

出國報告（出國類別：實習）

參加美國阿岡國家實驗室(ANL)舉辦 之核設施除役訓練課程

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：洪進達技士

派赴國家：美國

出國期間：106年11月12日至11月19日

報告日期：107年01月23日

摘 要

「2025 非核家園」是我國政府既定政策，國內核一廠、核二廠及核三廠將陸續進行除役作業，惟我國無論是核設施經營者或是管制機關目前皆未有執行或管制核能電廠除役的經驗，為此，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，另進行除役相關審查技術研究及辦理除役研討會與訓練，並派員出國見習，以精進物管局同仁對於除役管制專業能力，本次派員赴美參與美國能源部阿岡國家實驗室主辦的核設施除役訓練課程即為一例。本次課程講授內容共分十八個項目，計有「除役作業介紹」、「除役作業之環境、安全及衛生防護計畫」、「除役廢棄物管理」、「廠址及設施特性調查」、「除污技術」、「除役規劃及管理」、「除役經費分析」、「除役風險管理」、「除役拆解技術」、「除役最終狀態偵測」及「除役知識管理」等單元，訓練課程最後一天並參訪「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。本次課程內容相當豐富且實用，藉由本次訓練的學習，將有助於核設施除役作業安全及相關管制工作之執行。

目 次

摘要	i
目次	ii
一、目的.....	1
二、過程.....	1
三、訓練紀要.....	2
四、心得.....	25
五、建議.....	25
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.....	27
附錄二 美國能源部頒發之結業證書.....	28

一、目的

在國內「2025 非核家園」已是既定政策，核一廠於 107 年底即將進入除役階段，接續核二廠及核三廠除役作業也將陸續展開，惟我國內無論是核設施經營者或是主管機關-原能會在核電廠除役執行及管制方面都沒有相關經驗，若能向有核能電廠除役經驗的國家(例如美國、德國、日本)學習相關技術與經驗，可增進除役作業之順暢度，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。

本次參加美國能源部阿岡國家實驗室主辦的核設施除役訓練課程，其課程內容相當廣泛，包含源頭的除役規劃及管理、除污作業、拆除作業、廢料管理、除役作業知識管理、廠址最終狀態偵測作業等，期能藉由參與除役作業完整課程，學習國外除役作業相關法規、技術與經驗，以提升國內核設施除役作業之知識與整備能量。

二、過程

本次參加美國阿岡國家實驗室(ANL)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 12 日(日)	台北到拉斯維加斯	去程
11 月 13 日(一)	拉斯維加斯	美國阿岡國家實驗室(ANL)舉辦之核設施除役訓練課程
11 月 14 日(二)	拉斯維加斯	美國阿岡國家實驗室(ANL)舉辦之核設施除役訓練課程
11 月 15 日(三)	拉斯維加斯	美國阿岡國家實驗室(ANL)舉辦之核設施除役訓練課程
11 月 16 日(四)	拉斯維加斯	美國阿岡國家實驗室(ANL)舉辦之核設施除役訓練課程
11 月 17 日(五)	拉斯維加斯到洛杉磯	返程
11 月 18 日(六)	洛杉磯到台北	返程
11 月 19 日(日)	抵達台北	返程

三、訓練紀要

訓練課程由來自美國阿岡(Argonne)國家實驗室、本次訓練課程的負責人波音先生(Lawrence E. Boing)開場歡迎所有參訓學員，波音先生說明其在核電廠除役方面已有39年經驗，並說明其所任職的Argonne國家實驗室從事相當多核設施除役技術方面的研究，除用於核設施現場除役作業外，亦提供技術建議供美國核管會(Nuclear Regulatory Commission, NRC)參考；並說明本訓練的課程相當多元，希望所有參訓的學員皆可以有相當多的收穫。



圖1 本訓練課程負責人波音先生(Lawrence E. Boing)開場致詞。



圖2 本次訓練場地。

開場過程中，主辦單位提供各學員 1 只隨身碟，波音先生並說明隨身碟內含本次訓練課程所有簡報之電子檔，及相關之參考資料供大家參閱；主辦單位並提供 1 份本次參加訓練學員的通訊資料，供大家交流使用。

波音先生開場末段請參訓學員作簡短之自我介紹，自我介紹中並請說明個人工作內容及本次受訓特別有興趣之主題或方向。職自我介紹時簡要說明來自台灣，於核能管制機關—放射性物料管理局工作，主要工作為管制核電廠內放射性廢棄物的營運，並說明我國有三座核電廠運轉中；由於「2025 非核家園」的政府既定政策，2025 年所有核電廠將停止運轉，並進行除役作業，因此職奉派參加此除役訓練課程。

本次參訓之學員共 24 位(圖 3)，包含來自美國國內、加拿大、韓國、日本、英國及捷克等國，代表包含管制單位、核能研究機構及設施經營者，其中與我國臨近之韓國有 5 位學員參與本次訓練課程。本年度(2017 年)內訓練主辦單位已於韓國國內舉辦 1 次類似之除役訓練課程，可見韓國亦已積極規劃吸取國際上除役作業相關知識與經驗。

波音先生將 24 位學員有興趣之主題或方向一一記錄下來(圖 4)，結果學員有興趣之主題以一般除役作業 (General Decommissioning) 最多，再者為廢棄物管理，其他方向包含除役作業的計畫管理、風險評估、除役費用估計、除污作業及人員訓練等方面，波音先生並說明此資訊將提供給所有講師，使講師得針對學員較有興趣之方向加強介紹。



圖 3 2017 美國阿岡國家實驗室(ANL)核設施除役訓練課程參加人員合影

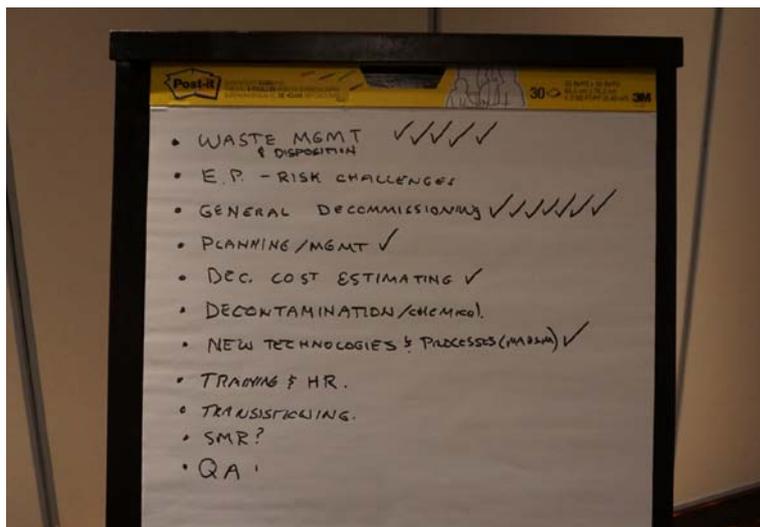


圖 4 本次參訓學員有興趣的主題/方向。

以下就部分訓練課程內容摘要分述如下：

(一) 除役作業介紹(Introduction to Decommissioning)

