

行政院及所屬各機關出國報告

(出國類別：開會/洽公)

參加第 20 屆國際核能工程會議 (ICONE-20-Power2012)及赴奇異公司討論MVD通信介面 系統測試維護相關技術

服務機關：台灣電力公司 龍門核能發電廠

出國人 職 稱：儀控工程師

姓 名：陳俊宇

出國地區：美國

出國日期：101.7.29~101.8.12

報告日期：101.10.11

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：參加第 20 屆國際核能工程會議(ICONE-20-Power2012)及赴奇異公司討論 MVD 通信介面系統測試維護相關技術

頁數 19 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：陳俊宇/台灣電力公司/龍門核能發電廠
/儀控工程師/02-24903550 分機 3711

出國類別：☐1 考察☐2 進修☐3 研究☐4 實習☒5 其他

出國期間：101 年 7 月 29 日~101 年 8 月 12 日

出國地區：美國

報告日期：101 年 10 月 11 日

分類號/目

關鍵詞：龍門核電廠, ICONE-20, NUMAC, MVD,

內容摘要：

本廠儀控工程師陳俊宇 101 年 1 月 5 日奉副總選派參加「國際核能工程會議/International Conference On Nuclear Engineering(ICONE-20)-Power 2012」預定本年 7 月 30 日至 8 月 3 日於美國加州舉行(核能發電處文號:2011-22-10 號)，該會議為美國核能界重要會議，會中將參與各方最新核能技術討論，對公司核能維護助益頗大，並將於會議中發表論文，作為台電公司與核能界交流管道。

因龍門核電廠採用多廠家控制系統，其中安全控制系統與非安全控制系統介面為 GEH 公司產品(MVD/Multiple Vendors Devise)，且數量龐大。在安裝測試階段發現許多通信介面及軟體設計問題，並曾列入高階營運會議報告議題，足見 MVD 設備問題重要性；目前硬體設備也多有停產問題，龍門電廠常有設計變更作業，擬前往討論設計變更後相關測試工作及軟硬體變更作業，供龍門核電廠測試維護參考。

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

目 錄

	頁次
壹、國外公務之內容與過程.....	1
一、目的.....	1
二、行程與工作項目	2
貳、執行過程與內容	3
一、赴奇異公司(G E H)討論系統測試維護 相關技術.....	3
(一)多廠家界面通訊設備 (MVD)測試工作	3
(二)奇異公司NUMAC 卡片維修狀態.....	5
(三)商規產品零組件檢證作業.....	5
(四)奇異公司大力推展之備品購買新模式.....	6
(五)線上備品資料庫系統.....	7
二、參加第20屆國際核能工程會議	7
(一)代表台電公司在 ICONE-20 發表論文內容：「核一廠電廠 喪失冷卻水且電廠全黑複合式事故的高壓注水熱流安全 分析研究」.....	7
(二)CONE-20-Power2012 研討會論文摘要	8
參、國外公務之心得與感想.....	13
肆、建議事項.....	15

壹、國外公務之目的與行程

一、目的：

(一) 出國任務：

本廠儀控工程師陳俊宇奉副總選派參加由美國機械工程協會(ASME)主辦之「國際核能工程會議/International Conference On Nuclear Engineering(ICON-20)-Power 2012」會議自 101 年 7 月 30 日至 8 月 3 日於美國加州阿納海爾市(ANAHEIM)舉行，該會議為美國核能界重要會議，會中將參與各方最新核能技術討論，對公司核能維護助益頗大，並將於會議中發表論文，作為台電公司與核能界交流管道。

另因龍門核電廠採用多廠家控制系統，其中安全控制系統與非安全控制系統介面為奇異公司產品(MVD/Multiple Vendors Devise)，且數量龐大。在安裝測試階段發現許多通信介面及軟體設計問題，並曾列入高階營運會議報告議題，足見MVD 設備問題重要性；目前硬體設備也多有停產問題，龍門電廠常有設計變更作業，擬前往討論設計變更後相關測試工作及軟硬體變更作業，供龍門核電廠測試維護參考。因奇異公司公司內部不允許照相，故報告中無法提供測試設備相片。

出國期間自中華民國一〇一年七月二十九日至一〇一年八月十二日止，共計 15 天。

(二) 緣起及目標：

美國機械工程協會(ASME)所主辦之「國際核能工程會議/International Conference On Nuclear Engineering(ICON-20)-Power 2012」為美國核能界重要會議，參加單位及人數眾多，新技術及產品發表，本屆會議於美國加州阿納海爾市舉行研討主題分為二十七個類別，包括「電廠運轉、維護、修改、生命週期」、「系統組件可靠度」、「下一代反應器發展」、「安全及保安技術」、「核燃料循環及廢料處理」、「熱-水流分析技術」、「熱交換器及冷卻系統」、「汽機、發電機系統」、「先進能源系統」等。

在日本福島核子事故後，核電廠全黑之複合事故是超出原有核電廠的設計基準事故，是核能界熱烈討論的議題之一，也不斷尋找此類事故的因應方法，台電核一廠採用與福島核電廠同型 BWR-4 反應器，有必要在商轉期間找出此類事故的因應方法。本廠儀控工程師陳俊宇使用美國核管會發展之最新的熱流安全分析程式(TRACE)發表一篇有關核一廠在喪失冷卻水且電廠全黑之複合式極端事故狀態的高壓注水熱流安全分析技術，題目為「核一廠在電廠喪失冷卻水且電廠全黑極端複合式事故的高壓注水熱流安全分析(The Extreme Event of the LOCA and Extended SBO with the TRACE Model of CHINSHAN BWR4 NPP)」。

