

出國報告（出國類別：實習）

赴美國參加 RESRAD 實務訓練出國報告

服務機關：核能研究所

姓名職稱：陳懿璿 技術員

黃坪吉 助理研究員

派赴國家：美國

出國期間：106 年 2 月 19 日~106 年 3 月 12 日

報告日期：106 年 4 月 10 日

摘 要

本次公差行程係由美國阿岡國家實驗室(Argonne National Laboratory, ANL) 規劃邀請，進行核能電廠除役作業技術交流，同時參加 ANL 所舉辦「RESRAD-ONSITE、RESRAD-OFFSITE 及 RESRAD-BUILD 等程式基礎應用訓練」與「RESRAD-ONSITE、RESRAD-OFFSITE、RESRAD-BIOTA 及 RESRAD-RDD 等程式進階實務訓練」課程。藉由參與兩階段訓練課程，除了增進 RESRAD 程式之參數靈敏度分析能力，並配合本土需求提升程式運用的彈性度與合理性，同時透過與 ANL 專業人員進行核電廠除役劑量評估之實務經驗交流，對我國未來核電廠除役工作推行，獲得相當之經驗回饋與助益。

關鍵字：靈敏度分析、導出濃度指引水平、大氣傳輸模式、分配係數

目 次

(頁碼)

摘 要	i
一、目 的	1
二、過 程	1
三、心得	39
四、建 議 事 項.....	40
五、附 錄	41

一、目的

本次公差訓練實習行程係由美國阿岡國家實驗室(Argonne National Laboratory, ANL)規劃邀請，進行核能電廠除役作業技術交流，同時參加 ANL 所舉辦的「RESRAD-ONSITE、RESRAD-OFFSITE 與 RESRAD-BUILD 等程式基礎應用訓練」與「RESRAD-ONSITE、RESRAD-OFFSITE、RESRAD-BIOTA 與 RESRAD-RDD 等程式進階實務訓練」課程。藉由參與兩階段訓練課程，除可增進 RESRAD 程式之參數靈敏度分析能力，並能配合本土需求提升程式運用的彈性度與合理性，同時亦透過與 ANL 專業人員進行核電廠除役劑量評估之實務經驗交流，將可對我國核電廠除役工作之推行，獲得相當之經驗回饋與助益。

二、過程

(一) 公差行程

本次公差於 2017 年 2 月 19 日搭乘長榮航空(BR565 班次)晚上 20:05 離開台灣桃園國際機場，直飛美國芝加哥歐海爾(O'Hare)國際機場，約當地時間 19:55 抵達。3 月 11 日凌晨 00:20 搭乘長榮航空(BR55 班次)，於台灣時間早上 06:00 返回台灣，詳細行程如表一所示。

本次 RESRAD 程式訓練課程舉辦地點為阿岡國家實驗室(Argonne National Laboratory, ANL)，位於美國伊利諾州杜佩奇縣，是美國能源部下屬的國家實驗室。ANL 為美國政府規模最大、歷史最悠久的科學研究機構之一，相關地理位置與園區研習地點如圖一所示。

表一、赴美公差行程規劃

日期	地點	內容
2 月 19 日	桃園→美國芝加哥	去程
2 月 20 至 2 月 21 日	美國伊利諾州	參加新進人員訓練
2 月 22 至 2 月 24 日	美國伊利諾州	與 ANL 專家進行技術交

		流與觀摩實習
2 月 27 至 3 月 3 日	美國伊利諾州	RESRAD-ONSITE, RESRAD-OFFSITE, RESRAD-BUILD 等程式 實務應用訓練
3 月 6 至 3 月 10 日	美國伊利諾州	Advanced RESRAD- ONSITE 與 RESRAD- OFFSITE, RESRAD- BIOTA, and RESRAD- RDD 等程式進階實務應 用訓練
3 月 11 日至 3 月 12 日	美國芝加哥→桃園	回程

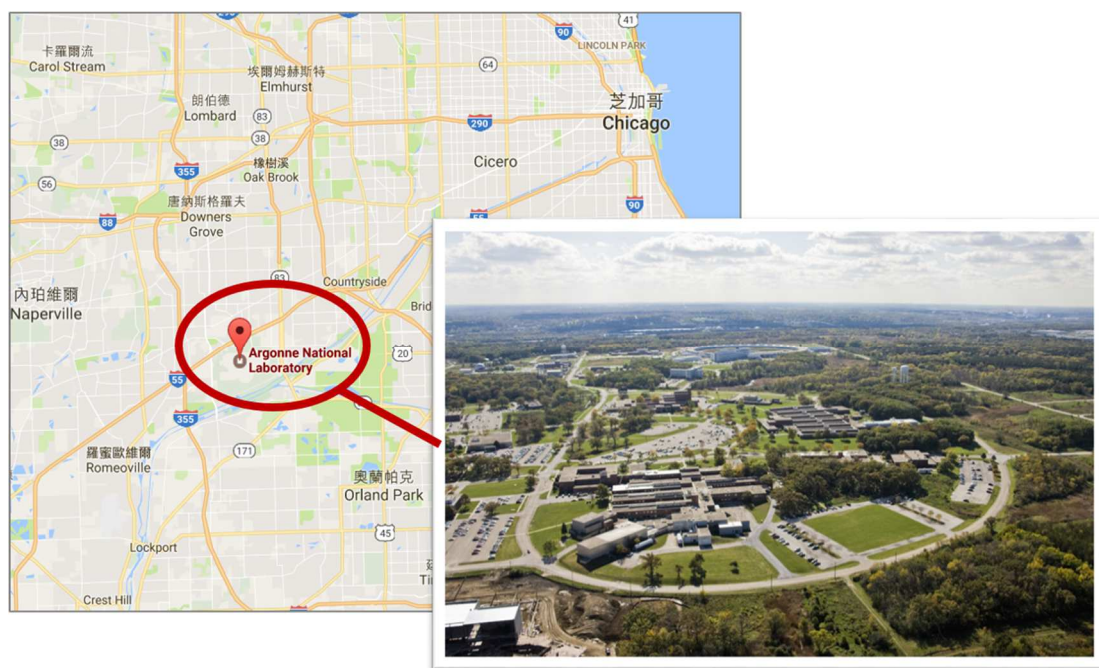


圖 一、美國阿岡國家實驗室地理位置圖

(二) 新進人員訓練(2/20-2/21)

由於本次訓練實習多規劃一週時間與 ANL 專家進行技術交流，因此依 ANL Human Resources New Employee Orientation Program 規定，須於 Building 201/190 室參加 2 天新進人員訓練講習，內容主要針對工安、環安、輻安、資安及發展歷

史等進行簡介，並於第二天(2/21)安排 1 小時院區導覽，介紹 ANL 各館舍位置分佈及主要研究方向，講習課程表如表 二所示；另本次 RESRAD 程式實務應用訓練課程舉辦地點，則位於北邊主要入口大門西側 Building 240/TCS Conference Center，如圖 二所示。

表 二、新進人員訓練講習課程表

日期	內容
2 月 20 日	- Introduction to Argonne – Human Resources - Counterintelligence - Computer Security
2 月 21 日	- Environmental Safety and Health - HEW presentation

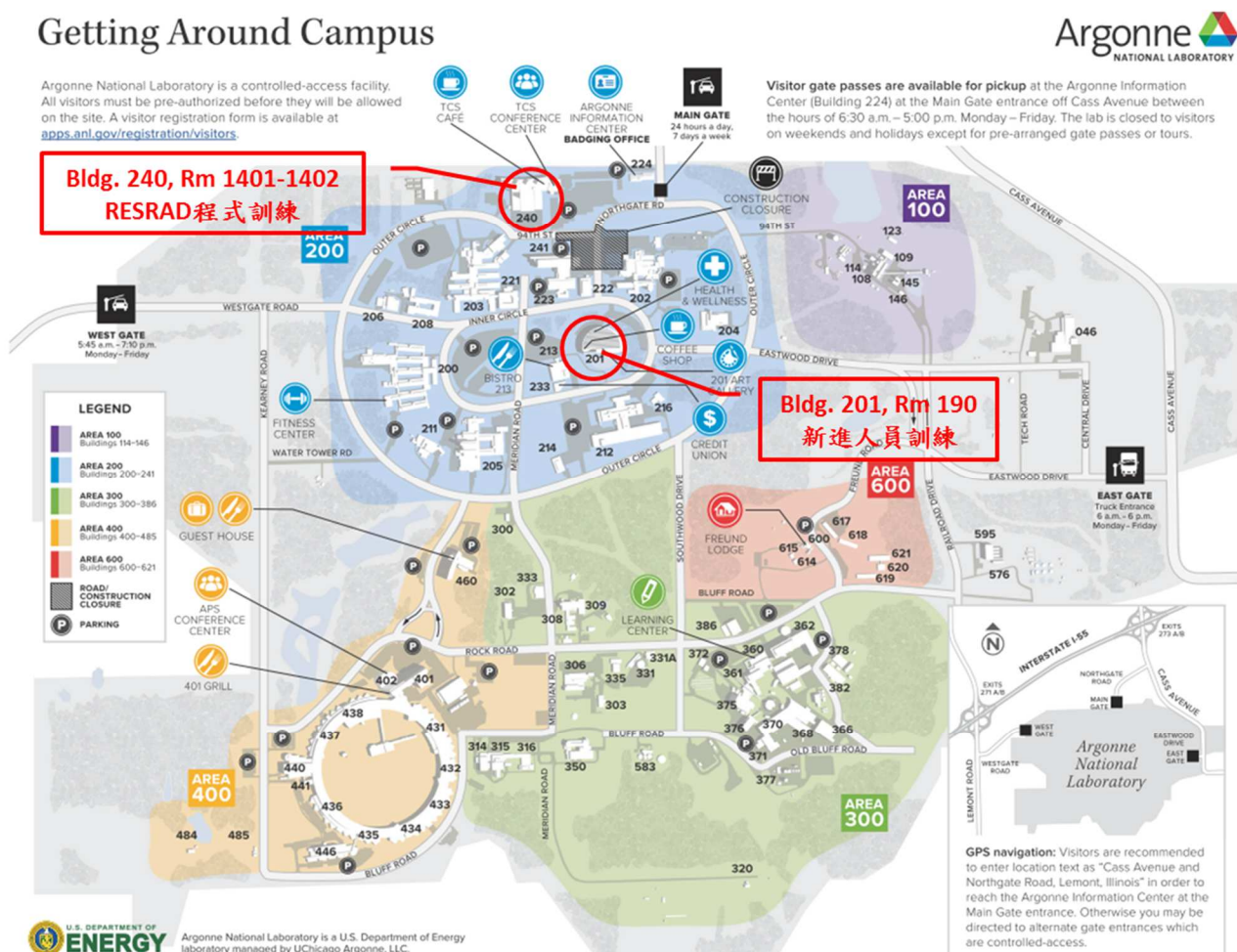


圖 二、新進人員及 RESRAD 程式訓練地點

(三) 與 ANL 專家進行技術交流紀要(2/22-2/24)

1. 美國除役廠址釋出再利用相關法規討論

美國除役廠址釋出再利用可容許殘餘輻射劑量標準，一般係以 10 CFR 20 Subpart E 來加以規範，其中 10 CFR 20.1402 係用於除役廠址無條件釋出再利用，而 10 CFR 20.1403 則主要用於除役廠址限制性釋出再利用。2 條準則當中，皆提到 25 mrem(0.25 mSv)之劑量標準，另外 10 CFR 20.1403 於某些條件下，亦額外訂定 100 mrem(1.0 mSv)之劑量標準，以下就這 2 點差異摘述與 ANL 專家討論之心得：

除役廠址釋出再利用，一般皆以農場居民(resident farmer)做為廠址釋出後再利用之情節假設，並以 25 mrem(0.25 mSv)做為關鍵群體平均成員之年劑量限值，此為 10 CFR 20.1402 所規範之內容；若除役廠址未來用途並非選用農場居民情節(例如：工作人員、休閒人員等)，則必須對選用該情節假設之正當性做出適當之說明，並同樣以 25 mrem(0.25 mSv) 做為關鍵群體平均成員之年劑量限值，此為 10 CFR 20.1403 所規範之內容，此處農場居民及工作人員皆屬最有可能(most likely)廠址未來使用情節假設。不同廠址未來使用情節，使用相同劑量限值來加以規範原因在於，無論是農場居民(resident farmer)或工作人員(industrial worker)，皆為一般民眾，因此在劑量限值設定上並無差異(皆為 25 mrem)，差異在於工作人員於除役廠址所接受殘餘輻射之曝露途徑，可能較農場居民少得多(例如：減少攝食或飲水等曝露途徑)，因此在相同劑量限值下，工作人員情節所推導出來的核種外釋清潔標準(DCGL)，可能會比農場居民情節高出一些。此外，若選用工作人員情節做為該除役廠址未來釋出可能使用方式，除了須證明廠址內工作人員所接受輻射劑量小於 25 mrem 之外，可能亦須針對廠址外居民劑量進行評估，評估其所接受之輻射劑量是否亦小於 25 mrem。此處不使用一般輻射作業對一般人所規定 100 mrem 劑量限值，原因在於此劑量限值係用於規範所有核設施對同一民眾所造成之年輻射劑量限值，25 mrem 係針對某一特定除役廠址對該位民眾所造成之年劑量限值，以保留部分餘裕。

此外，在 10 CFR 20.1403 中所提到 100 mrem 劑量限值，係適用於 2 種條件：(1) 當除役廠址未來釋出規劃做為限制性使用(並非所有一般民眾皆能自由進入)條件下，可能需額外證明廠址未來最不可能(unlikely scenario)之使用情節(如：農場居民情節)所推得之劑量仍小於 100 mrem 之要求；(2) 此外，可能某些廠址污染分佈相當特殊，在經過 ALARA 分析後，若將該廠址之殘餘輻射對一般人(農場居民)所造成之劑量減低至小於 25 mrem，在成本支出上或技術可能性上是難以達成的，此時可能可以使用 100 mrem 做為該除役廠址釋出再利用之劑量管制限值(10 CFR 20.1403 (e))。表 三則綜整不同除役廠址未來用途，所適用法規標準與情節假設。

表 三、不同除役廠址未來用途適用法規標準與情節假設

法規編號 (廠址未來用途)	劑量限值	適用情節
10 CFR20.1402 (無條件釋出)	0.25 mSv	農場居民
10 CFR20.1403 (限制性釋出)	(b) 0.25 mSv	工作人員(most likely scenario)
	(e)(1) 1.0 mSv	(1)未來喪失監管功能後可能情節，現階段為較不可能情節假設(unlikely scenario)，例如：農場居民； (2)某些廠址污染分佈相當特殊，在經過 ALARA 分析後，若將該廠址之殘餘輻射對一般人(農場居民)所造成之劑量減低至小於 0.25 mSv，在成本支出上或技術可能性上是難以達成的。
	(e)(2) 5.0 mSv	工作人員或除役廠址未來可能其他用途之情節，然而 ANL 專家指出此管制限值過高，較難以被社會大眾所接受。

綜上所述，當除役廠址未來規劃用做非限制性釋出再利用，則可透過廠址內劑量評估程式(如：RESRAD-ONSITE)進行關鍵核種清潔標準(DCGL)之推定或民眾輻射劑量評估，以證明除役廠址殘餘放射性對廠址內或廠址外之人員所造成之輻射劑量，可符合相關法規標準；

