

出國報告（出國類別：開會）

參加國際核燃料績效會議  
並順道訪問核燃料公司

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：林志保 核二廠 核工課長

派赴國家：美國

出國日期：98.06.12 至 98.06.22

報告日期：98.08.05

# 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：參加國際核燃料績效會議並順道訪問核燃料公司

頁數 31 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/(02) 2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

林志保/台灣電力公司/核二廠/核工課長/(02) 2498-5990 分機 2611

出國類別：□1 考察□2 進修□3 研究□4 實習■5 其他（開會）

出國期間：98.06.12 - 98.06.22

出國地區：美國

報告日期：98 年 08 月 05 日

分類號/目

關鍵詞：國際核燃料績效會議；經驗回饋；核燃料績效

內容摘要：(二百至三百字)

赴美國費城參加第 39 屆國際電力公司核燃料績效會議、發表本公司第二核能電廠核燃料績效簡報，並於行程順道訪問 AREVA 核燃料公司，與燃料廠家交換意見，及參觀其核燃料製造廠，瞭解製程改善情形。

本次參訪燃料製造廠，發覺該廠在各方面均有顯著之進步。如：入廠訓練與安檢、輻射污染偵測程序、工安及污染防護護具之要求、防止異物入侵管制、以及工作動線安排與廠房佈置等，其製造品質應能有效提昇。

本屆核燃料績效會議共有來自美、加、日、法、比、瑞典、台灣等多國與會代表，計發表 23 篇專題報告，內容涵蓋核燃料破損趨勢、燃料績效及經驗回饋、燃料匣彎曲等相關議題。本項會議提供一個很好的交流平台，與會代表大多為實務工作者，透過面對面交換意見，確實能汲取寶貴經驗，令人獲益匪淺，本公司宜持續派員參與。

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

# 目 錄

	頁數
一、出國事由 .....	1
二、出國行程 .....	1
三、訪問 <b>AREVA</b> 核燃料公司 .....	2
四、參加國際核燃料績效會議 .....	5
五、心得與建議 .....	14
六、附件一 .....	16
七、附件二 .....	19
八、附件三 .....	22

## 一、 出國事由

參加美國 Ameren UE 電力公司主辦之第 39 屆國際電力公司核燃料績效會議(39th International Utility Nuclear Fuel Performance Conference, IUNFPC)、發表本公司第二核能電廠核燃料績效簡報，並順道訪問 AREVA 核燃料公司，參觀其核燃料製造工廠，瞭解製程改善情形。

爲能先與燃料廠家交換意見，行程安排先訪問燃料廠家，再參加國際核燃料績效會議。

## 二、 出國行程

98 年 6 月 12 日至 13 日 往程（台北→西雅圖→里其蘭 AREVA 核燃料公司）。

98 年 6 月 14 日至 15 日 訪問 AREVA 核燃料公司，參觀其核燃料製造工廠。

98 年 6 月 16 日 前往 IUNFPC 會場（里其蘭→丹佛→費城）。

98 年 6 月 17 日至 19 日 參加第 39 屆國際電力公司核燃料績效會議。

98 年 6 月 20 日至 22 日 返程（費城→紐華克→台北）

### 三、 訪問 AREVA 核燃料公司

#### 1、 前言：

本公司第二核能發電廠自 2000 年起兩部機連續數週期均發生燃料破損，肇因之一為燃料丸表面製造缺陷所引發之燃料丸與護套交互作用(PCI)，與燃料廠家製程有嚴密關係。燃料廠家宣稱其製程已於 2004 年起有顯著改善，因此藉由本次出國機會，順道訪問位於華盛頓州里其蘭市(Richland, WA)之燃料製造廠，瞭解燃料廠家製程改善情形，就核燃料績效議題進行意見交換，並持續給予廠家持續改善之壓力。

另外，燃料廠家對於核燃料營運及監測技術亦不斷推陳出新，核燃料行為模擬方法更加精進。藉由本次訪問，瞭解其新監測方法大致內容及預期將造成之影響，並進行意見交換及討論。

#### 2、 核燃料行為模擬方法精進

沸水式反應器在升載過程中，通常燃料必須經過預調節(pre-conditioning)程序，以避免發生燃料丸與護套交互作用破損(PCI)。實務上，核子工程師利用爐心監測系統及燃料廠家所提供之燃料預調節規範來進行監測及提升功率。目前本公司核一、二廠均採用 AREVA 公司所製造的 ATRIUM-10 型燃料及其 REMACCX-10 燃料預調節準則，所使用的爐心監測系統為 POWERPLEX III 系統。

由於核二廠自 2000 年起兩部機不斷發生 PCI 燃料破損，肇因雖然大多為燃料丸表面製造缺陷所引發之燃料丸與護套交互作用，然而爐心監測系統及燃料預調節準則的準確度也時常被提出來討論。原能會核管處陳宜彬處長，在歷次燃料破損處理的審查會上就不只一次質疑模式的準確度。因此，燃料廠家也著手從監測方法上持續改善。

傳統的燃料預調節準則係依據實驗結果簡化而來，以起始功率及/或封套(envelope)做為燃料是否開始進行預調節的之依據。當升載過程中任一節點超過此一功率，即開始進行預調節程序，其方法為限制其節點功率上升率在某一限制值以下。在正常的狀況下，該限制值通常為 0.2 kw/ft/hr。因燃料廠家有燃料丸表面製造缺陷，目前該限制值調降為 0.12 kw/ft/hr。影響所及，將使每次升載至滿載的時間延長。以核二

廠為例，大修後首度升載至滿載，若不考慮其他檢修項目或偵測試驗所造成的延遲，自第二次併聯至滿載所需時間，通常為 3 至 3.5 日，對於容量因素影響顯著。但考量若因升載過速而導致燃料破損所造成的停機損失(10 日)，此一緩慢升載策略誠屬值得。

然而調降升載率是否就足夠保守？燃料丸與護套交互作用導致燃料破損，主要取決於兩者間之應力(hoop stress)大小。因此，核子工程師若能在進行下一個升載動作前(即抽控制棒或增加爐心流量)，利用方便好用的工具，評估其應力大小是否會超出基準，將比現有遵守升載率限制來得更有效。有鑑於此，AREVA 發展評估燃料丸與護套交互作用應力大小之工具 XEDOR，並與爐心監測系統結合。目前，本項工具仍在發展中，AREVA 公司特別利用本次機會，安排相關技術人員向職簡報有關該程式工具發展情形及對過去燃料破損應力析結果。內容令人印象深刻，過程中亦交換不少意見。

### 3、參觀燃料製造廠

本公司核二廠自 2000 年迄今共破損之 11 根燃料中，共有 5 根屬於 PCI 破損。其中有 4 根破損燃料送往核研所進行熱室檢驗，檢驗結果其中 2 根肇因確定為燃料丸表面製造缺陷所引發之 PCI 破損。而其他之 PCI 破損推測與此相關。因此，燃料廠家製程需進行改善，以減少此類破損發生之機率。

燃料廠家自 2004 年年中起開始改善製程，包括：採用較嚴格的接受準則、全面檢查每顆燃料丸表面製造缺陷(不用抽樣方式)、研擬採用儀器方式檢查等。製程改善後之燃料已有 1~2 批次填入核二廠爐心。

本次 AREVA 安排參訪的製程由燃料丸燒結開始、檢驗、裝入護套及至組合成燃料束止。與職前次於 2001 年前往進行填換爐心設計審查時參訪之印象有顯著之不同及改善，列舉如下：

#### (1) 入廠訓練與安檢。

進入 AREVA 前所有的訪客均需進行入廠訓練。訓練方式為觀看 DVD，內容為工業安全、輻射安全、緊急疏散與注意事項等等。雖然毋需測驗，但其內容仍令人

印象深刻。另外，其安檢程序與本公司核能電廠相當，不過背包係以人工檢查方式進行，照相機禁止使用。

(2) 輻射污染偵測程序。

進出管制區均需進行輻射污染偵測，偵測方式與核能電廠出管制站之偵測類似，但耗時較久。這些措施均是前次參訪所沒有的。

(3) 工安及污染防護護具之要求。

訪客入廠參觀需配戴安全帽、安全眼鏡、耳塞(噪音較高處)等工安護具，以及穿著白色工作服(類似實驗衣)與塑膠套鞋等。除了保護人身安全外，亦防止潛在的污染擴散。

(4) 防止異物入侵管制。

廠房地板用紅線畫出防止異物入侵管制區(FME Zone)，嚴格管制進入 FME Zone 之人員及物品(如：筆、眼鏡等需綁牢固)。未經允許不得進入 FME 管制區。職於參觀時不小心誤踩紅線，馬上被工作人員制止勸離。

