

出國報告(出國類別：實習)

參加美國能源部Argonne國家實驗室
舉辦之核設施除役訓練課程

服務機關：核能安全委員會

姓名職稱：郭柏慶研究助理

派赴國家：美國

出國期間：113年11月30日至12月07日

報告日期：114年01月23日

摘 要

此次除役訓練課程由美國能源部 Argonne 國家實驗室主辦，旨在提升學員對核設施除役過程的認識與實務应用能力。課程涵蓋核設施除役流程的基本介紹、環境安全及人員健康、除役計畫與管理、除役技術、除污及拆除技術、除役成本估算及國際除役現況等。基本介紹包括 NRC 與 DOE 的職責分工、管制要求、廢棄物管理、除污與拆除策略、資金規劃及案例分析。環境安全及人員健康部分著重探討除役風險與工安管理措施；除污技術課程介紹了化學、機械及其他創新技術的應用；拆除技術側重拆解過程與遠程技術應用；成本估算課程則涵蓋分類、風險管理及改進建議。並且透過案例分析，使學員能掌握除役各環節技術的實務應用，進一步提升核設施除役的安全性與合法性。

目 次

摘要	i
目次	ii
一、目的.....	1
二、過程.....	2
三、訓練紀要.....	3
四、心得.....	37
五、建議.....	38
附錄一 美國能源部於拉斯維加斯舉辦核設施除役專業訓練課程表.....	40
附錄二 美國能源部頒發之結業證書.....	41

一、目的

此次核安會派員參加核設施除役訓練課程，旨在強化對核設施除役程序的安全管制技術與檢查能力。隨著我國核能設施進入除役階段，安全、合法及有效的除役過程對於保障公眾與環境的健康安全至關重要。本訓練課程由美國能源部 Argonne 國家實驗室主辦，內容涵蓋核設施除役的核心領域，包括除役計畫的制定與管理、環境安全及人員健康、除污及拆除技術、費用估算及國際除役現況等。

個人透過參加此次為期三天的專業訓練，將學習到如何從理論與實務層面推動有效、安全的除役程序，並掌握國際標準及管理措施，這些將為台灣未來核設施除役提升管制效能。特別是透過與核能領域專家的交流，參訓人員將能獲得除役技術和管理的最新趨勢和實務做法。此次培訓的核心目標是提升學員在核設施除役中的技術專業性，進一步強化台灣除役過程的安全性及可行性，以確保台灣核能設施的除役工作符合國際標準並減少潛在風險。

二、過程

本次參加美國 Argonne 國家實驗室舉辦之核設施除役訓練課程，行程概要如下表。

日期	地點	行程
11 月 30 日(六) - 12 月 01 日(日)	台灣到拉斯維加斯	去程
12 月 02 日(一)	拉斯維加斯	美國 Argonne 國家實驗室舉辦之核設施除役訓練課程
12 月 03 日(二)	拉斯維加斯	美國 Argonne 國家實驗室舉辦之核設施除役訓練課程
12 月 04 日(三)	拉斯維加斯	美國 Argonne 國家實驗室舉辦之核設施除役訓練課程
12 月 05 日(四) - 12 月 07 日(六)	拉斯維加斯至台灣	返程

三、訓練紀要

本次核設施除役訓練課程由美國能源部 Argonne 國家實驗室主辦。負責人 Larry Boing 先生為所有參訓學員致開場詞，並熱情歡迎各國學員的到來。Boing 先生介紹了 Argonne 國家實驗室在核設施除役技術研究上的投入，說明這些技術不僅應用於美國境內的核設施除役作業，也提供技術建議供美國核管會(Nuclear Regulatory Commission, NRC)參考。

主辦單位為每位學員準備了含課程簡報及相關參考資料的隨身碟，以便學員隨時查閱。Boing 先生開場完後就邀請學員簡要介紹各自的工作背景和對訓練課程中特別感興趣的主題。職說明個人在核能安全委員會工作，主要協助核電廠內放射性廢棄物貯存及處理設施的相關安全管制作業，為因應各核電廠陸續停止運轉並進行除役，故派員參加此除役訓練課程以提升除役相關專業知識。

此次課程共有 29 位學員參加，分別來自美國、加拿大、台灣、南韓及日本等國家，學員所工作的單位包含核能電廠、管制機關及核能研究機構。

以下就部分訓練課程內容摘要分述如下：

(一) 核設施除役作業介紹訓練課程(Introduction to Decommissioning)

本課程介紹核設施除污與除役(Decontamination and Decommissioning, D&D)作業的核心內容，幫助學員了解美國能源部(Department of Energy, DOE)和美國核管會(Nuclear Regulatory Commission, NRC)在核設施除役中涉及的管制要求、技術挑戰、資金需求與管理策略。課程內容包括核設施除役的歷史背景、主要除役方法、核設施除污與拆除技術、放射性廢棄物管理、管制機關職責及政策、未來發展趨勢和課程案例分析。課程重點如下：

1. 核設施除役概述

核設施除役涉及關閉及拆除核電廠、研究用反應器、核燃料加工設施及其他相關場所，清理遺留的放射性和化學污染。隨著核能設施在美國逐步除役，DOE 和 NRC 根據除役程序與標準進行管制要求及檢查，目的在於減少環境污染並保

障人員安全，使除役順利進行。本課程首先概述核設施除役的背景，介紹了 DOE 和 NRC 在美國核除役中的不同角色和責任分工，並提供了除役程序的基本框架。

2. 管制機關的職責與政策

在美國，NRC 主要管制民用核設施和民用放射性物料的安全使用，而 DOE 則負責國防設施、核武器生產相關設施的除役及環境清理工作。根據《原子能法》、《綜合環境應對、賠償與責任法》(Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act, CERCLA)等主要法規及 10 CFR、NUREG、DOE Order 等監管標準對各類設施進行相關管制及檢查。

協議洲(Agreement States)是指與 NRC 簽訂協議，賦予各協議州許可及檢查在各協議州境內使用或擁有的放射性副產品、放射源或特殊核材料的權力。除聯邦機構或聯邦認可的印第安部落外，任何冀望在這些協議州之一擁有或使用許可材料的申請人應聯繫該州的負責官員，以獲得準備申請的指導。這些申請應向各協議州官員提出，而不是向 NRC 提出。講師介紹至 2020 年為止已有 39 洲簽屬為協議洲如下圖 1：

Agreement States – 2020 (39)

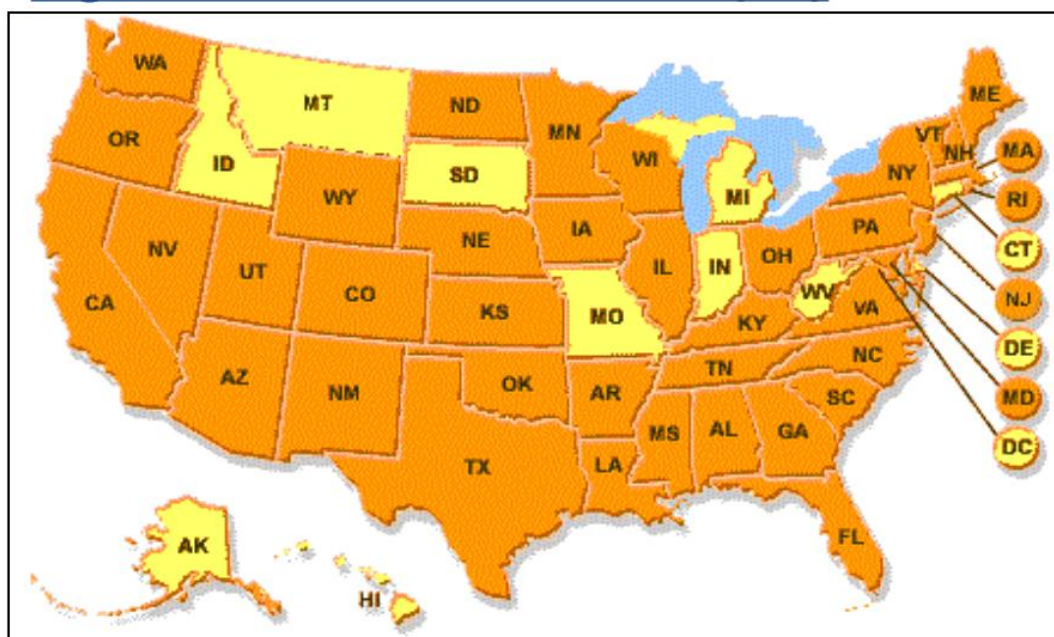


圖 1 簽署協議州數量

3. 除污與除役技術

核設施的除污與除役涉及多種技術，包括傳統的機械拆除、遠程操作和創新技術的應用。為減少人員曝露風險，對於高輻射環境採用了遠程控制設備進行拆除，並結合廢棄物減量化策略來降低成本。

4. 放射性廢棄物管理

在除役過程中，放射性廢棄物的管理是一大挑戰，涵蓋低放射性廢棄物(LLW)、高放射性廢棄物(HLW)和用過核子燃料的貯存。有些設施除役作業單位為降低成本，採用現地處置(On-site Disposal)代替場外運輸和處置(Off-site Disposal)的策略。例如在課程內提到的橡樹嶺(Oak Ridge)國家研究所就現地處置成本比較結果顯示，選擇在現地設置處置場可節省約 3500 萬美元。這樣的選擇不僅減少了運輸和外部處置的高昂費用，還降低了因運輸過程可能引發的輻射風險。

課程中還介紹所謂的歷史場址(Legacy Sites)，是指早期未完全遵循現代環保標準的核設施，它們可能存在有放射性和化學污染問題。這些場地的復原通常需要巨大的資金支持、創新技術的應用及長期的監測。

5. 地下水污染設施的除污

有一部分設施存在地下水污染問題，這些污染多來自於設施過去的運營過程，特別是核武器生產相關設施。污染物包括鈾、鋇、氚等放射性同位素。對於地下水污染設施的除污，採用物理、化學或生物技術來分離或隔離污染物，並設置長期監測系統來追蹤污染物濃度變化，確保地下水質不對周邊社區構成威脅。

6. 預算與資金需求

DOE 的環境管理部門(Department of Energy of Environmental Management, DOE-EM)每年需要大量資金支持除役計劃，根據預算歷史與未來預測顯示，隨著核設施清理需求的增長，資金需求將持續增加。預算的波動可能因政策變更、項目優先級調整等因素影響。長期的除役工作需要大量資金，可以通過優化管理來提升項目效率，確保資金能夠滿足清理、除污和長期監測的需求。

7. 社區與利益相關者參與

核設施除役對當地社區的影響巨大，因此管制機關強調利害關係人參與的重要性。高透明度和社區參與有助於提升政策的接受度，促進環保和社會責任的落實。

在第3天的案例分析 (Art of Community Engagement)中，講師一開始就提到「若未能有效地與社群互動，您與您的專案可能會損失多少，以及您願意承擔多少損失，這就是衡量誠意的標準」來說明社區參與的重要性。

