

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」及「輻安官訓練」

服務機關：行政院原子能委員會

姓名職稱：林琦峰技正、黃議輝技士

派赴國家：美國

出國期間：108年8月16日至108年9月1日

報告日期：108年11月20日

摘 要

本次公差係奉派參加核電廠除役之「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」及「輻安官訓練(Radiation Safety Officer)」。輻安官訓練於2018年8月19日至23日假美國田納西州橡樹嶺聯合大學專業訓練中心 (Oak Ridge Associated Universities (ORAU))舉行，訓練內容包含講師課堂講授、模擬操作訓練及實驗課程，教授許多身為輻射安全管理人員辦理業務所需專業知能，與本會輻射安全管理業務相關。而MARSAME 課程於108年8月26日至29日於相同地點舉行，訓練內容講授MARSAME 的方法論及應用方法，MARSAME應用於物質與設備於解除管制前的最終狀態偵測，與國內核能電廠除役所需面臨應用相關。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、行程：	2
三、過程紀要：	3
(一) 多部會輻射偵檢設備與物質調查手冊(MARSAME)訓練：	3
1. 背景知識介紹-1	4
2. 背景知識介紹-2	6
3. MARSAME 流程	9
4. 範例	14
(二)輻安官訓練：	27
1. 輻安官概述	27
2. 輻射偵測儀器特性	27
3. 輻射偵檢方式說明	29
4. 個人劑量計說明	30
5. 輻射應用	30
6. 液體閃爍偵檢系統	33
7. 實驗課程 1	37
8. 實驗課程 2	38
9. 實驗課程 3	39
四、心得與建議：	40

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，核電廠狀態由例行運轉進入除役階段。執行除役作業時，因工作人員可能長時間位於輻射水平較高的區域工作，為保障工作人員的輻射安全，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，藉此規劃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。

為加強本會對核設施除役物質與設備輻射量測及工作人員輻射安全的管制能力，依據 108 年編列之出國計畫，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)」及「輻安官」訓練課程。

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。因核電廠除役的過程中將產生大量設備與組件拆除廢棄物，設施經營者為有效率的方式取得設備與組件的輻射特性，可選擇使用 MARSAME 方法規劃輻射偵測，確保偵測數據的取得方式符合品質要求；輻安官訓練課程則講述工作人員輻射安全的管理與技術議題，並由講師及參訓人員交流輻射管理實務經驗等。藉由參加以上課程，可有系統地獲得相關知識與經驗，並能與國際專家面對面交流，就國內關注的議題，瞭解國際上現行作法與規定，進而完備我國核電廠除役之輻射安全管理技術能力。

二、行程：

日期	到達地點	工作內容
108.8.16(五)~ 108.8.18(日)	台北→美國田納西州	去程
108.8.19(一)~ 108.8.29(四)	美國田納西州橡樹嶺	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」及「輻安官訓練」
108.8.30(五)~ 108.9.1(日)	美國田納西州→台北	回程

三、過程紀要：

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，該中心類似我國法規規定的輻防訓練業者，持續提供核設施除役輻射偵測、核設施輻射安全管理及醫用輻射安全管理等訓練課程，自 1948 年開始，該中心已對超過 30,000 名學員提供訓練。課程除由中心編制內的講師講授外，尚邀請其它設施的資深講師講述其工作上的經驗。MARSAME 課程的講師為 David King 及 Eric Darois，David 為橡樹嶺聯合大學研究部門主管，曾規劃及執行美國橡樹嶺國家實驗室（Oak Ridge National Laboratory）部分除役場所的輻射偵檢，相當熟悉 MARSAME 方法，Eric 則為工程顧問公司 Radiation Safety Control Services 主管，曾參與 9 座除役核電廠的輻射偵測作業，對於輻射偵測規劃與實務作業均有相當豐富的知識與經驗；輻安官訓練的講師則為 Glenn Hathaway 與 Justin Spence 等人，均為橡樹嶺聯合大學專業訓練中心的專業講師，擁有豐富的輻射防護專業知識。

以下謹摘述本次訓練的重要課程內容：

(一) 多部會輻射偵檢設備與物質調查手冊(MARSAME)訓練：

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，如需外釋場址中受輻射影響設備或物質，各機關的認定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)。事實上，在發行

MARSAME 前，針對除役場址的輻射偵測，上述部會已發行 MARSSIM (Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual) 多部會輻射偵檢及場址調查手冊，兩手冊的概念類似，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)。

在美國 MARSAME 並非用來建立或超越任何法規或持照要求，且聯邦或州規定及指引可能與 MARSAME 不同，因此 MARSAME 僅作為獲得管制機關同意有關物質與設備(Materials and Equipment, M&E)偵檢的方法，至於廢棄物後續如何處置，管制機關並不會給予意見或認可。

1. 背景知識介紹-1

由於 MARSAME 的應用與 MARSSIM 有相似的架構，課程一開始為 MARSSIM 快速介紹。根據 MARSSIM 的資料品質目標(Data Quality objectives)，工作流程可分成幾個步驟：(1)場址歷史評估(Historical Site Assessment)、(2)範圍偵檢(Scoping Survey)、(3)特性偵檢(Characterization Survey)、(4)改善補救行動(Remedial Actions)、(5)最終狀態偵測(Final Status Surveys)、(6)評估結果(Evaluate Results)、(7)獨立驗證(Independent Verification)。各階段任務摘述如下：

(1) 場址歷史評估：

- a. 回顧執照及運轉紀錄
- b. 鑑別使用的核種，化學及物理型態
- c. 是否有任何異常發生，是否有任何未在紀錄上，是否有任何值得追查的傳聞
- d. 分類場址區域為受影響或非受影響區

e. 鑑別可能的污染介質及值得注意的特定區域

(2) 範圍偵檢：

a. 使用儀器執行有限偵檢，目的在於粗略量測整個區域

b. 根據 HAS 所知擴展

c. 收集偏頗或決斷性樣品(已知或預期有污染的地點)

d. 鑑別潛在背景場址以建立背景輻射程度

e. 用以設計特性調查

f. 支持初始偵檢單元分類

(3) 特性偵檢：

a. 須要足夠偵檢數量，不能隨意或粗略量測

b. 評估偵檢單元分類，是否比預期污染更嚴重

c. 計算平均污染程度、範圍及標準偏差

d. 建立比例因子（可能的）

e. ANSI/HPS N13.59 提供特性偵檢指引

(4) 改善補救行動：

a. 清理任何明顯或可能無法通過外釋標準區域

b. 平衡預算及時間，如果發現有忽略區域時的可能後果

c. 同時輻射偵檢，以支持污染主要區域已完成清除

(5) 最終狀態偵測：

a. 確認平均污染濃度低於 $DCGL_w$

b. 確認個別熱點污染同度低於 $DCGL_{EMC}$

c. $DCGL_w$ 及 $DCGL_{EMC}$ 經 Sum of Fraction 後是否小於 1

- d. 相對偏移 Δ/σ 情況
- e. 非參數統計方法(non-Parametric Statistics)選用 (按場址是否有背景污染，選擇 WRS 或 Sing Test 方法)

表 1：MARSAME 在概念上與 MARSSIM 相似，惟用字不同，列如下表

MARSAME 用字	MARSSIM 用字
處置標準(Disposition criterion)	外釋標準(Release criterion)
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)
警戒量測(Sentinel)	偏差量測(Biased)

MARSAME 分級與 MARSSIM 相似，同樣分成未受影響(Non-impacted)與受影響，並將受影響程度細分三級：

- (1) 第一級：有污染高度可能，部分或全部物質與設備可能超過限值
- (2) 第二級：可能有些有污染，但可能低於限值
- (3) 第三級：不太可能有污染

未受影響：沒有合理的理由或可能性受到污染

2. 背景知識介紹-2

物質與設備處置，於 MARSAME 提供分級方法(Graded Approach Means)，包含：

- (1) 未受輻射影響物質與設備(Non-impacted M&E)於分類程序(categorization)中移除。
- (2) 受輻射影響物質與設備，根據殘餘放射性強度分類(classified)，

