

核二廠1號機EOC-22反應爐支撐裙板 錨定螺栓斷裂結構安全分析報告

台灣電力公司

101.4.3

前言(I)

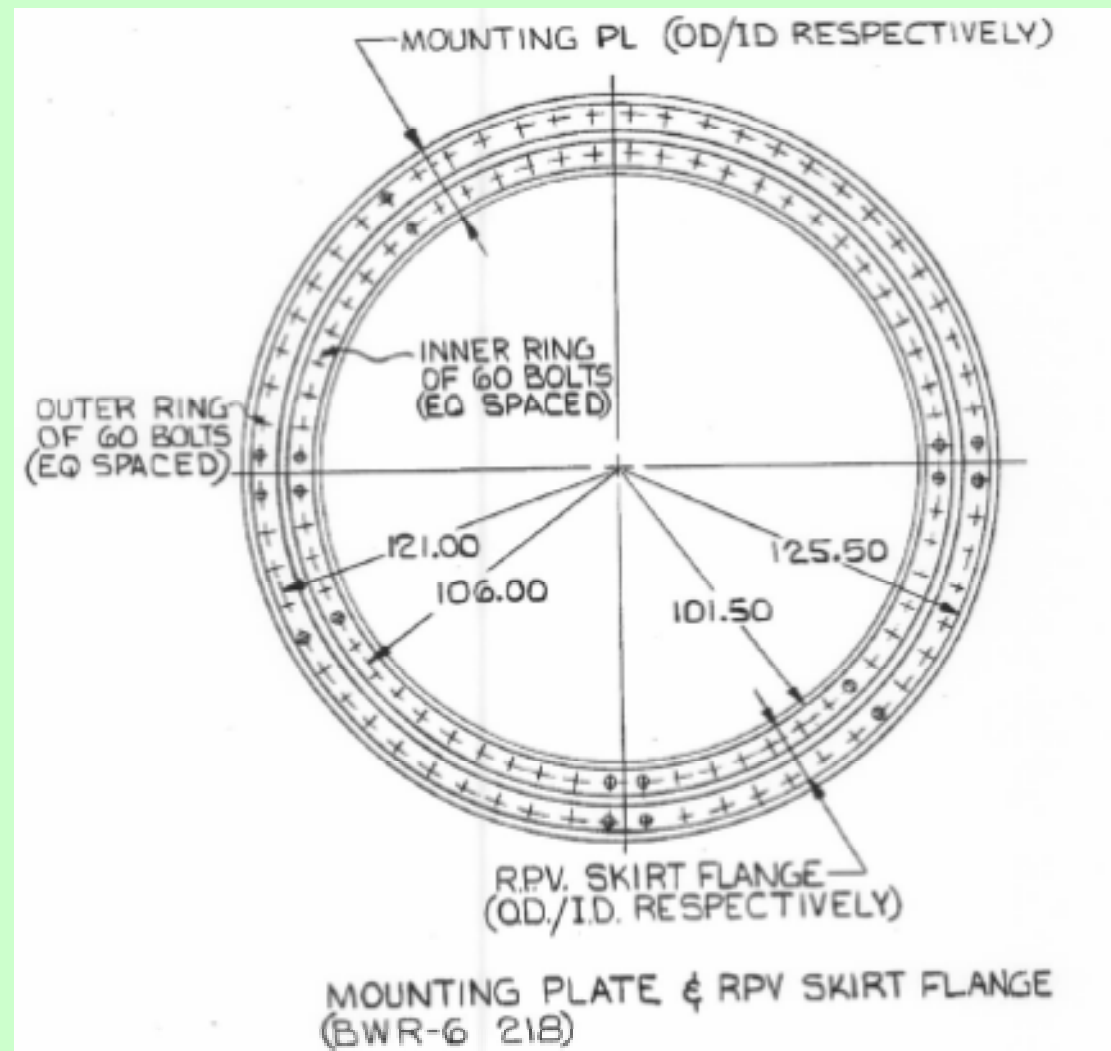
- 核二廠1號機EOC-22大修期間，於101年3月24 日執行反應爐支撐裙板錨定螺栓VT-3目視檢測，並進行清潔除銹作業時，亦發現位於裙板內側一只錨定螺栓斷裂。為確保安全運轉，核二廠針對其餘119支錨定螺栓進行超音波檢測，檢測結果發現內圈有2支錨定螺栓其超音波顯示背波消失，研判已接近斷裂；另外內圈有4支錨定螺栓有顯示，研判為螺紋根部裂紋。
- 本公司依據與2號機EOC-21相同的錨定螺栓安全分析判定準則，執行本分析評估，假設上述7根錨定螺栓已完全斷裂，並假設已斷裂錨定螺栓無支撐下，研判在最嚴苛暫態負荷組合，其餘錨定螺栓之結構完整性，確認可以仍保有原設計所訂之支撐功能。

前言(II)

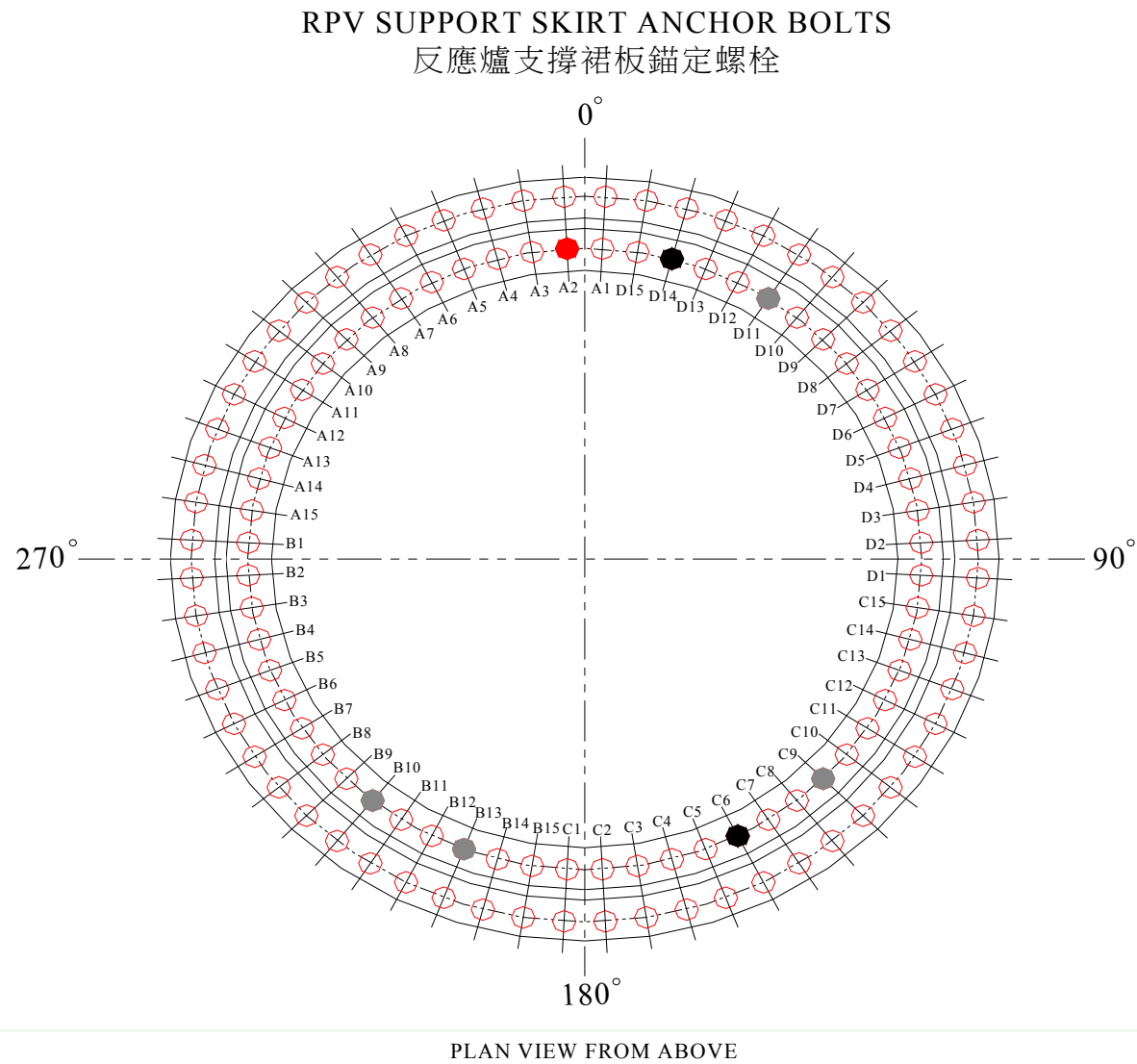
- 核二廠2號機EOC-21大修期間，亦曾執行反應爐支撐裙板錨定螺栓VT-3 目視檢測時，發現位於裙板外側一只直徑3吋，長度26吋之錨定螺栓斷裂。其餘119支錨定螺栓經詳細超音波檢查，並沒有發現任何劣化瑕疵。
- 本公司當時依據貝泰公司錨定螺栓設計計算書，執行分析評估，假設該已斷裂錨定螺栓無支撐下，研判在最嚴苛暫態負荷組合，其餘錨定螺栓之結構完整性，確認可以仍保有原設計所訂之支撐功能。並作為斷裂錨定螺栓尚未修復前，機組繼續運轉安全評估之依據。