若是未來除役廠址規劃用做限制性釋出再利用，則可能需同時應用廠址內(RESRAD-ONSITE)及廠址外(RESRAD-OFFSITE)劑量評估程式進行模擬分析，確保除役後廠址對周圍環境及民眾之輻射安全。表 四則綜整不同除役廠址未來用途，所適用情節假設與評估程式。

表 四、不同除役廠址未來用途適用情節假設與評估程式

廠址未來用途	可能情節	劑量限值	說明	適用評估程式
無條件釋出再利用	農場居民	0.25 mSv 10 CFR20.1402	屬最保守情節假設，不須額外進行論述選定該情節理由。	RESRAD-ONSITE
	休閒人員	0.25 mSv 10 CFR20.1402	須說明情節與曝露途徑選定之正當性。	RESRAD-ONSITE
限制性釋出再利用	工作人員 (廠址內)	0.25 mSv 10 CFR20.1403(b)	屬除役廠址未來最可能(most likely)使用情節，但須說明情節與曝露途徑選定之正當性。	RESRAD-ONSITE
	農場居民 (廠址內)	1.0 mSv 10 CFR20.1403(e)	屬除役廠址未來較不可能(un likely)使用情節，但須做為替代案例，證明即便除役廠址未來喪失監管功能，仍可保障民眾之輻射安全。	RESRAD-ONSITE
	農場居民 (廠址外)	0.25 mSv 建議額外評估情節	廠址外民眾仍可能因除役廠址所產生污染粉塵或地下水而遭受輻射曝露。	RESRAD-OFFSITE

2.以污染井水進行農耕灌溉之人員劑量評估

當核種外釋至地下水中造成地下水的污染，而居住人員以取井水的方始使用污染水，保守評估當居住人員以農耕方式自給自足，其所接受的劑量。假設污染水有兩種途徑導致人員體內曝露：case 1 為直接飲用污染水；case 2 為使用污染水灌溉農耕，並攝入受污染的作物。Case 1 可直接使用原能會提供的劑量轉換係數評估人員飲用污染水所接受之劑量。Case 2 需評估污染水在灌溉時，核種從水轉移至土壤的情形。根據水平衡的原理，單位時間內灌溉的水量與降水量總合會等於逕流量(runoff)、蒸發量、與下滲量的總合，如圖 三所示。所以經過

水平衡扣除隨著水經過蒸發與逕流流失的量，得知下滲的量，便可估計出土壤污染的厚度與污染土壤體積，進而求出土壤污染濃度。將土壤厚度與土壤污染濃度輸入至 RESRAD-ONSITE，可評估灌溉情節人員農耕所接受的劑量。

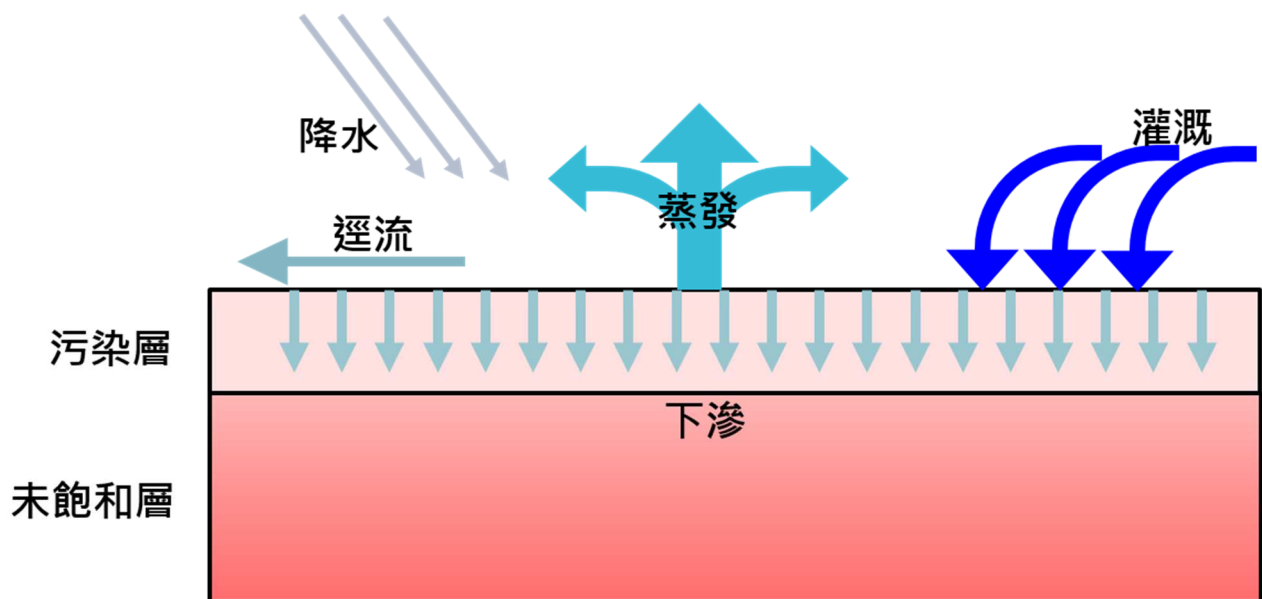


圖 三、農耕灌溉情節之水平衡示意圖

(四) RESRAD Family 程式介紹

自 1980 年代初期開始，ANL 即著手 RESRAD 相關評估程式之研發，目前為止共計研發 9 個 RESRAD Family Codes，如圖 四所示。其中 RESRAD-BASELINE、RESRAD-CHEM、RESRAD-ECORISK 等 3 個程式，由於僅能於 Windows 95 微軟作業系統下運跑，現階段使用者也較難取得該作業系統進行程式運跑，故 ANL 近年來也不再針對上述 3 個程式進行維護更新；另外，由於美國能源部禁止放射性廢棄物運出 DOE Site，排除廢棄物外釋再利用之可能性，故也暫停 RESRAD-RECYCLE 之維護更新，因此目前 RESRAD 網站上所顯示 5 個彩色圖樣，則為目前仍有進行維護更新之軟體(即 RESRAD、RESRAD-BIOTA、RESRAD-BUILD、RESRAD-RDD 及 RESRAD-OFFSITE)，亦是本次訓練課程之重點，如圖 五所示。

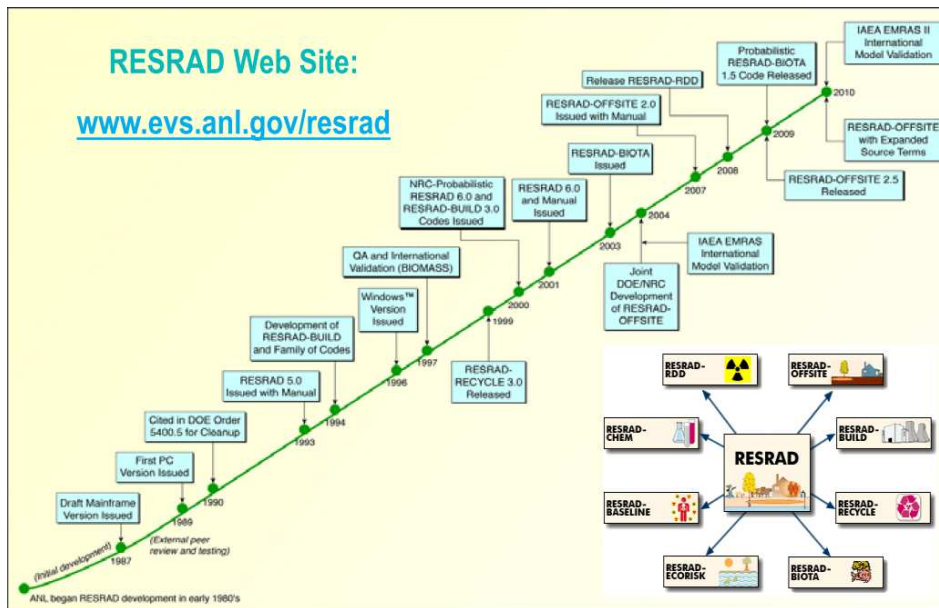


圖 四、RESRAD Family Codes 發展歷史



圖 五、目前仍持續維護更新之 RESRAD Codes(彩色圖示部分)

RESRAD 程式訓練課程，係由 ANL 環境科學部門(Environmental Science Division)所舉辦，至今已舉辦過超過 130 場訓練課程，然而先前訓練課程主要為 1 週班，本次為首次舉辦 2 週班訓練課程，分為第 1 週基礎訓練班及第 2 週進階訓練班，詳細課表資訊如附錄一所示。2 週訓練課程共有 5 位專家講授程式原理及實務操作，第 1 週基礎訓練班主要由 Charley Yu、Dave LePoire、Jing-Jy Cheng 與 Emmanuel Gnanapragasam 進行講授，第 2 週進階訓練班則由 Charley Yu、Dave LePoire、Jing-Jy Cheng 與 Sunita Kamboj 進行講授。

(五) RESRAD 程式基礎班訓練課程紀要(2/27-3/3)

RESRAD 程式訓練課程，主要針對 RESRAD-ONSITE、RESRAD-OFFSITE、與 RESRAD-BUILD 等 3 個程式進行基礎原理功能介紹與程式操作。基礎班學員共 28 人，除了陳員、黃員及物管局藍泰蔚技士係為我國代表學員之外，其他學員主要來自美國、韓國、波蘭及加拿大等國。以下就第 1 周進階訓練課程心得進行簡要介紹：

1. RESRAD-ONSITE

在完整的風險評估中，RESRAD 將一系列參數應用於曝露途徑分析當中，如圖 六所示，在 RESRAD 劑量評估中，共有九個主要曝露途徑：

- (1) 體外曝露
- (2) 吸入途徑：懸浮粒子、氬氣
- (3) 攝入途徑：土壤、水、植物、肉類、奶類、水產食物

RESRAD 將輸入參數群分成污染源(土壤)、環境中的核種釋出與傳輸、曝露途徑(與土壤使用目的有關)、和影響健康的相關參數。在污染源的部分，會影響的參數包括土壤面積大小、關鍵核種與核種濃度。影響環境中核種釋出的參數包括入滲(leaching)、大氣中的釋出、腐蝕(erosion)、植物根部吸收；影響環境中核種傳輸的參數包括地下水、大氣、氬氣、食物鏈。影響曝露途徑的參數，如大氣中的粒子與氬氣會影響吸入途徑的劑量，而攝入的植物、肉類、牛奶、水、與土壤會影響攝入途徑的攝入劑量。輸入以上參數，將計算出核種濃度(concentration)、環境轉移因子(environmental transport factor)、與劑量轉換係數(dose coefficient)，最後相乘便可得出劑量。

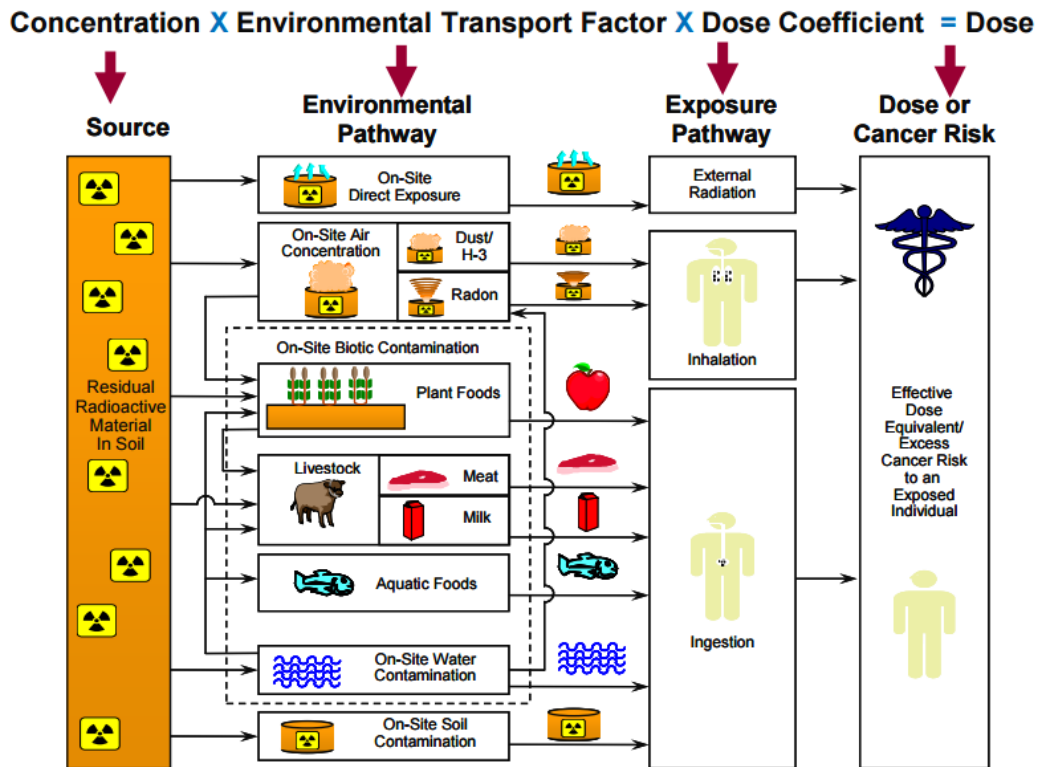


圖 六、核種於環境介質遷移途徑示意圖

當土壤受到放射性污染後，除了核種隨著時間衰變，導致核種濃度衰減之外，土壤的冲刷侵蝕而導致污染帶的放射性核種被帶至至場址外，和放射性核種隨著水的向下入滲進入至地下水中，皆會造成污染帶的核種濃度的減少，如圖 七所示。

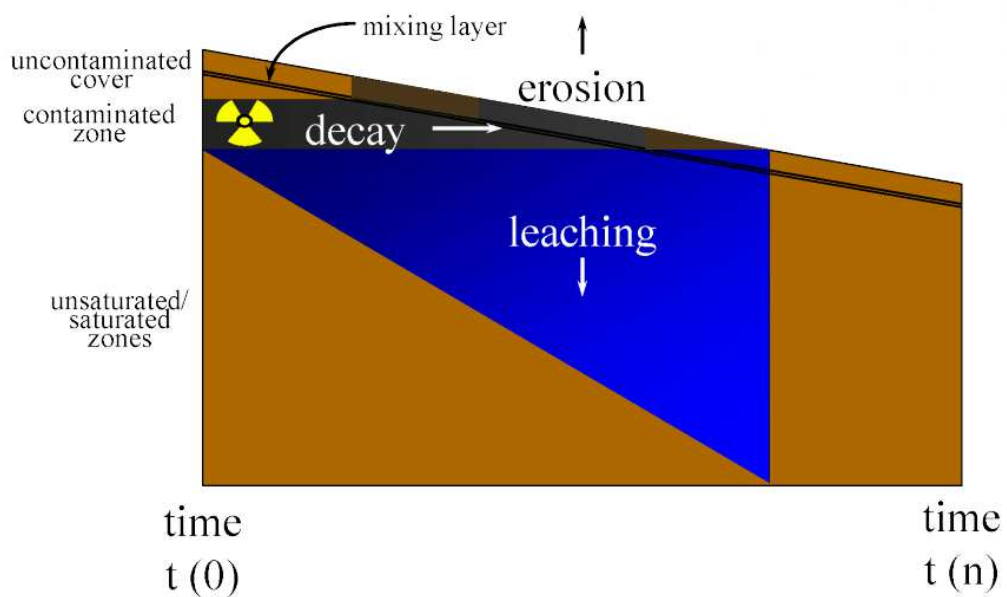


圖 七、影響污染帶核種含量之相關作用機制

在攝入途徑中，RESRAD 將途徑分成「與水相關之攝入途徑」(water dependent ingestion pathways)與「與水無關之攝入途徑」(water independent ingestion pathways)。這邊所稱的「水」，意指放射性核種隨著水流從污染帶往下入滲，而受到放射性核種污染的地下水或附近的池塘。「與水相關之攝入途徑」即污染帶先經由水的污染，再造成關鍵群體的攝入劑量，包含：關鍵群體攝入經由污染水源的灌溉的途徑，而受到污染之植物、肉類、奶類；食入受污染水源灌溉之牧草的牲畜與奶類；食入受污染水源污染之水產類，示意圖如圖 八所示。「與水無關之攝入途徑」則是假設一家庭在污染帶上方定居並進行農耕，所接受到的劑量，相關關係圖如圖 九所示。

