

#1機反應爐支撐裙板錨定螺栓斷裂 處置報告



核 二 廠
汪 雅 政
101年4月3日



報告綱要

- 一、前言
- 二、設備說明
- 三、超音波檢測
- 四、修復方案
- 五、安全評估
- 六、大會關切議題
- 七、結論



一、前言

- 核二廠依2EOC-21反應爐支撐裙板錨定螺栓(RPV Support Skirt Anchor Bolts)斷裂事件處理報告承諾事項，於1EOC-22大修執行#1機支撐裙板錨定螺栓超音波檢測。
- 101年3月23日執行一號機反應爐支撐裙板錨定螺栓UT檢測前之清潔作業時，發現位於支撐裙板內圈357度位置，編號A2之螺栓已經斷裂。



錨定螺栓2A 斷裂情形



頂部



- 斷裂位置為自頂部以下約18.2吋位置
- 原始螺栓直徑3吋，長度26吋，頂部及底部螺牙區長度分別為9吋及7吋長。



核二廠1號機損壞之錨定螺栓位置

RPV SUPPORT SKIRT ANCHOR BOLTS

反應爐支撐裙板錨定螺栓

Recirc
Outlet

0°

MSL

MSL

MSL

MSL

270°

90°

180°

Recirc
Outlet

PLAN VIEW FROM ABOVE

- 斷裂的錨定螺栓均位在內側
- A2已斷裂
- C6, D14無回波, 研判已近斷裂
- B10、B13、C9、D11有瑕疵指示
- 內側其餘53支及外側60支錨定螺栓, 結構完整。



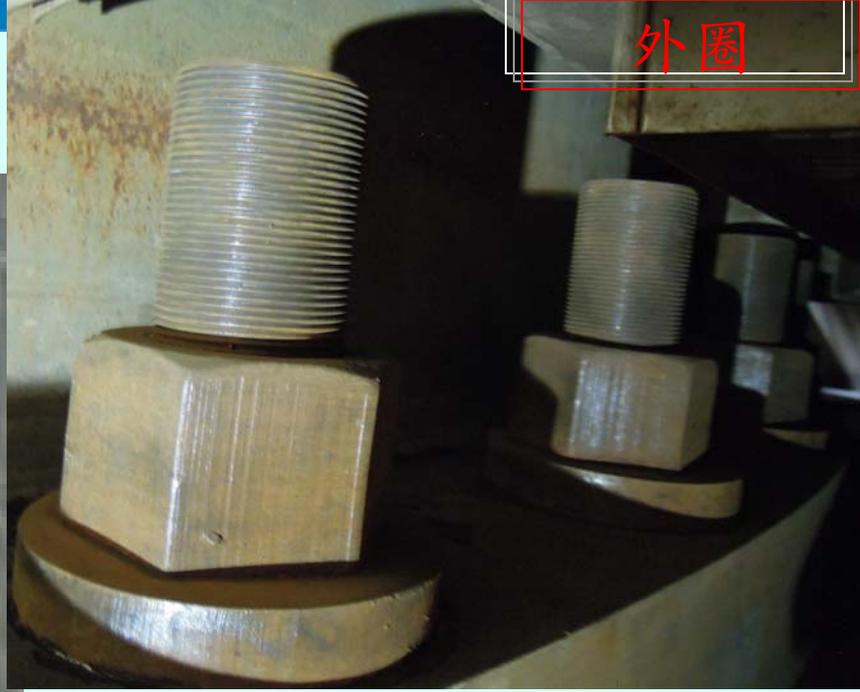
二、設備說明

- 核二廠反應爐為GE公司 BWR-6形式；反應爐下方之支撐裙板法蘭藉由內、外2圈各60支之錨定螺栓連結至基座(Pedestal)上之載板(Mounting Plate)，藉由摩擦力(Friction Joint)將反應爐之剪力負荷(shear loads)傳遞至基座。(AISC code)
- 錨定螺栓材質為ASTM A-540 Gr. B23 Class 1，直徑為3吋，長度26吋。螺栓預力為680KIPS。(subsection NF of ASME section III)



外圈

設備位置說明



內圈



Skirt Flange
 Mounting Plate
 Pedestal

SHIELD WALL LINER PLATE
SEE DWGS C-346 THRU C-354

Bio
Shielding
(A588 GRA)

FILL THESE COMPARTMENTS W/ CONG
OR GROUT AFTER RPV ANCHOR BOLTS
ARE 100% TENSIONED & INSPECTED

至基座底部
30'-8"

