

出國報告（出國類別：實習）

## 核一廠除役研習計畫

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：徐儒忠 維護品管課長

程維慶 主辦反應器維護專員

劉修源 週期能量規劃專員

林佳瑩 管路／結構維護專員

葉久萱 除役計畫管理專員

派赴國家：美國

出國期間：102 年 12 月 01 日至

102 年 12 月 23 日

報告日期：103 年 2 月 17 日

QP-08-00 F04

# 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：核一廠除役研習計畫

頁數 51 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

徐儒忠/台灣電力公司/核一廠/維護品管課長/ (02)26383501-3453

程維慶/台灣電力公司/核一廠/主辦反應器維護專員 / (02) 26383501-3298

劉修源/台灣電力公司/核發處/週期能量規劃專員/ (02)23667088

林佳瑩/台灣電力公司/核安處/管路/結構維護專員/ (02)23667193

葉久萱/台灣電力公司/核後端處/除役計畫管理專員 / (02)23657210-2243

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：102 年 12 月 01 日至 102 年 12 月 23 日 出國地區：美國

報告日期：103 年 2 月 17 日

分類號/目

關鍵詞：核能電廠除役

內容摘要：

本公司遵照政府於 100 年 11 月 3 日所宣佈之新能源政策，既有核電廠將不再延役，因此核一廠 1 號機將於 107 年停止運轉，另依「核子反應器設施管制法」第 23 條規定，本公司必須於 104 年底前陳報原能會除役計畫書。考量本公司將首次面臨核電廠除役工作，須積極汲取國外研究機構之相關報告及除役中核電廠之實際經驗，以進行除役工作之整體規劃。本次出國計畫派員赴國外接受核電廠除役相關課程實習，並安排前往除役中核電廠進行觀摩，蒐集最新核電廠除役資訊。本報告僅就課程內容(包含除役排程、廠址特性調查、現場除役作業觀摩、廢棄物管理等)摘要說明。

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

## 目錄

壹、出國目的.....	1
貳、出國過程.....	2
參、實習課程內容摘要.....	4
肆、心得及建議事項.....	47
附錄.....	a

## 圖目錄

圖 1 土壤污染的劑量評估模式 (RESRAD) 廠址釋出供一般使用 (土地無使用限制)	8
圖 2 土壤污染的劑量評估模式 (RESRAD) 廠址釋出供工業使用 (Rancho Seco 核電廠經驗)	9
圖 3 單一監測井	10
圖 4 不同水位監測井	10
圖 5 水下特性調查船	11
圖 6 水下岩石除污	12
圖 7 水下污染淤泥剷除作業	12
圖 8 排水渠道附近土地調查	12
圖 9 原廠址開發為太陽能電廠	13
圖 10 原廠址開發為汽電共生電廠	14
圖 11 內部組件切割方式示意圖	17
圖 12 磨料水刀	17
圖 13 金屬支解加工	18
圖 14 HBPP 鳥瞰圖	24
圖 15 無污染管制區告示牌	26
圖 16 往復式引擎發電機	26
圖 17 個人護具示意圖	27
圖 18 燃料填換廠房	28
圖 19 水處理系統	28
圖 20 Typical Waste Liners	35
圖 21 Typical High Dose Rate Shipping Cask	35
圖 22 Inter-Modal containers	35
圖 23 B-25 boxes	36
圖 24 Sea Land Containers	36
圖 25 改良後的 CRB 壓縮設備	38

## 表目錄

表 1 Connecticut Yankee Plant 及 Rancho Seco Plant 比較.....	6
表 2 Rancho Seco 核電廠 DCGLs 計算結果.....	14
表 3 美國電廠已完成反應器內部組件切割之相關資訊整理 .....	18
表 4 美國正在執行中的反應爐內部組件切割計畫 .....	19
表 5 已完成反應器本體切割之相關資訊整理 .....	21
表 6 全系統化學除污應用在 BWR 電廠實例 .....	45
表 7 次系統及組件除污實例 .....	45
表 8 BWR 電廠進行全系統化學除污後結果比較.....	45

## 壹、出國目的

本公司遵照政府於 100 年 11 月 3 日所宣佈之新能源政策，既有核能電廠將不再延役，因此核一廠 1 號機將於 107 年停止運轉，另依「核子反應器設施管制法」第 23 條規定，本公司必須於 104 年底前陳報原能會除役計畫書。考量本公司將首次面臨核能電廠除役工作，須積極汲取國外研究機構之相關報告及除役中核能電廠之實際經驗，以進行除役工作之整體規劃，有必要派員赴國外接受核能電廠除役相關課程實習，蒐集最新核能電廠除役資訊，以期培養本公司核能電廠除役種子教師及提升本公司除役相關專業能力；本次行程並安排前往除役中核能電廠進行觀摩，可了解電廠除役實務相關經驗，俾供後續公司進行除役規劃作業參考。

藉由派員前往實習及觀摩，以汲取國際核能電廠除役之規劃及執行相關經驗，強化本公司即將展開之除役管理與技術能力，以利本公司核能電廠除役工作之規劃暨推動。

## 貳、出國過程

### 一、至 EPRI Palo Alto Office 實習(課表如附件 1)：

本次實習計畫於 12/2~12/6 至 Electric Power Research Institute(EPRI) 的 Palo Alto Office 進行實習，由 EPRI 人員 Karen Kim 小姐講授課程如下：

- (一)Decommissioning Sequencing and Schedule
- (二)Site Release Process Overview
- (三)Land Area Characterization Experiences in the U.S.
- (四)Characterization of Groundwater at Nuclear Power Plants
- (五)Characterization of Underwater Areas
- (六)Characterization Experiences for Buildings and Systems in the U.S.
- (七)Experience with Reactor Internals Segmentation
- (八)Experiences with Reactor Vessel Segmentation

並於講授課程中或課程結束後，與 Karen Kim 小姐進行討論，藉此了解除役排程、廠址特性調查(地下水、建築物)、反應器壓力容器及內部組件切割等相關技術及議題。

### 二、至 Humboldt Bay 電廠觀摩：

本次實習計畫於 12/9~12/12 至 Humboldt Bay 電廠觀摩，由 EPRI 人員 Richard McGrath 先生陪同進行現場除役作業觀摩並講授課程如下：

- (一)Radiation Protection During Decommissioning in the United States
- (二)Data Management During Decommissioning
- (三)Management and Other Key Aspects of Decommissioning in the United States

現場除役作業觀摩結束後，與 Richard McGrath 先生進行討論，藉此了解除役現場作業的情況。

### 三、至 EPRI Charlotte Office 實習(課表如附件 2)：

本次實習計畫於 12/16~12/20 至 EPRI 的 Charlotte Office 進行實習，由 EPRI 人員 Richard Reid 先生講授課程如下：

- (一) Determination of Functioning System Needs during Decommissioning
- (二) Spent Fuel Pool Cooling and Isolation
- (三) Experience with Radioactive Waste Management for Decommissioning
- (四) High Activity Metal Volume Reduction Research
- (五) High Activity Spent Resin Volume Reduction
- (六) Management of Low Activity Solid Waste
- (七) Hazardous Waste Management Experiences in the United States
- (八) Volume Reduction Through Recycling of Metals
- (九) Systems Needed for Waste Water Management During Decommissioning
- (十) Contamination Control During Decommissioning
- (十一) Chemical Decontamination for Decommissioning: Overview and Experience Summary

並於講授課程中或課程結束後，與 Richard Reid 先生進行討論，藉此了解除役中須運轉及停止運轉的系統轉換及隔離、放射性廢棄物處理、水處理、用過核子燃料池的隔離冷卻等相關技術及議題。

## 參、實習課程內容摘要

### 一、至 EPRI Palo Alto Office 實習：

#### (一)Decommissioning Sequencing and Schedule

本項課程中，主要說明核能電廠的除役策略、除役作業的各個主要階段、除役作業排程內容及美國 Connecticut Yankee Plant 及 Rancho Seco Plant 的除役作業個案。

核能電廠的除役方法有三種：

- 1.立即拆除(DECOM)：在電廠永久停止運轉後，短期內將受放射性污染的設備物、結構物、設施及土壤予以除污與拆移，使廠址殘留的放射性低於法規標準，而可終止電廠執照。
- 2.延遲拆除(SAFSTOR)：將電廠長期安全貯存後，再進行除污與拆除工作，準備期約需二年，貯存期約需數十年。貯存期間，電廠設施大多原封不動，但核燃料由反應器移出，放射性液體由相關系統及設備處理與排放，長期貯存後，經放射性的衰減作用，將大量減少污染物及放射性物質的體積。
- 3.現場處置(ENTOMB)：將放射性結構物、系統以及設備物封存於耐久性的圍阻屏障內（如混凝土屏障），並對屏障結構做適當的維護及監測，直到終止執照為止。

除役後廠址再利用規劃影響除役作業規劃甚鉅。廠址再利用規劃需要考慮以下幾點：

- 1.廠址所有權係經營者擁有或將進行釋出?
- 2.原有廠房將會拆除或是保留?
- 3.廠址再利用規劃係屬：
  - (1)無限制使用:a.可供工業用  
b.可供住宅用  
c.可供住宅及農地用
  - (2)限制使用。

不同的選擇對應除役策略、劑量外釋限值及預算規劃亦有所不同。

在美國，聯邦政府負責用過核子燃料的處置，在最終處置場尚未決定前，用過核子燃料將置於獨立用過核子燃料乾式貯存設施(ISFSI, Independent Spent Fuel Storage Installation)內。

除役作業的各個主要階段分成：

- 除役前置作業準備階段
- 第一階段 - 將用過核子燃料移至乾式貯存設施
- 第二階段 - 高污染系統移除
- 第三階段 - 其餘系統拆除
- 第四階段 - 建築物除污
- 第五階段 - 最後復原及廠址釋出

依據上述主要階段，再細分各項作業規劃期程。

在前置作業準備階段，著重的是修訂大量規範及工程文件等，其中有安全分析報告的改版、系統安全等級的變更、運轉規範(或稱運轉技術規範)與程序書的修訂，以符合當時燃料退出的情況。並且研擬除役計畫書，內容主要包含除役作業對工作人員及公眾造成輻射劑量評估及廢棄物產量預估、使用何種拆除工法及除污方式、廠址外釋標準及最終輻射偵檢方式。

第一階段：考量安全有關係統的電源切換，執行化學除污，主要計劃(例如：反應器的移除)的規劃及發包作業。

第二階段：將主要組件拆除並移至最終處置場，以及用過核子燃料池洩水及除污。

第三階段：將其餘系統移除，以利建築物除污作業的執行。

第四階段：在廢棄物的營運及管理方面，需針對污染及無污染物進行分類，可降低作業成本。

第五階段：結構物的拆除(依據規劃結果)，進行土壤及地下水的復育，並完成最終廠址調查，及執照終止。

除役作業是階段性的工作，將所有必須完成的主要工作項目列表後，依據工作知識及經驗排定順序，逐步執行，而良好的策略規劃將有利於除役作業的執行。

課程中分別對美國 Connecticut Yankee Plant 及 Rancho Seco Plant 的背景、除役作業時程、主要成本花費、各項除役作業工法等提出相關說明，並比較兩個電廠不同處如表 1 所示。

表 1 Connecticut Yankee Plant 及 Rancho Seco Plant 比較

	Connecticut Yankee(簡稱 CY)	Rancho Seco	以 CY 與 Rancho Seco 進行比較，差異點如下
廠址未來使用方式	供住宅及農地用	供工業用	較高的廠釋限值，可降低除役預算及廢棄物產量
建築物的外釋值調查	無	有	調查費用較高，廢棄物產量較少
建物及土壤的放射性污染情形	高污染(含 $\alpha$ 粒子)	低污染	除污費用較低，廢棄物產量較少
反應器內部組件的放射性活度	非常高	1/10 of CY	內部組件切割較容易，花費較低
反應器切割	無	有	降低廢棄物預算
地下水質污染	有	無	無廢棄物產生，調查費用低
廠址最終調查設備	一般手持	可攜式 $\gamma$ 偵檢器	節省時間及人力
除役作業總花費	約 85 億美元	約 42 億美元	

## (二)Site Release Process Overview

本項課程，說明廠址調查及外釋的過程，利用 MARSSIM (Multi-Agency Radiation and Site Investigation Manual)的指引針對廠址調查做有效規劃。

MARSSIM 是一個針對廠址釋出所需執行全範圍性的輻射特性調查的指引，MARSSIM 評估程序是一個可疊代進行的過程，依序為：廠址歷史評估、範圍偵檢、特性偵檢、改善措施輔助偵檢、最終狀態偵檢。以所收集到的資訊為基礎來訂定下一個執行調查的內容及範圍，最後的結果應是一份詳細報告，內容載有廠址中放射性及非放射性污染物的範圍及特性。並經過管制單位的同意及驗證調查。MARSSIM 用以評估廠址符合外釋規範之要求。

美國核能管制委員會(NRC, Nuclear Regulatory Commission。以下簡稱核管會或 NRC)訂定，核能電廠除役後之廠址，其輻射劑量應符合下列標準：

