



防蝕工程學會

防蝕工程

期刊網址：<http://www.anticorr.org.tw>



10.6376/JCCE.201906\_33(2).0001

## 白金被覆的 304L 不銹鋼在沸水式反應器起動過程中的腐蝕行為 Corrosion Behaviour of Platinum Treated Type 304L Stainless Steels during Simulated BWR Startup Conditions

陳岳泰<sup>\*1</sup>、葉宗洸<sup>2</sup>、王美雅<sup>3</sup>

Yue-Tai Chen<sup>\*1</sup>, Tsung-Kuang Yeh<sup>2</sup>, Mei-Ya Wang<sup>3</sup>

### 中文摘要

低濃度注氫及貴重金屬化學添加(NobleChem™)或線上貴重金屬化學添加(On-line NobleChem™)被廣泛應用於沸水式核反應器的結構組件上。貴重金屬藉由飼水注入後沉積於不銹鋼的結構組件表面，可以有效催化金屬表面氫氣與氧氣、過氧化氫的結合，因而降低材料表面的電化學腐蝕電位(Electrochemical Corrosion Potential, ECP)，可有效抑制不銹鋼組件應力腐蝕龜裂(Stress Corrosion Cracking, SCC)的裂縫起始與成長。

但根據過去的研究顯示，在反應器啟動過程中，爐水因缺乏氫氣的添加而呈現高氧化性的水環境，此時存在貴重金屬沉積的金屬表面電化學腐蝕電位會相較於未沉積的高，較高的 ECP 會使得金屬表面交換電流密度增加，對 SCC 的抑制造成反效果。本篇研究將利用慢應變速率拉伸法探討 304L 不銹鋼在有貴重金屬鉑被覆時，於模擬反應器啟動過程中，不同溫度下的氧化性水環境對應力腐蝕龜裂的裂縫起始影響。研究結果顯示，氧化性的水環境下具貴重金屬被覆的 304L 不銹鋼表面將誘發較多的 SCC 啟始。

**關鍵詞：**沸水式反應器、應力腐蝕龜裂、貴重金屬化學添加、加氫水化學、慢應變速率拉伸試驗

### Abstract

Low HWC combined with noble metal chemical addition (NMCA) or Online NobleChem™ (OLNC) has

收到日期：109 年 01 月 02 日

修訂日期：109 年 10 月 28 日

接受日期：109 年 12 月 01 日

<sup>1</sup> 國立清華大學核子工程與科學研究所

<sup>1</sup> Institute of Nuclear Engineering and Science, National Tsing Hua University

<sup>2</sup> 國立清華大學工程與系統科學系

<sup>2</sup> Department of Engineering and System Science, National Tsing Hua University

<sup>3</sup> 國立清華大學原子科學技術發展中心

<sup>3</sup> Nuclear Science and Technology Development Center, National Tsing Hua University

\*聯絡作者：b821104@gmail.com

been adopted for boiling water reactors (BWRs) to mitigate stress corrosion cracking (SCC) by lowering the electrochemical corrosion potential (ECP) of structural materials in BWRs. Noble metal was injected into feedwater and then deposited on inner surface of the stainless steel (SS) piping to catalyze the recombination of hydrogen with oxygen and hydrogen peroxide. When the ECP was decreased to a critical potential ( $-230\text{ mVSHE}$ ), the susceptibility of SCC and the crack growth rate were obviously reduced.

However, some research indicated that the ECP of SS with NMCA application was increased, even higher than that without NMCA when the materials were exposed to oxidizing environments without hydrogen injection during startup of BWRs. Additionally, a higher ECP might increase the exchange current density and be detrimental to the resistance of SCC. In this study, the SCC initiation behavior of 304L SS with NMCA application was investigated in oxidizing environment with different temperature to simulate BWR water environments during startup. The results revealed that the NMCA certainly induced more crack initiation site on 304L SS in oxidizing conditions.

**Keywords:** BWR; Noble Metal Chemical Addition; On-Line Noble Metal Chemical Addition; Stress Corrosion Cracking; Slow Strain Rate Test; Startup.

## 1. 前言

近年來加氫水化學法 (Hydrogen Water Chemistry, HWC) 被廣泛運用於沸水式反應器 (Boiling Water Reactors, BWRs)，用以抑制反應器金屬組件的應力腐蝕龜裂 (Stress corrosion cracking, SCC)。電化學腐蝕電位被視為影響 SCC 敏感性的重要因素，當 ECP 降至 SCC 臨界電位 (critical corrosion potential)  $-230\text{ mVSHE}$  時可有效抑制 SCC 的敏感性 (susceptibility)<sup>[1]</sup>。然而，氫氣由反應器飼水端注入後，各部金屬組件降至臨界電位所需的濃度不同，也會因電廠而異，根據過去研究顯示，當飼水氫氣添加濃度大於  $0.5\text{ ppm}$  時易使爐水中含  $^{16}\text{N}$  的同位素揮發成氣態，導致電廠輻射劑量的增加<sup>[2]</sup>。為了降低過量注氫導致輻射劑量上升的負面效應，因此發展出貴重金屬化學添加法 (Noble Metal Chemical Addition, NMCA) 及 On-line 貴重金屬添加法 (On-line Noble Metal Chemical Addition, OLNC)，利用貴重金屬沉積於金屬表面，催化金屬表面的氫氣與氧化性物質氧氣或過氧化氫的反應，以減少飼水注氫的濃度<sup>[3,4]</sup>。

HWC 主要是利用氫氣與氧化性物質 (氧氣、過氧化氫等) 的反應，降低整體爐水的氧化性物質濃度，達到降低電化學腐蝕電位的效果，而用

NMCA 配合低濃度注氫的方式即是為使金屬組件表面的 ECP 更進一步降至 SCC 的臨界電位 ( $-230\text{ mVSHE}$ )，以有效抑制 SCC，但整體爐水環境電位相對於金屬表面仍較高。當氫氣濃度達到一定的化學劑量 (Stoichiometric)，通常為氫氣與氧化性物質莫爾比 (Molar Ratio) 大於 2 ( $M_{\text{H}_2/\text{O}_2} > 2$ )，氫氣與氧化性物質反應生成水 ( $\text{H}_2 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{H}_2 + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ )，金屬表面氧化性物質濃度在貴重金屬的催化下可更進一步降低至極小值，同時金屬表面 ECP 可更進一步降低至熱力學最低點 (Thermodynamic Minimum Value)  $-550\text{ mVSHE}$ 。<sup>[5]</sup>

