

沸水式反應器不銹鋼組件應用抑制性被覆之防蝕行爲研究

李明墉*、葉宗洸**、蔡春鴻*

Corrosion Mitigation for Stainless Steels Treated with Inhibitive Coatings in Boiling Water Reactor Environments

Ming-Yong Li*, Tsung-Kuang Yeh**, Chuen-Horng Tsai*

摘要

近年來，許多沸水式反應器均已採用加氫水化學 (Hydrogen Water Chemistry, HWC) 技術，藉以降低主冷卻水迴路中各組件的電化學腐蝕電位 (Electrochemical Corrosion Potential, ECP) 並進而防制延晶應力腐蝕龜裂 (Intergranular Stress Corrosion Cracking, IGSCC) 與輻射促進應力腐蝕龜裂 (Irradiation-Assisted Stress Corrosion Cracking) 的發生。文獻資料顯示，在較高飼水注氫量下 (通常在 0.6 ppm 以上)，HWC 有提昇管路輻射劑量率的副作用，且其對於反應器壓力槽內部接近爐心出口附近組件的 ECP 降低與 IGSCC 抑制功效並不明顯。因此，為求減少 HWC 技術中的注氫量需求與管路輻射劑量率，且有效降低爐心出口附近組件的腐蝕發生機率，我們嘗試利用抑制性被覆的方式，進行反應器主冷卻水迴路組件防蝕之可行性研究。

本研究以氧化鋯 (ZrO_2)、氧化鈦 (TiO_2) 及二硝酸基氧化鋯 ($ZrO(NO_3)_2$) 等化合物為試藥，透過化學添加的方式進行試片的被覆處理，在模擬沸水式反應器的水化學循環迴路中，針對經被覆處理後的 304 不銹鋼進行動態極化掃描分析、電化學腐蝕電位量測與慢應變速率拉伸測試，藉以了解上述材料在不同被覆處理狀態下的腐蝕行爲。透過動態極化掃描分析我們發現，304 不銹鋼在經過氧化鋯、二硝酸基氧化鋯與氧化鈦的化學添加被覆後，其腐蝕電流密度與鈍化電流密度皆比未被覆試片為低。在電化學腐蝕電位量測實驗中，經過抑制性被覆處理的試片，其 ECP 值並非如預期地較未被覆試片低，推測其原因可能是抑制性被覆同時降低氧還原與不銹鋼氧化的交換電流密度的結果。在慢應變速率拉伸實驗的部分，我們發現被覆與未被覆試片均出現嚴重的 IGSCC，但未被覆試片出現較小的伸長量與較短的斷裂時間，顯示試片龜裂起始的時間確實因抑制性被覆處理而延長，但發生龜裂的程度並不因被覆處理而有明顯的改變。

* 國立清華大學工程與系統科學系
Department of Engineering and System Science, National Tsing Hua University, Hsinchu, Taiwan, R. O. C.

** 國立清華大學原子科學技術發展中心
Nuclear Science and Technology Development Center, National Tsing Hua University,
Hsinchu, Taiwan, R. O. C.

Abstract

Incidents of intergranular stress corrosion cracking (IGSCC) and irradiation-assisted stress corrosion cracking (IASCC) of stainless steel components in the primary coolant circuits of boiling water reactors (BWRs) are occurring with increasing frequency as the power reactors age. In the past decade, the hydrogen water chemistry (HWC) technique has been widely adopted as a measure for mitigating IGSCC and IASCC in BWR vessel internal components. However, this technique is not without problems. In general, at a feedwater hydrogen concentration higher than 0.6 ppm, the radioactive Nitrogen-16 content in the main steam line is very likely to increase and the resulting radiation fields exert a high man-REM cost on the operator. Furthermore, it is not at all clear that HWC is effective in protecting some components against IGSCC and IASCC in terms of electrochemical corrosion potential (ECP) reduction, particularly for protecting near-core components. Therefore, new technologies, such as inhibitive coatings, were brought into consideration to enhance the effectiveness of HWC in the aspects of lower hydrogen consumption and more effective ECP reduction.

In the current study, surfaces of pre-oxidized Type 304 stainless steels (SS) were treated with various chemical compounds of TiO_2 , ZrO_2 , and $\text{ZrO}(\text{NO}_3)_2$ by chemical immersion at different temperatures. Electrochemical potentiodynamic polarization, ECP measurement, and slow strain rate tensile (SSRT) test were conducted to characterize the corrosion properties of the treated and untreated stainless steels. Test results showed that the treated SS specimens exhibited lower open circuit potentials, corrosion densities, and passive current densities than the pre-oxidized specimen. The ECPs of the treated and untreated specimens at 288 °C could vary by more than 200 mV at different dissolved oxygen concentrations, and the pre-oxidized specimen did not exhibit the highest ECP. According to the SSRT test results, all tested specimens showed severe IGSCC, but the pre-oxidized one had the lowest elongation and the shortest fracture time. The results indicated that inhibitive coatings did prolong the crack initiation times but failed to provide distinct protection against IGSCC once cracking started.