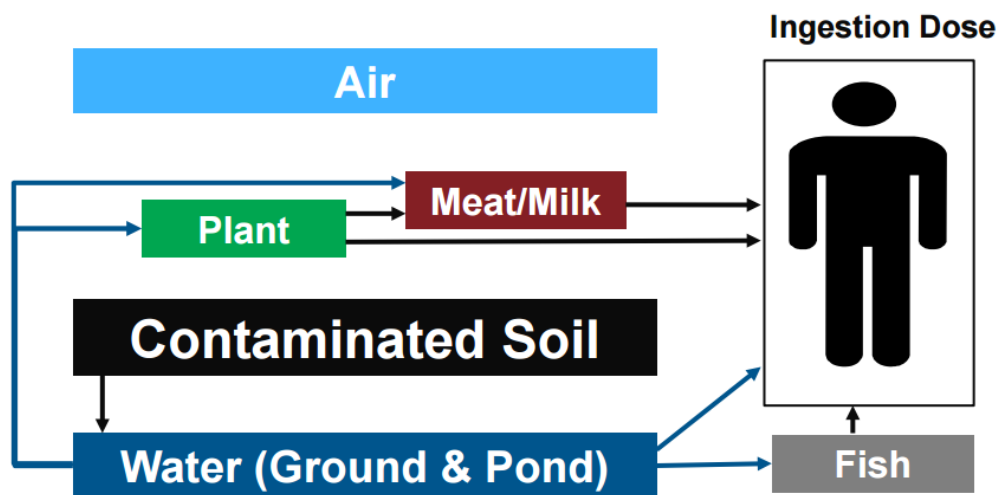


圖 八、與水相關之攝入途徑

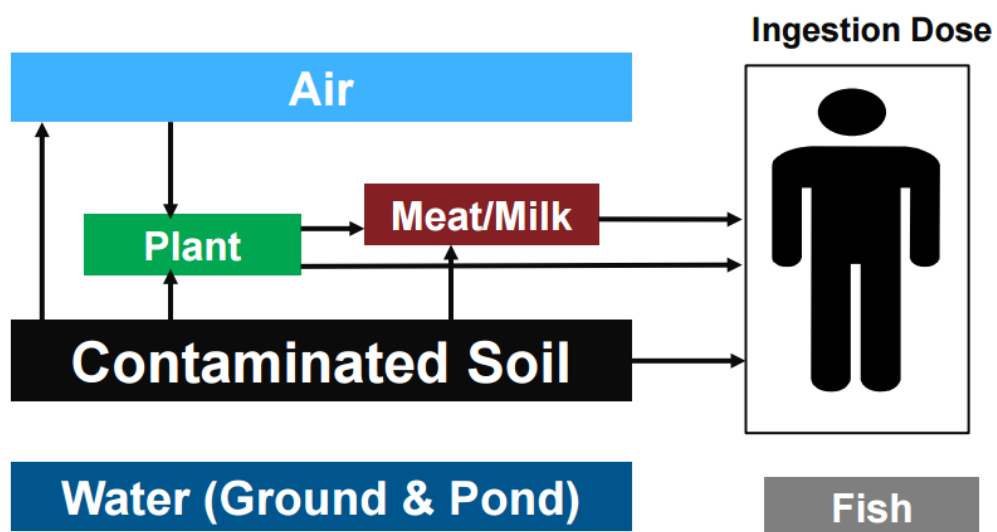


圖 九、非與水相關之攝入途徑

「與水相關之攝入途徑」的核種傳輸途徑可以被區分為兩部分：

- (1) A water pathway segment：放射性核種從污染帶延伸至食物鏈開始之前(井水或表面水體)的傳輸，皆屬於 water pathway。
- (2) A food chain pathway segment：放射性核種從水進入食物鏈開始至人體因攝食而接受曝露為止，屬於 food chain pathway segment。

在評估「與水相關之攝入途徑」的劑量時，環境轉移因子會受到 water pathway 的影響，因而影響劑量結果。在 water pathway 因子當中，課程特別介紹滲出模式(leaching model)與稀釋因子(dilution factor)。

(1) 滲出模式(leaching model)

在 RESRAD 中，滲出速率(leach rate)是指殘留的放射性污染隨著時間釋出的比例，是利用污染帶初始厚度與核種的分配係數(distribution coefficient)基於污染帶底部的水平衡模式估算而得，如圖 十所示。當核種移動速率遠慢於水流速時，滲出公式可表示為：

$$L_i = \frac{I}{T\rho_b K_{d_i}}$$

其中，

I ：入滲速率(infiltration rate) (m/yr)，指水分經由土壤表面進入地面下的過程。

T ：污染帶初始厚度(m)

ρ_b ：污染帶土壤密度(g/cm³)

K_{d_i} ：核種分配係數

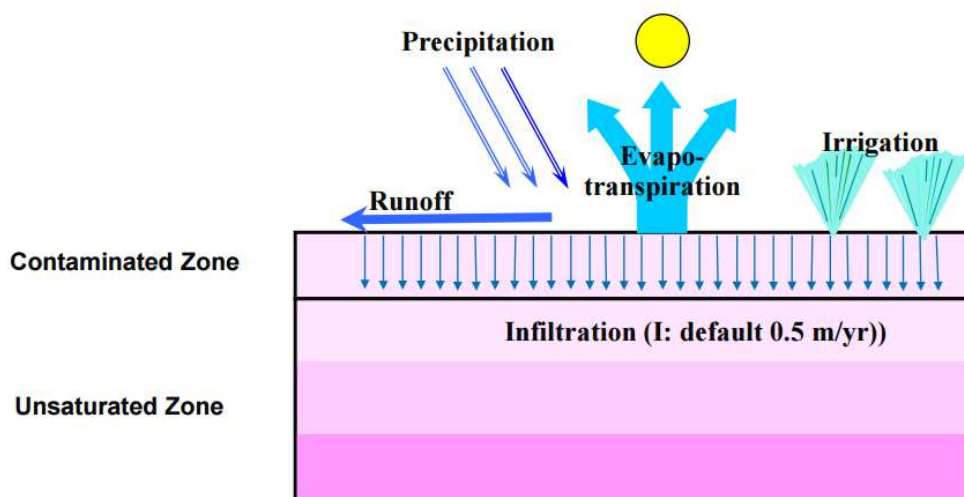


圖 十、水平衡模型示意圖

(2) 稀釋因子(dilution factor)

在相同放射核種活度下，會影響污染帶放射性核種濃度稀釋的參數包含含水層長度 (Length parallel to aquifer)、污染面積(Contaminated area)、入滲速率(Infiltration rate)、飽和帶導水係數(Saturated hydraulic conductivity)、水力梯度(Hydraulic gradient)、井深(Well depth)、與井幫浦抽水率(Well pumping rate)，示意圖如圖 十一所示。

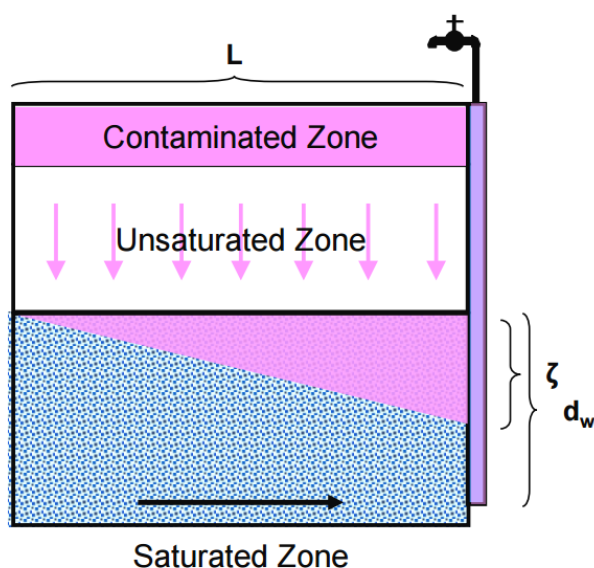


圖 十一、地下水中核種濃度稀釋因子(圖中 L 為污染區長度， ζ 為污染水在井中的深度， d_w 為井在地下水水位以下的深度)

如同各種評估模擬程式，評估結果的準確性取決於所輸入參數的準確性。因 RESRAD 所輸入參數共有 145 個程式內建參數，為了解眾多內建參數中，哪些輸入參數值之改變，將對劑量評估結果造成顯著影響，故 RESRAD 程式也提供內建參數的確定性分析(deterministic analysis)，或稱作靈敏度分析(sensitivity analysis)。操作方法為：對待測參數按 F9，或從工具列 Form option 內，也可找到靈敏度分析的選項，如圖 十二所示。這方法是將參數原本的值同時直接乘以與除以指定的範圍，如圖 十三所示。接著觀察三種結果是否有差異，三條曲線差異越大，代表該參數可能對劑量評估結果貢獻越大，如圖 十四所示。

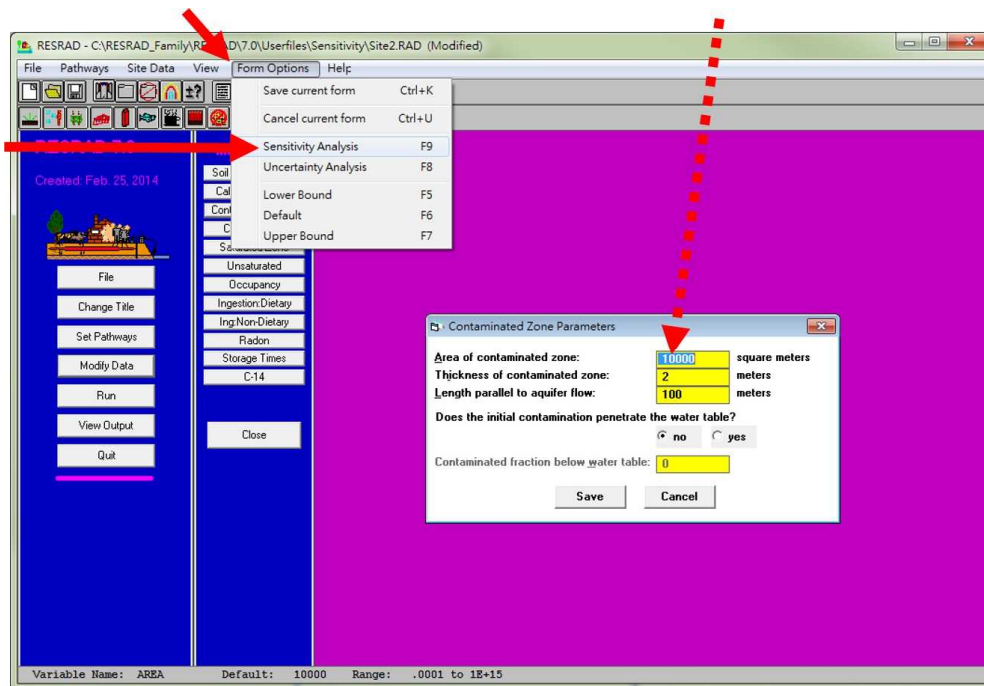


圖 十二、RESRAD 參數靈敏度分析操作示意圖

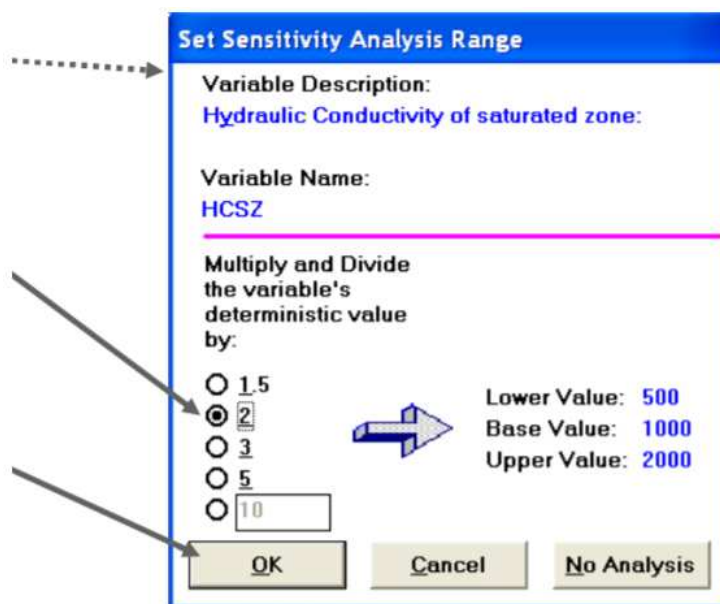


圖 十三、改變輸入參數值之設定方式

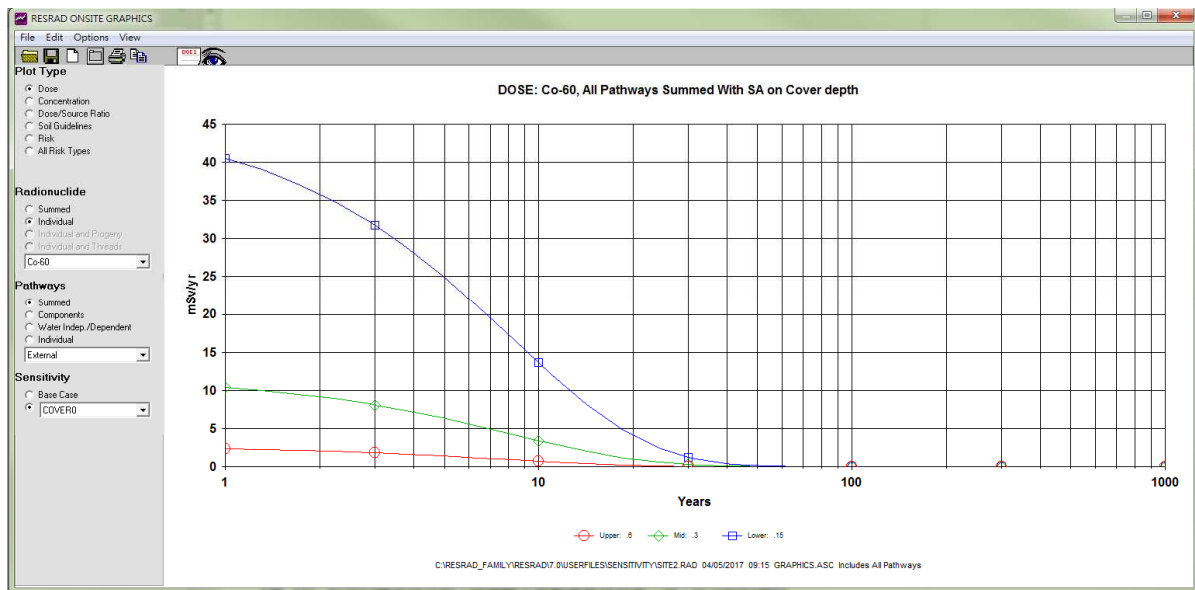


圖 十四、不同覆蓋層厚度對劑量評估結果之影響

因 RESRAD 內建參數眾多，除了觀察各參數對結果的影響，也需觀察參數之間的交互影響，故 RESRAD 提供另一種不確定度分析方法—機率式分析法(probabilistic analysis)。首先先決定參數適合的機率分佈，如均勻分佈(uniform distribution)或三角形分佈(triangular distribution)等，並利用蒙地卡羅取樣法(Monte Carlo)或是拉丁超立方體抽樣(Latin hypercube sampling, LHS)取樣，將取樣所得到的參數值 x 進行劑量評估計算，獲得一劑量值 $D(x_1, x_2, x_3, \dots)$ ，經過多次取樣進行相同劑量評估計算，可得到劑量分佈。將每個觀察點的機率加起來，則可得到劑量的累積機率分佈，如圖 十五所示。

