



財團法人 中華民國輻射防護協會

# 輻射防護簡訊

第 150 期

出刊日期 108 年 4 月 15 日

## 本期內容 CONTENT

### 專題報導 - 核能電廠除役作業與管制規範

1

筆者有幸於 2017 年底應中華民國輻射防護協會邀請，返國與國內同仁們研討核能電廠除役議題，引起熱烈的回應。由此也深深了解到國內在落實非核家園的目標上，即將遇到的挑戰。基於此議題在會中有著深入的討論，筆者在此將討論的心得做個總整理，以作為將來與國內同仁們在相關議題上互相切磋的參考。

### 訓練班課程

10

公告本會各項訓練班開課時間

### 輻協新聞廣場

11

各項證照考試資訊、國內產官學界最新消息、以及近日全球輻防新聞 全球輻防新聞

### 場址歷史評估簡介

14

除役過程中的輻射特性調查攸關除役完成後土地是否可以外釋之決定，本文摘述陳士友教授於「核能電廠除役作業與管制規範」一文中所提到的 MARSSIM 第三章場址歷史評估，供對核電廠除役工作有興趣的朋友們參考。

### 用過核子燃料乾式貯存簡介與混合式輻射遷移計算屏蔽分析應用

18

蒙地卡羅模擬中變異數降低技巧的選擇與應用是非常困難的，相當程度上應用的好與壞是依靠使用者經驗累積，故有人說成功的使用變異數降低技巧不只是一門科學更像是一門藝術！

# 核能電廠除役作業與管制規範

作者 陳士友 教授

美國伊利諾理工學院

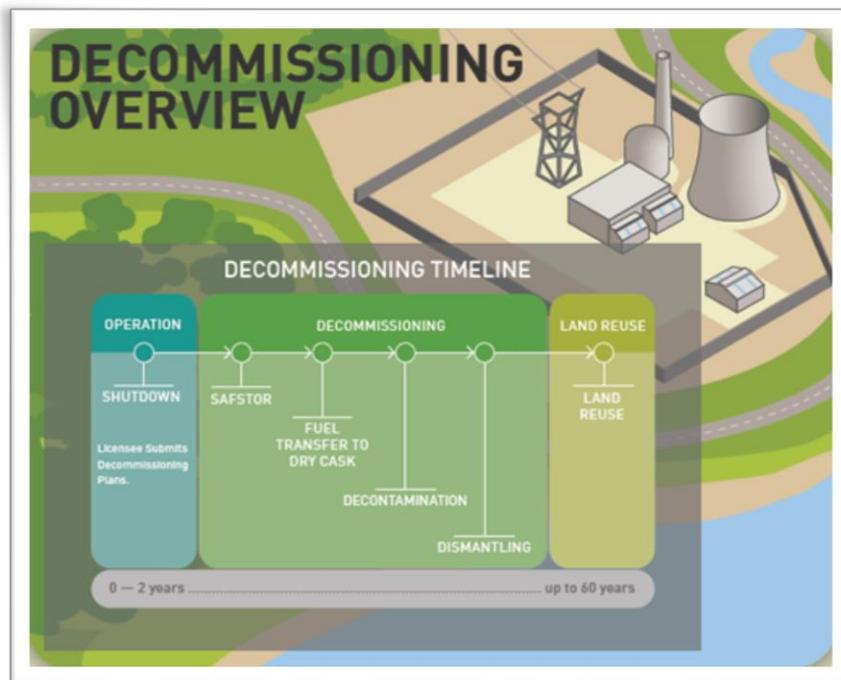
輻射防護協會海外諮詢委員

## 前言

筆者有幸於 2017 年底應中華民國輻射防護協會邀請，返國與國內同仁們研討核能電廠除役議題，引起熱烈的回應。由此也深深了解到國內在落實非核家園的目標上，即將遇到的挑戰。基於此議題在會中有著深入的討論，筆者在此將討論的心得做個總整理，以作為將來與國內同仁們在相關議題上互相切磋的參考。由於筆者的經驗大致上以美國為主，因此本文所引述的相關資料也著重於美國核電廠的除役經驗。另因法規的討論較具針對性，而且為了正確起見，本文的討論會侷限於法規上硬性的內容，比較條文式或艱澀的部分也敬請讀者見諒。

## 核能電廠除役的背景

一座核能電廠的執照一經批准後的有效期是 40 年，當電廠的營運在其執照即將到期前將會在現行的法規內面臨兩種選擇：一是申請延役將執照有效期再展延 20 年（也就是說將電廠的總共役齡延長至 60 年）；二就是決定關閉電廠，永久停運進而申請執照的解除（經由電廠的除役）。美國目前有 99 座運行的核能電廠，其中百分之九十已獲准延役，另外約有將近 30 座電廠已經或將要進行除役。我國目前有三座核能電廠共六個機組，政府的既定政策是要達成 2025 年“非核家園”的願景，位於金山的核一廠也就首當



(圖片來源：NUREG/BR-0521, Rev. 1)

其衝，一號機將於 2018 年底、二號機將於 2019 年屆齡之後，展開除役的作業。核二、三廠也將在數年後陸續除役。

有別於其他發電系統（例如火力發電）的除役，核能電廠的除役作業必須按照一套既定的嚴格機制，在法規管制下按部就班的進行除役工作。以下是在這方面的特殊考量（參考美國現行的核能法規）：

- 當核能電廠決定永久關閉時，此電廠的設施必須有計劃的通過一系列有關除役 (decommissioning) 的步驟：首先將其發電的服務及電廠的組裝安全的關閉並移除，同時也將任何殘餘的輻射物 (residual radioactivity) 降到法定值；進而解除電廠的執照 (license termination)。

- 核能管制單位對核能電廠的除役有一套相當嚴格的法規規定；目的在監督整個電廠的除役過程，包括移除用過的核燃料棒及清除所有在電廠各部及其用地殘餘的輻射污染。
- 現行法規目的是在除役的過程中確保電廠員工及廠外民眾的安全，並且在除役完成後對民眾安全及環境繼續提供保護。

因此，一般核能電廠的除役作業，從規劃、執行到完成可能要經過一段長達幾十年的時間，而其費用大約為 4 億美金(接近蓋一座新核電廠十分之一的價格)。以美國而言，法規規定的除役期限不得超過 60 年(我國目前的規定是 25 年)。

## 除役的目的及範疇

根據美國現行法規 10 CFR 50.2，除役的定義是將一座現役的核能電廠安全的停役，並將其可能的殘餘輻射劑量降到不同條件的法定限值，而達到下列的目的：

1. 將設備或廠址作無條件的外釋，達到現有執照解除 (License Termination) 的目的，或是
2. 將設備或廠址作有條件的外釋，達到現有執照解除的目的。

從法規的角度上說，除役是利用有計劃的方式解除電廠的執照，它的實質意義是將其原有佔地外釋後回歸為其他用途 (Reuse)。為此，除役將開始於電廠的停役，而在安全的移除及處置核燃料棒之後，進行一系列的除污及拆廠作業，最後妥善的整治並釋放原有的廠址。在除役的過程中必須確保電廠員工及廠外民眾的安全，以及對民眾健康及環境的保護。

## 除役的方式及法規

核能電廠的除役方式有下列三種可能：

1. 立即拆除 (DECON, immediate dismantling)：在反應器停役之後馬上進行電廠的各項建築、設備及設施作移除及除污的工作，除役所產生的核廢料也得到妥善的處理。完成所有的除役作業以成功的解除執照，而將原有的廠址釋放作其他用途。
2. 安全暫存 (SAFSTOR; deferred dismantling)：安全暫存與立即拆除基本上是類似的方式，只不過安全暫存在電廠停役後將電廠維持在一個安全穩定的狀態，直到經過一段時期的管理及監測後再進行拆除

。在這期間原廠地的設施在核燃料移除及冷卻系統清理後維持不變，直到廠方準備除役之時才開始移除及除污的工作，而原有的放射性污染活度將隨著時間的衰變而降低。

3. 固封除役 (ENTOMB)：電廠停役後即將各項建築、設備及設施用混凝土封存在原地，經過一段長時期的管理及監測後，待原有的放射性活度降到法定值後再釋放廠址。由於執行上的不確定性，目前尚無任何電廠申請固封除役的除役方式。

美國的電廠大多採用安全暫存的除役方式，少數進行立即拆除。多數採用安全暫存方式的理由是 因為同一廠址內要配合不同機組除役的時間以節省開支，或是延遲除役的時間以待爾後適當的時機再作處理 (例如核廢料貯存的問題等等)。

美國核管會 (NRC) 於 1996 年在核能電廠的除役上正式建立了現行的執照解除法規 (License Termination Rule)。它在電廠除役上做了明確的規範，其中最主要的條文在此討論如下：

### A. 法規 10 CFR 50.82(有關執照的解除) 明確的訂定了電廠除役的步驟及其內容：

- 當廠方決定停止電廠的營運後 30 天內必需將除役意願書以書面正式函告核管會
- 當廠方將核燃料自反應器永久移除時，必需同時以書面正式函告核管會
- 廠方必需在永遠停運後的 60 年內完成除役工作

## 註

### 其他相關法規

- Part 50, Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities (核能電廠法規)
- Part 51, Environmental Protection Regulations for Domestic Licensing and Related Regulatory Functions (環境法規)
- Part 70.38, Domestic Licensing of Special Nuclear Material (特殊核子物料法規)
- Part 72.54, Licensing Requirements for the Independent Storage of Spent Nuclear Fuel, High-Level Radioactive Waste, and Reactor-Related Greater than Class C Waste (用過核燃料及超 C 類低放射性廢棄物的貯存法規)
- Part 73, Physical Protection of Plants and Materials (核子設施及物料的保護法規)

由以上法規延伸出來的重要參考文件如下：

- Regulatory Guide 1.179, "Standard Format and Content of License Termination Plans for Nuclear Power Reactors"
- Regulatory Guide 1.184, "Decommissioning of Nuclear Power Reactors"
- Regulatory Guide 1.185, "Standard Format and Content for Post-Shut-down Decommissioning Activities Report"

- 廠方必需在永遠停運後的 2 年內將一份停運後的除役作業報告書 (post-shutdown decommissioning activities report, PSDAR) 送繳核管會
- 廠方在送繳停運後的除役作業報告書予核管會 90 天後得以開始啟動除役工作
- 廠方在除役作業完成的 2 年之前必需申請核能電廠執照解除手續並送繳核管會一份執照解除計畫書 ( license termination plan, LTP) 以供審核
- 廠方送繳的執照解除計畫書(LTP) 必需同時呈繳為終期安全分析報告 (FSAR)的訂正。核管會也將會以此做為批准執照修訂的依據
- 核管會將依據下列的審核結果以決定廠方執照解除的申請：
  - (i) 依照執照解除計畫書規劃進行剩餘場地設施的拆除
  - (ii) 輻射最終狀態偵檢及其相關

文件足以證明廠址的除役作業已遵守 10 CFR part 20 subpart E. 所設定殘餘輻射劑量標準值的規範

**B. 法規 10 CFR 20 Subpart E 規範了執照解除的殘餘輻射劑量標準值**

- 除役的輻射劑量是以關鍵群體 (critical group) 中的平均人員 (average member) 每年可能接受到的總有效劑量 (total effective dose) 為基準。而法規的遵守則以除役後 1,000 年內的最高劑量值來做決定
- 當廠址在除役後的劑量 (高於背景值而且包括地下水的飲用) 證明為不超過每年 0.25 毫西弗時，再加上對於核污染也做到合理抑低 (ALARA) 後，該廠址就可以考慮作無條件外釋
- 當廠址在除役後無法達到無條件外釋時，法規上會有不同的要求

## 註 (續)



- NUREG-1700, "Standard Review Plan for Evaluating Nuclear Power Reactor License Termination Plans"
- NUREG-1757, "Consolidated NMSS Decommissioning Guidance (Volume 1, 2 & 3)"
- NUREG-0586, "Final Generic Environmental Impact Statement (GEIS) on Decommissioning of Nuclear Facilities: Regarding the Decommissioning of Nuclear Power Reactors"
- NUREG-1575, "Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual (MARSSIM)"

另外美國核管會也參照了國際原子能總署的除役法規文件如下：

- IAEA, "Decommissioning of Nuclear Power Plants and Research Reactors," Safety Guide WS-G-2.1, December 1999.

