

# 輻射防護簡訊

第 177 期

出刊日期 112 年 10 月 15 日

## 本期內容

## CONTENT

### 輻射犯罪現場重建概述

1

輻射犯罪現場重建是嚴謹的科學推理過程，它是基於輻射的科學原理、理論架構和邏輯推理，將輻射現場物證進行分析、研判，並整合所有相關的調查資訊，進行最終的輻射犯罪現場重建。

### 小型模組核反應器的特性介紹

4

與一些再生能源如風能和太陽能比較，小型模組核反應器(SMR)在效率、經濟性和靈活性方面具有獨特的屬性。它提供可調度的能源，可以與混合能源系統中的可再生能源配對並提高其效率。SMR 在清潔能源轉型中發揮關鍵作用，同時也可幫助持續發展零碳排放的目標。

### 訓練班課程

6

公告本會各項訓練班開課時間

### 輻協新聞廣場

7

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

### 小型模組化核反應器在國際上的發展現況

10

目前世界各地已有 70 多種商業 SMR 設計和建造的開發，針對不同的輸出和不同的應用，例如電力、混合能源系統、供暖、海水淡化和工業應用的蒸汽等用途。

### 加速器運轉引發物質活化的分析：週期性與連續照射情節的差異與修正

14

蒙地卡羅法進行加速器設施運轉引發之物質活化與殘存活性的分析，文獻中常見的有三種照射情節假設。本文探討這三種照射情節對於加速器運轉引發之物質活化分析的效應，並據以建立適當的修正因子，以利簡化的連續照射模型在蒙地卡羅活化分析的正確使用。

# 輻射犯罪現場重建概述

作者 李承龍

臺灣警察專科學校/國立清華大學 副教授



## 前言

「犯罪現場重建」是指現場勘察人員根據犯罪現場的跡證位置、工具痕跡、型態證據以及鑑識實驗室的物證鑑定結果，綜合分析偵查人員的調查和查訪資料，判斷真兇在犯罪現場發生的各項犯罪活動。現場勘察人員在抵達犯罪現場後，除了進行現場封鎖、保全和紀錄等工作外，還需要運用科學搜查精神，觀察、尋找和判斷現場的有效跡證，並確認鑑識實驗室分析現場物證的鑑定結果。整個重建過程還涉及運用偵訊、查訪相關資訊和邏輯推理的系統化分析。在上述資訊中，犯罪現場的證物鑑定分析結果

對整體犯罪重建至關重要。它們能夠用於證明或排除嫌犯的在場或不在場，驗證相關證人對犯罪事件內容的陳述，建立或排除特定事件中的個人或物體之間的聯繫，並有助於偵查或調查人員提供新的查訪線索。

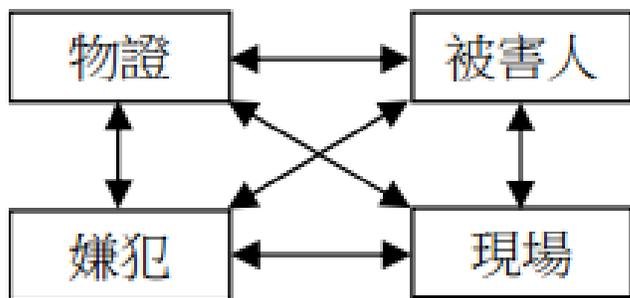
「輻射犯罪現場重建」和「犯罪現場重建」都是嚴謹的科學推理過程。輻射犯罪現場重建依賴於輻射現場勘察、輻射鑑識實驗結果和輻射鑑識專家的專業分析。它基於輻射的科學原理、理論架構和邏輯推理，將輻射現場物證進行分析、研判，並整合所有相關的查訪和調查資訊，包括輻射犯罪現場的勘查和輻射鑑識實驗室的驗

證結果。輻射鑑識分析、假設驗證、推理研判及最終的輻射犯罪現場重建結果，密不可分。

## 犯罪現場重建過程步驟

在犯罪現場重建的過程中，常見的基本科學方法和邏輯推理過程可以歸納為以下五個連續步驟：

一、資料蒐集：作為現場勘察人員，必須參考四面向連結理論（four-way linkage theory），如圖一所示，該理論是犯罪現場偵查的基礎。在進行犯罪偵查時，應該將「現場（crime scene）」、「被害人（victim）」、「嫌犯（suspect）」和「證物（physical evidence）」等四個要素相互連結，以便重建犯罪經過，從而找出真兇。現場勘察必須收集與犯罪現場、被害人或證人相關的所有跡證，包括現場的微物、文書、指紋、彈殼、生物跡證、工具痕跡和壓痕痕跡，以及被害者的狀態、傷口等，這些跡證都需要經過嚴格的檢驗、分類和分析。



圖一、四面向連結理論（four-way linkage theory）

二、邏輯推理：在進行證物分析之前，勘察人員可以對涉及犯罪行為的事件進行初步推測或合理解釋。在這個階段，應該避免先入為主的偏見，需要開放思維，接納各種合理的推論和可能的說法。實務上，我們發現同一犯罪現場的情境可能包含多種變因，這導致在重建的過程中可能會有各種不同的推理解釋方式。

三、形成假設：運用邏輯推理，形成假設的前提是必須先符合物證檢驗，包括對血跡、壓痕、筆跡、射擊殘跡、微物跡證、DNA 和指紋等鑑定結果。只有在這些檢驗結果的基礎上，才能建立假設並進行研判分析以及後續的查訪與調查工作。上述步驟的目的是為了累積足夠的情報，形成對該犯罪事件的所有可能情節的推論。這些推測過程是有科學根據的，我們稱之為假設。

四、驗證假設：一旦形成假設，就需要進行鑑識科學的驗證，以確認或排除假設中的某個論點的真實性。這包括比對犯罪現場採集的樣本與標準品，以及對偵查人員進行的偵訊、調查過程進行查驗。透過這些驗證過程，我們可以判斷犯罪重建的假設是否真實或有缺陷，是否需要重新假設和驗證。

五、形成理論：除了驗證現場跡證的結果外，在後續的訪查、調查過程中，還應該納入與被害人或嫌犯的行為有關的資訊、相關人員的活動、證人的陳述以及其他與事件相關的整體資訊。這些經過偵查人員查證的線索、鑑識實驗室的物證分析和研判結果，都應符合上述假設的推論過程和結果。只有在經過完整的驗證和假設

確認分析後，我們才能將其視為合理的理論。需要注意的是，犯罪現場重建的結果取決於鑑識人員可靠的鑑識資訊、偵查人員深入調查的程度，以及是否還存在尚未解決的現場問題。因此，犯罪現場重建的範圍可能是局部的、有限的，並不是所有案件都可以完全重建。

重建犯罪現場是一個綜合性的過程，需要專業知識和最新科學技術的支持。透過仔細收集犯罪現場的資料，進行推論、假設形成、驗證以及後續查訪和調查，我們可以建立一個較為完整且合理的案情推理。然而，我們必須承認科學有其極限，了解犯罪現場重建也有其限制。在實際操作中，獲取可靠的資訊並解決所有問題是困難的。

作為現場勘察人員，我們的使命是通過科學方法和專業技術，讓證據自己說話，根據科學證據提供客觀且可靠的犯罪現場重建結果，以協助外勤偵查人員和司法系統揭示現場的真相，讓審判者做出正確的判斷。下圖二，模擬槍擊現場，彈道重建模型。

#### 輻射犯罪現場重建步驟：

一、辨識：輻射犯罪現場重建的第一步是辨識。在現場勘察過程中，現場勘察人員需要辨識那些看似沒有證據價值的物件，找出可能有用的跡證。一旦發現現場證物，必須封鎖、保全現場，並完整地記錄、採集和保存跡證。這些跡證在經過輻射鑑識實驗室分析和比對後，可以有效識別、個化和追溯這些放射性證物的來源。當輻射犯罪現場經過專業保全、勘察和採證後，關鍵的輻射跡證經過辨識確認，即可進行下一步的重建工作。

二、鑑定：鑑定是透過比對輻射跡證，利用標準物品或已知物質的類化特徵，與輻射犯罪現場採集的輻射證物進行比較的過程。這包括比較跡證的輻射特性、化學成分和其他相關特徵。當證物尚未達到個化識別的階段時，通常會具有某些相似的分類特徵，例如輻射特性的數值、輻射源的類型等。因此，我們應該清楚描述這些相似特徵的程度，以區分類化和個化的程度。

三、個化：在輻射鑑識科學中，個化識別指的是通過獨一無二的特徵，表明可疑證物來自於已知輻射源。除了一般的類化特徵外，該證物還具有獨特的輻射特性，可以用來區分同一類型中不同的來源。輻射證物的鑑定、個化識別分析以及相關資料，在重建輻射犯罪現場的工作中扮演著重要的角色。

四、重建：重建是基於輻射犯罪現場勘察和輻射鑑識實驗室的分析結果，及來自不同來源的調查和查訪資訊，來重現輻射犯罪案件發生的過程。重建通常利用傳統的歸納和邏輯推理、統計數據、犯罪現場資訊以及各種輻射證物的實驗鑑定結果進行。



圖二、模擬槍擊現場，彈道重建模型（筆者拍攝於美國紐海芬大學）



圖三、核事故輻射現場 (圖 / 達志影像 / 美聯社)

