

# 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：核二廠 1 號機週期 25、2 號機週期 24 爐心設計審查

頁數 10 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力公司/陳德隆/23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

吳逸群/台灣電力公司/核能發電處/十一等核能工程監/02-23667086

劉修源/台灣電力公司/核能發電處/八等核能工程師/02-23667088

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他（洽公）

出國期間：2015/8/15 ~ 2015/8/28

出國地區：美國華盛頓州

報告日期：2015/10/2

分類號/目

關鍵詞：填換爐心設計

內容摘要：（二百至三百字）

本次任務主要審查核二廠 1 號機週期 25（KS1C25）及 2 號機週期 24（KS2C24）爐心布局設計所用之相關分析參數及計算書。

審查任務內容包括：KS1C25 及 KS2C24 填換爐心設計審查、6 項預先提出之稽查需求及問題、討論本次稽查需求、範圍及接受標準。此外，審查期間亦與燃料廠家進行多次技術討論及表達本公司需求，最後在完成本次審查任務後，與廠家技術人員進行稽查後總結及意見回饋。

總結，本公司委請燃料廠家執行之核二廠爐心設計，均能符合本公司爐心設計審查指引及其內部之品管標準。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網（<http://open.nat.gov.tw/reportwork>）

出國報告（出國類別：洽公）

## 核二廠 1 號機週期 25 及 2 號機週期 24 爐心設計審查

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：吳逸群 / 核能發電處核能工程監

劉修源 / 核能發電處核能工程師

派赴國家：美國

出國期間：104 年 8 月 15 日至 8 月 28 日

報告日期：104 年 10 月 2 日

# 目 錄

內 容	頁次
壹、出國目的	1
貳、出國行程	2
參、任務過程	3
一、審查期間重要討論會摘要	4
二、審查後總結	7
肆、結論、心得與建議事項	8

## 壹、出國目的

本次出國往、返程共計 14 日，主要任務為審查核二廠 1 號機週期 25 及 2 號機週期 24（以下分別簡稱 KS1C25 及 KS2C24）填換爐心設計分析文件，其內容包括填換爐心安全分析報告（Reload Licensing Analysis, RLA）、可用性評估報告（Operability Assessment, OA）、填換爐心設計指引、作業程序書、計算書及填換爐心燃料布局安排是否通過安全分析及本公司爐心設計之要求。

核二廠 2 部機現均已完成 SPU 中幅度功率提升，本次爐心設計均延續前週期的各項 SPU 設定進行設計與分析。為查核及瞭解燃料廠家是否仍確實依相關程序書執行 SPU 後評估分析工作，本次審查特別與核能研究所遴選之專業人員派赴廠家共同執行審查工作，務必確保燃料廠家執行填換爐心設計結果與設計品質符合本公司實際需求。本次除審查燃料廠家執行填換爐心設計之計算書文件外，並更進一步透過參訪瞭解廠家在核燃料及填換爐心設計相關領域之最新技術，確保本公司核電廠運轉之安全。

本次任務除由本公司人員審查燃料廠家設計之 KS1C25 及 KS2C24 填換爐心設計，也安排核能研究所人員一同赴燃料廠家協助本次審查任務進行，並與該公司相關技術人員進行討論，以進一步了解爐心布局設計與晶格設計之流程與執行相關分析之細節，包括 NRC 已核准之第 2 版臨界功率關係式（ACE correlation Rev.2）。

本次審查任務採用本公司爐心設計技術規範與計算書文件審查，並查對爐心設計工作站之輸入檔與輸出檔，審查期間並與燃料廠家人員進行問題討論與釐清。審查完成後，與燃料廠家負責執行本公司 KS1C25 及 KS2C24 中子設計、安全分析之工程師及主管進行討論。本次審查工作總計向燃料廠家提出 1 項審查建議，以期將來能有更多時間討論計算過程中之技術細節，逐步往「最佳化爐心布局」設計前進。