Skirt
Flange

Mounting Plate

Pedestal

RADIAL CROSS $\phi 1\frac{3}{8}$ "

$\phi 1\frac{1}{2}$
(A572 GR50)

SEE NOTE 4

EL(-)12'-8 $\frac{7}{8}$ "

1" ϕ AIR HOLE @ $\frac{1}{4}$ " OF EA
COMPARTMENT (TYP)

EL(-)14'-3"

WELDED STUDS 1'-0" C TO C MAX VERT
& 2°30' MAX HORIZ FROM EL(-)26'-4"
TO EL(-)12'-10 $\frac{3}{8}$ "

WELDED STUDS 1'-6" C TO C MAX
EA WAY FROM EL(-)26'-4" TO
EL(-)12'-10 $\frac{3}{8}$ "

EL(-)19'-11"

9'-5 $\frac{1}{2}$ " R

8'-1" R

$\phi 3\frac{1}{2}$ " (A588 GRA)
ANCHOR RING-SEE NOTES 2 & 3

EL(-)9'-4"

EL(-)9'-7 $\frac{1}{2}$ "

EL(-)10'-4"

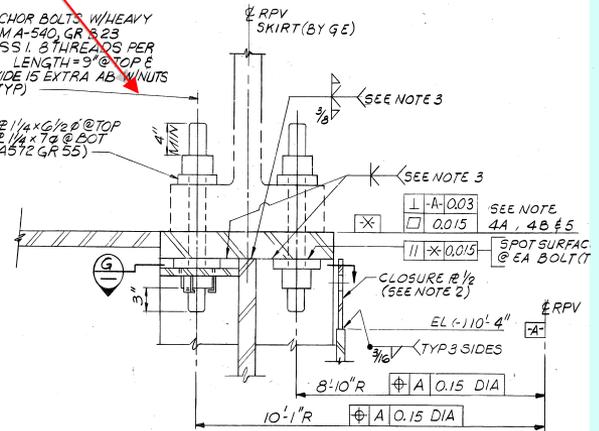
$\phi 1\frac{1}{4}$

BRACKET & BEAM BY G E
SEE G E DWG 767E556

EL(-)13'-7 $\frac{7}{8}$ "
& OPTIONAL SHOP SPLICE

$\phi 2$ (A572 GR42)
SEE NOTE 2

3" ϕ x 2'-2" ANCHOR BOLTS W/ HEAVY
HEX NUTS, ASTM A-540, GR B23
OR B24 CLASS 1, 6 THREADS PER
INCH, THREAD LENGTH 4" @ TOP &
7" @ BOT (PROVIDE 15 EXTRA AB MINUTS
FOR EA UNIT TYP)



三、超音波(UT)檢測

- 檢測方式及超音波檢測校準規塊製作比照ASME之規定
- 檢測工作人員為台電非破壞檢測隊蔡錫聯及陳敏榮，陳敏榮為資深中級超音波檢測員，蔡錫聯為高級超音波檢測師及EPRI 螺栓超音波能力驗證(PERFORMANCE DEMONSTRATION)檢定合格人員。



