

出國報告(出國類別：實習)

赴美國核管會研習核能電廠 稽查管制技術及參訪

服務機關：行政院原子能委員會

姓名職稱：吳文雄技士、曹裕后技士

派赴國家/地區：美國/華盛頓特區

出國期間：107年6月17日至107年7月19日

報告日期：107年10月12日

摘要

本次出國目的旨在提昇核能管制人員專業知能、精進核能電廠安全管制作業以及強化台美管制機關相互交流，行程內容包含三個禮拜的訓練課程以及一個禮拜的參訪。

訓練課程皆在美國核能管制委員會 (Nuclear Regulatory Commission, 簡稱 NRC) 的專業發展中心 (Professional Development Center, 簡稱 PDC) 舉辦，包含 NRC 主辦的「肇因分析/事件調查專題研討課程」(G-205 Root Cause/Incident Investigation Workshop)、NRC 的管制研究署 (Office of Nuclear Regulatory Research, 簡稱 RES) 與電力研究院 (Electric Power Research Institute, 簡稱 EPRI) 聯合舉辦的「火災機率風險評估-第二部分-電路分析」訓練課程 (Fire Probabilistic Risk Assessment Training-Module II-Electrical Analysis) 以及 NRC 主辦的「廠外事件」訓練課程 (P-204 External Events)。

期間並順道參訪 NRC 的運轉中心、駐美台北經濟文化代表處 (Taipei Economic and Cultural Representative Office in the U.S.) 科技組以及位於美國阿拉巴馬州的 Browns Ferry 核能電廠。

本次出國收穫成果豐富，除透過參加訓練課程學習專業知能與視察技巧外，亦經由各項參訪行程與美方就管制議題相互討論交流，汲取國際管制機關與核能機構之專業技術與經驗，並能夠實地了解其管制實務之作法，得以提昇視察人員的安全管制之知能與拓展國際視野。詳細的行程內容及心得已整理於報告中，此行所獲得之安全管理相關資訊亦可做為提供國內安全管制作業之參考。

目錄

摘要.....	i
目錄.....	ii
壹、 目的.....	1
貳、 出國行程.....	2
參、 行程內容及心得.....	3
肆、 建議.....	18
附件一、「肇因分析/事件調查專題研討課程」.....	19
附件二、「火災機率風險評估-第二部分-電路分析」課程.....	20
附件三、「廠外事件」課程.....	21
參訪照片.....	22

壹、目的

此次出國行程之目的旨在提昇核能管制人員專業知能、精進核能電廠安全管制作業以及強化台美管制機關相互交流，分別說明於下：

- 1、 提昇核能管制人員專業知能：藉由參加美國核能管制委員會（Nuclear Regulatory Commission, 簡稱 NRC）專業發展中心(Professional Development Center, 簡稱 PDC)之「肇因分析/事件調查專題研討課程」(G-205 Root Cause/Incident Investigation Workshop)、NRC 的管制研究署 (Office of Nuclear Regulatory Research, 簡稱 RES)與電力研究院 (Electric Power Research Institute, 簡稱 EPRI)聯合舉辦之「火災機率風險評估-第二部分-電路分析」(Fire Probabilistic Risk Assessment Training-Module II-Electrical Analysis)以及「廠外事件」(P-204 External Events)之訓練課程，學習人員的視察技巧、管制實務知識，及美國管制機關對於核能電廠火災機率風險評估之最新資訊，以提升我國核能電廠管制人員專業知能。
- 2、 精進核能電廠安全管制作業：藉由至美國核能電廠實地觀摩 NRC 視察員的駐廠活動，學習其核能電廠管制實務及經驗，有助於增進視察員對於執行相關視察作業與採行必要管制措施之要項的了解，藉以提升我國核能電廠安全管制作業。
- 3、 強化台美管制機關相互交流：藉由參訪美國 NRC 總部的運轉中心，了解 NRC 對於核能電廠緊急事件之指揮體系、通報機制與安全管制。另安排參訪營運中的核能電廠，了解國外核能電廠管制方式及對於福島事故後增設之 FLEX 相關設備的儲存規劃等，並與美方討論以深化雙方之經驗交流。

貳、出國行程

本次出國行程包含參加訓練課程及參訪行程，詳如下表。

日期	行程與工作內容
6月17~18日	去程(台北前往華盛頓特區)
6月19~22日	於 NRC PDC 參加「肇因分析/事故調查專題研討課程」(G-205 Root Cause/Incident Investigation Workshop)
6月25~29日	於 NRC PDC 參加「火災機率風險評估：第二部分-電路分析」(Fire Probabilistic Risk Assessment：Module II-Electrical Analysis)訓練課程
7月2日	個人休假
7月3日	參訪 NRC 運轉中心(Operations Center)及駐美台北經濟文化代表處(Taipei Economic and Cultural Representative Office in the U.S.)科技組
7月4日	美國獨立紀念日、議題整理
7月5日	路程(華盛頓特區前往亨茨維爾)
7月6日	參訪 Browns Ferry 核能電廠，參訪結束後於當日傍晚搭機返回華盛頓特區
7月9日	個人休假
7月10~13日	於 NRC PDC 參加「廠外事件」(P-204 External Events)訓練課程
7月16~19日	個人休假，其中7月18日至7月19日為回程(返回台北)

