

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：核能安全委員會

姓名職稱：楊貿元技士、蘇致賢技士

派赴國家/地區：美國/田納西州

出國期間：112年8月19日至112年9月8日

報告日期：112年11月7日

摘要

我國與美國在台美民用核能和平利用協定的架構下，舉辦台美民用核能合作會議，藉此合作會議交流原子能管制技術，並檢討及規劃雙方核能合作項目。派員赴美國核能管制委員會(Nuclear Regulatory Commission, NRC)研習核能電廠稽查管制技術及參訪，便為核能合作項目之一項。

本次赴美國 NRC 研習核能電廠稽查管制技術及參訪，為期 21 天，一共安排兩項行程。第一項行程為赴美國 NRC 位於田納西州查塔努加(Chattanooga, Tennessee)之技術訓練中心(Technical Training Center, TTC)，參加 R504P「Westinghouse Advanced Technology」訓練課程，內容為西屋四迴路壓水式反應器運轉技術規範及機組暫態分析等，第二項行程為參訪美國 Sequoyah 核電廠，包括 FLEX 設備儲存場所(FLEX Equipments Storage Building, FESB)、控制室及汽機廠房現場觀摩及討論，以及與美國 NRC 視察員做管制經驗之交流等。

藉由本次研習及參訪，期能加深對電廠系統、功能、設計理念及壓水式機組之認識，了解 FLEX 設備儲存場所的管制方式，並能與美國 NRC 人員交流視察技巧與技術文件審查方式，對於日後核能電廠管制工作有所助益。

目次

摘要.....	i
目次.....	ii
壹、 目的.....	1
貳、 過程.....	2
一、 赴美國 NRC 技術訓練中心參加 R504P 訓練課程.....	2
系統複習.....	2
停機餘裕計算以及反應度平衡.....	2
設計基礎.....	3
運轉技術規範.....	4
蒸汽產生器破管事故.....	8
預期暫態未急停.....	8
電廠全黑.....	9
管路未滿水.....	9
暫態分析.....	10
事件回顧.....	16
二、 參訪 Sequoyah 核電廠.....	17
Sequoyah 核電廠簡介.....	17
參訪.....	17
參、 心得及建議.....	19
附件 1 照片.....	21

壹、目的

我國與美國在台美民用核能和平利用協定的架構下，舉辦台美民用核能合作會議，藉此合作會議交流原子能管制技術，並檢討及規劃雙方核能合作項目。派員赴美國核能管制委員會(Nuclear Regulatory Commission, NRC)研習核能電廠稽查管制技術及參訪，便為核能合作項目之一項。

本次赴美國NRC研習核能電廠稽查管制技術及參訪，包含交通共為期21天，一共安排兩項行程。

第一項行程為赴NRC位於田納西州查塔努加(Chattanooga, Tennessee)之技術訓練中心(Technical Training Center, TTC)，參加R504P「Westinghouse Advanced Technology」訓練課程，內容為西屋四迴路壓水式反應器運轉技術規範及機組暫態分析等，加深對電廠系統、功能、設計理念及壓水式機組之了解。核三廠也是屬於西屋公司壓水式核能電廠之設計，藉由此種基礎養成訓練，能更深入了解壓水式機組，並認識西屋公司壓水式機組間設計之相同及相異處，對於未來運轉員考官之訓練、駐廠視察等皆會有所幫助。

第二項行程為參訪美國Sequoyah核電廠。Sequoyah核電廠位於查塔努加東北方，隸屬NRC第二分區辦公室管轄。Sequoyah核電廠有兩部機組，皆為西屋公司四迴路壓水式核能機組。而Sequoyah核電廠與核三廠除反應爐冷卻水迴路數量不同外，圍阻體形式為具冰冷凝器之設計，其最終熱沉採用河水提供衰變熱移除，透過這些差別能增加對於壓水式機組的認識。此外，也現場了解NRC如何管制該電廠之FLEX設備儲存場所設置情形。更藉由參訪電廠，並與美國NRC駐廠人員交流，能了解美國NRC人員的視察技巧與技術文件審查方式，期能對於日後核能電廠管制工作有所助益。

貳、過程

一、赴美國 NRC 技術訓練中心參加 R504P 訓練課程

本次赴 NRC TTC 參加之訓練課程為 R504P「Westinghouse Advanced Technology」。該課程內容為西屋公司壓水式核能電廠技術，並結合課堂訓練及模擬器講解，包括運轉技術規範、機組暫態等與壓水式核能電廠相關之特性說明。

訓練課程由 Philip Finegan、Scott Bussey、Gary Callaway、Sean Gawne-Mark 等 4 位講師講授，每堂課堂訓練有一主講講師，並常有其他講師同時在教室，適時補充講解，模擬器講解的課程則是講師全體出席。學員共有 22 員，其中僅有我國兩員不是美國 NRC 人員，可見此訓練機會之珍貴。