一、緒論

核電廠設計建造之初，採用的是抗蝕的不銹鋼材料，理論上可以使用至電廠四十年的法定年限，不會出現組件腐蝕劣化進而影響運轉安全的情形。然而截至目前為止，全世界沸水式反應器 (Boiling Water Reactor, BWR) 的壓力槽內部組件多數皆有應力腐蝕龜裂 (Stress Corrosion Cracking, SCC) 的問題，SCC 的類型則包括延晶應力腐蝕龜裂 (Intergranular Stress Corrosion Cracking, IGSCC) 與輻射促進應力腐蝕龜裂 (Irradiation-assisted Stress Corrosion Cracking, IASCC)。這些組件的劣化現象不僅可能直接或間接地影響到反應器運轉安全，後

續的修復工作更是耗費頗鉅。

在沸水式反應器的防蝕研究中，最受矚目的應屬加氫水化學技術 (Hydrogen Water Chemistry, HWC) 的開發與應用^(1,2)。然而在 HWC 技術應用十數年之後，採用中度 (飼水溶氫濃度大於 0.5 ppm) 或重度注氫的電廠不斷被隨之產生的工作區高輻射劑量率所困擾，此一副作用主要是冷卻水管路中放射性核種氦-16 與鈷-60 的含量增加所致。此外，部分採用 HWC 技術的電廠仍於若干組件發現 IGSCC⁽³⁾。於是增益或取代 HWC 的被覆處理技術陸續被提出研究^(4,9)，以達到降低注氫量甚至零注氫量即可保護 BWR 主冷卻水迴路的效果。上述的被覆處理技術

主要可以區分為催化性 (Catalytic) 與抑制性 (Inhibitive) 兩類，其中催化性被覆乃利用貴重金屬易於催化氫氣氧化的特性而達到防制金屬腐蝕的目的，故須配合低量注氫的實施；而抑制性被覆因以防止氧化劑還原與金屬氧化為目標，故有可能完全取代 HWC 技術。目前已有部分實驗室的初步測試結果證實抑制性被覆處理確有降低或抑制材料發生 IGSCC 機率的效果^(7,8)。Y. J. Kim⁽⁷⁾ 的研究中發現利用電漿噴灑法 (Plasma Spray) 進行抑制性被覆的防蝕效果最佳，不過此法只適用於電廠中少數容易更換的組件；而 R. Pathania⁽⁸⁾ 的研究裡則是利用溶膠凝膠法 (Sol-gel) 進行被覆，雖然對於電化學腐蝕電位與裂縫成長速率的降低有明顯的效果，但因此法必須配合外加電流的使用，所以不適用於結構龐大且複雜的核能電廠。綜觀而言，利用爐水循環流動特性的化學添加法是目前最有可能現場運用的被覆方式。

基於上述理由，我們決定利用具備絕緣特性的化學藥品 (如氧化鋯、氧化鈦、硝酸基氧化鋯等) 以化學添加的方式對 304 不銹鋼試片進行被覆處理，並透過電化學動態極化掃描以及 288°C 純水環境中的電化學腐蝕電位 (Electrochemical Corrosion Potential, ECP) 量測與慢應變速率拉伸測試 (Slow Strain Rate Test, SSRT)，探討此等抑制性被覆處理對於 304 不銹鋼腐蝕行為的影響。

二、實驗

(一) 試片設計與前處理

本實驗所用的 SSRT 試片材料為 304 不銹鋼，試片尺寸如圖一所示。所有試片均於高溫爐管中進行敏化熱處理，熱處理條件為 650°C，持溫 24 小時後淬冷，熱處理後的試片以碳化矽 (SiC) 砂紙研磨除去表面氧化層，研磨到 1200 號，並仔細確認在標記長度內，試片表面沒有明顯垂直於拉伸方向的刮痕。敏化後的試片透過電化學電位再活化法 (

Electrochemical Potentiokinetic Reactivation, EPR) 進行測試，以確認其敏化程度。

動態極化掃描分析與 ECP 量測所使用的試片形狀是 1 cm × 1 cm，厚度為 1 mm 的正方形試片，其材料、熱處理及研磨方式與 SSRT 試片相同。

(二) 化學添加

在實施化學添加被覆處理前，我們將試片置於丙酮溶液中，利用超音波震盪 10 分鐘，再以太離子水清洗試片表面，以確保試片表面的潔淨度。然後將試片置入高壓釜中，連接高溫高壓水循環系統，在水溫維持在 288°C 且水中溶氧量維持在 300 ppb 的條件下，進行 360 小時的預長氧化膜 (Prefilming) 處理，以模擬 BWR 主冷卻水迴路中使用多年組件的表面狀態。預長氧化膜完成後，隨即於一靜態高壓釜中進行試片的化學添加被覆處理。抑制性被覆所使用的試液有三種，藥品分別為 1 μm 粒子大小的氧化鋯 (ZrO₂)、1 μm 粒子大小的氧化鈦 (TiO₂)、與可溶性硝酸基氧化鋯 [ZrO(NO₃)₂]，調配濃度分別為 10 ppm、10 ppm 及 1 mM，試液配製時均使用超音波震盪 10 分鐘，以確保試液中之懸浮粒子 (ZrO₂ 與 TiO₂) 能夠充分分離並均勻分布於試液中。被覆處理時高壓釜中水溫分別維持在 90°C、150°C、200°C 三種溫度，各試片處理時間均為七天。

