

核二廠一號機錨定螺栓斷裂案事件 問題與答復

錨定螺栓簡介

1、核二廠錨定螺栓及反應爐基座位置及土木結構圖。

反應爐本體及混凝土基座



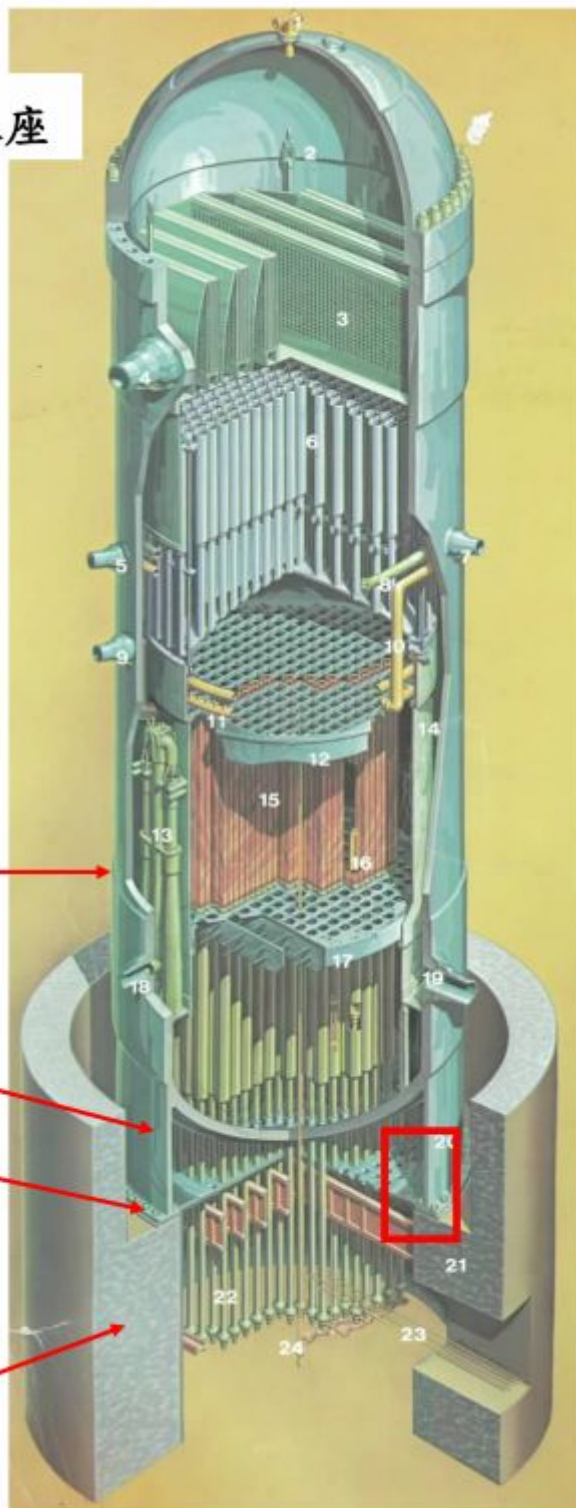
錨定螺栓圖示

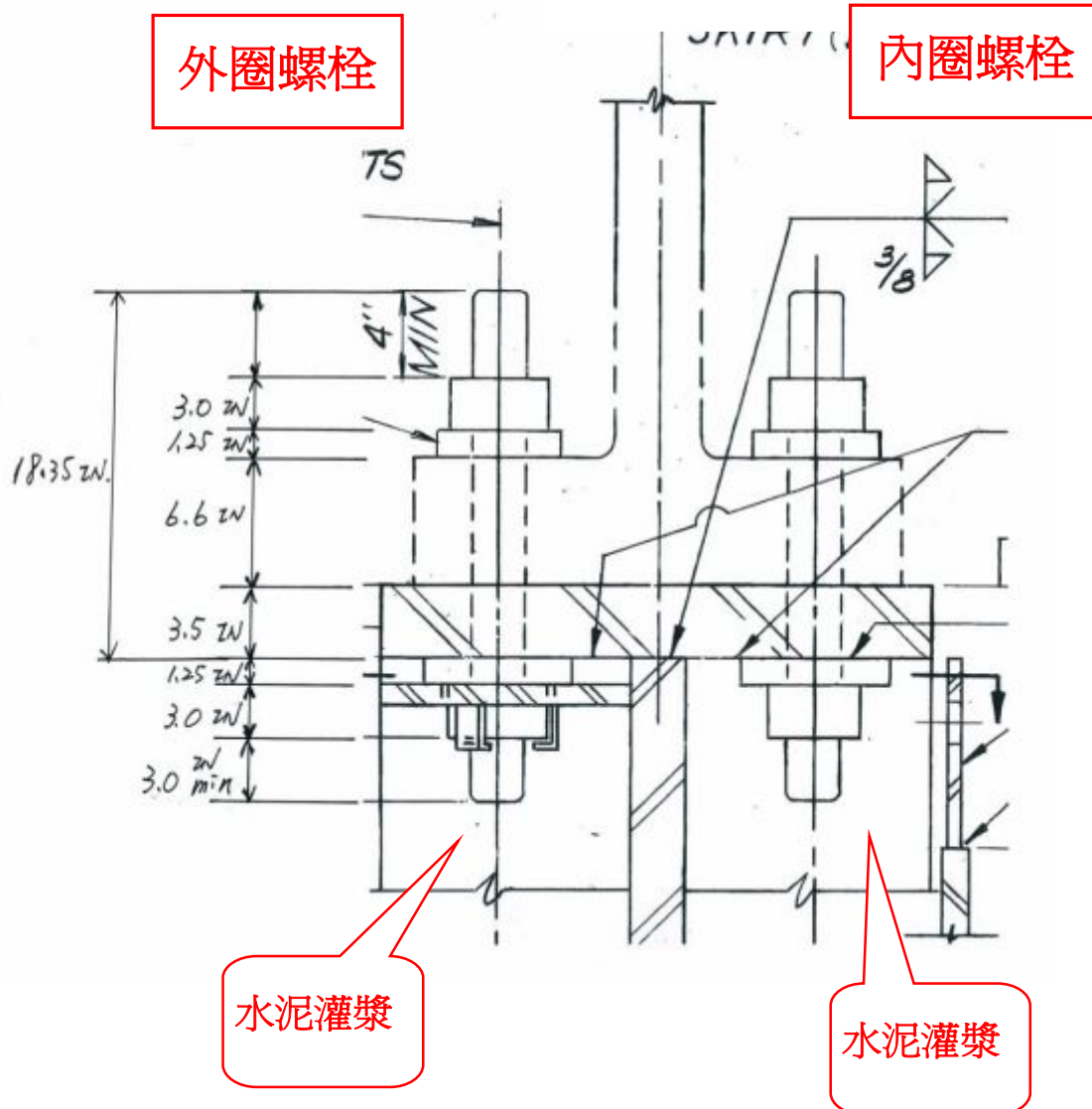
反應爐本體

支撐裙鈑

錨定螺栓

鋼筋混凝土基座





2、何謂「核能級」產品？

核能電廠依照美國聯邦法規 10 CFR Appendix B 之品保十八條制度，從採購、製造、安裝、檢驗等環節皆需要一一符合採購規範之要求，因此品質是一種符合規範要求的制度與保證。

