

出國報告（出國類別：實習）

赴美國參加多部會輻射偵檢與廠址調查手
冊訓練研習課程
(MARSSIM-2018)

服務機關：行政院原子能委員會

姓名職稱：黃郁仁副研究員、鄧之平技士

派赴國家/地區：美國田納西

出國期間：107年06月09日至107年06月21日

報告日期：107年09月17日

摘要

我國因 2025 非核家園政策，國內三座核能電廠將於運轉執照屆期後均將進行除役。依本會於 106 年 6 月 28 日完成審查之核一廠除役計畫，台電公司於核能電廠進入除役階段，依規劃時程須提送廠址輻射特性調查作業計畫，並提出廠址輻射特性調查報告。多部會輻射偵檢與廠址調查手冊 (Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual, MARSSIM) 為美國核管會接受用以證明除役核電廠廠址符合法規外釋標準之偵檢與調查方法(指引)，並已實際應用於美國核能設施除役之經驗。因此，學習美國除役電廠應用 MARSSIM 之方法論，與瞭解蒐集相關輻射特性調查與偵檢執行之技術經驗與資訊，將可精進國內除役管制專業技術能力，並可為我國核能電廠除役安全管制的重要參考，對國內核能電廠除役安全與管制作業將具有實質助益。

本次赴美國田納西訓練主要是參加美國橡樹嶺聯合大學(Oak Ridge Associated Universities, ORAU)舉辦之 2018 MARSSIM 訓練研習課程，訓練內容涵蓋 MARSSIM 概述、除役輻射偵檢種類、MARSSIM 統計概述、DCGL 選擇與應用、RESRAD/DandD 程式、偵檢單元分級、參考背景區域、表面活度偵檢及儀器靈敏度評估、最終狀態偵檢的設計與執行、MARSAME、執行統計測試、資料品質評估、難區分背景輻射及最終狀態偵檢報告等相關內容。本次參與受訓的學員除美國核電廠從業人員外，亦包含管制單位、製造廠家、軍方、學術與研究單位等之人員，另韓國管制單位與技術研究單位亦有派遣人員參加，因此除訓練課程講師之講授外，課程中學員間之經驗分享討論亦有助於對 MARSSIM 應用實務之瞭解。

目 次

	頁碼
壹、目的	01
貳、出國行程	02
參、過程紀要	04
肆、心得與建議	32
伍、附件	33

壹、目的

多部會輻射偵檢與廠址調查手冊訓練研習課程(Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual, MARSSIM)，係美國橡樹嶺聯合大學(ORAU)專業訓練中心每年定期於美國田納西開設之除役訓練課程之一，並曾於美國核管會(USNRC)等管制單位舉行相關訓練課程。本次之課程內容包含：「MARSSIM 概述」、「除役輻射偵檢種類」、「MARSSIM 統計概述」、「DCGL 選擇與應用」、「RESRAD/DandD/VSP 程式」、「偵檢單元分級」、「參考背景區域」、「表面活度偵檢及儀器靈敏度評估」、「最終狀態偵檢統計設計」、「最終狀態偵檢執行」、「MARSAME」、「執行統計測試」、「資料品質評估」、「難區分背景輻射」及「最終狀態偵檢報告」等多達 16 項之課程，內容相當豐富且實用，而除課堂講授討論之課程，亦安排介紹除役核能設施 Y-12 以加深學習成效。

本次奉派於 2018 年 6 月 11 日~6 月 15 日赴美國參加 ORAU 舉辦今年第 2 梯次 MARSSIM 訓練研習課程，主要目的為瞭解國際核能設施除役過渡階段之管制技術經驗，以及國際間核能電廠除役廠址輻射特性偵檢與最終狀態偵檢等方面之最新技術發展現況，以精進國內核能電廠除役之安全管制作業，並蒐集最新核能設施除役資訊，作為我國核能電廠除役安全管制的重要參考。

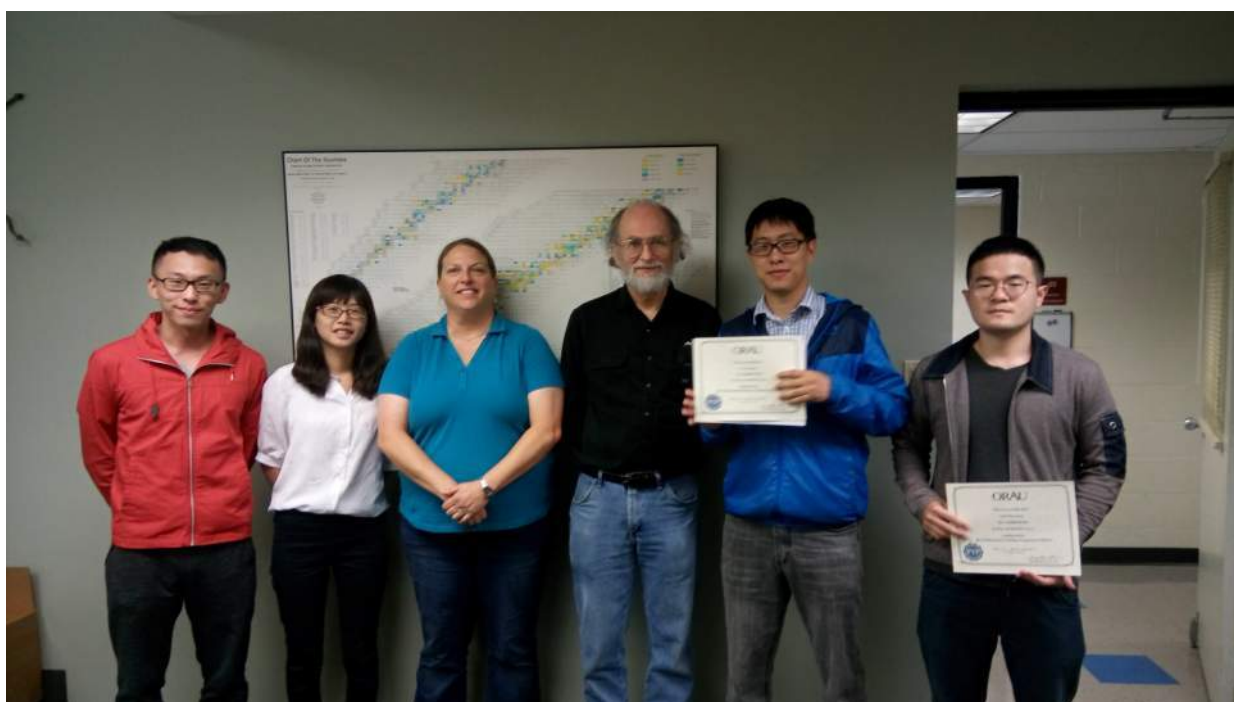
本次參與受訓的學員除美國當地管制單位、電力公司、製造廠家、軍方、學術與研究單位等之從業人員外，由於韓國釜山古里核電廠(KORI NPP)亦將進行除役輻射偵檢與廠址調查作業，因此韓國管制單位與技術研究單位亦分別派遣人員參與。訓練課程期間，學員均可自由發表提問與講授者交換意見。相信藉由本次訓練的學習，除可提升參訓人員除役管制專業知能外，並將有助於除役電廠之安全管制作業之精進。

貳、出國行程

(一) 本次公務行程：

此次訓練自 107 年 6 月 9 日起至 107 年 6 月 17 日止，公務行程共計 9 天，原計公務行程如下：

日期	行程	摘要
6/9~10	台北—美國田納西	往程
6/11~15	美國田納西州橡樹嶺	參加 2018 美國 ORAU MARSSIM 訓練課程
6/16~17	美國田納西州—台北	返程



圖一、2018 美國橡樹嶺聯合大學 MARSSIM 訓練研習課程結訓與講師合影

(二) 課程資訊：

MARSSIM 課程係由橡樹嶺聯合大學(Oak Ridge Associated Universities)專業訓練中心(Professional Training Programs)舉行。

MARSSIM: MULTI-AGENCY RADIATION SURVEY AND SITE INVESTIGATION MANUAL				
June 11 – 15, 2018				
DATE	TOPIC	INSTRUCTOR(s)	ROOM	
Monday, June 11	Welcome and Registration MARSSIM OVERVIEW Lunch MARSSIM OVERVIEW cont'd RADIOLOGICAL SURVEY TYPES IN SUPPORT OF DECOMMISSIONING	Bernhardt FRAME	135	
Tuesday, June 12	STATISTICS OVERVIEW FOR MARSSIM DCGLs: SELECTION AND APPLICATION RESRAD/DandD, RESRAD Build, VSP Lunch RESRAD/DandD, RESRAD Build, VSP (Cont'd) Problem Session: DCGLs ELECTRONIC RESOURCES	FRAME	135	
Wednesday, June 13	CLASSIFICATION AND SURVEY UNITS REFERENCE AREAS Lunch SURFACE ACTIVITY ASSESSMENT & DETECTION SENSITIVITY OF SURVEY INSTRUMENTATION STATISTICAL DESIGN OF FINAL STATUS SURVEYS	FRAME BERNHARDT	135 135	
Thursday, June 14	CLASS EXERCISE: EXAMPLES FOR MARSSIM FSS DESIGN INTEGRATED FINAL STATUS SURVEY Lunch MARSAME (SUPPLEMENT TO NUREG-1575) PERFORMING THE STATISTICAL TESTS EVALUATING THE CUSHING DATA SET DATA QUALITY ASSESSMENT	BERNHARDT FRAME BERNHARDT	135 135 135	
Friday, June 15	INDISTINGUISHABLE FROM BACKGROUND FINAL STATUS SURVEY REPORTS MARSSIM SUMMARY Course Critique and Adjourn	FRAME Staff	135 135	

