

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：

核電廠除役研習計畫-核電廠除役輻射特性偵檢訓練及加馬能譜分析實作訓練

頁數 24 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/02-2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

吳吉田/台灣電力公司/放射試驗室/11 等輻射計測課長/02-2638-1068

沈 奇/台灣電力公司/放射試驗室/11 等核三工作隊第一分隊課長/
08-889-6010

林義興/台灣電力公司/第二核能發電廠/ 9 等主辦劑量評估管制專員/
02-2498-5990

楊佳瑋/台灣電力公司/核能發電處/ 5 等協辦劑量評估專員/
02-2366-7078

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：2018/12/01~2018/12/09

派赴國家/地區：美國橡樹嶺

報告日期：2019/01/24

關鍵詞：

MARSSIM、廠址歷史調查(HSA)、範圍偵檢(SS)、特性調查(CS)、DQO、加馬能譜計測系統，核儀模組，能峰解析度。

內容摘要：(二百至三百字)

橡樹嶺聯合大學(ORAU： Oak Ridge Associated Universities)的前身為橡樹嶺核能研究所，其由橡樹嶺國家實驗室和包括田納西州立大學之美國南部 14 所大學成員共同成立，從以前至目前都是執行美國核能工業研究及應用之牛耳。目前與美國 Argonne National Laboratory (Argonne)國家實驗室一起合作訓練核能電廠和相關設施之除役工程技術和相關工作之人才。其訓練包括設施除役(Facility Decommissioning)、多部會輻射偵檢與廠址調查手冊(MARSSIM： Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual)、核能電廠除役輻射劑量評估程式(RESRAD： Residual Radioactivity (Model))、

廠址特性調查(Site Characterization)與加馬能譜分析系統(Gamma Spectroscopy)等核設施所需之課程。

目前本公司正需要針對已經運轉 40 年之第一核能發電廠兩部機組及後續面臨除役之電廠陸續展開除役相關偵檢工作，因此有必要派員分別參加 ORAU 專業訓練中心(Professional Training Program, PTP) 舉辦之「核電廠除役輻射特性偵檢訓練」與「加馬能譜分析實作訓練」課程，以因應未來執行相關工作所需之技術。

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）

核電廠除役研習計畫-
核電廠除役輻射特性偵檢訓練
及加馬能譜分析實作訓練

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：吳吉田 11 等輻射計測課長

沈 奇 11 等核三工作隊第一分隊課長

林義興 09 等主辦劑量評估管制專員

楊佳瑋 05 等協辦劑量評估專員

派赴國家：美國

出國期間：107 年 12 月 01 日至 12 月 09 日

報告日期：108 年 01 月 24 日

目 錄

| | 頁次 |
|------------|----|
| 壹、出國實習目的 | 1 |
| 貳、出國及返國行程 | 2 |
| 參、實習課程內容簡述 | 4 |
| 肆、結論與心得 | 15 |
| 伍、建議事項 | 17 |

壹、出國實習目的

行政院原子能委員會(以下簡稱原能會)曾於 106 年 10 月 18 日及 107 年 1 月 18 日召開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，建議須與美國多部會共同制定之 MARSSIM (Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual)調查程序一致性。MARSSIM 對於潛在具有輻射污染場所、環境及廠址設施提供一套標準化之輻射偵檢，包括偵檢規劃、實施及評估等作法，並訂定以劑量為基礎之廠址外釋標準，以證明該廠址符合最終狀態之輻射特性法規標準。

台灣電力公司(以下簡稱本公司)曾於 107 年 6 月 11 日至 15 日派員參加美國橡樹嶺聯合大學(ORAU)舉辦之 MARSSIM 訓練課程，回國後對本公司第一核能發電廠(以下簡稱核一廠)即將進入除役階段貢獻良多，惟參加人員經受訓課程發現，MARSSIM 課程主要係針對最終輻射狀態偵檢(Final Status Surveys, FSS)目的設計，對於除役初期之範圍偵檢(SS)與最終輻射狀態偵檢前之輻射特性偵檢(CS)只有概念性敘述；而今(108)年 6 月前，本公司將依原能會要求完成核一廠輻射特性調查計畫，對 SS 與 CS 之規劃必須有更完整的認識，故於此次派遣人選參加 ORAU 舉辦之核電廠除役輻射特性偵檢訓練，以建置更完整的 MARSSIM 流程與方法。

此外，除役過程中加馬能譜核種分析為非常重要的角色，得知 ORAU 亦有開設加馬能譜分析實作訓練課程，該課程除講述基礎原理，另有搭配專業實驗室實作課程。為提升本公司加馬能譜分析技術與增進國際間分析技術之互相交流，經審慎評估後派員參與此課程。