參、行程內容及心得

1、參加「肇因分析/事件調查專題研討課程」

本項專題研討課程的講師為 NRC 的 Ben Geppert 先生及 Scott Fillmon 先生，兩位講師從事核能相關領域，包括電廠運轉與安全管制皆已超過 30 年，具有豐富的經驗。

課程規劃為半天的課前線上研討(Webinar)及 6 月 19~22 日在 NRC PDC 的四天實體課程，課程內容詳見附件一。Webinar 於工作坊開始前(台灣時間 6 月 14 日清晨)進行，共四小時。Webinar 一開始講師即開宗明義地說肇因分析/事件調查的主要目的是為了確立防止事件再發生或降低其發生機率的改正行動，以保護電廠員工、公眾以及環境的健康和安全。而肇因分析/事件調查可使用的工具/方法包括 Event and Conditional Factors Analysis+(ECFA+)、Fault Tree Analysis(FTA)、Pareto Analysis、The 5-why Technique、Critical Incident Technique(CIT)、Barrier Analysis、Management Oversight and Risk Tree Analysis(MORT)等。另外講師也說明課程將以分組學習的方式進行，所有學員共分為三組，我們這一組共有六位成員，另外四位成員分別來自 NRC 的核能管制署 (Office of Nuclear Reactor Regulation, 簡稱 NRR)、首席人資官員辦公室(Office of the Chief Human Capital Officer, OCHCO)、第二區辦公室(Region II Office)及第四區辦公室(Region IV Office)。此外，在課程開始之前每一組都會被指派調查一個曾發生的事件案例，且須應用在課程期間學習到的工具/方法找出該事件的肇因，並在課程的最後一天進行簡報；我們這一組被指派調查的事件為 1987 年 4 月 10 日某座壓水式核能電廠發生的喪失餘熱移除(RHR)系統及反應器廠房內空浮放射性物質活度異常上升事件。以下就四天實體課程摘要說明。

(1) 6 月 19 日課程摘要

工作坊前三天進行的方式為上午由講師講授課程，下午為各組分組討論的時間。本日上午講授的課程為 ECFA+及 FTA。

ECFA+依時序將事件分成數個小的事件來描述，並描述每個小事件發生

時外部環境的狀態，再討論每個小事件從而找出事件根本肇因。需要強調的是，不管是描述小事件或是外部環境的狀態，都要注意要否有證據可以支持。FTA 使用 OR 邏輯閘及 AND 邏輯閘探討某個事件(例如某個閥關閉失敗)發生的原因，故障樹最上層為該事件，以下各層為數個中間事件，從上逐層往下推展，直到找出基礎事件。下午各組針對被指派調查的事件開始研究，檢閱指定核能電廠事件案例的相關資料，包含背景資訊、事件的時序、電廠的組織架構與事件相關的電廠人員等。每個組就像是 NRC 的擴大視察團隊 (Augmented Inspection Team, AIT)，組裡面的成員分別負責不同的工作。

(2) 6月20日課程摘要

本日上午講授的內容包含 Pareto Analysis、The 5-why technique、Critical Incidents Technique(CIT)及 Barrier Analysis。

Pareto Analysis 是一套統計的工具，並非找出事件根本肇因的方法。透過長條圖及累積曲線圖將造成某個問題的肇因分門別類，可清楚看出導致這個問題的主要肇因類別。

The 5-why technique 適用於討論涉及人因的問題，利用魚骨圖討論每個肇因發生的可能原因。The 5-why technique 中的「5-why」並不是指對某個肇因一定要問 5 個 why(即發展 5 層魚骨分支)，而是透過不斷的問 why 以找出該肇因發生的可能原因。繪製魚骨圖時必須要透過團隊討論的方式完成，以避免參雜過多個人意見、專業知識不足或問題探討不夠深入等問題。

CIT 是一種經由直接觀察或面談來收集資訊的定性方法，用在問題剛發生，但嚴重性及肇因還未知的階段。流程為先建立目標，其次建立計畫及規範，再其次收集資料，然後分析資料，最後是解釋和提出資料報告。

Barrier Analysis 用來討論風險與受影響目標間有哪些屏障，並透過分析以找出有哪些屏障失效。

下午各組利用學習到的工具/方法分析指定之核能電廠事件案例，我們被指派的工作為利用 FTA 分析 RHR 喪失的肇因。此外，由講師 Ben Geppert 扮演核能電廠的領班及資深運轉員，提供本組進行電廠人員模擬訪談，藉由訪談的過程收集事件相關資訊，過程相當生動。

(3) 6月21日課程摘要

本日上午講授的內容為 Management Oversight and Risk Tree(MORT)，MORT 是一套系統性的肇因調查方法，MORT 圖將超過 1500 個需要檢視的項目整理成一個龐大的故障樹，可做為協助蒐集及儲存資訊的工具。MORT 圖的輸入種類繁多，包含電廠設施、環境、政策及程序、人員、實施計畫、風險評估…等。使用 MORT 圖前須先進行 Barrier Analysis 以決定分析的風險、屏障及影響對象。在檢視 MORT 圖中各項目時可用不同顏色來進行分類，紅色代表必須在事故報告中說明，並提出適當的改善建議；綠色代表不需做任何處置；藍色代表缺乏證據或資訊，建議收集更多資料；另因 MORT 圖故障樹非常龐大，超過 1500 個需要檢視的項目不一定都適用於每個肇因調查，可使用黑色標示這些不適用的項目。詳細的操作可以參考 The Noordwijk Risk Initiative Foundation 出版的使用者手冊¹。

