

出國報告(出國類別：實習)

## 赴美國參加阿岡國家實驗室舉辦之設施 除役訓練課程

服務機關：核能安全委員會

姓名職稱：黃亭堯技士

派赴國家/地區：美國/拉斯維加斯

出國期間：114年3月22日至3月29日

報告日期：114年6月13日

# 摘要

本次訓練由美國阿岡國家實驗室(Argonne National Laboratory, ANL)於拉斯維加斯舉辦，訓練期間自114年3月24日至3月26日，共計三天。課程名稱為「設施除役訓練課程(Facility Decommissioning Training Course)」。

本次訓練課程的學員來自美國其他國家實驗室、產業界及韓國水電與核電公司(Korea Hydro & Nuclear Power)，授課團隊由 ANL 的專家學者及具有豐富除役經驗的業界專業工程師組成。課程內容涵蓋核設施整體除役介紹、環境安全與衛生管理、廢棄物處理、除役規劃與執行、輻射特性調查、最終狀態調查、污染清理技術、除役拆除技術、全球除役現況及案例分析等。

除理論基礎外，課程中特別分享多個成功除役廠址的實務案例，深入剖析除役各階段所面臨的挑戰，並探討實務上採用的有效克服策略。此外，課程亦介紹了最新的除役技術及國際間核電廠除役進度的差異，透過與美國專家的經驗交流，對我國核設施除役的知識與能力提升，獲益良多。

# 目次

|         |    |
|---------|----|
| 摘要      | I  |
| 目次      | II |
| 壹、目的    | 3  |
| 貳、行程    | 4  |
| 參、訓練紀要  | 5  |
| 肆、心得與建議 | 26 |

## 壹、目的

本次赴美參加設施除役訓練課程，旨在提升對核設施除役流程的監管技術與能力，確保我國核電廠在進入除役階段時，能夠依循安全、符合規定且有效的方法執行，從而保障公眾與環境的健康與安全。本訓練課程由隸屬於美國能源部的阿岡國家實驗室(Argonne National Laboratory, ANL)主辦，課程涵蓋核設施除役的關鍵領域，如除役計畫的制定與執行、環境安全與人員健康的保護、污染清理與拆除技術、廢棄物處理及國際除役動向等。此次為期三天的專業訓練，學員將能夠從理論與實務層面掌握如何有效推動安全的除役作業，並熟悉國際標準與管理措施，以強化我國核設施除役的監管能力。

此次出國不僅是參加訓練課程，更希望藉此深入了解美國在核設施除役方面的最新做法，並蒐集相關資訊，以作為我國核電廠除役管制技術的參考。透過與國際專家的學習與交流，學員得以掌握全球除役技術與管理的最新發展趨勢及實務經驗，期望藉此提升我國核設施除役管制人員的專業素養，並引入國際先進的除役技術與管理經驗，強化我國核能設施除役工作的安全性及可行性，確保執行過程符合國際規範，降低風險並提高執行效率。

## 貳、行程

本次奉派參加美國阿岡國家實驗室舉辦之設施除役訓練課程，行程概要如下：

| 日期                         | 地點                                       | 行程內容                       |
|----------------------------|------------------------------------------|----------------------------|
| 114/3/22(六)                | 臺灣→美國拉斯維加斯                               | 去程                         |
| 114/3/23(日)                | 美國拉斯維加斯                                  | 課前預習與提問資料準備                |
| 114/3/24~114/3/26<br>(一~三) | 美國拉斯維加斯 Tuscany<br>Suites & Casino Hotel | 參加美國阿岡國家實驗室<br>舉辦之設施除役訓練課程 |
| 114/3/27~114/3/29<br>(四~六) | 美國拉斯維加斯→臺灣                               | 回程                         |

## 參、訓練紀要

本次訓練課程旨在全面介紹各類核設施在除役過程中所需面對的關鍵議題與挑戰，涵蓋從規劃、執行到最終評估的各個環節，以下將依照課程進行的順序，逐步摘述此次訓練的重點內容。

### 一、核設施除役介紹(Introduction to Decommissioning)

介紹核設施除役的基本概念、流程、法規以及美國的管制機關與架構。

#### (一) 除役概述

核設施除役是指安全地將不再使用的設施或場所從營運狀態解除，並將廠址殘留的放射性活度降低至符合規定的標準，進而解除廠址管制，使其可供無限制或有限制條件下安全使用，最終完成營運許可證的終止。

除役流程是一項複雜的多方協調過程，涵蓋設施經營者、主管機關及其他利害關係人的密切互動。期間，主管機關必須持續掌握計畫進度，確保各項作業嚴格依據除役計畫執行，避免任何意外狀況發生。整個過程需經過周密規劃與合理除役方案的選擇，並伴隨專案文件的準備與審核，確保除役工作在安全、合規的前提下順利推進。

除役流程是一個需要周詳計畫、多方參與及嚴格監管的複雜過程，其具體步驟和重點會根據設施的性質、風險程度以及適用的法規要求而有所調整。除役流程的主要階段大致包括：

- 安全停機/停用 (Safe Shutdown/Deactivation)。
- 監督與維護 (Surveillance & Maintenance, S&M) 計畫。
- 輻射特性調查/規劃與工程 (Characterization Survey/Planning & Engineering)。
- 環境整治/復原 (Environmental Remediation/Restoration)。
- 最終狀態偵檢(Final Status Survey)。
- 最終報告/結案 (Final Report/Close-out)。
- 許可證終止/廠址解除管制(License Termination/Site Release)。

核設施在正常運轉期間，若面臨以下幾種情境時，便需開始審慎評估是否應邁入除役階段：

- 設施預期壽命結束。
- 技術過時。
- 營運成本過高。
- 運轉執照屆期。

- 設施運轉任務結束。
- 政府政策異動。
- 意外事故。

需要除役的設施種類繁多，包括鈾礦和選礦廠、燃料製造廠、動力用和研究用反應爐、研發實驗室(如粒子加速器、放射性示蹤實驗室、普通實驗室)、軍事/國防設施、廢棄物處置設施、工業設施、醫療設施、天然存在的放射性物質 (NORM) 和技術增強的天然放射性物質 (TENORM) 設施等，另依據廠址建造時期可區分為：

- 歷史廠址 (Legacy Sites)：指在現代管制法規訂定之前即開始營運的場所，因此除役和整治的過程較為複雜，例如：美國能源部 Hanford 生產反應爐。
- 現代設施 (Modern Sites)：在現代監管架構和運轉預期下營運，管理上較方便，除役和整治的考量也更周全。

## (二) 除役的策略

國際原子能總署 (IAEA) 建議除役策略：

- 舊策略 (1990年代中期以前)：分為 Stage 1、Stage 2 和 Stage 3。當時也使用其他術語，如 4D：Deactivation(去活化)、Decommissioning(除役)、Decontamination and Demolition (除污和拆除)，以及 5D(4D 加上 Disposal「處置」)。
- 新策略 (1990年代中期以後)：主要分為立即拆除 (Immediate Dismantling)、延遲拆除 (Deferred Dismantling) 和封存 (Entombment)。

美國管制除役策略：

- DECON(Decontamination,立即拆除)：立即開始拆除核設施並清除放射性污染，最短時間內恢復廠址可再利用。
- SAFSTOR(Safe Storage, 安全儲存)：將設施長期存放，待輻射衰變後再拆除。
- ENTOMB(密封封存)：用混凝土或其他屏蔽材料永久封存反應爐或核設施，使其與外界隔離，直到放射性活度降至安全水平。此外美國能源部所使用的原地除役策略(In Situ Decommissioning, ISD) 視同於 ENTOMB(封存)。

