

出國報告(出國類別：實習)

## 赴美國參加 2019 年阿岡實驗室除污 及除役訓練課程

服務機關：行政院原子能委員會

姓名職稱：張經妙技正、吳文雄技士

派赴國家/地區：美國/匹茲堡

出國期間：108 年 8 月 17 日至 108 年 8 月 25 日

報告日期：108 年 11 月 15 日

# 摘要

「除污及除役(Decontamination & Decommissioning, D&D)訓練」由美國阿岡國家實驗室(Argonne National Laboratory, ANL)所策畫開設，本次公差係前往美國匹茲堡，參加於 108 年 8 月 20 日至 108 年 8 月 22 日舉辦的梯次，課程內容包含「除役介紹」、「除役之環境安全及健康」、「廠址/設施特性」、「計畫及管理」、「除役成本估算」、「除役放射性廢棄物管理」、「除污技術」、「除役風險管理介紹」、「除役群體&知識管理資源」、「土壤分離」、「芝加哥鑄造鎂設施除役」、「水牛城大學研究用反應器除役」、「拆除技術」、「發展中的除役技術」、「反應器壓力槽切割」、「電腦軟體於除役之應用」、「克服設施的限制」、「最終狀態調查/執照終止」、「除役之關鍵概念」等項目。

藉由參與本訓練課程，瞭解了美國核設施除役安全管制、除污及除役相關技術發展最新資訊及未來發展趨勢。另在課堂上向講師請教核設施除役現場相關實務，討論工業界執行除役的相關經驗，收穫良多，詳細心得摘要整理於報告中。此外，參與國際相關訓練課程，可提升本會除役管制人員之專業知能，有助於除役管制作業。

# 目次

摘要.....	i
目次.....	ii
壹、目的.....	1
貳、出國行程 .....	2
參、行程內容 .....	3
肆、心得與建議 .....	20
附件一、課程表 .....	21

# 壹、目的

「除污及除役(Decontamination & Decommissioning, D&D)訓練」係由美國阿岡國家實驗室(Argonne National Laboratory, ANL)所策畫開設的訓練課程，每年約有 6~7 個梯次，分別在美國、加拿大、韓國等國家舉辦。本次奉派前往美國匹茲堡參加於 108 年 8 月 20 日至 108 年 8 月 22 日舉辦的訓練課程。除了來自於 ANL 的 Lawrence E. Boing 先生擔任主講師並統籌本次訓練課程以外，另聘請 6 位來自於除役工業界的專家擔任講師，分享實務經驗。

3 天的課程內容包含「除役介紹」、「除役之環境安全及健康」、「廠址/設施特性」、「計畫及管理」、「除役成本估算」、「除役放射性廢棄物管理」、「除污技術」、「除役風險管理介紹」、「除役群體&知識管理資源」、「土壤分離」、「芝加哥鑄造鎂設施除役」、「水牛城大學研究用反應器除役」、「拆除技術」、「發展中的除役技術」、「反應器壓力槽切割」、「電腦軟體於除役之應用」、「克服設施的限制」、「最終狀態調查/執照終止」、「除役之關鍵概念」等項目，詳細課程規劃如附件一。

參加 D&D 訓練之目的在於從美國核設施除役工業界的實務經驗中學習、掌握國際間除污及除役相關技術之發展，以提升本會核能電廠除役管制人員之專業知能。另可蒐集其它國家核能電廠除役相關的最新資訊，作為管制之參考，對國內核能電廠除役安全之管制有所助益。

## 貳、出國行程

本次出國行程自 108 年 8 月 17 日起至 108 年 8 月 25 日止，共計 9 日，詳如下表。

日期	行程與工作內容
8 月 17~18 日	去程(台北前往匹茲堡)
8 月 19 日	個人休假
8 月 20~22 日	參加美國 Argonne 實驗室舉辦之除污及除役訓練課程
8 月 23~25 日	回程(匹茲堡返回台北)

## 參、行程內容

本次參加美國 Argonne 實驗室舉辦之除污及除役訓練課程共 3 天，各訓練課程內容摘述如下：

一、8 月 20 日的課程議題包括「除役介紹」、「除役之環境安全及健康」、「廠址/設施特性」、「計畫及管理」、「除役成本估算」、「除役放射性廢棄物管理」等，摘要如下：

### 1. 除役介紹(Introduction to Decommissioning)

本課程主要介紹美國除役相關管制單位及要求，例如：聯邦管制單位有美國核管會(Nuclear Regulatory Commission, NRC)、能源部(Department of Energy, DOE)、環境保護署(Environmental Protection Agency, EPA)、交通部(Department of Transportation, DOT)、職業安全衛生署(Occupational Safety & Health Administration, OSHA)，前述單位分別依其業管，進行除役相關管制及檢查。州政府亦會對放射性污染、水汙染、廢氣排放、固體廢棄物許可、拆除許可、運輸議題、其他有害廢棄物、廠址外釋標準(大多以小於 0.25 毫西弗/年為標準)等事項進行管制。NRC 及 DOE 較常進行現場視察，例如：NRC 以程序書編號 IMC-2561 進行除役作業視察，而 DOE 則另由企業評估辦公室建置專案計畫進行視察，管制單位重視的項目包括除役工程對大眾安全健康的影響、組織與管理、工業安全、廢棄物管理、廠址最終狀態調查結果與輻射劑量計算模型、設施安全、自我評估、人員減少率、利害關係人的參與等。

DOE 對核能管制法規要求主要有 10 CFR Part 835(輻射防護)、10CFR Part 85(人員健康與安全)、10 CFR Parts 820 and 830(核能安全)、品質保證(DOE Order 414.1C)、放射性廢棄物管理(DOE Order 435.1)、工程管理(DOE Order 413.3B)等。此外，DOE 亦訂定資產管理法(Real Property Asset Management Order, RPAM 430.1B)，要求業者提報取得資產、運作、維護、貸款、處置等資料或計畫，並提出運輸、停用、除役、設施測試與維護等方面的除役技術導則。

