送出國報告電子檔 9. 本報告除上傳至出國報告資訊網外，將採行之公開發表： <ol style="list-style-type: none"> (1) 辦理本機關出國報告座談會(說明會)，與同仁進行知識分享。 (2) 於本機關業務會報提出報告 (3) 其他 10. 其他處理意見及方式：

報告人：

 107.8.28
 鄭錦榮

單位主管

 107.8.28
 鍾年勉

主管處主管

 107.8.29
 洪紹平

總經理：
 副總經理：

說明：

- 一、各機關可依需要自行增列審核項目內容，出國報告審核完畢本表請自行保存。
- 二、審核作業應於報告提出後二個月內完成，以不影響出國人員上傳出國報告至「公務報告資訊網為原則」。

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：參加 2018 國際熱浸鍍鋅研討會及風電塗層壽命評估

頁數 38 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台電人事處/陳德隆/02-23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

鄭錦榮/台電綜合研究所/化學與環境研究室/化學學監主任/02-80782231

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：中華民國 107 年 06 月 16 日 至 107 年 06 月 24 日 出國地區：德國

報告日期：中華民國 107 年 08 月 24 日

分類號/目

關鍵詞：鍍鋅表面缺陷、量化評估

內容摘要：（二百至三百字）

參加歐洲熱浸鍍鋅協會舉辦之 2018 國際鍍鋅年會，研討輸配電及風電的鋼鐵構件防蝕方法，並赴歐洲 Hempel 德國研究中心研討離岸風電塗層使用壽命評估方法。在柏林市伊斯特雷爾酒店(Estrel Hotel)舉辦之『2018 國際熱浸鍍鋅』研討會，該會議專注於鍍鋅在鋼鐵結構中的創新應用及鋅和鋅合金鍍層的防腐性能技術，後續精進建立輸電線路材料破損分析及維修評估方法與鐵塔結構的安全監測，提高輸電鐵塔設備運轉的可靠度與後續追蹤評估作業等工作技術。台電公司彰濱離岸風場測風塔已納入建構評估中，由於離岸風機長期處於海洋環境中，容易受到各類腐蝕等不良因素影響。大型海上風電場在投入運轉，風機機組的海中結構及塔座容易出現腐蝕劣化，除了製造問題，離岸的氣候條件、海上結構物的腐蝕防治設計、空氣中鹽份防蝕等，皆是機組日後運轉維護的重要因素，協助離岸風力海上結構物腐蝕防治設計，減少主要部件的更換或維修經費。

因此從會議中針對與台電熱浸鍍鋅鋼構材表面處理技術分別引述「熱浸鍍鋅合金元素對鍍鋅表面缺陷異常的影響」說明輸配電線路構材、鐵塔表面缺陷異常的與改善對策及「鋅鉻合金在批量熱浸鍍鋅中的腐蝕行為」改善重鹽害地區鍍鋅層易與海鹽粒子反應的缺陷。在 Hempel 德國研究中心以離岸風電塔座防蝕系統量化評估離岸風電塗層

使用壽命評估方法。建立(1)公司輸電線路材料破損分析及維修評估方法，鍍鋅在鋼鐵結構中的創新應用及鋅和鋅合金鍍層的防腐性能技術，提高輸電鐵塔設備運轉的可靠度與後續追蹤評估作業等工作技術。(2)如何結合國外海中結構物設計，提高防腐蝕保護，改善腐蝕監督控制，導入公司離岸風力海上結構物腐蝕防治設計及塗層壽命評估方法，減少主要部件的更換或維修經費。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網

(<http://report.nat.gov.tw/reportwork/>)

摘要

參加歐洲熱浸鍍鋅協會舉辦之 2018 國際鍍鋅年會，研討輸配電及風電的鋼鐵構件防蝕方法，並赴歐洲 Hempel 德國研究中心研討離岸風電塗層使用壽命評估方法。在柏林市伊斯特雷爾酒店(Estrel Hotel)舉辦之『2018 國際熱浸鍍鋅』研討會，該會議專注於鍍鋅在鋼鐵結構中的創新應用及鋅和鋅合金鍍層的防腐性能技術，後續精進建立輸電線路材料破損分析及維修評估方法與鐵塔結構的安全監測，提高輸電鐵塔設備運轉的可靠度與後續追蹤評估作業等工作技術。台電公司彰濱離岸風場測風塔已納入建構評估中，由於離岸風機長期處於海洋環境中，容易受到各類腐蝕等不良因素影響。大型海上風電場在投入運轉，風機機組的海中結構及塔座容易出現腐蝕劣化，除了製造問題，離岸的氣候條件、海上結構物的腐蝕防治設計、空氣中鹽份防蝕等，皆是機組日後運轉維護的重要因素，協助離岸風力海上結構物腐蝕防治設計，減少主要部件的更換或維修經費。

因此從會議中針對與台電熱浸鍍鋅鋼構材表面處理技術分別引述「熱浸鍍鋅合金元素對鍍鋅表面缺陷異常的影響」說明輸配電線路構材、鐵塔表面缺陷異常的與改善對策及「鋅鉻合金在批量熱浸鍍鋅中的腐蝕行為」改善重鹽害地區鍍鋅層易與海鹽粒子反應的缺陷。在Hempel 德國研究中心以離岸風電塔座防蝕系統量化評估離岸風電塗層使用壽命評估方法。建立(1)公司輸電線路材料破損分析及維修評估方法，鍍鋅在鋼鐵結構中的創新應用及鋅和鋅合金鍍層的防腐性能技術，提高輸電鐵塔設備運轉的可靠度與後續追蹤評估作業等工作技術。(2)如何結合國外海中結構物設計，提高防腐蝕保護，改善腐蝕監督控制，導入公司離岸風力海上結構物腐蝕防治設計及塗層壽命評估方法，減少主要部件的更換或維修經費。

目 次

行政院及所屬各機關出國報告提要.....	3
摘 要.....	5
目 次.....	6
一、目的.....	7
二、行程概要.....	8
三、會議及參訪內容.....	9
3.1 2018 國際熱浸鍍鋅研討會.....	9
3.2 熱浸鍍鋅鋼構材處理.....	16
3.3 熱浸鍍鋅合金元素對鍍鋅表面缺陷異常的影響 ⁽¹⁾	17
3.3.1 熱浸鍍鋅的新挑戰.....	17
3.3.2 Zn-Fe 相關的異常.....	19
3.3.3 影響表面異常的因素.....	21
3.4 鋅鉻合金在批量熱浸鍍鋅中的腐蝕行為 ⁽⁵⁾	23
3.4.1 通過合金添加劑提高鍍鋅表面的耐腐蝕性.....	23
3.4.2 試驗方法.....	23
3.4.3 含 Cr 的鋅合金作為合金元素進行熱浸鍍鋅.....	23
3.4.4 測試結果.....	24
3.4.5 結論.....	30
3.5 離岸風電塔座防蝕系統量化評估.....	31
3.5.1 離岸風電輸送平台構件腐蝕-塗層失效類型分析.....	31
3.5.2 防蝕系統風險評估與管理.....	32
3.5.3 防蝕系統量化防蝕評估方法.....	33
3.5.4 塗層劣化程度的量化評估.....	34
四、心得與感想.....	37
五、參考文獻.....	37

一、目的

1. 參加歐洲熱浸鍍鋅協會舉辦之 2018 國際鍍鋅年會，研討輸配電及風電的鋼鐵構件防蝕方法，並赴歐洲 Hempel 德國研究中心研討離岸風電塗層使用壽命評估方法。
2. 熱浸鍍鋅為鋼構材的主要表面處理技術，台電公司在輸配電線路構材、鐵塔及風力發電機塔座基礎皆已採用該防蝕方法，傳統熱浸鍍鋅輸電鐵塔在一般地區皆有良好的耐蝕性，但在重鹽害地區鍍鋅層易與海鹽粒子反應，加速損耗，特別是中火出口沿岸鐵塔腐蝕最嚴重，使用年限縮短至 20 年，因此如何改善防蝕技術，確保工作人員安全及輸電線路可靠性，在柏林市伊斯特雷爾酒店(Estrel Hotel)舉辦之『2018 國際熱浸鍍鋅』研討會，該會議專注於鍍鋅在鋼鐵結構中的創新應用及鋅和鋅合金鍍層的防腐性能技術，可與來自歐亞各地學者研討改善對策，促進國際熱浸鍍鋅的學習和交流。會後順道赴歐洲 Hempel 德國研究中心參訪離岸風力先進防蝕技術及風機塔座腐蝕防治技術，因應公司離岸風力防蝕規範的研訂，吸收新知以彌補日後施行經驗之不足。
3. 後續精進建立輸電線路材料破損分析及維修評估方法與鐵塔結構的安全監測，提高輸電鐵塔設備運轉的可靠度與後續追蹤評估作業等工作技術。台電公司彰濱離岸風場測風塔已納入建構評估中，由於離岸風機長期處於海洋環境中，容易受到各類腐蝕等不良因素影響。就像全球首個大型海上風電場 Horns Rev 在投入運轉後不久，風機機組的海中結構及塔座開始出現腐蝕劣化，除了製造問題，離岸的氣候條件、海上結構物的腐蝕防治設計、空氣中鹽份防蝕等，皆是機組日後運轉維護的重要因素，協助離岸風力海上結構物腐蝕防治設計，減少主要部件的更換或維修經費。

二、行程概要

本案開會含往返行程共 9 天，即自民國 107 年 06 月 16 日至同年 06 月 24 日止，其行程概要簡述如下：

參訪機構名稱	地點	詳細工作內容
European General Galvanizers Association	柏林	Intergalva 2018 conference, European General Galvanizers Association.
Hempe 德國研究中心	漢堡	離岸風機塗層劣化壽命評估實驗室參觀及研討

三、會議及參訪內容

3.1 2018 國際熱浸鍍鋅研討會

會議在德國柏林 The Estrel hotel 舉行，這是全球熱浸鍍鋅研究及生產製造業者必須參加的活動，超過 700 名代表來自超過 54 個國家，代表包括：業主，運營商和鍍鋅廠經理人、鍍鋅產品的用戶、腐蝕專家、使用鋼材的防腐蝕保護研究人員、設備和服務的供應商、內容包括技術，商業和環保主題，並伴隨著廣泛的展覽為該行業提供的設備，服務和材料，3 天的會議研討會及貿易展覽，針對與台電公司在輸配電線路構材、鐵塔及風力發電機塔座基礎研發相關議題說明如後，會議議程如表 1 所示。