反應爐支撐裙板及錨定螺栓結構設計



核二廠1號機損壞之錨定螺栓位置



斷裂的錨定螺栓均位在內側

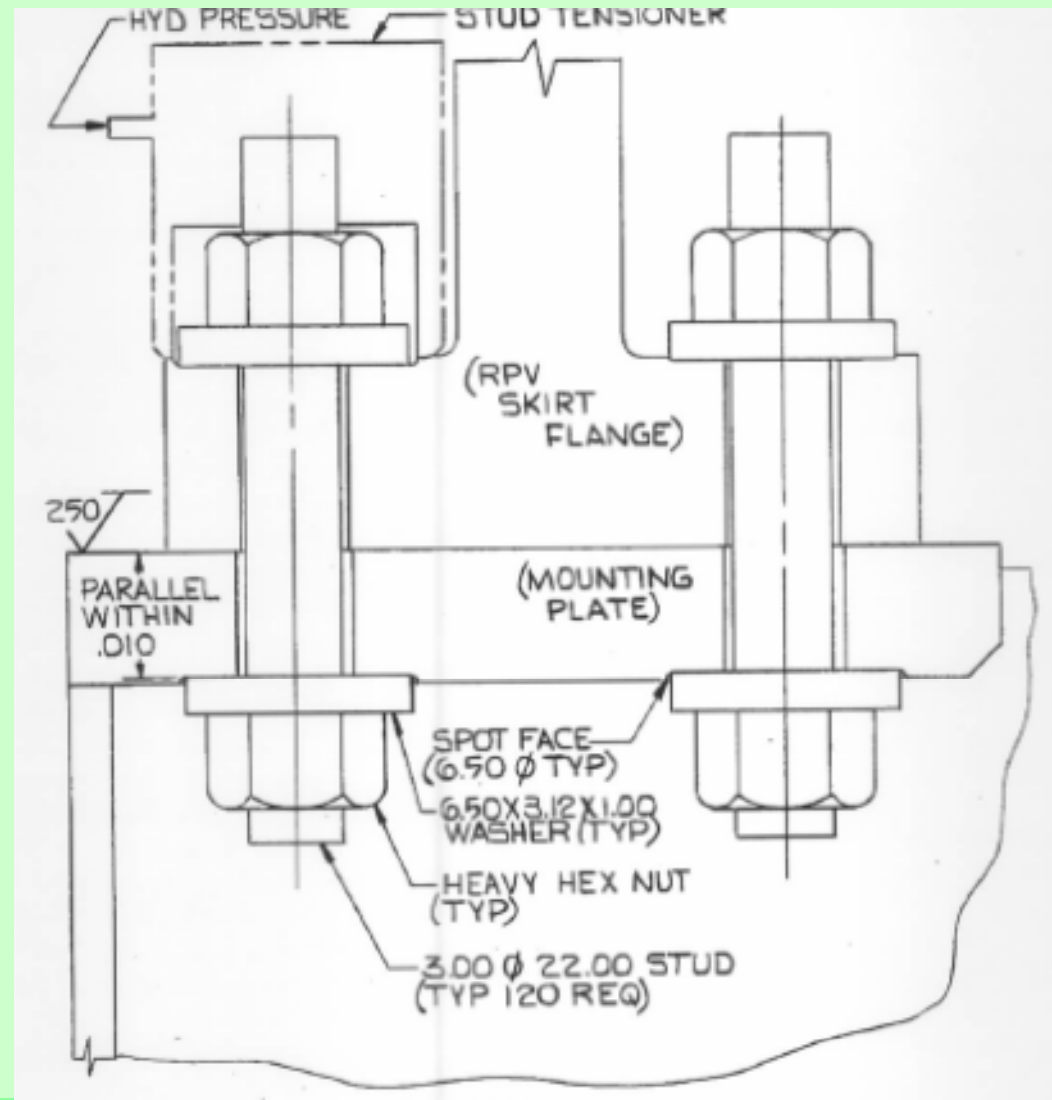
● 已斷裂
A2

● 無回波，研判已斷裂
C6，D14

● 瑕疵指示
B10，B13
C9，D11



反應爐支撐裙板及錨定螺栓結構設計



錨定螺栓結構設計規範

- 錨定螺栓設計能承受最嚴苛負荷狀況下之拉應力而不產生塑性變形。

拉應力 < 90% 降伏應力

- 錨定螺栓提供之正向壓力，所產生之磨擦力足以克服反應爐支撐裙板與基座間側向滑移剪力。

$$\mu \sigma_c > SF \tau$$

μ ：磨擦係數

σ_c ：正向壓應力

τ ：裙板接觸面之剪應力

SF：安全係數

反應爐支撐裙板及錨定螺栓結構設計

- 反應爐支撐裙板內/外側各有60只錨定螺栓
- 螺栓材質為ASTM A-540 Gr B23 或B24 Class 1
- 螺栓尺寸為直徑3吋，長度26吋
- 錨定螺栓設計所能承受最大應力：

拉應力<90% 降伏應力



反應爐支撐裙板及錨定螺栓結構設計

- 反應爐支撐裙板內/外側各有60只錨定螺栓
- 螺栓材質為ASTM A-540 Gr B23 或B24 Class 1
- 螺栓尺寸為直徑3吋，長度26吋
- 錨定螺栓設計所能承受最大應力：

拉應力<90% 降伏應力

以3吋螺栓(330°F)，負荷< 804 仟磅／bolt

$$\sigma_{\text{螺栓}} \leq 0.9\sigma_y$$

反應爐支撐裙板滑移檢核標準

Faulted + SSE condition:

$$\frac{\mu\sigma_c}{\tau} > 1.03$$

Power Range + OBE (1/2 SSE) (包括熱應力):

$$\frac{\mu\sigma_c}{\tau} > 1.10$$

Power Range + OBE (1/2 SSE) (不包括熱應力):