其他相關的文件請參照美國核管會的除役網頁：

- <https://www.nrc.gov/waste/decommissioning/reg-guides-comm/guidance.html>

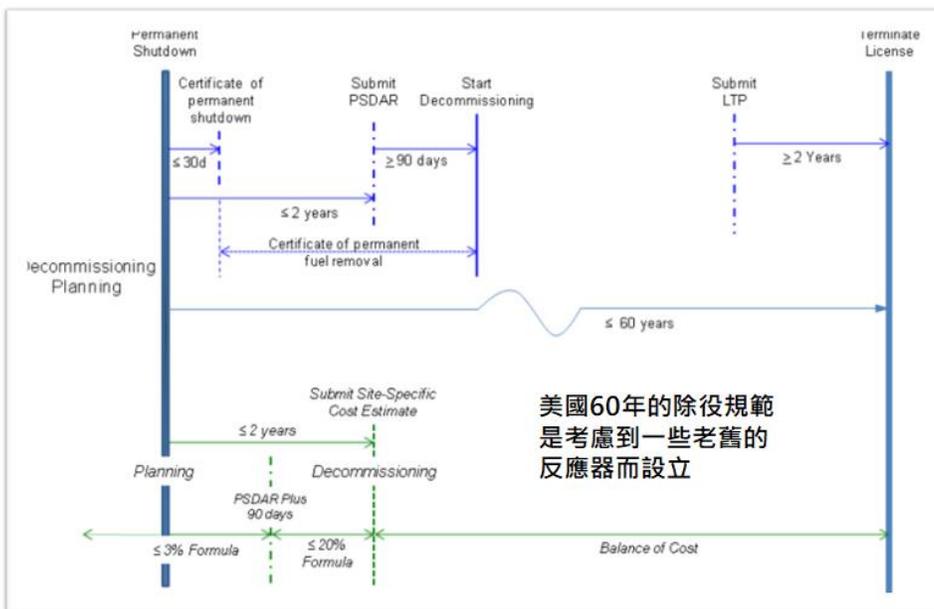
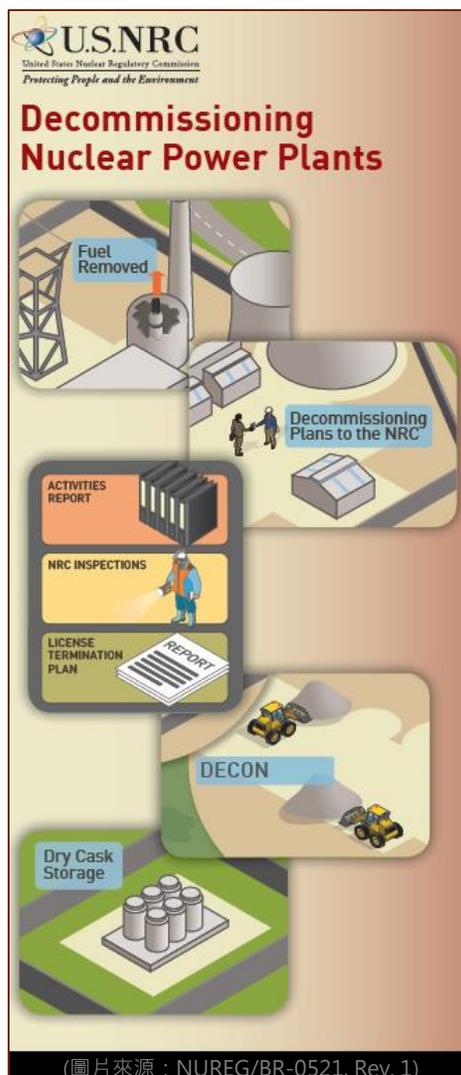


圖 1 美國核能電廠除役時程表 (資料來源：Regulatory Guide 1.184)



## 除役作業程序

電廠除役的作業時程及其流程大致上是依照 10 CFR 50.82 法規的規範，並詳述於法規指南第 1.184 號 (Regulatory Guide 1.184)。電廠除役的作業起始於其停役的意願，而終於執照的解除，這一切的作業必需在 60 年內完成 (註：在我國是 25 年)。這些當然還不包括之前的準備作業。圖一為一般核能電廠除役作業的步驟及時程，以下做進一步的討論。

核能電廠的除役大致包括 4 個主要階段的作業程序，其內容如下：

### A. 反應器停止運轉作業

反應器停止運轉作業開始於廠方決定永久停止運轉反應器 (Permanent Shutdown)。此時的作業是對外正式公告廠方除役的意願，並且在規定的 30 天內函告核管會永久停運意願書 (Certification of Permanent Shutdown)。核子燃料自反應器爐心 (Defuel) 移除後，在正式除役之前函告核管會核子燃料永久移除意願書 (Certification of Permanent Fuel Removal)。至此，核電廠的發電營運作業就宣告永遠的終結，也正式展開了除役的準備工作。

### B. 過渡期準備作業

廠方在反應器永久停運確認後的 2 年內需呈送核管會一份除役作業報告書 (Post-Shutdown Decommissioning Activities Report; PSDAR)。報告書中需要涵蓋詳盡的除役計劃，包括作業流程、時程表及各項安全的準備；同時也要對環境可能的衝擊作出評估。其中過渡期時所要準備的除役作業內容如下：

- 準備大量的文書作業，以用於執照在除役上的修訂，包括安全分析報告 (SAR)、不必要設施的降級、各類技術規範 (Technical Specifications) 與步驟的修訂等等。
- 著手準備除役計劃，包括人員劑量的管制、核廢料的處置、廠房拆除及除污方式、廠址外釋的輻射標準及最終狀態偵檢 (Final Status Survey) 方式等等。
- 廠地及設施除役的準備工作，包括降低核污染及降低人員輻射曝

露的可能劑量。

- 需要特殊處理的反應器內部機組，包括反應器爐心的外殼和控制棒等高活性的組件。

### C. 除役主要作業的執行

核管會規定廠方在呈送核管會一份停役後的除役作業報告書 90 天之後，才准許正式啟動除役工作。除役的作業也要按照呈送核管會的除役作業報告書 (PSDAR) 所規劃的作業程序進行。這些規劃詳述於法規指南 Regulatory Guide 1.185 PSDAR 的標準程序與內容中。以下為此報告的摘要：

- 將用過核子燃料從燃料池 (濕式貯存) 移至廠房外乾式貯存設施
- 移除高輻射及高污染的系統，包括反應器爐心的外殼及內部組件、大型的高輻射機組如蒸氣廠生器 (PWR)、反應器的主要系統 (如硼中子控制系統)
- 移除其他高污染的系統及建築物
- 進行化學除污工作，並開始各建築設施的除污作業
- 注意處理有可能引起工作人員及環境重大衝擊的不尋常的情況
- 準備在廠址預定存放機組的空間
- 準備核廢料的處理及外運的支援事項
- 重組除役管理組織及員工以利工作的進行

如果除役作業在各設施拆除後會有長期存放 (超過 5 年) 的可能，廠方需詳細準備貯存作業，這包括了核廢料貯存、各項除污工作及貯存的安全準備。

### D. 執照解除的後端作業

執照解除作業是屬於除役中後端的作業。執照解除計畫書 (LTP) 必須在電廠執照解除 2 年前呈送核管會審核，此計畫書是為了補正電廠的終期安全分析報告 (FSAR) 以作為執照修正的基礎。根據法規指南 Regulatory Guide 1.179，下列是除役計畫書所規劃的一些後端作業事項：

- 執行廠址輻射特性調查作業 (Site Characterization)。其目的是要提供廠址的污染資訊以用來作為最終狀態偵檢作業的基礎。
- 確認及拆除廠址內的其他設施。其目的是要確認及進行廠址內所剩餘的一些需要進一步的除役工作。
- 執行廠址的環境整治作業 (Site Remediation)。其目的是要利用執照解除計畫書中所規劃方式對環境進行整治達到殘餘輻射值標準。
- 執行廠址的最終狀態偵檢作業 (Final Status Survey)。這是要依據 MARSSIM 的場址調查技術規範去確認其遵守法規上對於殘餘輻射的限值。
- 執行廠址最後作業中的其他規定。包括了合理抑低 (ALARA) 的考量，以期達到廠址外釋及執照解除的最終目的。

上述後端作業的程序及決策過程如圖二所示：

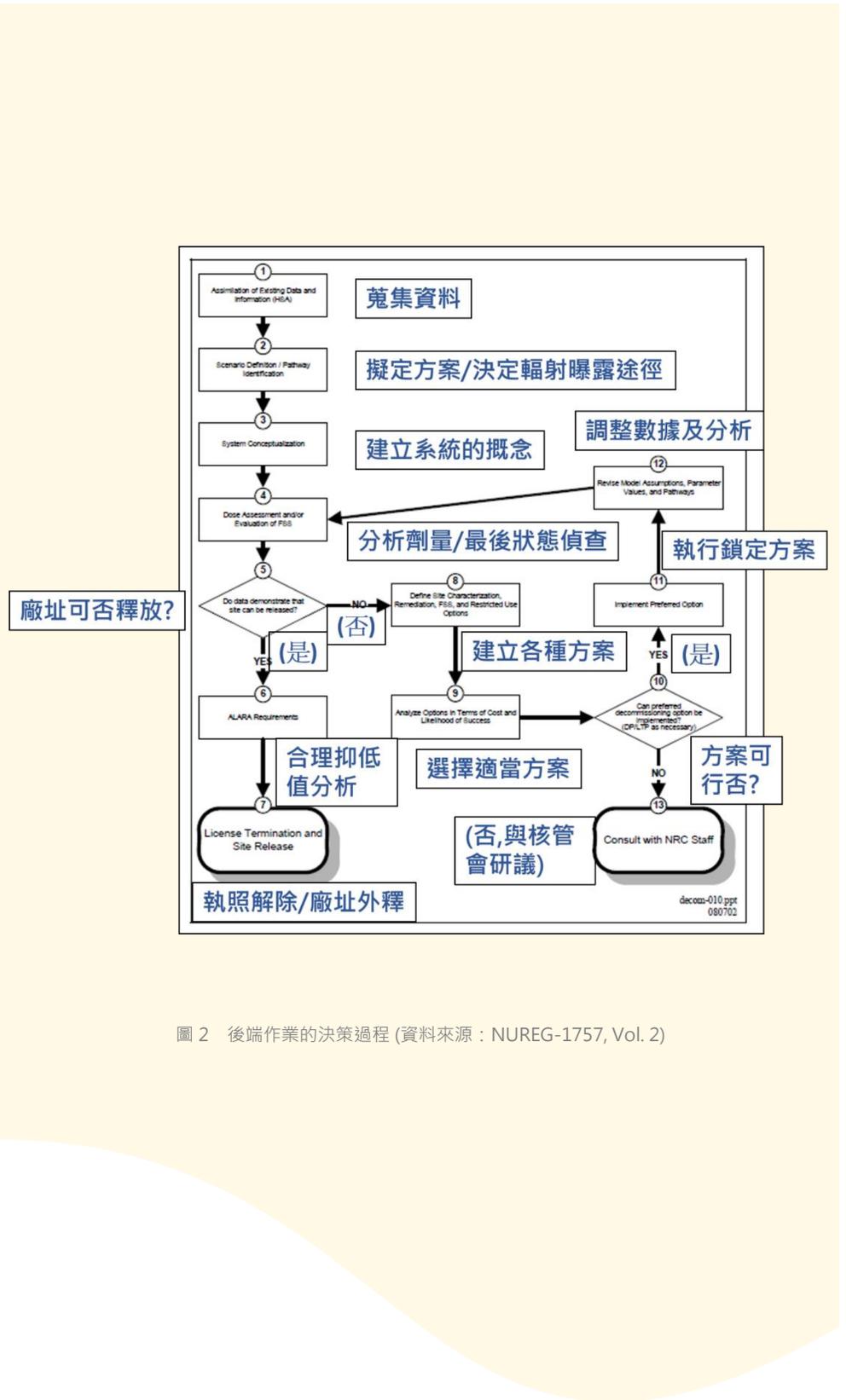


圖 2 後端作業的決策過程 (資料來源：NUREG-1757, Vol. 2)



圖 3 美國核能電廠除役三階段  
(圖片來源：NUREG/BR-0521, Rev. 1)

