

# 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：

EPRI -FRP 燃料可靠度亞洲區交流研討會

頁數\_16\_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

呂靜美/台灣電力公司/核能發電處/八等核能工程師/02-23667089

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：2017/10/17~2017/10/21

出國地區：韓國釜山

報告日期：2017/12/11

分類號/目

關鍵詞：燃料可靠度、EPRI

內容摘要：（二百至三百字）

今年度於韓國釜山進行之首次 FRP 全亞洲交流研討會為 FRP 團隊規劃、韓國水電與核電公司 KHNP 負責籌辦，與會單位包含美、中、台、韓、阿聯等國電力公司。會議中各國與會公司之電廠營運經驗回饋，多屬 PWR 機組核燃料營運議題居多，僅本公司分享為核二廠 1 號機週期 25 燃料破損處理經驗回饋屬於 BWR 燃料議題(如附件)。

本次討論會包含 FRP 燃料可靠度計畫下四個研究領域之最新研究技術、相關實驗與業界營運議題介紹：

1. Core-TAC: 非破壞性檢測技術(NDE)、燃料完整性監控、鋳材氫化研究、燃料可靠度與績效精進、燃料使用週期最佳化、突破性燃料技術研究
2. B-TAC: BWR 燃料護套陰影腐蝕、BWR 燃料積垢與水化學控制、BWR 燃料匣彎曲改善、BWR 控制棒葉片完整性監控、BWR 燃料結構與組件議題
3. P-TAC: PWR 燃料護套陰影腐蝕議題、PWR 燃料積垢、PWR 燃料結構與組件議題
4. Reg-TAC: 反應度突增之 RIA(Reactivity Insertion Accident)事故與護套氫化相關法規議題討論、燃料碎片(Fragmentation)機制探討

本報告將針對本次會議內容當中與本公司核燃料營運議題相關部分作詳細描述與探討。

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



## 出國報告（出國類別：開會）

# EPRI-FRP 燃料可靠度亞洲區交流研討會

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：呂靜美 核能發電處核能工程師

派赴國家：美國

出國期間：106 年 10 月 17 日至 10 月 21 日

報告日期：106 年 12 月 11 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
肆、結論、心得與建議事項	14
伍、參考資料	16

## 壹、出國目的

參與 EPRI-FRP 燃料可靠度亞洲區研討會，以瞭解本公司參與 EPRI 之 FRP(Fuel Reliability Program)燃料可靠度子計畫，現行資金運用情形及各領域研究範疇之最新發展現況，包含 BWR 與 PWR 燃料腐蝕積垢及相關組件結構完整性議題、燃料完整性監測及銦材氫化研究議題、安全分析與反應度管理相關法規議題等研究

本公司與美國電力研究所 EPRI 簽訂之 FRP 子計畫，於本次新期計畫(2017~2019)開始，EPRI 將過去每年赴亞洲各會員國單獨進行交流研討會之型式，改為第一年度邀請全亞洲各會員國電力公司共同參與研討會，次年度單獨拜訪各會員國。本年度於韓國釜山進行之首次全亞洲交流研討會為 FRP 團隊規劃、韓國水電與核電公司 KHNP 負責籌辦，與會單位包含美、中、日、台、韓、阿聯等國電力公司，參加該研討會有助於掌握核燃料技術之第一手國際資訊與研究發展現況，使相關情資汲取不中斷。

依循過去 EPRI 每年來訪本公司，針對當年度 FRP 計畫各項研究發展現況及其美國會員電力公司之核能機組燃料營運議題進行簡報，今年度首次以全亞洲電力公司年會方式進行。

參加本會議可確保國外最新核燃料技術知識汲取，增進本公司有關國外燃料營運、運轉之經驗吸收，提升燃料可靠度與機組營運績效。



## 貳、出國行程

106 年 10 月 17 日至 106 年 10 月 21 日含往返程共計 5 日，於韓國釜山 NOVOTEL AMBASSADOR 飯店會議現場執行本項任務。詳細行程如下：

<u>日 期</u>	<u>行 程</u>	<u>摘 要</u>
10/17	台北→釜山	往程
10/18	NOVOTEL AMBASSADOR 會議現場	1. 參加 Utility Round Table Discussion(各會員電力公司運轉經驗回饋討論與報告) 2. 參加 Core-TAC 議題報告
10/19	NOVOTEL AMBASSADOR 會議現場	1. 參加 B-TAC 議題報告 2. 參加 Reg-TAC 議題報告會議
10/20	NOVOTEL AMBASSADOR 會議現場	1. 參加 Falcon 程式介紹上午場(同時段之 P-TAC 議題報告由核研所副研究員代表參加) 2. Kori 電廠參觀(同時段之 Falcon 程式實作由核研所使用過 Falcon 之工程師代表參加)
10/21	釜山→台北	返程

## 參、任務過程

本次出國任務參與之會議內容分為以下幾項，就與公司核燃料營運有關部份作詳細探討、介紹：

(壹).FRP 計畫今年度研究重點概述

(貳).電廠經驗回饋

(參). FRP 執行計畫介紹

一、Core-Tac 議題:

(一)非破壞檢驗技術 F-SECT 應用於護套氫含量量測簡介

(二)NDE-Guided Ultrasonic Wave for Leaking Rod Detection(簡稱 GW)進步型超音波測量護套洩漏技術:

(三)SHIZAM (Study of Hydrogen Impacts in Zirconium Alloy Materials)鈦合金吸氫相關研究

二、B-TAC 議題:

(一)CRB 控制棒葉片完整性議題

(二)高效率超音波燃料清洗技術(Hihh efficiency UFC)

