

行政院原子能委員會放射性物料管理局

不銹鋼材料應力腐蝕劣化機制
研析與對策研究
期末報告

計畫編號：102FCMA003

計畫主持人：張惠雲

共同主持人：邱建國

受委託機關(構)：國立高雄大學

報告日期：中華民國 102 年 12 月

中文摘要

台電公司目前規劃於核電廠內興建用過核燃料乾式貯存設施。乾貯設施主要的組件包括不銹鋼材料製造的密封鋼筒及外部混凝土護箱。不銹鋼材料具有極佳的耐熱性、耐久性及抗腐蝕性，使用在核能組件上非常普遍，也被多數國家選作密封鋼筒的主要材料。在工業應用上，曾發現在特定的材料條件（材料選擇、應力狀態等）及環境條件（溫度、相對溼度等）下，且經過非常長時間的鹽分沉積後，不銹鋼材料表面可能產生應力腐蝕劣化（stress corrosion cracking, SCC）之現象。

本研究計畫首先蒐集與整理包括美國及日本等國外研究資料，並研析國外不銹鋼材料應力腐蝕劣化的研究發展與可能對策。之後，分析國內可能發生應力腐蝕劣化的本土環境條件及材料特性，並將上述成果反映於後續進行之腐蝕監測試驗。綜合以上，本計畫研究最後提出國內不銹鋼材料「監測與維護計畫(草案)」，與進行「本土化的應力腐蝕劣化長程研究規劃(建議)」。

Abstract

Taiwan Power Company plans to build dry storage systems for spent nuclear fuel on the plant sites. The essential components of dry storage systems include stainless steel canisters and concrete casks outside the canisters. Stainless steel is superior in heat-resistance, durability, and anti-corrosion, and therefore has been commonly used in nuclear facilities, for example the material of dry casks in many countries. Past industry experience shows that stainless steel is likely to undergo stress corrosion cracking (SCC) when specific material and environmental conditions are met, including types of stainless steel, residual stress, temperature, and relative humidity.

This study first collected and summarized the research materials including U.S. EPRI and Japan CRIEPI reports, giving an overview of the recent research and development on SCC monitoring. Then, the material and environmental conditions for SCC in Taiwan were analyzed, and the results were reflected in the simulated corrosion tests. Based on the above work, conclusion and suggestion were made on the research roadmap development on SCC monitoring for spent fuel dry storage systems in Taiwan.

目錄

一、前言	1
1.1 研究背景與目的	1
1.2 工作項目與進度	2
1.3 研究報告架構	2
二、國外 SCC 研究整理	3
2.1 序論	3
2.2 不銹鋼材料 SCC 研究發展	3
2.3 不銹鋼材料 SCC 可能對策	11
三、國內 SCC 條件研究	20
3.1 序論	20
3.2 環境條件分析	20
3.3 材料特性分析	24
3.4 腐蝕監測試驗	27
四、SCC 監測與研究建議	34
4.1 序論	34
4.2 日本管線 SCC 監測與維護計畫	34
4.3 日本乾貯設施 SCC 監測與維護評估流程(修正草案)	38
4.4 國內乾貯設施 SCC 監測與維護計畫(草案)	40
4.5 本土化 SCC 長程研究規劃 (建議)	48
五、結論	50
5.1 成果摘要	50
5.2 研究展望	51
參考文獻	53
附件-不銹鋼材料檢驗報告與出廠證明	

表目錄

表 3.1 國內過去研究 314L 不銹鋼材料銲接與加工前後 硬度	25
表 4-1 日本不銹鋼材料分析與機械性質試驗之項目內 容與目的	36

圖目錄

圖 2-1	日本 CRIEPI 四點彎曲加速腐蝕試驗	4
圖 2-2	日本 CRIEPI 乾貯設施不銹鋼密封筒縮尺模擬實體試驗結果	5
圖 2-3	鹽分潮解溫度與相對濕度	6
圖 2-4	日本 CRIEPI 乾式貯存設施不銹鋼筒 SCC 臨界鹽分試驗結果	7
圖 2-5	美國乾貯設施不銹鋼封鋼筒調查例	9
圖 2-6	日本 CRIEPI 不銹鋼桶 SCC 兩階段監測與維護評估流程	10
圖 2-7	硬度對 SCC 影響	13
圖 2-8	滾軋與敏化等表面處理對不銹鋼材料硬度之影響	14
圖 2-9	雷射銲接示意圖	16
圖 2-10	日本核電廠屋內與屋外空氣中氯鹽含量觀測結之比較	19
圖 2-11	風洞(室內)試驗與(現地)暴曬試驗所獲氯鹽沉積量	19
圖 3-1	臺灣基隆近年溫度與相對濕度每小時觀測值分佈	21
圖 3-2	臺灣基隆近年絕對濕度每小時分析結果歷時分佈	21
圖 3-3	臺灣基隆與日本硫球 RH= 40%-60%之時間比	22
圖 3-4	臺灣氯鹽沉積速率圖	23
圖 3-5	圓棒試驗示意圖	27
圖 3-6	不銹鋼圓棒試片浸漬試驗	28
圖 3-7	不銹鋼圓棒試片濕潤試驗	29
圖 3-8	經顯微鏡低倍率放大後的銹蝕箇處	29
圖 3-9	不銹鋼圓棒試片浸漬試驗	30

圖 3-10	不銹鋼圓棒試片濕潤試驗	30
圖 3-11	不銹鋼圓棒試的紅外線熱攝儀影像與對照的實驗照片	31
圖 3-12	試片規格與成品，拉升試驗機與鹽霧試驗機	33
圖 3-13	U 形試片大氣曝露試驗	33
圖 4-1	日本不銹鋼材料 SCC 評估流程，評估項目與研究課題之對應關係	35
圖 4-2	日本提議乾貯設施不銹鋼筒 SCC 兩階段監測與維護評估流程(修正草案)	39
圖 4-3	不銹鋼材料 SCC 初使發生時間影響因子之交互關係圖	40

一、前言

1.1 研究背景與目的

台電公司核能電廠商業運轉至今已逾 30 年，更換下來之用過核子燃料均暫存於用過燃料池，由於用過燃料池貯存容量設計不足存放 40 年運轉之用過核子燃料，因此台電公司規劃於核電廠內興建乾式貯存設施。乾式貯存設施主要的組件包括不銹鋼材料製造的密封鋼筒及外部混凝土護箱組成。不銹鋼材料具有極佳的耐熱性、耐久性及抗腐蝕性，使用在核能組件非常普遍，也被多數國家選作密封鋼筒的主要材料。密封鋼筒內部填充惰性氣體，可適當保護貯存之用過核子燃料。

依據台電公司核一廠用過核子燃料乾式貯存設施安全分析報告第六章第五節「密封評估」(三) 密封監測：密封邊界是藉由雙層封銲所構成，其在正常貯存的情況下不會有任何密封邊界的損壞；而銲接的作業方式亦經過美國核能管制委員會(Nuclear Regulatory Commission, 簡稱美國核管會 (USNRC) 審查通過的標準作業方法，且依美國核管會 ISG-5 之要求，銲接的密封邊界無放射性物質外釋之虞，因此不需密封監測 [1-1]。

美國核管會於 2012 年 11 月公布的資訊通告(Information Notice)，內容重點是針對不銹鋼材料可能的應力腐蝕劣化及乾式貯存容器的維護[1-2]。美國核管會明白表示，該資訊通告不是法規要求，故業者不需進行特定行動或提出書面回應[1-3]。但原能會重視該資訊通告的建議，已於 2012 年 12 月要求台電公司，應參照該資訊通告撰提核一乾貯設施維護與監測計畫(maintenance and surveillance program)，併同運轉執照申請文件送審，以強化貯存安全。

不銹鋼材料的工業使用時，曾發現在特定材料條件(材料選擇、應力狀態等)及環境條件(溫度、相對溼度等)，且經過非常長時間的鹽分沉積時可能在表面產生應力腐蝕劣化(stress corrosion cracking, SCC)之現象。本研究計畫之目的，除蒐集並

整理國外對於應力腐蝕劣化的研究現況，掌握不銹鋼材料應力腐蝕劣化的機制，也藉由試驗或模擬研究本土化環境條件及材料特性下的應力腐蝕劣化行為。綜合上述研究，提出不銹鋼材料初步應力腐蝕劣化的可能對策，藉以提昇相關管制作業的安全。

1.2 工作項目與進度

依據研究計畫書[1-4]之規劃，本年度主要研究工作項目包括：(1)蒐集整理與研析包括美國及日本等國外對於不銹鋼材料應力腐蝕劣化的研究發展；(2)蒐集整理與研析國外對於應力腐蝕劣化研究可能的對策；(3)蒐集國內可能發生應力腐蝕劣化的本土環境條件及材料特性；(4)國內應力腐蝕劣化環境分析與初期研究；(5)提出「監測與維護計畫」，及本土化的應力腐蝕劣化長程研究規劃建議。

1.3 研究報告架構

除本章「前言」說明研究背景與目的外，本計畫報告其他章節安排如下：

- ◆ 第二章、國外 SCC 研究整理
- ◆ 第三章、國內 SCC 條件研究
- ◆ 第四章、SCC 監測與研究建議
- ◆ 第五章、結論

二、國外 SCC 研究整理

2.1 序論

日本中央電力研究所(Central Research Institute of Electric Power Industry, CRIEPI) 報告，正常情況下用過核燃料乾式貯存設施中不銹鋼密封鋼筒表面初期最高溫度 89°C。過去已有很多研究探討廠房管線在 400°C-800°C 高溫溶液中不銹鋼材料銲道敏化後應力腐蝕劣化問題。雖然同是使用不銹鋼材料，乾貯設施與廠房管線所作用溫度等環境條件相當不同，故在評估乾貯設施長期結構完整性 (structural integrity) 時，確實有必要另外針對不銹鋼材料大氣環境下 SCC 發生條件與問題對策等進行研究。

美國電力研究所 (Electric Power Research Institute, EPRI) (2013) 針對用過核燃料乾式貯存設施不銹鋼密封筒 SCC 評估需求，建議研究(1)破壞模式與影響評估，(2)文獻調查，(3)檢查方法，與(4)劣化模型[2-1]。本章即針對上述研究項目，蒐集與整理包括美國與日本在內的國外研究報告，與 Corrosion Science 等專業期刊論文，以就不銹鋼材料 SCC 問題的研究發展與可能對策進行研析。

2.2 不銹鋼材料 SCC 研究發展

(1) 破壞模式與影響評估

SCC 破壞模式係指 SCC 發生後裂縫經過長時間成長，最後貫穿不銹鋼材料、進而破壞貯存設施密封性。為評估 SCC 影響，可進行加速腐蝕試驗與模擬分析，來求得不銹鋼材料在使用期間內 SCC 可能發生的條件與裂縫最大深度，以及對設施長期結構完整性所可能造成的影響。

Goto 與 Shirai 代表日本 CRIEPI(2012)於 ESCP 國際研討會中報告了 SCC 破壞模式與影響評估相關研究結果 [2-2,3]。

根據過去的研究已知，海鹽主要成分之一的氯化鎂 ($MgCl_2$) 對不銹鋼材料 SCC 影響最顯著，其潮解所需相對濕度(relative humidity, RH) 約 35%，換算自然環境溫度為 $50^{\circ}C$ 。為加速試驗，加溫到 $80^{\circ}C$ 。在上述環境條件下，CRIEPI 使用厚度 10mm 試片，配合四點彎曲試驗架構施加 270MPa 應力，並在試片中央滴入氯化鎂溶液或人工海水，進行 2000 小時以上加速腐蝕試驗後，求得裂縫成長速率 (約 $1.6 \times 10^{-11} m/s$)，如圖 2-1。

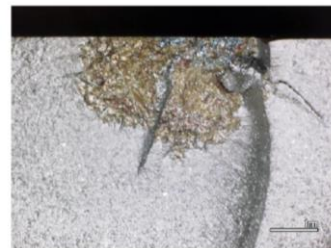
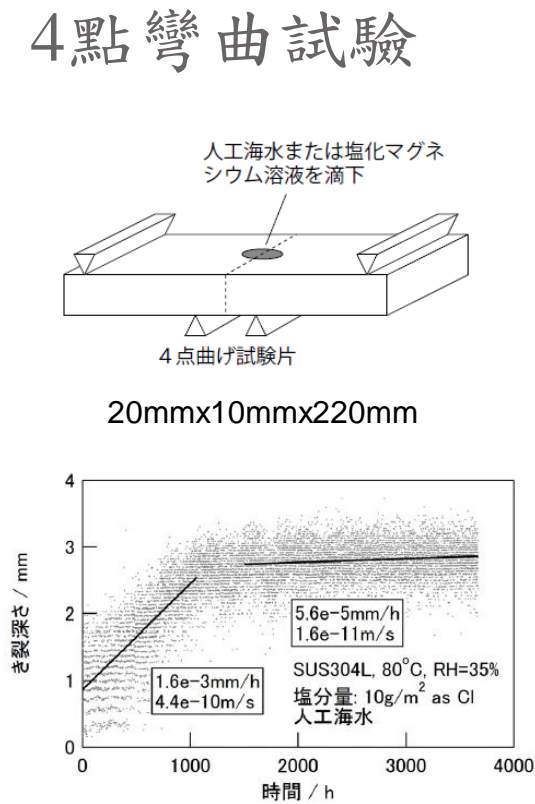


圖 2-1 日本 CRIEPI 四點彎曲加速腐蝕試驗 (取自文獻[2-2])

上述試驗結果與後來的乾貯設施不銹鋼密封桶縮尺模擬實體試驗結果非常相近，如圖 2-2 所示。模擬試驗中所用的不銹鋼密封桶採用實際設施相同板厚為 12.7mm 之 304L 不銹鋼材料，但密封桶直徑與高度分別縮小至 1836mm 與 1100mm。實體模擬試驗並未另外對不銹鋼密封桶施加拉應力，但利用 XRD (X-ray Diffraction) 精密儀器量測求得鐸道附近殘餘(拉)應力約 300MPa。試驗溫度為 80°C，而相對濕度(RH) 為 35%。經過進行 2000 小時加速腐蝕試驗後，求得 SCC 發生後裂縫成長速率 (crack growth rate, CGR) 為 2×10^{-11} m/s。

另外，由圖 2-1 與 2-2 可知，兩個加速腐蝕試驗所求得的 SCC 初始裂縫深度皆約為 3mm。目前試驗所得 SCC 發生所需相對濕度下限為 15%，因此估計乾貯設施不銹鋼密封筒表面溫濕度條件可供 SCC 反應時間約 15000 小時。根據以上結果推測，60 年後裂縫會成長增加 1.1 mm。最後，合計 SCC 最大裂縫深度為 4.1 mm，小於不銹鋼板厚 12.7mm (1/2 in)。綜合以上，依據 CRIEPI 的 Goto 與 Shirai 的研究結果，可以初步結論 SCC 問題應不會影響乾貯設施密封性。

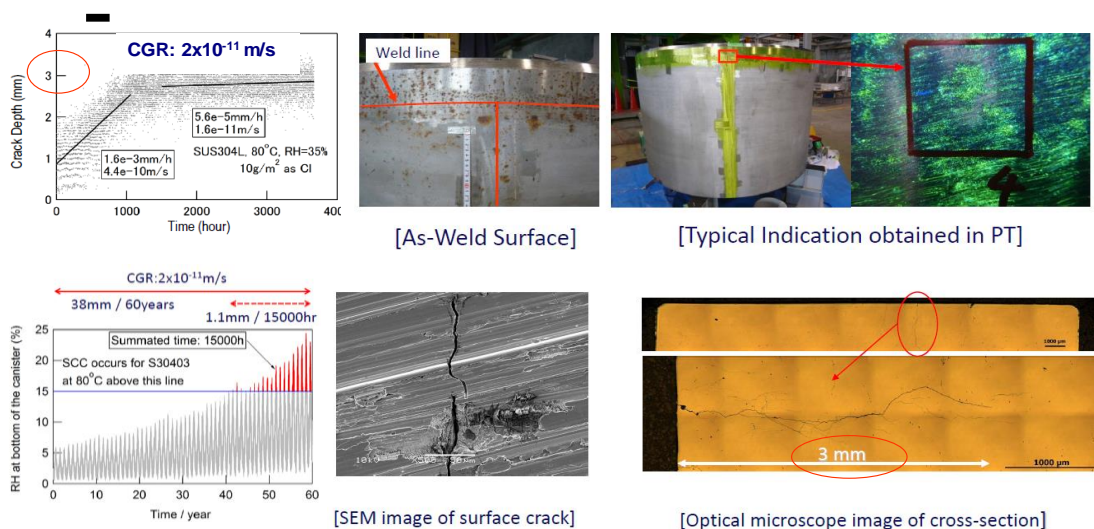


圖 2-2 日本 CRIEPI 乾貯設施不銹鋼密封筒縮尺模擬實體試驗結果 (取自文獻[2-3])

(2) 文獻調查

文獻調查可以用來瞭解不銹鋼材料(海洋)大氣環境下 SCC 可能發生條件，但因為試驗條件與實際情況往往不同，故相關結果可能並不適合直接用於實際設施 SCC 可能性評估。故 EPRI (2013) 針對用過核燃料乾式貯存設施不銹鋼密封筒 SCC 評估之建議研究課題的同時，也特別提到應用文獻調查結果時應詳細考慮(a)非直接暴露於環境，(b)表面空氣流動，與(c)溫度範圍(例如溫度到達(海鹽)潮解時所需時間)之影響[2-1]。易言之，乾式貯存設施的經營者應就乾貯場址特性條件，蒐集分析與研判 SCC 的相關文獻調查。

實際設施所在環境中，會有氯鹽以外空氣污染物可能參與作用。EPRI 已委託 He et al. (2013)針對乾貯設施不銹鋼密封筒，另行研究硫化物等工業產生的空氣污染物之影響[2-4,5]。初步結果顯示，硫化物單獨作用下不會導致不銹鋼材料產生銹蝕。但硫化物與氯化物混合後鹽分潮解所需相對溼度下降至 30%，不銹鋼材料可能因此更易有孔蝕現象。

