

出國報告（出國類別：實習）

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輻射防護處

姓名職稱：黃議輝技士

派赴國家/地區：美國

出國期間：107 年 09 月 15 日至 09 月 30 日

報告日期：107 年 12 月 20 日

摘要

本次出國參加美國阿岡(Argonne)國家實驗室主辦之輻射劑量評估系列程式 (RESRAD) 訓練，訓練內容包括：RESRAD-ONSITE、RESRAD-OFFSITE、RESRAD-BUILD、Advanced RESRAD-ONSITE、RESRAD-OFFSITE、RESRAD-BIOTA、RESRAD-RDD，該訓練課程主要提供程式概述、歷史、計算方法、輸入參數需求以及 RESRAD 系列程式的應用，其中包含講述 RESRAD-ONSITE、RESRAD-OFFSITE 劑量分析技術、靈敏度分析、核種擴散、曝露途徑、曝露情節、程式驗證等，並於 RESRAD-ONSITE、RESRAD-OFFSITE 的進階課程講述核種分配係數 (Distribution Coefficient, K_d) 的替代計算方法及新增的射源項釋出模型。另課程教授以 RESRAD-BUILD 計算在室內如何設定空間中各輻射源與接收者、輻射源的再釋出及是否考慮氫氣劑量貢獻等。於 RESRAD-BIOTA 中講述除役場址放射性核種於土壤及水源中，經由生物鏈傳遞及各項曝露途徑，計算生存於污染區的生物可能遭受的輻射劑量。RESRAD-RDD 課程中講述，與輻射有關的爆裂物污染，在 8 大類主要情境事件假設下，評估是否需採行防護行動、污染區可否進出等活動項目。各輻射劑量評估程式課程由講師講述該程式概述及計算原理後，講師與學員交互於個人電腦上，以案例操作型式完成各種案例演練，學員並學習如何將各種假設案例及評估需求轉為程式各項數據輸入，最後與輸出結果作比對討論，並由講師協助學員解答各課程及上機實作的各項問題。

目錄

壹、	目的.....	3
貳、	過程.....	4
一、	行程概要.....	7
二、	參加核能電廠除役輻射評估程式-RESRAD 訓練概要.....	5
(一)	RESRAD-ONSITE 程式學習概要.....	5
(二)	RESRAD-OFFSITE 程式學習概要.....	7
(三)	RESRAD-BUILD 程式學習概要.....	8
(四)	RESRAD 程式進階課程學習概要.....	9
參、	心得及建議.....	15

壹、目的

本次出國於 107 年 9 月，在此之前國內核一廠除役計畫已完成審核，同年 12 月 5 日，核一廠 1 號機運轉執照到期，而核二廠除役計畫將於同年 12 月底前，台電公司依據核子反應器設施管制法規定需送交原能會審查。因應核能電廠陸續進入除役階段，各項除役作業安全審查與管制持續進行中，現階段工作國內除須積極發展除役關鍵安全議題之審查與驗證技術外，亦亟需研習國際核能先進國家於核能電廠除役實務經驗與技術，並加強國內管制人才培訓，以提昇相關技術審查與管制能力，增進除役作業安全與除役工作順利進行。

本次出國目的為參加美國阿岡(Argonne)國家實驗室主辦之輻射劑量評估系列程式(RESRAD)訓練，本次訓練內容包括：RESRAD-ONSITE、RESRAD-OFFSITE、RESRAD-BUILD、Advanced RESRAD-ONSITE、RESRAD-OFFSITE、RESRAD-BIOTA、RESRAD-RDD，該訓練課程主要提供程式概述、歷史、計算方法、輸入參數需求以及 RESRAD 系列程式的應用，其中包含確定性(Deterministic)和機率性(Probabilistic)劑量分析技術、靈敏度分析、核種擴散、曝露途徑、曝露情節、程式驗證等。並由講師與學員交互於電腦上，以案例操作型式完成各種程式及案例的演練，參與者學習各項數據輸入和輸出，並由講師協助學員解答上機課程的各項問題。