(三) 表面分析

為對被覆表面進行分析，我們使用 JOEL-2000 掃描式電子顯微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM) 觀察被覆表面型態，搭配能量散佈 X 光分析儀 (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer, EDX) 進行成分分析，以利於了解被覆的結構與分布情形。

(四) 動態極化掃描分析

為了協助了解不同被覆處理試片的基本腐蝕特性差異，我們使用動態極化掃描分析對未被覆與不同被覆試片分別進行測試。我們利用 K₃Fe(CN)₆ 與

$K_4Fe(CN)_6$ 各 1 mM 的混和溶液當作測試溶液 (Test Solution)，分別對不同被覆條件的試片進行動態極化掃描分析測試，其中測試槽 (Test Cell) 內的測試溶液在每次測試之前須先經 6 小時的充氮除氧處理。實驗所使用的儀器為 EG & G Model 263A 的電化學分析儀，極化掃描速率為 1 mV/s，掃描範圍從開路電位 (Open Circuit Potential) 以下 350 mV (水解反應的產生) 至 1600 mV 停止。

(五) 水循環系統

為了模擬 BWR 爐心高溫高壓 (288°C、7.6 MPa) 的純水環境，我們建立了一組水循環系統，循環水採用兩階段離子交換濾心加以過濾純化，並利用 GLI Model C53 導電度測量儀監測循環水導電度，以 ORION Model 1816 溶氧測量儀監控水中溶氧量。水中溶氧控制是以氣體流量閥控制氣瓶純氧輸出至儲水槽流量而達成。此一系統除可用於進行慢應變速率拉伸實驗與電化學腐蝕電位量測，亦可應用於進行氧化膜處理和化學添加被覆程序。實驗中各項數據是利用多頻道 KEITHLEY Model 2700 電位計，透過 GBIP 介面連接個人電腦所形成的自動化數據擷取系統進行紀錄，圖二為水循環系統裝置示意圖。

(六) 慢應變速率拉伸實驗

本項實驗中，我們將拉伸試片置於 316 不銹鋼材質之高壓釜中，連接試片的拉力桿延伸出高壓釜後固連於拉伸機台上，之後將高壓釜連結於水循環系統中。實驗時拉伸應變速率控制為 $1.67 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ ，並利用線性電壓位移記錄器 (Linear Voltage Displacement Transducer) 監測試片伸長量。高壓釜中水溫與壓力分別維持在 288°C，與 7.6 MPa，循環水流量為 16 ml/min，循環水導電度在高壓系統入口位置維持小於 $0.1 \mu\text{S/cm}$ ，水中溶氧量控制於 300 ppb。試片拉伸時同時以電腦紀錄應力變化並監控維持各氣體的含量。試片拉斷後以掃描式電子顯微鏡觀察其斷面，估計斷面 IGSCC 百分比，並量測試片

伸長量，記錄試片斷裂所需時間。

(七) 電化學腐蝕電位量測實驗

實驗前首先於 ECP 試片邊緣點焊不銹鋼導線，不銹鋼線並以熱縮鐵弗龍 (Teflon) 套管包覆以達到絕緣的目的。試片置於體積為一公升的 316 不銹鋼高壓釜中。包覆鐵弗龍套管的導線通過 Conax 絕緣高壓接頭延伸至高壓釜外，連接多頻道掃描器與電位計以紀錄其電化學腐蝕電位變化。所用的參考電極為耐高溫銀/氯化銀電極，電解液為飽和氯化鉀，在 288°C 時的平衡電位為 $123 \text{ mV}_{\text{SHE}}$ ，電極外有冷卻水管予以冷卻，以降低溫度梯度造成的電位量測偏差。高壓釜中水溫與壓力分別維持在 288°C，與 7.6 MPa，循環水流量為 16 ml/min，循環水導電度在高壓系統入口位置維持小於 $0.1 \mu\text{S/cm}$ ，水中溶氧量則於 100 ppb 至 1000 ppb 的範圍中逐步改變。

三、結果與討論

(一) 敏化程度測試

我們採用雙循環電化學再活化法 (Double-Loop EPR) 做為敏化程度的分析方法。本項 EPR 測試中我們所使用的試片與用於 ECP 測量的試片同型，具代表性的 DL-EPR 的測試結果如圖三所示，敏化程度為 38.8%，已屬於重度敏化。

(二) 試片表面分析

在試片經過化學添加被覆處理後，我們利用 SEM 與 EDX 進行各類型試片表面的被覆分析。如圖四 (a) 所示，在預長氧化膜試片的表面可明顯觀察出疏鬆的結晶狀氧化物，屬於相當典型的外氧化層結構，EDX 結果亦出現常見於不銹鋼氧化層的化學成分如鐵、鉻、鎳、氧等。圖四 (b) 是經氧化鋯被覆處理 (150°C 環境) 的試片表面，SEM 照片中顏色對比較深的區域，經進一步的分析為氧化鋯的堆