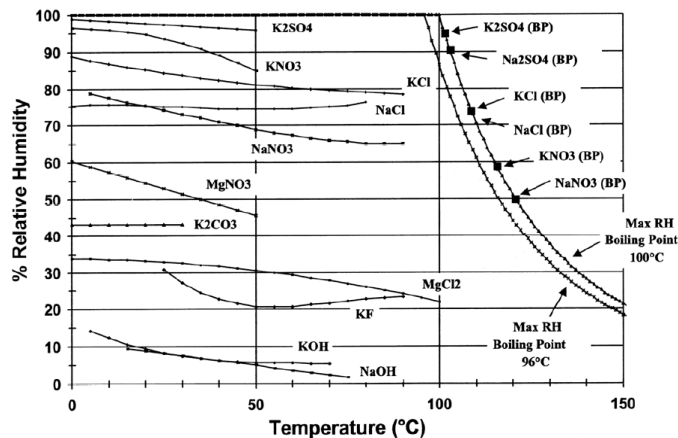


圖 2-3 鹽分潮解溫度與相對濕度 (取自文獻[2-7])

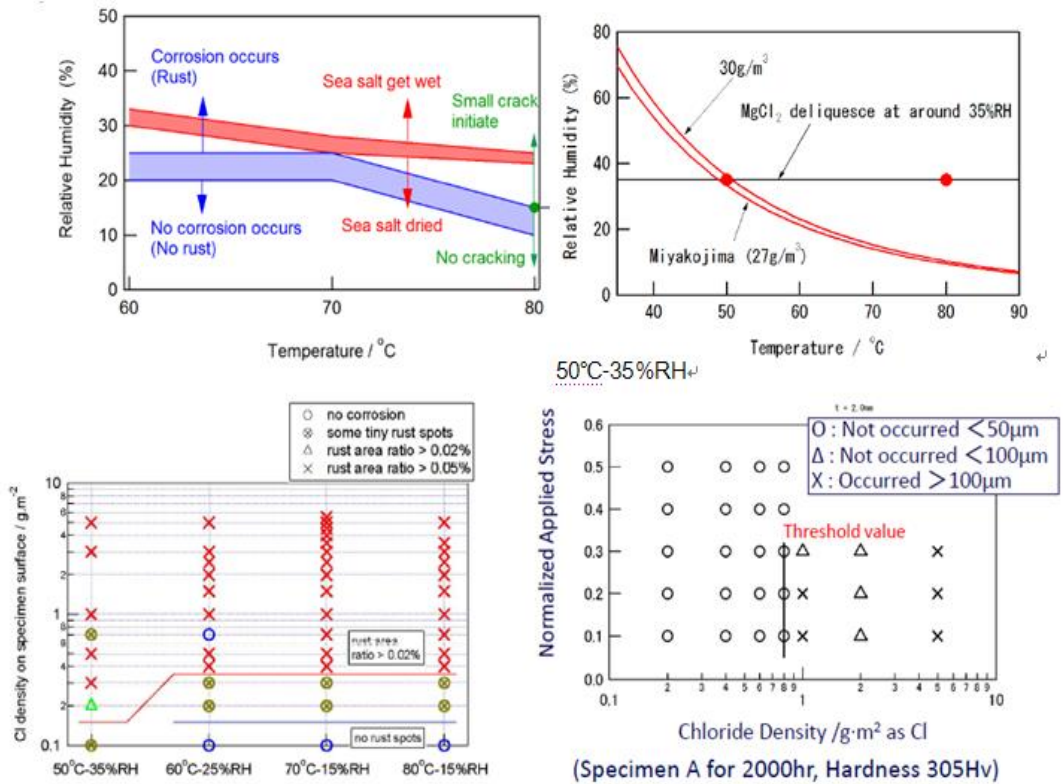


圖 2-4 日本 CRIEPI 乾式貯存設施不銹鋼筒 SCC 臨界鹽分試驗結果 (取自文獻[2-2])

日本 CRIEPI 的 Mayuzumi 等人 (2002) 經實驗確認，海鹽中 MgCl_2 在不銹鋼材料 SCC 反應中扮演重要的角色 [2-6]。 MgCl_2 在溫度到達 95°C 才會完全去結晶水呈乾燥狀態。如圖 2-3，美國 Gordon et al. (2006) 也報告常溫下 MgCl_2 潮解所需相對溼度約 30% [2-7]。Kolman (2001) 報告中引用洛斯阿拉莫斯國家實驗室 (Los Alamos National Laboratory) 實測資料，說明乾貯設施同一個不銹鋼密封鋼桶表面溫度隨所在部位不同溫度變化範圍在 89°C 與 30°C 之間[2-8]。與上述研究相近，日本 CRIEPI 分析結果也指出，正常貯存狀態下乾貯設施不銹鋼密封鋼桶表面初期最高溫度約為 89°C [2-9]。

過去研究以為，相對濕度必須高到讓如 MgCl_2 等海鹽成分潮

解後不銹鋼材料才會發生 SCC。但 Goto 與 Shirai (2012) 報告卻顯示，實驗室內溫度 80°C、相對溼度 15% 的條件下，304L 不銹鋼材料也可能會發生 SCC [2-2]。對照圖 2-3，溫度 80°C 下 MgCl₂ 潮解所需相對溼度超過 25%。如圖 2-4 所示，在大氣溫度 30°C 相對濕度 100% 條件下進行試驗後發現，不銹鋼材料溫度 50°C 比其他更高溫度時 SCC 反應劇烈。將圖 2-3 對照圖 2-4 後會發現，那是因為密封鋼筒表面溫度 50°C 時所對應的相對濕度為 35%、最接近 MgCl₂ 潮解所需相對溼度。

儘管如此，由於海水及濱海大氣中含不同比例 MgCl₂、CaCl₂ 及 NaCl 等氯鹽，前述三種氯鹽因潮解差異及所含氯離子數量不同，造成不銹鋼腐蝕(含應力腐蝕)之條件及劣化程度亦不相同。海水或濱海大氣中氯鹽 NaCl 佔絕對比例，仍為主要研究對象。

材料表面處理與冷加工程度，也會影響不銹鋼 SCC 特性。Turnbull et al. (2011) 針對包括核能電廠在內的工業設施之大氣應力腐蝕問題，將 MgCl₂ 置於四點彎曲試驗試體後移入相對濕度 45% 且溫度 60°C 實驗箱中進行 1500 小時加速腐蝕試驗，以探討表面處理方法對 304 不銹鋼材料 SCC 感受性影響 [2-10]。結果顯示，開裂趨勢與殘餘應力以及表面奈米微結構有關，且如糙度 (roughness) 等因素也有影響。Johns 與 Shemwell (1997) 報告了室溫 35°C 中性 NaCl 溶液中 304 不銹鋼螺絲與螺帽發生 SCC 之實驗案例 [2-11]。實驗材料包括了 304 不銹鋼，316 不銹鋼與 2205 雙相不銹鋼。實驗參數包括表面處理方法等。

Johns 與 Shemwell (1997) 回顧了奧斯田鐵系不銹鋼低溫應力腐蝕研究發展史 [2-11]。到 1970 年代仍普遍認為只要溫度低於 60°C，即使在 pH 值 2 之極酸溶液中，不銹鋼材料就不會產生 SCC 問題。進入 1990 年代後，一般仍認為不銹鋼材料在室溫下不會 SCC，除非是如實驗室或游泳池有高溫與氯化物集中等條件存在時。故上述不銹鋼材料室溫中性溶液中 SCC 例子乃屬首例，且後續分析將其歸因於不銹鋼材料加工所致的塑性

變形，殘餘應力，與表面瑕疵之影響。

綜合以上可知，不銹鋼材料大氣環境下 SCC 初始發生時間 (initiation time)，會受到溫度、相對溼度與海鹽成分等環境因素所左右，且加工所致局部塑性變形，殘餘應力，與表面瑕疵等材料因素也會有所影響。

(3) 檢查方法

EPRI (2013) 對於不銹鋼材料之 SCC，建議下列檢查方法研究課題，但並非對於相關業者的作業要求，包括：(a)針對乾貯不銹鋼筒銹蝕與孔蝕進行目視檢查，(b)針對乾貯不銹鋼筒表面溫度與周邊大氣溫度進行量測，(c)針對乾貯不銹鋼筒表面沉積物進行成分分析與濃度調查，以及(d)針對乾貯不銹鋼筒表面與周邊大氣之溫度，海鹽或其他沉積物等進行監測 [2-1]。

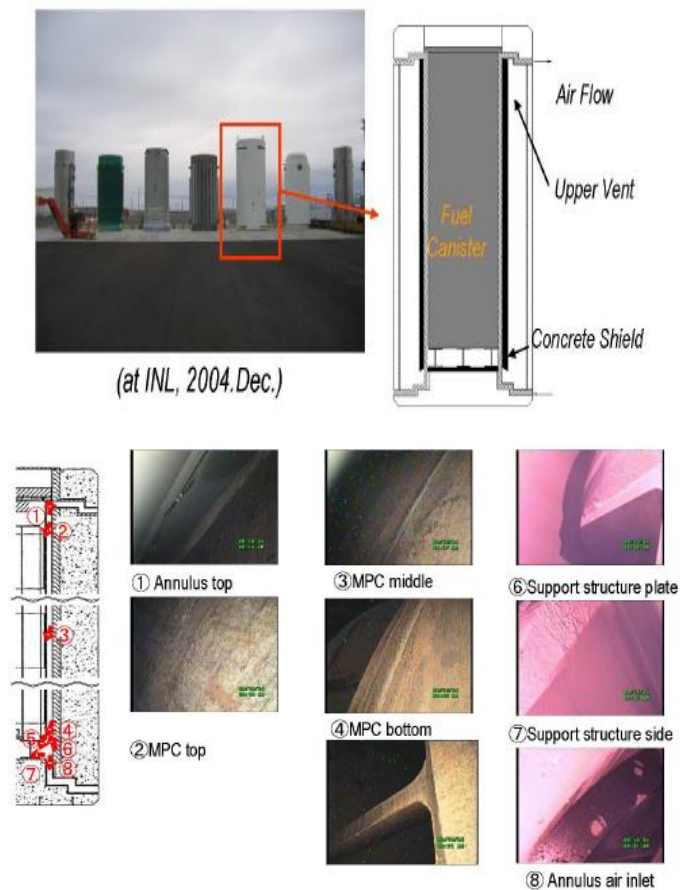


圖 2-5 美國乾貯設施不銹鋼封鋼筒調查例(取自文獻[2-12])

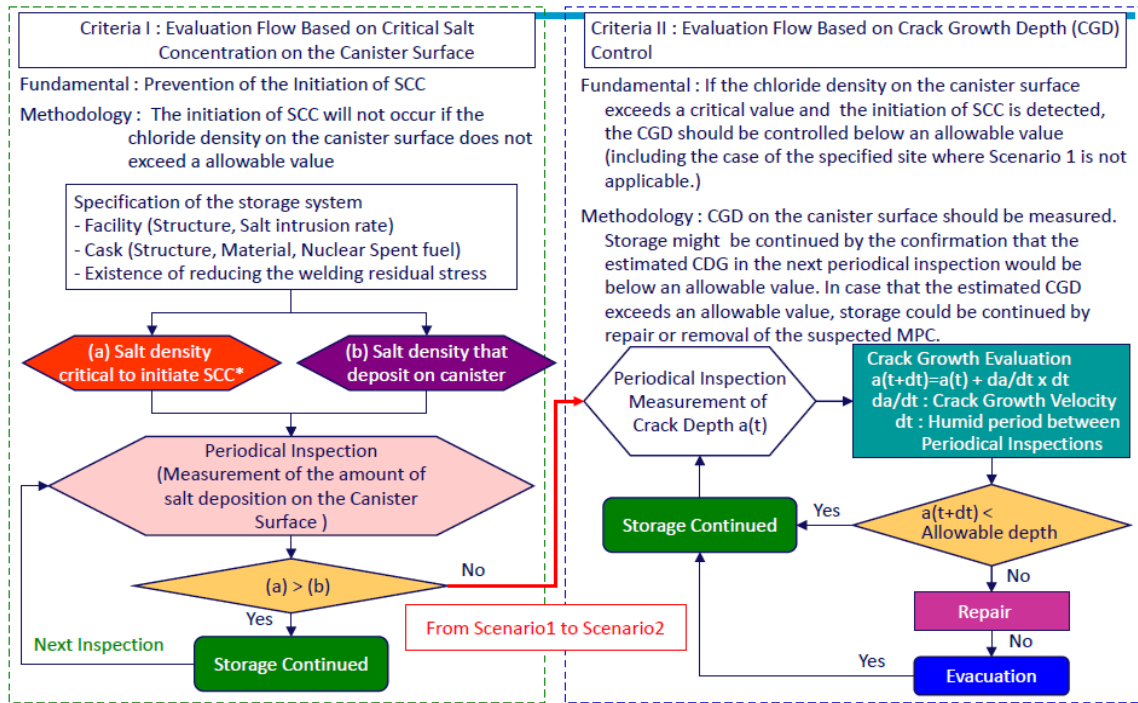


圖 2-6 日本 CRIEPI 不銹鋼桶 SCC 兩階段監測與維護評估流程 (2011 草案) (取自文獻[2-9])

Kolman (2001) 與 Shirai et al. (2008) 報告均提到，利用相機對美國目前使用中乾貯設施不銹鋼密封鋼桶進行目視檢查，雖有銹蝕跡象但無 SCC 之事證 (如圖 2-5) [2-8,12]。例如 CRIEPI 研究根據銹點大小來判斷 SCC 初始發生，也就是材料表面鏽蝕長度超過 $100\mu\text{m}(=0.1\text{mm})$ 者，裂縫有可能在材料深度方向才會持續成長。Kolman(2001) 報告中引用洛斯阿拉莫斯國家實驗室 (Los Alamos National Laboratory) 實測資料，說明乾貯設施不銹鋼密封鋼桶表面溫度介於 89°C 與 30°C 間 [2-8]。

如圖 2-6，日本 CRIEPI (2012)則建議，監控乾貯設施不銹鋼密封筒表面氯離子濃度，以防止 SCC 之發生[2-14]。儘管如此，乾貯設施不銹鋼密封鋼桶表面溫度，相對濕度與鹽分等監測方法與儀器，很多目前都是研究評估可行，但要應用在實務上仍需驗證 [2-5]。也因此，如美國 NRC 對不銹鋼密封鋼桶 SCC 監

測議題，目前僅止於建議研究而未有任何具體的管制措施。

(4) 劣化模型

EPRI (2013) 建議研究(a)熱量模型，(b)銲接殘餘應力，(c) SCC 裂縫發生與傳播等模型，並配合現地實測資料來預測(d) 不銹鋼筒表面鹽分在空間與時間上之分佈與變化 [2-1]。

日本 CRIEPI(2012)報告，針對乾貯設施進行研究試驗結果顯示，銲接後不銹鋼筒殘餘拉應力與不銹鋼材降伏強度相當 [2-9]。Dean et al. (2008) 針對 304 不銹鋼管殘餘應力進行實驗與有限元素分析，兩者比較後發現不銹鋼管銲接前即因熱處理與拉直過程而有初始殘餘應力，且拉直過程中冷加工導致塑性變形並增加銲接後殘餘應力 [2-13]。故銲接前材料加工殘餘應力應納入分析。Huang et al (2010) 應用渦電流非破壞檢測原理，針對鎳基銲道 SCC 裂縫發生與傳播進行有限元素模擬，探討相關電磁特性變化 [2-14]。

另一方面，日本原子力基盤機構 (2004) 報告提出，根據日本工業標準 JIS 規定，針對不銹鋼母材，銲道與熱影響區，分析金相、肥力鐵 (ferrite) 含量、成分元素與敏化程度，並進行拉伸試驗與硬度量測，以作為 SCC 影響評估用之基礎資料 (詳第四章) [2-15]。

2.3 不銹鋼材料 SCC 可能對策

SCC 乃是金屬合金在特定腐蝕環境下受靜態拉力產生劣化之現象。以下就材料，應力與環境等面向，討論包括美國與日本等國外最近針對乾貯設施 SCC 對策所進行的相關研究進行說明：

(1) 不銹鋼材料

美國 104 座核電廠中有 60 座在廠內興建乾貯設施，而乾貯設施的主要組件包括 304L 不銹鋼材料製造的密封鋼筒及外部

混凝土護箱[2-18]。國內核一廠與核二廠的乾式貯存設施目前也是規劃使用 304L 不銹鋼材料，依照國際標準模式來進行設計規劃與興建。

日本用過核燃料中期貯存設施，因為配合用過核燃料再處理政策的考量，目前均採用金屬護箱並存置於室內，但基於經濟性與國際標準等觀點，近年也開始研究採用混凝土護箱之可能性[2-9]。比照過去金屬護箱經驗，日本 CRIEPI 預計在 2017 年後配合業者使用混凝土護箱乾式貯存設施的時間，並規劃進行乾式貯存設施現地監測研究計畫[2-16]。

(2) 降低殘餘應力/局部塑性變形等影響

明石正恒(1998) 報告敏化不銹鋼 100 小時鹽霧試驗結果，顯示噴砂 (shot blasting) 與鋁離子噴塗 (Al-spray coating) 或鋁箔包覆 (Al-foil wrapping) 可降低 SCC 之可能性 [2-17]。美國 EPRI (2005) 研究說明，應用包括：珠擊強化 (shot peening)，雷射強化(laser peening)，與低塑性拋光(low plasticity burnishing) 等表面處理技術，來降低不銹鋼銲接殘餘應力[2-18]。

另一方面，García et al. (2001) 利用 $MgCl_2$ 溶液中 U 型彎曲試體，探討金屬冷加工 (cold work, CW) 對敏化 304 不銹鋼 SCC 行為影響 [2-19]。結果發現，退火 (annealed) 後 304 不銹鋼沿晶應力腐蝕劣化(IGSCC)會因為敏化而強化、即縮短破壞時間與加速 SCC 發生與傳播。但隨著冷加工 CW 程度增加，304 不銹鋼會變成混合或穿晶應力腐蝕劣化 (TGSCC) 為主。Kolman (2001) 針對含鈾組件貯存於不銹鋼筒時鏽蝕可能性，包括應力腐蝕劣化(SCC)，氫脆 (hydrogen embrittlement, HE)，液態金屬脆化，以及合金/介金屬化合物等相關文獻，進行研析 [2-8]。結果顯示，未敏化自溶銲道 (例如雷射銲接) 比加工硬化的不銹鋼母材易受 SCC 影響，但差異並不顯著；退火 (annealing) 雖然對抑至局部腐蝕效果有限，但可降低不銹鋼因

