



財團法人 中華民國輻射防護協會

# 輻射防護簡訊

第 181 期

出刊日期 113 年 6 月 15 日

## 本期內容

## CONTENT

### 淺談建築材料中放射性核種

1

建築材料中存在著天然放射性核種，也可能會有人工的核種，這放射性核種會對公眾造成曝露。本文參考 IAEA 的報告介紹建築材料所含放射性核種的訊息，可提供擬建立對建築材料的分級監管控制的參考。

### 淺談 IAEA SRS-117-建築材料中放射性核種曝露的管制

4

2023 年 2 月 IAEA 提出新安全報告(SRS-117)：建築材料中放射性核種曝露的管制，對建築材料發出的游離輻射的管制作法提出建議。報告的目的是為各國政府、監管機構或主管機關以及建築材料業者提供指引與建議，以建立對建築材料的監管控制。

### 訓練班課程

8

公告本會各項訓練班開課時間

### 輻協新聞廣場

9

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

### 311 福島事件放射性核種進入海洋的來源分析

13

2011.3.11 福島核電廠因地震和海嘯之故發生廠房氫爆意外，放射性氣體、揮發物和液體大量釋放，特別是釋放到沿岸海洋，這外釋放核種的流向取決於它們的海洋地球化學、物理過程和生物吸收。由於洋流的變化和海上採樣的挑戰，海洋環境的釋放研究相形困難，許多國際研究機構參與調查研究且發表許多論文，研究結果引起全球的關注。

### 反應器壓力槽及其內部組件與生物屏蔽牆輻射特性調查

17

核電廠除役作業如採立即拆除，須對設備、組件依個別特性、分類進行輻射特性調查。根據國際以往拆解經驗，反應器壓力槽及其內部組件與生物屏蔽牆因運轉過程中子活化，所造成之放射性活度占整廠除役廢棄物達 90 % 以上，故對於其放射性活度數值、分佈與分類之掌握將十分的重要。

# 淺談建築材料中放射性核種

作者 許芳裕

國立清華大學 原子科學技術發展中心 博士/教授

由於天然游離輻射普遍存在於我們生活的環境，建築材料中亦存在天然放射核種，可能會對公眾造成曝露。國際原子能總署(IAEA)安全標準叢書編號 GSR 第 3 部分(Safety Standards Series No. GSR Part 3)《輻射源輻射防護和安全：國際基本安全標準》規定了對包括建築材料在內的一系列商品中的放射性核種進行監管控制的要求。這些要求包括建立法律和管理框架，並確定商品中放射性核種所致曝露的參考基準。2017 年 11 月，IAEA 內部的輻射安全標準委員會闡明，需要制定關於管理建築材料所致曝露的導則，以支援 GSR 第 3 部分要求的適用以及國際原子能總署《安全標準叢書》中提供的建議，以建立對建築材料的分級監管控制。

## 可能引起關注之含放射性核種建築材料的類型

大多數建築和建築材料含有一定程度的天然或人工放射性核種，它們的濃度取決於材料的來源。絕大多數建築材料不會導致曝露在參考基準(1 mSv/a)的以上。但在某些情況下，建築材料中放射性核種的濃度確實會導致高於 1 mSv/a 的輻射曝露。

## 1. 全國建築和建築材料中天然放射性調查

各國政府可對該國使用的建築材料產生的輻射曝露進行有代表性的調查，並確定有可能引起高於輻射參考基準的基本材料。調查需要涵蓋用於生產建築材料的原材料、再利用和回收材料。這包括在該國生產的任何材料，以及從其他國家進口的材料。

政府或指定的監管機構或主管機關可以製作管理清單，對材料的類別進行分類，範例如下：

— 天然來源的材料：明礬頁岩、建築材料或其天然火成岩來源的添加劑，如花崗岩(例如花崗岩、正長岩、正片麻岩)、斑岩、凝灰岩、火山灰岩(火山灰)和熔岩。

— 含有來自加工含天然放射性物質(NORM)的工業殘留物的材料：粉煤灰、磷石膏、磷渣、錫渣、銅渣和赤泥(鋁生產的殘留物)。

— 鋼鐵生產中的殘留物。

— 有條件解除管制的材料，以便在建築行業中重複使用。



— 由回收廢料製成的建築和建築材料的金屬部件。

## 2. 建築材料中的人工放射性核種

建築材料中人工放射性核種的一些最常見來源是在鋼鐵生產過程中熔化的輻射源。這對於包括地震易發地區的國家尤其重要，在這些地區，建築物的建造中使用了大量的鋼鐵和金屬。

台灣發生的輻射鋼筋汙染建築物事件，—  $^{60}\text{Co}$  輻射源在鋼筋製造過程中被熔化；受污染的鋼筋被使用來建造了 181 座建築物。這種污染在 10 年後才被發現，估計平均累積劑量約為 50 mSv。

烏克蘭發生了不同類型的事件，其中在一棟公寓樓的混凝土牆內發現了一個含有放射性  $^{137}\text{Cs}$  膠囊。該輻射源在一採石場遺失之料位計的一部分；該採石場的礫石用於生產住宅大樓的混凝土，該射源位於其中一間臥室的牆壁上。兩個家庭在這公寓住了九年多。當被發現時，已造成了居民的大量輻射曝露。



圖一 各種建築材料中所含放射性核種逐漸受到關注

### 3. 在建築材料中使用清除後的材料

公眾對建築材料的輻射曝露主要是天然放射性提高的結果；然而，由於過去的輻射作業、意外污染或經解除管制或豁免材料的重複使用，人工放射性核種可能發生在建築材料中。

在合理可預見的情況下，任何個人因含輻射材料而預計產生的有效劑量在一年內約為  $10 \mu\text{Sv}$  或更少，則可以考慮解除管制。考慮到低概率情境，可以使用不同的標準，即任何個人在這種低概率情景下預計產生的有效劑量在一年內不超過  $1 \text{ mSv}$ 。

IAEA GSR 第 3 部分表 I.3 所列鈾衰變鏈或釷衰變鏈中的放射性核種 ( $1 \text{ Bq/g}$ ) 和  $^{40}\text{K}$  ( $10 \text{ Bq/g}$ ) 的參考基準，通常無法確保建築材料符合  $1 \text{ mSv/a}$  劑量標準。因此，可能需要對在建築材料中使用此類材料進行額外的限制。

### 4. 現有建築物材料中的放射性核種

在 IAEA GSR 第 3 部分要求對之前已建造的建築物可能包含具有高濃度 NORM 或人工放射性核種(可能導致曝露在  $1 \text{ mSv/a}$  參考基準以上)的材料建立資訊。例如，在 1970 年代捷克、羅

馬尼亞和瑞典等國家中，有一些鐳含量較高的材料被用於建造住宅。此外，在鈾礦周圍地區也發生了未經授權使用尾礦的情況，居民將尾礦回填用作房屋的地基。

相同的參考基準適用於所有建築物，無論建造年份如何。如果有理由懷疑在建造建築物中使用了 NORM 或人工放射性核種含量較高的材料，則可能需要進行特別調查以查明此類建築物，並在有正當理由的情況下採取補救行動。

就 NORM 而言，建築材料的衍生活度濃度通常比一般管制水準(即  $^{232}\text{Th}$  和  $^{238}\text{U}$  衰變系列為  $1 \text{ Bq/g}$ ， $^{40}\text{K}$  為  $10 \text{ Bq/g}$ )更嚴格。

### 5. 控制建築材料中放射性核種的分級方法

建築材料還受其他特定法規和標準的約束，其中包括規範和標準化建築材料的物理、化學和生物特性的綜合措施。

在歐盟(EU)，建築產品法規構成了與健康和安全的建築材料不同特性的監管基礎(包括對游離輻射的防護)。

在加拿大，對建築材料的某些特性已經要求測試標準，包括檢測頻率。

需要明確界定不同政府部門、監管機構或主管機關、建築材料生產商、建築公司、建築師和其他方面的責任領域和界限。例如，主管機關可能負責制定法規，而建築安全部門可能負責核查這些法規在建築材料方面的遵守和執行。或者，也可以指定機構單獨負責這兩項任務。

德國的《輻射防護法》以及相關的《輻射防護條例》規定了對建築材料的要求，包括  $1 \text{ mSv/a}$  的參考基準。然而，合規性的驗證由建築工程研究所 ( Deutsches Institut für Bautechnik ) 進行，該研究所通常負責德國建築和施工材料的批准。