貳、過程

一、行程概要

參加核能電廠除役輻射評估程式-RESRAD 訓練行程

9月15日(六)	臺北至芝加哥
9月16日(日)	課前資料整理與準備
9月17日(一)	RESRAD-ONSITE
9月18日(二)	RESRAD-ONSITE
9月19日(三)	RESRAD-OFFISITE
9月20日(四)	RESRAD-OFFISITE
9月21日(五)	RESRAD-BUILD
9月22日(六)	資料整理
9月23日(日)	資料整理
9月24日(一)	ADVANCED-ONSITE
9月25日(二)	ADVANCED-OFFISITE
9月26日(三)	ADVANCED-BIOTA
9月27日(四)	ADVANCED-BIOTA、RDD
9月28日(五)	ADVANCED-RDD
9月29日(六)	芝加哥搭機返台
9月30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

(一) RESRAD-ONSITE 程式學習概要

RESRAD-ONSITE 程式係美國能源部(DOE)、核管會(NRC)、環保署(EPA)、州政府等政府機關用以評估除役場址情況對人員劑量是否符合法規限值的分析工具。程式預設模型由上到下分為數層：表土層、污染層、未飽和層、地下水層。污染核種源項初始設定於污染層土壤內，該層亦可設定為未受表土層覆蓋或部分沒入地下水層中。放射性核種對人體曝露包含相當多樣途徑，包含：經由土壤攝入(Soil Ingestion)、懸浮灰塵吸入、土壤直接輻射、動植物吸收後人體間接攝入(假設根部長度 90 公分，當根部長度涵蓋受污染土壤時則會吸收放射性核種，次要參數還包含葉部沉積速率、生長週期、留滯、傳輸、風化等)、淋溶(Leaching)，淋溶速率(單位時間內殘留的污染核種釋放速率)計算考量水的各種傳遞模式增減包含「蒸發速率(Evaporation)、降雨(Precipitation)、灌溉(Irrigation)、滲透(Infiltration)、流失(Runoff)」，進入地下水後抽取井水或傳遞至地表水體後，再經由飲用或灌溉農作物、及水產攝入等許多樣途徑對活動於場址內人員造成輻射曝露。此外對於核種射源移除項還包含表面土壤侵蝕，其中程式預設由於農務情節需翻土，表土 15 公分內核種為均勻混合，當表土厚度因土壤侵蝕至不足 15 公分時，則一部分污染層土壤開始與表土混合，之後核種經由表土侵蝕被移除至場址外，或懸浮於空氣中，另還有淋溶作用從污染層滲入未飽和層。

RESRAD-ONSITE 程式除可用以計算劑量外，另一主要功能係設定人員最大容許劑量目標值，反向回推個單一核種在土壤中容許上限，即” 導出濃度水平”(DCGL, Derived Concentration Guideline Level)，用以判斷場址清理後殘留放射性核種濃度是否達到可接受標準，現實案例中土壤殘留放射性核種不只一種，應以

值一法則(Sum of Fraction)作計算。程式計算結果也顯示將導出濃度水平設定為土壤清理標準，對人員造成劑量值相對直接計算劑量結果為保守，原因係導出濃度水平假設計算係以個別核種於同一時間造成最大劑量之核種濃度比計算，然實際情況個別核種由於遷移傳遞有時間落差緣故，造成最大劑量時間往往錯開，因此個別核種劑量疊加後最高值會較低。

此外程式也預設許多保守假設條件，例如：水井位於地下水核種傳遞最高濃度中心線之污染土壤邊界上、核種分配係數(Distribution Coefficient, K_d)及其他參數通常選擇保守值、預設情境為生於於場址上的農民(食用的農作物、肉類、牛奶有一半產自污染場址、所有水源來自污染場址)、體內劑量使用保守的代謝係數、一維的地下水位計算及二維的地下水層無延散(no Dispersion)計算假設等。