- 非限制使用(unrestricted release)者，其對一般人造成之年有效劑量不得超過 0.25 毫西弗。

- 限制使用(restricted release)者，年有效劑量不得超過 1 毫西弗。

而美國各州亦會訂定其所要求的規範限制。而因為這些差別，計畫初期儘早和管制單位討論訂定出共同協議決定應遵守的標準與限制是非常重要的。

IAEA 指引與美國核管會針對除役過程中保留建築物的核電廠，允許使用較高的廠址外釋劑量限值。

在歐洲、德國、瑞典及英國等國家所規定的廠址外釋劑量限值則較為嚴格，年有效劑量不得超過 0.01 毫西弗。

廠址外釋劑量限值規定若相對嚴謹，則除役費用及放射性廢棄物產量也會因此而增加。

### (三) Land Area Characterization Experiences in the U.S.

在機組開始除役之前，須對電廠所在廠址進行土地輻射污染狀況調查（廠房內外均須評估），依美國調查經驗，廠址內、外土地輻射污染來源通常可歸因於下列數點：

1. 廠房外廢液貯存槽因老化等因素發生洩漏（此為最常見的污染來源）
2. 地表下埋設之管路發生洩漏（常見的洩漏來源）
3. 處理及封裝放射性廢棄物時，不慎外洩之放射性粉塵、微粒等（廠址內常見的污染來源）
4. 從輻射管制區逸散出之放射性物質
5. 鄰近電廠排水口之海底沉積物發現有輕微輻射污染
6. 外釋之放射性核種氣體
7. 廠內廢液處理系統發生洩漏污染（如洗衣房）
8. 廠內曾經就地掩埋之放射性廢棄物
9. 破管造成鄰近區域土壤污染
10. 放射性物質運輸路徑上及廢棄物堆疊區

一般而言，愈詳細的土地調查資料對電廠的除役工作愈有助益；在美國，多數電廠在除役工作開始前均歷經長時間的停機過程，導致除役工作開始後，大部份瞭解電廠過去歷史及運轉狀況的員工均已退休，使得土地特性調查工作不夠完善，使得電廠除役工作常有「驚訝」發現，耽擱除役計畫進度。

在完成廠址土地特性調查後，便需要決定未來土地的再利用模式，美國共有兩種土地外釋方案供設施經營者選擇：

1. **供住宅及農地使用**：對居住在該區域上的居民而言：其接受的年平均劑量須符合法規要求，通常以土壤污染的劑量評估模式 (RESRAD) 計算居民之年平均曝露劑量，而該模式可將以下路徑造成之輻射劑量納入計算：
  - (1) 直接接受來自土壤的輻射劑量
  - (2) 吸入放射性核種
  - (3) 居民因攝入污染區內食物所產生的輻射曝露劑量：
    - 污染區內種植的作物（可能使用污染水灌溉）
    - 肉類（受污染的飼料及牲畜之飲用水）
    - 受污染的井水或池塘等人類飲用水
    - 污染區內捕獲之魚類

略，本圖摘自 EPRI 訓練教材，為避免著作權爭議，故不顯示。

圖 1 土壤污染的劑量評估模式 (RESRAD) 廠址釋出供一般使用 (土地無使用限制)

2. **供工業使用**：此方案之土地並不外釋供民眾居住使用，而是電力公司再將該廠址轉利用，或改設立其它形式電廠為目的。而廠址內工作人員接受的年平均曝露劑量亦須符合法規要求；並以土壤污染的劑量評估模式 (RESRAD) 計算工作人員之年平均曝露劑量，選擇此模式計算之可能輻射劑量來源與上述方案不同，僅需考慮以下路徑：
  - (1) 限制工作人員每年在廠址內之工作時間

- (2) 工作人員接受環境輻射劑量來源可以減少(因工作者不會攝入廠址內種植的植物、肉類、或水生動、植物)
- (3) 為保守起見，Rancho Seco 電廠將地下水可能攝入體內之隱性輻射劑量來源納入計算
- (4) 總曝露劑量佔比小於 10%之放射性核種來源，NRC 允許可忽略該路徑造成之劑量

略，本圖摘自 EPRI 訓練教材，為避免著作權爭議，故不顯示。

圖 2 土壤污染的劑量評估模式 (RESRAD) 廠址釋出供工業使用 (Rancho Seco 核電廠經驗)

#### (四) Characterization of Groundwater at Nuclear Power Plants

對運轉中的核電廠而言，廠址內的地下管路如發生破口，放射性液體將污染鄰近土壤層，甚至有可能向下滲透至地下水層，並經由地下水外釋至廠界外，造成廠外民眾之輻射曝露，故在美國設施經營者必須執行地下水質監測，而其它地區如加拿大、法國等地，亦需執行地下水監測計畫。

對除役中電廠而言，因廠內每天都在進行除役工作，且整個除役過程的時間很長，所以在除役進行中，長期監測地下水是否含放射性物質是很重要的工作，同時可供判斷地下水是否符合外釋標準，如無法滿足法規要求的話，則需進一步淨化或暫貯處理。

在擬定地下水監測計畫以前，設施經營者必須全盤確認廠內是否有可能之放射性物質外洩來源，並須參考核電廠過去的運轉歷史，找出所有曾經發生管路洩漏之事件，因其可能持續外洩放射性物質。

研擬地下水監測計畫需考慮監測井位置及深度是否適當，及其設置目的，以決定典型的清潔土壤及地下水樣本。一般來說，非污染區的地下水樣本，可幫助建立核電廠的輻射背景值，進而得知污染區內地下水污染狀況；並可透過選定合

適深度及位置的監測井，分析已外釋核種資料，並經由其濃度梯度變化，初判可能的洩漏來源，避免放射性核種經由地下水向廠外擴散。

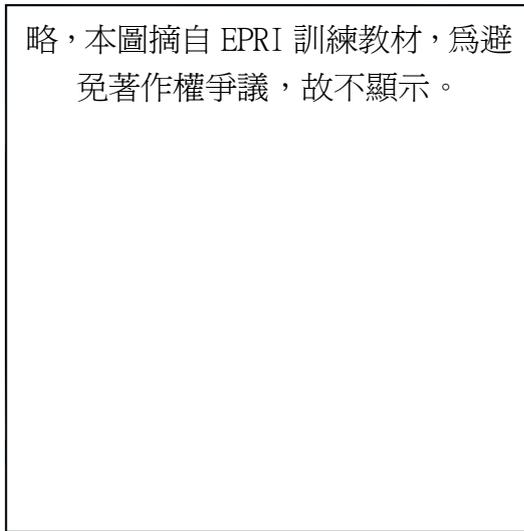


圖 3 單一監測井

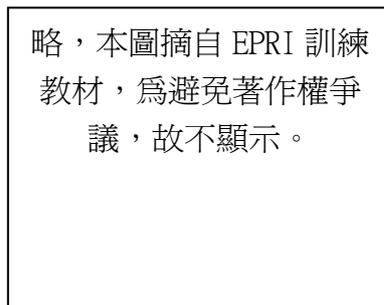


圖 4 不同水位監測井

此外，每個核電廠在建廠前，都會執行廠址的地質探勘，通常這些地質鑽探井亦可作為地下水監測的觀測井。

廠址外釋的地下水特性調查亦使用 RESRAD 程式，計算地下水放射性核種的導出濃度指引水平 (Derived Concentration Guideline Levels, DCGLs, 單位為 Bq/liter)，意謂除污至符合此標準以下即可。當設施經營者決定不同的廠址土地外釋用途後，RESRAD 程式計算地下水所造成的人體輻射曝露路徑亦不同，如 Rancho Seco 採用工業用地標準，供其它形式電廠使用。而在這個方案的規劃中，員工係被禁止使用、飲用地下水，故在進行 RESRAD 程式計算時，地下水造成的輻射曝露可被排除。對比 CY 電廠的廠址外釋方案 (供一般民眾永久居住、耕作)，在使用 RESRAD 程式時，便需將地下水對人體輻射曝露之相關路徑包含在

內，如灌溉植物用水、家畜肉品及牛奶（因使用或飲用受污之地下水）、家用（含飲用）之井水等路徑。

另外，根據 Connecticut Yankee plant 之地下水監測經驗顯示：

1. H-3：流動性佳，容易出現在回填物；母岩上層靠近建物污染處。一旦找到洩漏點並止漏後，其濃度將快速衰減。
2. Sr-90：移動性不佳，且最難除污（remediation）核種，即使找到洩漏點並止漏後，其濃度亦不會有太大變化。
3. Co-60 及 Cs-137：移動性最差，常見於發生洩漏之貯存槽或燃料廠房附近。

#### (五) Characterization of Underwater Area

此部份美國 EPRI 提供了 Big Rock Point、Maine Yankee 及 Connecticut Yankee plant，地下水中沉積物特性調查實例進行講解，並回饋相關經驗與本公司：

1. 如已遭輻射污染，後續清運、整治將為一大挑戰。
2. 在美國，由於民眾抗議及環保法規規定，不允許積水區洩水進行地下水區域特性調查。
3. 已污染之水底沉積物須清運乾淨，惟其體積可能相當龐大。
4. 因乾燥水底沉積物不容易，當移出污染之水底沉積物時，需避免污染其它清潔區。
5. 沉積物通常包含了生物成分（如青苔、貝類），進行處置前應先將所有生物殺死，避免處置過程中釋出放射性氣體。

略，本圖摘自 EPRI 訓練教材，為避免著作權爭議，故不顯示。

圖 5 水下特性調查船

略，本圖摘自 EPRI 訓練教材，為避免著作權爭議，故不顯示。

圖 6 水下岩石除污

略，本圖摘自 EPRI 訓練教材，為避免著作權爭議，故不顯示。

圖 7 水下污染淤泥剷除作業

略，本圖摘自 EPRI 訓練教材，為避免著作權爭議，故不顯示。

圖 8 排水渠道附近土地調查

#### (六) Characterization Experiences for Buildings and Systems in the U.S.

在核電廠除役計畫中，保留廠址內水泥廠房建物，或是採「拆除」策略，在美國均有實例可供參考。通常在除役計畫中，設施經營者會針對水泥建物及其內部埋設的系統設備、管路，進行歷史洩漏或空浮等因素，造成水泥表面滲透污染評估，依美國之調查經驗（水泥建物、電廠系統及設備等），典型常見的建物污染肇因有：

1. 放射性廢棄物處理及包封（所有電廠之共同肇因）
2. 污染區系統發生洩漏，進而污染鄰近區域（所有電廠之共同肇因）
3. 遭中子活化後之水泥結構

4. 連接廠內污水處理系統之管路發生洩漏
5. 放射性廢棄物倉庫或貯存區
6. 維護及製造區
7. 輔助鍋爐廠房區

一般而言，核電廠在除役初期時，廠內水泥建物可保留供辦公室使用，並保守假設員工每年在建物內工作時間，最長不超過 2000 小時（採用最保守的推算：1 年 365 天扣掉放假日，每日工作 8 小時計算）。此外，設施經營者亦可選擇保留廠區內部份水泥建物以減少廢棄水泥塊處置體積，節省成本。

廠房水泥建物拆除過程中產生的廢棄物，可以在妥善包封後送至處置場，但對處置費費用高的國家而言，如德國、台灣，可先將污染嚴重區域的水泥結構進行除污，降低活度，並可考慮回填廠址內低窪之處，或廠房的地下空間等方式節省後端處置成本，惟此方法可能會使環境承受較高的輻射污染。

折衷處理方案：以建物實際使用情況進行評估，在上述兩個方案中，屬於較「不貼近」實際狀況之作法，故 Rancho Seco 核電廠改採取建物「實際使用狀況」（Realistic Renovation Scenario）進行評估，其中包括以下假設：

1. 電力公司依然保有廠址及進入輻射區之控制權。
2. 員工僅允許進入建物內，執行例行維修及檢查（設備均已拆除，僅進行例行的廠房巡視、維護）。
3. 本方案允許較高的導出濃度指引水平（因員工接受來自水泥建物之輻射曝露時間較短，故允許較高的導出濃度指引水平）。

略，本圖摘自 EPRI 訓練教材，為避免著作權爭議，故不顯示。

圖 9 原廠址開發為太陽能電廠

略，本圖摘自 EPRI 訓練教材，為避免著作權爭議，故不顯示。

圖 10 原廠址開發為汽電共生電廠

利用「RESRAD-BUILD」程式內建的 Dose Modeling 模式，計算水泥建物「導出濃度指引水平」限值。程式內建有不同的輻射曝露模式（如長期曝露：居住、員工辦公室使用；或短期曝露：員工僅進入建物內進行例行巡視、維護等工作），及 7 種水泥建物對人體造成輻射曝露之路徑：

1. 直接接受輻射源曝露
2. 接受地板輻射物質的曝露
3. 接受放射性空浮曝露
4. 人體攝入空浮的放射性物質
5. 吸入氫氣及含氫原子的水蒸氣
6. 意外吞食放射性物質
7. 攝入其它放射性區域水泥表面的輻射物質

以 Rancho Seco 核電廠評估結果為例，其使用建物「實際使用狀況」方案之評估結果與過於保守之「保留建物」策略相比，兩者允許之導出濃度指引水平相差數倍，詳細計算結果可參考表 2。

