

出國報告（出國類別：研習）

參加2016美國能源部 Argonne實驗室 核設施除役訓練課程暨技術參訪

服務機關：行政院原子能委員會
放射性物料管理局

姓名職稱：唐大維技正

派赴國家：美國

出國期間：105年11月12日至11月20日

報告日期：106年01月11日

摘 要

我國目前正積極落實非核家園的政策，並確定核能電廠除役計畫如期逐步執行。原能會物管局自 101 年起，即開始積極規劃核能電廠除役管制工作，除訂定管制規範外，並進行除役相關審查技術研究及辦理除役研討會與訓練。且臺灣電力公司核一廠除役的正式申請公函已於 104 年 11 月 25 日送達原能會，原能會於 106 年 6 月底前完成除役計畫的審查作業。為精進物管局同仁對於除役管制專業能力，派員赴美參與美國能源部舉行的核設施除役專業訓練課程。此一訓練課程共分為兩個部份，第一部份由美國能源部 Argonne 實驗室核設施除役專案小組各專業講師負責講授除役相關過程及各項環節。第二部份則由主辦單位帶領學員赴內華達州國家安全場址(Nevada National Security Site)進行技術參訪，此一部份參觀核設施除役場址、核廢料掩埋場址及地下核子試爆場址。經由此次訓練可使參與除役工作專業人員之本職學能更上一層樓，建議相關單位仍應持續派員參與美國能源部每年舉辦此項之定期訓練，藉此可提升我國除役工作的水準與安全度。

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	26
五、建議	28
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	31
附錄二 內華達州國家安全場址廢棄物參訪行程表	32
附錄三 內華達州國家安全場址相關業務資料介紹	34
附錄四 本次訓練美國能源部頒發之結業證書	48

一、目的

以環境學的角度觀之，在核能設施的生命週期中，除役階段已經是從搖籃到墳墓中的旅程上的最後幾里路了。除役作業相關技術之專業是臺灣核能工業中的新興技術，尤其我國從未有類似的相關經驗，若能向先進國家學習相關技術與經驗，可增進推行是項工作之順暢度，也可在執行管制作業上更有效率，相對也可提升除役作業之安全性，派員參與是項訓練課程是有其必要。

本次訓練課程係由美國能源部 **Argonne** 實驗室核設施除役專案小組負責開設，本次課程講授內容共分十八個項目(課程內容綱要詳如附錄一)，計有「除役美國聯邦相關法規」、「除役環安職安」、「放射性廢棄物管理」、「除役廠址及設施特性調查」、「除役規劃及管理」、「除役經費分析」、「危害物質評估」、「除役拆除技術簡介」、「除役終期狀態」、「除役知識管理」、及「除役電廠實務介紹」等單元、內容相當豐富且實用，訓練課程最後一天，主辦單位還安排學員參訪位於拉斯維加斯西北方 65 英里的「內華達州國家安全場址」(Nevada National Security Sity, NNSS)，參觀核設施除役場址、核廢料掩埋場址及地下核子試爆場址(原訂參訪行程詳如附錄二)，由於主辦單位禁止學員攜帶手機及照相機，均由接待人員集中保管，故無法拍攝相關設施照片，於中午用餐時段發現餐廳內些關於本場址之相關資料陳列於展示架上，即收集取回作為參考，其相關資料詳見附錄三。

本次參與受訓的學員大都為美國當地核設施之專業從業人員，另外加拿大及韓國亦派員參訓，值得一提的是，韓國此次派遣的學員共有 4 位，而其中三位是核能電廠的年輕工程師，可看出韓國對於核電廠除役作業已開始著手規劃與準備。訓練課程期間，學員均可自由發表提問與講授者交換意見，而職亦將我國目前核能現況簡單介紹，結訓時主辦單位將結訓證書授與所有學員，職之證書影本請參閱附錄四。相信藉由本次訓練的學習，除可提升參訓者除役專業技能外，並有助於除役之安全及相關管制工作之執行。

二、過程

參加 2016 美國能源部 Argonne 實驗室核設施除役訓練課程暨技術參訪行程，係由美方能源部安排，行程概要如下表，另講師與學員合影如圖 1。

日期	地點與行程	訓練內容
11 月 12 日(六)	台北到洛杉磯	去程
11 月 13 日(日)	洛杉磯到拉斯維加斯	去程
11 月 14 日(一)	拉斯維加斯	參加 2016 美國能源部 Argonne 實驗室核設施除役訓練課程
11 月 15 日(二)	拉斯維加斯	參加 2016 美國能源部 Argonne 實驗室核設施除役訓練課程
11 月 16 日(三)	拉斯維加斯	參加 2016 美國能源部 Argonne 實驗室核設施除役訓練課程
11 月 17 日(四)	拉斯維加斯	參加 2016 美國能源部 Argonne 實驗室核設施除役訓練課程
11 月 18 日(五)	拉斯維加斯到洛杉磯	返程(簽准探親)
11 月 19 日(六)	洛杉磯到台北	返程
11 月 20 日(日)	抵達台北	



圖 1 2016 美國能源部 Argonne 實驗室核設施除役訓練課程參加人員合影

三、訓練紀要

就本次除役訓練課程內容與本局管制除役作業安全方面較有重要關連性的部份摘要分述如下：

(一) 除役作業引介(Introduction to Decommissioning)

在許多研討會或是訓練課程中都會提及核能電廠除役概念，但仍將美國除役現階段較新狀態在此簡要說明，在本節課程中提及除役背景、程序及細節及管制規範與單位。在美國除核設施外，一般的石化燃料廠房、工業廠址及化學貯槽也都需要執行除役相關作業，只是核能電廠除役作業較為繁複且需要注意輻射安全的考量。而在美國除了核能電廠外的核設施計有：鈾燃料製造設施、核醫藥物製造設施、鈾濃縮設施、核武製造設施、核廢處理及相關設施等，所以當設施的核准執照時間屆滿又不申請換照的情況下，即進入除役作業階段。

美國在現階段對於除役策略的方式分為三大類別，可做為除役規劃時之參考，分別為「立即拆除(DECON)」、「延遲拆除(SAFSTOR)」,及「固封除役(ENTOMB)」，詳細說明如下：

1. 立即拆除(DECON)：電廠運轉到達設計壽命後的一段時間內，即將廠內用過核燃料移出燃料池，並將所有含放射性物質的裝備、結構與部分設施除污後拆除，依其活度符合之處置場接收標準移至放射性廢棄物處置場，使廠址達到無限制使用之條件。
2. 延遲拆除(SAFSTOR)：電廠運轉到達設計壽命，設施停止運轉後，先維持在穩定狀況，使設施內之放射性核種經一段時間衰變，再進行組件之除污、拆除後移出廠區，使廠址達到無限制使用之條件。
3. 固封除役(ENTOMB)：電廠運轉到達設計壽命後，將廠內所有用過核燃料、放射性廢液與活度較低的放射性廢棄物及選擇部份可再利用組件移出廠區，再將殘留有高放射性或高污染性組件就地灌漿，密封在混凝土的屏蔽內。除

此固封之設施須維持輻射防護管制外，其餘廠址內之設施依除役作業進行，恢復土地無限制使用之條件。

而目前美國能源部亦提出「現址除役」(In Situ Decommissioning)，其概念較類似「固封除役(ENTOMB)」，而國際原子能總署(IAEA)所使用的除役策略為 Immediate Dismantling, Deferred Dismantling, Entombment。雖然所使用的詞彙有所出入，但其實質含意卻相差不大。

