

行政院原子能委員會放射性物料管理局  
委託研究計畫研究報告

低放射性廢棄物處置安全管制技術發展

子計畫四：低放射性廢棄物處置輻射劑量  
評估安全審查模式之研究(修訂版)

期末報告

計畫編號：104FCMA002

計畫主持人：董家鈞

子計畫四主持人：林文勝

受委託機關(構)：國立中央大學

報告日期：中華民國 104 年 12 月

## 摘要

本報告分析美國 RESRAD-OFFSITE 程式劑量評估技術與瑞典 Forsmark 擴建 SFR 中低放處置場之 SR-PSU 安全評估計畫。提出近岸與離島環境低放射性廢棄物處置之釋出核種濃度與輻射劑量轉換技術研析，低放射性廢棄物處置之輻射劑量與風險評估轉換技術之斜率因子研析，近場、遠場及生物圈之核種傳輸與劑量計算，研擬低放射性廢棄物坑道處置之生物圈輻射劑量結合近場、遠場全系統安全評估架構，研究成果顯示：RESRAD-OFFSITE 模式輻射劑量與風險評估，可提供參數敏感度分析、不確定度與機率分析報告，針對核種曝露提出致癌風險報告。SR-PSU 封閉後每年的輻射風險限值為  $10^{-6}$ ，大約等於自然存在之背景輻射的 1%，有效劑量與風險的轉換因子為 0.073 /Sv，因此前述風險限值約等於  $1.4 \times 10^{-5}$  Sv/yr 的有限劑量。SR-PSU 安全評估計畫近場、遠場及生物圈輻射劑量全系統安全評估架構，以區塊模型(Compartment models)分類近場、遠場與生物圈分成三個系統。研究成果提出低放審查導則(第 0 版)輻射劑量評估修訂建議，提供低放處置輻射劑量評估安全審查之應用。

## **ABSTRACT**

This study evaluates the dose assessment of the RESRAD-OFFSITE code and safety assessment SR-PSU project for the extended SFR repository located in Forsmark, SWEDEN. The results of the study have proposed the conversion between the radiological dose and concentration of releasing nuclide for the LLW radioactive waste disposal in the near-shore and off-shore island environments, investigating the slope factor that is the conversion between the radiological dose and risk assessment for the LLW radioactive waste disposal, radionuclide transport and dose calculations through the near-field, far-field and biosphere. The study also focused on the complete system of radiological dose of the biosphere integrated the near-field and far-field for the outline safety assessment in LLW tunnel disposal. The study results show as follows: radiological dose and risk assessment in RESRAD-OFFSITE code can provide sensitivity analysis, uncertainty and probabilistic analysis of parameter, and also evaluate the radiological dose and excess cancer risk to an individual who is exposed while located within or outside the area of radionuclide. The annual effective dose can be related to a risk criterion of  $10^{-6}$  for a representative individual in the group exposed to the greatest risk. The conversion from effective dose to risk is 0.073 per Sievert. It should be noted that a dose of 14  $\mu$ Sv corresponds to a risk of  $10^{-6}$ . The model chain for radionuclide transport and dose calculations in near-field, far-field, and biosphere are built using the compartment approach. Suggestions related to radiological dose and risk assessment involved in the Review Guidelines on Safety Assessment of Low-Level Waste Disposal Repository (0 version) are provided. The results of the report can also provide regulatory departments as references for the safety plan review of radiological dose assessment in low-level radioactive waste disposal.

## 目錄

摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
一、 前言.....	1
(一) 研究背景與目的.....	1
(二) 美國 NRC 提出輻射劑量評估模式.....	2
(三) 瑞典 SFR 處置場擴建之 SR-PSU 安全評估計畫.....	3
二、 核種濃度與輻射劑量轉換技術研析.....	8
(一) 活度與莫爾濃度單位轉換.....	8
(二) RESRAD-OFFSITE 模式之核種濃度與輻射劑量轉換.....	10
(三) SR-PSU 安全評估計畫之核種劑量係數.....	16
三、 低放射性廢棄物處置之輻射劑量與風險評估轉換技術研析	21
(一) RESRAD-OFFSITE 模式輻射劑量與風險評估.....	21
1. 參數敏感度分析、不確定度與機率分析報告.....	21
2. 致癌風險報告.....	36
(二) SR-PSU 安全評估計畫之輻射劑量與風險評估.....	40
四、 研擬低放射性廢棄物坑道處置之生物圈輻射劑量結合近場、 遠場全系統安全評估架構.....	44
(一) 近場及遠場模式結合 RESRAD-OFFSITE 模式建立輻射曝 露情節與劑量評估程序.....	44
(二) SR-PSU 安全評估計畫之生物圈輻射劑量結合近場、遠場 全系統安全評估架構.....	50
(三) SR-PSU 近場、遠場及生物圈全系統之模式.....	51
五、 提出低放審查導則(第 0 版)輻射劑量評估有關章節與條文內 容修訂建議.....	57

六、	結論與建議.....	82
七、	參考文獻.....	84

## 圖目錄

圖 1 美國 NRC 提出輻射劑量評估安全審查模式種類 .....	2
圖 2 瑞典 SFR 中低放最終處置場放射性核棄物最終處置場位置示意圖(SKB, 2013) .....	3
圖 3 FORSMARK 之 SFR 設施地表部分示意圖(SKB, 2013) .....	4
圖 4 SFR 設施概念示意圖（灰色是目前已營運中的 SFR1，藍色是規劃中的 SFR3）(SKB, 2014A) .....	4
圖 5 SR-PSU 計畫主報告、主要參考文獻與其他參考報告階層示意圖 .....	6
圖 6 SR-PSU 有關核種傳輸與生物圈輻射劑量評估相關報告關聯圖 .....	7
圖 7 RESRAD-OFFSITE 風險評估之劑量轉換因子程式庫來源介紹示意圖 .....	15
圖 8 執行敏感度分析的參數開啟及設定敏感度分析參數範圍示意圖 .....	22
圖 9 多參數敏感度分析的參數設定及設定敏感度分析參數範圍示意圖 .....	23
圖 10 多參數敏感度分析結果示意圖：抽水井含水層深度及抽水量參數變異情況下劑量可能的變動範圍 .....	24
圖 11 RESRAD-OFFSITE 不確定度及機率分析(介面)表單 .....	25
圖 12 RESRAD-OFFSITE 不確定度/機率分析之參數列於標籤左側變數敘述欄位示意圖 .....	27
圖 13 RESRAD-OFFSITE 不確定度/機率分析視窗點選「HELP」鍵顯示統計分佈協助表單 .....	27
圖 14 RESRAD-OFFSITE 不確定度/機率分析設定所選參數統計分佈的樣本選取方式 .....	28

圖 15	RESRAD-OFFSITE 不確定度/機率分析樣本觀察群組選擇 「CORRELATED OR UNCORRELATED」之輸入秩相關性設定 .....	29
圖 16	RESRAD-OFFSITE 輻射劑量與風險評估整合分析表單輸入界面 .....	30
圖 17	RESRAD-OFFSITE 不確定度/機率分析設定逐步進行分析、檢視 機率圖界面 .....	31
圖 18	RESRAD-OFFSITE 不確定度/機率分析設定檢視前次運算之機率 分布函數輸入/輸出視窗界面.....	32
圖 19	RESRAD-OFFSITE 不確定度/機率分析累積分佈函數取得劑量、 風險百分位數 .....	33
圖 20	RESRAD-OFFSITE 不確定度/機率分析輸入值與輸出散佈圖鑑別 輸入值對輸出之影響.....	34
圖 21	RESRAD-OFFSITE 不確定度/機率分析途徑與核種對於劑量與風 險變異之輸出值與輸出散佈圖 .....	34
圖 22	RESRAD-OFFSITE 時序圖表展示出總劑量(核種與途徑之劑量總 和).....	35
圖 23	輻射劑量與風險評估整合輸出參數(劑量、風險、途徑)界面 .....	35
圖 24	RESRAD-OFFSITE 風險評估之斜率因子程式庫來源介紹示意圖 .....	36
圖 25	處置場系統輻射劑量風險評估時間尺度.....	40
圖 26	主要情節與低發生率情節之總風險對應示意圖 .....	42
圖 27	比較主要情節與低發生率情節之最大輻射劑量年風險 .....	43
圖 28	近場及遠場模式結合生物圈 RESRAD-OFFSITE 模式建立輻射劑 量評估程序 .....	45
圖 29	各種氣候情況下各種情節與計算案例關連圖.....	52

圖 30	近場、遠場與生物圈核種傳輸計算之模式與資料關聯圖 .....	53
圖 31	生物圈區塊模型之核種傳輸模式模擬核種在陸地和水生系統 兩個自然生態系統.....	53
圖 32	SR-PSU 安全評估計畫廢料體、近場、遠場地質圈、生物圈 與氣候之評估模式流程圖(AMF).....	56

## 表目錄

表 1	SR-PSU 主報告和主要參考報告清單 .....	5
表 2	處置場接收廢棄物分類與數量表 .....	9
表 3	不同來源之低放廢棄物關鍵核種列表(本計畫整理；台電公司， 2010) .....	9
表 4	RESRAD-OFFSITE 劑量轉換因子(DCFs) .....	13
表 5	RESRAD-OFFSITE 劑量轉換因子(表 4 續) .....	14
表 6	RESRAD-OFFSITE 劑量轉換因子(表 5 續) .....	15
表 7	經由攝取、吸入與外部曝露的母核種劑量係數 .....	18
表 8	經由攝取、吸入與外部曝露的短半衰期子核種劑量係數 .....	19
表 9	經由攝取、吸入與外部曝露的核種(包括母核種與子核種輻射) 劑量係數 .....	20
表 10	RESRAD-OFFSITE 程式核種風險評估之斜率因子 .....	37
表 11	RESRAD-OFFSITE 程式核種風險評估之斜率因子 (表 10 續) .....	38
表 12	RESRAD-OFFSITE 程式核種風險評估之斜率因子 (表 11 續) .....	39
表 13	低發生率情節和情節組合的機率 .....	41
表 14	主要情節與低發生率情節對人體接受者年最大輻射劑量風險 .....	43
表 15	RESRAD-OFFSITE 輸入檔特性描述 .....	46
表 16	生物圈放射性核種傳輸模式之區塊模型 .....	54
表 17	SR-PSU 安全評估計畫安全報告 SFR 處置場址安全評估所應 用的模式 .....	55

## 一、前言

### (一)研究背景與目的

低放射性廢棄物最終處置場，係選擇適當地質條件且社會大眾能接受的地區進行掩埋處置，以工程與天然地層母岩(Rock matrix)之材質所形成的多重障壁，來阻絕或遲滯核種的外釋與遷移，將低放射性廢棄物與人類生活環境之生物圈隔絕起來，確保在足夠時間內使放射性核種的強度衰變減弱至對人類無害之劑量，防止重返及污染人類之生活環境。低放射性廢棄物最終處置場之多重障壁，係從廢棄物的固化桶開始，經由封裝的容器、固化桶包封模組、低滲透性高吸附性填充物、混凝土、回填材料等處置設施達到穩定隔絕核種的目的。經濟部已於 101 年 7 月 3 日核定公告「台東縣達仁鄉」南田村及「金門縣烏坵鄉」小坵村為建議候選場址，該部後續選址工作將進行地方溝通宣導、公投取得地方同意、地質探勘調查與辦理環境影響評估等作業。針對低放射性廢棄物處置場址輻射劑量評估安全審查，係為審照作業重要之程序過程。

為增進放射性廢棄物最終處置安全，近年來重要技術發展方向，依安全管制需求，須逐步建立相關管制規範及技術，使設施設計、安全評估及施工營運，能確保安全無虞。基此，在低放射性廢棄物最終處置管制規範的編訂方面，原能會物管局於 100 年度初步完成「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版)」。

為提升管制技術及持續精進管制規範，已於 102 度起就低放射性廢棄物處置輻射劑量評估安全審查模式之研究，透過蒐集、研析國際重要文獻及技術研發重點彙整，開始逐步建立 RESRAD(ONSITE 及 OFFSITE)程式輻射劑量評估審查技術，再於 103 年度完成 RESRAD(ONSITE 及 OFFSITE)程式參數需求研析、低放處置輻射劑量與風險評估技術文獻資訊研析、潛在處置場址輻射劑量與風險評估關鍵審查技術與方法研析、輻射劑量與風險評估整合管制技術研議。本年度將針對近岸與離島環境低放射性廢棄物處置之釋出核種濃度與輻射劑量轉換技術研析，低放射性廢棄物處置之輻射劑量與風險評估轉換技術之斜率因子研析，研擬低放射性廢棄物坑道處置之生物圈輻射劑量結合近場、遠場全系統安全評估架構，相關成果回饋於「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版)」安全評估章節之精進

建議，提供物管局低放射性廢棄物處置輻射劑量評估安全審查之應用，以適時提升該項管制技術議題之技能與規範的精進。

## (二)美國 NRC 提出輻射劑量評估模式

根據美國核能管制委員會於 2013 年 2 月 25 至 3 月 1 日在美國鳳凰城舉行之 Waste Management 2013 研討會星期四上午舉辦之「Panel: Recent Developments and Trends in Integrated Risk Assessment Methods, Tools and Decision Analysis Support」。提出低放射性廢棄物最終處置輻射劑量評估安全審查模式主要為：GOLDSIM、RESRAD(ONSITE) 6.5 and RESRAD-OFFSITE、FRAMES and GENII 及 AMBER 模式，如圖 1 所示。經蒐集 GOLDSIM、RESRAD(ONSITE) 6.5 and RESRAD-OFFSITE、FRAMES and GENII 及 AMBER 模式之輻射劑量與風險評估安全相關資料。已於 103 年度計畫針對 RESRAD(ONSITE 及 OFFSITE)、GOLDSIM、FRAMES and GENII 及 AMBER 模式進行介紹說明。

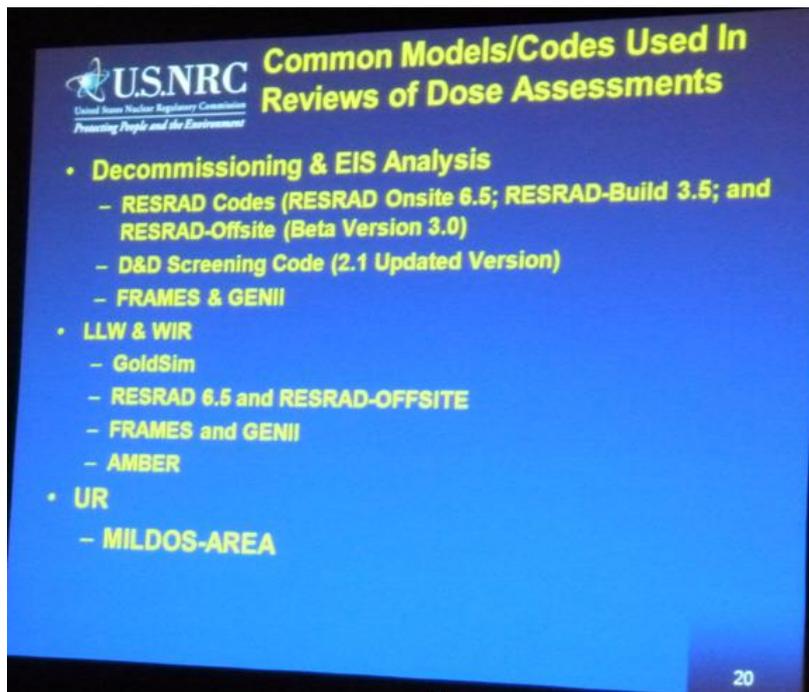


圖 1 美國 NRC 提出輻射劑量評估安全審查模式種類

(資源來源：於研討會現場 USNRC 簡報時拍攝) 其中 (WIR : Waste materials incidental to reprocessing ; EIS : Environmental impact statement)

針對 RESRAD 家族程式之 RESRAD-OFFSITE 程式係為輻射劑量與風險評估，從環境途徑、曝露途徑及劑量與癌症風險之輻射風險評估，建立低放處置輻射劑量與風險評估技術。本年度計畫將持續針對 RESRAD-OFFSITE 程式對於近岸與離島

環境低放射性廢棄物處置之釋出核種濃度與輻射劑量轉換技術研析，低放射性廢棄物處置之輻射劑量與風險評估轉換技術之斜率因子研析，研擬低放射性廢棄物坑道處置之生物圈輻射劑量結合近場、遠場全系統安全評估架構。

### (三)瑞典 SFR 處置場擴建之 SR-PSU 安全評估計畫

瑞典已於首都斯德哥爾摩北部約 139km 的 Östhammar 市 Forsmark 的核電廠內建置中低放射性核棄物最終處置場 SFR1，位於波羅的海離岸約 1 公里處的海床下，約 60 公尺深的位置，自 1988 年開始營運，由 4 個岩窖(rock vault)及 1 個筒倉(silo)所組成。目前正在規劃開發 SFR 擴建工程(SFR3)，由 5 個岩窖所組成，以容納未來電廠除役後的低放射性廢棄物。對於 Forsmark 位置圖如圖 2 所示，位於 Forsmark 港口與旁邊 Forsmark 核電廠之 SFR 設施地表部分示意如圖 3，及 SFR 設施概念示意如圖 4，其中：1 個 Silo 筒倉處置中放廢棄物、1-2BMA 岩窖處置坑道為處置中放射性廢棄物、1-2BTF 岩窖是處置混凝土箱盛裝的中放射性廢棄物、1-5BLA 岩窖是處置低放廢棄物、1BRT 岩窖是處置除役後之反應爐壓力容器。

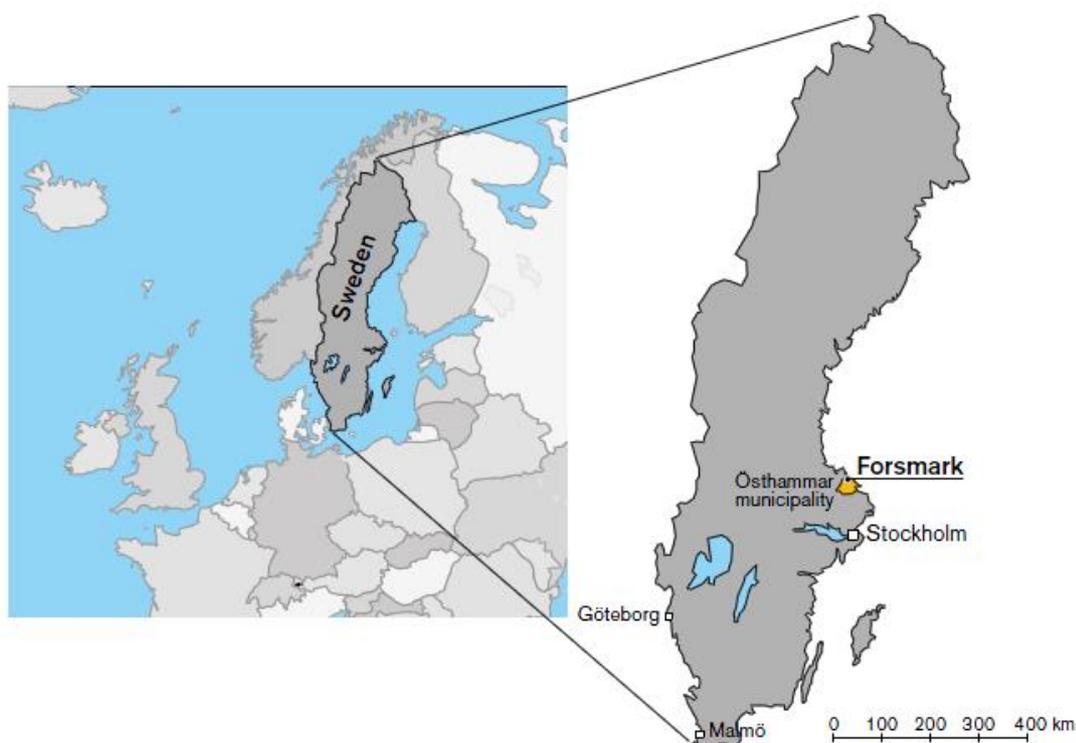


圖 2 瑞典 SFR 中低放最終處置場放射性核棄物最終處置場位置示意圖(SKB, 2013)



圖 3 Forsmark 之 SFR 設施地表部分示意圖(SKB, 2013)

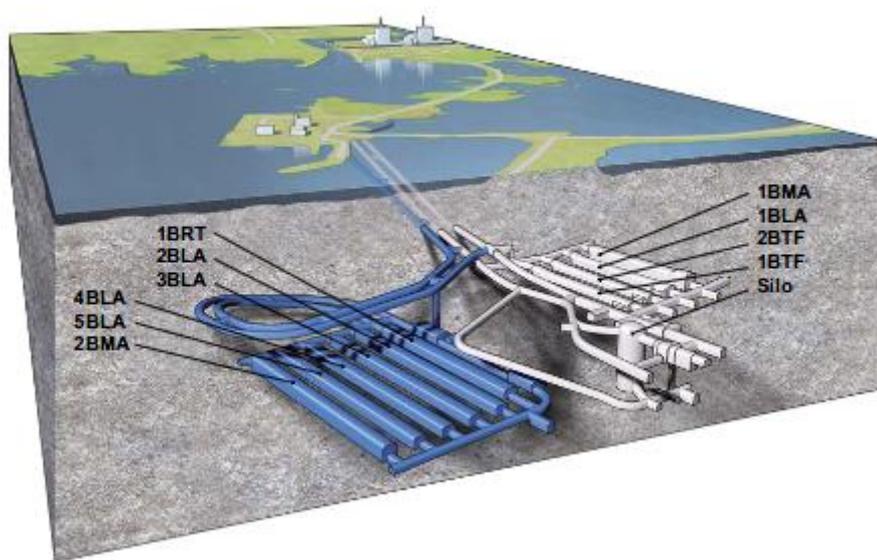


圖 4 SFR 設施概念示意圖（灰色是目前已營運中的 SFR1，藍色是規劃中的 SFR3）（SKB, 2014a）

為能於 SFR 最終處置場同時貯存和處置核電廠除役後放射性廢棄物，SKB 擴建 SFR 最終處置場，稱為 SFR3 計畫。另曾提出擴建 SFR 之 SFR2 計畫，係規劃作為處置反應爐核心部件和內部零件，但 SKB 已計畫在 Forsmark 電廠附近的岩層中，非 SFR 最終處置場區域位置，深度比 SFR 設施更深的深地質處置場址（SFL）進行。

SKB 已經完成 SR-PSU 計畫以作為 SFR 的擴建的使用執照申請文件。SR-PSU

的目的是評估 SFR 最終處置場未來的長期安全評估，即現有的 SFR1 和規劃中的 SFR3。SR-PSU 已完成一系列的安全評估報告，包括一本 SR-PSU 主報告 (SKB, 2014g)，和主要參考報告，包括：氣候報告 (SKB, 2014b)、放射性核種傳輸報告 (SKB, 2014f)、FEP 事件報告 (SKB, 2014c)，FHA 報告 (SKB, 2014d) 與生物圈綜合報告 (SKB, 2014a)，如表 1 所示，列出 SR-PSU 主報告和主要參考報告清單，包括近場、遠場及生物圈安全評估報告；特徵、事件、作用之 FEP 報告；未來人類活動之 FHA 報告 (Future human actions) 與核種傳輸與劑量安全評估報告。

表 1 SR-PSU 主報告和主要參考報告清單

報告編號	名稱摘要	報告名稱
TR-14-01	SR-PSU Main report	SFR長期安全分析 (SR-PSU安全評估主報告)
TR-14-02	Initial state report	SR-PSU初始狀態安全評估報告
TR-14-03	Waste process report	SR-PSU廢料固化體和組裝過程安全評估報告
TR-14-04	Barrier process report	SR-PSU工程障壁安全評估報告
TR-14-05	Geosphere process report	SR-PSU地質圈安全評估報告
TR-14-06	Biosphere synthesis report	SR-PSU生物圈安全評估報告
TR-14-07	FEP report	SR-PSU FEP特徵事件作用安全評估報告
TR-14-08	FHA report	SR-PSU未來人類活動安全評估報告
TR-14-09	Radionuclide transport report	SR-PSU 核種傳輸與劑量計算安全評估報告
TR-14-10	Data report	SR-PSU安全評估資料報告
TR-14-11	Model summary report	SR-PSU安全評估模式摘要報告
TR-14-12	Input data report	SR-PSU安全評估報告之輸入資料
TR-13-05	Climate report	SR-PSU安全評估有關之氣候與氣候相關議題

註：FEP 代表 特徵、事件、作用 (Features, events and processes)；FHA 代表未來人類活動 (Future human actions)

SR-PSU 安全評估計畫報告，共計十二章，合計約五百多頁，另有主要參考報告十二冊，合計超過三千餘頁。SR-PSU 計畫報告的內容如圖 5 所示。SR-PSU 安全評估之目的係為擴建 SFR 最終處置場長期安全評估結果能符合監管標準，其主要結論有三大重點：

1. 為了證明 Forsmark 擴建的 SFR 最終處置場於未來長期安全評估能符合瑞典適用法規。封閉後每年的輻射風險限值為  $10^{-6}$ ，大約等於自然存在之背景輻射的

1 % (SSMFS 2008:37 法規限值)。有效劑量與風險的轉換因子為 0.073 /Sv，因此前述風險限值約等於  $1.4 \times 10^{-5}$  Sv/yr 的有限劑量。依照 SSM's General Guidance，其風險發生機率須於 10 萬年內不能超過法規限值

2. 要確定處置場工程設計、興造、營運期間之安全評估結果必須滿足法規要求，且安全評估報告之結果必須是正確的。
3. 提供處置場設計研發、SKB 研發部門規劃、場址詳細調查和未來的安全評估，提供完整的報告資料回饋。

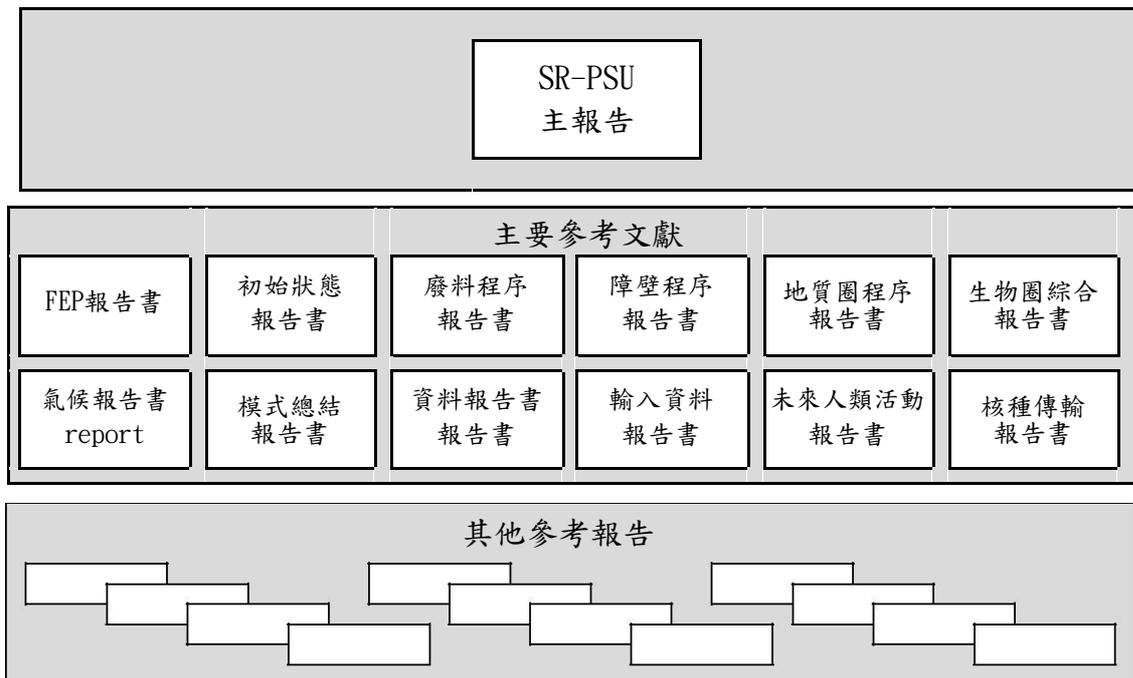


圖 5 SR-PSU 計畫主報告、主要參考文獻與其他參考報告階層示意圖

除了這些主要參考文獻中，安全評估報告還包括 SKB 很多背景調查報告和其他參考文獻。對於表 1 所列 SR-PSU 主報告和主要參考報告清單，有關核種傳輸與生物圈輻射劑量評估報告，依據 SR-PSU 整理結果列於圖 6，本計畫蒐集表 1 與圖 6 之生物圈及輻射劑量安全評估相關報告(如 R13-18、R13-43、R13-46、R14-02、TR14-01、TR14-06、TR14-09)，對於近岸與離島環境低放射性廢棄物處置之釋出核種濃度與輻射劑量轉換技術、低放射性廢棄物處置之輻射劑量與風險評估轉換技術之斜率因子進行研析，研究低放射性廢棄物坑道處置之生物圈輻射劑量結合近場、遠場全系統之安全評估架構。

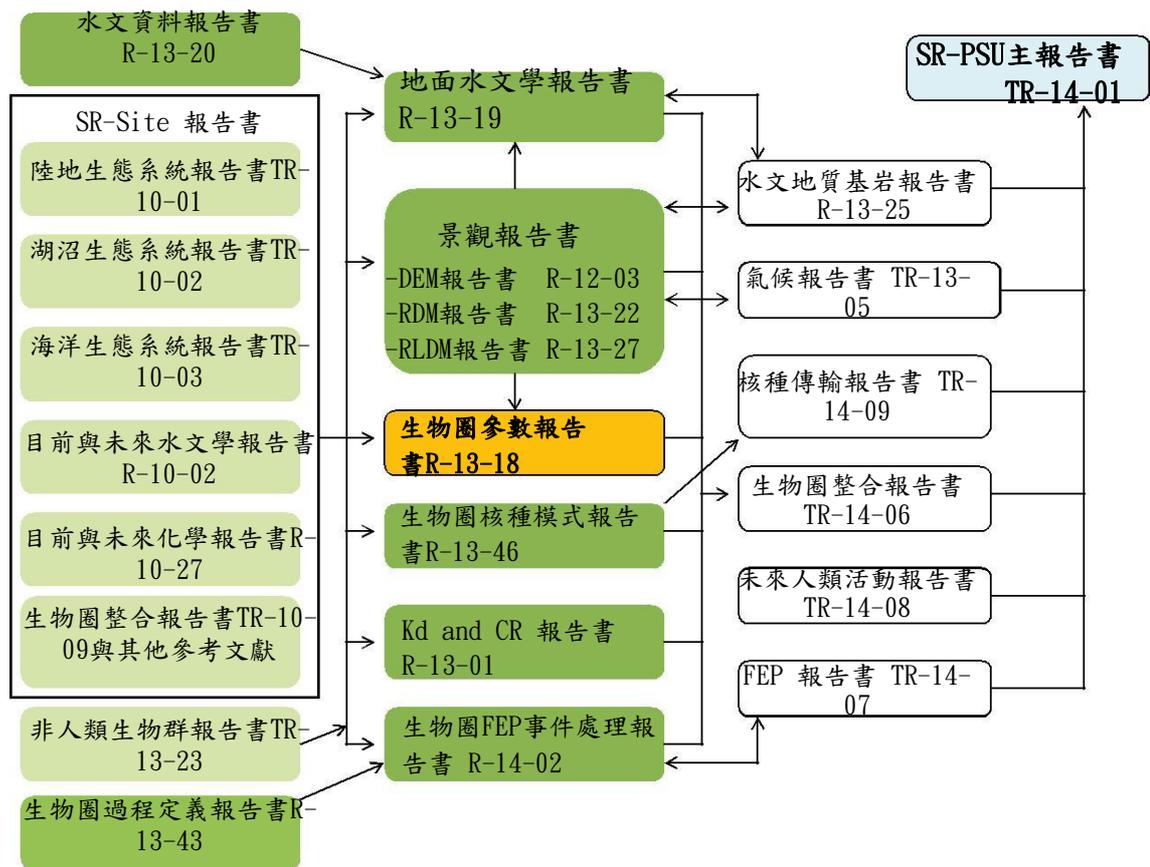


圖 6 SR-PSU 有關核種傳輸與生物圈輻射劑量評估相關報告關聯圖  
 其中：深綠色方框為生物圈報告、橘色方框為生物圈參數報告，淺綠色方框為 SR-Site 生物圈有關報告可作為 SR-PSU 生物圈補充報告，其他報告為 SR-PSU 有關報告與主報告

## 二、核種濃度與輻射劑量轉換技術研析

### (一) 活度與莫爾濃度單位轉換

近岸環境為國內低放處置潛在可能需面對之場址特徵之一，近岸環境之遠場安全分析將可能涉及海岸地區與近岸海域核種外釋；離島環境亦為國內低放處置未來可能需面對之場址特徵之一，雖與前述之近岸環境有相似之處，但若採取離島海床處置則遠場安全分析需考慮海域核種外釋。

由於傳統上污染物傳輸模式(如 HYDROGEOCHEM 模式)之濃度單位為容積莫爾濃度(Molality)，而核種濃度單位為活度單位，所以活度單位與莫爾濃度必須進行轉換，另外對於外釋出之核種濃度必須與輻射劑量單位進行轉換，才能完整計算外釋出之核種濃度換算為生物圈之輻射劑量。

方程式(1)進行容積莫爾濃度與活度單位之轉換，配合孔隙率及含水量適當修正後，可將 mol/l/year 單位轉換成 Bq/year 或 pCi/year 單位，所以遠場安全分析得到外釋出之核種濃度，經過式(1)與輻射劑量單位進行轉換成 Bq/year 或 pCi/year 後，利用 RESRAD-OFFSITE 模式進行輻射曝露情節與劑量評估與風險分析。

$$A = \frac{\lambda MN^0}{W} \quad (1)$$

其中： $A$  活度 (Activity (Bq))； $\lambda$  衰變常數 (decay constant)； $M$  核種質量 (Mass of radionuclide)； $N^0$  Avogadro's 數 ( $6.02 \times 10^{23}$ )； $W$  為核種原子量。

