

# 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

台灣電力公司

101.5.14

1. 疲勞裂縫成長驅使力之推估
2. 裂縫疲勞壽命之估算
3. 繼續運轉安全評估
4. 結論

# 1. 疲勞裂縫成長驅使力之推估

- A2、C6及D14螺栓斷裂面觀察到疲勞裂紋成長之前之裂縫深度為6~8 mm。
- 3支螺栓斷裂前之裂縫深度佔螺栓截面之50%以上，裂縫深度至少應為 $2.8466"/2=1.4233"$  (36.15 mm)。
- 研判疲勞裂縫成長驅使力應為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，估計17 ksi\*以上)，設計中並未予考慮。

\* 依文獻，回火溫度800°F之4340材料之疲勞極限為68 ksi (un-notched)，考慮螺牙根部應力集中係數約為4.0，疲勞極限值為 $68/4=17$  ksi。核二廠反應爐錨定螺栓材料回火溫度較高(900~950°F)，疲勞極限值稍高。

# 1. 疲勞裂縫成長驅使力之推估(續)

## □ 推估運轉中的交變應力 $\Delta\sigma$

- 應力比 $R \approx 1.0$ (平均應力極高)，螺栓材料之疲勞裂縫開始成長交變應力強度因子( $\Delta K_{th}$ )很小，文獻上無數據可以引用。為試圖瞭解A2、C6及D14螺栓斷裂面觀察到的裂紋疲勞破壞機制初步假設  $\Delta K_{th} = 0.5 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}}$ 。➡
- 依金相檢查結果，疲勞裂縫起始深度 $a = 6 \text{ mm}$ ，該裂縫深度之幾何形狀修正係數 $F = 1.2029$ 。

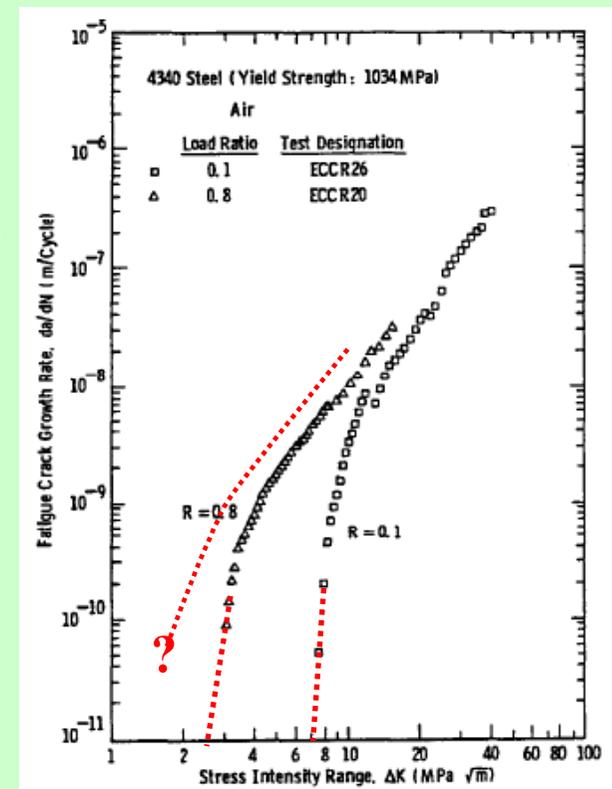
$$\Delta K_I = F\Delta\sigma\sqrt{\pi a} = \Delta K_{th} = 0.5 \quad \text{-----}(1)$$

- (1)式計算結果，交變應力 $\Delta\sigma = 0.483 \text{ ksi}$

- ## □ 推斷 $\Delta\sigma$ 由運轉中反應爐所引動，合理假設其應力作用頻率為反應爐基礎模式自然頻率8.29 Hz。

## 推估4340材料(降服強度1065 MPa)之 $\Delta K_{th}$ :

- 微小交變應力+preload，應力比 $R = \sigma_{min}/\sigma_{max} \approx 1.0$ 。
- $R=0.1$   $\Delta K_{th} = 7.0 \text{ MPa}\sqrt{m}$
- $R=0.8$   $\Delta K_{th} = 2.5 \text{ MPa}\sqrt{m}$
- $R=1.0$   $\Delta K_{th} = ?$
- 初步假設 $\Delta K_{th} = 0.5 \text{ ksi}\sqrt{in}$  ( $0.55 \text{ MPa}\sqrt{m}$ )  
以試圖瞭解A2、C6及D14螺栓斷裂面  
觀察到的裂紋疲勞破壞機制。