本內容為此次訓練的第一個課程，由本次訓練課程的負責人波音先生 (Lawrence E. Boing) 介紹。

波音先生說明本次訓練課程內容，適用於所有核設施的除役作業，包含核

能電廠、研究用反應器、核燃料轉化及濃縮設施設施、核能相關研究設施及國防設施、放射性廢棄物處理及處置設施、核能工業及醫學設施等，並說明世界上統計至 106 年 1 月，共有 406 部核能電廠反應器運轉中，此數量相較於 2002 年 438 部之歷史上最大數量已降低許多；而興建中核能機組部分，共有 13 個國家、55 部機組興建中。

波音先生說明所謂的除役 (Decommissioning)，即將一個設施或廠址從運轉中移除，並將殘存之放射性降低至允許程度的作業，此允許程度分為限制性使用與非限制性使用，波音先生補充說明民眾一般都希望除役後場址能非限制性使用，惟美國能源部 (Department of Energy, DOE) 在經費及便利性的考量下，其下轄設施除役後場址多為限制性使用。

除役策略方面，國際原子能總署 (International Atomic Energy Agency, IAEA) 所提供參考之除役策略包含立即拆除 (Immediate Dismantling)、延遲拆除 (Deferred Dismantling) 及固封 (Entombment) 三種，而美國在現階段對於除役策略與 IAEA 一致，惟其英文名稱略有差異，美國分別為立即拆除 (DECON)、延遲拆除 (SAFSTOR) 及固封 (ENTOMB)，美國能源部另提出在址除役 (In Situ Decommissioning, ISD)，其意涵與固封 (ENTOMB) 相似。針對前述三種除役策略之內容詳細說明如下：

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設備、結構與組件移除，使廠址達到外釋或再使用之目的。
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，再進行函含放射性物質的設備、結構與組件移除，使廠址達到外釋或再使用之目的。
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；廠址內之其餘設施依除役作業進行。

在美國影響除役策略的因素有「政府政策與法規」、「可用的放射性廢棄物管理系統」、「可支用的財務」、「設施或廠址未來的再利用」、「設施型式及殘留劑量」、「社會與經濟的衝擊」、「利害關係者的參與(Stakeholder Engagement)」等，波因先生表示其中「政府政策與法規」為影響除役策略最主要的因素，政府政策與相關法規的限制，將使經營者多方面考量將選定之除役策略。

波音先生說明在美國，除役作業為經營者在持照條件下、運轉期間結束後的其中一項活動，待除役作業完成後，並經核管會同意後，核設施執照才會失效，經營者才免除其責任。而我國目前法規規範所提核設施執照為設施之運轉執照，運轉期限到期後運轉執照即失效，雖法規上對部分除役作業中之要求有加以規範，但仍不完整，因此建議應於適當時機修法，可參考美國之管制方式或補足缺漏的部分。目前補強的方式乃以要求經營者於除役計畫書中敘明應遵循之事項，待除役計畫審查通過後經營者依法應依除役計畫執行除役作業之方式進行管制。

接著波音先生介紹美國除役相關的法規體系。美國核設施除役作業的管制機關除核管會外，亦有能源部、環保署等單位，由圖 5 的管制範疇示意圖可瞭解美國核能設施除役的管制概況。

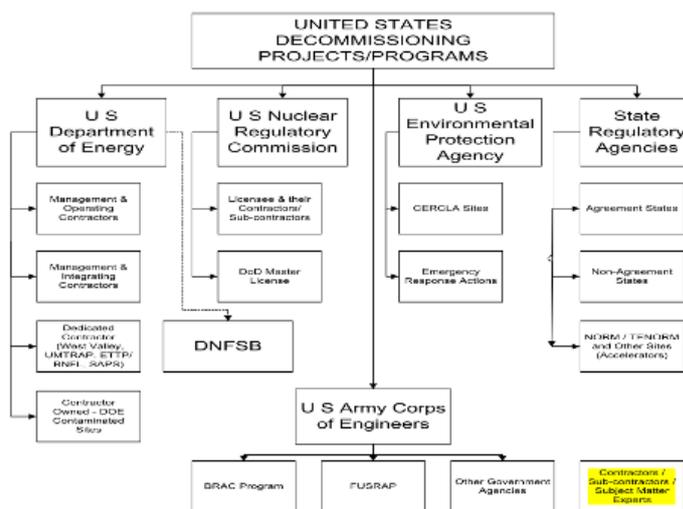


圖 5 美國核設施除役作業管制單位範疇示意圖

其中，美國各州的管制單位部份，美國核管會有跟總共 53 個州(區域)中的 37 個州(區域)簽署協議，使該州(區域)成為協議州(Agreement State)，協議州得在聯邦法規體系下自行管制天然放射性物質(Naturally Occurring Radioactive Materials, NORM)與能產生放射性的儀器設備，而在除役作業上，得制定比聯邦法規更嚴格的場址外釋標準，例如紐澤西州(New Jersey)要求廠址外釋標準為 0.19 mSv/hr，紐約州(New York) 要求廠址外釋標準為 0.1 mSv/hr。

波音先生也介紹美國核管會管制的除役設施與能源部下轄的除役設施目前除役現況，其中截至 2016 年 3 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 6。

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 6 全美各類核設施在核管會管制的除役計畫數量清單。

(二) 除役作業之環境、安全及衛生防護計畫

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

本課程的講師是來自 Ameriphsics 公司的漢森先生(Tom Hansen)，漢森先生在該公司擔任專案管理師(Project Management Professional)，具有輻射防護方面的碩士學位。



圖 7 來自 Ameriphsic 公司的漢森先生(Tom Hansen)。

漢森先生表示一般考量核能電廠安全時，首先皆想到輻射防護安全，然由許多核電廠除役作業的經驗顯示，工業安全方面的事項也非常重要，而整個環境、安全及衛生防護(ES&H)可分為輻射安全防護、非輻射相關安全防護及其他安全議題(圖 8)，其中輻射安全防護包含放射性排放控制、工作人員輻射防護及放射性廢棄物管理等，非輻射相關安全防護包含工業安全與衛生、非放射性排放及一般廢棄物管理等，而其他安全議題包含緊急計畫及醫療救護等。

