

出國報告(出國類別：開會)

參加第六屆美洲核能協會 核能儀控與人機界面技術專題會議

服務機關：台灣電力公司核能發電處

姓名職稱：李明宗 / 儀電組主管核工儀控

派赴國家：美國

出國期間：98.04.04~98.04.10

報告日期：98.05.11

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：

參加第六屆美洲核能協會核能儀控與人機界面技術專題會議

頁數 56 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

李明宗/台灣電力公司/核能發電處/主管核工儀控/(02) 2366-7062

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他

出國期間：98/04/04~98/04/10

出國地區：美國

報告日期：98/05/11

分類號/目

關鍵詞：CDR, EMI/RFI, FMEA, FPGA, LIRA, 老化, 過時管理, 網路安全

內容摘要：第六屆核能儀控與人機界面技術專題會議，於98年4月在田納西州 Knoxville 舉行，發表之技術報告超過200篇，整理工作上相關的幾項議題，內容如下：

- 一、EPRI-1018109 針對儀控老舊管理與現代化的問題，提出策略準則。
- 二、影響數位化升級是否會成功，不只是技術層面，非技術層面的問題也要照顧。
- 三、不同電廠電磁輻射環境不同，本文將介紹現場的輻射環境頻譜測量。
- 四、東芝公司開發出不可重複寫入 FPGA 的設計，並完成功率階中子偵測系統驗證。
- 五、LIRA 線上共振分析為一種偵測電纜劣化的方法，本文介紹了在美國和歐洲核能電廠設施的訊號電纜，在現場實驗測試的最新結果。
- 六、San Onofre 核電廠近年來積極規劃儀控系統之數位化，數位化過程中歸納出幾項重要的經驗。
- 七、介紹 EPRI-101672 的五個案例，這些案例乃是依據數起發生在美國核電廠的真實事件，重新編寫組合而成。

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

目 錄

壹、出國行程與目的.....	1
貳、任務過程與內容	2
叁、心得與感想	5
一、儀控老舊過時管理的策略.....	6
二、影響數位化升級的議題	10
三、核電廠數位化升級後之電磁環境測量	13
四、以 FPGA 為基礎之安全有關功率階中子偵測系統驗證	19
五、電纜之性能狀態監測方式-LIRA 線上共振分析.....	23
六、San Onofre 核電廠儀控系統數位化經驗.....	30
七、核電廠虛擬數位儀控經驗回饋	36
肆、建議事項	49
伍、附錄-參考文獻	51

圖 目 錄

圖 1 資源有限下的儀控系統架構	9
圖 2 電磁發射頻譜現場測量儀器	15
圖 3 主控制室電磁發射頻譜現場測量點.....	16
圖 4 實測頻譜超出限值	17
圖 5 實測頻譜接近限值	18
圖 6 東芝 FPGA 架構.....	20
圖 7 東芝 LPRM 模組架構.....	21
圖 8 東芝 LPRM/APRM 單元	21
圖 9 傳輸線的阻抗頻譜	24
圖 10 線上共振分析儀器架構圖.....	25
圖 11 LIRA 估算之電纜衰減值	26
圖 12 電纜整體性老化狀況指標 CBAC/CBAL 運算.....	26
圖 13 XLPE 電纜樣品 TDR 熱點(10 米處)偵測結果.....	27
圖 14 XLPE 電纜樣品 LIRA 熱點(10 米處)偵測結果	27
圖 15 XLPE 電纜絕緣破壞檢測樣品.....	28
圖 16 電纜絕緣破壞樣品 TDR 檢測結果	28
圖 17 電纜絕緣破壞樣品(CUT) LIRA 檢測結果	28
圖 18 電纜絕緣破壞樣品(GOUGE) LIRA 檢測結果	29
圖 19 EPR/EPDM 電纜熱效應樣品檢測結果	29
圖 20 EPR/EPDM 電纜 EAB/CBAC 關係式.....	29

圖 目 錄 (續)

圖 21 EPRI EPR 樣品 CBAC/CBAL 測試結果	30
圖 22 飼水控制系統 M/A 控制器.....	37
圖 23 數位控制訊號線與電驛有關之電纜共用導線管.....	38
圖 24 廠家建議接線圖.....	38
圖 25 控制器接線未加屏蔽及接地	39
圖 26 控制器接線應加屏蔽並適當接地.....	39
圖 27 廠內用電由主變壓器經輔助變壓器供電	40
圖 28 AVR 邏輯引發 86 閉鎖電驛動作導致主變壓器跳脫.....	40
圖 29 廠內電源轉由啓動變壓器供電	41
圖 30 熱影像攝影偵測高溫現象.....	41
圖 31 主汽機排汽壓力高三選二跳脫邏輯.....	42
圖 32 主汽機排汽壓力 DAS 訊號輸入.....	43
圖 33 PDN 電廠網路未適當分區隔離.....	45
圖 34 VSD 控制模組 WATCHDOG 逾時.....	45
圖 35 網路上關鍵性設備適當的分開隔離.....	46
圖 36 控制棒模組步進馬達由雙電源供電.....	47
圖 37 軟硬體設計均須符合系統之各項要求.....	48
圖 38 控制棒模組電源異常指示燈號	48

壹、出國行程與目的

本公司核一、二、三廠自商轉至今已運轉多年，儀控系統均面臨設備組件老化、備品取得困難等問題，數位化更新乃是必經之路，未來幾年將汰舊換新以數位化系統來替換現有的類比儀控系統，提昇機組運轉之可靠度；而儀控系統之更新須經長期且整體之規劃，以訂定更新策略，在替換過程中，諸多問題均需審慎的評估及考量，例如數位化系統尚須考慮網路安全，及引進自我診斷、自動校正、線上監測等預防性保養之維護功能，所涉及之技術不僅須維持原有系統功能，並須達到降低維護成本之目的。

本次出國任務之目的為前往美國參加美洲核能協會於 98 年 4 月 5 日至 4 月 9 日在田納西州諾克斯維市(Knoxville)舉辦之「第六屆核能儀控與人機界面技術專題會議」，出國行程及工作項目詳如下表：

起迄日期	前往/停留城市	工作項目
98.04.04~ 98.04.05	台北－紐約(留宿)－ 亞特蘭大－諾克斯維市	往程
98.04.06~ 98.04.08	諾克斯維市 (Knoxville)	核能儀控與人機界面 技術專題會議
98.04.09~ 98.04.10	諾克斯維市－休斯頓－ 舊金山－台北	返程

由美洲核能協會(ANS - American Nuclear Society)主辦的核能儀控與人機界面技術專題會議(Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies，簡稱 NPIC&HMIT)係國際核能界主要的儀控專題會議，研討主題涵蓋數位儀控及進步型人機界面之設計、運轉與維護等重要議題，參加單位包括美國核管會(USNRC)、美國能源部轄下之國家實驗室、美國電力研究協會(EPRI)、國際原子能總署、各國核能發電業者、主要的儀控系統製造廠商及專業顧問公司等，本公司有一名同仁參與技術審查委員會，自第二屆(1996 年)起歷屆會議均派員參加會議，汲取新發展的儀控技術與應用經驗。

核能儀控與人機界面技術專題會議是一場大型研討會議，集合了電力業者、管制人員、大學教授、研究人員與專家、技術開發與供應廠商，共同研討核能電廠儀控和人機界面技術，以及這些關鍵技術在核能電廠的使用經驗，這一系列的專題會議由橡樹嶺國家實驗室(Oak Ridge National Laboratory)的工作人員領導組織，會議主題包括最新儀控系統之應用趨勢、數位化更新相關技術之學術及應用經驗等，五天的研討會，由來自世界各地頂尖的儀控專家，帶領引導各國代表發表儀控領域之資訊及策略，並共享各項儀控維護資訊及觀念，本公司同仁於分組研討會中發表“Team Situation Awareness In Advanced Control Room - Lesson Learned From Integrated Verification And Validation”與“Development And Application Of ABWR Feedwater Pump And Controller Model”兩篇文章，本次奉派參加會議之目的在於吸取知識與經驗，對本公司核能電廠維護作業及掌握國外電廠相關營運資訊有所幫助，並有助於本公司核電廠儀控系統數位化更新工作之推動。

貳、任務過程與內容

儀控和人機界面技術的能力，不僅影響電廠績效與營運成本，也直接影響運轉的安全性，如何在現有電廠現代化或發展新電廠的過程中，有效地利用儀控和人機界面技術為本次會議的主題，會議的重點放在解決數位化過程中申請執照許可的不確定性，並討論目前的做法、最近的經驗、技術創新，和新興的解決辦法等，今年的會議還提供場所給技術供應商展示設備和服務。

本次核能儀控與人機界面技術專題會議為期五天，分兩階段進行，第一階段(4月5日)為數位儀控及人員因素兩個專題研討會(Workshop)，總共研討十五項議題。數位儀控這個專題提出現有核電廠和新電廠使用以電腦軟體為基礎的儀控設備之最新發展，電廠於申請執照更新或考慮將設備升級更新時，數位化的發展已越來越重要，研討會中來自美國核管會(NRC)、美國電力研究協會(EPRI)、工業界與各國之演講者提供各種不同的觀點，並強調包括美國新電廠申請運轉執照時，執照申請過程中展開的活動及最近的發展。另一個專題研討會為人員因素，其目的為確認新世代核電廠挑戰人因的創新方案；設計新一代的數位儀控設備，必須考慮人類的行為和標準，新電廠將採分散式和多模組間相互聯繫的網路系統，從中央位置遠端控制，因此，在這個全面人力系統整合的新環境中，新模式的人機系統需要提昇安全性與即時行動。這次研討

會強調新一代核電廠創新的人機界面技術，議題包括從狀況的提醒、通信和信息交流、人力觀點的標準、認知匹配的先進研究，到人類的互動動態和衡量標準，本專題亦提供與會者藉由親身體驗來感受人因的多方面挑戰，並探討新方案的一個機會。

第二階段(4月6日至9日)為分組討論，分成核能儀控及人機界面技術兩大主題，再細分為48個專題，範圍相當廣泛，發表之技術報告超過200篇，專題報告後進行綜合討論，由各專題報告人回答與會人員之提問，同一時段分別有五至七個分組專題同時進行討論，內容甚為豐富，參加者視需要參加有興趣的研討分組，研討會之時程與內容摘要如下表：

日期	時程	內容
4/5	08:00~17:00 (Workshop)	1. 數位儀控專題研討會 2. 人員因素專題研討會
4/6	08:15~11:35 (開幕專題演講)	1. 能源的挑戰：核能科技在未來能源的角色 2. 核能向前行 3. 下一世代的數位科技 4. 哈爾濱工程大學核能科技的教育與研究 5. 挑戰與機會 6. 數位儀控產業遠景 7. 國際原子能總署核能計畫與儀控活動
4/6	13:00~15:20 (分組討論)	1. I&C for Grid Appropriate Reactors 2. Equipment Prognostics 3. Modeling & Simulation 4. 核能電廠無線技術之應用 5. Modeling Digital I&C Systems in PRA/PSA 6. 安全文化 7. 變動中之數位化法規環境
4/6	15:20~17:10 (分組討論)	1. 分散式控制、網路及 Fieldbus 在核電廠之應用 2. Setpoint Methodologies 3. 警報系統 4. 數位化更新之經驗回饋 5. Modeling Digital I&C Systems in PRA/PSA 6. 電廠保護及安全系統

4/7	08:00~10:10 (分組討論)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 優良典範及各項標準之發展 2. 人機界面技術的確認與驗證(V&V) 3. 研究及測試用反應器內儀器之最近發展 4. 數位系統可靠度 5. 現代化更新 6. 商業化數位儀器之接受度
4/7	10:10~12:00 (分組討論)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 優良典範及各項標準之發展 2. 人機界面技術的確認與驗證(V&V) 3. 研究及測試用反應器內儀器之最近發展 4. 數位系統可靠度 5. 現代化更新 6. 維護與狀況監測 7. 核能電廠儀控專業人員之教育
4/7	13:30~15:40 (分組討論)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 研究用反應器儀控系統 2. 電腦化程序書 3. Instrumentation for the Fissile Material Accountability 4. 數位系統可靠度 5. 下一代儀控系統 6. 維護與狀況監測
4/7	15:40~17:30 (分組討論)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 網路安全執照申請與執行 2. 人力自動化 3. 安全有關軟體的確認與驗證(V&V) 4. 數位系統可靠度 5. 下一代儀控系統 6. 維護與狀況監測
4/8	08:00~10:10 (分組討論)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 儀控系統架構與協定 2. 分析方法與結果 3. 歐洲核電廠數位儀控現代化計畫之經驗 4. 人機界面技術之設計與執照申請 5. 診斷與預測性維護
4/8	10:10~12:00 (分組討論)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 新建反應器之控制 2. 分析方法與結果 3. 歐洲核電廠數位儀控現代化計畫之經驗 4. 人機界面技術之設計與執照申請 5. 診斷與預測性維護

4/8	13:30~15:40 (分組討論)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 先進控制運算式在核電廠之應用 2. 反應器監測的高級信號處理方法 3. 經由儀控系統升級達到電廠現代化 4. FPGA-Based Systems 5. 先進感測元件與量測技術
4/8	15:40~17:30 (分組討論)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 老化管理 2. 人機界面之應用 3. 人員可靠度 4. 新建反應器中儀控系統的法規方向 5. FPGA-Based Systems 6. 先進感測元件與量測技術 7. 核電廠長程永續性發展
4/9	08:00~10:10 (分組討論)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 安全系統數位儀控技術 2. 環境相容性 3. 多樣性和縱深防禦(D3) 4. 訓練 5. 安全關鍵軟體之發展與資格認證
4/9	10:10~12:00 (分組討論)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 多樣性和縱深防禦(D3) 2. 訓練

(備註：4/5 專題研討會須另外付費，未參加；4/9 因出國行程天數不足，無法參加)

叁、心得與感想

研討會的第二階段是分組技術專題之發表與討論，分成核能儀控及人機界面技術兩大主題，再細分為 48 個專題，範圍相當廣泛，發表之技術報告超過 200 篇，專題報告後進行綜合討論，由各專題報告人回答與會人員之提問，同一時段分別有五至七個分組專題同時進行討論，內容甚為豐富，參加者視需要參加有興趣的研討分組，因研討會同時間有數組同時進行，無法同時參加所有分組討論，但已攜回所有技術文章資料，將視工作需要予以參考引用，目前工作上相關的幾項議題，整理各研討內容於以下各節。

一、儀控老舊過時管理(Obsolescence Management)的策略 (EPRI, Ref.1)

EPRI 出版了一本儀控策略準則(1018109),針對儀控系統老舊管理與現代化的問題,提供改進辦法給電廠工程師、管理人員和規劃者。

- ◆ 問題：輕水式反應器的類比設計幾乎已被數位技術完全取代，願意維持老舊技術的供應商變得更為稀少，花費成本更為昂貴，多數電廠引進數位化取替已影響電廠可用性的個別儀控系統，但有些案例經歷了拖延、費用超支和不被支持的挑戰，加上數位技術無情且速和的發展，使得設備成為過時的速度遠超過它所取代的系統，導致電廠在運轉壽命中，設備持續地變為過時，而必須進行額外的更換。由於現有設備逐漸老化及可行的方案消失，電廠因為儀控系統過時而無法運轉的潛在機率正逐年增加。
- ◆ 機會：現代化的整合性儀控系統可以藉由更準確與更頻繁的數據收集，提高資產管理，而自動化亦可以提高許多運轉與維護活動的生產力與品質。這些改進可以縮減人力，並提高設備的可靠度，然而這些好處仍留在桌面上無法享受，因為普遍的做法僅將系統升級，無法引進全新技術應用到現有的環境。

1. 四種選擇：核電廠儀控現代化的四種基本選擇，詳如附表，實務上的選擇策略是較複雜而且是持續變化的。前兩種選擇是積極主動和策略性的，前期投資和決定是必要的；後兩個選擇嚴格受制於初始資本投資和長程承諾的延遲，屬於被動的辦法，採用較多的戰術，最重要的是，短期的投資成本和長程運轉維護費用之間的取捨。表中所謂的電廠風險指的是設備可用率降低與老舊過時的風險，計畫風險包括技術、時程、預算與執照申請的風險。根據業者商業的考慮以及電廠的特色，這些選項可能都是有效的，然而，EPRI的準則集中於前兩個策略選擇，因為後兩項戰術選擇已有豐富的經驗與指引。

	生產力 改進	初始 投資	長程維 護成本	電廠 風險	計畫 風險
積極性策略	高	高	低	中	高
資源有限的策略	中	中	中	小	中
戰術性升級	低	低	高	中	中
維護或更換舊零組件	無	無	很高	很高	很低

- (1) 積極性策略：主要目標是減少電廠長程的運轉與維護費用。
積極性策略涉及全廠性儀控架構的改變，以反映最新關鍵應用的成熟技術、亦反映電廠運轉維護及先進控制室的概念，藉由例如ESBWR與AP1000進步型電廠的概念設計，將技術和運轉維護概念相結合。
積極性策略初期將投入非常大的投資，但自動化功能可提高員工的工作效率，有助於大量減少長程運轉與維護的費用，但尤其對選擇採用這個策略的前幾個電廠，須承擔短期投資與執照申請變化多端的風險。電力業者若計畫發展進步型機組可考慮積極的遠景，優先將目前的核電廠現代化，從而實現同公司內機組運轉與維護作業的一致性。
- (2) 資源有限的策略：主要目標是管理老舊過時與電廠可用性降低的威脅，同時改善系統的整體性，避免維護上不必要的複雜性。
大多數業者對內部資本的投資、專家人力、與訓練資源等需求的分配是相互競爭排斥的，但是積極性策略所需的財務和人力資源的需求，根本就不具有吸引力的收益率。在有限資源的策略，放棄所謂誘人的生產效益，著重於管理老舊過時與電廠可利用性降低的風險，首要強調的是靈活性，以適應不斷變化的優先性；其次，建構一個儀控架構的框架，整合一系列現代化計畫，以商業數位技術取代原先設計。每一個計畫的規模大小，被限制在機組大修或線上維修時執行，這個選項通常意味著仍然採用混合式的控制室，傳統的控制盤面可能會逐步修改取消，以視頻顯示單元(Video Display Units, VDUs)和軟體控制來取代。
- (3) 戰術性升級：主要目標是矯正老舊過時與威脅電廠可用性等迫切性的問題。第三種選擇佔有主導的地位，自從1990年代初期甚至更早，為了處理設備因老舊過時導致電廠可用性降低的風險高得令人無法接受，核能產業首先引進數位化。現成的商業化產品可以適用於主要系統，一般的作業，個別系統升級分開採購，有可能再拼湊組成自動化平台，對於系統整合與長期維護造成一大挑戰，但許多業者持續成功地採用這樣的選擇，作為管理與成本競爭的替代方案。另外，EPRI與其他產業已提出許多相關的指引和案例可供參考。