本次審查結果確認燃料廠家執行 KS1C25 及 KS2C24 填換爐心安全分析報告，可符合燃料廠家內部及本公司所要求之接受標準，該 2 個週期填換爐心設計為「可接受」的。

## 貳、出國行程

104 年 8 月 15 日至 104 年 8 月 28 日（含往、返程 5 日）共計 14 日，對美商燃料廠家執行本項任務，每日行程摘要如下：

日 期	行 程	摘 要
8/15 (六)	台北→西雅圖	往程：由台北→西雅圖
8/16 (日)	西雅圖→巴斯 科→里其蘭	往程：由西雅圖→巴斯科→里其蘭
8/17 (一)	燃料廠家	(1) 辦理入廠手續及相關訓練（保安、工安及輻安）。 (2) 拜會爐心設計相關人員及召開本次爐心設計審查稽查前會議（Entrance Meeting）。 (3) 建立稽查用電腦工作站及相關計算書蒐集。
8/18 (二)	燃料廠家	進行 KS1C25 與 KS2C24 爐心設計審查。
8/19 (三)	燃料廠家	進行 KS1C25 與 KS2C24 爐心設計審查。
8/20 (四)	燃料廠家	(1) 進行 KS1C25 與 KS2C24 爐心設計審查。 (2) 參訪燃料製造工廠。
8/21 (五)	燃料廠家	(1) 進行 KS1C25 與 KS2C24 爐心設計審查。 (2) 與爐心設計資深工程師 Dang 討論本次預送之稽查議題。
8/22~ 8/23	里其蘭	星期假日
8/24 (一)	燃料廠家	(1) 介紹 ATRIUM-11 新燃料。 (2) 整理本次審查結果及審查任務之建議事項。 (3) 與爐心設計資深工程師 Dang 討論本次預送之稽查議題。

		(4) 與廠家熱流分析團隊討論臨界熱功率關係式 ACE 第 2 版之相關議題。
8/25 (二)	燃料廠家	(1) 進行稽查後總結。 (2) 彙總本次稽查結果及總結，供燃料廠家參考。
8/26~ 8/27	里其蘭→巴斯 科→西雅圖	返程
8/27~ 8/28	西雅圖→台北	返程

### 參、任務過程

本次任務共分以下五方面進行審查：

- (1) 以『台電沸水式反應器爐心設計審查指引』為依據，執行 KS1C25 及 KS2C24 填換爐心設計審查，並適時與負責工程師討論澄清，重點摘錄重要爐心設計參數。
- (2) 查對爐心設計工作站內的輸入檔，完成 KS1C25 及 KS1C24 各項爐心設計參數之審查，其結果均能符合本公司及廠家內部的品保標準，審查細節及審查意見。
- (3) 在出發前預先將本處所關心之議題 email 予燃料廠家，以俾抵美後與其技術人員討論。
- (4) 審查期間進行多次技術研討。
- (5) 離開前進行稽查後總結，並提出建議供廠家參考。

## 一、審查期間參訪行程及重要討論會摘要

### (一) 參觀核燃料製造廠行程

本項行程係由燃料廠家安排之行程，並由負責本公司核一、二廠燃料合約執行之專案經理帶領進行解說。因其曾任職於製造工廠，故對工廠事物、動線及工作人員都非常熟悉。本次參訪時，廠內的生產線恰巧進行檢修，暫停營運，故本次團隊可以接近燃料製造設備，近距離參訪。本次計參訪 3 個地方，包括鈾轉化廠、燃料製造廠、零件加工廠。簡介如下：