表 1 : 3-Day conference program with interactive workshops

Monday 18 June	
Opening Session	
9.00	<p>Welcome and Opening Remarks <i>(M Kopf, President, European General Galvanizers Association P Niederstein, Speaker of the Board, Industrieverband Feuerverzinken e. V.</i></p>
Session 1: Keynote Speakers	
9.20	<p>Keynote speech <i>L Thomsen, CEO, Future Matters</i></p>
	<p>The galvanizing industry in Germany <i>M Huckshold, Industrieverband Feuerverzinken e. V.</i></p>
	<p>The zinc supply/demand outlook <i>Dr R Cochrane, CRU International Ltd (UK)</i></p>
0.55	Coffee Break and Exhibition
Session 2: Galvanizing in Bridge Construction	
1.25	<p>Hot-dip galvanizing for steel and composite bridges – New research for application of hot-dip galvanizing with dowel strips <i>Prof. Dr.-Ing. D Ungermann, S Holtkamp; TU Dortmund University – Institute of Steel Construction (Germany)</i></p>
	<p>Galvanized bridges in Japan <i>H Shibayama, Japan Galvanizers Association (Japan)</i></p>
	<p>Hot-rolled sections and hot-dip-galvanizing – a perfect combination for efficiency and sustainability of bridges <i>Dr.-Ing. D Rademacher, ArcelorMittal Europe – Long Products (Luxembourg)</i></p>

	Discussion
2.45	Lunch & Exhibition
Session 3: Innovative Applications of Galvanizing in Steel Construction	
4.15	Fire resistance of galvanized structures <i>Prof. Dr.-Ing. M Mensinger, M.Sc. C Gaigl, Technical University of Munich, Chair of Metal Structures, Munich (Germany)</i>
	Steel Hybrid Onshore Wind Towers Installed with Minimum Effort ('SHOWTIME') <i>Prof C Rebello, Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering, University of Coimbra (Portugal)</i>
	Galvanized steel expansion joints for bridges <i>S Adam, mageba GmbH (Switzerland)</i>
	Discussion
5.30	Coffee Break and Exhibition
Session 4: Design of Bolted Steel Structures with Galvanizing	
6.00	Galvanized Steel Slip Factor Investigation – Part 2 <i>T J Langill, American Galvanizers Association (USA)</i>
	Slip resistant joints using galvanized steel – The EU SIROCO Project <i>Prof. Dr.-Ing. N Stranghöner, University of Duisberg Essen (Germany)</i>
	Examination of influencing factors on the coating quality of hot dip galvanized high strength fasteners for construction purposes <i>Dr.-Ing. H Hoche, M Lander, Prof. Dr.-Ing. M Oechsner, Center for Engineering Materials MPA-IfW, Technische Universität Darmstadt S Six, Dr. S Friedrich, Institut für Korrosionsschutz Dresden GmbH (Germany)</i>

	Slip-resistant connections in hot-dip galvanized steel bridge constructions <i>A Schudlich, Dr.-Ing. M Klein, Prof. Dr.-Ing. M Oechsner; State Materials Testing Institute (MPA) and Chair and Institute for Materials Technology (IfW) Darmstadt, (Germany)</i> <i>Prof. Dr.-Ing. D Ungermann, J Grote; TU Dortmund University – Institute of Steel Construction (Germany)</i>
	Discussion
7.15	Close of Session
Tuesday 19 June	
Session 5: Process Optimisation	
9.00	The myth of steel hydrogenation during pre-treatment for hot dip galvanizing – dogma versus reality <i>V Kuklik, Czech Technical University in Prague (Czech Republic)</i>
	Chemical pre-treatment of steel in the hot dip galvanizing process with focus on flux and drying conditions <i>F Schmelz, RAM Engineering + Anlagenbau GmbH (Germany)</i>
	Controlling LMAC occurrence at drain holes during hot-dip galvanizing <i>Dr H Asada, Kobe University (Japan)</i> Effect of geometric configuration on high-mast illumination pole demands during galvanizing process <i>R Nasouri, A Montoya & A Matamoros, University of Texas at San Antonio; K Nguyen, C Bennett & J Li, University of Kansas; T Kinstler, GalvaScience LLC (USA)</i>
	Discussion
0.30	Coffee Break and Exhibition

Session 6: Bath Alloy Technology	
1.15	Influence of alloying elements on galvanizing abnormalities with a special view on surface defects <i>R Pankert, Boliden (Sweden)</i>
	Bismuth influence in different concentrations in thickness and coating morphology for hot-dip galvanizing process <i>R Cavalcanti de Albuquerque Tozin & I Rezende, Nexa Resources (Brazil)</i>
	Lead-free and bismuth-containing zinc melts and kettles in hot-dip galvanizing <i>Dr. J Triebert & S Six Institut für Korrosionsschutz Dresden GmbH (Germany)</i>
	New zinc-aluminium alloy galvanizing technology <i>Yi Kiyokawa, Komagata Galvanizing Co. LTD (Japan)</i>
	Discussion
2.45	Lunch & Exhibition
4.15	Invitation to 11th Asia Pacific General Galvanizing Conference
Session 7: Insights in Galvanizing for Architecture and Construction	
4.20	Global structural steel projects in developing countries <i>M Lechner, Waagner-Biro AG (Austria)</i>
	Modern application of batch galvanized steel facades in architecture <i>Prof. Dr.-Ing. H Hachul, University of Applied Sciences Dortmund, Department Architecture (Germany)</i>
	A bright future for hot dip galvanized steel in the circular economy <i>B Dursin, Zink Info Benelux (Benelux)</i>

	Discussion
Session 8: Global Galvanizing Awards	
5.30	Announcement of the winners of Global Galvanizing Awards, including presentation of the winning projects by the successful architect or engineer: • Industry Award • Judges' Award
	Close of Session
6.15	Coffee and Exhibition
Wednesday 20 June	
Session 9: Galvanizing Meets Market Demands	
9.00	Utility tunnels in China <i>Prof Z Qifu (China)</i>
	Galvanizing for solar applications <i>J Tundidor, ATEG (Spain)</i>
	Beyond construction – galvanizing in transport and other applications <i>H Glinde, Industrieverband Feuerverzinken (Germany)</i>
	After 50 years of protection for the Sydney Opera House – time to develop a practical model for the durability of concrete structures using galvanized rebar <i>F Papworth, Building & Construction Research & Consultancy & P Golding, Galvanizers Association of Australia (Australia)</i>
	Discussion
1.00	Coffee Break and Exhibition
Session 10: Practical Experience & Market Opportunities with Galvanized Rebar	

1.30	<p>Galvanized reinforcing steel – better perspectives in application in Germany <i>Prof. Dr.-Ing. W Breit & R Adams, Technische Universität Kaiserslautern (Germany)</i></p>
	<p>Corrosion behaviour of galvanized reinforcement in chloride containing mortar and carbonated mortar <i>G Ebell, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (Germany)</i></p>
	Discussion
Session 11: Sustainability and Environment	
2.15	<p>Integration of a kettle cover in the zinc bath enclosure <i>F Nerat, KVK KOERNER Chemieanlagenbau G.m.b.H (Austria)</i></p>
	<p>Reducing emissions and imissions in pre-treatment plants caused by hydrochloric acid <i>J Kader, Stockmeier Chemie GmbH & Co. KG (Germany)</i></p>
	<p>Effective recovery of HCl and metals from pickling solutions by cuttingedge membrane technologies <i>R. Gueccia, S. Randazzo, A. Culcasi, A. Cipollina, G. Micale, Dipartimento dell’Innovazione Industriale e Digitale, Università di Palermo (Italy)</i></p>
3.10	Lunch and Exhibition
Session 12: Corrosion protection performance of zinc and zinc alloy coatings	
4.15	<p>Duplex systems at an oil & gas company – Brazil: Performance assessment <i>R Suplicy de Araujo Goes, ICZ – Instituto de Metais não Ferrosos; M Schultz, Petrobras; R Yuriko Ogura, Armco Staco; P Cesar Maziero Tiano, Marangoni Maretti; C Gnecco, Sherwin-Williams Paint Company; Prof. I Vieira Aoki, Polytechnic School of the University of São Paulo (Brazil)</i></p>

	<p>Durability determination of bridge constructions protected by hot dip galvanized coatings <i>P Lebelt & J Gehrke, Institut für Korrosionsschutz Dresden GmbH (Germany)</i></p>
	<p>Monitoring and mapping of corrosion of zinc coatings in some climatic zones of Italy <i>Prof. R Fratesi, Università Politecnica delle Marche (Italy)</i></p>
	<p>Corrosion investigations on zinc coatings by using gel-type electrolytes <i>M Babutzka, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) (Germany)</i></p>
	<p>Corrosion behaviour of zinc-chromium alloys for batch hot dip galvanizing <i>Prof. R. Feser, University of Applied Sciences, Iserlohn (Germany)</i></p>
	<p>Discussion</p>
	<p>Closing Remarks <i>M Kopf, President, European General Galvanizers Association</i></p>

3.2 熱浸鍍鋅鋼構材處理

熱浸鍍鋅為鋼構材的主要表面處理技術，台電公司在輸配電線路構材、鐵塔及風力發電機塔座基礎皆已採用該防蝕方法，傳統熱浸鍍鋅輸電鐵塔在一般地區皆有良好的耐蝕性，但在重鹽害地區鍍鋅層易與海鹽粒子反應，加速損耗，特別是中火出口沿岸鐵塔腐蝕最嚴重，使用年限縮短至 20 年，因此如何改善防蝕技術，確保工作人員安全及輸電線路可靠性，謀求輸配電線路構材防蝕技術精進，參加 107 年 6 月 18 至 20 日在柏林市伊斯特雷爾酒店(Estrel Hotel)舉辦之「2018 國際熱浸鍍鋅」研討會，該會議專注於鍍鋅在鋼鐵結構中的創新應用及鋅和鋅合金鍍層的防腐性能技術，針對與台電熱浸鍍鋅鋼構材表面處理技術分別引述「熱浸鍍鋅合金元素對鍍鋅表面缺陷異常的影響」說明輸配電線路構材、鐵塔表面缺陷異常的與改善對策及「鋅鉻合金在批量熱浸鍍鋅中的腐蝕行為」改善重鹽害地區鍍鋅層易與海鹽粒子反應的缺陷。

3.3 熱浸鍍鋅合金元素對鍍鋅表面缺陷異常的影響⁽¹⁾

3.3.1 熱浸鍍鋅的新挑戰

- (1) 均勻鍍層：鍍鋅層及表面外觀
- (2) 新的鋼鐵成分：鋁淨鋼及合金鋼(內氧化層、潤濕性影響、偏析、不同的微觀結構)，圖 1 為溫度影響鋼鐵的組織型態。
- (3) 增加鋼鐵產品的應用：焊接鋼樑
- (4) 前處理的試劑：對前處理的要求更高

