

核二廠1號機爐心燃料棒護套 受損案審查結論報告

行政院原子能委員會

中華民國 106 年 6 月

摘 要

台電公司核二廠 1 號機於去(105)年 7 月中旬由反應爐爐水及放射性廢氣活性取樣分析結果，發現相關參數有異常升高現象，初步研判爐心燃料棒護套可能有發生破損之情形，原能會(以下簡稱本會)除由駐廠視察員追蹤燃料完整性指標與廠房廢氣排放數值外，並要求台電公司密切注意相關參數變化趨勢，依程序書監測評估及採取必要措施。本會並持續注意電廠處理情形、燃料護套完整性相關參數變化趨勢與核電廠內及廠外環境監測資料，以確保機組運轉與環境輻射狀況均符合安全要求。

核二廠 1 號機已於去(105)年 12 月停機進行大修期間，由燃料廠家針對爐心所有 624 束燃料進行爐內啜吸作業，發現其中編號 K1H582 燃料束內之燃料棒護套有破損跡象。電廠依程序將該束燃料吊離爐心，傳送至用過燃料池執行非破壞檢測，確認該束燃料 91 支燃料棒中有 1 支燃料棒的護套有受損情形，其他燃料則經檢查確認為完整。核二廠已將受損之燃料棒取出後移至用過燃料池內之專用容器內儲放。期間本會均派員視察相關作業執行情形，並於 12 月 15 日召開會議，了解台電公司大修檢查情形與後續檢討改善措施，並要求台電公司針對本案運轉期間監測及處理措施、大修停機時之檢查作業、肇因探討、對廠內/外環境影響，以及防範改善措施等提出完整報告。本會並已聘請核燃料專長之會外專家 3 人與會內同仁組成專案小組，就本案相關要項進行嚴格審查。

本會於今年 1 月 18 日召開說明會議，由專案小組聽取台電公司全案辦理之最新情形，並針對後續專案報告應包含事項提出意見，要求台電公司納入專案報告。台電公司於今年 3 月 1 日來函提出專案報告，分別就 1 號機週期 25 運轉期間監測及處理措施、大修期間執行爐心燃料與破損燃料檢查及後續處理作業結果、燃料破損之肇因研判結果、對廠內/外環境影響，以及後續檢討防範改善措施提出說明。

本會專案小組就台電公司所提專案報告內容提出共 24 項審查意見，經召開 3 次審查會議，針對台電公司所提報告及對審查提問之答覆內容進行審查，確認相關審查意見均已獲釐清。綜合本會執行視察與專案小組對台電公司報告與審查提問答覆內容之審查結果，確認台電公司已於去年 12 月大修停機期間找出破損燃料，並移至用過燃料池將破損燃料取出後，置於專用容器貯放，其他爐心所有燃料經檢查無破損跡象；在破損肇因分析部分，台電公司與燃料廠家經由池邊檢驗及運轉資料分析結果，認為護套破損肇因為爐屑磨損之研判結果，經詳細就台電公司提供之報告資料及對相關問題之答覆詳細審查後，此肇因判定可以接受；在廠內/外環境影響部分，經評估計算本次燃料破損對廠內外人員造成之劑量，仍低於法規限值並有相當安全餘裕，核二廠亦已提出更嚴謹保守的因應措施，以儘量降低未來若發生類似事件對環境之影響，經審查可以接受。在防範改善措施部分，在本會要求之下，台電公司已就本次經驗，依據廢氣(惰性氣體)

活度、現場設備狀況、廠區環測結果研訂更保守積極之因應行動措施，未來運轉期間可提早發現護套洩漏及避免誤判，並儘早採取減緩劣化措施與必要時即早停機檢查，經審查可以接受。在防範爐屑磨損部分，此為目前國際間沸水式核電廠仍需努力面對與改善的問題，經本事件檢討，台電公司已採行更嚴密的防止異物入侵措施。此外，在防範異物入侵部分，亦要求台電公司積極汲取國外經驗，例如日本核電廠因爐屑造成之燃料破損率較他國為低，應與其文化及具體做法有關，台電公司宜加強這方面的技術交流，本會後續亦將持續追蹤台電公司所提檢討防範措施執行情形。

此外，為落實資訊公開與公眾參與，本會已於5月24日召開說明會(同步網路直播)，以廣泛蒐集大眾意見，現場並就出席人員關心之議題進行意見交換與溝通，後續亦對參加人員所提相關意見妥適回應，並於網路上公開。

目錄

壹、前言	01
一、事件經過說明.....	01
二、原能會安全管制作業情形.....	02
(一)運轉期間燃料完整性監測	03
(二)發現燃料棒受損之追蹤與管制	03
(三)大修停機期間檢查之追蹤與管制	05
(四)專案報告審查與追蹤	06
貳、台電公司專案報告審查情形	06
一、肇因分析.....	07
二、對廠區內外環境之影響說明.....	13
三、防範改善措施審查與追蹤.....	17
四、說明會辦理情形簡述.....	32
參、審查總結	33
附件 大事紀.....	35

壹、前言

一、事件經過說明

台電公司核二廠1號機於去(105)年7月中旬由反應爐爐水及放射性廢氣活性取樣分析結果，發現相關參數有異常升高現象，初步研判爐心燃料棒護套可能有發生破損之情形。核二廠依程序書就相關參數進行監測評估及採取功率壓抑措施(將研判護套可能受損之燃料棒周圍控制棒插入，降低該燃料功率)，以期抑制減緩破損情形。期間本會除由駐廠視察員追蹤燃料完整性指標與廠房廢氣排放數值外，並要求台電公司密切注意相關參數變化趨勢，依程序書監測評估及採取必要措施。同時持續注意電廠處理情形、燃料護套完整性相關參數變化趨勢與核電廠內及廠外環境監測資料。7月中旬至11月30日機組大修停機前之反應爐爐水及放射性廢氣排放活性各項監測數據，均低於安全限值。

核二廠1號機已於去(105)年12月停機進行大修期間，由燃料廠家針對爐心所有624束燃料進行爐內啜吸作業，發現其中編號K1H582燃料束內之燃料棒護套有破損跡象。電廠已依程序將該束燃料吊離爐心，傳送至用過燃料池執行非破壞檢測，確認該束燃料91支燃料棒中有1支燃料棒的護套有受損情形。核二廠已將受損之燃料棒取出後移至用過燃料池內之專用容器內儲放，該燃料束則經再次真空啜吸檢查確認為完整，該束燃料原本即規劃於本次大修退出爐心，故存放於用過燃料池中不再使用。期間本會均派員視

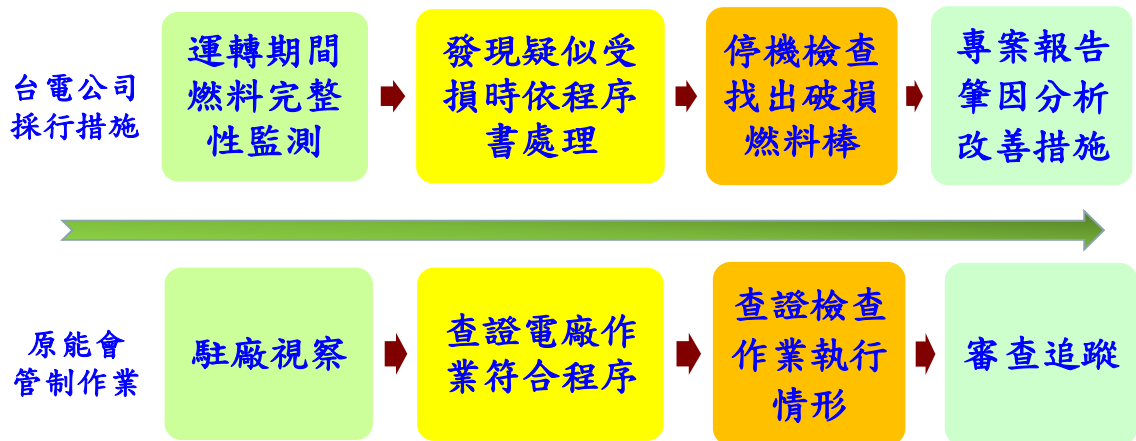
察相關作業執行情形，並已要求台電公司針對本案之檢查作業、肇因探討、檢討防範措施，以及對廠內/外環境影響提出完整報告。本會並已聘請會外專家與會內同仁組成專案小組，對台電公司所提專案報告進行審查。