綜上所述，本次實習本公司計核派 4 員參加，其中核二廠林義興專員及核能發電處楊佳瑋專員將參加「核電廠除役輻射特性偵檢訓練」，另放射試驗室吳課長吉田及沈課長奇將參加「加馬能譜分析實作訓練」，以利本公司後續核能電廠除役工作之規劃及推動。

貳、出國及返國行程

本次出國行程於 107 年 12 月 1 日至 107 年 12 月 9 日，含往返程共計 9 日，於 ORAU 專業訓練中心(Professional Training Program, PTP)實習本次課程。詳細行程如下：

| 日期 | 行程 | 摘要 |
|---------------|-----------|---|
| 107/12/1-12/2 | 台北→田納西 | 往程 |
| 12/3 | ORAU 課堂講習 | <p>核電廠除役輻射特性偵檢訓練</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 特性調查的目的 2. 品質保證計畫(QAPP) 3. MARSSIM 及 ANSI N13.59 概述 4. 與除役作業相關之輻射調查介紹 <p>加馬能譜分析實作訓練</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Gamma Ray Review and Interaction of Photons with Matter. 2. Gamma Spectroscopy Overview. 3. Solid Scintillation Detectors. 4. Lab : Equipment – NaI and/or LaBr (SD-210). 5. Lab : Energy Calibration – NaI and/or LaBr (SD-211). 6. Lab : Identification of Unknowns – NaI, then LaBr (SD-213). |
| 12/4 | ORAU 課堂講習 | <p>核電廠除役輻射特性偵檢訓練</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. MARSAME 及 RESRAD 介紹 2. 劑量評估演繹、DCGL 堆導 3. 建築物與土地相關輻射特性調查與除污 4. 廠址歷史調查觀念概述及範例介紹 <p>加馬能譜分析實作訓練</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Semiconductor Detectors. 2. Lab : Equipment – HPGe (GE-210). 3. Energy Calibration – HPGe (GE-211). 4. Identification of Unknowns – HPGe (GE-213). 5. Gamma Spectrum Features. 6. Lab : Low Energy Spectral Features (SD-257). 7. Demo : Well Counters (SD-258). |

| | | |
|-----------|-----------|---|
| 12/5 | ORAU 課堂講習 | 核電廠除役輻射特性偵檢訓練 1. 樣品取樣規劃設計 2. 範圍偵檢觀念概述及範例介紹 |
| | | 加馬能譜分析實作訓練 1. Preamplifiers and Amplifiers Analog to Digital Converters (ADCs). 2. Detector Resolution. 3. Gamma Spectrometry-Quantitative Analysis. 4. Lab : High Energy Spectral Features (SD-251). 5. Lab : Pole Zero Adjustment (SD-254). 6. Lab : Efficiency Calibration (SD-260) |
| 12/6 | ORAU 課堂講習 | 核電廠除役輻射特性偵檢訓練 1. 土地輻射特性調查觀念概述及範例介紹 2. 建築物輻射特性調查觀念概述及範例介紹 |
| | | 加馬能譜分析實作訓練 1. Standard Operating Procedures and Quality Assurance for Gamma Spectroscopy. 2. Lab : Efficiency Calibration and Measurement of Unknown Activity(SD-260). 3. Lab : Errors at High and Low Countrate (SD-253). 4. Group A : Sample Process and Laboratory Tour. 5. Group B : Portable Detectors-Identification of Unknowns(SD-300). 6. ISOCS Demonstration. |
| 12/7 | ORAU 課堂講習 | 核電廠除役輻射特性偵檢訓練 1. 除役輻防偵檢相關儀器及設備介紹 2. 數據管理技術 |
| | | 加馬能譜分析實作訓練 1. Lab : Geometry Factors (SD-265). 2. Lab : Quality Assurance Measurement of Resolution (SD-202.2). 3. Lab : Review of Gamma Spectrometry Reports (GE-215, GE-300). 4. Course Critiques and Adjourn.... |
| 12/7-12/9 | 田納西→台北 | 返程 |

參、實習課程內容簡述

一、核電廠除役輻射特性偵檢訓練

MARSSIM 對於潛在具有輻射污染場所、環境及場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。MARSSIM 對於潛在具有輻射污染場所、環境及廠址設施提供一套標準化之輻射偵檢，包括偵檢規劃、實施及評估等作法，並訂定以劑量為基礎之廠址外釋標準，以證明該廠址符合最終狀態之輻射特性法規標準。據我們熟知，MARSSIM 內廠址土地外釋作業流程工作主要含括：(1)廠址歷史評估(HSA)、(2)範圍偵檢(SS)、(3)特性偵檢(CS)及(4)最終狀態偵檢(FSS)

