

出國報告（出國類別：其他）

參加核能電廠除役輻射評估程式 -RESRAD 訓練

服務機關：行政院原子能委員會放射性物料
管理局

姓名職稱：藍泰蔚薦任技士

派赴國家：美國

報告日期：106 年 5 月 31 日

出國時間：106 年 2 月 26 日至 106 年 3 月 12 日

摘要

2025 非核家園是政府政策，目前台電公司依據核子反應器設施管制法規定，已於 104 年 11 月向原能會提報核一廠除役計畫申請除役許可。原能會正積極進行審查，即將展開核電廠各項除役作業安全管制作業。國內首次面臨核電廠除役課題，核電廠除役之安全管理為原能會新增之管制業務，內容包括除役計畫審查、除役作業檢查及新增除役廢棄物處理與貯存設施之興建審查及其轉運安全檢查、除役作業輻射安全管理及環境輻射監測等工作，故亟需就除役作業之安全管理，研習國際核能先進國家核電廠除役之實務技術與經驗。

本次出國目的為參加阿岡諾國家實驗室主辦之 RESRAD 訓練課程，學習「放射性核種殘餘風險與劑量分析 (RESRAD)」軟體程式系列、發展歷史及方法論，可針對核電廠除役後之廠址內外可能被核種污染的土地，經處理及評估後是否符合法令規範的劑量進行分析，以作為受低微量放射性核種污染的土地場址其解除管制或再利用的判斷依據，並可作為核電廠除役後場址之釋出或再利用以及除役有關規劃除污作業之參考。RESRAD 軟體程式亦可進行核電廠除役作業輻射現場的劑量評估，提供作業人員瞭解可能的輻射暴露風險，以利預先採取適當的防範措施，減少人員輻射暴露，有效執行核電廠除役作業，如能建立 RESRAD 程式技術能力，對除役作業輻射安全管理及環境輻射監測工作將有助益。

本次訓練基本課程的程式系列包括 RESRAD-ONSITE，RESRAD-OFFSITE 和 RESRAD-BUILD 評估程式(以下分別簡稱 ONSITE、

OFFSITE、BUILD)。而進階訓練課程為期五天，從 ONSITE 和 OFFSITE 程式的進階應用開始，包括 ONSITE 用於飽和層中的核種移動和稀釋的質量平衡模型，以及非分散模型的分析探討，OFFSITE 的射源項模型，則包括主要污染區的污染釋出選項及其意義的解析；在實作分析方面，則以程式的確定性、靈敏度分析及不確定分析練習操作為主。另亦學習兩個 RESRAD 家族程式：生物評估之 RESRAD-BIOTA(以下簡稱 BIOTA)及緊急應變之 RESRAD-RDD(以下簡稱 RDD)程式之應用。本課程每年舉辦數次不等，此次於 2 月 27 日至 3 月 10 日期間在阿岡諾實驗室多功能會議室兼電腦教室舉辦，學員有來自南韓、瑞典、美國及加拿大等國，共 28 人參加基礎課程訓練、13 人參加進階課程，職參與基礎及進階之課程訓練，未來擬將所學應用於核電廠除役管制作業。

目錄

一、	目的.....	4
二、	過程.....	6
	(一) 行程概要.....	7
	(二) 訓練概要.....	8
三、	心得.....	14
四、	建議事項.....	45

一、目的

2025 非核家園是政府政策，目前台電公司依據核子反應器設施管制法規定，已於 104 年 11 月向原能會提報核一廠除役計畫申請除役許可。原能會正積極進行審查，即將展開核電廠各項除役作業安全管制作業。國內首次面臨核電廠除役課題，核電廠除役之安全管理為原能會新增之管制業務，內容包括除役計畫審查、除役作業檢查、除役作業輻射安全管理及環境輻射監測等工作，除須進行相關除役關鍵安全議題之審查與驗證技術研究發展外，亦亟需就除役作業之安全管理，研習國際核能先進國家核電廠除役之實務技術與經驗，進行管制人力培訓，提昇管制技術能力，以確保除役作業安全。

本次出國目的為參加阿岡諾國家實驗室主辦之放射性核種殘餘風險與劑量分析軟體程式(RESidual RADioactivity，簡稱為 RESRAD)訓練課程，RESRAD 家族程式最初在 1980 年代初期發展出來，過去數十年間陸續開發了整套的程式，其主要功能包括：針對含有放射性核種的土壤，計算是否符合外釋法規規定的劑量和風險要求；計算含放射核種的土壤，對工作人員或一般民眾可能造成的年劑量值；及計算土壤中放射性核種擴散至附近週遭介質中的含量。因此利用 RESRAD 家族程式來評估核電廠廠址內外可能被核種污染的土地，經處理後是否符合法令規範的劑量，作為核電廠除役後場址之釋出或再利用以及除役有關規劃除污作業之參考。RESRAD 軟體程式亦可進行核電廠除役作業輻射現場的劑量評估，提供作業人員瞭解可能的輻射暴露風險，以利預先採取適當的防範措施，減少人員輻射暴露，有效執行核電廠除役作業。

本次訓練介紹包括 RESRAD-ONSITE，RESRAD-OFFSITE 和

RESRAD-BUILD 的程式介紹和分析模式。RESRAD-ONSITE 是評估被核種污染的土壤，並探討可能的暴露劑量；RESRAD-OFFSITE 評估程式是 RESRAD-ONSITE 評估程式的擴展，結合大氣擴散與地下水傳輸模式，可推算放射核種在土壤和地表水體中的場外累積劑量，可計算廠界處的個人輻射劑量。RESRAD-BUILD 則用以評估建築物內受到來自牆壁、天花板、地板所含的放射性物質所造成的輻射劑量。課程是由教師與學生間互動式的電腦演示，討論確定性、機率性分析、及敏感性分析的影響等。藉由例題逐步演算指導，從數據輸入步驟直至輸出計算結果的討論，由「做中學」學習程式的應用。進階訓練課程從 RESRAD-ONSITE 和 RESRAD-OFFSITE 評估程式的進階應用開始為期五天。課程中另外介紹兩個 RESRAD 程式：RESRAD-BIOTA 及 RESRAD-RDD。RESRAD-BIOTA，係處理對動植物輻射劑量的評估問題。另一個是 RESRAD-RDD 程式，專門針對輻射彈事件的緊急應變的防護措施決策輔助工具。課程涵蓋確定性、機率性劑量分析技術、及敏感性分析的深入探討。

由於台電公司已提送核一廠除役計畫送原能會審查，並規劃 2018 年起展開除役作業，藉由參加本訓練課程，學會使用程式進行核電廠除役現場的輻射劑量評估，對監督及安全管制核電廠除役作業誠有助益。

二、過程

(一) 行程概要

(二) 參加核能電廠除役輻射評估程式-RESRAD 訓練概要

(一)行程概要

參加核能電廠除役輻射評估程式-RESRAD 訓練行程

2 月 26 日（日）	臺北至芝加哥
2 月 27 日（一）	芝加哥至阿岡諾實驗室，報到，RESRAD 訓練
2 月 28 日（二）	RESRAD 訓練-ONSITE
3 月 1 日（三）	RESRAD 訓練-ONSITE
3 月 2 日（四）	RESRAD 訓練-OFFISITE
3 月 3 日（五）	RESRAD 訓練-BUILD
3 月 4 日（六）	資料整理
3 月 5 日（日）	資料整理
3 月 6 日（一）	ADVANCED 訓練-ONSITE KD 的估算、非均勻污染處理
3 月 7 日（二）	ADVANCED 訓練-OFFISITE、射源釋放選項、敏感度分析、不確定分析
3 月 8 日（三）	ADVANCED 訓練-BIOTA
3 月 9 日（四）	ADVANCED 訓練-BIOTA 實際案例學習、RDD
3 月 10 日（五）	ADVANCED 訓練-RDD
3 月 11 日（六）	阿岡諾實驗室至芝加哥搭機返台
3 月 12 日（日）	抵達臺北

(二) 參加核能電廠除役輻射評估程式-RESRAD 訓練概要

2 月 26 日(日)、2 月 27 日(一) –辦理相關研習課程有關手續

26 日晚間八點抵達芝加哥歐海爾機場，次日一早前往美國伊利諾州杜佩奇郡，美國能源部所屬的阿岡諾國家實驗室(Argonne National Lab)，於大門接待中心辦理出入許可證後，便開始研習課程，相關註冊資訊則係事先透過網路完成。

首日之課程表如下：

ONSITE Workshop	
Day 1	
8:45-9:00	註冊
9:00-9:20	RESRAD 專案經理余家禮(Yu, Charley)進行開幕致辭及學員自我介紹
9:20-9:40	ONSITE 概述
9:40-10:40	輸入參數之示範
10:40-10:50	休息
10:50-11:30	輸出參數之示範
11:30-1:00	午餐
1:00-2:00	上機練習
2:00 – 3:00	方法論概述
3:00 – 3:40	上機練習（確定性分析）
3:40 - 3:50	休息
3:50 – 4:15	方法論概述（續）
4:15 – 4:45	上機練習和課程回顧

