

核二廠1號機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

101.5.14

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

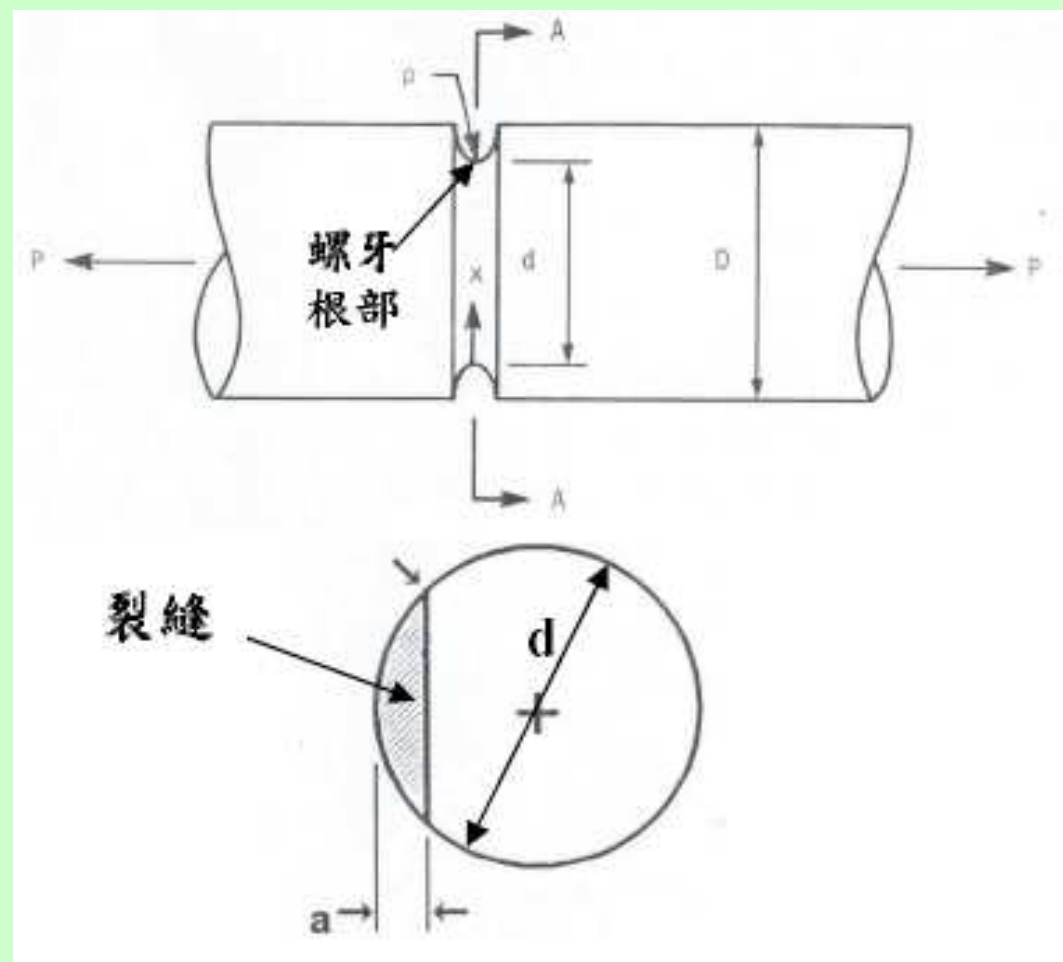
- 核二廠1號機EOC-22大修期間，發現7支瑕疵螺栓，目前7支有瑕疵螺栓均已修復完成，其餘113支螺栓於本次大修經UT檢測未發現裂縫顯示。
- 但為能確切掌握反應爐相關結構之安全，本公司保守假設錨定螺栓仍有可能存在UT檢測無法判讀的瑕疵，採取與原設計不同之考量方式，進行破壞力學分析，並預估可能之變動負載進行疲勞壽命評估。



二、裂縫假設及應力強度因子之計算

裂縫假設

- 分析假設螺栓內部仍可能存有UT未能檢測出最大為2.5 mm深之裂縫，且裂縫存在於螺牙根部，其形狀如右圖所示。



二、裂縫假設及應力強度因子之計算(續)

- 螺栓承受軸向力，螺牙根部裂縫尖端應力強度因子 K_I

$$K_I = F\sigma\sqrt{\pi a}$$

K_I ：應力強度因子

F ：計算之裂縫幾何形狀係數

σ ：圓柱體承受之軸向應力

a ：裂縫深度

螺牙根部淺裂縫突升之幾何形狀修正係數
(F)反映了螺牙根部應力集中效應。

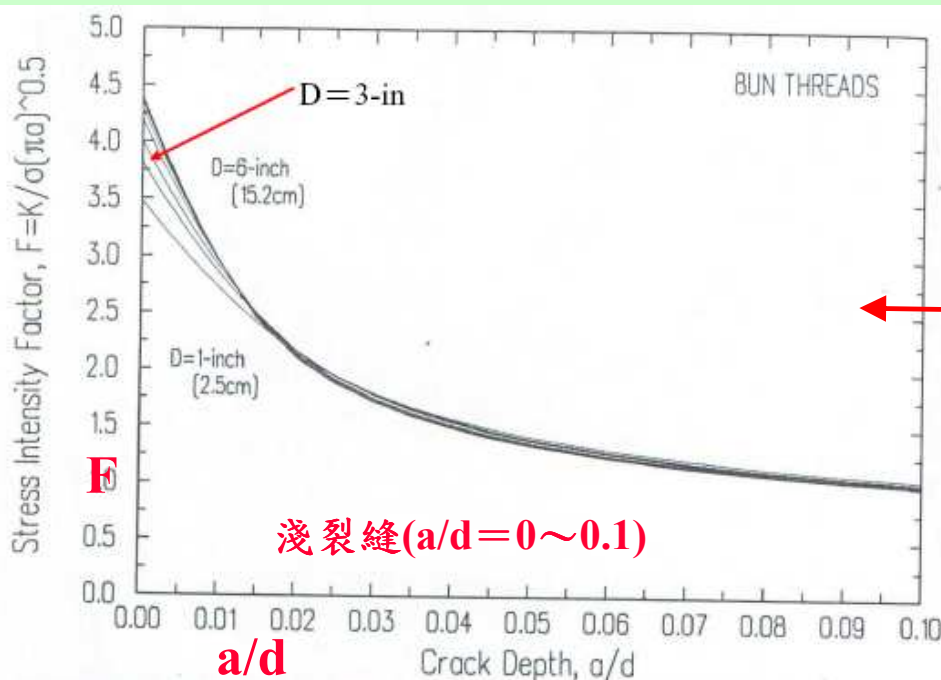


FIG. 10—Nondimensional stress intensity factor for 8UN threaded fasteners—expanded a/d scale.