冷加工 SCC 可能性，與降低氫脆可能性。

不銹鋼材料除銲接後敏化問題外，其機械加工所生塑性變形也是促發 SCC 重要原因之一。日本原子力協會(2009)研究報告指出，不銹鋼材試片研磨加工後硬度值若小於 270Hv，則不會發生 SCC [2-20]。維氏硬度試驗 (Vickers hardness test) 為常用的硬度試驗方法之一，其單位 Hv 代表負載與壓痕面積之比值，故使用任意負載均可獲 Hv 值相同之結果。日本 CRIEPI (2012) 的實驗也證實，在 50°C 相對濕度 35% 條件下，硬度 305Hv (大於 270Hv) 不銹鋼材經 2000 小時加速腐蝕試驗後發現有 SCC 之現象，但硬度 247Hv (小於 270Hv) 不銹鋼材經 5000 小時加速腐蝕試驗後上則未發現 SCC (如圖 2-7)。

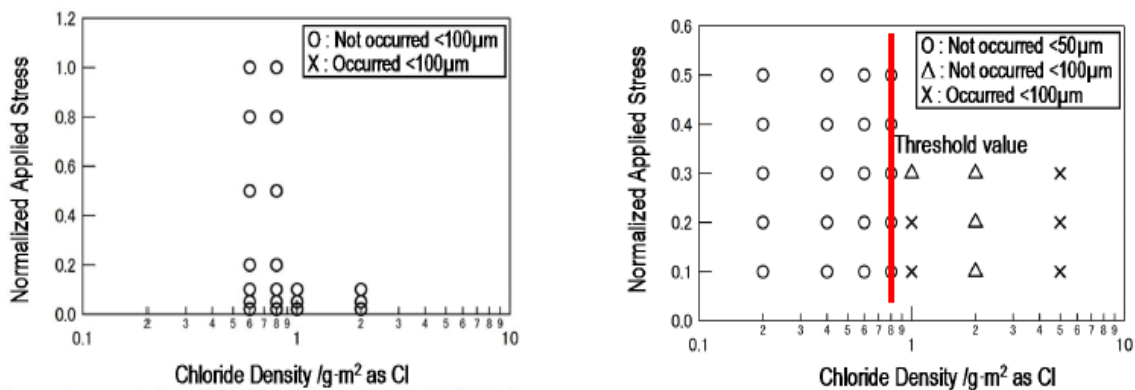


圖 2-7 硬度對 SCC 影響 (左:5000 hr, 247 Hv; 右:2000hr, 305 Hv) (取自文獻[2-9])

國內例如蔡履文教授最近的研究也指出，常溫滾軋會使不銹鋼硬度大幅增加、甚至超過 270Hv(如圖 2-8)。冷軋所致麻田散鐵相變態以及高表面殘留應力，促使常溫滾軋不銹鋼在 80°C、10%NaCl 鹽霧試驗中經 85 小時即破裂；同樣的條件下母材經 144 小時試驗也無 SCC 之跡象 [2-21,22]。

	BM	CW	HW	CWS	HWS
$\gamma\%$	91.1	40.0	59.5	60.9	82.4
Martensite%	8.9	60.0	40.5	39.1	17.6

		BM	CW	HW	CWS	HWS
Martensite	α' %	1.1%	9.1%	1.1%	2.6%	0.5%
	ϵ %	7.8%	50.9%	39.4%	36.5%	17.1%

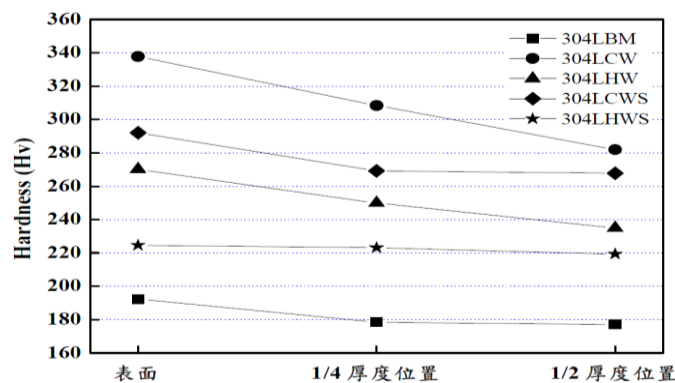


圖 2-8 滾軋與敏化等表面處理對不銹鋼材料硬度之影響；BM: 母材試片(as received), CW:常溫滾軋 20%, HW: 加熱 150°C 軋軋 20%, CWS:常溫滾軋後於 650°C 敏化 1 小時, HWS: 加熱軋軋後於 650°C 敏化 1 小時 (取自文獻 [2-21,22])

以下就(1)退火，(2)珠擊，與(3)雷射銲接於不銹鋼材料 SCC 防治之原理與適用性進行說明與比較[2-23]：

(a) 退火(annealing):

在冶金學或材料工程中，退火是一種改變材料微結構，進而改變如硬度、強度的機械性質的熱處理。過程為將金屬加熱到高於再結晶溫度的一點並維持此溫度一段時間，再將其緩慢冷卻。退火的功用在於恢復因冷加工而降低的性質，增加柔軟

性、延性和韌性，並釋放內部殘留應力、以及產生特定的顯微結構。退火過程中，多以原子或晶格空位的移動釋放內部殘留應力，透過這些原子重組的過程來消除金屬或陶瓷中的差排，然而這項改變動也讓金屬中的差排更易移動，增加了它們的延性。退火過後的金屬之後可以再拿去做進一步加工，如沖壓、塑造、成形等。

SCC 主要發生原因包括，(a)材料性質，(b)腐蝕環境，與(c)殘餘應力。金屬材料殘餘應力常發生於，(i)塑型變形，造成晶格變形改變，進而發生應力，(ii)冷卻時所引起的相變態（部分沃斯田鐵相轉為麻散田鐵相）。退火處理（弛力退火）能夠有效移動晶格空位，釋放殘餘應力，故對於改善不銹鋼抗 SCC 能力有很大效果。

(b) 珠擊 (shot peening):

珠擊加工為材料表面處理的加工法，在一般用途的工業金屬材料上，有提高疲勞強度、加工硬化、去除張應力等效果。由於珠擊費用較低廉，常被加工廠使用於表面粗糙鑄件的加工。利用極小的鋼珠或沙粒，經由高壓空氣噴出敲打表面，打出極小的表面凹痕並產生殘留應力，藉以改善表面性質。過去研究已證明，珠擊處理有效抑制在高溫高壓水循環管線內 IGSCC 的產生。同時提高疲勞強度，拉伸強度等機械性質。

珠擊處理與退火處理主要都是消除殘餘應力，但珠擊與退火不同的是，珠擊是以微小鋼粒敲打金屬表面，使其有凹洞，而產生“壓應力”，藉以消除金屬因加工或鍛造，銲接所產生的“張應力”，而使其殘留應力降低，對改善 SCC 有相當大幫助。

(c) 雷射銲接 (Laser welding)

如圖 2-9，一般雷射銲接為鑰孔式模式 (Keyhole mode)，當功率密度高於 $105\text{W}/\text{mm}^2$ 時，因材料表面溫度快速上升使母材開始熔融，降低金屬表面反射率而提高吸收率，接著材料汽

化產生高壓金屬推擠熔融金屬，在後續雷射光束下即形成一細長鑰孔，而鑰孔內因充滿離子化金屬蒸氣，將可以有效吸收雷射光增加熔深，並以金屬蒸氣壓對抗熔融金屬支撐孔壁，最後再由熔金回填至孔隙中。

雷射熔融將不銹鋼表面析出的的碳化鉻重熔回晶體中，使晶體中的鉻重新回到原始濃度，因而使不銹鋼抗腐蝕性提昇。另一方面，雷射重熔具有較大的寬深比，多用於修補不銹鋼表面。相較之下，雷射銲接則具有較小的寬深比，所產生的銲接熱影響區最小，材料變形也因此相對變少，故可將敏化對金屬材料影響降至最低。以下為雷射銲接之特點：

- 優點:可獲得高深寬比，因高吸收率，可用較快掃描速度即可完成加工，整體入熱量低，獲得範圍較小之熱影響區。
- 缺點:高速度亦使熔融冷卻速度提高，雖能使熔融區獲得較小的次晶，但亦使從熔融線至熱影響區間產生極大溫度梯度，故可能產生的最大熔融殘留應力較大。

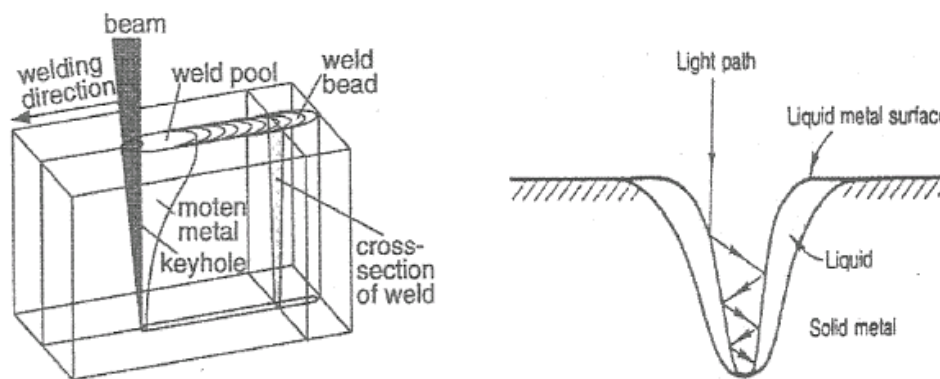


圖 2-9 雷射銲接示意圖 (取自文獻[2-23])

(3) 環境監測

美國 104 座核電廠中有 60 座在廠內興建乾貯設施，而乾貯設施的主要組件包括 304L 不銹鋼材料製造的密封鋼筒及外部混凝土護箱[2-18]。日本用過核燃料中期貯存目前均採用金屬護箱並存置於室內，但基於經濟性與國際標準等觀點，近年也開始研究採用混凝土護箱之可能性 [2-9]。如圖 2-4，早期實驗研究如 Mayuzumi 等人 (2002)就發現 304 與 304L 不銹鋼材料在低應力下仍可能有 SCC 問題 [2-6]。也因此，美國與日本目前都考慮以環境監測作為乾貯設施 SCC 對策，並持續進行相關研究。

如圖 2-6，日本 CRIEPI (2011) 針對乾貯設施不銹鋼密封筒已提出了 2 階段 SCC 監測與維護評估流程(草案)，也就是(1)防止 SCC 發生，與(2)控制 SCC 進行 [2-9] (日本 CRIEPI (2013)最新公佈的修正草案詳第四章)。過去日本 CRIEPI 已根據加速腐蝕試驗求得的 SCC 發生臨界氯鹽量，未來建議定期監測不銹鋼密封筒表面氯鹽沉積量，以根據兩者的比較來判斷 SCC 發生與否。

如圖 2-4，根據日本 CRIEPI 的腐蝕試驗，304L 不銹鋼材料發生 SCC 所需最低累積鹽分約 $0.8\text{g}/\text{m}^2$ 。上述腐蝕試驗乃對照日本觀測溫度與絕對濕度後，以 $30\text{g}/\text{m}^2$ 、相當 30°C 飽和水蒸氣中含水量，來換算不銹鋼材料不同溫度下相對濕度。另外，考慮鹽分中氯化鎂(MgCl_2) 潮解相對濕度最低約 35%，分析密封鋼筒表面對應溫度為 50°C (故後續進行的腐蝕加速試驗即以溫度為 80°C ，相對濕度 35% 為條件來進行)。

試驗結果發現，304L 不銹鋼材料在溫度 80°C 與相對濕度 15% 條件下，即會發生 SCC。也就是說，不銹鋼材料發生 SCC 所需相對溼度，低於鹽分中氯化鎂(MgCl_2) 潮解所需相對濕度。這可能是因為不銹鋼材表面之孔蝕 (pitting corrosion) 或間隙腐蝕等局部銹蝕，破壞了不銹鋼材表面氧化物保護層、導致

SCC 發生。另外，如圖 2-4 所示，在大氣溫度 30°C 相對濕度 100% 條件下進行試驗後發現，不銹鋼材料溫度 50°C 比 80°C 時 SCC 反應會更劇烈。將圖 2-4 對照圖 2-3 後會發現，那是因為密封鋼筒表面溫度 50°C 時其對應的相對濕度為 35%、最接近 MgCl₂ 潮解所需相對溼度。

日本 CRIEPI 也持續進行氯鹽沉積量監測相關研究。如圖 2-10，現地觀測試驗顯示，日本核電廠屋內與屋外空氣中單位體積氯鹽含量並無不同[2-24]。這也意味著，乾貯設施不銹鋼密封筒 SCC 問題，基本上不會因為設施外加建築物就有所不同。如圖 2-11，風洞(室內)試驗與(現地)暴曬試驗均顯示，試片平擺(與氣流平行)時比豎放時鹽分單位面積累積較多，且實驗溫度 30 °C 比 100°C 試片鹽分累積快 [2-25]。另外，CRIEPI 的初步實驗顯示，加裝濾氣裝置可減少乾貯設施通風孔內鹽分，且不影響原設計氣冷功能，但日本並未依據 CRIEPI 研究之結果要求業者須在乾貯設施加裝濾氣設備 [2-26]。日本 CRIEPI 最近也開始著手開發新的光學量測儀器與技術，來監測不銹鋼材料表面氯鹽沉積量[2-27,28]。

如圖 2-2，日本 CRIEPI 已發展完成 SCC 裂縫發展評估技術並實驗驗證[2-2]。又，研究常以電子顯微鏡 (SEM) 來確認不銹鋼材料 SCC 發生與否，但這很難用於實際廠房監測。故日本 CRIEPI 也提出改良超音波檢測法之構想，嘗試做為以監測不銹鋼材料 SCC 裂縫深度之可行性 [2-29]。

綜合以上，乾貯設施不銹鋼密封鋼桶表面溫度，相對濕度與鹽分等監測方法與儀器，很多都是目前持續研究發展中，但要應用在實務上仍需進一步驗證或改進 [2-5]。也因此，國內相關單位在乾貯設施不銹鋼密封桶設計製作階段，即已規劃並取得和實際設施冷加工程度與銲接程序相同之不銹鋼材料試片，而相關試驗之結果也可應用於實際乾貯設施不銹鋼密封鋼桶 SCC 監測與控制。

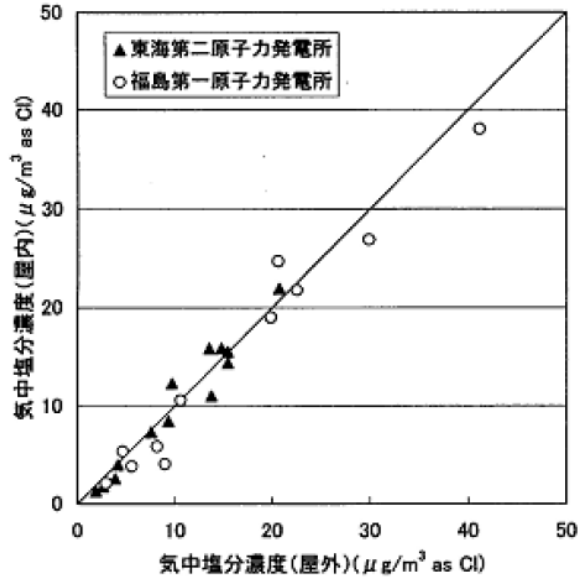


圖 2-10 日本核電廠屋內與屋外空氣中氯鹽含量觀測結之比較 (取自文獻[2-24])

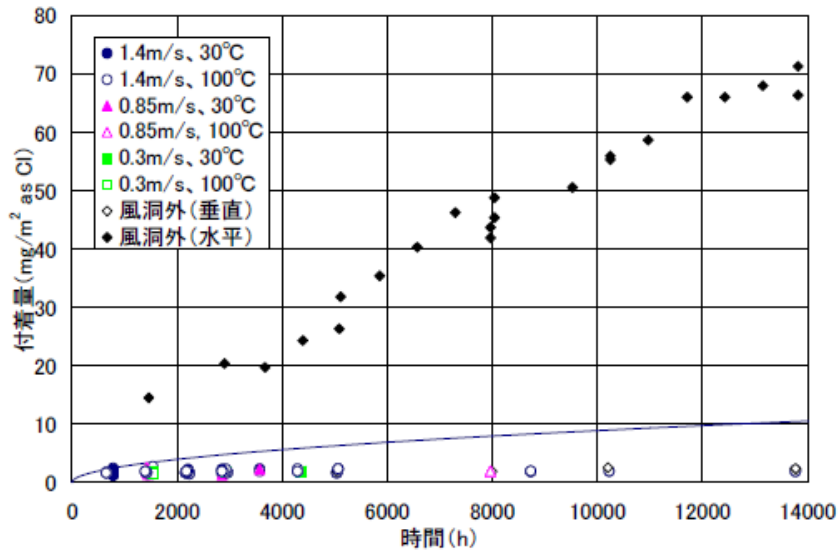


圖 2-11 風洞(室內)試驗與(現地)暴曬試驗所獲氯鹽沉積量(取自文獻[2-25])

三、國內 SCC 條件研究

3.1 序論

台電公司目前規劃於核電廠內興建乾式貯存設施。乾式貯存設施主要的組件包括不銹鋼材料製造的密封鋼筒及外部混凝土護箱。不銹鋼材料具有極佳的耐熱性、耐久性及抗腐蝕性，故使用在核能組件非常普遍，也被多數國家選作密封鋼筒的主要材料。在工業應用上，曾發現不銹鋼材料在特定材料條件（材料選擇、應力狀態等）及環境條件（溫度、相對溼度等），且經過長時間的鹽分沉積後，設施表面可能產生應力腐蝕劣化之現象。

本計畫研究在前一章已蒐集並整理國外不銹鋼材料 SCC 研究現況與問題對策。本章進一步針對國內可能發生 SCC 之環境條件與材料特性進行研究。具體而言，首先蒐集與分析國內乾貯設施所在位置附近之溫度，相對濕度，以及海鹽沉積速率等。之後，根據國內過去實驗資料分析銲接加工對國內不銹鋼材料 SCC 行為之影響。最後，彙整國內可能發生 SCC 的環境條件及材料特性，進行本土化 SCC 環境模擬分析與加速腐蝕試驗。