(5) 工作動線安排與廠房佈置。

工作動線安排、廠房佈置及整潔明亮程度與之前相比已改善很多。廠裏各種標示、標線、工作區的劃分均相當清楚。製程大部分都採用自動化設備，半成品暫存區規劃得井然有序，各種型式燃料棒(不同鈾濃縮度及可燃毒物棒)依雷射條碼貯放，再由自動化設備存取，避免人為失誤。

整體而言，AREVA 燃料製造工廠在各方面均已有顯著進步。

然而仍有尚待改進之處：例如：與近幾年燃料破損關鍵製程—使用自動化儀器檢查取代目視檢查燃料丸表面製造缺陷情形之方式尚未採用。經詢問計畫經理，答覆目前該設備尚未通過執照許可，因此尚未上線。本項目建議納入追蹤事項，將建請總處向 AREVA 公司要求提供正式上線時程計畫。

#### 四、 參加國際核燃料績效會議

##### 1、 背景說明

2007 年世界核能發電協會(WANO)，對本公司核二廠進行同行審查(peer review)時建議本公司：「向業界學習(benchmark)關於燃料完整性程序書中各行動階段(所採取策略)之保守性。並且，加強與其他 BWR 電廠之連繫，及積極地參與各 BWR 電廠使用者組織，以促進彼此之經驗交流。」。為呼應本項建議，本公司承諾將積極派員參加國際業界核燃料績效方面會議，進行標竿訪問、促進經驗交流。本年度國際核燃料績效會議，計畫討論促進核燃料可靠度、新型燃料設計、燃料二次劣化、破損燃料肇因探討及改善等議題。將有許多電力公司及燃料顧問機構之專家參與，可促進彼此經驗交流。因此，選定本項會議參加並發表核二廠破損燃料熱室檢查結果。

國際核燃料績效會議(IUNFPC)係由多國電力公司所組成的會議組織，每年定期舉辦會議乙次，由各電力公司輪流主辦。今年主辦單位為Ameren UE 電力公司，會議地點為美國賓夕凡尼亞州費城(Philadelphia, PA) Sofitel旅館，會期時間為 6/17 至 6/19 共計 3 日。大會議程及與會各電力公司、顧問機構代表詳如附件一、二。

##### 2、 本公司簡報概要

職代表本公司簡報核二廠自 2000 年起燃料破損肇因及改善措施，詳細簡報內容如附件三。本公司簡報安排於 6 月 17 日下午第一次休息後進行，簡報情形及內容概述如下：

- (1) 介紹本公司三座運轉中的核能電廠及一座興建中的核能電廠基本資料及地理位置。接著介紹核二廠營運績效，其中最引人注目的是，一號機於 2008 年容量因數創下高達 99.96%之佳績，在全世界 439 個運轉機組中排名第 11 名。
- (2) 核二廠有一項美國大部分電力公司所沒有的線上廢氣活度偵檢設備，可以即時分析由冷凝器抽出之廢氣放射性核種活度，藉以研判燃料之完整性。該設備正常狀況下每隔 30 分鐘分析一組數據，因此當有燃料破損發生時可立即偵知。這點各電力公司均表達高度之興趣。惟本項設備係由核二廠環化組早期自行研發成果，若要技術轉移給其他電力公司尚有困難，不過本公司可以給予適當的技術指導。

- (3) 核二廠燃料完整性偵測技術與世界水準相當，甚至有過之而無不及。包括：每日廢氣惰性氣體核種(Xe-133, Xe-135, Xe-138, Kr-85m, Kr-87, Kr-88 等)取樣進行實驗室分析、每 30 分鐘進行線上廢氣活度分析、即時廢氣處理後放射性讀數監測、核燃料劣化指標核種(Sr-91, Sr-92, Np-239, Cs-134, Cs-137 等)活度分析等等。這些技術可以迅速有效評估核燃料的完整性，並進行決策分析。
- (4) 自 2000 年起，核二廠兩部機共破損 11 根核燃料。其中，ATRIUM-9B 型(9X9)計破損 4 根；ATRIUM-10 型(10X10)計破損 7 根。這些燃料除了 1 根以外，燃耗均集中在 30 GWD/MTU 附近，亦均為進入爐心二個週期之燃料(*twice-burnt*)。破損主要原因有二：「燃料丸表面製造缺陷引發之 PCI(燃料丸與護套交互作用)」及「爐屑磨損(*debris*)」，破損根數各占 5 根，1 根原因不明。其中 4 根經由核研所熱室檢驗確認。職用圖表說明這些燃料破損情形及熱室檢驗結果。
- (5) 針對「燃料丸表面製造缺陷引發之 PCI」所採取的對策如下：
- 燃料廠家自 2004 年 6 月起改善製程，採用較嚴格燃料丸表面製造缺陷接受準則及檢驗規範，目前運送至核二廠之新燃料，均已改善。一、二號機目前爐心仍有一、兩批舊製程燃料。
  - 核二廠自 2007 年 2 月起升載採用最嚴格的緩慢升載策略(*soft startup & operation*)。包括：取消燃料預調節規範中之 *Pcfc* 值、限制 *ramping rate* 為 0.12 kw/ft/hr、限制 *ramping* 時功率上升速率每值小於 10%、於 90%功率附近暫停升載 4 個小時以釋放燃料丸與護套之應力等。
  - 儘量減少不必要的升降載，如：自 2007 年 5 月起將控制棒可用性測試分為全出棒及部分抽出棒兩組，將每週需降載的測試改為每個月降載測試。另外亦檢討整合需降載測試之偵測試驗，配合更換控制棒佈局調整測試週期，均有效減少升降載次數。
  - 更新循環水泵設備以提升海水冷卻效率，減少夏天因海水排放高溫降載次數。兩部機均已完成。

截至目前為止，核二廠未再因「燃料丸表面製造缺陷引發之 PCI」造成燃料破損。

(6) 針對「爐屑磨損」所採取的對策如下：

- 核二廠自二號機週期 21(2010 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%，較舊式小孔式底部繫板之濾除效率(約 50%)大幅提高。目前一號機已有 18 束新燃料採用。
- 持續強化防止異物入侵措施，包括：建立燃料廠房 3F 防止異物入侵措施、落實大修中防止異物入侵查核(專屬網頁)及研擬反應爐爐底清理策略等。其中一號機已於今年(2009)大修優先進行反應爐爐底部分區域清理工作，成效良好。由於一號機上週期(20)仍有因爐屑磨損造成之破損，防止異物入侵相關措施仍需持續加強。

與會各電力公司針對職之簡報所提問題及答覆摘要如下：

(1) Q.有關線上廢氣活度偵檢設備之取樣細節。

A.線上廢氣活度偵檢設備係由廢氣處理系統中活性碳床前端抽取廢氣進行分析，經由能譜分析(銻偵檢器及多階分析儀)評估各核種放射性活度，並將結果送至電腦工作站，經由專線傳至辦公室電腦連上廠內網路系統。所抽取之廢氣經分析後仍回到廢氣處理系統進行處理，不會造成取樣處(廢料廠房)污染。

(2) Q.防止異物入侵查核之專屬網頁詳情。

A.本項網頁提供電廠防止異物入侵待改善事項及優良典範之作業平台。當稽核員發現有任何待改善事項或優良典範，便可輸入登上網頁。改善前後之照片均會附上，讓缺失及改善情形一目瞭然。任何人均可利用網頁瀏覽器(如：IE 或 Firefox)閱覽，並可互相觀摩。