### 電廠在除役中的執照修訂

在除役的過程中，廠方按照規定必須依照上述兩段式的步驟，呈交核管會有關的除役計劃。其中除役作業報告書 (PSDAR) 規範電廠在硬體設施方面的除役作業，大部分工作的執行屬於廠方責任；而後端的作業則是依照廠方呈送的執照解除計畫書 (LTP)，經過核管會的審核與批准 (依據 NUREG-1700 除役審核報告書的規範) 執行。執照解除計畫書在除役法規上是重要的一環，它規範修訂現行執照內容的步驟以達成執照解除的目標。因此，後端作業對核管會而言，乃是相當重要的工作，它經由這步驟盡到電廠除役的最後把關責任。

一般而言，核管會執照審核的過程依雙軌制併行：一是經過電廠的終期安全分析報告 (FSAR) 的修訂；二是終期環評報告 (FEIS) 的審核。在除役的過程中，由於電廠各方面功能的遞減，它現有的執照也需要隨著這個改變而作修訂，這個修正的步驟同樣也依據雙軌的審核方式進行，也就是說電廠的 FSAR 和 FEIS 都要反映除役作業的情況而作修正，藉此修訂電廠執照，當然電廠相關的運作程序與規範也要隨著修訂。

### 除役後端作業細節

除役後端作業比較詳細的指導文件為除役綜合指南 (NUREG-1757) 特別是第二冊 (Vol. 2)，此文件提供了最重要的後端除役技術資訊及指南，包含了法規規定在殘餘輻射值上所須遵守的各項議題，例如：如何將廠址環境利用適當的軟體進行曝露途徑及輻射劑量的分析、如何執行廠址的輻射偵測

及調查、如何做出合理抑低分析 (ALARA Analysis)、如何考慮廠址部分外釋的可能、以及如何處理地下污染的狀況等等。更詳細的規範和指導文件則必須參照諸如 RESRAD 程式在輻射劑量計算模式上的應用以及多部會輻射偵測及廠址調查手冊 (MARSSIM Manual)。

以上後端除役作業必須依賴不同的技術用以證明對法規的遵守，特別是 10 CFR 20 Subpart E 所規範的殘餘輻射值的標準，也就是廠址無條件外釋 (非限制性使用) 的標準是個人年劑量 0.25 毫西弗，另加合理抑低 (ALARA) 的考量。依據 MARSSIM 的觀念，圖三解釋了這些技術在後端除役的關聯性。

在實際的運作上有三件要素：(一) 從輻射劑量轉換成活度 (即是導出濃度指引水平, DCGL)；(二) 用偵測及取樣方式測量出輻射數據；(三) 運用統計學解釋測定的結果從而做出決定。當然這些的運用必須在硬體上得到實際執行的支持，例如除污的方式與技術。這些不同的技術及詳細的規範就在下段中一一討論。

### 導出濃度指引水平 (DCGL)

導出濃度指引水平 (Derived Concentration Guideline Level, DCGL) 是放射性核種在受污染介質的表面或體積內所呈現的活度，這個活度值是直接由法規設定的輻射劑量或風險值所導出。如果廠址外釋屬於非限制使用，它的導出濃度指引水平就按照個人年劑量 0.25 毫西弗 (取自除役後一千年內的最高劑量) 推導而得。

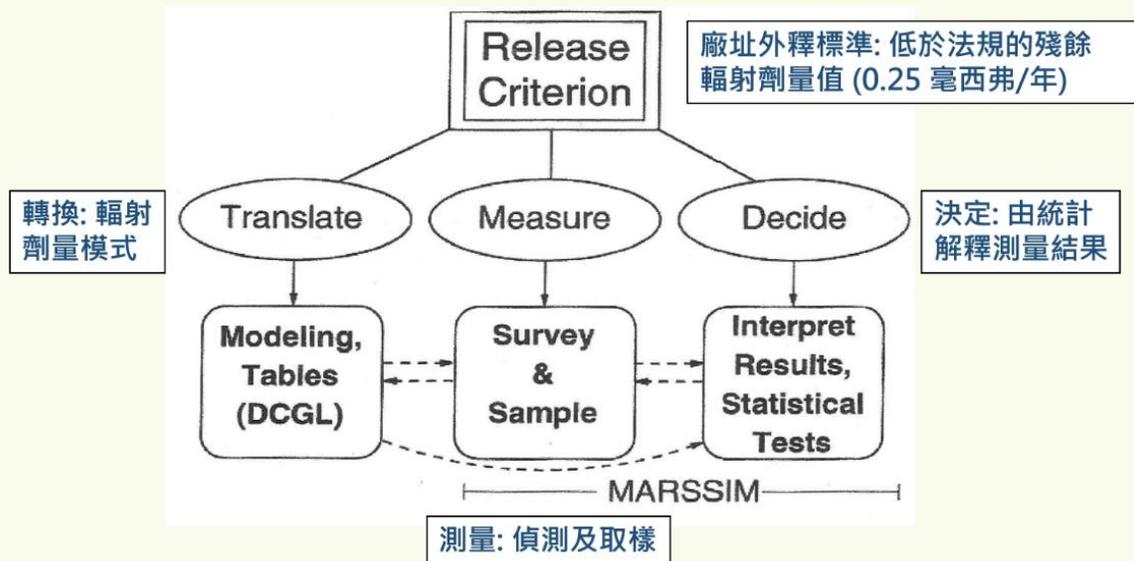


圖 4 各項技術在後端除役的關聯性 (取自 MARSSIM 手冊)

導出濃度指引水平 (DCGL) 的計算方式如下：

$$DSR = (\text{Peak Dose}) / \text{Source}, (\text{Dose}/\text{Bq}/\text{cm}^3)$$

$$DCGL = (\text{Dose Criterion}) / \text{DSR}, (\text{Bq}/\text{cm}^3)$$

以上 DSR 代表了輻射劑量對核種活度的比 (以體積污染為例) · 導出濃度指引水平 (DCGL) 則是直接取自法規劑量值 (Dose Criteria; 也就是 0.25 毫西弗) 和 DSR 的比。圖四 解釋了以鈾-238 為例 (其劑量的最高值發生於一千年後) · 主要是經由地下水的飲用 (鈾-238 會產生一系列的子核 · 因而隨著時間劑量值增高)

DSR 或 DCGL 都可用 RESRAD 程式計算導出。當然我們必須了解 RESRAD 是個複雜的程式 · 需要徹底了解該程式的應用 · 才能適當地將一個廠址的特性具體的反映在程式的輸入參數中 · 詳細的技術內涵及解說請參閱

RESRAD 手冊。另外核管會的除役綜合指南報告書 (NUREG-1757 Vol. 2; 輻射特性, 偵查及殘餘法定輻射值的決定) 也提供了相當有用的政策及技術上的指導。

### 輻射偵測及實地調查的決策

MARSSIM (Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual) 是由美國多部會發展出來的技術規範手冊 · 它著重於廠址輻射偵測及廠址調查 · 並用以確認在法規上殘餘輻射值的遵守 · 尤其在廠址的最終狀態調查 (Final Status Survey; FSS) 上 MARSSIM 提供詳盡的技術指引 · MARSSIM 所規範的調查適用於土壤 (15 公分內)或建築物表層上的污染。

廠址的輻射偵測及偵查方式及步驟如下：

- (一) 廠址歷史評估 (Historical Site Assessment) – 這是偵查中最開初始的作業 · 雖然不包括儀器的偵測 · 然而在整體的偵查中是相當重要的一環 · 它的目的是勾劃出廠址上可能污染的大致的輪廓 · 同時劃出受污染區與未受污染區 · 以利爾後的各項偵測作業。
- (二) 範圍偵檢 (Scoping Survey) – 這項偵測的目的是提供初級的污染資料以供後續的作業。
- (三) 特性偵檢 (Characterization Survey) – 這項作業是對廠址的污染做最詳細的偵測 · 包括重要的核種及污染的數據 · 以提供後端除污的決策依據。
- (四) 改善行動輔助偵檢 (remediation Support Survey) – 這項作業是在實際支援廠址除污整治的改善

行動，以期達到導出濃度指引水平的標準。

**(五) 最終狀態偵檢 (Final Status Survey)** – 這項作業的目的是廠方利用偵測數據及統計學理，用以證明廠址上的殘餘污染不超過法規的限值。

**(六) 驗證偵檢 (Verification or Confirmatory Survey)** – 這是由管制單位依據廠方提供的數據做了獨立的確認驗證偵檢。

其中 (一)至(五)項由廠方執行，最後一項則是由管制單位執行。

MARSSIM 對於數據品質目標 (Data Quality Objective) 程序有著相當嚴格的要求與控管，這些包括了作業團隊的組織、偵查的策略與方式、人員的訓練、儀器的使用及維修、數據的蒐集及分析、紀錄的保持等等。在這方面詳細的規範請參照 MARSSIM 手冊，另外核管會的除役綜合指南報告書 (NUREG-1757 Vol. 2) 也有相當詳細的討論。

### 除役的除污方式與技術

雖然除污方式與技術不在法規的範疇裡面，這方面的資訊對除役作業卻有著很大的幫助，在此作個大致的介紹。

一般而言選擇除污的方式會根據下列的因素考量：安全、效率、經濟效益、廢料的減量、可行性、再加上廠址的特殊性及除污的對象。除污科技相當發達，大致可分為下列四類：

- 化學除污 – 特別用於閉路系統的除污作業，例如主要的系統管路一般會應用化學藥劑去除污染，此技術相當有效而且具有高度的經濟效益。
- 電解除污 – 一般而言此除污技術屬於化學除污的一種，但需要電源的輔助，利用電極的原理得到除污的效果。通常用於鋼鐵或是鋁板表層的除污。
- 機械及手工除污 – 除役作業最常使用此除污技術。現有的科技已將此技術發展為多元性的應用，因此市面上可以發現林林總總的除污方式

與技術，並提供各式的除污選項。也因此，它也可以和其他技術一併使用達到最佳效果，在應用此技術時要特別注意空氣的污染與控管。

- 金屬鑄鎔除污 – 此一技術特別適用於有輕微污染的大量金屬 (例如鋼鐵或鋁的低鎔點金屬)，金屬的鑄鎔能有效的移除污染物質而達到金屬的回收或再利用。

總而言之，現有的除役技術相當多，技術選擇有賴於多方的考量，在除污的成效與經濟的考量中做出慎重的評估。這些考量在除役的各階段中，因所關注的對象不同而有所差異。

### 除役的核廢料產生與處置

除役的過程中會衍生的一項相當重要議題就是如何處理作業中產生的核廢料，這些包括了高階核廢料 (用過核燃料棒)和大量 (由數萬到數十萬桶)的低階核廢料 (見表一)。核廢料的處理、貯存以及最終處置議題在將來會遇到相當大的挑戰，因此在核廢料的處理上應該做出長遠的準備。

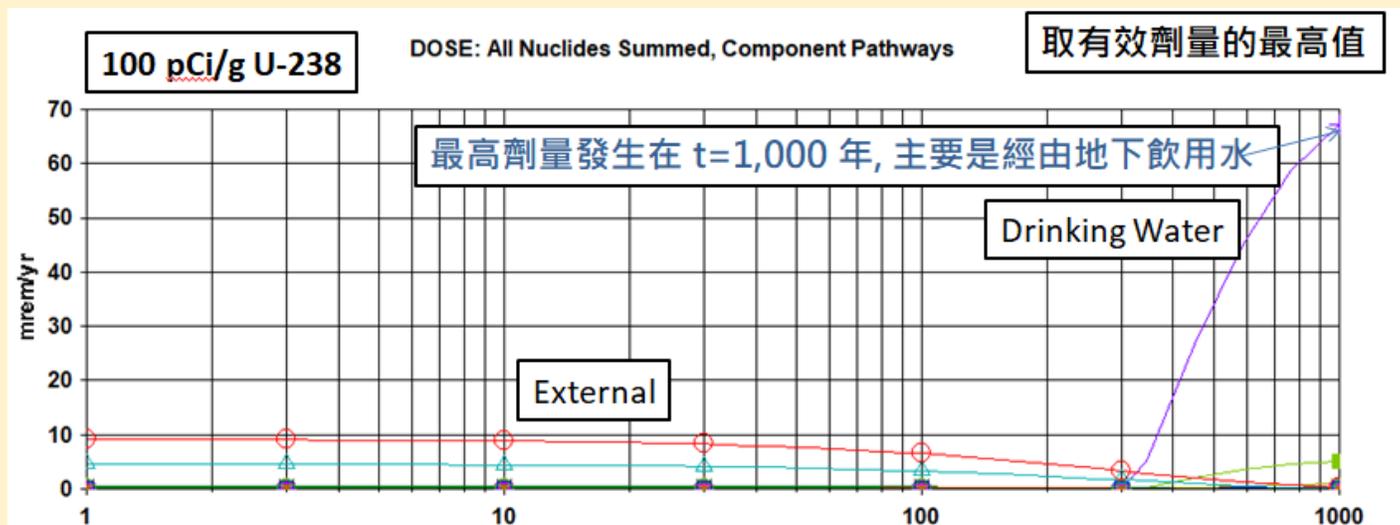


圖 5 RESRAD 程式計算範例

## 結語

核能發電廠的除役是一個相當繁雜且具有挑戰性的大工程，因此除役前需作出充分的準備及嚴謹的規劃，這些準備包括對相關法規及除役作業細節的了解、訂定各項除役作業的作業程序、熟習除役所需的技術及其運用、以及組織與領導的行政作業等等，當然也要保證擁有充足的除役基金得以在數十年內完成除役工作。

