

調 查 報 告

壹、案由：為台灣電力股份有限公司核二廠一號機反應爐發生底座錨定螺栓斷裂，該公司未經過行政院原子能委員會審查，逕自花費高達新台幣1億元卻僅購買及更新其中7顆瑕疵螺栓，對其他承受同樣金屬疲勞的113顆螺栓卻未作處理，涉有便宜行事等情乙案。

貳、調查意見：

本案台灣電力股份有限公司（下稱台電公司）第二核能發電廠（下稱核二廠，廠內有兩部反應爐機組，即一號機及二號機）一號機於民國（下同）101年3月16日起停機歲修，於進行反應爐支撐裙板之錨定螺栓檢測時，竟陸續發現7支錨定螺栓發生斷裂或裂紋之情事，影響核二廠之運轉安全，其後又耗費新台幣（下同）近億元之高昂費用委由原廠更新，涉有浪費公帑之嫌。爰經本院立案調查，經調閱台電公司及行政院原子能委員會（下稱原能會）有關卷證資料，並於101年7月11日約詢台電公司、原能會相關人員，並邀請學者專家列席諮詢，7月23日、8月20日、9月17日另請台電公司有關人員到院說明案情細節，以釐清案情。茲將調查意見臚陳如下：

一、台電公司施工人員於核二廠建廠時，因施工不慎而造成反應爐下方之錨定螺栓損傷，該公司品管人員卻未能即時發現缺失，復因施工環境不佳與錨定螺栓材質瑕疵等情，致二號機及一號機共8支錨定螺栓產生斷裂或裂紋，而須支付新台幣1億8千餘萬元之修復費用，核有疏失；台電公司及原能會發現錨定螺栓裂損後，所認定之斷裂原因前後不一，未

能適時澄清裂損之原因及影響，遭致媒體及大眾質疑，且先後三次變更修復支數，在 6 支螺栓均修復完成一號機可起動時，又因大眾質疑而決定修復第 7 支，致使該機啟動時間延後 61 天，增加成本之損失高達新台幣 62 億 2 千 2 百萬元，電力系統之備用容量率亦長時間降低約 3.3%，均核有違失。

(一) 錨定螺栓之安裝與材質：查核二廠於 66 年建廠時，錨定螺栓係由台電公司委由美商貝泰(Bechtel)公司進行採購(台電公司當時係聘請貝泰公司為顧問公司，負責核二廠廠房之設計及指導現場施工)，再經台電公司確認符合採購規範，並在貝泰公司之指導下，由台電公司人員施工安裝於反應爐下方之支撐裙板。錨定螺栓直徑約 7.6 公分、長約 66 公分，主要係為承受垂直拉力，以提供防止反應爐橫向滑動所需之摩擦力及部分剪力，材質為美國材料試驗協會(ASTM) A-540，GR.B 23，Class 1。

(二) 二號機於 100 年間發現 1 支錨定螺栓斷裂：

1、查核二廠二號機於 72 年 3 月間開始商業運轉，100 年 10 月 11 日至 11 月 12 日於進行第 21 次大修期間，於 10 月 24 日執行錨定螺栓 10 年 1 次週期之目視檢測前清潔作業時，首次發現位於裙板外側之 1 支錨定螺栓斷裂(編號 A15)，斷裂位置距螺栓頂部約 20 公分之螺牙處，其餘 119 支錨定螺栓經超音波檢測結果並無異常。核二廠透過國內供應商向國外廠家洽詢錨定螺栓之供料事宜，僅獲美國核能級之螺栓製造廠商 NOVA 公司回應，其 1 支螺栓(不含螺帽、墊圈)之報價為 25,000 美元，交貨期約 3 至 4 週，台電公司認為無法配合大修工期。嗣台電公司於 12 月 14 日提送該支錨定螺栓斷裂之安全評估及未來處置等

事件處置報告予原能會，經認為並不影響二號機之運轉安全，原能會在要求核二廠一、二號機於下次大修時，應全面進行錨定螺栓之超音波檢測及修復二號機該支錨定螺栓，爰於 11 月 11 日同意二號機恢復運轉，翌日二號機即發電併聯至電力系統迄今。核二廠預定將於 102 年 2 月 23 日至 3 月 24 日之二號機第 22 次大修期間，修復該 1 支斷裂之錨定螺栓，因修復恐涉及設計變更，台電公司決定向原設計廠家奇異公司洽商修復，以利獲得原能會審查通過。

- 2、核二廠二號機該支斷裂之錨定螺栓，係位於反應爐支撐裙板外側，並包覆於機座結構之襯板中，未如位於內側之錨定螺栓，可採敲除底部水泥方式移除，其修復方式須先使用機具退除(或鑽除)錨定螺栓之殘根，如能順利退出殘根而不傷及下部螺帽時，僅需重新鎖入 1 支錨定螺栓即可恢復原設計功能(核二廠已有備品)；若於螺栓殘根移除過程中損傷下部螺帽，則將採變更設計之修復方式，先擴孔下部載板並加以攻牙，以取代下部螺帽之功能，並使用尺寸較大之螺栓鎖入(若毋須使用第 2 方案時，亦可留為爾後更新之預備方案)。奇異公司依據核二廠之需求，於 101 年 9 月 3 日提出工作計畫書及報價，其修復費用為 3,196,558 美元，嗣奇異公司於 9 月 19 日提送修訂後計畫書及報價，修復費用調降為 2,913,761 美元，並同意將螺栓施工所需之螺栓拉伸機(價值為 86,930 美元)由租用改為轉移予台電公司。核二廠初步審查認為價格尚屬合理，目前正辦理後續議價及簽約等事宜。台電公司表示：「核二廠一號機於 101 年 3 月 16 日起之第 22 次大修期