這是一項複雜的工作，需要將不同的輻射證物分析、調查和其他資訊相互結合，形成假設並加以驗證，以獲得完整的輻射犯罪現場重建結果。

如上所述，在進行輻射犯罪現場重建時，需要輻射現場勘察人員仔細分析犯罪現場的資訊，借重輻射鑑識實驗室的分析結果，並搭配偵查人員查訪與調查的情資。重建過程運用科學原理、統計數據以及推理方法，考慮輻

射特性、輻射源的可能性以及輻射傳播路徑等因素，以獲得最佳的重建結果。

#### 小結

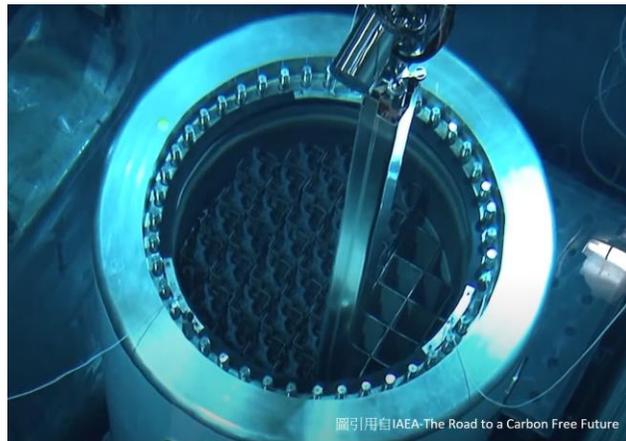
總而言之，輻射犯罪現場重建是一項基於科學分析和推理的工作，主要目的在於重新構建輻射犯罪發生的過程並提供相關證據和解釋。這需要勘察人員細緻地分析犯罪現場的資訊，結合輻射鑑識實驗室的分析結果，以及

偵查人員的調查情報。透過運用科學原理、統計數據和推理方法，可以得出最佳的重建結果。重建結果在刑事司法程序中扮演著關鍵的角色，有助於釐清犯罪行為和嫌疑人之間的關聯，提供有力的證據支持法庭的判決。同時，它還為後續的輻射安全調查、預防和控制提供專業的資訊和指導，有助於改進安全措施並降低輻射事件風險。圖三即為核事故輻射現場。

# 小型模組核反應器的特性介紹

作者 陳勝朗

財團法人核能科技協進會 首席顧問



## 前言

小型核反應器的發展按照國際原子能總署(IAEA)的定義,指小型反應器功率為 300MW 以下,中型反應器為 300~600 MW,目前統稱為“小型和中型反應器”,簡稱“中小型反應器”,如圖一。中小型反應器有時被簡稱為小型模組反應器 (Small Modular Reactors, SMR)。中小型反應器類型有:輕水反應器、高溫氣冷反應器、液態金屬反應器和熔鹽反應器,而輕水反應器是小型反應器的主要反應器型。

目前,由於大型反應器的安全問題考量,許多國家也積極在開發各種新型 SMR,全球掀起了研究開發 SMR 的熱潮。表一為運轉中的小型反應爐。

小型模組化反應器(SMR)·是先進的核反應爐·其功率容量可達每台 300 兆瓦 (MWe)·約為傳統核動力反應器發電容量的三分之一。許多小型模組化反應器裝置可以在工廠組裝並運輸到安裝地點·SMR 被設想用於工業應用或電網容量有限的偏遠地區等市場。

## SMR 的特點

大型動力反應器經由蒸汽循環發電的成本很高·若是要為大約 4 GWe 以下的小型電網提供服務·適合開發較小的機組·可以獨立建造·也可以設想其規模經濟作為更大綜合體中的模塊建造·並根據需要逐步增加容量。還有一些為偏遠地區開發獨立的小型單元·蓋小型規模電廠比大型規模更易於管理。SMR 優勢的另一個原因是可以更容易地代替除役的燃煤電廠·這些電廠的機組很少超過 500 兆瓦·有些甚至低至 50 兆瓦·美國預計將在 2015-25 年除役的燃煤電廠平均為 145 兆瓦。

SMR 的優點與其設計的性質 (小型和模組化) 有著內在的關聯。鑒於其佔用地面積較小·SMR 可以安裝在不適合大型核電廠的位置。SMR 的小型機組設備組件可以預先製造·然後再運送到現場安裝·這使得它們比大型動力反應器更便宜單純·SMR 可節省成本和建設時間·並且可以逐步部署以滿足不斷增長的能源需求。

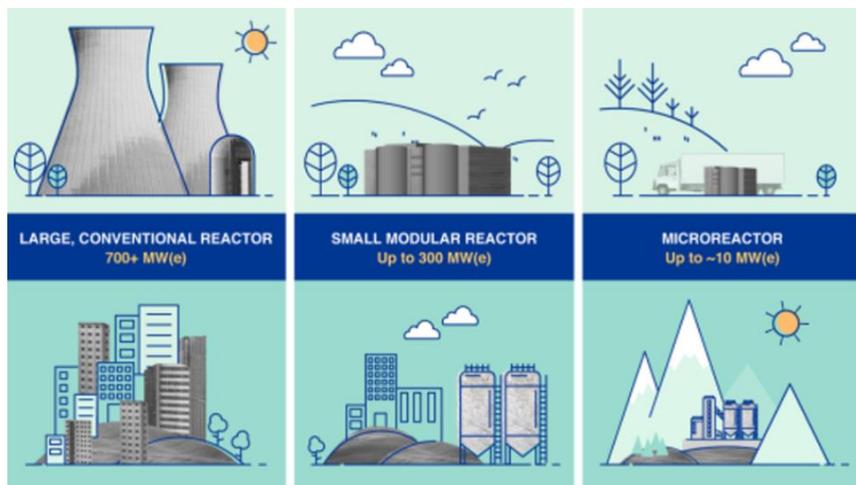


圖 1 小型模組化核反應爐(圖引用自 IAEA)

表一. 運轉中的小型反應器 (迄 2022 年 5 月)

Name	Capacity	Type	Developer
CNP-300	300 MWe	PWR	SNERDI/CNNC, Pakistan & China
PHWR-220	220 MWe	PHWR	NPCIL, India
EGP-6	11 MWe	LWGR	at Bilibino, Siberia (cogen)
KLT-40S	35 MWe	PWR	OKBM, Russia
RITM-200	50 MWe	Integral PWR, civil marine	OKBM, Russia

加快獲取能源的挑戰之一是基礎設施，考量農村地區有限的電網覆蓋以及農村電氣化的電網連接成本，在缺乏足夠的輸電線路和電網容量的地區，SMR 可以安裝到現有電網或遠端離網的地方，作為其較小的電力輸出的功能，為工業和人口提供低碳電力。這與微小反應器特別相關，微小反應器是 SMR 的一個子集，旨在產生通常達 10 MWe 的電力。與其他 SMR 相比，微小反應器的佔地面積更小，將更適合無法獲得清潔、可靠和負擔得起的能源的地區。

SMR 核電站在效率、經濟性和靈活性方面具有獨特的屬性。一些可再生能源，如風能和太陽能，是取決於天氣和時間的不穩定性能源。核反應器則提供可調度的能源，它們可以根據電力需求調整輸出，但 SMR 可以與混合能源系統中的可再生能源配對並提高其效率。這些特點使 SMR 在清潔能源轉型中發揮關鍵作用，同時也幫助各國實現可持續發展零碳排放的目標。

為實現普遍獲得能源的目標，有關國家所做的努力已取得明顯進展；然而，差距仍然普遍存在，主要集中在偏遠和農村地區。隨著全球努力尋求實施清潔和創新的解決方案，可再生能源

的增加使用以及 SMR 的引入有可能填補這些空白。

與現有傳統反應器相比，SMR 設計通常更簡單，並且 SMR 的安全特性通常更多地依賴於無電源系統和反應器的固有安全特性，例如低功率和低運行壓力。這意味著在這種情況下，不需要人為干預或外部力量來關閉系統，因為被動系統依賴於物理現象，例如自然循環、對流、重力和自我加壓。在某些情況下，這些增加的安全裕度消除或顯著降低了在發生事故時不安全因素向環境和公眾釋放放射性的可能性。

與大型核反應器相比，SMR 降低了核燃料需求。與傳統發電廠 1 到 2 年換料週期相比，基於 SMR 的發電廠可需要較少的換料頻率，即約為每 3 到 7 年一次。一些 SMR 設計可在不添換加料的情況下運行長達 30 年。

### SMR 的發展

世界各國的公私機構都在積極參與努力，使 SMR 技術在這十年內取得明顯的成果，目前全世界已在各地開發 70 多種商業 SMR 設計和建造，在國際原子能總署的手冊《SMR 技術發展進展》中進行了描述，針對不同的輸出和不同的應用，例如電力、混合能源

系統、供暖、海水淡化和工業應用的蒸汽。儘管 SMR 機組具有前期資本成本較低等優勢，但其經濟競爭力仍有待未來的實踐證明。

### 參考文獻

1. <https://www.worldnuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>
2. World Nuclear News, 2022/08/24 "Holtec ramps up SMR programme, eyes 2029 startup"