### (壹)、FRP 計畫今年度研究重點概述

有關本計畫經費會員涵蓋美、加、中、日、南韓、西班牙、瑞典、瑞士、台灣、阿聯猶、英國、墨西哥、南非等各核電公司。今年度全亞洲區與會公司除本公司，包含中國中廣核電公司(CGNPC)、南韓水力核能電力公司(KHNP)、阿聯猶核電公司(ENEC),原本預計與會之日本的關西電力因國內核能情勢嚴峻，故並未與會，本次各會員電力公司與會人員多數來自性質與我國核能研究所性質較相近之研究單位，較少來自電廠或電力公司。

本計畫主要針對業界在燃料可靠度提升、核燃料營運相關問題上進行實驗及研究，目前本計畫主力透過燃料於事故中機械材料特性耐受度之研究(簡稱 ATF, Accident Tolerance of Fuel)，可在不過份保守的規範下，燃料使用效益並符合法規要求，以期能讓業界在核燃料與爐心營運上能取得使用效益、成本、ATF 三者之最佳平衡。

FRP 計畫的演進，1980~90 年代期間主力於提升核燃料退出燃耗之研究、逐漸演進至 2000 年致力於減少燃料破損，期許 10 年內能透過精進核燃料使用效益以達到零破損之目標，近五年來則致力於解決業界在燃料營運上的問題，如 2010 年納入之 BWR 燃料匣彎曲研究專案(CDP)、2012 開始進行之燃材先進技術研發專案(Breakthrough Technology)，未來研究主力將針對燃料使用週期長度之最佳化設計、燃材鋳合金氫化反應、ATF 三塊主軸。

本計畫 FRP 目前研究各主、支領域如下：

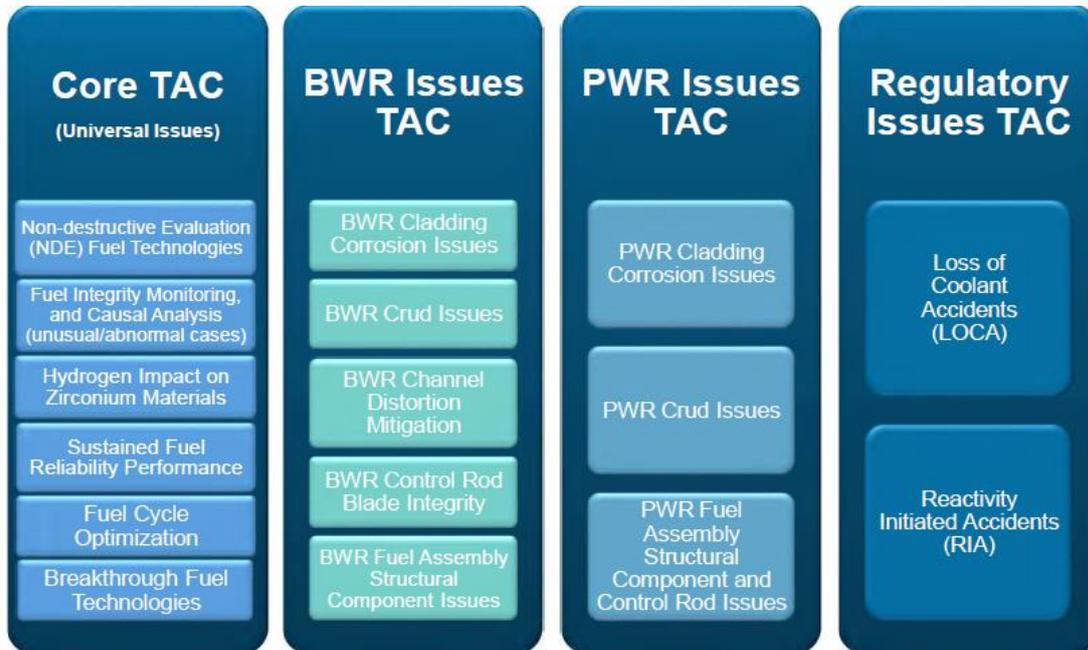
1. Fuel Material and Design: 燃材設計精進並改善燃料機械材料特性強度，以加強事故發生時燃料護套與燃料丸之耐受性、照射後燃料檢驗相關技術精進。
2. Fuel Reliability and Efficiency: 在運轉與燃料營運上精進維持高標準燃料可靠度、燃料破損預測方法論與導則最佳化、精進爐心營運提升燃料使用效益。
3. Safety and Accident Tolerance: 協助業界機組精進燃料營運並針對法規更新的要求做相關燃材特性研究、ATF 燃料製造有關之技術研發。
4. Modeling and Simulation: 燃料行為表現相關程式計算模組開發。
5. Regulation and Licensing: 與申照有關之燃料行為表現模擬程式精進，以符合法規要求，增進程式模擬精確度避免過度保守，以提升燃料使用效益。

本時段 FRP(2016~2018)之研究重點為：

1. Guidance Toward Elimination of Fuel Failures: 燃料破損相關導則制定與更新，重點項目包括：
  - (1)2008 年發布之燃料完整性評估與破損監測導則(Fuel Integrity Monitoring and Failure Evaluation Handbook): 含運轉期間燃料完整性及可靠度之 offgas、水化學、燃料護套表面積垢監測導則，自本時段計畫開始每年改版，現本公司即參考去年版本以製訂核燃料受損對策程序書。
  - (2)積垢改善與水化學控制、PWR GTRF(Grid to rod fretting, 燃料棒格架摩擦)監控、PCI(Pellet cladding interaction, 燃料丸護套應力)監控、燃料檢查(fuel inspection)最佳化與風險評估等各相關導則(guideline)。
2. DBA 設計基準事故燃材耐受性研究: 針對冷卻水流失 LOCA&反應度突增 RIA(Reactivity Insertion Accident)進行事故期間燃料行為實驗分析及相關研究、運轉歷程(燃耗及燃料棒熱功率大小)對 fuel fragmentation 之行為影響、護套機械特性研究。