螺栓斷裂肇因分析

3、錨定螺栓斷裂是否跟核二廠 1 號機切換停機有關？

經送實驗室檢視 3 支已斷裂或接近斷裂螺栓（A2,C6,D14），斷裂處之氧化層已存在一段時間，不是新的斷裂面，所以並非 3 月 16 日運轉模式開關切換至停機位置所造成。

4、為什麼核二廠 1 號機錨定螺栓會斷裂？

對於斷裂之螺栓，台電公司已送請核研所進行金相分析，並洽請奇異公司及工研院材化所共同探尋肇因，結論如下：

- (1)螺栓之斷裂的起始肇因乃是階段性腐蝕性環境、以前之施工方法較為老舊造成的應力集中或表面缺陷、及敏感性材料加上材料瑕疵三個條件同時存在下而產生應力腐蝕龜裂(SCC, stress corrosion cracking)。

核研所金相分析結果如下：

編號	裂紋起始	裂紋形貌	起始區形貌	成長區形貌	其他
A2	螺桿	平坦斜面	沿晶裂縫 micro-dimple 腐蝕破壞形貌	Dimple 疲勞裂紋	孔洞/硫化物夾雜
C6	螺牙	平坦斜面	沿晶裂縫 micro-dimple 腐蝕破壞形貌	Dimple 疲勞裂紋	硫化物夾雜
D14	螺牙	平坦斜面	沿晶裂縫 腐蝕孔 二次裂縫	Dimple 疲勞裂紋 淬火微裂紋	硫化物夾雜
B10	螺牙	由螺紋向螺栓內部及向下延伸	脆性沿晶裂縫 micro-dimple 應力腐蝕分枝	Dimple	硫化物夾雜
B13	螺牙	無明確方向	由 Phased Array 結果分析應與 B10 類同		
C9	螺牙	無明確方向			
D11	螺牙	由螺紋向螺栓內部及向下延伸			

- (2)經過運轉中的負荷以後，長的裂紋會釋放大部分螺栓預力，故螺栓不會因高張力而瞬間斷裂，但於運轉條件下承受較高之疲勞負荷，加上裂縫

較長，裂縫強度因子將高於門檻值，使裂縫因疲勞而成長，直到斷裂。而對於微小裂紋之螺栓仍維持大部份預力，只有部份運轉之疲勞負荷傳遞至螺栓，相對而言，在運轉應力下，裂縫強度因子仍處於門檻值以下，故不致因疲勞而使裂紋成長。

(3)再者，由斷裂面的腐蝕產物厚度可得證明裂紋緩慢長時間逐漸成長，不至於瞬間斷裂。

目前肇因已經非常明確，7支有問題之螺栓已全部更換，且在建立監測計畫下及每次大修執行超音波檢測，將可確保錨定螺栓之安全性。

5、壞掉的都是同一批次，怎麼會那麼巧？

一號機內、外圈錨定螺栓母材之爐號清查結果，3支斷裂螺栓及2支有裂紋顯示螺栓均為爐號61236(另2支有裂紋顯示螺栓爐號不可考)。

同一爐號(約4500公斤)屬於同一熔爐產出之鋼錠，其化學成分相近，但後續再經不同批次的鍛造、熱處理等加工而製成多批次螺栓(1支23.6公斤)，因此同一爐號僅代表同一批次之鋼錠原料，但不表示各批次加工製成之螺栓，具有完全相同的機械性質。

惟由下表比較得知，爐號61236具有較高硫含量，另由A2、C6、D14破斷螺栓的金相分析也顯示有大顆粒的硫化物存在，因此可以斷定61236爐號之原始母材有較高硫含量及硫不均勻分布之現象。而高含硫量對材料機械特性及腐蝕特性均有不良影響。

6、目前斷裂螺栓製造批號徹查結果為何？對原建廠材料測試報告證明(CMTR)之材質成分與台電公司目前委外分析之成分結果相互比較，是否為硫、碳或其他成分不均勻所致？

原建廠CMTR與斷裂螺栓化學成分分析比較如下表，結果顯示碳、硫含量均在規範內(C6含碳量在誤差規範範圍0.02%內)：

編號	裂紋情形	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo
建廠規範		0.37-0.44	0.6-0.95	≤0.025	≤0.025	0.15-0.35	0.65-0.95	1.55-2.00	0.20-0.30
8073029 CMTR		0.385	0.71	0.01	0.012	0.28	0.75	1.68	0.21
61765 CMTR		0.38	0.75	0.012	0.018	0.26	0.78	1.72	0.22
61236 CMTR		0.39	0.69	0.012	0.022	0.27	0.82	1.8	0.24
A2	斷裂	0.43	0.74	0.006	0.013	0.26	0.79	1.77	0.23
C6	幾近 斷裂	0.4611	0.75	0.01	0.0244	0.28	0.78	1.73	0.23
D14	幾近 斷裂	0.3851	0.73	0.01	0.0242	0.29	0.73	1.64	0.2
B10	裂紋	0.3998	0.68	0.01	0.0169	0.31	0.82	1.82	0.23
B13	裂紋	0.3876	0.75	0.01	0.0228	0.26	0.76	1.67	0.21
C9	裂紋	0.3792	0.76	0.01	0.023	0.26	0.76	1.71	0.21
D11	裂紋	0.3818	0.74	0.01	0.021	0.29	0.77	1.7	0.22
新品		0.39	0.73	0.011	0.016	0.28	0.76	1.72	0.24

同一爐號(每一爐約生產 4500 公斤鋼錠)屬於同一熔爐產出之鋼錠，其化學成分相近，但後續再經不同批次的加工及熱處理等製成多批次螺栓(每支重 23.6 公斤)，因此同一爐號僅代表同一批次之鋼錠原料，但不表示各批次加工製成之螺栓，具有完全相同的機械性質。

由上表比較得知，爐號 61236 具有較高硫含量，另由 A2、C6、D14 破斷螺栓的金相分析也顯示有大顆粒的硫化物存在，因此可以斷定 61236 爐號之原始母材有較高硫含量及硫不均勻分布之現象。而高含硫量對材料機械特性及腐蝕特性均有不良影響。

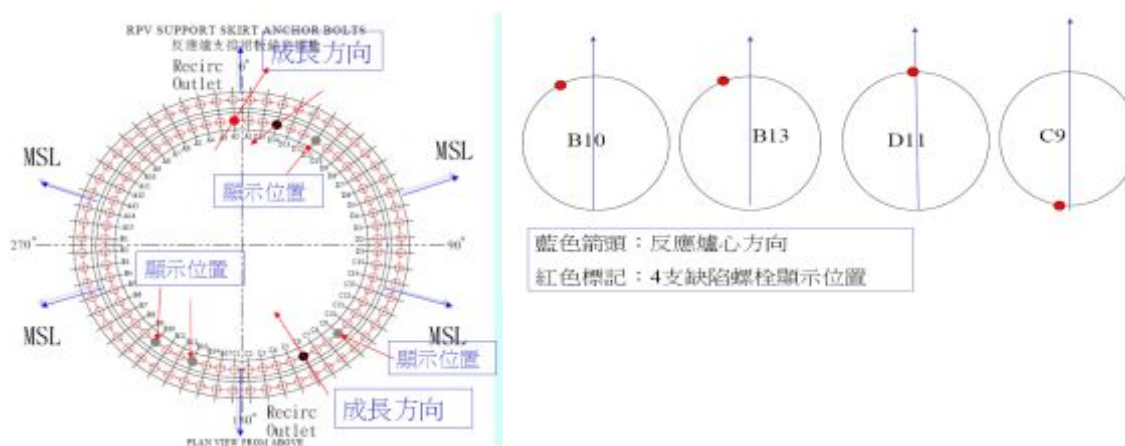
斷裂螺栓 A2 及 C6 化學成份分析顯示其含碳量較原建廠 CMTR 高。A2 及 C6 或有碳成份分布不均之現象，但由肇因分析顯示高碳含量並無明顯不利之影響。