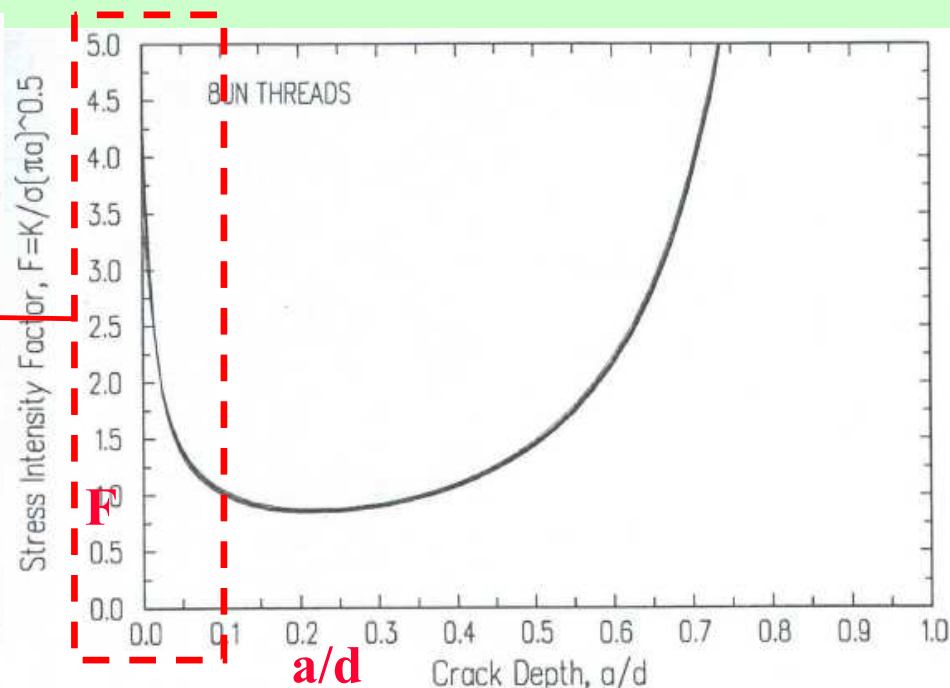


FIG. 9—Nondimensional stress intensity factors for 1-in. to 6-in. (2.5 to 15.2-cm)-diameter fasteners with 8UN threads.



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

$$K_I = F\sigma\sqrt{\pi a} = K_{IC}$$



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

■ 由斷裂面推估錨定螺栓材料之斷裂韌度

➤ 斷裂準則 $K_I = F\sigma\sqrt{\pi a} = K_{IC}$

➤ 確認破斷時裂縫深度a

✓ 斷裂面在快速斷裂時之裂縫深度保守估計約佔螺栓受力面之50%， $a = 2.846" \times 50\% = 1.423"$

➤ 計算幾何形狀修正係數 $F = F(a) = 1.49$ (@a/d=0.5)

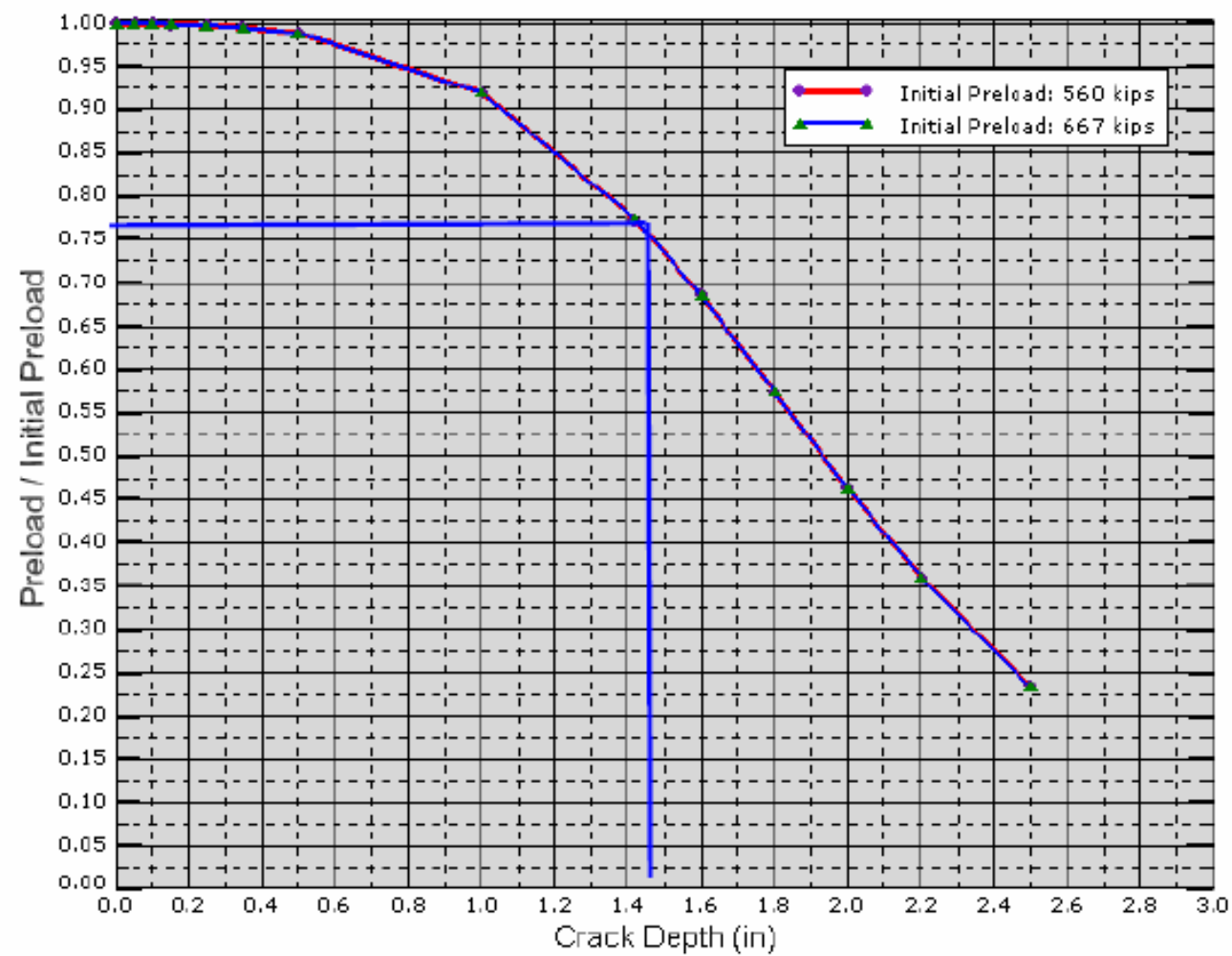
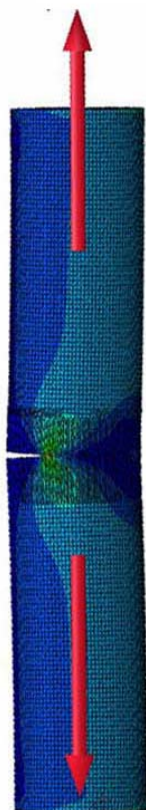
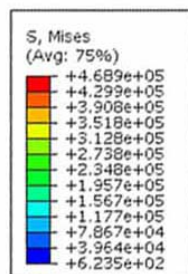
➤ 估算破斷時之螺栓應力

✓ 以FEM分析在displacement controlled loading下，3"螺栓之軸向力隨裂縫增長而下降之變化情形 ➡

✓ 裂縫深度 1.423 "時，preload下降為75%

✓ 保守假設未裂前之preload為510 kips，軸向應力為73.39 ksi，斷裂時之preload估計應為55.0 ksi。⬇





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(續)