奇異公司(GEH)近年來將加州聖荷西的NUMAC 製造工廠移到北卡萊那州威爾明頓市(Wilmington, North Carolina)。因此目前龍門計畫設計變更大部分在此執行，此行將實地探訪龍門計畫NUMAC 儀控設備整備情形，也將與工程師們討論測試修改方法及流程，以審視奇異公司對於龍門計畫推展的狀況。

二、行程與工作項目

此次奉派參加「國際核能工程會議/International Conference On Nuclear Engineering(ICON-20)-Power 2012」及「赴奇異公司討論 MVD 通信介面系統測試維護相關技術」工作時程，在美國加州阿納海爾市(ANAHEIM)參加會議並發表論文後，再前往奇異公司位於北卡萊那州威爾明頓市(Wilmington, North Carolina)製造基地討論有關 MVD 通信介面系統測試維護相關技術，共為期 15 天。詳細行程及工作項目如下表：

起迄日期	前往公司/停留城市	工作項目
101.7.29	往 程	台北－美國加州阿納海爾市
101.7.30 ～101.8.3	ICONE-20-Power2012 /美國加州阿納海爾市	參加「第 20 屆國際核能工程會議(ICON-20-Power2012)」，並發表論文
101. 8. 4	往 程	加州阿納海爾市(Anaheim, California) －北卡萊那州威爾明頓市 (Wilmington, North Carolina)
101.8.5 ～101.8.9	奇異公司(GEH) /威爾明頓市	赴奇異公司(GEH)討論 MVD 通信介面系統測試維護相關技術
101.8.10～ 101.8.12	返 程	Wilmington, NC－洛杉磯－台北

貳、執行過程與內容

本次出國任務分為二部份，第一部份為參加「國際核能工程會議 /International Conference On Nuclear Engineering(ICON-20-Power 2012)」，並發表一篇有關核一廠系統模擬技術論文，題目為「核一廠在電廠喪失冷卻水且電廠全黑複合式事故的高壓注水熱流安全分析(The Extreme Event of the LOCA and Extended SBO with the TRACE Model of CHINSHAN BWR4 NPP)」。

第二部份是前往奇異公司位於北卡萊那州威爾明頓市(Wilmington, North Carolina)製造基地討論有關MVD 通信介面系統及相關NUMAC 控制系統測試維護技術。全部執行過程與工作內容依時程分項說明如下：

一、赴奇異公司(GEH)討論系統測試維護相關技術

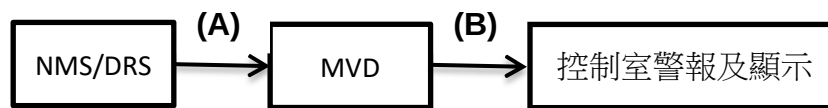
奇異公司(GEH)近年來將加州聖荷西的NUMAC 製造工廠移到北卡萊那州威爾明頓市(Wilmington, North Carolina)。奇異公司NUMAC 控制系統在龍門計畫二號機運至台灣後，美國就沒有測試設備，需將修改的測試元件運到台灣執行，造成修改測試工作延宕。此行見到奇異公司已在威爾明頓(Wilmington)建置龍門計畫NUMAC 測試設備，也與多位工程師討論測試修改工作，發現奇異公司已較以前準備積極多，相對於前 8 年的空窗期，今年的設備完整多了，對於龍門計畫是好消息，但仍有一段距離要趕上。在奇異公司分項討論內容如下：

(一) 多廠家界面通訊設備 (MVD, Multiple Vender Devise)測試工作

1. 台電工程師不斷提升維護技術，主導系統修改：

多廠家界面通訊設備(MVD)是安全有關控制系統與非安全有關控制系統重要的通訊介面，每一部機有 17 台 MVD，因系統初期運轉及連線不穩定，有許多程式錯誤經常當機，甚至曾列入台電高階經營管理會議追蹤事項，其重要性可見。經龍門電廠儀控組經多年來努力主導修改，甚至進入程式端修改。經過數十次更改程式(CODE)、增加防誤偵錯功能，讓系統穩定性大幅提高，台電維護技術也不斷提高，奇異公司 KIM YU

經理後來也委託電廠協助「多廠家界面通訊設備(MVD)」修改、偵錯、測試工作。



2. 協助核一廠MVD 設備查修工作：

龍門電廠儀控組經多年來努力，對於「多廠家界面通訊設備(MVD)」維護技術是台電最高的，包括(1)系統重組、(2)系統診斷、(3)上下游系統介面偵錯技術，並多次支援核一廠查修，並協助建立 MVD 監視技術，並建議從下游網路系統簡化及MVD 內部程式修改兩個中、長程改善著手，核一廠在第一階段網路簡化後已穩定許多，未來再修正MVD 本身程式小錯誤並監視上游FDDI 介面後就可以完全解決問題了。

2-1. 奇異公司FDDI 光纖通訊介面尚無監視工具(NMS~MVD)：

從核一廠及龍門廠偵錯經驗可知「多廠家界面通訊設備(MVD)」上游 FDDI 光纖通訊介面的監視工具是必要的，可更確認兩端問題點。此行確認奇異公司尚無設備可執行FDDI 介面查修監視功能，已建議奇異公司負責經理協助發展此通訊監視工具。

2-2. 增加「多廠家界面通訊設備(MVD)」的TCP/IP 介面的強韌性 (Robustness)