表 2 Rancho Seco 核電廠 DCGLs 計算結果

關鍵的放射性核種	導出濃度指引水平 (DCGLs) 單位: Bq/cm <sup>2</sup>		差異
	建物不拆除策略, 且員工每年在其內工作時間不超過 2,000 小時	建物不拆除策略, 且員工每年在其內工作時間不超過 500 小時 (Rancho Seco 核電廠模式)	
H-3	5.3 E+04	2.0 E+05	4 倍
Co-60	2.5 E+00	6.7 E+00	3 倍
Sr-90	2.0 E+01	3.4 E+02	17 倍

Cs-137	9.3 E+00	3.0 E+01	3 倍
Am-241	5.0 E-01	3.6 E+00	7 倍
Pu-241	3.0 E+01	1.9 E+02	6 倍

相較 Rancho Seco 核電廠的保留建物模式，Maine Yankee、Connecticut Yankee、Yankee Rowe 核電廠則採用利用廠內建物地下空間回填水泥廢棄物模式（Realistic Scenario）。採用本方案的優點有：避免廣泛修復爐內核儀穿越孔所污染的混凝土，及可節省成本及容易掌握除役進度（對 Rancho Seco 核電廠而言，其費時 2 年進行用過核子燃料池內側鋼襯後方混凝土除污）。

確定廠房建物的處置方式後，尚需進一步確認廠房水泥結構受輻射污染的程度，常見的非破壞性檢測方法有：電腦模擬計算污染的深度及程度，或使用  $\gamma$ -ray 偵檢器測量。透過選擇具代表性的取樣點除可以減少樣本數量，亦可降低成本。EPRI 依美國核電廠除役之建物混凝土特性調查經驗建議，下列水泥結構應進行鑽心採樣：

1. 系統管路洩漏處周圍混凝土
2. 無內襯鋼板保護的洩水道及洩（集）水坑
3. 地面裂縫或建物的兩平面接縫處
4. 受中子通量照射區
5. 曾曝露在放射性氣體（如 C-14，H-3）環境下的混凝土表面
6. 選定分析樣本（針對不易檢測出之放射性核種，如 C-14、Sr-90、 $\alpha$  衰變核種）

至於廠內各系統、設備等，則必須滿足「未檢出放射性物質」的標準才可外釋供商業使用。依美國的系統特性調查經驗，通常污染區內的系統組件或結構鋼體，若要透過除污達可外釋標準之成本，均高於「直接處置」方式。對於位於非污染區的系統主體，在除役執照失效前，可由廠內保健物理人員依程序書規定在檢測符合外釋標準後進行外釋。

若以設施經營者的角度，除役計畫中的廠址特性調查是非常重要且關鍵的部份，應落實執行調查。其中建物混凝土特性調查之重點，應著眼在輻射物質滲透混凝土的深度及受污染狀況的分類上，依經驗：

1. 位於高度污染區內之混凝土，可積極修復或完全刨除（取決於何種處置方式的成本較低）。
2. 被中子活化的水泥結構，如圍繞在反應器外側的生物屏蔽，通常需要完全移除。
3. 反應器底核儀的洩水孔亦為高度中子活化區域。
4. 特定設施內側的鋼襯後方（如用過核子燃料池），水泥結構通常污染嚴重，建議採取全部刨除方式（因為除污費用昂貴）。至於水泥結構內埋設的系統管路則需除污至導出濃度指引水平以下。

### **(七) Experience with Reactor Internals Segmentation**

在這個主題中，EPRI 分享了在美國已完成反應器內部組件切割的電廠案例，並就這些案例進行切割策略及切割方法等細節討論。

反應器內部組件因其長時間接受中子照射，屬中子高度活化、放射性強組件，普遍超過處置場的接收標準（超 C 類廢棄物）。據美國經驗，沸水式反應器內部組件的放射性核種活度總合約在 500 億貝克/克或更高（其中約 1 億貝克/克係半衰期超過 30 年之核種，主要來源是鎳-63），表面接觸劑量率約 10 西弗/小時。

目前在美國，A 類（Class A）的放射性廢棄物已有處置場；對 B、C 類的廢棄物而言，美國主要仍是採取廠內貯存策略（德州 Andrews 處置場開始接受一定體積的 B、C 類的廢棄物）。至於超 C 類廢棄物（GTCC，Greater Than Class C），美國不允許放置在地表處置場內，故需比照用過核子燃料的處置方式，暫時貯存在 ISFSI 中，等待進行深層地質處置。

在擬定反應器內部組件切割計畫前，應詳細調查及考慮以下因素：

1. 評估反應器內部組件的活度
2. 確認各種金屬廢棄物可再回收之處理方式
3. 廢棄物包封容器的尺寸
4. 處置場接收標準（最大活度限值，總重限值，輻射劑量限值等）
5. 運輸、交通限制等因素（總重限值，輻射劑量限值等）
6. 放射性廢棄物暫時貯存設施
7. 決定切割尺寸及順序

8. 決定封裝方式
9. 評估及選擇既有的切割技術，視需要開發新的切割方法，並決定哪些內部組件需切割，目前常見切割工具：
  - (1) 磨料水刀 (Abrasive Water Jet)
  - (2) 磨料懸浮水刀 (Water Abrasive Suspension)
  - (3) 機械切割 (Mechanical Cutting)
  - (4) 電漿切割 (Plasma Cutting)

略，本圖摘自 EPRI 訓練教材，為避免著作權爭議，故不顯示。

圖 11 內部組件切割方式示意圖

略，本圖摘自 EPRI 訓練教材，  
為避免著作權爭議，故不顯示。

圖 12 磨料水刀

略，本圖摘自 EPRI 訓練教材，為  
避免著作權爭議，故不顯示。

圖 13 金屬支解加工

反應器內部組件切割是影響核電廠整體除役計畫進度最關鍵的因素，EPRI 提供美國境內反應器內部組件切割資訊及相關經驗回饋整理如表 3 及表 4。

表 3 美國電廠已完成反應器內部組件切割之相關資訊整理

電廠	設計	日期	內部組件切割技術	經驗回饋
略，本圖摘自 EPRI 訓練教材，為避免著作權爭議，故不顯示。 Yankee Rowe	PWR - 167 MWe	1993	電漿電弧技術 (Plasma Arc)	(1) 總費時 10 個月。 (2) 使用電漿切割爐心側板時，恐導致嚴重空浮熔渣污染，並附於內穴內層及設備上，不易清理。
略，本圖摘自 EPRI 訓練教材，為避免著作權爭議，故不顯示。 Connecticut Yankee	PWR - 619 MWe	2000-2002	磨料水刀技術 (Abrasive Water Jet) 金屬支解加工 (Metal Disintegration Machining, MDM)	(1) 總費時 29 個月。 (2) 爐水過濾設備及軟帶容易堵塞，但維持適當流速可以避免此一現象。 (3) 水質清澈有助於降低工作劑量。
略，本圖摘自 EPRI 訓練教材，為避免著作權爭議，故不顯示。 Maine Yankee	PWR - 860 MWe	2001	磨料水刀技術 (Abrasive Water Jet) Hydraulic Milling	(1) 總費時 12 個月。 (2) 在設備移至廠址進行工作前，已進行測試，可有效改善效能。 (3) 切割成較大碎片可以節省時間。

略，本圖摘自 EPRI 訓練教材，為避免著作權爭議，故不顯示。 San Onofre 1	PWR - 410 MWe	2001	磨料水刀技術 (Abrasive Water Jet) 金屬支解加工 (Metal Disintegration Machining, MDM)	(1) 總費時 12 個月。 (2) 非常成功的案例。 (3) 高爐水過濾能力，能有效維持爐穴內水質清澈。 (4) 設備測試，有效改進效能。
略，本圖摘自 EPRI 訓練教材，為避免著作權爭議，故不顯示。 Rancho Seco	PWR - 913 MWe	2005-2006	機械切割 (Mechanical Cutting)	(1) 總費時 6 個月。 (2) 大型的往復鋸無法切割直徑超過 3 公尺的組件。 (3) 直接用其他機械切割方法亦成功。

表 4 美國正在執行中的反應爐內部組件切割計畫

電廠	設計	專案日期	內部組件切割技術
略，本圖摘自 EPRI 訓練教材，為避免著作權爭議，故不顯示。 Humboldt Bay 電廠	◎地理位置：位於加州北方。 ◎除役機組（3 號機）：GE 公司早期 BWR 設計，額定發電量 63 MWe。 ◎運轉時間：1963 to 1976 年。 ◎提昇耐震能力之經濟考量，業主 PG&E 公司於 1985 年決定永久停機。	2008 年起開始除役	(1) 所有內部組件均執行切割。 (2) 使用機械方式切割： 線鋸 Wire Saws 圓鋸 Disc Saws (3) 產生的廢棄物： <b>A 類</b> ：貯存在 EnergySolutions 公司猶他州 Clive 處置場。 <b>B、C 類</b> ：貯存在德州 Andrews 處置場。 <b>超 C 類</b> ：貯存在廠內 ISFSI 中。
略，本圖摘自 EPRI 訓練教材，為避免著作權爭議，故不顯示。 Zion 電廠	◎位於伊利諾州北方。 ◎除役機組（1、2 號機）：西屋公司 PWR 設計，額定發電量 1,040 MWe。 ◎於 1998 決定永久停機（更換 SG 之經濟效益不佳）。 ◎由包商取得除役執照，完成除役後，歸還業主廠址。	2 號機：最近已完成內部組件的切割 1 號機：February 2013 開始進行切割	(1) 所有內部組件均執行切割。 (2) 2010 年外包予 Siempelkamp Nuclear Services (SNS)：設計切割工具相關設備(disk saws 為主) (3) 切割並執行爐內組件封裝。 (4) 切割前，進行 mockup test。

由於反應器內部組件切割影響著整體除役計畫進度，故 EPRI 提供成功完成切割案例之經驗回饋供本公司參考：

1. 擬定詳細的各項內部組件切割計畫，包括任務，職責和選擇最適切割工具是整體工作否順利完成的關鍵因素。
  - (1) 早期美國多數電廠選擇磨料水刀 (AWJ)，但 Yankee Rowe 核電廠使用電漿電弧 (Plasma Arc) 切割，Rancho Seco、HBPP、Zion 核電廠則使用機械切割 (Mechanical Cutting)。
  - (2) 機械切割方式通常可以快速完成內部組件切割，惟需配合不同組件，選擇不同切割工具。
  - (3) 磨料懸浮水刀在切割過程中產生的二次性廢棄物雖然較「磨料水刀」少，但仍比機械切割方式多。但隨著機械切割技術進步，愈來愈多電廠開始採用機械切割。
  - (4) 進步的輸送系統是所有切割系統成功應用的關鍵。
2. 在人員訓練部分，經驗豐富的現場技術人員及機械工程師是缺一不可。
3. 在工作現場進行切割設備及相關工具測試是必要的。
4. 切割設備的設計必須便於現場維護。
5. 內部組件切割動作的重複性是節省關鍵的設計特點
6. 組件切割後的尺寸，其誤差不應太大，需能滿足方便封裝廢棄物為原則，如果可以，盡可能增加封裝容器的尺寸，並最小化切割數量、長度及最大化物件尺寸。
7. 在切割過程中，水質處理系統的設計必須能保持水質清澈。
8. 磨料水刀切割過程中，有效隔離切割區及非切割區是必要的 (避免污染擴散)。
9. 為合理抑低輻射劑量 (ALARA, as low as reasonably achievable)，保健物理人員有必要積極參與各項規劃作業。
10. 詳盡的廢棄物管理計畫是必須的。

## (八) Experiences with Reactor Vessel Segmentation

在反應器內部組件完成切割後，「反應器」本體是否也須進行切割，可視管制單位要求及處置場接收標準決定，原則上反應器若決定採切割方式處置，其步驟擬定與內部組件切割雷同；EPRI 提供已完成反應器本體切割之經驗分享如表 5。

表 5 已完成反應器本體切割之相關資訊整理

電廠	基本資料	切割方式	考慮因素	經驗回饋
Rancho Seco 核電廠	額定功率：913 MWe 所在地：美國 電廠型式：PWR 停機時間：1989 年  低輻射劑量(運轉時間短及已經長時間衰變)	◎使用機器人控制的磨料水刀進行切割。 ◎反應爐蓋使用鑽石線切割 (diamond wire)。	ALARA 輻射污染控制 切割速度 切割後廢棄物的處理 成本	(1) 高精度設計的機械手臂，具有高切割速率，是 Rancho Seco 核電廠在非密閉空間以磨料水刀進行切割之成功要素。 (2) 耗時 8 個月完成，總輻射劑量為 0.15Sv。 (3) 切割、運輸及處置成本約 510 萬美元。 (4) 切割較厚金屬時，過程中產生的金屬屑不易從水中分離 (約產生 15,500 公斤金屬碎屑)。 (5) 大量的金屬碎屑處置不易，且在台灣的處理費用可能非常昂貴。
Würgassen 核電廠	額定功率：650 MWe 所在地：德國 電廠型式：BWR 停機時間：1995 年	◎2010 年 4 月完成反應爐本體切割。 ◎使用磨料懸浮水刀切割技術。 ◎反應爐法蘭 (Reactor Flange) 使用帶鋸	因金屬回收處理廠限制接收尺寸，故切割成多片小金屬片。	(1) 40%反應爐本體金屬 (約 125 噸)，除污至符合可外釋利用之標準。 (2) 相關切割工作外包予擁有成熟切割技術之包商。

