

出國報告(出國類別：實習)

赴美國參加 Argonne 國家實驗室
設施除役訓練課程

服務機關：核能安全委員會

姓名職稱：吳東岳副研究員、廖柏名技正

派赴國家/地區：美國/聖塔菲

出國期間：113 年 7 月 14 日至 113 年 7 月 22 日

報告日期：113 年 10 月 18 日

摘要

2024 年 7 月 16~19 日期間，公差前往美國 Argonne 國家實驗室(ANL)於美國新墨西哥州首府聖塔菲城舉辦設施除役訓練課程(Facility Decommissioning Training Course)。講員除了來自 ANL 國家實驗室外，還來自業界中具有豐富除役相關技術執行工程經驗的專業工程人員。除我方參與人員之外，課程參與者來自美國聯邦機構、工業界和韓國管制技術支援單位。訓練課程包括：(1)除役介紹(含國際除役現況)；(2)除役環境安全與衛生；(3)除役廢棄物管理；(4)廠址設施輻射特性；(5)除役規劃與管理；(6)除污技術；(7)除役成本估算；(8)拆除技術；(9)最終狀態偵檢；(10)案例研討等內容。本報告將針對上述各項訓練課程內容，依課程順序加以整理說明，以作為我國核電廠除役安全管制技術之參考。

目次

摘要.....	i
目次.....	ii
壹、目的.....	1
貳、過程.....	2
一、出國行程.....	2
二、訓練課程.....	2
參、課程重點整理說明.....	4
一、除役簡介(含國際除役現況).....	4
二、除役環境安全與衛生.....	5
三、除役廢棄物管理.....	7
四、廠址設施輻射特性.....	8
五、除役規劃與管理.....	9
六、除污技術.....	12
七、除役成本估算.....	13
八、拆除技術.....	14
九、最終狀態偵檢.....	16
十、案例研討.....	17
肆、心得與建議.....	21

壹、目的

在過去的 40 多年裡，隸屬美國能源部的 Argonne 國家實驗室(以下簡稱 ANL) 的除役計畫已成功讓許多核子與放射性設施達成除役，包括：4 座研究用核子反應器、61 個鈾手套箱、1 座迴旋加速器設施、1 座燃料製造設施、1 座熱室設施，以及幾個較小的非反應器(廢棄物管理)放射性設施。因此，ANL 深具核子與放射性設施除役經驗，而且已辦理許多除役訓練課程分享該實驗室的除役經驗，並與來自世界各國參與訓練的學員不斷交流，並持續精進課程內容。

2024 年 7 月 16 日至 19 日期間，公差前往 ANL 於美國新墨西哥州首府聖塔菲城舉辦設施除役訓練課程(Facility Decommissioning Training Course)。課程講師除了來自 ANL 外，還來自業界具有豐富除役相關經驗的專業工程人員。除我方參與人員之外，課程參與者來自美國聯邦機構、工業界和韓國管制技術支援單位(KINS)。訓練課程包括：(1)除役介紹(含國際除役現況)；(2)除役環境安全與衛生；(3)除役廢棄物管理；(4)廠址設施輻射特性；(5)除役規劃與管理；(6)除污技術；(7)除役成本估算；(8)拆除技術；(9)最終狀態偵檢；(10)案例研討等內容。ANL 辦理這門課程目的是希望提供除污除役(D&D)過程中的基本步驟，傳授過去除役過程中所得之經驗，並分享以往 D&D 寶貴之見解和心得，以協助有效地進行 D&D 活動的決策和規劃，並確保安全和成本效益。

本次出國的目的主要在除了參加該訓練課程之外，亦希望藉由課程瞭解美國核設施相關除役最新作法，並蒐集相關資訊，以作為我國核能廠除役安全管制技術之參考。

貳、過程

一、出國行程

本次出國行程自 2024 年 7 月 14 日起至 2024 年 7 月 22 日止，共計 9 日，詳如下表：

日期	行程與工作內容
7/14~15	去程(台北前往聖塔菲)
7/16~19	參加除役訓練課程
7/20~22	回程(聖塔菲返回台北)

二、訓練課程

本次課程由 ANL 於美國新墨西哥州首府聖塔菲城舉辦，訓練期間為 2024 年 7 月 16~19 日共計 4 天，課程表如下：

日期	課程內容
7 月 16 日	<ol style="list-style-type: none">1. 除役介紹2. 除役環境安全與衛生3. 除役廢棄物管理4. 廠址設施輻射特性5. 除役規劃與管理6. 案例研討
7 月 17 日	<ol style="list-style-type: none">1. 除污技術2. 除役成本估算3. 案例研討

7月18日	<ol style="list-style-type: none">1. 拆除技術2. 最終狀態偵檢3. 案例研討
7月19日	<ol style="list-style-type: none">1. 國際除役現況2. 案例研討

ANL 是隸屬美國能源部的國家實驗室，為美國政府歷史悠久最具規模的研究機構之一，在核設施除役技術方面研究涉獵已久，且研究成果豐碩，除用於核設施現場除役工作外，亦提供管制建議供美國核管會(Nuclear Regulatory Commission, NRC)對核能電廠等多種核設施除役管制參考。本次訓練課程講師除了來自 ANL 國家實驗室資深人員外，多數還來自業界實際執行除役工作且經驗豐富的專業工程人員。

參、課程重點整理說明

一、除役簡介(含國際除役現況)

核設施除役係為安全地移除不再使用之廠址內設施，降低殘餘放射性至可接受程度，以便可釋出財產供非限制性使用及終止執照，或供限制性使用及終止執照。核設施之除役因涉及大量放射性物質及人員輻射劑量管制，相較於其他產業設施或廠房之拆除，需投入更多的時間與技術，包括輻射特性偵檢與調查、除污、放射性廢棄物管理等，以確保可能危害公眾健康與安全或環境生態之放射性物質外洩不會發生。