在美國影響決定除役的策略有「政府決策方向」、「法規」、「可用的放射性廢棄物管理系統」、「危害物質評估」、「可支用財務」、「廠址及設施未來再利用」、「設施型式及殘留劑量」及「社會與經濟的衝擊」，職向講授者提問「利害關係者的參與(Stakeholder Engagement)」之細節，講授者解釋因為除役作業應以安全、保安與環境考量擺在最優先順位，以高度危險物質減量為主要重點，雖然美國核設施大多地處偏遠，但仍有當地或鄰近居民是受除役作業最直接的利害關係人，所以要充分使當地或鄰近居民有充分的表達意見及參與，此項工作是在執行除役作業中社會溝通的一環，且作法有可能會影響除役策略的選定。雖然選定的除役策略或有不同，但美方除役的程序概分為三個步驟，分別為「前期準備」、「安全降載停機及除役執行與監測」、「除役後與法規要求之再確認」。

在美國核設施除役作業計畫的管制機關除能源部外、亦有核管會、環保署等單位，由圖 2 的管制範疇示意圖可瞭解美國核能設施除役的管制概況。依據 2014 年美國核管會依地區分為四個區域，分別由當地之區辦公室來負責相關安全管制業務(如圖 3)，講授者也建議管制者可參考核管會出版的除役視察指南。

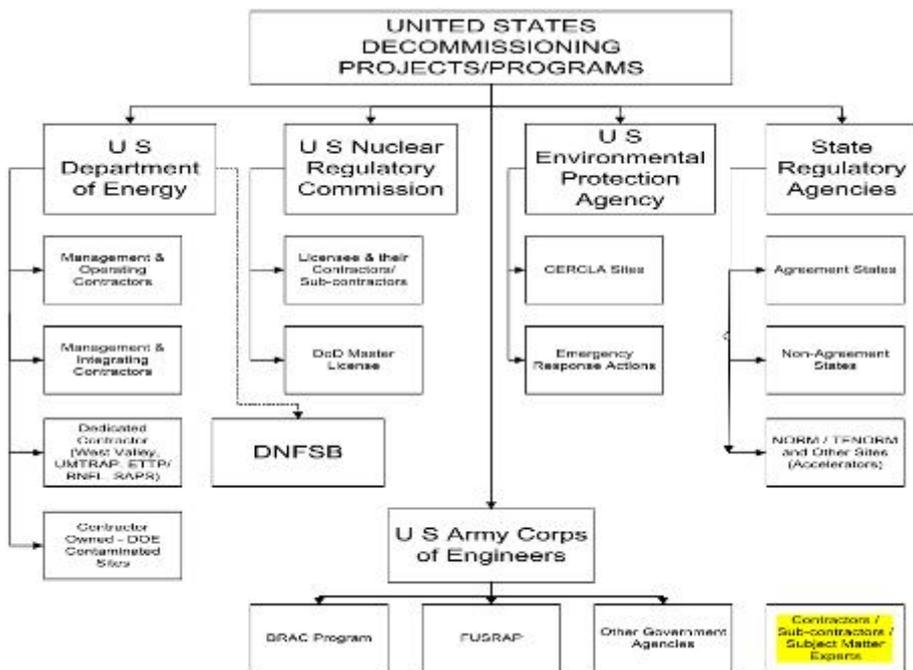


圖 2 美國各類核設施除設計畫中業者及承包商之管制單位範疇示意圖

NRC Regions - 2014

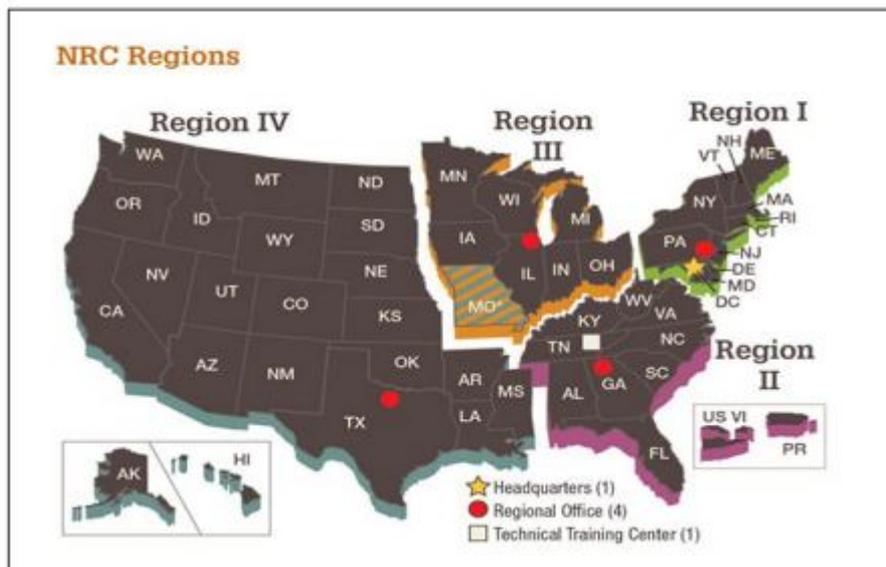


圖 3 美國核管會 2014 年將全美核設施區分四大區域管制示意圖

另遭受輻射污染的廠址是由美國環保署超級基金列管所清理復原，分布示意圖如圖 4，而在 1982 年至 2016 年期間，已由超級基金清理了 84 處輻射污染廠址，可參考美國環保署網址 <http://www.epa.gov/radiation/cleanup/usa.html>。

EPA Superfund Radiologically Contaminated Sites



圖 4 美國環保署就超級基金列管遭輻射污染之廠址分布示意圖

講授者也解說截至 2016 三月止，全美各類核設施在核管會管制的除役計畫數量清單（如圖 5）。

March 2016 NRC Decomm Program

Facility Grouping	# in program	Details
Nuclear Power Reactors	19	10 decommissioned in past; 13 in deferred dismantling; 6 plants dismantling now
Research & Test Reactors	5	Stabilizing but others expected soon
Complex Material Facilities	15	'Legacy Sites'
Uranium Recovery – Mills and ISR	11	Title II sites in Decomm/Remed; 28 tailing sites in LT Monit
Fuel Cycle Facilities	2	Partial site releases

圖 5 全美各類核設施在核管會管制的除役計畫數量清單

本課程最後也介紹了數個核設施除役成功的案例，其中一座核設施除役令職印象深刻，是「Rocky Flats Site」的一座核武工廠，該設施已於 2006 年 12 月完成所有除役之清理作業，其中清運出 600,000 立方公尺的放射性廢棄物，依類別分別運送至全美各地處理及貯存處置(如圖 6)，可看出美國核能工業分工如此之縝密，相關技術居於國際領先地位。

Waste Management & Materials Issues



圖 6 美國 Rocky Flats Site 放射性廢棄物清運至全美各地示意圖

(二) 除役作業中環境及人員安全衛生防護計畫

(Environment, Safety, & Health (ES&H) Planning for Decommissioning)

本次所有訓練課程中，本單元是職認為最重要，講師在講授中會引用一些詼諧的短片來詮釋課程內容，潛移默化中就讓學員了解安全相關的重要性。而除役作業中最重要還是作業人員的安全，因此須列為最優先考量，而管制機關在執行檢查作業時也要能熟稔除役計畫所涵蓋的作業人員安全防護計畫，以確保整體作業的安全性。

環境及人員安全衛生防護計畫是在指進行除役作業之時，需要進行免除對公

眾及工作人員有不良影響的整體考量，而其所涵蓋的範疇並非僅限於輻射安全，只要與安全相關的範疇均要考量納入，例如工業安全、火災防護、緊急計畫、非放射性廢棄物的管理、排放及運送等，其目的是降低其為害性，其範圍如圖 7 所示。



圖 7 除役作業中環境、人員安全及衛生防護計畫範疇示意圖

在除役作業中的各項工作意外、發生危害會對工作人員造成傷害或死亡，相對於設施或環境亦會造成災害，所以預防性的防範措施將會比事後的彌補檢討更有功效。而這些意外危害在工作場所中存在的放射性物質、危害性化學物質、能量及許多潛在因子，所以需要進行意外事前分析，進而建立防範機制，才會達到防護目標。講授者也舉了幾個需要分析的會造成意外之危害的項目、作業及控制方式，因牽涉範圍較廣且數量較多，以表 1 代示。