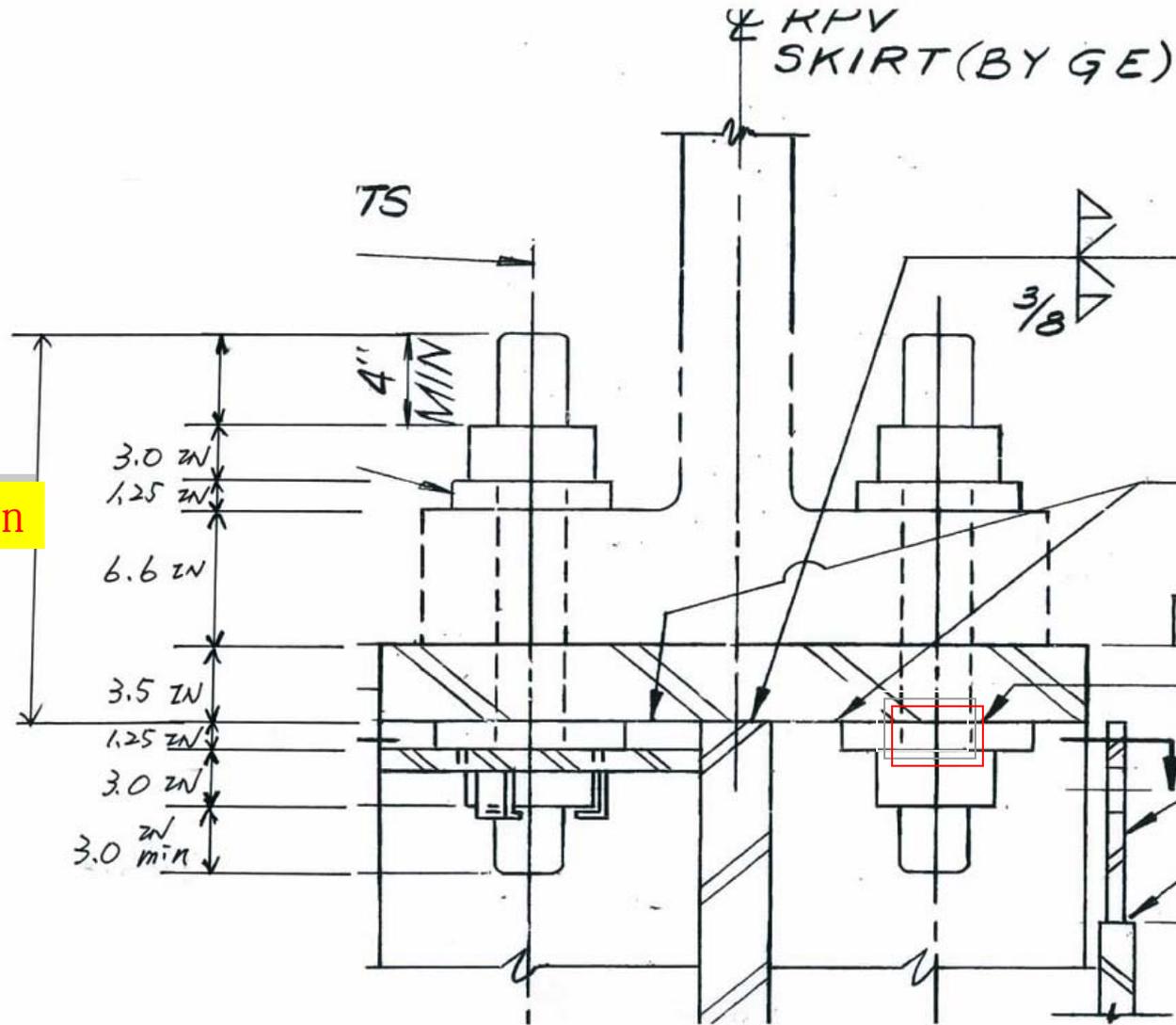
UT檢測結果

內外圈別	編號	顯示	位置
內圈	A2	斷裂	18.2"
	C6	近斷裂	21.7"
	D14	近斷裂	20"
	B10	裂紋	20.1"
	B13	裂紋	19.8"
	C9	裂紋	19.5"
	D11	裂紋	19.5"



錨定螺栓缺陷區域圖示

18.35In



裂紋深度評估

- 內圈編號C6及D14，超音波顯示背波消失 (NO BACKWALL REFLECTION)，判斷已接近斷裂。
- 內圈編號分別為B10, B13, C9, D11有顯示 (INDICATIONS)，但背波顯示良好。對於此4支螺栓之顯示，研判是螺紋根部裂紋。經判斷其深度約為2.5mm。



四、修復方案^{1/4}

- 材料：原設計材料
 - 螺栓：ASTM A-540 GR B23 Class 1
 - 螺帽：ASTM A-540 GR B23 Class 1
 - 墊圈：ASTM A-572 GR55
- 材料檢驗：
 - CMTR、C of C、QSC Certificate、QA Program
 - 超音波全體積檢測，確認材料內部無缺陷。



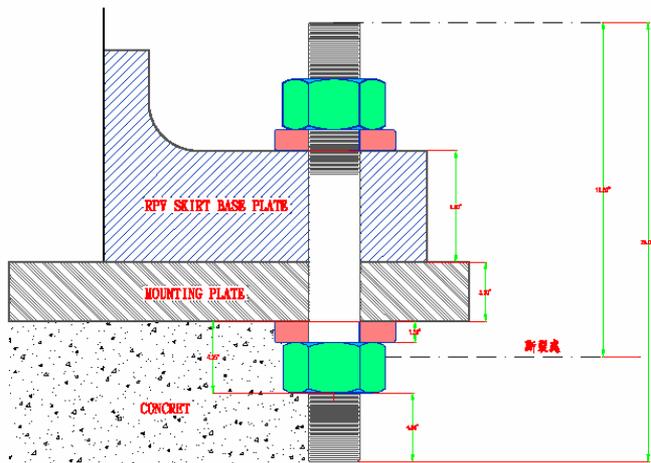
- 修復工法：以原設計結構修復
 - 移除底部螺栓之包覆水泥
 - RPV重量及其他如LOCA、SSE等所產生之應力主要是由RPV Pedestal支撐，Pedestal結構則由下列二者組成
 - 內外層LINER PLATE
 - 與LINER PLATE上之剪力釘結合之無筋混凝土
 - 由於內圈螺栓(Anchor Bolts)附近之混凝土區域並無剪力釘，因此無筋混凝土之作用為承受垂直載重及防震。



