

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：

核電廠除役輻射偵檢與廠址調查研習-MARSSIM 訓練課程

頁數 28 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力公司/陳德隆/23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

陳琬婷/台灣電力公司/核能發電處/六等核能工程師/02-23667077

陳威廷/台灣電力公司/核能二廠/六等核能工程師/02-24985990

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 開會6 其他

出國期間：2018/6/9~2018/6/20

出國地區：美國橡樹嶺

報告日期：2018/8/6

分類號/目

關鍵詞：MARSSIM、外釋標準、DCGL、偵檢單元、DQO

內容摘要：(二百至三百字)

美國「多部會輻射偵檢與廠址調查手冊」(Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual, MARSSIM)對於潛在具有輻射污染場所，環境及廠址設施之輻射偵檢提供了一套標準化的規劃、實施及評估的作法，主要使用資料品質目標(Data Quality Objectives, DQOs)流程來設計偵檢，確保偵檢品質與數量可支持最後廠址的釋出，並訂定以劑量為基礎之外釋標準，即導出濃度指引水平(Derived Concentration Guideline Level, DCGL)，最後以統計檢定的方法來證明該廠址之輻射特性符合外釋標準。

當遇到 MARSSIM 不夠詳盡或認為有其他作法時，建議依據 DQO 程序，與管制單位依據專業判斷來達成共識，以順利完成廠址外釋的目標。

本文電子檔已傳至公務出國報告資訊網 (<https://report.nat.gov.tw/reportwork>)

出國報告（出國類別：實習）

核電廠除役輻射偵檢與廠址調查研習 MARSSIM 訓練課程

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：陳琬婷 核能發電處核能工程師

陳威廷 核二廠核能工程師

派赴國家：美國橡樹嶺

出國期間：107 年 6 月 9 日至 6 月 20 日

報告日期：107 年 8 月 6 日

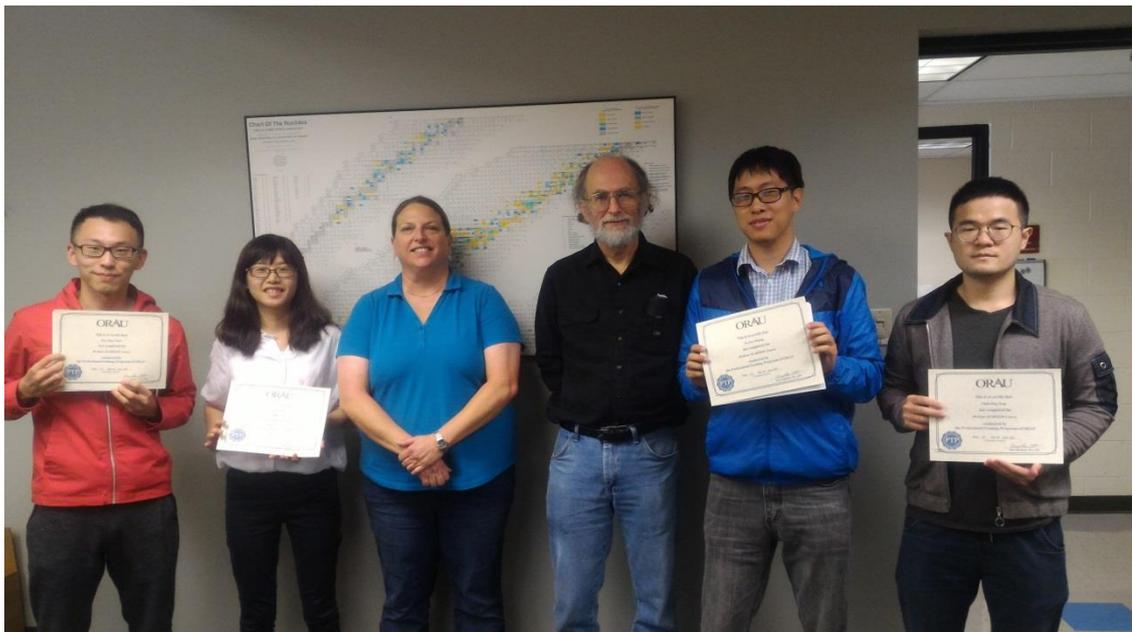
目 錄

	頁次
壹、目的	1
貳、過程	2
參、結論與心得	25
肆、建議事項	26
伍、參考資料	28

壹、目的

原能會曾於 106 年 10 月 18 日及 107 年 1 月 18 日召開之核能二廠除役準備工作溝通會議中提及除役電廠廠址輻射特性調查作業，須依美國多部會共同制定之 MARSSIM (Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual) 建議調查程序之一致性議題。MARSSIM 對於潛在具有輻射污染場所，環境及該廠址設施之輻射偵檢提供了一套標準化的規畫、實施及評估的作法，並訂定以劑量為基礎之外釋標準，以證明該廠址最終狀態之輻射特性符合外釋標準。

本公司已開始針對核電廠除役進行作業規劃，除為建立本公司最終狀態偵測之規劃技術，以及輻射特性調查之完整性，並尋求往後各除役廠址於輻射特性調查之作法一致，另外與主管機關達成共識亦是重要課題，MARSSI 內容除包含除役廠址輻射特性調查方式之建立與執行，亦強調 MARSSIM 保有彈性，並非須按照其每個建議執行，而是應綜合考量廠址自身狀況、社會觀感與經濟效益的議題，而這其中設施經營者與管制機關之間的共識非常重要，可預見除役過程需投入相當程度之溝通協調，以達成共識與互信，因此本次與主管機關共同赴美學習瞭解 MARSSIM，期建立共同的背景知識，將更有助於未來本公司與其之間的溝通與協調，使輻射偵檢與廠址外釋等議題可順利推動執行。



貳、過程

本次出國行程於 107 年 6 月 9 日至 107 年 6 月 20 日，含往返程共計 12 日，於美國田納西州橡樹嶺聯合大學(Oak Ridge Associated University, ORAU)專業訓練中心(Professional Training Program)實習本次課程。詳細行程如下：

日期	行程	摘要
6/9-6/10	台北→田納西	往程
6/11	ORAU 課堂講習	1. MARSSIM 概論 2. 除役過程所需之輻射偵檢形式
6/12	ORAU 課堂講習	1. MARSSIM 統計學概論 2. DCGL 之選擇與應用 3. RESRAD/DandD, RESRAD-Build, VSP 軟體介紹
6/13	ORAU 課堂講習	1. 廠址輻射分類與偵檢單元 2. 參考區(reference area) 3. 表面活度分析與偵檢儀器之偵測靈敏度 4. 最終狀態偵測統計檢定規劃
6/14	ORAU 課堂講習	1. 課堂演練：設計最終狀態偵測 2. 整合最終狀態偵檢 3. MARSAME(NUREG 1757 補充文件) 4. 資料品質分析(Data Quality Assessment, DQA)
6/15	ORAU 課堂講習	1. 偵檢數據無法與背景值區分之統計檢定方法 2. 最終狀態偵測報告內容 3. MARSSIM 總結
6/16-6/18	個人行程	個人行程與資料整理
6/19-6/20	田納西→台北	返程

將本次 MARSSIM 課程內容整理為以下幾項，並加以詳細探討介紹：

一、前言

- (一)、資料品質目標 DQO 簡介
- (二)、輻射偵檢與廠址調查流程

二、規劃階段

- (一)、DCGL 議題
- (二)、廠址輻射分級與偵檢單元建立
- (三)、決定選用情境 A 或情境 B、統計檢定方法
- (四)、決定在統計檢定中是否採用 Unity Rule
- (五)、選擇量測程序與偵測設備
- (六)、決定量測 MDC 及掃描 MDC
- (七)、決定量測及掃描的調查基準
- (八)、決定可接受之 Type I 及 Type II error，並設定 LBGR。
- (九)、決定適當之量測或取樣數目
- (十)、建立參考網格(reference grid)並決定量測/取樣位置

三、評估階段

- (一)、數據驗證
- (二)、數據確認
- (三)、DQA

四、決策階段

五、相關議題補充

- (一)、背景參考區建立
- (二)、最終狀態偵測報告

一、前言

MARSSIM全名為多部會輻射偵檢和廠址調查手冊(Multiagency Radiation Survey and Site Investigation Manual)，是由美國衛生署(EPA)、能源部(DOE)、核管會(NRC)和國防部(DOD)共同編寫的共識文件，其作為廠址除役調查的工業標準，提供一致的方法進行潛在受污染場所之輻射偵檢和廠址調查，MARSSIM的主要重點是採用DQO流程，為除役廠址提供「最終狀態輻射偵檢 (Final Status Survey, FSS)」之執行指引，以確認廠址輻射程度是否符合外釋標準。

其中MARSSIM對於輻射污染的調查與偵檢只著重於建物表面及表層土壤(15公分內)，並無包含物質與設備、次表土之外釋處理方法，如需針對物質與設備外釋的指引，可參考NUREG 1575補充文件之MARSAME手冊(Multi-Agency Radiation Survey and Assessment of Materials and Equipment Manual)，次表土外釋指引可參考發展建置中之MARSAS手冊(Multi-Agency Radiation Survey and Assessment of the Subsurface Manual)。

除了MARSSIM本文(NUREG 1575)外，有幾份重要的文件指引供參，列舉如下說明：

- NUREG 1505. NRC. A Nonparametric Statistical Methodology for the Design and Analysis of Final Status Decommissioning Surveys.