講師強調社群參與「是一門藝術，而非科學」，揭示傳統參與方法容易忽略的重要社群特質。圖2分別呈現了傳統參與(Traditional Participation)與真實參與(Authentic Participation)在社群參與中的結構差異，強調了「社群聲音」的重要性。

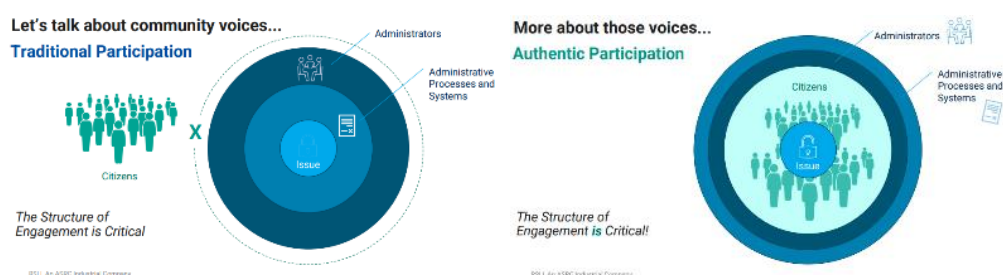


圖 2. 傳統參與及真實參與的差異

傳統參與顯示管理者與議題之間的行政流程位於核心，而公民則被置於邊緣，社群的聲音未被有效納入決策過程。公民雖有參與機會，但主要角色是被動的，僅僅作為流程中的配合者，反映出參與的形式主義；真實參與則將公民和議題置於核心位置，而管理者和行政流程退居輔助角色，強調公民在決策過程中的核心角色，實現真正的雙向互動。社群的聲音成為問題解決與決策制定的重要依據，避免了「走過場」或形式主義的情況。這種模式旨在建立更真實的對話，讓社群的參與更具實質意義。

講師提到與社區建立夥伴關係，可以告訴社區未來會達成的目標，以便提供相關觀點；聆聽社群成員的心聲，並且越早與社區建立夥伴關係越好，並與社群努力維持良好的關係。

講師也說明了為什麼有些溝通方式效果不佳，可能原因在於不知道如何接觸計畫所在社區的人們，因此不知道什麼對他們來說最重要；或是我們確實知道什麼是重要的，但由於社區的關注點或需求與我們正在努力的目標不同，而忽略並希望它消失。

講師提供一個 **Keystone** 案例，說明當初計畫時以最短路線(如下圖 3 紅線)、最低時間成本花費，但是忽略了氣候、地理、文化、歷史及人等因素而導致實際路線與原計畫路線相差甚遠(如下圖 3 藍線)。

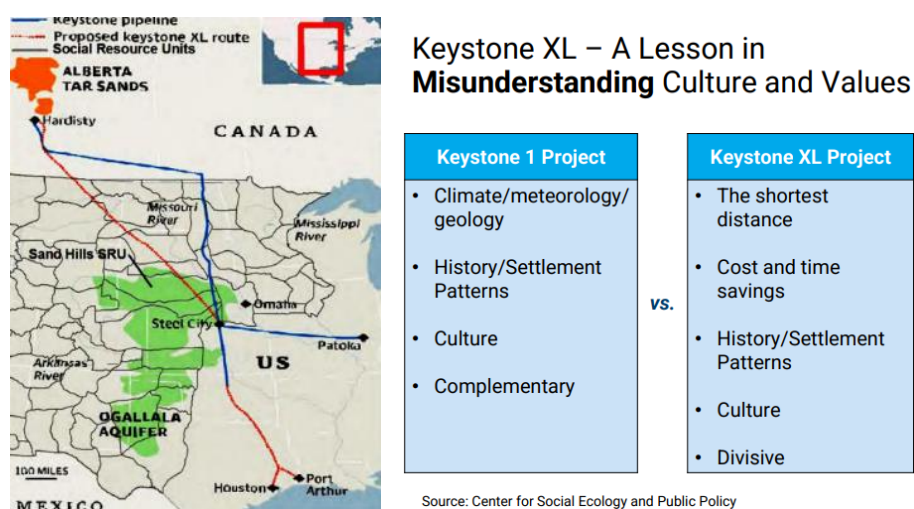


圖 3. Keystone 案例原計畫與實際執行的差異

課堂上還介紹了社會運作許可(Social License to Operate, SOL)，是指當專案得到當地社區和其他利害關係人或廣泛的社會接受時即存在。也就是社會運作許可普遍認可的定義是社區或利害關係人對組織、計畫或其活動的持續接受。

講師最後總結這堂課時強調人們渴望參與決策過程並獲得認可，同時指出開會時使用公家提供的會議室雖具成效，但咖啡館等更親民的場所會更受歡迎。他也提醒我們，在推動專案時，除了強調安全外，更應著重其對社區的正面影響，並積極與 Z 世代溝通，了解他們的想法。

8. 除役案例分析：橡樹嶺 K-25 氣體擴散廠

橡樹嶺 K-25 氣體擴散廠作為世界上最早的鈾濃縮設施之一，最終在 1987 年停止運營並進入除役階段。該設施的除污與拆除工作展現了在應對大型、複雜

除役項目中的創新方法。拆除過程中不僅克服了高輻射區域的技術挑戰，還採用了廢棄物減量策略，降低了廢棄物處理成本。此外，K-25 的場地清理後，成為橡樹嶺社區的發展資源，為未來土地再利用創造了可能性。

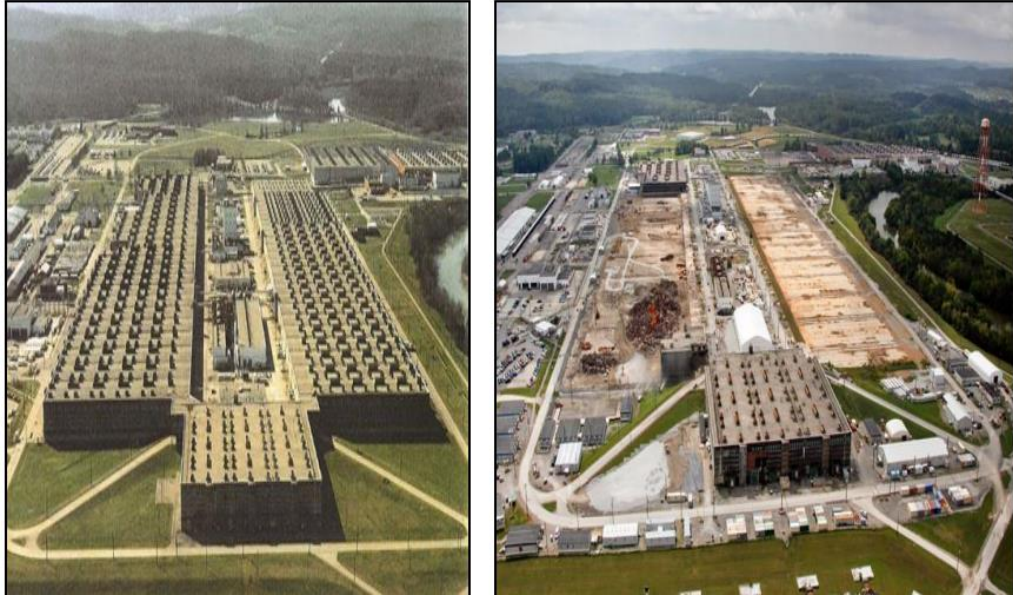


圖 4. K-25 場地拆除前及拆除中



圖 5. K-25 場地拆除後

核設施除役作業介紹訓練課程小結

本課程對美國核設施除役的政策、管制機關角色、除污技術、廢棄物管理及預算需求進行了初步介紹。核設施除役是一項資金密集型的長期工程，需要跨部

門協作、社區支持及穩定的資金來源。通過學習這些內容，將掌握核設施除役的核心流程和挑戰，為未來除役項目規劃和執行提供參考。

(二) 除役時的環境安全與健康(Environment Safety & Health in Decommissioning)

本課程詳細探討在核能設施除役過程中，環境、安全與健康(Environment Safety and Health, ES&H)規劃的關鍵議題。其核心涵蓋危害識別與控制、工作場所安全文化的建立、以及針對除役特有挑戰的應對策略。講師基於實務經驗提供具體案例進行講解，對於核能設施除役的 ES&H 管理能有進一步的瞭解。課程重點如下：

1. 環境、安全與健康(ES&H)的基礎概念

ES&H 的核心目標是透過識別、管理及控制危害，保護公眾、工作人員及環境免於核能設施除役過程中的不良影響。這包括確保所有活動都符合法規標準，如美國法規 10 CFR 851(勞工安全與健康計畫)，該法規詳述了工作人員安全計畫的要素，涵蓋違規處理及糾正措施的制定。此外，美國職業安全與健康管理局(Occupational Safety and Health Administration, OSHA)會要求雇主確保工作環境安全，避免嚴重已知危害的發生。這種結構化的管理方法使 ES&H 成為衡量除役計畫成功與否的主要指標。

2. 除役過程中的 ES&H 挑戰

核能設施除役面臨比運營期間更多的挑戰，特別是老化設施和動態變化的工作環境帶來的額外風險。常見挑戰包括系統與結構的老化(如通風系統、消防設施等)以及獨特作業(如重物吊裝、拆除與焊接等)。此外，除役過程涉及臨時工或承包商，這些人員可能缺乏操作經驗或對場地不熟悉。講師於課程上指出，需要針對這些挑戰進行持續的專業訓練，以確保操作安全。

3. 危害管理與管控措施

除役中的危害管理以作業危害分析(Job Hazard Analysis, JHA)為核心，通過分析工作任務時的環境、任務及工具，提前識別可能的風險並制定降低措施(如下圖 6)。

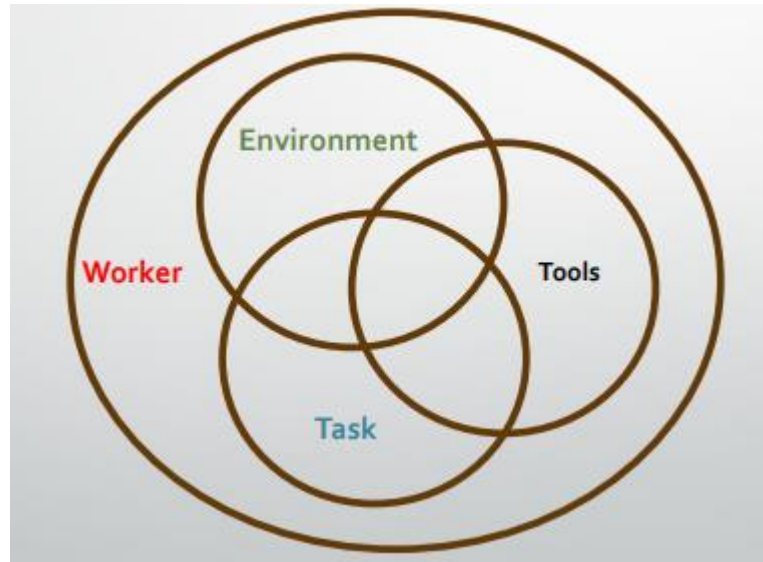


圖 6. 作業危害分析

講師亦介紹危害控制依據一個層級模型實施(如下圖 7)，分別是：

1. 危害消除(Elimination)：這是控制層級中最有效的方式，指徹底移除危害源。應在規劃階段考慮將高風險任務替換為無風險的替代方案。例如，若一特定設備存在輻射曝露風險，可以評估其是否能完全拆卸或封存以避免接觸。

