

出國報告（出國類別：實習）

核四廠爐心營運管理與起動測試技術 研習

服務機關：台灣電力公司核四廠

姓名職稱：陳德和核技課課長

派赴國家：美國

出國期間：民國 94 年 12 月 10 日至 18 日


報告日期：民國 95 年 1 月 24 日

出國報告審核表


出國報告名稱：核四廠爐心營運管理與起動測試技術研習		
出國人姓名(2人以上,以1人為代表)	職稱	服務單位
陳德和	核技課課長	台電公司核四廠
出國期間：94年12月10日至 94年12月18日		報告繳交日期：95年1月24日
出國計畫主辦機關審核意見	<input checked="" type="checkbox"/> 1.依限繳交出國報告 <input checked="" type="checkbox"/> 2.格式完整(本文必須具備「目地」、「過程」、「心得」、「建議事項」) <input checked="" type="checkbox"/> 3.內容充實完備。 <input checked="" type="checkbox"/> 4.建議具參考價值 <input type="checkbox"/> 5.送本機關參考或研辦 <input type="checkbox"/> 6.送上級機關參考 <input type="checkbox"/> 7.退回補正,原因: <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 不符原核定出國計畫 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容以 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 內容空洞簡略 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 電子檔案未依格式辦理 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 未於資訊網登錄提要資料及傳送出國報告電子檔 <input type="checkbox"/> 8.本報告除上傳至出國報告資訊網外,將採行之公開發表: <input type="checkbox"/> 辦理本機關出國報告座談會(說明會),與同人進行知識分享。 <input type="checkbox"/> 於本機關業務會報提出報告 <input type="checkbox"/> 9.其他處理意見及方式:	
層轉機關審核意見	<input type="checkbox"/> 1. 同意主辦機關審核意見 <input type="checkbox"/> 全部 <input type="checkbox"/> 部分_____ (填寫審核意見編號) <input type="checkbox"/> 2.退回補正,原因: _____ <input type="checkbox"/> 3.其他處理意見:	

說明：


- 一、出國計畫主辦機關即層轉機關時，不需填寫「層轉機關審核意見」。
- 二、各機關可依需要自行增列審核項目內容，出國報告審核完畢本表請自行保存。
- 三、審核作業應於報告提出後二個月內完成。

報告人 

單位主管 

主管處管 



總經理
副總經理：

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：

核四廠爐心營運管理與起動測試技術研習

頁數 12 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/02-23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

陳德和/台灣電力公司/第四核能發電廠/課長/02-24902401 轉 2933

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：94.12.10~94.12.18 出國地區：美國

報告日期：95.01.24

分類號/目

關鍵詞：NUCLEAR FUEL, CONTROL BLADE, STARTUP TEST, LUNG MEN

內容摘要：(二百至三百字)

龍門計畫是台電公司在二十一世紀推出的核能新機組，在 94 年 2 月限制二氧化碳的「京都議定書」生效，二氧化碳排放減量成為迫在眉睫的議題。核能機組是我國確保減少二氧化碳的選項之一，如何安全、平順與經濟穩定營運是極重要議題。於核四廠即將步入測試階段，起動測試與爐心營運管理是管理重點。本次出國即以上述議題赴龍門計劃核島區廠家奇異公司研討並交換相關見解，作為日後準備與防範。首先是赴 GNF-A 研議核燃料完整性事宜，控制棒龜裂事宜，燃料匣受控制棒陰影變形考量，和爐心營運運作監視安全問題等。再赴聖荷西奇異核能部門研議核能機組起動相關事宜，諸如：程序書現況，測試項目的完整性，測試支援，暫態時序設計問題的對策等。其中並參觀工廠與設備的測試情形。雙方獲得寶貴資料的相互交流，深信對日後業務的推展極有助益。

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

目 錄

壹、國外公務目的	.....	1
貳、國外公務過程	.....	2
參、國外公務內容紀要	.....	3
一、爐心管理	.....	3
二、起動測試管理	.....	5
三、現場參觀	.....	7
肆、國外公務心得與建議	.....	8

壹、國外公務目的

- 一、核能四廠核燃料和燃料匣由美國奇異公司投資的 GNF-A 公司生產，且控制棒亦為該公司的產品，鑑於近年來該工廠的同級產品(GE-14C 燃料，燃料匣與 D-120，D-230 型控制棒)的績效表現有待改進，為掌握相關營運資訊，作為日後核四廠爐心管理與起動測試的重要指標。
- 二、核四廠起動測試雖是整個機組的測試，但主要還是以核島區為主軸，該項測試核四廠的規劃為九個月，相較日本 9~11 個月，時程緊且控制系統與日本的 ABWR 有相當差異，目前規劃是借重奇異公司為主要顧問，所以有必要事先與奇異公司相關人員交換相互資訊、經驗與協助，達成順利測試目的與時程管控。

