

出國報告（出國類別：實習）

赴美參加核電廠除役之「多部會輻
射偵檢設備與物質調查手冊
(MARSAME)訓練」

服務機關：核能安全委員會

姓名職稱：黃俊華技士、林子桀技士

派赴國家：美國

出國期間：112年10月27日至112年11月5日

報告日期：113年1月11日

摘 要

國內核一、二廠已陸續進入除役期間，核三廠預計於2025年停止運轉進入除役，鑒於美國已有多部機組進行除役工作，具有相當豐富的除役經驗，為蒐集美國核電廠除役作業有關輻射量測作業之相關技術與資訊，以提升國內除役管制專業與知能，本次赴美國田納西州橡樹嶺聯合大學專業訓練中心(Oak Ridge Associated Universities, ORAU)，參加112年10月30日至11月2日舉行之「多部會輻射偵檢設備與物質調查手冊(The Multi-Agency Radiation Survey and Assessment of Materials and Equipment Manual, MARSAME)」訓練課程，訓練內容所講授之方法論，主要係應用於物質與設備解除管制之輻射偵檢技術，此為國內核能電廠除役廢棄物處理之關鍵議題，涉及輻射量測規劃、設計、偵檢、判斷等實務作業，本報告將摘述說明公差過程及訓練之重點內容，並提出心得與建議。

目錄

一、目的.....	1
二、出國行程.....	2
三、實習課程內容簡述.....	4
四、心得與建議.....	12

一、目的

自107年12月起，我國核一廠、核二廠及核三廠的運轉執照陸續到期，核電廠狀態由運轉進入除役階段。執行除役作業時，設施經營者必須在執行相關作業前取得物質與設備的輻射資訊，俾利評估相關作業對工作人員造成的輻射影響，保障工作人員的輻射安全，藉此安排較適當的工作排程及防護措施，合理抑低工作人員所接受之輻射劑量。

本次奉派赴美國橡樹嶺聯合大學（Oak Ridge Associated Universities, ORAU）參加「多部會輻射偵檢設備與物質調查手冊（The Multi-Agency Radiation Survey and Assessment of Materials and Equipment, MARSAME）」訓練課程，將有助於增進本會對核設施除役物質和設備輻射量測的理解，提升本會對核設施除役相關領域的管制能力。

MARSAME 係美國核管會、環保署等部會協商，以統計方法針對除役核電廠的設備與組件規劃輻射偵測的一套程序方法。鑒於我國三座核電廠陸續進入除役階段，除役過程中將產生大量設備與組件拆除廢棄物，設施經營者為能以有效率的方式取得設備與組件之輻射特性，可選擇使用MARSAME所述之方法論，進行輻射偵測作業規劃，確保所取得之偵測數據可符合品質要求。藉由參與本次訓練課程，可以系統地獲得相關知識和經驗，同時與國際專家面對面交流，就美國與我國核電廠除役管制經驗進行交流討論，有助於了解國際上的實務做法，並將這些經驗應用到國內核電廠的輻射安全管理技術中。

二、出國行程

(一)公務行程

此次訓練自112年10月27日起至112年11月5日止，共計10日，行程如下：

日期	行程	摘要
10/27~10/29	台北→美國田納西州	去程
10/30~11/2	美國田納西州橡樹嶺	參加2023美國ORAU MARSAME課程
11/3~11/5	美國田納西州→台北	返程

(二)課程資訊

本課程由美國橡樹嶺聯合大學專業訓練中心（Oak Ridge Associated University Professional Training Programs）舉辦，培訓時間為112年10月30日至11月2日，共計4天，課程表如下：

日期	課程內容
10月30日	1. MARSAME簡介 2. 行動基準
10月31日	1. 處置偵檢之統計分析 2. 量測品質目標 3. 表面活度評估與偵檢儀器的偵測靈敏度
11月1日	1. 參照物質標的 2. 處置偵檢計畫 3. 資料品質評估 4. MARSAME實務研習
11月2日	1. 處置偵檢報告 2. 輻射調查期間之學習經驗 3. 課程總結

美國橡樹嶺聯合大學於1946年10月17日成立於美國田納西州，自成立以來，一直與美國能源部和其他政府部門合作，在科學、教育、公衛發展、公共健康等

領域均有傑出表現，並提供多方面的輻射技術培訓。自1948年以來，已經培訓包含科學家、保健物理人員、工程師、教育單位、管制單位在內，超過30,000名學員，具有豐富的經驗與實績。