2. 替代(Substitution)：當無法完全消除危害時，可考慮用危害較小的替代方案來完成工作。例如，使用低毒性或無毒化學品替代原有的高毒性物質，或選擇非放射性材料來替換輻射源。此階層的有效性取決於替代方案的可行性以及對操作要求的影響。

3. 工程控制(Engineering Controls)：這一層級涉及設計和實施技術性解決方案以隔離或減少危害。例如，使用屏蔽或隔柵來減少人員輻射曝露，或者安裝局部通風系統以減少有害氣體的積累。這些管控措施在現場實施後通常能長期運行，但需要專業設計及定期維護。

4. 行政管制(Administrative Controls)：行政管制包括制定和執程序、政策和培訓計畫，幫助工作人員安全作業。例如，安排危害評估工作坊、實施輪班制度以減少輻射曝露時間，或強化對特定作業的監督。這種控制方式的優勢是靈活性高，但其效果依賴於工作人員的執行力與管理階層的支持。

5. 個人防護設備(Personal Protective Equipment, PPE)：這是最後一層，也是防護能力最弱的一層，用於補充其他管控措施。例如，工作人員在放射性區域內需要穿戴輻射屏蔽裝備、呼吸防護具或戴上安全眼鏡來降低直接曝露的風險。雖然 PPE 是不可或缺的，但它依賴於個人正確使用和持續配戴，且無法完全消除危害。

講師還強調，應定期評估管控措施的有效性，並根據需要進行調整。

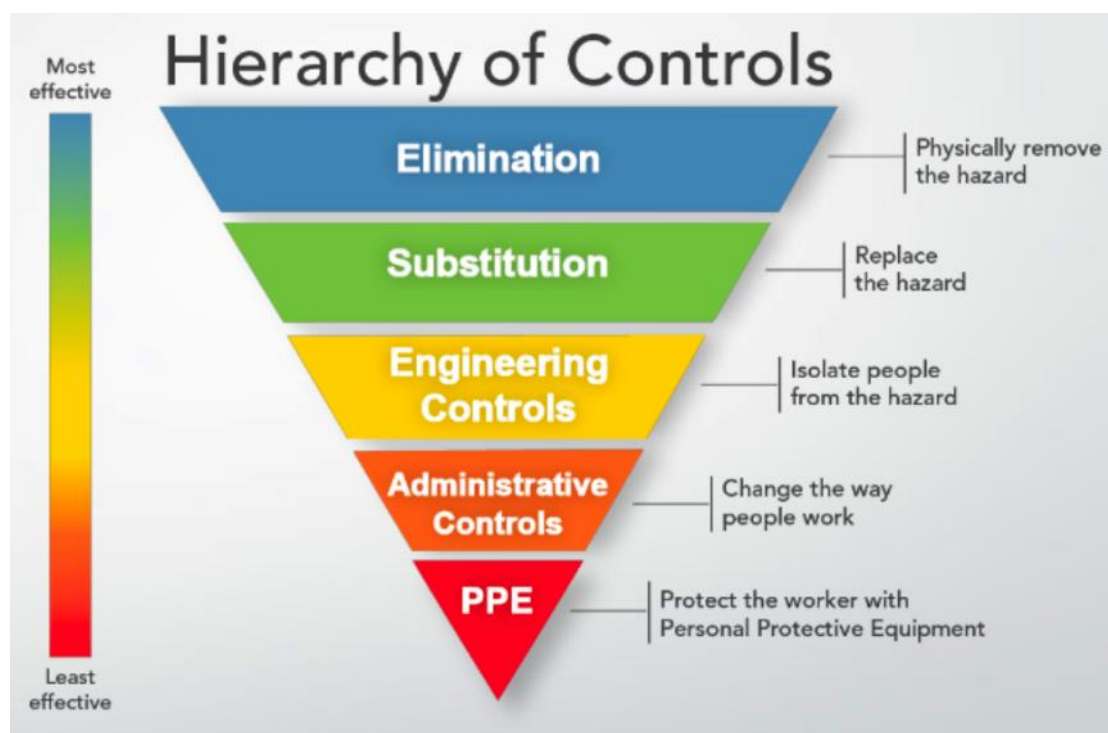


圖 7. 危害控制層級模型

4. 規劃與實施

在除役期間，現有的 ES&H 計畫往往基於核電廠營運需求而設計，必須針對除役特有的挑戰進行修訂。講師建議每個除役現場的 ES&H 計畫至少應包括：針對每項作業的危害分析、員工培訓計畫、個人防護設備使用要求、醫療監控需

求、緊急應變計畫、密閉空間進入程序、以及環境監測方案。ES&H 計畫的成功實施依賴於全體管理層的支持和參與，以及對潛在問題的主動監控與處理。

講師介紹了運轉時和除役時 ES&H 計畫的差異分析如下圖 8：

Summary of differing ES&H Challenges	
Operations	Decommissioning
Many Tasks are Routine	Many one of a kind tasks
Most Safety Issues Already Identified	New Tasks Create New Safety Challenges
Most Personnel Know the Site/Procedures	Many Contract Workers/Temporary/New
Site Plant Operations Mostly Routine	Site Work Is In Constant Flux
Nuclear Plants – Focus On Operating Excellence/Safety	Focus On Dismantling Safely
Site Producing Power/Collecting Funds	No Operating Funds/Limited Funds to Complete Work
Site has little change day to day	Site Configuration/Structures Constantly Change
Constant experienced Staff/Corporate Support	Fluctuating Staff levels Based On Work
Skill Sets of Staff Known and Proven	May Have Less Professional Staff/Increase Labor
Knowledgeable Operations Site Staff	D&D Experienced Work Force
Training Requirements and Programs Established	Substantial need for Ongoing/Initial Training

圖 8. ES&H 在運轉時和除役時的差異

5. 案例分析

講師提供多起真實案例，突顯核能設施除役中的潛在風險與應對措施。例如，在密閉隧道空間作業時未考慮到火災產生的可能，使用的化學藥劑最後引發火災，導致額外風險；講師還介紹了工安事件，舉例高壓瓶未用鏈子好好固定時，當瓶身傾倒時有可能使內部高壓氣體釋放導致瓶身飛出撞傷人員；另一個例子是使用重型機具吊運時，人員務必遠離吊具的旋轉半徑以避免被撞到。課堂上強調核安全文化的重要性，認為管理層與員工的共同承諾對於確保安全具有決定性影響。

ES&H 課程小結

核能設施除役的 ES&H 規劃對於確保工作人員安全、環境保護及作業有效性至關重要。成功的 ES&H 管理需要綜合考量危害辨識、嚴格的規劃與執行，以及管理層的全力支持。以安全優先而非成本與進度為導向，結合現場經驗與國際標準，是保障核能除役過程平穩過渡的關鍵。

(三) 除設計畫與管理(Planning and Management)

本課程針對美國核設施的除役專案規劃與管理進行介紹，內容涵蓋如前期規劃、成本效益分析、安全評估及管理模式等。講師介紹了國際原子能總署(IAEA)、美國能源部(DOE)及核管會(NRC)對於除役的指導方針，並提供多種實際案例與建議，以幫助從業者成功執行核設施除役專案。講師一上課時就提到「FAILING TO PLAN IS PLANNING TO FAIL」，指出未做好計劃就是在計劃失敗，也就是如果我們在面對一個任務、目標或挑戰時，沒有投入時間和精力進行妥善的規劃，那麼失敗的結果幾乎是可以預見的。課程重點如下：

1. 除役規劃與管理目標

有效的除役規劃與管理依賴於詳細的前期準備與持續的專案執行。課程強調前期規劃需要在設施關閉至少三年前開始，其目的是縮短過渡期以降低成本。

規劃的第一步是全面性的設施特性評估，包括歷史資料、輻射特性、現有基礎設施的狀態等。這些資料將支持對除污和拆除所需的技術進行精確選擇，並確保符合相關法規。此外，課程強調成本估算是規劃過程中的關鍵部分，這不僅包括初始拆除與除污成本，還需納入潛在的變更或意外狀況的預算，以避免超支或延誤。

另外，規劃過程中需納入多方利害關係人，包括當地政府、居民、以及相關管制機關的意見。利害關係人的參與有助於促進信任與支持，確保專案順利進行。總體而言，成功的規劃需要資源的承諾、清晰的管理流程以及持續的風險監控。

2. 管理選項與挑戰

國際上核設施的除役管理方式主要分為四種：自行執行、委託除役承包商(Decommissioning General Contractor, DGC)、許可轉移及資產出售。每種模式都有其獨特的優勢與挑戰，說明如下：

自行執行適合有經驗且人員資源充足的業主。它允許原始員工參與除役工作，保留設施的內部知識，並為現有員工提供再培訓和職業發展機會。然而，此模式下的風險由業主完全承擔，包括資金風險、專案失敗的可能性以及員工心態轉變

的挑戰。

委託承包商的模式可以減少風險，因為承包商通常具有豐富的除役經驗和專業知識。然而，課程強調業主仍需負責管理以確保承包商達到法規與專案的要求。有效率的合約管理是此模式成功的關鍵，特別是避免合約糾紛或目標不一致的情況。

許可轉移與資產出售則能完全移轉除役相關的責任與風險。這兩種模式的優勢在於能減少業主的負擔，但前提是找到能被利害關係人信任且有能力的新業主或承包商。

3. 成本效益分析與安全評估

在核設施除役過程中，成本效益分析與安全評估是關鍵步驟，旨在確保任務的經濟性與安全性。講師指出，這些分析需團隊合作完成，重點在於識別並選擇最佳的執行方式。

在成本效益分析中，應評估每項關鍵路徑活動的成本與風險。例如，高輻射區域的拆卸、放射性廢棄物的處理、以及大規模結構的移除等，都需要詳細的經濟性與安全性比較，選擇正確的技術。

安全評估則強調輻防安全與工業安全，尤其針對潛在的事故場景進行預防性設計與管制，包括空氣污染物的釋放、放射性物質的運送風險及現場事故的緩解措施，所有操作均需符合法規。課程強調每個項目活動都應包括詳細的危害分析，並在執行前舉行開工前簡報(pre-job briefing)，確保風險最小化。

4. 案例與實踐經驗

講師列舉了多個美國核設施除役的案例，包括 Zion 核電廠和 Humble Bay 核電廠。這些案例展示了不同管理模式的實際應用及其影響。

Zion 核電廠的案例採用了許可轉移的模式，由新的承包商負責拆卸並在完成後將土地歸還原業主。這種模式成功減少了原業主的負擔，但講師也指出，成功的前提是業主與新承包商之間的目標必須一致，並且合約需清楚界定風險與責任。

另一案例 **Humble Bay** 核電廠，採取業主自行管理模式，雖然保留了內部人員的參與，但面臨的挑戰在於缺乏先前的除役經驗，導致管理負擔加重。課程講師建議，業主可以透過引入專家顧問來彌補這方面的不足。