7、為什麼核二廠 1 號機錨定螺栓斷裂都在內圈？目前七根斷裂或具有裂紋螺栓，斷裂或裂紋方向與反應爐整體顯示有特定方向（南北向）可能之原因確認？

分析結果，階段性腐蝕性環境、以前之施工方法較為老舊造成的應力集中或表面缺陷、及敏感性材料加上材料瑕疵三個條件共存下而產生應力腐蝕龜裂(SCC)是本案的起始肇因。

正常運轉中，支撐裙板主要是接受垂直向上(vertical upward)力及熱力矩(thermal moment)之負荷，並沒有 SSE 及 LOCA 負荷，其中垂直向上力作用下，支撐裙板內外圈位置所受負荷相同，但在熱力矩負荷作用下，支撐裙板內圈(受拉力)所受負荷遠大於外圈(受壓力)，因此內圈受力損壞之情形應比較可能。

螺栓於拆除前均標示與反應爐爐心之相對位置，經比對金相分析判定裂紋之方向：3 支斷裂螺栓之裂紋成長方向及 4 支有裂紋顯示螺栓之裂紋位置如下圖所示，由裂紋成長方向及裂紋位置觀察，其與反應爐並無特定方向。



奇異公司依核二廠設計基準執行負載分析，分析結果在 0 度及 180 度方向上並沒有發現有額外的負載。雖然由設計理論分析在 0 度及 180 度方

向上並沒有發現有額外的負載，本會仍要求台電請奇異公司就相關議題持續與系統專家討論，強化後續分析。

本會列入後續管制項目為：奇異公司負載是理論分析，可能遺漏某些因素而無法解釋地動隨方向之差異，此問題牽涉到斷裂螺栓是否與隨方位改變的受力有關，台電應請奇異公司就相關議題持續與系統專家討論，強化後續分析。

註：LOCA: Loss of Coolant Accident；SSE: Safe Shutdown Earthquake

8、世界其他核電廠，是否有發生類似核二廠之案例？

尚未蒐集到國外有反應爐壓力槽錨定螺栓斷裂相同案例，依目前核能法規要求以目視檢查方式，有可能係無法檢視出螺栓內部之裂紋。接近案例有 1973 年美國 Haddam Neck 電廠蒸氣產生器支撐錨定螺栓，同樣材質於高預力及潮濕環境中發生應力腐蝕龜裂(SCC)。(詳見 EPRI NP-5769 Table 4-1)

地震儀之紀錄及對結構安全之影響

9、為什麼核二廠 1 號機切換停機時，測到 0.29g 的最大加速度？

101 年 3 月 16 日當核二廠 1 號機之運轉模式開關切換至停機時，強震儀 XE-105 確有垂直向最大加速度值 0.29g 紀錄。事後將 XE-105 送往國家地震工程研究中心進行訊號比對，此地震儀在垂直向有不穩定現象產生，因此當時所量得之 0.29g 振動波訊號，除了反應爐基座裙板附近瞬間振動力外，還有包含有背景雜波、地震儀零點上下晃動之失真訊號，無法確認當時垂直向量測到最大加速值 0.29g 之正確性。

10、如何確保地震來時螺栓及反應爐是完好無損？3 月 16 日 0.29g 地震訊號對反應爐系統組件有無影響？

(1)核電廠在廠房不同樓層位置設有強震儀，大地震來襲超過設定值，機組會立即自動停機；強震後會立即依照作業程序書執行現場勘察，確認重

要設備、組件之狀況(不只限定於螺栓)。

- (2)經過分析，在 Faulted condition(SSE+LOCA)下(承受 1083kips 垂直上揚力)，並不會對反應爐支撐裙板錨定螺栓之疲勞破壞有威脅性；因此即使有 0.29g(<SSE+LOCA)之交變垂直上揚力，亦不可能造成反應爐支撐裙板錨定螺栓疲勞破壞。另核二廠反應爐之振動頻率為 8.29 Hz，經由反應爐垂直方向之設計基準反應譜(高程-8'，詳參考資料 1)，查得反應爐裙板位置其垂直加速度 OBE 約為 0.57 g，SSE 約為 0.93 g(反應爐基座高程 -9' 4" 處垂直向加速度 OBE 為 0.16g，SSE 為 0.37g)。而核二廠反應爐支撐裙板之固定螺栓於設計時，亦採用反應爐之分析數據作為設計參數，即考慮 OBE 及 SSE 之設計條件。若地震儀記錄到最高之垂直加速度實際值已達 0.29 g，仍小於反應爐垂直設計加速度 0.57 g (OBE)及 0.93 g (SSE)，在設計安全範圍之內。核二廠依程序書執行各項檢測結果正常，反應器周邊組件、廠房及設備均無損壞發生。

註：LOCA: Loss of Coolant Accident；OBE: Operating Basis Earthquake；
SSE: Safe Shutdown Earthquake

11、一號機今年 3 月 16 日停機前後之測震記錄資料，過去 10 年的停機前後測震記錄資料。

- (1)今年 3 月 16 日當核二廠 1 號機之運轉模式開關切換至停機時，強震儀編號 OSG-XE-105 確有記錄到垂直方向最大加速度值 0.29g 的紀錄，同時在水平方向卻只有南北方向 0.0098g、東西方向 0.0081g 的加速度值，停機過程中，其餘強震儀紀錄顯示最大加速度值則僅有 0.036g，顯示記錄資料乃局部地方的瞬間加速度。事後針對地震儀編號 OSG-XE-105 紀錄研判，不論是從學理與工程實務的角度來看，除了人工製造的精密振動行為之外，實務上鮮少有真實的振動行為只會在垂直方向達 0.29g 高加速度值，而在水平方向的加速度值卻很低，因此，推測該地震儀記錄訊號很可能已經有失真的現象。