## 2. 裂縫疲勞壽命之計算

□ A2、C6及D14斷裂面觀察到斷裂前之裂縫深度約佔螺栓截面之50%以上，裂縫深度至少應為 $2.8466''/2=1.4233''$  (36.15 mm)。

□ 裂縫疲勞壽命

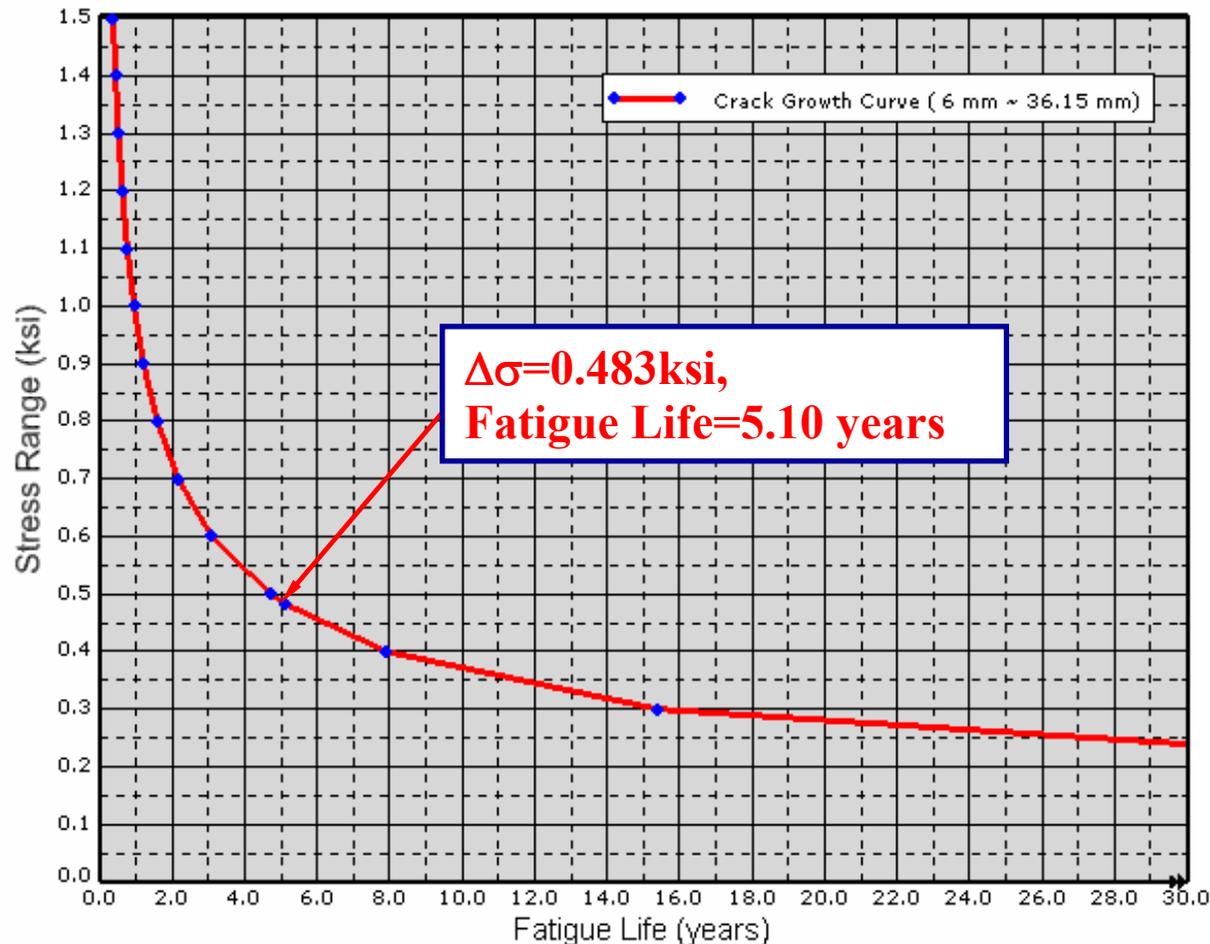
$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K_I)^m$$

$$\begin{aligned} N_f &= \int_0^N dN = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{c(\Delta K_I)^m} = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{c[F\Delta\sigma\sqrt{\pi a}]^m} \\ &= \frac{a_c^{(1-m/2)} - a_0^{(1-m/2)}}{(1-m/2)CF^m(\pi)^{m/2}(\Delta\sigma)^m} \end{aligned}$$