這些案例的共同點在於，成功的專案不僅依賴於技術執行，還需要綜合考量資金規劃、風險評估與利害關係人的支持。

除役計畫與管理課程小結

核設施除役成功的關鍵要素，首先是對專案最終狀態(**End State**)的明確認知，無論是土地復原還是許可終止，清晰的目標將指導專案的每個階段。

其次，講師指出需建立以持續改進為基礎的「活文件」計畫。隨著專案進展，計畫應根據實際需求進行更新，確保目標、預算與風險管理保持同步。講師還強調「學習他人經驗」的重要性，例如參考其他核設施的案例或參加相關的技術交流會議。

安全方面則被視為核心，融入專案管理的每個層面。講師建議不僅要滿足最低安全標準，還需在設計上加入額外的預防措施，如持續進行 **ALARA** 評估與員工再培訓計畫。

(四) 除役技術、除污及拆除 (Technologies、Decontamination and Dismantling)

這兩堂課程聚焦於核能設施和相關行業中應用的重要技術，分為三個核心單元。首先，「**Technologies**」單元涵蓋核設施除役過程中新興技術的介紹，並探討創新需求。接著，「**Decontamination Technologies**」單元專注於除污技術，旨在有效減少或清除放射性污染，以保障人員和環境安全。最後，「**Dismantlement Technologies**」單元著重於核設施拆除的流程與挑戰，並介紹所需的設備和工具。以下分別介紹這三個單元課程重點。

「Technologies」

「Technologies」訓練課程主要針對核設施除役過程中的新興技術及創新需求，旨在幫助除役團隊瞭解現有工具的演進及其應用，以促進安全、經濟和有效的除役工作。核設施除役是相當複雜且耗時的過程，這些技術的應用能在多方面提升工作效能，包括減少工期、降低成本及減輕環境和人員風險。課程結合理論與實務，涵蓋技術需求及實際案例，提供學員全面的知識基礎。課程重點如下：

1.技術需求與演進的原因

課程開始介紹了除役技術的演進原因。核設施的除役過程通常需要結合多種技術工具，這些工具組成「除役工具箱」，並不斷隨著科技進步而更新。除役過程中除了需考慮技術的有效性外，也應評估其成本效益，因此新技術的開發和採用主要目的在於提升整體效率。例如，透過引入先進的檢測和拆除技術，可有效縮短除役時間，並減少工作人員曝露於輻射中的風險。此外，有些技術來自其他工業領域，透過跨領域的技術移植也能為核設施除役帶來新的解決方案。因此，除役團隊須持續更新知識，以適應技術的快速變化並妥善應用於實際工作。

2.核設施除役的終極目標

達成核設施除役的主要目標可分為兩種方法，一種是採用現成的經濟有效技術，另一種是結合創新技術來累積知識和經驗。對於經濟有效的除役，強調使用現成技術，這種方式旨在降低成本和縮短工期，創新技術僅在確實有效且成本可接受的情況下才會採用。然而，另一種方法則鼓勵在除役過程中引入創新，將現有技術與新方法結合，這不僅可有效推進除役工作，還可透過不斷的技術探索和數據積累，為未來的除役項目提供寶貴經驗。隨著技術不斷演進，除役項目的目標和方法可能會隨之調整，因此保持彈性並善用不同技術組合是實現安全有效除役的關鍵。

3.先進技術在除役中的應用

課程探討了幾種對於除役具有重要意義的先進技術，包括雷射技術、無人機、模擬軟體和特徵化工具等。雷射技術被廣泛應用於除污和拆解，能精確切割並去

除受污染材料，減少二次廢棄物的產生；無人機配備感應器和量測設備，可以在高輻射區域遠程檢測和監控，減少人員曝露的風險；模擬與成像軟體有助於除役過程中的規劃和預測，使除役工作能更有效且準確地完成；而特徵化工具則提供精準的污染評估，讓操作員可以精確地進行除污處理。

無人機、模擬 3D 輻射成像如下圖 9：

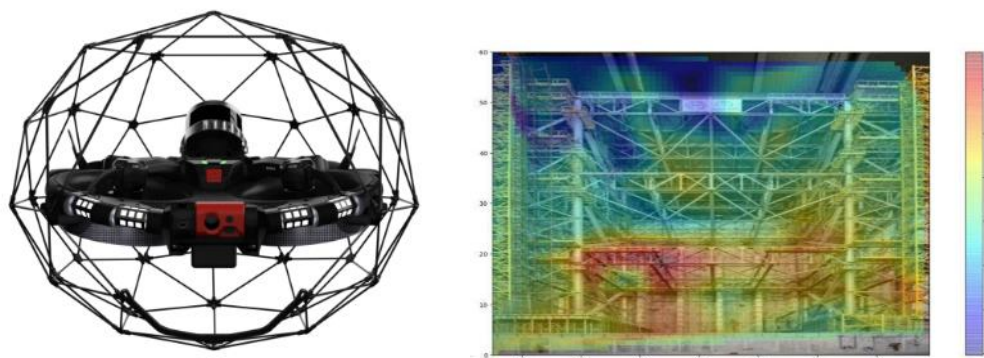


圖 9. 輻射偵測無人機及 3D 輻射成像

4. 創新需求與未來發展方向

課程最後分析了除役領域內的關鍵研發需求，從特徵化、分割/拆解，到廢棄物管理。在特徵化方面強調運用統計和遙測技術進行污染檢測與定位，以提高除污精度和效率；分割和拆解方面，需要智能遠程操作系統來應對不同環境的拆除任務，並設法減少二次廢棄物的產生；在廢棄物管理上，重點在於開發有效的除污與回收技術，將除污後的材料再利用於核工業或其他新建項目，以減少廢棄物的總量和處理負擔。未來的除役技術預計將朝向自動化、標準化和模組化方向發展，以提高作業的靈活性和可操作性，並減少人員介入的需求。

5. 案例分析

在第 2 天課程上的案例研究上，講師(為美國 PacTec 公司銷售經理)介紹了低放射性廢棄物包件的各項技術方案，涵蓋了美國運輸部(Department of Transportation, DOT)對放射性物質的包件要求、各類型包件的設計標準與測試規範，以及美國 PacTec 公司所開發的多種創新包件技術。講師強調，適當的包件

不僅確保了放射性物質在運輸與貯存過程中的安全性，也支援全球核設施除役與拆除任務。

講師介紹了第一型工業包件(IP-1)、第二型工業包件(IP-2)、甲型包件(TYPE A)及乙型包件(TYPE B)四種放射性物質運送包件，介紹如下：

第一型工業包件(IP-1)是為放射性活度較低的物質設計，符合基本安全要求，主要用於低放射性廢棄物的運輸與貯存。其設計重點在於易於搬運並能穩固地固定於運輸設備上，外部結構則需方便去污，避免因凹槽或縫隙造成污染物殘留。包件設計以安全為優先，不應為了增加功能而犧牲安全性。此外，IP-1 包件須能承受振動與加速度，以確保在運輸過程中能承受動態應力。此類包件主要應用於低活性廢棄物，如乾性廢棄物、建築拆除廢棄物及污染土壤等。

第二型工業包件 (IP-2) 適用於放射性活度較高的物質，不僅需符合 IP-1 的所有標準，更需額外通過物理測試以確保其安全性。IP-2 增加了墜落測試和堆疊測試。墜落測試旨在確保包件在設定高度跌落後仍能保持結構完整，防止內部放射性物質外洩；堆疊測試則用於驗證包件在堆疊運輸或貯存時，能夠承受一定時間的靜態重壓，避免變形或破裂。因此，IP-2 包件適用於較高活性的廢棄物，例如中等放射性廢棄物，包括高活性的乾性廢棄物、放射性污染土壤以及拆除廢棄物等。

甲型包件(TYPE A)的設計旨在運輸活度在法規限制範圍內的放射性物質，其設計與測試要求比 IP-2 更為嚴格，以確保即使在一般運送狀況下，包件仍能維持完整性，避免放射性物質外洩。在設計標準方面，TYPE A 型包件的最小尺寸需大於 10 公分，且能承受 -40°C 至 70°C 的溫度變化。為了確保氣密性，包件需具備完善的密封系統，即使在壓力降至 8.7 psia 時仍能維持結構完整性，且除壓力釋放閥外，其他閥門皆須具備防洩裝置，包件內部的輻射屏蔽設計也必須安全且穩定。在測試要求方面，除了 IP-2 已有的墜落測試與堆疊測試外，TYPE A 型包件還需通過模擬雨水或液體滲透影響的噴灑測試，以及模擬銳物撞擊的

穿刺測試。此類包件主要用於運輸中等活度的廢棄物，例如樹脂、顆粒狀活性炭、過濾器。

乙型包件(TYPE B)是針對高放射性物質設計的最高等級包件，必須符合美國法規 10 CFR Part 71 的規範，並確保即使在極其嚴重的事故條件下，例如高溫、高壓、劇烈撞擊和長時間浸水等情況下，仍能保持其完整性和安全性。此類包件用於運輸活度超過 TYPE A 型包件限制的放射性物質。在設計標準上，TYPE B 型包件必須能夠承受這些極端事故條件，並具備更嚴格的輻射屏蔽設計，以最大程度地防止輻射外洩。為驗證其性能，TYPE B 型包件需要通過多種嚴苛的測試，包括模擬從極高處跌落的墜落測試、驗證在高溫火焰中結構完整性的熱體試驗，以及模擬浸水或水下高壓環境影響的浸水試驗。因此，TYPE B 型包件主要應用於運輸高放射性廢棄物，例如核反應爐的用過燃料棒、高強度放射性物質以及特高活度的放射性廢棄物等。

講師有帶來實際的 IP-1 太空包來到現場給大家看，如下圖 10。並說明 PacTec 公司的產品已廣泛應用於美國、英國與其他核設施拆除項目中，顯示出有效的包件能力與安全性。



圖 10. PacTec 太空包側面及上方照

Technologies 課程小結

總體來說，本課程系統性地介紹了核設施除役中各項技術的應用及其創新需求，並強調持續的技術更新和專業培訓在除役領域的重要性。通過深入理解先進

技術的應用場景和未來發展，學員將具備更有效、安全地完成除役工作的能力，並為未來核設施除役項目的技術選擇和方法提供指導。

「Decontamination Technologies」

本課程旨在介紹核設施除污技術的基本概念、應用時機及各種方法的優缺點，以提升學員在核設施除污過程中的專業知識與實務能力。課程內容涵蓋除污技術的定義、影響技術選擇的因素、化學與物理除污技術的分類、不同技術的操作原理，以及實務應用中的考量。特別針對除污決策的重要性、各種方法的效能與成本效益進行深入探討，並結合過往實例和經驗，為學員提供有效選擇和應用除污技術的依據。課程重點如下：