		(Band Saw) 切割，共劃分 13 個待切割區，總計切割成 252 片。 ◎以遠端遙控方式完成切割作業。		(3)磨料懸浮水刀切割技術亦產生大量的二次性廢棄物
Stade 核電廠	額定功率：660 MWe 所在地：德國 電廠型式：PWR 停機時間：2003 年	◎反應爐內部實施化學除污。 ◎使用氧燃氣技術 (Oxygen Gas Technology) 進行本體切割，共切割成 172 個碎片。	依每一碎片的活度進行分類處置。	(1)從計劃，採購和啓動切割設備花了 15 個月。 (2)以 4 個月時間進行反應爐壓力容器拆卸。 (3)總輻射曝露 180 mSv。 (4)反應爐蓋亦使用氧燃氣技術進行切割 (手動操作)。拆卸和廢棄物封裝在 13 個工作日內完成。 (5)以氧燃氣技術進行切割明顯縮短切割工期(19 個月 vs 29 個月)。 (6)需高流量之通氣輔助設備 (避免體內污染)。
Humboldt Bay	額定功率：650 MWe 所在地：德國 電廠型式：BWR 停機時間：1995 年	計畫於 2013 年底至 2014 年底，進行反應爐機械切割。		A 類廢棄物貯存在 EnergySolutions 公司猶他州 Clive 處置場。
Zion	額定功率：650 MWe 所在地：德國 電廠型式：BWR 停機時間：1995 年	外包 Siempelkamp Nuclear Services 公司進行反應爐切割。		(1)在乾的 refueling cavity 進行反應爐切割。 (2)基於 Stade 核電廠反應爐切割經驗，使用氧-丙烷燃氣

				切割技術。(大部份設備為德國設計生產，在美國進行 mockup 測試)
--	--	--	--	-------------------------------------

從以上案例分析可知，對台灣未來核一廠除役而言，反應器本體切割過程中，如何有效減少產生的二次放射性廢棄物總量，隔離非污染區避免其遭受粉塵污染，減少最終處置體積，及最大允許處置活度等等因素考量，將決定最適切割方式；而二次廢棄物的處置成本，亦將直接影響反應器切割的總成本。此外切割過程中的輻射防護，亟需仰賴有經驗的保健物理人員，在擬定切割計畫時，協助進行合理抑低輻射劑量規劃，並設法控制可能發生的放射性物質擴散，減少相關作業人員體內污染之機會等等，均為切割計畫中之重要課題。

此外，目前在反應器切割技術中，機械切割及熱切割已經愈來愈被採納使用，近期美國使用之機械或氧-燃氣切割方式，因其在切割過程中產生較少之二次廢棄物，抑或許適用於核一廠除役作業。

## 二、至 Humboldt Bay 電廠觀摩：

### (一)Humboldt Bay 電廠背景說明

Humboldt Bay 電廠(以下簡稱為 HBPP)隸屬於美國 PG&E 公司(Pacific Gas & Electric Co.)，位於加州 Humboldt 郡尤里卡(Eureka)南邊的 Humboldt 灣出海口，如圖 14。該電廠有 3 部發電機組，一號機和二號機是火力發電機組，一號機於 1956 年商轉，發電量為 52MWe，二號機於 1958 年商轉，發電量為 53MWe。三號機是一座 65MWe 的沸水式反應器(BWR)，於 1960 年 11 月建造，1963 年 8 月商轉。1976 年 7 月因進行年度更換燃料和防震能力改善工程而停機大修，隨後因部份防震議題無法解決使機組大修工期延長，在此期間，反應器運轉及設計的安全標準有了重大改變，因此三號機未再重新起動。依 1983 年的最新經濟效益分析，發現重新起動三號機不符合成本效益，因此 PG&E 公司於該年 6 月宣佈打算將 HBPP 三號機除役，於 1985 年將反應器內的用過核子燃料全部移至用過核子燃料池(Spent Fuel Pool)存放，並基於下列因素決定以 SAFSTOR 除役方式向美國核管會(Nuclear Regulatory Commission，以下簡稱為 NRC)提出申請：

- 1、現有火力發電的人員可以勝任必要的監護及偵測試驗。
- 2、延長的貯存期間，可以使放射性物質衰變，約可減少 25%的輻射曝露劑量，因此可以簡化未來用過核子燃料的吊運及處理。
- 3、期望在未來 30 年的核能工業發展與經驗，可以有更低成本及更安全的方法來處理剩餘的用過核子燃料。

略，為避免著作權爭議，故不顯示。

圖 14 HBPP 鳥瞰圖

NRC 依照法規於 1985 年 7 月將 HBPP 三號機之執照狀態變更爲「擁有但不運轉」，HBPP 三號機處於 SAFSTOR 狀態，同時允許開始進行部分系統的除役工作，並同意這個執照延長至 2015 年。

在 2003 年 12 月，PG&E 公司正式向 NRC 提出 ISFSI 建造及運轉執照申請，欲將 HBPP 中的用過核子燃料置於 ISFSI 的貯存護箱（Dry Cask）內，所有的護箱都是採用地下存放的方式，不同於一般核能電廠的 ISFSI 是將貯存護箱放置地面。ISFSI 是作爲用過核子燃料和超 C 類放射性廢棄物暫時貯存的設施，直到可以移至美國能源部（Department of Energy, DOE）的最終處置場。NRC 於 2005 年 11 月依照 10CFR72 的規定，正式發照給 PG&E 公司，這個 ISFSI 執照有效期自 2005 年 11 月至 2025 年 11 月。HBPP 三號機所有的用過核子燃料於 2008 年 12 月全部從用過核子燃料池移至 ISFSI，同時也開始進行有限度的除污與拆廠作業。

PG&E 公司爲解決電力需求與避免現有廠區的運用空窗期，先從現有廠區中規劃出一個區域先完成最終廠區偵測（Final Site Survey），作爲無污染管制區，如圖 15，此一新的發電廠區稱爲 HBGS（Humboldt Bay Generating Station），HBGS 有十部往復式引擎發電機，總共可提供 163MWe 的電力，此類往復式引擎發電機使用天然氣，較原有的火力發電機組更有效率且更環保的燃氣發電機（如圖 16）。HBGS 於 2010 年 9 月開始商轉以取代原有的火力發電機組。HBPP 一號機與二號機也於 2010 年 9 月停機，與三號機同步進行除役，一、二號機於 2011 年完成除役後（依陪同的 EPRI 專家表示，火力電廠沒有輻射污染的問題，除役所需的時間大約是一年左右），所留下的區域作爲三號機除役時的污染物質處理及除污的空間。

略，為避免著作權爭議，故不顯示。

圖 15 無污染管制區告示牌

略，為避免著作權爭議，故不顯示。

圖 16 往復式引擎發電機

## (二) Humboldt Bay 電廠除役作業觀摩過程

HBPP 的除役工作時間是每週工作 4 天，每天工作 10 小時，規劃為大、小週末，當週由週一工作至週四，次週則由週二工作至週五，除方便工作人員安排適當的休閒規劃外，還可以運用週末時段作為特殊工作的工作時機（如高輻射／污染的作業、重件設備拆卸等）或是進度落後工作的額外工作時間。所以這一週在 HBPP 的觀摩時間只有 4 天，於 102 年 12 月 9 日~12 月 12 日由 EPRI 人員 Richard McGrath 先生陪同觀摩三號機的現場除役作業與各種會議，同時利用空檔時間討論於觀摩過程中有興趣或不了解的部份，並講授下述與除役相關的課程：

- 1、Radiation Protection During Decommissioning in the United States
- 2、Data Management During Decommissioning

### 3、Management and Other Key Aspects of Decommissioning in the United States

由於 12 月 8 日原規劃搭乘的班機受天氣因素而取消，一行人改搭 12 月 9 日的第一班飛機，並由機場直接到 HBPP。HBPP 的接待人員提供每位人員螢光外套及安全帽等個人護具（如圖 17），再由專人講述電廠觀摩期間的規定與要求，同時強調在辦公室外的廠區活動時，必須穿上螢光外套以資識別，否則會被質疑是非法進入，安全人員授權可以槍擊非法進入的人員。另在廠區存放乾式燃料護箱的 ISFSI 區域是禁止攝影，其他的區域只要在不影響工作人員的情況下，都可以攝影，顯示該廠非常友善。隨即由專人陪同到三號機的燃料填換廠房參觀反應器，HBPP 三號機的反應器與一般的 BWR 反應器不同，其設計與建造均屬於早期，反應器本體是在地下，燃料填換樓面與地面同高（如圖 18）。反應器內的爐心組件（RPV Internals）已於 10 月份完成移除並裝箱，部份屬於超 C 類放射性的爐心組件則於 11 月份時，裝入乾式燃料護箱並運送至 ISFSI 區域存放。反應器內 32 支控制棒驅動機構（Control Rod Drive Mechanism，CRDM）中尚有 14 支 CRDM 待移除，這是因為該廠於 1976 年即停止運轉，而原有的 CRDM 拆裝設備早已拆除，現有 HBPP 人員只能以替代性的臨時工具進行 CRDM 的移除作業，而最近因 CRDM 於移除下拉時，CRDM 會卡在反應器的底部而使工作受影響。在觀摩的這一週中，HBPP 的人員都在想解決的方法，最後在我們要離開的當天，終於成功的移除會卡住的 CRDM，但原先規劃的工作進度已稍有延遲。

略，為避免著作權爭議，故不顯示。

圖 17 個人護具示意圖

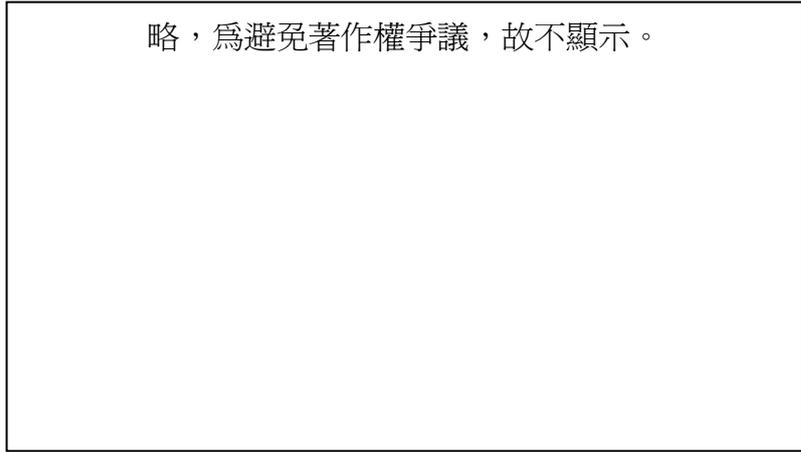


圖 18 燃料填換廠房

在 HBPP 的廠區的建築物只剩下三號機的燃料填換廠房、辦公室及除役作業用的臨時性建築物，其他的建築物（如一、二號機的火力發電機組廠房，三號機的汽機廠房）均拆除整平，並建立大型庫房作為三號機拆除設備的整理、除污、輻射污染偵測與裝箱待運的場地，此所以建立庫房，是因為該地的氣候多雨，須將戶外裝箱待運的廢棄物儲存箱移入室內，避免污染擴散至地面，而污染地下水。由於 HBPP 的用過核子燃料於用過核子燃料池存放期間發生燃料束破裂，中子隨冷卻水四處擴散，造成廠區有中子污染問題，所以將新建的計測室置於離廠區較遠的位置，降低污染計讀時的背景干擾。因原有的水處理系統已隨著除役工作進度而移除，為了管控地下水及除役工作所產生的污染水，另新建臨時性的水處理系統（如圖 19），以減少污染的擴散及降低放射性廢棄物的活度與產量。

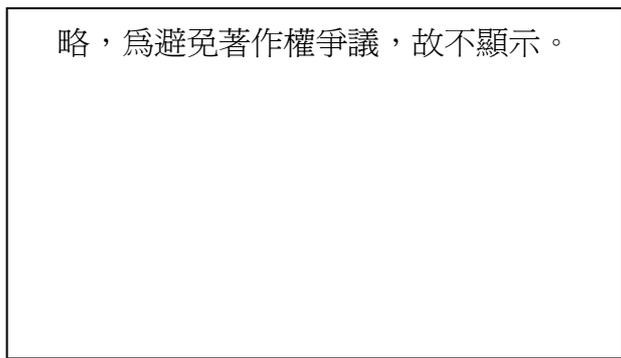


圖 19 水處理系統

在 HBPP 期間觀摩的會議包括 CRDM 移除工作進度會議、反應器切割工作進度會議、緊要冷凝器移除工作進度會議、輻防管理部門內部會議、跨公司的管理階層工作協調會（由 PG&E、HBPP、除役承包公司等管理階層人員參加）、廠區廢液