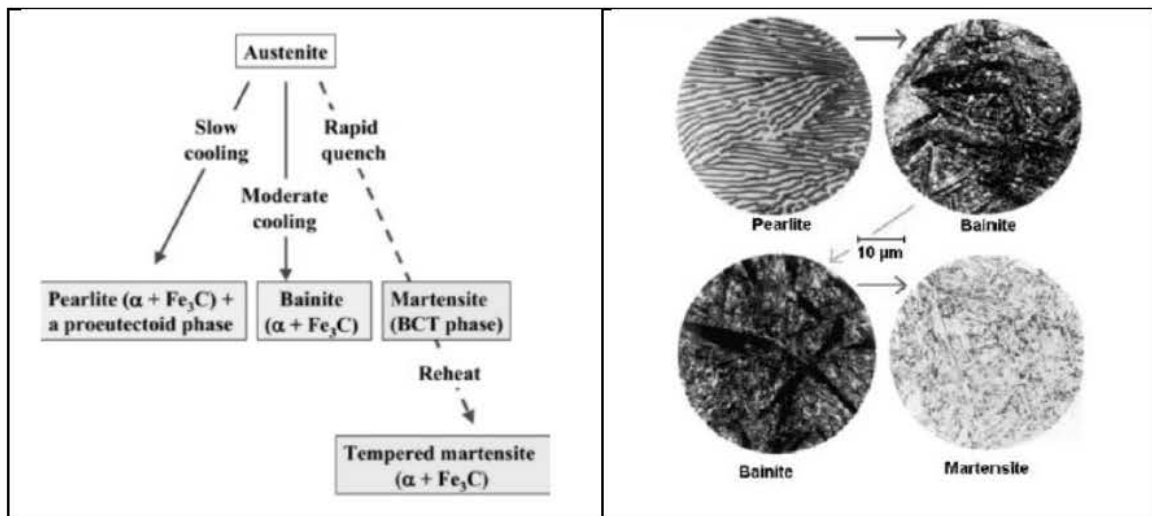


圖 1：溫度影響鋼鐵的組織型態

在熱浸鍍鋅過程中會產生鐵鋅合金反應，合金層會影響鍍層的厚度及液態鋅的物理性質，通常觀察到的表面缺陷如圖 2 所示，大多數影響表面缺陷的四主要因素包括：

- (1) 過量的 Zn-Fe 反應，如圖 3 所示。
- (2) 鋼材表面污染，如圖 4 所示。
- (3) 液態鋅對鋼的潤濕性差
- (4) 成分或溫度變化會影響鐵的析出

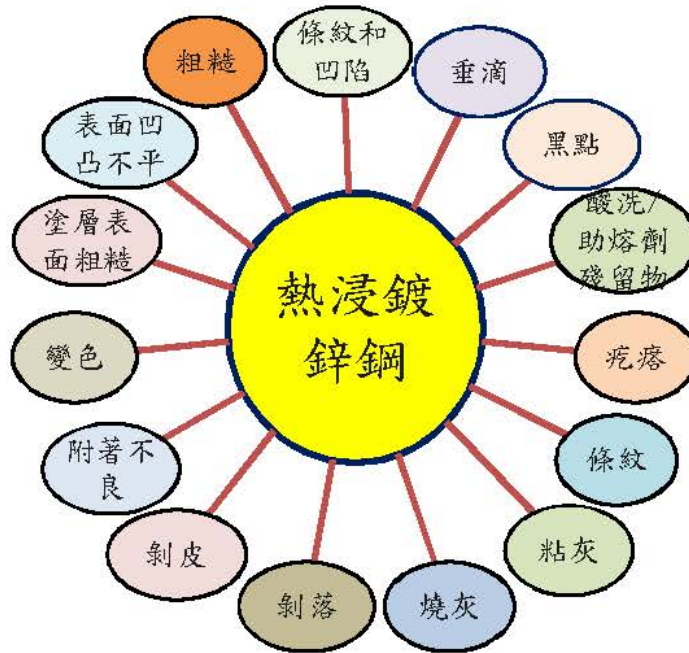


圖 2：熱浸鍍鋅表面缺陷

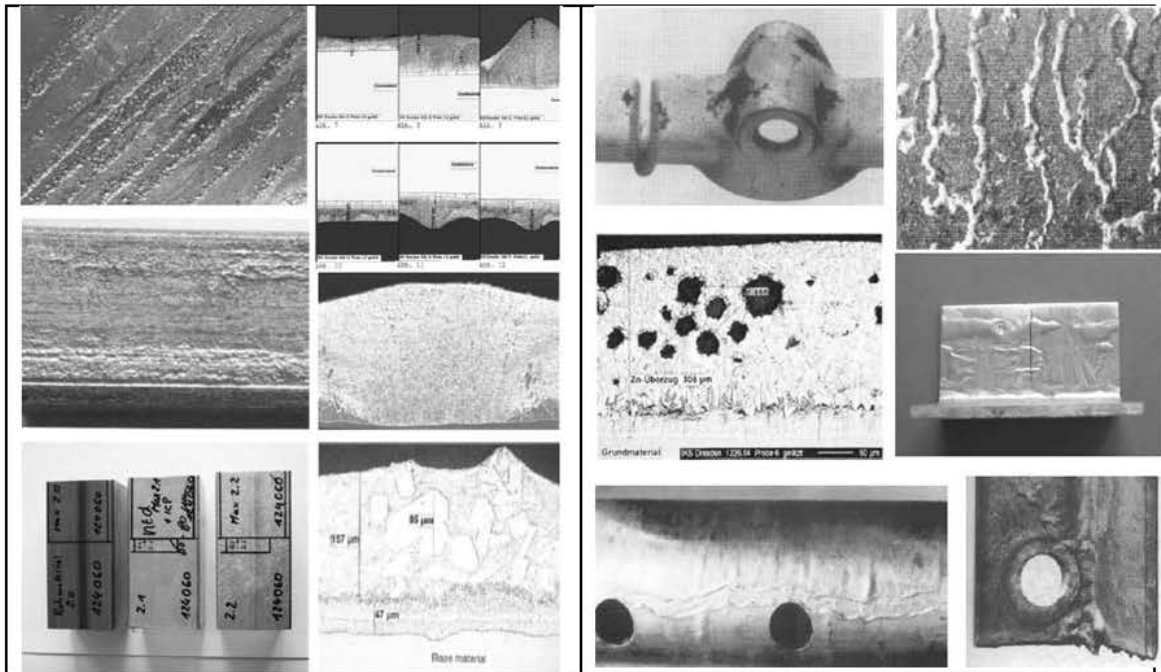


圖 3：Zn-Fe 反應對鍍層表面缺陷的影響

圖 4：鍍層表面缺陷與前處理、表面污染和 Zn 的物理性質有關

3.3.2 Zn-Fe 相關的異常

- (1) 鍍層過厚：過量的 Zn-Fe 反應與鋼組成有關，主要是受 Si 和 P 的成份影響，當 Si 含量在 0.03-0.12% 時鍍層的厚度急劇加厚。Schulz⁽²⁾ 指出在 Si 鋼的塗層成長與氫氣滲出的關連性。
- (2) Zn-Fe 的反應：Horstmann 對 Zn-Fe 反應進行了深入研究⁽³⁾，將鋼浸入液態鋅中，鋼開始溶解，鐵開始組成第一個 ζ 相，後來轉換為緻密的 δ 相，Horstmann 研究了液態鋅中鐵的溶解，並歸因於在不同合金層間存在不同的鐵量，隨著溫度的升高，Fe 的量隨預期的增加而增加，從 Zn-Fe 二元相圖 5 中可知， ζ 相在 480°C 開始去穩定化，轉化為 Fe 損失的增加。第二個重要結果是 ζ 相中 Fe 的含量隨鍍鋅溫度提高而減少，隨著更多的能量可用，促進了更穩定的 δ 相的形成。與鋼 Si 相關的觀察，包括隨著鋼中 Si 含量的增加，溶解 Fe 的量增加，其次，在 480°C 時純 Fe 的溶解開始增加（由於 ζ 的不穩定性）向低溫移動如圖 6 所示。Sebisty⁽⁴⁾ 觀察對於一些 Si 在 0.15 和 0.25% 之間的鋼，如果鍍鋅溫度從 450°C 升至 465°C，塗層厚度會減少，顯微照片顯示在這種情況下再次形成 δ 相是有利的。

