

核二廠#1機反應爐支撐裙板錨定螺栓 斷裂事件第四次審查會報告



台灣電力公司

101年5月14日

報告綱要

- 一、113支螺栓功能確認
- 二、超音波檢測報告
- 三、地震儀0.29g澄清事項
- 四、肇因分析報告
- 五、安全運轉評估報告
- 六、結語

一、113支螺栓功能確認

- 1.113支螺栓已完成預力驗證確認全部均大於560 KIPS，符合設計之510KIPS+10%餘裕之要求，施作過程經品質人員及總處審查工作組、授權核能監查員(ANII)人員查證，記錄文件均完整保存。
- 2.113支螺栓及新裝之7支螺栓經UT檢測合格，檢測過程已錄影存證，每根螺栓UT檢測紀錄均經品質組現場查證及總處審查工作組、授權核能監查員(ANII)人員查證。

一、113支螺栓功能確認_(續)

3.113支螺栓於現場執行硬度測試，利用破損的7支螺栓之硬度量測與實測抗拉強度的關係，推算出剩餘113支螺栓之抗拉強度。測試結果顯示剩餘113支螺栓之最低抗拉強度為內圈C8之148.86ksi，根據B13之實際拉伸測試結果，推算C8降伏強度至少有120.5ksi，仍能符合安全評估接受標準。

一、113支螺栓功能確認_(續)

4. 即使現有剩餘113支錨定螺栓中有超音波未能檢測出而之前已經產生之裂紋存在，則依裂紋成長機制，此裂紋將不會成長或是成長速率極為緩慢。本公司核二廠已規畫於每次大修執行螺栓超音波檢測，可有效追蹤發現成長之裂紋
5. 依本公司評估，即使有深2.5mm未能檢出之裂紋，在發生Faulted Condition時，不致有發生立即斷裂之疑慮。(另詳安全運轉評估報告)

二、超音波檢測報告

1. 螺栓修復前檢測經過

台電核發處非破壞檢測隊於101年3月23日及3月24日曾對全部120支錨定螺栓執行超音波檢測，依程序書規定當時只針對有瑕疵之螺栓錄下檢測訊號波型。

二、超音波檢測報告^(續)

2. 螺栓修復後檢測經過

120支螺栓於preload驗證分批執行後，5月2日至5月3日對120支螺栓(含7支內圈新螺栓)再執行超音波檢測，每根螺栓UT檢測過程均錄下檢測波型存證，且經品質組現場查證及總處審查工作組、授權核能監查員(ANII)人員查證。

二、超音波檢測報告(續)

3. 螺栓修復後檢測結果

120支螺栓全部檢測合格，其超音波檢測波型圖及校準波型圖，詳附於超音波檢測經過報告內。

三、地震儀0.29g澄清事項

1. 訊號來源與分析

- 分析最大加速值0.29g之歷時圖及富氏譜，此地震儀在觸發前即有不穩定現象(零點上下晃動)，而在觸發後，其歷時波形則呈現不對稱性，為一向上脈沖波，振動訊號超過0.2g之時間僅為0.2秒。
- 將此地震儀送交至國家地震研究中心進行測試驗證後，其南北向、東西向均反應正常，而垂直向在引發振動後仍有不穩定的現象產生。

三、地震儀0.29g澄清事項(續)

2. 地震儀不穩定訊號探討

地震儀垂直向長期處於背景振動量(來自於支撐架)約為0.01g左右之環境下，經過一段時間後即會造成感震器內部組件(平衡元件)之疲乏，因而造成零點晃動及訊號的不穩定。

三、地震儀0.29g澄清事項(續)

3. 對系統組件影響

地震儀係量測地震行為之儀器，對於振動量的量測並非適當，儘管0.29g振動量影響時間很短，同時包含有失真訊號，為保守起見，仍完成了反應爐結構及週邊組件檢測及評估，均無異常情形。