根據台電公司關鍵核種分析資料(台電公司，2010年)，該核種分析之目的在於推估各核設施在運轉過程中，所產生的低放射性廢棄物數量及總活度，與在除役過程中，廢棄物所含放射性核種之總活度，以估計未來最終處置場接收廢棄物時，其所含的核種總活度，提供未來處置場的處置概念規劃、基本工程設計、環境影響說明與後續功能/安全分析工作所需之基本資訊。該資料並指出我國低放射性廢棄物最終處置場計畫接收廢棄物之來源，包含：核一、二、三及核四廠運轉廢棄物、核一、二、三及核四廠除役廢棄物、核能研究所運轉廢棄物及該所接收全國同位素應用業界所產生之廢棄物、核能研究所及其它單位之除役廢棄物。處置場接收 A、B、C 類廢棄物分類廢棄物處置數量推估，採千桶為最小之統計單位，各類廢棄物數量推估如表 2 所列。該

報告參考國內外關鍵核種篩選方法，考量各產源之核種存量、濃度、半衰期與溶解度，以飲水情節分析其對關鍵群體的有效劑量，選取高於 0.25mSv/yr 之核種共計 14 種，本計畫特從其分析報告內加列 Co-60，共計 15 種。分別為 C-14、Ni-59、Co-60、Ni-63、Sr-90、Mo-93、Nb-94、Tc-99、I-129、Cs-137、Np-237、Pu-238、Pu-239、Pu-240、Am-241（關鍵核種如表 3 所示）。

表 2 處置場接收廢棄物分類與數量表

	A 類	B 類	C 類	總計
運轉廢棄物設計量(千桶)	301	4	10	315
除役廢棄物設計量(千桶)	659	12	12	683
處置場接收廢棄物設計量(千桶)	960	16	22	998
處置場接收廢棄物設計量比例	96.2%	1.6%	2.2%	100%

表 3 不同來源之低放廢棄物關鍵核種列表(本計畫整理；台電公司, 2010)

最終處置場廢棄物 (共 99.8 萬桶)				
關鍵核種(15 種)				
核種	半衰期(yr)	活度(Bq)	pBq/g	mole/l
C-14	5730	2.32E+13	9.10E-05	1.02E-11
Ni-59	7.6E4	4.00E+12	1.57E-05	2.34E-11
Co-60	5.27	1.62E+13	6.35E-05	6.58E-15
Ni-63	100	4.74E+14	1.86E-03	2.40E-32
Sr-90	28.9	1.21E+13	4.74E-05	2.69E-14
Mo-93	3.5E3	4.22E+09	1.65E-08	1.14E-15
Nb-94	2E4	1.10E+10	4.31E-08	1.69E-14
Tc-99	2.13E5	5.92E+11	2.32E-06	9.70E-12
I-129	1.57E7	4.48E+11	1.76E-06	5.41E-10
Cs-137	30	1.65E+14	6.47E-04	3.81E-13
Np-237	2.14E6	1.91E+07	7.49E-11	3.14E-15
Pu-238	86.4	4.26E+10	1.67E-07	2.83E-16
Pu-239	2.4E4	1.47E+12	5.76E-06	2.71E-12
Pu-240	6580	1.22E+12	4.78E-06	6.17E-13
Am-241	432.2	9.66E+11	3.79E-06	3.21E-14

依據台電公司低放處置設施功能模擬評估報告(B 版)及(C 版)，其假設 55 加侖之固化桶均為充滿水的飽和情況，其孔隙率為 0.15，含水體積為 31.23 公升，在固化桶內之核種能完全溶解於水中。核種平均活度與莫耳濃度單位之換算，可以由公式(1)換算求得如表 3 之莫爾濃度(mol/l)。

## (二) RESRAD-OFFSITE 模式之核種濃度與輻射劑量轉換

RESRAD-OFFSITE 模式之曝露途徑，包括

### 1. 土壤污染之外在輻射

針對污染土壤之外在輻射，程式模擬以下狀況：

- 當居住處所之室內、外位於現場，位於主要污染上方，曝露於主要污染之輻射。
- 當居住處所之室內、外位於遠場，不在主要污染區，曝露於主要污染之輻射。
- 當居住處所之室內、外位於遠場，並在遠場居住區曝露於累積土壤之輻射。
- 當農業區位於遠場，並曝露於農業區累積土壤之輻射。

以上四個情況之曝露結果顯示於 RESRAD-OFFSITE 模擬結果報告。

如同 RESRAD-ONSITE 使用者手冊之附錄 A(Yu et al. 2001)介紹，以下參數之乘積為上述四個情況之計算結果：

- 對於一無限厚度或面積之體積源項，可於劑量因子之函式庫選擇外部輻射之劑量轉換因子（如表 4 至表 6）
- 土壤之核種濃度(pCi g-1)
- 地區遮蔽因子的時間及室內建築物遮蔽
- 覆蓋與深度因子解釋污染物之有限厚度以及污染物與受體間之乾淨隔絕。
- 區域形狀因子解釋污染土壤之有限面積形狀，及受體位置跟污染物之關係。

遮蔽因子與核種有關，主要污染的形狀可分為圓形或多邊形。程式可設頂遠場或縣場之居住地位置與污染物位置之關係，其中居住及農業區的遠場位置假設為圓形，當計算外在輻射之曝露途徑時，受體位於圓心。

### 2. 吸入污染塵土

程式根據以下狀況模擬污染顆粒吸入之效應。

- 當現場居住區之室內、外位於主要污染上方，吸入從主要污染釋出之污染顆粒。
- 當遠場居住區之室內、外位於主要污染外側，吸入從主要污染釋出及大氣傳輸至遠場住宅區之污染顆粒。
- 位於遠場農業區，吸入從主要污染釋出及大氣傳輸至遠場農區之污染顆粒。

以上四個情況之曝露結果顯示於 RESRAD-OFFSITE 模擬結果報告。

如同 RESRAD-ONSITE 使用者手冊之附錄 B (Yu et al. 2001) 介紹，以下參數之乘積為上述四個情況之計算結果：

- 從劑量因子之函式庫選擇核種之劑量轉換因子（如表 4 至表 6）
- 地區遮蔽因子的時間及室內建築之塵土過濾
- 吸入率( $\text{m}^3 \text{ yr}^{-1}$ )
- 曝露位置之空氣核種濃度( $\text{pCi m}^{-3}$ )

下列因子乘積為現地位置之核種濃度：

- 主要污染濃度( $\text{pCi g}^{-1}$ )
- 表土體積混合因子
- 主要污染密度與混合區密度之比值
- 主要污染上方，空氣中吸入塵土顆粒濃度( $\text{g m}^{-3}$ )
- 面積因子可解釋從主要污染處釋放至無污染處之稀釋(Chang et al. 1998)。

以下參數之乘積為遠場之空氣濃度

- 遠場位置之大氣傳輸因子( $\text{Chi/Q}$ )( $\text{sm}^{-3}$ )。
- 核種大氣釋出率( $\text{pCi/yr}$ )。
- 秒/年之轉移因子

程式會計算吸入 C-14 氣體( $\text{CO}_2$ )及 H-3 蒸氣形式( $\text{H}_2\text{O}$ )，並列於曝露途徑報告。因此 C-14 之曝露報告包含顆粒及氣體形式，而 C-14 之顆粒及氣體形式有不同的劑量轉移因子。H-3 的吸入途徑報告為蒸氣形式，其中有 50%的  $^3\text{HHO}$  經由皮膚吸收，其吸收率為呼吸率的一半(ICRP 1979-1982)。

### 3. 吸入氦及短週期子核種

RESRAD-OFFSITE 根據以下四種狀況模擬氦及短週期子核種之吸入效應：

- 吸入從居住區(現場、遠場居住區)污染水釋放之氦及短週期子核種。
- 吸入在現場居住區(室內及室外)之主要污染及子核種所釋放氦及短週期子核種。
- 吸入在遠場居住區(室內及室外)之主要污染及經由大氣傳輸至遠場居住區所產生之子核種所釋放之氦。
- 吸入在農業區(室外)之主要污染及經由大氣傳輸至農業區所產生之子核種所釋放

之氣。

其中前兩項所使用之方法詳見 RESRAD-ONSITE 使用者手冊之附錄 C (Yu et al. 2001)，最後兩項模擬氫及其子核種在各位置濃度。程式根據從主要污染釋出之氫通量，以及氫與子核種之衰變調整因子( $\text{Chi}/Q$ )，從大氣傳輸模式計算濃度。

4. 攝取水、植物、奶類、肉類、水生食物以及參雜之土壤

(1)水、植物、奶類、肉類、水生食物之曝露乃根據以下之因子計算：

$$\text{Dose} = C_{\text{nuclide in food}} * U_1 * f_1 * \text{DCF} \quad (2)$$

其中：

DCF：核種劑量轉換因子( $[\text{mrem pCi}^{-1}]$ ) (如表 4 至表 6)

$U_1$ ：食物攝取率( $\text{kg yr}^{-1}$  或  $1 \text{ yr}^{-1}$ )

$f_1$ ：由污染區域獲得之食物比例

$C_{\text{nuclide in food}}$ ：食物的核種濃度( $\text{pCi} [\text{kg}]^{-1}$ ,  $\text{pCi L}^{-1}$ )

(2)根據現場、遠場之因子計算參雜在食物中的土壤之曝露量：

$$\text{Dose} = C_{\text{nuclide in soil}} * U_2 * f_2 * \text{DCF-ing} \quad (3)$$

其中：

DCF：核種劑量轉換因子( $[\text{mrem pCi}^{-1}]$ ) (如表 4 至表 6)

$U_2$ ：土壤攝取率( $\text{g yr}^{-1}$ )

$f_2$ ：位於現場或遠場之時間比例

$C_{\text{nuclide in soil}}$ ：土壤在現場或遠場之核種濃度( $\text{pCi g}^{-1}$ )

RESRAD-OFFSITE 模式劑量轉換因子程式庫可從 RESRAD-OFFSITE 劑量轉換因子編輯器設定，劑量轉換因子編輯器是一個獨立的應用程式，通用於所有的 RESRAD(ONSITE 及 OFFSITE)程式。劑量轉換因子程式庫儲存於資料庫中。下拉選單中，所有的劑量轉換因子程式庫包含：FGR11 (Eckerman et al. 1988)、age-dependant ICRP72 (ICRP 1996)或使用者自創的程式庫。(單位： $\text{mrem/pCi}$  或  $\text{mSv/Bq}$ ) (如圖 7)

RESRAD-OFFSITE 模式從 FGR11 (Eckerman et al. 1988)、age-dependant ICRP72 (ICRP 1996)建立之劑量轉換因子 (如表 4 至表 6)

表 4 RESRAD-OFFSITE 劑量轉換因子(DCFs)

核種 <sup>b</sup>	外在 DCFs (mrem/yr)/(pCi/g)	Class <sup>c</sup>	吸入		攝食
			DCFs (mrem/pCi)	f <sub>i</sub> <sup>d</sup>	DCF (mrem/pCi)
Ac-227	2.01E+00	D	6.72	1.00E-03	1.48E-02
Ag-108m+D	9.65E+00	Y	2.83E-04	5.00E-02	7.62E-06
Ag-110m+D	1.72E+01	Y	8.03E-05	5.00E-02	1.08E-05
Al-26	1.74E+01	D	7.96E-06	1.00E-02	1.46E-05
Am-241	4.37E-02	W	4.44E-01	1.00E-03	3.64E-03
Am-243+D	8.95E-01	W	4.40E-01	1.00E-03	3.63E-03
Au-195	2.07E-01	Y	1.30E-05	1.00E-01	1.06E-06
Ba-133	1.98E+00	D	7.86E-06	1.00E-01	3.40E-06
Be-7	2.88E-01	Y	3.21E-07	5.00E-03	1.28E-07
Bi-207	9.38E+00	W	2.00E-05	5.00E-02	5.48E-06
C-14	1.34E-05	(ORGANIC)	2.09E-06	1	2.09E-06
Ca-41	0.00E+00	W	1.35E-06	3.00E-01	1.27E-06
Ca-45	6.26E-05	W	6.62E-06	3.00E-01	3.16E-06
Cd-109	1.47E-02	D	1.14E-04	5.00E-02	1.31E-05
Ce-141	3.18E-01	Y	8.95E-06	3.00E-04	2.90E-06
Ce-144+D	3.24E-01	Y	3.74E-04	3.00E-04	2.11E-05
Cf-252	1.76E-04	W	1.57E-01	1.00E-03	1.08E-03
Cl-36	2.39E-03	W	2.19E-05	1	3.03E-06
Cm-243	5.83E-01	W	3.07E-01	1.00E-03	2.51E-03
Cm-244	1.26E-04	W	2.48E-01	1.00E-03	2.02E-03
Cm-245	3.40E-01	W	4.55E-01	1.00E-03	3.74E-03
Cm-246	1.16E-04	W	4.51E-01	1.00E-03	3.70E-03
Cm-247	1.86E+00	W	4.14E-01	1.00E-03	3.42E-03
Cm-248	8.78E-05	W	1.65	1.00E-03	1.36E-02
Co-57	5.01E-01	Y	9.07E-06	3.00E-01	1.18E-06
Co-60	1.62E+01	Y	2.19E-04	3.00E-01	2.69E-05
Cr-51	1.74E-01	Y	3.34E-07	1.00E-01	1.47E-01
Cs-134	9.47E+00	D	4.63E-05	1	7.33E-05
Cs-135	3.83E-05	D	4.55E-06	1	7.07E-06
Cs-137+D	3.41E+00	D	3.19E-05	1	5.00E-05
Eu-152	7.01E+00	W	2.21E-04	1.00E-03	6.48E-06
Eu-154	7.68E+00	W	2.86E-04	1.00E-03	9.55E-06
Eu-155	1.82E-01	W	4.14E-05	1.00E-03	1.53E-06
Fe-55	0.00E+00	D	2.69E-06	1.00E-01	6.07E-07
Fe-59	7.64E+00	D	1.48E-05	1.00E-01	6.70E-06
Gd-152	0.00E+00	D	2.43E-01	3.00E-04	1.61E-04
Gd-153	2.45E-01	D	2.38E-05	3.00E-04	1.17E-06
Ge-68+D	5.62E+00	W	5.19E-05	1	1.41E-06
H-3	0.00E+00	(H <sub>2</sub> O)	6.40E-08	1	6.40E-08
I-125	1.66E-02	D	2.42E-05	1	3.85E-05
I-129	1.29E-02	D	1.74E-04	1	2.76E-04
I-131	2.17E+00	D	3.29E-05	1	5.33E-05
In-111	1.96E+00	W	8.40E-7	2.00E-02	1.33E-06
Ir-192	4.61E+00	Y	2.82E-05	1.00E-02	5.74E-06
K-40	1.04E+00	D	1.24E-05	1	1.86E-05

表 5 RESRAD-OFFSITE 劑量轉換因子(表 4 續)

核種 <sup>b</sup>	外在 DCFs (mrem/yr)/(pCi/g)	Class <sup>c</sup>	吸入		攝食
			DCFs (mrem/pCi)	f <sub>1</sub> <sup>d</sup>	DCF (mrem/pCi)
La-138	7.96E+00	D	1.37E-03	1.00E-03	5.88E-06
Mn-54	5.16E+00	W	6.70E-06	1.00E-01	2.77E-06
Na-22	1.37E+01	D	7.66E-06	1	1.15E-05
Nb-93m	1.04E-04	Y	2.92E-05	1.00E-02	5.21E-07
Nb-94	9.68E+00	Y	4.14E-04	1.00E-02	7.14E-06
Nb-95	4.69E+00	Y	5.81E-06	1.00E-02	2.57E-06
Ni-59	0.00E+00	(VAPOR)	2.70E-06	5.00E-02	2.10E-07
Ni-63	0.00E+00	(VAPOR)	6.29E-06	5.00E-02	5.77E-07
Np-237+D	1.10E+00	W	5.40E-01	1.00E-03	4.44E-03
Pa-231	1.91E-01	W	1.28	1.00E-03	1.06E-02
Pb-210+D	6.05E-03	D	1.38E-02	2.00E-01	5.37E-03
Pm-147	5.01E-05	Y	3.92E-05	3.00E-04	1.05E-06
Po-210	5.23E-05	W	9.40E-03	1.00E-01	1.90E-03
Pu-238	1.51E-04	W	3.92E-01	1.00E-03	3.20E-03
Pu-239	2.95E-04	W	4.29E-01	1.00E-03	3.54E-03
Pu-240	1.47E-04	W	4.29E-01	1.00E-03	3.54E-03
Pu-241+D	1.89E-05	W	8.25E-03	1.00E-03	6.85E-05
Pu-242	1.28E-04	W	4.11E-01	1.00E-03	3.36E-03
Pu-244+D	7.73E+00	W	4.03E-01	1.00E-03	3.32E-03
Ra-226+D	1.12E+01	W	8.60E-03	2.00E-01	1.33E-03
Ra-228+D	5.98E+00	W	5.08E-03	2.00E-01	1.44E-03
Ru-106+D	1.29E+00	Y	4.77E-04	5.00E-02	2.74E-05
S-35	1.49E-05	W	2.48E-06	8.00E-01	7.33E-06
Sb-124	1.17E+01	W	2.52E-05	1.00E-02	1.01E-05
Sb-125	2.45E+00	W	1.22E-05	1.00E-01	2.81E-06
Sc-46	1.27E+01	Y	2.96E-05	1.00E-04	6.40E-06
Se-75	1.98E+00	W	8.47E-06	8.00E-01	9.62E-06
Se-79	1.86E-05	W	9.84E-06	8.00E-01	8.70E-06
Sm-147	0.00E+00	W	7.47E-02	3.00E-04	1.85E-04
Sm-151	9.84E-07	W	3.00E-05	3.00E-04	3.89E-07
Sm-153	1.58E-01	W	1.96E-06	3.00E-04	2.99E-06
Sn-113+D	1.46E+00	W	1.07E-05	2.00E-02	3.19E-06
Sn-126	1.18E+01	W	1.01E-04	2.00E-02	2.11E-05
Sr-85	2.97E+00	Y	5.03E-06	3.00E-01	1.98E-06
Sr-89	9.08E-03	Y	4.14E-05	1.00E-02	9.25E-06
Sr-90+D	2.46E-02	Y	1.31E-03	3.00E-01	1.53E-04
Ta-182	7.94E+00	Y	4.48E-05	1.00E-03	6.51E-06
Tc-99	1.26E-04	W	8.33E-06	8.00E-01	1.46E-06
Tc-99m	5.51E-01	D	3.26E-08	8.00E-01	6.22E-08
Te-125m	1.51E-02	W	7.29E-06	2.00E-01	3.67E-06
Th-228+D	1.02E+01	Y	3.45E-01	2.00E-04	8.08E-04
Th-229+D	1.60E+00	W	2.16	2.00E-04	4.03E-03
Th-230	1.21E-03	W	3.26E-01	2.00E-04	5.48E-04
Th-232	5.21E-04	W	1.64	2.00E-04	2.73E-03
Tl-201	2.76E-01	D	2.35E-07	1	3.00E-07
Tl-202	2.50E+00	D	9.84E-07	1	1.47E-06

表 6 RESRAD-OFFSITE 劑量轉換因子(表 5 續)

核種 <sup>b</sup>	外 在		吸 入		攝 食
	DCFs (mrem/yr)/(pCi/g)	Class <sup>c</sup>	DCFs (mrem/pCi)	f <sub>1</sub> <sup>d</sup>	DCF (mrem/pCi)
Tl-204	4.05E-03	D	2.41E-06	1	3.36E-06
U-232	9.02E-04	Y	6.59E-01	5.00E-02	1.31E-03
U-233	1.40E-03	Y	1.35E-01	5.00E-02	2.89E-04
U-234	4.02E-04	Y	1.32E-01	5.00E-02	2.83E-04
U-235+D	7.57E-01	Y	1.23E-01	5.00E-02	2.67E-04
U-236	2.15E-04	Y	1.25E-01	5.00E-02	2.69E-04
U-238+D	1.52E-01	Y	1.18E-01	5.00E-02	2.69E-04
Xe-131m	2.26E-02	D	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Zn-65	3.70E+00	Y	2.04E-05	5.00E-01	1.44E-05
Zr-93	0.00E+00	D	3.21E-04	2.00E-03	1.66E-06
Zr-95+D	4.52E+00	D	2.36E-05	2.00E-03	3.79E-06

- <sup>a</sup> External dose conversion factors taken from Eckerman and Ryman (1993), and inhalation and ingestion dose conversion factors are from Eckerman et al. (1988).
- <sup>b</sup> +D indicates that the dose conversion factors of associated radionuclides (half-life less than 30 days) are included along with the principal radionuclide.
- <sup>c</sup> The three inhalation classes D, W, and Y correspond to retention half-times of less than 10 days, 10 to 100 days, and greater than 100 days, respectively. (H<sub>2</sub>O) indicates water; (ORGANIC) indicates an organic material; and (VAPOR) indicates a gaseous material.
- <sup>d</sup> Fraction of a stable element entering the GI tract that reaches body fluids.

圖 7 RESRAD-OFFSITE 風險評估之劑量轉換因子程式庫來源介紹示意圖

### (三) SR-PSU 安全評估計畫之核種劑量係數

SR-PSU 安全評估計畫考慮空氣，土壤和水傳輸途徑，藉由各種評估模式分析廢料體、近場、遠場之核種傳輸，然後模擬得到進入生物圈的核種濃度，再利用核種劑量係數 (Dose coefficient) 與食物攝取率等參數計算對於人體輻射劑量。曝露於環境中的放射性核種的總劑量包括攝取水、攝取食物、外部曝露和吸入等四部分：

$$Dose_{total} = Dose_{ing,water} + Dose_{ing,food} + Dose_{ext} + Dose_{inh} \quad (4)$$

其中：

- $Dose_{ing,water}$  : 攝取水途徑的核種劑量[Sv y<sup>-1</sup>]
- $Dose_{ing,food}$  : 攝取食物途徑的核種劑量[Sv y<sup>-1</sup>]
- $Dose_{ext}$  : 外部曝露途徑的核種劑量[Sv y<sup>-1</sup>]
- $Dose_{inh}$  : 吸入途徑的核種劑量[Sv y<sup>-1</sup>]

攝取水的單一核種劑量取決於用水量[m<sup>3</sup> y<sup>-1</sup>]和所消耗水中核種濃度[Bq m<sup>-3</sup>]，如下式：

$$Dose_{ing,water} = AC_{ing,water} \text{ingRate}_{water} \text{doseCoef}_{ing,water} \quad (5)$$

其中：

- $AC_{ing,water}$  : 飲用水所含核種活度濃度[Bq m<sup>-3</sup>]
- $\text{ingRate}_{water}$  : 每年飲用水攝取率 [m<sup>3</sup> y<sup>-1</sup>]
- $\text{doseCoef}_{ing,water}$  : 攝取飲用水中核種的劑量係數[Sv Bq<sup>-1</sup>]

由於食物攝取途徑單一核種所造成的內在曝露取決於食物中活度濃度、食物消耗量、與飲食所有食物量，攝取食物途徑的核種劑量為

$$Dose_{ing,food} = \text{ingRate}_c \text{doseCoef}_{ing,food} \sum_1 AC_{food,i} f_{cont,food,i}, \quad \sum f_{cont,food,i} \leq 1 \quad (6)$$

其中：

- $\text{ingRate}_c$  : 成年人每年能量需求量[kgC y<sup>-1</sup>](以碳單位表示)
- $AC_{food,i}$  : 某食物 i 含核種活度濃度[Bq kgC<sup>-1</sup>],
- $f_{cont,food,i}$  : 飲食中攝取某食物 i 的比率[kgC kgC<sup>-1</sup>]
- $\text{doseCoef}_{ing,food}$  : 劑量係數[Sv Bq<sup>-1</sup>]

外部曝露由表土土壤的核種活性濃度、上層土壤的密度、於地表停留時間與外在接觸的劑量參數所決定，外部曝露途徑的核種劑量為：

$$Dose_{ext} = AC_{ground} dens_{ground} t_{exposure} doseCoef_{ext} \quad (7)$$

其中：

- $AC_{ground}$  : 表土土壤的核種活性濃度[Bq kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>]  
 $dens_{ground}$  : 上層土壤的密度[kg<sub>DW</sub> m<sup>-3</sup>]  
 $t_{exposure}$  : 於地表停留時間[h y<sup>-1</sup>]  
 $doseCoef_{ext}$  : 外在接觸途徑的劑量參數[(Sv h<sup>-1</sup>)/(Bq m<sup>-3</sup>)]

吸入途徑的核種劑量由空氣中核種活性濃度、吸入率與吸入途徑的核種劑量參數所決定，吸入途徑的核種劑量為：

$$Dose_{inh} = AC_{air} inhRate t_{exposure} doseCoef_{inh} \quad (8)$$

其中：

- $AC_{air}$  : 空氣中核種活性濃度[Bq m<sup>-3</sup>]  
 $inhRate$  : 吸入率[m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>]  
 $doseCoef_{inh}$  : 吸入途徑的核種劑量參數[Sv Bq<sup>-1</sup>]

SR-PSU 安全評估計畫劑量係數依據 ICRP (1996 年) 建議值，在表 7 列出攝取、吸入與外部曝露的母核種劑量係數，表 8 列出經由攝取、吸入與外部曝露的短半衰期子核種劑量係數。表 9 列出經由攝取、吸入與外部曝露的核種(包括母核種與子核種)輻射劑量係數，SR-PSU 安全評估計畫考慮空氣，土壤和水傳輸途徑，藉由廢料體、近場、遠場各種評估模式分析核種洩漏出近場後於遠場傳輸，當得到核種進入生物圈核種濃度後，再利用表 9 核種劑量係數 (Dose coefficient) 與食物攝取率等參數利用方程式(4)-(8)計算對於人體曝露於環境中的放射性核種的總劑量包括攝取水、攝取食物、外部曝露和吸入等四部分輻射劑量。

表 7 經由攝取、吸入與外部曝露的母核種劑量係數

Radionuclide	Half-life	Decay modes <sup>1</sup>	Ingestion Sv Bq <sup>-1</sup>	Inhalation Sv Bq <sup>-1</sup>	Type	External exposure Sv h <sup>-1</sup> per Bq m <sup>-3</sup>	Sv h <sup>-1</sup> per Bq m <sup>-2</sup>
H-3	12.35y	β-	1.8E-11	2.6E-10	S	-	-
C-14	5,730y	β-	5.8E-10	6.2E-12	CO <sub>2</sub>	2.1E-19	4.6E-17
			2.9E-11*	-	-	-	-
Cl-36	3.01E5y	EC,β+,β-	9.3E-10	7.3E-09	M	4.8E-17	4.0E-14
Ca-41	1.4E5y	EC	1.9E-10	1.8E-10	S	-	-
Ni-59	7.5E4y	EC	6.3E-11	4.4E-10	S	-	-
Co-60	5.271y	β-	3.4E-09	3.1E-08	S	3.0E-13	8.3E-12
Ni-63	96y	β-	1.5E-10	1.3E-09	S	-	-
Se-79	65,000y	β-	2.9E-09	6.8E-09	S	2.9E-19	5.9E-17
Sr-90	29.12y	β-	2.8E-08	1.6E-07	S	1.2E-17	5.9E-15
Mo-93	3.5E3y	EC	3.1E-09	2.3E-09	S	8.0E-18	1.4E-14
Nb-93m	13.6y	IT	1.2E-10	1.8E-09	S	1.4E-18	2.5E-15
Zr-93	1.53E6y	β-	1.1E-09	2.5E-08	F	-	-
Nb-94	2.03E4y	β-	1.7E-09	4.9E-08	S	1.8E-13	5.4E-12
Tc-99	2.13E5y	β-	6.4E-10	1.3E-08	S	2.1E-18	2.3E-16
Pd-107	6.5E6y	β-	3.7E-11	5.9E-10	S	-	-
Ag-108m	127y	EC,IT	2.3E-09	3.7E-08	S	1.7E-13	5.6E-12
Cd-113m	13.6y	β-	2.3E-08	1.1E-07	F	1.2E-17	6.4E-15
Sn-126	1.0E5y	β-	4.7E-09	2.8E-08	M	2.5E-15	1.7E-13
I-129	1.57E7y	β-	1.1E-07	3.6E-08	F	1.8E-16	7.0E-14
Ba-133	10.74y	EC	1.5E-09	1.0E-08	S	3.5E-14	1.3E-12
Cs-135	2.3E6y	β-	2.0E-09	8.6E-09	S	6.2E-19	9.7E-17
Cs-137	30.0y	β-	1.3E-08	3.9E-08	S	1.6E-17	1.1E-14
Sm-151	90y	β-	9.8E-11	4.0E-09	M	1.3E-20	1.3E-17
Eu-152	13.33y	β-,EC,β+	1.4E-09	4.2E-08	M	1.3E-13	3.9E-12
Ho-166m	1.20E3y	β-	2.0E-09	1.2E-07	M	1.9E-13	5.9E-12
Pb-210	22.3y	β-	6.9E-07	5.6E-06	S	3.8E-17	7.7E-15
Po-210	138.38d	α	1.2E-06	4.3E-06	S	9.5E-19	2.9E-17
Ra-226	1,600y	α	2.8E-07	9.5E-06	S	5.6E-16	2.2E-14
Ac-227	21.773y	β-,α	1.1E-06	5.5E-04	F	8.6E-18	5.1E-16
Th-228	1.9131y	α	7.2E-08	4.0E-05	S	1.4E-16	7.7E-15
Th-229	7,340y	α	4.9E-07	2.4E-04	F	5.6E-15	2.8E-13
Th-230	7.7E4y	α	2.1E-07	1.0E-04	F	2.1E-17	2.3E-15
Pa-231	3.276E4y	α	7.1E-07	1.4E-04	M	3.4E-15	1.4E-13
U-232	72y	α	3.3E-07	3.7E-05	S	1.5E-17	2.9E-15
U-233	1.585E5y	α	5.1E-08	9.6E-06	S	2.4E-17	2.2E-15
U-234	2.445E5y	α	4.9E-08	9.4E-06	S	6.6E-18	2.1E-15
U-235	703.8E6y	α	4.7E-08	8.5E-06	S	1.3E-14	5.0E-13
U-236	2.3415E7y	α	4.7E-08	8.7E-06	S	3.4E-18	1.8E-15
Np-237	2.14E6y	α	1.1E-07	5.0E-05	F	1.3E-15	9.1E-14
Pu-238	87.74y	SF,α	2.3E-07	1.1E-04	F	2.2E-18	2.3E-15
U-238	4.468E9y	SF,α	4.5E-08	8.0E-06	S	1.5E-18	1.5E-15
Pu-239	24,065y	α	2.5E-07	1.2E-04	F	5.1E-18	1.0E-15
Pu-240	6,537y	SF,α	2.5E-07	1.2E-04	F	2.2E-18	2.2E-15
Am-241	432.2y	α	2.0E-07	9.6E-05	F	7.2E-16	8.4E-14
Pu-241	14.4y	α,β-	4.8E-09	2.3E-06	F	1.0E-19	6.2E-18
Am-242m	152y	α,IT	1.9E-07	9.2E-05	F	2.8E-17	8.1E-15
Pu-242	3.763E5y	SF,α	2.4E-07	1.1E-04	F	1.9E-18	1.8E-15
Cm-242	162.8d	SF,α	1.2E-08	5.9E-06	S	2.5E-18	2.5E-15
Am-243	7,380y	α	2.0E-07	9.6E-05	F	2.4E-15	1.7E-13
Cm-243	28.5y	α,EC	1.5E-07	6.9E-05	F	1.0E-14	4.2E-13
Cm-244	18.11y	SF,α	1.2E-07	5.7E-05	F	1.7E-18	2.3E-15
Cm-245	8,500y	α	2.1E-07	9.9E-05	F	5.9E-15	2.9E-13
Cm-246	4,730y	SF,α	2.1E-07	9.8E-05	F	1.6E-18	2.1E-15

\*Dose coefficients (Sv Bq<sup>-1</sup>) for exposure from ingestion (doseCoef\_ing) and inhalation (doseCoef\_inh) (ICRP 1996). Dose coefficients (Sv h<sup>-1</sup> per Bq m<sup>-3</sup> and Sv h<sup>-1</sup> per Bq m<sup>-2</sup>) for external exposure (doseCoef\_ext, doseCoef\_ext\_surf) (Eckerman and Leggett 1996, Eckerman and Ryman 1993) due to spatially uniformly distributed radionuclides to an infinite depth and surface exposure respectively. Values include only radiations emitted by the indicated radionuclide

\*Dose coefficient used for ingestion of water (Leggett 2004).

<sup>1</sup> Decay modes: β- for beta minus decay, β+ for beta plus decay, EC for electron capture, α for alpha decay, IT for isometric transition, and SF for spontaneous fission.