以進行正確程度的檢查。

- (3) 將物質與設備本身的價值及處理手續，納入評估處置方案中。

在物質與設備偵檢設計規畫階段開始前，即需要：

- (1) 選擇處置選項（可參考 MARSAME 第 2 章，可能存在多重處置選項，根據實際情況而定），通常包括：
 - a. 外釋(再使用、回收、永久處置)或
 - b. 禁止/封鎖
- (2) 決策規則（可參考 MARSAME 第 3 章）
 - a. 為了制訂處置偵檢，需要理論的決策規則
 - b. 根據 MARSAME 定義，「規則」，需要用以描述在各種替代行動間選擇的條件
 - c. 決策規則通常會以「如果．．．則．．．」的形式呈現

處置選項決定後，下一步可以執行偵檢設計，需要的內容包含：

- (1) 零假設(Null hypothesis, MARSAME 第 4.2.1 節)
 - (2) 辨別力限值(Discrimination limit, MARSAME 第 4.2.2 節)
 - (3) 決策誤差限值(Decision error limits, MARSAME 第 4.2.5 節)
 - (4) 操作決策規則(Operational decision rule, MARSAME 第 4.2.6 節)
- 並利用資料品質目標(Data Quality Objective, DQO)程序建立偵檢計畫

DQO 係美國環保署所推展的 7 個執行步驟，簡要意涵即「定義問題並決定什麼樣的資料將需要用來回答這個問題」，詳細操作可參考文件：Guidance on Systematic Planning Using the Data Quality Objectives Process EPA QA/G-4。DQO 的 7 個步驟包含：

在物質與設備偵檢設計規畫階段開始前，即需要：

(1) 敘述問題

- a. 簡要描述問題
- b. 確定計畫團隊負責人及成員
- c. 建立要研究的環境危害的概念模型
- d. 確定資源，包含：預算、人力及時間表

(2) 確認研究目標

- a. 確認主要研究問題
- b. 考慮回答問題時可能發生的替代結果或行動
- c. 對於決策問題，制定決策聲明，組織多個決策
- d. 對於需要評估問題，請說明需要評估的內容和關鍵假設

(3) 確認輸入資料

- a. 確定要解決決策或評估結果需要的資料形式及來源
- b. 確定將用以指引或支持 DQO 後續決策或產出評估的資料基礎
- c. 選擇合適的取樣及分析方法以產生資料

(4) 定義研究邊界

- a. 定義有興趣的目標人群及其相關的空間邊界。

- b. 定義取樣單元的組成內容。
 - c. 指出樣本/數據收集時，相關的時間邊界和其他實踐限制。
 - d. 指出作成決策或評估的最小單元
- (5) 開發分析方法
- a. 指出適當的人群參數，以進行決策或估計。
 - b. 對於決策問題，選擇一個可行的工作層級，並產生有關的「如果…則…否則…」決策規則。
 - c. 對於需要評估問題，請指出評估工具和評估工具。
- (6) 指出績效或接受標準
- a. 對於決策問題，將決策規則設為統計假設測試，從測試中檢驗做出錯誤決策的後果，並對做出決策錯誤的可能性設置可接受的限制。
 - b. 對於評估問題，請指出評估不確定性的可接受限制。
- (7) 制定詳細的數據取得計劃
- a. 彙整所有步驟 1 至 6 中產生的所有資料和產出。
 - b. 使用此信息來確定替代取樣和分析設計適合預期用途。
 - c. 選擇並製作設計，使得該設計將產生最能達到績效或或接受標準的數據。

3. MARSAME 流程

MARSAME 流程可大致分為(1)「規劃(Plan)」、(2)「執行(Implement)」、(3)「評估 (Assess)」及(4)「決策(Decide)」等四個階段(詳如圖 1)：

(1) 規劃

為求能有效地執行 MARSAME 方法，執行團隊需具備的技能包含 MARSSIM 背景知識、保健物理專業、統計學知識、輻防實務經驗、輻射量測儀器知識，以及輻射偵測經驗。

在規劃階段，若能詳盡蒐集及評估待測之物質與設備的基本資訊，即可將這些物質與設備分類 (Categorize) 為「受輻射影響」與「未受輻射影響」，若物質與設備分類為未受輻射影響，後續無需詳細審查，但若分類為受輻射影響，則將依其受影響的程度進行分級 (Classification)，藉此規劃進一步的輻射偵測，因此物質與設備如能適當分類，將可大幅降低偵檢作業所需的人力與時間成本。

至於蒐集與評估物質與設備基本資訊的步驟，MARSAME 命名為初評 (Initial Assessment, IA)，其項目包含目視檢查、歷史紀錄審查、程序知識及巡查偵測 (Sentinel Measurement)。目視檢查即利用現場踏查或影像審查等方式，初步瞭解待測之物質或設備；歷史紀錄審查之項目包含場址審查、設施放射性物質審查、運轉紀錄、檢查報告及員工訪談等；程序知識則是藉由取得物質或設備必要的作業資訊，評估其是否受到輻射影響；巡查偵測則由執行團隊視需要執行，作為偵檢分類的補充資訊。

對於受影響設備與物質，執行團隊可將其進一步分級為第 1、2 或 3 級，針對受影響可能性最高的第 1 級，執行偵檢時將投入較多的資源。另如無法藉由歷史紀錄或程序知識判定受測物的分級，MARSAME 建議將其區分為第 1 級。

當執行團隊發現因缺少資料而無法設計處置偵檢，可視需要執行初步偵檢 (Preliminary Survey)。

如同 MARSSIM 的導出濃度指引基準 (Derived Concentration of

Guideline Level, DCGL) , MARSAME 亦有對應的決策標準—行動基準 (Action Level, AL) 。行動標準的來源，包含劑量或風險、法規標準、合理抑低考量、廢棄物接收標準等，其型式包含表面污染與體污染。美國放射性物質場址係由不同單位所主管，各主管機關規範之行動基準不盡相同，對於能源部場址，DOE Order 458.1 規範了數個群體的平均、最大及可移除污染之表面污染基準，核管會則於 Regulatory Guide 1.86 對其主管場址訂立特定之行動基準，另 ANSI/HPS N13.12-1999 則提供了體污染的篩選基準。此外，執行團隊亦可藉由評估曝露途徑，使用 RESRAD 等程式碼推導行動基準。

由於除役核電廠待外釋的物質與設備通常具有一定體積，故有必要瞭解其污染分佈，以此作為偵測之關注參數，而行動基準也應以關注參數的型式表示，以利研判偵測結果。以 DOE Order 5400.5 Figure IV-1 的要求為例，行動基準為「以 $\text{dpm}/100 \text{ cm}^2$ 表示的表面污染限值」，關注參數為「以 $\text{dpm}/100 \text{ cm}^2$ 表示的平均及最大表面污染值」，目標群體則為「平均值— 1 m^2 ；最大及可移除區域— 100 cm^2 」。

選擇處置選項為執行 MARSAME 方法時的一項重要考量，MARSAME 針對受影響物質與設備所提供的處置選項，包含再利用、回收、維持監管及其它替代處置選項。

偵檢單元(Survey Unit)是由執行團隊針對物質或設備的體積或數量，所界定的實體偵測範圍。由於每個偵檢單元的偵測結果會對應到一個處置選項，因此 MARSAME 建議清楚界定偵檢單元的邊界，若實務上無法取得物質或設備的局部偵測數據，執行團隊可視需要調整偵檢單元邊界。

決策規則 (Decision Rule) 為處置偵檢設計的要素之一，係將行動基準、關注參數、替代行動等項目，以「假使..則..(if...then...)」的句子

描述的規則，MARSAME 以一例表示：「假使 20,000 公斤混凝土碎石（約 8.3 立方公尺）的鐳-226 含量平均值低於解除管制行動基準 0.34 貝克/克，則該混凝土碎石可解除管制，否則須持續監管」。若場址內放射性核種不只一種，因而有兩個以上行動基準或處置選項，則可能需建立多個處置規則。

若要順利處置偵檢執行，有賴於選擇適當的量測方法，選擇量測方法的要素包含儀器與量測技術的選用。一般用於除役量測的儀器包含蓋格偵檢器、碘化鈉閃爍偵檢器及加馬能譜儀；量測技術則包含掃描、現場量測、取樣。執行團隊應依據待測之物質與設備的物理與放射性屬性，以及行動基準、背景值等因素，選用適合的儀器與量測技術。