- (2)台電公司於 4 月 25 日第 3 次審查會議時，認定該儀器已損壞，0.29g 之訊號為假訊號，本會及審查委員均未接受台電公司說法，並決議：「原

OSG-XE-105 地震儀應送專業機構檢測，除確認其是否失效外，並設法釐清其目前量測數據有多少的參考價值，納入分析。」

(3) 台電公司將此地震儀送交國家地震研究中心進行測試驗證後，確認其南北向、東西向均反應正常，而垂直向在引發振動後有失真不穩定的現象產生。

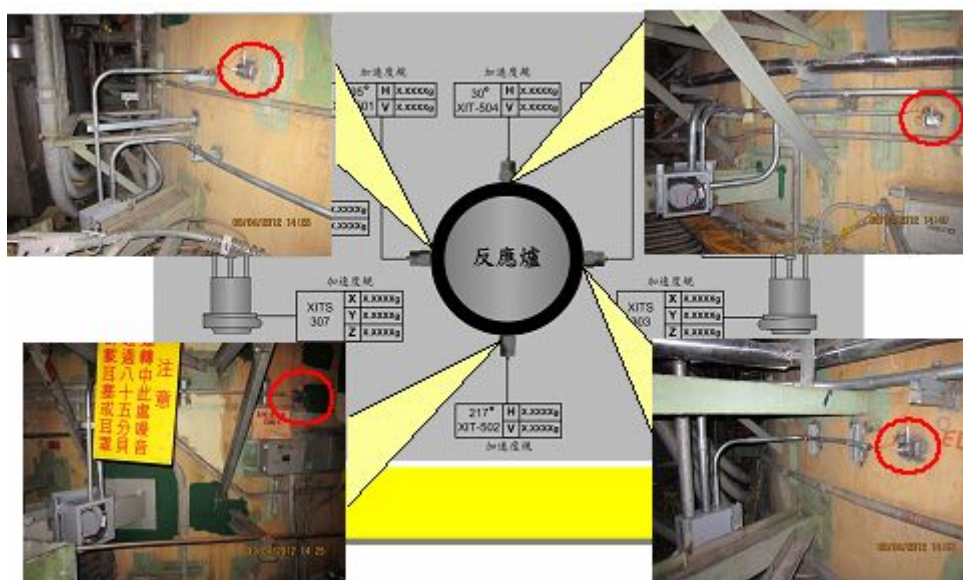
(4) 下表所列為核二廠一號機大修運轉模式開關切至停機模式可追溯之地震儀資料。

日期	時間	OSG-XE-105 軸向	最大加速值
96/9/29	21:53	南北方向	0.0320G
		東西方向	0.0186G
		垂直方向	0.0839G
96/9/29	21:56	南北方向	0.0285G
		東西方向	0.0209G
		垂直方向	0.1158G
99/10/7	05:53	南北方向	0.0138G
		東西方向	0.0174G
		垂直方向	0.0406G
99/10/7	15:17	南北方向	0.0185G
		東西方向	0.0185G
		垂直方向	0.0368G
101/3/16	05:50	南北方向	0.0098G
		東西方向	0.0081G
		垂直方向	0.2947G

12、鑑於機組停機過程在將「運轉模式」開關由「起動」階段轉至「停機」階段時，強震儀 OSG-XE-105 被引動並達 0.29g，台電公司應對反應爐相連接之安全管路/管嘴之銲接處，及反應爐爐內組件等提出安全評估報告，確保運轉安全無虞。

反應爐周邊存在相當多支管嘴/管路、控制棒驅動機構等，對安全之影響甚大，這些反應爐周邊組件之設計係採安全停機地震（SSE）之 0.4g 加以設計，相對於 0.29g 而言，仍存有相當大之安全餘裕。但本會對於 3 月 16 日核二廠 1 號機進行反應爐模式切換至停機（S/D）時，強震儀 OSG-XE-105 在垂直方向最大加速度有 0.29g 之紀錄，極為重視，要求台電公司必須確實加以澄清。

為確實掌握該處振動現象，期能達到事先防範效果，原能會已要求台電公司增加 8 只振動儀，水平向及垂直向各半（如下圖所示），此反應爐基座裙鈑之振動監測機制，將監測記錄 1 號機反應爐裙板處在起動/運轉等各階段的振動值，並依收集之資料於 3 個月後訂定「機組需降載/停機準則」，以作為爾後判定評估之依據。



本會基於核能安全保守性決策，假設 0.29g 之紀錄訊號為真，已要求台電公司進行現場勘察以確認和反應爐相連接之安全管路/管嘴（如：主蒸

汽管、飼水管、高/低壓安全注水管、控制棒驅動系統及其導管等)之銲接處未受其影響，而無運轉安全之疑慮。

核二廠於一號機第 22 次大修大修中完成下列各項反應爐周邊組件運轉安全檢測及評估：

- (1)依程序書 708.3.4「反應器內部組件目視檢查」執行反應爐內部組件檢查。
- (2)依營運檢測計畫執行安全管路/管嘴非破壞檢測，共檢測完成 59 口：包括再循環管路焊道 19 口，管嘴 29 口及爐水淨化系統(RWCU)管路焊道 11 口。
- (3)依程序書 732.6-IST「核能級組件支撐目視檢查程序書」檢查反應爐支撐裙板。
- (4)依程序書 612.3.7「控制棒驅動殼支架檢查」檢查控制棒驅動系統殼支架。
- (5)依程序書 575「地震緊急程序書」執行全廠巡視。
- (6)依程序書 295「反應爐壓力槽系統洩漏試驗」，執行反應爐加壓後壓力槽系統整體之洩漏測試。

核二廠依程序書執行以上各項檢測結果正常，確認反應器周邊組件、廠房及設備均無損壞發生，並未受到此可能高達 0.29g 振動波衝擊影響。同時，原能會亦於 4 月 16~20 日執行第 1 次專案視察時，針對此部分確認其已完成，並未發現異常情形。

註：LOCA:Loss of Coolant Accident；OBE:Operating Basis Earthquake；
SSE: Safe Shutdown Earthquake

錨定螺栓更換與超音波檢查

13、為什麼上一次大修沒有檢查出 7 根錨定螺栓斷裂？

核二廠一號機前次大修(99 年 10 月)依美國機械工程師學會(ASME)相關法規要求執行螺栓目視檢測(VT-3)合格，本次大修因 100 年 10 月二號機大修時曾發現一支螺栓斷裂，原能會要求台電公司在核二廠 1 號機此次

大修，全面執行螺栓超音波檢測(UT)，發現斷裂螺栓共 7 支。錨定螺栓內圈編號 A2 為 UT 工作前已斷，內圈編號 D14 及 C6 超音波顯示已接近斷裂，內圈編號 B10, B13, C9, D11 等 4 支有裂紋顯示，其餘 113 支螺栓超音波檢測合格。

14、發現台電錨定螺栓斷裂後，原能會有何作為？

本次一號機大修發現螺栓異常後，原能會除立即派員調查外，更邀請專家學者組成「核二廠 1 號機反應爐支撐裙鈹錨定螺栓審查小組」，審查成員專長涵蓋土木、材料、結構、地震、地質及環保等領域，分別從「螺栓斷裂肇因分析」、「結構安全分析」、「周邊組件運轉安全」、「機組起動運轉之安全」等各方面進行技術性審查。

審查小組於 101 年 4 月 3 日、4 月 6 日、4 月 25 日及 5 月 14 日執行反應爐支撐裙鈹錨定螺栓第一、二、三、四次專案審查會議，並分別提出 14、18、51、24 項審查意見。第一次審查會，針對螺栓斷裂肇因分析、地震儀紀錄之分析與處理、錨定螺栓更換與檢查、安全運轉評估四範疇提出 14 項審查意見，第二次審查會除開始進行第一次審查意見澄清外，並界定螺栓斷裂肇因分析、地震儀紀錄之分析與處理、錨定螺栓更換與檢查、安全運轉評估四大項目為審查範圍。審查小組共召開四次專案審查會議，總計提出 107 項審查意見，並逐步釐清前次審查意見，發掘進一步審查問題。

