



行政院原子能委員會
放射性物料管理局

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：103FCMA002

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 103 年 12 月

摘要

本報告提出 RESRAD 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，研究結果顯示，RESRAD 程式需求參數包括：RESRAD-OFFSITE 模式輸入條件，需要：場址區域範圍及地圖介面、核種源項濃度、核種源項釋出率與沉降速度、分佈係數、劑量換算與斜率因子、轉移因子、設定釋出途徑、報告及儲存時間、水文物理因子、主要污染區域、農業區域、牲畜飼養區域、遠場住宅區、大氣傳輸、非飽和含水層、飽和含水層、水利用量、地表水、地下水傳輸、攝取率、牲畜攝取飼養因子、植物因子、吸入及外部伽馬、外部輻射的形狀及面積因子、居住率、氦、碳 14、碳 12 質量分率、氫等，核種劑量換算與致癌風險斜率因子已建立於 RESRAD 資料庫內，且 RESRAD 已建立參數使用參考手冊。RESRAD 程式模擬的結果圖表可作為處置場址輻射劑量與風險評估判讀依據。RESRAD 已建立輻射劑量與風險評估整合分析，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概率報告中。將前述研究成果對低放審查導則(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。

ABSTRACT

This study has investigated the parameter requirement in the simulation of RESRAD code, reviews of technical literature for the radiological dose and risk assessment of low-level radioactive waste disposal, the key safety plan review and methodology of radiological dose and risk assessment in the potential low-level radioactive waste disposal site, and the research and analysis of merged control plan in radiological dose and risk assessment. Based on these achievements, suggestions related to radiological dose and risk assessment involved in the Review Guidelines on Safety Assessment of Low-Level Waste Disposal Repository (0 version) will be provided. The results show as follows: RESRAD code input parameters include site layout, map interface, source, source release and deposition velocity, distribution coefficients, dose conversion and slope factors, transfer factors, set pathways, reporting times, storage times, physical and hydrological parameters, primary contamination: physical and hydrological data, agricultural areas and livestock feed growing areas: physical and hydrological data, offsite dwelling area: physical and hydrological data, atmospheric transport parameters, unsaturated zone hydrology, saturated zone hydrology, water use, surface water body, groundwater transport parameters, ingestion rates, livestock intakes, livestock feed factors and plant factors, inhalation and external gamma, external radiation shape and area factors, occupancy factors, radon data, carbon-14 data, tritium data. The dose conversion factor and slope factor for the radionuclide have constructed in the dose factor library and the data collection handbook. Regression analysis between the desired outputs and the probabilistic inputs after RESRAD-OFFSITE's main computational code is run. Check the desired outputs (dose and/or risk and the pathways) and click on the determine correlation and regression coefficients button. The results are appended to the probabilistic dose and risk report. 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、計畫目的	1
二、安全分析 RESRAD 程式參數需求研析	2
(一) RESRAD 程式發展歷程	2
(二) RESRAD 程式 (ONSITE 及 OFFSITE 模組) 介紹	3
(三) RESRAD 程式參數需求	5
(四) RESRAD 程式參數統計分布設定	39
(五) RESRAD 參數資料調查使用手冊	40
三、低放處置輻射劑量與風險評估技術文獻資訊研析	45
(一) 低放射性廢棄物最終處置場的安全功能設計	45
(二) RESRAD-OFFSITE 程式輻射劑量與風險評估技術	46
(三) GOLDSIM 進行輻射劑量與風險評估	71
四、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	74
(一) RESRAD 模式模擬結果	74
(二) RESRAD 程式報告檢示器	75
(三) RESRAD 程式圖表檢視器 (決定性及敏感性分析).....	78
(四) 潛在處置場址輻射劑量與風險評估關鍵審查技術	81
1. RESRAD-OFFSITE 輻射曝露劑量模擬計算.....	81
2. RESRAD-OFFSITE 達仁潛在場址案例情境測試模擬.....	92
五、輻射劑量與風險評估整合管制技術研議	96
(一)RESRAD 輻射劑量與風險評估整合分析	96
(二)致癌風險斜率因子程式庫和輻射劑量轉換因子程式庫.....	98
六、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	101
七、結論與建議.....	132
八、參考文獻.....	134
附錄 A RESRAD-OFFSITE 參數資料彙編.....	附錄 A-1
附錄 B RESRAD 模擬土壤中放射性物質影響之資料蒐集手冊.....	附錄 B-1

圖目錄

圖 1	RESRAD 程式近 30 年來發展示意圖.....	2
圖 2	RESRAD 程式場址區域範圍設定輸入視窗.....	6
圖 3	RESRAD 程式主要污染位置與遠場生物圈位置設定概念示意圖.....	6
圖 4	RESRAD 程式地圖介面之主要污染、場外居住、井、表面水體、農田、地下水流 方向及指北針設定輸入視窗	7
圖 5	RESRAD 資料庫中的核種列表及關鍵核種初始濃度設定輸入視窗.....	8
圖 6	核種源項釋出至地下水釋出率與大氣沉降速度設定輸入視窗	9
圖 7	核種於九個區域(1.污染區域2.未飽和區域3.飽和區域4.表面水體沉積物5.水果、 穀物、非菜葉類區域6.菜葉類區域7.牧草、青貯飼料種植區8.牲畜飼料餵養區9. 居住區)之分佈係數設定輸入視窗	9
圖 8	核種劑量轉換及斜率因子設定輸入視窗	10
圖 9	氬的劑量轉換因子及斜率因子設定輸入視窗	11
圖 10	核種從土壤到植物的轉移因子設定輸入視窗	12
圖 11	設定釋出途徑	13
圖 12	模式設定輸出顯示時間點輸入視窗	14
圖 13	核種傳輸至食物或水被攝取、食用前之停留儲蓄時間輸入視窗	14
圖 14	降雨、風速及四個子區域之表單(污染區、農業區、牲畜飼養區、場外居住區)輸 入視窗。	15
圖 15	主要污染區域之物理及水文資料設定輸入視窗	16
圖 16	農業區與牲畜飼養區域之物理及水文資料設定輸入視窗	19
圖 17	遠場住宅區域之物理及水文資料設定輸入視窗	20
圖 18	大氣傳輸參數設定輸入視窗	21
圖 19	未飽和含水層參數設定輸入視窗	23
圖 20	飽和含水層參數設定輸入視窗	25

圖 21	水利用量參數設定輸入視窗	26
圖 22	地表水參數設定輸入視窗	27
圖 23	地下水參數設定輸入視窗	28
圖 24	飲用水及食物攝取率參數設定與牲畜、牲畜飼養及植物因子輸入視窗	30
圖 25	牲畜攝取設定輸入視窗	31
圖 26	飼養因子設定輸入視窗	32
圖 27	植物因子設定輸入視窗	32
圖 28	吸入及外部伽馬設定輸入視窗	33
圖 29	外部輻射形狀及面積因子設定輸入視窗	34
圖 30	外部輻射形狀及面積因子設定改變主要污染形狀之輸入視窗	35
圖 31	在處置場址主要污染區、場外住宅區與農地、牧場時間比例設定輸入視窗	36
圖 32	氬資料設定輸入視窗	37
圖 33	碳-14 資料設定輸入視窗	38
圖 34	碳-12 資料設定輸入視窗	38
圖 35	氡資料設定輸入視窗	39
圖 36	RESRAD 程式之環境途徑、暴露途徑及劑量與癌症風險評估示意圖.....	45
圖 37	輻射劑量計算的結構圖	72
圖 38	GOLDSIM 計算有效劑量率	73
圖 39	RESRAD 程式報告檢視器將自動開啟母核種劑量報告(SUMMARY.REP).....	76
圖 40	RESRAD 程式圖表檢視器以作為決定性及參數敏感性分析.....	78
圖 41	假設場址之概念示意圖	84
圖 42	測試案例場址於 RESRAD-OFFSITE 輸入介面示意圖	84
圖 43	測試案例場址水使用量輸入介面及參數	85
圖 44	測試案例場址植物因子輸入介面及參數	85
圖 45	測試案例場址家畜攝取水使用量輸入介面及參數	85
圖 46	測試案例場址攝取所有食物每年攝取量輸入介面及參數	86

圖 47	測試案例場址居民於各地區活動停留時間輸入介面及參數	86
圖 48	測試案例場址 AM-241 傳輸因子輸入介面及參數	87
圖 49	測試案例場址 AM-241 分佈係數 KD 值輸入介面及參數(KD=0)	87
圖 50	測試案例場址 AM-241 分佈係數 KD 值輸入介面及參數(RESRAD 預設值 KD=20)	88
圖 51	測試案例場址 I-129 傳輸因子輸入介面及參數.....	88
圖 52	測試案例場址 I-129 分佈係數 KD 值輸入介面及參數(KD=0).....	89
圖 53	測試案例場址 I-129 分佈係數 KD 值輸入介面及參數(RESRAD 預設值 KD=0.1)	89
圖 54	測試案例場址 Cs-137 傳輸因子輸入介面及參數.....	90
圖 55	測試案例場址 Cs-137 分佈係數 KD 值輸入介面及參數(KD=0).....	90
圖 56	測試案例場址 Cs-137 分佈係數 KD 值輸入介面及參數(RESRAD 預設值 KD=4600)	91
圖 57	測試案例場址所有傳輸途徑生物圈總劑量(RESRAD 預設 KD 值).....	91
圖 58	測試案例場址所有傳輸途徑生物圈總劑量(KD 值=0)	92
圖 59	洩漏出工程障壁之年洩漏濃度	93
圖 60	洩漏出工程障壁之年洩漏核種活度	94
圖 61	假設主要污染區域設為坑道內工程障壁之固化桶與生物圈位置示意圖	94
圖 62	核種經生物圈所有傳輸途徑之總劑量(RESRAD 預設 KD 值).....	95
圖 63	核種經生物圈所有傳輸途徑之總劑量(KD=0)	95
圖 64	RESRAD 輻射劑量與風險評估整合分析表單輸入介面.....	96
圖 65	RESRAD 時序圖表展示出總劑量(核種與途徑之劑量總和).....	97
圖 66	輻射劑量與風險評估整合輸出參數(劑量、風險、途徑)介面.....	97
圖 67	RESRAD 風險評估之斜率因子程式庫來源介紹示意圖.....	98
圖 68	RESRAD 風險評估之劑量轉換因子程式庫來源介紹示意圖.....	99
圖 69	核種經生物圈所有傳輸途徑之總劑量(RESRAD 預設 KD 值)之致癌風險	99

圖 70 核種經生物圈所有傳輸途徑之總劑量($K_D=0$) 之致癌風險 100

表目錄

表 1	RESRAD 程式之地圖介面圖示.....	7
表 2	機率密度函數之參數設定	40
表 3	RESRAD 模組參數輸入及詳細說明之章節編號位置.....	42
表 4	RESRAD 劑量轉換因子(DCFs)	65
表 5	RESRAD 劑量轉換因子(表 3 續).....	66
表 6	RESRAD 劑量轉換因子(表 4 續).....	67
表 7	RESRAD 程式核種風險評估之斜率因子.....	68
表 8	RESRAD 程式核種風險評估之斜率因子 (表 6 續)	69
表 9	RESRAD 程式核種風險評估之斜率因子 (表 7 續)	70
表 10	處置場接收廢棄物分類與數量表.....	82
表 11	不同來源之低放廢棄物關鍵核種列表.....	83

一、計畫目的

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 年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 程式輻射劑量評估審查技術。本子計畫針對 RESRAD 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、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，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、安全分析 RESRAD 程式參數需求研析

(一)RESRAD 程式發展歷程

美國 ARGONNE National Laboratory 為有效評估核種在場內與場外傳輸之暴露劑量與風險，開發 RESRAD 家族程式，RESRAD(onsite)程式最初在 1980 年代初期發展出來，為適應各種需求，包括：核場址除役後廠區土壤之輻射劑量與風險評估，為應用於低放射性廢棄物處置之核種於近場、遠場及生物圈全部傳輸途徑之輻射劑量與風險評估，由於不同狀況、需求、以及使用者之要求，因此在過去 30 年間陸續開發了包括不同模組功能之程式。此整套程式即被稱為 RESRAD 家族程式，過去 30 餘年發展如圖 1 所示。其中 RESRAD(ONSITE)為最初發展之程式模組，可應用於低放射性廢棄物處置則為 RESRAD (OFFSITE) 模組。RESRAD 家族程式已經被保健物理學家和輻防工程師作為輻射風險評估的工具，程式計算場址特有之殘餘放射性物質之法規限值、輻射劑量和現場居民之癌症風險。目前 RESRAD 程式已經被廣泛地使用在美國和世界各國，並已獲聯邦和州政府核准，包括美國能源部 (DOE) 和美國核管會 (NRC)。許多新特性增加到 RESRAD 家族程式；包括結合 ICRP-38 超過 830 核種的核種資料庫，提升機率分析的特性。(Yu, 2000, 2001, 2003, 2007)

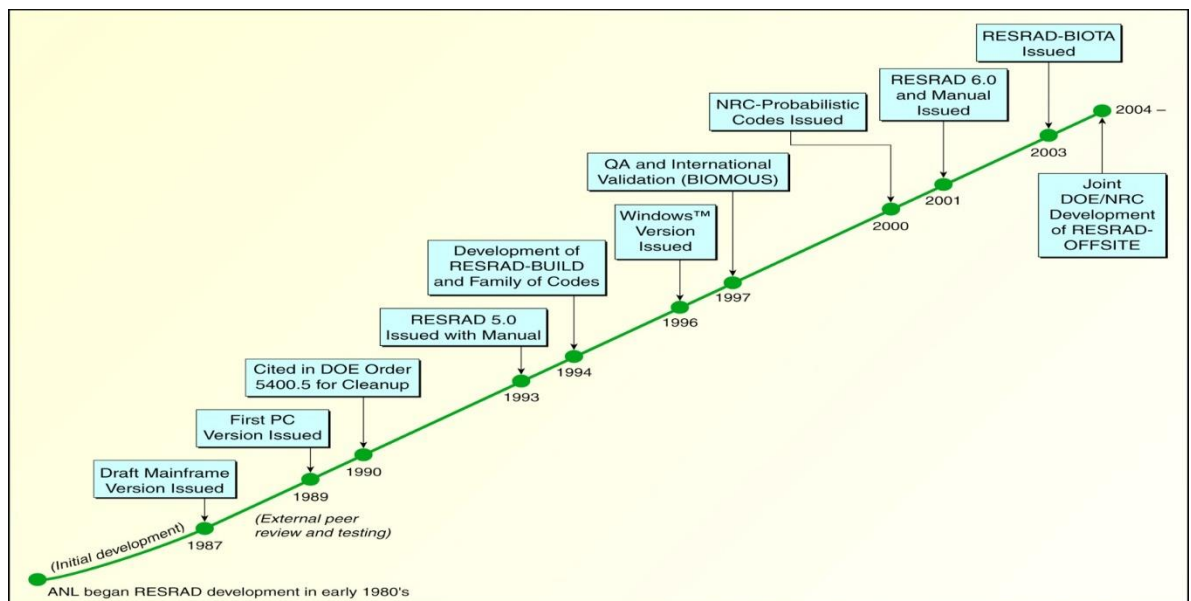


圖 1 RESRAD 程式近 30 年來發展示意圖

(二)RESRAD 程式 (ONSITE 及 OFFSITE 模組) 介紹

RESRAD(ONSITE)程式係假設初始污染均勻散佈於同一土層,該土層厚度相同,其上再由厚度一致之表土覆蓋。當表土經由地表逕流侵蝕,其厚度逐漸減少後,將開始影響受污染土層。通常受污染土層位於地下水水位面之上、或剛好與地下水水位面接觸、或形成 5 種未飽和土層(ONSITE 模組於未飽和土層數目最高可設為 5 層,所以以最多層狀態描述)。主要污染之概念化形狀會隨著暴露及傳輸模式改變。大氣與地下水傳輸模組之假設形狀為四邊形,但是兩個傳輸模式使用之形狀不需一致;而外在暴露模組假設主要污染區形狀為圓形或多邊形。RESRAD-OFFSITE 目前版本使用流量控制模式計算地下水釋出。根據流量控制模式,核種經由主要污染區釋出(滲漏)至地下水,此釋出效應將影響主要污染區濃度,但不會改變其物理尺度。當污染從上層逐漸移除,平衡控制(溶解或吸附)地下水釋出模式將在土層中產生非均一濃度剖面,而 RESRAD-OFFSITE 程式 2.5 版本並未建置此現象。

RESRAD (OFFSITE 模組) 使用手冊特別針對下列 8 項詳細介紹說明。1.使用手冊目的;2.安裝(包括:硬體需求、從 RASRAD 網頁安裝、使用光碟安裝、解除安裝);3.導覽(包括:目錄與工具欄、RESRAD-DOS 模擬器、圖像導引視窗、連結輸入格式);4.輸入表單(包括:名稱、初步輸入、場址規劃、地圖介面、點源、點源釋出與沉降速度、分佈係數、劑量換算與斜率因子、轉移因子、設定途徑、報告時間、儲存時間、物理及水文參數、主要污染:物理及水文資料、農業區與牲畜飼養區-物理及水文資料、遠場居住區-物理及水文資料、大氣傳輸參數、未飽和含水層、飽和含水層、水利用、地表水體、地下水傳輸參數、攝取率、牲畜攝入量、牲畜飼養因子及植物因子、吸入及外部伽瑪、外部輻射形狀及面積因子、居住因子、氬資料、碳-14 資料、氡資料);5.結果(包括:報告檢視器、圖表檢視器);6.強化(包括:每次單一因子敏感性分析、不確定性及概率分析:參數分佈標籤、取樣規範標籤、輸入等級相關標籤、輸出規範標籤、分析步驟標籤、後續迴歸標籤、多因子敏感性分析);7.協助(包括:應用協助、訊息記錄、網頁、執行時間回饋表單);8.文獻。

RESRAD (ONSITE 模組) 使用手冊特別針對下列 6 項詳細介紹說明。1. RESRAD-ONSITE 模組介紹;2.安裝(包括:硬體需求、作業系統-微軟 95 之後的版

本、CPU-奔騰處理器、記憶體 16MB 以上、硬碟空間 16MB、印表機驅動程式、使用光碟安裝、從網頁安裝、解除安裝；3.導覽 (RESRAD-DOS 模擬器、圖像導引視窗、目錄、工具欄)；4.輸入視窗(包括：核種名稱、主要核種之初始濃度、核種傳輸因子、計算參數、污染區域參數、地表覆蓋與污染區之水文數據、飽和層水文資料、無污染未飽和層參數、吸入及外在伽瑪資料、外在輻射面積因子、攝取途徑、植物因子、氫資料、碳 14 資料、劑量轉換因子、劑量因子、氫之風險劑量因子)；5.輸出視窗；6.強化及協助 (敏感性分析、不確定性分析、土壤圖層回饋、一般協助、參數描述、圖示協助、網頁、資料蒐集手冊、訊息紀錄) (Yu, 2000, 2001, 2003, 2007)

RESRAD-OFFSITE 與 RESRAD-ONSITE 相同及相異之處。

1.地下水釋出子模式

地下水釋出為 RESRAD-ONSITE 惟一的釋出模式，此為一階釋出模式，所以核種釋出到地下水的濃度與核種於土壤中的濃度等比率。在 RESRAD-OFFSITE 程式中也有相同的模式，但是核種濃度會隨著表土混合子模式調整而改變。

2.表土混合子模式

RESRAD-ONSITE 中的表土混合子模式忽略污染物被初始混合層侵蝕之可能。由於程式並未強調表土至遠場之機制，所以 RESRAD-ONSITE 較 RESRAD-OFFSITE 適合使用此模式。相對的，RESRAD-OFFSITE 探討風化物質累積於地表水體，

3.塵土釋出子模式

雖然 RESRAD-ONSITE 沒有相關大氣釋出模式，但卻以質量附載因子表現塵土釋出效應(吸入、落葉沉積)；在 RESRAD-OFFSITE 中，質量附載因子則延伸至大氣傳輸模式。

4.暴露模式

RESRAD-OFFSITE 保留所有 RESRAD-ONSITE 的暴露模式(直接外在輻射、塵土及氫吸入以及蔬菜、肉、奶、水產食物及土壤攝取)，並進行些微修改。RESRAD-OFFSITE 中，應用於更多位置及污染途徑，由於灌溉與沉積土壤的污染，可能對主要污染區、農業、農場用地造成影響。RESRAD-OFFSITE 程式中，針對暴露途徑進行些微調整，以符合程式之數值性質，並便於遠場地區應用。

5.地下水移流傳輸模式

RESRAD-ONSITE 之地下水傳輸模式考量核種間不同的傳輸速率；在 RESRAD-OFFSITE 除了延用此移流傳輸模式，並增加延散傳輸效應。儘管移流與延散的程式基本概念相似，但是其建置過程仍有不同。RESRAD-ONSITE 以數值方式評估核種在井中與地表水之濃度，並以解析解分析方式表示。在 RESRAD-OFFSITE 程式中，核種傳輸經由分層模擬(未飽和含水層、飽和含水層)，數值計算各分層流量隨時間改變之變化量。

6.RESRAD-OFFSITE 整合模組

RESRAD-OFFSITE 程式共整合：主要污染源之計算模組、大氣傳輸、地下水傳輸、遠場累積與暴露、由使用者介面處理資訊之輸入模組、單一參數敏感性分析之管理、產生文字報告模組、概率/不確定性分析模組。

(三)RESRAD 程式參數需求

國內放射性廢棄物處置輻射劑量與風險評估安全審查技術發展所面臨問題，主要是模式選擇與參數選用。RESRAD-OFFSITE 模式輸入條件，需要：場址區域範圍及地圖介面、核種源項濃度、核種源項釋出率與沉降速度、分佈係數、劑量換算與斜率因子、轉移因子、設定釋出途徑、報告及儲存時間、水文物理因子、主要污染區域、農業區域、牲畜飼養區域、遠場住宅區、大氣傳輸、非飽和含水層、飽和含水層、水利用量、地表水、地下水傳輸、攝取率、牲畜攝取飼養因子、植物因子、吸入及外部伽馬、外部輻射的形狀及面積因子、居住率、氦、碳 14、碳 12 質量分率、氬等，該參數核種劑量換算與致癌風險斜率因子已建立於 RESRAD 資料庫內，且 RESRAD 已建立參數使用參考手冊。底下分別針對上述參數說明：

1. 場址區域範圍及地圖介面

用於使用者已有特定之測量或計算長度；而地圖介面適用在當地圖中的可見特徵被用來定義於各個區域。

Site Layout

Bearing of X axis (clockwise angle from North) **90** degrees

X dimension of Primary Contamination **100** meters

Y dimension of Primary Contamination **100** meters

Location	Smaller X Coordinate		Larger X Coordinate		Smaller Y Coordinate	Larger Y Coordinate	meters
Fruit, grain, non-leafy vegetables plot	34.375	65.625	234	266			
Leafy vegetables plot	34.375	65.625	268	300			
Pasture, Silage growing area	0	100	450	550			
Grain fields	0	100	300	400			
Dwelling site	34.375	65.625	134	166			
Surface- water body	-100	200	550	850			

Display Map

Save

Cancel

圖 2 RESRAD 程式場址區域範圍設定輸入視窗

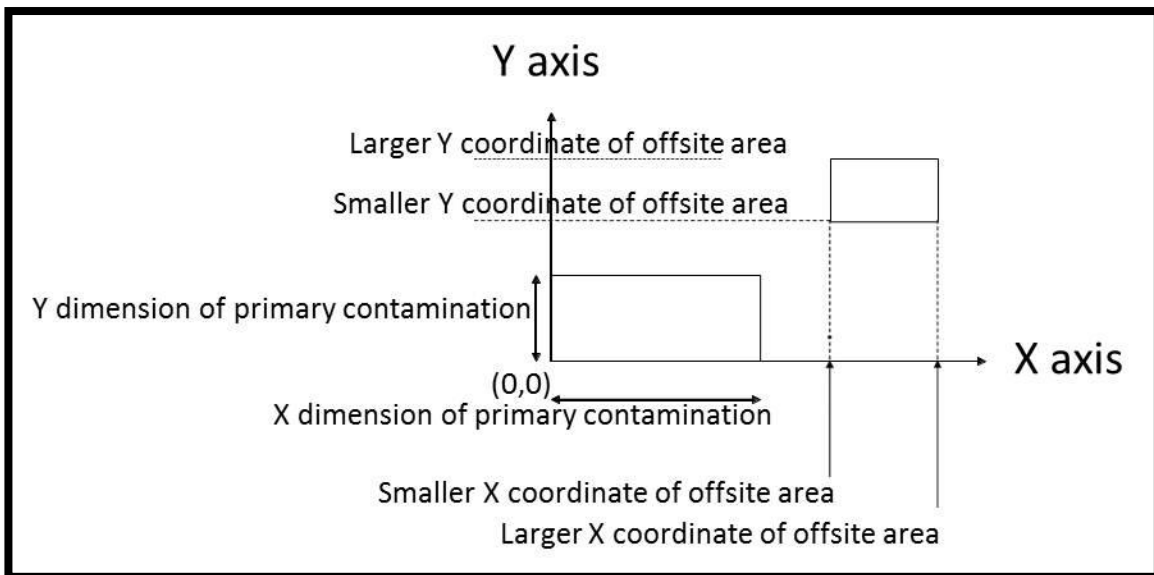


圖 3 RESRAD 程式主要污染位置與遠場生物圈位置設定概念示意圖

本輸入參數設定主要污染區域及遠場生物圈位置（如圖 2），並可再作為 RESRAD-OFFSITE 之大氣傳輸程式主要污染區域及遠場位置之範圍。主要污染區域（可當成近場放射性廢棄物處置場址）之左下角所夾的兩邊即為座標系統軸。遠場位置之範圍即由四個座標點定義。（如圖 3 所示）

X 軸軸承：從北邊到 X 軸正值的順時鐘角度。

X 方向主要污染：此為主要污染源平行於 X 軸的下邊長度。

Y 方向主要污染：此為主要污染源平行於 Y 軸的下邊長度。

遠場之 X 座標：此為遠場四邊形平行於 Y 軸的其中兩邊之 X 座標。

遠場之 Y 座標：此為遠場四邊形平行於 X 軸的其中兩邊之 Y 座標。

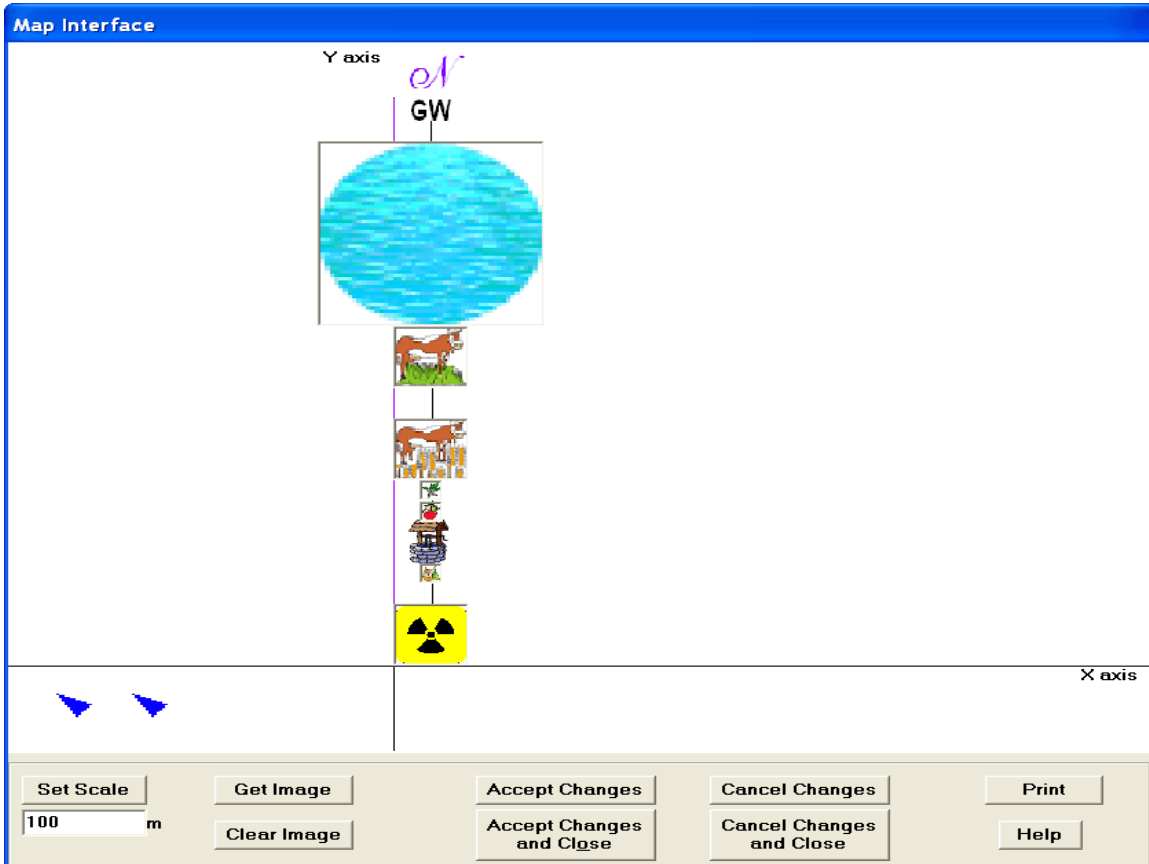


圖 4 RESRAD 程式地圖介面之主要污染、場外居住、井、表面水體、農田、地下水流方向及指北針設定輸入視窗

地圖介面可放置物件、調整物件大小及相對位置，物件包含主要污染、場外居住、井、表面水體、農田、地下水流方向及指北針，如圖 4 所示，其圖示意義如表 1。

表 1 RESRAD 程式之地圖介面圖示

圖示	表單
N	指北針，場址配置
輻射 (Radioactivity)	主要污染物
牛 (Cow)	牲畜生長區
葉子、水果 (Leaf or fruits)	農業區
房子 (House)	場外住宅區
井 (Well)	飽和水文區
藍圓圈/橢圓 (Blue circle/ellipse)	地表水體
地下水 (GW)	地下水傳輸

2. 核種源項濃度

The screenshot shows the 'Source' window in RESRAD. At the top, 'Nuclide Concentration:' is set to '100' pCi/g. Below this are two lists: 'List of Nuclides Present at the Site' and 'List of Nuclides in Database'. The first list contains C-14 (100), H-3 (100), Pb-210 (0), Ra-226 (100), Ra-228 (100), and Th-228 (0). The second list contains various nuclides, some with 'No DCFs' (Ar-37, Ar-39). In the center are several buttons: 'Add Nuclide', 'Delete Nuclide', 'Release and Air transport', 'Distribution Coefficients', 'Dose and risk factors', 'Transfer factors', and 'All nuclide factors'. At the bottom are navigation arrows and an 'OK' button.

List of Nuclides Present at the Site	
C-14	100
H-3	100
Pb-210	0
Ra-226	100
Ra-228	100
Th-228	0

List of Nuclides in Database	
Ac-227	
Ag-105	
Ag-108m	
Ag-110m	
Al-26	
Am-241	
Am-242m	
Am-243	
Ar-37	No DCFs
Ar-39	No DCFs
As-73	
Au-195	
Ba-133	
Be-10	
Be-7	
Bi-207	
Bi-210m	
Bk-247	
Bk-249	
C-14	
Ca-41	

圖 5 RESRAD 資料庫中的核種列表及關鍵核種初始濃度設定輸入視窗

低放場址固化桶內關鍵核種初始濃度可由本視窗介面進行輸入，如圖 5 所示，RESRAD 資料庫已建立約 209 個核種資料庫。若核種沒有劑量因子或斜率因子的資料，此列表將顯示「No DCFs」。這也提醒使用者，在一般情況下，不能選用顯示「No DCFs」的核種。程式沒有直接模擬子核種的宿命及傳輸，但將藉由衰變鏈反應之的關係，計算子核種劑量，評估子核種的風險與劑量。該輸入視窗亦進入設定存有釋出與空氣傳輸、分佈係數、劑量與風險因子和轉移因子。

3. 核種源項釋出率與大氣沉降速度

Source Release and Deposition Velocity

Radionuclide: Pb-210 Element: Pb

Release to ground water Atmospheric transport

Leach Rate: 0 /year Deposition velocity 0.001 m/s

Save Cancel

圖 6 核種源項釋出至地下水釋出率與大氣沉降速度設定輸入視窗

圖 6 是核種源項釋出至地下水釋出率與大氣沉降速度設定輸入視窗。當核種釋出速率不為零時，為一階釋出率模式用於計算處置場址固化桶核種釋出至地下水釋出率。當釋出速率為零時，程式將根據平衡狀態及雨水入滲率推估可能之核種釋出速率。

大氣沉降速度參數輸入後，程式將根據大氣傳輸，計算遠場地區核種沉降速率。

4. 分佈係數

Distribution Coefficients

Radionuclide: H-3

Distribution coefficient (cm³/g) in:-

Contaminated Zone: 0

Unsaturated Zone 1: 0

Saturated Zone: 0

Number of Unsaturated Zones: 1
set in preliminary inputs form

Sediment in surface water body 0

Fruit, grain, nonleafy fields 0

Leafy vegetable fields 0

Pasture, silage growing areas 0

Livestock feed grain fields 0

Dwelling site 0

Save Cancel

圖 7 核種於九個區域（1.污染區域 2.未飽和區域 3.飽和區域 4.表面水體沉積物 5.水果、穀物、非菜葉類區域 6.菜葉類區域 7.牧草、青貯飼料種植區 8.牲畜飼料餵養區 9.居住區）之分佈係數設定輸入視窗

圖 7 是核種於九個區域（1.污染區域 2.未飽和區域 3.飽和區域 4.表面水體沉積物

5.水果、穀物、非菜葉類區域 6.菜葉類區域 7.牧草、青貯飼料種植區 8.牲畜飼料餵養區 9.居住區) 之分佈係數設定輸入視窗。分佈係數是核種吸附於土壤質量對溶質於溶液中質量之比值。各核種都有預設之分佈係數，但是由於分佈係數受地化環境、土壤型態、pH 值、氧化還原電位及離子影響，其值可能變動範圍可達數個數量級。

5. 劑量換算與斜率因子

Dose Conversion and Slope Factors

Radionuclide: C-14

Slope Factor Library: FGR 13 Morbidity

External Slope factor	7.83E-12	(risk/year) / (pCi/g)
Food Ingestion Slope factor	2.E-12	risk/pCi
Water Ingestion Slope factor	1.55E-12	risk/pCi
Soil Ingestion Slope factor	2.E-12	risk/pCi
Inhalation Slope factor	1.69E-11	risk/pCi
Gaseous Inhalation Slope factor	1.99E-14	risk/pCi

Dose Factor Libraries: FGR 12, FGR 11

External Dose conversion factor	1.35E-5	mrem/year) / (pCi/g)
Ingestion Dose conversion factor	2.09E-6	mrem/pCi
Inhalation Dose conversion factor	2.09E-6	mrem/pCi
Gaseous Inhalation Dose conversion factor	2.35E-8	mrem/pCi

Buttons: Launch Dose and Slope Factors Editor, Save, Cancel

圖 8 核種劑量轉換及斜率因子設定輸入視窗

RESRAD 模式「風險評估之斜率因子程式庫」和「輻射劑量之劑量轉換因子程式庫」如圖 8 所示。斜率因子與暴露於外在輻射、土壤或攝取食物、水有關；劑量轉換因子與暴露於外在輻射、吸入或攝取相關。

斜率因子程式庫：斜率因子程式庫將會運用於模式分析。斜率因子程式庫可從 RESRAD 劑量轉換因子編輯器中設定。RESRAD 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 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(Federal Guidance Report No. 13) morbidity (Eckerman et al. 1999)、HEAST morbidity libraries (EPA 2001)或使用者自創的程式庫。(單位：Risk/pCi)

劑量轉換因子程式庫：劑量轉換因子程式庫將會運用於模式分析。劑量轉換因子程式庫可從 RESRAD 劑量轉換因子編輯器設定，RESRAD 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 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：mrem/pCi or mSv/Bq)

6. 氡的劑量轉換因子及斜率因子

Dose Conversion and Slope Factors

Radionuclide: Ra-226 Radon Dose and Slope Factors

Slope Factor Library: **FGR 13 Morbidity**

External Slope factor: 2.29E-8 (risk/year) / (pCi/g)

Food Ingestion Slope factor: 5.14E-10 risk/pCi

Water Ingestion Slope factor: 3.85E-10 risk/pCi

Soil Ingestion Slope factor: 5.14E-10 risk/pCi

Inhalation Slope factor: 2.82E-8 risk/pCi

Dose Factor Libraries: **FGR 12, FGR 11**

External Dose conversion factor: 0.0318 mrem/year) / (pCi/g)

Ingestion Dose conversion factor: 0.00132 mrem/pCi

Inhalation Dose conversion factor: 0.00858 mrem/pCi

Launch Dose and Slope Factors Editor

◀ Save ▶

Cancel

Risk and Dose Factors for Radon

Radon Progeny Slope Factors

Parent	Progeny	Slope Factor risk/pCi
Ra-226	Rn-222	1.8E-12
	Po-218	3.7E-12
	Pb-214	6.2E-12
	Bi-214	1.5E-11
Th-228	Rn-220	1.9E-13
	Po-216	3.E-15
	Pb-212	3.9E-11
	Bi-212	3.7E-11

Save Cancel

Radon Dose Conversion Factors

	Indoor	Outdoor	
Rn-222	760.	570.	mrem/WLM
Rn-220	150.	250.	mrem/WLM

圖 9 氡的劑量轉換因子及斜率因子設定輸入視窗

若使用者選取氦的前趨物(Ra-226、Th-228)並啟用氦途徑選項，即可從 RESRAD 程式劑量轉換及斜率因子表單開啟氦的同位素及其短半衰期子核種的表單。如圖 9 所示

7. 轉移因子

Category	Value	Unit
Soil to plant transfer factor		
Fruit, grain, nonleafy vegetables	0.001	(pCi/kg)/(pCi/kg)
Leafy vegetables:	0.001	(pCi/kg)/(pCi/kg)
Pasture, silage:	0.001	(pCi/kg)/(pCi/kg)
Livestock feed grain:	0.001	(pCi/kg)/(pCi/kg)
Intake to animal product transfer factor		
Meat:	0.0001	(pCi/kg)/(pCi/d)
Milk:	0.000005	(pCi/L)/(pCi/d)
Water to Aquatic food transfer factor		
Fish:	100	(pCi/kg)/(pCi/L)
Crustacea:	500	(pCi/kg)/(pCi/L)

圖 10 核種從土壤到植物的轉移因子設定輸入視窗

本參數係為放射性核種在場址不同介質間傳輸之轉換因子，轉移因子與核種元素有關。當使用者修改任何同位素的轉移因子，將套用至該元素之所有同位素設定。如圖 10 所示。其土壤至植物之傳輸因子、動物攝取量至動物產品之轉移因子、水至水生食物之轉移因子。

土壤至植物之傳輸因子：此為根部攝取轉移因子，其定義為食用植物之污染濃度比土壤污染濃度。RESRAD 資料庫對於每一個元素只有一組傳輸因子預設值。土壤及植物之傳輸因子在特定場址設定表單中共有四個輸入欄位。其中由於 H-3 與 C-14 之傳輸因子由程式計算，所以無法由此表單顯示。

動物攝取量至動物產品之轉移因子：此為放射性核種在燕麥、牛奶等產品與動物攝取量之比值，由於 H-3 與 C-14 之傳輸因子由程式計算，所以無法由此表單顯示。

水至水生食物之轉移因子：此為水生食物之放射性核種濃度與其生長水域之射性核種濃度的比值。

8. 設定釋出途徑



圖 11 設定釋出途徑

在預設情況下，只有氫途徑不能使用，其他途徑皆可使用。使用者可選取氫的前趨物後，再開啟氫途徑。如圖 11 所示。

9. 報告及儲存時間

輸出顯示時間點：使用者可設定不同時間點，而文字報告將根據時間點的設置，顯示各時間點的放射資料。常用的時間尺度為 1,000 年，但是使用者也可設定較長的模擬時間，以瞭解在大的時間尺度下，是否有任何潛在因子(地下水或其他因子)因為延遲效應，而發生任何變化。預測的時間尺度為最後報告時間及暴露時間的總合。計算及報告中的時間單位皆為年。如圖 12 所示。

此報告根據各個中繼時間點的計算結果，再內插算出各輸出顯示時間點的計算結果，輸出報告。

儲存時間：使用者可點擊「儲存時間」進入儲存時間表單。或是下一個表單就是

儲存時間表單，所以使用者也可點選「下一步」按鍵進入。如圖 12 所示。

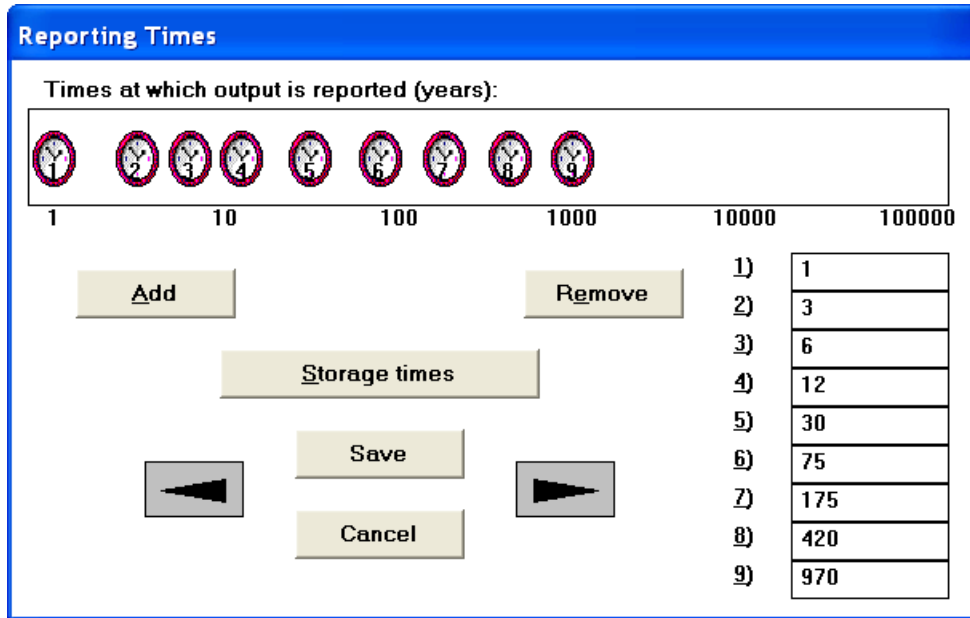


圖 12 模式設定輸出顯示時間點輸入視窗

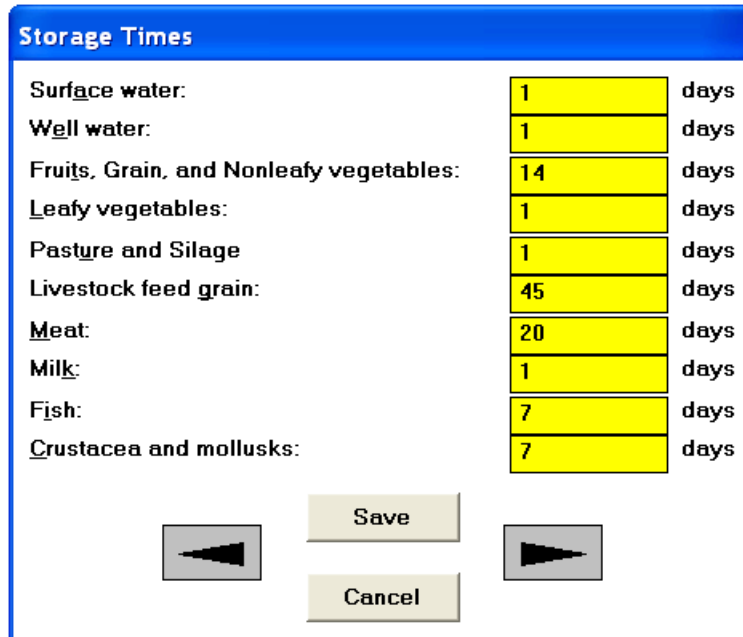


圖 13 核種傳輸至食物或水被攝取、食用前之停留儲蓄時間輸入視窗

此為食物或水被攝取、食用前，儲存的時間。因此食物或水中的核種濃度將藉由此參數調整。如圖 13 所示。

10. 水文物理因子

Physical and Hydrological

Site properties

Precipitation: 1 meters/year

Wind Speed: 2 meters/s

Sub-area properties

Contaminated zone and Cover

Agricultural areas

Livestock feed growing areas

Offsite Dwelling site

Save

Cancel

圖 14 降雨、風速及四個子區域之表單(污染區、農業區、牲畜飼養區、場外居住區)輸入視窗。

水文物理因子，包括：降雨、風速及四個子區域之表單(污染區、農業區、牲畜飼養區、場外居住區)之參數輸入，如圖 14 所示。

降雨：場址之年均降雨量，程式以此計算非飽和含水層入滲率、所有地區的滲出率及氫的蒸發散量。滲出率用來計算主要污染區域、農地、牧場與住宅區的土壤污染濃度。而入滲率會影響非飽和層的傳輸速率。

風速：年均風速可用來計算區域的吸入因子及落葉沉積因子，也可用於計算氮途徑及氫、碳 14 之模式。

四個子區域之表單(污染區、農業區、牲畜飼養區、場外居住區)。使用者可由此點擊指令進入四個子區域之表單設定物理水文資料。

11. 主要污染區域

Primary Contamination		
<i>Area of Primary contamination:</i>	10000	square meters
<u>L</u> ength of contamination parallel to aquifer flow:	100	meters
Depth of soil <u>m</u> ixing layer:	.15	meters
Deposition <u>V</u> elocity of dust:	.001	meters/s
Irrigation applied per year:	.2	meters/year
<u>E</u> vapotranspiration coefficient:	.5	
<u>R</u> unoff coefficient:	.2	
Rainfall and <u>R</u> unoff Factor:	160	
Slope-length-steepness factor:	.4	
Cover and Management Factor:	.003	
Support practice factor:	1	
	Soil layer	Clean Cover
	Contaminated zone	
<u>T</u> hickness:	2	0
Total <u>P</u> orosity:	.4	.4
<i>Erosion rate:</i>	1.147E-5	1.147E-5
<u>D</u> ry bulk density:	1.5	1.5
Soil erodibility factor:	.4	.4
<u>F</u> ield capacity:	.3	
<u>b</u> parameter:	5.3	
<u>H</u> ydraulic conductivity:	10	
Volumetric <u>w</u> ater content:		.05
		meters
		meters/year
		grams/cm ³
		tons/acre
		meters/year
<input type="button" value="Save"/> <input type="button" value="Cancel"/>		

圖 15 主要污染區域之物理及水文資料設定輸入視窗

主要污染區域之物理及水文資料設定，包括主要污染區域、平行水流之污染長度、土壤混合層深度、塵土沉降速率及、每年灌溉應用、蒸發散係數、逕流係數、降雨及逕流指數、坡長陡度係數、地表覆蓋與管理因子、水土保持措施因子、乾容積密度、土壤可蝕性因子、厚度(污染區土壤)、厚度(無污染之地表覆蓋區)、總孔隙率(污染區土壤或無污染之地表覆蓋區)、田間含水量(污染區)、b 參數(污染區)、水體積含量(無污染之地表覆蓋區)。如圖 15 所示。

主要污染區域：本欄位不需數入數據，程式將根據場址規劃表單之設定，進一步計算面積。主要污染面積之定義為，在一區域中，其土壤的核種濃度較背景值高兩個標準差所包含的面積。

平行水流之污染長度：從污染源向外擴散等濃度線，此長度為兩條等濃度線間之距離，且其方向與水流方向平行。

土壤混合層深度：在主要污染區表土之土壤混合層深度。其中土壤混合層就是經過長時間的人為或物理作用所形成的均勻土層。本參數就用來計算表土之污染濃度。

塵土沉降速率：此參數為主要污染區域中，具代表性的塵土沉降速率。程式假設場址內顆粒淨沉積為零時，利用塵土沉降速率來計算大氣中核種釋出量。

接下來的三個參數與降雨率將用來計算滲透率及氘於主要污染區域中的蒸發散率。

這些參數將影響污染釋出以及在未飽和含水層的傳輸。

每年灌溉應用：此為每年單位面積的灌溉水量。不同於生長季的灌溉水量，此設定之時間單位為年，而非灌溉季節。

蒸發散係數：蒸發散係數就是在地表的灌溉水及降雨量與其在大氣或植被蒸發溢散的比例。

逕流係數：此為降雨量與地表逕流量之比值，其中灌溉水與地表逕流之損失無關。

接下來的六個參數將用來計算侵蝕率，侵蝕率並非用來輸入 RESRAD-OFFSITE 程式，而是一個參考資訊。

降雨及逕流指數：降雨及逕流指數是用來評估降雨能量，可用來計算侵蝕率。

坡長陡度係數：地形剖面的侵蝕率。

地表覆蓋與管理因子：此因子與土地利用、植被及管理的侵蝕率有關，以前稱為種植管理因素。

水土保持措施因子：此因子為實施水土保持對侵蝕率的影響，以前稱為保護措施因子。

乾容積密度(污染區土壤或無污染之地表覆蓋區)：此為不同土層之單位體積的土壤固體重量。本參數將用於計算侵蝕率及外在輻射暴露。而污染區的乾容積密度也會用來計算核種釋出至地下水後，主要污染區的核種濃度。

土壤可蝕性因子：此因子用來衡量土壤侵蝕的敏感性。

厚度(污染區土壤)：此為土壤污染區(濃度大於背景值 2 個標準差)的上界至下界之距離(公尺)。

厚度(無污染之地表覆蓋區)：此為地表至污染土層上界(無污染土層)之距離上界(公尺)。

總孔隙率(污染區土壤或無污染之地表覆蓋區)：此為污染區土壤或無污染之地表覆蓋區中，土壤及其中之水、孔隙之體積比率。

田間含水量(污染區)：田間含水量即土壤中可容納之最大含水量。

b 參數(污染區)：b 參數為特定土壤指數，與不同土壤含水情況下之水力傳導係數有關。

水力傳導係數(污染區)：水力傳導係數即單位水力梯度之水流速度。

水體積含量(無污染之地表覆蓋區)：土壤與水分之體積比例。

12. 農業區域與牲畜飼養區域

農業區與牲畜飼養區域之物理及水文資料，如圖 16 所示。

面積：此為植物栽種面積及供牲畜放牧的牧場面積。本欄位不需數入數據，程式將根據場址規劃表單之設定，進一步計算面積。

與主要污染區重疊之比例：此為農田或牧場位於主要污染區之比例。若農田或牧場位於主要污染上，則此比例為 1；若農田或牧場不在主要污染上，則此比例為 0。此比例與牧草、作物直接吸收主要污染區的污染物有關。

每年灌溉應用：此為每年單位面積的灌溉水量。不同於生長季的灌溉水量，此設定之時間單位為年。

蒸發散係數：蒸發散係數就是在地表的灌溉水及降雨量與其在大氣或植被蒸發溢散的比例。

逕流係數：此為降雨量與地表逕流量之比值。灌溉水與地表逕流之損失無關。

耕犁層/土壤混合層之深度：土壤表層經過長時間的人為或物理作用所形成的均勻厚度。此係數將用來計算場外累積量。

總水土壤孔隙率：此為土壤體積比率。

乾容積密度：單位體積的土壤固體重量。

Agricultural Areas			
	Crops	Fruit, grain, non-leafy	Leafy vegetables
<i>Area (square meters):</i>		1000	1000
Fraction of area directly over primary contamination:		0	0
Irrigation applied per year (meters/year):		.2	.2
Evapotranspiration coefficient:		.5	.5
Runoff coefficient:		.2	.2
Depth of soil Mixing layer or Plow layer (meters):		.15	.15
Volumetric water content:		.3	.3
<i>Erosion rate (meters/year):</i>		1.147E-5	1.147E-5
Dry bulk density of soil (grams/cm ³):		1.5	1.5
Soil erodibility factor (tons/acre):		.4	.4
Slope-length-steepness factor:		.4	.4
Cover and management factor:		.003	.003
Support practice factor:		1	1
<input type="button" value="Save"/>		<input type="button" value="Cancel"/>	

Livestock Feed Growing Areas			
	Crops	Pasture, Silage	Grain
<i>Area (square meters):</i>		10000	10000
Fraction of area directly over primary contamination:		0	0
Irrigation applied per year (meters/year):		.2	.2
Evapotranspiration coefficient:		.5	.5
Runoff coefficient:		.2	.2
Depth of soil Mixing layer or Plow layer (meters):		.15	.15
Volumetric water content:		.3	.3
<i>Erosion rate (meters/year):</i>		1.147E-5	1.147E-5
Dry bulk density of soil (grams/cm ³):		1.5	1.5
Soil erodibility factor (tons/acre):		.4	.4
Slope-length-steepness factor:		.4	.4
Cover and management factor:		.003	.003
Support practice factor:		1	1
<input type="button" value="Save"/>		<input type="button" value="Cancel"/>	

圖 16 農業區與牲畜飼養區域之物理及水文資料設定輸入視窗

土壤可蝕性因子：此因子用來衡量土壤侵蝕的敏感性。

坡長陡度係數：地形剖面的侵蝕率。

地表覆蓋與管理因子：此因子與土地利用、植被及管理的侵蝕率有關，以前稱為種植管理因素。

水土保持措施因子：此因子為實施水土保持對侵蝕率的影響，以前稱為保護措施因子。

13. 遠場住宅區

Building location	Offsite Dwelling
<i>Area (square meters):</i>	1000
Irrigation applied per year (meters/year):	.2
Evapotranspiration coefficient:	.5
Runoff coefficient:	.2
Depth of soil Mixing layer or Plow layer (meters):	.15
Volumetric water content:	.3
<i>Erosion rate (meters/year):</i>	0
Dry bulk density of soil (grams/cm ³):	1.5
Soil erodibility factor (tons/acre):	0
Slope-length-steepness factor:	.4
Cover and management factor:	.003
Support practice factor:	1

圖 17 遠場住宅區域之物理及水文資料設定輸入視窗

遠場住宅區域之物理及水文資料，如圖 17 所示，包括面積、每年灌溉應用、蒸發散係數、逕流係數、耕犁層/土壤混合層之深度、總水土壤孔隙率、乾容積密度、土壤可蝕性因子、坡長陡度係數、地表覆蓋與管理因子、水土保持措施因子。

面積：此為場外居住區域之面積。本欄位不需數入數據，程式將根據場址規劃表單之設定，進一步計算面積。

每年灌溉應用：此為每年單位面積的灌溉草皮、家庭花園水量。

蒸發散係數、逕流係數、耕犁層/土壤混合層之深度、總水土壤孔隙率、乾容積密度、土壤可蝕性因子、坡長陡度係數、地表覆蓋與管理因子、水土保持措施因子：

此處敘述內容與農業區與牲畜飼養區一致。

14. 大氣傳輸

Atmospheric Transport

Release height	1	meters	Dispersion Model Coefficients <input checked="" type="radio"/> Pasquill-Gifford Coefficients <input type="radio"/> Briggs Rural Coefficients <input type="radio"/> Briggs Urban Coefficients			Windspeed Terrain <input checked="" type="radio"/> Rural <input type="radio"/> Urban		
Release heat flux	0	cal/s						
Anemometer height	10	meters						
Ambient temperature	285	Kelvin						
AM atmospheric mixing height	400	meters						
PM atmospheric mixing height	1600	meters						

	Fruit, grain, non-leafy vegetables plot	Leafy vegetables plot	Pasture, silage growing area	Grain fields	Dwelling site	Surface water body
Elevation of offsite location, relative to ground level at primary contamination	0	0	0	0	0	0

Grid spacing for areal integration m

modify joint frequency data read from STAR file for CHICAGO MIDWAY, IL

Wind speed	0.89	2.46	4.47	6.93	9.61	12.52	m/s
Stability class	Joint frequency of wind speed and stability class for wind from S to <input type="text" value="N"/>						
A	0	0	0	0	0	0	
B	0.00104	0.00206	0.0024	0	0	0	
C	0.0009	0.00343	0.01016	0.00206	0.00023	0	
D	0.00041	0.00605	0.01587	0.02284	0.00514	0.00103	
E	0.00112	0.00251	0.0193	0.02032	0.00308	0.00057	
F	0	0.01096	0.01599	0	0	0	

圖 18 大氣傳輸參數設定輸入視窗

大氣傳輸參數設定，如圖 18 所示。包括釋出高度、釋出熱通量、風速計高度、環境溫度、AM/PM 大氣混合高度、延散係數模式、風速地形、場外高程(與主要污染之地表的相對高程)、區域整合網格間距、讀取氣象 STAR 檔案、風速、聯合頻率(風速、風向及穩定等級)等。

釋出高度：此為污染物從地表上釋出之高度。

釋出熱通量：此為污染物釋出伴隨的熱能釋放。此係數將用來計算污染團上升。

風速計高度：此為測量風速之高度。

環境溫度：此為釋出位置之溫度。

AM/PM 大氣混合高度：大氣混合高度即為地表至穩定氣流之間的高度，污染物擴散將受限於混合層中。其中 AM/PM 即為上午與下午。

延散係數模式：此處可選取大氣傳輸模式中用於計算延散係數之方程式。

風速地形：選取場址地形，以決定風速與其高度之關係。

場外高程(與主要污染之地表的相對高程)：當場外地表之高程大於主要污染區地表之高程，程式將以此調整偏移之風向。這與場外的污染累積位置至污染區地表之高程差不同。

區域整合網格間距：當模式計算時，場外區域及主要污染區域都假設為四邊形(詳見 4.3 節)。一般情況之污染傳輸途徑為污染區域的中心點至場外區域的中心點，本程式將場外區域及主要污染區域切割成數個小區域，並計算所有子區域之傳輸途徑。使用此方法可得到較精確之大氣傳輸途徑，但是耗時較久。此參數即為子區域之最大尺寸。

讀取氣象 STAR 檔案：點擊此按鍵，就可選取 STAR 格式之文件，此文件包含風速之聯合次數分佈。

從 STAR 檔案修改聯合頻率資料：為避免誤觸檔案內容，一般並不能直接修改 STAR 檔案內容。如欲修改 STAR 檔案，請於讀取後勾選此選項。

風速：此為平均風速。

聯合頻率(風速、風向及穩定等級)：聯合頻率分佈包括：風速、風向及穩定等級。其中有 6 個穩定等級、6 段風速、16 個風向。聯合頻率之風向展示於下拉選單，由此可選擇欲查看之風向資訊。為避免造成混淆，風向之順序為風之來源至風之吹向；習慣上，風的方向判別就是風之來源至風之吹向(如：北風即從北方吹的風)。

15. 非飽和含水層

未飽和含水層參數設定如圖 19 所示，包括：未飽和含水區數目、厚度、土壤容積密度、總孔隙率、有效孔隙率、田間含水量、水力傳導係數、b 參數、縱向延散度。

未飽和含水區數目：飽和含水層與主要污染區之間的未飽和含水層數目。此參數只能於初步輸入表單設定，最高可設定至五層。點擊此按鍵可前往初步輸入表單進行設定，此設定與分佈係數有關，所以分佈係數表單也會同時開啟。

厚度：特定未飽和含水層之厚度。

土壤容積密度：特定未飽和含水層之單位體積內的土壤質量。

總孔隙率：土壤中液體及氣體所佔的總體積。

有效孔隙率：土壤中可用於水體流動的孔隙與土壤之體積比率。

田間含水量：土壤中重力水已排出，剩餘在土壤中的含水量；不考慮蒸發散情況下，田間含水量就是未飽和層的最低含水量。

水力傳導係數：水流在單位水力梯度引導下流經污染區的速度。

b 參數：特定土壤指數 b 參數與未飽和層之含水量及其水力傳導係數有關。

縱向延散度：此為縱向延散係數與孔隙水速度之比值。縱向延散度之單位為長度，參數變化與含水層厚度有關，其變動範圍級數約為含水層厚度的 0.01~1 倍。

Unsaturated Zone Hydrology	
Number of Unsaturated Zones: set in preliminary inputs form	1
Unsaturated Zone Number: 1:	
Thickness (meters)	4
Dry Bulk Density (grams/cm ³)	1.5
Total Porosity	.4
Effective Porosity	.2
Field Capacity	.3
Hydraulic Conductivity (meters/year)	10
b Parameter	5.3
Longitudinal Dispersivity (meters)	.1

圖 19 未飽和含水層參數設定輸入視窗

16. 飽和含水層

飽和含水層參數設定如圖 20 所示，包括：飽和含水層厚度、飽和含水層之容積密度、飽和含水層之總孔隙率、飽和含水層之有效孔隙率、飽和含水層之水力傳導係數、飽和含水層之水力梯度、含水層深度、飽和含水層之縱向延散度、飽和含水層之水平側向延散度、垂直延散、飽和含水層之垂直延散度、灌溉率、蒸發散係數、地表逕流係數等。

