

出國報告(出國類別：實習 線上訓練課程)

## 參加美國橡樹嶺聯合大學「除役階段的 廠址輻射特性調查」線上課程出國報告

服務機關：核能安全委員會

姓名職稱：林宣甫副研究員

江建峰技士

黃亭堯技士

派赴國家：臺灣，中華民國(線上訓練課程)

訓練期間：113年11月25日至11月29日

報告日期：114年2月21日

# 摘要

我國核一、二廠及核三廠1號機運轉執照已屆期，依法停止運轉，進入除役期間；核三廠2號機運轉執照亦將於114年5月17日屆期，依法除役。核能機組進入除役期間，台電公司依除役計畫，並參照美國「多部會輻射偵檢與廠址調查手冊」(Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual，以下簡稱 MARSSIM)，對廠址土地與建物進行輻射偵檢及評估等相關作業。核能安全委員會亦將本於專業與職責，嚴格執行安全審查與現場視察，確認除役作業符合法規要求。

為精進除役安全管制技術，本次參加美國田納西州橡樹嶺聯合大學(Oak Ridge Associated Universities，以下簡稱 ORAU)專業訓練中心舉辦之「除役階段的廠址輻射特性調查(Site Characterization in Support of Decommissioning)」線上訓練課程，汲取美國設施經營者運用 MARSSIM 手冊執行廠址評估、除役規劃、輻射特性調查方法及相關工具、測量數據分析與決策制定等實務作業，作為我國核電廠除役安全管制之參考。

# 目次

摘要.....	i
目次.....	ii
壹、目的.....	1
貳、過程.....	2
參、過程紀要.....	4
肆、心得與建議.....	19

# 壹、目的

國內核電廠進入除役期間，台電公司將依除設計畫，並參照美國 MARSSIM 手冊，對廠址土地與建物進行輻射特性調查等相關作業，掌握設施內的輻射與污染狀態，並應用至廢棄物估量、除役成本評估、拆除工法及除污技術選擇，以及廠址最終狀態偵檢等要項。本會亦將本於專業與職責，嚴格執行安全審查與現場視察，確認除役作業符合法規要求。

美國橡樹嶺聯合大學(ORAU)具有專業的專家團隊，為美國能源部(DOE)及其他聯邦機構提供創新的科學和技術解決方案，並定期舉辦輻射安全與保健物理相關訓練課程。為持續汲取美國設施經營者運用 MARSSIM 手冊的實務經驗，本次奉派參加美國 ORAU 主辦的「除役階段廠址輻射特性調查」(Site Characterization in Support of Decommissioning)線上訓練課程。課程內容涵蓋廠址評估、除役規劃、輻射特性調查方法與相關工具、測量數據分析及決策制定等，並透過循序漸進的設計，使學員能夠按部就班吸收除役相關知識，以精進除役安全管理專業知能。

## 貳、過程

本次奉派參加廠址輻射特性調查訓練過程概要說明如下：

- 一、課程名稱：「除役階段的廠址輻射特性調查(Site Characterization in Support of Decommissioning)」
- 二、主辦單位：美國橡樹嶺聯合大學(ORAU)
- 三、訓練時間：民國113年11月25日至113年11月29日
- 四、授課方式：參訓人員完成報名程序後，主辦單位提供線上課程網址、專屬帳號與密碼，由參訓人員登錄課程網址後，以線上研習方式研讀訓練教材，於報名完成後六個月內完成訓練。
- 五、課程內容：課程主題涵蓋輻射特性調查目的與應用、資料品質目標、廠址特定概念模型、導出濃度指引基準、廠址歷史評估、取樣設計、輻射污染掃描、課程練習等，共33個模組，課程表如圖一所示。

- Module 01: Purpose of Characterization Surveys
- Module 02: Descriptive Statistics
- Module 03: Overview of ANSI N13.59
- Module 04: Characterization and Decontamination of Buildings and Associated Structures
- Module 05: Characterization and Decontamination of Land Areas
- Module 06: Pathway Modeling and Derived Concentration Guideline Levels (DCGLs)
- Module 07: Characterization Start Point: The Historical Site Assessment Process
- Module 08: Exercise - HSA and Development of the CSM - FramKus Industries
- Module 09: Exercise - HSA and Development of the CSM - One Possible Solution - FramKus Industries
- Module 10: Sampling Designs
- Module 11: Scanning for Radiological Contamination
- Module 12: FramKus Industries Statement of Work
- Module 13: Scoping Survey Planning
- Module 14: Exercise - Scoping Survey Planning - Building Tutorial
- Module 15: Exercise - Scoping Survey Planning - Sheds 9-11
- Module 16: Exercise - Scoping Survey Planning - Warehouse C
- Module 17: Exercise - Scoping Survey Planning - Warehouses A and B
- Module 18: Exercise - Scoping Survey Planning - Class 2/3 Land Areas
- Module 19: Exercise - Scoping Survey Planning - Class 1/2 Land Areas
- Module 20: Exercise - Scoping Survey Planning - Class 1 Land Areas
- Module 21: Exercise - Scoping Survey Summary and CSM Revision - Structures
- Module 22: Exercise - Scoping Survey Summary and CSM Revision - Land Areas
- Module 23: Characterization Survey Planning-Preface
- Module 24: Exercise - Characterization Survey Planning - Sheds 9-11
- Module 25: Exercise - Characterization Survey Planning - Warehouse C
- Module 26: Exercise - Characterization Survey Planning - Warehouses A and B
- Module 27: Exercise - Characterization Survey Planning - Class 3 Land Areas
- Module 28: Exercise - Characterization Survey Planning - Class 2 Land Areas
- Module 29 - Exercise - Characterization Survey Planning - Class 1 Burn Area Contamination Bounding and Waste Disposal
- Module 30 - Exercise - Characterization Survey Planning - Class 1 Shed 1 Land Area - Determining Remediation Method
- Module 31: Exercise - Characterization Survey Planning - Class 1 Burial Pit - Probability of Identifying Hot Spot
- Module 32: Equipment and Systems Approaches
- Module 33: Data Management