■ 由斷裂面推估錨定螺栓材料之斷裂韌度(續)

$$K_{IC} = 1.49 \times 55.0 \times \sqrt{\pi \times 1.423} = 173 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}}$$



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(續)

■ 直接進行K_{IC}測試求取錨定螺栓材料之斷裂韌度

- **ASTM E-399 "Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials"**
- **有效的 K_{IC} 需確保測試在plane strain狀態**

試片厚度 $B = 2.5(K_{IC} / \sigma_y)^2$

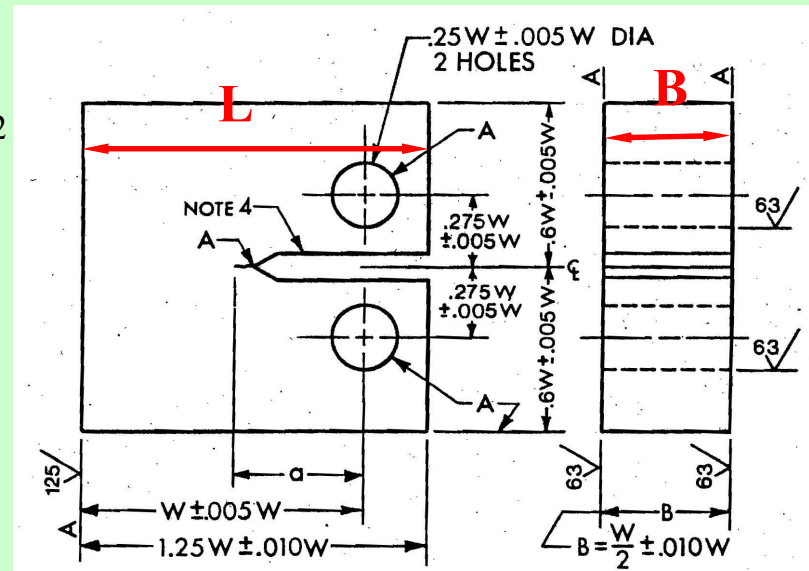
試片長度 $L = 2.5B = 6.25(K_{IC} / \sigma_y)^2$

For expected $K_{IC} = 100 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}}$

L=2.78"

For expected $K_{IC} = 120 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}}$

L=4.0''



- 錨定螺栓沒有足夠尺寸進行K_{IC}測試

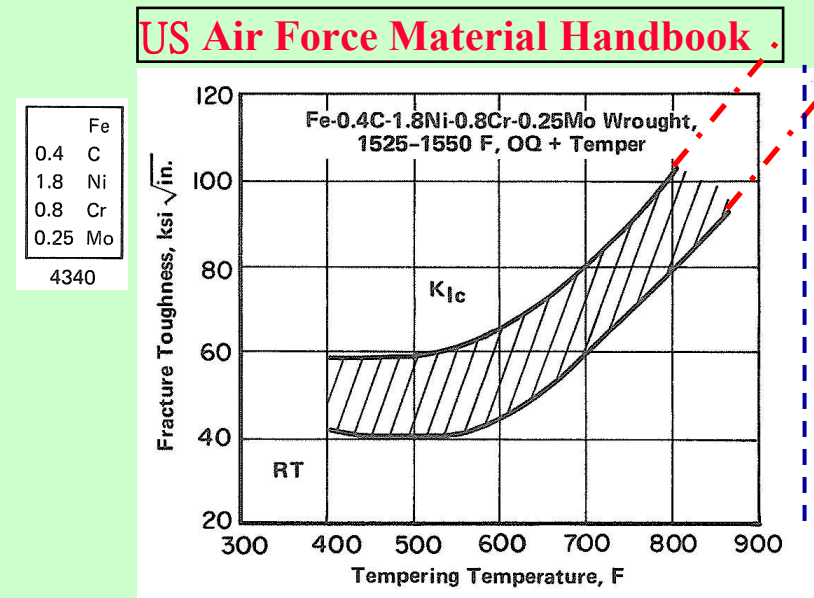
三、螺栓斷裂分析(續)

➤ 核二廠反應爐支撐裙板錨定螺栓材料之斷裂韌度(續)

■ 4340材料韌度相關資料

➤ 4340材料之 K_{IC} 與回火溫度息息相關

➤ 核二廠錨定螺栓回火溫度
900~950°F， K_{IC} 推估應在
110~120 $ksi\sqrt{in}$ 之間



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(續)

■ 4340材料韌度相關資料(續)

➤ 4340材料採用Rolfe-Novak-Barsom correlation由CVN換算 K_{IC} 之實例驗證

□ 4340材料奧斯田化熱處理在870°C Oil Quench，回火在350 °C(662°F)之材料特性實測資料【*】：

$$\sigma_y = 217 \text{ ksi}$$

CVN=17 ft-lbs

符合Rolfe-Novak-Barsom correlation 轉換條件

$$\text{CVN}=17 \text{ ft-lbs} \rightarrow K_{IC} = 81.69 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}}$$

$$\text{實測值 } K_{IC} = 80.0 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}}$$

* *An investigation of metallurgical Factors Which Affect the Fracture Toughness of Ultra High Strength Steels*, W. E. Wood etc., Lawrence Radiation Lab, LBL-1474, 1973.