2 月 27 日（一）、2 月 28 日（二）-ONSITE 程式介紹

目的在介紹 ONSITE 程式概述、方法論、分析工具以及應用實際案例，學員需瞭解 ONSITE 可以幫助解決的基本問題、考慮的環境運輸途徑、可能的土地利用情節，ONSITE 的主要輸入參數群，以及 ONSITE 中的主要保守假設。實作部分，學員需要將污染場址描述轉換為輸入參數，選擇適當之劑量和風險係數和劑量轉換因數編輯器(Dose and Risk Coefficient and Dose Conversion Factor Editor)，利用敏感性分析功能確認參數對計算結果之影響、學習如何在輸出報表中找到使用輸入參數值列表，及輸入參數資料之分享。程式有 6 項訓練課題，簡報之議題為：

- (1) ONSITE 訓練課程
- (2) ONSITE 概述。
- (3) ONSITE 方法論
- (4) 分析工具
- (5) 綜合應用
- (6) 驗證和確證

3 月 1 日 (三)、3 月 2 日 (四) -OFFSITE 程式介紹

3 月 1 日至 3 月 2 日介紹 OFFSITE，以及瞭解 ONSITE 和 OFFSITE 的主要差異：ONSITE 的目的是針對場址內為評估被核種污染的土壤，並研究輻射劑量與可能潛在路徑的暴露劑量。OFFSITE 的目的是估計對位於污染場址區域之外的受體接受放射物質暴露結果，計算包括放射學劑量、DCGL 以及核種濃度等數值。程式差異方面：包括 Kd 值之估算(限 ONSITE)、大氣擴散模型(限 OFFSITE)、灌溉居住畜牧等各區域位置指定(ONSITE 固定、OFFSITE 可個別指定)等，學員需要學習包括使用 OFFSITE 介面的主要功能、主要輸入參數群、方法論、分析

工具以及應用實際案例，方法論部分，特別介紹 OFFSITE 程式的地下水核種傳輸模型，及高斯煙羽大氣擴散模型兩大模型。實作部分，學員需要將污染場址描述轉換為輸入參數，利用敏感性分析功能確認參數對計算結果之影響，簡報之議題為：

- (1) OFFSITE 訓練課程
- (2) OFFSITE 演示
- (3) OFFSITE 方法論
- (4) OFFSITE 地下水傳輸
- (5) OFFSITE 空氣散佈模型
- (6) OFFSITE 核種累積
- (7) OFFSITE 劑量暴露
- (8) OFFSITE 不確定分析
- (9) OFFSITE 驗證、確證、標竿分析、國際比較

3月3日（五）-BUILD 程式介紹

3月3日介紹 BUILD 程式，目的在介紹 BUILD 程式概述、開發緣由，ONSITE 和 BUILD 的比較，可適用之射源類型和受體的相關參數設定、及如何以三維座標系統來模擬建築物內污染情節。方法論方面則個別介紹了 BUILD 考慮的劑量暴露路徑。實作方面，則以範例演練介紹解決問題之技巧，簡報之議題為：

- (1) BUILD 訓練課程
- (2) BUILD 介紹
- (3) BUILD 演示
- (4) BUILD 方法論

- (5) 問題解決技巧
- (6) BUILD 驗證
- (7) 品保和品管

3月6日(一) -ONSITE 程式進階-Kd 值估算、方法論

進階課程介紹 ONSITE 中如何利用既有的參數進行分佈係數(Kd, Distribution Coefficients)的推導，可用方式包括地下水濃度、溶解度限制及根吸收等方法，以及介紹 ONSITE 中用於解釋飽和層中核種移動和稀釋現象的質量平衡模型以及非分散模型。

實作分析方面，需要學習如何利用克服 ONSITE 原有的假設，來處理不均勻污染例如複數的污染分層情況，或是場址有數個熱點情況，及練習確定性、靈敏度分析及不確定分析。簡報之議題如下：

- (1) ONSITE Kd 值估算選項
- (2) ONSITE 的質量平衡和非分散性模型
- (3) 非均勻相污染

3月7日(二) -OFFSITE 程式進階-主要污染區的污染釋出選項、方法論

進階課程介紹 OFFSITE 中射源項模型，包括主要污染區的污染釋出選項及其意義，實作分析方面，練習確定性、靈敏度分析及不確定分析。簡報之議題如下：

- (1) OFFSITE 射源項模型-主要污染及釋放選項概述
- (2) OFFSITE 射源項模型-潛沒之主要污染區(Submerged primary contamination)
- (3) OFFSITE 射源項模型-射源項模組和釋放選項

- (4) 面積因子，使用劑量和面積數據從 OFFSITE 的不確定分析運算來產生面積因子

3 月 8 日 (三) -BIOTA 程式介紹

3 月 8 日及 3 月 9 日上午介紹 BIOTA 程式，目的在使學員瞭解美國能源部對環境輻射防護的管制和評估框架，以及 BIOTA 如何利用該框架為基礎發展對生物體劑量評估分級方法，實作練習方面，除程式介面練習，也進行生物體劑量評估分級方法，共分三階段，包括一般篩選階段(General Screening)、場址特定篩選階段(Site-Specific Screening)、現場特定分析階段(Site-Specific Analysis)的上機實作。課程中也額外介紹生態風險評估原則和流程，有助於學員認識如何利用 BIOTA 程式於生態風險評估問題的分析流程，並介紹生態風險評估方法運用的實際案例：Hanford 和 China Lake 場址，最後報告 BIOTA 程式和其他生物體劑量評估程式比較結果，確認 BIOTA 程式計算結果可信度。程式有 12 項訓練課題，簡報之題目為：

- (1) 課程介紹和概述
- (2) 環境輻射防護的管制和評估框架
- (3) BIOTA 程式概述
- (4) 一般篩選和場址特定篩選階段的演示
- (5) 生態風險分析的原則
- (6) 敏感性分析特點
- (7) 生物體編輯器特點
- (8) 數據匯入和匯出特點、圖表及報告
- (9) 案例分析 I-對 Hanford 300 Area 場址的 BIOTA 劑量評估

- (10) 案例分析 II-China Lake 武器試驗場的生態風險分析
- (11) 野生動物轉移因子(Transfer factor)資料庫-ICRP RAP 和劑量係數
- (12) BIOTA 劑量評估程式於國際程式比較學習之結果

3月9日(四)、3月10日(五) -RDD 程式介紹

3月9日下午及3月10日上午介紹 RDD 程式，目的在介紹防護措施 (Protective Action)及操作型指引(Operational Guidelines)，以及如何利用 RDD 程式產生操作型指引以快速決定必要的防護措施，操作型指引因應事故的不同時期分為七類；每一類再依不同的特性分為數個子類，上機實作的部分則依照操作型指引的每個分類，給予適當的練習課題。程式有 12 項訓練課題，簡報之題目為：

- (1) 操作型指引概述
- (2) 操作型指引和 RDD 方法論
- (3) 群組 A: 緊急應變期間進出管制
- (4) 群組 B: 操作型指引早期保護行動(疏散或掩蔽)
- (5) 群組 C. 對於搬遷的操作型指引-第一部：住宅，商業和其他領域
- (6) 群組 C. 對於搬遷的操作型指引-第二部：關鍵基礎設施利用
- (7) 群組 D: 暫時進入對基本活動的搬遷區
- (8) 群組 E: 對運輸和進出路線之操作型指引
- (9) 群組 F-4:從輻射管制區實際財產的釋放之操作型指引
- (10) 不包含於 RDD 裡的額外情節
- (11) 群組 G:食物消費
- (12) RDD 的品保和品管、標竿分析和應用

三、心得

RESRAD 是 RESidual RADioactivity 的簡稱，RESRAD 家族程式最初在 1980 年代初期發展出來，從那以後，由於不同狀況、需求、以及使用者之要求，因此在過去 20 年間陸續開發了整套的程式，其主要功能包括：針對含有放射性核種的土壤，計算是否符合外釋法規規定的劑量和風險要求；計算含放射核種的土壤，對工作人員或一般民眾可能造成的年劑量值；及計算土壤中放射性核種擴散至附近週遭介質中的含量。

基本上 RESRAD 的劑量分析邏輯是：從放射性核種的活度推算，分別計算核種以不同路徑於環境介質的遷移情況，並考慮進入人體的各種曝露途徑及個人生活習性的情境模擬，計算人體受到的輻射劑量，以確認符合年劑量限度的法規要求。本次共研習五種程式，分述如下：

一、ONSITE

(一)程式概述

ONSITE 程式主要目的即為評估被核種污染的土壤，並研究輻射劑量與可能潛在路徑的暴露劑量。

談到污染土壤的風險評估，社會大眾所關切的問題之一：多乾淨才夠乾淨？根據 10 CFR 20, Subpart E 規定，如果背景輻射以外的殘留放射性對關鍵群組的平均個體導致每年不超過 25 mrem (0.25 mSv) 的劑量暴露(包括來自地下水水源的放射性暴露)，則該場址將被視為非限制使用，並且殘餘放射性已經降低到合理可實現的水準 (ALARA)。但土壤中的核種濃度到何種水準時，可以符合上述法規規定，即是 ONSITE 程式分析的重點。