圖一：課程表

## 參、過程紀要

本次訓練課程涵蓋輻射特性調查目的與應用、資料品質目標、廠址特定概念模型、導出濃度指引基準、廠址歷史評估、取樣設計、輻射污染掃描、課程練習等單元，以下謹就課程順序提供摘要說明。

### 一、輻射特性調查目的

輻射特性調查在核電廠除役過程中扮演著相當重要的角色，其目的是提供一個全面且精細的數據基礎，幫助理解污染的來源、擴散途徑，以及對環境和人類健康的潛在風險，此過程不僅影響除役計畫的制定，也對未來土地再利用及環境輻射管理產生深遠影響。

輻射特性調查的主要目的為：

- (一) **定義污染的性質及範圍**：識別污染的物理形態、具體污染物、污染的程度、污染的介質，以及污染是否有可能擴散，如地下水污染。
- (二) **支持擴散途徑分析及導出濃度指引基準(Derived Concentration Guideline Level，以下簡稱 DCGL)的開發**：途徑分析有助於定義污染如何擴散，而 DCGL 有助於確定可接受的污染濃度，對於改善措施至關重要。
- (三) **支持改善措施(Remedial Action)的規劃**：收集的數據將有助於決定後續除役行動、確保安全性、估算廢棄物體積，並最大程度地減少外釋到環境的量。
- (四) **支持最終狀態偵檢(Final Status Survey，以下簡稱 FSS)的規劃**：輻射特性調查提供的數據可以幫助設計最終狀態偵檢，確認廠址符合解除管制標準。

輻射特性調查是除役作業中最具全面性且產出最多數據的階段，其最終目的是確保廠址可達解除管制標準，為此須收集足夠多的資料規劃後續的改善措施，並為滿足最終狀態偵檢所須的諸多具體訊息，如估計特定區域的污染濃度平均值和標準差等，故輻射特性調查過程須遵循 ANSI N13.59-2008 「Characterization in Support of Decommissioning Using the Data Quality Objectives Process」，以確保數據的可信度，這些數據可供支持改善措施的規劃，以及確保最終狀態偵檢的準確性。

### 二、ANSI N13.59-2008

ANSI N13.59-2008係採用資料品質目標(Data Quality Objective，以下簡稱 DQO)的一種結構化方法，用於核子設施除役過程中規劃和執行現場輻射特性調查。該標準透過整合資料品質目標(DQO)過程，確保輻射特性調查數據收集工作達到系統化與目標導向，並且能滿足法規與安全要求，同時減少過程中不必要的資源消耗。

ANSI N13.59-2008 的重點內容分述如下：

- (一) **支持決策設計**：規劃輻射特性調查過程中，所有的設計決策都應該清楚明確，並應藉由資料品質目標(DQO)，以確保這些決策的有效性。
- (二) **高靈活性**：由於現場條件通常與預期有所不同，因此輻射特性調查的設計應具有靈活性，並允許依據現場條件進行調整，避免在現場調查中出現過度取樣或取樣不足的情況。
- (三) **目標明確**：除役的最終目標是解除廠址管制，因此輻射特性調查應以支持最終狀態偵檢為目的進行設計，確保所收集的數據足夠可靠且具有合規性。
- (四) **分級方法**：調查的努力應該根據污染的可能程度進行分級，即污染潛力大的區域應進行更多的調查，並在滿足技術和法規需求的同時，達到資源的有效整合。

ANSI N13.59-2008亦為核設施除役活動提供多方面的指導，包含：

- (一) 廠址輻射特性調查：
  - 確定放射性污染的性質和範圍。
  - 支持改善措施的規劃和風險評估。
- (二) 廢棄物分類與管理：
  - 指導廢棄物的分類、處理。
  - 確保遵守清理標準並實現資源最佳化。
- (三) 合規性驗證：
  - 提供一個結構化的方法來證明符合清理標準。
  - 支持最終狀態偵檢(FSS)，以確認廠址條件符合解除管制標準。
- (四) 與管制機關和利害關係人之互動：
  - 通過詳實的數據紀錄促進透明的決策過程。
  - 增強與管制機關、利害關係人及公眾的溝通。

### 三、輻射特性調查之應用

為鑑別核子設施中各個偵檢單元之輻射污染程度，輻射特性調查過程涉及多種輻射偵測方式，而偵測方式與偵檢儀器之選擇均取決於現場環境情形與輻射污染狀況。課程中針對建築物及相關結構、土地進行區分，講述輻射污染偵測與除污的方法。

#### (一) 建築物及相關結構

核子設施拆除作業的兩大曝露途徑為體外輻射曝露和體內吸入曝露。體外曝露可透過控管工作人員作業時間，或利用長柄式、遠程遙控式輻射偵檢器來減少；吸入曝露則可透過設立臨時帳篷、或使用 HEPA 過濾通風系統來控制。拆除工作常見的活動包括混凝土與管道/通風管的移除，這些操作通常需要使用各種切割工具，如圓盤鋸、

雷射切割機等。

依據「多部會輻射偵檢與廠址調查手冊(MARSSIM)」，常用的手持儀器包括蓋革偵檢器(GM)、氣體流量比例計數器等。此外，還可以使用專門儀器達到更高效的偵檢效率，例如箱型偵檢器。

除污活動通常可以透過物理/機械、化學、電化學或金屬熔融等方法進行。常見的除污方法包括真空吸塵、研磨、化學除污等。除污過程中需要考慮的問題包括可能產生的廢棄物種類及產生廢棄物的後續處理方式。

## (二) 土地

「多部會輻射偵檢與廠址調查手冊(MARSSIM)」定義表土為距離表面6吋(約15公分)以內的土壤區域，有三種方式可用來偵測土壤，分別為掃描、取樣以及直接偵測。掃描通常是最初採取的步驟，通常使用碘化鈉(NaI)偵檢器進行加馬輻射掃描，這可以有效檢測到熱點(hot spot)污染區域，並配合全球定位系統(GPS)來紀錄污染點的位置，以便後續進行詳細調查。取樣則是進一步鑑定污染程度的重要方法，通常依據廠址歷史評估(HSA)資料判斷該區域的污染是否均勻分布，以選擇使用隨機或主觀方式取點，若污染分布均勻建議使用隨機取樣；若存在局部熱點，則可針對高機率污染區域採取主觀取樣，另應根據土壤的狀況選擇合適的取樣深度和工具，表層土壤樣本的採集可以使用鏟子、滑錘或螺旋鑽等工具。