飽和含水層厚度：本參數將用於計算飽和含水層中之垂直延散。程式也可用此檢視地下水流量。

飽和含水層之容積密度：特定含水層之單位體積內的土壤質量。

飽和含水層之總孔隙率：土壤中液體及氣體所佔的總體積。

飽和含水層之有效孔隙率：土壤中可用於水體流動的孔隙與土壤之體積比率。

飽和含水層之水力傳導係數：水流在單位水力梯度引導下流經污染區的速度。

以下參數分為兩欄，其中一欄為主要污染傳輸至地下水井，另一欄為傳輸至地表水體。

飽和含水層之水力梯度：水面之斜率。

含水層深度貢獻：含水層中各深度的地下水都有可能流至地下水井或地表水體，程式將根據此參數計算地下水流至地下水井或地表水體的污染濃度。

飽和含水層之縱向延散度：此為縱向延散係數與孔隙水速度之比值。縱向延散度之單位為長度，參數變化與飽和含水層的長度範圍有關。

飽和含水層之水平側向延散度：此為側向延散係數與孔隙水速度之比值。側向延散度之單位為長度。

垂直延散：使用者可選擇(1)使用污染物在飽和層垂直延散效果，並忽略污染物在含水層中過濾淨化的效果；或(2) 使用污染物在含水層中過濾淨化的效果，而忽略污染物在飽和層垂直延散效果。

飽和含水層之垂直延散度：此為垂直側向延散係數與孔隙水速度之比值。垂直側向延散度之單位為長度。

灌溉率：此參數為年度灌溉水量，單位為公尺/年，灌溉率應用於飽和層中的污染傳輸至上方土地之水體。灌溉率為一年之灌溉水量，而非一生長季的灌溉水量。本參數只有當使用含水層中過濾淨化的效果時，才需要設定。

蒸發散係數：本參數之定義為當污染傳輸至地表水體，其在飽和含水層上方土地的整體蒸發散係數。而蒸發散係數就是表土中的降雨、灌溉水量與從植被蒸發散至大氣水量之比值。本參數只有當使用含水層中過濾淨化的效果時，才需要設定。

地表逕流係數：本參數之定義為當污染傳輸至地表水體，其在飽和含水層上方土地的整體地表逕流係數。地表逕流係數就是降雨量與地表逕流量之比值，且假設地表逕流量不用於灌溉水。本參數只有當使用含水層中過濾淨化的效果時，才需要設定。

Saturated Zone Hydrology

Thickness of saturated zone:	100	meters
Dry Bulk Density of saturated zone:	1.5	grams/cm**3
Total porosity of saturated zone:	.4	
Effective porosity of saturated zone:	.2	
Hydraulic Conductivity of saturated zone:	100	meters/year



	to well	to surface waterbody	
Hydraulic Gradient of saturated zone:	.02	.02	
Depth of aquifer contributing	10	10	meters below water table
Longitudinal Dispersivity of saturated zone:	3	10	meters
Horizontal lateral Dispersivity of saturated zone:	.4	1	meters

Disperse Vertically

Vertical lateral Dispersivity of saturated zone:	.02	.06	meters
--	-----	-----	--------

Do Not Disperse Vertically

Value Averaged over length of saturated zone	to well	to surface waterbody	
Irrigation applied per a year:	2	2	meter/year
Evapotranspiration coefficient:	5	5	
Runoff coefficient:	2	2	


Save


Cancel

圖 20 飽和含水層參數設定輸入視窗

17. 水利用量

水利用量參數設定如圖 21 所示。以下詳述之：

本表單之重點為水的標的利用，其中第一欄為人類、牲畜對水的需求及用於灌溉的水。其他表單可能也有水利用參數的輸入欄位，使用者可從不同表單改變參數，而程式也將於全部表單更新修正內容。

Water Use					
Description of Usage:- Water for .	Quantity		Fraction of water from		Number of individuals
			Surface body	Well	
Consumption by humans	510	Liters/year	0	1	4
Use indoors of dwelling	225	Liters/day	0	1	
Beef cattle	50	Liters/day	0	1	2
Dairy cows	160	Liters/day	0	1	2
Irrigation applied per year:-					
Fruit, grain, non-leafy vegetables	.2	meters/year	0	1	1000
Leafy vegetables	.2	meters/year	0	1	1000
Pasture, Silage	.2	meters/year	0	1	10000
Livestock feed Grain	.2	meters/year	0	1	10000
Offsite Dwelling site	.2	meters/year	0	1	1000
Well pumping rate:			5100	cubic meters/year	
Well pumping rate needed to support specified Water use:			5084.17	cubic meters/year	
		Save			
		Cancel			

圖 21 水利用量參數設定輸入視窗

本表單之重點為水的標的利用，其中第一欄為人類、牲畜對水的需求及用於灌溉的水。其他表單可能也有水利用參數的輸入欄位，使用者可從不同表單改變參數，而程式也將於全部表單更新修正內容。

第二欄及第三欄為水的來源，即取自地表水體或井水的比例。若情境設定為，另外使用未受污染的水，則第二欄及第三欄之總和將小於 1。本表單之個體數量不可用作敏感性分析及不確定性分析，其餘可修改之參數皆可進行敏感性分析或不確定性分析。另外使用者須注意，當利用第二欄及第三欄進行不可用作敏感性分析或不確定性分析時，每組比例總合不可大於 1。

人類使用水量：個人使用水量，此水量包含飲食。

居家使用水量：居家使用水量，此水量包含清理、盥洗。本參數將用於計算水氣之劑量。

家牛使用水量：每隻家牛(供作肉品食用)飼養所需水量。

乳牛使用水量：每隻乳牛(提供乳製品)飼養所需水量。

個體數量：設定人類或牲畜之數量。此設定將只用來計算最小井抽水率，不會用

於其他運算程式中，因次不可用來做不確定性分析。

每年灌溉水量：此參數為單位土地面積之年度灌溉水量。灌溉率為一年之灌溉水量，而非一生長季的灌溉水量。

供給特定水需求之井水抽取率：此參數為本表單需求之抽水量，程式將自動計算供給特定水需求之井水抽取率，使用者可根據此參考數據，設定井水抽取率。

井水抽取率：使用者可根據程式計算之供給特定水需求之井水抽取率，來設定井水抽取率。由於井水抽取率不可低於表單設定之需求，所以本參數設定值不可低於供給特定水需求之井水抽取率，且執行不確定性分析時也應符合此原則。

18. 地表水

Surface Water Body		
Sediment delivery ratio:	1	
Volume of surface water body:	150000	cubic meters
Mean residence time of water in surface water body:	1	years
Surface area of water in surface water body:	30000	square meters

Save Cancel

圖 22 地表水參數設定輸入視窗

地表水參數設定如圖 22 所示，以下詳述之。

沉積傳輸比：此為受污染之土壤移動至地表水體之比率。本參數將用於計算表面侵蝕率之污染通量。

地表水體積：地表水之體積。

水於地表水之平均滯留時間：此為水在地表水體中的平均滯留時間，計算公式為每年地表區域水體積與流入該區域水體積之比值。

地表水面積：此為地表水所佔面積，程式將根據場址輸出表單之設定計算面積。本參數將用來計算來自大氣沉積的污染通量。

19. 地下水傳輸

Groundwater Transport

Sub Screens

Distance in the direction parallel to aquifer flow from downgradient edge of contamination to

well: meters
 surface water body: meters

Distance in the direction perpendicular to aquifer flow from center of contamination to

well: meters
 right edge of surface water body: meters
 left edge of surface water body: meters

Convergence criterion (fractional accuracy desired):

Number of sub zones (to model dispersion of progeny produced in transit):

Main sub zones in saturated zone
 Main sub zones in each partially saturated zone

nuclide specific retardation in all sub zones, longitudinal dispersion in all but the sub zone of transformation
 longitudinal dispersion in all sub zones, nuclide specific retardation in all but the sub zone of transformation, parent retardation in zone of transformation
 longitudinal dispersion in all sub zones, nuclide specific retardation in all but the sub zone of transformation, progeny retardation in zone of transformation

圖 23 地下水參數設定輸入視窗

地下水參數設定如圖 23 所示，以下詳述之。

子視窗(前往其他相關表單)：使用者可由此按鍵進入四個不同表單。使用者若已利用下方的下一步按鍵，前往這四個表單，則不需再重新設定。

未飽和含水層、飽和含水層、水利用及地表水：使用者可由此按鍵進入四個不同表單進行設定，此時原本的表單將不會關閉，而是隱藏在後，直到這些表單設定完後，原本表單將重新出現。

本表單之距離參數可用於執行不確定性分析及敏感性分析，而子區域之參數可用於進行一次性參數敏感性分析。

從主要污染至地下水井之平行於含水層水流距離：此為地下水流從主要污染處(高濃度)至地下水井(低濃度)之距離，單位為公尺。本參數用於計算從飽和含水層至

地下水井之污染傳輸。若本參數設定為負，代表地下水井之污染濃度高於主要污染處之濃度。當本參數為負值，或地下水從主要污染至地下水井之流動途徑與污染劑量沒有關係，程式將略過井水污染計算。

從主要污染至地表水體之平行於含水層水流距離：此為地下水流從主要污染處(高濃度)至地表水(低濃度)之距離，單位為公尺。本參數用於計算從飽和含水層至地表水之污染傳輸。若本參數設定為負，代表地表水之污染濃度高於主要污染處之濃度。當本參數為負值，或地下水從主要污染至地表水之流動途徑與污染劑量沒有關係，程式將略過地表水污染計算。

從主要污染至地下水井之垂直於含水層水流距離：此為通過主要污染與通過地下水井之兩地下水流其間的垂直距離，單位為公尺。本參數將計算污染物因擴散而稀釋之情形，主要應用於從井中抽水之情況。

從主要污染至地表水近邊之垂直於含水層水流距離：此為通過主要污染與通過地表水近邊之兩地下水流其間的垂直距離，單位為公尺。本參數將計算從地下水到地表水體之污染通量。

從主要污染至地表水遠邊之垂直於含水層水流距離：此為通過主要污染與通過地表水遠邊之兩地下水流其間的垂直距離，單位為公尺。本參數將計算從地下水到地表水體之污染通量。

收斂性判定：利用 Romberg 積分時，需要利用分數精度來計算地下水污染濃度，越小的數值，所需的點位越多，所花的計算時間也越久。因此如果收斂性判定值設的太低，程式運算時間將會過久，甚至仍無法達成收斂，此時程式會將運算失敗輸入至 QRFAIL.LOG 檔案中，此時程式將使用之前預估的 32,769 點位積分。如果收斂性判定值設為零，程式將根據 Simpson 法，使用 32 段區間積分。

模擬傳輸中產生之子核種傳輸

RESRAD-OFFSITE 有兩個地下水傳輸演算法，其一模擬母核種與子核種在土壤及地下水中之交互作用，其二模擬縱向擴散。當其中一種模擬方式具優勢時，使用者可選擇適當之演算法，模擬傳輸中產生之子核種傳輸。若兩種模擬方式都相對重要時，使用者可將傳輸區域分成數個子區域，再進行模擬傳輸中產生之子核種傳輸；使用這

個方法將會模擬所有傳輸途徑，因此將會增加運算時間。

飽和層之子區域：為增加模擬的準確度，程式將飽和層分成數個子區域。

部分飽和層之子區域：為增加模擬的準確度，程式將部份飽和層分成數個子區域。

模擬特定子核種之延滯或擴散

使用這兩個地下水傳輸演算法，將會有三個選擇選項。這些選項將影響特定原子在區域的傳輸結果。選項如下：

- 模擬區域中的特定子核種分佈係數之效應，並忽略縱向擴散之效應。
- 模擬區域中縱向擴散效應以及母核種對子核種的分佈係數。
- 模擬區域中縱向擴散效應以及子核種的分佈係數。

20. 攝取率

	Consumption rate		Fraction from affected area
Drinking water	510	Liters/year	1
Fish	5.4	kg/year	.5
Crustacea and mollusks	.9	kg/year	.5
Fruit, grain, non-leafy vegetables	160	kg/year	.5
Leafy vegetables	14	kg/year	.5
Meat	63	kg/year	1
Milk	92	Liters/year	1
Soil (incidental)	36.5	grams/year	

Livestock Factors

Livestock Feed Factors

Plant Factors

Save

Cancel

圖 24 飲用水及食物攝取率參數設定與牲畜、牲畜飼養及植物因子輸入視窗

飲用水及食物攝取率參數設定與牲畜、牲畜飼養及植物因子參數如圖 24 所示，以下詳述之。

消耗率：此為國家平均值，但是會隨著所在場址不同而有變動，因此使用者可以

隨著區域變化調整此數值。

來自污染區域之比例：此為消耗物質來自污染區域之比例。飲用水則為來自受污染的地表水體或地下水之比例，點擊飲用水之按鍵將會開啟水利用表單，使用者可由此調整比例。

前往其他表單

點擊下方按鍵可前往其他表單，或者可以點擊下一部按鍵，即可依序前往以下表單。

牲畜因子（如圖 25 所示）、牲畜飼養因子及植物因子：進入這些表單時，原本的表單將隱藏在後，直到牲畜因子、牲畜飼養因子及植物因子之設定結束後，原本的表單將重新出現。

21. 牲畜攝取及飼養因子

	Beef Cattle	Dairy Cows
<u>W</u> ater (liters/day)	50	160
<u>P</u> asture, and Silage (kg/day)	14	44
<u>G</u> rain (kg/day)	54	11
<u>S</u> oil from Pasture and Silage (kg/day)	.1	.4
<u>S</u> oil from grain (kg/day)	.4	.1

圖 25 牲畜攝取設定輸入視窗

22. 牲畜飼養因子

如圖 26 所示，此為國家平均值，但是會隨著所在場址不同而有變動，因此使用者可以隨著區域之飼育方式不同，調整此數值，其中第一欄為肉牛、第二欄為乳牛之所需攝取率。在攝食穀物、牧草、青貯時所吸收的土壤攝取率必需要另外計算，因為土壤中的污染濃度與植物不同。本表單之參數可用於不確定性分析及敏感性分析。

Livestock Feed Factors

Crops	Pasture, Silage	Grain
Wet weight crop yield (kg/m**2)	1.1	.7
Duration of Growing season (years)	.08	.17
Foliage to Food Transfer coefficient	1	.1
Weathering Removal constant (1/year)	20	20
Foliar interception factor for irrigation	.25	.25
Foliar interception factor for dust	.25	.25
Root Depth (meters)	.9	1.2

Save

Cancel

圖 26 飼養因子設定輸入視窗

23. 植物因子

Plant Factors

Crops	Fruit, grain, non-leafy	Leafy vegetables
Wet weight crop yield (kg/m**2)	.7	1.5
Duration of Growing season (years)	.17	.25
Foliage to Food Transfer coefficient	.1	1
Weathering Removal constant (1/year)	20	20
Foliar interception factor for irrigation	.25	.25
Foliar interception factor for dust	.25	.25
Root Depth (meters)	1.2	.9

Save

Cancel

圖 27 植物因子設定輸入視窗

如圖 27 所示，植物(蔬菜與家畜飼料)因子與生長及污染轉移相關，因此本表單之數值跟穀物混合及栽種方式有關。本表單之參數可用於不確定性分析及敏感性分析。

24. 吸入及外部伽馬

Parameter	Value	Unit
Inhalation rate:	8400	m ³ /year
Mass loading for inhalation:	.0001	grams/m ³
Mean Onsite mass loading :	.0001	grams/m ³
Indoor to outdoor dust concentration ratio:	.4	
External gamma penetration factor:	.7	

Shape of Primary Contamination

Occupancy Factors

Save

Cancel

圖 28 吸入及外部伽馬設定輸入視窗

本表單之參數可用於不確定性分析及敏感性分析。

吸入之質量加載：此為人類所在場址，空氣中吸入粒子單位體積之平均質量。本參數將用於來計算吸入途徑。

場址平均質量加載：此為主要污染區域上，空氣中含有污染的土壤粒子之平均質量。本參數將用於來計算污染釋放至大氣的速率。

室內至室外之塵土濃度比：本參數代表室內污染塵土濃度在建築物內的影響。此為室內與室外污染塵土濃度之比值。

外部伽瑪穿透因子：本參數代表室內伽瑪輻射濃度在建築物內的影響。此為穿透至室內的伽瑪輻射與室外伽瑪輻射濃度之比值。

前往其他表單

點擊下方按鍵可前往其他表單，或者可以點擊下一部按鍵，即可依序前往以下表單。

- 主要污染形狀、居住因子：點擊這些指令，可分別進入其設定表單。進入這些表單時，原本的表單將隱藏在後，直到主要污染形狀、居住因子之設定結束後，原本的表單將重新出現。

25. 外部輻射的形狀及面積因子

	Radius: (m)	Fraction:
1	13.25	0
2	26.5	0
3	39.75	0
4	53	.022
5	66.25	.19
6	79.5	.24
7	92.75	.2
8	106	.17
9	119.25	.15
10	132.5	.13
11	145.75	.12
12	159	.055

圖 29 外部輻射形狀及面積因子設定輸入視窗

如圖 29 所示。在表單左上角之圖示，其中黑色區域代表主要污染；若使用者點擊表單右側中間之按鍵「計算半徑及比例」，則此時黑色區塊將變為粉紅色。

主要污染平面形狀：根據預設值，程式將根據場址規劃及地圖介面的設定，計算主要污染的形狀與場外住宅區的中心，並以此計算外部輻射形狀及面積因子。現地住宅區之位置設定在主要污染中央。本表單可用於設定各住宅區的位置，並定義主要污染區多邊形的範圍。

改變住宅位置

如果主要污染區沒有完全顯示於表單圖示中，使用者可修改尺度欄(Scale)之數值(表單中間下方)，使主要污染區完全顯示於表單圖示中。在右上角選取標籤(場外/現地標籤)，可選取相關之住宅區，使用者亦可輸入住宅區座標或從圖表區點選住宅區。請使用者務必依序從現地/場外標籤執行，輸入位置座標，再點擊「計算半徑及比例」，以計算面積比例。游標的座標位置將顯示於表單中間上方欄位，此功能將幫助使用者快速找到住宅區位置。

External Radiation Shape and Area Factors

Current X: 198
 Current Y: 32
 Line Length: 7 meters
 Area: 17000 m²

Drawing Instructions
 Use the left mouse button to select or change the dwelling location and to calculate the Radii and Fractions.

Key board Instructions
 Key in the dwelling location. Then press the Calculate Radii and Fractions button.

Shape of the plan of the primary contamination:
 Circular Polygonal

Coordinates of the vertices of polygon:
 X (m): Y (m):
 Previous Vertex: 66 18 Next Vertex
 Current Vertex: 59 18 Complete Polygon

Scale: 200 meters

Onsite Offsite
 Dwelling Location X: 181
 Dwelling Location Y: 14

Calculate Radii and Fractions

	Radius: (m)	Fraction:
1	19.583333333	0
2	39.166666666	0
3	58.75	0
4	78.333333333	0
5	97.916666666	.034
6	117.5	.11
7	137.083333333	.19
8	156.666666666	.25
9	176.25	.21
10	195.833333333	.1
11	215.416666666	.048
12	235	.013

Save Cancel

圖 30 外部輻射形狀及面積因子設定改變主要污染形狀之輸入視窗

改變主要污染形狀

使用者可修改尺度欄(Scale)之數值(表單中間下方),使主要污染區及兩個住宅區完全顯示於表單圖示中。從表單左下方選取多邊形選項後,使用者可以利用表單中間黃色區塊的畫圖指示,使用滑鼠在圖示中畫出多邊形。或者用者可以利用表單中間綠色區塊的鍵盤指示,使用鍵盤在表單左下角輸入多邊形頂點座標。多邊形繪製完後,需指定場外/現地住宅區位置(根據改變住宅區位置之指示)。當程式計算半徑與比例時,也會同時計算多邊形面積,並將面積數值標示於表單中間上方之欄位。由於程式根據圖示介面計算每個環狀受污染的區域比例,因此本表單的參數不可用作不確定性分析及敏感性分析。如圖 30 所示。

26. 居住率

在處置場址主要污染區、場外住宅區與農地、牧場時間居住率如圖 31 所示。在主要污染區的時間比例

- 戶內：此為受體待在主要污染區上，位於戶內的時間比例。
- 戶內：此為受體待在主要污染區上，位於戶外的時間比例。如有任何農地、牧場位於主要污染區上，則此受體待在此區域的時間比率應列於戶外。

在場外住宅區的時間比例

- 戶內：此為受體待在主要污染區外，位於戶內的時間比例。
- 戶外：此為受體待在主要污染區外，位於戶外的時間比例。

在農地的時間比例：當農地、牧場受到污染的灌溉水及大氣沉積物影響，而此參數即為受體待在農地、牧場的時間比例。如果農地位於主要污染區上，則須同時設定在主要污染區的時間比例及在農地的時間比例。

[注意：在主要污染區、場外住宅區的戶內及戶外時間比例總合不可超過 1。由於定義的關係，若再加上在農地時間比例，則時間比例總合不可超過 2 (當受體整天都待在位於主要污染區上的農地)。

本表單之參數可用於不確定性分析及敏感性分析，但須注意不可抵觸上一段之限制]

Occupancy

Fraction of Time spent on PRIMARY CONTAMINATION (whether cultivated or not)

Indoors	0
Outdoors	0

Fraction of Time spent in OFFSITE DWELLING SITE

Indoors	.5
Outdoors	.1

Fraction of Time spent in FARMED AREAS (including Primary and Secondary contaminated areas)

Fruit, grain, and Nonleafy fields	.1
Leafy vegetable fields	.1
Pasture and silage fields	.1
Livestock grain fields	.1

If part of a farmed area lies on the Primary Contamination, the time fraction spent in that part of the area should be included in both the farmed area occupancy and the primary contamination occupancy.

Save Cancel

圖 31 在處置場址主要污染區、場外住宅區與農地、牧場時間比例設定輸入視窗

27. 氡

Radon		
Effective radon diffusion coefficient of Cover:	.000002	m**2/s
Effective radon diffusion coefficient of Contaminated zone:	.000002	m**2/s
Effective radon diffusion coefficient of Floor:	.0000003	m**2/s
Thickness of floor and foundation:	.15	meters
Density of floor and foundation:	2.4	g/cm**3
Total porosity of floor and foundation:	.1	
Volumetric water content of floor and foundation:	.03	
Depth of Foundation below ground level:	-1	meters
Onsite vertical dimension of mixing:	2	meters
Building room height:	2.5	meters
Building air exchange rate:	.5	1/hr
Building indoor area factor:	0	
Rn-222 emanation coefficient:	.25	
Rn-220 emanation coefficient:	.15	

Save
Cancel

圖 32 氡資料設定輸入視窗

如圖 32 所示。而欲進行氡參數設定，使用者須先開啟氡途徑選項。而只有污染物含有氡-222 或氡-220 時，才可開啟氡途徑選項。其中風速可於物理水文表單設定，水體積含量可於主要污染表單設定，這些都與氡劑量計算有關。

地基在地下水下方之深度：此為地下水面至地基下方的距離。預設值為-1，代表地基位於地下水上方。

現地混合垂直方向：本參數將用來計算混合體積，程式將以此計算氡、碳-14、氡-3 之現地濃度。

建築物室內面積因子：此為建築物位於污染區域之比率。若此參數大於 1，則代表牆壁穿透污染區。此參數之預設值為 0，代表這個隨時間變化的因子，其地板為 100m^2 ，而該建築物之牆體延伸至污染區。

28. 碳 14

Carbon-14

Thickness of evasion layer for C-14 in soil:	.3	meters
C-14 evasion flux rate from soil:	.0000007	1/sec
C-12 evasion flux rate from soil:	1E-10	1/sec
Fraction of vegetation carbon absorbed from soil:	.02	
Fraction of vegetation carbon absorbed from air:	.98	

Mass fractions of C-12

Save

Cancel

圖 33 碳-14 資料設定輸入視窗

Mass Fractions of Carbon-12

Contaminated soil:	.03	g/g
Local water:	.00002	g/cm**3
Fruit, grain, non-leafy vegetables:	.4	
Leafy vegetables:	.09	
Pasture and Silage	.09	
Livestock Feed Grain	.4	
Meat	.24	
Milk	.07	

Save

Cancel

圖 34 碳-12 資料設定輸入視窗

如圖 33 及圖 34 所示。在 RESRAD-OFFSITE 原文手冊的附錄 L 中，有關於碳-14 及其模式的介紹。在氫資料表單的現地垂直方向混合參數也可用於碳-14 及氫-3 之現地濃度。

29. 氫等

在 RESRAD-OFFSITE 手冊的附錄 L 中，有關於氫及其模式的介紹。在氫資料表單的現地垂直方向混合參數也可用於碳-14 及氫之現地濃度。如圖 35 所示。

Category	Value
Humidity in air:	8 grams/m**3
Mass fraction of water in:-	
Fruit, grain, non-leafy vegetables:	.8
Leafy vegetables:	.8
Pasture and Silage	.8
Livestock Feed Grain	.8
Meat	.6
Milk	.88

圖 35 氚資料設定輸入視窗

(四)RESRAD 程式參數統計分布設定

RESRAD-OFFSITE 耦合大氣延散模式、地下水傳輸模式和遠場累積模式。對於不同的土地利用型態及慢性曝露於輻射情形下，RESRAD-OFFITE 可計算其輻射劑量和過量終身致癌風險 (excess lifetime cancer risk)。本模組主要專注於計算土壤、空氣、水和生物作為媒介之受體受放射性汙染情況。於 RESRAD-OFFITE 有 9 種曝露方式：直接接觸、吸入性顆粒物和氣、攝取蔬菜、肉類、牛奶、水生食物、水和土壤。RESRAD-OFFSITE 採用路徑分析法而此種方法計算來源與受體在一段時間內的濃度。這些濃度用於計算曝露程度，劑量高低，過量致癌風險。放射性核種的輻射劑量、健康風險、土壤指引以及媒介濃度被計算於曝露時間。核種來源大小由時間做調整並可說明放射線衰退、負成長、分離、侵蝕及結合。使用者可建立曝露於核種的情境藉由不同的接觸路徑和參數之調整。

1. 參數分類

RESRAD-OFFSITE 模組之參數使用分為三類：物理性 (physical)、行為 (behavioral)或代謝性 (metabolic)皆於附錄 A 所示。

- (1) 物理性參數：不同受體下任何參數值均不改變稱為物理性參數。物理性參數的決定由來源位置和場址地質特性。
- (2) 行為參數：受不同受體之行為和情境改變而改變之參數稱為行為參數。以相同之受體而言，情境改變其參數隨之改變。

(3) 代謝參數：參數代表受體之代謝特性並且不受情境影響即可歸類為代謝參數。

2. 參數統計分布設定

參數選擇依據 RESRAD ONSITE 的參數分布所制定之準則 (Yu et al., 2000)。資料可以多種參數組合 (例如：植物的根和轉換因素因為不同之植物生長於不同地點)。

參數的選擇其功能如表 2 所示。根據不同之使用曝露情況可分為四大類：土壤與水文、大氣、農業和受體。每一參數分布意義包含單位、分布型態及輸入資料。對現有數據進行討論與說明來確定參數分布選用。詳細描述分布函數如附錄 B 所示。

表 2 機率密度函數之參數設定

參數	型態 ^a	使用分布型態	使用章節
體積含水量	P	線性	2.1
延散係數	P	線性	2.2
降雨沖蝕指數	P	線性	2.3
土壤沖蝕指數	P	線性	2.4
坡長及坡度因子	P	線性	2.5
覆蓋與管理因子	P, B	線性	2.6
P值	P, B	線性	2.7
土壤混和層深度	P, B	三角形	2.8
蒸發散係數	P	均勻	2.9
荷重	P, B	線性, 截斷常態分佈	3.1
沉降速度	P	對數常態分佈	3.2
風速	P	有界對數常態分佈	3.3
生長期	P	三角形	4.1
根系深度	P	均勻	4.2
植物轉移因子	P	截斷對數常態分佈	4.3
家庭用水量	B, M	線性	5.1
戶外時間比	B	線性	5.2

^a P = 物理性參數, B = 行為參數, M = 代謝參數

(五)RESRAD 參數資料調查使用手冊

美國能源部已開發 RESRAD 模式進行殘留輻射能物質路徑分析並寫成使用手冊。不僅水文地質、氣象、地球化學及地理幾何參數(長度、寬度及深度)；土壤相關參數皆考慮於 RESRAD 模式中。本手冊探討參數中的定義、種類、變異程度、量測方法論及地下水濾管開口深度位置。雖然本手冊發展主要為 RESRAD 模組所使用，內容所提及的也適用於其他模組。本報告已將該手冊翻譯整理如附錄 B。並簡介說明如下。

美國能源部(以下簡稱 DOE)建立殘留放射線物質指導方針，阿岡國家研究室(以下簡稱 ANL)發展計算機程式—RESRAD。RESRAD 開始發展始於 1980 年代初，經過 DOE 的努力及 ANL 的研發合作而有目前使用的 RESRAD 程式。DOE 透過 RESRAD 制定地區未受污染準則和輻射劑量計算。第一版 RESRAD 於 1989 年問世，之後陸續有新的功能加入其中。DOE 的環境部門提供基期的概念作為模組設定重大環境改變時之依據。資料收集手冊目的為引導 RESRAD 的使用者對模組參數設定及結果分析方面建立一個正確的評估方法。

RESRAD 模組是一個易於使用和多管道分析方法的程式。其主要功能為計算輻射劑量和輻射風險評估，當核子事故發生時的輻射擴散範圍內之災害受損程度皆可模擬預估。

當然 ANL 於 1991 年針對 RESRAD 模組內眾多參數進行敏感性分析其結果於文獻 RESRAD Parameter Sensitivity Analysis (Cheng et al., 1991)說明。一般而言，於地下水污染穿越時間(breakthrough time)發生前，覆蓋材質與污染區域之參數比未飽和與飽和地下水層之參數較敏感。其中穿越時間為污染物由非飽和層入滲至地下水過程的總時間。而參數改變的影響發生於穿越時間之後。於溶解的過程中，參數的敏感性對劑量濃度最大值之時間前後有著負面的影響。

RESRAD 模組已建立參數敏感性分析其中，幫助使用者簡單的操作參數敏感度分析。同時使用者可以參考 RESRAD Manual for Implementing Residual Radioactive Material Guidelines (Yu et al., 1993)和 RESRAD Parameter Sensitivity Analysis (Cheng et al., 1991)進行修改以加強 RESRAD 模組功能。

本 RESRAD 手冊已有 51 種參數，如表 3 所示。

REARAD 手冊提供參數定義、種類及預設值，至於其他相關之參數本手冊也提供量測方法。RESRAD 模組針對參數值的範圍進行設定。本手冊內容提供使用者更可進一步解讀參數的使用範圍、類型及參數變異性。

表 3 RESRAD 模組參數輸入及詳細說明之章節編號位置

輸入畫面	參數描述	參數表示	詳見於章節編號
R011	污染區域面積 (m ²)	AREA	30
R011	汙然區厚度 (m)	THICKO	39
R011	平行含水層內之流動長度 (m)	LCZPAQ	16
R011	放射線劑量限制 (mrem/yr)	BRDL	40
R011	物質放置時間 (yr)	TI	49
R011	計算時間 (yr)	T(t), 2 ≤ t ≤ 10	a
R012	主要放射線初始濃度 <i>i</i> (pCi/g)	S(i)	51
R012	放射線濃度於地下水 <i>i</i> (pCi/L)	W(i)	33
R013	覆蓋深度 (m)	COVERO	31
R013	覆蓋物質密度 (g/cm ³)	DENSCV	2
R013	覆蓋深度侵蝕率 (m/yr)	VCV	14
R013	污染區密度 (g/cm ³)	DENSCZ	2
R013	污染區侵蝕率 (m/yr)	VCZ	14
R013	污染區孔隙率	TPCZ	3
R013	污染區有效孔隙	EPCZ	4
R013	汙然區水力傳導係數 (m/yr)	HCCZ	5
R013	污染區參數 <i>b</i>	BCZ	13
R013	蒸發散係數	EVAPTR	12
R013	降水 (m/yr)	PRECIP	9
R013	灌溉率 (m/yr)	RI	11
R013	灌溉模式	IDITCH	b
R013	逕流係數	RUNOFF	10
R013	流域面積 (m ²)	WAREA	17
R013	土壤與水之正確性計算	EPS	a
R014	飽和區密度 (g/cm ³)	DENSAQ	2
R014	飽和區孔隙率	TPSZ	3
R014	飽和區有效孔隙	EPSZ	4
R014	飽和區水力傳導係數(m/yr)	HCSZ	5
R014	飽和區水力梯度	HGWT	15
R014	飽和區參數 <i>b</i>	BSZ	13

R014	水位洩降速率(m/yr)	VWT	18
R014	抽水井低於地下水位之深度(m)	DWIBWT	19
R014	模式: 非沿散 (ND) 或質量守恆 (MB)	MODEL	c
R014	地下水使用率 (m ³ /yr)	UW	c
R015	非飽和區分層數	NS ≤ 5,	25
R015	非飽和區厚度 (m)	H(z), 1 ≤ z ≤ NS	25
R015	非飽和區土壤密度 (g/cm ³)	DENSUZ(z)	2
R015	非飽和區孔隙率	TPUZ(z)	3
R015	非飽和區有效孔隙	EPUZ(z)	4
R015	非飽和區土壤比參數 <i>b</i>	BUZ(z)	13
R015	非飽和區水力傳導係數 (m/yr)	HCUZ(z)	5
R016	放射性核種擴散係數 <i>i</i>		
R016	於汙染區 (cm ³ /g)	DCACTC(i)	32
R016	於非飽和地下水區 <i>z</i> (cm ³ /g)	DCACTU(i,z)	32
R016	於飽和地下水區 (cm ³ /g)	DCACTS(i)	32
R016	滲漏率 (L/yr)	RLEACH(i)	34
R017	吸入率 (m ³ /yr)	INHALR	43
R017	輻射吸入量 (g/m ³)	MLINH	35
R017	空氣灰塵稀釋長度 (m)	LM	d
R017	暴露時間	ED	a,e
R017	吸入屏蔽係數	SHF3	36
R017	戶外屏蔽係數	SHF1	48
R017	廠址上室內滯留時間比	FIND	28,e
R017	廠址上戶外滯留時間比	FOTD	29,e
R017	形狀因子	FS1	50
R017	對區域內的環形區分數	FRACA(r) 1 ≤ r ≤ 12	50
R018	水果、蔬菜及穀物的消費量 (kg/yr)	DIET(1)	42
R018	有葉蔬菜消費量 (kg/yr)	DIET(2)	44
R018	牛奶消費 (L/yr)	DIET(3)	47
R018	家禽肉類的消費 (kg/yr)	DIET(4)	46
R018	魚類消費 (kg/yr)	DIET(5)	41
R018	其他海鮮消費 (kg/yr)	DIET(6)	41
R018	土壤吸收率 (g/yr)	SOIL	38
R018	飲用水吸收率 (L/yr)	DWI	52
R018	受廠址汙染之飲用水	FDW	a
R018	受廠址汙染之水產	FR9	a
R019	家畜飼料吸收生的肉 (kg/d)	LFI5	b
R019	家畜飼料吸收生的牛奶 (kg/d)	LFI6	b
R019	家畜攝取水後產生的肉 (L/d)	LWI5	45
R019	家畜攝取水後產生的牛奶 (L/d)	LWI6	45
R019	葉面殘留量 (g/m ³)	MLFD	b,f

R019	土壤混合層深度 (m)	DM	35,f
R019	植物根部深度 (m)	DROOT	37
R019	地下飲用水比例	FGWDW	b, c
R019	地下家畜飲用水比例	FGWLW	b, c
R019	地下灌溉水比例	FGWIR	b, c
R021	建築物地基深度 (m)	FLOOR	26
R021	建築物地基體積密度 (g/cm ³)	DENSFL	2
R021	覆蓋物之總孔隙率	TPCV	3
R021	建物地基總孔隙率	TPFL	3
R021	覆蓋物水體積含水量	PH2OCV	6
R021	地積水體積含水量	PH2OFL	6
R021	氬氣擴散係數 (m ² /s)		
R021	於覆蓋表層之物質	DIFCV	7
R021	於地基處之物質	DIFFL	7
R021	於受汙染區	DIFCZ	7
R021	氬氣垂直混合維度 (m)	HMIX	20
R021	平均風速 (m/s)	WIND	21
R021	平均建物改變風速率 (1/h)	REXG	22
R021	建物高度 (m)	HRM	23
R021	建物內部面積因子	FAI	24
R021	建物地基深度 (m)	DMFL	27
R021	場址逸散氬氣-222	EMANA(1)	8
R021	場址逸散氬氣-220	EMANA(2)	8

來源: ^a Yu et al. (1993), Section 4; ^b Yu et al. (1993), Appendix D; ^c Yu et al. (1993), Appendix E; ^d Yu et al. (1993), Appendix B; ^e EPA (1990a), Part I; and ^f Gilbert et al. (1983)

三、低放處置輻射劑量與風險評估技術文獻資訊研析

本工作內容針對 RESRAD 程式之環境途徑、暴露途徑及劑量與癌症風險之輻射風險評估之技術文獻資訊進行研析，並再蒐集歐洲、美國、日本等國處置低放射性廢棄物利用 GOLDSIM 進行輻射劑量與風險評估研析。

(一) 低放射性廢棄物最終處置場的安全功能設計

低放射性廢棄物最終處置場的安全功能設計，世界各國皆採「多重障壁」的概念，也就是利用多項的防護措施，隔絕放射性廢棄物於人類生活環境之外。這些多重障壁包括放射性廢棄物固化體障壁、廢棄物容器障壁、工程障壁、填充材料障壁、排水設施及天然障壁等。選擇最終處置場時最重要的考慮是如何避免或減少因地下水等媒介將放射性核種遷移至人類生活圈。為確認最終處置場多重障壁設計阻滯放射性核種的遷移，確保長期置放的過程，不致對環境品質與人類生活安全造成不良之影響。必須建立低放處置輻射劑量與風險評估技術，依據 RESRAD 程式設計，必須先針對核種遷移之環境途徑、暴露途徑先行確立，然後才能利用 RESRAD 程式計畫其輻射劑量與風險。相關 RESRAD 程式設計概念示意圖如所示。

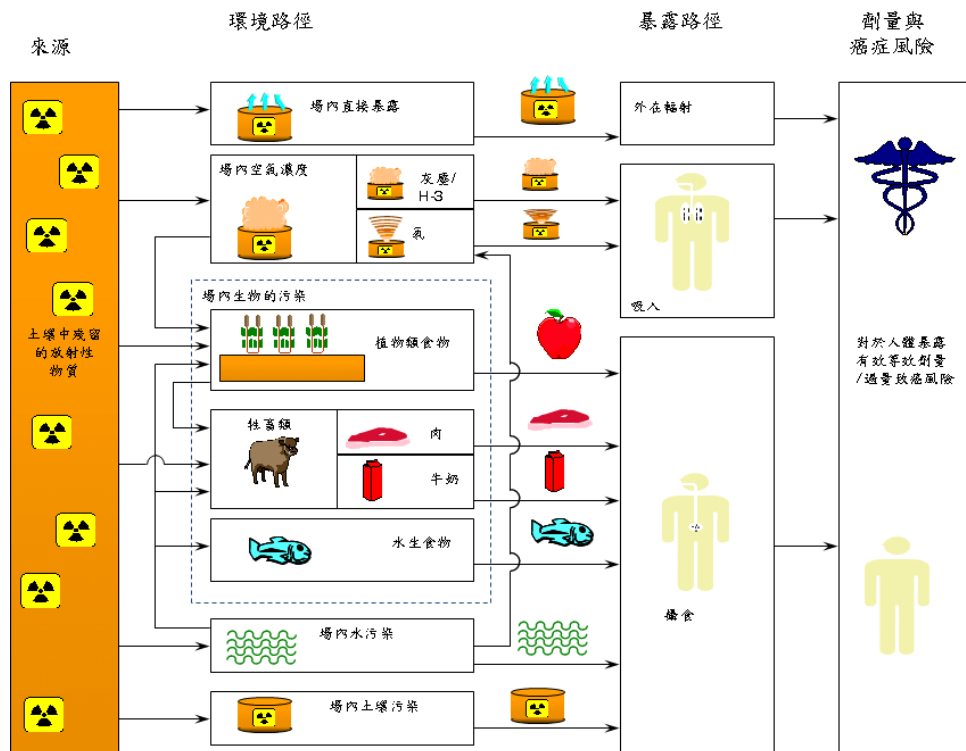


圖 36 RESRAD 程式之環境途徑、暴露途徑及劑量與癌症風險評估示意圖

(二) RESRAD-OFFSITE 程式輻射劑量與風險評估技術

1. 遠場位置及食物之核種累積

為說明 RESRAD-OFFSITE 程式輻射劑量與風險評估，需先瞭解 RESRAD-OFFSITE 在遠場農業區、地表水體及區域的植物及動物之核種污染物累積的概念方法。本方法用來計算污染物在表土、地表水體、植物、肉類、奶類及水生植物。

遠場表土由於灌溉污染水或沉積污染塵土，將會累積污染。

表土污染濃度計算會考量核種衰變、表土混合土壤、表土侵蝕以及吸附釋出平衡。植物之累積污染包含植物根部攝取遠場、現場土壤以及葉子攝取污染之灌溉水及塵土。

肉、奶類的污染轉換及累積原因包含攝取污染植物及其參雜之土壤、污染的水。

程式針對遠場地地表水體考量三個污染情境：(1)由於主要污染受侵蝕移除之污染土壤通量。(2)污染地下水進入地表水體。(3)大氣傳輸之塵土沉積。其中湖水污染考量放射性衰變、吸附脫附平衡以及污染湖水之流出。水生食物之污染濃度採用生物累積平衡因子計算。

1.1 遠場表土累積

本節描述模擬核種累積之過程，其數學式考量核種經過一段時間後(δt)，於遠場受體位置混合層之活性改變。

在混合層之沉積為：

$$D_i(t)A^o\delta t, \quad (1)$$

其中

$$D_i(t) = \text{核種與時間相關之沉積率 (pCi m}^{-2}\text{)},$$

$$A^o = \text{遠場受體區域面積 (m}^2\text{)}.$$

在混合層之放射性衰變為：

$$\lambda_i s_j^o(t) \rho_b^o d_{mix}^o A^o \delta t, \quad (2)$$

其中

$$s_j^o(t) = \text{母核種在遠場土壤之濃度 (pCi g}^{-1}\text{)}$$

$$\rho_b^o = \text{土壤在遠場位置之乾積密度 (g [cm]}^{-3}\text{)}$$

$$d_{mix}^o t = \text{遠場位置之混合深度 (m).}$$

在混合層之衰變為：

$$\lambda_i s_i^o(t) \rho_b^o d_{mix}^o A^o \delta t. \quad (3)$$

混合層之表面侵蝕損失為：

$$s_i^o(t) \rho_b^o \varepsilon^o A^o \delta t = s_i^o(t) \rho_b^o E^o d_{mix}^o A^o \delta t, \quad (4)$$

其中

$$\varepsilon^o = \text{遠場位置土壤侵蝕率 (m yr}^{-1}\text{)},$$

$$E^o = \text{混合層每年侵蝕比率 (yr}^{-1}\text{)}.$$

吸附脫附平衡滲漏為：

$c_i(t)$ 及 $s_i'(t)$ 分別代表核種 i 在時間為 t 時，混合層之水相、固相活性濃度。方程式以質量平衡 ($c_i(t)\theta_c^o + s_i'(t)\rho_b^o = s_i^o(t)\rho_b^o$) 及線性吸附 ($s_i'(t) = c_i(t)K_{d_i}^o$) 表示：

$$c_i(t) = \frac{s_i^o(t)\rho_b^o}{\theta_c^o + \rho_b^o K_{d_i}^o}. \quad (5)$$

而外洩損失為：

$$c_i(t)A^o I^o \delta t = \frac{s_i^o(t)\rho_b^o}{\theta_c^o + \rho_b^o K_{d_i}^o} A^o I^o \delta t = L_i^o s_i^o(t)\rho_b^o d_{mix}^o A^o \delta t, \quad (6)$$

其中

$$K_{d_i}^o = \text{核種在遠場位置之土水分佈係數 ([cm]}^{-3} \text{g}^{-1}\text{)},$$

$$\theta_c^o = \text{污染土壤在遠場位置之孔隙率 (無因次)},$$

$$I^o = \text{遠場位置之入滲率 (m yr}^{-1}\text{)},$$

$$L_i^o = \text{核種入滲至混合層速率 (yr}^{-1}\text{)}$$

$$= L_i^o = \frac{I^o/d_{mix}^o}{\theta_c^o + \rho_b^o K_{d_i}^o}$$

以上過程之淨效應就是混合層之活性改變：

$$\rho_b^o d_{mix}^o A^o \frac{ds_i^o(t)}{dt} \delta t \quad (7)$$

將以上過程結合，可得一質量平衡式：

$$\rho_b^o d_{mix}^o A^o \frac{ds_i^o(t)}{dt} = D_i(t)A^o + \lambda_i s_j^o(t) \rho_b^o d_{mix}^o A^o - \lambda_i s_i^o(t) \rho_b^o d_{mix}^o A^o - s_i^o(t) \rho_b^o E^o d_{mix}^o A^o - L_i^o s_i^o(t) \rho_b^o d_{mix}^o A^o \quad (8)$$

可簡化為：

$$\frac{ds_i^o(t)}{dt} + (\lambda_i + E^o + L_i^o) s_i^o(t) = \frac{D_i(t)}{\rho_b^o d_{mix}^o} + \lambda_i s_j^o(t). \quad (9)$$

從時間 0 到 t 之積分，可得：

$$s_i^o(t) = s_i^o(0) e^{-(\lambda_i + E^o + L_i^o)t} + \frac{e^{-(\lambda_i + E^o + L_i^o)t}}{\rho_b^o d_{mix}^o} \int_0^t D_i(t) e^{(\lambda_i + E^o + L_i^o)t} dt + \lambda_i e^{-(\lambda_i + E^o + L_i^o)t} \int_0^t s_j^o(t) e^{(\lambda_i + E^o + L_i^o)t} dt. \quad (10)$$

其中須瞭解 $D_i(t)$ 之形式，才可求解此方程式。

1.1.1 污染灌溉水造成之沉積

根據每年蒸發散及降雨潛勢，必須進行之區域灌溉只在每年部分時段執行，因此上述方程式可整裡成兩時段：灌溉期、非灌溉期。但是，在程式中以灌溉期的水量於整年均勻分佈較為合適，其表示如下：

$$D_i(t) = q_{ir} w_i^{ir}(t) \left[1 - f_{int} \frac{1 - \exp(-\lambda_w t_g)}{\lambda_w t_g} \right], \quad (11)$$

其中

$$q_{ir} = \text{年度農業區單位面積灌溉水量 (m),}$$

$$w_i^{ir}(t) = \text{灌溉水之核種濃度 (pCi m}^{-3}\text{),}$$

$f_{\text{int}} =$ 葉子擷取因子 (無因次),

$\lambda_w =$ 風化常數 (yr^{-1}),

$t_g =$ 作物灌溉成長期(yr).

由於植物之擷取及保留，因此最後一項調整沉積比例(詳見 2.3.3 節)。灌溉水之核種活性濃度在各個時點呈現性關係，因此灌溉水之核種沉積表示法為一線性時間函數：

$$D_i(t) = \alpha_i + \beta_i t, \quad (12)$$

其中 α_i 及 β_i 代表各個時間點之常數。

1.1.2 大氣之顆粒沉降

污染自大氣沉降到地表之速率為：

$$D_i(t) = V_{\text{dep}} a_i(t) \left[1 - f_{\text{int}} \frac{1 - \exp(-\lambda_w t_g)}{\lambda_w} \right], \quad (13)$$

其中

$V_{\text{dep}} =$ 污染顆粒沉降速率(m yr^{-1}), and

$a_i(t) =$ 核種大氣濃度(pCi m^{-3}).

由於植物之擷取及保留，因此最後一項調整沉積比例(詳見 1.3.4 節)。空氣之核種活性濃度在各個時點呈現性關係，因此核種沉積表示法為一線性時間函數。

1.1.3 衰變鏈中，第一個子核種之遠場土壤濃度

將時間相依之沉積率改為線性時間函數並積分¹之：

$$s_1^o(t) = s_1^o(0)e^{-(\lambda_1 + E^o + L_1^o)t} + \frac{\left(\alpha_1 - \frac{\beta_1}{\lambda_1 + E^o + L_1^o} \right) \left(1 - e^{-(\lambda_1 + E^o + L_1^o)t} \right) + \beta_1 t}{\rho_b^o d_{\text{mix}}^o (\lambda_1 + E^o + L_1^o)}. \quad (14)$$

整合方程式可得：

$$\begin{aligned} s_1^o(t) &= s_1^o(0)e^{-(\lambda_1 + E^o + L_1^o)t} + \frac{e^{-(\lambda_1 + E^o + L_1^o)t}}{\rho_b^o d_{\text{mix}}^o} \int_0^t (\alpha_1 + \beta_1 t) e^{(\lambda_1 + E^o + L_1^o)t} dt \\ &= s_1^o(0)e^{-(\lambda_1 + E^o + L_1^o)t} + \frac{e^{-(\lambda_1 + E^o + L_1^o)t}}{\rho_b^o d_{\text{mix}}^o} \alpha_1 \frac{e^{(\lambda_1 + E^o + L_1^o)t} - 1}{\lambda_1 + E^o + L_1^o} \\ &\quad + \frac{e^{-(\lambda_1 + E^o + L_1^o)t}}{\rho_b^o d_{\text{mix}}^o} \beta_1 \left(\frac{te^{(\lambda_1 + E^o + L_1^o)t} - 0}{\lambda_1 + E^o + L_1^o} - \frac{e^{(\lambda_1 + E^o + L_1^o)t} - 1}{(\lambda_1 + E^o + L_1^o)^2} \right) \end{aligned}$$

$$s_1^o(t) = A_1^0 + A_1^1 t + C_1^1 e^{-(\lambda_1 + E^o + L_1^o)t}, \quad (15)$$

其中

$$A_1^1 = \frac{\beta_1}{\rho_b^o d_{mix}^o (\lambda_1 + E^o + L_1^o)},$$

$$A_1^0 = \frac{\alpha_1 - \frac{\beta_1}{\lambda_1 + E^o + L_1^o}}{\rho_b^o d_{mix}^o (\lambda_1 + E^o + L_1^o)} = \frac{\alpha_1}{\rho_b^o d_{mix}^o (\lambda_1 + E^o + L_1^o)} - \frac{A_1^1}{\lambda_1 + E^o + L_1^o},$$

$$C_1^1 = s_1^o(0) - \frac{\alpha_1 - \frac{\beta_1}{\lambda_1 + E^o + L_1^o}}{\rho_b^o d_{mix}^o (\lambda_1 + E^o + L_1^o)} = s_1^o(0) - A_1^0.$$

1.1.4 衰變鏈中，第二個子核種之土壤濃度

與第一個子核種方程式(1.1.3 節)進行類比：

$$s_2^o(t) = s_2^o(0)e^{-(\lambda_2 + E^o + L_2^o)t} + \frac{\left(\alpha_2 - \frac{\beta_2}{\lambda_2 + E^o + L_2^o}\right)\left(1 - e^{-(\lambda_2 + E^o + L_2^o)t}\right) + \beta_2 t}{\rho_b^o d_{mix}^o (\lambda_2 + E^o + L_2^o)} + \lambda_2 e^{-(\lambda_2 + E^o + L_2^o)t} \int_0^t s_1^o(t) e^{(\lambda_2 + E^o + L_2^o)t} dt. \quad (16)$$

更換第一個子核種之濃度並積分²之：

$$s_2^o(t) = s_2^o(0)e^{-(\lambda_2 + E^o + L_2^o)t} + \frac{\left(\alpha_2 - \frac{\beta_2}{\lambda_2 + E^o + L_2^o}\right)\left(1 - e^{-(\lambda_2 + E^o + L_2^o)t}\right) + \beta_2 t}{\rho_b^o d_{mix}^o (\lambda_2 + E^o + L_2^o)} + \lambda_2 \frac{\left(A_1^0 - \frac{A_1^1}{\lambda_2 + E^o + L_2^o}\right)\left(1 - e^{-(\lambda_2 + E^o + L_2^o)t}\right) + A_1^1 t}{\lambda_2 + E^o + L_2^o} + \lambda_2 C_1^1 \frac{e^{-(\lambda_1 + E^o + L_1^o)t} - e^{-(\lambda_2 + E^o + L_2^o)t}}{\lambda_2 + L_2^o - \lambda_1 - L_1^o}. \quad (17)$$

整合方程式可得：

$$\int_0^t \left(A_1^0 + A_1^1 t + C_1^1 e^{-(\lambda_1 + E^o + L_1^o)t}\right) e^{(\lambda_2 + E^o + L_2^o)t} dt = A_1^0 \frac{e^{(\lambda_2 + E^o + L_2^o)t} - 1}{\lambda_2 + E^o + L_2^o} + A_1^1 \frac{te^{(\lambda_2 + E^o + L_2^o)t}}{\lambda_2 + E^o + L_2^o} - A_1^1 \frac{e^{(\lambda_2 + E^o + L_2^o)t} - 1}{(\lambda_2 + E^o + L_2^o)^2} + C_1^1 \frac{e^{(\lambda_2 + L_2^o - \lambda_1 - L_1^o)t} - 1}{\lambda_2 + L_2^o - \lambda_1 - L_1^o}$$

$$s_2^o(t) = A_2^0 + A_2^1 t + C_2^1 e^{-(\lambda_1 + E^o + L_1^o)t} + C_2^2 e^{-(\lambda_2 + E^o + L_2^o)t}, \quad (18)$$

其中

$$\begin{aligned} A_2^1 &= \frac{\beta_2}{\rho_b^o d_{mix}^o (\lambda_2 + E^o + L_2^o)} + \frac{\lambda_2 A_1^1}{\lambda_2 + E^o + L_2^o}, \\ A_2^0 &= \frac{\alpha_2 - \frac{\beta_2}{\lambda_2 + E^o + L_2^o}}{\rho_b^o d_{mix}^o (\lambda_2 + E^o + L_2^o)} + \lambda_2 \frac{A_1^0 - \frac{A_1^1}{\lambda_2 + E^o + L_2^o}}{\lambda_2 + E^o + L_2^o} \\ &= \frac{\alpha_2}{\rho_b^o d_{mix}^o (\lambda_2 + E^o + L_2^o)} + \frac{\lambda_2 A_1^0}{\lambda_2 + E^o + L_2^o} - \frac{A_2^1}{\lambda_2 + E^o + L_2^o} \\ C_2^1 &= \frac{\lambda_2 C_1^1}{\lambda_2 + L_2^o - \lambda_1 - L_1^o}, \quad \text{且} \\ C_2^2 &= s_2^o(0) - A_2^0 - C_2^1. \end{aligned}$$

1.1.5 衰變鏈中，第 j 個子核種之土壤濃度

使用第一個及第二個子核種方程式形式，可推得第 j 個子核種之方程式，假設第 i 個子核種之遠場濃度為：

$$s_i^o(t) = A_i^0 + A_i^1 t + \sum_{k=1}^i C_i^k e^{-(\lambda_k + E^o + L_k^o)t}. \quad (19)$$

則第 j 個子核種方程式為：

$$\begin{aligned} s_j^o(t) &= s_j^o(0) e^{-(\lambda_j + E^o + L_j^o)t} + \frac{\left(\alpha_j - \frac{\beta_j}{\lambda_j + E^o + L_j^o} \right) \left(1 - e^{-(\lambda_j + E^o + L_j^o)t} \right) + \beta_j t}{\rho_b^o d_{mix}^o (\lambda_j + E^o + L_j^o)} \\ &\quad + \lambda_j e^{-(\lambda_j + E^o + L_j^o)t} \int_0^t \left(A_i^0 + A_i^1 t + \sum_{k=1}^i C_i^k e^{-(\lambda_k + E^o + L_k^o)t} \right) e^{\lambda_j + E^o + L_j^o t} dt \end{aligned} \quad (20)$$

積分式為：

$$s_j^o(t) = s_j^o(0)e^{-(\lambda_j + E^o + L_j^o)t} + \lambda_j \sum_{k=1}^i C_i^k \frac{e^{-(\lambda_k + E^o + L_k^o)t} - e^{-(\lambda_j + E^o + L_j^o)t}}{\lambda_j + L_j^o - \lambda_k - L_k^o} \quad (21)$$

$$+ \frac{\left(\frac{\alpha_j}{\rho_b^o d_{mix}^o} + \lambda_j A_i^0 - \frac{\beta_j / \rho_b^o d_{mix}^o + \lambda_j A_i^1}{\lambda_j + E^o + L_j^o} \right) \left(1 - e^{-(\lambda_j + E^o + L_j^o)t} \right) + \left(\frac{\beta_j}{\rho_b^o d_{mix}^o} + \lambda_j A_i^1 \right) t}{\lambda_j + E^o + L_j^o}$$

$$s_j^o(t) = s_j^o(0)e^{-(\lambda_j + E^o + L_j^o)t} + \frac{\left(\alpha_j - \frac{\beta_j}{\lambda_j + E^o + L_j^o} \right) \left(1 - e^{-(\lambda_j + E^o + L_j^o)t} \right) + \beta_j t}{\rho_b^o d_{mix}^o (\lambda_j + E^o + L_j^o)} \quad (22)$$

$$+ \lambda_j \frac{\left(A_i^0 - \frac{A_i^1}{\lambda_j + E^o + L_j^o} \right) \left(1 - e^{-(\lambda_j + E^o + L_j^o)t} \right) + A_i^1 t}{\lambda_j + E^o + L_j^o} + \lambda_j \sum_{k=1}^i C_i^k \frac{e^{-(\lambda_k + E^o + L_k^o)t} - e^{-(\lambda_j + E^o + L_j^o)t}}{\lambda_j + L_j^o - \lambda_k - L_k^o}$$

整合方程式可得：

$$s_j^o(t) = A_j^0 + A_j^1 t + \sum_{k=1}^j C_j^k e^{-(\lambda_k + E^o + L_k^o)t},$$

其中

$$A_j^1 = \frac{\beta_j}{\rho_b^o d_{mix}^o (\lambda_j + E^o + L_j^o)} + \frac{\lambda_j A_{j-1}^1}{\lambda_j + E^o + L_j^o},$$

$$A_j^0 = \frac{\alpha_j - \frac{\beta_j}{\lambda_j + E^o + L_j^o}}{\rho_b^o d_{mix}^o (\lambda_j + E^o + L_j^o)} + \lambda_j \frac{A_{j-1}^0 - \frac{A_{j-1}^1}{\lambda_j + E^o + L_j^o}}{\lambda_j + E^o + L_j^o},$$

$$= \frac{\alpha_j}{\rho_b^o d_{mix}^o (\lambda_j + E^o + L_j^o)} + \frac{\lambda_j A_{j-1}^0}{\lambda_j + E^o + L_j^o} - \frac{A_j^1}{\lambda_j + E^o + L_j^o}$$

$$C_j^k = \frac{\lambda_j C_{j-1}^k}{\lambda_j + L_j^o - \lambda_k - L_k^o} \quad \text{當 } k \neq j, \text{ 且}$$

$$C_j^j = s_j^o(0) - A_j^0 - \sum_{k=1}^{j-1} C_j^k.$$

1.2 核種在地表水體累積

本處介紹核種累積模擬過程，其數學式考量核種經過一段時間後(δt)，地表水體之核

種之活性改變。

表面侵蝕的層積層之輸入：

$$R_i^{sr}(t)SDR\delta t, \quad (23)$$

其中

$$R_i^{sr}(t) = \text{主要污染之表土侵蝕造成核種 } i \text{ 的釋出率 (pCi yr}^{-1}\text{)}$$

$$SDR = \text{沉積傳輸比率}$$

將抽水區域之面積轉換成平方公尺後，沉積傳輸比率可藉由迴歸方程式推估求得， $SDR = 26A^{-0.3}$ 。

地下水核種輸入：

$$f_s(t)\delta t, \quad (24)$$

其中 $f_s(t)$ 為核種 i 經由地下水傳輸至地表水體之通量 (pCi yr⁻¹)。

大氣傳輸之核種輸入：

$$a_i(t)V_{dep}A^{sw}\delta t, \quad (25)$$

其中

$$a_i(t) = \text{核種 } i \text{ 之大氣濃度 (pCi m}^{-3}\text{)},$$

$$V_{dep} = \text{污染顆粒沉積速度 (m yr}^{-1}\text{)},$$

$$A^{sw} = \text{地表水體之表面積 (m}^2\text{)}.$$

核種衰變：

$$\lambda_i V^{sw} w_{i-1}^{sw}(t)\delta t + \lambda_i m^{sd}(t) s_{i-1}^{sd}(t)\delta t, \quad (26)$$