表 8 經由攝取、吸入與外部曝露的短半衰期子核種劑量係數

核種	半衰期	衰變方式 <sup>3</sup>	攝食		型式 Type	外部曝露 <sup>3</sup>	
			Sv Bq <sup>-1</sup>	吸入 Sv Bq <sup>-1</sup>		Sv h <sup>-1</sup> per Bq m <sup>-3</sup>	Sv h <sup>-1</sup> per Bq m <sup>-2</sup>
Y-90	64.0h	β-	2.7E-09	1.5E-09	S	7.7E-16	3.9E-13
Ag-108	2.37m	EC,β+,β-	-	-	-	2.2E-15	3.2E-13
Sb-126	12.4d	β-	2.4E-09	3.2E-09	S	3.1E-13	9.8E-12
Sb-126m	19.0m	IT,β-	3.6E-11	2.0E-11	S	1.7E-13	5.6E-12
Ba-137m	2.552m	IT	-	-	-	6.5E-14	2.1E-12
Tl-207	4.77m	β-	-	-	-	4.4E-16	2.0E-13
Tl-208	3.07m	β-	-	-	-	4.2E-13	1.1E-11
Pb-209	3.253h	β-	5.7E-11	6.1E-11	S	1.5E-17	1.1E-14
Tl-209	2.20m	β-	-	-	-	2.4E-13	6.9E-12
Bi-210	5.012d	β-	1.3E-09	9.3E-08	M	1.1E-16	1.3E-13
Bi-211	2.14m	α,β-	-	-	-	4.6E-15	1.6E-13
Pb-211	36.1m	β-	1.8E-10	1.2E-08	S	5.6E-15	3.4E-13
Po-211	0.516s	α	-	-	-	8.6E-16	2.7E-14
Bi-212	60.55m	β-,α	2.6E-10	3.1E-08	M	2.1E-14	8.1E-13
Pb-212	10.64h	β-	6.0E-09	1.9E-07	S	1.2E-14	4.9E-13
Po-212	0.305us	α	-	-	-	-	-
Bi-213	45.65m	β-,α	2.0E-10	3.0E-08	M	1.4E-14	6.0E-13
Po-213	4.2us	α	-	-	-	-	-
Bi-214	19.9m	β-	1.1E-10	1.4E-08	M	1.8E-13	5.2E-12
Pb-214	26.8m	β-	1.4E-10	1.5E-08	S	2.4E-14	8.6E-13
Po-214	164.3us	α	-	-	-	9.3E-18	2.9E-16
Po-215	0.001780s	α	-	-	-	1.8E-17	6.0E-16
Po-216	0.15s	α	-	-	-	1.9E-18	5.8E-17
At-217	0.0323s	α	-	-	-	3.2E-17	1.1E-15
At-218	2s	α	-	-	-	9.4E-17	1.3E-14
Po-218	3.05m	α,β-	-	-	-	1.0E-18	3.1E-17
Rn-219	3.96s	α	-	-	-	5.5E-15	1.9E-13
Rn-220	55.6s	α	3.5E-09 <sup>1</sup>	2.1E-08 <sup>2</sup>	-	4.1E-17	1.3E-15
Fr-221	4.8m	α	-	-	-	2.7E-15	1.0E-13
Rn-222	3.8235d	α	-	-	-	4.2E-17	1.4E-15
Fr-223	21.8m	β-	2.4E-09	8.9E-10	F	3.5E-15	2.8E-13
Ra-223	11.434d	α	1.0E-07	8.7E-06	S	1.1E-14	4.4E-13
Ra-224	3.66d	α	6.5E-08	3.4E-06	S	9.1E-16	3.3E-14
Ac-225	10.0d	α	2.4E-08	8.5E-06	S	1.1E-15	5.3E-14
Ra-225	14.8d	β-	9.9E-08	7.7E-06	S	1.7E-16	3.9E-14
Th-227	18.718d	α	8.8E-09	1.0E-05	S	9.3E-15	2.5E-13
Th-231	25.52h	β-	3.4E-10	3.3E-10	S	6.2E-16	5.6E-14
Pa-233	27.0d	β-	8.7E-10	3.9E-09	S	1.8E-14	6.7E-13
Pa-234	6.70h	β-	5.1E-10	4.0E-10	S	2.1E-13	6.5E-12
Pa-234m	1.17m	β-,IT	-	-	-	1.9E-15	3.9E-13
Th-234	24.10d	β-	3.4E-09	7.7E-09	S	4.1E-16	2.7E-14
U-237	6.75d	β-	7.6E-10	1.9E-09	S	9.3E-15	4.4E-13
Np-238	2.117d	β-	9.1E-10	3.5E-09	F	6.3E-14	1.9E-12
Np-239	2.355d	β-	8.0E-10	1.0E-09	S	1.3E-14	5.5E-13
Am-242	16.02h	EC,β-	3.0E-10	2.0E-08	S	8.6E-16	5.8E-14

\* Dose coefficients (Sv Bq<sup>-1</sup>) for exposure from ingestion (doseCoef\_ing) and inhalation (doseCoef\_inh) (ICRP 1996) for short-lived progeny not explicitly modelled. Dose coefficients (Sv h<sup>-1</sup> per Bq m<sup>-3</sup> and Sv h<sup>-1</sup> per Bq m<sup>-2</sup>) for external exposure (doseCoef\_ext and doseCoef\_ext\_surf) (Eckerman and Leggett 1996, Eckerman and Ryman 1993) due to spatially uniformly distributed radionuclides to an infinite depth and surface exposure respectively. Values include only radiations emitted by the indicated radionuclide.

<sup>1</sup> (NRC 1999).

<sup>2</sup> (ICRP 1993) recommended mean value.

<sup>3</sup> Decay modes: β- for beta minus decay, β+ for beta plus decay, EC for electron capture, α for alpha decay, IT for isometric transition, and SF for spontaneous fission.

表 9 經由攝取、吸入與外部曝露的核種(包括母核種與子核種輻射)劑量係數

核種	攝食 Sv Bq <sup>-1</sup>	吸入 Sv Bq <sup>-1</sup>	外在曝露 Sv h <sup>-1</sup> per Bq m <sup>-3</sup>	Sv h <sup>-1</sup> per Bq m <sup>-2</sup>
H-3	1.8E-11	2.6E-10	—	—
C-14	5.8E-10	6.2E-12	2.1E-19	4.6E-17
Cl-36	9.3E-10	7.3E-09	4.8E-17	4.0E-14
Ca-41	1.9E-10	1.8E-10	—	—
Ni-59	6.3E-11	4.4E-10	—	—
Co-60	3.4E-09	3.1E-08	3.0E-13	8.3E-12
Ni-63	1.5E-10	1.3E-09	—	—
Se-79	2.9E-09	6.8E-09	2.9E-19	5.9E-17
Sr-90*	3.1E-08	1.6E-07	7.9E-16	4.0E-13
Mo-93	3.1E-09	2.3E-09	8.0E-18	1.4E-14
Nb-93m	1.2E-10	1.8E-09	1.4E-18	2.5E-15
Zr-93	1.1E-09	2.5E-08	—	—
Nb-94	1.7E-09	4.9E-08	1.8E-13	5.4E-12
Tc-99	6.4E-10	1.3E-08	2.1E-18	2.3E-16
Pd-107	3.7E-11	5.9E-10	—	—
Ag-108m*	2.3E-09	3.7E-08	1.7E-13	5.6E-12
Cd-113m	2.3E-08	1.1E-07	1.2E-17	6.4E-15
Sn-126*	5.1E-09	2.8E-08	2.1E-13	7.1E-12
I-129	1.1E-07	3.6E-08	1.8E-16	7.0E-14
Ba-133	1.5E-09	1.0E-08	3.5E-14	1.3E-12
Cs-135	2.0E-09	8.6E-09	6.2E-19	9.7E-17
Cs-137*	1.3E-08	3.9E-08	6.2E-14	2.0E-12
Sm-151	9.8E-11	4.0E-09	1.3E-20	1.3E-17
Eu-152	1.4E-09	4.2E-08	1.3E-13	3.9E-12
Ho-166m	2.0E-09	1.2E-07	1.9E-13	5.9E-12
Pb-210*	6.9E-07	5.6E-06	1.4E-16	1.3E-13
Po-210	1.2E-06	4.3E-06	9.5E-19	2.9E-17
Ra-226*	2.8E-07	9.5E-06	2.0E-13	6.1E-12
Ac-227*	1.2E-06	5.5E-04	3.6E-14	1.7E-12
Th-228*	1.4E-07	4.4E-05	1.9E-13	5.2E-12
Th-229*	6.1E-07	2.4E-04	2.9E-14	1.2E-12
Th-230	2.1E-07	1.0E-04	2.1E-17	2.3E-15
Pa-231	7.1E-07	1.4E-04	3.4E-15	1.4E-13
U-232	3.3E-07	3.7E-05	1.5E-17	2.9E-15
U-233	5.1E-08	9.6E-06	2.4E-17	2.2E-15
U-234	4.9E-08	9.4E-06	6.6E-18	2.1E-15
U-235*	4.7E-08	8.5E-06	1.3E-14	5.6E-13
U-236	4.7E-08	8.7E-06	3.4E-18	1.8E-15
Np-237*	1.1E-07	5.0E-05	1.9E-14	7.6E-13
Pu-238	2.3E-07	1.1E-04	2.2E-18	2.3E-15
U-238*	4.8E-08	8.0E-06	3.0E-15	4.4E-13
Pu-239	2.5E-07	1.2E-04	5.1E-18	1.0E-15
Pu-240	2.5E-07	1.2E-04	2.2E-18	2.2E-15
Am-241	2.0E-07	9.6E-05	7.2E-16	8.4E-14
Pu-241*	4.8E-09	2.3E-06	3.3E-19	1.7E-17
Am-242m*	1.9E-07	9.2E-05	1.2E-15	7.5E-14
Pu-242	2.4E-07	1.1E-04	1.9E-18	1.8E-15
Cm-242	1.2E-08	5.9E-06	2.5E-18	2.5E-15
Am-243*	2.0E-07	9.6E-05	1.6E-14	7.3E-13
Cm-243	1.5E-07	6.9E-05	1.0E-14	4.2E-13
Cm-244	1.2E-07	5.7E-05	1.7E-18	2.3E-15
Cm-245	2.1E-07	9.9E-05	5.9E-15	2.9E-13
Cm-246	2.1E-07	9.8E-05	1.6E-18	2.1E-15

\* Dose coefficients include contribution from short-lived radioactive progeny assuming secular equilibrium.

\* Dose coefficients for exposure from ingestion (doseCoef\_ing) and inhalation (dose\_coef\_inh) (ICRP 1996). Dose coefficients (Sv h<sup>-1</sup> per Bq m<sup>-3</sup> and Sv h<sup>-1</sup> per Bq m<sup>-2</sup>) for external exposure (doseCoef\_ext and doseCoef\_ext\_surf) (Eckerman and Leggett 1996, Eckerman and Ryman 1993) due to spatially uniformly distributed radionuclides to an infinite depth and surface exposure respectively. Values include radiations emitted by the indicated radionuclide as well as the contribution from short-lived radioactive progeny

### 三、低放射性廢棄物處置之輻射劑量與風險評估轉換技術研析

#### (一)RESRAD-OFFSITE 模式輻射劑量與風險評估

##### 1. 參數敏感度分析、不確定度與機率分析報告

RESRAD-OFFSITE 有兩功能可調查每一個輸入值對運算結果之影響。其中敏感度分析可以觀察個別參數對模擬的影響；而不確定度/機率分析可選定部份參數及其變動範圍對模擬的變化，並檢視各參數之重要性。進而分析核種之途徑劑量、總劑量與途徑風險與總風險。其劑量與風險報告之檔案副檔名為(.prb)，其內容如下：

##### A. 輸入

- 各輸入分佈摘要

##### B. 報告時間內之最大值、最小值、標準差

- 各初始核種之總劑量
- 各初始核種之總風險
- 各初始核種之途徑劑量

##### C. 累積分佈函數

- 總劑量之峰值
- 途徑劑量之峰值
- 總風險之峰值
- 途徑風險之峰值

##### D. 相關及回歸係數(依使用者之需求)

- 輸入之總劑量峰值
- 輸入之途徑劑量峰值
- 輸入之核種劑量峰值
- 輸入之總風險峰值
- 輸入之途徑風險峰值
- 輸入之核種風險峰值

##### (1)參數敏感度分析

##### (A) 一次性單一參數敏感度分析

RESRAD-OFFSITE模式已建立一次性單一參數敏感度分析，可用於檢視參數的變化對模擬的劑量、風險或濃度之影響。每個選定的參數可根據原本設定濃度，選擇調整因子後，產生上限值、基值與下限值，程式再以這三個值分別運算，進行敏感度分析。在其他參數不變的情況下，程式將選定參數之上限值、基值、下限值模擬結果繪製成歷線，比較參數數值改變對結果之影響。

- (I) 選擇敏感度分析參數：從欲執行敏感度分析的參數開啟「設定敏感度分析參數範圍」（如圖8），選擇下方的調整因子。調整因子選定後，視窗右方將顯示敏感度分析參數之上限值、基值與下限值。如果使用者選擇最下方的欄位，可以輸入任何大於1的調整因子或使用預設值10。經過調整因子乘除後，如果參數超出合理輸入範圍，將會有一個警告訊息跳出，並顯示允許輸入最大值。如果使用者曾經改變原本用作敏感度分析參數之基值，須重新進入此視窗，已確認敏感度分析之參數變化仍在合理輸入範圍內。最後點擊「OK」鍵完成設定，則敏感性參數將會展示於敏感性輸入摘要欄。

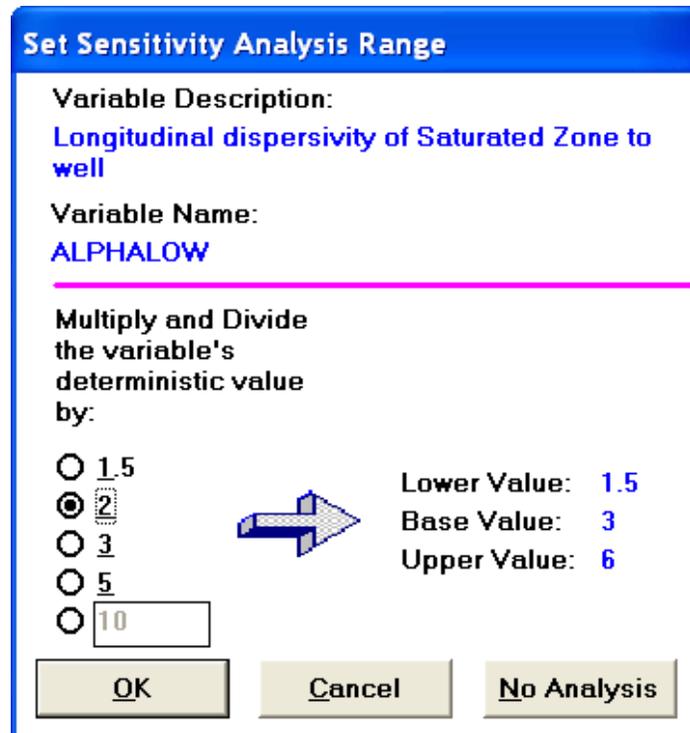


圖 8 執行敏感度分析的參數開啟及設定敏感度分析參數範圍示意圖

- (II) 移除敏感度分析參數：如果已經設定好敏感度分析參數，使用者可以從敏感性輸入摘要欄看到相關欄位。如欲移除該參數之敏感度分析，可點擊滑鼠右鍵，或者點擊滑鼠左鍵再選擇「不」；選擇「取消」將不會移出敏感度分析之參數。如果尚未選擇敏感度分析之參數，只需選擇「取消」即可退出此表單。
- (III) 檢視敏感度分析結果：敏感度分析結果只會以圖表格式展示，而非文字格式。在執行敏感度分析後，進入決定性圖表檢視器，在右側圖表選擇區下方選擇敏感性選項，從下拉選單選擇參數後，即可查看結果。

### (B) 多參數敏感度分析

多參數敏感度分析可以針對多參數進行不確定度分析，使用者只需在欲分析之參數上，按SHIFT+F8即可。程式將根據選定參數之原本數值，依圖9所示係以0.9至1.1間之比率變動，來進行不確定度分析。而均一分布(uniform distribution)程式設定至少可達±50%之比率變動。參數之劑量、風險敏感性乃根據標準迴歸係數或標準秩迴歸係數調整。

圖 9 多參數敏感度分析的參數設定及設定敏感度分析參數範圍示意圖

使用者可透過此功能查看在參數變異情況下，劑量可能的變動範圍(如圖10)。根據不同參數輸入值對應的輸出散佈圖，即可了解參數變動與結果呈現之變異及互動。使用者如欲了解輸出散佈圖上各點之座標點位，可將滑鼠游標移至目標點位並點擊之，則視窗將顯示點位座標，並出現十字線，以方便大家查看圖表之峰值。

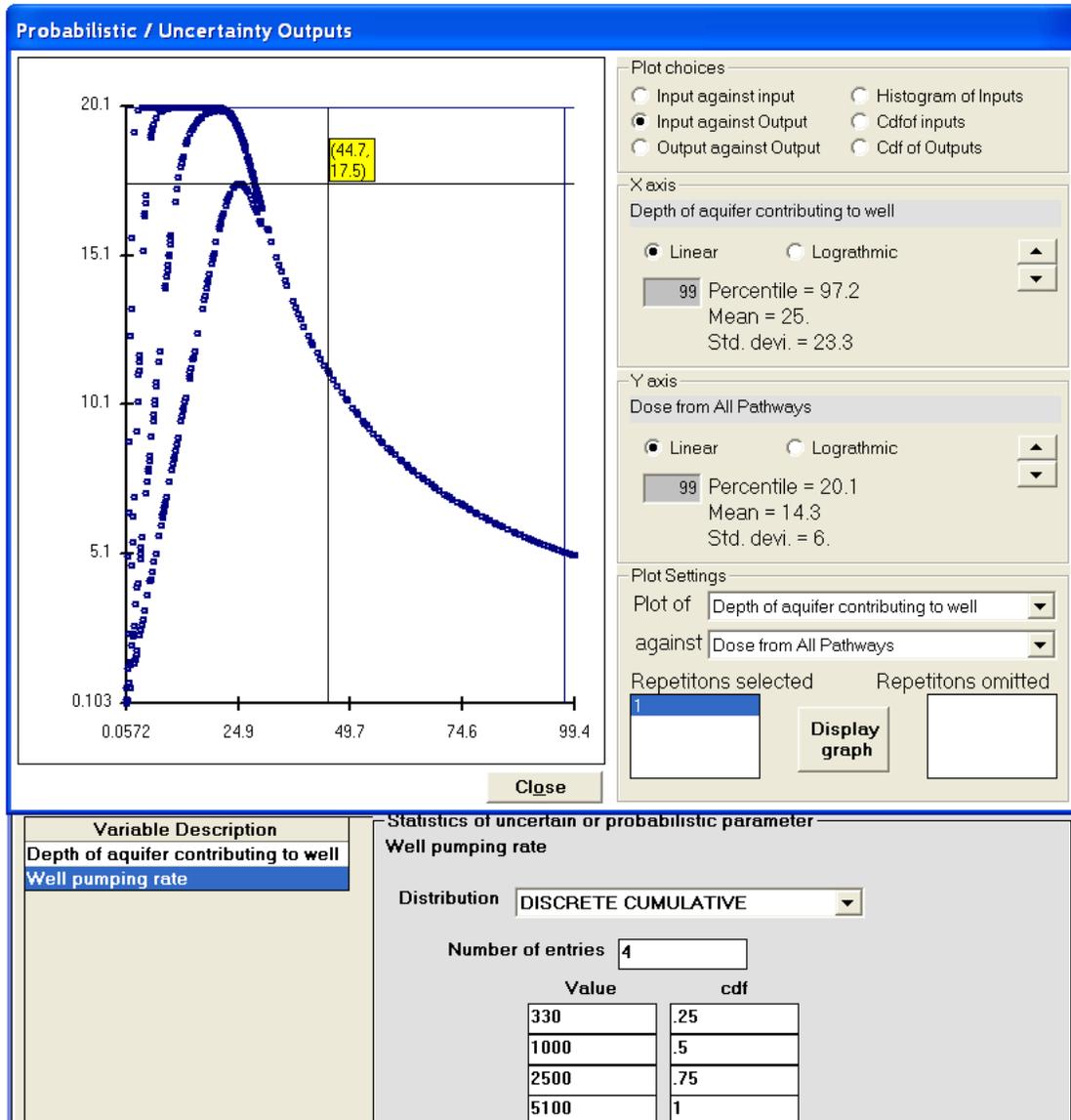


圖 10 多參數敏感度分析結果示意圖：抽水井含水層深度及抽水量參數變異情況下劑量可能的變動範圍

## (2)不確定度與機率分析

當使用者無法確定參數數值於案例模擬結果的變異性，可以使用不確定度/機率分析可用於評估參數數值對於模擬結果之變異。不確定度/機率分析也可用於辨別各參數對模

擬結果變化之重要性，如前述之多參數敏感度分析，藉此降低參數之不確定度，以有效的降低模式運算時劑量、風險、介質濃度之變異。

選擇不確定度及機率分析之參數，包括以下程序方法：(A)目錄：首先需選定欲執行不確定度/機率分析的參數，再從RESRAD-OFFSITE目錄點擊選項表單，選擇不確定度/機率分析(F8)。(B)工具欄：首先選定欲執行不確定度/機率分析的參數，在工具欄中點選「不確定度/機率分析」按鍵(其圖示為)。(C)輸入視窗：首先選定欲執行不確定度/機率分析的參數，然後再按鍵盤的F8按鍵。

使用者可在不確定度/機率分析介面表單之參數分佈標籤中查看選定之參數。而對於「不確定度及機率分析(介面)表單」為：「目錄：點擊檢視、不確定度/機率介面(CTRL+F8)，可開啟不確定度/機率分析介面表單（如圖11）。並可更改使用者偏好，設定成：當開啟RESRAD-OFFSITE時，就開啟不確定度/機率分析介面表單。」

使用上述方法(選定欲執行不確定度/機率分析的參數，再執行不確定度/機率分析)亦可開啟不確定度/機率分析介面表單，但此方法之目的為設定單一參數時才會發生。

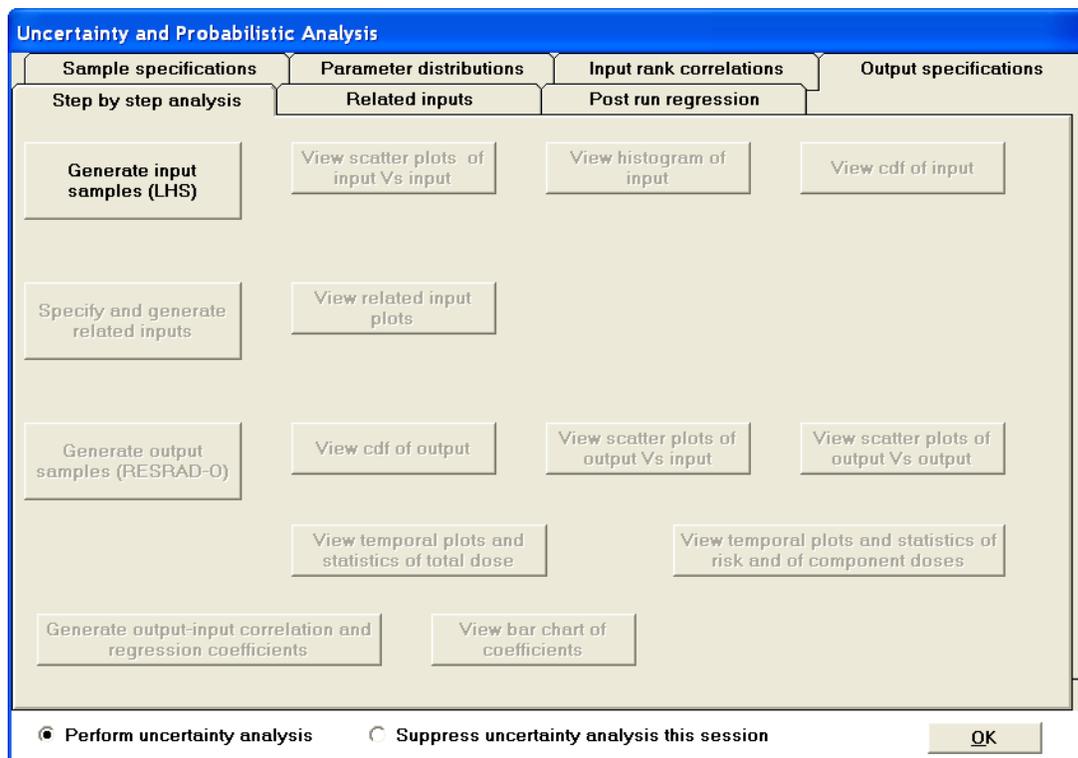


圖 11 RESRAD-OFFSITE 不確定度及機率分析(介面)表單

不確定度/機率分析表單共有七個標籤，其中相關輸入標籤正在建構設計中，底下就其他六個標籤介紹，並詳如後述：

- 參數分佈：使用者可以由此標籤設定參數輸入之不確定度或其分佈特性。
- 樣本設定：當參數分佈標籤設定完成後，此處可以從分佈特性設定機率輸出集合。
- 輸入秩相關：當樣本設定標籤設定完成後，此處可以設定參數間的相關係數。
- 輸出設定：此處有各種機率展示形態及分析選項可供輸出使用。還可以決定運算成果之儲存項目(各成分劑量、風險及濃度)，以及輸入/輸出之相關及迴歸係數。
- 逐步分析：由此可以按照時序進行分析，並逐步查看每一步驟之分析結果及機率圖表。
- 運算結果迴歸：由此可以選定特定輸入/輸出參數，並查看其相關迴歸係數。

#### (A) 參數分佈

所有作為不確定度/機率分析之參數，皆列於本標籤左側之變數敘述欄位，點選任一參數可查看其統計分佈之設定（如

圖12）。任何新增至不確定度/機率分析之參數，將會出現在本標籤左側變數敘述欄位列表之下方。參數之不確定度或機率分佈本標籤右側。設定介紹如下：

- (I) 從下拉選單選擇分佈類型。
- (II) 根據分佈類型，輸入數據以定義參數範圍。
- (III) 點擊「更新參數數據及分佈」或「上/下一個參數」，以儲存設定內容。
- (IV) 如果不想儲存已經更改之設定，請點選「回復參數數據及分佈」或直接點選左側欄位任一其他參數。

點選本標籤之「Help」鍵，將根據選定之統計分佈方式，顯示數據分佈協助表單，並於表單右方區塊(咖啡色區塊)，列出機率密度函數、分佈數據定義。輸入之數據必須滿足表單下方條件內容(灰色區塊)。表單左方顯示機率密度函數曲線，其中輸入值(垂直線條)需包含在曲線內，如果輸入之參數不包含在曲線內(紅色線)，則須重新改變參數數值。

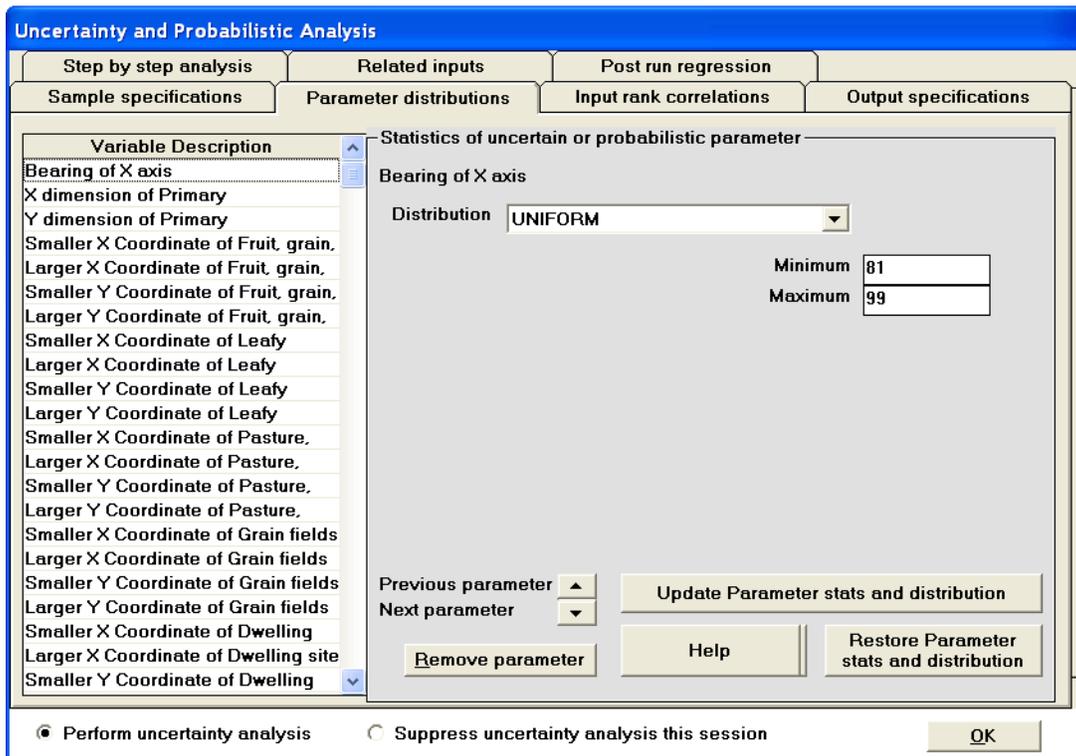


圖 12 RESRAD-OFFSITE 不確定度/機率分析之參數列於標籤左側變數敘述欄位示意圖

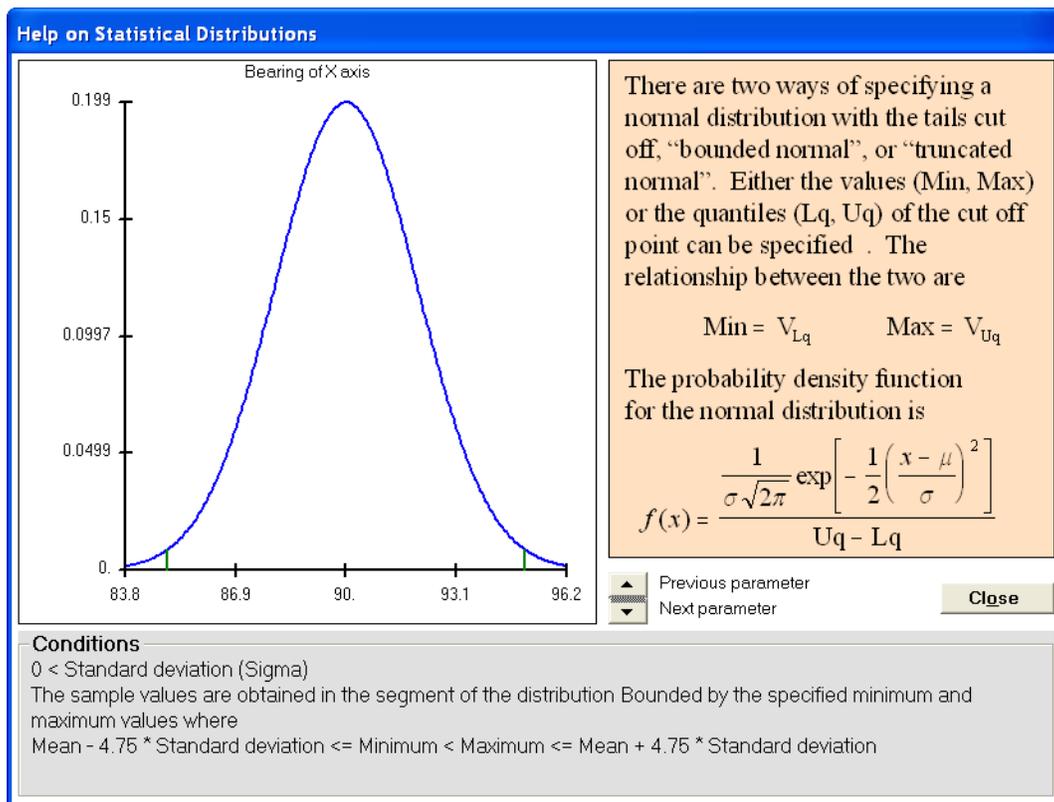


圖 13 RESRAD-OFFSITE 不確定度/機率分析視窗點選「Help」鍵顯示統計分佈協助表單

## (B) 樣本設定

根據上一個標籤選定不確定度/機率分析參數所設定的統計分佈方式，本標籤該統計分佈的樣本選取方式，並依照不同輸入樣本產生設定值。右邊區塊列出本標籤每個項目之介紹及功能（如圖14）。設定介紹如下：

The screenshot shows the 'Uncertainty and Probabilistic Analysis' dialog box. It has a blue title bar and a yellow background. The dialog is organized into several sections:

- Step by step analysis**:
  - Sample specifications**:
    - Random Seed: 1000
    - Number of Observations: 500
    - Number of Repetitions: 3
  - Sampling Technique**:
    - Latin Hypercube
    - Monte Carlo
  - Grouping of observations**:
    - Correlated or Uncorrelated
    - Random
- Information about current selection**:
  - Grouping of observations:=
  - Correlated or uncorrelated grouping: The samples of each variable are ordered and grouped together so that:
    - 1) the correlations between the variables for which correlations have been specified are as close as possible to the specified values.
    - 2) the correlation between the variables that are not specified to be correlated will be as close to zero as possible.
  - Random grouping: The samples of each variable are grouped together at random. It is possible that some of the variables will be correlated just by chance, especially if the number of observations is not much greater than the number of variables.

At the bottom, there are two radio buttons:  Perform uncertainty analysis and  Suppress uncertainty analysis this session. An 'OK' button is located in the bottom right corner.

圖 14 RESRAD-OFFSITE 不確定度/機率分析設定所選參數統計分佈的樣本選取方式

- (I) 觀察數目：根據前述參數的統計分佈方式，此為樣本數目。如果參數間有相關性或必須產生回歸統計，則觀察數目必須大於輸入參數數目。觀察數目越高，機率推估準確性也越高。
- (II) 樣本選取：程式提供兩個採樣方式：Latin hypercube sampling (LHS)、Monte Carlo。使用LHS，將分佈數量平均區分成觀察數目，再從機率密度函數之各區間隨機選取樣本；其特性為不論採樣數多小，都能確保採樣樣品涵蓋全部分佈範圍。使用Monte Carlo，將從分佈數量中，以機率密度函數隨機選取樣本；不同於LHS，當Monte Carlo採樣數較小，採樣樣品無法代表整體分佈範圍。
- (III) 隨機種子：程式使用LHS、Monte Carlo兩種方法，根據機率密度函數，利用亂數產生器隨機選取樣本。亂數產生器根據隨機種子製造數字，每增加一個數字就增

加更多隨機種子。如果初始隨機種子相同，則後續隨機產生的數列也會相同，因此如果使用者在不同電腦模擬，也會產生相同的分析。

(IV) 觀察群組：當輸入參數獲得足夠的樣本數，程式將會產生輸入機率集合。每個輸入集合的元素都涵蓋每個輸入參數的樣本。程式提供兩種方法將輸入參數樣本與輸入集合結合：(1)隨機群組、(2)相關或不相關群組。如果設定時，參數間需要存在相關性，或不需要存在相關性(零相關)，則可選擇第二個選項。

(V) 重覆數目：為了量測機率預測之準確性，此為分析重複次數。提高觀察數目可以提高分析準確性，但若需評估分析準確性，就需要增加分析次數；模擬結果越相近，代表準確性越高。

### (C) 輸入秩相關標籤

當使用者在樣本設定標籤中，於觀察群組選擇「Correlated or Uncorrelated」相關/不相關群組，才可以開啟本標籤設定。相關性可於輸入秩設定，不可於原始輸入設定。使用者可以在右側兩個下拉選單欄輸入兩個相關的參數，而秩相關係數可在下方及左側欄位修改。(如圖15)

The screenshot shows the 'Uncertainty and Probabilistic Analysis' software interface. The 'Input rank correlations' tab is active. It features a table with columns for 'Variable 1', 'Variable 2', and 'RCC'. Below the table, there are two dropdown menus for 'Variable 1' (set to 'ALPHALOSW') and 'Variable 2' (set to 'ALPHATW'). The descriptions for these variables are 'Longitudinal Dispersivity of saturated zone to surface waterbody' and 'Horizontal lateral Dispersivity of saturated zone to well' respectively. A text box for 'Rank Correlation Coefficient' is present, along with 'Update Correlation table' and 'Remove correlation' buttons. At the bottom, there are radio buttons for 'Perform uncertainty analysis' (selected) and 'Suppress uncertainty analysis this session', and an 'OK' button.

