

# 核二廠反應爐支撐裙板錨定螺栓 破壞及疲勞評估報告

台灣電力公司

101.4.25



- 一、前言
- 二、裂縫假設及應力強度因子之計算
- 三、螺栓斷裂分析
- 四、裂縫疲勞壽命評估
- 五、結論



# 一、前言

- 核二廠1號機EOC-22大修期間，發現7支瑕疵螺栓，目前已有6支修復完成，另1支亦進行修復中，其餘113支螺栓經UT檢測未發現裂縫顯示。
- 但為能確切掌握反應爐相關結構之安全，本公司保守假設錨定螺栓仍有可能存在UT檢測無法判讀的瑕疵，採取與原設計不同之考量方式，進行破壞力學分析，並預估可能之變動負載進行疲勞壽命評估。

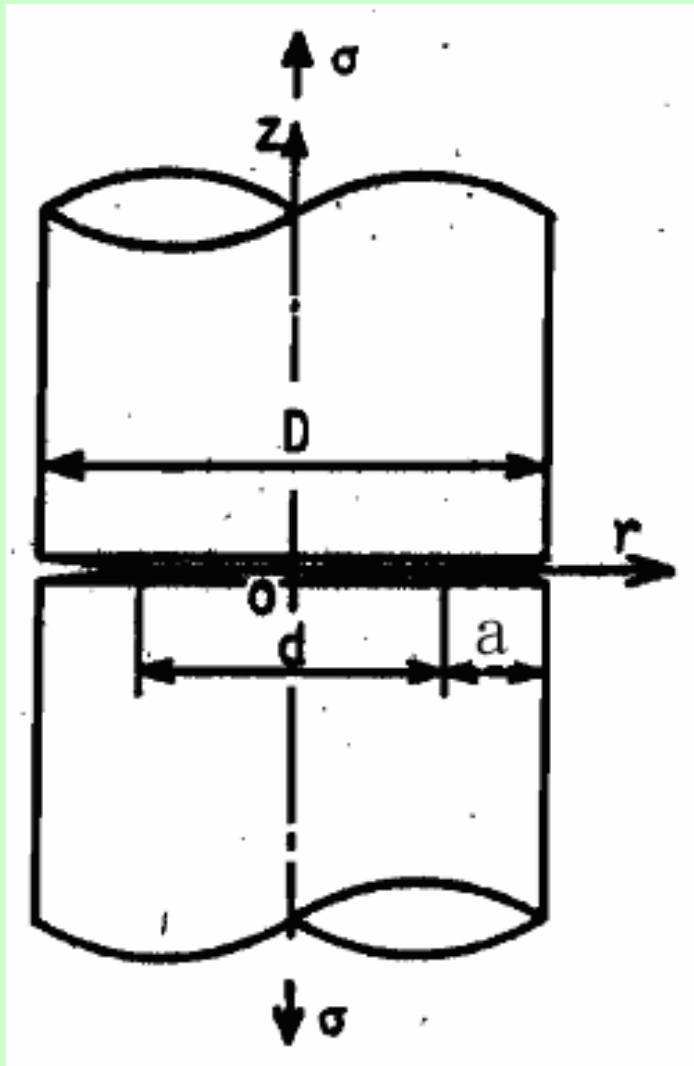


## 二、裂縫假設及應力強度因子之計算

### 裂縫假設

- 假設裂縫發生在螺牙根部，且螺牙溝槽為裂縫之一部份，裂縫為 $360^\circ$ 之周向裂縫。
- 假設螺栓內部仍存有UT未檢測出的2.5mm深之裂縫。
- 錨定螺栓外徑3"，螺紋根徑為2.8466"，螺牙深度為 $(3.00-2.8466)/2 = 0.0767" = 1.95 \text{ mm}$ 。
- 本分析假設螺栓之初始裂縫為 $2.5\text{mm} + 1.95 \text{ mm} = 4.45\text{mm}$ ，並保守假設為 $360^\circ$ 之全周裂縫。