其中

$$V^{sw} = \text{地表水體之體積 (m}^3\text{)},$$

$$w_{i-1}^{sw}(t) = \text{母核種於水中濃度 (pCi m}^{-3}\text{)},$$

$$m^{sd}(t) = \text{污染土壤在地表水體之累積質量 (g)},$$

$$s_{i-1}^{sd}(t) = \text{污染土壤之母核種在地表水體之濃度 (pCi g}^{-1}\text{)}.$$

因為核種衰變，造成核種 i 之減少：

$$\lambda_i V^{sw} w_i^{sw}(t) \delta t + \lambda_i m^{sd}(t) s_i^{sd}(t) \delta t. \quad (27)$$

利用水相、吸附相之關係， $s_i^{sd}(t) = 10^{-6} K_d^i w_i^{sw}(t)$ ，可轉變成：

$$\lambda_i (V^{sw} + 10^{-6} m^{sd}(t) K_d^{i-1}) w_{i-1}^{sw}(t) \delta t - \lambda_i (V^{sw} + 10^{-6} m^{sd}(t) K_d^i) w_i^{sw}(t) \delta t. \quad (28)$$

使用方程式定義核種 i 於地表水體之當量體積：

$$V_i^{sw}(t) = V^{sw} + m^{sd}(t) K_d^i / 10^6, \quad (29)$$

可簡化成：

$$\lambda_i V_{i-1}^{sw}(t) w_{i-1}^{sw}(t) \delta t - \lambda_i V_i^{sw}(t) w_i^{sw}(t) \delta t. \quad (30)$$

移除污染湖水：

$$q_{sw} w_i^{sw}(t) \delta t. \quad (31)$$

以上所有過程之效應就是湖水之淨改變：

$$\begin{aligned} & V^{sw} \frac{dw_i^{sw}(t)}{dt} \delta t + \frac{dm^{sd}(t) s_i^{sd}(t)}{dt} \delta t \\ &= V^{sw} \frac{dw_i^{sw}(t)}{dt} \delta t + m^{sd}(t) \frac{ds_i^{sd}(t)}{dt} \delta t + s_i^{sd}(t) \frac{dm^{sd}(t)}{dt} \delta t \\ &= (V^{sw} + 10^{-6} m^{sd}(t) K_d^i) \frac{dw_i^{sw}(t)}{dt} \delta t + 10^{-6} K_d^i w_i^{sw}(t) \frac{dm^{sd}(t)}{dt} \delta t \\ &= V_i^{sw}(t) \frac{dw_i^{sw}(t)}{dt} \delta t + 10^{-6} K_d^i w_i^{sw}(t) \frac{dm^{sd}(t)}{dt} \delta t \end{aligned} \quad (32)$$

利用質量平衡方程式，綜合上述效應：

$$\begin{aligned} V_i^{sw}(t) \frac{dw_i^{sw}(t)}{dt} + 10^{-6} K_d^i w_i^{sw}(t) \frac{dm^{sd}(t)}{dt} &= R_i^{sr}(t) SDR + f_s(t) + a_i(t) V_{dep} A^{sw} \\ &+ \lambda_i V_{i-1}^{sw}(t) w_{i-1}^{sw}(t) - \lambda_i V_i^{sw}(t) w_i^{sw}(t) - q_{sw} w_i^{sw}(t) \end{aligned} \quad (33)$$

與核種 i 之地表水體當量體積，可定義移除率、改變率、入流率：

$$\frac{dw_i^{sw}(t)}{dt} + (\lambda_i + \lambda_i^{sw} + \lambda_i^{sd})w_i^{sw}(t) = I_i^{sw}(t) + \lambda_i \frac{V_{i-1}^{sw}(t)}{V_i^{sw}(t)} w_{i-1}^{sw}(t), \quad (34)$$

其中

$$\lambda_i^{sw} = \frac{q_{sw}}{V_i^{sw}(t)} = \text{核種 } i \text{ 流出地表水體之移除率 (yr}^{-1}\text{)}$$

$$\lambda_i^{sd} = \frac{10^{-6} K_d^i}{V_i^{sw}(t)} \frac{dm^{sd}(t)}{dt} = \text{侵蝕土壤流入地表水體造成持續改變比例之當量率 (yr}^{-1}\text{)}$$

$$I_i^{sw}(t) = \frac{R_i^{sr}(t)SDR + f_s(t) + a_i(t)V_{dep}A^{sw}}{V_i^{sw}(t)} = \text{單位當量體積之核種 } i \text{ 進入地表水體率 (pCi yr}^{-1}\text{)}$$

假設 $\frac{V_{i-1}^{sw}(t)}{V_i^{sw}(t)}$ 從時間 0 到 t ，皆為常數，則時間 0 到 t 之積分為：

$$\begin{aligned} w_i^{sw}(t) = & w_i^{sw}(0)e^{-(\lambda_i + \lambda_i^{sw} + \lambda_i^{sd})t} + e^{-(\lambda_i + \lambda_i^{sw} + \lambda_i^{sd})t} \int_0^t I_i^{sw}(t)e^{(\lambda_i + \lambda_i^{sw} + \lambda_i^{sd})t} dt \\ & + \lambda_i e^{-(\lambda_i + \lambda_i^{sw} + \lambda_i^{sd})t} \frac{V_{i-1}^{sw}(t)}{V_i^{sw}(t)} \int_0^t w_{i-1}^{sw}(t)e^{(\lambda_i + \lambda_i^{sw} + \lambda_i^{sd})t} dt. \end{aligned} \quad (35)$$

其中須瞭解 $I_i^{sw}(t)$ 之形式，才可求解此方程式。

1.2.1 流入地表水體之核種

由於各時段之地表侵蝕、地下水流、大氣塵土沉積，使得核種進入地表水體，便可知特定時點之特定核種當量體積。因此，程式可計算每單位湖水當量體積之核種輸入。若假設其為線性關係，則方程式為線性方程式 $I_i^{sw}(t) = \alpha_i + \beta_i t$ ，其中 α_i 及 β_i 代表各個時間點之常數，其數值由當時之污染輸入決定。

1.2.2 衰變鏈產生第一個子核種在地表水體的濃度

將時間相依流入量替換成時間線性函數，並積分之(詳見 1.1.3)。

$$w_1^{sw}(t) = w_1^{sw}(0)e^{-(\lambda_1 + \lambda_1^{sw} + \lambda_1^{sd})t} + \frac{\left(\alpha_1 - \frac{\beta_1}{\lambda_1 + \lambda_1^{sw} + \lambda_1^{sd}}\right)\left(1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_1^{sw} + \lambda_1^{sd})t}\right) + \beta_1 t}{\lambda_1 + \lambda_1^{sw} + \lambda_1^{sd}} \quad (36)$$

整理各項次：

$$w_1^{sw}(t) = A_1^0 + A_1^1 t + C_1^1 e^{-(\lambda_1 + \lambda_1^{sw} + \lambda_1^{sd})t}, \quad (37)$$

其中

$$A_1^1 = \frac{\beta_1}{\lambda_1 + \lambda_1^{sw} + \lambda_1^{sd}},$$

$$A_1^0 = \frac{\alpha_1 - \frac{\beta_1}{\lambda_1 + \lambda_1^{sw} + \lambda_1^{sd}}}{\lambda_1 + \lambda_1^{sw} + \lambda_1^{sd}} = \frac{\alpha_1 - A_1^1}{\lambda_1 + \lambda_1^{sw} + \lambda_1^{sd}} \quad \text{且}$$

$$C_1^1 = w_1^{sw}(0) - \frac{\alpha_1 - \frac{\beta_1}{\lambda_1 + \lambda_1^{sw} + \lambda_1^{sd}}}{\lambda_1 + \lambda_1^{sw} + \lambda_1^{sd}} = w_1^{sw}(0) - A_1^0.$$

1.2.3 衰變鏈產生第二個子核種在地表水體的濃度

根據第一個子核種推導出的方程式(1.2.2 節)進行類比，可得：

$$w_2^{sw}(t) = w_2^{sw}(0)e^{-(\lambda_2 + \lambda_2^{sw} + \lambda_2^{sd})t} + \frac{\left(\alpha_2 - \frac{\beta_2}{\lambda_2 + \lambda_2^{sw} + \lambda_2^{sd}}\right)\left(1 - e^{-(\lambda_2 + \lambda_2^{sw} + \lambda_2^{sd})t}\right) + \beta_2 t}{\lambda_2 + \lambda_2^{sw} + \lambda_2^{sd}} + \lambda_2 e^{-(\lambda_2 + \lambda_2^{sw} + \lambda_2^{sd})t} \frac{V_1^{sw}(t)}{V_2^{sw}(t)} \int_0^t w_1^{sw}(t) e^{(\lambda_2 + \lambda_2^{sw} + \lambda_2^{sd})t} dt. \quad (38)$$

更換第一核種濃度，並利用 2.1.4 節之積分：

$$w_2^{sw}(t) = w_2^{sw}(0)e^{-(\lambda_2 + \lambda_2^{sw} + \lambda_2^{sd})t} + \frac{V_1^{sw}(t)}{V_2^{sw}(t)} \frac{\lambda_2 C_1^1 \left(e^{-(\lambda_1 + \lambda_1^{sw} + \lambda_1^{sd})t} - e^{-(\lambda_2 + \lambda_2^{sw} + \lambda_2^{sd})t}\right)}{\lambda_2 + \lambda_2^{sw} + \lambda_2^{sd} - \lambda_1 - \lambda_1^{sw} - \lambda_1^{sd}} + \frac{\left(\alpha_2 + \lambda_2 \frac{V_1^{sw}(t)}{V_2^{sw}(t)} A_1^0 - \frac{\beta_2 + \lambda_2 A_1^1 V_1^{sw}(t)/V_2^{sw}(t)}{\lambda_2 + \lambda_2^{sw} + \lambda_2^{sd}}\right)\left(1 - e^{-(\lambda_2 + \lambda_2^{sw} + \lambda_2^{sd})t}\right) + \left(\beta_2 + \lambda_2 \frac{V_1^{sw}(t)}{V_2^{sw}(t)} A_1^1\right)t}{\lambda_2 + \lambda_2^{sw} + \lambda_2^{sd}}. \quad (39)$$

整理各項式：

$$w_2^{sw}(t) = A_2^0 + A_2^1 t + C_2^1 e^{-(\lambda_1 + \lambda_1^{sw} + \lambda_1^{sd})t} + C_2^2 e^{-(\lambda_2 + \lambda_2^{sw} + \lambda_2^{sd})t}, \quad (40)$$

其中

$$A_2^1 = \left(\beta_2 + \frac{V_1^{sw}(t)}{V_2^{sw}(t)} \lambda_2 A_1^1\right) / (\lambda_2 + \lambda_2^{sw} + \lambda_2^{sd}),$$

$$A_2^0 = \frac{\alpha_2 + \lambda_2 \frac{V_1^{sw}(t)}{V_2^{sw}(t)} A_1^0 - \frac{\beta_2 + \lambda_2 A_1^1 V_1^{sw}(t)/V_2^{sw}(t)}{\lambda_2 + \lambda_2^{sw} + \lambda_2^{sd}}}{\lambda_2 + \lambda_2^{sw} + \lambda_2^{sd}},$$

$$= \left(\alpha_2 + \frac{V_1^{sw}(t)}{V_2^{sw}(t)} \lambda_2 A_1^0 - A_2^1 \right) / (\lambda_2 + \lambda_2^{sw} + \lambda_2^{sd})$$

$$C_2^1 = \frac{V_1^{sw}(t)}{V_2^{sw}(t)} \frac{\lambda_2 C_1^1}{\lambda_2 + \lambda_2^{sw} + \lambda_2^{sd} - \lambda_1 - \lambda_1^{sw} - \lambda_1^{sd}}, \text{ 且 } C_2^2 = w_2^{sw}(0) - A_2^0 - C_2^1$$

1.2.3 衰變鏈產生第 j 個子核種在地表水體的濃度

根據第一個、第二個子核種推導出的方程式，可得第 j 個核種之數學式(利用 1.1.5 節之方程式)：

$$w_j^{sw}(t) = w_j^{sw}(0) e^{-(\lambda_j + \lambda_j^{sw} + \lambda_j^{sd})t} + \frac{\left(\alpha_j - \frac{\beta_j}{\lambda_j + \lambda_j^{sw} + \lambda_j^{sd}} \right) \left(1 - e^{-(\lambda_j + \lambda_j^{sw} + \lambda_j^{sd})t} \right) + \beta_j t}{\lambda_j + \lambda_j^{sw} + \lambda_j^{sd}} \quad (41)$$

$$+ \lambda_j e^{-(\lambda_j + \lambda_j^{sw} + \lambda_j^{sd})t} \frac{V_i^{sw}(t)}{V_j^{sw}(t)} \int_0^t \left(A_{j-1}^0 + A_{j-1}^1 t + \sum_{k=1}^{j-1} C_{j-1}^k e^{-(\lambda_k + \lambda_k^{sw} + \lambda_k^{sd})t} \right) (t) e^{(\lambda_j + \lambda_j^{sw} + \lambda_j^{sd})t} dt$$

整理各項式：

$$w_j^{sw}(t) = A_j^0 + A_j^1 t + \sum_{k=1}^j C_j^k e^{-(\lambda_k + \lambda_k^{sw} + \lambda_k^{sd})t}, \quad (42)$$

其中

$$A_j^1 = \left(\beta_j + \frac{V_{j-1}^{sw}(t)}{V_j^{sw}(t)} \lambda_j A_{j-1}^1 \right) / (\lambda_j + \lambda_j^{sw} + \lambda_j^{sd}),$$

$$A_j^0 = \frac{\alpha_j}{\lambda_j + \lambda_j^{sw} + \lambda_j^{sd}} + \frac{V_{j-1}^{sw}(t)}{V_j^{sw}(t)} \frac{\lambda_j A_{j-1}^0}{\lambda_j + \lambda_j^{sw} + \lambda_j^{sd}} - \frac{A_j^1}{\lambda_j + \lambda_j^{sw} + \lambda_j^{sd}},$$

$$C_j^k = \frac{V_{j-1}^{sw}(t)}{V_j^{sw}(t)} \frac{\lambda_j C_{j-1}^k}{\lambda_j + \lambda_j^{sw} + \lambda_j^{sd} - \lambda_k - \lambda_k^{sw} + \lambda_k^{sd}} \text{ 當 } k \neq j, \text{ 且}$$

$$C_j^j = w_j^{sw}(0) - A_j^0 - \sum_{k=1}^{j-1} C_j^k.$$

1.3 於植物體之累積

本節介紹模擬於植物體內污染之累積過程，內容包含：獲得植物內核種濃度的四種方法。

1.3.1 根部於現場土壤之攝取

若部分(或全部)農業區域為於主要污染上，植物根部可深入主要污染攝取污染：

$$p_i^{onsoil}(t) = f_a f_{cd}(t) rtf_i s_i(t), \quad (43)$$

其中

$p_i^{onsoil}(t)$ = 植物根部從主要污染攝取後，其可食用部分之核種 i 之活性濃度 (pCi g⁻¹),

f_a = 位於主要污染上方之農業面積比例,

rtf_i = 核種 i 對於植物之根部攝取因子,

$s_i(t)$ = 核種 i 於現場土壤之活性濃度(pCi g⁻¹),

$f_{cd}(t)$ = 覆蓋及深度因子, which is the fraction of the root length exposed to the primary contamination given by

$$f_{cd}(t) = 0 \quad \text{當} \quad T_{cv}^c(t) \geq d_{root},$$

$$f_{cd}(t) = f_{vm}(t) \frac{\rho_{pc}}{\rho_{mix}} \quad \text{當} \quad T_{mix}^c(t) \geq d_{root},$$

$$f_{cd}(t) = \frac{f_{vm}(t) \frac{\rho_{pc}}{\rho_{mix}} T_{mix}^c(t) + d_{root} - T_{cv}^c(t) - T_{mix}^c(t)}{d_{root}} \quad \text{當}$$

$$T_{cv}^c(t) + T_{mix}^c(t) + T_{pc}^{um}(t) \geq d_{root}, \quad \text{且}$$

$$f_{cd}(t) = \frac{f_{vm}(t) \frac{\rho_{pc}}{\rho_{mix}} T_{mix}^c(t) + T_{cz}^{um}(t)}{d_{root}} \quad \text{當} \quad T_{cv}^c(t) + T_{mix}^c(t) + T_{pc}^{um}(t) < d_{root}$$

其中

d_{root} = 根部長度 (m)。

1.3.2 植物根部從遠場土壤之攝取

植物根部攝取遠場土壤，其可食用部分之核種 i 之活性濃度為：

$$p_i^{oi}(t) = \frac{f_{int} f_{il}}{Y} \frac{1 - \exp(-\lambda_w t_g)}{\lambda_w} \frac{q_{ir}}{t_g} w_i^{ir}(t), \quad (45)$$

由於程式只模擬核種在混核層之濃度，所以當植物根部深度超過混合層深度，將無法模擬混合層下方情形。

1.3.3 植物葉子從上方灌溉之攝取

本節使用之方程式為：

$$p_i^{oi}(t) = \frac{f_{int} f_{il}}{Y} \frac{1 - \exp(-\lambda_w t_g)}{\lambda_w} \frac{q_{ir}}{t_g} w_i^{ir}(t), \quad (45)$$

其中

$p_i^{oi}(t)$ = 植物可食用部位的核種 i 之活性濃度(葉子從灌溉水攝取) (pCi g⁻¹)

f_{il} = 污染物從樹葉轉移至可食用部位之比例

Y = 濕重作物產量(kg m⁻²)

本方程式假設灌溉期灌溉水之核種濃度為常數，並考量在 δt 時間內植物中之核種數量改變，其方程式為：

$$f_{int} \frac{q_{ir}}{t_g} w_i^{ir} \delta t. \quad (46)$$

核種因為風化流失之數量為：

$$\lambda_w P_i^{oi}(t) \delta t, \quad (47)$$

其中

$P_i^{oi}(t)$ = 由於灌溉造成的土地單位面積中植物生長之核種數量

核種數量在植物中的改變為：

$$\frac{dP_i^{oi}(t)}{dt} \delta t. \quad (48)$$

以質量平衡方程式表示：

$$\frac{dP_i^{oi}(t)}{dt} = f_{\text{int}} \frac{q_{ir}}{t_g} w_i^{ir} - \lambda_w P_i^{oi}(t). \quad (49)$$

將灌溉期積分：

$$P_i^{oi}(t) = f_{\text{int}} \frac{q_{ir}}{t_g} w_i^{ir} \frac{1 - \exp(-\lambda_w t_g)}{\lambda_w}. \quad (50)$$

此處利用與 1.1.1 節相同的因子，計算殘留在植物內的核種數目。植物可食用部位之濃度則根據轉移因子及產量計算。

1.3.4 落葉從塵土攝取核種

本攝取計算式為：

$$p_i^{dust}(t) = \frac{f_{\text{int}} f_{il}}{Y} \frac{1 - \exp(-\lambda_w t_g)}{\lambda_w} V_{dep} a_i(t), \quad (51)$$

其中 $p_i^{dust}(t)$ 為落葉攝取塵土(pCi g^{-1})造成植物可食用部位之核種 i 活性濃度。此方程式假設成長期時，塵土之核種濃度為常數，此推導與上一節相似。

1.4 於肉、奶類之累積

肉、奶類污染的累積及轉移起因於攝取污染植物、污染水、誤食植物夾雜之土壤。本過程之計算方程式為：

$$m_i(t) = imf_i \left[q_{ing}^p p_i(t) + q_{ing}^s \left(s_i^o(t) + f_a f_{vm} \frac{\rho_{cz}}{\rho_{mix}} s_i(t) \right) + q_{ing}^w w_i^{lf}(t) \right], \quad (52)$$

其中

imf_i =核種在肉、奶類製作時之濃度($[\text{pCi } \{\text{kg}\}^{-1}]/[\text{pCi d}^{-1}]$)

q_{ing}^p =牲畜植物攝取率(kg d^{-1})

q_{ing}^s =牲畜食入植物夾雜之土壤攝取率(kg d^{-1})

q_{ing}^w =牲畜汲水率(L d^{-1})

1.5 魚或水生食物之累積

程式利用平衡轉移，計算核種從湖水到生物體之濃度：

$$aqf_i(t) = baf_i w_i^{sw}(t), \quad (53)$$

其中

$aqf_i(t)$ =核種 i 在水生食物之活性濃度(pCi [kg]^{-1})

baf_i =水生食物與湖水間之生物累積因子或平衡濃度比例($[\text{pCi [kg]}^{-1}]/[\text{pCi L}^{-1}]$)

2. 暴露途徑與暴露情境

RESRAD-OFFSITE 計算暴露途徑之通則與 RESRAD-ONSITE(Yu et al. 2001)相同。兩程式主要之差別在於，RESRAD-OFFSITE 使用暴露之介質濃度，而 RESRAD-ONSITE 使用環境轉換因子。本計畫將針對 RESRAD 程式主要污染與其釋出之顆粒與氣體之劑量、風險，另外也亦說明主要污染釋出致地表逕流與地下水之劑量、風險。

2.1 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，暴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，暴露於主要污染之輻射。
- 當居住處所之室內、外位於遠場，並在遠場居住區暴露於累積土壤之輻射。
- 當農業區位於遠場，並暴露於農業區累積土壤之輻射。

以上四個情況之暴露結果於 RESRAD 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、斜率因子($[\text{mrem yr}^{-1}]/[\text{pCi g}^{-1}]$ 或 $[\text{risk yr}^{-1}]/[\text{pCi g}^{-1}]$)。(如表 4 至表 9)

- 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，當計算外在輻射之暴露途徑時，受體位於圓心。

2.2 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。
- 以上四個情況之暴露結果於 RESRAD 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)、斜率因子 ($[\text{mrem pCi}^{-1}]$ 或 $[\text{risk pCi}^{-1}]$) (如表 7 至表 9)
- 地區遮蔽因子的時間及室內建築之塵土過濾
- 吸入率 ($\text{m}^3 \text{ yr}^{-1}$)
- 暴露位置之空氣核種濃度 (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 (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 (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 (Chi/Q) (s m^{-3})。

- 核種大氣釋出率(pCi yr^{-1})。
- 秒/年之轉移因子

程式會計算吸入 C-14 氣體(CO_2)及 H-3 蒸氣形式(H_2O)，並列於暴露途徑報告。因此 C-14 之暴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 ^3HHO 經由皮膚吸收，其吸收率為呼吸率的一半(ICRP 1979–1982)。

2.3 吸入氬及短週期子核種

RESRAD-OFFSITE 根據以下四種狀況模擬氬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)污染水釋放之氬及短週期子核種。
- 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之氬及短週期子核種。
- 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氬。
- 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氬。

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)，最後兩項模擬氬及其子核種在各位置濃度。程式根據從主要污染釋出之氬通量，以及氬與子核種之衰變調整因子(Chi/Q)，從大氣傳輸模式計算濃度。

2.4 攝取水、植物、奶類、肉類、水生食物以及參雜之土壤

水、植物、奶類、肉類、水生食物之暴露乃根據以下之因子計算：

- 從選擇的劑量因子之函式庫決定核種及食物之劑量轉換因子、斜率因子 ($[\text{mrem pCi}^{-1}]$) 或 $[\text{risk pCi}^{-1}]$)
 - 攝取率(kg yr^{-1} 或 1 yr^{-1})
 - 由污染區域獲得之食物比例
 - 食物的核種濃度($\text{pCi} [\text{kg}]^{-1}$, pCi L^{-1})

程式根據現場、遠場之因子計算參雜在食物中的土壤之暴露量：

- 從選擇的劑量因子之函式庫決定核種之劑量轉換因子（如表 4 至表 6）、斜率因子([mrem pCi⁻¹] 或 [risk pCi⁻¹])（如表 7 至表 9）
- 土壤攝取率(g yr⁻¹)
- 位於現場或遠場之時間比例
- 土壤在現場或遠場之核種濃度(pCi g⁻¹)

表 4 RESRAD 劑量轉換因子(DCFs)

核種 ^b	外在 DCFs (mrem/yr)/(pCi/g)	Class ^c	吸入 DCFs (mrem/pCi)	f ₁ ^d	攝食 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 ₂ 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劑量轉換因子(表3續)

核種 ^b	外在 DCFs (mrem/yr)/(pCi/g)	Class ^c	吸入 DCFs (mrem/pCi)	f ₁ ^d	攝食 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 劑量轉換因子(表 4 續)

核種 ^b	外在 DCFs (mrem/yr)/(pCi/g)	Class ^c	吸入 DCFs (mrem/pCi)	f _i ^d	攝食 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

- a External dose conversion factors taken from Eckerman and Ryman (1993), and inhalation and ingestion dose conversion factors are from Eckerman et al. (1988).
- b +D indicates that the dose conversion factors of associated radionuclides (half-life less than 30 days) are included along with the principal radionuclide.
- c 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. (H₂O) indicates water; (ORGANIC) indicates an organic material; and (VAPOR) indicates a gaseous material.
- d Fraction of a stable element entering the GI tract that reaches body fluids.

表 7 RESRAD 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 8 RESRAD 程式核種風險評估之斜率因子 (表 6 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 9 RESRAD 程式核種風險評估之斜率因子 (表 7 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

^a 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).

(三) GOLDSIM 進行輻射劑量與風險評估

根據 GoldSim 原廠於 2012 年 8 月 29 及 30 日在美國華盛頓 NRC 總部舉行之「PUBLIC MEETING ON WORKSHOP ON PERFORMANCE ASSESSMENTS OF NEAR SURFACE DISPOSAL FACILITIES: FEPS ANALYSIS, SCENARIO AND CONCEPTUAL MODEL DEVELOPMENT, AND CODE SELECTION」簡報資料列出，已有澳大利亞、巴西、加拿大、中國、捷克、埃及、芬蘭、法國、德國、日本、韓國、立陶宛、馬其頓、荷蘭、巴基斯坦、羅馬尼亞、斯洛伐克、南非、西班牙、瑞士、台灣、英國、美國等國家應用其模式在放射性廢棄物處置安全評估之應用，應用之研究單位及場址包括：

•低放設施方面

—美國：Oak Ridge EMWMF 混合廢棄物設施、West Valley Demonstration 計畫、Savannah River 場址 E 區、內華達國家 Security 場址區 3 和 5 個廢棄物管理場址、WCS 德州聯盟廢棄物設施、猶他州設施 Energy Solutions Clive、WCS 德州安德魯 (Andrews, Texas) 低放射性廢棄物處置設施 CWF 及 FWF 設施、Los Alamos 國家實驗室 (LANL) 技術整治第 54 區之可行性調查、Los Alamos 國家實驗室材料處置區 (Material Disposal Area, MDA) G 區及 H 區的低放設施功能評估。

—國際上：英國的 Drigg, Dounreay，韓國 Wolseong，日本 Rokkasho，德國、匈牙利、斯洛伐克、烏克蘭及巴西，與其他國家各種低放場址

•另也有應用到高中放處置安全評估、除污與除役、環境復育

對於 GoldSim 模式之輻射劑量評估之應用，係以本身各項元件之性能進行複雜系統之模擬分析，各項元件之傳輸途徑及輻射劑量公式，必須由使用者定義及輸入。如圖 20 所示為 GoldSim 模式上層結構圖，該圖左側地方有輸入物件 **Materials** 為核種、水與土壤三種材料，係為各種物質材料特性參數輸入，延散模式 **Dispersion_Model** 則是地下水流與核種傳輸，劑量計算則是計算傳輸途徑及輻射劑量釋出率，**Dose_Factors** 劑量因子輸出則是代表模式計算出的劑量總有效釋出率。

劑量計算 **Dose_Calculation** 是 Goldsim 結構上最複雜的，必須要有由使用者自行輸入輻射劑量的解析方程式。相關輸入的構造圖如圖 37 輻射劑量計算的結構圖所示。

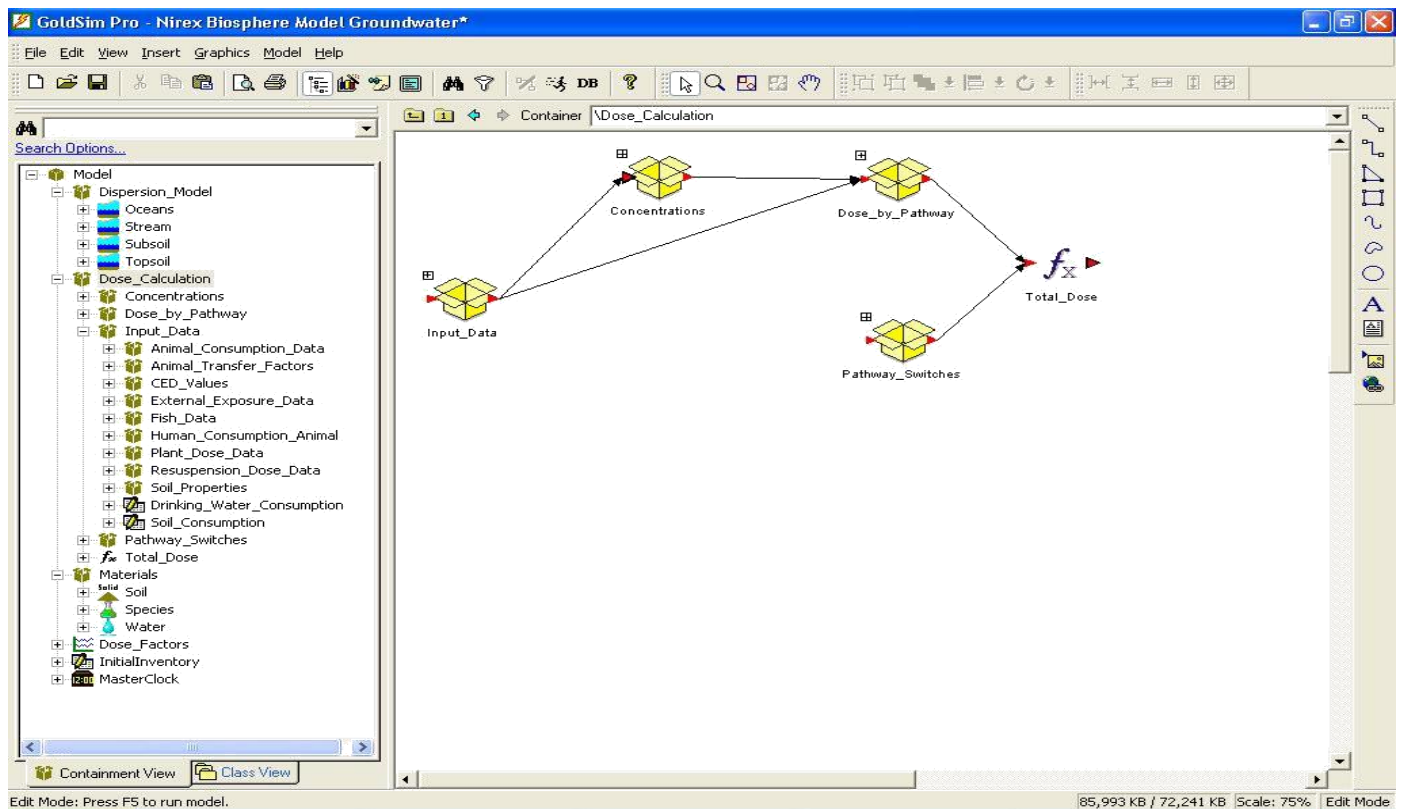


圖 37 輻射劑量計算的結構圖

輻射劑量的計算必須設定輸入值 (**Input_Data**)，濃度計算 (**Concentrations**)，各傳輸途徑的有效劑量率計算 (**Dose_by_Pathway**)，並再定義各種傳輸途徑的途徑元件開關 **Pathway_Switches**，與所有途徑劑量總和的總劑量 (包含內在曝露與外在曝露)。GOLDSIM 最大缺點就沒有像 RESRAD 程式有劑量轉換因子之資料庫 (如表 4 至表 6)、及風險評估斜率因子 ($[\text{mrem pCi}^{-1}]$ 或 $[\text{risk pCi}^{-1}]$) 資料庫 (如表 7 至表 9)，必須利用人為給定該參數。且其各種傳輸途徑必須使用者自行設定，而有效劑量之算式亦需人為給定 (如圖 38 GoldSim 計算有效劑量率計算)。

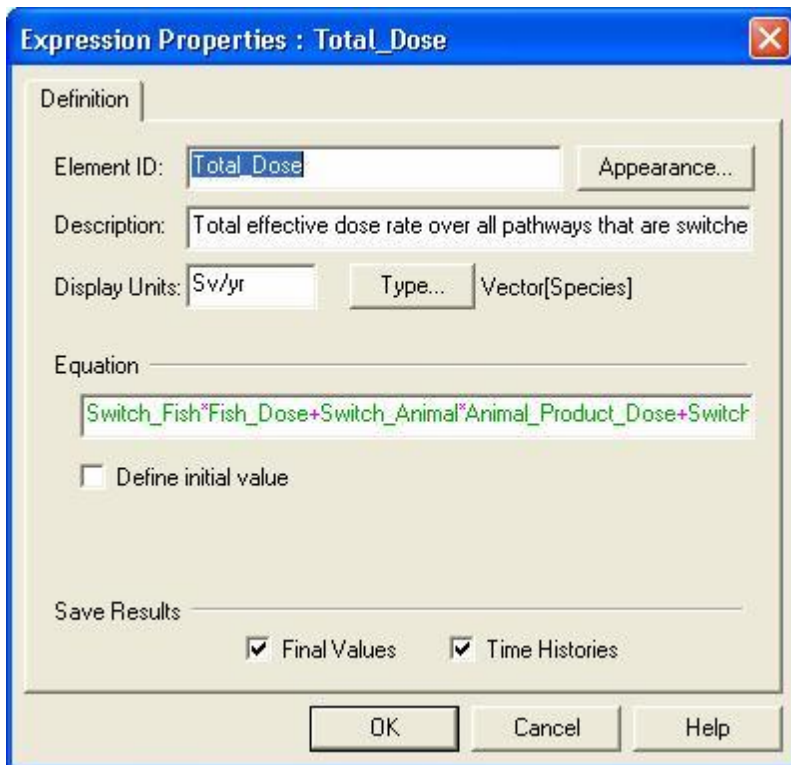


圖 38 GoldSim 計算有效劑量率

四、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

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，本計畫針對潛在處置場址輻射劑量與風險評估關鍵審查技術與方法進行研析。未來可利用 RESRAD 程式模擬的結果圖表作為處置場址輻射劑量與風險評估判讀依據。該結果與圖表判讀說明如後：

(一) RESRAD 模式模擬結果

1. 母核種劑量報告 (.par)

A. 輸入

- 劑量轉換因子
- 轉移因子
- 場址特性

B. 選擇途徑

C. 總劑量

- 特定報告時間
- 峰值及時間內峰值

D. 初始核種衰變鏈之途徑劑量

- 特定報告時間

E. 導覽資訊

- 初始核種在特定報告時間之劑量射源比
- 在特定報告時間之單一放射性核種土壤導覽
- 在核種劑量峰值時間之單一放射性核種土壤導覽
- 在所有核種劑量峰值時間之單一放射性核種土壤導覽

F. 運行時間資訊

- 執行時間
- 數值積分收斂失敗(地下水傳輸)

2. 子核種劑量報告 (.pro)

A. 核種暴露途徑劑量

- 特定報告時間

3. 致癌風險報告 (.rsk)

A. 致癌風險斜率因子

B. 過量致癌風險

- 初始核種

- 核種暴露
- 氬與短週期之子核種
- 不確定性與概率分析報告
 1. 劑量與風險報告 (.prb)
 - 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
 2. 概率輸入報告 (.smp)
 - A. 輸入
 - 輸入分佈
 - 相關係數排序
 - 不相容輸入警告
 - B. 輸入樣本
 - 輸入向量
 - 輸入向量的秩
 - 原始資料之相關係數
 - 排序資料之相關係數

(二) RESRAD 程式報告檢示器

View - SUMMARY.REP

File Edit Help

Font: MS LineDraw 10 Page: 1

RESRAD-OFFSITE, Version 2.0 T½ Limit = 180 days 07/26/2006 13:13 Page 1

Parent Dose Report
Title : Users Guide Output Screen Shots
File : UsersGuideNewSens.ROF

Table of Contents

Part I: Mixture Sums and Single Radionuclide Guidelines

Dose Conversion Factor (and Related) Parameter Summary ...	2
Site-Specific Parameter Summary	5
Summary of Pathway Selections	32
Contaminated Zone and Total Dose Summary	33
Total Dose Components	
Time = 0.000E+00	34
Time = 1.000E+00	35
Time = 3.000E+00	36
Time = 6.000E+00	37
Time = 1.200E+01	38
Time = 3.000E+01	39
Time = 7.500E+01	40
Time = 1.750E+02	41
Time = 4.200E+02	42
Time = 4.820E+02	43
Dose/Source Ratios Summed Over All Pathways	44
Single Radionuclide Soil Guidelines	44
Dose Per Nuclide Summed Over All Pathways	46
Soil Concentration Per Nuclide	46
Run Time Information	47

圖 39 RESRAD 程式報告檢視器將自動開啟母核種劑量報告(summary.rep)

當每次執行運算後，報告檢視器將自動開啟母核種劑量報告(summary.rep)。使用者也可藉由主目錄、工具欄、DOS 模擬器或圖示導引視窗檢視報告。(如圖圖 39 RESRAD 程式報告檢視器將自動開啟母核種劑量報告(summary.rep))

前往報告檢視器

- **主目錄：**點選檢視、文字輸出後，即可選取各式文字報告：母核種劑量報告、風險報告、子核種劑量報告、不確定性/概率劑量與風險報告、不確定性/概率輸入報告。
- **工具欄：**此處只可開啟母核種劑量報告。點選工具欄上第三個群組的第一個圖示—報告頁圖示。
- **DOS 模擬器：**點選檢視輸出後，選取欲檢閱的報告類型。
- **圖示導引視窗：**點選結果標籤，並選取欲檢閱的報告按鍵。

檢視已儲存之報告

如要檢視已儲存的報告，從報告檢視器的目錄中，點擊檔案、檢視其他檔案(CTRL+F)，從資料夾中選取檔案。各報告有不同的副檔名，介紹如下：

- .par：母核種劑量報告

- .pro：子核種劑量報告
- .rsk：致癌風險報告
- .prb：不確定性/概率劑量與風險報告
- .smp：不確定性/概率輸入報告

移動

- **頁：**使用者可使用下列方式前往其他頁。
 - 在頁數欄輸入頁碼後，點擊前往。
 - 點擊頁數欄的下拉選單，選取欲前往的頁碼。
 - 如欲前往下一頁，可點擊鍵盤的下一頁按鍵或點擊向下雙箭頭圖示。
 - 如欲前往上一頁，可點擊鍵盤的上一頁按鍵或點擊向上雙箭頭圖示。
- **頁內：**使用拖曳棒移動。
- **報告之間：**從報告檢示器的目錄中，點擊檔案、檢視其他檔案(CTRL+F)，選取其他報告；或關閉本報告檢視器，至主目錄選取其他檔案。

儲存檔案

每次執行運算後，原本的文字擊圖表檔案將會被覆蓋，使用者可用不同的檔名儲存，以避免檔案被覆蓋。

- **儲存所有檔案：**從報告檢示器的目錄中，點擊檔案、儲存全部檔案，將會儲存所有文字檔案。如果輸入檔名為 xxxx.rad，報告將會儲存為 xxxx.yyy，其中 yyy 代表「檢視已儲存報告」。
- **儲存開啟的檔案：**從報告檢示器的目錄中，點擊檔案、儲存檔案，程式將請求使用者為此檔案重新命名。

複製選擇

- **複製特定段落：**選取文字後，從報告檢示器的目錄中，點擊編輯/複製，就可根據微軟剪貼簿，將文字貼於試算表或文字檔。
- **複製目前頁面：**從報告檢示器的目錄中，點擊編輯/複製全部、編輯/複製；或者

點擊雙頁圖示。

列印

- **印表機設定：**RESRAD-OFFSITE 使用標準微軟印表機，設定印表機之路徑為：點擊檔案、印表機、設定。設定選項包含印表機、紙張大小及方向。
- **報告列印設定：**點擊單頁圖示，視窗將自動調整報告字體大小，使報告適合頁面寬度。
- **列印：**點擊檔案、列印或點擊印表機圖示，就可開啟列印視窗選擇列印整份報告、特定頁數或選定文字。

(三) RESRAD 程式圖表檢視器 (決定性及敏感性分析)

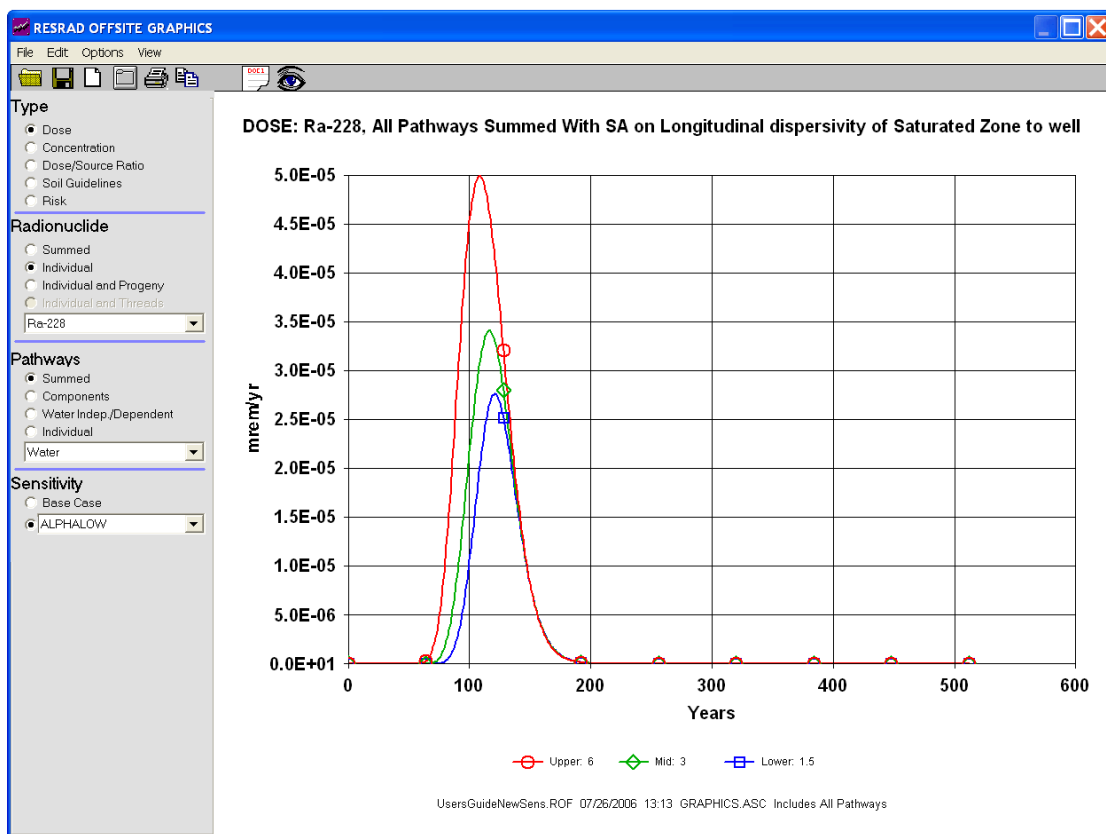


圖 40 RESRAD 程式圖表檢視器以作為決定性及參數敏感性分析

前往圖表檢視器

- **目錄：**從 RESRAD-OFFSITE 之主目錄選取檢視、決定性圖表。
- **工具欄：**從工具欄第三個群組選取中間圖示。其按鍵提示為檢視決定性圖表。

- **DOS 模擬器**：選取檢視輸出，並從輸出表單選取決定性圖表。
- **圖示導引視窗**：選取結果標籤，並點選決定性圖表。

圖表選擇區

使用者可以從圖表檢視器查看所有在 RESRAD-OFFSITE 模擬的核種、途徑或介質之劑量、風險及濃度資訊，因此圖表選擇區提供多樣的選擇供使用者設定，簡介如下。

- **圖表類型**：
 - **劑量**：選擇劑量以檢視輻射劑量在特定時間尺度下之圖形呈現。
 - **濃度**：由此可在特定時間尺度下，繪製核種在各種介質下的濃度。
 - **劑量/來源比例**：此為個別核種之劑量與其在土壤中初始濃度之比值圖。
 - **土壤導覽**：選擇土壤導覽以檢視土壤中初始核種濃度隨時間而變化的輻射劑量。
 - **風險**：選擇風險以檢視在特定時間尺度下，過量的致癌風險線圖。
- **放射性核種**：
 - **核種總合**：此選項將顯示場址內所有核種之劑量與風險圖形。
 - **核種個體**：此選項可顯示上述五種劑量與風險圖形(根據其定義顯示)。使用者可從下拉選單選擇核種。
 - a. 當使用濃度圖表，程式將展示選定的核種(初始核種或子核種)在介質中的濃度圖表。
 - b. 若使用其他四個圖表，程式將展示選定的放射性核種(初始核種)及其子核種之總量。
 - **個體及子核種**：本選項可用於劑量、劑量/來源比例及風險圖表，並展示特定放射性核種(初始核種)與個別子核種之劑量、劑量/來源或風險。

- **個體及反應鏈核種**：本選項可用於劑量、劑量/來源比例及風險圖表，並展示放射性核種反應鏈之劑量、劑量/來源或風險。初始放射性核種之反應鏈列於「衰變鏈濃縮核種」中的.chn 檔，使用者可使用記事本開啟。
- **途徑**：本選項可用於劑量、劑量/來源比例及風險圖表。
 - **總合**：此選項將顯示場址內所有傳輸途徑圖形。
 - **成分**：此選項將顯示場址內單一傳輸途徑圖形。
 - **與水無關/與水相關**：此圖表展示兩條途徑路線，一為空氣中之途徑，另一條為水中之途徑。
 - **個體**：使用者可從下拉選單選擇單一途徑，展示於圖表。
- **介質**：當選擇途徑選項，並使用濃度圖表時，可以於下拉選單選擇介質種類。
- **敏感性**：當使用敏感性分析時，可選擇此選項。
 - **基本案例**：選擇基本案例會出現確定性運算之結果。
 - **下拉選單中的參數**：從下拉選單選擇參數，以查看參數輸出之不確定性。

從圖表檢視器目錄

- **檔案**：
 - **開啟**：本指令用於開啟圖檔，圖檔與輸入檔案存放於相同資料夾，圖檔名稱也與輸入檔名相同，但副檔名為.grp.
 - **新視窗**：使用本指令可另外開啟圖檔。同資料的兩個圖檔可以同時開啟觀看，但是不同資料的兩個圖檔就不能同時開啟觀看。
 - **儲存圖檔資料**：本指令將圖檔中線條的 x、y 值存於 ACSII 檔案的欄位中。如果圖檔為多線條，每條線都會數值都可以展示。點選圖示「DOC1」可以產生檔案，點選圖示「eye」可以檢視/列印檔案。
 - **列印**：使用本指令列印圖檔。
 - **列印設定**：由此選擇印表機及其他列印設定。

- **關閉視窗**：當開啟多個圖形檢視器視窗時，使用此指令可關閉單一視窗。
- **關閉**：關閉所有圖形檢視器視窗。
- **編輯**：
 - **複製**：使用本指令將圖檔存成 WMF 檔，使用者亦可點選鍵盤之 Print Screen 鍵儲存品質較好的圖檔。
 - **匯出至 EXCEL**：使用本指令開啟新的 EXCEL 檔案，並儲存圖檔中的 x、y 值於 EXCEL 中。如果圖檔為多線條，則每條線都會數值都可以儲存於此。檔案之前三列為：圖表名稱、頁腳、欄位名稱。
- **選項**：本選項可改變圖表呈現方式，改變選項包含：軸線之線性/對數尺度、顯示/隱藏格線、選擇線條顏色、選擇線條樣式、隱藏/顯示工具列提示。
- **檢視**：使用本指令可檢視圖檔資料。使用檢視指令前，使用者需要先儲存圖檔資料(詳見上述儲存圖檔資料部分)。

(四) 潛在處置場址輻射劑量與風險評估關鍵審查技術

建立 RESRAD 模式可分析核種傳輸至生物圈後，體外直接暴露輻射、經由呼吸進入人體的體內暴露輻射及藉由食物、水進入人體的體內暴露輻射等暴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。我國未來配合現場調查資料，利用 RESRAD 建立場址區域範圍、關鍵核種種類、水文物理條件等自然環境，與利用 RESRAD 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。

1. RESRAD-OFFSITE 輻射曝露劑量模擬計算

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 10 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，分別為 C-14、Ni-59、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 30 所示）。假設 55 加侖固化桶，固化水泥之密度為 1200kg/m³，孔隙率為 0.15，估算固化桶水泥固化體重量為 255 公斤。

表 10 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%

假設上述所有關鍵核種配合 RESRAD-OFFSITE 模式訓練教材之例題進行案例測試研究，假設場址如圖 41 及圖 42 所示，並於 RESRAD-OFFSITE 設定部分參數。如：年平均降雨量為 1.25 m/year、主要污染區域無灌溉行為、覆蓋管理參數為 0.04、逕流係數為 0.5、葉蔬菜類植物耕種參數為 0.9、覆蓋管理參數為 0.08、水果及非葉蔬菜類植物耕種參數為耕種管理參數 0.04 等。其餘參數，使用 RESRAD-OFFSITE 模式預設值。相關參數設定如圖 43 至圖 56。對於核種 Kd 參數預設值詳細可參閱附錄 B-86 至 B-88 頁，位比較核種完全釋出時之情況，另假設所有核種 Kd 皆等於零時之之輻射劑量。以應用 RESRAD-OFFSITE 模式進行假設場址模擬測試，RESRAD-OFFSITE 分析核種傳輸至生物圈後，分析體外直接暴露輻射、經由呼吸進入人體的體內暴露輻射及藉由食物、水進入人體的體內暴露輻射等暴露傳輸途徑之輻射劑量與風險。依圖 57 所示，最後將評估核種從主要污染區域至生物圈之可能輻

射劑量，並瞭解該輻射劑量及風險是否能符合法令限值 0.25 mSv/year。本案例生物圈所有傳輸途徑之總劑量 8.5×10^{-11} mSv/year 於 1000 年之後。此劑量於小於劑量法規限值 0.25 mSv/year。然而依圖 58 所示，該假設案例不可能發生，核種 Kd 皆等於零，惟為比較生物圈所有傳輸途徑之總劑量，模擬 1000 年之後約為 42 mSv/year，此劑量大於劑量法規限值 0.25 mSv/year。

表 11 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(14 種)			
核種	半衰期(yr)	活度(Bq)	pBq/g
C-14	5730	2.32E+13	9.10E-05
Ni-59	7.6E4	4.00E+12	1.57E-05
Ni-63	100	4.74E+14	1.86E-03
Sr-90	28.9	1.21E+13	4.74E-05
Mo-93	3.5E3	4.22E+09	1.65E-08
Nb-94	2E4	1.10E+10	4.31E-08
Tc-99	2.13E5	5.92E+11	2.32E-06
I-129	1.57E7	4.48E+11	1.76E-06
Cs-137	30	1.65E+14	6.47E-04
Np-237	2.14E6	1.91E+07	7.49E-11
Pu-238	86.4	4.26E+10	1.67E-07
Pu-239	2.4E4	1.47E+12	5.76E-06
Pu-240	6580	1.22E+12	4.78E-06
Am-241	432.2	9.66E+11	3.79E-06

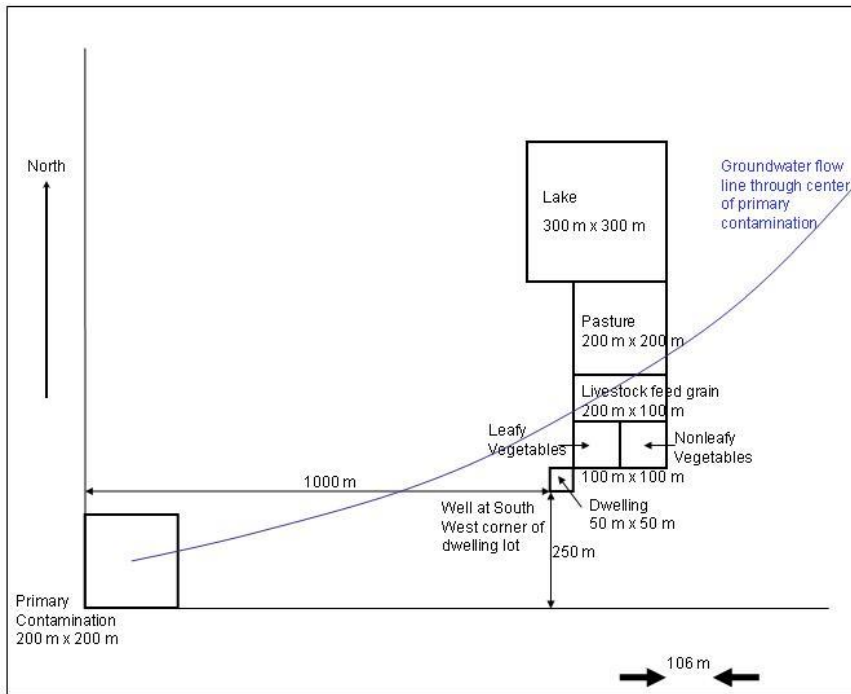


圖 41 假設場址之概念示意圖

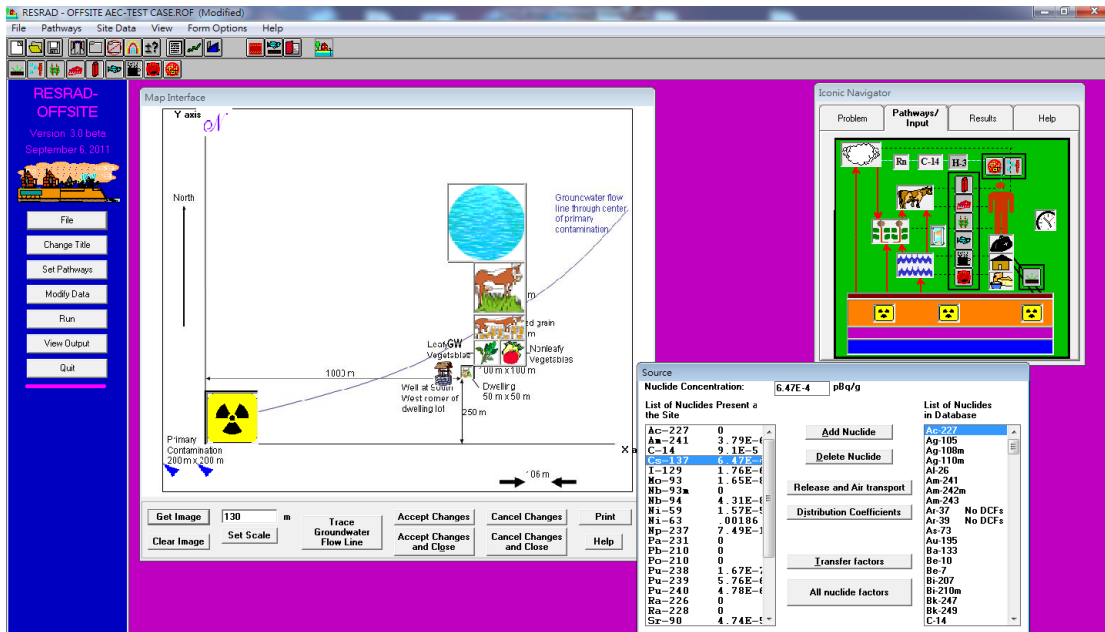


圖 42 測試案例場址於 RESRAD-OFFSITE 輸入介面示意圖

Water Use					
Description of Usage:- Water for ,	Quantity		Fraction of water from		Number of individuals
			Surface body	Well	
Consumption by humans	510	Liters/year	0	1	4
Use indoors of dwelling	225	Liters/day	0	1	
Beef cattle	50	Liters/day	0	1	2
Dairy cows	160	Liters/day	0	1	2
Irrigation applied per year:-					<i>area of Plot (sq. meters)</i>
Fruit, grain, non-leafy vegetables	.2	meters/year	0	1	10000
Leafy vegetables	.2	meters/year	0	1	10000
Pasture, Silage	.2	meters/year	0	1	40000
Livestock feed Grain	.2	meters/year	0	1	20000
Offsite Dwelling site	.2	meters/year	0	1	2500
Well pumping rate:			16985	cubic meters/year	
Well pumping rate needed to support specified Water use:			16984.17	cubic meters/year	

圖 43 測試案例場址水使用量輸入介面及參數

Plant Factors		
Crops	Fruit, grain, non-leafy	Leafy vegetables
Wet weight crop yield (kg/m ²)	.7	1.5
Duration of Growing season (years)	.17	.25
Foliage to Food Transfer coefficient	.1	1
Weathering Removal constant (1/year)	20	20
Foliar interception factor for irrigation	.25	.25
Foliar interception factor for dust	.25	.25
Root Depth (meters)	1.2	.9

圖 44 測試案例場址植物因子輸入介面及參數

Livestock Intakes		
	Beef Cattle	Dairy Cows
Water (liters/day)	50	160
Pasture, and Silage (kg/day)	14	44
Grain (kg/day)	54	11
Soil from Pasture and Silage (kg/day)	.1	.4
Soil from grain (kg/day)	.4	.1

圖 45 測試案例場址家畜攝取水使用量輸入介面及參數

Ingestion Rates			
	Consumption rate		Fraction from affected area
Drinking water	510	Liters/year	1
Fish	5.4	kg/year	.5
Crustacea and mollusks	.9	kg/year	.5
Fruit, grain, non-leafy vegetables	160	kg/year	.5
Leafy vegetables	14	kg/year	.5
Meat	63	kg/year	1
Milk	92	Liters/year	1
Soil (incidental)	36.5	grams/year	

Livestock Factors
Livestock Feed Factors
Plant Factors

圖 46 測試案例場址攝取所有食物每年攝取量輸入介面及參數

Occupancy	
Fraction of Time spent on PRIMARY CONTAMINATION (whether cultivated or not)	
Indoors	0
Outdoors	0
Fraction of Time spent in OFFSITE DWELLING SITE	
Indoors	.5
Outdoors	.2
Fraction of Time spent in FARMED AREAS (including Primary and Secondary contaminated areas)	
Fruit, grain, and Nonleafy fields	.1
Leafy vegetable fields	.08
Pasture and silage fields	.01
Livestock grain fields	.1

If part of a farmed area lies on the Primary Contamination, the time fraction spent in that part of the area should be included in both the farmed area occupancy and the primary contamination occupancy.