從龍門廠偵錯經驗可知「多廠家界面通訊設備(MVD)」的TCP/IP 介面不穩定會導致MVD 故障，已將此經驗回饋到核一廠MVD 問題查修，並獲得不錯結果。

3. 解決「棒控與資訊系統(RCIS)」通訊及不預期誤動作問題：

龍門核電廠MVD 與棒控與資訊系統(RCIS)初始運轉有無法連線問題，在奇異公司解決連線問題後，卻偶爾發生不預期控制棒阻棒信號，經過台電努力測試找到有力的證據後，據以持續要求奇異公司修改，但是奇異公司修改二年多卻未完成。幸好龍門核電廠儀控組人員維護技術提高，主導奇異公司另派遣指定 TA 重新修改新版程式後，於 101 年初

完全解決問題。因此台電人員提升維護技術是維持穩定發電的必定方向。

(二) 奇異公司NUMAC 卡片維修狀態：

1. 控制卡片維修：目前奇異公司控制卡片維修主要在美國加州委外執行，未來可前往考察，作為未來建立台電自主檢測能力。
2. 奇異公司GEDAC 卡片故障數量龐大，奇異公司 GEDAC 卡片故障，剛開始奇異公司認為是光纖尺寸不符合，以末段加上較大光纖做為改進方法，雖能解決現況，經電廠以此 GEDAC 卡片故障率接近 90%為理由不斷要求奇異公司深入探討肇因，並將 GEDAC 卡片列入討論議題，奇異公司目前已重新開發此光纖模組，是更佳解決方法。因考量先前奇異公司採用光纖尺寸轉換方式的系統穩定性較差，未來新卡片安裝後會要求奇異公司拆除目前不同尺寸光纖的安裝。
3. C41/C71/C51 韌體修改後所發生的特殊故障問題討論：近期 NUMAC 韌體程式修改後已多次發現造成系統不穩定現象，偶爾會有不正常跳脫狀況。經多次查修深入探討後發現是IC 電子元件更新，時脈速度不匹配的緣故，此行特別與奇異公司韌體工程師及軟體工程師討論，也獲證實是韌體問題，經討論後確認目前奇異公司採用軟體修改解決。但目前測試方式無法有效檢測此問題，已要求奇異公司針對此問題發展新的測試方法，未來會合併在整體測試(Integration Test)階段執行測試。

(三)商規產品零組件檢證作業(Dedication)

商用產品檢證成為安全有關設備是核能工業不可避免的路，即使是核能級零件也很無法採購到 100%核能級零組件，必需採用很多的商規產品，因此商用品檢驗是必需走的路，而電子大廠的商用產品已經做過很多測試，品質穩定，只要再加強部份測試即可採用。例如NUMAC 控制盤的平面顯示模組，尚無法找到核能級，但目前大廠商規品質非常穩定，也做過許多測試，因此奇異公司方式是採用大廠的模組，不需對單一模組檢驗，而在最後組裝成控制盤才執行整體測試。

更新安全有關顯示器(Display)及可程式控制器(PLC)是即龍門電廠將面對的商用設備檢證工作。因此應就此部份結合國內學術研究單位及產業界向核能管制單位溝通，才能提昇未來國內技術能力。如何在政府採用法規範下順利購得品質較穩定的大廠電子產品是須要克服的事。

從美國奇異公司檢證人員可知核能設備的零件選用必須非常小心，尤其是仿冒零件的問題，日前新聞也曾報導過美國軍方備品的仿冒零件問題相當嚴重，甚至影響到國防戰力。以下是奇異公司零件採用的要項。

1. 仍有生產的IC 零件：因電子工廠仍有生產，僅向大公司或直接授權的代理商購買電子零件，以避免買到假零件。電子大廠是例如摩托羅拉公司、三星電子、國家儀器(NI)...等，這種零件基本上不另檢測。
2. 已停產IC 零件：因為電子零件更新速度快、產品周期短，因此常有零件不再生產的問題，只好購買市場庫存零件。為了避免採購到儲存不量，甚至假零件，奇異公司會視情況執行下列工作 (1)僅向信任的零件大盤商採購, (2)初步查看商標有無修改痕跡並與原廠標籤比對無誤, (3)如有疑慮，會從製造商拿到零件功能測試資料，並比對，一般此測試工作會委託外部專業公司, (4)必要時會切開零件檢查晶片上的MARK。

(四) 奇異公司大力推展之備品購買新模式

EESP 系統(Expanded Exchange Service Program)是奇異公司正大力推展的備品購買模式，其觀念類似保險觀念，將欲加入此計劃的備品零件列出，在計劃年限內「所列出的備品零件」發生故障，奇異公司會義務提供備品更換；但是如果更換的備品較少，台電會付出超過備品價格的經費給奇異公司，這種情況恐怕不會被會計人員接受，是否符合政府採購法還需再研究。

(五) 線上備品資料庫系統(On Line Database)

此線上備品資料庫系統使用圖形介面，對於維護人員幫助很大，日本核電廠開始引用，日本 ABWR 核電廠採用 MR 維護資料庫已有 10 年經驗，奇異公司正積極推廣，此系統結合影像，將設備分解圖及詳細規範，透過電腦整合，可以直覺式在圖像上找到重要的資料、分解圖、採購資料、故障情況...等，這套系統已在日本 ABWR 維護經驗資料庫(MR)使用具有十年實績，龍門計劃初期也曾展示此種功能，但是後來一直未見實施。目前奇異公司正想積極推廣，也以「微調控制棒驅動系統(FMCRD)」作為案例，但對於奇異公司完成此系統達「應用等級」可能尚需一段時間。