## 二、裂縫假設及應力強度因子之計算(續)



圓柱體360°全周裂縫之應力強度因子 $K_I$

$$K_I = F \sigma_{net} \sqrt{\pi a d / D}$$

$$F = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{2} \lambda + \frac{3}{8} \lambda^2 - 0.363 \lambda^3 + 0.731 \lambda^4 \right) \left[ 1 + 0.1 \left( \frac{2a}{D} \right)^{1/2} \left( 1 - \frac{2a}{D} \right)^2 \right]$$

$$\lambda = \frac{d}{D}$$

$$\sigma_{net} = \sigma \left( \frac{D}{d} \right)^2$$

$K_I$ ：裂縫承受軸向拉張力所引發之Mode I應力強度因子

F：計算之裂縫幾何形狀係數

$\sigma$ ：圓柱體承受之軸向應力

$\sigma_{net}$ ：未裂截面承受之平均軸向應力

d：裂縫尖端所處之直徑

a：裂縫深度

D：圓柱體外徑

### 三、螺栓斷裂分析(續)

#### ➤ 脆性材料之斷裂準則

$$K_I \geq K_{IC}$$

$K_I$ ：應力強度因子

$K_{IC}$ ：材料之斷裂韌度(fracture toughness)

#### ➤ 圓周裂縫之錨定螺栓承受軸向力之斷裂條件

$$K_I = F \sigma_{net} \sqrt{\pi a d / D} = K_{IC}$$



### 三、螺栓斷裂分析(續)

#### ➤ 核二廠反應爐支撐裙板錨定螺栓材料之斷裂韌度

- 依據此批材料測試報告(CMTR)，錨定螺栓材料在90°F常溫下之夏比衝擊能(Charpy Impact Energy，CVN)為48~54ft-lb之間。
- 夏比衝擊能(CVN)與斷裂韌度(fracture toughness( $K_{IC}$ ))之關係

Rolfe-Novak-Barsom correlation

$$\left( \frac{K_{IC}}{S_y} \right)^2 = 5 \left( \frac{CVN}{S_y} - 0.05 \right)$$

降服強度 --- 110~246 ksi &  
夏比衝擊能 --- 16~89 ft-lb

$K_{IC}$ ：材料之斷裂韌度， $ksi\sqrt{in}$

$S_y$ ：材料之降服強度， $ksi$

CVN：材料之夏比衝擊能，ft-lb

### 三、螺栓斷裂分析(續)

#### ➤ 核二廠反應爐支撐裙板錨定螺栓材料之斷裂韌度

- 螺栓材料在90°F常溫下之斷裂韌度(fracture toughness( $K_{IC}$ ))為174~186  $ksi\sqrt{in}$  之間。
- 分析採用  $K_{IC} = 174 \text{ } ksi\sqrt{in}$

### 三、螺栓斷裂分析(續)

#### ➤ 錨定螺栓發生脆性斷裂之臨界裂縫深度

- ✓ 本公司針對核二廠1號機反應爐支撐裙板錨定螺栓尚有一支A2螺栓未修復時，以有限元素分析承受設計基準最嚴苛之故障狀況(SSE+LOCA)負載時，受力最嚴重之螺栓將承受672.32 kips，承受之軸向拉伸應力為 $672.32/6.51=103.27$  ksi。
- ✓ 錨定螺栓臨界裂縫深度為0.460"(11.68 mm)。

## 四、裂縫疲勞壽命評估

### ➤ 裂縫疲勞成長門檻

$$\Delta K_I = \Delta K_{th}$$

$\Delta K_I$  : 交變應力強度因子 (Stress Intensity Factor Range)

$\Delta K_{th}$  : 裂縫疲勞成長門檻之交變應力強度因子

### ➤ 裂縫疲勞成長

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K_I)^m$$

$\frac{da}{dN}$  : 每一受力循環之裂紋深度成長量，in/cycle或m/cycle等

C : 材料疲勞特性常數，由實驗得之。

m : 一般金屬材料之疲勞裂縫成長，其成長量da/dn與有密切關係



## 四、裂縫疲勞壽命評估(續)

### ➤ 裂縫疲勞成長(續)

$$\Delta K_I = F \Delta \sigma_{net} \sqrt{\pi a d / D}$$

$$\begin{aligned} N_f &= \int_0^N dN = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{c (\Delta K_I)^m} = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{c [F \Delta \sigma_{net} \sqrt{\pi a d / D}]^m} \\ &= \frac{a_c^{(1-m/2)} - a_0^{(1-m/2)}}{(1-m/2) C F^m (\pi d / D)^{m/2} (\Delta \sigma_{net})^m} \quad (m \neq 2) \\ &= \frac{1}{C} \frac{1}{F^2 (\pi d / D) (\Delta \sigma_{net})^2} \ln \left( \frac{a_c}{a_0} \right) \quad (m=2) \end{aligned}$$