- (1) 鈾轉化廠：此站係燃料廠家將來自濃縮公司（例如 USEC）的氣態  $UF_6$  轉換成  $UO_2$  粉末之處。燃料廠家的鈾轉化廠有兩種，分別為濕式轉化廠及乾式轉化廠。濕式轉化廠利用化學藥劑將本公司買到的鈾料溶解，再轉化為適合燒結為燃料丸之粉狀型式，惟濕式轉化法的缺點有：要求的工序多，操作複雜，且製程中會產生大量的廢液。至於乾式轉化則不需經過溶解的步驟，然乾式轉化的缺點則是  $UO_2$  粉末的陶瓷性能略差，且產品的氟含量較高，但因為具有工序簡單和產生的廢液量小的優點，因此，在克服上述缺點後，近來趨向於採用乾式轉化。目前這兩種轉化方式燃料廠家均有採用。
- (2) 燃料製造廠：本站係將  $UO_2$  粉末送入燃料丸模具中壓製成型後再燒結，並將燃料丸裝填至燃料護套中製成燃料棒，最後組裝燃料棒成燃料束。裝填燃料丸時，只有通過考核的工作人員才可以進入裝填燃料之紅線區（地上會有紅線標示），一般人員禁止進入。而燃料棒裝填完畢後，燃料廠家之資深工程師會藉中子及加馬射線設備進行檢測，確認燃料棒軸向的濃縮度及燃料丸裝填均正確無誤。整體而言，燃料製造廠整體環境清潔明亮，材料、器具亦陳列整齊。除了紅線管制，地上另繪有開門區、警戒區（黃線）等標示，且進入製造廠之員工、訪客等，均須配戴護目鏡、鞋套，管理相當良好。
- (3) 燃料組件加工廠：燃料束中某些特殊零件是在別處製造後送到燃料廠家加工，如燃料束底座、碎片濾網等。送過來的零件於此處拋光、琢磨，可以看到加工前與加工後之清楚差異。

## (二) ATRIUM-11 介紹會議

此部份係由廠家技術人員在核燃料製造廠內，進行實體 ATRIUM-11 燃料束介紹，並以簡報說明其優於 ATRIUM-10 燃料束之處：

- (1) 因 ATRIUM-11 燃料束設計大幅增加熱傳面積，可增加 LHGR 熱限值餘裕。
- (2) 可降低燃料丸濃縮度。
- (3) 減少燃料批次之訂購數量，降低核燃料前端及後端處理成本。
- (4) 新型燃料設計使停機餘裕增加，燃料束內之中子毒素可降低，燃料使用將更具經濟性。
- (5) 具有優異的抗爐屑設計：以往燃料的抗爐屑設計的過濾器 (filter) 僅安裝在燃料束底部；然為因應 ATRIUM-11 (11x11 燃料棒矩陣設計) 燃料棒間距變窄，恐導致爐屑磨耗導致護套洩漏之風險升高，故燃料廠家針對第二代抗爐屑設計之過濾器 (Improved FUELGUARD™) 再精進改良，並另開發燃料束上方之抗爐屑設計過濾器，用以降低燃料在挪移時，爐屑從燃料底部掉出至其它燃料束頂部之風險。
- (6) 核二升載因封套限值限制，升載速率較核一保守，燃料廠家建議如採用 ATRIUM-11 燃料設計，因為每根燃料棒出力降低，且燃料束熱傳導面積增加，可使核二廠在控制升降載速率上更具彈性。

## (三) 核一、二廠升載速率差異分析

- (1) 燃料廠家檢視美國現有之 BWR-6 電廠 (與核二廠同型之電廠，如 Grand Gulf 核電廠等)，所有 BWR-6 型式之核電廠均有燃料護套洩漏問題，為有效降低護套洩漏風險，降低電力公司發電損失，美國 BWR-6 型式之核電廠，幾乎均採保守性升載策略，減緩反應爐升載速率以充分降低燃料丸與護套間之應力，減少 PCI 現象，我國亦同。

- (2) 核二廠的 2 部機通常擔任電力基載的角色，在機組順利運轉的情況下，每部機只會經歷 1 次的「起動升載」，7 至 8 次的「控制棒布局更換」，這些升、降載過程中損失的容量因數，為可接受之風險損失。
- (3) 另考慮核二廠為大裝置容量機組，平均每束燃料出力較高，燃料負擔（load）較重，故在執行控制棒布局更換時，爐心功率需降載至 55%滿載功率。核一廠因燃料出力負擔較輕，僅需調降至 70%的滿載功率，便可執行控制棒布局更換，是以核二廠升載速率較慢。
- (4) 有關核一、二廠升載策略比較，核二廠與美國同型電廠之升載策略比較，燃料廠家表示將依本公司審查意見，彙整相關數據後，於下次訪台期間，對本公司進行更詳細之簡報說明及文件補充，並具體建議核二廠最佳之升載策略。