若土壤污染達到一定程度，則需要進行除污。常見的除污方法有土壤分類(sorting)和洗滌(washing)，分類(sorting)是指將土壤通過安裝碘化鈉偵檢器的傳送帶，根據偵檢器的反應，土壤會被分類為「乾淨土壤」或「受污染土壤」，土壤分類技術已在多個美國能源部(DOE)設施中使用，然而分類並不適用於污染均勻分布的土壤。洗滌(washing)是指將土壤與水混合，攪拌並過篩的過程。其目的是將粗顆粒土壤與細顆粒土壤分離，因為細顆粒土壤更有可能被污染，在清洗完成後，較細的、受污染的顆粒會懸浮在水中，這些顆粒可進一步分析後作為廢棄物處理，透過這些方法可以有效減少污染土壤的處理量。或可使用更高效的技術，如現地玻璃化技術(In-situ vitrification)，將污染土壤以攝氏1600-2000度的高溫加熱，轉化為玻璃狀物質，從而將污染物進行固化。

## 四、統計檢定

除役過程將透過輻射偵檢確認偵檢區域是否符合外釋標準，為使偵檢作業能發揮最大效益，經營者將以有限資源執行偵檢作業，並透過各種統計檢定方式確認偵檢結果。一般使用的統計檢定方式包含參數型或非參數型，取決於資料的分佈情形，參數型統計檢定係假設數據為常態分佈，非參數統計檢定則可適用於任何分佈情形。除役

過程中，由於不確定廠址的基礎分佈情形，因此通常使用非參數統計檢定方式。

MARSSIM 手冊建議的非參數統計檢定包含 Sign Test 及 WRS(Wilcoxon Rank Sum) Test，統計檢定型式的採用，與所關注的放射性核種是否出現於背景中有關。若偵檢單元所關注的核種為天然背景核種時，建議採用 WRS 統計檢定法。當所關注的核種並未在背景中出現時，則建議採用 Sign Test 統計檢定法。

## 五、資料品質目標

資料品質目標(DQO)係由美國環保署(EPA)所開發，具靈活性及迭代性的決策制定步驟，旨在指導有效利用環境數據的收集，以支持決策的合規性，用於確保輻射偵測的結果具有充分的品質與數量，可支持最終廠址解除管制的決定。

DQO 過程包含七個關鍵步驟，分述如下：

### 步驟1、陳述問題(State the problem)：

決策的第一步是清楚定義問題，以便專注於明確的目標。此步驟的預期產出為：

- 確認規劃團隊成員：這將取決於問題的規模和複雜性。應包括所有利害關係人的代表。
- 確認決策者：決策者是團隊的領導者，對最終決策具有最高權限。
- 簡要描述問題：描述目前對於問題的理解，如果問題較為複雜，可考慮將其分解為幾個部分。如以最終狀態偵檢為例，對問題的描述通常涉及證明全部或部分廠址符合法規解除管制標準。
- 總結問題的可用資源和調查期限：可用資源和調查期限通常建立在廠址特定的基礎上加以確認。

### 步驟2、陳述決策(State the decisions)：

此步驟的目的是定義現場工作須採取之決策，將主要研究問題與對應的行動結合起來，形成決策陳述，倘若需要多個單獨的決策時，應個別列出並定義解決這些決策的順序。

### 步驟3、識別決策所需的資料輸入(Identify the inputs to the decisions)

有效的決策當取決於數據與資訊的收集，在此步驟中，將著重於具體說明制定決策時所需的各種資訊，包含：

- 確定所需的變數或其他資訊
- 確定所需資訊的來源
- 確認是否存在適當的分析方法來提供所需數據

### 步驟4、明確決策的範圍界限(Specify boundaries for the decisions)

此步驟的目的是詳細描述問題的範圍，以定義決策所涵蓋的空間和時間邊界，範圍須專注於研究中受影響最大的區域進行取樣和分析，並識別任何數據收集的實際限制，例如天氣、濕度、季節等，這些因素都可能影響到數據的收集。

#### 步驟5、陳述決策規則(State the decision rules)

此步驟的目的是定義關注參數與指定行動基準，並將先前 DQO 的結果整合為單一陳述，如「若…則…」的決策規則，以描述選擇替代行動的邏輯依據。

例如：若某偵檢單元之輻射特性調查數據確認其符合 class 2標準，且測得表面劑量率之相對偏移均大於1，則使用此數據作為最終狀態偵檢之依據；若非如此，則須額外數據以精確估算，並檢查是否能將不同類型區域再細分，以減少整體評估變異性，使其相對偏移值介於1至3之間；抑或如果超過 DCGL，則重新進行分類並進一步調查。

#### 步驟6、陳述可接受的誤差範圍(State acceptable error tolerances)

此一步驟允許為決策錯誤設定容許誤差範圍，基於對做出錯誤決策後果的考量，涉及了偽陽性與偽陰性的限度，其對應的誤判容許率分別為 TYPE I 誤差( $\alpha$ )與 TYPE II 誤差( $\beta$ )，規劃的目標是有效設計調查流程，以減少做出錯誤決策的可能性。

#### 步驟7、優化取樣設計(Optimize the sampling design)

此步驟為回顧 DQO 前六步的結果，並確定它們是否與最終目標一致。選擇最具資源分配效益的數據收集策略，以滿足所有的 DQO，可能包括簡單隨機取樣、分層隨機取樣、系統性取樣等。此外也須選擇滿足 DQO 的最佳樣本大小，若成本(或其他限制)與所需數據不匹配，則需要放寬其中一個限制條件，例如，增加預算、提高容許的誤差率、放寬時間期限、改變調查範圍等。