選擇除役策略的考量因素通常包含：

1. 政府基礎設施，如框架、政策和法規。
2. 資金來源：政府資助或透過除役基金。
3. 廢棄物管理系統的可用性。
4. 設施或廠址的未來用途。
5. 設施類型、物理狀態和殘留放射性活度。
6. 潛在危害的安全評估。

7. 除役人力。
8. 社會和經濟影響，如可能的利害關係人。

選擇何種策略取決於一系列技術、經濟、社會和法規因素，最終目標是安全地將核設施從使用狀態移除，以使土地外釋或在非限制條件下使用，並達到法規允許的最終狀態(End State)，即外釋標準(Release Criteria / Clearance Criteria)。

### (三) 美國的管制機關與架構

主要的管制機關包括核能管制委員會(NRC)、能源部(DOE)和環境保護署(EPA)，以及州政府，這些機關在除役過程中的職權分工如圖一所示。

#### 1. 美國核能管制委員會(Nuclear Regulatory Commission, NRC)：

NRC 是美國主要的核能管制機關，負責監管大部分的設施經營者，其監管對象涵蓋商業核電廠、研究反應器以及放射性物質持用者。在管制方面，NRC 發布一系列法規(Code of Federal Regulations, CFRs)、法規指引(Regulatory Guides)、標準審查計畫(Standard Review Plans)、部門技術立場文件(Branch Technical Position Papers)和 NUREG 報告等文件，用以規範除役活動。

除役過程中，NRC 負責審查和批准核電廠的除役計畫，但目前多已不再強制要求電廠提交除役計畫，而是使用核電廠停止運轉後除役活動報告(Post-Shutdown Decommissioning Activities Report, PSDAR)和執照終止計畫(LTP)替代。另外 NRC 也會執行除役檢查，檢查頻率通常取決於除役活動的風險程度，有關檢查的方針、頻率及項目由 NRC 制定於 IMC2561 文件中，NRC 亦負責批准最終的廠址外釋和授權終止執照。

#### 2. 美國能源部 (Department of Energy, DOE)：

DOE 既是設施經營者，也是其自身設施的監管者，具有獨特的雙重身分。DOE 制定了專屬的管理政策、指引以及技術標準，以規範轄下設施的除役作業，例如：「用過燃料管理計畫」(Spent Fuel Management Program, SFMP)與「早期使用廠址復原行動計畫」(Formerly Utilized Sites Remedial Action Program, FUSRAP)等，皆為 DOE 針對不同類型廠址所推動的管理方案。

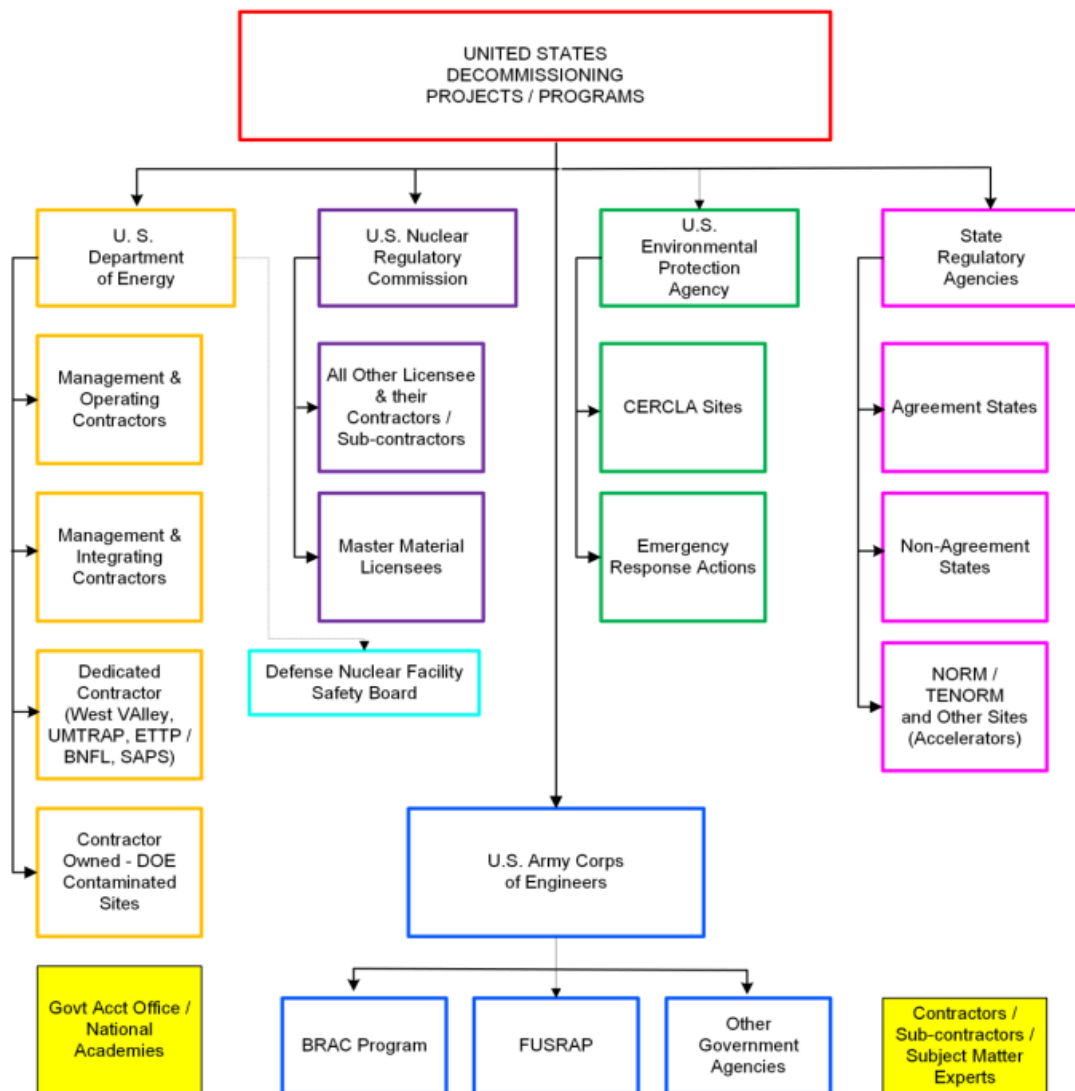
在除役策略方面，DOE 採用自有的除役模式，例如「原地除役」(In Situ Decommissioning, ISD)，即將部分設施原地封存，減少拆除與運輸放射性廢棄物的風險與成本。此外，DOE 設有獨立的除役檢查流程，由企業評估辦公室(Office of Enterprise Assessment, EA)負責執行，確保除役過程符合法規與標準。為提升管理效能，DOE 亦制定了自有的計畫性方案與標準審查方法文件(Criteria Review & Approach Document, CRAD)，作為除役活動審查與監督的依據。

#### 3. 美國環境保護署 (Environmental Protection Agency, EPA)：

EPA 是美國主要的環境管制機關，工作範疇涵蓋廢棄物廠址的移除工作，例如 Gulf Nuclear 廠址和鐳塗料廠址；此外，EPA 也負責洩漏廠址和事故廠址的緊急應變處理，如火車脫軌事故。根據美國「綜合環境處理、賠償和責任法」(CERCLA，又稱 Superfund)，EPA 負責對歷史污染或無主污染廠址進行調查、修復以及責任追溯，對於同時受到 CERCLA 監管的 DOE 廠址，DOE 與 EPA 於1995年共同發布聯合政策聲明，針對非緊急除役活動，制定合作清理方案，以促進協調與高效的環境復原。