另在對廠內/外環境影響部分，核二廠 1 號機汽機廠房流程輻射監測器於 105 年 9 月間持續發生警訊，本會即要求台電公司針對廠內及廠外環境試樣執行加強監測作業，針對代表性及關鍵性試樣增加取樣頻次(如每季改為每週)。台電公司於 12 月 8 日通報臨近廠界 4A 站(離電廠 1 公里內)之環境草樣，測得碘-131 活度為 5.9 貝克/公斤，達「環境輻射監測規範」調查基準 4 貝克/公斤，本會隨即至電廠進行了解，並於 12 月 13 日針對此事要求台電公司至本會說明肇因及改善措施。台電公司說明造成草樣碘-131 活度升高之原因，研判應為大修後汽機開蓋所造成，本會要求核二廠檢討大修過程中有可能造成碘-131 外釋之相關作業，並要求台電公司加強執行核二廠外環境每日特別取樣計畫，另本會輻射偵測中心亦平行加強進行取樣分析作業，以確保民眾及環境輻射安全。因 12 月 16 日起草樣碘-131 活度已低於調查基準，並逐漸穩定下降，故自 106 年 1 月起台電公司恢復至每週取樣一次，監測頻次將視環境監測結果適時調整。

二、原能會安全管制作業情形

本會對燃料完整性之安全管制作業可分為運轉期間燃料完整性監測、發現燃料受損之追蹤與管制、停機期間燃料檢查作業之追蹤與管制，以及對肇

因研判與檢討防範措施之管制等階段(參考下圖)，各階段之安全管制情形說明如下。



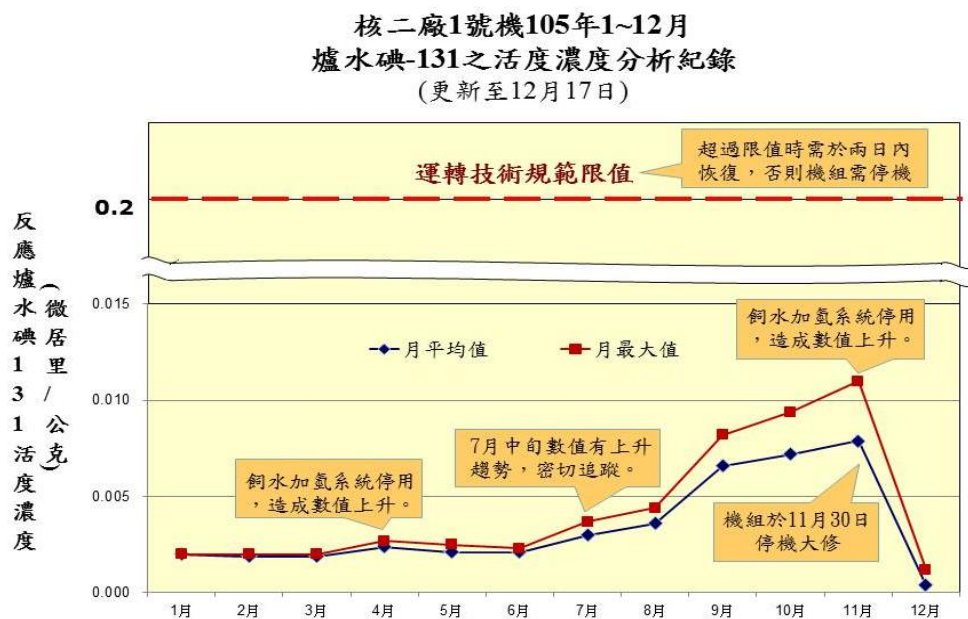
(一)運轉期間燃料完整性監測

平常機組運轉期間，台電公司已依本會要求，訂有運轉期間監測機制，可以藉由反應爐水及廢氣(offgas)活度定期取樣，以監測燃料護套是否有破損徵兆。本會平時則由駐廠視察員適時查證機組運轉期間監測參數是否有異常變化。

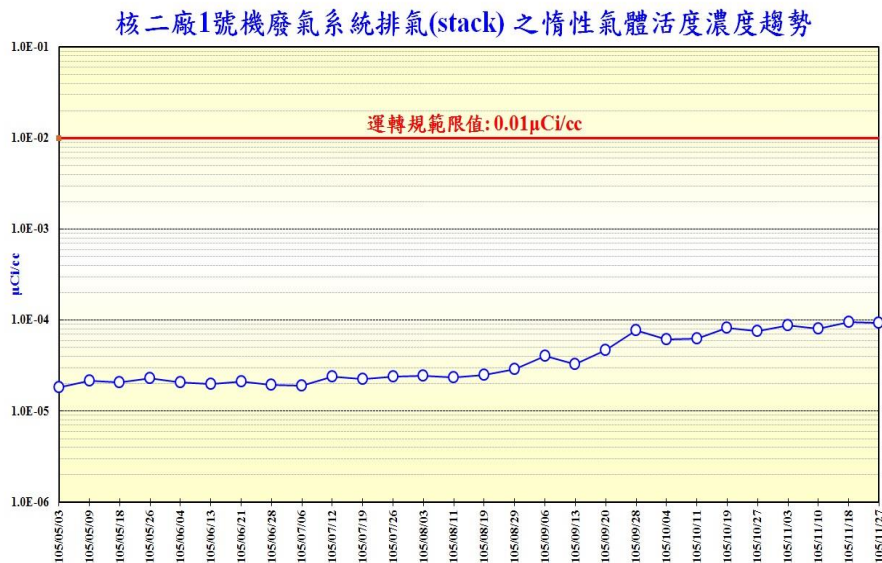
(二)發現燃料棒破損之追蹤與管制

核二廠1號機於去(105)年7月中旬初步研判爐心燃料棒護套可能有發生破損之情形後，本會除由駐廠視察員密切追蹤燃料完整性指標與廠房廢氣排放數值，並要求台電公司密切注意相關參數變化趨勢，依程序書監測評估及採取必要措施。同時持續注意電廠處理情形、燃料護套完整性相關參數變化趨勢與核電廠內及廠外環境監測資料。期

間，核二廠綜合更換控制棒佈局、廢氣總活度變化及廠家所提供之疑似洩漏燃料束所屬控制單元，研判護套洩漏燃料束位於控制棒 20-13 單元或周圍，於9月15日進行功率壓抑，將該控制棒保持在全入位置，以壓抑該可疑燃料束之功率，由結果顯示經功率壓抑後，爐水碘濃度上升趨勢確有緩和，電廠並依程序書減少非必要之功率升降，以及緩慢升降載運轉策略。由7月中旬至11月30日機組大修停機前之反應爐爐水及放射性廢氣排放活性各項監測數據顯示，均低於安全限值(如圖一、二)。



圖一 反應爐爐水碘-131活度濃度分析紀錄



圖二 廢氣系統排放活度濃度紀錄

(三)停機期間燃料檢查作業之追蹤與管制

1 號機於 105 年 11 月 30 日停機大修，停機後完成全部爐心 624 束燃料爐內啜吸檢查作業，發現 1 燃料束(K1H582)內燃料棒有破損跡象(位置為 20-09 控制單元中)，其餘 623 束則均無護套破損洩漏跡象。隨後電廠於 12 月 9 日依程序將該束燃料傳送至 1 號機用過燃料池，於 12 月 12 日開始由燃料廠家 AREVA 公司在用過燃料池邊進行目視及渦電流(Eddy Current)檢驗，以找出護套受損之燃料棒。經進行燃料束(K1H582)內全部 91 根燃料棒之渦電流檢測，確認僅 L07 位置有護套洩漏現象。核二廠已將受損之燃料棒取出後移至用過燃料池內之專用容器內儲放，並將鉛棒插入 L07 位置完成檢修，而修復後的燃料束(K1H582)則再經數次真空啜吸檢測，結果均顯示正常，確認該燃料束

中已無護套洩漏之燃料棒，同時該燃料束原規劃為此次大修退出爐心之燃料，因此貯存於用過燃料池中，不再使用；前述作業期間，本會均派員查證相關作業執行情形，確認已找出破損燃料棒，並將其取出置放於專用容器內，而修復後之原燃料束則依規劃貯存於用過燃料池中。本會並於去年 12 月 15 日召開會議，了解台電公司大修檢查情形與後續檢討改善措施，並要求台電公司針對本案運轉期間監測及處理措施、大修停機時之檢查作業、肇因探討、對廠內、外環境影響，以及防範改善措施等提出完整報告。