三、地震儀0.29g澄清事項(續)

4. 振動監測改善及計畫-1

反應爐

加速度規

95°	H	X.XXXXg
501	V	X.XXXXg

加速度規

30°	H	X.XXXXg
XIT-504	V	X.XXXXg

加速度規

XITS	X	X.XXXXg
302	Y	X.XXXXg

Pump A
1P-43A

加速度規

XITS	X	X.XXXXg
307	Y	X.XXXXg
	Z	X.XXXXg

加速度規

217°	H	X.XXXXg
XIT-502	V	X.XXXXg

加速度規

增8只振動加速規

注意
轉中此處噪音
過八十五分貝
戴耳塞或耳罩

09/04/2012 14:25

09/04/2012 14:40

09/04/2012 14:25

09/04/2012 14:57

三、地震儀0.29g澄清事項(續)

4. 振動監測改善及計畫-2

- 移除護欄



- 增加鋼樑

- 為減少地震儀所在位置之外在高頻干擾(如安裝處之鐵板平台或護欄，可能引發高頻背景)，所以將於101/05/15前在地震儀安裝處之鐵板平台增加斜撐支架或鋼樑，並移除平台上之護欄。
- 另為提高此地震儀之可靠度，亦將定期更換此地震儀。

三、地震儀0.29g澄清事項(續)

4. 振動監測改善及計畫-3

第二核能發電廠營運程序書

編號：SP-2012-06

版次：11

第 4/4 頁

- 為確保反應爐運轉之安全，已建立反應爐基座裙板之振動監測機制，將監測記錄一號機反應爐裙板處在啟動/運轉等各階段的振動值，並依收集之資料訂定一準則，以作為爾後判定機組需降載/停機之評估依據。

程序書名稱：反應爐裙板螺栓振動監測之背景資料收集

列印日期:05/07/12



四、肇因分析

1. 金相/裂紋形貌觀察摘要：

編號	裂紋起始	裂紋深度	裂紋形貌	起始區形貌	成長區形貌	其他	備註
A2	螺桿區	斷裂	平坦	表面損傷 沿晶裂縫 腐蝕破壞形貌	疲勞裂紋	熱處理不良 硫化物夾雜	金相分析
C6	螺牙	斷裂	平坦斜面	牙根部起始 沿晶裂縫 腐蝕破壞形貌	疲勞裂紋	熱處理不良 硫化物夾雜	金相分析
D14	螺牙	幾近斷裂	平坦斜面	表面損傷 沿晶裂縫 腐蝕破壞形貌	疲勞裂紋	熱處理不良 硫化物夾雜	金相分析
B10	螺牙	5~6mm	由螺紋向螺 栓內部及向 下延伸	牙面起始 沿晶裂縫 腐蝕破壞形貌	疲勞裂紋	硫化物夾雜	金相分析 /Phased Array
B13	螺牙	4mm	無明確方向			由Phased Array超音 波檢測其裂 紋形貌與 B10類同， 判斷起始區 與B10相同	Phased Array
C9	螺牙	1mm	無明確方向				Phased Array
D11	螺牙	8mm	由螺紋向螺 栓內部及向 下延伸				Phased Array



四、肇因分析(續)