15、既然目視檢查不易檢查螺栓是否斷裂，那原能會如何要求台電公司改善？

依目前核能法規要求以目視檢查方式，無法檢視出螺栓內部之裂紋，原能會要求台電公司核二廠一、二號機於未來每次大修均將執行超音波(UT)檢測，確認無成長之裂紋，以確保反應爐之安全。

16、核二廠一號機錨定螺栓超音波檢測是依據什麼規範？

對於核二廠反應爐支撐裙板錨定螺栓超音波檢測工作，台電公司係依據美國機械工程師學會(ASME)的規定，編定「螺栓之超音波檢測」程序書據以執行，並做成檢測報告，將正常與有問題的螺栓分別記錄。本次檢測結果顯示，其中有 3 支已經斷裂或接近斷裂，另外 4 支則有不同位置的裂紋信號。為保留此斷裂或裂紋信號，有問題的螺栓各取一代表性信號圖加以儲存做為佐證；無問題之螺栓，依作業程序書及國際慣例，不需逐項留存信號，但須於檢測報告簽名以示負責。台電公司超音波檢測結果之記錄方式，符合美國機械工程師學會(ASME)規章的要求與超音波檢測程序書規定，參與本次檢測之人員亦均持有合格超音波檢測證照，人員技術能力與檢測設備都達國際水準之上。

17、為什麼台電超音波檢測的精度最低只到 2.5mm？

- (1)超音波檢測依規定必須以 2.5mm 深刻槽執行儀器校準，係依據美國機械工程師學會(ASME)法規對 3 吋直徑螺栓檢測之規定，並不代表超音波檢測只能做到 2.5mm 深以上裂痕，而是此裂痕以上之尺寸可以確保檢出得到較精確判定。為保守考量，檢測發現之裂紋若小於 2.5mm，均視為 2.5mm 裂痕，並以 2.5mm 裂紋深度去做安全評估，結果顯示在最嚴苛的故障負載下，亦不致發生螺栓立即斷裂之疑慮。
- (2)雖檢測儀器標準可達 0.6mm 之精確值，但在實際檢測時遇到螺牙部份，會有雜波導致不易判讀，此為無法肯定 2.5mm 以下裂痕探測之信心度之原因。此次最初檢測 4 支有瑕疵信號的螺栓，經過核研所進一步金相分析結果，其中 C9 只有 1.0mm 深的裂痕，可以證實超音波檢測實際操作時可以檢測到 2.5mm 以下裂紋。

18、核二廠 1 號機雖然只斷 7 根螺栓，請問台電是否檢查所有螺栓，確保其他螺栓沒斷？

原能會已要求台電公司重做全部 120 支(含 7 支新換裝)螺栓超音波檢測，並已於 5 月 3 日完成，檢測結果均合格，並錄影存證以昭公信。同

時，原能會亦要求台電公司對其餘 113 支螺栓全數進行螺栓鎖緊度驗證，再輔以超音波全體積檢測，於 5 月 4 日完成並留存紀錄，相關驗證及檢測說明如下：

(1)螺栓鎖緊度驗證：

為確保原有 113 支螺栓保有足夠的設計預力，台電公司按奇異公司提供之程序書，進行預力查驗，施作過程依品保程序，並有獨立第三者授權核能監查員(ANII)人員隨同查證，以 560 千磅(kips)（510 千磅加上 10% 裕度）拉伸螺栓，驗證螺栓仍在鎖緊狀態。

(2)超音波全體積檢測：

檢測方式及檢測所需之校準規塊比照美國機械工程師學會(ASME)的標準，且檢測人員均持有合格超音波檢測證照。原有 113 支螺栓及新裝之 7 支螺栓經 UT 檢測合格，檢測過程已錄影存證，每根螺栓 UT 檢測紀錄均經品保程序現場查證及獨立第三者授權核能監查員(ANII)人員隨同查證。

原有 113 支螺栓均已經超音波檢測，並無發現可偵測到之裂紋。所以即使有螺栓安裝不當，因螺栓斷裂肇因應力腐蝕龜裂(SCC)三個條件不同時存在，不易起始或有顯著成長，因此應不影響下週期安全運轉，台電公司核二廠以後每次大修均將以超音波檢測確保螺栓完整性。

19、台電公司錨定螺栓超音波檢測相關之疑義是否已完全澄清？

台電公司本次核二廠一號機大修共執行三階段錨定螺栓超音波檢測，檢測結果都相同。第一階段至第三階段相關執行時間、工作項目及檢測人員及其證照，詳如表 1 及表 2：

表 1：錨定螺栓超音波檢測工作內容及人員表

階段	時間	工作內容	工作人員
一	3/24	120 支第 1 次檢查	蔡錫聯、陳敏榮
二	4/8	9 支新品到廠後檢查	陳敏榮

	4/10	內 C2 Pre-load 查驗後檢查	陳敏榮
	4/11	內 B10, B13, C6, C9, D11, D14 更換後檢查	陳敏榮
	4/21	28 支 Pre-load 查驗後檢查	陳振宇
	4/26	內 A2 更換後檢查	陳振宇
三	5/1~5/2	84 支 Pre-load 前檢查(目的供作 比對，無留存報告)	楊海明、李朝凱
	5/2~5/3	120 支 查驗 (84 支 為 75% Pre-load 後查驗)後全部檢 查，錄影存證、留存訊號資料	楊海明、李朝凱

表 2 台電工作人員非破壞檢測証書列表

人員姓名	檢測方法與等級
蔡錫聯	超音波檢測 (UT) -高級 EPRI螺栓PDI UT直束檢測證書
陳振宇	超音波檢測 (UT) -高級
楊海明	超音波檢測 (UT) -高級 EPRI螺栓PDI UT直束檢測證書
陳敏榮	超音波檢測 (UT) -中級
李朝凱	超音波檢測 (UT) -中級

在第三階段檢測過程中，本會並派員進行現場抽查，查證結果相關檢測程序書、執行檢測之人員資格證照與現場檢測結果與台電公司陳送資料相符。

台電公司執行超音波檢測人員都具有執照（詳如表 2），檢測工作均需遵守法規與程序書規定。超音波檢測掃瞄時之靈敏度，在檢測專業要求上，為易讀取訊號，技術上採將波高放大 2 倍進行掃描。標準塊校準波形圖乃是以 53db 為準，檢測時使用之 59dB 乃是將波高放大 2 倍，其所得訊號即為實際 2 倍大小。59dB 選用乃自 53db 增加 6db 而得，其使用

公式為 $20\log N$ ， N 為訊號波高之倍數，當 $N=2$ 時， $20\log N=6.0206\text{db}$ ，為 6db 之來源。

例如外界疑慮有嚴重裂痕螺栓 D15，其訊號實際波高為 7%與相應位置校準之波高 39%比對結果，其訊號波高仍不到百分之二十，依檢測法規之規定不需記錄，故審查未發現台電公司有記錄不實之問題。除已更換的 7 支錨定螺栓外，其餘 29 支有訊號錨定螺栓都是微小的訊號或雜訊，依法規不需記錄。台電公司依照檢測程序書評估結果，有問題螺栓確認僅此 7 支。為取信於社會大眾，台電公司將檢測作業資料及報告，分別送交獨立第三者中華民國非破壞檢測協會講師葉博士（ASNT UT level III & 中華民國非破壞檢測協會 UT 高級檢測師）及工研院吳博士（ASNT UT level III）審查，確認檢測結果之正確性。對於外界解讀超音波檢測訊號所產生之疑義，亦提出澄清。