影響未飽和層核種傳輸速率參數包括： K_d 值(Distribution Coefficient)、水飽和分率、未飽和層厚度、滲透率、有效孔隙率(Effective Porosity)。而影響淋溶速率包括：污染層的 K_d 值、滲透率、污染層厚度、土壤密度等，如果 K_d 值很小時則會被總孔隙率及飽和分率影響。影響地下水層中核種傳輸速率參數包含：飽和層的 K_d 值、污染層面積、與含水層流動平行的長度、地下水井深、水井抽水速率、滲透率、水力傳導係數(Hydraulic conductivity)、水力梯度(Hydraulic gradient)、有效孔隙率。

此外程式為提高運算速度簡化核種衰變及增長的衰變鏈模型，將短半衰期核種位置及劑量貢獻均併入其相對長母核中，故不另計算短半衰期核種遷移傳遞，

另有關不準度分析(Probabilistic Analysis)，依講師說明目前 NRC 對於除役場址劑量評估有使用不準度分析，該方法係將廠址中各重要參數以機率分布型式輸入 RESRAD 程式，應用蒙地卡羅(Monte Carlo)或拉丁超立方(Latin Hypercube)取樣方法，重複從參數機率分布中取出多組數參數組合，輸入 RESRAD 計算，最

後得出場址殘餘核種對人員劑量的機率分布及累積機率分布。使用此方法係各項特性量測數據以機率分布方式表示，並作為輸入參數經程式計算後得到對應的劑量機率分布，好處是可以較貼近現實情境，但講師也說明使用該方式也有相對應的困難，包括得到劑量計算結果為機率分布，於公眾溝通時難以用定值解釋場址對人員劑量符合法規標準，以及劑量累計機率分布百分位數(percentile)應取多少才能兼具合理性與保守性，皆端視業者與管制機關協商結果，法規無明確定值，加上場址各種參數應如何選用適合的機率分布模型、各種參數間可能並非完全獨立，參數間需要依場址特性值輸入之間關連性等，因此不準度分析(Probabilistic Analysis)相較確定性分析(Deterministic Analysis)計算複雜許多。

對於案例演練污染面積的擴大對輻射劑量的影響，結果對曝露人員直接劑量逐漸增加，但對於水源有關之劑量則增加至一定程度後持平，解釋係因當污染面積擴大，污染地下水傳遞至水井深度逐漸增加，因水井深度有限，當污染地下水深度超過水井深度後，抽取地下水核種濃度則不再增加。而 U-238 與 U-234 污染場址靈敏度分析演練，結果 Kd 值越大，劑量最大值出現時間越晚，總劑量值正比於污染層厚度，飽和層滲漏速率越大，劑量最大值出現時間越早，對總劑量值大小無顯著影響。

(二) RESRAD-OFFSITE 程式學習概要

RESRAD-OFFSITE 主要的學習內容包括：(1)學習程式中 RESRAD-OFFSITE 與 RESRAD-ONSITE 差異、(2)學習 RESRAD-OFFSITE 操作介面主要功能、(3)學習使用新的射源項模型、(4)學習不準度分析的延伸功能。RESRAD-OFFSITE 的用途主要在於評估位於污染場址外的民眾，所受到輻射曝露途徑及劑量，並用

以回推廠址 DCGL 及判斷民眾接受劑量是否符合法規標準。

RESRAD-OFFSITE 與 RESRAD-ONSITE 的差異包括：(1)接受輻射曝露的標的不再侷限於廠內，而是可在廠外任何使用者指定地點，並輸入占用因素作計算、(2)水井也不侷限在廠址邊界而是任何使用者指定地點、(3)放射性核種可經由各項物理模式將核種傳遞由場址傳遞至場址外地區，例如：淋溶(Leaching)、徑流水侵蝕(erosion by runoff)、風蝕(wind erosion)、大氣傳遞(Atmospheric release and transport)等方式傳遞到地表水體、地下水體及場外各項人員活動區域等、(4)加入大氣擴散模式，可以依照廠址特性輸入 16 方位風速分佈比例及不穩定度經由高斯煙羽擴散模式計算放射性核種，從場址經大氣擴散至場外各地區及分佈、(5)地表水體累積模式，用以評估二次污染情形等。