#### 4. 州政府 (State Governments)：

截至2020年，美國有39個「協議州(Agreement States)」，這些州政府與 NRC 簽訂協議，與 NRC 共同管理，協議州政府可以制定比聯邦政府更嚴格的標準，並管制聯邦政府權力之外的事項，如某些 NORM 材料和可發生游離輻射設備。州政府還負責頒發與除役相關的其他許可證，例如水質許可證、空氣排放許可證、固體廢棄物許可證、拆除許可證、運輸許可證和有害廢棄物許可證等。



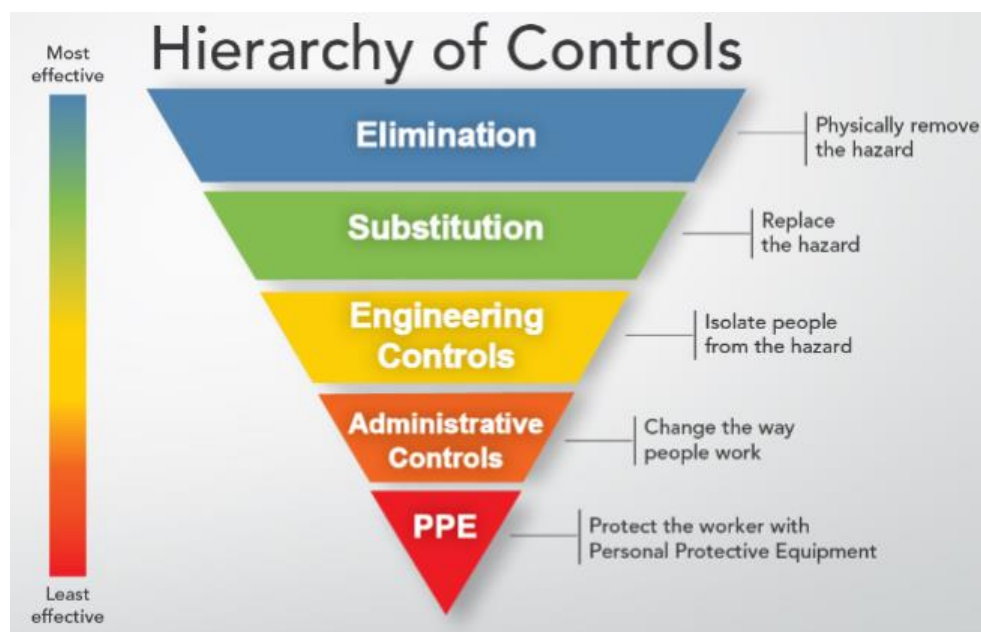
圖一、美國主要除役管制機關分工圖

## 二、環境、安全與健康 (Environment, Safety, & Health, ES&H)

### (一) ES&H 概述

ES&H 的核心目標在於採用整合性方法，全面保護工作人員、一般民眾及環境，避免因工作活動而產生的危害與負面影響，這是一項可衡量且應優先推動的目標。美國能源部依據10 CFR 851法規，規範工作人員安全與健康計畫，並建立明確程序來判定違規情形及執行相應的改正措施。ES&H 的職能涵蓋範圍廣泛，包括輻射安全、非輻射安全及其他相關安全領域，其中輻射安全又細分為工作人員輻射安全管制、放射性物質排放管理及放射性廢棄物處理等方面

危害(Hazards)被定義為可能導致人員生病、受傷或死亡，或危害設施及環境之潛在危險源，可能涉及放射性、化學、能源或其他不利的工作場所條件。為了有效管理危害，必須充分理解並學會識別危害，並藉此分析需採取的改善行動。而有效控制和預防危害的方法包括：教導工作人員如何識別並控制危害；使用「危害控制層級」(hierarchy of controls，如圖二)來識別和評估控制方案，其有效性由高到低依序是：消除 (Elimination)、替代 (Substitution)、工程控制 (Engineering Controls)、行政管制 (Administrative Controls)和個人防護裝備 (Personal Protective Equipment, PPE)；以及為緊急情況和非例行活動制定危害控制計畫。



圖二、危害控制層級

### (二) 除役過程的 ES&H 規劃

ES&H 在核設施的營運階段與除役期間皆面臨重大挑戰，然而除役階段因設施系

統與結構多已老化，加上廠址狀況在此期間不斷變動，使得 ES&H 的規劃更為複雜且具挑戰性，除役作業本身也提升了人員曝露於各種潛在危害的風險，例如：

- 頻繁使用鷹架、梯子及升降設備
- 有時需進入密閉空間作業
- 因焊接與研磨作業導致接觸有害氣體與粉塵
- 增加重物吊運與廢棄物搬運等高風險作業

上述因素皆加劇了除役期間對 ES&H 的要求與壓力。

此外，除役階段的人力組成亦與營運時不同，現場人員數量會依照作業需求機動調整，且所需技能也較為特殊。由於除役階段往往依賴大量外部承包人力，這些人員可能缺乏相關經驗與組織知識，因此更需仰賴完善且持續的教育訓練。為降低潛在風險，強化作業安全與防護能力，建議採取以下措施：

- 建立嚴謹且簡潔的作業流程
- 確保工作人員接受充分的健康檢查
- 鼓勵工作人員參與前期規劃與風險評估

在核設施除役的過程中，環境、安全與健康(ES&H)的核心理念是將安全置於首位，其優先性應超越成本與工期的考量，所有現場潛在的危害都必須被嚴肅看待，並認知到這些風險的性質與嚴重程度會隨除役進度而不斷演變，因此，深入掌握特定廠址的具體風險與挑戰，是確保安全管理有效落實的關鍵。執行除役作業時，營運階段所建立的安全控制措施可視情況沿用，並根據除役的特殊需求進行必要的調整。同時，持續維護與強化一套全面性的 ES&H 計畫至關重要，規劃工作時，應預設污染物可能擴散至原本乾淨的區域，並審慎檢視設施的結構性問題，例如樓板承載能力、起重機荷重限制，以及土壤整治作業可能對建築結構造成的影響。ES&H 計畫的有效執行，極度仰賴人員的高度參與及紀律，這不僅是基層工作者的責任，更需要包括管理團隊在內的所有層級以身作則，以實際行動展現對安全的堅定承諾。

### 三、除役規劃與管理(Planning and Management)

除役的規劃與管理包含除役前期準備、資源配置、組織管理、成本效益分析、安全文化建構、利害關係人溝通與管制機關應對等事項，其過程涉及跨部門協調、法規遵循與公共溝通，其複雜程度與挑戰性不亞於核設施的建造與運轉。

#### (一) 除役規劃重點

除役計畫的成功關鍵，在於能否及早啟動並展開詳實而縝密的準備，以美國經驗為例，多數核電廠建議於停機前三年即展開除役規劃作業，避免在尚未具備完整藍圖

與程序的情況下貿然啟動拆除工程，進而衍生額外風險與資源浪費。有效的前期規劃應涵蓋人力配置、程序制定與成本估算，並預先納入風險因子與彈性應變空間，以確保作業的穩定推進。