控制各種建築材料以實現輻射防護目的既不可行也沒有必要；IAEA 建議採用分級辦法，只管制可能引起高於既定國家參考基準的建築材料。

預先選擇與確立可能涉及輻射安全議題有關的材料和工業殘留物可能是有用的。

根據 IAEA 《安全標準叢書》中 NO.RS-G-1.7 提供的建議，包括每種放射性核種  $^{226}\text{Ra}$  和  $^{228}\text{Ra}$  的最大活度濃度定為  $1 \text{ Bq/g}$ ，以及排除 (Exclusion)、豁免 (Exemption) 和解除管制 (Clearance) 概念的應用等。主管機關應為建築業提供指導，包括行政和技術方面的指導。

### 我國現行對建築材料之管理作法

我國現行之天然放射性物質管理辦法 (106 年 9 月修訂) 第九條規定，經主管機關公告納管之建材，應實施活度濃度分析；如對建材表面  $0.1$  公尺處測量

輻射劑量率，其劑量率結果(不含背景值)小於每小時 0.2 微西弗者，不在此限。如實施活度濃度分析，在結果要求上較 IAEA 建議嚴格。

目前游離輻射主管機關核能安全委員會雖未將任何建築材料公告納管，但每年均對天然石材業者進行訪查，近年仍持續輔導與建議業者進行自主管理，及委託學研機構對建築材料業者(包括天然石材及其他建材業者)逐步宣導輻射安全重要性，及對市場進行抽樣調查與分析，提出自主管理建議等，掌握建築材料之輻射安全現況，提升民眾對建築材料安全使用的信心。



## 參考文獻

- ◆ IAEA, 2023. Regulatory Control of Exposure Due to Radionuclides in Building Materials and Construction Materials. No. SRS 117. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- ◆ IAEA, 2014. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements No. GSR Part 3. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- ◆ 核能安全委員會，天然放射性物質管理辦法，2017 年 9 月。

# 淺談 IAEA SRS-117-建築材料中放射性核種曝露的管制

作者 許芳裕

國立清華大學 原子科學技術發展中心 博士/教授

2023 年 2 月，IAEA 即提出新安全報告(SRS-117)：建築材料中放射性核種曝露的管制(Regulatory control of exposure due to radionuclides in building materials and construction materials)，對建築材料發出的游離輻射的管制作法提出建議。IAEA SRS-117 報告的目的是為各國政府、監管機構或主管機關以及建築材料業者提供指引與建議，以建立對建築材料的分級監管控制。

IAEA SRS 117 報告內容除了規定了出版物的目標和範圍(第 1 章)外，主要分成三個部分；(1)可能引起關注的建築材料類型描述(第 2 章)，(2)政府、監管機構或主管機關的作用和責任，並在建築材料的監管控制方面向監管機構或主管機關提供指引與建議(第 3 章)，以及(3)為建築材料的生產商、供應商和最終使用者提供之輻射防護指引與建議(第 4 章)。本文針對 SRS 117 報告中對政府和監管機構或主管機關的責任重點彙整。

## 政府和監管機構或主管機關的責任

IAEA GSR 第 1 部分的要求 4 規定，“政府應確保監管機構或主管機關在

其安全相關決策中具有有效的獨立性”。政府負責建立防護和安全的法律框架，並指定或建立一個負責制定和執行條例的監管機構或主管機關。IAEA GSR 第 3 部分指出：“監管機構或有關主管機關應實施防護策略，包括：確保向受曝露的個人提供關於潛在健康風險以及減少其曝露和相關風險作法的資訊。”；GSR 第 3 部分亦要求監管機構或其他相關當局確定建築材料的參考基準。通常認為，確定建築材料體外曝露的參考基準是不夠的；因其不包括氫引起的曝露，氫的防護 GSR 第 3 部分建議有一個單獨的參考基準。

政府有責任提供必要的財政、技術和人力資源，以可靠和有效地實施輻射風險控制的要求，包括對涉及放射性核種的建築材料。例如，實施對建築材料的要求需要特定的人力和技術資源，例如有能力進行可靠劑量評估的合格專家和能夠測量建築材料放射性含量的獨立實驗室。

1. 關於含放射性核種建築材料的法規和指引

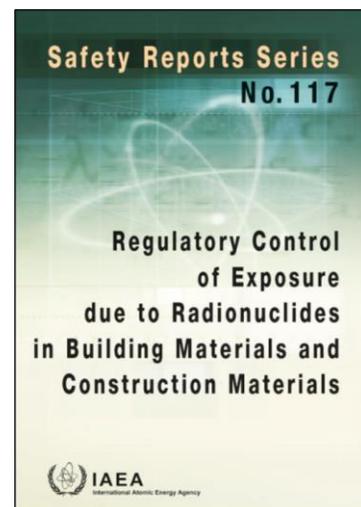
要建立一個監管框架，解決由於建築材料而造成公眾曝露的所有原因，並確定負責的各方(例如製造商、建築商)。

建立建築材料的監管要求，包括不超過 1 mSv/a 的參考基準(對於現有建築和新建建築)。對於現有建築物，參考基準可用於支援對公眾的保護，並在超過參考基準的情況下採取糾正措施。

一旦監管機構或主管機關確立了參考基準，法規就需要定義責任方，以確保建築材料符合要求。建築材料的生產商和製造商、進口商、貿易商和建築公司可被視為此類材料生命週期不同階段的責任方，可負責證明其遵守法規。

在引入有關建築材料輻射防護的新法規要求和指引時，監管機構或主管機關要驗證合規性責任分配給了製造商和最終使用者，以及此類材料的進口商。

2. 證明符合含放射性核種的建築材料的要求



為了證明符合含有放射性核種的建築材料的監管要求，材料的生產商、進口商、貿易商或最終使用者需要進行放射性測量；任何一種測量都需要符合品保要求並使用經主管機關批准的方法。

測量的樣品需要有代表性；由於某些原材料的不均勻性，可能必須考慮特殊的取樣程序。

某些國家，採石場會對開採用於建築材料的原材料進行分類，以確定該材料適合住宅或公共建築。然而，由於岩石體的不均勻特徵，需要對正在開發的批次原材料進行單獨測試，以證明其符合規定。

如果需要證明符合現有建築物的參考基準，加馬劑量率測量是適當的方法。

### 3. 建立含有放射性核種的建築材料篩選工具

為國家法規提供依據的參考基準以 1 mSv 的年有效劑量值為基礎。年有效劑量的計算可能很複雜，只能由輻

射防護專家完成。因此，將篩選工具納入條例或指引是一種非常普遍的做法，以便提供一種簡單的方法來證明符合參考基準。

篩選工具可以是基於  $^{40}\text{K}$ 、 $^{226}\text{Ra}$  和  $^{232}\text{Th}$  的測量活度濃度指數的簡單計算。此公式的一個例子是北歐國家輻射防護主管機關在 2000 年建議的活度指數濃度計算(在以下的公式中表示為 I)：

$$I = \frac{C_{\text{Ra-226}}}{300} + \frac{C_{\text{Th-232}}}{200} + \frac{C_{\text{K-40}}}{3000}$$

其中  $C_{\text{Ra-226}}$ 、 $C_{\text{Th-232}}$  和  $C_{\text{K-40}}$  是  $^{238}\text{U}$ ( $^{226}\text{Ra}$ )、 $^{232}\text{Th}$  和  $^{40}\text{K}$  的活度濃度，分別以 Bq/kg 表示。如果 AI 計算的結果低於國家法規或規範(指引)中設定的參考值，則建築材料的使用應符合 1 mSv/a 的參考基準。