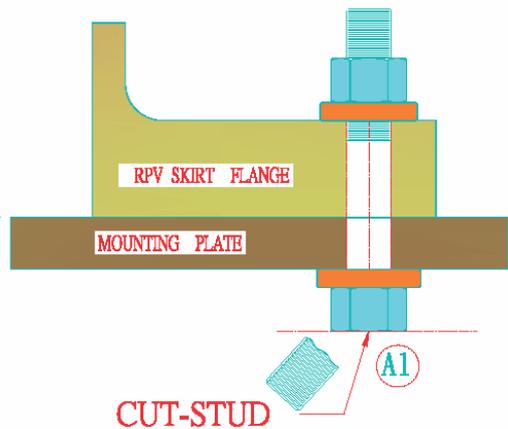
- 移除螺栓組件 (過程中須保護破裂面，以供金相分析)
 - 切除下部螺牙區
 - 切開上部螺帽並移除，殘餘螺栓將下移
 - 螺栓下移後再自下方墊圈上方切斷，將可完整保留裂紋區域。



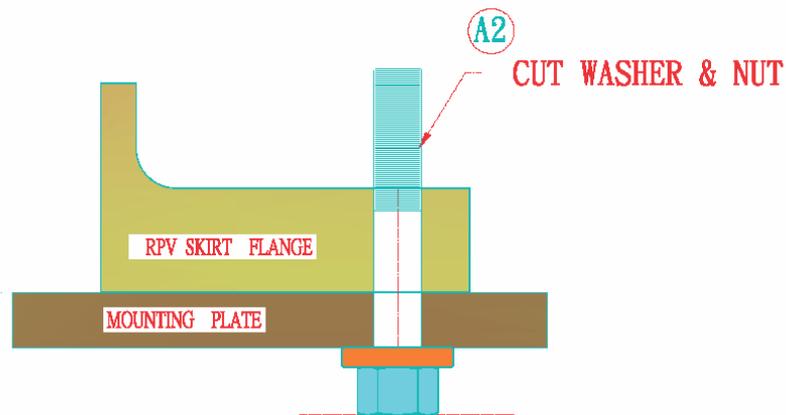
BOLT NO. -B13



STUD NO. -B13

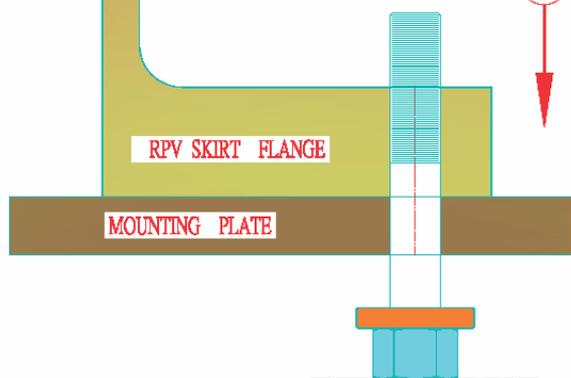


STUD NO. -B13

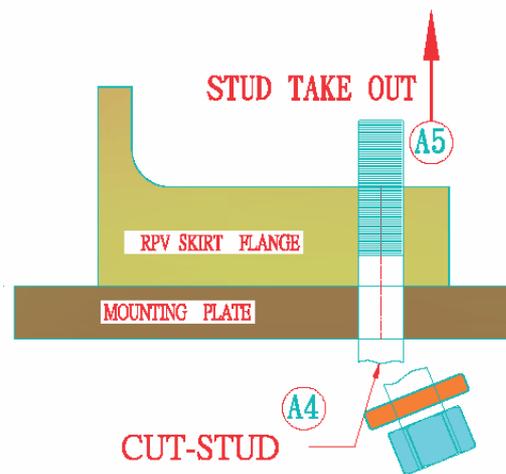


STUD NO. -B13

STUD GO DOWN (A3)