3. Development and Qualification of Advanced Fuel Inspection Technologies:用過燃料檢查、控制棒、爐心相關組件等之 NDE(非破壞檢驗)技術精進及開發和特性研究。

FRP 底下共計四大子計畫，如下圖所示，各子計畫今年度研究內容，本報告將摘錄與本公司燃料營運可資參考之資訊做介紹(含 Core-TAC、B-TAC、Reg-TAC)與 Falcon 程式使用介紹(因議程限制需與 P-TAC 擇一項目參與)：



## (貳)、電廠經驗回饋

### 一、美國 Palo Verde 護套積垢經驗回饋

Palo Verde 共計 3 部 PWR 機組，隸屬於 APS(Arizona Public Service Overview) 電力公司，APS 位於美國亞利桑那州，有 1 座核能電廠、2 座火力電廠、7 座天然氣電廠、1 座太陽能電廠，提供該州約 6200MW 之電力，其中 Palo Verde 核電廠提供了約 20% 之電力。

Palo Verde 機組額定熱功率為 3990MWt，3 部機組於 1980 年代末期商轉，原商轉執照 40 年均再申請延役 20 年，預計於 2045 年起陸續除役。機組設計上可供 10% 的功率提升，現已進行 2 次功率提升，分別提升 2%，第 2 次功率提升時完成全廠 6 台蒸氣產生器更換，未來預計再提升 1.7%。該電廠自 2008 年起未再有燃料破損，運轉策略上，新型的燃料或爐心設計，均先使用於 2 號機，待確保 2 號機採用後燃料營運均無異常，其餘兩部機組才會採行。該電廠為 18 個月爐心運轉週期，未採用 24 個月爐心週期設計，係因 24 個月週期之大修工期太長，且亞利桑那州夏季炎熱不能安排大修，應盡量避免大修落在夏季巔峰用電期之可能性。

該電廠本次分享之經驗回饋議題為，2 號機於週期 9 採行之爐心設計由原本的火圈式(rings of fire)，改變為土星式(saturn)，用以平衡整個爐心的尖峰因數(peaking factor)分布並減少爐心外圍中子 leaking。

2 號機週期 9 發生部份位於爐心高功率區之**使用一週期**燃料束有 10 支燃料棒(分布於不同燃料束)發生積垢引發局部腐蝕 (CILC, crud induced localized corrosion)造成之護套洩漏。積垢附著於燃料表面且會吸附空泡導致熱傳變差，亦吸附離子造成護套表面腐蝕，綜合影響下造成護套破損。該週期 CILC 發生之綜合原因及該週期爐心、燃料營運影響如下：

1. 土星式設計造成 PWR 機組的燃料護套表面積垢(crud)分布預測分析程式無法準確預測高功率區燃料的積垢分布、累積。
2. 該週期(U2C9)於週期初發生跳機急停，燃料積垢重新溶於爐水中再重新分布，而因 PWR 爐心營運特性為週期初 top skew，top skew 的軸向功率分布對於燃料表面次冷態沸騰較易吸附離子與積垢的現象較為不利。急停後重新啟動，功率再次集中於燃料頂部，造成比原本運轉時更多積垢附於頂部之燃料表面，對於積垢引發功率偏移之現象 CIPS( crud induce power shift)亦有不利影響。
3. U2C9 期中因設備檢修需進行 MOC 大修後再啟動，殘留在積垢間的硼酸結晶再度溶解，啟動後硼酸結晶重新分佈在燃料上半部之積垢，造成 CIPS 現象較為嚴重。

綜合以上，使用的積垢預測分析程式未能準確計算高功率區燃料有額外的積垢分布。針對此問題，Palo Verde 核電廠認為主要肇因來自雙火圈的爐心設計，故在 EOC9 大修期間花了近 3 週的時間對原本於 U2C10 爐心設計進行微調(一般約需 6 個月左右時成完成下一週期爐心設計及相關安全分析)，並未影響當次大修排程，退出 20 束已使用一週期之燃料，以重置入(re-insert)及原 U2C9 預計退出之燃料來取代。

後續除爐心設計調整回火圈式以外，Palo Verde 持續對每週期(cy-specific)爐心熱水力參數做特性分析，發展新的燃料晶格(lattice)設計以改善爐心高功率區的熱水力參數，增加安全餘裕，甚至一束燃料最多有過使用**3種濃縮度分佈**(一般 PWR 燃料多為兩種濃縮度分布，

即軸向中央區域使用較高濃縮度與上下兩處靠近端塞處使用較低濃縮度)。有關積垢的問題，在 cy-specific 的監測上，研究燃料表面積垢分布的量&位置、機制、環境，嚴格監控積垢形成以及可能引發的相關爐心及燃料營運議題，來改善 crud 預測程式，避免 CILC 或 CIPS 的發生。

過去以來，Palo Verde 搭配不同的晶格設計與燃料型式，共使用過 10 種爐心設計型態，現在固定採用一種爐心設計型態。功率尖峰因數依照其安全分析最高可達 1.7，目前尖峰因數最多達到 1.4~1.5。

## 二、韓國 KHNP 電力公司 AOA 及爐水注鋅經驗回饋

現韓國運轉中電廠共有 24 座 PWR 機組，5 座興建中、4 座預備興建中。其 2009~2016 年間之燃料績效，以爐屑磨損造成居多，約占 5 成，其餘為燃料棒格架磨損(Grid to rod fretting, GTF)及製造瑕疵，並無燃料表面積垢引發腐蝕造成護套洩漏之肇因。