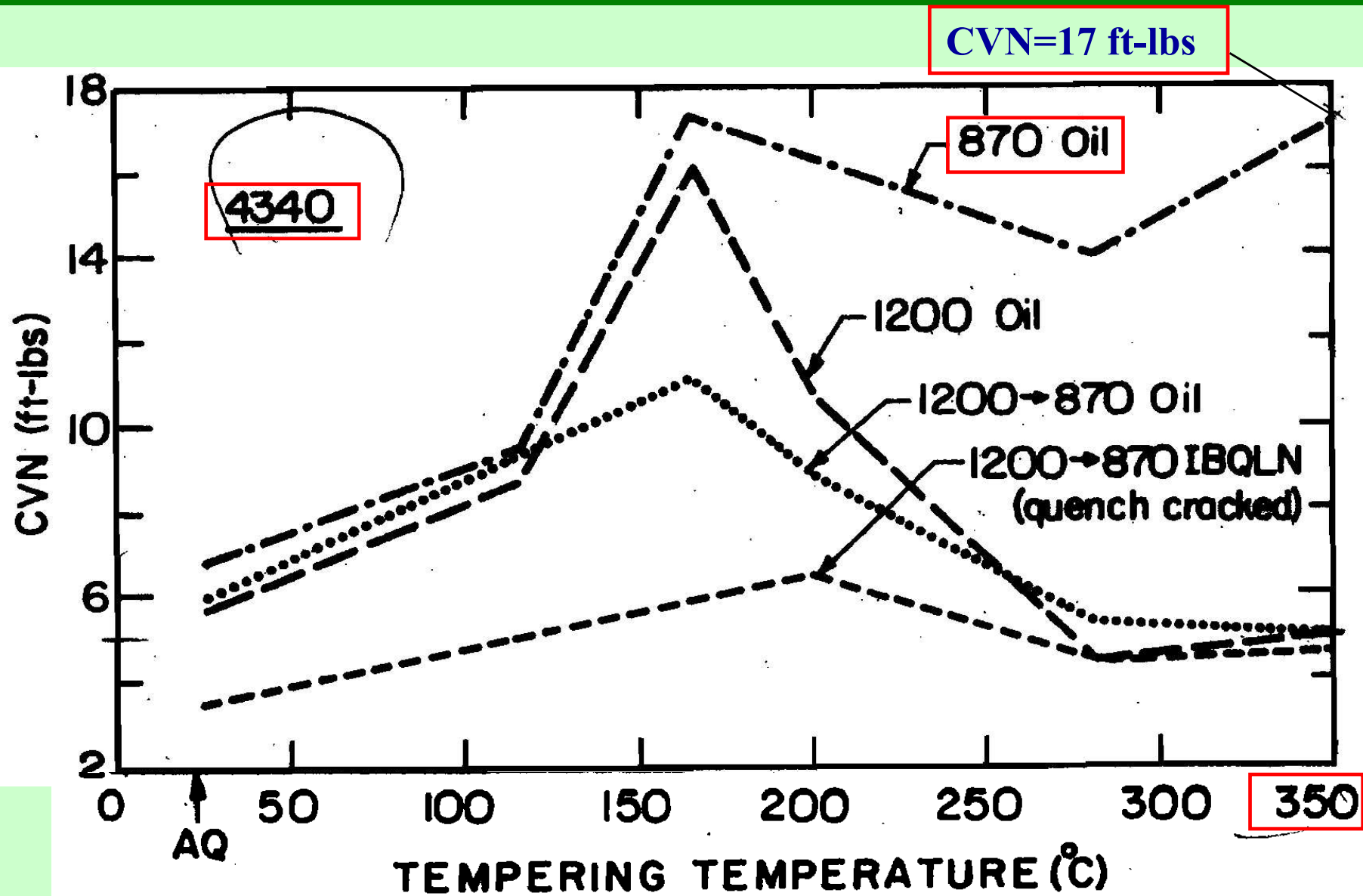


Table XVII. Room temperature longitudinal tensile properties for alloy 4340

Austenitizing Temperature °C	Quench	Tempering Temperature °C	Test Specimen Number	.2% Yield Strength			Ultimate Tensile Strength ksi	Elonga- tion %	Reduction of Area %	True Fracture Strain %
				micro	macro	macro' **				
1200	Oil	A Q	13	165	220	195	326	6.9	5.5	.04
		200	14	200	227	220	288	8.5	19.0	.20
		280	15	202	212	210	256	7.7	24.0	.26
		350	16	195	207	200	238	6.8	20.0	.21
1200-870	Oil	A Q *	17	190	210	180	315		12.0	.11
		A Q *	18	200	218	200	308	3.0	13.0	.12
		A Q *	19	200	220	212	320	3.9	8.8	.08
		A Q	7	160	230	188	318	2.6	6.7	.06
		A Q	8	163	232	200	318	3.7	8.8	.08
		200	9	195	230	225	290	7.1	13.0	.12
		280	10	197	215	205	253	7.7	21.0	.23
		280	11	208	225	217	265	6.7	12.0	.11
		350 *	20	200	200	200	232	7.3	20.1	.21
		350 *	21	202	200	200	236	6.1	21.1	.23
		350	12	196	205	200	235	6.6	15.0	.04
870	Oil	A Q	1	180	237	210	323	10.6	17.0	
		A Q	2	171	225	205	320	7.4	44.6	.18
		200	3	195	235	225	290	13.5	54.8	.58
		280	4	210	210	210	235	13.4	47.1	.79
		280	5	225	230	230	262	12.8	55.6	.62
		350	6	217	217	217	242	13.9	6.7	.80

* These specimens were heat treated at a later date than the other specimens and were machined instead of ground.

** Corrected macro yield strength, explained in text.



Rolfe-Novak-Barsom correlation

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

K_{IC} ：材料之斷裂韌度

S_y ：材料之降服強度，

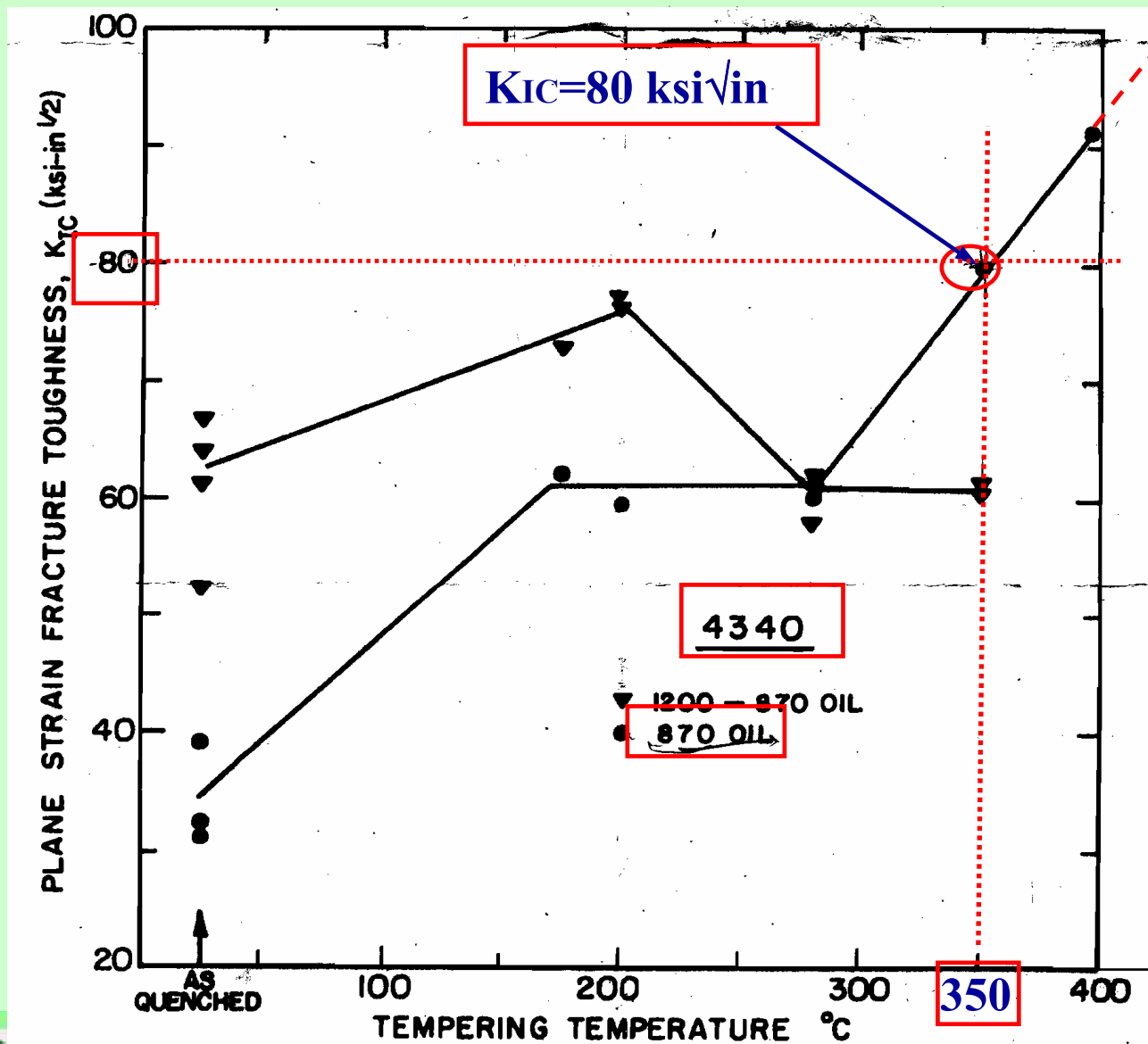
CVN：材料之夏比衝擊能，ft-lb

限制條件：

降服強度 S_y ---110~246 ksi

夏比夏比衝擊能 CVN ---16~89 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(續)