貳、國外公務過程

本次公務包括兩部分：

1. 透過奇異公司安排參訪奇異公司、日立公司與東芝公司共同投資在北卡威明頓的燃料廠，並討論與交換燃料營運管理的議題。
2. 赴奇異公司位於聖荷西的設計部門討論與交換核四廠機組起動相關議題。

詳細之行程說明如後：

工作任務	日期
往程	94.12.10~11
參訪 GNF-A 交換爐心管理事宜	94.12.12~13
移地	94.12.14
赴奇異公司(GENE)商談起動測試管理事宜	94.12.15~16
返程	94.12.17~18

本次出國承蒙核四廠主管及台電長官的厚愛核與研習，能與核四廠核島區主要供應廠家研討與交換相關議題見解，深信對日後機組的起動與爐心營運極有助益。核四廠早日安全、平順與經濟穩定營運，對公司與國家在能源上，尤其在 94 年 2 月開始的限制二氧化碳之「京都議定書」生效，二氧化碳排放減量成為迫在眉睫的全球議題上，定有其擔任的角色。

參、國外公務內容紀要

一、爐心管理

(一) 核燃料的完整性

核燃料的完整性對核能電廠的重要性可由下述了解：(1)一旦發生燃料破損，不可避免的會有大量的分裂產物由護套外洩。(2)通常會迫使機組必須降載停機作必要的處理，此期間替代能源的代價與調度是項挑戰。(3)即使破損燃料被移除後，該機組的高輻射背景值仍將持續一段相當長的時間。對機組維護及人員劑量的管理上都會造成極大的問題。(4)核能電廠燃料破損對爐心營運的衝擊很大，包括輻射性物質的抑低。如破損的機率相同，對大爐子的營運挑戰更大。(5)燃料的破損不僅對運轉有所影響，亦對維護劑量的影響深遠，同時外界對電力公司營運能力形象產生某種程度的質疑。

核四廠的反應爐有核一廠的兩倍多大，以美國 Stoller 公司的統計資料如附圖一顯示，如爐內燃料的破損機率相同，核四廠所面臨的挑戰機會更多。此外，日本柏崎電廠 6 與 7 號進步型沸水式機組在初始營運時亦面臨燃料破損的挑戰，後來的肇因是爐屑管理。

另最近幾年，核能工業界產生了一些不預期的燃料行為與破損事件，且核燃料破損率有逐漸攀升趨勢，引起了各方廣泛注意。核能工業界的大部份專家懷疑，核燃料完整性的安全餘裕可能係被下述各項營運策略所侵蝕：

- 1、核燃料負荷增加：功率提昇、較長運轉週期、高濃縮度與高燃耗設計、及爐心設計與燃料型式設計變更。
- 2、燃料棒護套採用新材質及製程變更。
- 3、爐水化學策略變更：DZO(加鋅)、NMCA(填加貴金屬)、HWC(加氫化學)。

上述各因素彼此間交互作用後，將使問題更加複雜化，亦更增加了燃料營運的風險，導致核燃料破損率增加。那麼核四廠爐心管理能做些預防作業？依美國核能協會(INPO)對 BWR 燃料破損肇因趨勢如圖二所示，除水質管理外，就是在試運轉與起動階段好好管理外物入侵，與柔性升載管理，如燃料封套預調節準則(PCIOMR)。

(二) 控制棒龜裂防範

控制棒龜裂問題已是核一、二廠普及現象，目前除更換新

製程或更換不同廠家產品以外，似無對策。核四廠的初始安裝控制棒已完成製作並已送龍門施工處倉庫。控制棒龜裂對未來大修時程的衝擊很大。

控制棒葉片損壞肇因分析：(1)把手滾輪插梢孔附近之裂紋。係(A)把手於鑽孔過程有明顯的冷作硬化。(B)把手於滾輪插銷孔與插銷間形成隙裂(Crevice)，因隙裂氧化腐蝕(Crevice Corrosion)機制，留置腐蝕物污染。(C)在把手鑽孔過程留下顯著的殘留應力。(D)輻射輔助效應。(2)把手至護鞘焊道附近之裂紋。係因主要為冷作及把手與護鞘焊接殘留應力所致。(3)護鞘至繫棒第一焊道附近之裂紋。係主要為材料瑕疵及焊接殘留應力所致。