(三) 課程師資簡介：

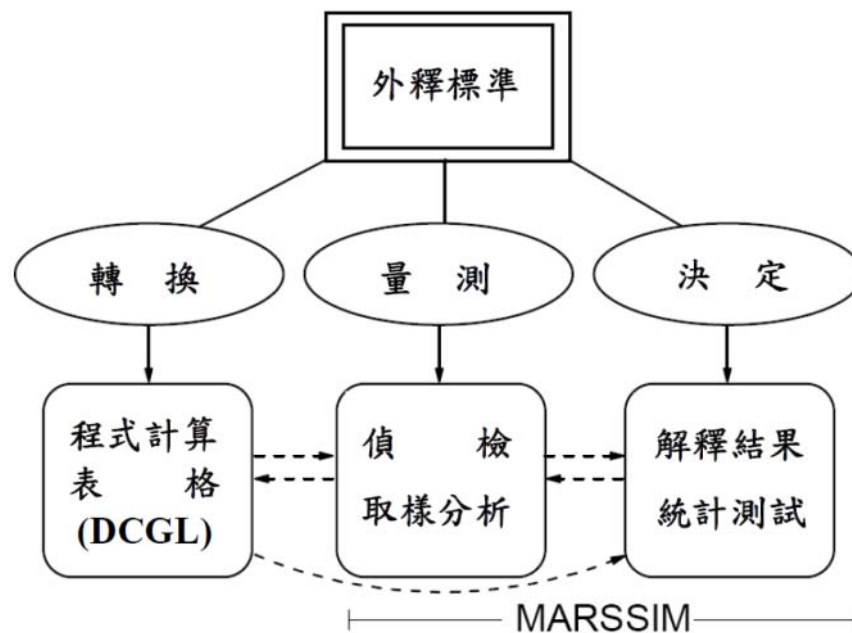
本次 MARSSIM 訓練課程的二位講師 Frame 與 Bernhardt，均為美國資深保健物理師，具有多年核能與輻射防護相關領域之授課經驗，在除役核能電廠輻射偵檢及廠址調查作業亦具有多年實務經驗，對 MARSSIM 指引之內容與實務應用操作亦均十分熟悉。

參、過程紀要

以下摘要說明本次 MARSSIM 訓練課程內容重點：

(一) MARSSIM 概述(MARSSIM Overview)

美國多部會輻射偵檢與廠址特性調查手冊(Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual, MARSSIM)是由美國四個放射性物質管制權責單位（國防部、能源部、環保署、核能管制委員會），針對可能受污染的地點進行輻射調查方法，共同制訂的一致性指引文件。MARSSIM 的目的係以科學為基礎，提供建立廠址輻射偵檢與調查的方法指引，以為從廠址最終狀態輻射偵檢規劃到證明符合法規外釋標準，提供一系列科學的程序，並供主管機關與設施經營者可據以實施的一套指引，因此其具有科學的嚴謹性，及應用的靈活性，足以應用於各種場地的清理條件。



圖二、MARSSIM 概述

MARSSIM 並沒有針對廠址的外釋標準問題作討論，其外釋標準係由管制單位制訂，我國對於核子反應器設施除役後之廠址輻射劑量規定，係依核管法施行細則第 17 條之規定，屬限制性使用者，其對一般人造成之年有效劑量不得超過 1.0 毫西弗；非限制性使用

者，其對一般人造成之年有效劑量不得超過 0.25 毫西弗。

MARSSIM 的重點是判斷除役廠址是否符合外釋標準，因此於廠址除役完成後，業者需提交最終狀態偵檢 (Final Status Survey, FSS) 報告，由管制機關確認除役廠址的殘餘輻射是否符合外釋標準要求(即導出濃度指引水平(Derived Concentration Guideline Level, DCGL))。

MARSSIM 僅針對建築物表面和表層土壤部分之外釋評估，並不包括建築材料、設備、次表土、地表水或地下水、生物體、空氣、下水道、沉積或深層污染等介質之輻射偵檢與調查技術。因此 MARSSIM 的補充手冊說明，對於物質設備的技術資訊可以參考「多部會輻射偵檢與物質設備評估指引(Multi-Agency Radiation Survey and Assessment of Materials and Equipment, MARSAME)」，至於次表土之輻射特性調查與外釋評估則需參照「多部會輻射偵檢與次表土評估指引(Multi-Agency Radiation Survey and Assessment of the Subsurface, MARSAS)」；而有關放射性核種需進行的實驗室分析項目，以及規劃、實施和評估則需依據「多機構放射實驗室分析方案手冊(Multi-Agency Radiological Laboratory Analytical Protocols Manual, MARLAP)」。

另外，美國能源部橡樹嶺科學與教育研究所 (Oak Ridge Institute for Science and Education, ORISE) 也分別發展出 Computerization Of the MARSSIM for Planning and Assessing Site Survey (COMPASS)及 Visual Sample Plan (VSP)(適用於 Win 95/98 作業系統)，可協助使用者進行最終狀態偵檢作業計畫的規劃設計。同時 ORISE 未來將研發結合 VSP 與 COMPASS 兩者功能之版本。

此外課程中亦介紹一些與 MARSSIM 相關的重要報告文件：

- NUREG-1505 (A Nonparametric Statistical Methodology for the Design and Analysis of Final Status Decommissioning Surveys,1998)，除了 MARSSIM 的主要重點與更詳細地統計介紹，亦提供替代方法，以及污染核種存在於背景中(indistinguishable from background)」之評估參考指引。
- NUREG-1507 Minimum Detectable Concentrations with Typical Radiation Survey

Instruments for Various Contaminants and Field Conditions,1998，討論 MARSSIM 掃描式偵檢和量測儀器的最低可測濃度、儀器計數統計資訊及表面污染量化等議題。

- NUREG-1757 Consolidated Decommissioning Guidance，係 NRC 對於一些除役面向提供的綜合技術指引，例如：最終狀態輻射偵檢計畫、MARSSIM 執行、劑量評估模式、合理抑低(ALARA)等。
- MARSSIM 使用者手冊教科書 Decommissioning Health Physics A Handbook for MARSSIM Users 作者係美洲保健物理協會理事長 Dr. Eric. W. Abelquist 博士，其藉由在 ORAU 關於 MARSSIM 之長年教學經驗，從實務面角度建議執行的方向與應注意事項，對於剛接觸 MARSSIM 與最終狀態偵檢的使用者來說是十分有用且應用廣泛的指引。

MARSSIM 提供建築物表面與表層土壤證明符合以劑量或風險為基礎的法規或標準之最終狀態偵檢計畫、執行、評估與文件管理的相關資訊。MARSSIM 雖不見得完美無缺，在某些特殊情況下，仍可能顯得不適切或不足，但卻不失是一套有系統及邏輯性的方法，這對評估輻射污染來說是相當重要的特質。

表一、MARSSIM 方法優缺點分析

優點	缺點
可彈性靈活使用	僅適用於建築物表面和表面土壤之污染
統計方法應用非參數統計法	MARSSIM 方法需要主管機關和業者之間充分的溝通，方能有效完成
可減少量測和(或)取樣數目	
在評估受污染之土壤時，有助於降低輻射偵檢的成本，尤其是當土壤取樣樣品必須使用到放射化學分析方法時	MARSSIM 之內容龐雜繁複

(二) 除役輻射偵檢種類(Radiological Survey Types in Support of Decommissioning)

1. 資料品質目標(Data Quality Objectives, DQOs)程序

資料品質目標 (DQOs)程序總共包含以下 7 個步驟：

(1) 陳述問題

- (2) 確認決策
- (3) 識別決策時所需的資訊
- (4) 定義研究邊界
- (5) 建立決策規則
- (6) 具體說明決策錯誤的容許範圍
- (7) 優化偵檢設計以蒐集數據

程序的目的是在建立數據品質標準及發展偵檢設計的科學方法，期望透過一系列以科學方法為基礎來建立數據品質標準及發展輻射偵檢設計之規劃流程，可以進一步提升輻射偵檢的作業品質及效率，並確保在作決策時所使用的環境數據的類型、質與量，使最後的決策更為合理可行。

2. 輻射偵檢與廠址調查過程 (Radiation Survey and Site Investigation - RSSI)

前述小節資料生命週期是 MARSSIM 指引中的執行依據，以作為收集數據的架構。為確認使用 DQO 程序可符合承諾驗證之要求，MARSSIM 建議使用一系列之輻射偵檢方法。RSSI 過程就是採用一系列輻射偵檢方法，以證明放射性污染廠址可符合以劑量或風險為基礎的法規要求。

偵檢規劃與設計是協助使用者在執行最後偵檢作業時，事先規劃出一套可達終極目標的策略，證實可符合導出濃度指引水平 (Derived Concentration Guideline Levels - DCGL)，在 RSSI 過程中有七個主要的步驟：(1) 廠址確認；(2) 廠址歷史評估；(3) 廠址範圍偵檢；(4) 廠址特性偵檢；(5) 廠址改善行動的輔助偵檢；(6) 廠址最終狀態偵檢；(7) 驗證偵檢，如圖二。雖然範圍、特性與改善行動偵檢亦可達成多項目標，但 MARSSIM 著重於可證明能符合 DCGL 目標的最終狀態偵檢之概念說明。通常執行偵檢作業前，可收集以前偵檢的資料來規劃 (例如，規劃特性偵檢可參考範圍偵檢收集的資訊)，直到完成最後偵檢。最後偵檢的目的在於證實不會超過法規所建立的管制標準。因此在設計與規劃各階段偵檢方式時，應朝向達成最終的管制目標。例如，範圍偵檢可朝達成最終偵檢的目標設計，如此範圍偵檢報告也可當最終偵檢報告。

RSSI 主要步驟之簡要概念：

- (1) 廠址確認：已知或者有可能受到污染潛能的廠址。
- (2) 廠址歷史評估：其工作涉及整理並重新檢視一個廠址的運轉歷史相關資料，推估可能會受到輻射影響的廠址區域、規劃執行範圍偵檢的區域。
- (3) 範圍偵檢：有助於決定那一地區可能含有殘留的放射性，以及在執行範圍偵檢作業時必須特別注意的區域。
- (4) 特性偵檢：特性偵檢的結果並應包括足夠的廠址物理特性資料，包括表面形態、天候與氣象、地表水文、地質、人口統計、土地利用狀況與水文資料等，同時特性偵檢方法必須徵求管制機關的同意。
- (5) 改善行動輔助偵檢：其目的也在於監測除污成果的有效性，亦即殘留放射性是否已經被清除或降低到可接受的水平。
- (6) 最終狀態偵檢作業：其目的在證實每一偵檢地區之殘留放射性可滿足外釋標準或不受限制使用。
- (7) 驗證偵檢：為了確認廠址外釋能否接受，管制單位或許會對經營者 FSS 偵檢結果委請獨立第三方執行驗證。