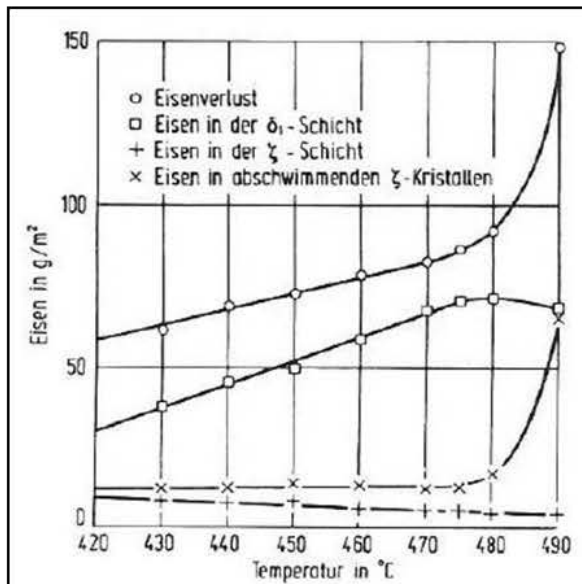


圖 5：金屬間化合物中的鐵分佈

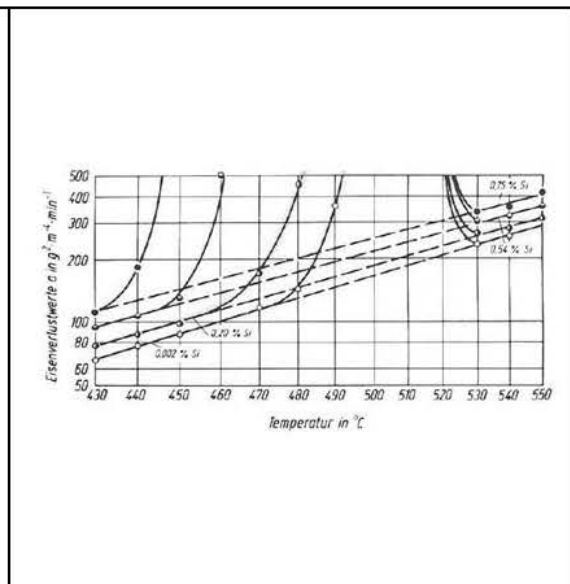


圖 6：Si 對溶解 Fe 的影響

(3) 部份金屬元素會減少Zn-Fe反應時的表面缺陷，如圖7及圖8所示。

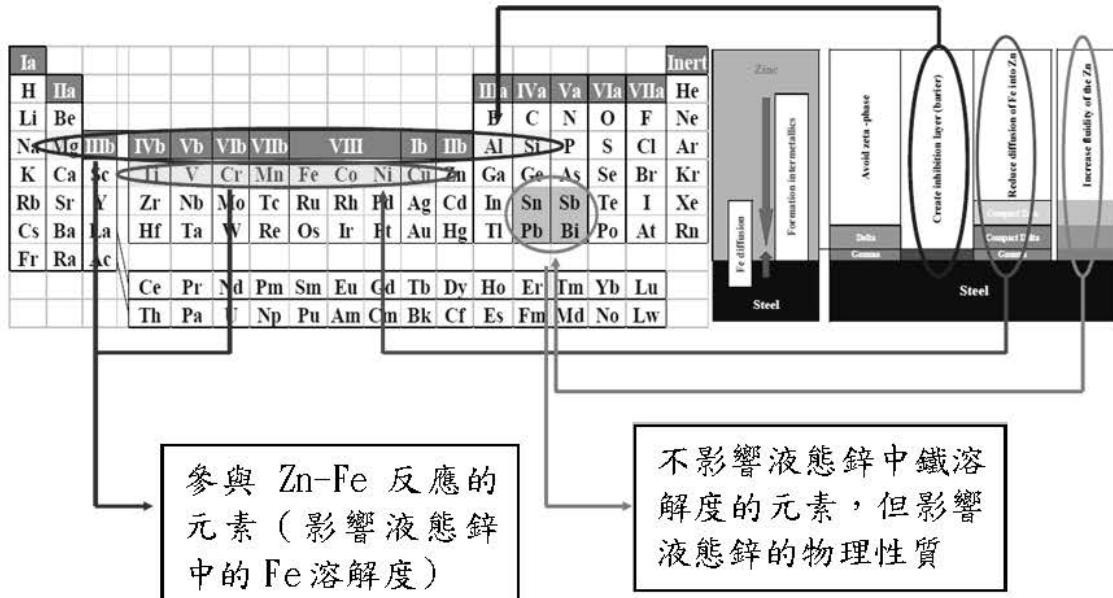


圖7：熱浸鍍鋅鍍浴化學成份和Zn-Fe反應控制塗層厚度和Zn熔體的物理性能

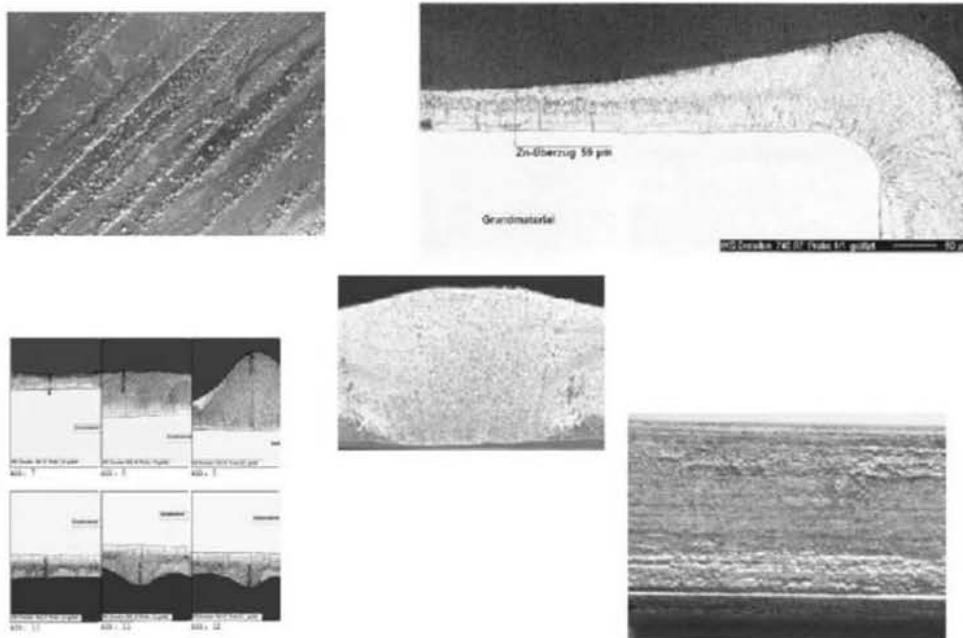


圖8：部份金屬元素會減少Zn-Fe反應時的表面缺陷
 (a) Al：暫時抑製作用
 (b) Ni：增加金屬化合物間的密實，有利於 δ 相生長

(4) 部份金屬元素會減少鋅熔體的物理性質有關的表面缺陷

Pb, Sn, Bi對鋅熔體的物理性質影響包括：

- (a) 粘性：一般來說Pb, Sn和Bi的影響很小，Pb當量粘度 = Pb + 2.5 Sn + 2.5 Bi
- (b) 表面張力：Bi的影響最大，Pb當量表面張力 = Pb + 0.15 Sn + 6 Bi
- (c) 潤濕性：Pb當量潤濕性 = Pb + 3 Sn + 2 Bi，如圖9所示。
- (d) 鍍浴的穩定性和 Fe 沉積：成分變化(如 Al, Ni, ...) 及溫度變化會影響 Fe 的沉積，如圖 10 所示。

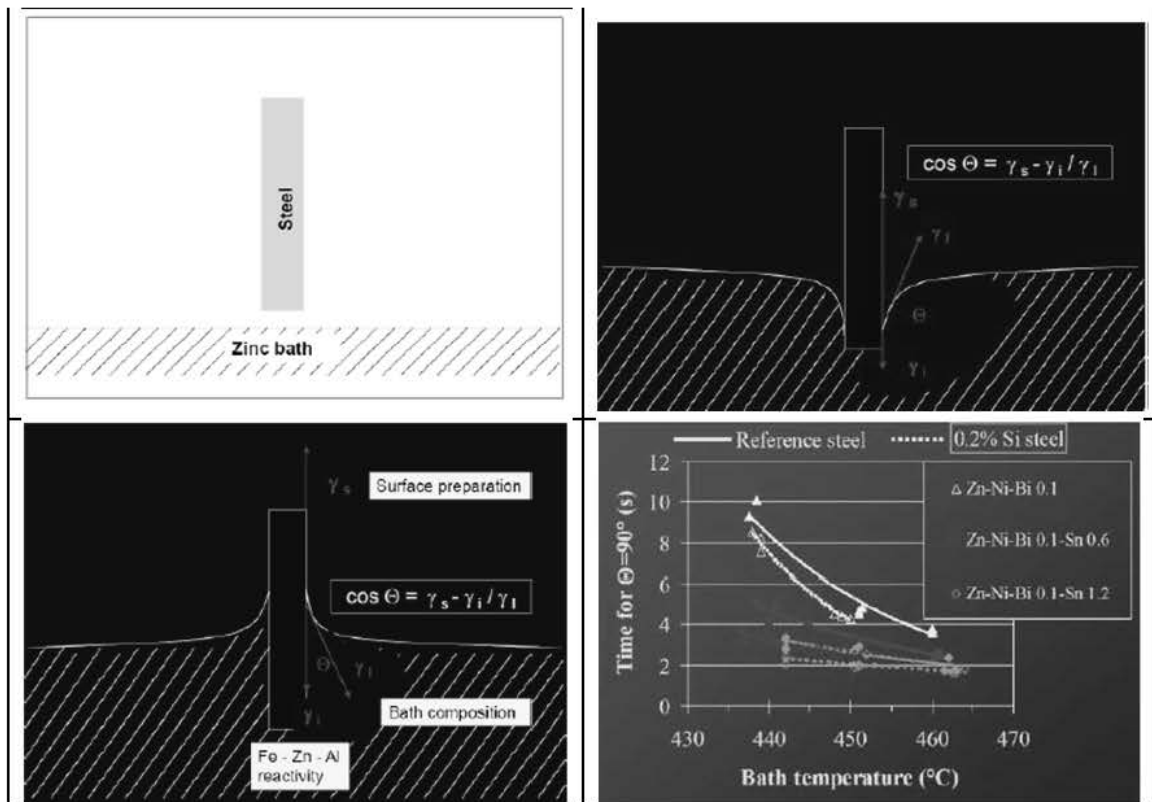


圖9：鋅具潤濕的物理性質

3.3.3 影響表面異常的因素

將Zn-Fe反應、表面污染、Zn的物理性質、Fe沉積等因素結合，說明在製程及金屬元素造成表面缺陷的分析，如減少塗層厚度、塗層均一性、黑點、褪色、燒灰、條紋和凹陷、表面粗糙、表面凹凸不平、垂滴、酸洗/助熔劑殘留物、疙瘩、附著不良、剝離或剝落等，可以得出結論，合金元素可以提供幫助，同時通過良好的前處理來

減少表面缺陷。參與Zn-Fe反應的元素將改善塗層厚度異常和均勻性，並可改善表面光澤亮度。另一方面，如果沒有正確添加，這些元素會產生疙瘩，Pb，Bi和Sn的元素對Zn液體熔體的物理性質有影響，並且可以幫助減少與排水不良有關的所有異常，如圖10所示。

Origin		defects and abnormalities														
Zn-Fe-reaction																
Surface contamination																
Physical properties Zn																
Fe-precipitations																
		Reduced coating thickness	Coating homogeneity	Black spots	Discolorations	Gray aspect	Ridges and furrows	Rough surface	Enhanced dross	Streaks and sags	Tear drops	Pickle and flux residues	Pimples	Bad adherence	Peeling / Flaking	
Process																
Degreasing																
Rinsing																
Pickling																
Rinsing																
Fluxing																
Drying																
Zn-bath																
Al																
Ni																
Pb																
Bi																
Sn																

圖10：前處理和鋅浴組成對鍍鋅異常的影響

3.4 鋅鉻合金在批量熱浸鍍鋅中的腐蝕行為⁽⁵⁾

3.4.1 通過合金添加劑提高鍍鋅表面的耐腐蝕性

表 2：鋼材：S355J2+N, Si 0.18% (Sebisty steel)

合金成份(%)						
C	Si	Mn	P	S	Al	Cr
0.15	0.18	1.39	0.014	0.005	0.043	0.04
Cu	Mo	N	Nb	Ni	Ti	V
0.10	0.01	0.003	0.02	0.07	0.002	0.01

- (1) 樣品幾何形狀：10 cm x 10 cm x 4 mm
- (2) 合金元素：鉻；
- (3) 濃度：為 1.0%和 2.0%，含有 0.5% Pb 及飽和 Fe
- (4) 溫度：430°C-480°C，
- (5) 浸漬時間：3 min-10 min
- (6) 前處理：ZnCl₂/NH₄Cl 鹼性助熔劑

3.4.2 試驗方法

- (1) 恆定氣候試驗
- (2) 大氣腐蝕試驗
- (3) 金相組織結構和鍍層厚度
- (4) 極化曲線測試
- (5) 附著力測試

表 3：鋅合金的組成及合金元素的濃度

合金元素的濃度 (%)			
Cr	Pb	Fe	Zn
1(0.39)	0.5	飽和	餘量
2(0.46)	0.5	飽和	餘量

3.4.3 含 Cr 的鋅合金作為合金元素進行熱浸鍍鋅

- (1) 在 600°C 下手動攪拌 5 天製備鋅-鉻合金
- (2) 與 Cr 合金化後，鋅合金的熔點升高 5-10°C
- (3) 450°C 的鋅液溫度足以形成合金層，不會侵蝕鍍鋅槽

- (4) 含有 ZnCr 合金的熱浸鍍鋅鋼板在熱浸鍍鋅塗層上表現出比傳統合金更光亮的表面
- (5) 使用鉻顆粒（直徑 1-2mm）製備鋅鉻合金比使用漂浮的粉末更有效
- (6) 使用 0,39% 粉末 Cr 加入 1%Cr 製備 ZnCr 熔體可以加入溶液中
- (7) 將顆粒狀 Cr 加於 2%CrZn 合金，可以在鋅液中得到 0,46% Cr
- (8) 用其他元素代替鉛會導得更光滑的表面

3.4.4 測試結果

- (1) 外觀：以 1%及 2%的 Cr 分別進 450°C, 10 分鐘及 470°C, 10 分鐘製程條件可獲得四種試片，由圖 11 塗層表面良好、表面光澤度佳、表面粗糙度少、由於使用粉末，表面含 1%Cr 較粗糙。