Variable 1	Variable 2	RCC

Rank Correlations

Variable 1: ALPHALOSW  
Longitudinal Dispersivity of saturated zone to surface waterbody

Variable 2: ALPHATW  
Horizontal lateral Dispersivity of saturated zone to well

Rank Correlation Coefficient: [ ]

[ Update Correlation table ]  
[ Remove correlation ]

Perform uncertainty analysis     Suppress uncertainty analysis this session    [ OK ]

圖 15 RESRAD-OFFSITE 不確定度/機率分析樣本觀察群組選擇「Correlated or Uncorrelated」之輸入秩相關性設定

當點擊右下方「Update Correlation table」更新秩相關表，可儲存左方欄位變數資料。使用者如欲刪除左方欄位，只須先點擊該欄位後，再點擊右下方「Remove correlation」按鍵即可。使用者也可直接點擊相關係數欄位編輯秩相關係數之數值，數值編輯後須點擊「更新秩相關表」才算完成編輯。兩個不相關的變數(其相關係數為零)不需在此進行設定，因為所有不在此欄位之參數，已經預設其相關性為零。

(D) 輸出設定

本表單左上方可選擇五種劑量與風險之機率結果，其中四個選項已經啟用(如圖16)。使用者亦可選擇「圖表時間點之劑量、風險」，來輸出各時點之劑量、風險與濃度內容；但是使用者若是點選此選項，程式運算時間也將增加。點擊右側欄位的查核欄，可以選擇各式輸出表單。左下方之欄位可用於選擇輸入/輸出之相關及迴歸係數計算方式；又或者，使用者可以不用先設定此區域，而直接執行程式運算時，程式將一併計算選定之輸入/輸出相關及迴歸係數（詳見後面(F)運算結果迴歸）。

**Uncertainty and Probabilistic Analysis**

Step by step analysis      Related inputs      Post run regression

Sample specifications      Parameter distributions      Input rank correlations      Output specifications

PRE RESRAD run specifications

Probabilistic statistical analysis is available on the following outputs

- Peak total dose and risk (summed over nuclides and pathways)
- Peak dose and risk from each pathway (summed over all nuclides)
- Peak dose and risk from each nuclide in the source (summed over all pathways)
- Dose and risk at graphic time points
- Dose from each nuclide and pathway at each of the user specified times

Output-Input correlation and regression options

Check the coefficients to be computed

	PCC	SRC	PRCC	SRRC
Peak total dose	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Peak pathway dose	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Peak nuclide dose	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Probabilistic outputs available for current selection

Temporal plots of chosen percentiles, mean and median of Total Dose will be available irrespective of whether this option is set or not.

If this option is checked, the following probabilistic analysis option will be available for component Doses, component Risks and Media concentrations:=

1. Temporal plots of chosen percentiles, mean and median.
2. Statistics (mean, median, minimum, maximum, and percentiles) at the graphical time points.

The component doses (or risks) are the doses (or risks) from the individual pathways due to the individual nuclides.

Perform uncertainty analysis       Suppress uncertainty analysis this session      **OK**

圖 16 RESRAD-OFFSITE 輻射劑量與風險評估整合分析表單輸入界面

(E) 逐步分析

本標籤主要含有三大功能：(1)逐步進行分析、(2)做為起始點檢視機率圖、(3)檢視前次運算之圖表。本標籤之全部按鍵可在不同時機點啟動使用。

本標籤之「Generate input samples(LHS)」產生輸入樣本(LHS)指令是唯一可以在新開啟的機率輸入檔案中，執行的指令；使用者可以點擊此按鍵執行機率樣本產生程式(LHS)。當樣本產生之後，上排右側的三個指令與下方「Generate output samples(RESRAD-O)」指令即可使用。上排右側的三個指令可用於查看相關圖表，並檢視輸入分佈數據。從這些圖表可以確認樣本是否按照分佈狀況呈現，並展示出特定參數之相關性。(如圖17)

點擊「Generate output samples(RESRAD-O)」產生輸出樣本(RESRAD-O)以執行程式運算，機率分析所需之時間與檔案大小有關，簡單的案例分析可能耗時數分鐘，而完整的分析可能需耗時數小時。使用者可以從運算時間回饋表單得知運算時間推估。當程式完成運算結果後，使用者即可點擊剩餘其他使用指令。(如圖17)

第三排右方之三個指令可用於檢視輸出之機率圖表；第四排之指令可以產生時序圖表，其中左方指令可產生總劑量之時序圖表及數據(程式尚未建構個別成份之劑量、風險及濃度輸出)，而點選右方指令可以產生確定性圖表檔案(需在圖表檢視器查看)。在最下排，點擊「Generate output-input correlation and regression coefficients」產生輸入/輸出相關及迴歸係數可進入運算結果迴歸標籤。(如圖17)

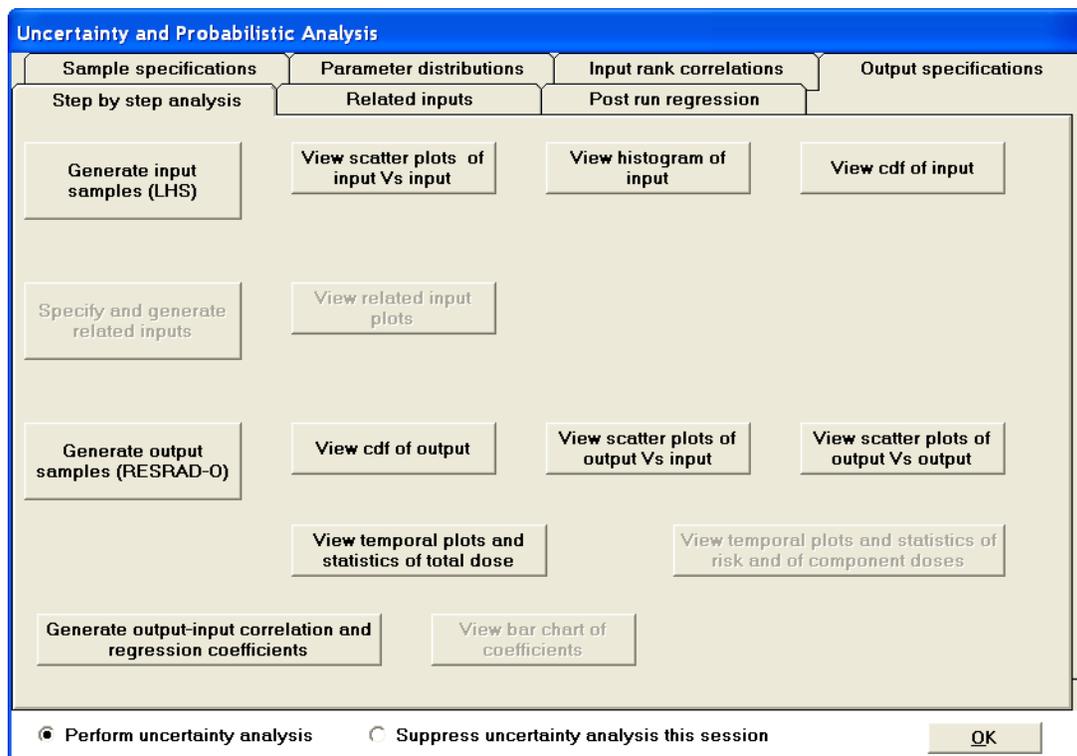


圖 17 RESRAD-OFFSITE 不確定度/機率分析設定逐步進行分析、檢視機率圖界面

使用者如欲檢視前次運算之圖表，可以由此標籤打開相關檔案查看。當使用者開啟一個舊檔案，程式將檢查該檔案是否曾經執行過。如果該檔案曾經執行過，且相關機率結果仍然存在，則使用者可以直接點擊標籤右下方之「Pre Existing Output」預先存在輸出按鍵，程式將從記憶中讀取前次運算之機率輸入/輸出結果(如圖18)；由於執行此步驟可能需要一些時間讀取，所以程式將跳出「請稍待」，請使用者耐心等待。接著，使用者即可使用七個圖表指令：三個輸入圖(scatter plots of input vs. input, histogram of input, and cumulative distribution function [cdf] of input)(輸入值與輸入散佈圖、輸入直方圖、輸入之累積分佈函數(cdf))、三個輸出圖(cdf of output, scatter plots of output vs. input, and scatter plots of output vs. output)(輸出之累積分佈函數、輸入值與輸出散佈圖、輸出值與輸出散佈圖)以及總劑量之時序圖表。由此也可進行輸入/輸出迴歸分析。

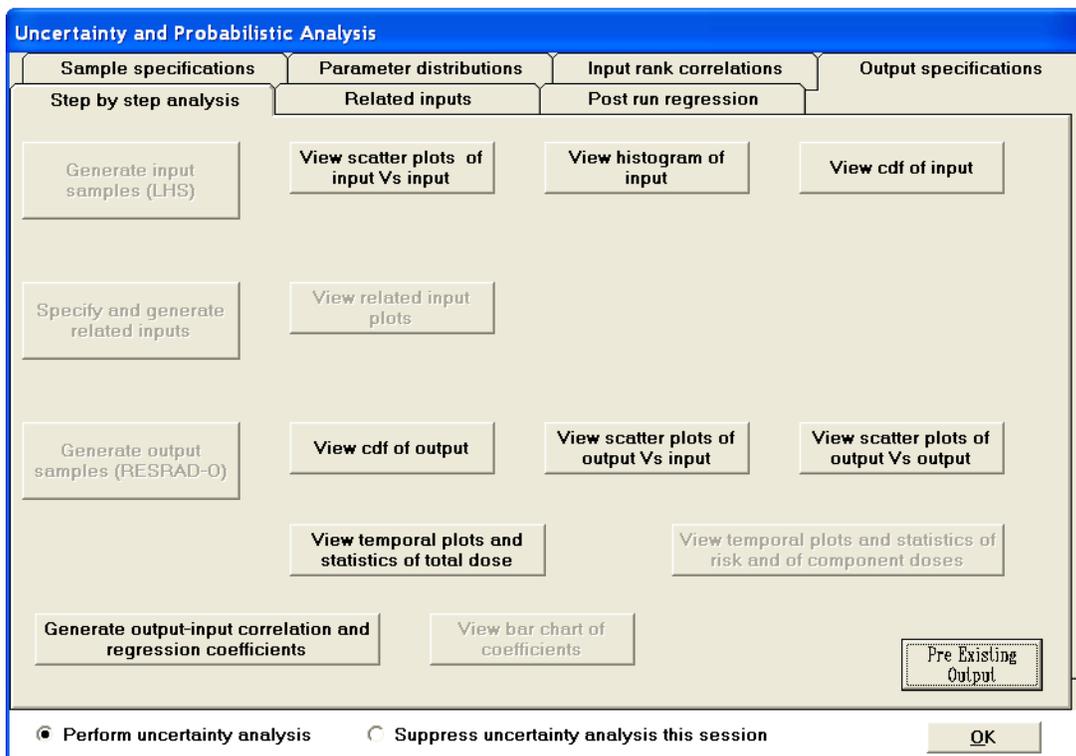


圖 18 RESRAD-OFFSITE 不確定度/機率分析設定檢視前次運算之機率分布函數輸入/輸出視窗界面

輸出之劑量、風險百分位數可以從輸出之累積分佈函數取得。使用者可以在表單右側灰色欄位輸入百分位，以取得對應之數值、平均值、標準差以及各別之誤差範圍(誤差範圍為「±」後方數據)，但是如果誤差範圍值遠小於百分位數、平均值及標準差，誤差範圍將不會列出。如欲知道其他百分比之百分位數，使用者可以直接點擊左側圖表之對應位置，圖表就會在滑鼠游標處出現黃色數據欄，顯示數值；當移動滑鼠游標，黃色數據

欄就會消失。點選右邊上一步/下一步箭頭指令，可以切換輸出參數。使用者可以減少重複次數，並按下「展示圖形鍵」，讓圖表顯示更清楚。使用者亦可從表單邊緣拖曳視窗，改變其展示大小。(如圖19)

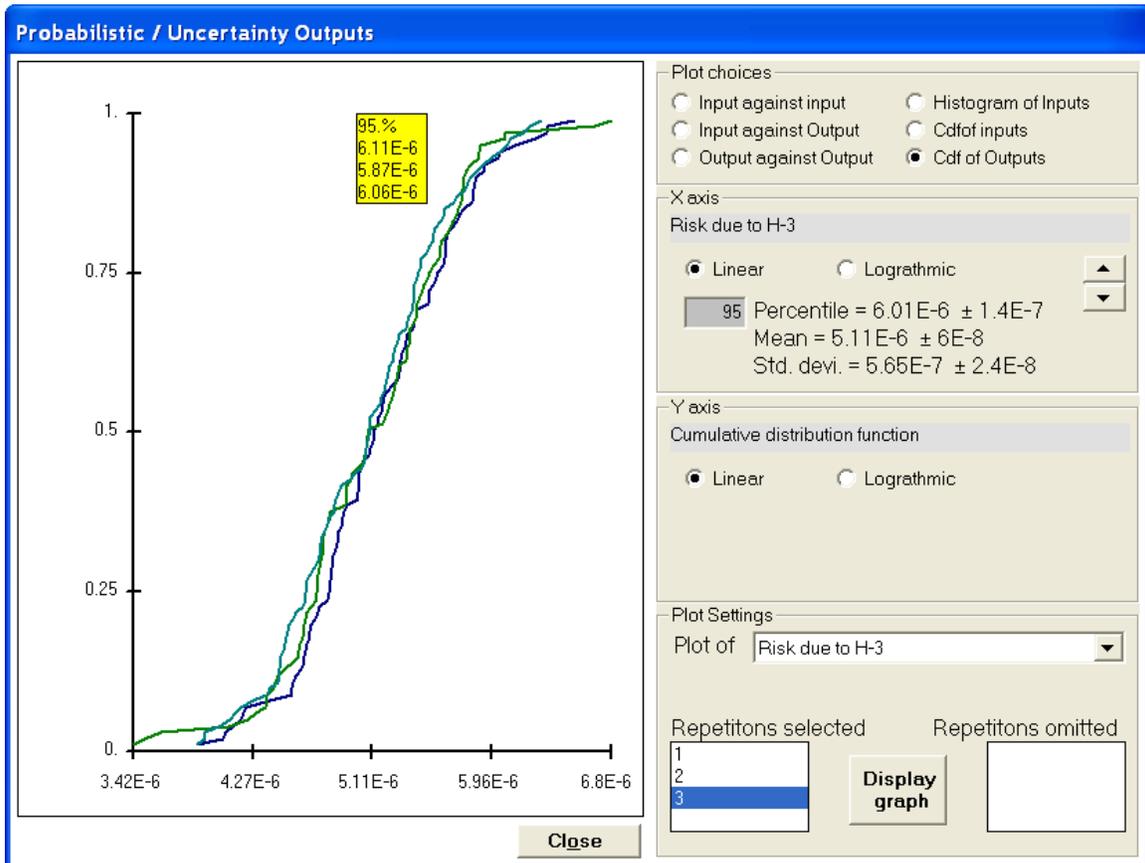


圖 19 RESRAD-OFFSITE 不確定度/機率分析累積分佈函數取得劑量、風險百分位數

輸入值與輸出散佈圖可用於鑑別輸入值對輸出之影響，尤其是只有少數重要輸入參數時。然而，從本圖例可知，如果還有許多影響性較大的參數存在時，使用者將不容易找出關鍵參數。此外，使用者也可用迴歸係數挑選出重要的參數。(如圖20)

輸出值與輸出散佈圖(本圖例)可以有效判定，途徑與核種對於劑量與風險之變異有直接的影響。輸出值與輸出散佈圖也可以找出一般參數對重要途徑之影響。(如圖21)

時序圖表可以展示出總劑量(核種與途徑之劑量總和)之平均值、眾數以及特定百分位數隨時間變化之結果(如圖22)。由圖22可知所有重複數據可以展示在同一張圖表。為了讓圖表展示清楚，使用者亦可選擇單一樣本分佈。其中黃色欄位顯示出游標所在點位之圖表坐標。使用可以藉由滑鼠點擊圖表，從右下方欄位取得相對應年分之圖表資料。

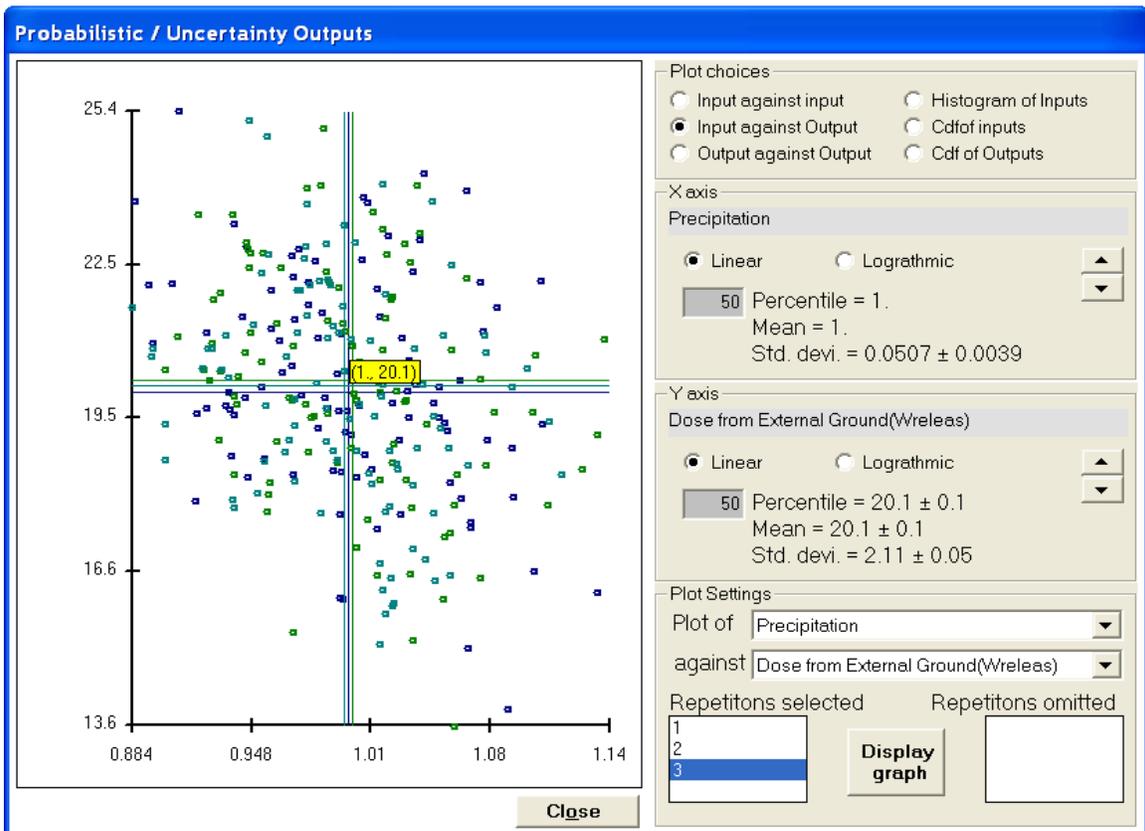


圖 20 RESRAD-OFFSITE 不確定度/機率分析輸入值與輸出散佈圖鑑別輸入值對輸出之影響

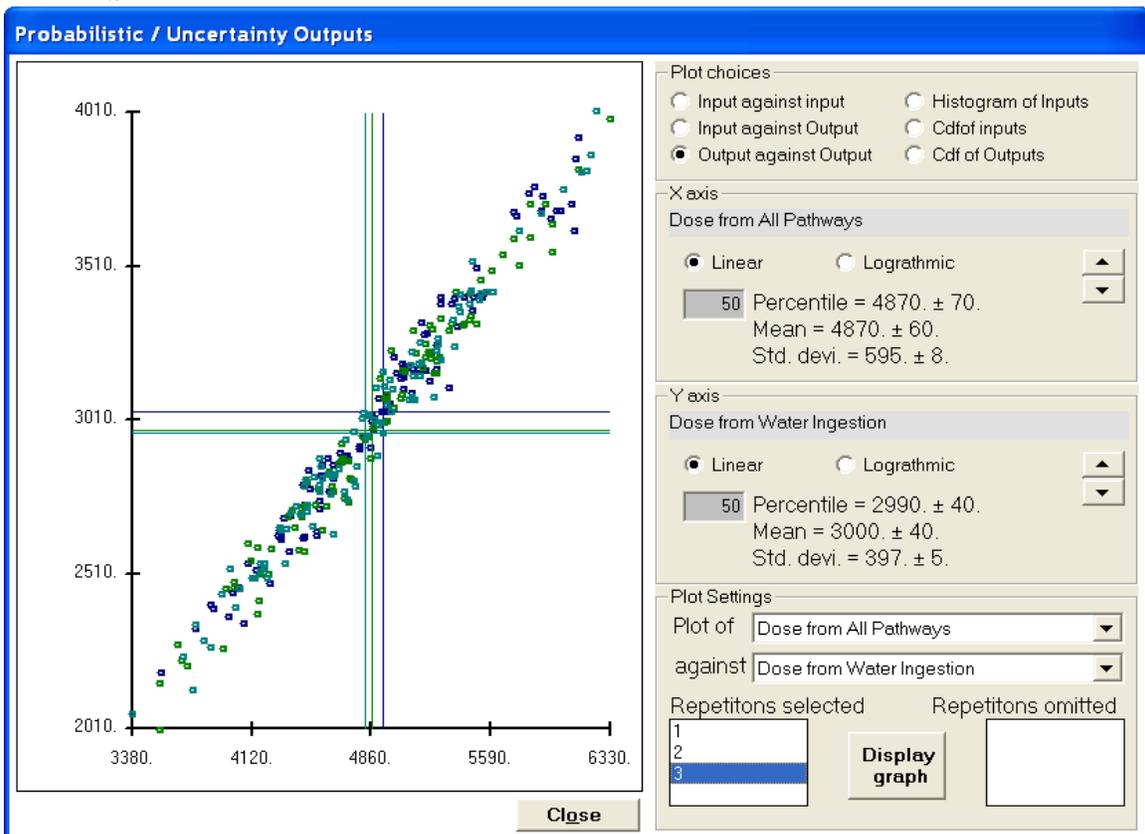


圖 21 RESRAD-OFFSITE 不確定度/機率分析途徑與核種對於劑量與風險變異之輸出值與輸出散佈圖

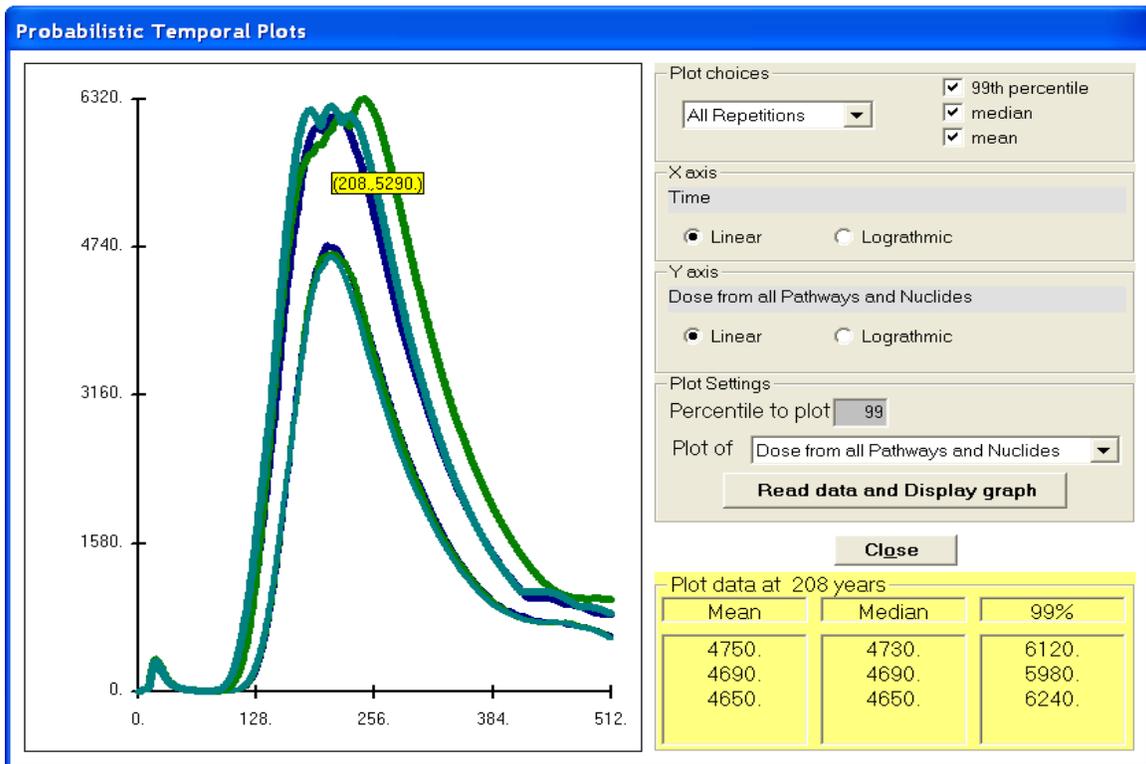


圖 22 RESRAD-OFFSITE 時序圖表展示出總劑量(核種與途徑之劑量總和)

(F) 運算結果迴歸

執行完RESRAD-OFFSITE運算後，使用者可在此針對選定之輸入及輸出參數，進行迴歸分析。使用者只需勾選欲分析之輸出參數(劑量、風險、途徑)，並點擊「決定相關及迴歸係數」，其結果將附加在劑量與風險機率報告中。(如圖23)

**Output-input correlation and regression options**  
 Check the correlation coefficients and regression coefficients that you want the code to compute, then press the "Determine correlation and regression coefficients" command button

Dose     Risk    PCC   SRC   PRCC   SRRC

Peak Total dose and risk            

Peak Nuclide dose and risk            

Peak Pathway dose and risk

Pathway	Sub pathway →	Water borne	Air borne and direct
External radiation from ground		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Inhalation of particulates		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Ingestion of Fish		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Inhalation of Rn and progeny		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Ingestion of Vegetables		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Ingestion of Meat		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Ingestion of Milk		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Ingestion of Soil		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Ingestion of Water		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

**Determine correlation and regression coefficients**

Partial Correlation Coefficient (PCC)    Standardized Partial Regression Coefficient (SRC)  
 Partial Rank Correlation Coefficient (PRCC)    Standardized Partial Rank Regression Coefficient (SRRC)

Perform uncertainty analysis     Suppress uncertainty analysis this session    **OK**

圖 23 輻射劑量與風險評估整合輸出參數(劑量、風險、途徑)界面

## 2. 致癌風險報告

RESRAD-OFFSITE 有一功能可針對核種曝露提出該致癌風險報告，其報告檔案之副檔名為(.rsk)，其內容如下：

- A. 致癌風險斜率因子
- B. 過量致癌風險：初始核種、核種曝露、氬與短週期之子核種

RESRAD-OFFSITE 模式「致癌風險之斜率因子程式庫」可從 RESRAD-OFFSITE 劑量轉換因子編輯器中設定。斜率因子程式庫是一個獨立的應用程式，通用於所有的 RESRAD(ONSITE 及 OFFSITE)程式。斜率因子程式庫儲存於資料庫中。下拉選單中，所有的斜率因子程式庫包含：FGR13 morbidity (Eckerman et al. 1999)、HEAST morbidity libraries (EPA 2001)或使用自創的程式庫。(單位：Risk/pCi 或 Risk/pBq)(如圖 24)

The image shows a screenshot of the EPA website. The main heading is "輻射劑量與風險評估技術" (Radiation Dose and Risk Assessment Technology). Below it, there is a section titled "Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure to Radionuclides" which is a Federal Guidance Report No. 13. To the right, there is a green box with the text "風險評估之斜率因子程式庫" (Risk Assessment Slope Factor Libraries) and a list of libraries: "❖ FGR13 morbidity (Eckerman et al. 1999) · HEAST morbidity libraries (EPA 2001)". Below this, there is a screenshot of the EPA website's "Radionuclide Carcinogenicity Slope Factors: HEAST" page, which provides detailed information about the HEAST tables and includes a "Download Area" and "User's Guide".

圖 24 RESRAD-OFFSITE 風險評估之斜率因子程式庫來源介紹示意圖

表 10 RESRAD-OFFSITE 程式核種風險評估之斜率因子

核種	外在曝露 (Risk/yr)/(pCi/g)	吸入 (Risk/pCi)	食物攝食 (Risk/pCi)	水攝食 (Risk/pCi)	土壤攝食 (Risk/pCi)
Ac-227+D	1.47E-06	2.13E-07	6.51E-10	4.85E-10	6.51E-10
Ag-108m+D	7.19E-06	1.04E-10	1.12E-11	8.14E-12	1.12E-11
Ag-110m+D	1.30E-05	4.51E-11	1.37E-11	9.88E-12	1.37E-11
Al-26	1.33E-05	2.90E-10	2.49E-11	1.73E-11	2.49E-11
Am-241	2.76E-08	3.77E-08	1.34E-10	1.04E-10	1.34E-10
Am-243+D	6.35E-07	3.70E-08	1.41E-10	1.08E-10	1.41E-10
Au-195	1.38E-07	6.48E-12	2.19E-12	1.50E-12	2.19E-12
Ba-133	1.44E-06	3.25E-11	9.44E-12	6.81E-12	9.44E-12
Be-7	2.13E-07	2.13E-13	1.20E-13	8.66E-14	1.20E-13
Bi-207	7.08E-06	1.10E-10	8.14E-12	5.66E-12	8.14E-12
C-14	7.83E-12	1.69E-11	2.00E-12	1.55E-12	2.00E-12
Ca-41	0.00E+00	5.07E-13	4.37E-13	3.53E-13	4.37E-13
Ca-45	3.96E-11	1.28E-11	3.37E-12	2.47E-12	3.37E-12
Cd-109	8.73E-09	2.19E-11	6.70E-12	5.00E-12	6.70E-12
Ce-141	2.27E-07	1.35E-11	6.77E-12	4.63E-12	6.77E-12
Ce-144+D	2.41E-07	1.80E-10	5.19E-11	3.53E-11	5.19E-11
Cf-252	1.80E-11	2.60E-08	1.80E-10	1.80E-10	1.80E-10
Cl-36	1.74E-09	1.01E-10	4.44E-12	3.30E-12	4.44E-12
Cm-243	4.19E-07	3.67E-08	1.23E-10	9.47E-11	1.23E-10
Cm-244	4.85E-11	3.56E-08	1.08E-10	8.36E-11	1.08E-10
Cm-245	2.38E-07	3.81E-08	1.35E-10	1.04E-10	1.35E-10
Cm-246	4.57E-11	3.77E-08	1.31E-10	1.02E-10	1.31E-10
Cm-247+D	1.36E-06	3.49E-08	1.30E-10	1.00E-10	1.30E-10
Cm-248	1.50E-11	1.50E-07	1.30E-09	1.30E-09	1.30E-09
Co-57	3.55E-07	3.74E-12	1.49E-12	1.04E-12	1.49E-12
Co-60	1.24E-05	1.01E-10	2.23E-11	1.57E-11	2.23E-11
Cr-51	1.27E-07	1.67E-13	2.66E-13	1.85E-13	2.66E-13
Cs-134	7.10E-06	6.99E-11	5.14E-11	4.22E-11	5.14E-11
Cs-135	2.36E-11	2.49E-11	5.88E-12	4.74E-12	5.88E-12
Cs-137+D	2.55E-06	1.12E-10	3.74E-11	3.04E-11	3.74E-11
Eu-152	5.30E-06	1.90E-10	8.70E-12	6.07E-12	8.70E-12
Eu-154	5.83E-06	2.11E-10	1.49E-11	1.03E-11	1.49E-11
Eu-155	1.24E-07	1.91E-11	2.77E-12	1.90E-12	2.77E-12
Fe-55	0.00E+00	1.48E-12	1.16E-12	8.62E-13	1.16E-12
Fe-59	5.83E-06	1.47E-11	1.11E-11	7.88E-12	1.11E-11
Gd-152	0.00E+00	9.10E-09	3.85E-11	2.97E-11	3.85E-11
Gd-153	1.62E-07	8.58E-12	2.22E-12	1.52E-12	2.22E-12
Ge-68+D	4.17E-06	1.08E-10	1.03E-11	7.24E-12	1.03E-11
H-3	0.00E+00	8.51E-13	1.44E-13	1.12E-13	1.44E-13
I-125	7.24E-09	2.77E-11	6.29E-11	2.54E-11	6.29E-11
I-129 (vapor)	6.09E-09	1.60E-10	3.22E-10	1.48E-10	3.22E-10
I-131	1.59E-06	5.03E-11	1.34E-10	4.55E-11	1.34E-10
In-111	1.42E-06	8.58E-13	1.85E-12	1.29E-12	1.85E-12
Ir-192	3.40E-06	2.41E-11	1.07E-11	7.36E-12	1.07E-11
K-40	7.97E-07	2.22E-10	3.43E-11	2.47E-11	3.43E-11

表 11 RESRAD-OFFSITE 程式核種風險評估之斜率因子 (表 10 續)