## 2. 裂縫疲勞壽命之計算(續)

- 計算裂縫由6 mm開始疲勞裂縫成長至36.15 mm斷裂時之疲勞壽命為5.10年，與金相觀察結果相近。

核二廠反應爐支撐裙板錨定螺栓交變應力與疲勞壽命關係線圖



### 3. 繼續運轉安全評估

#### □ 假設螺栓螺牙根部存在2.5 mm UT未檢測之裂縫

- 承受0.483 ksi交變應力，裂縫尖端之交變應力強度因子  $\Delta K_I = 0.428 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}} < \Delta K_{\text{th}} = 0.5 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}}$ ，裂縫不會成長。
- 保守假設裂縫會成長，裂縫斷裂尺寸比照C6螺栓(36.15 mm)，其疲勞壽命為6.56年。➡
- 保守假設裂縫會成長，以螺栓  $K_{IC} = 115.26 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}}$ ，並考慮裂縫成長後，preload下降效應，發生斷裂之臨界裂縫尺寸為13.97 mm (0.55") [如計算之bolt fracture curve]，其疲勞壽命為3.91年。➡

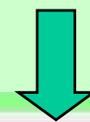


## 4. 結論

- 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。
- 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。

## 4. 結論 (續)

- 引用航空界對飛機之損傷容限(**Damage Tolerance**)結構安全觀：結構難免有瑕疵，但只要有妥善的維護計畫(UT檢測計畫)，可以在設備失效前檢測出諸如疲勞與腐蝕裂紋，並加以修復，則可確保設備之安全營運。[詳如附]
- 基於上述之探討結果，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。