(3) Q.反應爐爐底部分區域清理工作相關細節。

A.大修時移除爐心中央部分控制單元，包括：燃料、控制棒葉片、燃料墊塊、控制棒導管等。然後使用水底攝影機及真空吸塵器進行反應爐爐底部分區域清理，過程相當耗時。

可能是大部分與會代表來自電力公司現場工作人員，對於電廠實務方面較感興趣，

對於破損燃料熱室檢驗結果反而沒提出較深入之問題。

### 3、其他電力公司簡報摘要

本次會議共有來自美、加、日、法、比、瑞典、台灣等多國與會代表，計發表 23 篇專題報告，內容涵蓋核燃料破損趨勢、燃料績效及經驗回饋、燃料匣彎曲等相關議題。與會各電力公司代表們討論熱烈，分享彼經驗及資訊，令人獲益匪淺。以下就部分與本公司較相關之議題進行探討：

#### 【燃料破損趨勢議題】

##### (1) EPRI(美國電力研究所) Aylin Kucuk 博士報告燃料績效資料庫 FRED 更新情形。

FRED 資料庫原本以美國電力公司為主，後來在歐洲及亞洲國家的電力公司逐漸加入後，資料庫內容已愈來愈充實，也愈能逐漸反映國際核燃料績效趨勢。本公司於前一次 FRP(燃料可靠度計畫 2005-2007)期間加入，開始提供核燃料營運績效資料。由於美國幾乎所有電力公司均已加入此一資料庫，最能代表其核燃料績效趨勢情形。從簡報資料顯示，美國沸水式機組核燃料破損主要肇因依序為：爐屑磨損(39%)、PCI (25%)、不明原因(21%)、積垢腐蝕(13%)、及製造因素(2%)。破損情形確實有逐年下降趨勢，惟要達到 2010 年零破損目標仍相當困難，還有相當多的改善空間。為達此一目標，EPRI 持續發展各項防範燃料破損指引。

雖然非美國電力公司加入 FRED 資料庫的家數不多，簡報內容亦對此部分燃料績效進行統計。不過，統計結果與美國電力公司大相逕庭：沸水式機組所有破損燃料中約 30%爐屑磨損，其他則原因不明。可能是非美國電力公司仍在學習使用 FRED 資料庫的緣故，或者在肇因尚未最終判定前均以未明來表示。由於本公司的資料亦有輸入，核二廠自加入 FRED 資料庫起曾輸入一號機週期 19 有 1 根疑似 PCI 破損，但未顯示在其統計內。因此，職針對此一統計之正確性進行提問，Kucuk 博士回覆會再檢查。希望本年度 EPRI 訪問本公司前能適時更正。

##### (2) NAC Stoller Mr. Christopher A. Rusch 簡報國際核燃料績效趨勢。

Stoller 公司由於會員分佈遍及全世界，不像 EPRI 的 FRED 資料庫較偏重美國。因此，其統計結果更具有代表性。該公司係以每兩年移動平均方法統計燃料破損趨勢。最近一期(2006 年年中至 2008 年年中)統計資料顯示，沸水式機組核燃料破損主要肇因依序為：爐屑磨損(42%)、PCI (32%)、不明原因(18%)、製造因素

(5%)、及未檢驗(3%)。排序和 EPRI 類似，其中「不明原因」一項大多數疑與爐屑磨損有關。

全球三家主要沸水式機組核燃料供應商(GNF, AREVA, WH)自 2000 年起燃料破損率有上升趨勢，至 2003 年達到高峰後逐年下降，惟 AREVA 公司則又緩慢上升；而壓水式機組核燃料供應商因併購關係僅剩兩家(AREVA, WH)，爲了確實反映不同製造廠核燃料績效，該統計仍以併購前的公司爲基礎。亦即分爲：AREVA, AREVA(B&W), WH, WH(CE)進行統計。結果顯示，AREVA 與 WH 燃料破損率均保持逐漸下降趨勢，而被併購的 B&W 及 CE 燃料績效均不佳。

### (3) 燃料破損趨勢議題討論

核二廠自 2000 年以來之密集燃料破損，主要肇因爲爐屑磨損及 PCI 兩項。與美國及全球沸水式機組燃料破損的主要肇因相同。

其中，PCI 一般認爲係來自燃料廠家製程不夠嚴謹導致燃料丸表面缺陷所引起。但燃料廠家製程從以前就是如此，只會愈來愈改善，何以在近期突然造成大量 PCI 破損？燃料廠家所提供的預調節規範通常根據其 ramp test 實驗數據訂定，其中是否因保留較少餘裕或模式不準度較高，導致升載過程變得不夠保守，不足以因應燃料丸表面可能有潛在缺陷的狀況？另外，燃料設計由 8X8 進化至 10X10 後，是否已隱含先天上的弱點(weakness)，致使其在升降載過程中就處於較不利的情勢？

關於爐屑磨損問題，沸水式機組最近大多數初始破損點均發生於燃料上半部。核二廠近幾年的爐屑磨損破損亦是如此。由於 10X10 的燃料設計，大多採取部分燃料棒爲半長棒設計，致使燃料上半部燃料棒排列會有部分無燃料棒的情形。某些區域燃料棒與燃料棒間距拉長，有無可能容易讓異物由燃料棒上方直接掉入，造成破損？若異物(爐屑)由燃料底部進入，有無可能由於目前的燃料型式及燃料隔板(spacer)設計在單相流的部分(爐水)容易讓爐屑通過，但當愈往燃料上部，因雙相流(水及氣)產生，隨著空泡係數增加，而使爐屑通過愈來愈困難，最終導致爐屑被卡在燃料上半部進而造成磨損破損？此外，10X10 的燃料設計，燃料棒外徑約 1 公分，燃料護套僅約 1 公釐，是否先天上就較不易對抗磨損？

上述這些課題均與 10X10 燃料設計有關，值得我們深思。

## 【燃料績效及經驗回饋議題】

本屆會議大多數電力公司代表均報告其燃料績效及處理經驗，其中比較引人關注的項目摘要如下：

### (1) 高效能抗爐屑底部繫板(debris filter)。

Progress Energy公司Mr. Gregory Cadigan Hahn提到該公司Brunswick電廠 1,2 號機分別自 2008, 2009 年起之 ATRIUM-10 新燃料裝置 FUELGUARD 抗爐屑底部繫板修訂版(modified FUELGUARD debris filter)，計畫分別自 2010, 2011 年起(即下個燃料週期)之 ATRIUM-10 新燃料裝置改良型 FUELGUARD 抗爐屑底部繫板(improved FUELGUARD debris filter)。職提問該兩種 debris filter 與原型有何不同時，Mr. Hahn 僅答覆係為調整底部繫板之壓力降。

核二廠自 2010 年起的新燃料將採用 FUELGUARD debris filter，實際上目前 1 號機爐心中已有 18 束新燃料採用。為避免在全面使用前即可能已過時或有潛在問題，有關此部分之技術細節仍需詢問 AREVA 公司。

另外，Brunswick 電廠 1,2 號機之前的 GNF GE-14 燃料亦裝置有 Defender 抗爐屑底部繫板。Exelon 公司 Mr. Matt Heverly 亦提及該公司的 GE-14 燃料亦裝置有 Defender 抗爐屑底部繫板。無論是 AREVA 的 FUELGUARD 或是 GNF 的 Defender，均為高效能抗爐屑底部繫板，可濾除大部分爐屑(宣稱可濾除 90% 以上)。未來新燃料採用高效能抗爐屑底部繫板應為潮流。

### (2) 燃料啜吸技術考量

燃料破損後到底需採用何種燃料啜吸技術找出破損燃料有諸多考量因素。例如：在期中停機非找出破損燃料不可之狀況下，採用 in-core sipping 技術雖然迅速但仍有無法找出之風險，需輔以 vacuum sipping 當後備計畫；而在大修中，可考慮 in-mast sipping 或 telescope sipping 方式，因其不占要徑工期，但先決條件是破孔需夠大。

Exelon 公司 Mr. Michael Reitmeyer 提及該公司有一部機組於運轉中發現燃料疑似破損，但破損狀況相當輕微。大修停機時採用 telescope sipping 方式未找出破損燃料。結果，機組重新起動後又有大量廢氣產生，證實破損燃料仍在爐心。隨後進行功率壓抑測試及期中停機移除破損燃料。職提問有無進行 Cs-134 及