3.2 環境條件分析

(1) 溫度與溼度

針對核能發電廠，本計畫研究蒐集與分析中央氣象局基隆測站與恆春測站之溫度與相對濕度(relative humidity, RH)的近五年每小時觀測資料[3-1]後，換算求出對應的絕對濕度(absolute humidity)。圖 3-1 為基隆測站溫度與相對濕度之觀測結果。圖中每一個點代表一筆每小時觀測記錄。圖 3-2 為根據圖 3-1 的溫度與相對濕度換算求出來的絕對濕度。基隆測站近年絕對濕度最大值為 26.9 g/m^3 。

CRIEPI 報告[3-2] 指出，日本核能發電廠近年絕對濕度最大值為 27 g/m^3 ，且該記錄發生於日本海附近。為方便比較，圖

3-1 的座標軸範圍，為日本海附近的觀測範圍。經比較後可知，日本海沿岸與臺灣基隆的溫度與相對濕度之分佈範圍不同，但兩地的絕對濕度最大值卻相當。

美國 NRC 報告[3-3]指出，自然環境下絕對濕度最大值約為 30 g/m^3 。也因此，CRIEPI 以絕對濕度 30 g/m^3 ，相當於 30°C 相對濕度 100% 之條件，換算不同溫度之相對溼度來進行腐蝕實驗 [e.g. 3-2]。本計畫研究將參考上述蒐集研析的資料，進行相關試驗條件設定。

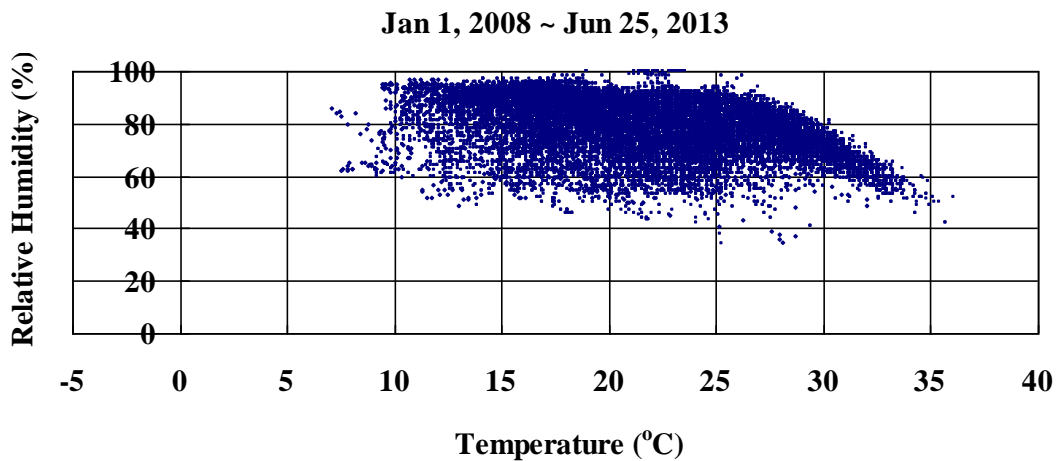


圖 3-1 臺灣基隆近年溫度與相對濕度每小時觀測值分佈

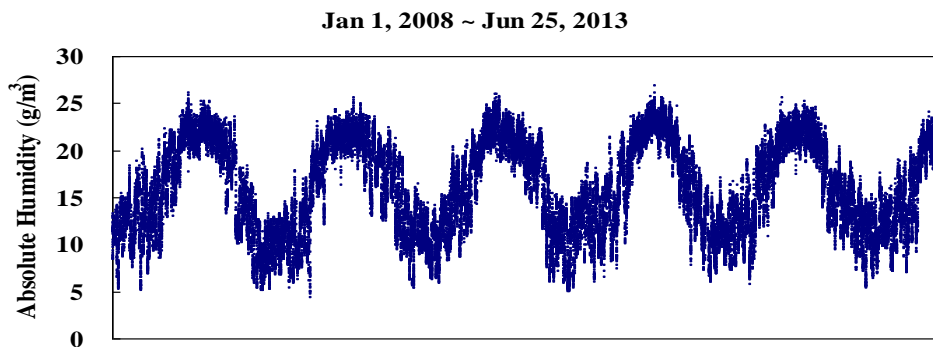


圖 3-2 臺灣基隆近年絕對濕度每小時分析結果歷時分佈

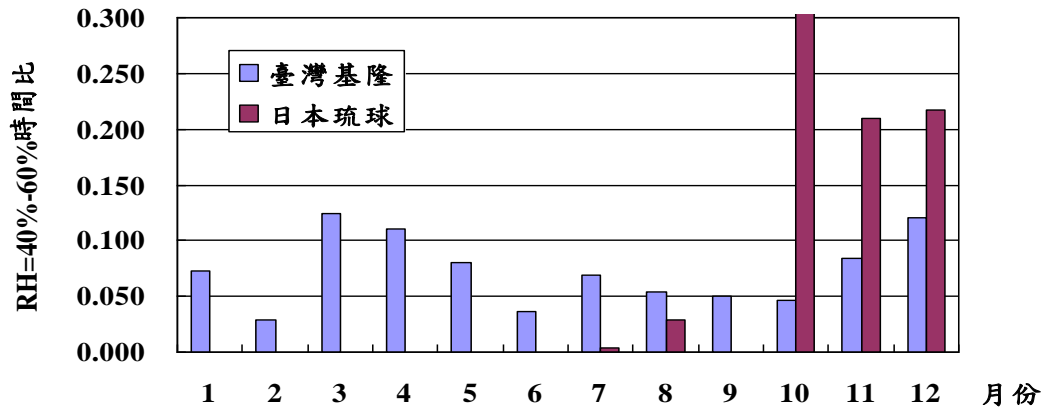


圖 3-3 臺灣基隆與日本琉球 RH= 40%-60%之時間比

圖 3-3 為基隆測站一年 12 個月中相對溼度 RH=40%-60%之時間比。沖繩是日本汽車工業腐蝕標準制定時進行測試的主要地點，而該地區的琉球大學曾有研究 [3-4] 指出，當地冬季 (10-12 月)比夏季(7-9 月)的 RH=40%-60%之時間比多，故觀測到 304 不銹鋼材料在冬季更易 SCC。上述實驗結果也被重新整理以與基隆測站資料比較於圖 3-3。由圖可知，不銹鋼材料在臺灣基隆明顯地會比在日本琉球不易發生 SCC。另外，除了 10-12 月，臺灣在 3-5 月時 RH= 40%-60%之時間比也較多。

(2) 氯離子沉積

交通部運輸研究所港灣技術研究中心「臺灣地區大氣腐蝕劣化因子調查研究」，在國內很多重要設施與工業園區內設有測站，並每季報告氯鹽 (Cl⁻) 沉積速率[3-5]。也就是全年四季，即春季(3-6 月)，夏季(6-9 月)，秋季(9-11 月)，與冬季(11-3 月)，每季依序進行採樣。採樣即依照 CNS13745 將已知面積的濕纖維織物暴露於大氣一段時間，之後進行化學分析來測定大氣中氯 (Cl⁻) 離子濃度。

結果可以分為兩類，一為直接觀測記錄。例如，核一廠直接觀測時間為 2007 年 5 月起至 2008 年 8 月。觀測最大氯鹽 (Cl⁻)

沉積速率值為 $11.23 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ ，發生時間在 2008 年第 1 季(即 2008 年 1 月起至 5 月)。觀測最小氯鹽 (Cl^-) 沉積速率值為 $7.69 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ ，發生時間在第 2 季(即 2008 年 5 月起至 8 月)。另外，核二廠附近(即基隆試驗線 300m 處) 觀測時間為 2007 年 5 月起至 2008 年 8 月。觀測最大氯鹽 (Cl^-) 沉積速率值為 $4.62 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ ，發生時間在 2008 年第 1 季(即 2008 年 1 月起至 5 月)。觀測最小氯鹽 (Cl^-) 沉積速率值為 $0.25 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ ，發生時間在 2007 年第 4 季(即 2007 年 9 月起至 2008 年 1 月)。

另一為將臺灣全部 60 個觀測點記錄內插作成的氯鹽沉積速率圖。圖 3-4 為民國 101 年(即 2012 年)結果。圖中紅色標示臺灣氯鹽沉積速率大於 $10 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 的位置，也就是北起基隆到嘉義一帶的西部沿海工業區，以及東部海岸線，大氣中氯鹽濃度較高。又，推估 2012 年核一廠與核二廠附近的氯鹽沉積速率約 $8 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ ，這與過去 2007 年~2008 年間直接觀測記錄結果相近。

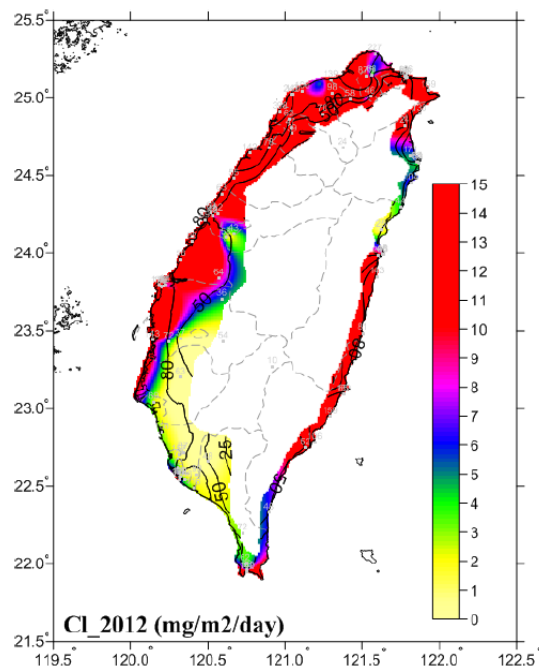


圖 3-4 臺灣氯鹽沉積速率圖

國科會研究計畫[3-6]曾在距離海岸線 50m 的高美濕地進行採樣分析，當地所測得的大氣濃度 $128\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，其中氯 (Cl^-) 離子含量 4.32%，經換算大氣中氯 (Cl^-) 離子濃度為 $5.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。CRIEPI 報告[3-7,8]在日本核電廠量測到的大氣中氯 (Cl^-) 離子濃度則介於 $2\sim 40\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

值得注意的是，直接影響 SCC 的是不銹鋼材料表面附著的氯 (Cl^-) 離子量，而非大氣中氯 (Cl^-) 離子濃度。大氣中氯 (Cl^-) 離子濃度高，可能附著於不銹鋼材料表面附著的氯 (Cl^-) 離子量也多。日本 CRIEPI 研究報告則[3-8]顯示，除了大氣中氯 (Cl^-) 離子濃度，氣流的速度，方向與溫度也會影響氯 (Cl^-) 離子附著於不銹鋼材料表面的量。

此外，日本 CRIEPI 實驗後發現，在核電廠的室內與室外所量測到的大氣中氯 (Cl^-) 離子濃度幾乎相同[3-7]。另外，日本業界也有實驗[3-4]顯示，比起露天放置的情況，有屋頂局部遮閉的情況反而不利於雨水或強風將不銹鋼材料表面附著的氯鹽帶走，故不銹鋼材料有可能因此更易有 SCC 問題。

3.3 材料特性分析

如表 3.1，本計畫整理國內相關研究中不銹鋼銲接加工前後硬度值，以探討金屬退火 (annealing)，冷加工 (cold work, CW)，與敏化 (sensitization) 等，對 314L 不銹鋼材料 SCC 可能影響。日本相關研究 [3-9,10] 指出，不銹鋼材料若硬度小於 270Hv 則不會產生 SCC。由表可知，扣除圓棒與表面處理等個案，國內過去研究所用的 314L 不銹鋼材料即使銲接後硬度也仍在 270Hv 以下，可以推斷發生 SCC 可能性低。但這些不銹鋼材料經加工製成圓棒，或者滾軋與珠擊等表面處理，則硬度會增加並超過 270Hv，甚至高達 380Hv，故發生 SCC 可能性也隨之增加。

表 3.1 國內過去研究 314L 不銹鋼材料銲接與加工前後硬度

文獻	板厚 (mm)	母材 硬度	銲材	銲接 方法	銲道 硬度	熱影響區 硬度	表面 處理
1	6, 4.8	175-200					滾軋 225-325
2	6, 4.8	180-190					滾軋 220-340
3	圓棒 9.7	325-450					
4	3	160-170		EBW	160-175	180-190	
5	3	180-190		EBW	160-170		
6	6	175-215	52, 82, 152	SMAW GTAW	170-200	185-215	
7	6	190	TGS30 8L TS308 L	SMAW GTAW	200-240	200	
8	9	170		PAW	180	160-180	
9	16	190	TGS30 8L TS308 L	SMAW GTAW	210-220	200-225	
10	12	180-190	TGS30 8L TS308 L	SMAW GTAW	175-200	175-225	
11	9	175		PAW	180-200	160-180	
12	9	175		PAW	180-200	160-180	
13	3	185-190		EBW	195-200		
14	15, 7.5	270	82				熱處理、 珠擊 200-380

附註：

文獻1: 陳昇燦, 「軋延304L不銹鋼其氫致疲勞裂縫加速特性研究」, 國立臺灣海洋大學材料工程研究所碩士學位論文, 指導教授: 蔡履文。

- 文獻 2: 林育如,「304L 不銹鋼軋延組織之氫脆特性研究」,國立臺灣海洋大學材料工程研究所碩士學位論文,指導教授:蔡履文。
- 文獻 3: 楊孟杰,「預變形 304L 不銹鋼在高速高溫變形下之機械性質與微觀結構分析」,國立成功大學機械工程學系碩士學位論文,指導教授:李偉賢。
- 文獻 4: 林永定,「鎳基 690 合金與 SUS 304L 不銹鋼異種金屬電子束銲接特性與微結構研究」,國立成功大學機械工程學系博士學位論文,指導教授:李驊登。
- 文獻 5: 范文傑,「Nd-YAG 雷射銲接製程參數對鎳基 690 與 304L 不銹鋼異種銲接之影響」,國立成功大學機械工程學系碩士學位論文,指導教授:李驊登。
- 文獻 6: 鄭勝隆,「鎳基 690 合金與 SUS 304L 不銹鋼異種金屬銲接特性與微結構研究」,國立成功大學機械工程學系博士學位論文,指導教授:李驊登。
- 文獻 7: 陳柏村,「溫度及應變速率在 304L 不銹鋼銲接件抗拉性質與顯微結構上的效應分析」,國立成功大學機械工程學系碩士學位論文,指導教授:李偉賢。
- 文獻 8: 許耀臣,「304L 不銹鋼電漿電弧銲接件在不同溫度及應變速率下的機械性質與破壞行為」,國立成功大學機械工程學系碩士學位論文,指導教授:李偉賢。
- 文獻 9: 曾繁宗,「304L 不銹鋼之惰性氣體鎢棒電弧銲及遮蔽金屬電弧銲銲接件的高速撞擊行為與顯微結構之特性分析」,國立成功大學機械工程學系碩士學位論文,指導教授:李偉賢。
- 文獻 10: 程仁毅,「304L 不銹鋼之惰性氣體鎢棒電弧銲及遮蔽金屬電弧銲銲接件在動態剪切負荷下的塑變行為與破壞特性分析」,國立成功大學機械工程學系碩士學位論文,指導教授:李偉賢。
- 文獻 11: 江明信,「304L 不銹鋼定電流與脈衝電流電漿銲接件在動態剪切荷載下之塑變行為及破壞特性比較」,國立成功大學機械工程學系碩士學位論文,指導教授:李偉賢。
- 文獻 12: 陳志維,「應變速率及銲接電流模式在 304L 不銹鋼電漿電弧銲接件之動態撞擊特性及顯微結構的效應分析」,國立成功大學機械工程學系碩士學位論文,指導教授:李偉賢。
- 文獻 13: 楊仲霖,「電子束銲接製程參數對 690 合金與 304L 不銹鋼異種銲接之影響」,國立成功大學機械工程學系碩士學位論文,指導教授:李驊登。
- 文獻 14: 黃冠儒,「高溫純水中 82 合金與 304 低碳不銹鋼異材銲件之應力腐蝕研究」,國立清華大學工程與系統科學所材料組碩士學位論文,指導教授:蔡春鴻,葉宗洸。

3.4 腐蝕監測試驗

(1) 圓棒試片

(A) 試片特性

如前節所述，雖然同樣是 304L 不銹鋼材料，條鋼或棒材因加工影響表面硬度高，比板材更容易發生 SCC 之現象。本計畫研究因此選擇使用直徑 6mm 圓棒試片，進行腐蝕試驗。試驗用的鋼棒化學成分經分析後，其碳含量過高無法完全符合 304L 標準，經判定視同為 304 不銹鋼材料 (詳附件)。

圓棒試片在軸向連續取 12 點進行維氏硬度試驗，所獲最大硬度值為 374 Hv，而最小硬度值為 306 Hv。對照國內外過去相關實驗研究，上述圓棒試片應可用於觀察 SCC 現象與研究腐蝕偵測方法。本試驗研究的目的之一是要在非常短期間內觀察不銹鋼材料的腐蝕現象，而非模擬乾貯材料或環境的效應。

(B) 試驗方法

為加速腐蝕試驗之進行，本計畫研究採取兩種試驗方法，一為浸漬試驗 (immersed test)，另一為濕潤試驗或鹽霧試驗 (salt fog test)(如圖 3-5 所示)。