$$\frac{\mu\sigma_c}{\tau} > 1.65$$

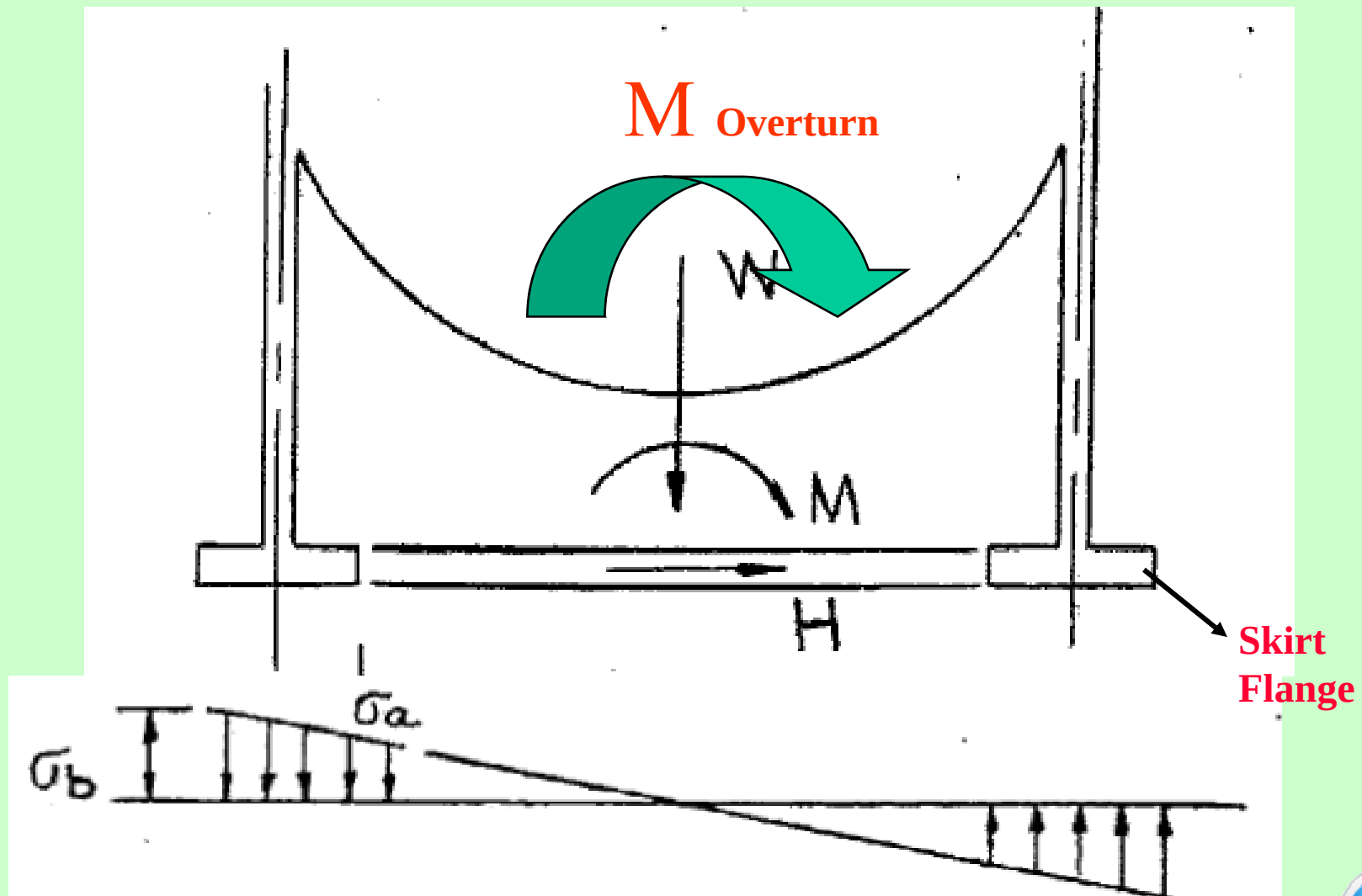
螺栓承載最大的暫態組合

Faulted condition
+
SSE

螺栓最大的暫態組合所要承載的負荷

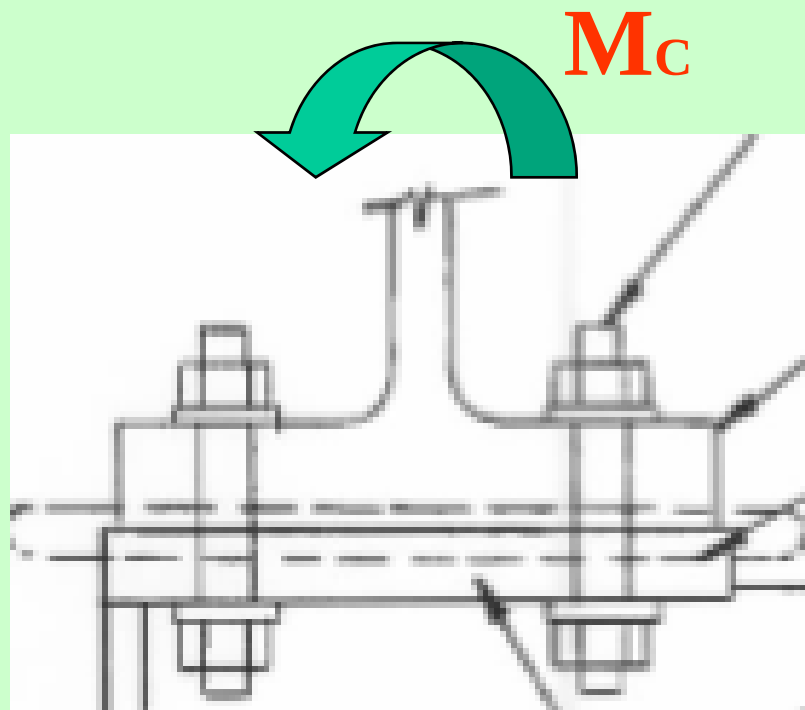
1	Overturn Moment	$M_{TOT'L}$	3125000 in-kips
2	Max. Dir. Shear Force	$H_{TOT'L}$	6275 kips
3	Twisting Moment	M_T	241412 in-kips
4	Vertical upward Force	V_y	890 kips
5	Thermal Radial Shear of Circumference based on mean Diameter of RPV	H_C	40 kips/in
6	Thermal Circumferential Moment of Circumference based on mean Diameter of RPV Skirt	M_C	325 in- kips/in
7	Friction Coeff. Between contact surfaces of RPV Skirt Flange & Anchor Ring	μ	0.35