須進行除役管制之核設施包括：鈾礦開採與碾磨場、鈾純化與轉變廠、鈾再濃縮精煉廠、燃料元件加工廠、核能發電廠、用過燃料再處理廠及核武製造相關設施等。在美國涉及核設施除役之管制機關，包括：能源部(Department of Energy, DOE)、核能管制委員會(Nuclear Regulatory Commission, NRC)、交通部(Department of Transportation, DOT)、環境保護署(Environmental Protection Agency, EPA)、職業安全衛生署(Occupational Safety & Health Administration, OSHA)及州政府等。

NRC 與 DOE 較常進行現場視察，視察頻次通常依現場作業活動而定，NRC 依「除役中動力反應器視察計畫」所訂視察要求與程序進行除役作業視察，相關 D&D 指引文件如：整合多年來 D&D 相關文件、RG 1.184 動力反應器除役流程及 NUREG-1575 MARSSIM 協定等。DOE 由企業評估辦公室(Office of Enterprise Assessment)依計畫方案進行除役視察，相關法規要求有：10 CFR 835 輻射防護、10 CFR 851 作業人員安全與衛生、10 CFR 820 & 830 核能安全、DOE Order 414.4D 品質保證、DOE Order 435.1 放射性廢棄物管理、DOE Order 413.3B 計畫管理等。管制機關對 D&D 管制重點在：對公眾安全衛生之認知(安全文化)、組織與管理(包括承包商管理)、利害關係人參與、人員流動率、工業安全、廢棄物管理、廠址最終輻射偵測及劑量模型、廠址實體保安及自我評估程序等。

核設施之除役策略，依據美國 NUREG-0586「Final Generic Environmental Impact Statement on Decommissioning of Nuclear Facilities」報告訂有三種選項：立即除污並拆除(DECON)、安全貯存(SAFSTOR)及長期封存(ENTOMB)。國際原子能總署(IAEA)亦有類似的選項，分別為立即拆除(Immediate Dismantling)、延後拆除(Deferred Dismantling)及長期封存(Entombment)。DECON 模式是在電廠永久停止運轉後，短期內將受放射性污染之物質、設備、結構及土壤等予以除污與拆移，使廠址殘留的放射性強度低於法規標準，而可終止電廠執照。SAFSTOR 模式是將核設施先安全貯存一段時間致放射性衰減後，再進行除污拆除工作，可大量減少輻射偵檢與除污作業，以及放射性廢棄物的體積。ENTOMB 模式是將受放射性污染之物質、設備及結構等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。

除役作業錯綜複雜，藉蒐集他人寶貴經驗從中學習，避免重蹈覆轍，才能促進除役作業如期如質順利完成。網路上多元的管道，提供大量除役相關訊息之蒐集，例如：US NRC Annual Decommissioning Status Report、US DOE Office of EM - Annual Progress Report、World Nuclear Industry Status Report 等。依 World Nuclear Industry Status Report 2024 截至 2024 年 7 月 1 日止的統計，全球共有 213 座核子反應器永久停機，其中 23 座成功完成除役，美國最大宗佔 17 座，其餘為德國 4 座，日本及西班牙各 1 座。從此觀之，美國擁有完整的核能除役產業及豐富的除役經驗，應為我國對於核能電廠除役作業不管是設施經營者的執行，或是管制機關的安全管制，值得借鏡及學習之對象。

二、除役環境安全與衛生

除役環境安全與衛生包括：輻射安全、非輻射安全及其他安全等項，為可量測的目標，重要性優先於成本或進度等其他目標。輻射安全包括：放射性物質排放管制(Radiological effluent controls)、工作人員輻射曝露劑量管制、放射性廢棄物管理及運送等。非輻射安全包括：工業安全、工業衛生、非

放射性物質排放管制、非放射性廢棄物管理及運送等。其它安全包括：關鍵議題、醫療急救、消防、紀錄管理、緊急計畫、監督及品質保證等。

除役期間環境安全衛生的挑戰，主要來自 D&D 涉及劣化的系統與結構，且現場環境不斷在改變，例如：架設鷹架、侷限空間施工、有害氣體、焊接與研磨造成煙霧與粉塵、重物吊運、廢棄物運送等，為維持工作人員對現場作業危害的覺知，需要建立穩健的流程與程序。除役期間與運轉期間之差別，整理說明如下：

運轉期間	除役期間
多為例行任務	多為特定任務
多數安全議題已辨識	新任務創造新挑戰
多數人員熟悉現場及程序	多數為包商、臨時人員或新進人員
廠址或電廠運轉多為例行作業	廠址作業持續變動
注重運轉安全(核能電廠)	注重拆除安全
持續發電累積除役基金	不再運轉，須以有限基金完成除役
廠址狀況日復一日少有變動	廠址組態與結構持續變動
穩定具經驗的員工及合作支援人員	員工水平依不同作業變動
員工所需技能組合已知且經證明	可能有少數專業人員，但多為勞工
訓練要求與計畫已排定	首次及持續的訓練有實質需要

要有效管理危害，須瞭解危害且能在危害發生前辨識危害，並採取行動以降低或消除危害。典型的除役期間危害如：游離輻射(長時間於輻射區作業)、非游離輻射(長時間戶外作業紫外線曝露)、潛在曝露於生物危害(以通風系統為媒介)、化學曝露(毒性、可燃性、腐蝕性)、高度可能用到含石棉物質、進入侷限空間作業、電氣危害(觸電、短路火災)、爆炸(化學反應或過壓造成)、崩塌及物體掉落等。

危害管制方法，依有效性由強至弱依序為：消除(Elimination)，實際移除危害；替代(Substitution)，用其他方式替代原作業；工程管制(Engineering