下午各組繼續利用學習到的工具/方法分析指定的核能電廠事件案例，並製作隔天簡報所需的檔案。吳文雄技士被指派的工作為 MORT 分析，本組設定的風險、屏障及受影響的對象分別為反應器廠房內空浮放射性物質活度異常上升(風險)、反應爐冷卻水系統(屏障)及人(受影響的對象)。曹裕后技士被指派的工作為繪製魚骨圖，利用魚骨圖分析爐心內空泡產生的肇因。肇因分為四大類進行探討，分別為人、電廠、政策、程序。此外，由講師 Ben Geppert 扮演核能電廠的工程師，接續前一天的模擬訪談，以收集更多事件相關資訊。

(4) 6月22日課程摘要

本日為課程的最後一天，由各組輪流就幾天來進行的分析過程與結果進行簡報，簡報進行的方式模擬 NRC 擴大視察團隊呈現視察結果的方式進行，每一位成員都需負責一部分的簡報。本組共使用 ECFA+、FTA、The 5-why technique、Barrier Analysis、MORT 等方法分析指定的核能電廠事件案例

¹ J.Kingston et al., "NRI MORT User's Manual-For Use with the Management Oversight & Risk Tree Analytical Diagram," Second edition, December 2009.

的根本肇因，我們則負責簡報 The 5-why technique 的部分，在簡報完成之後順利結束本週的課程。

綜合而言，這個課程講授了肇因分析與事件調查會使用到的工具及方法，並提供學員以腳色扮演的方式，應用所學到的工具及方法調查核能電廠實際發生過的事件，是相當難得的經驗。這些工具及方法在概念上並不困難，但實際在進行肇因分析與事件調查時，必須具備足夠的專業知識及經驗，搭配使用適當的工具及方法，才能找出真正的根本肇因。

2、參加「火災機率風險評估-第二部分-電路分析」訓練課程

火災機率風險評估課程是 NRC-RES 與 EPRI 聯合舉辦，共有五大部分，分別是 Module I-Probabilistic Risk Assessment、Module II-Electrical Analysis、Module III-Fire Analysis、Module IV-Fire Human Reliability Analysis 及、Module V-Advanced Fire Modeling。本次參加的是第二部分-電路分析(Module II-Electrical Analysis)，其為說明如何進行火災造成的電路故障之分析，以用於火災機率風險評估，課程內容涵蓋範圍包含電路故障模式、火災引起的電路故障研究、電纜選擇、電路故障分析、電路故障模式可能性分析及相關電路的分析，詳見附件二。課程於 6 月 25~29 日在 NRC PDC 上課，講師共有三位，分別是來自 NRC-RES 的 Gabriel Taylor 先生以及來自 Jensen Hughes 公司的 Daniel Funk 先生與 Dane Lovelace 先生，以下就 5 天的課程摘要說明之。

(1) 6 月 25 日課程摘要

本日除進行整個課程的概述外，另講授電路分析的基礎及電路故障模式。

電路分析的基礎介紹電路分析會用到的基礎資訊，例如各種元件在電路圖上的圖示、ANSI/IEEE 標準元件的代號、各種圖面(one-line diagram、three-line diagram、elementary diagram、block diagram…等)。此外，由於本課程主要關注的是氣動閥/電磁閥、電動閥、斷路器的相關電路，因此分別介紹氣動閥/電磁閥、電動閥、斷路器的結構及相關圖面。

電路故障模式介紹電纜因為火災引起的的故障模式(Open Circuit、Short-to-Ground、Hot Short…等)、過電流和過電流保護等定義。

(2) 6月26日課程摘要

本日講授的課程包含電路故障模式、火災引起的電路故障研究、電纜選擇。

電路故障模式接續昨天(6月25日)的課程詳細介紹各種 Hot Short 的模式，講師並解說各種 Hot Short 模式如何造成誤動作。

火災引起的電路故障研究探討高影響性的元件，當這些元件因火災而失效時可能對核能電廠造成立即且無法恢復(即燃料受損)的後果，以沸水式核能電廠為例，當高影響性元件失效造成多個安全釋壓閥誤開啟，同時又造成一定數量的低壓注水系統失效時，反應爐內冷卻水量的流失可能會超過設計基準事故的分析。另外還介紹了電路故障測試、Electrical PIRT(Phenomena Identification and Ranking Table)Panel、資料分析、比流計(CT)電路開路測試、經濟合作暨發展組織核能署的高能電弧故障(High Energy Arcing Fault, HEAF)現象研究等，其中經濟合作暨發展組織核能署目前已經完成26項HEAF測試，在課堂上講師有播放一些相關的測試影片。

電纜選擇講述如何辨識與火災機率風險評估相關的電路/電纜，辨識的方法一般是參考 NEI-00-01 報告²及 NUREG/CR-6850 報告³，NEI-00-01 報告中的方法可分為9個步驟：

- (1)定義安全停機設備
- (2)確認操作每個安全停機設備所需的電路(電源，控制，儀表)
- (3)確認假操作或誤操作可能影響安全停機的設備
- (4)確認失效時會造成假啟動的連鎖電路和電纜
- (5)決定設備的運轉是否需要電力

² NEI 00-01, "Guidance for Post-Fire Safe Shutdown Circuit Analysis," Rev.2, May 2009.

³ NUREG/CR-6850, "EPRI/NRC-RES Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities," Final Report, Sep 2005.