Overturb Moment



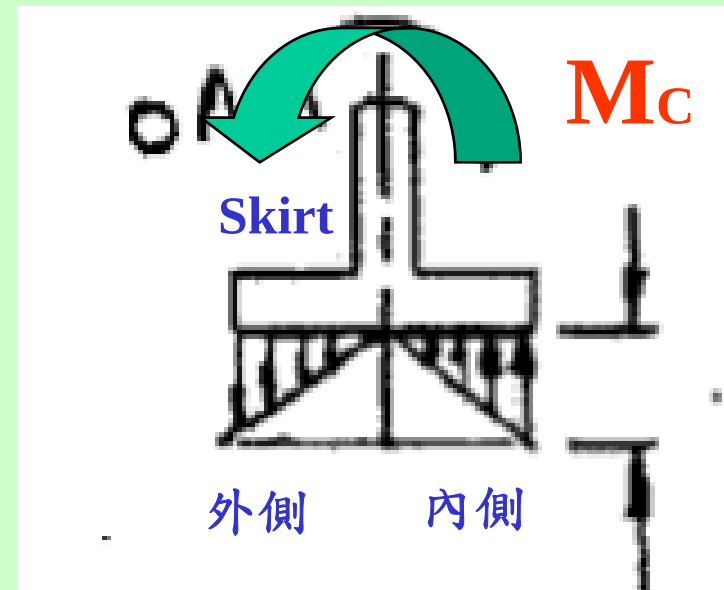
Thermal Moment of RPV Skirt

M_c

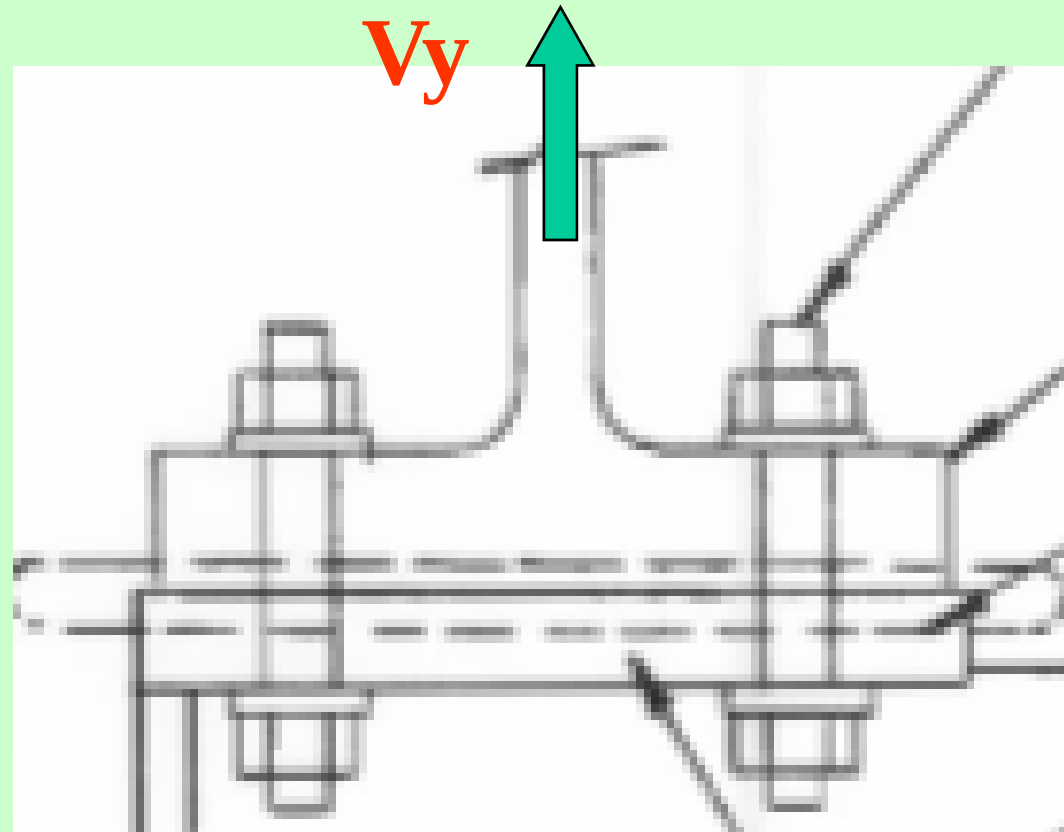


Skirt 外側

Skirt 內側



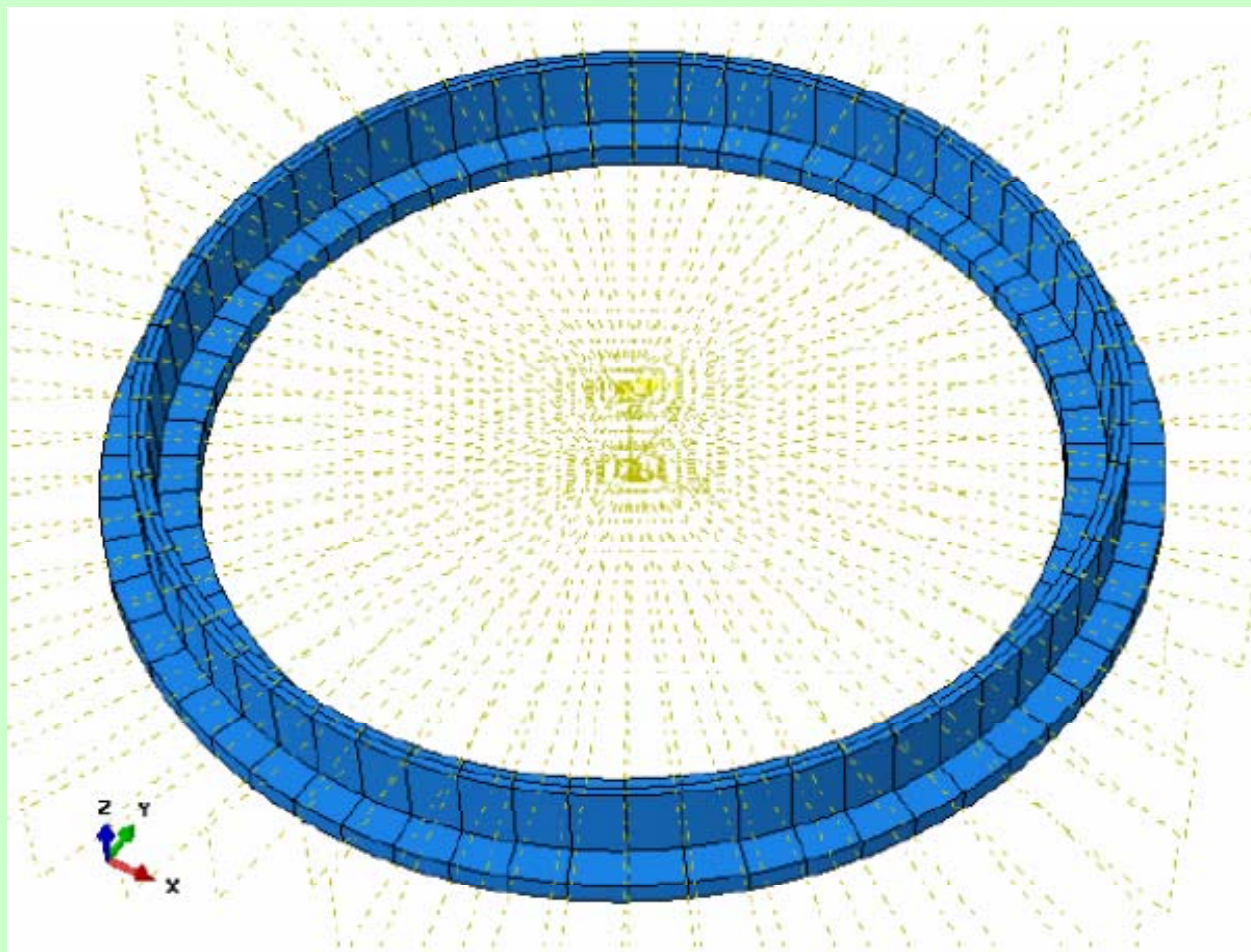