圖 47 測試案例場址居民於各地區活動停留時間輸入介面及參數

Transfer Factors

Radionuclide: Am-241 Element Am

Soil to plant transfer factor

Fruit, grain, nonleafy vegetables	0.001	(pBq/kg)/(pBq/kg)
Leafy vegetables:	0.001	(pBq/kg)/(pBq/kg)
Pasture, silage:	0.001	(pBq/kg)/(pBq/kg)
Livestock feed grain:	0.001	(pBq/kg)/(pBq/kg)

Intake to animal product transfer factor

Meat:	0.00005	(pBq/kg)/(pBq/d)
Milk:	0.000002	(pBq/L)/(pBq/d)

Water to Aquatic food transfer factor

Fish:	30	(pBq/kg)/(pBq/L)
Crustacea:	1000	(pBq/kg)/(pBq/L)

圖 48 測試案例場址 Am-241 傳輸因子輸入介面及參數

Distribution Coefficients

Radionuclide Am-241

Distribution coefficient (cm³/g, in:-

Contaminated Zone:	0	Sediment in surface water body	0
Unsaturated Zone 1:	0	Fruit, grain, nonleafy fields	0
Saturated Zone:	0	Leafy vegetable fields	0
Number of Unsaturated Zones: set in preliminary inputs form	1	Pasture, silage growing areas	0
		Livestock feed grain fields	0
		Dwelling site	0

Save

Cancel

圖 49 測試案例場址 Am-241 分佈係數 Kd 值輸入介面及參數(Kd=0)

Distribution Coefficients

Radionuclide Am-241

Distribution coefficient (cm³/g) in:-

Contaminated Zone:	20	Sediment in surface water body	20
Unsaturated Zone 1:	20	Fruit, grain, nonleafy fields	20
		Leafy vegetable fields	20
		Pasture, silage growing areas	20
		Livestock feed grain fields	20
Saturated Zone:	20	Dwelling site	20
Number of Unsaturated Zones: set in preliminary inputs form	1		

圖 50 測試案例場址 Am-241 分佈係數 Kd 值輸入介面及參數(RESRAD 預設值 Kd=20)

Transfer Factors

Radionuclide: I-129 Element I

Soil to plant transfer factor

Fruit, grain, nonleafy vegetables	0.02	(pBq/kg)/(pBq/kg)
Leafy vegetables:	0.02	(pBq/kg)/(pBq/kg)
Pasture, silage:	0.02	(pBq/kg)/(pBq/kg)
Livestock feed grain:	0.02	(pBq/kg)/(pBq/kg)

Intake to animal product transfer factor

Meat:	0.007	(pBq/kg)/(pBq/d)
Milk:	0.01	(pBq/L)/(pBq/d)

Water to Aquatic food transfer factor

Fish:	40	(pBq/kg)/(pBq/L)
Crustacea:	5	(pBq/kg)/(pBq/L)

圖 51 測試案例場址 I-129 傳輸因子輸入介面及參數

Distribution Coefficients

Radionuclide I-129

Distribution coefficient (cm³/g, in:-

Contaminated Zone:	0	Sediment in surface water body	0
Unsaturated Zone 1:	0	Fruit, grain, nonleafy fields	0
		Leafy vegetable fields	0
		Pasture, silage growing areas	0
		Livestock feed grain fields	0
Saturated Zone:	0	Dwelling site	0
Number of Unsaturated Zones: set in preliminary inputs form	1		

Save

Cancel

圖 52 測試案例場址 I-129 分佈係數 Kd 值輸入介面及參數(Kd=0)

Distribution Coefficients

Radionuclide I-129

Distribution coefficient (cm³/g, in:-

Contaminated Zone:	.1	Sediment in surface water body	.1
Unsaturated Zone 1:	.1	Fruit, grain, nonleafy fields	.1
		Leafy vegetable fields	.1
		Pasture, silage growing areas	.1
		Livestock feed grain fields	.1
Saturated Zone:	.1	Dwelling site	.1
Number of Unsaturated Zones: set in preliminary inputs form	1		

圖 53 測試案例場址 I-129 分佈係數 Kd 值輸入介面及參數(RESRAD 預設值 Kd=0.1)

Transfer Factors		
Radionuclide: Cs-137		Element Cs
Soil to plant transfer factor		
Fruit, grain, nonleafy vegetables	0.04	(pBq/kg)/(pBq/kg)
Leafy vegetables:	0.04	(pBq/kg)/(pBq/kg)
Pasture, silage:	0.04	(pBq/kg)/(pBq/kg)
Livestock feed grain:	0.04	(pBq/kg)/(pBq/kg)
Intake to animal product transfer factor		
Meat:	0.03	(pBq/kg)/(pBq/d)
Milk:	0.008	(pBq/L)/(pBq/d)
Water to Aquatic food transfer factor		
Fish:	2000	(pBq/kg)/(pBq/L)
Crustacea:	100	(pBq/kg)/(pBq/L)

圖 54 測試案例場址 Cs-137 傳輸因子輸入介面及參數

Distribution Coefficients	
Radionuclide Cs-137	
Distribution coefficient (cm³/g, in:-	
Contaminated Zone:	0
Unsaturated Zone 1:	0
Saturated Zone:	0
Number of Unsaturated Zones: set in preliminary inputs form	1
Sediment in surface water body	0
Fruit, grain, nonleafy fields	0
Leafy vegetable fields	0
Pasture, silage growing areas	0
Livestock feed grain fields	0
Dwelling site	0
Save	Cancel

圖 55 測試案例場址 Cs-137 分佈係數 Kd 值輸入介面及參數(Kd=0)

Distribution Coefficients

Radionuclide Cs-137

Distribution coefficient (cm³/g) in:-

Contaminated Zone:	<input type="text" value="4600"/>	Sediment in surface water body	<input type="text" value="4600"/>
Unsaturated Zone 1:	<input type="text" value="4600"/>	Fruit, grain, nonleafy fields	<input type="text" value="4600"/>
		Leafy vegetable fields	<input type="text" value="4600"/>
		Pasture, silage growing areas	<input type="text" value="4600"/>
		Livestock feed grain fields	<input type="text" value="4600"/>
Saturated Zone:	<input type="text" value="4600"/>	Dwelling site	<input type="text" value="4600"/>
Number of Unsaturated Zones: set in preliminary inputs form	<input type="text" value="1"/>		

圖 56 測試案例場址 Cs-137 分佈係數 Kd 值輸入介面及參數(RESRAD 預設值 Kd=4600)

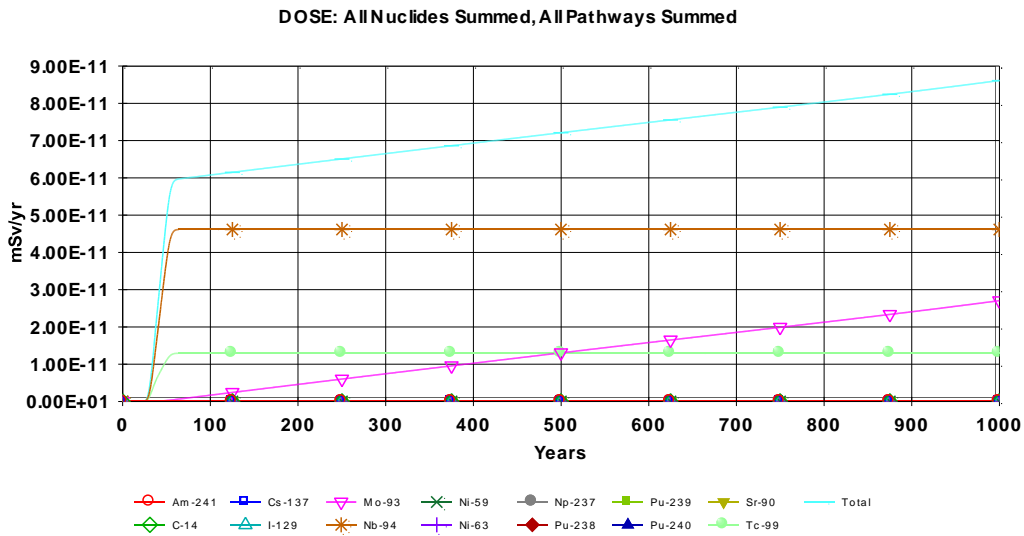


圖 57 測試案例場址所有傳輸途徑生物圈總劑量(RESRAD 預設 Kd 值)

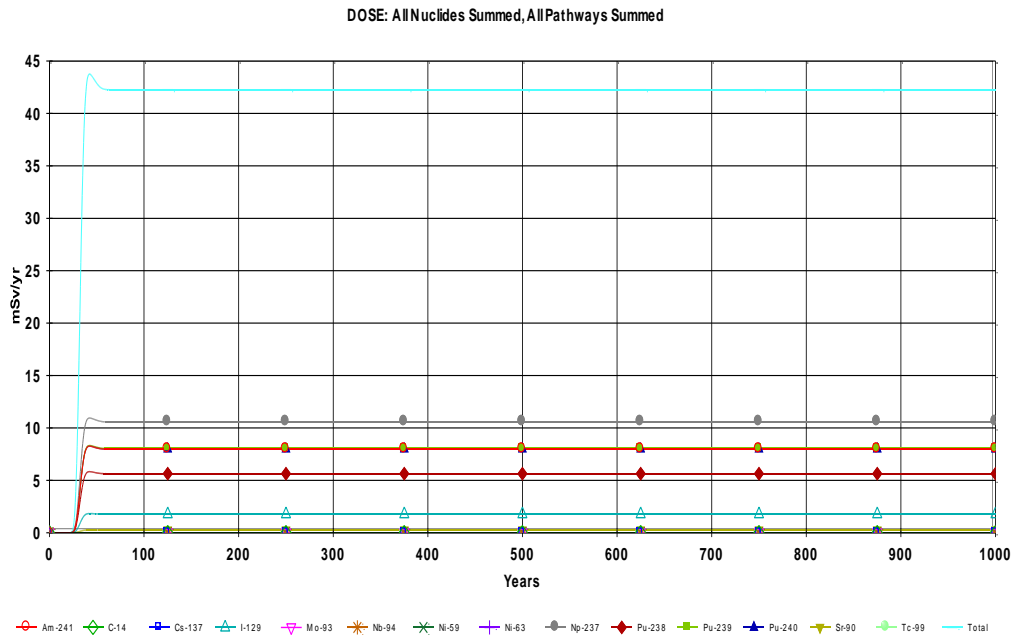


圖 58 測試案例場址所有傳輸途徑生物圈總劑量(Kd 值=0)

2. RESRAD-OFFSITE 達仁潛在場址案例情境測試模擬

達仁潛在場址進行案例情境測試模擬，本案例研究係利用台灣達仁鄉潛在場址之設計，參考美國德州安德魯安全評估作業之作法，由 HYDROGEOCHEM 模式模擬得到 Cs-137、I-129、Sr-90 核種釋出率，如圖 59 及圖 60 所示。並將該洩漏量納入 RESRAD 模式模擬分析核種傳輸生物圈環境，該生物圈環境假設由農作耕種、牲畜畜牧與人類使用水井當成飲用水源，以 RESRAD-OFFSITE 模式建立輻射曝露情節與劑量評估。案例研究假設場址之位置如圖 61 所示。工程障壁假設為 RESRAD-OFFSITE 模式之主要污染區域，由於目前係為測試案例，有關 RESRAD-OFFSITE 模式需輸入之參數係依據其使用手冊內定之參數，其中 Kd 參數 Cs-137 為 $4600(\text{cm}^3/\text{g})$ 、I-129 為 $0.1(\text{cm}^3/\text{g})$ 、Sr-90 為 $30(\text{cm}^3/\text{g})$ 。配合 RESRAD-OFFSITE 模式訓練教材之例題，調整部分參數。如：年平均降雨量為 1.25 m/year、主要污染區域無灌溉行為、覆蓋管理參數為 0.04、逕流係數為 0.5、葉蔬菜類植物耕種參數為 0.9、覆蓋管理參數為 0.08、水果及非葉蔬菜類植物耕種參數為耕種管理參數 0.04 等。由 HYDROGEOCHEM 模式模擬達仁鄉潛在場址混凝土工程障壁水泥化礦物退化及

核種釋出後流經工程障壁之反應化學傳輸。利用台灣電力公司、台灣水泥公司、瑞典 SKB、以及國內外相關等文獻資料建置模式，輸入資料包括工程障壁設計與其內之各介質物理參數、各介質之化學組成、水流初始與邊界條件、傳輸物種之初始與邊界條件以及主要核種之源項。依據台電公司規劃之工程障壁，依設計可將工程障壁內個介質分成：混凝土、固化桶、膨潤土(Bentonite)與回填材料。

應用 RESRAD-OFFSITE 模式進行假設場址模擬測試，RESRAD-OFFSITE 分析核種傳輸至生物圈後，分析體外直接暴露輻射、經由呼吸進入人體的體內暴露輻射及藉由食物、水進入人體的體內暴露輻射等暴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。本案例生物圈所有傳輸途徑之總劑量於 1000 年之後約為 3.1×10^{-12} mSv/year。此劑量於遠小於劑量法規限值 0.25 mSv/year，如圖 62。另考慮 $K_d=0$ 時案例，生物圈所有傳輸途徑之總劑量於 1000 年之後約為 3.2×10^{-7} mSv/year，此劑量亦遠小於劑量法規限值 0.25 mSv/year，如圖 63。

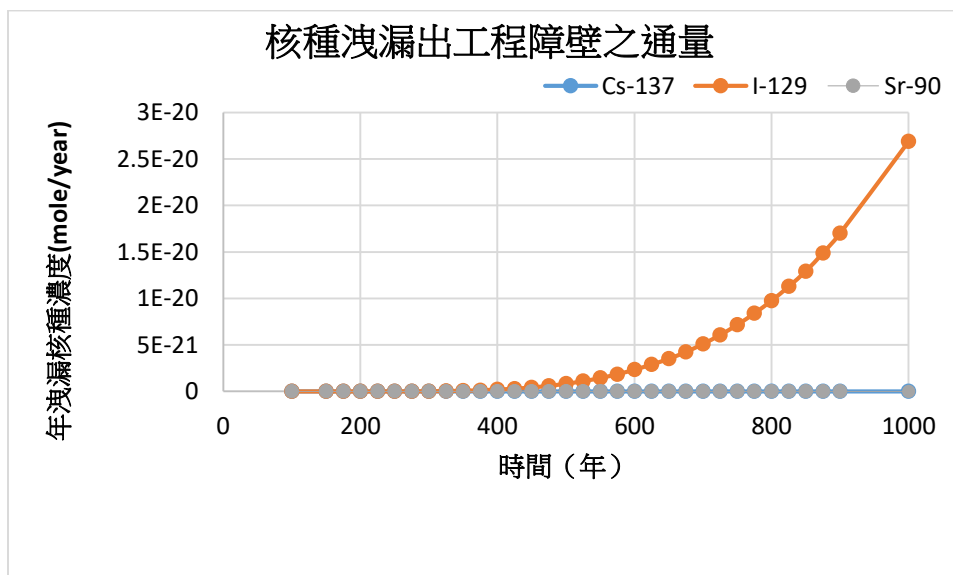


圖 59 洩漏出工程障壁之年洩漏濃度

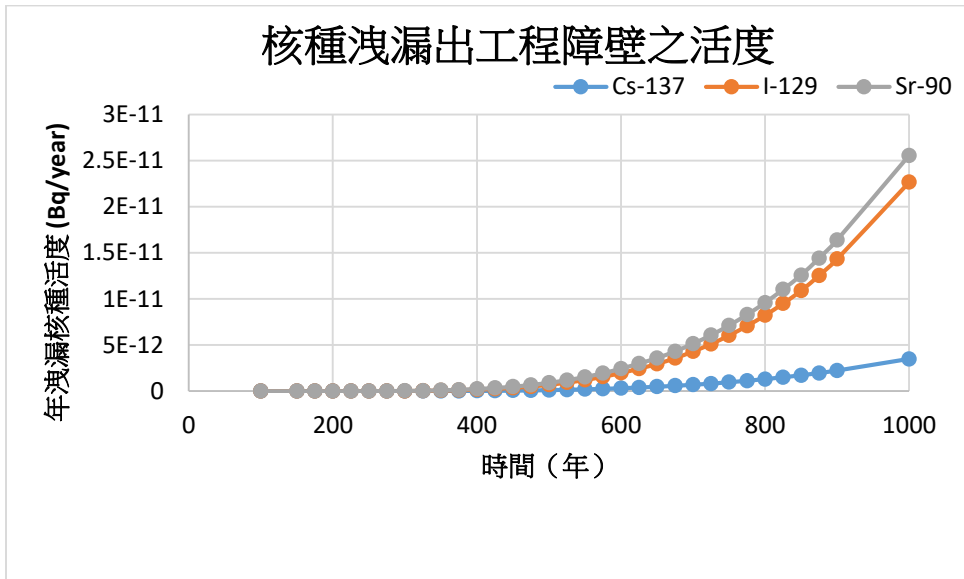


圖 60 洩漏出工程障壁之年洩漏核種活度

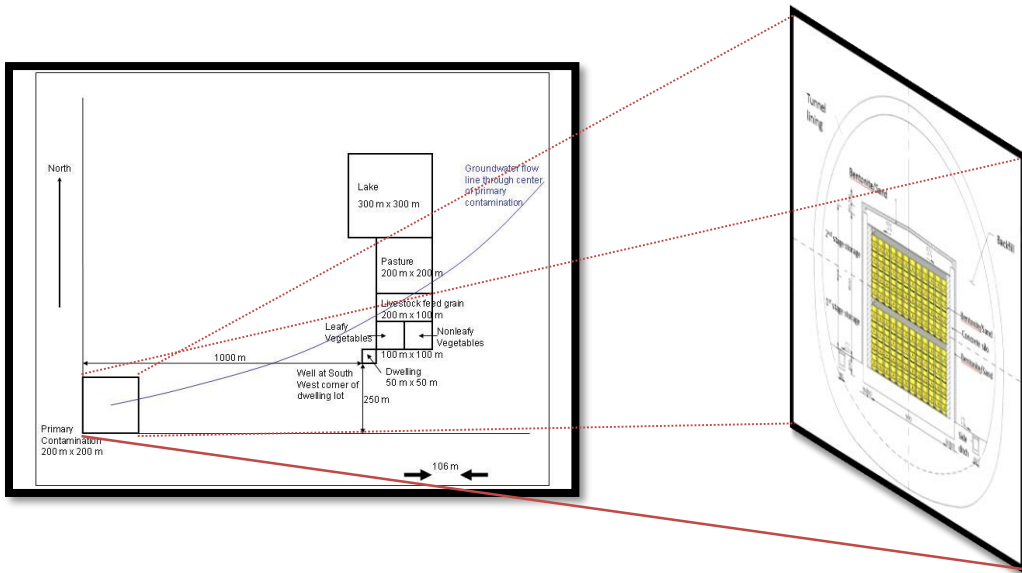


圖 61 假設主要污染區域設為坑道內工程障壁之固化桶與生物圈位置示意圖

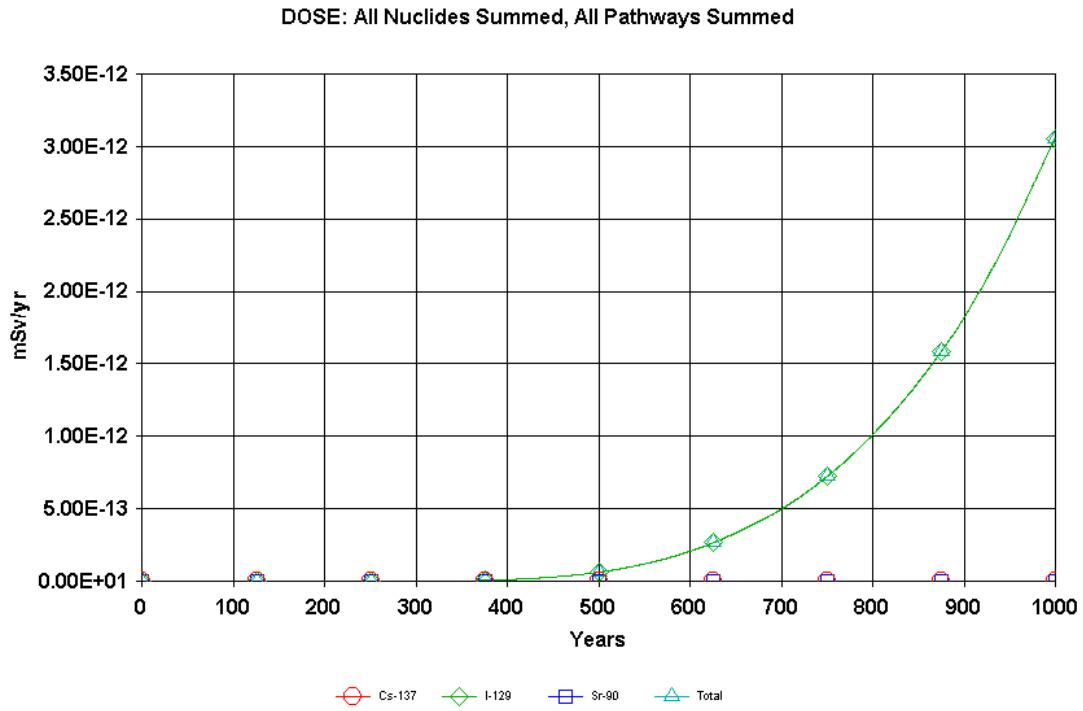


圖 62 核種經生物圈所有傳輸途徑之總劑量(RESRAD 預設 Kd 值)

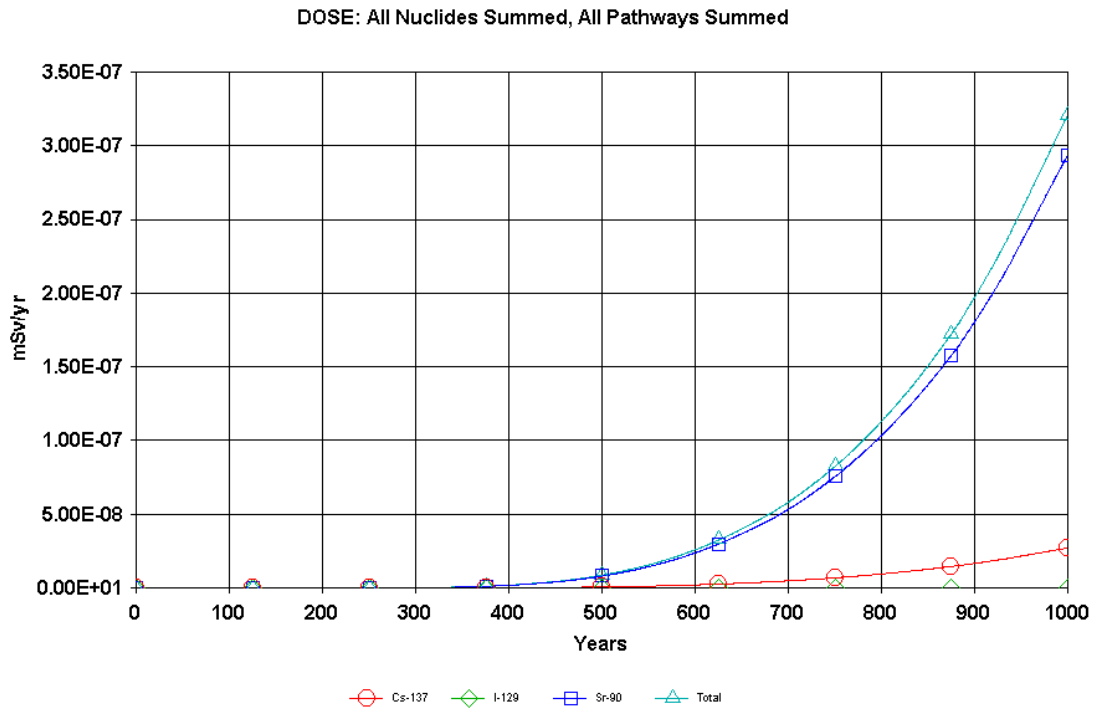


圖 63 核種經生物圈所有傳輸途徑之總劑量(Kd=0)

五、輻射劑量與風險評估整合管制技術研議

(一) RESRAD輻射劑量與風險評估整合分析

針對國內低放處置方式分淺層處置與地質處置兩種。這兩種處置方式均面臨未來造成曝露的可能性，也就是潛在暴露。對於此一潛在暴露，最佳的方法就是訂立低放處置輻射風險標準加以管制。

國際輻射防護組織與核能先進國家低放處置輻射風險標準研究對於放射性廢棄物最終處置的安全標準，主要為劑量與風險兩種指標，各國依其國情有不同的法規限值。我國目前訂定低放處置設施對一般人造成之個人年有效劑量，不得超過0.25 毫西弗，並應合理抑低。（物管局，2011）

RESRAD已建立輻射劑量與風險評估整合分析，使用者可選擇「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（如圖64）；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。由本圖例可知，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様本分佈。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（如圖65）；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概率報告中（如圖66）。

Step by step analysis	Related inputs	Post run regression	Output specifications	
Sample specifications	Parameter distributions	Input rank correlations	Output specifications	
PRE RESRAD run specifications		Probabilistic outputs available for current selection		
Probabilistic statistical analysis is available on the following outputs		Temporal plots of chosen percentiles, mean and median of Total Dose will be available irrespective of whether this option is set or not.		
<input checked="" type="checkbox"/> Peak total dose and risk (summed over nuclides and pathways)		If this option is checked, the following probabilistic analysis option will be available for component Doses, component Risks and Media concentrations: =		
<input checked="" type="checkbox"/> Peak dose and risk from each pathway (summed over all nuclides)		1. Temporal plots of chosen percentiles, mean and median,		
<input checked="" type="checkbox"/> Peak dose and risk from each nuclide in the source (summed over all pathways)		2. Statistics (mean, median, minimum, maximum, and percentiles) at the graphical time points.		
<input type="checkbox"/> Dose and risk at graphic time points		The component doses (or risks) are the doses (or risks) from the individual pathways due to the individual nuclides.		
<input checked="" type="checkbox"/> 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"/>
<input checked="" type="radio"/> Perform uncertainty analysis <input type="radio"/> Suppress uncertainty analysis this session <input type="button" value="OK"/>				

圖 64 RESRAD 輻射劑量與風險評估整合分析表單輸入界面

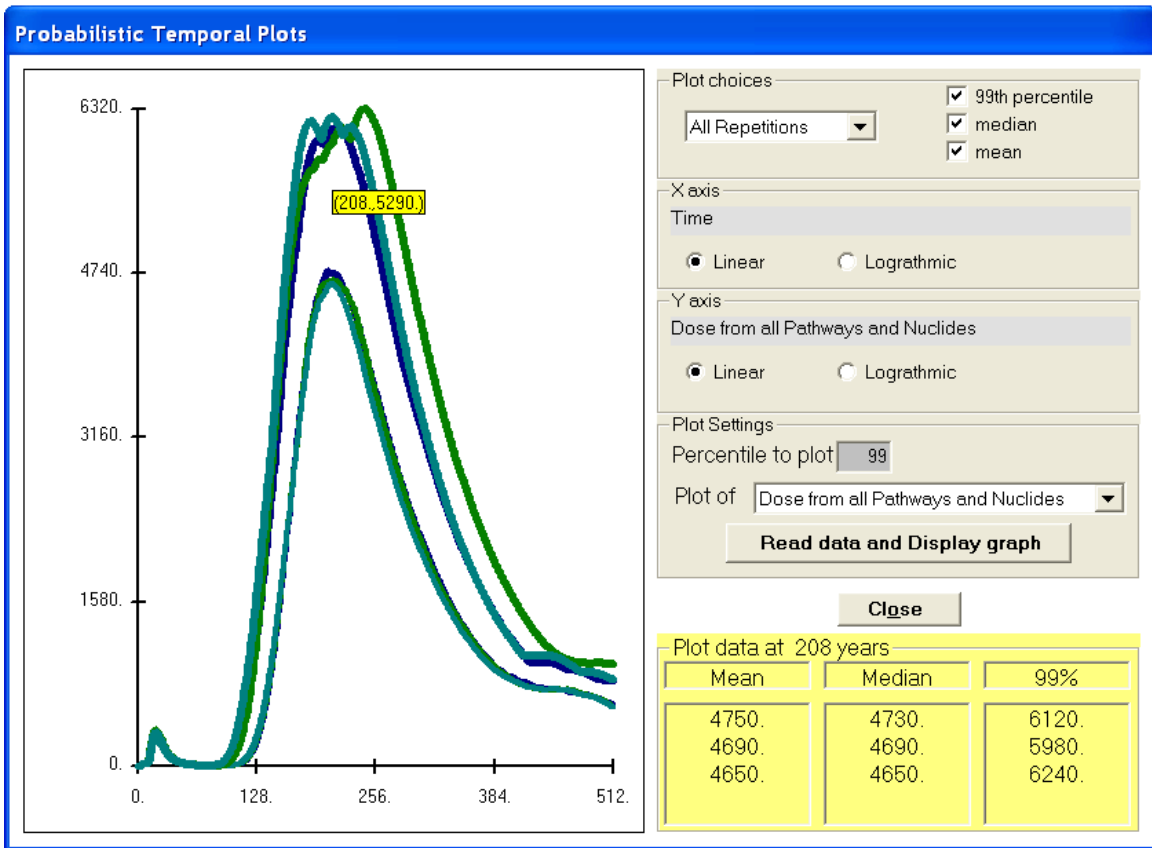


圖 65 RESRAD 時序圖表展示出總劑量(核種與途徑之劑量總和)

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

	PCC	SRC	PRCC	SRRC
<input checked="" type="checkbox"/> Dose <input checked="" type="checkbox"/> Risk				
Peak Total dose and risk	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Peak Nuclide dose and risk	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Peak Pathway dose and risk				
Pathway		Water borne		Air borne and direct
Sub pathway →				
External radiation from ground	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Inhalation of particulates	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Ingestion of Fish	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Inhalation of Rn and progeny	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Ingestion of Vegetables	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Ingestion of Meat	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Ingestion of Milk	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Ingestion of Soil	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Ingestion of Water	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<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 66 輻射劑量與風險評估整合輸出參數(劑量、風險、途徑)界面

(二) 致癌風險斜率因子程式庫和輻射劑量轉換因子程式庫

RESRAD模式「致癌風險之斜率因子程式庫」和「輻射劑量轉換因子程式庫」如下：

斜率因子程式庫：斜率因子程式庫將會運用於模式分析。斜率因子程式庫可從RESRAD劑量轉換因子編輯器中設定。RESRAD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)或使用者自創的程式庫。(單位：Risk/pCi 或 Risk/pBq)(如圖67)

劑量轉換因子程式庫：劑量轉換因子程式庫將會運用於模式分析。劑量轉換因子程式庫可從RESRAD劑量轉換因子編輯器設定，RESRAD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：mrem/pCi 或 mSv/Bq) (如圖68)

本計畫藉由RESRAD程式研析及案例模擬，進行國內放射性廢棄物處置輻射劑量與風險評估整合管制技術研議。圖62核種經生物圈所有傳輸途徑之總劑量(RESRAD預設Kd值)與圖63核種經生物圈所有傳輸途徑之總劑量(Kd=0)，利用RESRAD程式斜率因子程式庫得到之致癌風險如圖69及圖70所示。

The image shows a composite of two web pages from the U.S. Environmental Protection Agency (EPA). The top-left page is titled "Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure to Radionuclides" and is identified as "Federal Guidance Report No. 13". It includes the EPA logo and the text "United States Environmental Protection Agency" and "Air and Radiation (60512) EPA 402 R-99-001 September 1999". The top-right page is titled "Radiation Protection" and features a green box with the text "風險評估之斜率因子程式庫" (Risk Assessment Slope Factor Libraries). Below this, it lists "FGR13 morbidity (Eckerman et al. 1999) · HEAST morbidity libraries (EPA 2001)". The bottom portion of the image shows a screenshot of the EPA's "Radiation Protection" website, specifically the "Radionuclide Carcinogenicity Slope Factors: HEAST" page. This page contains detailed information about the HEAST tables, including updates from April 16, 2001, and a download area for the user's guide and tables.

圖 67 RESRAD 風險評估之斜率因子程式庫來源介紹示意圖

輻射劑量與風險評估技術

FEDERAL GUIDANCE REPORT NO. 11

LIMITING VALUES OF RADIONUCLIDE INTAKE AND AIR CONCENTRATION AND DOSE CONVERSION FACTORS FOR INHALATION, SUBMERSION, AND INGESTION

Derived Guides for Control of Occupational Exposure and Exposure-to-Dose Conversion Factors for General Application, Based on the 1987 Federal Radiation Protection Guidance

Keith F. Eckerman, Anthony B. Wolfstam, and Allan C.B. Richardson

Oak Ridge National Laboratory
Oak Ridge, Tennessee 37831

Office of Radiation Programs
U.S. Environmental Protection Agency
Washington, DC 20460

1988

輻射劑量之劑量轉換因子程式庫

FGR11 (Eckerman et al. 1988) · age-dependant ICRP72 (ICRP 1996)

圖 68 RESRAD 風險評估之劑量轉換因子程式庫來源介紹示意圖

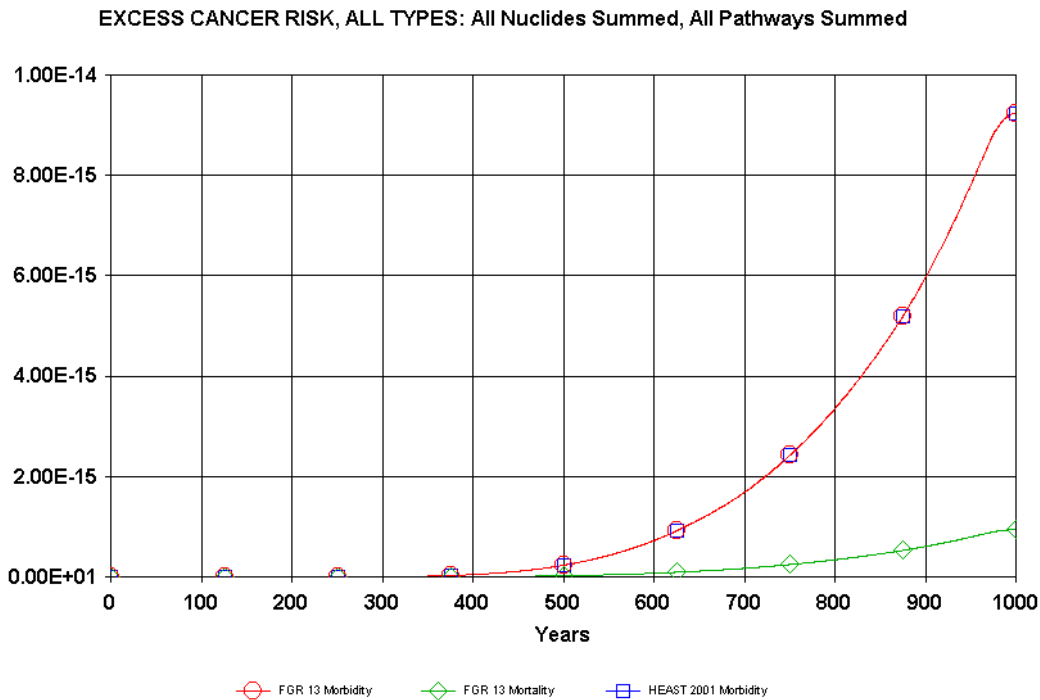


圖 69 核種經生物圈所有傳輸途徑之總劑量(RESRAD 預設 Kd 值)之致癌風險

EXCESS CANCER RISK, ALL TYPES: All Nuclides Summed, All Pathways Summed

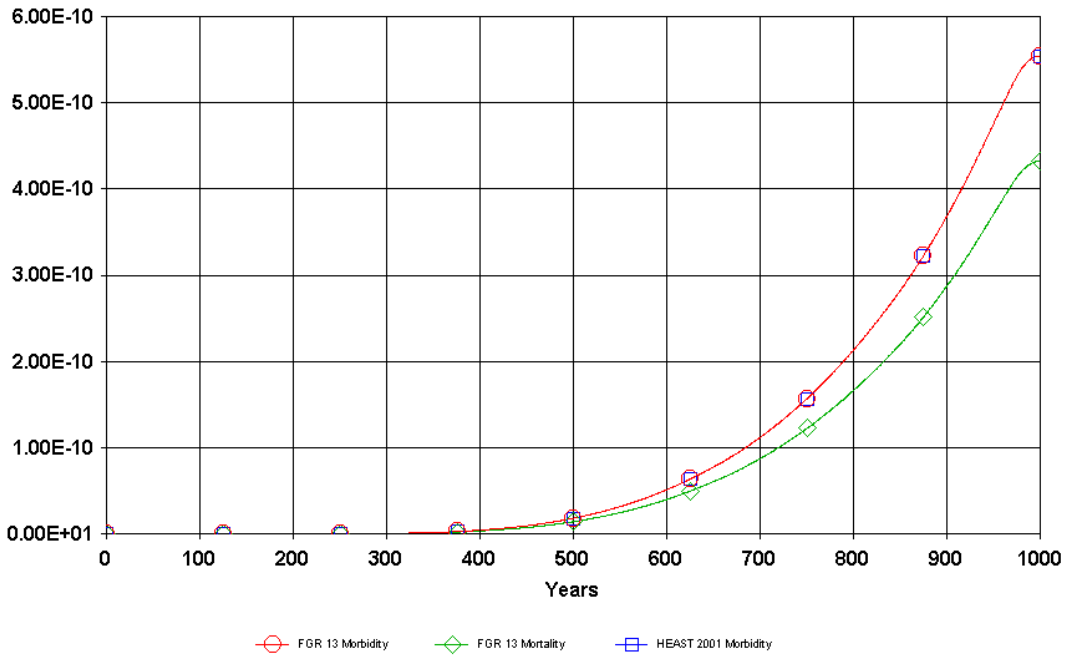


圖 70 核種經生物圈所有傳輸途徑之總劑量(Kd=0) 之致癌風險

六、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

物管局對低放射性廢棄物陸地處置(land disposal)之管制，乃依本審查導則及其他相關法規要求進行審查，已研訂「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版)」。

本審查導則適用於近地表處置(near-surface disposal)與坑道處置(cavern disposal)之審查要求。若採深層地質處置(deep geological disposal)則將視個案需要，建立額外的審查要求。欲獲得低放射性廢棄物處置設施(disposal facility)建造執照，執照申請者(license applicant)必須提出申請並檢附安全分析報告(Safety Analysis Report, 簡稱 SAR)等規定資訊，證明所提議設施(proposed facility)符合本審查導則及其他相關法規要求。SAR 之編撰應遵循原能會發布之「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則」(以下簡稱 SAR 導則)。本審查導則提供物管局審查人員進行 SAR 審查時的指引。必要時將納入新增技術要求，進行修訂與發布。進行 LLW 處置設施執照申請審查時，審查人員的責任在於合理確保執照申請者所提出的規劃設施符合我國法規要求。亦即，此設施之場址(site)、設計、建造、運轉、與封閉(closure)不會對公眾健康與安全造成不必要的風險，且環境品質可獲得保障。審查人員應評審申請資訊內容是否充分與適當，必要時進行獨立驗證分析以確認其符合法律與技術規範的要求。為協助執照申請者瞭解審查如何進行，審查人員須明確提出達成發照決定所採行的標準(standards)、準則(criteria)、和基準(bases)。本審查導則具有導引審查人員進行審查以及使執照申請者瞭解審查安全考量的雙重目的。證明處置設施安全性符合發照要求是執照申請者的責任。物管局審查人員的責任在於檢視執照申請者所提出的資訊是否充分與適當，足以合理確保申請案能符合法規要求。審查結論將是原能會決定是否核發執照之重要依據。審查人員應通知執照申請者尚有缺失或資訊不足之處，並說明審查依據。俟執照申請者提出修訂說明與資訊補充後，再進行審查。

本計畫藉由計畫執行過程，對於 RESRAD 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。已將該建議納入「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 103 年 5 月 8 日、103 年 8 月 19 日、103 年 10 月 28 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。以對於「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版)」第七章安全評估提出精進建議如下。

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、除污排水)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>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、除污排水)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。 (一)提供資料 1. 申請處置設施前,國</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。 (一)提供資料 10. 申請處置設施前,國</p>	

修正條文	現行條文	說明
<p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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、瀝濾指數、耐火性、耐水性、耐候性、耐輻射、耐菌性等資料。</p> <p>6. 廢棄物活度資料，包括主要核種(含難測核種)的名稱、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，</p>	<p>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。</p> <p>11. 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。</p> <p>12. 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。</p> <p>13. 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。</p> <p>14. 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、瀝濾指數、耐火性、耐水性、耐候性、耐輻射、耐菌性等資料。</p> <p>15. 廢棄物活度資料，包括主要核種(含難測核種)的名稱、半衰期、推估處置時之活度及平均濃度。</p> <p>16. 處置設施內的廢棄物之處置相關規劃。</p> <p>17. 處置設施運轉期間，</p>	

修正條文	現行條文	說明
<p>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>接收、貯存及處置廢棄物之規劃。</p> <p>18. 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>6. 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>7. 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>8. 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>9. 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>10. 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>二、核種傳輸特性： 評估處置設施工程與天然障壁在設施運轉及封閉後，<u>孔隙介質或岩體裂</u></p>	<p>二、核種傳輸特性： 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</p>	<p>地下水滲流是現象非參數，配合淺地層近地表處置與坑道處置方式，明確</p>

修正條文	現行條文	說明
<p>隙之水力傳導係數、核種擴散、延散、<u>分配係數</u>、<u>核種生物地球化學反應</u>等特性參數，以模擬分析地下水<u>水流</u>機制、核種傳輸及處置設施之長期穩定性。</p> <p>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<u>水力</u>、擴散、延散，核種分配係數、核種生物地球化學反應等特性，及地下水流場與流量等資料；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>(一)提供資料</p> <p>1. 處置場址附近的氣象資訊與核種滲漏分析： (1)為計算核種釋出之大氣擴散，提供之氣象參數，包括：核種釋出熱通量、風速計高度、核種釋出位置環境溫度、上午/下午大氣混合高度、風速地形、平均風速、聯合頻率(風速、風向及穩定等級)</p> <p>(2) 核種滲漏分析數</p>	<p>散、延散與<u>遲滯吸附</u>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。</p> <p>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>(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</p>	<p>表示是水力傳導係數。遲滯吸附以分配係數代表。</p> <p>滲流原文為 Seepage，一般指污染物隨水流滲流出、或是地下水流動造成構造物破壞(如土壩滲流)。在含水層流動建議通稱為地下水流。</p> <p>增加核種生物地球化學反應參數資料。</p> <p>滲流修改為「水力」增加「核種分配係數、核種生物地質化學反應」</p> <p>為利 RESRAD-OFFSITE 模式應用。建議增機氣象資料。核種釋出熱通量、風速計高度、核種釋出位置環境溫度、上午/下午大氣混合高度、風速地形、平均風速、聯合頻率(風速、風向及穩定等級)其中聯合頻率分佈包括：風速、風向及穩定等級。其中有 6 個穩定等級、6 段風速、16 個風向。</p>

修正條文	現行條文	說明
<p>據：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。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>(3) 滲漏分析方式：其描述包含文件、假設、驗證及校正。</p> <p>6. 工程障壁材料與天然障壁對關鍵核種的分配係數、核種生物地球化學反應參數值。</p> <p>(二) 審查作業</p> <p>4. 擴散、延散與分配係數、核種生物地球化學反應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>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>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>(二) 審查作業</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>明確指出是「核種滲漏」</p> <p>遲滯吸附以分配係數代表。</p> <p>「重要」建議修改為「關鍵」</p> <p>遲滯吸附以分配係數代表。增加「核種生物地球化學反應」</p>
<p>三、正常狀況之輻射劑量：</p> <p>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</p>	<p>三、正常狀況之輻射劑量：</p> <p>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</p>	

修正條文	現行條文	說明
<p>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</p>	<p>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</p>	

修正條文	現行條文	說明
<p>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、<u>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。</u></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、與建築物之釋出空浮、(d)植物根部或穴居動物或昆蟲挖掘造成污染</p>	<p>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、與建築物之釋出空浮、(d)植物根部或穴居動物或昆蟲挖掘造成污染</p>	<p>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>

修正條文	現行條文	說明
<p>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</p>	<p>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</p>	

修正條文	現行條文	說明
<p>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>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>	

修正條文	現行條文	說明
<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</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>(3) 提供的核種傳輸機制(地下水、空氣、地表水、直</p>	

修正條文	現行條文	說明
<p>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： (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。 (2) 處置設施重要組 件的特徵事件與 過程是否已充分 考量。 (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>接輻射、生物) 資料是否足以供 進行獨立的安全 評估。</p> <p>(4) 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： (4) 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。 (5) 處置設施重要組 件的特徵事件與 過程是否已充分 考量。 (6) 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>五、核種外釋到達人類活 動範圍之傳輸機制： 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</p>	<p>五、核種外釋到達人類活 動範圍之傳輸機制： 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</p>	

修正條文	現行條文	說明
<p>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。</p> <p>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) 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、場界位置之核種濃度以及地下水自此位置流出後被地表水稀釋的地表水流量。</p> <p>(5) 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。</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，</p>	<p>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。</p> <p>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) 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</p>	<p>一、地下水中的核種濃度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、長期的環境變動現象(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</p>

修正條文	現行條文	說明
<p>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) 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</p>	<p>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) 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>響核種遷移的過程。</p>

修正條文	現行條文	說明
<p>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，核種濃度隨空間與時間變化之地表水傳輸模式。</p> <p>(3) 地表水傳輸模式之源項輸入參數，須包括核種釋出至地表水之速率、與從地下水釋出至地表水之源項。</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</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、與地下水介面之源項。</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</p>	<p></p> <p>文字適當修正</p> <p></p> <p>文字適當修正</p>

修正條文	現行條文	說明
<p>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</p>	<p>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>5. 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</p>	<p>文字適當修正</p>

修正條文	現行條文	說明
<p>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<u>生物</u>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>(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>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>6. 空氣</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</p>	

修正條文	現行條文	說明
<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，以及模擬長短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的氣象資訊是否合理且足夠。</p>	<p>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，以及模擬長短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的</p>	

修正條文	現行條文	說明
<p>(9) 模式中，場址及其環境之氣象數據是否具代表性。</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) 模式中使用的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>(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</p>	<p>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) 模式中使用的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>7. 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>	

修正條文	現行條文	說明
<p>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以主管機關利用程式分析，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</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>8. 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</p>	<p>文字適當修正</p>

修正條文	現行條文	說明
<p>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>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>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。</p> <p>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)。</p> <p>(二)審查作業</p> <p>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。</p> <p>2. 運轉期與封閉後正常</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>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。</p> <p>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)。</p> <p>(二)審查作業</p> <p>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。</p> <p>2. 運轉期與封閉後正常</p>	

修正條文	現行條文	說明
<p>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。</p>	<p>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。</p>	
<p>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。</p>	<p>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。</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"> 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。 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。 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。 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。 	<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"> 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。 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。 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。 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。 	

修正條文	現行條文	說明
<p>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。</p> <p>(二)審查作業</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>3. 重要設備使用壽命之評估是否合理。</p>	<p>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。</p> <p>(二)審查作業</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>3. 重要設備使用壽命之評估是否合理。</p>	
<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>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>	<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>	

修正條文	現行條文	說明
<p>1. 處置場界圍籬與標示的材質與方法。</p> <p>2. C類廢棄物處置位置與深度之規劃。</p> <p>3. C類廢棄物障壁的材質、設計與施工方法。</p> <p>(二)審查作業</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p>	<p>1. 處置場界圍籬與標示的材質與方法。</p> <p>2. C類廢棄物處置位置與深度之規劃。</p> <p>3. C類廢棄物障壁的材質、設計與施工方法。</p> <p>(二)審查作業</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</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</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</p>	

修正條文	現行條文	說明
<p>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>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</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</p>	

修正條文	現行條文	說明
<p>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</p>	<p>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</p>	

修正條文	現行條文	說明
<p>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>(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。</p> <p>(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。</p>	<p>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>4. 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>(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。</p> <p>(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。</p>	

修正條文	現行條文	說明
<p>(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。</p> <p>2. 邊坡穩定性</p> <p>(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</p>	<p>(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。</p> <p>5. 邊坡穩定性</p> <p>(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</p>	

修正條文	現行條文	說明
<p>保測試頻率等是否均有詳細施工規範。</p> <p>(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</p>	<p>保測試頻率等是否均有詳細施工規範。</p> <p>(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</p>	

修正條文	現行條文	說明
<p>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. 地球化學環境</p> <p>(1) 處置設施建設前的水質(pH、Eh、Ec等)、岩石礦物組成等地球化學環境資料，以及處置設施的工程設計等相關資料。</p> <p>(2) 長期可能對工程障壁之影響分析。</p> <p>(3) 處置場的背景地面水及地下水水質地地球化學環境監測計</p>	<p>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>6. 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>	

修正條文	現行條文	說明
畫。		

七、結論與建議

本子計畫針對 RESRAD 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、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，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。獲得以下結論與建議：

一、安全分析 RESRAD 程式參數需求研析

本計畫已建立完整 RESRAD-OFFSITE 模式輸入參數，包括：場址區域範圍及地圖介面、核種源項濃度、核種源項釋出率與沉降速度、分佈係數、劑量換算與斜率因子、轉移因子、設定釋出途徑、報告及儲存時間、水文物理因子、主要污染區域、農業區域、牲畜飼養區域、遠場住宅區、大氣傳輸、非飽和含水層、飽和含水層、水利用量、地表水、地下水傳輸、攝取率、牲畜攝取飼養因子、植物因子、吸入及外部伽馬、外部輻射的形狀及面積因子、居住率、氦、碳 14、碳 12 質量分率、氬等，該參數核種劑量換算與致癌風險斜率因子已建立於 RESRAD 資料庫內，且 RESRAD 已建立參數使用參考手冊。以解決國內低放處置輻射劑量安全審查技術發展之模式選擇與參數選用所面臨問題。

二、低放處置輻射劑量與風險評估技術文獻資訊研析

RESRAD 程式之環境途徑、暴露途徑及劑量與癌症風險之輻射風險評估之技術文獻資訊進行研析，並再蒐集歐洲、美國、日本等國處置低放射性廢棄物利用 GOLDSIM 進行輻射劑量與風險評估研析。劑量計算 Dose_Calculation 是 GOLDSIM 結構上最複雜的，必須要有由使用者自行輸入輻射劑量解析方程式。

三、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

建立 RESRAD 程式模擬結果作為輻射劑量與致癌風險判讀依據。包括：母(子)核種劑量報告檔 (.par)：劑量轉換因子、轉移因子、場址特性；途徑；總劑量；核種衰變鏈途徑劑量；所有核種劑量峰值時間。致癌風險報告檔 (.rsk)：致癌風險斜率因子；過量致癌風險。以作為輻射劑量與風險評估審查技術方法。

四、輻射劑量與風險評估整合管制技術研議

RESRAD 已建立輻射劑量與致癌風險評估整合分析，使用者可選擇「圖表時間點之劑量、致癌風險」，來輸出各時點之劑量、致癌風險與濃度內容。本計畫已應用該技術於輻射劑量與風險評估整合管制。

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

RESRAD 程式參數需求納入審查導則，提供物管局低放處置輻射劑量評估審查應用，精進管制技術議題技能。

美國 ARGONNE National Laboratory 為有效評估核種在近場與遠場傳輸之暴露劑量與風險開發之 RESRAD (OFFSITE 模組)，已設計利用模擬評估殘留放射性物質的輻射劑量和風險。已獲得美國核能管制委員會 (USNRC) 在核能場址除役及低放射性廢棄物處置安全評估審查之工具，已經在美國和其他國家的使用案例超過 300 餘個。所以本研究特利用 RESRAD (OFFSITE 模組) 建立評估放射性廢棄物處置場址輻射劑量安全評估之有效工具。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，本計畫藉由 RESRAD 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。綜合分析研析成果與我國現行技術規範，研擬「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則 (第 0 版)」相關章節之精進建議。透過國際重要文獻及技術研發重點之蒐集、研析與彙整，以提升輻射劑量評估安全審查管制技術議題之技能與規範的精進。建議未來可透過本計畫建立核種從近場、地質圈、生物圈傳輸遷移之全系統串接模擬有關各種生物圈曝露途徑的輻射劑量評估之技術。對於源項、近場及遠場模式，均有與場址及處置單元相關(工程設計)之不同關鍵參數。如何藉由調查、試驗與監測獲取這些關鍵參數為技術發展重點之一，並進而結合生物圈曝露途徑的輻射劑量評估，整合模式介面間之輸入與輸出亦為未來技術發展重點之一。

八、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，「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，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
- 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/heat/download.htm>.
- Hull, L.C., Schafer A.L., 2008. Accelerated transport of ⁹⁰Sr 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.
- 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.

附錄 A RESRAD-OFFSITE 參數資料彙編

RESRAD-OFFSITE 參數資料彙編

編輯群：

B.M. Biwer, S. Kamboj, J.-J. Cheng, C.R. Yuen,
E. Gnanapragasam, and C. Yu

Environmental Science Division
Argonne National Laboratory

目 錄

符號表 (NOTATION)

1. 緒論 (INTRODUCTION)

1.1 目的與使用範疇 (Purpose and Scope)

1.2 簡述 RESRAD-OFF (Brief Description of RESRAD-OFFSITE Code)

1.3 參數分類 (Parameter Classification)

1.4 參數統計分布設定 (Parameters Selected for Assignment of Distributions)

2 土壤與水文參數分布設定 (SOILS AND HYDROLOGY PARAMETER DISTRIBUTIONS)

2.1 體積含水量 (Volumetric Water Content)

2.2 延散係數 (Dispersivity)

2.3 降雨沖蝕指數 (Rainfall Erosion Index)

2.4 土壤沖蝕指數 (Soil Erodibility Factor)

2.5 坡長及坡度因子 (Slope Length-Steepness Factor)

2.6 覆蓋與管理因子 (Cover and Management Factor)

2.7 P 值 (Support Practice Factor)

2.8 土壤混和層深度 (Depth of Soil Mixing Layer)

2.9 蒸發散係數 (Evapotranspiration Coefficient)

3. 大氣參數分布 (ATMOSPHERIC PARAMETER DISTRIBUTIONS)

3.1 荷重 (Mass Loading)

3.2 沉降速度 (Deposition Velocity)

3.3 風速 (Wind Speed)

4. 農業參數分布 (AGRICULTURE PARAMETER DISTRIBUTIONS)

4.1 生長期 (Duration of the Growing Season)

4.2 根系深度 (Depth of Roots)

4.3 植物轉移因子 (Transfer Factors for Plants)

5. 受體參數分布 (RECEPTOR PARAMETER DISTRIBUTIONS)

5.1 家庭用水量 (Quantity of Water for Household Purposes)

5.2 戶外比 (Outdoor Fraction)

6. 參考文獻 (REFERENCES)

附件 A：RESRAD-OFFSITE 模組各使用參數及參數型態 (Parameters and Parameter Types in RESRAD-OFFSITE Code)

附件 B：RESRAD-OFFSITE 模組統計分布及參數定義 (Statistical Distributions Used in RESRAD-OFFSITE and Their Defining Parameters)

圖目錄 (FIGURES)

圖 2.1-1 體積含水量之累積分布函數.....	11
圖 2.2-1 非飽和層縱向延散性的累積分佈函數.....	15
圖 2.2-2 飽和層縱向延散性的累積分佈函數.....	15
圖 2.2-3 飽和層水平延散性的累積分佈函數.....	16
圖 2.2-4 飽和層垂直延散性的累積分佈函數.....	16
圖 2.3-1 降雨侵蝕指數之累積機率函數.....	18
圖 2.4-1 土壤沖蝕指數之累積機.....	21
圖 2.5-1 坡長及坡度因子累積分布方程式.....	23
圖 2.6-1 累積分布之覆蓋與管理因子.....	27
圖 2.7-1 累積機率分布之 P 值.....	30
圖 2.8-1 混合土壤層深度之機率密度分布.....	31
圖 3.1-1 攝入質量負荷之直方圖和累積分佈函數.....	47
圖 3.1-2 平均近場質量負載之直方圖和概率密度函.....	47
圖 3.2-1 利用粒徑推估沉降速度.....	49
圖 3.2-2 氣霧粒徑分佈中三峰特性.....	51
圖 3.2-3 RESRAD-BUILD 的室內沉降速度分布圖.....	53
圖 3.2-4 RESRAD-OFFSITE 的室外沉降速度分布圖.....	54
圖 3.3 -1 風速直立圖與 RESRAD (ONSITE)中風速之機率密度函數.....	56
圖 4.1-1 牧草成長周期的機率密度函數。.....	59
圖 4.1-2 穀物成長周期的機率密度函數.....	61
圖 4.1-3 水果、堅果、穀物與非葉類蔬菜成長周期的機率密度函數。.....	64
圖 4.1-4 葉類蔬菜成長周期的機率密度函數。.....	65
圖 4.2-1 牧草和青貯根系深度之機率密度函數.....	68
圖 4.2-2 穀物根系深度之機率密度函數.....	69

圖 4.2-3 水果、堅果與非葉類蔬菜根系深度之機率密度函數	71
圖 4.2-4 葉類蔬菜根系深度之機率密度函數	72
圖 4.2-5 RESRAD(ONSITE)根系深度之機率密度函數	72
圖 5.1-1 家庭用水量之機率密度函數	79
圖 5.2-1 住宅戶外比之累積機率函式 (RESRAD-ONSITE 或 RESRAD-OFFSITE)	82
圖 5.2-2 農村地區戶外比之累積機率函數	84

表目錄 (TABLES)

表 1.2-1 機率密度函數之參數設定.....	9
表 2.1-1 不同土壤型態之體積含水量累積機率分布.....	10
表 2.1-2 不同土壤型態之體積含水量分布值.....	10
表 2.2-1 非飽和層縱向延散性累積分佈.....	13
表 2.2-2 飽和層縱向延散性的累積分佈.....	13
表 2.2-3 飽和層水平延散性累積分佈.....	14
表 2.2-4 飽和層垂直延散性累積分佈.....	14
表 2.3-1 降雨侵蝕指數之累積分佈.....	18
表 2.4-1 土壤沖蝕指數之累積分佈.....	19
表 2.4-2 不同有機物含量之土壤沖蝕指數(噸/英畝).....	20
表 2.5-1 坡長及坡度因子之累積分佈.....	22
表 2.6-1 覆蓋與管理因子之累積分佈.....	24
表 2.6-2 牧場(PASTURE, RANGE)和閒置地區覆蓋與管理因子(C)表.....	25
表 2.6-3 不受外界干擾之森林之覆蓋與管理因子(C).....	26
表 2.7-1 P 值之累積機率分布.....	27
表 2.7-2 P 值和坡長限制.....	28
表 2.7-3 帶狀種植之最大帶狀寬度和坡長限制之 P 值.....	28
表 2.9-1 不同之農業氣候區域之平均 ET_0 值.....	34
表 2.9-2 不受外力干擾及良好管理之 $K_{C,AVG}$	35
表 2.9-2 (續 1).....	36
表 2.9-2 (續 2).....	38
表 2.9-3 於良好管理下之不同類型作物之 $K_{C,AVG}$ 值.....	40
表 2.9-4 溫帶半乾燥區蒸發散係數案例計算.....	42
表 3.1-1 RESRAD 攝入之質量負荷累積分佈函數.....	45
表 3.2-1 藉由顆粒尺寸量測之室內沉降速度.....	52
表 3.2-2 居所有無放置家具與顆粒尺寸量測之沉降速度.....	53
表 3.2-3 各種放射性核種之室內沉降速度.....	53
表 3.3-1 RESRAD-OFFSITE 程式中風速均勻分布之上下限.....	56

表 3.3-2 STAR 風速區間	57
表 4.1-1 生長週期的三角形分佈(天).....	58
表 4.1-2 牧草於四個階段生長週期被消耗所需時間(天).....	58
表 4.1-3 美國不同糧食作物的生長週期.....	60
表 4.1-4 不同穀物於四個階段生長週期被消耗所需時間.....	61
表 4.1-5 不同水果、堅果、穀物與非葉類蔬菜於四個階段生長週期被消耗所需時間.....	63
表 4.1-6 不同葉類蔬菜於四個階段生長週期被消耗所需時間	65
表 4.2-1 根系深度均勻分布輸入值	67
表 4.2-2 不同牧草之根系深度	68
表 4.2-3 不同穀物之根系深度	69
表 4.2-4 不同水果、堅果與非葉類蔬菜之根系深度	70
表 4.2-5 不同葉類蔬菜之根系深度	71
表 4.3-1 植物轉移因子之對數常態分佈參數值.....	74
表 4.3-1(延續上頁)	75
表 4.3-2 不同濕重產物所所含之平均乾重含量	76
表 5.1-1 平均每天人均用水量過去研究.....	77
表 5.1-2 REUWS 之 12 個站點人均室內用水量	78
表 5.1-3 人均室內用水故障率.....	79
表 5.2-1 戶外比之累積機率分布	81
表 5.2-2 每日戶外比之統計值.....	83

1. 介紹

1.1 目的與使用範疇 (Purpose and Scope)

參數使用以機率分布來表示這樣的表示方式已使用於 RESRAD ONSITE 和 RESRAD-BUILD 程式碼中，並記錄於 (Yu et al., 2000; Biwer, 2002, Yu et al., 2003) 研究中。本報告提出一些新的參數分布情形於 RESRAD-OFFSITE 程式碼中使用這些新的參數，而其中有部分已使用於 RESRAD ONSITE 程式碼中。本報告專注於 RESRAD-OFFSITE 中新的參數使用。其中參數及參數型態如附件 A。

1.2 簡述 RESRAD-OFFSITE

RESRAD-OFFSITE 可評估個體受放射性污染之放射性劑量和過量致癌風險。RESRAD-ONSITE 被設計為近場受體評估放射劑量而 RESRAD-OFFSITE 為 RESRAD-ONSITE 模組之延伸 (Yu et al., 2001)。RESRAD-OFFSITE 耦合大氣延散模式、地下水傳輸模式和遠場累積模式。對於不同的土地利用型態及慢性曝露於輻射情形下，RESRAD-OFFSITE 可計算其輻射劑量和過量終身致癌風險 (excess lifetime cancer risk)。本模組主要專注於計算土壤、空氣、水和生物作為媒介之受體受放射性污染情況。於 RESRAD-OFFSITE 有 9 種曝露方式：直接接觸、吸入性顆粒物和氬、攝取蔬菜、肉類、牛奶、水生食物、水和土壤。RESRAD-OFFSITE 採用路徑分析法而此種方法計算來源與受體在一段時間內的濃度。這些濃度用於計算曝露程度，劑量高低，過量致癌風險。放射性核種的輻射劑量、健康風險、土壤指引以及媒介濃度被計算於曝露時間。核種來源大小由時間做調整並可說明放射線衰退、負成長、分離、侵蝕及結合。使用者可建立曝露於核種的情境藉由不同的接觸路徑和參數之調整。

1.3 參數分類

RESRAD-OFFSITE 模組之參數使用分為三類：物理性 (physical)、行為 (behavioral) 或代謝性 (metabolic) 皆於附錄 A 所示。

物理性參數：不同受體下任何參數值均不改變稱為物理性參數。物理性參數的決定由來源位置和場址地質特性。

行為參數：受不同受體之行為和情境改變而改變之參數稱為行為參數。以相同之受體而言，情境改變其參數隨之改變。

代謝參數：參數代表受體之代謝特性並且不受情境影響即可歸類為代謝參數。

1.4 參數統計分布設定

參數選擇依據 RESRAD ONSITE 的參數分布所制定之準則 (Yu et al., 2000)。資料可以多種參數組合 (例如：植物的根和轉換因素因為不同之植物生長於不同地點)。

參數的選擇其功能如表 1.2-1 所示。根據不同之使用曝露情況可分為四大類：土壤與水文(第 2 章)、大氣(第三章)、農業(第四章)和受體(第 5 章)。每一參數分布意義包含單位、分布型態及輸入資料。對現有數據進行討論與說明來確定參數分布選用。詳細描述分布函數如附錄 B 所示。

表1.2-1 機率密度函數之參數設定

參數	型態 ^a	使用分布型態	使用章節
體積含水量	P	線性	2.1
延散係數	P	線性	2.2
降雨沖蝕指數	P	線性	2.3
土壤沖蝕指數	P	線性	2.4
坡長及坡度因子	P	線性	2.5
覆蓋與管理因子	P, B	線性	2.6
P值	P, B	線性	2.7
土壤混和層深度	P, B	三角形	2.8
蒸發散係數	P	均勻	2.9
荷重	P, B	線性, 截斷常態分佈	3.1
沉降速度	P	對數常態分佈	3.2
風速	P	有界對數常態分布	3.3
生長期	P	三角形	4.1
根系深度	P	均勻	4.2
植物轉移因子	P	截斷對數常態分布	4.3
家庭用水量	B, M	線性	5.1
戶外時間比	B	線性	5.2

^a P = 物理性參數, B = 行為參數, M = 代謝參數

2. 土壤與水文參數分布設定 (SOILS AND HYDROLOGY PARAMETER DISTRIBUTIONS)

2.1 體積含水量 (Volumetric Water Content)

模組使用：RESRAD-OFFSITE

描述：體積含水量為土樣中水的體積與土樣整體體積的比值。

單位：無因次

機率輸入形式：

分布：連續線性

各分布型態之定義值：(表 2.1-1)

討論：

計算主要污染源氬的通量(flux)採用覆蓋物之體積含水量作為依據。遠場受體區域(住宅區、農業區和牲畜飼料區)可被使用作為植物對土壤、肉類和牛奶的轉換因子並計算汙染濃度。

體積含水量為量測土樣之含水量，其範圍介於殘餘含水量至填滿土樣總孔隙之量。更進一步的討論於 3.2 和 3.3 節的附錄 C 所示(Yu et al., 2000)。影響土樣含水量之因子有土壤型態、當地排水情形和地理位置。缺乏特定點之資料推估可使用通用的分布。為了方便建模，針對受體區域 RESRAD-OFFSITE 假設當地排水良好。換句話說，假設之地區無水的

滯留。因此，體積含水量假設為該地區之田間容水量並發展預設參數分布。田間容水量土壤為在含水量飽和後，任其自然排水，待其停止時，所含之水量即稱之。以年作為單位，RESRAD-OFFSITE 將體積含水量和田間含水量視為相等是合理的。於此時間區間內，排水的發生對土地影響較大其中季節降雨也會造成變化。

為了描述土壤型態變化之機率分布(如表 2.1-2)所示。其中之分布不是一般常態分布就是對數常態分布。

表2.1-1 不同土壤型態之體積含水量累積機率分布

體積含水量	累積機率	體積含水量	累積機率
0.025	0.000	0.375	0.897
0.030	0.0002	0.40	0.934
0.040	0.003	0.425	0.961
0.047	0.010	0.45	0.979
0.056	0.028	0.48	0.991
0.070	0.070	0.53	0.999
0.080	0.104	0.56	1.000
0.10	0.175		
0.115	0.226		
0.13	0.272		
0.15	0.329		
0.29	0.705		
0.325	0.793		
0.35	0.849		

表2.1-2 不同土壤型態之體積含水量分布值

土壤型態	分布型態	平均值	標準差	最小值	最高值
砂土	LN(-2.83,0.241) ^a	0.0466	0.0106	0.0228	0.0907
壤質砂土	LN(-2.55,0.281)	0.0809	0.0224	0.0327	0.186
砂壤土	LN(-2.21,0.314)	0.116	0.0369	0.0417	0.291
砂質粘土壤	LN(-1.59,0.254)	0.212	0.0568	0.0933	0.449
壤土	LN(-1.68,0.300)	0.194	0.0609	0.0735	0.468
粉質壤土	Normal	0.252	0.0776	0.0119	0.491
泥土	Normal	0.236	0.0578	0.0575	0.415
粘質壤土	LN(-1.27,0.297)	0.292	0.0862	0.112	0.700
粉質粘壤土	Normal	0.347	0.0710	0.127	0.566
砂質黏土	LN(-1.23,0.210)	0.299	0.0623	0.153	0.559
粉質黏土	Normal	0.334	0.0678	0.124	0.543
粘土	Normal	0.340	0.0893	0.0638	0.615

^a LN(m,s) = 對數常態分布

來源: Meyer et al. (1997); Carsel and Parrish (1988).