(四)專案報告審查與追蹤

本會聘請專家 3 名與會內同仁組成立專案小組，先於今年 1 月 18 日召開說明會議，由專案小組聽取台電公司對全案辦理之最新情形，並針對後續專案報告應包含內容與補充說明事項提出意見，要求台電公司納入專案報告。之後台電公司於 3 月 1 日提出專案報告後，由專案小組就台電公司所提專案報告進行嚴格審查，經召開 3 次審查會議，共提出 24 項審查意見，相關審查情形詳見下節。

貳、台電公司專案報告審查情形

台電公司專案報告載明運轉期間監測及處理措施、大修期間檢查作業及結果、肇因分析、對廠區內外環境之影響說明，以及後續處理改善措施等項，其中有關運轉期間監測及處理措施及大修期間檢查作

業及結果部分，本會已於作業期間進行視察確認。本節則分別說明本會專案小組對台電公司報告有關「肇因分析」、「廠內、外環境影響」及「後續防範改善措施」等項內容之審查情形。

一、肇因分析

台電公司說明燃料護套破損肇因可歸類為「燃料相關」及「運轉/維護相關」兩類。燃料相關的原因包括：護套氫化、氫脆增強燃料丸與護套交互作用(PCI)、焊道腐蝕、格架／燃料棒磨損、燃料密化或燃料丸漏填之護套塌陷、燃料護套二次劣化、燃料護套高燃耗腐蝕洩漏、增強格架陰影腐蝕(ESSC)、其它未偵測到的製造缺陷等。運轉/維護相關的原因則包括：燃料丸與護套交互作用(PCI)、爐屑磨損、變態沸騰或乾涸、過高燃料中心溫度、過高內壓造成之應力與應變、積垢誘發護套局部腐蝕(CILC)等。經電廠查核機組的運轉歷程、控制棒抽插紀錄、反應爐功率遞增速率(Ramping)紀錄、爐心相關運轉熱限值紀錄及燃料節點功率等，均符合規定，因此研判本次護套破損應與運轉無關。另台電公司說明由燃料廠家 AREVA 公司進行池邊檢驗及提出之肇因分析總結報告內容，由破損洩漏的型態及位置判斷指出，L07 燃料棒初始洩漏為間格器(Spacer) #5 下緣的小穿孔，其肇因為爐屑磨損(Debris Fretting)，此與 AREVA 公司及工業界之經驗一致，使用現代防爐屑過濾器之沸水式反應器燃料，爐屑主要係卡在燃料棒上部，鄰近雙相流區域之 Spacer 位置。總結報告中亦將「燃料相關」的各項因素逐一排除。

另檢查 L07 燃料棒發現有二次劣化之長開口型裂縫產生，此因核燃料劣化機制為一連串複雜而交互影響的過程，一旦護套初始缺陷(primary defect)形成，冷卻水(爐水)將自「初始洩漏區」的緊密裂縫處滲入護套內，之後受熱蒸發形成水氣，排擠部份氬氣而降低燃料丸與護套間之間隙熱傳導性，使燃料丸溫度增加並膨脹，進而對護套施加應力，造成護套裂縫加大。綜上，台電公司研判此次燃料護套破損之肇因為爐屑磨損(Debris Fretting)。

審查小組就台電公司所提專案報告進行審查，針對肇因分析研判提出相關審查提問 RAI-AR-01、RAI-AR-02、RAI-AR-03、RAI-AR-04、RAI-AR-05、RAI-AR-07、RAI-AR-09、RAI-AR-010、RAI-AR-011 及 RAI-I-05，分別說明如下：

審查提問 RAI-AR-01，為了解燃料受損是否源自 PCI，要求台電公司提供受損燃料束(K1H582)所在控制單元及其北邊鄰近控制單元相關資料，包括(1)在前次運轉週期的控制棒佈局歷史(含更換時間)，並就燃料可靠度圖中的各尖峰出現時間討論是否與本案有關；(2)K1H582 在前述控制棒抽動前後的功率及軸向功率分布情形；(3) 燃料可靠度(FRI)圖中尖峰的對應爐水及廢氣活度資料。台電公司提供相關資料並說明由該資料可看出該週期早期 FRI 的兩個尖峰與控制棒佈局更換時間無關，而由廢氣資料看來，燃料在早期就可能有受損，也與控制棒佈局更換時間無關。再加上在早期 FRI 的尖峰處，控制棒抽動前後的功率及軸向功率分布均控制良好，故可

排除 PCI 為燃料受損肇因，答覆內容經審查可以接受。

審查提問 RAI-AR-02 及 RAI-AR-04，要求台電公司註明 L07 燃料棒之各疑似缺陷(defects)大約位置、大小、長度、照片以及附近格架、控制棒間之相對位置，並補充 L07 燃料棒環向裂縫詳細資料，與軸向裂縫相對位置關係。台電公司已依意見提供完整的缺陷大約位置、大小、長度以及附近格架、控制棒間之相對位置。經審查台電公司報告及回覆說明內容，對於確定原始缺陷為爐屑磨損造成之孔洞，其他軸向裂縫及環狀裂痕為二次缺陷，由此推定受損肇因為爐屑磨損，答覆內容經審查可以接受。

審查提問 RAI-AR-03，為瞭解在 spacer #3 附近的軸向裂縫特性，要求台電公司提供 L07 燃料棒在 spacer #3 附近的裂縫檢查結果影像紀錄。台電公司提供影像，可看出該裂縫有二次劣化缺陷的裂縫特徵，台電公司說明該缺陷非初始裂縫，答覆內容經審查可以接受。

審查提問 RAI-AR-05，要求台電公司提供 L07 燃料棒在裂縫處疑似燃料丸流失的影像紀錄。台電公司答覆說明提供 L07 燃料棒在軸向裂縫處疑似燃料丸流失(washout)的照片，確可發現內部燃料有局部流失，表示爐心迷離鈾會增加，經審查答覆內容可以接受。有關爐心迷離鈾之主要影響為造成廢氣總活度增加，詳參 RAI-II-02 之審查內容。

審查提問 RAI-I-05，要求台電公司就專案報告內容對相關缺陷描述用詞或編號不一致部分提出澄清修正。台電公司答覆說明內容修正，答覆內容經

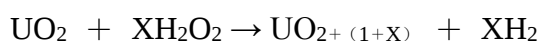
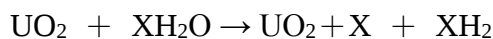
審查可以接受。

審查提問 RAI-AR-07，要求台電公司與核二廠一號機第 22 週期爐屑磨損情形進行比對。台電公司提供比對資料，二案例破損均為爐屑造成，惟第 22 週期燃料棒位置靠近控制棒，本案位置則遠離控制棒，初期壓抑效果呈現略有不同，答覆內容經審查可以接受。

審查提問RAI-AR-09，要求台電公司確認造成燃料破損之原因是否確為爐屑磨損，並提供佐證。台電公司答覆說明依據AREVA公司對本案肇因分析總結報告內容，本次燃料護套洩漏之原因確認為爐屑磨損，L07燃料棒 Spacer #5附近發現之小穿孔研判為初始缺陷，其肇因為爐屑磨損，與AREVA公司及工業界之經驗一致，使用現代防爐屑過濾器之BWR燃料，爐屑主要卡在燃料棒上部鄰近雙相流區域之Spacer所在位置。本次護套洩漏為燃料束底部繫板使用FUELGUARD™過濾器後第一次發生之爐屑磨損導致護套洩漏事件。軸向裂縫則是銦合金護套發生二次劣化(secondary defect)之指示，與燃料棒功率遞增歷程相關。另一方面，二次劣化之環狀裂痕，因容易出現在初始缺陷附近，且通常距離不會太遠，與燃料棒功率遞增歷程相關程度較小。因此，AREVA公司認為，本次渦電流檢測出在Span#2中間之穿孔應為護套氫化所致之二次劣化穿孔。經比對Spacer #5下方由爐屑磨損造成之主要缺陷，該穿孔跡象屬於尚未完全劣化的二次缺陷，答覆內容經審查可以接受。

審查提問 RAI-AR-10，要求台電公司提供軸向裂縫起始及終止點與爐屑磨損缺陷相對位置，並闡述主要缺陷。台電公司答覆說明軸向裂縫如 RAI-AR-02 之圖示，主要缺陷說明如 RAI-AR-09 之答覆內容。經審查比對台電公司提供之燃料束示意圖與 K1H582 L07 之燃料護套洩漏情形彙整圖及 RAI-AR-09 爐屑磨損佐證資料，答覆內容經審查可以接受。