此份文件內容大致與MARSSIM相同，但包含更多詳細的統計議題，尤為情境B之主要指引，即證明量測值無法與背景區分。

- NUREG 1507. NRC. Minimum Detectable Concentrations with Typical Radiation Survey Instruments for Various Contaminants and Field Conditions.

MARSSIM的一大關鍵是偵檢儀器的掃描及量測MDC (Minimum Detectable Concentration)，NUREG 1507基於MARSSIM的MDC計算內容加以補充擴展，亦提供計數統計相關資訊並使用ISO-750方法量化表面汙染。

- NUREG 1757. NRC. Consolidated Decommissioning Guidance (Vol 2)

NUREG 1757具三個volume，主要是NRC對於除役提供的指引，其中Volume 2涵蓋FSS及MARSSIM的實作，另外也包含劑量評估模式以及合理抑低ALARA議題，其附錄APPENDIX提供許多範例，是特別有用的參考資料。

MARSSIM 受歡迎原因是由於它極具彈性，在此引述 MARSSIM 原文：「MARSSIM uses the word “should” as a recommendation, that ought not be interpreted as a requirement.」，也就是MARSSIM 建議之方法應視為一個可信度極高的參考指引，但我們並不一定完全按照每個步驟來做使用；另一優勢為 MARSSIM 使用無母數統計法，即我們不需要假設數據是常態分

佈或對數常態分佈，第三可大幅降低量測或取樣數目，尤以土壤化學分析是較耗費成本的作業，使用 MARSSIM 可在取樣點數與通過外釋標準間做一平衡擇取。

MARSSIM 也具有缺點：

- 其一它只針對表面汙染提供外釋指引，並不包含物質與設備。
- 其二對於局部汙染(hot spot 或單一的放射性物質)並沒有提供很好的處理機制。
- 其三 MARSSIM 是否能有效實施建立在執照者與管制單位大量的溝通，此部分也是老師於課堂中數次強調，當遇到 MARSSIM 沒有提供指引或指引不清時，應著重於業者與管制單位的有效溝通結果，雙方皆有共識下再繼續執行。
- 其四為 MARSSIM 複雜且容易令人混淆不清，因 MARSSIM 文章敘述大多給予大方向，並未提供執行的細節，讀者讀來可能會產生疑惑；總結而言，MARSSIM 建立一套可信並且更佳的指引，但是 MARSSIM 仍不完美，當遇到提供的指引不詳盡時，建議依據 DQO 程序，同時依據專業判斷，並徵求管制單位意見。

(一)、資料品質目標 DQO 簡介

最終狀態偵測可由資料生命週期 (data life cycle) 四個階段組成，即規劃階段、執行階段、數據分析階段及決策階段，其中規劃階段主要使用資料品質目標(Data Quality Objectives, DQOs)流程來設計偵檢，DQO 為美國環保署 EPA 提出之管理方式，確保輻射偵測的結果具有充分的品質與數量，可支持最後廠址釋出的決定，以下為 DQO 七個步驟：

1. 步驟一、陳述問題

此任何決策過程的第一步是確定問題，以便使調查的重點為明確。此步驟的預期產出為：

- 計劃團隊成員名單和決策者的身份
- 對問題的簡要描述：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外釋法規標準。
- 總結問題的可用資源和相關截止日期：可用資源和截止日期通常建立在廠址特定的基礎上加以確認。

2. 步驟二、確認決策

此步驟的預期輸出是一個決策聲明，將主要研究問題與問題的可能解決方案聯繫起來。

3. 步驟三：確認決策所需的資料輸入

收集數據或資訊對於解決決策聲明是必要的。在這一步中，規劃團隊著重於決策所需的資訊並具體說明作解決決策聲明時所需的不同種類資訊，本步驟的預期輸出是：

- 解決決策聲明所需的資訊清單
- 未來要進行量測的環境變量或廠址特性清單

4. 步驟四：定義研究的邊界

在此步驟中，規劃團隊應根據在 DQO 流程的第 1 步驟或先前的調查中所收集到的現有資訊，建立廠址的概念模型，概念模型描述了廠址或設施的周圍環境，並提出關於放射性核種的存在及其潛在遷移途徑的假設。此步驟的目的是定義決策聲明所涵蓋的空間和時間邊界，以便容易解釋數據。

5. 步驟五：制定決策規則

此步驟的目的是定義感興趣的參數、具體說明行動基準（或 DCGL），並將前面的 DQO 步驟的產出整合成單一個語句（「若...則...」的決策規則），以描述選擇採取措施之邏輯基礎。

6. 步驟六：具體說明決策錯誤的容許範圍

此步驟目的為具體說明決策者對決策錯誤的容許範圍，於規劃階段，這些容許範圍可以建立數據收集的效能與目標，而規劃團隊的目標是設計調查流程，以減少做出決策錯誤的可能性。舉例而言，將步驟 5 決策規則減化為「是」或「否」之間做選擇，此時決定虛無假設與對立假設，當以這種方式進行決定時，會出現 2 種判斷錯誤的機率，即偽陽性(False-positive)與偽陰性(False-negative)，其對應的誤判容許率分別為 TYPE I 誤差(α)與 TYPE II 誤差(β)，此步驟便是決定假設、前述誤差的可接受範圍以及灰區下限(Lower Bound of Gray Region, LBGR)。

7. 步驟七：優化收集數據的設計

此步驟目的為產生滿足 DQO 且最符合資源效益的偵檢設計，重新審視 DQO 程序中的前幾個步驟後，可能需要不止一次地執行 Step 7。

(二)、輻射偵檢與廠址調查流程

除役廠址需進行不同類型的輻射偵檢，以確認廠址殘餘污染程度，MARSSIM 將此稱為輻射偵檢與廠址調查流程 (Radiation Survey and Site Investigation, RSSI)，於 MARSSIM 第 2 章及第 5 章有所討論，並提供各類型輻射偵檢的詳細說明以及範例清單，RSSI 流程可參考圖 2，以下簡述各種偵檢之特色：

1. **廠址歷史評估 (HSA)**，HSA 本身不是一項輻射偵檢作業，而是盡可能的收集該廠址的歷史訊息，方式檢視包括各類文件報告，例如輻射偵檢的紀錄、例行業務調查報告、異常事件和污水排放的記錄等，以及訪談前員工及現有員工。HSA 的目標是確認潛在的污染源，以區分受影響區及非受影響區，並為後續的範圍偵檢和特性調查設計提供資訊。
2. **範圍偵檢 (Scoping Survey)**：以 HSA 為基礎，加以專業判斷哪些受關注區域需進行量測或取樣，目標是要提供廠址大致的污染程度與分布情形，並區分出第三級區域。
3. **特性偵檢 (Characterization Survey)**：以 HSA 與範圍偵檢的結果作為基礎，通過隨機取樣/量測和專業判斷的量測，在特性偵檢階段收集所有受關注區域的樣本與量測數據，目的是清楚定義污染性質和程度，以便判斷是否採取復原行動和規劃廢棄物處理的方式，另一目的為蒐集廠址特定參數以推導較精確符合廠址特性之 DCGL，同時應於此階段建立各偵檢單元的量測平均值與標準差，以應用到 FSS 設計中。
4. **改善行動輔助偵檢 (remedial action support survey)**：目的是執行補救措施後決定廠址或單一偵檢區是否已經可做最終狀態偵檢，並提供最新廠址特定參數的估計值以規劃最終狀態偵檢。
5. **最終狀態偵檢 (Final Status Survey, FSS)**：證明除役廠址符合劑量或風險推估而得的外釋標準。
6. **驗證偵檢 (Verification survey)**：由第三方獨立機構或管制單位執行的偵檢。

二、規劃階段

於規劃FSS階段，可歸納為十個步驟，下述將逐步說明：

(一)、建立單一核種與多核種之DCGL

對於除役廠址而言外釋標準是針對殘餘污染的一個最基本限制，美國NRC於10 CFR 20敘明，外釋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0.25毫西弗，我國法規目前採NRC建議值。而此外釋標準

無法直接被量測得知，為便於執行廠址復原及管制作業，土地使用劑量標準(0.25毫西弗)會透過曝露途徑模式，轉換成可直接量測到的放射性核種濃度(Bq/kg)，即導出濃度指引水平DCGL，DCGL為一定義區域內最大可允許的平均污染值，如此核種污染值達DCGL，代表造成之劑量達到外釋標準，單一核種的DCGL推導雖不在MARSSIM範疇，但在FSS階段卻扮演重要角色。