### 4. 含放射性核種的建築材料不合格

如果發現不合格的情況，監管機構或主管機關需要在國家法規或規範(指引)規定的時限內通知主管機關。因此，監管規定需要包括通知責任的細節、

提交的資訊、通知的時限以及確定要通知哪個部門。

#### 4.1 何時通知主管當局

法規或指引需要具體規定通知監管機構或主管機關的條件，一般而言，要求在以下情況下進行通知是合適的：

— 新的建築物或建築材料進入市場，並被評估為引起高於 1 mSv/a 的輻射曝露(在法規中明定由製造商、進口商或貿易商通知)。

— 現有建築材料被評估為具有高於 1 mSv/a 的輻射曝露(由製造商或貿易商通知)。

— 現有建築物被評估為產生超過 1 mSv/a 的輻射曝露(由建築物擁有人、建築公司或開發商通知)。

#### 4.2 通知中應提交的資訊

對於建築材料，通知中提交的資訊建議包括以下內容：

— 建築材料的原產地。

— 供應商、貿易商、進口商或製造商的名稱、電話和地址。

— 所有相關放射性核種的活度濃度(由合格的實驗室或測量服務提供者評估確定)。

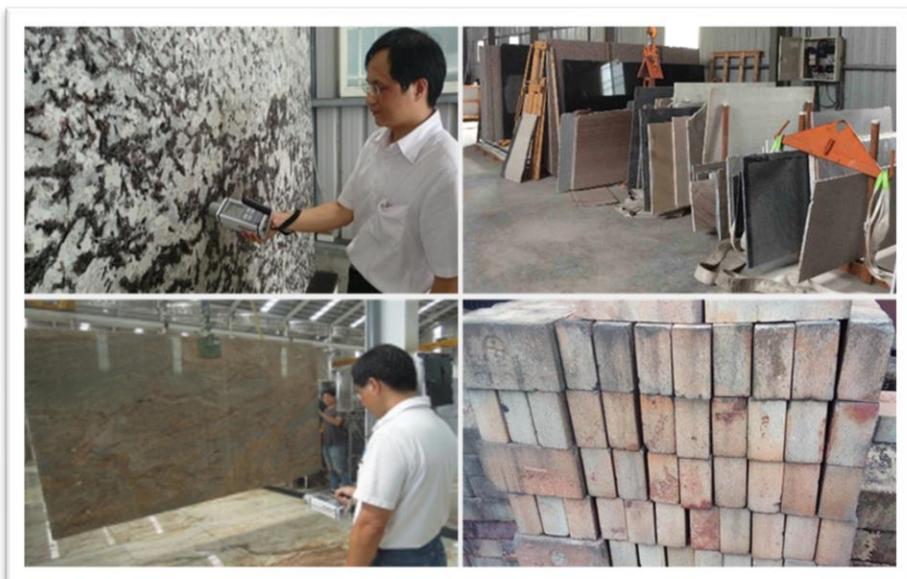
— 不合規定的原因：

- 將測量的活度濃度與法規或規範(指引)中規定的值進行比較。

- 劑量評估表明已超過既定的參考基準。

- 不符合規定的原因分析結果。

— 建築材料的預期用途。



圖一 現場檢測建築材料放射性情況

— 使用此建築材料的正當性 (Justification)。

對於現有建築物，此類資訊建議包括以下內容：

— 建築公司、開發商或建築物擁有者的名稱、電話和地址。

— 建築物的地址。

— 建築物目前和預期的用途。

— 在建築物內的不同房間或位置劑量率測量結果的紀錄。

— 不合格的原因：

- 測得的劑量率或活度濃度超過法規或指南中規定的值；

- 劑量評估表明已超過既定的參考基準；

- 不符合規定的原因分析結果。

— 提出的矯正措施和後續測量。

5. 對合格實驗室和測量服務提供者的監管要求

建築材料中的放射性以及現有建築物中的加馬劑量率的測量，需要由符合監管機構或主管機關要求規定的實驗室進行。這種要求可包括國家機構的認證或有關部門的批准。

擁有自己合格實驗室的大型建築材料生產商可能有義務將一定比例的樣品發送給獨立的實驗室或測量服務提供者，以確認或驗證其測量結果。

需要建立適當的品質保證系統，以確保所有測量結果準確無誤，並可追溯到國家或國際標準。

6. 含放射性核種建築材料的量測方法

各國需要建立劑量評估程式和方法，以確保一致性。輻射曝露是由於現有建築物還是由於建築材料，需要不同的測量方法。建築材料中放射性核種的活度濃度，可以使用考慮材料厚度和密度以及佔用時間等參數的模型來估計對代表性人員的年有效劑量。

對於現有建築物，加馬劑量率的測量可用於估計居住者的年有效劑量。

準確測定建築材料中放射性核種的活度濃度對於劑量評估和篩選工具的應用是必要的。確定建築材料中放射性核種的活度濃度可用不同的方法，最常用的方法是加馬能譜分析法。

提交測量的所有樣品必須能代表相關建築材料。如果樣品不能反映材料內部的實際放射性含量，則即使是高品質的測量結果也幾乎無用。

通常，測量天然存在的放射性核種 $^{40}\text{K}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 和 $^{232}\text{Th}$ 的活度濃度將是主要焦點。

加馬能譜分析儀設備需要具有可追溯的校正。

7. 測定含有放射性核種的建築物中的加馬劑量率

在現有建築物中，可以使用直接測量加馬劑量率來證明符合建築材料的劑量參考基準。需要採取措施確保可以比較不同建築物的劑量率測量值，同時考慮到周圍材料的貢獻和劑量率測量的位置。可以使用之兩個方法：

— 直接測量加馬劑量率和直接計算年有效劑量。這是證明是否符合規定的一種簡單有效的方法，特別是如果在

法規或規範(指引)中設定了加馬劑量率的衍生參考基準。

— 測量天然存在放射性核種的活度濃度，以計算由於 NORM 引起的劑量率；此方法可用於在法規中設定的衍生參考基準(活度濃度指數)以證明其合規性。

**證明建築材料中放射性核種符合法規要求**

1. 建築材料製造商和生產商

含有放射性核種建築材料的製造商和生產商可能包括木材、混凝土、礦物、粘土、天然和工程石材、磚塊、地板產品和建築金屬的供應商。建築材料製造商在供應這些材料時應提供其公司名稱、電話和地址等聯繫資訊，以實現可追溯性。出於輻射防護目的，建築材料應有清晰的標籤或文件，說明產品的名稱、來源和成分及其預期用途。

製造商負責在將原材料用於建築和建築材料之前對其進行管理控制，並需要考慮材料類型和來源等因素。考慮地質(產地)因素通常是可能發現天然放射性核種活度濃度增加的良好方法。製造商可向相關主管機關詢問更多資訊。

製造商和生產商需要謹慎行事，避免在建築材料中使用鈾礦場的鈾礦。

製造商和生產商需要確保採集具有代表性的樣品來確定建築材料中放射性核種的活度濃度。

如果在用於生產建築材料的原材料中測量放射性核種的活度濃度，生產者可以使用這些結果根據原材料的混合比例和生產過程中的品質變化等來

估計最終產品中放射性核種的活度濃度。生產商有責任核實其產品的估計活度濃度和濃度指數是否低於監管機構或主管機關規定的參考基準允許值。

建築材料的生產商需要由合格的實驗室測量其產品中的活度濃度，可以是自己的實驗室，也可以是獨立的測量服務提供者。所使用的測量方法和劑量估計方式需要符合監管機構或主管機關提供的任何法規或規範(指引)。

如果懷疑建築材料中存在人工放射性核種，生產商需要向主管機關報告，並諮詢合格的實驗室，以進一步識別放射性核種並調查材料中的放射性影響。

## 2. 建築材料供應商

鼓勵建築材料供應商(包括貿易商、經銷商和進口商)，確保以下幾點：

- 僅提供帶有技術規格的標籤材料；
- 放射性核種活度濃度離子的測量已由合格的實驗室進行(實驗室測試可由材料的製造商、生產商或進口商或外部服務提供者提供)；
- 建築材料符合國家法規或指南中定義的任何適用活動指數。

證明符合規定的文件可以作為對材料性能的基本要求之一。

當供應商在國際上購買或銷售建築材料時，他們成為進口商或出口商，還需要確保材料符合其他國家的相關要求和法規。

進口商和出口商需要注意，即使建築材料中放射性核種的活度濃度低於一般解除管制水平，這些材料仍可能超過個別國家規定的參考基準。

## 3. 建築材料的最終使用者(消費者)

建築材料的最終使用者(消費者)包括設計師、建築商、安裝人員和建築擁有者。鼓勵最終用戶選擇和使用帶有明確聲明技術規格標籤的材料，亦鼓勵他們要求供應商提供活度濃度測量的結果以及證明材料符合輻射防護要求的任何計算、評估報告或證書。

建築和施工公司可能還需要通過劑量率測量和/或提供證據證明僅使用符合國家法規或規範(指引)的建築材料來證明最終施工的合規性。

## 4. 證明建築材料符合輻射防護要求

為了確認建築材料是否符合輻射防護要求，需要以下資訊：

- 建築材料的原產地。
- 供應商和生產商的名稱、電話和地址。
- 由合格的實驗室或測量服務提供者確定之所有相關放射性核種的活度濃度。
- 基於以下一項或多項的合規性確認：
  - 將測得的活度濃度與法規或指南中規定的值進行比較；
  - 對測量的活度濃度應用合適的篩選工具的結果；
  - 對年度有效劑量的評估以及與既定參考基準的比較(包括計算假設和參數的詳細說明)。
- 執行測量的合格實驗室或測量服務提供者的聯繫方式。