(二)方法論

概述

ONSITE 程式可以透過兩大方式，進行劑量/風險估算或確定清潔標準的分析，其一為正向的分析：輸入測得的殘留放射性物質濃度，選定環境暴露途徑，輸入相關參數透過程式計算獲得暴露劑量數值。其二為逆向的分析：輸入劑量限制以估計可容許殘留的放射性物質濃度限值，污染場址低於此放射性物質濃度限值可使個體的暴露劑量低於劑量限度，亦即計算導出濃度指引水平(Derived Concentration Guideline Level, DCGL)，程式也能依據每個放射核種的最大可能暴露劑量，分別為每個放射核種導出 DCGL，存在多個放射核種的情況下，使用分數總和(Sum of Fraction)公式可運用個別核種 DCGL 來評估總核種濃度是否會造成場址超過法規規範的劑量暴露限值。

RESRED 的基本方法論是透過濃度、環境轉換因數、劑量係數間的乘積，最終獲得劑量數據。以 ONSITE 為例，考慮了三大類、九個主要的環境途徑(如下圖一)，外部暴露來自於地面，吸入暴露的途徑來自於污染物顆粒和氡氣，攝入則考慮土壤、水、植物、肉、牛奶和水生生物，以最保守的農業情節中居民日常活動可能受到輻射劑量的情境加以分析。在程式執行前，需對土壤中放射性核種活度進行調查，以了解放射性核種污染的面積與形狀。分析時，ONSITE 程式將土壤分成 3 層，即無污染覆蓋層(上層)、污染區(中層)、未飽和區或飽和區(下層)。另外也考慮核種的衰變、土壤侵蝕和瀝濾效應的分析，及可依照居民的生活習性差異，透過輸入該土壤上停留的時間比和屋內/外的屏蔽因數等參數要項，計算來自土壤地表的個人體外輻射劑量。

本圖係 RESRAD 訓練課程上課資料，為避免著作權爭議，故不顯示。

圖一、ONSITE 程式考慮之暴露途徑及主要方法論

ONSITE 沒有如 OFFSITE 般使用高斯煙羽模型做為之大氣釋出模式，係使用質量負載因數(Mass loading)表現塵土釋出效應(例如：用於吸入及沉積於落葉上被植物吸收的途徑)，在 OFFSITE 中，質量附載因數則延伸至大氣傳輸模式作為輸入參數之一。

地下水傳輸模型

地下水釋出為 ONSITE 唯一的釋出模式，對於飽和層中核種移動和稀釋現象，ONSITE 使用質量平衡(Mass balance)和非擴散(Non-Dispersive)模型來模擬，此兩項模型可用來計算穿透時間(Breakthrough time)，係指在放射核種測量後，在水源使用地點當放射核種首次出現水中之時間，上升時間(Rise Time)，係指在穿透時間後，放射核種濃度達到最大值的時間，而稀釋因數(Dilution factor)，係指於水源使用地點放射核種在水中的濃度，與滲流水(Infiltrating water)離開不飽和區域時的放射核種濃度之間的比率。

質量平衡模型將井位設定於污染區的中心，假定從污染區釋放的所有放射核種都通過井抽出，且污染物一旦到達地下水表(**underwater table**)就被抽出，不考慮上升時間，所謂上升時間即從污染物進入地下水表，再移動到井裏所需時間。稀釋因數的計算方式是以被截獲的污染水量除以井水抽水率(**U_w**)的比率。排放到地下水表的污染水量為 $A \times I$ ，其中 A 為污染區的面積， I 為滲透率，假定 100 % 被污染的水皆被截取，由此可知，稀釋因數取決於排放到地下水表的污染水 ($A \times I$)，以及井水抽水率，使用質量平衡模型時，須注意其適用於較小的污染區域 並且較為保守。

非分散模型則將井設置於污染區邊緣，此模型考慮上升時間以及在污染物行進期間發生衰變和內生長(**Ingrowth**)，稀釋因數則取決於排放到地下水位的污染水量，井位處的污染層深度，井深度低於地下水表的深度等因素，一般而言，非分散模型適用於較大區域的評估。

特殊放射核種傳輸模型

特別的是，**ONSITE** 對特殊放射核種，氚，碳-14 和氫，也建立了各自的傳輸模型，用於估算土壤，土壤水分和空氣中的碳-14 和氚濃度，其中地下水中的碳-14 和氚濃度是使用 **RESRAD** 程式的地下水模型得出的。

氚的模型中，空氣中氚濃度來自於計算土壤水分中的氚含量，其後以水蒸汽的形式釋放氚，再透過吸入的路徑(包括皮膚吸收都考量在內)對生物體產生劑量。植物攝入路徑方面，則討論從土壤到植物間氚的轉移，此部分遵循氫的根吸收和灌溉路徑來估算。

碳-14 模型假設空氣中碳-14 濃度來自於深度 30 公分內的地層，碳-14 以二氧化碳型態釋出至大氣，因此暴露的途徑包括顆粒塵土和氣體碳-14 的吸入，植物攝入的部分，則考慮植物的光合作用和根部吸收路徑。

氦氣的傳輸模型，氦氣的模型，在戶外的部分主要考慮通過土壤擴散，室內考慮氦氣通過地基和空氣交換，因為氦氣可通過土壤以及混凝土地板擴散並溶解在水中。氦氣核種則考慮到氦-222（來自鈾-238 鏈）和氦-220（來自釷-232 鏈）。

(四) ONSITE 特有方法論-Kd 值估算法

由於 ONSITE 有相當多的途徑都需要透過土壤及地下水傳輸，Kd 值(即分佈係數，其定義為土壤中固體相的核種濃度除以溶液相濃度)是關鍵的參數，需要詳加考慮，但影響 Kd 的因素相當多，有土壤型態，農地、砂地或黏土等會造成不同的 Kd 值，化學物質(或者是核種)的型態，化合物或金屬態，其他化學物質的存在(有機物質含量、競爭離子、錯合劑等)、土壤水的 pH 值等均會影響平衡狀態下的真實 Kd 值。在美國環保署 2004 年發布的 402-R-04-002C 報告中也提到，使用文獻中提及的預設值或是一般通用值來預測污染物的遷移可能會造成極大的誤差。舉例而言，鈾在 RESRAD 程式的預設值、部分文獻中所列出的在砂地中的、在黏土中的 Kd 值各自可相差至 1~3 個數量級不等。Kd 值一般而言隨著有機物質在溶液相中的濃度增加而減少，而有機物存在於固體相的時候，會傾向增加 Kd，此係污染物會和有機物形成鹽類從而大大的影響 Kd 值的表現。根據文獻，鈾在砂地中的 Kd 值大約在 10-100 間，而有機物環境下，Kd 值則大約接近 10000。因此在 ONSITE 中，特別提供幾種方式，在缺乏實際調查的 Kd 值時仍可對 Kd 值進行估算 (只有 ONSITE 有此選項)，只要給定特定數據，可以自動估算 Kd 值，估算選項有四種，分別為由地下水濃度(此選項只用於非分散模型的地下水傳輸模式可適用)、由溶解度極限估算、由滲濾率常數估算、基於植物/土壤濃度比率估算。以下分別介紹：

方法 1 由地下水濃度估算

於 ONSITE 軟體介面中輸入地下水濃度以及自輻射物質放置後的流逝時間

(Elapsed time)來估算，概念係將核種的傳輸路徑設定為從土壤中瀝取出，傳輸到更深層的土壤，經過地下水含水層，最後到達井位。此估算法係假設污染層、以及地下水位(ground water table)的厚度維持相同，且污染層、非飽和層和飽和層的 K_d 值都相同，利用重複嘗試不同 K_d 值以趨近輸入的地下水濃度值，但使用限制上，只限於衰變鏈的母核種，此外也有無法導出合理的 K_d 值之情形(例如地下水濃度大於溶解度時)，此時會回復使用軟體給定的 K_d 預設值。此方法另外還可應用到射源劑量比(Dose-to-Source ratio)的推導，藉由選擇適當的暴露途徑及使用輸入地下水濃度法達成，除了自動產生核種有效 K_d 值外，使用報告產出功能，找到時間為 0 時之井水濃度，和與水相關暴露途徑的劑量總和，兩者相除可計算射源劑量比。

方法 2 輸入溶解度極限

溶解度是化合物在水中的最大溶解濃度，元素的溶解度隨其化合形式而變化，但水中的其他化學物可以影響其值。輸入溶解度，程式將會計算出相應的 K_d ，使指定放射核種在污染區塊產生相同的溶解濃度。輸入溶解度極限法的基本假設為不溶於水的放射核種只會吸附在土壤粒子上，而不會形成沈澱物或膠體；使用限制方面，僅適用只有母核種為最初存在的核種情形，如果最初存在的核種是其他現有存在衰變鏈中的子核種，水中濃度可能會超過溶解度極限。

方法 3 使用植物/土壤比率

需多文獻中都發現，植物/土壤濃度比（CR，或是土壤-植物轉移因數）和 K_d 值之間存在強相關性，並且可用以下的方程式來表示：

- $\ln K_d = a + b \times \ln CR$
- $K_d = A \times (CR)^b$
- $b \approx -0.56$ (i.e., nearly proportional to the inverse square root of CR)
- a or A depends on soil type