對於未知土壤型態其分布的選用以個別土壤分類之權重平均作計算。而權重因子於原文使用手冊附件 C 之 3.1 討論(Yu et al., 2000)。權重平均之機率密度函數依據所感興趣範圍，選取連續函數作為權重平均之代表。針對一般土壤型態，(圖 2.1-1)為設定之體積含水量之累積分布函數。當一特定點進行分析時，應採用當地之土壤型態，為了滿足模式一致性，對於土壤型態對應之參數分布應考慮：土壤密度、總孔隙率、有效孔隙率、水力傳導係數及土壤參數 b 。

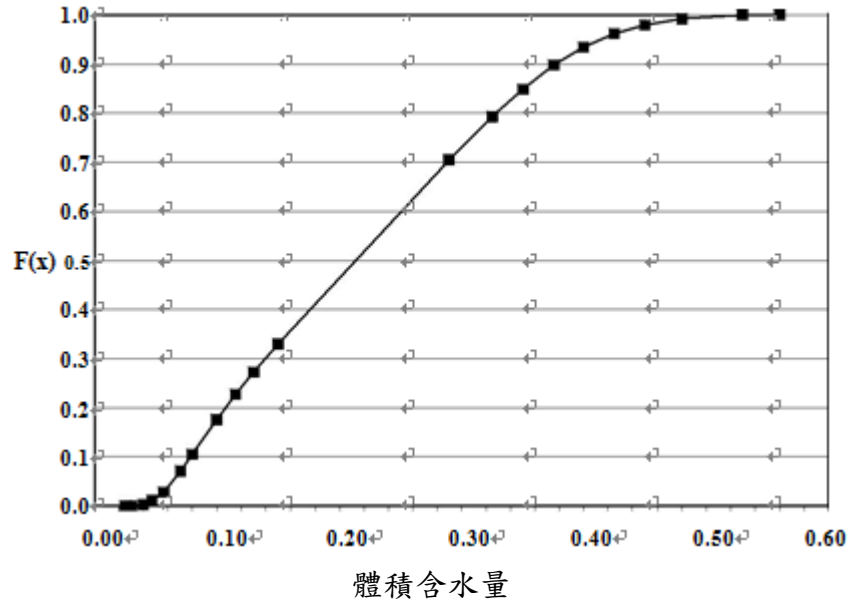


圖 2.1-1 體積含水量之累積分布函數

2.2 延散性(Dispersivity)

模組適用: RESRAD-OFFSITE

描述:

透過移流-延散方程式描述地下水系統的模式，其污染物於地下水系統之延散傳輸主要影響參數為延散係數(dispersion coefficient)。延散係數是由機械混合(mechanical mixing)與擴散兩現象所組成。對於較粗糙的物質如沙子，其由擴散所致的延散因相對影響很小事可以被忽略的。另一方面機械混合所致的延散可由孔隙介質的延散特性(動態延散性)量化其數值。

單位: 公尺 (m)

機率輸入形式:

分佈: 連續線型分佈

各分佈型態之定義值: 輸入值請見表 2.2-1 至表 2.2-3。

討論:

在未飽和含水層中，縱向延散性是與流線向下的方向有關。地下土壤的結構是很難被量化定義，不過卻會受到水文地質特性(如土壤延散性)而影響(Vervoort et al. 1999)。土壤延散性若不直接從現場量測取得，亦可透過線性方程式計算其縱向延散性。

$$\alpha_{LV} = 0.02 + 0.022 * D_u, \quad (2.2-1)$$

其中:

D_u = 未飽和層總深度(total depth of the unsaturated zone) (m).

上述方程式是透過電力研究機構(EPRI, 1985)於實驗室分析與現地資料迴歸所得出。實驗範圍之垂直刻度從0.23至20公尺，其相關係數為0.66。

另有其他類似的線性回歸方程式應用於MEPA程式中，於該程式中縱向延散性是假設為非飽和層厚度的百分之一 (Ho et al. 2002)。

美國環保局透過蒙地卡羅方法採樣非飽和層之厚度推導出縱向延散性分佈，該分佈彙總於表2.2-1與圖2.2-1，RESRAD-OFFSITE的預設非飽和層的縱向延散性也是採用該資料。

飽和層的延散性是分別由三個方向測量而出，分別為縱向 (the x direction) 水流的延散性、水平橫向(y direction)水流的延散性與垂直方向(z direction) 水流的延散性。

許多文獻研究指出在固定控制條件的實驗中延散性與均勻砂質材料有關。(Klotz and Moser, 1974)透過2500現地採樣，發現延散性會隨著顆粒尺寸大小與粒度分佈均勻係數而增加。較不均勻的物質(擁有較高的均勻係數)其延散性較高，其他土壤的物理參數，如顆粒形狀，顆粒的粗糙度，顆粒棱角，與緻密度也可影響其延散性，不過影響性較小。將所有的參數考慮進去，延散係數為土壤特徵值且與滲透率無關。

實驗室研究雖可得知不同因子影響飽和層的延散性，現地研究更可得知延散性實際的應用。實驗室中Gelhar et al. (1992)發現縱向延散性範圍0.1至10mm。現地實驗中縱向延散性大至100公尺，橫向延散性大至50公尺，並應用於數學模擬大污染物之傳輸研究中。(Gelhar et al. 1992).(Schulze-Makuch, 2005)透過Gelhar彙總的數據一些其他資料，發展出一經驗公式:

$$\alpha_L = c(L)^m, \quad (2.2-2)$$

α_L = 縱向延散性

L = 水流流動距離

c, m = 係數,

c, m係數會隨著不同的地質而改變。對於底泥的縱向延散性，Gelhar 與 Schulze-Makuch, m係數分別帶入0.11與0.7。這些數值亦可帶入2.2-2方程式計算出飽和層的縱向延散性。縱向延散性的數值一般較大水平延散性8倍，而較垂直延散性160倍。

美國環保局使用地區性現場模擬方式，產生飽和層縱向延散性累積分佈函數如表2.2-2與圖2.2-2，而相對應的水平延散性分佈與垂直延散性分佈則分別表列於表2.2-3與圖2.2-3、表2.2-4與圖2.2-4。

RESRAD-OFFSITE預設分佈即是使用上述資料作為一般分析運算的基礎。

表 2.2-1 非飽和層縱向延散性累積分佈

縱向延散性(m)	累積機率
0.0267	0.00
0.057	0.10
0.107	0.25
0.154	0.50
0.354	0.75
0.423	0.80
0.665	0.85
0.959	0.90
1	0.95
1	1.00

表 2.2-2 飽和層縱向延散性的累積分佈

縱向延散性(m)	累積機率
0.100	0.00
1.22	0.10
3.62	0.25
8.96	0.50
25.4	0.75
43.2	0.80
65.3	0.85
92.1	0.90
135	0.95
318	1.00

表 2.2-3 飽和層水平延散性累積分佈

水平延散性(m)	累積機率
0.0125	0.00
0.153	0.10
0.452	0.25
1.12	0.50
3.17	0.75
5.40	0.80
8.16	0.85
11.5	0.90
16.9	0.95
39.7	1.00

表 2.2-4 飽和層垂直延散性累積分佈

垂直延散性(m)	累積機率
0.0100	0.00
0.0100	0.10
0.0226	0.25
0.0560	0.50
0.158	0.75
0.270	0.80
0.408	0.85
0.576	0.90
0.845	0.95
1.99	1.00

資料來源: EPA (2003).

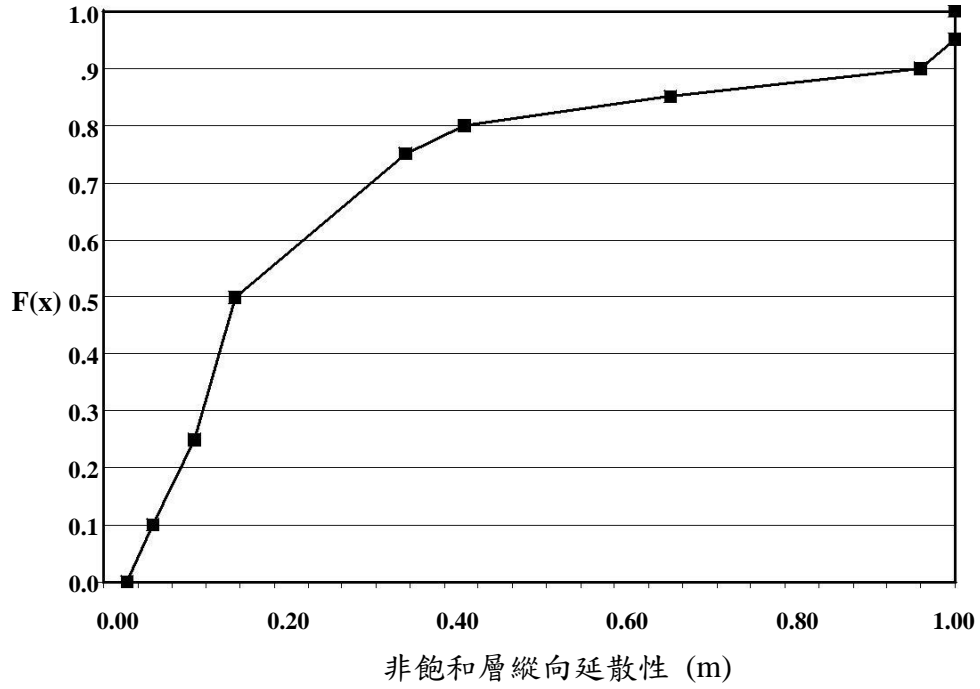


圖 2.2-1 非飽和層縱向延散性的累積分佈函數

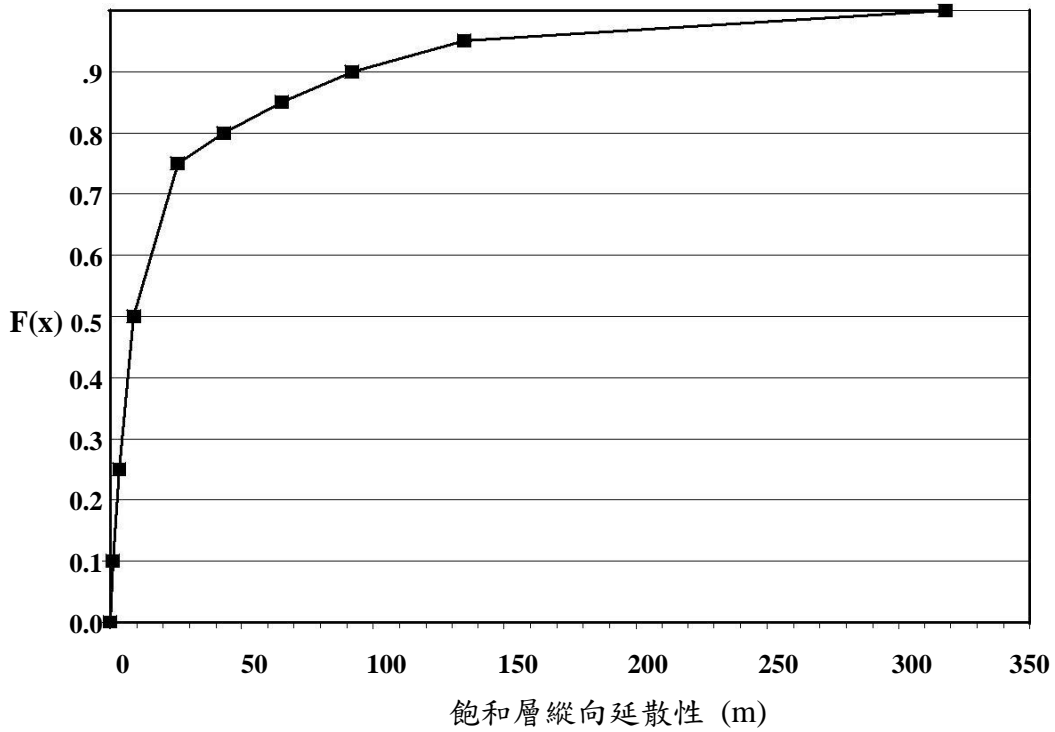


圖 2.2-2 飽和層縱向延散性的累積分佈函數

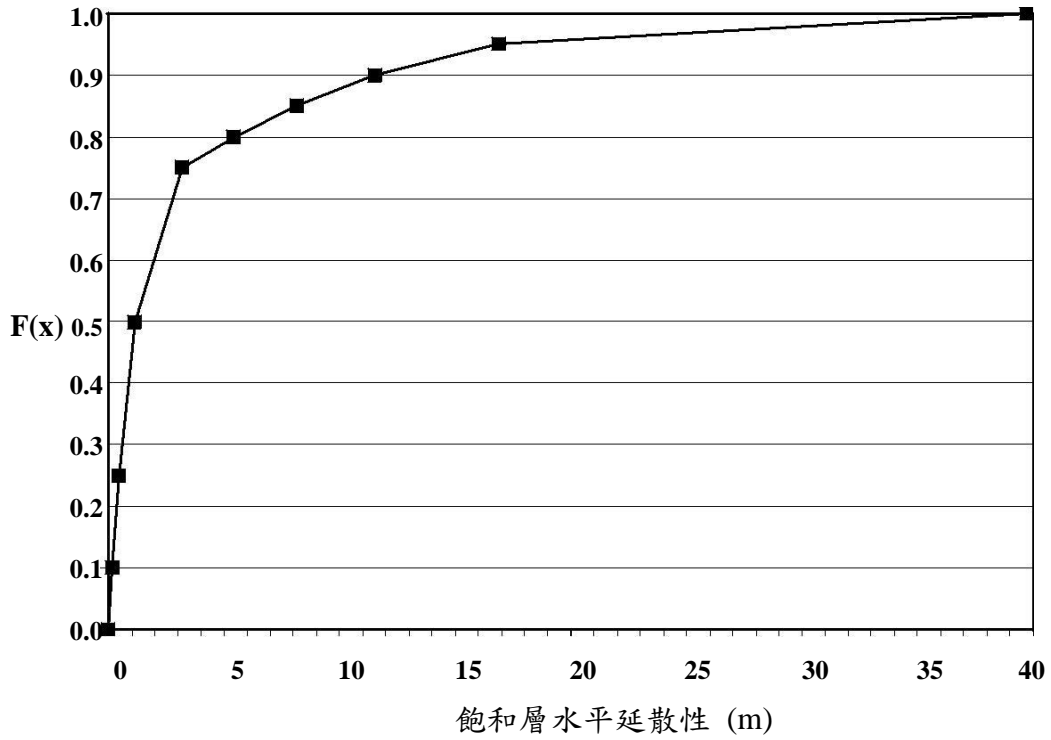


圖 2.2-3 飽和層水平延散性的累積分佈函數

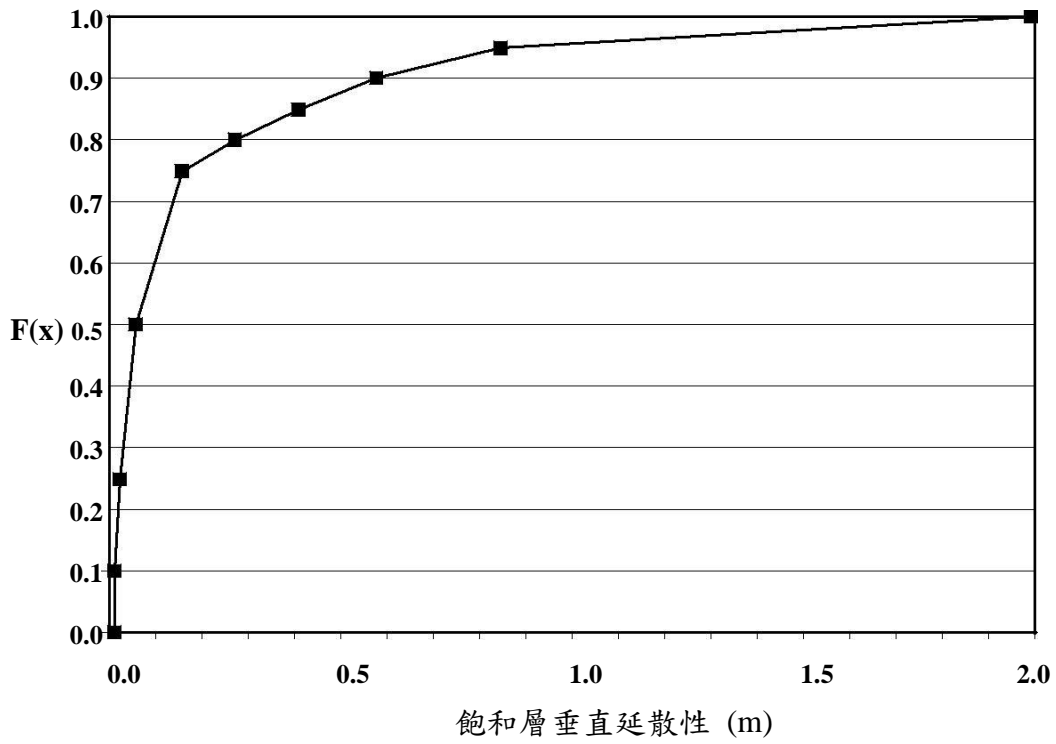


圖 2.2-4 飽和層垂直延散性的累積分佈函數

2.3 降雨沖蝕指數

模組適用: RESRAD-OFFSITE

描述: 降雨沖蝕指數是用來衡量降雨所造成的土壤流失。

單位: 無單位

機率輸入形式

分佈: 連續線型分佈

各分佈型態之定義值: 輸入值請見表 2.3-1

討論:

RESRAD-OFFSITE 採用土壤沖蝕速率(soil erosion rate)去計算主要污染區域上表面土壤的濃度。此濃度可用來計算放射性核種污染物至大氣及地下水釋放率，並計算器官吸入及土壤攝入的劑量。釋放至大氣的污染量亦可用來計算農業區及家畜區順風下之核種累積劑量。

RESRAD-OFFSITE 採用通用的土壤沖蝕方程式(USLE) (Wischmeier and Smith 1978) 計算土壤污染區域及農業區域土壤沖蝕速率。通用的土壤沖蝕方程式(USLE)多年來適用於水土保持規劃中對不同種植作物區域或管理系統計算其長期平均水土流失。

方程式(USLE)為:

$$A = RKLSCP, \quad (2.3-1)$$

A = 每年每單位面積之水土流失量 (tons/acre per yr)

R = 降雨和徑流因子

K = 土壤沖蝕指數;

LS = 坡長及坡度因子

C = 覆蓋與管理因子 (the cover and management factor)

P = P值 (the support practice factor).

其中土壤沖蝕指數、坡長及坡度因子、覆蓋與管理因子及P值將會在2.4章至2.7章節分別詳細介紹。

在通用的土壤沖蝕方程式中降雨沖蝕指數可是為方程式中的降雨和徑流因子(R)。降雨和徑流因子代表因降雨而致的沖蝕，並定義為降雨沖蝕單位數。而標準的降雨沖蝕指數是用來度量降雨及徑流所致沖蝕力。降雨沖蝕指數可利用(Wischmeier and Smith 1978; Shen and Julien 1993)發展的暴風式子計算:

$$R = 0.01 \sum EI, \quad (2.3-2)$$

E = 暴風動能 英尺-噸/英畝吋 (foot-tons per acre-inch)

I = 降雨強度 (英吋/小時),

暴風動能與降雨強度之關係可表示成:

$$E = 916 + 3311 \log_{10} I. \quad (2.3-3)$$

土壤沖蝕與土壤沖蝕方程式中場址特定參數具高度依賴性，區域的降雨沖蝕指數可由圖1 (Wischmeier and Smith, 1978)提供美國降雨沖蝕指數等高線圖。並提供全美國181地區5、20、50%機率分佈的降雨沖蝕指數。區域性的數值會隨著地區的每年的基礎資料而改變，考量數十年之影響模擬RESRAD-OFFSITE衝擊時，建議該指數使用長期平均數。

美國農業部(USDA)自然資源保護局 (NRCS) 已經公佈了1997年全國資源清查資料，其中資料庫記錄全美國超過800000地區，每個紀錄數據包含了通用的水土流失方程式中所需之參數，其資料是為一般土壤、水及相關資源的統計數據，並沒有涵蓋單獨獨立的農場

及田地數據。

從這些數據中，RESRAD-OFFSITE應用於全美國地區的降雨侵蝕指數分佈，其分佈數據如表2.3-1與圖2.3-1。

不過若是要得之特定區域中最合適的降雨沖蝕指數，仍建議詢問當地農業部門專家。

表 2.3-1 降雨侵蝕指數之累積分佈

降雨侵蝕指數	累積機率
5	0.000777
65	0.177
123	0.341
200	0.683
315	0.863
400	0.967
475	0.991
600	1.00

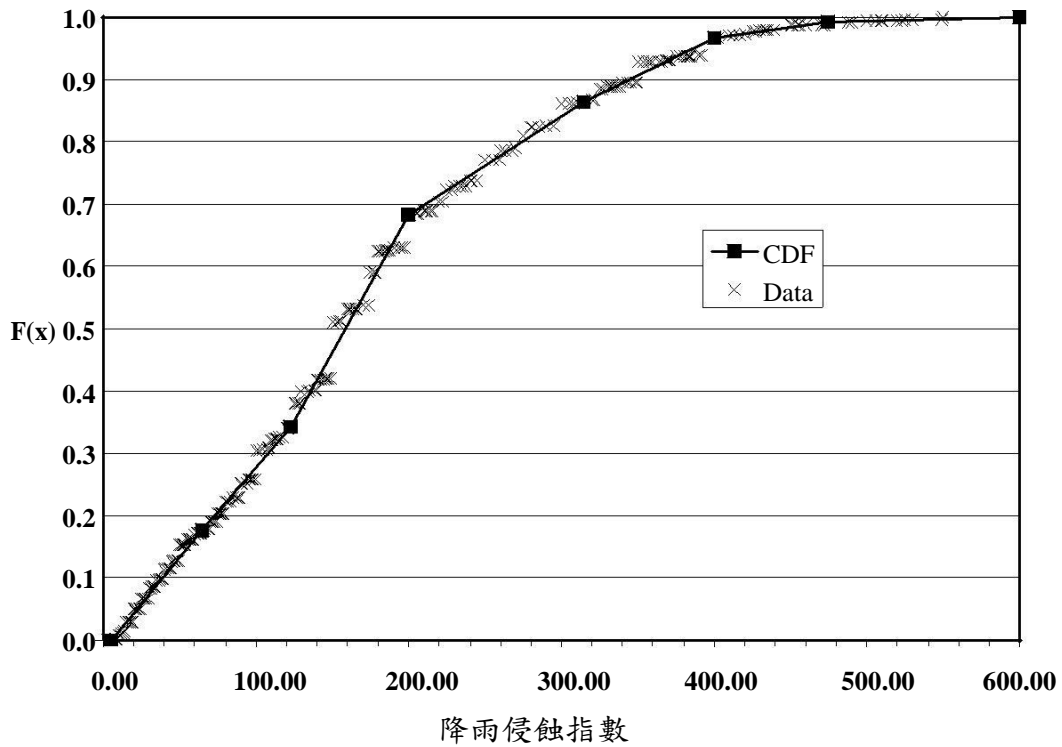


圖 2.3-1 降雨侵蝕指數之累積機率函數

2.4 土壤沖蝕指數

模組適用: RESRAD-OFFSITE

描述: 土壤沖蝕指數為量化土壤侵蝕過程之敏感度。

單位: 噸/英畝 (tons/acre)

機率輸入形式:

分佈: 連續線型分佈

各分佈型態之定義值: 輸入值請見表2.4-1

說明:

如上節2.3所述，土壤沖蝕指數(K)為土壤沖蝕方程式中參數。土壤沖蝕方程式作為RESRAD-OFFSITE程式中，計算主要污染地區的土壤沖蝕，其土壤沖蝕速率則用來計算放射性核種污染物至大氣及地下水釋放率，並計算器官吸入及土壤攝入的劑量。釋放至大氣的污染量亦可用來計算農業區及家畜區順風下之核種累積劑量。

土壤於特定地區的內在特性會影響土壤沖蝕速率，例如土地坡度，覆蓋率，降雨與徑流。土壤沖蝕速率亦會由相關的土壤特性如顆粒尺寸分佈，土壤質地，滲透性及有機物含量所改變。兩個不同有機物含量的沖蝕指數數據表列於表 2.4-2。更詳細有關沖蝕指數，如利用列線圖(Nomograph)來決定其因子或其他之研究可參考(Wischmeier and Smith, 1978)與(Renard et al., 1997)之研究。

美國農業部(USDA)自然資源保護局(NRCS)已經公佈了1997年全國資源清查資料，其中資料庫記錄全美國超過800000地區，每個數據紀錄包含了通用的土壤沖蝕方程式中所需之參數，其資料是為一般土壤、水及相關資源的統計數據，並沒有涵蓋單獨獨立的農場及田地數據。從這些數據中，發展出RESRAD-OFFSITE程式中涵蓋全美國地區的沖蝕指數分佈，其分佈數據如表2.4-1與圖2.4-1。不過若是要得之特定區域中最合適的沖蝕指數，仍建議詢問當地農業部門專家。

表 2.4-1 土壤沖蝕指數之累積分佈

土壤沖蝕指數 (噸/英畝)	累積機率
0.01	1.99×10^{-6}
0.08	0.00495
0.15	0.107
0.25	0.364
0.37	0.869
0.43	0.961
0.49	0.996
0.64	1.00

表 2.4-2 不同有機物含量之土壤沖蝕指數(噸/英畝)

質地分類	有機物質含量	
	0.5%	2%
細砂	0.16	0.14
極細砂	0.42	0.36
壤質砂土	0.12	0.1
壤質極細砂	0.44	0.38
沙壤土	0.27	0.24
極細沙壤土	0.47	0.41
粉質壤土	0.48	0.42
粘壤土	0.28	0.25
粉質粘壤土	0.37	0.32
粉質粘土	0.25	0.23

資料來源: Shen and Julien (1993).

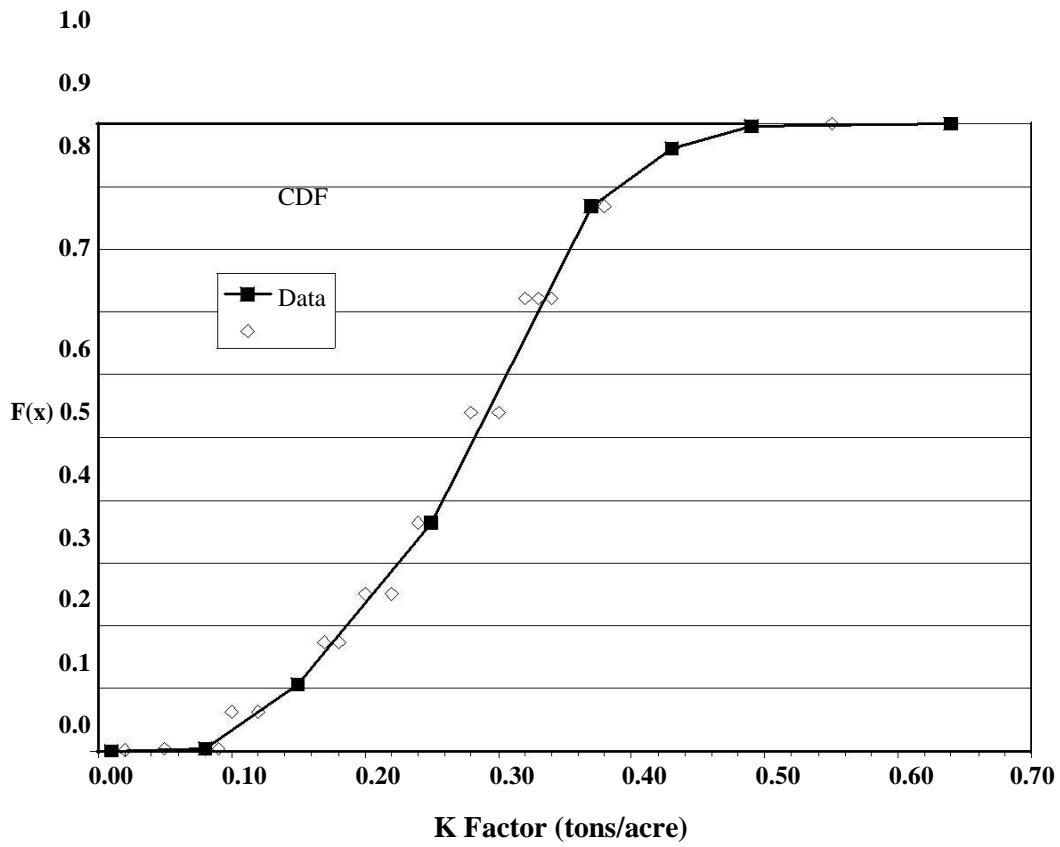


圖 2.4-1 土壤沖蝕指數之累積機

2.5 坡長及坡度因子(Slope Length-Steepness Factor)

模組應用：RESRAD-OFFSITE

應用描述：坡長及坡度因子考慮侵蝕過程中地形坡度的波長及坡度因子之影響。

單位：無因次

機率密度輸入值：

分布型態：連續線性

分布機率之定義請見於表 2.5-1

討論：

坡長及坡度因子(LS)為 USLE 公式的一部分並於本章 2.3 節已討論。將其嵌入 RESRAD-OFFSITE 可估計於主要受污染地區土壤侵蝕量。土壤侵蝕率被使用在主要污染地區表層土壤污染濃度推估，計算出來的濃度用於估計放射性核素污染物釋放到大氣和地下水，也可用於計算體外受體吸入和土壤吸收之劑量。被釋放到大氣中的污染物被用來估計順風處農業及家畜飼料地區的放射線核素累積量。

坡長及坡度因子為每單位面積損失之土壤的比例。一般所考慮的地形因子(LS)，即為坡長因子和坡度因子的結合。坡長因子為現地土壤流失對 72.6 英尺坡長之比 (Wischmeier and Smith 1978)，如下：

$$L = \left(\frac{\lambda}{72.6}\right)^m$$

其中

λ = 現地坡長(ft)

$m = 0.2$ (當坡度 $<1\%$)； 0.3 (當坡度 $1\% \sim 3\%$)； 0.4 (當坡度 $3.5\% \sim 4.5\%$)； 0.5 (當坡度 $\geq 5\%$)。坡度百分比之定義為(垂直距離比水平距離) $\times 100$ 。

表2.5-1 坡長及坡度因子之累積分布

坡長及坡度因子	累積積率分布
0.0316	0.000206
0.15	0.301
0.30	0.566
0.60	0.745
1.5	0.893
5.00	0.978
20.0	0.998
49.2	1.00

坡度因子(S)的評估 (Wischmeier and Smith 1978)：

$$S = 65.41\sin^2\theta + 4.56\sin\theta + 0.065,$$

其中， θ = 角度 = $\tan^{-1}\left(\frac{\text{坡度百分比}}{100}\right)$

坡長及坡度因子(LS)由式 2.5-1 和式 2.5-2 結合聯合運算：

$$LS = \left(\frac{\lambda}{72.6}\right)^m (65.41\sin^2\theta + 4.56\sin\theta + 0.065)$$

另外，關於適當的 L 與 S 值皆可由 Wischmeier and Smith (1978) and Renard et al. (1997) 計算獲得，其中包含不規則坡度或不同之土壤型態皆可做調整。另外，m 值皆為平均值為式 2.5-1 所用。Renard *et al.* (1997) 提供更精確現地坡度 m 值。

USDA 的 NRCS 以投稿 1997 年的自然資源調查，其中資料庫包含 80 萬個位於美國的地點，而每個值皆可作為 USLE 的參數使用。資料庫的值被設計為一般情況下的統計分析型態，並且統計形態趨勢考慮土壤、水及相關資源，其中農場及一般場域皆不被考慮。於 RESRAD-OFFSITE 中坡長及坡度百分比之值為預設分布值並使用於式 2.5-3。分布值列表於表 2.5-1 和圖 2.5-1。藉由式 2.5-3 可知點位坡長及坡度因子之適當分布值。

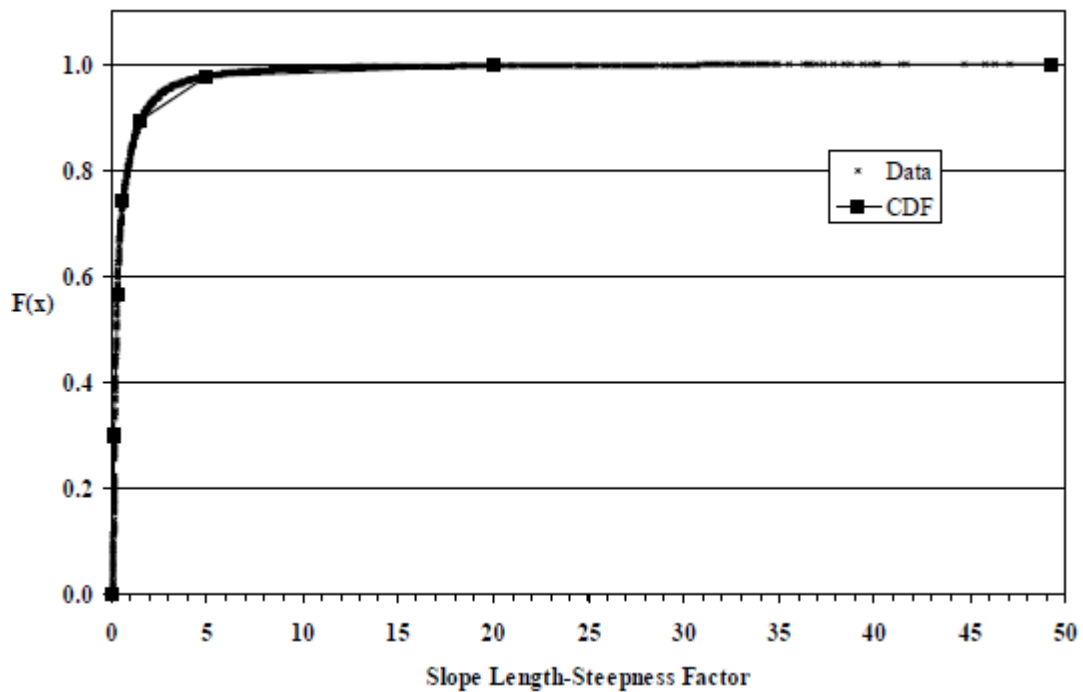


圖 2.5-1 坡長及坡度因子累積分布方程式

2.6 覆蓋與管理因子 COVER AND MANAGEMENT FACTOR

應用模組：**RESRAD-OFFSITE**

描述：覆蓋與管理因子主要考慮直披種植方法、作物輪作、殘餘作物管理和污染區覆蓋率保護土壤侵蝕情形。

單位：無因次

輸入機率：

分布型態：連續線性

機率分布定義值請見於表 2.6-1

討論：

覆蓋與管理因子為 USLE 公式其中部分並已討論於 2.3 節。將其嵌入 RESRAD-OFFSITE 可估計於主要受污染地區土壤侵蝕量。土壤侵蝕率被使用在主要污染地區表層土壤污染濃度推估，計算出來的濃度用於估計放射性核素污染物釋放大氣和地下水，也可用於計算體外受體吸入和土壤吸收之劑量。被釋放大氣中的污染物被用來估計順風處農業及家畜飼料地區的放射線核素累積量。

表2.6-1 覆蓋與管理因子之累積分布

覆蓋與管理因子	累積機率
0.00001	3.17×10^{-6}
0.020	0.327
0.085	0.421
0.149	0.519
0.284	0.845
0.400	0.961
0.550	0.991
1.000	1.00

覆蓋與管理因子覆蓋和管理效應是密切相關的，因為目前覆蓋的類型是依賴於土地的管理方式。種植方式可以輪作作物、連續為主或是土地休耕等方式。耕作的表面粗糙度的表面和不同程度上以種子床的準備界定包括各種級別之先前作物或其他植物殘留。收成時會留下一定量之殘留物直到下一次耕作，而土地可能成為非管理地區。

覆蓋與管理因子考慮的因子影響中，其定義耕作土壤的流失率在一定情況下具有自淨之能力(Wischmeier and Smith 1978)。牧場和森林地之覆蓋與管理因子建議值如表 2.6-1 和表 2.6-3。更多有關農地推估因子可見於 (Wischmeier and Smith,

1978; Renard *et al.*, 1997)。

USDA 的 NRCS 已發表研究於 1997 年的 National Resources Inventory，其中包含位於美國之 80 萬個點資料，而每一個紀錄值皆適用 USLE 的參數。因為此資料庫被設計為一般情況下之土壤、水和相關資源的統計分析但對於個別之農地條件並無明確界定。從這些資料中 RESRAD-OFFSITE 模組已發展全美國之覆蓋與管理因子的預設機率分布，如表 2.6-1 和圖 2.6-1。然而一個較適當之因子選定還是有賴於當地之專家學者鑑定。

表2.6-2 牧場(pasture, range)和閒置地區覆蓋與管理因子(C)表

植披覆蓋		接觸土壤表層之覆蓋率						
		地表覆蓋率						
類型高度 ^b	覆蓋百分比 ^c	類型 ^d	0	20	40	60	80	95+
無感覆蓋		G	0.45	0.20	0.10	0.042	0.013	0.003
		W	0.45	0.24	0.15	0.091	0.043	0.011
平均掉落高度20英尺雜草								
與矮灌木叢	25	G	0.36	0.17	0.09	0.038	0.013	0.003
		W	0.36	0.20	0.13	0.083	0.041	0.011
	50	G	0.26	0.13	0.07	0.035	0.012	0.003
		W	0.26	0.16	0.11	0.076	0.039	0.011
	75	G	0.17	0.10	0.06	0.032	0.011	0.003
		W	0.17	0.12	0.09	0.068	0.038	0.011
有感高度之灌木叢掉落高度6.5英尺								
	25	G	0.40	0.18	0.09	0.040	0.013	0.003
		W	0.40	0.22	0.14	0.087	0.042	0.011
	50	G	0.34	0.16	0.08	0.038	0.012	0.003
		W	0.34	0.19	0.13	0.082	0.041	0.011
	75	G	0.28	0.14	0.08	0.036	0.012	0.003
		W	0.28	0.17	0.12	0.078	0.040	0.011
樹木與灌木叢最低掉落高度13英尺								
	25	G	0.42	0.19	0.10	0.041	0.013	0.003
		W	0.42	0.23	0.14	0.089	0.042	0.011

50	G	0.39	0.18	0.09	0.040	0.013	0.003
	W	0.39	0.21	0.14	0.087	0.042	0.011
75	G	0.36	0.17	0.09	0.039	0.012	0.003
	W	0.36	0.20	0.13	0.084	0.041	0.011

- ^a C值之假設為植被與泥土有機質隨機分布於全區
- ^b 覆蓋高度假定為平均掉落高度，其從覆蓋高度至地面。如果掉落高度超過33英尺即可忽略覆蓋率影響。
- ^c 全區覆蓋比例可很被遮蓋之部分。
- ^d G：草類植被之覆蓋至少2英吋深
W：表面覆蓋幾乎為落葉
- 來源：Wischmeier and Smith (1978)

表2.6-3 不受外界干擾之森林之覆蓋與管理因子(C)

樹木與灌木之覆蓋比率	至少 2 英吋深之落葉覆蓋比	因子(C)
100-75	100-90	.0001-.001
70-45	85-75	.002-.004
40-20	70-40	.003-.009

- ^a 最小有效覆蓋少於 40% 或林冠披覆少於 20% 之區域即可使用表 2.6-2。林地做放牧用、收成後或森林大火過後也可使用表 2.6-2。
- ^b 放牧區所使用的 C 值決定於有效之林冠高度變化。
- 來源：Wischmeier and Smith (1978)

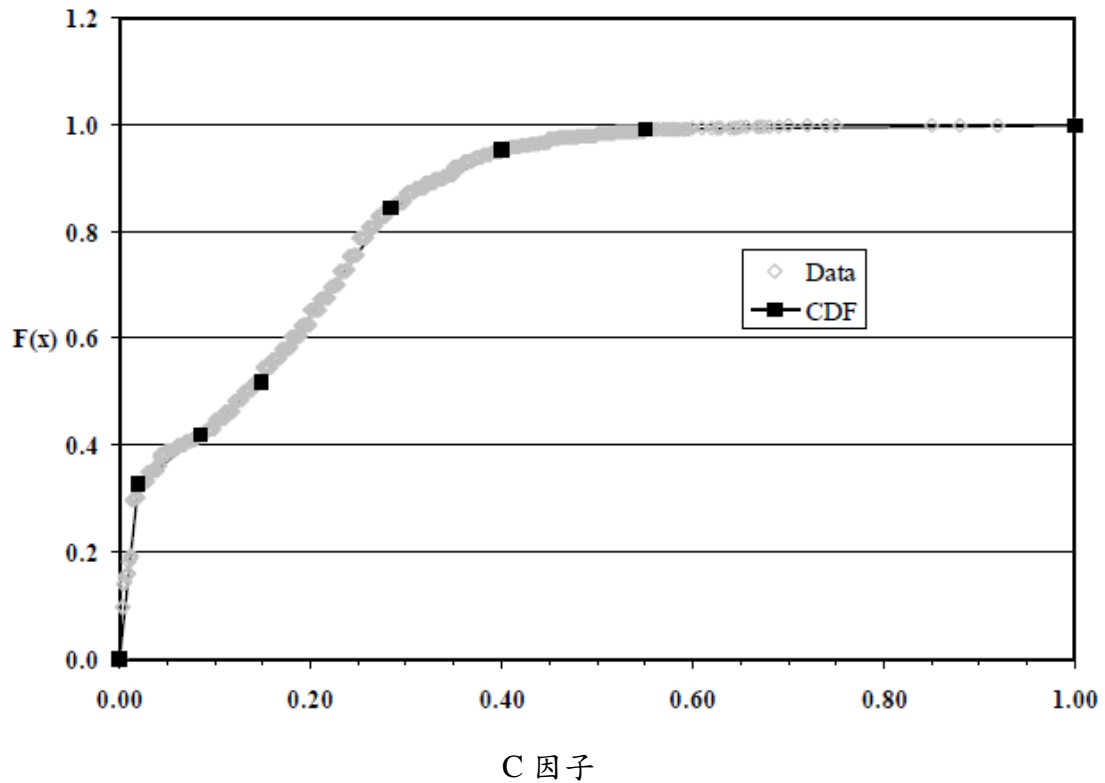


圖 2.6-1 累積分布之覆蓋與管理因子

2.7 P 值(SUPPORT PRACTICE FACTOR)

應用模組：RESRAD-OFFSITE

描述：P 值考慮污染區域之帶狀種植，和梯田土壤侵蝕的影響。

單位：無因次

輸入機率：

機率分布：連續線性

機率分布定義值可見於表 2.7-1

討論：

P 值為 USLE 公式其中部分並已討論於 2.3 節。將其嵌入 RESRAD-OFFSITE 可估計於主要受污染地區土壤侵蝕量。土壤侵蝕率被使用在主要污染地區表層土壤污染濃度推估，計算出來的濃度用於估計放射性核素污染物釋放到大氣和地下水，也可用於計算體外受體吸入和土壤吸收之劑量。被釋放到大氣中的污染物被用來估計順風處農業及家畜飼料地區的放射線核素累積量。

P 值之定義為上坡及下坡耕作之土壤流失比(Wischmeier and Smith, 1978)。因此，P 值包含帶狀種植、梯田。作物輪作，其殘留作物的量和其他作物於此並不考慮，因為此部分只考慮部分覆蓋與管理因子，如 2.6 節所示。

表2.7-1 P值之累積機率分布

P 值	累積機率
0.25	0.00170
0.45	0.00821
0.55	0.0379
0.6	0.0604
0.75	0.0715
0.99	0.0782
1	1

耕作和種植之等值線已證明是在斜坡上最有效的在 38% 的範圍內(Wischmeier and Smith, 1978)，對於較小坡度而言，其坡度以等高線坡度為主；對於較大坡度時，等高線橫向情形是不理想的(contour row capacity)。一場降雨事件，滯洪池之功能其坡的長度是有效影響等值線的特性。如果橫向輪廓遭超量的水破壞，更多的土壤可能會丟失比如果橫向是面向向上和向下的斜坡。依據不同之坡度百分比和坡長所對應之 P 值如表 2.7-2。當採用帶狀種植，這種做法比單獨輪廓更有效，涉及交替的草皮和中耕作物或輪廓上小雜糧帶之 P 值，如表 2.7-3 所示。梯田可以進一步減少侵蝕，並能與其他做法，如考慮與覆蓋與管理因子相結合，如 2.6 節。更多相關資料可見於 Wischmeier 和 Smith (1978) 和 Renard *et al.* (1997)。

表2.7-2 P值和坡長限制

坡度比	P 值	最大坡長(ft ^a)
1 to 2	0.60	400
3 to 5	0.50	300
6 to 8	0.50	200
9 to 12	0.60	120
13 to 16	0.70	80
17 to 20	0.80	60
21 to 25	0.90	50

^a如果作物幼苗後殘留蓋會經常超過 50%，限制可能會增加 25%。

來源：Wischmeier and Smith (1978)

表2.7-3 帶狀種植之最大帶狀寬度和坡長限制之P值

坡度比	P值 ^a			帶狀寬度 (英尺) ^b	最大坡長 (英尺)
	A	B	C		
1 to 2	0.30	0.45	0.60	130	800

3 to 5	.25	.38	.50	100	600
6 to 8	.25	.38	.50	100	400
9 to 12	.30	.45	.60	80	240
13 to 16	.35	.52	.70	80	160
17 to 20	.40	.60	.80	60	120
21 to 25	.45	.68	.90	50	100

^a P 值：

A：四年期之中耕作物，小顆粒與草甸幼苗，兩年期之草地，後者可取代前者。

B：2 年中耕作物之四年輪植、冬季穀物和 1 年期的草地。

C：帶狀中耕作物和小粒

^b 調整帶狀種植寬度限制，以適應寬度的農業設備。

來源：Wischmeier and Smith (1978)

美國農業部的 NRCS 已經公佈了 1997 年全國資源清查 (2001 USDA)，其中包含與該範圍內超過 80 萬個地點的數據資料庫每個記錄都包含在 USLE 的參數值。由於數據庫是專為涉及土壤，水和相關資源的總體狀況和發展趨勢的統計分析，個體農場和田地都沒有確定。從這些資料，P 值因子之分配已於 RESRAD-OFFSITE 發展成功，並提供了一個全國之覆蓋率。其分佈列於表 2.7-1 及圖 2.7-1 所示。一地區特定的 P 值因子分佈應與專家或在當地的國家農業技術推廣辦公室協商，以確保其正確性。

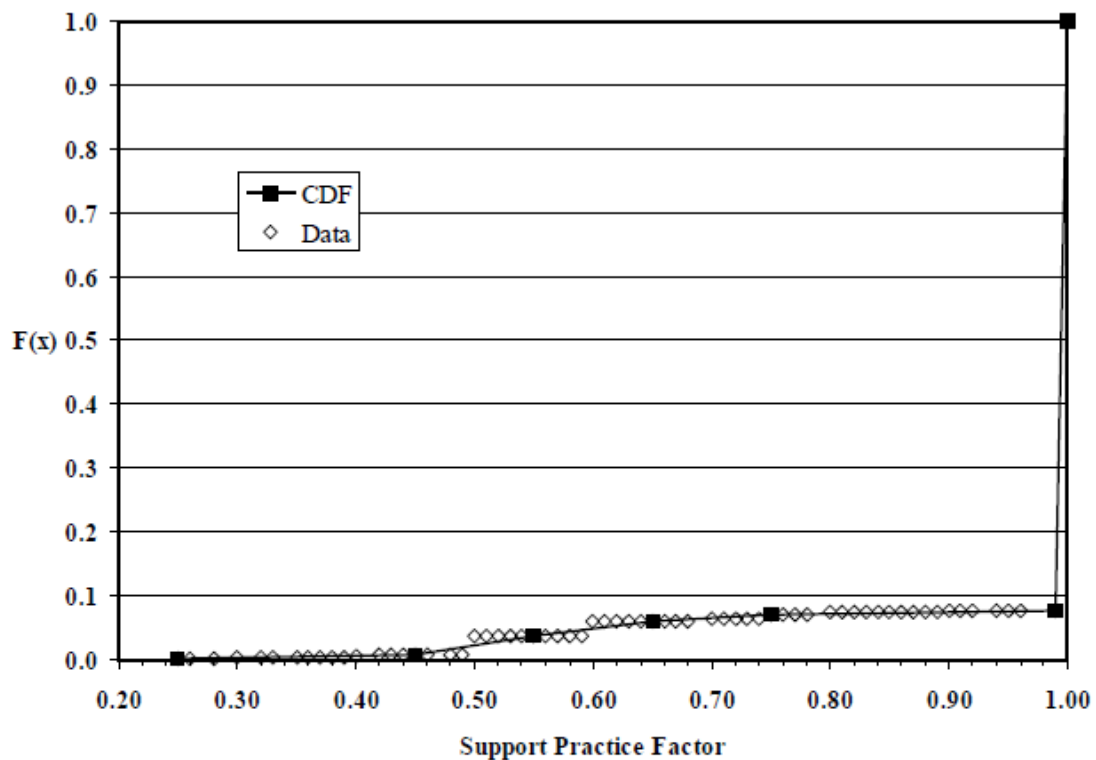


圖 2.7-1 累積機率分布之 P 值

2.8 土壤混和層深度(DEPTH OF SOIL MIXING LAYER)

應用模組：RESRAD (onsite), RESRAD-OFFSITE

描述：土壤混合層參數的深度用在土壤混合層參數的深度被用來在計算深度因子的灰塵吸入和土壤攝取途徑和用於葉面沉積的攝入途徑葉面沉積途徑。

單位：公尺

輸入機率分布：

分布：三角形

機率分布值之定義：

最小：0.0；最大：0.6；最有可能：0.15

描述：深度因子視為土粒於地表被污染的比例。計算之前提為假設更上層之土壤層土壤與污染物混合，其厚度等於土壤混合層之厚度。

上部土層之混合可能通過大氣（風或降雨/徑流）和機械性之干擾。對於一個農民住宅方案中，因機械干擾一般受影響深度最大。這些干擾包括使用農業設備（例如，犁耕）和腳和車輛通行。在土地相對未受干擾的部分，混合層深度接近 0 之預期。另一方面，對土地進行定期耕翻和其他農業活動的作物生產部分，混合土壤深度約 0.6 公尺。

作物生產耕作之土壤應盡可能淺，滿足曝氣土壤之目標，控制雜草，結合肥料，控制土壤被侵蝕，並提供合適的苗床和根床 (Buckingham, 1984) 的目標。典型犁的深度是 0.15~0.20 米(6~8 英寸)的順序。然而，犁田造成土壤之壓實，每年可視為相同的深度(Buckingham 1984)。此壓密層應盡量翻土並耕至較深的深度，以便讓空氣和水的流動更加容易。較深的耕作類型應下降到約 0.6 米(23 英寸)，即可一般使用市售設備來實現。因此，土壤混合層深度預計將介於 0~0.6 米的農民住宅。三角形分佈在這兩個值之間的最可能的值的土壤混合層，以 0.15 米(6 英寸)，以此用於 RESRAD 作為一個近似值，因為耕作和耕作型態之土地利用百分比分別影響土地和耕作深度。對於混合土壤層之機率密度函數型態，如圖

2.8-1。

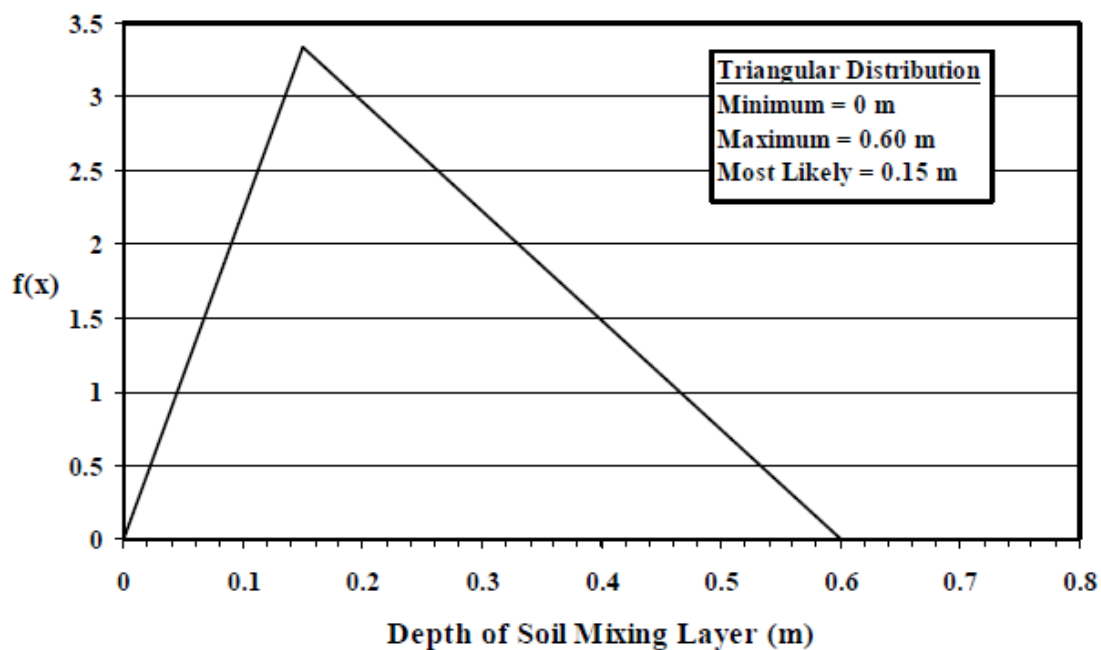


圖 2.8-1 混合土壤層深度之機率密度分布

特定土地利用之地區皆有個別的值，最小深度接近 0 m 在農業領域可以應用。在過去的二十年中，休耕的做法日益普及其好處減少土壤顆粒物質排放和侵蝕，提高了土壤有機質含量，增加水分含量以利植物吸收，並減少二氧化碳排放量 (USDA 2002)。

耕作小於 0.6m 是有可能的，但它被認為是非標準的做法 (Dunker *et al.*, 1995; Allen *et al.*, 1995)。一般商用設備對於耕作深度到達 1.2 公尺是可行的 (Dunker *et al.*, 1995)。其中一個試圖用混合的結果對策，為了減少食品污染，Chernobyl 地區採用的是深耕 (Konoplev *et al.*, 1993; Vovk *et al.*, 1993)。深耕被認為是前蘇聯恢復受放射性核素污染之農業區，其犁田深度約 0.6~0.75 不等 (Vovk *et al.*, 1993)。

2.9 蒸發散係數(EVAPOTRANSPIRATION COEFFICIENT)

應用模組：RESRAD (onsite), RESRAD-OFFSITE

描述：蒸發散係數為水分經由轉換至大氣中與原來總水體積的比值。

單位：無因次

輸入機率：

分布：均勻

討論：

蒸發散係數 C_e 如下：

$$C_e = \frac{ET_r}{(1 - C_r)P_r + IR_r}$$

其中

ET_r =蒸發散率 (m/yr)

P_r =降雨量 (m/yr)

IR_r =灌溉 (m/yr)

C_r =逕流係數

此參數和某些其它的輸入參數使用於 RESRAD-OFFSITE，例如：降水率，灌溉率和徑流係數，在主要污染區中(農業、家畜飼料區及住宅區)，根據質量守衡以確定水的深層滲透速率。位於深層土壤之水的滲透率最終採用放射線浸出率從此地區最上層土壤開始計算其污染範圍並且計算至地下水系統。RESRAD(現場)只著眼於主要污染區域之滲透速率。

蒸發的過程，由此液體被轉化為水蒸汽和從蒸發表面移除，改變水分子的狀態從液體到蒸氣需要能量。一旦水分子蒸發，介於蒸發表面和周圍大氣之間的壓差會

從蒸發除去表面的水蒸汽。因此，太陽輻射，空氣溫度，空氣濕度和風速的氣候參數評估蒸發過程時需要考慮的。另外，在土壤表面作物冠層遮蔭程度和水蒸發表面的量也需要加以考慮。

葉面蒸發包含在植物組織中的液體水的汽化和蒸汽脫離至大氣中。幾乎所有的水分吸收被蒸散，只有一小部分留在植物體內。植物蒸發方式有，如直接蒸發或依賴於能源供應，蒸汽壓力梯度及風的影響。此外，土壤含水量和植物根抓住水的能力，也決定了蒸發散率。不同種類的植物其植物蒸發散率(蒸騰)皆不同，不僅不同種類之作物，還需考慮作物的生長、環境及對環境的管理等因素。

蒸發散和植物蒸發散其發生的時間是一致的，很難做分辨。當作物是尚小，水的蒸發損失由土壤決定，但一旦作物發達並完全覆蓋土壤，蒸騰作用變成主要過程。蒸散量的蒸發從土壤表面和蒸騰從植被總和起來。蒸發散的速率為每單位時間的長度來表示(mm/d 或 m/yr)。

由於獲得精確的現場測量的難度，蒸散率通常從氣象數據計算。許多公式由不同之研究人員發展而得，但其中一些只在特定的氣候和農業條件下有效。1990年5月舉行的一次專家協商會議結果，聯合國糧食和農業組織(FAO)採用了的Penman-Monteith公式相結合的方法來計算不同的栽培管理條件下，蒸散率對不同類型的作物(Allen *et al.*, 1998)。該方法包括使用一個參考蒸散率(ET_0)和作物係數(K_c)來計算蒸散率特定作物(ET_c)。參考作物被定義為假設作物高 0.12 公尺，表面 resistance 為 70 (s/m)，同時反照率為 0.23，這樣的假設與一般均勻高度之綠草極為相似。

ET_0 為參考作物於標準下之蒸發散率，即沒有壓力，充分澆水之生長狀況。 K_c 是 ET_0 如果一個修正係數，佔特定作物和參考作物之間的物理和生理上的差異。它也可以包含一個調整到佔實際生長狀況的標準條件下的偏差，諸如水和鹽水彼此的壓力、低種植密度、環境因素和管理實踐。由 ET_0 和 K_c 的乘積可得 ET_c 。表 2.9-1 列出蒸散的不同農業氣候地區的平均值(ET_0)。 ET_0 為考慮生長季之每日蒸發散量。在不受任何外力干擾下，針對不同生長階段和不同作物之 K_c 值列表，如表 2.9-2 (Allen *et al.*, 1998)。於生長階段中期的 K_c 值大於初始即發展階段。因為在中期階段，作物完全長大，並通過葉面蒸騰更多的水。當資料缺失季節性的 K_c ，在最後一列平均 K_c 的考慮為不同發育階段的持續時間，當作在不同階段的持續時間的信息，或 K_c 的簡單平均。表 2.9-3 列出四種不同之作物其 K_c 的範圍值及平均值，同時考慮生長期時的情況代入 RESRAD-OFFSITE。通過累加個別的 K_c ，其平均超過所有不同之作物，並列出不同的作物 K_c 值。

K_c 和 $K_{c,avg}$ 值呈現標準生長條件下的值。於實際環境中，土壤條件有別於標準條

件，由於不利的環境設置或較差的田間管理，如土壤鹽度和水短缺的問題。因此，為了得到較正確之 Kc 值考慮應力係數 Ks 是必須的。雖然沒有簡單直接的方法是通過糧農組織(Allen *et al.*, 1998)估計 Ks 的，一般規定，0.5 和 1 之間的值可以選擇，以 0.5 表示非常貧瘠的土壤條件，1 表示優良，適宜條件。

表2.9-1 不同之農業氣候區域之平均ET₀值

區域	每日平均溫度 (°C)		
	冷 ~10°C	適中 20°C	熱 > 30°C
熱帶與亞熱帶			
潮濕和半潮濕	2 - 3	3 - 5	5 - 7
乾燥和半乾燥	2 - 4	4 - 6	6 - 8
溫帶地區			
潮濕和半潮濕	1 - 2	2 - 4	4 - 7
乾燥和半乾燥	1 - 3	4 - 7	6 - 9

來源：Allen *et al.*, (1998), Table 2.