特別不可輕忽的是準備如何處置可能產生的大量核廢料，對此我們得千萬切記：非核家園 ≠ 無核家園。廢料的產生是除役的必然結果，如何適當的處理核廢料乃是除役工作上的一項重要挑戰，這項認知需要在各階層的溝通上作出清楚的交代與準備。

本文嘗試勾劃除役各項議題的梗概，希望有興趣的讀者可以利用本文的參考文件更深入的了解除役在各方面的

規範。讀者如果想更進一步的了解一些以上所提的除役技術在實際面的應用，可以考慮報名相關的訓練課程，例如：

- RESRAD 訓練課程 (阿岡國家實驗室(ANL)開班)  
<http://resrad.evs.anl.gov/trainin/g/>
- MARSSIM 訓練課程 (橡樹嶺聯合大學(ORAU)開班)  
<https://www.ornl.gov/environmental-assessments-health-physics/capabilities/health-physics-training/course-marssim.aspx>
- Decommissioning and Decontamination 除役作業及除污訓練課程 (阿岡國家實驗室開班)  
<http://www.dd.anl.gov/ddtraini/ng/>

## 重要參考文獻

1. 本文中所提及的各項法規指導文獻 (NUREG 及 Regulatory Guide).
2. Yu, C., et al. (2001). User's Manual for RESRAD 6.0. Argonne National Laboratory.  
(<http://resrad.evs.anl.gov/docs/resrad6.pdf>)
3. Abelquist, E. (2014). Decommissioning Health Physics: A Handbook for MARSSIM Users.
4. NEA/OECD (1999). Decontamination Techniques Used in Decommissioning Activities, A Report by the NEA Task Group on Decontamination. Paris, France. (<https://www.oecd-nea.org/rwm/reports/1999/decontec.pdf>)
5. McGrath, R, and R. Reid (2014). Waste Management for Decommissioning of Nuclear Power Plants: An EPRI Decommissioning Program Report. Symposium on Recycling of Metals Arising from Operation and Decommissioning of Nuclear Facilities. Sweden.

表 1 核電廠除役所產生的低階核廢料比較 (資料來源：McGrath and Reid, 2014)

| 核廢料類階<br>(依照美國法規定義) | 某些歐洲電廠 (M <sup>3</sup> ) | 美國電廠<br>MAINE YANKEE (M <sup>3</sup> ) | 美國電廠<br>RANCHO SECO (M <sup>3</sup> ) |
|---------------------|--------------------------|--|---------------------------------------|
| A 類低階廢料             | 2,911                    | 90,650                                 | 17,244                                |
| B-C 類低階廢料           | 2,459                    | 570                                    | 93                                    |
| 超c類低階廢料             | 109                      | 不詳                                     | 11                                    |
| 總數                  | 5,479                    | 106,610                                | 17,348                                |
| 除役策略                | 外釋達清潔 (clearance) 標準的廢料* | 僅執行輕微的全面除污作業                           | 建築物的全面除污裝備上輕微的除污                      |

\*註: 歐洲法規訂定清潔 (clearance) 標準，准許大量低階核廢料外釋，美國法規則無此規範。



## 訓練班課程(108 年度)

放射性物質或可發生游離  
輻射設備操作人員研習班

A 組 36 小時-許可類

**A3 新竹** 帝國經貿大樓  
7 月 16 日~7 月 23 日

B 組 18 小時-登記類

**B4 新竹** 帝國經貿大樓  
3 月 6 日~3 月 8 日

**B5 高雄** 文化大學推廣部  
3 月 20 日~3 月 22 日

**B6 台北** 建國大樓

4 月 10 日~4 月 12 日

**B7 台中** 文化大學推廣部  
4 月 24 日~4 月 26 日

**B8 高雄** 文化大學推廣部  
5 月 8 日~5 月 10 日

**B9 新竹** 帝國經貿大樓  
5 月 15 日~5 月 17 日

**B10 台北** 建國大樓  
6 月 4 日~6 月 6 日

**B11 台中** 文化大學推廣部  
6 月 26 日~6 月 28 日

輻射防護專業人員訓練班：  
輻防員(108 小時) / 輻防師  
(144 小時)

**員 35 期**

新竹 帝國經貿大樓  
第一階段

7 月 1 日~5 日

第二階段

7 月 8 日~12 日

第三階段

7 月 29 日~8 月 2 日

第四階段

8 月 5 日~8 月 8 日

**進階 22**

新竹 帝國經貿大樓  
第一階段

8 月 14 日~8 月 16 日

第二階段

8 月 19 日~8 月 21 日

輻射防護繼續教育訓練班  
(3/6 小時)

新竹 清華大學

3 月 11 日(上午&下午)

台北 建國大樓

3 月 15 日(上午&下午)

高雄 科學工藝博物館南館

3 月 29 日(上午&下午)

台中 文化大學推廣部

4 月 16 日(上午&下午)

台北 建國大樓

5 月 24 日(上午&下午)

高雄 科學工藝博物館南館

6 月 14 日(上午&下午)

新竹 清華大學

6 月 21 日(上午&下午)

鋼鐵建材輻射偵檢人員訓  
練班

**鋼 1 高雄** 文化大學推廣部

3 月 27~3 月 28 日

**鋼 2 新竹** 帝國經貿大樓

4 月 17~4 月 18 日

上課地點

台北

建國大樓：台北市館前路  
28 號

新竹

帝國經貿大樓：新竹市光復  
路二段 295 號 20 樓

台中

文化大學推廣部：台中市西  
屯區台灣大道三段 658 號

高雄

國立科學工藝博物館-南館：  
高雄市三民區九如一路  
797 號

文化大學推廣部高雄教育  
中心：高雄市前金區中正  
四路 215 號 3 樓

課程安排問題，請聯絡本會，電話 (03) 572-2224

分機 313 李貞君 (繼續教育)；

314 林珏汶 (專業人員)；

315 邱靜宜 (鋼鐵建材、放射性物質與游離輻射設備)

傳真 (03) 572-2521315



## 輻防新聞廣場

### 最新證照考試日期與榜單

- 行政院原子能委員會「108 年放射性廢棄物處理設施運轉人員測驗公告及簡章」。[訊息連結](#)

「108 年放射性廢棄物處理設施運轉人員測驗」定於 108 年 6 月 14 日舉行，報名日期為 108 年 4 月 22 日至 5 月 3 日，相關事項請點選下方(相關連結)詳閱公告及簡章。

相關連結：[108 年度放射性廢棄物處理設施運轉人員測驗](#) (發布日期 108 年 3 月 20 日)

### 國內新聞

- 行政院原子能委員會發布有關 108 年 2 月 21 日媒體轉載「心臟斷層掃描做一次 輻射量是核災食品的 8 萬倍？」之回應說明。[訊息連結](#)

有關電子媒體轉載之【部分錯誤】媒體報導「心臟斷層掃描做一次 輻射量是核災區食品的 8 萬倍」？內文提及原能會製作之醫療游離輻射劑量比較圖數值更新問題，原能會感謝各界對醫療輻射劑量之關注及提供寶貴意見，並本於游離輻射安全主管機關職責，就相關內容回應說明如下：

一、原能會製作醫療游離輻射劑量比較圖之目的，係本於保障民眾健康之角度，使民眾瞭解輻射醫療檢查雖然有其正當性，但因為會接受到不同程度的輻射劑量，所以仍應在醫師的醫囑下接受檢查，而非盲目要求醫師開立輻射檢查。就原能會網頁上公布的之醫療游離輻射劑量比較圖，係先前引用北美放射醫學會 (RSNA) 對傳統電腦斷層掃描心臟冠狀動脈血管攝影劑量調查資料，惟隨著近年電腦斷層儀器設備推陳出新及影像技術快速進步，目前放射診斷的劑量確實有降低之趨勢。

二、承上，根據美國放射醫學會 (ACR) 與北美放射醫學會 (RSNA) 專家審視認可之醫療資訊網 (<https://www.radiologyinfo.org>) 數據顯示，電腦斷層掃描檢查在不同掃描檢查模式下，因設定之參數不同，所得到的劑量也會有所不同，以電腦斷層掃描心臟冠狀動脈血管攝影劑量調查資料為例，其劑量約為 12 毫西弗，而電腦斷層掃描心臟鈣化分析檢查，則約為 3 毫西弗。

三、原能會自 94 年迄今，為提升輻射醫療曝露品質，持續推動輻射醫療曝露品保作業，要求醫療院所輻射醫療設備應有最適化的劑量輸出，以保障民眾健康。目前本會也蒐集若干國際間電腦斷層掃描檢查劑量資料，惟為求慎重，刻正請中華民國放射線醫學會、中華民國核醫學學會與中華民國醫學物理學會等專業醫學會協助確認，待確認後將儘快更新醫療劑量資訊，提供最新數據予民眾參用。(發布日期 108 年 2 月 23 日)

➤ 行政院原子能委員會發布有關媒體報導「蘭嶼核廢料遷移延宕 原能會再罰台電 5 千萬」之回應說明。[訊息連結](#)

有關媒體刊載「蘭嶼核廢料遷移延宕 原能會再罰台電 5 千萬」報導，原能會本於核能安全主管機關職責，謹就相關報導內容回應說明如下：

一、台電公司依放射性物料管理法(簡稱物管法)第 29 條第 1 項規定，具有依低放處置計畫時程切實推動之法定義務。台電公司低放處置選址作業，長期來因地方政府未能配合，未能選定場址，致使蘭嶼核廢料未能遷出，原能會依物管法對低放處置計畫負有監督管制之責，依法開罰台電公司 5 千萬，旨在督促台電公司加強與地方政府及民眾溝通。

二、台電公司低放處置已依客觀標準選出台東達仁及金門烏坵二處建議候選場址，選址關鍵在於加強地方溝通協調，選址回頭重新辦理，並無助於解決地方溝通協調為主的選址問題。再者，台電公司辦理低放選址作業時，於 98 年間已有因公告建議候選場址不足，致選址作業退回至潛在場址篩選階段重新辦理，顯見選址條例並非沒有回頭機制。

三、國際核廢處置選址作業主流，採與地方溝通協商，建立共識為主，並以公正組織、公開程序及客觀標準方式辦理，選址條例並非絕對必要。目前社會各界對研修選址條例意見不一，未來若能建立共識並有助於選址作業，將會積極辦理選址條例研修或制定作業。另參考世界高放廢棄物處置先進國家，包括瑞典、芬蘭、法國等並未制定選址條例，選址專責機構依公正的組織體、公開參與程序及客觀的標準之選址原則，積極與地方溝通說明後，均得以選定處置場址，制定選址條例亦非絕對必要。

四、台電高放處置計畫剛邁入選址階段，原能會已請經濟部及台電公司，參照國際核廢處置選址成功經驗，以公正組織、公開程序及客觀標準，先辦理後續建議候選場址的選址作業。

五、原能會為核能安全監督與管制機關，已制定「高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」，明確規範用過核子燃料最終處置的安全標準，並訂定「高放最終處置場址規範」，供台電公司執行最終處置選址之依循，可供台電公司做為選址的客觀標準。(發布日期 108 年 3 月 2 日)

➤ 行政院原子能委員會發布 108 年 3 月 23 日有關媒體刊載「核二廠白天開除役說明會 晚上摸黑運 200 燃料束進場」之回應說明。[訊息連結](#)

有關 108 年 3 月 23 日「核二廠白天開除役說明會 晚上摸黑運 200 燃料束進場」媒體內容報導，原能會本於核能安全主管機關職責，謹就相關報導內容回應說明如下：