為了確認現有建築物中的建築材料符合參考基準，需要以下資訊：

— 建築物內不同房間或位置的劑量率測量結果。

— 基於以下一項或多項的合規性確認：

- 將劑量測量結果與法規或規範(指引)中規定的值進行比較；
- 評估年度有效劑量並與既定參考基準進行比較(包括對假設和參數的計算的詳細描述)。

— 執行測量的合格實驗室或測量服務提供者的聯繫方式。

目前游離輻射主管機關核能安全委員會雖未將任何建築材料公告納管，但依我國現行天然放射性物質管理辦法第九條規定，若經主管機關公告納管之建材，應實施活度濃度分析。實施活度濃度分析，其活度濃度指數(I)定義公式與IAEA SRS-117報告相符，但在結果要求上比IAEA建議嚴格，我國 $I < 3$ 始能用於室內，IAEA(歐盟)建議 $I \leq 6$ 即可用於室內。

## 參考文獻

IAEA, 2023. Regulatory Control of Exposure Due to Radionuclides in Building Materials and Construction Materials. No. SRS 117. International Atomic Energy Agency, Vienna.

IAEA, 2014. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements No. GSR Part 3. International Atomic Energy Agency, Vienna.

核能安全委員會，天然放射性物質管理辦法，2017年9月。



## 訓練班課程(113 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 高雄 文化大學推廣部  
7 月 10 日~7 月 17 日  
A4 新竹 帝國經貿大樓  
8 月 05 日~8 月 09 日

B 組 18 小時-登記類  
B13 台北 進出口同業公會  
7 月 6 日~7 月 7 日  
B14 新竹 帝國經貿大樓  
7 月 16 日~7 月 18 日  
B15 台中 文化大學推廣部  
7 月 23 日~7 月 25 日  
B16 高雄 文化大學推廣部  
8 月 13 日~8 月 15 日  
B17 台北 進出口同業公會  
8 月 20 日~8 月 22 日  
B18 新竹 帝國經貿大樓  
9 月 10 日~9 月 12 日  
B19 台中 文化大學推廣部  
9 月 24 日~9 月 26 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 44 期  
新竹 帝國經貿大樓  
第一階段  
113 年 7 月 1 日~5 日  
第二階段  
113 年 7 月 8 日~12 日  
第三階段  
113 年 7 月 22 日~26 日  
第四階段  
113 年 7 月 29 日~8 月 01 日

進階 25 期  
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)

高雄 科學工藝博物館南館  
6 月 27 日(上午&下午)  
台北 進出口同業公會  
7 月 3 日(上午&下午)  
新竹 經濟部專研中心  
8 月 27 日(上午&下午)  
台中 文化大學推廣部  
7 月 30 日(上午&下午)

鋼鐵建材輻射偵檢人員訓練班

鋼 2 新竹 帝國經貿大樓  
6 月 13 日~6 月 14 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

- 核能安全委員會 113 年第 1 次「輻射防護專業測驗」及「操作人員輻射安全證書測驗」公告及簡章。[訊息連結](#)

113 年第 1 次「輻射防護專業測驗」及「操作人員輻射安全證書測驗」，訂於 113 年 4 月 27 日舉行，報名日期為 113 年 2 月 5 日至 3 月 1 日，採網路報名，相關事項請點選下方→(相關連結)詳閱簡章。

相關連結：[輻防測驗](#)、[輻安測驗](#)

### 國內新聞

- 中央廣播電台報導「民團反核電延役 環境部：使用核電須符 3 原則」。[訊息連結](#)

針對國民黨立委提出核電延役修法草案，環境部次長施文真今天(26日)表示，使用核電必須確保三大原則，包括核能安全、核廢料妥善處理、全民有共識；「全國廢核行動平台」則堅決反對核電延役，將於明天下午重返街頭，集結立法院外表達訴求。

多名國民黨立委日前提出「核子反應器設施延役條例草案」，盼為核電廠延役解套，在核能安全條件下，維持核能發電，降低能源危機。

對此，環境部次長施文真 26 日受訪表示，環境部對於使用核能一直秉持三大原則，包括核能安全、核廢料妥善處理及全民有共識。她說：『(原音)因為不管過去部長包括在立法院，還有包括去年底我們在參加 COP(聯合國氣候峰會)的時候，其實我們的政策都是以這 3 個原則為主，要確保它的安全性，然後要有全民共識，核廢料的處置必須要能夠妥善的處理。』

「全國廢核行動平台」發言人、綠色公民行動聯盟秘書長崔愷欣受訪時則表示，核電延役恐產生許多後遺症，必須考量台灣地震頻繁、核災等因素，不能倉卒修法。她說：『(原音)主要是因為這一次國會的新任立委他們一上任就已經提出了想要核電延役的修法，這個其實是一個沒有社會共識、甚至是一個違反專業的修法，因為其實核電的審查標準它本來是有它專業的，但是他們就是提出想要放寬它的年限，甚至放寬它的標準，那對此我們民間團體覺得是無法忍受。』

由多個公民團體組成的「全國廢核行動平台」將於 27 日反核大遊行 10 週年之際，在立法院外舉辦反核電延役行動，重現 2014 年占領行動，現場將播放核災警報，並號召 300 人一起躺在中山南路上，表達堅決反對老舊核電廠延役的訴求。(發布日期 113 年 4 月 26 日)

聯合新聞網報導「監委查核電廠  
抗震力 核電延役攻防再起」。

[訊息連結](#)

核電廠延役議題延燒，在野黨提出延役法案，準總統賴清德原屬意的閣揆人選、民進黨智庫副董事長童子賢也力促核電延役。外界正關注賴政府上任後能源政策是否反轉，監察院昨發布，監委田秋堃、趙永清、蔡崇義針對核電廠抗震能力，已啟動調查。在野黨質疑，監委是衝著童子賢等核電開明派而來，是在找賴清德麻煩。

三位監委認為，許多發展核能應用的國家皆審慎全面體檢核能電廠安全性，而台灣位環太平洋火環帶上，斷層密布地震頻繁，政府二〇二〇年耗資近五億元完成的「地震危害再評估」已指出，核一、二、三廠防震能力堪憂，最近核電延役聲再起，有必要為核安把關，因此啟動調查。

田秋堃：釐清核電廠補強強度

主查監委田秋堃昨表示，三一—福島核災後，二〇一五年行政院原子能委員會（現為核能安全委員會）要求台電公司針對核電廠進行「地震危害再評估」，執程序依循美國地震危害分析資深委員會所訂定第三層級（SSHAC Level 3）程序，考量距核一、二、三廠三二〇公里範圍內所有可能震源，進行機率式地震危害評估。

田秋堃指出，「地震危害再評估」提出核一、二、三廠地動加速度值（PGA）分別為〇點六九八g、一點二七二g、一點三八四g，遠遠超過核一、二、三廠建廠當時設計的防震係數，分別是〇點三g、〇點四g、〇點四g，「國家花了幾億元作了這分報告，結果至今都沒有人重視」，當時台電有提交補強報告給原能會，但如今主張核電延役聲再起，而不是除役，那補強的強度將是完全不同檔次，應予以釐清。

「特別是目前仍在運轉中的核三廠，遇到地震時，所承受的地動加速度值是最大的。」田秋堃說，因此她決定申請調查，針對該報告內容，邀專家學者、官員來一同為核電安全把關，另外，目前我國核電廠內，冷卻池均儲有大量燃料棒，若遇到地震時，如何應變，也是這次調查重點之一。

王鴻薇：鞏固反核基本教義派

國民黨立委王鴻薇質疑，田秋堃等監委偏向反核派，在民進黨內部反核立場鬆動之時啟動調查，意在鞏固綠營反核基本教義派，是衝著童子賢等核電開明派而來，是在找賴清德麻煩。國民黨立委賴士葆表示，監委當然有權責調查，不過監委也不是核電、核安專家，這時候跳出來，除了政治表態，沒有其他太大意義。

台電：配合監委調查提供資料

台電回應表示，會配合監委調查，提供相關資料並說明，台電在日本福島核災之後，已啟動核電廠安全停機的設備及結構進行盤點並補強，除役及運轉機組現階段均安全無虞。（發布日期 113 年 5 月 12 日）