Vertical upward Force V_y



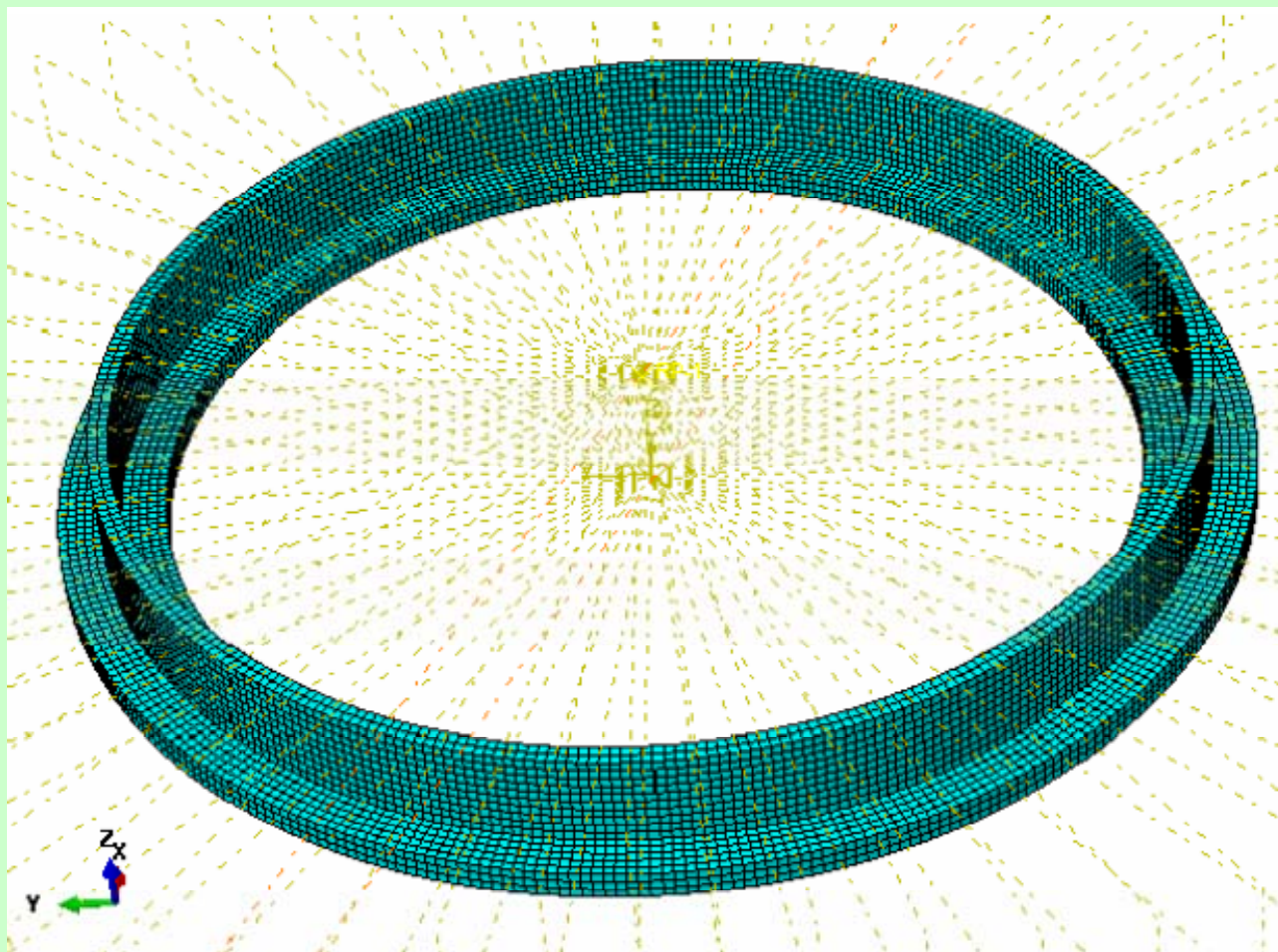
Skirt 外側

Skirt 內側

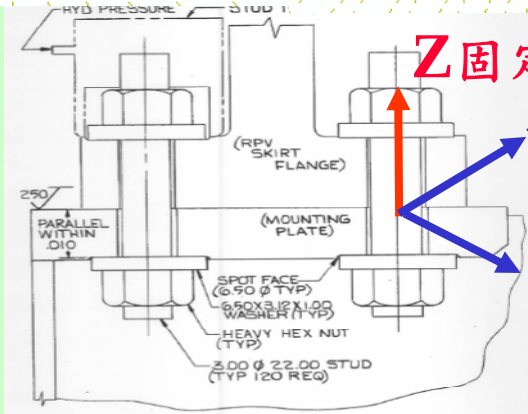
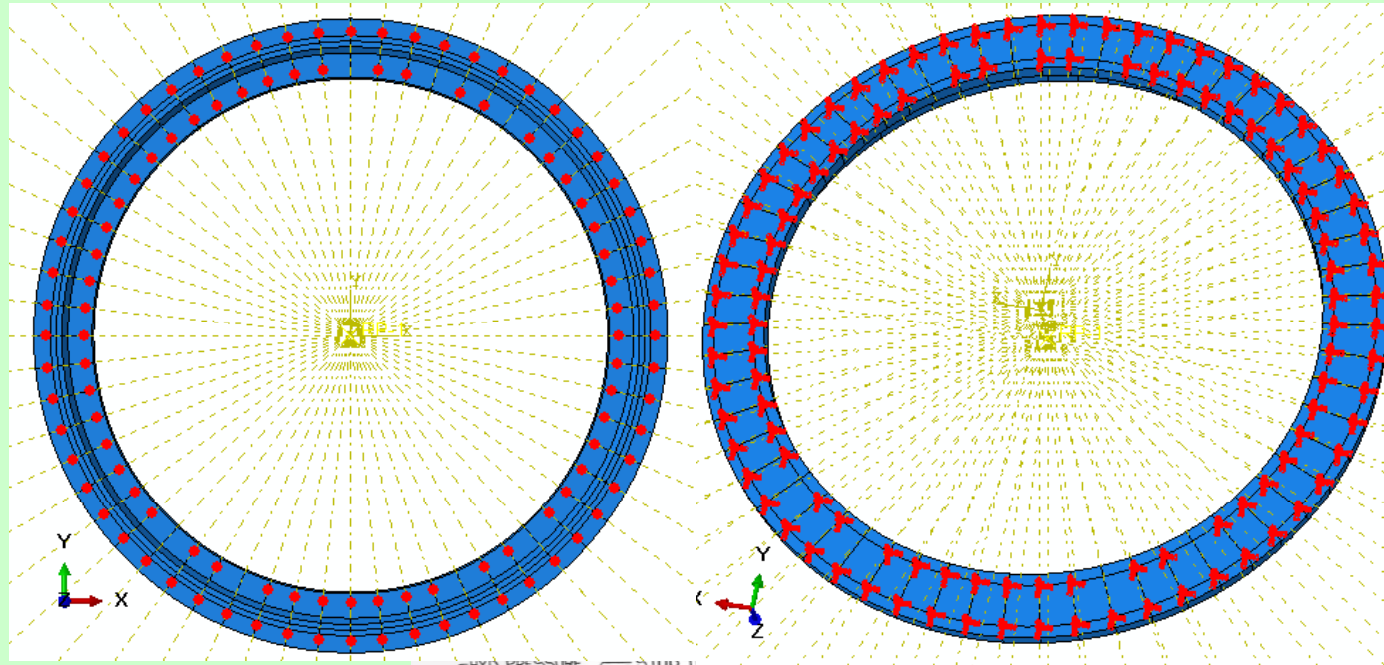
有限元素分析模型