- (6)若設備的運轉需要電力，確認最靠近的上游電源並驗證該電源是否在安全停機的列表中
- (7)為設備分配電纜
- (8)確認電纜佈線
- (9)確認電纜所在位置的防火分區

NUREG/CR-6850 報告中的方法則可分為 6 個步驟：

- (1)編譯和評估先決資訊和數據
- (2)選擇火災機率風險評估電路/電纜
- (3)確認並選擇火災機率風險評估電源
- (4)執行有關的電路審查
- (5)決定電纜佈線
- (6)產生火災機率風險評估電纜列表和目標設備位置報告

(3) 6 月 27 日課程摘要

本日講授的課程為詳細的電路故障分析，其目的在於辨識火災引起的特定電纜故障模式所造成電路及組件的可能響應、篩選不影響組件完成其功能的電纜、篩選不影響組件完成其功能的電源及連鎖。參考 NUREG/CR-6850 報告，詳細的電路故障分析可分為 3 個步驟。在執行時須注意以下事項：

- (1)電路故障分析是靜態的分析，未考慮時變的因素。
- (2)可能的電纜邏輯關係。
- (3)使用 Hot Probe 的方法來分析電纜的故障模式。
- (4)分析結果的編撰需與火災機率風險評估資料庫的格式相容。

另外建議分析者使用一致的符號來記錄結果。課程內容講述完畢之後是電路分析練習的時間，每個練習都會使用到數張圖面(elementary diagram、block diagram…等)，進行的方式是先給上課同學自行練習約 20 分鐘，然後講師再逐步演練分析的過程，本日練習了氣動閥及電動閥的電路分析。

(4) 6 月 28 日課程摘要

本日講授的課程為電路故障模式可能性分析，參考 NUREG/CR-7150

volume 1⁴&2⁵中最新的方法，主要可以分為 3 個步驟，其重點之一是要算出電路中的某個電纜造成組件誤動作的條件機率，而這個條件機率與電路設計、電路形式、電路是否接地、電源是 DC 或是 AC、電纜結構、電纜故障模式等條件有關。上述這些條件必須透過詳細的電路故障分析得到，得到之後再透過查表的方式查得條件機率。另一個重點是組件誤動作持續的時間對特定的機率風險評估情節有顯著的影響，而分析組件誤動作持續的時間有一些假設及限制，在分析時必須注意。課堂上講師舉了幾個例子，實際執行電纜故障造成組件誤動作條件機率的計算。課程內容講述完畢之後是電路分析練習的時間，進行方式如同昨天(6 月 27 日)，本日練習了氣動閥、電動閥、泵的電路分析。

(5) 6 月 29 日課程摘要

本日講授的課程包含相關電路及課程總結。

相關電路的課程一開始，講師即說明相關電路的分析需要特別的電工專業知識，以及在火災機率風險評估建立相關電路缺點的模型是很困難的。相關電路的定義為可以透過不利的互相作用而影響關鍵設備/系統的電路，相關電路與關鍵設備/系統有共同的電源、機箱(enclosure)或誤動作。講師並在課堂上舉了幾個例子，來說明共同電源、共同機箱可能造成不利的互相影響作用。

課程總結的部分講師強調火災機率風險評估的電路分析不能粗枝大葉，且必須持續地與團隊成員聯繫討論，才能得到正確結果。另外提到依據以往的經驗，電路分析通常佔火災機率風險評估所需經費的 40%至 60%，所以在制定計畫時，電路分析必須是主要的考量。

綜合而言，「火災機率風險評估-第二部分-電路分析」提供了執行火災機率風險評估所需的知識。為了加深我們學習的印象，講師在授課完後以氣動閥、電動閥以及泵的電路分析練習讓我們了解在實務上如何使用各種圖面來分析電

⁴ NUREG/CR-7150, "Joint Assessment of Cable Damage and Quantification of Effects from Fire, Volume 1" Final Report, October 2012.

⁵ NUREG/CR-7150, "Joint Assessment of Cable Damage and Quantification of Effects from Fire, Volume 2" Final Report, May 2014.

路。另外課程中撥放的一些有關電弧故障引起火災的影片，以及設備實際燃燒的過程，讓我們對電路故障所引起的火災有了更深刻的印象。

3、參訪行程

本次共安排參訪 NRC 運轉中心、駐美台北經濟文化代表處科技組、Browns Ferry 核能電廠等機構，茲就各參訪行程內容摘述於下。

(1) 參訪 NRC 運轉中心與駐美台北經濟文化代表處科技組摘要

於 7 月 3 日參訪 NRC 運轉中心，NRC 運轉中心位於 NRC 總部第三大樓地下室，先由 NRC 人員(核能管制署 Mary Jane Ross-Lee 副處長等三位)帶領我們進行參觀，在進入之前必須將手機置放於置物櫃中以避免干擾儀器。NRC 運轉中心內大致可分為控制中心、主要監測區、新聞小組等。首先前往指揮中心聽取簡報，內容包含運轉中心的組織、人員編制、監管項目、緊急應變時的層級、小組組成等。

運轉中心平時每天 24 小時都有兩位專職人員值勤，分為日班及夜班兩個班，每個班 12 個小時。類似本會核安監管中心的值勤人員，負責接收核能電廠、民眾等與輻射有關的緊急通報。緊急事件發生時，運轉中心為 NRC 的應變中樞，此時有反應器安全小組及防護措施小組在主要監測區監測事件的演變，並將各項資訊即時彙整至控制中心以進行應變行動的決策，Mary Jane Ross-Lee 副處長特別提到反應器安全小組及防護措施小組的成員來自於 NRC 的各個部門，且都是屬於自願性的參加，成員必須接受定期的訓練。另外在事故發生時可以透過運轉中心內的新聞小組發布與事件有關的最新訊息，並回應民眾諮詢的問題。