一般 NMCA 方法注入採用的是貴重金屬鉑 (Pt) 或銠 (Rh) 鹽類的化合物 ( $\text{Na}_2\text{Pt}(\text{OH})_6$ 、 $\text{Na}_3\text{Rh}(\text{NO}_2)_6$ ) 水溶液，而 OLNC 僅採用  $\text{Na}_2\text{Pt}(\text{OH})_6$  作為注入的化學藥劑。以反應器材料完整性 (Reactor Material Integrity) 的考量觀點來看，爐心冷卻水中鈉離子濃度與其他雜質濃度應盡量降低，以維持冷卻水的導電度。因此近年來更有奈米膠體氧化鉑 (Platinum Oxide Nanoparticle Colloidal) 顆粒被發展出來，可免除有機雜質隨著貴重金屬的注入進入到爐水中。<sup>[6,7]</sup>

根據過去的電廠經驗與研究<sup>[8,9]</sup>，通常鉑金屬於不銹鋼金屬表面沉積量大於  $0.1\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$  即足以

使 ECP 降低至  $-500\text{mV}_{\text{SHE}}$ 。而近年來業界建議電廠採用的貴重金屬鉑於金屬表面沉積量應小於  $10\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ，而標準的 NMCA 貴重金屬沉積量應大於  $0.15\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。但根據實際採用 NMCA 的 Mühleberg (KKM) 電廠經驗顯示<sup>[9]</sup>，貴重金屬的沉積量僅小於  $0.1\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ，因此必然有其他因素會影響到貴重金屬於反應器組件上沉積。而過去有研究結果顯示，在採用低濃度 HWC 結合 NMCA 的 BWR 電廠，不銹鋼組件表面貴重金屬被覆的完整性將會影響到催化氫氣與氧化性物質的再結合反應效率，若貴重金屬分布不均或缺乏的區域可能導致金屬表面仍殘有氧化性物質，無法有效降低 ECP 抑制 SCC 的發生；甚至在缺乏氫氣的金屬組件表面也可能導致 ECP 的上升，進而對 SCC 的防治造成反效果<sup>[5]</sup>。

過去 BWR 設計使用 HWC 方法的實際氫氣注入時機大約在反應器啟動後功率約達到 20~30% 時，然而反應器在停機換燃料的過程中，爐水將暴露於大氣環境下，因此在反應器啟動過程中金屬組件將會處在一個相對較高氧化性的水環境下，亦即一般水化學(Normal Water Chemistry, NWC) 的環境下。過去的研究指出<sup>[10]</sup>，SCC 的裂縫成長速度(Crack Growth Rate, CGR)在反應器啟動過程的中間溫度下會相較於一般運轉時的溫度 (~288°C) 下高，因此，近年來逐漸開始有在反應器功率小於 10% 時即開始注入氫氣，稱之為 Early hydrogen water chemistry (EHWC)，為避免在啟動過程中氧化性環境對 SCC 的抑制造成負面影響。而若是有採用 NMCA 方法卻未使用 EHWC 的電廠來說，根據過去的研究指出金屬組件若具貴重金屬的被覆且處在氧化性的環境下，ECP 將會相對於一般無貴重金屬被覆的金屬組件高，因此可能對於 SCC 的防治造成反效果<sup>[2]</sup>。故針對有採用 NMCA 卻未使用 EHWC 的 BWR 電廠，在反應器啟動過程中的溫度下，具貴重金屬被覆的金屬組

件，處在氧化性的環境是否對於 SCC 敏感性帶來負面的影響需要進一步的實驗研究來確認。

因此本篇研究主題為，在模擬 BWR 電廠啟動過程中間溫度 200°C、250°C 以及運轉溫度 288°C 的氧化性純水環境下，具貴重金屬鉑被覆的 304L 不銹鋼材料 SCC 的敏感性評估。

## 2. 實驗方法

本實驗採用 304L 不銹鋼做為評估材料，其成分分析如表一所示。而本實驗採用慢應變速率拉伸法(Slow Strain Rate Test, SSRT)，以  $3 \times 10^{-7}/\text{s}$  的應變速率在模擬 BWRs 反應器啟動過程中的溫度 200°C、250°C 以及運轉溫度 288°C 的純水下進行 SCC 的評估，圖一為 SSRT 使用的棒狀試樣尺寸示意圖。圖二為實驗設置的高溫水循環迴路示意圖，放置試樣的高溫高壓腔體中利用水循環迴路持續維持在約 7.8MPa 的壓力下避免水的沸騰。水循環迴路中的溶氧量利用持續通入氧氣與氫氣泡維持在 300ppb，並利用離子交換樹脂使水循環迴路中的純水導電度維持在  $0.06\mu\text{S}/\text{cm}$ ，模擬沸水式反應器水循環迴路的高溫純水環境。

SSRT 使用的棒狀試樣由塊材經 CNC (Computer Numerical Control) 加工成型，試樣首先在 1050°C 下經 30 分鐘的固溶熱處理(Solution Annealing, SA)，再經過攝氏 650 度 24 小時的敏化熱處理。而再進行 SSRT 前，所有棒狀試樣皆會先在 288°C 含氧量 1ppm 的純水環境中經過 14 天的預長氧化層處理，而部分試樣經過熱水沉積法(Hydrothermal Deposition Process) 沉積鉑(Pt)，將試樣置於 288°C 高溫除氧純水迴路中經過七天的時間，純水中添加  $\text{Na}_2\text{Pt}(\text{OH})_6$  作為的鉑前驅物，計算純水中鉑金屬濃度為 1 ppm，此外沉積鉑的試樣旁會另外放置一平板狀試片用以計算鉑於試樣表面的沉積量。

表 1 304L 不銹鋼試片化學成分(wt %)。  
Table 1 The composition (wt%) of 304L stainless steel sample.

Element	Fe	C	Si	Mn
Mass%	-	0.0212	0.09	1.72
Element	P	S	Cr	Ni
Mass%	0.03	<0.0005	17.63	6.92

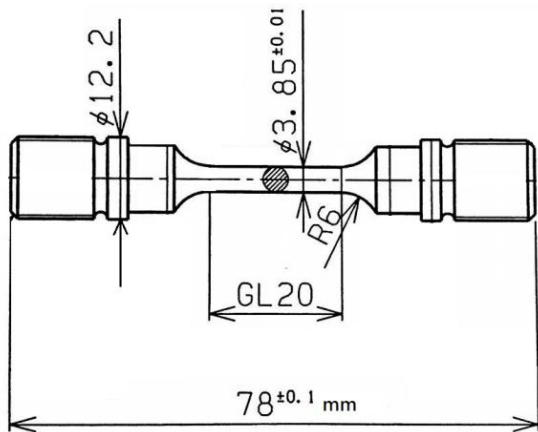


圖 1 SSRT 使用之圓棒狀式樣尺寸示意圖。  
Figure 1 Dimensions of the rod sample used in the SSRT tests.