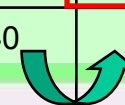
■ 核二廠反應爐支撐裙板錨定螺栓材料之斷裂韌度

- 90°F夏比衝擊能測試結果CVN=24.94~43.25 ft-lb ➡
- 最低CVN值：C6螺栓(CVN=24.94 ft-lb , Sy=154.2 ksi)
- 符合Rolfe-Novak-Barsom correlation限制條件
- $K_{IC}=115.26 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}}$



核二廠一號機損換錨定螺栓機械性質測試結果

編號	爐號	裂紋情況	抗拉強度 ksi	降伏強度 ksi	伸長率 %	斷面縮率 %	Charpy Test Ft-lb@10°F	Charpy Test Ft-lb@90°F
規範			≥ 165	≥ 150	≥ 10	≥ 35	Information Only	Information Only
建廠			168~174	155~161	15~16	52.6~54.3	26~38	48~54
	61236		173.9	161.6	15	53	26~28	48~49
A2	61236	斷裂	189	171.7	14.2	46.2		26.74
C6	61236	斷裂	175.1	154.2	14.7	45.5	19.26	26.03 24.94
D14	61236	幾近斷裂	173.7	159.1	16.6	53.1	38.52	
B10	61236	裂紋	164.2 158.2 158.1	138.6 138 138.4	16.4 17.2 17.8	53.5 53.2 53.1	28.03	42.53
B13	NA	裂紋	143.3	120.5	18.7	55.4		42.37
C9	61236	裂紋	159.2 159.8	138.7 139.6	18.3 17.3	56.1 55.8		43.25
D11	NA	裂紋	179.4	167.9	15.8	49.5		40.96
新品			166~171	151~157	15~16	47~51	34~40	



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

- ✓ 核二廠1號機反應爐支撐裙板錨定螺栓於運轉中承受最大應力為施加680 kips預拉力，並承受設計基準最嚴苛之故障狀況(Faulted Condition)負載，螺栓應力為111.66 ksi。 [TPC] [GE]
- ✓ 錨定螺栓臨界裂縫深度為0.397"(10.08 mm)。



台電分析結果

-1.630e-02
 -0.000e+00
 1.217e-03
 2.435e-03
 3.652e-03
 4.870e-03
 6.087e-03
 7.305e-03
 8.522e-03
 9.739e-03
 1.096e-02
 1.217e-02
 1.339e-02
 1.461e-02

7.1048e+05
 7.1196e+05
 7.1230e+05
 7.1014e+05
 7.1152e+05
 7.0988e+05
 7.1124e+05
 7.0883e+05

7.1196e+05
 7.1230e+05
 7.1014e+05
 7.1152e+05
 7.0988e+05
 7.1124e+05
 7.0883e+05
 7.0683e+05

最大軸向力712,300 kip
 應力 = $712,300 / 6.506 = 109.48 \text{ ksi}$

奇異公司分析結果

Table 4: Stud Stresses for the Additional Load Cases Requested by TPC

Case#	Preload (kips/stud)	Load Condition	Stress Type	Stud Stress (ksi)
1	680	Plant Specific Faulted Loads	P_m+Q_m	Max= 107.70
2	680	Plant Specific Upset Loads	P_m+Q_m	Max= 107.00
3	680	Plant Specific Faulted OTM only ^{A,B}	P_m+Q_m	Max= 107.03 Min= 106.06
4	680	Plant Specific Upset OTM only ^{A,B}	P_m+Q_m	Max= 106.28 Min= 106.11
5	680	Plant Specific Upset Thermal Moment Only	Q_m	Max= 106.31
6	680	Plant Specific Faulted Vertical Upward Force only	P_m+Q_m	Max= 106.28
7	680	Design Basis Faulted Loads ^C	P_m+Q_m	Max= 111.66
8	560	Plant Specific Faulted Loads	P_m+Q_m	Max= 90.13

A. OTM – Over Turning Moment

B. The minimum value shown is the stress of the studs on the compression side of flange due to OTM, presented only for cases 3 and 4 per TPC request.

C. Vertical upward force is assumed to be 1083 kips instead of the Design Basis value per TPC request.

四、裂縫疲勞壽命評估

➤ 裂縫疲勞成長門檻

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

ΔK_I : 交變應力強度因子 (Stress Intensity Factor Range)

ΔK_{th} : 裂縫疲勞成長門檻之交變應力強度因子

➤ 裂縫疲勞成長

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K_I)^m \quad (\text{Paris' Law})$$

$\frac{da}{dN}$: 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 ΔK_I 有密切關係



四、裂縫疲勞壽命評估(續)

➤ 裂縫疲勞成長(續)

$$\Delta K_I = F \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$$

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

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)