而 a 或 A 的值取決於土壤類型，其值如下表所示

係數	砂地	黏土	肥沃土壤	有機壤
a	2.11	3.36	3.78	4.62
A	8	29	44	101

(參考見 RESRAD 使用者手冊的附錄 H)

$$CR = \frac{C_v}{C_s}$$

C_v ：食用成熟期時，作物和飼料用植物部位的濃度（濕重）

C_s ：在根部附近土壤的濃度（乾重）

但土壤-植物轉移因數事實上隨著土壤性質和土壤中放射核種的地球化學性質複雜地變化，而土壤的狀態也受管理措施所影響，如耕作，石灰，施肥和灌溉。核種在植物中的分佈，隨植物的不同部分不同，放射核種也很可能不是均勻分佈的，而是傾向於集中在某些植物組織中，解析大多數放射核種的數據，雖然確切數據僅限於有限的植物類型，但即使對於研究最多的放射核種，值也可以在幾個數量級上變化。由於 ONSITE 預設值是使用沃土(loamy soil)的係數來導出有效 K_d ，因此本方法估算出之 K_d 值，其運用的範圍也受到限制。

方法 4 滲濾率常數的輸入

ONSITE 假定放射核種 i 的(Leach rate)滲濾率 $R_i(t)$ 與污染區中的核種存量成比例，利用以下的公式可計算得 K_d 值。

$$\begin{aligned}\dot{R}_i(t) &= I \times A \times C_i(t) = L_i \times \rho_b^{(CZ)} \times A \times T(t) \times S_i(t) \\ &= L_i \times [\underbrace{\rho_b^{(CZ)} \times A \times T(t) \times K_{d,i} \times C_i(t)}_{\text{Inventory in solid phase}} + \underbrace{A \times T(t) \times \theta^{(CZ)} \times C_i(t)}_{\text{Inventory in liquid phase}}]\end{aligned}$$

$$L_i = \frac{I}{\theta^{(CZ)} T_0 R_{d_i}^{(CZ)}}$$

$$R_{d_i} = 1 + \frac{\rho_b K_{d_i}}{\theta}$$

而其中各代數的定義如下： L_i 為核種 i 的滲濾率(單位 yr^{-1})， $\rho_b^{(CZ)}$ 為污染區

的整體密度(單位元 kg/m^3)， A 為污染區的面積(單位 m^2)， T_i 為污染區在時間 t 的厚度， $S_i(t)$ 為時間 t 時，核種 i 在污染區內可滲濾的平均濃度(單位 Bq/kg 或 Ci/kg)， K_{di} 為核種 i 的分佈係數， I 為滲透率(單位 m/yr)， θ 為體積水含量(無單位)， $\theta^{(CZ)}$ = 污染區體積水含量(無單位)， T_0 為污染區初始厚度(m)， $R_{di}^{(CZ)}$ = 放射核種 i 在污染區的延遲因數(無單位)。

實際上的操作係為輸入必要參數 (如下圖程式介面)即可自動依上述公式估算 K_d 值，須透過下列視窗右半部選擇四種 K_d 估算方式其中之一，而 K_d 值的估算結果，也可以提供給其他 RESRAD 的程式使用。

Transport Factors	
Radionuclide:	Ra-226
Distribution Coefficients:	cm^3/g
Contaminated Zone:	70
Unsaturated Zone 1:	70
Saturated Zone:	70
Unsaturated Zones:	1
Options:	
Water Concentration	0 year
Groundwater Concentration:	0 pCi/L
Solubility Limit:	0 mol/L
Leach Rate:	.001 /year
Use Plant/Soil ratio	☐
Save Cancel	

圖二、ONSITE 程式的 K_d 自動估算程式介面。

(五)程式參數介紹

使用 ONSITE 程式進行計算時，污染物相關的參數需輸入污染區物理尺寸，濃度，以及確認的核種。核種釋出部分之參數需輸入滲濾性質，污染顆粒向大氣釋放，土壤侵蝕，植物根部吸收等相關參數。核種運輸部分之參數則包括地下水，空氣，氫氣，食物鏈等相關參數。暴露途徑之參數則有外部暴露、攝入和吸入三種途徑，其中吸入途徑考慮污染顆粒及氫氣的吸入，攝入的途徑則考慮植物，肉，牛奶，水，土壤的攝入。

ONSITE 和 OFFSITE 可以共用劑量轉換因數資料庫，其中所採用的劑量轉

換因數主要是美國聯邦指引 12 號報告(Federal Guidance Report No. 12)—FGR-12; Eckerman and Ryman 1993, 使用者可以從資料庫中選擇一個合適的劑量轉換因數使用, 或是使用劑量轉換因數編輯器修改劑量轉換因數, 特別配合污染場址的特性建立一個新的劑量轉換因數資料庫。

ONSITE 程式運用許多保守假設, 來確保其計算結果的保守度, 例如程式假定所有活動都發生在受污染的土地上, 井(用於畜牧、灌溉及飲用水源等)設置於濃度最高的污染邊緣, 同時經常使用的預設分佈係數和其他參數是保守的, 程式預設情況是最保守的自給自足農民情節, 設定的食物來源是一半的植物, 一半的肉和牛奶, 所有使用的水源則均來自受污染土地, 內部劑量係數(Internal Dose Coefficients)考慮肺和胃腸道最大值, 食物轉移因數(Food transfer factors)則是使用敏感生物的數值。

(六)實務運用注意事項

需要注意的是, ONSITE係假設污染區塊為均勻相污染, 對於非均勻相的污染, 視情況需要多次計算, 由於ONSITE程式一次只能設定一個污染層, 因此同一地區的地層有兩層污染時, 就必須要分開來討論, 將其中一層設定污染層, 另一層設定為非飽和層, 然後分別透過ONSITE程式計算劑量, 並且加總其結果。對於同一污染區域有數個熱點時, 同污染活度的熱點可加以合併擴大其面積, 但不同活度的污染熱點, 則必須分開計算, 分別透過ONSITE程式計算劑量, 並且加總其結果。

二、OFFSITE

(一)程式概述

OFFSITE 是 ONSITE 的延伸, 其程式發展的目的是估計對位於污染場址區

域之外的受體接受放射物質暴露結果，計算包括放射學劑量、DCGL 以及核種濃度等數值。OFFSITE 透過指定污染物釋放途徑、環境傳輸方式、暴露途徑，分析暴露情節，進行暴露劑量計算，並利用分析工具(敏感度分析、不確定分析等)，對輸入參數進一步分析其對計算結果的影響。和 ONSITE 不同的是，OFFSITE 對於污染物釋放途徑不限定於場址內，OFFSITE 的核種傳輸路徑設定主要有三類：1.污染區和表面土壤混合產生表面土壤混合層，進而釋放污染物到大氣之中；2.表層土壤的侵蝕也會將污染物帶到場址外的表面水體之中；3.地下水的污染透過從主要污染區滲濾出的污染物，並經過非飽和層到達地下水所在位置。在 ONSITE 中對於井水位置、表面水體位置、畜牧區、農業區等沒有如 OFFSITE 一般詳細標示出相對位置，但 OFFSITE 中各區域相對位置則大大影響了核種傳輸到各個區域的量及造成的劑量影響。

(二)方法論概述

OFFSITE 的核種環境傳輸模型概念如下圖三，從左上角的橘色主要污染區開始，以大氣傳輸、表面逕流水及地下水三種主要方式釋出污染物。污染物透過大氣傳輸到畜牧區、農業區、居住區和表面水體，除此之外，也透過表面逕流(Runoff)侵蝕釋出污染物到表面水體之中。主要污染區域也會透過地下水的途徑污染井水和表面水體，而污染的井水和表面水體則會視情況被畜牧區、農業區、居住區等各個區域使用。

本圖係 RESRAD 訓練課程上課資料，為避免著作權爭議，故不顯示。

圖三、OFFSITE 的核種環境傳輸模型概念

暴露途徑則同樣是考慮外部暴露、吸入和攝入的部分，外部暴露來自於地面，吸入暴露的途徑來自於污染物顆粒和氬氣，攝入則考慮土壤、水、植物、肉、牛奶和水生生物。

因此 OFFSITE 涉及污染物自污染區的釋出，以及釋出後核種透過水相關或者是大氣相關的傳輸路徑進行傳輸，使用的傳輸模型包括許多層面，例如核種在土壤中的傳輸、地下水的傳輸及大氣有關的傳輸模型，以下分別介紹。

(三)主要污染區模型概述

OFFSITE 的主要污染層(Primary Contamination)的模型設定其為一層“土壤”具有均勻的厚度，並且是均勻污染，其上可以設定有一層清潔的覆蓋物，主要污染層深度可以依需要設定位於地下水表面、橫跨在地下水表面，或恰好在地下水表面以下。此模型考慮輻射轉換(radiological transformation)、主要污染層和表面覆蓋層的混合，及表面層和大氣之間的顆粒交換，此外也包括氫，碳-14，氦-220

和氦-222 的氣體釋放。主要污染層也考慮與水相關的途徑，包括經過降雨等地表徑流移動主要污染層表面的核種，或通過滲透地層的水流去除放射核種，並且可模擬隨著時間推移，工程屏障緩慢失效的情況。