(4) 維護或更換舊零組件：主要目標是以最少的短期現金支出維持電廠運轉。當電廠的壽命已相對較短，或有信心維持儀控系統的長程運轉，就可能沒有意義作進一步新設備的投資，業者可能選擇依賴供應商的庫存或長程提供備品的承諾，換言之，這是一種運轉到失效(Run-to-Failure)的選擇。初期，這是一個廉價和簡單的選擇，但長程來看是昂貴的，在沒有備份的計畫下，這種做法會帶來電廠可用性降低的高風險，若供應商因面對企業經營的困難、收購、不可預見的技術改變，或只是銷量太低等因素，改變了長程供應備品的承諾，在最壞的情況下，電廠可能會關閉。

2. 資源有限的方法：業者的企業條件與經濟資源不同，但無論是否符合效益，大多數電廠均受限於有限的資本，額外的限制來自組織無法應付迅速的變化，這樣的局限是因為人力、專家、訓練等資源有限，以及須承擔非常複雜計畫的風險，管理上，對於長程規劃或隨機決定需要靈活性的妥協，以優先應付短期的威脅。維持計畫方法的一致性，廠際間互動與整合將帶來利益，並保持適當的彈性，考慮長短程間的平衡，其原則如下：

- ◆ 完整的計畫項目以 5-10 年為時間範圍。
- ◆ 限制計畫的項目，以符合計畫性停機的時程，並打破傳統系統的界限。
- ◆ 維持儀控系統架構的同質性，但容納必要的異質性。
- ◆ 消除關鍵系統的單點脆弱性。
- ◆ 保留原主控制室的佈局，採用混合式的概念，而不是先進的控制室，逐步淘汰老舊過時的控制盤儀器，以更容易維護的視頻顯示單元取代。
- ◆ 投資電廠有線和無線通信共用的基礎設施，以及可容納新功能與完成系統解決方案的應用程序伺服器。
- ◆ 引進或擴充以狀況為依歸(CBM)的線上維護，包括自動化的趨勢分析。
- ◆ 組成小型的核心技術審標團隊，執行採購規範訂定，技術審查，管理供應商等工作，並維持這個團隊的人力，以連續執行多個計畫。

總而言之，這些措施將有助於達成一致性與符合成本效益，應可達到以下具體的節省效果：

- ◆ 減少庫存備品的種類與數量。
- ◆ 善用多方面應用共享的基礎設施，降低個別的應用成本。

- ◆ 簡化採購、整合和安裝等作業。
- ◆ 附帶的效益，可能減少維護人力。

圖 1 顯示儀控系統的架構概念，它提供了足夠的彈性以適應寬廣的範圍與個別電廠，亦適用於不同的反應器類型，功能架構圖只提供商業反應器一般的導則，並不提供選擇的執行方案。成本效益問題，多年來已阻礙了核電廠現代化的進展，工業界早已認識到需要管理過時的儀控系統，但符合成本效益的解決方案難以計畫，判斷和執行。策略選擇必須考慮整個生命週期，包括對運轉與維護的影響，雖然不能解決所有的問題，但確定了關鍵領域，提醒需要更多的注意。多數電廠現在預計申請延長執照與繼續數十年的運轉，需要更換老舊過時的儀控系統已經變得越來越明顯與迫切，EPRI 預期，儀控現代化策略的導則有助於業者於向前推進時做出最明智的決定。

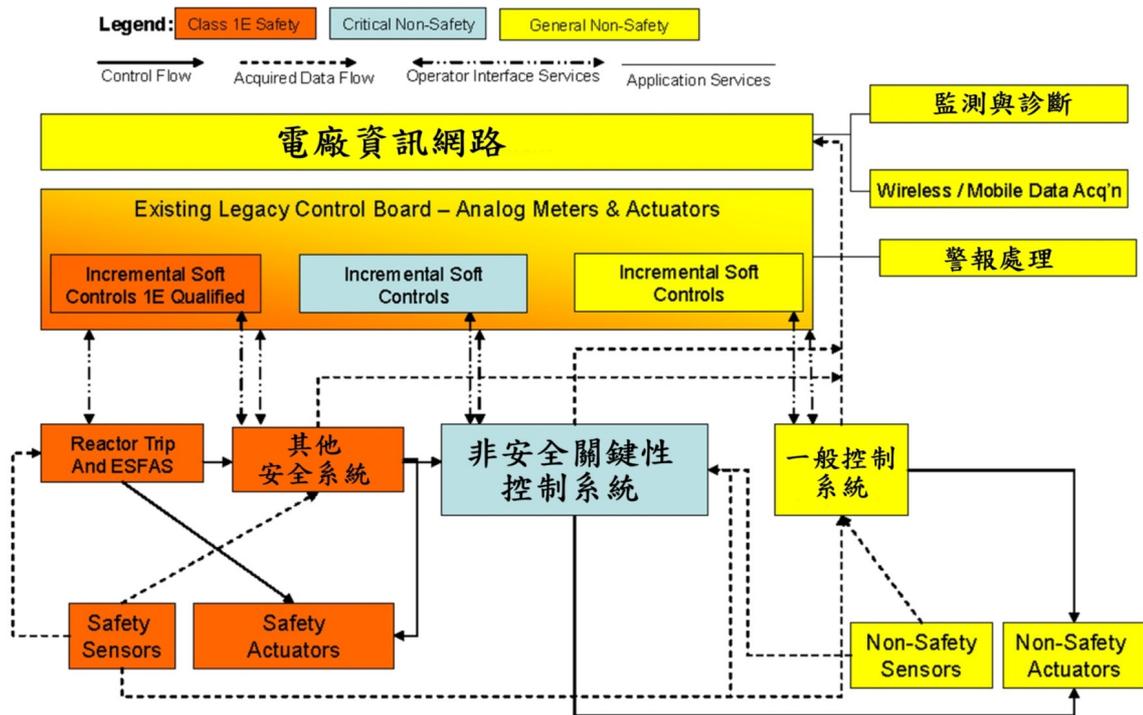


圖 1 資源有限下的儀控系統架構

二、影響數位化升級的議題 (Southern Nuclear Operating Company, Ref.2)

許多工程師參與數位化升級，重點均擺在技術層面的問題，例如軟硬體設計、發展與執行測試計畫、或執行現場通信網路等，不幸的是，數位化的成功，不就是要關注技術層面，非技術層面的問題也要照顧。本文將探討影響數位化是否會成功而需要處理的三個領域，首先是需要具有數位化經驗和熟悉的管理人員；第二個議題是發展並訓練工程人員成為軟體與通信、機械與電氣等多方面混合領域專長；最後，有必要建立例如網路安全、軟體構型管理、與軟體開發等相關計畫，以確保數位化短期與長程的成功。

1. 加強數位知識的管理：

對於許多管理者和執行者，「數位」讓人想起了黑莓機或個人電腦，工程管理人員通常有很好的機械、土木、或電氣等工程背景，卻鮮少有管理人員備儀控背景，更談不上了解數位控制。因為他們的背景，他們很難涉及到數位化的問題，因此，第一個要關切的領域是，管理階層通常不熟悉數位化升級。

◆ 減少語意的混淆：

重要的是說明問題的方式要能讓聽眾可以理解，簡單明確的說明，避免使用專用術語，因為聽眾很快會失去興趣，且可能不明白你在說什麼。另外，縮寫在不同的領域會有不同的意義，例如 MOV 電廠一般的用法是電動閥，但用在數位技術時，MOV (Metal Oxide Varistor)是金屬氧化物壓敏電阻的意思。

另一種方法，可能有助於彌合溝通上的差距，例如，針對機械工程師，將網路類比為管路的安排，防火牆就像一個止回閥，控制器類似驅動器，數據網路上的風暴，好比是管路上的水錘，這聽起來雖然有點過於簡單化，關鍵是以能理解的方式傳達信息。

◆ 避免資訊過載：

數位化升級計畫的時間從幾個月到幾年，將有足夠的時間來了解數位化的問題與障礙，重要的是使人們能夠消化他們所學，如果有機會，只討論一個或兩個最緊迫的問題，應避免讓對方資訊過載，記住，不是要去改變他人成為儀控與數位專家，只是要讓管理階層對問題有所理解，只講想法或概念，而不是將所有信息塞給對方，目的是為了增加數位化的了解，減少不安，

幫助人們理解，但不過度填鴨。溝通的內容要視對象而定，不同層級的主管或人員，考慮的觀點會不同。

2. 發展技術人員數位化技能：

第二個關切的領域是需要培養不同類型的儀器技術人員，這些技術人員除了機械、電力等技能外，也需要了解軟體和通信協定。熟悉傳統儀控設計、安裝、維護的人員往往不熟悉軟體編寫、軟體測試、或建立傳送器與處理器間的通訊，而具有軟體和網路技能的人員一般都在資訊或電腦部門，缺乏傳統儀控的背景與經驗。

- ◆ 數位團隊：核電廠越來越多的數位化設備，有些公司開始成立數位團隊，這些團隊的形成不只是為了軟體與設計的領域，在維護部門亦有需要成立。
- ◆ 數位人力的訓練：最低限度應包括軟體、通信、機械及電氣等領域；軟體部分包括開發、測試與故障排除，額外的需求包括品保、備份儲存作業、災難回復計畫、與系統響應等；通信主題包括網路、協定、故障排除、與網路安全。機械訓練包括流量、壓力、水位、震動等參數的測量，管路佈建與流程、流體系統設計、系統響應時間等；電氣主題包括溫度、電壓、電流、功率等參數的測量，EMI 和基本電路理論也是必要的；如果預期人員將參與顯示功能的發展，那麼人因工程也是必須的課程。
- ◆ 訓練教材的來源：訓練包括設計、測試、實施和維護等不同階段，另外再加上一些廠商提供的特定訓練；訓練課程由業界團體設計發展，例如 ISA(International Society of Automation)可提供基本測量與通信課程，EPRI 提供 EMI 課程，而基本電路理論、執照申請問題，與品保課程往往由業者提供。
- ◆ 了解法規的立場，數位儀控工程師應閱讀和理解下列的法規指引：IEEE 7-4.3.2, IEEE 603, EPRI TR-102348, NRC R.G 1.152-R2, R.G 1.168-R1, R.G 1.169, R.G 1.170, R.G 1.171, R.G 1.172, R.G 1.173, EPRI TR-102348-R1, NEI 01-01, NRC DI&C-ISG-01-R0, ISG-02-R0, ISG-03-R0, ISG-04-R0, ISG-04-R1, NRC NUREG-0800 BTP 7-14 R5, BTP 7-18 R5, BTP 7-19 R5。
- ◆ 複合數位專家：儀控環境變化迅速，有必要進行數位儀控人力培訓，電力

業者已開始考慮需要培訓擁有這些技能的複合專家，透過內部在職訓練以及配合特定的供應商進行人力培訓。核工業有必要新型的複合式數位專家，他們除了需要熟悉傳統儀控外，還需了解軟體與通信等新主題，及數位化執照申請過程中法規的立場。

3. 維持數位化計畫的發展方案：最後關注的領域是發展方案，以支撐持續運轉的數位技術，核工業已制定預防保養與電廠檢測項目，INPO 亦已建立 18 個不同領域的工程計畫導則，例如控制設定點、防火、流量加速腐蝕、閘門、熱交換器、焊接、和馬達等。

- ◆ 軟體開發計畫：IEEE 7.4.3-2 標準範安全系統軟體開發的各個階段，它並不適用於非安全相關系統，這之間的差距需要關切。比較正規的做法是提供編寫規範指引、需求文件、軟硬體設計說明等重要文件，此外，不同控制系統的數據亦需要加入工作程序，換言之，需要編寫數據定義文件。
- ◆ 軟體測試計畫：傳統上，依據確定的設計執行軟體測試是非常簡單的，只要以特定的輸入得到預期的結果即可，隨著數位技術的發展，輸入的可能組合變得複雜而難以管理，在未來，測試將必須證明處理器可以同時執行 25 項任務，而沒有任何功能上的退化，此外，必須在網路流量很大的狀況下，測試系統功能退化的程度。基本上，測試觀念與架構，應視整個儀控系統不同的特性而定。

軟體測試的另一個議題是測試平台的規模該有多大？測試台包括處理器、輸出入埠、通訊網路、與測試設備等，過去，在同一時間內只能測試部分的軟體代碼，現在，使用更強大的網路，測試變得更加複雜。為了防止因為部分網路故障導致功能完全失效，測試台必須能夠測試多處理器間的通信。測試的目的已擴展到為了研究數位系統如何對異常狀況作出反應，而不只是證明一系列的輸出入結果。

- ◆ 軟體品質保證程序：核電廠有大量的軟體程式在正式的品保程序以外的範圍，原因是這些軟體與安全無關，隨著安全數位控制的到來，必須重新審視軟體的品保問題。某些使用於核工業的軟體程式，從未正式執行軟體驗證，非安全有關設備軟體的品保要求較低，但非安全有關的設備也會造成反應度異常，軟體品質保證將涵蓋更多的領域，數位設備公司將需要一個

強大的軟體品保程序。

- ◆ 軟體構型管理：應該如何儲存備份軟體和應該儲存在哪裡呢？這些問題的答案各不相同，但每家公司的確需要制定一套標準方式，去處理、儲存備份與修改軟體。
- ◆ 預防電磁雜訊干擾計畫：依據 EPRI 技術報告 TR-102323 “電廠電磁干擾測試準則” 執行。
- ◆ 網路安全計畫：美國能源部已經成立了國家監督控制和數據採集（Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA）測試台，以強化電力、天然氣和石油等工業的控制系統之網路安全，美國 SCADA 系統測試台是由愛達荷國家實驗室和桑迪亞國家實驗室共同努力建立的，美國核管會也正在制定法規的導則。

三、核電廠數位化升級後之電磁環境測量 (AMS Corporation, Ref.3)

在美國一些核能電廠已實施小規模的數位化，一個系統一個系統的升級，但一直沒有放棄現有的系統而切換到完全的數位平台，新的數位系統允許增加監測程序和先進的診斷技術，可以提高核電廠的工作效率和安全，但為什麼沒有大規模轉換為數位系統？其中一個主要原因是數位系統的可靠性差，若核電廠的電磁環境惡劣，將造成系統的脆弱點，而影響數位系統的可靠性。

NRC 和 EPRI 已提供電磁相容性的測試準則，協助數位系統的認證，但這些準則只建立在評估核電廠電磁輻射環境的一般通用的基礎上，由於不同的電廠，其電磁輻射環境會有所不同，本文將介紹現場電廠的輻射環境頻譜測量。

1. 現有電磁相容性(ElectroMagnetic Compatibility, EMC)的要求：

美國核管會管理安全有關儀器的 EMI/RFI 為 R.G 1.180，該文件指出，核電廠現有的儀控設備，目前正在以電腦為基礎的數位系統或先進的類比系統所取代，然而，針對核電廠的 EMI/RFI 環境，新系統比原來的儀控系統可能顯現更大的脆弱點。數位技術的不斷發展，設計上採用越來越高的系統頻率和更低的邏輯電壓，這些進步卻可能在 EMI/RFI 方面對數位系統產生不利的影響，EMI/RFI 對於數位系統的影響顯然是 NRC 關注的議題，核電廠必須提供符合 NRC 法規標準 R.G 1.180 要求的文件。

電磁相容認證測試分為發射值與耐受度兩類，法規要求，安全有關和可能會影響到核電廠安全功能的非安全儀控系統，須執行這兩類測試；發射測試是衡量待測設備(Equipment Under Test, EUT) 產生與傳播的電磁能量，耐受度測試則是確認 EUT 能承受預期的電磁能量而不影響其功能。這些測試是為了確保設備能夠承受電廠的 EMI/RFI 環境，亦不會增加現場電磁輻射的整體水平；非安全系統，可能安裝在安全儀控系統的附近，應執行發射值測量，以確保安裝的系統不會增加電磁輻射的整體水平而影響安全系統的運轉。

電磁相容測試的方式，乃在電力、信號、接地電纜導入傳導型 EMI/RFI，以及在空氣中傳播電磁輻射，觀察測試設備受干擾的程度，NRC 可接受的 EMC 測試程序是美軍規 MIL-STD 461 和 IEC 61000 系列，但兩者不能混合測試。NRC 在 1996 年 4 月的一份安全評估報告中批准了 EPRI TR-102323 R1，該報告包括現有電廠的電磁輻射背景以及設備限制值，TR-102323 已發行新版本 R2 與 R3，但 NRC 尚未批准。

2. 電廠電磁輻射環境的改變：

NRC、EPRI 的導則乃是以 1990 年代初期核電廠的電磁輻射背景值為基礎，自那時以來，因為儀器，安全或通信的目的，有無數的 EMI/RFI 發射源被引進，修訂導則文件以維持其適用性，但數位與無線技術的發展遠超過了法規的修訂速度。安全系統控制儀器的數位技術持續增加系統頻率，如果沒有適當的測試，這些系統對電磁輻射將如何作出反應，或這些高頻率發射如何影響周圍的系統設備是未知的，因此需要增加在電廠電磁輻射的監測和評估。

現有的類比系統，因為組件故障、老化，可能被更換為不盡相同的組件，功能可能是相同的，但由於技術變革，頻率響應或特性可能已被修改，因此，更換組件可能改變電廠的電磁輻射或受到不利的影響。引進個人與攜帶式通信設備，例如以個人數位助理(PDA)、黑莓機、手機執行日常數據的收集與現場通訊，也會改變現場的電磁輻射，執行測試或功能檢查的筆記本電腦或其它攜帶式測試設備，其他如數位相機、攝錄機、收音機、遙控器，其它手持電子設備均可能會影響電廠電磁輻射。