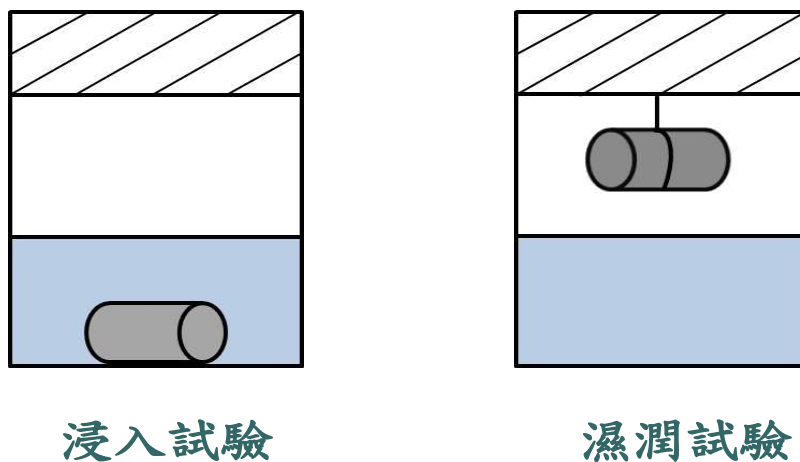


圖 3-5 圓棒試驗示意圖

具體而言，將圓棒試片直接浸漬於鹽液中或用綿線懸吊於鹽液上，再將裝液的玻璃瓶用鋁箔封口後，放入烘箱中以進行定溫定濕的腐蝕試驗。

(C) 試驗結果

本試驗研究的目的之一是要在非常短期間內觀察不銹鋼材料的腐蝕現象，而非模擬乾貯材料或環境的效應。為此，本計畫研究將圓棒試片放入 80°C 氯化鎂飽和水溶液中進行試驗。如圖 3-6，在試驗第 1 天後圓棒試片表面即出現孔蝕，之後黑褐色銹蝕箇處隨試驗天數而增加。重覆試驗後第 15 天，肉眼即可觀察到圓棒試片表面部分銹蝕箇處進一步擴展開來。但將試片表面銹蝕箇處以化學藥劑清除後，確認並無腐蝕裂隙或 SCC 之跡象。

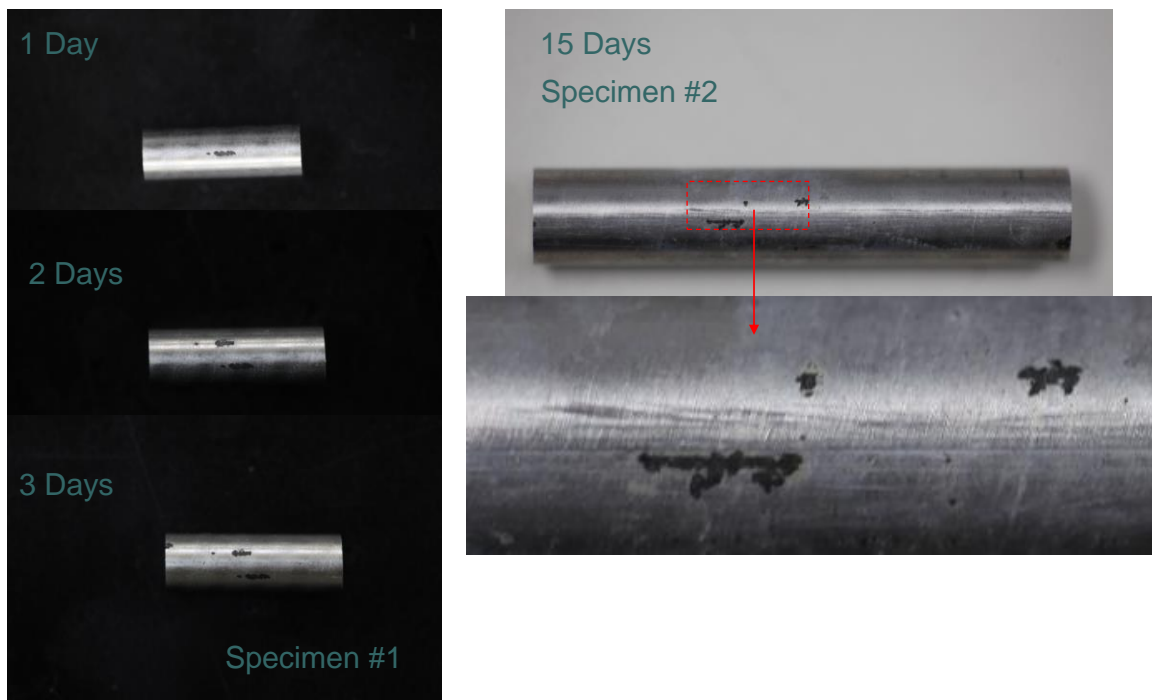


圖 3-6 不銹鋼圓棒試片浸漬試驗 (80°C, 氯化鎂飽和水溶液)

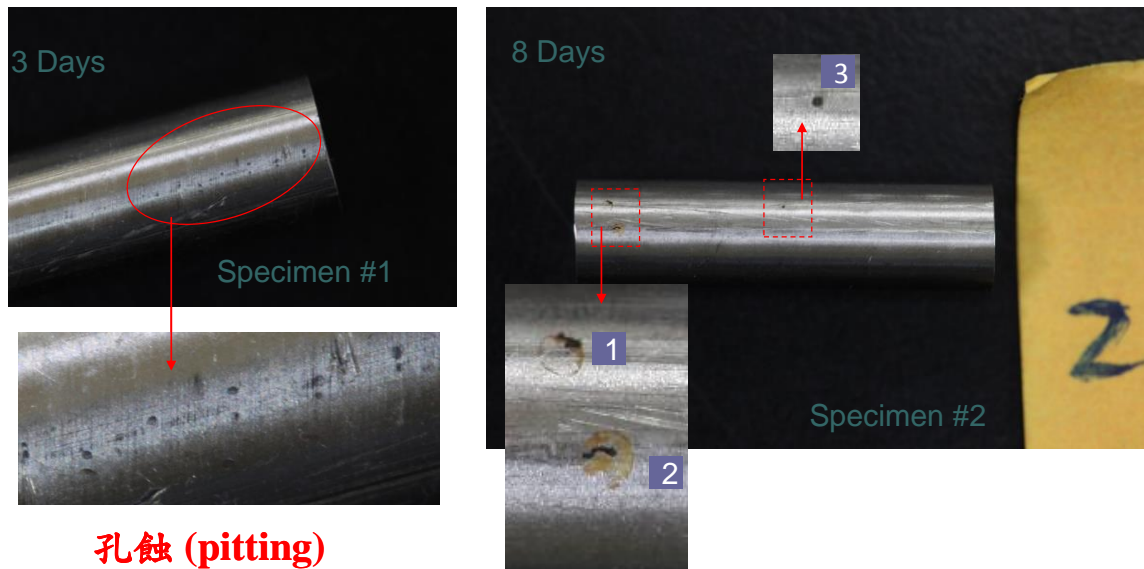


圖 3-7 不銹鋼圓棒試片濕潤試驗 (60°C, 氯化鎂飽和水溶液)

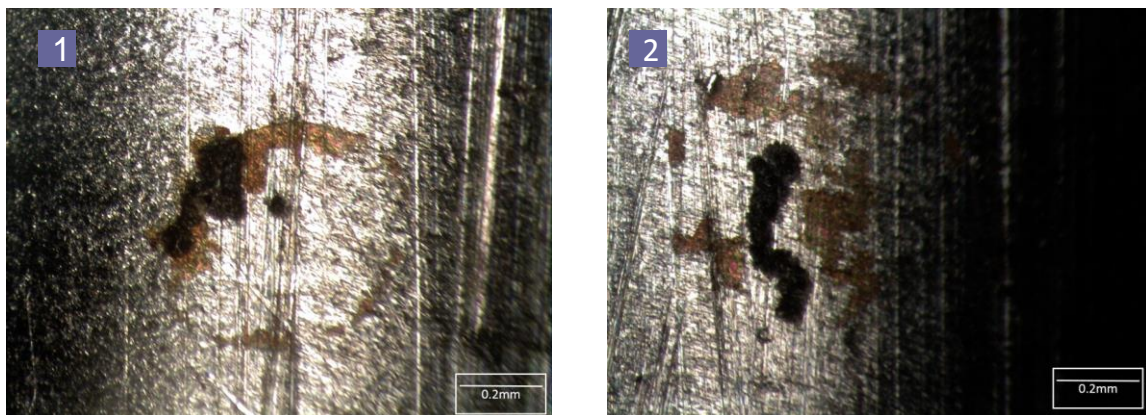


圖 3-8 經顯微鏡低倍率放大後的銹蝕箇處

另外，將圓棒試片懸吊於 60°C 氯化鎂飽和水溶液上進行濕潤試驗。如圖 3-7，試驗第 3 天後圓棒表面即出現孔蝕，之後銹蝕箇處與面積隨試驗天數增加。在試驗第 8 天，肉眼即可觀察到圓棒表面部分黃褐色銹蝕上，出現黑色銹斑。SCC 初始發生 (SCC initiation) 可由表面裂縫長度是否超過 100 μm (=0.1 mm) 來確認。如圖 3-8，銹蝕箇處在顯微鏡低倍率放大後確認並無腐蝕裂隙或 SCC 之跡象。

國內研究[3-11]指出，在 0.01M $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ +20 wt% NaCl (pH=8) 水溶液上升至 80°C 時，304 不銹鋼試片在慢應變拉伸試驗中有 SCC 現象。相同條件的試驗改成為 0.01M $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 溶液或 20 wt% NaCl 溶液，304 不銹鋼試片卻不會有任何 SCC 跡象。

參考上述研究，本計畫研究將圓棒試片放入 0.01M $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ +20 wt% NaCl (pH=8) 溶液中，進行 60°C 浸漬試驗。如圖 3-9，在試驗第 1 天後試片表面即出現孔蝕，且因硫化物作用部分銹蝕箇處呈黑褐色。之後行 60°C 濕潤試驗，如圖 3-10，試驗 7 天後見圓棒試片端部出現黃褐色銹蝕。為了比較，使用相同的溶液分別進行了 40°C，60°C，與 80°C 的濕潤試驗，最長試驗時間為 28 天。結果未見任何試片有腐蝕裂隙或 SCC 之跡象。



圖 3-9 不銹鋼圓棒試片浸漬試驗 (60°C, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ + NaCl 溶液)



圖 3-10 不銹鋼圓棒試片濕潤試驗 (60°C, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ + NaCl 溶液)

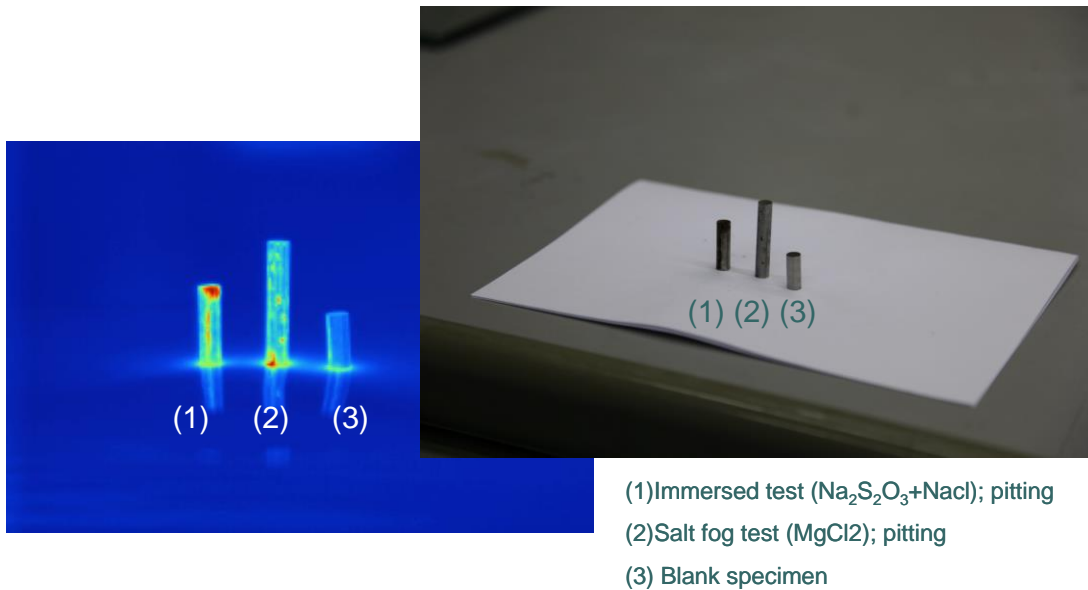


圖 3-11 不銹鋼圓棒試的紅外線熱攝儀影像與對照的實驗照片

如圖 3-11，使用紅外線熱攝儀量測圓棒試片表面熱輻射，有銹蝕箇處可以被特定出來。為了方便比較，經浸漬試驗與濕潤試驗的觀察試片兩個，與未試驗的對照試片一個，放在一起拍照與測定表面熱輻射。

(2) 板狀試片

(A) 試片特性

國內外乾貯設施不銹鋼密封筒通常是採用板厚 1/2 in (12.7 mm) (含) 以上的 304L 不銹鋼板經銲接加工而成。本計畫研究因此委託採購板厚 13 mm 的 304L 不銹鋼板，並加工製作成 5A 標準試片與 U 形試片，以進行試驗研究。除了銲接敏化，冷加工所致局部塑性變形，也是影響不銹鋼材料 SCC 的重要因素之一。本計畫研究針對此問題進行定性的試驗研究。

試驗用的鋼板化學成分經分析後，包括碳含量等主要組成元素符合 304L 不銹鋼材料標準 (詳附件)。另外，鋼板試片連續取 12 點進行維氏硬度試驗，所獲最大硬度值為 281 Hv，而

最小硬度值為 203 Hv。對照國內外過去相關實驗研究，上述鋼板試片應仍可用於觀察 SCC 現象與研究腐蝕偵測方法。

(B) 試驗方法

除了彎曲試片，本計畫研究將數片相同不銹鋼材料試片先用拉伸試驗機施予不同程度的塑性應變後，再放入鹽霧試驗機中進行腐蝕試驗。試驗所使用的鹽霧試驗機，是臺灣科技大學營建系前年新購研究設備。該試驗機具有較大的容量，可供一般土木或建築材料進行耐久性研究。另外，試驗溫度可以控制在 50°C-70°C 範圍，而相對濕度可以控制在 40% 以下，足以模擬乾貯設施 SCC 可能發生條件。

鋼板試片彎曲成 U 形時，試片內外兩側分別有壓應力與拉應力作用，同一個試片內每一個位置隨曲率變化而有不同程度的(塑性)應變。加工成形後應力被釋放，試片雖不再受力但塑性應變仍被保留於局部。相較之下，拉升試片是同一個試體內每個位置都有相同程度塑性應變。除了鹽霧試驗，本計畫研究也將部分彎曲試片，放置於高雄大學工學院大樓五樓露台，進行大氣暴露試驗、進行觀測。

(C) 試驗過程

依規範規定，板厚 13 mm 的 304L 不銹鋼板拉伸試驗可用 5A 標準試片，如圖 3-12。試片已經被施予 5 個不同程度塑性應變，另外加 1 個空白試片，每組試驗有 6 個試片。目前第一組試片已準備放入鹽霧試驗機進行試驗。之後的其他組試片也將依計畫持續進行試驗與觀察。

U 形試片被放置於高雄大學工學院大樓五樓露台，進行大氣暴露試驗，如圖 3-13。刻意將部分試片擺放成海鹽易沉積的情況下，試驗已超過兩個月後現在也仍僅見些許黃褐色銹痕，未有任何類似 SCC 跡象。

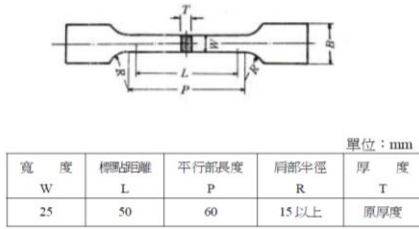


圖 3-12 試片規格與成品，拉升試驗機與鹽霧試驗機



圖 3-13 U 形試片大氣曝露試驗

四、SCC 監測與研究建議

4.1 序論

如文獻回顧所述，不銹鋼材料 SCC 發生機制與裂縫成長，在現階段仍無法完全由研究來說明或預測。特別是，用過核燃料乾式貯存設施不銹鋼密封筒所涉及的大氣環境下應力腐蝕劣化，各國對於此課題研究仍在規劃與持續進行中。儘管如此，過去針對其他廠房管線探討高溫液態下應力腐蝕劣化之基礎研究，以及後續的監測與維護計畫，雖然與乾式貯存的靜態環境不相同，但仍可提供參考。

綜合以上，本章首先引用日本原子力基盤安全機構 2004 年期中報告，說明不銹鋼材料 SCC 評估流程，評估項目與研究課題之對應關係。之後，介紹日本中央電力研究所 2013 年公佈的乾貯設施不銹鋼筒 SCC 兩階段監測與維護評估流程(修正草案)，並總結相關研究成果與後續研究課題。最後，參考國外研究結果與本土環境條件，初步探討國內乾貯設施不銹鋼筒監測與維護計畫(草案)，與本土化 SCC 長程研究規劃(建議)。

4.2 日本管線 SCC 監測與維護計畫

日本 2002 年有核能發電廠報告，在 BWR 反應爐壁體與 PLR 管線發現 316 不銹鋼材料 SCC 問題。因此，日本原子力機盤安全機構在 2003 年到 2007 年展開為期 5 年的調查與基礎研究 [4-1]。

日本的不銹鋼材料 SCC 監測與維護流程，評估項目與研究課題之對應關係可整理如圖 4-1。不銹鋼材料 SCC 監測與維護計畫，乃是根據定期檢查結果來實施。當檢查結果未達合格標準，則需繼續進行裂縫成長評估。綜合判斷，下次定期檢查前不銹鋼材料是否有破壞之虞。除了檢查合格標準與容許基準值，不銹鋼材料裂縫成長評估也都必須根據與實際設施條件一