DCGL具有兩種基本形式：DCGL_w及DCGL_{EMC}，DCGL_w定義為整個偵檢單元可允許的平均污染值，若在偵檢單元內有局部區域的污染量偏高，考量其導致輻射劑量的貢獻比率，另外以偵檢區面積對受污染面積的比例來修正DCGL_w值，即DCGL_{EMC}，因此DCGL_{EMC}可視為熱區(hot spot)內可允許的平均污染濃度，以下介紹不同形式的DCGL：

1. 單一核種的DCGL_w值可由下式進行計算：

$$DCGL = \frac{\text{外釋標準}(0.25mSv)}{\text{核種單位濃度造成的劑量}\left(\frac{mSv}{Bq/g}\right)}$$

目前NUREG 1757 vol.2針對單一核種建立screening level值，screening level是利用DandD code內預設參數進行運跑得到，設施經營者可直接採用或將其作調整後使用，但screening level屬相對保守，通常設施經營者會期望較高的DCGL_w，此時可收集廠址特定參數，並採用RESRED與RESRAD-Build進行DCGL_w分析，以求貼近真實的廠址情況，並得到較高的DCGL_w。對於單一核種的DCGL討論可參考NUREG 1757 vol.2 APPENDIX I。

2. DCGL_{EMC}：定義DCGL_{EMC}的用意，在於確保即便有小範圍的污染值高於DCGL_w，對整個偵檢單元而言其輻射水平仍能符合土地外釋劑量標準，DCGL_{EMC}公式如下：

$$DCGL_{EMC} = DCGL_w \times AF$$

AF為大於1的比例，是特定核種及特定區域的面積因子(Area Factor)，

$$\text{Area Factor} = \frac{\text{預設面積下的有效劑量}}{\text{熱區面積的有效劑量}}$$

MARSSIM及NUREG 1505皆有提供面積因子列表，但不傾向採用，而是建議使用RESRAD計算AF。

3. 在具有多核種的廠址使用DCGL：

執行總 α 及總 β 量測(通常於建物表面)時，該量測值包含多個核種的貢獻，此種情形下有兩個方法可決定適用的DCGL：

- 直接採用最嚴格的DCGL：此方法最簡單，不須建立各核種之間的貢獻比例，

也就是假設所有 α 跟 β 都是由最嚴格核種產生的；如果預期污染值都小於各核種DCGL，且各核種DCGL相近，此方法是很適用的。

- 建立各核種貢獻的比例，推算gross DCGL：此方法較複雜，須建立各核種的貢獻比例，其計算式如下

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

- f_1 為核種 1 貢獻之比例
- $DCGL_1$ 為核種 1 之單一 DCGL
- f_2 為核種 2 貢獻之比例
- $DCGL_2$ 為核種 2 之單一 DCGL

4. 使用替代量測：

基於成本考量，我們可以建立較花費分析成本的核種（如Sr-90經由放射化學分析得到），與分析成本較低的核種（如Cs-137經由 γ 能譜分析得到）之比例，便可藉由量測後者說明前者的存在，上述例子中Cs-137即為代表核種(surrogate)，Sr-90為推論核種(inferred)，即使我們不量測推論核種，其仍有劑量貢獻，因此需要調整（降低）代表核種之DCGL，以留置部分劑量餘裕給推論核種，通式計算如下：

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

- $DCGL_{adj\ sur}$ ：代表核種經調整後之 DCGL。
- $DCGL_{sur}$ ：代表核種尚未調整前之 DCGL。
- $DCGL_1$ ：第一推論核種的 DCGL。
- R_1 ：第一推論核種與代表核種活度之比值。

比例因數的決定方法並無正確或標準做法，以主管機關與持照者皆可接受為主，有時難以建立兩個核種間一致的比例關係，此時較合理的做法是審視收集得來的數據並使用DQO程序決定適當的比例因數。

（二）、依據輻射污染程度進行廠址分級與建立偵檢單元

此步驟分為兩階段，如標題所述，先將廠址依據輻射污染程度進行分級，再建立偵檢單元，MARSSIM採用級進法（graded approach）來確認殘餘污染的特性。MARSSIM對於分級和偵檢單元的設計並無太多限制，此過程極為彈性，我們可依據眼前的狀況作調整，因此此步驟並無一定正確的結果。

廠址分級可參考MARSSIM 2.2/2.4.1/2.5.2/4.4章節以及NUREG vol2 APPENDIX A。初始依據HSA資訊判定受影響區及不受影響區，受影響區再依潛在輻射污染程度再分為三級：class 1、class 2及class 3。廠址分級可以在除役的任何階段執行，但必要執行是在進入FSS之前，而分級的所需資訊則在HSA階段、特性偵檢及復原行動偵檢中取得。

其中不受影響區是指過去至今從未有任任何潛在輻射污染，不受影響區的確認通常是在除役早期。對於不受影響區，請參考[五、相關議題補充—背景參考區建立]。

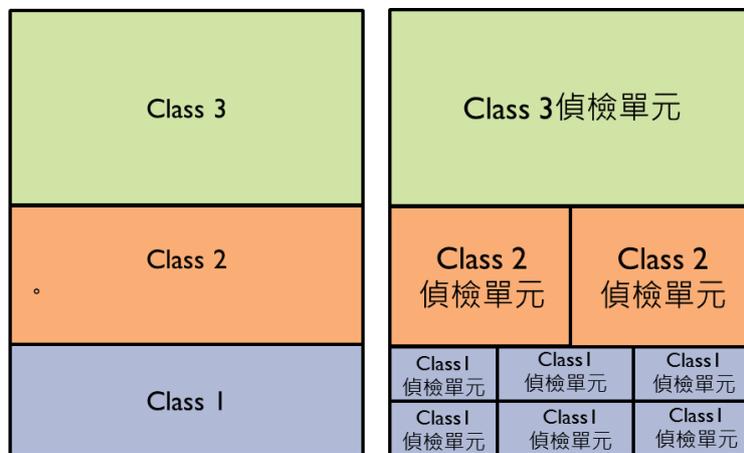
以下簡述各級區域之特性：

- class 1：
現在或過去具有任何改善行動，具有潛在污染或已知污染高於DCGLw。
- class 2：
Class 2的定義為「現在或過去具有任何改善行動，具有潛在污染或已知污染，但不高於DCGLw」。
- class 3：
MARSSIM定義class 3為「沒有潛在污染或污染程度低微，不超過顯著比例(10%-25%)之DCGL」，即使某個區域沒有受到影響，但因為沒有足夠的證據支持判別為不受影響，建議仍然將其分類為class 3。

在FSS階段得到的數據有可能會改變原本的分級情形(重新分級可參考MARSSIM 4.4及5.5.3)，此種情況只能給予更嚴格的分級，即Class 2重新分類為class 1，Class 3重新分類為class 2或class 1，重新分類後再繼續執行FSS。

偵檢單元建立可參考MARSSIM 2.2/4.6章節以及NUREG vol 2 APPENDIX A。偵檢單元是最終外釋標準驗證的基礎，每個偵檢單元的DQO流程是獨立的，最後一個廠址要能外釋，必須其內所有偵檢單元均符合外釋標準才行。

建立偵檢單元的主要目的為允許除役以不同速率執行，可能一個偵檢單元執行完特性調查即可符合release criteria，但是相鄰的偵檢單元需要執行改善復原行動；另一目的為輔助決策者確認哪個區塊需要投入較大偵檢成本，此與分級後量測的密度及掃描範圍有關，下圖為分級後對應之偵檢單元，基本上越嚴格的分級對應的偵檢單元面積就越小：



污染程度

偵檢單元面積大小

圖 2 輻射分級與對應之偵檢單元

而面積大小MARRSIM有所建議（非絕對性的要求），如下表：

表 1 輻射分級與偵檢單元面積

偵檢單元面積 (上限)	建築物面積(m ²)	土地面積(m ²)
Class 1	<100m ²	<2000m ²
Class 2	100~1000m ²	2000~10000m ²
Class 3	無限制	無限制

總言之偵檢單元的建立取決於實務偵檢的便利性，以及盡可能地將同質性高的偵檢單元合併以減少偵檢成本。

(三)、決定選用情境A或情境B、及統計檢定方法

情境A為大部分FSS採用的情節，虛無假設為「偵檢單元不符合外釋標準」，因此我們將偵檢單元內的污染值與DCGL相比，目標是驗證偵檢單元內之殘餘輻射低於DCGL，此時採用無母數統計(non-parametric)檢定法Sign Test與WRS test，無母數統計不需要對於數據分布有太多假設，即數據無須為常態分佈或是其他特定情況，因土壤或建物表面之污染程度通常不為常態分佈，因此MARSSIM建議使用上述兩種統計檢定方法。以下介紹兩種檢定方法的使用情境：