表2.9-2 不受外力干擾及良好管理之 $K_{c,avg}$

作物	作物成長階段 (d)								$K_{c,avg}^d$
	$K_{c,ini}^a$	$K_{c,mid}^b$	$K_{c,end}^c$	Init. (Lini)	Dev. (Ldev)	Mid (Lmid)	Late (Llate)	Total	
果類和豆類									
蘋果、櫻桃、梨	1	1	1	23 ^e	63 ^e	113 ^e	40 ^e	239	0.86
杏、桃、核果	0.58 ^f	1.03	0.76	23 ^e	63 ^e	113 ^e	40 ^e	239	0.82
香蕉	0.5	1.1	1	120	90	120	60	390	0.76
哈密瓜	0.5	0.85	0.6	20	52.5	30	17.5	120	0.6
柑橘類水果(無地面覆蓋)	0.62	0.57	0.83	60	90	120	95	365	0.66
柑橘類水果(積極地面覆蓋)	0.8	0.78	0.8	60	90	120	95	365	0.79
葡萄	0.3	0.78	0.45	22.5	50	81.25	55	209	0.53
奇異果	0.4	1.05	1.05						0.83
橄	0.65	0.7	0.7	30	90	60	90	270	0.68
鳳梨	0.5	0.4	0.4	60	120	600	10	790	0.42
開心果	0.4	1.1	0.45	20	60	30	40	150	0.58
草莓	0.4	0.85	0.75						0.67
甜瓜	0.5	1.05	0.75	25	37.5	55	21.25	138.8	0.76
西瓜	0.4	1	0.75	15	25	25	30	95	0.67
核桃	0.5	1.1	0.65	20	10	130	30	190	0.93
穀物									

大麥	0.3	1.15	0.25	25	36.7	55.8	31.7	149	0.61	
玉米	0.3	1.2	0.48	26	40	48	35	148	0.63	
甜玉米	0.3	1.15	1.05	22	29	31	29	111	0.73	
粟	0.3	1	0.3	18	28	48	30	123	0.57	
燕麥	0.3	1.15	0.25	25	36.7	55.8	31.7	149.2	0.61	
梁	0.3	1.13	0.8	20	35	42.5	30	127.5	0.69	
春小麥	0.3	1.15	0.33	25	36.7	55.8	31.7	149.2	0.62	
冬小麥	0.55	1.15	0.33	131	272	61.7	28.3	493	0.61	
無葉植物										
朝鮮薊	0.5	1	0.95	30	33	250	30	343	0.90	
蘆筍	0.5	0.95	0.3	70	30	150	48	298	0.69	
干豆和豆類	0.4	1.15	0.35	20	26.7	35	20	101.7	0.65	

表2.9-2 (續1)

作物	作物生長階段 (d)								
	K _{c,ini} ^a	K _{c,mid} ^b	K _{c,end} ^c	Init. (L _{ini})	Dev. (L _{dev})	Mid (L _{mid})	Late (L _{late})	Total	K _{c,avg} ^d
豆類	0.5	1.05	0.9	17.5	27.5	27.5	10	82.5	0.73
甜菜	0.5	1.05	0.95	20	27.5	22.5	10	80	0.71
蘿蔔	0.7	1.05	0.95	27	40	63	23	153	0.58

薯類一年期	0.3	0.8	0.3	20	40	90	60	210	0.51
薯類二年期	0.3	1.1	0.5	150	40	110	60	360	0.58
鷹嘴豆(chick pea)	0.4	1	0.35						0.58
黃瓜	0.65	1	0.6	22.5	32.5	45	17.5	117.5	0.78
茄子	0.6	1.05	0.9	30	42.5	40	22.5	135	0.78
蠶豆	0.5	1.15	1.1	90	45	40	0	175	0.65
大蒜	0.7	1	0.7						0.80
鷹嘴豆(Grabanzo)	0.4	1.15	0.35						0.63
綠豆及紅豆	0.4	1.05	0.48	20	30	30	20	100	0.61
花生	0.4	1.15	0.6	32	38	38	28	137	0.65
扁豆	0.4	1.1	0.3	23	33	65	40	160	0.66
洋蔥	0.7	1	1	25	43	28	18	115	0.41
豌豆	0.4	1.15	0.63	23	27	33	17	100	0.69
土豆	0.5	1.15	0.75	31	32	50.5	27	140.5	0.78
南光	0.5	1	0.8	22.5	32.5	32.5	22.5	110	0.71
蘿蔔(Radish)	0.7	0.9	0.85	7.5	10	15	5	37.5	0.8
黃豆	0.4	1.15	0.5	18	13	58	23	113	0.81
南瓜(Squash, zucchini)	0.5	0.95	0.75	22.5	32.5	25	15	95	0.66
甜菜(Sugar beet)	0.35	1.2	0.7	33.6	50	75.7	35.7	195	0.74
甜椒	0.6	1.05	0.9	28.8	37.5	75	25	166.25	0.85
紅薯	0.5	1.15	0.65	17.5	30	55	35	137.5	0.8

番茄	0.6	1.15	0.8	31	41	53	29	154	0.83
蔔(Turnip)	0.5	1.1	0.95						0.85
多葉植物									
花椰菜(Broccoli)	0.7	1.05	0.95	35	45	40	15	135	0.83
甘藍菜(Brussel sprout)	0.7	1.05	0.95	25	33	45	20	123	0.54

表2.9-2 (續2)

作物	作物生長階段 (d)								K _{c,avg} ^d
	K _{c,ini} ^a	K _{c,mid} ^b	K _{c,end} ^c	Init. (Lini)	Dev. (Ldev)	Mid (Lmid)	Late (Llate)	Total	
甘藍菜	0.7	1.05	0.95	40	60	50	15	165	0.40
花椰菜	0.7	1.05	0.95	35	50	40	15	140	0.83
芹菜	0.7	1.05	1	26.7	45	81.7	18.3	171.7	0.90
莧苳	0.7	1	0.95	27.5	38.75	28.75	10	105	0.81
菠菜	0.7	1	0.95	20	25	20	8	73	0.37
飼料				7.5	20	16.25	8.75		

紫花苜蓿	0.4	0.88	0.85					52.5	0.62
百慕大草	0.45	0.95	0.75	10	25	35	35	105	0.72
苜	0.4	1.03	0.98						0.80
放牧草场	0.35	0.85	0.8						0.67
蘇丹草	0.5	1.03	0.98	28	40	27	17	112	0.70
草地	0.85	0.9	0.9						0.88

表2.9-3 於良好管理下之不同類型作物之 $K_{c,avg}$ 值

	果類 豆類, 穀物,和 無葉植物	多葉	飼料	糧食
最小值	0.41	0.37	0.62	0.57
最大值	0.93	0.90	0.88	0.73
平均值	0.69	0.67	0.73	0.63

前段提及有效生長季節之 K_c 值，然而 RESRAD (onsite)和 RESRAD-OFFSITE 需輸入每年之平均值。因此，淡季期間的 K_c 值也應該得到發展。而在淡季期間，寒冷的天氣限制了農作物的生長，減少農事活動，結論是農地型態不是荒蕪就是很少植被覆蓋。可由表 2.9-2 選出淡季之值 0.3。 K_c 值可與 E_0 一起計算並獲得明確之全年作物之蒸發散量， E_c 。 E_c 可以帶入式 2.9-1 中計算最後可得蒸發散係數 C_e 。因為 C_e 主要受氣候因素所影響，所以無預設其機率分布。

特定點的蒸散係數可進行 RESRAD-OFFSITE 計算。估計特定點的分佈範圍為 C_e 的程序以下段落描述。

表 2.9-4 描述特定點推估不同作物蒸發散係數之程序：第一、從表 2.9-1 列出的四個選項中選出最有代表性(農業氣候特性)的區域；第二、找出一年中某幾天之氣溫介於以下四種型態， $\sim 0^\circ\text{C}$ ， $\sim 10^\circ\text{C}$ ， $\sim 20^\circ\text{C}$ 和 $> 30^\circ\text{C}$ 。一年當中，透過 ET_0 可以計算出各溫度範圍對於蒸發散所損失水的量，如表 2.9-1。表 2.9-4 其地區假設為半乾燥溫帶地區。

蒸發散(ET_0)的量必須透過 K_c 值進行修正各作物蒸發散係數。於季節性平均值 $K_{c,avg}$ 基礎上，不同作物項目列於表 2.9-3，同時應力係數因子 K_s 可協助調整 K_c 值使其更趨於實際狀況。表 2.9-4 中，應力因子有 1、1、0.75 和 0.75 分別被選為四種不同作物，並假設無葉植物和多葉植物受到比草料和穀物更多的管理。整個年度不會是農作物的生長期，因為低溫在淡季，其中計算調整後的 K_c 值只適用在生長期內。表 2.9-4 顯示，生長期其溫度介於 $\sim 10^\circ\text{C}$ 至 $> 30^\circ\text{C}$ 的範圍。當溫度下降到 $\sim 0^\circ\text{C}$ ，農作物被視為枯萎和生長，最終停了下來。考慮地面將僅部分地區覆蓋枯葉和蒸騰不會被激活的溫度範圍內， K_c 值調整為 0.3。計算不同溫度範圍的蒸散值再分別乘以相應的 K_c 值，以獲得實際的作物之 ET_c 值。根據不同作物類別，表 2.9-4 列出了 ET_c 的低點和高點不同之溫度範圍。最後，年蒸散率 (ET_r)可以透過不同溫度範圍之 ET_c 加總所得。表 2.9-4 呈現推估蒸發散係數透過式 2.9-1 計算。現地應採用年降雨資料進行計算，如過研究區域屬同一地區其四

種不同之作物應具相同之降雨係數。灌溉率應反映應力條件下的作物在田間的經驗。表 2.9-4，灌溉率假設幾種情境：無葉植物、多葉植物、牧草和穀物，其值分別為 0.5、0.7、0.2,和 0.2 (m/yr)。以灌溉率來說，無葉植物和多葉植物其擁有之灌溉率高於牧草和穀物類。反映應力修正係數為 1 之植物地區和 0.75 之飼料區域。特定點的徑流係數也應考慮。均勻機率分佈的計算，其低點和高點可以被假定並作為特定點之輸入 RESRAD-OFFSITE 進行計算。

為了進行比較，Palmer (1993)給出了灌溉效率，這是灌溉水被輸送到根區和可用於蒸發量的百分比範圍是 0.6 至 0.75。其中水只有很小一部分被實際用於植物生長;大部分將通過蒸散丟失。效率的影響是由灌溉面積的大小決定，因為傳遞到農田的點之間輸送會有損失。The Water Atlas of the United States (Geraghty *et al.*, 1973)指出 70%落在美國本土的水幾乎由土地蒸騰損失。

表2.9 -4 溫帶半乾燥區蒸發散係數案例計算

溫度	天數/年 ^a	ET ₀ 範圍 (mm/d) ^b		ET ₀ (mm) ^c	
		低	高	低	高
平均溫度 ~ 0°C	120	0	1	0	120
平均溫度~ 10°C	120	1	3	120	360
平均溫度~ 20°C	65	4	7	260	455
平均溫度> 30°C	60	6	9	360	540

作物項目	K _{c,avg} ^d	K _s ^e	調整 K _c ^f	不同溫度之K _c ^g			
				~ 0°C	~ 10°C	~ 20°C	> 30°C
無葉植物	0.69	1	0.69	0.30	0.69	0.69	0.69
多葉植物	0.67	1	0.67	0.30	0.67	0.67	0.67
飼料	0.73	0.75	0.55	0.30	0.55	0.55	0.55
穀物	0.63	0.75	0.47	0.30	0.47	0.47	0.47

作物項目	不同溫度之總ET _c 值 ^h								年蒸發散率ET _r (m/yr) ⁱ
	~ 0°C		~ 10°C		~ 20°C		> 30°C		
	低	高	低	高	低	高	低	高	

無葉植物	0	36	83	248	179	314	248	373	0.51	0.97
多葉植物	0	36	80	241	174	305	241	362	0.50	0.94
飼料	0	36	66	197	142	249	197	296	0.41	0.78
穀物	0	36	57	170	123	215	170	255	0.35	0.68

表 2.9-4 (續 1)

作物項目	年降雨量 (m/yr) ^j	年灌溉量 (m/yr) ^k	逕流 係數 ^l	係數 ^m	
				低	高
無葉植物	1	0.5	0.25	0.41	0.78
多葉植物	1	0.7	0.25	0.34	0.65
飼料	1	0.2	0.25	0.43	0.82
穀物	1	0.2	0.25	0.37	0.71

a 天數(Values are the number of days of the specified temperature during a year)

b 0和1 mm/d假設為邊界值

c 由日ET₀ 計算得總ET₀

d K_{C,avg} 為每季K_c 之平均值

e K_s 為K_{c,avg} 校正因子

- f $K_{c,avg}$ 和 K_s 乘積為 K_c
- g 不同溫度下對應不同之 K_c 值
- h 不同溫度下的總 ET_c 值為 K_c 值與總 ET_o 的乘積(mm)
- i ET_r 為總 ET_c 值之總和與不同溫度下以 m/yr 表示
- j 年降雨率只要地點相近其值皆同
- k 不同之作物其年灌溉率不同。
- l 逕流係數隨不同之作物有不同之值
- m 蒸發散係數由式 2.9-1 推導其值由 0~1，如超過 1 請以 1 取代

3.大氣參數分佈

3.1 質量負荷(Mass Loading)

模組適用: RESRAD (onsite), RESRAD-OFFSITE

描述:

此參數為主要污染區域大氣沉降顆粒(如土壤)之總濃度 (RESRAD-OFFSITE) , 或是可被人體攝入的濃度 (RESRAD和RESRAD-OFFSITE) 。

單位: ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

機率輸入形式:

吸入之質量負荷 (RESRAD (onsite), RESRAD-OFFSITE)

分佈: 連續線性

各分佈型態之定義值: 見表3.1-1的輸入值。

平均近場質量載荷 (RESRAD-OFFSITE(遠場))

分佈: 截斷對數常態分佈

各分佈型態之定義值:

相關平均值: 3.80

下四分位值: 0.001

相關的標準偏差: 0.455

上四分位值: 0.999

討論:

主要污染區的懸浮顆粒和灰塵會造成放射性攝入危險。對於RESRAD (onsite) and RESRAD-OFFSITE該參數代表受污染的土壤和塵埃的時間平均可攝入濃度。而懸浮物質吸入的比例可用微粒物質的PM-2.5來表示(顆粒直徑<2.5微米), 該PM-2.5對呼吸系統的危害最高(2004 EPA)。環境空氣中的PM-2.5濃度其數據是從EPA大氣數據網站所取得的資料(EPA 2005)。

主要污染區的懸浮顆粒和塵埃可隨風向分散而污染其他區域。RESRAD-OFFSITE程式中, 平均近場質量負荷參數可當作空氣中受污染顆粒之濃度, 並用來計算大氣中受污染物釋放速率。其受污染顆粒之濃度可代表為總懸浮顆粒物(TSP), 其濃度資料可由EPA的網站取得。(EPA2005)

表3.1-1 RESRAD攝入之質量負荷累積分佈函數

質量負荷 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	累積分佈函數	質量負荷 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	累積分佈函數	質量負荷 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	累積分佈函數
0	0.0000	18	0.9514	36	0.9989
1	0.0001	19	0.9664	37	0.9989
2	0.0005	20	0.9743	38	0.9990
3	0.0024	21	0.9801	>38	1.0000
4	0.0092	22	0.9842		
5	0.0237	23	0.9876		
6	0.0493	24	0.9899		
7	0.0870	25	0.9924		
8	0.1343	26	0.9940		
9	0.1946	27	0.9950		
10	0.2725	28	0.9959		
11	0.3666	29	0.9965		

12	0.4720	30	0.9967
13	0.5815	31	0.9974
14	0.6895	32	0.9980
15	0.7929	33	0.9983
16	0.8750	34	0.9985
17	0.9223	35	0.9986

於2000年至2004年間，美國及其領地空氣監測站所測之數據，每年平均的PM-2.5濃度為1690、總懸浮顆粒物TSP為345。此外，因監測站天氣的差異，其資料並不能代表鄰近地區的數據且並不適用整個美國地區。

圖3.1-1為結合攝入PM-2.5濃度直方圖和累積分佈函數。而平均近場質量負荷，則利用非線性最小二乘法回歸分析TSP機率密度函數可符合對數正態分佈，如圖3.1-2。

這兩種程式皆使用質量負荷參數估算每年的攝入劑量。因此使用較短期質量負荷資料將導致每年劑量的高估。RESRAD (onsite) 及RESRAD-OFFSITE程式中可使用平均質量負荷因子，以計算較符合真實情況之劑量，同時也不建議使用短期質量負荷資料去模擬。

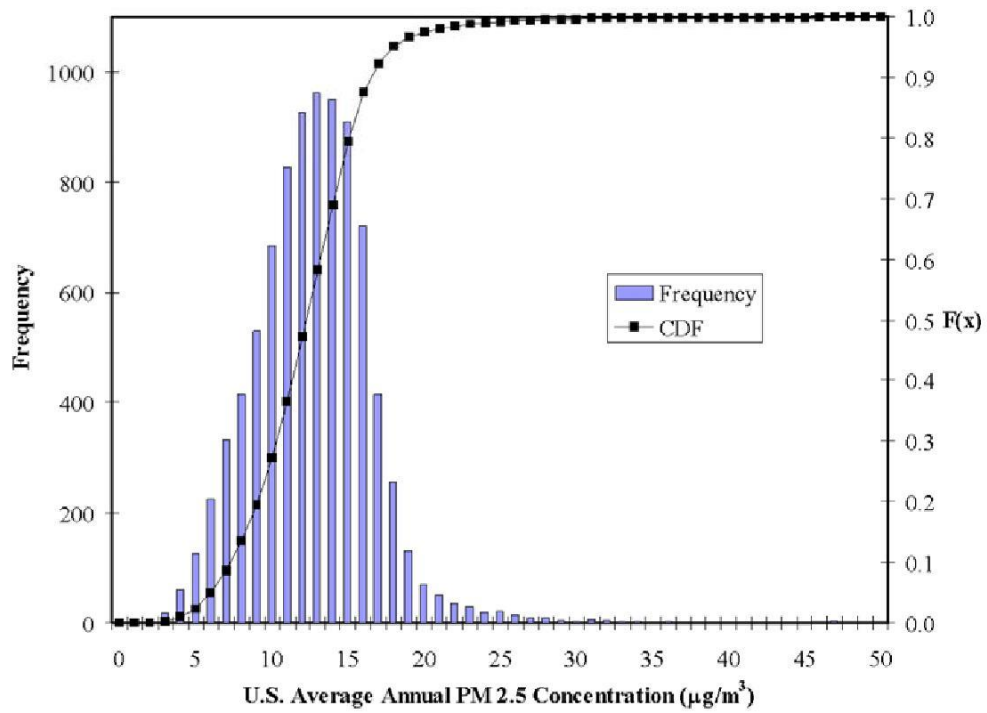


圖 3.1-1 攝入質量負荷之直方圖和累積分佈函數

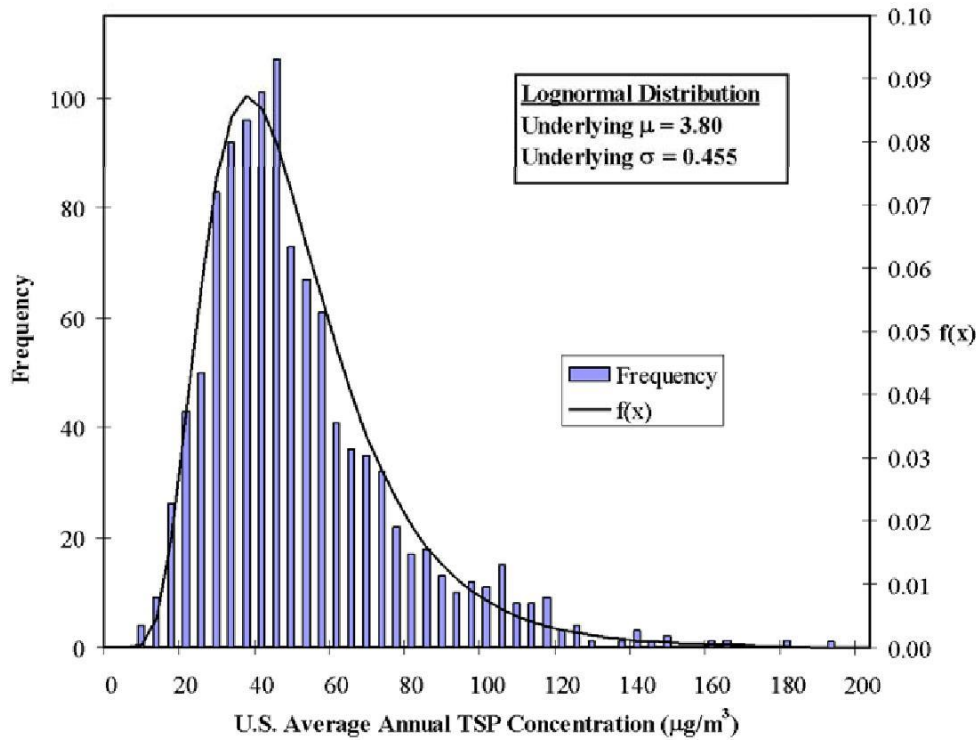


圖 3.1-2 平均近場質量負載之直方圖和概率密度函

3.2 沉降速度

模組適用:: RESRAD-BUILD, RESRAD-OFFSITE

描述:

RESRAD-BUILD程式中，此參數代表污染物顆粒在室內建築物空氣中的沉積速度。
RESRAD-OFFSITE程式中，此參數代表從污染區迎風而下的污染顆粒戶外沉積。

單位:m/s

機率輸入形式:

RESRAD-OFFSITE

分佈:對數均勻分佈

各分佈型態之定義值:

最小值: 1.0×10^{-6} 最大值: 1.0

RESRAD-BUILD

分佈:對數均勻分佈

各分佈型態之定義值:

最小值: 2.7×10^{-6} 最大值: 2.7×10^{-3}

討論:

沉降速度代表顆粒在空氣中沉降於表面中的速率。在RESRAD-OFFSITE程式中，戶外沉降速度被用來計算研究區域地面的污染物濃度，可藉由污染源迎風面空氣中顆粒濃度乘上沉降速度得知。

一般戶外的沉降速度 v_d 的方程式為 (Sehmel 1980):

$$V_d = \frac{-F}{\chi}, \quad (3.2.-1)$$

F = 沉降通量。

χ = 空氣中顆粒濃度。

實驗測定得沉降速度同時涉及到地面上空氣濃度與沉降通量的量測方法。因此，地面上約莫一公尺的空氣濃度以往一直被使用作為計算的參考值。戶外的沉降速度是顆粒、氣象與地表特性的函數。重要的顆粒特性包含，直徑、密度、形狀；重要的氣象特性包含大氣穩定度、風速；另重要的地表特性包含表面粗糙度和組合物。

室內空氣顆粒的衰退速率公式為：

$$\lambda_d = \frac{v_d A_d}{V}, \quad (3.2.-2)$$

A_d = 可沉降的表面積。

V = 空氣的體積。

對室內沉降而言，沉降速度取決於顆粒與室內空間的特性。重要的顆粒特性包括直徑，密度和形狀，就像是室外沉降的情況一樣。室內空間的特性包括空氣粘度和密度，湍流，溫度梯度和表面幾何形狀。

Nazaroff and Cass (1989)兩位學者研究發展出室內沉降速度為顆粒尺寸函數。因為缺乏對地表水流條件的資料，其理論計算是不太可能產生令人合理的答案。不過卻可觀察出沉積速度為顆粒尺寸函數的趨勢。圖3.2-1說明基於Nazaroff and Cass的方法基礎上，沉降速度在地板上理想化表示作為顆粒尺寸的函數。類似的觀察與預測亦可應用在戶外的顆粒沉降。(Sehmel 1980).

由於沉降速度取決於顆粒大小，因此沉降速度的概率密度函數分佈相依於顆粒尺寸

的概率密度函數分佈。在大氣中的顆粒尺寸分佈通常具有三種型式(Seinfeld and Pandis 1998)。微粒(直徑小於 $2.5 \mu\text{m}$)可分成兩種型式核模態(nuclei mode)與堆積模態(accumulation mode)。

模態(直徑約於 $0.005-0.1 \mu\text{m}$)包含大氣中最大數量的顆粒，但只佔空氣中顆粒的總質量很少百分比(Seinfeld and Pandis 1998)。核模態顆粒主要是由大氣中氣體冷凝而成如燃燒的產物。而堆積模態顆粒(直徑約於 $0.1-2.5 \mu\text{m}$)佔氣溶膠質量的很大一部分。堆積模態顆粒通過顆粒在核模態凝固和通過氣體的冷凝形成於更小的顆粒，因為去除機制效率不高，在這個尺寸範圍內，顆粒傾向於累積(因此稱作堆積模態)。

第三個型態是指粗顆粒(直徑大於 $2.5 \mu\text{m}$)，主要形成是由機械過程所產生。其它粗顆粒來源包括揚塵和植物顆粒。此三種粒徑皆特徵於對數常態分佈(John, 1993)。(Whitby and Sverdrup, 1980)利用平均數與標準差發現粒徑分布呈現三峰特質。室內的空氣濃度類似於上述分布，因建築物的外牆對小於 $10 \mu\text{m}$ 的顆粒而言並不顯著。當比較沉降速度與顆粒大小的分布時，廣泛的機率密度函數可適用於室內外沉降速度(如圖3.2-1及3.2-2)，室內實驗數據支持此假設如表3.2-1及3.2-2。

B-62

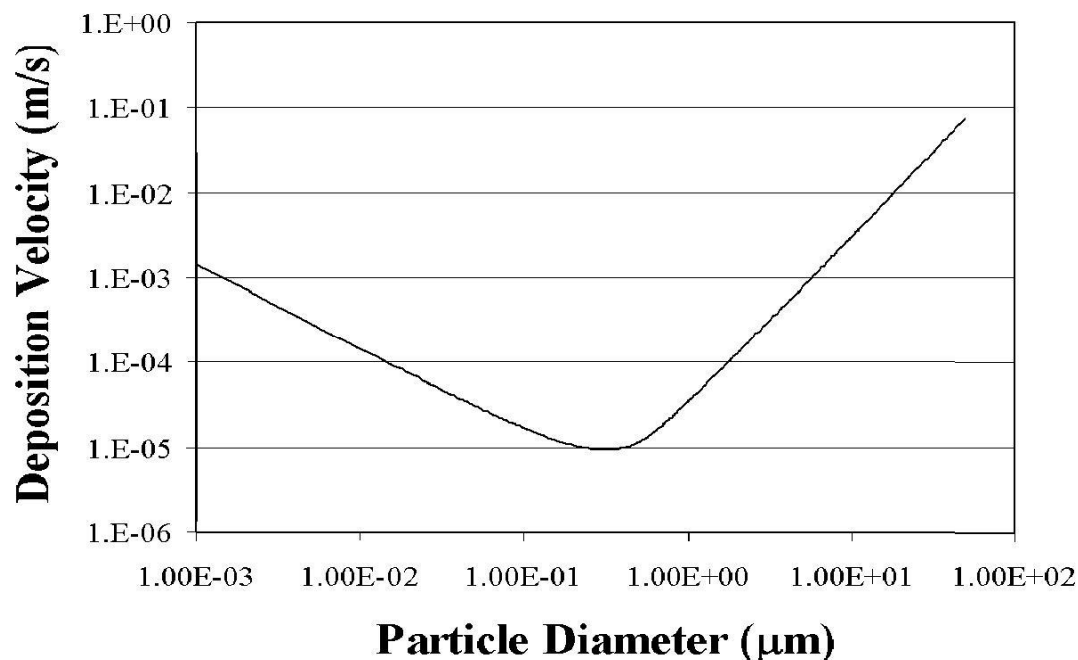


圖 3.2-1 利用粒徑推估沉降速度

此外，沉降是依賴於區域氣流模式(azaroff and Cass, 1989)，與顆粒大小和質量，微小的區域氣流系統變化(如由於氣候或季節的變化)結合，導致沉降速度的變化。因為在RESRAD-BUILD模組下，沉降速度的輸入值是利用在氣流條件下潛在的範圍內的所有顆粒大小所推估，故呈現為一對數常態分佈，其最大最小值分別為 2.7×10^{-6} m/s及 2.7×10^{-3} m/s。各數值表列於3.2-1及3.2-1。分佈圖於3.2-3。

除了粒徑大小之外，風速、表面粗糙度與天氣穩度亦主要影響室外顆粒之沉降速度(Sehmel 1980, 1984; Harper et al. 1995)。在RESRAD -OFFSITE模組中室外沉降速度之分佈必然較為廣泛的，因為在RESRAD -OFFSITE空氣擴散模型並未明確解釋的粒徑和表面粗糙度。

RESRAD-OFFSITE模組中，主要基於兩個風速為0.1m/s的顆粒尺寸和10 μ m條件下，沉積速度於草地和城市地區，其對數常態分佈最小值為 1.0×10^{-6} m/s，最大值為1.0 m/s(如圖3.2-4)。

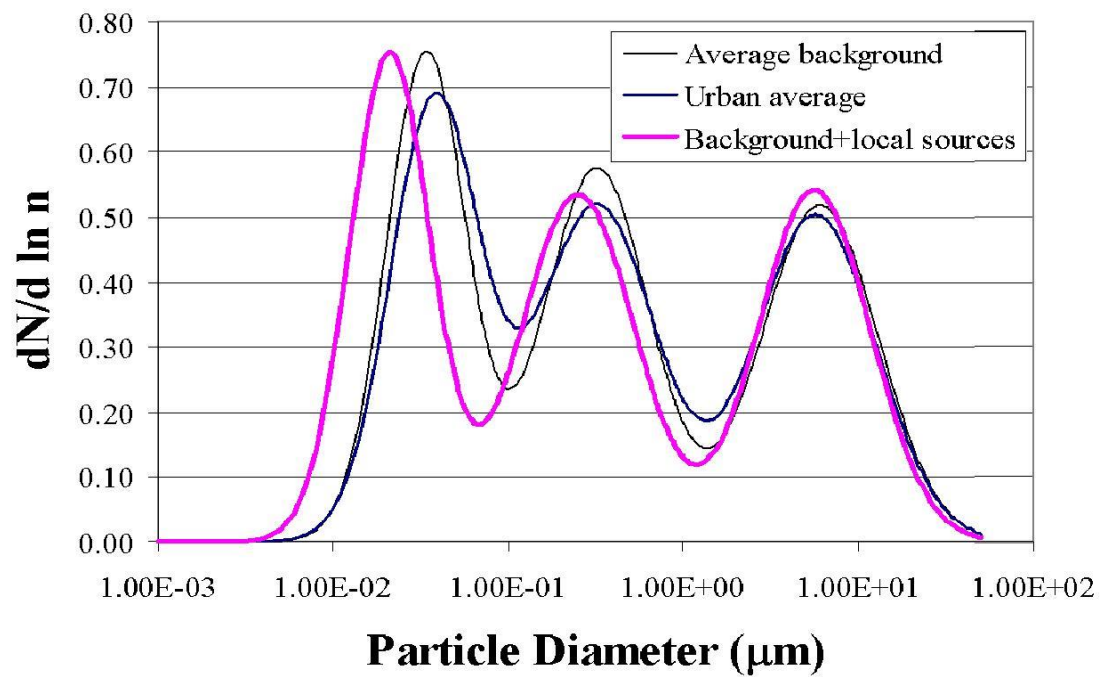


圖 3.2-2 氣霧粒徑分佈中三峰特性

表 3.2-1 藉由顆粒尺寸量測之室內沉降速度

顆粒尺寸 (μm)	沉降速度 (m/s)	說明	參考依據
0.71	1.7×10^{-5}	Be-7 正常自然的空氣流動	Lang 1995
1.4	1.3×10^{-5}		
2.8	6.7×10^{-5}		
0.71	1.33×10^{-4}	Be-7 受迫之空氣流動	
1.4	2.66×10^{-4}		
2.8	3.88×10^{-4}		
1-2	1.7×10^{-4}	Data Set 1 (使用SF ₆ 追蹤器之採樣)	Thatcher and Layton 1995
2-3	3.7×10^{-4}		
3-4	5.1×10^{-4}		
4-6	1.1×10^{-4}		
1-2	1.9×10^{-4}	Data Set 2	
2-3	5.0×10^{-4}		
3-4	5.6×10^{-4}		
4-6	1.2×10^{-4}		
1-5	3.1×10^{-4}	Data Set 3	
5-10	9.1×10^{-4}		
10-25	1.6×10^{-4}		
>25	2.7×10^{-3}		
0.07	1.72×10^{-5}	從香菸燃燒實驗之資料Offermann et al. (1985)	Nazaroff and Cass 1989
0.10	2.7×10^{-6}		
0.12	3.8×10^{-6}		
0.17	3.8×10^{-6}		
0.22	4.7×10^{-6}		
0.26	8.9×10^{-6}		
0.35	8.2×10^{-6}		
0.44	8.7×10^{-6}		
0.56	9.8×10^{-6}		
0.72	1.51×10^{-5}		
0.91	1.3×10^{-4}		
<2.5	3×10^{-5} and 3×10^{-5}	硫酸根離子微粒	Sinclair et al. 1985
2.5-15	1×10^{-2} and 2×10^{-5}	鈣離子微粒	

表3.2-2 居所有無放置家具與顆粒尺寸
量測之沉降速度

顆粒尺寸 (μm)	平均沉降速度 (m/s)	
	無放置家具	有放置家具
0.5	6.1×10^{-5}	8.2×10^{-5}
2.5	1.33×10^{-4}	1.73×10^{-4}
3.0	1.37×10^{-4}	2.25×10^{-4}
4.5	2.88×10^{-4}	2.88×10^{-4}
5.5	3.04×10^{-4}	3.24×10^{-4}

資料來源: Fogh et al. (1997).

表3.2-3 各種放射性核種之
室內沉降速度

同位素	平均沉降速度 (m/s)
Cs-137	6.4×10^{-5}
Cs-134	6.2×10^{-6}
I-131 (particulate)	1.1×10^{-4}
Be-7	7.1×10^{-5}
Ru-103	2.0×10^{-4}
Ru-106	1.7×10^{-4}
Ce-141	3.1×10^{-4}
Ce-144	3.9×10^{-4}
Zr-95	5.8×10^{-4}
Nb-95	1.9×10^{-4}

資料來源: Roed and Cannell (1987).

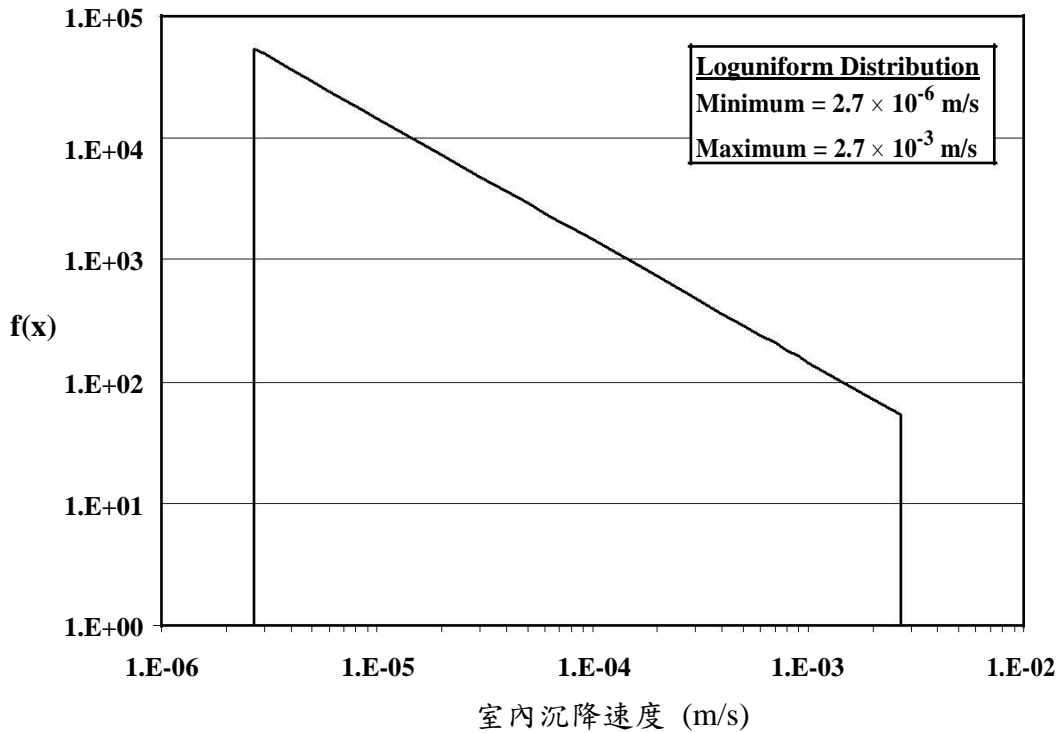


圖 3.2-3 RESRAD-BUILD 的室內沉降速度分布圖

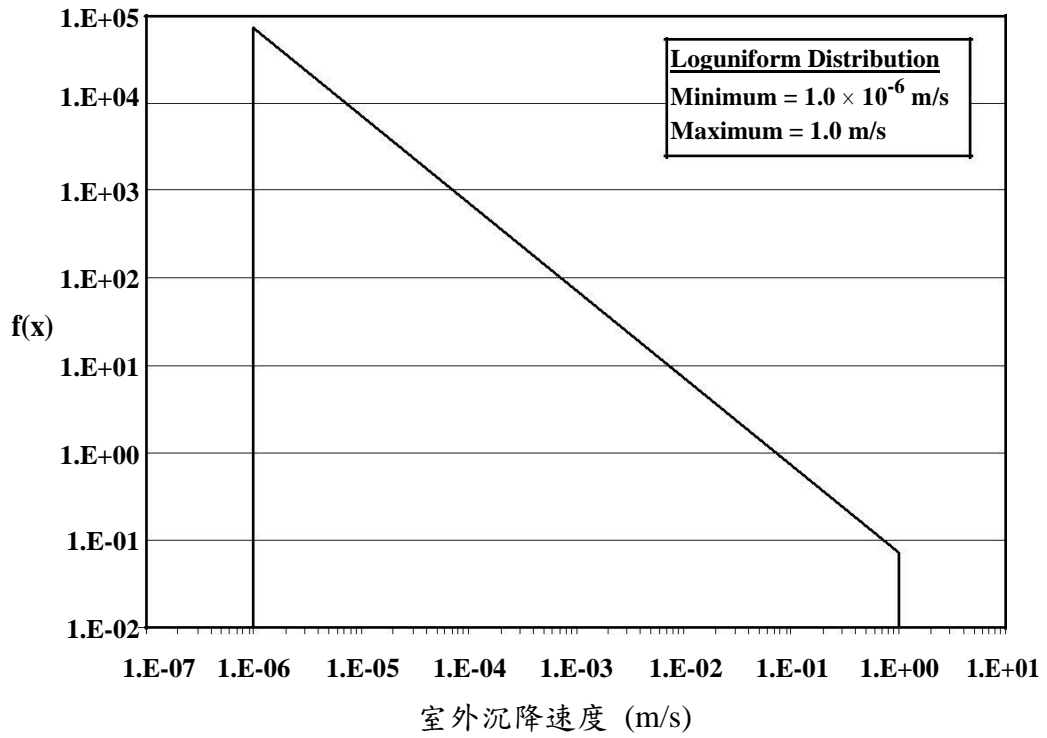


圖 3.2-4 RESRAD-OFFSITE 的室外沉降速度分布圖

3.3 風速(Wind Speed)

模組適用: RESRAD (onsite), RESRAD-OFFSITE

描述:

RESRAD (onsite)程式中，該風速代表模擬場址每年平均風速。

應用於RESRAD-OFFSITE程式中，計算空氣擴散之污染物時，使用聯合頻率分佈與大氣穩定度將風速劃分成六個區間，每個區間皆代表該區間的風速。

單位: (m/s)

機率輸入形式:

RESRAD (onsite)

分佈: 有邊界對數常態

各分佈型態之定義值:

相關平均值:	1.445	下限:	1.4
相關標準差:	0.2419	上限:	13

RESRAD-OFFSITE

分佈: 均勻

各分佈型態之定義值: 見表 3.3-1.

討論:

在特定的區域內風速會隨著時間每日或是每季變化，並且風速符合對數常態分佈及韋伯分佈的特性。而在美國每年的平均風速亦隨著地區而改變。

RESRAD (onsite)程式中，風速資料是來自美國271個氣象站資料分析，其中平均每個觀測站紀錄43年資料，而統計分析得出全國性的風速分佈。

其全國性的分佈資料正符合對數常態分佈，並利用貝氏估計擬合機率密度函數符合對數常態分佈。利用最大似然估計風速平均值為1.445;標準差為0.2417。中位數為4.2(m/s)，其中位數與美國年平均風速4.1相近。

表 3.3-1 RESRAD-OFFSITE 程式中風速均勻分布之上
下限

風速區間	下限 (m/s)	上限 (m/s)
1	0.514	1.80
2	1.81	3.34
3	3.35	5.40
4	5.41	8.49
5	8.50	11.1
6	11.2	14.1

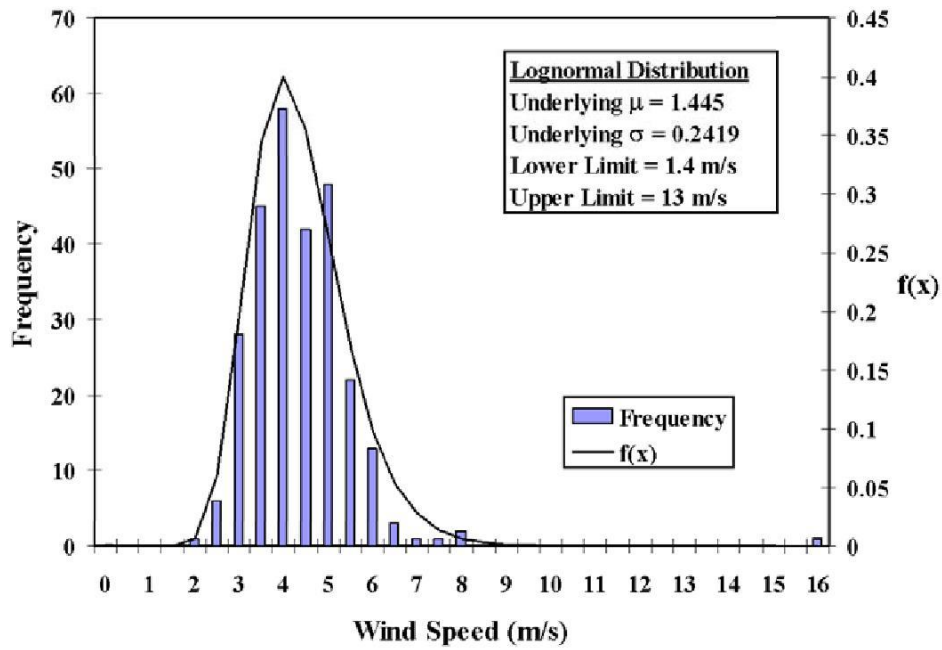


圖 3.3 -1 風速直方圖與 RESRAD (onsite) 中風速之機率密度函數

上述的分佈僅適用特定條件，因為僅271觀測站資料點，不能代表整個美國地區的分佈。況且，監測站僅在短距離地形差異小的區域，並不能代表整個大地區的分佈。

RESRAD-OFFSITE程式中，利用風速與大氣穩定度的聯合頻率分佈，計算風面下每個方向的污染物濃度。該頻率與每個扇區的風速與大氣穩定度等大氣條件所佔的時間比率有關。為了符合STAR聯合頻率資料檔案的格式，RESRAD-OFFSITE於16個扇區，各區分6個風速區間和6個大氣穩定度等級。於STAR檔案中風速區間如表3.3-2，在RESRAD-OFFSITE程式中每個風速區間代表平均值，並被用來計算大氣的擴散速度。

概率的方式而言，風速是假設每個區間都是均勻分佈，且每個區間有其邊界範圍，其上下限可參考風速上下限可參考表 3.3-1。

表 3.3-2 STAR 風速區間

風速區間	下限 (knots [m/s])	上限 (knots [m/s])	RESRAD- OFFSITE (m/s)
1	1 (0.514)	3 (1.54)	0.89
2	4 (2.06)	6 (3.09)	2.46
3	7 (3.60)	10 (5.14)	4.47
4	11 (5.66)	16 (8.23)	6.93
5	17 (8.75)	21 (10.80)	9.61
6	>21 (10.80)		12.52

資料來源: Parks (1992)

4 農業參數分佈

4.1 生長週期(DURATION OF THE GROWING SEASON)

模組適用: RESRAD-OFFSITE

描述:

生長週期指植物因葉面沉積與根攝入而受汙染的時間。

單位: 日。

機率輸入形式:

分佈: 三角形分佈

各分佈型態之定義值: 見表4.1-1.

討論:

根據美國輻射防護與度量委員會(NCRP)定義, 生長週期為地面作物受汙染所曝露的時間(NCRP 1984)。該週期時間隨著不同植物類型與不同地區生長的季節而變化(Hoffman et al. 1982)。

許多的文獻使用30天作為牧草的生長週期, 而60天作為農作物的生長週期(NRC 1977; NCRP 1984; Whelan et al. 1987; DOE 1995)。牧草30天的生長週期乃放牧的習性所致; 而一半農作物的生長時間大概等同60天。

聯合國世界糧農組織研究了不同作物(Allen et al. 1998), 並提供有關不同作物於不同生長階段的生長週期資訊。主要可將作物分成四個階段, 初始階段、成長階段、中期階段與後期階段。初始階段為該開始種植至10%的地面覆蓋, 不過就多年生的植物而言, 其初始階段則為作物發芽期間。成長階段為10%的地面覆蓋至全覆蓋。中期階段為全覆蓋製作物成熟期間。後期階段為作物成熟時至作物採收或是作物枯老期間。當中的資料包含蔬菜、纖維作物、油料作物、穀物、牧草和水果。

許多不同物種的牧草(如: 果園草, 金絲雀草, 梯牧草, 布魯姆草, 黑麥草, 葦狀羊茅)與豆科植物(如紅三葉, 紫花苜蓿, 三葉草)被作為飼料。

表4.1-2列舉不同牧草於不同階段被消耗所需時間。一般而言, 最初始的幼芽生長時間會較其他幼芽所需之時間長。對於牧草而言, 牧草的分佈依據作物成長至開始成熟的時間所定, 因此, 牧草建議的生長週期一般為三角形分佈, 其最小值為20天, 最可能的值為30天, 最大值为55天。

表 4.1-1 生長週期的三角形分佈(天)

機率輸入	區域類型			
	牧草	穀物	水果、穀物 和非葉類蔬菜	葉類蔬菜
最小值	20	60	30	40
最可能值	30	120	105	75
最大值	55	210	320	180

表 4.1-2 牧草於四個階段生長週期被消耗所需時間(天)

牧草	飼料於四個生長週期被消耗所需時間 (天)				作物生長至成熟所需總時間
	初始階段	成長階段	中期階段 (成熟)	後期階段 (採收)	
	紫花苜蓿, 初始扦插	10	20-30	20-25	
紫花苜蓿, 扦插	5	10-20	10	5-10	20-30
乾草	10	15	75	35	30
蘇丹紅, 初始扦插	25	25	15	10	40
蘇丹紅, 扦插	3	15	12	7	27

農業手冊編號628提供美國農業作物一般的種植與採收資料。穀物生長週期的相關資訊也是從該手冊摘錄。表4.1-3彙總美國不同區域作物的生長週期包含平均值、最小值與最大值，同時表列出農作物生長州數、總採收面積、最大生產地區。在一些情況下，許多作物會在生長週期中採收。玉米與冬季小麥是美國最常被採收的作物，作為家畜飼料最常見的儲存穀物乃是大麥，燕麥，玉米與高粱。種植這些作物所需最短時間為70天，春季作物種植時間最長為190天。

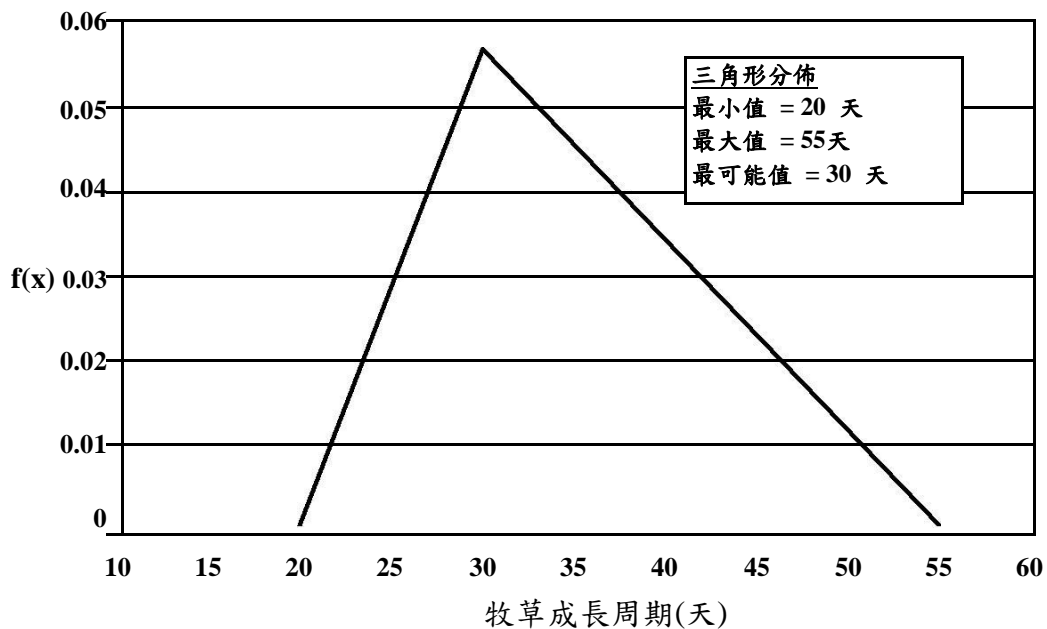


圖 4.1-1 牧草成長週期的機率密度函數。

表4.1-3 美國不同糧食作物的生長週期

作物	平均值	最小值	最大值	州數	採收面積 (英畝)	最大生產地區
大麥(春季)	1.1E+02	7.0E+01	1.8E+02	1.7E+01	6.4E+06	North Dakota Virginia and Pennsylvania
大麥(秋季)	2.4E+02	1.1E+02	3.1E+02	1.4E+01	3.5E+02	Pennsylvania
小麥(春季)	1.2E+02	1.0E+02	1.5E+02	1.2E+01	2.0E+07	North Dakota
小麥(冬季)	2.7E+02	1.5E+02	3.4E+02	4.2E+01	4.0E+07	Kansas
黃豆	1.4E+02	1.2E+02	1.7E+02	2.9E+01	6.3E+07	Iowa and Illinois
高粱, 穀物,	1.4E+02	9.4E+01	1.7E+02	1.8E+01	1.2E+07	Kansas
稻米	1.4E+02	1.2E+02	1.5E+02	6.0E+00	2.8E+06	Arkansas
燕麥(秋季)	2.3E+02	1.7E+02	2.7E+02	7.0E+00	2.5E+05	Texas
燕麥(春季)	1.1E+02	8.4E+01	1.8E+02	2.4E+01	2.4E+06	North Dakota
玉米	1.6E+02	1.3E+02	1.9E+02	4.1E+01	7.3E+07	Iowa and Illinois

表4.1-4 表列不同穀物的生長階段所需時間(Allen et al., 1998)。一般而言秋冬季作物生長所需時間較春季作物長。穀物於成長至成熟階段時葉面沉降會致污染物劑量的增加，因此成長階段至成熟階段所需時間為穀物的生長週期分佈。穀物建議的生長週期為三角形分佈，其最小值為60天，最可能值為120天，最大值為210天。

表4.1-4 不同穀物於四個階段生長週期被消耗所需時間

穀物	初始階段	成長階段	中期階段	後期階段	作物生長至成熟所需總時間
			(成熟)	(採收)	
大麥/燕麥/春季小麥	15-40	25-60	40-60	20-40	90-160
冬季小麥	20-160	60-140	40-75	25-30	175-210
小雜糧	20-25	30-35	60-65	40	130-140
玉米	20-30	35-50	40-60	30-50	105-150
甜玉米	20-30	20-40	25-70	10-103	60-163
穀子	15-20	25-30	40-55	25-35	90-120
高粱	20	35	40-45	30	105-110
稻米	30	30	60-80	30-40	120-150

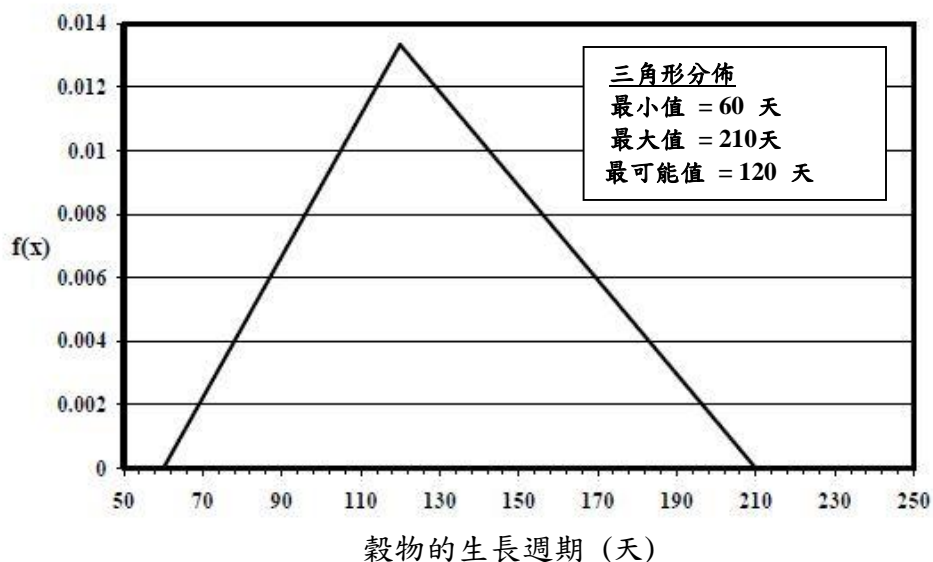


圖 4.1-2 穀物成長週期的機率密度函數

表4.1-5 表列不同的水果、堅果、穀物與非葉類蔬菜的生長階段所需時間(Allen et al., 1998)。對於這些植物於成長至成熟階段時葉面沉降會致污染物劑量的增加，因此成長階段至成熟階段所需時間為水果、堅果、穀物與非葉類蔬菜的生長週期分佈。水果、堅果、穀物與非葉類蔬菜建議的生長週期(圖4.1-3)為三角形分佈，其最小值為30天，最可能值為105天，最大值為320天。

表4.1-6 表列不同的葉類蔬菜的生長階段所需時間(Allen et al., 1998)。對於這些植物於成長至成熟階段時葉面沉降會致污染物劑量的增加，因此成長階段至成熟階段所需時間為葉類蔬菜的生長週期分佈。葉類蔬菜建議的生長週期(圖4.1-4)為三角形分佈，其最小值為40天，最可能值為75天，最大值為180天。

表 4.1-5不同水果、堅果、穀物與非葉類蔬菜於四個階段生長週期被消耗所需時間

	初始階段	成長階段	中期階段 (成熟)	後期階段 (採收)	作物生長至成熟所需總時間
水果與堅果					
香蕉	120	60-90	120-180	5-60	245-270
哈密瓜	10-30	45-60	25-40	10-25	90-110
柑橘	60	90	120	95	305
葡萄	20-30	40-60	40-120	20-80	160-220
橄	30	90	60	90	240
開心果	20	60	30	40	130
甜瓜	15-30	30-45	40-65	15-30	95-130
核桃	20	10	130	30	170
西瓜	10-20	20-30	20-30	30	70-90
穀物					
大麥/燕麥/小麥	15-40	25-60	40-65	20-40	90-160
玉米	20-30	35-50	40-60	30-50	105-150
穀物(小)	20-25	30-35	60-65	40	130-140
穀子	15-20	25-30	40-55	25-35	90-120
稻米	30	30	60-80	30-40	120-150
高粱	20	35	40-45	30	105-110
甜玉米	20-30	20-40	25-70	10-103	60-163
冬季小麥	20-160	60-140	40-75	25-30	160-210
非葉類蔬菜					
朝鮮薊	20-40	25-40	250	30	305-320
蘆筍	50-90	30	100-200	45-50	180-275
豆(乾)	15-25	25-30	30-40	20	75-90
豆(綠)	15-20	25-30	25-30	10	60-70
甜菜	15-25	25-30	20-25	10	55-65
柿子椒	25-30	35-40	40-110	20-30	95-180
蠶豆(乾)	90	45	40	60	145
蠶豆(綠)	90	45	40	0	85
胡蘿蔔	20-30	30-50	30-90	20-30	80-170
木薯	20-150	40	90-110	60	190-210
黃瓜	20-25	30-35	40-50	15-20	85-105
茄子	30	40-45	40	20-25	100-110
蠶豆	15-20	25-30	35	15	75-80
綠豆, 豇豆	20	30	30	20	80
花生	25-35	35-45	35-45	25-35	105
酒花	25	40	80	10	130
扁豆	20-25	30-35	60-70	40	130-145
洋蔥	15-20	25-35	70-110	40-45	135-190

表 4.1-5 (延續上頁)

碗豆	15-35	25-30	30-35	15-20	75-80
馬鈴薯	25-45	30-35	30-70	20-30	90-120
南瓜	20-25	30-35	30-35	20-25	80-95
蘿蔔	5-10	10	15	5	30
黃豆	15-20	15-35	40-75	15-30	70-130
南瓜，西葫蘆	20-25	30-35	25	15	70-75
甜菜	25-50	30-75	50-100	10-65	130-230
紅薯	15-20	30	50-60	30-40	110-130
蕃茄	25-35	40-45	45-70	25-30	105-145

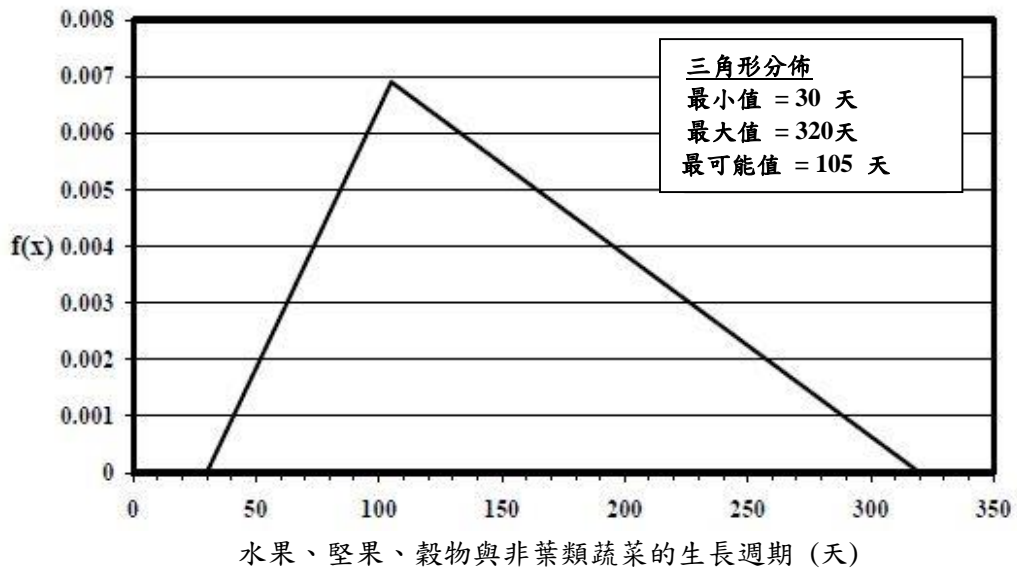


圖 4.1-3 水果、堅果、穀物與非葉類蔬菜成長週期的機率密度函數。

表 4.1-6 不同葉類蔬菜於四個階段生長週期被消耗所需時間

葉類蔬菜	初始階	成長階段	中期階段	後期階	作物生長至成熟所 需總時間
	段			段	
花椰菜	35	45	40	15	100
甘藍菜	40	60	50	15	125
花菜	35	50	40	15	105
芹菜	25-30	40-55	45-105	15-20	100-180
十字花科	20-30	30-35	20-90	10-40	60-165
生菜	20-35	30-50	15-45	10	55-105
洋蔥(綠)	20-30	30-55	10-55	5-40	45-150
菠菜	20	20-30	15-40	5-10	40-80

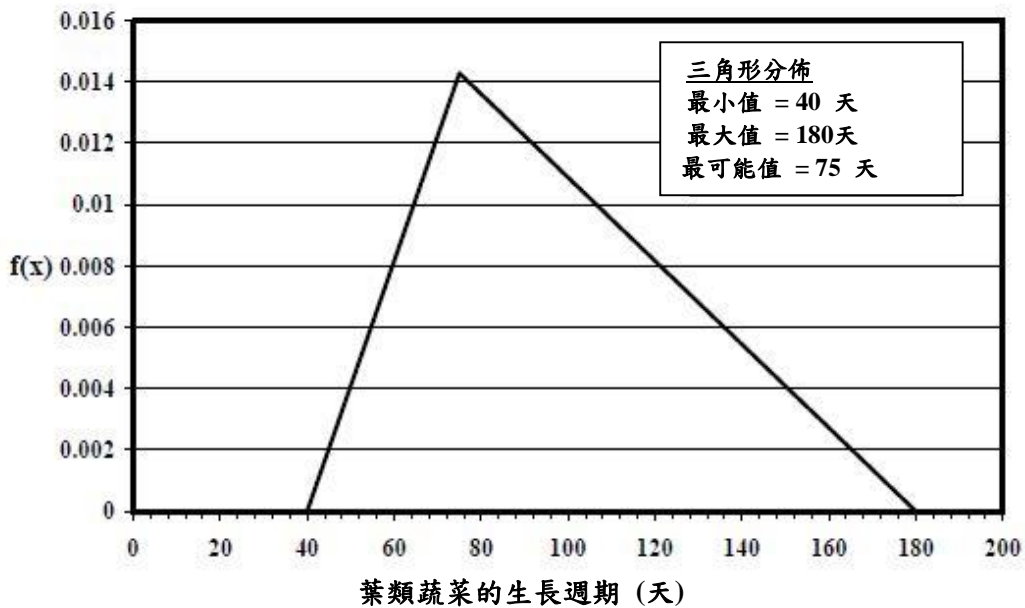


圖 4.1-4 葉類蔬菜成長週期的機率密度函數。

4.2 根系深度(DEPTH OF ROOTS)

模組適用: RESRAD (onsite), RESRAD-OFFSITE

描述:

此參數代表多種生長於污染區域之平均根系深度。RESRAD-OFFSITE模組中將人類消耗之植物劃分成:(一)葉類蔬菜及(二)水果、堅果、穀物與非葉類蔬菜。牲畜消耗之植物則劃分成:牧草、青貯(silage)、穀物。

單位: 公尺 (m)

機率輸入形式:

分佈: 均勻分布

各分佈型態之定義值: 請見表 4.2-1.