二、第20屆國際核能工程會議(20th International Conference On Nuclear Engineering collocated with the ASME 2012 Power Conference, ICONE-20-Power2012)：

為促進國際核能技術交流，並互換最新之研究與運轉心得，由美國機械工程師學會（ASME）、日本機械工程師學會（JSME）及中國核能協會（CNS）主辦之第 20 屆「國際核子工程研討會」於今（2012）年 7 月 30 至 8 月 3 日在美國加州阿納海爾市(ANAHEIM)舉行，今年會議主席 Dr. Igor Pioro 以本次會議主題「永續未來發展的多元化能源」以專題演講方式發表會議引言，本屆研討主題包括研討主題分為二十七個類別，含括「電廠運轉、維護、修改、生命週期」、「系統組件可靠度」、「下一代反應器發展」、「安全及保安技術」、「核燃料循環及廢料處理」、「熱-水流分析技術」、「熱交換器及冷卻系統」、「汽機、發電機系統」、「先進能源系統」等。本次會議亦針對日本福島電廠事故發生後，討論多項相關嚴重核子事故評估分析可作為國內核電廠參考。

(一) 代表公司在ICONE-20 發表論文內容：

本次代表公司在ICONE-20 會議所發表的論文題目為「核一廠電廠喪失冷卻水且電廠全黑複合式事故的高壓注水熱流安全分析研究(The Extreme Event of the LOCA and Extended SBO with the TRACE Model of

CHINSHAN BWR4 NPP)」。本篇論文研究的分析程式是採美國核管會發展之最新的熱流安全分析程式(TRACE)，是未來美國核管會(NRC)主要的熱流安全分析程式。

TREACE 是美國核管會發展之最新的熱流安全分析程式，結合過去 TRAC, RELAP, ROMADA 等分析程式，應用新的人機介面SNAP，可適用於喪失冷卻水事故(Loss of coolant accident, LOCA)及各種熱水流暫態分析(Thermal-Hydraulic Analysis)。

從論文研究結果可知「核電廠全黑」是造成核燃料損壞的主要原因，在加上其他異常狀況將使事故更嚴重，因此各國均進行此部份做更進一步分析，以下是研究論文初步結論。

1. 核一廠的爐心隔離冷卻系統(RCIC)注入流量僅足夠應付無破孔情況，甚至數平方公分破孔(1%截面積)就會使反應爐水位降低，使燃料破損。使用高壓爐心注入系統(HPCI)且提高注入閥設定點可以有效解決「電廠全黑與喪失冷卻水之複合式事故」。
2. 圍阻體壓力在冷卻水喪失時會急速增加，若在「電廠全黑」情況，圍阻體將被破壞。如果善用高壓爐心注入系統(HPCI)的分流作為圍阻體噴灑系統的備援，可以有效降低圍阻體壓力。
3. 當反應爐洩壓時會使水位大幅下降，造成燃料溫度急遽增加，反應爐壓力再升高，造成後來注水困難。因此反應爐洩壓前維持高水位是必需的，善用蒸汽驅動高壓注水系統可以有效因應「電廠全黑」情況。

(二) CONE-20-Power2012 研討會論文摘要：

本次研討會所涵蓋的範圍非常廣泛，以下僅就核能電廠的運轉、維護、工程改善、先進反應器及近期發展、設計基準及超出設計基準事故等議題，作概要性介紹。

1. 「歐洲進步型沸水式反應器(EU-ABWR)」近期發展：

龍門電廠亦採用「進步型沸水式反應器(ABWR)」，因此東芝公司(Toshiba)所提出有關福島事故後歐洲進步型沸水式反應器(EU-ABWR)的減緩事故策略值得參考。題目：歐洲進步型沸水式反應器 EU-ABWR 因

應福島事故的先進延緩策略 (Advanced Mitigative Strategies of EU-ABWR Based on the Fukushima Accident)

回顧福島事故，其事故原因大致可分類為電廠大區域喪失(LOLA)、最終熱沉喪失(LUHS)、長期廠區全黑(SBO)及嚴重核子事故(SA)等。Toshiba 公司在因應歐洲市場與西歐核能管制協會(WENRA)安全要求，已致力於 ABWR 設計評估，其主要設計特性如下：

- (1). 因應緩和嚴重核子事故，採用爐心捕捉器(core catcher)及被動式圍阻體冷卻系統(PCCS)。
- (2). 因應經濟競爭，發電功率為 1600 MWe。
- (3). 設置 4 個分區的安全系統強化重複性及分離性原則，以降低執照風險。
- (4). 採用 N+2 安全系統原則，以利執行線上維修提高電廠可用性。
- (5). 安全功能的多樣性以降低發生共因故障的機率。
- (6). 採用鋼板反應器廠房，以防禦大型飛機撞擊。

EU-ABWR 大部分設計均延襲 ABWR 原有設計，EU-ABWR 採用無水封微調控制棒驅動機構(S-FMCRD)，以改善設備維護。同時，EU-ABWR 採用鋼板反應器廠房，以防禦大型飛機撞擊，並設置爐心捕捉器及隔離冷凝器(IC)，以因應更嚴重核子事故。在提升發電效率方面，在不改變 NSSS 設計架構前條下，EU-ABWR 可提升功率約 10%，熱功率由原 ABWR 的 3926 MWt 提升至 4300 MWt，其低壓汽機轉子最後一級為超長葉片(super long blade)，可提升發電功率至 1600 MWe。