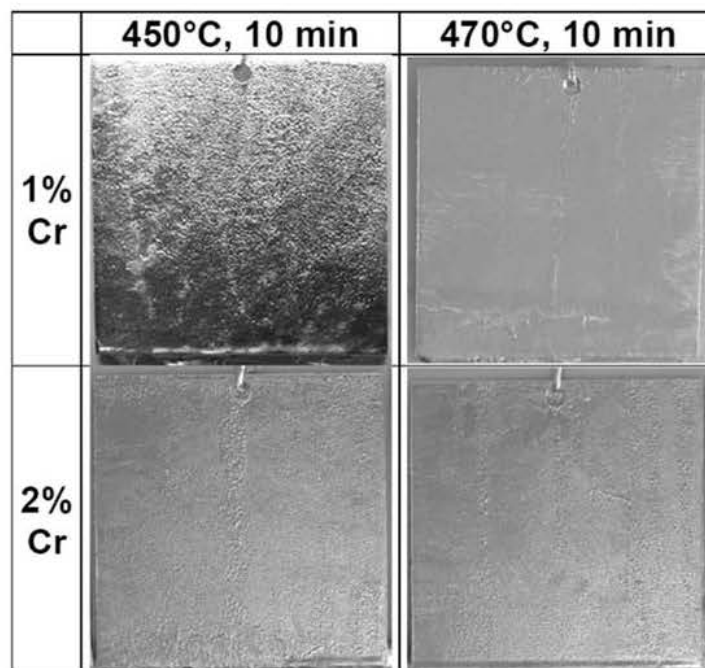


圖 11：試片塗層表面良好、表面光澤度佳、表面粗糙度少、由於使用粉末，表面含 1%Cr 較粗糙。

- (2) 金相組織截面

在鍍鋅層的正常位置中可以找到 Γ 、 δ 、 ζ 和 η 相如圖 12 所示。

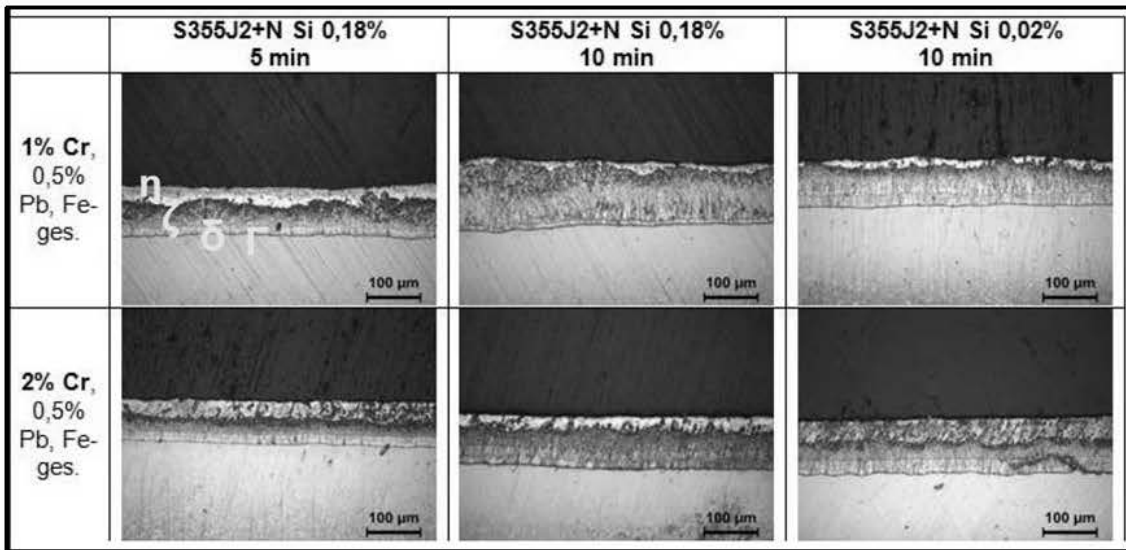


圖 12：鍍鋅層的金相組織截面

(3) 塗層厚度

添加 Cr 來減少鍍層厚度，在 450°C、10min 含 2%Cr 時鍍層厚度降低 34%，在較低的鍍鋅溫度和時間下表面較粗糙，如圖 13 所示。

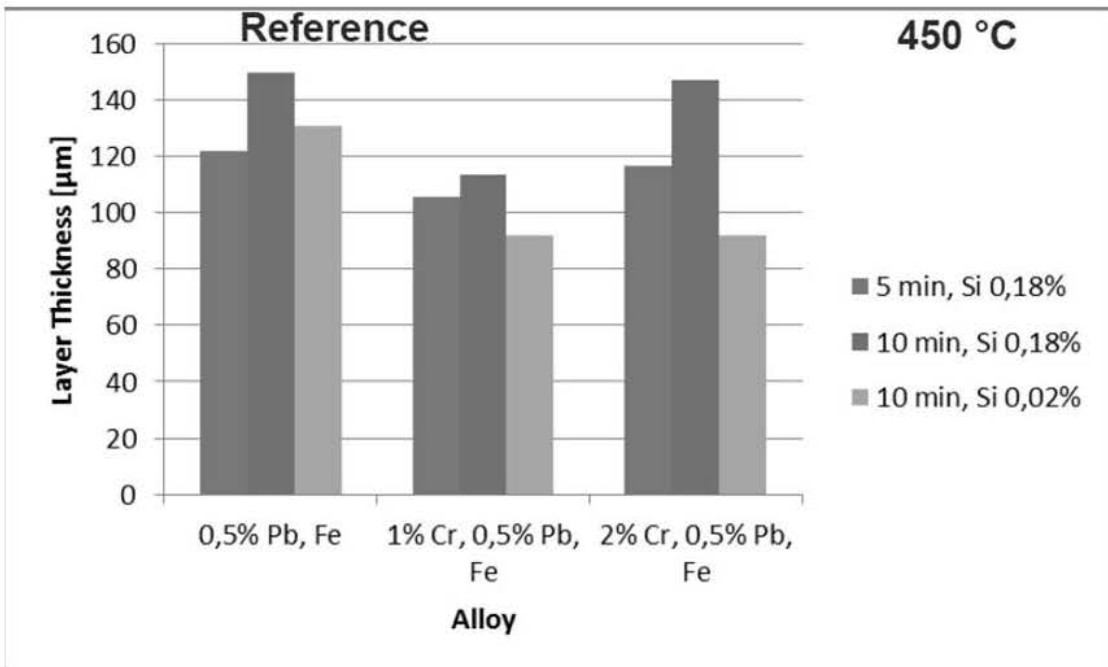


圖 13：塗層在不同製程條件的厚度

(4) 恆定氣候腐蝕試驗

與不含 Cr 的鍍鋅塗層相比，含 1%Cr 的合金在恆定氣候試驗中的白銹形成減少了 17%，2%的 Cr 減少了 28%，如圖 14 所示。

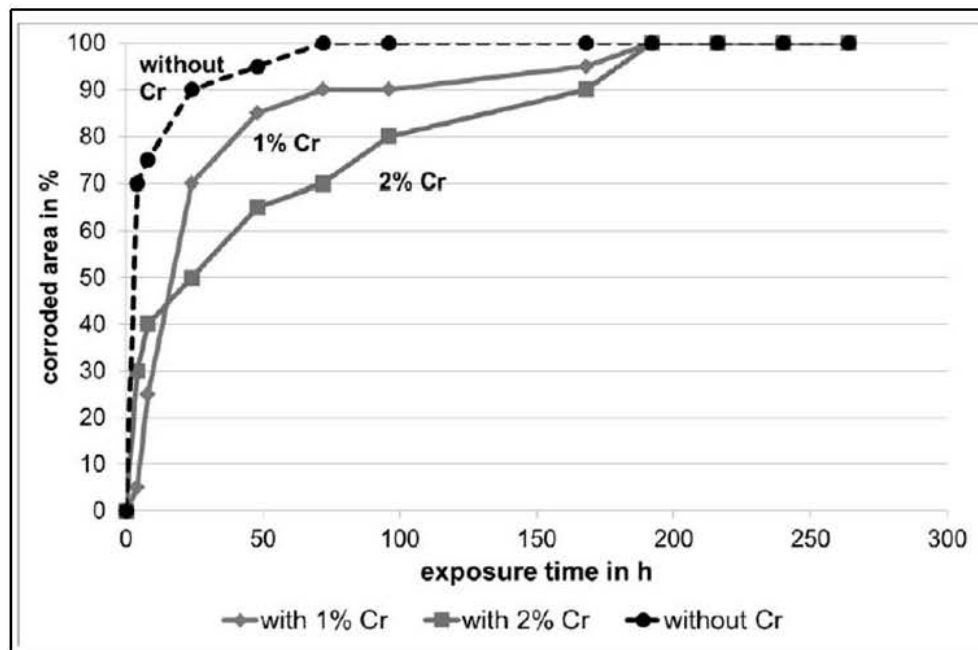


圖 14：恆定氣候試驗的腐蝕行為

(5) 大氣腐蝕試驗

在室外大氣腐蝕試驗暴露 1000 小時後，1%Cr 與傳統的鍍鋅樣品相比，腐蝕率減少了 95%，表面具有良好光澤，沒有 Cr 的鋅塗層的腐蝕率為 $0.3\mu\text{m}/\text{年}$ ，在 18,000 小時後，Zn-Cr 合金的表面幾乎沒有變化，如圖 15 所示。

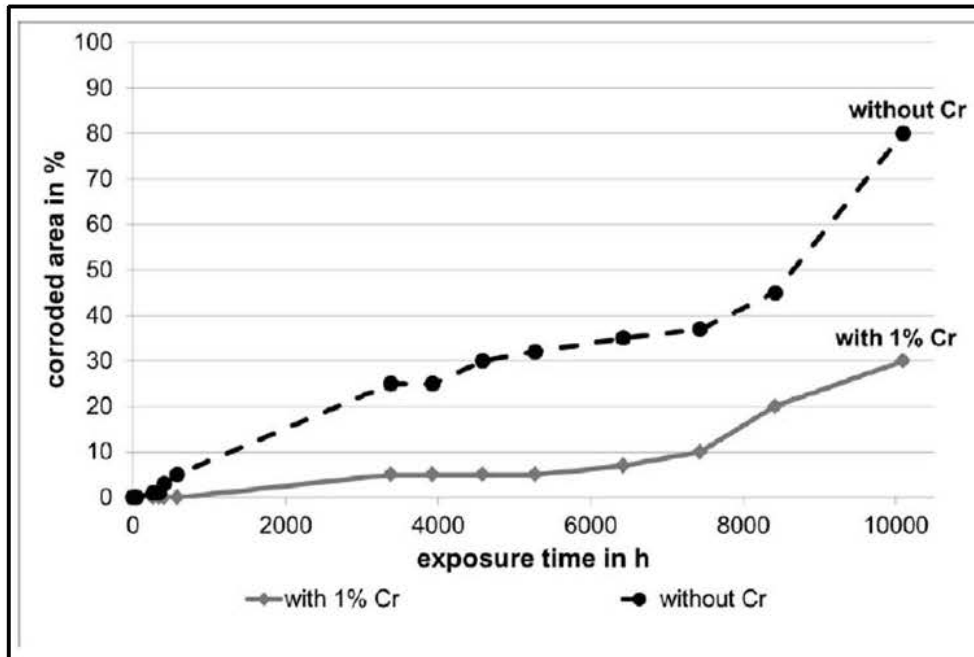


圖 15：大氣腐蝕試驗

(6) 附著力試驗

附著强度高於平均 5MPa 的常規鍍鋅層，含鉻塗層可達 15MPa，部分甚至大於 20MPa，1%和 2%Cr 的結果比較如圖 16，附著力隨著鍍鋅時間的增加而減少。