功率運轉時，PWR 反應爐水中所含的管路腐蝕產物 Ni 及 Fe 釋放，而燃料棒表面的次冷沸騰 (Sub-cooled boiling) 效應而在燃料棒表面產生一層鬆散之積垢 (crud)。因為燃料上半部溫度高，次冷沸騰較燃料底部旺盛，所以燃料頂部的積垢會較燃料底部厚，而積垢越厚的地方因水的接觸面積減少使得燃料出力較低，且積垢間隙(crud impedance)易吸引硼酸結晶堆積，因此 AOA(Axial Offset Anomaly) 發生時爐心軸向功率大多偏向負值，此效亦即前面所述之 **Crud Induced Power Shift (CIPS)**。

考量爐心設計的不準度，爐心與燃料營運上應控制 AOA 偏差於-3%餘裕內(本公司核三廠的 AOA 監控也定在-3%以內)。針對積垢引發的功率偏移問題 KHNP 曾採取超音波清洗燃料(UFC, ultrasonic fuel cleaning)、注 Zn，或在下一週期填換較多新燃料(退出較多用過燃料)等方式，自 2008~2016 期間(2017 年沒有 AOA 發生)，KHNP 的機組陸續於幾個運轉週期發生 AOA，嚴重之案例經驗回饋如下：

1. AOA 最嚴重達-10.17%之案例:此案例發生在韓國自行開發之 PWR 機組 OPR1000(與 PWR 均屬第二代型反應器、有兩串迴路)，EOC10 大修進行蒸氣產生器更換，下一週期(CY11)考量蒸氣產生器管壁經沖蝕產生許多鎳離子，會有較多積垢生成，且鎳離子化合物形成的積垢密度較高，因此透過**爐心佈局設計**的改善去減少燃料表面之次冷態沸騰區域，使當週期 AO 控制良好，沒有 AOA 發生。C12 時因採行功率提升，使**燃料表面次冷沸騰區大幅增加**，加上先前累積在爐水中的積垢，使 CIPS 情況惡化，AOA 達-10.17%，後續改善採取**降載運轉至 75%**的方式，而該機組目前仍停機中。
2. AOA 達-5%之案例:為一般西屋設計之三迴路 PWR 機組，因前週期大修進行蒸氣產生器替換，沖蝕造成較多鎳離子積垢，下一週期則利用**爐心佈局設計**的調整，去減少燃料表面次冷沸騰發生的區域。

針對 AOA 問題的改善，KHNP 進行每週期爐心設計 AOA 風險評估分析。如下一週期有進行功率提升、注 Zn、蒸氣產生器替換、燃料設計變更、運轉週期延長時，先行擬定 AOA 預防策略。KHNP 每週期執行之 AOA 改善方針(亦稱為 CIPS guideline)如下所示：

1. 當前運轉週期(CY N-1)進行 AO 監控，如發生 AOA 則列出可能影響之原因，評估可採行的改善方式，如爐水酸鹼度控制、功率調整等等
2. 定出採行的 AOA 改善方式並執行後，監控' 當週期 AOA 改善的情形，將結果反饋至下一週期。
3. 針對下一週期(CY N)做爐心佈局/loading pattern)風險評估(包含審查各爐心反應度及熱水力相關參數變化、週期長度，考量下一週期是否有功率提升、蒸氣產生器更換、注鋅、使用新型燃料等等)
4. 依據上述爐心佈局風險評估結果，使用 EPRI 發行之積垢預測分析程式 BOA( Boron-induced Offset Anomaly)進行下一週期(CY N)之 CIPS 風險評估，如評估超出 AOA 監控基準值將進行爐心佈局重設計。此外，併入運轉週期(CY N-1)AOA 監測結果訂出下一週期的 AOA 預防措施(可能視嚴重情況決定是否做 UFC，或採用爐心水化學改善如注鋅)。
5. 承上，新週期開始運轉後，監控全週期的爐心功率 AO 變化、CIPS 變化。如出現 AOA 則依 1.2 點所述進行改善。

有關注 Zn 的計畫，KHNP 預計在將來要將更多機組進行爐水注 Zn。好處如下：

1. 透過 Zn 離子添加，因其價電位高，有助於吸引負離子，改善護套的延晶龜裂腐蝕(IGSCC, Intergranular Stress Corrosion Cracking)。
2. Zn 離子附著於蒸氣產生器管壁，可減少 Ni 的沖蝕現象，並減少 Ni 經照射後 Co 的附著，以減少劑量。

但初期因 Zn 離子與腐蝕產物之 Cr、Fe、Ni 離子進行置換，造成積垢短暫時間的增加，提高 CIPS 風險，後期因這些離子被爐水過濾系統濾除，可以降低爐水腐蝕與積垢之現象，改善 CIPS 的問題。高功率之機組，加鋅初期的 CIPS 風險相對較高，KHNP 參考 EPRI 的 2012 年發行之 PWR Primary Zinc Application Sourcebook, Rev1，其 PWR 機組現注 Zn 濃度最高 5 ppb(於一次側注鋅，且濃度維持固定)。未來期望透過更多評估研究後，能改善積垢對於 AOA 和 CIPS 的影響，以提高注鋅的濃度。

有鑒於 Palo Verde 使用土星式爐心設計造成 PWR 燃料護套表面的積垢問題，引發 CIPS 與 CILC，經查核三廠爐心設計未使用過土星式，應無此疑慮。詳見“結論、心得與建議事項”第 1 點。

## (參)FRP 執行計畫介紹

### 一、Core-TAC 議題

(一)、非破壞檢驗技術 F-SECT (Frequency-Scanning Eddy Current Technique) 應用於護套氬

含量量測簡介:

F-SECT 在鋁合金檢測上廣泛應用於氧化層厚度量測以及剩餘之金屬層厚度，並利用測出之材料電導係數推測氬含量。相較傳統渦電流使用單一頻率之探針沿測量平面掃描，F-SECT 使用頻率範圍 400kHz~8MHz 間之探針進行點測量，有 24 個或更多個頻率值，數目將依測試需求、觀察樣品特性而定。許多測試發現導電係數與**含氬量**之間的測量誤差以積垢之鐵磁性成份為主要(此為各類 EC 檢測需克服之問題，不限於 FSECT)，現透過更多量測及相關特性研究，以求得較精確的 F-SECT 測量輸出值，再回推氬含量。

FSECT 研究專案包括如下(FSECT 電導係數量測與氬含量之量化關係經驗式:電導係數減少則氬含量增加、不同鋁合金之氬含量測量靈敏度分析):

1. BWR 燃料組件氬含量測量:樣本包含西班牙 Confronts 的燃料匣&控制棒、德國 Gun 電廠 Atrium-10B(Zr-2 水棒)&美國 Browns Ferry Atrium-10A(Zr-4 水棒)。
2. FSECT 用於 BWR 燃料棒護套氬含量軸向分布測量
3. 鐵磁性積垢影響測量誤差的補償方法:Magnetic Saturation
4. FSECT 的 PWR 燃料及相關組件之含氬量量測

在氬含量測量上，如能盡量除去積垢及氧化層厚度，可減少鐵磁性成份對測量誤差之影響。池邊檢驗使用 F-SECT 無法利用 **Magnetic Saturation Device** 做補償較正(**Magnetic Saturation Compensation** 係利用鐵磁性積垢的均勻分佈和累積，找出其飽和含量，再對 FSECT 量測結果做補償)，主因燃料池水的工作溫度太低不利其運作，只能在熱室使用。而上述研究結果顯示，探討不同燃耗之燃料匣及控制棒其 FSECT 氬量測結果，因沒有明顯的氬濃度梯度分布及氬化層邊界(Hydride rim)，故不需做**Magnetic Saturation**校正；而 PWR 燃料護套表面積垢因主要為鎳基化合物(Ni-base)，較無鐵磁性材質，而鐵磁性積垢多在沸騰表面下生成，PWR 僅上部燃料有次冷態沸騰，不需做 **Magnetic Saturation** 校正。

(二)、 NDE-Guided Ultrasonic Wave for Leaking Rod Detection(簡稱 GW)進步型超音波測量護套洩漏技術:

過去傳統超音波偵測燃料破損多以水自燃料破口進入之辨識來找破口。現因燃料設計的改善，破損肇因多為爐屑磨損，而部分爐屑磨損造成的初始破口多為裂縫(crack)很小的 thru-wall defect,水自破口滲入燃料棒護套內有限，傳統 UT 不見得適用。GW 具有靈敏度高、速度比傳統渦電流檢測快速的特性，探針在設計上可以偵測出 0.005” 大小(KS2C26 之破損肇因為 thru-wall,大小約 0.01\*0.03”)的裂縫。利用 GW 找出燃料之初始破口，需先拆除燃料頂部導架(UTP 或 top nozzle),而 BWR 燃料需拆除燃料匣，格架(grid spacer)不需拆除，GW 探針自側面由一排排燃料棒的縫隙間穿入做檢測(如圖)，可上下移動，除應用於 LWR 的 4-phase(4 個面型式)燃料型態，也使用在 CANDU、VVER 其他非 4-phase 的型態。

GW 靈敏度良好，各種 SCC(stress corrosion crack,應力腐蝕裂縫)、爐屑磨損、腫泡及各種機械破壞都可量測。信心度可達 75%護套厚度以上(即沒有完全穿透的護套磨損，如裂縫大小超過 75%護套厚度以上都可偵測)，靠近格架週邊的破口也可偵測。

GW 的 wave 強度(頻率、振幅等等)會受燃料棒與 grid spacer 的接觸面及密度較低較鬆散的燃料丸粉末或碎片而減弱，對此均有進行訊號的補償校正，減少 S/N(signal/noise) 比例，不影響偵測的準確度。

(三)、 SHIZAM (Study of Hydrogen Impacts in Zirconium Alloy Materials) 鈳合金的吸氫相關研究:

針對氫影響鈳合金材料機械特性研究包含以下幾個領域之探討:氫含量對鈳合金於 LOCA、RIA(反應度突增)事故期間燃料行為表現之影響、BWR 燃料匣彎曲、PWR 燃料彎曲、鈳合金氫化或吸氫造成材料脆化、二次劣化、及 hydrogen orientation、delay hydrogen crack(DHC)對乾貯運送與儲存期間的影響等等。

約 10~20%的氫由燃料護套吸收，餘 80%溶於爐水。氫含量對燃料護套鈳合金影響，氫自氧化膜層擴散進入護套金屬層，主要分為氫離子與鈳合金反應生成氫化鈳、氫原子溶解於護套。溫度每大於 100°C，氫溶解度增加 100ppm，溫度下降的過程中因溶解度降低析出的氫則轉為氫化鈳。

目前的研究重點為電廠或燃料廠家向 NRC 申照之 LOCA 分析中，原 NRC 10CFR50.46b 規定 ECR(Equivalent Clad Reacted,%)於發生 LOCA 時應限制在 17%內，現擬針對不同 Hydrogen uptake 的含量下修 ECR 限值。原法規制定 ECR 限制僅針對 LOCA 時氧化膜厚度不得超過護套 17%厚度之規定(正常運轉退出之燃料氧化膜厚度約為護套厚度之 2%)，唯韓國對燃料申照規範則以更保守方式定義 ECR，包含氧化膜與積垢之厚度。