間，所修復 7 支錨定螺栓之總價為 311 萬美元(機具並未移轉台電公司)，而二號機雖僅修復 1 支錨定螺栓，惟工法完全不同，修復費用亦達 290 萬餘美元，主要費用仍以技術服務為大宗，奇異公司之技術服務費用有其一定的標準，且適用於全球；且因涉及設計變更之分析、設計、評估等費用較高，因此所需費用會較純粹更換螺栓之費用為高，因此兩者不能以單純更換之螺栓數量來比較。」

(三)一號機於 101 年發現 7 支錨定螺栓裂損及 29 支錨定螺栓測得微小訊號或雜訊：

- 1、核二廠一號機依計畫於 101 年 3 月 16 日凌晨 0 時 41 分起停機進行第 22 次大修，於 3 月 23 日進行清潔作業時，發現支撐裙板內側有 1 支錨定螺栓斷裂。3 月 24 日起開始執行超音波檢測，3 月 26 日再發現支撐裙板內側另有 2 支錨定螺栓已近斷裂，4 支錨定螺栓有裂紋顯示，其裂紋判斷約為 2.5 公釐(螺栓發生斷裂之臨界裂縫深度為 10.08 公釐)。上開 7 支錨定螺栓之裂損情形詳如下表：

編號	位置(方位度數 0 度為南方)	裂損情形	斷裂/裂紋距離 螺栓頂部距離	斷裂/裂紋位置
A2	內圈 357 度	已斷裂	46.5 公分	螺桿
C6	內圈 153 度	近斷裂	55.1 公分	螺牙
D14	內圈 15 度	近斷裂	50.8 公分	螺牙
B10	內圈 219 度	裂紋	51.1 公分	螺牙
B13	內圈 201 度	裂紋	50.3 公分	螺牙
C9	內圈 135 度	裂紋	49.5 公分	螺牙

D11	內圈 33 度	裂紋	49.5 公分	螺牙
-----	---------	----	---------	----

2、此外，另有 29 支錨定螺栓測得微小之訊號或雜訊。台電公司稱：依據美國機械工程師學會(ASME)檢測直徑 3 吋螺栓之規定，應以 2.5 公釐深之刻槽執行儀器校準，該尺寸以上之訊號始為較精確之判定，然超音波檢測儀器雖可達 0.6 公釐之精確值，惟螺牙部分會有雜波而不易判讀，致無法肯定 2.5 公釐以下裂痕之訊號，為保守考量，檢測發現之瑕疵若小於 2.5 公釐，均視為 2.5 公釐之裂痕等語。查一號機第 22 次大修之原計畫工期為 36 天(101 年 3 月 16 日至 4 月 20 日)，台電公司於 3 月 23 日至 3 月 26 日陸續發現 7 支錨定螺栓有裂損情事後，為使機組能儘速啟動，最初僅決定委請奇異公司先行修復 3 支(B13、C6、D14)已斷裂之錨定螺栓，並預估金額約為 5 千萬元以下，嗣因台電公司未能適時明確澄清錨定螺栓裂損之原因及影響，致遭有關媒體及大眾等之質疑，原能會遂再決定將修復數量增至 6 支錨定螺栓，餘第 7 支(編號 A2)留待下次大修時再行修復。4 月 9 日奇異公司提出修復 6 支螺栓(包含 9 組螺栓組件)之報價為 2,918,494 美元。4 月 14 日至 30 日核二廠要求奇異公司執行第 7 支螺栓之修復及其他額外工作，奇異公司報價 448,594 美元，總計為 3,367,088 美元，台電公司表示，奇異公司之工程規劃設計、結構安全分析、製程監督等技術服務費用，約占全部費用之 40%。因外界質疑 7 支螺栓之修復費用過高，核二廠於 6 月 7 日成立奇異公司報價費用審查專案小組，並要求奇異公司給予優惠，奇異公

司則同意諮詢人員及日用費採用較低費率，計折扣 21,012 美元，並額外提供優惠折扣 84,177 美元，而調降報價為 3,261,899 美元。8 月 20 日台電公司與奇異公司之最後議價結果為 311 萬美元，其中奇異公司之計畫管理與支援、現場分析與諮詢等技術服務費用，共約 106 萬餘美元，約占全部費用三分之一，而 9 組與原設計規格相同之錨定螺栓共計 403,093 美元(2 組為備用)，僅約占全部費用八分之一，即每組錨定螺栓(包含螺栓 1 支、螺帽 2 個、墊圈 2 個)之材料費約為 44,788 美元，其餘則為人力、機具及檢測等施作費用。

- 3、查台電公司於 101 年 3 月間發現核二廠一號機 7 支錨定螺栓有裂損情事後，原本決定僅修復 3 支，嗣因台電公司未能適時明確澄清錨定螺栓裂損之原因及影響，致遭有關媒體及大眾等之質疑，原能會遂再決定將修復數量增至 6 支錨定螺栓，一號機於 4 月 18 日 15 時 20 分即已完成各項原訂之大修工作，機組隨時可起動。然適逢電價調漲，外界對台電公司各項營運事項強力抨擊，致本案錨定螺栓裂損之問題，亦成為關注之焦點，原能會為應各界(含立法院)之要求，召開 4 次審查委員會，嗣要求台電公司提前修復第 7 支錨定螺栓，並增加其他檢測作業，經核二廠於 4 月 27 日修復第 7 支錨定螺栓，並完成後續相關錨定螺栓之檢測作業後，直至 6 月 18 日 18 時 30 分原能會始同意一號機起動，6 月 20 日一號機發電併聯至電力系統，其中等待機組獲准起動時間約為 61 天。而一號機併聯時程由原訂 101 年 4 月 21 日延後至 6 月 20 日，實際大修之停機時間