核種	外在曝露 (Risk/yr)/(pCi/g)	吸入 (Risk/pCi)	食物攝食 (Risk/pCi)	水攝食 (Risk/pCi)	土壤攝食 (Risk/pCi)
La-138	6.07E-06	3.05E-10	4.96E-12	3.53E-12	4.96E-12
Mn-54	3.89E-06	1.21E-11	3.11E-12	2.28E-12	3.11E-12
Na-22	1.03E-05	9.73E-11	1.26E-11	9.62E-12	1.26E-11
Nb-93m	3.83E-11	5.66E-12	1.17E-12	8.03E-13	1.17E-12
Nb-94	7.29E-06	1.35E-10	1.11E-11	7.77E-12	1.11E-11
Nb-95	3.53E-06	6.44E-12	3.50E-12	2.45E-12	3.50E-12
Ni-59	0.00E+00	1.27E-12	3.89E-13	2.74E-13	3.89E-13
Ni-63	0.00E+00	3.74E-12	9.51E-13	6.70E-13	9.51E-13
Np-237+D	7.96E-07	2.87E-08	9.10E-11	6.73E-11	9.10E-11
Pa-231	1.39E-07	7.62E-08	2.26E-10	1.73E-10	2.26E-10
Pb-210+D	4.17E-09	2.80E-08	1.19E-09	8.88E-10	1.19E-09
Pm-147	3.21E-11	1.61E-11	2.48E-12	1.69E-12	2.48E-12
Po-210	3.95E-11	1.45E-08	2.25E-09	1.77E-09	2.25E-09
Pu-238	7.22E-11	5.22E-08	1.69E-10	1.31E-10	1.69E-10
Pu-239	2.00E-10	5.51E-08	1.74E-10	1.35E-10	1.74E-10
Pu-240	6.98E-11	5.55E-08	1.74E-10	1.35E-10	1.74E-10
Pu-241+D	1.33E-11	8.66E-10	2.28E-12	1.77E-12	2.28E-12
Pu-242	6.25E-11	5.25E-08	1.65E-10	1.28E-10	1.65E-10
Pu-244	2.70E-08	2.70E-08	3.20E-10	3.20E-10	3.20E-10
Ra-226+D	8.49E-06	2.82E-08	5.14E-10	3.85E-10	5.14E-10
Ra-228+D	4.53E-06	4.37E-08	1.43E-09	1.04E-09	1.43E-09
Ru-106+D	9.66E-07	2.23E-10	6.11E-11	4.22E-11	6.11E-11
S-35	8.77E-12	6.55E-12	3.70E-12	2.72E-12	3.70E-12
Sb-124	8.89E-06	3.20E-11	1.85E-11	1.29E-11	1.85E-11
Sb-125	1.81E-06	4.00E-11	6.14E-12	4.37E-12	6.14E-12
Sb-126	1.28E-05	1.29E-11	1.59E-11	1.11E-11	1.59E-11
Sb-126m	6.94E-06	3.32E-14	9.21E-14	6.66E-14	9.21E-14
Sc-46	9.63E-06	2.47E-11	8.88E-12	6.22E-12	8.88E-12
Se-75	1.45E-06	5.00E-12	1.08E-11	8.14E-12	1.08E-11
Se-79	1.10E-11	1.99E-11	9.69E-12	7.29E-12	9.69E-12
Sm-147	0.00E+00	1.26E-08	4.77E-11	3.74E-11	4.77E-11
Sm-151	3.60E-13	9.18E-12	8.07E-13	5.55E-13	8.07E-13
Sm-153	1.06E-07	3.19E-12	7.10E-12	4.85E-12	7.10E-12
Sn-113	2.02E-08	1.45E-11	6.33E-12	4.33E-12	6.33E-12
Sn-126	8.83E-06	4.13E-11	3.92E-11	2.72E-11	3.92E-11
Sr-85	2.20E-06	3.23E-12	3.11E-12	2.26E-12	3.11E-12
Sr-89	7.19E-09	3.02E-11	1.84E-11	1.28E-11	1.84E-11
Sr-90+D	1.96E-08	4.34E-10	9.55E-11	7.40E-11	9.55E-11
Ta-182	6.04E-06	3.74E-11	1.15E-11	7.96E-12	1.15E-11
Tc-99	8.14E-11	3.81E-11	4.00E-12	2.75E-12	4.00E-12
Tc-99m	3.93E-07	6.07E-14	1.14E-13	7.96E-14	1.14E-13
Te-125m	6.98E-09	1.45E-11	4.70E-12	3.33E-12	4.70E-12
Th-228+D	7.79E-06	1.44E-07	4.22E-10	3.00E-10	4.22E-10
Th-229+D	1.17E-06	2.30E-07	7.14E-10	5.29E-10	7.14E-10
Th-230	8.18E-10	3.40E-08	1.19E-10	9.10E-11	1.19E-10
Th-232	3.42E-10	4.33E-08	1.33E-10	1.01E-10	1.33E-10

表 12 RESRAD-OFFSITE 程式核種風險評估之斜率因子 (表 11 續)

核種	外在曝露 (Risk/yr)/(pCi/g)	吸入 (Risk/pCi)	食物攝食 (Risk/pCi)	水攝食 (Risk/pCi)	土壤攝食 (Risk/pCi)
Tl-201	1.88E-07	6.85E-13	5.00E-13	3.61E-13	5.00E-13
Tl-202	1.83E-06	1.34E-12	2.01E-12	1.49E-12	2.01E-12
Tl-204	2.76E-09	6.07E-11	8.25E-12	5.85E-12	8.25E-12
U-232	5.98E-10	9.25E-08	3.85E-10	2.92E-10	3.85E-10
U-233	9.82E-10	2.83E-08	9.69E-11	7.18E-11	9.69E-11
U-234	2.52E-10	2.78E-08	9.55E-11	7.07E-11	9.55E-11
U-235+D	5.43E-07	2.51E-08	9.73E-11	7.18E-11	9.73E-11
U-236	1.25E-10	2.58E-08	9.03E-11	6.70E-11	9.03E-11
U-238+D	8.66E-08	2.37E-08	1.20E-10	8.73E-11	1.20E-10
Xe-131m	1.41E-08	0	0	0	0
Zn-65	2.81E-06	7.59E-12	1.54E-11	1.17E-11	1.54E-11
Zr-93	0.00E+00	1.52E-11	1.44E-12	1.11E-12	1.44E-12
Zr-95	3.40E-06	2.11E-11	6.59E-12	4.59E-12	6.59E-12

<sup>a</sup> Values for slope factors were taken from FGR-13 (Eckerman et al. 1999) except for Cf-252, Cm-248, and Pu-244. These radionuclide values were obtained from Yu et al. (2001).

## (二)SR-PSU 安全評估計畫之輻射劑量與風險評估

封閉後每年的輻射風險限值為  $10^{-6}$ ，大約等於自然存在之背景輻射的 1% (SSMFS 2008:37 法規限值)。有效劑量與風險的轉換因子為 0.073 /Sv，因此前述風險限值約等於  $1.4 \times 10^{-5}$  Sv/yr 的有限劑量。依照 SSM's General Guidance，其風險發生機率須於 10 萬年內不能超過法規限值。SR-PSU 安全評估計畫基本上可以將劑量評估結果的時間序列乘上各種處置設施演化的機率加權計算而得到風險隨時間的變化。圖 25 表示處置場系統輻射劑量風險評估時間尺度。在營運階段，處置場系統和內部元件的狀態描述係基於最初的參考設計。操作營運階段未包含在關閉後的安全評估，但是此階段需要評估其演化過程，以便瞭解處置場系統關閉和飽和之後的初始狀態描述。從處置場關閉到冰河週期狀態是基於初始狀態和參考演化的描述。在後冰河週期，為簡化描述、演化及模擬。對於生物圈人類接受者的劑量和風險，係藉由模擬計算得到核種洩漏所造成的劑量與風險。

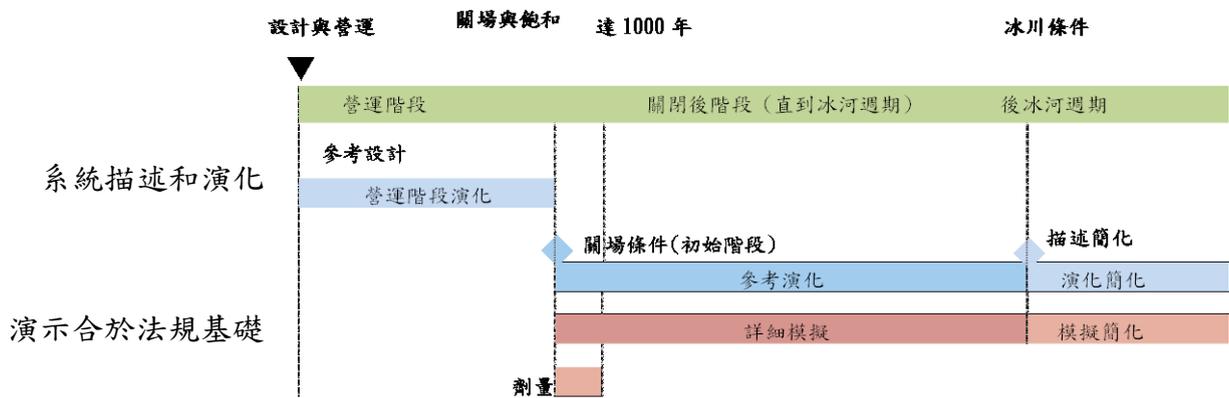


圖 25 處置場系統輻射劑量風險評估時間尺度

除了地震情節以外，對於低發生率情節，其發生風險的計算與主要情節相同，乘以情節的機率(如表 13 所示)，可得到情節的最終風險估計值。地震情節以較為保守的方式估算風險，由模式估算各個模擬時間的最大劑量值乘上發生地震事件綜合機率，將可以得到地震造成輻射劑量的風險。主要情節與不太可能發生的情節之總風險對應示意圖(如圖 26)，藉以評估不同情境風險，希望能獲得總輻射劑量的風險值。

總風險可以主要情節和這些不太可能發生的情節，由它們各自的機率加權的總和得到，如下式所示：

$$Risk_{Total} = Risk_{Main\_scenario} \left( 1 - \sum_{\substack{\text{less} \\ \text{probable} \\ \text{scenario}(i)}} P_i \right) + \sum_{\substack{\text{less} \\ \text{probable} \\ \text{scenario}(i)}} (P_i Risk_i) \quad (9)$$

另一方面侵入井、處置場下游井情節和主要情節不是相互排斥的，總風險計算假定一個用於主情節的機率，如下式

$$Risk_{Well} = Risk_{Main\_scenario} + \sum_{\substack{\text{Well} \\ \text{scenario}(i)}} (P_i Risk_i) \quad (10)$$

主要情節與低發生率情節對人體接受者年最大輻射劑量風險列於

表 14 及圖 27，發現最大輻射劑量風險值  $4.0 \times 10^{-7}$  發生於主要情節，第二大的輻射劑量風險值  $2.6 \times 10^{-7}$  發生於 IBLA 的入侵井情節。

表 13 低發生率情節和情節組合的機率

情節	機率 (P)
高庫存 (High inventory)	< 0.05
基岩流體高速流動(High flow in the bedrock)	< 0.1
混凝土加速退化(Accelerated concrete degradation)	< 0.1
膨潤土退化(Bentonite degradation)	< 0.1
地震(Earthquake)	$10^{-6}/\text{year}$
高濃度錯合劑(High concentrations of complexing agents)	< 0.1
處置場下游井(Wells downstream of the repository)	0.13
入侵井(Intrusion wells)	
筒倉(Silo)	$2 \cdot 10^{-4}$
SFR 1 每個岩窖(Each vault in SFR 1)	$8 \cdot 10^{-4}$
SFR 3 每個岩窖(Each vault in SFR 3)	$3 \cdot 10^{-4}$
<b>情節組合 1 (Scenario combination 1)</b>	< 0.1·0.1
情節組合 1 結合基岩流體高速流動與混凝土加速退化兩個情節	
<b>情節組合 2 (Scenario combination 2)</b>	< 0.1·0.1
情節組合 2 結合基岩流體高速流動與高濃度錯合劑兩個情節	

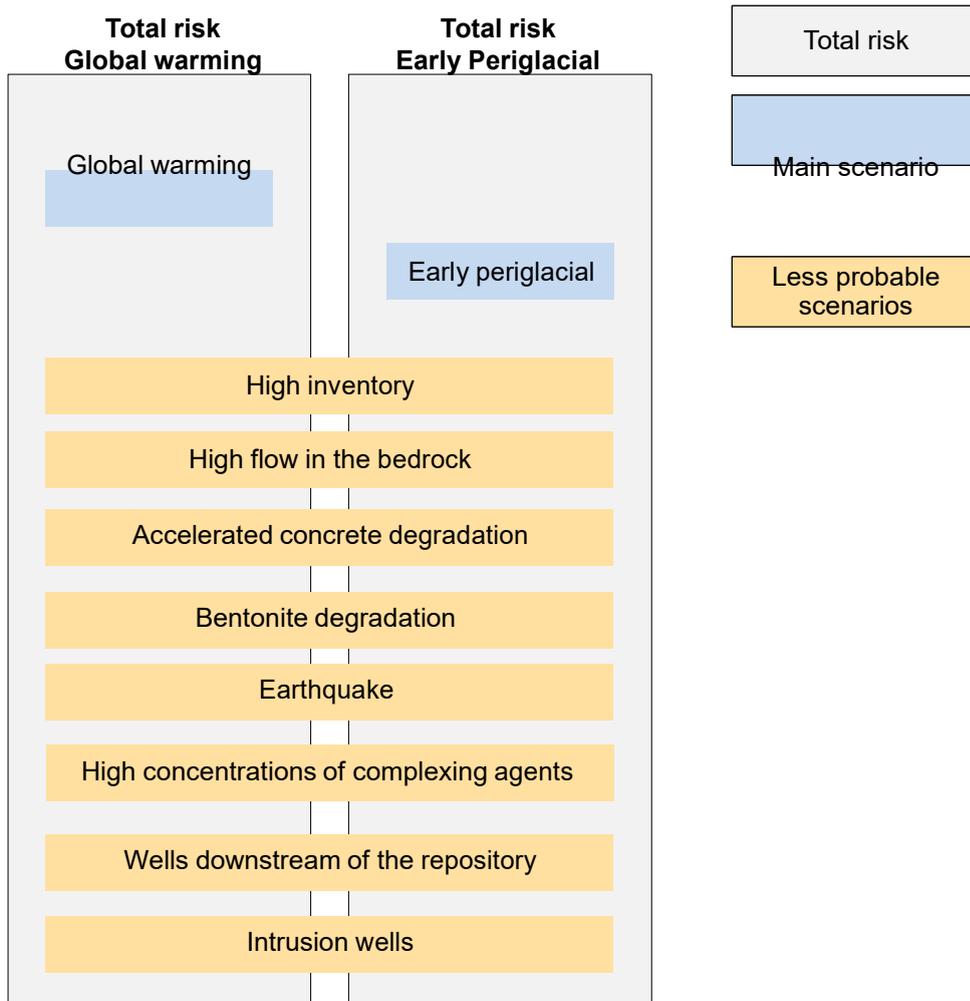


圖 26 主要情節與低發生率情節之總風險對應示意圖

表 14 主要情節與低發生率情節對人體接受者年最大輻射劑量風險

情節(Scenario)	最大輻射劑量風險	最大風險發生時間[AD]
<b>Main scenario</b>		
Global warming variant	$4.0 \cdot 10^{-7}$	6,200
Early periglacial variant	$9.0 \cdot 10^{-9}$	17,800
<b>Less probable scenarios</b>		
High inventory	$8.3 \cdot 10^{-8}$	7,200
High flow in the bedrock	$5.4 \cdot 10^{-8}$	5,900
Accelerated concrete degradation	$5.7 \cdot 10^{-8}$	5,250
Bentonite degradation	$4.2 \cdot 10^{-8}$	6,250
Earthquake	$2.5 \cdot 10^{-8}$	58,500
High concentrations of complexing agents	$7.6 \cdot 10^{-8}$	44,500
Wells downstream of the repository	$1.4 \cdot 10^{-7}$	5,000
Intrusion wells – Silo	$1.9 \cdot 10^{-8}$	4,400
Intrusion wells – 1BMA	$8.4 \cdot 10^{-8}$	4,100
Intrusion wells – 1BLA	$2.6 \cdot 10^{-7}$	3,050
Intrusion wells – 1BTF	$7.8 \cdot 10^{-9}$	3,250
Intrusion wells – 2BTF	$1.1 \cdot 10^{-8}$	3,850
Intrusion wells – BRT	$8.3 \cdot 10^{-10}$	3,250
Intrusion wells – 2BMA	$1.6 \cdot 10^{-9}$	86,000
Intrusion wells – 2BLA	$2.0 \cdot 10^{-8}$	3,450
Intrusion wells – 3BLA	$1.9 \cdot 10^{-8}$	3,400
Intrusion wells – 4BLA	$1.6 \cdot 10^{-8}$	3,550
Intrusion wells – 5BLA	$2.1 \cdot 10^{-8}$	3,550
<b>Scenario combinations</b>		
Scenario combination 1	$8.9 \cdot 10^{-9}$	5,700
Scenario combination 2	$9.7 \cdot 10^{-9}$	40,000

註：The year at which the maximum radiological risks are obtained is also indicated. The maximum radiological risk is given for both the *global warming variant* and the *early periglacial variant* of the main scenario.

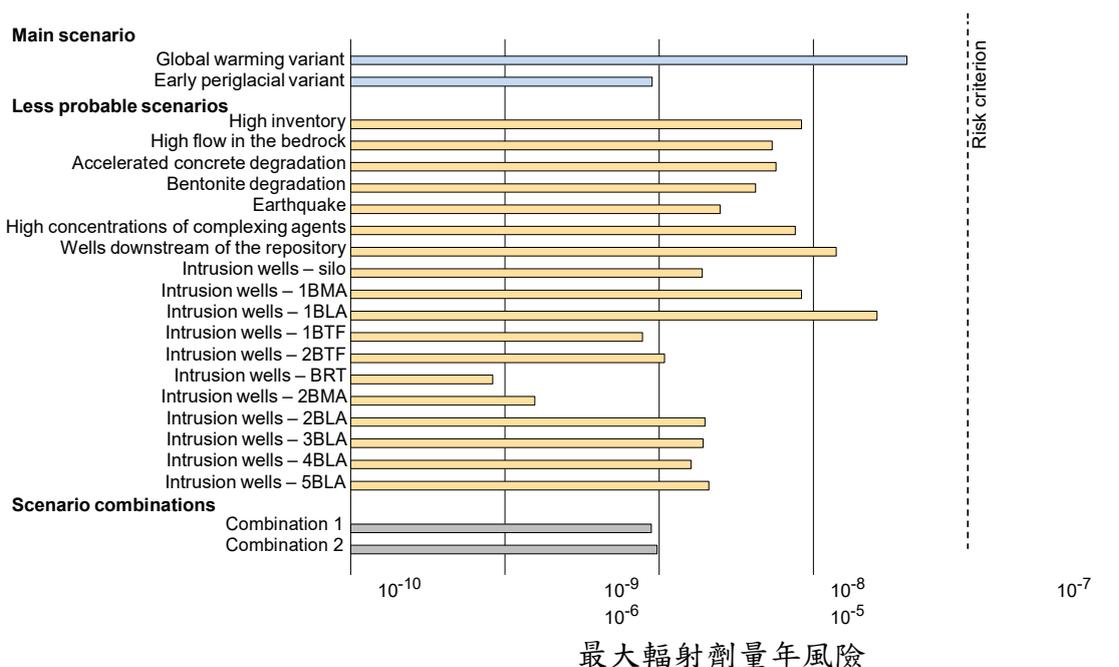


圖 27 比較主要情節與低發生率情節之最大輻射劑量年風險

#### 四、研擬低放射性廢棄物坑道處置之生物圈輻射劑量結合近場、遠場全系統安全評估架構

為研擬低放射性廢棄物坑道處置之生物圈輻射劑量結合近場、遠場全系統安全評估架構，本計畫結合「子項計畫三：低低放射性廢棄物處置設施安全評估審查規範精進之研究」低放射性廢棄物坑道處置近場與遠場整合安全分析，提出合適之近場、遠場整合安全分析架構應用於低放坑道處置之安全分析，將生物圈輻射劑量結合技術串接子計畫三近場解析解或 HYDROGEOCHEM 遠場模擬結果。並再研析 SR-PSU 安全評估計畫提出三個情節(包括：主要情節、低發生率情節與其他情節或剩餘情節)之處置場系統長期安全性評估。SR-PSU 安全評估計畫近場、遠場及生物圈輻射劑量全系統安全評估架構，以區塊模型(Compartment models)分類近場、遠場與生物圈分成三個系統，建置放射性核種於近場、遠場和生物圈遷移模型。該區塊模型建置放射性核種於近場、遠場和生物圈遷移模型類似。以下分別介紹之。

##### (一)近場及遠場模式結合 RESRAD-OFFSITE 模式建立輻射曝露情節與劑量評估程序

「子項計畫三：低放射性廢棄物處置設施安全評估審查規範精進之研究」，進行低放射性廢棄物坑道處置近場與遠場整合安全分析研擬，整合提出合適之近場遠場整合安全分析架構應用於低放坑道處置安全分析，近場採解析解(Chen et al., 2012)或銜接 HYDROGEOCHEM(Yeh, et al., 2004,2009)進行近場、遠場安全分析，其架構圖如圖 28。研擬低放射性廢棄物坑道處置之生物圈輻射劑量結合子項計畫三之近場、遠場成果，完成低放坑道處置全系統安全評估架構之研擬。

##### 1. 近場解析解核種釋出量連結 RESRAD-OFFSITE 遠場、生物圈輻射劑量評估

根據子計畫三指出，多核種衰變鏈解析解數學模式進行處置場功能安全評估時，可藉由數學模式模擬了解萬一發生洩漏，放射性核種在地下水系統中移動的情形，因此在模擬前須了解核種傳輸的現象，包含核種在地下水系統中隨時間增加所發生的衰變，以及母核種依序衰變成若干個子核種，所形成的衰變鏈，此外若廢料桶發生洩漏，污染物將隨地下水流移動的同時，在廢料桶內的核種也持續發生衰變，綜合源項衰變與移棲衰變效應在近場安全分析的應用。

如圖 28 近場及遠場模式結合生物圈 RESRAD-OFFSITE 模式建立輻射劑量評估程

序，依據近場解析核種釋出量，將可配合後面所述 AQFLUXIN.DAT 為核種及子核種傳輸至地下水之通量(如表 15)，利用通量交換藉以匯入 RESRAD-OFFSITE 模式遠場解析及生物圈輻射劑量評估。

## 2. HYDROGEOCHEM 模式近場、遠場模擬核種釋出量連結 RESRAD-OFFSITE 生物圈輻射劑量評估

整合 HYDROGEOCHEM5.0 及 RESRAD-OFFSITE 模式，利用 RESRAD-OFFSITE 模式建立輻射曝露情節與劑量評估程序。RESRAD-OFFSITE 模式原始碼係為 FORTRAN 語言所撰寫，並以 Visual Basic 建立互動的視覺介面，依程式設計選取應用程式所需的物件，規劃其位置、大小、設定其相關屬性，完成與使用者互動的視窗化介面。該視窗化介面即是輻射曝露情節與劑量評估程序，可與使用者產生友善化的操作環境。然 RESRAD-OFFSITE 模式當初設計時，已預先規劃完成與其他程式相連結之設定方法，如表 15 所示 RESRAD-OFFSITE 輸入檔特性描述。該 AQFLUXIN.DAT 為核種及子核種傳輸至地下水之通量，將可利用通量交換與 HYDROGEOCHEM 進行整合聯結。

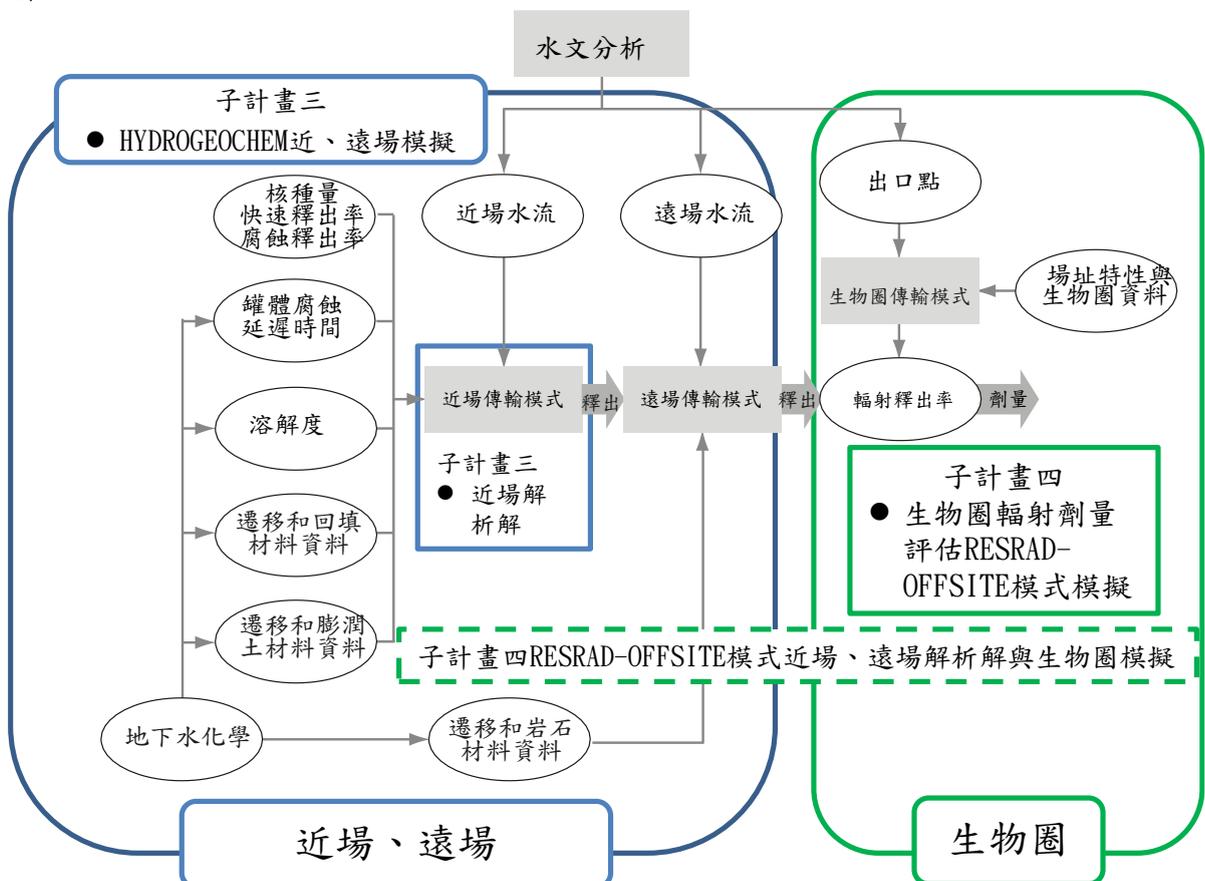


圖 28 近場及遠場模式結合生物圈 RESRAD-OFFSITE 模式建立輻射劑量評估程序

表 15 RESRAD-OFFSITE 輸入檔特性描述

檔名	描述
AQFLUXIN.DAT	核種及子核種傳輸至地下水之通量(Flux) 單位：pCi/year
SWFLUXIN.DAT	核種及子核種傳輸至地面水之通量(Flux) 單位：pCi/year
AIFLUXIN.DAT	核種及子核種傳輸至空氣之通量(Flux) 單位：pCi/year

由於 HYDROGEOCHEM 模式之生物地化反應傳輸控制方程式以質量守恆、生物地化反應與 Fick's flux law 理論為基礎，其控制方程式可描述任何物種於地下水飽和/非飽和含水層三維空間分布與時變之物種濃度，如式(11)所示。其主要的傳輸過程為移流、延散/擴散、生物地化反應(包含放射性的衰變效應)、源項與匯項。詳如下列介紹：

$$\frac{\partial \theta C_i}{\partial t} + \theta \alpha \frac{\partial h}{\partial t} C_i = L(C_i) + \theta r_i + M_i, \quad i \in \{M\} \quad (11)$$

$$L(C_i) = -\nabla \cdot (\mathbf{V}C_i) + \nabla \cdot [\theta \mathbf{D} \cdot \nabla C_i] \quad (12)$$

(11)及(12)式中

$C_i$ ：第  $i$  個物種之濃度  $(M/L^3)$

$r_i$ ： $i$  物種之生物地化反應生成速率  $(M/L^3/T)$

$L(C_i)$ ：傳輸運算子(The transport operator)

$\{M\} = \{1, 2, \dots, M\}$

$\{M\}$ ：物種數量

$\mathbf{D}$ ：延散係數(The dispersion tensor)  $(L^2/T)$

$M_i$ ：第  $i$  個物種之源項與匯項  $(M/L^3/T)$

方程式(11)即為 HYDROGEOCHEM 模式模擬得到之濃度通量，由方程式(1)進行容積莫爾濃度與活度單位之轉換，配合孔隙率及含水量適當修正後，可將 mol/l/year 單位轉換成 Bq/year 或 pCi/year 單位，所以將 HYDROGEOCHEM 輸出濃度轉換通量成 pCi/year 後，並再將 HYDROGEOCHEM 模式輸出結果設定為 AQFLUXIN.DAT 檔之格式，將可整合 HYDROGEOCHEM5.0 及 RESRAD 模式模擬分析建立 RESRAD 模式分析核種傳輸至生物圈輻射劑量結合近場、遠場全系統安全評估架構，分析體外直接曝露輻射、經由呼吸進入人體的體內曝露輻射及藉由食物、水進入人體的體內曝露輻射等曝露傳輸途徑之輻射劑量與風險。最後將評估核種從工程障壁至生物圈之可能

輻射劑量及風險，並瞭解該輻射劑量及風險是否能符合法令限值 0.25 mSv/year。我國未來可依據 RESRAD 參數使用參考手冊現場調查場址區域範圍、關鍵核種種類、水文物理條件等自然環境，與利用該參考手冊選用參數，可利於國內放射性廢棄物處置輻射劑量與風險評估安全審查進行與技術提昇。並利用 RESRAD 模式已建立完整之輸出結果判斷。作為國內放射性廢棄物處置輻射劑量與風險評估有效決策判斷依據。

依據前述方法可將 HYDROGEOCHEM 模擬連結 RESRAD-OFFSITE 生物圈輻射劑量評估。

### 3. RESRAD-OFFSITE 近場、遠場及生物圈輻射劑量評估架構

RESRAD 具有二維傳輸解析解，但不能考慮熱-水文-化學(Thermo-Hydro-Chemistry)演變對處置場址放射性廢棄物長期之影響，但 RESRAD 模式可分析近場核種垂直方向入滲遷移釋出、水平方向遠場之核種遷移，並可建立輻射曝露情節與劑量評估程序。

#### (1) 近場核種入滲及衰變鏈

放射性核種衰變鏈轉換及入滲導致量減少，將影響廢料桶區核種含量及濃度。母核種衰變鏈轉換產生之子核種濃度會隨著時間增加。初始核種及其子核種活性濃度可由以下方程式推導得出：

$$\frac{dA_1}{dt} = -(\lambda_1 + \mu_1)A_1 \quad (13)$$

$$\frac{dA_k}{dt} = \lambda_k A_{k-1} - (\lambda_k + \mu_k)A_k \quad \text{對於 } 2 \leq k \leq n, \quad (14)$$

其中

$A_k(t)$  = 第 k 個核種衰變鏈之活性濃度(pCi g<sup>-1</sup>),

$t$  = 場址建立後之時間(yr),

$\lambda_k$  = 第 k 個核種之放射性轉換常數 (yr<sup>-1</sup>), 且

$\mu_k$  = 第 k 個核種之入滲率常數<sup>1</sup> (yr<sup>-1</sup>)

將方程式同乘  $e^{(\lambda_k + \mu_k)t}$ ，並以  $\int_0^t e^{(\lambda_k + \mu_k)t} A_{k-1}(t) dt$  積分形成，

$$A_k(t) = \sum_{i=1}^k a_{k,i} \exp(-\lambda_i t - \mu_i t) \quad (15)$$

<sup>1</sup> 如果使用者未輸入入滲率，RESRAD-OFFSITE 將依照初始釋出率評估一入滲率，使得吸附及釋出率達到平衡；並根據主要污染核種之特定分佈係數計算。

其中

$a_{k,i}$  = 根據  $a_{1,1} = A_1(0)$  定義之係數集合,

$$a_{k,i} = \frac{\lambda_k a_{k-1,i}}{\lambda_k + \mu_k - \lambda_i - \mu_i} \quad \text{對於 } 1 \leq i < k, \text{ 且}$$

$$a_{k,k} = -\sum_{i=1}^{k-1} a_{k,i}$$

針對 H-3、C-14，活性濃度方程式如下所示：

$$A(t) = A(0) \exp(-\lambda t - \mu t - \varepsilon v(t)t) \quad (16)$$

其中

$\varepsilon v(t) = t$  時間之侵蝕率 ( $\text{yr}^{-1}$ ) (詳見 RESRAD 第 6 版使用手冊附錄 L [Yu et al. 2001] 中，對於侵蝕率隨時間變化以及 H-3、C-14 模式之相關討論)

(2) 近場釋出模式：1-階釋出模式(First-order release model)

根據初始母核種、入滲率、衰變鏈之轉換常數計算於各時間點核種活性濃度：

$$A_k(t) = \sum_{i=1}^k a_{k,i} \exp(-\lambda_i t - \mu_i t) \quad (17)$$

其中

$a_{k,i}$  = 由  $a_{1,1} = A_1(0)$  定義為係數之集合

$$a_{k,i} = \frac{\lambda_k a_{k-1,i}}{\lambda_k + \mu_k - \lambda_i - \mu_i} \quad \text{對於 } 1 \leq i < k, \text{ 且}$$

$$a_{k,k} = -\sum_{i=1}^{k-1} a_{k,i} .$$

(3) 近場釋出模式：均勻釋出模式(Uniform release model)

$$A_k(t) = \left(1 - \frac{t}{T_{\text{release}}}\right) \sum_{i=1}^k a_{k,i} \exp(-\lambda_i t) \quad \text{當 } t < T_{\text{release}} \quad (18)$$

$$A_k(t) = 0 \quad \text{當 } t \geq T_{\text{release}} \quad (19)$$

其中

$T_{release} =$  核種持續釋出之時間(年)

$$a_{k,i} = \frac{\lambda_k a_{k-1,i}}{\lambda_k - \lambda_i} \quad \text{對於 } 1 \leq i < k, \text{ 且}$$

$$a_{k,k} = -\sum_{i=1}^{k-1} a_{k,i}.$$

(4) 近場釋出模式：平衡脫附釋出模式(Uniform release model)