一般來說正常運轉下，護套完整之高燃耗(燃料棒燃耗達約 60Gwd/MTU)退出燃料其吸氫量，PWR Zr-4 護套燃料棒約 600ppm，BWR Zr-2 護套燃料棒約 100~200ppm。

燃料護套吸氫量非單一因素影響，除需考量功率運轉歷程、爐心設計、燃料棒之燃耗等

因素，對於氫於不同鋳合金的擴散行為、溫度對於鋳合金吸氫含量之材料特性韌脆轉換的影響(低溫、高氫含量使鋳合金變脆)、吸氫對潛變之影響、Hydrogen orientation(乾貯限制護套溫度不得超過 400°C，主因高溫下氫大量溶解於鋳合金中，呈環狀分布，降到室溫呈徑向分佈，此現象稱為 hydrogen orientation。氫的徑向分佈助長 Hoop stress 向外延展，且大量氫析出成 ZrH 造成護套脆化，導致脆裂。**EPRI 專家說明，針對 400°C之限制溫度，如燃料退出時含氫量在 100ppm 以內不會有乾貯之 hydrogen orientation 問題，如達 300ppm 以上則可能會發生 hydrogen orientation**)、DHC(delay hydrogen crack,護套內層的 micro crack 形成初始之徑向應力及裂縫，氫沿裂縫與應力方向蓄積，並因徑向之溫度梯度分布，隨時間延長，氫大量在裂縫間端蓄積，造成護套脆裂。引發 DHC 的初始 hoop stress 基準值約為 90MPa)等現象及機制需有更詳盡之研究探討及相關實驗數據，才能針對功率與燃耗等因素發展出氫含量預測的經驗式與模組。目前 EPRI 底下除 FRP 外，NFIR(Nuclear Fuel Industry Research)與 UFHLW(Used Fuel High Level Waste)兩項專案皆有進行 HPU(Hydrogen Pickup)相關之研究，其中上述之 DHC 及 Hydrogen Orientation 現象對乾貯影響較多，為 UFHLW 專案之重點研究項目，今年底至明年度 SHIZAM 專案會召開兩場 HPU 研討會，第一場為鋳合金吸氫的機制與效應、第二場為吸氫對燃料行為的影響。

燃料於爐心使用之功率歷程、燃耗等等均影響護套吸氫量，而氫含量將影響乾貯期間隨著溫度、環境的改變，是否能維持燃料之完整性，因此需對吸氫量在護套劣化機制上的影響進行較多研究探討，詳“**結論、心得與建議事項**”第 2 點。

## 二、B-TAC

(一)、CRB 控制棒完整性議題：控制棒葉片完整性議題目前為 B-TAC 最重要的研究項目

### 1. 控制棒型式發展：

西屋 W.H 發展的型式為 CR 系列，最新型為 CR99；GE 發展的型式為 D 系列、馬拉松、OEM(Original Equipment Manufacturing,最舊型)、Ultra(最新型)。OEM 有發生硼管破裂的紀錄，多發生在控制棒尖端(TIP)的高燃耗區域，但目前美國仍有部分機組使用中，主要用於 CCC 爐心的 ARO 控制單元位置。目前 CR99(核二廠有使用)與 Ultra 型式控制棒尚無發生未達中子或機械壽命前的裂痕(premature degradation of crack)。

### 2. Handle Crack 的案例與研究：美國的 Dresden 電廠曾發生 OEM 型控制棒把手段裂事件。<sup>4</sup>

肇因探討著重在把手不銹鋼材質的中子照射輻照損傷及 IASCC( irradiation assistant stress corrosion cracking),把手段裂有過兩起案例，

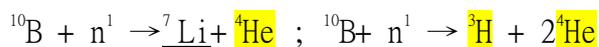
1982 年：使用超過 20 年之 OEM 於大修控制棒挪移期間發生斷裂。

2012 年：已退出之 OEM 由貯存格吊出發生

目前將執行肇因分析為比較完整未照射的 OEM 控制棒把手焊道結構與經照射後斷裂的樣本間其差異為何。PIE 熱室檢查將於 ORNL 實驗室進行。

### 3. 探討控制棒葉片裂化機制：

硼管裂痕的產生來自於硼吸收中子產生  $^4\text{He}$  與  $^3\text{H}$ (如下化學式)，氣體擠壓對硼管造成**初始應力**。另需考慮**材料特性**包含熱傳問題即硼管冷卻不足與 B<sub>4</sub>C 粉末燒結不均勻(如 B<sub>4</sub>C 粉末填充硼管型式之控制棒頂端與外緣的高中子通量區會有燒結膨脹的現象)，**爐水環境**包含沖蝕效應與電位腐蝕、中子照射之 IASCC 等等。初使應力併同材料特性及運轉環境，構成應力腐蝕 SCC(Stress Corrosion Crack)惡化之條件，造成裂痕劣化。



4. CRB 完整性議題資料庫的蒐集(CBAD):現 EPRI 透過 FRED 既有的各機組控制棒使用資料(member utility 會在每週期大修後於 FRED 輸入更換的控制棒型號與數量)，蒐集各機組控制棒完整性相關運轉經驗(OE)，包含硼管破裂導致碳化硼流失、把手斷裂等等造成控制棒葉片因劣化而提早於機械或中子壽命前退出的各項案例，併同各機組之水化學指標，建立 CBAD(Control Rod Blade Assessment Database)。主要的研究目標三項：
  - (1) 找出控制棒燃耗(depleted)對劣化(cracking)之影響
  - (2) 可預測評估 CRB cracking 劣化的水化學指標(也包含 offgas,  $^3\text{H}$ 、 $^4\text{He}$ )
  - (3) 發展出如何利用爐心線上偵測系統(CMSS ,Core Monitor Surveillance System) 併同功率偵檢器的監測，以透過爐心中子特性(neutronic observation)來發現 CRB 的硼流失現象。
5. 現 CBAD 資料庫內共有 7 座機組提供相關運轉經驗，包含有裂痕的 CRB 在爐心各位置的使用紀錄、各週期控制棒結數抽插紀錄(movement history)以了解這些發生劣化之控制棒受爐心中子照射的影響，CBAD 的目的希望能透過該資料庫發展上述(2)、(3)項預測並評估控制棒葉片 B<sub>4</sub>C 洩漏的指標。目前美國 Brownswick 電廠正進行 CBAD 資料庫之功能使用測試。