則為 96.7 天(101 年 3 月 16 日至 6 月 20 日)，亦延後 61 天。一號機每日發電量 23.47 百萬度(每日燃料成本新台幣 3.65 百萬元)，台電公司須調度其他自有之大潭電廠、通霄電廠、大林五號、大林六號等燃氣機組及協和電廠、大林三號、大林四號等燃油機組因應大修停機期間之供電，燃氣及燃油機組各調度達 15.52 及 7.95 百萬度(每日燃料成本各為新台幣 61.36 百萬元及 44.68 百萬元)，致每日燃氣及燃油機組之發電燃料替代成本約為新台幣 1.02 億元，總計延後 61 日因成本增加而造成之損失共計為新台幣 62 億 2 千 2 百萬元。另當時每日最高負載約 3,000 萬瓩，核二廠一號機停機期間，系統將減少近 100 萬瓩之供電能力，故造成電力系統之備用容量率約降低 3.3%。

- 4、台電公司表示：「核二廠一號機發現 7 支錨定螺栓裂損後，曾接洽 3 家國內五金供應商，其口頭答復交貨期皆要 3 至 4 週，因此作罷；經洽奇異公司緊急搜詢後，尋獲合格之材料供應商，可於 2 週內提供修復所需之核能級螺栓，並提出相關品質文件與認證，因此委由奇異公司進行更新。本次錨定螺栓更新後，核二廠已掌握及建立相關施工技術及維修程序書，未來若遇相同案例，台電公司人員將有能力按程序書自行修復，不再委外施工，預估施工機具(螺栓拉伸器及螺栓伸長量超音波量測器)約新台幣 600 萬元及錨定螺栓每組約 60 萬元(自行向國外採購，奇異公司已提供採購規範及圖面)，已不需原廠昂貴之技術服務費用。另有關媒體報載本案錨定螺栓更新價格過高(網路 1 支 2,418 元或中國大陸製 1 支 3,076

元)乙節，經洽詢報載之幾家公司，皆非美國機械工程師協會認證合格之工廠，不符合核能安全要求。」

(四)台電公司及原能會所認定之肇因難平爭議；對於錨定螺栓裂損原因核有違失：

- 1、關於核二廠一號錨定螺栓裂損之原因，媒體及大眾對之提出許多質疑，重點包括：本案錨定螺栓發生斷裂或裂紋，係屬金屬疲勞或材質瑕疵問題（含碳量偏高），或因停機振動而造成螺栓裂損；在大修停機前，曾有異常之振動，後來發現振動來自反應爐體內，附近測震儀顯示高達 0.29 g（重力加速度， $1g=980\text{cm}/\text{sec}^2$ ），相當於 4 級地震之衝擊波；錨定螺栓之超音波檢測儀器精確度不足，刻意忽略細小裂紋，應有 3 成左右之錨定螺栓有瑕疵；其餘未更新之 113 支錨定螺栓潛藏斷裂危機，應全數更新，且核燃料棒應全部移出；台電公司貿然再起動核二廠一號機等等。
- 2、核二廠二號機於發現 1 支錨定螺栓斷裂後，台電公司即將該螺栓斷裂面取樣送請財團法人工業研究院（下稱工研院）及原能會核能研究所（下稱核研所）進行破斷面檢驗及金相分析（奇異公司亦依台電公司之要求，派遣材料專家來臺參與金相分析之工作），並於 100 年 12 月 14 日提送處置報告予原能會審查，該報告第六點「肇因研判」認為：斷裂原因可能是疲勞破壞或應力腐蝕龜裂，非使用環境所導致的老化。嗣核二廠一號機發現 7 支錨定螺栓有裂紋或斷裂，台電公司再委託工研院及核研所進行該 7 支錨定螺栓之相關檢測，並經輿論關切及提出質疑後，台電公司又重新認定二號機該支錨定螺栓斷裂之肇因，且竟與

上開處置報告大相逕庭，認為：錨定螺栓裂紋之肇因，並非疲勞老化所造成，而係「階段性腐蝕環境」（建廠初期露天環境造成）、「以前的施工方法造成應力集中或表面缺陷」及「材料瑕疵」等（如夾雜硫化物，惟裂損螺栓之碳、硫含量仍於規範內；另裂損之 7 支螺栓有 5 支來自同一批爐號，另 2 支爐號則無法查出）三項因素同時存在，而造成應力腐蝕龜裂。原能會審查結果，亦同意上開肇因。

- 3、經查台電公司及原能會所分析之上開肇因，均係採事後推測，而且前後不一，至今仍未能確實排除其他原因存在。再者，台電公司既稱裂損螺栓原因為裂損螺栓夾雜硫化物而有「材料瑕疵」，卻高價採購與裂損螺栓完全相同材質之螺栓作為修復之用，其所稱之肇因是否真實即有可疑之處，恐難平息爭議。原能會應審慎追蹤本案裂損錨定螺栓修復後，對於台電公司後續研提螺栓應力監測之可行性評估計畫、分析反應爐基座之動態荷載、強震儀與振動加速規之調整建議、每次大修應執行螺栓之超音波檢測及驗證預力、修訂超音波檢測程序書、續請奇異公司執行相關分析及提供有關資料等管制要求，且由於部分肇因係採事後推測，應再審慎確認肇因是否確為上開 3 種因素同時存在，而造成錨定螺栓之應力腐蝕龜裂，以維核二廠之運轉安全。