依課程主題將課程內容摘要整理如下：

系統複習

第一天上午的課程是系統的複習，講師說明本次課程教材使用的反應器控制及保護邏輯等，同時也是其他學員先前參加的 R304P「Westinghouse Technology」課程的複習。所介紹的系統係西屋公司四迴路壓水式反應器機組，雖然與核三廠之三迴路不同，但設計大致相同，僅於細部有差異，故雖示意圖的構圖也有差異，但聽講時仍很快便能熟悉，為後面的課程打好更紮實的基礎。

停機餘裕計算以及反應度平衡

反應度平衡的部分，用來預測臨界棒位或臨界硼酸濃度，分為有參考點或者是沒有參考點的情況。若把預測臨界棒位與控制棒插入限值比較，便能確定停機餘裕是否足夠？以及是否需要調整停機餘裕等考量。

停機餘裕的部分，講師強調並提醒停機餘裕可能表示當下的狀態或者是

未來的狀態；如果是在次臨界的情況，停機餘裕是表示距離臨界有多遠，而如果是功率運轉的情況，則是表示一旦停機後，距離臨界將會有多遠等。

可能影響反應度的參數可分為在停機後可能立即改變的控制棒位置、RCS 溫度、功率及不會立即改變的氫、鈾及硼酸的濃度兩類。如果要改變停機餘裕，需要同時使兩類的參數改變，因為在維持臨界的狀態下，如果透過改變一個參數增加正反應度，便會需要另一參數減少反應度；但如果改變的參數都是同一類，在停機後仍僅會互相抵銷(都立即改變或都未改變)，只有同時改變兩類的參數，才能改變停機後的反應度。而在停機後不會立即改變的參數，且係運轉員可以控制的僅有硼酸濃度，所以基本上要改變停機餘裕，就會需要改變硼酸濃度。

設計基礎

課程先介紹執照申請的規定，美國核電廠執照是採用兩階段申請，除新反應器有採用 Combined License 方式外，建廠階段需要建廠許可，申請者需提出初期安全分析報告(Preliminary Safety Analysis Report, PSAR)，運轉階段需要運轉執照，申請者提出終期安全分析報告(Final Safety Analysis Report, FSAR)作為申請文件，經審查核定的 FSAR 便成為核電廠運轉的執照基礎。FSAR 的內容會包含各結構、系統、組件(Structures, Systems and Components, SSCs)的敘述，也包含設計準則以及符合這些準則的做法，並需包含事故分析、法規要求、以及運轉技術規範等。

上述的設計準則，美國 NRC 係依據 10 CFR 50 Appendix A；法規要求，包含法規、法規指引(Regulatory Guide, RG)及所採用的工業規範、標準等，其中 NRC 把採用的工業規範及標準，以及採用時的額外限制等規定均列於 10 CFR 50.55a。

總而言之，執照內容是由申請者提出，管制機關對於申請者的申請表示同意或不同意。除了 FSAR 之外，廣義的持照基礎，還會包含持照者於重要

案件對於管制機關的承諾。FSAR 每兩年定期更新，故持照基礎也會跟著變動。

持照基準中，位階最高的是 SSCs 的設計基準功能以及設計基準參數。設計基準功能是為符合法規要求，該 SSCs 需達到的功能。而設計基準參數則是指分析時所使用的參數或者是法規有相關規定的數值等。這些功能或參數需要經過 NRC 同意才能修改。除此之外的 FSAR 內容或者是相關的設計或計算輔助文件，可依據 10 CFR 50.59 適用性判定、篩濾、評估等過程而修改。

我國對於電廠執照的管理與美國採用類似方式，故這部分課程內容很熟悉，且能更加瞭解其概念，故學習成效及收穫頗豐。

運轉技術規範

運轉技術規範部分介紹相關法源及依據，內容須包含核電廠安全限值 (Safety Limits, SL)、安全系統設計限值 (Limiting Safety System Settings, LSSS)、機組運轉限制條件 (Limiting Conditions for Operation, LCO)、偵測試驗要求 (Surveillance Requirements, SR)、設計特性 (Design Features)、行政管理要求 (Administrative Controls) 等。

安全限值是拿來保護物理屏障 (此處所指之物理屏障，特別指燃料護套及 RCS 完整性)，一旦超出安全限值範圍，便需經過管制機關同意才能再起動；圍阻體相關物理參數則由 LCO 規定。

安全系統設計限值是指自動保護裝置的設定值，包括自動急停以及引動特殊安全措施的設定值，沒有獨立章節，而是分別包含在機組運轉限制條件 3.3.1、3.3.2 章節之內容。

機組運轉限制條件是指安全運轉所需要的最低系統需求，會針對各系統列出適用的機組運轉情形以及不滿足時需採取的行動，而偵測試驗是用來確認機組運轉限制條件是否滿足，故沒有獨立章節，而是包含在各機組運轉限

制條件中。

設計特性是指被改變時會嚴重影響安全的特性，包括材料及地理環境等。行政管理則是包含組織、管理、程序、回報要求等會影響安全運轉的行政規定。

運轉技術規範中的定義及基礎並非 10 CFR 50.36 要求，但會與運轉技術規範一起陳報，廣義上也稱作運轉技術規範，但講師也提醒基礎的修改並不像運轉技術規範需要送主管機關審查，美國的持照者可依相關程序進行修改。