所有這些設備的發射量將增加電廠 EMC 的風險，雖然現在的風險可能無害，但當電廠轉移到了先進的數位控制技術，他們是否仍然無害？NRC 在 2008

年報告中提出一個在 Indian Point 核電廠發生的案例，2008 年 2 月在敏感設備的附近使用數位相機，造成主飼水泵回退、水位下降，最後只好手動急停。

3. 電廠電磁發射頻譜現場測量：

爲了了解電廠電磁輻射的組成頻率，必須執行發射頻譜現場測量，包括各電廠的輻射型放射與從電力、信號、接地電纜產生的傳導型放射。依據 NRC/EPRI 的測量規範，測量設備如圖 2 所示，包括接收天線、頻譜分析儀、和一台用於分析與儲存數據的電腦。

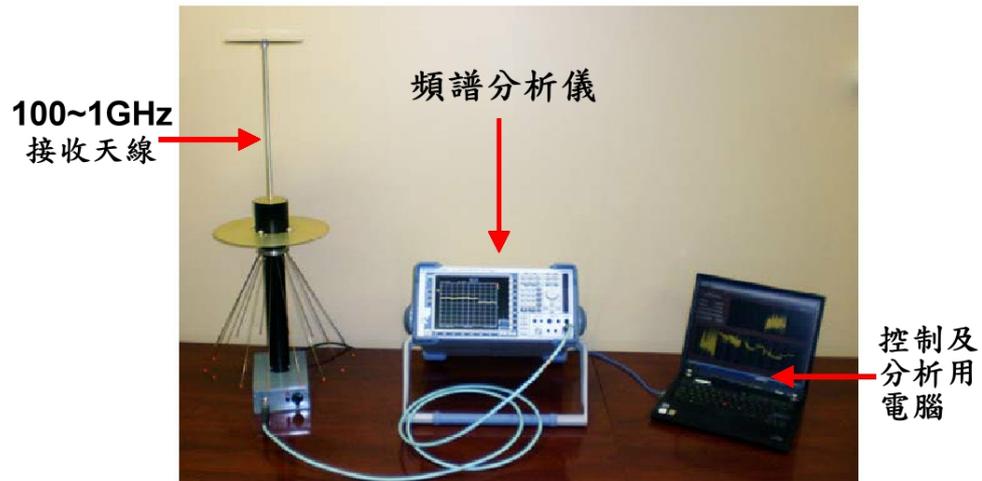


圖 2 電磁發射頻譜現場測量儀器

於舊設備移除前執行現場測量的結果，可當做是電廠電磁輻射的一個背景基準，與數位化安裝後實地測量的結果比較，以確保發射量沒有增加，這些數據也可以和 EPRI TR-102323 文件中的限制值比較。實地測量的數據將提供新系統受到潛在 EMI/RFI 干擾的具體頻率，可針對這個頻率作為測試新系統的重點，測試結果將提供一個新的基準，以供日後參考。有些設備例如變流器、電源、或電池充電器的電氣暫態，於實地測量時不會被偵測到，有越來越多的擔心，對於這些暫態是否會對設備造成干擾，因此，通過安裝過程中的確認，可以限制這些暫態的影響，並避免其干擾。執行現場測量有四個主要步驟：

- (1) 確定執行 EMC 測試的導則：第一步是從 NRC、EPRI、MIL-STD、IEC、CISPR 等準則中選定一種 EMC 準則，將確定測試配置、硬體要求、測試程序、以及可接受的限度，另外，準則制定的是 EMC 認證測試，而不是實地測量，因此有關參數的偏離標準，例如待測設備的距離或未使用線路阻抗穩

定網路(LISN)，只要是能夠了解對測試結果的影響，偏離是被允許的，但應該備註說明。

- (2) 確定執行測量的地點：進行數位化設備安裝，應在現場的任何受影響的地區執行。對於一個典型的現場測量，測試地點將根據多項因素影響，包括安全相關的設備、大發射源設備、可能產生影響結果的無線或其他設備、或任何曾經對 EMI/RFI 敏感性的設備。圖 3 是一個典型的選擇控制室為測試地點，小圓點為測試地點，箭頭指示的方向為測試期間天線面對的方向。

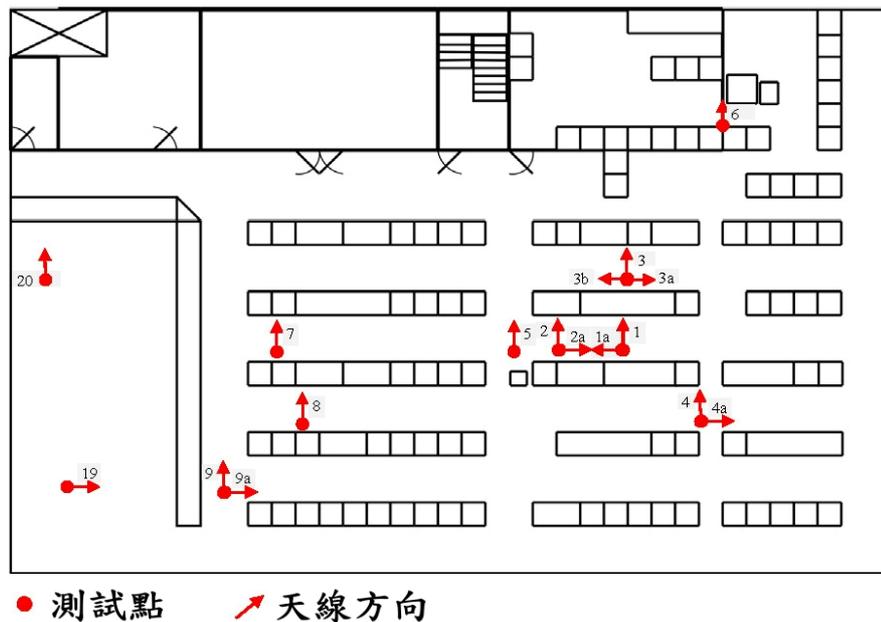


圖 3 主控制室電磁發射頻譜現場測量點

- (3) 執行測試：應記錄現場測試條件，例如測試設備、測試系統與電廠運轉條件，以便將來作比較用，另外應提供測試照片；如果偵測到大的發射源，例如圖 4 所示，應重新對特定頻率執行測量，做進一步的調查，可能的話應查明發射來源，因為如果該數位系統被 EMI/RFI 所影響，那麼降低發射源的放射量就可以減少其對數位設備的影響性。例如，在圖 4 中超出限值的 1.9 GHz 發射頻率，經調查發現是電廠使用的小型手機。
- (4) 分析結果並提出建議，以便盡量減少任何發射量超過了可接受的範圍內。當放射測試數據接近限制值，如圖 5，進一步評估是必要的，根據現場的調查數據和 EMC 認證測試的結果，提出可靠的結論與建議。與 EPRI TR-102323 文件中相對應的耐受度測試值做比較，若現有的電廠放射量已

超過了耐受度測試值，那麼，新數位系統的測試水平應增加到超過電廠的實測值，這是為了確保新設備不會受到影響。如果放射值已超過 TR-102323 文件中各電廠之放射值，須查明來源的放射值，並通過屏蔽、濾波、接地、電纜分離等手段限制放射量，以降低對電廠設備運轉干擾的可能性。

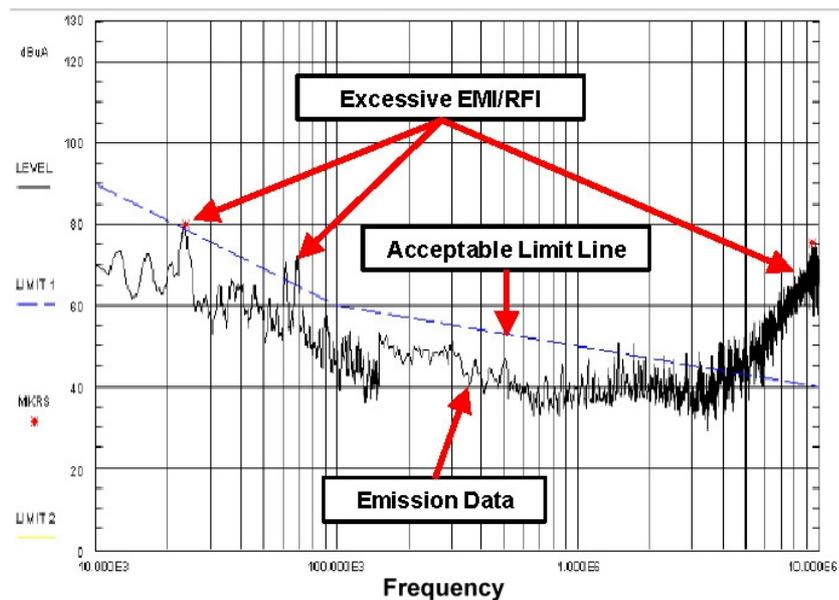
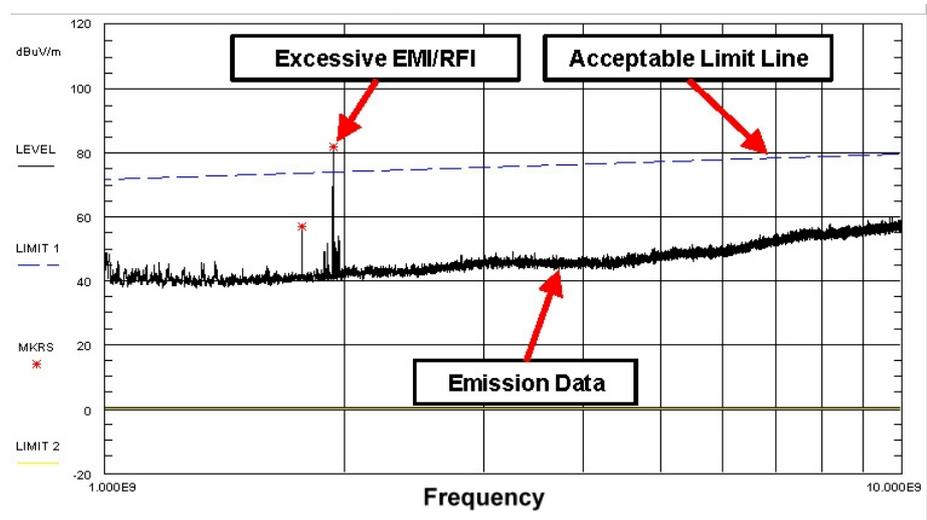


圖 4 實測頻譜超出限值 (上)輻射型-1.9GHz (下)傳導型

電磁發射頻譜現場測量主要的優點，可透過比較數位系統安裝前後之測量數據，確認現場放射量沒有明顯增加，提供核電廠數位化更高的品質保證；第二個好處是，可以將電磁相容認證程序的重點，放在已觀測到過度放射的頻率點上，重要的是把重點放在新系統和電廠設備間的相互作用；第三個好處是，結合電廠的放射數據與 EMC 的認證測試，判斷安裝的數位系統是否會影響電

廠設備，以便在設備安裝時確認風險而加以改進。

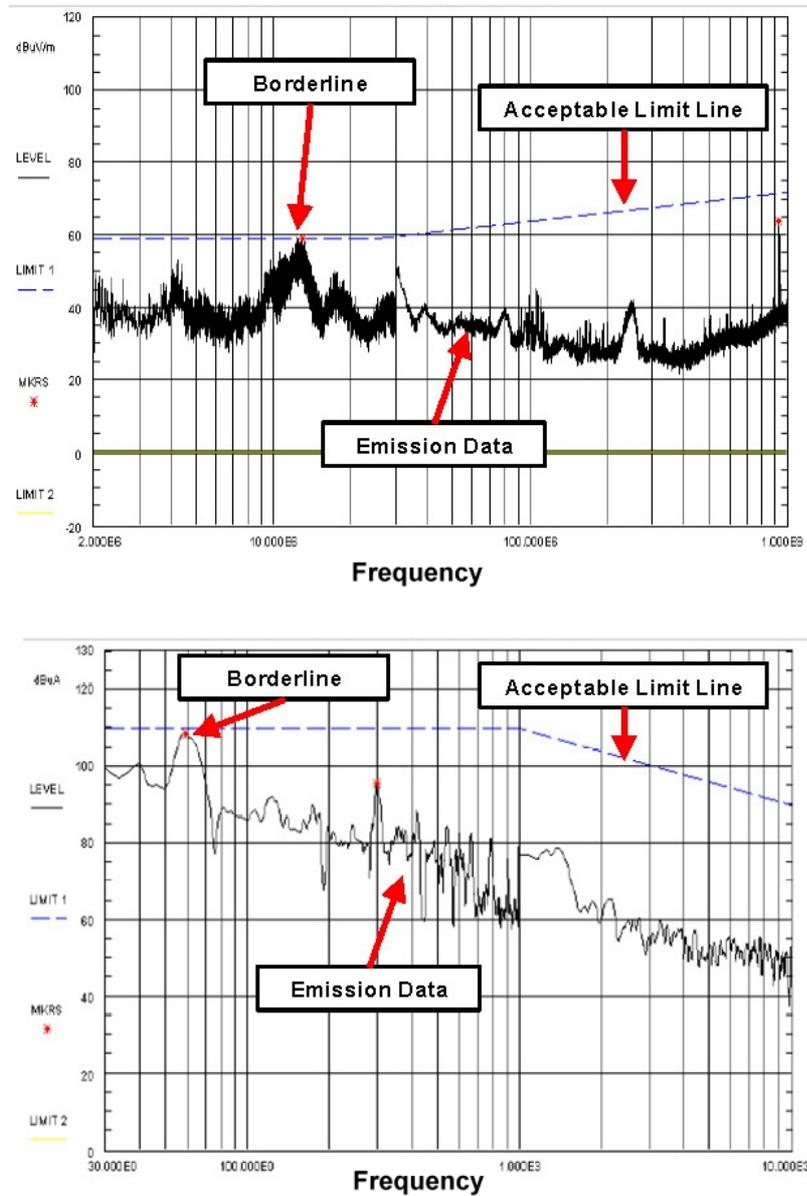


圖 5 實測頻譜接近限值 (上)輻射型 (下)傳導型

世界各國期望核電廠能運轉 60 年或更久，電磁相容性的問題必須加以解決，以確保系統在這些電廠的 EMI/RFI 環境中安全可靠的運轉，利用放射頻譜現場測量這個不可或缺的工具，協助 EMC 的驗證程序，以降低 EMI/RFI 的干擾而導致數位系統故障失效的機率。

四、以 FPGA 為基礎之安全有關功率階中子偵測系統驗證 (Toshiba Corporation Power Systems Company, Ref.4)

進步型沸水式反應器(ABWR)是世界上第一個全數位儀控系統的 BWR 電廠，由於以電腦為基礎的安全有關儀控系統，必須符合軟體驗證 V&V 的法規和標準，然而，軟體豐富的功能與由此產生的複雜性使得軟體驗證 V&V，花費昂貴與費時。此外，與核能工業相比，微處理器的生命週期較短，大多數微處理器可能幾年內被淘汰。

元件可程式邏輯閘陣列(Field Programmable Gate Array, FPGA)是一個含有可編輯元件的半導體設備，是一個可供使用者程式化的邏輯閘元件，目前以硬體描述語言所完成的電路設計，可以經過簡單的綜合與佈局，快速的燒錄至 FPGA 上進行測試，這些可編輯元件可以被用來實現一些基本的邏輯閘電路(AND、OR、XOR、NOT)，或者例如解碼



器或數學方程式等更複雜的組合功能，系統設計師可以根據需要把 FPGA 內部的邏輯塊連接起來，完成所需要的邏輯功能。除了邏輯單元，FPGA 其他可編輯的元件尚有作為內部信號線與外部引腳界面的輸出入模組，以及將輸出入信號與網路連結的連結器。

因為 FPGA 沒有電腦儀控系統所需的操作系統(OS)或複雜的應用程式，故以 FPGA 為基礎的儀控系統，其軟體驗證 V&V 比較簡單且可負擔得起的。考慮到這些好處，東芝公司選擇 FPGA 作為下一代核電廠儀控系統的裝置，東芝首先於非安全系統-輻射監測器使用，並已有出色的運轉經驗，接著，東芝以符合美國 NRC 的管制程序，設計以 FPGA 為基礎的安全儀控系統。

東芝公司開發出不可重複寫入 FPGA 的一種設計，作為安全儀控系統，在設計過程符合美國法規，並以功率階中子偵測系統向美國 NRC 提出申請認證應用，計畫將來能提供美國的核能市場。FPGA 系統的優勢包括邏輯設計嚴謹、操作簡便、確定性與可驗證性，但是仍然有一些尚待解決的問題。

1. FPGA 模組架構：

FPGA 的技術已經被應用到衛星、軍事、航空、飛機等領域，在這些領域中可靠性是最重要的。東芝選擇不可重複寫入 FPGA 使用於安全儀控系統，因為只能編寫一次，不必考慮 FPGA 中的程式可能在運轉或維護時無意中被改變的問題。

功能元件是 FPGA 晶片中最小的邏輯元件，每個功能元件包含一個可以經過完全測試的簡單邏輯，在核電廠安全有關儀控系統，執行完全測試是不合實際的，因為數位電路信號的組合可能大到測試時間太長而無法接受，故功能元件的規模被限制在可以接受的測試時間內，FPGA 則須使用經過驗證過的功能元件組合而成，如圖 6，為了確認 FPGA 組合正確，東芝在 FPGA 功能元件間的連接點，模擬測試信號，執行從 0 到 1、1 到 0 的邏輯切換測試，以驗證功能元件之間的連結完全正確。

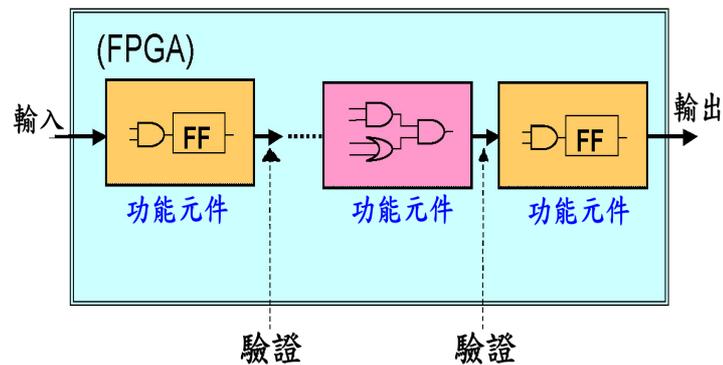


圖 6 東芝 FPGA 架構

功率階中子偵測系統使用於測量 10%~125% 額定功率之中子通量，本系統包括 APRM/LPRM 及再循環流量單元，每個單元包含七個模組，每個模組由一個或多個印刷電路板與前盤組成，電路板包括 FPGA 的信號處理及人機界面電路，前盤連接到 FPGA 的人機界面，允許運轉或維護人員設定適當的設定點。每個 LPRM 模組處理一只中子偵檢器訊號，並將訊號送至 APRM 模組，如圖 7、圖 8，LPRM/APRM 單元包括 LPRM、APRM 與狀態模組，其中狀態模組以 LED 燈號顯示自我診斷的結果，在中子偵測系統中 FPGA 只使用於數位處理程序中。