總之控制棒葉片損壞肇因是應力腐蝕，即(1)拉應力：(A)硼管內應力；(B)殘留應力；(C)冷加工。(2)腐蝕環境：(A)高溫；(B)水質(Cl^- 、 SO_4^{2-})。(3)敏感材料：(A)敏化(鉻乏)；(B)焊接。而輻射加速應力腐蝕龜裂

(Irradiation-assisted Stress Corrosion Cracking (IASCC))，其結果引發沿晶應力腐蝕龜裂(IGSCC)。關於在日本於發生控制棒腐蝕龜裂，引發國內核一/二廠檢查之發生機制簡要說明於圖三所示。

核四廠初始爐心所採用的控制棒均已製造完成，並已送龍門施工處的倉庫，由於製程與核一/二廠曾發生龜裂者雷同。為避免對日後大修排程與系統調度的問題，應即早考量因應。奇異公司並表示必要時，可派員來台訓練人員後加以處理，如採用鑽孔等以避免貫穿事宜。

(三) 控制棒陰影腐蝕作用對燃料匣彎曲影響

2000年起美國 BWR/6 電廠，包括 Clinton、Perry-1、Grand Gulf-1 及 River Bend-1 發生 120-75 mm 燃料匣彎曲 (Channel Bowing)；另兩座 BWR/4 電廠發生燃料匣 100-65-50 mm Interactive 燃料匣彎曲 (Channel Bowing) 現象：某些第三個燃料週期(38~42 GWD/MT)之燃料匣彎向控制棒，導致此位置之控制棒難以定位或抽插困難。上述燃料匣彎曲之燃料，皆於第一個週期置入控制單元爐心(Controlled-Cell)。

GNF-A 認為，燃料匣彎曲的原因是控制棒對燃料匣產生「陰影腐蝕」(Shadow Corrosion)所引起，而「陰影腐蝕」可能起源於第一個燃料週期，因為這些燃料皆於第一個週期置入 Controlled-Cell；燃料匣於壽命開

始易受控制棒「陰影腐蝕」影響。在高燃耗燃料下(38~42 GWD/MT)有燃料匣彎曲現象，非預期的軸向負荷，已知之鋳合金陰影腐蝕；但鋳合金陰影腐蝕反應機制仍不甚清楚。針對燃料匣變形的預測 GNF-A 有一套電腦程式叫控制格子爐心中燃料架格子摩擦預測方法(Cell Friction Methodology)，配合再填換燃料循環燃料加以作最佳化調度，其運算後的報表如圖四所示。

控制棒陰影作用緩解計有：(1)燃料匣挪移計畫；(2)改回厚薄一樣的燃料匣；(3)燃料週期設計改善(低洩漏率爐心設計)。所以因核四廠使用控制單元爐心，於再填換燃料設計時應特別留意燃料匣對控制棒抽插的影響。

(四) 3D MONICORE 遙控監視之防火牆

核四廠機組的運作是以數位控制、監視與顯示相關訊息，系統內並未有特殊的防毒軟體。廠用電腦提供爐心偵測(也就是 3D MONICORE)的功能，以反應器及電廠實際量測到的數量，計算爐心熱限值參數，支援自動熱限值監視器(ATLM)設定值的更新功能。為了解 3D MONICORE 的運作正常與否，GNF-A 對所安裝的機組，一般提供即時監控服務，但時間有限，常在 GNF-A 就直接監視 3D MONICORE 運作情況，若有異常立即提供解決對策。

鑑於核四廠的機組數位系統並無防毒軟體在作防火牆工作，所以由 GNF-A 監視 3D MONICORE，最擔心是病毒的闖入與駭客闖入問題，經了解現有的病毒極少可貫穿不同的作業軟體，並於裝開關(不監視時即關)與數據處理機(MODEN)，另加硬體防毒軟體的設備可擔入此守門員角色，如確可行日後可考量。