審查提問RAI-AR-11，要求台電公司說明主要缺陷(Primary Defect)及次要缺陷(Secondary Defect)生成關係。台電公司答覆AREVA公司本案總結報告指出，L07燃料棒初始洩漏區推測應為spacer #5附近的小穿孔，其肇因為爐屑磨損，並已有二次劣化之長開口型裂縫產生。因核燃料護套一旦初始缺陷(primary defect)形成，冷卻水(爐水)將自「初始洩漏區」的緊密裂縫處滲入護套內，受熱蒸發形成水氣，排擠部份氬氣，降低燃料丸與護套間之熱傳導性，導致燃料丸溫度升高並膨脹，施加應力作用於護套，造成護套裂縫加大，更多的冷卻水進入護套內，提供更多額外水氣，導致二氧化鈾(UO₂)與水氣產生局部氧化作用，形成較鬆散之「高氧相氧化鈾」並釋出氬氣，方程式如下：



「高氧相氧化鈾」熱傳導能力降低，燃料丸溫度升高膨脹，熱應變增加，作用於護套之局部應力因而增加。當護套承受之局部應力超過臨界應力或材

料破裂韌性時，初始洩漏區的裂縫便會開始生長與擴大。此外，鋳合金護套穿孔處內壁與水氣作用局部氧化，生成氧化膜，釋出之氫氣($\text{Zr} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZrO} + \text{H}_2$)再被鋳合金護套吸收。當鋳合金護套氫含量超過其溶解限值時，即以氫化鋳($\text{Zr} + \text{H}_2 \rightarrow \text{ZrH}_2$)析出，導致鋳合金護套脆化劣化。於適當條件下，冷卻水持續侵入護套，與燃料丸及鋳合金交互作用，缺陷進一步劣化延伸形成「軸向裂縫」及於距離初始缺陷不遠處生成「環狀裂痕」等二次缺陷，答覆內容經審查可以接受。

針對爐屑並未尋獲，機組再起動後是否會發生同樣狀況的問題，台電公司答覆說明該燃料於大修進行燃料檢查時未能發現卡在燃料的爐屑，其原因推斷可能是爐屑造成燃料破損後，因爐心水流擾動被帶離燃料及爐心。此現象與國際核能工業界在破損燃料棒進行檢查時大都未發現爐屑之狀況一致。而核二廠有冷凝水系統的除礦過濾器及反應爐爐水淨化系統的過濾式除礦器、燃料束底部繫板亦安裝有高效能爐屑過濾器等，可將該等爐屑濾除，避免再進入燃料區域。台電公司認為未發現的爐屑對於燃料完整性不會造成影響。另台電公司已於大修期間針對爐底區域進行清查及錄影，並未發現有爐屑。台電公司並提出核二廠於1號機週期17及2號機週期18，以及國外電廠發現燃料因爐屑磨損而致護套洩漏之案例，說明於檢查過程亦未找到爐屑，於下週期運轉時燃料完整性正常，顯示未發現的爐屑於機組再起動不會造成燃料護套磨損洩漏。若因該爐屑未被移除而於運轉時進入燃料區，又導致燃料

護套洩漏時，將依照核二廠已修訂更嚴格的「強化護套洩漏監測機制及行動對策」，及早發現與進行功率壓抑，並加強環境輻射狀況監測，必要時停機以避免護套洩漏惡化。此部分就實際狀況而言，雖然發生機率很低，然確實很難保證一定不會發生，就燃料安全而言，台電公司已依本會要求採取更保守積極的監測與行動措施，若萬一發生時，仍可及時發現並採取對應措施，確保有效降低對環境的影響。

綜合專案小組對台電公司專案報告之肇因分析及對審查提問答覆內容審查結果，檢視核二廠1號機反應爐運轉歷程及核燃料完整性相關監測數據，台電公司研判本次護套洩漏應與運轉無關之論述合理，可以接受。另台電公司根據AREVA公司池邊目視檢查及渦電流檢測結果，檢視缺陷破損型態及位置，判定L07燃料棒Spacer 5下緣小穿孔為初始缺陷，破損肇因判斷為爐屑磨損(Debris Fretting)引起，以及其他軸向裂紋及環狀裂痕等為冷卻水自初始洩漏區滲入護套，與燃料丸及鋁合金護套交互作用，於初始缺陷上下方所形成之二次缺陷等研判結果，可以接受。台電公司報告對於肇因分析已提出適當說明及佐證資料，破損肇因研判為爐屑磨損之結果，經審查可以接受。

二、對廠區內外環境之影響說明

台電公司報告中說明 105 年 10 月 3 日至 12 月 31 日間，核二廠廠區監測區所設 10 個 24 小時連續輻射監測站之直接輻射劑量率監測資料顯示，各監測站之監測結果均無異常。

台電公司並提出核二廠 105 年 1 月至 9 月放射性廢氣排放實績評估之廠外民眾最大個人有效劑量為 0.00434 毫西弗，最大個人器官等價劑量為 0.00207 毫西弗，均低於「核能電廠環境輻射劑量設計規範」設計限值(0.05 毫西弗/機組-年)與法規限值。另採保守評估策略，假設自 10 月 1 日起，1 號機以排氣輻射偵測器警報設定值運轉至 11 月 30 日，合計 105 年度對民眾之最大個人有效劑量約為 0.01671 毫西弗，對民眾之影響仍低於設計限值與法規限值。

在環境監測部份，在廠區草樣所測得碘-131 核種最高值為 11.3 貝克/公斤·濕樣，未超過查驗基準(20 貝克/公斤·濕樣)。另外本次於 12 月 5 日大修初期在廠界環境東北東方向 GR 202 監測點發現有環境草樣超過『環境試樣放射性分析預警基準』之調查基準(4 貝克/公斤·濕樣)乙項，台電公司說明因該地區附近並無牧場，該草樣與人類之食物鏈無關，對一般民眾健康安全並無任何不良之影響，如採取保守評估碘-131 和核種之廢氣排放量對關鍵群體之影響時，評估值均遠低於電廠之設計與法規限值。

該量測值已於 12 月中旬低於調查基準，並於 106 年 1 月 16 日降低至小於計測設備的最低可測值(Minimum Detectable Amount，簡稱 MDA)。

為有效避免放射性產物穿越多重屏障而釋出到廠房或廠外環境，核二廠亦於大修中進行高/低壓汽機及汽機廠房蒸汽管路各部份重要組件，包含高壓汽機接合面、汽封、管、閥之修整與迫緊裝置之改善更新工作等，防止蒸

汽管路發生洩漏而導致廠房內部及廠界環境局部放射性增加。

審查小組就台電公司所提專案報告進行審查，針對廠區內外環境之影響部分提出審查提問 RAI-AR-08 及 RAI-AR-12，分別說明如下：

審查提問 RAI-AR-08，要求台電公司說明護套洩漏燃料棒後續管理及安全作為。台電公司答覆說明本次檢查出之 L07 洩漏燃料棒，在 AREVA 公司之技術人員完成該棒之目視檢查及渦電流檢測，確認供肇因判斷用之數據、影像資料均充足後，已移入核二廠一號機用過燃料池之護套洩漏燃料專屬提籃中存放，因其內幾乎已無放射性氣體殘留，置於用過燃料池底存放並無輻射防護之安全疑慮。此外，核二廠用過燃料池設計上有池水淨化系統，可濾除水中放射性雜質，且池水均定期取樣化驗以監測水質；用過燃料廠房並設置有區域輻射監測器及連續空氣取樣與連續空氣監測器，隨時監控廠房內輻射狀況；燃料廠房排氣時，均經高效率微粒空氣過濾器及高效率活性碳過濾器濾除放射性物質，再經線上輻射監測器監測確認無疑慮後，再予以排氣，對廠房內工作人員及廠外民眾皆無影響，答覆內容經審查可以接受。

審查提問RAI-AR-12，要求台電公司就廠內外環境影響部分補充說明廠內環境監測情形及數據，並提供較長的環境監測數據趨勢以及說明。台電公司答覆已再提供105年10月3日至12月31日期間核二廠廠區監測站之直接輻射劑量率，監測結果均無異常。另以輻射偵測器警報設定值評估1號機自105年10月1日運轉至11月30日，105年度對民眾之最大個人有效劑量約為

0.01671 毫西弗，低於設計限值(0.05毫西弗/機組年)。廠區草樣於105年12月13日在開關場監測點測得最高值為11.3貝克/公斤·濕樣，未超過調查基準(150貝克/公斤·濕樣)。台電公司另提供105年1月至106年2月廠界環境草樣監測結果及趨勢分析說明，其中105年12月5日在東北東方向 GR 202監測點測得最高值為5.9貝克/公斤·濕樣，超過『環境試樣放射性分析預警基準』之調查基準(4貝克/公斤·濕樣)，經電廠採取對應行動與經歷之時間衰變後，該量測值於12月中旬已低於查驗標準，並於106年1月16日降低至小於計測之最低可測值。