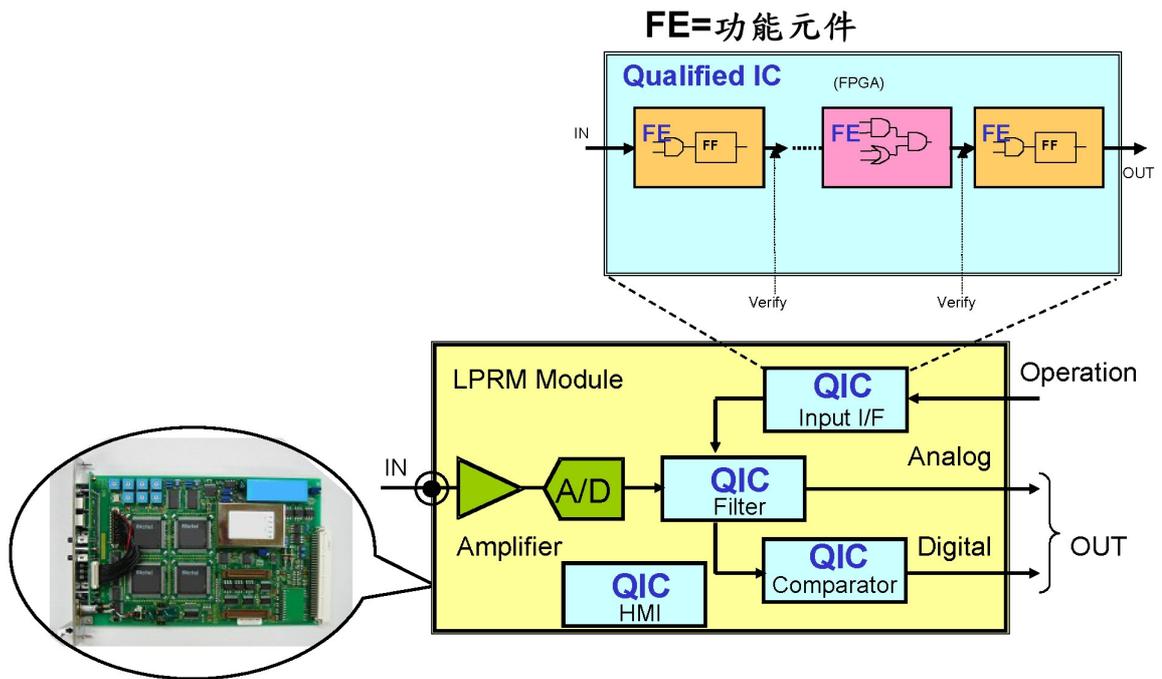


圖 7 東芝 LPRM 模組架構



圖 8 東芝 LPRM/APRM 單元

2. FPGA 系統設計程序與邏輯驗證：

FPGA 是半導體設施屬於硬體，FPGA 元件中的邏輯，其設計與製造則是使用類似生產軟體的程序，東芝使用 VHDL(Very High Speed Integrated Circuit Hardware Definition Language) 的編碼程式，將邏輯寫入 FPGA 硬體。針對安全儀控的設計與發展，在產品的生命週期中，東芝開發的程序如下：

- 設計工程師定義系統規範；以功率階中子偵測系統為例，將系統分解為單元，再定義每一單元的系統功能。
- 定義系統中組件的功能需求，例如定義單元與模組的需求。
- 設計 FPGA 內部的邏輯。

- 利用編寫工具將邏輯寫入 FPGA 中，然後執行驗證。
- 將 FPGA 焊接組裝在電路板上，完成模組之製造，並執行單元與模組的驗證測試。
- 將單元整合成系統，並執行系統驗證。

核電廠安全系統使用的 FPGA，其設計過程中，目前尚未有適用的準則或標準，由於發展過程中與電腦軟體類似，東芝公司開發 FPGA 設計流程中採用 IEEE 7-4.3.2-2003，並依據 IEEE 1012-1998 標準的高性能軟體驗證，該標準定義了一系列的 V&V 工作與活動，例如需求追蹤分析(requirements traceability analyses)，驗證上階段的需求可以追蹤到下一階段，而下階段的功能也可回溯到前一階段；於 FPGA 的生命週期中，亦須執行潛在的危​​害分析。

3. 功率階中子偵測系統驗證測試：

東芝公司設計與製造的 FPGA 為基礎的 PRNM 系統，按照既定的設計流程執行邏輯驗證，硬體驗證測試亦符合 EPRI TR-107330 的要求，儘管這套系統不是 PLC，這些系統通常安裝在主控制室，因此 TR-107330 的要求仍須適用，執行下列的測試以確認符合規範的要求，並證明設備在壓力狀況下功能正常：

- 環境測試：在 EPRI TR-107330 所要求的溫度和濕度條件下，確保系統提供的功能仍能正常工作。測試樣品成功地通過了輻射測試，亦通過溫度和濕度的考驗，在測試期間及測試後未出現實體或功能上的退化，針對環境的測試條件，符合所有適用的性能要求，測試結果證明，測試樣品在不正常的溫度和濕度下，仍不會故障失效。
- 耐震測試是確保該系統在 TR-107330 所要求的地震中能繼續正常運作，測試樣品成功地完成了耐震的振動測試，在測試期間及測試後未出現實體或功能上的退化。
- 電磁干擾 EMI/RFI 測試，確保該系統 EMI/RFI 的耐受度與發射值均符合美國 NRC 法規 R.G 1.180 R1 之要求，測試樣品於耐受度測試期間，輸出入資料持續轉換未中斷，數據亦能保持一致性，系統功能正常；樣品之放射值測量，亦在限制值之內。
- 突升電壓(Surge)耐受度測試，確保該系統符合 R.G 1.180 R1 之要求，於測試樣品上施加突升電壓，仍能維持正常運作。

- 電氣快速暫態(EFT/B)測試，確保該系統符合 R.G 1.180 R1 之要求，測試樣品於測試期間仍能維持正常運作，符合測試標準。
- 靜電放電(ESD)測試，確保該系統於 TR-107330 的靜電環境下仍能維持正常運作，執行測試符合 TR-102323 R2 之要求。於測試樣品前盤、側邊、前盤組件施加 ESD 雜訊，系統未出現暫時退化或功能喪失。
- 隔離測試，確保系統能提供適當的電氣與功能隔離，測試標準依據 EPRI TR-107330 與 IEEE 384-1992，施加測試電壓在測試點上，測試樣品的安全功能在測期間與測試後，仍能正常運作。

五、電纜之性能狀態監測方式- LIRA 線上共振分析 (TECNATOM, Ref.5)

線上共振分析(Line Resonance Analysis, LIRA)為一種偵測電纜劣化的方法，最初使用於挪威能源科技局的 Halden 反應器計畫，經由 Wirescan 公司發展成商業化產品，它的理論是基於傳輸線理論和共振分析。LIRA 技術是一種非破壞性測試方式，不會損害任何電纜或連接到電纜的設備，可用於線上檢測電纜電氣參數，因為絕緣故障或劣化所產生局部或整體性的變化，本文介紹了在美國和歐洲核能電廠設施的訊號電纜，在現場實驗測試的最新結果。

1. 傳輸線理論：

傳輸線是電源和負載間連接電路的一部分，傳輸線的行爲表現取決於傳輸線的長度與訊號波長的比值，當傳輸線長度遠低於波長(例如很短的電纜或訊號低頻率)，並不會影響在電路上的行爲與線路阻抗，任何時候從電源側計算，線路阻抗會等於負載阻抗，但若傳輸線長度大於波長時，線路阻抗將與傳輸線的特性息息相關，當電纜在傳輸高頻訊號的狀況下，R 電阻、L 電感、C 電容、G 絕緣電導率等四個參數完全掌控電纜狀態表現。

依據傳輸線理論，傳輸線的行爲分為兩個複雜的參數：

第一個參數是傳遞功能： $\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta$

α 為衰減常數， β 為傳遞常數；

第二個參數為特性阻抗： $Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$

LIRA 分析包括了專有的運算式，從雜訊測量來準確評估線路阻抗頻譜，

估計線路阻抗是評估電纜局部或整體性劣化的基礎，圖 9 所示為 100 米長 PVC 的儀器電纜，在 0-10 MHz 訊號範圍之線路阻抗估計值。

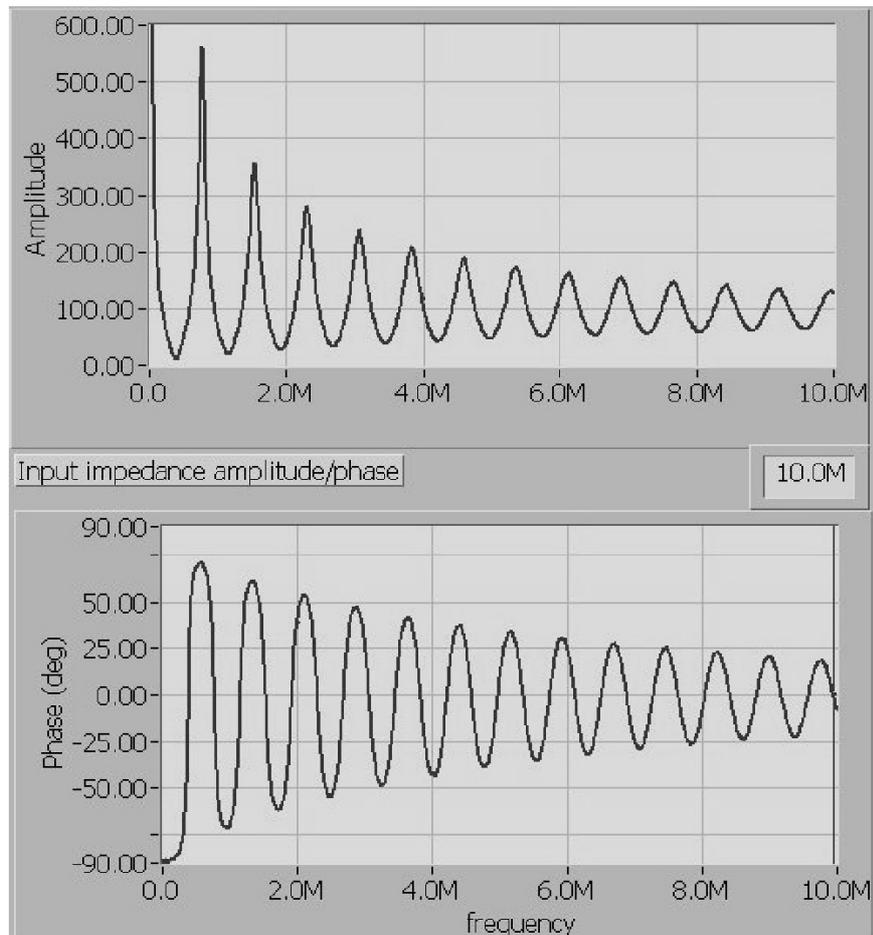


圖 9 傳輸線的阻抗頻譜 (spectrum)

依據 LIRA 測試的結果，發現電纜絕緣因受熱劣化或機械應力損傷，對於電容值的影響較大，電感值的影響較小。直接量測線路上的電容/電感值，來評估電纜老化的偵測方式，因為靈敏度與準確性不夠不會有效，而 LIRA 可通過其對複雜的線路阻抗評估，並利用加強相位和振幅的放大係數這個優勢，監測電容值和電感值的變化；儘管如此，LIRA 這種技術仍具有以下缺點：

- ◆ 共振值不僅取決於電纜電氣參數，也與電纜長度和連接負載的被動元件有關，換句話說，這種技術需要為每個測試電纜建立參考基準，而不只是建立每種電纜型式的基準。這種方法可有效使用於連續即時監測的電纜，但不適用於去診斷已安裝舊電纜的劣化狀況。
- ◆ LIRA 很難區分電纜劣化故障或是負載端故障(負載感抗的變化)。

基於上述的原因，LIRA 必須執行專有的運算式，以準確地評估局部劣化的位置與嚴重程度，以及電纜的整體狀況。

2. 線上共振分析儀器架構：

線上共振分析透過專有的運算式，從線路阻抗頻譜可以偵測到局部高溫條件下導致的電纜熱點損害、局部機械應力對絕緣的損壞，及因熱產生整體性的劣化現象。LIRA 儀器架構如圖 10，雜訊產生器輸出 1~3V 訊號，受測電纜連接到調變器(modulator)，調變器輸出兩個控道，CH0 為參考訊號，CH1 是依據電纜阻抗調變後之訊號，兩個訊號送入數位示波器(目前採用的型號為 National Instruments PXI-5124)，線上分析為本系統之核心，評估電纜老化的狀況，模擬器模擬包括從電纜輸入經調變器至數位處理的流程，可模擬任何類型與電纜長度，可利用實測值的外插結果，及執行假設分析。

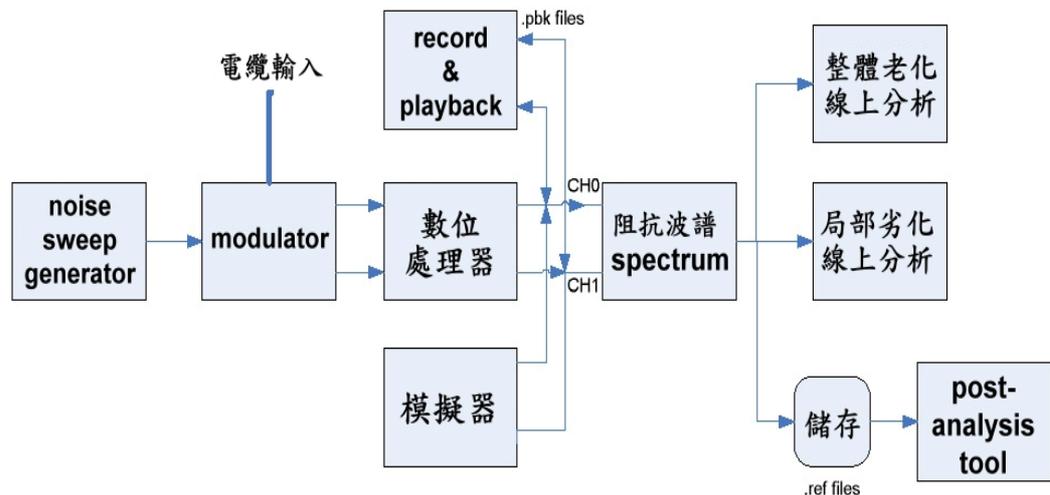


圖 10 線上共振分析儀器架構圖

3. 整體性老化狀況評估：

由一些測試顯示，電纜絕緣的整體劣化會導致介質電容和電纜電感在一定程度上變化，而這些變化會影響到電纜的衰減係數，衰減公式如下：

$$\alpha(dB/km) = Kf^a \sqrt{\frac{C}{L}}, \text{ K=常數, f=頻率, a=0.5~1.0}$$

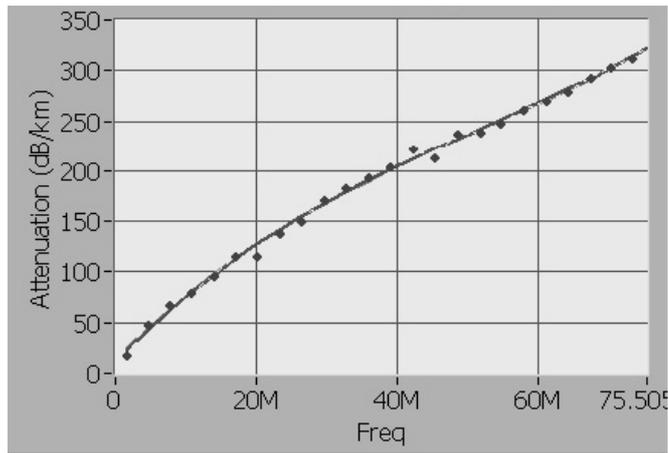


圖 11 LIRA 估算之電纜衰減值

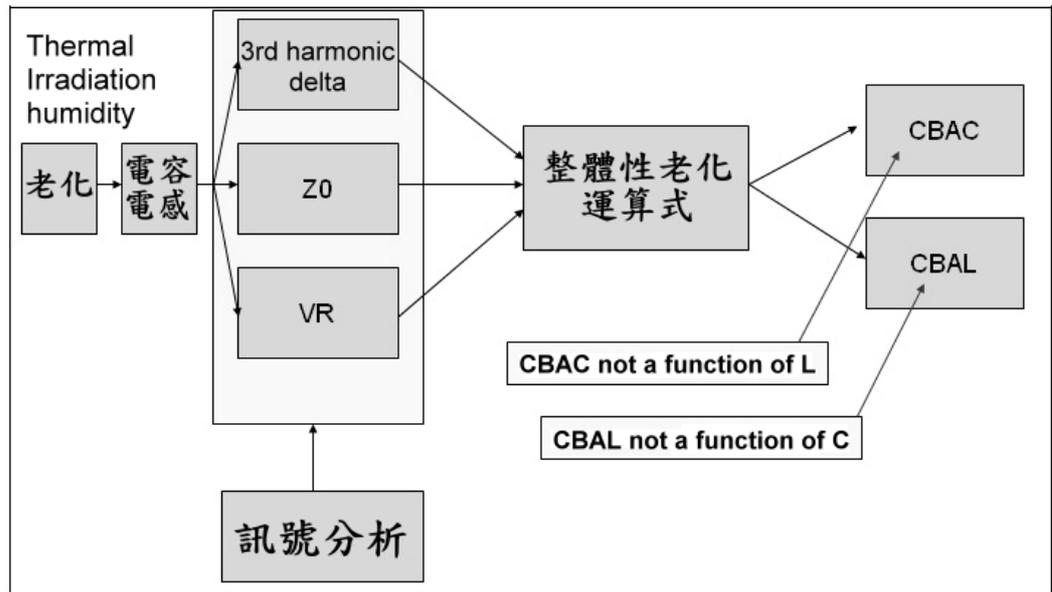


圖 12 電纜整體性老化狀況指標 CBAC/CBAL 運算

LIRA 使用高頻衰減值當作電纜整體性老化狀況的基準，估算高頻衰減值的專門運算式稱為第三諧波分析法，然而只評估衰減值還不足夠，由於電纜劣化以相當複雜的方式影響電容或電感，電容對電感的比值並非單一模式，因此 LIRA 提出如圖 12 的方式，先將影響電感、電容的成份隔離，產生只對電感或只對電容靈敏的參數，稱為 CBAC 或 CBAL(Central Band Attenuation for Capacitance / Inductance)，由於已經證明電纜劣化對電容值的影響較大，因此以 CBAC 為評估電纜整體性老化狀況的指標。CBAC 的計算是使用頻率分析，並透過第三諧波分析(高頻衰減)、電纜特性阻抗 Z0、訊號相位速度 VR 等估算方式而得到。