為確認所執行的量測能否符合其偵測目標，MARSAME 建立了新的術語「量測品質目標(Measurement Quality Objectives, MQO)」，其涵蓋的項目包含量測方法不確定度、偵測性能(Detection Capability)、量化能力(Quantification Capability)、範圍、鑑別力(Specificity)及強固性(Ruggedness)。執行團隊可視需要另行增加 MQO。為能符合 MQO，執行團隊應依據物質與設備的複雜程度、關注核種(Radionuclide of Concern)及偵檢技術，選用適當的量測方法。

MARSAME 內說明了量測與儀器的性能指標，儀器使用前，均須經過適當的校正，偵檢人員每日應執行至少兩次射源反應驗證。一般會以儀器讀值變動在平均值 $\pm 3\sigma$ 的範圍作為可接受的變動標準。

背景量測應在關注核種含量極低的區域執行，如可行，背景值量測應針對相似於待測物的材質進行偵檢，或退而求其次以周遭背景替代。背景值應每日執行量測。

有關偵測結果的判定，MARSAME 著重於依據統計方法。執行團隊須選擇虛無假設 (Null Hypothesis)、鑑別值 (Discrimination Limit)、

決策誤差 (Decision Error)。

虛無假設分為情節 A 與情節 B，情節 A 係假設物質與設備中受到的污染超過行動基準，情節 B 則假設物質與設備的污染含量與背景值相近。

鑑別值則為可有信賴地和行動基準區隔的數值，此數值來自現場量測或取樣分析，鑑別值與行動基準間的差值定義為偏移 (Δ , shift)，每單位標準差的偏移值定義為「相對偏移(Δ/σ , relative shift)」，相對偏移值將影響所執行的取樣數量。

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」，以假設物質與設備中受到的污染超過行動基準的情節 A 為例，型一誤差即誤判為污染未超過行動基準的比率，型二誤差則為誤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，但這些誤差一般會影響健康風險、社會影響與除役成本。

因應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。針對程度最嚴重的第 1 級污染，須執行 100% 偵測，第 3 級則因污染程度超過行動基準的機率較低，僅需偵測 10% 以下的範圍，至於介於第 1 級與第 3 級之間的第 2 級，則可由其相對偏移值評估偵測範圍，第二級偵測範圍一般介於 10~100%。

若掃描偵測不足以達成偵測目標，則可考慮改採現場靜態量測，現場量測一般使用較大體積偵檢器，需較長的計測時間，量測數量也因而受限。

(2) 執行

執行為 MARSAME 流程的第 2 階段，MARSAME 並未限定執行所採用的偵檢技術，執行團隊可依據處置選項，採用適當的偵檢技術。

執行處置偵檢所需考量的因素包含工人的健康與安全、設備與物質的搬運、物質與設備的隔離、MQOs 的建立、量測方法的選擇、資料呈報方式等。工人的健康安全考量應列為首要考量，物質與設備的物理、化學、放射性等特性若會對工人的健康安全造成危害，都應在計畫書中提供相關防護措施；物質與設備的搬運，所準備的柵格除需適於搬運，尚需利於執行偵檢；物質與設備的隔離會影響量測不確定度的評估，其隔離方式取決於待偵檢之物質與設備的物理與放射性屬性；對於 MQO 的建立，執行團隊應針對量測不確定度、最小可偵測濃度及最小可量化濃度（Minimum Quantifiable Concentration）建立目標值。

(3) 評估

資料評估為 MARSAME 流程的第 3 階段。前 2 階段取得的資料應先經過驗證及確效，再評估其形式、品質、數量是否能支持原規劃之用途，MARSAME 特別將此評估流程命名為數據品質評估（Data Quality Assessment, DQA），此流程共有 5 個步驟：1. 審查 DQOs 及偵檢設計；2. 資料初審；3. 選擇統計試驗方式；4. 驗證統計試驗的假設；5. 為數據提供結論。

有關統計試驗，若背景中無污染，則可使用 Sign Test，反之則可使用 Wilcoxon Rank Sum Test。

(4) 決策

此為 MARSAME 流程的最終階段，目的為確認是否接受虛無假設。例如虛無假設若為情節 B（即假設物質與設備的放射性與背景值接近），當偵測值大於背景，即推翻了虛無假設。

4. 範例

針對物質與設備的外釋及解除管制，訓練主辦單位參照

MARSAME 方法，撰擬了一份範例，其架構相當具有參考價值。範例的架構共分為 6 個章節，第 0 章為封面、審查簽核及修訂紀錄，第 1 章為案由說明，第 2 章為合理抑低規劃，第 3 章為職責劃分，第 4 章為方法說明，第 5 章為參考文獻清單，另有 5 個附件，附件 A 為偵檢包敘述範例，附件 B 為儀器的可操作性驗證，附件 C 為儀器性能驗證，附件 D 為儀器最小可測濃度的計算，附件 E 為總活度及可移除活度的計算。以下摘要說明範例的填寫方式。

(1) 第 0 章 審查簽核與計畫書修訂紀錄

審查簽核包含撰寫者、審查者及核定者的簽署資訊，修訂紀錄則列表說明修訂版次、章節、修訂內容及修訂日期等資訊。

(2) 第 1 章 案由說明

本章有 3 個子節，分別為「1.1 背景」、「1.2 範圍與目標」及「1.3 適用性 (Applicability)」。

a. 第 1.1 節 背景

說明設施的背景資訊，例如運轉狀態、現況描述、使用的核種等資訊。

b. 第 1.2 節 範圍與目標

說明為何要外釋與解除管制物質與設備，以及界定物質與設備的範圍。

c. 第 1.3 節 適用性(Applicability)

說明設施的組織架構，以及偵檢作業執行部門的運作情形。

(3) 第 2 章 合理抑低

本章宣告量測作業的輻射合理抑低政策。

(4) 第 3 章 職責劃分

本章描述偵檢作業執行部門的人員職責。

(5) 第 4 章 方法說明

本章依據 MARSAME 流程，說明「規劃」、「執行」、「評估」、「決定」等內容。報告主文僅說明原則，細部規劃則在附件 A（偵檢包敘述）中呈現。

a. 第 4.1 節 規劃

MARSAME 相關章節：第 1 章、第 1.4.1 節、第 2 章、第 3 章、第 4 章

(a) 第 4.1.1 節 組織執行團隊

MARSAME 相關章節：第 1 章，第 1.3 節

執行團隊所需具備的技能包含 MARSSIM 背景知識、保健物理專業、統計學知識、輻防實務經驗、輻射量測儀器知識，以及輻射偵測經驗。

i. 第 4.1.1.1 節 啟動數據品質目標流程

MARSAME 相關章節：第 1 章，第 1.4.1 節

參考 EPA QA/G-4（詳如圖 2），數據品質目標流程由「定義問題」到「選擇適當計畫」，共有七個步驟，執行團隊應針對欲評估的目標（例如人員劑量、廢棄物盤點等），就偵測範圍、量測方法、接受標準等面向來規劃偵檢作業。

ii. 第 4.1.1.2 節 發展偵檢設計

MARSAME 相關章節：第 4 章

本章節係基於事先擬定的決策規則（MARSAME

第 3.7 節)，再依據 MARSAME 第 4 章敘述的方法建立偵檢設計，說明虛無假設、選定情境、設備與物質分級原則、偵檢方式、執行程序等內容。

iii. 第 4.1.1.3 節 徵求主管機關意見

MARSAME 相關章節：第 1 章，第 1.3 節

本章節敘述執行團隊與主管機關討論的情形。

(b) 第 4.1.2 節 確認及說明可能的危害

MARSAME 相關章節：第 5 章，第 5.2 節

本章節依據 MARSAME 第 5.2 節的說明，參考 MARSAME 第 8 章的範例，對工作人員進行職業安全分析（Job Safety Analysis, JSA）。

(c) 第 4.1.3 節 執行初步評估

MARSAME 相關章節：第 2 章

初步評估為 MARSAME 調查流程中最重要的一步驟，執行團隊應說明如何確保初步評估的目標得以達成。

i. 第 4.1.3.1 節 分類及隔離物質與設備

MARSAME 相關章節：第 2 章，第 2.2 節；第 4 章，第 4.3 節

執行團隊應於本章節敘述如何將物質與設備分類為受影響與未受影響，以及將受影響的物質與設備進一步分為三個等級。分類及分級可採用目視檢查、歷史紀錄審查、程序知識及巡查偵測等方式。