國際間包括燃料廠家、機組進行控制棒 depletion 監控大致有 3 種方式:

- (1) 使用程式計算並預測控制棒各節點(node)與結段(segment)燃耗，例如 MB2 (AREVA) 與 PANCEA (GEH)及 POLCA (Westinghouse Sweden ,WSE)、Simulate (瑞典 Studsvik)、MCNP (EPRI)
  - (2) 大修期間池邊目視檢查或 NDE 檢驗
  - (3) 利用運轉期間抽插棒與功率、反應度等中子(neutronic)現象之變化觀察配合爐水硼濃度的監測，來判定是否有 CRB 劣化導致硼流失的問題。
6. NDE 非破壞性檢驗技術發展:

EPRI 現發展 X-ray 照射檢驗 CRB 完整性之技術，可用於水下 100 呎做控制棒葉片池邊設檢驗(已於今年度完成 DEMO,預計於 2019 年實際應用於西班牙 Confentes 電廠的池邊檢驗工作)。裝置使用便利，可延 CRB 平面垂直或橫向移動進行量測，並一次使用不同能譜的 X-ray 進行大面積的檢測。

在使用上比中子攝影(neutron radiography method)檢驗方便,每一面葉片檢驗所需時間約 10 分鐘。該技術的解析度足夠辨識硼管中的空泡區、空管與填滿 B<sub>4</sub>C 的正常硼管、硼管破裂處(在成像上與完整硼管略為不同，需仔細辨認)、破裂硼管中部份充水(相較

於後者較難辨識)、整根硼管 B<sub>4</sub>C 粉末全部流失充滿水。

#### 7. CR99 B<sub>4</sub>C HIP 熱室檢驗:

瑞典 Oskarsham 電廠使用的 CR99 原型，進行熱室檢驗的樣本為照射 4 個爐心週期 (regulation position)+1 週期 ARO，最高結段燃耗達 33% B-10 depletion。目的為了解 HIP 型 CRB，其 B<sub>4</sub>C 在高中子通量下的 Depletion 行為，利用熱室檢驗之結果來驗證 EPRI 其 CRB 燃耗計算模組(MCNB)的正確性。

有關本節所述控制棒硼耗乏監測的三種方法，包含 code 模擬預測、大修期間池邊檢查、運轉期間爐水硼濃度監測，本公司核一、廠均確實採行。考量 OEM 型控制棒把手斷裂之國際案例之建議事項，詳見“**結論、心得與建議事項**”第 3 點。

#### (二)、 高效率超音波燃料清洗技術(High efficiency UFC)

部分美國電廠隨機組老化，爐內組件及管路經中子照射後具有放射性之金屬離子釋出到爐水，增加劑量，因此部分機組採取超音波燃料清洗的方式抑低劑量。EPRI 開發高效能 UFC 技術與傳統式 UFC 相比，多了 40%功率，transducer 在分布上可減低傳統式清洗不均勻之問題。業界採用的案例包括美國 BrownsFerry 與 QuadCities，目前多用來清洗邊緣燃料或非高功率區之燃料，以避免清洗完畢後，可能造成積垢分布不均勻，表面積垢局部剝落裂開(crud spallation)造成的 cold spot，使護套因氫脆容易 PCI 破損；或是局部積垢清除後，局部燃料與水流接觸面積增加，使燃料出力提升，瞬間超出原本封套限值造成 PCI 破損。

LaSalle2 機組首次利用 HE-UFC 清洗少數爐心中央部分燃料，主要為測試性質用，使用 1、2 週期燃料經清洗後檢查其護套表面，效果良好、均勻，僅少部分仍有微薄積垢殘留，現經清洗之燃料均已置入爐心繼續使用，待週期結束後再做池邊檢驗觀察是否護套表面有異常痕跡或可能有上述 PCI 之疑慮。EPRI 表示，LaSalle2 共清洗爐心中 260 束燃料，減少約 17700Ci 活度，其中燃料表面積垢導致的活度僅占 10000Ci，主要活度來自燃料底部 Fuel Guard 的碎片(推測來自再循環水泵閥)，清洗過程共約移除了近 90 多個碎片。清洗一束燃料期間發現，未清洗前劑量測量時其能譜出現某一核種的 peak，並發現底部燃料之碎片，待清洗移除後該核種之 peak 即消失，為避免 PCI 疑慮，LaSalle 決定將原本

要清洗的所有使用 1 週期的燃料僅局部清洗 LTP。重要結論為:

1. 爐心劑量主要的貢獻源自 debris，而 HE-UFC 現有較多機組使用在燃料底部的爐屑清洗使用。
2. 以 LaSalle2 與 QuadCities 使用 HE-UFC 後成果比較，後者因使用爐水注 Zn，因此積垢較前者厚重，清洗完畢發現有部分 spallation 現象。