Cs-147 取樣，Mr. Reitmeyer 回覆 Cs 取樣疑似 once burnt 燃料，後來期中停機亦證實為 once burnt 燃料。

本項經驗相當寶貴，與核二廠 1 號機週期 14 之經驗雷同。但核二廠比較幸運，當時雖然於 EOC14 大修中未用 telescope sipping 方式找出破損燃料，但 Cs 取樣分析顯示破損燃料為退出燃料。後來於機組重新起動後，在燃料貯存池中使用 vacuum sipping 方式找出破損燃料。

Mr. Reitmeyer 最後以 3 項建議做為總結：①不要以為破損輕微就可不做功率壓抑測試；②事情不會自行了結；③不要將雞蛋放在同一個籃子裏。不過隨後職與其在休息期間就功率壓抑測試時機彼此相換意見，咸認在破損狀況輕微的條件下，進行功率壓抑測試之困難度相當高，仍待商榷。職亦提供核二廠 1 號機週期 14 之經驗與其分享。

### (3) 燃料重新置入(re-insert)爐心問題

破損燃料修復後到底應不應重新置入爐心，亦有諸多考量因素。若決定不再使用，通常會受到來自公司會計部門之壓力。但以技術層面考量，通常燃料受損均有其脆弱(vulnerable)未知之一環，即使肇因已釐清，使用上多少仍有一些疑慮。

Fuelco 公司 Michael Brown 博士提及 Callaway 電廠於週期 13 發生 2 束燃料破損。破損位置剛好位於對稱位置，因此將另外 2 束對稱位置未檢驗出破損之燃料一併退出爐心，隨後於週期 15 大修重新置入爐心使用。結果，其中 1 束於週期 16 重新起動後即發生破損。研判可能於週期 13 即發生破損，當時未被偵知。由於是對稱位置，推測肇因可能與 PCI 有關。

本案例雖然不是破損燃料修復後重新置入爐心，但狀況有點類似。未來在使用重新置入爐心燃料時當更審慎。

### (4) 燃料績效特別好的電廠

有些電廠一直保持良好的燃料營運績效記錄，如：Dominion 電力公司 Kewaunee 電廠自 1986 年迄今無燃料破損、Surry 電廠 2 號機連續 16 個燃料週期迄今無燃料破損、Exelon 電力公司的 Clinton 電廠無燃料破損經驗、Fuelco 電力公司的 Diablo Canyon 電廠 1 號機自 1991 年迄今無燃料破損等等。對於為何可以如此保持良好的燃料營運績效之問題，均表示並無採取特別防範措施。如果有優良典

範可以互相學習可供借鏡，那麼至少同一家電力公司之燃料營運績效應該相當。但前述電力公司其他電廠燃料營運績效即相差甚多。而以本公司為例，核一、二廠均使用同一廠家之燃料，防範燃料破損策略與措施類似，水準與業界齊一，結果燃料營運績效亦顯著不同。難道燃料破損純粹為機率問題？

### 【燃料匣彎曲議題】

#### (1) 燃料匣材質

燃料匣材質一般認為仍以 Zr-4 較不易發生燃料匣彎曲問題，另外 D-lattice 爐心也較不易發生燃料匣彎曲問題。但 Progress Energy 電力公司 Brunswick 電廠 2 號機為 D-lattice 爐心，其燃料匣材質為 Zr-2，最近也發生疑似燃料匣彎曲問題，造成受影響的控制棒宣告不可用，計畫於 2009 年 8 月大修時進行燃料匣彎曲檢測。Exelon 電力公司 Peach Bottom 電廠 3 號機也是 D-lattice 爐心，其燃料匣材質亦為 Zr-2，於今年(2009)1 月 21 日停機大修過程中，有 2 根控制棒於全入後無法停妥於 00 位置，另外還有 2 根控制棒無法停妥。均疑與燃料匣彎曲有關。

#### (2) 燃料匣更換

為解決燃料匣彎曲問題，許多電廠進行燃料匣更換之預防措施。如：Exelon 電力公司 LaSalle 電廠 2 號機於週期 12 大修計更換 294 束燃料匣、Quad Cities 電廠 1 號機於週期 20 大修更換 24 束燃料匣。比較引人注意的是，該廠更換的是西屋公司 SVEA-96 Optima2 型燃料的燃料匣。該型燃料是業界普遍認為最不易發生燃料匣彎曲的燃料。這意謂為避免損及運轉時之安全餘裕，堅持保守作為仍是非常必要的。至於職提問更換後舊燃料匣如何處理之問題，對方回覆先暫存燃料貯存池經減容後再移出廠房。

(3) PPL 電力公司 Mr. Chris Hoffman 報告 Susquehanna 電廠燃料匣彎曲處理經驗 PPL(Pennsylvania Power & Light)電力公司 Susquehanna 電廠(共兩部機)，過去為了處理燃料匣彎曲問題，付出了相當高昂的代價。包括：在 2 年半期間總計更換約 1,000 束燃料匣、3 次期中停機、3 次大修、挪移約 6000 束燃料等。經過一連串的努力後，目前燃料匣彎曲問題似乎已經遠離。這些努力除了上述所付出之代價外，尚包含下列預防/改善措施：

- 燃料匣材質均已由 Zr-2 變更為 Zr-4。

- 參考燃料廠家建議及依據本身經驗訂定燃料匣彎曲偵測試驗方法及準則。
- 訂定期中停機處理原則。

Susquehanna 電廠對於燃料匣彎曲議題有豐富之處理經驗。本公司核一、二廠防範燃料匣彎曲之措施與 Susquehanna 電廠類似。由變更燃料匣材質、定期監測、必要時更換燃料匣等方面進行防範，確保控制棒安全功能無損。

#### 【其他議題】

- (1) Southern Nuclear 電力公司使用超音波清洗技術進行 PWR 燃料除污。該清洗技術係配合 Vacuum Sipping 進行。職提問進行超音波清洗之目的，回覆並非爲了降低劑量考量，係爲積垢考量(水質因素)。至於 BWR 燃料並未使用該方法進行除污。
- (2) Southern Nuclear 電力公司提及其 BWR 廠亦有更換 GE D230 型控制棒爲西屋 CR-99 型控制棒。主要原因並非控制棒裂紋，而是懷疑控制棒硼吸收管有破孔，導致硼流失。爐水硼濃度約達 200~300 ppb，而在更換控制棒佈局前後會發現硼濃度變化。此一經驗相當獨特，硼流失程度可在更換控制棒佈局前後會看出硼濃度變化，顯示其硼流失程度相當嚴重。

## 五、心得與建議

- 1、 本次參訪 AREVA 燃料製造廠，發覺該廠在各方面均有顯著之進步。如：入廠訓練與安檢、輻射污染偵測程序、工安及污染防護護具之要求、防止異物入侵管制、以及工作動線安排與廠房佈置等，其製造品質應能有效提昇。而本公司持續派員赴燃料廠家進行實地查訪，並就核燃料績效議題進行意見交換，均能持續給予廠家持續改善之壓力。
- 2、 燃料廠家 AREVA 宣稱爲了解決燃料丸表面製造缺陷問題，自 2004 年年中起開始改變製程，其中包括將使用儀器自動檢查方式進行燃料丸表面檢查，以取代之前的目視檢查。然而，本次參訪的結果顯示，AREVA 里其蘭製造廠仍使用目視檢查，有關儀器自動檢查仍未上線。AREVA 計劃經理 Ms. Kris Mitchell 當場說明該套設備已接近完成 Licensed，可於近期(預估 8 月)內完成上線。由於本項改良，將影響本公司核一、二廠執行相關防範措施(如：緩慢升載策略)之時程，建議總處(核能安全處)追蹤其完成改善之時程。
- 3、 有關核二廠自 2000 年以來燃料破損之最終肇因，經熱室檢驗及廠家使用較先進之應力分析程式後，廠家對於部分破損棒之肇因認定與本公司「核能機組核燃料績效歷史資料報告」所載不同。本次赴費城所報告之資料係與廠家確認後之最終肇因報告。由於本公司「核能機組核燃料績效歷史資料報告」係依據廠家歷次破損燃料肇因分析報告而得，若廠家最終結論與原分析報告不同，廠家應有義務進行更正或正式通知本公司。本項目建議核能發電處向廠家表達本公司之關切。
- 4、 國際電力公司核燃料績效會議(IUNFPC)每年舉辦一次，參加者僅限電力公司及顧問機構。由於排除燃料廠家及管制單位的參與，與會者大多可以暢所欲言。多數電力公司均會抱怨燃料廠家的服務不夠周全之處，也會有一些未能見諸文字的經驗，確實是一個很好的交流平台。核二廠雖然自 2000 年起至 2008 年止燃料績效表現不佳，但累積相當豐富的處理經驗，可提供其他電力公司參考。而與會代表大多爲實務工作者，透過面對面交換意見，確實能汲取寶貴經驗，本公司宜持續派員參與。
- 5、 本公司在處理核燃料破損決策的細膩程度，以及相關防範措施，與國際同步，甚至較保守。如：燃料破損後採用何種燃料啜吸技術找出破損燃料之考量，以及萬一未