除役的最終目標，是清除廠址內所有放射性與其他有害物質，使該廠址達到土地解除管制的標準，得以作為限制性或非限制性使用。依據美國相關法規如10 CFR 20 Subpart E，業主須遵守聯邦政府、州政府與地方政府之規範，完成必要的復原與監管程序，為達成上述目標，廠址的歷史與污染特性調查(如廠址歷史評估，HSA)至為關鍵。透過調閱過往圖面、事故紀錄、輻射量測與相關文書資料，可全面瞭解設施潛在風險與污染源，並據以推算合理的除役費用與時間規模，這些資料亦將成為後續與管制機關溝通、設計工作流程與建立預算的基礎。

與管制機關的互動，不僅是一項必要動作，更是除役順利推動的助力。依據美方經驗顯示，除役單位應主動與 NRC、DOE、EPA 等機關保持密切聯繫，明確釐清相關主責機關與適用法規(如 CERCLA、NEPA 等)，並按期繳交必要文件，如停止運轉後除役活動報告(PSDAR)、除役計畫(DP)、執照終止計畫(LTP)等，爭取主管機關之共識與配合(Buy-in)。

此外，利害關係人(Stakeholders)及在地社群的參與亦是不可忽視的一環，在初期即展開持續性溝通，並設立公民參與平台或社區諮詢委員會，可有效建立公信力與合作氛圍，美國不少除役案例顯示，當地居民與非政府組織的支持，對於除役進程與最終成果有顯著正面影響。最後，整體安全規劃與專業訓練是貫穿除役全程的關鍵因素，針對吊掛作業、切割作業等高風險環節，均需安排相應的訓練與模擬演練，並於各階段導入 ALARA 原則，強化現場作業的劑量控管與風險防範，確保員工與公眾的健康安全。

## (二) 除役管理策略

除役工作的順利推動，除了前期的縝密規劃外，亦有賴於妥善的管理策略與執行模式，根據美國多項除役實例，業者在執行除役專案時，常依自身條件與風險承擔能力，選擇適切的管理架構，常見模式如下：

### 1. 自辦(Self-Perform)：

- 優點：可保留更多廠址知識與員工經驗，業者能主動掌控工程進度、品質與細節。
- 缺點：業主須承擔除役過程中的所有風險，並克服組織文化由營運轉為除役之心態轉變。

### 2. 承包商模式(Decommissioning Contractor)：

- 優點：由具備豐富經驗的專業廠商負責執行，提高效率與安全性，此外業者只需對單一承包商負責，有助於溝通與協調，減少內部管理負擔。
  - 缺點：須投入足夠資源進行合約管理與績效監督，確保承包商依據合約內容履行責任，若契約條款不夠明確，可能導致責任界定不清，進而引發爭議或管理困境。
3. 團隊整合(Integrated D&D Team)
- 優點：業主與外部人員雙方共同執行，保留既有廠址知識與當地就業機會。
  - 缺點：內外人員融合過程中可能產生文化差異與溝通落差，需妥善管理組織內部的協作氛圍與角色分工。
4. 執照轉讓(License Transfer)：
- 優點：風險轉移至新執照持有者，由具經驗或專業除役機構承擔風險，並可迅速啟動拆除作業。
  - 缺點：因監督減少而導致品質疑慮，且需積極爭取主管機關與社會大眾的信任與接受度。
5. 資產出售(Sell the Asset)：
- 優點：業主可將整體資產(包含場址、除役責任與除役信託基金)轉讓予具除役執行能力的第三方專業公司，能加速資產與責任的清算，有利於業主重整資源、聚焦核心業務。
  - 缺點：成交過程往往牽涉複雜財務、法律與信譽審查，亦需說服管制機關與當地利害關係人接受新業主的執行能力與長期承諾。

有效的除役管理，需建立一套結構清晰、功能齊備的組織體系，依除役階段不同(如過渡期、執行期、終止階段)，組織需涵蓋工程、工安、訓練、輻防、行政、法規對應與公關等職能，並重視知識移轉與人力延攬，組織內部應避免階層過多，鼓勵部門間溝通協作，並建立即時決策機制，以減少溝通延遲與資訊傳達錯誤。在人力資源方面，須提前部署轉任、離職協助與制定激勵策略，提供再訓練、職涯諮詢與透明的溝通管道，使員工清楚了解未來方向，減少組織內部動盪。整體而言，除役管理策略的核心價值在於「穩定推動、明確分工、有效溝通、妥善承擔」，唯有整合內外資源與持續優化組織運作，方能安全、高效地達成除役目標。

#### 四、除役期間的廢棄物管理(Waste Management in Decommissioning)

核設施的除役作業(Decommissioning and Decontamination, D&D)之所以成本高昂且過程複雜，核心挑戰在於放射性廢棄物的處理與管理，廢棄物管理在整個 D&D 生命週

期中扮演著舉足輕重的角色，其相關費用通常佔除役總預算的30%至45%，因此，是否具有高效的廢棄物管理策略，將直接左右 D&D 計畫的工期安排、預算控制，甚至影響最終能否順利達成目標。

廢棄物的管理概念與規劃起始於「廠址歷史評估」(Historical Site Assessment, HSA)，HSA 的目的在於徹底瞭解廠址過去與現在的狀況，從而預測廢棄物可能存在的位置與類型，進行 HSA 的重要原則是「越早開始越好」，一份全面的 HSA 報告通常包含廠址特性、評估方法、歷史文件審查、現場調查以及最重要的「人員訪談」，過往的經驗顯示，廠址的污染可能存在於輻射管制區域之外，且歷史記錄可能不甚完整，因此，與現職或離職員工的訪談將成為尋找隱藏問題的關鍵。

在 HSA 確立潛在區域後，接下來便是進行輻射特性調查，這一步驟是為了獲取詳細資訊，以便規劃後續除役作業並滿足執照終止的要求，輻射特性調查所提供的數據資料，對於評估廢棄物總量、確定除污方法及成本估算至關重要。從過往經驗中得知，輻射特性調查的準確性將受到 HSA 的影響，此外，調查過程亦須考慮到難以偵測的核種與非放射性物質，並確保人員經過適當訓練以維持技術的一致性。

D&D 過程中產生的廢棄物主要分為兩大類：放射性廢棄物和非放射性廢棄物(如石棉、PCB)，其中美國 NRC 法規10 CFR 61將低階放射性廢棄物(Low Level Waste, LLW)依據放射性核種活度與穩定度分為 A、B、C 三類，A 類所需防護規範最低，C 類最高。為了有效管理廢棄物，可依據實際情形採用多種策略與技術，其核心理念是將廢棄物產量最小化，一般而言，物料的回收與再利用(Valorization)是最具經濟效益的首選，而大量物料的最終外釋調查(Bulk Survey for Release, BSFR)也是考量的選項之一，BSFR 是核設施除役時，為了證明大批物料的放射性活度低於法規管制標準，所進行的大規模輻射調查流程，可有效減少所需處理的放射性廢棄物產量與成本。

此外，污染的隔離與預防也極為重要，可透過物理屏障、塗層、通風過濾(HEPA)等方式來實現，當無法實現產量最小化時，則考慮體積減量技術，例如壓實、切碎、焚燒和金屬熔煉等。講師在課程中不斷強調 OHIO(Only Handle It Once)的概念，指在處理廢棄物時，盡量確保每個物品在同一人手上只接觸過一次，以避免重複搬運造成額外的時間與成本，以及規避不必要的風險發生。

廢棄物的管理也牽涉到適當的包裝與運輸，容器的設計一般須考量內容物的特性與安全設計，並符合低成本、運送方便、容易貯存等要求，而運輸的方式依據成本與時程考量，主要透過卡車和鐵路達成，另外，考量通常廢棄物的產生速度可能會超過運輸的能力，妥善規劃場內廢棄物的運輸路徑，以及預留足夠的暫存區域是必要的。最終步驟則是廢棄物的處置，廢棄物處置場一般選址於高度乾燥、地理隔離性強且地