(五) 台電公司對於錨定螺栓裂損原因核有違失：

台電公司施工人員建廠時使用液壓扳手以手工鎖緊錨定螺栓於反應爐支撐裙板上，因預力大小控制不當，造成應力集中或表面缺陷，使部分螺栓於施工時即有表面缺陷之存在，致於局部應力集中

區域形成應力腐蝕龜裂。該公司品管人員卻未能即時發現缺失，復因施工環境不佳與錨定螺栓材質瑕疵等情，而引發二號機 1 支及一號機 7 支錨定螺栓陸續產生裂紋或斷裂，造成二號機 1 支錨定螺栓預估修復費用 2,913,761 美元(約新台幣 9 千萬元)及一號機 7 支錨定螺栓 311 萬美元，共計 6 百餘萬美元(約新台幣 1 億 8 千餘萬元)之損失，台電公司相關施工及品保作業，顯有疏失。

(六)台電公司及原能會對遲延修復造成鉅額損失均有違失：

台電公司於 101 年 3 月間發現核二廠一號機 7 支錨定螺栓有裂損情事後，因未能適時明確澄清錨定螺栓裂損之原因及影響，遭致有關媒體及大眾等之質疑，致原本決定僅修復 3 支，再增至 6 支，直至 6 支均修復完成後，一號機於 4 月 18 日完成機組大修而隨時可起動時，又因大眾質疑而決定修復第 7 支錨定螺栓，致使一號機發電併聯至電力系統之時程，由原訂 101 年 4 月 21 日延後至 6 月 20 日，共延後 61 天，延後 61 日因替代燃料成本增加，而造成之損失共計為新台幣 62 億 2 千 2 百萬元，電力系統之備用容量率亦長時間降低約 3.3%，影響供電可靠度，均有違失。

二、台電公司各核能電廠應適時進行反應爐底座錨定螺栓之檢測，並宜長期監控，以確保無裂損情形發生，且宜委由第三單位參與或協助辦理，以昭公信；又目前之檢測方法與週期之規定，應再釐清是否合宜或有加強之必要；另原能會亦應切實監督台電公司執行錨定螺栓之相關檢測及協助檢討檢測方式與週期，以維核能電廠之營運安全。

- (一)按美國機械工程師協會 ASME Section XI(1995 年及 1996 年增修版)第 IWF 章之表 IWF-2500-1，其中項目編號 F1.40 項之檢測方式為目視檢測，週期為每 10 年檢測 1 次，即錨定螺栓僅需 10 年執行目視檢測 1 次。核二廠反應爐支撐裙板錨定螺栓之檢測，亦依據上開規範辦理檢測，其一、二號機錨定螺栓之第 3 次目視檢測，係規劃於第 21 次大修執行，一號機於 99 年 10 月執行目視檢測結果合格，二號機於 100 年 10 月進行錨定螺栓維護作業時，發現 1 支螺栓已斷裂。
- (二)查核一廠反應爐支撐裙板錨定螺栓之設計與核二廠有異，其計有 180 支（上層 60、下層 120 支，與核二廠之架構不同），因核二廠已發現錨定螺栓有裂損情事，且台電公司認為依據目前規範要求以目視檢查之方式，並無法檢視出螺栓內部之瑕疵，核一廠一號機於 100 年 11 月 28 日至 101 年 1 月 3 日之第 25 次大修期間，即於 100 年 12 月 24 日執行錨定螺栓之超音波檢測，結果並未發現有裂痕顯示。而核一廠二號機於 101 年 10 月 11 日至 11 月 18 日之第 25 次大修期間，於 10 月 24 日至 26 日間進行錨定螺栓之超音波檢測，檢測結果亦全部合格，相關檢測皆由台電公司核能發電處駐廠之非破壞性檢測隊執行，原能會駐廠視察員則在旁監督。而核三廠為壓水式反應爐，其支撐結構並無錨定螺栓之設計，與核一、二廠之沸水式反應爐不同，經台電公司洽詢原設計廠商西屋公司，所得之回應為相關法規並未要求支撐結構應執行任何類型之非破壞檢測，且美國同類型之電廠亦未曾執行相關檢測。另台電公司表示，核四廠於反應爐吊裝期間，設有臨時之遮雨棚，且錨定螺栓表面塗布一層油漆保

護，並已於 101 年 4 月執行一、二號機之超音波檢測結果合格；又依據核一廠一號機 100 年 12 月大修及二號機 101 年 10 月大修時，進行現場檢查之實際狀況研判，建廠當時反應爐錨定螺栓暴露於潮溼環境之情形應相當輕微等語。