利用核種傳輸控制方程式，藉由水流沖蝕核種，由液相及固相核種之分佈係數控制水流沖蝕核種情況下之核種釋出作用。

$$\begin{aligned} \frac{\partial c_m}{\partial t} &= -\lambda c_m + \frac{\theta_m}{(\theta_t + \rho_b K_d)} \left( -V_m \frac{\partial c_m}{\partial z} + D_z^m \frac{\partial^2 c_m}{\partial z^2} \right) \\ &= -\lambda c_m - V_c \frac{\partial c_m}{\partial z} + D_z^c \frac{\partial^2 c_m}{\partial z^2}, \end{aligned} \quad (20)$$

其中

$$V_c = V_m \frac{\theta_m}{\theta_t + \rho_b K_d} = \text{土壤污染物平均速度 (m year-1)}$$

$$D_z^c = D_z^m \frac{\theta_m}{\theta_t + \rho_b K_d} = \text{土壤污染擴散係數 (m}^2 \text{ year-1)}$$

$K_d =$  分佈係數  $([\text{cm}]^3 \text{ pCi g}^{-1})$ ;

$c_m, c_{im} =$  移動、非移動孔隙率中之核種濃度  $(\text{pCi m}^{-3})$ ;

$\theta_m =$  移動孔隙率，可以在孔隙中自由流動之水體積。

$\theta_{im} =$  非移動孔隙率，在孔隙中無法自由流動之水體積。

$\theta_t =$  上述兩孔隙率相加，即為所有連接孔隙率。

$V_m =$  水流經移動孔隙之平均速度  $(\text{m year}^{-1})$

## (二) SR-PSU 安全評估計畫之生物圈輻射劑量結合近場、遠場全系統安全評估架構

### 1. SR-PSU 安全評估計畫情節分類

SR-PSU 安全評估計畫提出三個情節分類：主要情節、低發生率情節與其他情節或剩餘情節，對於 SFR 處置場系統進行長期安全性評估。

- (1) 主要情節：基於初始狀態與處置場長期演化過程及處置場安全有關情境。主要情節依照參考演化有二個版本：全球暖化版本和早冰緣期版本。
- (2) 低發生率情節：根據安全功能的潛在喪失來挑選低發生率情節。
- (3) 其他情節或剩餘情節：與未來人類活動有關的情節，任何為使情節完整需增加的稱為剩餘情節

SR-PSU 安全評估計畫之計算情節是基於前述主要情節、低發生率情節、其他情節或剩餘情節與情節組合，各種氣候情況下各種情節與計算案例關連如圖 29。

### 2. 近場、遠場及生物圈輻射劑量全系統安全評估架構

SR-PSU 安全評估計畫對於近場、遠場及生物圈輻射劑量全系統安全評估架構，列如圖 30 之近場、遠場與生物圈核種傳輸計算之模式與資料關聯圖，詳細的評估模式流程圖如圖 32。對於近場、遠場與生物圈系統以區塊模型(Compartment models)分類，建置放射性核種於近場、遠場和生物圈遷移模型，表 16 列出生物圈放射性核種傳輸模式之區塊模型及圖 31 生物圈區塊模型之核種傳輸模式模擬核種在陸地和水生系統兩個自然生態系統。

近場、遠場和生物圈視為每個區塊模型系統，在每個區塊內的核種被假定為充分混合及具均勻性。這種簡化假設可能使得系統和其未來演化具有相當的不確定度，但是藉由區塊模型結構能適當地分類近場、遠場和生物圈區域，避免高估或低估可能的輻射劑量峰值及風險。

每個區塊區域假設為獨立的均勻實體，有其自己的屬性和子模型狀態。區塊內的狀態（即放射性核種含量）取決於區塊內部作用過程（如放射性衰變）和每個區塊之間（近場、遠場與生物圈系統）的質量交換過程（如移流和擴散的傳輸。）和其內部的源和匯作用。其交換過程之「轉移」和「轉移係數」定義為：

- **Transfer  $Tr_{ij}$  [Bq/year]**：核種從源項區塊系統  $i$  轉移傳送到另一個區塊系統  $j$

地放射性核種通量。

- **Transfer coefficient**  $TC_{ij}$  [1/year]：核種轉移量  $Tr_{ij}$  從源項區塊系統放射性核種含量  $A^n$  的比例因子。即  $Tr_{ij} = TC_{ij} A^n$  線性模型，其適用於 SR-PSU 大部分的近場、遠場和生物圈遷移轉移過程。惟一的例外情形是受核種溶解度影響的傳輸過程。

區塊系統放射性核種含量的變化率可由以下公式說明：

$$\dot{A}_i^n = \sum_{j \in N_i} Tr_{ji}^n - \sum_{j \in N_i} Tr_{ij}^n + \sum_{p \in P_n} Br_p^n \lambda^n A_i^p - \lambda^n A_i^n + r_i^n \quad (21)$$

其中：

$A_i^n$  = 放射性核種  $n$  在區塊系統  $i$  的含量, [Bq],

$\dot{A}_i^n$  =  $A_i^n$  變化率, [Bq/yr],

$A_i^p$  = 母核種  $p$  在區塊系統  $i$  的含量, [Bq],

$N_i$  = 一組區塊室連接到區塊系統  $i$ , [無因次],

$P_n$  = 一組母核種  $n$ , [無因次],

$Tr_{ji}^n$  = 核種  $n$  從區塊系統  $i$  轉移傳送到另一個區塊系統  $j$ , [Bq year<sup>-1</sup>],

$\lambda^n$  = 核種  $n$  衰變率 [year<sup>-1</sup>],

$Br_p^n$  = 從母核種  $p$  衰變為子核種  $n$  的分支比, [-],

$r_i^n$  = 區塊系統  $i$  內放射性核種  $n$  的源和匯項 [Bq year<sup>-1</sup>].

### (三) SR-PSU 近場、遠場及生物圈全系統之模式

SFR 處置場址的內外部與世界其他國家（如美國 Yucca Mountain）不同，所以 SR-PSU 安全評估計畫安全報告中所用的模式，係採用符合瑞典國內處置系統地質狀況的模式。由於 Forsmark 處置場址位於波羅的海海岸，非美國沙漠大陸型氣候特性，而是屬於海洋性氣候條件。並考慮未來冰川運動和海水入侵對處置場系統的影響。有些模式雖是非自主發展，但應用前皆經過驗證程序。表 17 列出 SR-PSU 安全評估計畫安全報告 SFR 處置場址安全評估所應用的模式，包含廢料體、近場、遠場及生物圈，並沒有使用美國 Yucca Mountain 計畫所開發的 Goldsim 程式。

氣候情況	情節	計算案例
全球暖化	<b>主要情節</b>	
	Global warming	CCM_GW CCM_TR
	Early periglacial	CCM_EP
早期的冰緣時期	<b>低發生率情節</b>	
	High inventory	CCL_IH
Weichselian 冰河週期	High flow in the bedrock	CCL_FH
	Accelerated concrete degradation	CCL_BC
	Bentonite degradation	CCL_BB
	Earthquake	CCL_EQ
	High concentrations of complexing agents	CCL_CA
	Wells downstream of the repository	CCL_WD
延伸全球暖化	Intrusion wells	CCL_WI
	<b>剩餘情節</b>	
	Loss of barrier function	CCR_B1 CCR_B2
	Changed redox conditions in SFR 1	CCR_RX
	Extended global warming	CCR_EX
	Unclosed repository	CCR_UR
	Future human action	CCFHA1 CCFHA2 CCFHA3
	Glaciation and post-glaciation condition	CCR_GC
	<b>情節組合</b>	
	Scenario combination 1	CCC_SC1
	Scenario combination 2	CCC_SC2

CCM_GW Global warming CC	CCR_B1 Loss of barrier funct. CC - no sorption in the repository
CCM_TR Timing of releases	CCR_B2 Loss of barrier funct. CC - no sorption in the bedrock
CC CCM_CD Collective dose	CCR_B3 Loss of barrier funct. CC - high water flow in the repository
CC CCM_EP Early periglacial	CCR_RX Changed repository redox conditions in SFR 1CC
CCL_IH High inventory CC	CCR_EX Extended global warming
CCL_FH High flow in the bedrock CC	CC CCR_UR Unclosed repository CC
CCL_BC Accelerated concrete degradation	CCFHA1 FHA CC - Expos. of on-site crew during a drilling event
CC CCL_BB Bentonite degradation CC	CCFHA2 FHA CC - Exp. during construction on drill. detritus landfill
CCL_EQ Earthquake CC	CCFHA3 FHA CC - Expos. due to cultivation on drill.
CCL_CA High conc. of complexing agents CC	
CCL_WD Wells downstream of the repository CC	CCC_SC1 Scenario combination 1 -
CCL_WI Intrusion wells CC	CC CCC_SC2 Scenario combination 2 - CC

圖 29 各種氣候情況下各種情節與計算案例關連圖

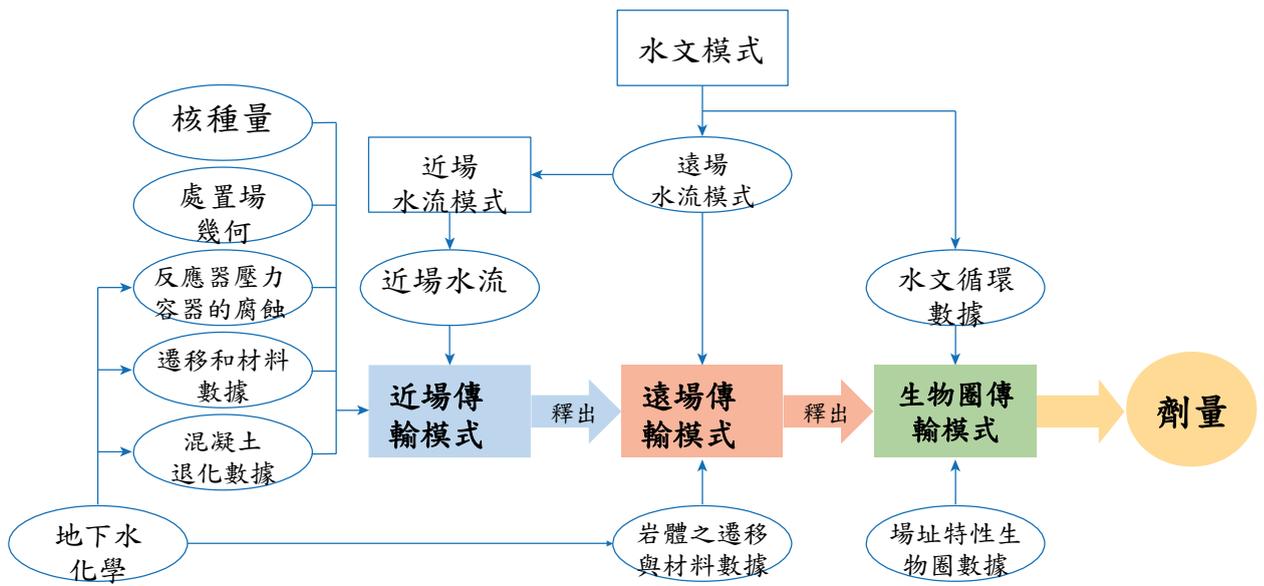


圖 30 近場、遠場與生物圈核種傳輸計算之模式與資料關聯圖

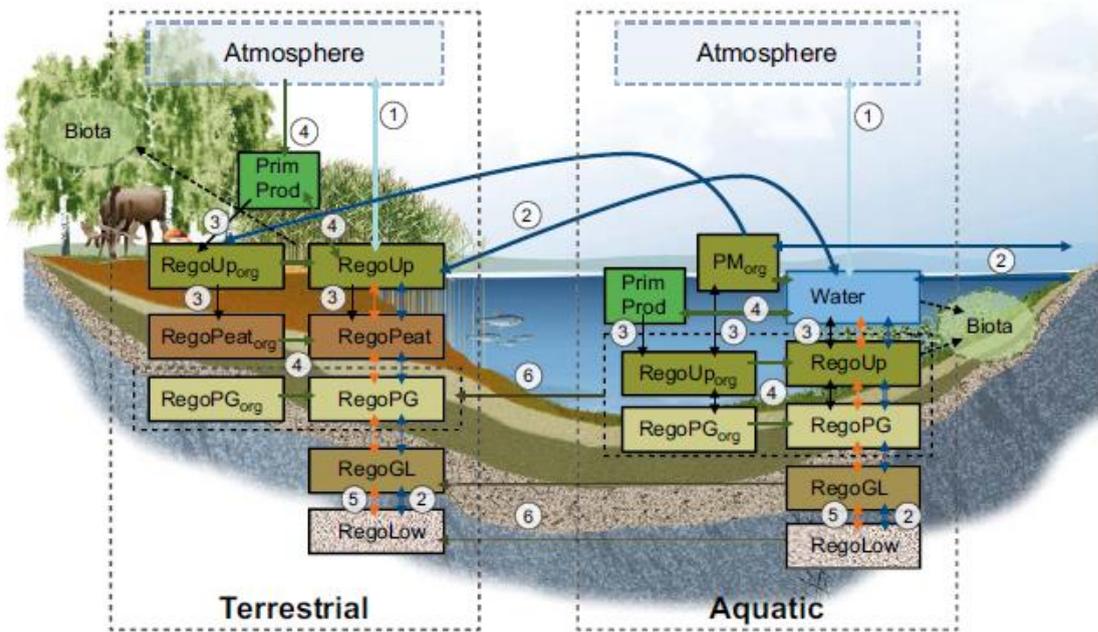


圖 31 生物圈區塊模型之核種傳輸模式模擬核種在陸地和水生系統兩個自然生態系統

表 16 生物圈放射性核種傳輸模式之區塊模型

區塊模型	說明
<b>水生 Aquatic</b>	
Water	Radionuclides in open water of sea basins, lakes and streams, including radionuclides dissolved in water and adsorbed to particulate matter.
PM <sub>org</sub> <sup>1</sup>	Radionuclides stored in organic particulate matter suspended in the water column. Prim
Prod	Radionuclides stored in aquatic primary producers, including radionuclides in pelagic, microbenthic and macrobenthic primary producers.
RegoUp	Radionuclides in the upper oxic and biologically active layer of aquatic sediments, including radionuclides in pore water and adsorbed on sediment particles.
RegoUp <sub>org</sub>	Radionuclides incorporated into organic particulate matter in the upper aerobic and biological active layer of aquatic sediments.
RegoPG	Radionuclides in post-glacial aquatic sediments (clay gyttja) below the biological active layer, including radionuclides in pore water and adsorbed on sediment particles.
RegoPG <sub>org</sub>	Radionuclides incorporated into organic particulate matter in post-glacial aquatic sediments (clay gyttja) below the biological active layer.
RegoGL	Radionuclides in glacial clay (typically overlaid by post-glacial deposits), including radionuclides in pore water and adsorbed on sediment particles.
RegoLow	Radionuclides in till (typically overlaid by glacial clay), including radionuclides in pore water and adsorbed on sediment particles.
<b>陸生 (沼澤) Terrestrial (mire)</b>	
PrimProd	Radionuclides stored in mire vegetation biomass, including both above and below ground biomass of bryophytes, vascular plants, dwarf shrubs and trees.
RegoUp	Radionuclides in the upper oxic and biologically active layer of wetland peat (acrotelm peat), including radionuclides in pore water and adsorbed on peat.
RegoUp <sub>org</sub>	Radionuclides incorporated into organic matter in the upper aerobic and biologically active layer of peat (acrotelm peat).
RegoPeat	Radionuclides in deep, permanently anoxic, wetland peat (catotelm peat), including radionuclides in pore water and adsorbed on peat.
RegoPeat <sub>org</sub>	Radionuclides incorporated into organic matter in the deep, permanently anoxic wetland peat (catotelm peat).
RegoPG	Radionuclides in post-glacial sediments (clay gyttja) overlaid by wetland peat, including radionuclides in pore water and adsorbed on sediment particles.
RegoPG <sub>org</sub>	Radionuclides incorporated into particulate organic matter in post-glacial sediments (clay gyttja) overlaid by wetland peat.
RegoGL	Radionuclides in glacial clay buried under wetland peat and typically overlaid by post-glacial deposits. Inventory includes radionuclides in pore water and adsorbed on sediment particles.
RegoLow	Radionuclides in till, buried under wetland peat and typically overlaid by glacial clay. Inventory includes radionuclides in pore water and adsorbed on sediment particles.
<b>陸生 (農業) Terrestrial (agriculture)</b>	
RegoUp	Radionuclides in the upper layer of agricultural soil (or top soil) influenced by plowing and bioturbation, and where crops primarily take up nutrients and trace elements. This layer is well drained and have a high soil biological activity. Inventory includes radionuclides in pore water and adsorbed on sediment particles.
RegoUp <sub>org</sub>	Radionuclides incorporated into solid organic matter in the upper layer of agricultural soil.

<sup>1</sup> Compartment is also referred to as Water<sub>org</sub> in the technical model description (Saetre et al. 2013).

表 17 SR-PSU 安全評估計畫安全報告 SFR 處置場址安全評估所應用的模式

模式功能與使用方式	模式名稱	評估模式流程圖(圖 32)編號	詳細報告名稱
<b>廢料體</b>			
反應器壓力容器的腐蝕	Ecolego	95	<b>Radionuclide transport report</b> (SKB, 2014f)
<b>近場</b>			
瀝青膨脹評估	Comsol Multiphysics	150	von Shenck and Bultmark 2014
處置場 pH 演化	PHREEQC	51, 133, 174, 206	Cronstrand 2014
處置場氧化還原演化	PHREEQC	49	Duro et al. 2012
近場水文	Comsol Multiphysics	50, 104, 109, 153, 176	Abarca et al. 2014
鋼筋鏽蝕和混凝土化學退化	PHAST	38	Höglund 2014
液相核種傳輸	Ecolego	76	<b>Radionuclide transport report</b> (SKB, 2014f)
地震加載	ADINA	25	Georgiev 2013
<b>地質圈</b>			
水文地質	Darcy Tools	7, 9, 11, 12, 84, 135	Odén et al. 2014
液相核種傳輸	Ecolego	16	<b>Radionuclide transport report</b> (SKB, 2014f)
岩塵與開挖擾動帶	3DEC	6, 26	Mas Ivars et al. 2013
<b>氣候</b>			
較長期的間冰期條件下氣候情況	CCSM4, LOVE-CLIM, Numerical GIA model, Numerical permafrost	13, 18, 65, 72, 74, 128	Brandefelt et al. 2013, Goosse et al. 2010, <b>Climate report</b> (SKB, 2014b), Hartikainen et al. 2010
最低氣溫在下個 60,000 年	CCSM4, LOVE-CLIM	66, 210	Brandefelt et al. 2013, Goosse et al. 2010
潛在的永凍土	CCSM4, LOVE-CLIM, Numerical permafrost model	188	Brandefelt et al. 2013, Goosse et al. 2010, Hartikainen et al. 2010
海岸線演化	Numerical GIA model	190	<b>Climate report</b> (SKB, 2014b)
Weichselian 冰河氣候週期的情況下代表自然變化	Numerical GIA model, Numerical permafrost model	191, 196	<b>Climate report</b> (SKB, 2014b), Hartikainen et al. 2010
Weichselian 冰蓋發展	Numerical ice sheet model (UMISM)	69, 142, 193	<b>Climate report</b> (SKB, 2014b)
Weichselian 多年凍土發展	CCSM4, LOVE-CLIM	192	Brandefelt et al. 2013, Goosse et al. 2010
Weichselian 海岸線演化	Numerical GIA model	194	<b>Climate report</b>
<b>生物圈</b>			
生物圈保護對象標識	ArcGIS	103	<b>Biosphere synthesis report</b> , Brydsten and Strömgren 2013
景觀模型	ArcGIS	1, 52, 54, 99, 164	<b>Biosphere synthesis report</b> , Strömgren and Brydsten 2013, Sohlenius et al. 2013
核種傳輸與劑量	Ecolego	212	<b>Radionuclide transport report</b>
地面水文	MIKE SHE	138, 173	<b>Biosphere synthesis report</b> , Werner et al. 2013a

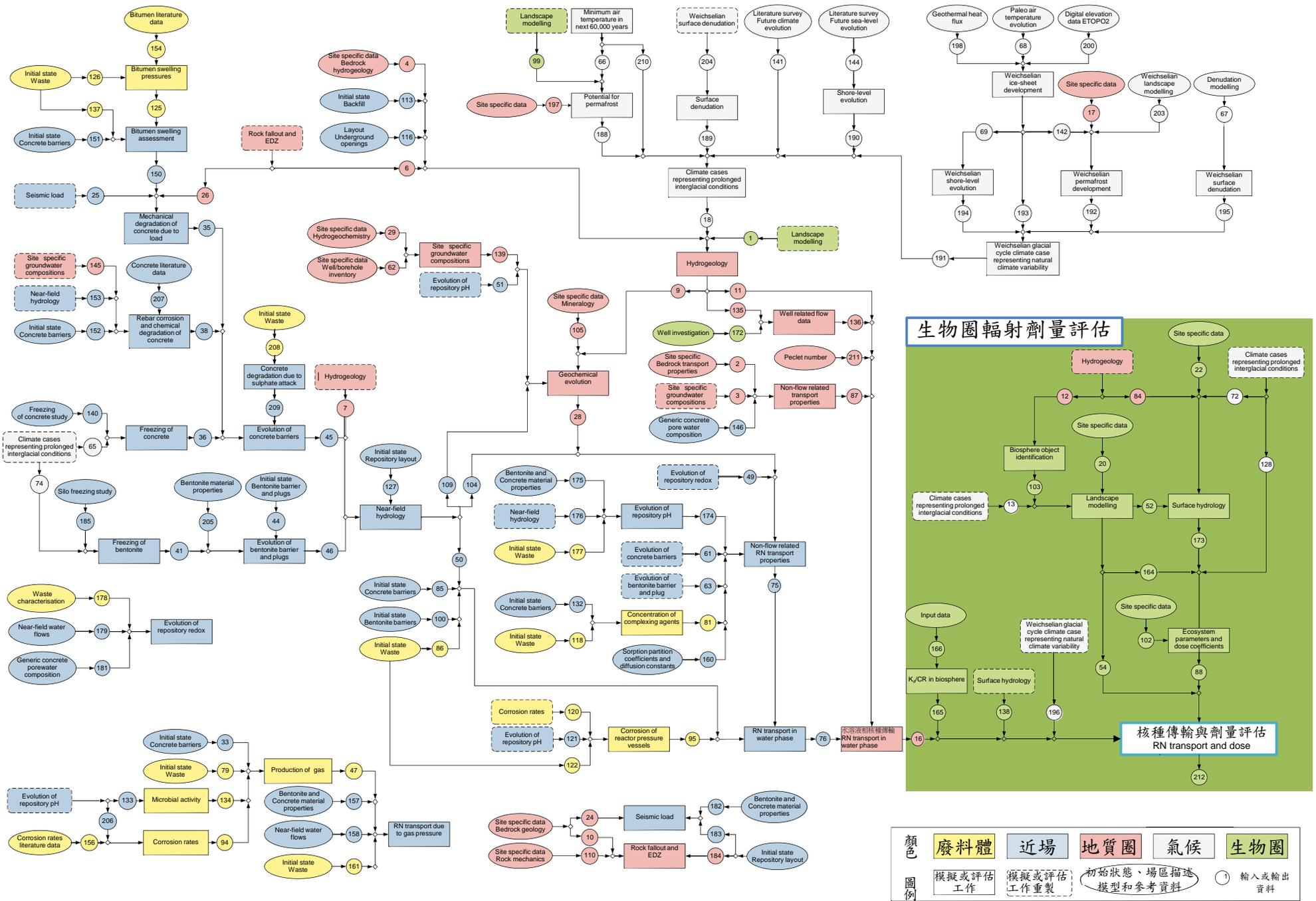


圖 32 SR-PSU 安全評估計畫廢料體、近場、遠場地質圈、生物圈與氣候之評估模式流程圖(AMF)

## 五、提出低放審查導則(第 0 版)輻射劑量評估有關章節與條文內容修訂建議

本計畫藉由計畫執行過程，對於近岸與離島環境低放射性廢棄物處置之釋出核種濃度與輻射劑量轉換技術研析，低放射性廢棄物處置之輻射劑量與風險評估轉換技術之斜率因子研析，近場、遠場及生物圈之核種傳輸與劑量計算。未來將持續進行研擬低放射性廢棄物坑道處置之生物圈輻射劑量結合近場、遠場全系統安全評估架構。本子計畫已將建議納入「子計畫一：低放射性廢棄物處置場址特性審查規範精進之研究」，參加 104 年 5 月 19 日、104 年 9 月 8 日及 104 年 10 月 13 日三次的學者專家會議。針對「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版)第七章處置設施之安全評估」、「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版)第三章場址特性之描述修訂草案」、「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版)第四章處置設施之設計」進行修訂建議。而本子計畫四輻射劑量與風險評估之研究，回饋至與子計畫三所修訂審查導則第七章處置設施之安全評估相關條文內。其中「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版)」第七章安全評估，經子計畫一彙整如下：

修正條文	現行條文	說明
<p>7.1 輻射劑量評估：說明廢棄物性質與場區之可能核種傳輸路徑及特性，並分別評估運轉期(廢棄物接收、暫存、吊卸、處理、處置、除汙排水)及封閉後正常與異常狀況下對工作人員及民眾輻射劑量之影響，並與現行法規做比較。</p> <p>一、廢棄物描述： <del>包括總數量、總活度、廢棄物特性基本假設等。</del> 廢棄物為處置設施安全評估的重要資料，應提供充足資料供審查，以確保處置安全。為妥善描述處置的低放射性廢棄物，本節內容應提供下列資料，若在其他章節已提出可免提供，但請說明出處。</p> <p>(一)提供資料</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 申請處置設施前，國內各設施已產生的低放射性廢棄物：<del>內容包括廢棄物種類、數量、特性、活度及貯存位置。</del></li> <li>2. 國內已存在或可能新增設施，預估可能產生的低放射性廢棄物及其未來趨勢：內容包括廢棄物種類、數量、特性及活度。</li> <li>3. 廢棄物種類資料，包括廢棄物的來源、處理方式、固化劑、螯合劑成分、盛裝容器(是否為高完整性盛裝容器)、及其分類。</li> <li>4. 廢棄物數量資料，包括廢棄物處理後的體積、重量及包裝後的數量。</li> <li>5. 廢棄物特性資料，包括廢棄物的組成及其物理與化學特性、自由水含量、抗壓強度、<del>滲濾溶出</del>指數、耐火性、耐水性、耐候性、耐輻射、耐菌性等資料。</li> <li>6. 廢棄物活度資料，包括主要核種(含難測核種)的名稱、</li> </ol>	<p>7.1 輻射劑量評估：說明廢棄物性質與場區之可能核種傳輸路徑及特性，並分別評估運轉期(廢棄物接收、暫存、吊卸、處理、處置、除汙排水)及封閉後正常與異常狀況下對工作人員及民眾輻射劑量之影響，並與現行法規做比較。</p> <p>一、廢棄物描述： 包括總數量、總活度、廢棄物特性基本假設等。 廢棄物為處置設施安全評估的重要資料，應提供充足資料供審查，以確保處置安全。為妥善描述處置的低放射性廢棄物，本節內容應提供下列資料，若在其他章節已提出可免提供，但請說明出處。</p> <p>(一)提供資料</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 申請處置設施前，國內各設施已產生的低放射性廢棄物：內容包括廢棄物種類、數量、特性、活度及貯存位置。</li> <li>2. 國內已存在或可能新增設施，預估可能產生的低放射性廢棄物及其未來趨勢：內容包括廢棄物種類、數量、特性及活度。</li> <li>3. 廢棄物種類資料，包括廢棄物的來源、處理方式、固化劑、螯合劑成分、盛裝容器(是否為高完整性容器)、及其分類。</li> <li>4. 廢棄物數量資料，包括廢棄物處理後的體積、重量及包裝後的數量。</li> <li>5. 廢棄物特性資料，包括廢棄物的組成及其物理與化學特性、自由水含量、抗壓強度、滲濾指數、耐火性、耐水性、耐候性、耐輻射、耐菌性等資料。</li> <li>6. 廢棄物活度資料，包括主要核種(含難測核種)的名稱、</li> </ol>	<p>刪除與後續提供資料重覆文字。</p> <p>文字修訂。</p> <p>根據放射性辭彙修訂用。</p> <p>有關 7、8、9 部分，非廢棄物特性描述，且： 7 已於第 2 章說明 8 已於第 6 章說明 9 已於第 11 章說明 故建議刪除此 3 項。</p> <p>三、改以正面肯定敘述之形式做文字說明。</p> <p>四、改以正面肯定敘述之形式做文字說明。</p>