一、原能會於今(108)年 3 月 22 日於萬里區公所舉辦核二廠除役計畫審查地方說明會，係為落實非核家園政策，做好資訊公開並加強公眾參與，主動辦理的除役審查說明會活動。

二、另台電公司 3 月 23 日凌晨執行的核二廠燃料運送作業，是為維持核電廠正常運轉的例行作業，不影響除役規劃。兩項作業之間並無關聯性，惟因說明會與運送作業辦理時程相近，致使外界誤解。三、原能會於 3 月 22 日在萬里區公所舉辦核二廠除役計畫審查地方說明會，係依規劃於進行核二廠除役計畫審查作業期間，為聽取地方鄉親與公眾意見所辦理的活動之一。台電公司依「核子反應器設施管制法」規定於去年 12 月 27 日提出除役許可申請。

四、原能會現正就核二廠除役計畫進行嚴格審查中。原能會為落實資訊公開及加強公眾參與，已將核二廠除役計畫公布於對外網頁之「核能電廠除役」專區及函送地方行政機關，供地方行政機關與大眾參閱，後續也會依審查進程陸續公布相

關資訊，同時也會持續辦理現場查訪與說明會等之公眾參與作業。

五、台電公司於 108 年 3 月 23 日凌晨執行核二廠 1 號機第 26 批次填換核子燃料共 192 束的運送作業，係屬核電廠正常運轉的例行作業。台電公司依據「核子燃料運作安全管理規則」規定提出申請，經原能會核准後實施。

六、核二廠 1 號機第 26 批次填換 192 束之核子燃料裝於 8 只海運貨櫃，依據我國「核子燃料運送計畫」與「核子燃料安全管制計畫」暨國際核子保防及保安規定，於 3 月 23 日凌晨在武裝警力安全戒護及原能會審查並派員監督下，安全運抵核二廠。

七、我國自 66 年迄今核能電廠核子燃料運送作業，包含本次核二廠燃料運送，共執行 184 次，在原能會嚴格監督及警政機關之安全戒護下，均能安全達成任務。

八、原能會為全民的原能會，核電廠除役與核物料管制是專業問題，也是社會大眾關注的問題，原能會將持續秉持專業技術外，也會站在社會大眾的角度思考問題、處理問題，讓民眾可以安心放心。(發布日期 108 年 3 月 23 日)

### 國外核能新聞

➔ 2019 年 3 月歐洲核能新聞剪影。[訊息連結](#)

瑞士|核能安全督察委員會核准 Mühleberg 核電廠停機過渡運轉計畫 ENSI、Bluewin 新聞 108 年 3 月 29 日 (資料來源: [ENSI News 2019-3-29](#)、[Bluewin News 2019-3-29](#))

德國|聯邦中期貯存公司說明核廢料處置規畫

Krieszeitung-Wochenblatt 新聞 108 年 3 月 1 日 (資料來源: [Krieszeitung-Wochenblatt 2019-3-1](#))

(發布日期 108 年 4 月 11 日)

### 即時訊息與法令更新

➔ 放射性物質或可發生游離輻射設備銷售服務業者名單。[訊息連結](#)。

「放射性物質或可發生游離輻射設備銷售服務業者名單」已公布於本會網站，請點選下方(相關網站)即可下載瀏覽。

相關連結：[放射性物質或可發生游離輻射設備銷售服務業者名單](#)：(發布日期 108 年 4 月 9 日)

➔ 行政院原子能委員會輻射偵測中心辦理手提輻射偵檢器校正服務，開跑了！。[訊息連結](#)

原能會輻射偵測中心定期於每年 3、6、9 及 12 月辦理手提輻射偵檢器校正服務，本季服務期間為 3 月 4 日至 3 月 25 日。

原能會輻射偵測中心之加馬劑量校正室，係通過國家認證基金會(Taiwan Accreditation Foundation, TAF)之認證實驗室，提供手提輻射偵檢器之校正服務，並出具含有 TAF 認證標誌之校正報告。

高雄市以外之業者，如需校正當日取件之便捷服務，請先電話預約，服務電話：(07) 3709206 分機 112 或 311。

服務項目內容、收費方式請參考：[https://www.aec.gov.tw/環境輻射偵測/對外技術服務/技術服務項目--7\\_3163\\_3720.html](https://www.aec.gov.tw/環境輻射偵測/對外技術服務/技術服務項目--7_3163_3720.html) (發布日期 108 年 2 月 21 日)

# 場址歷史評估簡介

作者 尹學禮

輻射防護協會顧問

我國核能一廠一號機運轉執照於 107 年 12 月 5 日屆期，正式邁入除役階段。除役過程中的輻射特性調查攸關除役完成後土地是否可以外釋之決定，本文摘述陳士友教授於「核能電廠除役作業與管制規範」一文中所提到的 MARSSIM 第三章場址歷史評估，供對核電廠除役工作有興趣的朋友們參考。

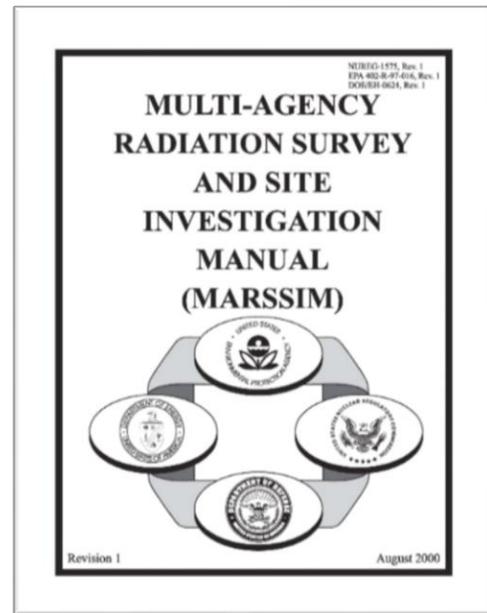


圖 1 多部會輻射偵檢與場址調查手冊  
(圖片來源: [US NRC](#))

## 前言

美國核管會(NRC)、環保署(EPA)與能源部(DOE)，於西元 2000 年 8 月共同出版了「多部會輻射偵檢與場址調查手冊」(Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual, MARSSIM)，其目的是提供規劃、執行、評估及文件控管等相關資訊，以確認建物表面與表層土壤之最終輻射偵檢，能符合以劑量或風險為基準之相關法規或標準，並能促進資源的有效應用。這本報告是美國聯邦四個放射性物質管制權責單位核管會、環保署、能源部與國防部所共同制定的一致性之文件。惟 MARSSIM 僅針對建物表面與表層土壤為主要的介質，只考量輻射有關的危害，透過最終狀態之偵檢，作為判斷場址是否符合外釋標準的依據。

MARSSIM 中之輻射偵檢與場址調查(RSSI)，其流程係採漸進方式，首先進行者即為場址歷史評估(HSA)，接續進

行範圍偵檢、特性偵檢等，最後是最終狀態偵檢。場址歷史評估是一項調查工作，目的是收集場址自開始運轉迄今的完整歷史資料，主要目標為：

- 確認污染的潛在來源
- 判定場址是否對人類的健康有威脅
- 初步分類場址或偵檢單元為受影響與未受影響地區
- 提供範圍與特性偵檢設計的參考數據
- 評估污染遷移的可能性
- 確認與調查與場址相關的額外潛在於放射性場址

## 資料品質目標

在 HSA 過程中，數據品質目標(Data Quality Objectives, DQO)的流程，有助於指導資料蒐集之規劃。HSA-DQO 預期將提供規劃小組之選定，場址問題的簡述，以及初步將場址或偵檢單元分為受影響與未受影響區。

數據品質目標之規劃小組由各技術領域專家所組成，並應包括利害相關者代表的參與，一旦成立規劃小組後就應考慮公眾參與，以因應後續之評估與可能之偵檢作業。

## 場址之確認

對潛在具放射性之場址，可依下列方式加以確認：

1. 經授權擁有或處理放射性物質的紀錄 (如持有 NRC 或 NRC 協議州政府的執照等)。
2. 陳報給政府機構有關放射性物質可能之外釋。
3. 依超級基金補償再授權法案(SARA 第 105(d)節)之人民陳情書。
4. 地面與空中之放射性偵測。
5. 洽詢有關場址的訊息。
6. 審閱 EPA 之環境輻射偵檢系統資料庫(ERAMS)。

## 初步之 HSA 調查

初步之 HSA 調查是有限範圍的調查作業，主要目的是蒐集設施或場址及其周圍的資料，以供將場址或偵檢單元初步分類為受影響區與未受影響區，在後續過程中再將受影響區分類為第 1 級、第 2 級及第 3 級。下述問題可供初步 HSA 調查時參考：

1. 場址是否曾被核准作放射性物質的製造、使用或銷售？
2. 場址內是否曾被核准處理或焚化放射性物質？是否有其作業的證據？
3. 場址是否曾有排放之深井或相關的核准？
4. 場址是否曾被核准從事非牙科或非醫療 X-光機之輻射產生裝置或放射性物質的研究？
5. 場址是否曾被核准貯存或處理土壤水份密度計 (銻-鈹或鈾-鈹中子射源)或厚度監測計？
6. 場址過去是否曾以活化方式生產放射性物質？
7. 場址中是否貯存有放射性射源？
8. 場址是否有涉及曼哈頓計畫或任何曼哈頓工程區作業的證據(1942-1946)？
9. 場址是否曾涉及支援核武的測試(1945-1962)？
10. 場址中是否有設施曾做為武器貯存區？場址是否曾經執行武器的維護保養？
11. 場址是否執行過放射性污染船舶、車輛或飛機之除污、維修、或貯存？
12. 場址或場址附近是否有飛機意外事故的紀錄(例如：耗乏鈾平衡錘、鈦合金、鐳儀表版)？
13. 場址是否曾有過核醫藥物之製造、貯存、搬遷或處理？

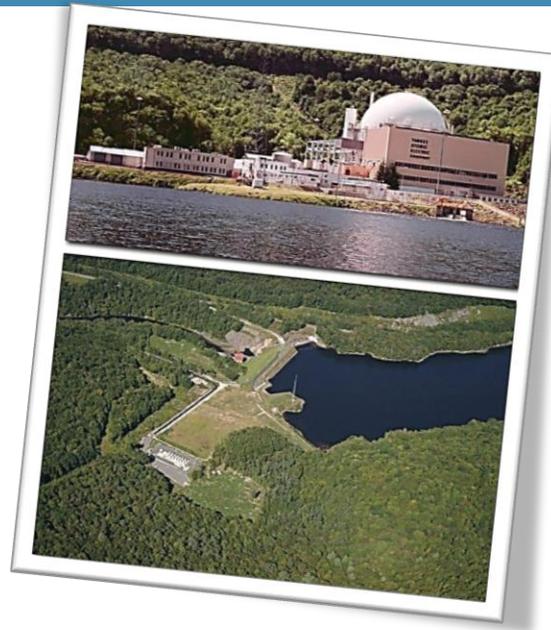


圖 2 Yankee Rowe 核電廠除役前後  
場址照片  
(圖片來源: [Masslive](#))

14. 場址是否曾進行動物研究？
15. 場址是否曾生產、研究、測試或貯存鈾、鈾或鐳混合物(NORM)？
16. 場址是否曾涉及加工或製造天然放射性物質，或鈾的開採、碾磨、或生產？
17. 場址內是否曾使用過煤或煤的產品？若有，燃燒後的煤灰或煤灰是否殘留在場內？若有，是否經雨水冲刷在場內形成水塘？
18. 場址是否曾處理過高活度的天然放射性物質(例如噴砂用的獨居石砂)？
19. 場址是否曾處理過油、天然氣工廠的管路？
20. 有無其他理由，懷疑場址受到放射性物質污染？

場址現有資料可提供污染濃度與分佈之情況，惟須注意以往偵檢與取樣資料以及度量方式與標準等，是否符合 HSA 之需求，並應了解自前次取樣後污染源情況是否有所改變。

初步之 HSA 調查可參考之資料包括設施與放射性物質之執照，設施運轉期間之各項紀錄、地圖、藍圖、不同時

間之空照圖，以及企業之相關合約與財務紀錄等。此外，可透過訪查與面談獲取第一手資料，或澄清已收集資料之正確性。洽談的對象包括經理、工程師、設施工作人員與貨車司機等。為了確保紀錄的完整，面談時可雇用訓練有素的調查員與採用說明或問答。