工程屏障的弱化效果

OFFSITE 可模擬隨著時間推移，工程屏障緩慢失效的情況，工程屏障完好時設定核種不會自污染層中釋放，而容許指定特定時間後，放射核種開始達到可釋放的狀態並指定可釋放的分率，對於所有子核種也使用相同的時間設定，但不在同一轉化鏈(transformation chain)的兩種放射核種的釋放時間可能不同。須注意的是，核種可釋放的分率不一定會與初始放射核種的起始總量的可釋放分率相同，因為直至工程屏障首次開始失效的時間之前，其中一些初始放射核種可能已經轉換成別的核種。

工程屏障通常隨時間持續減弱其效果，因此核種的釋放將隨時間變化，OFFSITE 需要指定開始時可釋放的核種的分數，及在工程屏障弱化結束時，指定可釋放的核種的分數做為輸入參數，核種的釋放可以分為兩種模式，漸進式和階段式的變化，漸進式的核種可釋放分數將隨時間線性變化，而同時瀝濾率也會隨時間線性變化，階段式的變化係為工程屏障弱化的開始後和結束後有兩個不連續的釋放階段，個別以指定的瀝濾率釋放核種。

(四)方法論-核種傳輸模型

核種傳輸路徑

OFFSITE 考量的核種傳輸及暴露的路徑也類似於 ONSITE，例如植物的累積機制包括透過根部的吸收、葉面攔截污染粉塵、葉面攔截污染灌溉水、葉面截獲的污染物再轉移到植物的可食用部分。肉和牛奶相關污染路徑則是透過牲畜食用受污染的飼料（糧食，草）、以及用飼料餵食的同時攝取土壤及攝入受污染的水，

之後再轉移到牛奶或積累在肉中。但是地面水體的污染機制則和 ONSITE 不同，因為 ONSITE 沒有地表逕流的核種傳輸路徑，但 OFFSITE 的地表水體的污染考慮來自污染區侵蝕土壤的逕流流入水體，以及煙塵沉降在水面，地下水污染表面水體所考慮的路徑方面，有污染的地下水流入，以及受污染的水體透過地下水或是地表水流流出，侵蝕土壤的逕流流入水體後，形成底泥和地表水體水進行核種交換等機制。地表水體水則會進一步使水生生物在體內累積核種，或是透過灌溉行為造成動植物的污染。以下簡單介紹 OFFSITE 的核種傳輸模型

地表逕流傳輸模型

OFFSITE 涉及不同領域的方法論描述核種的傳輸，對土壤的侵蝕，係利用通用土壤流失方程式來描述，將土壤侵蝕速率用以下參數的乘積來計算：降雨侵蝕指數(取決於一年中降雨的能量)、土壤侵蝕因數(度量土壤容易腐蝕的程度)、斜率和長度因數(量化地形效果)、覆土和管理因素(依植被的類型和程度而有不同)、支持實踐因素(support practice factor)(例如：梯田、等高線耕作的有無等)及土壤密度之乘積。

大氣擴散傳輸模型

大氣擴散模式是採取高斯煙羽模式來分析，煙羽流可能會被穩定的平流層所限制，在 OFFSITE 中，將風速自 A 至 F 分為 6 個等級，16 個方向的風來分析，理論上，最穩定的 F 等級的風會使污染物平順的隨風飄動，最後沉積至地面時造成較高的劑量，而最不穩定等級的風，會使污染物與大氣充分混合，造成較低的劑量，反之，最高穩定度以及最低的風速會造成的劑量是最高的。

地下水傳輸模型

地下水傳輸方面，依照污染區、非飽和層和飽和層性質不同考量不同的傳輸機制，為了簡化問題的複雜度，OFFSITE 在污染區、非飽和層和飽和層著重考

慮核種隨著行進方向的流動效應，而在非飽和層則另考慮行進方向的擴散效應，在飽和水層，則考慮所有方向的擴散效應。

(五)程式參數介紹

OFFSITE 介面和 ONSITE 相比，選項類似但較為複雜，在進行暴露情節分析時，OFFSITE 包含了典型的幾個暴露情節，包括自給自足的農業情節，也是 OFFSITE 預設且最為保守的情節，其他包括工業、娛樂、住宅等情節，可以透過選擇路徑和使用參數來模擬。由於 OFFSITE 涉及大氣和地下水的傳輸模型，所需輸入參數大致上可分為幾個類別，污染物性質方面，需要輸入尺寸，深度，滲濾率，濃度等參數，氣象參數則需要降水量，徑流，蒸散量和擴散係數等，地球化學與水文學方面則需要分佈係數，水力傳導率等，資源使用和消費方面，對於吸入，灌溉，攝入，佔用因數都需要依據情節的不同，予以指定其數值。

計算暴露劑量時 OFFSITE 使用和 ONSITE 相同的劑量轉換係數資料庫，外部暴露途徑，可使用 FGR 12 和 ICRP 60 資料庫，吸入和攝取途徑則可使用 FGR 11 或 ICRP 72 資料庫。風險斜率因數的資料庫有 HEAST (2001) and Federal Guidance Report Number 13 (1999)。核種轉換則可使用 ICRP-38 (全部 838 個核種)或 DEDATA 資料庫 (全部 1252 個核種)。

(六)運算結果的產出

計算結果產生後，OFFSITE 可以產出詳細的報表，並支援最多十個計算時點，但只能在指定的報告時間並且在執行計算之前必須指定。此外，不確定分析模組，是對 OFFSITE 的龐大的參數進行分析的優良工具，藉由對參數進行不確定分析，可以幫助搜尋敏感參數，這可以幫助使用者在進行場址調查的時候，瞭解參數的重要性或是篩選出需要優先進行調查、需要深入調查的參數，或是在選擇參數值的時候瞭解其保守值為何。

(七)程式的驗證

OFFSITE 雖然涉及不同領域的方法論和需要輸入大量的參數以得到對場址外的劑量暴露計算結果，但和其他 RESRAD 程式一樣，OFFSITE 也經過嚴密的設計驗證，由於 ONSITE 程式已經經過美國能源部的認可，且 ONSITE 與 OFFSITE 在外部暴露、吸入暴露、攝入暴露、釋放到地下水的模式上使用類似的公式，因此 OFFSITE 程式選擇透過與 ONSITE 在自給農民情節上進行指標比較而得到設計驗證，其比較的結果則記錄在 DOE / EH-0708 號文件中，並公佈在 RESRAD 網站。此外，為瞭解不同的程式在類似的情況下可否得到類似的結果，OFFSITE 參與了國際性的程式比較活動，利用車諾比案例的資料，與 VAMP、BIOMOVs II、BIOMASS 及 EMRAS 等劑量評估程式比較計算結果，其中 OFFSITE 也展現了良好的精確性。

三、BUILD

(一)程式概述

ONSITE 和 BUILD 程式都是處理污染場址內的劑量暴露問題，而 BUILD 程式則是以考慮建築物的污染，在空氣流中造成污染物的擴散，並使正常建築物的一般日常活動或是在 D&D 活動中造成劑量暴露為目的所開發。近年來除役及拆除(Decommissioning and Dismantle, D&D)活動的增加，使 BUILD 的研發需求跟著上升，加速了 BUILD 的發展腳步並且持續更新。BUILD 的發展歷程自於 1994 年 12 月發布了 DOS 版本，Windows 版本則於 1996 年 7 月發布，2000 年 9 月將不確定性的程式模塊更新升級，目前 BUILD 新版本已經是 3.4 版。

BUILD 的分析方法，主要考慮途徑、射源幾何形狀、射源與受體、座標系統、射源移除情況、空氣流動、劑量計算、氡和氡特性模式、作業導則的開發等方式。ONSITE 和 BUILD 的差異是 ONSITE 是針對土壤，當放射性物質污染土壤，會經自然變遷過程移動，進

而衍生食物鏈和水資源受到污染；但 BUILD 是針對建築物，當建築物受到放射性物質污染，會使內部人員直接受到輻射照射，且建築物內空氣流動會使放射性物質飄逸，導致人員受到曝露。

(二)方法論-射源項

BUILD 會考慮建築物污染在空氣流中造成污染擴散，存在於建築物中的放射性物質，會因該建築物的整修情節或是正常使用情結下而逐漸釋出進入周遭的空氣。因此 BUILD 方法論在模擬射源放射核種從射源到空氣的運輸路徑，是透過指定參數包括射源壽命、可移除分率、空浮分率(Air fraction)，來描述射源的移除和注入(source-injection)，此類參數均是影響放射性物質移除或進入其他區域的主要因數，其中侵蝕率可以透過可移除分數/射源壽命來計算，在 BUILD 程式中，射源在射源壽命內是以線性的速率被移除，假設 10 年內可移除分率為 10%的射源，則代表每年可移除 1%的射源污染量。此外，在射源上存在清潔覆蓋層也在考慮情況之內，如果射源被未污染材料覆蓋，則覆蓋其上的未污染部分首先受到侵蝕，其後才是污染源區域的侵蝕，對單一射源 BUILD 最多可以設定五個未污染的覆蓋層。射源注入方面，在 BUILD 中射源進入到空氣的速率由空浮分率決定，舉例而言，可移除分率為 10%，空浮分率也為 10%的射源，則射源有 1%的量會成為空浮，此參數可和空浮相關劑量暴露的路徑搭配，例如與建築氣流模型搭配，計算空浮從一個房間傳送到另一個房間造成劑量暴露的效應。