(三)綜上，台電公司各營運或興建中之核能電廠，應適時進行反應爐底座錨定螺栓之檢測，並宜長期監控，以確保無裂損之情形發生，如核二廠一號機 7 支裂損錨定螺栓更新完成後，台電公司雖表示錨定螺栓已無造成初始裂紋之 3 個條件同時存在條件，惟日後每次大修實應再以超音波進行檢測，以確認有無新增裂紋；且相關超音波檢測皆由台電公司自行執行，允宜委由第三單位參與或協助辦理，以昭公信；且核二廠二號機 1 支斷裂之錨定螺栓之修復費用恐高達 291 萬餘美元，台電宜與原廠再議定合理之價格，並切實進行技術轉移，俾利公司權益；又依據目前之規範，錨定螺栓僅需 10 年執行 1 次目視檢測，並無超音波檢測之相關規定，其檢測之方式與週期，應再加強與縮短；另原能會亦應切實監督台電公司執行錨定螺栓之相關檢測及協助檢討檢測方式與週期，以維核能電廠之營運安全。

三、台電公司核一廠及核二廠之沸水式反應爐，易因爐水水質、側板材質及銲接殘留應力等情，致使爐心側板發生應力腐蝕之龜裂情事，裂紋較為嚴重之核一廠兩部機組爐心側板，雖已加裝穩定器以滿足原設計之結構功能，核二廠該公司則認為尚不需修理，兩廠並經該公司評估認為仍可繼續安全運轉，惟台電公司及原能會仍應定期檢測、評估及審查爐心側板之龜裂狀況，確保反應爐之結構完整性，以維核一廠及核二廠

之運轉安全。

- (一)按核一廠及核二廠之反應爐，屬沸水式反應爐，其爐心側板為圓筒型之不銹鋼(304L)結構，厚度約為2.5吋，係由水平銲道與垂直銲道組合成之360度圓筒狀，上、下段以螺栓鎖合，並銲於阻板之頂部邊緣，藉由下方之支撐構造與壓力槽連結，其主要功能係分隔降流區再循環水流(往下)及爐心水流(往上)，並作為頂部導架、蒸汽乾燥器及爐心灑水噴嘴等設施之支撐，以及形成爐心溢滿區(重新淹沒爐心之容器圍板)。然該沸水式反應爐由於環境(爐水水質、高中子通量【隨累積中子通量愈高，材料降伏應力亦愈高】與長期高溫運轉)、側板材質(不銹鋼材料中之雜質)及銲接殘留應力等因素，致使爐心側板銲道之熱影響區，易發生應力腐蝕龜裂，此為沸水式反應爐爐心側板之共通性問題，且該等裂紋通常極為緊密，開口處往往有氧化物堵塞，不易以目視檢測發現。西元1990年瑞士KKM核能電廠之沸水式反應器爐心側板內側銲道之熱影響區，首次發現有裂紋情況，該龜裂問題始受到全球核能界之重視；復於1993年至1994年間，美國Brunswick、Dresden及Quad Cities等核能電廠之爐心側板銲道，亦陸續發現類似之裂紋，全球同類型之各核能電廠紛紛加強爐心側板銲道之檢查。1994年沸水式反應爐所屬電廠業者即聯合成立研究計畫(台電公司亦為計畫成員)，並由美國電力研究所(Electric Power Research Institute, EPRI)主導發展一套標準檢測及評估準則，此準則亦獲得美國核能管制委員會之核准，並要求美國相關核能電廠遵循使用，台電公司及原能會亦採用此準則，依據爐心側板之檢測結果，考量各種負荷及運轉狀

況進行評估，在確保爐心側板完整性之情況下，訂定下次檢測時間。

(二)查台電公司核一廠及核二廠之反應爐，屬沸水式反應爐，故爐心側板易因應力腐蝕而發生龜裂，原能會首先要求核二廠自 83 年起於機組大修時，執行爐心側板之檢測，其檢測方法以超音波檢測為主、目視檢測為輔。台電公司有關核二廠執行爐心側板之檢測情形如下：

1、一號機：

(1)83 年 10 月之第 10 次大修時，首次執行爐心側板之檢測，檢測結果並未發現龜裂。

(2)95 年 3 月第 18 次大修檢測發現編號 H4/H5 鐸道各有 2 處橫向裂紋，H4 鐸道裂紋為 19.6cm(長)、0.7cm(深)及 10cm(長)、0.63cm(深)，H5 鐸道裂紋長度則分別為 9.2cm 及 1.6cm，深度均小於 0.4cm。

(3)101 年 3 月第 22 次大修再次檢測結果，H4 鐸道橫向裂紋成長為 29.6cm(長)、1.77cm(深)及 11.6cm(長)、0.78cm(深)，裂紋總長約為水平鐸道全周長(1,500cm)之 2.8%；而 H5 鐸道兩處橫向裂紋長度成長為 10.4cm 及 1.6cm，深度亦均小於 0.4cm，裂紋總長約為水平鐸道全周長之 0.8%。經台電公司依據標準評估準則評估結果，認為仍可確保爐心側板完整性，機組可繼續安全運轉。

2、二號機：

(1)84 年 10 月第 10 次大修首次執行檢測結果，發現 H4 鐸道有 1 道約 15 至 20cm 之橫向裂紋。其後，核二廠即依相關規定定期追蹤檢測。

(2)100 年 10 月第 21 次大修之檢測結果，H4 鐸道

有 4 處橫向裂紋，裂紋長度介於 2cm 至 48.9cm，深度為 0.4cm 至 2.5cm，裂紋總長約為全周長之 5.4%；另 H5 鐸道發現 6 處橫向裂紋，長度介於 3.2cm 至 13.2cm，深度為 1.3cm 至 1.73cm，裂紋總長約為全周長之 3.6%。經台電公司確認仍可確保爐心側板之完整性，機組可繼續安全運轉。