- **Sign Test**：Sign Test為單樣本檢定，即不需要與背景（參考區域）做對照，當適用於背景沒有污染，或是有輕微污染（相對於DCGL只佔一小部分），可忽略背景或將總活度減去背景活度，此時利用Sign Test決定量測點數，例如執行土壤中的Co-60加馬能譜分析。而建物表面量測總 α/β 時，當DCGL高出背景許多，亦採Sign Test並忽略背景，或是即使DCGL與背景相近，也可以將量測值扣除背景後，採Sign Test分析淨值。
- **WRS test**：WRS test為雙樣本檢定，適用於背景有污染，且相對於DCGL有顯著的比例，此時利用WRS test決定量測點數，例如執行土壤中的Cs-137加馬能譜分析或土壤中有U-238污染，因土壤背景即含有核爆落塵的影響與天然鈾衰變系列。建物表面量測總 α/β 時，當DCGL與背景相近，亦採WRS test。

值得注意的是，講師特別提到關於核電廠建物表面的量測，雖然MARSSIM建議使用WRS test，但因為劃分偵檢區須考慮潛在污染及表面材質，使用WRS test將會導致同一個房間內存在數個偵檢區，講師認為這是不太實際的做法，因此建議建物表面量測最好都是使用Sign test。

情境 B 最具代表性的應用是為了證明「偵檢單元的量測值與背景無法區分」，其虛無假設為「偵檢單元符合外釋標準」，亦即要證明偵檢單元內之平均殘餘輻射污染無法與背景區分，例如 Cs-137 的 DCGL 比背景中 Cs-137 含量高出許多，採情境 A，而 Ra-226 的 DCGL 低，且與背景中 Ra-226 含量相近，採情境 B，因此情境 B 使用時機為污染物存在於背景中，且 DCGL 很低，背景輻射變動範圍大之時，決定採用情境 B 後，統計檢定方法為 Kruskal-Wallis Test 與 Quantile test，於 NUREG 1505 第 13 章提供概述如何證明背景的不可區分性，而統計檢定的細節可以參考第 6、7 章。

(四)、決定在統計檢定中是否採用Unity Rule

當同一樣品或同一地點會有兩個以上的測值，就須採用Unity Rule，例如在同一土壤樣品量測得Co-60和Cs-137，或是在建物的同一處表面進行α/β量測，Unity Rule是將相對偏移中的DCGL設為1，再針對LBGR及σ做調整，公式如下：

$$LBGR = \frac{\text{核種1的活度}}{DCGL_1} + \frac{\text{核種2的活度}}{DCGL_2} + \text{etc} \quad \sigma = \sqrt{\left(\frac{\sigma}{DCGL}\right)_{\text{核種1}}^2 + \left(\frac{\sigma}{DCGL}\right)_{\text{核種2}}^2 + \text{etc}}$$

(五)、選擇量測程序與偵測設備

輻射偵檢包含兩種基本活動，即量測（measurement）與掃描（scan），掃描是在活度偏高的區域表面上以固定速度移動可攜帶式輻射偵檢器，偵測表面活度，掃描不須提供個別核種資訊，目的是找出潛在的熱區；而量測是將偵檢器固定於污染表面之上，並由偵檢器回應讀數來推斷放射性程度，取樣則是在某地區中蒐集一部份環境介質，所收集的樣品隨後進行分析，以確認污染物種類並量測其放射性濃度。

關於偵檢儀器的採用，可以採用氣流式比例偵檢器量測建物表面總α/β，使用碘化鈉偵檢器量測土壤γ，下表統整量測與掃描使用的儀器與方法：

表 2 量測與掃描使用的儀器與方法

	取樣或直接量測 (數量由相對偏移決定)	掃描 (掃描範圍依據偵檢單元的分類)
目的	分析偵檢單元內平均活度	找出熱區
建物表面(gross α/β)	量測建物表面得 α/β 活度 (充氣式比例計數器計數一分鐘)	掃描建物表面得 α/β 活度 (充氣式比例計數器)
土壤(γ-emitters)	取樣並送實驗室作分析	掃描土壤 γ 活度 (碘化鈉偵檢器)

分類為class 1的偵檢單元，掃描範圍建議涵蓋整個偵檢單元，取樣或直接量測數據則以系統性方法取得（例如在步驟十會提到的三角網格法），分類為class 2的偵檢單元，掃描範圍建議涵蓋10%~100%的偵檢單元，取樣或直接量測數據亦以系統性方法取得，class 3偵檢單元的掃描範圍可用專業判斷來執行，取樣量測則以隨機方式決定，至於非受影響區是完不須進行任何的掃描與取樣量測，下圖為量測取樣位置與掃描範圍之示意圖：

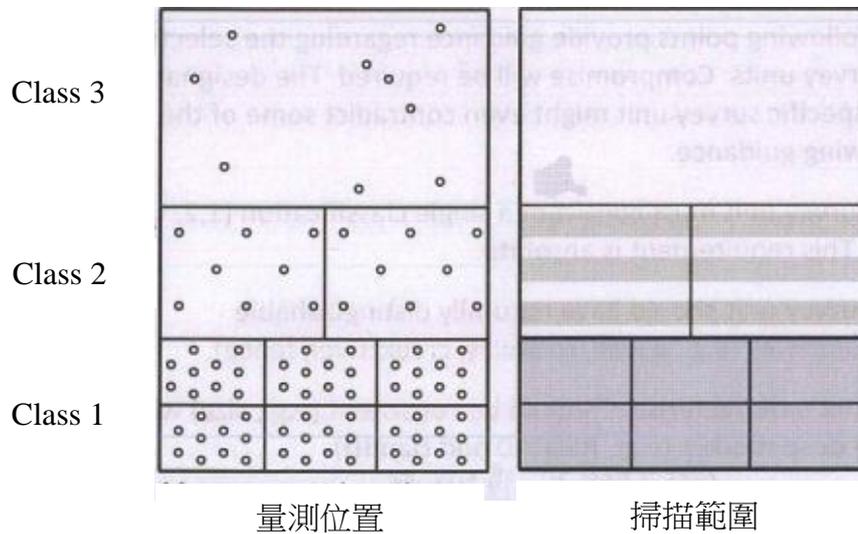


圖 5 不同分級區域量測取樣位置與掃描範圍

(六)、決定量測MDC及掃描MDC

上節談到偵檢儀器的使用，須依據儀器可量測的輻射種類、偵檢何種介質等作為選擇依據，另一重要指標則是儀器的最小可測濃度（Minimum Detection Concentration, MDC）需小於DCGLw，亦即儀器偵測靈敏度至少要能偵測到DCGLw以下的污染水平，如偵測極限大於DCGLw，則此儀器並不適用，因此MDC是驗證上述偵檢儀器與偵檢流程是否妥適的一項指標。

MARSSIM建議量測程序使用的儀器，應評估其measurement MDC，達到DCGLw的10%~50%，10%以內為佳；掃描程序使用的儀器其scan MDC應小於class 1的DCGL_{EMC}其measurement MDC及scan MDC計算公式如下：

$$\text{measurement MDC}(dpm/100cm^2) = \frac{3 + 4.65\sqrt{C_B}}{t \cdot E_i \cdot E_s \cdot \frac{A}{100}}$$

- C_B ：背景計數值
- t ：計測時間（分鐘），樣品與背景計測時間相同。
- E_i ：儀器效率(2π)
- E_s ：射源效率
- A ：probe area (cm^2)

$$\text{scan MDC}(dpm/100cm^2) = \frac{60 \cdot d' \cdot \sqrt{C_{Bi}}}{i \cdot \sqrt{p} \cdot E_i \cdot E_s \cdot \frac{A}{100}}$$

- C_{Bi} ：i時間內背景計數值。
- d' ：2.32，參考MARSSIM表6.5，如偽陽性機率是0.25，正確偵測的機率是0.95，則 $d'=2.32$ 。
- i ：於hot spot的計測時間（秒）。
- p ：偵測者效率（MARSSIM建議0.5）。

(七)、決定量測及掃描的調查基準

由儀器顯示之讀值響應判斷是否需須展開進一步調查，MARSSIM建議Class 1的調查基準可以將count rate設定至對應 $DCGL_{EMC}$ ，亦即儀器如有警報聲響，代表此區域污染活可能超過 $DCGL_{EMC}$ ，應採對應的調查行動；Class 2的調查基準對應 $DCGL_w$ ，Class 3調查基準則設定至 $DCGL_w$ 的一部分。