找出破損燃料之後備方案等，本公司在決策上之考量均較細膩。而爲了防範燃料丸表面缺陷所引起之 PCI 破損，本公司亦採取比廠家建議更保守之升載策略。對於破損燃料修復後再置入爐心之議題，本公司亦思慮再三。透過本次會議，分享彼此經驗，能讓與會者瞭解本公司在處理核燃料議題之態度及做法。

- 6、自 2000 年起，國際核燃料績效逐漸變差，隨後在業界不斷努力及提出 2010 年零破損目標的帶動下，又逐漸變好。雖然要在 2010 年達成燃料零破損之目標已相當困難，但經由業界持續貢獻優良作業典範、處理及防範經驗、破損肇因追查與防治等，彼此能夠互相交流學習，咸認應能逐年降低燃料之破損率。

**39<sup>th</sup> International Utility Nuclear Fuel Performance Conference**  
**Philadelphia, Pennsylvania, USA**  
**June 17 - 19, 2009**

**Agenda**

**Wednesday**  
**June 17<sup>th</sup>**

Time	Speaker	Company	Topic
7:30 AM	8:30 AM	<i>European Breakfast</i>	
8:30 AM	8:45 AM	Michael Brown	<i>IUNFPC Steering Committee</i> Welcome
8:45 AM	9:15 AM	Aylin Kucuk	<i>EPR</i> Industry Fuel Performance Trends – FRED Update
9:15 AM	9:45 AM	Gregory Hahn	<i>Progress Energy</i> Progress Energy Fuel Performance Update
9:45 AM	10:30 AM	Matt Heverly	<i>Exelon</i> Exelon Fuel Performance
10:30 AM	10:45 AM	<i>Break</i>	
10:45 AM	11:30 AM	Thierry Meylogan	<i>EdF</i> EdF Fuel Performance
11:30 AM	12:00 PM	Richard Loftin	<i>Southern Nuclear</i> PWR & BWR Fuel Performance Update
12:00 PM	1:00 PM	<i>Lunch Break</i>	
1:00 PM	1:30 PM	Chris Hoffman	<i>PP&amp;L</i> PPL Channel Bow and Re-channeling Experience
1:30 PM	2:15 PM	Al Strasser	<i>Aquarius</i> BWR Channel Bow
2:15 PM	2:45 PM	David Smith	<i>Entergy</i> Fuel Performance at Entergy
2:45 PM	3:15 PM	<i>Break</i>	
3:15 PM	3:45 PM	Alex Lin	<i>Taiwan Power</i> Root Causes of Kuosheng Failed Fuel Since 2000
3:45 PM	4:15 PM	Ralph Klein	<i>Anatech</i> Quality Issues-An Update As We Move Towards 0 by 10
4:15 PM	4:45 PM		

**39<sup>th</sup> International Utility Nuclear Fuel Performance Conference  
Philadelphia, Pennsylvania, USA  
June 17 - 19, 2009**

**Agenda**

	<b>Speaker</b>	<b>Company</b>	<b>Topic</b>
<b>Thursday June 18<sup>th</sup></b>			
7:30 AM	8:30 AM	<i>European Breakfast</i>	
8:30 AM	9:00 AM	Penney File	Recent Fuel Performance at Constellation
9:00 AM	9:30 AM	Matthew Rybenski	Fuel Performance at Fort Calhoun
9:30 AM	10:00 AM	Michael Reitmeyer	GE141 ITA Project
10:00 AM	10:15 AM	<i>Break</i>	
10:15 AM	11:00 AM	Dion Sunderland	Ready for 2010 – Preventing PCI
11:00 AM	11:45 AM	Michael Brown	Fuelco Fuel Performance
12:00 PM	1:00 PM	<i>Lunch Break</i>	
1:00 PM	1:30 PM	Gaelle LeMeur	Radiochemical Specifications Fuel Failure Determination in Core Xenon Monitoring
1:30 PM	2:15 PM	Mark Porter	Fuel Performance in TVA Reactors
<b>Friday June 19<sup>th</sup></b>			
7:30 AM	8:30 AM	<i>Continental Breakfast</i>	
8:30 AM	9:00 AM	Chris Rusch	Global Trends in Fuel Reliability
9:00 AM	9:30 AM	Eric Olson	Recent Fuel Performance in Kansai PWR Plants
9:30 AM	10:00 AM	Audrius Jasiulevicius	Fuel Performance at Vattenfall plants
10:00 AM	10:30 AM	<i>Break</i>	
10:30 AM	10:45 AM	Ruben Rodriguez	FP&L Fuel Performance
10:45 AM	11:15 AM	Jessica Odish	PSEG Nuclear Fuel Performance
11:15 AM	11:45 PM	Norm Wolfhope	Fuel Performance at Dominion Nuclear
12:00 PM		<i>Adjourn</i>	

## International Utility Nuclear Fuel Performance Conference Host Organizations (1970-2009)

Year	Organization	Year	Organization	Year	Organization
1970	Consumers Power	1984	Yankee Atomic	1998	<i>No meeting held</i>
1971	Ontario Hydro	1985	Texas Utilities	1999	AmerenUE
1972	Consumers Power	1986	Duke Power	2000	Energy Northwest
1973	Pacific Gas & Electric	1987	Ontario Hydro	2001	Entergy
1974	GPU Service	1988	Virginia Power	2002	Tennessee Valley Authority
1975	Southern Services	1989	Entergy	2003	Southern California Edison
1976	Arkansas Power & Light	1990	Northern States Power	2004	Southern Nuclear
1977	Tennessee Valley Authority	1991	Carolina Power & Light	2005	Las Vegas, NV
1978	Florida Power & Light	1992	Florida Power & Light	2006	Washington, DC
1979	Southern California Edison	1993	Commonwealth Edison	2007	Argonne National Laboratory (Chicago)
1980	Northern States Power	1994	Yankee Atomic	2008	Dallas, TX
1981	Portland General Electric	1995	Public Service Electricity & Gas	2009	Philadelphia, PA
1982	Consumers Power	1996	Argonne National Laboratory (Idaho)	2010	
1983	GPU Nuclear	1997	Ontario Hydro	2011	

# 2009 International Utility Nuclear Fuel Performance Conference Attendance List

2009/7/28

附件二、國際核燃料績效會議與會人員

Last Name	First Name	Company	E-mail address	Phone
Beavers	Victoria	Southern Nuclear	vbeavers@southernco.com	205-992-7179
Brown	Michael	Fuelco/AmerenUE	jbrown@ameren.com	314-554-3432
Chiu	Wan-June	INER	wjchiu@iner.gov.tw	886-3-4711400 x6656
Eyre	Matt	PSEG Nuclear	matthew.eyre@pseg.com	856-339-1807
File	Penney	Constellation Energy	penney.a.file@constellation.com	410-495-4470
Hahn	Gregory	Progress Energy	Gregory.hahn@pgnmail.com	919-546-7922
Heverly	Matthew	Exelon	matthew.heverly@exeloncorp.com	610-765-5891
Hilton	Bruce	Idaho National Laboratory	bruce.hilton@inl.gov	208-533-7758
Hoffman	Chris	PPL Susquehanna	ckhoffman@pplweb.com	610-774-4043
Jasiulevicius	Audrius	Vattenfall Nuclear Fuel AB	Audrius.Jasiulevicius@vattenfall.com	+46 87395407
Kennard	Michael	Anatech	kennard@anatech.com	845-454-6100
Kirkland	Matthew	Detroit Edison	kirklandm@deenergy.com	734-586-1852
Klein	Ralph	Anatech	rklein@anatech.com	860-885-1980
Kucuk	Aylin	EPRI	AKucuk@epri.com	650-855-2124
Le Meur	Gaëlle	EdF	gaelle.le-meur@edf.fr	33+(0)143697148
Lin	Alex	Taiwan Power Company	u808941@taipower.com.tw	886-2-24985990 ext. 2611