## 場址之勘查

場址勘查之目的是收集足夠的資料，以決定未來要採行的作業，並記錄場址具有危害(建物結構等)的情形，供未來執行偵檢工作時參考。通常此勘查適用於無法取得相關資訊的場址，例如廢棄之場址等，而對取得 NRC 執照之場址，有關資料應相當充足。準備場址勘查前，要先審查有關設施或場址已知的資料，以規劃勘察計畫。開始進行場址勘查前，應安排進入場址的適當通道並準備適宜的健康與安全計畫，視需要由地方機關通知當地民眾。應妥為準備必要之材料與設備，例如照相機、偵測儀器、空照圖、記事本與防水之墨水筆等。

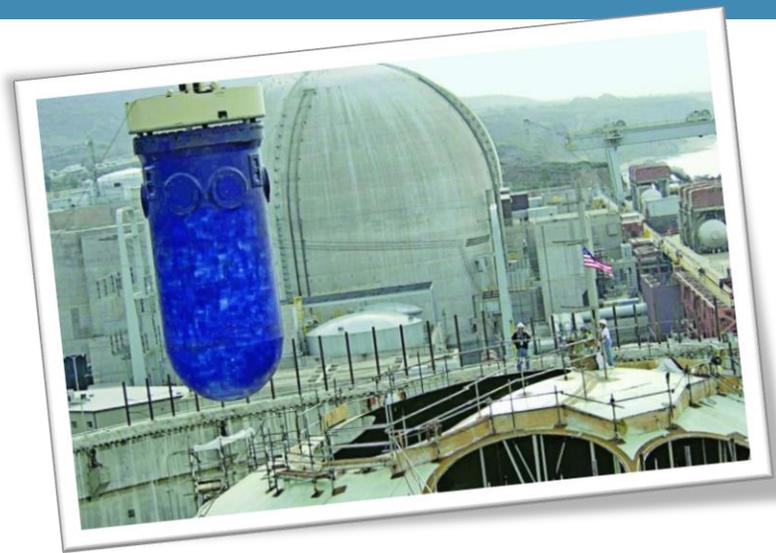


圖 3 美國 San Onofre 核電廠一號機組除役照片

(圖片來源: [Chemical & Engineering News](#); Credit: Earl S. Cryer/UPI Photo Service/Newscom)

### HSA 數據之評估

HSA 之目的是決定場址或設施的現況，其蒐集的數據也可用來區分場址是屬於需採進一步行動，或對人員健康與環境僅有輕微或沒有威脅的地區。此篩選過程可提供場址處置建議。場址運轉情況是主要影響場址是否有潛在殘餘污染的因素，若係使用未受損之密封射源，污染的可能性就很低。化工廠之管路洩漏會造成土壤污染，使用大量放射性礦物，特別是使用收集處理系統時，就可能造成地表之污染。這些均可藉由檢閱採購、運送與盤存等紀錄確認相關情況。

**確認可能的污染地區**是依 HSA 蒐集的數據，將場址初步分類為受影響與未受影響區。受影響區可能包括紀錄顯示貯存放射性物質有排放與擴散，以及曾掩埋、處理放射性物質，並可能包含其鄰接之地區。而未受影響區指合理確認不可能有殘餘放射性污染的地區，並應保留確認之書面紀錄。惟依後續累積之偵檢資料，受影響區之分類可能會據以修正。

**確認可能污染的介質**是評估放射性物質是否轉移到各類環境介質。

MARSSIM 的重點在表土與建築物表面。評估結果可分為「疑似污染」或「未受污染」。針對各種環境介質分類說明如下，惟須注意特定場址內的情況會各不相同：

1. **表土**：指場址最上層的土壤，一般指表面下 15 公分的土壤，評估確認地區是否有高或低污染的可能性(即為第 1、2、3 級地區)。
2. **次表土與環境介質**：指非表土的地下固體物質，調查的目的在定位出可能污染的垂直範圍。包括某地區之表土已確認或可能受到污染？是否有無法確認污染源的地下水？
3. **地表水**：包括小溪、河川、湖泊、海岸潮汐與海洋等。考量之問題包括廢料量是否很大？排水區是否很大？是否屬細質與黏土造成滲透率很低？是否曾發現廢棄物沈積於地表水中？地下水是否可能流至地表水？是否有分析或間接證據顯示地表水受污染等？
4. **地下水**：評估地下水一般要瞭解局部地區地質與次地表情況，如地層學，含水層及地下水使用狀況。包括廢料量是否很大？雨量是否很大？滲透率是否很高？場址是否位於

石灰岩(卡司特)地形？表面到含水層的深度？潛在污染物在地下水是否移動很快？以及是否有分析或間接證據顯示地下水受污染？

5. **空氣**：空氣很少成為污染的來源，而是評估空氣為再懸浮與放射性污染擴散的途徑。包括是否測到污染物排放至空氣中？是否有間接證據顯示污染排到空氣中等？
6. **結構物**：包括相鄰的結構物是否用來貯存或處理放射性物質？建築物未受影響的部分與可能受污染地區是否共用排水或通風系統？是否有證據顯示先前確認污染地區已經使用油漆或其他固定污染物方法進行改善？

發展場址概念模式是建立場址的圖表，包括已知污染地區、可能受污染的地區、受影響地區放射性核種的形式與濃度、可能的污染介質、與參考(背景)區的位置等，並應於平面圖中包含建物與財產邊界。此場址之分類有助於安排有限的資源用於預期可無限制外釋的地區，以及確認可能性很低或不可能無限制外釋的地區。

專業判斷是一項科學調查，能用來對歷史資料作獨立審查，輔助 HSA 做決策。合格的專業人員可來自規劃小組、專業組織、政府機構、大學、顧問公司與公益團體等。

### 決定場址調查過程的後續步驟

MARSSIM 的目的就是敘述如何證明殘餘之放射性符合外釋標準的程序與其方法，完成場址歷史評估後的下一步驟是進行偵檢規劃與設計，此部分可參考 MARSSIM 第 5 章。例如可先評估範圍偵檢之目的來決定是否須做進一步之範圍偵檢，包括目前之污染是否需進一步評估，是否需要除污與

規劃進一步偵檢所需的工作。如果這些資訊均已藉由 HSA 得到，就不須做範圍偵檢。通常外釋之決策須依專業判斷，而最終由管制主管機關來決定。

### 場址歷史評估報告

場址歷史評估報告之目的，旨在彙總說明有關場址的已知事項，包括 HSA 期間的執行作業、與所有研究的資料等。撰寫時應使用通俗的文字，避免專業的技術性術語。場址歷史評估報

告的內容包括執行概述、目的、特性確認、方法、以往與現在之使用情形以及相關發現等。

### 場址歷史評估報告之審查

報告之審查程序是由規劃小組推舉一位審查人員先詳細審查 HSA 報告內容的一致性，並完成品質管制的機制。第二位審查人員須具有豐富的場址評估經驗，檢視全部的資料確保其一致性，並對 HSA 報告的結論提出獨立之

評估意見。審查之品保目標是找出並改正錯誤。若審查指出報告的結論有瑕疵，HSA 調查人員與場址審查人員應再作檢查並解決不符合的情形。如審查人員的觀點與調查人員意見相左，雙方應討論取得一致的共識。對缺乏明確證明的情況，必須做保守性的判斷，以避免低估污染的存在而做出不適當的 HSA 建議。

## 補充資料



(摘選自環境保護署 土壤及地下水污染整治網)

我國第一起被發現的土壤及地下水污染是民國 72 年桃園的「鎳米事件」，後來彰化縣、台中縣及雲林縣都接續發現鎳米，當時國內尚未有完整的法規與制度。有鑑於污染事件的連續發生，環保署參考美國「超級基金」( Superfund ) 架構研擬「土壤及地下水污染整治法」，於民國 89 年 2 月 2 日公布。

然而，僅理解國內土污法對土壤及地下水污染未來的發展恐有不足，惟有更透徹了解美國超級基金相關法規的「立意」與「涵義」，才能從中汲取國外制度與經驗，進而推動污染整治的工作。美國重要的相關法規有三：(1)資源保育及回收法案(RCRA)、(2)全面性環境對策、賠償及責任法案(CERCLA)及(3)超級基金修正及再認可法案(SARA)。

美國於 1965 年制定了固體廢棄物處置法(Solid Waste Disposal Act, SWDA)，又於 1976 年修法更名為資源保育及回收法(Resource Conservation and Recovery Act, RCRA)，後經多次修正於 1984 年公布危害性與固體廢棄物修正案(Hazardous and Solid Waste

### 美國「超級基金」(superfund) 三法簡介

Amendments, HSWA)。規定廢棄物處理由州或當地政府負責，聯邦政府則負責發展或擴大再生市場。

RCRA 法案主要用於管理都市廢棄物、有害廢棄物及地下儲存桶，並提供作為廢棄物管理之依據。其目標為妥善處置廢棄物，保護人類健康及環境。

全面性環境對策、賠償及責任法案(Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act, CERCLA, 1980)又被稱為「Superfund 法案」，其產生主要因 RCRA 法只管制廢棄物的產生、運輸與最終處置，然對於已發生污染之事件無能為力，故美國政府頒布 CERCLA 法，據此著手處理已遭污染之場址。此法案具有三種法律能力：1. 對危害性物質的排放採取行動；2. 要求責任團體採取適當之措施並監督之；3. 由聯邦政府負責收回整治工程之經費。此法建立「超級基金」(Superfund)，並首度通過 16 億美金進行污染調查、研究與清理。亦規範整治方案之決策過程必須有「民眾參與」，所有整治調查及可行性研究必須公開並提供閱覽。

超級基金修正及再認可法案(Superfund Amendment and Reauthorization Act, SARA, 1986)，其主要目的為追究污染者的責任及清理有害廢棄物場址，以補強 CERCLA 法案之不足，主要修正內容包括再授權 CERCLA 五年，增加有害物質信託基金規模，原 CERCLA 授權最初五年的清理經費為 16 億美元，SARA 在下一個五年提供 85 億美元等。

有了以上的授權，美國環保署得對有害物質之潛在危害進行應變處置。而基金主要來源為石油或化學工業徵收的稅金，但針對清理所需的費用首先取自潛在責任團體。這些人或公司對場址的污染具有潛在的責任，責任程度包括自過去或現在場址的所有權、過去棄置的物質或產生的物質。如果美國環保署無法在一段合理的時間內與其完成確認或協商，則先使用信託基金，待完成清理後再向潛在責任團體追償。

# 用過核子燃料乾式貯存簡介 與混合式輻射遷移計算屏蔽 分析應用

作者 賴柏辰  
國立清華大學核子工程與科學研究所 博士生  
清華大學原科院輻防協會獎學金 107 年得主



## 用過核子燃料乾式貯存簡介

國內、外核能電廠的用過核子燃料，初期均放置於廠房內用過燃料池裡，除利用池水作為輻射屏蔽外，亦藉由冷卻水系統持續帶走用過燃料產生之衰變熱。早期興建的核能電廠，其用過燃料池多數在設計初期並未考慮足夠的存放空間容納電廠 40 年運轉容量，故需增建額外的中期貯存設施。

用過核子燃料中期貯存設施可分為濕式貯存和乾式貯存二種。國際原子能總署 (IAEA)2017 年資料顯示 (圖 1)<sup>1, 2</sup>，國際上有 27 個國家共計 151 座營運中的用過核子燃料中期貯存設施，其中濕式貯存設施有 30 座，但自 2000 年後僅有中國增設濕式貯存設施，其目的並非為燃料貯存，而是用過燃料再處理發展需求；乾式貯存設施有 121 座，多半分布於美國。此數據顯示，用過核子燃料採乾式貯存為目前國際間較普遍採用的型式。

乾式貯存設施依其是否具有廠房，劃分為露天乾貯和室內乾貯兩類。依據我國原子能委員會公告資料 (圖 2)<sup>3</sup>，截至 2018 年 6 月，國際間用過核子燃料乾式貯存設施共有 131 座，其中露天乾

貯有 95 座佔多數，室內乾貯有 36 座，比例約為 3 : 1。室內乾貯的廠房型式可為混凝土建物或鋼構建物，兩者目的性不同，前者多以貯放金屬護箱為主，建物除作為簡單遮蔽物外，本身仍需提供輻射屏蔽效益，室內乾貯多為此型式；後者搭配貯置混凝土護箱，不需具有輻射屏蔽功能，僅提供簡單遮蔽。國際間商轉案例顯示露天或室內的乾貯型式皆相當成熟，未有孰優孰劣的重大差異，經適當設計與審查皆可達到安全存放用過核子燃料的目標。