## 訓練班課程(112 年度)

放射性物質或可發生游離  
輻射設備操作人員研習班

### B 組 18 小時-登記類

**B18 新竹** 帝國經貿大樓

9 月 25 日 ~9 月 27 日

**B19 台北** 進出口同業公會

10 月 3 日 ~10 月 5 日

**B20 台中** 文化大學推廣部

10 月 18 日 ~ 10 月 20 日

**B21 高雄** 文化大學推廣部

11 月 8 日 ~11 月 10 日

**B22 新竹** 帝國經貿大樓

11 月 15 日 ~11 月 17 日

**B23 台北** 進出口同業公會

12 月 13 日 ~12 月 15 日

**B24 台中** 文化大學推廣部

12 月 19 日 ~ 12 月 21 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 41 期

新竹 帝國經貿大樓

第一階段

112 年 7 月 3 日 ~7 日

第二階段

112 年 7 月 10 日 ~ 14 日

第三階段

112 年 7 月 26 日 ~ 28 日

第四階段

112 年 7 月 31 日 ~ 8 月 04 日

### 進階 25 期

新竹 帝國經貿大樓

第一階段

8 月 9 日~8 月 11 日

第二階段

8 月 14 日~8 月 16 日

輻射防護繼續教育訓練班  
(3/6 小時)

**高雄** 科學工藝博物館南館

9 月 27 日 (上午&下午)

10 月 26 日 (上午&下午)

12 月 8 日 (上午&下午)

**台北** 進出口同業公會

10 月 6 日 (上午&下午)

11 月 30 日 (上午&下午)

**新竹** 經濟部專研中心

10 月 17 日 (上午&下午)

11 月 21 日 (上午&下午)

12 月 14 日 (上午&下午)

**台中** 文化大學推廣部

10 月 12 日 (上午&下午)

鋼鐵建材輻射偵檢人員訓練班

**鋼 3 台中** 文化大學推廣部

11 月 1 日 ~ 11 月 2 日

### 上課地點

#### 台北

進出口同業公會：台北市中山區松江路 350 號

#### 新竹

帝國經貿大樓：新竹市光復路二段 295 號 20 樓  
經濟部專研中心：新竹市光復路二段 3 號

#### 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)；

315 邱靜宜 (鋼鐵建材、放射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「112 年第 1 次輻射防護專業測驗與輻射安全證書測驗及格人員名單」。 [訊息連結](#)

「112 年第 1 次輻射防護專業測驗與輻射安全證書測驗及格人員名單」已公布於本會網站，請點選下方（附檔下載）即可下載瀏覽。

相關連結：[相關連結](#)（發布日期 112 年 6 月 7 日）

附檔下載(1)：[112 年第 1 次輻射防護專業測驗及格人員名單 \(PDF 檔案\)](#)

附檔下載(2)：[112 年第 1 次操作人員輻射安全證書測驗及格人員名單 \(PDF 檔案\)](#)

### 國內新聞

- ➔ Yahoo 新聞報導「日本排核處理水 馬來西亞沙巴海域安裝輻射偵測儀」 [訊息連結](#)

日本 8 月 24 日開始排放核處理水入海，引起多國擔憂。大馬科學、工藝及革新部（MOSTI）除在東馬沙巴海域安裝輻射偵測儀，也會對日本進口的高風險食品進行第 4 級檢測。

日本 24 日起把核處理水排海，中國隨即宣布全面暫停進口原產地為日本的水產品，抵制日本其他食品的聲音迅速蔓延，甚至波及美妝用品。

科學、工藝及革新部長鄭立慷昨天透過社群平台臉書（Facebook）表示，針對日本政府排放核處理水入海，大馬已在東馬沙巴海域安裝一架輻射偵測儀器，另也會在大馬領海增加 4 架輻射偵測器，檢測海域輻射情形。

他在臉書指出，大馬政府瞭解人民的擔憂，非常關注這件事，並透過科學、工藝與革新部轄下的大馬原子能局在沙巴海域安裝「多光譜水質監測系統」，檢測大馬海域水質。

鄭立慷說，儀器每天 24 小時運作，檢測大海水質輻射情況。目前在東南亞國家中僅有越南和新加坡有安裝偵測儀器，大馬是第 3 個安裝這種儀器的東南亞國家。

他強調，衛生部也從 24 日起對日本進口的高風險食品進行第 4 級檢查，藉以分析放射性物質含量。

（發布日期 112 年 8 月 28 日）

- ➡ 自由時報報導「怕吃到輻射鹽 部分民眾非理性囤鹽 / 學者：1 天吃 444 公斤含氚鹽巴才超標」。 [訊息連結](#)

日本福島排放含氚廢水，引發南韓與中國民眾非理性囤鹽，國內也出現類似情況。台鹽公司強調我精鹽廠產能充足；東海大學應用物理系則計算，一天要吃四四四公斤用福島核電廠排放含氚廢水製成的鹽巴，輻射劑量才會超出世界衛生組織 ( WHO ) 規範，民眾不要過度恐慌。

新竹市有民眾發現，這兩天住家附近超市貨架上的台鹽產品闕如，店員告知有許多民眾一次購買好幾包，原因是「為避免吃到日本輻射鹽，要買一點回家放」。記者昨天下午實地前往新竹市東區的家樂福與全聯，發現果真台鹽產品都被搶購一空，店員證實有搶購的情況，補貨時間也還不能確定。

台鹽公司表示，目前市面上的食鹽皆是日本開始排放含氚廢水之前生產，送樣品至原能會核研所的食品放射性檢測實驗室，進行碘、銻、錒及氚等放射性元素檢測分析，結果均無異常。

另因應傳統中元檔期食用鹽銷售旺季，各項食用鹽品所備庫存均七月底前已增加供應，目前各大通路備貨與供應與過往相較皆屬正常。

台鹽：隨時可提高產能

台鹽公司強調，國內食鹽市場需求約為每年十萬噸，通霄精鹽廠在國營專賣時期即負責供應民生食用鹽，其設計產能即以每年十萬噸為規劃，即便鹽品自由化後產量降低到約七萬多噸，但仍具備緊急生產備貨能力，隨時可提高產能，也會確保品質，請民眾放心。

原能會也表示，目前跨部會的台灣海域輻射監測計畫仍持續進行，隨時掌握台灣海域輻射狀況，目前輻射數值都在正常範圍內。

東海大學應用物理系在臉書發文說明，目前台灣的標準是「高級食鹽」含水量必須低於 0.5%，「普通級食鹽」則是 3% 以下，若將福島核電廠處理後排出的水拿來製鹽，一公斤鹽裡殘餘的水量是三十克，鹽輻射劑量約是四十五貝克。按照 WHO 對於水中氚的規範是每公升一萬貝克，以每人一天要喝二公升水計算，等同於一天要吃下四四四公斤福島核電廠排放的含氚廢水製成的鹽巴，才會超出 WHO 規範。( 發布日期 112 年 8 月 28 日 )

- ➡ 自由時報報導「輻射超標就要求停止！福島核廢水排海 我國向日本表明立場」。 [訊息連結](#)

日本於 8 月 24 日起將福島第一核電廠的核處理水排放入海，儘管有聯合國國際原子能總署 ( IAEA ) 背書安全無虞，美國國務院也聲明力挺，中國仍藉故禁止日本水產品進口，並挑起反日情緒。對此，台灣日本關係協會透露，我方已對日方表示，在排放過程中若發現與原先計劃有所不同，或在排放後發現周邊海水輻射值超標等任何異常，我方除會立即向日方反映，也會要求日方立即停止排放，這是我國立場。

台灣日本關係協會表示，針對福島核處理水排放議題，我方透過台北與東京雙重管道向日方進行溝通、表達立場。我方表示，在日方排放核處理水的過程中，若發現與原先計劃有所不同，或在排放後發現周邊海水輻射值超標，一旦發現有任何異常，我方就會向日方反映，也會要求日方立即停止排放，這是我國立場。而日方對此也表示認同。( 發布日期 112 年 9 月 7 日 )

- ➡ 華視新聞網報導「福島核處理水排海滿 1 個月！中禁日水產衝擊擴大」。 [訊息連結](#)

日本福島第一核電廠，排放核廢水一個月了，日方檢測海水及魚類，有沒有受輻射汙染，濃度都沒有異常，第二梯次排海最快從本月底開始。不過，由於中國持續禁止引進日本水產，日本相關行業受到的打擊還在擴大。

一箱箱海鮮分裝完成，等待水產商抽籤競價。這裡是日本福島一處漁港，儘管日本已排出 7800 噸含氚水，但不影響每天的捕撈、批發作業。水產商人鈴木孝治 (TC0031-40)，排水前排水後漁獲沒有兩樣，我暫時看不到什麼負評，上個月 24 日開始，日本將福島核災後產生的核處理水排入太平洋。

東京電力公司每天檢測附近海水的核輻射，至多 1 公升海水含有 10 貝克劑量，遠低於日本國家標準的每升 1500 貝克，)捕獲的海魚輻射也沒有飆高，即便公布這些科學數據，中國並不採信，第一時間禁止日本水產進口，到現在不見鬆綁跡象。

單單 8 月，日本賣水產給中國賺到的收益，就比去年同月短少 30 億日元，約合 6 億 5000 萬台幣。很多在中國開日本料理店、標榜食材「產地直送」的日本業者，現在只能在中國當地魚市找替代品。