(i) 第 4.1.3.1.1 節 目視檢查

MARSAME 相關章節：第 2 章，第 2.2.1 節

目視檢查的目標，在於訂定偵檢單元範圍、定義決策規則的關鍵參數、確立例行偵測的標準作業流程、評估健康安全相關考量等，因此本段應就上述目標，以現場踏查、檢視影像資料等方式，敘述目視檢查的發現。

(ii) 第 4.1.3.1.2 節 審視歷史紀錄

MARSAME 相關章節：第 2 章，第 2.2.2 節

本段應就書面審查，敘述物質與設備相關的歷史紀錄，以提供分類為是否受影響的佐證資料。可供書面審查的文件，包含物質與設備相關的許可證、執照、運轉紀錄、檢查報告等。另也可摘錄人員訪談紀錄，提供更完整的佐證說明。

(iii) 第 4.1.3.1.3 節 瞭解程序知識

MARSAME 相關章節：第 2 章，第 2.2.3 節

本段說明藉由審查物質與設備所在的歷史紀錄，增加相關的程序知識，進而提供物質與設備的分類基礎。可供參考的資料包含物質與設備的購買紀錄、維護紀錄、運轉日誌、處置偵檢紀錄等。

(iv) 第 4.1.3.1.4 節 巡查偵測

MARSAME 相關章節：第 2 章，第 2.2.4 節

巡查偵測是基於初步評估的目標，在關鍵地點

(通常是管路等難量測的位置)所執行的量測。為補充資訊,可視需要執行巡查偵測,但不能只依據巡查偵測的結果來判定物質與設備是否受輻射影響。本段即就相關巡查偵測的規劃提供說明。

(v) 第 4.1.3.1.5 節 初步偵檢

MARSAME 相關章節:第 2 章,第 2.3 節

初步偵檢的目的類似於 MARSSIM 的範圍偵檢及特性偵檢,用於補充規劃處置偵檢所需的資料。執行團隊應依據既有的標準作業程序,或以 DQO 流程來建立或執行初步偵檢。

ii. 第 4.1.3.2 節 物質與設備的說明

MARSAME 相關章節:第 2 章,第 2.4 節

執行團隊應在本段敘述物質與設備的物理與輻射特性。

(i) 第 4.1.3.2.1 節 物理特性

本段所敘述的物理特性包含尺寸、複雜程度(例:材質組成、污染圍阻等)、可接近性(例:人員能否進入、是否有滲透至難量測區域的情形)、固有价值(例:能否回收、維修或復原,以及處置成本)等。

(ii) 第 4.1.3.2.2 節 輻射特性

本段所敘述的輻射特性,包含關注核種的種類、活度、分布、位置,以及核種活度間相對比例(即

比例因數)等資訊。

(d) 第 4.1.4 節 選擇處置選項

MARSAME 相關章節：第 2 章，第 2.5 節；第 3 章，第 3.5 節

選擇處置選項為執行 MARSAME 方法的關鍵步驟，執行團隊應選擇適合物質與設備的處置選項，並在本段說明所選用的處置選項，以及選用該選項的理由等資訊。

(e) 4.1.5 節 物質與設備的分級

MARSAME 相關章節：第 4 章，第 4.3 節；第 1 章，第 1.2 節

本段應說明受輻射影響之物質與設備的分級規劃。依照物質與設備的污染情形，大致可分為 3 級，第 1 級為輻射含量很可能大於行動基準、很可能有熱點或缺乏證據分級為第 2、3 級的物質與設備，而第 2 級為輻射含量不大可能高於行動基準或有熱點的物質與設備，第 3 級則為輻射含量幾乎不可能超過背景值或缺乏證據分類為未受輻射影響的物質與設備。3 個等級中，以污染程度最高的第 1 級需投入最多資源來執行偵檢。

MARSAME 相關章節：第 2 章，第 2.5 節；第 3 章，第 3.5 節

選擇處置選項為執行 MARSAME 方法的關鍵步驟，執行團隊應選擇適合物質與設備的處置選項，並在本段說明所選用的處置選項，以及選用該選項的理

由等資訊。

(f) 第 4.1.6 節 依據所選的處置選項來建立行動基準

MARSAME 相關章節：第 3 章，第 3.3 節

本段應說明表面污染及體污染的行動基準。建立行動基準的依據，包含物質與設備的污染所對應的劑量或風險（例：依據預期的曝露途徑模式，以 RESRAD 進行計算）、管制限值（例：NRC RG 1.86、DOE Order 5400.5、ANSI 13.12-1999 (R2010)）、合理抑低、廢棄物接收標準等。行動基準可依據 DQO 程序來進行調整，例如發現場址中存在多種核種，則視偵檢方式能否鑑別核種，將行動基準調整為總活度行動基準或個別核種的行動基準。

(g) 第 4.1.7 節 確立關注參數

MARSAME 相關章節：第 3 章，第 3.4 節

關注參數即行動基準的表現型式，例如表現為表面污染或體污染、平均值或最大值、1 m² 內的平均濃度或 100 cm² 的最大可移除污染的限值。本段落應敘述所規劃的關注參數。

(h) 第 4.1.8 節 確立替代選項

MARSAME 相關章節：第 3 章，第 3.5 節

替代選項為處置物質與設備時所能採取的行動選項。本段落應參考 MARSAME 表 3.2，確立可能的替代選項。

(i) 第 4.1.9 節 確立偵檢單元邊界

MARSAME 相關章節：第 3 章，第 3.6 節

偵檢單元為一定數量、物件的物質與設備，為採取處置選項的標的物。本段落應參考 MARSAME 圖 3.3，建立明確的偵檢單元邊界，以利詮釋偵測結果。

(j) 第 4.1.10 節 建立處置規則

MARSAME 相關章節：第 3 章，第 3.7 節；第 7 章，第 7.2.6 節

處置規則為敘述處置條件及方式的文句，其內容包含行動基準、關注參數、替代行動等。執行團隊應於本段敘述處置規則，藉以設計處置偵檢。

(k) 第 4.1.11 節 選擇量測方法及建立量測品質目標

MARSAME 相關章節：第 3 章，第 3.8 節；第 5 章，第 5.5 節；第 5 章，第 5.9 節；第 7 章，第 7.3 節

執行團隊應參考 MARSAME 第 3.8 節有關量測方法選擇的考量（例如行動基準、背景水平等），於本段說明所選用的偵檢方法，包含敘述偵檢儀器（例如蓋格偵檢器、碘化鈉偵檢器、加馬能譜分析儀等）及量測方式（例如掃描、現場量測、取樣等）。

另為確認量測方法能否符合偵檢目標，執行團隊應參考 MARSAME 第 3.8 節，建立 6 個量測品質目標（Measurement Quality Objectives, MQO），包含量測不確定度、偵測能力、量化能力、範圍、鑑別力、強固性等。