本次實習主題主要針對除役初期之廠址歷史評估、範圍偵檢與輻射特性偵檢做深入的介紹，全程採用課堂講授及個人與課堂練習實做的方式，使參與學員熟悉除役之廠址輻射特性偵檢的各項程序。而以下將依序依不同工作項目撰寫其相關基本理論概述：

(一) 廠址歷史評估(Historical Site Assessment, HSA)

廠址歷史評估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，其目的及重要性為希望透過廠址歷史評估能對廠址運轉歷史做詳細的了解，其中所需進行的工作為查找並歸納出廠址潛在的放射性污染源和污染的性質。

根據上述資料對廠址的運轉歷史有較清楚的掌握後，可依據蒐集資料將廠址內的土地面積及建築物與污染物遷移途徑(運送路徑、地勢高低)進行詳細評估，並依 MARSSIM 定義之不同污染程度分級做初步分級，由污染程度的嚴重性依序分為第一級(Class 1)、第二級(Class 2)及第三級(Class 3)，上述廠址歷史評估之資訊能輔助後續之範圍偵檢與特性調查並提供部份調查參數資訊。

(二) 範圍偵檢(Scoping Survey, SS)

範圍偵檢是接續在廠址歷史調查之後，而各階段的偵檢皆是環環相扣的工作，從一開始的廠址歷史調查，再來依照廠址歷史調查結果來規劃範圍偵檢，並利用範圍偵檢的結果來驗證廠址歷史調查的內容，待後續再依照範圍偵檢結果來規劃特性調查範圍偵檢，這一連串工作主要的

目的就是希望能盡一切努力來減少“清潔”區域到最終狀態偵檢還需做額外調查的工作，以有效降低人力與資源浪費。

範圍偵檢主要參考的文件為美國衛生署 EPA： **Guidance on Choosing a Sampling Design for Environmental Data Collection EPA QA/G-5S** 與美國核管會 NRC： **MARSSIM, NUREG-1575**。於開始範圍偵檢階段，可以採用 NRC 草案 NUREG-5512 提供之用於制訂調查數據質量目標的導出濃度指引水平(DGCL)篩選值，待後續隨著調查得到的數據增加，將足以獲得開發特定廠址導出濃度指引水平所需的要素。

從範圍偵檢開始將運用許多範圍偵檢的資料品質目標(DQO)，資料品質目標為美國環保署 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，可支持所採取的決策，而這些資料品質目標只是一種可能的方案，其實規劃範圍偵檢沒有所謂絕對錯誤或正確的偵檢計劃，有些規畫可能會造成成本增加，而有些規劃也可能會造成更大的不確定性，故關鍵要素是作為規劃者能明白知曉擬控制的成本、可以容忍的相對不確定性、產出的數據要能正確的提供關注區域的狀況，及需識別可能存在的差距與未知之處。故當遇到提供的指引不詳盡時，建議依據資料品質目標程序，同時依據專業判斷，並徵求管制單位意見後透過一連串資料品質目標(DQO)的過程，決定最終選擇的偵檢規劃設計。

不同區域及不同建築物於範圍偵檢時，資料品質目標均依照不一樣目的與需求來設計，故於應用時資料品質目標表格數量會非常多。後續利用各土地與建築物之範圍偵檢結果，將可依照其調查數據，再次細分和修訂廠址歷史調查時各個土地面積的分類。

(三) 特性偵檢(Characterization Survey, CS)：

1. 設計特性偵檢目的：

(1)偵測單元的污染性質和程度：依據 HSA 與範圍偵測結果作為基礎，再經隨機方式取樣並量測，及專業判斷取樣點(受關注區域的樣本與量測數據)，以判斷是否採取復原行動與規劃後續廢棄物處理方式。

(2)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，可應用到 FSS 設計中。

2.特性偵檢計畫之設備考量因子：

- (1)儀器選用(輻射種類與能量、儀器 MDC 要求、定性定量)
- (2)原位量測(In-Situ)(土地污染之體積深度、軟體能力、校正因素)
- (3)土地的表面掃描
 - 潛在污染和 DQO 來建立級進法(Graded approach)基礎
 - 使用 GPS 結合加馬掃描偵測的資料來進行評估
 - 有無即時判斷偵檢數據的真實性(輻射偵檢儀器反應頻率快慢)