STUD TAKE OUT (A5)



- 安裝新螺栓組件
- 螺栓鎖磅及量測伸長量
- 超音波探傷檢測
- 灌漿
 - 更換螺栓所移除之混凝土區域僅向下面為混凝土，其餘5個面(前、後、左、右及上)均為鋼板(liner plate)，新填補之混凝土其抗壓強度為5000磅以上，故即使混凝土有新舊接合面亦不影響垂直載重之承受力。



- 環境限制

- 空間/干擾物限制

- A2螺栓受RWCU Bottom Drain管路影響施工
- 內圈空間區域狹窄

- 輻射劑量限制

- 增設屏蔽後工作區劑量率約為0.4mSv/hr

- 設備結構限制

- 螺栓底部位於槽狀結構內，並包覆高強度水泥





反應爐裙部螺栓輻射劑量率偵測報告



1.0~2.0mSv/h
(屏蔽前)

0.4~0.7mSv/h
(屏蔽前)

In-Core Housing :
20~30mSv/h

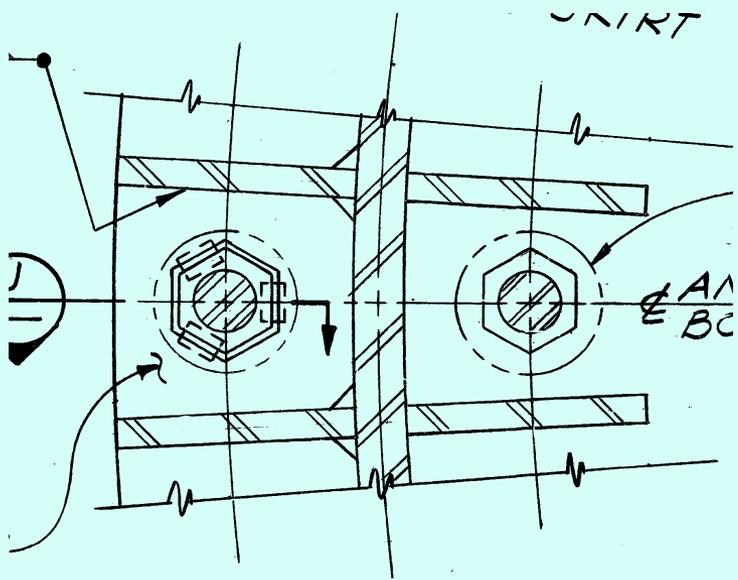


屏蔽前



屏蔽後

區域	爐底區	螺栓區
屏蔽前(mSv/h)	1.0~2.0	0.4~0.7
屏蔽後(mSv/h)	0.5~1.0	0.4



- 修復策略

- 由於前述環境的限制，修復7支斷裂/裂紋螺栓困難度高。
- 經安全評估；7支斷裂/裂紋螺栓均未修復情況下，其承受最大軸向應力螺栓(D15)餘裕為8.2%，修理更換D14、C6、B13等3支螺栓後，其餘裕由8.2%提高為15%。
- 本次大修先修復D14、C6、B13等3支螺栓，A2、D11、C9、B10待下次大修修復。

- 工作管制

- NCD-101032
- 1109.09按法規要求執行機械組件之修理與更換
- 特殊作業程序書



五、安全評估^{1/3}

- 核安處安全評估：

- 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。

- 依實際斷裂內圈7根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根依實際位置斷裂後，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。



六、安全評估^{2/3}

- 核安處安全評估：

- 接觸面滑移檢核分析計算顯示，依實際位置內側螺栓斷裂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。



六、安全評估^{3/3}

- GE公司進行之繼續安全運轉評估：
 - 依目前實際斷裂/裂紋7支之位置分析，機組仍能繼續安全運轉。



七、大會關切議題

- 肇因分析應從整體分析角度再加強。
 - 謹遵大會意見辦理。
 - 將待其餘破斷螺栓之金相檢驗後，確實檢討所有可能引起之原因，以釐清是否有共因失效之情況。



- 整體肇因未釐清前，應加強監測反應爐支撐裙板與基座之振動行為。
- 不論修護方案如何，仍然須請台電公司提出合理且適宜之監測方案，以防微杜漸。
 - 原先OSG-XE-105之強震儀已更新，且測試校正完成。
 - 將新增其監測功能：在振動觸發後，會立即送出訊息通知運轉人員及維護人員，由維護人員收集相關振動資料並會同廠家判讀，以利進行持續之振動監測。
 - 待振動監測資料持續收集後，將可比對分析反應爐裙板螺栓更換前後之振動差異。
 - #2號機將提改善案，擬在乾井相同位置裝設強震儀。