(l) 第 4.1.12 節 選擇量測技術與儀器

MARSAME 相關章節：第 5 章，第 5.9 節

i. 第 4.1.12.1 節 驗證性能指標

執行團隊應依據 MARSAME 第 5.9.4 節及第 5.9.5 節，於本段落說明儀器如何證明儀器性能指標可符合 ANSI N323A、ANSI N42.17A 及 ANSI 42.17C 等標準。

ii. 第 4.1.12.2 節 目視檢查

於本段落說明儀器外觀、電池功能等項目所預計採取的目視檢查。

iii. 第 4.1.12.3 節 校正

本段說明儀器的校正計畫與允收標準。

iv. 第 4.1.12.4 節 背景

本段說明預計的背景值量測位置、取得方式及量測頻度等資訊。

(m) 第 4.1.13 節 設計處置偵檢

MARSAME 相關章節：第 4 章

本段落應參考 MARSAME 第 4.5 節，就處置偵檢設計，詳細說明虛無假設、相對偏移與量測數量的預估方式、決策誤差率、分級決策與對應的量測技術、分級流程、偵檢範圍比率等項目。處置偵檢的設計流程可參考 MARSAME 圖 4.5。

b. 第 4.2 節 執行

MARSAME 相關章節：第 5 章；第 1 章，第 1.4.2 節。

本段落應就偵檢設計的偵測作業的執行面提出規劃，規劃的面向包含健康安全考量、物質與設備的搬運、物質與設備的分離、量測品質目標、量測方法及資料報表等。

c. 第 4.3 節 數據評估

MARSAME 相關章節：第 6 章；第 1 章，第 1.4.3 節。

本段落應說明如何利用 MARSAME 第 6.2 節建議的 DQA 流程，評估偵測數據的型式、品質及數量能否符合預期目的。MARSAME 建議的 DQA 流程共有 5 個步驟，分別為：1. 審視 DQO 及偵檢設計；2. 初步檢視數據；3. 選擇統計試驗；4. 驗證統計試驗的假設；5. 訂立結論。數據的比較基準為灰區上限（UBGR）或取樣群體的信賴基準上限（MARSAME 第 6.3 節、第 6.4 節），並以 WRS 試驗或 Sign 試驗確認是否接受虛無假設。

d. 第 4.4 節 決策

MARSAME 相關章節：第 6 章，第 6.8 節；第 1 章，第 1.4.4 節。

本段落說明接受或否決虛無假設的依據，例如情節 B 假設受測物的放射性與背景相近，但若實際測得之放射性超過背景值或 0，則推翻虛無假設。

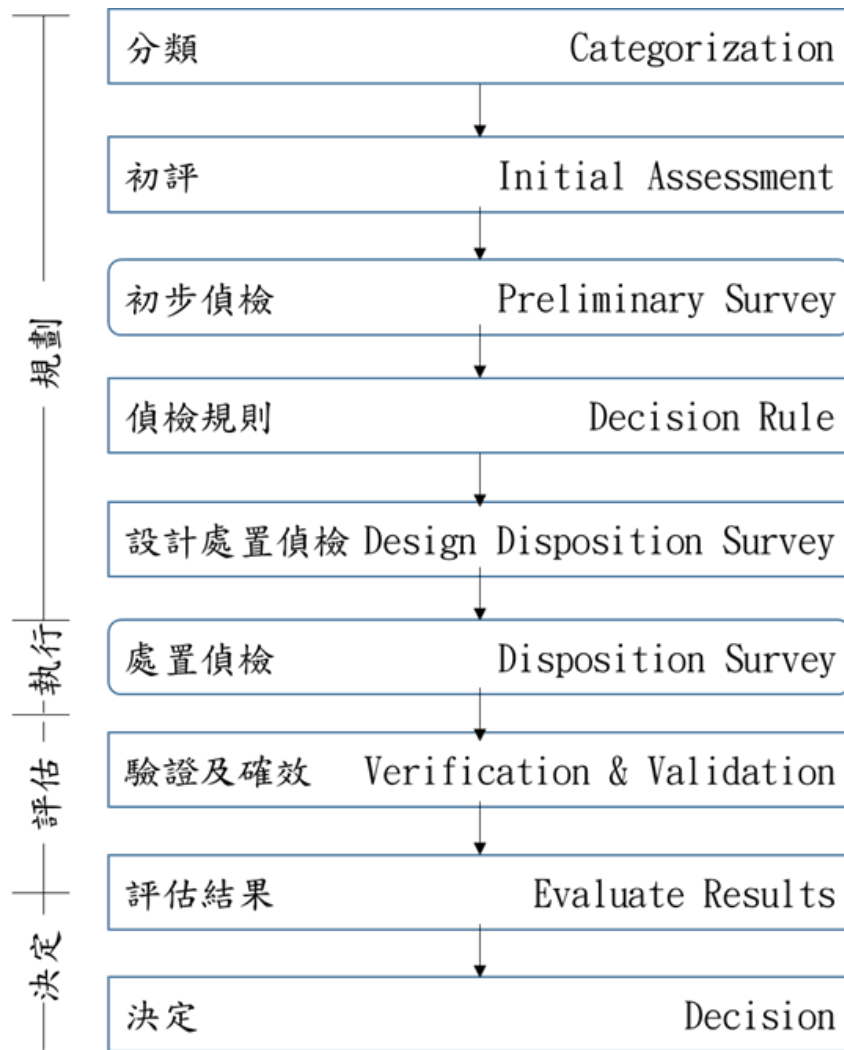


圖 1 MARSAME 方法之流程圖

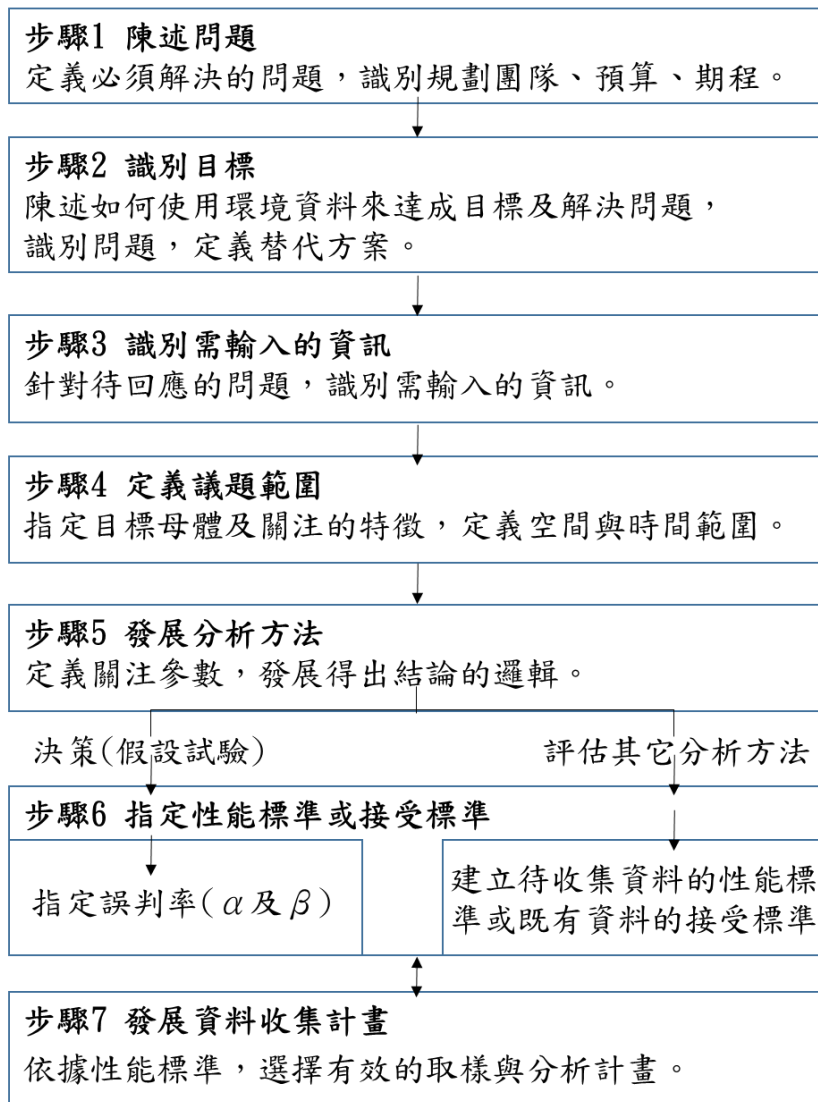


圖 2 數據品質目標流程 (Data Quality Objective Process, 來源：EPA QA/G-4)

(二)輻安官訓練：

有關橡樹嶺聯合大學專業訓練中心所舉辦之輻安官訓練，其性質類似核設施輻防管理員訓練，課程內容包含輻防基本知識（輻射與物質作用及生物效應、輻安官職責、放射性物質保安、存量盤點及紀錄、輻射計算相關數學、衰變計算）、管制實務（輻射量測偵檢、偵測儀器性質、劑量計畫規範、檢查與稽查方法、放射性物質管理等）、美國輻防法規等，以下謹摘要說明課程重要內容。

1. 輻安官概述

輻安官工作的主要目的包括：(1)確保工作人員及公眾輻射安全，(2)防止輻射確定效應及最小化機率效應的風險。

其職責包含(參考 NUREG-1556 Vol.7 Rev1)：(1)停止現場不安全工作、(2)監督除污、(3)射源保安、(4)廢棄物處置、(5)處理管制事務、(6)紀錄維護、(7)計畫審計、(8)輻射偵測、(9)工作人員訓練、(10)異常事件調查。