金相/裂紋形貌觀察：

• A2裂紋形貌



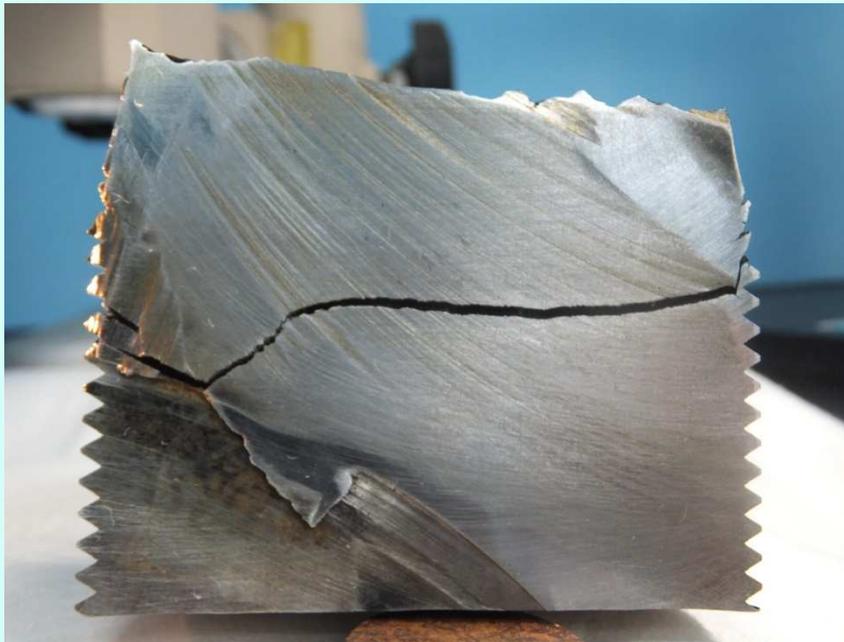
• C6裂紋形貌



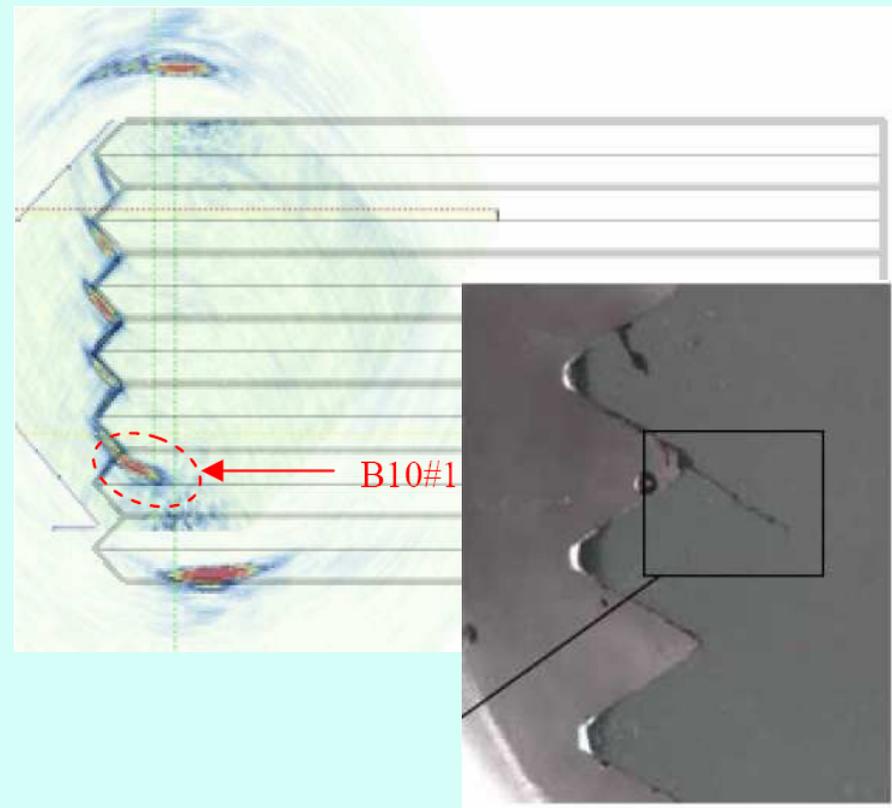
四、肇因分析(續)