2. 設計基準及超出設計基準事故

2-1. 設計基準及超出設計基準事故：檢視有助於減緩超出設計基準事故的非安全相關系統 (Identification of Non-safety Systems to Withstand Beyond Design Basis Events)

由美國 Bethcel 公司 Mr. James Nygaard 所提出有關於發生「超出設計基準事故(BDBA)」，針對電廠關鍵性安全操作或維持電廠穩定度的較脆弱非安全相關系統進行初步評估。在日本發生福島電廠事故後，全世

界即高度重視核能電廠所提供的安全保證。各國均要求核電廠執行壓力測試，以評估其承受非原始設計的極端災害能力，並致力發展關鍵性或主要系統的操作方法。

2011 年 3 月 11 日日本本州近海地震並引發海嘯所造成的福島電廠事故僅是 2011 年許多直接影響核能電廠的天然災害之一，僅在美國境內至少有 4 個核能設施受水災、火災或地震所影響，如 6 月份發生密蘇里河的洪水影響 Omaha Public Power District 的 Fort Calhoun 核能電廠和 Nebraska Public Power District 的 Cooper 核能電廠，而保護 Fort Calhoun 核能電廠的充氣護堤(inflatable berm)意外地止斷密蘇里河的侵襲；同時於 6 月美國新墨西哥州森林火災的威脅，使得擁有核子物質的 Los Alamos 國家實驗室關閉一個多星期；8 月 23 日規模 5.8 級的強烈地震震撼了美國東海岸，震央距離 Dominion 的 2 個 North Anna 核能機組僅 11 英里，此地震已超出電廠設計基準，造成該 2 個運轉中的機組停機，緊急系統也如期啟動反應。

此篇文章主要探討發生bdba事故後，針對電廠關鍵性安全操作或維持電廠穩定度進行初步評估。即使事故的發生未超出電廠設計基準，此評估方法亦有助於提升電廠安全。

初步評估主要是基於廣泛的事故，如福島電廠事故，評估電廠周邊系統可提供電廠運轉員、工作人員或緊急應變人員的資助，譬如提供通訊、廠區通行...等。其它周邊可提供電廠運轉或復原的資助，譬如提供不同電源或冷卻裝置，多種系統共用的被動組件同時也被加以評估。一旦較為脆弱的系統、結構或組件被評斷後，再發展各種修改或減緩方法。

此篇文章介紹重點主要聚焦在除了被分別探索地關鍵項目外的系統、設備和基礎設施。電廠在發生一個大型的事故期間，電力、通行道路、通訊、冷卻水及其它設施的大範圍損壞後，可能阻礙電廠執行安全停機的能力。系統，設備和基礎設施經確定後，則需依照電廠特定基準執行如下的評估：

- (1). 安全相關或重要設備所有後備功能的關聯性。
- (2). 後備方法施行前的最大時間餘裕。

- (3). 喪失動能或冷卻水源的可能性。
- (4). 廠外資源的可用性和時間。
- (5). 多樣性的現況。
- (6). 重複性的現況。
- (7). 強化增加完整性的潛在對策。
- (8). 臨時設施連接至電廠永久設施的對策。
- (9). 運轉員和救援人員的易於接近對策。
- (10). 運轉員和救援人員的工作和測試設備。
- (11). 運轉員和救援人員的生活安排。

2-2. 超出設計基準事故：沸水式反應器超出設計基準的安全保證（Safety Assurance for Boiling Water Reactors (BWRs) Beyond Design Basis）

由美國加州 Campbell City Mr. Salomon Levy 所提出有關於 BWR BDBA 的安全保證說明，主要藉由檢討日本福島事故發生原因，提出相關經驗學習，以避免爐心熔毀的發生。當極端不正確的設計基準加上超出常態的自然災害，如日本福島第一核能發電廠一、二、三號機案例，會使核能電廠的安全系統失效，導致爐心熔毀。

福島電廠因為難以理解的低海嘯高度設計基準已被指責為造成電廠大面積淹水及損壞而導致發生「電廠全黑(SBO)」的主要原因，但 Bulletin of the Atomic Scientists 所發表的福島電廠事故的回顧中卻說明：「法規指引說明對於眾所皆知的 3 個爐心熔毀事故，「電廠全黑(SBO)」並無需被視為導致災害的最大責任。」，還有許多其它有關日本管制不足導致嚴重核子事故之說明。

同時，本篇文章另說明有關福島第一核能發電廠於發生「超出設計基準事故(BDBA)」的不當操作，包括隔離冷凝器(IC)不當操作及對爐心隔離冷卻系統(RCIC)運轉限制認知不足。其中隔離冷凝器(IC)及爐心隔離冷卻系統(RCIC)的設計是在沸水式反應器(BWR)電廠於發生電廠全黑(SBO)事件時，提供短期冷卻，之後再由消防水提供長期冷卻直到反應爐冷停機。