3.特性偵檢計畫考量方向(想要獲得什麼結果可以促進整體計畫進行)：

- (1)證實 HSA：範圍掃描結果是否皆被確認
- (2)污染源鑑別：了解污染源位置、數量、比例，確認是否需要整治 (Remediation)
- (3)廢棄土和放射性廢棄物(Hot spot)是否可以被選定的處理設施接受
- (4)如不需要整治區域就應該減少重複偵測相同區域
 - 例該區域已可執行 FSS，可先於特性階段時就執行該區域之 FSS

4.使用工具與統計方法

(1) VSP (Visual Sample Plan)

VSP 是一種電腦軟體工具，專門為取樣計劃而開發的軟體，該軟體建立於統計抽樣理論和統計分析方法上，有助於確保收集正確的數據類型、質量和數量，而獲得自信評估結果以通過決策。

VSP 在美國能源部、美國環保局與美國國防部等多部會的支持下開發，具備有許多取樣設計和統計分析模塊，提供可視覺化功能於建築物 and 樣本位置，及結合統計分析模塊，以獲得最佳取樣設計，目前 VSP 專注於環境監測和管理、土壤，建築物，地下水，沉積物，地表水，次表層的取樣設計與相關應用分析，設計中運用許多統計抽樣設計方法，包括隨機(random)、系統(systematic)、順序(sequential)、自適應集群(adaptive cluster)、協作(collaborative)、分層(stratified)、橫斷面(transect)、多增量(multi-increment)、組合判斷(judgment)/ 概率(probabilistic)和排名組合抽樣(rank set sampling)等。

透過視覺化的樣本計劃，並採用統計學上使用的方法，加上數據質量目標（Data Quality Objectives, DQO）流程，可得知該目標需要多少樣品，及應該在何處獲得樣品。VSP 實際執行是圍繞需要的數據與確認其目的用途，為後續流程與分析順遂，故必需於製定數據收集計劃前，務必要先前了解如何處理數據及數據精確性。

(2) RSS (Ranked Set Sampling)

排名組合抽樣方法係為統計學上一種，最初是由 McIntyre(1952) 開發，而該統計方法結合簡單的隨機抽樣，現場調查員的專業知識與判斷，以選擇收集樣本；或依據現場篩選測量而適當取代專業判斷。排名組合抽樣方法的使用，目的是從收集的樣本中增加產生代表性測量結果的機會，如此可獲得更好的估計平均值及標準差；此外，排名組合抽樣方法可以比簡單隨機抽樣更具成本效益，因為只需要收集和測量的樣本會更少。

通常通過視覺評估現場中各種潛在取樣位置的一些特徵，其中特徵是感興趣的變量或污染物之相對量的良好指示。一個簡單的生態學例子來說明排名組合抽樣方法，假設需要估算某區域樹木的平均年齡（樹的視覺大小 - 隨著年齡的增長而增加）。首先隨機選擇三棵樹，然後用眼睛判斷哪棵樹最小。標記要測量的最小樹，忽略其他兩棵樹；接下來，隨機選擇另一組三棵樹進行排名，標記中等大小的樹並忽略其他兩個；接下來，隨機選擇另外三棵樹，標記最大的樹，忽略其他兩個，重複此過程 10 次（10 個循環），總共 90 棵樹，其中 30 棵樹已被標記，60 棵樹被忽略，在 30 棵標記樹中，10 棵來自一般較小的樹木，10 棵來自一般中等大小的樹木，10 棵來自一般較大的樹木，通過取樣或其他適當的測量技術，來確定 30 棵標記樹木的年齡，並使用該測量值來估算該地塊樹木的平均年齡。

二、加馬能譜分析實作訓練

(一) Gamma ray review and interactions of photons with matter.

加馬核種所放射出加馬光子與偵檢器作用時主要會產生光電吸收(Photoelectric absorption)、康普吞散射(Compton scattering)和成對產生(Pair production)等三種效應。

1. 光電吸收

當光子能量小於 400 keV 時，其與原子外圍 K 層或 L 層軌道電子作用時就會將電子撞離軌道，並且帶走扣掉電子束縛能外之其他光子能量，而外層電子就會掉回到 K 層或 L 層軌道，同時產生特性 X-ray。

2. 康普吞散射

當核種加馬光子與原子外圍電子作用時，並帶走光子部分能量，就會產生康普吞散射效應。

3. 成對產生

加馬核種光子能量大於 1.022 MeV 時，在其他原子核之庫倫場中作用時會產生電子和正子對(electron-positron pair)。

在加馬核種發射出之光子與偵檢器或一般物質作用時，光電吸收、康普吞散射和成對產生等三項效應是其主要作用機制，而光子的能量更與這些物質作用的機率具有絕對性的相關。

(二) Solid Scintillation Detectors.