金相/裂紋形貌觀察：

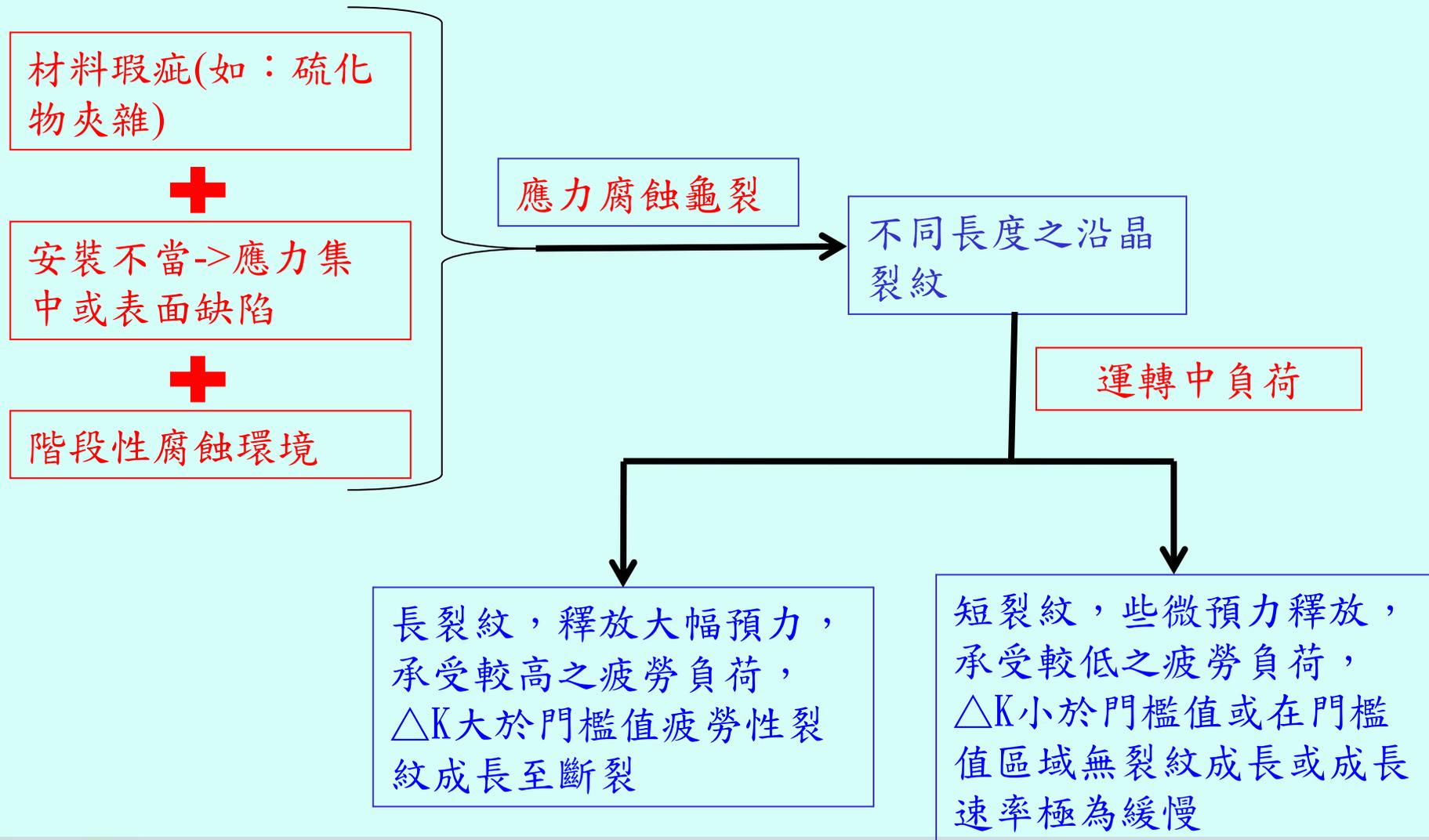
- D14裂紋形貌



- B10裂紋形貌

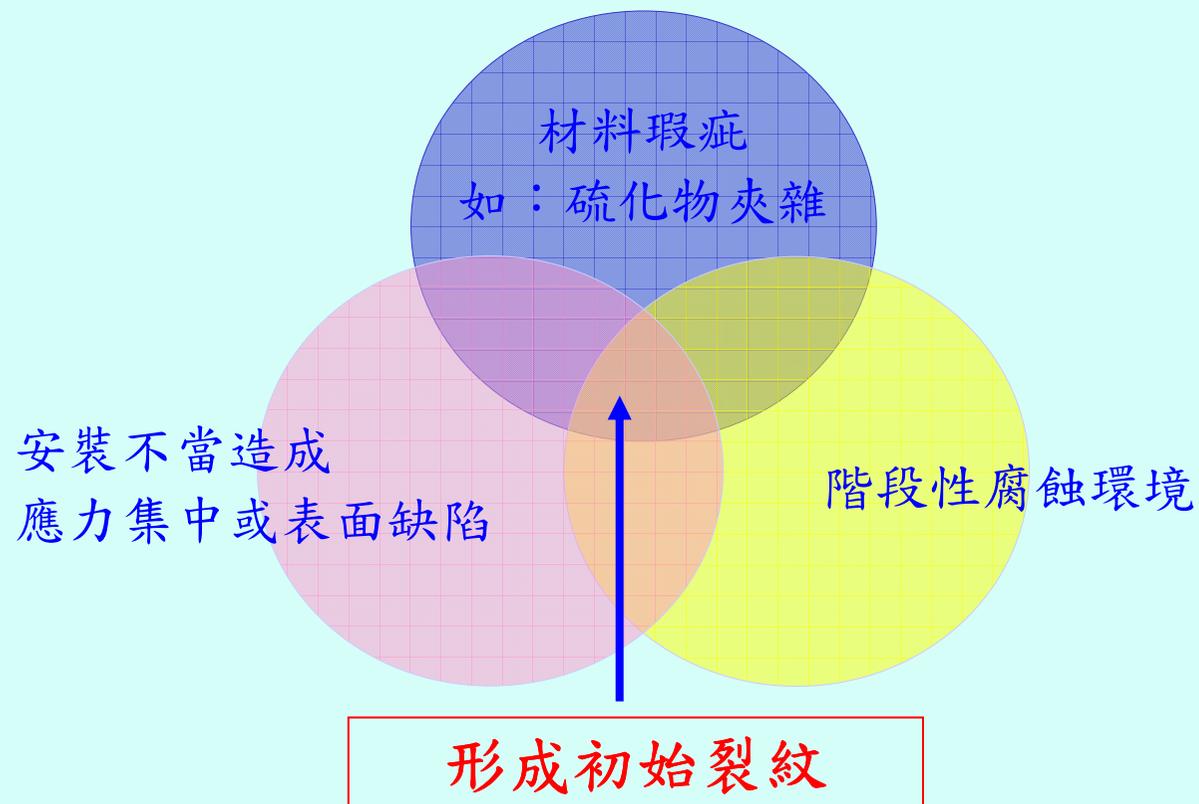