Controls)，將人員與危害隔離；行政管制(Administrative Controls)，改變人員作業方式；使用個人防護裝置。

危害管制措施，分成工作人員及雇主兩部分。工作人員須可取得安全與醫療相關資訊、有權表達安全疑慮或拒絕從事不安全或認知不安全的工作、當危險將發生時可停止工作等。雇主部分，須與工作人員共同制定安全衛生計畫、設置有證照的安全衛生人員、設立安全衛生危害通報程序且對通報者不得有報復行為、定期溝通安全衛生及危害管制措施須張貼或顯示於工作場所等措施。

三、除役廢棄物管理

核能電廠進入除役拆除階段，相關設備、結構及物質之拆除將產生大量廢棄物，其中包括受到放射性污染的廢棄物，故須規劃管理以避免放射性物質不當外釋造成公眾危害；另一方面，若將未受放射性污染或經除污已無輻射安全疑慮之廢棄物，過度保守歸類為低放射性廢棄物，只會徒增安全管制與最終處置不必要之成本，故如何適當執行除役廢棄物管理，為除役過程當中一個非常重要課題。從廠址歷史評估(Historical Site Assessment, HSA)開始到輻射特性調查(Characterization)得以掌握廠址內放射性存量與分布，到如何進行減容以利包裝(Packaging)並運送(Transport)到廢棄物處置場處理(Disposal)等，均屬除役廢棄物管理之一環。

為達有效管理除役廢棄物，除污除役目標應包括：管理、執行與輻防人員需三方協調合作(Coordination)；設法降低廢棄物處理與運送、包裝容器、輻射特性調查、搬運及二次廢棄物等之成本；考量施工順序、階段性、合理抑低要求、共享資源、現金流及物料流等因素進行適當排程；儘可能一次性處理完成(Only Handle It Once)，避免因面對多種任務作業頻繁切換導致專注力流失；滿足法規對廠址最終狀態要求之標準；拆除之廢棄物須符合處置場的接受標準。

依美國聯邦法規 10 CFR 61 之規定，低放射性廢棄物分為 A、B、C 及超 C 類，就各類別的潛在危害而言，A 類小於 B 類，B 類小於 C 類，超 C 類危害相對來得大。就過去實務經驗統計，核設施除役廢棄物不同類別體積之佔比：A

類低放射性廢棄物約佔 12%，B、C 類低放射性廢棄物約佔 0.03%，超 C 類低放射性廢棄物約佔 0.0007%，其餘為一般廢棄物約佔 88%。不同類別廢棄物處理成本之佔比：A 類低放射性廢棄物約佔 50%，B、C 類低放射性廢棄物約佔 20%，超 C 類低放射性廢棄物約佔 5%，其餘為一般廢棄物約佔 25%。

拆除過程中應盡量做到廢棄物量最小化，可採取避免廢棄物再次產生的隔離防護措施，例如：實體隔離、帆布覆蓋、通風過濾或限制人員設備的移動路徑等；亦可採取廢棄物減容技術，例如：壓縮(Compaction)、破碎(Shredding)、焚燒(Incineration)及金屬熔解(Metal melt)等。

四、廠址設施輻射特性

廠址設施輻射特性調查係為確實掌握廠址設施輻射與污染狀態，供後續除役工作的執行依據，為除役先期作業最重要的工作項目之一。輻射特性調查結果可應用於除役環境安全衛生、除役規劃與管理、除役成本估算、除役廢棄物管理、除污技術與拆除工法之選擇及最終狀態偵測規劃等重要工作。

目前世界各國核電廠除役工作對於廠址設施輻射特性調查之規劃，多數採用美國多部會輻射偵檢與廠址調查手冊(Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual, MARSSIM)所訂作法。完整的輻射偵測與廠址調查(Radiation Survey and Site Investigation)作業流程如下：廠址歷史評估(Historical Site Assessment)、範圍偵檢(Scoping Survey)、輻射特性偵檢(Characterization Survey)、改善措施輔助偵檢(Remedial Action Support Survey)及最終狀態偵檢(Final Status Survey)。

廠址歷史評估係藉由查核運轉紀錄、例行偵測試驗結果、事故與非預期事件等資料，藉由訪談運轉、維護人員等方式，辨識廠址內潛在的污染物、污染區及污染媒介，初步判斷輻射工作活動影響範圍為「受影響區」或「未受影響區」，並發展廠址概念模型，在廠區圖上標示可能污染位置，作為後續偵檢區域劃分的規劃依據。

範圍偵檢係以廠址歷史評估為基礎，進一步對「受影響區」進行現場初步偵測，以確認「受影響區」劃分的正確性，並依受污染影響程度將「受影響區」

分成 3 級：第 1 級區域係可能已受放射性污染，且污染高於導出濃度指引水平 (DCGL, Derived Concentration Guideline Level) 值；第 2 級區域係可能已受放射性污染，但未超過 DCGL 值；第 3 級區域係在受影響區內，但預期不會有任何殘餘活度或殘留活度遠低於 DCGL 值。

輻射特性偵檢係依「受影響區」分類等級，以偵檢包(Survey Package)的概念進行系統化偵測工作，對需關注區域的廠區建築及土地規劃適當的量測方法與量測位置，對輻射狀態與污染情況進行詳盡調查，以確定污染的性質與程度。

改善措施輔助偵檢係於輻射特性偵檢後，若發現特定區域的污染值超過 DCGL 值，將對該區域進行適當的除污措施改善，進行除污過程中執行即時輻射偵檢，以確認該區域的輻射污染狀況已改善且可符合接受標準。