儘管改用中國在地海鮮，但平息不了疑慮，日本料理店來客數大減。再這樣下去，關門大吉只是時間的問題，香港與中國兩大市場，拒買日本魚蝦，日本當局正在研擬洽談，出口到中東國家的新通路，但有水產商擔心，遠水救不了近火。

日本政府一方面撥出 207 億日元、將近 45 億台幣補貼水產業度過難關。一方面準備循 WTO 途徑，促使中國取消日本水產禁令，至於第二波核處理水排海，最快 9 月底再次啟動。(發布日期 112 年 9 月 24 日)

- ➡ 自由時報報導「中俄又聯手 要求日本停止排放核廢水」。 [訊息連結](#)

俄羅斯 4 日表示，儘管莫斯科與北京方面多次要求，日本仍未能提供有關福島第 1 核電廠排放到大海的輻射水的完整資訊。

俄羅斯外交部發言人沙卡洛娃 (Maria Zakharova) 表示，日本只要停止將和廢水排入大海，相關憂慮就能得以緩解。(發布日期 112 年 10 月 4 日)

# 小型模組化核反應器在國際上的發展現況

作者 陳勝朗

財團法人核能科技協進會 首席顧問



與現有的傳統核反應器相比，SMR 的設計通常更為簡單，更為機動，並且 SMR 的安全特性也少人為干預或外部力量來關閉系統，這些增加的安全裕度顯著的減少了在發生事故時不安全因素向環境與公眾釋放放射性的可能性，世界上的公私機構都在積極參與努力，使 SMR 技術能在近年取得成果。例如俄羅斯的 Akademik Lomonosov 是世界上第一座浮式核電站，於 2020 年 5 月開始商業運營，正從兩台 35 MW(e) 的 SMR 生產能源。其他 SMR 也在非洲迦納、捷克、加拿大、中國、俄羅斯、韓國和美國建造或處於許可階段。

茲分別就各國發展現況介紹如下：

## 美國

美國在 2012 年 3 月，能源部(DOE)與有興趣在南卡羅來納州薩凡納河場址建造示範小型反應器的三家公司簽署了協議。這三家公司和反應器是：Hyperion (現為 Gen 4 Energy) 擁有 25 MWe 快滋生反應器，Holtec 擁有 160 MWe PWR，以及 NuScale 擁有 45 MWe PWR (後來增加到 60 MWe，然後增加到 77 MWe)。這些

協議涉及提供土地，但不涉及資金。美國能源部並與另外四個小型反應器開發商討論類似的安排，目標是在 10-15 年內擁有一套小型反應器，為美國能源部綜合體提供電力。(在 1953-1991 年間，薩凡納河是許多用於製造和運行武器鈾和氙的生產的反應器的地方。)

2013 年 12 月，美國能源部宣布將以 50-50 的成本分攤方式向 NuScale 提供進一步的撥款，在五年內高達 2.17 億美元，以支持其最初 45 MWe 小型反應器的設計開發和 NRC 認證和許可設計，隨後增加到 60 MWe，然後增加到 77 MWe。2013 年年中，NuScale 啟動了西部核計劃 (WIN)——一項廣泛的、多西部州的合作——研究美國西部多模塊 NuScale SMR 工廠的示

範和部署。WIN 包括位於華盛頓的西北能源公司 (ENW) 和猶他州聯合市政電力系統 (UAMPS)。它現在被稱為無碳電力項目。作為 Project WIN 的一部分而建造的 NuScale SMR 演示預計將於 2024 年在美國能源部的愛達荷國家實驗室 (INL) 投入使用，UAMPS 為所有者，ENW 為運營商。隨後是 UAMPS 擁有的、由 Energy Northwest 運營的全尺寸 (最初為 12 個但現在為 6 個模塊) 工廠，成本為 5000 美元/千瓦，因此約為 30 億美元。

美國 Holtec International 表示，它已“顯著增加”其清潔能源研發預算，現在的目標是最早在 2029 年將第一台 SMR-160 投入使用，比之前的計劃



圖一 各國小型反應器

提前一年。它計劃將 SMR-160 與被稱為綠色鍋爐的清潔能源存儲和發電系統配對。

這家美國公司表示，它對美國政府的“支持姿態”感到鼓舞，包括最近通過的《降低通脹法案》，該法案稱將“推動美國核能的崛起”。它設想將其 SMR-160 先進反應器與其清潔能源儲存和發電 (CESG) 技術相結合，成為“分佈式清潔能源生態系統”的核心。

Holtec 最近提交了一份 74 億美元的聯邦貸款申請，以使其能夠提高其現有製造設施的 SMR 生產能力，在美國建造和運營四台 SMR-160，並建造一個新的 Holtec 重工 (HHI) 用於 SMR-160 組件和模塊的更高容量製造的複合體。它仍在評估 HHI 的位置，但表示擬議中的大型工廠可能靠近其第一台美國 SMR-160 的所在地。

Holtec 說，許多候選地點正在考慮用於第一台 SMR-160。其中包括前 Oyster Creek 核電站場址，該場址的特定工廠佈局和環境監測工作已經在進行中，以支持申請施工許可證。在 Exelon 去年關閉了單機組沸水反應器裝置後，Holtec 於 2019 年接管了新澤西工廠的除役。

Holtec 表示，該公司擁有的其他核除役場地以及“核、煤和綠地場地”也在

考慮之中。

SMR-160 是一種加壓輕水反應器，使用市售的低濃縮鈾燃料發電 160 MWe (525 MWt)，具有為工業應用和製氫產生工藝熱的靈活性。Holtec 於 2021 年與韓國現代公司就 SMR-160 在全球的設備供應達成協議。該公司設想將 SMR-160 電廠與其 Green Boiler CESG 系統配對，以存儲電廠本身和總電網的剩餘能量，然後可用於發電不足時期。CESG 系統的一種變體稱為 HI-HEAT 已被設計用於提供區域供熱系統。

美國、日本與迦納合作部署 SMR。美國、日本和迦納宣布了一項戰略合作，以支持在這個西非國家部署小型模塊化反應器。通過這種夥伴關係，迦納可以成為非洲的一個先進的核技術中心。

Holtec 在捷克共和國的團隊不斷壯大，Škoda Praha 已同意進行成本估算，併計劃與 Holtec 的合作夥伴現代工程和建築公司在捷克共和國建造 Holtec SMR-160 裝置。

Holtec International 和韓國現代工程建設公司已同意加快該計劃，以完成 SMR-160 先進小型模塊化反應器剩餘系統和結構的工廠設計平衡。

## 英國

英國 Urenco 呼籲歐洲開發基於石墨慢化 HTR 概念的非常小型 (4 MWe) 的“即插即用”固有安全反應器，它正在尋求政府對原型“U-Battery”的支持，比利比諾熱電聯產廠的四個小型機組已經在西伯利亞的偏遠角落運行。這四個 62 MWt (熱) 裝置不是一般尋常的石墨慢化沸水設計，水/蒸汽通道通過慢化劑。它們產生用於區域供暖的蒸汽和 11 MWe (淨) 電力，遠離任何電網。它們是世界上最小的商業動力反應器，自 1976 年以來一直表現良好，在北極地區惡劣的氣候條件下比化石燃料替代品便宜得多，但將於 2023 年除役。

勞斯萊斯 SMR 的英國工廠候選名單中增加了兩個站點。勞斯萊斯 SMR 正在對目前正在運行的八個地點進行實地考察，以主辦其第一家小型模塊化反應器工廠。

## 加拿大

加拿大基礎設施銀行宣布向安大略發電公司的達靈頓新核項目承諾投資 9.7 億加元 (7.13 億美元)，這是該銀行迄今為止對清潔能源的最大投資。OPG 申請達靈頓 SMR 安大略發電公司的建設許可證已提交申請

表一. 建設中的小型反應器

Name	Capacity	Type	Developer
CAREM25	27 MWe	Integral PWR	CNEA & INVAP, Argentina
HTR-PM	210 MWe	Twin HTR	INET, CNEC & Huaneng, China
ACP100/Linglong One	125 MWe	Integral PWR	CNNC, China
BREST	300 MWe	Lead FNR	RDIP, Russia

表二. 近期開發設計部署的小型反應器

Name	Capacity	Type	Developer
VBER-300	300 MWe	PWR	OKBM, Russia
NuScale Power Module	77 MWe	Integral PWR	NuScale Power + Fluor, USA
SMR-160	160 MWe	PWR	Holtec, USA + SNC-Lavalin, Canada
SMART	100 MWe	Integral PWR	KAERI, South Korea
BWRX-300	300 MWe	BWR	GE Hitachi, USA
PRISM	311 MWe	Sodium FNR	GE Hitachi, USA
Natrium	345 MWe	Sodium FNR	TerraPower + GE Hitachi, USA
ARC-100	100 MWe	Sodium FNR	ARC with GE Hitachi, USA
Integral MSR	192 MWe	MSR	Terrestrial Energy, Canada
Seaborg CMSR	100 MWe	MSR	Seaborg, Denmark
Hermes prototype	35 MWt	MSR-Triso	Kairos, USA
RITM-200M	50 MWe	Integral PWR	OKBM, Russia
RITM-200N	55 MWe	Integral PWR	OKBM, Russia
BANDI-60S	60 MWe	PWR	Kepeco, South Korea
Xe-100	80 MWe	HTR	X-energy, USA
ACPR50S	60 MWe	PWR	CGN, China
Moltex SSR-W	300 MWe	MSR	Moltex, UK