本次課程的講師為David King和Andrew Owens，David King為一名具有超過30年經驗的資深保健物理師，擅長輻射相關作業數據的規劃、執行與分析，擔任ORAU的訓練課程講師。Andrew Owen自2016年以來，在ORAU擔任保健物理師，作為專業培訓計畫的講師，負責授課、發展實驗室與現場實務等工作，亦有執行獨立環境偵測驗證評估、驗證計畫，以及以加馬能譜進行in-situ非破壞量測等相關技術經驗。

三、實習課程內容簡述

(一)MARSAME簡介

MARSAME全名為Multi-Agency Radiation Survey and Assessment of Materials and Equipment，亦即「多部會輻射偵檢設備與物質調查手冊」。在美國，使用放射性物質的設施是由不同的政府機關所主管，例如核能電廠的主管機關為核管會(Nuclear Regulatory Commission, NRC)，軍方基地為國防部(Department of Defense, DOD)，部分國家實驗室為能源部(Department of Energy, DOE)所管轄，除役場址中受輻射影響之設備或物質，各機關的認定可外釋的方法及標準並不一致，為尋求一致的輻射偵測與管理方法，能源部、國防部、環保署(Environmental Protection Agency, EPA)及核管會經過跨部會協商，於2009年1月共同發行了 MARSAME手冊，用以協助物質與設備(Materials and Equipment, M&E)解除管制(Clearance)，具有可適用於不同類型的物質與設備，以及被美國管制機關普遍接受等優點。事實上，在發行 MARSAME 前，針對除役場址的輻射偵測，已先於2000年8月發行 MARSSIM (Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual) 多部會輻射偵檢及場址調查手冊，而MARSAME則是作為MARSSIM的補充手冊，兩者的概念類似，均採取分級法，依據標的物受輻射影響的可能性，以統計方法規劃適當的偵測或取樣數量，進而取得標的物的輻射特性，評估是否清潔至解除管制(Clearance)。

MARSAME是依據標的物之風險高低分為Class 1(高風險)、Class 2、Class 3(低風險)及未受影響，並依分級結果建立掃描密度，風險越高者，掃描密度越高，且使用無母數統計分析法決定樣本數，並進行數據分析、採用數據品質目標(Data Quality Objective)建立偵檢計畫等。前述概念雖與MARSSIM相似，但在用字上略有差異，差異處如下表1：

表1：MARSAME與MARSSIM用字差異處

MARSAME 用字	MARSSIM 用字
處置標準(Disposition criterion)	外釋標準(Release criterion)
初始評估(Initial Assessment)	廠址歷史評估 (Historical Site Assessment)
行動基準(Action level)	導出濃度指引基準(Derived concentration guideline level)
處置偵檢(Disposition survey)	最終狀態偵測(Final status survey)

(二)物質與設備的初始評估

在執行MARSAME時，需先蒐集與物質及設備相關之基本資訊並進行評估，MARSAME將此步驟稱為初始評估 (Initial Assessment, IA)，並依收集之資訊來決定物質與設備係屬受輻射影響或未受輻射影響，其中未受輻射影響係指物質與設備未具有高於背景值之放射性核種濃度或放射性之合理可能性者，而受輻射影響為不被分類為未受輻射影響之物質與設備。

初始評估之項目包含目視檢查、歷史紀錄審查、程序知識及前哨量測 (Sentinel Measurement)。目視檢查係利用現場勘查或影像審查等方式，初步瞭解待測物質或設備之外觀狀態；歷史紀錄係藉由設施放射性物料使用紀錄、運轉紀錄、檢查報告及員工訪談等過程進行資料收集與評估；程序知識則是藉由設備的維護紀錄，取得物質或設備過往的使用資訊，評估其是否受到輻射影響；前哨量測係用來輔助判斷該設備是否受到污染，是屬於偏差型(biased)量測，與系統性量測或是隨機量測的性質不同，指的是基於某個目的，特別挑選設備的某個部位進行量測。