聚處，而 EDX 結果也證實了氧化鋯的存在。不過深色區域在整個試片表面的分布並不均勻，顯示氧化鋯被覆在本實驗狀態下出現了局部被覆的情形。相異於氧化鋯被覆的不均勻性，200°C 化學添加處理後的氧化鈦被覆顯得較為均勻，但被覆量卻不如氧化鋯高。上述現象可由圖四 (c) 中 SEM 與 EDX 分析結果得知，照片中氧化鈦被覆試片表面與預長氧化膜試片表面並無明顯差異，但 EDX 分析結果出現低量鈦元素訊號。二硝酸基氧化鋯的被覆亦為不均勻分布，如圖四 (c) 所示，黑色塊狀區域即為二硝酸基氧化鋯的分布位置，EDX 分析結果證實此類型區域中鋯元素的存在。由於黑色區域佔有試片表面的範圍相較其他兩者並不大，而進一步的 EDX 結果發現顏色較淺區域幾乎沒有鋯元素的訊號，顯示二硝酸基氧化鋯的分布量偏低。

(三) 動態電位極化掃描分析

在 $K_3Fe(CN)_6$ 與 $K_4Fe(CN)_6$ 各 1 mM 的混合溶液中，不同被覆條件試片的動態電位極化掃描分析結果如圖五至圖七所示。其中經過被覆處理試片的鈍化電流密度 (Passivity Current Density) 皆比預長氧化膜 (Prefilm) 試片為低，說明在經過化學添加被覆處理後，304 不銹鋼氧化層的性質已經發生變化，並使得金屬在鈍化電位區的氧化速率變小，至於不同被覆處理與不同被覆溫度的試片的鈍化電流密度差距並不大，詳細數據如表一所示。此外，在此混合溶液中，經被覆處理試片的腐蝕電流密度與腐蝕電位均較 Prefilm 試片為低，其中腐蝕電流密度降低的幅度較為明顯，均達 50% 以上；而腐蝕電位降低的則相當有限，介於 7 至 34 mV 之間。上述結果顯示抑制性被覆確實對於金屬氧化的速率有明顯降低的效果，至於腐蝕電位的降低效果不明顯可能與金屬本身交換電流密度的改變有關，我們將在下一節中加以討論。值得注意的是，在表一的極化掃描結果中並未包含 $TiO_2-150^\circ C$ 處理試片的數據，此乃由於實驗時受到不明原因干擾，致使結果出現大幅偏

差，因此我們並未計算其腐蝕電位與腐蝕電流密度，不過圖六中我們仍列出掃描曲線。

(四) 電化學腐蝕電位 (ECP) 量測

由於高壓釜的容量限制，ECP 的量測總共區分兩個批次進行，其中第一批次包含 Prefilm、 $ZrO_2-90^\circ C$ 、 $ZrO_2-200^\circ C$ 、 $TiO_2-90^\circ C$ 、 $TiO_2-200^\circ C$ 、 $ZrO(NO_3)_2-200^\circ C$ 處理的試片，第二批次有 Prefilm、 $ZrO_2-150^\circ C$ 、 $TiO_2-150^\circ C$ 、 $ZrO(NO_3)_2-90^\circ C$ 、 $ZrO(NO_3)_2-150^\circ C$ 處理的試片，水中溶氧量的變化有 100、200、300、400、500、750、1000 ppb 等七種濃度，而 ECP 量測結果如圖八所示。綜合量測結果可發現兩個現象，在較低溶氧濃度 (300 ppb 以下) 的 ECP 值有偏低的現象，Prefilm 試片的 ECP 值並非如預期中是最高的。

首先，低溶氧量的 ECP 值偏低可能是由於高壓釜釜壁消耗了部份的溶氧，由此一消耗量相對於原始溶氧量已無法加以忽略，導致出口溶氧值明顯低於入口溶氧值，所以高壓釜中的實際溶氧值低於儀器的量測值；此外，高壓釜中的線性流速太低也會使 ECP 的量測值出現較電廠量測值為低的情形，這最主要是因氧化還原反應的極限電流密度 (Limiting Current Density) 大幅減小之故。Prefilm 試片未出現高於其他所有試片的 ECP 值，推測應與金屬本身交換電流密度發生變化有關，此可由圖九中的伊凡斯圖 (Evans Diagram) 獲得解釋。理論上，當抑制性被覆施加後，可同時降低氧還原與不銹鋼氧化的交換電流密度。圖九-A 為抑制性被覆促使氧還原反應的交換電流密度下降幅度大於金屬氧化反應的交換電流密度下降幅度，因而導致 ECP 從 $E_{corr,1}$ 下降到 $E_{corr,2}$ 。圖九-B 則為抑制性被覆使得金屬氧化反應的交換電流密度下降幅度較大，使得 ECP 從 $E_{corr,1}$ 上升至 $E_{corr,2}$ 。上述的推論說明在抑制性被覆的條件下，ECP 量測已無法成為判定材料是否可能發生腐蝕的有效指標，唯有破壞性實驗如 SSRT 測試或裂縫成長測試，方可提供較可靠的判斷依據。