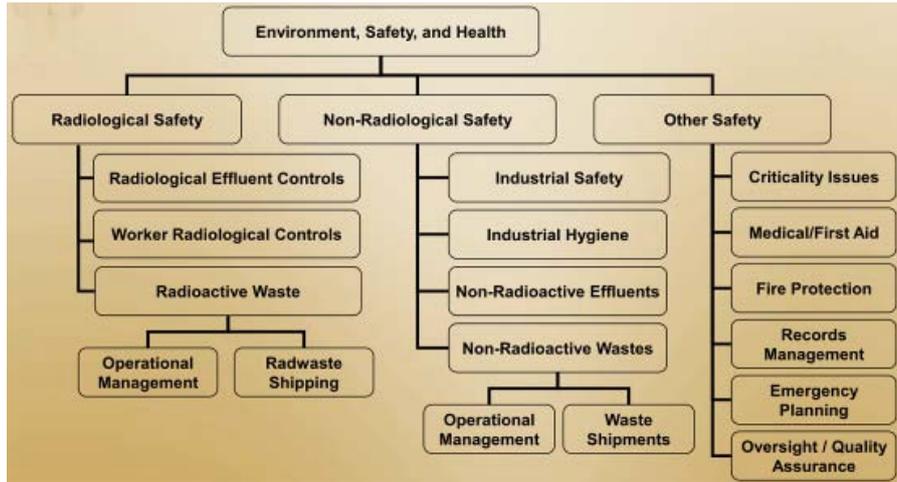


圖 7 除役作業中環境、人員安全及衛生防護範疇示意圖。

漢森先生並表示除役作業之現場工作前皆應先進行作業危害分析 (Job Hazard Analysis)，該分析應注重工作者與工作內容、使用的工具、工作環境之間的關係，以分析輻射安全、非輻射安全及其他安全議題；分析結果並應確實落實，落實的方式以工程層面管控(Engineering Controls)最佳，再來為行政層面管控(Administrative Controls)及個人防護裝備(Personal Protective Equipment)。其中漢森先生針對管理上的控制特別提出夥伴系統 (Buddy System) 的觀念，該措施主要精神為一人執行工作，另一人進行監看，由監看人員注意作業內容或環境是否可能有危害發生。漢森先生的說明內容使職聯想到目前國內核能電廠的作業，由職於核能電廠執行檢查作業過程中，發現漢森先生所提之工作前作業危害分析及夥伴系統，已包含於國內核電廠工作前執行之工具箱會議查對表中，而作業過程中皆有監工人員，此管理方式與夥伴系統類似。

漢森先生並一一說明在設施除役過程中可能出現的危害類型，包含游離輻射與非游離輻射、生化危害、侷限空間、化學危害、爆炸、用電安全、不符人體工學之作業、塌陷、墜落及火災等，並提出相關案例供學員特別注意，職對其中數項案例印象深刻，說明如下：

1. 設計用以預防氣體回流之 U 型管，有可能在進行除污作業後，U 型管

位置殘留之液體被置換為有害物質(例如化學品)，而造成區域環境的空氣污染。

2. 設計有接地線之設備，作業人員可能因為作業區域之電源插座為不具接地設計（兩孔之電源插座），而將設備電源插頭上之接地設計拔除，可能因此使作業人員有觸電危害。
3. 大型管件或水道內部末端可加黃線標示，提醒人員於其中作業時已接近末端位置，避免人員墜落。
4. 移動式吊車作業時支撐腳應確實著地，避免吊運過程吊車翹起。

漢森先生在課程最後提出幾項環境、安全及衛生防護的幾個重要元素，摘要如下：

1. 管理作為的實際介入 (Management buy-in)：漢森先生明確說明管理者對 ES&H 的要求，不應只是口頭說說而已，而應有實際的管理作為。
2. 保安 (Security) 及工作許可 (Work permits)：避免無關人員進入不熟習環境。
3. 訓練與認證 (Training and Qualification)：確保作業人員具有相當之操作能力與了解所處環境。
4. 適當的防護設備
5. 經驗回饋與持續改進 (Feedback and continuous improvement)

本訓練課程講師在講授中會引用一些諷刺的短片或事故的照片來詮釋課程內容，使學員了解安全相關的重要性。而除役作業中最重要的是作業人員的安全，因此須列為為最優先考量，而管制機關亦應熟稔設施除役作業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。

(三) 除役廢棄物管理(Waste Management in Decommissioning)

本課程的講師是來自 ReNuke 公司的克希先生 (Mark Kirshe)，克希先生是該公司的副董事長兼行銷長。克希先生於課程中說明其曾造訪台灣，並了解我國核二廠減容中心的焚化爐及超高壓壓縮機。

克希先生首先介紹除役期間廢棄物管理相關的重要議題有下列幾項：

1. 費用(Costs)：包含廢棄物的處置、運送、盛裝容器、廢棄物特性、搬卸裝運及二次廢棄物等議題。
2. 計畫排程(Schedule)：除役工期排序、階段性正進行之工作、合理抑低劑量(ALARA)、資金流通、物料流通等議題。
3. 法規要求(Regulatory)：須符合除役後最終外釋標準，避免違背承諾事項等。
4. 安全(Safety)：人因工學所有安全事項、放射性污染等。

克希先生說明由過往經驗，廢棄物管理成本占整體除役與拆除作業預算的30%至45%，佔比相當高，因此廢棄物管理作業應審慎執行。其中，有關費用的部分，講師於課程間及課後討論時，多次談論到在美國，設施經營者對於廢棄物之管理，往往會將廢棄物處置費用列入考量，以決定其所產生之廢棄物是否進一步進行處理、除污或減容等程序，最終選擇一般是以最經濟的方式執行。

而在除役作業中廢棄物管理也受限於許多因素，例如「最終處置場的接收標準」、「盛裝容器的規格、限制與容量」、「廢棄物的運送方式」、「輻射劑量合理抑低的考量」、「相關管制及法規符合性」、「風險管理」等。

美國對於放射性廢棄物的分類，低放射性廢棄物主要依據美國聯邦法規10CFR61之規定分為A類、B類、C類及超C類，我國之分類方式與美國相同。而美國除了對放射性廢棄物進行管制外，對於非放射性廢棄物亦有相關法規加以管制，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。當然我國核能電廠執行除役作業時，非放射性廢棄物的管理也應遵循相關的環保法規進行管理。

講者說明對於放射性廢棄物管理，建立廢棄物資料檔案是相當重要的，該廢棄物的資料內容應包含廢棄物的物理、化學特性、輻射特性、來源、認證的試驗室取樣分析結果。

對於放射性廢棄物處理，講者說明常常會採行最小化的程序，而最小化程序包含焚化、壓縮、破碎、金屬熔融、較長期的貯存待衰變及回收再使用等，其中焚化的減容比可達 100:1，而壓縮也可達 2:1 到 12:1。