講授者亦提醒學員，雖然已有執行工作危害性分析，也得到分析後的結論，但仍必需依據分析結果採取危害性的控制措施，將這些分析結果落實納入工作任務中，這樣才能有效的避免意外危害事件發生。而危害的優先順序和有效性控制措施如下：

表 1 除役作業中意外危害項目、作業方式及控制方式列表

Hazard	Task/Operation	Control Measures
Carbon Monoxide	<ul style="list-style-type: none"> ● Machinery operations associated with cutting floors 	<ul style="list-style-type: none"> ● Carbon monoxide monitoring will be accomplished while operating cutting equipment ● Work will be stopped when ≥ 50 parts per million (ppm) parts of air ● Portable ventilation may be used to prevent work stoppages above
Respirable Dust	<ul style="list-style-type: none"> ● Machinery operations associated with cutting floors, excavation, and earthmoving ● Waste conditioning 	<ul style="list-style-type: none"> ● Surfaces will be wetted during cutting ● Water will be used for dust suppression ● The action limit is no visible dust

1. 工程層面管控(Engineering Controls)：

在此一層面上，包括實務工作上如何去除或降低危害因子，例如封密某一特定區域，或者隔離圍籬、重新定位或移除等，都可以達到避免意外危害事件發生。

2. 行政層面管控(Administrative Controls)：

在此一層面上，涵蓋了人員訓練、程序書的建立與落實執行、工期的限定、監測、警報訊號等。

3. 個人防護裝備(Personal Protective Equipment)：

當工程控制不可行或不可完全消除危害因子時，個人防護裝備就顯得相當重要了，尤其是工作場所沒有提供額外的保護時或者根本無法以工程技術層面來控制危害性質工作，但又不得不派遣工作人員進入有危害區域或從事此類危害性工程時就顯得十分重要了。而在除役作業的實務工作上，某些場合無法完全消除危害性因子時，就需要上述三項措施組合搭配執行。

而且講師也針對運轉中與除役之核設施在環境、人員安全及衛生防護面向上

有不同挑戰解釋說明，如表 2 所示，例如在除役作業中許多工作是前所未有的經驗，且沒有既有的防護經驗，而且著重在拆除作業上，這些諸多需要面對的挑戰，不僅現場規劃及工作人員要直接面對，甚至在管制單位對作業上的安全確認也是較高難度挑戰。

表 2 運轉中與除役核設施在環境、人員安全及衛生防護面向上不同挑戰項目表

運轉中的核設施(Operations)	除役之核設施(Decommissioning)
許多工作是例行性質	許多工作是獨特性質
大部份安全議題已獲認證	新工作創建新的安全性挑戰
大多數員工明瞭廠址特性及操作流程	新進且為臨時性承包商占多數
廠址內廠房作業是例行性	廠址內工作是持續性的流動進行
核電廠-著重績效安全的操作	著重於拆除的安全性
發電且財務累積增進	並未有營運基金且有限的財務完成工作
現場隨著時間僅些為改變	廠址外貌及結構持續的改變
有經驗的及支援性質的工作人員	基於不同工作而變動較大的工作人員
有專業且獲認證的工作人員	允許專業技能較低的工作人員
智能型的工作人員	經驗型的工作人員
已建立完善的訓練機制	為持續性需求而進行或起始的訓練

而在隨著除役工程的程序中，放射性與工業的危害程度會互相消長，亦即隨著除役工程的進展，放射性危害因子會逐漸降低，反之工業性危害因子反而會增加，這點在我國是未曾有的經驗，值得業者及管制單位要特別注意。

除役作業中有許多工程內含有典型危害性因子，例如「游離輻射危害」、「生物性危害」、「侷限空間作業危害」、「化學性危害」、「爆炸性危害」、「電氣危害」、「人因工程危害」、「挖掘危害」、「墜落危害」、「火災/熱危害」、「機械性危害」、「噪音危害」、「粉塵危害」、及「吊卸危害」等，講師一一介紹並簡要說明各項防護措施。也提及除役作業之初始對於環境的衝擊，並說明聯邦法規的相關管制

注意事項。

業者就上述所有會影響環境及人員安全及健康的危害性因子之防護措施，均需要在除役計畫中的防護計畫專章或是同等文件內清楚羅列。

(三) 除役作業之廢棄物管理(Waste Management in Decommissioning)

本單元可說是與我國放射性物料管制工作上最相關且最重要的議題，而講者 Mark Kirshe 曾多次來台演講，亦瞭解我國放射性廢棄物的現況與困境。

除役作業中在廢棄物管理範疇中，重要的關聯目標有下列幾項：

- 成本(Cost)：關係到廢棄物的處置、運送、盛裝容器、廢棄物特性、搬卸裝運及二次廢棄物等議題。
- 計畫清單(Schedule)：工期排序、階段性正進行之工作、合理抑低劑量(ALARA)、資金流通、物料流通等均會影響廢棄物量與質。
- 管制層面(Regulatory)：須符合除役後最終使用標準，避免為背承諾事項等。
- 安全層面(Safety)：人因工學所有安全事項、放射性污染等。

講授者也提及在廢棄物這部份會占整體除役與拆除作業預算的 30% 至 45%，所占比重不低。

而在除役作業中廢棄物管理也受限於許多限制因子，例如「最終處置場的接收標準」、「廢棄物盛裝容器規格、限制條件與盛裝容量」、「可使用的盛裝容器及金屬護箱與火車」、「合理抑低劑量的考量」、「遵循所有相關管制及法規」、「風險管理」等。講授者也以美國實際案例解釋各項限制因子，所以在我國目前正進行的除役作業，其中廢棄物管理將會有嚴峻的工作須盡全力達成安全管制的終極目標。而對於廢棄物成本的衝擊因子不外乎為廢棄物的「活度」、「體積」、「搬運機具及尺寸限制」、「運輸模式」、「劑量率」、「運送距離」、「容器種類」及「最終處置」等。而美方除了對於放射性廢棄物嚴密管制其安全性外，對於非放射性廢棄物亦加以嚴密管制，例如「毒性物質管理法(Toxic Substances Control Act, TSCA)」所管制的石棉、多氯聯苯等，「美國資源保育回收法(Resource Conservation

and Recovery Act, RCRA)」內所規範的「腐蝕性」、「易燃性」、「反應性」、「毒性」廢棄物等。可想見當我國核能電廠進入拆除廠房階段時，非放射性廢棄物主管機關的環保單位勢必也將介入參與管制作業。

在上述的嚴格法規管制下，美方在進行除役作業時，對於放射性廢棄物需要格外謹慎，對於廢棄物的檔案需要清楚瞭解，須敘明廢棄物的物理、化學特性及輻射特性，亦要交代清楚其源頭流向並且需要認證的試驗室取樣驗證，而且還要預先進行樣品試運作業，可瞭解在實際運送作業時可能遭遇到非書面計畫性的問題，以及如何克服與解決，而且樣品運送之成本亦要列入整體預算之內。而拆廠作業所產生的廢棄物種類甚多，需要妥善進行分類，因為依據經驗廢棄物計有廢液、廠址內受污染的土壤、建物結構拆除的混凝土、反應器組件及二次廢棄物等。而每一種廢棄物的特性不盡相同，所以在處理或收集上均要格外謹慎。如圖 8 即為美方某核設施在拆除廠房時，連同廠址內場址地面下受污染的土壤一併挖掘清理之照片。

在講授課程中亦針對廢棄物的減容技術說明並舉例(如圖 9 的金屬熔鑄鑄錠)，在廢棄物減容減量相關技術上我國亦有一定技術水準，故在課程中職也提及我國廢棄物減容再利用的實績分享受訓學員。