- 各項安全分析應考慮螺栓可能承受之動態力，包括：螺栓的疲勞分析。
 - 核二廠 RPV skirt 錨定螺栓設計時考慮了SSE及LOCA，所產生的動態負荷，分析結果當施加SSE及LOCA之dynamic loads後，在RPV skirt錨定螺栓節點處各承受2,606,000 in-kips及519,000 in-kips之overturn moments，以及890 kips之向上垂直力。上述之dynamic loads在上次二號機及本次一號機RPV skirt 錨定螺栓安全評估中均已納入。
 - 目前由OSG-XE-105強震儀記錄來看，雖有6個頻率點稍微超過原SSE設計頻譜，但反應爐之fundamental (1st) Mode 自然頻率為8.29 Hz，而紀錄中超過原SSE設計頻譜之頻率各為0.5 Hz及35 Hz附近，均遠離8.29 Hz，其餘各頻率點均低於原SSE設計頻譜甚多，因此，此記錄之event造成反應爐(包括skirt)之response應仍比原SSE設計頻譜還小。



- 各項安全分析應考慮螺栓可能承受之動態力，包括：螺栓的疲勞分析。(續)
 - ASME設計法規，在faulted condition下(即SSE+LOCA)，並不要求進行疲勞分析。然而在normal operation及upset conditions下，如有dynamic loads則需進行疲勞分析，主要考量為normal operation及upset conditions為持續性或較經常性發生之運轉情況，有可能會累積疲勞損傷造成破壞。
 - 未來完整肇因分析結論若確認核二廠RPV skirt 錨定螺栓之劣化機制有疲勞跡象，則本公司將進一步追查其來源及大小，以及作用之時間等，並進行必要的疲勞壽命評估。



- 內圈7根錨定螺栓斷裂/裂紋，已經逼近或超越原設計之餘裕，電廠應速提修復方案，完成錨定螺栓之修繕，確保基座整體勁度符合原設計之要求。
 - 在目前實際斷裂/裂紋7支錨定螺栓情況下，經安全評估，基座整體勁度可符合原設計之接受標準。
 - 由於整體環境限制，本次大修將先完成3支缺陷螺栓修復。其餘4支將規畫於下次大修修復。



- 基於核二廠目前經驗回饋，錨定螺栓之檢測週期與檢測方法不應只以滿足ASME法規為限。
 - 依ASME SECTION XI所定VT-3目視檢測方法並無法發現該螺栓之缺陷。
 - 將於接下來2次大修皆執行UT檢測，若檢測結果正常，則後續每2次大修執行乙次UT檢測。即#1機於1EOC-23、24，#2機於2EOC-22、23執行)



- 必須更深入確認爐內組件及IVVI之檢測結果，以釋對爐內各組件安全之疑慮。
 - 1EOC-22大修IVVI之檢測發現為SHSAM之限制固定梢有新增磨損現象，及爐心側板H4水平焊道2條裂紋有增長，其餘組件之檢查結果均正常。
 - 前述SHSAM之限制固定梢磨損及爐心側板H4水平焊道裂紋增長，皆在正常磨損/成長範圍內，因此沒有不正常之振動力所引起之損壞。



- 修復方案必須跟原GE施工工序與規範進行比對，以確保結構受力在原GE設計範圍。
 - 螺栓修復所需材料及工法、施作程序，均由GE公司所提出，且是依循原設計更換螺栓方式，修復完畢將由GE公司確認符合原設計要求。
 - 材料亦依循原規範。
 - 本次螺栓更換GE公司之協力廠商為Bolt Tech公司，為專業螺栓公司。



- 本案台電應提出檢測結果，肇因分析因應措施，安全影響評估之書面報告，並列為大修起動前之管制事項須經本會審查同意。
 - 本次核二廠一號機EOC-22大修，現階段經檢視仍符合申請自行管制起動之條件，並持續朝此目標努力。對於大會要求之書面報告，本公司將盡全力結合國內外專家之專業能力，儘速提出報會。然其中部分項目如肇因分析，需要較長時間分析與確認，恐無法於大修期間內定案，但本公司於處理期間，將會與大會保持密切聯繫，提供各項要求報告資料，以兼顧審查時效與即時溝通。