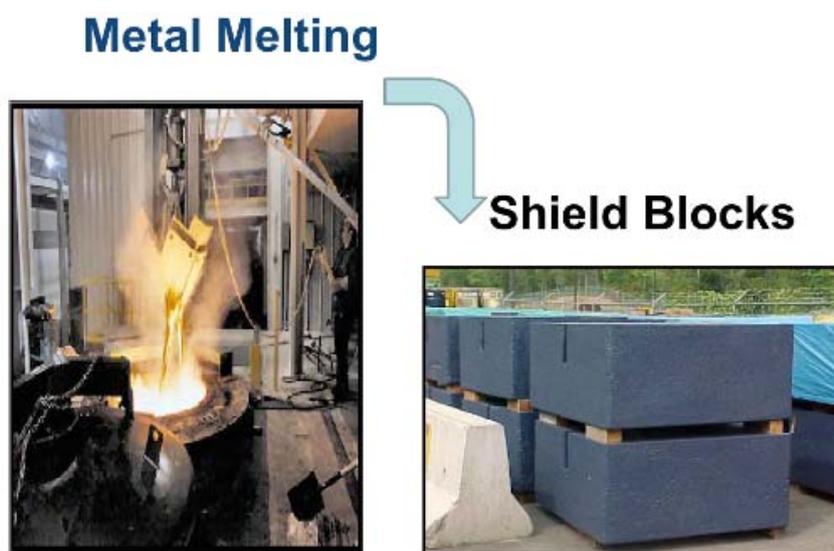


圖 8 低放射性廢金屬鎔鑄減容製成金屬鑄錠作為屏蔽再利用。

除役作業產生的廢棄物運送也是一項重要議題，講者除舉例說明不同運送方式所需的費用外，在美國放射性廢棄物的運送須遵守聯邦法規 49CFR172 Subpart I 之運輸保安法，對於運送計畫以及載具的規範要求，而我國也有相對應的管制規範。

本課程中，講者提出有關廢棄物管理的一項口號：「OHIO!」，該口號內容為「一步到位的處理」(Only Handle It Once)，講者認為廢棄物的管理，無論是廢棄物收集、處理、建立資料等，最好為一次就處理好，例如廢棄物收集時，

就把分類作業做好，應避免全部集中後再來分類，使作業人員重複接受輻射劑量；又例如在建立廢棄物的資料檔案時，對於廢棄物的資訊(輻射劑量率、核種活度、廢棄物特性)亦應一次完整調查，避免後來發現資訊不足或資料有疑慮時，資料更新的困擾及重複調查所造成的作業人員輻射劑量。

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

本課程講師為先前講授環境、安全及衛生防護的漢森先生(Tom Hansen)。漢森先生首先說明設施場址特性調查的重要性，廠址特性調查作業為除役作業中的重點工作項目，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。而廠址特性調查的目的不是去了解場址的每一件事情，而是得到必要的資訊，當未來在執行決策時可以決定選擇適當的途徑。前述未來的決策項目舉例如下：放射性污染程度是否超過外釋標準？甚麼樣的輻射防護方式對工作人員較恰當？什麼清潔技術較有效？將產生多少放射性廢棄物？等議題。廠址特性調查被視為除役的起始步驟，用來界定工作範圍、準備廠址除設計畫、選擇除役技術、發展廢棄物處置策略、細化成本估算與時程及收集管制機關或利害關係人關切資料等。

前述廠址特性調查，在美國多部會輻射偵檢與場址調查手冊(Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual, MARSSIM)中有完整之調查流程，稱為輻射偵檢與廠址調查(Radiation Survey and Site Investigation, RSSI)。其流程首先進行廠址確認(Site Identification)，後續步驟分別為廠址歷史評估(Historical Site Assessment, HSA)、輻射範圍界定偵檢(Scoping Survey)、輻射特性偵檢(Characterization Survey)，若有需要執行整治或除污作業，作業後執行改善措施輔助輻射偵檢 (Remedial Action Support Survey)，最後進行最終狀態輻射偵檢(Final Status Survey, FSS)。其中部份

流程的目的簡單說明如下：

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

- (1) 區別受影響與未受影響的區域。
- (2) 確認污染的潛在來源。
- (3) 判斷廠址是否對人類的健康或環境有威脅。
- (4) 提供輻射範圍偵檢(Scoping Survey)與輻射特性偵檢(Characterization Survey)的參考數據。
- (5) 提供污染遷移可能性的評估。
- (6) 確認廠址內的額外潛在放射性區域。

2. 輻射範圍界定偵檢(Scoping Survey)：

輻射範圍界定偵檢將初步確認在 HSA 期間對區域畫為受影響區域之受污染程度與範圍。其主要目的如下：

- (1) 進行初步的危害評估 (Hazard Assessment)。
- (2) 收集數據以將全部或部分區域畫分為受影響區域之第三級(Class 3)。
- (3) 如果需要的話提供作為輻射特性偵檢設計的參考資料。

3. 輻射特性偵檢(Characterization Survey)：

輻射特性偵檢係依 HSA 與範圍輻射偵檢結果來規劃，並針對受影響區做詳細的輻射偵測。輻射特性偵檢的主要目的如下：

- (1) 了解污染的特性與程度。
- (2) 收集數據以進行整治方法與技術之評估。
- (3) 收集最終輻射偵檢設計所需資訊。

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的如下：

- (1) 選擇/證實輻射偵檢單元分類。
- (2) 驗證每一個輻射偵檢單元殘餘污染的潛在劑量或風險低於外釋標準。
- (3) 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。

講者並說明前述每一步驟之執行，為確保其執行的品質，皆應遵照 MARSSIM 中訂定之數據品質目標 (Data Quality Objective, DQO) 來執行，有關數據品質目標之內容細節，可參考 MARSSIM 相關內容。

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，其中包含具有即時定位功能的掃描式儀器，量測完成後即以平面圖搭配不同顏色表示不同污染程度來呈現，對於目標廠址之輻射特性得一目了然。

(五) 除污技術(Decontamination Technologies)

本課程講師為本訓練課程的負責人波音先生 (Lawrence E. Boing)，他首先介紹何謂除污(Decontamination)，他說明除污乃藉由沖洗、加熱、化學藥劑、電化學方式及機械作用等方法，來移除設施或設備區域或表面污染的作業。

在選擇除污方式時，須考量下列幾個因子：

1. 安全性：選用的除污技術不會造成污染擴散或產生新的危害性物質。
2. 效率性：選用最低的操作成本、已有應用實例、僅需短時間之作業且工作人員輻射曝露最少的技術。
3. 成本效能性：除污所需費用與廢棄物後續處理、運送、處置費用總合考量下之所需成本。
4. 廢棄物管理：選擇產生最少之一次及二次廢棄物的技術。
5. 應用之可行性：避免密集性勞力的技術或在處理過程中使用大量不常用物質，另波音先生亦說明很多除污技術需在高濕度、高溫或低溫環

境下進行，這也是選擇除污方式時須考量的因素之一。

波音先生並提示應避免把運轉期間除污作業與除役期間的除污作業混為一談，因為除役期間除污作業對設備的傷害較不重要，因此運轉期間與除役期間對除污方式的考量將有明顯的不同，應避免以運轉期間選擇除污方式的考量，沿用至除役期間選用除污方式的考量，才得以選得除役期間最佳之除污方式。