#### (四) 爐心追隨（CORE FOLLOW）之重要性

- (1) 本次稽查時發現 KS2C23 的爐心追隨報告中，全週期最大 LHGR 之 Under-Prediction 為 8.3%，（表示 MB2 程式之預測值較電廠 PPLEX 實際測量值不保守），此數值大幅悖離燃料廠家及核二廠過往經驗範圍。燃料廠家隨即建議本公司進行 LPRM 校準或檢修等相關工作，經核二廠檢查後，發現 LPRM 信號有漂移現象，在更換 LPRM 並經校正後，LHGR 之 Under-Prediction 回歸正常範圍（約 2%至 3%）。
- (2) 燃料廠家及本公司每隔一段固定時間，均會針對核一廠及核二廠的爐心營運狀況，執行爐心追隨計算，相互比較 MB2 與 PPLEX 間差異，故當爐內中子偵測器發生問題時，均可在最短時間內發現異狀，並至少有兩方獨立進行驗證，執行本項工作對維持機組的安全營運有其必要性，亦為爐心設計的入門基礎。

## 二、審查後總結

- (1) 請燃料廠家提供美國 Susquehanna 電廠 2 號機，其 Zr-4 燃料匣彎曲量測結果之正式報告供本公司參考。
- (2) 因過去核一、二廠均有執行緊急爐心重設計經驗，在深入瞭解燃料廠家緊急爐心重設計之相關工作內容後，其相關評估工作繁多，一般約需 10 個工作日，因核二廠為本公司重要之基載機組，對公司整體營運至關重要，故此次稽查後亦與燃料廠家討論，希望燃料廠家未來如本公司有需求，盡可能調足人力支援相關分析業務，協助核二廠 1、2 號機能依原訂排程起動。
- (3) 核一廠及核二廠的升降載策略不同，請燃料廠家針對核一廠及核二廠之爐心營運數據進行分析，並與美國境內的同型核電廠進行比較。

## 肆、結論、心得與建議事項

### 一、結論

本次審查燃料廠家設計之 KS1C25 及 KS2C24 填換爐心布局設計，均能符合本公司及燃料廠家內部所要求之接受標準，因此 KS1C25 及 KS2C24 之填換爐心設計結果為可接受。

此外燃料廠家針對本公司預先提送的 6 項議題，均指派相關專長，或是專責之技術人員，以面對面溝通、討論方式提供答覆，此外亦積極協助解決目前電廠遭遇之問題，並另外準備書面文件之電子檔供本公司參考。

### 二、心得

- (1) 燃料廠家為一國際性的大公司，在品質文件控制及專業技能訓練均屬扎實，由以針對訓練編纂之程序書，內容井然有序。以執行爐心設計相關之各項分析作業為例，其對應之具備能力，均一一詳細規範，同時指派資深同事（具超過 10 年爐心設計經驗之工程師）從旁協助新進員工，加速核心技術建立及達到經驗傳承，此部份相當類似本公司目前推動的導師制度雷同一各部門將所屬之核心或關鍵技術朝向細緻化歸納、整理，再由資深同仁編纂學習過程中應具備之基礎技能、訓練等，並另有管制表納入相關紀錄，落實訓練及經驗傳承。
- (2) 目前燃料廠家內部技術文件及品質文件均以線上（on-line）進行管理，此部份相當不易，其優點除了檔管管理方便外，當多組人馬需要查閱相關資料時，均容易取得，且文件易容易清楚分類，很值得借鏡學習。尤其本公司紙本的歷史資料繁多，未來如能在簽案完成後即進行電子化存檔、分類，未來在積極推動廠處輪調條件下，廠處新調職人員亦能快速瞭解其所屬之業務範疇；而新進公司人員，則可由較資深同仁或課長指導，養成文件掃描電子化習慣，俾日後檔案管理及經驗傳承。
- (3) 爐心分析計算書的有效性與品質控制，均仰賴有經驗之 QA 人員。而爐心設計的中子分析、之安全分析，均須執行大量的電腦模擬計算，故燃料廠家針對相關分析訂定了標準作業程序，且使用自動化處理方式執行大部分的計算分析，並