- 檢測之不準度有多大?縱使台電7根都修復，因看來已不是個案，仍應就其他螺栓仍可繼續使用運轉安全無慮提出評估論述。
 - 超音波檢測儀器是依據法規規定之人工瑕疵2.5mm校準，檢測無問題。
 - 其餘113支螺栓完整性經UT檢測合格；而從螺栓斷裂面顯示其裂紋之成長並非短時間形成，可藉由定期之螺栓UT檢測來確保螺栓之完整性。

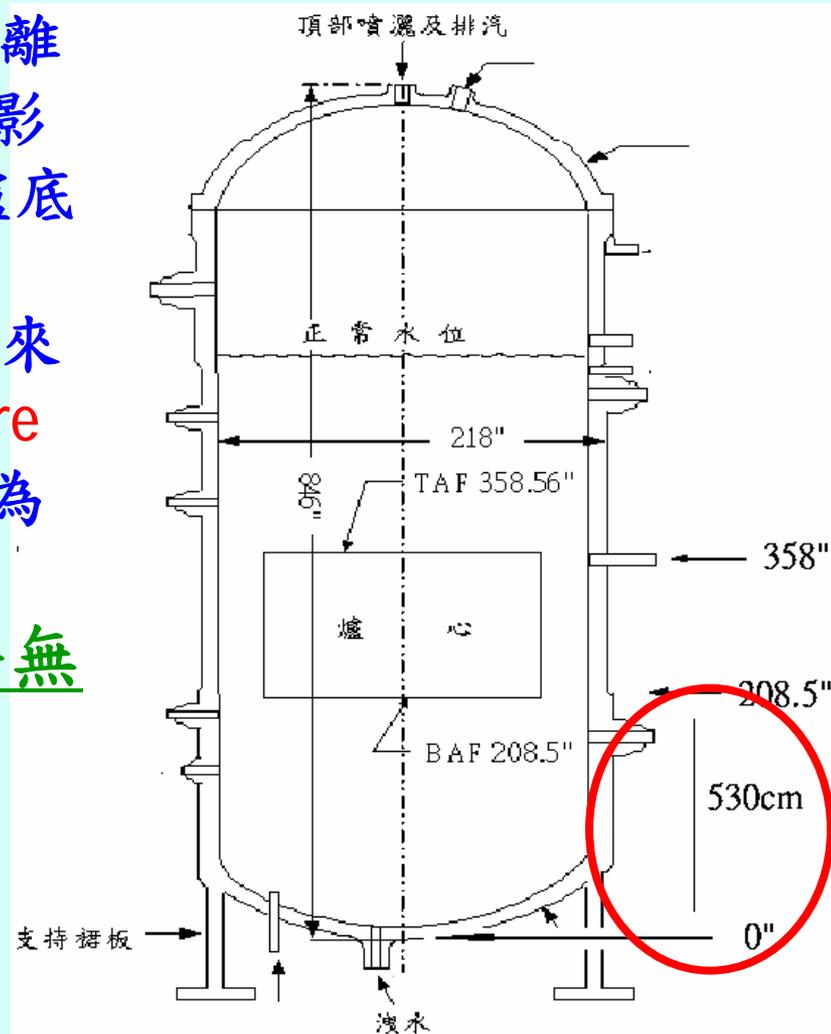


●修復時，爐心中心燃料是否退出，以降低人員劑量？

□如右圖所示，爐心內燃料底部距離爐底約530cm，爐心內燃料不會影響爐底工作區域之輻射劑量率(爐底之接觸劑量率僅為0.3mSv/h)

□爐底工作區域輻射劑量主要貢獻來自該區33支之靠外側17支的In Core Housing (每支接觸輻射劑量率約為20~30mSv/h)

□結論：修復時爐心中心燃料無
礙



區域	爐底區	螺栓區
屏蔽前(mSv/h)	1.0~2.0	0.4~0.7
屏蔽後(mSv/h)	0.5~1.0	0.4

- 其他螺栓是否仍有足夠磅數，要提出證明？
 - Bolt Tech專家指出現階段如以量測in-place 螺栓之長度，而以比對建廠施工紀錄，並無法得到正確的結果。
 - 可行方式為以螺栓拉伸機直接施力量測，惟本廠對此方式有損壞螺栓之疑慮，本廠目前評估中。



- RPV振動有超出OBE，是否需執行walkdown
 - 3月16日一號機依計劃停機準備1EOC-22大修，5:50所有控制棒均已插至全入，運轉員依程序書245將反應爐 Mode Switch由Startup切至Shutdown位置時，地震儀 105 動作。由於中央氣象局位於中央花園之地震儀未動作，且中央氣象局並未發佈任何地震報告，因此當時判定為地震儀誤動作。但保守考量，仍依程序書575執行全廠巡視，巡視結果兩部機均未發現異常。