- (三)又核一廠部分，一號機於 84 年 4 月第 14 次大修時，首次檢測結果發現 H6 鐸道內側有 20 處共約 289.26cm 之橫向裂紋，占全周長(1,283cm)之 22.5%，裂紋最深處為 0.58cm。二號機於 83 年 3 月第 12 次大修時，首次檢測結果發現水平鐸道 H3 內側有橫向裂痕，83 年 4 月以超音波複查確定 H3 鐸道裂紋全長約為 482.68 cm，占全周長之 37.6%，裂紋最深處為 1.45cm；84 年 2 月第 13 次大修時，再檢測發現 H3、H5、H6 鐸道內側有多處龜裂，其橫向裂紋最深分別為 1.91cm、0.64cm 及 1.02cm，未發現裂紋範圍僅分別占周長之 44.3%、33.7% 及 44.9%，裂紋範圍極廣。台電公司為確保核一廠兩部機組爐心側板之結構完整，乃委託反應器原製造廠商奇異公司進行檢修工作，二號機於 85 年 4 月第 14 次大修時修復（修復費用為 308 萬美元），一號機則於 85 年 9 月第 15 次大修時修復（修復費用為 299.8 萬美元）；修復方法係於壓力槽與爐心側板間加裝 4 組垂向穩定器（Stabilizer, 每組相隔 90 度，每組包含：夾頭總成、上部支撐總成、上部總成、中間支撐總成、拉桿及下部總成、下部彈簧楔形總成、爐心底板楔形總成等 7 部分），以取代爐心側板水平鐸道之結構功能，其設計壽命含括一、二號機之剩餘壽命。一號機於安裝穩定器後

，水平鐸道經目視檢查結果均正常，二號機除於 H3 水平鐸道發現長約 3.81 cm 之橫向裂紋顯示外，餘均無發現異常現象。台電公司表示，核一廠各機組爐心側板新設 4 組穩定器後，已取代爐心側板水平鐸道之結構功能，已不需再檢測水平鐸道，僅需定期檢查穩定器即可(每次大修檢查 1 組)，至今穩定器之完整性檢查皆正常。該公司又稱：「依 97 年之調查結果，全球計有 51 部沸水式反應爐之爐心側板，有大小不一之裂紋，其中 9 部機組更換爐心側板(主要為日本之核能電廠)，16 部機組已進行檢修，其他 26 部機組則以定期檢測方式監視裂紋變化；而核二廠屬於第 3 者情形，經執行標準準則評估後，確認仍可確保爐心側板之完整性，機組可繼續安全運轉尚不必修理，僅需持續監測裂紋變化即可，日後如裂紋持續成長而有可能危及爐心側板完整性時，將依相關法規及在原能會監督下，採取修理或更換等措施因應。」

- (四)綜上，按沸水式反應爐由於受輻射照射、爐水水質等運轉環境及側板材質、鐸接殘留應力等因素之影響，致爐心側板之鐸道易發生應力腐蝕龜裂，此為沸水式反應爐爐心側板之共通性問題。台電公司核一廠及核二廠亦採沸水式反應爐，其中核二廠一號機於 83 年 10 月起計發現有 4 處橫向裂紋，裂紋總長約為鐸道全周長之 3.6%，深度於 1.77cm 以下，裂紋位於側板外側；二號機於 84 年 10 月起則發現有 10 處橫向裂紋，總長約為全周長之 9%，深度為 2.5cm 以下，裂紋位於側板內側；該等橫向裂紋經台電公司依據標準準則評估結果，認為仍可確保爐心側板完整性，機組尚可繼續安全運轉，仍不需修理，僅需持續監測裂紋變化即可。而核一廠部分，

一號機於 84 年 4 月間發現有 20 處橫向裂紋，裂紋總長約占鐸道全周長之 22.5%，深度為 0.58cm 以下，裂紋均位於側板內側；二號機於 84 年 2 月間則發現有 3 處鐸道有多處橫向裂紋，裂紋範圍占鐸道全周長之 5 成以上，深度為 1.91 cm 以下，由於橫向裂紋情形較為嚴重，台電公司為確保兩機組爐心側板之結構完整性，即委由奇異公司加裝垂向穩定器，以取代爐心側板水平鐸道之結構功能，其後除於二號機水平鐸道發現 1 處新橫向裂紋外，餘均無發現異常現象。台電公司核一廠及核二廠之沸水式反應爐爐心側板，已發生應力腐蝕之龜裂情事，核一廠爐心側板雖已加裝垂向穩定器，以滿足原設計之結構功能，核二廠爐心側板台電公司則認為尚不需修理，兩廠並經該公司評估認為仍可繼續安全運轉，惟台電公司及原能會仍應定期檢測、評估及審查爐心側板之龜裂狀況，確保反應爐之結構完整性，以維核一廠及核二廠之運轉安全。

四、台電公司核能電廠反應爐周遭之地震儀長期處於高頻振動環境，致元件易生疲乏而使輸出訊號失真，核二廠一號機於第 22 次大修之停機時，確曾發生地震儀之異常訊號，相關測振設施除應定期檢修及更換組件，以提高可靠度外，允宜評估於各核能電廠反應爐適當位置加裝振動量震儀器，亦可協助釐清錨定螺栓斷裂等事件之肇因，原能會應續追蹤及檢討各核能電廠反應爐之振動監測方案，以確實掌握爐體之振動狀況。