運轉技術規範從早期的客製化運轉技術規範(Custom Technical Specification, CTS)、標準化運轉技術規範(Standard Technical Specification, STS)，演進至目前常見的改良型標準化運轉技術規範(Improved Standard Technical Specification, ITS)，在演進過程中，依照 10 CFR 50.36(c)(2)(ii)的準則，將與準則不符合的部分，另外編入運轉技術手冊(Technical Requirement Manual, TRM)，運轉技術手冊的部分不再屬於運轉技術規範，也因此從通報中與運轉技術規範相關的條文排除。講師也說明美國是由核電廠自行決定是否要更改為較新格式的運轉技術規範，而核電廠會依經濟效益考量決定。

介紹上述美國運轉技術規範的法源依據及演進後，講師再說明運轉技術規範中定義及邏輯符號的使用方式。

在機組運轉限制條件不符合時的行動完成期限的部分，有不同串的同設備接續故障時，在滿足一定條件下可以延長 24 小時的規定。講師有特別說明該內容所指的接續故障要屬於機組運轉限制條件中的同一狀況(Condition)，如果是不同狀況並不適用。

除此之外，要特別注意 3.0 章節中機組運轉限制條件與偵測試驗要求之間的關聯性及同時適用的情形。而從一個機組運轉限制條件導引到另一個機

組運轉限制條件的複雜案例，可以依時間軸畫圖，以幫助釐清優先性較高的機組運轉限制條件之要求。講師也說明有註記(Note)的段落，最好從註記開始讀，因為實際內容可能會因為註記而有所不同。

因為教材使用的四迴路反應器與本已熟悉之我國核三廠的三迴路反應器系統仍有設計上的差異，故教材中所使用的運轉技術規範與核三廠的運轉技術規範也有些許內容不同，但於課程中確認教材中所使用的運轉技術規範的內容，即可正確理解課程講解之內容。講師也說明此部分課程重點是瞭解從運轉技術規範中找到正確的規定，以及運轉技術規範規定的解讀及闡釋方式。

本次的課程也包括風險告知運轉技術規範(Risk Informed Technical Specification, RITS)，RITS 是將風險的機率概念導入運轉技術規範中，採用風險概念之安全度評估(Probabilistic Risk Assessment, PRA)結果導入，可以依設備狀況改變分析條件，並能考慮更多設備失效的機率及嚴重性的問題，也能考慮廠外事件的機率及影響。

在美國的業者改採 RITS，須依據美國 NRC 認可的業界 PRA 標準及準則，並經過同行審查後，才能向 NRC 申請提出執照修改。

關於 RITS 與法規要求的符合性，講師說明由於用來分類需納入機組運轉限制條件設備的準則採定論式，並沒有討論風險概念的空間，但在機組運轉限制條件不符合的後果可以採用風險概念的方式來說明。

目前已實行的 RITS 相關應用，可以從在 NRC 網站公布的各核電廠執照文件中取得，而講師也整理相關資訊，個案說明如下。

- (1) 機組運轉限制條件 3.0.4、偵測試驗要求 3.0.4 的運轉模式(MODE)：可使用風險評估及風險管理解除運轉模式轉換的限制，但相關規定要求在壓力槽低溫過壓防護、高壓注水、輔助飼水或柴油機等相關的設備不可用的情況，並不適用風險告知的放寬方式。

- (2) 將特定機組運轉限制條件中，進入 MODE 5 的行動要求，以進入 MODE 4 取代：可使用風險評估及風險管理確認機組維持在 MODE 4 的適切性，但同時也有但書，並不能因行動只要求進入 MODE 4，而引用機組運轉限制條件 3.0.4 在機組運轉限制條件的狀態下進入 MODE 4。
- (3) 在偵測試驗未於規定期限執行的情況：採用風險評估及風險管理，將偵測試驗要求 3.0.3 之補做期限延長至超過 24 小時。
- (4) 新增機組運轉限制條件 3.0.8、3.0.9：RITS 另外也將避震器及屏障，包括門、牆壁等，但不包含消防及通風相關之設備屏障，納入機組運轉限制條件的通則中(分別為機組運轉限制條件 3.0.8、3.0.9)，允許採用風險評估，於經過一定時間後才進入所支援或保護系統的機組運轉限制條件。
- (5) 行動完成時間：允許採用風險告知完成時間(Risk Informed Completion Time, RICT)並列表，與原行動完成時間(Required Action Completion Time, RACT)要求同時列入運轉技術規範並擇一採用，但仍不得超過 30 天，且針對失去安全功能的情況(例如兩串都不可用的 Condition)不允許延長。受到 PRA 模式分析能力之限制，通常只有運轉模式 1、2 可適用。此外，在 RICT 使用期間，若有將造成機組組態變動之計畫性工作，需先更新 RICT；若機組組態發生非預期變動，要在 RACT 及 12 小時兩者中較短者的期限內更新 RICT，且該不可用設備之狀態評估若無法在 RACT 內完成，便需將共因失效機率列入分析或者是採用風險管理措施(Risk Management Action)。而在部分 PRA 模型中，可將風險管理措施的影響也納入分析。運轉技術規範的行政管理章節須成立相關的管理方案，並定期檢視績效。此外使用 RICT 的期間，必須計算累積風險。NRC 將上述相關事項納入維護風險管理視察的範圍。