最終狀態偵檢目的係為證明廠址內設備、結構及物質經拆除及改善措施整治後，廠址之輻射劑量已可符合管制機關所定之釋出標準，已無危害公眾健康與安全或環境生態之虞。

執行輻射偵檢前應先制定偵檢計畫，偵檢計畫的要素包括：取樣與量測的型式(系統性或隨機性)及分析的型式；儀器靈敏度的要求；取樣與量測的數量；取樣與量測的位置；數據驗證及品質管制/品質保證；數據報告；重新檢驗偵檢方法的條件。偵檢完成後需提出偵檢報告，偵檢報告內容需包括：廠址歷史評估、儀器與偵檢程序、偵檢的發現與結果、陳述事項的佐證資訊與參考資料及品質保證與品質管制。

五、除役規劃與管理

除役作業龐大且錯綜複雜，要能在有限資金與期限內順利完成，有賴於良好的除役規劃與管理。除役規劃應儘早開始，核能電廠之除役規劃最晚須在機組停機前 3 年即開始，規劃著重在最小化過渡期間及人事成本。除役工作之執行者可有多種選項，當除役工作非由原設施經營者而由除役公司執行時，如何區分兩造權責，應於合約中清楚界定，並進行適當的管理。

除役規劃者應清楚設施狀況，可透過廠內文件紀錄與圖面、與廠址人員面談、廠址歷史評估及輻射特性資料等取得廠址關鍵資訊。除役計畫應載明計畫的最終狀態、制定詳細的成本與進度規劃、包含預期的風險及應變措施並含括所有階段(從過渡到執照終止)。規劃時應借助有經驗的除役人員，並以其他進行除役中廠址作為標竿來衡量，同時儘早與管制機關接洽，從與管制機關互換資訊或非正式討論中常能獲取申請所需文件之指引，並邀請公眾等利害關係人參與除役規劃，讓可能衝擊除役策略的利害關係人參與可建立彼此關係及信任，促使除役工作得以順利完成。

美國核設施之除役工作，設施經營者除可自辦外，亦可委託除役公司執行，或將除役執照移轉至除役公司執行(除役完成後再將執照移轉回原設施經營者)，甚或將資產賣給除役公司執行除役工作。

設施經營者自辦除役工作的優點是：現有員工可保有工作、員工熟悉廠址設施、藉學習除役新技能提供職涯機會。但帶來的挑戰為：須自行承擔所有除役風險、缺乏除役流程與管控的相關知識、員工從運轉至除役的心態調適。設施經營者自辦除役工作的美國核電廠案例有：Torjan、Big Rock Point、Rancho Seco 及 Humboldt Bay 等。

委託除役公司執行除役工作係將除役工作的管理與監督之責委請除役公司執行，其餘仍由設施經營者執行。優點是：風險與報酬共享、由有經驗除役公司執行可降低風險。但帶來的挑戰為：設施經營者對廠址內作業仍需負責、需負擔額外承包商成本(如風險、應變及利潤)、廠內具經驗員工可能流失。與除役公司的合約類型可分成固定價格(總價承攬)與非固定價格兩大類，固定價格合約係除役公司同意以固定的價格完成約定工作，除役公司承擔較大風險，代表案例有 Maine Yankee 及 Connecticut Yankee 兩座核能電廠；非固定價格合約依不同利潤基礎分不同型式，計有：成本加成本百分比(Cost Plus Percentage of Costs, CPPC)合約、成本加獎勵金(Cost Plus Award Fee, CPAF)合約、成本加激勵金合約(Cost Plus Incentive Fee, CPIF)等型式。CPPC 合約係約定給付除役公司成本並約定以成本多少百分比作為除役公司利潤，成本依花費之工時及材料計算，通常用在成本與排程不明的特殊工作。CPAF 合約係約定給付除役公司成本，另合約期間滿足設施經營者主觀的績效標準即

可獲取獎金，但此並未在合約條文中明文規定。CPIF 合約係約定給付除役公司成本，加上合約中預先商議的獎金，待合約結束績效目標達成後發放。合約型式之選擇通常依設施經營者設定之風險胃納(Risk appetite, 代表企業面對風險願意損失的最大金額)決定，設施經營者的目標是合約績效最大化與風險最小化，除役公司的目標是風險最小化與利潤最大化。大型複雜的核電廠除役工作通常依不同工作範圍訂定不同型式的合約。以非固定價格委託除役公司執行除役工作的美國核電廠案例為：Fort Calhoun、Fort St. Vrain 及 San Onofre。

將除役執照移轉至除役公司執行除役工作，除役完成後執照再移轉回原設施經營者，優點是：主要設施風險可轉移至新的持照者、原設施經營者毋須關注除污除役工作。但帶來的挑戰為：設施經營者仍需有限地監督、需利害關係人可接受、設施經營者對除役計畫幾乎沒有管控權。將執照移轉至除役公司執行除役工作的美國核電廠案例為：Zion 及 La Crosse。

將資產賣給除役公司執行除役工作，優點是：原設施經營者完全無除役的責任與風險、原設施經營者可專注於運轉事業。但帶來的挑戰為：需說服利害關係人新設施經營者具備能力、財務與法律障礙需耗時處理。將資產賣給除役公司執行除役工作的美國核電廠案例為：Vermont Yankee、Pilgrim、Indian Point、Oyster Creek 及 TMI-2 等。

除役管理組織需依工作相關活動及法規要求建立，員工的程度與專業應隨除役不同階段之進展適當調整，各階段所需關鍵人力應及早識別，包括設備維修、道路施工等支援人力。對除役管理應進行評估與分析，包括：成本效益分析、安全衛生評估、合理抑低(ALARA)評估及設立獨立的審查委員會。

成本效益分析為一種常見的決策方法，係就執行一項工作活動的各種可能方案(alternatives)所需之成本及可達成之效益進行比較，以決定採用之方案，通常會選擇淨效益最大的方案。為節省時間金錢、降低風險與輻射劑量，除役過程中關鍵路徑作業(Critical path activities)與主要任務，例如：危害物質處置、高安全或高放射性風險作業(如大型筒槽或爐內組件之移除)、高放射性污染設備組件之拆解、除污與切割技術之選擇等，應執行成本效益分析。