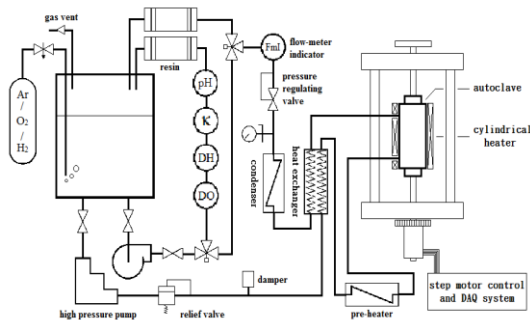


圖 2 高溫水循環迴路示意圖。  
Figure 2 Schematic diagram of high temperature water circulation loop.

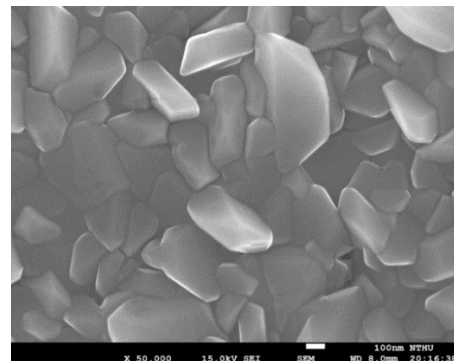
本實驗採用掃描式電子顯微鏡(Scanning Electron Microscopy, SEM)分析 SSRT 結果之棒狀試樣破斷面形貌與試樣表面氧化層上鉑的沉積分布狀況；並利用能量色散 X 射線譜(Energy dispersive X-ray spectroscopy, EDX) 確認氧化層上的鉑沉積；利用雙環電化學再活化法(Double-

Loop Electrochemical Potentiokinetic Reactivation, DL-EPR) 確認棒狀試樣的敏化程度(Degree of Sensitization, DOS)，實驗結果顯示，經過 24 小時 650°C 的熱處理後，304L 不銹鋼材料的敏化程度約為 3.99%；材料的化學組成利用感應電耦合質譜儀 (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer, ICP-MS) 與碳硫分析(Carbon/Sulfur Analyzer) 確定使用的 304L SS 成分，同時也利用 ICP-MS 分析鉑於試樣上的沉積量。

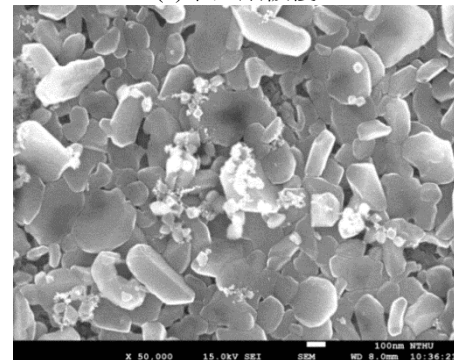
### 3. 實驗方法結果與討論

#### 3.1 氧化層表面形貌

本實驗 304L SS 試樣氧化層表面形貌如圖三所示，無論是否經過鉑沉積的試樣表面之氧化層顆粒經雷射拉曼光譜分析顯示主要為 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>(Magnetite) 結構。



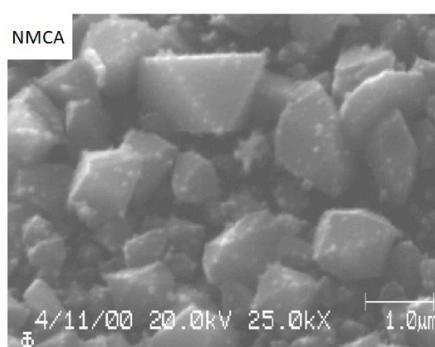
(a) 未經鉑被覆



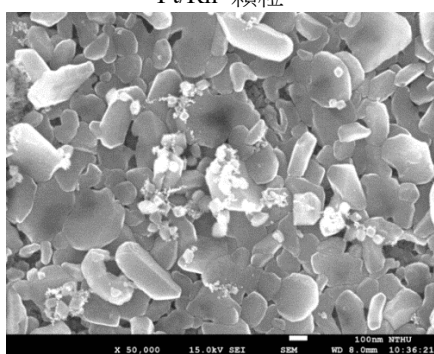
(b) 經過鉑被覆

圖 3 未經過鉑被覆(a)與經過鉑被覆(b)之 304L SS 表面氧化層形貌。  
Figure 3 Morphologies of the oxide film of 304L SS (a) without Pt coating (b) with Pt coating.

而經過鉑沉積的試樣表面明顯可見不連續白色的叢聚顆粒，經過 EDX 確認及主要為鉑金屬沉積顆粒，而利用 ICP-MS 分析鉑於氧化層表面沉積量約為  $0.33 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ，圖四為美國 General Electric(GE)公司過去研究文獻記載<sup>[6]</sup>，常見的 304 SS 氧化層表面鉑分佈，圖四(a)為模擬 NMCA 的 304 SS 氧化層表面鉑沉積形貌，圖四(b)為模擬 OLN C，根據其研究顯示，鉑於氧化層表面的分佈可能影響到金屬表面催化效果，本實驗沉積結果顯示試樣氧化層上鉑分佈有些為叢聚現象，若想達到最佳的鉑沉積分佈於氧化層表面仍須進一步的研究探討。



(a) 304 SS 於 135°C 下模擬 NMCA 方法沉積 Pt/Rh 顆粒



(b) 304 SS 於 288°C 下模擬 OLN C 方法沉積 Pt 奈米顆粒

圖 4 貴重金屬奈米顆粒於氧化層上之沉積分佈形貌，(a)模擬 NMCA 環境(b)模擬 OLN C 之水環境<sup>[6]</sup>。

Figure 4 Morphologies of the oxide film of 304L SS with Pt nanoparticle coating (a) at simulating NMCA condition (b) at OLN C condition.