(6) 偵測試驗週期：採用風險告知決定週期並列表，並同時適用偵測試驗要求 3.0.2、3.0.3 的 25%緩衝時間及未執行時的規定，但以其他方案管理的偵測試驗或者是有特殊執行時機的偵測試驗不適用，上述做法要納入運轉技術規範的行政管理章節並有相關的管理方案。

(7) 注意事項：

(A) 使用時需注意以上所述的幾種應用方式除了放寬部分規定外，也同時必須注意有需包含的措施或例外等。

(B) 目前美國 NRC 並未同意在機組運轉限制條件 3.0.3 的行動時間納入風險告知的觀念。

(C) 從運轉技術規範移除無風險顯著性系統的應用，因需要修改法規，目前並無相關應用之個案。

蒸汽產生器破管事故

蒸汽產生器破管事故(Steam Generator Tube Rupture, SGTR)會產生一旁通圍阻體之路徑，並需要由運轉員的操作來救援事故後果。

課程說明 SGTR 發生時，於一次側及二次側能觀察到的徵兆、事故時的現象、運轉員可採取的行動等。另也說明與喪失外電同時發生時的處理方式。對於 SGTR，也須關注正常運轉期間的預防作為，例如水化學管理、管束檢測等。我國核三廠對於蒸汽產生器破管事故，已於 FSAR 分析，並已有程序書及人員訓練。

預期暫態未急停

預期暫態未急停(Anticipated Transient Without Scram, ATWS)是指於暫態發生時，機組相關參數已達停機設定點，但控制棒因某些原因而未能將反應器急停的情形。

最嚴峻的情況為二次側失去飼水，但反應器未急停。美國 NRC 對於此種

情況，制定法規要求壓水式反應器機組都要安裝獨立於原反應器保護系統的線路，引動汽機跳脫以及起動輔助飼水系統，該系統稱為預期暫態未急停減緩系統致動線路(ATWS Mitigation System Actuation Circuitry, AMSAC)。我國核三廠也已於運轉初期安裝 AMSAC。

電廠全黑

課程討論電廠全黑的定義、對電廠造成的威脅、美國 NRC 對於此議題的相關法規要求，以及電廠全黑時運轉員執行的策略等。

電廠全黑時因應策略受限，最重要的是及時恢復電力，可以修復原來的設備或者是使用移動式設備，同時也嘗試使用不需電力的設備移除一、二次側熱量等其他策略。

電廠全黑時，其中一個威脅是喪失反應器冷卻水泵軸封注水及冷卻，軸封因而受損所造成的一次側冷卻水流失。美國核電廠在日本福島 311 核災之後已陸續於 RCP 軸封安裝因應此種狀況的元件，故於電廠全黑導致軸封冷卻水流失議題所受威脅已較過往降低，我國核三廠也已於福島事故後更換此種元件。

管路未滿水

管路未滿水是指於安全系統欲起動時，若管路未滿水，有空氣或蒸汽存在管路中，便可能發生水槌或氣鎖而無法發揮系統原設計之功能，甚至可能毀壞設備。

講師針對氣體及蒸汽可能的來源，業界的案例或可能的失效形式，以及如何預防等內容加以說明，常見氣體來源包括蓄壓槽氮氣、止回閥洩漏、不凝結氣體、逸氣不完全、水位指示失效等等。相關案例則是引用 NRC GL 2008-01 文件。我國核三廠也已建立相關因應措施之程序書。

暫態分析

暫態分析包括暫態的產生及發展，以及控制系統、保護系統如何作用。核電廠，包括核三廠，皆已建立程序書處理各種暫態，本課程主要以運轉人員未介入時的暫態演變為主，瞭解控制系統及保護系統如何發揮功能，以及機組如何透過控制系統及保護系統達到穩定的狀態。

課程討論暫態分析的原則，包括反應器冷卻水系統溫度變化、功率變化、調壓槽壓力變化、控制棒組動作、充水流量、蒸汽產生器水位、蒸汽流量、蒸汽排放系統控制、飼水流量等九項內容，分別說明如下。

第一項為反應器冷卻水系統(Reactor Coolant System, RCS)的溫度變化表示一、二次側的功率不同，這是能量守恆的必然結果。講師也澄清一般認為壓水式反應器是一次側功率跟隨著二次側功率而變化；但在調整二次側功率時，控制棒便會自動調整而影響一次側的功率，此現象是建構在控制棒控制系統的運作上。以二次側功率增加為例，較高的二次側功率對應的 RCS 程式溫度也較高，但要使 RCS 溫度升高，一次側功率必須大於二次側功率，故一次側功率並非僅是跟隨二次側功率，實際上會因控制棒控制系統的運作而一度領先於二次側功率。

此外關於 RCS 溫度，也需注意急遽變化後，會影響中子逃逸率，使得功率偵檢器數值失真，此種情況，使用 RCS 熱端與冷端溫度差可能會是較好的選擇，因為在蒸汽流量與一、二次側功率都穩定時，冷熱端溫度差正比於移除的熱量，也因此正比於一次側功率。