下水無連通之區域，美國設有商業處置場接受不同類別的 LLW，美國 DOE 亦設有廠址負責處理 DOE 設施或聯邦政府產生的廢棄物，例如內華達國家保安場址(NNSS)低放射性廢棄物處置場。廢棄物接收標準(Waste Acceptance Criteria, WAC) 明訂所有進場廢棄物之放射性、化學性、物理性條件，每一廢棄物來源單位須提出證明並經驗證其符合 WAC，方可獲准運入廢棄物處置場，各處置場對於品質保證、廢棄物來源單位、包裝運輸的合規性、輻射與危害特性的鑑定均需進行嚴密管控。

核設施除役過程中的廢棄物管理，是一項必須謹慎應對的重要課題，成功的關鍵往往在於準確且完整的廠址歷史評估、輻射特性調查，以及周密的廢棄物管理規劃。實際作業中，流程往往無法完全依照預定順序進行，因此遵循 OHIO 原則(Only Handle It Once)尤為重要，以提升作業效率並降低風險，此外，除役專案的條件與挑戰會隨著不同階段變化，必須持續關注法規更新狀況與吸取業界經驗教訓，制訂完善的應變處理計畫，方是不斷優化除役廢棄物管理水準的不二法門。

## 五、輻射調查與廠址調查程序(Radiation Survey and Site Investigation Process, RSSI)

### (一) MARSSIM 與 MARSAME 簡介

在核設施除役與環境調查的過程中，精確且系統化的輻射特性調查對於風險評估、後續處置與最終外釋具有關鍵意義。美國環保署(EPA)聯合核能管制委員會(NRC)、能源部(DOE)與國防部(DOD)所制定的兩份技術指引文件－MARSSIM(Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual)與 MARSAME(Multi-Agency Radiation Survey and Assessment of Materials and Equipment)，提供了輻射特性調查在不同應用場景中的標準化流程與科學方法。

MARSSIM 主要針對廠址及建物表面進行最終狀態調查(Final Status Survey, FSS)，其核心價值在於建立統計學上可接受的放射性殘留評估流程，確保廠址的外釋符合法規標準，透過分類調查區域、建立偵檢單元、設計取樣策略與數據評估等步驟，MARSSIM 協助調查單位在資源有限的情況下，仍能有效證實廠址達到外釋標準。

相對地，MARSAME 則延伸了 MARSSIM 的精神，聚焦於可移動性材料與設備(如廢金屬、工具、內裝物)的放射性評估，其重要性在於提供一套可行且成本效益高的調查方法，使除役過程中的大量待處理物品，能依其放射性特性妥善分類、再利用或處置，避免資源浪費並降低整體除役成本。

### (二) RSSI 簡介

輻射偵檢與廠址調查程序(Radiation Survey and Site Investigation Process, RSSI)是一套系統性的流程，用來規劃、執行與評估核設施除役過程中的輻射污染狀況，此流程是

MARSSIM 中的核心架構之一，也被廣泛應用於核設施廠址的清理與解除管制作業。這個調查程序通常包含以下階段：

1. 廠址歷史評估(Historical Site Assessment, HSA)：

HSA 的目標是初步將核設施區分為受影響與未受影響區域、識別潛在污染源、評估對人類健康與環境是否構成威脅等，可為後續範圍調查與輻射特性調查的設計提供參考，資料的來源有歷史運轉紀錄、許可文件、事故紀錄、作業人員訪談、廠址設計圖與照片等。透過 HSA 的執行，可初步建立廠址概念模型(Conceptual Site Model, CSM)，幫助識別設施的污染源、外釋機制、遷移路徑、曝露途徑和有關受體，並協助後續輻射特性調查的規劃。

2. 範圍偵檢(Scoping Survey)：

範圍偵檢的功能包含驗證 HSA 的結果、執行初步危害評估、支援初步的廠址分類(如 Class 3)，若有需要，範圍偵檢的結果可作為提供輻射特性調查設計之參考依據，與評估調查計畫是否可有效應用於輻射特性調查或最終狀態偵檢。

3. 輻射特性調查(Characterization Survey)：

廠址與設施的輻射特性調查是除役過程中的關鍵工作，也是所有調查階段中最全面且數據最豐富的一環，其主要目的是確認污染的性質與範圍，分析污染的擴散途徑以及對環境和人類的潛在風險，為除污規劃與後續最終狀態偵檢奠定良好基礎。具體工作內容包含：明確界定污染物種類、分布介質與污染程度；收集數據以評估適合的改善措施與除污技術；作為設計最終狀態偵檢的重要依據。

4. 改善輔助偵檢(Remedial Support Survey)：

改善輔助偵檢是在除污作業進行期間即時執行的調查階段，主要目的在於確保修復行動達到預期成效，並為進入最終狀態偵檢做好準備，其關鍵任務包含：即時支援現場的污染改善措施，判斷除污行動是否足夠；確認廠址或偵檢單元是否已具備進入 FSS 的條件；提供廠址特定參數(如污染分布、劑量估算等)的最新估值，以作為 FSS 設計的依據。透過即時的調查資料回饋，可有效避免「除污過度」或「除污不足」的情況，提升資源利用效率與最終狀態偵檢的精確性。

5. 最終狀態偵檢(Final Status Survey, FSS)：

最終狀態偵檢是確認廠址經過改善措施或除污作業後，是否達到事先設定之外釋標準與環境安全要求的關鍵階段，FSS 的執行需依據經主管機關審查同意的偵檢計畫，並依照系統性取樣與統計方法進行，確保調查結果具代表性與可信度。具體作業內容包含：根據輻射特性調查與改善偵檢的結果，設計取樣策略與偵檢單元、進行放射性物質的劑量或濃度量測、分析殘餘濃度是否符合外釋標準，並完成最終狀態調查報告

(Final Status Survey Report, FSSR)。FSS 不僅是一項偵檢技術活動，更是安全性與合規性的最終驗證，對於廠址釋出後的未來用途與長期監控策略都具有重大意義。

此外，針對上述各項調查階段，課程中特別著重說明輻射特性調查與最終狀態偵檢兩個步驟，並強調其在整體除役過程中的關鍵地位，以下針對此兩階段的調查內容進行補充說明：

### (三) 輻射特性調查

設計輻射特性調查一般需考量以下幾點因素：

- 決策目標與法規依據。
- 取樣方法，如隨機取樣或系統性取樣。
- 偵檢儀器的選擇，包含儀器靈敏度與最低可測濃度(MDC)。
- 品質保證與品質管制(QA/QC)。
- 決策規則與誤差容忍度(Decision Rule and Error Tolerance)。

課程中建議採用資料品質目標(Data Quality Objectives, DQO)流程來優化樣本數與佈點設計，DQO 是一種系統性的方法，用於協助調查人員設計取樣與分析計畫，以確保所收集的數據足以支持決策，同時避免過度調查或資源浪費。該流程由美國環保署所制定，為核設施廠址調查中的重要指引，同時收錄於 ANSI/HPS N13.59及 MARSSIM 之中。DQO 過程包含七個關鍵步驟，分述如下：