(三) RESRAD-BUILD 程式學習概要

RESRAD-BUILD 主要教導學員如何使用電腦程式，計算人員在污染建築物內所接受到的劑量。講師說明當初此程式建置過程中，因考量實際現實中放射性母核種加子核種數量繁多，多射源位置及多接收者位置，計算各樓層彼此之間輻射穿透及屏蔽等過程十分困難，故最後程式僅將受污染建築物的房間數量限制為三個。而 RESRAD-BUILD 計算人員曝露途徑包括：(1)污染建築物的直接輻射、(2)污染建築物釋出的放射性物質沉積造成的體外曝露、(3)污染建築物釋出的放射性物質懸浮於空氣中造成的體外曝露、(4)污染建築物釋出的放射性物質懸浮於空氣中造成的體內曝露、(5)污染建築物含有鈾或鈾釋出含氦的子核種，另還可計算含氦核種造成的體內曝露、(6)誤食部分射源造成的體內曝露、(7)污染建築物釋出的放射性物質沉積於食物表面被人員攝入造成體內曝露。

對於輻射源設定，此程式可選擇點射源、線射源、面射源與體射源，面射源可選擇圓形或方形，體射源可選擇圓柱型或六面體。而程式演練時說明，體射源預設不考慮自屏蔽，因此如需將此加入計算可於體射源中建層（如射源層、屏蔽層）。而程式亦有手動輸入房間與房間之間的通氣量，及房間與外界環境的通氣量功能，如手動輸入房間的排氣量，程式會自動輸入平衡的進氣量因此不會有房間被抽至真空情況。

(四) RESRAD 程式進階課程學習概要

RESRAD 程式進階課程主要對於 RESRAD-ONSITE、RESRAD-OFFSITE、RESRAD-BIOTA 及 RESRAD-RDD 程式作講授。

1. 對於 RESRAD-ONSITE 進階訓練課程

講授包含：(1) K_d 值替代計算方法、(2)地下水井模式、(3)有輻射熱點場址劑量評估。由於各種核種在不同土壤中的傳輸速率參數 K_d 值可能差異甚大，且 K_d 值對於與核種傳輸至地下水層後的輻射曝露途徑影響程度大，因此進階課程說明 K_d 值的替代計算方法，包括以(1)地下水核種濃度、(2)溶解度限值、(3)淋溶速率、(4)於植物土壤核種比例，分別用以估算土壤不同層中可能的 K_d 參數。

關於地下水模式介紹兩種模型分別為質量平衡模型(Mass Balance Model)與無延散模型(Non-Dispersive Model)。質量平衡模型適用於污染場址面積污染較小，並假設水井位於污染場址中央，當抽水量小於污染場址土地面積乘上淋溶速率時，即假水井抽到的水都是從污染層傳至地下水層的水，相反若抽水量大於污染場址土地面積乘上淋溶速率時，即水井抽到的水僅有部分是從污染層傳至地下水層的水，因此還有其他潔淨的地下水稀釋緣故，以比例關係推算水井抽到的水

中核種濃度比例。而無彌散模型則適用於污染場址面積污染較大，並假設水井位於場址邊界地下水流向中心線下游位置。

另外對於當清理後場址無法完全符合 DCGL，部分區域有高殘餘放射性污染物情況下，如何依個別污染程度及範圍，以 RESRAD-ONSITE 建置平均的污染程度及範圍以評估場址造成的平均劑量。