四、肇因分析(續)



四、肇因分析(續)

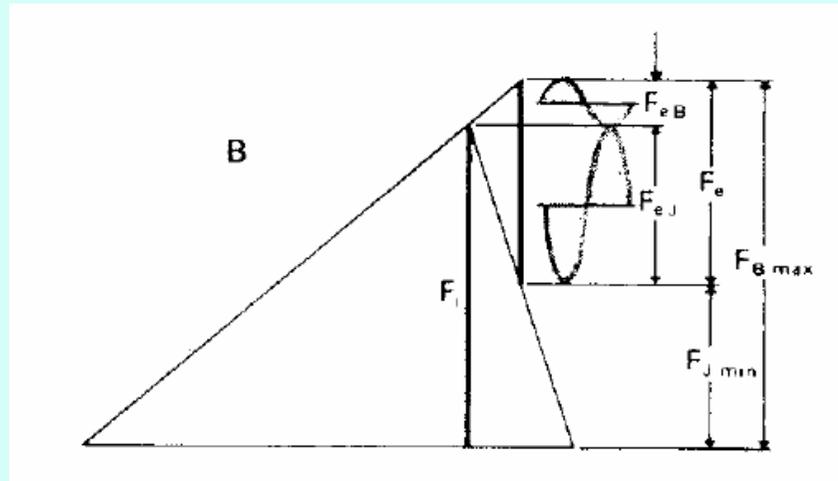
支撐裙板錨定螺栓之肇因：應力腐蝕龜裂(SCC)