有限元素分析模型網格



有限元素分析模型拘束條件

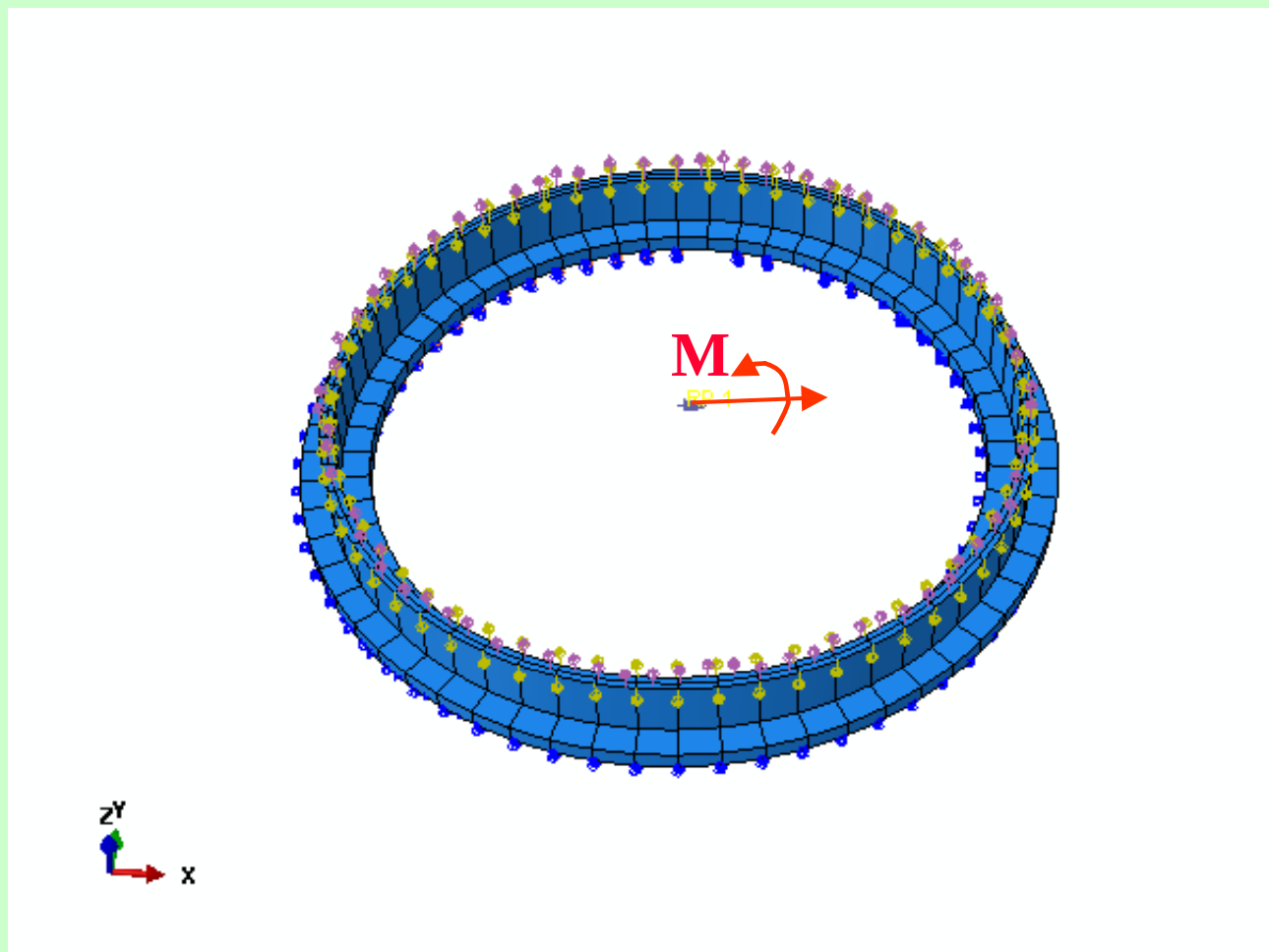


Z固定

Y無拘束

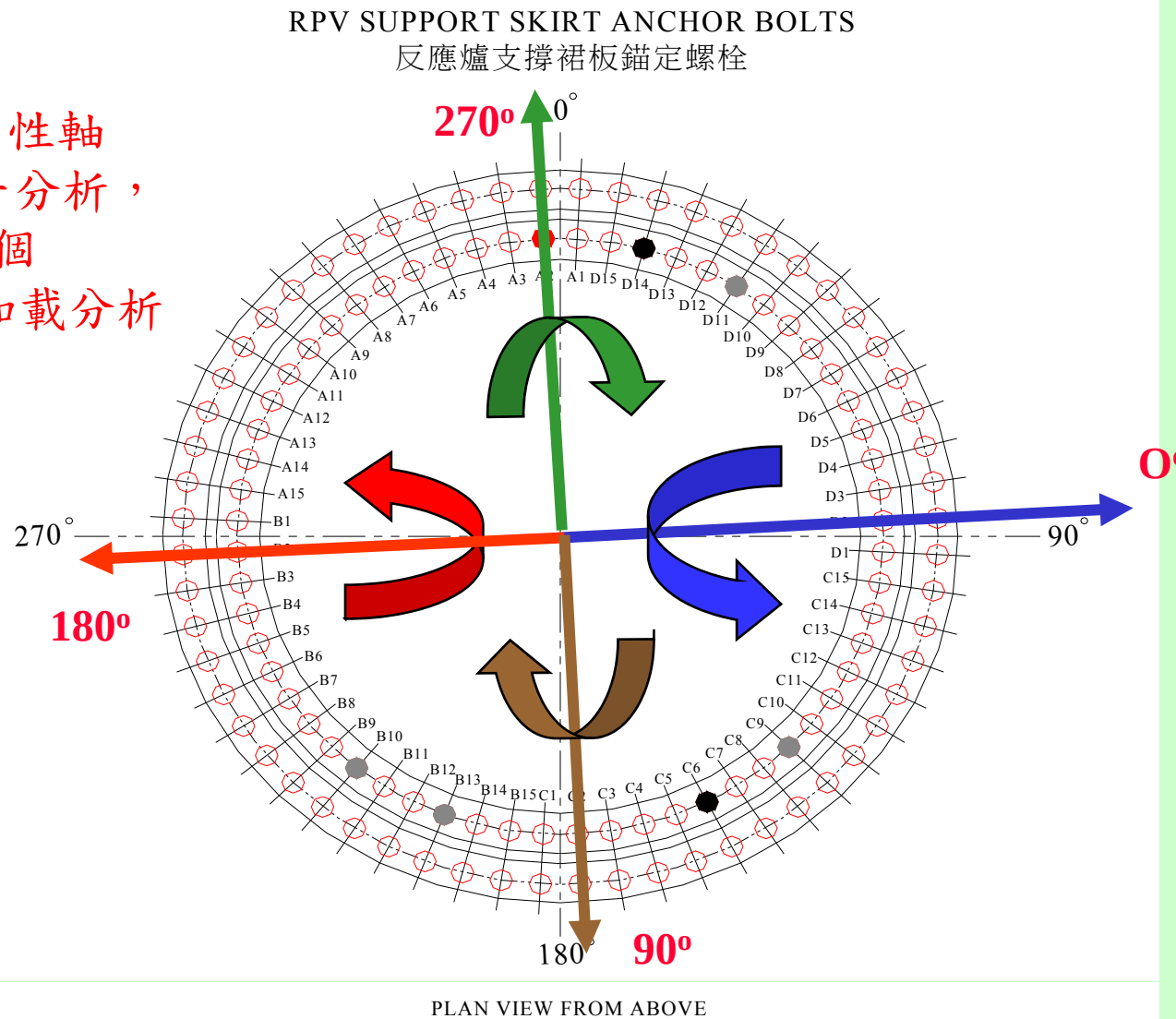
X無拘束

反應爐支撐裙板之受載狀況



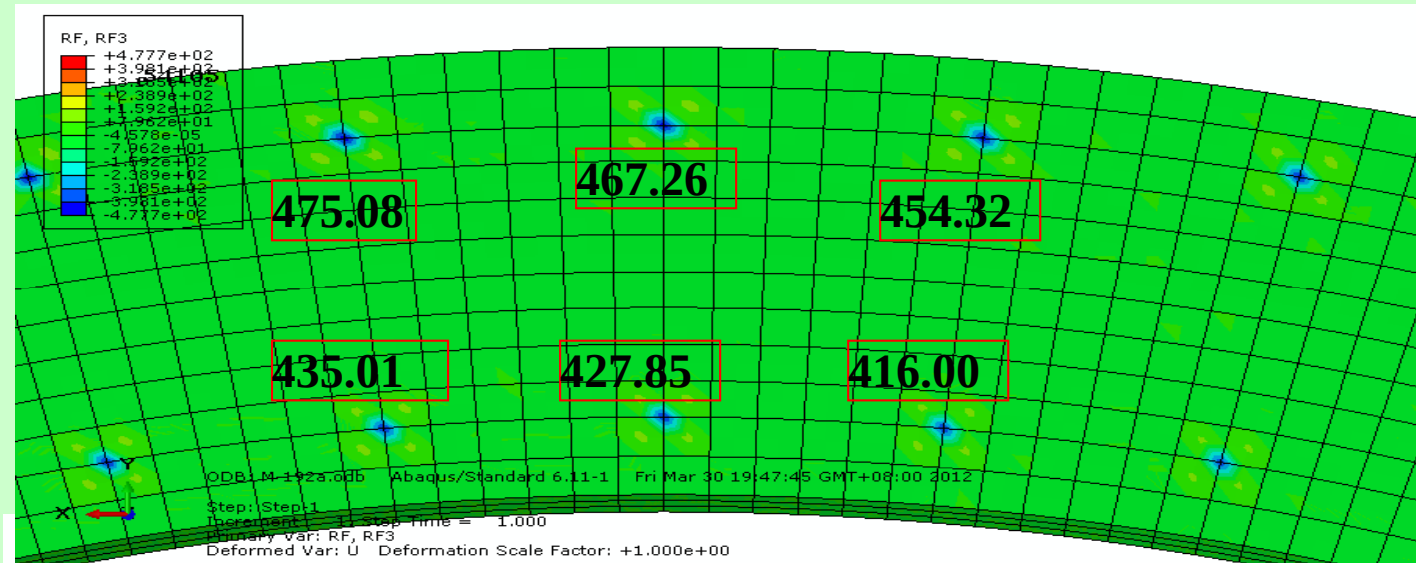
有限元素分析overturn中性軸角度位置

overturn中性軸
每6度作一分析，
故共有60個
Overturn加載分析

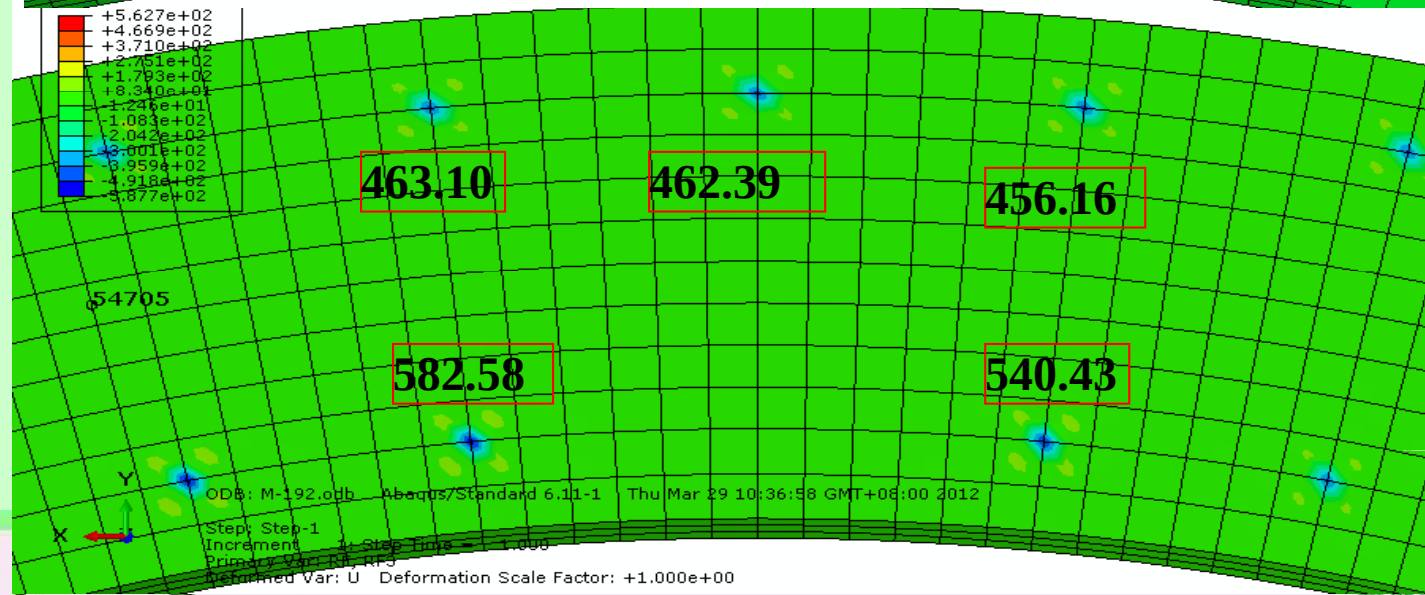


承受overturn moment螺栓受力示意

120根螺栓
完好之螺栓
受力情形

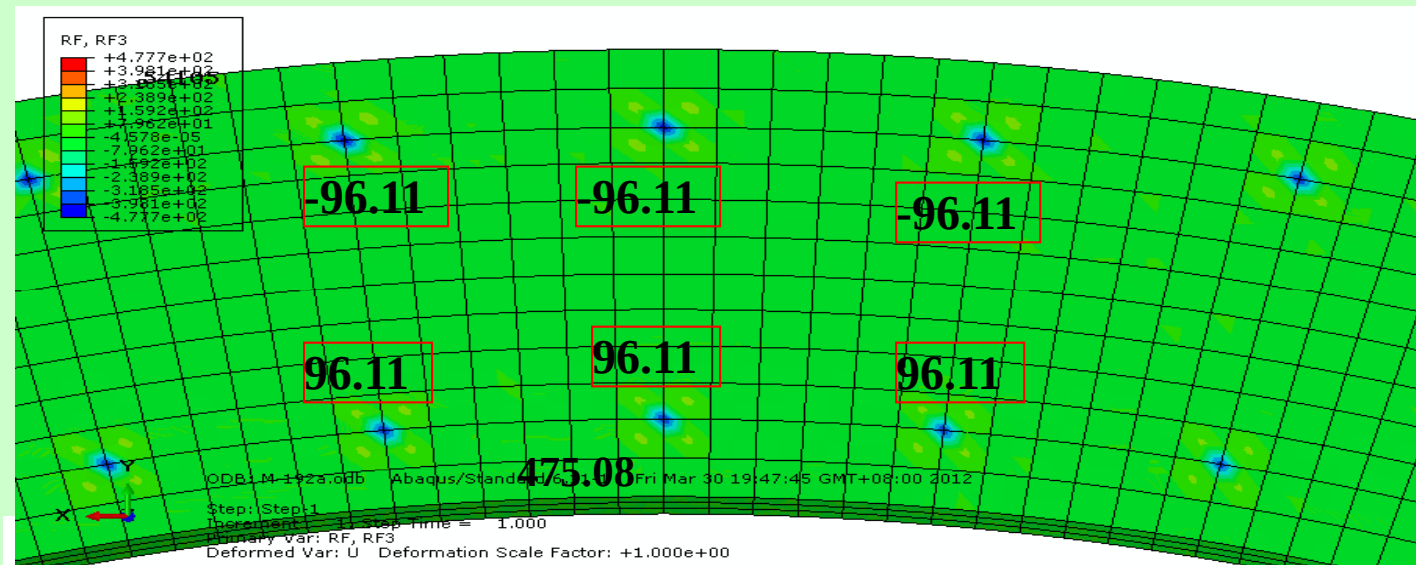


一根螺栓斷
裂後之鄰近
螺栓之受力
情形

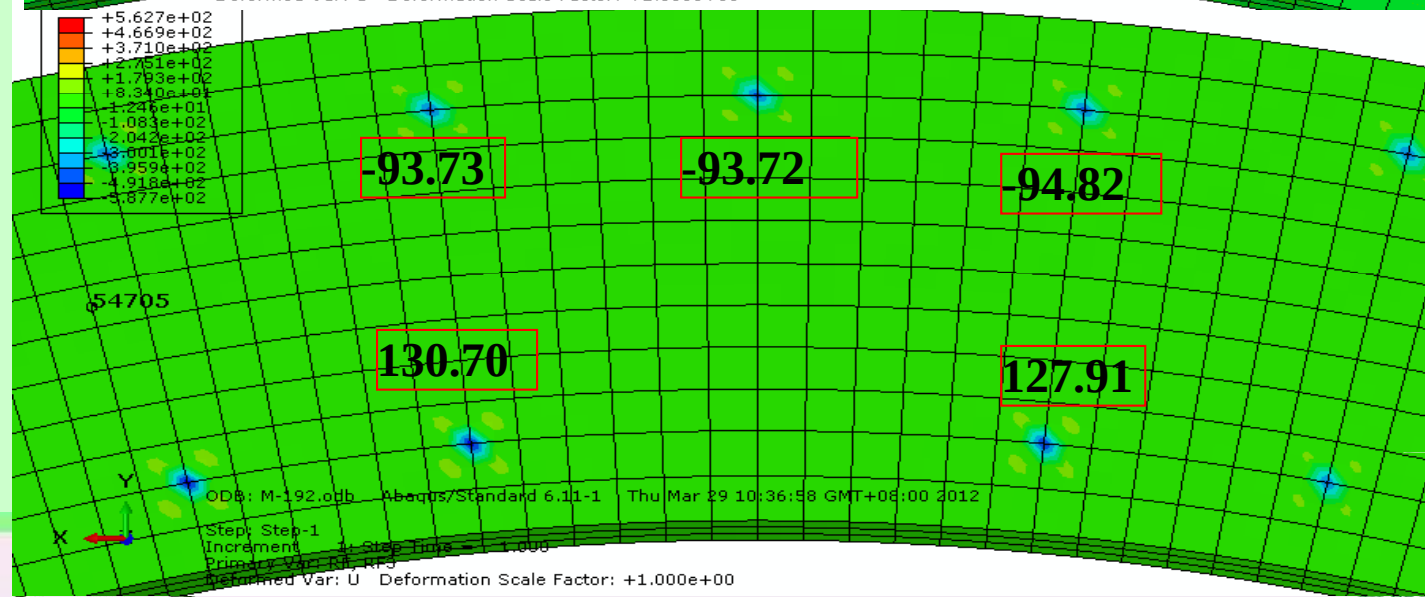


承受thermal moment螺栓受力示意

120根螺栓
完好之螺栓
受力情形

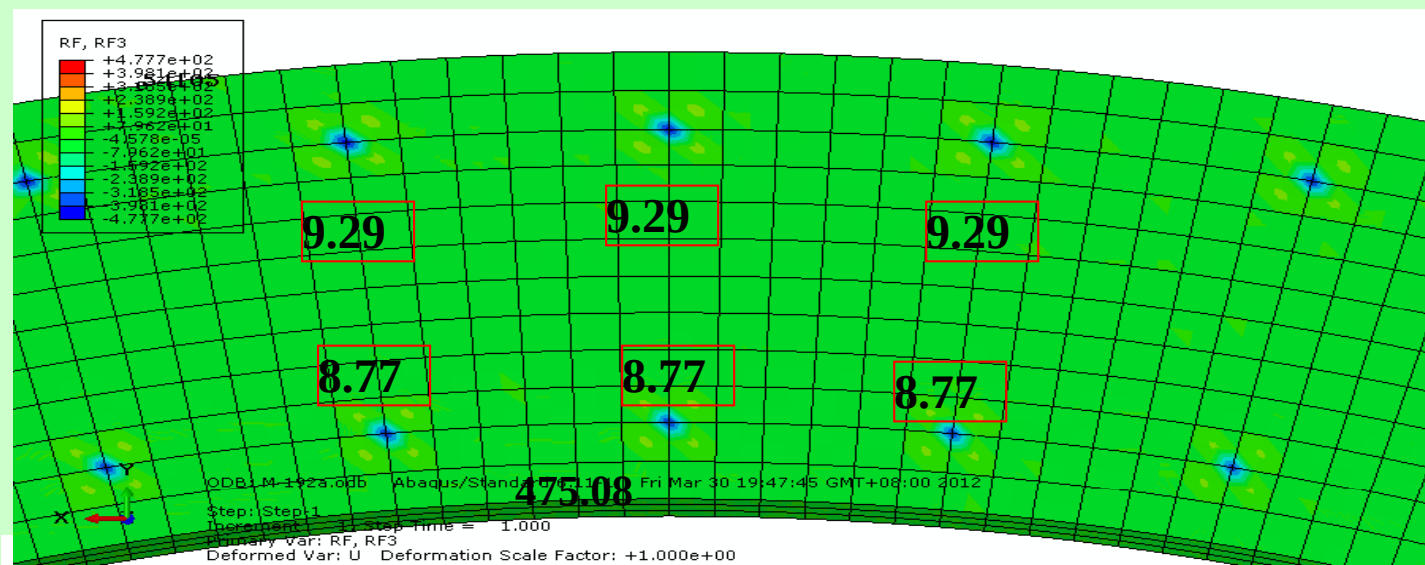


一根螺栓斷
裂後之鄰近
螺栓之受力
情形

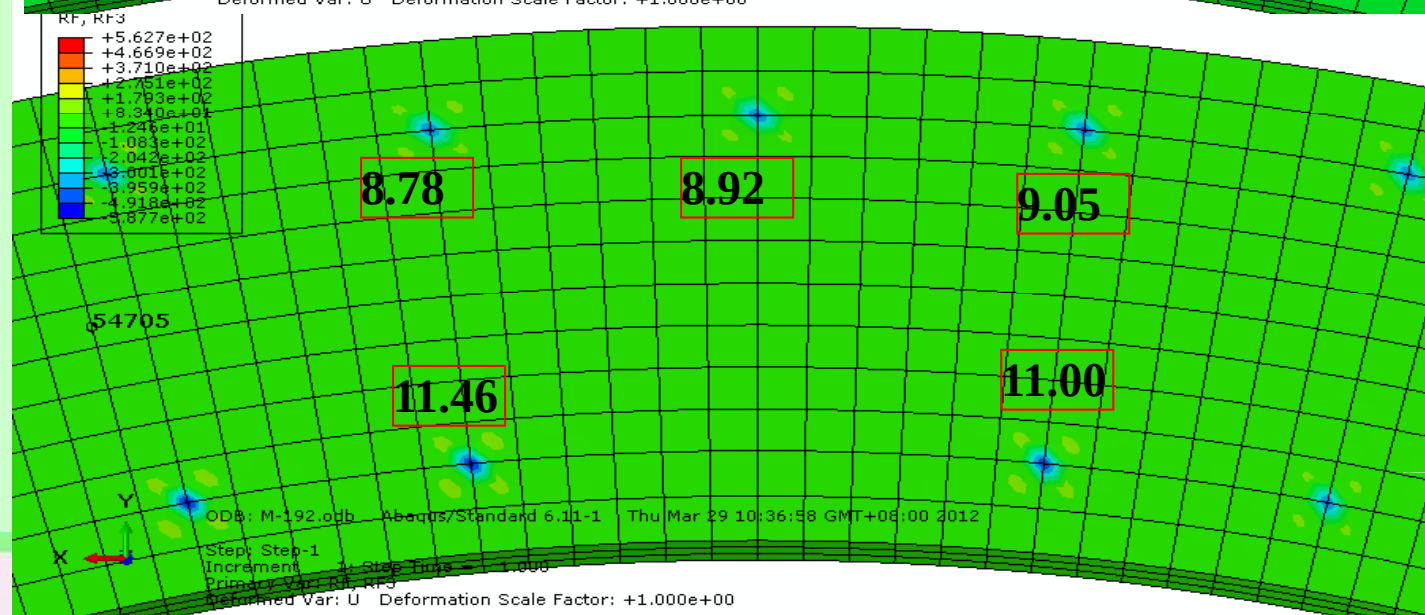


承受軸向力之螺栓受力示意

120根螺栓
完好之螺栓
受力情形



一根螺栓斷
裂後之鄰近
螺栓之受力
情形



核二廠1號機裙板錨定螺栓內圈7根螺栓斷裂後，螺栓承受之最大軸向力

假設A2 C6 D14 B10 B13 C9 D11內圈螺栓完全斷裂不承受負荷