(三)方法論-核種傳輸路徑

BUILD 考慮的核種傳輸路徑包括吸入、攝入和外部暴露路徑，吸入方面，考慮空浮和再懸浮(resuspension)效應、攝入方面，考慮直接攝入懸浮物和透過懸浮物沉積在食物上再被攝入的機制，外部暴露方面，考慮污染源造成的直接暴露

和懸浮物造成的暴露，以及氡氣造成的暴露。以下簡單地介紹：

吸入途徑

吸入途徑是和空氣相關的途徑，模擬吸入顆粒物(包括沉積後再懸浮然後被吸入的顆粒)，因為空浮可以透過房間之間的空氣交換，因此射源和受體可能在不同的房間，由於是和空氣有關途徑，因此空浮比率關鍵性地決定了可被吸入顆粒量及暴露劑量，劑量計算同樣使用 FGR 11 資料庫提供之吸入劑量轉換因數，由於 BUILD 程式假定房間的空氣是均勻混合的，因此無論在房間內任何位置，吸入所導致的劑量都是相同的。

攝入途徑

直接攝入污染物的途徑，是模擬偶然攝入受污染物質，受體必須與射源在同一個房間才會有直接攝入的途徑，且可移除分數必須大於 0，使用 FGR 11 資料庫的劑量轉換因數來導出暴露劑量。間接攝入途徑是和空氣相關途徑，模擬間接攝入顆粒沉積物，射源和受體可能在不同的房間，採用 FGR 11 資料庫所提供的攝入劑量轉換因數，無論在房間內任何位置，此途徑所導致的劑量都是相同的，至於沉積的放射核種的平均濃度 BUILD 利用空氣質量模型(Air quality model)來計算，間接攝入僅考慮透過空浮傳播的射源材料，如果去除射源時不產生空浮，則 BUILD 將忽略該部分不計，在 BUILD 報告的攝入途徑劑量報告，直接攝入和間接攝入被總結成單次攝入劑量，因此要估計直接攝入的劑量，則必須將間接攝入率設置為零。

外部暴露

空氣途徑造成的外部劑量，係指外部劑量來自於沉積顆粒、空氣中瀰漫(submersion)的途徑，亦使用 FGR 11 外部劑量轉換因數，此途徑的劑量暴露取決於空浮比率，由於此途徑不考慮屏蔽的效應，無論在房間內任何位置，此途徑所

導致的劑量都是相同的。

(四)程式參數介紹

射源項參數

BUILD 可以輸入四種不同的射源類型，以達到廣泛的應用的目的，包括點、線、面(包括圓形和長方形狀的面射源)、體射源(包括圓柱形和長方體形狀的射源)，也具備能夠處理複合不同射源類型的能力，例如處理位於體射源之上還有一個面射源的案例，或是在一個面射源上有熱點的案例。

各種類射源參數除了共通點為需要指定核種相關條件外，射源位置參數的指定略有不同，點射源則需要指定房間，以及所在房間的 X，Y，Z 座標；線射源，需要指定房間、線射源的中心點座標、射源長度以及射源所指向的方向(但只限 X、Y 或 Z 方向)。圓形面射源，指定射源中心點座標，射源面積以及射源面對方向(同樣只限 X、Y 或 Z 方向)，圓形體射源指定參數和面射源相同，但須額外提供體射源厚度及密度資訊，矩形的面射源、體射源則需要指定矩形的長度和寬度。由於 RESRAD 只提供三維座標系統，射源的指向方向又只限於座標軸方向，因此使用者必須視需要配合射源位置自行旋轉座標系統，舉例而言，如果受污染的管線沿著房間的對角線運行，坐標系統將被旋轉以符合程式運算需求，又如果存在多個射源面對方向均不一致，那麼可能必須運行 BUILD 程式多次，再合併加總其計算資料。

受體參數

受體的參數，需要指定位於哪個房間、以及所在房間的 X，Y，Z 座標，由於考慮的是對人的暴露，一般的活動情況下通常指定在房間地板上方 1 米的位置處。屏蔽的問題也在 BUILD 的考量之中，每個射源和受體配對之間 BUILD 允許設定單一屏蔽，每次運算可設定 10 射源，10 個受體，因此最多可以產生 100

對射源、受體及屏蔽的組合。

建築環境的設定

為了減低問題的複雜度，BUILD 對於建築物的幾何形狀，設定最多只支援 3 個房間的環境，除此之外，建築物的排列可以是 1-3 個房間的建築物的任意排列，包括單房間、雙房間、三房間、雙層樓、雙房間在一樓一房間在二樓、雙層樓、三層樓、包含地下室的雙層樓等情況分析模式，大小也能由使用者自行設定。每個房間 BUILD 採用三維的矩形坐標系統來確認射源和受體的相對空間位置，坐標可以原點由使用者自行選擇，未在程式中指定，但程式提供圖像化的介面幫助使用者建立射源和受體的相對位置概念圖，BUILD 的視覺化的介面，將射源和受體以透過不同顏色顯示房間的位置，不同圖標顯示射源的類型，例如體射源以圓柱體標示、面射源以圓形標示，線射源以薄長方體標示，點射源則以點來標示，方便使用者迅速確認射源及受體相對位置。

暴露情節設定

此外，BUILD 可以設定建築物處在裝修或是一般佔用的情節，透過受體參數選擇可以設定所需的情節。一般而言，建築佔用情節的特點是長時間的核種低量的釋放，射源材料可能成為空浮物質的機率更高，暴露時間通常為一年；建築裝修情節特點是在短時間內大量釋放核種，暴露時間較短，通常為 30~90 天。BUILD 單一次運算可設定最多 10 個受體，可用於對建築物中的多個受體進行劑量估算以獲得集體劑量，也能模擬單一個體在多個位置執行不同任務的情況，而這種情況則更符合實際作業所需。

劑量轉換因數資料庫

BUILD 同時也能夠共用 RESRAD 的劑量轉換因數資料庫，在完成各項參數的輸入後，使用 FGR 12 資料庫做為外部劑量轉換因數的資料庫，並考慮污染區

域大小、厚度、密度、屏蔽材料厚度、屏蔽材料密度、屏蔽材料的性質修正後得出外部暴露劑量計算結果。

(五)程式的驗證

總體而言，對大部分在污染建築物活動造成人員劑量暴露之情況，BUILD 程式已考量其暴露途徑及進行一般日常活動或是 D&D 活動情節，而 BUILD 程式的方法論更經過充分的驗證來確保程式的設計和計算結果的準確性。

2001 年 10 月 RESRED 發布的內部審核報告中即將 BUILD 計算結果與利用使用者手冊中給出的 MS Excel 計算式所獲得計算結果進行比較，比較包括氡模型、氫模型、直接攝入、吸入、間接攝入等途徑的計算結果。外部的獨立驗證方面，由 Tetra Tech NUS Inc.於 2003 年 3 月完成驗證，驗證範圍包括放射核種資料庫、輸入參數、個別傳輸和暴露路徑及不確定分析模組。以上嚴密的驗證過程將確保 BUILD 程式設計符合原本的方法論，並且提升計算結果的可信程度。

四、BIOTA

(一)程式概述

生物體保護觀念的演進

隨著國際間對於環境輻射防護意識的演進，國際間除了關注對人的保護外，也持續增加對環境的輻射防護，舉例而言，1977 年國際放射防護委員會聲明中表示如果人受到充分保護，那麼其他生物也可能受到充分保護（ICRP Pub.26, 1977）。1991 年的聲明中：偶爾，非人類物種的個體成員可能受到傷害，但不會危害整個物種或造成物種之間的不平衡（ICRP Pub.60, 1991）。2003 年的聲明中：國際放射防護委員會需要修改其現有的保護制度，特別是制定一種全面的方法來研究及保護生物受到輻射效應的影響。（ICRP Pub.91, 2003）

1990 年的美國能源部已開始採行生物群體的平行保護觀念，意即如果對代

表性個體的暴露劑量小於劑量限值，則可達成對生物群體的保護，美國能源部是第一個定出對生物群體劑量限值的單位，對水生生物訂出 10 mGy/d 的劑量限值（根據 DOE 5400.5 號命令），稍後其他規範也陸續出現生物體的輻射防護規定，10 CFR 834，subpart F(1995-1996)中規定：對水生生物劑量限值為 400 μ Gy / hr；對陸地植物劑量限值為 400 μ Gy / hr；對陸生動物劑量限值為則為 40 μ Gy / hr。除此之外，DOE 458.1 號命令（2011）中規定水生動物，河岸動物，陸生植物和動物的劑量限值分別為 1rad / d，0.1rad / d，1rad / d，和 0.1rad / d，其後美國能源部也不斷強化在生物群體的保護機制。

BIOTA發展緣起

BIOTA 是用於生物體劑量評估的新一代工具，由於前代類似功能的 RAD-BCG 計算軟體係基於 Microsoft Excel 環境開發，已經接近軟體平臺功能的極限，因此轉向 RESRAD 平臺發展，因為 RESRAD 經過長期的品質保證和驗證研究，並且在美國能源部，其他美國聯邦和州政府機構以及美國核工業中得到廣泛認可和應用，也可提供所需的軟體結構與支援資源來因應美國能源部持續擴增的生物群體劑量評估方法需求。