安全衛生評估係對可能的工安與輻安進行評估。工安為除役過程中最大風險，應就每項作業可能風險進行評估，工作執行前應進行工具箱會議提醒安全注意事項，並指派工安人員現場監督。另對可能造成下列情況的作業亦應進行安全評估，如：廠內或廠外空浮微粒釋出、廠內或廠外洩漏之外釋、放射性或危害物質之外釋、廠內或廠外放射性廢棄物之運送意外等。

合理抑低評估係建立劑量目標(目標應具挑戰性但可達成)，透過廠址歷史評估與輻射特性之數據、預估人員與團隊作業之曝露時間、準備每項作業的劑量評估及移除高劑量區主要組件等方式設立目標，並努力降低劑量，定期執行合理抑低評估。

設立獨立的審查委員會，由具除污除役經驗的專業人員組成，藉現場巡視、文件審查及與關鍵人員面談等方式進行監督，並提供獨立的除役進度評估報告與建議事項，以協助除役工作之進行。

六、除污技術

除污係藉由化學、機械或其他等方式進行清潔，將設施或設備之表面或區域的污染全數或部分移除，可減少人員輻射曝露劑量、降低人員防護設備級別、減少廢棄物體積、有利物件之運送或外釋。

除污技術選擇的考量因素，包括：安全，不可因除污導致污染擴散或引發新的危害；效率，縮短工時以減少人員輻射曝露劑量；成本效益，除污成本應少於不除污直接外送處理的成本；廢棄物管理，減少二次廢棄物生成或降低廢棄物類別；使用可行性，避免使用勞力密集或消耗大量物質的除污方式，或考量購買外部服務是否更為便宜。

除污方法概分為：化學除污、電化學除污、機械與手工除污及金屬熔融等方法，而各種方法的除污效果係採用除污因子(Decontamination Factor, DF)定量表示，該 DF 為除污前的放射性比活度與除污後比活度的比值，其與多少%表面活度被移走的關係式為： $\% \text{ of Activity Removed} = (1 - 1/DF) \times 100$ ，即除污因子 DF 為 10 時，代表可移除表面 90%的核種。

化學除污係以濃縮或稀釋的藥劑(reagents)接觸污染物，溶解累積的污垢層後露出母材，使用效果快速，對於複雜幾何形狀但表面均勻者尤有速效(但多孔性表面則無效)，多用於封閉系統，亦有在開放系統批次使用。藥劑的型態有泡沫、凝膠、膏狀物及霧化劑等。藥劑的類型有：氧化劑(Oxidants)，具輕度腐蝕性，如 AREVA 公司開發的 CORD 技術，多運用於運轉中核電廠之除污，針對除役核電廠系統除污普遍採用 CORD D UV 技術；還原劑(Reductants)，具侵蝕性，如英國中央電力局開發的 LOMI 技術；複合劑(Complexants)，具溫和侵蝕性，如西屋公司開發的 NITROX 技術；酸基物(Acid bases)，具強烈侵蝕性，如美國電力研究院(EPRI)與英國 Bradtec 公司共同開發的 DfD 技術，具應用於美國 Big Rock Point 及 Maine Yankee 除役核電廠除污之實績。

電化學除污為輔以外加電場的化學除污，將待除污件接陽極，電解槽接陰極，為與電鍍相反的過程。外加電流加快除污速度、除污效果較佳，具二次廢棄物減量效果。電化學除污法對於碳鋼、不銹鋼及鋁等小徑管的除污尤其效果，但若管路表面有油脂或塗漆等，除污效果將會降低。

機械與手工除污技術相對簡單、操作容易且價格便宜，使用最為廣泛，但通常需要進行空浮污染管制，甚至採取聽力保護措施。機械與手工除污技術包括：掃除/擦洗/刷洗/吸塵、剝離塗層(Strippable Coating)、超音波清洗/振動拋光、高壓水槍(Hydro-lasing)、噴砂研磨(Sand blasting)、液態氮、蒸汽吸塵清洗、粗礮(Scabblers)/割除(Scarifiers)、液壓或氣動拆除錘、刮除(Shaving)、鑽孔與擊碎(Drilling and spalling)及研磨(Grinder)等方式。

金屬熔融法係將低度污染的金屬廢料予以熔煉處理，使大部分的放射性核種進入爐渣或尾氣中，少部分殘留於鑄錠內呈現均勻分佈，這些鑄錠可轉用於製造放射性廢棄物容器或用做遮罩、圍阻之用，因此得以減少廢棄物總量。

七、除役成本估算

進行除役成本估算，需瞭解：廠址狀況、預期風險與應變方案、執行預算、廠址放射性存量(site inventory)、估算方法、工作執行單位、工作範圍與最終狀態、法規要求、利害關係人關注事項、估算目的及廢棄物管理等。

詳細的除役成本估算步驟：(1)界定工作範圍；(2)決定採用的除役策略；(3)蒐集廠址相關資訊，如廠址結構平面圖、輻射特性、地下結構、埋管、薪資結構與人力成本等一般資訊，以及廠址內放射性存量；(4)界定假設條件，依廠址資訊、公司判斷及估算人員之經驗來決定；(5)識別各項作業與任務，作業與任務係依最終狀態與工作範圍來制定；(6)制定單位成本因子(Unit Cost Factor)與生產力因子(Productivity Factor)，單位成本因子依待執行活動之敘述、在理想情境下執行該活動的預估時間、預估之生產力因子、除役團隊之組成、執行活動所需設備與消耗品等來決定，而生產力因子又稱為工作困難度因子(Work Difficulty Factor)，係用於非理想情境工作效率不佳導致成本可能升高之調整；(7)對各項作業進行成本估算，應納入完成各項作業需要的所有成本，包括間接費用、人事費用、設備費用及執照費用等；(8)擬定各計畫之排程；(9)制定最終成本估算。