*註：ASNT：美國非破壞檢測協會；UT：超音波檢測；level III：高級檢測師。

20、台電公司修復的七根螺栓，是否能保證螺栓斷裂不會再發生？

台電公司修復的 7 支螺栓之品保程序係依核二廠程序書 1115.01「不符品質案件處理管製程序」辦理。現場已依據 SP-2012-04 特殊程序書施工完畢，施工期間均經品保程序現場查證，獨立第三者授權核能監查員(ANII)人員訂定查證點現場抽查。其施工與檢測紀錄皆附於 NCD 101032 內，內容包括下列各項：

- (1)NCD 101032 執行及審查表格內容
- (2)1109.09 法規修理/更換程序書執行及審查紀錄
- (3)特殊程序書 SP-2012-04 執行版及附件
 - a.施工人員訓練紀錄
 - b.施工過程紀錄
 - c.儀器校驗紀錄
 - d.螺栓更換後回填混凝土抗壓試驗報告
 - e.UT 檢測紀錄

(4)台電公司核發處檢測隊的「核二廠 1 號機 EOC-22 反應爐支撐裙板錨定螺栓 UT 檢測報告」

為取信於社會大眾，台電公司另將檢測作業資料及報告，分別送交獨立第三者中華民國非破壞檢測協會講師葉博士（ASNT UT level III & 中華民國非破壞檢測協會 UT 高級檢測師）及工研院吳博士（ASNT UT level III）審查，確認檢測結果正確。

*註：ASNT：美國非破壞檢測協會； level III：高級檢測師。

21、原本錨定螺栓下部已被水泥包覆，請問如何修復？

核二廠一號機錨定螺栓固定基座所灌注之水泥，其四周乃包覆於基座結構襯板（鋼板）之中，此次進行螺栓修復過程中，將水泥鑿除，並於螺栓安裝完成後重新灌漿，灌漿施作符合奇異公司之工作程序。本次灌漿水泥為 Embeco 880，依據材料規範在 30°C 環境下，施灌完成後 24 小時，強度可達到 5000 psi；核二廠已於 4 月 8 日完成測試用試塊 2 組製作，於養生 72 小時後，經測試其抗壓強度至少為 7600psi。

(1)核二廠一號機錨定螺栓固定基座所灌注之水泥，其四周乃包覆於基座結構襯板（鋼板）之中，目前結構保持完整，且目前國外核電廠錨定螺栓固定基座之水泥並無探傷檢測要求。

(2)核二廠一號機此次進行螺栓修復過程中將部分水泥鑿除並於螺栓安裝完成後重新灌漿，灌漿施作程序符合奇異公司之工作程序，新舊水泥接合面經貝泰公司確認水泥均包覆在基座結構鋼板中，故不影響支撐強度。灌漿施作工作程序如下：

a. 灌漿前已考慮新舊混凝土之結合問題，依灌漿程序：

(a). 確認孔洞灌漿表面至少有 2~3 公分深度的粗糙面。

(b). 清理孔洞灌漿表面上的所有碎屑(使用吸塵器)。

即可確保新舊混凝土交界面之結合力。

b. 養護時間及環境因子：

(a). 依廠家規範資料，使用之混凝土在環境溫度 30°C 時，經過 24 小時後

即可達強度平均 5000 磅以上(停機大修時，乾井周溫約 30°C)，故考量之養護時間為至少 24 小時。

(b).因使用之混凝土不含氯，故對埋置其內之螺栓及螺帽無不利之環境因子。

安全運轉評估（設計餘裕及 PRA 評估）

22、什麼是安全度評估分析(PRA)？

現行國內外安全度評估分析模式，均採用美國機械工程師學會/美國核能學會（ASME/ANS）開發之標準模型，該分析模型業經美國核管會(USNRC)認可。此分析模型皆未將被動組件(如錨定螺栓)之失效模式納入考量，其理由係指在現行維護檢測方案下，被動組件之失效模式遠低於其他主動組件（如馬達、泵）發生機率達 2 個量級或在總失效機率 1% 之下，因此在一般標準 PRA 模式內已先行篩濾，大部分只間接反映在風險的肇始事件頻率統計或估算之內。

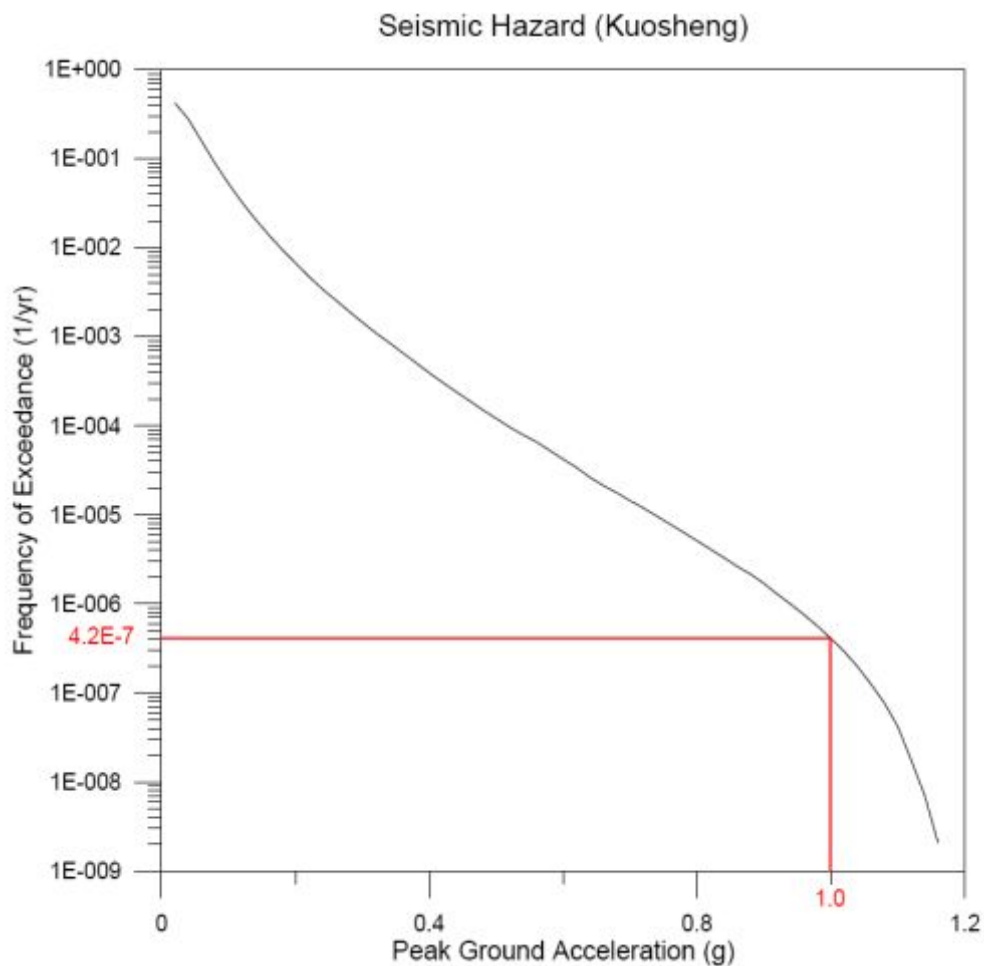
本案之反應爐支撐裙板錨定螺栓主要功能在將反應爐支撐裙板固定於鋼筋混凝土基座上。當反應爐支撐裙板部分錨定螺栓失效，將導致反應爐整體耐震能力下降，有可能造成機組運轉風險增加，故風險的增加主要來源為由地震所引發的肇始事件。