斷裂螺栓數量		承受最大軸向力螺栓位置	軸向力 (kips)			螺栓軸向總受力 (kips)	螺栓達90%降服強度之受力 (kips)	是否符合設計要求
外圈	內圈		Overturn Moment (Faulted + SSE)	Thermal Moment	Vertical Upward Force			
0	7根 實際位置	D15 內圈	587.66	139.4	11.29	738.35	804.6	符合

核二廠1號機錨定螺栓完整性評估

假設A2 C6 D14 B10 B13 C9 D11
內圈螺栓完全斷裂不承受負荷

承受最大軸向力螺栓位置	中性軸角度	軸向力 (kips)			螺栓軸向總受力 (kips)	螺栓達90%降服強度之受力 (kips)	是否符合設計要求
		Overtorn Moment (Faulted + SSE)	Thermal Moment	Vertical Upward Force			
A1內圈	0	582.31	137.7	11.12	731.16	804.6	符合
A1內圈	6	585.65	137.7	11.12	734.51		
D15內圈	6	583.49	139.4	11.29	734.17	804.6	符合
D15內圈	12	587.66	139.4	11.29	738.35		
D15內圈	18	585.39	139.4	11.29	736.08	804.6	符合
D13內圈	18	584.77	139.4	11.45	735.62		
D13內圈	24	587.14	139.4	11.45	737.99	804.6	符合
D12內圈	30	584.49	137.7	11.52	733.71		
B12內圈	210	584.22	136.57	10.75	731.54	804.6	符合