從事後分析來看 3 個福島電廠爐心熔毀事件是可以避免的，當時如果集中在反應爐洩壓及使用地震後 1~3 小時即可安置完成的消防水系統，提供增加 3 個已洩壓完成的反應爐的可用水源，以維持 3 個反應爐於冷停機狀態。然而一號機決定關閉隔離冷凝器(IC)運轉，其理由無法理解，而二、三號機選擇使用爐心隔離冷卻系統(RCIC)而延遲洩壓及已完成的替代反應爐水源。日本運轉員、管理及法規可能沒有充分考慮到的是，由於海嘯電廠導致最終熱沉失效，在停止隔離冷凝器(IC)停止運作及爐心隔離冷卻系統(RCIC)不確定是否可用的狀態下，其結果將是(1)圍阻體將成為吸收爐心隔離冷卻系統(RCIC)及反應爐釋壓閥(SRV)輸送反應爐衰變熱的唯一熱沉；(2)僅在有限的幾個小時可提供已洩壓的反應爐注入其它可用的水源；(3)圍阻體高壓力以及後續逸氣的所造成的困難應可避免；(4) 在發生如福島核電廠事故，如何正確地採用反應器數據並做出適當的減緩行動。

經由福島電廠事故所有的經驗教訓，在超出設計基準的安全策略應包括避免與限制爐心熔毀的所有可能因素。更最重要是核安信念如同美國核管會(NRC)副執行長M.J. Virgilio 所說的一句話「核能電廠人員及管理應建立強烈的核安文化，相信它並與它共存」。

2-3. 超出設計基準事故：圍阻體外部水池對於沸水式反應器的嚴重核子事故的效應分析 (Severe Accident Analysis for BWR with Containment Outer Pool)

由日本Hitachi-GE 公司Mr. Koki Yoshimura 所提出有關於「圍阻體外部水池」對於沸水式反應器嚴重核子事故的減緩分析。基於深度防禦的概念，防止及限制分裂產物的釋放，基本上有三個對策，第一為預防SBO 事故擴展；第二為緩和事故；第三為緩和事故的衝擊。其中第一個對策主要概念為應用海堤牆、保護牆或水密門，以及分離設備安裝位置，以強化緊急柴油發電機(EDG)的完整性；第三個對策主要概念為藉由如水、沙及過濾器移除分裂產物，並以具有洗刷池的過濾排氣系統則為最主要選擇；而由於各種各樣的事故進程使得第二個對策則較為複雜。

對現有電廠事故減緩的主要策略為如反應爐洩壓、替代注水、圍阻體排氣等運轉員操作，次世代核能電廠(ESBWR)在沒有替代注水情況下則設計有「被動式爐心冷卻系統(PCCS)」其優點為設備簡單，但缺點則為設備太大無法為現有電廠所使用。為強化減緩「電廠全黑(SBO)事故」嚴重性，除前述運轉員操作策略外，亦應結合其它對策，本篇文章即就現有BWR 電廠所發展出來的被動式圍阻體外部水池的替代應用，進行有關外部水池於BDBA 事故時之效應評估。

圍阻體外部水池評估是假設電廠發生電廠全黑(SBO)事故，致核燃料失去冷卻水覆蓋而溫度急遽上升，最後導致爐心損壞。在喪失注水情況，圍阻體溫度及壓力將導致圍阻體完整性破壞，此時圍阻體外部水池將成為減緩事故的一項選擇。本篇文章探討數種圍阻體外部水池策略包括反應爐爐穴水池、濕井外部水池及圍阻體外部水池策略等。當發生電廠全黑(SBO)情況，藉由模組分析進行 6 個代表性案例模擬結果，圍阻體外部水池策略之優點分述如下：

- (1). 在 RPV 受損狀況，反應爐爐穴水池可有效提供圍阻體頂蓋冷卻，但高溫氣體常會停滯其中。
- (2). 增加抑壓池冷凝容量，濕井外部水池有效抑壓圍阻體氣體壓力。
- (3). 圍阻體外殼外部水池同時具備上述兩種策略之優點，亦能提供上乾井冷卻功能。

「圍阻體外部水池」的熱移除容量是有限的，但其可靠性及穩定性比任何一種替代注水更佳，因此合併其它對策後，「圍阻體外部水池」策略能有效減緩事故嚴重性。未來的反應爐設計，圍阻體外部水池仍可視為被動式安全系統的選擇之一。

參、國外公務之心得與感想

- 一、奇異公司在過去近20多年來大量將技術工作外包，採用計劃工程師控管下包商進度，已喪失技術開發能力，在龍門計劃修改進度及費用屢遭受下包商延遲及增加預算要求。例如NUMAC系統曾發生奇異公司下包商解

決一項設備通訊問題後，卻增加不預期阻棒誤信號，這是在商轉後絕對不允許的現象，經過兩年多不斷地測試及修改都無法解決，最後在電廠強力指名由奇異公司SERVICE部門的工程師，重新修改通訊程式(CODE)後才徹底解決，而奇異公司龍門團隊因政策問題也在此事件付出大量經費給外包商又無法解決，最後也變成台電買單。從這事件可以瞭解，台電工程師應具有專業的主導能力。台電這十多年來也朝向外包制度，在奇異公司及龍門計劃的經驗看來，台灣承包商並無日本承包商的技術能力及穩定性，又有政府採購法限制，或可在加強承包商技術證照人員的比例要求及落實稽核上，維持品質。