4. 局部劣化偵測：

從 2006 年到 2007 年與 EPRI 合作執行有限數量的 XLPE 絕緣和 EPR 絕緣電纜的熱老化檢測，以評價 LIRA 辨識老化程度的能力，依實驗的結果發展出一個條件指標 DNORM (degree of normalized degradation)，用於評估熱點的嚴重性。接下來將說明在西班牙 TECNATOM 的實驗結果。

5. TECNATOM 2008 年實驗結果：

- (1) 實驗目的：針對熱老化和機械損傷的故障檢測結果，和其他常用的監測技術比較，以評估線上共振分析的能力，本實驗採用的其他技術包括斷裂伸長率 (Elongation-At-Break)、機械壓痕測試(Indenter)，時域反射計(Time Domain Reflectometry, TDR)，使用電纜材料為 EPR(EPDM 防火絕緣)/XLPE(XLPE)。
- (2) 熱點偵測：四條 30 米長之 XLPE 樣品，在 10 米處製造約 2 米的劣化區段，實驗結果 TDR 方式可找出 10 米處之熱點(圖 13)，LIRA 偵測結果亦清楚標示 9 米與 11 米間之劣化區段(圖 14)，針對 XLPE 與 EPR 樣品檢測結果均正確。

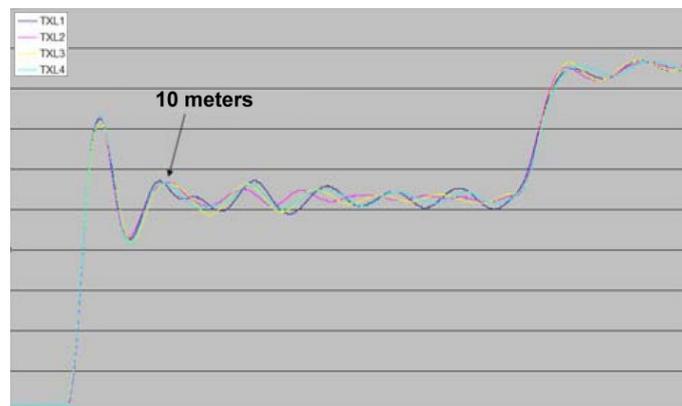


圖 13 XLPE 電纜樣品 TDR 熱點(10 米處)偵測結果

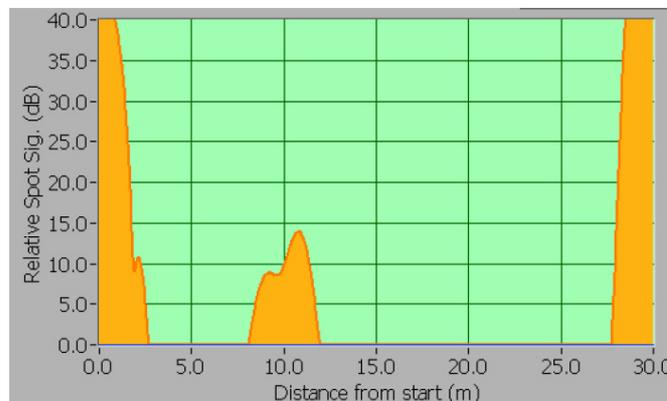


圖 14 XLPE 電纜樣品 LIRA 熱點(10 米處)偵測結果

- (3) 機械應力損傷檢測：於 2006-2007 年 EPRI 執行兩種類型的機械故障檢測，將多芯電纜絕緣割斷與挖破(圖 15)，由圖 16、圖 17、圖 18 顯示，TDR 偵測的位置不準度較高，LIRA 之偵測圖形，0dB 以下為雜訊，應該忽略。

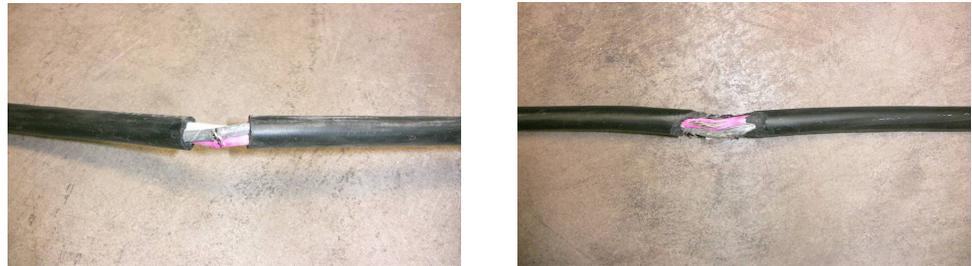


圖 15 XLPE 電纜絕緣破壞檢測樣品(左)CUT (右)GOUGE



圖 16 電纜絕緣破壞樣品 TDR 檢測結果

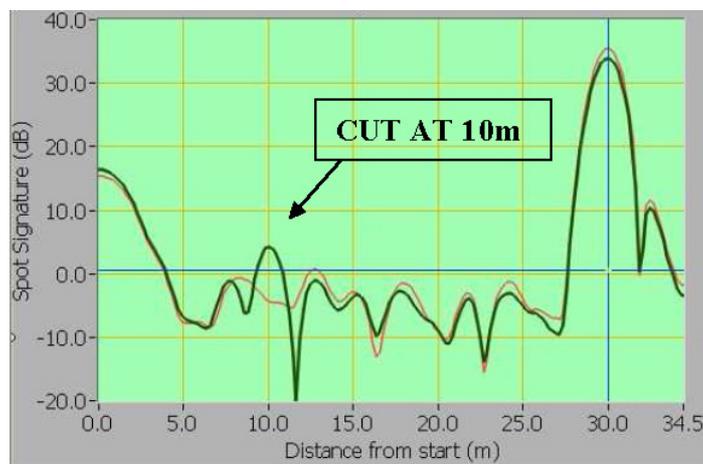


圖 17 電纜絕緣破壞樣品(CUT) LIRA 檢測結果

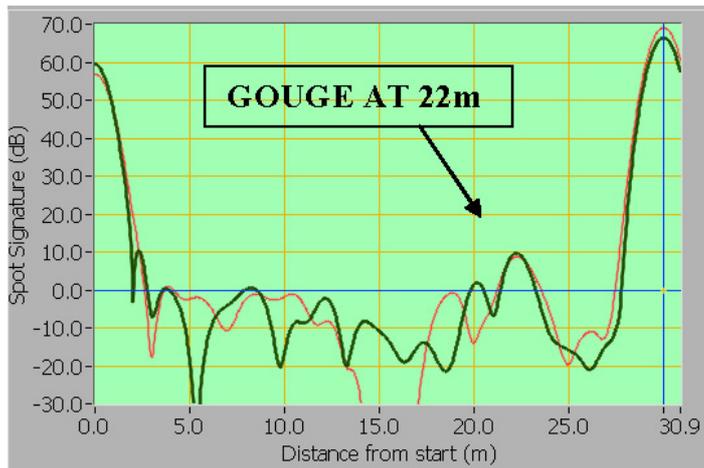


圖 18 電纜絕緣破壞樣品(GOUGE) LIRA 檢測結果

- (4) 整體性老化狀況評估: 三個 20 米長 EPR 樣品分別置於 140°C 環境下各 10 天、20 天、30 天, 模擬熱效應 20 年、40 年、60 年, LIRA 檢測結果與 EAB 類似, 均有品質下降劣化的趨勢(圖 19), 有趣的是熱效應 20 年至 60 年間, EAB 對 CBAC 之比值幾乎為線性(圖 20), 因此可以外插方式求得比值。

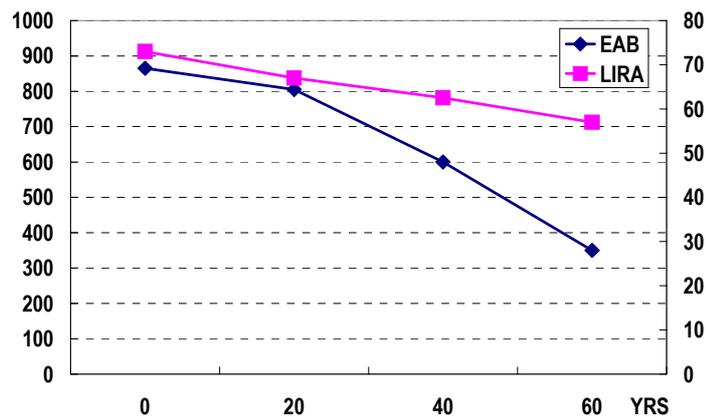


圖 19 EPR/EPDM 電纜熱效應樣品檢測結果

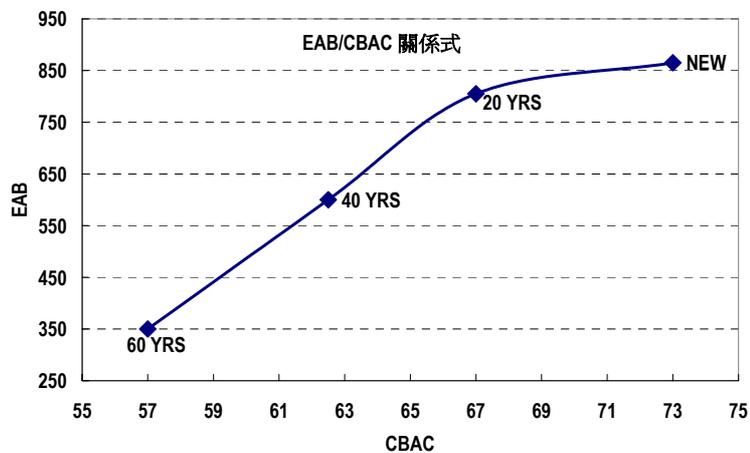


圖 20 EPR/EPDM 電纜 EAB/CBAC 關係式

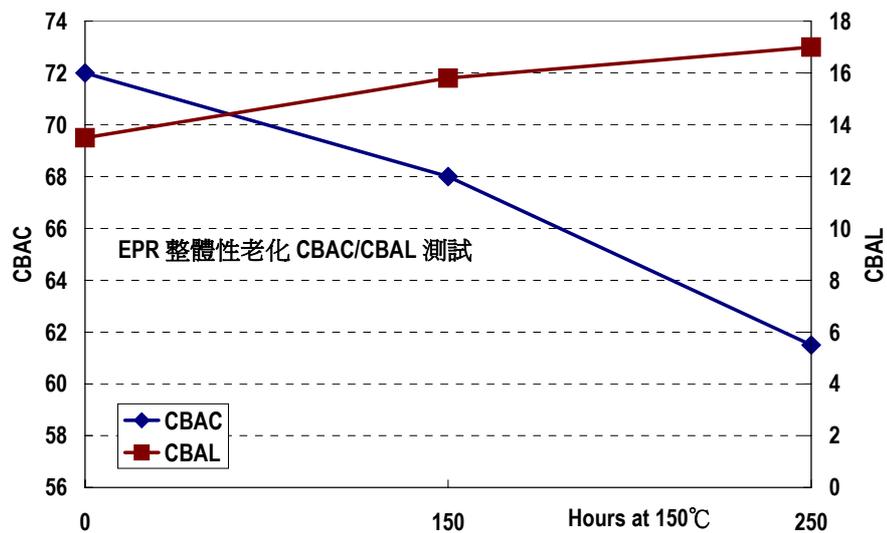


圖 21 EPR EPR 樣品 CBAC/CBAL 測試結果

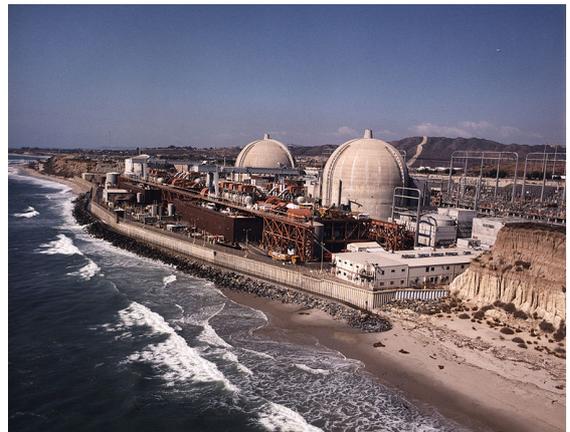
EPR 於 2007 年將 EPR 電纜樣品置於 150°C 環境下測試，發現新電纜的 CBAC 值為 72 (圖 21)，與圖 19 中 TECNATOM 的測試結果相同。

- 結論：EPR 在 2006 年和 2007 年，與 TECNATOM 2008 年的測試，結果顯示，線上共振分析可以找到多蕊電纜被割斷或挖破的確實位置，以 CBAC 指標證明 LIRA 有能力評估整體性熱效應老化的相對程度；這些試驗還證明，即使絕緣功能仍然正常，LIRA 能夠指出絕緣的局部損壞位置，可以在壽命終期之前辨識老化現象，有助於評估導線管內受到局部熱效應或輻射效應導致老化的電纜，及可使用於評估難以到達的電纜槽內的電纜。

六、San Onofre 核電廠儀控系統數位化經驗 (Southern California Edison, Ref.6)

1. SONGS (San Onofre Nuclear

Generating Station)核電廠簡介：位於加州聖地牙哥西北角大太平洋海岸，供應南加州約 20% 電力，隸屬於南加州愛迪生電力公司；一號機為西屋 PWR 機組，運轉 25 年後於 1992 年關閉，二號三號機為 CE PWR 機組，分別於 1983.08.08 及 1984.04.01 商轉，發電量為 1172 MWe/1178 MWe。



San Onofre 核電廠近年來積極規劃儀控系統之數位化，已完成或規劃中之系統包括：非安全有關之冷凍機控制、主飼水控制、主汽機調速及超速跳脫控制、主飼水泵汽機調速及超速跳脫控制、次級電廠控制、硼酸/稀釋主要補充系統等，以上所述這些系統的升級更新包括強化控制功能、設備性能監測、人機界面等，數位化過程中歸納出幾項重要的經驗如下：

2. 長遠規劃，老舊設備管理：

長程來看，老舊的類比設備須逐一數位化，以最合適且功能相同之獨立數位系統取代個別的老舊系統，聽起來很合理且簡單，但這樣的作法並不符合一般著重成本效益的商業法則，第一個重大控制系統數位化計畫不能與其它改善工作的作法相同，若採用相同的處理方式，費用將是非常昂貴的，須發展一個長程且整合的整體計畫，來管控類比系統的老舊問題。

- ◆ 每增加一個數位化平台將需要新的文件、資訊儲存的需求、及人員訓練等，在以後的章節會更詳細地討論，但基本上應將各項變動降到最低。
- ◆ 新控制系統主要的安裝成本與基礎設施(例如電源配置，佈線/網路，和空調設備)有相當關係，在核電廠重新佈置銅線電纜的費用可高達數百萬美元，使用新的數位通信技術(例如，Fieldbus 與光纖網路)是可能的解決方案，但需要在計畫前提出綜合性的系統架構。已有幾個核電廠在主要系統開始數位化更新前，投下可觀的投資改善數位系統的基礎設施。
- ◆ 重大投資需要很多年，準確地預測現金流量是長程計畫的一部分，將有助於必要資金的獲得，並減少預算被削減的機會。
- ◆ 長程計畫帶來大的遠景，若只執行更換單獨控制系統，而未考慮整體系統的協同關係，將可能忽略了分散式控制系統(DCS)的重要電源。

3. 項目規劃和概念設計：

長程規劃將對每個系統定義明確的改善範圍，成功的數位化規劃及概念設計發展需要一個整合的團隊，傳統的改善計畫通常由系統工程師負責，然大部分的系統工程師通常不熟悉數位技術，由不了解 DCS 系統的工程師負責數位化更新將是困難的任務，應由系統工程師、DCS 工程師、運轉與工程設計等人員組成的一個綜合的工程團隊負責，並須確定下列事項：

- ◆ 人機界面的改變：現存的硬體操作，存在一些人員的操作問題，數位化更新引進軟體操作控制(例如觸摸式螢幕)，提供一個修正人員操作問題的機會。
- ◆ 現場設備更換：某些情況下，現有設備仍能相容使用，不須更換，若考慮使用 HART(Highway Addressable Remote Transducer)通信協定提供遠程自動診斷測試，則需要更換；另外現場設備若已老舊過時，很容易做立即更換的決定，但若現場設備仍然堪用，則還須考慮更換的成本效益。
- ◆ 控制系統功能：數位化設備更新提供改善系統控制的機會，但須了解到，改變越多就越有機會犯錯，因此重新設計主要控制系統，須仔細的規劃，並考慮必要的知識資源。

4. 計畫範圍與預算：

計畫初期，數位化範圍的擴充是不可避免的，其中的一項誘因來自於數位控制器能擴展功能的能力，而須注意的是，控制系統的改變所產生的影響須能夠被了解，應該精確地回答以下的幾個基本問題：

- ◆ 安裝額外必要電纜的真正費用是多少？
- ◆ 設計改變是否只影響到軟體，或者需要例如輸出入模組等額外的硬體？
- ◆ 運轉訓練的內容是什麼？
- ◆ 類比系統的設計是依據多年以前的運轉經驗，現有控制邏輯的設計基準是否完全了解？
- ◆ 現有電廠模式必須依據新的控制邏輯去做改變，如何驗證改變的部份？
- ◆ 這些改變如何去影響運轉人員的訓練模擬器？