一般使用度量加馬核種固體閃爍偵檢器主要材料有碘化鈉(NaI)、溴化鏷(LaBr₃)、碘化銫(CsI)、鎢酸鎘(Cadmium tungstate : CdWO₄)、鍺酸鉍(Bismuth germanate : BGO)、銻釷氧正矽酸鹽(Lutetium-yttrium oxyorthosilicate : LYSO)等六種材質，常用可是用商業化的是碘化鈉和溴化鏷，因為從光電產生率、材質穩定度、溫溼度依存性及解析度都佔有非常優良地位，另外從設備價性比也是很大優勢。

至於碘化鈉(NaI(Tl))及溴化鏷(LaBr₃(Ce))與純鍺偵檢器相比較除了解析度較差外，其優勢是為可方便攜帶和不需利用液態氮來冷卻閃爍偵檢器就可以直接隨時間、地點需要而立即使用來計測出該標的物的活度。

(三) Semiconductor Detectors.

半導體偵檢器是目前最普遍使用於加馬核種度量設備，其與絕緣體材質適合用於度量加馬光子核種主要是其有適合產生電子與電洞之能階 (Band gap)，可以將在適合加馬能峰的解析度(FWHM： Full Width at Half Maximum)範圍內判斷核種能峰，進而執行核種定性及核種活度定量之需求。

目前常見於使用在半導體偵檢器材質有鍺(Germanium)、矽(Silicon：Si(Li))、碲化鎘(Cadmium telluride：CdTe)、碲化鎘鋅(Cadmium zinc telluride：CZT)、碘化汞(II) (Mercury(II) iodide：HgI₂)等五種偵檢器材質，純鍺是目前最普遍用於度量釋放加馬光子核種之偵檢器材質，以原子序來看，雖非最佳的加馬光子阻擋材料(原子序 32 只比矽高，比其餘常用材質低)和執行分析加馬核種時，需在絕對溫度(K) 80 下才能運作，但是其有較佳之能峰解析度、能階高度和低的電子-電洞對，對於核種能峰在 50 keV ~ 2000 keV 有很好的鑑別率，也就是比較可以準確的將複雜的光子能峰分別判別歸屬於正確的加馬核種，這些皆能弭補上述缺點，而相關受業者所悉愛使用，

各類偵檢器材質與光子作用時對於產生能峰之解析度會因物質特性而產生很大的差異，因此要準確判定核種需選擇適當之設備，以達到核種定性和定量之目的。

(四) Gamma Spectrum Features.

一般而言，要量測環境中的低活度樣品，需要在低干擾的背景環境下度量，因此要有鉛屏蔽的環境下執行計測，此狀況下加馬輻射線會與鉛屏蔽、物質和屏蔽內襯作用而產生核種光子能峰、康普頓邊緣、互毀能峰、散射能峰和 X-ray 能峰等。

在加馬核種光子能量大於 $2m_0c^2$ 時，就會出現 $E-m_0c^2$ 及 $E-2m_0c^2$ 的能峰。有時在一個較為複雜的計測樣品基質或是核種在短時間同時會放射出多能峰，而儀器無法於解析時間內分辨各別能峰事件時會有加總能峰(summing peak)出現。

總之，在一個有屏蔽的計測系統內核種加馬光子與偵檢器作用時所產生的能峰及其機制如表 2、加馬光子作用機制與能譜產生結果。

表 2、加馬光子作用機制與能譜產生結果

| 產生能譜 | 射源光子作用標的 | 作用機制 |
|---------------|----------|------------|
| 光子能峰 | 偵檢器 | 光電效應 |
| X-ray 逃逸能峰 | 偵檢器 | 光電效應 |
| 康普吞連續能譜 | 偵檢器 | 康普吞散射 |
| 單一和雙逃逸峰 | 偵檢器 | 成對產生 |
| 特性 X-ray | 屏蔽 | 光電效應 |
| 散射能峰 | 屏蔽 | 康普吞散射 |
| 互毀能峰(511 keV) | 屏蔽 | 成對產生 |
| 加總能峰 | 偵檢器 | 多光子的符合光電效應 |

(五) Preamplifiers, Reamplifiers, Amplifiers, and Analog to Digital Converters (ADCs).