處理廠房的工作進度會議與早上 7 點召開 CRDM 移除工作前會議等，除管理階層工作協調會涉及層面寬廣而時間較長之外，其他的會議均在一小時內完成，會議主席都會規劃議程並依議程的時間完成，如附件 3 的反應器切割進度會議議程。在會議中主席提問各項工作的進度現況，而負責部門確認進度符合與否，若進度落後，也會說明會如何補救，只有少數項目會提出困難事項列入討論，所以會議大都可以準時或提早結束，避免人員被會議時間給綁住，而沒有時間去處理其他的公務。經詢問 EPRI 的 Richard McGrath 先生，Richard 告知在開會前，各負責人會即與相關人員或部門討論，確認工作現況和需其他人員配合或執行困難的事項，以減少會議中討論的時間，提升會議的績效。

## 1. Radiation Protection During Decommissioning in the United States

課程中主要說明輻射防護工作在營運機組與除役機組中的不同，除役輻射防護方案的要素，除役輻射防護的經驗學習及  $\alpha$  粒子污染管制。營運機組的輻射防護著眼於體外曝露劑量及污染管制，係因機組狀態穩定如：系統保持閉路狀態、切割工作較少、體內曝露劑量主要是短壽命 (Short-Lived) 的同位素 (如 I-131)。除役機組的輻射防護著眼於體內曝露劑量，係因所有的高污染系統都將呈現開放狀態、體內曝露劑量有  $\alpha$  粒子、機組狀態因系統開放而持續改變，輻射狀態經常改變而輻射管制需經常更新。依除役輻射防護的經驗學習，在訂定除役輻射防護方案時，須考量下列要素：輻射防護訓練 (由於除役時的工作人員大都未在核能機組中待過)、廠房外部監測、體內曝露劑量、ALARA 方案、輻射工作管制 (因系統呈現開放狀態進行設備移除，須有較多的輻射防護規劃，輻射狀況隨工作的進行而改變，套句國外的用詞：There are always surprise.)、輻射偵測與告示 (偵測頻率增加)、呼吸防護計畫 (呼吸防護面具使用量高)、空浮偵測 (空氣取樣頻率增加，需有  $\alpha$  粒子連續空氣取樣)、污染管制 (系統呈現開放狀態，需增加臨時性通風，高空浮的工作區域需用封閉式帳篷)、放射性物質管制 (輻射管制區域經常變動，需使用臨時圍籬)、處理流程管制方案 (由於系統設備內部核種會隨除役廢棄物外送處理，因此須考量該類核種的比例建立污染等級)、放射性物質運送 (有大量的混凝土、土壤、大件設備、反應器爐槽切片等不同於營運機組的物質) 及輻射量測儀器管理方案 (多種儀器長期使用以執行最終廠區偵測)。核能電廠若有燃料破損的事件發生時，則需注意  $\alpha$  輻射效應的

影響，在 HBPP 及 Connecticut Yankee 電廠有燃料破損， $\alpha$  粒子隨冷卻水流到處移動造成污染，部份廠區因長壽命 (Long-Lived)  $\alpha$  粒子存在而需持續除污，甚至於需待 20 年的衰變。當除役工作展開後， $\alpha$  粒子的影響包括：污染擦拭 (Smear) 須將  $\alpha$  粒子列入計讀、增加空氣取樣、增加呼吸防護面具的使用、增加體內曝露的複雜度、增加保健物理人員的訓練及地下水可能遭受  $\alpha$  粒子污染而違反飲用水的規範。

## 2. Data Management During Decommissioning

課程中主要說明資料處理系統所需的功能及要素。由於核能電廠有放射性的特性，在除役後須完成廠區最終偵測 (Final Site Survey, FSS) 以證實符合廠區釋出限值 (Site Release Limit)。所以這個資料處理系統需能處理極大量的數據，包含工作套件、廢棄物裝運資料、廢液及廢氣排放紀錄、廠區歷史評估資料、評估結果特性與範圍；廠區最終偵測資料與結果等。在所有的數據分析評估過程中，須有數據品質目標 (Data Quality Objective, DQO) 的流程，此流程的 7 個步驟依序為：問題描述、確認結論、確認結論的輸入資料、界定結論的範圍、發展結論規則、確定結論錯誤的容許限值、資料取得設計的最佳化(詳參 EPRI 經驗報告 1015500)。在最終廠區偵測取樣結果的評估中，須納入「低階偏差評估 (Low Level Bias Assessment)」，依實驗室經驗，輻射防護要求偵測的核種中，有部份是屬於難以偵測的核種 (Hard to Detect Nuclides, HTDN)，其分析技術有：

- (1) Liquid Scintillation Counting : Fe-55、Ni-63、Tc-99、Pu-241。
- (2) Gas Proportional Counting : Sr-90。
- (3) Alpha Spectroscopy : Am-241。

若未納入低階偏差評估，會造成取樣的結果不具代表性，而需增加額外的資源耗費，如重新取樣、重新分析等。而其解決方法須使用統計測試的方式來判定是否存在有低階偏差評估。

### 3. Management and Other Key Aspects of Decommissioning in the United States

課程中主要討論 4 大主題：管理與組織、發包方式及電廠人員的需求。以 HBPP 的除役工作而言，HBPP 的組織分為兩大區塊：(1)廠長、工程技術支援人員與行政體系人員約有 100 多人，在廠區 5 哩外的辦公室。(2)副廠長、運轉人員、輻射防護人員與工作人員約有 400 多人在廠區內執行實際的除役工作，其中輻射防護人員就有 100 多人。美國各除役電廠的發包方式有自主管理 (Self Manage)、統包 (Turnkey) 及全面移轉 (Total Turnkey) 等三種，簡述如下：

- 1、自主管理：由電力公司主導整個除役工作，將現場工作發包給有經驗的大承包商，大承包商提供現場監督及工作人力，HBPP 與大多數除役電廠即採用此方式。
- 2、統包：電廠保有執照、管制單位的介面連繫並執行計畫監督，而統包商則管理除役及下包商，美國 Connecticut Yankee 電廠與 Maine Yankee 電廠即採用之方式。
- 3、全面移轉：電力公司將電廠執照及除役基金轉移至另一具有除役執照的公司，由該公司執行除役及將用過核子燃料移至乾式貯存設施。除役完成後再將電廠執照轉回電力公司，美國 Zion 電廠即採用此方式。

在除役期間電廠工作人員需求部份，概分為五個階段：第一階段的將用過核子燃料移至乾式貯存設施、第二階段的高污染系統拆除、第三階段的其他系統拆除、第四階段的建築物除污及第五階段的最後復原及廠址釋出。茲將各階段分述如下：

- 1、將用過核子燃料移至乾式貯存設施：運轉持照人員可減少至最低要求，主要運轉人力偏重於燃料吊運，需有主要的工程技術人員準備及規劃未來的重要計畫案。
- 2、高污染系統拆除：運轉及工程技術人員的需求降低，輻射防護人員需大量增加，承包商的支援人力需大量增加。
- 3、其他系統移除階段：由於設備減少，因此只需要有設備操作人員。隨著設備的移除，工程技術人員需求持續降低。輻射防護人員需保持在最大數量，承包商的支援人力需求仍大。

- 4、建築物除污階段：只需少量的工程技術人員及運轉操作員，輻射防護人員大多執行最終廠區偵測，承包商須有大量的低階支援人力。
- 5、最後復原及廠址釋出階段：除最終廠區偵測人力外，其他人力隨除役作業漸次完成而減少。

### 三、至 EPRI Charlotte Office 實習：

#### (一) Determination of Functioning System Needs during Decommissioning

討論除役作業初期所需達成的目標—除役期間仍須運轉之系統重新分類及其安全分類變更。

在除役作業的初期，須針對技術規範與運作系統、必要程序、緊急計畫等的刪減及變更作業，確實執行篩選及規劃。未來進行除役作業時，將可達成下列目的，如運轉員及助理運轉員數量的減少、降低管制單位干涉的風險、節省緊急計畫編制人力等。課程中並舉西班牙為例，以流程圖說明電廠停機前兩年內的準備時期，與電廠停止運轉至開始除役間的過渡時期中，須完成的各項管制文件準備作業。

SERT(System Evaluation Recategorization and Transition)用於在廠址上評估所有的結構、系統和組件(SSC, structures、systems and components)，依據其各項標準來評估，然後分類，用來確定除役工作需要什麼系統、儀器、維護作業等。

一般而言，在用過核子燃料尚未移至乾式貯存設施之前，存放於用過核子燃料池中，而與其相關系統的存在是必要的，用過核子燃料營運管理、燃料池冷卻系統、水處理系統、燃料廠房排氣系統及監控、電源供應系統等。美國電廠除役時，在提交燃料退出反應器的安全分析報告後，通常都將前述各項系統列為非安全有關的系統，唯一視為安全有關的系統是用過核子燃料池支撐結構。獨立燃料池島區建立則是有利於其他廠房的除污與拆除作業。

此外，水處理、空浮/氣體的管制、消防系統、相關的電力及照明系統等，皆是在此階段所需之相關系統。有些電廠在除役後期階段，會改為使用可移動式的發電設備及照明設備，以便於其作業執行。

並舉例說明德國 Mülheim-Kärlich 核電廠，因為針對各項必要存留系統的優化改善，得以讓其除役作業順利執行並降低費用支出。

#### (二) Spent Fuel Pool Cooling and Isolation

以美國國內電廠說明，在大部分除役電廠中，用過核子燃料池冷卻及淨化系統(SFPCC, Spent fuel pool cooling and cleanup system)常會修改以適用於除役作業的執行，有些電廠甚至於停機後一年內即完成修改。一般 SFPCC 設計包

含：最終熱沉、混合床除礦器、過濾器、備用電源等設備。基本上，部分電廠針對用過核子燃料池水質的核種含量訂定相關容許標準，儘管技術規範並沒有相關的要求。而多數美國電廠將 SFPCC 系統列為非安全有關係統。

許多國家在電廠停機後，用過核子燃料立即移出至廠外貯存設施或再處理設施。若用過核子燃料遲遲未移至乾式貯存設施，會影響用過核子燃料廠房及相關設備的除役作業及時程。以西班牙為例，其管制單位要求在燃料尚未全部移至乾式貯存設施前，必須維持相關安全系統設備的運作，例如燃料池冷卻系統、至少一台柴油發電機可用於燃料池冷卻及循環水系統、持續運作的循環水系統、及相關安全設備及附屬設備的維護作業等。

### (三) Experience with Radioactive Waste Management for Decommissioning

本項課程中，以美國及歐洲國家進行除役產生廢棄物的營運介紹。

在美國，低放射性廢棄物依據 10CFR61，分為 A、B、C 類及超 C 類，其中 A、B、C 類廢棄物可於近地表進行處置；超 C 類廢棄物則需進行地質處置。美國共有 5 個放射性廢棄物處置場，分別是：

- (1) Clive, Utah site(Energy Solutions)；
- (2) State of Tennessee Licensed Landfills；
- (3) Barnwell, South Carolina Site(Energy Solutions)；
- (4) Richland, Washington site(US Ecology)；
- (5) Andrews, Texas Site(Waste Control Specialists)。

美國常見的廢棄物包裝形式則有：

- B/C 類廢棄物：Typical Waste Liners(圖 20)、Typical High Dose Rate Shipping Cask(圖 21)
- A 類廢棄物：Inter-Modal Containers(圖 22)、B-25 Boxes(圖 23)、Sea Land Containers(圖 24)

略，本圖摘自 EPRI 訓練教材，為避免著作權爭議，故不顯示。

圖 20 Typical Waste Liners

略，本圖摘自 EPRI 訓練教材，為避免著作權爭議，故不顯示。

圖 21 Typical High Dose Rate Shipping Cask

略，本圖摘自 EPRI 訓練教材，為避免著作權爭議，故不顯示。

圖 22 Inter-Modal containers

略，本圖摘自 EPRI 訓練教材，為避免  
著作權爭議，故不顯示。

圖 23 B-25 boxes

略，本圖摘自 EPRI 訓練教材，為避免  
著作權爭議，故不顯示。

圖 24 Sea Land Containers

大組件(例如:反應器壓力槽和蒸汽產生器等)可以整件或是以切割成數件方式進行處置，主要的考量有包裝方式、處置場可容納的大小、運輸路徑等。美國的法規允許以濃度(活度除以重量)來分類廢棄物，因此蒸汽產生器的某些部分可被視為 A 類廢棄物進行處置。

依據美國核電廠除役的經驗，在除役作業進行期間，廢棄物的運送量及活度可能依據不同階段會有相當顯著的變化，舉例如下：

- (1) 除役作業剛開始時會送走較高劑量率的廢棄物，可減少區域的輻射劑量率，但因其數量較少，運送量不大。
- (2) 除役作業進行至主要拆除階段及建築物除污階段，廢棄物的活度較低，但運送量明顯增加，且此時需要維持廠房在一定負壓。
- (3) 除役作業至最後建築物除污及最後復原階段，針對極低放射性廢棄物的運送量會相當龐大，但已不需要廠房通風系統。

