

#1機反應爐支撐裙板錨定螺栓斷裂 原能會101年4月3日第一次審查意見答覆



核 二 廠
營運測試課長
汪 雅 政
101年4月6日

1. RPV錨定螺栓攸關RPV運轉的振動量，及各個nozzles的受力，及RPV結構穩定等等，應是核電廠所有組件支撐中最重要的一項，其能符合設計的要求無法絲毫放鬆。

- 為確保RPV在部分錨定螺栓有斷裂或瑕疵之情況下仍可符合原設計接受標準並安全營運，本公司已進行詳細評估，評估結果顯示，其最大軸向力仍低於螺栓材料達90%降服強度受力之設計基準；另接觸面滑移檢核分析計算顯示，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。以上分析結果顯示，RPV skirt部分錨定螺栓雖有斷裂或瑕疵，但仍符合設計基準，繼續安全運轉無虞。但為求更進一步確保RPV之安全營運，本公司仍盡其所能，已擬妥修復方案，至少修復3支，以獲取更大之運轉安全餘裕。



2. 歷年來每次SRV測試及S/D均引動#1-A2螺栓旁的105地震儀動作，因係SRV測試及S/D動作的瞬間衝擊力造成，而非簡報所稱之地震儀誤動作而且螺栓斷裂應與這些多次瞬間衝擊力有關台電宜再以金相檢驗配合破壞力學角度解釋這些螺栓斷裂之肇因。

- 熱室檢驗結果顯示，螺栓邊緣裂紋萌生(Crack Initiation)處出現脆性沿晶破壞表徵，裂紋萌生後之裂紋擴展(Crack propagation)階段則開始出現延性韌窩破壞並從而主導螺栓整體之斷裂；脆性破壞侷限在起裂源2~3mm之範圍(螺栓直徑3吋)，而整體之韌窩破壞斷面(至最終拉斷前)形貌均勻，無其他可見之破壞表徵。因韌窩破壞為塑性變形(慢速應變率)之結果，因此可確認：裂紋擴展沒有受到瞬間衝擊力(極快速應變率)之影響。



3. 簡報內容有關螺栓完整性評估之應力分析，係假設尚未發現斷裂的其他所有螺栓均是完整、沒有缺陷的前提才成立。所以台電至少應提出”尚未發現斷裂的其他所有螺栓均是完整、沒有缺陷的”以及”仍保有足夠磅數”之證明。

- 螺栓完整性檢測是以超音波(UT)進行螺栓內部全體積的檢測；檢測方式及檢測所需之校準規塊比照ASTM的標準，而且檢測人員之一的蔡錫聯先生除為高級超音波檢測師外，亦為EPRI螺栓超音波檢測能力驗證檢定合格人員。因此，其餘經檢查合格之螺栓的完整性是可確認的。
- GE公司評估認為其他螺栓之鎖緊預力不會有鬆弛現象
 - 除非存在有減損接觸厚度(corrosion)或增加螺栓長度(yielding, failure)的機制，否則螺栓之預力並不會鬆弛。
 - 從損壞螺栓的觀察及螺栓的工作環境並無明顯的腐蝕效應。
 - 從螺栓的原始應力分析，螺栓的延展變形具有足夠的餘裕。

• 業界無任何運轉經驗顯示該螺栓有鬆弛的情形。



How can TPC assure the preload are there? Measure the elongation or use the tensioner to check the tension? Any other method? If they have to use the tensioner to re-check the stud tension, do they have to do them all or just take some sample check? (James Wang)

Response:

GEH does not believe there has been a loss of preload in the existing anchor stud joints and therefore does not recommend preload inspection of the remaining studs based on the following reasons.

The initial installation process allowed for a 10% elongation relaxation of the studs. Thus, unless there has been a mechanism to decrease the effective thickness of the joint (e.g. corrosion) or increase in the effective grip length of the stud (yielding, failure), preload of the joint should have been maintained. From the limited images provided of the damaged hardware and surrounding areas, there does not appear to be sufficient corrosion to suspect a loss of preload in the remaining studs. Also, based on the original stress analysis of the stud, there is sufficient margin to allowable yield stress therefore; yielding could not have been a cause of increase in effective grip, resulting in preload loss. Additionally GEH is not aware of any operating plant experience where there was either a failure or loss of preload of these anchor studs.