圖 8 拆除某核設施廠房，連同廠址地面下受污染土壤一併挖掘清理

Metal Melting



Shield Blocks



圖 9 低放射性廢棄物金屬經由鎔鑄減容製成金屬鑄錠作為屏蔽再利用

拆除後的廢棄物運送也是一項重要議題，在美國須遵守聯邦法規 49CFR172 Subpart I 之運輸保安法，對於運送計畫以及載具的規範要求，在我國也有相對應的管制規範，只是美國幅員遼闊，有些研究用核設施又設立在都市之大專院校內，除役拆除作業後的運送有較多實務上的挑戰與考量。不過順帶一提的是，美方執行除役作業時，曾發現有料帳不明的廢棄物桶。此種事件連美國都曾發生過，不可諱言的這種類似情形也可能發生在其他國家，所以除了必須要確認廢棄物的各項特性外，對於廢棄物的管理從源頭管制到後續貯存均要嚴密管制，才能確保除役作業及環境安全。

(四) 廠址/設施特性調查(Site / Facility Characterization)

廠址特性調查作業為除役計畫中要求的重點工作項目，而且核設施拆除前的物理、輻射與非輻射特性調查是所有除役計畫的關鍵元素。其中放射性廢棄物輻射特性調查目的是提供核種類型、數量、分布、物理性質及化學狀態等可靠的數據資訊。若廠址特性調查做的不夠確實，將在執行除役作業時產生額外非預期的

支出成本。廠址特性調查能被視作朝向廠址除役的起始步驟(如圖 10 之除役步驟示意圖)，用來界定工作範圍與準備廠址除役計畫、選擇除污與除役技術、發展廢棄物處置策略、及細化成本估算與時程。

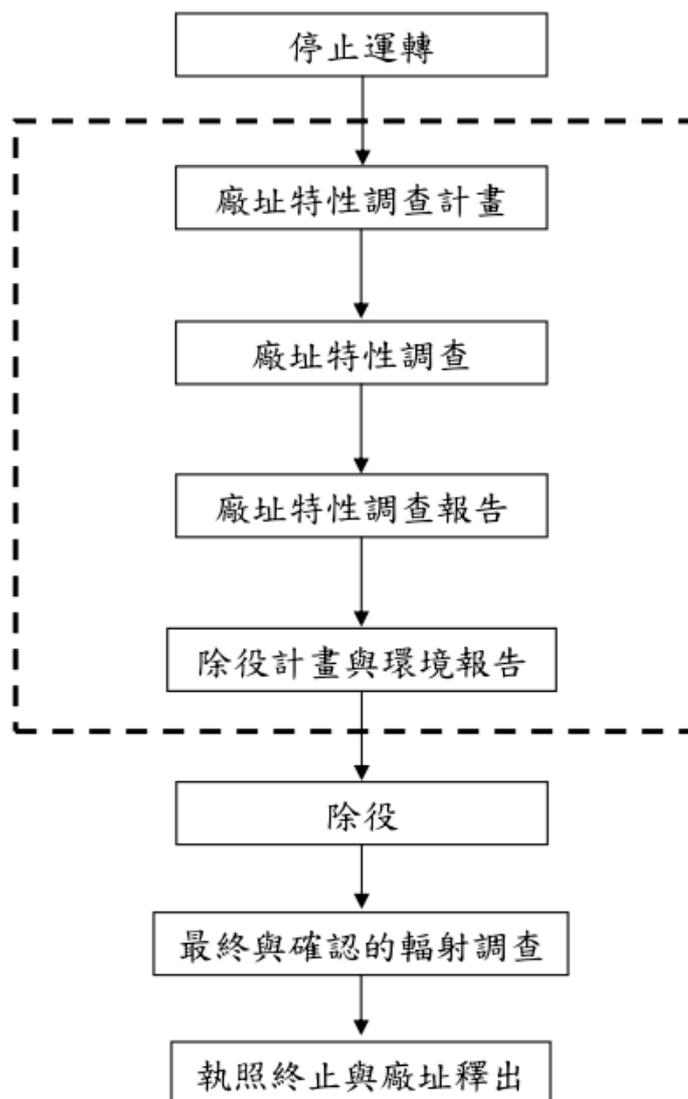


圖 10 廠址特性調查在除役作業步驟中位置關係

而另外在核設施除役作業的輻射偵檢與廠址調查(Radiation Survey and Site Investigation, RSSI)作業流程如圖 11。首先進行廠址歷史評估(Historical Site Assessment, HSA)，之後再進行各項輻射偵檢，包括範圍輻射偵檢(Scoping Survey, SS)、特性輻射偵檢(Characterization Survey, CS)、改善措施輔助輻射偵檢(Remedial

Action Support Survey, RASS)以及最終狀態輻射偵檢(Final Status Survey, FSS)。

由圖 11 可知 RSSI 作業流程分為廠址確認、廠址歷史評估、範圍輻射偵檢、特性輻射偵檢、改善措施輔助輻射偵檢與最終狀態輻射偵檢等項目。

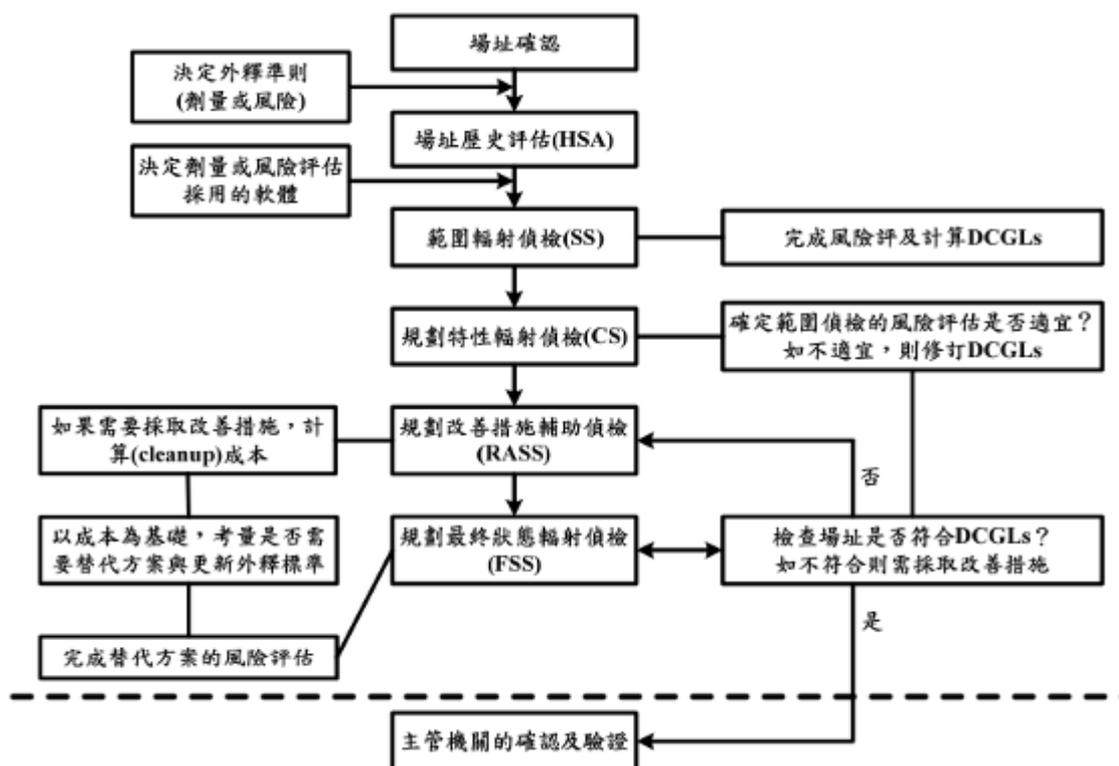


圖 11 輻射偵檢與場址調查(RSSI)作業流程

其中較為重要的項目目標簡單說明如下：

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

廠址歷史評估(HSA)的目的是為了收集和場址與其環境相關的資訊，而 HSA 的主要目標如下：

- 確認污染的潛在來源。
- 判定廠址是否對人類的健康有威脅。
- 區別受影響與未受影響的區域。
- 提供範圍與特性輻射偵檢設計的輸入數據(或參考數據)。
- 提供污染遷移可能性的評估。