(一)查台電公司核能電廠地震監測系統之設計，係依據美國核能管制委員會之規範，同一廠址僅需於其中一部機組裝置地震監測儀器即可，因此核二廠僅於

一號機反應爐基座裙板旁安裝地震監測系統之強震儀(三軸向加速度地震儀)，其量測範圍較大，為正負 2g 之加速度值，另於一次圍阻體外加裝一只弱震儀，其測範圍為正負 0.25g，惟精密度較高，相關測震儀器若達觸發值，則進行記錄及儲存。而核電廠於機組停機大修時，在停機操作過程中需將所有控制棒插至爐心後，並切換模式開關至停機位置，再繼續降溫降壓至冷爐狀態，以更換爐內之核燃料。台電公司表示：控制棒全入後並切換模式開關至停機位置時，程序書並未要求記錄當時反應爐之壓力值，且停機時之「再驗證」機制不會造成反應爐內之水錘效應，而核二廠反應爐停機時插入控制棒所生之振動，係由控制棒驅動機構，驅動液壓將控制棒插入爐心所產生，歷年運轉模式開關轉至停機位置時(插入控制棒)，均會有此振動，正常振動值約為 0.04g 至 0.05g (約為敲擊所產生之力量)，且其維持時間相當短(0.2 秒)，難與地震所產生之震力相比；又歷年核二廠測得較大地震紀錄為 921 及 331 大地震(分別發生於 88 年 9 月 21 日及 91 年 3 月 31 日)，反應爐基座裙板地震儀所測得之振動最大加速值僅有 0.024 g 及 0.027g，而核一廠及核三廠地震監測系統則皆未曾發生因機組停機，而造成弱震儀或強震儀動作之現象，即以往機組停機時，地震監測系統之最大振動量，皆未達觸發設定值；另近 10 年核一、二廠一號機強震儀因地震引動之觸發紀錄，僅有 91 年 3 月 31 日發生於花蓮外海之地震，其最大值約為 0.019g，其中核一廠強震儀使用至今並無異常及損壞情形等語。

(二)查 101 年 3 月 16 日核二廠一號機開始進行第 22 次大修，於上午 5 時 50 分將反應爐運轉模式切換至

停機時，曾造成二次圍阻體外地上之弱震儀(編號 OSG-XE-109，各向之觸發設定值皆為 0.0015g)及反應爐旁生物屏蔽牆上之強震儀(強震儀編號 OSG-XE-105，垂直向【Z 軸】觸發值為 0.16g)動作(任一組測震儀被觸發，皆會引發所有測震儀同時記錄震度)，其中強震儀垂直方向之最大加速度值高達 0.29g(其水平方向之南北及東西方向【X 軸及 Y 軸】各為 0.0098g 及 0.0081g，其餘 7 組強震儀之最大加速度值僅有 0.036g(最鄰近之乾井外側結構體上之強震儀)，而弱震儀則顯示 0.01g)，顯與歷次停機時之振動值有異，並遭外界質疑是否造成反應爐支撐裙板上錨定螺栓裂損之肇因。經核二廠人員於 101 年 3 月 16 日將強震儀拆下進行校正及檢測後，發現強震儀垂直向訊號已有偏差，且已無法修復；核二廠即 4 月 30 日將該強震儀送至財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心進行檢測，檢測發現強震儀垂直向不論輸入 0.158g(921 大地震之波形)、0.169g(8Hz 正弦波)或 0.134g(25Hz 正弦波)之加速度值，皆逐漸漂移至滿刻度 2g，其儀器皆顯示為 2.000g，而強震儀南北向、東西向則顯示正常；台電公司表示該 0.29g 之振動量，係停機當時反應爐基座裙板處地震儀所量得之振動量，其包含停機時反應爐之振動力、背景雜波、地震儀零點上下晃動之失真訊號等，雖 0.29g 振動量影響時間甚短，並包含失真訊號；嗣經核二廠評估結果，認為若實際發生 0.29g 之瞬間振動量，亦未能對錨定螺栓及反應爐造成損害，且一號機第 22 次大修中已完成各項相關檢測，反應爐相連接之安全管路(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)之鉚

接處並未受影響，檢測結果正常，反應器周邊組件亦無損壞情形。台電公司表示：「依據核二廠一號機以往停機時之地震儀紀錄資料，當運轉模式開關切換至停機位置時，各廠房之地震資料相當一致，因此研判 101 年 3 月 16 日停機時，反應爐基座裙板垂直向之實際振動量約為 0.03g 至 0.05g，屬正常之振動量；另由 3 支損壞錨定螺栓斷裂處之氧化層，亦可判定此瞬間振動量與錨定螺栓斷裂無關。事後針對此地震儀進行校正、背景紀錄分析及送往國家地震工程研究中心進行訊號比對，均可證實該地震儀垂直向訊號 0.2947g 是失真的。」原能會則稱：「經台電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。」

- (三)再查核二廠為掌握反應爐之實際振動情形，除於 101 年 5 月之一號機第 22 次大修期間，於反應爐旁之生物屏蔽牆加裝 8 只振動加速規，當振動加速規數值超過 0.1g 時，將由核二廠人員確認肇因，再決定機組是否降載或停機，並針對地震儀基座進行鋼樑補強及護欄移除等改善作業，以免地震儀發生錯誤訊號；嗣一號機於 6 月 18 日核准啟動後，核二廠即依程序書(SP-2012-06)執行反應爐基座裙板振動之連續監測及記錄(8 只振動加速規及相關地震儀)，所錄得振動加速值較大之紀錄，係於運轉模式開關切換至停機模式之測試時(約 0.04g 至 0.07g)，以及反應爐安全釋壓閥測試過程(約 0.08g)等兩階段，此振動加速值為測試過程中引發之正常振動量，而其餘振動加速值均小於 0.005g。又原能會已對核二廠加強執行監測方案，包含：
1. 核二廠一號機新增之 8 只振動加速規監測系統