1. 除污技術的基本概念與定義

除污技術的核心在於移除設施或設備表面的放射性污染，降低設施或設備拆除過程對工作人員之輻射影響，並提升拆除廢棄物後續處理效益。課程首先對除污的基本定義進行闡述，指出除污通常透過化學、物理或機械手段來去除附著於表面或滲透到表層的污染物。一般來說，除污技術應根據設施的特性、污染物種類、污染深度以及除污目的等多種因素進行選擇。

2. 除污技術選擇的影響因素

在核設施除污作業中，選擇合適的技術至關重要。課程指出，除污技術的選擇需要考慮多方面的因素，包括：

- **安全性**：技術應確保在除污過程中不會造成污染擴散或產生新的危害；
- **效率**：技術的應用應具有操作簡便、效率高且能夠在短時間內完成；
- **成本效益**：選用技術應在成本上具有合理性，避免過度昂貴的技术導致資源浪費；
- **廢棄物管理**：應盡量減少二次廢棄物的生成，並得以選擇較低分類的廢棄物處置方式；

- **可行性**：選擇技術應避免過於勞力密集或需大量材料的方式，確保操作和應用過程簡便易行。

此外，課程特別指出，不應將維護性除污與除役除污混淆。維護性除污強調維持設備運行狀態，而除役除污則可採取更具破壞性的方式，因為已不再需要考慮對設備的保護。

3. 除污技術的分類

除污技術大致分為化學除污、電化學除污、機械除污、金屬熔融技術，以及一些創新技術。課程對每種技術的工作原理、應用場合、優缺點及限制進行了詳細說明：

3.1 化學除污技術

化學除污技術通常利用酸、鹼、氧化劑、還原劑等化學試劑來去除表面污染物。化學除污適合於閉合系統的除污，如核設施的主要迴路管道內部。課程介紹了常見的化學除污過程，這些過程使用氟硼酸、高錳酸鉀和草酸等試劑進行多階段處理，以分解和去除污染物。

3.2 電化學除污技術

電化學除污技術利用電場輔助化學試劑去除金屬表面上的污染物(如下圖 11)。此技術適合於除污不規則或複雜幾何形狀的小型金屬構件，如小直徑管道。常用酸劑包括磷酸、硝酸和草酸等，並需結合加熱和攪拌以提高效率。電化學除污的除污因子高達 100，適合需要高除污率的情境。

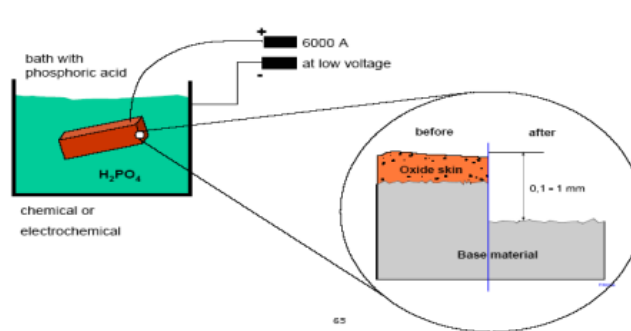


圖 11. 電化學除污技術

3.3 機械除污技術

此類技術應用廣泛，包括刷洗、真空清理、超聲波清洗、CO₂ 噴射和液氮噴射等。這些技術常用於局部表面除污。課程中特別提到 Blastrac Abrasive Blaster (如下圖 12)，它使用高速拋射的磨料來清除污染層，並設有廢棄物回收和過濾系統，減少二次污染。此外，Scabblers(刮削機)和 Needle Gun(針槍)也被廣泛應用，針對混凝土和金屬表面上的附著污染具有顯著除污效果。

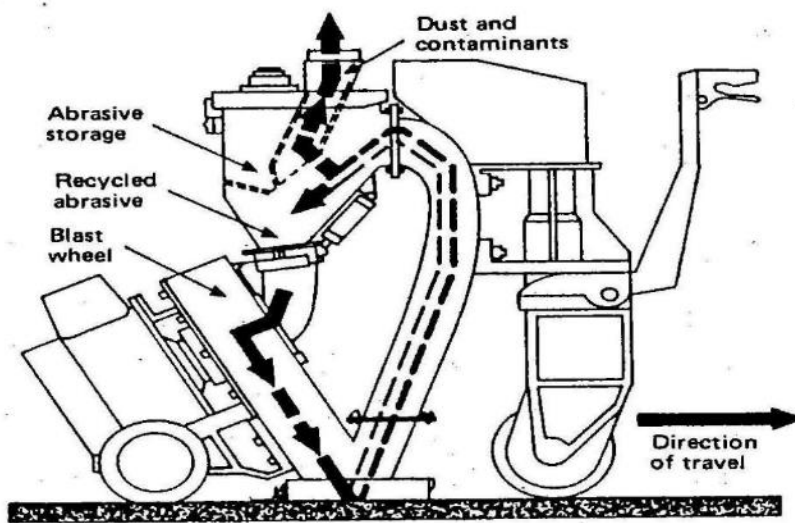


FIG. 9. Portable abrasive blasting equipment. (Credit: Blastrac.)

圖 12. Blastrac 噴砂機

課堂上也有磨料廠商提供相關樣品介紹如下圖 13：



圖 13.不同種類的磨料實體樣品介紹

3.4 金屬熔融技術

在除役過程中會產生大量輕微污染的金屬廢棄物，金屬熔融技術可回收金屬資源，並集中處理放射性污染物。課程中介紹了國際上的一些工業級熔融設施，例如瑞典的 Studsvik 設施，它們使用感應爐和電弧爐將金屬熔化為錠，進一步減少廢棄物體積。

3.5 創新除污技術

課程還提到一些新興技術，如雷射除污、微生物除污和超臨界流體除污等。雷射除污能夠有效清除複雜表面的污染物，而生物除污和超臨界流體除污等技術仍處於早期發展階段，可能在未來應用中展現潛力。

4. 除污因子(DF)與經濟效益

講師於課程中說明了“除污因子”(Decontamination Factor, DF)的概念，用於衡量除污技術的除污效果。公式如下表示。DF 值越高，表示除污效果越好，例如 DF 值為 10 表示去除 90% 的放射性污染物。選擇技術時應考慮 DF 值與成本之間的平衡，並在確保有效除污的前提下，追求成本效益的最大化。

$$\% \text{ of Activity Removed} = \left(1 - \frac{1}{DF}\right) * 100$$

5. 實務經驗與考量

“過去的除污決策經驗極為重要”，課程中反覆強調這一觀點。實務經驗能幫助決策者避免潛在錯誤，並最大化除污的成本效益，特別是在選擇除污技術時，必須根據設施特性、污染物類型和經濟可行性進行具體情境分析，以確保資源的合理分配和最佳的除污效果。

Decontamination Technologies 課程小結

本課程強調了除污技術的多樣性及其在核設施除役中的關鍵角色。有效的除污決策需要結合技術、成本、廢棄物管理等多方面考量，並根據具體場地需求選擇適當方法。此外，隨著新技術的發展，未來可能會出現更有效且環保的除污方

案。課程建議學員在實務中靈活運用所學知識，謹慎分析除污需求，並參考過往經驗，以達成最佳的除污效果。

「Dismantlement Technologies」

拆解技術在核設施除役中的應用需求日益增加，特別是針對已運營多年的老化設施。此訓練課程的目標在於介紹各類拆解技術的理論、實務應用及其挑戰。針對核設施的拆解過程，本課程系統性地涵蓋了各種拆解方法的適用場景、技術選擇的關鍵因素、遠程操作技術的使用、以及污染管控措施，以確保在遵守安全標準的前提下，達到有效的拆解效果。課程重點如下：

1. 拆解技術的背景與需求

拆解技術被定義為使用機械、熱能或電氣技術移除設備或結構，以達成除污及廢棄物處理的需求。根據拆解的目的與期望的最終狀態，拆解程度從簡單的部分拆解到完全拆除皆有可能。本課程針對核設施拆解的特殊需求，包括輻射曝露控制、高活化設備的安全移除、廢棄物包件運輸等，分析了各種技術的適用性與選擇準則。

2. 技術分類及應用場景

本課程介紹了拆解技術的多種類別，並深入探討其優缺點及應用場景如下：

機械切割技術：包括剪刀、鋸、金剛石線(也稱鑽石切割) 等技術。這些技術適用於鋼結構及混凝土的精確拆解，且廢棄物生成較少。例如，金剛石線技術以高精度切割和適用於各種材料厚度而受到青睞，特別是在需要控制廢棄物生成的應用中。然而，金剛石線在操作時需要 360 度的進入空間，並且切割過程較慢，在處理複雜結構時可能會面臨線材斷裂的風險。

熱能切割技術：如電漿電弧切割和氧燃燒切割適用於厚金屬的快速切割。這類技術能在水下或輻射環境中操作，但會產生煙霧及氣溶膠，因此需完善的通風和污染控制系統。

電氣切割技術：如電火花加工(Electrical Discharge Machining, EDM)和金屬分解加工(Metal Disintegration Machining, MDM)，適合高強度金屬的精密拆解，並能有效地控制切割精度。此類技術適合用於輻射高風險區域，但速度相對較慢，適合用於高精度要求的場景。EDM 和 MDM 雖然都是電氣切割技術，但它們在原理和應用上有所不同：

電火花加工使用高頻電火花逐層蝕刻金屬，適合複雜幾何形狀的精細切割。它的精度高且表面光潔度良好，適合用於加工精密部件。電火花加工在加工過程中需要冷卻液來沖刷切屑，因此在速度上較慢，但適用範圍廣。

金屬分解加工採用高頻脈衝電弧快速分解金屬，適合於切割螺栓或焊接部件等高強度結構。金屬分解加工的切割速度較快，尤其適合去除大體積金屬，但精度相對較低，通常適用於粗切割。

兩者的主要區別在於精度與應用場景：EDM 精細且適合複雜形狀的切割，而 MDM 更適合快速移除大體積金屬。

3. 遠端拆解技術的使用及挑戰

在核設施拆解的決策中，安全性始終是首要考量，尤其是在高輻射環境中。遠端拆解技術例如機械手臂、遙控機器人及輪式移動機器人，成為高輻射、空間受限或高危險作業環境中的理想選擇。遠端拆解的應用能顯著降低人員的輻射曝露，符合「合理抑低」(ALARA)原則，從而有效保護操作人員的安全。然而，遠端拆解技術的設備成本、培訓需求及日常維護開支通常較高，需要在項目中投入大量資源。因此，課程對比了人員曝露的成本與遠端拆解設備的費用，並建議在高輻射劑量的環境下優先選擇遠端拆解操作，以最大限度地降低風險。而在輻射曝露風險較低、工作複雜性不高且成本差異顯著的情況下，直接人員操作可能更具經濟效益。