- 確認與調查與廠址相關的額外潛在放射性廠址

2. 界定範圍輻射偵檢(Scoping Survey, SS)：

如果在 HSA 期間收集的數據指出某地區有受到輻射影響，則將執行範圍輻射偵檢。範圍輻射偵檢依據有限的量測結果提供特定廠址的資訊，其主要目標如下：

- 執行初步的有害性評估。
- 評估輻射偵檢計畫是否能有效地在特性或最終狀態輻射偵檢中使用。
- 如果需要的話提供作為特性輻射偵檢的輸入數據。

3. 特性輻射偵檢(Characterization Survey, CS)：

特性輻射偵檢係依 HSA 與範圍輻射偵檢結果來規劃，並針對污染區做詳細的放射性環境特性調查。特性輻射偵檢的主要目的如下：

- 決定污染的本質與廣度。
- 收集數據以支持選擇改善方法與技術之評估。
- 評估輻射偵檢計畫是否能有效地使用於最終輻射偵檢。

4. 最終狀態輻射偵檢(Final Status Survey, FSS)

最終狀態輻射偵檢結果用來證明是否符合法規要求，最終狀態輻射偵檢的主要目標如下：

- 選擇/證實輻射偵檢單元分類。
- 驗證每一個輻射偵檢單元殘餘污染的潛在劑量或者風險低於外釋標準。
- 驗證每一個輻射偵檢單元內小地區高活度造成的潛在劑量與風險低於外釋標準。

講者並介紹因應輻射偵測目的不同所使用的各類輻射偵測儀器，不論是環境等級或是污染特性調查等級，這些儀器我國核設施大多數均有採購及使用，所以廠址早期調查越確實，則後續執行拆除作業的廢棄物管控也將更有效率，故管

制單位應要求業者於核電廠除役先期作業上，必須確實執行落實此一範疇的調查工作。

(五) 除污技術(Decontamination Technologies)

核設施除役作業中牽涉到除污、拆除及廢棄物管理等重要步驟，而選擇與應用適當的除污方式及拆除技術勢必成為除役計畫成功與否的關鍵因素。其中又以除污技術為在核設施除役作業期間最常使用的關鍵技術之一。由於核設施除污作業中，污染組件表面乃是藉由沖洗、熱力、化學溶劑、電化學方式及機械作用等方法來移除核種(如圖 12)，相對的也會產生二次廢棄物，所以當需要除污項目愈多及範疇愈廣時，則產生的二次廢棄物也就會愈多，另廢棄物的產生亦會直接與成本相互關聯。所以在確保工作人員安全以及放射性廢棄物減量考量因素上，選擇適當的除污技術就顯得相當重要了，而本課程講授者就除污技術選擇評估因子及協助選擇的資源均有詳加介紹，職認為此部份資訊對於除役業者及管制單位均有其重要參考價值。除污的目的除了降低輻射曝露外，也可以減少貯存及處置場處置的空間壓力、降低貯存期間或長期監測與監管要求。以確保民眾健康與安全。

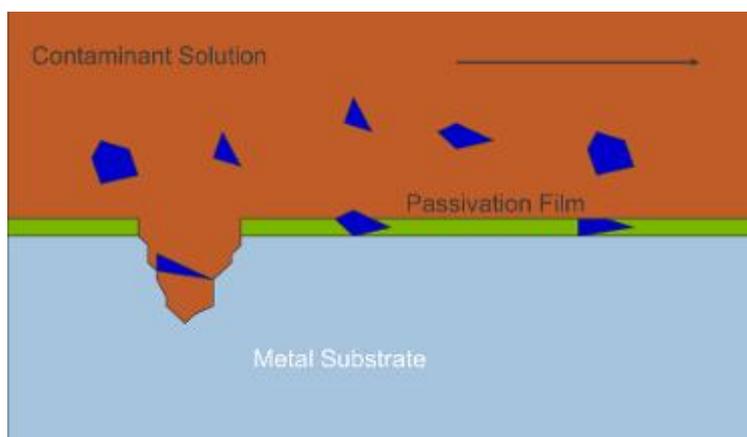


圖 12 利用化學溶劑來移除組件金屬內部污染的核種

選擇適用的除污技術需要考量下列幾個因子，分列如下：

- 安全性—選用的技術不會產生污染擴散及新的危害性物質。
- 效率性—選用最低的操作成本、使用已有驗證且在短時間內作業中使作業中

的工作人員輻射曝露最少化的技術。

- 成本效能性—選擇除污後比未除污的物質運送費用要低的除污技術。
- 廢棄物管理—選取產生最少化的一次及二次廢棄物的技術。
- 應用之可行性—避免密集性勞力的技術或避免在處理過程中使用大量不常用物質。

課程中講授各式除污方式及機具，由於講授時間有限，無法對每一種技術都詳細介紹，但已經使學員瞭解不同作業、組件所使用的各類除污方法(如表 3)。

表 3 不同作業階段之各類除污方法一覽表

作業方式	除污目的	待除污物件	除污方法
組件拆解前除污	降低職業曝露	管路系統	化學除污 機械除污
		桶槽	水力噴射、噴砂、剝離式被覆
拆解後除污	金屬再利用及減少放射性廢棄物	管路，組件	電拋光、化學浸泡、噴砂、超音波、凝膠
建物(混凝土)除污	廢棄物外釋及減少放射性混凝土廢棄物	混凝土表面	機械鏟除
			真空吸塵法
			刨削/刮刨
			鑽孔與打碎
			噴鋼砂
			微波照射

(六) 除役作業之經費估算(Cost Estimates for Decommissioning)

除役經費估算(Decommissioning Cost Estimate ,DCE)是一項要兼顧品質及準確性的困難工作，在管制機關的立場而言，也許經費議題不如安全議題獲得管制機關的青睞，但卻也是會因為經費因素而影響安全防護，所以也要特別注意業者對經費的評估作業是否符合品質的要求。

核能電廠除役費用比其他設施費用要高，是因為在有輻射的環境中工作，故具有複雜性及高風險度。而從事放射性廢棄物管理費用、廠址輻射特性調查及環境復育等工作，均需要具有經驗的人員來執行，一般而言，具有經驗的工作人員

人事成本較高。而會影響除役估算費用的因素，也包括除役的行政執行架構、所選擇的除役策略、所考量費用項目(費用估算範圍)、所採用方法及所考量的風險與不確定性方式。另商業核能電廠除役費用係採最高風險與考量不確定性因子，包括運轉期間與除役期間事件與事故、政治架構條件改變、放射性廢棄物管理、貯存與處置費用預想不到的演變，以及主管機關對業者提出額外的要求與管制，均會影響到經費故算的準確性與品質。

(七) 拆解作業技術(Dismantling Technologies)

在本單元中，講師將拆解作業的緣由、傳統型式的拆解應用模式、選擇特定拆解技術的參數以及成熟與新興拆解技術等，拆解定義為除役過程中拆除清潔或放射性設備或組件結構，所使用的方法為熱力、機械或電氣等方法執行拆解作業，但有時也因某種因素考量不須拆解或是以廢棄物最小量產出方式來執行拆解。而核設施組件、結構拆解的緣由，是移除高活性的物件以及要符合最終處置的接收標準要求以外，也要考量運送的限制條件等因素，所以在評估作業時，都會事前擬妥拆解計畫，明列拆除項目與範圍。講者並以美國與歐洲亞洲除役拆解方式不同作比較，美國較偏向整個大組件拆除，而歐亞大多數國家較偏向盡可能將組件拆解分割成較小尺寸的物料或廢料。

講師針對傳統型式的拆解應用模式講授中提及，拆解之工作環境有組件由外往內或者由內往外進行，現場作業環境空間常因組件結構的不同而有所差異。在選擇拆除技術方面，沒有任何單一技術可以滿足除役計畫內所有涵蓋的拆除需求及項目，拆除技術選擇取決於設施類型(核電廠、燃料循環設施、核武及核研究設施)、同位素存在類型、設備與零件的活度水平、待拆除設備/零件(混凝土或金屬)及放射性同位素與污染層的物理/化學性質。其中設施類型直接影響同位素含量、工業安全及切割環境，進而影響程序的選擇。