NRC 將核能管制法規分成聯邦法規(Code of Federal Regulations)、管制指引(Regulatory Guides)、審查標準計畫(Standard Review Plans)、技術說明文件(Branch Technical Position Papers)、核能安全報告或資訊(NUREG)等。其中與除役相關的聯邦法規有 10 CFR Parts 30、40、50、及 70；除役相關 RG 則有 RG 1.179 核電廠執照終止計畫的標準格式型內容(Standard Format and Content of License Termination Plans for Nuclear Power Reactors)、RG 1.184 核電廠除役(Decommissioning of Nuclear Power Reactors)、RG 1.185 停機後除役作業活動報告的標準格式型內容(Standard Format and Content for Post-Shutdown Decommissioning Activities Report)、RG 4.22 除役計畫(Decommissioning Planning)等；除役相關 NUREG 包含 NUREG-1757(共 3 冊)、NUREG-1575(MARSSIM)及 NUREG-1576(MARLAP)等，另 NRC 與 EPA 曾簽訂廠址清理接受標準之備忘錄。

目前美國有 10 座核電廠在 NRC 管轄下已完成除役作業及執照終止，在廠址除役完成後，有可能部份區域仍須持續監管及限制使用，外釋區則有許多種再利用方式，例如：重新改建成建物、作為野生動植物保護區、博物館等。

機組永久停止運轉後，須經過轉換及準備期才能進行除役作業。轉換期屬於機組運轉的延伸期，這階段主要須移出用過燃料及放射性廢棄物，並且進行系統管路洩水及輻射特性調查等。準備期依照需求進行廠房或系統設計變更、建立除役所需新系統、組織人員轉換、準備除役工作程序書、採買設備、與承包商簽約等。除役策略若為(1)直接拆除，則轉換及準備期過後即可進行除污及拆除作業；若除役策略為(2)封存一段時間後再拆除，則轉換期過後，先進入測試及維護之準備期，僅針對需維持功能之系統設備進行維護，並安裝相關監測儀器，監測其劣化情形，其他不需要的系統設備可先拆除，待封存期限結束之後才開始除污及拆除作業。前述兩者策略於除污及拆除作業完成後，才開始進行廠址最終狀態調查，並準備結果報告，以申請執照終止，解除管制。

## 2. 除役之環境安全及健康 (Environment Safety & Health in Decommissioning)

除役環境安全及健康(Environment Safety & Health, ES&H)是一套整體考量的計畫，用以保護公眾、從事除役作業的人員以及環境，其必須包含以下要項：

- 輻射安全部分：控制人員接受到的劑量、放射性廢液控制、放射性廢棄物控制(包含管理及運輸)。
- 非輻射安全部分：工業安全衛生、非放射性廢水控制、非放射性廢棄物控制(包含管理及運輸)。
- 其它：醫療/急救、防火、紀錄管理、緊急計畫、監督/品質保證。

對於從事除役作業的人員，首先進行工作危害分析。透過評估人員執行的工作、使用的工具，及所處的環境，來確認可能發生的危害。接著，採取措施將其消除或將其風險降低至可接受的程度。這些措施中最有效的方式是利用工程設計、其次是行政管理、再其次是個人的防護裝備。

對於除污及除役(Decontamination & Decommissioning, D&D)作業方面，安全及健康的挑戰來自於工作環境可能每天都在變化；舉例來說，隨著除役工作的進行，鷹架使用的數量增加、危險環境變多、焊接/打磨作業量上升...等，因此必須要有方法讓人員清楚認知環境的改變。此外，典型的 D&D 危害來自於游離輻射、非游離輻射、生物、化學物質、受限制的空間(任何足以讓人員進入執行被指派的工作，進出該空間的方式受到限制)、爆炸、崩塌、物體掉落、火災、噪音...等。

在制定 ES&H 計畫時，對於人員會遭遇到的危害必須要有相關訓練；對於危害的預防(緩抑)必須考量物體掉落防護、使用耳塞/護目鏡/安全鞋；若有污染物存在，必須假設其會因潑灑、容器破裂等原因而進入清潔(無污染)區域。特別要注意的是，雖然很多 D&D 工作都可能外包，但設施經營者必須負起人員的安全及健康的責任。承包商必須要依據設施經營者的 ES&H 計畫進行工作，如承包商有自己的 ES&H 計畫，在施行前必須要經過設施經營者的審查及同意。

### 3. 廠址/設施特性(Site / Facility Characterization)

MARSSIM 是符合美國環保部門及 NRC 輻射劑量安全管制標準的工作指引，



雖然該手冊主要處理的對象是表土及建物表層，並未說明如何將放射性核種管制劑量轉換成導出濃度指引基準（Derived Concentration Guideline Level, DCGL），也未說明如何處理地下水及地表水輻射污染調查的議題，但仍是可嚴謹且實用於核設施除役作業之輻射調查工作手冊。MARSAME 則是 MARSSIM 的增補文件，主要係說明如何調查物質及設備輻射污染狀況。輻射調查規劃首要應關注的是，殘留放射性污染物是否原本就存在環境背景中、殘留放射性污染物的特性為何、平均殘留放射性污染物活度是否低於外釋標準、廠區內是否有一小塊地其殘留放射性污染物活度大於調查濃度水平、該使用何種調查方法論、先進的科技對調查殘留放射性污染物活度有何幫助等。