有關核能電廠緊急事件的通報，在事件發生時業者必須先定義事件的等級，共分四個等級，從嚴重至輕微分別為事故(accident)、廠區事件(site event)、警戒(alert)、異常(abnormal)。依法規的要求業者必須在事件發生後的 15 分鐘內通報核能電廠所在地的地方政府，另須在定義事件等級後的 1 小時內通報 NRC，主要原因是地方政府負責決策當地的民眾防護行動。

聽取完簡報後前往主要監測區實地參觀，主要監測區最前方是一個弧形

的大螢幕，可顯示各項資訊，例如使用 Google Earth 顯示事故電廠所在地的地形、使用 ERDS(Emergency Response Data System)監測事故電廠系統參數的變化等。主要監測區內有數十個工作人員的座位，每個座位都有相同的配備，以便彈性安排反應器安全小組及防護措施小組的位置。每位工作人員都有兩個螢幕及一副耳機可使用，一個螢幕用來擷取前方弧形大螢幕的資訊，另一個螢幕可用來做預測事故演變的相關計算，例如防護措施小組可使用 RASCAL 程式估算事故將造成的劑量，作為判斷民眾是否須採取疏散或掩蔽等措施的依據。耳機則是用來確保工作人員間的溝通無礙，減少需要移動討論的情形。

NRC 運轉中心參訪結束後即前往駐美台北經濟文化代表處科技組，拜會曾東澤組長以及本會代表喬凌寰副組長，就國內核能電廠安全管制近況以及科技組的工作內容等交換意見。

(2) 參訪 Browns Ferry 核能電廠摘要

Browns Ferry 核能電廠隸屬於 Tennessee Valley Authority，共有三部 BWR/4 機組，圍阻體皆為 Mark I 型；該電廠於 1966 年開始建造，1、2、3 號機分別於 1973 年、1974 年、1976 年取得運轉執照，三部機組並於 2006 年通過延役 20 年之申請，目前皆在運轉中。

7 月 5 日與喬凌寰副組長會合後，搭機由華盛頓特區前往阿拉巴馬州的亨茨維爾，準備次日(7 月 6 日)參訪 Browns Ferry 核能電廠。

7 月 6 日約 8 點到達 Browns Ferry 核能電廠的訓練中心，負責接待我們的是 NRC 資深駐廠視察員 Thomas Stephens 先生以及駐廠視察員 Matthew Kirk 先生與 Nicholas Hobbs 先生，另外有一位來自 NRC 總部的人員陪同參訪。首先參觀因應福島事故後所增設之 FLEX 設備廠房，過程有兩位電廠人員陪同視察員解說各項 FLEX 設備的功能。Browns Ferry 核能電廠的 FLEX 廠房規模為全美數一數二，是立方體形式的建築，據電廠人員表示，採用這種形式的建築是為了可以容納更多的 FLEX 設備。FLEX 廠房中的 FLEX 設備包含 480V 的移動式柴油發電機、移動式補水泵、沉水泵、軟管、氮氣瓶等。Browns Ferry 核能電廠所在地最嚴重的天然災害是龍捲風，並無地震

的威脅，但 FLEX 設備的固定仍做得相當確實。

接著由視察員帶領我們參觀各項廠內設施，Browns Ferry 核能電廠的保安非常森嚴，進入廠區前訪客必須在先前於訓練中心填寫的個人資料表上再簽一次名，透過筆跡來確認訪客的身分；另外對視察員可陪同的訪客人數也有規定，在廠區內需要刷卡進入的區域每位視察員開啟一次門僅能允許兩位訪客一起進入，故我們一行七人(三名視察員，四名訪客)必須分三批進入。參觀的設施包含現場 FLEX 設備的相關機櫃、福島事故後圍阻體新增的 Hardened vent system、RHR service water pump room、吊運用過燃料的區域、乾貯場、兩台備用柴油發電機(用於提供高壓泵的動力)等。比較特別的是 Browns Ferry 核能電廠每年會做一次將用過燃料由用過燃料池搬運至乾貯場的工作。

期間我們也針對兩項議題進行交流，首先是關於核能電廠的低密度人口區，資深駐廠視察員 Thomas Stephens 先生表示，美國法規對低密度人口區內的土地使用無明確限制，另核能電廠必須定期檢視其緊急應變計畫以因應低密度人口區內人口變化的情形。此外，美國的核能電廠必須將核燃料都移出爐心後才算進入除役階段，此時須考量的是用過燃料池的燃料發生事故時造成的廠外劑量，一般說來，約需 1 至 1.5 年的時間用過燃料池內的燃料其衰變熱才會減少至即使發生事故也不需要廠外應變的程度，此時核能電廠可能會提出申請豁免廠外緊急應變計畫，一旦廠外緊急應變計畫不再需要，則緊急計畫區及低密度人口區也不再需要，即可以移除。而廠內緊急應變計畫的方面，隨著除役工作的進行，最後會縮減為乾貯場制定的廠內的緊急應變計畫。