在此有學員提問在美國如何決定除污到什麼程度才算完成，波音先生說明在美國決定將系統或設備除污到何種程度很大的一項因子為費用上的考量，即進一步除污的費用與若直接進處置場所需額外增加的費用間何者較大，往往即決定系統或設備的除污程度。

接續波音先生說明各種形式的除污作業，包含各種化學除污、電化學除污、機械除污、金屬熔融及新興的除污方式，並針對各項除污方式的特性與限制進行介紹，例如波音先生說明電化學除污適用於材質為碳鋼、不鏽鋼及鋁之設備的除污，而大部分都用在桶槽浸泡形式的小組件除污作業上，且材料表面覆有油脂、鐵鏽、潤滑油脂及油漆者，採行電化學除污方式之效果並不好；研磨爆破(Abrasive Blasting)即一般所謂噴沙除污，若使用在含有油脂及潤滑油脂的表面上，將會有問題發生。

此外，波音先生並介紹由美國愛達荷(Idaho)國家實驗室所研發之泡沫除污，泡沫除污分兩階段，首先於污染表面噴上除污泡沫，表層污染物被泡沫包覆後，將泡沫以吸塵器移除完成表面除污；第二階段再於表面覆上含有鹽類的黏土，由黏土內鹽類與較深層之核種進行離子交換，之後再將黏土移除，即完成除污作業，由講者所提供之影片，說明泡沫除污加上黏土附著於污染表面 6 周，其除污效率可達 95%。

波音先生並介紹可剝塗層(Strippable Coatings)除污法，此法乃將塗層材

料塗抹於污染表面上，該塗層材料會漸漸乾燥、凝固，並包覆或鏈結鬆散的污染物，待一段時間後，再將塗層連同污染物質一起由污染表面剝除；此外，可剝塗層也可用來固定表面的污染物質，以避免空間內空浮濃度上升，或將欲拆解結構表面上之污染物暫時固定，以避免結構物在拆解或搬運時可能的污染擴散。可剝塗層已有商業化商品，例如 ALARA 1146、TechSol 8001、DeconGel 及 Stripcoat TLC Free 等。

課程最後，波音先生並列舉一些除污作業相關的文件，使對除污技術、應用有興趣的學員可以進一步參考，列舉的文件包括：

1. IAEA TRS #395 及 TRS #401
2. US DOE, Decommissioning Handbook, DOE/EM-0142P(1994)
3. EC, Decommissioning of Nuclear Installations, EUR-16211(1995)
4. Survey of Decotamination Processes Applicable to DOE Nuclear Facilities, ANL-97/19, 1997
5. Technology Reference Guide for Radioactivity Contaminated Surface, EPA, April 2006, EPA-402-R-06-003
6. ASME Decommissioning Handbook-Decontamination Chapter

(六) 拆解技術(Dismantling Technologies)

本課程講師亦為本訓練課程的負責人波音先生 (Lawrence E. Boing)，在本單元中，講師首先對拆解(Dismantling)進行定義，拆解為設施除役過程中拆除清潔或放射性設備或組件結構，所使用的熱力、機械或電氣等拆解方法。接著波音先生說明選擇適當拆解方法所需考量的因素，包括：

1. 材料特性：
 - (1) 切割材料的型式、厚度及幾何形狀

- (2) 如果是混凝土是否為特殊強化混凝土(Reinforcement)
- 2. 環境、安全及健康因素：
 - (1) 設施的型式
 - (2) 切割為空氣中或水中進行
 - (3) 是否有放射性污染?活化程度與空間劑量率大小
- 3. 廢棄物管理
 - (1) 切割後廢棄物產量
 - (2) 處置設施之接收標準等
- 4. 專案管理
 - (1) 拆除期程
 - (2) 費用

波音先生並提出比利時 BR-3 電廠所使用各種拆解技術的切割速度與切割作業所造成的空浮程度舉例(圖 9)，說明選擇拆解技術前，可多參考過往已採行者的經驗，選擇最適於自身設施的技術。授課過程中，波音先生並說明其認為模擬測試(Mock-up testing)非常重要(圖 10)，如此能更進一步確保實際作業時的安全與效率。

接著波音先生介紹各種切割方法，包含機械切割、熱切割、雷射切割、爆破拆解等，波音先生並於課程中展示一般用於水泥切割的鑽石索鋸(Diamond Wire Cutting)，其切割繩索樣貌(圖 11)，使參訓人員增加臨場感。除了前述的技術，波音先生並介紹現在較先進的技術，包含使用機器人或機械手臂等，惟講者提醒參訓人員，新的技術不一定是最好的，使用前應確認該技術是否有實際經驗，以確保拆解作業安全。

波音先生在說明過程中不時說明在切割過程中難免會動用到火源或產生火花，所以工作環境的意外防護應特別注意，例如防火毯、滅火器、緊急待命人

員等均應整備齊全，以確保作業安全。職認為這點是最基本也是最重要的，日後我國核電廠除役時在拆解組件工程時，不僅業者施工單位應整備齊全並提高警覺外，原能會的視察員也應將此項目要列為檢查重點之一。

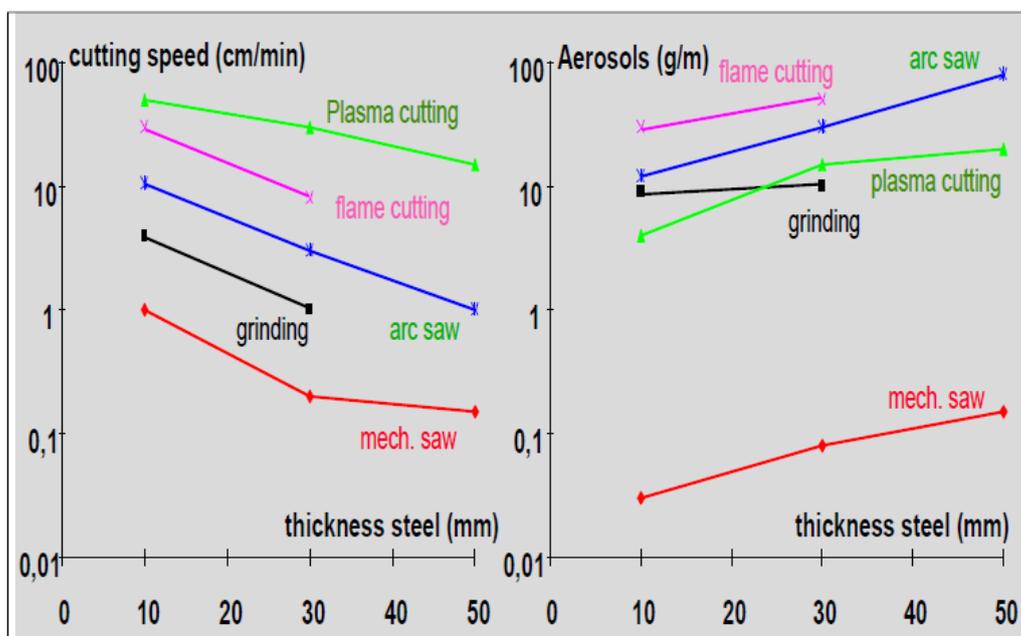


圖 9 比利時 BR-3 電廠各種拆解技術的切割速度與切割作業所造成的空浮程度

Training & Mock-Up Testing



圖 10 將以機械手臂進行切割前的模擬測試。



圖 11 課程中展示的鑽石索鋸(Diamond Wire Cutting)繩索

(七) 最終狀態偵測/執照終止(Final Status Surveys/License Termination)