輻射偵測與廠址調查作業為除役計畫中重點工作項目，而且核設施拆除前的狀態、輻射與非輻射特性調查是所有除役計畫的關鍵元素，相關調查結果應符合要求，以確保工作人員、環境與公眾安全。由於廠址輻射特性調查之結果，可用來界定除役工作範圍、選擇除污與除役技術、發展廢棄物處置策略、精化成本估算與時程、規劃輻防與工安、定義外釋準則，以及提供最終狀態偵檢設計輸入資料，因此，一般被視為廠址除役的起始步驟。

(三) DCGL 選擇與應用(DCGLs: Selection and Application)

最終狀態輻射偵檢結果用來證明是否符合法規要求，是 MARSSIM 最重視的偵檢方

式，而利用資料生命週期用於輔助輻射偵檢與廠址調查之程序，可將最終狀態輻射偵檢歸納成四個主要步驟為規劃階段、執行階段、評估階段及決策階段。在規劃階段主要有 17 個步驟：

步驟 1、4：決定單一核種的導出濃度指引水平 DCGL_w 值及 DCGL_{EMC} 值

除役過程應確保殘留活度不會造成個人曝露於不可接受的輻射劑量與放射性物質活度，利用程式(RESRAD/RESRAD-Build/DandD code)分析各種可能的核種遷移途徑與曝露情節，計算或推導出符合放射性劑量標準的放射性物質殘留水平。

DCGL 基本上可分為兩類型，一為 DCGL_w，另一為 DCGL_{EMC}，分別說明如下：

DCGL_w：指在一個完整的偵檢單元內之 DCGL 平均值。

DCGL_{EMC}：指在一偵檢單元當中所另外定義出的某一塊更小區域內之 DCGL 平均值，或許也可以把它想成是熱點(hot spot)內的 DCGL 平均值。

步驟 2：決定多核種的導出濃度指引水平 DCGL_{Gross} 值

對於多核種的情況，可以先對總阿伐或貝他活度發展出 DCGL 值，再來決定個別核種的活度，這個方法可使用現場量測的總活度，不必先去決定個別核種的活度，而是直接將量測值與總活度 DCGL 值做比較。計算如下：

$$DCGL_{Gross} = \frac{1}{\frac{f_1}{DCGL_1} + \frac{f_2}{DCGL_2} + \dots + \frac{f_n}{DCGL_n}}$$

其中，

DCGL_{Gross} 為代表所有核種之 DCGL 值

DCGL₁ 為第 1 種核種(例如：Cs-137)的 DCGL 值

f₁ 為第 1 種核種的活度貢獻比率

DCGL₂ 為第 2 種核種(例如：Co-60)的 DCGL 值

f₂ 為第 2 種核種的活度貢獻比率，以此類推。

步驟 3：替代量測方法之導出濃度指引水平 DCGL_w 值

多核種污染的廠址，可能只要量測一種污染物，並藉由替代量測方法就可證明所

有的污染物可符合承諾或規定要求。此外如果分析一核種會比分析另一個核種簡單，那就可以節省時間與資源。例如，使用量測 Cs-137 濃度取代 Sr-90 分析，因為樣品不需要進行 Sr-90 放射化學分離，如此就可減少 Sr-90 的分析成本。其公式如下：

$$DCGL_{ADJ\ SURR} = \frac{1}{\frac{1}{DCGL_{SURR}} + \frac{R_1}{DCGL_1} + \dots + \frac{R_n}{DCGL_n}}$$

其中 $DCGL_{ADJ\ SURR}$ 為代表核種(如：Cs-137)經調整後的 DCGL 值(其數值會比未調整前的 DCGL 值還低)

$DCGL_{SURR}$ 為代表核種尚未調整前的 DCGL 值

$DCGL_1$ 為第 1 種推論核種(如：Sr-90)的 DCGL 值

R_1 為第 1 種推論核種(Sr-90)之活度比上代表核種(Cs-137)活度之比值

$DCGL_n$ 為第 n 種推論核種的 DCGL 值

R_n 為第 n 種推論核種之活度比上代表核種(Cs-137)活度之比值

另前述步驟 2 有關總阿伐或貝他之 Gross DCGL 也可對無法偵測核種如 H-3 或 Ni-63 使用替代量測方法，其公式如下說明：

$$DCGL_{adj\ gross} = \frac{1}{\frac{1}{DCGL_{gross}} + \frac{R_1}{DCGL_1} + \dots + \frac{R_n}{DCGL_n}}$$

假如不同放射核種之間的比值不能透過廠址歷史評估資料來決定計算，MARSSIM 建議可以範圍或特性偵檢之其中一個目標值來決定核種之間的比值，而不是用最終輻射偵檢狀態結果來決定比值。如果使用最終狀態輻射偵檢資料來決定比值，MARSSIM 建議至少要有 10% 的量測（包含直接量測與取樣）是包含所有考量的放射性核種。對於使用替代法，通常很難在兩個或更多的放射性核種中建立一致的比值。除了遵循規定的替代比值之變異性可接受水平指引外，較合理的方法是審查收集的資料來建立比值，與利用 DQO 作業流程從資料中選擇一個適當的比值。

(四) RESRAD/DandD

導出濃度指引水平(Derived Concentration Guideline Level, DCGL)為各種曝露途徑與情境分析之計算結果，並對應外釋準則所要求劑量限值。可以下列分析程式進行分析計算獲得：

- RESRAD—由 USDOE 之 ANL 在 1980 年開發並持續更新。
- DandD—由 USNRC 之 Sandia 在 1998 年開發。
- 其他分析程式—Cap88-PC、GENII-S、PRESTO。

NUREG-1757 之 Vol.2 中有針對一些常見核種建立 DCGL 篩選水平(表二)，如要計算其他核種之 DCGL 篩選水平，則可依該指引之建議使用最新版本(Version 2.1.0)的 DandD 程式，採預設參數值來計算。至於廠址特定之 DCGL_w，則可依建議使用的 RESRAD (the environmental contamination RESidual RADioactive materials) 和 RESRAD-Build 程式(註：由美國阿岡諾國家實驗室(Argonne National Laboratory)研發並已經過驗證與確認)來計算得到，該程式可使用 9 種曝露途徑分析評估輻射劑量與對應風險，並在污染源介質導出外釋準則或放射性核種濃度的管制限值，相關程式已廣泛被世界上超過 100 個國家的管制機構、風險評估團體與學術研究單位所使用，具有一定成熟度與公信力。

表二、建築物表面常見污染核種之可接受推定濃度指引水平

放射性核種	可接受推定濃度指引水平 (貝克/100 平方公分) (非限制性使用外釋情節)	放射性核種	可接受推定濃度指引水平 (貝克/100 平方公分) (非限制性使用外釋情節)
H-3	1.2E+08	Co-60	7.1E+03
C-14	3.7E+06	Ni-63	1.8E+06
Na-22	9.5E+03	Sr-90	8.7E+03
S-35	1.3E+07	Tc-99	1.3E+06
Cl-36	5.0E+05	I-129	3.5E+04
Mn-54	3.2E+04	Cs-137	2.8E+04
Fe-55	4.5E+06	Ir-192	7.4E+04

(五) 偵檢單元分級(Classification and Survey Units)

步驟 5：受影響區域分類及建立背景參考區域

廠址每個區域均依其受污染的潛在影響情形，分為兩類：影響區和未受影響區。未受影響區一般由 HSA 確認，是沒有受到放射性影響或有操作紀錄的區域。

倘若某一區域是屬於潛在污染地區，則分類為影響區，此影響區又依影響程度由高至低分為三級(如下表三)，在可能有高污染的地區花費較多的偵檢努力，增加效率。

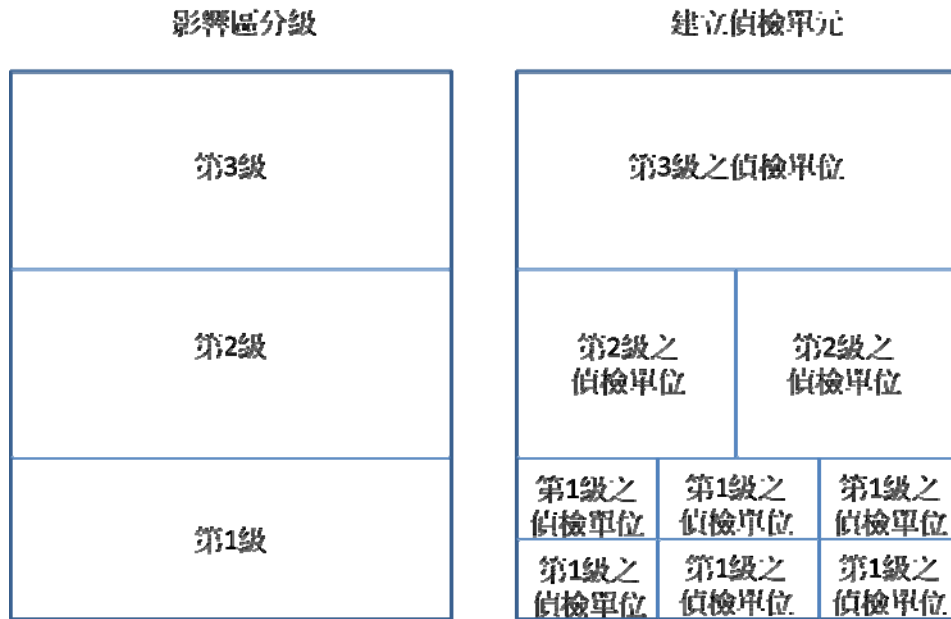
MARSSIM 所使用的假設為評估是否符合外釋的所有受輻射影響地區其放射性污染合理地可能會高於 DCGLw。此項初始假設意指所有地區起初應先考量為第一級輻射地區，除非有證據的根據才再分類為第二級區或未受影響的第三級區。