二、起動測試管理

在聖荷西奇異的核能設計部門討論與交換核四廠機組起動相關議題，以下是相關議題所作的討論與交流要點。

(一) 程序書現況

1、奇異公司已在 2005 年 12 月 14 日完成該公司認為應提出的起動測試程序書，所有的內部審查，將最後的一些送

台電審查。

2、起動測試程序書是否完善，待核四廠等審查單位的發掘與提出修改。

3、整個程序書：經比較日本 ABWR 與核四廠的起動項目後，發現有些項目未詳列，如自動熱功率監測器(ATLM)，熱功性能監測與診斷器(TPM&D)有待提出。

4、測試規範合理性：有些起動測試程序書接收標準訂定並非非常合理，例如輻射偵測在第一階接收標準為符合我國輻射相關法規規定，而起動測試基本上是建立基礎資料，重點是有否符合設計上在某一處的輻射屏蔽強度以下，作為日後人員進出的管制，所以廠家的標準有待澄清。

(二) 測試項目的完整性

經審查奇異公司所送本公司審查起動測試程序書後，發現部份內容並非完整。如：(1)爐心流量，缺少爐心功率係數的校正程序。(2)自動負載追隨，缺少合約完整要求參數的驗證。核四廠將反映事實請奇異公司補全。

(三) 測試支援

1、預定 2006 年 4 月成立聯合試運轉小組。

2、試運轉與起動測試期間各九個月，時程要求緊湊，整個歷程的規劃與執行要完整整合與推動。

3、在台灣的國人對核四的期望與要求高，管制單位要求也提高，起動測試的非預期跳脫已不能像往常般的多。

4、勞基法要求七天中要有一天休息。

5、設備的庫存時間長，是否對測試有所影響？

6、測試諮詢工程師的數量因預算有限，人數在合理內。

7、時程的規劃與測試項目的細節。

8、奇異公司將在今年上半年提系統測試暫態分析報告。

(四) 暫態時序設計問題的對策

1、安全系統由 DRS 網路經閘路器傳送至 INVENSYS 的 DCIS 才標示時間，最後於 TRA 彙總顯示某暫態的綜合特性，有時間差，可能影響暫態的解讀。目前的 DCIS 結構上，因不再更改，所以前述問題一定存在。現公司的作法是暫接受現有的設計，由奇異公司減價驗收，以後再改善。

2、面臨的問題：事實仍存在，要求 GE 對此提適當訓練，充分了解暫態分析報告特性，電廠內部研商可能因應的解讀能力與在全尺寸模擬器特性的比對。

三、 現場參觀

(一) 燃料棒管子製造

奇異公司位於北卡威明頓的核燃料廠，實際是由奇異公司、日立公司與東芝公司共同投資的工廠代號 GNF-A，另有一廠位於日本代號 GNF-J。GNF-A 所在的廠區除核燃料外，控制棒或爐內部份組件亦在該處製造。現在奇異公司因核能部門管理重整，未來聖荷西大部份業務亦將轉往該處處理。

核燃料元件的製作與組立是相當繁複與細密作業，生產線的佈局，產品的品管，驗收和紀錄作業的管理非常周詳不可。就以燃料棒的製作，由驗料，延拉成管子且內部有軟銼，熱處理，檢驗，編號登錄，均非常嚴謹。

(二) 3D MONICORE 功能實證

關於 3D MONICORE 作業軟體，奇異公司原在 α 工作站發展，有點類似 DOS 的操作介面，但因現在業界的同仁非常熟識視窗作業系統 Window 介面，所以奇異再推出 3D WinR 操作介面版本，看就有感覺(See and Feel)極方便。

本次在聖荷西奇異公司看到核四廠二號機的 3D MONICORE 主機存放情況，奇異公司並展示 3D MONICORE 的作業機能，不論是預測或計算，操作相當便捷，深信日後引進，對核四廠核技人員的作業定助益極大。

(三) NUMAC 測試與貯存

在聖荷西奇異公司參訪與討論起動測試相關作業時，得知核四廠的二號機安全系統之反應爐保護系統、主蒸汽隔離閥的儀控系統與中子控制系統等，及流程上三重控制系統部份盤面正在測試。於是便請求參觀測試狀況，看過測試管理之後，對於奇異公司的信心更堅固，圖五展示測試的部份情景。另對於已測試過的設備，已加上塑膠護套保存在倉庫，避免灰塵對電子產品的損壞，基本上庫存管理應屬良好。

肆、國外公務心得與建議

一、依日本 ABWR 運轉電廠核燃料破損的經驗，日方表示是試運轉所殘留的爐屑所造成，所以核四廠在試運轉與起動測試期間，更應嚴格管理外物入侵，避免非必要的營運困擾。

二、依奇異公司 GE-14C 燃料的破損資料，除外物入侵管理，水質控制外，電廠所能做的是柔性功率提升，故爐心營運上 3D MONICORE 的 PCIOMR 須爭取恢復，減少營運時對燃料的負荷應是項選擇。