- ➔ 中央廣播電台報導「監測日本核廢水對海洋影響 遠洋漁業重鎮高雄將增 2 生物氫檢測實驗室」。 [訊息連結](#)

日本福島核電廠將長期排放含氫處理水，對我國海域及漁業是否造成影響，需仰賴科學檢測數據進行相關評估。國家原子能科技研究院於桃園市建置我國第一間生物氫檢測實驗室後，也將協助位於高雄市的核安會輻射偵測中心及高雄市衛生局建置生物氫檢測實驗室，將針對遠洋漁業進行輻射偵測。

國家原子能科技研究院於 111 年 8 月啟用我國第一間生物氫檢測實驗室，目前年檢驗量能已提升至 1,400 件，除可提供相關漁產品檢測分析服務外，也用於分析我國鄰近海域生態環境中的氫含量，作為日本排放含氫處理水後，評估我國海域生態輻射影響重要參考依據。

國原院副院長王正忠指出，生物體內的氫，依其化學組成可分為「組織自由水氫」及「有機鍵結氫」兩類，其中，組織自由水氫可用「冷凍真空乾燥技術」萃取，而有機鍵結氫則需將乾燥後生物樣品在通氧高溫條件下緩慢燃燒取得，最後以「低背景液態閃爍計數儀」測定氫核種含量，目前測量的漁產品氫含量都在背景值下。他說：『(原音)最多還是自由水氫，就是體液這塊最多，如果那塊合格，那有機鍵結氫就更合格，這個(有機鍵結氫)會燒比較久，前面那個(自由水氫)比較快，若自由水氫達到 10 貝克，表示比較高，再來測有機鍵結氫。』

國原院也透露，目前桃園市的生物氫檢測實驗室主要檢驗基隆港及桃園機場相關日本海域的漁獲，後續會協助位於高雄市的核安會輻射偵測中心及高雄市衛生局建置兩間生物氫檢測實驗室，針對遠洋漁業重鎮進行輻射偵測把關，屆時全台將有三間生物氫檢測實驗室。(發布日期 113 年 5 月 21 日)

- ➔ 聯合新聞網報導「重啟核電？國發會主委劉鏡清稱從 3 方面來看待」。 [訊息連結](#)

外界關注賴政府是否重啟核電，新任國發會主委劉鏡清今天表示，對於核能的想法，他與和碩董事長童子賢、經濟部長郭智輝都是理性來看這件事，畢竟三人都是從產業來，他認為第一要看電夠不夠，第二是低碳電夠不夠，第三是淨零。

劉鏡清今天舉行媒體茶敘，在被問到如何落實 2050 淨零碳排的政策目標，以及核二和核三廠延役等相關問題時，他表示，2050 的淨零路徑圖是否要有核能是問號，核能是低碳能源，但能否成為綠能有賴於能否良好貯存，台電正在做乾式貯存，乾式貯存起來後，「有良好貯存，就有機會可以成為綠能」。

劉鏡清說，核能(延役)會牽涉法令問題，要等立法院決議、看社會認同、安全做好，這會是開放式討論，行政部門未來會依立法院決議做該做的事。他指出，現在只剩核二、三廠，他的了解是，核二重啟可能要四年以上；核能重啟如果朝野有共識，他本身沒有排斥，對他來講，只能在有限範圍內去減碳。

他指出，要減碳除了嘗試發展藍綠氫，另外考慮到廠商外銷需求，在綠電憑證上要找一些國外的憑證，協助廠商解決出口問題。

劉鏡清表示，2050 淨零目標滾動式調整，他最看好的是綠氫，現在用的是灰氫和藍氫，根據國際間的報告，綠氫 2030 年有機會起來、2035 年成熟商轉。此外，中研院已經有把天然氣轉成藍綠氫的技術，藍綠氫屬於零碳，成功的話可進入商轉，中研院估計成本和現在的綠電一樣。

他說，藍綠氫實驗若能成功，可作為備案，如果將來核能能夠進來，也是低碳電，前提是貯存的問題能解決，但也會是機會，長期他比較看好三、五年後的綠氫發的商轉發展，畢竟台灣四面環海，儘管技術還在不斷發展。(發布日期 113 年 5 月 28 日)

自由時報報導「國原院首用氫水養海水魚 實驗輻射生物累積、強化監控機制」。 [訊息連結](#)

日本去年 8 月起開始排放含氫核廢水，台灣核安會長期監控其可能造成的影響，而國家原子能科技研究院今(7日)也表示，已在 5 日開啟「海水魚含氫養殖試驗」，確認生物累積效應，以利未來快速監測海水生物是否受污染。

日本福島第一核電廠因地震引發核災後，累積龐大核廢水無處去，去年 8 月 24 日起，正式將處理過的核廢水稀釋流入海，但其中仍含有無法清除乾淨的「氫」放射物，引發周邊鄰近國家擔憂對環境及生物的影響。我國政府透過行政院層級啟動應變。

而為了為確保海水生物食用輻射劑量，國家原子能科技研究院化工所已在 6 月 5 日上午 9 點，將氫核種投入到有 150 尾的黃錫鯛養殖池內(氫濃度 1500Bq/L)，預計進行長達 1 年的生物累積實驗，確認其體內無機氫(TFWT)及有機氫(OBT)生物累積效應，並與日本含氫海水養殖的比目魚進行比對、分析差異，未來更可快速確認台灣周遭海洋或海水生物是否遭受氫污染，更加完善檢測及監控機制。

而核安會日前發布「我國因應日本含氫廢水排放配套措施進度說明(第 20 報)」，指出日本福島第一核電廠已於 4 日結束第 6 批次含氫廢水排放作業，總計排放體積約為 7800 立方公尺，氫總活度約 1.4 兆貝克。

該報告中提到，依中央氣象署最新的海流擴散預報顯示，第 6 批次排放的含氫廢水，受福島沿岸潮汐與黑潮影響緩慢往北擴散。整體而言，總計 6 批次的含氫廢水隨著洋流往東擴散，主要影響區域在日本本州東部海域，最遠已橫跨黑潮延伸流東區，預報最大濃度值皆低於儀器最小可測值，目前對台灣周遭海域暫無任何影響。

核安會表示，持續透過跨部會合作進行我國海域輻射監測，自 106 年開始至今年 6 月 2 日，累積完成海水、海生物(含漁獲)、岸沙(含海底泥)等各式海域樣本，共計 9250 件樣本分析，結果皆無輻射異常。(發布日期 113 年 6 月 7 日)

# 311 福島事件放射性核種進入海洋的來源分析

作者 陳清江

義守大學 醫學影像暨放射科學系 退休

## 前言

2011 年 3 月 11 日東北地震和海嘯之後發生福島第一核電廠斷電和過熱，導致廠房氫氣爆炸，放射性氣體、揮發物和液體大量釋放，特別是釋放到沿岸海洋。這些放射核種的命運主要取決於它們的海洋地球化學、物理過程和生物吸收。雖然陸地上的放射性可以重新採樣並繪製其分佈圖，但由於洋流的變化和海上採樣的挑戰，向海洋環境的釋放分布更難表徵。

此次外釋進入海洋的事件史無前例，許多國際研究機構參與相關調查研究計畫，並發表許多研究論文，有些結果也透過新聞媒體披露引起全球的關注。本文主要參考“福島第一核電廠衍生的海洋中放射核種回顧：傳輸、歸宿和影響評估” (Fukushima Daiichi-Derived Radionuclides in the Ocean: Transport, Fate, and Impacts. Annual Review of Marine Science Vol. 9:173-203 January 2017. <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-marine-010816-060733>) 編寫而

成。本回顧共有 12 個國際研究所參與，引用文獻達 164 篇內容豐富，分成數小主題彙整以饗讀者。

## 簡介

2011 年 3 月 11 日，日本東北地區發生芮氏規模 9 的地震和引發的海嘯，導致福島第一核電廠(FDNPP)向海洋釋放大量放射核種。此外釋事件直接的健康問題集中在短壽命的放射性污染物上，而環境影響則集中在壽命較長(半化期超過 1 年)的放射核種。

與 1986 年發生的車諾比爾核電廠(烏克蘭)事故相比，福島的洩漏量要小得多，並且包含更具揮發性的放射核種和氣體，例如  $^{131}\text{I}$  (半化期 8 天)， $^{134}\text{Cs}$  (半化期 2.06 年) 和  $^{137}\text{Cs}$  (半化期 30.2 年)。福島釋放的  $^{137}\text{Cs}$  總量比大氣層核爆(在 1963 年達到頂峰)全球放射性落塵小約 50 倍，比車諾比事故小約 5 倍，並且與塞拉菲爾德核燃料再理廠故意排放所造成的結果類似(比塞勒 2014)。