表三、廠址影響區分級說明

影響區分級	第一級 (class 1)	表示現在或過去有量測活度高於 DCGLw 的潛力，有可能或在執行改善行動之前有可能受到放射性污染的地區（依據廠址運轉歷史紀錄），或已知受污染的地區（依據以前放射性輻射偵檢紀錄），改善行動前污染超過 DCGLw 的地區其輻射等級應分類為第 1 級。
	第二級 (class 2)	表示現在或過去雖受過潛在污染影響，有可能或在執行改善行動之前有可能受到放射性污染的地區，或已知受污染的地區，但污染未超過 DCGLw 的地區。
	第三級 (class 3)	任何預期沒有任何殘餘活度的受影響地區，或者是預期的殘餘活度水平遠低於 DCGLw 的地區，可以廠址運轉的歷史紀錄與先前放射性輻射偵檢結果來做判斷。

步驟 6：建立偵檢單元

各區域之空間又因偵檢規劃與執行之需要，需分割成許多塊小單元，稱為偵檢單元 (survey units)。偵檢單元為一實體地區，有特定大小與形狀的結構物或土地的地區，該地區是否超過外釋標準，應按最終狀態輻射偵檢的結果做決定。而各個偵檢單元的大小與其區域分類等級息息相關，越具污染潛力之區域，其偵檢單元就要分割地越小。以下為影響區分級與偵檢單元之關係如圖五：



圖三、影響區分級與偵檢單元之關係

而偵檢單元應該依據分類、曝露路徑模式假設、與特定廠址的情況來限制其大小，偵檢單元的建議面積如下：

表四、廠址影響區分級與廠房結構/土地面積關係

影響區分級	廠房結構	土地面積
第 1 級	約 100m ² 地板	約 2000m ²
第 2 級	約 100~1000m ² 地板	約 2000~10000m ²
第 3 級	沒有限制	沒有限制

(六) MARSSIM 統計概述(Statistics Overview for MARSSIM)

在偵檢規劃階段與偵檢結果決策階段，考量廠址最終狀態偵檢範圍無法 100%逐一偵檢(群體分布未知)且不切實際，依隨機取樣結果進行決策亦會受限於統計誤差，因此統計學與無效假設是必要的工具。

在統計學推導包含無效假設及信心區間測試，在 NUREG/CR-5849 有建議執行信心區間測試以符合外釋準則，MARSSIM 則是以無效假設方法證明來符合外釋準則。在 MARSSIM 最終狀態偵檢過程裡會應用許多種類統計檢定，主要有兩種無參數統計檢定為 Sign Test 與 Wilcoxon Rank Sum (WRS) Test。統計檢定結果會與臨界值進行比對，若統計

檢定超過臨界值，則推翻偵檢單元內殘餘放射性活度超過 DCGLw 之無效假設。因此臨界值設定位置將影響統計分布超越之比例，若假設臨界值設定在平均濃度，以 Normal 分布將會有 50%數據會超越臨界值，表示有 50%偵檢數據可能是大於 DCGLw，但通過無效假設而外釋，此情況是不被管制單位所允許，因此通常會設定在容許 5%數據會超越臨界值，此時臨界值會設定在平均濃度加上 1.65 倍標準差，此為 Type I error (α) = 0.05 之由來。反之，若統計檢定未超過臨界值，則未推翻偵檢單元內殘餘放射性活度超過 DCGLw 之無效假設，表示有偵檢數據可能是小於 DCGLw，但未通過無效假設而須進行除污改善補救行動，此情況是不被 MARSSIM 執行者所希望，此為 Type II error (β)之由來。

(七) 最終狀態偵檢統計檢定設計(Statistical Design of Final Status Surveys)

最終狀態偵檢(FSS)與資料品質目標(DQO)：最終狀態偵檢目的確認每個偵檢單元內的殘餘放射性活度均能滿足外釋準則，並由 HSA 建立運轉歷史資料，以及 Scoping Survey 與 Characterization Survey 提供輻射偵檢結果，偵檢設計包含掃描辨識熱點位置，隨機統計取樣來訂定偵檢單元內平均污染濃度水平。

步驟 7：決定採用情節 A 或情節 B

大部分的案例都是使用情節 A，可視為預設情節，其無效假設可假設為「該(待評估)偵檢單元不符合外釋標準」，統計檢定時是比較該偵檢單元之污染物活度濃度與其 DCGL。

情節 B 之無效假設可假設為「該(待評估)偵檢單元符合外釋標準」，MARSSIM 指引並未提及太多關於情節 B 之說明，主要是要參考 NUREG-1505 手冊。

步驟 8：決定採用統計檢定法(Sign Test 或 WRS Test)

關於統計檢定方法，MARSSIM 乃建議採用二個非參數統計檢定法：Sign Test 和 Wilcoxon Rank Sum (WRS) Test。非參數統計檢定法之最大優點為不用對資料的分布狀況作太多假設，不似參數統計檢定法(如：student t test)須先假設數據資料是呈常態分布。

步驟 9：決定是否運用「值一法則」

若建築物表面同時量測到不同類型放射性活度如總阿伐與貝他，或是於土壤同時量測到不同核種時，除上述檢定方法外，還需使用值一法則假設 $DCGL = 1$ ，在計算標準差與 LBGR 時，其總阿伐與貝他或不同核種個別活度與 DCGL 比值加總結果應 ≤ 1

在前述章節所討論的替代量測是描述調整多放射性核種 DCGL 的另一種方法。其他方法尚包含使用「值一法則」。值一法則如下述所示，當多核種混合在一起，所有濃度限值 (DCGL) 比值的總和應小於或等於 1：

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

(八) 表面活度偵檢及儀器靈敏度評估 (Surface Activity Assessment & Detection Sensitivity)

步驟 10、11：量測設備選擇與量測程序

MARSSIM 第 6 章有提到表面活度分析可參考 ISO-7503-1、NUREG-1507 及 NUREG-1757 Vol.2 等相關文獻，相關偵檢儀器靈敏度評估有最小可偵測濃度標準。在 MARSSIM 附錄 H 有針對表面活度分析所使用偵檢儀器進行描述，例如量測 α 粒子、 β 粒子與 α 粒子加 β 粒子及 γ 能譜所使用的氣體比例計數器、蓋格計數器(GM)、硫化鋅(ZnS)及碘化鈉(NaI)閃爍體計數器等。對於偵檢儀器的選擇需依據污染程度、放射性核種產生輻射種類、偵檢介質及最小可偵測濃度的儀器靈敏度。在 MARSSIM 有建議理想的靜態量測 MDCs 應小於 $DCGL_w$ 的 10%，然儀器靈敏度介於 $DCGL_w$ 的 10%~50%之間仍可接受，但此標準不適用於動態掃描 MDCs。

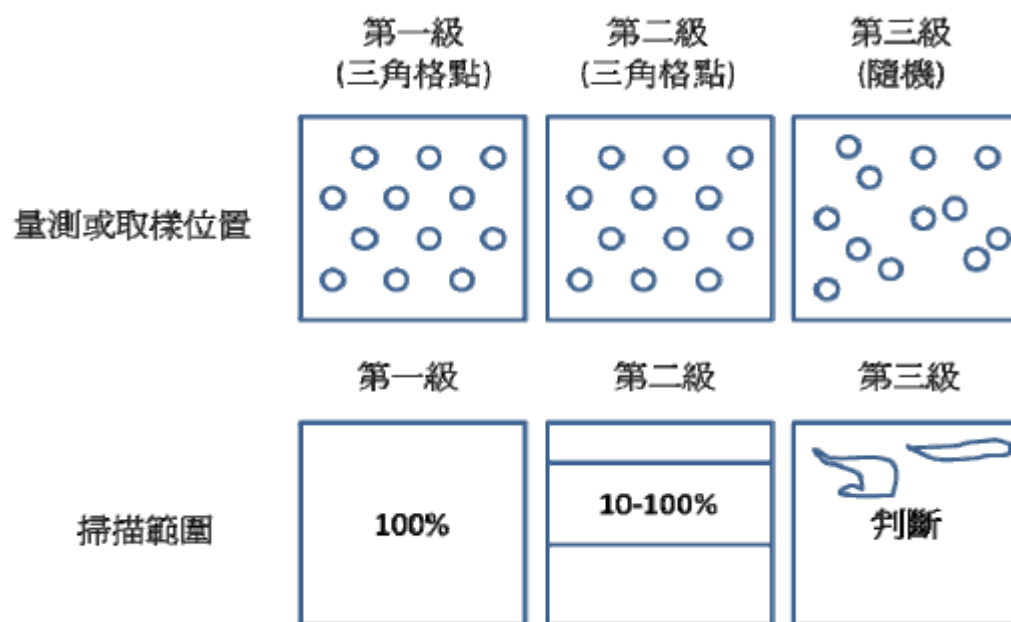
步驟 12：決定靜態量測與動態掃描偵檢之最小可偵測濃度(MDCs)

靜態量測 MDC 在 NUREG-1507 有提供偵檢單元與背景輻射相同與不同計數時間的計算方法。

動態掃描 MDC 在 MARSSIM 說明適用於 Class 1 偵檢單元，並確保其最小可偵測濃度可獲得檢出，執行掃描所使用儀器種類包含 NaI 偵檢器、氣體比例計數器(樓板或手持偵

檢器)、蓋格與 ZnS 偵檢器，以及配合 GPS 定位的偵檢器。掃描儀器靈敏度部分，可能要確認訊號是僅來自於背景，或者是來自射源加上背景貢獻，在 NUREG/CR-6364 說明可透過電腦模擬測試與執行現場偵測來評估模擬正確性，藉以評估掃描靈敏度。

另外也要考量人為因素亦可能影響掃描結果，例如在掃描過程儀器出現錯誤警報使得執行偵檢人員誤判為污染區域，或者是掃描過程儀器出現失誤使得執行偵檢人員誤判為清潔區域。在長時間掃描過程中，偵檢人員警覺會隨疲勞使得注意力逐漸喪失，較不容易被發現有污染區域，且偵檢器探頭通常會移動越來越快。因此在掃描過程會有兩步驟為持續監測觀察是否有顯在的射源，以及靜止並使用偵檢探頭量測或定點收集土壤樣品分析，上述掃描量測時間及取樣分析數量將決定偵檢的成本。理想觀察者必須依量測時間內所觀察到的計數讀值、假設熱點大小及掃描率來判定污染射源使否存在。