(五) 慢應變速率拉伸 (SSRT) 實驗

在 SSRT 測試中，受測試片包括 prefilm 以及所有經 90°C 與 200°C 被覆處理的試片，測試環境為 300 ppb 溶氧濃度的無氫高溫 (288°C) 純水環境，測試結果涵蓋試片斷裂時間、伸長率 (Elongation) 以及斷裂面 IGSCC 百分比，如表二所示。其中 prefilm 試片的斷裂時間與伸長率分別為 209 小時與 7%，試片斷裂面的 IGSCC 百分比達 50%，而試片側面接近斷裂處的位置並出現許多二次裂口，如圖十所示。

所有經過抑制性被覆處理試片的斷裂時間及伸長率均與 prefilm 試片明顯不同。所有處理過試片的斷裂時間均較 prefilm 試片長約 80 小時以上，其中 $ZrO(NO_3)_2$ -200°C 處理試片的斷裂時間更長達 333 小時。此外，所有被覆處理試片的伸長率均維持於 10% 至 12% 之間，而 $ZrO(NO_3)_2$ -200°C 處理試片的伸長率達 12%，為各試片中最高。至於 IGSCC 百分比部份，大部分試片均相當接近 50%，雖然經 $ZrO(NO_3)_2$ 被覆處理的兩個試片出現略低的 IGSCC %，但 30% 與 36% 的數值仍嫌過高。值得注意的是，經過被覆處理試片側面上的二次裂口數量均較 prefilm 試片為少 (如圖十一至十三所示)，顯示抑制性被覆有降低龜裂起始機率的功能。

綜合以上的結果可以發現，不論是何種藥品或何種被覆處理溫度，目前採行的抑制性被覆處理方式對於 304 不銹鋼在純水環境中的抗蝕能力提供了一定程度的助益，此一助益主要來自於龜裂起始時間的延長，延長的比率將近 50%，而屬機械性質的延伸率也因之增加 50% 左右。而在應變量不斷逐漸增加的 SSRT 測試中，各試片的 IGSCC % 在測試結束後均達 30% 以上，甚至達到與 prefilm 試片相同的 50%。上述現象出現在 SSRT 的測試結果中並不令人意外，此乃因抑制性被覆的作用原理主要是防止或減緩金屬表面的氧化還原反應，而 SSRT 測試中不斷增加的應變量，最終會導致被覆膜的破壞並使其喪失抑制氧化還原反應的能力，因此龜裂起始的時間可因被覆而延長，但 IGSCC% 在水化學條件並

未獲得實際改善的情況下，不易有明顯的減少。進一步有關抑制性被覆處理對於腐蝕速率變化的影響，須透過裂縫成長速率實驗取得。

四、結論

在本項研究中，我們得到以下結論：

- (1) 透過 SEM 的觀察得知， ZrO_2 、 TiO_2 、 $ZrO(NO_3)_2$ 三種試藥經過化學添加方式所獲得的覆膜表面型態不盡相同。 ZrO_2 與 $ZrO(NO_3)_2$ 是以較不均勻的方式附著在 304 不銹鋼的氧化層上；而 TiO_2 處理後的不銹鋼氧化層與 prefilm 試片的氧化層無法明顯區別，但由 EDX 成分分析則可發現 Ti 的訊號。
- (2) 抑制性覆膜可經由改變不銹鋼表面氧化膜的性質以達到降低腐蝕速率的目的，此可經由動態電位極化掃描實驗中，經過抑制性被覆處理試片出現相對較低的鈍化電流密度與腐蝕電流密度而得到證實。
- (3) ECP 量測結果顯示，經過抑制性被覆處理試片的 ECP 值並非都低於 prefilm 試片，可能的理由為抑制性被覆同時降低氧還原反應與不銹鋼氧化反應的交換電流密度，個別降幅的差異可分別導致 ECP 的上昇或下降。
- (4) 透過 SSRT 的實驗結果，我們推測試片經過抑制性被覆處理後，可以延長裂縫起始的時間與發生的機率，而得到較長的拉伸時間與數量較少的二次裂口。一旦進入裂縫成長階段後，抑制性覆膜便不再具有保護效果，導致被覆試片斷裂面的 IGSCC % 與 prefilm 試片不相上下。

五、致謝

感謝台灣電力公司核發處的研究經費支持 (計畫編號：NOD3629)。

六、參考文獻

1. R. L. Cowan, Nuclear Engineering International, January 1986, p. 26.
2. M. E. Indig, "Recent Advances in Measuring ECPs in BWR Systems," Proc. 4th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems - Water Reactors, NACE, Jekyll Island, GA., Aug. 6-10, 1989, p. 4-411.
3. Nuclear Regulatory Commission, Cracking of Vertical Welds in the Core Shroud and Degraded Repair, NRC Information Notice 97-17, April 4, 1997.
4. L. W. Niedrach, Corrosion, Vol. 47, p. 162 (1991).
5. Y. J. Kim, L. W. Niedrach, M. E. Indig, and P. L. Andresen, Journal of Metals, Vol. 44, No. 2, p. 14 (1992).
6. Tsung-Kuang Yeh and D. D. Macdonald, "Modeling the Development of Damage in BWR Primary Coolant Circuits," Proc. 7th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems - Water Reactors, NACE, Breckenridge, Colorado, Aug. 6-10, 1995, p. 909.
7. Y. J. Kim and P. L. Andresen, "Application of Insulated Protective Coatings for Reduction of Corrosion Potential in High Temperature Water," CORROSION/96, NACE, Denver, Colorado, Mar. 24-29, 1996, Paper Number 105.
8. R. Pathania, Zirconium Oxide Deposition to Mitigate IGSCC, BWRVIP Mitigation Committee Meeting, Atlanta, GA, October 1-3, 1997, EPRI.
9. B. Stellwag, M. Lasch, and U. Staudt, "Investigation into Alternatives to Hydrogen Water Chemistry in BWR Plants," Proceedings of 1998 JAIF International Conference on Water Chemistry in Nuclear Power Plants, JAIF, Kashiwazaki, Japan, Oct. 13-16, p186.