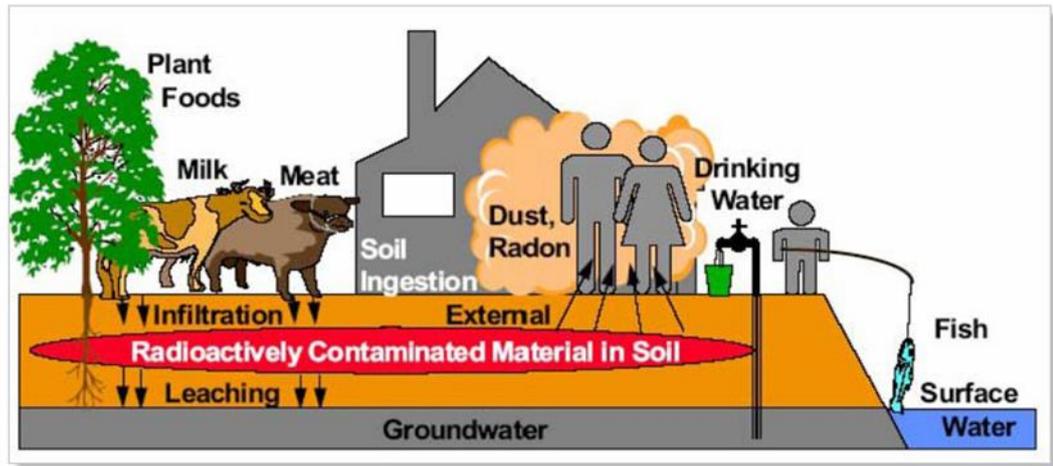
### 六、廠址特定概念模型

廠址特定概念模型(Site-Specific Conceptual Model)旨在透過圖型描述特定廠址中重要的環境傳輸與曝露途徑，可幫助識別並理解污染源、外釋機制、遷移路徑、曝露途徑和有關受體。這個模型能夠清晰地顯示哪些污染途徑對受體可能構成顯著的輻射劑量，可幫助輻射特性調查之規劃，並填補調查當中的數據缺失，進而為後續的 DCGL 計算提供依據，廠址特定概念模型範例如圖二。

一般來說，廠址特定概念模型會包含以下元素：

- 污染源(例如：研究實驗室表面)
- 可能的的外釋機制(例如：滲漏和逕流)
- 遷移途徑(例如：地下水或塵埃)

- 主要曝露途徑(例如：攝入或吸入)
- 潛在的受體(例如：建築物內的居住者或農場居民)



圖二、廠址特定概念模型

## 七、導出濃度指引基準(DCGL)

解除管制標準是針對除役廠址中殘餘污染的法定限值，美國核管會(NRC)規定，當解除管制目標為非限制性使用，且廠址殘餘污染可與背景輻射區分的情形下，其造成關鍵群體年有效劑量不得超過25毫侖目(25 mrem/yr)。

為便於執行廠址復原及管制作業，上述年有效劑量標準可透過轉換成可直接量測到的放射性核種濃度(Bq/kg)，即導出濃度指引基準(DCGL)來量化。DCGL 是指在特定區域內允許的最大平均污染濃度，當濃度不超過這一限值時，該區域的輻射污染風險被認為對公眾健康和環境是可接受的。

DCGL 的目的是確保除役後的核電廠廠址能夠達到適當的安全標準，以使廠址可供重新利用，而不對公眾健康造成威脅。此值可以針對單一核種或特定核種混合物而制定。基於污染範圍的不同，DCGL 可分為適用於大面積的  $DCGL_w$ ，以及適用於小面積高活度區域的  $DCGL_{EMC}$ 。

(一) 若以美國對於除役核電廠解除管制之標準 25 mrem/yr 為例，若某一區域僅存在單一放射性核種，假設此核種每單位活度可產生 8.4 mrem 之劑量，則此一放射性核種的 DCGL 值可由下式推算：

$$DCGL = \frac{25 \text{ mrem/yr}}{(8.4 \text{ mrem/yr})/(1 \text{ pCi/g})} = \frac{3 \text{ pCi}}{g} \quad \text{式一}$$

(二) 多污染物的處理方法：當廠址存在多種污染物時，可運用值一法則(Unity Rule)和替代法則(Surrogate Method)推導出適當的 DCGL。

(1) 值一法則(Unity Rule)：

適用於全部放射性核種都可被輕易測量的情況，若某區域中每個放射性核種的濃度與各自 DCGL 之比例相加小於 1 時，代表此區域可符合解除管制標準。

$$\frac{C_1}{DCGL_1} + \frac{C_2}{DCGL_2} + \dots + \frac{C_n}{DCGL_n} \leq 1 \quad \text{式二}$$

$C_n$  = 某個放射性核種的平均濃度

$DCGL_n$  = 某個放射性核種的 DCGL 值

(2) 替代法則(Surrogate Method)：

基於成本考量，我們可透過較易量測核種(亦即分析成本較低之核種)與較難量測核種(分析成本較高)之間的比例關係，藉由前者(代表核種，surrogate radionuclide)說明後者(推論核種，inferred radionuclide)的存在，其 DCGL 可由下式得出：

$$DCGL_{SURR,Mod} = \frac{1}{\frac{1}{DCGL_{SURR}} + \frac{R_2}{DCGL_2} + \dots + \frac{R_n}{DCGL_n}} \quad \text{式三}$$

$DCGL_{SURR,Mod}$  = 代表核種修正後的 DCGL 值

$DCGL_{SURR}$  = 代表核種修正前的 DCGL 值

$R_n$  = 某推論核種與代表核種活度的比值

$DCGL_n$  = 某推論核種的 DCGL 值

## 八、廠址歷史評估

廠址歷史評估(Historical Site Assessment, HSA)是一項調查工作，蒐集自電廠開始運轉至今，與廠址有關的歷史資料，進行彙整和分析，其目的是確認放射性物質與潛在或已知污染的來源、評估是否有污染遷移的可能性、提供後續範圍偵檢與輻射特性調查所需資訊，以及初步評估廠址或偵檢單元為受影響區(Impacted Area)或未受影響區(Non-Impacted Area)。