乾式貯存護箱為用過核子燃料的重要存放主體，國際間常見的護箱型式為混凝土護箱 (Concrete Cask)、金屬護箱 (Metal Cask)、混凝土模組 (Concrete Module) 及混凝土貯存窖 (Concrete Vault) (圖 3) 等 4 種。

混凝土護箱結構主要分兩部分：不鏽鋼材質的密封鋼筒 (Canister) 及具有碳鋼內襯和混凝土材質外殼的混凝土外箱。混凝土模組同樣以外部混凝土作主屏蔽，惟其採用水平擺置方式。上述兩者皆因選用熱傳導能力較差之混凝土作為主屏蔽材料，故無法經由混凝土表面進行散熱達到移熱要求，故需於密封鋼筒與

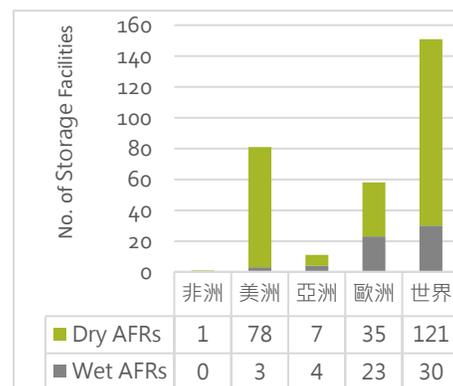


圖 1、全球用過核子燃料中期貯存設施分布 (資料來源：IAEA)

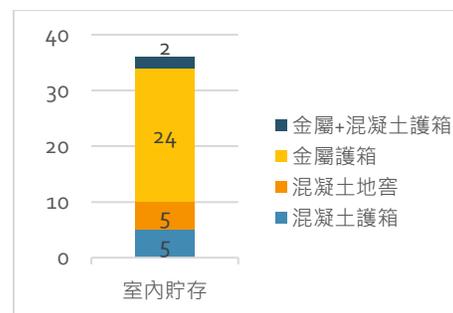
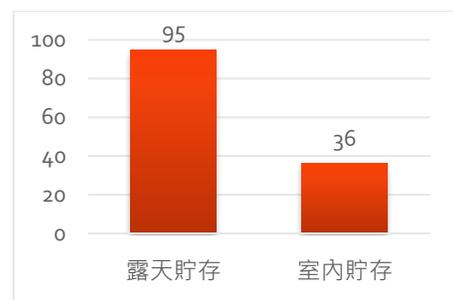


圖 2、國際乾式貯存設施統計分析 (資料來源：FCMA, 2018)



圖 3 乾貯護箱型式  
( 圖片來源: HOLTECASIA 左上 ; GNS 右上 ; Nuclear Street News Team 右下 ; PURAM 左下 )

貯存護箱間，保留足夠的間隙讓空氣流經密封鋼筒表面以自然對流的方式散熱，而在護箱上下方保留的進出氣通道即為輻射劑量率的重要貢獻之一。

金屬護箱以較厚之金屬密封容器搭配中子吸收材來滿足中子和加馬輻射的屏蔽要求，因其採用之材料多具有高熱傳導能力之鐵系金屬，使得金屬護箱能直接藉由護箱表面移除熱，金屬護箱表面為

輻射安全分析的重點區域。

就輻射屏蔽而言，混凝土護箱主要劑量貢獻來源為加馬輻射，而金屬護箱則為中子輻射。儘管來源不同，但兩種護箱皆可經由設計來符合總劑量的規範，達到安全貯存用過核子燃料的設計目標，並無優劣之差別。唯需注意未來因護箱的差異，安全審查的重點將不同，以及熱測試時應選用適當的輻射偵檢器。

### 台灣用過核子燃料與乾式貯存現況

目前台灣電力公司對於用過核子燃料的管理策略為：「近程採廠內水池貯存、中程以廠內乾式貯存、長程推動最終處置」<sup>8</sup>。

核一廠的用過燃料池經過 1987 及 1999 年兩次引進高密度燃料儲存架 (Re-racking) 擴充後，目前燃料池貯存總容量為 6,166 束，迄今已存放 6,150

表 1 台灣各核能電廠用過核子燃料束相關資料<sup>9</sup>

| 機組  |     | 商轉年  | 用過燃料池貯存容量   | 已貯存量  | 乾式貯存場設置容量 |
|-----|-----|------|-------------|-------|-----------|
| 核一廠 | 一號機 | 1978 | 6,166       | 6,150 | 1,680     |
|     | 二號機 | 1979 |             |       |           |
| 核二廠 | 一號機 | 1981 | 8796 + 880* | 9,076 | 2,349     |
|     | 二號機 | 1983 |             |       |           |
| 核三廠 | 一號機 | 1984 | 4,320       | 3,044 | -         |
|     | 二號機 | 1985 |             |       |           |

\*修改兩機組之護箱裝載池各增加 440 束貯存空間  
\*\*統計至 2019 年 2 月底

束。核二廠的用過燃料池亦經過兩次擴充(1992 及 2006 年)，貯存總量為 8,796 束，目前燃料池存量已飽和，故於 2017 年起在兩機組護箱裝載池內各增設 440 束貯存空間，使機組能維持運轉，迄今核二廠內總和已存放了 9,076 束。核三廠用過燃料池目前則尚有貯存空間。三座核能電廠用過燃料束數量相關資料列於表 1<sup>9</sup>。由於用過燃料束存放短缺的問題，核一、二廠之乾式貯存設施的建立已經是刻不容緩。

核一廠 1 期乾貯設施位於核一廠內西南方乾華溪下游左岸空地，設計為露天乾貯，預定設置 30 組混凝土護箱，預計採用 INER-HPS 護箱，每組可裝載 56 束用過燃料，共可存放 1,680 束，設施現況如圖 4。目前已完成場址興建與相關設備設置，於 2013 年通過整體

功能驗證(第一階段)，並獲原能會同意執行熱測試作業(第二階段)，但因地方政府未核發水保設施完工證明，故熱測試作業延宕至今。

核二廠 1 期乾貯設施位於廠內北方空地，設計為露天乾貯，預計設置 27 組混凝土護箱，採用 NAC/CTCIM 護箱系統，每組可裝載 87 束用過燃料，共存放 2,349 束，完工模擬如圖 5 所示。於 2015 年獲核發建造執照，但目前受地方政府影響尚無法進行現場施工。

行政院於 2016 年 9 月 2 日政策指示經濟部督促台電公司提出室內乾式貯存設施計畫，因此台電公司新規劃的核一、二廠 2 期乾貯設施，皆採室內乾貯型式，預計貯存涵蓋核電廠商轉期間的所有用過燃料<sup>8, 10</sup>。

## 應用混合式輻射遷移計算進行乾貯設施屏蔽分析

用過核子燃料乾貯相關之輻射屏蔽分析主要包含兩部分，用過核子燃料輻射源項的評估以及貯存護箱與設施的屏蔽計算，在此僅討論屏蔽計算部分。

護箱與設施的屏蔽分析是一個具有挑戰性的問題，除了複雜射源特性與幾何模型(護箱、設施整體)之外，同時還包含了深穿透(Deep Penetration)、輻射滲流(Radiation Streaming)與天空散射(Skyshine)等困難且大規模的遷移計算，依據過往累積的經驗，最佳的解決方法需仰賴先進的數值方法與高速電腦。

使用連續能量截面資料的蒙地卡羅計算通常被視為對於複雜屏蔽問題最準確的遷移計算方法，但除了相對耗時之外，



圖4 核一廠1期  
乾貯設施現況

圖5 核二廠1期  
乾貯設施示意圖



圖片來源: 台電核一廠乾式貯存計畫(上); 台電用過核子燃料乾式貯存(下)

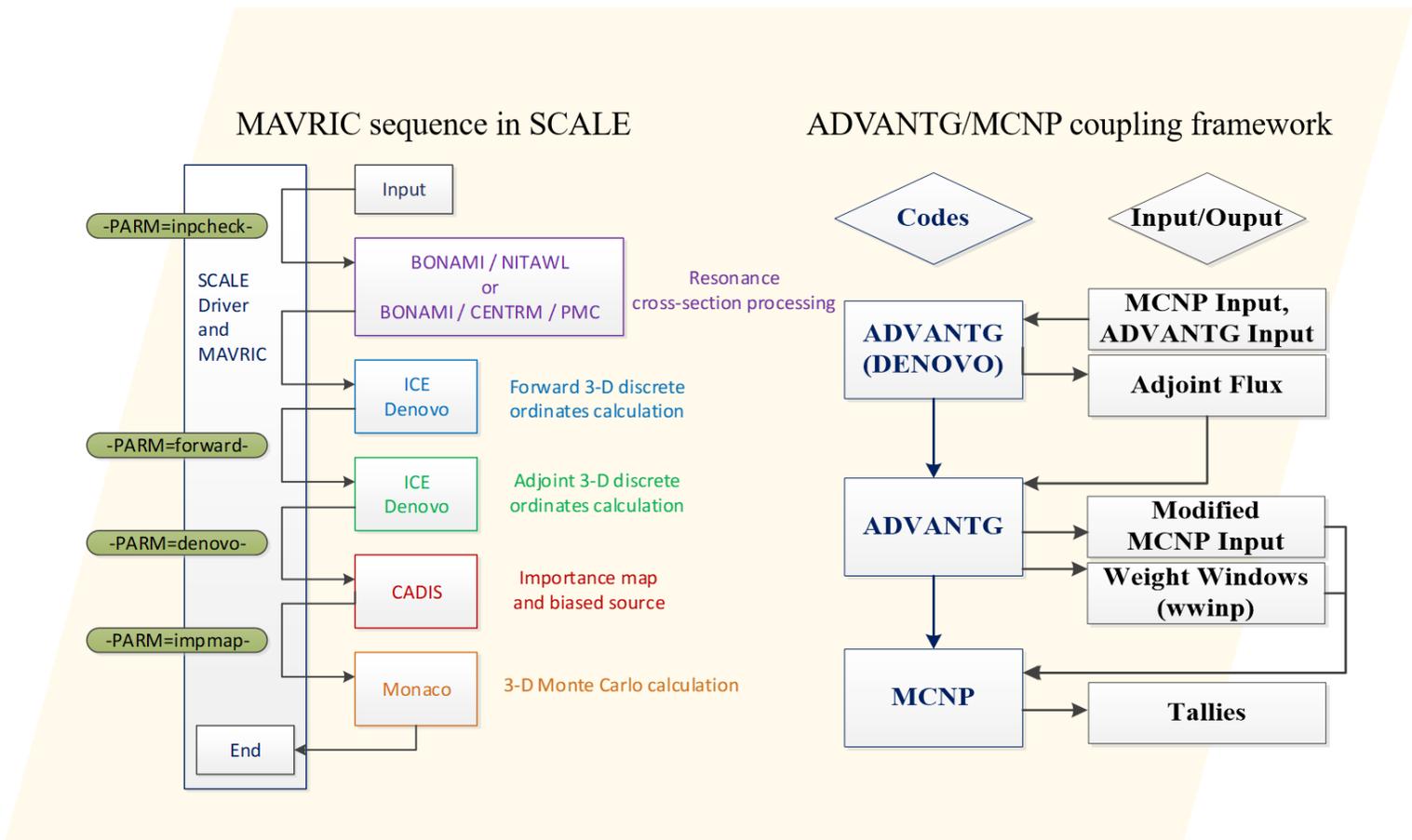


圖 6 MAVRIC/SCALE 與 ADVANTG/MCNP 序列流程圖

蒙地卡羅計算結果還有不可避免的統計誤差。針對乾貯這類複雜且龐大的輻射屏蔽問題，選擇使用蒙地卡羅程式進行模擬，若無引入有效的變異數降低技巧，可能無法在正常的電腦資源與時間限制下得到合理可信的估計值。

蒙地卡羅模擬中可應用的變異數降低技巧很多，如權重射源 (Source Biasing)、俄羅斯輪盤 / 分裂 (Russian Roulette/Splitting)、重要性取樣 (Importance Sampling) 等等。但是，變異數降低技巧的選擇與應用是非常困難的，相當程度上應用的好與壞是依靠使用者經驗累積，故有人說成功的使用