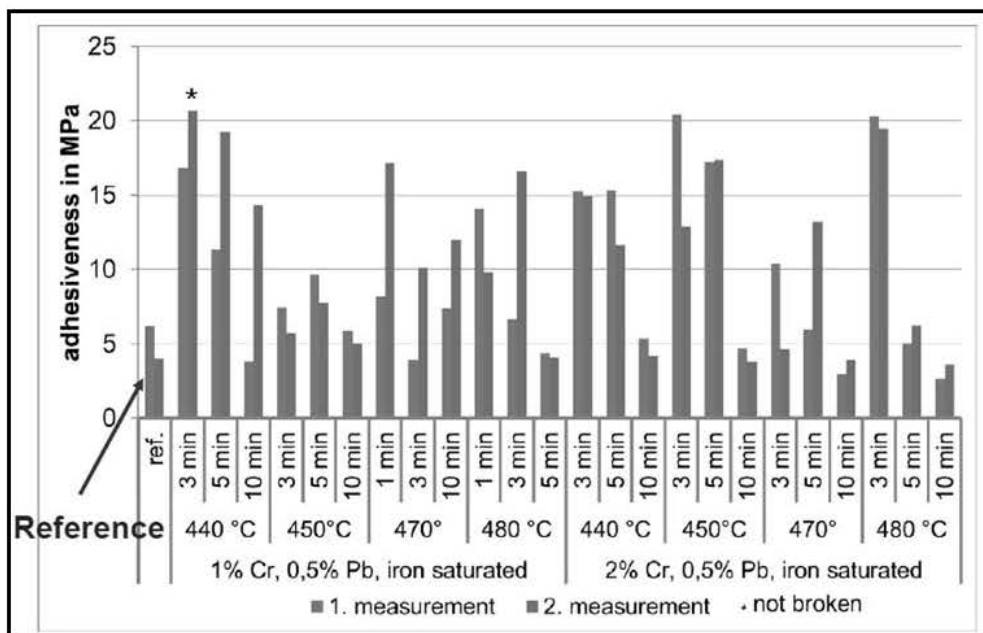


圖 16：含鉻熱浸鍍鋅塗層的附著力強度

(7) 極化曲線測試

合金化 2%Cr，與純鋅相比，腐蝕電流密度可以降低至 55%，與傳統的熱浸鍍鋅層相比降低至 25%，Zn-Cr 表面的陰極氧還原和金屬溶解減少如圖 17 所示，經大氣腐蝕 6 週後 ZnCr 合金的極化曲線與鋅層相比，形成高達~90%的鍍層可以進一步降低腐蝕電流密度如圖 18 所示。

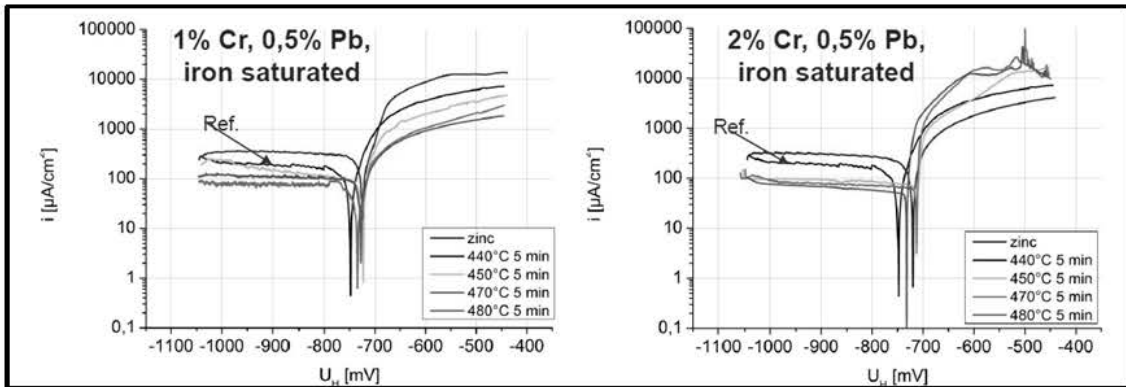


圖 17：電流密度-電位極化曲線

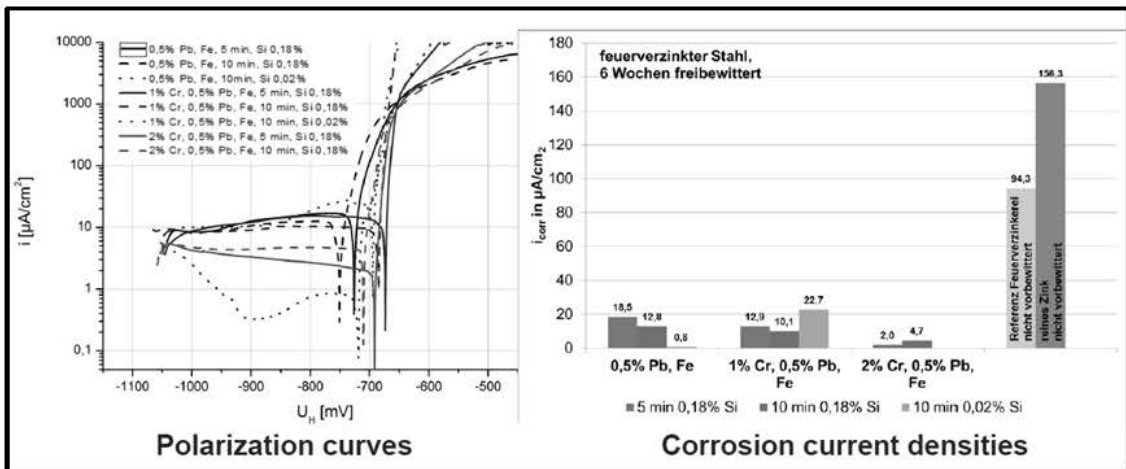


圖 18：經大氣腐蝕 6 週後 ZnCr 合金的極化曲線

(8) 鍍層的縱深分佈

Cr 最大值為表面層下 1/3 處，含 1%Cr 的 Cr 合金的最大值為 0.64%，含 2%Cr 的合金的最大值為 0.7%如圖 19 所示，在大氣腐蝕試驗期間隨著層的移除，腐蝕保護將增加，在第一次測量證實了這一假設。

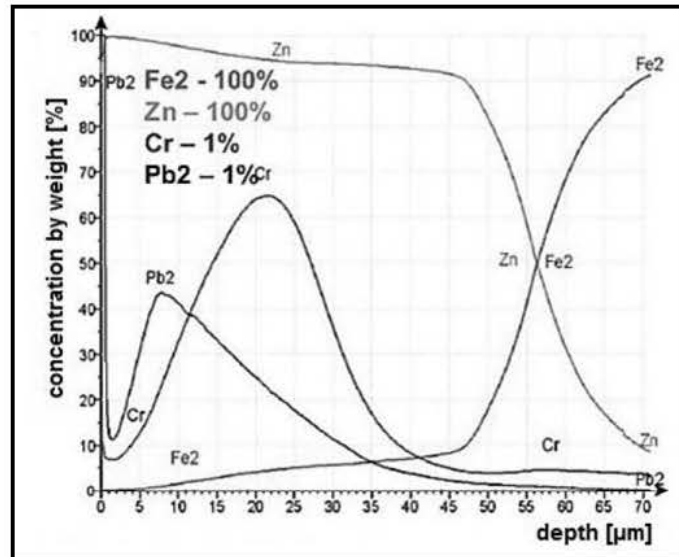
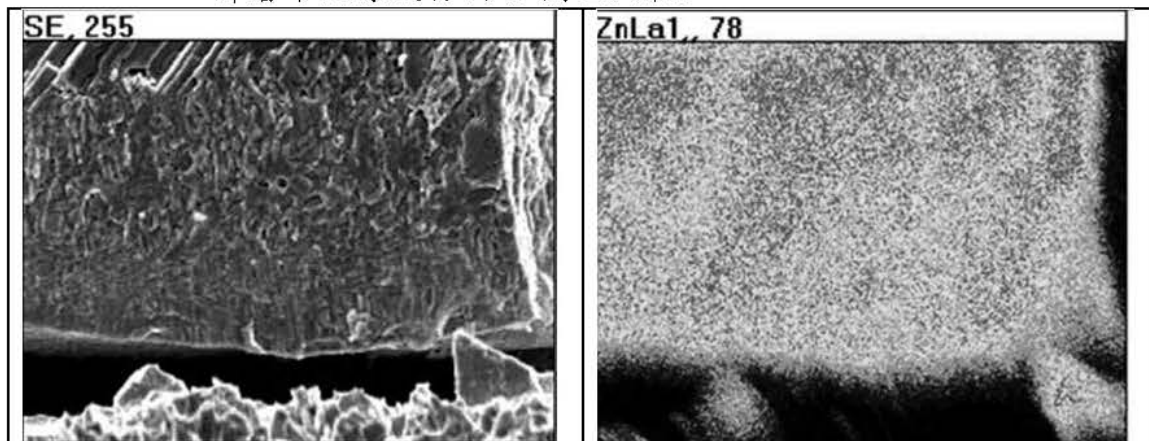