### 3.2 SSRT 實驗結果

本實驗三個溫度測試條件(288°C、250°C、200°C)下有無鉑被覆之 304L SS SSRT 測試結果整理如下圖五之應力應變曲線，而所有測試條件之試樣機械表現(Mechanical Performance)整理如下表二。比較三個測試溫度下未經鉑被覆之 304L SS 試樣之機械表現，在溫度 250°C 的測試條件下伸長量較低，機械表現較差。

圖六至圖八為三個測試溫度條件下，無鉑被覆之 SSRT 拉伸試樣破斷面形貌 SEM 圖，圖中紅線標示的區域為沿晶應力腐蝕龜裂(Intergranular Stress Corrosion Cracking, IGSCC)主導破裂的區域、黃色線標示區域則為穿晶應力腐蝕龜裂(Transgranular Stress Corrosion Cracking, TGSCC)。比較 IGSCC 佔破斷面上之比例，在測試溫度 250°C 下較 288°C 下多，TGSCC 佔比相近，而在 200°C 的測試溫度下則未觀察到任何 SCC 發生。根據本實驗室過去的研究結果<sup>[11]</sup>，中度敏化之 316L SS 在模擬 BWR 水環境，溶氧量 300ppb 測試溫度 200°C、250°C 和 288°C 三個溫度條件下，測試溫度 250°C 的條件下相較其他兩個溫度條件會出現最差的機械表現。304L、316L 兩種不銹鋼在溫度 250°C 下有較差的機械表現之原因推測是由於在棒狀試樣上出現的多重裂縫起始，如圖九本實驗之 304L 不銹鋼試樣側面 SEM 圖所示，由圖可見到在測試溫度 250°C 下試樣側面有明顯較多的 SCC 裂口，且由圖七與圖八的破斷面結果可見有兩個主要對應的 IGSCC 裂口主導試樣的破裂，在延著破斷口周邊有明顯多個 SCC 的裂縫起始點，而多重的小裂縫起始容易相互結合形成較大裂縫，進而使試樣較早破斷。而在測試溫度 288°C 的測試溫度下，試樣側面出現相對 250°C 下較少的裂縫起始點，且從圖六的破斷面可見到試樣的破斷主要由單一個 IGSCC 的裂縫起始主導。

表2 在溫度 200、250、288°C 下有無鉑被覆之 304L SS 於含氧量 300ppb 的純水環境中 SSRT 測試結果之機械表現與破斷面各種 SCC 佔比。

Table2 SSRT results of all samples in pure water environments containing 300 ppb dissolved oxygen at 200, 250 and 288°C.

	Yield strength (MPa)	UTS (MPa)	Elongation (%)	IGSCC%	TGSCC%	SCC total%
304L SEN24hr 288°C (DO:300ppb)	134.77	388.6	30.67	6.9	15.7	22.6
304L SEN24hr 250°C (DO:300ppb)	127.81	388.1	28.95	10.1	8.4	18.5
304L SEN24hr 200°C (DO:300ppb)	134.51	426.7	47.13	0.0	0.0	0.0
304L SEN24hr 288°C (DO:300ppb Pt-treated 7days)	131.68	356.4	24.44	9.6	13.5	23.1
304L SEN24hr 250°C (DO:300ppb Pt-treated 7days)	132.97	402.3	30.25	9.2	12.9	22.1

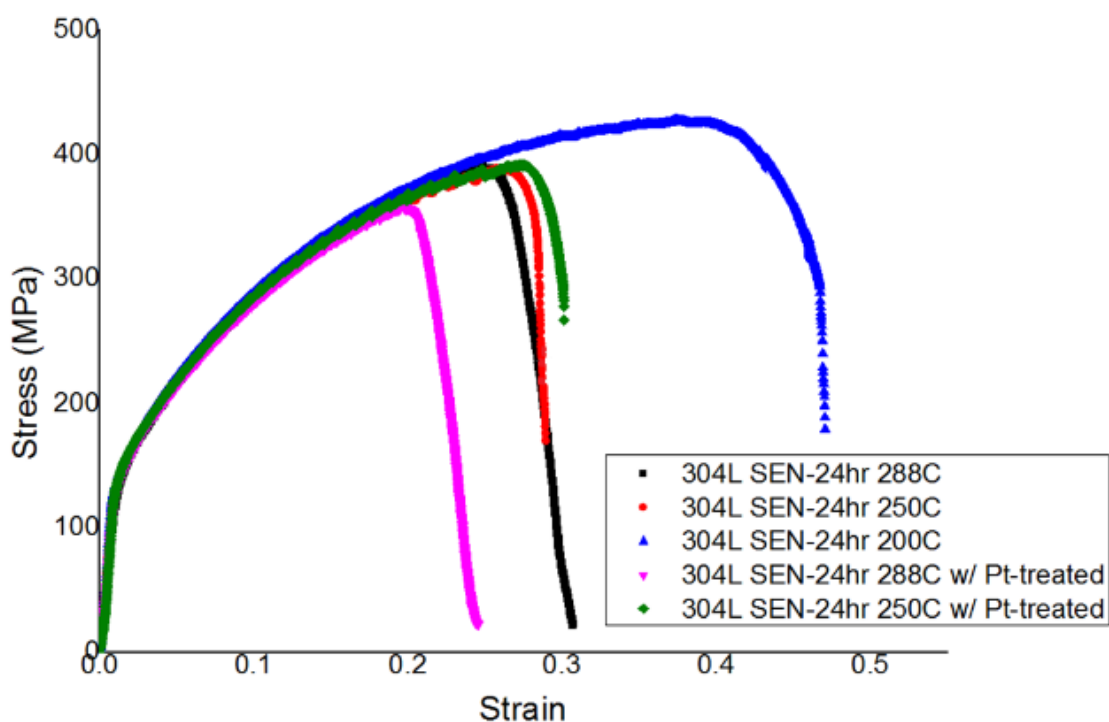


圖5 在溫度 200、250、288°C 下有無鉑被覆之 304L SS 於含氧量 300ppb 的純水環境中 SSRT 測試結果之應力應變曲線。

Figure 5 Stress-strain curves for 304L SS in pure water environments containing 300 ppb dissolved oxygen at 200, 250 and 288°C.