Probabilistic Analysis

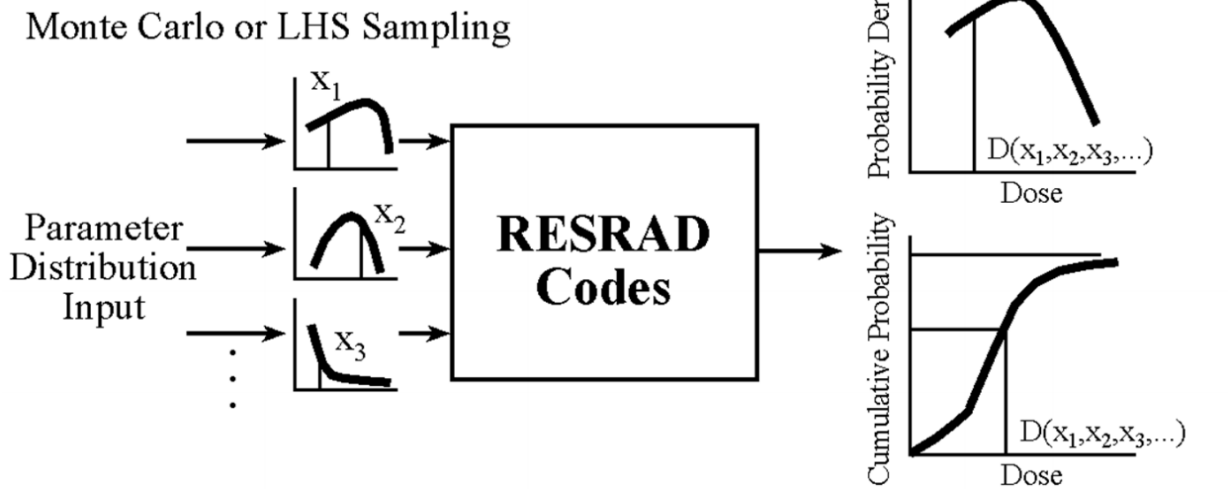


圖 十五、機率式分析方法示意圖

RESRAD 程式進行機率分析的操作方法為：對欲分析的參數按 F8，或從上方工具列的 Form option，也可找到不確定度/機率式分析(uncertainty/probabilistic analysis)的選項，如圖 十六所示；選擇參數機率分佈(probability distribution)，當輸入參數的每個值的機率皆相同時，參數的分佈可選擇均勻分佈(uniform distribution)表示；當可推測參數的最大值與最小值時，可選擇三角形分佈(triangular distribution)。不同的分佈方式需要輸入該參數分佈的特定值，如分佈範圍的最大值與最小值等(圖 十七)；接著再設定取樣資訊，如觀察點數量或重複次數等(圖 十八)。前述的確定性分析，僅能觀察一個參數，計算一次並得到一個劑量值，如劑量的峰值或風險的峰值；而機率式分析則是同時對一個或多個參數分佈進行多次取樣與計算，而計算的次數取決於觀察點的數量與重複的次數，如 5,000 的觀察點，並重複 5 次，則程式需計算次數為 25,000 次，最終輸出的結果為一機率分佈，如劑量峰值的分佈或風險峰值的分佈。

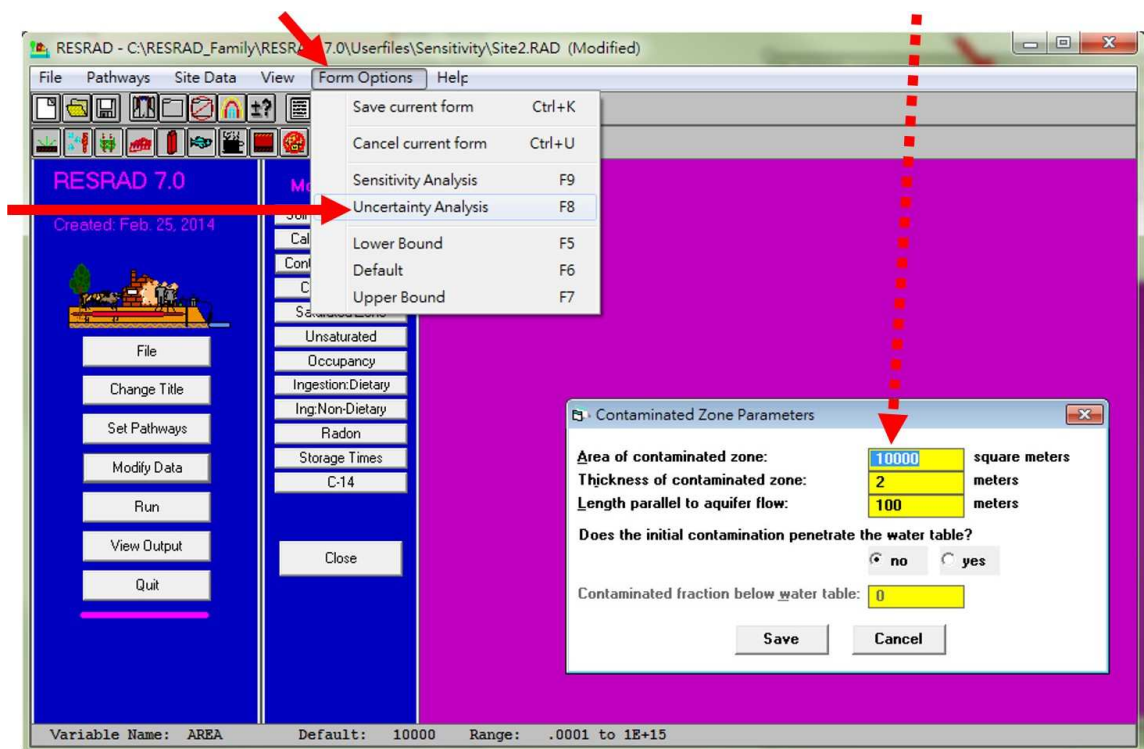


圖 十六、RESRAD 程式內建參數機率式分析操作示意圖

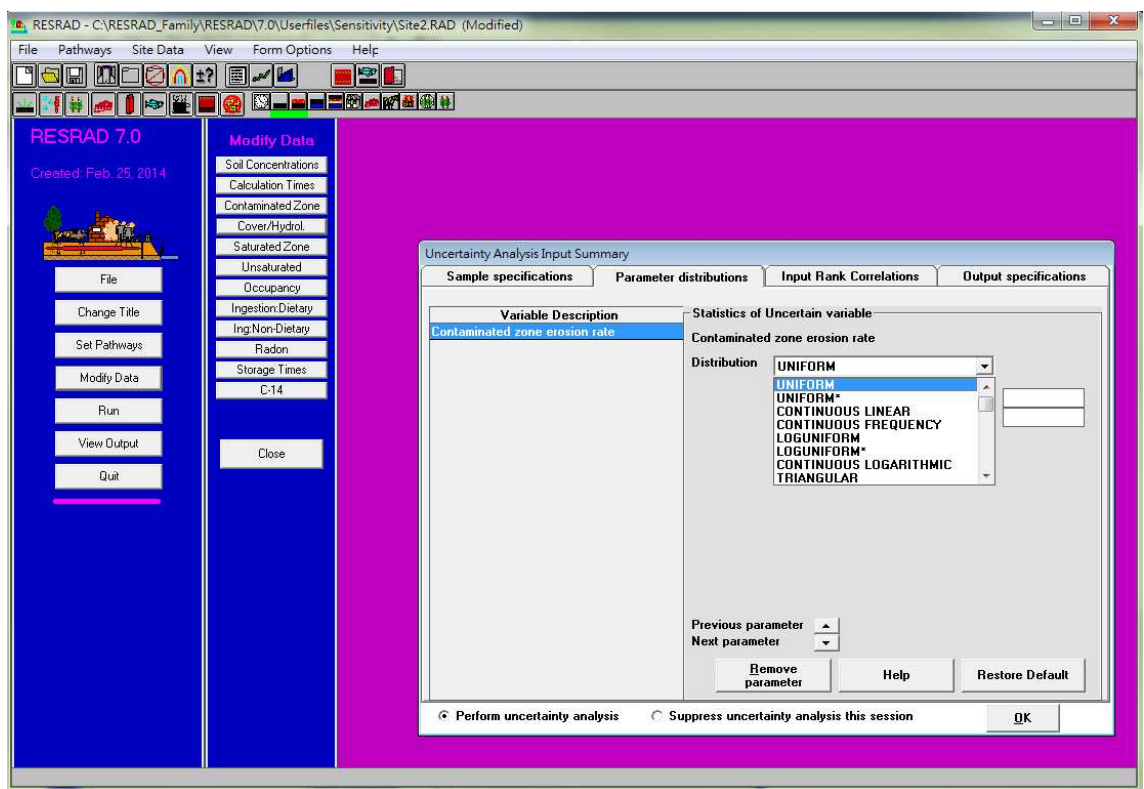


圖 十七、設定評估參數之統計分佈類別

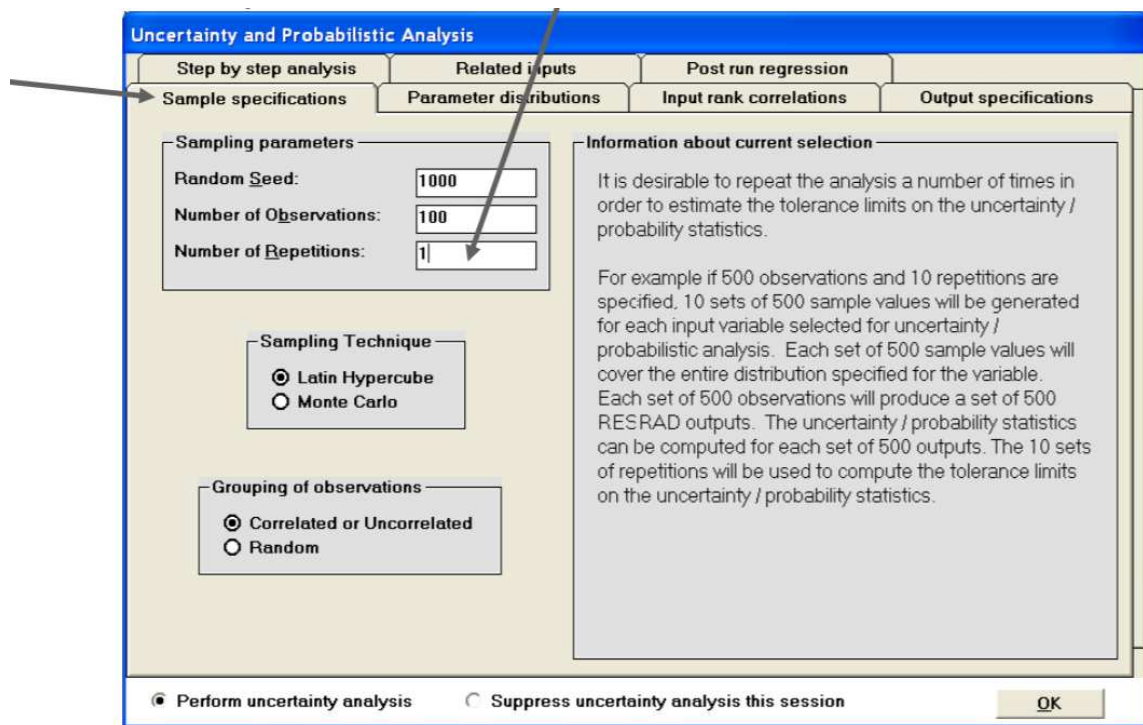


圖 十八、RESRAD 不確定分析設定視窗

2. RESRAD-OFFSITE

與 RESRAD-ONSITE 相比，RESRAD-OFFSITE 加入場址外的土壤放射性核種累積模式 (offsite soil accumulation submodel)，並改善平流-延散地下水傳輸模式 (advective-dispersive groundwater transport submodel)，使能更準確地預測在傳輸過程中所產生之子核的運輸。初始放射性污染 (primary contamination) 會透過擴散至大氣、傳輸至附近表面水體、與入滲至地下水流，而導致二次污染 (secondary contamination) (圖 十九)，故 RESRAD-OFFSITE 加入大氣傳輸模式 (atmospheric transport submodel) 與表面水體累積模式 (surface water body accumulation submodel)，評估二次污染導致的影響。許多在 RESRAD-ONSITE 既有的模式，在 RESRAD-OFFSITE 發展的過程中被精進。

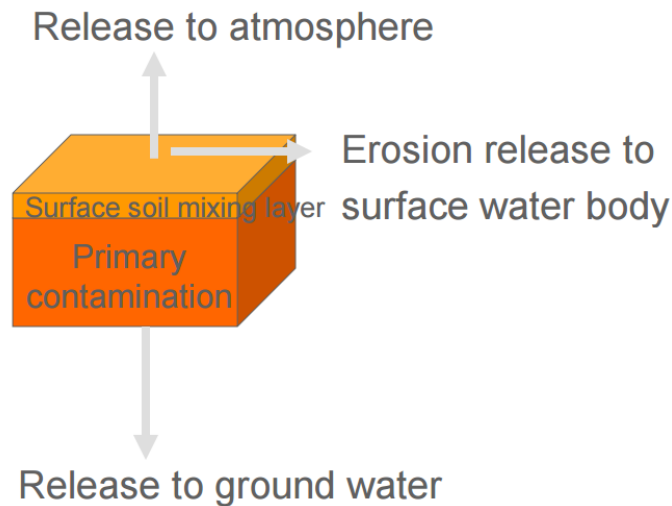


圖 十九、污染物釋出機制示意圖

RESRAD-OFFISITE 的大氣傳輸模式是建構於面射源(Area source)的高斯煙羽散模式(Gaussian plume dispersion)，放射性核種釋放順著風從污染區向外傳輸，並由於大氣紊流而擴散。面射源之特性是矩形的，具有隨時間變化的排放率，並位於量測點的上風處。在評估放射性污染在大氣傳輸的過程並無考慮放射性衰減，因為比起關鍵核種的半衰期，大氣傳輸的時間相對較短。高斯煙羽式的面射源產生，是在有效釋放高度的一點射源往外釋出含污染物的煙羽形成一扇型面積。然而，煙羽的高度會受到穩定的大氣平流層(stable layer)的限制，僅到大氣對流層(mixing layer)的高度，故過高的釋放點，導致煙羽到達穩定層高度 L 時，會產生煙羽反射(plume reflection)(圖 二十)，被反射的煙羽會與釋出的煙羽產生混和作用。放射性污染的煙羽擴散最終會由於乾沉降(dry deposition)或濕沉降(wet deposition)而耗盡。