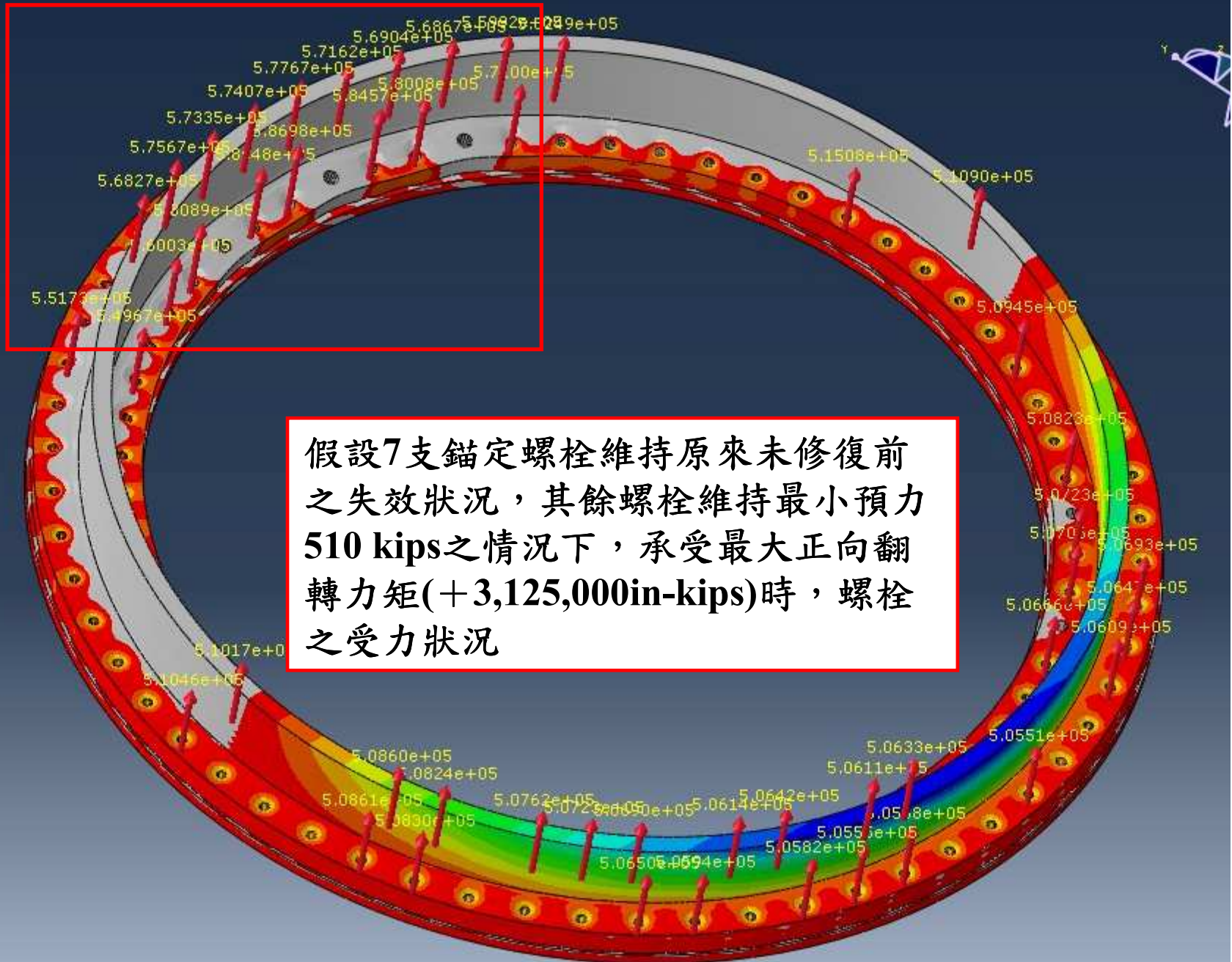
➤ 反應爐支撐裙板錨定螺栓可能承受之交變負載

✓ 地震力(包括SRV沖放)交變負載

- ❖ 保守假設7支錨定螺栓維持原來未修復前之失效狀況，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正反向翻轉力矩(overturning moment $\pm 3,125,000$ in-kips)之受力狀況
- ❖ 承受最大正向翻轉力矩(+3,125,000 in-kips)時，最高軸向力586,980 kip (D15位置)，最高應力 = 90.16 ksi。➡
- ❖ 承受最大反向翻轉力矩(-3,125,000 in-kips)時，D15位置軸向力505,990 kip，應力 = 77.73 ksi；交變應力 $\Delta\sigma = 90.16 - 77.73 = 12.43$ ksi。➡
- ❖ 保守假設每次強震1分鐘，頻率為反應爐基礎模式振動頻率8.29 Hz，承受應力循環 $8.29 \times 60 = 497$ cycles。
- ❖ 保守假設40年，每年一次，總共承受應力循環19896 cycles。

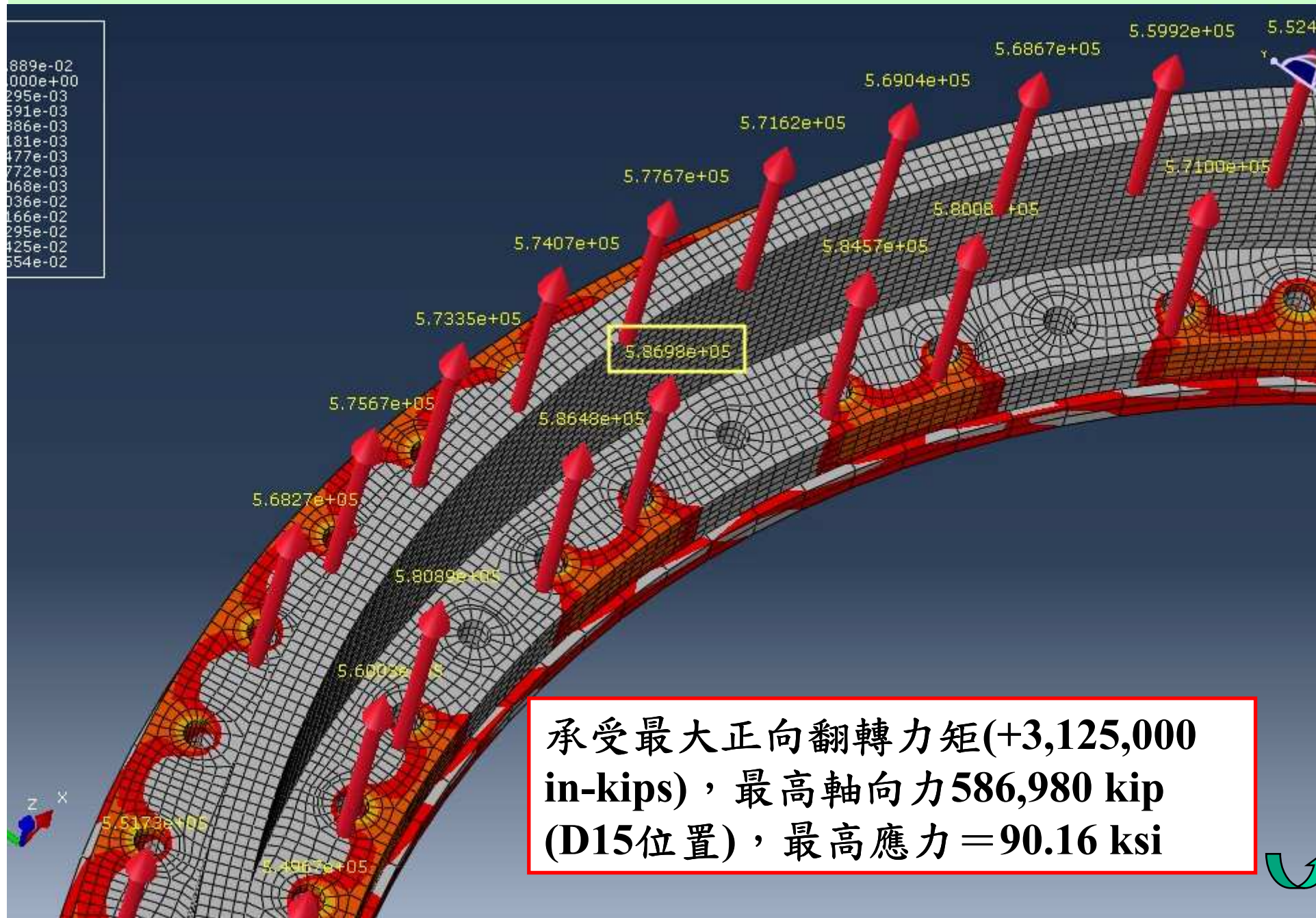


889e-02
000e+00
95e-03
91e-03
86e-03
81e-03
77e-03
72e-03
68e-03
36e-02
66e-02
95e-02
25e-02
54e-02