第二項為在暫態時要注意功率的變化，功率的變化與反應度有關，常見影響反應度的參數包括 RCS 溫度、燃料溫度、控制棒位等，而由於暫態分析的時間框架較短，氙毒一般不在考慮範圍中。

第三項為調壓槽的壓力變化，與反應爐冷卻水存量進出調壓槽有關，換言之，與 RCS 溫度造成的膨脹以及調壓槽水位有關，如果趨勢不同時，便需

注意是否有其他控制或安全系統動作等因素作用而產生與 RCS 溫度不同的趨勢，例如調壓槽噴灑或者是動力釋壓閥、安全閥動作。而調壓槽水位則要注意程式水位在 RCS 平均溫度對應到 100%功率時便達到上限，之後溫度再上升時，程式水位不會再上升。

第四項為控制棒組的動作，除了與 RCS 溫度及參考溫度的差異有關外，也要注意功率不匹配的影響，而上述兩個來源有時候作用方向會相反。

第五項為充水流量依調壓槽水位調整，不過充水流量變化除了可能與調壓槽水位有關之外，由於充水泵為離心泵，在 RCS 壓力變化時也會受影響，此外充水流量變化也可能與安全注水訊號動作的第二台充水泵起動及充水管路隔離有關。而為了避免引水閃化，充水流量控制閥會有最小流量的限制，流量降到 0 時表示有訊號將充水隔離。

第六項為要注意蒸汽產生器水位指示於壓力變化時的膨脹或收縮現象，雖然與實際的水位不同，在寬幅水位計中較不易觀察這現象，但仍會在窄幅水位計觀察到，並由於系統的控制及保護功能使用窄幅水位計做為訊號源而造成影響。且不只是汽機負載變動造成的壓力變化，包括主蒸汽隔離閥、蒸汽排放系統、動力釋壓閥、安全閥等開關也會造成壓力變化。

第七項為蒸汽流量會與汽機負載、動力釋壓閥、安全閥、蒸汽排放系統或蒸汽管路破管有關，此外由於蒸汽流量使用蒸汽壓力修正，故蒸汽壓力於暫態變化較大時，要注意蒸汽壓力對蒸汽流量指示造成的影響。而由於蒸汽產生器中的水為飽和狀態，蒸汽壓力通常為該溫度的飽和壓力。

第八項為蒸汽排放系統之控制；包括允許開啟之邏輯控制及決定開度之需求訊號，可以從實際的蒸汽流量變化確認蒸汽排放閥是否有開啟。在蒸汽排放系統需求訊號高，但尚未符合開啟邏輯的狀況下，若忽然符合開啟邏輯，蒸汽排放閥全數開啟，有可能造成蒸汽產生器水位膨脹，或者是蒸汽流量變化大而引動主蒸汽隔離訊號之情況。蒸汽排放系統的作用僅限制 RCS 平均溫

度上升，若要讓 RCS 平均溫度回到程式溫度，仍需依賴控制棒系統作用。

第九項為飼水流量使用水位、蒸汽流量等參數控制，同時也將飼水流量回饋至控制系統。在暫態後短時間內為流量差影響較大，但隨著暫態經過較長時間後，水位誤差會隨時間累積而成為主要的控制參數。

暫態分析過程中要注意各參數之趨勢轉折點，趨勢轉折點通常表示有安全系統或控制系統作用。除了關注每個參數個別的趨勢外，並要注意各參數之間的關聯，才會了解整體發生的變化。

有發生儀器失效的分析則要注意與儀器有關的保護或控制功能，是否有造成設備非預期動作，同時也要注意其他正常的控道數值，以得到正確的趨勢變化。

此外要注意案例初始假設的條件，假設條件不同，後續發生的現象也會不同。

在暫態分析原則之後，針對實際案例做講解，將案例依類型分類為十八類後分述如下。

第一類是二次側功率緩慢上升或下降。這兩個案例是基本的功率變動，並假設控制系統都正常運作，可以熟悉課程的進行方式以及控制系統如何動作、各參數之間的關聯等，雖然簡單，但比想像中有效果。

第二類為手動急停的案例，可以看到反應器停機對於一次側壓力的影響、蒸汽排放系統在停機時如何發揮效果，以及反應器跳脫斷路器打開後與 RCS 平均溫度低設定點產生將飼水隔離的訊號等。這個案例對於之後暫態演進中發生反應器急停的案例的理解都有幫助。

第三類為二次側功率非預期降低 10%或 50%的兩個案例，與緩慢上升下降不同，除控制棒外，還可能需要使用蒸汽排放系統。控制棒能應對的功率突降範圍以及蒸汽排放系統能應對的功率突降範圍不同。

第四類一樣是假設二次側功率非預期降低，但假設發生不同的控制系統無法發揮功能，分別為控制棒自動動作但蒸汽排放系統無法使用、控制棒置於手動無法自動動作但蒸汽排放系統可以使用、兩者都不能使用等。控制棒控制系統對於控制 RCS 平均溫度的反應較慢，但蒸汽排放系統無法使 RCS 平均溫度接近程式溫度，兩個系統的功能是互補的，以此再回去檢視這幾個案例的差別，就能更確切知道兩個系統的功能。