管制者主要關心的是廠址最終狀態調查結果，但是輻射特性調查是放射性污染調查及廠址偵查(Radiation Survey and Site Investigation, RSSI)很重要的工作，若執行不確實，將增加日後不可預期的開銷。特性調查目標是為了收集必要的數據，以便選擇未來該採取的改善行動為何。特性調查是個須不斷重複的過程，在過程中可以定義出污染範圍、確認適合的除污技術、初估除役費用，並訂定放射性廢棄物處理策略、作業人員安全劑量及設計最終廠址調查。

RSSI 包含廠址辨識(Site Identification)、廠址歷史評估(Historical Site Assessment)、範圍調查(Scoping Survey)、特性調查(Characterization Survey)、整治改善後驗證調查(Remedial Action Support Survey)及最終狀態調查(Final Status Survey)。廠址歷史評估主要是要區別出廠址內受放射性污染影響及不受影響的區域範圍，並且可提供資料，供調查者獲知放射性污染物可能遷移的路徑及範圍；範圍調查則是用來驗證歷史廠址評估結果，確認第三級污染分類區域範圍，並提供後續輻射特性調查相關資訊或可做為最終狀態調查的數據；輻射特性調查的目的是確認污染核種的性質及範圍，其調查結果亦可用於評估後續該採取的改善行動技術為何，並且驗證污染區經整治改善後，其調查結果已符合標準，可做為最終調查的數據。此外，輻射特性調查是 RSSI 中最全面且收集最多數據資訊

的步驟。整治改善後的驗證調查是為了確認在進行整治後之結果，以及是否可進入最終狀態調查，並且提供廠址最新預估的特性參數，作為最終狀態調查設計輸入的資訊。此外調查設計須考量樣品的種類和量測方法、儀器靈敏度要求、取樣位置及數目、資料驗證及其品管、調查結果再現性等。儀器的選擇則必須考量放射性污染物的能量與種類、最小可偵測濃度、儀器偵測效率、儀器測量尺度、新科技儀器等。

#### 4. 計畫及管理(Planning and Management)

除設計畫及工作應在設施永久停機前三年即開始進行，在開始之前，關注的重點應在於如何縮短除役過渡階段，以減少用於工作人員的成本(經評估，美國核電廠除役過渡階段用於工作人員的成本約每天美金 70,000 元)。此外，除設計畫制定者必須清楚除役設施的廠址歷史評估、運轉紀錄、各式圖面，以及設施特性。在美國，核電廠於預計永久停機日期 30 天前必須向 NRC 提出書面通知；用過燃料移出爐心後，設施經營者必須向 NRC 提出書面證明；設施經營者在永久停機前或至晚於永久停機後兩年內，必須向 NRC 提出停機後除役活動報告(Post-Shutdown Decommissioning Activities Report, PSDAR)。

除役管理包含以下幾種方式：

- 由設施經營者自己執行：優點在於工作可以保留給現有員工、員工很了解除役設施、可能有新的工作機會(因除役需要不同的技術)。挑戰在於要改變員工的心態(從運轉到除役)、可能缺乏除役經驗、必須承擔所有 D&D 工作的風險，以及是否可保留關鍵人員。
- 由一除役總承包商執行：優點在於風險可以分攤、具備豐富的除役經驗。挑戰在於設施經營者仍須負責設施廠址除役(因此需要加強監督總承包商)、負擔雇用總承包商產生的額外成本，以及工作可能無法保留給現有員工。
- 設施經營者將其執照轉移至另一家公司執行(除役完成後執照再轉移回原設施經營者)：優點在於可將風險轉移至另一家公司、可以限縮管制

的需求。挑戰在於必須得到利害關係人的認同，以及設施經營者對 D&D 工作掌控的程度可能很小。

- 設施經營者將其資產賣給另一家除役公司執行：優點在於可將風險及義務轉移至另一家公司、設施經營者不再負責除役工作。挑戰在於必須得到利害關係人的認同、財務/稅務的問題可能要花很多時間解決，以及用過核子燃料獨立貯存設施的後續處理。

除役管理的一大重點是安全及健康的評估，其為除役計畫能否成功的關鍵。除役安全包含工業安全及輻射安全，而工業安全通常是風險的最大來源，在評估時有一些國際標準及導則可提供參考，例如國際原子能總署的安全標準系列「No. General Safety Requirements Part 6 - Decommissioning of Facilities」<sup>1</sup>。在輻射安全方面，對於可能會造成放射性物質空浮的作業，以及會造成放射性物質外釋的假想事故(例如放射性廢棄物運送意外事故)，都要加以評估。

## 5. 除役成本估算(Cost Estimates for Decommissioning)

國際組織，包含美國 DOE/DoD 及歐盟 (EC)、OECD/NEA、IAEA 對於工作支出經費預估已出版相關同行審查導則，例如:International Structure for Decommissioning Costing (ISDC) 就是前述國際組織共同合作編纂的手冊，而 IF/NESP-036 則是最早且仍被視為很有價值的參考指引。使用電腦化經費預估系統對業者是很有幫助的，例如：可追蹤實獲值管理系統 (Earned Value Management System, EVMS)。良好管理支出經費有許多益處及目的，例如:確保有足夠的除役基金、掌握風險管理、規劃工作時程及其方法策略、符合管制要求等。預估工作支出經費有許多種方法，其中最常用的方法是由下而上 (Bottom-Up) 之評估，這種方法論非常精準，但需要輸入詳細的廠區設備或物質相關花費。

支出經費預估管理要有相當品質，須考量除役策略、除役完成條件、廠

---

<sup>1</sup> IAEA, "No.GSR Part 6 - Decommissioning of Facilities General Safety Requirements," 2014.