完成物質與設備的受輻射影響分類後，接續執行初步偵檢，初步偵檢的目的

有兩個，一為取得更為詳細的物理特性與輻射特性之資訊，物理特性包含物件的尺寸、形狀、大小、複雜性、可接近性等資訊，輻射特性則包含核種種類、活度、分布、位置等資訊。二為針對物質與設備進行偵檢單元劃分，並依物件材質種類進行分類，例如管件、金屬件、鋼架等。

(三)行動基準、分級與偵檢單元

行動基準的訂定是執行MARSAME過程中相當關鍵的一個環節，首先，必須了解行動基準與處置標準之間的關係，行動基準會因廢棄物的處置方式，例如是否維持現行輻防管制、採無條件外釋、針對回收或再使用進行輻防管制、能否歸類為事業廢棄物或作為放射性廢棄物等情形，而有所不同，當有複數個處置選擇，則伴隨著複數個行動基準。

行動基準常訂定於個別放射性核種，如用於具多種放射性核種之物件，則必須以值一法則(Unity rule)進行計算，得到修正後的行動基準值。

$$AL_{gross} = \frac{1}{\frac{f_1}{AL_1} + \frac{f_2}{AL_2} + \dots + \frac{f_n}{AL_n}}$$

AL_{gross} =所有核種進行計算後之結果

AL_1 = 第1個核種的行動基準 (例如 Cs-137)

f_1 = 第1個核種所佔有的分率

AL_2 = 第2個核種的行動基準 (例如 Co-60)

f_2 = 第2個核種所佔有的分率

對於受影響設備與物質，執行團隊將其進一步分級為第1、2或3級。當設備與物質具有以下三種情況時，會分類為第1級：(1)其所含有的核種濃度或放射性，已知或有可能高於行動基準者(Action Level, AL)；(2)設備或物質有小範圍具有較高的核種濃度；(3)證據不足以將其分類為第2或第3級時。此分級通常係指在機組運轉期間，直接與放射性物質接觸，或是因活化而可能超過行動基準之設備與物

質，因具有較高的污染可能，在執行偵檢時，必須投入較多的資源。

第2級係指物質與設備所含有的核種濃度或放射性，高於行動基準之可能性低，或是幾乎沒有小範圍高核種濃度之情形，即分為第2級；第3級係指物質與設備所含有的核種濃度或放射性，幾乎沒有高於背景值之可能性，或是證據不足以支持將其分類為未受輻射影響之情形，則分為第3級。

除了前述行動基準以外，偵檢單元(Survey Unit)在物質與設備處置決策(disposition decision)上，也是一項很重要的考量關鍵，偵檢單元指的是執行偵檢時，對物質與設備的劃分，偵檢單元可以是一個群體或是單一物件。必須先彙整所有有關物質與設備的資訊，來決定其處置決策，而每個偵檢單元只會有一個處置決策，但對於複雜度高的物質與設備而言，常會伴隨著數個處置決策。偵檢單元可能受到行動基準、物質與設備的物理性質、輻射狀態以及量測方式等因素影響其邊界的界定，且若能夠清楚的定義偵檢單元的邊界，對於判斷後續取得的相關數據也會越容易。

(四)偵檢設計

MARSAME手冊列舉 Scan-Only survey、In situ survey、MARSSIM-type survey與Method-base survey等四個偵檢方法，但MARSAME中未特別強調method-based survey。

因物質與設備所受的污染程度差異，所需投入的偵測資源亦有差異。MARSAME手冊建議各級的掃描覆蓋比例，針對污染程度最嚴重的第1級，須執行100%表面偵測，第3級因污染程度超過行動基準的機率較低，係採專業判斷方式進行偵測，偵測範圍僅10%的設備表面，

第2級偵測比例介於10~100%，可由相對偏移值(Relative shift, Δ/σ)計算偵測比例， Δ 係指行動基準與LBGR之差值， σ 係指偵檢單元中量測群體的標準差，LBGR係指偵檢單元中的期望濃度，通常是量測數據的平均值或中間值。當 Δ 越

小，表示行動基準與LBGR之間的差異越小，此時則需要較高的偵檢比例，反之，當 Δ 越大，表示行動基準與LBGR之間的差異越大，此時的偵檢比例則較低，由圖1可看出不同相對偏移值，分別對應的偵檢比例。