反應爐支撐裙板接觸面滑移檢核

負荷 狀況	螺栓 狀況	接觸面壓應力 (ksi)			接觸 面剪 應力 (τ) (ksi)	滑移 檢核 $\mu\sigma_t / \tau$ ($\mu=0.35$)	S.F. 規範	是否 符合 設計 要求
		螺栓 預拉 力	其他負 荷造成 之壓應 力	接觸面 總壓應 力 σ_t				
Faulted + SSE	120支完好	3.73	3.62	7.35	2.323	1.105	1.03	符合
	7支斷裂	3.514		7.134		1.074		
P.R.+ OBE+ 熱應力	120支完好	3.73	2.64	6.37	1.18	1.89	1.1	符合
	7支斷裂	3.514		6.154		1.83		
P.R.+ OBE (不含熱應力)	120支完好	3.73	0	3.73	0.332	3.93	1.65	符合
	7支斷裂	3.514		3.514		3.70		

結論

- 本分析採用有限元素分析方法，以期能準確計算反應爐支撐裙板錨定螺栓斷裂後，所有其他螺栓受力之重分配情形。
- 依實際斷裂錨定螺栓位置建立有限元素分析模型，分析結果顯示，核二廠1號機反應爐支撐裙板錨定螺栓內圈7根螺栓斷裂後，承受最大軸向力之螺栓在D15內圈螺栓，其軸向力值為738.35 kips，仍低於螺栓材料達90%降服強度受力804.6 kips之設計基準，顯示仍符合設計基準，繼續安全運轉無虞。



結論(續)

- 接觸面滑移檢核分析計算顯示，內側螺栓斷裂7根，其他未斷錨定螺栓提供之正向壓力，所產生之磨擦力足以克服反應爐支撐裙板與基座間側向滑移剪力，亦即在最嚴苛之負荷情況下，反應爐支撐裙板接觸面不會滑移。