址輻射調查、廢棄物管理、支出管理方法論、除役採用的技術、支出管理程式等。此外，支出項目可分為作業相關支出、週期性支出、特殊支出、不可預期的風險支出及災害損失等。其中作業相關支出包含除污、拆除、廢棄物裝箱、運輸、處理及處置等。週期性支出包含工程期程及管理計畫，例如：執照管理、運轉及維護、人員輻射安全防護、設施安全、工程管理顧問等支出。特殊支出則包含廠外支援、保險、稅金、安全設備(例如：放射性污染水處理程序)、第三方驗證、租借拆除設備等。最後，面對不可預期的風險支出及災害損失，則需要備有緊急儲備金相關費用。

除役作業支出經費預估約可分為 9 個步驟，分別為(1)定義工作範圍、(2)選擇策略(例如：立即拆除)、(3)收集資料(廠址及設備資訊，例如：廠區建物結構、設備管路圖面、工作人員薪資、稅務、保險、放射性廢棄物及用過燃料處理與處置、自行管理工程或外包廠商、混凝土是否能回填等)、(4)定義假設條件(決定哪些設備須移除)、(5)定義作業及任務(須進行移除設備分類，作業性質及區域分類)、(6)建立單位支出因子及工作效率因子 (Unit Cost Factors and Productivity Factors)、(7)建立作業項目支出預估 (Activity Estimates)、(8)建立每項工作排程及(9)製作最終整合工作支出預估及排程。另外還需考量廠址復原及除役過程中所需之設備維護費用。針對風險管理，許多核設施經營者聘請獨立的承包商預估整體工程支出，或使用支出經費預估及財務風險管理相關軟體。

然而，當工作範圍變動、使用不精準或不完整的資訊、使用不同估算方法論、發生意外事故、風險發生等，都有可能導致原先預估的費用支出不準確，因此除役作業須聘請各工作階層具經驗的人員參與，收集完整廠址資訊並考慮管制介面，及盡早讓相關利害關係人參與。

## 6. 除役放射性廢棄物管理(Waste Management in Decommissioning)

除役過程的放射性廢棄物管理從除役設施的廠址歷史評估開始，用以確認除役設施廠址可能產生放射性廢棄物的區域。接著透過取樣及輻射偵測的結果來估算放射性廢棄物的量，以及評估移除的方式、費用等。

依據美國法規 10 CFR 61，低放射性廢棄物可分為 A 類、B 類、C 類，以及超 C 類四種。採用立即拆除策略的核能電廠在除污及除役過程產生的廢棄物體積佔比估算中，A 類約佔 12%、B 類/C 類約佔 0.03%、超 C 類約佔 0.0007%，其餘為非放射性廢棄物。而在廢棄物處理費用佔比估算中，A 類約佔 50%、B 類/C 類約佔 20%、超 C 類約佔 5%，非放射性廢棄物約佔 25%。

低放射性廢棄物減量的方式包括使用專用的工具或設備、將個人防護設備進行除污、將混凝土與土壤分離、採用 SAFSTOR 的除役策略等。而低放射性廢棄物減容的技術則包括壓縮、切碎、焚化等。

核電廠除役廠址內可能只有一部機組在進行除役，廠址內的土地面積也可能不大，因此在除役時必須制定完善的低放射性廢棄物管理計畫，這個計畫必須考量低放射性廢棄物裝箱及運輸的方式、廠內運輸的路線、除役計畫的進行對管理的影響，須注意的是，通常低放射性廢棄物產生的速度比清運的速度來的快，因此可能需要一個較大的暫存區。

二、8 月 21 日的課程議題包括「除污技術」、「除役風險管理介紹」、「除役群體 & 知識管理資源」、「土壤分離」、「芝加哥鑄造鎂設施除役」、「水牛城大學研究用反應器除役」等，摘要如下：

#### 1. 除污技術(Decontamination Technologies)

除役不一定要採用新科技，但必須使用成熟有效率的技術，且符合經濟效益。除污因子(Decontamination Factor, DF)的選擇必須考量其安全性、是否有效率且經濟、產生的二次廢棄物數量等面向，因為除污的目的主要係為減少放射性廢棄物及降低輻射劑量。除污方式可分為：化學除污、電化學除污、機械除污、金屬熔解除污等。

化學除污通常用於封閉系統，其使用廣泛、經濟且可快速溶解表層累積的污垢，但須由具相關經驗的人員控管。此外，加熱、接觸時間和攪拌對於化學除污亦是重要的變數；複合物(complexants)可更有效地與污染物結合，除污劑亦可以和膠體黏糊結合，應用在黏除污染物的實務中。化學除污劑的形式有氧化劑(輕微腐蝕性，例如:CORD)、還原劑(具侵蝕性，例如:LOMI)、

複合物(較溫和)、酸性物質(強侵蝕性，例如:Hydrofluoric/Nitric、Fluoroboric、DfD)。

電化學除污通常是使用電壓促成化學反應，對於處理碳鋼、不銹鋼和鋁污染十分有效，因此處理直徑較小的管道很有效用，但是遇到油、鐵鏽、油脂和油漆等物質時，則需注意可能產生其他相關技術處理議題。

機械除污既容易又便宜，因此廣泛被使用，包含掃除(Sweeping)、刮擦(scrubbing)、刷(brushing)、吸塵(vacuuming)、剝離(stripable)、磨料噴砂(abrasives、sand blasting、grit blasting)、雷射燃燒(laser ablation)、液壓或氣動錘(Hydraulic or Pneumatic Hammer)等方式。另除役期間將產生大量輕度污染的金屬廢料，使用金屬熔解法有助重新鑄造有價值的資源，並且可以減少廢棄物的量。