討論:

根系深度主要依植物種類而變,以白菜,菠菜,萵苣,花椰菜而言其根系深度為0.9公尺。其他植物例如果樹期根系深度就可能超過2公尺而苜蓿則可深至4公尺。概括而述,其根系深度一般並不會深超過地面1公尺。根系深度用來計算其植物、肉類、牛奶曝露途徑(exposure pathways)之覆蓋率與深度因子,因為植物於污染區可以透過根系攝取放射性核種之污染。植物透過根系攝取放射性核種之污染,是假設植物之根系直接觸及污染區土壤之條件下。

每個農作物都有其生根之特性,並且會隨著土壤生長,如果土壤符合深厚、均勻且濕度平均分佈。生長期期作物的根會深長,剛成熟兩個月的作物一般根系約深0.6-0.9公尺,根系一般會在六個月後生長到1.8至3.0公尺以上。當上層土壤保持一定濕度,植物會從其表面獲得適當水分;但當土壤表面濕度降低時,植物便會朝土壤下層獲取水分,因此使植物根系往下延伸。一般而言,植物根系下層存在較少根部,主要因根系無法從下層土壤獲取足夠的水分。平均的根系深度與該植物葉子生長至最大時間有關,但其深度僅限於地下水水位以上之土壤層。

表4.2-2表列出不同家畜食用牧草之根系深度,其生長條件(如降雨量及溫度)會隨著整個美國區域的地理及每年氣候條件而改變。在RESRAD-OFFSITE建議採用均勻分布表達家畜食用牧草之根系深度,其最小值為0.3m,最大值為3.6m(詳如圖4.2-1)。如果特定條件是已知的,可以使用表4.2-2獲得特定牧草類型的根系深度值。

表4.2-3表列出不同家畜食用穀物之根系深度,一般而言,春季生長的穀物期根系深度會較冬季生長的穀物短淺。在RESRAD-OFFSITE建議採用均勻分布表達家畜食用穀物之根系深度,其最小值為0.5m,最大值為2.4m(詳如圖4.2-2)。如果特定條件是已知的,可以使用表4.2-3獲得特定穀物類型的根系深度值。

表4.2-4表列出人類食用的各種水果、堅果與非葉類蔬菜之根系深度,一般而言。在RESRAD-OFFSITE建議採用均勻分布表達人類食用穀物之根系深度,其最小值為0.3m,最大值為2.4m(詳如圖4.2-3)。如果特定條件是已知的,可以使用表4.2-4獲得特定植物類型的根系深度值。

表4.2-5表列出人類食用的各種葉類蔬菜之根系深度,一般而言。在RESRAD-OFFSITE建議採用均勻分布表達人類食用穀物之根系深度,其最小值為0.3m,最大值為0.9m(詳如圖4.2-4)。如果特定條件是已知的,可以使用表4.2-4獲得特定葉類蔬菜的根系深度值。

RESRAD-ONSITE建議採用均勻分布表達根系深度,該分布並無區分植物類型,其分佈最小值為0.3m,最大值為4.0m。然而,基於各種不種植物的類型,可參考先前所述

表格獲取相關的根系深度資料(表4.2-2至4.2-5)。圖4.2-5為RESRAD-ONSITE根系深度之機率密度函數。

表 4.2-1 根系深度均勻分布輸入值

區域類型	最小值	最大值
<u>RESRAD-OFFSITE</u>		
牧草和青貯	0.3	3.6
穀物	0.5	2.4
水果、穀物與非葉類蔬菜	0.3	2.4
葉類蔬菜	0.3	0.9
<u>RESRAD (onsite)</u>		
汙染區	0.3	4.0

表 4.2-2 不同牧草之根系深度

牧草類型	根系深度 (m)	Curwen and Massie (1994)	Weaver (1926)	Georgeson and Payne (1897)	Canadell et al. (1996)	Allen et al. (1998)
苜蓿	0.6-3.6	0.6-1.2	3-3.6	1.5-1.8		1.0-3.0
百慕大草	1.0-1.5					1.0-1.5
蘭草	0.3-2.1		1.5-2.1	0.3-1.1		
布魯姆草	1.1-2.0		1.7-2.0		1.1	
加那利草	0.6-1.5			0.6-1.5		
三葉草	1.5-2.4		1.5-2.4			
三葉草(紅)	0.6-2.4	0.6	1.5-2.4	1.5		0.6-0.9
羊茅	0.6-1.2		0.6-1.2			
果園生草	0.9-1.3		0.9-1.3			
黑麥草	0.6-0.9		0.6-0.9			0.6-1.0
三葉草	0.6-1.2	0.6-1.2				
貓尾草	0.4-0.9		0.4-0.9			
野牛草	0.6-1.9		0.6-0.9	0.9	1.9	
牧草	0.6-1.5	0.6-1.2				0.5-1.5
須芒草	1.5-2.8		1.5-2.7		1.5-2.8	
小白羊	0.9-1.8		0.9-1.7		1.5-1.8	

資料來源: Modified from Weaver (1926), Georgeson and Payne (1897), Canadell et al. (1996), Curwen and Massie (1994), Allen et al. (1998).

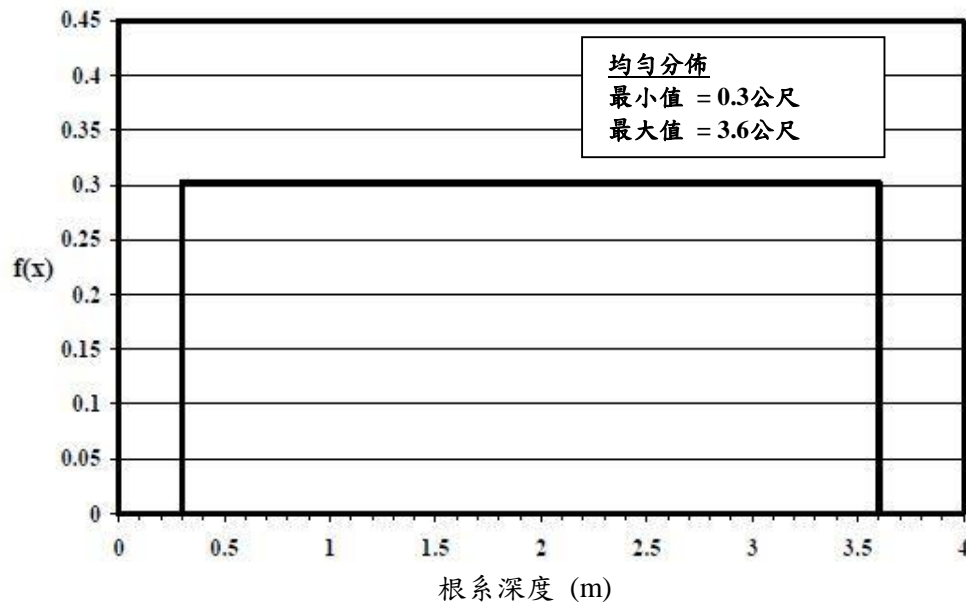


圖 4.2-1 牧草和青貯根系深度之機率密度函數

表 4.2-3 不同穀物之根系深度

穀物類型	根系深度範圍 (m)	Allen et al. (1998)	Weaver and Brunner (1927)	Curwen and Massie (1994)	Weaver (1926)
大麥	1.0-2.0	1.0-1.5			1.4-2.0
玉米	1.0-2.4	1.0-1.7	1.5-2.4	0.6-1.2	1.5-1.8
粟	1.0-2.0	1.0-2.0			
燕麥	1.0-1.5	1.0-1.5			1.2-1.5
稻米	0.5-1.0	0.5-1.0			
高粱	1.0-2.0	1.0-2.0			1.4-1.8
春季小麥	1.0-1.5	1.0-1.5		0.6	
冬季小麥	1.5-2.1	1.5-1.8			1.5-2.1

資料來源: Allen et al. (1998), Weaver and Brunner (1927), Curwen and Massie (1994), Weaver (1926).

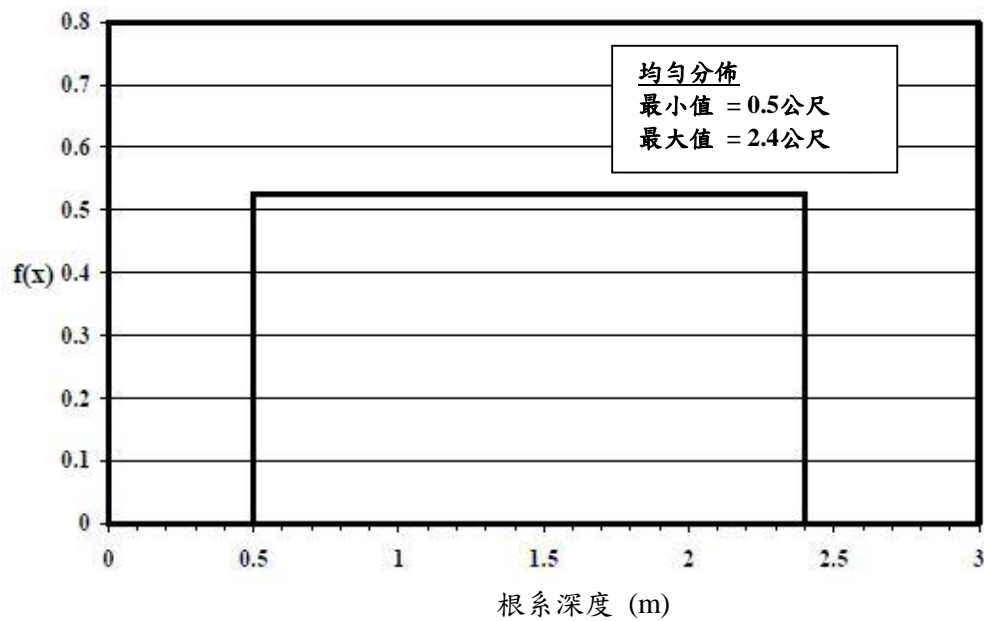


圖 4.2-2 穀物根系深度之機率密度函數

表 4.2-4不同水果、堅果與非葉類蔬菜之根系深度

植物類型	根系深度 範圍 (m)	Allen et al. (1998)	Weaver and Brunner (1927)	Kemble and Sanders (2000)	Evans et al. (1996)	Curwen and Massie (1994)	Weaver (1926)
水果和堅果							
杏仁, 蘋果, 杏, 櫻桃 葡萄, 桃, 梨	1.0-2.0	1.0-2.0					
酪梨	0.5-1.0	0.5-1.0					
香蕉	0.5-0.9	0.5-0.9					
漿果	0.6-1.2	0.6-1.2				0.6-1.2	
哈密瓜	0.3-1.5	0.9-1.5	1.1	0.3-0.6			
柑橘類水果	1.2-1.5	1.2-1.5					
獼猴桃	0.7-1.3	0.7-1.3					
橄	1.2-1.7	1.2-1.7					
菠蘿	0.3-0.6	0.3-0.6					
開心果	1.0-1.5	1.0-1.5					
草莓	0.2-0.6	0.2-0.3	0.3-0.6		0.3	0.3	
甜瓜, 西瓜	0.8-1.5	0.8-1.5	1.1	>0.6		0.6-1.2	
非葉類蔬菜							
朝鮮薊	0.6-0.9	0.6-0.9					
蘆筍	1.2-3.0	1.2-1.8	1.5-3.0	>0.6			
胡蘿蔔	0.3-2.0	0.5-1.0	0.6-2.0	0.3-0.6	0.5		
鷹嘴豆	0.3-1.0	0.6-1.0	0.6-1.0	0.3-0.6	0.5	0.6	
黃瓜	0.3-1.2	0.7-1.2	1.1	0.3-0.6			
茄子	0.3-2.0	0.7-1.2	1.2-2.0	0.3-0.6			
綠豆	0.5-0.7	0.5-0.7		0.5-0.6	0.5		
利馬豆	0.6-1.2	0.8-1.2	0.9-1.2	>0.6		0.6	
秋葵	0.5-1.2		0.5-1.2	>0.6			
洋蔥	0.3-1.0	0.3-0.6	0.5-1.0	0.3-0.5	0.3	0.5	
土豆	0.3-0.9	0.4-0.6		0.3-0.5	0.5	0.5	0.6-0.9
南瓜	0.6-1.8	1.0-1.5	1.8	>0.6		0.6-1.2	
蘿蔔	0.3-0.9	0.3-0.5	0.6-0.9				
南瓜, 西葫蘆	0.3-1.8	0.6-1.0	1.8	0.3-0.6		0.6-1.2	
甜菜	0.5-2.0	0.7-1.2	1.2-2.0	0.5-0.6	0.5	0.5	1.5-1.8
甜椒	0.3-1.2	0.5-1.0	0.9-1.2	0.3-0.6	0.3	0.6	
紅薯	0.6-1.5	1.0-1.5	1.2	>0.6			
蕃茄	0.6-1.7	0.7-1.5	1.0-1.7	>0.6			
蘿蔔	0.5-1.5	0.5-1.0	1.5				

資料來源: Allen et al. (1998), Weaver and Brunner (1927), Kemble and Sanders (2000), Evans et al. (1996), Curwen and Massie (1994), Weaver (1926).

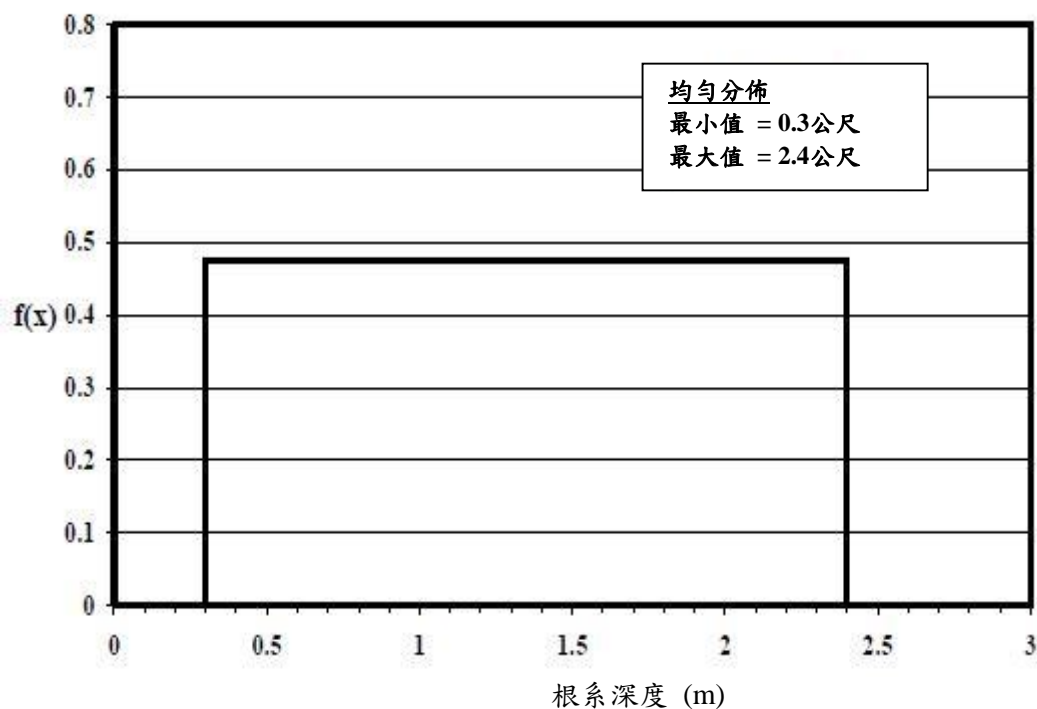


圖 4.2-3 水果、堅果與非葉類蔬菜根系深度之機率密度函數

表 4.2-5 不同葉類蔬菜之根系深度

葉類蔬菜	根系深度 範圍(m)	Curwen and Massie (1994)	Allen et al. (1998)	Weaver and Brunner (1927)	Kemble and Sanders (2000)	Evans et al. (1996)
菠菜	0.3-0.5		0.3-0.5	0.3	0.3-0.5	0.3-0.5
生菜	0.3-0.9	0.5	0.3-0.5		0.6-0.9	0.3-0.5
花椰菜	0.3-0.6		0.4-0.6		0.3-0.5	0.3-0.5
芹菜	0.3-0.5		0.3-0.5		0.3-0.5	
捲心菜	0.3-0.9		0.5-0.8	0.9	0.3-0.5	0.3-0.5
菜花	0.3-0.9		0.4-0.7	0.9	0.3-0.5	0.3-0.5
抱子甘藍	0.3-0.6		0.4-0.6		0.3-0.5	
薄荷	0.4-0.8		0.4-0.8			
甘蘭	0.3-0.5				0.3-0.5	
芥菜	0.3-0.6				0.5-0.6	0.3-0.5

資料來源: Curwen and Massie (1994), Allen et al. (1998), Weaver and Brunner (1927), Kevin and Sanders (2000), Evans et al. (1996).

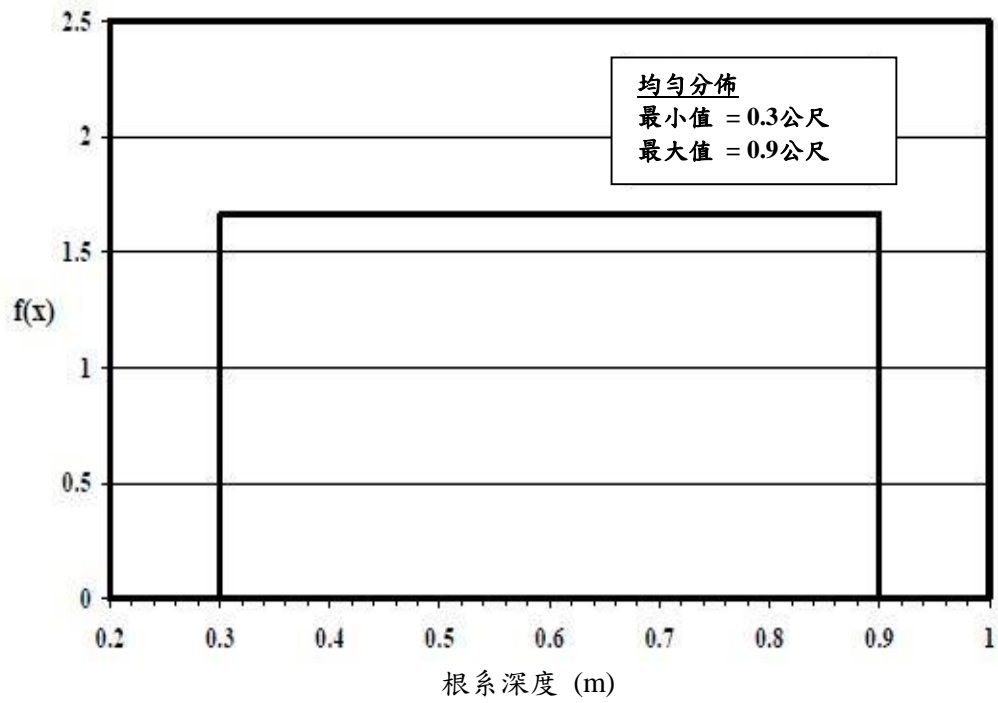


圖 4.2-4 葉類蔬菜根系深度之機率密度函數

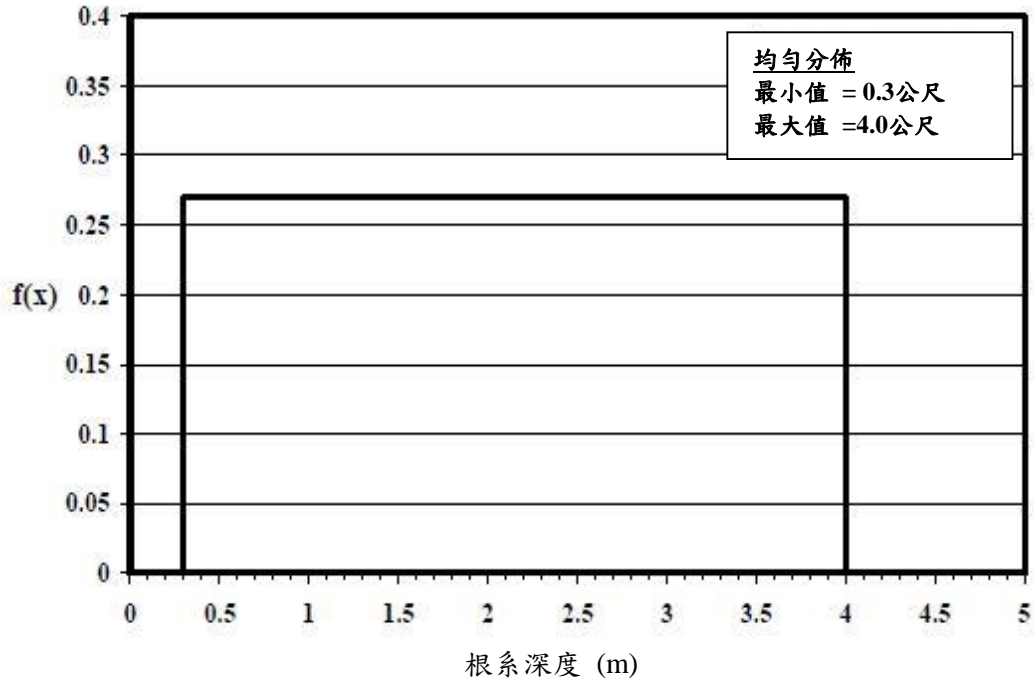


圖 4.2-5 RESRAD(Onsite)根系深度之機率密度函數

4.3植物轉移因子(TRANSFER FACTORS FOR PLANTS)

模組適用: RESRAD-OFFSITE

描述:

植物轉移因子為核種於各種蔬菜、水果、穀物與家畜飼料產品於收成時(鮮重)所含的核種濃度，或是植物由根部收入核種的單位濃度(乾重)。

單位: pCi/g (植物鮮重重量)與pCi/g (土壤乾重重量)之比值。pCi=15毫西佛。

機率輸入形式:

分佈: 截斷對數常態分佈

各分佈型態之定義值:

數值是參考各種放射性元素之同位素，如表4.3-1。該表之數值分別針對人類食用的水果、穀物與蔬菜(RESRAD-ONSITE 與 RESRAD-OFFSITE)及家畜食用之產品(RESRAD-OFFSITE)。各元素之上下四分位數為0.001與0.999。

討論:

土壤至植物轉移因子被定義為植物的放射性核種濃度與土壤的放射性核種濃度之比值。核種的植物轉移因子隨著土壤特性和地質特性而改變，特定的植物類型亦會隨著區域及氣候條件而改變其植物轉移因子數值。此外，管理因子如犁地、撒石灰、施肥及灌溉強度亦會影響其比值(IAEA 1994)。進入蒸散流之後，核種濃度並不會均勻分布至植物內部，而是傾向於集中於特定植物器官(Grogan 1985)。大多數的核種都有相關的植物轉移因子零星資料，不過即使是相同的核種，不同的研究資料顯示其植物轉移因子數值可相差許多級數(IAEA 1994)。

RESRAD-OFFSITE是可以輸入不同水果、堅果、非葉類蔬菜、葉類蔬菜、牧草、青貯和家畜飼糧的植物轉移因子。其中水果、堅果、非葉類蔬菜、葉類蔬菜是針對人類食用的；牧草、青貯和家畜飼糧是針對家畜食用。在其他的輻射評估報告中如NUREG/CR-5512，提供了不同植物類型的植物轉移因子(乾重)。而從各種植物類型「乾重植物轉移因子」轉換至「濕重植物轉移因子」，必須要考量各種植物類型的「乾濕權重轉化因子」。此外特定植物的植物轉移因子必須依植物類型加權(Wang et al. 1993)。雖然不同放射性核種的植物轉移因子數值可能相差數個級數，但是若同個核種條件下所對應不同的植物類型其植物轉換因子的數值就不會相異太大(NCRP 1999)。

對數常態分佈是最適合用來描述植物轉移因子之分佈。植物轉移因子可從全國輻射防護委員會(NCRP 1999)的量測報告取得(附錄D)。該報告提供人類食用的植物轉移因子與其平均數及標準差，另外也提供家畜食用之植物轉移因子，各個元素的數值如表4.3-1，當中 σ 代表為標準差、 μ 為平均值。表4.3-2提供不同濕重產物所所含之平均乾重含量，資料摘錄自IAEA (1994)。

RESRAD-ONSITE和RESRAD-OFFSITE模組需要植物轉移因子描述pCi/g 每克植物鮮重與pCi/g 每克土壤乾重之比值。其他的研究如NUREG/CR-5512 (Kennedy and Strenge, 1992)，描述四種類型的植物轉移因子為pCi/g 每克植物乾重與pCi/g 每克土壤乾重之比值。而乾濕權重轉化因子則適合用來轉換不同乾濕類型的植物轉移因子。(Baes et al., 1984)量測出一個整體平均乾濕權重轉化因子0.428並應用於表4.3-1，所得出的數值與NUREG/CR-5512 (Kennedy and Strenge 1992)報告中的數值符合。

表 4.3-1植物轉移因子之對數常態分佈參數值

元素	人類食用 ^a		家畜飼料 ^b	
	μ_v	σ	μ_p	σ
Ac	-6.91	1.1	-6.91	1.1
Ag	-5.52	0.9	-3.69	0.9
Al	-5.52	1.1	-5.30	1.1
Am	-6.91	0.9	-6.91	0.9
As	-2.53	1.1	-3.00	1.1
Ba	-4.61	1.1	-3.69	0.9
Be	-5.52	1.1	-5.30	1.1
Bi	-2.3	1.1	-2.08	1.1
Br	-0.92	1.1	-0.69	1.1
C ^c	-0.36	0.9	-0.36	0.9
Ca	-0.69	1.1	0.22	1.1
Cd	-0.69	1.1	-1.39	1.1
Ce	-6.21	1	-4.38	1.0
Cf	-6.91	1.1	-6.91	1.1
Cl	3	1.1	3.22	1.1
Cm	-6.91	0.9	-6.91	0.9
Co	-2.53	0.9	-0.69	0.9
Cr	-4.61	1	-4.61	1.0
Cs	-3.22	1	-3.00	1.0
Cu	-3	1	-1.61	1.0
Eu	-6.21	1.1	-4.38	1.1
F	-3.91	1.1	-4.20	1.1
Fe	-6.91	0.9	-5.99	1.0
Gd	-6.21	1.1	-4.38	1.1
Ge	-0.92	1.1	0.00	1.1
H _e	1.57	1.1	1.57	1.1
Hg	-1.2	1.1	-1.39	1.1
Ho	-6.21	1.1	-4.38	1.1
I	-3.91	0.9	-3.69	0.9
In	-5.81	1.1	-5.99	1.1
Ir	-3.51	1.1	-3.00	1.1
K	-1.2	1.1	-0.29	1.1
La	-6.21	0.9	-4.38	0.9
Mg	-3.5	1.1	-3.69	1.1
Mn	-1.2	0.9	0.92	0.9
Mo	-2.3	1.1	-2.30	1.0
N ^c	3.4	0.9	3.4	0.9
Na	-3	1	-3.00	1.0
Nb	-4.61	1.1	-3.69	1.0
Nd	-6.21	1	-4.38	1.1
Ni	-3	0.9	-1.39	0.9
Np	-3.91	0.9	-3.69	0.9
P	0	1.1	-0.29	1.1
Pa	-4.61	1.1	-4.38	1.1
Pb	-5.52	0.9	-3.79	0.9

表 4.3-1 (延續上頁)

元素	人類食用 ^a		家畜飼料 ^b	
	μ_v	σ	μ_p	σ
Pd	-2.3	1.1	-2.08	1.1
Pm	-6.21	1.1	-4.38	1.1
Po	-6.9	0.9	-5.99	0.9
Pr	-6.21	1	-4.38	1.0
Pu	-6.91	0.9	-8.29	0.9
Ra	-3.22	0.9	-3.00	0.9
Rb	-1.61	1	-0.69	1.0
Rh	-3.51	1	-3.00	1.0
Ru	-3.51	0.9	-3.00	0.9
S	-0.51	1.1	-0.70	1.1
Sb	-4.61	1	-4.38	1.0
Sc	-6.21	1.1	-5.99	1.1
Se	-2.3	1.1	-2.08	1.1
Si	-3.9	1.1	-3.69	1.1
Sm	-6.21	1.1	-4.38	1.1
Sn	-1.2	1.1	-1.39	1.1
Sr	-1.2	1	0.00	1.0
Ta	-6.21	1.1	-5.30	1.1
Tb	-6.21	1.1	-4.38	1.1
Tc	1.61	0.9	2.30	0.9
Te	-2.3	1	-1.12	1.0
Th	-6.91	0.9	-8.29	0.9
Tl	-1.61	1.1	-1.90	1.1
U	-6.21	0.9	-3.69	0.9
W	-0.22	1	-0.29	1.0
Y	-6.21	1.1	-4.38	1.1
Zn	-0.92	0.9	-1.39	0.9
Zr	-6.91	1.1	-6.68	1.0

^a 採用Bv(wet)數值(NCRP, 1999)

^b 利用0.25乾溼轉化因子，傳化Bv(dry)值為Bp(wet)。

c 摘錄自(Yu et al., 2001).

資料來源: NCRP,1999。

表 4.3-2 不同濕重產物所所含之平均乾重含量
(Average Dry Weight Content of Different Fresh Products)

產物	乾重含量	產物	乾重含量
飼料		穀類	
紫花苜蓿, 苜蓿	0.19	大麥、燕麥、小麥	0.86
玉米	0.31	玉米(玉米)	0.55
青草	0.1	蔬菜	
豌豆, 豆	0.25	捲心菜	0.12
黃豆	0.31	菜花	0.11
根莖作物		芹菜	0.06
甜菜, 甜菜	0.22	生菜	0.08
胡蘿蔔	0.16	菠菜	0.08
蘿蔔	0.09	蕃茄	0.06
蕪菁	0.12	西葫蘆	0.05
球莖甘藍	0.06	黃瓜	0.05
木薯	0.38	韭	0.11
馬鈴薯	0.21	洋蔥	0.11
甘藍	0.11	覆盆子	0.16

資料來源: 摘錄IAEA (1994).

5. 受體參數分布(RECEPTOR PARAMETER DISTRIBUTIONS)

5.1 家庭用水量 (Quantity of Water for Household Purposes)

應用模組：RESRAD-OFFSITE

描述：家庭用水量為家庭內各體用水量之總和。

單位：公升/天

輸入機率：

分布：截斷-對數常態分布

分布值之定義：

低於平均值：5.51

低於第一四分位數：0.001

低於標準偏差：0.407

高於第四四分位數：0.999

討論：

室內水用途，住宅套型通常來自廁所，洗衣機，浴缸和淋浴，馬桶漏水，洗碗機和其他雜項用途。每天使用的總量取決於許多變量，包括地理位置，一年中的時間，共享住所的人的數量，以及裝置和器具的水的效率。表 5.1-1 列出了在住宅設置平均每天人均用水量為一些過去的研究。早期的工作也提出過去 20 世紀 60 年代和 70 年代，擬合對數常態分佈的數據可用以 189 升/天幾何平均的人均室內使用率 Nazaroff *et al.*, (1988)。

最新的研究對居民用水可使用之範例是住宅用途水研究(REUWS) (Mayer *et al.* 1999)。資助這項研究是由美國水務協會研究基金會和 22 直轄市，水利水電和水供應商。這項研究的目標包括水資源利用預測模型的發展，比較地理位置之間的差異，分別為室內和室外水的使用，探討不同的燈具和電器用水量之變化。該 REUWS 記錄北美 12 個不同的地點，為期 2 週，於冬季和夏季連續採樣約 100 單戶住宅。採樣是通過使用連接到水流量計，每個住所數據將被記錄。表 5.1-2 列出每個站點人均室內用水量。

圖 5.1-1 顯示來自 REUWS 之機率分佈函數為 RESRAD-OFFSITE 結合使用人均用水量頻率分佈的直方圖。機率密度函數擬合良好，對數常態分佈利用非線性最小二乘法回歸分析。

表5.1-1 平均每天人均用水量過去研究

研究	住戶數	研究時間 (月)	平均 (公升/人/天)	範圍 (公升/人/天)
----	-----	-------------	----------------	----------------

Brown & Caldwell (1984)	210		250.6	216.9 - 276.3
Anderson and Siegrist (1989)	90	3	268	249.4 - 289.9
Anderson et al. (1993)	25	3	191.9	98.9 - 322.5
Mayer et al. (1999)	1,188	1	262.3	216.1 - 316.1
Weighted average	153		259.7	

表5.1-2 REUWS之12個站點人均室內用水量

研究區域	研究區域大小		平均每日人均室內	每日人均室內使用	人均室內使用標準偏
	住戶數	平均每戶之人數	使用 (公升/人/天)	(中位數) (公升/人/天)	差 (公升/人/天)
Seattle, WA	99	2.8	216	204	108
San Diego, CA	100	2.7	221	205	88.6
Boulder, CO	100	2.4	245	228	97.7
Lompoc, CA	100	2.8	249	212	126
Tampa, FL	99	2.4	249	223	127
Walnut Valley Water District, CA	99	3.3	257	240	117
Denver, CO	99	2.7	262	246	132
Las Virgennes Metropolitan Water District, CA	100	3.1	263	231	146
Waterloo and Cambridge, ON	95	3.1	267	225	169
Phoenix, AZ	100	2.9	294	253	170
Tempe and Scottsdale, AZ	99	2.3	308	240	256
Eugene, OR	98	2.5	316	242	261
12 study sites	1188	2.8	262	229	150

來源：Mayer *et al.*, (1999)

表 5.1-1 和 5.1-2，人均室內用水變化。其內部相互之間的變化可以歸因於區域個人使用習慣，或節水器具減少流動裝置(Mayer *et al.*, 1999)。表 5.1-3 之間呈現設備的使用及 12 站點用水的明細。在燈具/電器，使用事件，流速和研究參與者的人口統計學存在附加信息可見於 Mayer *et al.*, (1999)。

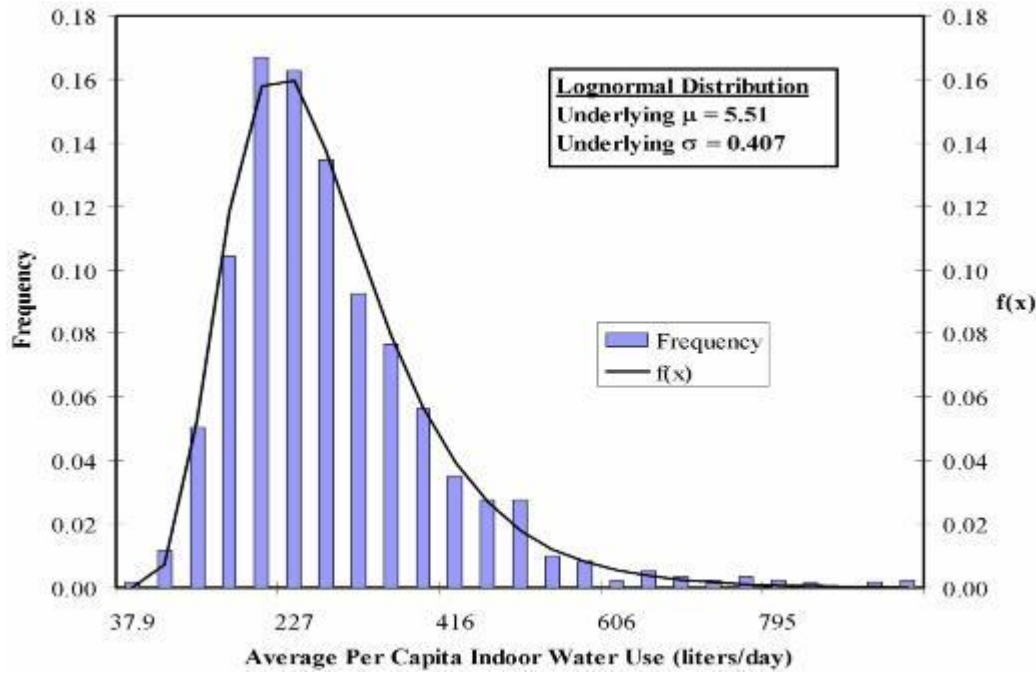


圖 5.1-1 家庭用水量之機率密度函數

表5.1-3 人均室內用水故障率

研究地區	衣服					其他		
	馬桶	洗衣機	蓮蓬頭	水龍頭	滲漏	民生用水	沐浴	洗碗機
Seattle, WA	17.100	12.0	11.4	8.7	5.9	0.0	1.1	1.0
San Diego, CA	15.800	16.3	9.0	10.8	4.6	0.3	0.5	0.9
Boulder, CO	19.8	14.0	13.1	11.6	3.4	0.2	1.4	1.4
Lompoc, CA	16.6	15.3	11.1	9.9	10.1	0.9	1.2	0.8
Tampa, FL	16.700	14.2	10.2	12.0	10.8	0.3	1.1	0.6
Walnut Valley Water District, CA	18	14.1	11.7	12.3	7.6	2.3	1.0	0.8
Denver, CO	21.1	15.6	12.9	10.5	5.8	0.5	1.6	1.2
Las Virgennes Metropolitan 水區 (water distinct), CA	15.7	16.8	11.4	11.2	11.2	1.1	1.3	0.9
Waterloo and Cambridge, ON	20.3	13.7	8.3	11.4	8.2	6.0	1.9	0.8
Phoenix, AZ	19.6	16.9	12.5	9.6	14.8	2.2	1.2	0.8
Tempe and Scottsdale, AZ	18.4	14.5	12.6	11.2	17.6	5.0	0.9	1.1
Eugene, OR	22.9	17.1	15.1	11.9	13.6	0.1	1.5	1.4
12處研究地區	18.5	15.0	11.6	10.9	9.5	1.6	1.2	1.0

來源：Mayer *et al.*, (1999); (Mayer et al. 2000); Tampa, Florida (Mayer et al. 2004);

and the San Francisco Bay area (Mayer et al. 2003)

5.2 戶外比(Outdoor Fraction)

應用模組：RESRAD (onsite), RESRAD-OFFSITE

描述：戶外比為個體於室外所待的時間

單位：無因次

輸入機率：

分布：連續線性

分布值之定義可見於表 5.2-1

討論：

在 RESRAD-ONSITE 和 RESRAD-OFFSITE 中，室外部分中使用的曝露計算，以計算出的時間在室外的停留或居住位置花費的時間量。實際曝露時間在每個位置由受體位置的戶外分數乘以曝露時間進行估計。RESRAD 考慮養殖地區之戶外比。

對 RESRAD-ONSITE 來說，戶外比為受體曝露於輻射線之時間比。當評估農業區時，戶外比將被轉換成曝露於戶外時間的長度。EPA 的曝露因子手冊內容為廣泛的人類活動行為，包含活動於家內庭院的時間。此資料取自 (Tsang and Klepeis, 1996)。表 5.2-1 統整不同情境下的機率分布，此分布可代表 18~64 歲之男性。圖 5.2-1 為 RESRAD (onsite)戶外比參數之累積機率分布函式。此分布函式也適用於住宅區之 RESRAD-OFFSITE。

表5.2-1 戶外比之累積機率分布

累積機率	戶外比	
	住宅	農村地區
0	0.000174	0.000868
0.05	0.00694	0.00347
0.25	0.0278	0.0139
0.5	0.0625	0.0399
0.75	0.125	0.0868
0.9	0.222	0.11
0.95	0.292	0.127
0.98	0.396	0.162
0.99	0.458	0.166
1	0.896	0.166

RESRAD-OFFSITE 對於農村區戶外花費時間比例可近似於曝露於戶外之總時間(EPA 1997)。因為 RESRAD-OFFSITE 模組之四個不同的場區，對於花費時間比此部分皆假設為總時間的 1/4，如表 5.2-1。所用的數值介於 18~64 歲的年齡組中，但這些值近似於那些用於所有的雄性或雌性受體，如表 5.2-2。農村地區戶外比之累積分佈函數，如圖 5.2-2。對於實際場域分析，農村區域之戶外比必須考慮實際區域範圍進行調整。

對於其他 RESRAD-ONSITE 或 RESRAD-OFFSITE 情境皆考慮戶外比，EPA (1997)的報告中也包含戶外比的考量，其分布如表 5.2-2。

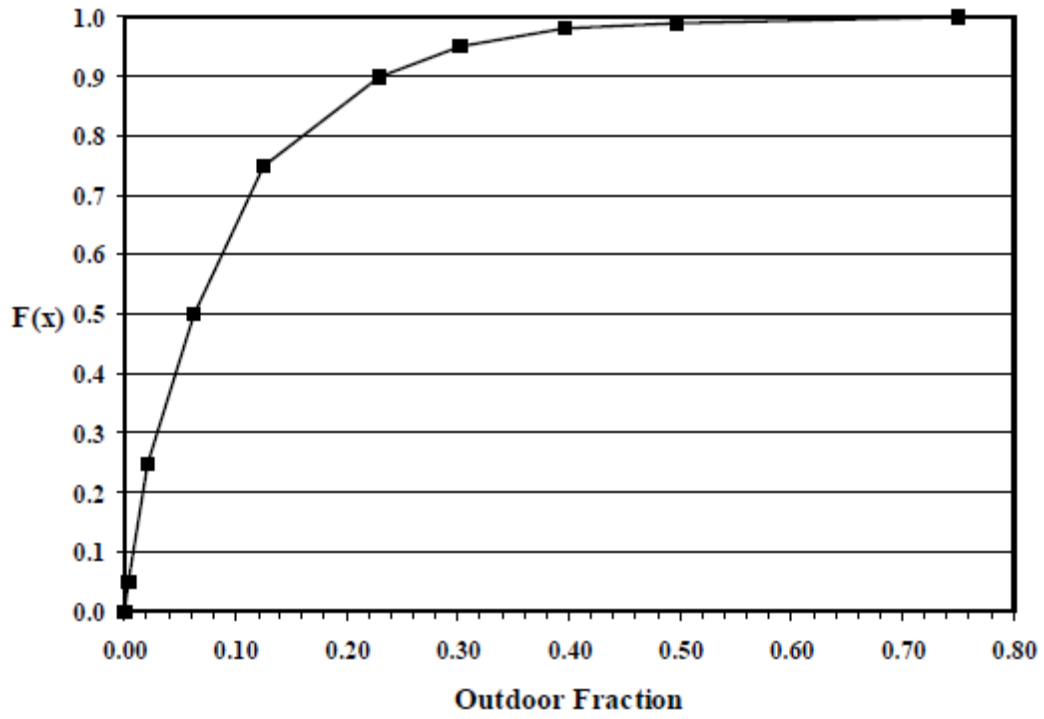


圖 5.2-1 住宅戶外比之累積機率函式 (RESRAD-ONSITE 或 RESRAD-OFFSITE)

表5.2-2 每日戶外比之統計值

項目	人口 群體	N ^a	Min.	Max.	百分比							
					5	25	50	75	90	95	98	99
<i>每日於家裡或戶外之比</i>												
全部		2308	0.001	0.896	0.00694	0.0278	0.0625	0.125	0.222	0.292	0.396	0.458
性別	男性	1198	0.001	0.896	0.00694	0.0417	0.0833	0.138	0.250	0.347	0.435	0.507
性別	女性	1107	0.001	0.740	0.00347	0.0208	0.0521	0.104	0.198	0.250	0.313	0.389
年紀	18-64	1301	0.001	0.750	0.00347	0.0208	0.0625	0.125	0.229	0.302	0.396	0.497
<i>每日農村地區戶外比</i>												
全部		128	0	0.166	0.003	0.013	0.031	0.074	0.104	0.127	0.148	0.162
性別	男性	86	0.001	0.166	0.005	0.016	0.040	0.087	0.115	0.135	0.162	0.166
性別	女性	42	0.001	0.104	0.003	0.009	0.018	0.036	0.046	0.084	0.104	0.104
年紀	18-64	91	0.001	0.166	0.003	0.014	0.040	0.087	0.110	0.135	0.162	0.166
<i>每日工作地區戶外比</i>												
全部		4891	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.021	0.035
性別	男性	2463	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011	0.029	0.042
性別	女性	2428	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.008
年紀	18-64	4621	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.021	0.035

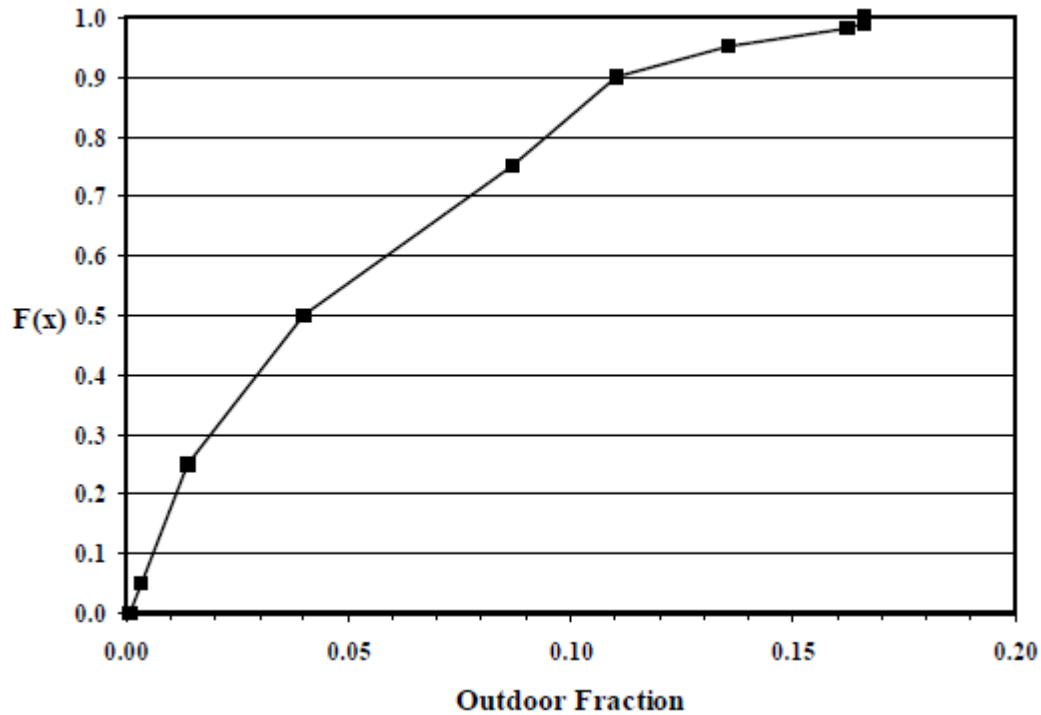


圖 5.2-2 農村地區戶外比之累積機率函數

6. 參考文獻 (REFERENCES)

Allen, R.G., et al., *Crop Evapotranspiration — Guidelines for Computing Crop Water Requirements*, FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e00.htm>, 1998.

Allen, R.R., et al., "Residual Deep Plowing Effects on Irrigation Intake for Pullman Clay Loam," *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:1424-1429, 1995.

Anderson, D.L. and R.L. Siegrist, "The Performance of Ultra-Low Volume Flush Toilets in Phoenix," *Journal of the American Water Works Association*, 81(3):52-57, 1989.

Anderson, D.L., et al., "The Impact of Water Conserving Water Fixtures on Residential Water Use Characteristics in Tampa, Florida," in *Proceedings of the Conserv93 Conference*, December 12-16, Las Vegas, Nev., 1993.

Baes, C.F., III, et al., *A Review and Analysis of Parameters for Assessing Transport of Environmentally Released Radionuclides Through Agriculture*, ORNL-5786, Health and Safety Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn., 1984.

Baker, J., *Forage Variety Production Notes*,
<http://www.noble.org/Ag/Research/Articles/ForageVariety2002/index.htm>, 2002.

Baker, J., *Forage Yields from Bermudagrass, Varieties and Strains*, Jerry L. Baker, The Samuel Roberts Noble Foundation Inc., 2510 Sam Noble Parkway, Ardmore, Okla. 73401, NF-FO-04-02, 2003.

Beyeler, W.E., et al., "Review of Parameter Data for the NUREG/CR_5512 Residential Farmer Scenario and Probability Distributions for the DandD Parameter Analysis," letter report prepared by Sandia National Laboratories for U.S. Nuclear Regulatory Commission, January 1998.

Biwer, B.M., et al., *Technical Basis for Calculating Radiation Doses for the Building Occupancy Scenario Using the PROBABILISTIC RESRAD-BUILD 3.0 Code*, NUREG/CR-6755, ANL/EAD/TM-02-1, prepared by Argonne National Laboratory, Argonne, Ill., for the U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research, Division of Systems Analysis and Regulatory Research, Washington, D.C., February 2002.

Brown and Caldwell, *Residential Water Conservation Projects*, Research Report 903 (HUD-PDR-903), U.S. Department of Housing and Urban Development, Office of

Policy Development, Washington, D.C., 1984.

Buckingham, F., *Tillage*, Deere & Company, Moline, Ill., 1984.

Burmester, D.E., “A Lognormal Distribution for Time Spent Showering,”
Risk Analysis, 18(1):33-35, 1998.

Canadell, J., et al., “Maximum Rooting Depth of Vegetable Types at the
Global Scale,” *Oecologia*, 108:583-595, 1996.

Carsel R.F. and R.S. Parrish, “Developing Joint Probability Distributions of
Soil Water Retention Characteristics,” *Water Resources Research*,
24:755-769, May 1988.

Curwen, D. and L.R. Massie, “Irrigation Management in Wisconsin — the Wisconsin
Irrigation Scheduling Program (WISP),” A3600, I-01-94-2M-90-MS, 1994.

DOE — See U.S. Department of Energy.

Dunker, R.E., et al., “Deep Tillage Effects on Compacted Surface-Mined Land,”
Soil Sci. Soc. Am. J., 59:192-199, 1995.

Electric Power Research Institute, *A Review of Field Scale Physical Solute Transport
Processes in Saturated and Unsaturated Porous Media*, Palo Alto, Calif., as
referenced in EPA (2003), 1985.

EPA — U.S. Environmental Protection Agency.

EPRI — See Electric Power Research Institute.

Evans, et al., “Soil, Water, and Crop Characteristics Important to Irrigation
Scheduling,” published by North Carolina Cooperative Extension Service,
publication number AG 452-1,
<http://www.bae.ncsu.edu/programs/extension/evans/ag452-1.htm>, June 1996.

Fogh, C.L., et al., “Size Specific Indoor Aerosol Deposition Measurements
and Derived I/O Concentrations Ratios,” *Atmospheric Environment*,

31:2193-2203, 1997.

Gelhar, Lynn W., et al., “A Critical Review of Data on Field-Scale Dispersion in Aquifers,”

Water Resources Research, 28(7):1955-1974, 1992.

Georgeson, C.C. and J.E. Payne, “Investigation of the Root Development of Some Forage Plants,” Experimental Station of the Kansas State Agricultural College, Manhattan, Bulletin No. 75, August 1897.

Geraghty, J., et al., *Water Atlas of the United States*, Plate 13, Water Information Center, Inc., Port Washington, N.Y., 1973.

Grogan, H.A., *Concentration Ratios for BIOPATH: Selection of the Soil-to-Plant Concentration Ratios Database*, Report EIR-Bericht Nr. 575, Swiss Federal Institute for Reactor Research, Geneva, Switzerland, 1985.

Harper et al., *Probabilistic Accident Consequence Uncertainty Analysis, Dispersion and Deposition Uncertainty Assessments, Appendices C,D,E,F, and G*, Vol. 3, NUREG/

CR-6244, EUR 15855EN, SAND94-1453, prepared for U.S. Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory Research, Washington, D.C., and the Commission of the European Communities, Brussels, 1995.

Ho, C.K., et al., *Development of a Risk-Based Probabilistic Performance-Assessment Method for Long-Term Cover Systems – 2nd Edition*, SAND2002-3131, Sandia National Laboratories, Albuquerque, N.M., 2002.

Hoffman, F. O., et al., *Variability in Dose Estimates Associated with the Food Chain Transport and Ingestion of Selected Radionuclides*, NUREG/CR-2612, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn., 1982.

IAEA — See International Atomic Energy Agency.

ICRP — International Commission on Radiological Protection.

International Atomic Energy Agency, *Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Temperate Environments*, Technical Reports Series No. 364, produced in collaboration with the International Union of Radioecologists, Vienna, 1994.

International Commission on Radiological Protection, *Principles of Monitoring for the Radiation Protection of the Population*, ICRP No. 43, New York, N.Y., 1985.

John, W., “The Characteristics of Environmental and Laboratory-Generated Aerosols,” in *Aerosol Measurement, Principles, Techniques, and Applications*, Willeke, K. and P.A. Baron (eds.), John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y., pp. 54-76, 1993.

Justus, C.G., et al., “Nationwide Assessment of Potential Output from Wind-Powered Generators,” *J. Appl. Meteor.*, 15(7):673-678, 1976.

Kemble, J.K. and D.C. Sanders, “Basics of Vegetable Crop Irrigation,” ANR-1169, <http://www.aces.edu>, April 2000.

Kennedy, W.E. and D.L. Strenge, *Residual Radioactive Contamination from Decommissioning; A Technical Basis for Translating Contamination Levels to Annual Total Effective Dose Equivalent*, NUREG/CR-5512, PNL 7994, Vol. 1, prepared by Pacific Northwest Laboratory for U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1992.

Klotz, D. and Moser, H., “Hydrodynamic Dispersion as Aquifer Characteristic: Model Experiments with Radioactive Tracers,” *Isotope Techniques in Groundwater Hydrology*, Vol. 2, International Atomic Energy Agency, Vienna, p. 341-354, 1974.

Konoplev, A.V., et al., “Influence of Agricultural Countermeasures on the Ratio of Different Chemical Forms of Radionuclides in Soil and Soil Solution,” *Sci. Total Environ.*, 137:147-162, 1993.

Lang, C., “Indoor Deposition and the Protective Effect of Houses Against Airborne Pollution,” Ph.D Thesis Riso-R-780(en), ISBN 87-550-2024-0 (as cited in Fogh et al., 1997), 1995.

Luna, R.E. and H.W. Church, "Estimation of Long Term Concentrations Using a 'Universal' Wind Speed Distribution," *J. Appl. Meteor.*, 13:910-916, 1974.

Majewski, C., University of New Hampshire Extension educator, agricultural resources (forage, hay, and haylage production with selected forage species), 2004.

Mayer, P.W., et al., *Residential End Uses of Water*, AWWA Research Foundation and American Water Works Association, Denver, Colo., 1999.

Mayer, P., 2005, personal communication from P. Mayer, Aquacraft, Inc., Boulder, Colorado, to B. Biwer, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois, October 5.

Meyer, P.D., et al., "Uncertainty Analyses of Infiltration and Subsurface Flow and Transport for SDMP Sites," NUREG/CR-6565, Pacific Northwest National Laboratory, prepared for U.S. Nuclear Regulatory Commission, September 1997.

Mayer, P.W., et al., *Seattle Home Water Conservation Study, the Impacts of High Efficiency Plumbing Fixture Retrofits in Single-Family Homes*, prepared by Aquacraft, Inc., Water Engineering and Management, Boulder, Colo., for Seattle Public Utilities and the U.S. Environmental Protection Agency, December 2000.