用於生物體輻射風險評估問題之多層次篩選方法

國際原子能總署在 1999 年 TECDOC-1091 號文件中提出了以多層次篩選程式的概念來處理生物群體輻射風險評估問題，而此多階段篩選方法也為美國能源部所採用，原本多層次篩選方法就是一種簡易的方法來確認生物群體是否符合輻射劑量或環境保護標準，通常用於生態風險評估，有足夠的靈活性，也符合時間和成本效益。多層次篩選方法可用於確定放射核種，並瞭解是否有必要進一步評估，或者無需進一步注意。實際應用上初步篩選即能夠處理大多數情況，在初步篩選失敗時則可能需要額外的分析評估，多階段的篩選程式可確保工作的規模能

依據環境影響的可能性和嚴重性來量度。為了符合生態風險評估所需，BIOTA 的開發基於以上的原則來進行，以分級方法為基本架構，充分利用現有通用數據和場址特定數據，使 BIOTA 可用於多種環境介質和生物群體類型的生態風險評估需求。

(二)方法論概述

前面提到 BIOTA 以分級方法為基本架構，以美國能源部所採用的多階段篩選方法為例，第一階段為數據整合(data assembly)，第二階段為一般性篩選，對應到 BIOTA 程式的 Level 1，為透過比較介質濃度與 BCG 判斷場址是否具有潛在風險，所謂 BCG，係指生物群濃度指引 (BCG, BIOTA Concentration Guides)，BIOTA 透過 BCG 來評估單一環境介質中的核種濃度是否符合劑量限值 (BCG 的計算方式為劑量限值除以內部劑量暴露和外部劑量暴露劑量的總和)，對於多介質或多個放射核種存在的情形，則使用分率總和(sum of fraction)的方式來表示多核種或多環境介質下的 BCG。第三階段為場址特定篩選，對應到程式 Level 2，利用場址代表性參數進行場址特定篩選；以及場址特定分析，對應到程式 Level 3，利用動力學或異速生長(Kinetic & Allometric)模型工具進行場址特定分析。

本圖係 RESRAD 訓練課程上課資料，為避免著作權爭議，故不顯示。

圖四、多階段篩選方法與 BIOTA 程式架構的對照示意圖

(三)程式功能介紹

BIOTA 的程式開發是 2000 年 6 月由美國能源部發起的，美國能源部也持續發展和贊助；美國能源部稍後成立了 ECORAD 工作小組，由美國能源部，環境保護局（EPA）和核能管制委員會（NRC）組成合作開發程式，2001 年成功將 RAD-BCG 計算器轉換為 RESRAD BIOTA 測試版，其後便持續更新，2002 年增加了敏感度分析，2003 年為 8 種生物體制定了劑量轉換因數，2003 年增加生物體編輯器(Organism Editor)，2008 年則增加了概率分析能力，目前資料庫中共有 46 種放射核種可使用。其使用者指南手冊，也併同 DOE/ISCORS 技術報告於 2004 年 1 月發布。BIOTA 作為美國能源部的新一代的生物群體生態風險評估工具，和前一代 RAD-BCG 計算器相比，除了能重現 RAD-BCG 的計算結果，生成相同的 BCG，能夠提供更進一步的功能，包括輸出圖形和報告，直接顯示篩選結果（通過或失敗），匯出數據，查看劑量轉換因數，劑量結果等，使用者在軟體介

面中可以選擇放射學單位，調整參數，劑量限值，劑量轉換因數和異速生長參數 (Allometric parameters)，對輸入參數進行靈敏度分析或不確定分析。此外，BIOTA 預設的受體型態則包含水生動物、河岸動物、陸生動物、陸生植物四類，當需要進一步更詳細地進行生態風險評估時，也可以用內建的 8 種特定幾何形體以及對應的劑量轉換因數編輯自己需要的場址特定受體。

(四)實際案例介紹-China Lake 武器試驗場

場址調查階段

本次課程也介紹了 BIOTA 實際應用在現地場址評估的案例，評估地點為 China Lake 武器試驗場，位於加州 Mojave 沙漠的西部邊緣，超過 1000 英畝面積的武器試驗場，進行風險評估的地區為 Kennedy Stands 地區和 G-6 試驗區，場址目前用於訓練和武器試驗之用，以及一般的維護以及公用設備的修繕，未作為居住區用途。當要評估該場址的生態風險時，首先對該場址調查其可能作為代表性受體的棲息生物，調查得知該地區無水生生物，屬於陸地沙漠地形，有零星的植物，可能的受體包括：昆蟲和其他無脊椎動物、爬蟲類、鳥類和哺乳動物，生物覓食範圍則是植物、昆蟲和無脊椎動物。

建立生態風險概念場址模型

下一階段是建立生態風險概念場址模型(如下圖五)，複數的動植物可能會在評估區域內活動，透過多種途徑所造成的內部劑量暴露來源，植物的暴露路徑為根部攝取，野生動物則為吸入和透過攝入食物和意外攝入土壤。外部劑量暴露方面，所有的生態受體可能會受到土壤內的鈾核種的暴露照射產生外部暴露劑量。

本圖係 RESRAD 訓練課程上課資料，為避免著作權爭議，故不顯示。

圖五、BIOTA 實際應用之現地場址評估案例 China Lake 的生態概念圖

經過統計，具有代表性的生態受體總共區分八個範疇，個別選出代表性的動物，食草類哺乳動物(袋鼠)、食草鳥類(斑鳩)、食草爬蟲類(沙漠鬣蜥)、食昆蟲哺乳類(蒼白洞蝠)、雜食性哺乳動物(土狼)、肉食性哺乳動物(敏狐)、肉食性鳥類(美國隼)、肉食性爬蟲動物(牛蛇)。完成調查後，便需要蒐集相關的參數，考慮的核種為 U-234、U-235、U-238，使用的與劑量暴露相關參數則包括生物體重量、覓食組合、食物和土壤攝入率、吸入率、暴露時間、比率等，參數的來源可透過文獻資料：USEPA Federal Guidance Reports and Wildlife Exposure Factor Handbook, RAGS 獲取。各生物物種需要考慮的暴露途徑則從生態食物鏈的模型則可以得知，應考慮從攝食物種獲得 (除了昆蟲)、來自環境介質、以及攝入空氣獲得的劑量，昆蟲組織中的鈾濃度則假定與土壤中的鈾濃度相同。

數據整合階段

在評估核種從環境介質(土壤、水、空氣和沉積物)的轉移到生物群體時，濃度比率(concentration ratio)是一個關鍵的參數，Handbook of Parameter Value for the prediction of Radionuclide Transfer to Wildlife 可以提供所需的參數值，這本手

刪除了提供核種在環境介質與生物體間的平衡濃度比率、生物體內核種濃度轉換成活度濃度的係數外，也描述了這些參數是如何從有關數據蒐集並且推導出來，並且提供使用這些參數的指引說明，也有助於填補數據資料的缺口。

危害商數法介紹-判定場址潛在風險

整合以上數據後，運行 BIOTA 程式的篩選程式，將土壤濃度和篩選程式使用的土壤 BCG 值比較。當篩選程式顯示出有潛在的風險時，將繼續進行場址特定分析，本次對生態風險的定性評估使用危害商數法(Hazard Quotient,HQ)，在篩選階段，HQ 為土壤濃度/土壤 BCG 值的比值。在場址特定分析階段，HQ 為程式計算出的劑量暴露/劑量標準的比值，其中劑量標準對陸地植物為 10mGy/d，對於陸地野生動物為 1mGy/d。風險指數(HI, Hazard Index)為危害商數的總和，可對風險程度以定量數據方式呈現，當 HI 大於 1 時，可能存在不可接受的風險，HI 小於 1 時，基本上認為沒有不可接受的風險。

一般篩選階段、場址特定分析階段

經過分析，在篩選階段，Kennedy Stands 的 HI 達到 1.01，G-6 試驗區則為 0.13，無生態風險，但 Kennedy Stands 區域需要進一步執行場址特定分析，將八個代表性的生態物種個別評估其 HI 指數後，HI 最高的物種為袋鼠，HI 指數為 0.65，這可能是因為袋鼠的生活區域較小，活動區域都位在污染場址，受到較多的劑量暴露，但風險指數只有 0.65，顯示最高風險的物種仍然沒有顯著的生態風險，故最後結論為場址為安全並且符合環境輻射標準。總體而言，雖在篩選階段顯示出 Kennedy Stands 區域可能有非常輕微的不可接受生態風險，但經過場址特定分析後，分析結果顯示所有的代表性物種其劑量暴露都低於生態劑量限值。

(五)程式的驗證

整體而言，BIOTA 做為新一代的生態風險評估工具，其方法論經過嚴密的

審查，包括美國能源部技術標準計劃(DOE Technical Standards Program)正式審查和同意，以及由 DOE-EM 贊助的獨立外部同行審查，BIOTA 採用之方程式和程式架構能支援其在生態風險評估中的使用需求，從使用 BCG 的一般篩選階段，到場址特定分析階段，提供一個完整的評估。