在撰寫廢棄物營運計畫需要考慮以下幾點：

- (1) 確定廢棄物處置方式
- (2) 決定廢棄物除污及處置的策略，並考量處置費用多寡
- (3) 廢棄物容器包件與運輸方式的選擇(在除役規劃開始前應先知道容器大小)
- (4) 規劃廢棄物在廠內的運送路徑
- (5) 除役計畫排程亦會影響廢棄物營運策略
- (6) 除役作業中廢棄物的產出速度往往快過運送速度，可能會需要更多的貯存空間

美國以外的地區如歐洲，則大多採用 IAEA 的規定方式進行分類，主要是依據放射性活度及核種半衰期分成 EW(exempt waste)、VLLW(very low level waste)、VSLW(very short lived waste)、LLW(low level waste)、ILW(intermediate level waste)、HLW(high level waste)。大部分國家會建立 LLW 及 ILW 處置場，甚至也有 VLLW 的處置場。然而許多國家並沒有處置場，這樣一來便阻礙了電廠除役作業的推動，在處置場營運前須要另外興建貯存設施；廢棄物包裝尺寸大小無法確定，造成除役規劃上有困難。

除役廢棄物產量評估會依據所採取的除役策略、廢棄物分類方式而有所不同。依據歐盟規定，若廢棄物所含放射性核種活度合乎清除標準後則可解除管制，如此一來便可大規模的減少廢棄物容積。而大組件的處置費用較美國高的多，處置場通常不接受大組件(包括：反應器壓力槽、大型氣渦輪機組件等)，而需要進行切割。因此，處置方式會選擇進一步除污至可外釋或回收。

#### **(四) High Activity Metal Volume Reduction Research**

本課程係針對高活度金屬的減容方式進行探討。

BWR 的高活度金屬來源主要為爐心材料(Core Barrel)、燃料匣(Fuel Channel)、控制棒葉片(Control Rod Blades, CRBs)；其中爐心材料為不可壓，其他兩種則是可壓廢棄物。

在美國，BWR 的用過核子燃料池已沒有足夠空間可貯放控制棒葉片及燃料匣。但由於運送護箱的價格昂貴，電廠通常不採取運送的方式來處理此類廢棄

物。美國運轉中的 BWR 尚未有將控制棒葉片、燃料匣、local power range monitors (LPRMs) 置入貯存護箱的經驗。

標準的廢棄物包裝無法完全容納 CRB，且傳統的處理方式，例如壓縮及切割，會導致 CRB 中的 boron 洩漏，如此一來便需要花費更多人力及時間進行清潔。EPRI 針對上述問題提出了一份報告 (Reactor Activated Hardware Disposition) 來改善上述處理方式及包裝容器。

本報告中提到一種改良的壓縮方式 (壓縮設備如圖所示)，可減少操作時間，並採用遙控的方式在水中操作，且壓縮完成後可維持組件的完整性，壓縮作業可較之前花費的金額少，人員接受劑量也較低。

略，本圖摘自 EPRI 訓練教材，為避免著作權爭議，故不顯示。

圖 25 改良後的 CRB 壓縮設備

除了處理方式的精進，包裝容器的設計也有所改良。改良後包裝容器可與現行的乾式貯存設施系統組件相容，可容納整個 CRB 組件，可遠端操作，亦具有耐震性。

傳統的 CRB 貯存格架係用於貯存圓形的組件，若可改為方形的格架，可有效增加池子的貯存空間，亦可用於貯存未壓縮的 CRB。

此外，高活度金屬亦可選擇在廠內乾式貯存設施進行貯存，多用途的護箱 (Multipurpose canisters, MPCs) 可被用來貯存 GTCC 類的放射性廢棄物 (例如：活化組件等)，活化組件與用過核子燃料不同，進入乾式貯存前不需進行額外的安定化步驟。

### **(五) High Activity Spent Resin Volume Reduction**

課程中針對廢樹脂的先進處理方式進行介紹，並提出幾項減少 B/C 類廢棄物產量的方法。

處理高活度廢樹脂的基本構想，係將原本可能被分類為 B/C 類的廢樹脂分離成活度較低的 A 類(90%體積)及活度較高的 C 類(10%體積)。且在進行上述處理時，會特別注意可能影響廢棄物分類的幾個核種，例如：Ni-63、Cs-137、Sr-90。

廢樹脂經過初步分離、去除核種、過渡金屬沉澱、過濾/固化/脫水等程序後，即可分離出活度較低的 A 類及活度較高的 C 類廢棄物。上述處理過程已完成實驗室規模的測試，且小規模測試已完成非放射性廢棄物測試部分，尚須以放射性廢棄物進行測試及進一步推動先導型計畫。

一般而言，在電廠中有幾項措施會減少 B/C 類廢棄物產量，列舉如下：

1. 使用爐水淨化系統
2. 使用用過核子燃料池的離子交換器
3. 適度減少離子交換器中樹脂的使用量(但不會影響其效率)

### **(六) Management of Low Activity Solid Waste**

除役作業所產生的低放射性固體廢棄物主要有水處理殘渣、消耗品(防護衣、塑膠等)、混凝土等，因為上述廢棄物活度並不高，可採取壓縮、焚化、調查後外釋、玻璃固化等方式進行減容處理。關於防護衣的減容方式，亦可考慮採

用 OREX 這類可溶於特殊溶劑的材質製成的防護衣，或是採用可重複水洗的材質，都可以有效的減少廢棄物體積。

低放射性活度廢棄物處理計畫需要將可能在除役作業期間產生的廢棄物特性及體積大小依據種類進行數量估算，並且依據不同種類廢棄物研擬成本最佳化的處理、包裝、處置方式進行描述，最後須選出幾種最佳的處理方式。若要考量到如何節省成本，則要確認廢棄物種類的分類可與處理方式相互配合。

水處理殘渣來源是有機樹脂、沸石等，上述廢棄物的活度不一，但大多活度較高。處理活度較高的殘渣需考量以下幾項：可能需要有更好的包裝方式、對處置場的要求較高、或是有更好的抗滲濾固化的介質(如水泥或玻璃化)。

混凝土在電廠除役過程中也是廢棄物的主要來源之一，接下來要介紹一些混凝土拆除方式。混凝土若遭到污染，無法很輕易的除污，但可考量刨除其表面，或可用化學物質披覆於其上後將污染物析出去除。大型的混凝土可利用鑽石索線進行切割，而廠房結構則可利用大型機具進行拆除。

接下來介紹 Yankee Rowe 電廠的混凝土處理方式，起初估計拆除圍阻體及輔助廠房後會產生超過 1300 萬公斤的混凝土，上述混凝土將會在廠址內作為回填材料之用，且僅需符合 NRC 的規定（利用 DCGL 推定活度）。而後來 Yankee Rowe 電廠所在的麻州政府環境保護部門要求回填材料須達未檢出的活度（含難測核種），最後僅有符合上述要求的混凝土才能回填，其餘受 PCB 污染的土壤則送至掩埋場進行處置。在進行廠址特性調查時，發現混凝土內因為氣體核種的遷移，含有微量的放射性。開始進行拆除工作後，將混凝土進行採樣分析，發現雖然可以符合 NRC 的規定，但不符合環境保護部門的要求，無法回填。因此，需要更多的分析才能發展出更精確的比例因數。Yankee Rowe 電廠後來利用卡車裝載混凝土通過偵檢器，確認超過 90%的混凝土可用作回填材料。

### **(七) Hazardous Waste Management Experiences in the United States**

對於核電廠除役所產生的有害廢棄物處理相關要求，係由美國環保署 Resource Conservation and Recovery Act(RCRA)所規範。部分州政府甚至會要求須符合 Remedial Standards Regulation(RSRs)。關於 Universal Waste 則是同樣被 RCRA 及州政府的法律所管制。

在核電廠運轉期間，有害廢棄物的來源有：廢油及燃料油桶（含可萃取的總石油碳氫化合物-除草劑、多環芳香烴等）、化學實驗室（含鄰苯二甲酸二辛酯（BEPH）、菲、異佛爾酮、異丙苯、五氯酚等）、多氯聯苯、半揮發性有機物、砷、銅、鎳、鎘、鋅、氯、鉛、銻等。除役作業期間則另外會有四氫呋喃產生。而在美國，化學廢棄物的處理需要許可證，許可證係用於管制拆除時化學廢棄物的適當清除、包裝和貯存。

在美國，含有多氯聯苯超過 50ppm 的物質受到 40CFR761 法規所管制，上述法規規定了含多氯聯苯物質的去除、貯存、除污及運送方式。在核電廠拆除時若有物質使用含多氯聯苯的油漆，須在建築物拆除前進行除污或設法減低多氯聯苯含量；或是在拆除後，進行處置前將含多氯聯苯的物質和其他物質分類包裝。在 Connecticut Yankee 和 Yankee Rowe 電廠，因為使用了含多氯聯苯的油漆，除役時花費了很大的心力進行土壤復育並處置受多氯聯苯污染的廢棄物。

若油漆中含有鉛、氯或鋇等物質，因為上述物質的密度較高，若是不進行切割而是直接進行處置，則不需要將其分類為有害廢棄物或管制。若需要進行切割，則在 RCRA 法下須視其為有害廢棄物（因為通常這類物質無法通過 Toxicity Characteristic Leaching Procedure 毒性瀝濾測試）。另外，像混凝土或是木頭這類上有油漆的殘骸，需要定期進行上述測試。

若有含石棉濃度超過 1%的物質需在結構物拆除前進行分類，所有的石棉需在拆除前去除，且作為石棉廢棄物被處置。

為了符合 RCRA 法的管制要求，在拆除作業前需進行廠址歷史評估、特性調查；復原後取樣分析；進行地下水監測等。上述的歷史評估可與輻射調查的歷史評估同時進行。

若廢棄物中同時含有放射性廢棄物及有害廢棄物（例如混合廢棄物），便須視為放射性廢棄物進行處置，但在運輸及處置時仍需有相關有害物質的說明文件。混合廢棄物雖然可視為放射性廢棄物進行處置，但在處置前需要先進行處理（例如固化）、處置成本通常較單純放射性廢棄物來的高。因為上述原因，核電廠運轉執照的擁有者應儘量避免混合廢棄物的產生。

## (八) Volume Reduction Through Recycling of Metals

在除役作業中，含放射性的金屬物質可透過變賣或是回收再利用的方式進行處理。但是僅有少數的物質有變賣的價值，例如：適合相同大小機組的氣渦輪機、大型變壓器、開關設備或其他供電系統組件等及辦公室設備、其他如在輻射防護領域上所使用的設備（例如：計數室的設備、輻射偵檢器、廠址最終狀態調查設備、攜帶式 GPS 設備、校正設備等）。

若金屬可無限制外釋則可送至金屬回收場，在美國可達無限制外釋的標準係物質要達未檢出活度之下。有回收價值的金屬包括：鉛、鎳、鐵等，但被中子活化的金屬通常沒有回收價值（整體被污染）。

金屬的除污可利用以下方式：水洗、噴砂（對鉛無用）、乾冰噴砂、化學除污、拭污、去除表面（適用於鉛）等，但須在除污時減少二次廢棄物的產量。

在美國，受污染的金屬係以類似鑄造方式熔融後，非金屬的放射性核種（如銻、銻）會聚集在熔融金屬的表面，可將其進一步分離。在 1995 年時，受污染金屬的回收值達到一高峰，每年有 13600 噸碳鋼及不鏽鋼進行回收。但社會大眾擔心受污染的金屬回收之後，會轉而利用在一般商業產品中。在 2000 年時，DOE 規定所有從含放射性領域所回收的金屬僅能在核設施回收利用。

在 2004 年，DOE 回收了 710 噸的鉛，省下約新臺幣 1 億 1 千萬元。鉛通常是被用來作為屏蔽物質。2004 年時的處置費用是每公斤 240 元；而回收費用約為每公斤 120 元。前述 DOE 的規定亦適用於鉛，鉛可被回收作為放射性廢棄物桶或是傳送護箱使用。

在美國，由於受污染的金屬處置費用並不高，回收並不是主要的選項；但如果金屬可回收再利用於核能相關領域，節省下來的費用也是相當可觀的。

## (九) Systems Needed for Waste Water Management During Decommissioning

在除役期間，水處理系統的幾項功能仍需維持正常運作，其使用目的及期間羅列如下：

- 用過核子燃料冷卻：能持續移除用過核子燃料束的衰變熱，可於用過核子燃料移至乾式貯存護箱後停止運轉；
- 切割池的能見度：在反應器及其內部組件切割時仍需維持；
- 放射性廢液處理：維持燃料池能見度、淨化被污染的水；

- 地下水處理。

影響水處理系統的要求，有幾項因素：廢水中的核種濃度、廢水導電度、廢水內沉澱物質含量、廢水產生的速率。

水處理系統在除役的不同階段仍需要維持其正常運轉，主要分為 5 個不同階段：

1.階段 1(用過核子燃料移至乾式貯存設施)：此時僅需要維持用過核子燃料池的冷卻系統或是其他為用過核子燃料池而設置的系統(例如：燃料池補水系統、液體廢料處理系統)運轉。用過核子燃料池冷卻系統是唯一在安全分類清單上高於 Radwaste Quality Assurance(QA)的系統，美國電廠通常將這些系統降級至一個新的安全分類—Spent Fuel Quality。液體廢料處理系統中的離子交換器及過濾器仍需可用，以維持用過核子燃料池的水質；既有的液體廢料處理系統亦會用於反應器系統的洩水處理；液體廢料處理系統被歸類為 Radwaste QA。