伴隨著拆除作業的進行會產生二次廢棄物，例如研磨粉塵、沖刷廢液、碎片

與煙霧等，控制這些污染物質是非常重要的，因為會直接影響工作人員安全(例如氣溶膠、廢棄物裝卸等)以及廢棄物管理(更多待處置的廢棄物)，有時過濾器因捕捉塵粒所產生廢棄物體積，會造成總廢棄物體積增加。若將二次廢棄物裝卸與處理的成本考量進來，有時會比開始使用稍為昂貴但較少二次廢棄物產生的程序更加昂貴。進行切割時要先予以訓練與模擬(如圖 13)，如此才較能確保實際作業時的安全與效率。

Training & Mock-Up Testing



圖 13 機械手臂進行切割前的模擬試割

在切割過程中不免會動用到火源，所以工作環境的意外防範要求是要以更嚴格標準來要求的，例如防火毯、滅火器、緊急待命人員等均要缺一不可，而輻射防護的配備更是嚴格要遵守，這點是日後我國核電廠除役時在拆解組件工程時，不僅業者施工單位要提高警覺外，原能會的視察員也要列為重點檢查項目之一。

(八) 發展中的技術(Evolving Technologies)

擔任本節課程的講師為 AREVA 派駐美國分公司技術部門主管，由於該公司在除役實務上有相當豐富經驗，所以可以讓從事除役的業者有更新的認知及參

考，在本節課程中先介紹機器人之遠端操控來執行高劑量區域之相關工作，雖然上述工作經費及時間成本耗費不低，但卻是必須要使用的，畢竟工作人員的健康與安全才是最重要的，因為在高劑量或極度狹隘空間等艱困的工作環境的確不適合派遣人力去執行，唯有藉助機器人之遠端操控才可安全的完成作業，講授者並以污染區域內的清除風管積垢除污作業舉例，在長 30 英吋寬 8 英吋的遠端除污設備上亦配備有攝影功能，其功效令職印象深刻。

而選擇這些發展中的技術要考量的因素有防範輻射污染的保護機制、移動性、維護性、工作精準度與操控性、尺寸重量及實際經驗等。講授者提醒學員有一點要注意的是，對於負責性較高的計畫作業或是環境，要利用自動化機器或是遠端操控設備之前，建議在全尺寸無輻射的空間先進行試驗(即為冷測試)，如此才能確保所使用的機具與設備是最合適的選擇。

而後在拆解新興技術中也介紹了電漿火炬切割組件技術以及其優缺點與適用範圍。雖該設備可以移動且功率較低，但工作溫度仍可以超過攝氏 3000 度。在除污作業中介紹利用雷射光及凝膠除污等新興技術，並說明其適用範圍及優缺點，在場有幾位從事現場執行或是規劃除役計畫的學員亦提出使用後心得與講授者意見交換，討論氣氛熱絡。不過當講授者介紹到最後一項特性技術 (Characterization Technologies)時，其中有一項技術令所有學員為之讚嘆，是名為「Gamma Camera」，講授者解釋本項技術在數年前僅為理論階段，而如今已發展為應用於偵測污染組件商業產品。此設備索搭配的攝影機可將組件上受污染劑量的範圍與等劑量圖顯現於該組件的影像上(如圖 14)，可使現場的工作人員立即了解到該組件污染狀態，除可提升工作效率外，亦可增加輻射安全的防護性，講授者並以廠房中某些彎管會累積放射性物質之實務偵測舉例，職亦提問偵測距離的控制是否會影響其解析能力，講授者解釋的確會影響，但還要視現場劑量情況來決定偵測的距離的遠近。

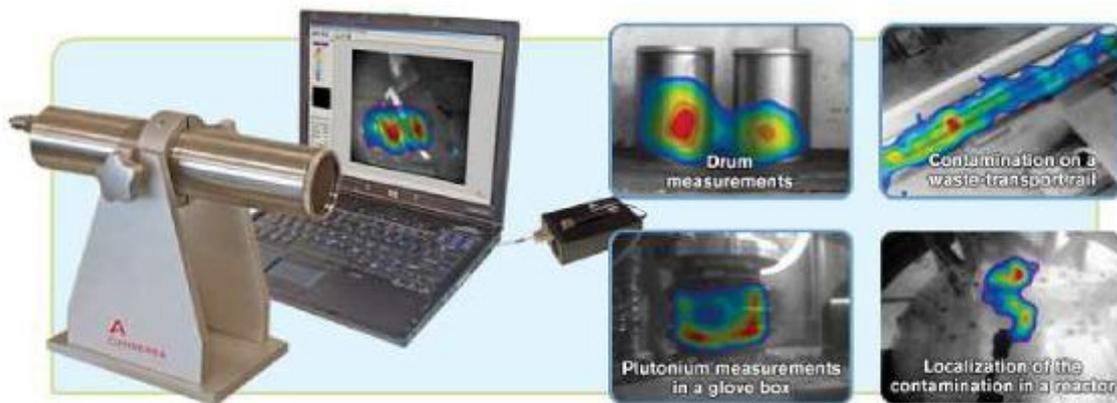


圖 14 Gamma Camera 可直接清楚顯現等劑量值範圍於組件影像上

在本課程的最後，也介紹了放射性廢棄物的新興偵測技術，其中有一項係對設施拆解後的砂土進行篩選。因為要處理分類的容積相當多，所以此設備採為自動化偵測即分類(如圖 15)，不需要人員在旁處理，最後將有污染的部份集中管制。不過職亦提問此項工作如何確保分類後的品質，講授者也說明相關工作人員還會進行複測，確保廢土的偵測品質，如此作業可以增加執行效能外，也可以減低工作人力的負荷與劑量，亦可有效執行外釋作業。

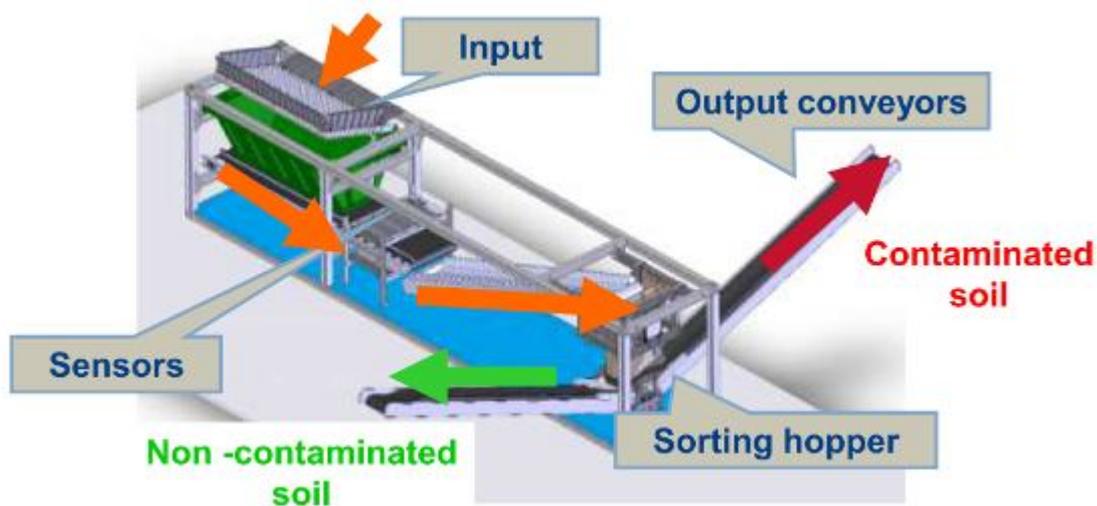


圖 15 含有放射性廢棄砂土自動分選設備示意圖

本單元是學員與講授者討論最為熱絡的一門課程，學員中因有許多都是參與除役工作的主管與工程師，對於講師介紹的各項技術均詳加詢問其特性及細節，

因此耽誤到後面接續的課程時間，令職感受美方從業人員之敬業態度值得學習。

(九) 終期狀態調查/執照終止(Final Status Surveys/License Termination)