本課程講師為先前講授環境、安全及衛生防護計畫的漢森先生(Tom Hansen)。有關最終狀態偵測，漢森先生說明在美國，執行最終狀態偵測皆參考多部會輻射偵檢與廠址調查指引(Multiagency Radiation Survey and Site Investigation Manual, MARSSIM)，它是一套用以證明場址符合輻射劑量或風險的法規標準的標準程序，不過土壤部分的應用範圍僅限表層土壤(表面以下 15 公分內)，對於表層土壤以下及地下水的調查不適用。接著漢森先生提到設施除役後場址的外釋標準，此外釋標準皆以法規加以明定，然此外釋標準皆以每年所受輻射劑量為限值，與最終狀態偵測所得土壤中核種活度濃度值無法直接比較，此時可藉由劑量評估程式，藉由輸入土壤中核種活度值，並考量可能造成的體外或體內輻射暴露途徑後，即可得場址外釋後人員所受之整體輻射劑量，藉此與法規限值進行比較，或是藉由法規限值回算土壤內核種活度限值，直接與土壤中核種濃度進行比較，確認是否符合法規要求。漢森先生說明其中劑量評估程式有美國阿岡(Argonne)實驗室開發的 RESRAD、美國桑迪亞(Sandia)

國家實驗室開發的 DandD 及其他 Cap88-PC 及 GENIIS 等程式。漢森先生並說明對於廠址最終狀態偵測，MARSSIM 從規劃、分類、偵檢儀器要求、取樣規劃及取樣數量等，皆有完整導引做法，MARSSIM 對於量測結果是否符合法規要求，亦有一套方法供使用者參用。當然，除役後廠址是否符合相關外釋標準，是由主管機關來進行認定，此認定作業可能由主管機關或主管機關所授權的單位來執行，此認定作業包含再量測驗證、文件及數據的檢視、現場檢視業者偵測或檢測程序、樣品平行分析等。

(八) 美國內華達州國家安全場址(National Nevada Security Site)參訪

訓練課程最後一天(11 月 16 日)，主辦單位帶學員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。該廠址前身為內華達測試場(Nevada Test Site, NTS)，即為美國早期核試爆的地方，此外並有多個核廢料處置場。該場址位處沙漠地帶，所占面積約 1360 平方英里(圖 12)，並被外圍約 4500 平方英里的政府管理土地所包圍；目前仍有約 4000 人在內工作。

因受限於參訪時間及當地幅員遼闊，僅規劃安排參訪四個設施，分別為引擎維護組裝及拆除設施(Engine Maintenance, Assembly, and Disassembly (E-MAD) Facility，圖 13(截自室內課程資料))、第五區放射性廢棄物管理場址(Area 5 Radioactive Waste Management Site，圖 14(截自室內課程資料))、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 15。