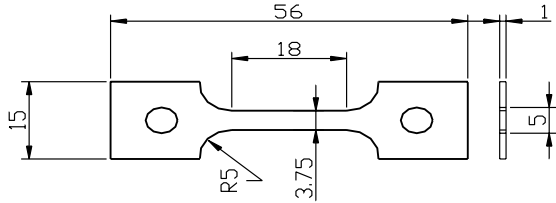
表一 室溫下不同被覆處理試片於 1 mM $K_3Fe(CN)_6$ 與 1 mM $K_4Fe(CN)_6$ 混合電解液中的鈍化電流密度、腐蝕電流密度及腐蝕電位

試片種類	鈍化電流密度 ($\mu A/cm^2$)	腐蝕電流密度 ($\mu A/cm^2$)	腐蝕電位 (mV _{SCE})
Prefilm	70	24.6	141
ZrO ₂ -90°C	25	5.7	117
ZrO ₂ -150°C	60	10.5	125
ZrO ₂ -200°C	40	5.1	126
TiO ₂ -90°C	30	3.3	122
TiO ₂ -150°C*	-	-	-
TiO ₂ -200°C	45	10.6	107
ZrO(NO ₃) ₂ -90°C	30	6.5	112
ZrO(NO ₃) ₂ -150°C	60	0.7	134
ZrO(NO ₃) ₂ -200°C	40	4.3	126

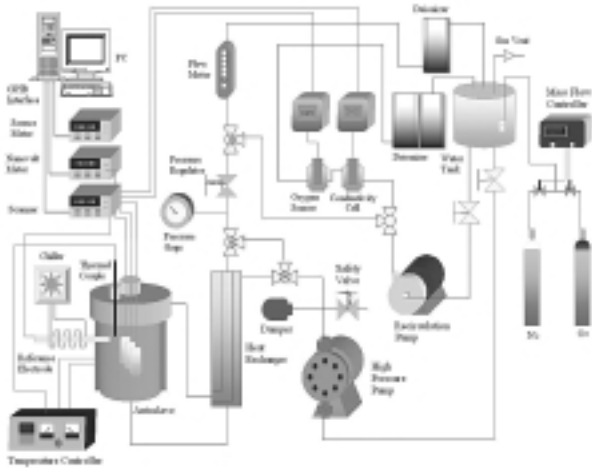
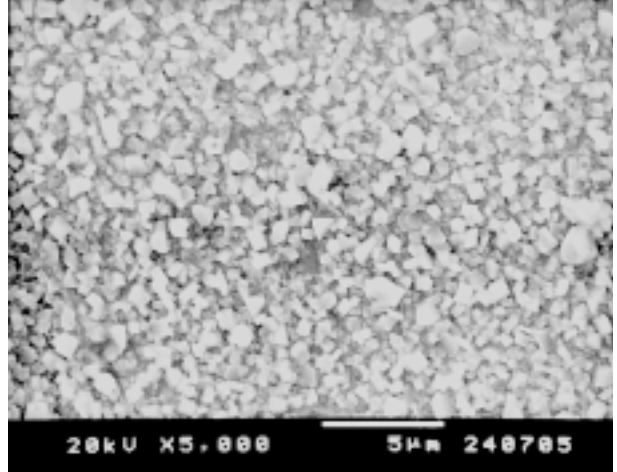
*未成功之測試

表二 各試片接受 SSRT 測試後之斷裂時間、伸長率及 IGSCC 百分比

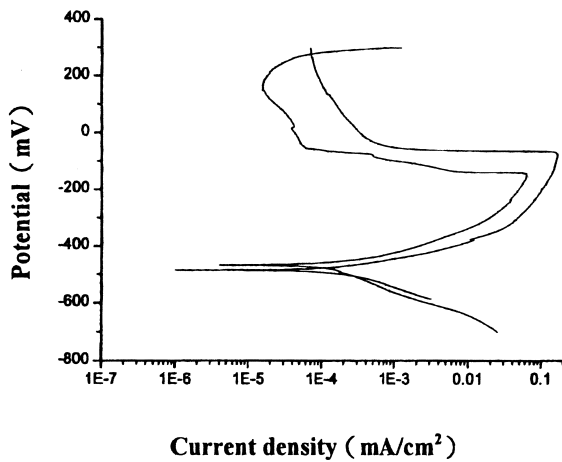
試片種類	斷裂時間 (hours)	伸長率 (%)	IGSCC 百分比 (%)
Prefilm	209	7	50
ZrO ₂ -90°C	311	11	52
ZrO ₂ -200°C	318	11	48
TiO ₂ -90°C	319	11	30
TiO ₂ -200°C	285	10	36
ZrO(NO ₃) ₂ -90°C	278	10	48
ZrO(NO ₃) ₂ -200°C	333	12	49