白金被覆的 304L 不銹鋼在沸水式反應器起動過程中的腐蝕行為

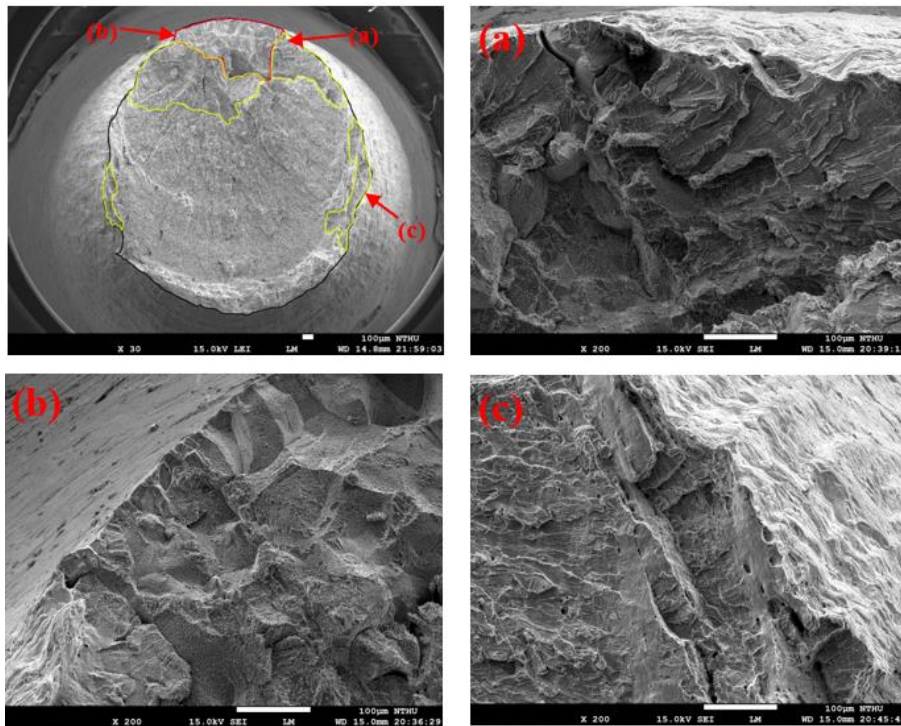


圖 6 無鉑被覆之 304L SS 於溫度 288°C 溶氧量 300ppb 的純水中 SSRT 試樣破斷面形貌 SEM 圖。  
Figure 6 SEM images of fractured surface of the 304L SS in pure water environments containing 300 ppb dissolved oxygen at 288°C.

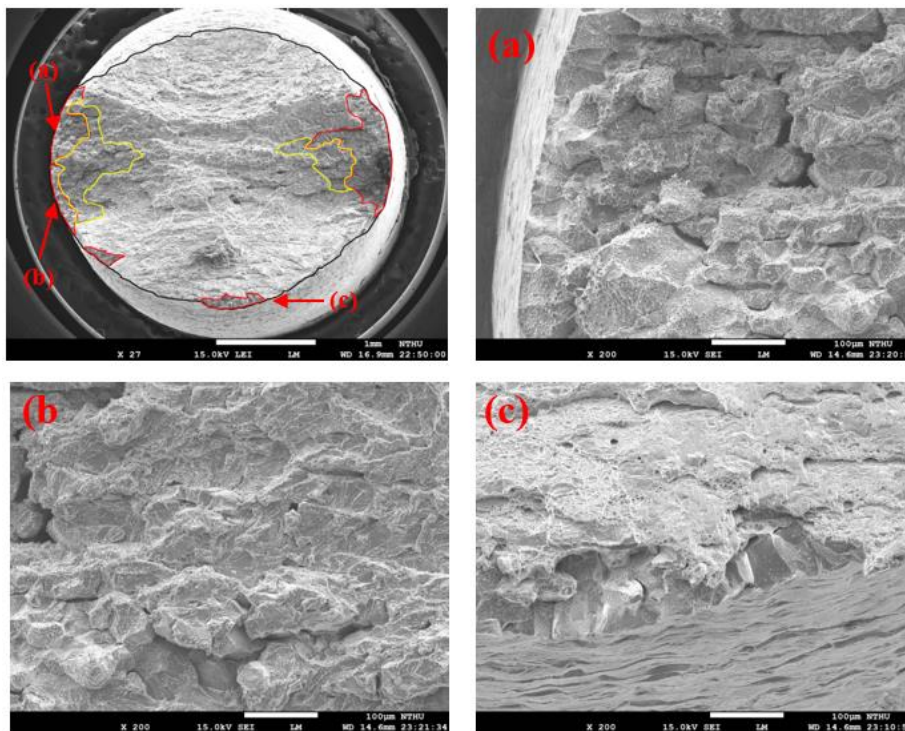


圖 7 無鉑被覆之 304L SS 於溫度 250°C 溶氧量 300ppb 的純水中 SSRT 試樣破斷面形貌 SEM 圖。  
Figure 7 SEM images of fractured surface of the 304L SS in pure water environments containing 300 ppb dissolved oxygen at 250°C.