核二廠一號機反應爐支撐裙板共有 120 支錨定螺栓，分析評估核二廠一號機在 7 支螺栓尚未修復的狀況下，於功率運轉期間的風險指標變化量，所評估的風險指標為爐心熔損發生頻率(Core Damage Frequency, CDF)，並引用美國 NRC 法規指引 RG 1.174 「執照基準變更之風險告知決策方法」為風險判定依據，以確立整體風險變化之大小。

23、請說明安全度評估（PRA）分析結果？

參照原能會於 1985 年完成核二廠原始安全度評估報告，以錨定螺栓為支撐的反應爐裙板原設計耐震能力大於 3g，假設核二廠一號機錨定螺栓 7 支斷裂皆未修復狀況，依據台電公司有限元素分析結果，其螺栓固定反

應爐壓力槽的強度因此下降 23.8%，保守判定其耐震力將由 3g 開始同等比例下降，故耐震力將約為 2.29g ($3g \times (1-23.8\%)$)。依此比對原地震安全度評估危害度資料，要達到螺栓支撐有遭破壞之虞的地震大小，經高信心度且低失效機率(High Confidence and Low Probability of Failure, HCLPF)轉換計算後，其 HCLPF 地表加速度約為 1.0g；故保守假設地表加速度達 1.0g 之地震發生時，即直接造成爐心熔損，不考慮其他救援措施。經查核二廠地震危害度曲線，1.0g 地震之發生頻率約為 4.2E-7/年(如下圖)，保守假定發生此狀況即發生爐心熔損狀態，爐心熔損頻率增幅為 4.2E-7/年。



目前核二廠爐心熔損頻率總風險為 2.55E-5/年(即機組處正常狀態，120 支錨定螺栓皆正常之風險)，若 7 支螺栓斷裂之假設組態發生，則整體風險將變為 2.592E-5/年(等於 2.55E-5+4.2E-7)。

綜觀上述保守假設分析結果，引用美國 NRC 法規指引 RG 1.174，保守假設 7 支錨定螺栓斷裂組態下，判定爐心熔損頻率風險仍在變化微小的範圍內（區域 III），屬可接受且有相當安全餘裕。

RG 1.174 風險判定標準如下圖：

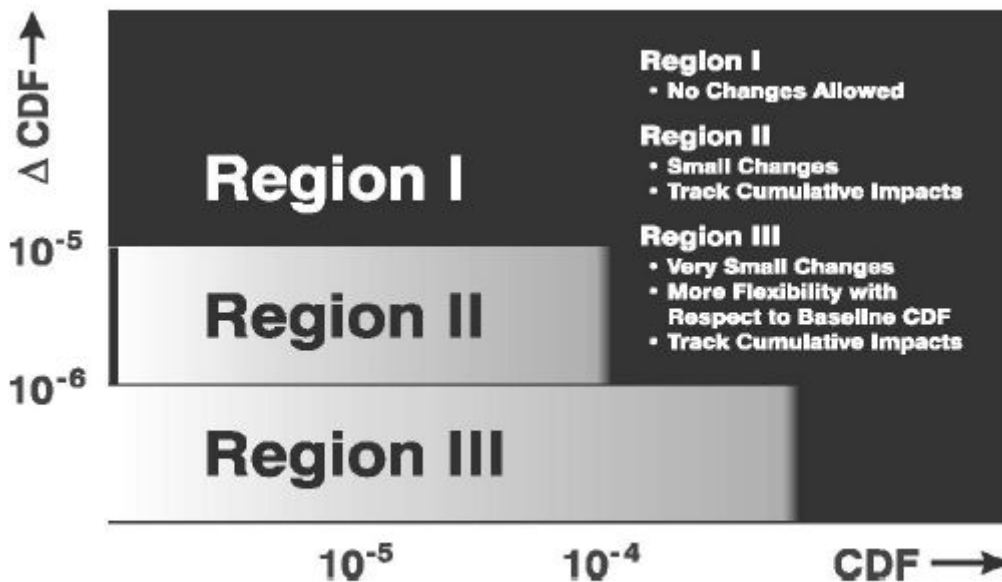


Figure 4 Acceptance guidelines* for core damage frequency

24、請問螺栓無損害時餘裕為多少？斷裂幾根螺栓則餘裕為零？

7 支斷裂/裂紋螺栓均未修復情況下，依原設計規範接受標準，其承受最大軸向應力螺栓(D15)餘裕為 8.2%，當更換 D14、C6、B13 等 3 支螺栓後，承受最大軸向應力為 D12 內圈螺栓，其餘裕為 15%。其餘螺栓之餘裕均大於此數值。依原設計規範接受標準，螺栓完全無損害時餘裕約為 30.6%。以分析之經驗顯示，螺栓最大軸向拉力餘裕為零並非只取決於多於幾根螺栓斷裂，另要視斷裂螺栓位置而定。

台電公司已完成核二廠一號機第 22 次大修反應爐支撐裙板錨定螺栓斷裂結構安全分析報告，評估分析在沒有已斷裂錨定螺栓支撐及其他螺栓沒有可檢出裂紋情況下，包括 7 支已斷及有裂痕螺栓實際位置情況及更換 6 支螺栓及運轉中緊臨 A2 再斷裂 1 支螺栓等情況，在最嚴苛暫態負荷組合下，其餘錨定螺栓之最大軸向力及結構完整性，與反應爐支撐裙板法蘭與 pedestal mounting plate 接觸面滑移檢核，確認可以仍保有建廠

顧問公司貝泰對錨定螺栓原設計計算書所訂之支撐功能。其中包含地震力、熱應力、SRV，Shutdown（反應爐模式切換至停機）等 upward loading 均已包含在內。

25、原廠 BWR-6 PRA 或國內執行風險分析狀況？

經查證核二廠建廠時(1974 年)PRA 技術仍在發展階段，故奇異公司未執行核二廠量化風險評估(PRA)

核二廠量化風險評估(PRA)模式，係於 1985 年由原能會、核能研究所與台灣電力公司等單位共同完成，並由台電公司執行後續更新維護與精進工作，且經國外安全評估專家定期審查（Peer Review）作業，以確保台電公司量化風險評估模式符合國際標準。

26、台電以及所聘顧問公司參與本案評估人員是否具錨定螺栓相關工作專業能力？

本案相關工作包括螺栓斷裂肇因分析、修復方案訂定(包括材料規範、工具、施工程序)、安全評估等，屬於專案型工作，依據其工作內容、專業領域、權責區分，分別由不同單位參與，大致上分工如下：