圖四、量測/取樣模式和掃描範圍示意圖

步驟 13：決定輻射偵檢之調查基準

在儀器之調查基準設定上，由儀器響應警示是否需要展開進一步調查。Class 1 偵檢單元之調查基準可以設定為 $DCGL_{EMC}$ 相對應的計數率，Class 2 偵檢單元之調查基準可設為

DCGL_w 相對應的計數率，而 Class 3 偵檢單元之調查基準則可設定在 DCGL_w 之某百分比程度相對應的計數率如表五。如為需要進一步調查的熱點，可用粉筆或插旗之方式來劃定調查範圍。

表五、第一、二、三級偵檢單元展開調查基準之設定點

偵檢單元分級	展開直接量測或取樣調查	展開掃描區域調查
Class 1	>DCGL _{emc}	>DCGL _{emc}
Class 2	>DCGL	>DCGL
Class 3	>部分比例 DCGL	>部分比例 DCGL 或 >掃描 MDC (若掃描 MDC>DCGL)

步驟 14：決定第一類誤差(Type I error)與第二類誤差(Type II error)之可接受錯誤判斷機率值(α 與 β)，並定出灰色區域之下限(LBGR)

無效假設為假設偵檢單元內殘餘放射性活度超過外釋標準，決策錯誤可能發生於當無效假設被推翻，但實際上偵檢單元內殘餘放射性活度確實超過外釋標準，此為管制單位應注意的 Type I error (α)；或是當無效假設被接受，但實際上偵檢單元內殘餘放射性活度遠低於外釋標準，此為 MARSSIM 使用者會注意的 Type II error (β)。訂定灰色地帶即相對偏移，其上限定義為 DCGL_w，而其下限(Low Bound of the Gray Region, LBGR)通常設定在預期偵檢單元內平均濃度值，且需要從偵檢單元內提供足夠的輻射特性調查資料。

課堂上講師提醒 Type II error (β)雖 MARSSIM 指引說明可用 0.05 或 0.1，但仍建議學員使用依量測數據平均值即 LBGR(power curve 峰值)所對應 β 誤差值較為適切，理由為濃度低於 LBGR 數據理論上不應超過 DCGL(屬較清潔數據)，若納入 β 誤差範圍則有可能後續要執行清潔除污作業不符成本效益；反之濃度高於 LBGR 數據才應注意是否有機會會超過 DCGL(屬較污染數據)。

步驟 15：決定適當的取樣(量測)數目

當灰色區域 LBGR 越大，就需要越多的量測或取樣數據來縮小資料的擴散分布，亦即降低 σ (sigma)。在決定適當的取樣或量測之數目前，我們須先計算相對偏移

$$\Delta/\sigma=(DCGLw-LBGR)/\sigma$$

WRS Test 設計步驟為(1)估計參考背景區域與偵檢單元的標準差，並選擇較大數值；(2)計算出相對偏移公式；(3)定義偵檢單元量測值超越參考背景區域之機率 Pr 與決定 Type I (α) & Type II (β) 誤差比率；(4)計算取樣數量 N 再增加 20% 允許遺失或異常取樣數據之餘裕(偵檢單元與參考背景區域取樣數量各半 $1.2 \times N/2$)。

Sign Test 設計步驟為(1)估計偵檢單元的標準差；(2)計算出相對偏移公式；(3)定義偵檢單元量測值低於相對偏移 Δ 之機率 $Sign p$ 與決定 Type I (α) & Type II (β) 誤差比率；(4)計算取樣數量 N 再增加 20% 允許遺失或異常取樣數據之餘裕(偵檢單元取樣數量 $1.2N$)。

對於上述 WRS Test 與 Sign Test 步驟較複雜之計算公式，MARSSIM 已提供相對偏移與統計誤差對應需取樣數量之簡易表格可供使用者直接查表，其取樣數量已包含 20% 允許遺失或異常取樣數據之餘裕。

步驟 16：對於第一級偵檢單元額外的量測/取樣數目

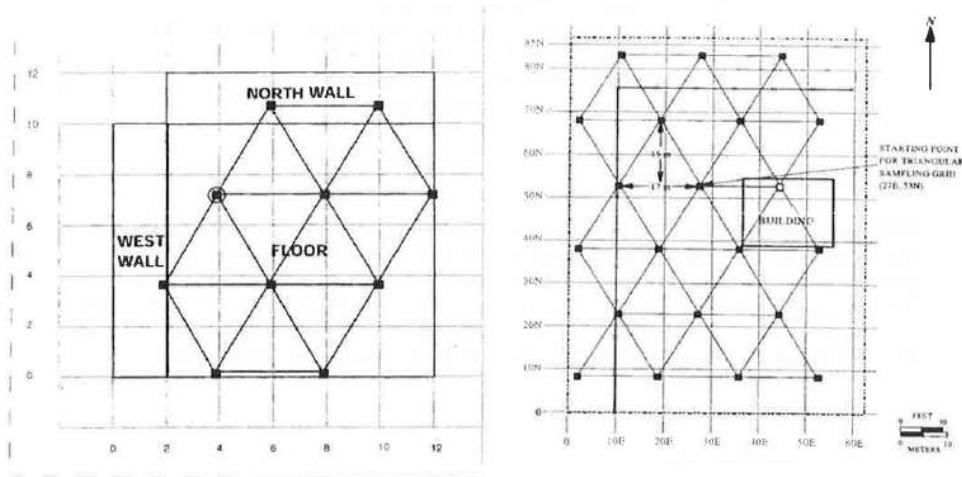
當掃描 MDC 大於 $DCGLEMC$ 時，表示熱點無法被儀器檢出，就還需要額外的量測/取樣數目，使得面積因子縮小，進而獲得與掃描 MDC 相符或較小的 $DCGLEMC$ 。以目前所使用儀器的掃描 MDC 除以 $DCGLw$ 來計算新的面積因子(AF_{NEW})，接著決定 AF_{NEW} 相應之面積(Asu)，最後計算得新的取樣/量測數目(n_{NEW})。

步驟 17：製作參考網格(reference grid)並決定取樣(量測)點位置

在 Class 1 and 2 受影響區域應三角格

經營者自己可決定是否製作參考網格建立座標地圖。製作參考網格的好處是讓使用的人易懂，能夠清楚快速地依座標方位尋找到取樣/量測位置。

課堂上講師建議參考網格應設計為三角格點模式，原因是三角格點面積小於方形格點，前述有說明當面積因子較小時， $DCGLEMC$ 也會等比例降低，可增加儀器掃描 MDC 檢出熱點之機率。



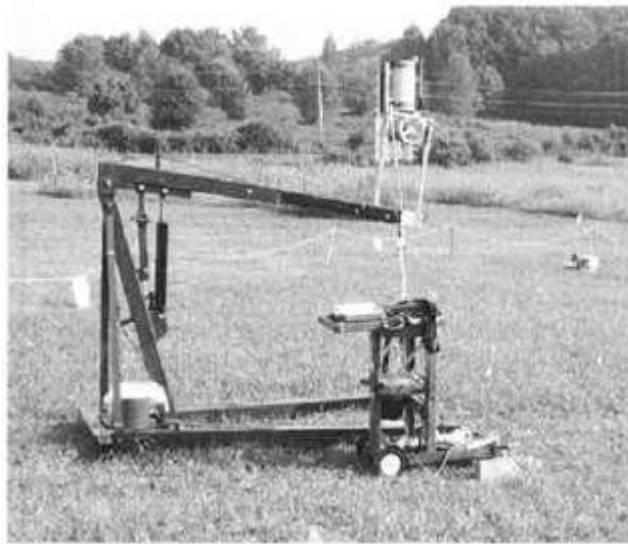
圖五、Class 1 and Class 2 受影響區域之三角格點示意圖

(九) 最終狀態偵檢執行(Integrated Final Status Survey)

執行階段主要分為兩步驟：(1)掃描污染物表面；(2)執行結構表面靜態量測或收集土壤樣本。

基礎的偵檢活動包含收集量測數據及(或)取樣分析，以及執行掃描作業。對於廠區土壤偵檢活動可能會執行掃描作業與收集取樣，而不會執行靜態量測，其原因為在一些土壤污染的量測案例或許會被執行 γ 能譜分析過程而消除土壤取樣的需求。另對於廠房結構表面偵檢活動可能會執行掃描作業與靜態量測，但不須執行收集取樣，因為結構表面可能偶爾在運轉期間已被收集，如塗料或擦拭。

在結構表面掃描須訂定 α 粒子、 β 粒子濃度，須考量偵檢器探頭距離表面位置與掃描速度，通常亦會於室內執行簡易 γ 射線掃描。在土壤執行 γ 射線掃描時，偵檢器探頭通常使用 NaI 偵檢器，掃描距離表面須維持適當距離，偵檢人員移動速度約不能太快。在土壤取樣分析須收集表層土壤，通常為 MARSSIM 表土偵檢範圍以下，在放射化學分析須收集約少樣品量，在 γ 能譜分析則須收集約大樣品量，若預期會使用特定垂直方向污染探頭，則取樣方法的標準化是很重要的。課堂上有介紹現場執行同位素分析的儀器，通常會使用高純銻偵檢器(HPGe)，可以消除或減少所需的土壤樣品數，且資料獲得將更迅速。



圖六、就地 γ 能譜同位素分析儀

在執行調查水平目的是為了放射性核種分析，其單位可表示為計數率或濃度，當發現觀察到的計數率或濃度超過調查水平時，則須執行輻射偵檢調查，步驟為(1)確認量測結果；(2)每個調查結果與對應改善補救行動。執行調查水平作業之偵檢儀器選擇，在 α 粒子掃描與量測通常會使用氣體比例計數器與 ZnS 閃爍體， β 粒子掃描與量測通常會使用氣體比例計數器、蓋格計數器與塑膠閃爍體。在 γ 射線掃描與量測通常使用 NaI 閃爍體(2"x2")、低能光子則使用 FLDLER，在某些應用，偵檢機器會裝備 NaI 偵檢器或大型塑膠閃爍體。另外，業主可能會在選擇儀器的效率與預算之間進行評估，兩種可能偵檢儀器將被考量作為偵檢單元掃描設備，並執行土壤取樣以對污染區域進行靜態分析。不同偵檢單元分類之調查基準設定詳見表七內容。