4. 先進拆解技術

隨著拆解技術的不斷演進，一些新興技術逐漸被應用於核設施拆解中：

冰鋸切割(Ice Sawing): 冰鋸切割技術利用極低溫冷凍技術將待切割的材料脆化，然後使用鋸切設備進行切割。該技術通常採用液氮等冷凍劑，將金屬或其他高強度材料冷卻至接近其脆化點，使材料的延展性顯著降低而變脆，便於輕鬆且快速地分離。冰鋸切割特別適合於傳統機械方法難以切割的高強度金屬，並且操作過程中無需產生火花或煙霧，能在低粉塵的環境下進行操作，有效降低二次廢棄物和安全風險。此技術的優點包括無火花切割，適合易燃環境，並且低溫操作能避免對周邊設備的熱影響。冰鋸切割廣泛應用於核設施的拆解，尤其是反應爐壓力容器、厚壁鋼管等厚金屬結構。儘管冰鋸切割在高輻射區域的拆解上效果顯著，但操作低溫冷凍劑需額外成本，且對於大體積金屬結構，冷卻和切割過程相對較慢。

這項技術的應用還需要完善的附屬系統，如通風設備、污染控制和安全監測。冰鋸切割需考量冷凍劑的安全操作和冷卻管理。此外，這些先進技術在輻射環境中應用時，安全監測設備(如輻射劑量監測)也不可少，以確保人員和環境安全。

5. 污染控制方法

在核設施的拆解過程中，放射性污染控制至關重要。本課程介紹了「深度防禦」方法，分階段使用各種塗料與穩定劑來減少污染物的釋放。常見措施包括使用固定劑、灌漿及可剝式塗料，以在不同場景下控制粉塵和氣溶膠的擴散。固定劑適合在拆解區域內形成穩定的防護層，防止污染物在拆解過程中進一步擴散。灌漿可有效封堵裂縫或孔隙，防止輻射性粉塵的外洩。而可剝式塗料則是一種便捷的表面防護材料，適用於固定輕度污染的表面。可剝式塗料在作業完成後可整片撕下，將污染物包覆並安全處理，減少後續清理工作量及二次廢棄物生成。這些防護措施的協同應用可確保拆解過程中污染物不擴散至環境中，有助於嚴格管控放射性物質的外洩風險。

6. 案例學習

在核設施拆解課程中，講師介紹了比利時 **BR-3** 核電廠拆解專案和美國 **Trojan** 核電廠壓力容器拆解與運輸。

BR-3 是比利時第一座研究用反應爐，其拆解過程展示了有效的拆解技術。拆解過程中，團隊採用了多種先進技術，包括帶鋸切割技術，用於厚重材料及反應爐壓力容器的分段切割。此外，機械切割技術的應用，如液壓鉗和破碎機，對於拆除鋼筋混凝土結構尤為重要。在拆解高輻射區域前，進行了有效的除污與固定化處理，顯著降低了輻射粉塵曝露的風險。

Trojan 核電廠的反應爐壓力容器(RPV)拆解展示了大型核設施整體移除技術的應用。拆解團隊採用整體移除策略，先將容器內部灌漿以填充空隙並穩定結構，隨後利用專用吊具將其移出現場。該容器重達 1100 噸，移除後需進行多模式運輸，包括陸路和水路結合，最終送至位於 Clive 的廢棄物最終處置場。整個運輸過程中，考慮到輻射屏蔽、重量分布以及當地運送法規，完成了安全與符合規定的廢棄物運送。

此外，拆解過程中採用了防塵罩及輻射屏蔽措施，確保施工現場及周邊環境的安全與穩定。與傳統的分段拆解方式相比，整體移除不僅顯著縮短工期，還降低了人員的輻射曝露，實現了成本效益最大化。

Dismantlement Technologies 課程小結

核設施的拆解項目要求技術的安全性及有效的成本控制。在不同場景中選擇合適的技術，並有效管理遠端操作、污染控制、輻射安全及廢棄物處理，對於成功完成拆解至關重要。未來隨著技術的發展，如機器人技術的進步及遠端操作設備的成本降低，預期將大幅提高拆解效率和人員安全性。本課程提醒從業人員在實施拆解技術時，應重視過去的經驗教訓，以安全為原則，達到有效的拆解效果。

(五) 除役成本估算(Cost Estimation for Decommissioning)

核設施的除役是確保安全與環境保護的重要階段，而準確的成本估算(Decommissioning Cost Estimate, DCE)在其中扮演關鍵角色。本次訓練課程介紹 DCE 的理論與實踐方法，包括成本估算的依據(Basis of Estimate, BoE)、風險管理

與應對措施、工作分解結構(Work Breakdown Structure, WBS)以及國際除役成本結構(International Structure for Decommissioning Costing, ISDC)的應用。課程重點如下：

1.成本估算的基礎與風險評估管理

在進行核能設施除役的成本估算前，建立可靠的估算基礎(BoE)是不可或缺的步驟。BoE 涵蓋對設施狀況的全面評估、廢棄物管理策略的制定、數據來源的明確以及假設和排除條件的詳細紀錄。其目的是提高估算的準確性、透明度與可追溯性，從而增強利益相關方的信心。

風險評估與管理是核設施除役成本估算中的關鍵，旨在辨識、分析並減輕不確定性對除役作業的影響，確保資源合理配置並實現目標。風險分為個別風險(特定事件影響)與整體項目風險(全局不確定性)，其評估方法包括定性與定量分析。定性分析利用訪談、歷史數據與風險登記表，根據風險的影響與概率進行優先級排序；定量分析則採用蒙地卡羅模擬等工具，將風險量化為具體的成本或工期影響，為決策提供依據。

為有效管理風險，應識別可能的影響因素並制定相應的緩解措施，例如強化設備維護、改進操作程序或設置備用機制。同時，應急金和管理儲備金是應對已知及未知風險的重要保障。講師簡報中介紹到美國核管會建議應急金至少占估算的 25%。此外，為避免範疇變更、數據不完整等問題，應定期更新成本估算並進行全面審查。透過系統化的風險管理流程，不僅能降低不確定性對除役作業的影響，還能提升規劃與執行的成功率，有助於核設施的安全除役提。

2.工作分解結構(WBS)與國際除役成本結構(ISDC)

WBS 是用於將項目分解為更小、可管理單元的工具，為核設施除役活動提供了清晰的執行框架。WBS 通過逐層細分的方式，從高層次的「除役活動」，細化到如「移除特定房間的管道」等具體任務。講師介紹了 WBS Level 5 範例(如下圖 14)，詳細說明了從「除役活動」至「確保管道排空」的任務層次，展示了如何對工作範圍進行精確劃分。



Work Breakdown and Scheduling

WBS Level 5 Example

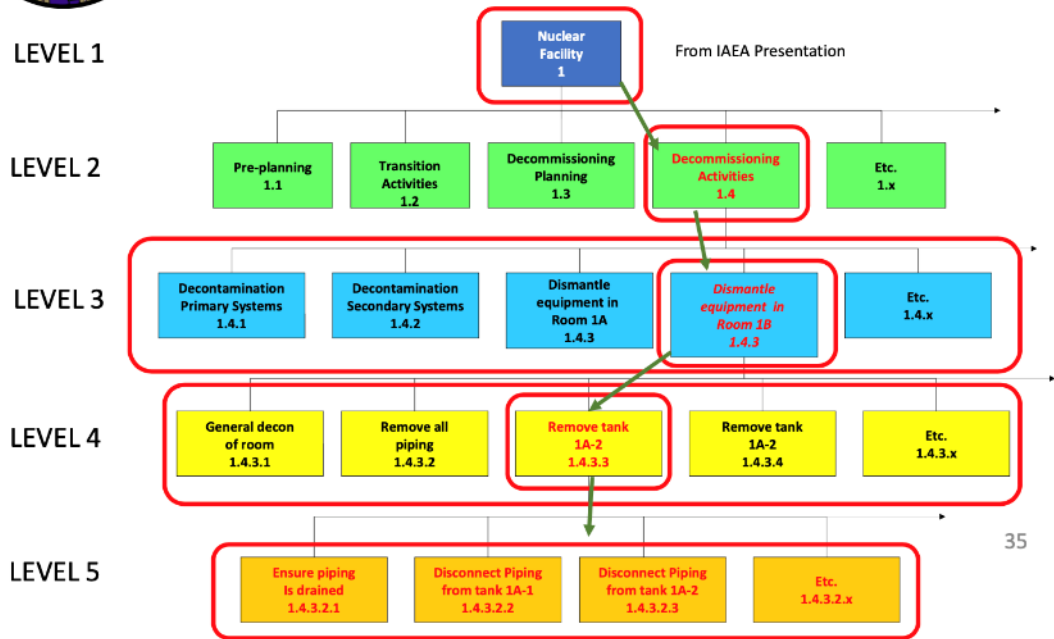


圖 14. WBS 五階層圖

此外，國際除役成本結構(ISDC)提供了一種標準化的成本結構，用於統一核設施除役的成本分類，適用於所有類型的設施。

講師於課堂上詳細說明除役成本估算的九大步驟如下：

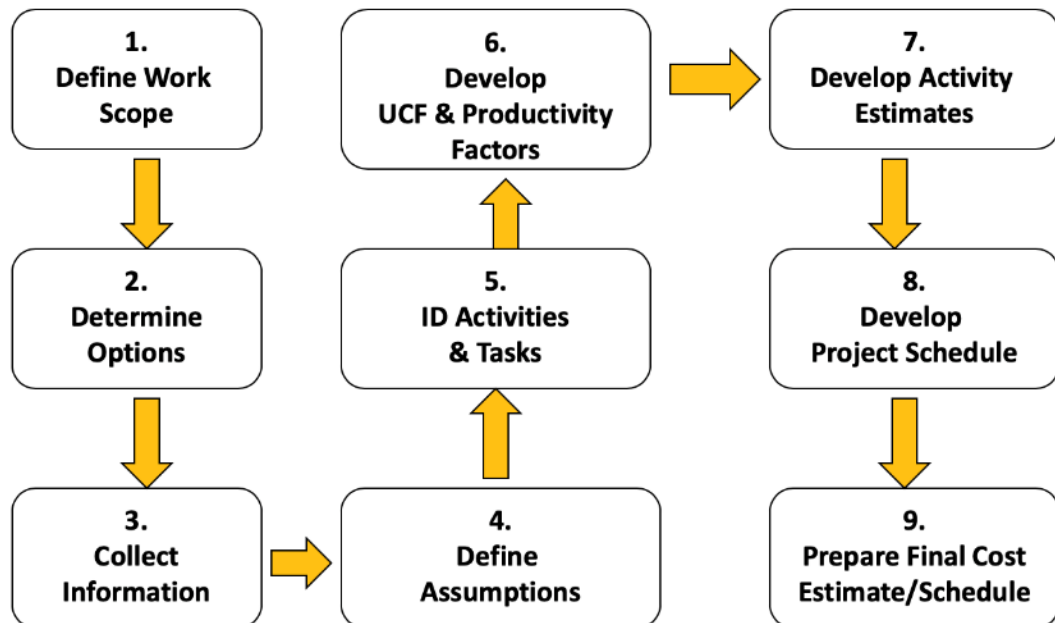


圖 15. 核設施除役成本估算九大步驟

2.1. 定義工作範圍

工作範圍的界定是成本估算的基石。它明確了哪些工作屬於估算的範疇，例如需拆解的設施、需要除污的區域以及廢棄物的處置要求。講師指出，準確的範圍定義應包括以下幾方面：

- 物理範圍：例如需要拆除的建築物或設備，明確標示在場地平面圖上。
- 工作範疇：除污、拆卸、廢棄物管理等具體活動的描述。
- 項目限制：如施工期間的管制要求或技術規範。