另一個議題是關於 2 號機在 1985 年至 1991 年之間處於長期停機經驗，其與我國核一廠的狀況相似，因此想了解 Browns Ferry 核能電廠 2 號機於該段停機期間有關爐心內燃料佈置、組件材料、終期安全分析報告/運轉技術規範之更新或修改情形、持照運轉人員的訓練計劃以及設備維護測試作業情形。針對我們所提的問題，NRC Thomas Stephens 先生表示，2 號機在 1985 年至 1991 年期間燃料是移出爐心的狀態，而且 2 號機組件材料在爐水

淨化系統仍維持運轉下，材料腐蝕的問題較輕微。此外，針對終期安全分析報告/運轉技術規範之更新/修改議題，電廠有提出終期安全分析報告修改，運轉技術規範部分則沒有變動，另外持照運轉人員的訓練計劃仍要滿足 NRC 相關規定，可參考 NUREG-1021 Rev.11 之 ES-202 preparing and reviewing operator licensing applications 之 D 節 NRC license eligibility guidelines 說明，因此可了解持照運轉人員的訓練部分是沒有任何改變的。至於停機期間 2 號機的維護和偵測試驗範圍係比照終期安全分析報告/運轉技術規範中界定有關安全相關的組件，並執行相關維護測試，另針對 ISI/IST 之檢測及測試週期部份，ISI 的十年檢測週期(period) 相關規定依 ASME Sec. XI 表 IWB/C/D/E/F-2411-1 執行，至於 IST 部分則是依據 ASME OM code 的測試週期，每 3 個月及 18 個月來執行泵/閥部分的測試。

之後並至 1 號機及 2 號機的共用控制室參觀，由值班主任介紹 FLEX 執行時的編制(共分成 6 組)及操作流程圖，及 1 號機的控制盤面。

4、參加「廠外事件」訓練課程

廠外事件風險分析 (External Events Risk Analysis) 係分析由於火災、水災及地震等廠外事件對電廠的影響。本課程涵蓋範圍包含廠外事件風險分析、廠內水災、強風、廠外水災及其他事件(High Winds, External Floods, and Others, HFO)、龍捲風事件、地震風險評估(包括地震危害分析、地震耐震度(Fragility)評估、系統反應分析)及耐震餘裕方法、火災風險分析介紹、5 種火災分析工具等，課程內容詳見附件三。課程於 7 月 10~13 日在 NRC PDC 上課，講師為來自 Idaho 國家實驗室的 James Knudsen 先生以及 John Biersdorf。

(1) 7 月 10 日課程摘要

本日講授的課程包含廠外事件風險分析概述、廠內部水災、HFO、龍捲風事件、運輸事故。

廠外事件風險分析概述介紹電廠內/外的火災、水災及地震，和喪失廠

外電源(Loss Of Offsite Power, LOOP)等事件。

廠內水災舉例電廠的事故及造成的後果，並對救援組件的失效率及失效時間進行練習。

HFO 則介紹 IPEEE(Individual Plant Examination of External Event)對強風、廠外水災、運輸事故、設備附近事故及其他廠外事件所建議的方法，但不包括廠內水災、火災及地震。並說明 NUREG/CR-23006之 10.3.1 節對事件初始篩選準則的定義，同時舉 Denver 電廠為例來做篩選練習。

龍捲風事件以發生在 Browns Ferry 核能電廠的歷史事件為例，來說明龍捲風對電廠造成的危害，同時說明如何以點標的模式(Point Target Model)及大標的模式(Large Target Model)計算龍捲風襲擊電廠的機率。

運輸事故考慮空中交通、地面交通、水上交通及管線等 4 種模式。

(2) 7 月 11 日課程摘要

本日講授的課程包含地震風險評估、地震危害分析、地震耐震度評估、地震分析方法、地震餘裕方法、電廠系統及序列分析等。

地震風險評估介紹地震分析方法的流程、地震危害曲線、耐震度曲線等。

地震危害分析介紹三種用來表示地震危害的方法，包含 PGA(Peak Ground Acceleration)、SA(Spectral Acceleration) 及 UHS(Uniform Hazard Spectra)。另外說明繪製地震危害曲線的基本四步驟如下：

- (1) 確認地震源
- (2) 對每一地震源，產生一描述頻率與大小的模型
- (3) 對每一地震源，產生一描述地面運動參數與(震度大小，與地震源距離)的模型
- (4) 整合所有地震源的模型以形成地震危害曲線

地震耐震度評估介紹耐震度模式，並說明耐震度性曲線可用 3 個參數

⁶ NUREG/CR-2300, "PRA Procedures Guide: A Guide to the Performance of Probabilistic Risk Assessments for Nuclear Power Plants," January 1983.