加馬多頻道能譜分析系統(Gamma Multi-channel Analysis System)是由高純度鍺偵檢器(High Purity Germanium Detector ,HPGe Detector)，前置放大器(Preamplifier)，高壓供應器(High Voltage Power Supply)，能譜放大器(Spectroscopy Amplifier)，類比數位轉化器(Analog to Digital Converter)，多頻道能譜分析儀(Multi-channel Analyzer)，加馬能譜分析軟體(Gamma Analysis Software)等。由於加馬多頻道能譜分析系統具有解析度佳，核種能峰判定技術純熟，在加上系統冷卻方式的更新和系統計測效率之大幅改善，只要正確的執行能量校準、計測效率校正及良好系統品管設定，對於試樣中放射性加馬核種準確的定性及定量分析是簡單易行之事。

1. 前置放大器

純銻偵檢器產生的訊號很小，很容易經過一段距離訊號線後而衰減變小，甚至變成雜訊，因此需要經過前置放大器將訊號能量和時間變成適合傳輸的脈衝波形，因此純銻偵檢器和前置放大器要越靠近越好，以免造成訊號的過度衰減。

2. 能譜放大器

偵檢器的訊號經過前置放大器後波形回復至基準線很慢，會造成長拖尾脈衝(Long Tailed Pulse)，而使前後的脈衝會有重疊現象發生，所以仍需要再將脈衝執行增益調整(Gain Range)、時間常數設定(Shaping Time Constants)、能量微分(Differentiation Energy)、能量積分(Integration Energy)和降低雜訊的干擾(low noise design)等以克服能峰會重疊而分不開情形，所以能譜放大器的功能是将偵檢器從核種所放射加馬光子，接收後的訊號利用 RC 濾波功能(Resistor-Capacitor filter)處理具有下列特性的波形：接近高斯分佈的脈衝波形(Near-Gaussian pulse shape)、加強訊號與雜訊比(Signal-to-Noise Ratio Enhancement)、基線的復歸(Baseline Restorer)、脈衝對稱性(Pulse Symmetry)和良好的量測效能(Count Rate Performance)等等。

3. 類比數位轉化器

截至目前為止，前面所提之加馬光子訊號均是類比訊號存在，然而在電腦內加馬多頻道能譜分析軟體只會接受數位訊號，因此系統必須有設備按照放大器輸出的脈衝振幅(Amplitude)類比訊號轉換成數位訊號(Digital Word)來呈現(能譜放大器轉換產生的脈衝振幅也是依照核種輻射出的光子能量比例)，讓加馬光子訊號能被加馬多頻道能譜分析軟體接受，類比數位轉化器就扮演這個功能。目前類比數位轉化器有三種型式：

- Wilkinson
 - Older design
 - Some older detection systems may still contain this type.

- Successive Approximation
 - Most currently available ADCs are this type.
- Fash
 - Rarely used on its own.

(六) Gamma Spectrometry-Quantitative Analysis.

加馬能譜分析系統分析樣品時，核種的判定是根據其所放射出之能峰能量和能峰數量所決定，因此能量校正是系統從試樣中找出其所含有天然核種和人工核種之依據，也是樣品中核種是否存在之定性分析，即先訂出每一根加馬光子能峰的能量再和核種每一根能峰之能力比對。

對於樣品中核種活度的定量分析就要利用標準輻射源來對加馬能譜分析系統執行效率校正，一般使用單一核種或是混合核種，其各有其優劣之處，但是最基本的是要涵蓋分析核種能量為範圍，而不要效率校正完後以外插方式來執行核種能峰效率推算，因為其會對核種判定及核種活度的計算造成很大的誤差。

核種加馬光子能峰的的積分就計算核種能峰活度，但是前面說過加馬光子在有屏蔽的計測腔內會與鉛屏蔽、其他物質作用而產生康普吞連續光譜造成計測能譜之背景計測數，所以計算加馬光子能峰需將此部分扣除，其計算方式如下：

$$R_N = \frac{C_N}{t} = \frac{G - B_C - B_L}{t}$$

R_N ：能峰淨計數率

G ：ROI 總計數

B_C ：康普吞背景計數

B_L ：實驗是背景計數值

t ：樣品計測時間

C_N ：樣品淨計數

加馬多頻道能譜分析系統在效率校正時，一般所使用方程式為三次方以上，因此校正射源需有四支核種能峰才能建立效率方程式。除此之外，也如能量校正所需要的核種能峰分析範圍至少要含蓋核能發電設施常見的加馬核種能峰能量含蓋至 1.5 MeV 左右，而符合此條件的有銻-152(121.78keV、244.69keV、344.27keV、411.11keV、443.98keV、778.89keV、867.32keV、964.01keV、1085.78keV、1112.02keV、1407.95keV)，其有 11 支能峰可以用來建立效率方程式，另一種是多射源有十二支能峰的多射源核種也符合此需求。

(七) Standard Operating Procedures and Quality Assurance for Gamma Spectroscopy.