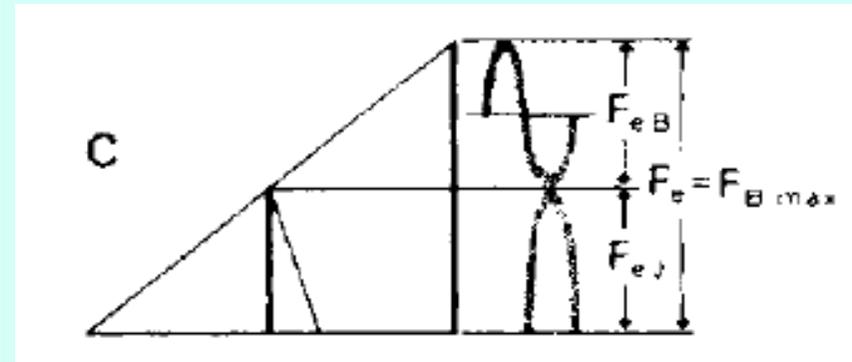
四、肇因分析(續)

裂紋開口與螺栓預力關係：

- 如初始裂縫過長，高剛性螺栓預力將大幅降低，在運轉中承受較高之疲勞負荷。



external load divided into an additional bolt load F_{eB} and reduction in joint compression F_{eJ}



insufficient preload F_i causes excessive additional bolt load F_{eB} .

四、肇因分析^(續)

- 即使現有剩餘113支錨定螺栓中有超音波未能檢測出而當時已經產生之裂紋存在，則依裂紋成長機制，此裂紋不會成長或成長速率極為緩慢。
- 對可能有成長的裂紋，因其成長速率極為緩慢，本公司核二廠已規畫於每次大修執行螺栓超音波檢測，可有效追蹤發現成長之裂紋，確保機組安全運轉無虞。

五、安全運轉評估

■ 本次評估重點

(核二廠反應爐支撐裙板錨定螺栓破壞力學及疲勞評估報告Rev. 2)

(核二廠1號機反應爐支撐裙板錨定螺栓斷裂面金相呈現之疲勞裂縫成長機制探討. ppt)

➤ 採用螺栓斷裂韌度 $K_{IC} = 115.26 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}}$

- 審查會質疑螺栓斷裂韌度 $K_{IC} = 174 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}}$ 偏高，本公司由斷裂螺栓取樣進行夏比衝擊能試驗，採用其中最低值換算，另本公司蒐集4340材料相關文獻，比較不同回火溫度之材料韌度，並由實際斷裂面推估錨定螺栓之 K_{IC} ，推斷錨定螺栓斷裂韌度 $K_{IC} = 115.26 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}}$ 應屬合理。

五、安全運轉評估(續)

- 採用符合實際幾何形狀之應力強度因子 K_I 計算式
 - 前一版(Rev.1)評估中，應力強度因子 K_I 採用圓柱體360°全周裂紋進行計算，顯然過度保守。本次評估採用外徑3"，8UN螺牙螺栓，符合核二廠反應爐支撐裙板錨定螺栓實際幾何形狀之 K_I 計算式。評估過程保守假設裂縫存在螺紋根部。

五、安全運轉評估(續)