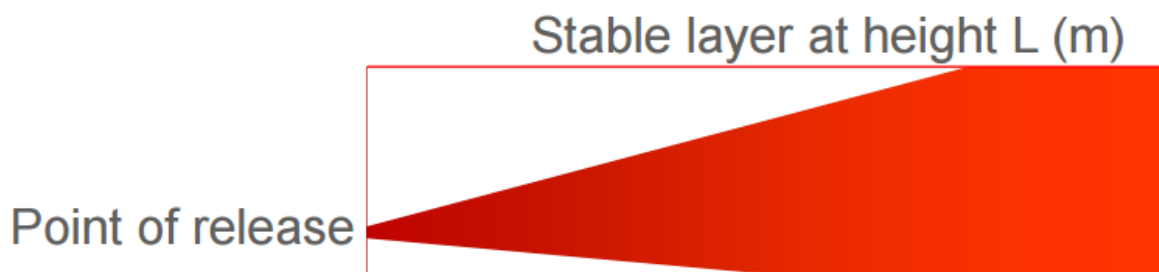


圖 二十、大氣煙羽反射示意圖

煙羽受熱浮力而上升，煙羽的上升受到煙羽穩定度、風速、與量測點距離的影響。

RESRAD-OFFSITE 將煙羽根據穩定度分成 A 類(最不穩定)至 F 類(最穩定)六類，如表 五所示。越不穩定的煙羽，越容易受熱浮力而上升，經由風而被帶往其他地方造成二次污染。當風速很弱時，煙羽為垂直上升，當風速很強時，帶有放射性污染的煙羽會隨的風向被帶往其他區域。RESRAD-OFFSITE 的大氣傳輸模式，將風的方向分割成 16 個方位，如圖 二十一所示。核種*i*與釋放點的距離*x*所形成的扇形之平均空氣濃度 $\overline{C_{sec}}(\text{Ci/m}^3)$ ，當無煙羽反射作用時，扇形的平均空氣濃度可以(方程式 1 表示：

$$\overline{C_{sec}}(x, i) = \frac{Q_{x_i}}{\sqrt{2\pi}\sigma_y u_H L} \left[\exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \right] dy \quad (\text{方程式 1})$$

其中，

Q_{x_i} ：核種*i*與釋放點的距離*x*之活度(Ci)

σ_y ：橫向擴散係數

u_H ：在有效釋放高度 *H* 的平均風速(m/s)

L：混和層的高度(m)

y：煙羽中心與側風的距離(m)

當有煙羽反射，而導致煙羽混和作用時，扇形的平均空氣濃度可以(方程式 2 表示：

$$\overline{C_{sec}}(x, i) = \frac{Q_{x_i}}{2y_{sec} u_H L} dy \quad (\text{方程式 2})$$

表 五、RESRAD-OFFSITE 大氣傳輸模式之煙羽穩定度分類

Stability Class	Description
Class A	非常不穩定(Very Unstable)
Class B	不穩定(Unstable)
Class C	稍微不穩定(Slightly Unstable)
Class D	中立(Neutral)
Class E	稍微穩定(Slightly Stable)
Class F	穩定(Stable)

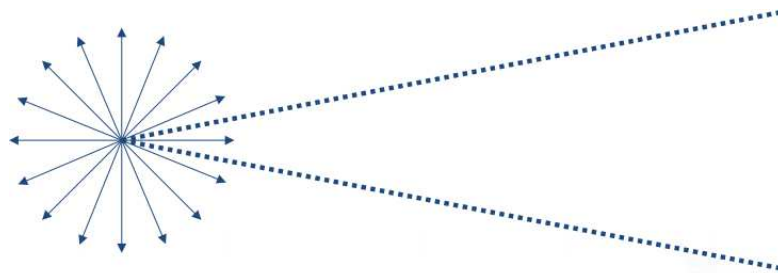


圖 二十一、RESRAD-OFFSITE 的大氣傳輸模式包含 16 個煙羽方位

在 RESRAD-OFFSITE 程式中，將風速分成 6 個區間，包括上述 6 種煙羽穩定度(A 至 F) 與 16 個方位，在程式介面利用聯合頻率分佈(joint frequency distribution)表示各種組合的機率，如圖 二十二所示。RESRAD-OFFSITE 程式有提供美國各州主要城市或機場的長期氣候監測整合資料。

Read Meteorological STAR file						
☐ modify joint frequency data read from STAR file for CHICAGO OHARE, IL						
Wind speed	0.89	2.46	4.47	6.93	9.61	12.52 m/s
Stability class	Joint frequency of wind speed and stability class for wind from SSW to NNE					
A	0.00022	0.00021	0	0	0	0
B	0.0008	0.00185	0.00123	0	0	0
C	0.00099	0.00226	0.00582	0.00123	0.00021	0.00007
D	0.00149	0.00774	0.01842	0.02267	0.0024	0.00055
E	0	0.00342	0.00548	0	0	0
F	0.00604	0.00911	0	0	0	0

圖 二十二、芝加哥歐海爾機場附近的各方位的風速與穩定度的聯合機率分佈

知道各方位的風速與穩定度的機率分佈後，RESRAD-OFFSITE 程式利用面射源模式(area source model)計算出平均空氣濃度。在 RESRAD-OFFSITE 的計算中，分成面射源的矩形面積與量測點區域的面積。其計算方式為利用(方程式 1 或(方程式 2 進行一系列點對點的計算(point-to-point calculation)。如圖 二十三所示，計算每一個面射源給某個量測區域的網格的空氣濃度，將所有面射源給量測區同一個網格的空氣濃度相加，計算量測區域單一網格的平均空氣濃度，以相同方式計算量測區全部網格，可得到平均空氣濃度。

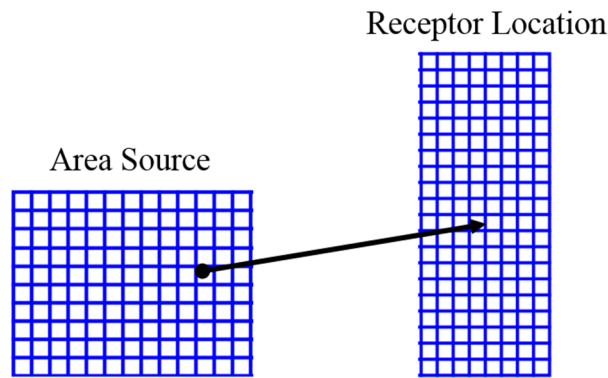


圖 二十三、Point-to-point calculations

3. RESRAD-BUILD

RESRAD-BUILD 於 1994 年發展出 DOS 版本，至 1996 年發展成 windows 版本，至今已更新至 version 3.8.0.4。前述 RESRAD-ONSITE 與 RESRAD-OFFSITE 程式是評估污染土壤經由食物攝取或造成水污染再透過曝露途徑所造成的人員最終劑量與風險，而 RESRAD-BUILD 則是分析因人類造成的放射性物質污染之建物對居住或工作的人員所產生的劑量，其程式主介面如圖 二十四所示。放射性物質可藉由擴散(例如氬氣及含氬的水)、力學移除(例如除污行動)、或侵蝕(移除表面污染)而釋出至室內空氣中。建築物內的放射性物質在不同房間的遷移，RESRAD-BUILD 採用室內氣體模式(indoor air quality model)模擬。室內氣體模式利用下列三點評估空氣中放射性粉塵與衰變產生的氬氣子核之遷移：

- (1) 不同房間之間與室內外的氣體交換；
- (2) 細微顆粒的沉積與再懸浮；
- (3) 放射性物質的衰變與內生長；

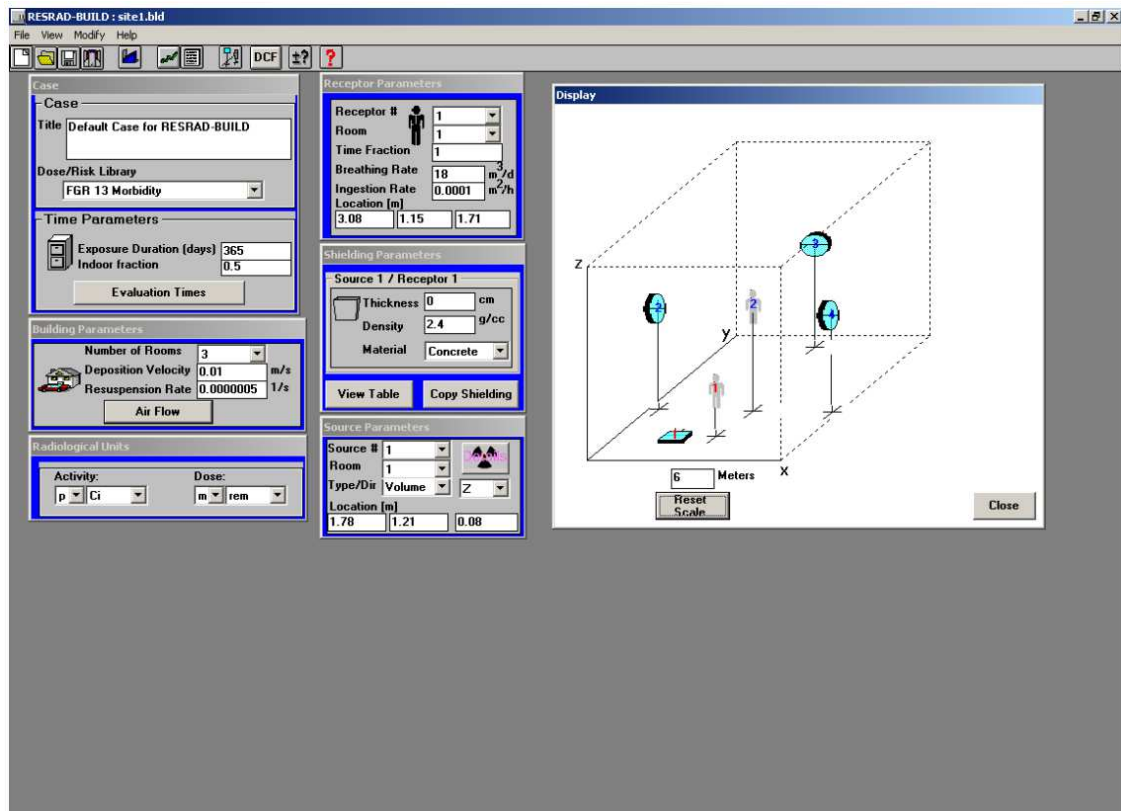


圖 二十四、RESRAD-BUILD 程式主介面

RESRAD-BUILD 程式限制一棟建物可設定三個房間，因此單一房間的大倉庫或三層樓的住家皆適用。RESRAD-BUILD 程式進行劑量評估計算時，考量以下七種曝露途徑(圖 二十五)：

- (1) 直接來自污染建物的體外曝露；
- (2) 來自污染建物的放射性物質沉積於地面，再造成人員的體外曝露；
- (3) 空氣中來自污染建物的放射性再懸浮顆粒造成的體外曝露
- (4) 吸入空浮的放射性顆粒造成的體內曝露
- (5) 在室內吸入氡的子核或含氡水氣造成的體內曝露
- (6) 因接觸射源而直接誤食放射性物質造成體內曝露
- (7) 空氣中的放射性物質沉積於食物表面，而被人員攝入造成體內曝露

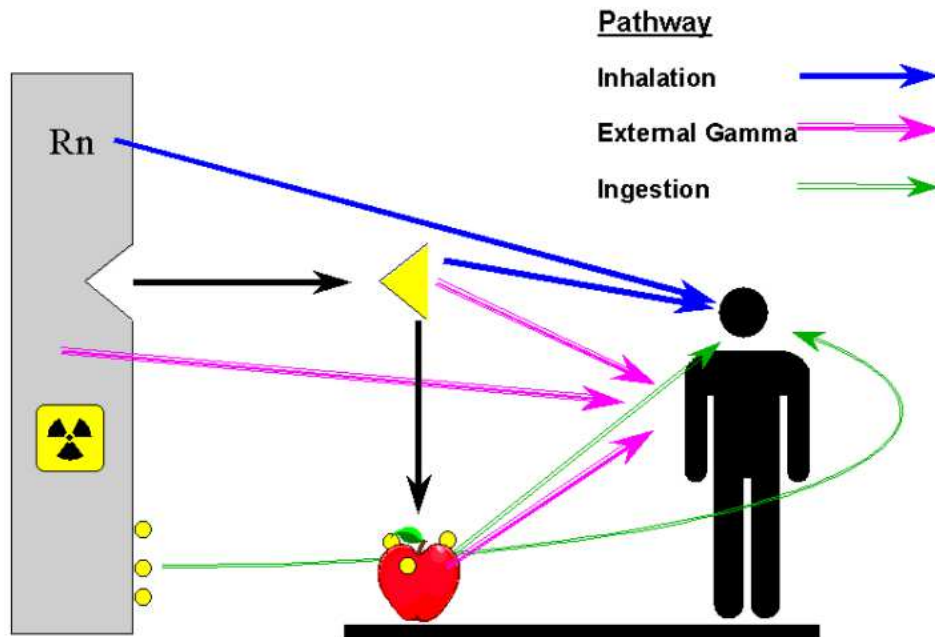


圖 二十五、RESRAD-BUILD 程式七種曝露途徑示意圖

RESRAD-BUILD 程式計算體外曝露劑量時，考量射源與劑量接受者之間的屏蔽材質造成衰減，提供 8 種屏蔽材質供使用者選擇，並可選擇屏蔽物質的厚度與密度。RESRAD-BUILD 程式也供使用者定義射源種類可包含點、線、面、與體射源，面射源的幾何形狀可以為圓形或矩形，體射源可以為圓柱體或長方體，如所示。體射源最多可由五層不同的材質組成。

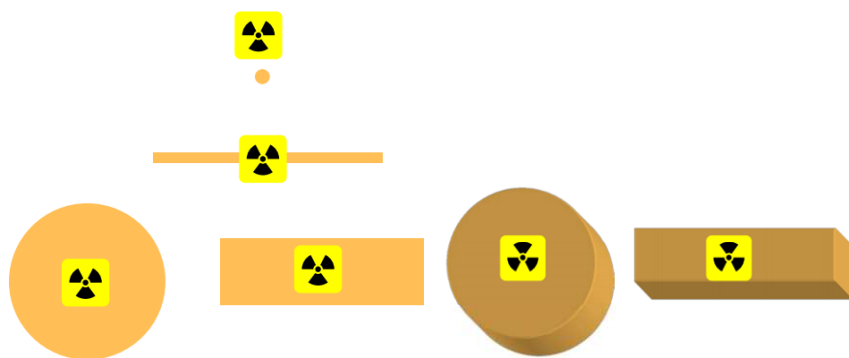


圖 二十六、射源幾何形狀

RESRAD-BUILD 程式內建 67 個主要核種資料，半衰期皆等於或大於六個月。程式將半衰期小於六個月的主核種衰變產物歸類為關聯核種(associated radionuclides)，並假設關聯核種