第五類是控制棒掉棒，暫態發展比較單純，而因為假設掉棒的位置並非正中央，故對於不同象限會有不同的影響，透過這個案例可以了解不同象限有不同狀況的情形。

第六類為控制棒故障抽出的暫態，分成發生在 50%功率及尚在中程階中子偵檢器範圍的案例。這兩個案例很像，但由於中程階中子偵檢器的案例尚未達到加熱起始點，可以發現兩個案例中因 T_{avg} 上升而產生的負反應度開始作用的時間不同。此外要注意中程階中子偵檢器範圍的案例，因為其反應器的保護設計邏輯為 10%功率以上時汽機仍處於跳脫狀態時會將反應器急停，才會於 10%功率時發生急停。

第七類為控制棒插入的暫態，分為三個案例，分別為假設 RCS 冷端或熱端熱電偶故障偏高，以及功率階（Power Range）中子偵檢器故障偏高的情形。這三個案例與掉棒一樣，暫態中一次側功率小於二次側，不過規模更大，所以會發生不一樣的現象。另外因為教材所使用的反應器的控制棒控制邏輯使用各控道中的高值作為訊號源，故單個訊號來源發生異常便造成暫態。

第八類是假設蒸汽排放系統開啟的邏輯未被復歸的情況下，控制器故障而輸出 100%的需求。這個案例可以觀察到蒸汽排放系統所有的閥同時開啟時的暫態可能引動其他安全系統，包括主蒸氣隔離信號與安全注水信號等，對於其他案例中蒸汽排放系統開啟前後的暫態可以有更多了解，也能發現在汽機跳脫前後，蒸汽排放系統的控制系統有差異等。

第九類為汽機衝擊室的壓力控道故障偏高，有兩個案例，教材中所使用的反應器設計中，兩個控道分別使用在不同的控制功能，故這兩個案例顯示類似但不同的暫態，從這兩個暫態可以理解設計上將控制功能分至兩個控道控制時並不是隨便分配的。

第十類為調壓槽水位或壓力控道失效，有三個案例。調壓槽水位跟調壓槽壓力異常皆可能引動反應器急停，從這三個案例可以了解調壓槽參數對於反應器穩定運轉的重要性。這三個案例因為教材所使用的調壓槽控制平時便需選用數個水位或壓力控道之中的各其中一個控道作為主要訊號源，故單個訊號來源發生異常便造成暫態。

第十一類為蒸汽產生器的水位或流量控制，有四個案例。講師在上課時用大象與人的比喻說明水位與流量在蒸汽產生器水位控制上的差異，水位在控制邏輯中的角色就像平時在睡覺的大象，平時對於水位控制的影響較小，主要皆由流量主宰，不過當水位偏離設定點過久，就像醒來的大象，會主宰水位控制，此時流量的影響就像人拉不動大象一樣，生動的比喻令人印象深刻。而蒸汽產生器水位控制異常的案例，假設故障發生在選出中值的元件，是因為若只假設單一水位控道失效，而另外兩個水位控道仍正常的話，中值並不會產生顯著變化。

第十二類為主飼水泵跳脫，可以觀察汽機設定值回退，以及蒸汽產生器水位控制系統在長時間偏離設定點後的控制問題。此種暫態需要運轉員確認狀況並於穩定後適時介入，才能減小暫態。

第十三類為非滿載時，主蒸汽隔離閥關閉的案例，可以了解靠其他迴路之流量增加能彌補被隔離的迴路移除一次側熱量，以及蒸汽產生器壓力過高時會使飼水流量減少。

第十四類為 RCP 跳脫的案例。此暫態可以了解失去動力的迴路會產生逆向的水流，故正常的迴路的流量會增加，而由於 RCP 流量計的讀數缺乏方向

性，故逆向的水流於流量計產生的數值仍為正值。

第十五類為主蒸汽管破管(Main Steam Line Break, MSLB)，分為四個案例，分別假設蒸汽產生器安全閥誤開啟、於中程階中子偵檢器區間在圍阻體內破管且失去外電、全功率運轉在圍阻體內破管、於中程階中子偵檢器區間在主蒸汽隔離閥下游破管等。這些案例可以看到不同破管大小、不同破管位置、不同功率階段的不同暫態。MSLB 會造成一次側冷卻而產生正反應度，要靠主蒸汽隔離閥隔離不完整的蒸汽產生器，以避免過度冷卻，如果破管是發生在主蒸汽隔離閥上游，則需要運轉員隔離該蒸汽產生器的輔助飼水。由於 MSLB 的特性是造成一次側過度冷卻，MSLB 在燃料週期結束會比燃料週期開始更為嚴峻，因為燃料週期結束時的緩和劑溫度係數為絕對值更大的負值。

第十六類為蒸汽產生器破管(SGTR)，由於此案例要仰賴運轉員的迅速處理才能減緩輻射物質外釋，暫態部分只有就保護裝置自動動作的部分講解，並僅講解到一次側壓力及水位穩定而已，同時有另一堂課程說明運轉員的處理方式，包括要降溫降壓避免一次側水繼續洩漏至二次側，以及二次側被污染的水的處理方式的優缺點。