(十) 資料品質評估(Data Quality Assessment)

資料品質評估階段主要分為 8 個步驟：(1)資料驗證；(2)資料確認；(3)資料初檢；(4)繪製輻射數據圖；(5)必要時執行 Sign Test；(6)或 WRS Test 統計再檢定；(7)熱點調查評估；(8)評估所有污染源造成的總劑量是否符合外釋標準。

廠址輻射量測所收集到的資料，其品質之可信度必須經由一些驗證與確認(Verification and Validation, V&V)程序來加以評估。即評估資料之過程涉及三部分：驗證、確認和品質評估。

步驟 1：資料驗證

資料驗證之部分在 MARSSIM 和 NUREG-1576 有詳細說明，主要係針對執行量測和取樣之實驗室的能力驗證，確認內容應包括：該實驗室是否有使用選定的分析方法、該實驗室是否每日檢核儀器性能、該實驗室是否有分析品管試樣(QC samples)、該實驗室是否參加過實驗室能力試驗比對等。

步驟 2：資料確認

資料確認之部分則在 MARSSIM 和 NUREG-1576 有說明，建議對於每個資料數據都應重新檢視過，並加以符號標籤做用途分類，例如：有疑問的數據標示為 J、低於 MDC 的數據標示為 U、不能用的數據標示為 R 等。確認資料時，確認人員應依據廠址運轉史、核種化學特性、核種之觀察到的值與其期望值之比率等多方面來加以判斷該數據是否合理。

關於資料品質評估(Data Quality Assessment, DQA)之程序，因偵檢設計期間早已選定好要使用的統計檢定法了，因此，MARSSIM 所建議的 DQA 五步驟在實務操作上建議調整為：DQOs 和資料初檢→繪數據圖→必要時進行統計檢定→熱點調查評估→必要時評估所有污染源造成的總劑量是否符合外釋標準。以下就每個步驟稍加說明：

步驟 3：DQOs 和資料初檢

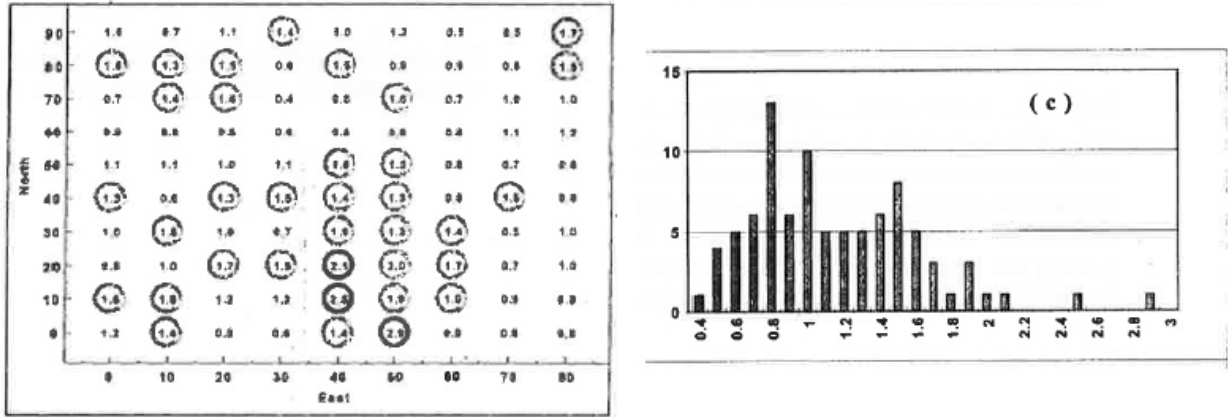
首先確認有效資料的數目、最小量測值、最大量測值、平均值、中數、標準誤差等，再依序確認區域分類是否正確、量測取樣數目是否已達要求，以及平均值是高於或低於 LBGR。接下來判斷偵檢單元是否通過外釋標準，若統計檢定(Sign Test 或 WRS Test)之結果為污染平均值超過 DCGLw，則直接宣告該偵檢單元無法通過外釋標準，而倘若統計檢定之結果為污染平均值低於 DCGLw，則仍應依下列情況考慮是否再做進一步的再檢定：

第 1 種情況：當所有量測值均低於 DCGLw 時，就無須對偵檢結果做進一步的再檢定。

第 2 種情況：當有部分量測值高於 DCGLw 時，則需要對偵檢結果進一步再檢定。

步驟 4：繪製輻射數據圖

此步驟係建議將量測數據標示於各個量測/取樣座標點上，如下圖：



圖七、量測數據位置分布平面圖與劑量區間分布直方圖

步驟 5、6：必要時進行統計再檢定

步驟 1 所謂的再檢定，亦即再以統計方法測試無效假設，其操作方法將依第一次使用的統計檢定法(Sign Test 或 WRS Test)而有所不同，操作技術之細節請詳參 MARSSIM 和 NUREG-1505。以 Sign Test 為例，此統計測試所要比較的是「低於 DCGLw 之數據的數量」和「臨界值(critical value, CV)」，當低於 DCGLw 之數據數量大於臨界值時，則確定「駁回無效假設」，判斷「該偵檢單元符合外釋標準」。前述臨界值可於 MARSSIM 查表得知。

步驟 7：熱點調查評估

所有高於調查基準的量測值均須進一步進行調查，調查內容包括：確認初始量測數據、污染區域範圍、熱點的平均濃度、熱點的 DCGL_{EMC} 等。然後以下列公式之進行計算：

$$\frac{AveConc_1}{DCGL_{EMC1}} + \frac{AveConc_2}{DCGL_{EMC2}} + \dots < 1$$

當計算結果小於 1 時，評估為該熱點內的污染未超過外釋標準，反之，當結果大於或等於 1 時，該熱點內的污染並不符合外釋標準。換言之，上述公式僅用以評估一熱點內的劑量是否符合外釋標準，但其結果並不能直接代表整個偵檢單元內的劑量一定也符合或

不符合外釋標準，亦即仍須另外評估整個偵檢單元內所有污染源造成的總劑量。當評估一熱點內的劑量不符合外釋標準時，就要對此熱點實施改善補救行動(remedial action)。關於此步驟，MARSSIM 和 NUREG-1505 均有相關詳細說明。

步驟 8：必要時評估所有污染源造成的總劑量是否符合外釋標準

MARSSIM 和 NUREG-1505 中有提供如何完成此評估步驟的方法建議，公式如下：

$$\frac{\delta}{DCGL} + \sum \frac{(\text{average concentration for elevated area} - \delta)}{(\text{area factor for elevated area})(DCGL)} < 1$$

資料利用週期之決策階段

當發生下列情形之一者，設施經營者必須決定下一步該怎麼做：

情形 1：偵檢單元分類錯誤

原分類為 Class 2 影響區的偵檢單元，當其真實量測值高於 DCGL 時，表示在輻射偵檢規劃時對此單元做了錯誤分類。同理，原分類為 Class 3 影響區的偵檢單元，當發生量測值稍高於 DCGL 時，表示此偵檢單元亦分類錯誤。若發生錯誤分類的情況，這些區域應重新進行分類，再分割成更小的偵檢單元，並重新偵檢。

當管制單位審查到此種情形時，建議應考慮保持彈性作法，對於「錯誤分類的跡象不太明顯且評估其劑量很小」的情況，或許也可允許讓設施經營者以「清除現有疑慮之地方」的作法來取代「重新分類與偵檢」，如此將可大大減低相關成本支出。

情形 2：偵檢單元之平均濃度超過 DCGL

- (1) 可對整個偵檢單元進行改善補救行動並重新偵檢
- (2) DCGL_w 可能設太低，可重新檢討 RESRAD 運跑時之特性參數，修正輸入值，重訂高一點的 DCGL
- (3) 外釋目標改為限制使用用途

情形 3：偵檢單元無法通過統計檢定

- (1) 可對整個偵檢單元進行改善補救行動並重新偵檢

- (2) 檢查統計檢定過程有沒有做錯
- (3) 檢討是否因量測/取樣數目不夠而導致無法通過統計檢定，倘若真的是因為這種原因所造成，應可考慮允許讓設施經營者進行一次「二次取樣(double sampling)」來增加數據數量
- (4) 檢討是否因參考區域的量測數目少於偵檢單元的量測數目(WRS Test 要求參考區域量測數目應至少與偵檢單元一致)，可考慮評估參考區域是否適當

課堂上講師提醒對於上述(3)，原因是因量測/取樣數目不夠而導致無法通過統計檢定：真實量測值的平均值/標準誤差(FSS 數據)大於在計算相對偏移時所用到的 LBGR/標準誤差(SS、CS 或 RASS 數據)。當進行「二次取樣」時，這些額外量測的取樣位置採隨機選擇，取得的新數據加進原數據群中，再重新做一次統計檢定。

情形 4：偵檢單元內的熱點評估不通過

- (1) 可對這些熱點進行改善補救行動並重新偵檢
- (2) DCGL 可能設太低，可重新檢討 RESRAD 程式輸入的特性參數，如情節與曝露途徑修正輸入值，重訂高一點的 DCGL(此為最後選項，應與管制單位討論)
- (3) 面積因子(AF)可能太低，可修正 RESRAD 程式輸入的特性參數，如污染邊界範圍，重新計算出 AF 值(此為最後選項，應與管制單位討論)

情形 5：偵檢單元內的總劑量超過外釋標準。

考量偵檢單元內總劑量超過外釋標準原因可能來自於平均劑量或多個熱點加總結果，對於量測/取樣數據或劑量分析程式可能影響因素太多情況下，建議直接對偵檢單元進行改善補救行動並重新偵檢方式較為快速。