如果工作範圍定義不完整，可能導致漏估成本或項目延誤。範例中提到，應盡早與管制機關和利益相關方協商，避免後期增加範疇而影響時程和預算。

2.2. 確定選項

選擇適合的除役策略是第二步驟的核心。講師介紹核設施除役策略主要分為以下兩類：

- 立即拆除(Prompt DECON)：立即開始除役工作，並快速完成場地恢復。
- 延遲除役(SAFSTOR)：將設施維持在安全狀態，等待輻射劑量降低後再進行拆除。

講師強調，策略選擇需基於多方面考量：

- 經濟性：立即拆除可能降低長期維護費用，但需要更高的初期投入。
- 場地需求：如場地的最終用途是否急需回收。
- 法規與技術因素：如當地法規對輻射曝露的限制。

場地條件的變化可能要求在不同策略間進行靈活調整，並充分量化其對成本的影響。

2.3. 收集資訊

準確的資訊收集是保證估算可信度的基礎。建議收集的資訊包括：

- 場地圖與設施清單：如詳細的場地平面圖、設備位置資訊。
- 廢棄物分類與數量：包括放射性廢棄物、危險性廢棄物和一般廢棄物的估算數據。

- 歷史操作數據：如污染來源、輻射水平的測量紀錄。

使用現場調查與歷史數據相結合的方法可最大程度提高數據的準確性。任何數據缺失都需在估算中明確標記，並加入相應的不確定性分析。

2.4. 定義假設

假設是構建成本估算模型的重要前提。例如：

- 場址最終狀態：土地是否需恢復至綠地標準，或僅限於工業用途。
- 施工限制：例如是否允許在夜間施工或輻射屏蔽的可用性。
- 資源可用性：如當地人力資源和廢棄物處置設施的接近程度。

所有假設必須得到業主或客戶的同意，未經驗證的假設可能導致預算偏差或未來的法規糾紛。

2.5. 識別活動與任務

活動與任務的識別主要藉由工作分解結構(WBS)達成。以課堂中的 WBS 範例為例：

- 第一階層 Level 1：核設施除役。
- 第二階層 Level 2：除役活動(例如除污、拆解)。
- 第三階層 Level 3：特定區域的設備拆卸(如 1A 房間)。
- 第四階層 Level 4：更細分的任務(如移除管道)。
- 第五階層 Level 5：操作細節(如確保管道排空)。

講師強調，通過分層結構可明確任務的順序與資源需求，並為後續的時程計劃提供基礎。

2.6. 單位成本因子(Unit Cost Factor, UCF)與生產力因子

單位成本因子是針對每項活動的標準化成本估算工具，考慮了：

- 理想條件下的工時與材料消耗。
- 調整因子：如輻射環境、侷限空間操作對效率的影響。例如，移除受污染的泵需考慮輻射防護措施，可能增加所需時間與設備成本。

講師指出，為提高估算的準確性，應使用歷史數據與專家經驗結合的方法來制定這些調整因子。

2.7. 活動估算

活動估算是將所有識別出的任務進行資源分配與成本計算。講師建議：

- 分階段匯總：按區域或任務類型匯總成本。
- 逐步細化：先進行粗略估算，再隨數據完善逐步細化。

估算結果應清楚區分直接成本(如設備拆解)與間接成本(如工程技術取得)，並加入應急費用以應對可能的成本變化。

2.8. 開發項目時程

開發項目時程需要考慮任務之間的依賴關係與資源限制。講師建議：

- 整合時程表：通過整合時程表可以識別影響總時程的任務。
- 分配資源：確保關鍵任務獲得足夠的資源支持。

講師特別提到，應結合風險管理工具，為可能的延誤設置緩衝時間。

2.9. 準備最終成本估算

此步驟著重於整合成本估算與專案時程，以建立全面且可執行的核能設施除役計畫。首先，將所有工作範疇的成本匯總，包括勞動力、設備、材料及風險應急金，並根據現場條件及單位成本因子計算出各項工作的單位成本與總成本。這些數據以清單化或分級結構的方式呈現。接著，根據工作分解結構(WBS)與各任務的持續時間，整合多個工作區域的進度、所需資源及任務時程，形成詳細的專案時間表。同時，分析施工區域的容納能力與同步作業可能性，確保資源分配合理且計畫可行。

最終報告涵蓋成本估算的基礎數據、WBS、專案組織架構、主要進度表及關鍵路徑分析，提供足夠的資訊支撐決策。這一整合步驟的核心目的是將前期分析的成果轉化為精確的成本與時間框架，確保資源運用有效，計畫執行透明，並為除役活動的順利實施奠定基礎。

上述九大步驟構成了一個連貫且全面的除役成本估算框架，適用於多種核設施場景。它們的價值在於不僅能提供準確的成本數據，還能通過系統化管理降低風險並提高效率。透過該課程，學員可學習如何應用這些方法，從而在未來的核能設施除役項目中制定更科學、可靠的估算計劃。

3. 應急費用與風險管理的重要性

講師於課堂上強調，應急費用與風險管理是成本估算的重要組成。應急費用用於應對「已知未知」(known unknowns)的變數，如場地條件的變化或材料成本的波動；風險管理則考慮到可能影響除役作業的「未知未知」(unknown unknowns)，例如法規變更或極端天氣。

風險分析通常採用專業軟體(如@risk)以量化不確定性對成本與時程的潛在影響，並制定相應的緩解策略。

除役成本估算課程小結

除役成本估算是一個動態且持續改進的過程，需隨著技術發展與場地條件的變化進行更新。講師於課堂上強調，良好的成本估算不僅需要成熟的估算方法與透明的報告結構，還需要所有相關部門的參與及有效的風險管理。

本課程為學員提供了一個全面的理論與執行框架，幫助核設施除役制定更準確、可靠的成本估算方法。同時，課程也提醒我們，成本估算的核心在於規劃的嚴謹性與執行的靈活性，唯有兩者結合，方能確保計畫的成功。

(六) 國際除役現況(International Decommissioning)

這堂課詳細闡述了國際間核設施除役技術與執行的現狀，涵蓋核電廠與研究反應器的案例，並探討政策、技術創新及資金挑戰。講師於課堂上指出全球核電設施的平均壽命約為 32 年，永久停機數量逐年增加，而除役相關活動的成功與否受制於政府框架、基礎設施以及廢棄物管理的有效性。講師特別關注廢棄物處理、安全標準與各國除役政策的差異，並強調技術創新對未來除役進程的意義。課程重點如下：

1. 除役現狀與挑戰

一些國家由於政策或經濟原因，難以有效推動除役工作，導致大量設施未達成“綠地化”或“工業用地”釋放標準。

挑戰包括：

- **政府框架的不足**：部分國家缺乏系統性的除役規範或透明的核廢料管理流程。
- **資金短缺**：除役是一項耗資巨大的任務，涉及拆除設施、廢棄物處理、土地恢復等。資金來源不穩定的國家可能無法按時完成。
- **人力資源匱乏**：需要專業技術人員支持，而許多國家在培養和維持這類人力資源方面存在困難。

此外，核設施的現狀和殘留放射性物質的活度高低，也直接影響除役的複雜性和成本。

2. 國際合作與技術標準

國際間的合作對於推動除役進程至關重要。國際原子能總署 IAEA 和經濟合作暨發展組織核能署(Organization for Economic Co-operation and Development / Nuclear Energy Agency , OECD/NEA)等組織，提供技術支援和經驗分享平台。

- **IAEA**：其技術工作小組專注於除役與環境復原，匯集全球專家的經驗和建議，並推動跨國協作。
- **OECD/NEA**：以“發達國家幫助發達國家”為原則，針對技術執行提出建議。
- **區域框架**：歐盟部分國家致力於建立共同的“區域管制框架”，以取代分散的國家標準。

報告還強調，國際合作不僅提升了技術共享，還能幫助發展中國家通過技術轉移提升除役能力。

3. 放射性廢棄物管理與創新技術

放射性廢棄物管理是核設施除役的核心挑戰。成功的放射性廢棄物管理需結

合完善的技術、設施和政策，並解決以下問題：

- **臨時貯存的依賴**：部分國家沒有建設永久性放射性廢棄物最終處置設施，依賴臨時貯存設施應對問題。
- **缺乏統一方案**：一些除役項目被迫採用臨時或自定義的放射性廢棄物貯存策略，增加長期風險。
- **創新技術的應用**：報告介紹了許多先進技術，包括人工智慧、機器人和數位技術也逐步被應用於拆解與放射性廢棄物處理過程中，提升安全性與效率。

新技術的推廣為全球核能除役提供了更有效且經濟的解決方案，但技術採用的普及度仍因成本或政策影響而有限。

4. 各地區除役進展

講師介紹了不同國家或地區在除役工作中的實踐與挑戰：

- **歐洲**：
 - 德國已完成所有核電廠的關閉，並在除役放射性廢棄物管理上有卓越表現。
 - 挪威與丹麥逐步退出核能領域，但面臨核廢料最終處置與舊設施清理的挑戰。
 - 法國和西班牙則將除役作為核能發展轉型的重要一環，推動技術創新與成本優化。
- **亞洲**：
 - **日本**：福島第一核電廠除役進展緩慢，燃料碎片的清除與污染水處理成為主要困難點。
 - **韓國**：雖政策多次改變，但目前韓國政府有資助韓國原子能研究所(Korea Atomic Energy Research Institute)及韓國除役研究所(Korean Research Institute for Decommissioning)計畫，並加強對輕水反應器與重水反應器(Canada Deuterium Uranium, CANDU)的研究。

- **台灣**：積極推動核電廠停機與除役，但放射性廢棄物處理的最終方案仍有待完善。
- **美洲**：美國展現了多種除役模式的靈活性，結合商業與公共機構，成功完成了 17 座核電廠的除役。
- **新興市場**：如孟加拉、土耳其等首次運行核電的國家，正開始考慮未來除役需求，計劃藉助國際技術支持來應對挑戰。

這些地區的經驗展現了國際除役活動的多樣性，也反映出不同國家的經濟狀況、技術水平及政策框架對除役進程的深遠影響。

國際除役現況課程小結

核設施除役是一項複雜的系統工程，需要結合技術創新、政策支持與國際合作。未來應積極推動數位化、人工智慧等新興技術在除役領域的應用，同時完善國際合作機制，建立穩健的財務模式，並加強與社會大眾的溝通，以提升社會接受度，確保除役工作順利進行。

整體而言，本課程提供了一個全面的國際除役現狀分析，展示了核能產業在全球能源轉型中的挑戰與機遇。隨著更多國家關閉核電設施，除役的技術、管理和政策需求將更加迫切，各國需攜手合作，共同推動核能設施的安全除役與環境恢復。

(七) 帶回家的核心概念總結(Key Concepts to Take Home)