本文介紹有關 FDNPP 釋放到海洋的人造放射核種的已知狀況，重點是鈾

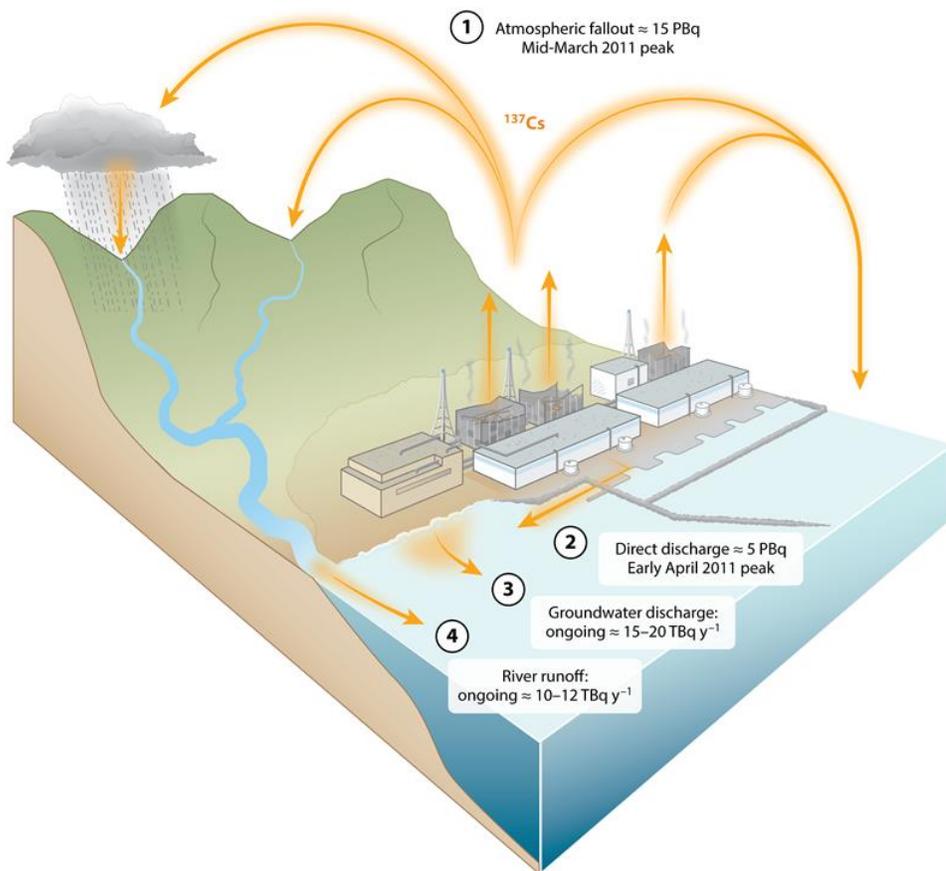


放射核種，也討論其它人造放射核種污染物。首先總結了海洋輸入，包括大氣落塵、直接排放和 FDNPP 放射核種的陸地來源。本論文也研究了鈾的傳輸和命運，從它通過洋流等物理過程的傳輸和混合開始，然後討論它與碎屑和生物顆粒的不那麼占主導地位但很重要的關聯，以及它們向海底的傳輸和在海底的命運。也討論了 FDNPP 污染物的生物吸收及其對海洋生物群可能的劑量影響。最後討論了人類健康和社會問題。

## 福島第一核電廠放射核種進入海洋的來源

環境中 FDNPP 衍生的放射核種有四個主要來源(圖 1)。最大和最早的來源是氣體和揮發性放射核種最初的排放和爆炸性釋放到大氣中，這導致了陸地和海洋的落塵，大氣落塵在 3 月 15 日左右達到高峰。

傳輸模型顯示，80%以上的落塵發生在海洋表面，其中 FDNPP 附近的沿海水域沉積量最高，儘管沒有海洋上空的大氣落塵數據可以直接測量。



 Buessler K, et al. 2017.  
Annu. Rev. Mar. Sci. 9:173–203

圖 1. 福島第一核電廠  $^{137}\text{Cs}$  來源示意圖。大氣落塵 (1) 和直接排放 (2) 顯示為事故第一個月釋放的總活度 (PBq) (表 1 中的中位數)。地下水排放 (3) 和河流徑流 (4) 第一年的近似範圍，單位為兆貝克 (TBq)

大氣落塵造成的後果是在 FDNPP 的緊急冷卻工作期間，受污染物質直接排放到海洋的程度有所減少，導致陸地徑流、受污染地下水流增加以及積水從反應爐建築物的地下室洩漏到海洋。這種二次釋放過程在 2011 年 4 月 6 日左右達到峰值，當時在靠近 FDNPP 的海洋中觀察到最高的 FDNPP 放射性銫活度。還必須考慮持續透過河流、徑流和地下水流從陸地釋放到海洋的放射核種。這些來源受到一系列複雜過程的影響，但它們比最初的大氣落塵和隨後的直接排放要小得多。

太平洋地區的  $^{137}\text{Cs}$  水平受背景落塵和 FDNPP 污染的共同影響，而  $^{134}\text{Cs}$  水平則完全與 FDNPP 輸入相關，因為這種壽命較短的放射核種的背景落塵(核爆落塵殘留)在現代已經幾乎完全蛻變。

在 FDNPP 釋放後的第一個月內，測量到的反應器排放物中  $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$  活度比是均勻的，並且非常接近  $(0.99 \pm 0.03)$ 。當  $^{134}\text{Cs}$  活度衰減校正至初始釋放時間時，它們反映了源自 FDNPP 的  $^{137}\text{Cs}$  活性水準。因此  $^{134}\text{Cs}$  的測量結果可用以區分從核爆落

塵殘留和 FDNPP 中釋出的  $^{137}\text{Cs}$  存量成分。

我們對放射性銫的每個源項進行了不同的估計，並與其它四種放射核種： $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{239,240}\text{Pu}$ 、 $^{129}\text{I}$  和  $^{131}\text{I}$  進行了簡要比較。

由於大氣模式中傳輸和沈積參數的不確定性以及缺乏進行反演計算所需的觀測，對  $^{137}\text{Cs}$  大氣沉降總量的估計差異很大 (表 1)。其中一些研究使用陸地和/或表層海洋觀測來估計其大氣沉積模型，這些估計範圍為 8.8 至 50 PBq。其它研究僅估計海洋上空的大氣落塵沉積，這些估計範圍為 5 至 14.8 PBq。由於不同文獻的估計值差異太大，取平均值作為代表，總結 10 份文獻大氣沉降總量估計值為  $17 \pm 7.6 \text{ PBq}$ 。

其它研究僅估計海洋上空的大氣沉降物沉積，這些估計範圍為 5 至 14.8 PBq，總結 6 份文獻海洋上空大氣沉降估計值為  $8.5 \pm 2.8 \text{ PBq}$ 。

為了估計放射性銫直接排放到海洋的總量，一些小組使用了海洋模型，並結合了 2011 年 3 月至 5 月直接排放最高時期 FDNPP 附近地表水中銫的觀測結果。也能夠使用  $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$  活度比來進一步區分直接排放和大氣輸入的時期。總結 8 份文獻直接排放估計值為  $8.4 \pm 5.7 \text{ PBq}$

由於某些地區缺乏抽樣，上述一些估計被認為可能被低估。儘管如此，對於來自大氣落塵和直接排放到北太平洋的  $^{137}\text{Cs}$  的 FDNPP 輸入總量，估計值趨於收斂於 15 至 20 PBq。總結 3 份文獻北太平洋總量估計值為  $15.5 \pm 0.5 \text{ PBq}$ 。

表 1. 福島第一核電廠進入海洋的  $^{137}\text{Cs}$  來源估算結果(PBq)

來源	文獻數量	估算量範圍	平均值
大氣沉降總量	10	8.8~36	17±7.6
海洋上空大氣沉降	6	5~14.8	8.5±2.8
直接排放到海洋	8	3.5~27	8.4±5.7
北太平洋總量	3	15.2~16.1	15.5±0.5

由表一的  $^{137}\text{Cs}$  海洋大氣沉降總量加上直接排放到海洋總量估計值為 16.9 PBq，與北太平洋總量估計值 15.5 PBq 相當接近，這意味著比 FDNPP 事件之前的北太平洋核武測試（69 PBq）額外增加了約 25% 的  $^{137}\text{Cs}$ 。