依據 MARSSIM 手冊定義，未受影響區係指沒有合理潛在殘餘污染的區域。受影響區域則為可能有潛在殘餘污染的區域，並可更進一步分為三級：

- 第1級(Class 1)：根據廠址運轉歷史，此區域曾經或目前存在放射性污染，且污染程度超過  $DCGL_w$ ，即使經過改善措施仍可能受影響。
- 第2級(Class 2)：曾經或目前可能存在放射性污染，但預期污染程度不會超過  $DCGL_w$ 。
- 第3級(Class 3)：任何受影響的區域，依據廠址運轉歷史和先前的輻射調查，此區域預期不含任何殘餘放射性污染物，或其活度遠低於  $DCGL_w$ 。

廠址歷史評估主要分為三個階段，包含廠址確認、初步廠址調查，以及廠址勘查。廠址確認係確認潛在放射性污染的廠址。初步廠址調查作業是蒐集設施或廠址與周圍的資料，以取得足夠資訊，將廠址或偵檢單元初步分類為受影響區或未受影響區。蒐集的關鍵資訊包括污染的放射性核種、污染的位置和濃度、污染的物理和化學形式，以及任何潛在的曝露途徑。可蒐集的資訊來源包括：管制文件、運轉紀錄、員工訪談、航空照片、輻射測量、地形圖、設施相關圖示、廢棄物去向等資料。廠址勘查則係針對資料不足的廠址，透過現場收集資訊，並紀錄廠址、建物與結構情形，以決定未來要採行的作業及執行偵檢作業的參考。

課程假設一個 FramKus Industries 廠址，該廠址由軍方自1939年開始進行放射性物質相關作業，運作20年後決定除役。經營者已處置廠內多數設施與設備，並拆除電線、管道和通風管路等設備。另亦提供廠址歷史評估(HSA)報告、航空照片、廠房建物和土地面積的描述、部分建物照片、放射性劑量相關數據及管制機關核發之放射性物質使用執照等文件。由受訓學員利用廠址歷史評估期間收集的資訊，依據潛在污染的可能性，對 FramKus Industries 廠址的建物和土地進行初步分類，並發展廠址概念模型，以規劃後續範圍偵檢與輻射特性調查作業等工作。

訓練教材假設整個 FramKus Industries 廠址的殘餘放射性污染超過自然背景水平，因此所有區域均為受影響區。再透過專業判斷，評估建物或土地污染情形，並將其區分為三類：Class 1、2、3。若評估的分類結果有不確定性，則該區域可能初步分類為 Class 1/2或2/3，例如廠址內北部區域土地，因該區域曾貯存和運送非密封放射性物質，故初步判斷為 Class 1/2。另外，若沒有可用資訊時，則預設該區域為 Class 1，例如廠房1、2因為從未進行輻射偵檢與分析，所以沒有可用的數據能證明該廠房有低於 Class 1的可能性，初步評估結果即為 Class 1。最後再將廠房建物及土地的初步分類結果，整併成完整的 FramKus Industries 廠址，並以顏色區分 Class 1、2、3，作為初步廠址概念模型。

## 九、取樣設計

經營者規劃取樣調查時，一般係以非機率式取樣(Non-probabilistic sampling)和機率式取樣(Probabilistic sampling)等方法為主。非機率式取樣主要係以專業知識或判斷選擇取樣位置，例如判斷取樣(Judgmental sampling)中，選擇的取樣位置係基於專業知識或經驗等主觀條件(如加馬輻射水平升高的位置)，而便利取樣(Convenience sampling)則是在鄰近、易於取得，或進行其他廠址調查作業時取得的樣本，關鍵是這些樣本不是隨機的樣本。而機率式取樣則以隨機方式瞭解調查區域內樣品分佈結果，確保區域內每個可能位置都具有相同的選擇機率。

經營者選擇抽樣方法需考慮多項因素，包括實施抽樣計畫所需投入的人力資源、成本，以及該資料的用途，重要的是知道如何使用此數據，並了解隨機取樣位置和判斷取樣位置之間的差異性。

### (一) 判斷取樣設計

判斷取樣通常應用於專案生命週期的初期階段，或在預算與時間有限的情況下，現場調查進行的方式。例如，在專案初期，可能需要確認是否須進一步執行詳細調查，並針對污染可能性最高的區域(如建物表面、排水溝渠等)收集判斷樣本。此外，判斷性樣本也可用於調查特定的小範圍高活度區域。

雖然判斷取樣結果可為特定調查作業提供參考，但該資料應謹慎應用於統計數據(如平均值與變異數)。例如，來自熱點(hot spot)區域的判斷性樣本資料，不應與隨機樣本結果合併，估算整個調查區域的平均濃度。因此，判斷樣本結果通常須獨立評估。

### (二) 隨機取樣設計

相較於判斷性抽樣，隨機取樣適用於總體參數估計(如平均值、標準差及其他統計參數)。例如，在解除管制的情境下，通常需根據平均濃度進行評估，而隨機抽樣能較為準確地估計平均濃度，相較之下，判斷性抽樣則可能導致偏差。

設施經營者可依據偵檢目標選擇適當的隨機抽樣方法，主要包括普通隨機抽樣(Ordinary Random Sampling)與系統網格抽樣(Systematic Grid Sampling)。

#### (1) 普通隨機(Ordinary Random)：

假設污染物在區域內均勻分布，在任何位置採集的樣品具有相似的結果，可適用於計算平均值、變異數、信心水平與其他統計參數。

#### (2) 系統化或網格化(Systematic Grid)：

考量部分區域中，污染濃度並非均勻分佈，可透過系統或網格設計，規劃一個隨機的起點，再依長方形或三角形模式，計算兩點之間的距離，由起始取樣點的位置往外取樣。

$$\text{長方形網格 } L = \sqrt{\frac{A}{n}} \quad \text{三角網格 } L = \sqrt{\frac{A}{0.866n}}$$