5. 平台/廠家的選擇：

預先確定安全和非安全系統數位化平台的準則，可消除選擇供應商的痛苦，然而決定標準的平台可能是最困難的任務，San Onofre 核電廠曾嘗試規範安全與非安全有關的兩個主要平台，然而這一決定正受到挑戰，因為如果只考慮前期支出，所選擇的非安全平台並不是最低的成本，因此選擇數位化平台時應考慮以下的建議：

- ◆ 盡量減少不同的平台。San Onofre 核電廠發現，若同時擁有兩個 DCS 平台，要維持人員的訓練與熟練度是具有挑戰性，且花費與非常昂貴的。

- ◆ 觀摩 DCS 系統在其他產業例如石油/化學工廠的應用，不要只專注於核能產業上。
- ◆ 平台的選定將會有長程影響。
- ◆ 使用同一評選程序與標準去評估每個平台。
- ◆ 在評選的過程中，設法參加每個平台的使用者小組會議，這是一個快速簡便的方法來衡量如何滿足現有用戶。

6. 工程師和技術員的訓練

有知識的工作人員是掌握未知狀況最好的保險政策，簡單的數位化控制系統能夠完成比一般類比電路更複雜的控制算法，要理解這種複雜性，需要受過專門訓練。San Onofre 核電廠一名員工進行為期一週的訓練課程，花費約為美金 2,500 到 6,000 元，還不包括旅行費用，系統管理員則可能需要多達 6 個星期的課堂訓練，其中包括執行實際的具體任務，使成為真正的專家能手。此外，人員需要離開工作現場接受訓練，所喪失幾個星期的生產力，亦應列入成本考慮。願意花費高成本來培養一小群人員，考慮的是這些專家以後將使用新的有價值的技能。

7. 類比系統設計基礎文件的轉換

數位控制系統一個最大的優勢是可以處理大量的數據，但在核電廠中碰到一個棘手的問題：你如何管理 DCS 系統的上百個參數，使 DCS 系統精確地微調控制？傳統的類比系統很容易以一張圖面文件，或控制版的電子資料庫儲存，San Onofre 電廠遇到的問題是，現有合格的資料庫管理系統無法處理 DCS 系統大量的數據，因此不得不使用影印保存這些文件與紀錄。

另一個問題是界定那些可調參數與設計基礎有關，牽涉到設計基礎參數的改變，可能需要以設計變更流程處理，有些參數的設定值須等到機組啟動測試後才能決定，但大修後啟動階段並不是一個好的時間點來處理這些設計變更。對於新的 DCS 系統，數據管理將是一項挑戰，如何達到最好的管理，取決於個別電廠現有的文件管理、資訊科技的基礎設施與構型管理的過程，這些管控流程應與電廠設備更新同步升級，這是長程計畫中另一項需要考慮的重要因素。

8. 軟體媒體的控制與儲存

另一項議題是控制軟體改變的程序，DCS 系統可隨時線上變更，並不需要關閉流程，現在的挑戰是修改後的軟體備份與儲存安全，並將軟體的最新版本提供給供應廠商，以備在未來的某一時刻需要廠家的支持協助，這可能聽起來很簡單，但工業界已發生許多使用錯誤的軟體文件而導致意想不到結果的案例。隨意變更控制流程是 DCS 系統致命的弱點，應給予必要的關注與重視，其中包括工作人員的訓練，以確保軟體品質更為確實，

9. 類比系統的硬體操作轉換成軟體操作

數位化系統採用觸摸式螢幕顯示控制，通常稱為人機界面或只是軟體控制，這是一個新領域，人機界面可以顯示更多的信息，並以較容易理解的方式顯示。San Onofre 核電廠決定於兩個主要的非安全相關的數位系統採用軟體控制，而有些電廠則保留原有的硬體操作器，僅將 DCS 系統當成單純的輸出入邏輯處理器，這兩種方法各有其優缺點。維持良好的人員因素是極為重要的，運轉部門須指派一位具有經驗且有權作決定的高級運轉員參與數位圖控軟體的發展，發展的最佳模式是由電廠內部團隊主導，而非借助於供應廠商，這將可能是最具成本效益的方案。

數位化過程中應注意以下的關鍵點：

- ◆ 執行主要控制面板功能的長程規劃時，至少應包括一個能在未來佈局的概念設計，我們不想在更換昂貴的類比設備，兩年後又要改成新的數位化人機界面螢幕。
- ◆ 如果在發展的階段就讓運轉人員參與並扮演重要角色，他們會更願意接受新科技。
- ◆ 於圖控軟體開發階段，無論花費多少心思執行模擬與測試，仍需要經過適當的調整，運轉員才有機會使用圖控軟體來實際控制電廠，對於訓練有素、熟悉內部的團隊可以很容易地執行這樣的調整，但如果必須回去求助供應商，事情會變得複雜多了，以供應商的角度可能不了解電廠人員的需求，導致將來發生人為疏失的機率大增。

- ◆ 針對人機界面的螢幕故障，應執行失靈模式及效應分析，必須明確地指出運轉員在喪失控制螢幕時應該如何操作，一種選擇是採用多螢幕，可以在故障時互相取代，另外，也可以設計較簡單的螢幕更換方式。

10. 警報管理選擇

控制室的警報聲響及閃爍燈，很容易提醒在控制室的人員，相對地，運轉員容易忽略人機界面螢幕上閃動的指示，因此，於取消任何硬體警報窗時，應使用嚴謹的設計變更申請審查流程管控。人機界面的一個優勢是強化警報管理，有了這種能力，更有責任確保電廠的人因設計基礎假設，會被提出重新接受審查。

- ◆ 警報管理策略應該是一個全面性的計畫，並有適當的管理文件。
- ◆ 應考慮電廠正常、異常、緊急操作以及所有電廠暫態。
- ◆ 運轉員越難找到信息(須花費更多步驟)，越不可能去使用它。
- ◆ 保持原有警報窗相同的文字，使運轉員在壓力的情況下仍可快速閱讀。
- ◆ 請記住，發生了不對勁並不意味著運轉員須立即反應，在 DCS 系統環境的警報管理，是將收到的信息排列優先順序和管理，使運轉員能充分了解，依據優先順序而不會手忙腳亂不知所措。

11. 工廠與電廠允收測試(FAT/SAT)

工廠與電廠允收測試的目的是提供一個重要的機會，包括發現設計上的缺陷與控制邏輯不經意的被修改，並利用測試過程中執行人員訓練，安裝前使運轉維護人員可以熟悉系統。爲了充分利用這些測試的優點，針對供應商提供的 FAT 程序，需要進行徹底審查，確保有足夠的測試去驗證“假設”狀況，這可能需要比多數廠商通常建議的還要更多的輸出入點模擬訊號，在系統安裝前，即使發現只有一個編碼錯誤，可能需要額外的支出去修正，但這是需要採取的必要措施。

San Onofre 電廠曾發生未能驗證偵測器輸出的相容性而導致主汽機跳脫的案例，新的主汽機調速 DCS 系統，仍使用原來的汽機速度偵測器，偵測訊號上的諧波，在舊系統中會被忽略不計，但新系統會將諧波列入計算，導致指示速度偏高，造成汽機超速跳脫動作。利用模擬(mock-up)設備執行一些簡單的測試，就可以發現偵測訊號的諧波問題而加以改善防範，但事前每個人

都認為已有其他電廠採用類似系統，故推論偵測器的相容性與安全性。這裡得到的主要教訓是，每一項假設都應該通過風險分析與測試驗證，以本案為例，若經過適當的風險分析，並配合 FAT 或 SAT 對關鍵參數測試驗證，原來的速度偵測器是不可能過關的。

七、核電廠虛擬數位儀控經驗回饋 (EPRI-1016722, Ref.8)

www.taipower.com.tw

- 處長的話
- 重要資訊
- 系統功能
- 相關連結
- 相關資訊
- 回首頁

訓練課程及經驗回饋

EPRI 基礎課程 *** 點選時請同時按住Shift鍵，以方便全螢幕閱覽。(最佳解析度：1024*768)***

1. EPRI 核工原理(Basic Atomic and Nuclear Physics)
2. EPRI 土木工程(Civil Engineering)
3. EPRI 電機工程(Electrical Engineering)
4. EPRI 熱傳與流力(Heat Transfer and Fluid Flow)
5. EPRI 電廠材料(Nuclear Power Plant Materials)
6. EPRI 機械工程(Mechanical Engineering Topics)

EPRI 數位儀控操作經驗 *** 下列數位儀控操作經驗，為有聲課程，請先將喇叭打開，或接上耳機視聽，點選時若同時按住Shift鍵，可以方便全螢幕閱覽(最佳解析度：您可自行決定)***

1. Case Study 1 (DFW)
2. Case Study 2 (AVR)
3. Case Study 3 (EHC)
4. Case Study 4 (VSD)
5. Case Study 5 (CRD)

核電廠 Seismic Orientation Training *** 最佳解析度：800*600 ***

接下來的章節將介紹的五個案例來自 EPRI 2008 年出版之技術文件 1016722，這些案例乃是依據數起發生在美國核電廠的真實事件，重新編寫組合而成，並製作成互動式有聲訓練教材，本份教材已置於台電公司核能發電處網站訓練課程及經驗傳承(<http://10.18.8.153/paper/main13.html>, 詳上圖)，提供儀控維護人員參考。案例分析的方式除了系統背景介紹、事件說明與肇因分析外，另外依據整個改善案之各個階段，例如於概念設計、細部設計、採購、測試、安裝、運轉維護等階段中找出被突破的屏障，再據以提出寶貴的經驗，此種分析模式值得本公司核能系統效仿。

1. 案例研討一：某電廠 PWR 機組因蒸汽產生器水位暫態無法控制，導致手動急停。

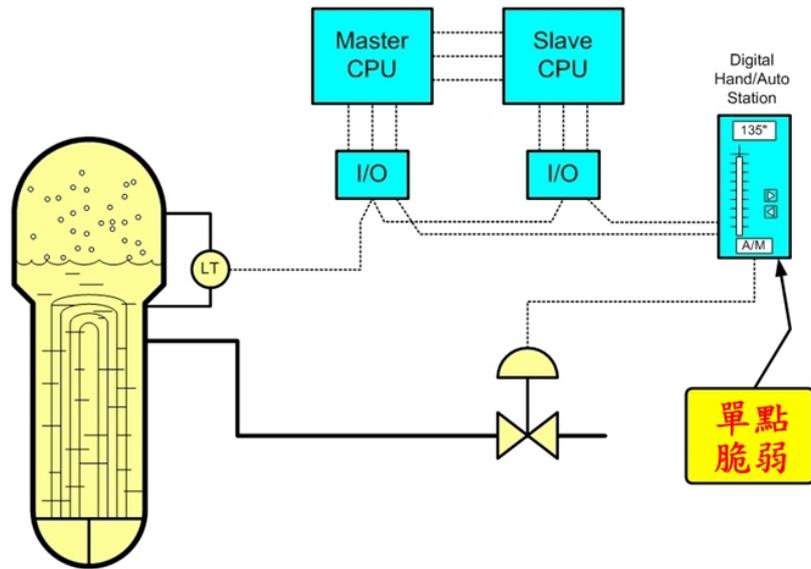


圖 22 飼水控制系統 M/A 控制器

- ◆ 背景說明：飼水控制系統更新，設計上僅有一只數位 M/A 控制器，訊號線與其他電驛裝置之電纜共用導線管，且控制器輸入訊號未依廠家建議使用屏蔽線。
- ◆ 事件說明：由於電氣快速暫態(Electrical Fast Transient, EFT)導致 M/A 數位控制器閉鎖，輸出漂移上升，補水閥逐步開啓，蒸汽產生器水位上升，但控制器失靈已無法控制閥位，水位持續上升至接近限制值，運轉員只好手動急停。
- ◆ 事件原因：
 - (1) 單點脆弱性(Single Point Vulnerability)：只有一只 M/A 控制器(圖 22)，喪失重複保護功能。
 - (2) 不洽當的硬體設計：未設計雙重 M/A 控制器，且數位控制器之訊號線與其他電驛有關之電纜共用導線管靠在一起(圖 23)，當電驛切換動作時，導致 EFT 電氣快速暫態之電磁雜訊侵入。
 - (3) 無效的接線準則：訊號線未依廠家建議使用附加屏蔽之雙絞線(圖 24、圖 25、圖 26)，當 EFT 電磁雜訊產生時，電磁干擾直接影響控制器之記憶體晶片，產生 RAM BAD 異常，導致 M/A 控制器閉鎖。
 - (4) 執行飼水控制系統更新，安裝測試時只測量主控制室輻射型電磁波強度，未執行傳導型電磁環境測量，新設備亦未執行電磁耐受度驗證。

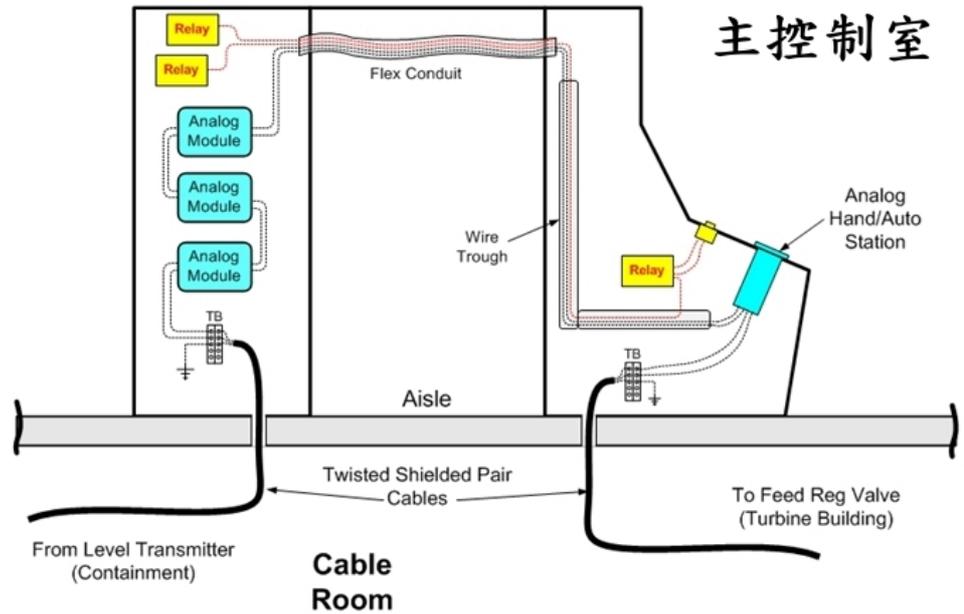


圖 23 數位控制訊號線與電驛有關之電纜共用導線管

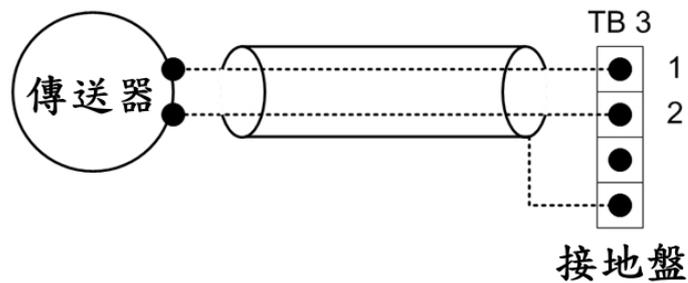


圖 24 廠家建議接線圖

◆ 經驗回饋：

- (1) 數位化更新時須執行 CDR(Critical Digital Review)關鍵數位審查：於概念設計時應針對系統可靠度，確認無任何單點脆弱問題而導致單一故障跳機事件；細部設計時則須分析失靈模式，找出 watchdog 逾時將導致控制器閉鎖之缺點，而及時提出改善措施。
- (2) 電磁干擾耐受度測試：依據 EPRI TR-102323 準則(台電公司核能電廠須依據美國 NRC R.G 1.180 R1)，關鍵性設備之耐受度測試及現場電磁環境測量須包括傳導型及輻射型電磁干擾。

- (3) 數位設備接線準則：依據 IEEE-422、IEEE-690 與 EPRI 電廠電氣系列第四冊，並確實依據廠家建議或優良典範執行，接地及接線細節應與廠家工程人員討論。