## 2. 除役風險管理介紹 (Introduction to Risk Management in Decommissioning)

可能發生在計畫之外的事件即為風險，風險有時候也可以是一個機會。這些事件並不一定會發生，但需要評估其發生的可能性。

定性風險分析是透過評估、合併風險發生的可能性及其影響，對風險進行優先排序以進一步分析或採取行動的過程。使用的工具為「風險登記表(Risk Register)」，以確認可能的風險及機會。因除役面臨的狀況不斷在改變，風險登記表必須定期更新。風險的級別(高、中、低)與緩抑該風險所採取的方法有關，必要時須進行個別成本效益分析。以下是一個風險登記表的範例：

編號	2016-01	2016-02	
風險或機會	機會	風險	
分類	技術類	技術類	
風險移動	無變動	無變動	
造成原因	雇用外部廢棄物處理公司	橋式起重機老化或維修品質不良	
事件	聘請外部專業團隊處理廢棄物，可提升作業安全，及降低廢棄物貯存在廠內的負擔	有橋式起重機在操作時可能會故障的風險	
可能造成結果	可能可以降低成本、縮短除役時程、降低員工的游離輻射曝露	可能會造成設備掉落、工作延宕、須負擔修復費用	
優先度	立即	立即	
已有的控制	搜尋可能的廢棄物處理公司	廠商檢修橋式起重機，並對預防性維護計畫進行審查及修訂	
採取緩抑措施前評估	影響	低	高
	可能性	低	中
降低風險的行動或實現機會	與廢棄物處理公司簽約	確認關鍵的備用組件，必要時預購	
採取緩抑措施後評估	影響	中	高
	可能性	高	中
對風險處理或容忍	處理	處理	
風險造成的花費	不適用	\$20,000	
緩抑措施花費	待定	\$5,000	

從定性風險評估的結果進行量化評估即為定量風險評估，通常使用基於蒙地卡羅法的電腦軟體進行計算，例如 PERTMASTER、@Risk、Crystal Ball、MODEL RISK，計算結果則使用直方圖、累積機率圖等方式來呈現。

在評估除役成本時，大部分事項屬於已經知道的已知，這些事項構成成本估算的基礎。小部分事項屬於已經知道的未知，這些事項所需的成本也是成本估算不準度的來源。除此之外，還存在某些事項屬於還不知道的未知(此為風險的來源)，也可能增加成本。因此，必須編列應變管理的儲備金來作為因應。

### 3. 除役群體&知識管理資源 (Decommissioning Community & Knowledge Management Resources)

本課程說明除污及除役作業涉及各除役群體，需要國際、國家、地方、公司及個人支援。國際除役相關群體有 OECD/NEA、EC、EBRD、World Nuclear Association 等，美國國內相關群體有 NRC、DOE、EPA、EPRI (Electric Power Research Institute)、NEI(Nuclear Energy Institute)、EFCOG、CRCPD(Conference of Radiation Control Program Directors)、ITRC(Interstate Technology & Regulatory Council)等，區域群體包含運轉者、承包商、大學學術單位、技術規範組織(例如:ASTM-E10.03、ANSI-N13、CSA N294)等。此外，除役若要順利完成，就必須調查當地社區的關切議題並設置論壇，設計一些活動，讓相關利害關係人參與並感興趣，且定期開放現場導覽或會議，讓大眾了解除役現況。至於獲得除役相關資料庫資源可由參加國際會議、研討會、訓練課程、專業組織及技術規範組織等方式取得。最後在簡報中列舉了許多國際除役相關訓練課程及參考手冊，供使用者日後參考。

### 4. 土壤分離(Soil Segregation Environmental Restoration/D&D)

在廠址復原階段，廠址內的土壤須進行整治至可接受的標準(若為非限制使用，須整治至對一般人造成之年劑量不超過 0.25 毫西弗)，而土壤分離可以增進土壤整治的效率，並降低偵測不準度造成的影響。

除役設施廠址在決定未來用途，並確定可接受的劑量標準後，必須使用電腦軟體(例如 RESRAD)求得特定核種的導出濃度指引基準(Derived Concentration Guideline Level, DCGL)。土壤整治完成後執行的最終狀態調查(Final Status Survey, FSS)即為了驗證整治的成果是否已可符合 DCGL，土壤整治及 FSS 可能是一個遞迴的過程，而 FSS 存在固有的不準度，可能會造成過多的低放射性廢棄物。

傳統上是利用挖掘的方法來進行土壤整治，為了降低運輸及處置所需的



費用，以及降低偵測的不準度，土壤分離技術提供了一套可行的方法。首先對受影響區域內的土壤進行 100%挖掘，接著對挖掘後的土壤表面執行 FSS 以確認符合 DCGL，挖掘出的土壤則透過土壤自動分離系統量測活度，將符合 DCGL 的土壤分離，最後再將這些土壤回填至原挖掘區域。

#### 5. 芝加哥鑄造鎂設施除役(Chicago Magnesium Facility ER/D&D)

伊利諾州過去替國防部製造輕質、高強度含鈾的鎂合金飛機零件，並且將鈾渣埋存在廠區。過去非正式紀錄記載廠區有 13 處埋有鈾渣，另外還有傳聞廠區除了埋藏鈾渣外，還埋藏其他物質。1997 年伊利諾伊州政府要求該公司除役，因此該公司進行廠址輻射特性調查，然而由於規劃欠佳，產生了錯誤結論。該公司欠缺專業除役人員及經費，因此 NRC 及 EPA 提供部分經費由國防部 (Corps of Engineers) 委請專業團隊執行廠址輻射特性調查作業，主要分成 3 個階段。第 1 階段係使用  $\gamma$  偵測儀器，掃描廠區找出埋有鈾渣的 13 處位置，並將該放射性物質挖出裝桶暫存於廠內。第 2 階段因為每年經費限制故進度緩慢，這階段挖掘並處置了近 1400 萬磅含鈾的廢棄物。第 3 階段才開始進行建物表層及下方表層污染調查。廠區被區分為 7 個受影響區，每區最少有 18 個表面偵測位置(深度約 6 feet)，調查結果發現仍有數個位置 Th-232 偵測值大於 65 pCi/g，必須執行整治改善行動。最後約有 480 桶共 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運至垃圾場埋藏；約花費 270 萬美金。