變異數降低技巧不只是一門科學更像是一門藝術！

學者 J. C. Wagner 與 A. Haghightat 等人經由一些先期的研究發展出一套新的變異數降低技巧 - CADIS (Consistent Adjoint Driven Importance Sampling) 理論<sup>11, 12</sup>。CADIS 理論結合決定論法與蒙地卡羅法兩種計算方法的優點，先以一次快速、粗略的決定論法計算求得伴隨函數 (Adjoint Function) 資訊，依此進而導出具有一致性的權重射源與重要性遷移地圖給蒙地卡羅法程式使用，藉此加速對問題描述較詳細之蒙地卡羅模擬程式。這就像先對模擬問題求解，已

經知道問題的答案後再進行粒子模擬，不浪費時間去模擬在不重要區域的粒子，將時間花在對問題相對重要的地方。

以針對核二廠 1 期乾貯護箱 (MAGNASTOR) 作表面劑量率分析為例，採用 ADVANTG/MCNP 耦合計算與 SCALE/MAVRIC 控制序列等兩套大型輻射遷移計算程式，應用 CADIS 理論，其中決定論法計算採用 Denovo 程式，再各別以 MCNP 和 Monaco 程式作蒙地卡羅模擬，其程式序列流程如圖 6。此兩套方法的優點為 Denovo 能自動化地產生適用於三維蒙地卡羅程式的權重射源分布及粒子重要性遷移地圖，

MAGNASTOR 護箱屏蔽分析模型如圖 7，內裝填 87 束用過燃料，且各燃料束依其特性區分為上端板區 (Upper End Fitting)、充氣區 (Plenum)、有效燃料區 (Effective Fuel Region)、下端板區 (Lower End Fitting) 等四區，外層有混凝土護箱屏蔽。燃料束射源項設定為安全分析報告中的設計基準燃料，進行護箱表面劑量率評估。

所有程式皆操作於同樣的電腦環境下，個人電腦裝載 Window 7 作業系統配置 3.4 GHz 中央處理器 (I7-3770) 和 16GB 記憶體。固定每種射源案例燃料中子 (Fuel Neutron, FN)、燃料光子 (Fuel Gamma, FG) 及結構光子 (Hardware Gamma, HG) 計算時間為 26 小時。護箱表面劑量率分析結果 (圖 8) 顯示，不論是側邊或是頂部，加馬輻射皆為劑量貢獻主要來源，頂部劑量率會大於側邊劑量率，圖中黑色虛線代表台灣天然背景輻射劑量率。

中子劑量率部分，護箱側邊最大值靠近於進氣口端，頂部最大值位於密封鋼筒和混凝土護箱間夾層空氣通道上方，此兩劑量高點可能為中子滲流之影響。同樣的計算時間解同一個問題，其計算結果之統計誤差大小可視為計算效率好壞之表現，研究結果發現 ADVANTG/MCNP 和 MAVRIC 計算效率相近，且兩者皆明顯優於 MCNP，MCNP 中子劑量率分布雖有較大之統計誤差，但仍可觀察出其分布和其他兩者相近。

加馬劑量率部分，護箱側邊呈現較平緩分布，中間有效燃料區域呈現一寬峰分布，進氣通道區光子滲流的影響並不像中子一樣劇烈。護箱頂部加馬劑量最高點仍為夾層空氣通道上方。三種分析方法在護箱側邊近乎呈現一致的結果，惟在高度 400 公分以上開始出現差異，此部分將在討論各射源項對加馬劑量率貢獻分布 (圖 9) 時作探討。

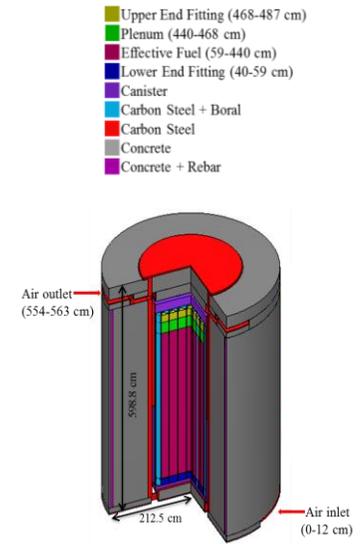


圖 7 MAGNASTOR 護箱屏蔽模型

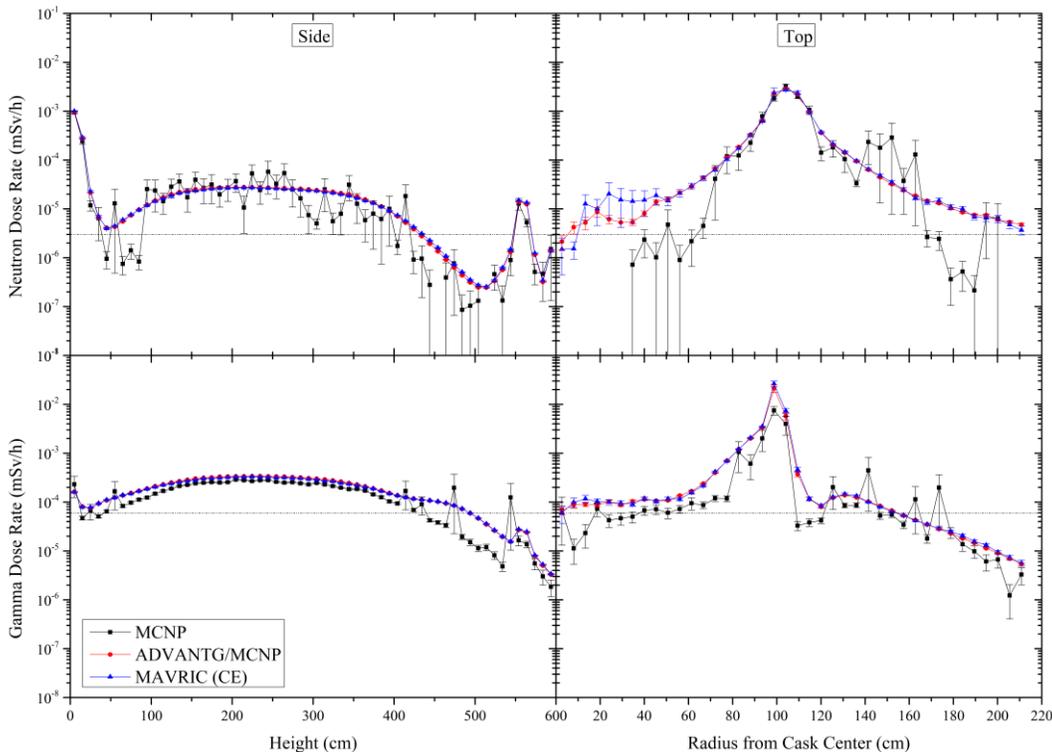


圖 8 MAGNASTOR 護箱表面劑量率分布

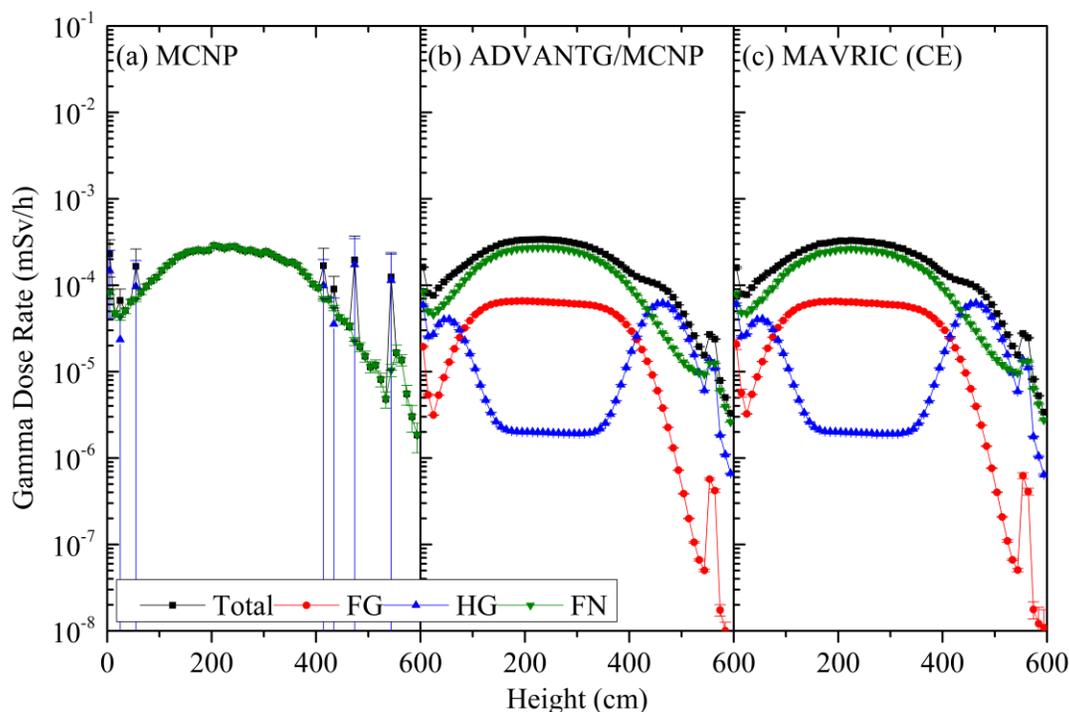


圖 7 MAGNASTOR 護箱側邊三種射源項之加馬劑量率分布

由圖 9 中 ADVANTG/MCNP 和 MAVRIC 的結果可知，除護箱側邊 450 公分以上之區域外，燃料中子產生的二次光子為主要劑量貢獻。由於護箱側邊 450 公分以上之結構光子較強且能量較高，使其成為主要劑量貢獻。ADVANTG/MCNP 和 MAVRIC 兩種方法應用了 FW-CADIS 理論，在三個射源項皆能有良好的計算結果，且結果一致。然而，MCNP 在 26 小時的計算時間內，無法得到一有意義之答案值，特別是燃料光子和結構光子射源，無法有效引導模擬粒子穿透護箱達表面有效區。

## 結論

不論台灣未來的能源政策走向為何，核電廠用過核子燃料都必須進行後續的貯存與處置，乾貯設施在其中佔有重要的角色，不論是露天乾貯或是室內乾貯，不論採用混凝土護箱或金屬護箱，其皆能藉由良好設計來符合安全貯存用過核

子燃料的目標，而應考量實際情況來進行選擇。因應台灣核能電廠將陸續進入除役階段，為了讓除役工作能順利按照規劃之時程進行，廠內乾貯設施應盡速取得共識開始建造啟用。

混合式遷移計算方法結合決定論法與蒙特卡羅法的優點，是目前公認對於困難的輻射屏蔽問題最佳的解決方案，特別是應用於用過核子燃料乾貯屏蔽分析相關的研究。但在遭遇如核一、二廠 2 期乾貯這類大型乾貯設施問題時，如何能更有效應用此方法，仍需做進一步的研究探討。

## 參考文獻

- IAEA, "NUCLEAR TECHNOLOGY REVIEW 2017" GC(61)/INF/4, 2017.
- IAEA, List of Nuclear Fuel Cycle Facilities, <https://infcis.iaea.org/NFCIS/Facilities>
- 行政院原子能委員會, *用過核燃料露天與室內貯存安全比較分析*, 2018.
- <https://www.nacintl.com/ums>
- <https://www.gns.de/language=en/24394>
- <https://nuclearstreet.com/>
- <http://www.rhk.hu/en/our-premises/isfs/>
- 台灣電力公司, 核能後端營運, <http://nbmi.taipower.com.tw/>
- 行政院原子能委員會, *核能電廠用過核子燃料貯存表*, 2019, <https://www.aec.gov.tw/>
- 台灣電力公司, <https://www.taipower.com.tw/tc/index.aspx>
- J. C. Wanger and A. Haghghat, "Automated Variance Reduction of Monte Carlo Shielding Calculations Using the Discrete Ordinates Adjoint Function," *Nuclear Science and Engineering*, vol. 128, pp. 186-208, 1998.
- A. Haghghat and J. C. Wagner, "Monte Carlo variance reduction with deterministic importance functions," *Progress in Nuclear Energy*, vol. 42, no. 1, pp. 25-53, 2003.

發行人  
張似璵

執行編輯  
陳 璋

編輯委員  
尹學禮  
江祥輝  
劉代欽  
蔡惠予  
魯經邦



**出版單位**

財團法人中華民國輻射防護協會

行政院新聞局 出版事業登記證  
局版北市誌字 第柒伍零號

**地址**

30017 新竹市光復路二段 295 號 15 樓之 1

03-5722224 電話 | 03-5722521 傳真

01486683 統編

rpa.newsletter@gmail.com 電郵 | www.rpa.org.tw 網站