- 二、奇異公司NUMAC控制系統的龍門計畫測試設備已於此行看到建立完成(2012年)，對未來NUMAC的測試修改進度幫助很大。龍門計畫奇異公司NUMAC控制系統在二號機運至台灣後，美國就沒有測試設備，需將修改的測試元件運到台灣執行，造成修改測試工作延宕。在台電近年來多次反映後此行見到奇異公司已建置完成龍門計畫NUMAC測試設備，並與許多工程師討論測試修改工作後，發現奇異公司比過去幾年積極，相較於前8年的空窗期，今年的設備完整許多，對於龍門計畫是好消息。
- 三、奇異公司NUMAC產品檢證作業品保人員(QA)對於零件篩選及檢測方式具有主導地位，與台灣一般科技公司品保人員(QA)分工類似，但是台電的QC與QA兩者分工差異不大，也較少切入技術作為第三方測試驗證。
- 四、EESP系統(Expanded Exchange Service Program)是奇異公司正大力推展的備品購買模式，其觀念類似保險觀念，將欲加入此計劃的備品零件列出，在計劃年限內「所列出的備品零件」發生故障，奇異公司會義務提供備品更換；但是如果更換的備品較少，台電會付出超過備品價格的經費給奇異公司，這種情況恐怕不會被會計人員接受，是否符合政府採購法還需再研究。
- 五、線上備品資料庫系統(On Line Database)使用圖形介面，對於維護人員幫助很大，日本核電廠開始引用，日本ABWR核電廠採用MR維護資料庫已有10年經驗，奇異公司正積極推廣，此系統結合影像，將設備分解圖及詳細規範，透過電腦整合，可以直覺式在圖像上找到重要的資料、分解

圖、採購資料、故障情況...等，這套系統已在日本ABWR維護經驗資料庫(MR)使用具有十年實績，龍門計劃初期也曾展示此種功能，但是後來一直未見實施。目前奇異公司正想積極推廣，也以「微調控制棒驅動系統(FMCRD)」作為案例，但對於奇異公司完成此系統100%應用可能尚需時間。

- 六、此行奇異公司訪問中發現美國法律要求公司需與政府官員保持相當大的界限(例如NRC核管會)，不能代訂旅館，甚至連飯盒也需由政府官員買單支付！此法律對於公司及官員雙方均有罰責，這個情況在後來遇見NRC政府官員時獲得證實。這在東方國家會覺得不近人情，但是對於確保政府官員行政中立是不錯的方式。
- 七、在ICONE-20會議中發現行程表的額外活動是外國常有的驚喜，可帶來愉快的氣氛，例如在晚宴後額外安排欣賞DISNEYLAND水舞表演，帶來活動高潮及美好回憶。本次在台灣舉辦的NUTHOS-9晚宴中也額外安排明華園演出。

肆、建議事項

- 一、因應設備停產問題，應積極規劃控制設備自行維護及更新：一般電子零件生產時程約10~15年，因此控制卡片壽命最多不超過15年，日本電廠控制設備更換週期也按此訂定年限。龍門電廠儀控設備製造設計已達10~12年，已面臨控制卡片停產、無法購買備品的問題，因龍門計畫最初建廠並無編列備品，在施工後測試已面臨無備品維修、甚至購買不到的窘境。例如棒控制資訊系統及廢料廠房控制系統為日本HITACHI設備，現有設備已停產無法購買，也無法提供維修服務，在商轉前就需更新控制設備，動輒花費數億元，且此類問題每隔約15年會重複發生，台電應積極規劃儀控設備更新工作，也應思考培養國內自製能力，才能積極降低維護費用並提升技術能力。中期規劃應從進階測試設備建立開始，在充分瞭解細部信號後，為未來設備更新鋪路。
- 二、商用產品檢證作業：商用產品檢證成為安全有關設備是核能工業不可避

免的路，即使核能級設備也無法採購到100%核能級零組件，必需採用很多的商規產品，因此商用品檢驗是必需走的路，而電子大廠的商用產品已經做過很多測試，品質穩定，只要再加強部份測試即可採用。例如NUMAC控制盤的平面顯示模組，並無法找到核能級，但目前商規品質已經非常穩定，因此奇異公司方式是採用大廠的模組，不需對單一模組檢驗，在最後組裝成控制盤才執行整體測試。因此應就此部份結合國內學術研究單位及產業界向核能管制單位溝通，才能提昇未來國內技術能力。另外如何在政府採購法規範下順利購得品質較穩定的大廠電子產品是公家單位須要克服的事。

例如更新安全有關顯示器(Display)及可程式控制器(PLC)是龍門電廠即將面對的商用設備檢證工作 (1)台電採購零件在符合政府採購法前提下須能購買到品質好且穩定的零件，可以從零件篩檢測試將不良廠家過濾，雖須額外費用及時間，但對於核能設備是必要的。從美國奇異公司檢證人員可知核能設備的零件選用必須非常小心，尤其是仿冒零件的問題，日前新聞也曾報導過美國軍方備品的仿冒零件問題相當嚴重，甚至影響到國防戰力。奇異公司的因應策略是儘量採用大型製造廠家IC零件，例如NI, Motororal, NEC,... 並向原IC零件製造廠家採購；如果IC零件停產時，則向信賴的供應商採購，以避免採購到品質不佳甚至仿冒零件。(2)積極建立商用零組件檢證方式，現今很多零件並無軍規產品，例如平面顯示器可視為單一零組件，須採用商用零件檢證作業，做為未來設備維護規劃。中科院目前對於仿冒零件因應方式為採用大廠高等級IC、目視及電子卡片製作後做BURN-IN來篩選，也可符合篩選功能。

三、台電人員提升維護技術是維持穩定發電的必定方向：以「多廠家界面通訊設備(MVD)」設備維護技術提昇為例，龍門電廠儀控組經多年來努力，對於「多廠家界面通訊設備(MVD)」維護技術是台電最高的，包括(1)系統重組、(2)系統診斷、(3)上下游系統介面偵錯技術，並多次支援核一廠查修，並協助建立MVD監視技術，已建議核一廠從下游網路系統簡化及MVD內部程式修改兩個中、長程改善著手，目前在第一階段簡化下游網路後，該系統已穩定。從核一廠及龍門廠偵錯經驗可知(1)上游FDDI光纖