第十七類為爐心喪失冷卻水事故(Loss of Coolant Accident, LOCA)的案例，是假設在冷端破管，冷端破管會使該迴路的安全注水迅速從破口流出，因為安全注水是從冷端注入 RCS。大破口 LOCA 的暫態達到穩定的必要條件，是要將一次側降壓，因一次側的壓力愈大，安全注水流量越小，而從破口流出的流量卻越大，要待壓力下降，兩流量取得平衡後，一次側水位才能穩定。課程並說明爐心上方在暫態過程中產生氣體並累積後，於水位一度低於破口時，便能藉由該破口排出氣體並降壓。雖然基本的處理在過去就有認識，不過課程又更深入說明背後的理論。

第十八類為預期暫態未急停(ATWS)的暫態。ATWS 是控制棒異常而無法

依設計於設計時間內瞬間插入反應器，僅能靠控制棒控制系統插入(較慢)以及 RCS 平均溫度上升產生負反應度，以降低一次側功率，與 MSLB 相反的，在燃料週期開始會比燃料週期結束更為嚴峻，因為燃料週期開始時的緩和劑溫度係數為絕對值較小的負值。除了在課程詳細講述外，講師並於模擬器分別展示預期暫態未急停緩和系統致動線路發揮作用與沒有發揮作用的暫態，讓大家了解預期暫態未急停緩和系統致動線路為什麼重要，有了更深的印象。

除了以上述方式於確定暫態發生原因後了解後續的演變，訓練過程中，也培養學員看到各種趨勢時，如何正確判讀肇始事件及設備動作是否正常的的能力。或者是看到系統的保護或控制邏輯時，推想事故時可能的演進等。

除了於課堂講解暫態之外，課程也安排學員至模擬器，觀察暫態時各項儀表及指示的實際變化情形，驗證課程所學，講師並適時補充資料，受益良多。

暫態分析的訓練中，會發現因為反應器設計之些許不同，而在暫態演進中產生對應的差異。但更重要的是在訓練過程，可以釐清各參數如何隨其他參數的變化而變動，如何切入問題，如何顧及全面性的變化等，這些思考方式對於管制工作會有極大助益。

事件回顧

這部分課程回顧過去各電廠曾發生的事件，尤其是三哩島、車諾比、福島等重大事件。

上述重大事件後所建立的法規，可能都是過去重大事件經驗的累積。從這些事件可以了解前人的努力，以及前人如何記取教訓。看著這些事件後的現場照片，讓我們對於這份工作產生更深的使命感。

二、參訪 Sequoyah 核電廠

Sequoyah 核電廠簡介

Sequoyah 核電廠位於查塔努加東北方，隸屬 NRC 第二分區辦公室監管。Sequoyah 核電廠由田納西流域管理局(Tennessee Valley Authority, TVA)經營，廠內有兩部機組，皆為西屋公司四迴路壓水式核能機組，分別自 1980、1981 年開始運轉，於 2015 年申請執照更新後，執照已獲核准將分別於 2040、2041 年到期。而 Sequoyah 與核三廠除反應爐冷卻水迴路數量不同外，圍阻體形式為具冰冷凝器之設計，且由於位於內陸，其最終熱沉採用河水提供衰變熱移除。Sequoyah 核電廠主要考慮的自然災害為地震、颱風、龍捲風、水災、降雪、高溫等，災害種類與我國略有差異，故本次特別請 NRC 安排至該廠 FLEX 設備儲存建築(Flex Equipments Storage Building, FESB)現場實地瞭解其配置。

參訪

本次參訪全程由 NRC 資深駐廠視察員 D. Hardage 先生及駐廠視察員 A.Price 先生陪同，並由 TVA 人員陪同至 FSEB 現場參訪。

D. Hardage 先生說明 NRC 於 Sequoyah 共有三位人員，其中有一位仍在訓練中，故實際上為兩位視察員。D.Hardage 先生表示已於 Sequoyah 駐廠六年，即將輪替至其他核電廠。

本次進廠後，先由 TVA 就 FESB 及相關策略做概要性摘要之簡報。TVA 人員也說明若是水災發生，部分移動式設備於救援時需設置的位置將會被淹沒，故規劃時也同時考慮水災發生時替代的設置位置。

請 TVA 人員說明使用移動式設備汲取河水時，針對水中雜物之處理情形。

TVA 人員澄清該廠使用的移動式設備是將沉水泵置入水中，汲取後再加壓供給機組，該沉水泵取水點低於水面，且有濾網，可以減少雜物之影響。

D.Hardage 先生也說明 FESB 的位置與防範龍捲風有關，與機組有足夠的距離，減少龍捲風同時行經兩者的可能性。每年依據 NRC IP 71111.24 要求查證 FLEX 設備。

FESB 現場參訪後，回至 NRC 辦公室與 NRC 人員交流技術議題，包括去年 Sequoyah 異常事件之管制經驗以及河水水位變化等議題。

Sequoyah 於去年曾有一異常事件報告(Licensee Event Report, LER)，為該廠 1 號機有一台 CCP 故障，但無法於運轉技術規範規定之時間內恢復可用，Sequoyah 核電廠申請 Enforcement Discretion，在 NRC 同意下避免停機。我們詢問該案相關的行政規定，並分述如下。