判讀結果，除避免因人為疏失而得到錯誤結果外，並可節省大量的人力工時外。每份計算書完成後，燃料廠家均指派具較多年實務經驗之資深品保工程師，再詳細檢查、審視計算過程及結果，確保每份計算書的品質及正確性。

- (4) 燃料廠家為本公司長期合作的燃料供應商，且雙方長久以來均致力於核能的和平、安全應用，故燃料廠家相當重視本公司的意見。本次執行稽核任務時，燃料廠家亦展現十足誠意，包括爐心設計團隊全體配合本公司稽查進度，備妥相關爐心設計計算書，訪談時並應允未來雙方合約期間，盡可能協助本公司核一、二廠安全且順利運轉。
- (5) 審查期間燃料廠家對我國的核能政策走向亦十分關心，並指出全球暖化所造成的氣候變遷、極端天氣等，都將造成許多災害，而全球暖化議題將重新受到各國重視，台灣為一海島型國家，勢必遭受衝擊，未來在維持減碳承諾及能源安全考量上，核能有其必要性。
- (6) 本次出國審查任務承蒙公司內長官們支持及給予增廣見聞的機會，亦感謝燃料廠家積極協助及全力配合完成稽查任務，使得本次的任務順利完成。311日本福島事件對國內的核能政策衝擊甚大，我們只有要求自己能在工作上確實做好，以機組安全且穩定運轉為己任，同時加強對民眾溝通事務的推動，重拾國人對核能信心。

### 三、建議

- (1) 查核燃料廠家之相關填換爐心設計分析計算書、填換爐心設計指引、作業程序書等十分耗時。本次稽查時恰巧燃料廠家的日本客戶，亦在執行爐心設計稽查。經深入瞭解後，日本的稽查方式或許可為本公司下次執行稽查任務之借鏡：本公司的稽查項目有固定項目及非固定項目，非固定項目為電廠在實際執行爐心營運時之意見。固定項目係指『審查指引』中所列必要之稽查項目，該等項目散布在燃料廠家不同計算書中，一一查對計算書及輸入檔相當費時，或可仿效日本方式，除將稽查項目預送燃料廠家外（本公司現行作法亦同），請廠家針

對重要稽查內容進行簡報，如此可節省大量翻閱資料時間，讓本公司稽查人員可以有更多時間與燃料廠家技術人員進行訪談。

- (2) 爐心設計的安全分析部分，目前燃料廠家的負責人為華裔人士，其在熱水流分析模式建立及暫態事故分析有豐富且專業之見解，我方應趁機大量與其交流，由以本次稽查時與其已建立良好互動關係，對方更承諾願意予以我方關於相關技術的指教及討論，這對本公司技術建立是一好機會，今年度稽查活動雖已結束，惟仍應繼續透過 email 方式討論相關技術問題。
- (3) 此次赴國外執行審查任務是由對電廠營運相當熟稔的資深同仁與較資淺的同仁共同執行，除了生活上相互照應外，在燃料廠家期間，審查計算書或專案報告時遇有疑問亦可互相討論，俾釐清問題及達到經驗傳承。另亦可藉由執行任務過程中加強本身的專業知識，同時也是一個很好的國際學習的機會。如預算允許，建議公司仍應持續由「資深同仁與資淺同仁搭配組合」執行類似的工作，並建議公司應培訓及鼓勵新人出國洽公或開會，持續與國際交流接軌，替公司培養更多優秀的人力。