# 2009 International Utility Nuclear Fuel Performance Conference Attendance List

2009/7/28

Last Name	First Name	Company	E-mail address	Phone
Lofin	Richard	Southern Nuclear	ralofin@southernco.com	205-992-5453
Meylogan	Thierry	EdF	thierry.meylogan@edf.fr	33+(0)469654711
Montin	John	AECL	montinj@aecl.ca	613-584-3311 x46339
Odish	Jessica	PSEG Nuclear	jessica.odish@pseg.com	856-339-1910
Olson	Eric	Stoller	eolson@stoller.com	303-546-4410
Payton	Steve	Exelon	stephen.payton@exeloncorp.com	610-765-5489
Petty	Jocelyn	Duke Energy	jcpetty2@duke-energy.com	704-382-2667
Porter	Mark	TVA	mdporter@tva.gov	423-751-4853
Reitmeyer	Michael	Exelon	michael.reitmeyer@exeloncorp.com	610-765-5059
Rivera	John	NAC International	jrivera@nacintl.com	770-595-4929
Rodriguez	Ruben	Florida Power & Light	ruben_j_rodriguez@fpl.com	561-694-3345
Rusch	Chris	NAC International	crusch@nacintl.com	678-328-1222
Rybenski	Matthew	Omaha Public Power District	mcrybenski@oppd.com	402-533-6841
Sap	Frans	Electrabel	frans.sap@electrabel.com	+32 85 315336
Smith	David	Entergy Operations	dsmit23@entergy.com	601-368-5412
Stackler	William	PSEG Nuclear, LLC	William.Stackler@pseg.com	856-339-1318

# 2009 International Utility Nuclear Fuel Performance Conference Attendance List

2009/7/28

Last Name	First Name	Company	E-mail address	Phone
Strasser	Alfred	Aquarius Services	stras68@optonline.net	914-366-8875
Wengloski	Philip	Constellation Energy	Philip.I.Wengloski@constellation.com	410-495-2892
Wolffhope	Norman	Dominion	Norman.Wolffhope@dom.com	804-273-2268



Root Causes of Kuosheng  
Failed Fuels since Year 2000

Alex C.P. Lin  
Kuosheng NPS  
Taiwan Power Company  
June 17-19, 2009

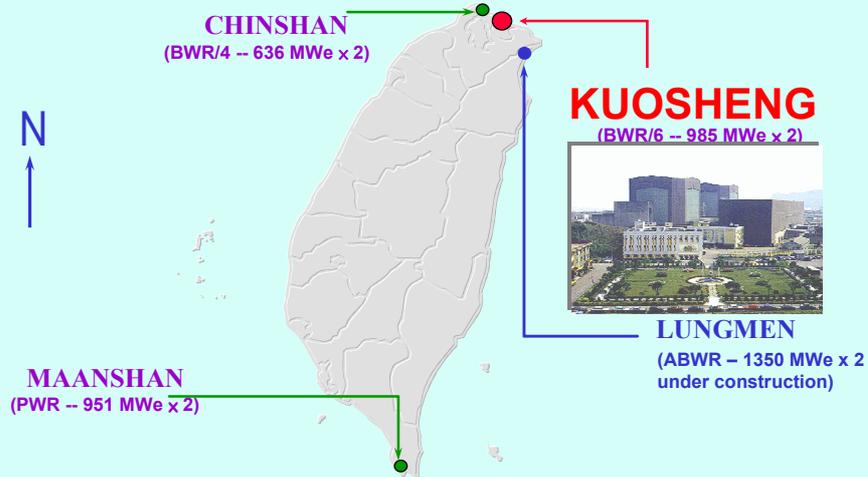
 台灣電力公司 -1- Taiwan Power Company KSNPS 

## Contents

- Kuosheng NPS Overview
- Fuel Failure Summary (since Year 2000)
- Root Causes
  - Non-classical PCI
  - Debris Fretting
- Corrective Actions

 台灣電力公司 -2- Taiwan Power Company KSNPS 

## The Nuclear Power Plants in Taiwan



台灣電力公司

-3-

Taiwan Power Company KSNPS



## Kuosheng's Summary

- ❑ Major Equipments :
  - Reactor : **GE (BWR-6)**      Turb./Gen. : **WH**
- ❑ Capacity : **985 MWe x 2 Units**
- ❑ Milestones :
 

	<b>Construction</b>	<b>Commercial</b>
➢ Unit 1	<b>1974. 09. 18</b>	<b>1981. 12. 28</b>
➢ Unit 2	<b>1974. 09. 18</b>	<b>1983. 03. 16</b>
- ❑ Percentage of Installed Capacity: **5.1%** in 2008
- ❑ Electricity Generation: **16.2 Billion kwh** in 2008 (**7.8%**)
- ❑ MUR Uprated: **1.7%** in 2007
- ❑ KS1, with its **yearly C.F. of 99.96%** in 2008, was ranked as the **eleventh high performance** among worldwide 439 operating nuclear units.