2. 對於 RESRAD-OFFSITE 進階訓練課程講授射源項外釋模型。

RESRAD-OFFSITE 程式中相較 RESRAD-ONSITE 模型使用的 Version 2 Release Model，其係假設污染核種全部累積於污染層底部並逐漸穿透釋出，在污染層之中並不會有核種傳輸計算，因此初始時間從污染層底部釋出的核種濃度最高之後逐漸降低。然而 RESRAD-OFFSITE 程式中增加兩種新的射源釋出模型，分別為一階控制釋出(First Order Rate Controlled Release)與瞬間平衡脫附釋放(Instantaneous Equilibrium Desorption Release)，在一階控制釋出模型中核種需經由污染層傳遞過程才能到達污染層底部後釋出，而瞬間平衡脫附釋放模型係假設某個時間點起始，污染層才開始釋放放射性核種至未飽和層或飽和層，RESRAD-OFFSITE 上述兩模型主要目的用於計算核廢料貯存場址中，人工屏障失效後的核種射源外釋情境。對於使用者如何合理設定人工屏障失效型態及時間，講師說明個案須仰賴其他實驗或評估計算才能獲得可輸入 RESRAD-OFFSITE 計算的合理參數。

3. 對於 RESRAD-BIOTA 訓練課程講授射非人類生物的輻射劑量計算。

在美國制訂對非人類生物輻射劑量法規限值單位，有別於對人類使用的有效劑量(Effective Dose, Sv or rem)，非人類生物係使用吸收劑量(Absorbed Dose,

Gy)。RESRAD-BIOTA 將對非人類生物體輻射造成影響的評估分為三個階段包括：一般篩選階段(General Screening)、場址特定篩選階段(Site-Specific Screening)、場址特性分析階段(Site-Specific Analysis)。在第一階段中以相似於設定場址清潔標準導出濃度水平(DCGL)作法，將對非人類生物劑量限值與場址單位核種濃度造成劑量作比值，得出場址個別核種濃度限值 BCGs(Biota Concentration Guides)，如為多核種再以值一法則計算。由於一階計算方式較為保守，如場址清理後情況無法符合 BCGs，則依場址特性輸入其他更完整的參數，以二階段或三階段 RESRAD-BIOTA 程式評估計算。於二階段中可調整環境與生物的核種遷移係數，例如土壤至草、草至兔子、兔子至狐狸、水至狐狸等不同傳遞途徑之間的核種遷移係數。而到第三階段可進一步根據當地生物種類，設訂生物體的大小、重量等，進一步評估物種實際接受到的輻射劑量。

4. 對於 RESRAD-RDD 訓練課程講授包含：

RESRAD-RDD 程式係用以評估與輻射有關的爆炸或外釋事件，評估在污染區內或經過污染區的人預估劑量，並提供相關應變人員判斷是否超過美國的防護行動指引(Protective Action Guides, PAGs)，而需要執行相對應的應變或管制措施(例如疏散、掩蔽、限制停留時間或通行等)，及採行/未採行該措施所獲得的劑量。RESRAD-RDD 中預設了 7 大類主要情境分別為：(1)緊急應變期間進出管制、(2)早期防護行動、(3)撤離區域關鍵基礎設施的使用、(4)撤離區域的暫時進入、(5)運輸及進出路境、(6)來自輻射管制區外釋物料、(7)食物消費。從主要情境下再細分若干次情境。由於 RESRAD-RDD 大部分情節及參數為程式預設且固定，因此無法完全按使用者的實際需求作調整，例如：限定核種種類為：Co-60、Sr-90、Cs-137、Ir-192、Po-210、Ra-226、Pu-238、Pu-239、Am-241、Cm-244、Cf-252