1. 陳述問題(State the problem)：清楚描述調查目的，以便專注於明確的目標，例如：是否有超出外釋標準的污染存在。
2. 陳述決策(State the decisions)：說明將根據哪些標準或情境做出判斷，目的是將主要問題與對應的行動結合起來，定義現場工作須採取之決策。
3. 識別決策所需的資料輸入(Identify inputs to the decision)：列出進行決策所需的資料類型，例如污染濃度、範圍、相關變數與資料來源。
4. 明確決策的範圍界限(Specify the boundaries for the decisions)：詳細定義問題的範圍，包含調查地理區域、時間界限等。
5. 陳述決策規則(State the decision rules)：建立指定行動基準，例如：「若 Cs-137表面污染濃度  $>X \text{ Bq/cm}^2$ ，則需進行除污」。
6. 陳述可接受的誤差範圍(State acceptable error tolerances)：決定誤差的容許範圍(例如第一型與第二型錯誤的容忍度)，與樣本數、檢測靈敏度之間的平衡。
7. 優化取樣設計(Optimize the sampling design)：根據以上步驟，設計最有效率、最具代表性的取樣策略並確定是否與最終目標一致。

為鑑別核設施中各個偵檢單元之輻射污染程度，輻射特性調查過程涉及多種輻射

偵測方式與偵檢儀器，其選擇依據取決於現場環境情形與輻射污染狀況，課程中介紹了三種用於測量表面污染的儀器如下：

1. 表面污染儀(Surface Contamination Monitor)：

- 偵測原理：多為比例計數器(Proportional Counter)，具位置感測功能。
- 解析度：可提供25cm<sup>2</sup>格點為單位的數據，每平方公尺可達400個測量點，空間解析度高。
- 優點：具有低背景偵測能力，適合快速偵檢；可自動產生報告，減少人工紀錄誤差。
- 應用範圍：適用於外釋前的表面掃描、污染熱點定位、最終狀態確認等，主要用於建築物牆面、地板、設備表面等範圍大但污染分布不均勻的環境。

2. ERG Model 102F(Enhanced Radiation Grid Scanner)：

- 偵測器類型：六區段硫化鋅塑膠閃爍體(Six zone zinc sulfide plastic scintillator)，專門偵測阿伐與低能量貝他輻射。
- 定位功能：搭載高準確度定位系統(< 2 吋)，可精準記錄污染位置。
- 掃描特性：由馬達控制，維持儀器恆速掃描，確保掃描一致性；使用專屬軟體進行數據分析與圖像輸出。
- 適用場景：是一種全自動地面掃描儀器系統，設計用於大面積表面掃描，整合機械掃描與高靈敏度偵測模組。適用於核設施地板清除後的外釋前掃描、驗證大面積阿伐污染清除成效。

3. ISOCS(In Situ Object Counting System)：

- 核心功能：是一種廠址原位加馬能譜分析儀器，利用高純鍺偵檢器(HPGe)進行高解析度加馬能譜分析，透過蒙地卡羅模型(Monte Carlo)建立複雜幾何模型與效率校正曲線。
- 特色：可直接在現場使用，無需樣品採集；可建模大型物體(如設備、管線、混凝土塊)，以估算內部放射性含量。
- 優點：屬非侵入性，可節省樣品處理時間；成本雖高，但在實務中廣泛使用，可於合理期間內回本。
- 應用情境：廣泛應用於複雜幾何物體或空間內的非破壞性測量，如建物拆除前對混凝土牆體或設備內部污染評估，以及核設施除役期間進行核種辨識與活度估算，。

(四) 最終狀態偵檢

最終狀態偵檢是確保核設施於除污後符合外釋標準的核心作業，透過統計資料的

蒐集與分析，確認廠址或建物是否達到解除管制的劑量或風險基準，雖名為「最終」，但此類調查應與前期廠址輻射特性調查密切配合，並非僅於除役末期才展開。

外釋標準(release criteria)是針對除役廠址中殘餘污染的法定限值，美國NRC規定，當外釋目標為非限制性使用，且廠址殘餘污染可與背景輻射區分的情形下，造成關鍵群體年有效劑量不得超過25毫侖目(25 mrem/yr)，即0.25mSv/yr。

為便於管制廠址復原及外釋作業，導出濃度指引基準(Derived Concentration Guideline Level, DCGL)是將上述劑量標準，透過廠址特定的曝露途徑與環境因子，轉換成用於實際量測的濃度單位(Bq/kg)，亦即某特定區域內可容許的最大平均污染濃度，另依據使用範圍的不同，DCGL可區分為DCGL<sub>w</sub>及DCGL<sub>EMC</sub>。

- DCGL<sub>w</sub>(DCGL for wide-area averaging)：針對廣泛、均勻分佈的污染所設計，主要用於統計檢定(如 WRS test 或 Sign test)。
- DCGL<sub>EMC</sub>(DCGL for elevated measurement comparison)：評估小範圍污染高於背景值的區域(熱點)，對於整體偵檢單元而言是否仍符合外釋標準。

當偵檢單元內存在多個放射性核種時，可使用值一法則(Unity Rule)來判斷廠址內殘餘輻射強度是否符合外釋標準，即當某區域中每個放射性核種的濃度與各自 DCGL 之比例相加小於1時，代表此區域可符合外釋標準。

值一法則(Unity Rule)如下：

$$\frac{C_1}{DCGL_1} + \frac{C_2}{DCGL_2} + \cdots + \frac{C_n}{DCGL_n} \leq 1$$

C<sub>n</sub>=某個放射性核種的平均濃度

DCGL<sub>n</sub>=某個放射性核種的 DCGL 值

若偵檢單元內存在熱點時：

$$\frac{\delta}{DCGL_w} + \frac{C_{EMC} - \delta}{DCGL_{EMC}} \leq 1$$

δ = 偵檢單元內核種平均活度

C<sub>EMC</sub>=高活度區核種平均活度

DCGL<sub>W</sub> 與 DCGL<sub>EMC</sub> 兩者間關係為：

$$DCGL_{EMC} = DCGL_W \times AF$$

$$\text{面積因子 } AF(\text{Area Factor}) = \frac{\text{預設面積之有效劑量}}{\text{熱區面積之有效劑量}}$$

最終狀態偵檢設計須符合統計驗證邏輯與監管要求，核心步驟包括：

1. 調查區分類：根據潛在污染風險劃分為非受影響區(Non-Impacted Area)與受影響區(Impacted Area)。
2. 設立虛無假設(H0)：假設該區域殘留的放射性活度超過外釋標準。
3. 設定決策區間：定義灰色區域(Gray Region)，灰色區域的上下界，一般建議以 DCGL<sub>W</sub> 設為上界，以 DCGL<sub>W</sub> 的一半值作為下界。
4. 決策誤差容許範圍：設定 Type I 與 Type II 誤差機率(常設為5%)。
5. 樣本數估算與抽樣方式：依據  $\Delta/\sigma$  (相對偏移)計算樣本數與位置，並繪製網格圖(方格或三角格)。
6. 常見三種測量方式：
  - 掃描(Scanning)
  - 直接測量(Direct Measurement)
  - 取樣分析(Sampling)

常見的 DCGL 計算工具與模型介紹如下：

1. RESRAD：
  - (1) 開發單位：美國阿岡國家實驗室 Argonne National Laboratory(ANL)。
  - (2) 功能模組：
    - RESRAD-Onsite：模擬受管制土地的使用情境，如農夫、建築工人等。
    - RESRAD-Offsite：考量污染物遷移至廠址外的情境，如地下水傳輸。
    - RESRAD-Build：針對建築物的室內殘留污染(如牆面、地板)計算劑量。
  - (3) 特點：彈性高、可調整曝露途徑與參數，適合分析特定廠址。
  - (4) 用途：計算劑量、反推 DCGL，支援 ALARA 分析。
2. DandD：
  - (1) 開發單位：美國 NRC 委託 Sandia 國家實驗室於1998年開發。
  - (2) 內建場景：包含室內居住、建物維修、水源攝取等典型曝露場景。