在美國獲取輻安官執照，需要取得設施及管制機關的認可。輻安官取得執照的法規要求包含：10 CFR 33.13 (管理範疇類別 A 特定執照申請)、10 CFR 34.3 (工業攝影 RSO 的定義)、10 CFR 34.42 (訓練及測驗要求)、10 CFR 34.43 (工作訓練要求)、10 CFR 35.2 (RSO 的定義)、10 CFR 35.50 (RSO 及助理 RSO 的訓練要求)、10 CFR 35.59 (再訓練)。上述輻安官及助理輻安官法規要求，在我國對應相似於輻射防護人員管理辦法所述：輻射防護師、輻射防護員訓練、考照、持照等相關法規規範。

2. 輻射偵測儀器特性

輻射偵檢器的特性由其型式決定，因偵檢器特性會影響偵檢數據，故有必要依據使用目的及場合選擇適當的偵檢器型式，並需規劃品保計

畫，定時執行功能測試與校正，確保偵測數據的正確性。輻射偵檢器的用途大致有表面污染量測、劑量率量測及熱點搜尋等三種，污染偵檢器主要用於偵測貝他及阿伐等帶電粒子，使用時需貼近表面至約 1 公分以內的距離，另需建立計數效率，以將計數值轉換為污染活度；劑量率量測儀則用於量測光子及中子等穿透輻射，利用光電交互作用的原理，達到偵測的效果，儀器須定期校正，以表現正確的讀值；熱點搜尋則用於找尋遺失射源或土壤污染位置。

輻射偵檢器的型式有氣流式比例計數器、游離腔偵檢器、餅探頭(pancake)蓋格偵檢器、固態閃爍偵檢器等。對於除役作業的表面污染量測，最常使用氣流式比例計數器，該類儀器靈敏度高，且可選擇「阿伐粒子偵測」、「貝他粒子偵測」、「阿伐及貝他粒子偵測」等模式，但使用時需外接 P-10 氣體鋼瓶，故其攜帶性稍微受到限制；游離腔偵檢器則可量測劑量與劑量率，該類儀器可提供準確的讀值，可設計為實驗室或現場量測儀器，高壓游離腔可在低或高劑量率的狀態下進行偵測，某些游離腔偵檢器具備貝他窗口的設計，可利用開、關窗的方式鑑別貝他粒子的輻射貢獻，惟游離腔偵檢器反應時間較慢，須在偵測位置持續偵測約 30 秒以上方可取得偵測數據，使用前亦需暖機 10 分鐘以上，使用上可利用開、關窗的方式鑑別貝他粒子與強穿輻射；餅探頭蓋格偵檢器則為最廣泛使用的偵檢器，最適合用於污染偵檢，但也可用於劑量率偵測，應用於污染偵檢時，除了可偵測貝他粒子，如適當使用，也可偵測阿伐粒子與加馬射線；固態閃爍偵檢器則依其用途差異，使用不同的閃爍體材質，針對污染偵測，一般使用硫化鋅（偵測阿伐粒子）、塑膠（偵測貝他粒子）及磷（偵測阿伐及貝他粒子）等閃爍體材質，針對 X 光和加馬射線造成的輻射劑量率，則使用塑膠或碘化鈉閃爍體材質，其中污染偵測用之閃爍體偵檢器因需偵測阿伐或貝他粒子，採用薄窗設計，故需注意其保存與運送情形，使用前亦需確認是否有漏光的情形。

輻射偵測儀器依其顯示型態，可概分為類比與數位兩種，類比式偵測儀需同於偵測時需同時檢視數據窗口及範圍設置旋鈕，並依據所選擇的範圍正確解讀數據尺度；數位式雖然可自動切換偵測範圍，但使用者務必確認讀值對應的單位，若記錄錯誤單位，其偵測結果偏差將達上千倍。

3. 輻射偵檢方式說明

輻射偵檢依其量測標的，可分為輻射曝露量（或劑量率）與污染值等量測方式。曝露量量測係偵測加馬射線或中子，量測時應將偵檢器置於距標的物適當距離之位置，避免偵檢器太過接近標的物反而導致量測值低估。另一方面，污染值量測係偵測短射程之阿伐或貝他，故偵檢時應將偵檢頭置於相當接近受測物表面的位置（例如距離 1 公分處），並以每秒 1 個偵檢頭寬度的速度，於受測物表面以 S 形軌跡移動偵檢頭，偵測時應避免偵檢頭受到受測物污染，美國核管會 RG 1.86 規定之污染限值詳如表 2。

表 2 美國核管會 Regulatory Guide 1.86 規定之污染限值

核種	現場量測		樣品分析
	平均值 ¹ (dpm/100 cm ²)	最大值 (dpm/100 cm ²)	可移除部分 ² (dpm/100 cm ²)
天然鈾、鈾-235、鈾-238、衰變產物	5,000 (α)	15,000 (α)	1,000 (α)
超鈾元素、鐳-226、鐳-228、釷-230、釷-228、鏷-231、錒-227、碘-125、碘-129	100	300	20

天然鈾、鈾-232、銻-90、鐳-223、鐳-224、鈾-232、碘-126、碘-131、碘-133	1,000	3,000	200
其它貝他-加馬核種	5,000 (β - γ)	15,000 (β - γ)	1,000 (β - γ)

1 平均值為 1 平方公尺內的平均

2 可移除樣品係取樣（含擦拭樣）後，於儀器中進行分析。

4. 個人劑量計說明

依據曝露情境及曝露計畫不同，可選用的個人劑量計包含：膠片配章、熱發光劑量計 (Thermoluminescent dosimeters, TLDs)、光刺激發光劑量計 (Optically stimulated luminescence dosimeters, OSLDs)、末端劑量計 (Extremity dosimeters (TLD))。TLD 常用材料包含氟化鋰(LiF)或氟化鈣 (CaF)，輻射與晶體交互作用使電子躍遷至較高能階並藉由雜質捕獲，當 TLD 被加熱時，量測電子釋出回到基態釋出之光線(通常是紅外光)，以回推 TLD 接受到的輻射劑量。LiF 材料對於空氣或組織劑量而言，在 10keV 到 10MeV 能量區，能量依持性幾乎是線性關係，而 TLD 也可能使用其他材質包括 Li₂B₄O₇ 添加 Cu，用於量測皮膚劑量、Li₂B₄O₇ 添加 Cu 並加上塑膠屏蔽，用以量測深部劑量、CaSO₄ 添加 Tm，用以量測低劑量(如每日劑量查核)。而 OSLD 劑量計常用材料為氧化鋁粉末，工作原理類似 TLD，差異在於讀取劑量方式不同，以綠光照射劑量計後釋出的藍光正比於輻射劑量，且與 TLD 不同的是 OSLD 對於該次曝露可重複計讀。而偵測低限部分，OSLD 大約可測至 0.01mSv，而 TLD 及膠片配章大約可測至 0.1mSv。

5. 輻射應用

輻射偵檢依其量測標的，可分為輻射曝露量（或劑量率）與污染值等量測方式。曝露量量測係偵測加馬射線或中子，量測時應將偵檢器置

於距標的物適當距離之位置，避免偵檢器太過接近標的物反而導致量測值低估。

在輻射源及設備課程當中，介紹許多常見核種、製造方法、民生應用、半衰期、常用活度等，如表 3~表 5。並且介紹密封射源的各種常見應用包含：

(1) 藥物及研究：

e. 近距離放射治療

f. 永久性種子植入治療

g. 加馬刀多射束治療

(2) 輻射照射：

f. 小規模樣品照射器

g. 血液照射器

h. 工業消毒廠

(3) 工業攝影：

a. 工業加馬攝影機

b. 管路爬行器

(4) 井探測（藉由量測岩石層密度決定是否有可能生產石油）

(5) 厚度或密度量測儀

(6) 材料分析

a. 濕度分析

b. 元素分析

c. XRF 射線螢光分析儀（X-ray Fluorescence Spectrometer：XRF）

(7) 商品

- a. 煙霧偵檢器
- b. 靜電消除器
- c. 自發光標誌
- d. 放射性同位素熱電發電機

(8) 校正射源

- a. 校正及參考射源
- b. 劑量校準儀

表 3、常見診斷放射性核種

核種	Gamma 能量(kev)	半衰期	放射性藥品型態	診斷器官	活度(mCi)
^{99m} Tc	140	6.0 小時	多樣	所有	20-30
¹²³ I	159	13.2 小時	碘化鈉	甲狀腺	1-2
¹³³ Xe	81	5.2 天	惰性氣體	肺	10-20
¹¹¹ In	172, 249	67 小時	奧辛；8-羥喹啉	白血球	0.5
²⁰¹ Tl	70-80	73.2 小時	氯化鉍	心臟	3-4