七、結論

- 依安全分析結論在7支螺栓失效的情況下，其承受最大軸向應力螺栓餘裕為8.2%，本次修復3支螺栓以後，其餘裕由8.2%提升至15%，可繼續安全運轉無虞。
- 本次修復作業完全依照GE公司的修復計畫，在GE之監督下，依循原設計要求及方式更換螺栓修復完畢，並將由GE確認符合原設計要求。
- 本公司將在大修啟動前提出正式書面報告，內容包括檢測結果、初步肇因分析、因應措施及安全評估等，送請大會審查。



核能發電
追求卓越

安全第一
品質為先



敬請
批評指教



•反應爐模式開關切S/D引動地震儀資料
(95年系統更新後有觸發記錄)

日期	•時間	• OSG-XE-105軸向	•最大加速值	•備註
• 96/9/29 (附件1)	• 21:53	•南北向	• 0.0320G	•反應譜超過OBE DBRS
		•東西向	• 0.0186G	
		•垂直向	• 0.0839G	
• 96/9/29 (附件1)	• 21:56	•南北向	• 0.0285G	•反應譜超過OBE DBRS
		•東西向	• 0.0209G	
		•垂直向	• 0.1158G	
• 99/10/7 (附件2)	• 05:53	•南北向	• 0.0138G	•此次大修停機後，已於 10/30前將地震儀感測器/訊 號線更新及增加支撐架
		•東西向	• 0.0174G	
		•垂直向	• 0.0406G	
• 99/10/7 (附件2)	• 15:17	•南北向	• 0.0185G	•此次大修停機後，已於 10/30前將地震儀感測器/訊 號線更新及增加支撐架
		•東西向	• 0.0185G	
		•垂直向	• 0.0368G	
• 101/3/16 (附件3)	• 05:50	•南北向	• 0.0098G	•加速值超過OBE設定，反應 譜超過SSE DBRS
		•東西向	• 0.0081G	
		•垂直向	• 0.2947G	



核二廠1號機支撐裙板錨定螺栓完整性評估

(假設4支螺栓不受力，其餘螺栓受力最嚴重之前十大)

承受最大軸向力螺栓位置	力矩施加角度 (Deg)	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	544.65	125.67	10.61	680.92	804.6	符合
	6	547.06	125.67	10.61	683.34		
	12	543.49	125.67	10.61	679.76		
A3內圈	0	543.72	125.12	10.46	679.30	804.6	符合
D12內圈	24	543.60	125.67	10.93	680.16	804.6	符合
	30	547.38	125.67	10.93	683.98		
	36	545.20	125.67	10.93	681.80		
D10內圈	36	544.17	125.13	11.02	680.32	804.6	符合
	42	545.76	125.13	11.02	681.91		
	48	541.38	125.13	11.02	677.56		



核二廠1號機支撐裙板錨定螺栓完整性評估

(修復後， D14螺栓受力最嚴重之5個受力角度及其受力大小)

承受最大軸向力螺栓位置	力矩施加角度 (Deg)	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			
D14內圈	18	462.51	103.55	9.10	575.15	804.6	符合
	24	460.08	103.55	9.10	572.72		
	12	462.51	103.55	9.10	572.52		
	30	452.61	103.55	9.10	565.25		
	6	452.20	103.55	9.10	564.84		



核二廠1號機支撐裙板錨定螺栓完整性評估

(修復後，C6螺栓受力最嚴重之5個受力角度及其受力大小)

承受最大軸向力螺栓位置	力矩施加角度 (Deg)	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			
C6內圈	156	452.69	99.80	9.00	561.49	804.6	符合
	162	450.36	99.80	9.00	559.17		
	150	450.05	99.80	9.00	558.86		
	168	443.10	99.80	9.00	551.91		
	144	442.49	99.80	9.00	551.30		

核二廠1號機支撐裙板錨定螺栓完整性評估

(修復後，B13螺栓受力最嚴重之5個受力角度及其受力大小)

承受最大軸向力螺栓位置	力矩施加角度 (Deg)	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			
B13內圈	204	455.26	99.80	9.00	563.53	804.6	符合
	198	452.87	99.80	9.00	561.14		
	210	452.66	99.80	9.00	560.93		
	192	445.52	99.80	9.00	553.79		
	216	445.10	99.80	9.00	553.37		