共 11 種，其他如工人工作時間固定為 8 小時，劑量限值固定為 PAGs 的指引值等。

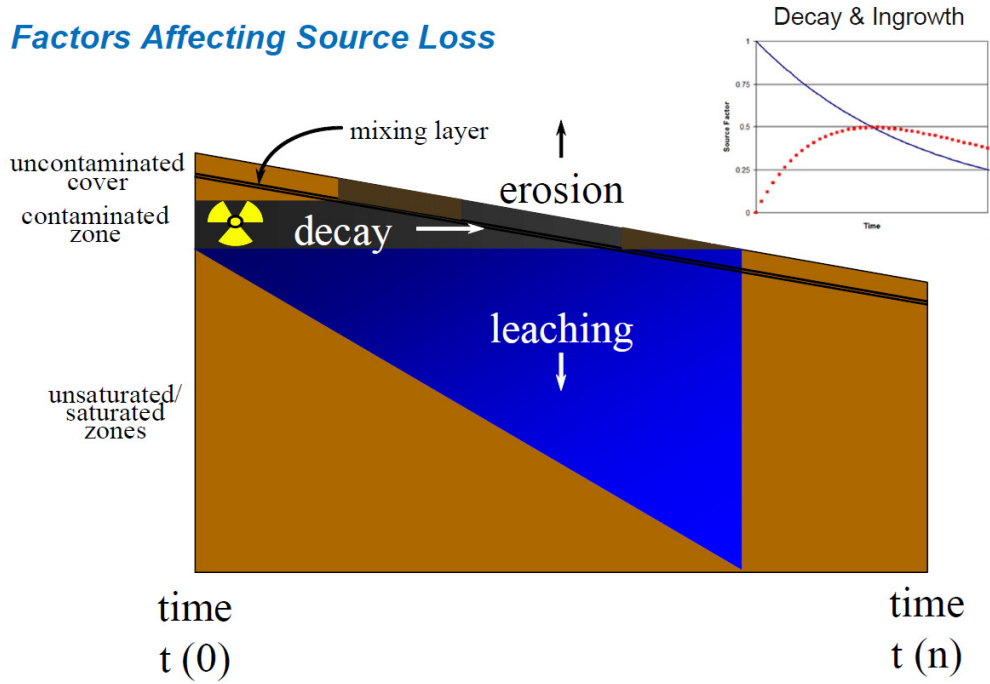


圖 1、土壤污染層放射性核種向外擴散途徑示意圖

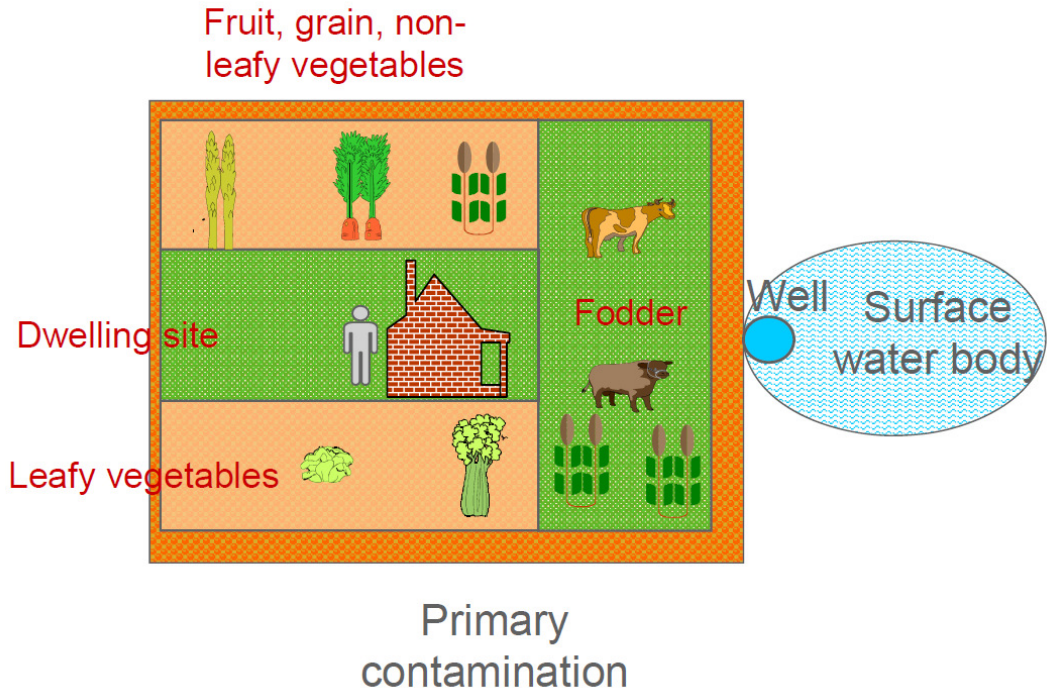


圖 2、RESRAD-ONSITE 場址內活動情節示意圖

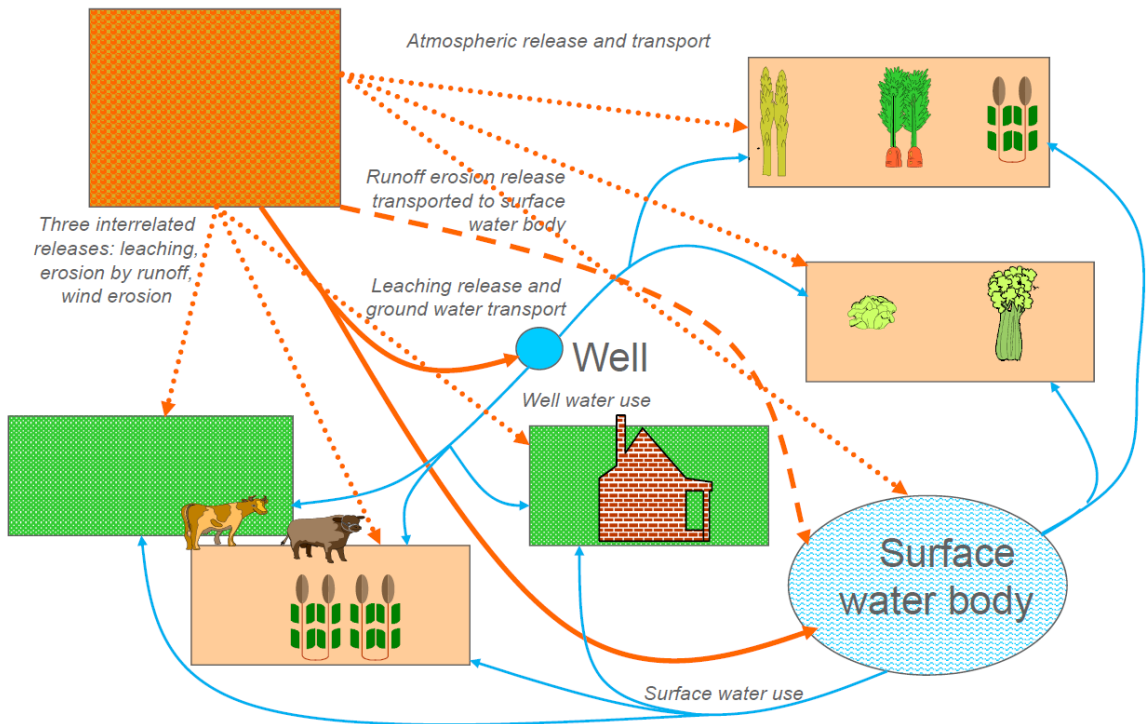


圖 3、RESRAD-OFFSITE 場址外活動情節與核種傳遞途徑示意圖

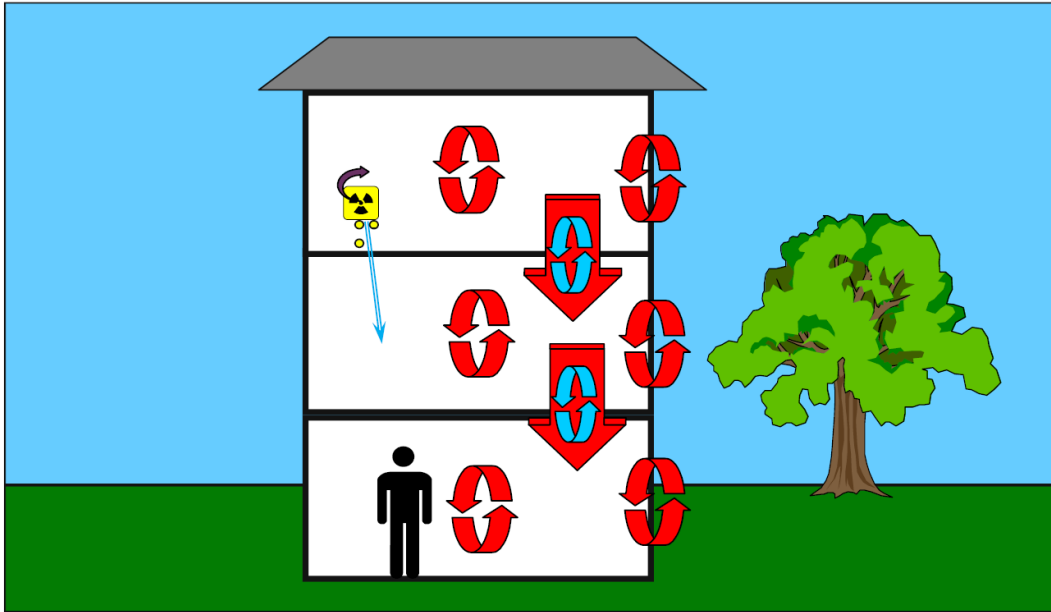


圖 4、RESRAD-Build 房間分隔輻射源與接收者及房間換氣示意圖¹



圖 5、講解核種於固、液體傳輸速率差異實驗