符合品質要求的除役成本估算應包含下列事項：假設與排除事項，假設可能是拆除範圍、廢棄物處置或土壤體積等，排除事項可能是電氣開關設備與變壓器、輸電線路、道路及建築物等；法律與技術的邊界條件，如聯邦政府、州政府及地方政府的要求；各種限制條件，如外釋標準、曝露限值、綠地或工業使用等；除役策略，立即拆除或安全貯存；最終狀態要求；利害關係人關注事項納入成本估算考量；設施描述與廠址輻射特性，如放射性污染設備、結構及物質之存量，以及核反應器容器組件的中子活度；廢棄物管理，含搬運方法、包裝方法、貯存設施、運送方法及最終處置選項等；使用數據之來源，依實際現場調查之數據或以工程經驗判斷；使用的成本估算法，由下到上法、特定類比法、參數法、成本審查與更新法或專家意見法等；預期之風險與應變方案；使用之除污技術及拆除工法；估算使用之軟體或計算方法。

八、拆除技術

拆除(Dismantling)係利用熱力、機械或電力等方式移除設備或結構以完成除役流程。核設施之拆除作業主要分成金屬件切割與混凝土切割兩大類。金

屬件切割技術包括：機械切割、熱力切割、電力切割及水刀切割等。混凝土切割技術包括：機械切割、熱力切割及水刀切割等。

金屬件機械切割技術包括：液壓剪(Shears)與壓穿式電剪(Nibbler)，液壓剪適用於棒材與管材之切割，壓穿式電剪適用於板金件之切割，剪切的優點是快速且幾乎不產生二次廢棄物；鋸切，如圓盤鋸切割(Disk Sawing)、帶鋸切割(Band Sawing)或往復式鋸切割(Reciprocating Sawing)；磨料輪(Abrasive Wheels)；鑽石索鋸(Diamond Wire)；銑切(Milling)等。

金屬件熱力切割技術包括：鋁熱反應槍(Thermite Reaction Lance)，利用鋁熱反應劇烈放熱，溫度可高達 4000~10,000°F(2200~5538°C)；電漿火炬(Plasma Arc Torch)，電流多落在 100~200 安培，可高達 1,000 安培，優點為切割速度快且品質佳，缺點為有熱反應產物，增加二次廢棄物量及人員輻射曝露劑量；氧-燃料火炬(Oxy-Fuel Torch)，如氧-乙炔、氧-丙烷及氧-汽油等火炬，溫度約在 1500°F(815°C)，優點為價格便宜且安裝容易，缺點為可切割之材料有限；金屬粉末噴射切割(Metal Powder Injection Cutting)，使用 200 篩目(mesh)的鐵粉噴射撞擊切割，溫度可高達 16,000°F(8870°C)；控制性爆破(Controlled Explosives)；雷射切割等。

金屬件電力切割技術包括：金屬分解加工(Metal Disintegration Machining)、金屬放電加工(Metal Discharge Machining)、電弧鋸(Arc Saw)、電弧鑿削(Electrical Arc Gouging)及接觸電弧金屬切割(Contact Arc Metal Cutting)等。

金屬件水刀切割技術係利用高壓水柱帶出磨料撞擊待切割物件，以移除材料達成切割功能。優點為可切割厚板且不會產生熱反應產物，缺點為需特殊過濾設備，且會產生大量二次廢棄物。

混凝土機械切割技術包括：鑽石索鋸(Diamond Wire Saw)、取心鋸(Coring Saws)、液壓或氣動錘(Hydraulic or pneumatic Hammers)、壓碎機(Crusher)、岩石開裂機(Rock Splitters)及拆牆鐵球(Wrecking Ball)等。

混凝土熱力切割技術包括：火焰切割(Flame Cutting)、氧火炬(Oxygen Lance)及爆破(Explosives)等。

依上所述，有各式各樣的拆除工具可供選用，且價格範圍廣泛，於選用工具時應就操作安全、輻射劑量、環境衝擊及廠址特定因素的影響等進行評估，並注意從歷史經驗中學習，避免重蹈覆轍，且注意毋須過度複雜，愈簡單愈好。

九、最終狀態偵檢

最終狀態偵檢之目的係為蒐集廠址可符合外釋標準所需的輻射統計數據。廠址外釋標準由管制機關規定，多以人年有效劑量限值表示，但其無法由輻射偵檢儀器直接量測取得，故應配合廠址內放射性核種類型，配合適當的曝露路徑與情節設計，依據廠址土壤及設施內殘餘放射性物質，以程式分析計算達目標人年有效劑量限值時各種核種的濃度限值，該等濃度限值即所謂導出濃度指引水平(Derived Concentration Guideline Level, DCGL)。常見的程式包括由美國能源部委託 Argonne 國家實驗室開發的 RESRAD 程式，或美國核管會委託 Sandia 國家實驗室開發的 DandD 程式。

最終狀態偵檢蒐集輻射數據分成規劃、執行及數據評估等 3 個階段。規劃階段係使用數據品質目標(Data Quality Objectives, DQO)的流程來設計輻射偵檢，係為確保輻射偵檢之數據具有充分的品質與數量。執行階段係使用適用的偵檢儀器及偵檢方法進行偵檢，需同行進行品質保證及品質管制相關作業。評估階段係對偵檢取得之輻射數據進行數據驗證(Data Verification)、數據確認(Data Validation)及數據品質評估(Data Quality Assessment)等作業。