(八)、決定可接受之Type I及Type II error，並設定LBGR。

MARSSIM所使用的虛無假設為「殘留放射性核種的活度（中位數或平均值）超過外釋標準」，即低於 $DCGL_w$ (亦為灰區上限)，而統計檢定的結果只有兩種，一為拒絕(reject)虛無假設，二為無法拒絕(fail to reject)虛無假設。然只有在無限多個取樣點的情況下，才能百分之百確定是拒絕還是無法拒絕，因此在有限的取樣點數下，必須考慮錯誤判斷的可能性，即「Type I」和「Type II」誤差。Type I認為虛無假設是錯誤但其實是正確的，也就是判斷為廠址可外釋但其實超過外釋標準，這就導致外釋的廠址有潛在的輻安疑慮，顯然這是主管機關即原能會所不想發生的結果，因此Type I又稱為「主管機關誤差」，發生的機率為 α ， α 越小越好，實務上由主管機關來訂定，一般國外使用0.05。Type II則認為虛無假設是正確但其實是錯誤的，也就是判斷廠址超過外釋標準但其實可外釋，就必須增加除污的成效或者取更多的樣，增加除役的成本，顯然這是經營者即台電公司所不願見到的結果，因此Type II又稱為「經營者誤差」，發生的機率為 β ，實務上由經營者來決定。

LBGR則為放射性核種污染的期望濃度(即中位數或平均值)，在規劃取樣數量時會用到，LBGR如果離 $DCGL$ 越遠，表示有越大的機率能符合外釋標準(即拒絕虛無假設)，一般使用實際量測的中位數或平均值來做為LBGR，若初期沒有量測數據，MARSSIM建議假設為 $DCGL$ 的一半。

$DCGL$ 、LBGR、灰區、 α 、 β 的關係如下圖， $1-\alpha$ 為正確判斷虛無假設是正確的機率，即廠址實際不可外釋且判斷為不可外釋的機率，又稱為信心水準(confidence)。

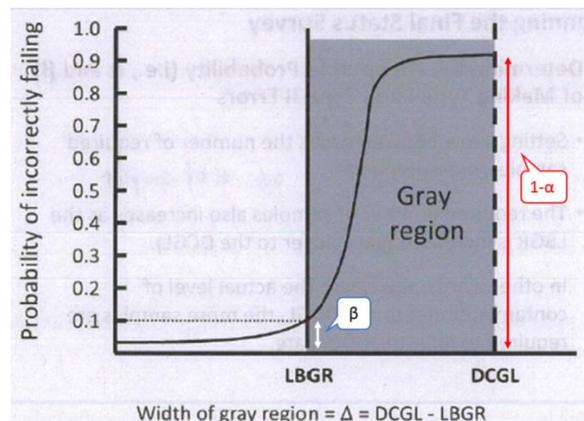


圖 6 DCGL、LBGR、灰區、 α 、 β 的關係圖

對於經營者來說，關心的是 β ，因此可改畫成如下圖， $1-\beta$ 為正確判斷虛無假設是錯誤的機率，即廠址實際可外釋且判斷為可外釋的機率，又稱為檢定力(power)。Everyone wants power !

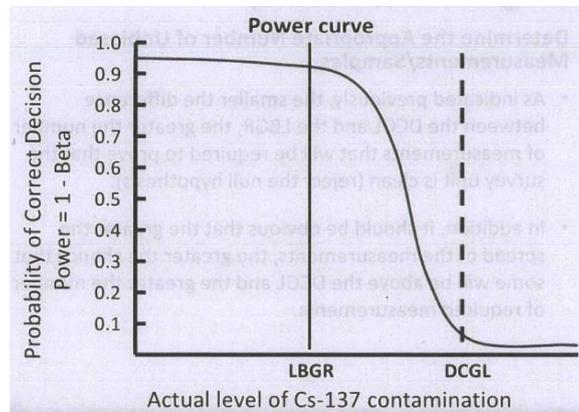


圖 7 檢定力曲線

(九)、決定適當之量測或取樣數目

本步驟又可細分成幾個小步驟：

- Step 1：計算相對偏移(relative shift)， Δ/σ
- Step 2：決定偵檢單元之隨機量測值小於DCGLW且大於參考區隨機量測值的機率，Pr
- Step 3：由決策誤差 Type I (α)、Type II (β)，訂出 $Z_{1-\alpha}$ 及 $Z_{1-\beta}$
- Step 4：計算或查表得到總偵測或取樣的數量，N
- Step 5：如果是Class 1，須確認點數是否足夠將熱點偵測出來(使用表面掃描)

因步驟較為複雜，直接以範例來做說明：廠址土壤有污染核種Th-232衰變系列及天然鈾(U-238, U-234, U-235，活度比例為0.485, 0.493, 0.022)，此偵檢區分類為Class 1，其面積(A)為2700 m²，Th-232 的DCGL為3 pCi/g、U-238的DCGL為120 pCi/g，經由特性偵檢得到的核種濃度中位數為：

表 3 本案例汙染核種整理

	偵檢區	參考區
Th-232	1.8±0.5(1 σ)	1.2±0.3(1 σ)
U-238	22.6±8.8(1 σ)	1.4±0.7(1 σ)

因背景有顯著污染，因此使用WRS test，可參考MARSSIM 5.5.2.2。

- Step 1：計算相對偏移(relative shift)， Δ/σ ：

$$\text{相對偏移} = \frac{\Delta}{\sigma} = \frac{\text{DCGL}_W - \text{LBGR}}{\sigma}$$

其中， $\Delta = \text{DCGL}_W - \text{LBGR}$ 即灰區， σ 為偵測(或取樣)數據的標準差，越多的量測數據或更精密的儀器可降低 σ ，本案例因含有兩種核種，因此必須使用值一法則(unity rule)，即 $\text{DCGL}_W = 1$ ，

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\text{Th232}}}{\text{DCGL}_{\text{Th232}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\text{U238}}}{\text{DCGL}_{\text{U238}}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0.5}{3}\right)^2 + \left(\frac{8.8}{120}\right)^2} = 0.182$$

$$\text{LBGR} = \frac{\text{Th232}_{\text{淨濃度}}}{\text{DCGL}_{\text{Th232}}} + \frac{\text{U238}_{\text{淨濃度}}}{\text{DCGL}_{\text{U238}}} = \frac{1.8-1.2}{3} + \frac{22.6-1.4}{120} = 0.38$$

$$\text{相對偏移} = \frac{\Delta}{\sigma} = \frac{1 - 0.38}{0.182} \approx 3.4 \quad (\text{MARSSIM 建議相對偏移應在 } 1\sim 4 \text{ 之間})$$

- Step 2: 決定偵檢單元之隨機量測值小於 DCGL_W 且大於參考區隨機量測值的機率，Pr：查MARSSIM Table 5.1，因 $\Delta/\sigma \approx 3.4$ 而表5.1沒有，可無條件捨去(較保守)，使 $\Delta/\sigma = 3$ ，查表可得Pr=0.983039
- Step 3: 由決策誤差 Type I (α)、Type II (β)，訂出 $Z_{1-\alpha}$ 及 $Z_{1-\beta}$ ：
 α 與 β 取0.05，可查MARSSIM Table 5.2， $Z_{1-\alpha}$ 及 $Z_{1-\beta}$ 皆為1.645
- Step 4: 計算或查表得到總偵測或取樣的數量，N：

使用WRS test計算N的公式：

$$N = \frac{(Z_{1-\alpha} + Z_{1-\beta})^2}{3(P_r - 0.5)^2} = \frac{(1.645 + 1.645)^2}{3(0.983039 - 0.5)^2} = 15.5$$

考慮遺失或不能用的資料，MARSSIM建議多取20%較為保險，故 $N = 15.5 \times 1.2 = 18.6$ ，無條件進位成19(較保守)，因N為偵檢區及參考區總偵測點數，須分配兩區各別的偵測點數，最簡單方法為分一半($N/2$)，即偵檢區及參考區之偵測點數各為 $19/2 = 9.5$ 個，無條件進位成10個(較保守)，即偵檢區(n)取10個，參考區(m)取10個。

亦可直接查MARSSIM Table 5.3，得到 $N/2 = 10$ ，與計算結果相符，可發現表已增加20%作為餘裕。

Sign test決定偵測或取樣的數量與WRS test類似，可參考MARSSIM 5.5.2.3。

- Step 5: 如果是Class 1，須確認點數是否足夠將熱點(hot spots)偵測出來(使用表面掃描)：
講師在課堂上一再重複強調：看到Class 1，就要想到hot spots！因此延續上述案例，此偵檢區為Class 1，取10個點有可能會忽略掉hot spots，故需要以下步驟來確認：
 - ◇ Step 5.1: 決定要求的掃描MDC(required scan MDC)
 - ◇ Step 5.2: 比較實際與要求的掃描MDC(actual vs required)

- ✧ Step 5.3：如果實際 ≤ 要求，則偵測點足夠
- ✧ Step 5.4：如果實際 > 要求，須增加偵測點

以下針對步驟5.1至5.4進行說明：

- ✧ Step5. 1：決定要求的掃描MDC(required scan MDC)：配合表面掃描(surface scanning)可保證小面積高污染區仍符合外適標準或DCGLEMC。

$$\text{Required scan MDC(即DCGLEMC)} = \text{DCGL}_W \times \text{Area Factor}$$

其中，面積因數(Area Factor)可由RESRAD評估而得。

首先計算平均每偵測單元面積(a')為 $A/n=2700/10=270 \text{ m}^2$ ，查閱下表可得Th-232及U-238的面積因數：

表 4 本案例使用之面積因素列表

面積(m ²)	Th-232	U-238
3000	1	1
300	1.19	1.36
100	1.36	1.61
30	1.78	2.07
10	2.63	2.89
3	5.49	5.36
1	12.4	9.66