日本沿海水域的放射性銫也透過河川來源和地表水徑流輸入。銫對淡水中的懸浮顆粒有很高的親和力，因此它通過河流的傳輸和運送很大程度上與暴雨和洪水期間發生的高沉積物負荷有關。一旦進入海洋，顆粒狀銫在很大程度上仍然不可逆地吸附，實驗顯示只有百分之幾從海水中的土壤中脫附。

海底地下水排放是放射性銫進入海洋的另一個長期來源，特別是來自受污染的 FDNPP 場地的放射性銫。神田 (2013) 利用 FDNPP 現場港內水的交換率以及港內外海水 Cs 濃度差異，計算出 2011 年夏季的平均釋放率為 93  $\text{GBq}\cdot\text{d}^{-1}$ ，夏季的平均釋放率為 8  $\text{GBq} - 6 \text{PBq}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

從 2012 年 7 月到 2015 年 3 月，FDNPP 場址附近地表水中的  $^{137}\text{Cs}$  活度從大約  $10,000 \text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$  下降到  $1,000 \text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ，研究計算出 2013 年的排放率約為 30  $\text{GBq}\cdot\text{d}^{-1}$  和 2014 年 10  $\text{GBq}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

與第一個月相比，這些比率較小，事故當時  $^{137}\text{Cs}$  輸入量高出五到六個數量級（30 天內  $15-20 \text{PBq} = 0.5-0.7 \times 10^6 \text{GBq}\cdot\text{d}^{-1}$ ）。

上面討論的河流輸入的大小與通過 FDNPP 地下水的連續輸入源的大小相似，儘管進入海洋的大部分河流輸入由顆粒相關的銫組成，而溶解的 Cs 在地下水中佔主導地位。

#### 其它長半化期放射核種

就半化期超過 1 年、對健康影響最大的其它放射核種而言， $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{239,240}\text{Pu}$  和  $^{129}\text{I}$  最受關注。FDNPP 大氣落塵中的  $^{90}\text{Sr}$  含量比在陸地上測得的  $^{137}\text{Cs}$  低四個數量級，因為其揮發性較低。FDNPP 釋放的  $^{90}\text{Sr}$  大部分直接排放到北太平洋，估計總庫存量為 0.04 至 1.0 PBq。自初次排放以來，據報導 FDNPP 場址發生放射性廢液洩漏，海水中  $^{90}\text{Sr}$  活度相應異常，FDNPP 場址附近海洋中  $^{90}\text{Sr}$  活度短時間內超過  $^{137}\text{Cs}$ 。

2011 年 6 月，在 FDNPP 東方海上 30-600 公里處測得海水中初始  $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$  比率為  $39 \pm 1$ ，該比率顯著高於全球大氣沉降比率 1.6，但更接近在 FDNPP 現場的死水中測得的

值為  $12.5 \text{ }^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$  比率隨著時間的推移而下降，2013 年 FDNPP 場址 100 公里以內的水域中平均為 3.8 推測這是由於持續的意外洩漏和/或 Sr 的較高流動性造成的，因為 Cs 更強烈地吸附在土壤顆粒上，而 Sr 仍然大部分溶解，因此在通過地下水的任何持續釋放中相對富集。

使用  $^{134}\text{Cs}$  濃度數據以及  $^{90}\text{Sr}$  和  $^{137}\text{Cs}$  之間的明顯關係來估計 FDNPP 在 2013 年 9 月以  $2.3-8.5 \text{GBq}\cdot\text{d}^{-1}$  的速率將  $^{90}\text{Sr}$  洩漏到北太平洋。這證實了東京電力公司 (TEPCO) 截至 2015 年 6 月的監測數據顯示，FDNPP 排放通道附近  $^{90}\text{Sr}$  和  $^{137}\text{Cs}$  的活度分別比 2011 年 3 月前的濃度高出 10 倍和 1,000 倍。

長半化期 Pu 同位素的潛在釋放也引起了公眾的廣泛關注，因為這些同位素對體內輻射暴露存在潛在的巨大健康風險。根據對落葉層和土壤的檢查，FDNPP 衍生的  $^{137}\text{Cs}$  與  $^{239,240}\text{Pu}$  的比率為 100 萬或更高，其中使用 Pu 的同位素比率來區分武器測試衍生的 Pu 和 FDNPP 衍生的 Pu。總共只有相對少量的 Pu，大約  $1.0-2.4 \times 10^9 \text{Bq}$  從受損的 FDNPP 反應器釋放到環境中。

這與此放射核種的低揮發性和 FDNPP 爆炸物釋放有限的推論相當一致，與 CNPP 相比，CNPP 釋放了多達  $3 \times 10^{13}$  Bq 的  $^{239,240}$  Pu。日本海岸附近的幾項海洋研究未能檢測到 FDNPP 中的 Pu 污染。

FDNPP 也釋放了約 1 公斤的長半化期  $^{129}$ I (半化期為 1600 萬年)，主要透

過直接排放到海洋中。這些排放僅導致海水濃度小幅增加  $^{129}$ I，超過 FDNPP 附近水體上部 250 m 的沉澱物水準。由於其半化期長， $^{129}$ I 在未來幾年可能可用作 FDNPP 釋放的海洋環流示踪劑。

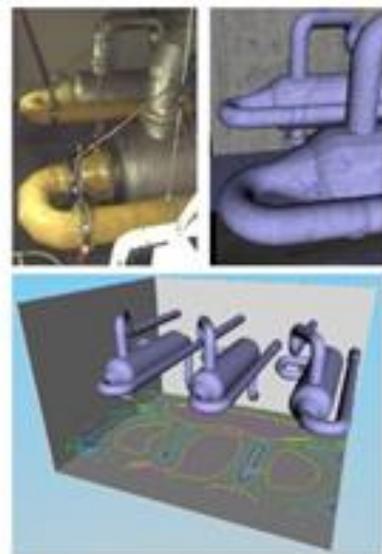
最後，雖然  $^{131}$ I 的半化期很短 (8 天)，但它在陸地上有重大的健康問

題，但在海洋中則較少。其分佈一般遵循  $^{137}$ Cs，但由於放射性衰變，其濃度隨時間下降得更快。觀測顯示，2011 年 3 月 26 日之前， $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$  比率在大氣沉降到海洋中的變化較大，此後更加穩定。這種變化已被用來論證沿岸海洋放射性銫的主要來源最初是大氣落塵，但此後為直接排放。

# 反應器壓力槽及其內部組件與生物屏蔽牆輻射特性調查

作者 江謝鎮至

台灣電力公司 核能後端營運處



## 一、前言

遵循我國目前非核家園政策，國內核電廠將陸續進入除役階段。除役作業如依照國際間立即拆除策略，首要之務是將爐心燃料移出至用過燃料池或乾式貯存設施安全存放，再對廠房內設備、組件依個別特性、分類分別進行輻射特性調查、拆除、除污、裝箱及運貯等廢棄物管理作業。

根據國際間以往之拆解經驗，反應器壓力槽 (Reactor Pressure Vessel, RPV) 及其內部組件 (RPV Internals, RPVI) 與生物屏蔽牆 (Biological

Shielding, BS) 因多年運轉中子活化，所造成之放射性活度占整廠除役廢棄物達 90 % 以上；故對於反應器壓力槽及其內部組件與生物屏蔽牆放射性活度數值、分佈與分類之掌握將十分的重要。

其中反應器壓力槽及其內部組件放射性來源除了中子活化外，另包含活化腐蝕產物 (Chalk River Unidentified Deposits, CRUD)、燃料破損釋放之分裂產物等，故完整詳細的輻射特性調查作業將有助於未來切割、分類、裝箱、放射性廢棄物產量估算等作業規劃。

國際間對反應器壓力槽切割、處置的方式主要有三種，分別為整桶處置、粗切灌漿處置、細切裝箱處置等，如下圖 1。考量廢棄物盛裝容器製造或採購成本、切割方式的選擇，筆者認為配合反應器壓力槽切割處置方式的不同，其輻射特性調查的精細程度應有所不同。整桶處置的輻射特性調查最簡略、粗切處置次之，細切裝箱處置應最詳細。

## 二、輻射特性調查

依據 IAEA TRS No.389 報告，一個廣義的輻射特性調查計畫，應包含：

1. 歷史資料的審查
2. 計算方法的執行
3. 依據適當的統計分析方法來制定取樣及分析計畫
4. 現場量測、取樣與分析的執行
5. 數據的審查與評估
6. 計算結果與量測數據的比較