#### 6. 水牛城大學研究用反應器除役(University @ Buffalo Research Reactor Decommissioning)

水牛城大學研究用反應器於 1959 年開始建造，1961 年初次臨界，1994 年以後這座研究用反應器即不再使用。除役階段的監管單位包含 NRC、EPA、紐約州衛生局(Department of Health, DOH)、環境保護局(Department of Environmental Conservation, DEC)、勞工局(Department of Labor, DOL) 等，其除役執行歷程如下：

時間	紀要
2009年7月-2011年2月	執行廠址歷史評估及輻射特性調查
2011年7月	清除舊有廢棄物
2011年9月	申請執照變更
2012年7月	提出最終狀態調查計畫
2014年9月	拆除建築物
2015年	廠址復原

課堂上講師以圖面輔以照片的方式解說每個階段的過程，在經驗學習的部分特別強調溝通是除役計畫成功的關鍵，水牛城大學每個月都會與 NRC、DOH、DEC 等監管單位舉辦電話會議，以確認各監管單位需要的關鍵資料。此外，在公眾溝通方面，水牛城大學於重要作業(例如拆除建築物)的執行期間會公布執行情形週報，以消除公眾疑慮。

三、8月22日的課程議題包括「拆除技術」、「反應器壓力槽切割」、「電腦軟體於除役之應用」、「克服設施的限制」、「最終狀態調查/執照終止」、「除役之關鍵概念」等，摘要如下：

#### 1. 拆除技術(Dismantling Technologies)

拆除是為了移除設備和建物，並且將拆下來的物件切裝成桶，以便包裝及運送。拆除技術的選擇須考量物質種類、厚度、作業安全(空氣中或水下作業)、廢棄物管理等。此外，切割前，須先以小模組模擬切割，並且建置好安全切割的工作環境區。至於大型組件例如:反應器壓力槽、蒸汽產生器、熱交換器是否需要以切割方式拆除，則須考量其作業安全風險、時間與經費經濟效益、現場作業準備、廢棄物輻射劑量及其接受標準、運輸問題等。那些較老舊的核設施，因為現場使用大量的石棉及水泥材料，因此可能需要較多時間及人力才能拆除。

拆除技術可分為金屬切割(熱能、機械、電能切割、其它)及混凝土切割(熱能、機械切割)。機械切割技術包含剪裁器(Shears)、鋸(Saws)、往復鋸和帶鋸(reciprocating and band)、砂輪(Abrasive wheels)、金剛石線鋸(Diamond wire)、銑削(Milling)、圓刀(Circular cutters)等。熱切割技術

有電漿弧(Plasma Arc)、含氧火炬(Oxy-fuel Torch)、金屬粉墨注入切割(Metal Powder Injection Cutting)、炸藥爆破(Explosives)等。金屬電能切割技術有金屬崩解加工(Metal Disintegration Machining, MDM)、放電加工(Electrical Discharge Machining, EDM)、弧鋸(Arc Saw)、電弧氣刨(Electric Arc Gouging)等，另外亦可使用水刀及雷射切割金屬。混凝土切割技術則包含金剛石線鋸(Diamond Wire Saw)、混凝土牆鋸及取芯鋸(concrete wall saws and coring saws)、液壓或氣動錘(Hydraulic or Pneumatic Hammers)、破碎機和剪板機(Crushers and Shears)、岩石分裂器(Rock Splitters)、破碎球(Wrecking Ball)、火焰切割、炸藥爆破等方式。

過去 10 年美國工業界 15%的工安意外是來自於設施拆除作業，大多是承包商於拆除前未先執行工程調查。因此建物拆除前應備有計畫，並應符合美國職業安全與健康管理法規 29 CFR Subpart T，及 ANSI/ASSE 10.6-2006「拆除人員的安全與健康計劃要求」。此外，採用炸藥爆破方式前，應先進行該物件或建物除污作業，備妥灑水及監測設備，先以模型模擬測試後才能現場施行。切割拆除技術有許多種，但都應考量評估其安全性、人員工作劑量、廠區環境因素等。遠端操作雖然是可行的，但需要注意其他衍生的技術議題，因此以簡單的方法完成拆除，並由過往經驗學習除役作業，是較經濟且方便實踐的途徑。

## 2. 反應器壓力槽處置(Reactor Vessel Disposition)

除役工程管理者應決定反應器及其內部組件是現場切割裝桶貯存，或是不切割送到貯存地安全封存，或採取切割方式時，應決定要直接在空氣中切割或水下作業。水下作業須注意水質，且須避免異物掉入水池工作區，也需要設計合適的廢棄物桶及其裝桶系統。反應器及其內部組件切割技術的選擇須考量速度、廢料產量、曝露率、水處理及殘渣收集的面向，例如：熱切割技術雖然快速且彈性，但會有廢氣排放、水處理及產生較多二次廢棄物的風險。機械切割技術雖然操作容易，產生的二次廢棄物較少，但是效率較低且慢，設備刀具容易損壞。磨鋸雖然技術成熟但速度太慢，且會有水處理及產

生較多二次廢棄物的風險。因此，進行反應器及其內部組件切割前，應參考過往經驗，事先規劃模擬切割，選擇成熟技術，採用大型廢料桶，產生的切割物件數量最小化，或者委託有經驗的承包商執行，以減少廢棄物數量、降低人員曝露劑量、降低廢氣及浮渣的產生。