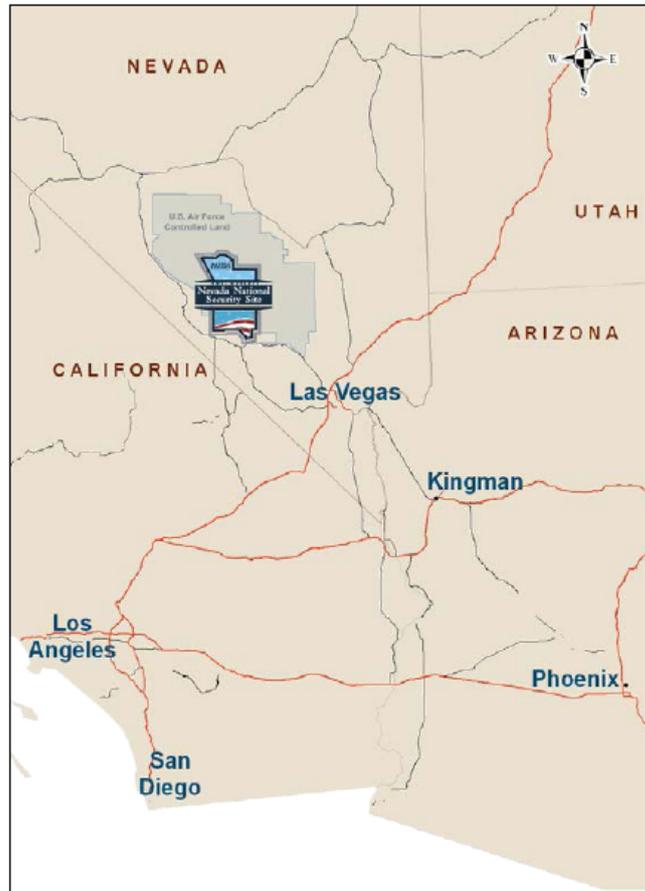


圖 12 內華達州國家安全場址位置圖。

EMAD Facility* at NNSS (old NTS) - 1

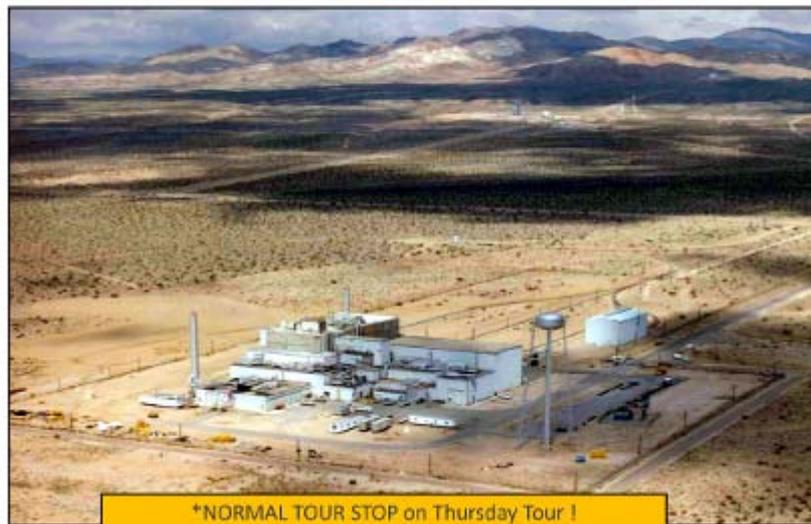


圖 13 引擎維護組裝及拆除設施(E-MAD)。



圖 14 內華達州國家安全場址內之放射性廢棄物處置場。

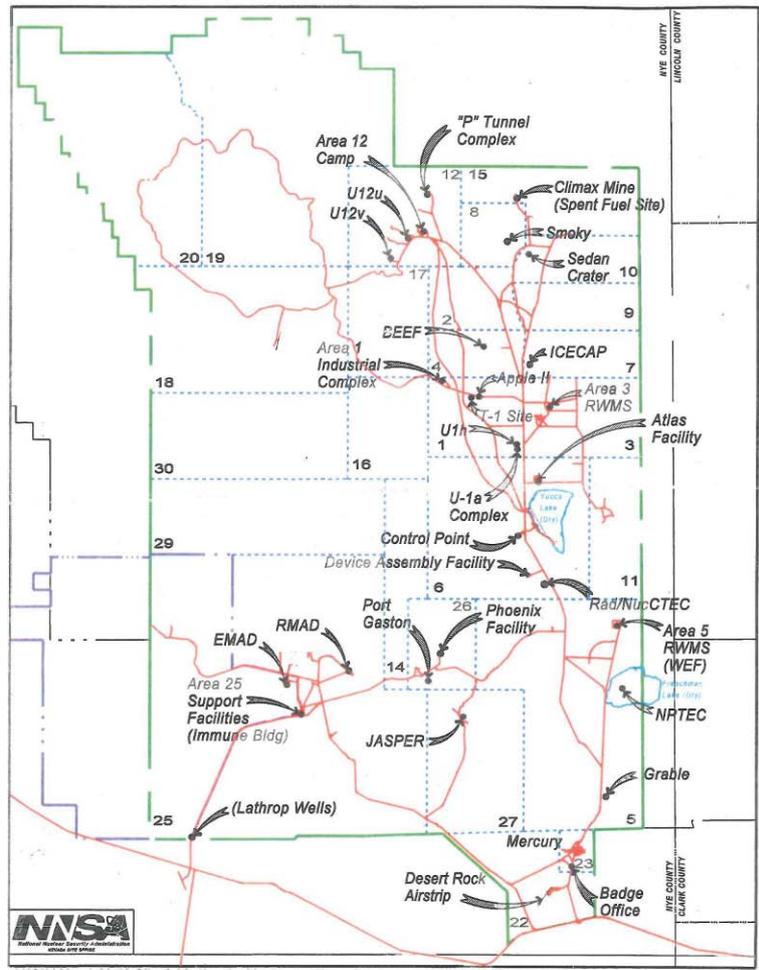


圖 15 內華達州國家安全場址內的各設施位置地圖。

由於 NNS 內因保安因素要求參訪人員不得攜帶相機及行動電話，所以無法拍攝場址內的相關設施，前述圖片均為室內課堂說明之資料擷取。惟參訪過程主辦單位協助拍攝參訪學員合照(圖 16、17)。



圖 16 參訪學員於引擎維護組裝及拆除設施(E-MAD)前合影。

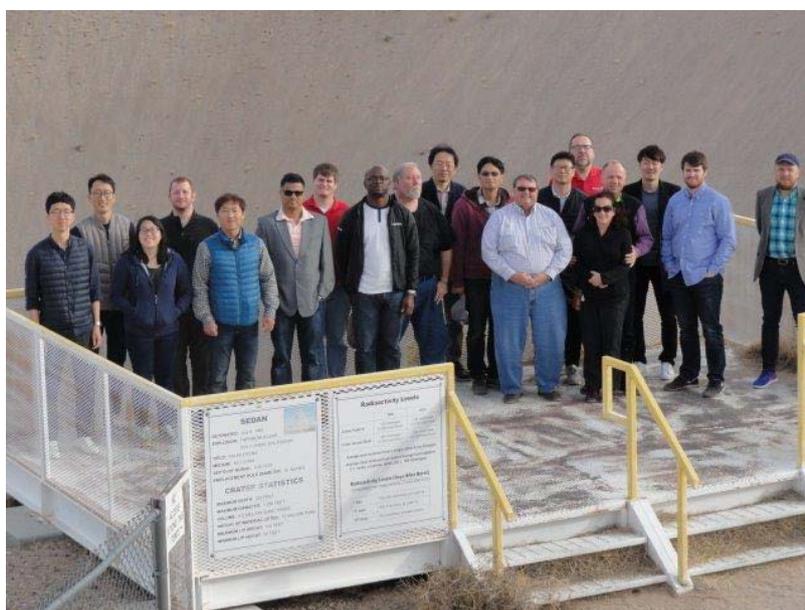


圖 17 參訪學員於地底核試爆坑(Sedan Crater)遺址前合影。

四、心得

本次奉派參加美國能源部主辦之核設施除役訓練課程，並參訪美國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) 本次課程內容相當豐富，且主辦單位除提供課程的完整簡報資料外，並針對每一課程之補充資料分類提供給學員進一步參閱，職受益良多；此外，亦已將相關資料提供給其他同仁參考。
- (二) 廠址特性調查作業相當重要，能掌握設施各區域完整的輻射特性，對於後續除污作業、拆除作業及放射性廢棄物管理才能正確評估並增進其安全性，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。
- (三) 一般考量核能電廠安全時，首先皆想到輻射防護安全，然由核電廠除役作業期間，將會陸續執行除污作業、拆除作業、吊運作業等，因此環境、安全及衛生防護方面的事項也非常重要，訓練課程中所提作業前進行危害分析，並落實危害分析結果、夥伴系統及經驗回饋等作為，將對設施除役期間之作業安全將有所助益，應加強落實。
- (四) 有關放射性廢棄物管理，職認為課程中講者提出「OHIO!」的口號、即一步到位的處理(Only Handle It Once)非常重要，即無論是放射性廢棄物的收集、建立資料、處理等，最好為一次就處理好，避免使作業人員重複接受輻射劑量。

五、建議

就參與本次研習訓練的心得提出建議事項如下：

- (一) 本項由美國能源部阿岡國家實驗室所辦理的核設施除役訓練課程內容完

整且豐富，且受訓過程中，多次與各國參訓人員交流各自國內原子能領域的現況，結訓後並留有所有參訓人員聯絡資訊，未來仍可溝通、交流。總結本次參訓受益良多，建議未來可持續派員參與該訓練課程或類似訓練課程，以提升我國核設施除役管制能量。