- (1)台電公司—核二廠統籌全案，總公司核發處、核安處協助。
- (2)奇異公司—提供原始反應爐基座設計資料，擬訂螺栓修復方案，並提供修復所需之螺栓、材料、機具、施工程序，及執行相關結構完整性評估。
- (3)貝泰公司—提供原始設計資料，協助訂定修復方案中有關水泥基礎部份
- (4)核 研 所—依據台電公司提供之螺栓試片，進行金相分析及螺栓失效肇因探討。

以上參與之各單位，均屬於有核能品保方案之專業機構，依據其品保程序執行相關工作。

27、錨定螺栓、基座產品與施工廠商其專業能力是否合格？

- (1)核二廠一號機修復所使用之錨定螺栓之供應商為「DuBose National

Energy Services Inc.」係奇異公司之合格材料供應商(ASL)，亦為 ASME 之 QSC(Quality System Certificate，品質制度證書)合格供應商。本批螺栓材料均符合設計規範 ASTM A540 B23 CLASS 1，其材質報告 (CMTR) 存核二廠資料中心，永久保存。

(2)修復施工之廠商即為原設計之奇異公司及其協力廠家 Bolt-tech.螺栓專業廠家。

28、台電無法檢測出 2.5mm 以下之裂紋，假如螺栓有 2.5mm 裂紋，核二廠 1 號機還安全嗎？

核二廠一號機反應爐支撐裙板內圈 7 支問題螺栓已於 4 月 27 日完成更換，原有 113 支螺栓雖於 3 月 24 日經超音波檢測合格，但為能確切掌握反應爐相關結構之安全，台電公司保守假設錨定螺栓仍有可能存在超音波檢測不準度無法判讀的裂紋(2.5mm)，因此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分析。本分析假設核二廠反應爐支撐裙板每支錨定螺栓在螺牙根部均存在 2.5 mm 之裂縫，於運轉過程中，萬一發生設計基準最嚴苛之故障狀況(Faulted Condition, SSE+LOCA)負載時，不至於有發生螺栓立即斷裂之疑慮；而承受可能的反覆交變應力，包括地震力(含安全釋放閥沖放)、機組起動後支撐裙板因溫升外漲所施加之熱力矩以及因反應爐急停而產生之交變垂直上揚力等，機組 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，核二廠一號機應可繼續安全運轉一個週期（18 個月）以上無虞。

註：LOCA: Loss of Coolant Accident；SSE: Safe Shutdown Earthquake

大修起動審查、後續管制要求與未來監測機制

29、核二廠 1 號機本次大修起動審查機制為何？

在原能會確定螺栓斷裂肇因分析、結構安全分析、周邊組件運轉安全以及機組起動運轉安全之審查完成，確認機組安全無虞的狀態下，將依據

「核子反應器設施停止運轉後再起動管制辦法」第三章之第 9 條規定：
「核能機組完成機組臨界前工作項目後，經營者應於機組初次臨界前，
檢送載明下列事項之大修作業品質報告及稽查報告，報請主管機關審查
同意後，機組始得進入臨界：」進行大修後再起動審查，經本會核准後
機組方可起動。

30、是否要求台電公司加強監測核二廠一號機，確保機組安全？

監測反應爐基座裙板之振動情況：

核二廠一號機新增之振動監測系統(含 8 只振動加速規)，此系統為連續
且即時之資料讀取系統，須將監測資料長期儲存以進行分析比對，當結
構物發生動態特性改變時，由運轉人員即時監控，採取相關應變措施，
並立即通報本會。

- (1)強震儀 OSG-XE-135（設置在原儀器 OSG-XE-105 位置處）：透過網路與
主控制室之連結，在強震儀振動觸發後，會立即送出訊息通知。
- (2)反應爐基座外牆加裝 8 只振動加速儀：
 - a.利用實體線路接至主控制室，可即時提供運轉人員監視異常振動訊號。
 - b.即時存取資料，並每月進行資料分析及與舊有資料之比對判定，以長期
監測振動狀況。

31、核二廠 1 號機此次大修之後續管制要求與後續監測機制為何？

核二廠一號機反應爐支撐裙板錨定螺栓斷裂事件暨修復後運轉安全評估
經審查結果，本會對台電公司核二廠一、二號機運轉之後續管制要求如
下：

- (1)奇異公司負載是理論分析，可能遺漏某些因素而無法解釋地動隨方向之
差異，此問題牽涉到斷裂螺栓是否與隨方位改變的受力有關，台電應請
奇異公司就相關議題持續與系統專家討論，強化後續分析。
- (2)奇異公司所提供之螺栓新品之螺牙加工為車製，品管文件中並未提供搓
牙部牙型輪廓，台電公司應續向奇異公司洽詢螺栓搓牙部牙型輪廓。

- (3) 台電公司爾後使用之檢測數據，要經 17025 實驗室認證的實驗室進行，數據才能做為依據。
- (4) 台電公司應針對核二廠兩部機組反應爐支撐裙板錨定螺栓應力監測，研提可行性評估計畫（例如螺栓加裝 Strain gauge 等方式），提送本會。
- (5) 本案振動監測計畫應採連續監測與連續記錄辦理，未來應依據記錄數據進一步分析與釐清運轉與停機階段之 RPV 支撐裙板基座是否有設計考量之外的動態荷載。
- (6) 強震儀與振動加速規之後續要求：
- a. 建議將 8 只振動加速規與警報系統聯結，並設定 2 只或以上之加速規偵測到異常振動再啟動警報，以減少誤發警報。
 - b. 強震儀之觸發值設定不宜太低，以防漏失大地震之紀錄（大地震之前可能出現一系列前震，觸發設定值太低，有可能在大地震之前即用完強震儀儲存資料之記憶體）。
- (7) 對錨定螺栓可能有成長的裂紋，因其成長速率極為緩慢，核二廠以後每次大修應執行螺栓超音波檢測，確認無成長之裂紋，以確保機組運轉安全。
- (8) 核二廠一號機 7 支斷裂之錨定螺栓均已更換完成，必須於運轉一燃料週期後，驗證預力仍大於 560kips。
- (9) 核二廠於下次大修執行錨定螺栓超音波檢測前，應修訂完成執行錨定螺栓超音波檢測所使用之程序書，將校準規塊製作方式、錨定螺栓檢測程序、檢測使用之頻率及強度、檢測操作步驟、儀器設定、畫面記錄等均納入程序書管制，並聘請外部專家審閱該份程序書，以為日後螺栓檢測工作之依據。
- (10) 當核二廠發生 OBE 以上地震，機組急停後，核二廠應再重新執行錨定螺栓超音波檢測，確認無損後，再提出機組重新起動申請。

本案後續加強監測方案如下，要求台電公司應確實執行：

- (1)核二廠一號機新增之振動監測系統(含 8 只振動加速規)，此系統為連續且即時之資料讀取系統，須將監測資料長期儲存以進行分析比對，當結構物發生動態特性改變時，由運轉人員即時監控，採取相關應變措施，並立即通報本會。
- (2)核二廠二號機在下次大修（EOC-22）時，應比照一號機增設震動監測系統。