L：各測量點之間格距離(m)；A：偵檢單元面積(m<sup>2</sup>)；n：取樣所需點數

依據 MARSSIM 手冊所提建議，設施經營者應結合判斷性抽樣和隨機抽樣的抽樣設計。針對 Class 3 偵檢單元，因幾乎沒有超過 DCGL 的可能性，MARSSIM 建議使用普通隨機抽樣分佈；對於 Class 1、2 偵檢單元，則建議使用系統性三角網格設計抽樣。

此外，對於局部高輻射區域，不論偵檢單元的類別，設施經營者均可採用判斷性取樣進行調查作業。

## 十、輻射污染掃描

輻射偵測方式主要可區分為三類，分別為動態掃描、取樣，以及靜態表面測量。而在輻射特性調查中，掃描是非常普遍的偵測手段，除了依據可能的衰變產物選擇適當的偵檢儀器外，偵檢人員也須依照偵檢物的幾何樣式採用不同的偵測方式，以下分別就體積污染與表面污染進行介紹。

### (一) 體積污染(volumetric contamination)

掃描體積污染通常使用碘化鈉偵檢器，碘化鈉偵檢器對於鈾或鈾礦石這類放射性核種及某些分裂產物(如 Cs-137)具有高敏感性。體積污染通常會放出足夠的加馬輻射，可被碘化鈉偵檢器探測到，假使污染物不包含產生加馬輻射的放射性核種，例如 Sr-90，則掃描方式可能無效。在此情況下，偵檢方式通常會如化學污染般，僅依賴取樣方式進行。

一般的偵測模式是掃描人員手持碘化鈉偵檢器，以每秒約2-3英尺(約0.6-0.9公尺)速度行走，並以 S 形軌跡進行掃描。保持偵檢器與地面的距離(盡量保持4-5英吋，約0.1-0.12公尺)，以及維持一定掃描速度皆與掃描品質息息相關。倘若掃描人員步行速度過快，偵檢器可能無法在小範圍內有足夠時間產生顯著的反應。此外，最佳做法是掃描人員使用耳機來專注聽取偵檢器的反應(點擊聲)，當輻射或污染程度增加時，點擊聲的數量或每分鐘計數(cpm)也會跟著增加。因此，如果掃描人員在某片土壤中發現偵檢器反應顯著增加，那麼該區域可能存在較高的輻射水平，應進一步進行調查。

### (二) 表面污染(surface contamination)

表面污染掃描方式並不像體積污染掃描那麼直接。首先規劃者需要了解污染物所釋放的輻射類型( $\alpha$ 、 $\beta$  或  $\alpha + \beta$ )。某些偵檢器專門配置為測量  $\alpha$  輻射，如硫化鋅；或  $\beta$  輻射，如塑膠閃爍偵檢器；而其他偵檢器可以配置為測量  $\alpha + \beta$  輻射，如氣體比例偵檢器。

無論選擇何種偵檢器，表面掃描的調查技術與體積掃描有所不同。例如，偵檢器的反應仍然是通過可聽到的點擊聲(cpm)來表示，但對於表面掃描的偵檢器而言，計數率顯著較低。在沒有任何污染物(即背景條件)的情況下，掃描人員可以預期  $\alpha$  偵檢器的點擊率為1-2 cpm，GM 為50-60 cpm，其他  $\beta$  輻射或  $\alpha + \beta$  輻射偵檢器的點擊率則為300-600 cpm。表面掃描和體積掃描的另一個重要區別是掃描的速度。表面掃描通常是在每秒約一個偵檢器寬度的速度下進行。另外，表面掃描須盡可能將偵檢器探頭靠近

測量物表面，偵檢器到測量物表面的距離通常是0.25英寸(約0.6公分，亦即非常接近)。

一般而言，掃描技術適用於鑑別輻射熱點(hot spot)的存在，其通常對於輻射的敏感度較低，且無法鑑別核種種類，但可協助偵測人員覆蓋大範圍區域並鎖定可能的污染點。當掃描過程中某區域出現較高的偵檢器反應時，可在此區域內採取靜態測量，以獲得較精確的輻射偵檢數據，並將其值與 DCGL 進行直接比較，以規劃後續的決策行動。

## 十一、範圍偵檢規劃

若廠址歷史評估(HSA)所收集的資訊顯示某個區域為受影響區，則可進行範圍偵檢(Scoping Survey)。範圍偵檢基於有限的測量數據，提供廠址相關資訊，其目的包括：進行初步危害評估、協助將全部或部分廠址分類為第 3 級區域，以及提供輻射特性調查設計所需的輸入數據等。然而，根據訓練教材，範圍偵檢並非必要作業程序，對於現場歷史資料充足、輻射或運轉歷史相對簡單，或污染程度嚴重的情況，經營者可視需求決定是否執行範圍偵檢，以確認其必要性。

範圍偵檢主要依據廠址歷史評估結果進行判斷性量測。如果評估結果顯示某個區域屬於第 3 級，且未發現污染，則可直接將該區域分類為第 3 級，並執行第 3 級最終狀態偵檢。若範圍偵檢發現污染，則該區域可能需重新分類為第 1 級或第 2 級，並進一步執行輻射特性調查，以收集足夠資訊，確認是否存在需立即處理的放射性問題。

範圍偵檢的規劃涉及審查廠址歷史評估等相關資訊，並評估與放射性物質有關的洩漏、貯存、外釋或其他資訊。一般作法是補充廠址歷史評估的資訊，例如放射性污染的位置、範圍、強度及種類等資訊。因此在設計上，範圍偵檢基於專業判斷進行，而輻射特性調查、改善措施輔助偵檢和最終狀態偵檢的設計，則會納入統計概念。另訓練教材指出範圍偵檢應基於資料品質目標(DQOs)的程序，以確保能取得適當品質和數量的數據。此外，該文件還應涵蓋實驗室分析要求、儀器設備、偵檢與取樣程序，以及經營者執行偵檢時所需的其他資訊。因此，一般範圍偵檢計畫包括引言、廠址歷史摘要、資料品質目標(DQOs)、作業指引、健康與安全要求、數據管理、樣品管理、分析實驗室要求、報告要求等。