<p>半衰期、推估處置時之活度及平均濃度。</p> <p><del>7. 處置設施內的廢棄物之處置相關規劃。</del></p> <p><del>8. 處置設施運轉期間，接收、貯存及處置廢棄物之規劃。</del></p> <p><del>9. 處置設施封閉時所產生之廢棄物規劃。</del></p> <p>(二)審查作業</p> <p>1. 若提供資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</p> <p>2. 提供資料中廢棄物種類、數量、特性、活度之預估資料應合理且足夠設施安全評估之使用。</p> <p>3. 已產生的廢棄物資料應足以判斷運轉期間預期接收低放射性廢棄物規劃之適當性。</p> <p>4. 場址內特定核種之總存量(至少包括「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」之附表一及附表二核種)或某些 A 類廢棄物之結構穩定性之要求，可列入處置設施之運轉執照內之限制條件。</p> <p>5. 處置設施場址封閉時所產生之廢棄物之種類、型態及數量等資訊，應至少足以判斷封閉計畫的合理性。</p> <p><b>二、核種傳輸特性：</b> 評估處置設施工程與天然障壁在設施運轉及封閉後，地下水滲流、擴散、延散與遲滯吸附等特性參數，以模擬分析地下水滲流機制、核種傳輸及處置設施之長期穩定性。 核種藉水與空氣介質的傳輸，外釋到生物圈。水介質是重要的傳輸機制，所以須提供評估模式所需資料，如：水與核種在工程障壁與天然障壁間的水力、擴散、延散、核種遲滯因子等特性，及其流場與流量等資料；對處置場的安全評估甚為重要，至少應提供下列資料供審查。</p>	<p>半衰期、推估處置時之活度及平均濃度。</p> <p>7. 處置設施內的廢棄物之處置相關規劃。</p> <p>8. 處置設施運轉期間，接收、貯存及處置廢棄物之規劃。</p> <p>9. 處置設施封閉時所產生之廢棄物規劃。</p> <p>(二)審查作業</p> <p>1. 若提供資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</p> <p>2. 提供資料中廢棄物種類、數量、特性、活度之預估資料，是否合理？是否足夠用於設施之安全評估？</p> <p>3. 已產生的廢棄物資料，是否足以判斷運轉期間預期接收低放射性廢棄物規劃之適當性？</p> <p>4. 場址內特定核種之總存量(如 C-14、H-3、Tc-99 或 I-129)或某些 A 類廢棄物之結構穩定性之要求，可列入處置設施之運轉執照內之限制條件。</p> <p>5. 處置設施場址封閉時所產生之廢棄物之種類、型態及數量等資訊，應至少足以判斷封閉計畫的合理性。</p> <p><b>二、核種傳輸特性：</b> 評估處置設施工程與天然障壁在設施運轉及封閉後，地下水滲流、擴散、延散與遲滯吸附等特性參數，以模擬分析地下水滲流機制、核種傳輸及處置設施之長期穩定性。 核種藉水與空氣介質的傳輸，外釋到人類的活動範圍。水介質是重要的傳輸機制，所以須提供水與核種在工程障壁與天然障壁間的滲流、擴散、延散等特性，及其流場與流量等資料；對處置場的安全評估甚為重要，至少應提供下列資料供審查。</p>	<p>五、完整列入「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」之附表一及附表二核種。 法規已修訂不需明列某些 A 類廢棄物</p> <p>六、於「低放射性廢棄物坑道處置安全評估關鍵議題初步探討」研究報告中，指出核種主要藉由移流及擴散作用傳輸至生物圈活動範圍。</p> <p>七、於「放射性廢棄物處置安全分析模式驗證及場址特性調查審查技術之研究」研究報告中，4.2 節修正建議，除了滲流、擴散、延散等特性外，應包含「核種遲滯因子」較為適當。</p> <p>八、於「放射性廢棄物處置安全分析模式驗證及場址特性調查審查技術之研究」研究報告中，4.2 節修正建議，除了氣象資訊外，應還需包含「水文資訊」較為適當；於「低放射性廢棄物最終處置場址之環境安全因子審查技術規範研議」研究報告中，指出至少要有一年連續紀錄的長期性氣象資料內容較完整。</p> <p>十、於「放射性廢棄物處置安全分析模式驗證及場址特性調查審查技術之研究」研究報告中，4.2 節修正建議，除了最佳化調整外，應還需包含「不確定性分析」較為適當。</p> <p>十一、於「放射性廢棄物處置安全分析模式驗證及場址特性調查審查技術之研究」研究報告中，4.2 節修正建議，使用名詞「資料」較為適當，並其描述應還需包含「模式」較為完整。</p>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>(一)提供資料</p> <p>1. 處置場址附近<u>至少連續一年的水文與氣象資訊</u>：水從處置設施覆蓋層(或坑道壁上層)的地表滲漏到處置單元之滲漏分析數據與滲漏分析方式。</p> <p>(1) 滲漏分析數據：包含地質統計技術、近似值、處理、數據產生及/或消去、保守估計、以及為達到較佳模擬結果而將現地資訊或實驗室數據所做之<u>最佳化調整與不確定性分析</u>。</p> <p>(2) 滲漏分析方式：其描述包含<u>資料、假設、模式、驗證及校正</u>。</p> <p>2. 提出滲漏時進入處置單元之水流體積以及滲漏之時間與空間分佈之預測。包括最大降雨量、可能降雨之時間分佈。</p> <p>3. 評估工程障壁覆蓋層(或坑道壁上層)材料的侵蝕、穴居動物、植物生態對滲漏之影響。</p> <p>4. 工程障壁覆蓋層(或坑道壁上層)之工程設計：包含厚度、橫向延伸、材料粒徑、</p>	<p>(一)提供資料</p> <p>1. 處置場址附近的氣象資訊：水從處置設施覆蓋層(或坑道壁上層)的地表滲漏到處置單元之滲漏分析數據與滲漏分析方式。</p> <p>(1) 滲漏分析數據：包含地質統計技術、近似值、處理、數據產生及/或消去、保守估計、以及為達到較佳模擬結果而將現地資訊或實驗室數據所做之最佳化調整。</p> <p>(2) 滲漏分析方式：其描述包含文件、假設、驗證及校正。</p> <p>2. 提出滲漏時進入處置單元之水流體積以及滲漏之時間與空間分佈之預測。包括最大降雨量、可能降雨之時間分佈。</p> <p>3. 評估工程覆蓋層(或坑道壁上層)材料的侵蝕、穴居動物、植物生態對滲漏之影響。</p> <p>4. 覆蓋層(或坑道壁上層)之工程設計：包含厚度、橫向延伸、材料粒徑、邊坡、總孔隙度與有效孔隙度、水力傳</p>	<p>十二、「重要」建議修改為「關鍵」。修改為「遲滯因子」。</p> <p>與 7.4 節長期穩定內容重覆</p> <p>十三、修改為「遲滯因子」。</p> <p>十四、強調應考慮參數的可信賴度。</p> <p>與 7.4 節長期穩定內容重覆</p> <p>十五、增加概念模式、評估模式及程式驗證及確認之審查條文。</p> <p>刪除重覆用字</p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>邊坡、總孔隙度與有效孔隙度、水力傳導係數以及含水量與毛細勢能與水力傳導係數之關係。</p> <p>5. 工程障壁材料與天然障壁對地下水之擴散與延散參數值。</p> <p>6. 工程障壁材料與天然障壁對<b>關鍵</b>核種的<b>遲滯因子參數值</b>。</p> <p>7. <del>預估滲漏引起的地層下陷。</del></p> <p>(二)審查作業</p> <p>1. 若提供資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</p> <p>2. 用於估算場址滲漏量之數據及分析技術是否合理，驗證覆蓋層系統之物理特性並確認其數值足夠保守或真實。</p> <p>3. <b>工程障壁覆蓋層(或坑道壁上層)</b>是否具降低滲漏及導引滲漏水流遠離廢棄物之能力。</p> <p>4. 擴散、延散與<b>遲滯因子</b>參數值是否合理且足以提供合理之準確度或保守之分析。若場址參數無法取得，應確認採適當保守假設，若參數存在不確定性或不一致，其數值應與文獻中所得之相似地質介質數值範圍相比較，<b>並估計其可信賴度。</b></p> <p>5. <del>水流透過覆蓋層(或坑道壁上層)系統導致之下陷效應預估是否合理。</del></p> <p><b>三、正常狀況之輻射劑量：</b> 評估處置設施運轉期及封閉後在正常狀況之輻射劑量，包括傳輸機制說明、情節分析、<b>概念模式說明、評估模式及程式說明</b>、輸入資料、輸出資料、敏感度分析、不確定性分析、評估結果<b>及使用之評估程式</b>。</p> <p>處置設施核准運轉後，包含五個時期，分別為運轉期，封閉期、觀察及監測期，主動監管</p>	<p>導係數以及含水量與毛細勢能與水力傳導係數之關係。</p> <p>5. 工程障壁材料與天然障壁對地下水之擴散與延散參數值。</p> <p>6. 工程障壁材料與天然障壁對重要核種的遲滯吸附參數值。</p> <p>7. 預估滲漏引起的地層下陷。</p> <p>(二)審查作業</p> <p>1. 若提供資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</p> <p>2. 用於估算場址滲漏量之數據及分析技術是否合理，驗證覆蓋層系統之物理特性並確認其數值足夠保守或真實。</p> <p>3. 覆蓋層(或坑道壁上層)是否具降低滲漏及導引滲漏水流遠離廢棄物之能力。</p> <p>4. 擴散、延散與遲滯吸附參數值是否合理且足以提供合理之準確度或保守之分析。若場址參數無法取得，應確認採適當保守假設，若參數存在不確定性或不一致，其數值應與文獻中所得之相似地質介質數值範圍相比較。</p> <p>5. 水流透過覆蓋層(或坑道壁上層)系統導致之下陷效應預估是否合理。</p> <p><b>三、正常狀況之輻射劑量：</b> 評估處置設施運轉期及封閉後在正常狀況之輻射劑量，包括傳輸機制說明、情節分析、輸入資料、輸出資料、敏感度分析、不確定性分析、評估結果及使用之評估程式。</p> <p>處置設施核准運轉後，包含五個時期，分別為運轉期，封閉期，觀察及監測期，主動監管期(或</p>	<p>十六、處置設施於運轉期及封閉後，在正常狀況下，工程障壁仍保有其功能，滲漏進入處置單元之水地下水，可能受到工程障壁阻絕而減少流出之水量，進而降低放射性核種的外釋量，因此須考慮自處置單元向天然障壁流出之水量。</p> <p>十七、於「低放射性廢棄物坑道處置安全評估關鍵議題初步探討」研究報告中，指出情節(Scenario)是對影響處置場功能之可能未來的描述，包含特徵</p>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>期(或稱監管期)及被動監管期(或稱被動期)。</p> <p>運轉期間，將接收廢棄物進行處置，對場外民眾有直接曝露的風險；對場內工作人員，可能造成體內曝露與體外曝露。曝露途徑有地下水、空氣、地表水、直接輻射、生物等途徑。</p> <p>場址封閉期時，對場址內土地除污及/或結構拆除，仍會產生一些放射性廢棄物並須處置。對場外民眾有直接曝露的風險；對場內工作人員，可能造成體內曝露與體外曝露。</p> <p>為降低對民眾與工作人員之輻射劑量，所以處置場須採多重障壁的防護措施。須評估處置設施運轉期及封閉後在正常狀況下對民眾與工作人員之輻射劑量，為使輻射劑量評估合理及保守，須提供下列資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 處置設施運轉期及封閉後在正常狀況之核種傳輸機制說明：包含地下水、空氣、地表水、直接輻射、生物及其他傳輸機制。</p> <p>(1) 地下水：(a)定義並量化處置單元中重要核種藉地下水外釋之排放點、(b)考慮螯合劑之影響或其他可能提高放射性核種遷移之化學媒介時，所使用的放射性核種外釋模型及參數值、(c)滲漏進入處置單元之水量、<b>自處置單元向天然障壁流出之水量及其與放射性核種外釋之關係資料。</b></p> <p>(2) 空氣：(a)定義並量化處置單元中重要核種藉空氣外釋之排放點與排放區域、(b)廢棄物分解產生的放射性氣體、處置單元或集水坑積水之蒸發氣體</p>	<p>稱監管期)及被動監管期(或稱被動期)。</p> <p>運轉期間，將接收廢棄物進行處置，對場外民眾有直接曝露的風險；對場內工作人員，可能造成體內曝露與體外曝露。曝露途徑有地下水、空氣、地表水、直接輻射、生物等途徑。</p> <p>場址封閉期時，對場址內土地除污及/或結構拆除，仍會產生一些放射性廢棄物並須處置。對場外民眾有直接曝露的風險；對場內工作人員，可能造成體內曝露與體外曝露。</p> <p>為降低對民眾與工作人員之輻射劑量，所以處置場須採多重障壁的防護措施。須評估處置設施運轉期及封閉後在正常狀況下對民眾與工作人員之輻射劑量，為使輻射劑量評估合理及保守，須提供下列資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 處置設施運轉期及封閉後在正常狀況之核種傳輸機制說明：包含地下水、空氣、地表水、直接輻射、生物及其他傳輸機制。</p> <p>(1) 地下水：(a)定義並量化處置單元中重要核種藉地下水外釋之排放點、(b)考慮螯合劑之影響或其他可能提高放射性核種遷移之化學媒介時，所使用的放射性核種外釋模型及參數值、(c)滲漏進入處置單元之水量與放射性核種外釋之關係資料。</p> <p>(2) 空氣：(a)定義並量化處置單元中重要核種藉空氣外釋之排放點與排放區域、(b)廢棄物分解產生的放射性氣體、處置單元或集水坑積水之蒸發氣體、(c)場址污染土壤、地表、與建築物</p>	<p>(Feature)、事件(Event)及作用(Process)等的組合，即為FEP。</p> <p>十九、增加概念模式、<b>評估</b>模式及程式驗證及確認之審查條文，新增第4點與第5點，原第4點與第5點改成第6點與第7點。</p>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>體、(c)場址污染土壤、地表、與建築物之釋出空浮、(d)植物根部或穴居動物或昆蟲挖掘造成污染物之空浮、(e)封閉作業時，建築物除污或拆除作業造成污染物之空浮。</p> <p>(3) 地表水：(a)處置單元中的排水、排水層或集水坑以及有可能接觸到廢棄物之地表水、(b)場址污染土壤、地表、與建築物透過地表水傳輸之污染物、(c)植物根部或穴居動物或昆蟲挖掘之污染物經地表水的傳輸、(d)封閉作業時，建築物除污或拆除作業透過地表水傳輸之污染物。</p> <p>(4) 直接輻射：(a)廢棄物運送車輛之加馬輻射、(b)部分場址運轉時之加馬輻射、(c)主動監管期間，處置單元上衰減之加馬輻射與場址污染地表或建物之加馬輻射。</p> <p>(5) 生物：定義並定量直接經由生物途徑將污染物外釋及傳輸至場址外，如穴居動物由場址帶走污染物後，被獵人宰食。</p> <p>2. 正常情節(或稱設計情節)分析：</p> <p>(1) 選用國際常用的低放射性廢棄物處置的<u>特徵、事件及作用等組合(FEP)通用表</u>(如IAEA或國際組織)。</p> <p>(2) 經學者專家就處置場的氣候與地質特性、周圍環境及處置場設計，從國際常用的FEP通用表篩選出與</p>	<p>之釋出空浮、(d)植物根部或穴居動物或昆蟲挖掘造成污染物之空浮、(e)封閉作業時，建築物除污或拆除作業造成污染物之空浮。</p> <p>(3) 地表水：(a)處置單元中的排水、排水層或集水坑以及有可能接觸到廢棄物之地表水、(b)場址污染土壤、地表、與建築物透過地表水傳輸之污染物、(c)植物根部或穴居動物或昆蟲挖掘之污染物經地表水的傳輸、(d)封閉作業時，建築物除污或拆除作業透過地表水傳輸之污染物。</p> <p>(4) 直接輻射：(a)廢棄物運送車輛之加馬輻射、(b)部分場址運轉時之加馬輻射、(c)主動監管期間，處置單元上衰減之加馬輻射與場址污染地表或建物之加馬輻射。</p> <p>(5) 生物：定義並定量直接經由生物途徑將污染物外釋及傳輸至場址外，如穴居動物由場址帶走污染物後，被獵人宰食。</p> <p>2. 正常情節(或稱設計情節)分析：</p> <p>(1) 選用國際常用的低放射性廢棄物處置的特徵事件過程(FEP)通用表(如IAEA或國際組織)。</p> <p>(2) 經學者專家就處置場的氣候與地質特性、周圍環境及處置場設計，從國際常用的FEP通用表篩選出與該處置場正常情況相關的FEPs，並記錄任</p>	<p>二十、增加概念模式、<b>評估</b>模式及程式驗證及確認之審查條文。</p> <p>二十一、海嘯或暴潮<b>溢淹</b>；於「低放射性廢棄物坑道處置安全評估關鍵議題初步探討」研究報告中，指出在處置場封閉後，出現破壞情節的狀況包含：因人類<b>不經無意</b>的入侵行為、豎井或調查井發生回填失效<b>→及發生垂直斷層等主客觀</b>因素。</p> <p>二十二、於「低放射性廢棄物坑道處置安全評估關鍵議題初步探討」研究報告中，指出情節(Scenario)是對影響處置場功能之可能未來的描述，包含特徵(Feature)、事件(Event)及作用(Process)等的組合，即為FEP。</p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>該處置場正常情況相關的 FEPs，並記錄任何 FEP 被排除的原因。</p> <p>(3) 選出處置系統的重要組件(如廢棄物體、各種工程障壁(近場)、天然障壁(遠場)、生物圈等)，分析並說明重要組件的特徵、正常情況下重要組件經常發生及緩慢發生的事件、各重要組件間的互相作用過程。</p> <p>(4) 因放射性核種在各重要組件內傳輸可分為氣體、液體與固體的形態；考量選出的 FEPs，以合理的邏輯方法，繪出放射性核種傳輸的路徑，並建構出氣體傳輸正常情節、液體傳輸正常情節、固體傳輸正常情節。</p> <p>3. 提出正常情節輻射劑量評估程式及其輸入資料與輸出資料。</p> <p>4. 對正常情節輻射劑量評估程式的參數，進行敏感度分析。</p> <p>5. 對敏感度高的參數，考量參數的分布狀況，進行個人有效劑量的不確定性分析。</p> <p>6. 民眾與工作人員之輻射劑量評估結果。</p> <p>(二)審查作業</p> <p>1. 若提供資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</p> <p>2. 正常狀況之核種傳輸機制說明：</p> <p>(1) 提供的核種傳輸機制(地下水、空氣、地表水、直接輻射、生物)資料是否足以供進行獨立的安全評估。</p> <p>(2) 放射性核種傳輸機制是否合理且保守。</p> <p>3. 正常情節分析：</p>	<p>何 FEP 被排除的原因。</p> <p>(3) 選出處置系統的重要組件(如廢棄物體、各種工程障壁(近場)、天然障壁(遠場)、生物圈等)，分析並說明重要組件的特徵、正常情況下重要組件經常發生及緩慢發生的事件、各重要組件間的互相作用過程。</p> <p>(4) 因放射性核種在各重要組件內傳輸可分為氣體、液體與固體的形態；考量選出的 FEPs，以合理的邏輯方法，繪出放射性核種傳輸的路徑，並建構出氣體傳輸正常情節、液體傳輸正常情節、固體傳輸正常情節。</p> <p>3. 提出正常情節輻射劑量評估程式及其輸入資料與輸出資料。</p> <p>4. 對正常情節輻射劑量評估程式的參數，進行敏感度分析。</p> <p>5. 對敏感度高的參數，考量參數的分布狀況，進行個人有效劑量的不確定性分析。</p> <p>6. 民眾與工作人員之輻射劑量評估結果。</p> <p>(二)審查作業</p> <p>1. 若提供資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</p> <p>2. 正常狀況之核種傳輸機制說明：</p> <p>(1) 提供的核種傳輸機制(地下水、空氣、地表水、直接輻射、生物)資料是否足以供進行獨立的安全評估。</p> <p>(2) 放射性核種傳輸機制是否合理且保守。</p> <p>3. 正常情節分析：</p>	<p>二十三、增加概念模式、評估模式及程式驗證及確認之審查條文，新增第 4 點與第 5 點，原第 4 點至第 7 點改成第 6 點至第 9 點。</p> <p>因核種外勢不僅會影響人類活動，也會影響到生態而間接影響到人類，故以生物圈描述較為合理</p> <p>二十四、於「放射性廢棄物處置安全分析模式驗證及場址特性調查審查技術之研究」研究報告中，4.2 節修正建議，應需先建構水文地質模型與假設，再描述潛在的核種遷移地下水途徑較為適當。增加第(2)點，原第(2)、(3)點改為第(3)、(4)點。</p> <p>二十五、地下水中的核種濃度</p>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>(1) 篩選出與該處置場正常情況相關的 FEPs，是否經由專家學者所確認：被排除的 FEPs 之原因是否合理。</p> <p>(2) 處置設施重要組件的特徵事件與過程是否已充分考量。</p> <p>(3) 氣體傳輸正常情節、液體傳輸正常情節、固體傳輸正常情節是否合理。</p> <p>4. <u>應根據場址資訊與合理性研擬正常狀況下之概念模式，說明如何根據其結果建構與選用評估模式。</u></p> <p>5. <u>應根據分析模式的結果說明所選用之程式，該程式需經過專業之驗證及確認後方能使用於評估報告。</u></p> <p>6. 正常情節輻射劑量評估程式的輸入資料是否符合場址資訊與合理性，其輸出資料是否合理。</p> <p>7. 是否進行參數敏感度分析與不確定分析，分析結果是否合理。</p> <p><b>四、異常狀況之輻射劑量：</b>          評估處置設施運轉期及封閉後在意外事故或異常狀況下之輻射劑量，包括傳輸機制說明、意外事故或異常狀況之發生頻率、情節分析、<b>概念模式說明、評估模式及程式說明</b>、輸入資料、輸出資料、敏感度分析、不確定性分析、評估結果及使用之評估程式。          處置設施在運轉期，封閉期，觀察及監測期，主動監管期及被動監管期，可能發生人為或天然的意外事件。這些人為或天然的意外事件，通常發生的機率都很低，若其發生所產生的後果影響輕微，則可忽略不計；若發生所產生的後果影響嚴重，則應評估其影響。故此處的異常狀況之輻射劑量，係針對發生機率低後果影響嚴重</p>	<p>(1) 篩選出與該處置場正常情況相關的 FEPs，是否經由專家學者所確認：被排除的 FEPs 之原因是否合理。</p> <p>(2) 處置設施重要組件的特徵事件與過程是否已充分考量。</p> <p>(3) 氣體傳輸正常情節、液體傳輸正常情節、固體傳輸正常情節是否合理。</p> <p>4. 正常情節輻射劑量評估程式的輸入資料是否符合場址資訊與合理性，其輸出資料是否合理。</p> <p>5. 是否進行參數敏感度分析與不確定分析，分析結果是否合理。</p> <p><b>四、異常狀況之輻射劑量：</b>          評估處置設施運轉期及封閉後在意外事故或異常狀況下之輻射劑量，包括傳輸機制說明、意外事故或異常狀況之發生頻率、情節分析、輸入資料、輸出資料、敏感度分析、不確定性分析、評估結果及使用之評估程式。          處置設施在運轉期，封閉期，觀察及監測期，主動監管期及被動監管期，可能發生人為或天然的意外事件。這些人為或天然的意外事件，通常發生的機率都很低，若其發生所產生的後果影響輕微，則可忽略不計；若發生所產生的後果影響嚴重，則應評估其影響。故此處的異常狀況之輻射劑量，係針對發生機率低後果影響嚴重的人為或天然意外事件，對民眾與工作人之輻射劑量評估。</p>	<p>會於地下水流到地表(生物圈)時，被流出點的地表水(河川、湖泊等陸水或海水)稀釋，故劑量評估時需取得流出點之地表水流量。</p> <p>二十六、增加第(6)點，長期環境變動現象(例如地質環境、氣候與海平面變化、地形變化等)可能會使地下水流場或地下水的組成產生改變，進而影響核種遷移的過程。</p> <p>二十七、於「放射性廢棄物處置安全分析模式驗證及場址特性調查審查技術之研究」研究報告中，4.2 節修正建議，地表水傳輸模式應修改為「水流與傳輸模式」，並於模式之源項輸入參數中，地下水界面部分新增「匯項」。</p>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>的人為或天然意外事件，對民眾與工作人之輻射劑量評估。</p> <p>(一)提供資料</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 處置設施運轉期及封閉後，意外事故或異常狀況之預測：包括事故種類(如<b>運轉時廢棄物包件從吊車墜落</b>、<b>地震、海嘯、或暴潮、人類無意入侵、豎井或調查井發生回填失效</b>)及發生頻率。</li> <li>2. 處置設施運轉期及封閉後，依事故種類說明意外事故或異常狀況之核種傳輸機制。</li> <li>3. 異常情節(或稱替代情節)分析：處置設施運轉期及封閉後，意外事故或異常狀況之處置情節。 <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 選用國際常用的低放射性廢棄物處置的<b>特徵、事件及作用(FEP)</b>通用表(如 IAEA 或國際組織)。</li> <li>(2) 經學者專家從國際常用的 FEP 通用表篩選出與該處置場異常情況相關的 FEPs。</li> <li>(3) 選出處置系統的重要組件(如廢棄物體、各種工程障壁(近場)、天然障壁(遠場)、生物圈等)，分析並說明重要組件的特徵、異常情況下重要組件發生的事件、各重要組件間的互相作用過程。</li> <li>(4) 考量選出的異常情況相關的 FEPs 及各重要組件與其間的特徵與作用過程，以合理的邏輯方法，繪出放射性核種傳輸的路徑，並建構出異常情節。</li> </ol> </li> <li>4. <b>應根據場址資訊與合理性研擬異常狀況下之概念模式，</b></li> </ol>	<p>(一)提供資料</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 處置設施運轉期及封閉後，意外事故或異常狀況之預測：包括事故種類(如運轉時廢棄物從吊車墜落；封閉後發生有害地震、海水淹沒處置場、人類無意入侵處置場)及發生頻率。</li> <li>2. 處置設施運轉期及封閉後，依事故種類說明意外事故或異常狀況之核種傳輸機制。</li> <li>3. 異常情節(或稱替代情節)分析：處置設施運轉期及封閉後，意外事故或異常狀況之處置情節。 <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 選用國際常用的低放射性廢棄物處置的特徵事件過程(FEP)通用表(如 IAEA 或國際組織)。</li> <li>(2) 經學者專家從國際常用的 FEP 通用表篩選出與該處置場異常情況相關的 FEPs。</li> <li>(3) 選出處置系統的重要組件(如廢棄物體、各種工程障壁(近場)、天然障壁(遠場)、生物圈等)，分析並說明重要組件的特徵、異常情況下重要組件發生的事件、各重要組件間的互相作用過程。</li> <li>(4) 考量選出的異常情況相關的 FEPs 及各重要組件與其間的特徵與作用過程，以合理的邏輯方法，繪出放射性核種傳輸的路徑，並建構出異常情節。</li> </ol> </li> </ol>	<p>二十八、參照 10 CFR 61.13(b)</p>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------

<p><b>說明如何根據其結果建構與選用評估分析模式。</b></p> <p>5. <b>應根據分析模式的結果說明所選用之程式，該程式需經過專業之驗證及確認後方能使用於評估報告。</b></p> <p>6. 提出異常情節輻射劑量評估程式及其輸入資料及其輸出資料。</p> <p>7. 對異常情節輻射劑量評估程式的參數，進行敏感度分析。(若正常情節已分析過的參數，可不必再進行敏感度分析)</p> <p>8. 對敏感度高的參數，考量參數的分布狀況，進行個人有效劑量的不確定性分析。</p> <p>9. 考量事件發生的機率，提出民眾與工作人員之輻射劑量(風險)評估結果。</p> <p>(二)審查作業</p> <p>1. 若提供資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</p> <p>2. 事故種類與發生頻率之預測是否可考量場址特性及氣象條件，其參考文獻及假設是否合理。</p> <p>3. 異常狀況之核種傳輸機制是否合理且保守。</p> <p>4. 異常情節建構是否經由專家學者所確認、意外事故或異常狀況之重要組件特徵事件與過程是否已充分考量、異常情節建構是否合理。</p> <p>5. 異常情節輻射劑量風險評估程式的輸入資料是否符合場址資訊與合理性，其輸出資料是否合理。</p> <p>6. 是否進行參數敏感度分析與不確定分析，分析結果是否合理。</p> <p><b>五、核種外釋到達人類活動範圍生物圈之傳輸機制：</b> 包括地下水、空氣、地表水、其他傳輸機制，及直接輻射與向天輻射對個人之曝露，並描</p>	<p>4. 提出異常情節輻射劑量評估程式及其輸入資料及其輸出資料。</p> <p>5. 對異常情節輻射劑量評估程式的參數，進行敏感度分析。(若正常情節已分析過的參數，可不必再進行敏感度分析)</p> <p>6. 對敏感度高的參數，考量參數的分布狀況，進行個人有效劑量的不確定性分析。</p> <p>7. 考量事件發生的機率，提出民眾與工作人員之輻射劑量(風險)評估結果。</p> <p>(二)審查作業</p> <p>1. 若提供資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</p> <p>2. 事故種類與發生頻率之預測是否可考量場址特性及氣象條件，其參考文獻及假設是否合理。</p> <p>3. 異常狀況之核種傳輸機制是否合理且保守。</p> <p>4. 異常情節建構是否經由專家學者所確認、意外事故或異常狀況之重要組件特徵事件與過程是否已充分考量、異常情節建構是否合理。</p> <p>5. 異常情節輻射劑量風險評估程式的輸入資料是否符合場址資訊與合理性，其輸出資料是否合理。</p> <p>6. 是否進行參數敏感度分析與不確定分析，分析結果是否合理。</p> <p><b>五、核種外釋到達人類活動範圍之傳輸機制：</b> 包括地下水、空氣、地表水、其他傳輸機制，及直接輻射與向天輻射對個人之曝露，並描述各傳輸機制之概念模式、數學模式及分析所需之參數。 地下水、空氣、地表水、其他傳輸機制概念模式、數學模式及分析所需之參數的正確性，影響處</p>	<p>二十九、於「放射性廢棄物處置安全分析模式驗證及場址特性調查審查技術之研究」研究報告中，4.2 節修正建議，使用名詞「參數」較為適當。</p> <p>三十、誤植更正「五」。於「放射性廢棄物處置安全分析模式驗證及場址特性調查審查技術之研究」研究報告中，4.2 節修正建議，應需包含提供「不確定性分析結果」資料，</p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>述各傳輸機制之概念模式、數學模式及分析所需之參數。地下水、空氣、地表水、其他傳輸機制概念模式、數學模式及分析所需之參數的正確性，影響處置設施之輻射劑量安全評估，故請提供下列資料，供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 地下水</p> <p>(1) <u>依場址地質及水文地質特性所建構之水文地質模型與假設。</u></p> <p>(2) <u>依所建構水文地質模型描述潛在的核種遷移地下水途徑。</u></p> <p>(3) 地下水之流場→(流速與流向之分布與數值)。</p> <p>(4) 核種藉地下水之傳輸模式。</p> <p>(5) <u>人類或生物圈可能接觸到地下水位置及場界位置之核種外釋至生物圈位置、活度與濃度以及可能稀釋地下水的地表水流量。</u></p> <p>(6) <u>說明長期變動現象(例如地質環境、氣候與海平面變化、地形變化等)對地下水流之影響。</u></p> <p>2. 空氣</p> <p>(1) 估算大氣傳輸及放射性核種外釋到大氣之延散，所使用的模式、電腦程式與計算方式。</p> <p>(2) 大氣傳輸及擴散模式應包括：(a)放射性核種釋出之時間與頻率變化之計算方式，(b)放射性核種釋出高度，(c)放射性污染源之幾何形狀，(d)再懸浮射源之排放率及基準，(e)考量射源與監測點間之地形及結構之影響，(f)關鍵群體</p>	<p>置設施之輻射劑量安全評估，故請提供下列資料，供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 地下水</p> <p>(1) 依場址地質及水文地質特性，描述潛在的核種遷移地下水途徑。</p> <p>(2) 地下水之流場、流速與流向之分布與數值。</p> <p>(3) 核種藉地下水之傳輸模式。</p> <p>(4) 人類或生物圈可能接觸到地下水位置及場界位置之核種濃度。</p> <p>2. 空氣</p> <p>(1) 估算大氣傳輸及放射性核種外釋到大氣之延散，所使用的模式、電腦程式與計算方式。</p> <p>(2) 大氣傳輸及擴散模式應包括：(a)放射性核種釋出之時間與頻率變化之計算方式，(b)放射性核種釋出高度，(c)放射性污染源之幾何形狀，(d)再懸浮射源之排放率及基準，(e)考量射源與監測點間之地形及結構之影響，(f)關鍵群體與鄰近場址外監測點之位置及高度，(g)放射性污染雲煙(plume)濃度的計算方式，(h)</p>	<p>以供審查是否符合法規限值。</p> <p>1.根據 IAEA-SSG 29 第 5.25 節規定，新增本項要求。</p> <p>2. 另建議參考美國法規 10 CFR 61.2，請主管機關考量是否修訂安全分析報告導則第七章一(六)為” 說明各種傳輸機制之評估結果，是否符合法規限值。且處置設施封閉後，評估之時間尺度應達一萬年。” (若依此修訂後，則審查導則，則同步刪除” 並說明評估時間尺度之合理性。” 之字句)</p>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>與鄰近場址外監測點之位置及高度，(g)放射性污染雲煙(plume)濃度的計算方式，(h)以處置場址為中心，十六個 22.5 徑度扇形區域中，每個區域之人口分佈，(i)空氣傳輸與擴散模擬之移除機制與微粒沉積速率，(j)用於量化移除機制、乾濕沉積速率及單位面積沉積量之計算模式。</p> <p>(3) 可代表場址環境並用於大氣傳輸與擴散分析之氣象數據。</p> <p>(4) 預估空浮的表面沉積濃度與場址外個人的劑量。</p> <p>3. 地表水</p> <p>(1) 核種遷移的所有可能的地表水概念模式。</p> <p>(2) 用於分析場址下游適當位置核種濃度之具有空間與時間分佈的<u>地表水水流與傳輸模式</u>。</p> <p>(3) <u>地表水水流與傳輸模式</u>之源項輸入參數，須包括地表水釋出速率、與<u>地下水界面之源/匯項</u>。</p> <p>(4) <u>經地表水水流與傳輸模式</u>計算所得的核種濃度。</p> <p>4. 其他傳輸機制：包括直接輻射、向天輻射與生物傳輸。</p> <p>(1) 加馬輻射的曝露模式(含電腦程式、污染源、接受者的模型建構)。</p> <p>(2) 在運轉期間，場外個人的曝露。主要考量的情節有二：(a)廢棄物運送至場區的載運車輛停車曝露，(b)吊掛作業所可能產生之曝露。</p> <p>(3) 在主動監管期間，工作人員的劑量分析，主要途徑來自場址土</p>	<p>以處置場址為中心，十六個 22.5 徑度扇形區域中，每個區域之人口分佈，(i)空氣傳輸與擴散模擬之移除機制與微粒沉積速率，(j)用於量化移除機制、乾濕沉積速率及單位面積沉積量之計算模式。</p> <p>(3) 可代表場址環境並用於大氣傳輸與擴散分析之氣象數據。</p> <p>(4) 預估空浮的表面沉積濃度與場址外個人的劑量。</p> <p>3. 地表水</p> <p>(1) 核種遷移的所有可能的地表水概念模式。</p> <p>(2) 用於分析場址下游適當位置核種濃度之具有空間與時間分佈的地表水傳輸模式。</p> <p>(3) 地表水傳輸模式之源項輸入參數，須包括地表水釋出速率、與地下水界面之源項。</p> <p>(4) 經地表水傳輸模式計算所得的核種濃度。</p> <p>4. 其他傳輸機制：包括直接輻射、向天輻射與生物傳輸。</p> <p>(1) 加馬輻射的曝露模式(含電腦程式、污染源、接受者的模型建構)。</p> <p>(2) 在運轉期間，場外個人的曝露。主要考量的情節有二：(a)廢棄物運送至場區的載運車輛停車曝露，(b)吊掛作業所可能產生之曝露。</p> <p>(3) 在主動監管期間，工作人員的劑量分析，主要途徑來自場址土壤的直接輻射；場外個人的劑量分析，除來自場址土壤的直接</p>	
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

<p>壤的直接輻射；場外個人的劑量分析，除來自場址土壤的直接輻射外，亦須考量向天輻射。</p> <p>(4) 在被動監管期間，須考量人員無意闖入的劑量分析，<b>包括農耕、居住、鑽井或其他合理可預見的活動，並提供防止闖入者障壁系統的有效性時間。</b></p> <p>(5) 生物傳輸機制分析，包含由處置設施遷移出去的受污染生物，成為食物鏈的一環。</p> <p>(二) 審查作業</p> <p>1. 地下水</p> <p>(1) 若提供地下水資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</p> <p>(2) 是否完整並清楚定義核種傳輸之所有可能的地下水途徑。</p> <p>(3) 地下水概念模式中之水文地質、地質及地球化學資訊是否與安全分析報告中場址特性之數據一致。</p> <p>(4) 地下水模式之輸入參數值是否合理且足以提供合理之準確度或保守之分析。若場址參數無法取得，應確認採適當保守假設，若輸入參數存在不確定性或不一致，其數值應與文獻中所得之相似地質介質數值範圍相比較。</p> <p>(5) 確認地下水模式之程式符合物理、化學及數學原則(並經過驗證)，且正確地使用程式。</p> <p>2. 空氣</p>	<p>輻射外，亦須考量向天輻射。</p> <p>(4) 在被動監管期間，須考量人員無意闖入的劑量分析。</p> <p>(5) 生物傳輸機制分析，包含由處置設施遷移出去的受污染生物，成為食物鏈的一環。</p> <p>(二) 審查作業</p> <p>1. 地下水</p> <p>(1) 若提供地下水資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</p> <p>(2) 是否完整並清楚定義核種傳輸之所有可能的地下水途徑。</p> <p>(3) 地下水概念模式中之水文地質、地質及地球化學資訊是否與安全分析報告中場址特性之數據一致。</p> <p>(4) 地下水模式之輸入參數值是否合理且足以提供合理之準確度或保守之分析。若場址參數無法取得，應確認採適當保守假設，若輸入參數存在不確定性或不一致，其數值應與文獻中所得之相似地質介質數值範圍相比較。</p> <p>(5) 確認地下水模式之程式符合物理、化學及數學原則(並經過驗證)，且正確地使用程式。</p> <p>2. 空氣</p> <p>(1) 空氣途徑分析資料是否完整。</p>	
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