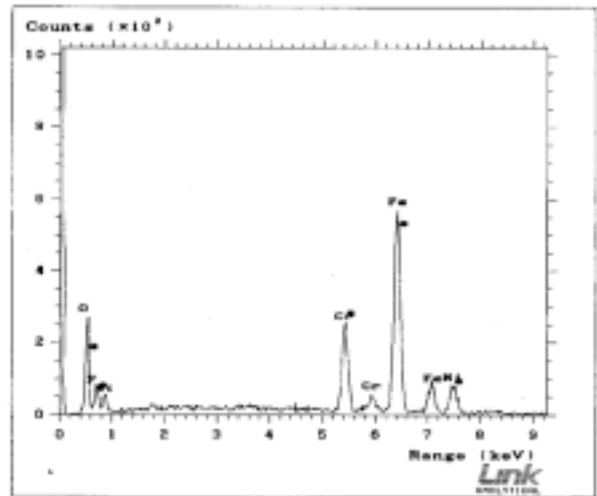
圖一 SSRT 試片尺寸



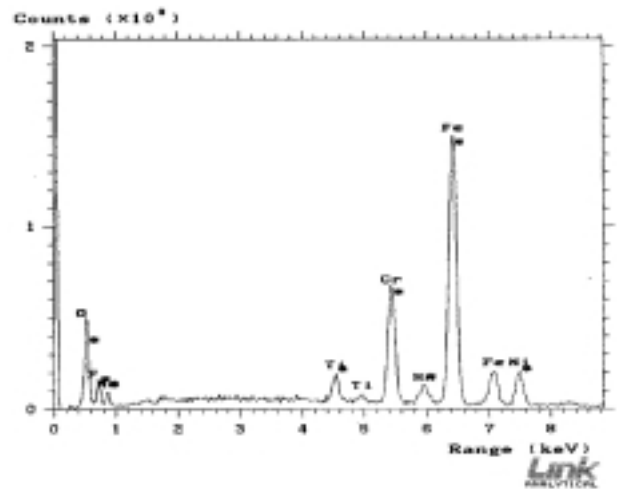
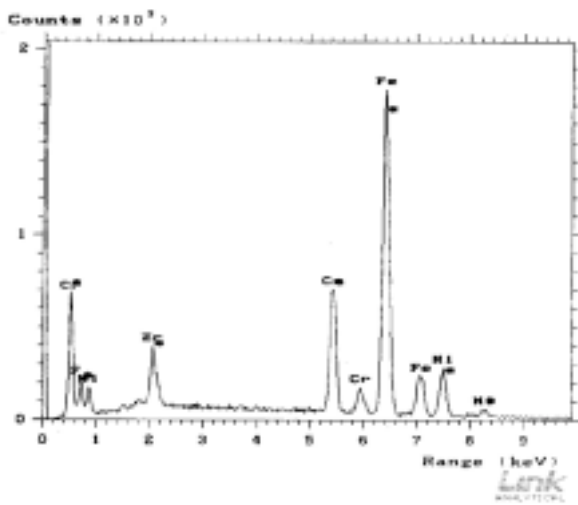
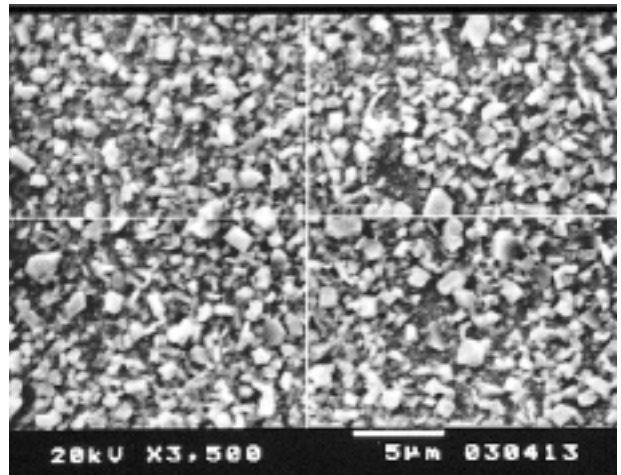
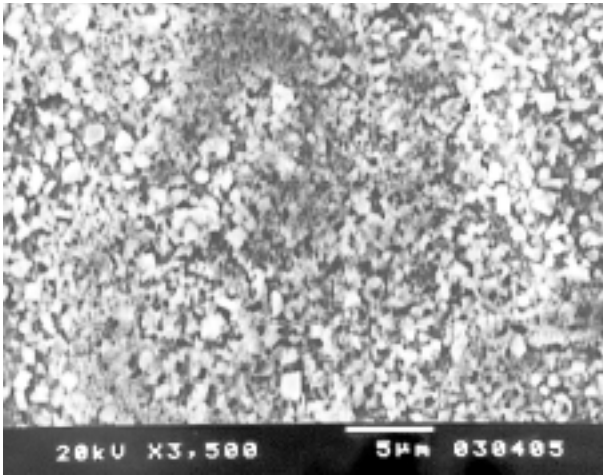
圖二 水循環系統裝置示意圖