註：本表僅供本範例用，實際AF應重新計算

因平均每偵測單元面積 270 m^2 接近 300 m^2 ，可簡單的以300的值來計：

$$\text{Th-232的required scan MDC} = 3 \times 1.19 = 3.57 \text{ pCi/g}$$

$$\text{U-238 的required scan MDC} = 120 \times 1.36 = 163 \text{ pCi/g}$$

- ✧ Step5. 2：比較實際與要求的掃描MDC(actual vs required)：

假設使用1.25” x 1.5” NaI偵檢器之Actual scan MDC為：

Th-232：4 pCi/g

天然鈾：130 pCi/g，考慮U-238活度比例即 $0.485 \times 130 = 63 \text{ pCi/g}$

- ✧ Step 5.3：如果實際 ≤ 要求，則偵測點足夠

U-238實際MDC為63 pCi/g，低於要求的163 pCi/g，故偵測點足夠，但Th-232實際MDC為4 pCi/g，高於要求的3.57pCi/g，須增加測量點。

因本步驟只需比較大小，故Step 5.1使用較不保守的近似值是可以被接受的，當然，如果實際與要求的MDC相近，應使用對數內插法來求得更精準的面積因數。

- ✧ Step5. 4：如果實際 > 要求，須增加偵測點：

依據實際MDC重新計算Th-232的面積因數(Area Factor)

$$\text{Area Factor} = \frac{\text{actual scan MDC}}{\text{DCGLW}} = \frac{4}{3} = 1.33$$

使用對數內插法求新的偵檢面積：

$$\frac{\ln x - \ln 100}{\ln 1.33 - \ln 1.36} = \frac{\ln 300 - \ln 100}{\ln 1.19 - \ln 1.36}, x = 120 \text{ m}^2$$

故偵檢區的偵測點修正為 $2700/120=23$ 點，參考區仍維持 10 點。

(十)、建立參考網格(reference grid)並決定量測/取樣位置

設計出每個偵檢單元所需的量測取樣點數後，後續便是決定量測取樣的位置，因此建議建立參考網格，參考網格的型式由持照者決定，主要是在執行階段須讓實際偵測者容易明瞭並使用。針對 Class 3 區域使用亂數隨機產生偵測點，如下圖所示。

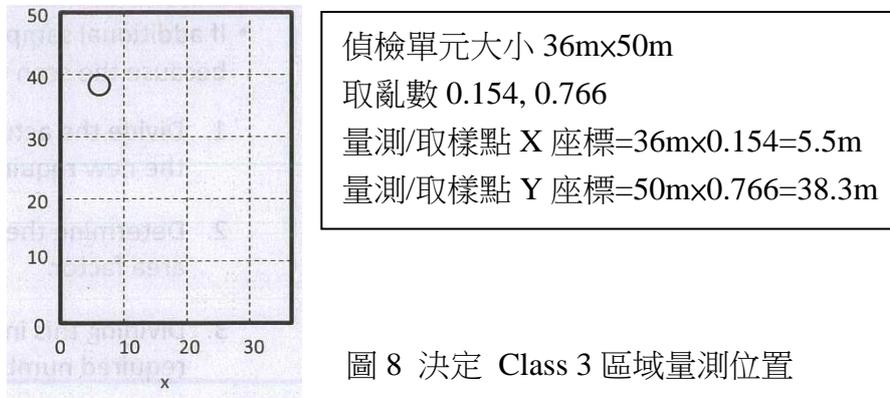


圖 8 決定 Class 3 區域量測位置

Class 1 及 Class 區域則採用亂數隨機產生初始偵測點，再計算點與點之間的距離 L 並由初始偵測點往外擴張，此為三角網格法，如下圖所示。L 計算式為如下：

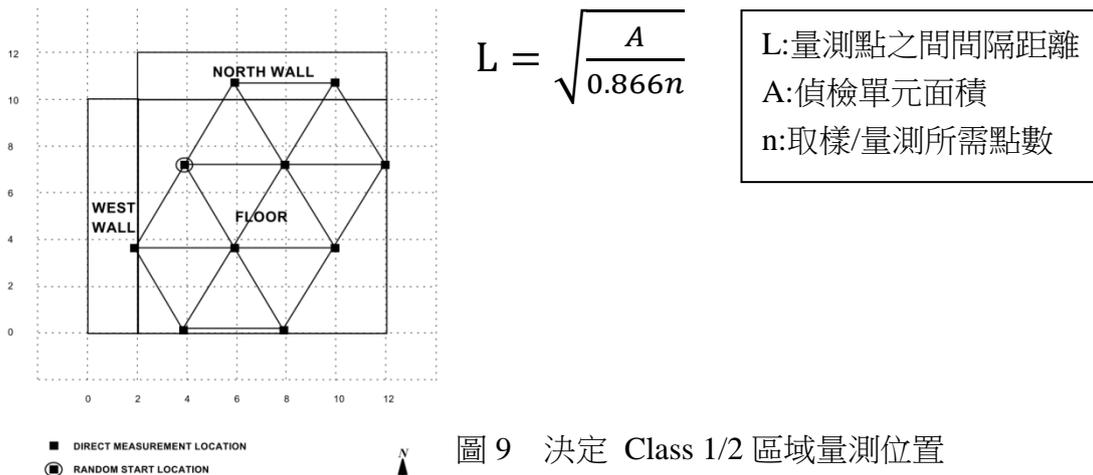


圖 9 決定 Class 1/2 區域量測位置

三、評估階段

經由量測/取樣及掃描個偵檢單元後，須對收集到的數據加以分析以確保數據品質，

MARSSIM 提到三個部分，分別是數據驗證 (verification)、數據確認 (validation) 以及 DQA (Data Quality Assessment) 流程，以下逐一詳述：

(一)、數據驗證

數據驗證通常針對實驗室而言，需確認其是否執行應當有的作為，例如是否採用 DQO 程序決定使用的分析方法、是否執行針對儀器執行每日必要的檢查、是否執行 QC 樣本的分析以及是否參加實驗室之間的能力比對等。除了確認實驗室作為，此概念亦可應用於現場偵測或取樣作業，分析過程中儀器是否有適當的靈敏度、是否在正確的位置取了適當的樣品數...等，總結而言，數據驗證即是確認數據來源是否由可靠正確的方式取得。

(二)、數據確認

針對每一筆數據評估其可用性，判斷人員可以從廠址的運轉歷史角度、放射性核種的化學特性等不同觀點加以識別此數據是否有意義、是否可用於外釋標準之判斷。

(三)、DQA

MARSSIM 建議 DQA 程序有五個步驟，ORAU 依據其建議進行改善，將其五個步驟調整如下：

1. 初步的 DQO 與數據審查

此步驟確認有效資料的數目、最小量測值、最大量測值、平均值、中位數、標準差等，並確認區域分類是否正確，分類錯誤的對策詳參[決策階段—case 2]。

平均值計算可以和參考地區的平均值以及外釋標準(DCGL_w)做比較，以得到偵檢單元狀態的初步提示，而分析樣品標準差非常重要，如果值太大，可能表示所取的樣品數不足以達到統計檢定的需求。而計算中位數是要與平均值比較，如果兩者差異過大，代表資料分布出現偏差。

承上，針對不同情形需要再次執行統計，其評估準則見表 7，而建立背景量測值的狀況下，其評估準則見表 8。

表 5 數據審查判讀結果(無建立背景值)

量測數據結果	結論
所有的量測數據皆低於 DCGL _w	偵檢單元符合土地使用劑量標準。
量測數據的平均值大於 DCGL _w	偵檢單元不符合土地使用劑量標準。
有任一量測數據大於 DCGL _w 但全部數據的平均值小於 DCGL _w	執行 Sign 檢定。

表 6 數據審查判讀結果(有建立背景值)

量測數據結果	結論
偵檢單元的最大量測值和背景參考區的最小量測值間的差值低於 $DCGL_w$ 。	偵檢單元符合土地使用劑量標準。
偵檢單元的平均量測值和背景參考區的平均量測值之間的差值大於 $DCGL_w$ 。	偵檢單元不符合土地使用劑量標準。
偵檢單元的任一量測值和背景參考區的任一量測值間的差值大於 $DCGL_w$ ，但偵檢單元的平均量測值和背景參考區的平均量測值間的差值小於 $DCGL_w$ 。	執行 WRS 檢定。

2. 建立圖形資料

可建立量測位置圖和直方圖，前者可顯示數據的空間分佈，後者可檢查數值的分佈型態。

3.