<p>(1) 空氣途徑分析資料是否完整。</p> <p>(2) 大氣傳輸及延散所使用之模式與計算方式之描述是否正確。</p> <p>(3) 模式是否可模擬由射源至監測位置之大氣傳輸及延散。</p> <p>(4) 大氣傳輸模式內參數的靈敏度分析，確保可有效預估其傳輸行為。</p> <p>(5) 地表釋出與通風口有效釋出、不同幾何污染源，以及模擬長時間之計算方式是否可被接受。</p> <p>(6) 量化移除機制、乾濕沉積速率、面沉積及雲煙之數學方法(須考慮核種釋出的類型、場址降水資料、污染源到接受點的距離、空氣穩定度分級)。</p> <p>(7) 由乾濕沉積導致表面污染之計算方式(須考慮核種種類特性、場址氣象情況與地理環境)。</p> <p>(8) 空氣傳輸與擴散模式中使用之氣象資訊是否合理且足夠。</p> <p>(9) 模式中，場址及其環境之氣象數據是否具有代表性。</p> <p>(10) 風速與風向之量測時間及間隔是否合理。</p> <p>(11) 用於計算空氣傳播及擴散之延散參數及空氣穩定度等級是否正確。</p> <p>(12) 大氣傳輸及擴散模式應符合下列要求： (a) 模式中使用之場址輸入數據具代表性； (b) 模式已考慮場址之物理特性，如結構、不規則地形、乾濕沉積， (c) 模式已考慮釋出放射性核</p>	<p>(2) 大氣傳輸及延散所使用之模式與計算方式之描述是否正確。</p> <p>(3) 模式是否可模擬由射源至監測位置之大氣傳輸及延散。</p> <p>(4) 大氣傳輸模式內參數的靈敏度分析，確保可有效預估其傳輸行為。</p> <p>(5) 地表釋出與通風口有效釋出、不同幾何污染源，以及模擬長時間之計算方式是否可被接受。</p> <p>(6) 量化移除機制、乾濕沉積速率、面沉積及雲煙之數學方法(須考慮核種釋出的類型、場址降水資料、污染源到接受點的距離、空氣穩定度分級)。</p> <p>(7) 由乾濕沉積導致表面污染之計算方式(須考慮核種種類特性、場址氣象情況與地理環境)。</p> <p>(8) 空氣傳輸與擴散模式中使用之氣象資訊是否合理且足夠。</p> <p>(9) 模式中，場址及其環境之氣象數據是否具有代表性。</p> <p>(10) 風速與風向之量測時間及間隔是否合理。</p> <p>(11) 用於計算空氣傳播及擴散之延散參數及空氣穩定度等級是否正確。</p> <p>(12) 大氣傳輸及擴散模式應符合下列要求： (a) 模式中使用之場址輸入數據具代表性； (b) 模式已考慮場址之物理特性，如結構、不規則地形、乾濕沉積， (c) 模式已考慮釋出放射性核種之物理及化學特性。</p> <p>3. 地表水</p>	
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

<p>種之物理及化學特性。</p> <p>3. 地表水</p> <p>(1) 若提供地表水資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</p> <p>(2) <u>參數選擇與使用</u>是否採用保守原則，未來所有可能的地表水改變(降水量變化或已知未來建造水井、水庫、取水口等)是否能於計算中反應。</p> <p>(3) 藉地表水核種遷移分析是否包括：(a)描述延散特性及在正常與意外情形下於現存或未來使用者位置地表水環境的稀釋能力，(b)提供現存或未來使用者位置在正常與意外情形下，年平均與最大濃度(意外時)估計與基準，(c)定義可能污染地表水使用者之途徑，與(d)描述數據之參考來源。</p> <p>4. 其他傳輸機制</p> <p>(1) 若提供加馬輻射與經由生物途徑的傳輸的描述及資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</p> <p>(2) 加馬輻射的傳輸機制中屏蔽增建因子與其數學模式，體外曝露模式，射源模式，輸入參數是否正確。</p> <p>(3) 加馬輻射與生物傳輸之相關假設，是否保守。</p>	<p>(1) 若提供地表水資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</p> <p>(2) 係數選擇與參數使用是否採用保守原則，未來所有可能的地表水改變(降水量變化或已知未來建造水井、水庫、取水口等)是否能於計算中反應。</p> <p>(3) 藉地表水核種遷移分析是否包括：(a)描述延散特性及在正常與意外情形下於現存或未來使用者位置地表水環境的稀釋能力，(b)提供現存或未來使用者位置在正常與意外情形下，年平均與最大濃度(意外時)估計與基準，(c)定義可能污染地表水使用者之途徑，與(d)描述數據之參考來源。</p> <p>4. 其他傳輸機制</p> <p>(1) 若提供加馬輻射與經由生物途徑的傳輸的描述及資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</p> <p>(2) 加馬輻射的傳輸機制中屏蔽增建因子與其數學模式，體外曝露模式，射源模式，輸入參數是否正確。</p> <p>(3) 加馬輻射與生物傳輸之相關假設，是否保守。</p> <p>六、述明各種傳輸機制之評估結果，是否符合法規限值，提供下列資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p>	
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

<p>六、述明各種傳輸機制之評估結果，是否符合法規限值，提供下列資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 彙整 7.1 中一至<u>五</u>節之分析結果。確認最大個人劑量位置，主要放射性曝露介質，<u>主要攝入途徑，與不確定性分析結果</u>。</li> <li>2. 劑量評估分為(1)運轉期與封閉後正常情節最大個人劑量，(2)運轉期與封閉後異常情節最大輻射劑量(風險)。</li> <li>3. 評估結果應說明尖峰劑量發生的時間。並說明評估時間尺度之合理性。</li> </ol> <p>(二)審查作業</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 運轉期正常情節工作人員最大個人劑量，須小於游離輻射防護安全標準之職業輻射年有效劑量。</li> <li>2. 運轉期與封閉後正常情節場外一般民眾最大個人劑量，須小於低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則中第八條之規定，場外一般民眾年有效劑量，不得超過 0.25 毫西弗。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 彙整 7.1 中一至六節之分析結果。確認最大個人劑量位置，主要放射性曝露介質，主要攝入途徑。</li> <li>2. 劑量評估分為(1)運轉期與封閉後正常情節最大個人劑量，(2)運轉期與封閉後異常情節最大輻射劑量(風險)。</li> </ol> <p>(二)審查作業</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 運轉期正常情節工作人員最大個人劑量，須小於游離輻射防護安全標準之職業輻射年有效劑量。</li> <li>2. 運轉期與封閉後正常情節場外一般民眾最大個人劑量，須小於低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則中第八條之規定，場外一般民眾年有效劑量，不得超過 0.25 毫西弗。</li> </ol>	
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

修正條文	現行條文	說明
<p><b>7.2 設備操作：依據處置設施之設備特性及操作程序，評估運轉期設備操作之安全性。</b></p> <p>處置設施內重要設備之良好特性、正確地使用操作，涉及處置場運轉安全，所以要求評估運轉期設備操作之安全性，故應提供下列資料供審查：</p> <p>(一)提供資料</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 說明廢棄物桶暫存與處置之吊升或堆貯設備的特性、功能與使用方法。</li> <li>2. 說明填充廢棄物桶間隙之填充機設備的特性、功能與使用方法。</li> <li>3. 說明處置設施內公用系統與輔助系統中電力、供水、廢水收集等設備的特性、功能與使用方法。</li> <li>4. 說明並表列處置設施內重要設備之已完成的操作與維護程序書。</li> <li>5. 評估處置設施內重要設備之使用壽命，並說明更換作業之方法。</li> </ol> <p>(二)審查作業</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 處置設施內重要設備的特性與功能，是否考量場址特性與要求，足以符合設計目的與安全目標。</li> <li>2. 檢視重要設備之操作與維護程序書，是否具有合理的保證，運轉作業不會中斷，及不允許因為重要與必要設備缺乏或故障，而發生不安全的狀況。</li> <li>3. 重要設備使用壽命之評估是否合理。</li> </ol>	<p><b>7.2 設備操作：依據處置設施之設備特性及操作程序，評估運轉期設備操作之安全性。</b></p> <p>處置設施內重要設備之良好特性、正確地使用操作，涉及處置場運轉安全，所以要求評估運轉期設備操作之安全性，故應提供下列資料供審查：</p> <p>(一)提供資料</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 說明廢棄物桶暫存與處置之吊升或堆貯設備的特性、功能與使用方法。</li> <li>2. 說明填充廢棄物桶間隙之填充機設備的特性、功能與使用方法。</li> <li>3. 說明處置設施內公用系統與輔助系統中電力、供水、廢水收集等設備的特性、功能與使用方法。</li> <li>4. 說明並表列處置設施內重要設備之已完成的操作與維護程序書。</li> <li>5. 評估處置設施內重要設備之使用壽命，並說明更換作業之方法。</li> </ol> <p>(二)審查作業</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 處置設施內重要設備的特性與功能，是否考量場址特性與要求，足以符合設計目的與安全目標。</li> <li>2. 檢視重要設備之操作與維護程序書，是否具有合理的保證，運轉作業不會中斷，及不允許因為重要與必要設備缺乏或故障，而發生不安全的狀況。</li> <li>3. 重要設備使用壽命之評估是否合理。</li> </ol>	



修正條文	現行條文	說明
<p>7.3 闖入者防護：描述在處置設施營運中、封閉後，防止無意闖入者接近廢棄物所採行之防護設計及措施障壁系統，並評估其功能。</p> <p>在處置設施營運中，只要有堅固的場界圍籬與標示，即可防止無意闖入者接近廢棄物；在處置設施封閉後，則須提供合理的防護措施障壁系統，才能防範非刻意之入侵行為。因此須提供下列資料，供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 處置場界圍籬與標示的材質與方法。</li> <li>2. C類廢棄物處置位置與深度之規劃。</li> <li>3. C類廢棄物防止闖入者障壁系統障壁的材質、設計與施工方法</li> </ol> <p>(二)審查作業</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 處置場界圍籬與標示的材質、維護與設置方法，是否能夠堅固保存至處置場免於監管期，並能確保其功能。</li> <li>2. 坑道處置，C類廢棄物須處置在坑道最內部，不易接觸的位置；淺地處置，C類廢棄物須處置在覆蓋層頂部下方至少5公尺以上。在C類廢棄物處置區應有防止闖入者障壁系統是否建造防止入侵者障壁系統，妥善區隔，達到防護之目的。</li> <li>3. 入侵者工程障壁在場址封閉後是否能保持500年的功能性與完整性，是否能滿足需求。並檢視所有使用的數據與假設及計算方法之適用性，以及分析結果之合理性。</li> </ol>	<p>7.3 闖入者防護：描述在處置設施營運中、封閉後，防止無意闖入者接近廢棄物所採行之防護設計及措施，並評估其功能。</p> <p>在處置設施營運中，只要有堅固的場界圍籬與標示，即可防止無意闖入者接近廢棄物；在處置設施封閉後，則須提供合理的防護措施，才能防範非刻意之入侵行為。因此須提供下列資料，供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 處置場界圍籬與標示的材質與方法。</li> <li>2. C類廢棄物處置位置與深度之規劃。</li> <li>3. C類廢棄物障壁的材質、設計與施工方法。</li> </ol> <p>(二)審查作業</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 處置場界圍籬與標示的材質、維護與設置方法，是否能夠堅固保存至處置場免於監管期，並能確保其功能。</li> <li>2. 坑道處置，C類廢棄物須處置在坑道最內部，不易接觸的位置；淺地處置，C類廢棄物須處置在覆蓋層頂部下方至少5公尺以上。在C類廢棄物處置區是否建造防止入侵者障壁系統，妥善區隔，達到防護之目的。</li> <li>3. 入侵者工程障壁在場址封閉後是否能保持500年的功能性與完整性，是否能滿足需求。並檢視所有使用的數據與假設及計算方法之適用性，以及分析結果之合理性。</li> </ol>	<p>導則既有名詞能統一，根據行政院原子能委員會放射性物料管理局「放射性廢料辭彙」，其施工建造完成後至封閉期之期間應稱為運轉期。</p> <p>廢棄物可分為A類、B類及C類，在處置時應全盤考量，故刪除C類用詞。</p> <p>刪除部分語意重覆文字</p>

修正條文	現行條文	說明
<p>7.4 長期穩定性：評估並分析處置設施於運轉期間及封閉後之長期穩定性與安全性。分析時應說明分析方法、輸入參數、假設狀況、適用範圍、模式分析結果及不確定性等。</p> <p>安全分析報告提出可能影響處置設施長期穩定性與安全性的事件，應審查每一事件評估與分析是否符合長期穩定性的安全要求。影響處置設施長期穩定性的因素有：水的侵蝕、邊坡穩定性、地層沉陷與下陷、<b>地層抬升、海平面上升或下降、地球化學環境</b>，因此須提供下列資料供審查，以確保處置場封閉後之長期穩定性與安全性。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 水的侵蝕</p> <p>(1) 處置場可能洪水之預估分析：包括：降水量、降水損失、逕流反應特性、渠道洪水聚積、<b>洪水侵蝕的地形變遷</b>、水位分析、流速分析、處置場的最大可能洪水量 (probable maximum flood, PMF)、設計洪水量與降低或控制地形不穩定性的改善程序。</p> <p>(2) 上游若有水庫，提供水庫的位置與大小、<b>水庫潰壩之出尖峰流量、分析水庫潰壩機率與損壞情形</b>。</p> <p>(3) 侵蝕防護設計：包括附近溪流洪水的侵蝕防護、排水渠道的侵蝕防護、壕溝與覆蓋層邊坡的侵蝕防護、隧道上層的侵蝕防護、侵蝕防護的耐久性。</p> <p>2. 邊坡穩定性</p> <p>(1) 場址/邊坡區域特性： (a)場址地質對於穩定</p>	<p>7.4 長期穩定性：評估並分析處置設施於運轉期間及封閉後之長期穩定性與安全性。分析時應說明分析方法、輸入參數、假設狀況、適用範圍、模式分析結果及不確定性等。</p> <p>安全分析報告提出可能影響處置設施長期穩定性與安全性的事件，應審查每一事件評估與分析是否符合長期穩定性的安全要求。影響處置設施長期穩定性的因素有：水的侵蝕、邊坡穩定性、地層沉陷與下陷，因此須提供下列資料供審查，以確保處置場封閉後之長期穩定性與安全性。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 水的侵蝕</p> <p>(1) 處置場可能洪水之預估分析：包括：降水量、降水損失、逕流反應特性、渠道洪水聚積、不穩定性地形的類型、水位分析、流速分析、處置場的最大可能洪水量 (probable maximum flood, PMF)、設計洪水量與降低或控制地形不穩定性的改善程序。</p> <p>(2) 上游若有水庫，提供水庫的位置與大小、水庫瞬間損壞提出尖峰流量、分析水庫損壞的影響。</p> <p>(3) 侵蝕防護設計：包括附近溪流洪水的侵蝕防護、排水渠道的侵蝕防護、壕溝與覆蓋層邊坡的侵蝕防護、隧道上層的侵蝕防護、侵蝕防護的耐久性。</p> <p>2. 邊坡穩定性</p> <p>(1) 場址/邊坡區域特性： (a)場址地質對於穩定性可能的影響、(b)場</p>	<p>一、長期穩定性應包含監測計畫與項目審查。</p> <p>二、於「低放射性廢棄物處置設施安全評估審查規範精進之研究」研究報告中，修正建議影響處置設施長期穩定性的因素，應包含「地層抬升、海平面上升、地球化學環境」方面資料較為完整。</p> <p>三、於「低放射性廢棄物坑道處置技術審查要項研究」研究報告中，指出可能的地形變遷造成場址受到洪水與侵蝕的影響，包括：(i)不穩定性地形的類型；(ii)地形變化對洪水與洪水流速的影響；(iii)降低或控制地形不穩定性的改善程序，故應將「不穩定性地形的類型」更改為「洪水侵蝕的地形變遷」。</p> <p>四、於「放射性廢棄物處置安全分析模式驗證及場址特性調查審查技術之研究」研究報告中，4.2 節修正建議，使用專有名詞「水庫潰壩」較為適當。</p> <p>五、建議維持邊坡穩定性較適合淺地表處置所需，未來應針對坑道處置增列條文。 <b>為因應台灣未來可能採坑道處置，未來將增列 3.處置坑道穩定性</b></p>

<p>性可能的影響、(b)場址調查所使用之大地工程與地球物理技術、(c)邊坡穩定性材料與土壤參數、(d)邊坡區域的地下水位面位置以及變動範圍、(e)邊坡使用借土材料的特性、(f)夯實工作與夯實後材料的強度。</p> <p>(2) 邊坡穩定性：(a)邊坡所採用之有關土壤與岩石之參數、(b)邊坡靜態穩定性分析、(c)地震及地層移動的邊坡動態穩定性分析、(d)場址下方土壤液化分析。</p> <p>3. 地層沉陷與下陷</p> <p>(1) 場址特性、處置場建造、運轉以及處置單元開挖相關資訊。</p> <p>(2) 長期可能發生沉陷區域之模擬與分析。</p> <p>(3) 沉陷之監控與改善計畫。</p> <p>4. <u>地層抬升與沉降</u></p> <p>(1) <u>場址特性、處置場建造、運轉以及處置單元開挖相關資訊。</u></p> <p>(2) <u>長期可能發生抬升區域之模擬與分析。</u></p> <p>5. <u>海平面上升或下降</u></p> <p>(1) <u>鄰近海岸地區之處置場址應提供海平面上升或下降速率之推估。</u></p> <p>6. 地球化學環境</p> <p>(1) <u>處置設施建設前的地球化學環境背景資料。</u></p> <p>(2) <u>處置場封閉後的地球化學環境監測計畫。</u></p> <p>(二)審查作業</p> <p>1. 水的侵蝕</p> <p>(1) 設計洪水量須大於PMF；若設計洪水量低於PMF，則應審查設計洪水量的合理性</p>	<p>址調查所使用之大地工程與地球物理技術、(c)邊坡穩定性材料與土壤參數、(d)邊坡區域的地下水位面位置以及變動範圍、(e)邊坡使用借土材料的特性、(f)夯實工作與夯實後材料的強度。</p> <p>(2) 邊坡穩定性：(a)邊坡所採用之有關土壤與岩石之參數、(b)邊坡靜態穩定性分析、(c)地震及地層移動的邊坡動態穩定性分析、(d)場址下方土壤液化分析。</p> <p>3. 地層沉陷與下陷</p> <p>(1) 場址特性、處置場建造、運轉以及處置單元開挖相關資訊。</p> <p>(2) 長期可能發生沉陷區域之模擬與分析。</p> <p>(3) 沉陷之監控與改善計畫。</p> <p>(二)審查作業</p> <p>1. 水的侵蝕</p> <p>(1) 設計洪水量須大於PMF；若設計洪水量低於PMF，則應審查設計洪水量的合理性，另外，排水區域也應一併考量。</p>	<p>六、增加第4、5、6點，於「低放射性廢棄物處置設施安全評估審查規範精進之研究」研究報告中，修正建議影響處置設施長期穩定性的因素中，所需提供資料，應包含「地層抬升、海平面上升或下降、地球化學環境」方面資料較為完整。如何模擬與分析亦需說明。</p> <p>七、於「放射性廢棄物處置安全分析模式驗證及場址特性調查審查技術之研究」研究報告中，4.2節修正建議，應包含「排水設施與區域設置」較為完整。</p>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

性，另外，**排水設施與區域設置也應一併考量**。

- (2) 上游水庫的影響，必須是在處置場洪水設計可容許範圍內。
- (3) 資料是否足以在洪水以及侵蝕議題上提供足夠的安全證據。侵蝕設計應能合理確保處置場封閉的長期穩定，免於主動維護的需求。
- (4) 為了防範風蝕與水的侵蝕，壕溝覆蓋層之設計應審慎考量，包括坡度與厚度等。

## 2. 邊坡穩定性

- (1) 場址/邊坡區域特性：  
(a) 是否有充足的地質相關工作足以描述場區的地質特性。(b) 是否有場址附近的調查位置(鑽孔、探針、試坑、槽溝、震測線、水壓觀測井)、地質剖面、穩定性調查的邊坡位置等，應有清楚的描述並繪製成圖，剖面圖展現邊坡的地層。(c) 邊坡穩定性材料與土壤參數之測試，是否符合相關大地工程專業規範。(d) 是否充分考慮地下水對邊坡穩定性設計的影響。(e) 借土材料穩定性與強度參數，是否經過適當的材料樣品測試。(f) 材料選擇、夯實準則、溼度、級配、品保測試頻率等是否均有詳細施工規範。
- (2) 邊坡穩定性：  
(a) 邊坡土壤是否經具有靜態與動態性質與岩石組成之說明，分析參數是考量實驗室或現地實驗資料。(b) 邊坡靜態穩定性分析，是否包括不同的土壤介質

- (2) 上游水庫的影響，必須是在處置場洪水設計可容許範圍內。
- (3) 資料是否足以在洪水以及侵蝕議題上提供足夠的安全證據。侵蝕設計應能合理確保處置場封閉的長期穩定，免於主動維護的需求。
- (4) 為了防範風蝕與水的侵蝕，壕溝覆蓋層之設計應審慎考量，包括坡度與厚度等。

## 2. 邊坡穩定性

- (1) 場址/邊坡區域特性：  
(a) 是否有充足的地質相關工作足以描述場區的地質特性。(b) 是否有場址附近的調查位置(鑽孔、探針、試坑、槽溝、震測線、水壓觀測井)、地質剖面、穩定性調查的邊坡位置等，應有清楚的描述並繪製成圖，剖面圖展現邊坡的地層。(c) 邊坡穩定性材料與土壤參數之測試，是否符合相關大地工程專業規範。(d) 是否充分考慮地下水對邊坡穩定性設計的影響。(e) 借土材料穩定性與強度參數，是否經過適當的材料樣品測試。(f) 材料選擇、夯實準則、溼度、級配、品保測試頻率等是否均有詳細施工規範。
- (2) 邊坡穩定性：  
(a) 邊坡土壤是否經具有靜態與動態性質與岩石組成之說明，分析參數是考量實驗室或現地實驗資料。(b) 邊坡靜態穩定性分析，是否包括不同的土壤介質以及作用力之邊界與材料特性、預期荷重條件下的最小安全係

增加第 4、5 點，於「低放射性廢棄物處置設施安全評估審查規範精進之研究」研究報告中，修正建議影響處置設施長期穩定性的因素中，所需審查作業，應包含「地層抬升與海平面上升或下降」方面資料較為完整。如何模擬與分析亦需說明。如何模擬與分析的相關資料亦需提供說明。

九、增加第 6 點，處置設施的建造可能對周遭環境造成地球化學環境上的改變，例如設施周邊岩盤的飽和與未飽和的狀態變化、因飽和與未飽和變化造成的氧化還原狀態改變、深層地下水沿著水路上昇所造成的水質變化等，而影響工程障壁的狀態。由於利用地下水流動解析預測設施周邊岩盤的地球化學環境變化時，因地球化學環境會隨著處置設施的建設逐漸變化，較難以坑道開挖前的資料驗證模型的正確性。因此，需於設施建設後，持續監測孔隙水壓、飽和度等地球化

<p>以及作用力之邊界與材料特性、預期荷重條件下的最小安全係數。(c)動態穩定性分析，是否包括地震所引發之加速度與震波速度之分析。(d)場址下方土壤液化分析是否經現地或實驗室測試。</p> <p>(3) 確認天然與人為邊坡之長期穩定。</p> <p>(4) 邊坡分析符合保守原則，且引用數據確實可用。</p> <p>(5) 邊坡坡度、受力等分析應合理且保守，對於可能引發之負面效應，有足夠安全係數。</p> <p>(6) 借土材料之選用、開挖、夯實等有適當之品管計畫。</p> <p>3. 地層沉陷與下陷</p> <p>(1) 開挖相關資訊是否足夠供審查者進行沉陷與下陷相關事項審查。</p> <p>(2) 長期可能發生沉陷區域之模擬，是否合理且保守、是否考量其不確定性。</p> <p>(3) 岩層中是否有潛在溶解洞穴可能造成下陷？</p> <p>(4) 防止沉陷與下陷之材料是否已經過詳細與合理的實驗與分析？所提供之數據是否足以支持相關之設計？</p> <p>4. <u>地層抬升與沉降</u></p> <p>(1) <u>相關資訊是否足夠供審查者進行地層抬升相關事項審查。</u></p> <p>(2) <u>長期可能發生抬升區域之模擬，是否合理且保守、是否考量其不確定性。</u></p> <p>5. <u>海平面上升或下降</u></p> <p>(1) <u>鄰近海岸地區之處置場址應考慮海平面上升或下降之影響</u></p>	<p>數。(c)動態穩定性分析，是否包括地震所引發之加速度與震波速度之分析。(d)場址下方土壤液化分析是否經現地或實驗室測試。</p> <p>(3) 確認天然與人為邊坡之長期穩定。</p> <p>(4) 邊坡分析符合保守原則，且引用數據確實可用。</p> <p>(5) 邊坡坡度、受力等分析應合理且保守，對於可能引發之負面效應，有足夠安全係數。</p> <p>(6) 借土材料之選用、開挖、夯實等有適當之品管計畫。</p> <p>3. 地層沉陷與下陷</p> <p>(1) 開挖相關資訊是否足夠供審查者進行沉陷與下陷相關事項審查。</p> <p>(2) 長期可能發生沉陷區域之模擬，是否合理且保守、是否考量其不確定性。</p> <p>(3) 岩層中是否有潛在溶解洞穴可能造成下陷？</p> <p>(4) 防止沉陷與下陷之材料是否已經過詳細與合理的實驗與分析？所提供之數據是否足以支持相關之設計？</p>	<p>學環境變化，並將監測結果反饋至地球化學環境變化之預測模式中。</p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------

<p>6. <u>地球化學環境</u></p> <p>(1) <u>應考慮地球化學環境</u> <u>可能對工程障壁之長</u> <u>期影響分析</u></p>		
-------------------------------------------------------------------------------------------	--	--

## 六、結論與建議

針對低放射性廢棄物處置場址安全輻射劑量評估安全審查，係為審照作業重要之程序過程。藉由評估瞭解有多少的核種濃度可由近場釋出遷移至生物圈，與釋出的核種濃度有多少的輻射劑量對於人體有影響，將可決定低放處置設施效能及安全處置環境之是否能滿足處置要求。因此所有的低放處置設施必須被管理及處置到對人體及環境為最低危害劑量，0.25 mSv/year 是目前的所規定的最低劑量。本報告分析美國 RESRAD-OFFSITE 程式劑量評估技術與瑞典 Forsmark 擴建 SFR 中低放處置場之 SR-PSU 安全評估計畫。

針對 RESRAD 家族程式之 RESRAD-OFFSITE 程式係為輻射劑量與風險評估，從環境途徑、曝露途徑及劑量與癌症風險之輻射風險評估，建立低放處置輻射劑量與風險評估技術。本年度計畫持續針對 RESRAD-OFFSITE 程式對於近岸與離島環境低放射性廢棄物處置之釋出核種濃度與輻射劑量轉換技術研析，低放射性廢棄物處置之輻射劑量與風險評估轉換技術之斜率因子研析，研擬低放射性廢棄物坑道處置之生物圈輻射劑量結合近場、遠場全系統安全評估架構。

瑞典 Forsmark 擴建 SFR 中低放處置場之 SR-PSU 安全評估計畫。本計畫蒐集 SR-PSU 主報告和主要參考報告清單，有關核種傳輸與生物圈輻射劑量評估報告(如 R13-18、R13-43、R13-46、R14-02、TR14-01、TR14-06、TR14-09)，對於近岸與離島環境低放射性廢棄物處置之釋出核種濃度與輻射劑量轉換技術、低放射性廢棄物處置之輻射劑量與風險評估轉換技術之斜率因子進行研析，研究低放射性廢棄物坑道處置之生物圈輻射劑量結合近場、遠場全系統之安全評估架構。

本計畫完成近岸與離島環境低放射性廢棄物處置之釋出核種濃度與輻射劑量轉換技術研析，低放射性廢棄物處置之輻射劑量與風險評估轉換技術之斜率因子研析，近場、遠場及生物圈之核種傳輸與劑量計算、研擬低放射性廢棄物坑道處置之生物圈輻射劑量結合近場、遠場全系統安全評估架構，並將前述研究成果將針對低放審查導則(第 0 版)輻射劑量評估有關章節與條文內容提出修訂建議，提供物管局低放射性廢棄物處置輻射劑量評估安全審查之應用。

建議未來可朝向下列工作方向持續進行：

1. 國外放射性廢棄物坑道處置生物圈劑量評估技術蒐集及彙整
2. 瑞典 SFR-PSU 低放射性廢棄物坑道處置生物圈劑量評估要項：研析瑞典 SFR-PSU 技術報告 TR-14-01 主報告關於生物圈劑量評估要項
3. 瑞典 SFR-PSU 低放射性廢棄物坑道處置生物圈劑量評估參數要項：研析瑞典 SFR-PSU 技術報告 R13-18 生物圈參數使用於核種傳輸與劑量評估要項
4. 提出低放射性廢棄物坑道處置生物圈劑量評估要項建議

根據瑞典 SFR-PSU 技術報告 TR-14-01 主報告關於生物圈劑量評估要項，R13-18 生物圈參數使用於核種傳輸與劑量評估要項，提出國內低放射性廢棄物坑道處置生物圈劑量評估要項，目前欠缺項目及需補充調查項目之建議，俾利藉由生物圈輻射劑量評估是否合乎監管標準，藉此了解處置場系統的安全功能是否合乎安全標準。

## 七、參考文獻

- 台電公司，2010，低放射性廢棄物處置關鍵核種篩選報告（A版），台灣電力公司。
- 行政院原子能委員會放射性物料管理局，2013，「低放射性廢棄物處置輻射劑量評估安全審查模式之研究」研究報告，行政院原子能委員會放射性物料管理局，2013，P297
- 行政院原子能委員會放射性物料管理局，2011，參加美國德州安德魯低放射性廢棄物處置場審照研討會報告，行政院原子能委員會放射性物料管理局，2011，P42
- 行政院原子能委員會放射性物料管理局，2013a，低放射性廢棄物處置安全管理技術發展-子計畫二：低放射性廢棄物處置設施設計審查規範精進之研究報告，行政院原子能委員會放射性物料管理局，2013，P131
- 行政院原子能委員會放射性物料管理局，2013b，低放射性廢棄物處置安全管理技術發展-子計畫四：低放射性廢棄物處置輻射劑量評估安全審查模式之研究，行政院原子能委員會放射性物料管理局，2013，P298
- 行政院原子能委員會放射性物料管理局，2014，低放射性廢棄物處置安全管理技術發展-子計畫四：低放射性廢棄物處置輻射劑量評估安全審查模式之研究，行政院原子能委員會放射性物料管理局，2014，P350
- Altmann, S., 2008. 'Geo'chemical research: A key building block for nuclear waste disposal safety cases, *Journal of Contaminant Hydrology* 102, p174–179.
- Chang, Y.-S., et al., 1998, Evaluation of the Area Factor Used in the RESRAD Code for the Estimation of Airborne Contaminant Concentrations of Finite Area Sources, ANL/EAD/TM-82, Argonne National Laboratory, Argonne, Ill., July.
- Eckerman, K.F., and J.C. Ryman, 1993, External Exposure to Radionuclides in Air, Water, and Soil, Exposure to Dose Coefficients for General Application, Based on the 1987 Federal Radiation Protection Guidance, EPA 402-R-93-076, Federal Guidance Report No. 12, prepared by Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn., for U.S. Environmental Protection Agency, Office of Radiation and Indoor Air, Washington, D.C.
- Eckerman, K.F., et al., 1988, Limiting Values of Radionuclide Intake and Air Concentration and Dose Conversion Factors for Inhalation, Submersion, and Ingestion, EPA-520/1-88-020, Federal Guidance Report No. 11, prepared by Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn., for U.S. Environmental Protection Agency, Office of Radiation Programs, Washington, D.C.
- Eckerman, K.F., et al., 1999, Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure to Radionuclides, EPA-402-R-99-001, Federal Guidance Report No. 13, prepared by Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn., for U.S. Environmental Protection Agency, Office of Radiation Programs, Washington, D.C.
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 2001, "Risk Assessment, Radionuclide Table Slope Factors Download Area," April 16. Available at <http://www.epa.gov/radiation/heast/download.htm>.

- Hull, L.C., Schafer A.L., 2008. Accelerated transport of <sup>90</sup>Sr following a release of high ionic strength solution in vadose zone sediments, *Journal of Contaminant Hydrology* 97, p135–157.
- ICRP (International Commission on Radiological Protection), 1979–1982, *Limits for Intakes of Radionuclides by Workers*, ICRP Publication 30, Part 1 (and Supplement), Part 2 (and Supplement), Part 3 (and Supplements A and B), and Index, a report by Committee 2 of the International Commission on Radiological Protection, adopted by the Commission in July 1978, *Annals of the ICRP*, Pergamon Press, New York, N.Y.
- ICRP (International Commission on Radiological Protection), 1983, *Radionuclide Transformations: Energy and Intensity of Emissions*, ICRP Publication 38, *Annals of the ICRP*, Vols. 11–13, Pergamon Press, New York, N.Y.
- ICRP, 1996, *Age-Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 5 – Compilation of Ingestion and Inhalation Dose Coefficients*, ICRP Publication 72, *Annals of the ICRP*, Vol. 26(1), Pergamon Press, New York, N.Y.
- SKB, 2013. *Biosphere parameters used in radionuclide transport modelling and dose calculations in SR-PSU*. SKB R-13-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014a. *Biosphere synthesis report for the safety assessment SR-PSU*. SKB TR-14-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014b. *Climate and climate related issues for the safety assessment SR-PSU*. SKB TR-13-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014c. *FEP report for the safety assessment SR-PSU*. SKB TR-14-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014d. *Handling of future human actions in the safety assessment SR-PSU*. SKB TR-14-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014e. *Handling of biosphere FEPs and recommendations for model development in SR-PSU*, SKB R-14-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014f. *Radionuclide transport and dose calculations for the safety assessment SR-PSU*. SKB TR-14-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014g. *Safety analysis for SFR. Long-term safety. Main report for the safety assessment SR-PSU*. SKB TR-14-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Soil, *Exposure to Dose Coefficients for General Application, Based on the 1987 Federal Radiation Protection Guidance*, EPA 402-R-93-081, Federal Guidance Report No. 12, prepared by Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn., for U.S. Environmental Protection Agency, Office of Radiation and Indoor Air, Washington, D.C.
- Yu, C., et al., 2000, *Development of Probabilistic RESRAD 6.0 and RESRAD-BUILD 3.0*

Computer Codes, NUREG/CR-6697, ANL/EAD/TM-98, prepared by Argonne National Laboratory, Argonne, Ill., for the U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research, Division of Risk Analysis and Applications, Washington, D.C. November 2000.

Yu, C., et al., 2001, User's Manual for RESRAD Version 6, ANL/EAD-4, Argonne National Laboratory, Argonne, Ill., July 2001.

Yu, C., et al., 2003, User's Manual for RESRAD-BUILD Version 3, ANL/EAD/03-1, Argonne National Laboratory, Argonne, Ill., June 2003.

Yu, C., et al., 2007, User's Manual for RESRAD-OFFSITE Version 2, ANL/EVS/TM/07-1, DOE/HS-0005, NUREG/CR-6937, Argonne National Laboratory, Argonne, Ill., June 2007.