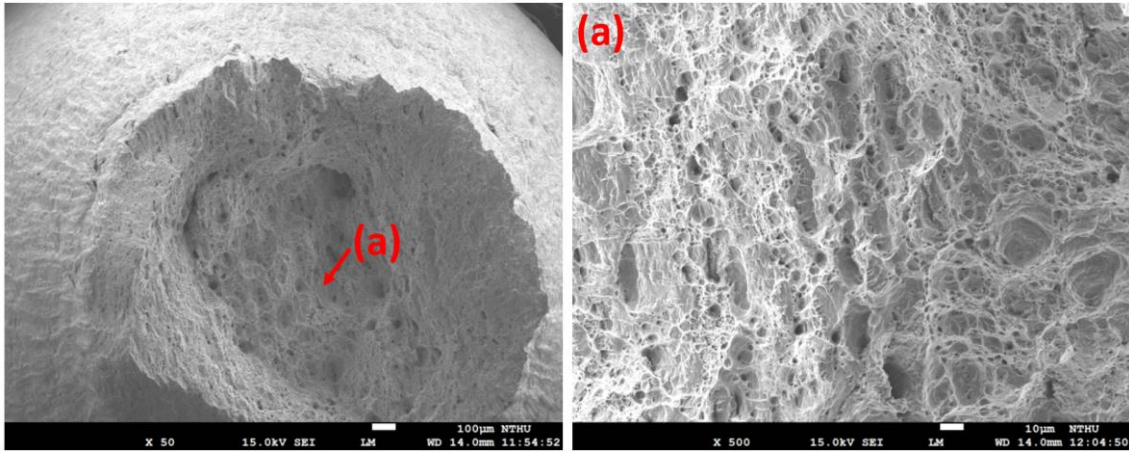
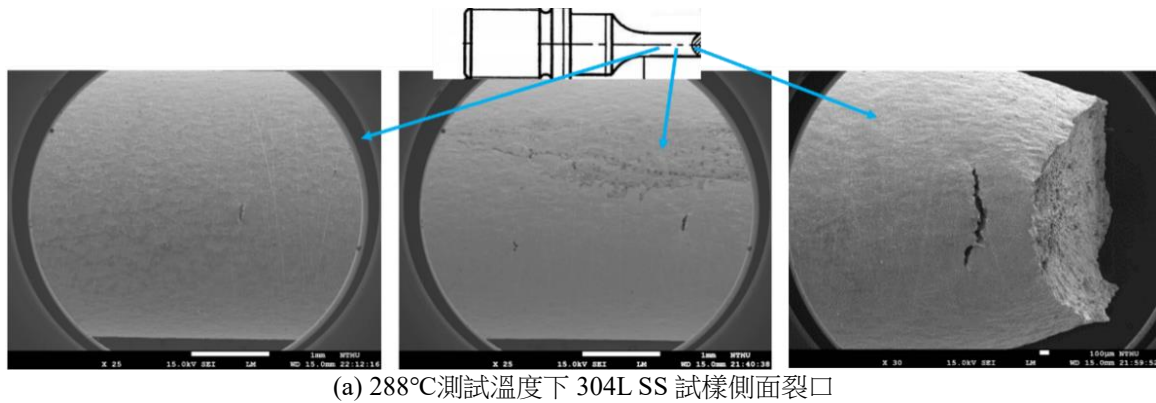
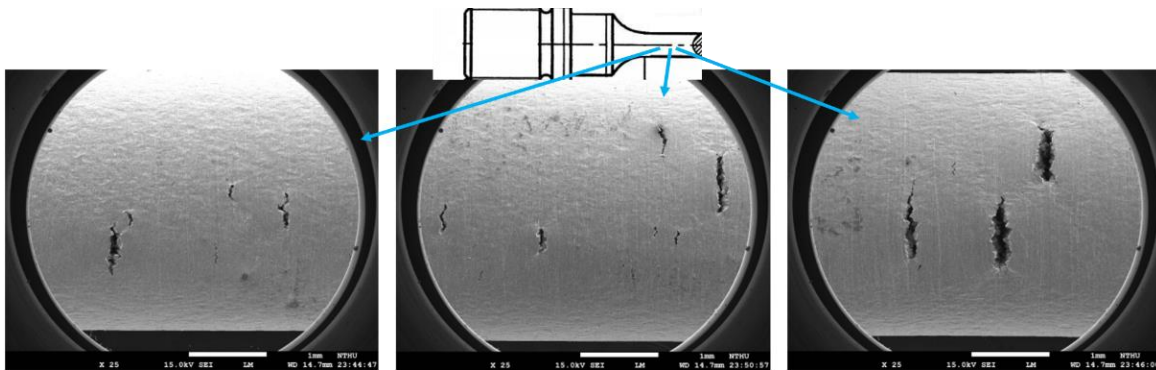


圖 8 無鉑被覆之 304L SS 於溫度 200°C 溶氧量 300ppb 的純水中 SSRT 試樣破斷面形貌 SEM 圖。  
Figure 8 SEM images of fractured surface of the 304L SS in pure water environments containing 300 ppb dissolved oxygen at 200°C.



(a) 288°C 測試溫度下 304L SS 試樣側面裂口



(b) 250°C 測試溫度下 304L SS 試樣側面裂口。

圖 9 無鉑被覆之 304L SS 於溶氧量 300ppb 的純水中 SSRT 試樣側面裂口形貌 SEM 圖，(a) 測試溫度 288°C、(b) 測試溫度 250°C。  
Figure 9 Sidewall morphologies of fractured surface of the 304L SS in pure water environments containing 300 ppb dissolved oxygen (a) at 288 °C and (b) at 250°C.

過去的研究提出多種 SCC 發生機制，而其中有一種為氧化膜破裂機制 (Film-rupture Mechanism)<sup>[12,13]</sup>，此機制解釋 SCC 的發生主要分

為三個階段：氧化層破裂→金屬溶解→金屬再鈍化。據我們的推測，本實驗利用之 SSRT 將使 SCC 裂口的氧化層因拉伸而破裂持續的產生，因此，



金屬溶解與再鈍化的速率相互競爭成為主導材料破斷的主要兩步驟，根據本實驗室過去的研究經驗<sup>[11,14]</sup>，在 250°C 與 288°C 的溫度下應存在一個閾值溫度，將使得金屬的再鈍化速率高過金屬溶解，因此在溫度 288°C 下不銹鋼試樣出現較 250°C 下較少的裂縫起始；而在 250°C 的測試溫度下，由於再鈍化的速率不足以抑制金屬的溶解，因此出現較多的裂縫起始且有較差的機械表現；在測試溫度 200°C 的條件下，由於金屬溶解與再鈍化的速率都較慢，故無 SCC 的發生，實驗結果顯示 304L SS 的破裂由延性破裂主導，在破斷面上可觀察到典型的窩穴組織。

有經過鉑被覆之 304L SS 試樣於測試溫度 250°C 與 288°C 下的破斷面形貌 SEM 圖如圖十、圖十一所示。參考圖五與表二的機械表現數據顯示，在測試溫度 288°C 下，有鉑被覆之 304L SS 相較於未經鉑被覆之試樣有較差的機械表現，但在

250°C 的測試溫度下有鉑被覆之試樣與無被覆的機械表現相差不多。而由破斷面的 SEM 分析顯示，有鉑被覆的試樣在測試溫度 288°C 下比無被覆鉑的試樣出現較多的 IGSCC 形貌，推測在鉑的被覆下 IGSCC 的裂縫成長速率較快，因此也導致有鉑被覆的 304L SS 試樣在 288°C 下伸長量較短機械表現較差；而在測試溫度 250°C 下，有無鉑被覆的試樣破斷口 IGSCC 的佔比相差不多。圖十二為經鉑被覆的試樣在 288°C 與 250°C 的 SSRT 結果之側面裂口 SEM 圖。經過鉑被覆的試樣表面預期會有較高的 ECP 且易誘發 SCC，但比較在 288°C 與 250°C 的測試溫度下有無鉑被覆的試樣側面裂口數並沒有很大差異，推測可能是鉑的沉積量不足夠能影響到試樣表面的 ECP，故未看出很明顯差異，未來仍須進一步的研究增加鉑的沉積量來確認在氧化性環境下是否對 304L SS 的 SCC 造成影響。