蒐集輻射數據的偵檢方法有 3 種：掃描(Scan)，係在活度偏高區域之表面以固定速度移動可攜式偵檢器偵測表面活度，目的為找出潛在熱區；直接量測(Direct Measurement)，係偵檢器直接固定於待測件表面，由偵檢器讀數推斷放射性程度；取樣(Sampling)，係蒐集一部分環境介質進行分析，以確認污染物種類並量測放射性濃度。

最終狀態偵檢之偵檢單元(Survey units)係依輻射污染程度建立，依 MARSSIM 之建議：第 1 級區域的偵檢單元，掃描範圍建議涵蓋整個偵檢單元(100% Coverage)，取樣或直接量測以系統性方式取得；第 2 級區域的偵檢單元，掃描範圍建議涵蓋 10%~100%的偵檢單元(10~100% Systematic)，取樣或

直接量測以系統性方式取得；第3級區域的偵檢單元，掃描範圍可用專業判斷，取樣或直接量測得以隨機方式取得。至於非受影響區是完全不須進行任何的掃描、直接量測或取樣。

對最終狀態偵測取得之數據，應進行數據驗證，為確認數據來源係由可靠正確的方式取得；數據確認，係依廠址歷史評估、放射性核種特性等判斷每筆數據是否有意義、是否可用於外釋標準之判斷等；數據品質評估，係視量測數據之結果，判斷是否需使用統計檢定法(statistical tests)評估，若污染物於背景中存在採 Wilcoxon Rank Sum(WRS)檢定法評估，若污染物於背景中不存在則採 Sign 檢定法評估，可釐清偵檢單元結果超出外釋標準之原因有無可能是因樣本數過低造成。

十、案例研討

(一)ANL JANUS 研究用核子反應器設施除役

JANUS 研究用核子反應器主要用於中子輻射研究，該設施包括：核子反應器、控制室、冷卻系統以及相關的輔助設施。由於反應器老化和研究需求改變，ANL 決定將其除役。除役計畫由 ANL 專業團隊負責，團隊成員包括：

計畫經理：負責整體項目的規劃和執行。

技術專家：包括核工程師、環境科學家和放射性廢物管理專家。

安全專員：確保除役過程中的安全措施到位。

環境監測人員：負責監測和評估環境影響。

法規專員：確保項目符合所有相關法律和規範。

除役公司：負責除役管理及環境安全衛生監督。

除役計畫執行，先進行初步評估，包括環境和風險評估：對反應器及其周邊環境進行詳細評估，確定污染範圍和程度，並制定應變計畫。接著執行拆除工作，包括制定詳細的拆除計畫，確保每一步驟的安全性。使用防護裝備和技術，確保工作人員和環境的安全措施。針對廢棄物進行管理，將放射性廢物分類，並根據其放射性強度進行不同的處理。對高放射性廢物進行安全儲存，確保不會對環境造成影響。受污染土壤的整治：使用技術如土壤洗

滌、穩定化處理和生物修復，去除或穩定污染物。監測和驗證：在整治過程中和之後，持續監測土壤質量，確保整治效果。JANUS 反應器除役計畫是一個複雜且具有挑戰性的過程，涉及多方面的技術和環境考量。通過詳細的計劃和專業的執行，該計畫旨在確保除役過程的安全性和環保性，並使得對周邊環境的影響最小化。課堂講師 Larry Boing 表示，持續的環境監測和創新的技術應用有助於達成此一目標。

(二)水面艦支援駁船(SSSB)的拆解與處置

本堂課由來自 APTIM 公司的計畫主持人 Fox Bruce 介紹水面艦支援駁船(surface ship support barge, SSSB)的拆解和處置，該合約是首次以商業合約進行海軍船艦之拆解與處置，客戶為美國海軍海洋體系司令部(NAVSEA)，並由 NRC 通過 NAVSEA/NRC 之間協議進行監管。該船隻(SSSB)由二戰時期的 T2 油輪改裝而成，用於支援核動力航空母艦的加油作業，並臨時存放用過燃料。計畫執行步驟包括：將船隻從維吉尼亞州拖移到阿拉巴馬州船塢、移除和處置受輻射影響的材料，恢復和釋出現場至項目原狀態。總結該 SSSB 項目的拆解和處置過程如下：(1)進行場地準備與基準特性調查；(2)SSSB 拆除前置作業，如基礎設施、工作區域、電力、火災預防、環境(空氣、水、沉積物)監測、颶風緊急應變計畫、移除並處置雜項材料與設備、清潔室廢棄物移出準備、制定切割與吊運計畫等；(3)備妥作為分類拆解物尺寸與包裝之場所的圍阻體結構(containment structure, CS)；(4)將船隻分段拆解後移至 CS 進行尺寸分類與包裝；(5)進行非限制性外釋之偵檢；(6)移除水坑內的工具與設備，並進行水處理及水坑拆除；(7)將船隻最後一段拆解後移至 CS 進行尺寸分類和包裝；(8)將廢棄物包裝並運送到德州處置場；(9)進行最終狀態偵檢並釋出場地。過程充滿諸多挑戰，包括：疫情限制、高勞動力流動率、物流延誤及水源管理等問題，整個計畫在 2020 年 6 月開始，2023 年 7 月完成。