圖 19：GDOES 分析 1%Cr，0.5%Pb，飽和 Fe；450°C，10 分鐘

(9) 元素分佈-EDS

鋅層中元素的分佈如圖 20 所示。



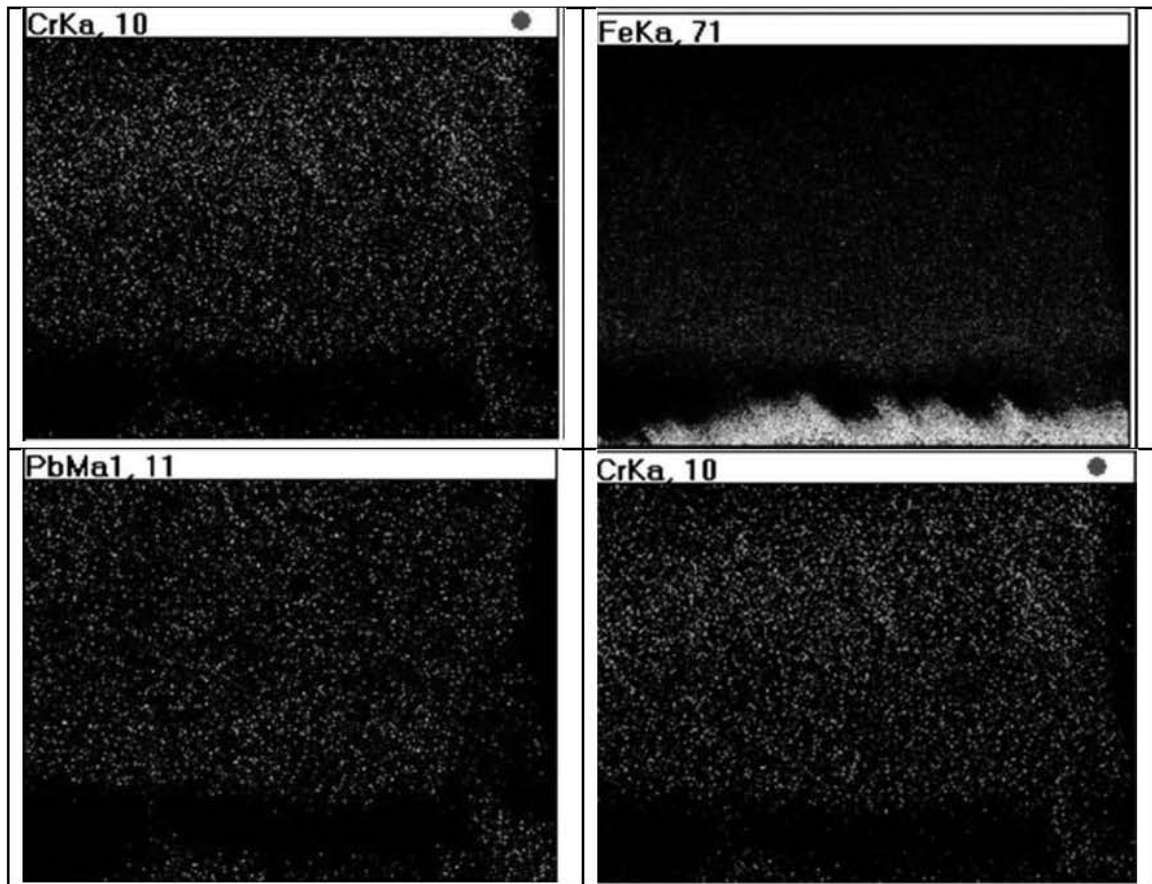


圖 20：鍍鋅層中元素的分佈

3.4.5 結論

- (1) 添加 Cr 可顯著提高恆定氣候試驗和大氣腐蝕的耐腐蝕性。
- (2) 24 小時後，2% 含 Cr 合金的白銹形成減少達 28%。
- (3) 在大氣腐蝕時仍然保持強光澤。
- (4) 不需要額外的鈍化。
- (5) 層厚度減少高達 34%。
- (6) 表面下約 1/3 層厚度的 Cr 富集區，腐蝕保護隨著壽命而增加。
- (7) 沒有發生液態金屬輔助裂紋(LMAC)。

3.5 離岸風電塔座防蝕系統量化評估

歐洲 Hempel 德國研究中心參訪離岸風力先進防蝕技術及風機塔座腐蝕防治技術，因應公司離岸風力防蝕規範的研訂，台電公司彰濱離岸風場測風塔已納入建構中，由於離岸風機長期處於海洋環境中，容易受到各類腐蝕等不良因素影響。就像全球首個大型海上風電場 Horns Rev 在投入運轉後不久，風機機組的海中結構及塔座開始出現腐蝕劣化，除了製造問題，離岸的氣候條件、海上結構物的腐蝕防治設計、空氣中鹽份防蝕等，皆是機組日後運轉維護的重要因素，協助離岸風力海上結構物腐蝕防治設計，減少主要部件的更換或維修經費。Hempel 德國研究中心提供離岸風電塔座防蝕系統量化評估資料供參考。

3.5.1 離岸風電輸送平台構件腐蝕-塗層失效類型分析

海洋工程結構鋼材腐蝕環境控制可分為大氣帶(Atmospheric Zone)、飛沫帶(Splash Zone)、潮汐帶(Tidal Zone)、水中帶(Full Immersion Zone)、海泥帶(Mud Zone) 詳如圖 21 海洋工程結構鋼材腐蝕環境，表 4 為低碳鋼在離岸環境不同區域的腐蝕速率，圖 22 至 25 為離岸風電輸送平台構件腐蝕。

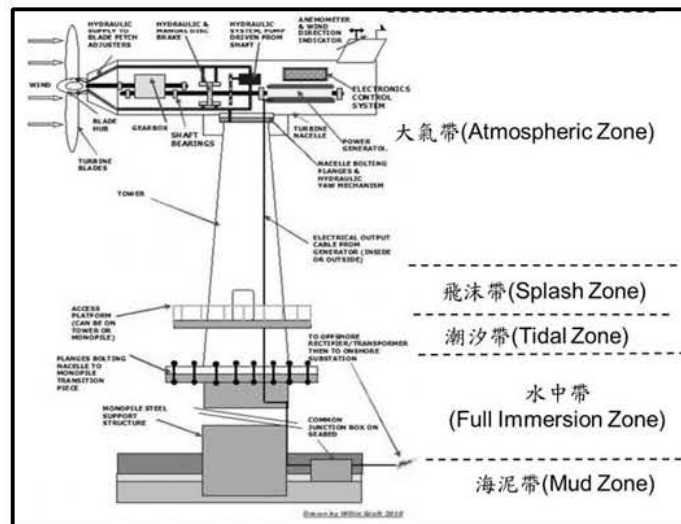


圖 21：海洋工程結構鋼材腐蝕環境控制

表 4：低碳鋼在離岸環境不同區域的腐蝕速率

不同離岸環境區域	未受保護鋼材的腐蝕速率(mm/yr)
大氣帶	50 to 75
飛沫帶	230 to 400
潮汐帶	50 to 230
水中帶	130 to 200
海泥帶	60 to 130

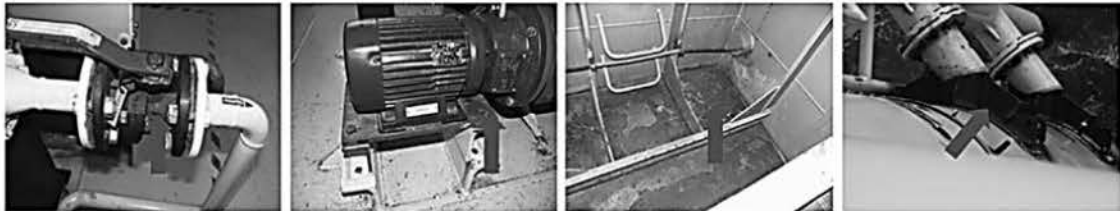


圖 23：未塗漆的部分，導致鋼構表面腐蝕(箭頭標示)

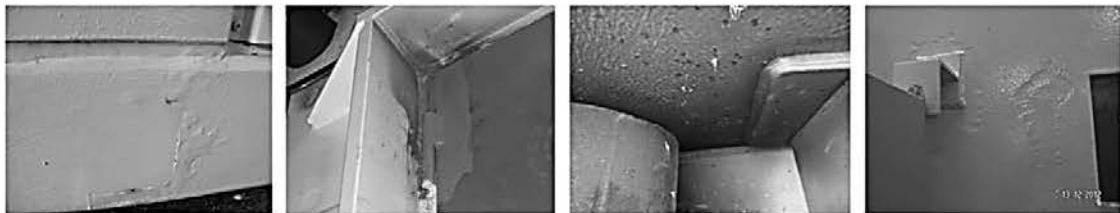


圖 24：塗層施工不當，導致針孔、覆蓋不足、橘皮、薄膜厚度太薄(從左起)



圖 25：熱浸鍍鋅處不當，導致部分白銹或紅銹點

3.5.2 防蝕系統風險評估與管理

現代維護策略是基於風險的檢查和維護，方法特別涉及海上風力建物鋼結構的穩定性和功能，整體考慮將保護塗層及鋼材裕度作為鋼結構的一部分，並將保護塗層系統的性能納入風險評估中。已經有許多方法來評估海上石油和石油的保護塗層系統。並以圖 26 進行風險分析和評估程序。

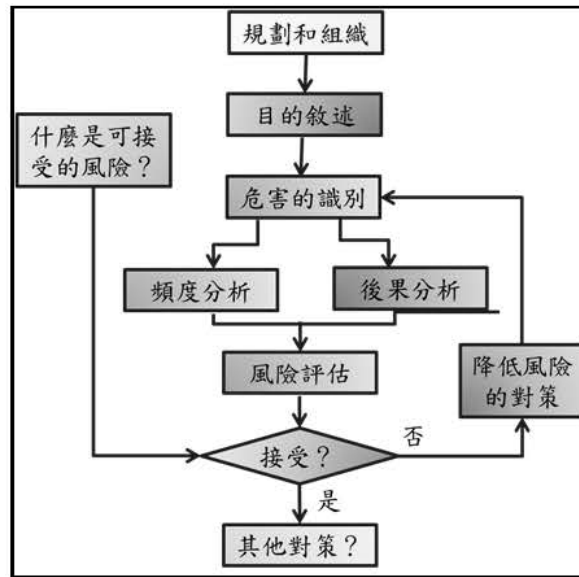


圖 26：風險分析和評估程序

$$R_S = P_F \cdot C_F \quad (1)$$

R ：結構件失效的風險

P_F ：失效的機率，包括塗層失效（塗層劣化）和腐蝕（金屬損耗）

C_F ：OWEA 失效的後果與當地狀況，構件的功能；對應的機械和腐蝕負荷有關）

防蝕系統風險評估的發展，主要問題是塗層狀況或塗層損壞，以 % 量化。然而這些方法基本上缺乏客觀估計塗層損壞和更詳細的說明塗層損壞與參考區域的大小有關。對離岸風電塔座防蝕系統風險評估以 (1)ISO 12944-7；(2)ISO 4628-2~5；(3)影像辨識系統，評估離岸風電塔座防蝕系塗層劣化的風險評估基準及量化追蹤。