(六)實際運用注意事項

BIOTA 採用的分級評估架構代表一種具有成本效益的技術，不必對不具風險的場址進行無窮盡的深入評估，適用性廣泛，對於不同的環境介質，BIOTA 也能廣泛的適用，包括陸地環境、淡水、沿岸和海洋環境，但選擇參數值必須很小心（例如 K_d 值）時，因沿海和海洋淡水，沿海環境的平衡化學性質存在顯著差異。此外，BIOTA 允許使用場址和生物群體特定的輸入數據，如果必要，也可以執行詳細的生物體特定的劑量評估。但 BIOTA 受限其方法論，其適用情況仍然有些限制，舉例而言，BIOTA 的方法論基於假設慢性的暴露情況，因此不適用急性暴露的評估，在輻射事故中，由於通常造成短期的，急性的暴露，因此 BIOTA 不適用或者僅部分適用於輻射事故，然而 BIOTA 使用的方程式和模型在技術上可應用於評估長期風險，因此對於事故後長期的暴露或復原階段，BIOTA 仍然可為生物群體的健康風險提供指引。

五、RDD

(一)程式概述

RDD 程式是產生各類操作型指引(Operational Guideline)供事故時緊急應變查詢及評估用的程式，詳細的 RDD 程式介紹可以從 RESRAD 在 2009 年 2 月為 RDD 程式發布的操作型指引初步報告中得到，該報告中提供 RDD 程式方法論，操作型指引和一些使用者指南訊息。

操作型指引定義

所謂操作型指引(Operational Guidelines)係由美國能源部轄下的操作型指引工作小組所訂定的，指以現場輻射測量結果與預先推導出的輻射水準相比較，以快速確定是否對人員的劑量超過防護行動指引(Protective Action Guide, PAG)的劑量值，並據以決定是否需要採取保護公眾的行動。操作型指引因應事故的不同時期分為七類；每一類再依不同的特性分為數個子類，考慮面向包括個人財產：建築物、路和橋樑；關鍵基礎設施和資源：醫院、運輸、電力設施和水、食物資源；受體情景涵蓋：工作者和公眾、城市、郊區和鄉村環境。

防護行動指引定義

所謂防護行動指引是指針對意外事件或輻射物質外釋時，特定防護行動(Protective Action) (例如公眾的掩蔽或疏散，限制飲食及飲水等)之參考人的預期輻射劑量(projected dose)。PAG 作用是在確實瞭解事故的輻射劑量前，提供公眾與工作人員輻射安全防護的行動指引，但由於防護行動指引採劑量基礎，但實務上難以直接對劑量進行量測，因此預先利用 RDD 程式推導出不同介質的活度或濃度與防護行動指引間的關聯性，再透過量測不同介質的輻射或濃度，藉由量測結果與防護行動指引建議值比較，可快速決定必要的防護措施。

(二)方法論概述

RDD 程式推導操作型指引時，首先從 11 個放射核種（Am-241，Cf-252，Cm-244，Co-60，Cs-137，Ir-192，Po-210，Pu-238，Pu-239，Ra-226 和 Sr-90）指定適當核種及參數應用 RDD 方法論，RDD 方法論依照狀況會考慮複數可能的污染表面、放射性衰變和天氣影響，對個別群組發展適用的受體情節，之後確認暴露途徑並為個別情節發展劑量暴露之相關參數。

暴露途徑

RDD 程式方法論考慮的外部直接暴露途徑有：在戶外的街道/土壤上的污染

物造成的外部暴露（來自地面）、在戶外外牆污染物的外部暴露、在室內屋頂污染物的外部暴露、在室內內牆上的污染物的外部暴露、在室內地板上的污染物的外部暴露。空氣浸沒(air submersion)的途徑有：在戶外浸沒在受污染的空氣、在室內浸沒在受污染的空氣中。吸入相關的途徑：戶外吸入暴露（街道/土壤再懸浮的污染物）、室內吸入暴露（室內空氣污染是由戶外空氣污染和室內污染物再懸浮造成的）、室內吸入氡氣。攝入相關的途徑：於戶外從街道/土壤攝入粉塵顆粒、在室內攝入粉塵顆粒（保守假設為從地板而來的粉塵）。

操作型指引推導

確認暴露途徑後，RDD 程式將會計算射源劑量比（dose-to-source ratio, DSR），並與適用的 PAG 搭配，藉此推導出操作型指引。RDD 採用基於 ICRP-60 劑量轉換因子來產生操作型指引，對於吸入和攝入途徑，使用成人的 ICRP-72 資料庫的劑量轉換因數。對於 G 組，ICRP-72 資料庫中年齡相關攝入劑量轉換劑量因數則用於食物消費情節的劑量計算。

RDD 程式會以查詢表的形式，針對 Am-241、Cf-252、Cm-244、Co-60、Cs-137、Ir-192、Po-210、Pu-238、Pu-239、Ra-226 及 Sr-90 等 11 個核種製作操作型指引，藉此訂出不同階段的防護行動與劑量建議值。舉例而言，A 類操作型指引是用於 RDD 事故早期，針對第一時間處理與緊急工作人員防護決策的指引，以停留時間查詢表方式來表示(如下圖六)，該表以緊急工作人員 0.05 西弗的劑量限值為基礎；將上述 11 個核種對應工作人員在事故地區最長可停留時間。

本圖係 RESRAD 訓練課程上課資料，為避免著作權爭議，故不顯示。

圖六、基於阿伐量測結果導出之 A 類操作型指引-停留時間表(無呼吸器保護，銻-239 為例)

(三)程式功能介紹-操作型指引七大類群組

操作型指引群組共分七大類 A 至 G 群組，在適用事故早期階段包括群組 A 和群組 B，群組 A 在緊急事故應變期間的進出管制，子群組包括（1）生命和財產節約措施（2）緊急工作人員區域的劃出(demarcation)。群組 B.早期保護行動，其目的為在 RDD 事件後，對於公眾是否要進行疏散或是室內掩蔽的決策提供支援。子群組包括（1）疏散（2）室內掩蔽。作業指引群組事故中間期，群組 C 為搬遷區的關鍵基礎設施利用，其目的為在 RDD 事件後，對居住區、商業、工業區或其他地區決定是否需要搬遷，對於在搬遷區的關鍵設施決定其是否能繼續運作。子群組包括（1）居民區（2）商業和工業區（3）其他地區，如公園和紀念碑（4）醫院和保健設施（5）關鍵交通設施（6）水和下水道設施（7）電力和燃料設施。群組 D 決定臨時進入搬遷區進行基本活動的指引，例如是否可以暫時性的進入搬遷區來取出財產，紀錄文件或進行其他活動，子群組包括（1）工人進入企業的基本行動（2）公眾進入住宅搜索。群組 E 著重交通和通行路線的評估，子群組包括（1）橋樑（2）街道和通道（3）人行道和人行道。事故恢復階段的群組，群組 F 為從輻射管制區域釋放財產，其目的在於決定位於輻射管制

區的實體財產是否可以釋出。子群組包括（1）個人財產（2）廢棄物（3）有害廢棄物（4）土地和建築物。群組 G 食物消費，目的在於確認何時食物為安全可供消費使用，子群組包括（1）推定干預基準(derived intervention level,DIL)、規劃值（planning value, PV），PV 值係指允許在食物中的放射性活度限值（2）作物的土壤濃度（3）適用於生長新作物的土壤濃度（事故中間階段）（4）（復原階段）限制性使用土地的土壤濃度。

(四)程式實際運用例

實際應用上 RDD 程式可做為操作型指引執行的輔助工具，或是直接用以計算特定事故的操作型指引，舉例而言，在 2011 年 3 月 11 日福島第一核電廠事件中，輻射劑量的評估即使用了 RDD 程式，對種植水稻和海鮮產品提供可供消費的評估，以及對日本事故地區的火車乘客、汽車司機和乘客的劑量評估。總體而言，RDD 程式作為多功能且快速的事務評估與工具程式，能解決橋樑和道路，車輛，建築物和土壤的釋放問題，重返停留時間以及清理措施造成的影響提供以決策評估。

四、建議事項

- (一)、RESRAD-ONSITE 評估程式為國際上具有代表性的環境輻射劑量評估程式，已獲得美國核管會與能源部認可，並已實際應用於多座核電廠除役之環境輻射劑量管理。建議可對使用 RESRAD 程式進行的核電廠除役之環境輻射劑量評估規劃、除役計畫及除役後場址的劑量評估結果進行查核。
- (二)、RESRAD 家族程式包括 RESRAD-ONSITE、RESRAD-OFFSITE、RESRAD-BUILD、RESRAD-BIOTA 和 RESRAD-RDD 評估程式都是通過驗證且免費分享的程式，並且持續更新功能。我國核設施經營者應建立環境劑量評估團隊與時俱進，執行國內相關核子設施環境輻射劑量評估或核子事故之緊急劑量評估作業。
- (三)、RESRAD 評估程式取得容易，且硬體設備使用一般個人電腦即可運算；授課講師包括余家禮博士、鄭靜枝博士等皆為華裔專家，建議國內可適時邀請講師來台傳授最新版之 RESRAD 程式及指導平行審查作業技巧等，俾使我國核設施除役業務的執行可更具成效。
- (四)、建議國內除役執行單位或研究機構可執行 RESRAD 程式方面之本土化研究，結合國內三座核電廠除役之實務需求，以提升我國輻射劑量評估之技術水平。