4. 如有需要，執行 Sign 統計或 WRS 統計

本步驟的意義在於為了釐清偵檢單元無法通過外釋標準的原因是樣本數量過少（標準差值較大），抑或是廠址本身污染確實高於 $DCGL_w$ 。首先，依表 7 初步數據審查的程序，如無法確認是否已符合或不符合外釋標準，則執行 Sign test，如果「核種濃度低於 $DCGL_w$ 」的數量較「臨界值(critical value)」大（Table I.3 可查臨界值），則可拒絕虛無假設，即偵檢區符合外釋標準。。

WRS 再統計同樣依初步數據審查的程序，如無法確認是否已符合或不符合外釋標準，則執行 WRS test，同樣以範例說明：土壤含有 Cs-137 污染， $DCGL_w=1.5$ pCi/g， $LBGR=0.5$ pCi/g， $\sigma_s=1$ pCi/g， $\sigma_r=1$ pCi/g， $\alpha=0.05$ ， $\beta=0.1$ ，計算後得到偵檢區及參考區各取 8 個偵測值如表 12，數據判讀結果如表 8：

表 7 本案例偵檢結果

偵檢區	參考區
2.0	0.6
1.4	0.5
1.5	0.4
1.8	0.2
1.3	0.7
0.9	0.1

偵檢區	參考區
1.5	0.1
1.6	0.7
平均值 1.5	平均值 0.43

表 8 數據審查判讀結果

偵檢結果	結論	本案例評估結果
偵檢區最大值減去參考區最小值 < DCGL _w	符合外釋標準	2.0-0.1=1.9 1.9 > 1.5 (不符合，繼續下一步)
偵檢區平均值減去參考區平均值 > DCGL _w	不符外釋標準	1.5-0.43=1.07 1.07 < 1.5 (不符合，繼續下一步)
偵檢區任一值減去參考區任一值 > DCGL _w ，且偵檢區平均值減去 參考區平均值 < DCGL _w	執行 WRS test 及熱點分析	1.9 > 1.5 1.07 < 1.5 符合，執行 WRS test

- Step 1：調整參考區的量測值，將參考區加上 DCGL_w，如下表：

表 9 本案例檢定結果-1

參考區	調整後(adjusted)的參考區
0.6	2.1
0.5	2.0
0.4	1.9
0.2	1.7
0.7	2.2
0.1	1.6
0.1	1.6
0.7	2.2

- Step 2：將偵檢區(S)及調整後參考區(R)的數據合在一起排名，數值最小的排第 1，如果有相同的數據則使用平均的排名，並將排名加總，如下表：

表 10 本案例檢定結果-2

量測值	地點	排名
0.9	S	1
1.3	S	2
1.4	S	3
1.5	S	4.5

表 10 本案例檢定結果-2

量測值	地點	排名
1.5	S	4.5
1.6	S	7
1.6	R	7
1.6	R	7
1.7	R	9
1.8	S	10
1.9	R	11
2.0	S	12.5
2.0	R	12.5
2.1	R	14
2.2	R	15.5
2.2	R	1.5

合計： $W_r=91.5$

- Step 3：查 MARSSI Appendix I 的 Table I.4，如果「排名加總」(即 W_r)較「臨界值(critical value)」來得大，則可拒絕虛無假設，即偵檢區符合外釋標準。 $m=8, n=8, \alpha=0.05$ ，查表得臨界值為 84，因為 W_r 大於臨界值，故此偵檢區符合外釋標準。

5. 執行熱區調查評估 (Elevated Measurement Comparison)

分析包含偵檢單元內所有量測值，所有大於調查基準的量測值均需執行調查，包含確認初始量測數據、污染區域範圍、熱區的平均濃度、熱區的 $DCGL_{EMC}$ 等。以下列公式計算，確認此熱區的劑量貢獻符合外釋標準：

$$\left[\frac{\text{平均活度}}{DCGL_{EMC}} \right]_{\text{核種 1}} + \left[\frac{\text{平均活度}}{DCGL_{EMC}} \right]_{\text{核種 2}} + \dots + \left[\frac{\text{平均活度}}{DCGL_{EMC}} \right]_{\text{核種 n}} < 1$$

5. 決定所有核種造成之總劑量低於外釋標準

上述步驟只能確認熱區的貢獻劑量符合外釋標準，但不保證整個偵檢單元的劑量會符合，因此仍須另外評估整個偵檢單元內所有污染源造成的總劑量，這也是設施經營者最容易略的一個步驟而導致無法通過外釋，評估公式如下：

$$\frac{\delta}{DCGL_w} + \frac{\text{熱區1的平均活度}-\delta}{\text{熱區1的}DCGL_{EMC}} + \dots + \frac{\text{熱區n的平均活度}-\delta}{\text{熱區n的}DCGL_{EMC}} < 1$$

δ 為偵檢單元內的平均濃度（不包含偏差式數據）。

五、決策階段

發生下列情形，設施經營者必須決定下一步該怎麼做，許多時候亦須經管制單位認可，如能在事前先逐一設想可能的情境預備解決方案是最佳的。

- **Case 1：偵檢單元分類錯誤。**

在 class 2 的偵檢單元，其真實量測值高於 DCGL，或 class 3 偵檢單元，其量測值稍高於 DCGL，這些情形都屬分類錯誤，這些區域應重新進行分類，再分割成更小的偵檢單元，並重新執行偵檢。如並無出現大量或固定模式的分類錯誤，且其造成的劑量很低微，管制單位或許可彈性處理，讓設施經營者執行清理復原行動即可。

- **Case 2：偵檢單元之平均濃度超過 DCGL。**

對整個偵檢單元進行改善補救行動並重新偵檢，或是 DCGL_w 可能設太低，可以重新檢討 RESRAD 之特性參數，重訂高一點的 DCGL。

- **Case 3：偵檢單元無法通過統計檢定。**

遇到此情形可以檢查統計檢定過程有沒有做錯，或是否因量測/取樣數目不夠而導致無法通過統計檢定，有兩個判斷依據可以確認是否為前述原因，其一為實際量測值的標準差較規劃階段計算相對偏移使用的標準差大，其二是量測平均值較相對偏移使用的 LBGR 大，如確認是因取樣數不足，管制單位可同意設施經營者採一次「二次取樣(double sampling)」增加數據數量。另一可能原因是背景地區的量測值相對於偵檢單元不適用，需重新考量其合適性。

- **Case 4：偵檢單元內的熱區評估無法通過。**

遇到此情形，對這些熱區進行改善補救行動並重新偵檢，或 DCGL_w 與 Area Factor 可能設太低，重新檢討 RESRAD 之特性參數，重訂高一點的 DCGL 與 AF 值。

六、相關議題補充

(一)、背景參考區

依據 MARSSIM 定義，參考區域是一處鄰近廠址，但不受歷史運轉活動與放射性排放物影響（處於上風處或上游處），並與偵檢單元有相近的物理、化學、地質、輻射性及生物性質的地區，同一參考區可以做為多個偵檢單元的比較，無關面積大小與分級程度；如果參考區域具有顯著不同的背景程度，則可以使用多個參考區域。

參考區如果越接近偵檢單元，越可以反映出偵檢單元的真實背景值，尤其對於開放式土地而言更是如此，理想上參考區會選擇廠址內（on-site）的不受影響區，但 NUREG 1757 volume 2 section A.3.2 提到參考區也可以選用廠址外（off-site）的區域。如果不容易獲得合適的參考區域，可以使用導出的參考區域，從偵檢單元獲取背景訊息，例如可以基於偵檢單

元中不存在殘餘放射性的區域來導出背景分佈，因此有些案例中會將參考區設置在 Class 3 區域，因為被分類為 Class 3 不代表其有經歷過運轉活動。

其他議題如參考區域的面積，因為找出適合的參考區已非常困難，MARSSIM 並無再針對其設定面積大小的限制。而參考區的量測是採隨機方式，重點是參考區的位置應對該地區具有代表性。而為了盡量減低比較上的系統性偏差與確保參考區量測值的品質，建議在參考區實行的取樣流程、量測技術及偵檢儀器皆與偵檢單元相同。

(二)、最終狀態偵測報告

此節針對最終狀態偵測報告之內容進行摘述，了解最終狀態偵測報告必須涵蓋的資訊，可幫助設施經營者於規劃及執行期間盡可能蒐集所需要的資訊。

最終狀態偵測報告可以很複雜且篇幅甚多，因此盡可能在不同的偵檢階段就將紀錄文件化，以便最終將其彙整入最終狀態偵測報告。關於報告的相關指引，可參考 MARSSIM 第 2、5、8 章及 NUREG 1757 vol 2 第 4-17 頁至第 4-23 頁，於 MARSSIM APPENDIX A 提供簡單的 FSS 報告範例。