表三. 正在開發的微小的反應設計 ( 小於 25 MWe )

Name	Capacity	Type	Developer
U-battery	4 MWe	HTR	Urenco-led consortium, UK
Starcore	10-20 MWe	HTR	Starcore, Quebec
MMR-5/-10	5 or 10 MWe	HTR	UltraSafe Nuclear, USA
Holos Quad	3-13 MWe	HTR	HolosGen, USA
Gen4 module	25 MWe	Lead-bismuth FNR	Gen4 (Hyperion), USA
Xe-Mobile	1-5 MWe	HTR	X-energy, USA
BANR	50 MWt	HTR	BWXT, USA
Sealer	3-10 MWe	Lead FNR	LeadCold, Sweden
eVinci	0.2-5 MWe	Heatpipe FNR	Westinghouse, USA
Aurora	1.5 MWe	Heatpipe FNR	Oklo, USA
NuScale micro	1-10 MWe	Heatpipe	NuScale, USA

獲得在達靈頓工地建造小型模塊化反應器的許可證，併計劃在那裡建造加拿大第一座商業電網規模的 SMR。

#### 中國

中國大陸就部署準備而言，高溫反應器

(HTR)技術緊隨水冷反應器之後，自力研創的高溫氣冷反應器已於 2022/2/6 發電上網，其具有多項技術優勢，包括更高的發電效率，固有的安全特性(如耐事故燃料)，提供圍護的覆層和反應器器芯，其設計方式使得即使在大多數

假設的情況下，發生熔化的可能性也極低。高溫氣冷反應器在為生產氫氣提供核熱方面也非常有效。

石島灣高溫氣冷反應器核電站並網 (反應器熱功率，MWt 250，機組電功率，MWe 211) 該廠是全球首座

具有第四代核電技術主要特徵的球床模組式高溫氣冷反應器核電站。由華能集團牽頭，於 2012 年開工建設的石島灣高溫氣冷反應器示範工程，因具有第四代核電技術安全特徵受到世界矚目。未來將在降低燃煤發電比例、儘早達成“雙碳”目標方面作出重要貢獻。與常規壓水反應器核電工程相比不同的是，石島灣高溫氣冷反應器有兩座反應器，是兩台蒸汽發生器帶動一台汽輪機發電。石島灣核電站滿功率運行每年可發電 14 億度，為 200 萬居民提供生活用電，相對於燃煤發電，可減少超 150 萬噸的二氧化碳和其它污染物排放。

上海電氣作為重要參建單位之一，提供了核島和常規島多項核心設備。歷經十餘年攻關，自主研發製造，助力整個工程設備中國國產化率達到 93.4%。

ACP100 小型模組化反應器 (SMR)，(反應器熱功率，MWt 385，機組電功率，MWe 125) 在海南長江建設示範 ACP100 小型模組化反應器 (SMR) 已獲得中國政府的批准。此多用途 125 MWe 壓水反應器 (PWR)，也稱為玲瓏一號。設計用於發電、供暖、蒸汽生產或海水淡化。玲瓏一號 (ACP100)，是全球首個陸上商用模組化小反應器。

“玲瓏一號”具有一體化反應器技術、高效直流蒸汽發生器技術、遮罩主泵技術、固有安全加非能動安全技術、模組化技術等特徵；具有技術先進及成熟、多用途、部署靈活、設備成熟度高、工程可實施性好等突出優勢。適用於海島、礦區、高耗能企業等多種場景的能源供應，具有大型核電機組無法取代的功能。“玲瓏一號”於 2021 年 7 月 13 日在海南昌江核電開工建設，建造工期為 58 個月。

中核集團是在 2019 年 7 月宣佈啟動長



圖二 玲瓏一號用途示意圖

江建設 ACP100 核反應器專案。自 2010 年開始開發的 ACP100 集成壓水反應器的初步設計於 2014 年完成。其主冷卻劑回路的主要部件安裝在反應器壓力容器內。2016 年該設計成為首個通過國際原子能總署安全審查的 SMR。

目前世界已在各地開發的 70 多種商業 SMR 設計和建造，針對不同的輸出和不同的應用，例如電力、混合能源系統、供暖、海水淡化和工業應用的蒸汽，在國際原子能總署的新手冊《SMR 技術發展進展》中進行了描述。SMR 核電站在效率、經濟性和靈活性方面皆具有其獨特的屬性，而且與現有傳統反應器相比，SMR 設計通常更簡單也降低燃料需求，並且 SMR 的安全特性更多地依賴於無電源系統和反應器的固有安全特性，這些特性都使 SMR 的發展受到重視。隨著全球努力尋求清潔和創新的能源解決方案，可再生能源的增加使用以及 SMR 的引入可以填補這些空白。這些特點使 SMR 在清潔能源轉型中發揮關鍵作用，同時也幫助各國實現未來可持續發展目標。

### 參考資料

1. <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>
2. World Nuclear News, 2022/08/24 "Holtec ramps up SMR programme, eyes 2029 startup"
3. 李富, 中國清華大學核研院, HTR-PM 固有安全特性, 第四屆海峽兩岸核能合作研討會, 山東威海, 2016.9.26-27
4. 華能山東石島灣核電有限公司, 高溫氣冷堆廠介紹與發展歷程, 2022.2.3
5. 李雲迪, 中國核電工程公司, "小型核反應器及浮動式核反應器--技術及安全特點"
6. 中國中原對外工程有限公司, 中國示範 ACP100 小型模組化(玲瓏一號)反應堆 (SMR) 簡介與工程進展, 2022.3
7. 陳勝朗, "玲瓏一號工程推展情形" 2022.11.4.

# 加速器運轉引發物質活化的分析： 週期性與連續照射情節的差異與修正

作者 房博文<sup>1</sup>、許榮鈞<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>國立清華大學核子工程與科學研究所

<sup>2</sup>國立清華大學工程與系統科學系

## 摘要

利用蒙地卡羅法進行加速器設施運轉引發之物質活化與殘存活性的分析有賴於合理照射情節的假設。文獻中常見的照射情節有三種，第一種是週期性的照射，另外二種則屬於簡化的連續照射情節：(0)根據設施每日例行的運轉歷程建立類似週期性照射的情節，此一模型最接近真實情況，但不易複製延伸到長期的設施運轉歷史；(1)忽略二次照射之間的停機，直接連成簡化的連續照射；(2)同樣是簡化的連續照射但降低射束輸出，也就是將總工作負載平均分配在設施的生命期。本研究深入探討這三種照射情節對於加速器運轉引發之物質活化分析的效應，特別是各種不同半衰期核種的累積與衰變的影響，並據以建立適當的修正因子，以利簡化的連續照射模型在蒙地卡羅活化分析的正確使用。

**關鍵字：**照射情節、殘存活性、設施除役

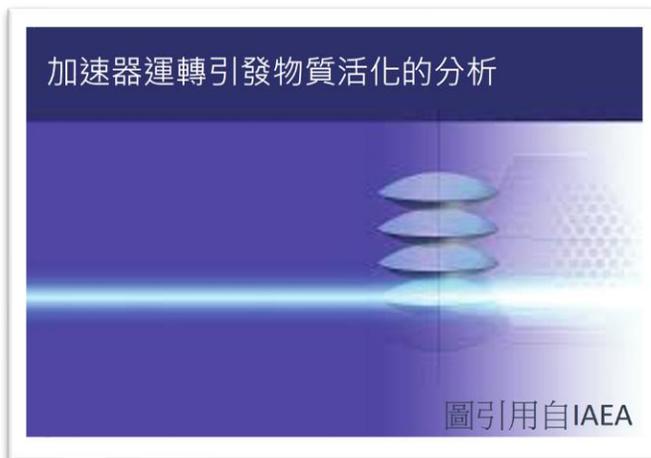
## 簡介

國際原子能總署於 2020 年出版了一份主題為加速器除役的報告[1]，內容彙整過往加速器除役的重要經驗，點出設施除役過程中應注意的關鍵議題與實用建議。報告中強調加速器運轉歷程與可能誘發的物質活化的息息相關，設施應依實際運轉狀況的資訊定期更新活化評估；報告中亦指出使用蒙地卡羅方法搭配合理的運轉假設情節是國際間通用的活化評估方法之一。

關於加速器運轉射束輸出開關的模擬，文獻回顧顯示有三種照射情節假設常用於活化分析：(0)根據設施每日例行的運轉歷程建立類似週期性照射的情節，例如 Martínez-Serrano 與 de los Rios[2,3] 分析  $^{18}\text{F}$  生產設施周遭物質活化的週期性照射情節；又例如 Wu 等人[4]應用類似模型解析一座運轉 30 年的質子治療設施可能造成的活化狀況。此一模型最接近真實情況，但若使用於蒙地卡羅的活化分析，則不易複製延伸到數十年之久的運轉歷史，主要是受限於極端冗長的重覆輸入用於定義頻繁的射束開關照射情節。另外二種照射情節的

假設則是將頻繁射束開關的週期性照射情節大幅簡化為一次性長期連續的照射，通常有下列二種近似方式：(1)忽略二次照射之間的停機，直接連成簡化的連續照射[5,6]；(2)同樣是簡化的連續照射但降低輸出電流，也就是將總工作負載平均分配在設施的生命期[7,8]。