- (3) 特點：提供 NRC 預設曝露參數，簡易使用，提供預設篩選值(Default Screening Values, DSV) 的計算基礎。
  - (4) 用途：作為 NRC 文件(如 NUREG-1757)中 DSV 的重要計算依據。
3. EPA PRG/SPRG/BPRG Calculators：
- (1) 開發單位：美國環保署(EPA)。
  - (2) 用途分類：
    - PRG：土壤、水、空氣中之初步清理濃度目標(Preliminary Remediation Goals)。
    - SPRG：硬質戶外表面(如混凝土)污染濃度估算。
    - BPRG：室內表面污染濃度，用於建築物除役清理。
  - (3) 特點：計算簡便且風險導向，適合作為初步篩選與決策輔助工具。

## 六、除役技術介紹

### (一) 現有技術介紹

核能設施的除役(Decommissioning)是一項兼具挑戰性與策略性的工程，涵蓋了結構拆除、除污、廢棄物管理、輻射防護與最終狀態偵檢等多個層面，如何在確保人員安全與環境保護的前提下，採用最適宜的除役技術，穩健、高效地完成作業，成為各國核能管制單位與設施經營者的重要課題。

傳統上，核能設施的除役作業主要依賴人工進行物理切割、機具拆除與放射性物質處理，然而這類方法往往伴隨高輻射風險與高成本，也容易受到現場條件限制。為因應此困境，全球開始廣泛運用既有工業技術並結合核能領域需求，發展出多樣化、專業化的除役工具組合，俗稱「除役工具箱(Decommissioning Toolbox)」，該工具箱涵蓋了以下幾類核心技術：

1. 物理拆除與切割技術：
  - (4) 機械切割工具：包含鋼鋸、電動切割機、液壓剪、混凝土破碎機等，適用於結構拆解、鋼筋混凝土處理。
  - (5) 雷射切割與等離子弧技術(plasma arc cutting)：提供精確、無接觸式的切割方式，能有效降低輻射交叉污染風險，尤其適用於高輻射環境中。
  - (6) 水刀切割(abrasive water jet)：以高壓水混合磨料切割硬質材料，無熱效應，可避免產生放射性飛灰。
2. 表面除污技術：
  - (7) 剝離塗層(Strippable Coatings)：如 ALARA 1146、TLC Strippable coating 等塗料可直接黏附並帶走表面污染物，簡化除污程序。

(8) 混凝土刨除(Concrete Shaving/Scabbling)：以專用工具去除表層污染混凝土，常與放射性掃描技術搭配使用。

(9) 化學清洗劑與凝膠(如 Decon Gel、Super Gel)：應用於不適合研磨或切削的精密設備表面，降低污染殘留。

### 3. 放射性測量與成像系統：

- ISOCS 系統：即「現地物件計數系統(In-Situ Object Counting System)」，能快速執行不同幾何形狀物體的放射性核種定量。
- Gamma Camera 與 CORIS 360全景放射影像系統：結合壓縮感測與光學技術，提升影像擷取速度與視野廣度。
- NDAalpha 偵檢器：首款可現場使用的阿伐能譜分析儀，對貝他和加馬輻射污染物的敏感度低，能專注在阿伐輻射的辨識與分析，解決以往需送實驗室檢測的侷限。

## (二) 新興技術發展趨勢

為了降低作業成本與人員輻射曝露風險，以強化除役規劃與決策效率、縮短工期並提升整體工程品質，目前各國不斷投入心力進行研發，新興科技正逐步進入除役領域，包含機器人、自動化控制系統、人工智慧等，均成為推動除役任務更安全、精準與高效率的關鍵驅動力。以下為幾項重點發展技術：

### 1. 智慧感測與影像技術：

- LAMP 3D 輻射建模系統：整合雷射雷達(LiDAR)與加馬偵檢技術，即時建構輻射三維分布圖，廣泛應用於核電廠及 DOE 廠址。
- Createc 輻射成像技術：已應用於車諾比電廠(Chernobyl Nuclear Power Plant)，採用壓縮感測理論結合光學相機，可在短時間內產生完整輻射強度分布地圖，支援後續拆除作業的規劃與決策。

### 2. 機器人與遠端操作系統：

- CARMA-II：應用於英國的賽拉菲爾德廠址(Sellafield Site)，具備雷射掃描與3D相機，執行例行監測與地形建模，減少人員曝露時間。
- SPOT(Boston Dynamics)：具備行走、爬樓梯、自我復位等能力，可搭載多種傳感器於高輻射環境中自主巡檢，如圖三。
- 自主廠址調查車(Autonomous Characterization Vehicle)：由美國 EPRI(Electric Power Research Institute)研發，具備 GPS、Wi-Fi 與3x3吋 NaI 偵檢器，日間巡檢速度達每分鐘16平方公尺，並可建立完整測量地圖。

### 3. 人工智慧：

國際原子能總署(IAEA)最新啟動的 DEDICATE 計畫(2025-2027)，推動 AI、機器學習、虛擬實境(VR)與擴增實境(AR)在除役規劃與操作中的導入，預期可提升作業模擬精度與培訓效率。

整體而言，除役工作不僅是對過去核設施所做的結尾，也是科技創新的驅動平台，未來除役技術將朝向「模組化、數位化、遠端操作、自動化」發展，並強調跨部門知識整合與技術標準化。雖然資金與政策面仍具挑戰，但全球正逐步建構以科技為基礎的除役新常態，唯有持續推動技術演進、跨國交流與實務應用整合，方能在安全、效率與成本之間取得最佳平衡。



圖三、SPOT 機器人

## 七、案例簡介(Case Study)

課程中介紹不少成功的除役案例，以下分別就各個案例進行概要介紹：

### (一) 美國內華達大學雷諾分校(UNR)第58號建築

#### 1. 設施背景概況：

建於1920年左右，建築物涵蓋地上兩層加地下室，總面積約8,00平方公尺，曾由美國礦業局於1921 – 1954年間使用，因長期使用含鎘與鐳的放射性材料，造成輻射污染，經初步調查顯示鐳-226殘留濃度超出美國 NRC 標準，因後續建築持續被使用，內部裝修層遮蓋原始表面，增加調查難度。

#### 2. 調查與除污措施：

在2017年時已完成「初步輻射特性調查」，但因測量點數過少(平均每間房只取3個點)，加上部分關鍵區域，如排水系統、外部空間未納入偵檢範圍，以及建築物在

使用狀態下測量，導致原始污染表面難以評估(有覆蓋新建材、家具等)，使得最初調查資料不全，遂由 Ameriphysics 公司於2020年重新執行調查，核心補強行動包含：開挖原始地板與局部除污、進行樓層間隙空間檢測、移除牆面覆蓋建材與污染熱點確認、外牆與地下室的擴大範圍污染偵檢等。

3. 教訓與經驗回饋：

- 除役成功三大原則：調查、調查、再調查 (characterize, characterize, characterize!)。
- 提前於計畫初期確認外釋標準並取得主管機關核可。
- 當資訊不足以做出決策時，應勇於要求重新調查或追加調查。