與母核達成永久平衡。目前 RESRAD-BUILD 程式內建 53 個關聯核種，故總核種數量為 120 個。

RESRAD-BUILD 程式評估體外曝露途徑造成的劑量，使用 FGR 12 報告所提供的體外劑量轉換係數，而體內曝露途徑的劑量評估，則採用 FGR 11 報告提供的劑量轉換係數。RESRAD-BUILD 程式在評估 1 個房間的放射性活動變化，使用空氣流動模式(air flow model)，如圖 二十七所示。空氣流動模式以(方程式 3 來求得一間房間內放射性核種活度的變化，若情節設定為三間房間，則室內房間之間的空氣流動模式如所示。

$$V \frac{dC}{dt} = I - QC - \lambda VC + \lambda VC_p - \lambda_D VC + \frac{\lambda_R \lambda_D VC}{\lambda_R + \lambda} \quad (\text{方程式 3})$$

其中，

$V \frac{dC}{dt}$ ，空氣中放射性核種在房間內的活度變化

I ，注入率(injection rate)，空氣中放射性核種活度因注入而增加

QC ，室內外空氣交換導致室內空氣中放射性核種活度減少

λVC ，空氣中放射性核種活度因衰變而減少

λVC_p ，因母核衰變而增加空氣中放射性核種活度

$\lambda_D VC$ ，空氣中放射性核種活度因沉降而減少

$\frac{\lambda_R \lambda_D VC}{\lambda_R + \lambda}$ ，空氣中放射性核種活度因粒子再懸浮而增加

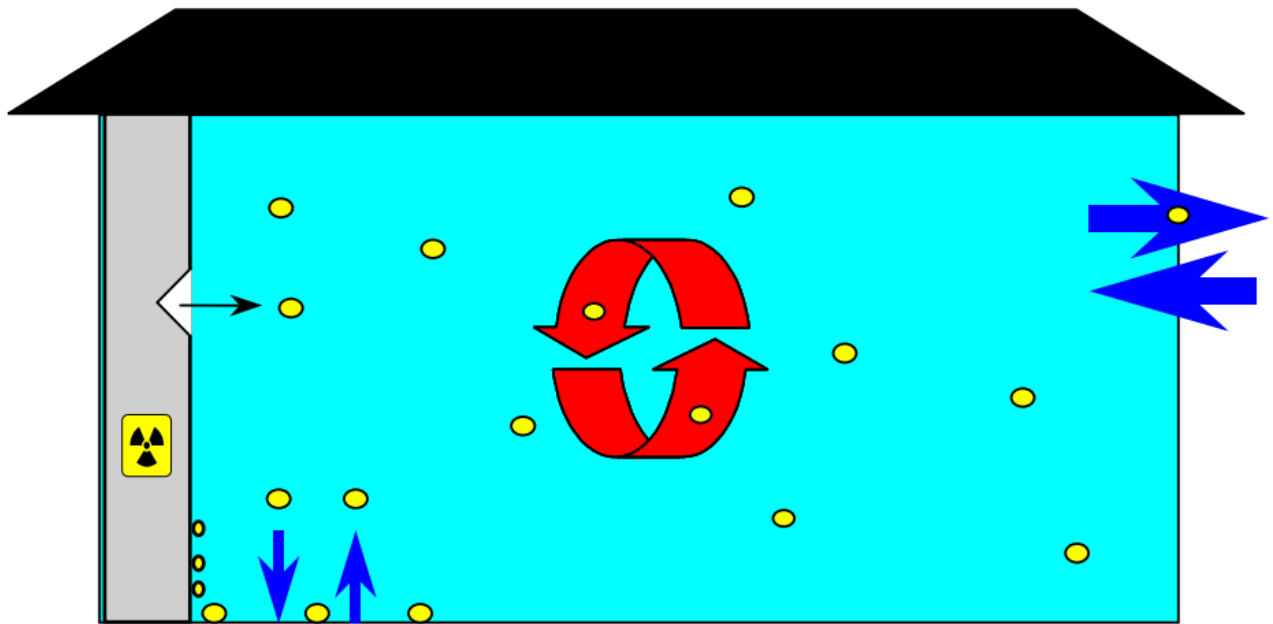


圖 二十七、空氣流動模式示意圖(一個房間)

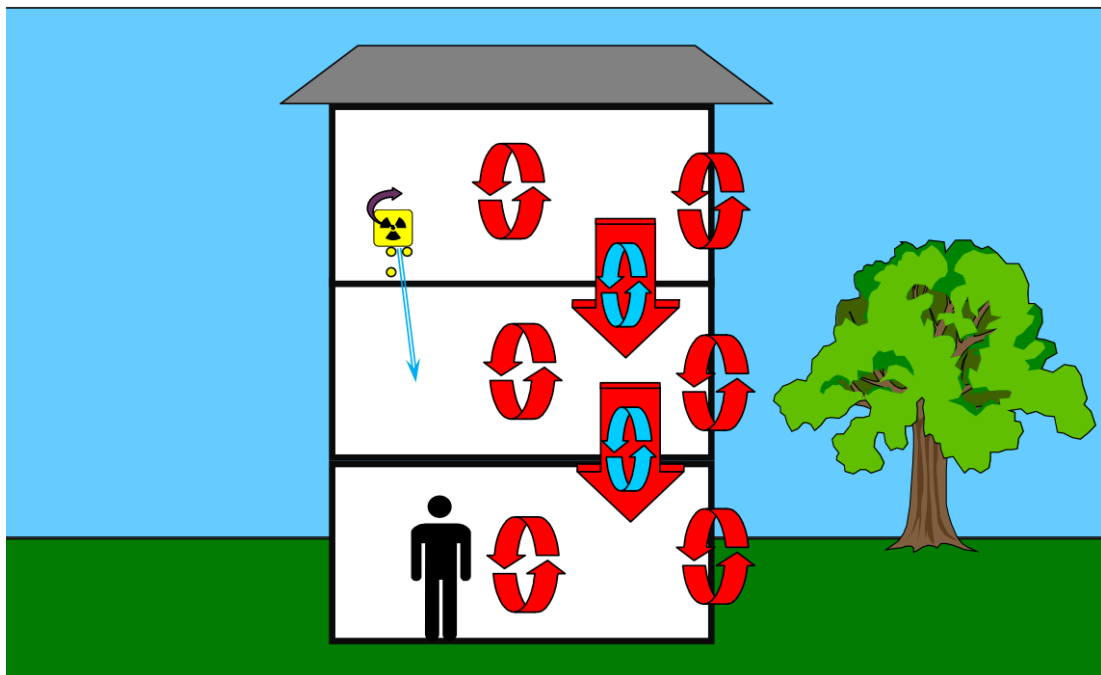


圖 二十八、空氣流動模式示意圖(三個房間)

(六) RESRAD 程式進階班訓練課程紀要(3/6-3/10)

RESRAD 程式進階班訓練課程，主要是針對 RESRAD-ONSITE、RESRAD-OFFSITE、RESRAD-BIOTA 及 RESRAD-RDD 等 4 個程式進行介紹。其中 RESRAD-ONSITE 及 RESRAD-

OFFSITE 程式於基礎班中，已針對程式介面、基本功能及案例進行介紹，進階班則是針對程式中進階功能，例如：替代 K_d 運算方法、2 種抽取井水模式假設及 new source term model 等進行介紹。進階班學員人數(13 人)較基礎班學員(28 人)短少一倍之多，其中亦有部分學員是第 2 周才加入訓練課程，其中除了黃員、陳員及物管局藍泰蔚技士係為我國代表學員之外，其他學員主要來自美國、韓國、波蘭及加拿大等國。以下就第 2 周進階訓練課程心得進行簡要介紹：

1. RESRAD-ONSITE

由於某些核種於不同類型土壤中，吸附能力(K_d)有很大差異，再加上許多文獻報導，若核種傳輸介質中有膠體粒子存在，可能會加速核種傳輸速度，因此在上述情況下，一般文獻所報導 K_d 則無法真實模擬核種於這些地層中傳輸情形。因此，在進階班 RESRAD-ONSITE 訓練課程中，則介紹 4 種計算 K_d 值之替代方法，分別為地下水核種濃度(groundwater concentration)、溶解度限值(solubility limit)、滲出率(leach rate)及植物/土壤核種遷移係數(plant/soil concentration ratio)，可用於估算核種於不同地層中較接近於真實情況之 K_d ，RESRAD 程式中參數輸入介面如圖 二十九所示。然而，上述方法中，無論是以地下水核種濃度或溶解度限值來估算 K_d ，由於無法區分地下水中的核種是來自於污染土壤，或是自污染土壤中母核衰變所產生之子核，故僅適用於估算初始即存在於污染土壤母核(如：Ra-226)之 K_d ，其衰變子核(如：Pb-210)之 K_d 則無法進行估算，因此在使用上仍有些限制。

Transport Factors	
Radionuclide: Cs-137	
Distribution Coefficients: cm ³ /g	
Contaminated Zone:	4600
Unsaturated Zone 1:	4600
Saturated Zone:	4600
Unsaturated Zones:	1
Options:	
Water Concentration	
Time since material placement:	0 year
Groundwater Concentration:	0 pCi/L
Solubility Limit:	0 mol/L
Leach Rate:	0 /year
Use Plant/Soil ratio	☐
Save	Cancel

圖 二十九、RESRAD 程式中 4 種計算 K_d 值之替代方法

在 RESRAD 所評估的曝露途徑中，可區分為與水相關(Water dependent pathways)以及與水不相關(Water independent pathways)之曝露途徑，其中與水相關的曝露途徑則包含飲用污染井水、攝食使用污染水源所生產之魚類，及抽取污染井水灌溉農作物，進而攝食污染農產品、畜產品及乳製品等途徑。為評估這些與水相關曝露途徑所造成之輻射劑量，其中關鍵步驟則在於估算井水中核種濃度，RESRAD 程式內建 2 種抽取井水模式假設(Mass Balance Model 及 Non-Dispersive Model)，可用於計算井水之核種稀釋因子，如圖 三十所示。

Mass Balance Model 一般適用於污染土壤面積小於 1,000 平方公尺之廠址，並假設抽水井位於該廠址之中心位置，當污染區面積與入滲率乘積($A \times I$)小於井水抽取率(U_w)時，井水中核種稀釋因子(f_1)為 AI/U_w ；反之，若污染區面積與入滲率乘積($A \times I$)大於井水抽取率(U_w)時，則自污染帶滲出至地下水之核種，則全數被該抽井所抽出使用，此時井水中核種稀釋因子(f_1)為 1.0，如圖 三十一所示。

另一種抽取井水之模式 Non-Dispersive Model，較適用於污染面積較大之廠址(一般面積大於 1,000 平方公尺)，其中假設抽水井位於廠址地下水下游之邊界處，圖 三十二為不同井水抽取深度搭配不同污染地下水煙羽深度條件下，4 種地下水中核種濃度稀釋因子之計算方法。

Parameter	Value	Unit
Density of saturated zone:	1.5	grams/cm ³
Saturated zone total porosity:	.4	
Saturated zone effective porosity:	.2	
Saturated zone field capacity:	.2	
Saturated zone hydraulic conductivity:	100	meters/year
Saturated zone hydraulic gradient:	.02	
Saturated zone b parameter:	5.3	
Water table drop rate:	.001	meters/year
Well pump intake depth:	10	meters below water table
Model for Water Transport Parameters:	☒ Nondispersion ☐ Mass-Balance	
Well pumping rate:	250	cubic meters/year

圖 三十、2 種計算井水中核種稀釋因子之模式假設

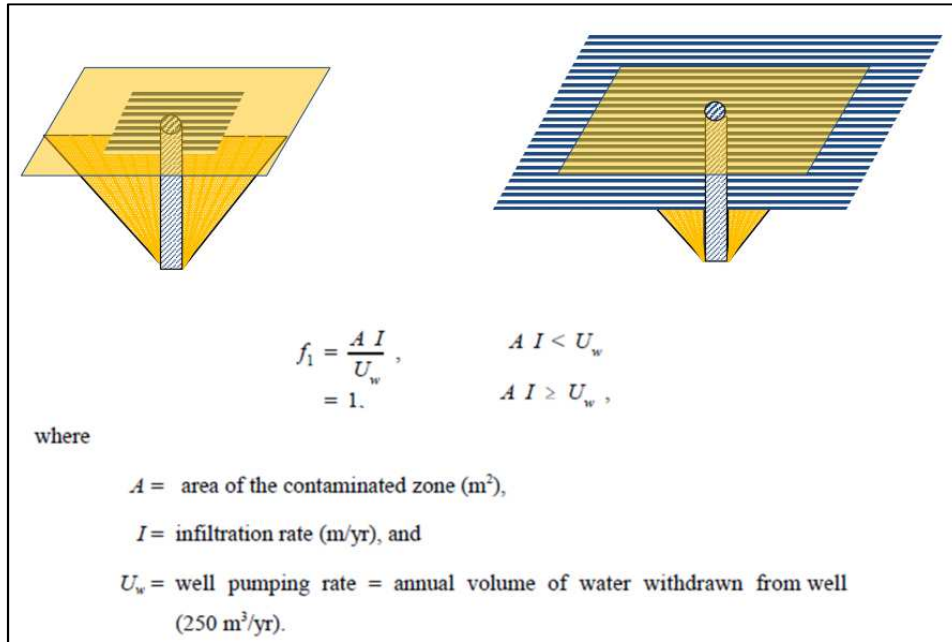


圖 三十一、Mass Balance Model

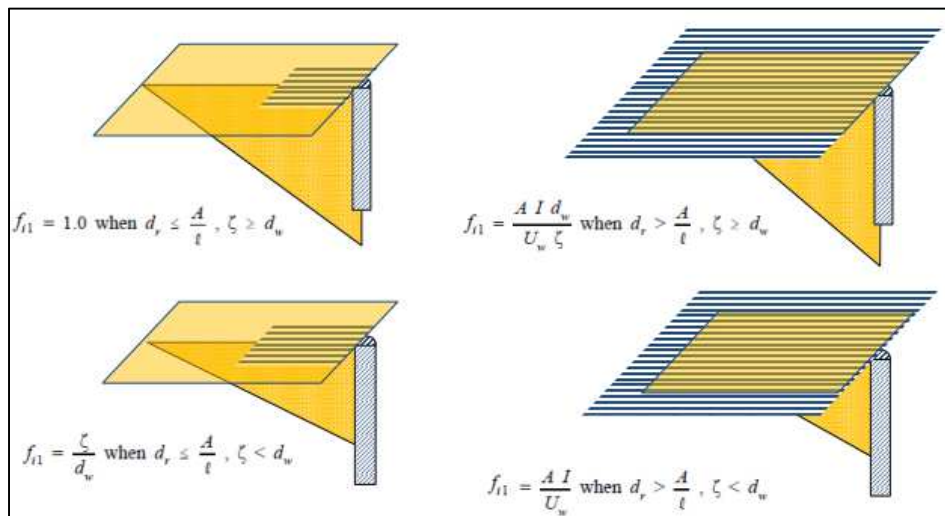


圖 三十二、Non-Dispersive Model

2. RESRAD-OFFSITE

在 RESRAD-ONSITE 程式中，核種於污染層釋出機制為 Version 2 Release Methodology，即核種於污染層中並不會進行傳輸，而是假設全部累積在污染層底部再開始釋出至未飽和層及飽和層中，因此在 $t=0$ 時核種釋出量最大，隨後核種釋出量則隨著時間增加而逐漸減少，如圖 三十三所示。