(三)芝加哥鎂合金鑄造設施除役

伊利諾州早年專門製造輕質、高強度含鈦的鎂合金飛機零件的工廠，相關零件鈦濃度大約在 2.5~4%。該工廠在 1950 年代初期，將含鈦渣的廢料直接埋在廠區地表下，工廠非正式紀錄顯示埋於廠區東邊共計 13 處。伊利諾伊州政府於 1997 年要求該設施除役，因此該廠進行廠址輻射特性調查，然而該調查並不完善且最終結論還有錯誤。由於該工廠欠缺專業除役人員及經費，因此美國核管會(NRC)及環保署(EPA)提供部分經費由國防部委請專業團隊執行該廠址輻射特性調查作業。調查過程首先使用 Gamma 偵檢儀器掃描廠區，並找出埋有鈦渣廢料的位置，再將該放射性廢料挖出裝桶並暫存於廠內。因為經費限制故此進展緩慢，最後處置約 1400 萬磅廢棄物。最後階段則開始進行建物表層及下方表層污染偵檢，整個廠區共被區分為 7 個受影響區，每區最少有 18 個表面偵測位置。調查結果發現仍有數個位置鈦 232 輻射值太大必須執行整治改善行動。最後約有 450 萬磅的 Class A 低階放射性廢棄物運到 Energy Solutions 處理及處置；約有 610 萬磅豁免放射性廢物被運至垃圾場掩埋。總經費約 270 萬美金，低於原先估計的 1100 萬美金。

(四)紐約州立大學水牛城分校研究用反應器除役

紐約州立大學水牛城分校的研究用反應器建造於 1959 年，1961 年初次臨界。因 1993 年發生熱交換器洩漏事件，1994 年 6 月以後就不再使用。2009 年選擇除役設計承包商，2010~2011 年期間進行輻射特性調查及除役前置作業，並制定除役計畫，於 2012 年除役計畫獲得美國核管會(NRC)核准後開始進行除役，以及選擇拆除承包商。除役管制機關眾多，包括：NRC(第一區辦公室及除役科)、紐約州政府(衛生局、環保資源局、勞工局等)、環保署等。輻射特性調查包括：表土與次表土壤取樣、廢料系統取樣、Alpha/Beta 輻射量測、掃描量測、管道偵檢、生物屏蔽牆鑽芯、反應器中子活化分析、建築表面特性偵檢等項。除役前置作業包括：長期留存廢棄物清空、干擾物移除等。除役作業包括：規劃與準備、移除反應器內部組件、以鑽石索鋸拆解生物屏蔽牆及熱室、移除廢液槽、移除冷卻水系統、移除通風系統、表面除污、拆除建築物及進行最終狀態偵檢。最終於 2015 年完成廠址復原。課堂講師

Tom Hansen 博士表示，與各單位保持良好的溝通是本項除役計畫成功的關鍵；特別是，該大學每個月都會定期與聯邦及州政府等管制單位進行會議，且為消除大眾疑慮，於重要作業的執行期間都會公布工作執行週報。該項做法值得台灣日後相關核設施除役進行時之借鏡。

(五)內華達大學 Reno 分校 58 號館除污

內華達大學 Reno 分校 58 號館建於 1920 年，為地上兩層加地下一層之結構，可用面積約 8,700 平方英尺。美國礦業局於 1921 至 1954 年間在此館進行鐳樣品測試，導致建築物受到鐳-226 的污染。該棟建築曾於 2017 年進行首次輻射特性偵檢，報告結論為該建築物殘留鐳-226 放射性超過 NRC 所定之表面污染限值，但當時未針對此報告結論規劃整治或拆除作業。直到 2020 年 10 月始委託 Ameriphysics 公司規劃整治工作，經該公司初步審查該報告內容發現諸多不合理情形，包括：該建築物於偵檢期間還在裝潢與使用、內部許多原始表面已被新材料覆蓋、偵檢數據太少(平均每個房間只有 3 個量測點)、部分預期高劑量區域無偵檢數據等，經執行額外數據收集，包括：每間房間劃分 4 象限並於每象限中間拆除部分地毯以偵檢原始樓地板；移除部分天花板以偵檢樓層間區域；地下室樓地板進行偵檢；對磚牆外部近通風口處及磚牆內部移除覆蓋物進行偵檢等，更精確地掌握放射性污染的分布及活度狀況後，於 2021 年 12 月開始進行除污，2022 年 4 月完成最終狀態偵檢報告，2022 年 7 月順利取得執照之更新。課堂最後講師提到：除役計畫成功的關鍵在於輻射特性調查，必須仔細檢視數據以確保其符合計畫目標，此外，在缺乏決定後續作業所需之明確資訊時，不要害怕收集額外數據。

肆、心得與建議

1. 本次設施除役訓練課程內容，包括從除役規劃開始至廠址外釋結束等所有步驟基本概念，涉及除役環境安全與衛生、除役廢棄物管理、輻射偵檢規劃與技術、除役計畫規劃與管理、除污技術、除役成本估算及拆除工法等多種不同領域與專業，對於核設施除役整體概念及未來所需專業的掌握多有助益，但後續對特定專業之知識與技能，仍需自我學習或另參加專業課程加強。
2. 核電廠除役因涉及放射性物質危害及人員輻射劑量管制，相較於一般產業設施或廠房之拆除，具有更多的法規要求(如輻防與放射性廢棄物管理等相關法規)、技術需求(如輻射偵檢、除污及拆除技術等)及對現場作業進行之限制(人員輻射曝露劑量不可超過限值)等，存在交互依存複雜關係，任一環節疏忽均可能影響進度，為期能在有限基金下如質如期地完成除役工作，在現今國際間已有諸多核設施(包括核電廠)完成除役之先例下，應藉助持續蒐集國外先進國家成熟的除役技術與豐富的除役經驗，以為參考並促使順利完成除役工作。
3. 本次設施除役訓練課程內容包含核設施除役過程所有步驟基本概念，並提供豐富的除役資訊來源，對於核設施除役整體概念及未來所需專業的掌握多有助益，且所請講師多為業界不同領域具多年實際除役經驗的專家，藉由當面跟課程講師請益或討論可汲取其寶貴的實務經驗，亦有助於除役安全管制能力的提升，建議可持續參加本項課程。
4. 美國擁有豐富的核設施除役經驗，對應之除役安全管制能力經多年累積應最為完整，建議持續追蹤美國核管會對於核電廠除役管制之實務經驗，供作為我國對於核電廠除役安全管制之參考。