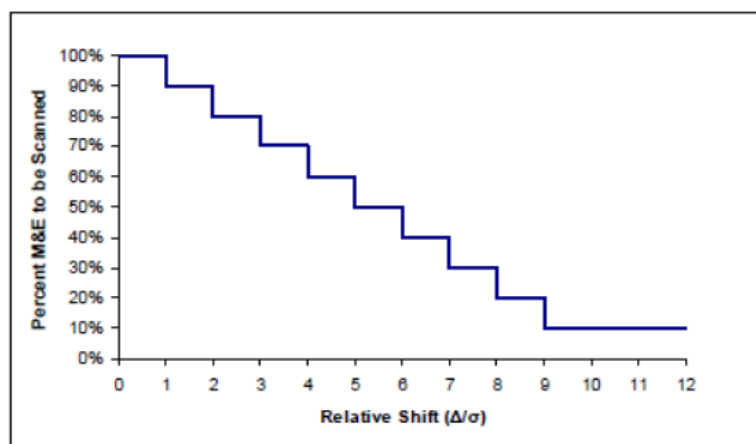


圖1：相對偏移值與偵檢比例

第一類偵檢方式Scan-Only survey係指執行偵檢時，偵檢器相對於物件，採連續移動的方法進行偵檢，執行時得以手持式偵檢儀器於物件表面定速移動，或是固定偵檢儀器的位置，以移動物件的方式進行，讀取偵檢器顯示的數值。在實務上，包括氣體比例檢測器、塑膠閃爍偵檢器、阿伐閃爍偵檢器、蓋格計數器、碘化鈉偵檢器等多種偵檢儀器可用，並依核種種類來選擇適用的偵檢器。

第二類偵檢方式In situ survey係指於適當位置執行偵檢，In situ survey屬於靜態量測，特徵為量測時會就物件進行100%表面量測，所需花費的量測時間較長，但相較於Scan-Only survey，量測次數較少，可使用純鍺偵檢(Purity germanium detector)、箱型量測(Box counter)、門框偵檢器(Portal monitor)等偵檢儀器進行量測。

第三類偵檢方式為MARSSIM-type survey，MARSSIM-type survey係以統計的方式，針對已確認具有污染之範圍，藉由執行數次靜態量測所得到的偵檢結果，確定核種的平均濃度或放射性水平，並依背景是否含有核種來決定採用WRS test或Sign test，在實務執行上較為複雜，一般而言，MARSSIM-type survey只使用於具有價值的大型複雜物件，且有不適用Scan-Only survey與In situ survey偵檢方式

之情形時。

(五)統計檢定與虛無假設

當無法取得理想數據資料，或是資料具有不確定度時，會以統計檢定 (statistics test) 的方式來執行決策規則 (Decision Rule)，在設計處置偵檢時，會試圖控制決策誤差 (Decision Error) 的機率在可接受範圍。

在執行統計檢定時，有三個重要的概念：虛無假設 (Null Hypothesis)、鑑別限值 (Discrimination Limit) 與決策誤差 (Decision Error)。

虛無假設與執行統計檢定 (Statistical Test) 的隨機偵檢 (Random Measurement) 數量有關，並取決於係採用情節A或情節B，情節A係假設物質與設備之偵檢單元受到的污染超過行動基準，情節B則假設物質與設備之偵檢單元受到污染與背景值相近，通常是採用情節A。

鑑別限值係指在執行量測時，能與行動基準可靠地進行區分的某一個核種濃度或放射性水平值，該數值即稱為鑑別限值 (Discrimination Limit)，此數值可由現場量測、掃描或取樣分析而來。鑑別限值與行動基準間的差值被定義為偏移 (Δ , shift)，每單位標準差的偏移值定義為「相對偏移 (Δ/σ , Relative shift)」，相對偏移值會影響偵檢或是取樣的數量。

決策誤差有「型一 (α , Type I)」及「型二 (β , Type II)」兩種，型一誤差定義為「否定正確的虛無假設」，型二誤差則定義為「無法否定錯誤的虛無假設」，以情節A為例，型一誤差的 α 值係指將物質與設備誤判為污染未超過行動基準的比率，型二誤差的 β 值則為將乾淨物質誤判為受污染的比率。造成誤差係因偵測的不確定度所致，這些誤差會影響健康風險、社會影響與除役成本，消除誤差的唯一方式是取得無限次的量測數據，但基於實務作業並無法達到此條件，通常是假定一個可接受的誤差值，對型一而言， α 是假定0.05(即5%)，型二的 β 則是0.1(即10%)，但如前述所言，考量 α 、 β 對於社會與除役成本之影響，須由設施經營者與管制單