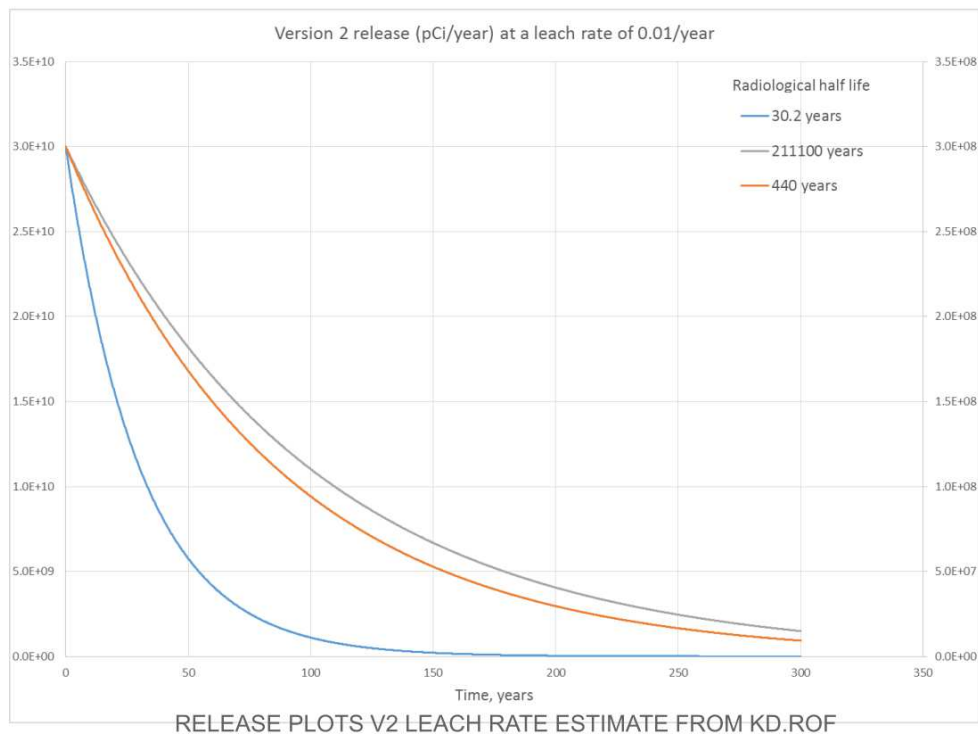


圖 三十三、以 Version 2 Release model 模擬 3 種核種隨時間釋出率變化

在進階班 RESRAD-OFFSITE 訓練課程中，則是介紹 2 種新的 source term release model，分別為 First Order Rate Controlled Release 及 Instantaneous Equilibrium Desorption Release，程式輸入視窗如圖 三十四所示。有別於 Version 2 Release model，First Order Rate Controlled Release model 中核種假設將在污染層中進行傳輸，直到污染層最底部才釋出至未飽和層及飽和層中，而核種於污染層中傳輸時間則稱為 travel time，如圖 三十五所示；另外 Instantaneous Equilibrium Desorption Release model 則是假設密閉容器中核種，當容器破裂而隨著水被帶出時，立刻與容器外未受污染土壤達到平衡，進而傳輸至未飽和層及飽和層中。在實務應用上，2 種 source term release model 皆可用於評估廢棄物貯存容器破損後核種釋出情形，其中 First Order Rate Controlled Release model 較適用於核種與基質之間仍有吸附/脫附作用存在，而 Instantaneous Equilibrium Desorption Release model 則適用於核種瞬間至基質中釋出之案例。

Source Release

Radionuclide Ac-227 ▲▼ Element Ac

Release to ground water

☒ Version 2 Release Methodology

Specify First Order Leach Rate: 0 /year

Use Distribution Coefficient to Estimate First Order Leach Rate: 20 cc/g

Radionuclide bearing material becomes releasable

☒ Linearly over time ☐ Stepwise in time

Time at which radionuclide first becomes releasable (delay time) 0 years

Fraction of radionuclide bearing material that is initially releasable 1

Time over which transformation to releasable form occurs 0 years

Total fraction of radionuclide bearing material that is releasable 1

Release mechanism

☒ First Order Rate Controlled Release with Transport

☐ Instantaneous Equilibrium Desorption Release

Initial Leach Rate 0 /year

Final Leach Rate 0 /year

Distribution Coefficient in the contaminated zone: 20 cc/g

Release to Atmospheric

Radionuclide becomes available for release

☒ in the same manner as for release to groundwater ☐ Beginning at time zero

▶
Save
▶

▶
Cancel
▶

圖 三十四、Source Term Release Model 程式輸入介面

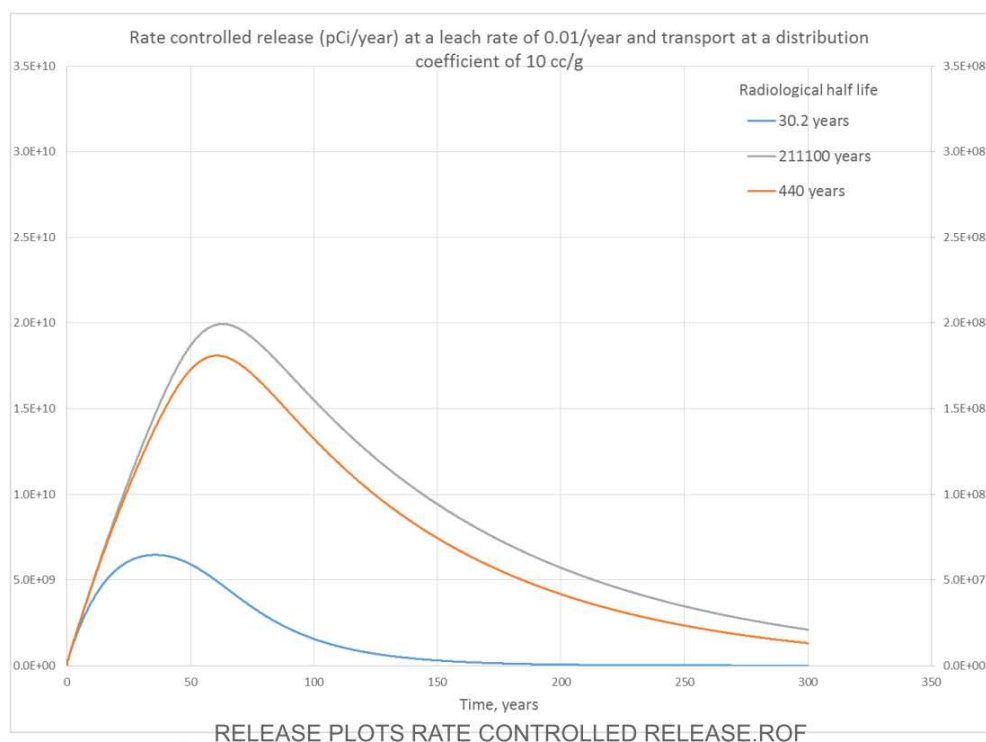


圖 三十五、以 First Order Rate Controlled Release model 模擬 3 種核種隨時間釋出率變化

3. RESRAD-BIOTA

由國際放射防護委員會(ICRP)先前所發表的報告可知，早期人們對於非人類生物體之輻射防護概念，可說是相當缺乏，然而隨著時間演進，先前以人類為主之輻射防護體系，則逐漸拓展至對非人類生物體之防護，以 ICRP 於 2003 年所發布的第 91 號報告為例，當中提及應修改現階段輻射防護系統，開發可用於評估生物體受到輻射曝露所造成影響之方法，並保障生物體免於輻射曝露所受之傷害，如圖 三十六所示。

“...if man is adequately protected then other living things are also likely to be sufficiently protected.” (ICRP Pub. 26, 1977) “The Commission believes that the standards of environmental control needed to protect man to the degree currently thought desirable will ensure that other species are not put at risk.” (ICRP Pub. 60, 1991) “Occasionally, individual members of non-human species might be harmed, but not to the extent of endangering whole species or creating imbalance between species.” (ICRP Pub. 60, 1991) “...ICRP therefore needs to revise its current system of protection, and particularly, develop a comprehensive approach to the study of the effects on, and protection of, all living matter with respect to the effects of ionising radiation...” (ICRP Pub. 91, 2003)
--

圖 三十六、國際放射防護委員會(ICRP)對非人類生物體輻射防護概念之演進

其中美國(能源部)則為世界上第一個制定非人類生物體輻射劑量管制法規及發展劑量評估程式(RESRAD-Biota)之國家，其中最早管制法規係源自於美國能源部 1990 年所公布 5400.5 命令(DOE Order 5400.5)，當中規範水生動物可接受之輻射劑量限值為 10 mGy/d (1 rad/d)，有別於人類係以有效劑量(Effective dose)做為輻射劑量管制限值，非人類生物體則是以吸收劑量(Absorbed dose)做為輻射劑量管制限值。隨後美國則陸續制定陸生植物、陸生動物及水邊動物之劑量管制限值，如表 六所示。

表 六、美國針對非人類生物體所制訂輻射劑量管制法規

法規(年份)	內容
DOE Order 5400.5 (1990)	▪ 水生動物：400 μGy/hr (1 rad/d)
10 CFR 83, Subpart F (1995-96)	▪ 陸生植物：400 μGy/hr (1 rad/d) ▪ 陸生動物：40 μGy/hr (0.1 rad/d)
DOE O458.1 (2011)	▪ 水生動物：400 μGy/hr (1 rad/d) ▪ 水邊動物：40 μGy/hr (0.1 rad/d) ▪ 陸生植物：400 μGy/hr (1 rad/d) ▪ 陸生動物：40 μGy/hr (0.1 rad/d)

	rad/d)
--	--------

美國能源部於 2000 年 6 月所開發非人類生物體劑量評估程式(RESRAD-Biota)，則是以分級方法(Graded Approach)評估輻射對非人類生物體所造成之影響，分別為 Level 1, Level 2 及 Level 3，如圖 三十七所示。Level 1 則是直接將環境介質(土壤、水及沉積物)中所測得核種活度濃度與 BCGs(Biota Concentration Guides)進行比較，其中 BCG 為某一放射性核種於環境介質中，相對應所給定劑量限值(水生動物、陸生植物或陸生動物等)之濃度限值，概念則類似於核電廠除役中，將以劑量限值之管制標準轉換為以核種活度濃度(DCGLs)之清潔標準。

$$BCG \left(\frac{Bq}{kg} \right) = \frac{Dose \ Limit \ \left(\frac{Gy}{y} \right)}{Internal \ Dose + External \ Dose \left(\frac{Gy}{y} \text{ per } \frac{Bq}{kg} \right)}$$

隨後，將各個核種於不同環境介質中，核種活度濃度對 BCG 之比值加總起來，若總比值小於 1.0，則代表環境中核種對非人類生物體所造成之影響，小於目前劑量管制限值；反之，若總比值大於 1.0，並不代表環境中核種對非人類生物體所造成之影響，已超過目前劑量管制限值，而是需要輸入更多廠址特定參數，進一步分析其影響程度，在 RESRAD-Biota 中，則是進入 Level 2 及 Level 3 分析階段。

$$\text{Sum of Fractions} = \left(\frac{[Conc]}{BCG} \right)_{soil} + \left(\frac{[Conc]}{BCG} \right)_{water} + \left(\frac{[Conc]}{BCG} \right)_{sediment}$$

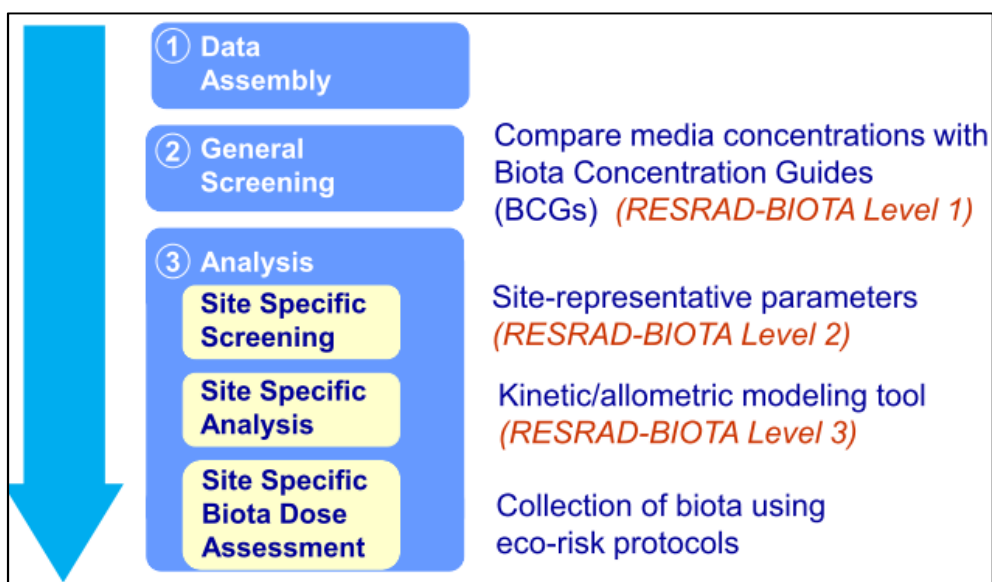


圖 三十七、RESRAD-Biota 之分級評估方法

Level 2 及 Level 3 分析方法，比 Level 1 有更多修改程式輸入參數之彈性，如表 七所示。例如，Level 2 可修改分配係數(K_d)或 BIV(Bioaccumulation factor)等參數，其中 BIV 為核種之遷移係數(例如：土壤至植物或水至水生動物之核種遷移係數)；Level 3 可利用 New Organism Wizard 功能，並依據生物體之幾何形狀、重量等參數，自行建立新的生物體模型進行模擬。

表 七、3 種不同層級分析方法可修改程式輸入參數比較

Parameter	Level		
	1	2	3
Units	x	x	x
Concentration, K_d Option, DL	x	x	x
View BCG results	x	x	x
View dose results		x	x
Sensitivity		x	x
K_d Modification, Mean Conc. setting		x	x
BIV		x	x
CF, T_f			x
DCF options (RBE , T_{cut})			x
Organism selection			x
Organism addition (W, shape, Base)			x
Organism allometric params			x
Allometric option (org, nuc)			x

課程當中亦透過 2 個案例解析(Hanford 300 Area 及 NAWS China Lake)，說明如何透過利用 RESRAD-Biota 程式，評估環境中放射性物質對非人類生物體所造成之影響。

諸如本章前段內容所述，即便與非人類生物體輻射劑量法規規定，早於 1990 年即制定公布，然而在 1999 年之前，美國國內核設施將非人類生物體劑量評估結果納入場址年度環境評估報告(Annual Site Environmental Reports, ASERS)所佔比例仍低於 10%，然而當美國能源部於 2000 年公布非人類生物體分級劑量評估方法 (A Graded Approach for Evaluating Radiation Doses to Aquatic and Terrestrial Biota)報告後，將非人類生物體劑量評估結果納入 ASERS 比例則逐年上升(如圖 三十八所示)，顯示美國對非人類生物體輻射防護之重視。