表 4、常見正子斷層掃描診斷放射性核種

核種	製造方法	半衰期	放射性藥品型態	診斷器官	活度(mCi)
¹⁸ F	迴旋加速器	1.9 小時	氟化去氧葡萄糖 (FDG)	腫瘤、心臟	20-30
¹¹ C	迴旋加速器	20 分鐘	各種有機化合物	大腦、心臟、腫瘤	1-2
¹³ N	迴旋加速器	10 分鐘	氨	肺	10-20
¹⁵ O	迴旋加速器	2 分鐘	水、二氧化碳	白血球	0.5
⁸² Rb	放射核種產生器	75 秒	氯化鉀	心臟	3-4

表 5、常見治療放射性核種

核種	射線	半衰期	放射性藥品型態	診斷器官	活度(mCi)
¹³¹ I	β 、 γ	8.1 天	碘化鈉	甲狀腺	5-200
¹³¹ I	β 、 γ	8.1 天	單株抗體 (MoAb)	淋巴細胞	50-150
⁹⁰ Y	β	2.6 天	單株抗體	淋巴細胞	20-50
⁹⁰ Y	β	2.6 天	微球體	肝	40-80
⁸⁹ Sr	β	50 天	氯化鋇	骨腫瘤	2-4
¹⁵³ Sm	β 、 γ	1.9 天	Lexidronate (一種藥物名稱)	骨腫瘤	10-20

6. 液體閃爍偵檢系統

在液體閃爍計數當中，介紹此套系統主要用來偵檢純 β 核種，例如 H-3、Ni-63、C-14、S-35、P-32，另外也可用來量化 α 射源、電子捕獲衰變的射源（例如 Fe-55、Cr-51、I-125），此套系統比較並不常用來做核種識別，相反的比較多用來度量已知核種的活度。測量系統的組成常見係將樣品（例如 1mL）的溶液，倒入裝有閃爍液（例如 10mL）的透明塑膠或玻璃瓶中，考量玻璃當中可能含有微量天然放射性物質（例如 K-40），有些實驗室僅使用塑膠瓶作為承裝容器。當帶電粒子釋出激發閃爍液後會放出閃爍光，與樣品相接的光電倍增管收集後產生並放大帶電信號。當帶電粒子能量越大，激發的溶劑分子越多，閃爍液發出的光子越多，光電倍增管收到的脈衝信號越大，給定一固定的純 β 核種，其 β 能量呈現範圍分布並具有最大值。

閃爍液包含兩部分：(1)溶劑、(2)閃爍劑(Fluor)。

(1) 溶劑：材料性質的選擇通常需考量：

- a. 對樣品有良好的可溶性
- b. 閃化點高
- c. 毒性低

- d. 生物可分解
- e. 對閃爍劑有良好的可溶性
- f. 光子或化學反應發光率低
- g. 高計數效率（氬）
- h. 化學及顏色淬息阻抗(Chemical and color quench resistant)

舊式溶劑通常使用：甲苯(toluene)、苯(benzene)、二噁烷(dioxane)、二甲苯(xylene)、pseudodocumene。近期的溶劑通常使用：直鏈烷基苯 Linear alkyl benzene(LAB)、二異丙基萘 Di-isopropylnaphthalene(DIN)、苯基二甲基乙烷 Phenylxylethane(PXE)

(2) 閃爍劑：通常佔閃爍液的 0.3~1%，功能為吸收溶劑及射源激發能量並發光。而閃爍劑可區分為兩類：

- a. 一次閃爍劑：主要的閃爍劑，發射波長小於 400nm 的紫外光 (UV)。最常用材料為 2,5 二苯基噁唑(2,5 diphenyloxazole, PPO)，主要發射波長 357nm 的 UVA。
- b. 二次閃爍劑(波長偏移)：將發射光的波長，增加到光電倍增管吸收效率更高的範圍。最常用材料為 1,4 雙[2-甲基苯乙烯基]苯 (1,4 bis[2-methylstyryl] benzene (bis-MSB)) 及 1,4 雙[5-苯基噁唑-2-基]苯 (1,4 bis[5-phenyloxazol-2yl] benzene (bis-MSB))。

液體閃爍偵檢系統一般會遇到的問題包含：

- (1) 將試樣溶入溶液
- (2) 靜電
- (3) 光致發光(photoluminescence)

(4) 化學致發光(chemiluminescence)

(5) 淬息(quenching)：

- a. 光學
- b. 顏色
- c. 化學

(1) 將試樣溶入溶液：

目的係將樣品完全且均勻的溶入閃爍液中成為乳膠或凝膠狀，如果樣品(放射性物質)無法與閃爍液接觸， β 可能在接觸閃爍液之前已損失部分能量，尤其如果出現樣品與閃爍液分層情形，此問題會更加重要。解決的方法可能有先用少量溶劑（例如 0.5mL）與樣品混和，之後再加入閃爍液中，另外用超音波震盪可能有助於混和。對於由於溶劑都是有機溶液，所以有機的樣品可以很好的混和，但對於含水樣品則需要使用乳化劑幫助溶合。

(2) 靜電：

殘留在閃爍液體瓶表面的靜電可能導致隨機發射單光子，由於靜電關係導致的脈衝信號，最大約等於 10keV 的 β 約等於氬，而塑膠瓶相較於玻璃瓶更容易產生靜電，若在低濕度使用布手套的情況下，可能使加劇問題，因此在大部分液體閃爍偵檢系統中，靜電消除器列為選配裝備。

(3) 光致發光(photoluminescence)：

由於環境中的紫外光造成閃爍液或盛裝瓶激發，造成光子的釋出，產生相似於氬的脈衝，大多數的脈衝介於 0-2keV，最大可到 6keV，幸運的是光致發光隨時間消退非常快，一般可在 5 分鐘內完全消除，光致

發光與淬息機制不同，也可以透過降低樣品溫度消除。

(4) 化學致發光(chemiluminescence)：

化學致發光係由於樣品在閃爍液中產生化學反應導致錯誤的發光，不幸的是此種發光機制可能持續數天或者更久，在下列這些情況下，化學致發光會成為主要問題：

- a. 混和樣品的閃爍液是鹼性的
- b. 閃爍液含有氧化劑
- c. 閃爍液含有機溶劑

對大部分化學致發光情況下，會有多重單光子事件，此部分能被液體閃爍偵檢器中的巧合電路(coincidence circuitry)給最小化，另外化學致發光也可藉由將閃爍液 PH 值調至中性以降低，另一種簡單方法是在樣品加入閃爍液後等待數小時到數天後再計測，另一派的作法會將閃爍液先加熱以增進化學反應速率，之後再冷卻及計測。

(5) 淬息(quenching)：

淬息機制在蓋格 (GM)偵檢器中也許是好事，但在液體閃爍偵檢系統中，卻是不想要的機制。在液體閃爍偵檢系統中，淬息機制係指能量傳遞過程中的一種干擾，使得傳遞到光電倍增管中的光子數量減少。

- a. 光學：指的是除了閃爍液以外，有其他的原因使得閃爍光被吸收，例如：在閃爍液盛裝瓶側面貼標籤紙（並非瓶蓋的光吸收），閃爍液盛裝瓶外側殘留指紋。
- b. 顏色：由於閃爍液的顏色，使得閃爍光被吸收。此問題常見於生物樣品，例如：血液、尿液。一種解決方式是將閃爍液置於紫外光下曝曬數小時，以消除閃爍液顏色。水溶液解決方法是在 1mL 的樣品中，混和 0.1-0.3mL 的 30% 濃度雙氧水，