- (二) 核能電廠除役過程中，除考量輻射安全外，環境、安全及衛生防護方面亦應相當重視，預防措施除訓練課程中提及的事前危害分析、夥伴系統及經驗回饋外，其實目前核能電廠內已有其他預防機制，建議核能電廠除役期間應要求除役作業單位落實自主三級品保，確保環境、安全及衛生防護之預防機制皆已落實。
- (三) 有關核能電廠除役過程中之環境、安全及衛生防護作業，除前述制度性之預防措施外，本次訓練課程中亦提出許多事前想不到卻發生的情形，因此建議除役作業單位應多邀請有除役經驗的專家進行演講，以吸取國外環境、安全及衛生防護方面意外事故的經驗，避免相同事件再發生。
- (四) 本訓練課程中，講者提出有關廢棄物管理應一步到位的口號：「OHIO!」(Only Handle It Once)，即廢棄物的管理，無論是收集、建立資料、處理等，應一次就處理好，例如廢棄物收集時，就把分類作業做好，應避免全部集中後再來分類。此觀念除適用於除役期間，亦適用於運轉中核能電廠，建議應要求台電公司持續加強落實。
- (五) 除我國核電廠將陸續進行除役作業外，國外亦有許多核電廠將進行除役作業，有需求的情形下，預期許多新開發的輻射偵檢技術、除污技術及拆解技術等將陸續被推廣，建議除役作業單位在採用時應確認該新技術是否已有實用案例，以避免新型設備上線後才發現不可行，造成設施內更難處理的殘局。

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

ANL Decommissioning Training Course			FINAL	
DD106 Class				
November 13-16, 2017				
The Tuscan Suites & Casino				
Las Vegas, NV, USA				
Date	Time Slot	Activity	Speaker	#
M, 11-13-17	8:00 - 8:15 AM	Registration / Sign-in	Larry Boing, ANL	
M, 11-13-17	8:15 - 8:30 AM	Opening Remarks	Larry Boing, ANL	
M, 11-13-17	8:30 - 8:45 AM	Attendee Introductions	Participants	
M, 11-13-17	8:45 - 10:15 AM	Introduction to Decommissioning	Larry Boing, ANL	1
M, 11-13-17	10:15 - 11:15 AM	Environment Safety & Health in Decommissioning	Tom Hansen, AmeriPhysics	2
M, 11-13-17	11:15 AM - 12:15 PM	LUNCH (on your own)		
M, 11-13-17	12:15 - 1:30 PM	Waste Management in Decommissioning	Mark Kirshe, ReNuke	3
M, 11-13-17	1:30 - 1:45 PM	GROUP PHOTO	Exact Location & Timing TBD	
M, 11-13-17	1:45 - 2:30 PM	CS-TED	TED	4
M, 11-13-17	2:30 - 2:45 PM	BREAK		
M, 11-13-17	2:45 - 3:40 PM	Site / Facility Characterization	Tom Hansen, AmeriPhysics	5
M, 11-13-17	3:40 - 4:50 PM	Planning and Management	Joe Carignan, Carignan & Assoc	6
M, 11-13-17	4:50 - 5:00 PM	Q&A / Discussions / Videos	ALL	
Tu, 11-14-17	8:25 - 8:30 AM	Opening Remarks	Larry Boing, ANL	
Tu, 11-14-17	8:30 - 9:30 AM	Decontamination Technologies	Larry Boing, ANL	7
Tu, 11-14-17	9:30 - 10:45 AM	Cost Estimates for Decommissioning	Joe Carignan, Carignan & Assoc	8
Tu, 11-14-17	10:45 - 11:00 AM	BREAK		
Tu, 11-14-17	11:00 - 11:55 AM	CS-Foundry Decommissioning Project	Tom Hansen, AmeriPhysics	9
Tu, 11-14-17	11:55 AM - 1:00 PM	LUNCH (on your own)		
Tu, 11-14-17	1:00 - 2:00 PM	CS - DOE/NNSS Radioactive Waste Management Program	Scott Kranker, NSTec	10
Tu, 11-14-17	2:00 - 3:00 PM	Computer Based Tools in Decommissioning	Dustin Miller, Chase Env	11
Tu, 11-14-17	3:00 - 3:15 PM	BREAK		
Tu, 11-14-17	3:15 - 4:00 PM	CS - Risk Management in Decommissioning	Joe Carignan, Carignan & Assoc	12
Tu, 11-14-17	4:00 - 4:30 PM	Q&A / Discussions / Videos	ALL	
W, 11-15-17	8:25 - 8:30 AM	Opening Remarks	Larry Boing, ANL	
W, 11-15-17	8:30 - 9:30 AM	Dismantling Technologies	Larry Boing, ANL	13
W, 11-15-17	9:30 - 10:40 AM	CS - Reactor Vessel Disposition	Mark Kirshe, ReNuke	14
W, 11-15-17	10:40 - 11:00 AM	BREAK		
W, 11-15-17	11:00-11:55 AM	Evolving Technologies	Larry Boing, ANL	15
W, 11-15-17	11:55 AM - 12:45 PM	LUNCH (on your own)		
W, 11-15-17	12:45 - 1:45 PM	CS - Decommissioning of University @ Buffalo R.R.	Dustin Miller, Chase Env	16
W, 11-15-17	1:45 - 2:15 PM	Decommissioning Knowledge Management & Resources	Larry Boing, ANL	17
W, 11-15-17	2:15 - 2:30 PM	BREAK		
W, 11-15-17	2:30 - 3:30 PM	Final Status Surveys/License Termination	Tom Hansen, AmeriPhysics	18
W, 11-15-17	3:30 - 4:30 PM	CS - Decommissioning Activities at the DOE-NNSS	Reed Poders, NSTec	19
W, 11-15-17	4:30 - 4:45 PM	Key Concepts to Take Home	Larry Boing, ANL	20
W, 11-15-17	4:45 - 4:55 PM	Q & A / Discussions	ALL	
W, 11-15-17	4:55 - 5:00 PM	Distribution of Certificates / Closing Remarks / Book Drwg	Larry Boing, ANL	
Th, 3-16-17	7:30 AM - 5:00 PM	TOUR OF NN 33 (the old NEVADA TEST SITE)	An NSTec Representative	21
		Internet Resources for Decommissioning	Larry Boing, ANL	22
		ACRONYMI Listing	Larry Boing, ANL	23
		International Decommissioning	Larry Boing, ANL	24
		Soil Clean-Up	Larry Boing, ANL	25
		Case Study - JANUS Reactor Decommissioning	Larry Boing, ANL	26
		Deactivation Process	Larry Boing, ANL	27
For NTS/INSS Souvenirs				
NTS Historical Foundation's "Atomic Testing Museum"				
755 East Flamingo Road				
Las Vegas, NV 89119-7363				
Phone: 702-794-5151				
http://www.nts-hf.org/				
Note - Limited hours of operation - great visit / souvenirs - visit Sunday or Friday				