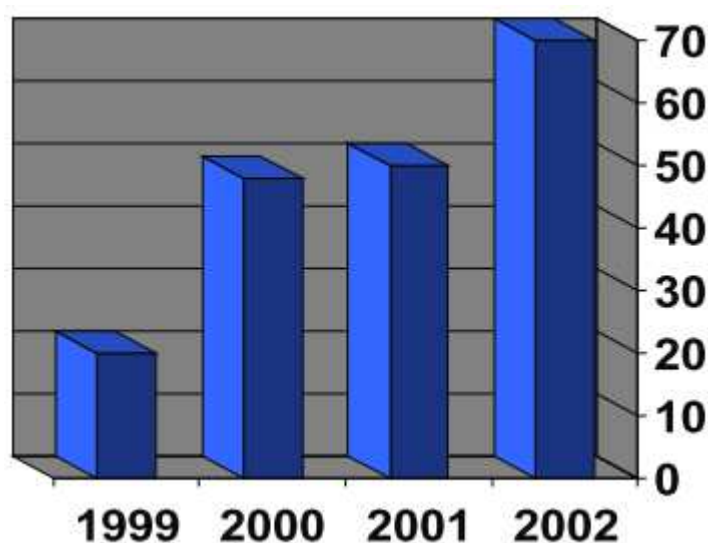


圖 三十八、將非人類生物體劑量評估結果納入 ASERS 逐年所佔比例

4. RESRAD-RDD

RESRAD-RDD 是評估輻射彈(Radiological Dispersal Device, RDD)與簡易核子裝置(improvised nuclear device)事故後在早期、中期、晚期的緊急應變操作指引(Operational Guidelines)。操作指引是透過地表輻射濃度水平(與已知的量測數據相比)與在污染區的逗留時間(與已知的放射性濃度)，對應防護行動指引(protection action guides, PAGs)，提供決策者在當面對不同輻射意外事故時，能快速決定是否須採取必要防護行動或措施。防護行動(protection action)是指對 RDD 事故進行緊急應變，以減少或排除民眾受到輻射或其他危險因子的暴露。美國國土安全部機構間後果管理小組(Consequence Management Subgroup, CMS)，於 2008 年提出「輻射彈及簡易核子裝置緊急事故防護與復原規劃指引」，以提供緊急應變之防護行動指

引(PAGs)，根據參考人受到 RDD 或輻射洩漏事故的曝露後之投射劑量，進行防護行動以減少或防止該劑量的發生。預先導出的輻射水平可以與場址的量測輻射值比較，假如超過 PAGs，可快速決定執行保護公眾的防護行動。操作指引是由美國 DOE 轄下的操作指引工作小組 (Operational Guidelines Task Group, OGT)所訂定，所考慮的物件包含：建物、道路與橋樑、及車輛；關鍵基礎設施與資源包含：醫院、運輸系統、水源、與食物；曝露情節包含：工作人員與一般民眾、都市、郊區、與農村。OGT 根據 11 個核種(Am-241、Cf-252、Cm-244、Co-60、Cs-137、Ir-192、Po-210、Pu-238、Pu-239、Ra-226 及 Sr-90)，訂定早期、中期、與恢復期等不同階段建議防護行動與劑量建議值。因應事故的不同時期，操作指引共分為 7 類(A-G)，每一類再依其不同特性分為數個子類，整理列表如表 八所示。

表 八、操作指引分類

Phase	Groups	Subgroups
早期	A. 緊急應變之進出管制	1. 搶救生命與財產 2. 設定緊急管制區
	B. 早期防護行動	1. 疏散 2. 掩蔽
中期	C. 安置區域的關鍵基礎設施的利用	1. 住宅區 2. 商業與工業區 3. 其他地區，例如公園與紀念館 4. 醫院與其他健康照護設施 5. 關鍵交通運輸設施 6. 飲水與下水道設施 7. 電力與燃料設施
	D. 安置區域因必要活動的臨時進出	1. 工作人員因工作職責之必要行動 2. 民眾為搶救財產而進出住宅
	E. 交通及道路的使用	1. 橋樑 2. 街道與幹線道路 3. 人行道
恢復期	F. 輻射管制區的財產外釋	1. 個人財產，廢棄物除外 2. 廢棄物 3. 有害廢棄物 4. 土地及房產
	G. 食物的消耗	1. 早期導出干預水平(Derived Intervention Levels) 2. 種植農作物地區的土壤濃度(早期) 3. 種植新農作物區域的土壤濃度(中期) 4. 限制性使用的土壤濃度(恢復期)

最後於課程結束後，與 RESRAD 訓練課程講師於 ANL Building 240 大門前合影(圖 三十九)，另圖 四十為本次 RESRAD 訓練課程上課教室(Building 240/Room 1401-1402)。



圖 三十九、與 RESRAD 訓練課程講師合影

(左起) 陳懿璿、Dave LePoire、鄭靜枝博士、Sunita Kamboj 博士、余家禮博士、黃珮吉、物管局藍泰蔚技士



圖 四十、RESRAD 訓練課程教室(Building 240/Room1401-1402)

三、心得

此次赴美國阿岡國家實驗室進行核能電廠除役作業技術交流，同時參加 ANL 所舉辦的「RESRAD-ONSITE, RESRAD-OFFSITE, RESRAD-BUILD 等程式實務應用訓練」與「Advanced RESRAD-ONSITE 與 RESRAD-OFFSITE, RESRAD-BIOTA, and RESRAD-RDD 等程式進階實務訓練」課程，有幾點公差心得敘述如下：

- (一) RESRAD 系列程式的開發，源自於美國阿岡國家實驗室為因應核電廠除役所面臨的一系列不同情節的劑量評估與風險所發展。本次訓練課程學習 RESRAD-ONSITE、RESRAD-OFFSITE、RESRAD-BUILD、RESRAD-BIOTA、與 RESRAD-RDD 程式的原理方法介紹與實際操作，增進對以上程式的瞭解，並藉由此次訓練的機會，向余家禮博士與鄭靜枝博士請教學習劑量評估的實務經驗，有助於未來研究計畫的推展。
- (二) 除役場址可否釋出再利用，需透過相關評估程式驗證準備釋出區域之場址殘餘輻射劑量是否符合法規標準，其中 RESRAD-ONSITE 及 RESRAD-OFFSITE 即是為滿足上述需求而開發劑量評估程式，然而如何在程式眾多內建參數中，找出可能顯著影響劑量評估結果之參數，則可應用本次訓練課程所介紹參數靈敏度(sensitivity)或機率式(probabilistic)分析功能來加以評估，不僅可用於調查場址特定參數優先次序之規劃，更可提升劑量評估結果的準確度，未來相關技術應可助於我國核電廠除役工作之推行。
- (三) 上述 RESRAD-ONSITE 及 RESRAD-OFFSITE 程式起初即是為核電廠除役之需求而開發劑量評估程式，然而隨著世界各國近年來逐漸重視廢棄物最終處置議題，ANL 於 2013 年所開發 RESRAD-OFFSITE New Source Term Model (Version 3)則因此孕育而生，其中 2 種核種釋出模組(equilibrium desorption release 與 uniform release)則可應用於評估地下廢棄物貯存設施核種釋出模擬評估，新射源模組功能亦與其他類似程式(例如：DUST-MS 與 GoldSim)進行比對，評估結果及趨勢大致上皆相當吻合，未來可供國內相關進行廢棄物處置安全評估研究單位參考使用。

四、建議事項

此次赴美國阿岡國家實驗室進行核能電廠除役作業技術交流，同時參加 ANL 所舉辦的「RESRAD-ONSITE, RESRAD-OFFSITE, RESRAD-BUILD 等程式實務應用訓練」與「Advanced RESRAD-ONSITE 與 RESRAD-OFFSITE, RESRAD-BIOTA, and RESRAD-RDD 等程式進階實務訓練」課程，有幾點建議敘述如下：

- (一) 本次 RESRAD 程式實務應用訓練，為 ANL 歷年來首次舉辦 2 週班訓練課程，2 週內 ANL RESRAD 程式專家相繼完成 5 個 RESRAD family codes 介紹及演練示範，課程內容安排可說是相當充實緊湊，但由於各個程式應用目的及範圍各有不同，難以在短時間內完全消化，再加上為配合 ANL New Employee Orientation Program 規定，須於訓練課程開始前參加新進人員訓練講習，使得僅能安排課程開始之前時間與 ANL 專家進行技術交流，建議未來可預留課程後經驗交流時間，以便針對課程期間所發現問題，進一步與 ANL 專家進行深入探討。
- (二) 觀看近年來國際放射防護委員會(ICRP)所發表的報告可知，人類對於非人類生物體之輻射防護可說是逐漸重視，美國則早於 1990 年即因應制定相關法規保障非人類生物體所受輻射曝露，2002 年後美國國內核設施將非人類生物體劑量評估結果納入場址年度環境評估報告(ASERS)比例更達 70%，反觀我國目前仍未制定與非人類生物體輻射防護相關法規，建議未來可參照國際最新資訊，制定符合我國國情非人類生物體輻防法規，並引進相關劑量評估技術，以確保生態環境永續健全發展。

五、附 錄

RESRAD-ONSITE、RESRAD-OFFSITE 與 RESRAD-BUILD 程式基礎班訓練課程表 (106.02.27-106.03.03)

RESRAD-ONSITE Workshop	
Day 1	
8:45-9:00	Registration
9:00-9:20	Opening Remarks/Introduction
9:20-9:40	Overview of RESRAD-ONSITE
9:40-10:40	Input Demonstration
10:40-10:50	Break
10:50-11:30	Output Demonstration
11:30-1:00	Lunch
1:00-2:00	Case Hands-on
2:00 – 3:00	Methodology
3:00 – 3:40	Hands-on (deterministic)
3:40 - 3:50	Break
3:50 – 4:15	Methodology (continued)
4:15 – 4:45	Hands-on and review
Day 2	
8:30- 9:00	RESRAD Family of Codes
9:00 – 9:50	Hands-on and review
9:50- 10:00	Break
10:00- 10:40	Data Requirements
10:40- 11:00	Distribution Coefficients
11:00- 11:45	Hands-on and review
11:45- 1:00	Lunch
1:00 - 1:40	Sensitivity Analysis
1:40 - 2:30	Hands-on and review
2:30 - 3:00	Dose and Risk Coefficient and DCF Editor
3:00 - 3:10	Break
3:10 - 3:45	Problem Solving- An Example
3:45 - 4:00	Verification & Validation
4:00 - 4:45	Hands-on/Course Evaluation
RESRAD-OFFSITE	
Day 3	
8:30-9:00	Review of RESRAD-OFFSITE
9:00-10:30	RESRAD Input Demonstration
10:30-10:45	Break
10:45-11:45	RESRAD Output Demonstration
12:00-1:00	Lunch
1:00-2:00	RESRAD-Offsite Differences
2:00 – 3:00	Contamination & Release Model
3:00 – 3:40	Hands-on (deterministic)
3:40 - 3:50	Break
3:50 – 4:30	Air Dispersion
4:30 - 4:45	Hands-on and review

Day 4	
8:30 – 9:30	Groundwater Model
9:30 - 10:00	Hands-on and review
10:00 - 10:15	Break
10:15 - 10:45	Offsite Accumulation
10:45 - 11:45	Hands-on and review
11:45- 1:00	Lunch
1:00 – 2:30	Integrated Offsite Scenario
2:30-2:45	Break
2:45 - 4:45	Probabilistic Analysis
<i>RESRAD–BUILD Workshop Agenda</i>	
Day 5	
8:30 – 8:50	Introduction
8:50 – 9:15	RESRAD–BUILD Overview
9:15 – 10:00	RESRAD–BUILD Input Demo
10:00 –10:10	Break
10:10 –10:30	RESRAD–BUILD Output Demo
10:30 –11:15	Hands–on
11:15 –11:45	RESRAD–BUILD Methodology
11:45 – 1:00	Lunch
1:00 – 1:40	RESRAD–BUILD Methodology (cont'd)
1:40 – 2:30	Hands–on and review
2:30 – 2:50	Advanced Features Demonstration
2:50 – 3:00	Break
3:00 – 3:15	Hands–on and review
3:15 – 3:40	Problem Solving Techniques
3:40 – 3:50	Verification and Validation
3:50 – 4:00	Hands–on/Course Evaluation

RESRAD-ONSITE、RESRAD-OFFSITE、RESRAD-BIOTA 與 RESRAD-RDD 程式進階訓練課程表(106.03.06-106.03.10)

<i>Advanced RESRAD-ONSITE & RESRAD-OFFSITE</i>	
Day 1	
8:45-9:00	Registration
9:00-9:30	Kd Estimate Options in RESRAD-ONSITE (Water concentrations, Solubility Limit, Root uptake)
9:30-10:30	Hands-on
10:30-10:45	Break
10:45-11:15	Mass Balance Model in RESRAD-ONSITE
11:15-11:45	Hands-on
11:45-1:00	Lunch
1:00-2:00	Inhomogeneous Contamination in RESRAD-ONSITE (Layered, hotspots, shape factor, and area factors)
2:00 – 3:00	Hands-on
3:00 – 3:15	Break
3:15 – 4:30	Hands-on RESRAD-OFFSITE (Deterministic and Sensitivity)
<i>Advanced RESRAD-OFFSITE</i>	
Day 2	
8:30- 9:00	Source Term Model
9:30 – 10:15	Hands-on Source Release Exercises
10:15- 10:00	Break
10:00- 10:30	Flux input/output
10:30- 11:45	Hands-on Submerged Source
11:45- 1:00	Lunch
1:00 - 2:00	Probabilistic/Sensitivity Analysis
2:00 - 2:45	Hands-on Probabilistic Scenario
2:45 - 3:00	Break
3:00 - 4:00	Application of Probabilistic Analysis (Area Factors, Fenceline Analysis)
4:00 - 4:45	Document Overview

<i>Day 3</i>	<i>RESRAD-BIOTA</i>
8:30 – 8:45	Introduction
8:45 – 9:15	Regulatory and Evaluation Framework for Radiation Protection of the Environment
9:15 – 9:30	RESRAD-BIOTA Overview
9:30 – 10:10	RESRAD-BIOTA Input Demo
10:10 –10:20	Break
10:20 –10:45	RESRAD-BIOTA Output Demo
10:45 –11:15	Hands-on and review
11:15 – 11:45	RESRAD-BIOTA Methodology
11:45 – 1:15	Lunch
1:15 – 2:00	Demonstration of General Screening and Site-Specific Screening Phases and Hands-on Problem 1
2:00 – 2:20	Hands-on & Review
2:20 – 3:20	Principles of Ecological Risk Assessment
3:20 – 3:30	Break
3:30 – 3:45	Organism Wizard Feature
3:45 – 4:15	Site-Specific Analysis Phase and Hands-on Problem 3
4:15 – 4:45	Hands-on & Discussion
4:45	Adjourn for Day 1
Day 4	
8:30 – 9:00	The Technical Basis Behind the RESRAD-BIOTA Code
9:00 –9:30	Hands-on Problem 5
9:30 – 10:00	Bring It All Together: Two Case Studies
10:00 – 10:15	Break
10:15 – 10:45	Hands-on and Review
10:45 – 11:00	Wildlife Transfer Factors Database
11:00 – 11:45	International Model Comparison Studies on Biota Dose Assessment
11:45 – 1:00	Lunch

RESRAD-RDD	
Day 4	
1:00 – 1:15	Introduction
1:15 – 2:00	Protective Action Decisions
2:00 – 2:30	Methodology
2:30 – 2:45	Break
2:45 – 3:15	RESRAD-RDD Demo
3:15 – 4:00	Hands-on
4:00 – 4:45	Group A, Access During Emergency Response
Day 5	
8:30 – 9:30	Group B, Early-Phase Protective Actions
9:30 – 10:30	Group C, Relocation
10:30 – 10:45	Break
10:45 – 11:45	Group D, Temporary Access
11:45 – 1:00	Lunch
1:00 – 2:00	Group E, Transportation
2:00 – 3:00	Group F, Release of Property
3:00 – 3:15	Break
3:15 – 4:15	Group G, Food Consumption
4:15 – 4:45	Review and Discussion