圖 1 顯示上述三種常見於活化分析照射情節的示意圖。情節(0)是根據設施實際運轉狀況所建立的週期性照射，其預測結果應最接近真實情況，但其在蒙地卡羅模擬的輸入描述上非常冗長，而且不同設施有不同運轉情節，因此難以客觀互相比較或參考引用。相反地，情節(1)與情節(2)的簡化連續照射在蒙地卡羅程式中易於描述，但其預測結果是否合理反應實際運轉情況則令人存疑？針對加速器運轉引發之物質活化的分析，為了兼顧照射情節描述的方便性與活化預測的正確性，本研究以典型放射性物質生產設施的照射歷程為基礎，有系統地比較前述三種情節對於不同半衰期核種的累積與衰變，據以建立適當的修正因子，以利簡化的連續照射模型在蒙地卡羅活化分析的正確使用。



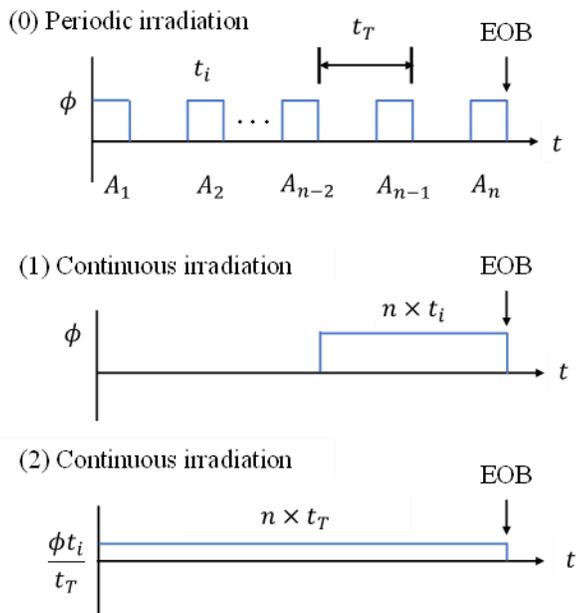


圖 1. 常用於活化分析的三種射束照射情節

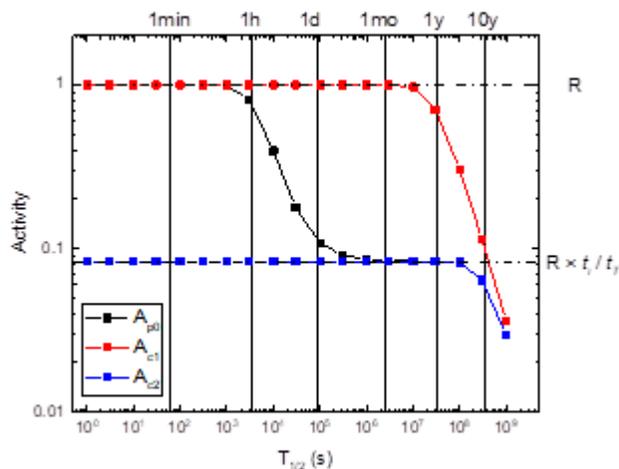


圖 2. 利用三種照射情節評估不同半衰期核種的殘存活度

另外，為擴大應用範圍，本研究進一步建立無因次照射情節，以一次射束開關的照射週期為單位，將運轉照射時間與核種半衰期進行無因次化處理，推導所得之修正因子可更方便應用於各式加速器的運轉情節。

### 三種照射情節的活化解析

一次典型射束開關的照射情節下，某一特定核種活度(A)的累積與衰變隨時間變化如[1]所描述：

$$A = R(1 - e^{-\lambda t_i})e^{-\lambda t_c} \quad [1]$$

其中，R為飽和活度，λ為該核種的衰變常數，t<sub>i</sub>為照射時間，t<sub>c</sub>為冷卻時間。如圖 1 所示，情節(0)為週期性照射，每一次的射束開關視為一個照射週期 t<sub>T</sub>，包含運轉的照射時間 t<sub>i</sub> 與停機的冷卻時間，設施的運轉歷程則由 n 個照射週期構成。情節(1)則忽略二次照射之間的停機，壓縮運轉歷程為連續照射 (n × t<sub>i</sub>) 的時間。

情節(2)則按比例降低射束輸出，將總工作負載平均分配給設施的運轉全程時間 (n × t<sub>T</sub>)。三種照射情節的總工作負載相同，均為 n × t<sub>i</sub> × φ，其中 φ 為單位時間的射束輸出。對齊三種照射情節的最後停止運轉時間(EOB)，本研究的重點在於觀察比較三種照射情節 EOB 之後各種不同半衰期核種活度的差異。

情節(0)在 n 個照射週期結束後的核種活度(A<sub>p0</sub>)如[2]的推導所示：

$$A_n = R(1 - e^{-\lambda t_i})$$

$$A_{n-1} = R(1 - e^{-\lambda t_i})e^{-\lambda t_T}$$

$$A_{p0} = \sum_{i=1}^n A_i = R(1 - e^{-\lambda t_i}) \frac{1 - (e^{-\lambda t_T})^n}{1 - e^{-\lambda t_T}} \quad [2]$$

情節(1)在連續照射 n t<sub>i</sub> 時間後的殘存核種活度(A<sub>c1</sub>)如[3]所示：

$$A_{c1} = R(1 - e^{-\lambda n t_i}) \quad [3]$$

情節(2)在降低射束輸出 (φ × t<sub>i</sub> / t<sub>T</sub>) 連續照射 n t<sub>T</sub> 時間後的殘存核種活度(A<sub>c2</sub>)則如[4]所示：

$$A_{c2} = R \frac{t_i}{t_T} (1 - e^{-\lambda n t_T}) \quad [4]$$

比較二種簡化的連續照射情節所得之 EOB 核種活度(A<sub>c1</sub>與A<sub>c2</sub>)與接近實際狀況的週期性照射結果(A<sub>p0</sub>)的差異，我們即可獲得不同照射簡化情節對於加速器運轉引發之物質活化分析的影響，並據以進行適當修正。

### 放射性物質生產設施活化評估的應用

國內有多座迴旋加速器的核醫藥物放射性物質生產設施，其運轉會伴隨二次中子的產生以及設施周遭物質的活化。參考大部分設施的每日例行運轉情節，本研究選擇以下參數進行活化預測的比較：t<sub>i</sub> = 2 h、t<sub>T</sub> = 24 h、n = 20y × 365 d/y = 7300，也就是設施每天運轉約 2 小時產製同位素，持續運行約 20 年。考量前述三種照射情節，圖 2 呈現該設施停機後各種不同半衰期核種殘存活度的比較。

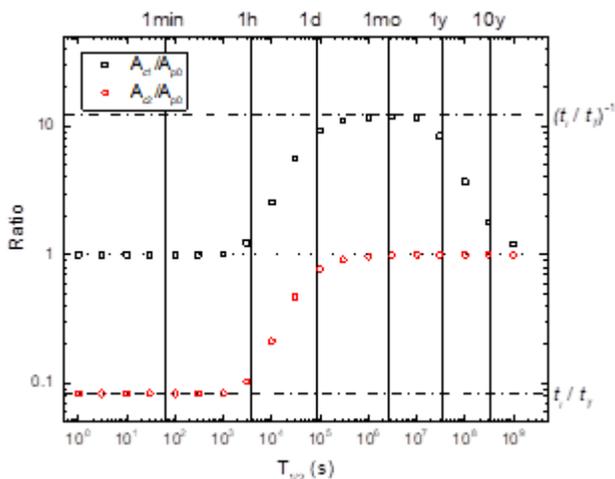


圖 3. 以  $A_{p0}$  為基礎比較 2 種簡化連續照射情節所得之殘存活度預測的差異

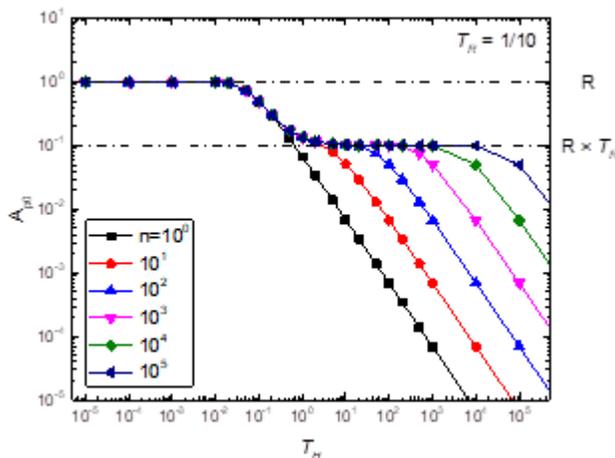


圖 4.  $T_R$  為 1/10 時，在不同照射週期次數累積下，情節(0)預測 EOB 後各種半衰期核種的活度

圖 3 則呈現以週期性照射結果  $A_{p0}$  為基準，比較二種簡化情節各自所預測之活度的差異。針對半衰期小於  $10^3$  秒的核種， $A_{c1}$  與  $A_{p0}$  結果類似，二者都接近飽和活度，但  $A_{c2}$  的預測則遠低於  $A_{p0}$  的結果， $A_{c2}/A_{p0} = 1/12$ ，恰好與  $t_i/t_T$  比例一致。半衰期介於  $10^3$ - $10^9$  秒的核種， $A_{c1}$  的預測與  $A_{p0}$  相比呈現不同程度的高估；半衰期小於  $10^6$  秒的核種， $A_{c2}$  的預測與  $A_{p0}$  相比則呈現不同程度的低估。至於長半衰期的核種 ( $>10^6$  秒)， $A_{c2}$  與  $A_{p0}$  的預測幾乎吻合，但  $A_{c1}$  的預測明顯高