(二) MC-40 迴旋加速器

1. 設施背景概況：

- 設施類型：Scanditronix MC-40 迴旋加速器，
- 功能用途：用於研究或醫療放射性同位素生產。
- 設備狀況：裝置為屏蔽型(shielded)迴旋加速器，本體重量高達39噸。

2. 調查與除污措施：

前期進行完整輻射特性調查，包括主要活化核種的鑑定(如 Co-60、Eu-152、Eu-154)，屏蔽型裝置一般污染集中於地板混凝土，較容易處理，首先拆解迴旋加速器主體與附屬設施，接著根據劑量與釋出標準，局部去除(scabbling)數吋厚的混凝土表層，完成混凝土除污作業，過程中的廢棄物依據美國各州的廢棄物標準分類進行運送及貯存。

3. 教訓與經驗回饋：

- 加速器之除役須特別注意混凝土活化層深度與分布。
- 裝置是否有屏蔽(shielding)會大幅影響污染形態與清理策略。
- 儘管非核子反應爐，加速器周邊材料仍可能嚴重活化，需採取與核設施類似的調查與拆除程序。

(三) 美國各核電廠爐內構件(RVI)與反應器壓力槽(RPV)分割處理案例

1. Vermont Yankee：

(1) 設施背景概況：

反應器型式為沸水式反應器(BWR)，電力規模為620MWe，目前已完成 RVI/RPV 除役作業，壓力槽高度約13.4公尺、直徑約4.3公尺、壁厚20.3公分，活化程度分布於不同區域。

(2) 除役拆除技術：

RVI 部分採熱切割(thermal cutting) 與鑽石鋸(diamond wire saw) 結合方式拆除，先行移除上部導引結與燃料支撐組件，再分段拆解主爐心支撐結構與下部內筒，全程切割採水下操作，利用水作為輻射屏蔽與冷卻介質。RPV 使用鑽石鋸橫向切割方式，將壓力槽主體分為五個環狀段，壓力槽底部為半球形結構，使用鑽石鋸採垂直切割方式進行分段，分割後整體體積與形狀更利於裝入標準廢棄物容器內。

(3) 教訓與經驗回饋：

- 使用標準化工具與模組化流程可大幅提升作業效率。
- 預先進行乾式測試與操作程序模擬，避免現場意外產生。
- 明確分級與包裝策略降低廢棄物容器使用數量，節省成本。

2. Zion Nuclear Power Station Units 1 & 2：

(1) 設施背景概況：

反應器型式為壓水式反應器(PWR)，共兩部機組，除役方式採延遲除役，2013 - 2015年間由美國 EnergySolutions 公司與 SeimpleKamp 公司合作，使用 C-HORCE 等專利拆除整合系統進行 RPV/RVI 拆解作業。

(2) 除役拆除技術：

內部構件 RVI 使用機械切割(Bolt Milling Tool)與水下分段技術，RPV 則使用火焰切割(Oxy-propane flame cut) 方式搭配 C-HORCE(圓周液壓切割設備，Circumferential Hydraulically Operated Cutting Equipment)技術。藉由水下切割並搭配過濾系統維持水質清澈與視線清晰，以明確區分不同污染程度的組件後，分別包裝運出。

(3) 教訓與經驗回饋：

- 使用過濾處理系統保持水質清澈是工程順利的關鍵。
- 火焰切割效率雖高但會產生大量氣體與懸浮微粒，需加強通風與清洗系統。
- 須視現場條件設計穩定的切割支架，避免切割位置偏移。

3. Crystal River 3：

(1) 設施背景概況：

反應器型式為壓水式反應器(PWR)，發電規模為913MWe，除役工作由法國 Orano 公司執行，為近期最具規模的完整 RPV/RVI 拆解工程之一。壓力槽高度約10.6公尺、直徑4.8公尺、壁厚22.8公分，總重約240噸。

(2) 除役拆除技術：

Crystal River 3 的 RVI 於除役初期即完成分割，採用熱切割與鑽石鋸等技術

進行水下作業，高活化組件獨立封裝並移至乾式貯存設施，其他活化組件則依活度分類後進行後續處理與運送。RVI 拆除作業在 RPV 分段之前即完成，確保後續壓力槽切割工作順利進行。隨後 RPV 依上、中、下三段進行鑽石鋸分割，其中中段因活度最高，被歸類為 B/C 類廢棄物，需使用經 NRC 許可的專屬容器進行封裝與運輸；上下段則屬於活度較低的 A 類廢棄物，分段完成後，各部分以大型包件進行封裝，透過海運與陸運從佛羅里達跨墨西哥灣運送至德州 WCS 處置場。

(3) 教訓與經驗回饋：

- 採用大型設備分段切割與運輸方案在安全與成本效益間取得良好平衡，有效節省高達30%的整體處置成本。
- 工程前須充分模擬運輸路徑與地面的荷重限制。
- 使用大型容器封裝可大幅減少廢棄物容器數量與管理負擔。

## 肆、心得與建議

本次有幸赴美參加由阿岡國家實驗室舉辦之設施除役訓練課程，深切體認到核能設施除役工程所蘊含的專業廣度與技術深度，尤以國際間在規劃、執行與管理等層面之成熟經驗，對我國正處於能源轉型關鍵期的除役工作而言，極具借鏡價值，茲歸納本次參訓之主要心得與具體建議如下：

1. 課程中反覆強調，除役計畫的成敗關鍵在於能否及早啟動並進行詳盡且縝密的準備工作，從風險評估、除污策略的制定，到廢棄物管理及最終解除管制，每一項決策的基礎皆依賴於對廠址歷史與輻射特性的深入調查。UNR 的案例提醒我們，切勿低估初期輻射調查的重要性及潛在的隱藏污染風險，建議準備工作應於停機前數年即開始規劃，並且善用系統性方法，例如資料品質目標(DQO)，以及遵循標準指引如 MARSSIM，以確保調查結果的準確性與全面性。
2. 在除役期間，環境、安全與健康(ES&H)需置於首位，優先順位應高於成本與時程，美國於除役階段仍高度重視工作人員與民眾之輻射安全與環境永續，顯示除役工程不應僅視為終結手段，而是一場以人為本、長期規劃的轉型歷程。我國正邁入核能電廠除役階段初期，更應以謹慎、科學、透明之態度，深化對除役風險的辨識與溝通機制，建立社會對除役安全的信任及共識。
3. 放射性廢棄物的管理係除役當中最為複雜的關鍵環節，透過此次訓練，學習到廢棄物減量策略、OHIO 原則以及對廢棄物接收標準(WAC)的理解，對於提升我國廢棄物管理的效率與經濟性極具參考價值。此外，本次訓練不僅介紹了傳統與現代除役技術，更展示了機器人、人工智慧等新興科技在除役領域的應用趨勢，這些技術有助於降低人員輻射曝露、提升效率與量測精準度，建議我國可多關注、研究此類新興技術，以有效強化除役工作之效能。
4. 透過汲取課程中各國的案例分享，例如美國核電廠爐內構件的分割處理，瞭解不同反應爐類型與複雜設施的應對策略，藉由這些寶貴的經驗，可為我國未來的除役工作提供重要借鏡，建議未來除役階段，可多參考類似國際成功經驗，藉此擬定最佳的除役策略，減少除役過程可能產生之風險與危害。
5. 本次訓練由具備深厚實務與研發經驗的機構主辦，並匯聚多國專業人士交流，建議未來可持續派員參加此類國際性除役訓練課程，可有效吸收國際最新技術與管制經驗，提升我國核設施除役管制人員的專業素養與前瞻視野，為未來更複雜的除役任務奠定堅實的基礎。