4. 上述應力分析之螺栓之allowable stress $0.9F_y$ 為804.6kips請再核算。

- 本公司於核二廠2號機EOC-21及1號機EOC-22反應爐支撐裙板錨定螺栓斷裂結構安全分析，所採用之每根螺栓拉力接受標準，係根據貝泰對錨定螺栓設計計算書中之規範，其計算值為 $0.9\sigma_y$ （330°F運轉溫度下降伏強度之90%數值）X每根螺栓受拉力面積6.51in²，計算書摘錄如下：
- 螺栓材料： A-540 B23 CLASS 1 ，3" ϕ ，受拉力面積6.51in²。

- A-540 B23 CLASS 1在各個溫度機械性質如下：

溫度	100°F	200°F	300°F	400°F
最低降伏強度 σ_y (Ksi)	150.0	143.4	138.6	134.4
3" ϕ 螺栓降伏負荷 ($\sigma_y \times 6.51$ in^2)(Kips/bolt)	976.5	933.5	902.2	874.9
90%之3" ϕ 螺栓降伏負荷(Kips/bolt)	878.9	840.2	812.0	787.4

- 故在330°F運轉溫度下，每根螺栓拉力接受標準係由300°F及400°F之數值(812.0 Kips/bolt及787.4Kips/bolt)所內插出來，經本公司驗算無誤。



5. 如比照#2之螺栓完整性評估之應力分析思維，如只修復3根已斷之螺栓，萬一再斷一支，安全分析會過嗎？

- 本公司於核二廠2號機EOC-21反應爐支撐裙板錨定螺栓斷裂結構安全分析是在外圈斷裂1根下，非常保守假設緊臨兩支內圈螺栓斷裂情形下執行應力重分配計算。1號機EOC-22錨定螺栓斷裂結構安全分析，係依螺栓斷裂實際位置建置有限元素模型執行應力計算。若再假設其他螺栓斷裂，需視位置實際分析方可得知是否每根螺栓是否符合接受標準。



- 本公司在1號機EOC-22除7支已斷裂或有裂痕之錨定螺栓之外，其餘113支螺栓均已執行精密UT檢查，沒有可測出之瑕疵。由核研所執行包括兩部機兩支已斷裂螺栓斷面之金相肇因分析，不論其裂痕起始成長之成因或驅動負荷來源，是應力腐蝕龜裂、疲勞或可能之製造安裝所造成之瑕疵，其大部斷面為脆性斷面，且斷面佈滿大量腐蝕產物，研判裂痕成長期程很長，裂痕成長到可被瞬間拉斷之剩餘截面積應需要一段非常長的時程。本公司安排下兩次大修期間均執行UT檢查，其他螺栓若有明顯裂痕起始或成長之情形，本公司可以檢測出，並立即採取修復措施。



6. 請台電考量利用這次大修期間：(1)好好看看現場是否有無不應該有的環境或可以進一步防止螺栓老劣化的環境因子，(2) 螺帽及墊圈接面塗以防破壞漆以利日後協助判別螺栓是否因振動引起鬆動，(3)在螺栓同一高程的生物屏蔽牆外加裝振動監測sensor以利日後持續觀察並分析SRV測試及S/D引動之振動量。

- 依審查意見，將於螺帽與裙板法蘭以漆線標示其相對位置。
- 由現場檢視結果，螺栓組件表面雖有褐色鏽斑，以歷經30年運轉時間而言，螺栓所處環境堪稱良好。(如圖)
- 另水泥包覆部份也顯示並無腐蝕現象。(如圖)





- 螺栓位於爐心燃料底部以下530公分處，無中子照射顧慮，因此無輻射引發材質變化疑慮。
- 反應爐基座裙板之振動監視計畫：
 - 如附。



7. 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%。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%，當修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。