審查小組要求台電公司再提供 105 年 1 月至 106 年 2 月 6 日廠內監測區直接輻射劑量率之數據，並以 105 年 10 月-12 月實際放射性廢氣排放值進行廠外民眾劑量評估，及提出 105 年劑量評估結果。另於報告中補充說明針對環測草樣超過調查基準時之因應行動措施。台電公司答覆已提供 105 年 1 月至 106 年 2 月間廠內監測區直接輻射劑量率之趨勢圖，並以 105 年 10 月至 12 月實際放射性廢氣排放值評估民眾劑量，1、2 號機民眾之關鍵群體有效劑量分別為 2.11 微西弗與 9.53×10^{-4} 微西弗，另 105 年全年核二廠 2 部機惰性氣體排放造成民眾之關鍵群體有效劑量為 0.00647 毫西弗；放射性碘、氚及微粒等廢氣造成民眾之關鍵群體器官等價劑量為 0.0096 毫西弗，均遠低於法規設計限值(有效劑量：0.1 毫西弗/2 部機·年；等價劑量：0.3 毫西弗/2 部機·年)。

台電公司並說明環境草樣超過調查基準時，將採取之因應行動措施，包括(1)調查環境試樣超過調查基準原因；(2)若無法立即確認肇因或阻斷放射源，影響之機組應立即採取包括必要時停機之措施，以使環境試樣低於調查基準；(3)若確認原因則針對排放源進行維修止漏或暫時封堵工作；(4)若研判係與燃料棒護套洩漏有關，則依據本次燃料護套洩漏之檢討改進措施，執行相對之因應措施；(5)加強廠區與環境試樣取樣之監測頻度後依「核二廠燃料護套洩漏專案監測區及環境輻射加強監測計畫」執行，確認受影響之程度與範圍；(6)依據環境試樣取樣分析數據及廢氣排放之放射性核種活度，評估對民眾及環境之影響等因應措施，答覆內容經審查可以接受，台電公司並依要求將相關監測數據及劑量評估結果說明納入報告中。

綜合專案小組對台電公司報告內容及審查提問答覆內容與報告修訂結果，經評估計算本次燃料破損對廠內外人員造成之劑量，仍低於法規限值並有相當安全餘裕，核二廠亦已提出更嚴謹保守的因應措施，以儘量降低對環境之影響，經審查可以接受。

三、防範改善措施

台電公司就核二廠 1 號機近年所發生之燃料護套破損洩漏事件，彙整探究主要肇因包括「燃料丸表面製造缺陷」誘發燃料護套洩漏之非典型 PCI 護套洩漏及「爐屑磨損」兩項，台電公司依本會要求已採行下列強化改善措施：

1. 針對「燃料丸表面製造缺陷」已採行之具體強化對策：

- (1) 由燃料廠家 AREVA 公司自 93 年 6 月起，全面改採用較嚴格之燃料丸表面製造缺陷接受準則及檢驗規範。
- (2) 2 號機自週期 22(100 年 11 月)、1 號機則自週期 23(101 年 6 月)起，開始採用 FS-10 新型設計之燃料丸，因其特殊之邊緣削角(chamfer)設計，能有效抑止燃料丸表面缺陷所導致之非典型 PCI。
- (3) 自 96 年 2 月起迄今，反應爐升載過程均依燃料公司建議，採用最保守的「緩慢升載策略(soft operation)」，以充分釋放燃料丸與護套間之應力。
- (4) 減少非計畫性之維護、檢修作業、並調整控制棒佈局至最佳化，盡量減少不必要的升降載。此外並更新兩部機組的循環水泵設備，提升海水冷卻效率，減少夏天因海水排放高溫降載次數。

2. 針對「爐屑磨損」具體強化對策：

(1) 過去已採行的措施

持續依核二廠防範異物入侵程序書 708.1.1 執行並強化管制作為。

(2) 本次大修採取強化措施

- a. 針對爐底爐屑狀況進行清查及錄影，過程僅觀察到微小銹垢顆粒 (Crud particulates)與銹垢剝離的痕跡等，經目視檢查人員判定沒有足堪紀錄的異常指示。

- b. 爐心相關之設備，其開口於作業前、後均執行攝/錄影，俾檢查及管控有無零件遺失致異物入侵反應爐重要系統。
- c. 爐心無工作進行時，上方將以帆布覆蓋保護，避免異物從爐心上方掉入。

(3) 持續改善項目

- a. 自 2 號機週期 21(99 年 3 月)起所使用的新燃料，均採用高效能的爐屑過濾底部繫板(FUELGUARD™ Debris Filter)，其濾除效率為 90%，已較舊式小孔式底部繫板之濾除效率(約 50%)大幅提高。目前兩部機已全數使用高效能的爐屑過濾底部繫板燃料設計。
- b. 加強新燃料接收檢查，以防止有安全疑慮(夾雜爐屑)的燃料置入爐心。參考國內外有關新燃料接收檢查的典範案例及燃料廠家建議，提昇新燃料接收檢查成效。
- c. 參考國內外有關吊卸作業的典範案例及燃料廠家建議，提升廠外和廠內的核燃料吊卸作業品質。
- d. 為防止異物入侵系統，降低燃料完整性受損風險，核二廠實施下列相關管制措施，包括：建立燃料廠房 3 樓防止異物入侵措施、落實大修中防止異物入侵查核措施，具體內容已列入 708.1.1 程序書。

(4) 新增強化項目：

台電公司根據本次燃料護套洩漏及廢氣流量偏高經驗，針對曾發

生護套洩漏之爐心情況，重新檢討強化程序書及燃料可靠度指標(FRI)

相關因應行動之保守性，俾及早發現護套異狀，並依燃料護套洩漏各

行動階段準則，採相關行動措施因應。其提出之各階段行動標準如下

表：

類別 行動階段	潔淨的爐心	上一週期曾發生護套洩漏之爐心
Level 1 疑似護套洩漏	• $FRI \geq 300 \mu\text{Ci/sec}$。 • 其它證據顯示燃料護套有洩漏發生。	• 碘-131、Xe-133 活度上升為穩態值之兩倍。 • Xe-138/Xe-133 活度比值小於 100。 • 六種放射性廢氣核種總活度超過 $1,000 \mu\text{Ci/sec}^3$。 • $FRI \geq 300 \mu\text{Ci/sec}$。
Level 2 爐水活度偏高	• $FRI \geq 5,000 \mu\text{Ci/sec}$。	• 六種放射性廢氣核種總活度超過 $10,000 \mu\text{Ci/sec}^3$。 • 碘-131 等價劑量超過 $0.001 \mu\text{Ci/gm}^3$。
Level 3 評估是否降載運轉	• 六種放射性廢氣核種總活度超過 $20,000 \mu\text{Ci/sec}$。	• 六種放射性廢氣核種總活度超過 $50,000 \mu\text{Ci/sec}^3$。 • 碘-131 等價劑量超過運轉規範限值的 20%。(0.04 $\mu\text{Ci/gm}$) • 惰性氣體總排釋率超過運轉規範限值的 20%。(58,000 $\mu\text{Ci/sec}$)
Level 4 評估是否提前大修	• 六種放射性廢氣核種總活度超過 $50,000 \mu\text{Ci/sec}$。	
Level 5 評估是否立即停機	• 六種放射性廢氣核種總活度超過 $145,000 \mu\text{Ci/sec}$。	

審查小組就專案報告內容進行審查，提出相關審查提問RAI-AR-06、RAI-I-01、RAI-I-02、RAI-I-03、RAI-I-04、RAI-I-05、RAI-I-06、RAI-I-07、

RAI-I-08、RAI-I-09、RAI-I-10、RAI-II-01及RAI-II-02，分別說明如下：

審查提問 RAI-AR-06，針對日本核電廠爐屑破損率較他國偏低，與其傳統注重潔淨文化有關，要求台電公司應學習引進其乾淨清潔的文化及具體做法，經由人員訓練與教育方式，深化為日常之習慣。台電公司答覆說明核二廠與日本中國電力公司島根核電廠為姊妹廠，106 年下半年島根核電廠將派員來核二廠進行技術交流訪問，核二廠已請島根核電廠將其防範異物入侵(FME)的做法、維持廠房乾淨清潔之文化及相關之人員訓練與教育方式，列為本年技術交流訪問之重點項目，答覆內容經審查可以接受。