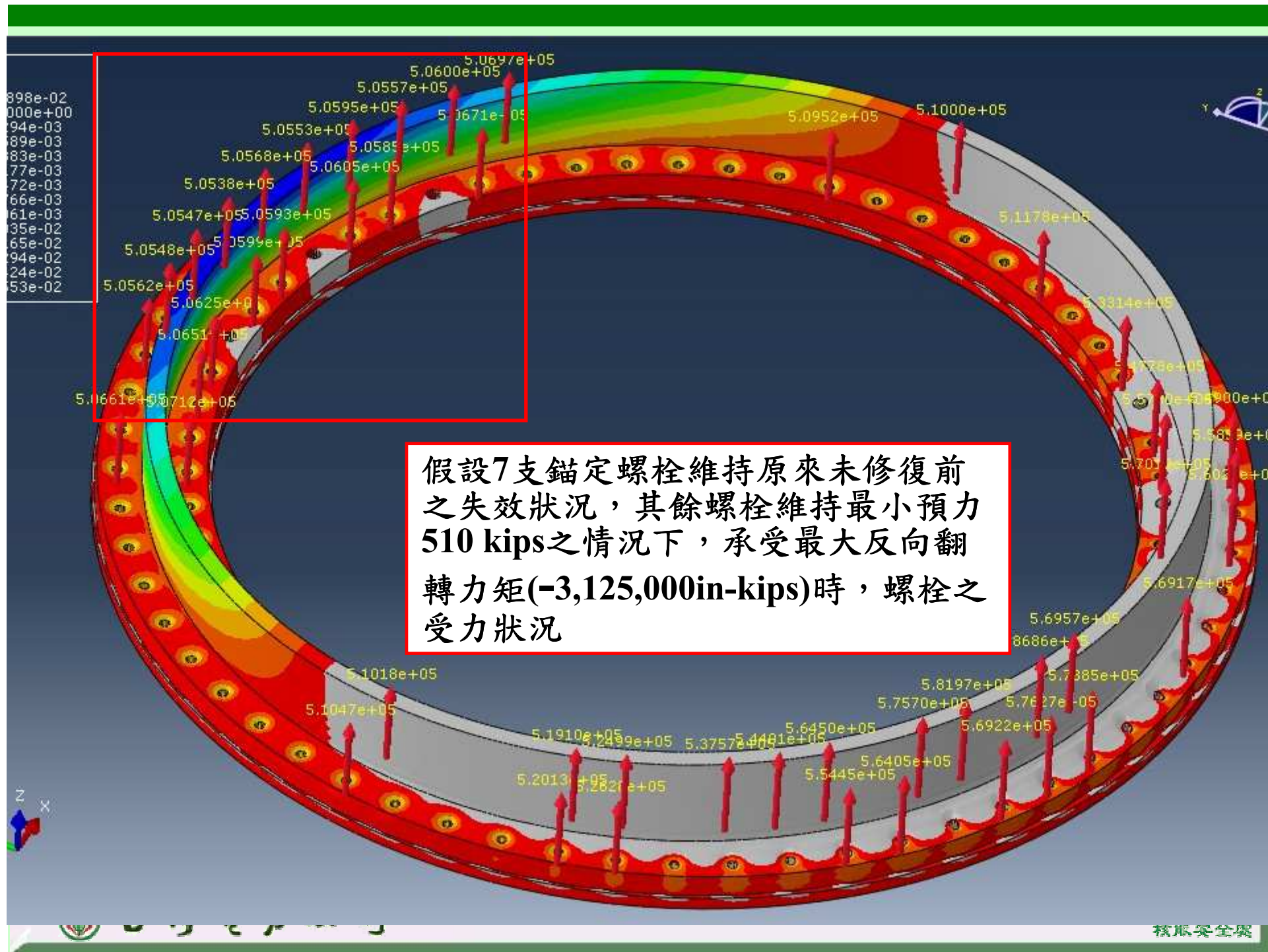


假設7支錨定螺栓維持原來未修復前
之失效狀況，其餘螺栓維持最小預力
510 kips之情況下，承受最大正向翻
轉力矩(+3,125,000in-kips)時，螺栓
之受力狀況

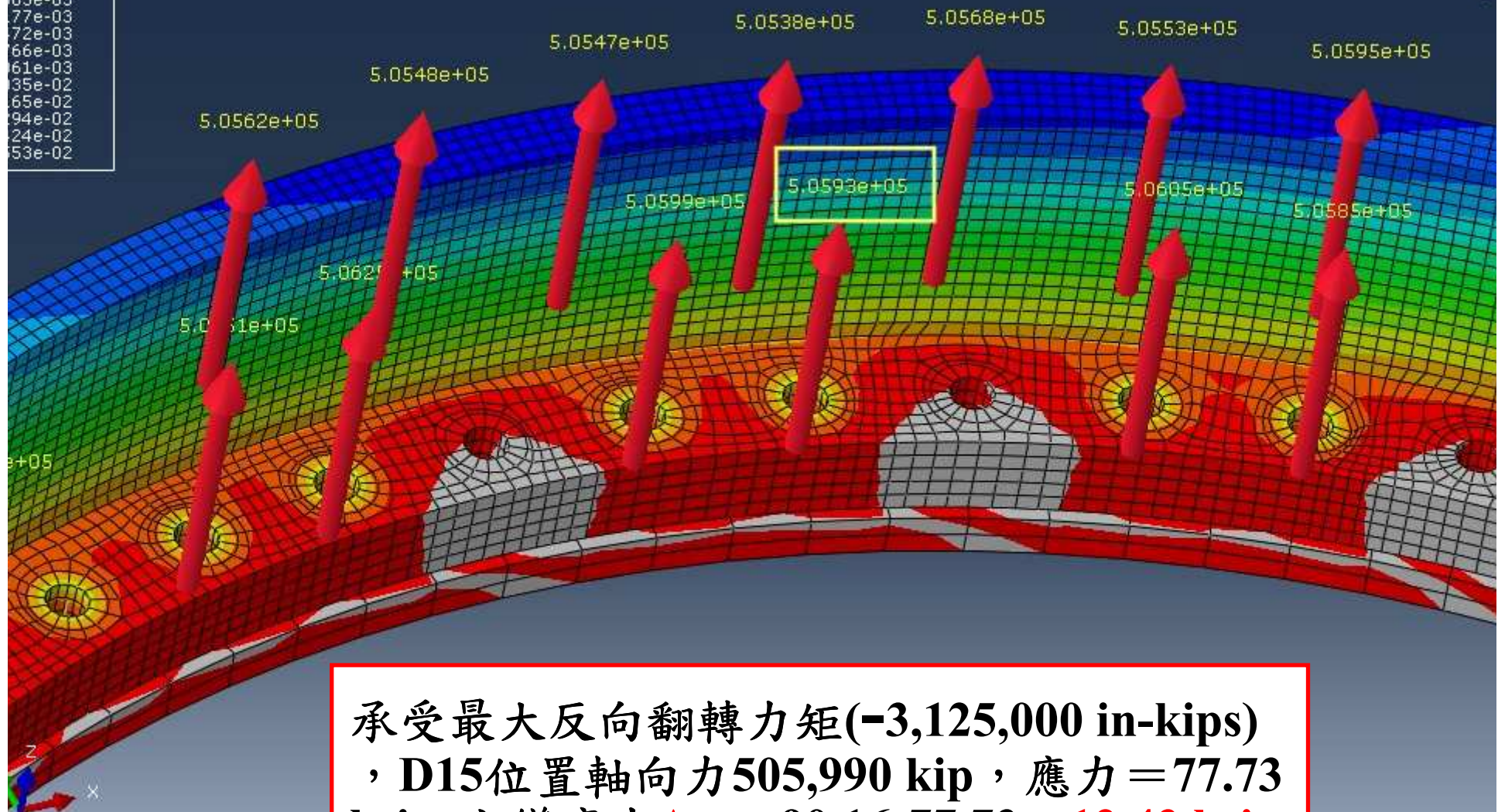
889e-02
000e+00
295e-03
591e-03
886e-03
181e-03
477e-03
772e-03
068e-03
036e-02
166e-02
295e-02
425e-02
554e-02