加馬能譜分析系統之品質管制方法除上述所提能量校正、效率校正和測試系統穩定度外，尚需要考慮計測系統使用過程是否有受到外界不當核種之干擾，而造成分析結果之誤差，也代表在可量測樣品期間，分析系統不放置樣品時可量測到除計測屏蔽所造成之天然核種外，應該量測不到不應該出現的人工核種等等。為確保上述的要求，加馬能譜分析系統必需執行加馬計測系統的背景品值管制，下面是表 3、核能設施實驗室之加馬能譜分析系統品質管制測試內容所示。

表 3、核能設施實驗室之加馬能譜分析系統品質管制測試內容

| 項 目 | 內 容 |
|-------|---|
| 系統校正 | 1. 加馬能譜分析系統能量校正 2. 加馬能譜分析系統效率校正 |
| 穩定度測試 | 1. 低、中、高能量區域能峰活度 2. 固定能峰解析度(FWHM) 3. 系統背景污染測試 |

(八) Review of Gamma Spectrometry Reports

加馬能譜分析系統為求準確分析核種活度的結果除上述的能量校正、效率較校和日常品質管制作業外，對於樣品計測時需輸入取樣時間、

幾何形狀選擇和計測時間之決定是很重要的參數，因為這些參數會決定計測結果之儀器最低可測量活度(LLD)漸數據之不確定度等。

在完成加馬能譜分析計測結果後，所測得樣品中之核種及其活度外，仍需注意下列事項，以獲得更準確的分析結果：

1. 計測樣所顯示無感時間的大小。
2. 兩個單一能峰合併成一能峰所造成之漏失。
3. 試樣幾何形狀，尤其是樣品形狀、偵檢頭距離之最佳化。
4. 計測試樣之試樣體積和試樣密度之因素。
5. 核種能峰之相互干擾是否會造成核種誤判。

肆、結論與心得

一、核電廠除役輻射特性偵檢訓練

首先，感謝公司內各級長官給予我們前往美國田納西 ORAU 學習除役相關偵檢技術規劃的機會，使我們能順利獲派於 107 年 12 月 1 日至 107 年 12 月 9 日前往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, PTP)實習。

本次實習主要著重講述有關廠址除役土地外釋，其內容係參照多部會輻射偵檢與廠址調查手冊(MARSSIM)內最初廠址歷史調查(HSA)、範圍偵檢(SS)與特性調查(CS)之概念論述及相對應之應用範例介紹等，參與實習後受用良多，回國經過努力復習研讀並與現場同仁共同討論，期望將所學能助本公司能更具體了解輻射偵檢每個步驟需達到的目標與實際執行做法。

本次實習於範圍偵檢(SS)與特性調查(CS)內容中使用大量於除役各項偵檢規劃中之資料品質目標(DQO)，並用來對不同範圍的土地與建築物做詳細的偵檢規劃，惟資料品質目標內陳述決策點，實際上並無絕對的數值與標準，而須透過不間斷與主管機關共同協商下，凝聚雙方共識而決定的。

另外 VSP(Visual Sample Plan)專業軟體極為便利且可靠，係現今美國本土經常使用來規劃特性調查偵檢的輔助工具，因其軟體採取之規劃方式與統計分析方法皆是遵循 MARSSIM 內容執行，依據有法源相關軟體較易與主管機關協商，亦可使用於後續 MARSSIM FSS 進行全面的偵檢規劃與統計分析。

二、加馬能譜分析實作訓練

- (一) 工欲善其事必先利其器，同樣加馬能譜分析系統所接的不同偵檢器，就會有不一樣的結果，而且能事半功倍，如在實驗室內建立的加馬能譜分析系統，則以純鍺或矽偵檢器為主，因為其良好的偵檢器解析度(FWHM)可分析出最佳狀況核種能峰，正確判斷核種類別並且降低可接受之最低可量測濃度(AMDA)。至於用於環境現場加馬能譜量測系統則以閃爍偵檢器碘化鈉、碘化銫(和溴化鏷為主，因為系統不需液態氮冷卻，移動性方便，業務容易展開，而且系統較不易故障。
- (二) 加馬射線能譜法已經用於環境測繪(environmental mapping)，地質測繪(geological mapping)和礦物勘探(mineral exploration)主要是量測鉀-40、鈾-235/鈾-238 和釷-232 核種，來探勘環境中天然核種分佈及鈾礦的含量等，如果應用於核設施大片地表或牆面之度量再配合準值器(collimator)可以事先測量出高污染點(hot spot)，並事先移除後再拆除需解構之物體，則可降低污染廢棄物之數量。
- (三) 從放射性衰變數據表(Radioactive decay data tables)熟悉核種衰變途徑鏈瞭解核種光子能峰、單一逃逸峰、雙逃逸峰、康普頓邊緣、互毀能峰、散射能峰和 X-ray 能峰等，並輔以能峰峰度後，就以減少多能峰核種干擾單一能峰核種之正確判定。
- (四) 熟悉加馬能譜分析系統之各核儀模組(Nuclear instrumentation module : NIM)之功能與訊號輸入輸出，當馬能譜分析系統有異常狀況產生時，如系統解析度異常，則需檢察偵檢器和前置放大器等，此時就需使用示波器(Oscilloscopy)來檢查前置放大器訊號和調整放大器之歸零功能鍵(Pole zero)，可以讓加馬核種能峰之前拖曳(Low tailing)與後拖曳(High tailing)回復正常，而不必更換整套馬能譜分析系統的電子儀控模組。