8. 初步螺栓照片發現Crack Initiation似乎與孔洞有關，且孔洞長軸近1mm，台電公司是否保留當年安裝之品保文件，螺栓表面狀態之資料？

- 經查相關資料，所獲為#1、2機螺栓施工檢驗紀錄，完整記錄螺栓尺寸量測、鎖磅過程及螺栓伸長量。由螺栓伸長量量測紀錄，每支螺栓均在預力設計範圍。



9. 栓破斷面照片裂縫成核處發現脆性沿晶破斷，是否熱處理不當造成回火脆性？請台電公司對新購螺栓加強熱處理條件之監督及拉力試驗後之破斷面檢視，以確保無不當熱處理。

- 熱處理不當(如回火時間過短或回火溫度過低；規範要求回火溫度 $\geq 450^{\circ}\text{C}$)會導致螺栓發生脆性沿晶破斷。
- 目前A2試片之金相檢驗結果似乎有熱處理不當跡象，後續破斷試片將特別注意檢驗，以確認是否有熱處理不當現象。
- 謹依大會意見將轉達GE公司加強監督，本公司亦會加強各項檢驗報告審查。



10. 本次會議討論疲勞因子是負荷元之一？請評估本螺栓疲勞裂縫生長速率為何？如果螺栓已裂縫成核（Crack Initiation）但尺寸大小低於UT檢測之偵測極限，裂縫成長是否足以運轉至下一個週期？

- 如第一次審查會中敘述，A2螺栓所處環境是有疲勞之運轉條件，且檢驗中的確發現有疲勞之證據：striation，但其對螺栓斷裂之裂紋萌生/裂紋擴展貢獻為次要，非斷裂肇因。在既有之負荷條件（ $DK \neq \text{constant}$ ）及加載頻率下，由striation spacing 推估裂紋擴展速率為 $\sim 1.25\text{E-4 mm/cycle}$ 。
- 因此，如有低於UT檢測極限之裂紋，以上述之裂紋擴展速度而言，足以運轉至下一個週期。



11. 第5頁A2螺栓斷裂位置在頂部以下18.2吋處，不在螺紋根部位置，與通常螺栓最大應力發生在最前面螺牙間的認知不同，請說明可能原因？

- 熱室檢驗發現，A2錨定螺栓斷口(18.2吋)區域之螺桿表面嚴重磨損，意謂A2錨定螺栓在斷裂前必定與RPV skirt flange/mounting plate 彼此接觸，引發一極大之彎曲力矩，此彎曲應力加上單軸向拉伸(預)應力造成A2錨定螺栓於該處斷裂。



12. 第11頁此次發生斷裂或發現裂紋indications的螺栓都在內圈，請就反應爐與支撐裙板的受力情形檢討其可能原因。

- 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(vertical upward)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。



13. 第30頁在強震儀紀錄比對時，應該考量的是反應爐安裝在pedestal上的整體結構自然頻率，本報告所提的反應爐fundamental mode自然頻率是否為前者，請說明。

- 核二廠反應爐之自然頻率分析模型中，包括反應爐槽體，爐內組件及支撐裙板均已建置在同一模型中，所以 反應爐fundamental mode自然頻率為8.29 Hz，是指反應爐安裝在pedestal上的整體結構自然頻率。



14. 第45~47頁，螺栓預力必須達680kips以提供反應爐支撐裙板與基座間必要的摩擦力，此三個表中的螺栓軸向總受力都低於600kips，是否符合要求？

- 支撐裙板與基座間滑移檢核分析，係根據設計計算書，以每根螺栓只能提供510 KIPS作為分析輸入，實際螺栓預力680kips遠大於此值，所以有相當大的保守餘裕。
- 螺栓拉力分析中，軸向拉力數值係反應外在負荷作用，受力輸入並未不包括預拉力，所以預拉力仍提供足夠之正向壓力以克服支撐裙板與基座間之剪力。



核能發電
追求卓越

安全第一
品質為先



敬請
批評指教