FSS 報告格式沒有統一正確的版本，但須涵蓋的內容如下：

- 敘述廠址環境與背景資訊，例如位置、氣象條件、運轉歷史事件及廢棄物處理活動等，此部份資訊應於 HSA 階段建立文件保存。敘述除役活動相關資訊，如早期的偵檢行動結果（範圍偵檢、特性偵檢與復原偵檢等）。
- 將規劃階段的活動在 FSS 報告內加以說明，例如 QA/QC 的流程、如何確認污染物並建立其 DCGL，如何執行廠址分類與偵檢單元的確認、背景參考區域的選擇依據等，另外偵檢技術亦可做為另一獨立敘述的議題，例如儀器選用、校正流程與 MDC 計算方法，偵檢過程也是可加以說明的主題，例如每個偵檢單元是使用何種統計方法檢定以得到取樣量測數目、實際偵檢過程中採用的策略方法以及現場與實驗室的量測技術等。
- 數據分析階段包含評估數據的方法與統計分析，評估數據的方法例如審視 DQO 的產出以及對數據執行初步的分析以判斷是否需再次執行統計檢定、建立直方圖等。統計分析則包含是否再次執行 Sign 或 WRS 檢定確認樣本數量足夠、如何執行熱區評估以及最後的偵檢結果是否符合外釋標準。

FSS 報告應提供關於偵檢單元相對於 DCGL 的輻射狀況完整且明確的記錄，此外，也應提供足夠的數據和訊息，以便能夠對調查結果進行獨立評估。

參、結論與心得

除役的最終目標是確保未來的廠址或建築物不會因過去作業的殘留輻射污染對人類健康和環境造成不合理的風險，而此目標是經由對設施/廠址進行改善復原來實現，並且通過執行最終狀態偵測來證明，該廠址設施已達合適的放射性外釋標準。MARSSIM 主要提供除役廠址最終狀態偵測的規畫、執行、評估與決策程序指引，以證明該廠址殘留之輻射水平符合法規外釋標準。於其資料生命週期的規劃階段採用 DQO 程序，建立廠址特定的 DCGL，DCGL 有多種形式，我們可以考量廠址狀況發展建立單一核種及多核種之 DCGL，而替代核種 DCGL 可以降低土壤進行放射化學分析的成本，考量熱區的存在與劑量貢獻則以 DCGL_{EMC} 進行評估；再依廠址內區域之輻射水平與 DCGL 比較進行分級並建立偵檢單元，於各偵檢單元制定合適偵檢程序（量測／取樣及掃描）與選用適當偵檢儀器（須具備足夠的 MDC）；最後依據統計學原理，規劃具代表性的偵測點數及點位，確保廠址內的放射性物質均受到偵測。而分析階段則是將執行階段所收集取樣的數據予以檢視分析，如果無法通過外釋標準，再以統計檢定方法判斷是否要進行二次取樣增加量測點數，亦提出過程中可能產生的問題及建議解決方案。MARSSIM 同時兼顧輻射安全目標與偵檢成本控制之考量，可供主管機關與廠址設施經營者端都能據以實施的一套指引。

MARSSIM 看似複雜，但是具有彈性，因此不需要全部都遵照其步驟執行，我們應取其邏輯而自用，以累積數十年之輻射偵測經驗為基礎，再配合統計方法與 DOQ 觀念，化繁為簡供實務執行。而在規劃 Class 1 偵檢取樣以及評估是否符合外釋標準時，仍建議依照 MARSSIM 所述的方式，以資料品質目標(DQO)及資料品質分析(DQA)來保證數據的品質，讓主管機關有信心地同意除役廠址可外釋。

課堂也強調除役是個耗時耗費且耗神的工作，需要主管機關與經營者經常的溝通與協調，彼此達成共識讓除役順利推行，故建議本公司應密切的與原能會保持溝通與協調，以避免在沒有共識的情況下，造成無謂的時間、金錢以及人力的浪費。

肆、建議事項

本出國案已於 7 月 16 日舉行公司內部分享會，將本次實習所得與同仁分享，並將最終狀態偵測的架構與應考量面向逐項介紹，參加成員討論非常踴躍。會議間對於 FSS 之前的各項輻射偵檢活動亦有所疑問，鑒於本次研習的重點為 FSS 而非其他類型的偵檢，對於這些疑問尚未有明確的答案，且本公司核一廠即將進入除役，要面臨到的即是廠址歷史評估與輻射特性調查等關鍵作業，經了解 ORAU 預計於 2018 年 12 月 3 日至 12 月 7 日舉辦課程「Site Characterization in Support of Decommissioning: Planning, Implementation, and Evaluation」，建議派員赴美學習，再配合本次所學 FSS，便可建構完整的 MARSSIM 流程與方法，同時亦可建立本公司廠址外釋的觀念與技術。

MARSSIM 於規劃階段制定諸多指引，目的即是將後續實行偵檢的成本轉嫁至規劃期間，亦即如果規劃做得好，可預期減少除役期間輻射偵檢與除污程度所花費的人力與技術成本，但考量本國民情，未來對民眾及管制單位的溝通成本亦不可少，且溝通成本不見得會少於實際成本，因此未來仍應考量兩者花費取其平衡，並建議採用保守原則。

配合本公司核電廠除役時程，接下來核一廠將正式進入除役，由本次所學來規劃除役各階段的輻射偵檢作業，建議在除役過渡階段（預定 8 年）執行廠址歷史評估，以區分出受影響區及不受影響區，並推導初步的 DCGL，配合範圍偵檢將這些受影響區區分出第三級區域；直至拆廠階段（預定 12 年），隨著廠房建物的拆遷與整治，進行特性偵檢區分第一級及第二級區域，並收集廠址特定參數推導符合廠址特性的 DCGL，同時收集 FSS 規劃所需參數，並視殘餘輻射情況進行復原行動輔助偵檢；至最終狀態偵測階段（預定 3 年）則執行本篇報告所述內容，證明廠址符合外釋標準。

廠址歷史評估、範圍偵檢及特性偵檢是近於眼前準備要執行的項目，建議在這些輻射偵檢或調查期間建立及取得以下資料數據：

- 初步個別核種 DCGL 數值。（除役初期）
- 廠址特定 DCGL 數值。（特性偵檢階段）
- 代表核種與推論核種之比例因數。
- 蒐集歷史運轉資料及初步偵測數據，與 DCGL 相比後進行廠址分級及偵檢單元建立。
- 偵檢單元量測值之平均 LBGR，偵檢單元量測值之標準差 σ 。
- Hot spot 區域評估(Area Factor)。
- 參考區建立。

針對物質與設備外釋，建議以遵循既有的輻防管制規範為主，必要時可參考 MARSAME 指引。而 NRC 官員來台交流演說時亦提及，在執行土壤污染偵測時，重點應為確認污染分布的程度及範圍，也就是說可能污染不只存在於表土 15 公分，當確認污染深度超過 15 公分時，其分析方法應參考 MARSAS。

關於 HSA 執行後將廠址分為受影響區及非受影響區，目前核一、核二廠除役計畫係將明顯受輻射污染的區域劃分為受影響區，而其他區域則劃分為非受影響區，因除役計畫主要是建立相關的方法論，並且資料與數據的收集期間在電廠停機前，某種程度上會受到運轉的限制而不夠完整，建議往後電廠真正開始除役，保守考量將廠界內所有區域劃為受影響區，因為經歷數十年的運轉，要對一區域證明其完全不受影響是有困難的，而劃分受影響區後的分級，參考下述。

MARSSIM 建議初始分級應求保守規劃，即是將廠址所有區域分類為 class 1，因為分類為 class 1 不需要證據或理由支持，反之，往 class 2 及 class 3 就需更多更充足的證據和理由，雖 MARSSIM 如此建議，但考量一但分類為 class 1，隨著廠址拆除清理及復原，後續勢必往寬鬆方向調整分級，再依據美國經驗，往寬鬆方向調整須與主管機關協調確認，又是另一成本的投入，因此建議初期輻射偵檢階段即將三個類別區分出來，建立概念模型，預估分類的情況應與最終狀態時不會相差太多，中間過程再針對需調整分級的偵檢單元進行評估與說明。

美國注重地下埋管及地下水是否遭受污染議題，於台灣而言雖地下水途徑不明顯，但為對公眾說明與減低主管機關的顧慮，後續相關的評估可能是無法避免的。最後補充，依據 MARSSIM 專業人士 Dr. Eric Abelquist 表示，前述所有輻射偵檢與廠址調查相關資訊，需要等燃料退出爐心後予亦執行才有意義，因為此時的輻射程度（包含背景）才是真正廠址要外釋前的狀況，因此建議在討論有關 MARSSIM 議題時，考慮目前我國情境並加以判斷其適用性。

伍、參考資料

1. 本次實習課程簡報
2. Eric W. Abelquist, Decommissioning Health Physics. A Handbook for MARSSIM Users.
3. NUREG 1575. NRC. Multi-Agency Radiation Site Survey and Investigation Manual (MARSSIM)
4. NUREG 1757. NRC. Consolidated Decommissioning Guidance (Vol 2)