，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，並即通報原能會。2.核二廠二號機在下次第 22 次大修時，應比照一號機增設振動監測系統。」

(四)綜上，台電公司核二廠於正常運轉中，其反應爐再循環泵運轉及相關管路、爐心水流與安裝處之鐵板平台或護欄振動引發之訊號，使反應爐旁之地震儀垂直向長期處於高頻振動環境，相當時間後即易造成感震器內部之平衡元件疲乏，致輸出訊號失真。核二廠一號機於 101 年 3 月 16 日第 22 次大修之停機時，確實發生安裝於反應爐旁生物屏蔽牆上之強震儀動作，核二廠雖已針對地震儀基座進行鋼樑補強等改善作業，惟仍應於每次大修期間定期檢修地震儀及更換相關組件，以提高此地震儀之可靠度外，允宜評估於各核能電廠反應爐適當位置加裝振動量測儀器，亦可協助釐清錨定螺栓裂損等事件之肇因，原能會應續追蹤及檢討各核能電廠反應爐之振動監測方案，以確實掌握爐體之振動狀況。

五、台電公司核二廠於停機大修期間，意外發現反應爐鋼製外殼底座部分之錨定螺栓裂紋或斷裂情事，凸顯反應爐結構安全令人憂心，除台電公司應深入檢討造成螺栓裂損之切實原因外，另各核能電廠之反應爐已運轉多年，台電公司允宜進行整體結構安全之評估，以確保運轉及公眾安全。

(一)按核二廠反應爐基座為一高約 30 呎，內、外側襯覆鋼板之圓筒狀鋼筋混凝土，底部連接於岩盤，基座上方係以圓筒內側襯覆之鋼板支撐裙板，鋼板上方先垂直銲接一厚度約 3.5 吋之載板，載板上方再置放裙板法蘭，利用錨定螺栓鎖緊固定（螺栓安裝

鎖磅時，所施加之預拉力為 68 萬磅），以將反應爐之剪力負荷傳遞至基座。查核二廠反應爐基座結構設計之原始廠家為奇異公司，於建廠前亦經由相關管制單位審查，然台電公司各核能電廠之反應爐已運轉多年，核一、二、三廠目前廠內各有兩部機組，依據原能會「核子反應器設施管制法」第 6 條之規定，由原能會核予 40 年之運轉執照，該 3 座核能電廠現有 6 部機將分別於 107 年 12 月、108 年 7 月、110 年 12 月、112 年 3 月、113 年 7 月及 114 年 5 月屆滿 40 年之運轉年限，顯已分別商轉約達 34、33、31、28.7、28.4 及 27.5 年之久。

(二)查核二廠因本案 7 支錨定螺栓裂損事件之影響，並經台電公司及原能會事後評估認為螺栓裂損之主要 3 項肇因為：建廠初期露天之施工環境、施工不慎造成之應力集中或表面缺陷、材料瑕疵，於 101 年 7 月 27 日洽請泰興工程顧問股份有限公司執行核二廠反應爐基座耐震設計與國內現行法規耐震設計之比較，其分析結論略以：「核二廠最終安全分析報告之設計載重組合公式中，尚有各種假設意外及事故等狀況之組合，係國內現行耐震設計法規所沒有的。另就反應爐基座高程(地面下 9 呎 4 吋)之水平地震加速度比較，手動安全停機地震力之最小加速度為 0.26g，自動安全停機地震力之最小加速度為 0.5g，而國內現行耐震設計法規之公式計算後可得加速度為 0.112g，小於核二廠上開加速度值，顯見核二廠之耐震設計比較保守。」又台電公司表示：「反應爐本體側向有大型穿越管路及相關限制器以限制其搖擺，而錨定螺栓並不需承受所有反應爐擺動之負荷。」

(三)綜上，核二廠對反應器廠房結構之檢查係依據核二

廠程序書 1268「廠區內外結構體檢查程序書」執行，其檢查週期為每 18 個月執行一次；核二廠於本案 7 支錨定螺栓裂損事件發生後，曾洽請顧問公司執行反應爐基座耐震設計與國內現行法規耐震設計之比較，雖獲優於國內現行耐震設計法規之結論，惟國內「建築物耐震設計規範」於 63 年頒布施行後，曾於 71、78 及 86 等年度修正耐震設計條文，嗣於國內經歷 921 地震之重創後，有關震區劃分、建築、設備及管線等結構耐震規範等條文，皆已重新修訂，以符實際耐震需求；台電公司各核能電廠雖屬特種建築物，然其反應爐已運轉多年，其相關結構安全確涉及公共安全，台電公司允宜委外進行整體結構安全之評估外，應再就錨定螺栓之材質、腐蝕狀況、施工正確性、預拉力大小、應力與彈性疲勞分析及反應爐振動、耐震能力、鋼製外殼結構等情，詳予檢討，以確保廠區內外與核能安全有關之建築、設備及管線等，於電廠營運期間可安全使用，原能會亦應切實查核及監督各核能電廠之相關結構安全，俾確保運轉及公眾安全。

調查委員：高鳳仙

趙昌平

陳永祥