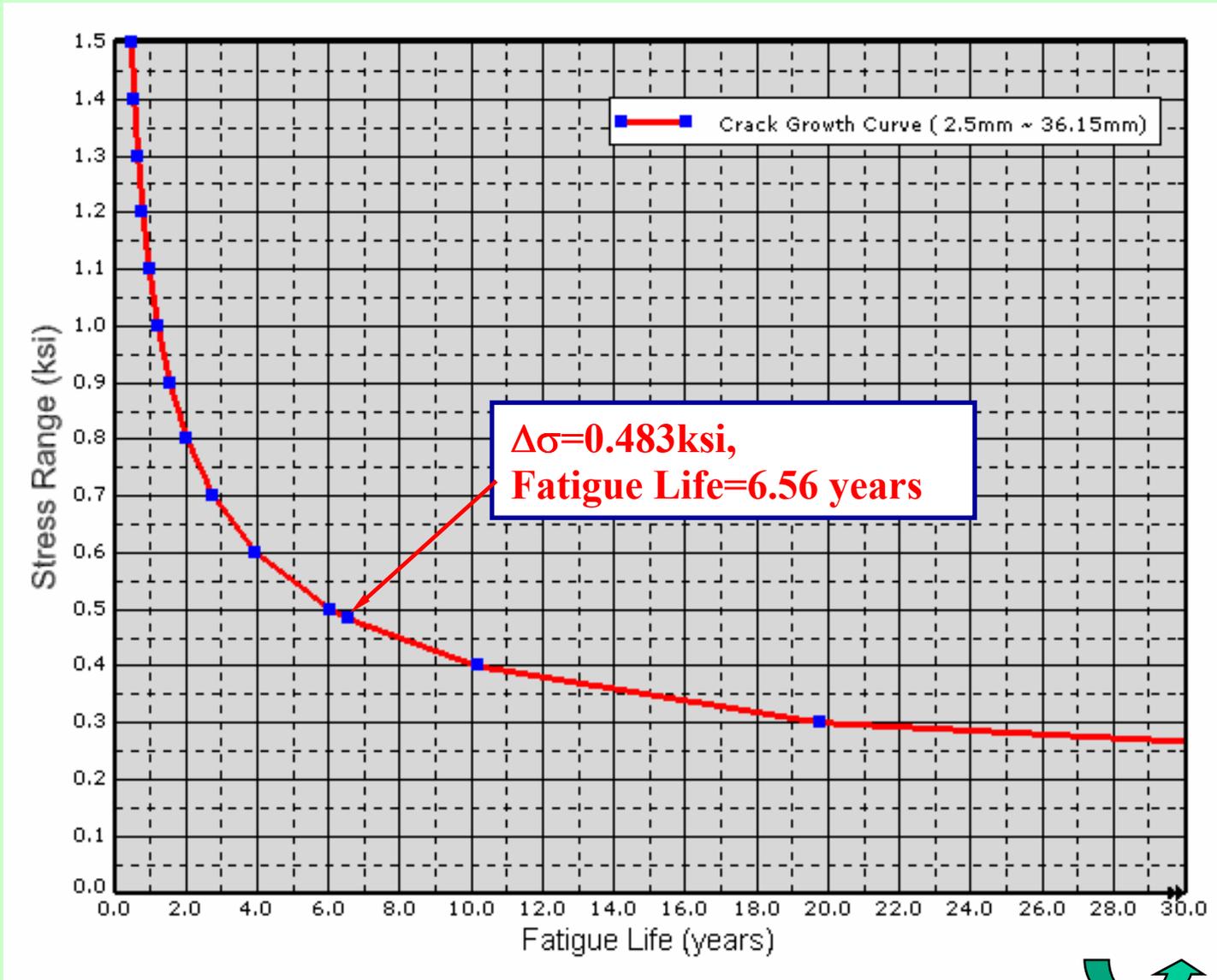
# Damage Tolerance

Damage tolerance is based on the assumption that **flaws can exist in any structure** and such flaws propagate with usage. This approach is commonly used in aerospace engineering to manage the extension of cracks in structure through the application of the principles of fracture mechanics.

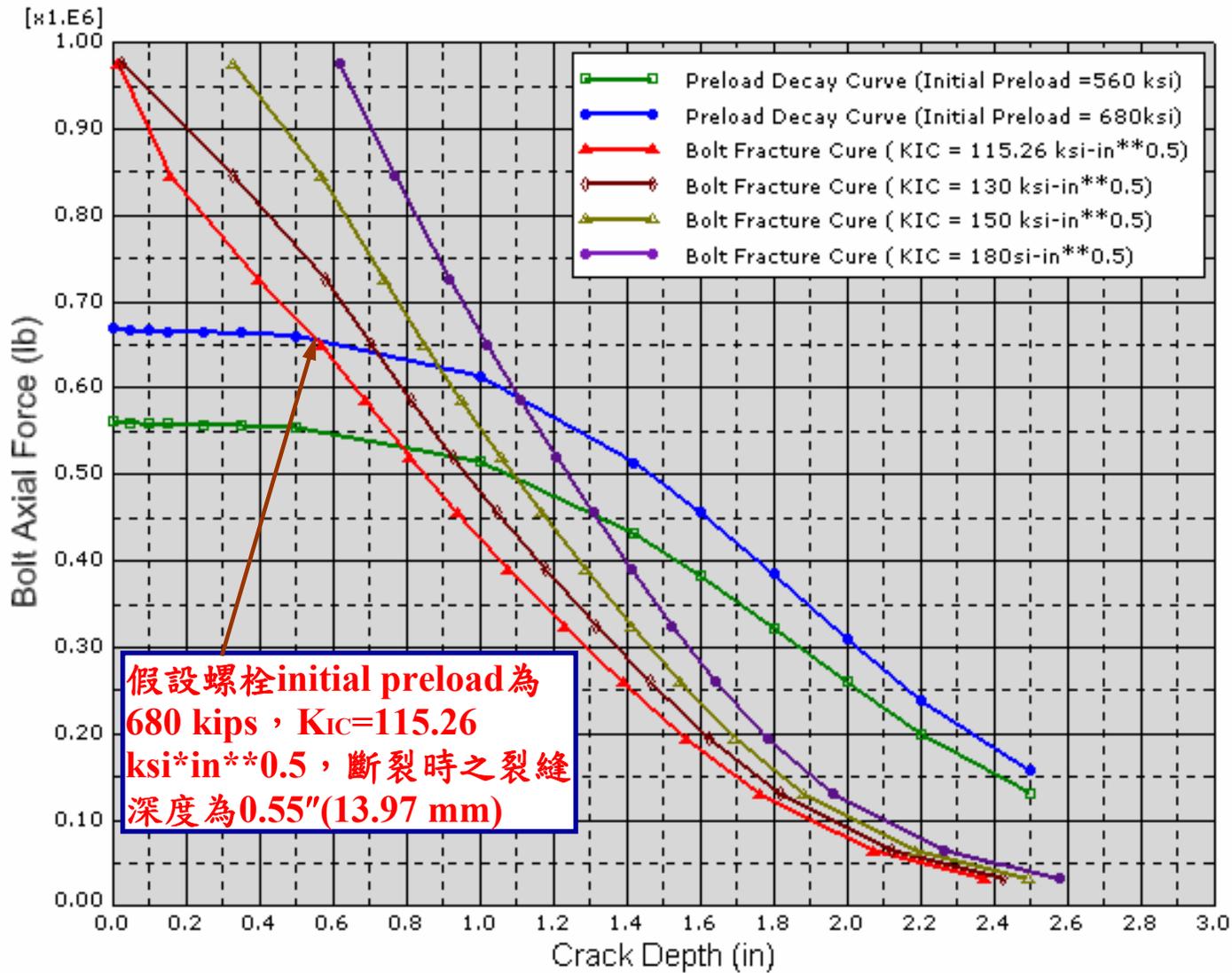
In aerospace engineering, structure is considered **to be damage tolerant if a maintenance program has been implemented that will result in the detection and repair of accidental damage, corrosion and fatigue cracking** before such damage reduces the residual strength of the structure below an acceptable limit.