評估偵檢結果時，可透過直接量測或實驗室分析識別廠址內潛在放射性核種。此外，偵檢數據須轉換為與導出濃度指引基準(DCGL)相同的單位，並與其進行比較。若範圍偵檢目的是提供廠址輻射危害的初步評估，或提供輻射特性調查的額外資訊，則偵檢數據應提供殘餘放射性物質的位置及初步範圍。

範圍偵檢結果的紀錄方式取決於偵檢的具體目標。若是提供輻射特性調查的補充

資訊，文件應包含廠址的輻射狀況概述。偵檢結果亦應包含識別潛在污染物(包括識別放射性核種的方法)、污染程度(如活度濃度、污染面積、污染深度)，以及與導出濃度指引基準相對之比值。若經營者規劃將廠址外釋，則應該提出與最終狀態偵檢相同程度的報告。

## 十二、輻射特性調查規劃

若廠址歷史評估和範圍偵檢的結果，偵檢單元在最終狀態偵檢中可能被分類為第1類或第2類區域時，則應進行輻射特性調查。其偵檢規劃係依廠址歷史評估和範圍偵檢結果，對污染區域進行詳細放射性環境特性調查。主要目的是決定污染性質與範圍、收集數據以選擇改善措施與技術，以及提供最終狀態偵檢設計的輸入數據。輻射特性調查作業主要釐清下列問題。

### (一) 污染的性質和範圍

輻射特性調查階段前，經營者應有初步廠址概念模型，顯示已知污染的位置、疑似污染區域，以及其他廠址相關資訊。輻射特性調查應能清楚了解污染物具體的位置和濃度，例如污染物的平均值、最大值、標準偏差等，並確定污染物濃度是否超過 DCGL，以及超過的具體位置及超過的程度。偵檢數據亦可用來進一步修訂 DCGL 的數值。

### (二) 偵檢數據應適用於規劃改善措施

輻射特性調查數據及廠址概念模型應確認哪些物料的污染濃度超過 DCGL 標準，以及污染的分佈狀況，以確認須要清除的物料。此外，由於美國部分處置設施對污染物濃度、廢棄物的形式、容器體積等有其限制，因此輻射特性調查數據可確認符合處置設施的廢料接受標準。

### (三) 偵檢數據應足以適用於最終狀態偵檢設計

最終狀態偵檢的關鍵輸入數據包含分類、偵檢單元範圍，以及範圍內污染物的平均值和標準差，因此輻射特性調查須確認先前分類的結果，並依 MARSSIM 手冊規定，依每個分類結果擬定適當的偵檢單元，並估算污染物的平均值和標準差，以確定每個偵檢單元須要收集的樣本數量。

輻射特性調查作業應以廠址歷史評估及範圍偵檢結果做為基礎，透過資料品質目標程序進行設計，並擬定輻射特性調查計畫，包括簡介、廠址歷史摘要、初步偵檢摘要、資料品質目標(DQOs)、作業指引、健康與安全要求、數據管理、樣本管理、分析實驗室要求、報告要求等，以確保偵檢結果符合要求。

若輻射特性調查數據要作為最終偵檢補充數據時，應以統計學的方法確認偵檢單元是否符合外釋標準。若做為改善措施的參考指引時，亦應確認殘餘放射性的位置與

範圍，並將偵檢結果與 DCGL 進行比較，區分為超過 DCGL、未超過 DCGL 或未受污染。對於直接測量顯示有較高活性的區域，亦需進一步評估，以確定是否需要進行額外測量。

### 十三、課程練習

課程模擬一個假設的 FramKus Industries 廠址土地與建物，提供受訓學員依循資料品質目標(DQO)程序，練習如何設計範圍偵檢與輻射特性調查，以下就該廠址第三級土地設計輻射特性調查規畫進行摘要說明。

#### (1) 步驟1、陳述問題

依範圍偵檢數據顯示，該區域殘餘污染濃度超過導出濃度指引基準(DCGL)的可能性較低，因此初步分類為第3級區域。為確認分類結果的正確性，經營者執行輻射特性調查，以確認放射性核種濃度遠低於導出濃度指引基準(DCGL)。本項陳述問題內容為目標土地區域依 MARSSIM 分類為第3級偵檢單元，預期偵檢數據可佐證最終狀態決策。

#### (2) 步驟2、陳述決策

本項說明須解決的主要研究問題(Principal Study Questions, PSQ)，並提出可能的決策方案。

主要研究問題：廠址內關切的放射性核種(Radionuclides of Concern，以下簡稱 ROC)濃度是否遠低於 DCGL？

- 若是，則確認收集的數據符合最終狀態偵檢要求。
- 若否，則將不可接受區域劃分為新的偵檢單元，重新分類，並得出結論，該偵檢單元不符合最終狀態要求。

#### (3) 步驟3、識別決策所需的資料輸入

經營者須考慮的數據包含土壤取樣的分析結果、表面掃描、導出濃度指引基準及替代比值、初步偵檢數據、現場及實驗室分析程序等。

#### (4) 步驟4、明確決策的範圍界限

研究範圍主要考量空間、時間等因素。空間範圍部分主要包含第3級土地的偵檢範圍，調查對象僅限於表土，不包含更深層土壤或地下水。時間範圍部分則依計畫所訂工作時程內完成。

#### (5) 步驟5、陳述決策規則

本項調查過程中，關鍵參數是每個放射性核種的平均值與標準差，經營者須確認每個偵檢單元關切的放射性核種(ROC)平均濃度低於導出濃度指引基準(DCGL)，以確保符合標準。因此決策規則為：

- 如果數據顯示，偵檢單元內關切的放射性核種(ROC)平均值低於導出濃度指引基準(DCGL)，則可直接使用這些數據進行最終狀態偵檢(FSS)。
- 如果數據顯示，關切的放射性核種(ROC)平均值超過導出濃度指引基準(DCGL)，則須進一步細分偵檢單元，並重新規劃最終狀態偵檢(FSS)。