(A_M, β_R, β_U)來描述其不準度，其中 A_M 為地面加速度耐震容量中位數、 β_R 為中位數的固有 randomness、 β_U 為中位數的固有不準度。

地震分析方法在介紹 OBE(Operating Basis Earthquake)、DBE(Design Basis Earthquake)以及 RLE(Review Level Earthquake)三種地震定義後，並說明地震 PRA 以下列 6 個步驟作分析：

步驟 1：地震危害分析-頻率與大小的地面運動

步驟 2：頻譜響應分析-地面運動轉換成局部(地面、地板或組件)運動

步驟 3：電廠現場勘查-確認典型與非典型的結構、系統、組件

步驟 4：耐震度分析-估計結構、系統、組件的耐震強度

步驟 5：系統分析-地震產生的主要損害

步驟 6：圍阻體反應與廠外後果

另解說地震分析使用的兩種主要方法為地震餘裕分析(Seismic Margins Analysis) 及地震風險評估(Seismic PRA)。

地震餘裕方法比較 NRC 及 EPRI 所用方法的差異性。

電廠系統及序列分析介紹決定地震序列的 Fault Tree Linking 及 Event Tree with Boundary Conditions 兩種方法。

(3) 7月12日課程摘要

本日講授的課程包含火災風險分析歷史、火災風險分析、火災分析工具、火災機率及一般機率、火災風險觀察、火災影響在 SPAR(Standardized Plant Analysis Risk)模式的型式、火災情境。

火災風險分析歷史介紹核能電廠的消防計畫，該計畫在 1979 年前須參照 10 CFR Part50 Appendix R 的規範，1979 年後則須符合 10 CFR50.48(a) 的規範。

火災風險分析介紹定性上採取步驟為資訊及資料收集、電廠現場勘查、電廠火災位置定義、火災位置特性表、位置基準的火災情境。

火災分析工具介紹 FDT(Fire Dynamic Tool)、FIVE(Fire-Induced Vulnerability Evaluation)、CFAST(Consolidated Fire Growth and Smoke Transport)、MAGIC(Global Analysis Model for fire into

Compartments)及 FDS (Computation Fluid Dynamics Model)等五種分析工具。

火災機率類別及一般機率部分，先介紹電廠 8 個常發生火災的位置，再討論這些位置的設備發生火災，得到 37 種一般機率類別。針對 FIVE 分析工具，介紹其分析的三個階段，分別是第一階段為進行火災區域篩選 (Fire Area Screening) 定性分析，第二階段則為火災隔間篩選 (Fire Compartment Screening) 的定量分析，最後第三階段則執行電廠現場勘查及確認，之後並舉例做實際練習。

火災風險觀察介紹核能電廠對重要火災事件的觀察發現，例如廠區全黑 (SBO)、爐心冷卻功能喪失、運轉員動作、一次 (Primary) 火災可能導致二次 (Secondary) 火災、非安全範圍的氣渦輪機廠房及開關場火災等。

火災影響在 SPAR 模式的型式介紹直接失效、增加故障機率值、誤動作/誤操作以及人為錯誤機率增加等，之後利用事件樹及故障樹針對以上型式來做練習。

火災情境先介紹其是以一連串事件的火災點火源為開始，至電廠安全停機或爐心損毀為止，並說明完整情境包含火災點火源情境、火災成長和設備受損情境、火災抑制情境、電廠安全停機 (SSD) 反應情境等。火災 SDP (Significance Determination Process) 與火災 PRA 則介紹火災風險量測為：

$CDF = F * SF * NSP * CCDP$ ，其中參數之定義為：

F：Fire Frequency，在某段時間(指反應器運轉 12 個月)內發生火災頻率。

SF：Severity Factor，值介於 0~1，其一般定義為反應特定火災情境中被認為具威脅性的火災部分。

NSP：Non-Suppression Probability，特定的損壞目標或二次可燃物點燃失效發生之前，火災不會被壓制的條件機率。

CCDP：Conditional Core Damage Probability，火災後安全停機工作無法實現安全穩定熱停機並導致爐心毀損的條件機率。

在課程結束之前，講師特別告訴大家魔鬼總是在細節中，要大家應該特別去留意細節。

(4) 7月13日課程摘要

該日為筆試，我們通過筆試之後順利結束本週的課程。

綜合而言，「廠外事件」課程講述核能電廠內外的火災、水災及地震、和 LOOP 等事件所造成的影響，同時也針對火災及地震 PRA 使用的方法做詳盡的介紹，內容相當豐富，本課程所學到的知識可應用於火災安全風險分析管制及視察作業，對身為視察員的我們相當實用。

肆、建議

- 1、 本次出國行程包含三週的訓練及一週的參訪，三週上課的形式各不相同，不管是在專業知識或是了解美國核能電廠視察員所接受的訓練皆有相當大的收穫，對我國視察員的養成及擴大國際視野甚有助益，建議持續派員赴 NRC 研習核能電廠稽查管制技術及參訪。
- 2、 課程「肇因分析/事件調查專題研討課程」學習到的分析工具/方法相當多，其概念與程序與國內採用的方法基本上類似，本課程不僅讓我們充實在事件調查上的專業知能，其上課模式採行包括作法講解與案例實際操作的「做中學，學中做」的方式，也令我們耳目一新，建議未來規劃本會辦理類似訓練課程時，可將此上課模式納入參考。
- 3、 火災機率風險評估為我國核安管制持續關心的議題之一，本會已派員參加第二部分及第三部分之訓練課程，建議就管制需要持續派員參加其他部分課程，並持續掌握國際間火災機率風險評估的最新發展，以提升管制效能。
- 4、 本次參訪美國 Browns Ferry 核能電廠，實際觀摩討論美國核管會視察員駐廠視察作業之執行與了解該電廠的福島改善措施，並就相關議題面對面討論交流，此一模式有助於汲取其他管制機關與核能電廠之經驗，對視察員之視察與管制的執行與視野均有實質助益，建議未來仍持續安排此行程。另考量當前我國的能源政策規劃在 2025 年達成非核家園的目標，核一、二、核三廠即將陸續進入除役階段，除役安全管制已為本會的施政重點，因此建議未來的國外電廠參訪可增加除役中的電廠，以汲取除役安全管制經驗。