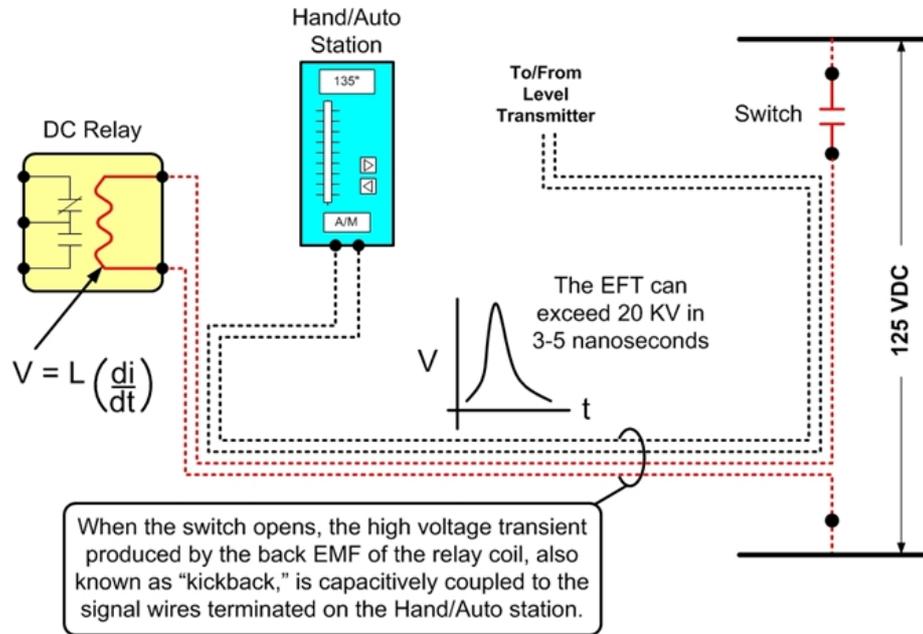


圖 25 控制器接線未加屏蔽及接地

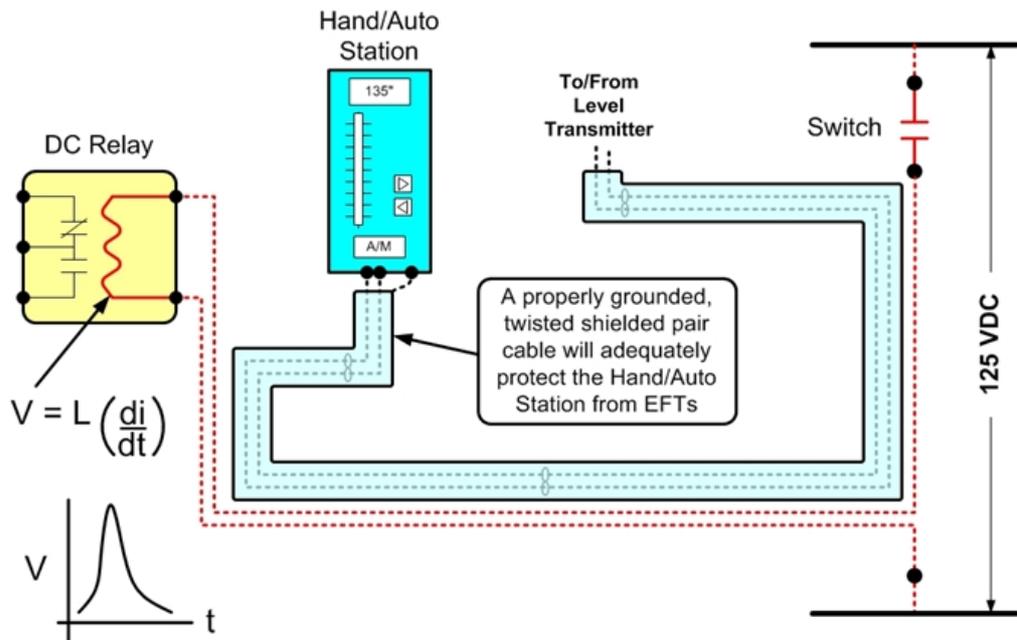


圖 26 控制器接線應加屏蔽並適當接地

2. 案例研討二：大修期間，更換 AVR 輸出入卡片及其接頭，造成主變壓器跳脫，影響停機安全(Shutdown Safety)設備。

- ◆ 背景說明：AVR 數位化更新後，由於工廠組裝不良造成比流器輸入訊號接點局部高溫，導致輸出入卡片可能損壞，影響機組正常運轉，維護人員安排於大修期間更換 AVR 輸出入卡片及接頭。
- ◆ 事件說明：大修期間廠內用電由主變壓器經輔助變壓器供電(圖 27)，卡片更換前 AVR 盤面掛卡斷電，更換完成後盤面復電，由於數位系統須執行初始設定，造成邏輯電驛來回動作，86 閉鎖電驛動作(圖 28)，導致主變壓器跳脫，廠內電源轉由啟動變壓器供電，影響下游停機安全設備(圖 29)。

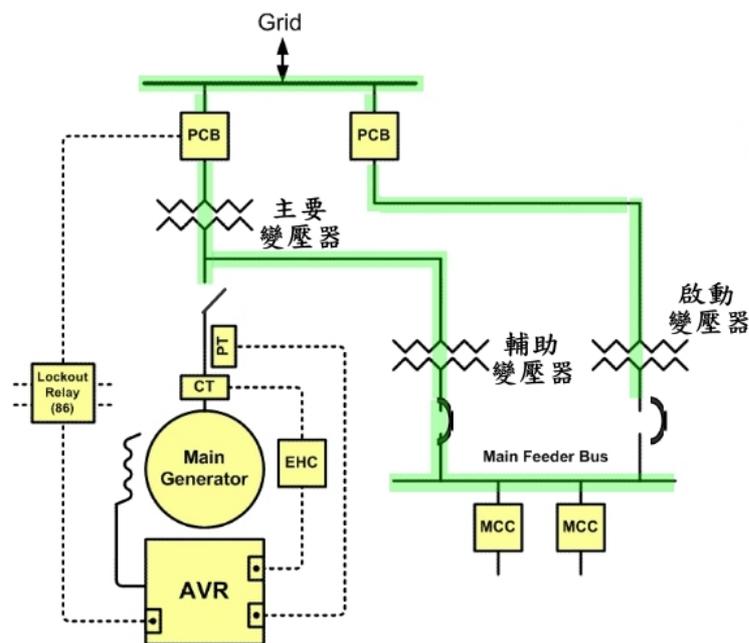


圖 27 廠內用電由主變壓器經輔助變壓器供電

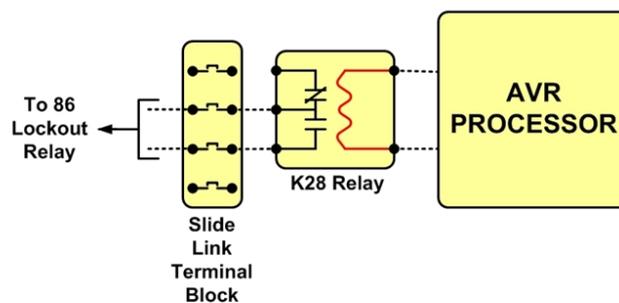


圖 28 AVR 邏輯引發 86 閉鎖電驛動作，導致主變壓器跳脫

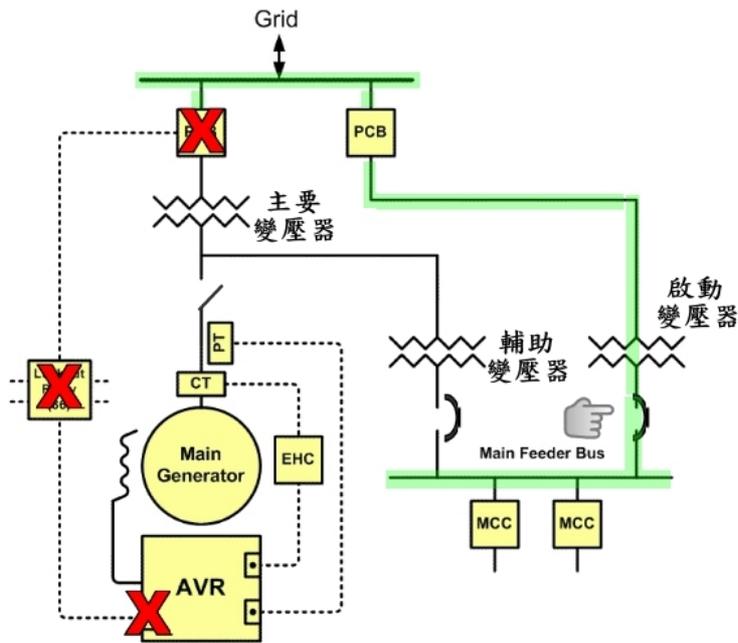


圖 29 廠內電源轉由啟動變壓器供電

◆ 事件原因：

- (1) 人因疏失：工廠人員組裝不良，出廠卡片接頭已有瑕疵；現場維護人員不完全了解新系統，誤以為更換 AVR 卡片不會去跳脫主變壓器。
- (2) 不洽當的維護程序書：更換 AVR 卡片之維護程序書由電廠人員參考 FAT/SAT 測試程序書編寫，未完整考慮線上系統之所有狀況，且執行前未確實驗證程序書之正確性，遺漏主變壓器跳脫邏輯之隔離。
- (3) FAT/SAT 驗收程序不完整：熱影像攝影技術可輕易發現接頭不良所造成的高溫現象，驗收測試未施以熱影像攝影，故無法及時發現問題。
- (4) 系統監測不足夠：正常運轉後之預防保養，未施以熱影像攝影，故無法發現局部高溫問題。

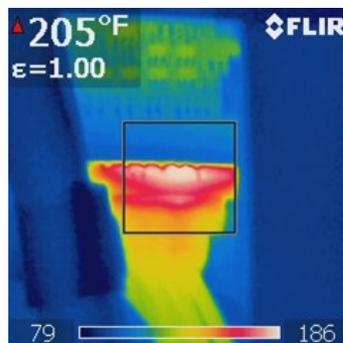


圖 30 熱影像攝影偵測高溫現象

◆ 經驗回饋：

- (1) 於改善案成立時，應積極深入了解新系統與原來系統之差異，及釐清新系統與未更改系統之間的交互影響關係。
- (2) 運轉後之維護程序書應於改善完成新系統上線前編寫完成，並確認正確性，不能等到發生了問題才急就章著手研究；若經費許可，應要求供應商提供運轉後之維護程序書。
- (3) 於改善案成立時應執行失靈模式效應分析(Failure Modes and Effects Analysis, FMEA)，確定新系統的影響範圍，對於爾後的維護工作，才能完整地考慮須隔離的範圍。
- (4) 善用熱影像攝影技術：卡片接點、保險絲、電驛接點…等電氣設備均可以此方式監測溫度是否異常。

3. 案例研討三：維護人員不慎將傳送器訊號線短路，導致汽機排氣壓力高訊號動作，主汽機跳脫。

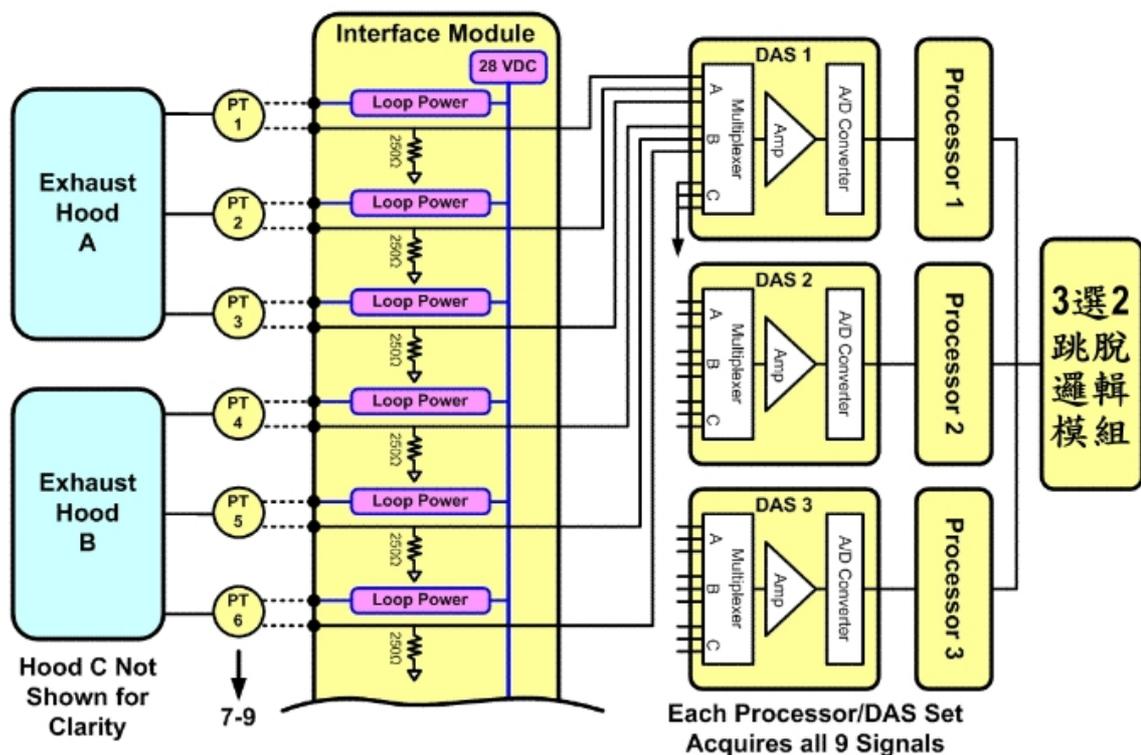


圖 31 主汽機排汽壓力高三選二跳脫邏輯

- ◆ 背景說明：主汽機 DEH(Digital Electro Hydraulic)數位化控制系統安裝完成，又提出後續改善，將壓力開關改成壓力傳送器加上軟體運算式；現場

共安裝九個壓力傳送器，所有壓力訊號均輸入到三組 DAS 資料截取系統，經處理後再進入三選二跳脫邏輯(圖 31、圖 32)。

- ◆ 事件說明：維護人員依據程序書至汽機廠房執行壓力傳送器維護工作，當執行到第五個傳送器時，不慎將傳送器的正負端訊號線短路，造成 DAS 系統輸出高電位，由於每個壓力訊號同時送給三組 DAS 系統，三組 DAS 輸出均為高壓力，雖然已將 Hood-B 組輸出隔離閉鎖，Hood A/C 兩組跳脫邏輯仍然動作，導致汽機排氣高壓力三選二邏輯動作，主汽機跳脫。

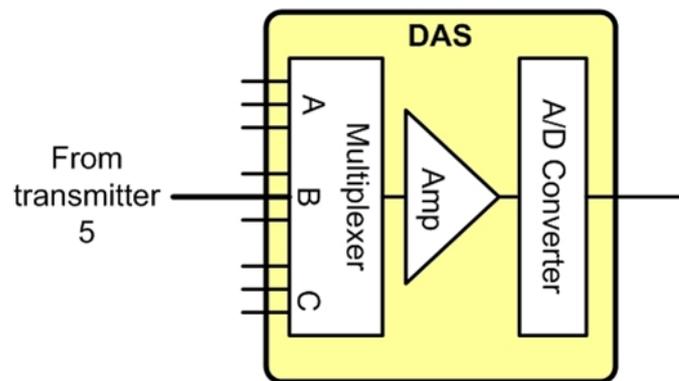


圖 32 主汽機排汽壓力 DAS 訊號輸入

- ◆ 事件原因：
 - (1) 共因失效(Common Cause Failure)設計：本案若 DAS 輸入訊號異常，輸出維持高壓力訊號，此為保守之設計，並無不當，但由於將所有訊號同時送給所有的 DAS，導致單一故障即會引發跳機之共因失效。
 - (2) 修改後測試不完整：更新改善案完成後，測試程序未包括例如輸入訊號短路、接地等故障訊號之測試，無法及時發現共因失效之設計。
 - (3) FMEA 失靈模式效應分析不完全：依據當時的分析模式無法找出傳送器單一故障引發汽機跳脫之弱點，須再加上各種故障模式的模擬訊號驗證。
 - (4) 維護疏失：汽機廠房環境不良，高溫溼熱加上燈光昏暗，維護人員在疲倦的狀態下，不慎將傳送器正負端短路。
- ◆ 經驗回饋：
 - (1) 共因失效的防禦措施：維護人員應深入了解系統，針對共因失效設計弱

點的維護工作，應執行潛在性危險評估；本案可再提後續改善，例如訊號前端增加濾波處理，或每組 DAS 只接受三個壓力訊號，而非所有訊號送給所有 DAS。

- (2) 故障訊號模擬測試：改善後驗收測試，應可考慮加入各種故障訊號（Failed High、Failed Low、Failed As-is、Loss of Power）之模擬，以驗證系統之可靠度，確認無單一故障單點脆弱的問題。
- (3) 失靈模式效應分析：依據 IEEE-352 FMEA 分析應包括非安全系統的改善工作，本案歷經兩次改善評估，卻未能找出系統上的單點脆弱性，故執行 FMEA 分析，應再加上各種故障訊號的模擬測試驗證。
- (4) 不良的作業環場容易引發人員作業疏失，執行改善案時，儀器元件或設備安裝位置的選擇，應一併考慮執行維護工作之環境品質與便利性。

4. 案例研討四：某電廠 BWR 機組因電廠數據網路發生訊息傳播風暴，導致再循環泵之可變調速器失控，兩台再循環泵跳脫，運轉員依規定手動急停。

- ◆ 背景說明：再循環泵原由馬達-發電機組(M-G SET)控制速度，數位化更新後改成可變調速器(Variable Speed Drive, VSD)控制，電廠四號五號兩部機的 VSD 和其他系統同時掛在電廠數據網路(Plant Data Network, PDN)上提供運轉資訊，VSD 控制程序之中斷處理允許硬體岔斷，正在執行中的即時控制程序可能會被硬體岔斷中斷。
- ◆ 事件說明：四號機處於 100%滿載運轉，PDN 發生訊息傳播風暴(Broadcast Storm)，再循環泵浦可變速度控制模組因不斷來自 PDN 網路的訊息岔斷程式干擾，導致再循環泵速度控制模組 Watchdog 逾時失控，兩台泵浦跳脫，反應爐功率降到 60%，依電廠程序書規定手動急停。
- ◆ 事件原因：
 - (1) 電廠網路超載異常，發生訊息傳播風暴，不停地中斷再循環泵控制模組之控制程序，導致控制失效。
 - (2) 網路未適當分區隔離：PDN 電廠網路原設計僅為提供電廠運轉資料顯示用，不具任何控制功能，由於網路上同時掛滿兩部機之 VSD、DEH、DEMIN CONTROL、電廠電腦等設備，且未適當區隔(圖 33)，造成網路超載。