- (1) D. Hardage 先生說明於 NRC Enforcement Manual 之 Appendix F 有相關規定，核電廠申請 Enforcement Discretion 需先跟 NRC 分區辦公室或總處之窗口人員事先溝通，除了要符合手冊中所敘述的用途外，申請文件中所需的資料以及 PRA 計算結果門檻等，皆於手冊中有詳盡規定。
- (2) 核電廠申請時需提出 PRA 計算風險，確認風險小於門檻值。D. Hardage 先生說明 NRC 有另外一套軟體做平行驗證。
- (3) D. Hardage 先生說明雖然 NRC 這次已發行 Notices of Enforcement Discretion(NOED)同意暫時不用變換模式，但 Sequoyah 仍然屬於運轉於運轉技術規範不允許的模式而需依相關規定陳報 LER，NOED 僅有豁免不用變換模式而已，沒有豁免其他相關規定。
- (4) Sequoyah 申請 Enforcement Discretion，提出 PRA 計算結果與門檻比較，但在 NRC 網站資料顯示 Sequoyah 的運轉技術規範採用 RITS 的 RICT，應可以直接使用 RICT。A.Price 先生說明 Sequoyah 當時尚未完成使用

RICT 之運轉技術規範變更，故需要申請 Enforcement Discretion，未來如果再發生類似情況，確實僅需於 RICT 允許時間內完成檢修即可。

Sequoyah 電廠使用河水作為最終熱沉，其河水水位變化的潛在議題，D. Hardage 說明 Sequoyah 所在流域上下游都有水壩，如果上游水壩失效，包括 NRC 駐廠辦公室所在處皆會淹沒，並展示廠區在上游水壩失效後大部分被淹沒的模擬圖說明；如果下游水壩失效，水位便會下降，取水水道自河川底下取水，並有儲存水的能力等，皆有相關分析。而運轉技術規範也規定若最終熱沉水平面過低，需依規定停機等。

於辦公室技術交流告一段落後，D. Hardage 先生便提議陪同到電廠的控制室及汽機廠房等處做現場視察之觀摩。

由於與 D. Hardage 先生討論時有提及冷卻塔相關議題，於控制室參訪時，D. Hardage 先生特別請值班人員說明冷卻塔的運作時機。Sequoyah 的冷卻塔並未持續運轉，只在水溫過高時使用，避免影響環境，當日水溫不需使用冷卻塔，值班人員並說明使用冷卻塔會使發電量減少，故僅有於水溫過高時或者是 TVA 公司有要求時使用。

離開控制室之後，至技術支援中心(Technical Support Center, TSC)及汽機廠房等。TSC 有數個螢幕，D. Hardage 先生說明可與 TVA 公司及 NRC 連線。另 D. Hardage 先生也介紹 NRC 於 TSC 中的辦公室。

汽機廠房部分，則由於 Sequoyah 兩部機組有共用控制室及廠房，於同棟廠房內可以看到兩部機組之汽機設備，也因此於廠房中有張貼特別多的標語提醒工作人員要注意自己所處位置，提醒相關人員在正確廠房操作與工作。

參、心得及建議

本次參加課程為 R504P 「Westinghouse Advanced Technology」，藉由課程

對 PWR 機組有更多認識，不管是機組對於暫態的反應、運轉技術規範的解讀、過往重大事件等都有更多了解，是很不錯的課程，建議可列為未來派員時的候選課程名單之一。

課程中預期暫態未急停及電廠全黑時的單元，美國電廠因應事件發生的可能性而陸續加裝對應此兩種事件的預期暫態未急停減緩系統致動線路及 RCP 軸封元件等。我國核三廠也已安裝上述系統及元件，透過此課程更瞭解其背後發展的歷史進程、理論、系統功能及作用方式等，使我們對於類似設備認識的深度及廣度更為增加。

參加課程同時也觀察課程的進行方式，本次 R504P 課程常常有不止一名講師在教室，會互相補充內容，我們也藉由他們的意見交換，獲得更多資訊。在臺灣時的訓練雖然不常於一堂課安排超過一位講師，但都會有資深的主管或同仁願意分享寶貴經驗，有異曲同工之妙。

本次核電廠參訪為 Sequoyah 核電廠，了解與核三廠的設備差異，以及天災的防範方式等，並就該電廠去年實際運轉及管制經驗討論，更了解 NRC 的管制作為、PRA 及 RITS 的應用等，收穫良多，建議未來若有機會，除課程外也儘可能安排電廠參訪。

在行程安排、參加課程、參訪電廠等，都有很多機會與美國的專業人員接觸交流，對我們是非常寶貴的經驗，可以了解他們做事的方式，也增進我們的視野，建議持續派員赴 NRC 研習核能電廠稽查管制技術及參訪。

附件 1 照片



與 NRC TTC R504P 課程講師群合影



與 Sequoyah 駐廠視察員及電廠員工合影