估，最大差異為  $A_{p0}$  的 12 倍，恰為  $t_i/t_T$  比例的倒數。半衰期超過  $10^9$  秒以上的核種，三種照射情節的活化預測再趨於相同。

圖 2 與圖 3 中  $A_{c1}$  與  $A_{p0}$  在核種半衰期大於  $10^9$  秒時會再次趨於相等，這是因為在週期性照射的情節下，極長半衰期的核種在每一次中間停機時的衰變極少，幾乎可忽略，因此週期性照射結果與一次性連續性照射的預測自然趨於一致。然而此現象僅發生在核種半衰期遠大於設施生命期的情況，例如：當核種半衰

期是設施生命期的 3 倍以上時， $|1 - (A_{c1}/A_{p0})| < 10\%$ ；當核種半衰期是設施生命期的 30 倍以上時， $|1 - (A_{c1}/A_{p0})| < 1\%$ 。

總結上述觀察，簡化的情節(1)適用於評估半衰期小於  $10^3$  秒或大於  $10^9$  秒的核種，而簡化的情節(2)則適用於評估半衰期大於  $10^6$  秒的核種，若非此二特例，簡化連續照射情節的預測應搭配適當的修正因子，藉此彌補照射情節簡化所造成活化預測的高估或低估。舉例說明上述分析結果的實際應用，參考 Fang 等人[9]針對放射性物質生產設施混凝土活化的評估，該研究利用簡化情節(1)進行蒙地卡羅活化分析，針對混凝土中六個重要核種的活度預測，文中建議的修正因子分別為：

$^{54}\text{Mn}$  ( $T_{1/2}=0.85$  年) 8.9、 $^{55}\text{Fe}$  ( $T_{1/2}=2.74$  年) 3.6、 $^{60}\text{Co}$  ( $T_{1/2}=5.27$  年) 2.3、 $^{134}\text{Cs}$  ( $T_{1/2}=2.07$  年) 4.6、 $^{152}\text{Eu}$  ( $T_{1/2}=13.54$  年) 1.4、 $^{154}\text{Eu}$  ( $T_{1/2}=8.59$  年) 1.7，這些數值與圖 3 中  $A_{c1}/A_{p0}$  的結果一致。值得注意，圖 2 與圖 3 的結果是針對設施每天運轉約 2 小時的情況下所得，若是有不同的運轉情節則需重新比較方程式[2]-[4]的預測。

為了方便各類設施不同運轉情節的參考與引用，本研究進一步將前述照射情節的時間進行無因次化處理，方法與案例探討如下。

### 無因次處理與案例探討

針對週期性照射情節的一般化，選擇以一個照射週期  $t_T$  為單位來度量照射時間  $t_i$  或核種半衰期  $t_{1/2}$  應是最好選擇，此二參數對應之無因次化物理量這裡定義為工作因數  $T_R$  與衰變因數  $T_H$ 。此時，方程式[2]-[4]描述三種照射情節在 EOB 時的核種活度可以改寫成如下[5]-[7]所示：

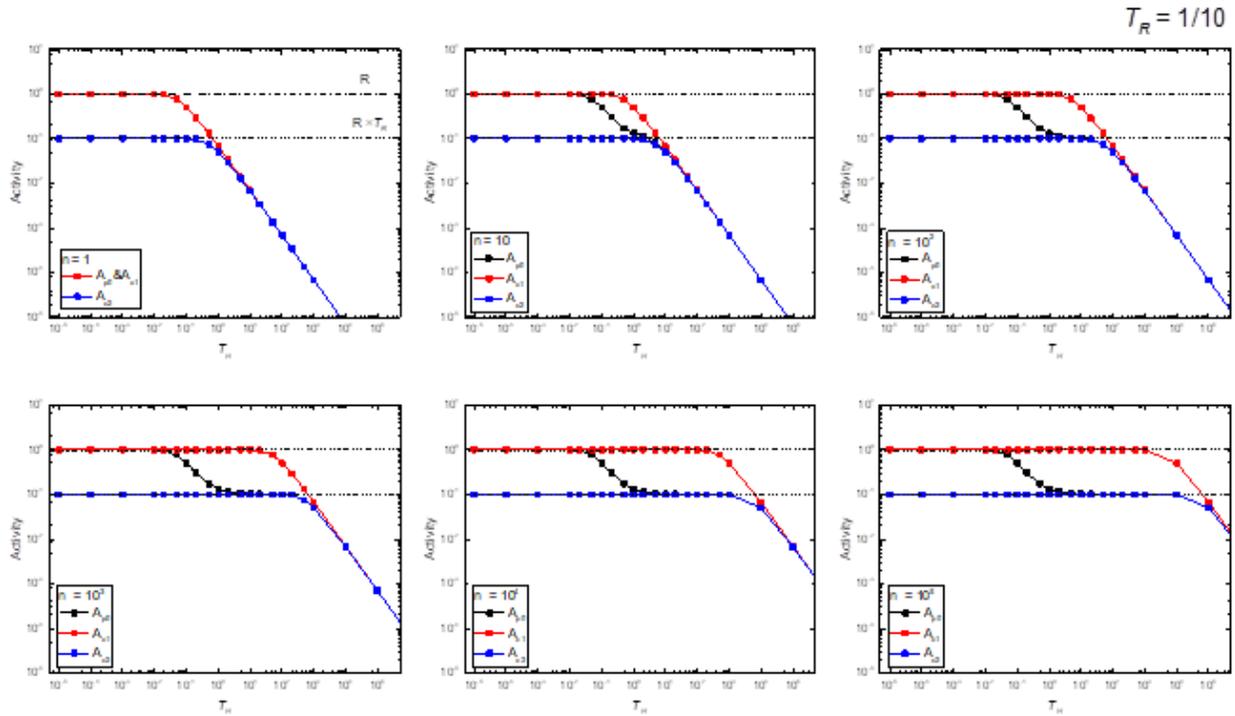


圖 5.  $T_R$  為 1/10 時，在不同照射週期次數累積下，三種照射情節預測 EOB 後各種半衰期核種的活度

$$A_{p0} = R \left(1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{T_R}{T_H}}\right) \frac{1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{n}{T_H}}}{1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{T_H}}} \quad [5]$$

$$A_{c1} = R \left(1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{n T_R}{T_H}}\right) \quad [6]$$

$$A_{c2} = R T_R \left(1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{n}{T_H}}\right) \quad [7]$$

$$\begin{cases} T_R \equiv \frac{t_i}{t_T}, & 0 < T_R < 1 \\ T_H \equiv \frac{t_{1/2}}{t_T}, & T_H > 0 \end{cases}$$

先選擇工作因數  $T_R=1/10$  的情況進行說明，圖 4 呈現情節(0)預測 EOB 後各種不同半衰期核種的殘存活度，並顯示其隨照射週期次數  $n$  的變化。 $T_H$  小於 0.01 的核種經過 1 次照射其數量即達最高飽和活度 ( $R$ )；隨著照射週期次數的增加， $T_H$  大於 10 的核種會達到一個次飽和活度 ( $R \times T_R$ ) 的穩定狀態。次飽和活度的物理意義在此可被解讀為核種衰變減少的數量與產製增加的數量達到平衡，即第  $n$  次照射結束後至第  $n+1$  次照射結束所衰變的核種數量與第  $n+1$  次

照射所增加的核種數量達到平衡，如下推導[8]所示：

$$A_{p0} = R \left(1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{T_R}{T_H}}\right) \frac{1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{n}{T_H}}}{1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{T_H}}} \equiv kR$$

$$kR \left(1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{T_H}}\right) = R \left(1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{T_R}{T_H}}\right)$$

$$T_H \rightarrow \infty, k = \frac{1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{T_R}{T_H}}}{1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{T_H}}} \rightarrow T_R \quad [8]$$

上式顯示長半衰期核種的殘存活度與飽和活度比值會趨近  $T_R$ ，此一觀察也與 Wu 等人[4]的論點一致。考量更長半衰期的核種(當  $T_H$  持續增加時)，核種的活度無法維持在次飽和狀態，在有限的照射次數下會呈現隨著  $T_H$  的增加而減少。

同樣固定  $T_R=1/10$ ，圖 5 則呈現三種照射情節在不同的照射週期次數下所預測的核種殘存活度。當照射只有 1 次時， $A_{c1}$  與  $A_{p0}$  的預測是完全一樣的，但  $A_{c2}$  明顯低估短半衰期核種， $A_{c2}$  與  $A_{p0}$  所預測