$a_0$ ：初始裂紋深度

$a_c$ ：臨界裂紋深度

$N_f$ ：裂紋深度由  $a_0$  擴展至  $a_c$  所  
經歷之應力循環數

## 四、裂縫疲勞壽命評估(續)

### ➤ 反應爐支撐裙板錨定螺栓可能承受之交變負載

#### ✓ Thermal moment (起停機反應爐支撐裙板外漲內縮)

- ❖ 受力最嚴重螺栓承受之軸向力為125.11 kips，應力為19.22 ksi。
- ❖ 螺栓承受  $\Delta\sigma = 19.22$  ksi之交變應力，應力循環頻率為每次起停機。

#### ✓ 反應爐急停而產生之交變垂直上揚力

- ❖ OSG-XE-105強震儀曾記錄到最高之垂直加速度值曾達到0.297 g，介於於OBE (0.2 g)及SSE (0.4 g)之間，分析反應爐急停對錨定螺栓之疲勞影響，可保守假設此事件所發生之垂直上揚力比照SSE + LOCA之最嚴苛事故
- ❖ 在最嚴苛事故(SSE + LOCA)下，反應爐支撐裙板承受1083 kips之垂直上揚力時，受力最嚴重螺栓所承受之軸向力為10.48 kips，應力為 $10.48 \text{ kip} / 6.51 = 1.61 \text{ ksi}$

## 四、裂縫疲勞壽命評估(續)

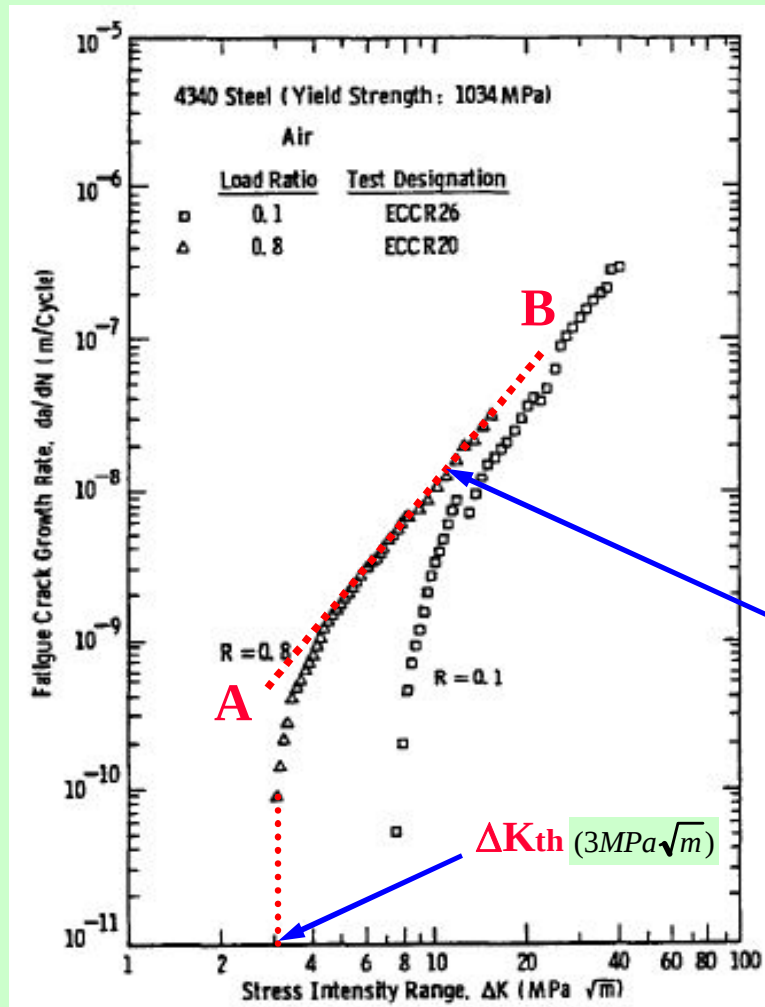
### ✓反應爐急停而產生之交變垂直上揚力(續)