2.階段 2(高污染系統移除)：此時不需要用過核子燃料池的冷卻系統，但仍需要液體廢料處理系統(系統洩水處理及維持切割池的能見度)。上述系統所需的離子交換器及過濾器都較運轉中簡化且屏蔽較少，因為區域輻射劑量率已降低。通常在切割反應器及其內部組件時使用的池水淨化設備是額外加裝的，係由負責切割工作的分包商提供。

3.階段 3(剩餘系統的移除)：在這個階段，所有的系統已完成洩水，僅剩下液體廢料處理系統，此時通常採用可移動式的離子交換器及過濾器設備。

4.階段 4(建築物除污)：此時所有系統已洩水完成且建築物完成除污，廢水的產生來源為建築物除污。但在美國，通常建築物的除污使用的水量很少，因為產生的水很難利用離子交換的方式進行處理。若建築物除污產生的廢水活度很低，則液體廢料處理系統可以更簡化。如果廠址復育與洩水有關，則為滿足排放需求，需要可容納較高通量的過濾系統。

5.階段 5(最後復原及廠址釋出)：此時廠址的狀態，所有建築物已完成除污並達可外釋標準、建築物拆除(如果有)、土壤復育、地下水的復育(如果需要)。水處理的需求已經近乎零，但如果廠址復原與洩水有關，則為滿足排放需求，需要可容納較高通量的過濾系統。

## (十) Contamination Control During Decommissioning

在整個除役作業過程中，避免污染物質散佈導致交叉污染的管控是必要的。尤其是在執行拆除受放射性物質污染的系統設備、高活度金屬組件切割作業時，另外在除污系統的建置作業與排氣系統拆除時，亦需注意。

避免污染物質散佈的基本策略即是降低空氣中的污染物質，利用抽氣過濾系統，避免污染物質由廠房內洩漏至環境中，該設備可以是固定式或移動式的，此外亦須重視人員的防護及建築物表面的除污作業。在除役作業中，各個階段的任務不同，污染物質散佈的潛在機率影響也不同，其中又以第一、二階段(用過核子燃料移至乾式貯存設施階段及高污染系統移除階段)較為重視。

另外還提及其他方式用來降低設備組件表面污染散佈的機率，利用水洗法以高壓水柱清洗，或以擦拭等方式，針對輕度附著易去除的污染物先執行除污作業。而對於污染物固定於表面，無法使用前述方式去除者，則在切割前，使用塗料、泥漿或泡沫等藥劑使污染物固定於設備組件的表面，降低造成空浮污染的機率。而這些技術的選擇使用，在規劃時皆需考量二次廢棄物的產生。

## (十一) Chemical Decontamination for Decommissioning: Overview and Experience Summary

化學除污可以達到以下目的：

- 降低職業曝露
- 減少輻射管制措施—減少高輻射污染區域、減少  $\alpha$  粒子污染機會
- 降低金屬廢棄物的活度—可將分類降階、提高可回收使用/豁免管制機率並減少廢棄物處置費用

化學除污依據實施的範圍可分為全系統或部分全系統除污、次系統及組件除污。

針對除役的化學除污方法有：EPRI DfD、Siemens CORD-D/UV、EPRI DFDX、MEDOC(硝酸鈾銨)。運轉中電廠使用的化學除污方法有：Siemens/AREVA CORD-UV、EPRI LOMI、Westinghouse CITROX and NITROX-E、Hitachi HOP、Toshiba T-OZON。

全系統化學除污應用在 BWR 電廠的實例，整理如表 6 所示；次系統及組件除污的實例整理如表 7。

表 6 全系統化學除污應用在 BWR 電廠實例

化學除污法	應用電廠(年分)
Siemens/Areva Cord UV	VAK Kahl (1993), Würgassen (1998), Lingen (2001), Caorso (2004), Barseback (2008)
EPRI DfD	Big Rock Point (1998)

表 7 次系統及組件除污實例

化學除污法	應用電廠(年分)
EPRI DfD	Dresden RWCU Heat Exchanger (1998), Quad Cities Heat Exchanger (1998), Trojan Hold Up Tanks and RWCU Heat Exchangers (1998)
EPRI LOMI	Yankee Rowe Coolant Piping (1996; with NITROX)

BWR 電廠進行全系統化學除污後結果比較整理如表 8 所示。

表 8 BWR 電廠進行全系統化學除污後結果比較

電廠	電廠大小	反應器或其內部組件是否進行化學除污?	其他進行化學除污的系統	產生樹脂廢棄物量	除污因子 (Decontamination factor, DF)
Big Rock Point (1998 DfD)	67 MWe	包含反應器，但內部組件已移除	Steam Drum, RWCU, Shutdown Cooling	16.4 m <sup>3</sup>	高溫：27 低溫：26
Barsebäck Unit 1 (2007 Cord-UV)	605 MWe	包含反應器，但內部組件已移除	RHR, RWCU, Feedwater, Core Spray	3.62 m <sup>3</sup>	平均 286
Barsebäck Unit 2 (2008 Cord-UV)	605 MWe	包含反應器，但內部組件已移除	RHR, RWCU, Feedwater, Core Spray	4 m <sup>3</sup>	平均 93

全系統化學除污已在除役中電廠有多次應用實例，經驗回饋如下：

- 若要進行化學除污應在停機後儘速完成(考量設備可用性及最佳效益)
- 應儘量委由專業有經驗的廠家執行
- 成功的全系統化學除污，需要高再循環流量

- 若系統中可能有  $\alpha$  粒子污染存在，需先針對數量進行調查
- 需要評估化學除污對電廠中關鍵材料的影響
- 在要求達到特定 DF 值時，同時亦須考慮廢棄物產量

## 肆、心得及建議事項

### 一、至 EPRI Palo Alto Office 實習：

(一)除役後廠址再利用規劃影響除役作業規劃甚鉅，且不同的選擇對應除役策略、劑量外釋限值及預算規劃亦有所不同。

建議：在除役作業規劃初期，應及早決定除役後廠址再利用方式，此一決定不僅僅影響策略、可外釋的劑量限值、預算，亦會影響廢棄物產量、所採用的除污技術等。依經驗，愈完善的廠址特性調查，電力業主愈能掌握除役工作時程，進而降低除役成本。

(二)MARSSIM 是一個針對廠址釋出所需執行全範圍性的輻射特性調查的指引，所產出的報告內容記載廠址中放射性及非放射性污染物的範圍及特性等。

建議：因我國法規規定在永久停止運轉前三年需提出除役計畫，在停機前進行特性調查所得的結果可能與永久停止運轉後的狀態有所不同。因此，有關特性調查的疊代進行過程會較其他國家的期程更為冗長且必要。另 MARSSIM 指引對廠內之系統設備、次表土、地表水、碎石礫、污水管線等並無提供具體調查方法，但有提供相關參考指引；因此，如本公司欲採用 MARSSIM 指引，則相關參考指引應一同採用。

(三)在美國，多數電廠在除役工作開始前均歷經長時間的停機過程，導致除役工作開始後，大部份瞭解電廠過去歷史及運轉狀況的員工均已退休，使得土地特性調查工作不夠完善，耽擱除役計畫進度。

建議：由於我國法規的規定，本項工作預定會在永久停止運轉前開始進行，在這樣的情況下，所遭遇到的問題會比美國少。但在 107 年以前，許多目前在核一廠工作的資深同仁可能會屆齡退休，除了工作經驗上的傳承之外，也須仰賴其在電廠工作的回憶，協助此項調查工作的進行。

(四)Connecticut Yankee 電廠因為其地下水遭受到污染而需要進行大規模的土壤復育工作。

建議：儘早清查核一廠地下水是否有遭污染之情事，若有，則須建立復原計畫，同時除役作業的花費亦會相對提高，影響後端營運基金估列。

(五)Rancho Seco 電廠對用過核子燃料池進行特性調查時發現內側的鋼襯後方的水泥結構已被污染，因為除污費用昂貴，採取全部刨除方式。

建議：一般認為用過核子燃料池的污染應在池底，而非牆面上被鋼襯隔絕的水泥結構，但 Rancho Seco 電廠進行特性調查後發現水泥結構已被污染。由此可知，在進行特性調查前雖會先行蒐集相關資料以確認其範圍，但仍不能僅以常識進行判斷，否則可能在實際進行除役作業時得到更多「驚訝」。

(六)反應器及其內部組件切割計畫可說是除役作業中一大重點工作，此項計畫所花費的時間期程對除役作業的進行有重大影響。

建議：切割作業進行前須先有良好的規劃，包括廢棄物清運、包裝等計畫，另須考慮到切割作業是否於水下進行及二次廢棄物產量等。另於切割計畫擬定階段，以至現場作業時，均需仰賴保健物理人員積極參與，並提供專業輻射防護經驗。

## 二、至 Humboldt Bay 電廠觀摩：

(一)HBPP 三號機於停止運轉 32 年（1976 ~ 2008）後才開始除役，除役人員均非當時電廠營運人員，部份大修需使用之設備因不再使用而拆除，導致除役期間部份設備只能以替代性的臨時工具進行移除，影響工作進度且增加人員曝露劑量。

建議：核一廠依除役規劃於停止運轉後有 8 年的過渡期，且現有員工的年齡偏高，待除役工作正式展開時，大多已退休或升遷離開原來的工作崗位，因此應利用現在機組營運的期間作好經驗傳承，避免類似事情發生。

(二)HBPP 於 1985 年即置於 SAFSTOR 狀態，待 2008 年才正式除役，於 2009 年時對內部員工發行一份 “Decommissioning Project Transition Plan”，說明除役計畫的變動與原因，讓電廠員工重溫除役的規劃、時程進度與目標。

建議：依原能會法規要求，核一廠須於 104 年提出除役計畫，得正式除役時可能又經過了 10 多年，屆時可比照 HBPP 的作法，提出一份過渡計畫說明，使後續的工作人員能了解除役規劃的始末與變動。

(三)HBPP 在辦公室各區域都張貼有整個除役時程，除文字敘述外，另以廠房標示該區域的工作於何時開始，並於何時結束，相當容易了解。同時又將各時期的廠區變化標示出來，使所有員工都明白未來的廠區環境是處於何種狀態，如附件 4、5、6 所示。

建議：核一廠現在雖處於初步規劃階段，也可比擬繪出未來的廠區形態，供同仁作為工作目標。

(四)燃料破損會造成除役時  $\alpha$  粒子擴散污染（特別是曾經發生開口性破孔，燃料丸被爐水沖出之電廠），作業人員  $\alpha$  粒子體內污染風險亦隨之提升，增加除役的工作量及困難度；故對燃料破損發生頻率較高的核二廠而言，由 HBPP 除役經驗可知， $\alpha$  粒子擴散污染控制為整體除役計畫之重點，而此部份需仰賴專業保健物理人員之輻射防護經驗。

建議：在電廠營運期間應落實異物入侵防範措施，隨時監測燃料可靠度，盡可能減少燃料破損機會，特別是避免開放性破孔發生。

(五)核一廠除役計畫分為 4 個階段：停機過渡階段、除役拆廠階段、廠址環境輻射偵測階段、廠址復原階段。其中於停機過渡階段期間，大部份的安全系統（如反應器保護系統、高壓注水系統、爐心隔離冷卻系統、爐心噴灑系統、備用硼液系統等）均已不需要再運轉，及維持系統功能可用。

建議：修改運轉規範（TS）、終期安全分析報告書（FSAR）及技術規範手冊（TRM）等持照文件內容，免除偵測試驗／維護程序書的執行，同時減少因違反上述文件規定的違規案件發生。

(六)參考國外除役作業中的規劃，除了原有的水處理系統與臨時性的水處理系統會同時使用外，其他系統均予以隔離包括廠內的通風系統，以避免在拆除系統設備時，污染物質隨著通風系統的運轉而到處擴散。

建議：於進入除役拆廠階段，即將廠內各區域進行詳細規劃，以臨時性的通風或水處理設備隔離各個高污染區域，以避免高／低污染設備交互污染。

三、至 EPRI Charlotte Office 實習：

(一)在除役作業的初期，須針對技術規範與運作系統、必要程序、緊急計畫等的刪減及變更作業，確實執行篩選及規劃。在美國，大約僅需一年時間即可完成上述文件的變更。

建議：由於核一廠為我國首次商用核電廠進行除役，在撰寫除役計畫第五章「除役期間仍須運轉之重要系統、設備、組件及其運轉方式」時，應同步與主管機關溝通並保持聯繫，確認前述文件變更實際作業方式，以避免雙方認知有太大落差。且上述文件變更應儘速完成以降低人力及維護設備等花費。

(二)許多國家並沒有處置場，這樣一來便阻礙了電廠除役作業的推動，且在處置場營運前須要另外興建貯存設施，廢棄物包裝尺寸大小往往無法確定，上述原因亦會造成除役規劃的困難。