專案小組針對如何從以往及本次經驗，研議及早發現燃料破損與採取對應措施，以做為如何及早發現燃料可能發生破損與決定燃料何時開始功率壓抑及提早在適當時機採取行動，避免受損燃料持續劣化，抑低運轉期間以及大修汽機等設備開蓋與拆修時廢氣(液)排放的輻射強度，提出審查提問 RAI-I-01、RAI-I-02 及 RAI-I-03 等，要求台電公司(1) 說明 FRI 的定義及其與燃料受損數目及破口大小的關係；(2)提供過去核二燃料爐屑磨損案例之相關的功率歷史、FRI、Xe-133、Xe-138/133 比值、6 種廢氣總活度、I-131 等的歷史資料圖形，以瞭解燃料受損後之劣化與它們數值的關係，作為監視措施的參考；(3)由核二廠 1 號機第 25 週期燃料 FRI 及廢氣相關參數變化情形討論燃料可能開始受損的時間，以及可能開始劣化的時間；(4)提供過去曾執行過燃料受損後功率壓抑的經驗，討論其是否有效，以及說明目前國外電廠在燃料受損後是否還進行功率壓抑以及其時機及方法；(5)所提對於降載

或停機之行動標準，如爐水碘-131 等價劑量需超過 $0.04 \mu\text{Ci/gm}$ ，然依本次事件經驗，爐水碘-131 等價劑量最高值約 $0.01 \mu\text{Ci/gm}$ ，離標準尚遠卻已有環境輻射升高現象。請再就本次經驗(包括 Sum-6、惰性氣體總排放率、現場設備狀況及已造成廠區草樣達調查基準)重新研提更保守嚴謹之停機行動標準，同時針對降載運轉乙項，請台電重新研議更適切的作法。針對第(1)項，台電公司答覆說明 FRI 之定義為參考美國電力研究協會(EPRI)發展並經世界核能協會(WANO)採用的計算公式，主要是以氙-133、氙-135、氙-138 等三種同位素估算自燃料棒釋出的分裂氣體量。並說明一般以 FRI 大於 300 時表示燃料可能有護套洩漏的跡象，另已提供 FRI 與缺陷大小及數量的關係圖。針對第(2)項，台電公司提供兩部機共五個有爐屑磨損造成護套洩漏及三個燃料完整週期的相關運轉實績資料，同時依審查提問要求於燃料營運實績表中，增加核二廠各週期 Xe-133 活度上升達新標準之日期資料，並說明由新判斷標準的 FRI、I-131、6 種廢氣總活度及 Xe-133 四種指標，對於各週期是否有護套洩漏或燃料完整性，能夠更正確地判斷，且無誤判情形，甚至可提早偵知燃料出現輕微瑕疵的時機，提供未來運轉時一套更適當的監測機制。針對第(3)項，台電公司提供第 25 週期 FRI 及廢氣 Xe-133 及 I-131 之全週期變化圖，台電公司過去運轉期間判斷燃料是否發生護套洩漏均以 FRI 值作為唯一之判斷依據，而依本次經驗，未來將再加入 Xe-133 活度上升為穩態值之二倍(持續達一週以上)及碘-131 作為輔助判斷燃料完整性之依據。

若依此新判斷標準，核二廠 1 號機則於 105 年 3 月 18 日至 105 年 3 月 24 日期間，Xe-133 活度在 43~49 $\mu\text{Ci/sec}$ 間變動時，認定此時燃料護套已發生洩漏，較原判斷準則提早了三個多月。同時，仿照 Xe-133 的監視作法，新增碘-131 等價劑量較正常平均值上升達 0.001 $\mu\text{Ci/gm}$ 作為輔助判斷燃料是否發生劣化情況之判斷依據，則於 105 年 7 月 21 日，已進入二階行動階段。

台電公司並依審查意見提供 1 號機第 25 週期之六種廢氣總活度及 Xe-133 活度趨勢圖，其於 105 年 1 月 6 日之紀錄 SJAE 廢氣活度達到燃料護套破損洩漏之一階行動門檻且持續一週(此時 Xe-133 活度上升為穩定運轉時 1.5 倍以上)，依新標準將認定此時燃料護套已發生洩漏，較使用原始判斷準則提早 6 個多月。同時，六種廢氣總活度在 105 年 7 月 18 日(23530.8 $\mu\text{Ci/sec}$)達到新準則之二階行動階段門檻值，應採取二階行動因應。台電公司護套洩漏判斷準則修訂後，將從過去僅以 FRI 值之高低判斷燃料是否發生護套洩漏之依據，改為再加入 Xe-133 活度/碘-131 活度上升為穩態值之二倍、Xe-138/Xe-133 比值小於 100 以及六種放射性核種總活度(Sum-6)大於 1000 $\mu\text{Ci/sec}$ (此項指標需加上 Xe-133 活度上升大於 50%才視為有效)等項任一存在且持續達一週以上時之準則，作為輔助判斷燃料完整性之依據。依前述多項準則重新檢視 1 號機第 25 週期燃料護套洩漏事件，以 Xe-133 活度或六種廢氣總活度(Sum-6)大於 1,000 $\mu\text{Ci/sec}$ 且 Xe-133 活度上升大於 50%之新標準，將較原始判斷準則分別提早了 4 個月及 6 個月即判定燃料已發生輕微瑕

疵，其他如碘-131 活度、Xe-138/Xe-133 比值，則新舊準則並無明顯差異。

針對第(4)項，台電公司提供核二廠過去兩部機共 7 次規模不等之功率壓抑測試經驗，其中 5 次為有效或部份有效壓抑；在國外經驗部分，台電公司提供五個國外與核二廠同型之 BWR-6 電廠功率壓抑經驗，其中 4 個有效，1 個無效。台電公司也列舉了壓抑測試的一些負面作用需要考慮，但仍認為功率壓抑測試有其效益。另外，針對執行功率壓抑測試之時機，台電公司說明參考國外同型電廠(Cofrentes、KKL 及 Perry 等電廠)，大多數皆在發現護套洩漏燃料後的 1.5 至 3 個月內進行第一次的功率壓抑測試，為保守考量，核二廠未來將護套洩漏後執行功率壓抑測試之開始時間提前為約 1.5 個月。針對第(5)項，台電公司核二廠依 1 號機第 25 週期燃料護套洩漏事件經驗，額外增訂更嚴謹之停機行動標準，若發生(a)功率壓抑效果不如預期且 SJAЕ 廢氣活度或碘-131 等價劑量有持續上升趨勢，預期大修前將達到三/四階行動階段之標準；(b)燃料護套洩漏情況已進入二階行動階段達 1 個月仍無法定位出護套洩漏燃料位置，亦即無法進行功率壓抑；(c)六種廢氣總活度扣除穩態平均值後達 $25,000 \mu\text{Ci/sec}$ (50%三階行動階段門檻值)或碘-131 等價劑量扣除穩態平均值後達 $0.005 \mu\text{Ci/gm}$ (約 50%本次事件碘-131 等價劑量最高值)等任一狀況時，核二廠將召開 SORC 會議評估期中開蓋檢修時程，不再考慮降載運轉乙項，並聯繫燃料廠家來廠進行啜吸檢查，以機組停機方式防止燃料劣化。有關降載運轉乙項，台電公司答覆說明若功率壓抑測試後，可

成功定位出護套洩漏燃料並進行功率壓抑，應可有效防止護套洩漏燃料發生劣化，後續機組可恢復滿載運轉，除了爐心再填換分析報告中敘述的週期末遞降(Coastdown)運轉情況外，不會有降載運轉的疑慮；若功率壓抑效果不如預期，1 個月內無法回到一階行動準則以下，或於後續運轉期間發現護套洩漏燃料有劣化跡象時，將立即召開 SORC 會議決定機組期中停機時程，不會考慮降載運轉乙項，並聯繫燃料廠家來廠進行啜吸檢查，以機組停機方式防止燃料劣化。若因汽機廠房管路洩漏造成部分放射性分裂氣體外釋，並造成核二廠監測區環境試樣超過『核能電廠監測區試樣放射性分析行動基準與因應行動』之調查基準或廠界環境試樣超過『環境試樣放射性分析預警基準』之調查基準，則核二廠亦將依前述原則召開 SORC 會議討論期中開蓋檢修時程，以機組停機方式防止燃料劣化。綜合以上答覆內容，就修訂後之新判斷標準來看，包含 FRI、碘-131、Xe-133 活度、Xe-138/Xe-133 活度、六種放射性廢氣核種總活度等判斷項目。相關限制較過去嚴格，可提早發現護套洩漏，且範圍較廣，可以互相驗證，避免誤判。再由各行動階段對應之行動對策來看，一階行動除判斷可能肇因外，並利用 FLUX TILT 定位護套洩漏燃料，以及早進行功率壓制。若功率壓制效果不佳，則需進行非計劃性停機開蓋或提前大修，將受損燃料檢出。以上這些作為都較原準則能夠及早發現，並採取更為保守之對應措施，因此答覆內容經審查可以接受。