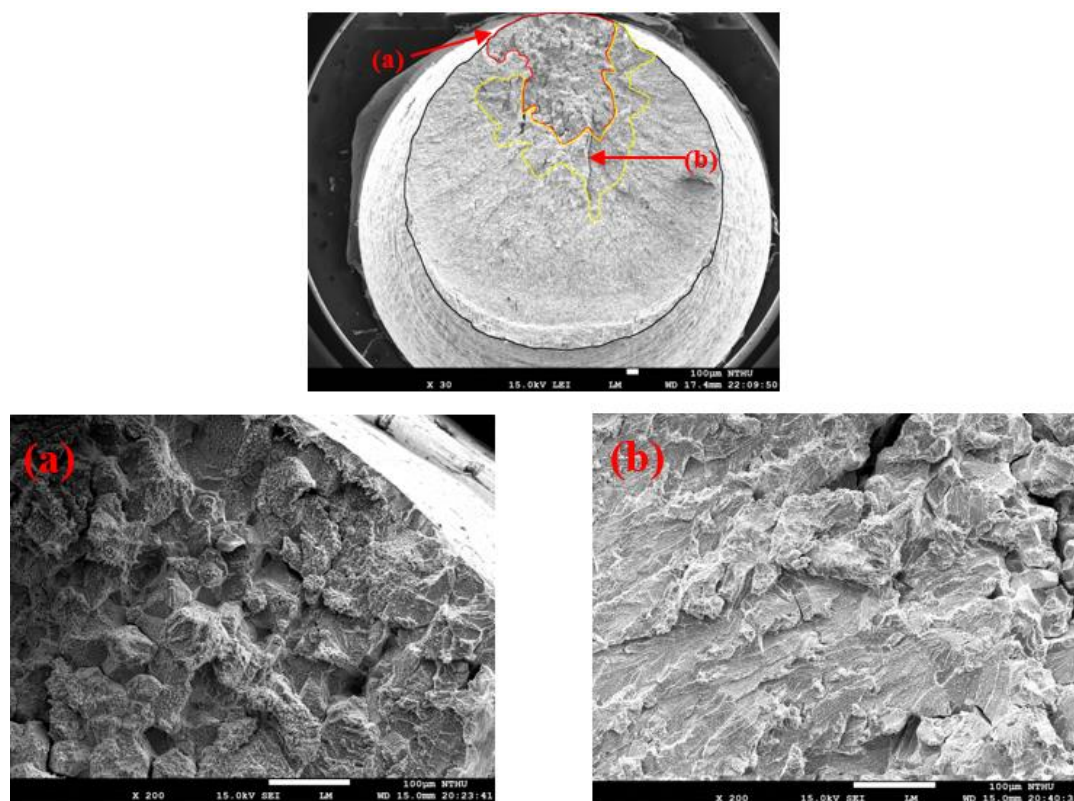


圖 10 經鉑被覆之 304L SS 於溫度 288°C 溶氧量 300ppb 的純水中 SSRT 試樣破斷面形貌 SEM 圖。  
Figure 10 SEM images of fractured surface of the 304L SS with Pt coating in pure water environments containing 300 ppb dissolved oxygen at 288°C.

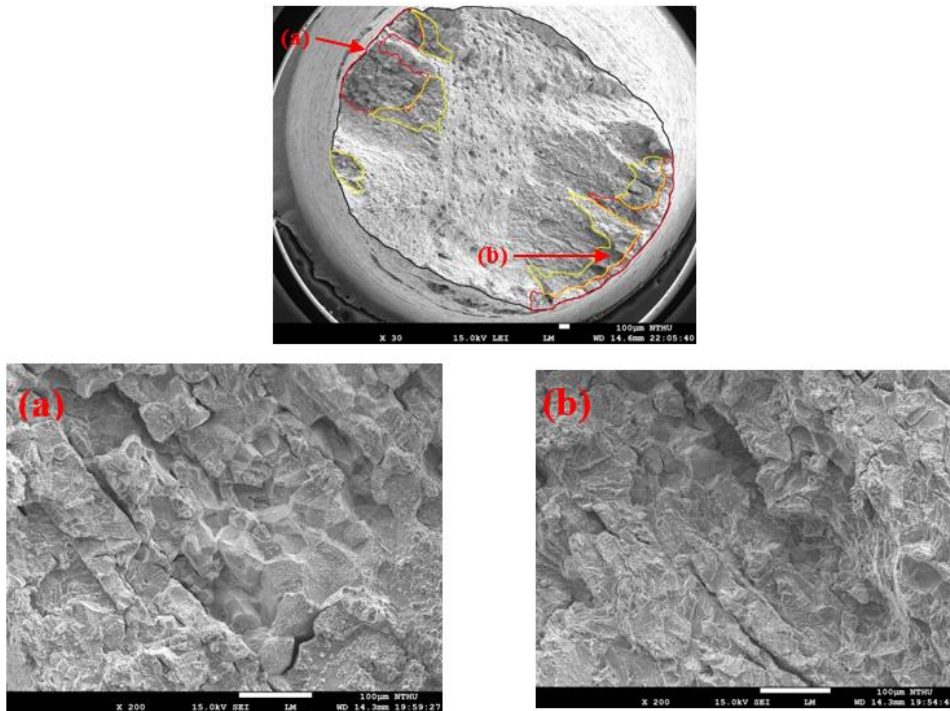
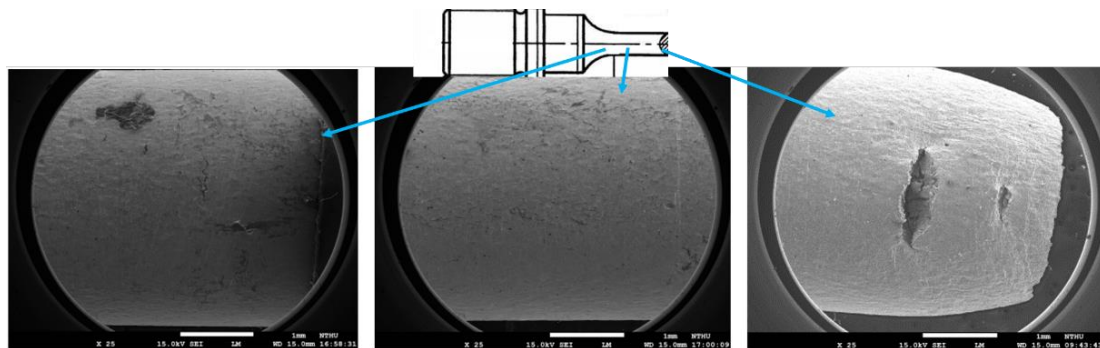
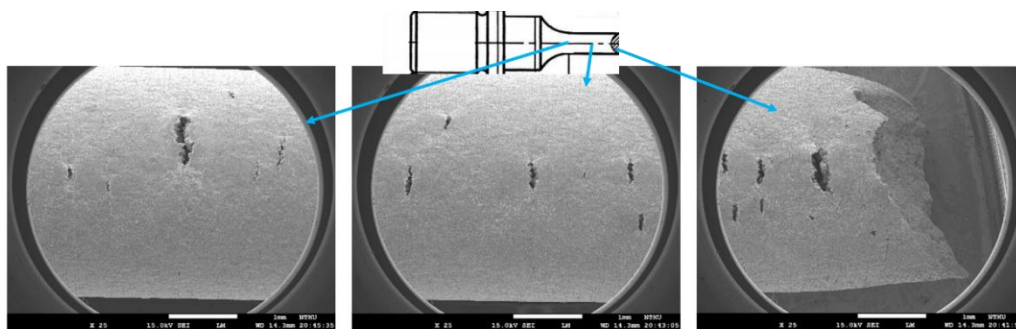