### 3. 電腦軟體於除役之應用(Computer Based Tools in Decommissioning)

本課程簡介 D&D 工作可應用的電腦軟體工具，分類清單如下：

- 計劃管理：Primavera P6 Scheduling、MS Project、PoleStar Proprietary。
- 保健物理/輻射安全：Microshield、RadPro Calculator、VARSKIN、COMPLY、CAP 88。
- 土地外釋標準：RESRAD 程式集(包含 RESRAD-ONSITE、RESRAD-OFFSITE、RESRAD-BUILD、RESRAD-BIOTA)、DandD。
- 放射性物質外釋偵測：Visual Sample Plan、MARSSIMPower 2000、COMPASS、SADA。
- 運輸及包裝：RADMAN、RAM SHP、FILTRK、Low Track、MS Excel。

設施經營者、管制者、除役相關公司及研究機構可就各自所需，由上述清單選取適用的電腦軟體工具並加以利用。

### 4. 克服設施的限制(Overcoming Facility Limitations)

本課程主要說明設施在除役時，可能會面臨到一些空間限制，不利除役作業，但只要針對該作業環境，設計出適合的工具，一樣可以順利將放射性物質或組件裝桶移出設施。課程中以移除池底散落數個隔板網架為例，鑒於廠房空間小且天車吊運噸數受限，又須顧及人員工作劑量限制，因此承接此工作的團隊設計了一個簡易、吊運噸數足夠及具輻射屏蔽的桶子，將池底散落的隔板網架吊起，並且可略為彎曲網架減少體積尺寸，裝入屏蔽廢料桶後移出廠房。

## 5. 最終狀態調查/執照終止(Final Status Surveys/License Termination)

除役設施廠址內的土地依未來用途的不同而有不同的外釋標準，這些標準由管制機關訂定，通常以一般人會接受到的年劑量作為限值。偵測儀器無法直接測得劑量，故需使用程式計算，將上述年劑量限值轉換成特定核種的活度限值(即 DCGL)；常見的程式包含由 ANL 發展的 RESRAD 程式集，及由桑迪亞國家實驗室(Sandia National Laboratory)發展的 DandD 程式。FSS 的目的即為驗證除役設施廠址內的土地是否已符合 DCGL，以作為土地外釋的依據。

依 MARSSIM 流程，受影響區可以分為 3 級。第一級受影響區有污染的可能或已知有污染，預期污染程度超過 DCGL。第二級受影響區有污染的可能或已知有污染，但預期污染程度不超過 DCGL。第三級受影響區預期沒有殘存的放射性物質或預期殘存的放射性物質活度遠小於 DCGL。在 FSS 階段，偵測單元設計建議如下：

Survey Unit Classification		Statistical Test	Elevated Measurement Comparison	Sampling and/or Direct Measurement	Scanning
Impacted	Class 1	Yes	Yes	Systematic	100% Coverage
	Class 2	Yes	Yes	Systematic	10%~100% Systematic
	Class 3	Yes	Yes	Random	Judgmental

偵測得到的數據必須透過統計檢定來評估，若背景中存在關注的核種，則採用 WRS(Wilcoxon Rank Sum, WRS)檢定；若背景中不存在關注的核種，則採用 Sign 檢定。

在設施經營者完成 FSS 之後，管制者會確認除役設施廠址內的土地是否已可外釋。包括透過量測、文件及資料審查、實地了解偵測及量測的程序、由管制者的實驗室進行取樣分析等。

課堂上講師並準備了一個例題，提供學員練習 DCGL 推導(利用 NUREG-1757 中所提供各核種表土污染的篩濾值)、偵測單元設計、計算統計檢定所需取點的數量等。

## 6. 除役之關鍵概念(Key Concepts)

總結順利完成 D&D 工作的關鍵概念如下：

- 資訊交換：從其它已經完成的或正在進行中的除役工作經驗學習。
- 溝通：因除役工作機會可能減少，必須與員工、團隊成員良好溝通，另外為了確保除役工作順利進行，必須與管制者及利害關係人定期溝通。
- 計畫/成本估算：儘早與除役計畫相關方一起開始制定計畫，對除役完成後的土地使用必須規劃實際的情節，如此才能了解可能存在的風險。除役成本則可透過合格的、經驗證的組織協助，來對成本進行詳細估算。
- 廠址/設施歷史調查：花足夠的時間來執行廠址歷史評估，以詳細了解設施運轉歷程，相關紀錄的收集也應盡早開始進行。
- 廢棄物管理：清楚了解廢棄物的特性、組成、處置的路徑、包裝的規定。此外，因廢棄物管理所需費用佔除役成本相當大的比例，對廢棄物管理方式必須進行成本效益評估。
- 計畫管理：有效執行 ES & H，盡可能將計畫管理簡單化。特別需注意計畫管理包含協助員工轉職，使他們可以順利過渡到下一個被指派的工作。
- 危害分析：在除役計畫的任何階段都要把安全及環境保護納入考量，針對每項可能發生的危害所造成的影響都要加以評估，並且要有防止或緩抑其結果的方法。
- 除役技術：一般說來，現有的技術已足以順利完成 D & D 工作，重點在於決定使用某種技術之前必須要謹慎的執行成本效益評估。此外，使用新的工具可能可以增進工作效率。
- 最終狀態調查：FSS 計畫必須在除役設施廠址現場工作接近開始之前即開始計畫，收集資料、分析、紀錄，及做成報告。
- 團隊合作：學習如何良好的團隊合作，對於團隊內的成員要確保他們有完成工作/任務所需的工具及知識，以增強團隊的執行能力。