審查提問 RAI-I-04，要求台電公司本案破損燃料棒 L07 位置遠離控制棒，並與控制單元 20-09、20-13、24-09、24-13 保持約相對等距離，受控制影響可能相對減小。如能提供該燃料棒在 20-13 及 16-13 控制棒壓抑前後軸向功率變化，將有助釐清該燃料棒所處情境。台電公司答覆說明以先進爐心分析程式 SIMULATE-3 計算研究比較 L07 周邊不同控制棒插入，對該燃料棒功率壓抑效果，結果顯示並無顯著差異，亦可證實此次核二廠 1 號機所執行之定位及壓抑措施並無不當，答覆內容經審查可以接受。

審查提問 RAI-I-05，要求台電公司就如何防止破損燃料缺陷擴大提出防範措施/對策。台電公司答覆說明併於 RAI-I-03 回覆防止破損燃料缺陷擴大防範措施/對策，答覆內容經審查可以接受。

審查提問 RAI-I-06，針對報告之後續處理改善措施「燃料丸表面製造缺陷」與「爐屑磨損」所提具體強化對策內容，要求台電公司補充說明那些項目是因應本次事件新增之具體強化對策。台電公司答覆說明，「爐屑磨損」具體強化對策所提爐底爐屑狀況進行清查及錄影；爐心相關之設備開口作業前、後需執行攝/錄影，俾檢查及管控有無零件遺失致異物入侵反應爐重要系統；因應爐心長時間無工作進行時，上方以帆布覆蓋保護，避免異物從爐心上方掉入等三項措施為因應本次事件新增之強化對策，其餘皆為因應過去發生護套洩漏事件已採行之改善措施，並持續加強精進。答覆內容經審查可以接受。

審查提問 RAI-I-07，針對報告之後續處理改善措施，針對「爐屑磨損」之具體強化對策說明本次大修已針對爐底爐屑狀況進行清查，要求台電公司補充說明檢查範圍與釐清畫面各項跡證，並澄清此作業是否列入未來大修檢查項目。台電公司答覆說明於 1 號機第 25 次大修期間移出爐心中間區域的控制棒及其周邊各 4 束燃料，以配合進行爐底爐屑狀況清查，檢查範圍包含爐底周邊，檢查影像畫面，經奇異公司釐清為積垢與摩擦痕跡對燃料無影響，檢查結果並未發現異常。核二廠檢討未來每次大修將持續執行反應爐環狀區(反應爐冷卻水進入爐底前之區域)爐屑吸塵工作，並將爐底爐屑清查列入每次大修檢查項目，答覆內容經審查可以接受。

審查提問 RAI-I-08，要求台電公司澄清核二廠燃料使用之爐屑過濾底部繫板是否有進一步改善，以及台電公司對於防範異物入侵再進一步研議提出精進措施。台電公司答覆說明，因核二廠將於民國 110 年 12 月起陸續除役，且次週期所需燃料也已抵廠，經評估即使目前進行燃料採購作業，預計除役前仍無法將全爐心燃料全數更換為新型設計燃料，故除役前將不會採用第三代 FUELGUARD™ 底部繫板過濾器及頂部屏網之燃料。針對防止異物入侵之強化作為部分，台電公司答覆說明核二廠已要求各組清查可能造成異物入侵的維護工作，再根據工作內容提出具體防範異物入侵之措施，並要求核二廠檢驗員及承攬商落實執行，以達到全面性的防範異物入侵效果。管制作為已納入各相關維護程序書，並改善反應器廠房 7 樓防止異物入侵管制區、抑

壓池、燃料廠房 3 樓 FME 區擋板，以進一步抑低異物入侵機率。為降低異物入侵機率，防止異物對燃料造成影響，避免燃料護套洩漏事件發生，核二廠已將因應本次 1 號機第 25 週期燃料護套洩漏事件新增之防範爐屑磨損管制措施併同核二廠過去已採行的防範異物入侵(FME)作法彙整為『核二廠防範爐屑磨損精進方案』，同時將之納入全廠性的 FME 訓練課程教材，加強工作人員對調整後之防範爐屑磨損措施的認知，再藉由連續的訓練使防範異物入侵觀念成為工作人員行事的主臬，並於工作中落實執行，俾利燃料完整性之維護。核二廠亦全面更新反應器廠房 7 樓地面鋪設之 PE 布，搭配上上述 FME 區域的清潔工作以確保樓面的清潔，另外，核二廠已於 RAI-AR-06 答覆說明將再參酌日本電廠作法持續精進，答覆內容經審查可以接受，然本項除需從制度與硬體持續加強外，人員執行面之落實也是相當重要，本會亦將持續加強查核電廠執行情形。

審查提問 RAI-I-09，針對報告之後續處理改善措施，有關「爐屑磨損」之具體強化對策所述加強新燃料接收檢查乙項，要求台電公司說明新燃料檢查作業之改善內容。台電公司答覆說明，核二廠 1 號機第 26 週期新燃料檢查作業持續遵照程序書要求對每束新燃料束目視檢查，檢查合格之燃料束吊移至檢查後暫存區。本次新燃料檢查作業啟用燃料廠房新燃料窖作為燃料檢查後的暫存區，該燃料窖平時不使用時保持關閉。新燃料窖週邊設有圍籬，窖蓋開啟後，上方鋪設安全網，每束新燃料吊入新燃料窖之貯存格後，立即

於燃料上繫板套上防護塑膠套，以防止異物進入燃料束。燃料檢查作業結束即蓋回燃料窖蓋。窖蓋回蓋前，清理其密封墊片及窖口墊片接觸面以減少異物入侵可能並保持密封效果。新燃料上傳至反應器廠房上燃料池前，新燃料窖蓋開啟後，亦逐束確認每束燃料防護塑膠套完整無缺損、確認移除塑膠套後燃料上繫板無異物再吊移燃料束進行上傳作業。答覆內容經審查可以接受。

審查提問 RAI-I-10，針對報告之後續處理改善措施，有關所提燃料護套洩漏行動階段之修訂方案，要求台電公司檢討將環境試樣放射性分析納入指標，在檢測結果有異常時，可依各階段之行動標準，採取相對之作為。台電公司答覆說明，核能電廠設計具有多重屏障確保放射性分裂產物不會外釋至外界，即使在燃料護套洩漏存在情況下，既有的高效率的廢氣處理系統可有效濾除或滯留放射性分裂產物避免其擴散至外界，然而若因汽機廠房管路洩漏造成部分放射性分裂氣體外釋，並造成核二廠廠區監測區環境試樣超過『核能電廠監測區試樣放射性分析行動基準與因應行動』之調查基準或廠界環境試樣超過『環境試樣放射性分析預警基準』之調查基準，則核二廠亦將召開 SORC 會議評估是否需提前降載因應或期中開蓋檢修。台電公司並說明核二廠已制定「核二廠燃料護套洩漏專案監測區及環境輻射加強監測計畫」，將藉由燃料護套洩漏一階行動引動計畫。同時當行動階段提升時，核二廠立即針對監測區監測草樣之 4 站加強取樣分析，由每週 1~2 次調整為連

續 3 天每天 1 次，並依據取樣結果判斷啟動相關因應階段，另修訂前述監測計劃的土、草樣監測頻度，於第 2、3 階段之監測頻度原為每季者調整為每月(每週監測頻度部分維持不變)，答覆內容經審查可以接受。