圖 11 經鉑被覆之 304L SS 於溫度 250°C 溶氧量 300ppb 的純水中 SSRT 試樣破斷面形貌 SEM 圖。  
Figure 11 SEM images of fractured surface of the 304L SS with Pt coating in pure water environments containing 300 ppb dissolved oxygen at 250°C.



(a) 288°C 測試溫度下 304L SS 試樣側面裂口



(b) 250°C 測試溫度下 304L SS 試樣側面裂口。

圖 12 經鉑被覆之 304L SS 於溶氧量 300ppb 的純水中 SSRT 試樣側面裂口形貌 SEM 圖，(a) 測試溫度 288°C、(b) 測試溫度 250°C。  
Figure 12 Sidewall morphologies of fractured surface of the 304L SS with Pt coating in pure water environments containing 300 ppb dissolved oxygen (a) at 288°C and (b) at 250°C.

## 4. 結論

有鉑貴重金屬被覆與無鉑貴重金屬被覆的敏化 304L 不銹鋼，在模擬 BWR 啟動過程中的氧化性(含氧量 300ppb)純水環境 200、250、288°C 的測試溫度下，SCC 敏感性利用 SSRT 的測試結果總結如下：

1. 觀察 SSRT 破斷面結構顯示，在測試溫度 288°C 下無論是否有鉑被覆的敏化 304L SS 主要由單一個 IGSCC 裂口佔據試樣破斷面，而在 250°C 的測試溫度下，無論是否有鉑被覆的敏化 304L SS 破斷面上會出現多重的 SCC 裂縫起始；在 200°C 的測試溫度下敏化的 304L SS 沒有 SCC 的發生。
2. 經過鉑的被覆之敏化的 304L SS 在 288°C 的測試溫度下，機械表現較無被覆的差，破斷面上也有較多的 IGSCC 出現。而在 250°C 的測試溫度下，經過鉑被覆 304L SS 與無被覆的機械表現相差不多，破斷面上 SCC 的佔比相近，貴重金屬鉑在此溫度下對 304L SS 表面的催化效果可能較不明顯，以至於對於表面 ECP 的影響不大，對於 SCC 敏感性影響不明顯。

## 參考文獻

- [1] "Hydrogen water chemistry operating experience", R.L.Cowan, et al., International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 25, Issues 1-4, (1986) pp.313-331.
- [2] "A numerical model for evaluating the impact of noble metal chemical addition in boiling water reactors.", Yeh, Tsung-Kuang., Nuclear science and engineering 142.2 (2002) pp.220-229.
- [3] Young-Jin Kim, Peter L. Andresen, "Formation and application of nano noble metal particles to mitigate stress corrosion cracking in BWR," 2010 International Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems, Quebec City, Canada, 2010, 3.01
- [4] S. Hettiarachchi, "NobleChem™ for commercial power plant application," International conference on water chemistry in nuclear reactors systems - operation optimisation and new developments, Avignon, France. April 22-26, 2002
- [5] "The Efficiency of Noble Metals in Reducing the Corrosion Potential in the Primary Coolant Circuits of Boiling Water Reactors Operating under Hydrogen Water Chemistry Operation", T. K. Yeh and D. D. Macdonald, Journal of Nuclear Science and Technology, 43, (2006) pp.1228.
- [6] Hettiarachchi, S., "NobleChem™ for commercial power plant application". Chemistry 2002: International conference on water chemistry in nuclear reactors systems - operation optimisation and new developments, Avignon, France. April 22-26, 2002.
- [7] Kim, Y. J., P. L. Andresen, and S. Hettiarachchi. "Formation and application of nano noble metal particles to mitigate stress corrosion cracking in BWR." Proceedings of the Nuclear Plant Chemistry Conference (NPC 2010). Quebec City: Canada Nuclear Society, 2010 pp.3-7.
- [8] Kazushige Ishida, et al., "Study on Platinum Deposition Treatment on Material Surfaces by Addition of Platinum Oxide Nano-particle in High Temperature Water," 2016 International Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems, Brighton, United Kingdom, October 2-7, 109 (2016)
- [9] Susan Garcia1, et al., "Platinum Behaviour in BWR Systems," 2016 International Conference

- on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems, Brighton, United Kingdom, October 2-7, 109 (2016)
- [10] S. E. Garcia, et al., "Effect of Hydrazine, Carbohydrazide and Hydrogen Injection on Noble Metal Treated Stainless Steel ECP and IGSCC Mitigation During BWR Startups," 2010 International Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems, Quebec City, Canada, October 3-7, 3.09P (2010).
- [11] 何泉漢,「304L不銹鋼和316L不銹鋼於模擬沸水式反應器起動狀態之水化學環境中的應力腐蝕龜裂行為研究」,國立清華大學,碩士論文,2018。
- [12] V. S. Raja, Tetsuo Shoji, in: Stress Corrosion Cracking-Theory and Practice 1st Edition, (Woodhead Publishing, UK, 2011).
- [13] The National Physical Laboratory, Stress Corrosion Cracking-Guides to Good Practice in Corrosion Control, 1982.
- [14] 邱又文,「304不銹鋼於模擬沸水式反應器起動狀態之水化學環境中的應力腐蝕龜裂行為研究」,國立清華大學,碩士論文,2014。