3.5.3 防蝕系統量化防蝕評估方法

$$H_S = C_1 \cdot T_E^{C_2} \quad (2)$$

H_S ：金屬損耗， T_E ：塗層破壞後的暴露時間，

C_1 、 C_2 ：經驗參數，與特定的腐蝕條件相關（濕潤時間，相對濕度，溫度，環境中的氯化物濃度等）。

$$T_E = T - T_C - T_T \quad (3)$$

T_E ：是塗層破壞後的暴露時間， T_C ：是塗層壽命， T_T ：是過渡期， T 是總暴露時間。

$$CA = V_{\text{Corr}} (T_D - T_C) \quad (4)$$

CA：腐蝕裕度， V_{Corr} ：腐蝕速率， T_D ：結構的設計壽命

$$T_A = CA / V_{\text{Corr}} \quad (5)$$

$$N_P = N_C + N_S = R_i / 100 + H_s / CA \quad (6)$$

N_P ：防護性能 = 塗層條件 (N_C) + 金屬損耗條件 (N_S)， R_i 是塗層劣化程度百分比

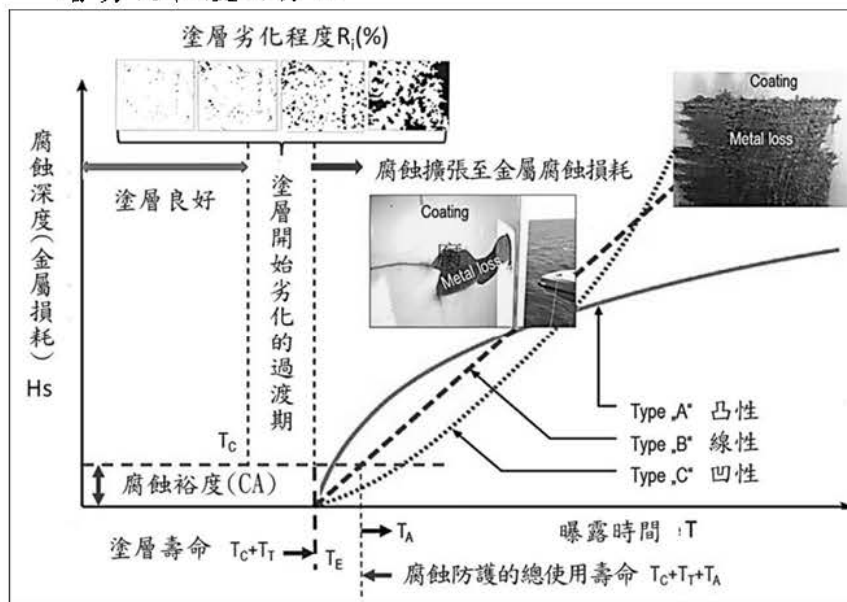


圖 27：海洋環境中鋼材的腐蝕防護和腐蝕進展的示意圖與暴露時間的關係

3.5.4 塗層劣化程度的量化評估

分別以影像辨識判斷塔座腐蝕防治，如圖 28 所示，實驗方法流程：Step1：框出生鏽的 5 個地方做為我們訓練的樣本，Step2：比較此五個地方的 Hue 值，找出生鏽處較適當的 Hue 值，如圖 29 塗層劣化程度的量化評估，Step3：接著掃描整張影像，算出每個像素的 Hue_Angle，將此值帶入訓練樣本矩陣，設一相似門檻值(ThresholdOf-Similarity)，如果所得到的值小於門檻值，則此像素的 Hue 值蠻接近之前訓練出來的樣本，因此將其視為生鏽的地方，如圖 30 塗層劣化程度的量化評估。可獲得如表 5 海上鋼結構的塗層狀況判斷及圖 31 塗層防蝕性能的風險和外觀判斷基準。

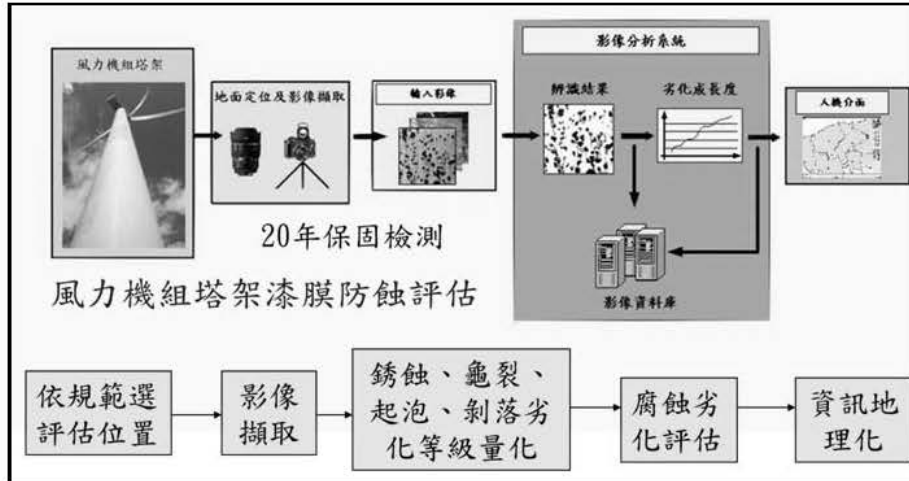


圖 28：塔座腐蝕防治

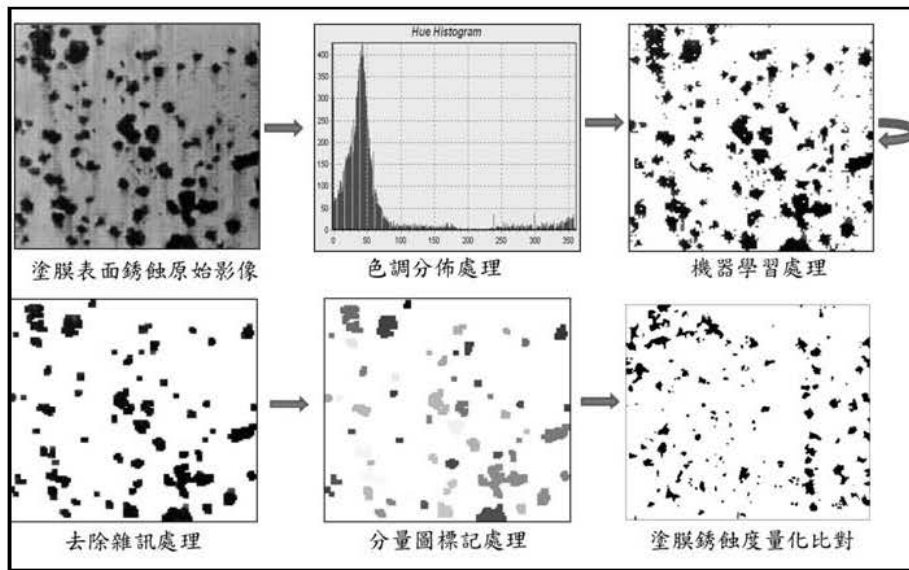


圖 29：塗層劣化程度的量化評估

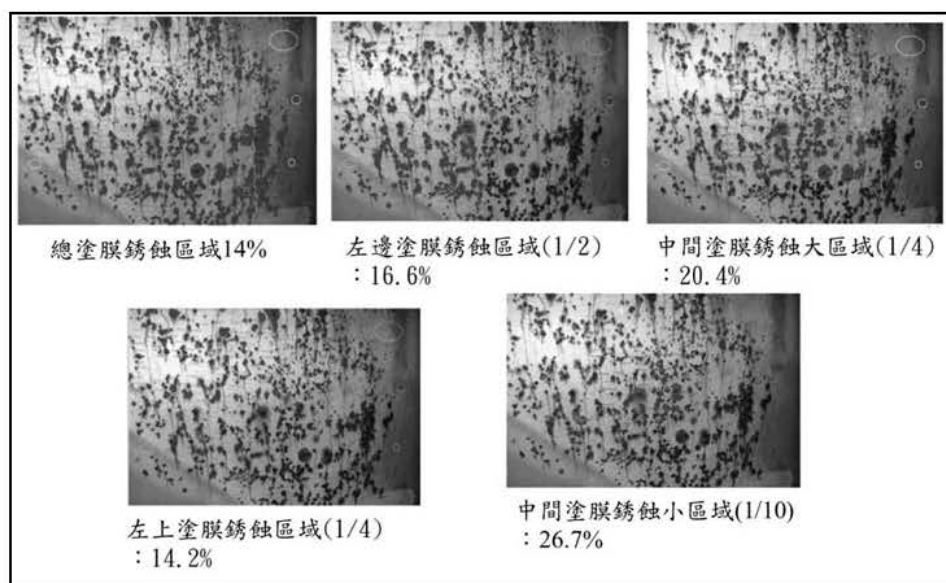


圖 30：塗層劣化程度的量化評估

表 5：海上鋼結構的塗層狀況判斷

塗層狀況	Ref: S.B. Axelsen, Corrosion 66 (2010), 015003/1-9	Ref: P.E. Versowsk, NBS. 2004 pp. 170.	E. Landet, NACE 2006	
	需要表面處理的總面積百分比	佔總面積的百分比	塗層失效的百分比	塗層破壞面積的百分比
		1. 面漆有缺陷		
		2. 塗層有缺陷		
		3. 乾膜厚少於60%規劃值		
1	≤3	≤5	≤5	≤1
2	>3 - 8	>5 - 20	>5 - 10	>1 - 3
3	>8 - 20	>20 - 40	>10 - 25	>3 - 10
4	>20 - 40	>40	>25 - 50	>10 - 20
5	>40		>50	-

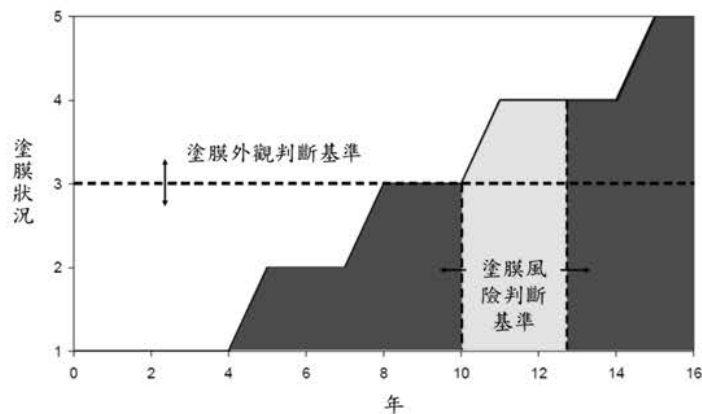


圖 31：塗層防蝕性能的風險和外觀判斷基準

四、心得與感想

- (1) 參加歐洲熱浸鍍鋅協會舉辦之 2018 國際鍍鋅年會，研討輸配電及風電的鋼鐵構件防蝕方法，鍍鋅在鋼鐵結構中的創新應用及鋅和鋅合金鍍層的防腐性能技術，後續精進建立輸電線路材料破損分析及維修評估方法與鐵塔結構的安全監測，提高輸電鐵塔設備運轉的可靠度與後續追蹤評估作業等工作技術。
- (2) 歐洲 Hempel 德國研究中心研討離岸風電塗層使用壽命評估方法。協助海上結構物的腐蝕防治設計，機組日後運轉維護，減少主要部件的更換或維修經費。
- (3) 海洋環境給風力發電帶來的防腐問題目前看來都有解決方案，但是有些解決方案付出的代價是巨大的，成本居高不下，有些解決技術還不太成熟，工藝繁雜，解決問題有點牽強。離岸風場建設將規劃進行，如果防腐蝕問題處理不好，小則使個別風電機組故障頻頻，影響機組運轉效率，大則使機組大面積故障，被迫拆除。

五、參考文獻

1. R Pankert, Boliden (Sweden), Influence of alloying elements on galvanizing abnormalities with a special view on surface defects. 25th International Galvanizing Conference, Berlin, 2018.
2. Schulz W-D, Schubert P and Thiele M: Proceedings Intergalva 2003

3. Horstmann D: Zum Ablauf der Eisen-Zink-Reaktion, GAV-Schrift 1991 pp 11-30
4. Sebisty JJ: 11 International Zinc Conference, Stresa 1973
5. Prof. R. Feser, University of Applied Sciences, Iserlohn (Germany) Corrosion behaviour of zinc-chromium alloys for batch hot dip galvanizing. . 25th International Galvanizing Conference, Berlin, 2018.