承受最大正向翻轉力矩(+3,125,000
in-kips)，最高軸向力586,980 kip
(D15位置)，最高應力=90.16 ksi



898e-02
000e+00
94e-03
89e-03
83e-03
77e-03
72e-03
66e-03
61e-03
35e-02
65e-02
94e-02
24e-02
53e-02



承受最大反向翻轉力矩(-3,125,000 in-kips)
，D15位置軸向力505,990 kip，應力=77.73
ksi；交變應力 $\Delta\sigma = 90.16 - 77.73 = 12.43$ ksi



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 交變負載

- ❖ 保守假設7支錨定螺栓維持原來未修復前之失效狀況，其餘螺栓均無施加預力之情況下，以有限元素分析螺栓受力狀況
- ❖ 最高軸向力139.4 kip (D15位置)，應力=21.41 ksi。
- ❖ 交變應力 $\Delta\sigma = 21.41 - 0 = 21.41$ ksi。
- ❖ 應力循環頻率為每次起停機，預計運轉40年發生此項交變應力循環數在100 cycles以內。



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(續)

✓反應爐急停而產生之交變負載

❖ OSG-XE-105強震儀記錄曾記錄到最高0.297 g之垂直加速度，介於於OBE (0.2 g)及SSE (0.4 g)之間，因此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。

❖ 保守假設7支錨定螺栓維持原來未修復前之失效狀況，其餘螺栓均無施加預力之情況下，以有限元素分析螺栓受力狀況

❖ 最高軸向力11.52 kip (D15位置)，應力=1.77 ksi。

❖ 交變應力 $\Delta\sigma = 1.77 - 0 = 1.77$ ksi。

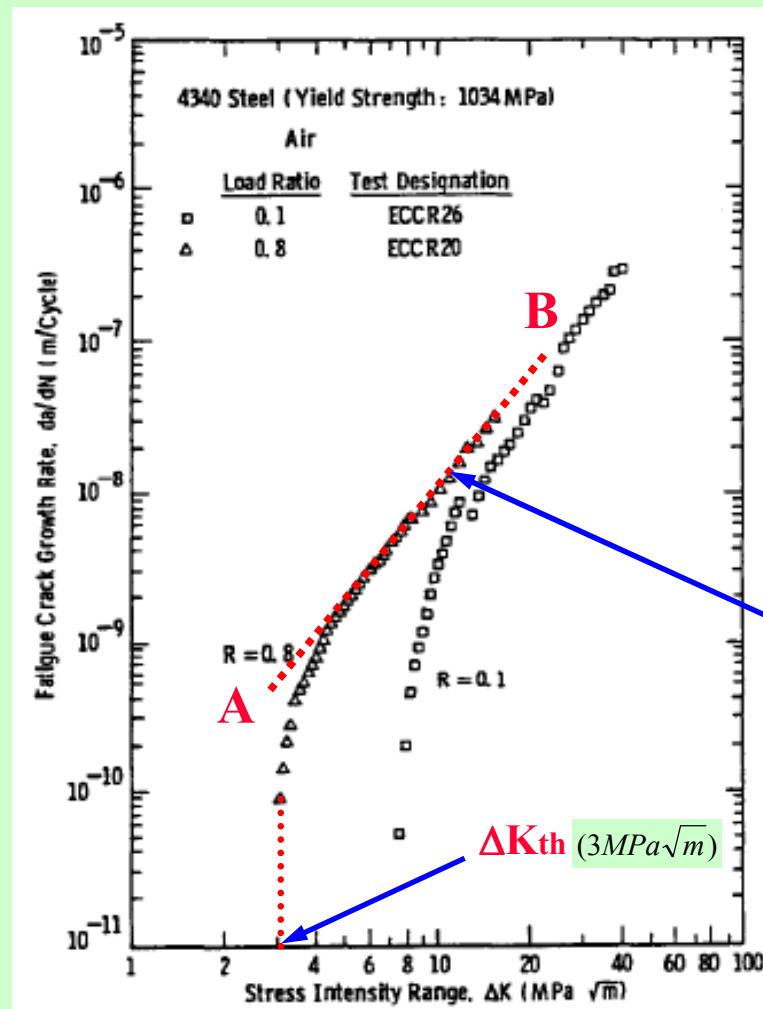
❖ 整個歷程1.7秒，頻率為反應爐基礎模式振動頻率8.29 Hz，承受應力循環 $8.29 \times 1.7 = 14$ cycles。

❖ 保守假設每次停機均發生，預計運轉40年發生此項交變應力循環數在1400 cycles以內。



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)

❖螺栓承受地震力(包括SRV沖放)

- 交變應力 $\Delta\sigma = 12.43 \text{ ksi (85.72Mpa)}$
- 假想之裂縫深度 $a=2.5 \text{ mm}$, $\Delta K_I > \Delta K_{th}$
- 裂縫會疲勞成長
- 裂紋深度由 2.5 mm 擴展至 10.08 mm 之應力循環數為 $3.84 \times 10^5 \text{ cycles}$ (附件一)
- 每部機40年之應力循環數應在 100 cycles 以內 ($\ll 3.84 \times 10^5$)
- 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)

❖螺栓承受thermal moment

- 交變應力 $\Delta\sigma = 21.41 \text{ ksi (147.66 Mpa)}$
- 假想之裂縫深度 $a=2.5 \text{ mm}$, $\Delta K_I > \Delta K_{th}$
- 裂縫會疲勞成長
- 裂紋深度由 2.5 mm 擴展至 10.08 mm 之受力循環數為 $1.07 \times 10^5 \text{ cycles}$
- 每部機40年之應力循環數應在100次以內($\ll 1.07 \times 10^5$)
- 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 $\Delta\sigma = 1.61 \text{ ksi (11.10 Mpa)}$
- 假想之裂縫深度 $a=2.5 \text{ mm}$, $\Delta K_I < \Delta K_{th}$
- 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 2.5 mm 擴展至 10.08 mm 之受力循環數為 $4.4 \times 10^7 \text{ cycles}$
- 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 cycles ($\ll 4.4 \times 10^7$)
- 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

- ✓ 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0.397 in (10.08 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。
- ✓ 錨定螺栓承受地震力(包括SRV沖放)交變應力，裂縫之疲勞壽命為 3.84×10^5 cycles。估計每次強震歷時1分鐘，則應力循環數為498 cycles (8.29×60)，保守估計每年發生1次，則運轉40年發生上列交變應力循環數不超過19896 cycles ($\ll 3.84 \times 10^5$)，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。



五、結論(續)

- ✓ 錨定螺栓承受thermal moment交變應力，裂縫之疲勞壽命為 1.07×10^5 cycles。由於此項thermal moment發生之時機為每次起停機，保守估計每部機運轉40年之應力循環數應在100 cycles以內($\ll 1.07 \times 10^5$)，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 4.4×10^7 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($\ll 4.4 \times 10^7$)，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(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