通訊介面的監視工具是必要的，可確認兩端問題點。此行確認奇異公司尚無設備可執行FDDI介面查修監視功能，已建議奇異公司負責經理協助發展此通訊監視工具。(2)增加MVD的TCP/IP介面的強韌性(Robustness)，MVD的TCP/IP介面不穩定會導致MVD故障，已將此經驗回饋到核一廠MVD問題查修，並獲得不錯結果。目前已再要求奇異公司更改程式，加強TCP/IP除錯功能。

四、台電應督促原廠建立及改善測試方法：

1. 龍門計畫奇異公司NUMAC控制設備在二號機設備運至台灣後，美國並無完整測試設備，導致NUMAC設備修改工作無法進行，必須在工地測試，無法有效測試且浪費時間。經多次與奇異公司經理會議反映後，奇異公司今年在Wilmington終於設置了完整的NUMAC設備，對於NUMAC設備修改測試進度幫助很大。

2. 補強NUMAC設備測試方法，近期NUMAC韌體程式修改後已多次發現不穩定現象，經多次查修後發現是IC元件更新，IC速度不匹配的緣故，此行特別與奇異公司韌體工程師及軟體工程師討論，解決方法是採用軟體修改，但目前測試方式無法有效檢測此問題，已要求奇異公司新增此檢驗方法。

五、應努力查出真正肇因，做最完整的改善，奇異公司GEDAC卡片故障，剛開始奇異公司認為是光纖尺寸不符合，以末段加上較大光纖做為改進方法，雖能解決現況，經電廠以此GEDAC卡片故障率接近90%為理由不斷要求奇異公司深入探討肇因，並將GEDAC卡片列入討論議題，奇異公司目前已重新開發此光纖模組，是更佳解決方法。因考量先前奇異公司採用光纖尺寸轉換方式的系統穩定性較差，未來新卡片安裝後會要求奇異公司拆除目前不同尺寸光纖的安裝。

六、輕量化輻射防護材料的應用：在ASME主辦的ICONE-20會場展示一款美國極輕量化輻射防護新材料，因重量輕可運用範圍更廣泛，可作為高輻射設備屏蔽，有效降低工作人員劑量，在美國San Onofre等7個電廠有使用實績(如附圖二)，已將資料交給保健物理組參考。

七、針對FUKUSIMA核子事故，因為「電廠全黑事故」一直是導致爐心熔毀

的主要原因，近幾年來全世界核電廠已發生多次「電廠全黑事故」，包括美國的洪水、龍捲風、日本海嘯及核三廠火災...，此類合併的天然災害是超出核電廠設計基準，而且已發生數次此類危機，各國均再次審查並加強現有防護設備，提出改善計畫包括(1)被動式低壓爐心注水系統、(2)圍阻體具過濾系統的排放管路、(3)被動式的氫氣抑低裝置(不需電源) (4)蒸氣推動的高壓爐心注水系統...等，目前台電主要針對第一項工作改善，未來尚有改善空間，且粗估費用也不致太高，又能大幅增加安全度。

八、從論文研究結果可知「核電廠全黑」是造成核燃料損壞的主要原因，在加上其他異常狀況將使事故更嚴重，因此需要更進一步分析，以下是論文初步結論。

1. 核一廠的爐心隔離冷卻系統(RCIC)注入流量僅足夠應付無破孔情況，甚至數平方公分破孔(1%截面積)就會使反應爐水位降低，使燃料破損，使用高壓爐心注入系統(HPCI)且提高注入閥設定點可以有效解決「電廠全黑與喪失冷卻水之複合式事故」。
2. 圍阻體壓力在冷卻水喪失時會急速增加，若在「電廠全黑」情況，圍阻體將被破壞。如果善用高壓爐心注入系統(HPCI)的分流作為圍阻體噴灑系統的備援，可以有效降低圍阻體壓力。

九、龍門核電廠ECCS系統中高壓爐心注水(HPCI)系統為馬達泵，僅爐心隔離冷卻系統(RCIC)為蒸汽驅動，在電廠全黑(SBO)加上極小破孔事故時，就無法保持爐心水位，因此龍門電廠使用電力驅動之高壓爐心注水系統，在「電廠全黑」事故可應用的注水更加嚴苛了。從安全分析結果建議龍門電廠(1)加強廠區電源，如增設電廠全黑氣渦輪發電機及(2)考量使用蒸汽驅動飼水泵作為高壓注水的備援系統。

十、在日本發生福島電廠事故後，全世界即高度重視核能電廠所提供的安全保證。各國均要求核電廠執行壓力測試，以評估其承受非原始設計的極端災害能力，並致力發展關鍵性或主要系統的操作方法。目前各國核電廠執行的評估如下：

- (1). 安全相關或重要設備所有後備功能的關聯性。
- (2). 後備方法執行前的最大允許時間。
- (3). 喪失動能或冷卻水源的可能性。
- (4). 廠外資源的可用性和時間。
- (5). 多樣性的現況。

- (6). 重複性的現況。
- (7). 強化增加完整性的潛在對策。
- (8). 臨時設施連接至電廠永久設施的對策。
- (9). 運轉員和救援人員的易於接近對策。
- (10). 運轉員和救援人員的工作和測試設備。
- (11). 運轉員和救援人員的生活安排。