¹ 圖 1 至圖 4 引用自本次美國阿岡國家實驗室 RESRAD 訓練課程資料

參、心得及建議

- 一、 RESRAD-ONSITE 及 RESRAD-OFFSITE 劑量評估程式為美國能源部資助美國阿岡國家實驗室開發，並獲得美國核管會認可用於多座核能電廠、核燃料採礦廠除役場址輻射劑量評估。由於除役場址清潔目標不論是以非限制性使用 0.25mSv/y 或限制性使用 1mSv/y 的法規標準，均小於台灣地區背景輻射年平均值約 1.6mSv/y，因此難以完全仰賴儀器測量直接輻射方式證明符合法規標準，需同美國除役經驗以程式評估場址在假設情境下各種曝露途徑對人員的輻射劑量影響，用以驗證是否符合法規規範。因此建議未來可進一步派員研習 RESRAD 程式在核電廠除役應用，例如：業者及管制機關如何合理地依場址特性，決定場址特性輸入參數，並合理地假設人類活動情節及土地應用等，同時借鏡國外經驗建立我國管制機關與業者認可的核能電廠除役場址合理的清潔及除污標準，推動長期除役工作。
- 二、 RESRAD 程式獲得國際認可及廣泛使用，且網路上隨時可免費下載並安裝於個人電腦操作及運算，但 RESRAD-ONSITE 及 RESRAD-OFFSITE 龐大的各項參數於程式計算式中的含義、參數之間的相關性、參數設定是否合於物理意義等，都需要國內持續培養團隊長期深入學習、使用並參與相關國際比對工作，從中發現錯誤並改正學習、經驗傳承、厚植實力，才有可能用於對國內核一、二、三廠除役場址作合理的輻射評估。
- 三、 由於除役為長期且需要專業訓練之作業，建議可持續派員參與此類國外除役技術訓練，並透過受訓機會汲取國外技術專家除役作法及技術經驗，促進我國除役工作順利進行。