致的基礎研究結果來決定。

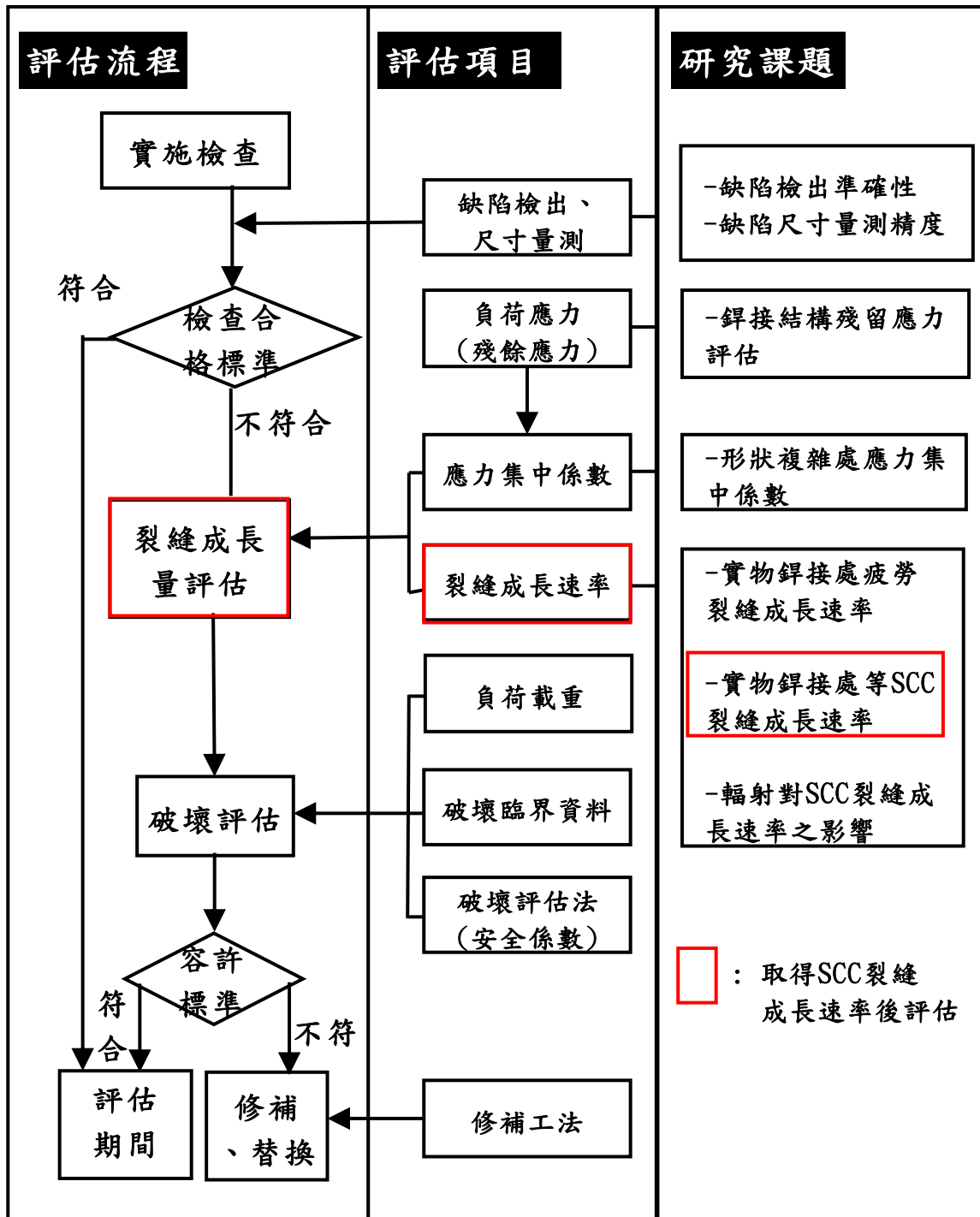


圖 4-1 日本不銹鋼材料 SCC 評估流程，評估項目與研究課題之對應關係 (取自文獻[4-1]，本計畫研究重新編譯整理)

表 4-1 日本不銹鋼材料分析與機械性質試驗之項目內容與目的
(取自文獻[4-1]，本計畫研究重新編譯整理)

區分	試驗項目/ 對應規範	試驗內容	試驗目的與結果應用
材料 分析 試驗	金屬結構觀察 JIS G0553 JIS G0571	<ul style="list-style-type: none"> - 母材，銲接金屬與熔融線附近斷面巨觀與微觀結構 (macro- and micro- structures) 觀察 - 金相攝影腐蝕液使用王水或草酸溶液 	<ul style="list-style-type: none"> - 從銲接接頭試體取下條狀試片進行巨觀與微觀結構觀察 - 根據試片結構無異常析出物，來確認接頭銲接健全性 - 提供 CT 試驗試片開槽導入位置之檢討用
	肥力鐵 (ferrite) 量測定 JIS Z3119	<ul style="list-style-type: none"> - 母材，銲接金屬與熔融線附近肥力鐵量測定 - 使用肥粒鐵分析儀 (ferrite scope) 	<ul style="list-style-type: none"> - 依母材，銲接金屬與熔融線附近肥力鐵量測定結果，來確認銲接施作正常 - 提供 CT 試驗檢討試片開槽導入位置 - 提供肥力鐵量影響銲接金屬與熔融線附近 SCC 進展速度之檢討用
	元素分析 JIS G0417	<ul style="list-style-type: none"> - 母材，銲接金屬與熔融線附近元素 (Fe, Ni, Cr, Mo, Si, P, S, Mn) 分析 	<ul style="list-style-type: none"> - 評估位置附近元素測定量與銲接後釋出量後，確認銲接施作正常 - 提供元素釋出量影響銲接金屬與熔融線附近 SCC 進展速度之檢討用
	敏化 (sensitization) 程度測定 JIS G0580	<ul style="list-style-type: none"> - 母材，銲接金屬與熔融線附近敏化程度，用電化學再活化 (Electrochemical Reactivation, EPR) 試驗測定 	<ul style="list-style-type: none"> - 根據 SCC 進展速度評估位置附近無銲接敏化，來確認健全性

表 4-1 日本不銹鋼材料分析與機械性質試驗之項目內容與目的
(續)(取自文獻[4-1]，本計畫研究重新編譯整理)

區分	試驗項目/ 對應規範	試驗內容	試驗目的與結果應用
機械性質測定	拉力試驗 JIS Z2201 (14A: RT) JIS G0567 (II-6: 高溫)	<ul style="list-style-type: none"> - 銲接金屬與熔融線附近機械性質以拉力試驗來評估。母材以鋼材檢查證明書 (miller sheet)來評估 - 評估項目含降伏強度 (0.2% offset yield strength)，拉力強度，伸長率與斷面縮率 	<ul style="list-style-type: none"> - 取得 SCC 進展速度評估位置附近室溫與 288°C 的機械性質資料後，確認銲接接合健全性
	硬度試驗 JIS Z2244 (維氏硬度 Vickers-hardness)	<ul style="list-style-type: none"> - 母材，銲接金屬與熔融線附近維氏硬度評估 - 實物損傷部位 (管線內部)及板厚中央部位開槽 (notch) 以評估硬度 	<ul style="list-style-type: none"> - 取得 SCC 進展速度評估位置附近維氏硬度分佈資料後，確認銲接接合健全性 - 細間距(試驗荷重 0.98N (100g)) 求得硬度分佈後，供 0.5t CT 試片預裂縫導入位置之參考用

如表 4.1，實際設施的不銹鋼材料(包含銲道與熱影響區)可以依據日本工業標準 JIS 等規定，進行材料分析與機械性質試驗，以作為後續基礎研究之依據。

4.3 日本乾貯設施 SCC 監測與維護評估流程(修正草案)

日本中央電力研究所 (CRIEPI) 針對用過核燃料乾貯設施不銹鋼筒，在 2011 年提出兩階段的 SCC 監測與維護評估流程 (草案)的構想 [4-2]。如圖 4.2，2013 年公佈的修訂版中，在監測與維護評估流程中新增了鹽分除去的部分[4-3]。但如第 2.3 節所述，有關鹽分去除仍是 CRIEPI 所提出的研發構想，並未要求業者必須採用。

具體而言，在 SCC 監測與維護計畫實行前，要先對乾貯設施(所在環境與除熱條件)，構件位置(不銹鋼筒、溫度記錄與使用材料)，與銲接殘餘應力消除與否等，進行瞭解與評估。

計畫第 1 階段旨在監測與預防 SCC 發生。當不銹鋼筒表面附著的鹽分超過臨界值，即清除鋼筒表面的鹽分。若鋼筒表面的鹽分無法清除、降到臨界值以下，即進入第 2 階段。

第 2 階段則是監測與管理 SCC 裂縫成長進度。綜合裂縫量測與成長預測之結果，若經判斷下次定期檢查前不銹鋼鋼板厚度可能因 SCC 裂縫減少到臨界值以下，則進行修補或撤除。

圖 4-3 整理不銹鋼材料 SCC 初始發生時間影響因子之交互關係圖。配合監測與維護計畫(草案)之發展，日本 CRIEPI 過去幾年已陸續試驗求得 SCC 發生所需氯離子 (Cl^-) 臨界濃度，並實機試驗再確認 SCC 發生後裂縫成長速率，以及發展鹽分去除裝置。除持續檢討與改進銲道超音波檢測技術等，以對裂縫大小與深度進行監測，CRIEPI 最近更著手開發新的光學儀器來量測不銹鋼筒表面附著的氯鹽含量(詳第二章)。

上述方案是以氯離子 (Cl^-) 濃度作為評估的基礎，國內未來研究可以納入沿海工業污染物(例如 SO_4^{2-})相關影響 [4-4]。另外，日本 CRIEPI 專家曾於 102 年 10 月 28 日訪台，就 SCC 監測與維護計畫提出說明，日本管制單位沒有要求業者進行全尺寸的監測，而鹽分除去裝置目前也仍在研究階段，並沒有實際應用於任何乾貯設施[4-5]。就臺灣乾貯設施的特性，國內業

者也可以參照 CRIEPI 研究，探討鹽分去除之可行性。

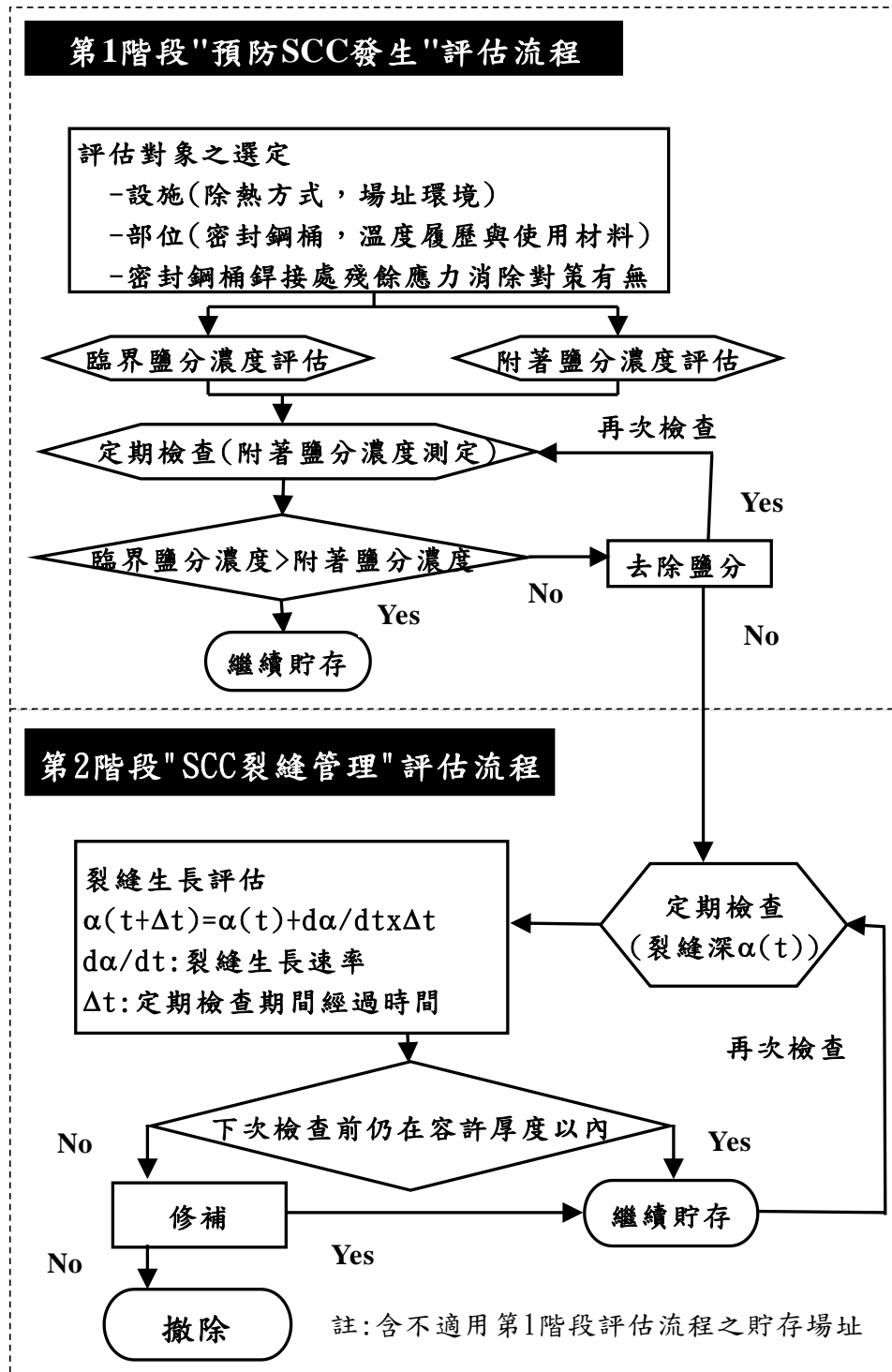


圖 4-2 日本提議乾貯設施不銹鋼筒 SCC 兩階段監測與維護評估流程(修正草案)(取自文獻[4-3], 本計畫研究重新編譯整理)

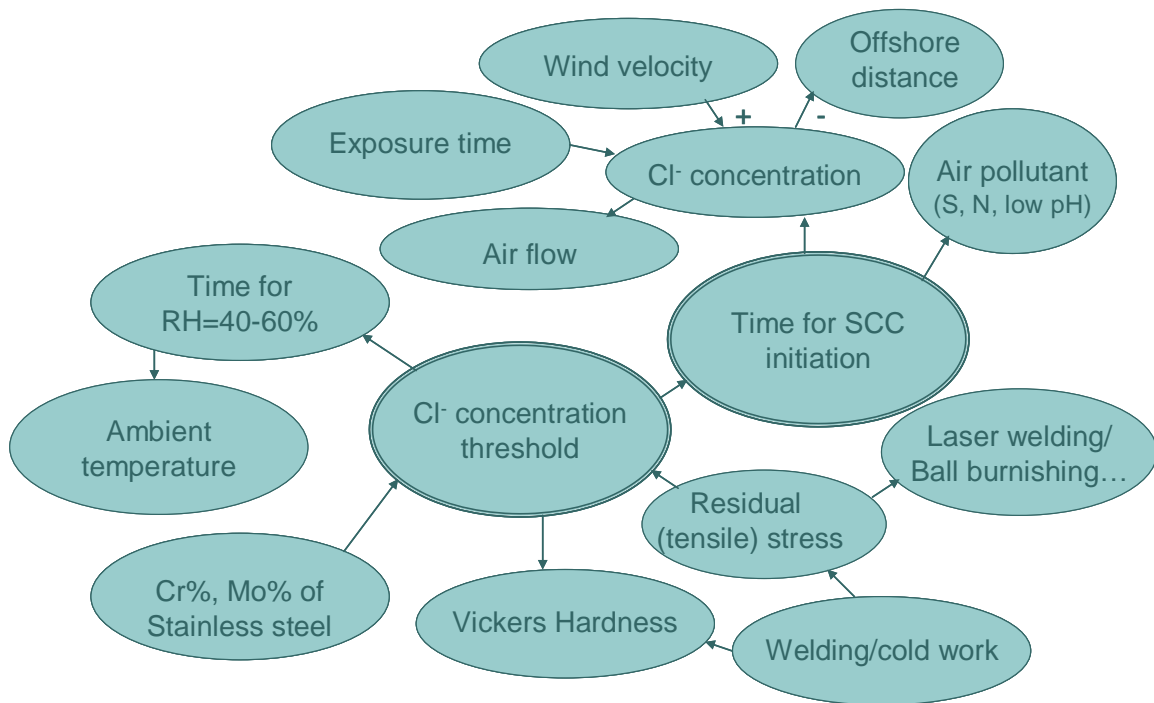


圖 4-3 不銹鋼材料 SCC 初使發生時間影響因子之交互關係圖

4.4 國內乾貯設施 SCC 監測與維護計畫(草案)

台電公司核能電廠商業運轉至今已逾 30 年，更換下來之用過核子燃料均暫存於用過燃料池，由於用過燃料池貯存容量設計不足存放 40 年運轉之用過核子燃料，因此台電公司規劃於核電廠內興建乾式貯存設施。

本計畫研究彙整國外 SCC 研究與問題對策，並參照臺灣環境條件與材料特性後，針對國內乾貯設施環境監測與維護計畫提出以下具體建議：

- ◆ 針對乾貯設施不銹鋼筒應力腐蝕劣化環境監測，日本 CRIEPI(2013)所提出的計畫可供參考，後續研究亦可納

入沿海工業污染物 SO_4^{2-} 相關影響。計畫所需資料除參考 ASME、日本原子力基盤機構(2004)報告與日本工業標準 JIS，來試驗取得。此外，SCC環境監測控制點應根據熱流分析結果，特別是溫度空間分佈與隨時間變化，來妥善安排。

- ◆ 用過核子燃料乾貯密封不銹鋼筒監測與維護計畫書規劃至少應包含下列內容：(1)不銹鋼銲件試體 (設計、製造及取樣材料來源與基本測試參考數據報告)，(2)應力腐蝕劣化影響與鋼筒使用壽限評估，(3)監測時程規劃，(4)監測方法與合格判定標準，(5)判定不合格後處理，(6)中長程研發議題規劃等。
- ◆ 中程研發議題規劃，建議內容著重於「沿海大氣環境不銹鋼氯鹽應力腐蝕劣化」問題研究，研究參數涵蓋(1)溫度、溼度、大氣含鹽量等環境因素及(2)鋼材、冷作加工、銲接殘應力、敏化等材料因素。相關研究成果應可應用於「密封鋼筒環境劣化監測計畫」監測樣品檢測結果評估，及鋼筒壽限分析等。

經國內相關單位與學者專家討論後，本研究計畫成果已被反映於「用過核子燃料乾式貯存設施維護與監測計畫導則(草案)」[4-6]，並先後徵詢美國 NRC 專家與日本 CRIEPI 專家等意見，進行修改。

條文的具體內容與根據本計畫研究成果所作說明，逐項整理對照如下：

用過核子燃料乾式貯存設施維護與監測計畫導則(草案)

壹、依據

為強化用過核子燃料乾式貯存設施的安全，原能會於101年12月要求設施經營者應研提乾貯設施維護與監測計畫，併同運轉執照申請文件送審，以強化貯存安全。維護作業部分，應涵蓋混凝土護箱、貯存基座、傳送護箱、輔助設備及再取出設備等項目；監測作業方面，應涵蓋乾貯護箱溫度、環境輻射、土石流、邊坡穩定、保安及密封鋼筒腐蝕劣化等監測措施。另因考量國內乾貯設施位於沿海地區，應加強密封鋼筒腐蝕劣化之監測，以確保乾貯設施之長期安全。