執照終止計畫是在描述除役作業執行到最終狀態調查程序，以及逐一驗證除役後的廠址可滿足無限制使用釋出之要求。執照終止計畫除役之剩餘活動將依法規 10 CFR Part 50 進行，將有利於公眾安全或民眾健康，同時亦不會對環境品質有不利影響。執照終止計畫內容包括一般資訊、廠址特性調查、剩餘活動確認、廠址復育計畫、最終狀態調查、符合輻射標準、除役費用更新及環境報告補充等。

(十) 內華達州國家安全場址廢棄物計畫及參訪(NNSS Radioactive Waste Management Program & Tour OF NNSS (the Old Nevada Test Site))

在訓練課程的最後一天，驅車前往距拉斯維加斯西北方六十五英里的內華達州國家安全場址參訪，該場址地處於沙漠地帶，該場址所占面積占 1360 平方英里，該場址周圍的 4500 平方英里均被聯邦政府所管制(如圖 16)。

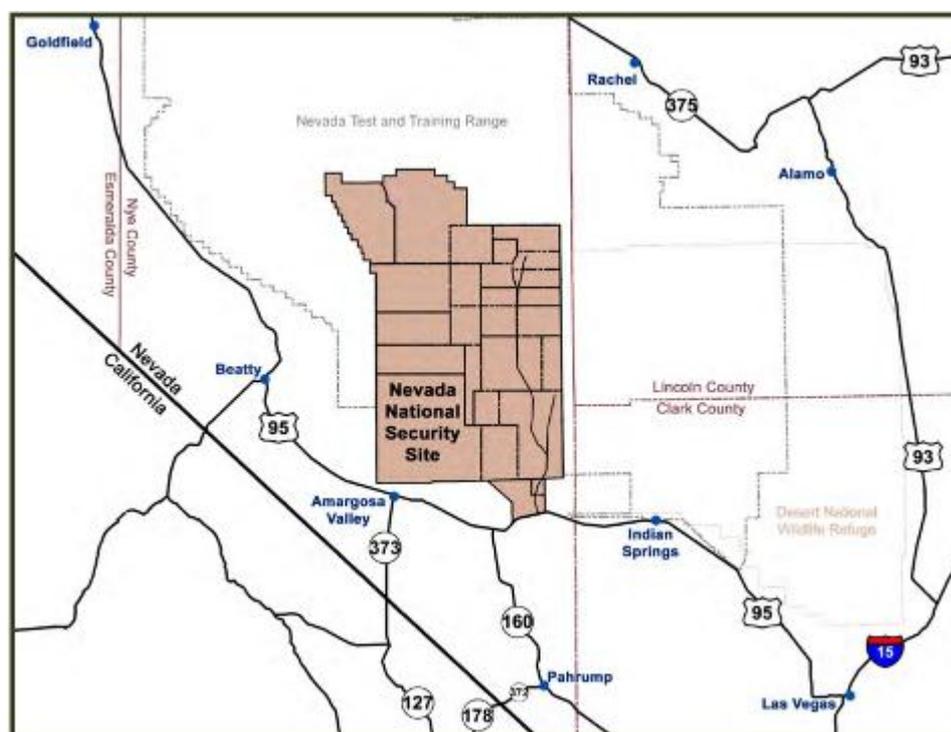


圖 16 內華達州國家安全場址位置圖

由於主辦單位已經在室內課程解釋參訪行程及該場址之任務，該場址是隸屬於美國能源部，其境內有諸多實驗室及 1960 年代核試爆場，亦有低放射性廢棄物貯存設施，因受限於參訪時間及當地幅員遼闊，故並未依照表訂(如附錄二之參訪表)參訪每個設施，實際上僅安排參訪四個設施，分別為引擎維護組裝及拆除設施(Engine Maintenance, Assembly, and Disassembly (E-MAD) Facility，如圖 17)之除役後廠房、第三區放射性廢棄物管理場址(Area 3 Radioactive Waste Management Site.如圖 18)、核子武器數據傳輸研究屋(Icecap GZ.)及地底核試爆區(Sedan Crater) ，該場址內的各設施位置圖如圖 19。