的活度只有在  $T_H$  大於 10 的情況會吻合。當照射次數逐漸增加時，三種照射情節的差異也逐漸明顯，整體變化大致如前一小節所述，簡化的情節(1)  $A_{c1}$  適用於評估短半衰期或極長半衰期的核種，而簡化的情節(2)  $A_{c2}$  則適用於評估長半衰期的核種，詳細半衰期數字或範圍會受工作因數  $T_R$  與照射次數  $n$  的影響，請參考圖 5 內容的呈現。若非如此，簡化連續照射情節的預測都應搭配適當的修正因子。前述放射性物質生產設施活化評估中假設的工作因數  $T_R$  為 1/12，其結果可與本案例  $T_R=1/10$  與  $n=10^4$  的情況進行大致比較：當評估半衰期約為小於  $10^3$  秒或大於  $10^9$  秒的核種，照射週期 24 小時對應之  $T_H$  為  $<0.01$  或  $>10^4$ ，情節(1)的簡化連續照射可獲得合理預測 ( $A_{c1}/A_{p0} \sim 1$ )；當評估半衰期約大於  $10^6$  秒的核種，照射週期 24 小時對應之  $T_H$  為  $>10$ ，情節(2)簡化連續照射是不错的近似 ( $A_{c2}/A_{p0} \sim 1$ )。

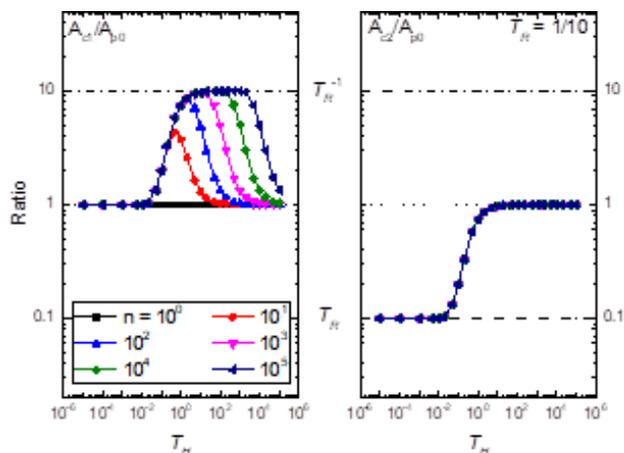


圖 6.  $T_R$  為 1/10 時,  $A_{c1}/A_{p0}$  及  $A_{c2}/A_{p0}$  在不同照射週期次數及衰變因數下的變化

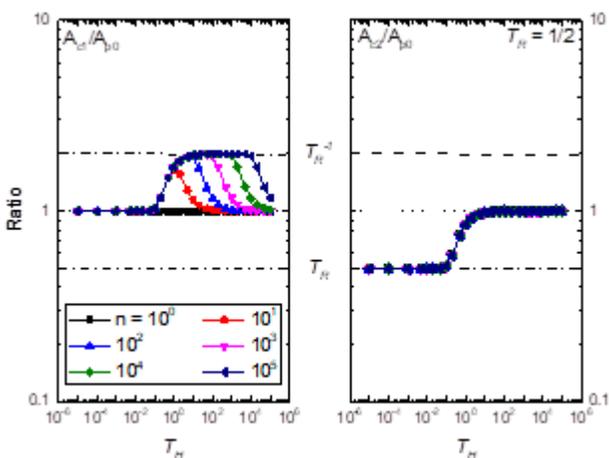


圖 7.  $T_R$  為 1/2 時,  $A_{c1}/A_{p0}$  及  $A_{c2}/A_{p0}$  在不同照射週期次數及衰變因數下的變化

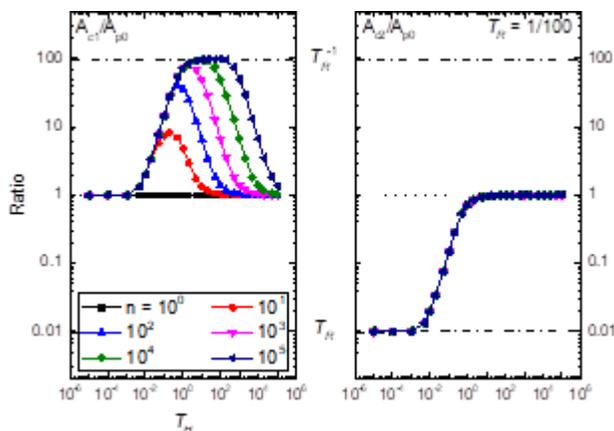


圖 8.  $T_R$  為 1/100 時,  $A_{c1}/A_{p0}$  及  $A_{c2}/A_{p0}$  在不同照射週期次數及衰變因數下的變化

至於其它半衰期核種評估所需之簡化連續照射修正因子可由圖 6 內容讀取。

加速器設施的種類繁多，視其目的有不同的照射情節，除了前述  $T_R$  為 1/10 的案例之外，圖 7 與圖 8 進一步分別呈現兩種不同工作因數下  $A_{c1}/A_{p0}$  及  $A_{c2}/A_{p0}$  的比值，以利使用者參考引用。圖 7 呈現  $T_R$  為 1/2 時的活度預測比值， $A_{c1}$  與  $A_{p0}$  的預測在  $T_H$  小於 0.1 時是一致的； $A_{c2}$  與  $A_{p0}$  的預測在  $T_H$  大於 10 時一致；至於  $T_H$  介於 0.1–10 之間的核種，簡化的連續照射情節可能導致 0.5–2 倍的活度預測差異，建議進行適當修正。圖 8 呈現  $T_R$  為 1/100 時的活度預測比值， $A_{c1}$  與  $A_{p0}$  的預測在  $T_H$  小於 0.001 時是一致的； $A_{c2}$  與  $A_{p0}$  的預測在  $T_H$  大於 10 時一致；至於  $T_H$  介於 0.001–10 之間的核種，簡化的連續照射情節可能導致 0.01–100 倍的活度預測差異，更應該執行必要修正避免過度高估或低估。

## 結論

參考文獻中常用於加速器引發物質活化分析的射束照射情節，本研究考慮週期性照射情節以及二種近似簡化的連續照射情節，以放射性物質生產設施的例行運轉為例，有系統地比較三種照射情節對於不同半衰期核種的殘存活度預測。相較於接近實際的週期性照射情節，比較結果顯示簡化的情節(1)適用於評估短半衰期或極長半衰期的核種；而簡化的情節(2)則適用於評估長半衰期的核種；至於其它半衰期的核種評估，簡化連續照射情節的預測可能導致不同程度的低估或高估。針對此一議題並考量加速器運轉照射情節的變化，本研究提供一系列的簡化連續照射修正因子，有利於簡化連續照射模型在蒙地卡羅活化分析的正確使用，也有利於相關設施活化分析或除役規劃的審查。



## 參考文獻

- [1] IAEA, 2020. Decommissioning of Particle Accelerators. International Atomic Energy Agency, Technical Reports No. NW-T-2.9, Vienna, Austria.
- [2] Martínez-Serrano, J.J. and de los Rios, A.D., 2014. Prediction induced activity in the HAVAR foils of the  $^{18}\text{F}$  production targets of a PET cyclotron and derived radiological risk. *Health Phys.* 107, 103-110.
- [3] Martínez-Serrano, J.J. and de los Rios, A.D., 2010. Prediction of neutron induced radioactivity in the concrete walls of a PET cyclotron vault room with MCNPX. *Med. Phys.* 37, 6015-6021.
- [4] Wu, Q., Wang, Q., Liang, T., Zhang, G., Ma, Y., Chen, Y., Ye, R., Liu, Q., Wang, Y., Wang, H., 2016. Study on patient-induced radioactivity during proton treatment in hengjian proton medical facility. *Appl. Rad. Isot.* 115, 235-250.
- [5] Augusto, R.S., Trudel, A., Liu, Z., Kinakin, M., Paley, W., Bjelić, Z., Messengerg, A., Mildenerger, J., Chak, J., Groumoutis, T., Smith, J., Pinto, D., 2021. An overview of the shielding optimization studies for the TRIUMF-ARIEL facility. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.* 1005, 165401.
- [6] Yoshida, G., Matsumura, H., Masumoto, K., Nakamura, H., Toyoda, A., Nobuhara, F., Iwai, S., Nishikawa, K., Hayashi, K., Ishioka, J., Hanaki, H., Miyauchi, H., Nagahashi, S., Sawada, M., Goto, K., Yamamoto, Y., Miura, T., Bessho, K., 2021. Investigation into activation of accelerators at various synchrotron radiation facilities in Japan. *J. Nucl. Sci. Technol.* 59, 543-554.
- [7] Luo, C., Li, W., Yang, B., Su, Y., Li, Y., Li, Z., Mao, W., Liu, X., Yan, W., Ma, F., 2022. Induced radiation studies and personnel dose assessment in a carbon ion therapy facility. *Appl. Rad. Isot.* 188, 110350.
- [8] Carbonez, P., La Torre, F. P., Michaud, R., Silari, M., 2012. Residual radioactivity at the CERN 600 MeV synchrocyclotron. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.* 694, 234-245.
- [9] Fang, P.W., Wang, K.W., Hsieh, Y.I., Huang, J.C., Sheu, R.J., 2022. Characteristics of neutron production and concrete activation in cyclotron vaults for self-shielded and non-self-shielded facilities. *Radiat. Phys. Chem.* 201, 110448.

發行人  
張似璵

主編  
劉代欽

執行編輯  
林珏汶

編輯委員  
尹學禮  
江祥輝  
劉中鈞



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