伍、建議事項

一、核電廠除役輻射特性偵檢訓練

- (一) 建議公司能開始著重 VSP 軟體學習，因根據本次實習課程發現 VSP (Visual Sample Plan)軟體是規劃特性調查偵檢時極為便利的輔助工具，其軟體採取之規劃方式與統計分析方法皆是遵循 MARSSIM 內容執行，若能習得 VSP 技術，將可有效幫助本公司執行特性調查偵檢規劃。
- (二) 建議未來林訓中心在電廠運轉相關訓練需求逐步降低後，可將目前模擬設備修改為除役準備相關模擬設備。
- (三) 目前本公司已陸續派員前往學習 MARSSIM 與除役相關偵檢技術規劃等技術，惟於大量建築物廢棄物相關除役技術規劃尚欠缺中，大量建築廢棄物會與後續廢棄物處理相關，故必續將其妥善規劃，建議於未來能再提供 MARSAME 學習機會並將其引進回國，使核電廠除役技術更加完善。

二、加馬能譜分析實作訓練

赴參加加馬能譜分析計測結果後，對於未來無論運轉中核能設施的環境輻射監測或除役時需執行的廠區輻射特性調查和廠址復原所需執行的加馬核種輻射強度偵測，應可以準確量測出核種並且順利執行輻射監測目的。由於在橡樹嶺聯合大學受訓時為全英文上課，所以為達成上述工作目標需注意下列事項：

- (一) 語言方面，除經過公司要求之語言程度外，另需具備加馬能譜計測系統之專業術語與輻射防護專業術語，因為美國橡樹嶺聯合大學上課之課程內容不會從基礎專業術語教起，而是直接從馬能譜計測系統之理論和實際架構切入課程內容。
- (二) 目前已發展成熟可以商業應用來檢測樣品中加馬核種活度的設備主要以閃爍偵檢器及半導體偵檢器兩類為主，而閃爍偵檢器以碘化鈉 (NaI(Tl))、碘化銫(CsI(Tl), CsI(Na))和溴化鏷(LaBr₃)，主要優勢是不需額外冷卻系統，方便攜帶出戶外及核設施之空間使用。半導體偵檢器以鍺和矽兩種材質為主，鍺能帶間隙(Bandgap)0.74 eV 比矽能帶間隙 1.16 eV

低，再者鍺產生電子電洞需 2.96 eV，矽產生電子電洞需 3.76 eV，因此鍺偵檢器比矽偵檢器有較的加加馬能譜解析度，應用也較為普遍，而半導體偵檢器設備需要在液態氮溫度(77K)下才能使用，引比較適合在實驗室內使應用。

- (三) 常見加馬核種能是量介於 50 keV ~ 2000 keV 經過中子活化分析、核燃料分裂及天然放射性加馬核種有數千之多，在加上有些加馬核種會放出多於一個以上能峰和在有計測屏蔽環境下會產生 X-ray，因此在量測樣品或環境中加馬核種時需注意核種能峰干擾問題，以避免造成加馬核種及其活度的誤判，影響劑量評估的準確性及人員污染的恐慌。
- (四) 加馬能譜計測系統主要是由偵檢器、前置放大器、高壓供應器、放大器、類比數位轉換器和能譜收集分析系統所組成，其中系統連接和系統內參數設定是攸關系統分析出加馬核種及活度之準確性，因此對於每一設備輸入條件和輸出訊號的相關性結果需有適當的瞭解，以正確建立及隨時掌握馬能譜計測系統的穩定性及正常可用狀態。
- (五) 赴美國受訓除語言的適應外，生活上應有所規劃，包括食衣住行等事項，飲食適應性和餐廳所在，氣候、溫度狀況，居住旅館是否安全等不會因生理上問題影響學習工作的進度，尤其美國幅員廣闊，交通是一大挑戰，所以希望像美國的橡樹嶺聯合大學等比較偏僻的學習場所可以允許提供租車之需求。