三、燃料匣在營運上留意控制棒陰影腐蝕作用會造成影響插棒的議題，所以燃料填換時對燃料匣變形考量要列為要項之一。

四、本廠的控制棒均已抵達工地，對於潛在龜裂問題，應積極妥善處理，避免影響本廠日後大修排程與調度困境。

五、核工程序書部份涉及 3D MONICORE 章節，因奇異已推出 3D WinR 操作介面版本，可考量比照電腦操作手冊中圖文並列方式，使程序書明確易懂。

六、奇異公司對沸水式核能機組的起動測試經驗上極豐富，所以本廠的起動測試程序書要適時詳加審查並與奇異公司保持意見交流。

七、起動測試預測的暫態分析報告宜製作成簡報，供測試同仁對系統反應的認知共識並設法在全尺寸模擬器作特性比對。

八、為掌握起動測試在九個月內完成時程要求，今年(2006)應完成適當的測試排程初步規劃，並研討執行的合理性。

九、預期參與核四廠的核技測試人員與往日核一/二/三廠在起動測試階段少，相關單位人員不易長期支援，宜與總處和核一/二/三廠協商建立專家支援制度，某些測試時請總處或友廠派人短暫支援。另電廠內亦可作人力最佳化運用，有些人主要負責起動測試，但可考量在試運轉就參與某些系統的測試工作，譬如核技人員在燃料檢查調度許可下，可考量參與部份棒位控制與資訊系統(RCIS)，硼液控制系統，爐水控制系統或中子控制系統等測試工作。

十、暫態紀錄器因時間標籤問題，可能影響紀錄的研判，核技人員應對系統深入了解，並研讀奇異的暫態分析報告，配合模擬器的演練適當加以比對，增加對機組特性的掌控，以利日後相關分析的工程研判和推理，在有限時期內安全與暢順完成起動測試作業。

圖一 BWR 燃料破損率趨勢(Stoller)

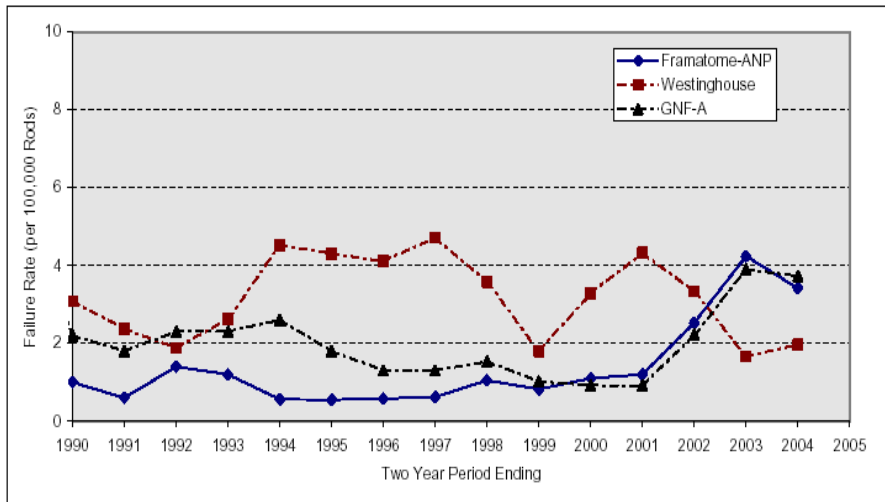
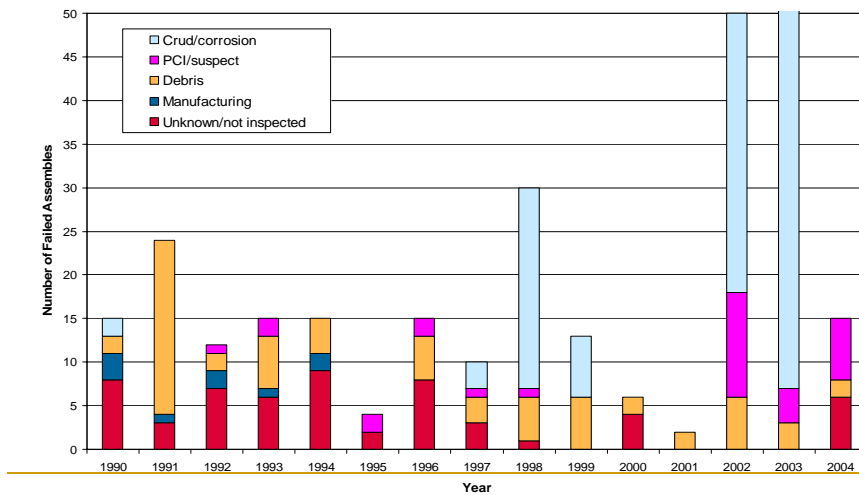
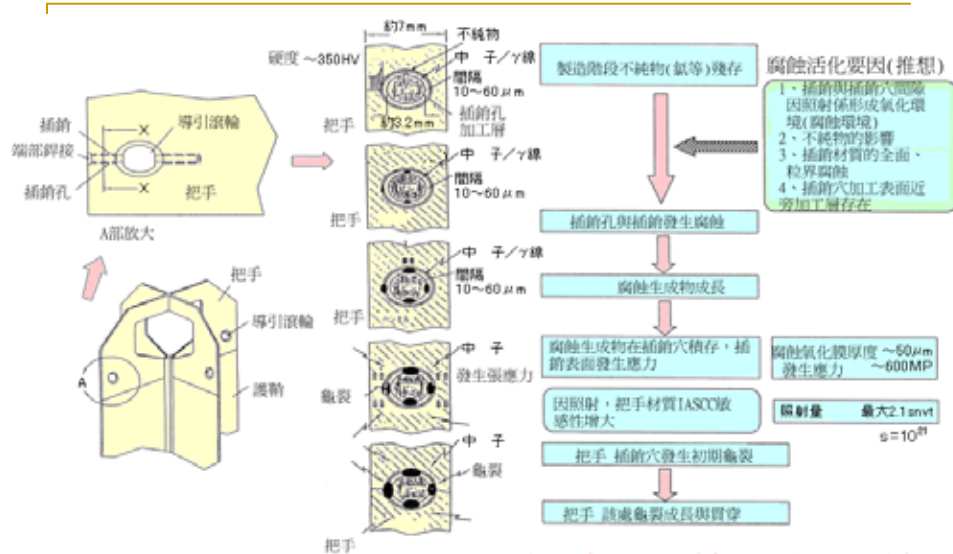