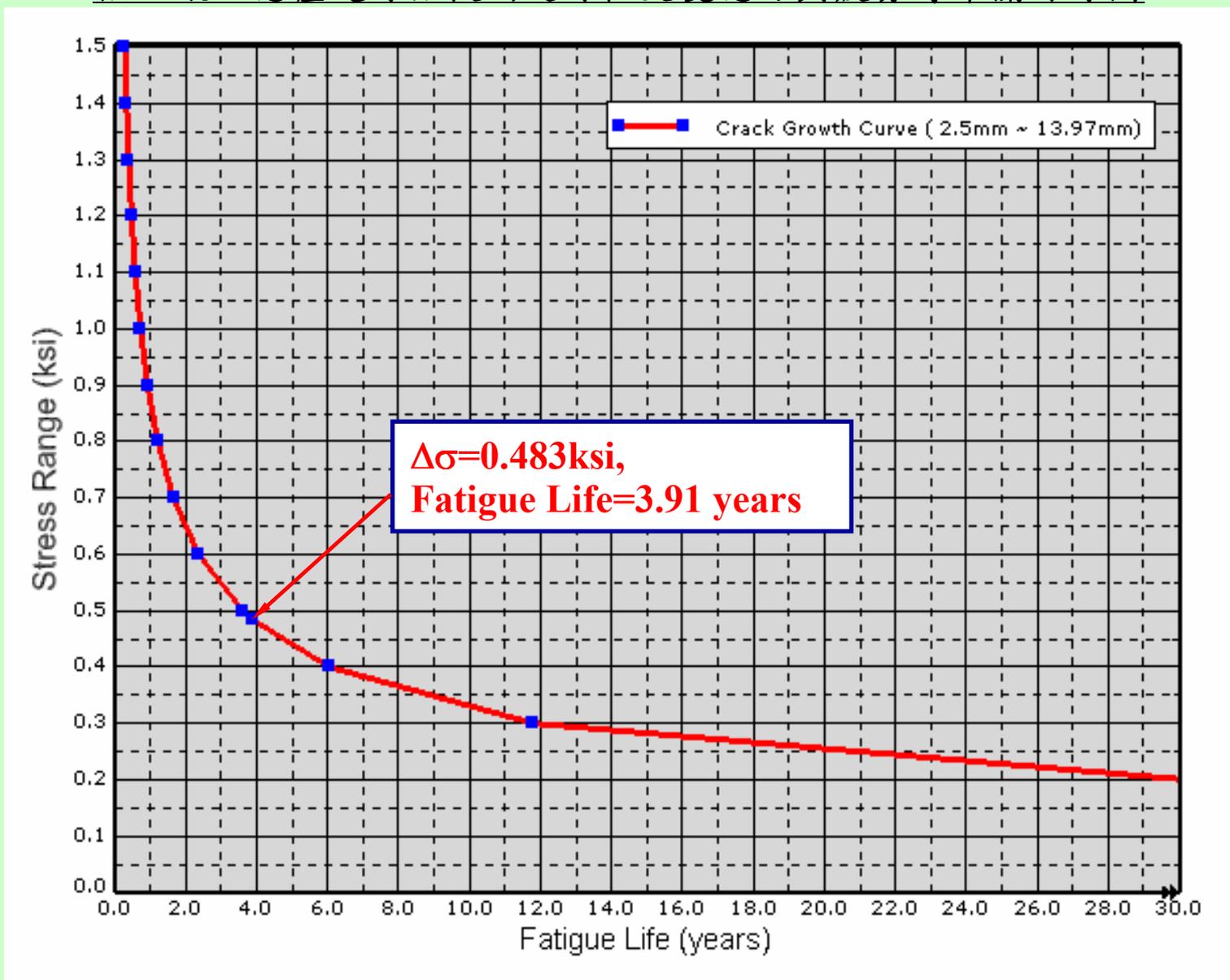
# 核二廠反應爐支撐裙板錨定螺栓交變應力與疲勞壽命關係線圖



# 核二廠反應爐支撐裙板錨定螺栓斷裂曲線



# 核二廠反應爐支撐裙板錨定螺栓交變應力與疲勞壽命關係線圖



謝謝聆聽  
敬請賜教