#### (6) 步驟6、陳述可接受的誤差範圍

偵檢過程中，單一污染物的偵檢單元使用 Sign Test。多核種污染物的偵檢單元則以 WRS Test。決策誤差部分，型一錯誤及型二錯誤均為0.05。

#### (7) 步驟7、優化取樣設計

資料品質目標(DQO)的第7步係評估不同的數據收集方法，並選擇最適合的方案。而訓練教材說明前項第一步至第六步已納入保守考量，例如初步範圍偵檢數據(Scoping Data)已包含 Cs-137、U 和 Th 的總濃度，且數據中亦涵蓋背景輻射的影響。

取樣規劃部分，演練案例區分為污染物存在於背景區域及不存在背景區域。針對污染物不存在於背景區域，以 Sign Test 單樣本檢定，不需要與背景參考區域對比。而污染物存在於背景區域之案例，則以 WRS Test 雙樣本檢定。兩案例分別透過計算相對偏移及對應的誤判容許率等，使用電腦輔助軟體 VSP(Visual Sample Plan)，隨機規劃偵檢單元的取樣位置。

### 十四、數據管理

數據生命週期(Data Life Cycle)可適用於所有偵檢類型，如範圍偵檢、輻射特性調查、改善措施輔助偵檢與最終狀態偵檢，且主要由三個階段組成：

(一) 規劃階段：MARSSIM 手冊主要使用品質保證計畫(Quality Assurance Project Plan，以下簡稱 QAPP)紀錄品質保證程序與品質管制作業。在規劃階段時，該品質保證計畫應擬定資料品質目標的作業程序，並包含數據管理規劃，例如需收集哪種類型的數據；收集數據的方法(如掃描或取樣)；適用哪種數據格式或標準；如何使用數據；如何分享數據；是否符合政策要求等。

(二) 實施階段：所有參與計畫的人員都可取得最新的品質保證計畫(QAPP)，且現場工作人員的訓練證書應證明其具備執行標準作業程序的能力。實施階段也要持續評估與稽核是否如期執行取樣計畫；工作人員是否正確執行取樣作業；是否對避免交叉污染採取適當措施；是否正確測試與維護偵檢儀器；是否正確執行掃描作業；工作人員是否了解參考網格系統；紀錄的訊息是否準確且完整。

若現場作業期間，有無法預期的情況，需調整標準作業程序，其修訂後的程序應

合理，並在工作日誌或相關文件中詳細記錄。

(三) 評估階段：數據收集完成後，就需要決定是否接受、拒絕或有限使用該數據，以符合偵檢的目標。

- (1) 數據驗證(verification)：評估數據的完整性、正確性，以及是否符合相關程序規定，本項作業通常會在實施階段與評估階段持續進行。
- (2) 數據確認(validation)：評估數據的品質，多數在取得數據並進行數據處理後進行。通常多與實驗室分析相關，但也可以適用於現場測量。
- (3) 數據品質評估：完成數據驗證與確認後，應確認獲得所需的數據、確認數據與預期一致、對數據進行統計分析，以及評估數據的空間分布(例如直條圖或分布圖)等。

## 肆、心得與建議

- 一、本課程旨在強調輻射特性調查在核電廠除役過程中所發揮的功能，從最初的廠址歷史評估、範圍偵檢，到輻射特性調查及後續的改善措施輔助偵檢與最終狀態偵檢，每個步驟均環環相扣。輻射特性調查之初期規劃取決於過去廠址已知的輻射偵測紀錄與範圍偵檢數據；其產出之數據則可用於規劃後續改善措施與支持最終狀態偵檢之可信度。在此之中，DQO 的使用可提供廠址輻射特性調查多方面的益處，包含可根據廠址條件和項目需求的變化，靈活調整數據收集與分析策略；並透過合理有效的資源分配，以縮短整體調查時間；最終確保廠址改善措施與最終狀態偵檢之決策係基於準確合理之數據，且符合 DCGL 與相關法規之要求。
- 二、在核電廠除役過程中，輻射特性調查扮演著關鍵角色，輻射特性調查不僅有助於精確地確定污染的性質和範圍，還能提供後續的改善措施與最終狀態偵檢有力支持。透過詳細的調查，能夠識別主要污染源及其遷移路徑，並進行有效的風險評估。在實際應用中，特性調查的規模和範圍將根據設施的複雜性及污染的可能程度而定，設施經營者須考量技術與能力，並參酌各國之類似作法，研擬出最佳的輻射偵檢與除污方式，過程中亦包含與主管機關間的協商與溝通。本課程藉由深入淺出的方式將複雜難懂的觀念以淺白的語句及簡易的例題呈現，對於我國執行安全管制有實質性的參考價值，建議未來可持續派員參加此類課程。
- 三、資料品質目標是一系列規劃步驟，旨在建立資料品質標準與偵檢規劃，以提升偵檢的有效性、執行效益及決策準確度，並確保偵檢結果具有足夠的數據量與品質。國內核電廠亦參照美國 MARSSIM 手冊執行輻射特性調查作業，建議持續蒐集美國電廠運用 MARSSIM 手冊的相關實務經驗，以深入瞭解資料品質目標的實務應用，作為安全管制的參考。
- 四、本課程為 MARSSIM 手冊的進階課程，考量範圍不僅限於輻射特性調查，更涵蓋從廠址歷史評估(HSA)至輻射特性調查等各階段的整體規劃，目標是制定可靠且經濟的輻射偵檢方案，以確保廠址最終符合解除管制標準。此外，課程設計包含實作練習題，透過建立虛擬廠址並提供相關背景文件資料，讓學員進行實戰演練。雖然練習題所選廠址為簡單放射性物質作業場所，而非核能電廠，但對於初次學習者而言，已足以幫助理解除役過程中不同污染程度區域所需考量的各種問題與細節。
- 五、本次出國訓練，原規劃參加美國橡樹嶺聯合大學(ORAU)舉辦的輻射特性調查實體

課程，然因主辦單位取消原訂課程後，改為參加線上課程。而線上課程的訓練過程以自主研讀教材為主，缺少與講師現場討論與集思廣益的機會。若未來參加類似訓練，建議優先選擇實體課程，以利參訓人員就課程內容進行深入討論，提升學習效果。