貳、目的

本導則旨在提供內容格式，供乾式貯存設施經營者撰寫「用過核子燃料乾式貯存設施維護與監測計畫」之依循。依本導則所建議之內容撰寫者，將有助於資料準備之完整性。惟本導則並非法規要求，設施經營者亦可參考其他國家發展經驗，增修訂「維護與監測計畫」之內容。

參、維護與監測計畫內容概要

「用過核子燃料乾式貯存設施維護與監測計畫」內容概要詳如附錄。

肆、修改

本導則如有未盡事宜者，得視需要修訂之。

[說明] 根據國內乾貯設施安全分析報告，正常貯存狀態下乾貯

設施不銹鋼密封鋼筒表面初期溫度超過 120°C [4-7]。海鹽主要成分 NaCl 潮解需要相對溼度約 75%。也就是說，密封鋼筒表面溫度要降到室溫左右，NaCl 才會潮解、使不銹鋼材料腐蝕甚至 SCC。根據國內外研究綜合判斷，上述環境條件在臺灣乾貯設施目前所考慮的使用期間內應該不會發生。另外，美日等國目前也僅建議對不銹鋼材料 SCC 課題進行研究，並未實際採取任何管制措施。考量臺灣乾貯設施位於沿海地區，國內主管機關訂定本導則(草案)協助業者加強密封鋼筒腐蝕劣化監測作業，以確保臺灣乾貯設施之長期安全。

「用過核子燃料乾式貯存設施維護與監測計畫」內容概要

參、強化乾式貯存設施密封鋼筒應力腐蝕劣化監測之研究發展 (如附件)

[說明] 用過核燃料乾式貯存設施不銹鋼密封筒所涉及的大氣環境下應力腐蝕劣化，各國對於此課題研究仍在規劃與持續進行中。本計畫研究蒐集與整理國內外 SCC 相關研究資料，根據研究結果所作建議經國內相關單位學者專家討論後，將目前已可能落實於乾貯設施安全管制作業者列為調查分析項目，其他則列為中長期研究發展課題。

科學研究一日千里。國內乾貯設施安全管制作業，也會隨著未來乾式貯存設施密封鋼筒應力腐蝕劣化監測研究之發展，而日趨完善。為確保業者自主研究有更多發揮的空間，也為國內乾貯設施安全管制作業能日趨完善，「強化乾式貯存設施密封鋼筒應力腐蝕劣化監測之研究發展」相關條文因此僅列為附件以供參考。

附件

乾式貯存設施強化密封鋼筒應力腐蝕劣化監測之研究發展

乾式貯存設施密封鋼筒應力腐蝕劣化監測強化措施，得參考本附件所列項目、日本電力中央研究所(CRIEPI)、美國電力研究所(EPRI)之研究發展項目，並充分考量國內乾貯設施環境特性辦理。

下述各項應力腐蝕劣化因子資料之調查方式，可藉由貯存護箱監測或實體模擬分析等方式為之。應力腐蝕劣化監測及評估技術之研究發展，除台電公司自行規劃執行外，可邀請或參與國際合作研究計畫達成。

[說明] 在特定環境條件(溫度、相對溼度等)及材料條件(材料選擇、應力狀態等)下，且經過長時間的鹽分沉積後，不銹鋼材料可能在表面產生應力腐蝕劣化(stress corrosion cracking, SCC)之現象。在 2004 年與美國例行合作會議中，日本原子力保安院(Nuclear and Industrial Safety Agency, NISA) 與電力中央研究所(Central Research Institute of Electric Power Industry, CRIEPI)即建議，針對沿海地區乾式貯存設施應進一步研究與探討 SCC 問題與對策。目前，日美等國已將 SCC 議題納入乾貯設施長期營運計畫檢討中。

一、乾式貯存場應力腐蝕劣化機制環境因子資料之調查分析

1. 乾式貯存場空氣鹽分濃度監測資料
2. 乾式貯存場附近工業污染物空氣濃度資料蒐集
3. 乾式貯存場環境溫度資料蒐集
4. 乾式貯存場環境濕度資料蒐集

[說明] 不銹鋼材料 SCC 發生所需鹽分濃度，與環境溫度與溼度有關。自然環境下絕對溼度最大值為 30g/m^3 ，此相當於空氣在 30°C 相對溼度(RH)100%時所含的水量。國內近年氣象觀測資料經換算後乾貯設施附近絕對溼度最大值約 27g/m^3 。日本 CRIEPI 實驗發現，海鹽主要成分 MgCl_2 潮解所需相對溼度較低 (RH~ 35%)，對不銹鋼材料 SCC 發生有決定性的影響。日本 CRIEPI 在絕對溼度最大值為 30g/m^3 條件下實驗，結果發現在 50°C 相對溼度(RH) 35%時，304L 不銹鋼材料 SCC 發生所需氯離子濃度最小、約 0.8g/m^3 。推測原因，實驗溼度(RH) 與 MgCl_2 潮解所需溼度接近、故 SCC 反應顯著。同實驗也顯示， 80°C 相對溼度(RH) 15%、低於 MgCl_2 潮解溼度時，304L 不銹鋼材料 SCC 反應仍會進行。另外，過去的文獻與美國 NRC 最近的報告均指出，工業污染物可能影響不銹鋼材料 SCC 發生的時間，故應將相關影響納入研究與評估。

二、不銹鋼密封鋼筒材料應力腐蝕劣化因子資料之調查分析

1. 不銹鋼密封鋼筒材料(母材，銲道與熱影響區)基本資料
2. 不銹鋼密封鋼筒銲道應力基本資料(含試驗方法)

- 3.不銹鋼密封鋼筒外表面溫度分布評估資料
- 4.乾貯場環境鹽分監測，推估鋼筒表面沉積
- 5.乾貯場環境溼度與密封鋼筒外表面濕度關聯性探討
- 6.不銹鋼密封鋼筒應力腐蝕裂隙之監測方法研究(含環境試片監測結果的分析比對)

[說明] 乾貯設施在設計與製作過程中，應規劃取得與實際設施相同條件的不銹鋼銲件試片(包含母材，銲道與熱影響區)，並依 ASME 進行材料分析與機械性質試驗，以確保材料、銲材、銲接程序之合理性。針對 SCC 問題，可以另外參考日本原子力基盤安全機構 2004 年報告與日本工業標準 JIS 規定，進行相關試驗。金相觀察可找出熱影響區位置，以作為 CT 試片 (compact tension test) 開槽位置，並用以求得不銹鋼銲件 SCC 裂縫成長速率。另外，母材、銲道與熱影響之肥力鐵 (ferrite) 含量、成分元素、敏化程度與微硬度，可用來評估銲接、殘留應力與加工之影響。

除(1)裂縫發生(SCC initiation) 所需最小氯離子濃度，加速腐蝕試驗研究也可以求得(2) 不銹鋼材料(2) 初始裂縫深度，與(3)裂縫成長速率。SCC 影響因子包括：環境，材料與應力。故未來進行相關研究時，可考慮沿時間軸探討 SCC 各影響因子之變化，以進一步分析與評估沿海不銹鋼設施之長期健全性。上述結果，也將有助於不銹鋼設施在使用期間不同階段擬訂具體的監測目標與對應的維護方法。

三、密封鋼筒不銹鋼材料應力腐蝕劣化監測及評估技術之研究發展

1. 國際乾式貯存密封鋼筒應力腐蝕劣化研究資訊之蒐集分析
2. 乾式貯存密封鋼筒材料發生應力腐蝕劣化閥值條件之研究
3. 密封鋼筒材料應力腐蝕劣化現場檢查技術之發展
4. 乾式貯存密封鋼筒材料應力腐蝕劣化發展(長度、深度)評估之研究
5. 乾式貯存密封鋼筒材料腐蝕劣化評估及乾式貯存密封鋼筒續用可靠度評估(或殘餘壽限預估)
6. 不銹鋼材料應力腐蝕劣化減緩方法之研究

[說明]應力腐蝕劣化(SCC)分成兩個階段，(1)裂縫發生 (SCC initiation) 與(2)成長 (crack propagation)。因此，沿海不銹鋼設施環境監測與維護計畫需至少含蓋以上兩個部分。日本 CRIEPI 研究是以不銹鋼裂縫深度超過 $50 \mu\text{m}$ (0.05mm)，對應表面裂縫長度大於 $100 \mu\text{m}$ (0.1mm)作為 SCC 發生判定之標準。隨著 SCC 反應持續進行，不銹鋼表面裂縫會出現所謂的「二次裂縫」。

針對 SCC 裂縫偵測，仍需持續研究或是開發新的非破壞檢測技術。目前美日各國各種方法之研究包括：渦電流法 (Eddy Current Technique) 與陣列式超音波檢測 (Phased Array Ultrasonic Testing Technique)。另外，日本 CRIEPI 提議以不銹鋼筒表面氯鹽附著量，間接地監控 SCC 裂縫發生，後續研究探討加裝濾氣裝置減鹽概念以及雷射光學量測氯鹽之可能性。

綜合以上，SCC 發生臨界條件之研究與評估，應採取與實際設施條件一致的不銹鋼材料試片，並彙整本土環

境條件與乾貯設施熱流分析結果，以現地觀測或模擬試驗來進行。相關的課題包括：(a) 氯鹽含量與鋼筒表面鹽附著量關聯性，(b) 密封不銹鋼筒表面氯鹽附著量及發生氯鹽應力腐蝕所需時間，及(c) 去除密封不銹鋼筒表面鹽分之必要性與可行性。

四、乾式貯存設施十年再評估之密封鋼筒應力腐蝕劣化檢查及評估規劃

4.5 本土化 SCC 長程研究規劃(建議)

目前美國與日本針對乾式貯存應力腐蝕劣化的議題，核能主管機關並沒有法令規定要求業者必須採行的強制措施，但美國 EPRI 與日本 CRIEPI 都持續進行相關的研究。借鏡美日等國經驗，建議乾貯設施申照單位(台電公司)可以執行長期的研究發展，其研究發展項目內容可考量涵蓋環境監測技術、鹽分去除技術、以及模擬實體試驗等。

影響不銹鋼材料 SCC 的因子很多，包括環境條件(例如：溫度，溼度與鹽分等)，與材料特性(例如：表面處理、殘留應力、與局部塑性變形等)。因此，環境監測應該是乾貯設施 SCC 問題對策中最務實可靠的作法。環境監測必須要有即時性，才能迅速反應結果於乾貯設施之維護管理作業。從美國經驗來看，經過十年以上時間後不銹鋼密封鋼筒表面會有很多類似灰塵的沉積物，雖然取樣實驗後證實不銹鋼材料並無 SCC 之跡象。但因應環境監測即時性之要求，沉積物和鹽分一樣應該被考慮去除、才不會影響乾貯設施的監測作業。

針對金屬護箱，日本 CRIEPI 過去曾進行長達 20 年實尺寸乾貯設施現地監測研究。針對混凝土護箱，CRIEPI 目前計畫於 2017 年後，配合日本業界作業同步進行現地研究[4-5]。借鏡日

本的經驗，國內未來可以對乾貯設施監測所需方法或儀器與控制點等進行研究。為妥善安排未來 SCC 環境監測控制點，宜重新檢視熱流分析結果，特別是溫度空間分佈與隨時間變化。日本 CRIEPI 實驗結果已顯示，密封鋼筒表面溫度 50°C 相對濕度 35% 時，SCC 反應可能最劇烈。國內今後的研究可以進一步實驗，找出臺灣本土環境下 SCC 最可能發生的溫度與濕度等條件。

五、結論

5.1 成果摘要

本計畫研究首先蒐集與整理包括美國及日本等國外對於不銹鋼材料應力腐蝕劣化的研究發展，並研析國外對於應力腐蝕劣化研究可能對策。之後，彙整國內可能發生應力腐蝕劣化的本土環境條件及材料特性後，規劃進行國內應力腐蝕劣化環境分析與加速腐蝕試驗。根據以上成果，提出國內乾貯設施不銹鋼筒監測與維護計畫(草案)，與提出本土化應力腐蝕劣化長程研究規劃(建議)。

本計畫研究成果經國內相關單位與學者專家討論後，已被反映於「用過核子燃料乾式貯存設施營運維護與監測計畫導則(草案)」，並徵詢美國 NRC 專家與日本 CRIEPI 專家之意見，來進行修改。本計畫研究所獲主要結果與建議如下，可以提供台電公司提出用過核子燃料乾式貯存設施營運維護與監測計畫的參考。

- (1) 不銹鋼材料 SCC 發生機制與裂縫成長，在現階段仍無法完全由研究來說明或預測。也因此，參考日本原子力基盤安全機構 2004 年期中報告，國內相關單位已從實際設施採樣，準備進行材料分析與機械性質分析等基礎研究，並設計與製作與實際條件相同的不銹鋼材料（包含鐸道與熱影響區）試片，進行後續問題對策研究。
- (2) 不銹鋼材料 SCC 問題對策可以從材料，應力與環境等不同面向來探討。美國 104 座核電廠中已有 60 座在廠內興建乾貯設施，而乾貯設施的主要組件包括 304L 不銹鋼材料製造的密封鋼筒及外部混凝土護箱。美國已將 SCC 評估納入乾貯設施延長管理計畫(最長達 120 年)。日本近年也開始研究採用上述乾貯設施之可能性，並計畫於 2017 年後配合業界作業同步進行實尺寸乾貯設施現地監測研究。
- (3) 日本中央電力研究所已根據實際密封鋼筒腐蝕進行加速腐蝕試驗，研究 SCC 裂縫成長評估模式，並綜合判斷 SCC

問題不會影響乾貯設施長期結構完整性。另外，CRIEPI (2013)也公佈兩階段 SCC 監測與維護評估流程(修正草案)，以監測海鹽沉積量監視 SCC 發生，並加入鹽分去除部分來避免 SCC 發生的概念。但是上述僅為 CRIEPI 的研究構想，目前日本並未要求乾貯設備須裝設鹽分去除設備。SCC 發生後則依裂縫成長評估結果，來判斷設施是否須進行後續作為。

- (4) 日本 CRIEPI (2013)公佈的兩階段 SCC 監測與維護評估流程(修正草案)，可供參考。除氯離子 (Cl⁻) 濃度，國內未來研究可納入沿海工業污染物(例如 SO₄²⁻)相關影響。

5.2 研究展望

根據國內乾貯設施安全分析報告，正常貯存狀態下乾貯設施不銹鋼密封鋼筒表面初期溫度超過 120°C。海鹽主要成分 NaCl 潮解需要相對溼度約 75%。也就是說，密封鋼筒表面溫度要降到室溫左右，NaCl 才會潮解、使不銹鋼材料腐蝕甚至 SCC。綜合判斷，上述條件在乾貯設施目前所考慮的使用期間內應該不會發生。因此，美日等國目前也僅建議對不銹鋼材料 SCC 課題進行研究，並未實際採取任何管制措施。考量臺灣乾貯設施位於沿海地區，國內主管機關訂定「用過核子燃料乾式貯存設施營運維護與監測計畫導則(草案)」，本導則(草案)主要可提供內容格式，供乾式貯存設施經營者台電公司撰擬「用過核子燃料乾式貯存設施維護與監測計畫」之依循。依本導則所建議之內容撰寫者，將有助於資料準備之完整性。惟本導則並非法規要求，設施經營者亦可參考其他國家發展經驗，增修訂「維護與監測計畫」之內容。

用過核燃料乾式貯存設施不銹鋼密封筒所涉及的大氣環境下應力腐蝕劣化，各國對於此課題研究仍在規劃與持續進行中。本計畫研究建議經國內相關單位學者專家討論後，將有助於提供台電公司未來提出「用過核燃料乾式貯存設施維護與監

測計畫」之內容的方向。科學研究一日千里。國內乾貯設施安全管制作業也會隨著未來乾式貯存設施密封鋼筒應力腐蝕劣化監測研究之發展，而日趨完善。也為確保業者自主研究有更多發揮的空間，「強化乾式貯存設施密封鋼筒應力腐蝕劣化監測之研究發展」相關條文因此僅列為附件以供參考。

影響不銹鋼材料 SCC 的因子很多，包括環境條件(例如：溫度，溼度與鹽分等)，與材料特性(例如：表面處理、殘留應力、與局部塑性變形等)。因此，環境監測應該是乾貯設施 SCC 問題對策中最務實可靠的作法。環境監測必須要有即時性，才能迅速反應結果於乾貯設施之維護管理作業。從美國經驗來看，經過十年以上時間後不銹鋼密封鋼筒表面會有很多類似灰塵的沉積物，雖然取樣實驗後證實不銹鋼材料僅部分銹蝕無 SCC 之跡象，但因應環境監測即時性之要求，這些沉積物和鹽分一樣，應該被考慮去除，才不會影響乾貯設施的監測與維護管理作業。因此台電公司在乾式貯存設施營運後的十年再評估之密封鋼筒應力腐蝕劣化檢查及評估規劃，可以考量納入相關的措施。

針對金屬護箱，日本 CRIEPI 過去曾進行長達 20 年實尺寸乾貯設施現地監測研究。針對混凝土護箱，CRIEPI 目前計畫於 2017 年之後，配合日本業界的實務作業，將考慮進行同步進行現地研究。借鏡日本的經驗，國內未來可以對乾貯設施現地監測所需方法或儀器等進行研究。日本 CRIEPI 實驗結果顯示，密封鋼筒表面溫度 50°C 相對濕度 35% 時，SCC 反應可能性較高。台電公司未來針對密封鋼筒不銹鋼材料應力腐蝕劣化監測及評估技術之研究發展，也可以考量探討臺灣本土環境下 SCC 最可能發生的溫度與濕度等條件。