Figure 3: BWR Fuel Failure Rates -- All Failure Causes

圖二 BWR 燃料破損肇因趨勢(INPO)



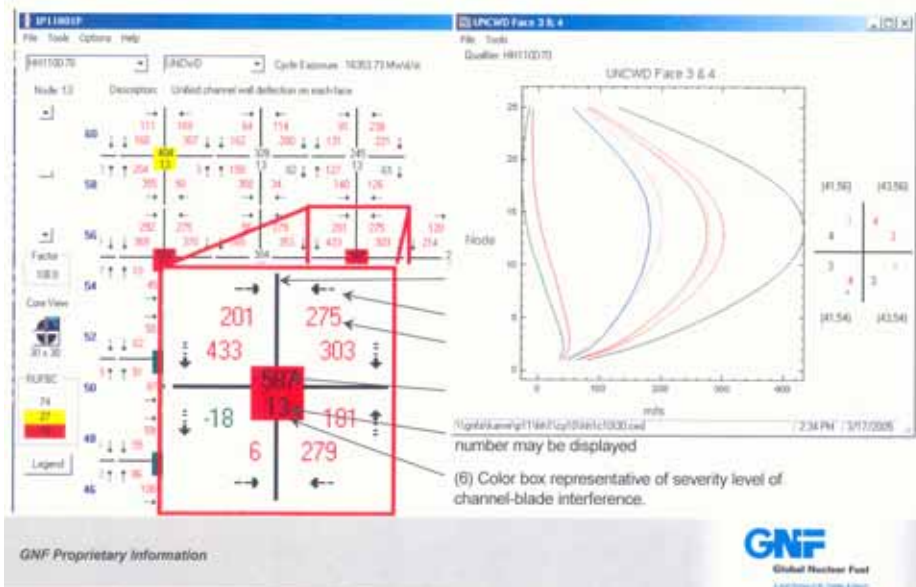


圖三 BWR控制棒把手部位發生IASCC機制簡要說明(東海電廠二號機)

[出典] 通商産業省資源エネルギー庁公益事業部原子力発電安全管理課(編): 日本原子力発電(株)東海第二発電所の定期検査中に発見されたトラブルの原因と対策について、平成12年度 原子力発電所運転管理年報、(社)火力原子力発電技術協会、p.212-213

Cell Friction Methodology (CFM)

圖四 控制格子爐心格子摩擦預測方法結果報告





圖五 RTIF 機櫃外貌與測試狀態