位討論後決定。

(六)樣本數計算

在計算所需樣本數時，需使用相對偏移，參考文獻通常建議將中間值濃度設定為LBGR，但因平均值通常高於中間值，因此可以得到更為保守的結果。

在MARSAME手冊Table A.2a與Table A.2b中，已列出執行Sign test與WRS test所需之樣本數，其中縱列為相對偏移值(Δ/σ)，橫列為 α 與 β ，可直接查詢該表，無需自行計算。MARSAME手冊建議樣本數可再增加20%，雖然這並非是強制規定，但優點是可以避免不適用的樣本或是量測數據，而且若樣本數或是量測數據過少，在執行統計檢定時，較容易失敗。

(七)結果判定

對於Scan-Only survey、In situ survey兩種偵檢方法，結果判定可能有以下形式：

1. 當任一個數據高於行動基準時，結果為不通過(failure)。
2. 當平均值高於行動基準時，結果為不通過。
3. 當閾值(例如採用95%信心區間所計算之平均濃度)高於行動基準時，結果為不通過。

對於MARSSIM-type survey，則須視設施經營者採用哪個統計檢定(statistical test)方式，檢定方法有Sign test與WRS test兩種，差異在於當背景不含污染物時，使用Sign test，當背景包含污染物時，則使用WRS test。

在執行Sign test與WRS test前，依偵檢結果能先進行簡易判斷以下結論：

1. Sign test：所有量測結果均小於行動基準，結果為通過。

2. Sign test：量測結果的平均值小於行動基準，結果為不通過。
3. WRS test：所有的量測結果(量測值須加上平均背景值)均低於行動基準，結果為通過。
4. WRS test：量測結果的平均值(量測值須加上平均背景值)低於行動基準，結果為不通過。

如果有必要執行Sign test與WRS test，則須依照MARSAME手冊第6章第5節判斷是否通過行動基準，但要注意此檢定只能用在隨機或系統性取樣量測結果，不能用在專業判斷的取樣量測結果。

(八)討論交流

ORAU在輻射防護領域具有豐富的經驗，曾數次受美國管制單位委託，執行核設施廠址MARSSIM與MARSAME驗證工作，我國正處於建立核電廠廢棄物離廠偵檢管制作業的階段。本次受訓期間就量測工作與第三方驗證等議題進行交流，講師強調相關作業取決於電廠如何建立一套完整的流程並取得具可信度的證據，但此問題須由設施經營者與管制單位進行溝通達成共識，至於後者，講師表示美國相關管制單位有委請ORAU協助進行廠址驗證調查作業，並依據調查結果提出建議，供管制機關進行判斷。

四、心得與建議

1. 核能電廠除役工作，不僅要考量原有的輻射防護作業，在廢棄物處理上，亦要需要投入大量的輻射技術資源與人力，對設施經營者以及管制單位雙方而言，不僅是一項重要的課題，尤其輻防專業人才在除役領域上更顯得重要，因此應積極培養輻防專業人才，以滿足除役工作的需求。
2. MARSAME 是一套結合事前調查規劃、量測與統計學分析等多門學科結合起來，做出合理判斷的方法論，設施經營者可以依照設備的狀況，選擇適用的量測技術，經過一連串的規劃、偵檢、評估流程，最終判斷廢棄物是否符合處置標準。本會參酌 MARSAME 相關作法，要求台電公司建立廢棄物評估流程並妥善規劃量測工作，嚴格執行除役管制作業。
3. 有關美國除役實務經驗，講師表示美國有核電廠或核物料製造等多種設施，廠址特性差異大，相關評估與量測工作仍係取決於廠址實際狀況，無法一概而論，最重要的是設施經營者之作法須獲得管制單位的認可。而我國核一、二廠為沸水式反應器，核三廠為壓水式反應器，針對各廠除役計畫、輻射調查報告，拆除計畫等相關報告，須將廠址特性納入考量，進行整體規劃。