(十一) 執行統計檢定(Performing the Statistical Tests)

在前述資料生命週期評估階段，若偵檢量測結果為污染平均值低於 DCGL_w，但有部分量測值高於 DCGL_w，則須執行統計檢定(WRS Test 或 Sign Test)。

在 WRS Test 方法為偵檢單元量測數據中最大值與參考背景區域中最小值進行比較，若其差值仍小於 DCGLw，則符合外釋標準；若偵檢單元與參考背景區域之污染平均差值大於 DCGLw 則不符合外釋標準；若偵檢單元與參考背景區域之污染平均差值小於 DCGLw，但有部分量測值大於 DCGLw，則須執行統計檢定。

- (1)將 DCGLw 與參考背景區域每個量測數據相加，並獲得調整後參考背景區域量測值。
- (2)調整後參考背景區域量測數量為 m ，偵檢單元量測數量為 n ，總量測數量為 $N=m+n$ ，並進行排序。
- (3)若有部分量測結果為相同數值，則給予相同平均排序。
- (4)對於有 t 個小於 MDC 的量測數據，則從序位第 1 位到第 t 位進行排序，但其限制為小於 MDC 的量測數據 t 不能大於總量測數量 N 的 40%。
- (5)計算 W_r ，將調整後參考背景區域之序位進行加總。
- (6)當 W_r 大於臨界值時，則確定「駁回無效假設」，判斷「該偵檢單元符合外釋標準」。

在 Sign Test 方法為偵檢單元量測數據均小於 DCGLw，則符合外釋標準；若偵檢單元污染平均值大於 DCGLw 則不符合外釋標準；若偵檢單元之量測結果為污染平均值小於 DCGLw，然有部分量測值大於 DCGLw，則須執行統計檢定。

- (1)表列出偵檢單元量測數據
- (2)將 DCGLw 減去每個偵檢單元量測數據
- (3)若為正值標示 S+，反之為負值標示 S-
- (4)當低於 DCGLw 之 S+數量大於臨界值時，則確定「駁回無效假設」，判斷「該偵檢單元符合外釋標準」。

(十二) 參考背景區域(Reference Areas)

當統計檢定決定使用 WRS Test 方法進行評估時，則必須挑選偵檢單元所對應的參考背景區域，MARSSIM 提到廠址參考背景區域應與評估偵檢單元之物理、化學、地質、輻

射與生物特性相似，相同的參考背景區域可以使用於不同偵檢單元進行比對，無論其大小或等級分類，然若背景區域與偵檢單元之間有顯著差異，則需要多樣的參考背景區域。

MARSSIM 提到參考背景區域選址應位於廠址內未受污染排放影響區域如上風或上游處，避免其他非廠址活動所造成污染之影響或干擾，未有放射性物質營運之歷史紀錄，物理性質應與偵檢單元接近，理想的參考背景區域應選擇廠內未受影響區域。然 NUREG-1757 說明特殊情況參考背景區域可來自於廠外區域、選擇廠內 Class 3 受影響區域或偵檢單元本身，例如廠房結構表面、土壤地表之鑽心取樣、結構牆面之 α 、 β 粒子量測等特殊情況之參考背景區域選擇，應於規劃偵檢作業時與管制單位進行討論，相關擦拭與取樣分析作業可以協助確認是否為清潔區域。

在找尋戶外參考背景區域相關要點為土壤種類等條件應與偵檢單元相似、對於潛在射源應提升偵檢密度以利選擇上風處參考背景區域、應與偵檢單元位置接近。

在找尋室內參考背景區域相關要點為廠房結構材料等條件應與偵檢單元相似(如混凝土、乾井、瓷磚、磚牆及天花板等)，參考背景區域可選擇相同時間與廠家所建造可能含有偵檢單元在內之廠房結構，其內部位置應選擇未有放射性物質營運之歷史紀錄(如頂樓或交誼廳)。另對於 β 偵檢器對背景輻射量測結果，可能會因不同廠房結構位置而有所變化，如廠房底層基礎位置量測結果較高。在絕緣體背景輻射量測結果亦會增建靜電與加速氬氣產生衰變產物，對於相關 α 、 β 粒子計數率貢獻應剔除。

MARSSIM 說明參考背景區域量測數量亦應與偵檢單元相同，其量測數量 N ，一半為偵檢單元量測數量 $N/2$ ，另一半為參考背景區域量測數量 $N/2$ 。NUREG-1757 說明每個參考背景區域面積應至少等同於偵檢單元大小，量測位置為隨機取樣但也沒有理由說不能以系統取樣，關鍵在於參考背景區域量測與取樣收集型式必須為非偏差型，可有助於定位出個別熱點的位置。MARSSIM 說明參考背景區域量測品質應至少等同於偵檢單元量測品質，以及相同偵檢程序書、量測技術與儀器類型，包含偵檢器靈敏度與精準度。

(十三) 難區分背景輻射(Indistinguishable from Background)

MARSSIM 在區分污染區域與參考區域背景輻射貢獻部分，提供 A 與 B 兩個情境作為評估使用，情境 A 為 MARSSIM 預設的無效推論方法假設偵檢單元未符合外釋準則；反之，情境 B 為無效推論方法假設偵檢單元符合外釋準則，而情境 B 是適用於當污染區域偵檢結果接近參考區域背景輻射並須進行區別時的評估方法。然而對於同一廠址可能有不同偵檢單元適用不同情境來評估，或是同一偵檢單元內不同核種如 Cs-137 相對於土壤，其 DCGL 濃度高於背景值許多，較適合情境 A 進行評估，另 Ra-226 相對於土壤，其 DCGL 濃度較接近背景值，較適合情境 B 進行評估。10CFR20 要求廠址作為非限制性使用的劑量限值為每年 0.25mSv，若殘餘輻射劑量可與背景輻射區分，則使用情境 A；若殘餘輻射劑量難以與背景輻射區分則使用情境 B，則外釋條件 DCGL 則非扮演主要腳色。MARSSIM 並未提供情境 B 分析方法，其主要為參考 NUREG-1505 如何辨別難區分的背景輻射，以及相關統計學的方法。另在 NUREG-1757 對於難區分的背景輻射亦有相關定義。

對於難區分的背景輻射目前尚未有廠址分級、掃描、儀器可接受的最小偵測準則與調查等級，對於管制單位可接受的方式可能為嚴謹的廠址分級、最小偵測準則要求與調查等級，如 LBGR(3 σ)或 LBGR 加上 DCGL 值進行判定。當難區分的背景輻射使用情境 B 時須執行兩次統計學測試為 WRS Test 與 Quantile Test，且須向管制單位提出證明，相關適用條件包含(1)總 α 發射體核種或 β 發射體核種或核種分析量測須執行時，且核種是可在背景區域量到；(2)DCGL 相對於背景輻射差異性較小；(3)DCGL 接近儀器最小偵測能力值。

在難區分的背景輻射的偵檢單元量測數量，預期 DCGL 會相對較低且量測變異性較高，計算相對位移值可能較低以至於需要量測數量較高，以及清潔的偵檢單元有較大機率落入失敗，因此需要利用 DQO 過程減少取樣數量。建構難區分的背景輻射評估主要有 4 個步驟，前兩步驟主要在規劃背景輻射量測資料：

1. 執行 Kruskal-Wallis (K-W) nonparametric test，若背景輻射量測結果有顯著性的變化，管制單位可能傾向看到相關測試能執行，但也可能允許略過不執行，若背景輻射是明顯可以區分出來。

2. 定義難區分背景輻射的濃度，通常為 LBGR(3ω)。後兩步驟主要在評估背景輻射量測資料。
3. 執行 WRS Test，若拒絕假定推論失敗以確認偵檢單元是否通過。
4. 執行 Quantile Test，若拒絕假定推論失敗以確認偵檢單元符合外釋條件。

(十四) MARSAME

有關於物料和設備之相關偵檢的規劃、執行、評估及文件化等技術資訊是寫在 MARSSIM 的補充報告-「多部會輻射偵檢與物料設備評估指引(Multi-agency Radiation Survey and Assessment of Materials and Equipment, MARSAME)」當中，對於設施內物料與設備部分，包含金屬、混凝土、工具、設備、管路、電纜、容器等，可利用 MARSAME 進行評估，其優點在於鼓勵彈性的評估方法，可應用在簡單案例如外釋單一設備組件而不需要完整執行其方法論，就算應用在較複雜的案例，許多 MARSAME 亦有相關程序步驟供使用者依循。

MARSAME 使用重點在於應用量測品質目標(Measurement Quality Objectives, MQO)，相關內容在多部會放射實驗室分析程序指引(Multi-agency Radiation Laboratory Analytical Protocols manual, MARLAP)有介紹，例如不準確度、最小可偵測濃度及最小可量化濃度等內容。其描述不同種建構偵檢方法，如掃描偵檢、就地偵檢、MARSSIM 類型偵檢及基礎方法偵檢，並依偵檢單元種類而對應 MQO 需求與統計檢定。

- MARSAME 在規劃階段之主要步驟分為：

- (1)決定處置選項：對於物料與設備處置進行分類如維持放射性物料管制現況、清潔物料設備再利用放行、低污染物料設備再利用存放等待外釋、一般事業用廢棄物處置及高低放射性廢棄物處置。
- (2)決定行動水平：在 MARSAME 的行動水平即為 MARSSIM 的 DCGL，其對應不同的處置選項而有不同接受標準，如同 FSS 的限制性/非限制性使用，在 RG 8.23 有說明不同表面污染核種的行動水平。