審查提問 RAI-II-01，要求台電公司針對後續改善措施，建議可採深度防禦概念敘述，將所有可能防止發生 primary defect 之策略放在第一層，第二層策略則為防止和延後 secondary defect 的發生。台電公司答覆說明將先由燃料製造端（如加強設計、製造、運輸、檢查）及電廠運轉端（保守昇降載策略、水質控制、廢氣活度控制）排除可能造成破損因子。針對造成破損最大主因爐屑磨損採深度防禦多層防護圍堵概念。首先制定嚴密措施防範新異物由外面入侵系統，針對系統可能殘留異物進行偵查和移除，如仍有異物可藉燃料元件底部過濾裝置補捉。同時核二廠積極研擬更嚴格的燃料護套洩漏監測機制，以及燃料護套洩漏後之防止及延緩發生二次劣化的行動措施。另外，考量燃料護套洩漏事件耦合蒸汽邊界完整性不佳對於核二廠監測區及環境的影響，核二廠也擬妥『核二廠燃料護套洩漏專案監測區及環境輻射加強監測計畫』，一旦燃料發生輕微瑕疵，即啟動計畫中強化監測作為，密切監控燃料護套洩漏事件對於核二廠監測區及環境的潛在性影響，答覆內容經審查可以接受。

審查提問 RAI-II-02，要求台電公司說明以 L07 破損情形，剝落碎屑之影響為何。台電公司答覆說明經初步檢視 L07 護套洩漏燃料棒表面雖有軸

向裂縫等二次劣化現象，但各裂紋表面均屬平整，無剝落碎屑入侵爐心的風險；自軸向裂縫中逸出至爐心的鈾燃料未來則將以迷離鈾的形式，持續對六種廢氣核種之活度產生影響，預期 1 號機第 26 週期起動滿載後的六種廢氣總活度將較以往略高，亦即爐心六種廢氣總活度背景值較高。儘管如此，核二廠原設計即有之廢氣處理系統仍有充分能力予以處理並抑低其系統末端廢氣活度至最小，迷離鈾的存在對燃料的完整性並無實質威脅。另在 Span#2、#7 中發現的環狀裂痕，並沒有觀察到任何剝離跡象；而在 Span#5 上表面觀察到的摩擦痕跡，則是在護套洩漏燃料棒抽離燃料束過程中形成，經摩擦掉落的物質均將落在燃料準備機上，而在之後被濾除。護套洩漏燃料棒在檢修後已移往護套洩漏燃料提籃存放，整體而言對爐心無影響，答覆內容經審查可以接受。

台電公司在此週期中，均按照程序書 1032 處理燃料受損現象。該程序書之核燃料受損對策之各個行動階段，一、二階行動階段係以燃料可靠度指標數值(FRI)進行判定，三、四階行動階段則改採六種放射性廢氣總活度為標準。本週期依上述準則，FRI 僅達到一階行動階段，且離二階行動階段尚遠，惟一號機本週期末六種廢氣總活度最高已達 46,455 $\mu\text{Ci/sec}$ ，接近三階行動階段門檻之 50,000 $\mu\text{Ci/sec}$ 。為提早因應受損燃料可能的劣化現象，以減少可能的輻射洩漏，本會要求核二廠重新檢討及修訂現行核燃料受損對策程序書之各階段行動判斷標準，以及對應之行動對策。

綜合專案小組對報告修訂內容及台電公司對審查提問答覆之審查結果，台電公司已採取較過去更為嚴格保守且範圍更廣之判斷標準，可提早發現護套洩漏及避免誤判。在各階段行動對策來看，亦已採取更保守之措施，經詳細審查台電公司提出之新版核燃料受損對策程序書之各階段行動標準，確能提早因應受損燃料劣化的可能性，經審查可以接受。

至於防範爐屑磨損部分，核工業界雖以燃料零破損為目標，使得因製造及運轉造成破損相較雖有大幅降低，但因爐屑造成破損時有所聞。依據核能發電協會(Institute of Nuclear Power Operations, INPO)統計資料，2015 年美國 34 座沸水式核能機組共發生 22 件燃料護套洩漏事件；而 2017 年 3 月止，美國 9 座核能電廠(其中有 6 座為沸水式核能電廠)發生燃料護套洩漏事件。核二廠歷年破損亦大部分由爐屑造成，可見在改善製造及運轉問題後，爐屑已成為核工業界防範燃料破損困擾之共同課題。經本事件檢討，台電公司亦已更嚴密的防止異物入侵措施。日本核電廠因爐屑造成之燃料破損率較他國為低，這應與他們傳統潔淨文化有關，本會亦督促台電公司應藉由引進日本核電廠乾淨清潔的文化及具體做法，經由人員訓練與教育方式，深化為日常之習慣，期望在多方努力下能解決此困擾的課題。

四、說明會辦理情形簡述

本會為加強公民參與，並聽取民眾對本案之意見，以作為本會安全管制之參考，乃於 5 月 24 日召開說明會(同步線上直播)，邀請公民團體參加。

先由台電公司說明核二廠 1 號機燃料破損案的處理過程、如何確認破損的燃料棒、肇因分析、環境影響以及後續強化的防範措施，再由本會說明對該案之安全管制作為，之後本會並與出席人員就其關心議題進行意見交換與溝通說明。本次說明會參加人員所提相關意見與書面意見，本會已納入回應紀錄，並提供回應說明，有關說明會之相關資料及回應說明均於本會對外網站公開（網址：http://www.aec.gov.tw/焦點專區/公眾參與平台/原能會106年05月24日辦理核二廠1號機燃料破損案之管制作業說明會--218_2981_3673.html）。

參、審查總結

針對本次燃料棒護套受損，本會已全程掌握與管制。除密切注意運轉期間燃料護套完整性相關參數變化趨勢與核電廠內及廠外環境監測資料外，於機組停機大修期間並派員針對電廠爐心燃料檢查作業進行查證，亦要求台電公司注意大修作業管控，以降低放射性物質外釋，並持續加強對環境監測。

本會亦成立專案小組，聘請專家與本會同仁就台電公司所提專案報告進行審查。經專案小組對台電公司所提報告及對審查提問答覆內容進行審查，確認相關審查意見均已獲釐清。綜合本會執行視察與專案小組對台電公司報告與審查提問答覆內容之審查結果，確認台電公司已於去年 12 月大修停機期間找出破損燃料，並移至用過燃料池將破損燃料取出後，置於專用容器貯放，其他爐心所有燃料經檢查無破損跡象；在破損肇因分析部分，經詳細審

查台電公司提供之報告資料及各項相關問題之答覆，台電公司經由池邊檢驗結果及運轉資料分析結果，認為護套破損肇因為爐屑磨損之研判結果，經審查可以接受；在廠內、外環境影響部分，經評估計算本次燃料破損對廠內外人員造成之劑量，仍低於法規限值並有相當安全餘裕，核二廠亦已提出更嚴謹保守的因應措施，以儘量降低對環境之影響，經審查可以接受。在防範改善措施部分，在本會要求之下，台電公司已就本次經驗，依據廢氣(惰性氣體)活度、現場設備狀況、廠區環測結果研訂更保守積極之因應行動措施，未來運轉期間可提早發現護套洩漏及避免誤判，並儘早採取減緩劣化措施與必要時即早停機檢查，經審查可以接受。在防範爐屑磨損部分，此為目前國際間沸水式核電廠仍需努力面對與改善的問題，經本事件檢討，台電公司已採行更嚴密的防止異物入侵措施，惟本會亦要求台電公司應再積極汲取國外經驗，如日本核電廠因爐屑造成之燃料破損率較他國低，應與其文化及具體做法有關，台電公司宜加強這方面的技術交流，期在深化為日常作業習慣之多方努力下，能進一步確保燃料完整性，本會後續亦將持續追蹤台電公司所提檢討防範措施執行情形。

附件 「核二廠 1 號機燃料破損案」安全管制大事紀

106.6.02

日期	項 目
105/12/15	召開處理現況說明會議。 發函要求台電公司提出專案書面報告。
106/01/18	召開處理現況說明會議。
106/01/23	函送 1 月 18 日會議紀錄及要求補充說明事項。
106/03/01	台電公司來函提出「核二廠 1 號機第 25 週期燃料破損專案報告」。
106/03/06	台電公司來函提出 1 月 18 日會議後續要求補充說明事項之答覆，並說明相關內容已納入專案報告。
106/03/15	召開第 1 次審查會議
106/03/31	函送原能會再審查意見。
106/04/26	召開第 2 次審查會議
106/05/2	函送原能會再審查意見。
106/05/11	召開第 3 次審查會議
106/05/18	函送原能會再審查意見。
106/05/26	函復同意台電公司對原能會再審查意見之答覆內容。
106/05/29	將原能會撰寫之審查結論報告初稿送審查委員審閱。
106/05/31	審查委員均已回覆同意原能會撰寫之審查結論報告初稿。
106/06/02	完成原能會審查結論報告之核定作業，函復同意台電公司「核二廠 1 號機第 25 週期燃料破損專案報告」。