附件一、「肇因分析/事件調查專題研討課程」

Webinar		Day 1	Day 2	Day 3	Day 4
1-Welcome 2-Initiating the RCA 3-RCA Techniques 4-Writing Root Cause Statements	8-12am	1-Welcome 2-Fact Finding Technique 3-Event and Causal Factor Analysis 4-Change Analysis 5-Fault Tree Analysis	6-Pareto Analysis 7-The Five Whys 8-The Critical Incident Technique 9-Barrier Analysis	Knowledge check- Review of previous day' s material 10-Management and Oversight Risk Tree	Knowledge check- Review of previous day' s material Prepare for Out Brief Close
Pre-work		Lunch			
Students will complete a Root Cause Statement exercise. Students will review case study assignment, charter and event notification to prepare classroom activities.	1-4:30pm	Team Case Study Assignment	Team Case Study Assignment	Team Case Study Assignment	De-Brief Course Close

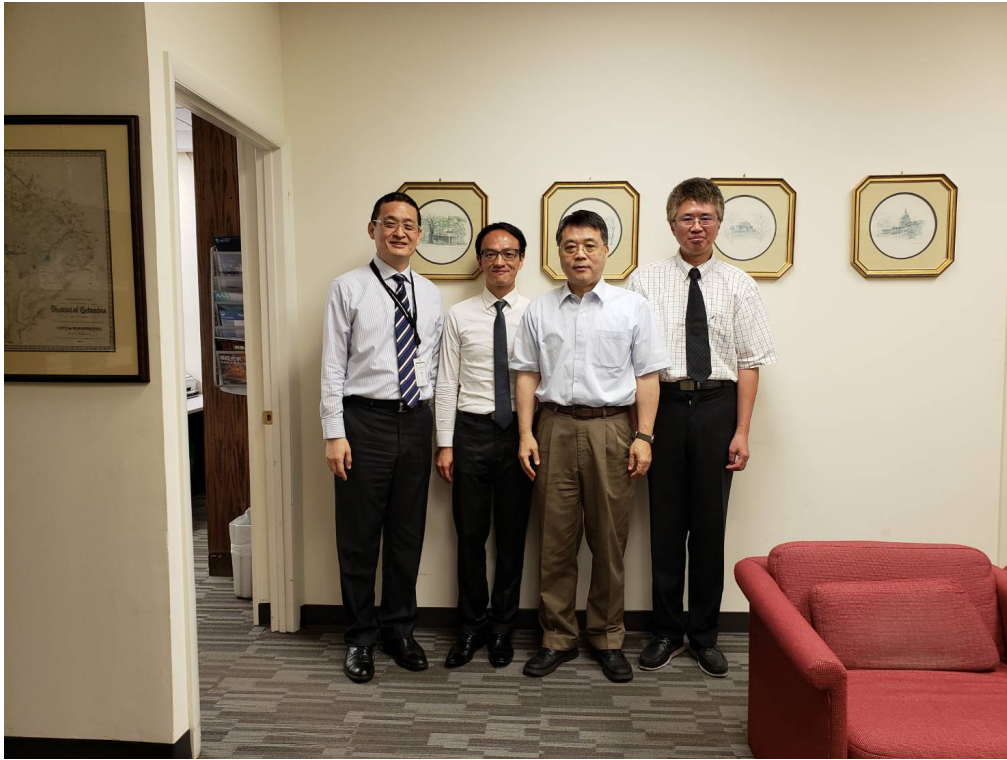
附件二、「火災機率風險評估-第二部分-電路分析」課程

Fire PRA Module II- Electrical Analysis		
Day		Title
6/25 Monday	AM	Introduction & Overview to Circuit Analysis
	PM	Circuit Analysis Fundamentals/Fire Research
6/26 Tuesday	AM	Cable Failure Mode-Theory and Application
	PM	Circuit Failure Mode-Theory and Application
6/27 Wednesday	AM	Task 3-Cable Selection/ Task 9-Detailed Circuit Analysis
	PM	Task 10-Failure mode likelihood/Example Walk Through
6/28 Thursday	AM	Practical Exercises
	PM	Practical Exercises
6/29 Friday	AM	Practical Exercises/Summary
	PM	Wrap up & adjourn

附件三、「廠外事件」課程

Day	Title
7/10 Tuesday	<ul style="list-style-type: none"> ● Internal Flooding ● High Winds, External Floods, and Others ● Tornado and High wind Events ● Transportation Accidents
7/11 Wednesday	<ul style="list-style-type: none"> ● Seismic Risk Assessment ● Seismic Hazard Analysis ● Seismic Fragility Evaluation ● Seismic Analysis Methods ● Seismic Margin Approach ● Plant System and Sequence Analysis
7/12 Thursday	<ul style="list-style-type: none"> ● Fire Risk Analysis History ● Fire Risk Analysis Introduction ● Five Fire Analysis Tools ● Fire Frequency Bins and Generic Frequencies ● Overview of the EPRI Five-Induced Vulnerability Evaluation (Five) Methodology ● Fire PRA ● Fire Risk Observations ● Inclusion of Internal Fire Impacts in SPAR Models ● Fire Scenarios ● Fire SDP vs. Fire PRA Concepts and Terminology
7/13 Friday	<ul style="list-style-type: none"> ● Quiz

參訪照片



參訪駐美台北經濟文化代表處科技組



參訪 Browns Ferry 核能電廠