台灣電力公司

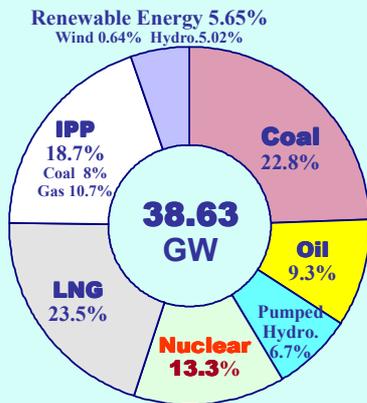
-4-

Taiwan Power Company KSNPS

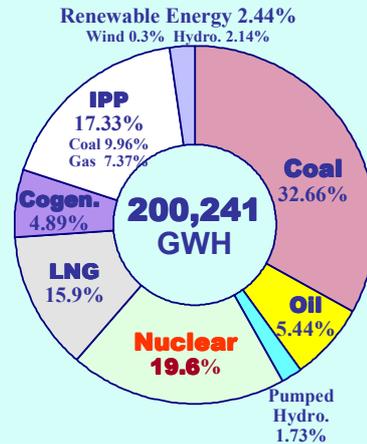


# TPC Electricity Distribution in 2008

## Installation

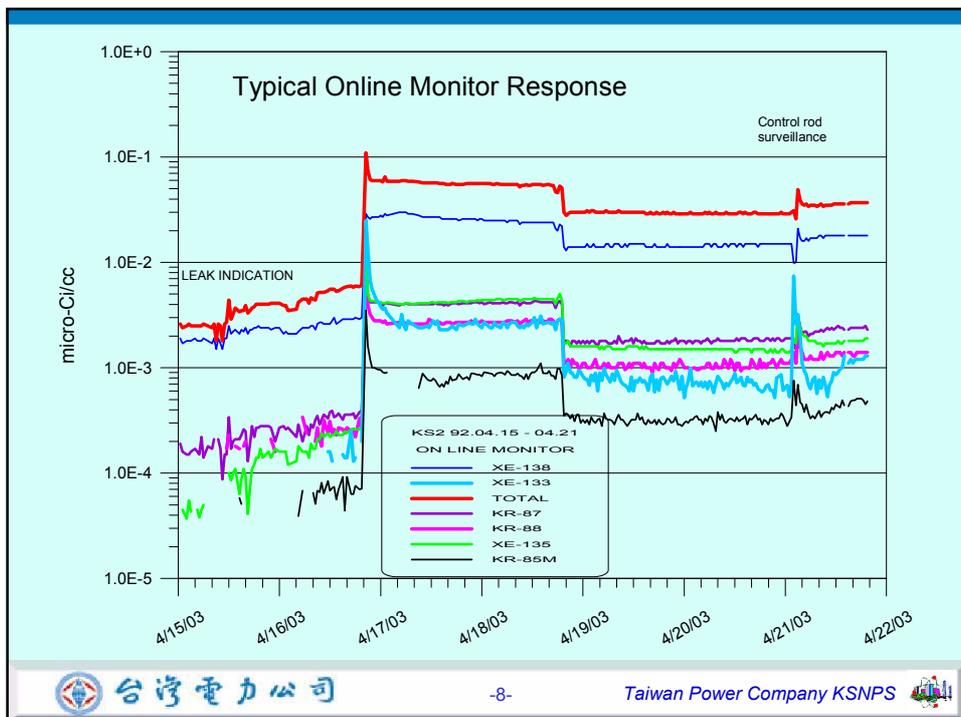
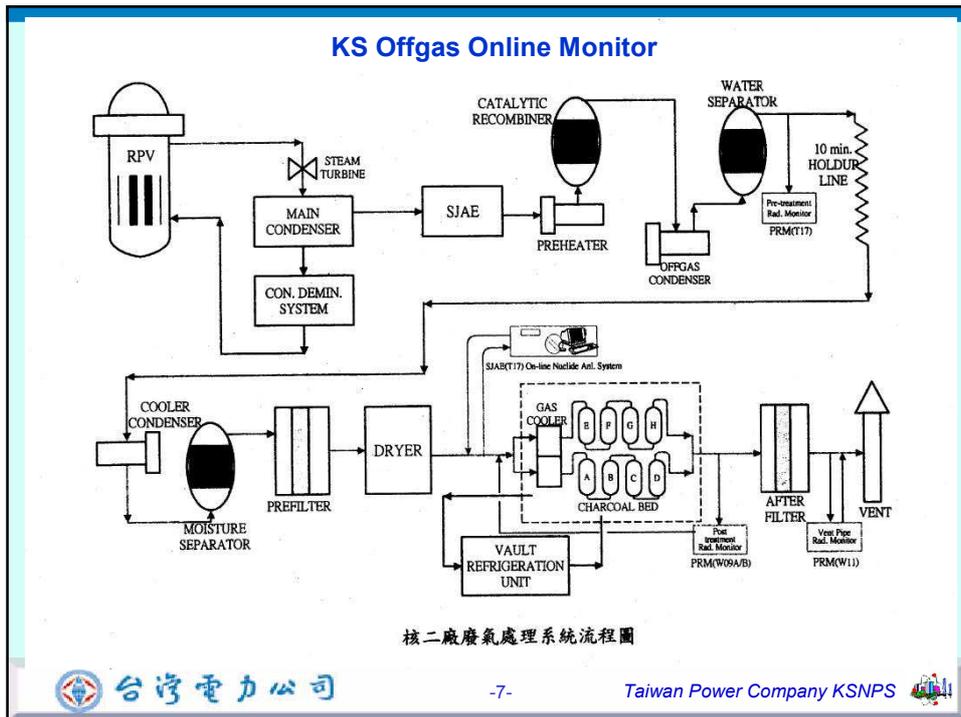


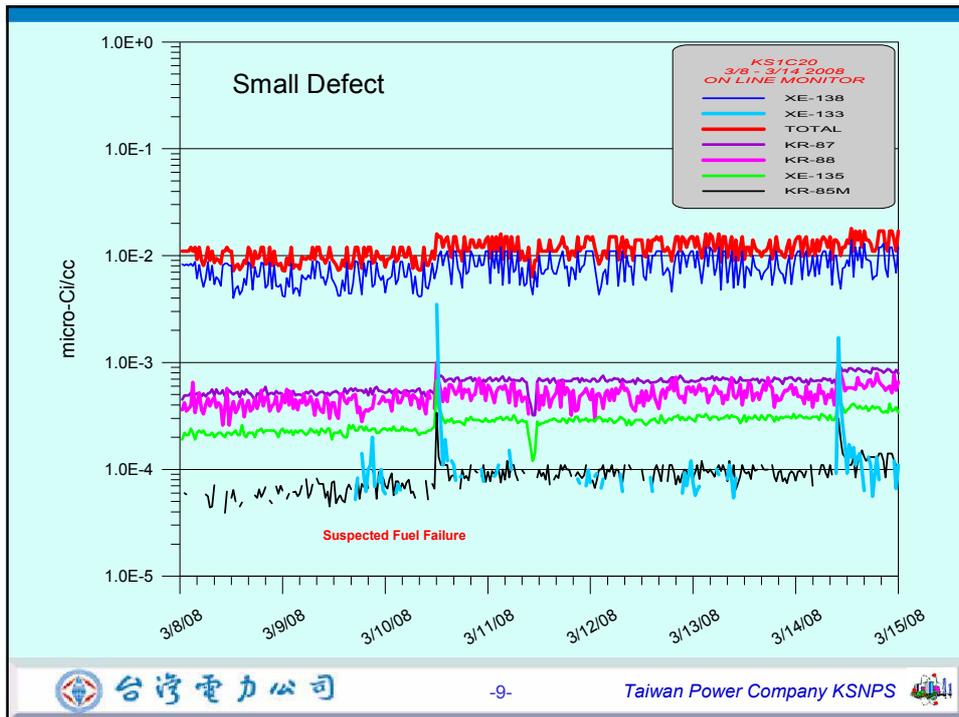
## Generation



## Information for Fuel Integrity Evaluation

- Offgas Daily Sample ( $\mu$  Ci/sec)
  - Xe-133, Xe-135, Xe-138
  - Kr-85m, Kr-87, Kr-88
- Online Offgas Monitoring System ( $\mu$  Ci/cc)
  - 30 mins
- Post treatment radiation monitor (cpm)
- Post Failure
  - Cs-134, Cs-137 (exposure evaluation)
  - Sr-91, Sr-92, Np-239 (degraded index)





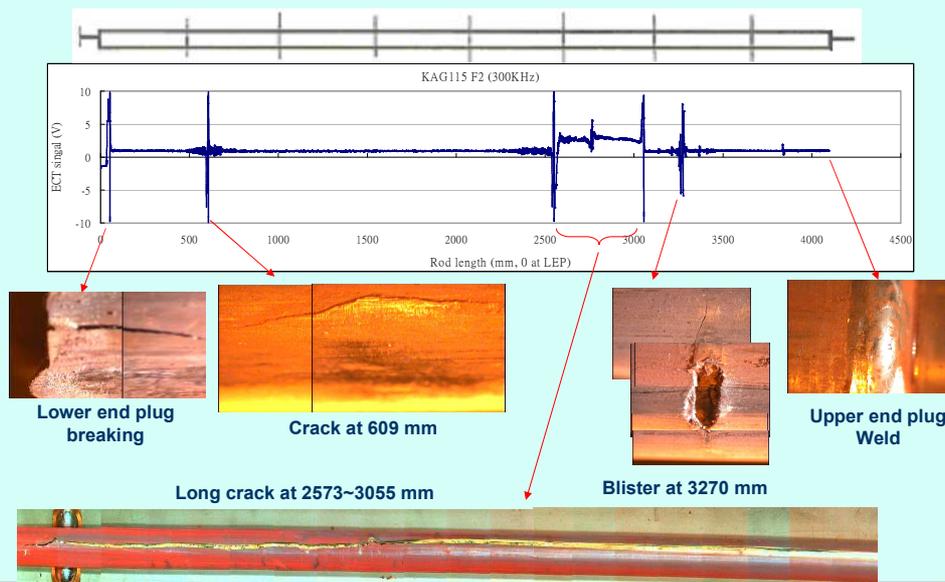
## Fuel Failure Summary

Unit/Cycle	Detected	Sipping	BU/Type	Root Cause
KS2/16(MOC)	2003.4.16	2003.12.23	28.9/A9B	NC-PCI (MPS found in hot cell)
			28.6/A9B	NC-PCI (MPS found in hot Cell)
KS2/17(MOC)	2004.6.21	2004.12.25	35.2/A9B	PCI possible (No MPS found in hot cell)
			33.8/A9B	NC-PCI possible
KS1/17(EOC)	2004.8.9	2004.9.13	31.0/A10	Debris (visual inspection)
KS2/18(MOC)	2005.12.19	2006.1.27	30.7/A10	Debris (determined in hot cell)
KS2/18(EOC)	2006.7.1	2007.4.16	32.9/A10	Debris (visual inspection)
			33.2/A10	Undetermined (low stress)
KS1/19(MOC)	2006.9.27	2007.2.17	40.2/A10	PCI possible
KS1/19(EOC)	2007.8.15	2007.9.10	28.5/A10	Debris (visual inspection)
KS1/20(EOC)	2008.3.10	2009.3.12	26.6/A10	Debris (visual inspection)