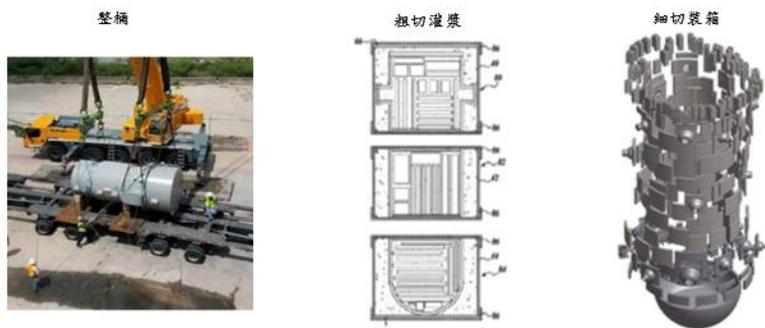


圖 1. 反應器壓力槽切割處置型式

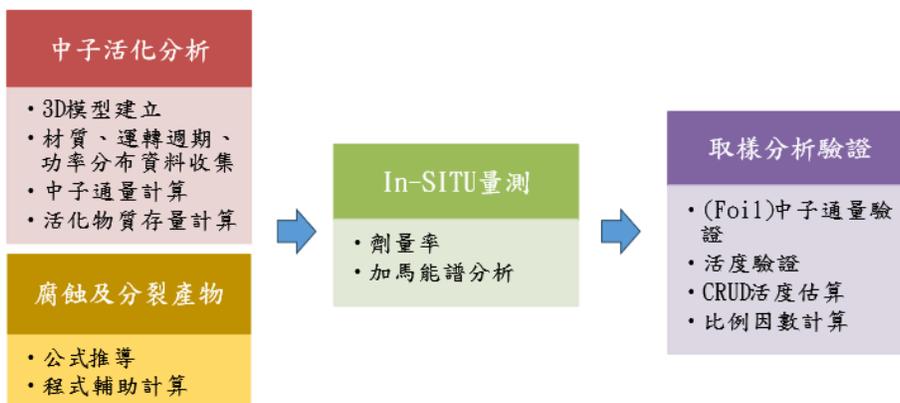


圖 2. RPV、RPVI & BS 輻射特性調查流程

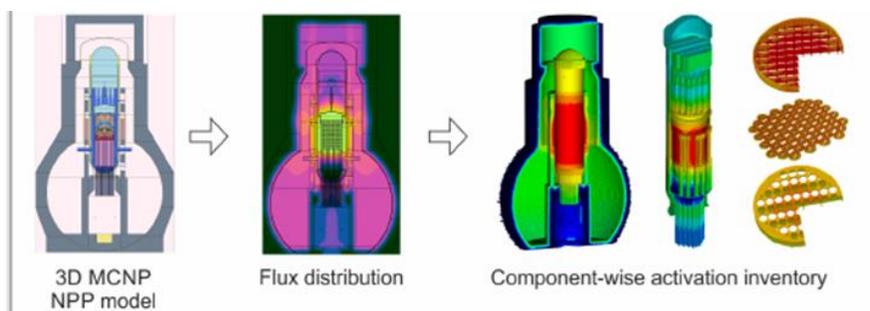


圖 3.中子活化分析流程

其流程與美國多部會輻射偵檢暨場址調查手冊 (Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual, MARSSIM)中資料生命週期 (Data life cycle)量測數據品保概念一致。

國際間執行反應器壓力槽及其內部組件與生物屏蔽牆輻射特性調查，為全面了解中子活化、腐蝕產物及分裂產物放射性活度，會分別利用公式推導、程式評估、現場實際量測及取樣分析之方式，以獲得輻射特性調查結果，如圖 2。

就中子活化放射性存量部分，一般會先蒐集其運轉週期資訊、爐心功率分布及反應器壓力槽及其內部組件與生物屏蔽牆尺寸、材質組成、密度等資料，並建立 3D 模型，利用電腦程式

(如 ANISN、DORT、ORIGEN、MCNP)執行中子通量及活化物質存量計算，如圖 3。有了初步計算結果，須再執行取樣分析，包含利用金屬薄片 (foil) 中子通量量測、取樣核種活度分析以驗證程式分析結果。

腐蝕產物及分裂產物放射性活度估算方面，義大利 Trino 核電廠採用公式推導，如式 1，及 VISIPLAN 軟體輔助計算，如圖 4，並以實際表面劑量率及取樣核種分析(包含難測核種分析及比例因數計算)加以驗證計算結果。

反應器壓力槽頂蓋內表面污染預估：

$$\frac{dC_{w,i}(t)}{dt} = \frac{a_i \cdot d_H}{4} \cdot C_{b,i} - (b_i + \lambda_i) \cdot C_{w,i}(t)$$

.....式 1

$a_i$ : 沉積因子(1/s)

$b_i$ : 釋出因子(1/s)

$\lambda_i$ : 放射性衰變常數(1/s)

$C_{w,i}$ : 主冷卻水放射性濃度量(Bq/cm<sup>3</sup>)

$t$ : 時間(s)

$d_H$ : 水力直徑(cm)

### 三、各國案例

德國 Würgassen 核電廠在取樣分析上，同時取活化樣品及腐蝕產物樣，包含乾燥器、汽水分離器、控制棒導管、噴射泵、爐心側板等組件共 36 個樣送西門子 KWU 放射化學實驗室分析，最後將程式計算結果及取樣分析結果進行比對驗證。日本東海核電廠生物屏蔽牆以 Co-60 及 Eu-152 兩個主要核種進行中子活化程式分析及鑽心取樣比對，結果大致相近。

斯洛伐克 V1 核電廠活化組件輻射特性調查除了反應器壓力槽及其內部組件與生物屏蔽牆外，

另外針對高放廢棄物貯存設施、用過燃料池皆進行量測、取樣分析。瑞士國家放射性廢棄物處置合作社 Nagra 發展 A M A C ( A d v a n c e d Methodology for Activation Characterization) 技術，有效且精確地獲取中子活化分析數據，並可最佳化切割與裝箱策略，如圖 5。

#### 四、結論

本國核電廠已陸續達運轉年限，除役作業積極進行與推動中，反應器壓力槽及其內部組件與生物屏蔽牆之輻射特性調查、拆除切割及裝箱規劃可參考國際間案例，規劃適合之作業方式，並與主管機關密切溝通，以達到核能安全之要求，並降低工作人員與廠外民眾之輻射風險。

### VISIPLAN A 3D ALARA planning tool for Nuclear Environments



圖 4.VISIPLAN 軟體介面

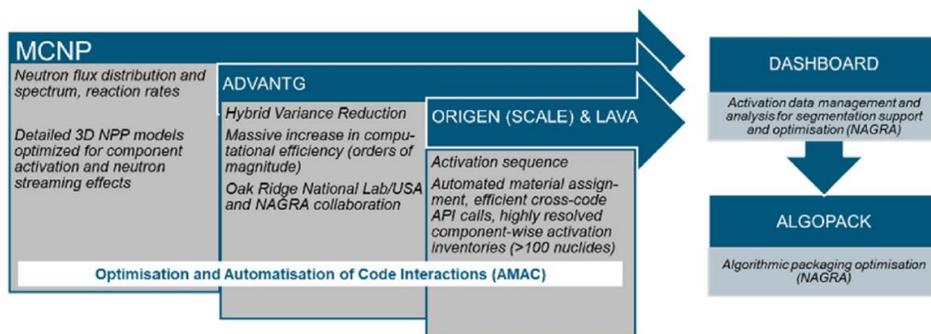


圖 5.AMAC 技術流程

### 🔍 參考文獻

- [1] Radiological Characterization of Shut Down Nuclear Reactors for Decommissioning Purposes. IAEA TRS No.389,1998.
- [2] Characterization of RPV, RPV Internals and Core Scrap at WÜRGASSEN Nuclear Power Plant. B. Christ, 1999.
- [3] Illustration of Nagra' s AMAC approach to Kori-1 NPP decommissioning based on experience from its detailed application to Swiss NPPs. Ben Volmert, 2021.
- [4] Radiological characterization of the reactor or pressure vessel of Trino NPP for dismantling purposes. Stefano Rossini, 2018.
- [5] Comparison of Calculated Radioactivity and Core Sample Analysis of biological shield concrete required for study on decommissioning of Tokai power station. K.Tokuhara.
- [6] Radiological Characterization of V1 NPP Technological Systems and Buildings–Activation. Kristína Křištofová.

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