建議：我國目前尚未有處置場，在除役規劃的同時須考量廢棄物產量、廠內暫存空間、廢棄物包裝尺寸等問題。

(三)高活度金屬(如：Core Barrel、Fuel Channel、CRBs)可選擇在廠內乾式貯存設施進行貯存。

建議：上述的工作可於正式除役前開始進行，可為用過核子燃料池釋出更多空間。

(四)處理高活度廢樹脂的基本構想，係將原本可能被分類為 B/C 類的廢樹脂分離成活度較低的 A 類(90%體積)及活度較高的 C 類(10%體積)。

建議：在台灣，因為處置場係由台電公司負責營運，故各類低放射性廢棄物所需的處置費用無太大差異，上述構想若僅是考慮費用及廢棄物體積的情況下，並無太大幫助。但若考慮到處置場整體廢棄物活度上限值，則可考慮引進此種廢樹脂處理方式。

(五)混凝土在電廠除役過程中是廢棄物的主要來源之一，部分電廠將混凝土作為回填材料使用。

建議：考量廠內貯存空間有限，廢棄混凝土如無法外運，可考慮是否做為回填材料使用，或進行放射性廢棄物固化之用。

(六)核電廠除役所產生的有害廢棄物處理相關要求應符合該國法規規定。

建議：課程中所提到的有害廢棄物種類，現在在核一廠已經沒有在使用，惟運轉初期曾經使用過而後汰換下來的廢棄物若仍留在廠內，則須於除役規劃時一併列入有害廢棄物處理規劃中。

(七)在除役作業中，含放射性的金屬物質可透過變賣或是回收再利用的方式進行處理。

建議：在其他國家也許可利用變賣或是回收再利用的方式來處理廢金屬，但我國並無核能相關的產業，若想處理廢金屬，可優先考慮將其回收至運轉中電廠使用。

(八)水處理系統在除役的不同階段仍需要維持其正常運轉。

建議：除役作業不同階段所需的水處理系統功能有所不同，建議可與除役作業排程一同考量後，規劃核一廠除役作業時的水處理系統。

(九)在整個除役作業過程中，避免污染物質散佈導致交叉污染的管控是必要的。

建議：由於除役作業期間，可能會有多項拆除作業同時進行，上述管控可減低工作人員所接受到的輻射劑量。

(十)進行化學除污時，除了要求達到特定 DF 值外，同時亦須考慮廢棄物產量。

建議：不是所有的材料都適用化學除污，在進行化學除污前須先對除污程序、方法有一定的了解，必要時可對關鍵材料進行試驗。

## 附錄

附件 1 EPRI Palo Alto Office 實習課表(1/3)

# AGENDA

## DECOMMISSIONING TRAINING FOR TAIWAN POWER COMPANY

December 2-6, 2013 • EPRI Palo Alto

MONDAY, DECEMBER 2, 2013	
TIME	TOPIC
8:30 a.m.	Welcome and Introduction Training Objectives and Goals
9:00 a.m.	Decommissioning Sequencing and Schedule (Presentation 1) <ul style="list-style-type: none"><li>• Decommissioning Strategy and Decisions</li><li>• Overview of the Decommissioning Process</li><li>• Typical Decommissioning Sequence and Schedule</li></ul>
10:00 a.m.	Break
10:30 a.m.	Decommissioning Sequencing and Schedule (Pres. 1) <ul style="list-style-type: none"><li>• Detailed Decommissioning Case Studies<ul style="list-style-type: none"><li>– Connecticut Yankee Plant – Resident Farmer End State</li><li>– Rancho Seco Plant – Industrial Use End State</li></ul></li></ul>
12:00 p.m.	Lunch
1:00 p.m.	Site Release Process Overview (Pres. 2) <ul style="list-style-type: none"><li>• Overview of Site Survey and Release Process Site Release Criteria and Limits</li><li>• Site Survey Types (MARSSIM)<ul style="list-style-type: none"><li>– Scoping Surveys</li><li>– Characterization Surveys</li></ul></li></ul>
1:45 p.m.	Summary of Day 1 Discussion
2:00 p.m.	Adjourn Day 1 Training
2:30 p.m.	Self Study
5:00 p.m.	Adjourn Self Study

附件 1 EPRI Palo Alto Office 實習課表(2/3)

**DECOMMISSIONING TRAINING FOR TAIWAN POWER COMPANY**

December 2-6, 2013 • EPRI Palo Alto

<b>TUESDAY, DECEMBER 3, 2013</b>	
<b>TIME</b>	<b>TOPIC</b>
8:30 a.m.	Arrive at EPRI Palo Alto
8:45 a.m.	Self Study
10:00 a.m.	Training Day 2 Objectives and Goals
10:15 a.m.	Site Characterization <ul style="list-style-type: none"> <li>• Land Characterization (Pres. 3)</li> </ul>
12:00 p.m.	Lunch
1:00 p.m.	Site Characterization <ul style="list-style-type: none"> <li>• Groundwater Characterization (Pres. 4)</li> </ul>
3:00 p.m.	Summary of Day 2 Discussion
3:30 p.m.	Self Study
5:00 p.m.	Adjourn Self Study

<b>WEDNESDAY, DECEMBER 4, 2013</b>	
<b>TIME</b>	<b>TOPIC</b>
8:30 a.m.	Arrive at EPRI Palo Alto
8:45 a.m.	Self Study
10:00 a.m.	Training Day 3 Objectives and Goals
10:15 a.m.	Site Characterization <ul style="list-style-type: none"> <li>• Underwater Areas (Pres. 5)</li> </ul>
12:00 p.m.	Lunch
1:00 p.m.	Site Characterization <ul style="list-style-type: none"> <li>• Buildings (Pres. 6)</li> </ul>
3:00 p.m.	Summary of Day 3 Discussion
3:30 p.m.	Self Study
5:00 p.m.	Adjourn Self Study

附件 1 EPRI Palo Alto Office 實習課表(3/3)

**DECOMMISSIONING TRAINING FOR TAIWAN POWER COMPANY**

December 2-6, 2013 • EPRI Palo Alto

THURSDAY, DECEMBER 5, 2013	
TIME	TOPIC
8:30 a.m.	Arrive at EPRI Palo Alto
8:45 a.m.	Self Study
10:00 a.m.	Training Day 4 Objectives and Goals
10:15 a.m.	Experiences with Reactor Internals Segmentation (Pres. 7)
12:00 p.m.	Lunch
1:00 p.m.	Experiences with Reactor Internals Segmentation (Pres. 7, cont')
3:00 p.m.	Summary of Day 4 Discussion
3:30 p.m.	Self Study
5:00 p.m.	Adjourn Self Study

FRIDAY, DECEMBER 6, 2013	
TIME	TOPIC
8:30 a.m.	Arrive at EPRI Palo Alto
8:45 a.m.	Self Study
10:00 a.m.	Training Day 5 Objectives and Goals
10:15 a.m.	Experiences with Reactor Vessel Segmentation (Pres. 8)
12:00 p.m.	Lunch
1:00 p.m.	Experiences with Reactor Vessel Segmentation (Pres. 8, cont')
3:00 p.m.	Summary of Day 5 Discussion
3:30 p.m.	Overview of Palo Alto Training
4:00 p.m.	Adjourn Palo Alto Training

附件 2 EPRI Charlotte Office 實習課表(1/3)



## Agenda

### TaiPower Decommissioning Technology Training

2013 December 16-20 • Charlotte, North Carolina

Monday, 16 December	
Time	Topic
8:30 a.m.	Welcome and Introduction Review of Palo Alto Training and Humboldt Bay Visit
9:00 a.m.	Determination of Functioning System Needs (Presentation 9) <ul style="list-style-type: none"> <li>• Typical System Related Goals During Early Stages of Decommissioning</li> <li>• Process for Justification of System Downgrading</li> <li>• U.S. Experience with System Reclassification</li> <li>• Typical Systems Required during Decommissioning</li> </ul>
10:00 a.m.	Break
10:30 a.m.	Determination of Functioning System Needs (Presentation 9, Continued)
12:00 p.m.	Lunch
1:00 p.m.	Spent Fuel Pool Isolation, Cooling and Safety Analysis (Presentation 10) <ul style="list-style-type: none"> <li>• Experiences with Maintaining the Spent Fuel Pool Cooled During Decommissioning</li> <li>• Approaches that Allow Isolation of the Fuel Pool Until Fuel is Moved to Dry Fuel Storage</li> </ul>
2:00 p.m.	Begin Self Study; Refreshments at 3:00 p.m.
5:00 p.m.	Adjourn
Tuesday, 17 December	
Time	Topic
8:30 a.m.	Written Quiz on Day 1 Topics
9:15 a.m.	Quiz Review
9:30 a.m.	Radioactive Waste Management during Decommissioning (Presentation 11) <ul style="list-style-type: none"> <li>• US Radioactive Waste Disposal Options</li> <li>• Decommissioning Waste Volumes and Strategies</li> <li>• Typical Shipping Packages</li> <li>• Disposition of Large Components</li> <li>• Key Waste Management Lessons Learned</li> </ul>
10:00 a.m.	Break
10:30 a.m.	Radioactive Waste Management during Decommissioning (Presentation 11, Continued)
12:00 p.m.	Lunch
1:00 p.m.	High Activity Metal Volume Reduction Technology (Presentation 12) <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sources of High Activity Metal</li> <li>• Focus of EPRI Research</li> <li>• Field Implementation Results (By Exelon)</li> </ul>
2:00 p.m.	Begin Self Study; Refreshments at 3:00 p.m.
5:00 p.m.	Adjourn

## 附件 2 EPRI Charlotte Office 實習課表(2/3)

Wednesday, 18 December	
Time	Topic
8:30 a.m.	Written Quiz on Day 2 Topics
9:15 a.m.	Quiz Review
9:30 a.m.	High Activity Resin (Presentation 13) <ul style="list-style-type: none"> <li>• EPRI Technical Report # 1025303, "Program on Technology Innovation: Volume Reduction Methods and Waste Form Changes for High-Activity Spent Resin", June 2012</li> <li>• Other EPRI Reports Class B/C and Intermediate Level Waste Volume Reduction:               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ # 1015115, "Waste Class B/C Reduction Guidelines", 2007</li> <li>○ # 1023017, " Waste Class B/C Reduction Guidelines, Revision 1", 2011</li> </ul> </li> </ul>
10:00 a.m.	Break
10:30 a.m.	High Activity Resin (Presentation 13, Continued)
12:00 p.m.	Lunch
1:00 p.m.	Management of Low Activity Solid Wastes (Presentation 14) <ul style="list-style-type: none"> <li>• Low Activity Solid Wastes generated during a Decommissioning               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Water Treatment Media</li> <li>○ Consumables</li> <li>○ Concrete</li> </ul> </li> <li>• Potential Treatment Methods</li> <li>• Concrete Clearance Methods</li> </ul>
2:00 p.m.	Begin Self Study; Refreshments at 3:00 p.m.
5:00 p.m.	Adjourn

Thursday, 19 December	
Time	Topic
8:30 a.m.	Written Quiz on Day 3 Topics
9:15 a.m.	Quiz Review
9:30 a.m.	Hazardous Waste Management (Presentation 15)
10:00 a.m.	Break
10:30 a.m.	Volume Reduction through Asset Management and Recycle (Presentation 16)
12:00 p.m.	Lunch
1:00 p.m.	Systems Needed for Waste Water and Contamination Control (Presentation 17) <ul style="list-style-type: none"> <li>• Functions of Systems Needed for Decommissioning               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Spent Fuel Cooling</li> <li>○ Clarity of Cutting Pools</li> <li>○ Radioactive Liquid Waste Management</li> <li>○ Groundwater Processing</li> </ul> </li> <li>• Water Systems Needed for Different Phases of Decommissioning               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Phase 1: Moving Fuel to Dry Fuel Storage</li> <li>○ Phase 2: Highly Contaminated Systems Removal</li> <li>○ Phase 3: Remaining Systems Being Removed</li> <li>○ Phase 4: Buildings Being Decontaminated</li> <li>○ Phase 5: Final Remediation and Site Release</li> </ul> </li> </ul>
2:00 p.m.	Begin Self Study; Refreshments at 3:00 p.m.
5:00 p.m.	Adjourn

## 附件 2 EPRI Charlotte Office 實習課表(3/3)

Friday, 20 December	
Time	Topic
8:30 a.m.	Written Quiz on Day 4 Topics
9:15 a.m.	Quiz Review
9:30 a.m.	Contamination Control during Decommissioning (Presentation 18)
10:30 a.m.	Break
11:00 a.m.	Self Study
12:00 p.m.	Lunch
1:00 p.m.	Comprehensive Examination
2:30 p.m.	Exam Review
3:30 p.m.	Adjourn

附件 3 反應爐切割進度會議議程 (1/2)

略，為避免著作權爭議，故不顯示。

附件 3 反應爐切割進度會議議程 (2/2)

略，為避免著作權爭議，故不顯示。

#### 附件 4 除役工作時程

略，為避免著作權爭議，故不顯示。

#### 附件 5 廠區變化

略，為避免著作權爭議，故不顯示。

附件 6 廠房除役時程

略，為避免著作權爭議，故不顯示。