以達到漂白的作用，由於過程中會產生氧氣泡，若直接置入計讀，會有強烈吸光效果，因此必須先將閃爍液加熱到 50 度並且需偶爾搖晃。對於非水溶液樣品及溶於有機溶劑樣品，可使用過氧化苯甲酰(benzoyl peroxide)漂白。

- c. 化學：指的是樣品或閃爍液吸收激發或游離能量後，就不將能量釋出給閃爍劑，使得閃爍光較預期減少（脈衝信號變小）。常見的化學淬息劑包含：氧、氯仿(chloroform)。

7. 實驗課程 1

演示直接輻射度量儀器的校正及可能遇到的問題。課程中以 Micro Rem/Sievert Tissue-Equivalent Survey Meter 進行量測實驗，輻射度量儀器讀值與校正射源距離校正實驗中，由點射源假設讀值距離平方成反比，實驗結果大致能與距離平方成反比一致。講師並演示校正可能遭遇的問題：(1)當度量儀器貼近校正射源時，儀器讀值較預估值低，解釋其原因為距離過近不可再視為點射源，且輻射造成偵檢器激發游離並非均勻分布，偵檢器受體僅其中一部分受輻射線照射。(2)輻射度量值偏差的來源，講師演示校正射源之輻射線，除直接射入偵檢儀器，由於實驗室大小有限，另有部分射線係經過牆壁反射後再射入偵檢儀器，可透過校正射源與度量儀器間，置入一厚鉛屏蔽，阻擋直接進入偵檢器輻射線，而度量出該位置經由環境反射的輻射強度。

- (1) 輻射度量值偏差的來源，講師演示校正射源之輻射線，除直接射入偵檢儀器，由於實驗室大小有限，另有部分射線係經過牆壁反射後再射入偵檢儀器，可透過校正射源與度量儀器間，置入一厚鉛屏蔽，阻擋直接進入偵檢器輻射線，而度量出該位置經由環境反射的輻射強度。

8. 實驗課程 2

講述如何正確選擇輻射偵測儀器，由於輻射線種類 (α 、 β 、 γ) 及能量不同，必須對儀器偵測原理及偵測場輻射性質具有一定程度的了解，才能正確選擇輻射偵檢儀器及判斷正確的讀值。使用輻射偵檢器需要作到的判斷包括：輻射種類、能譜、輻射線強度、輻射的方向、輻射場輻射的時間及空間變動。

講師也特別提醒，在開始使用輻射儀器作偵測之前，應先驗證儀器近期是否經過校正、儀器是否可以正確運作，包含：(1)轉至電池檢查功能，確認電池及電路能正確運作、(2)將儀器轉至最靈敏的刻度，並逐漸靠近檢查射源，查看儀器讀值是否隨距離變近逐漸增加、(3)對於蓋格偵檢器，使用 β 、 γ 射源，觀察儀器對射源與偵檢器之間增加屏蔽造成的讀值變化。

實驗課程發給常見的輻射偵檢器，包含：(1)Pancake(G-M)、(2)End window(G-M)、(3)Side-wall(G-M)、(4)ZnS 平板偵檢器、(5)NaI 偵檢器。

用以測試是否能應用於各種類輻射線、強度，包含：(1) α 射源 (4.62MeV 及 4.69MeV, Th-230)、(2)低能量 β (156keV, C-14)、(3)低能量 β (293keV, Tc-99)、(4)高能量 β (763keV, Tl-204)、(5)高能量 β (564keV, 2281keV, Sr-90/Y-90)、(6) β 、 γ 混和射源 (β 512keV, γ 662keV, Cs-137)、(7)低能量 γ (88keV, Cd-109, 電子捕獲)。偵檢器是否能用以量測對應輻射源，實驗結果如表 6，此外並以盲測方式，讓學員透過各種儀器交互操作及掃瞄，找出並辨別實驗各區域放出的為何種輻射線，經過此實驗課程，實際了解輻射線之辨別必須了解各種儀器之操作、適用特性、適用輻射線等，以避免錯誤判讀量測結果。

表 6、常見輻射偵檢器 V.S.可偵檢輻射線

偵檢器	窗厚度 (mg/cm ²)	α Th-230 α 4.62MeV α 4.69MeV	β 低能量 C-14 β 156keV max	β 低能量 Tc-99 β 293keV max	β 高能量 Tl-204 β 763keV max	β 高能量 Sr-90/Y-90 β 564keV β 2281keV max	$\beta + \gamma$ Cs-137 γ 662keV β 512keV	低能量 γ (電子 捕獲) Cd-109 γ 88keV
Pancake(G-M)	1.5-2.0	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
End window(G-M)	1.5-2.0	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N
Side-wall(G-M)	30	N	N	N	Y	Y	Y	Y
ZnS 平板偵檢器	0.8	Y	N	N	N	N	N	N
NaI 偵檢器	N/A	N	N	N	N	N	Y	Y

Y:儀器可量測、N:儀器不可量測

9. 實驗課程 3

講師放置未知核種於高純鍺偵檢器內，每組學員則分別實際操作多頻道分析儀(MCA)、區別康普吞散射能譜，並查閱文獻鑑別能峰對應之放射性核種。實驗結果如表 7，對於能峰 437.0 keV 並對應核種，講師提醒對於多能峰核種或多核種樣品，由於樣品可能於相當短時間內發出 2 種以上能量的 γ 射線，並且被偵檢器同時測得，因能量加總產生新能峰，例如 437.0 keV 為 356.2 keV 與 80.8 keV 能量 γ 射線同時測得的結果。

表 7、未知核種鑑別實驗

實驗編號	實測能峰(keV)	未知核種鑑別	文獻能峰值(keV)
1.	1173.1	Co-60	1173.2
	1332.3	Co-60	1332.5
2.	661.7	Cs-137	661.6
	1459.9	K-40	1460.8
3.	514.1	Kr-85	514.0
4.	276.6	Ba-133	276.4
	303.0	Ba-133	302.8
	356.2	Ba-133	356.0
	384.0	Ba-133	383.9
	437.0		
	80.8	Ba-133	81

四、心得與建議：

(一) 心得：

1. 擦拭測試(smear test)為國內常用的污染取樣量測方式，但為取得較準確的量測結果，應採取正確的取樣程序，或可參考美國 DOE Order 5400.5 Figure IV-1 提供的指引。經詢問 MARSAME 課程講師，事實上，依據美國除役核電廠的輻射量測經驗，因擦拭測試有時誤差較大，故規劃取樣項目時較少將擦拭測試列入。
2. 有關除役廢棄物的外釋標準，儘管我國已訂定「一定活度或比活度以下放射性廢棄物管理辦法」，但該管理辦法只能規範廢棄物的核種活度及比活度，這有賴於以批次方式對除役廢棄物進行核種分析，然依據國外實務經驗，為求時間效益，一般會以移動式偵檢器搭配取樣分析來獲得廢棄物的輻射特性，惟移動式偵檢器一般僅能偵測總阿伐/貝他活度，於此情況下，設施經營者應另外對偵檢作業評估行動基準。

(二) 建議：

1. 美國 MARSAME 架構及做法，值得我國借鏡。國內核一、二、三廠將陸續除役，過程中將產生龐大數量之拆廠廢棄物，依據國外經驗，拆廠廢棄物絕大部分屬可外釋之清潔廢棄物。為了確認廢棄物是否清潔而可外釋，MARSAME 提供了一套嚴謹的統計方法，可供除役廢棄物的偵測規劃作為參考。核一廠除役計畫重要管制事項編號 CS-DP-15 要求台電公司提交清潔外釋計畫至主管機關物管局審查，為利資源共享，建議將本出國報告送物管局參考，以利其審查台電公司之計畫書。
2. 在輻安官訓練的量測實驗課中，講師一再強調使用輻射偵檢器的人員應具備專業的量測知識，才能針對特定的情況選擇適合的儀器，

以正確的程序進行量測，並適切地詮釋偵測結果。國內數年前曾有關心環境輻射的民眾於使用手持式偵檢器時，因操作程序或數值解讀錯誤，造成其對偵測結果有所疑慮。或許可建議輻防訓練業者辦理訓練時，可將量測技術及實務操作納入課程。