- (3)執行初步評估：為了確認物料設備潛在污染源，會先初步執行偵檢作業包含目視檢查、檢視歷史紀錄、評估如何物料處置過程及難接近區域初步量測。目的為辨識物料設備物理特性如尺寸、材質、數量、可否接近程度、衰變輻射種類與處置花費，以及辨識物料設備放化特性如核種種類、估計濃度平均值、範圍、核種比率、污染分布與位置。
- (4)決定使用的偵檢類型：偵檢類型包含掃描偵檢、就地偵檢、MARSSIM 類型偵檢及基礎方法偵檢。課堂上講師是建議先使用就地偵檢，而 MARSSIM 類型偵檢(量測與掃描)則是最後選項。
- (5)資料品質目標：MARSAME 也使用 DQO 方法對偵檢規劃階段的資料進行評估，並決定最適當收集資料方式、從收集資料內決定最適當條件，以及訂定容許誤差限值等 7 個步驟(同 MARSSIM 方法)。
- (6)量測品質目標：MQO 是實驗室分析的績效準則或目標，可視為實驗室分析的 DQO 過程，並分別敘述於 MARSAME 及 MARLAP 內容。MQO 有 6 個檢視項目依重要程度排序分別為不準度分析、可偵測能力、可量化能力、範圍、特異性及耐用性。對於 MQOs 計算有可能較複雜，特別是不準度分析方法，另有專門計算不準度分析的軟體。
- (7)物料與設備分級：物料與設備會根據潛在污染情形進行受影響區域分級 Class 1、2、3 與未受影響區域，潛在污染程度越大，應花更多努力執行特性調查(同 MARSSIM 方法)。
- (8)辨識偵檢單元：物料與設備的偵檢單元較特殊，有可能是許多、一些或單一設備組件所組成，也有可能是獨立物件如手工具，部分隔離物件與主物件可能以不同偵檢單元方式進行處理，其量測結果將決定處置方式。在處理物料與設備有許多優點大於處理廠房結構，其中一個主要的優點是可以在相似環境找尋替代或混合的物料與設備，並可後處理使污染更均勻分布或更容易被偵檢。偵檢單元大小可透過劑量分析程式模擬假設的行動水平來確認可能受影響區域來劃分，與 MARSSIM 不同的

是，其大小與受影響區域分級無關，這也是 MARSAME 在應用上有更多的彈性之一，但還是有可能侷限於量測方法與儀器偵檢能力。

● MARSAME 在資料品質評估(DQA)階段之主要步驟分為：

- (1)審視 DQOs 與偵檢設計：確認 DQOs、MQOs 選擇正確性，並驗證偵檢區域應有適當量測數量。
- (2)建置初步資料審查：在資料驗證部分，應有 QA 與 QC 參與審查報告，並執行資料圖面審查，以及計算基本統計量化參數如最大小值、平均值、中位數及標準差。
- (3)選擇統計檢定方法：一般而言在資料生命週期規劃階段早已決定統計檢定方法，
- (4)驗證統計檢定假設條件：MARSAME 提供不同評估方法所對應關切議題、驗證方法及適用偵檢類型。
- (5)畫出偵檢資料結果：MARSAME 提供不同偵檢類型、情境 A or B 判定外釋準則。

(十五) 最終狀態偵檢報告(Final Status Survey Report)

有關前述最終狀態偵檢所應用 MARSSIM 方法論相關內容與成果，最後業主須納入 FSS 報告內容並提交給管制單位審查，預期內容會是非常龐大繁瑣，在課堂上講師建議來自於設施經營者的學員應盡可能提早開始準備報告內容，如廠址歷史評估 HSA 期間。對於相關報告並沒有制式格式，但可參考 NUREG-5849、MARSSIM 及 NUREG-1757 內容、課堂上講師所提供 ORAU 網址文件範例或 NRC 網址內容。

報告至少包含兩個基本內容，第一部分為廠址描述，第二部分為每個獨立的偵檢單元描述，報告所述執行偵檢作業的程序書應適用於每個偵檢單元之條件，其餘要項亦應納入報告內容摘述：

- (1) 背景與廠址描述：應包含運轉歷史如營運執行與廢料處理情形，以及除役活動如初步偵檢結果討論與改善補救行動程序。
- (2) 規劃 DQOs：應包含 QA/QC 程序、污染辨識、DCGLs 建立、廠址區域分級、辨識

偵檢單元與量測位置及選擇背景參考區域。

(3) 規劃偵檢步驟：應包含選擇儀器與偵檢技術，以及偵檢步驟。

(4) 評估偵檢結果：應包含簡化與評估資料的技術，以及統計評估。

課堂上講師亦提供早期 NUREG-5849、現今 MARSSIM 與 NUREG-1757 所使用報告格式相關內容，其中管制單位應注意重點包含(1)若量測結果超過儀器調查基準，應將任何增加量測數據、改善補救行動或重新執行偵檢資料納入報告內容，以確保潛在污染議題已獲得解決；(2)任何內容改變必須標註說明如二次取樣或重新執行檢定測試。

另美國核管會亦發布管制議題總結，要求包含(1)經營者應提供管制單位從劑量分析程式 DandD 或 RESRAD 計算 DCGL 輸出結果資料，事實上講師提醒在執行最終狀態偵檢過程甚至在規劃階段應提早提供給管制單位檢視，但也應合理納入報告內容；(2)對於不適切的廠址歷史評估資料與輻射狀態現況，亦要求提供相關資訊詳盡說明；(3)對於土壤總核種活度分析，需提供放射性核種資料來評估廠址核種狀況，以及提供相對比例與初始污染變化；(4)偵檢單元分級多數為 Class 1 與 Class 3，許多區域為潛在 Class 2 區域，需進一步調查來判定；(5)在使用不同儀器作為掃描偵檢時，提供最小偵測濃度或計算資料，另相關儀器校正步驟部分，可參考 ISO-7503 內容。

肆、心得與建議

此次參加美國 ORAU 舉辦 MARSSIM-2018 訓練課程之心得與建議，可歸納下列幾項：

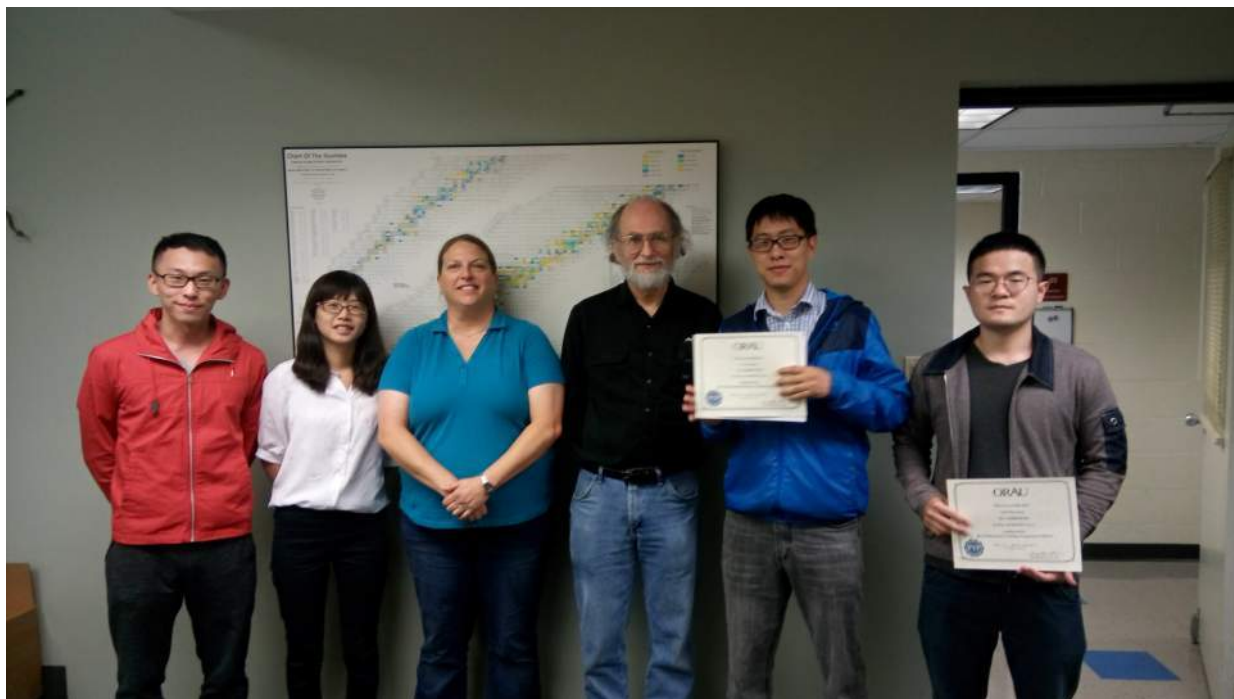
1. 多部會輻射偵檢與廠址調查手冊(MARSSIM)是一套已發展成熟且具有豐富實際使用經驗，可供除役審查者端與廠址設施經營者端都能據以實施指引，以及做為我國除役電廠最終狀態偵檢作業據以施行的參考資料及外釋標準。
2. 我國核一廠除役計畫已要求在廠址復原階段依 MARSSIM 方法論執行最終狀態偵檢作業，其應用上仍有許多值得參考國外除役經驗作法，如劑量分析程式、廠址特性參數應用、輻射偵檢數據資料納入 DQO、DQA 及 QA/QC 進行管理、統計檢定方法應用與 Type I & II 誤差決定，以及其他物料、設備、次表土、地下水與埋管等相關參考指引等，建議應適時與台電公司進行技術溝通與討論，以便於未來訂定相關輻射特性調查與最終狀態偵檢之作業規範，可作為重要管制事項審查之依循。
3. 本次赴美國參與橡樹嶺聯合大學(ORAU)舉行的 MARSSIM 訓練課程，其內容主要涵蓋最終狀態偵檢規劃、執行、評估及決策等階段相關指引，然對於 MARSAME 及其他廠址輻射特性偵檢技術課程中亦有介紹，因此建議應持續派員學習其他相關輔助訓練課程。
4. 對於因應我國核能電廠除役計畫後續須執行廠址輻射特性調查與最終狀態偵檢作業，參考 ORAU 在美國除役設施 Y-12 及 Zion 電廠進行廠址輻射特性調查與最終狀態偵檢之經驗回饋，建議可邀請國際具有除役專業知識與經驗團隊開設訓練課程，並建立與國際除役管制交流與技術合作之平台，促進國際交流合作。

伍、附件

附件一 MARSSIM-2018 訓練課堂照片

附件二 MARSSIM-2018 結訓證書

附件一 MARSSIM-2018訓練課堂



MARSSIM-2018 課堂結束後學員合影

附件二 MARSSIM-2018 結訓證書