## Hot Cell Examination

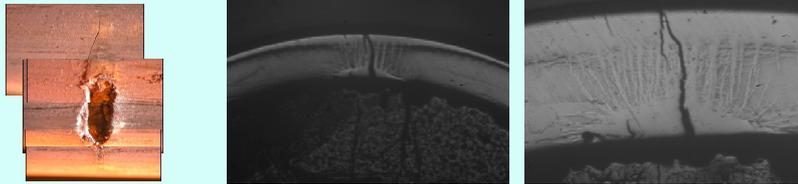
- ❑ The hot cell examination project started in mid-2006 and ended in early 2009.
- ❑ Three failed ATRIUM-9B rods (two from cycle 16, one from cycle 17), one failed ATRIUM-10 rod (from mid-cycle 18), and several reference rods were sent to the hot cell of INER (Institute of Nuclear Energy Research) in Taiwan for detail examination.

### KS2C16 1st A9B Failed Rod-NDT



### Metallographic Analysis

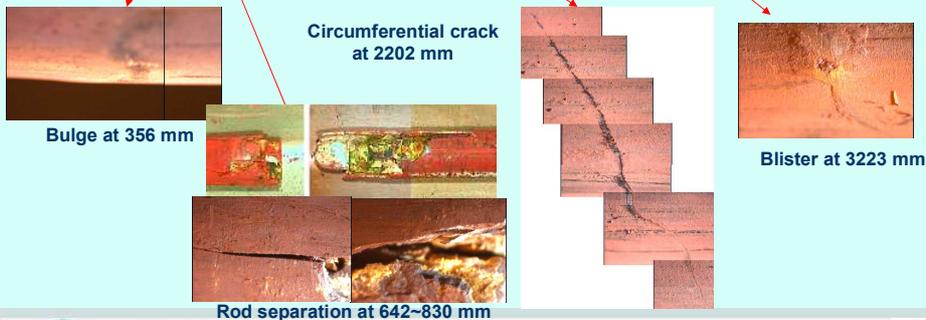
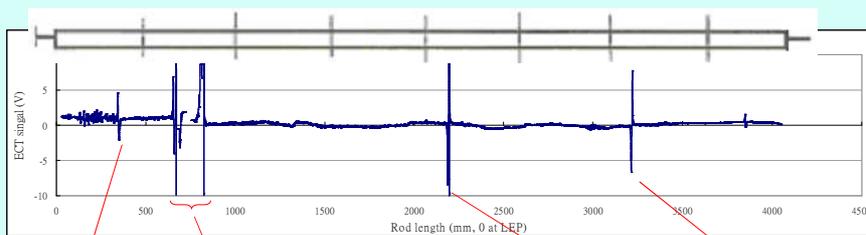
#### □ 3270mm – Blister



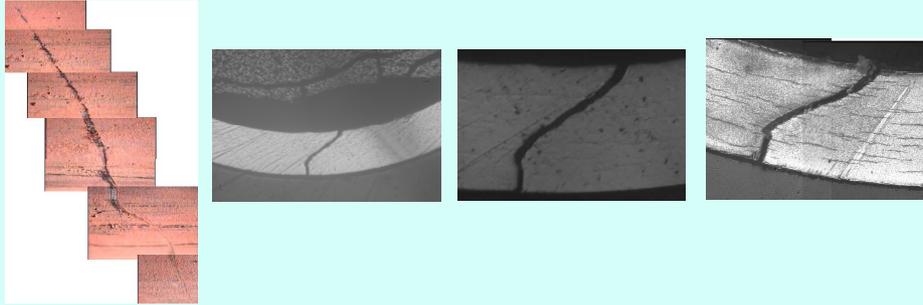
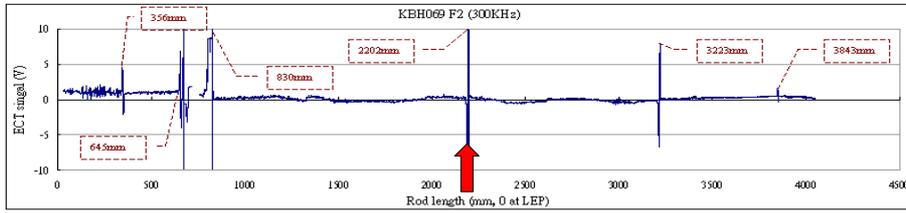
#### □ 609mm – axial crack



### KS2C16 2nd A9B Failed Rod-NDT



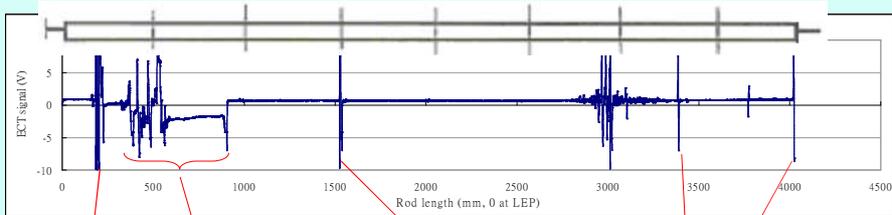
### Metallographic - Circumferential crack @ 2202 mm



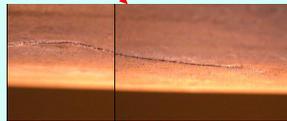
台灣電力公司

-15-

Taiwan Power Company KSNPS



Bulge at 190 mm

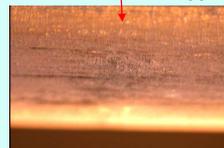


Crack at 1524 mm



Upper end plug

Long crack at 253~946 mm



Blister at 3395 mm

### KS2C17 1st A9B Failed Rod-NDT



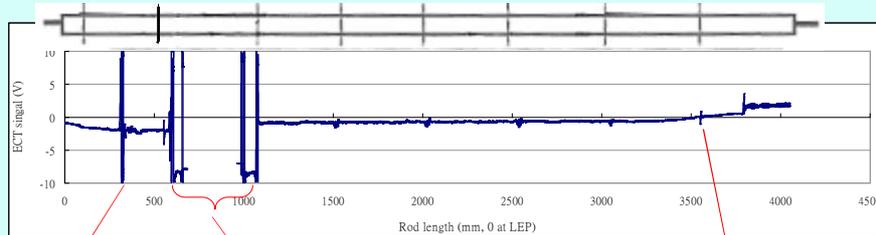
台灣電力公司

-16-

Taiwan Power Company KSNPS



## KS2C18(m) A10 Failed Rod-NDT



Crack at 307~330 mm



Debris fret at 3551 mm



Long crack at 698~1085mm



台灣電力公司

-17-

Taiwan Power Company KSNPS



## Corrective Actions-1

- ❑ To prevent from NC-PCI
  - Vendor has changed its manufacturing process, and pellet surface inspection criteria since mid 2004.
  - Kuosheng has adopted more rigorous power maneuvering strategy and fuel conditioning criteria (soft startup & operation strategy) since early 2007.



台灣電力公司

-18-

Taiwan Power Company KSNPS



## Corrective Actions-2

### ❑ To prevent from debris fretting

- Kuosheng has enforced its FME procedure, such as establishing the FME zone and control point in the spent fuel pool area, web-based FME auditing bulleting board, FME prerequisites prior to a maintenance task, etc.
- Kuosheng has performed partial RPV bottom head cleaning in the latest outage(1EOC20) for legacy debris.
- The fresh fuels furnished with more efficient debris filter (AREVA FUELGUARD LTP) are loaded into the core from 2009.



Thank you for  
your attention !