有關本節所述高效率超音波清洗技術是否可應用於核二廠爐心燃料，詳**結論、心得與建議事項**”第 4 點。

## 肆、結論、心得與建議事項：

1. 核三廠採用之爐心設計目前均為 1/8 對稱火圈式(未使用過 Saturn 土星式)，在爐心設計上透過使功率尖峰因數分布非常平均之設計，以避免 CILC 與 CIPS 發生，甚而為了達到較保守安全之餘裕，相較於一般節省成本之爐心設計方式，平均 3 個週期約莫多使用 4 束新燃料填換(多退出 4 束新燃料)。核三廠燃料營運績效佳，爐心水化學品質良好，雖並未使用積垢預測分析程式，但有維持進行全週期運轉期間 AO 變化監控，過去核三燃料並未有過因積垢引發護套腐蝕之護套洩漏。

〔內容對應:(貳)、電廠經驗回饋〕

2. 有關 B-TAC 之控制棒完整性議題，如討論所述控制棒硼耗乏監測方法共三種，核一、二廠在營運上均有使用：

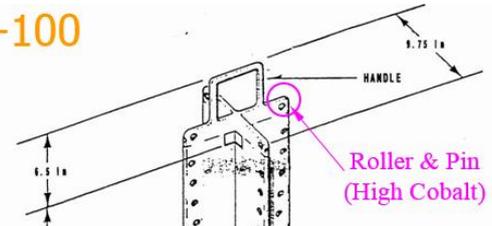
(1) 控制棒燃耗預估之計算模組:每週期結束後依照“控制棒葉片壽命中期之評估”程序書，委由燃料廠家計算預估下週期末控制棒燃耗是否超出其機械或中子壽命(以較短者為限)，預測燃耗可能超過壽命終期者，依程序書規定之保守原則決定是否進行控制棒挪移至 ARO(棒全出)之控制單元最多再使用一週期或退出不用。

(2) 池邊檢查:每週期大修期間依照『沸水式控制棒長程監測計畫』與“控制棒葉片檢查”程序書，依不同型式(D-100/215/230、馬拉松、CR99)制定的控制棒目視抽檢原則，越舊型的控制棒抽檢原則越嚴格，而替換原則的制定亦相當保守，如硼管處發現裂痕即退出不使用(D 系列之硼管直接與爐水接觸，馬拉松型在硼管內多一層內囊型不銹鋼管裝填 B4C，不致有 B4C 直接外洩之疑慮)，而各型控制棒在檢查時，其把手週邊發現裂紋之可接受準則亦相當保守(例如發現把手有垂直貫穿裂紋即不使用)，可避免吊運發生斷裂之疑慮。有關硼流失之部分，目前除 D100 曾有過硼管處之裂紋外，其他形式 CRB 之裂紋多為把手或滾輪週邊之裂紋及把手護銷之間焊道附近有裂紋。最新型的 CR99 為理論密度提高至 100%的 B4C 細棒(HIP Pin)，解決了 B4C 粉末燒結不均勻產生擠壓應力的問題，使用以來並未有裂紋發現。

(3) 運轉期間硼濃度監測，依照“爐水硼濃度監測”程序書，以保守之餘裕，定出累積爐水硼濃度在正常運轉下及有硼流失疑慮時各行動階段之基準值，每週監測爐水硼濃度，而監測發現異常時以 RWCU 濾除效率、爐水硼濃度等，推估洩漏的 B4C 流失量，如經保守假設下評估 SDM 可能不足則停機(最大容許度約 3 根控制棒硼管破裂完全流失)。

綜合以上，電廠營運期間應無控制棒完整性或吊運問題影響安全運轉之疑慮，未來可視 BWR 營運方向決定是否納入 CBAD(需待 EPRI 完成測試並上線)使用做為運轉中 CRB 葉片完整性監控的參考。

D-100



有關除役期間，D-100 型控制棒的吊運，因其把手設計與國際發生把手斷裂的 OEM 型控制棒其結構較為類似(D-215、馬拉松、



CR99 把手結構設計相近，不同於 OEM、D-100，如右)，建議未來對其應制定較保守的吊運策略，以降低把手斷裂的可能。

〔內容對應：(參)、FRP 計畫項目執行介紹／二、B-TAC／(一)、CRB 控制棒完整性議題〕

3. 有鑑於核二廠爐屑磨損之燃料破損案例較多，未來如有延長營運之可能，將納入成本考量，可考慮採用 HE-UFC 做清洗。經洽詢 EPRI 專家評估是否會有 spallation 的疑慮，其建議是因核二廠無爐水加 Zn，應不會有 spallation 的問題，但因該技術目前仍無法確定可完全排除間接引發 PCI 的疑慮，仍不建議做高功率區整束燃料的清洗。另建議有關 KS1BOC26 啟動後背景劑量較高的問題，也可考慮於大修期間做再循環管路的化學除汙清洗以減低背景劑量，來取代燃料清洗。

〔內容對應：(參)、FRP 計畫項目執行介紹／二、B-TAC／(二)、高效率超音波燃料清洗技術(Hihh efficiency UFC)〕

## 伍、參考資料

### 本次會議簡報 EPRI 引述文獻

1. EPRI 研究報告：[Feasibility of Using Magnetic Saturation Technology with F-SECT to Assess Crud and Oxide Thickness](#)
2. EPRI 研究報告：[Feasibility Study for Detecting Cracks in Lifting Handles of BWR Fuel Bundles and Control Rods Using Guided Ultrasonic Waves](#)
3. EPRI 研究報告：[Fuel Reliability Program: Fuel Design Evaluation Handbook: Tools for Assessing Fuel and Core Component Performance](#)
4. EPRI 研究報告：[Feasibility Study for Control Rod and Control Blade Inspection Techniques](#)
5. EPRI 研究報告：[Modified Burst Testing of Irradiated Boiling Water Reactor Cladding](#)