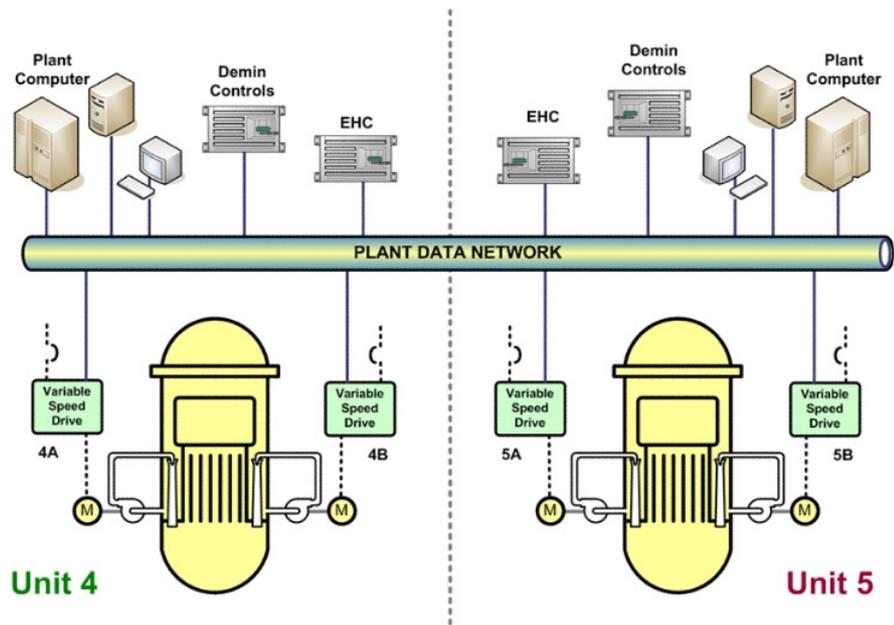


圖 33 PDN 電廠網路未適當分區隔離

- (3) VSD 控制模組之即時控制程序允許被硬體岔斷中斷執行，當網路負載大時，控制模組無法及時完成基本工作，Watchdog 逾時(圖 34)。

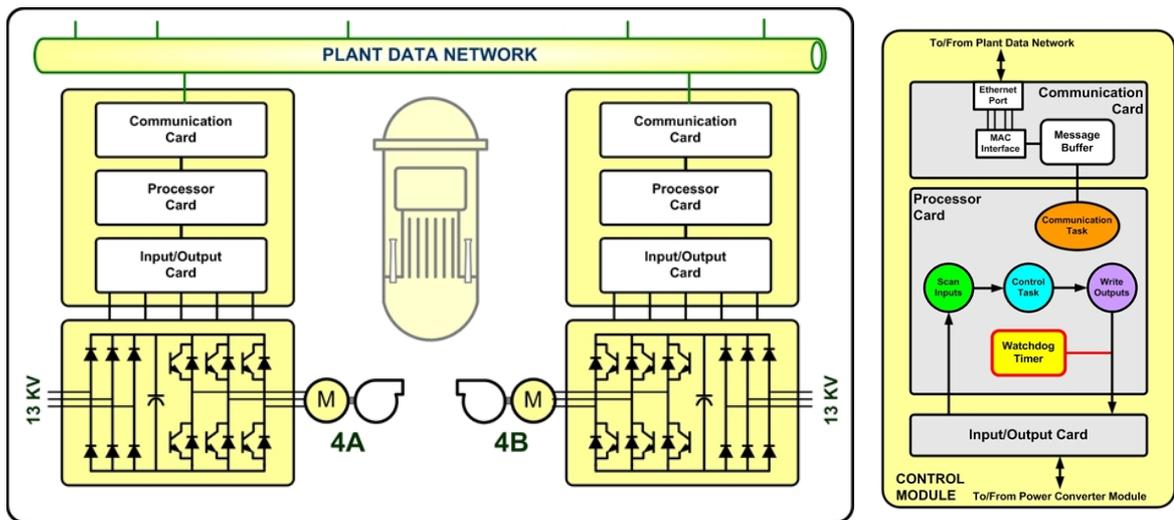


圖 34 VSD 控制模組 WATCHDOG 逾時

- (4) 驗收測試不完整：未針對網路高負載之狀況，執行完整的模擬測試，驗證系統的可靠度。

◆ 經驗回饋：

- (1) 應以適當的工具或程序即時監測網路之負載狀況，以及早發現網路負載超載問題，並提出改善。
- (2) 應採用已驗證過之網路設計，避免在連結設備間發生共因失效模式之弱點，針對網路上關鍵性設備應適當的分開隔離，本案已將四號五號機之設備以防火牆分隔，並將兩台再循環泵之 VSD 控制器以路由器(ROUTER)分離(圖 35)。

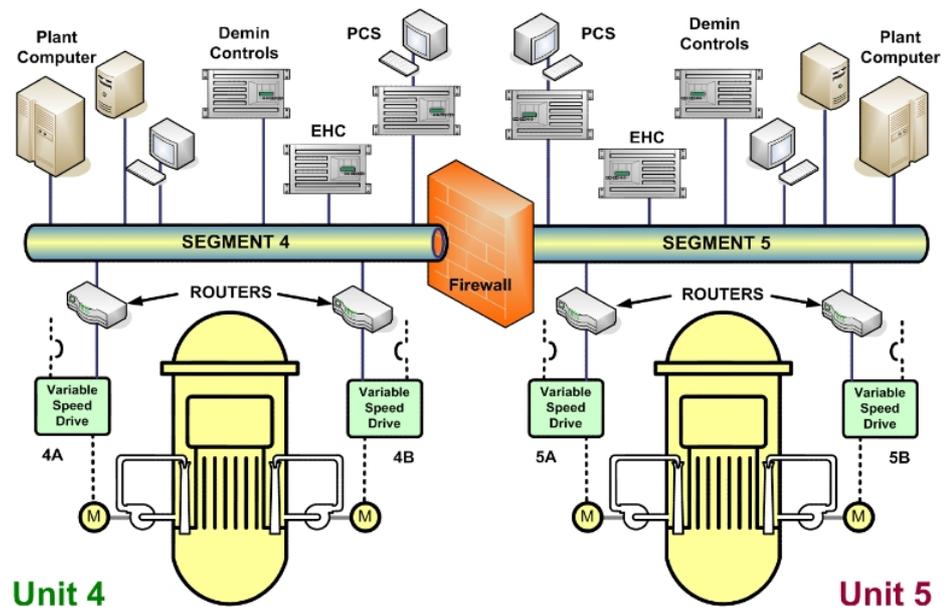


圖 35 網路上關鍵性設備適當的分開隔離

- (3) 數位化更新須執行 CDR 數位關鍵審查，以本案為例，基本的再循環泵速度控制程序不應被中斷，以保證 WATCHDOG 的有效性，故須評估硬體岔斷功能，及重新安排中斷程序之優先性。
5. 案例研討五：某電廠 PWR 機組發生控制棒意外掉落插入，功率自動回退，停機檢修。

- ◆ 背景說明：控制棒位置由步進馬達調整，此馬達由雙電源供電(圖 36)；CRD 控制機構中有一個脈波產生器模組(Pulse Generator Module, PGM)，PGM 模組接受人機界面(HMI)的指令，提供脈波訊號給 CRD 電源供給器控制步進馬達並調整控制棒位置，同時電源供給器會回授電壓訊號給 PGM，當偵測到回授訊號誤差大於 3%時，表示電源異常，PGM 會下指令關閉電源，

若兩只電源喪失時該只控制棒掉落插入爐心。

- ◆ 事件說明：機組滿載運轉，控制棒電源供給器 A 組實際電壓正常，但回授電壓漂移至超出設定值，控制系統關閉 A 組電源，卻無任何警告警報，一段時間之後，B 組電源同樣發生回授電壓漂移超過設定值，系統亦關閉 B 組電源，喪失兩組電源的 control 棒掉落插入爐心，此時功率自動回退至 63%，經診斷後決定停機檢修。

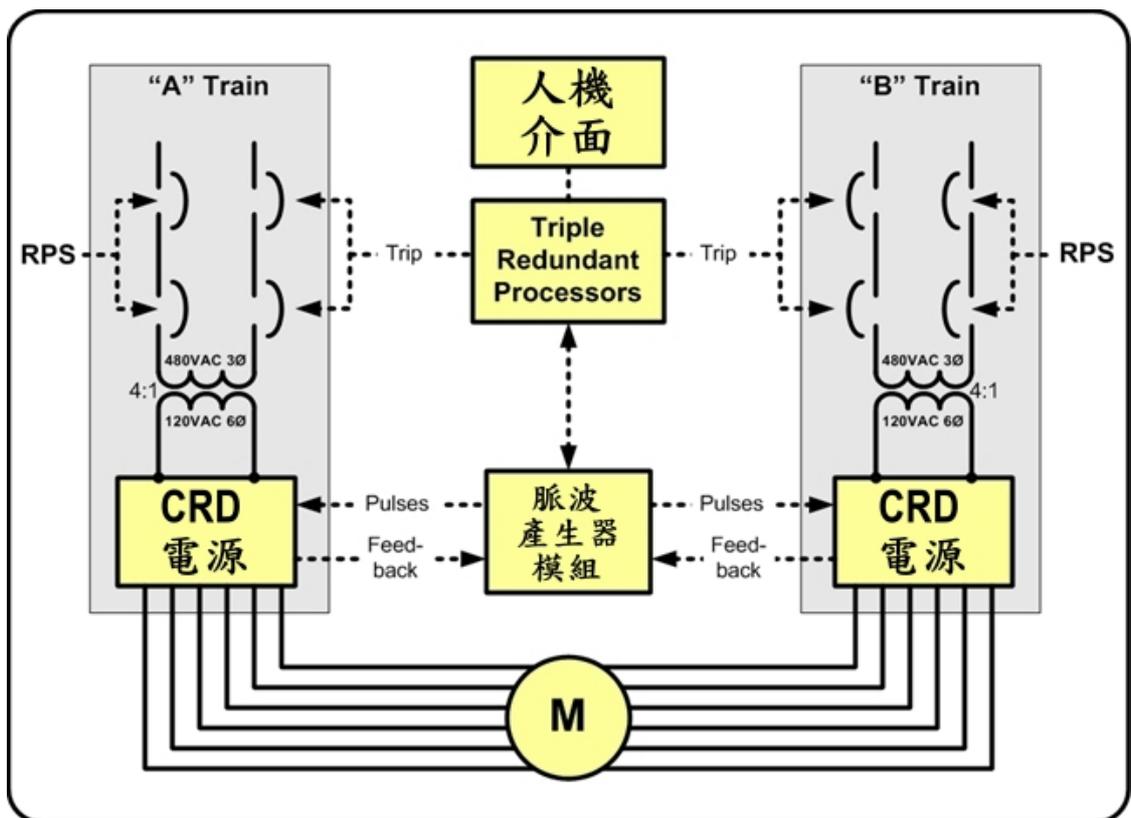


圖 36 控制棒模組步進馬達由雙電源供電

- ◆ 事件原因：
 - (1) 設定點餘裕不足：電源回授電壓無法穩定在 $\pm 3\%$ 以內，漂移至超出設定值。
 - (2) 軟硬體設計錯誤：本案原始設計文件中，系統需求及失靈模式效應分析的結果均要求必須具備故障失效之警報，但於細部設計時卻未確認這一點，導致系統無法提供單一電源故障之警報，未能滿足系統之需求。
 - (3) 測試及維護程序不完整：驗收程序未能確認設計文件要求之警報，於平

常巡視或預防保養時亦未檢查異常指示燈或收集重要參數數據。

◆ 經驗回饋：

- (1) 針對數位系統應依據 EPRI-103291 驗證導則，確認軟硬體設計均能符合系統之各項要求(圖 37)。
- (2) 監測關鍵參數：應定期檢查各種指示燈號，收集並評估重要參數，以確保系統正常運轉(圖 38)。
- (3) 任何跳脫設定應保留足夠的運轉餘裕，重要系統應在跳脫設定前增設警告警報，避免沒有任何警示之故障(Silence Failure)。

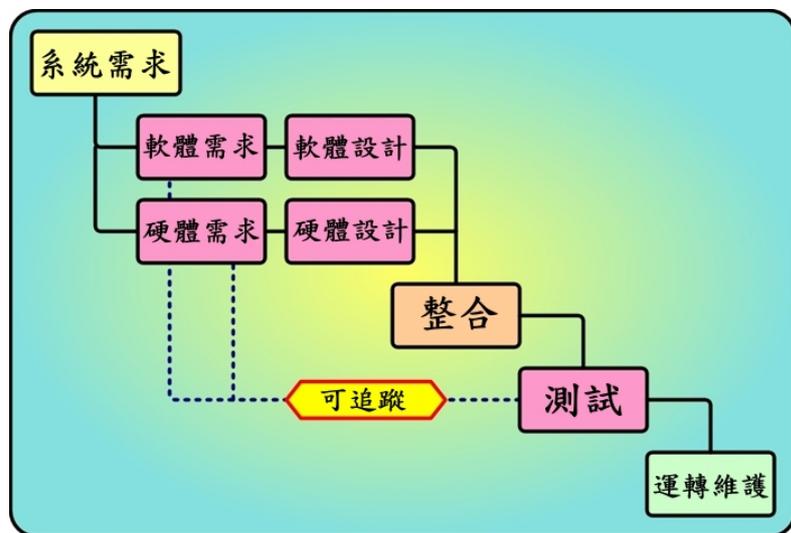


圖 37 軟硬體設計均須符合系統之各項要求

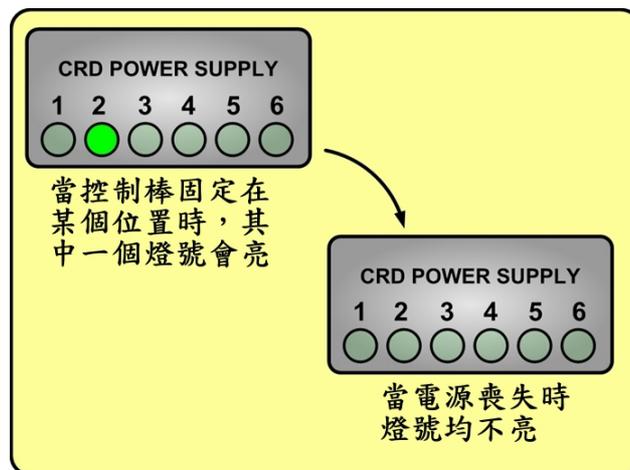


圖 38 控制棒模組電源異常指示燈號

肆、建議事項

- 一、本屆核能儀控與人機界面技術專題會議，與會人員共發表之技術報告超過 200 篇，內容相當廣泛：包括美國核管會之法規立場，各技術研究機構例如 EPRI、IAEA 等發表之各項數位儀控系統相關導則，各電力公司之運轉維護經驗，各供應廠家的新式技術，以及大學、研究機構的學術觀點等，本公司在儀控系統數位化的過程中，可研讀參考，擬將各篇文章全文與重點摘要置放於台電公司核能發電處網站，提供給台電內部人員分享。
- 二、本公司核一、二、三廠儀控系統未來幾年將逐步執行數位化升級，更新策略可參考 EPRI 1018109 之策略準則，考慮長短程間的平衡：
 - 計畫項目以 5-10 年為範圍。
 - 限制計畫的項目，以符合計畫性停機的時程。
 - 維持儀控系統架構的同質性，但容納必要的異質性。
 - 消除關鍵系統的單點脆弱性。
 - 保留原主控制室的佈局，逐步淘汰老舊過時的控制盤儀器。
 - 投資電廠通信網路等基礎設施，以及應用程序伺服器。
 - 引進以狀況為依歸(CBM)的線上維護，包括自動化的趨勢分析。
 - 組成小型的核心技術審標團隊，執行採購規範訂定，技術審查，管理供應商等工作，並維持這個團隊的人力，以連續執行多個計畫。
- 三、本公司欲發展數位化儀控系統，須同時執行軟體開發、軟體測試、軟體品保程序、軟體構型管理、預防電磁雜訊干擾、網路安全等相關 Programs 計畫。
- 四、電磁發射頻譜現場測量主要的優點，可比較系統安裝前後之數據，確認現場放射量沒有明顯增加；將電磁相容認證程序的重點，放在已觀測到過度放射的頻率點上；判斷新安裝的系統是否會影響電廠設備，以便加以改進。本公司四個核電廠儀控系統未來會逐步汰舊換新，將引進無數的 EMI/RFI 發射源，影響電廠電磁輻射環境，於重要地點執行電磁發射頻譜現場測量是有必要的。

五、 從 EPRI-1016722 的五個數位儀控案例中，得到幾項重要經驗：

- 數位化更新須執行 CDR 數位關鍵審查，各項程序之執行優先順序要妥善安排，確保 Watchdog 的有效性，及基本功能可正常執行而不被中斷。
- 於概念設計時應針對系統可靠度，確認無任何單點脆弱問題而導致單一故障跳機事件。
- 改善案成立時應執行 FMEA 失靈模式效應分析，確定新系統的影響範圍，改善後驗收測試，應可考慮加入例如電源喪失，Failure High，Failure Low，Failure as-is，網路超載等各種故障訊號之模擬，以驗證系統之可靠度，確認無單一故障的問題。
- 不良的作業環場容易引發人員作業疏失，執行改善案時，儀器元件或設備安裝位置的選擇，應一併考慮執行後續維護工作之環境品質與便利性。
- 任何跳脫設定應保留足夠的運轉餘裕，重要系統應在跳脫設定前增設警告警報，避免沒有任何警示之故障(Silence Failure)。
- 維護程序書應於改善完成新系統上線前編寫完成，並須確認正確性。
- 電磁干擾耐受度測試及現場電磁環境測量須包括傳導型及輻射型。
- 善用熱影像攝影技術，監測卡片接點、保險絲、電驛接點…等電氣設備溫度是否異常。
- 應定期檢視數位設備之重要燈號，監測關鍵參數，以確保系統正常運轉。
- 應採用已驗證過之網路設計，避免發生共因失效模式之弱點，針對網路上關鍵性設備應適當的分開隔離；並以適當的工具即時監測數位網路之負載狀況，以及早發現網路負載超載問題。

六、 依據出國人員生活費報支規定，若主辦單位部分供膳者，應按供餐情形扣除生活費，不分早、午、晚餐每餐各扣 10%，但實際上各餐的費用差異很大不會相同，建議比照訓練所早、午、晚餐餐費 1:2:2 之比例，即各佔 6%/12%/12%，或以 5%/10%/15%之比例扣除較為合理。

七、 美國國內航空對於境內班機行李托運，有些公司會收取美金 15 元之托運費，這筆費用卻無法報銷，而出國人員有 120 元美金之返國公務資料運費，由於目前多數公務資料已轉成光碟或電子檔，使用此項費用之機會已不大，建議行李托運費可以從此項費用下報支。

伍、附錄 參考文獻

1. *Strategies for Instrumentation And Control Obsolescence Management*, Raymond C. Torok, EPRI, Randall S. May.
2. *Non-Technical Issues Impacting Digital Upgrades*, James H. Flowers, Southern Nuclear Operating Company.
3. *Electromagnetic Environment Testing To Support Digital Upgrades In Nuclear Power Plants*, C.J. Kiger, H.M. Hashemian, and C.D. Sexton, R.D. Meininger and D.M. Nace, AMS Corporation.
4. *Qualification Of FPGA-Based Safety-Related PRM System*, Tadashi MIYAZAKI, Naotaka ODA, Yasushi GOTO, Toshifumi HAYASHI, Toshifumi SATO and Shinji IGAWA, Toshiba Corporation Power Systems Company.
5. *Condition Monitoring Of Electrical Cables Using Line Resonance Analysis (LIRA)*, Paolo F. Fantoni, Instituttt for energiteknikk, Gary J. Toman, EPRI, Juan Carlos Cano Gonzalez, TECNATOM SA.
6. *Digital Control System Upgrades Lessons Learned At SONGS*, Richard G. Ewing, Southern California Edison.
7. *Lessons Learned & Case Studies Based On US Digital Operating Experience*, Bruce Geddes, Southern Engineering Services, Ray Torok, EPRI.
8. *Digital Instrumentation & Control Operating Experience Lessons Learned - Case Studies*, EPRI-1016722.