## 肆、心得與建議

1. 本訓練課程係由阿岡實驗室主辦，邀請多位具核設施除役經驗之專家講授美國核設施除役管制法規、美國核設施除役經驗、除役環境安全與人員健康、除役切割技術、輻射污染偵測技術、除役經費預估與工程管理等議題。透過參與本課程除可瞭解美國除役安全管理及除役相關技術發展最新資訊及未來趨勢外，並且可直接向課程講師請教或討論核設施除役相關現場實務，建議可持續參與除役相關訓練課程，對增進除役專業知識有相當之助益。
2. 課程中講師提及核設施除役關鍵概念，例如：核設施除役業者應儘早與核設施除役利害關係者及管制者溝通、積極參與國際除役群體及收集除役經驗、執行除役作業前應妥善規劃、事前評估可能之安全及經濟風險，並選用經濟且成熟安全的除役技術，使每個除役作業步驟一次到位，才有機會如質如期完成核設施之除役，建議此概念可考量為我國核設施除役管制之參考。
3. 課程中講師曾介紹一些除役作業常用的除污化學藥劑、機械除污工具或輻射偵測儀器等，並提及各項工具及儀器不一定適用於所有作業情境下，也各有偵測範圍限制，必須於使用前詳盡瞭解該工具或儀器的特性，以降低無效測量或製造更多二次廢棄物之情況，耗費不必要的資源，因此建議持續針對除污方法、儀器或工具使用方面進行了解，以提升現場視察所需知能。

# 附件一、課程表

Date	Time Slot	Activity / Topic	Speaker
Tu, 8-20-19	8:00 - 8:15 AM	Registration / Sign-In / Opening Remarks	Larry Boing, ANL
Tu, 8-20-19	8:15 - 8:45 AM	Attendee Introductions	Participants
Tu, 8-20-19	8:45 - 10:15 AM	Introduction to Decommissioning	Larry Boing, ANL
Tu, 8-20-19	10:15 - 11:15 AM	Environment Safety & Health in Decommissioning	Tom Hansen, Ameriphysics
Tu, 8-20-19	11:15 AM - 12:15 PM	LUNCH (on your own)	
Tu, 8-20-19	12:15 - 1:15 PM	Site / Facility Characterization	Tom Hansen, Ameriphysics
Tu, 8-20-19	1:15 - 1:30 PM	GROUP PHOTO	
Tu, 8-20-19	1:30 - 2:30 PM	Planning and Management	Joe Carignan, Carignan & Assoc
Tu, 8-20-19	2:30 - 2:45 PM	BREAK	
Tu, 8-20-19	2:45 - 3:45 PM	Cost Estimates for Decommissioning	Joe Carignan, Carignan & Assoc
Tu, 8-20-19	3:45 - 4:45 PM	Waste Management in Decommissioning	Mark Kirshe, ReNuke
Tu, 8-20-19	4:45 - 5:00 PM	Q&A / Discussions / Videos	ALL
W, 8-21-19	8:25 - 8:30 AM	Opening Remarks	Larry Boing, ANL
W, 8-21-19	8:30 - 9:00 AM	Technologies - Overview	Larry Boing, ANL
W, 8-21-19	9:00 - 10:00 AM	Decontamination Technologies	Larry Boing, ANL
W, 8-21-19	10:00 - 10:45 AM	CS - Introduction to Risk Management in Decommissioning	Joe Carignan, Carignan & Assoc
W, 8-21-19	10:45 - 11:00 AM	BREAK	
W, 8-21-19	11:00 - 11:55 AM	Decommissioning Community & Knowledge Management Resources	Larry Boing, ANL
W, 8-21-19	11:55 AM - 1:00 PM	LUNCH & LEARN (Box lunch provided)	Bill Smart, PacTec
W, 8-21-19	1:00 - 2:00 PM	CS - Soil Segregation ER/D&D	Alex Lopez, Perma-Fix E S
W, 8-21-19	2:00 - 3:00 PM	CS-Chicago Magnesium Facility ER/D&D	Tom Hansen, Ameriphysics
W, 8-21-19	3:00 - 3:15 PM	BREAK	
W, 8-21-19	3:15 - 4:30 PM	CS - University @ Buffalo Research Reactor Decommissioning	Dustin Miller, Chase Environmental
W, 8-21-19	4:30 - 5:00 PM	Q & A / Discussion / Videos	ALL
Th, 8-22-19	8:25 - 8:30 AM	Opening Remarks	Larry Boing, ANL
Th, 8-22-19	8:30 - 9:40 AM	Dismantling Technologies	Larry Boing, ANL
Th, 8-22-19	9:40 - 10:40 AM	Evolving Technologies	Ernesto Faillace, ORANO
Th, 8-22-19	10:40 - 10:55 AM	BREAK	
Th, 8-22-19	10:55 - 11:55 AM	CS - Reactor Vessel Disposition	Mark Kirshe, ReNuke
Th, 8-22-19	11:55 AM - 12:55 PM	LUNCH (on your own)	
Th, 8-22-19	12:55 - 2:00 PM	CS- Computer Based Tools in Decommissioning	Dustin Miller, Chase Environmental
Th, 8-22-19	2:00 - 2:45 PM	CS - Overcoming Facility Limitations	Ernesto Faillace, ORANO
Th, 8-22-19	2:45- 3:00 PM	BREAK	
Th, 8-22-19	3:00 - 4:00 PM	Final Status Surveys/License Termination	Tom Hansen, Ameriphysics
Th, 8-22-19	4:00 - 4:30 PM	Key Concepts to Take Home	Larry Boing, ANL
Th, 8-22-19	4:30 - 4:45 PM	Q & A / Discussions	ALL
Th, 8-22-19	4:45 - 5:00 PM	Certificates / Closing Remarks / Book Dwg & Give Aways	Larry Boing, ANL