參考文獻

- [1-1] 臺灣電力公司(2008), 核一廠用過核子燃料乾式貯存設施安全分析報告第六章第五節「密封評估」(三) 密封監測.
- [1-2] U.S. NRC(2012), NRC Information Notice 2012-20: Potential Chloride-Induced Stress Corrosion Cracking of Austenitic Stainless Steel and Maintenance of Dry Cask Storage System Canisters, Washington D.C.
- [1-3] G. Oberson (2013), Stress Corrosion Cracking of Spent Fuel Dry Storage Canisters, FCMA Seminar on Spent Fuel Initial Loading, Taipei.
- [1-4] 張惠雲與邱建國(2013), 「不銹鋼材料應力腐蝕劣化機制研析與對策研究」計畫書
- [2-1] Waldrop et al. (2013). Used fuel dry storage stainless canister stress corrosion cracking susceptibility: R&D map leading to identification of canister potentially susceptible to stress corrosion cracking, EPRI Report (No. ML13042A140).
- [2-2] M. Goto, K. Shirai. (2012). Current status of research on stress corrosion cracking of stainless steel canister for concrete cask, Extended Storage Collaboration Program (ESCP) Meeting, Florida, USA.
- [2-3] Shirai et al. (2011). Study on Interim Storage of Spent Nuclear Fuel by Concrete Cask for Practical Use –Feasibility Study on Prevention of Stress Corrosion Cracking for Type 304L Stainless Steel Canister, CRIEPI Report (No. N10035) (in Japanese)
- [2-4] He et al. (2013). Scoping study of effect of salts in non-coastal particulate matter on stress corrosion cracking of type 304 stainless steel, EPRI Report (No. ML13018A120)
- [2-5] Greg Oberson (2013), Stress Corrosion Cracking of Spent Nuclear Fuel Dry Storage Canisters, FCMA-NRC Workshop
- [2-6] Mayuzumi et al. (2002). Chloride stress corrosion cracking of Type 304 and 304L stainless steels in air, CRIEPI Report (No. T01042)
- [2-7] Gordon et al. (2006). Effects of marine environments on stress corrosion cracking of austenitic stainless steels, EPRI Report (No. 1011820)
- [2-8] D. G. Kolman (2001). A review of the potential environmentally assisted failure mechanisms of austenitic stainless steel storage containers housing stabilized radioactive compounds, Corrosion Science 43(1), 99-125
- [2-9] Tani et al (2012), Evaluation and Verification of Long Term Reliability of the Spent Fuel Dry Storage Cask- SCC Evaluation Test of Multi-purpose Canister, FCMA-CRIEPI Workshop
- [2-10] Turnbull et al. (2011). Sensitivity of stress corrosion cracking of stainless steel to surface machining and grinding procedure, Corrosion Science 53(10), 3398-3415
- [2-11] D.R. Johns, K. Shemwell. (1997). The crevice corrosion and stress corrosion cracking resistance of austenitic and duplex stainless steel fasteners, Corrosion Science 39(3), 473–481
- [2-12] Shirai et al. (2008). Research on spent fuel storage and transportation in CRIEPI (Part 2 concrete cask storage), Proceedings of the 16th Pacific Basin Nuclear Conference
- [2-13] Dean et al. (2008). Numerical and experimental investigations on welding residual stress in multi-pass butt-welded austenitic stainless steel pipe, Computational

- Materials Science 42(2), 234–244
- [2-14] Huang et al (2010) Electromagnetic modeling of stress corrosion cracking in Inconel welds, E-Journal of Advanced Maintenance, 168-180
- [2-15] 独立行政法人原子力安全基盤機構 (2004) 原子力用ステンレス鋼の耐応力腐食割れ実証に関する報告書
- [2-16] M. Wataru (2013). Roadmap development for SCC monitoring program on spent fuel dry storage in Japan. FCMA-CRIEPI workshop on Spent Fuel Dry Storage and Radwaste Disposal
- [2-17] 明石正恒(1998). ステンレス鋼の湿潤大気応力腐食割れ研究の現状と課題, 材料のパフォーマンス研究会講演
- [2-18] Effects of Marine Environments on Stress Corrosion Cracking of Austenitic Stainless Steels, EPRI, Palo Alto, CA : 2005. 1011820.
- [2-19] García et al. (2001). Effects of prior cold work and sensitization heat treatment on chloride stress corrosion cracking in type 304 stainless steels, Corrosion Science 43(8), 1519-1539
- [2-20] 日本原子力技術協會(2009), JANTI-VIP-10, Version 1 (in Japanese).
- [2-21] 林育如(2010), 「304L 不銹鋼軋延組織之氫脆特性研究」, 國立臺灣海洋大學材料工程研究所碩士學位論文, 指導教授: 蔡履文。
- [2-22] 李婉如(2012), 「304L 不銹鋼軋延組織之鹽霧應力腐蝕特性研究」, 國立臺灣海洋大學材料工程研究所碩士學位論文, 指導教授: 蔡履文。
- [2-23] 洪聖凱(2010), 「不銹鋼鐸件沿晶應力腐蝕劣化之雷射表面重熔修補技術研究」, 國立成功大學機械博士班, 指導教授: 李驊登
- [2-24] Wataru et al. (2007). Evaluation on the atmospheric sea salt concentration for practical use of the dry storage facility using the concrete cask, CRIEPI Report (Rep. No. N06022).
- [2-25] M. Wataru and T. Saegusa.(2010). Evaluation of the salt deposition on the canister surface of concrete cask - Measurement test of the salt deposition in the laboratory and the field - , CRIEPI Report (Rep. No. N09023).
- [2-26] H. Tageta and T. Saegusa.(2011).Development of Salt Particle Collection Device for Preventing SCC on Canister (Part 2)- Applicability Evaluation for Salt Particle Collection Device-, CRIEPI Report (Rep. No. N11044).
- [2-27] Eto et al. (2012). Development of measurement technology of chlorine attached on canister using laser -Application of LIBS using collinear geometry- , CRIEPI Report (Rep. No. H11020).
- [2-28] Eto et al. (2013). Development of Measurement Technology of Chlorine Attached on Canister Using Laser , CRIEPI Report (Rep. No. H12020).
- [2-29] Hirasawa et al. (2012). Application of Ultrasonic Inspection Technique for Crack Depth Sizing on Nickel Based Alloy Weld - Part3: Establishment of UT Procedure for Crack Depth Sizing by Phased Array UT - , CRIEPI Report (Rep. No. Q11011).
- [3-1] 交通部中央氣象局網頁<<http://www.cwb.gov.tw/V7/climate/30day/30day.htm>>
- [3-2] Tani et al (2012), Evaluation and Verification of Long Term Reliability of the Spent Fuel Dry Storage Cask- SCC Evaluation Test of Multi-purpose Canister, FCMA-CRIEPI Workshop

- [3-3] Greg Oberson (2013), Stress Corrosion Cracking of Spent Nuclear Fuel Dry Storage Canisters, FCMA Seminar on Spent Fuel Initial Loading, Taipei.
- [3-4] 明石正恒(1998), ステンレスの湿潤大気応力腐食割れ研究の現状と課題, 東京工業大學演講資料
- [3-5] 交通部運輸研究所港灣技術研究中心「臺灣地區大氣腐蝕劣化因子調查研究」網頁 < <http://163.29.73.11:8080/introduction.asp> >
- [3-6] 楊錫賢等(2000), 沿海地區大氣微粒中陰陽離子特性分析, 國科會研究計畫報告 (計畫編號: NSC89-2211-E-324-021)
- [3-7] Wataru et al. (2007). Evaluation on the atmospheric sea salt concentration for practical use of the dry storage facility using the concrete cask, CRIEPI Report (Rep. No. N06022).
- [3-8] M. Wataru and T. Saegusa.(2010). Evaluation of the salt deposition on the canister surface of concrete cask - Measurement test of the salt deposition in the laboratory and the field - , CRIEPI Report (Rep. No. N09023).
- [3-9] Shirai et al. (2011). Study on Interim Storage of Spent Nuclear Fuel by Concrete Cask for Practical Use –Feasibility Study on Prevention of Stress Corrosion Cracking for Type 304L Stainless Steel Canister, CRIEPI Report (No. N10035) (in Japanese)
- [3-10] 日本原子力技術協會(2009). JANTI-VIP-10, Version 1 (in Japanese).
- [3-11] 林志宏(1995). 硫代硫酸根對不銹鋼於氯化鈉溶液中之孔蝕及應力腐蝕破裂影響研究, 國立成功大學材料科學(工程)研究所碩士論文.
- [4-1] 日本原子力基盤安全機構 (2004), 原子力用ステンレス鋼の耐応力腐食割れ実証に関する報告書
- [4-2] Shirai et al. (2011). Study on Interim Storage of Spent Nuclear Fuel by Concrete Cask for Practical Use -Feasibility Study on Prevention of Chloride Induced Stress Corrosion Cracking for Type304L Stainless Steel Canister- , CRIEPI Report (No. N10035).
- [4-3] Goto et al. (2013). Study on Interim Storage of Spent Nuclear Fuel by Concrete Cask for Practical Use - Feasibility Study on Prevention of Chloride Induced Stress Corrosion Cracking for Type304L, 316L Stainless Steel Canister-, CRIEPI Report (No. N12023).
- [4-4] T. Shibata (2007). Passivity breakdown and stress corrosion cracking of stainless steel, Corrosion Science 49(1), 20–30
- [4-5] M. Wataru (2013). Roadmap development for SCC monitoring program on spent fuel dry storage in Japan, FCMA Workshop on Spent Fuel Dry Storage and Radwaste Disposal, Taipei
- [4-6] 原能會物管局(2013). 用過核子燃料乾式貯存設施營運維護與監測計畫導則(草案) .
- [4-7] 施純寬(2012). 核二廠用過核子燃料乾式貯存設施熱傳安全驗證研究. 原能會物管局委託研究計畫報告 (編號 101FCMA004), p.21

附件-不銹鋼材料檢驗報告與出廠證明

國立臺灣大學工學院材料科學與工程學系

地址：台北市羅斯福路四段一號 電話：(02)33661358~9 傳真：(02)23638217

材料試驗室接受委託試驗報告書



試驗編號：130446CM 送試日期：2013-10-15 試驗日期：2013-10-16 報告日期：2013-10-16

委託單位：國立高雄大學

委託單位地址：高雄市楠梓區高雄大學路700號

取樣者：國立高雄大學土木與環境工程學系 劉琨泰

送試者：國立高雄大學土木與環境工程學系 劉琨泰

報告使用目的：研究用

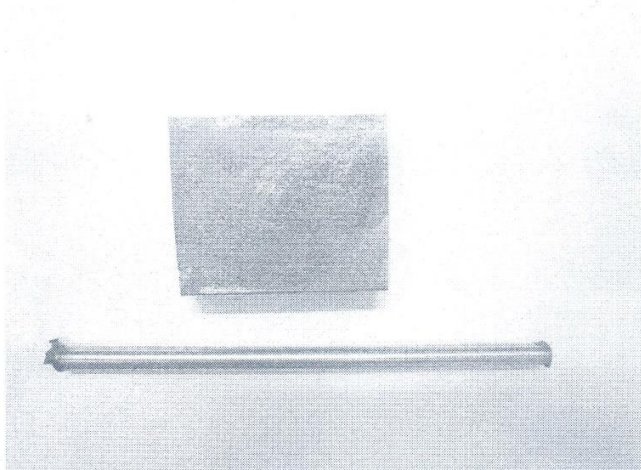
樣產地或製造廠：

試樣名稱：不銹鋼板、棒

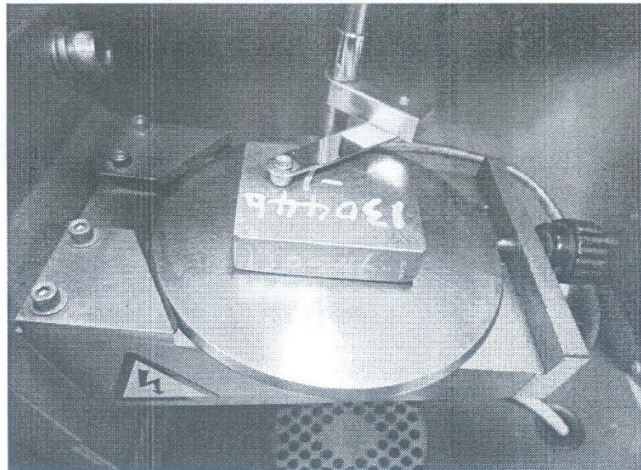
試驗項目：成份分析

(一) 成份分析(wt %)

試樣材質尺寸	C (碳)	Si (矽)	Mn (錳)	P (磷)	S (硫)	Ni (鎳)	Cr (鉻)
304 規範參考值	0.080 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	8.00~10.50	18.00~20.00
不銹鋼板	0.018	0.48	0.98	0.028	*0.005	8.19	18.19
不銹鋼棒	0.044	0.35	1.64	0.032	0.011	8.48	18.56



圖一、送試樣品



圖二、試驗完成

試驗說明：

1. 本試驗係依 CNS 8499 G3164 規範施行，試驗項目係由委託者自行要求。
2. 試驗方法：分光分析法 ASTM E415-08。
3. 試驗儀器：SHIMADZU GVM-1014S。
4. *S 不在 TAF 認可範圍內

報告使用說明：

1. 本報告分離使用無效。未經本試驗室書面同意，不得任意摘錄複製使用，但全文複製除外。
2. 報告遺失恕不補發。試驗結果僅對試樣負責，試樣保存期限1個月。

本試驗報告共 1 頁，此為第 1 頁

報告簽署人：



YOUNG
YEOW YIH STEEL CO., LTD.

品質證明書
Inspection Certificate

高雄永安區永工十路2號
NO. 2 YEONG GONG 10TH ROAD, YEONG AN DISTRICT,
KAHSIUNG CITY, TAIWAN, R.O.C.
TEL: 886-7-6225616 FAX: 886-7-6226808

品證號碼: MT1305046

Contract No. (訂單號碼): S1303031 Customer (客戶): 廣山企業有限公司

PAGE: 1/1

Date: 2013/05/10

Commodity (品名): HOT ROLLED STAINLESS STEEL PLATE Surface Finish (表面等級): NO. 1

Solution Treatment 1080 °C A.T.

Specification (規格): ASTM A240-11

Steel Grade (鋼種): 304/304L

Item No.	Product No.	Heat No.	Size	Pos.	Kgs	Impact Test (衝擊試驗)		
						(20°C) / Min. 60 J	(-196°C) / Min. 60 J	AVE.
1	BU30424	215411	13mm X 1524mm X 6096mm	13	12,656			
2	BU30425	171780	13mm X 1219mm X 2438mm	10	3,132			
3	BU30425	171780	13mm X 1219mm X 4876mm	6	3,760			
4	BU30425	171780	13mm X 1219mm X 6096mm	17	13,299			
5	BU30427	266706	15mm X 1219mm X 4876mm	2	1,450			
Total					48	34,297		

Item No.	Chemical Composition (化學成分) / Heat Analysis (熔煉分析)										
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N	Cu	Ti
Max.	0.030	0.75	2.00	0.045	0.030	12.00	19.50		0.100		
Min.						8.00	17.50				
1	0.023	0.48	0.98	0.031	0.003	8.05	18.18	0.01	0.048	0.04	
2	0.017	0.36	1.29	0.038	0.005	8.11	18.15	0.13	0.040	0.28	
3	0.017	0.36	1.29	0.038	0.005	8.11	18.15	0.13	0.040	0.28	
4	0.017	0.36	1.29	0.038	0.005	8.11	18.15	0.13	0.040	0.28	
5	0.019	0.40	1.29	0.041	0.003	8.04	18.06	0.13	0.032	0.29	

Remarks: Certified to ASME SA-240-2011. YYS has established a QMS according to ISO 9001:2008 by TÜV. Material meets the hardness requirement of NACE MR0175. This certificate complies to 3.1/EN 10204:2004.

Manager of Quality Assurance Department
M. J. Wang

We hereby certify that material described herein has been manufactured and tested with satisfactory results in accordance with the requirement of the above related specification.

We hereby certify that the material described above has been detected and has no radiation contamination. (鋼板字號2008號)

File: 128-1/98.07

2013年11月 5日 8時35分

10: 缺上... 缺上...



證明書 INSPEI CERTIFICATE

82053 中華民國台灣省高雄縣岡山鎮寶來路369號
 369, PAO MI RD., BAINIYU LAGE, KANGSHAN JENN
 KAOSHUNG HSIEN, TAIWAN 82053, R.O.C.
 TEL: (07)611-1111 (10 Line) FAX: (07)625-1280

客戶/住址 Client/Address	麗豐五金股份有限公司 新北市三重區光復路一段134號	客戶編號 Client No.	D10924 35871740	交運日期 Delivery Date	26/01/2011	證明書編號 Certificate No.	A1000129007	證明書日期 Issue Date	27/01/2011
製品名稱 Commodity	不銹鋼酸洗發花材 SOLUTION TREATMENT WIRE RODS								

項次 Item	出貨單號 Packing No.	訂單編號 Order No.	鋼種名稱 Steel Grade.	線徑 Diam.	軋製序號 Rolling o.	數量 Quantity (pcs)	重量 Net (kg)	毛重 Gross (kg)	製程 Process	製程說明 Process Description
1	1B3385	DIS10G101	304L1	5.50	0C304	2	2,235	2,239	HRAP	HR:熱軋(Hot Rolled) A:固溶化(Solution Treated) → 均 P:酸洗(Acid Pickling Treated)
2		DIS10G101	304L1	5.50	11114	1	1,517	1,519		
3		DIS10G102	304L1	6.50	11086	2	3,223	3,227		
4		DIS10G103	304L1	8.50	0C196	2	3,210	3,214		
5		DIS10G104	304L1	9.50	11145	2	3,191	3,195		
6	1B3386	DIS1A5206	304L1	10.00	11161	1	1,514	1,516		

產品編號 Heat No.	抗拉強度 Tensile Stress (N/mm ²)	伸長率 Elongation (%)	縮減率 Reduction (%)	硬度 Hardness (Hv)	屈服強度 Yield Stress (N/mm ²)	化學成分 (Chemical Composition) (%)										
						Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N		
259416	572	55.8	81.4	179	100	31	169	38	4	897	1832	15	59	890		
259741	560	57.8	83.4	174	29	163	27	2	2	892	1810	17	61	720		
259743	564	56.5	84.8	174	33	162	27	2	2	818	1813	13	60	760		
259417	572	57.5	82.2	179	30	174	29	7	7	911	1819	14	58	820		
259742	567	60.3	82.5	176	33	162	28	3	3	808	1816	15	62	820		
259745	565	61.5	81.3	176	33	171	29	5	5	814	1809	17	62	890		

機械性質 (Mechanical Properties)

We hereby certify that the material described herein has been manufactured and tested with satisfactory results accordance with the requirement of the above material specification.

備註 (Remarks):

The material described above has been detected free radiation.

技術部主管
Manager of Technology Division

李振宏

客戶聯 (白) 自存聯 (黃)