EMAD Facility* at NNSS (old NTS) - 1

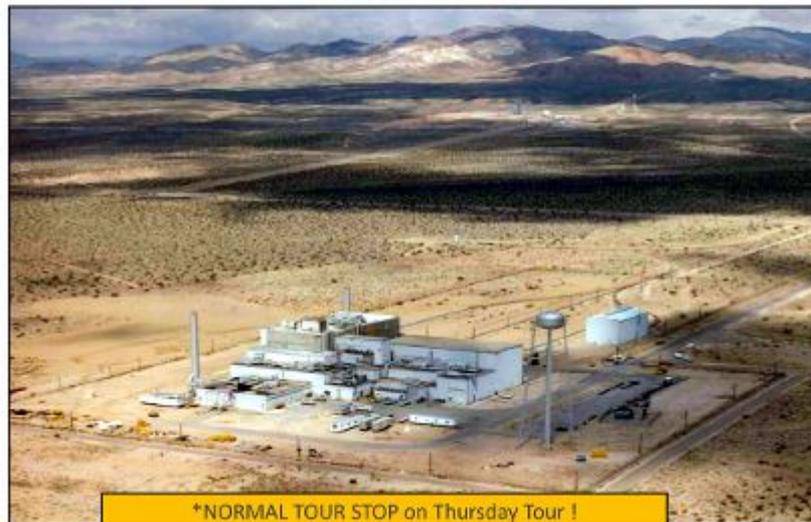


圖 17 引擎維護組裝及拆除設施(E-MAD)示意圖



圖 18 放射性廢棄物管理貯存場之低放射性廢棄物以太空包方式貯存

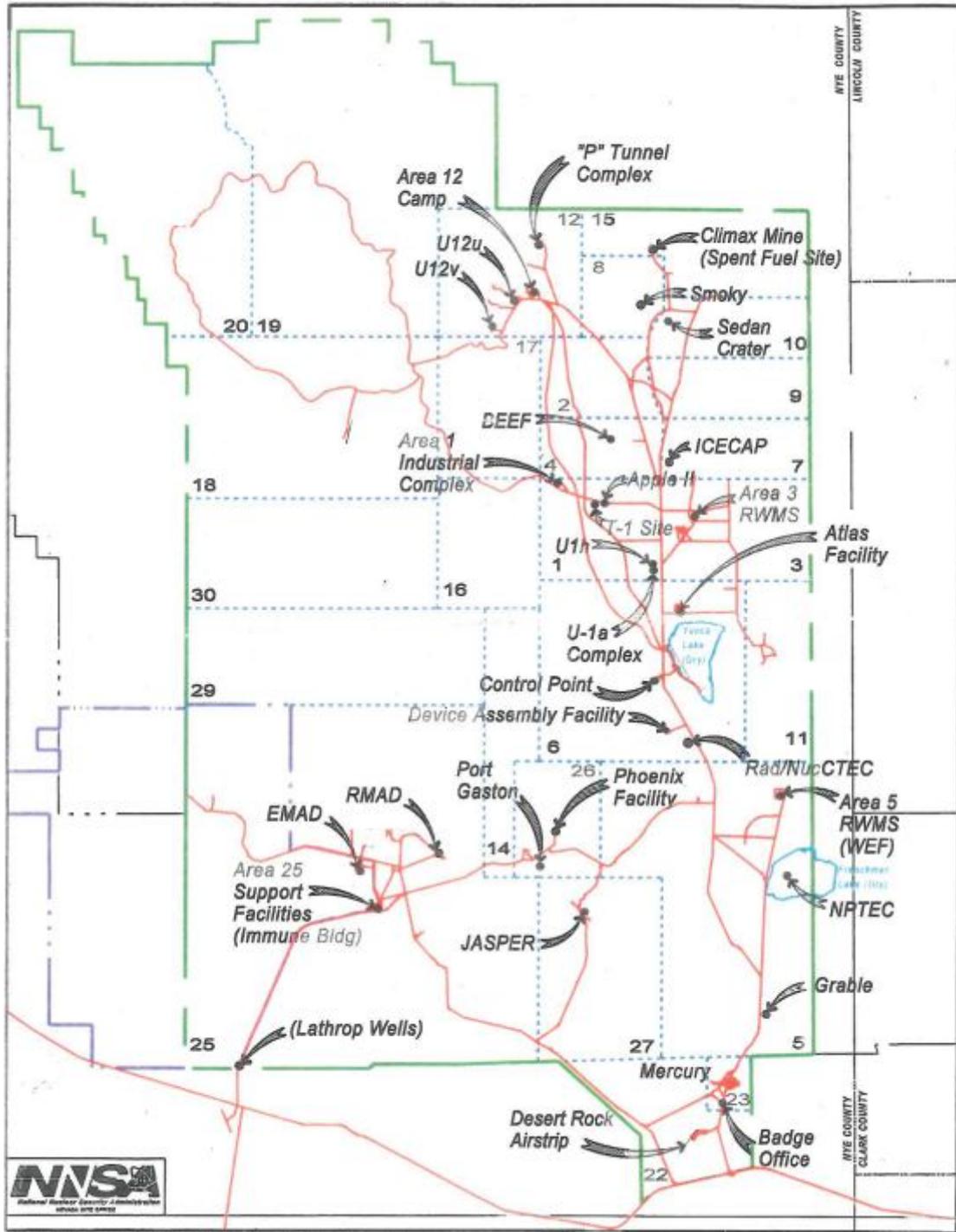


圖 19 內華達州國家安全場址場址內的各設施位置地圖

由於主辦單位要求學員不得攜帶相機及行動電話，所以無法將該場址內的相關設施拍攝，故相關圖片均為室內課堂說明之資料擷取。唯由主辦單位將參訪學員合照後再電郵給學員，如圖 20，21。而能源部均派員解說每個設施的背景及其任務，均能與室內課程講授內容大致相符，讓參訪學員清楚瞭解相關設施。



圖 20 參訪學員於除役後的引擎維護組裝及拆除設施(E-MAD)合影



圖 21 參訪學員於地底核試爆坑 (Sedan Crater)遺址前合影

由於該日參訪行程僅發放場址位置地圖，除此之外並未發放任何資料，故職於員工餐廳(Mercury Cafeteria)午餐後發現餐廳中有些業務介紹資料陳列於展示架上，即便取回以供參考，詳見附錄三。

四、心得

此次奉派參加美國能源部舉行的核設施除役專業訓練課程，並參訪內華達州國家安全場址，了解美國除役專業技術之進展與應用。以下就此行的心得說明如

下：

- (一)在除役作業的規劃作業上，應特別注意廠址特性調查作業，因為是項作業為除役計畫中的重點工作，核設施拆除前的物理、輻射與非輻射特性調查是所有除役計畫的關鍵元素。尤其放射性廢棄物輻射特性調查更是重要，其目的是可以提供除役作業範疇內之核種類型、數量、分布、物理性質及化學狀態等可靠的數據資訊，若廠址特性調查做的不夠確實，將在執行除役作業時會產生額外非預期的支出成本，調查做的確實將來才能減少拆除廠房不確定性及增進安全性。
- (二)在除役作業的工作人員安全及衛生保護相關議題上，除役作業中最重要的還是作業人員的安全應為最優先考量，職認為廠房拆除的就算再徹底，廠址復原的再乾淨，都比不上工安零事故來的重要。而在管制機關的立場上，職認為在執行檢查作業時，管制人員也要能熟稔除役計畫所涵蓋的作業人員安全防护計畫，以確保整體作業的安全性。
- (三)在除役作業的執行作業之核心技術上，職認為有除污及拆除這兩大技術工程在除役作業中所佔很大的比例，畢竟除役之除污作業與運轉中核電廠除污是不盡相同，因為還要考量到拆除作業及放射性廢棄物產生的關聯性，在我國較欠缺經驗的技術為此兩部份，所以在日後執行實務上，將會面對此類實際問題，不過依據我國核設施經營者的員工素質及專業程度，相信應可克服此一挑戰。
- (四)除役後的放射性廢棄物相關議題上，不可諱言我國的自然及政治環境不如美方，業者在除役過程中，如何有效的管制及外釋才能達成放射性廢棄物產量最少化。這也同時為考驗管制單位進行現場查核的一項重要工作，因為嚴密檢視業者是否落實執行減量計畫是管制單位責無旁貸的任務，職認為本項議題所衍生的問題將是我國在除役工作中需要克服的艱辛挑戰。

而本次主辦單位的主持人 Larry Boing，適本次所有講師中，唯一的能源部 Argonne 國家實驗室的正式員工，目前擔任該實驗室核子工程部的除役部門主管，本次訓練中有諸多重要課程均是由他擔綱講授，原本於 2016 年期間，美國能源部派員協助我國開設除役訓練課程時，但因故無法成行，而職與他交換意見時，據其表示日後應盡可能造訪我國，協助我國除役作業之訓練講授，期能使我國除役工作進展順利，他也在訓練最後預告 2017 年美方仍會開設三個除役訓練班，時間及地點如圖 22 所示。



圖 22 本次課程主辦人預告 2017 除役訓練時間及地點

五、建議

本次參與美國能源部舉行的核設施除役專業訓練課程，聆聽從事除役實務專家在這一方面的講授，課程期間並參訪內華達州國家安全場址，了解美國能源部對於核子科技應用的整合計畫與做法，藉由參加訓練的研習，有助於提升除役的

管制能力，以下就參與本次研習訓練的心得提出建議事項：

- (一)因我國除役作業尚屬起步階段，而且未曾有實務經驗，且從事本項工作之專業人員數量亦是有限，不論是在核能電廠經營者或是管制單位中，均有人力不足之處；目前國內經常辦理除役相關之研討會議或訓練，雖然可提升除役相關從業人員的知能，但仍建議現階段核能電廠經營者及管制單位，仍需持續派員赴先進國家汲取除役專業技術，吸取更深更廣之相關專業知識，另建議業者亦應優先考量派遣核電廠內實際從事除役作業的工程師赴外學習，俾利除役工作順利執行與確保其安全管制。
- (二)雖然我國正在執行核能電廠除役計畫審查作業，管制單位已督促業者需考量除役後所產生的放射性廢棄物的貯存地點及空間，建議台電公司但仍需積極推動公民參與及加強與地方政府和居民溝通，並取得地方政府有關用過核燃料乾貯設施的相關許可，俾順利推展除役作業
- (三)我國核能電廠內承包商的專業能力事關除役作業品質與安全，若要承接除役的核心工作，例如除污作業或是拆除工程，其技術能力及使用機具均要足夠承受大量且複雜的工作量，建議台電公司應加強要求承包商之相關訓練以提升其作業能量與專業技術，其能達到除役計畫所要求的品質與符合規範。
- (四)除役計畫要有專業管理與組織，來執行並建立知識管理，除可做為後續核能設施陸續除役工作的經驗傳承外，亦可以增加安全性與提昇工作效率，建議業者在建立知識管理方面上，仍需要注意知識管理的品質與落實制度之實行，相信可精進我國除役專業技術。
- (五)當核能設施進入除役階段時，原先負責運轉及維護的現場人員之工作權與心理層面亦需要受到安置與保障，這點在美方授課時有特別提及，這部份也建議台電公司要注意現場作業人員的工作士氣，以及盡早規劃及落實借重此些專業人員之技術，經由善用人才及任用將該些人力轉任為除役計畫之現場工

程品管人員，除可提升除役作業施作之安全及品質，亦可強化我國除役技術與經驗傳承。