- ❖ 依OSG-XE-105強震儀記錄顯示，振動信號超過OBE 0.2 g之時間為0.2秒，整個歷程由引動到回復背景值歷時1.7秒，應力循環頻率可假設為反應爐之基礎振動模式頻率8.29 Hz。
- ❖ 此一事件承受之交變應力為1.61 ksi，經歷循環數為 $8.29 \times 1.7 = 14$  cycles。



## 四、裂縫疲勞壽命評估(續)

### ✓ ASME A-540 Gr B23 Class 1材料之疲勞特性



$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K_I)^m$$

$$c = 4.78 \times 10^{-11} \text{ m/cycle}$$
$$m = 2.32$$

## 四、裂縫疲勞壽命評估(續)

### ✓疲勞壽命評估結果(續)

#### ❖螺栓承受thermal moment

- 交變應力  $\Delta\sigma_p = 19.22 \text{ ksi (132.55 Mpa)}$
- 可求得達到  $\Delta K_{th}$  之裂縫深度為  $0.0008 \text{ m} = 0.8 \text{ mm} < 4.45 \text{ mm}$
- 裂縫會疲勞成長
- 裂紋深度由  $4.45 \text{ mm}$  擴展至  $11.68 \text{ mm}$  之受力循環數為  $8.2 \times 10^4 \text{ cycles}$  (附件一)
- 每部機40年之應力循環數應在100次以內( $<< 8.2 \times 10^4$ )
- 對反應爐支撐裙板錨定螺栓之疲勞破壞沒有威脅性。

## 四、裂縫疲勞壽命評估(續)

### ✓疲勞壽命評估結果(續)

#### ❖反應爐急停而產生之交變垂直上揚力

- 交變應力  $\Delta\sigma = 1.61 \text{ ksi (11.10 Mpa)}$
- 可求得 達到  $\Delta K_{th}$ 之裂縫深度為  $18.0 \text{ mm} > 4.45 \text{ mm}$
- 裂縫不會疲勞成長
- 若保守假設上述交變負載會讓螺栓之裂縫落在裂縫成長區，裂紋深度由  $4.45 \text{ mm}$ 擴展至  $11.68 \text{ mm}$ 之受力循環數為  $2.6 \times 10^7 \text{ cycles}$
- 估計每一事件之應力循環數應在14次以內，假設每次停機均發生此一事件，則總應力循環數為  $1400 \text{ cycles}$  ( $\ll 2.6 \times 10^7$ )
- 對反應爐支撐裙板錨定螺栓之疲勞破壞沒有威脅性。

## 五、結論

- ✓ 假設錨定螺栓仍有可能存在UT檢測無法判讀的2.5 mm之裂縫深度，加上螺紋深度，本分析假設螺栓之初始裂縫為4.45 mm之全周裂縫，進行破壞力學分析，並預估可能之變動負載進行疲勞壽命評估。
- ✓ 反應爐支撐裙板錨定螺栓承受設計基準最嚴苛之故障狀況(SSE+LOCA)之負載時，受力最嚴重之螺栓發生脆斷時之臨界裂縫深度為0.46053 in (11.684 mm)，因此，假設目前錨定螺栓有現存2.5mm之裂縫深度，在發生SSE+LOCA時，不致有發生立即斷裂之疑慮。



## 五、結論(續)

- ✓ 錨定螺栓承受thermal moment交變應力，裂縫之疲勞壽命為  $4.5 \times 10^5$  cycles。由於此項thermal moment發生之應力循環頻率為每次起停機，保守估計每部機運轉40年之應力循環數應在100 cycles以內 ( $\ll 4.5 \times 10^5$ )，換言之，此項負載對反應爐支撐裙板錨定螺栓之疲勞破壞沒有威脅性。
- ✓ 保守假設錨定螺栓承受反應爐急停產生之交變垂直上揚力與SSE+LOCA產生相同的上揚力，，裂縫之疲勞壽命為  $2.6 \times 10^7$  cycles。此一事件經歷時間極短 (1.7 sec)，估算反應爐運轉40年應承受1400個應力循環數以內 ( $\ll 2.6 \times 10^7$ )，顯示此項負載對反應爐支撐裙板錨定螺栓之疲勞破壞沒有威脅性。

## 五、結論(續)

- ✓ 由以上分析結果顯示，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(加上螺紋深度共4.45 mm)之裂縫，在運轉過程中，包括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(斷裂前之容許應力循環數)。因此，核二廠1號機應可繼續安全運轉一個週期以上無虞。

報告完畢

敬請指教