■ 本次評估重點

- 增加地震力(包括SRV沖放)之疲勞評估
- 假設發生安全停機地震(SSE)及SRV沖放，反應爐支撐裙板承受 $\pm 3,125,000$ in-kips之翻轉力矩(overturning moment)，並保守假設7錨定螺栓維持原來未修復前之失效情況，其餘螺栓維持最小預力510 kips之情況下，以有限元素分析螺栓承受之最高軸向交變應力 $\Delta\sigma = 12.42\text{ksi}$ (90.16ksi \sim 77.73 ksi)，疲勞壽命為 3.84×10^5 cycles。(估計每次事件歷時1分鐘，則應力循環數為498 cycles)

五、安全運轉評估(續)

■ 螺栓斷裂面金相呈現之疲勞裂縫成長機制探討

- 由本項探討可瞭解，螺栓因某些因素導致萌生初始裂縫，並達到疲勞裂縫成長門檻時，微小動態應力在長時間的持續作用下，可能導致結構疲勞裂縫成長而致斷裂。
- 依推斷，錨定螺栓產生疲勞裂縫成長而致斷裂之驅使力應係承受運轉中持續存在之輕微振動力，造成螺栓承受輕微交變應力，由於此項交變應力遠低於螺栓材料之疲勞極限值(endurance limit)，對一般完好結構不構成威脅，設計中亦未予考慮。

五、安全運轉評估(續)

■ 螺栓斷裂面金相呈現之疲勞裂縫成長機制探討(續)

- 假設其餘113支螺栓螺牙根部均存在2.5 mm UT未檢測出之裂縫，運轉中持續承受上列之交變應力，則2.5 mm深度以下之裂縫不致於產生疲勞裂縫成長。
- 若保守假設2.5mm裂縫於運轉中持續承受上列之交變應力會產生疲勞裂縫成長，則其疲勞壽命為3.91 ~6.56年，下個週期之UT檢測前，不至於有結構安全疑慮。

五、安全運轉評估(續)

■ 評估結果

- 分析結果顯示，即使假設核二廠反應爐支撐裙板每支錨定螺栓均存在2.5 mm之裂縫，在運轉過程中，承受設計基準最嚴苛之故障狀況(SSE + LOCA)負載時，不會有發生螺栓立即斷裂之疑慮。
- 承受可能的交變應力，包括地震力(包括SRV沖放)、每次起停機反應爐支撐裙板之外漲內縮及量測到的垂直振動等，其40年發生之應力循環數均遠低於螺栓之疲勞裂縫成長壽命。

五、安全運轉評估(續)

■ 評估結果

- A2、C6及D14螺栓出現較深之初始裂縫後(6 mm 以上)，導致發生疲勞裂縫成長而致斷裂之驅使力應係承受運轉中持續存在之輕微振動力，造成螺栓承受輕微交變應力。此項交變應力對2.5 mm 以下裂縫之螺栓不致產生疲勞裂縫成長，即使保守假設會成長，其壽命為3.91 ~ 6.56年。
- 基於上述之分析及探討結果，配合妥善的維護計畫(UT檢測計畫)，核二廠1號機錨定螺栓繼續運轉一個週期安全無虞。

六、結 語

1. 即使現有錨定螺栓中有超音波未能檢測出而當時已經產生之裂紋存在，此裂紋是不會成長或是成長速率極為緩慢。(詳肇因分析報告)
2. 7支螺栓均已修復(詳螺栓修復報告)
3. 113支螺栓功能確保(詳113支螺栓功能確保報告)
4. 反應爐結構\周邊組件安全確保(詳結構\周邊組件安全確保報告)



六、結 語(續)

5. 每次大修執行螺栓超音波檢測
6. 反應爐裙板振動監測
7. 最嚴苛之故障狀況(Faulted Condition)
負載不致發生螺栓立即斷裂(詳安全運轉
評估報告)

基於上述，核二廠一號機應可繼續安全運轉一個週期以上無虞。

核能發電
追求卓越

安全第一
品質為先



敬請
批評指教