圖三 熱處理 304 不銹鋼試片所測得的DL-EPR 結果 (100 Ir / Ia = 38.8)

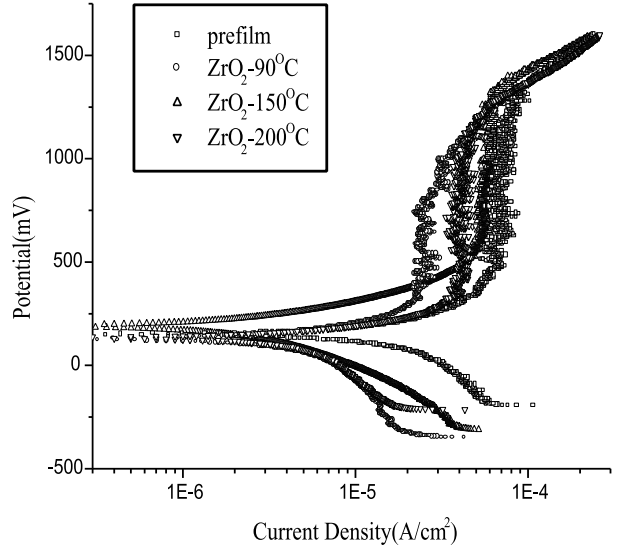
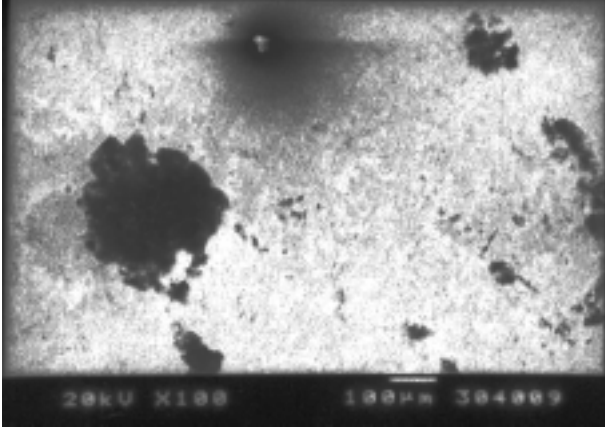


圖四 (a) 預長氧化膜試片表面的SEM 照片與EDX 成分分析結果

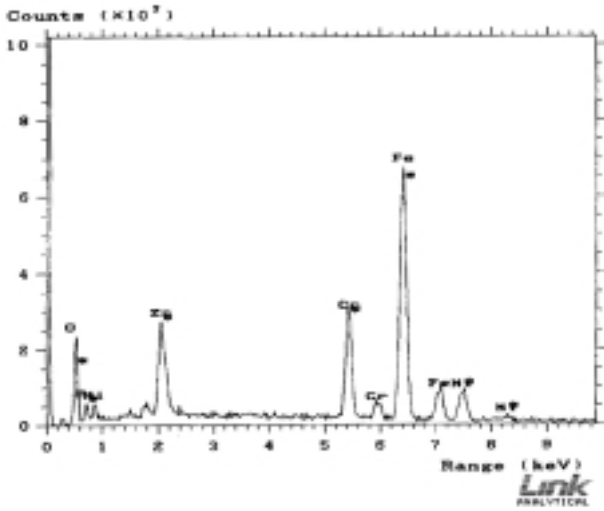


圖四 (b) 氧化鋯被覆處理試片表面的SEM 照片與 EDX 成分分析結果

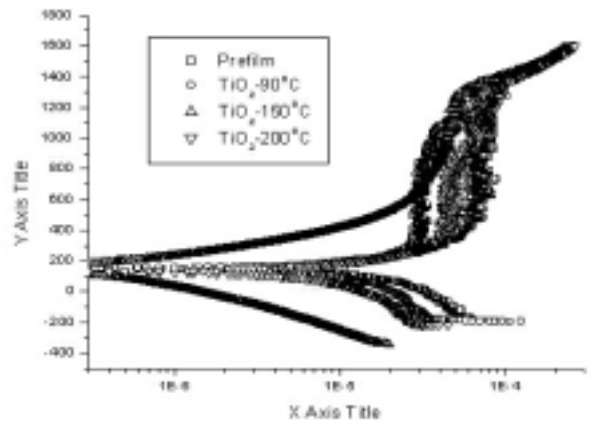
圖四 (c) 氧化鈦被覆處理試片表面的SEM 照片與 EDX 成分分析結果



圖五 ZrO_2 -90°C、 ZrO_2 -150°C、 ZrO_2 -200°C處理試片與prefilm 試片的極化掃描曲線圖



圖四 (d) 二硝酸基氧化鋯被覆處理試片表面的SEM 照片與EDX 成分分析結果



圖六 TiO_2 -90°C、 TiO_2 -150°C、 TiO_2 -200°C處理試片與prefilm 試片的極化掃描曲線圖