本次為期三天的核設施除役訓練課程圍繞核能設施除役過程中的關鍵行動和實務技巧，從理論到實踐，全方位提升學員的專業能力。課程最後，講師提供了以下十項總結：

1. 資訊交流：強調跨項目的經驗分享，參與技術會議，建立知識管理庫以應對複雜法規的挑戰，並提升學習曲線。
2. 溝通協調：與員工、社區和管制機關保持透明交流，定期報告進展，明確項目範圍及清理標準，減少因人員變動引發的衝突。

3. 規劃與成本估算：早期投入規劃，制定未來土地利用方案，整合專業團隊進行詳細成本評估，以降低超支風險。
4. 場址與設施歷史：深入進行歷史調查與特性描述，收集完整紀錄，為除役工作的精準執行提供基礎。
5. 廢棄物管理：全面了解廢棄物特性、最終處置路徑及包件需求，親訪最終處置場，並進行成本效益分析，減少後期處置成本。
6. 項目管理：強調安全與環境保護，採用簡化的管理技術與專業獨立專家，落實除役項目的持續管控與有效執行。
7. 危害評估：系統分析項目風險，制定有效管控措施，並將安全意識融入每個環節，確保對環境及人員的最低影響。
8. 技術應用：探索現成或新興技術，分析其成本效益，避免在實驗性技術上投入過多資源。
9. 最終調查：在除役初期即展開調查規劃，確保文件化和合法性，為解除除役管制解除奠定基礎。
10. 團隊合作：加強團隊能力與知識分享，提供足夠資源，確保團隊協作達到“一次完成”的目標。

講師在課程結尾強調，除役雖非高度複雜的科學，但其成功的關鍵在於以嚴密規劃為核心，結合團隊合作與技術創新，並善於借鑒和應用最佳做法。透過整合資源與經驗的全方位策略，這 3 天的課程為學員提供了一系列實用的指導方針，幫助學員有效應對各種挑戰，同時實現除役工作的安全性、效率及可持續性。

四、心得

此次由美國能源部 Argonne 國家實驗室主辦的核設施除役訓練，於拉斯維加斯圓滿舉行。本課程以提升學員對核設施除役全過程的系統認識與實務應用能力為核心，為期三天，內容涵蓋多個關鍵領域。以下為主要心得與收穫：

1. 透過課程中對核設施除役流程的介紹，深入學習了管制要求、放射性廢棄物管理以及拆除策略等核心議題，並結合相關案例的分析，進一步掌握除役計畫的重要性及具體執行方法。
2. 針對環境與人員健康風險管理，本次訓練系統性地介紹了國際標準與管理措施如何有效降低除役過程中可能對人員和環境造成的風險，並提升了應對緊急事件的能力。
3. 本課程對於化學、機械及電化學除污技術的詳細講解，不同技術在實際操作中的應用條件與效果。同時，對拆除技術及遠端機器人技術的探討，展示了如何在減少人員輻射曝露的同時，提升除役工作的安全性與效率。
4. 課程中對國際除役現況的分析，了解其他國家在政策、技術創新與資金挑戰上的經驗，特別是核電廠與研究反應器的成功案例，可作為我國未來引入先進技術與標準的參考。
5. 鑒於核電廠除役涉及複雜的技術、環境及社會議題，及早與社區建立開放且具建設性的溝通管道至關重要，可透過舉辦說明會等多種形式，主動向社區說明除役計畫內容、潛在影響及安全措施，並納入社區意見，共同參與監督除役過程。此舉不僅能提升資訊透明度、化解疑慮，更能建立互信基礎，促進除役工作順利進行，並維護社區民眾的權益。

五、建議

就參與本次研習訓練提出建議事項如下：

1. 本課程涵蓋核設施除役的各個核心領域，對參訓人員的專業知識與實務能力有顯著提升。建議未來本會可持續派員參加此類訓練課程，或參與與核設施除役相關的其他國際研習活動，以提升我國除役專業管制人才的持續培養，並強化與國際上管制機關、營運業者及研究專業人員之經驗與專業交流。

2. 課程指出，核電廠除役工作不局限於設施的拆除，還具有推動技術創新與促進產業升級的重要潛力，例如人工智慧技術在近年來的快速發展，特別是在影像辨識技術、設備老化狀態的精準評估，以及檢測效率提升等方面的潛力，這些技術的發展將有助於提高除役工作的精確性與效率，促進相關作業的安全性與可行性，建議本會可透過專題研究等計畫，廣納相關技術領域之管制研究，以提升核設施除役相關管制技術能力。
3. 本課程深入講解化學、機械及電化學除污技術，詳細說明不同技術在實際操作中的適用條件與成效。同時，針對拆除技術及遠端機器人技術的探討，展示了如何在減少人員輻射曝露的前提下，提升除役工作的安全性與效率。建議本會國內配合電廠除役計畫之進程，加強除污技術資訊蒐集，提升相關安全管制量能，確認核設施除污作業之安全性。

附錄一 美國能源部 Argonne 國家實驗室核設施除役專業訓練課程表

A	B	C	D	E	F
1					
2			ANL Facility Decommissioning Training Course		
3			December 2-5, 2024		
4			Tuscany Suites & Casino, Las Vegas, NV, USA		
5			Session # DD160		
6					
7	Date	Time Slot	Activity	Speaker	#
8					
9					
10	M, 12-2-24	7:45 - 8:00 AM	Sign-in / Opening Remarks	Larry Boing, ANL	
11	M, 12-2-24	8:00 - 8:30 AM	Attendee Introductions	Participants	
12	M, 12-2-24	8:30 - 10:15 AM	Introduction to Decommissioning	Larry Boing, ANL	1
13	M, 12-2-24	10:15 - 11:15 AM	Environment Safety & Health in Decommissioning	Joe Carignan, Carignan & Assoc	2
14	M, 12-2-24	11:15 AM - 12:15 PM	Waste Management in Decommissioning	Mark Kirshe, ReNuke	3
15	M, 12-2-24	12:15 - 1:15 PM	LUNCH (on your own)		
16	M, 12-2-24	1:15 - 2:15 PM	Site / Facility Characterization	Tom Hansen, SE Compact	4
17	M, 12-2-24	2:15 - 3:30 PM	Planning and Management (incl Risk Mgmt)	Joe Carignan, Carignan & Assoc	5
18	M, 12-2-24	3:30 - 3:45 PM	BREAK		
19	M, 12-2-24	3:45 - 4:15 PM	CS - UNR D&D/ER Planning - Bldg 58	Tom Hansen, SE Compact	6
20	M, 12-2-24	4:15 - 5:00 PM	CS-U/Pu Facility Decommissioning	Dustin Miller, TerranearPMC	7
21					
22					
23	Tu, 12-3-24	8:00 - 8:30 AM	CS - Republic Services (former US Ecology) Update	Sherry Frenette, Republic Sevices	8
24	Tu, 12-3-24	8:30 - 9:15 AM	CS - Small Research Facility Decommissioning	Tom Hansen, SE Compact	9
25	Tu, 12-3-24	9:15 - 10:40 AM	Intro to Technologies plus Decontamination Technologies	Larry Boing, ANL	10
26	Tu, 12-3-24	10:40 - 10:55 AM	BREAK		
27	Tu, 12-3-24	10:55 AM - 12 Noon	Cost Estimates for Decommissioning	Joe Carignan, Carignan & Assoc	11
28	Tu, 12-3-24	12 Noon - 1:00 PM	LUNCH (on your own)		
29	Tu, 12-3-24	1:00 - 1:45 PM	CS - Decommissioning Under CERCLA	Lesley Cusisk, RSI	12
30	Tu, 12-3-24	1:45 - 2:15 PM	CS - Waste Packaging Overview	Bill Smart, PacTec Inc	13
31	Tu, 12-3-24	2:15 - 2:30 PM	BREAK		
32	Tu, 12-3-24	2:30 - 3:15 PM	CS - Disposal Site Interfaces	Syd Gordon, Consultant	14
33	Tu, 12-3-24	3:15 - 4:15 PM	CS - U at Buffalo RR D&D	Dustin Miller, TerranearPMC	15
34	Tu, 12-3-24	4:15 - 5:00 PM	International Decommissioning	Larry Boing, ANL	16
35	Tu, 12-3-24	5:00 - 5:10 PM	Q&A / Discussions / Videos	ALL	
36					
37					
38	W, 12-4-24	8:15 - 8:20 AM	Opening Remarks	Larry Boing, ANL	
39	W, 12-4-24	8:20 - 9:50 AM	Dismantling Technologies	Larry Boing, ANL	17
40	W, 12-4-24	9:50 - 10:50 AM	CS - Decommissioning of the SSSB	Jack Reust and Bruce Fox, APTIM	18
41	W, 12-4-24	10:50 - 11:05 AM	BREAK		
42	W, 12-4-24	11:05 - 11:55 AM	CS - Reactor Internal & RPV Segmentation	Mark Kirshe, ReNuke	19
43	W, 12-4-24	11:55 AM - 12:55 PM	LUNCH (on your own)		
44	W, 12-4-24	12:55 - 1:40 PM	CS - Art of Community Engagement	Lesley Cusisk, RSI	20
45	W, 12-4-24	1:40 - 2:15 PM	CS - Laser Cleaning/Decontamination	Jim Seifer, Adapt Laser	21
46	W, 12-4-24	2:15 - 3:30 PM	Final Status Surveys/License Termination	Tom Hansen, SE Compact	22
47	W, 12-4-24	3:30 - 3:40 PM	BREAK		
48	W, 12-4-24	3:40 - 4:30 PM	CS - NNSS Decommissioning Activities	Jason Sofie, Navarro Research & Engrg	23
49	W, 12-4-24	4:30 - 4:45 PM	Project Close out Activities / Key Concepts to Take Home	Larry Boing, ANL	24
50	W, 12-4-24	4:45 - 4:55 PM	Q & A / Discussions	ALL	
51	W, 12-4-24	4:55 - 5:00 PM	Certificates / Closing Remarks / Book Dwg & Give Aways	Larry Boing, ANL	
52					
53	Th, 12-5-24	6:00 AM - 5:00 PM	MOTOR COACH TOUR OF NNSS (old NEVADA TEST SITE)	MSTS / Navarro	25
54		EARLY !!			
55		BE ON TIME !!			
56			ACRONYM Listing	Larry Boing, ANL	26
57			International Decommissioning	Larry Boing, ANL	27
58			Soil Clean-Up	Larry Boing, ANL	28
59			Case Study - JANUS Reactor Decommissioning	Larry Boing, ANL	29
60			Deactivation Process	Larry Boing, ANL	30
61			Decommissioning Community & Knowledge Management	Larry Boing, ANL	31
62			Internet Resources for Decommissioning	Larry Boing, ANL	32
63					
64			For NTS/NNSS Souvenirs		
65			NTS Historical Foundation's "Atomic Testing Museum"		
66			755 East Flamingo Road		
67			Las Vegas, NV 89119-7363		
68			Check website for further details including hours		
69			(Several blocks to east of Tuscany along Flamingo Road.)		
70			https://nationalatomictestingmuseum.org/		
71			Note - great visit / souvenirs - visit Sunday or Friday		
72			Entry fee \$29; allow 2 hours minimum; open 9 am-5 pm; closed Thursday		
73					