Mayer, P.W., et al., *Residential Indoor Water Conservation Study: Evaluation of High Efficiency Indoor Plumbing Fixture Retrofits in Single-Family Homes in the East Bay Municipal Utility District Service Area*, prepared by Aquacraft, Inc., Water Engineering and Management, Boulder, Colo., for the East Bay Municipal Utility District and the U.S. Environmental Protection Agency, July 2003.

Mayer, P.W., et al., *Tampa Water Department Residential Water Conservation Study, the Impacts of High Efficiency Plumbing Fixture Retrofits in Single-Family Homes*, prepared by Aquacraft, Inc., Water Engineering and Management, Boulder, Colo., for the Tampa Water Department and the U.S. Environmental Protection Agency, January 2004.

National Climatic Data Center, "Comparative Climatic Data for the United States through 1998," National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department

of Commerce, Washington, D.C., 1999.

National Council on Radiation Protection and Measurements, *Radiological Assessment: Predicting the Transport, Bioaccumulation, and Uptake by Man of Radionuclides Released to the Environment*, NCRP Rep. No. 76, Bethesda, Md., 1984.

National Council on Radiation Protection and Measurements, *Recommended Screening Limits for Contaminated Surface Soil and Review of Factors Relevant to Site-Specific Issues*, Report No. 129, 1999.

Nazaroff, W.W., et al., "Radon Entry via Potable Water," in *Radon and Its Decay Products in Indoor Air*, Nazaroff, W.W. and A.V. Nero, Jr. (eds.), John Wiley & Sons, New York, N.Y., 1988.

Nazaroff, W.W. and G.R. Cass, "Mass-Transport Aspects of Pollutant Removal at Indoor Surfaces," *Environ. Int.*, 15:567-584, 1989.

Nazaroff, W.W., et al., "Critique of the Use of Deposition Velocity in Modeling Indoor Air Quality," in *Modeling of Indoor Quality and Exposure*, Nagda, N.L. (ed.), ASTM STP 1205, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Penn., pp. 148-165, 1993.

NCDC — See National Climatic Data Center.

NCRP — See National Council on Radiation Protection and Measurements.

Neuman, Shlomo P., "Universal Scaling of Hydraulic Conductivities and Dispersivities in Geologic Media," *Water Resources Research*, 26:1749-1758, 1990.

NRC — See U.S. Nuclear Regulatory Commission.

Offermann, F.J., et al., "Control of Respirable Particles in Indoor Air with Portable Air Cleaners," *Atmos. Environ.*, 19:1761-1771, 1985.

Owensby, C.E. and K.L. Anderson, *Effect of Clipping Date on Loamy Upland*

Bluestem Range, contribution No. 1069, Department of Agronomy, Kansas Agricultural Experiment Station, Manhattan, Kan., 1969.

Palmer, D.P., "Irrigation," in *Davis's Handbook of Applied Hydraulics*, Zipparro, V.J., et al. (eds.), 4th ed., McGraw Hill, New York, N.Y., 1993.

Parks, B.S., 1992, User's Guide for CAP88-PC, Version 1.0, EPA-402-B-92-001, U.S. Environmental Protection Agency, Las Vegas, Nev., 1992.

Renard, K.G., et al., *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*, Agricultural Handbook No. 703, U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Tucson, Ariz., January 1997.

Roed, J. and R.J. Cannell, "Relationship between Indoor and Outdoor Aerosol Concentration Following the Chernobyl Accident," *Radiat. Prot. Dosim.*, 21:107-110, 1987.

Schulze-Makuch, D., "Longitudinal Dispersivity Data and Implications for Scaling Behavior," *Ground Water*, 43(3):443-456, 2005.

Sehmel, G.A., "Particle and Gas Dry Deposition: A Review," *Atmos. Environ.*, 14:983-1011, 1980.

Sehmel, G.A., "Deposition and Resuspension," in *Atmospheric Science and Power Production*, DE84-005177, DOE/TIC-27601, Randerson, D. (ed.), Weather Nuclear Support Office, National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce, prepared for U.S. Department of Energy, Office of Energy Research, Office of Health and Environmental Research, Washington, D.C., 1984.

Seinfeld, J.H. and S.N. Pandis, *Atmospheric Chemistry and Physics*, John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y., 1998.

- Shen, H.W. and P. Julien, "Erosion and Sediment Transport," in *Handbook of Hydrology*, Maidment, D.R. (ed.), McGraw-Hill, Inc., New York, N.Y., 1993.
- Sinclair, J.D., et al., "Indoor/Outdoor Concentrations and Indoor Surface Accumulations of Ionic Substances," *Atmos. Environ.*, 19(2):315-323, 1985.
- Thatcher, T.L. and D.W. Layton, "Deposition, Resuspension, and Penetration of Particles within a Residence," *Atmos. Environ.*, 29(13):1487-1497, 1995.
- Tsang, A.M. and N.E. Klepeis, "Results Tables from a Detailed Analysis of the National Human Activity Pattern Survey (NHAPS) Response," draft report prepared for the U.S. Environmental Protection Agency by Lockheed Martin, Contract No. 68-W6-001, 1996.
- U.S. Department of Agriculture, "Usual Planting and Harvesting Dates for U.S. Field Crops," Agricultural Handbook Number 628, December 1997.
- U.S. Department of Agriculture, *1997 National Resources Inventory (revised December 2000)*, Natural Resources Conservation Service, Washington, D.C., and Statistical Laboratory, Iowa State University, Ames, Iowa, CD-ROM, Version 1, December 2001.
- U.S. Department of Agriculture, National Agronomy Manual, 190-V-NAM, 3rd edition, National Resources Conservation Service, Washington, D.C., October 2002.
- U.S. Department of Energy, *Preliminary Remediation Goals for Use at the U.S. Department of Energy Oak Ridge Operations Office*, ES/ER/TM-106, Environmental Restoration Division, Oak Ridge, Tenn., 1995.
- U.S. Environmental Protection Agency, "Exposure Factors Handbook, Update to Exposure Factors Handbook, EPA/600/8-89/043 — May 1989," EPA/600/P-95/002Fa,b&c, National Center for Environmental Assessment, Office of Research and Development, Washington, D.C., August 1997.
- U.S. Environmental Protection Agency, *Onsite Wastewater Treatment*

Systems Manual, EPA/625/R-00/008, Office of Water, Office of Research and Development, Washington, D.C., February 2002.

U.S. Environmental Protection Agency, *EPA's Composite Model for Leachate Migration with Transformation Products (EPACMTP), Parameters/Data Background Document*, EPA530-R-03-003, Office of Solid Waste, Washington, D.C., April 2003.

U.S. Environmental Protection Agency, *Air Quality Criteria for Particulate Matter, Vols. I & II*, EPA/600/P-99/002aF and EPA/600/P-99/002bF, National Center for Environmental Assessment-RTP, Office of Research and Development, Research Triangle Park, N.C., 2004.

U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air and Radiation, home page for the AirData Web site, <http://www.epa.gov/air/data/index.html>, 2005.

U.S. Nuclear Regulatory Commission, *Regulatory Guide 1.109: Calculation of Annual Doses to Man from Routine Releases of Reactor Effluents for the Purpose of Evaluating Compliance with 10 CFR Part 50, Appendix I*, Washington, D.C., 1977.

USDA — See U.S. Department of Agriculture.

Vervoort, R. W., et al., "Soil Structure Development and Preferential Solute Flow," *Water Resources Research* 35:913-928, 1999.

Vovk, I.F., et al., "Technical Approaches to Decontamination of Terrestrial Environments in the CIS (former USSR)," *The Science of the Total Environment*, 137:49-63, 1993.

Wang, Y.Y., et al., *A Compilation of Radionuclide Transfer Factors for the Plant, Meat, Milk, and Aquatic Food Pathways and the Suggested Default Values for the RESRAD Code*, ANL/EAIS/TM_103, Argonne National Laboratory, Argonne, Ill., prepared for the U.S. Department of Energy, August 1993.

Weaver, J.E., *Root Development of Field Crops*, first edition, McGraw-Hill Book Company,

<http://www.soilandhealth.org/01aglibrary/010139fieldcroproots/010139toc.html>,
1926.

Weaver, J.E. and W.E. Bruner, *Root Development of Vegetable Crops*, first edition,
McGraw- Hill Book Company,
<http://www.soilandhealth.org/01aglibrary/010137veg.roots/010137toc.html>, 1927.

Whelan, G., et al., *The Remedial Action Priority System (RAPS): Mathematical Formulations*, DOE/RL/87-09, Pacific Northwest Laboratory, Richland, Wash.,
1987.

Whitby, K.T. and G.M. Sverdrup, “California Aerosols: Their Physical and Chemical Characteristics,” in *The Character and Origins of Smog Aerosols*, Hidy, G.M., et al. (eds.), John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y., pg. 495,
1980 (as cited in John, 1993).

Wilkes, C.R., et al., “Probability Distributions for Showering and Bathing Water-Use Behavior for Various U.S. Subpopulations,” *Risk Analysis*,
25(2):317-337, 2005

Wischmeier, W.H. and D.D. Smith, *Predicting Rainfall Erosion Losses — A Guide to Conservation Planning*, Agriculture Handbook No. 537, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., December 1978.

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

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

附錄 B RESRAD 模擬土壤中放射性物質影響之 資料蒐集手冊

RESRAD 模擬土壤中放射性物質影響之資料蒐集手冊
DATA COLLECTION HANDBOOK TO SUPPORT
MODELING IMPACTS OF RADIOACTIVE
MATERIAL IN SOIL

by

C. Yu, C. Loureiro*, J.-J. Cheng, L.G. Jones, Y.Y. Wang, Y.P. Chia,* and E. Faillace

環境評估和信息科學部阿岡國家實驗室，阿岡國家實驗室，伊利諾州
Environmental Assessment and Information Sciences Division
Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois

April 1993

work sponsored by

U.S. Department of Energy
Assistant Secretary for Environment, Safety and Health
Office of Environmental Guidance
Assistant Secretary for Environmental
Restoration and Waste Management
Office of Environmental Restoration

Loureiro is associated with Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, Brazil, and Chia with the Department of Geology, Taiwan University, Taiwan, Republic of China.

目錄	
謝誌	6
符號	6
摘要	8
1 介紹 INTRODUCTION	8
2 土壤密度 SOIL DENSITY	23
3 總孔隙率 TOTAL POROSITY	32
4 有效孔隙率 EFFECTIVE POROSITY	36
5 水力傳導係數 HYDRAULIC CONDUCTIVITY	37
6 體積含水率 VOLUMETRIC WATER CONTENT	52
7 有效氡擴散係數 EFFECTIVE RADON DIFFUSION COEFFICIENT	54
8 氡析出係數 RADON EMANATION COEFFICIENT	60
9 降水 PRECIPITATION RATE	63
10 逕流係數 RUNOFF COEFFICIENT	67
11 灌溉流量 IRRIGATION RATE	69
12 蒸發散係數 EVAPOTRANSPIRATION COEFFICIENT	70
13 土壤特定指數 b 參數 (SOIL-SPECIFIC EXPONENTIAL b PARAMETER)	73
14 侵蝕速率 EROSION RATE	74
15 水力梯度 HYDRAULIC GRADIENT	75
16 汙染區域平行於含水層之長度 LENGTH OF CONTAMINATED ZONE PARALLEL TO THE AQUIFER FLOW	76
17 河川或池塘的流域面積 WATERSHED AREA FOR NEARBY STREAM OR POND	76
18 地下水位下降速率 WATER TABLE DROP RATE	77
19 井-泵浦取水深度 WELL-PUMP INTAKE DEPTH	77
20 氡氣垂直高度 RADON VERTICAL DIMENSION OF MIXING	77
21 年平均風速 AVERAGE ANNUAL WIND SPEED	78
22 建築物平均空氣交換率 AVERAGE BUILDING AIR EXCHANGE RATE	78
23 建築物房間高度 BUILDING ROOM HEIGHT	
24 建築物室內面積因子 BUILDING INDOOR AREA FACTOR	
25 未飽和層非汙染區域之厚度 THICKNESS OF UNCONTAMINATED UNSATURATED ZONE	80
26 建築物地基深度 BUILDING FOUNDATION THICKNESS	81
26 地基於地表下之深度 FOUNDATION DEPTH BELOW GROUND SURFACE	81
28 室內停留時間比率 FRACTION OF TIME SPENT INDOORS ON-SITE	81
29 室外停留時間 FRACTION OF TIME SPENT OUTDOORS ON-SITE	81
30 汙染區域面積 AREA OF CONTAMINATED ZONE	82
31 覆蓋深度 COVER DEPTH	82
32 分佈係數 DISTRIBUTION COEFFICIENTS	83
33.地下水放射性核種濃度 RADIONUCLIDE CONCENTRATION IN GROUNDWATER	87
34.浸出率 LEACH RATE	88
35 吸入之質量負荷 MASS LOADING FOR INHALATION	88
36.吸入路徑之遮蔽係數 SHIELDING FACTOR FOR INHALATION PATHWAY	89

37 根系深度 DEPTH OF ROOTS	89
38 土壤攝入率 SOIL INGESTION RATE	89
39 汙染區域之厚度 THICKNESS OF CONTAMINATED ZONE	90
40. 輻射劑量限值 RADIATION DOSE LIMIT	91
41 海鮮食物消耗率 SEAFOOD CONSUMPTION RATE	91
42 水果、蔬菜、糧食消耗率 FRUIT, VEGETABLE, AND GRAIN CONSUMPTION RATE	92
43 吸入率 INHALATION RATE	93
44 有葉蔬菜消耗率 LEAFY VEGETABLE CONSUMPTION RATE	94
45 牛及乳牛飲水攝入率 LIVESTOCK WATER INTAKE RATE FOR BEEF CATTLE AND MILK COWS	94
46 牛肉和禽肉消耗率 MEAT AND POULTRY CONSUMPTION RATE	94
47 牛奶消耗率 MILK CONSUMPTION RATE	95
48 外部 GAMMA 射線之遮蔽係數 SHIELDING FACTOR FOR EXTERNAL GAMMA RADIATION	95
49 廢棄物放置的經過時間 ELAPSED TIME OF WASTE PLACEMENT	95
50 形狀因子(外部 GAMMA)SHAPE FACTOR (EXTERNAL GAMMA)	96
51 主要放射性核種初始濃度 INITIAL CONCENTRATIONS OF PRINCIPAL RADIONUCLIDES	97
52 飲用水攝入率 DRINKING WATER INTAKE RATE	98
53 參考文獻 REFERENCES	99

圖目錄

圖 2.1 美國農業部土壤命名法	27
圖 9.1 北美大陸年平均降水率	66
圖 12.1 美國的潛勢蒸發散率分布	71
圖 50.1 示意圖_非規格形狀汙染區域環繞並分成四個圓型環狀.....	97

表目錄

表 1.2-1 機率密度函數之參數設定.....	9
表 2.1-1 不同土壤型態之體積含水量累積機率分布.....	10
表 2.1-2 不同土壤型態之體積含水量分布值.....	10
表 2.2-1 非飽和層縱向延散性累積分佈.....	13
表 2.2-2 飽和層縱向延散性的累積分佈.....	13
表 2.2-3 飽和層水平延散性累積分佈.....	14
表 2.2-4 飽和層垂直延散性累積分佈.....	14
表 2.3-1 降雨侵蝕指數之累積分佈.....	18
表 2.4-1 土壤沖蝕指數之累積分佈.....	19
表 2.4-2 不同有機物含量之土壤沖蝕指數(噸/英畝).....	20
表 2.5-1 坡長及坡度因子之累積分佈.....	22
表 2.6-1 覆蓋與管理因子之累積分佈.....	24
表 2.6-2 牧場(PASTURE, RANGE)和閒置地區覆蓋與管理因子(C)表.....	25
表 2.6-3 不受外界干擾之森林之覆蓋與管理因子(C).....	26
表 2.7-1 P 值之累積機率分佈.....	27
表 2.7-2 P 值和坡長限制.....	28
表 2.7-3 帶狀種植之最大帶狀寬度和坡長限制之 P 值.....	28
表 2.9-1 不同之農業氣候區域之平均 ET_0 值.....	34
表 2.9-2 不受外力干擾及良好管理之 $K_{c,AVG}$	35
表 2.9-2 (續 1).....	36
表 2.9-2 (續 2).....	38
表 2.9-3 於良好管理下之不同類型作物之 $K_{c,AVG}$ 值.....	40
表 2.9-4 溫帶半乾燥區蒸發散係數案例計算.....	42
表 3.1-1 RESRAD 攝入之質量負荷累積分佈函數.....	45
表 3.2-1 藉由顆粒尺寸量測之室內沉降速度.....	52
表 3.2-2 居所有無放置家具與顆粒尺寸量測之沉降速度.....	53
表 3.2-3 各種放射性核種之室內沉降速度.....	53
表 3.3-1 RESRAD-OFFSITE 程式中風速均勻分布之上下限.....	56
表 3.3-2 STAR 風速區間.....	57
表 4.1-1 生長週期的三角形分佈(天).....	58
表 4.1-2 牧草於四個階段生長週期被消耗所需時間(天).....	58
表 4.1-3 美國不同糧食作物的生長週期.....	60
表 4.1-4 不同穀物於四個階段生長週期被消耗所需時間.....	61
表 4.1-5 不同水果、堅果、穀物與非葉類蔬菜於四個階段生長週期被消耗所需時間.....	63

表 4.1-6 不同葉類蔬菜於四個階段生長週期被消耗所需時間	65
表 4.2-1 根系深度均勻分布輸入值	67
表 4.2-2 不同牧草之根系深度	68
表 4.2-3 不同穀物之根系深度	69
表 4.2-4 不同水果、堅果與非葉類蔬菜之根系深度	70
表 4.2-5 不同葉類蔬菜之根系深度	71
表 4.3-1 植物轉移因子之對數常態分佈參數值	74
表 4.3-1 (延續上頁)	75
表 4.3-2 不同濕重產物所所含之平均乾重含量	76
表 5.1-1 平均每天人均用水量過去研究	77
表 5.1-2 REUWS 之 12 個站點人均室內用水量	78
表 5.1-3 人均室內用水故障率	79
表 5.2-1 戶外比之累積機率分布	81
表 5.2-2 每日戶外比之統計值	83

謝誌

The authors would like to thank Andrew Wallo III, W. Alexander Williams, and Harold Peterson, Jr., of the U.S. Department of Energy for providing guidance, encouragement, discussion, and comments during the preparation of this report. We would also like to thank the following people for reviewing the draft report: Donald L. Mackenzie and Gary Hartman of the U.S. Department of Energy; Richard Swaja of Oak Ridge National Laboratory; John Russell of Booz-Allen & Hamilton, Inc.; YuChien Yuan of Square Y Consultants; and Shih-Yew Chen, Cheong-Yip R. Yuen, and Stephen C.L. Yin of Argonne National Laboratory. Finally, we thank Patricia Hollopeter for editorial assistance and the Information and Publishing Division Document Processing Center for document preparation.

符號

以下為只取首字母的縮寫詞、詞首字母縮略詞及縮寫之符號表

	阿岡國家研究室
ANL	Argonne National Laboratory
	美國材料和試驗協會
ASTM	American Society for Testing and Materials
	衍生集中指南
DCG	derived concentration guide
	美國陸軍
DOA	U.S. Department of the Army
	美國能源部
DOE	U.S. Department of Energy
DOI	美國內政部

	U.S. Department of the Interior
	美國環境保護局
EPA	U.S. Environmental Protection Agency
	補救行動計劃
FUSRAP	Formerly Utilized Sites Remedial Action Program
	國際輻射防護協會
ICRP	International Commission on Radiological Protection
	檢測低限
LLD	lower limit of detection
	美國國家科學院
NAS	National Academy of Sciences
	美國國家癌症研究所
NCI	National Cancer Institute
	國家遠洋漁業服務中心
NMFS	National Marine Fisheries Service
	國家海洋及大氣總署
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
	美國核管會
NRC	U.S. Nuclear Regulatory Commission
	美國水土保持局
SCS	U.S. Soil Conservation Service
	四氯雙苯環戴奧辛
TCDD	tetrachlorodibenzo-p-dioxin
	美國農業部
USDA	U.S. Department of Agriculture
	土壤流失方程式
USLE	Universal Soil Loss Equation

量測單位

°C	攝氏	m	公尺
cm	公分	m ²	平方公尺
cm ³	立方公分	m ³	立方公尺
d	天數	mi	英里
ft ²	平方英尺	mi ²	平方英里
g	公克	mm	毫米
gal	加侖	mol	莫耳
h	小時	mrem	毫侖目
in.	英吋	mSv	毫西弗特
keV	(千)伏特	pCi	微微居里

kg	公斤	s	秒
km ²	平方公里	T	時間
l	長度	V	體積
l ²	長度的平方	yr	年
l ³	長度的立方		
L	公升		
lb	磅		
M	質量		

土壤特性

C. Yu, C. Loureiro, J.-J. Cheng, L.G. Jones, Y.Y. Wang,
Y.P. Chia, and E. Faillace

摘要

美國能源部已開發 RESRAD 模式進行殘留輻射能物質路徑分析並寫成使用手冊。不僅水文地質、氣象、地球化學及地理幾何參數(長度、寬度及深度);土壤相關參數皆考慮於 RESRAD 模式中。本手冊探討參數中的定義、種類、變異程度、量測方法論及地下水濾管開口深度位置。雖然本手冊發展主要為 RESRAD 模組所使用，內容所提及的也適用於其他模組。

1 介紹 INTRODUCTION

為協助美國能源部(以下簡稱 DOE)建立殘留放射線物質指導方針，阿岡國家研究室(以下簡稱 ANL)發展計算機程式—RESRAD。RESRAD 開始發展始於 1980 年代初，經過 DOE 的努力及 ANL 的研發合作而有目前使用的 RESRAD 程式。DOE 透過 RESRAD 制定地區未受污染準則和輻射劑量計算。第一版 RESRAD 於 1989 年問世，之後陸續有新的功能加入其中。DOE 的環境部門提供基期的概念作為模組設定重大環境改變時之依據。言歸正傳，本書主要目的為引導 RESRAD 的使用者對模組參數設定及結果分析方面建立一個正確的評估方法。

RESRAD 模組是一個易於使用和多管道分析方法的程式。其主要功能為計算輻射劑量和輻射風險評估，當核子事故發生時的放射線擴散範圍內之災害受損程度皆可模擬預估。

當然 ANL 於 1991 年針對 RESRAD 模組內眾多參數進行敏感性分析其結果於文獻 *RESRAD Parameter Sensitivity Analysis* (Cheng et al., 1991)說明。一般而言，於地下水污染穿越時間(breakthrough time)發生前，覆蓋材質與污染區域之參數比未飽和與飽和地下水層之參數較敏感。其中穿越時間為污染物由非飽和層入滲至地下水過程的總時間。而參數改變的影響發生於穿越時間之後。於溶解的過程中，參數的敏感性對劑量濃度最大値之時間前後有著負面的影響。

RESRAD 模組已建立參數敏感性分析其中，幫助使用者簡單的操作參數敏感度分析。同時使用者可以參考 RESRAD Manual for Implementing Residual Radioactive Material Guidelines (Yu et al., 1993)和 RESRAD Parameter Sensitivity Analysis (Cheng et al., 1991)進行修改以加強 RESRAD 模組功能。

在本 RESRAD 手冊已有 51 種參數被討論，如表 1.1。至於未討論於本模式之參數也可參考表 1.1 所示。手冊提供輸入參數之應用路徑如表 1.2 所示。

REARAD 手冊提供參數定義、種類及預設值於其中，至於其他相關之參數本手冊也提供量測方法。RESRAD 模組針對參數值的範圍進行設定，如表 1.3。本手冊內容提供使用者更一解讀的方法針對參數的使用範圍、類型及參數變異性。

預設參數值已進行真實性確認如表 1.3。一般而言，廠址性參數皆使用預設值之設定。

表 1.1 RESRAD 模組參數輸入，詳見於章節編號

輸入畫面	參數描述	參數表示	詳見於章節編號
R011	汙染區域面積 (m ²)	AREA	30
R011	汙然區厚度 (m)	THICKO	39
R011	平行含水層內之流動長度 (m)	LCZPAQ	16
R011	放射線劑量限制 (mrem/yr)	BRDL	40
R011	物質放置時間 (yr)	TI	49
R011	計算時間 (yr)	T(t), 2 ≤ t ≤ 10	a
R012	主要放射線初始濃度 <i>i</i> (pCi/g)	S(i)	51
R012	放射線濃度於地下水 <i>i</i> (pCi/L)	W(i)	33
R013	覆蓋深度 (m)	COVERO	31
R013	覆蓋物質密度 (g/cm ³)	DENSCV	2
R013	覆蓋深度侵蝕率 (m/yr)	VCV	14
R013	汙染區密度 (g/cm ³)	DENSCZ	2
R013	汙染區侵蝕率 (m/yr)	VCZ	14
R013	汙染區孔隙率	TPCZ	3
R013	汙染區有效孔隙	EPCZ	4
R013	汙然區水力傳導係數 (m/yr)	HCCZ	5
R013	汙染區參數 <i>b</i>	BCZ	13
R013	蒸發散係數	EVAPTR	12
R013	降水 (m/yr)	PRECIP	9
R013	灌溉率 (m/yr)	RI	11
R013	灌溉模式	IDITCH	b
R013	逕流係數	RUNOFF	10
R013	流域面積 (m ²)	WAREA	17
R013	土壤與水之正確性計算	EPS	a
R014	飽和區密度 (g/cm ³)	DENSAQ	2
R014	飽和區孔隙率	TPSZ	3
R014	飽和區有效孔隙	EPSZ	4
R014	飽和區水力傳導係數(m/yr)	HCSZ	5
R014	飽和區水力梯度	HGWT	15
R014	飽和區參數 <i>b</i>	BSZ	13
R014	水位洩降速率(m/yr)	VWT	18
R014	抽水井低於地下水位之深度(m)	DWIBWT	19
R014	模式: 非沿散 (ND) 或質量守恆 (MB)	MODEL	c
R014	地下水使用率 (m ³ /yr)	UW	c

R015	非飽和區分層數	NS ≤ 5,	25
R015	非飽和區厚度 (m)	H(z), 1 ≤ z ≤ NS	25
R015	非飽和區土壤密度 (g/cm ³)	DENSUZ(z)	2
R015	非飽和區孔隙率	TPUZ(z)	3
R015	非飽和區有效孔隙	EPUZ(z)	4
R015	非飽和區土壤比參數 <i>b</i>	BUZ(z)	13
R015	非飽和區水力傳導係數 (m/yr)	HCUZ(z)	5
R016	放射性核種擴散係數 <i>i</i>		
R016	於汙染區 (cm ³ /g)	DCACTC(i)	32
R016	於非飽和地下水區 <i>z</i> (cm ³ /g)	DCACTU(i,z)	32
R016	於飽和地下水區 (cm ³ /g)	DCACTS(i)	32
R016	滲漏率 (L/yr)	RLEACH(i)	34
R017	吸入率 (m ³ /yr)	INHALR	43
R017	輻射吸入量 (g/m ³)	MLINH	35
R017	空氣灰塵稀釋長度 (m)	LM	d
R017	暴露時間	ED	a,e
R017	吸入屏蔽係數	SHF3	36
R017	戶外屏蔽係數	SHF1	48
R017	廠址上室內滯留時間比	FIND	28,e
R017	廠址上戶外滯留時間比	FOTD	29,e
R017	形狀因子	FS1	50
R017	對區域內的環形區分數	FRACA(r) 1 ≤ r ≤ 12	50
R018	水果、蔬菜及穀物的消費量 (kg/yr)	DIET(1)	42
R018	有葉蔬菜消費量 (kg/yr)	DIET(2)	44
R018	牛奶消費 (L/yr)	DIET(3)	47
R018	家禽肉類的消費 (kg/yr)	DIET(4)	46
R018	魚類消費 (kg/yr)	DIET(5)	41
R018	其他海鮮消費 (kg/yr)	DIET(6)	41
R018	土壤吸收率 (g/yr)	SOIL	38
R018	飲用水吸收率 (L/yr)	DWI	52
R018	受廠址汙染之飲用水	FDW	a
R018	受廠址汙染之水產	FR9	a
R019	家畜飼料吸收生的肉 (kg/d)	LFI5	b
R019	家畜飼料吸收生的牛奶 (kg/d)	LFI6	b
R019	家畜攝取水後產生的肉 (L/d)	LWI5	45
R019	家畜攝取水後產生的牛奶 (L/d)	LWI6	45
R019	葉面殘留量 (g/m ³)	MLFD	b,f
R019	土壤混合層深度 (m)	DM	35,f
R019	植物根部深度 (m)	DROOT	37
R019	地下飲用水比例	FGWDW	b, c

R019	地下家畜飲用水比例	FGWLW	b, c
R019	地下灌溉水比例	FGWIR	b, c
R021	建築物地基深度 (m)	FLOOR	26
R021	建築物地基體積密度 (g/cm ³)	DENSFL	2
R021	覆蓋物之總孔隙率	TPCV	3
R021	建物地基總孔隙率	TPFL	3
R021	覆蓋物水體積含水量	PH2OCV	6
R021	地積水體積含水量	PH2OFL	6
R021	氬氣擴散係數 (m ² /s)		
R021	於覆蓋表層之物質	DIFCV	7
R021	於地基處之物質	DIFFL	7
R021	於受汙染區	DIFCZ	7
R021	氬氣垂直混合維度 (m)	HMIX	20
R021	平均風速 (m/s)	WIND	21
R021	平均建物改變風速率 (1/h)	REXG	22
R021	建物高度 (m)	HRM	23
R021	建物內部面積因子	FAI	24
R021	建物地基深度 (m)	DMFL	27
R021	場址逸散氬氣-222	EMANA(1)	8
R021	場址逸散氬氣-220	EMANA(2)	8

來源: ^a Yu et al. (1993), Section 4; ^b Yu et al. (1993), Appendix D; ^c Yu et al. (1993), Appendix E; ^d Yu et al. (1993), Appendix B; ^e EPA (1990a), Part I; and ^f Gilbert et al. (1983)

表 1.2 適用的途徑和數據輸入畫面位置的 RESRAD 輸入參數

參數	污染路徑									
	外部伽瑪 吸入		植物	肉類	牛奶	水產	飲用		土壤	輸入
			攝取	攝取	攝取	食物	水	氬氣	攝取	畫面
土壤密度										
覆蓋物質	Used	- ^a	-	-	-	-	-	used	-	R013
污染區	Used	-	used	used	used	used	used	used	used	R013
非飽和區	-	-	used	used	used	used	used	used	-	R015
飽和區	-	-	used	used	used	used	used	used	-	R014
地基材質	-	-	-	-	-	-	-	used	-	R021
總孔隙率										
覆蓋物質	-	-	-	-	-	-	-	used	-	R021
污染區	Used	used	used	used	used	used	used	used	used	R013
非飽和區	-	-	used	used	used	used	used	used	-	R015
飽和區	-	-	used	used	used	used	used	used	-	R014
地基材質	-	-	-	-	-	-	-	used	-	R021
有小孔隙率										
污染區	Used	used	used	used	used	used	used	used	used	R013
非飽和區	-	-	used	used	used	used	used	-	-	R015
飽和區	-	-	used	used	used	used	used	-	-	R014
水力傳導係數										
污染區	Used	used	used	used	used	used	used	used	used	R013
非飽和區	-	-	used	used	used	used	used	used	-	R015
飽和區	-	-	used	used	used	used	used	used	-	R014

含水量										
覆蓋物質	-	-	-	-	-	-	-	used	-	R021
地基物質	-	-	-	-	-	-	-	used	-	R021
氬氣有效擴散係數										
覆蓋材質	-	-	-	-	-	-	-	used	-	R021
汙染區	-	-	-	-	-	-	-	used	-	R021
地基材質	-	-	-	-	-	-	-	used	-	R021
氬逸散率	-	-	-	-	-	-	-	used	-	R021
降水率	Used	used	used	used	used	used	used	used	used	R013
逕流係數	Used	used	used	used	used	used	used	used	used	R013

表 1.2 (Cont.)

參數	污染路徑									
	外部	植物	肉類	牛奶	水產	飲用			土壤	入
	伽瑪	吸入	攝入	攝入	攝入	食物	水	氣	攝入	畫面
灌溉率	Used	used	used	used	used	used	used	used	Used	R013
蒸發散係數	Used	used	used	used	used	used	used	used	used	R013
土壤參數 <i>b</i>										
已污染區	used	used	used	used	used	used	used	used	used	R013
非飽和區	-	-	used	used	used	used	used	used	-	R015
飽和區	-	-	used	used	used	used	used	used	-	R014
侵蝕率										
覆蓋材質	used	used	used	used	used	used	used	used	used	R013
已污染區	used	used	used	used	used	used	used	used	used	R013
水力梯度	-	-	used	used	used	used	used	used	-	R014
已污染區長度										
含水層平行流	-	-	used	used	used	used	used	used	-	R011
集水區面積	-	-								
洩降率	-	-	used	used	used	used	used	used	-	R013
水井深度	-	-	used	used	used	used	used	used	-	R014
氬氣垂直混和	-	-	used	used	used	used	used	used	-	R014
年平均風速	-	-	-	-	-	-	-	used	-	R021
平均建築空氣交換率	-	-	-	-	-	-	-	used	-	R021

建築高度	-	-	-	-	-	-	-	used	-	R021
室內因子	-	-	-	-	-	-	-	used	-	R021
								used	-	R021
非飽和區為污染厚度	-	-	used	used	used	used	used	used	-	R015

表 1.2 (Cont.)

參數	污染路徑									輸入 介面
	外部 伽瑪	吸入	植物 攝取	肉類 攝取	牛奶 攝取	水產 食物	飲用水	氬氣	土壤 攝取	
建築基礎厚度	-	-	-	-	-	-	-	used	-	R021
地下室建築厚度	-	-	-	-	-	-	-	used	-	R021
暴露於廠址內之室內時間	used	used	-	-	-	-	-	used	used	R017
暴露於廠址內之室外時間	used	used	-	-	-	-	-	used	used	R017
廠址性										
污染區面積	used	used	used	used	used	used	used	used	used	R011
覆蓋深度	used	used	used	used	used	used	used	used	used	R013
分佈係數	used	used	used	used	used	used	used	used	used	R016

污染區環形面積區域	used	-	-	-	-	-	-	-	-	-	R017
地下水內放射性物質濃度	used	used	used	used	used	used	used	used	used	used	R012
逸散率	used	used	used	used	used	used	used	used	used	used	R016
牲畜飼料供應地											
肉類	-	-	-	used	-	-	-	-	-	-	R019
牛奶	-	-	-	-	used	-	-	-	-	-	R019
吸入性物質的量	-	used	-	-	-	-	-	-	-	-	R017
牛奶消耗率	-	-	-	-	used	-	-	-	-	-	R018
吸入性屏蔽因子	-	used	-	-	-	-	-	-	-	-	R017
根部深度	-	-	used	used	used	-	-	-	-	-	R019
土壤攝入量	-	-	-	-	-	-	-	-	-	used	R018

表 1.2 (Cont.)

參數	污染路徑										
	外部伽瑪	吸入	植物攝入量	肉類攝入量	牛奶攝入量	水產食物	飲用水	氬氣	土壤攝入量	輸入介面	
污染區厚度	used	used	used	used	used	used	used	used	used	used	R011
放射濃度劑量限制	used	used	used	used	used	used	used	used	used	used	R011

空氣灰塵稀釋長度	-	used	used	used	used	-	-	-	-	R017
水產消費率	-	-	-	-	-	used	-	-	-	R018
水果, 蔬菜, 及穀物 消費率	-	-	used	-	-	-	-	-	-	R018
吸入率	-	used	-	-	-	-	-	-	-	R017
有葉植物消費率	-	-	used	-	-	-	-	-	-	R018
牲畜對水的攝入率										
肉類	-	-	-	used	-	-	-	-	-	R019
牛奶	-	-	-	-	used	-	-	-	-	R019
家禽肉類消費率	-	-	-	used	-	-	-	-	-	R018
外部伽瑪射線屏蔽係數	used	-	-	-	-	-	-	-	-	R017
垃圾處置場使用時間	used	used	used	used	used	used	used	used	used	R011
形狀因子, 外部伽瑪	used	-	-	-	-	-	-	-	-	R017
主要核種內部濃度	used	used	used	used	used	used	used	used	used	R012
飲用水攝入率	-	-	-	-	-	-	used	-	-	R018
廠址飲用水分數	-	-	-	-	-	-	used	used	-	R018
廠址食物分數	-	-	-	-	-	used	-	-	-	R018
廠址食物分數	-	-	-	-	-	used	-	-	-	R018
葉面物質沉積	-	-	used	used	used	-	-	-	-	R019

表 1.2 (Cont.)

參數	汙染路徑									輸入 介面
	外部 伽瑪	吸入	植物 攝入率	肉類 攝入率	牛奶 攝入率	水產 食物	飲用 水	氬氣	土壤 攝入率	
土壤混合層厚度	-	-	used	used	used	-	-	-	-	R019
地下水										
飲用水	-	-	-	-	-	-	used	-	-	R019
牲畜飲用水	-	-	-	used	used	-	-	-	-	R019
灌溉用水	-	-	used	-	-	-	-	-	-	R019

^a 連字符表示該參數沒有在 RESRAD 計算中使用。

表 1.2 (Cont.)

參數	汙染路徑									輸入 介面
	外部 伽瑪	吸入	植物 攝入率	肉類 攝入率	牛奶 攝入率	水產 食物	飲用 水	氬氣	土壤 攝入率	
土壤混合層厚度	-	-	used	used	used	-	-	-	-	R019
地下水										
飲用水	-	-	-	-	-	-	used	-	-	R019
牲畜飲用水	-	-	-	used	used	-	-	-	-	R019
灌溉用水	-	-	used	-	-	-	-	-	-	R019

^a 連字符表示該參數沒有在 RESRAD 計算中使用。

表 1.3 RESRAD 參數設定預設值, 最小值與最大值設定

參數	單位	預設值	最小值 ^a	最大值 ^a
土壤總體密度				
覆蓋物質	g/cm ³	1.5	0	100
汙染區	g/cm ³	1.5	0	100
非飽和區	g/cm ³	1.5	0	100
飽和區	g/cm ³	1.5	0	100
地基物質	g/cm ³	2.4	0	100
總孔隙率				
覆蓋物質	- ^b	.4	0	1
汙染區	-	.4	0	1
非飽和區	-	.4	0	1
飽和區	-	.4	0	1
地基物質	-	.1	0	1
有效孔隙率				
汙染區	-	.2	0	1
飽和區	-	.2	0	1
非飽和區	-	.2	0	1
水力傳導係數				
汙染區	m/yr	10	0	1 10 ¹⁰
非飽和區	m/yr	10	0	1 10 ¹⁰
飽和區	m/yr	100	0	1 10 ¹⁰
體積含水量				
覆蓋物質	-	0.05	0	1
地基物質	-	0.03	0	1
氬有效擴散係數				
覆蓋物質	m ² /s	2 10 ⁻⁶	c	1
汙染區	m ² /s	2 10 ⁻⁶	c	1
地基物質	m ² /s	3 10 ⁻⁷	c	1
氬氣逸散係數 (Rn-222/Rn-220)	-	0.25/0.15	0.01	1
降水率	m/yr	1	0	10
逕流係數	-	0.2	0	1
灌溉率	m/yr	0.2	0	10
蒸發散係數	-	0.5	0	0.999
比土壤參數^b				
汙染區	-	5.3	0	15

非飽和區	-	5.3	0	15
飽和區	-	5.3	0	15
侵蝕率				
覆蓋物質	m/yr	0.001	0	5
汙染區	m/yr	0.001	0	5
水力梯度	-	0.02	0	10
汙染區平行含水層水流之長度				
	m	100	0	∞

表 1.3 (Cont.)

參數	單位	預設值	最低值 ^a	最高值 ^a
鄰近溪流之集水區面積				
	m ²	1×10 ⁶	0	∞
水位洩降率	m/yr	0.001	0	5
抽水井濾管深度	m	10	0	1,000
氬垂直混合程度	m	2	0	1,000
年平均風速	m/s	2	0	100
平均建物空氣交換率	1/h	0.5	0	1,000
建物高度	m	2.5	0	100
建物室內面積因子	-	0	0	100
非飽和區非汙染深度				
	m	4	0	10,000
建物厚度	m	0.15	0	10
地基深度				
	m	1	0	100
暴露於廠址內之室內時間	-	0.5	0	1
暴露於廠址內之室外時間	-	0.25	0	1
汙染區面積	m ²	10,000	0	∞

覆蓋深度	m	0	0	100
分佈係數	cm ³ /g	d	0	1×10 ¹⁰
汙染區環形面積分布	-	0	0	1
地下水放射線濃度	pCi/L	0	0	1×10 ²⁰
逸散率	1/yr	0	0	1×10 ¹⁰
牲畜飼料區				
肉類	kg/d	68	0	300
牛奶	kg/d	55	0	300
吸入物質質量	g/m ³	2	10 ⁻⁴	0
牛奶消費率	L/yr	92	0	1,000
吸入屏蔽因子	-	0.4	0	1
根部深度	m	0.9	0	100
土壤攝入率	g/yr	36.5	0	10,000

表 1.3 (Cont.)

參數	單位	預設值	最低值 ^a	最高值 ^a
污染區厚度	m	2	10 ⁻¹⁰	1,000
放射線劑量限制	mrem/yr	30	0.01	10,000
空氣粉塵稀釋長度	m	3	0	1,000
水產食物消費率				
魚	kg/yr	5.4	0	1,000
其他	kg/yr	0.9	0	100
水果, 蔬菜, 和穀物				
消費率	kg/yr	160	0	1,000
吸入率	m ³ /yr	8,400	0	20,000
有葉植物消費率	kg/yr	14	0	100
牲畜水飲用率				
肉類	L/d	50	0	500
牛奶	L/d	160	0	500
家禽肉類消費率	kg/yr	63	0	300
外部伽瑪屏蔽因子	-	0.7	0	1
廢棄物放置時間	yr	0	0	1,000
形狀因子, 外部伽瑪	-	1	0 ^c	1
主要放射線初始濃度	pCi/g	d	0	1×10 ²⁰
飲用水抽取率	L/yr	510	0	1,000
廠址飲用水分數	-	1	0	1
廠址水產食物分數	-	0.5	0	1
葉面沉積物	g/m ³	10 ⁻⁴	0	1
土壤混和層厚度	m	0.15	0	1
地下水				
飲用水	-	1	0	1
牲畜飲用水	-	1	0	1
灌溉用水	-	1	0	1

^a 下限和上限的值表示可以在 RESRAD 使用的輸入參數

^b 連字符表示該參數是無因次的。

^c 此參數為負值作為在 RESRAD 一個標誌。參見手冊中的部分對細節的具體參數。

^d 預設值為放射性核素。

2 土壤密度 SOIL DENSITY

2.1 定義

密度，適用於任何種類的質量 M 和體積 V 均質單相材料，單位為質量與體積的比值。在特定條件下，該定義可表示一個材料的定義。至於多孔介質這種非均質且多相的材質，密度的定義會造就許多不同的結論，取決於對系統質量及體積的定義。

土壤為典型的異質且多相孔隙介質系統。一般而言包含三種相：(1) 固相 (2) 液相 (3) 氣相，其中包含空氣及其他氣體。於此三相系統中，平均密度的概念可以定義如下：(1) 土壤顆粒的密度 (ρ_s)；(2) 總體密度 (ρ_b)；(3) 濕容積密度 (ρ_t)。

關於三種(固、液、氣)不同相的土壤，在定義之前須明確定義其質量和體積。因此，考慮土壤代表性單元體積 (REV) 必須滿足以下條件：(Bear 1972; Marsily 1986)

一足夠大的土體包含大量的孔隙，這樣的概念可視為一整體土壤性質。

一足夠小的土體任何參數的改變在土壤中的任何參數的變化，皆可以通過連續的函數來近似。

其中土壤 REV, 各個相中的質量定義如下：

M_s = 固體質量

M_l = 液體質量

M_g = 氣體質量

M_t = 總質量

其中土壤 REV, 各個相中的體積定義如下

V_s = 固體體積,

V_l = 液體體積,

V_g = 氣相體積,

$V_p = V_l + V_g$ = 孔隙體積

$V_t = V_s + V_l + V_g$ = 總體積

以上介紹的質量及體積的定義皆被應用於土壤顆粒密度、乾土單位重與濕土單位重 ($M \cdot l^{-3}$)。

2.1.1 乾土單位重

土壤顆粒密度 ρ_s , 或稱固體密度, 其代表土壤本身的密度(例如: 礦物) 土壤密度可表示如下:

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (2.1)$$

礦物土壤中, 土壤顆粒密度範圍變化不大約介於 $2.6-2.7 \text{ g/cm}^3$ (Hillel 1980b). 密度範圍值相當靠近石英的密度, 同時其為砂土的主要組成成分。而 2.65 g/cm^3 為典型礦物土壤顆粒密度 (Freeze and Cherry 1979)。鋁矽酸鹽類之黏土也具有相同之密度範圍值。氧化鐵含量較多之土壤將增加土壤密度; 而有機物含量較多之土壤將降低土壤密度。

2.1.2 單位容積密度

單位容積密度 ρ_b , 為乾土重與土壤(固液氣相)體積的比值, 計算如下:

$$\rho_b = \frac{M_s}{V_t} = \frac{M_s}{V_s + V_l + V_g} \quad (2.2)$$

總體密度 ρ_b ，與土壤顆粒密度 ρ_s 成線性關係，其中 p_t 為土壤孔隙率，計算如下：

$$\rho_b = (1 - p_t)\rho_s \quad (2.3)$$

其中 $1-p_t$ 為乾土體積與總體積之比值，Section 3 將討論總孔隙率。

以上定義顯示，單位容積密度小於乾土單位重。例如，如果孔隙體積 ($V_l + V_g$) 為總體積的一半單位容積密度值即為乾土單位重之一半。

乾土單位重其土壤密度範圍介於 $1.1 \sim 1.6 \text{ g/cm}^3$ 。其中砂土之乾土單位重為最高 1.6 g/cm^3 ；而黏土其土壤密度為 1.1 g/cm^3 (Hillel 1980b)。混凝土高聚合（即，小的總孔隙度）的程度，在一般情況下，比起一般土壤則具有較高的乾土單位重。不同類型土壤及混凝土之皆具有一代表性之乾土單位重，如表 2.1 所示。乾土單位重不僅表示土壤顆粒排列結構同時也表示土壤顆粒之膨脹或壓縮特性。

表 2.1 提供推估總體密度時使用者應具備土壤分布類型之知識。一般方法為現場土壤分類，此法屬粗略判斷 (Brady 1984)。該判別方法將土壤顆粒透過拇指與食指的揉捏作為判斷依據。通常是有幫助的濕潤樣品更準確地估計可塑性。當搓揉濕黏土時，發現其愈搓愈光滑代表土壤含黏土之成分。愈光滑的濕土壤其黏土含量愈高。砂土顆粒分明，而泥土在乾燥時類似粉狀物濕潤時有輕微之塑性及黏性。一般而言聚集成塊的土壤其為泥土或黏土的可能性極高。感覺法的正確性取決於過去大量的經驗累積。而實驗室實驗結果較為精準但耗時。實驗室法以粒徑分析進行土壤顆粒的分類，通常用於較大顆粒土壤及水中較細顆粒的組成探討 (Marshall and Holmes 1979)。美國農業部開發以粒徑分析作為基礎並進行土壤命名的方法，如圖 2.1，其中圖標將說明土壤質地分析的意義。

表 2.1 各種土壤型態所使用之乾土單位重值

土壤型態	乾土單位重 ρ_b (g/cm ³)
砂土	1.52
砂壤土	1.44
壤土	1.36
泥土	1.28
粘壤土	1.28
粘土	1.20
混凝土	2.40

備註：大部分土壤之乾土單位重值皆介於 1.1~1.6 g/cm³ (Hillel 1980b).

來源：Linsley et al. (1982); Poffijn (1988).

2.1.3 總體密度

總體密度 ρ_t 為土壤總質量(包含乾土重及液體重)與總體積(乾土體積、液體體積和氣體體積)的比值

$$\rho_t = \frac{M_t}{V_t} = \frac{M_s + M_l}{V_s + V_l + V_g} \quad (2.4)$$

總體密度有別於乾土單位重，其特別受土壤水分之影響。對於一乾燥土壤總體密度約等於乾土單位重。

2.2 量測方法論

在 RESRAD 中，僅五種區域特性採用乾土單位重的參數(如：覆蓋層、汙染區、非飽和及飽和層區、建物基層區)。然而乾土單位重需計算土壤總孔隙率並加以扣除，因此量測技術上及程序上皆有不同。

量測標準作法採用 FUSRAP (Formerly Utilized Sites Remedial Action Program)計畫之施作方式量測土壤顆粒密度及乾土密度，同時透過美國材料和試驗協會 (ASTM 1992a-o)和美國陸軍團(DOA 1970)檢測，如表 2.2 所示。討論量測方法論於文獻 Blake and Hartge (1986a,b) 有更進一步說明。

2.2.1 土壤顆粒密度量測

土樣顆粒密度計算方式分為兩類：(1) M_s 乾土重 (2) 乾土體積 (Blake and Hartge 1986b)。假設水為土樣中唯一揮發性物質，質量 M_s 可由烘乾(溫度約介於 105°C~115°C)之土樣獲得。此法不是用於含有機物及瀝青之土壤。

土壤顆粒體積 V_s 可量測有以下幾種方式：一種方法是直接通過觀察乾燥土壤所得到的增加的水體積為孔隙水體積，因此欲得乾燥土體積必須以總體積扣除孔隙體積即可得，同時必須以攪拌的方式確定土壤與水間不含空氣。

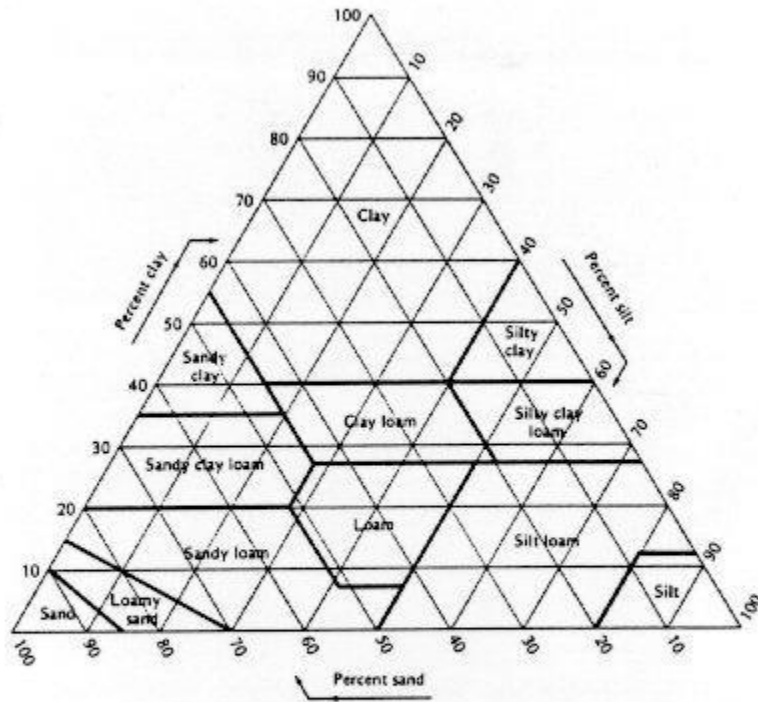


FIGURE 2.1 U.S. Department of Agriculture Method for Naming Soils (Note: Percentage of sand, silt, and clay in the major soil textural classes. To use the diagram, locate the percentage of clay first and project inward as shown by the arrow. Do the same for the percentage of silt [or sand]. The point at which the two projections cross will identify the class name.) (Source: Brady 1984)

圖 2.1 美國農業部土壤命名法

觀察法導致一個問題，因為必須攪拌土樣祛除空氣，攪拌的過程中會產生熱，熱會導致總體在計算上的誤差。

另一個檢測 V_s 方式評估水的質量和體積以水取代土樣，並得出乾土體積。此法已被使用一段時間，其具備簡單、直接、準確 (Blake and Hartge 1986a)

表 2.2 FUSRAP 計畫地區以標準法量測土壤顆粒密度和總體密度

參數量測	方式	量測	
		標準試驗法	參考文獻
土壤 顆粒 密度	土樣 試驗	附錄 IV: 比重	DOA (1970)
		ASTM D 854-91: Standard Test Method for Specific Gravity of Soils	ASTM (1992a)
總體 土壤 密度	土樣 試驗	Appendix II: Unit Weights, Void Ratio, Porosity, and Degree of Saturation	DOA (1970)
		ASTM D 1556: 以砂錐法取代標準法量測土壤密度及單位重	ASTM (1992b)
	現地實驗	ASTM D 2167-84: 以橡皮膜法取代標準法量測土壤密度及單位重	ASTM (1992d)
		ASTM D 2922-91: 以放射分析法取代標準法量測土壤密度及土料 (淺層)	ASTM (1992g)
		ASTM D 2937-83: 傳動缸法取代標準試驗方量測土壤密度	ASTM (1992h)
		ASTM D 4564-86: 套管法取代標準試驗量測土壤密度	ASTM (1992k)
	現地地下水試驗	ASTM D 5195-91: 放射分析法取代標準試驗法量測地層下土壤及岩石之密度	ASTM (1992n)

如果水的體積 V_{dw} 取代土體 V_s 並且體積相等，乾土密度可表示為以下：

$$\rho_s = \rho_w \frac{M_s}{M_{dw}} \quad (2.5)$$

其中 M_{dw} 為水的質量而 ρ_w 為水的密度，因此土壤顆粒密度的計算必須評估一定壓力及溫度下水的密度 (DOA 1970, Appendix IV; ASTM 1992a)。

$$V_{dw} = \frac{M_{dw}}{\rho_w} = V_s = \frac{M_s}{\rho_s} \quad (2.6)$$

M_{dw} 的值為使用量桶量測以下個物理量：

M_f = 空量筒的質量；

M_{fs} = 量筒+乾土樣的質量；

M_{fsw} = 量筒+土樣+水 V_f 的質量

M_{fw} = 量筒+乾淨無雜質水之質量

取代乾土重的水質量 M_{dw} 可以下列方式計算：

取代 M_{dw} 以 ρ_s 表示如下(式 2.7)：

$$\rho_s = \rho_w \left[\frac{M_s}{(M_{fs} - M_f) - (M_{fsw} - M_{fw})} \right] \quad (2.7)$$

這種計算密度方式相對精確，但需要透過仔細的體積與質量量測同時考慮壓力及溫度條件的影響。可能之誤差導致不僅決定質量和體積而且也無法代表土樣特性。

$$M_{dw} = (M_{fs} - M_f) - (M_{fsw} - M_{fw}) \quad (2.8)$$

2.2.2 乾土單位重量測

土樣之乾土單位重(ρ_b)評估方式有二：(1) M_s , 由烘乾之土樣獲得(2) V_t , 土樣總體積。前述，為了計算土壤密度(ρ_s)、質量(M_s)，將土樣進行 105~115°C 的烘乾達到乾土重不變並量測其物理量。實驗室量測方法直接獲得土壤乾土單位重(DOA 1970, Appendix II)。直接量測土樣密度方法包含鑽孔法及開挖法。

以上這些不同的方法與蒐集土樣的方式與量測容積有關。對於鑽孔法 (Blake and Hartge 1986a; ASTM 1992h)，以圓柱形狀之搜集器打入土壤，但必須避免破壞土樣。欲知現地深度之土壤，收集一已知體積(V_t)之土樣並經過高溫烘乾過程祛除水分子並得出土體單位重。在使用這種技術的問題包括取樣困難，比如礫石的土壤中的存在，並在當採樣引入地面採樣過程破壞土壤的結構。

開挖法 (Blake and Hartge 1986a)土樣密度取決於現地開挖的程度，並高溫烘乾稱重即可得土樣質量等物理性質。而土樣體積(V_t)取得有幾個不同的方式。其一為排砂漏斗法 (ASTM 1992b)其中砂與每單位質量的已知體積的選定類型用現地開挖孔。然後，通過測量來填補孔砂的總質量，體積可被確定。另一個使用橡皮膜法得土樣體積(V_t) (ASTM 1992d)。在該技術中，橡膠被置於孔隙中，並填充有液體（水）至所述開挖洞之邊界。土樣開挖體積等於橡膠內所填充的液體體積。

開挖法的優點為適合異質性較明顯之大顆粒土壤。

放射線法或是 γ 射線衰減法應用於現地較實驗室適用 (Blake and Hartge 1986a; ASTM 1992g,o)。這種方法是基於這樣的 γ 輻射量的衰減和分散，取決於土壤的性質，包括在介質中的固體/液體組成的結構密度。通過測量穿過介質或傳輸即散由土壤成分，並到達檢測器放置在遠離所述光源的輻射，並通過使用適當的校準，土壤的濕密度， ρ_T ，可以被確定。為確定的乾土密度， ρ_B ，藉由刪除土壤中的液相物質來達到校正的結果是必要的。

使用現地放射線法量測土壤密度有幾個優於實驗室法的點：(1) 可現場評估土樣密度(2) 對土樣的影響最小 (3) 所花費的時間最少 (4) 量測深度最深，因開挖面積最小 (5) 非破壞性，因此可重複量測同一點。除了以上五點優點外，其也有缺點。因為放射線法較其他方法複雜，過程也須不斷校正，並且實驗儀器花費較貴。系統操作員必須受完整的放射線方面的防護訓練。

2.3 RESRAD 輸入資料的需要條件

於 RESRAD 中乾土密度重以 g/cm^3 來表示，並應用於以下部分：(1) 覆蓋物質 (2) 汙染區 (3) 非飽和區 (4) 飽和區 (5) 建物基礎材質 (例如：混凝土)。前四種型態之土壤已固定使用 1.5 g/cm^3 作為乾土密度，其值代表砂土。雖然建物基礎材質大部分接近土壤型態，參雜著混凝土於其中而混凝土具較小的孔隙率，會大大提升其土壤密度，因此 RESRAD 將建物基礎材質之密度定為 2.4 g/cm^3 。此預設值普遍應用於 RESRAD 並獲得驗證。如為更準確的使用 RESRAD，特定之站點的數據應該作為修正預設值之用。

土壤型態為已知，可參照表 2.1 作為乾土密度參數輸入。如遇未知土壤型態而無法作為 RESRAD 輸入值，建議透過本章 2.2.2 所介紹實驗法以獲得土樣特性。

3 總孔隙率 TOTAL POROSITY

3.1 定義

多孔介質的總孔隙率是孔隙體積與土樣總體積的比。假設土壤系統為三相組成—固體、液體、氣體。其中 V_s 固相體積, V_l 為液相體積, V_g 為氣相體積, $V_p = V_l + V_g$ 總孔隙的體積, and $V_t = V_s + V_l + V_g$ 為土樣總體積, 而總孔隙率 p_t , 表示如下:

$$p_t = \frac{V_p}{V_t} = \frac{V_l + V_g}{V_s + V_l + V_g} \quad (3.1)$$

孔隙率為無因次的量, 表示不同土壤型態的特性, 可以小數或百分比表示, 如表 3.1。更詳細之土樣孔隙率值如表 3.2 所示。一般而言, 未壓密之總孔隙率值介於 0.25-0.7 (25%-70%)。粗顆粒砂(礫石)擁有較小的總孔隙率值而細顆粒砂(黏土、泥土)具有較高的總孔隙率值。總孔隙率並不是一定值, 特別是黏土土樣, 本身會膨脹、收縮、壓縮或破碎等影響總孔隙率值。

表 3.1 孔隙率

土壤型態	孔隙率, p_t
未壓縮	
礫石	0.25 - 0.40
砂	0.25 - 0.50
泥土	0.35 - 0.50
黏土	0.40 - 0.70
岩石	
破碎玄武岩	0.05 - 0.50
喀斯特石灰石	0.05 - 0.50
砂岩	0.05 - 0.30
石灰岩, 白雲石	0.00 - 0.20
頁岩	0.00 - 0.10
破碎結晶岩	0.00 - 0.10
高密度結晶岩	0.00 - 0.05

來源: Freeze and Cherry (1979).

表 3.2 孔隙率值特性

型態	總孔隙率, p_t			有效孔隙率, ^a p_e		
	總孔隙率範圍		平均	有效孔隙率範圍		平均
砂土						
砂岩 (細)	- ^b	-		0.02	- 0.40	0.21
砂岩 (中)	0.14	- 0.49	0.34	0.12	- 0.41	0.27
粉砂岩	0.21	- 0.41	0.35	0.01 - 0.33		0.12
砂 (細)	0.25	- 0.53	0.43	0.01	- 0.46	0.33
砂 (中)	-	-		0.16	- 0.46	0.32
砂 (粗)	0.31	- 0.46	0.39	0.18	- 0.43	0.30
礫石 (細)	0.25	- 0.38	0.34	0.13	- 0.40	0.28
礫石 (中)	-	-		0.17	- 0.44	0.24
礫石 (粗)	0.24	- 0.36	0.28	0.13	- 0.25	0.21
粉土	0.34	- 0.51	0.45	0.01	- 0.39	0.20
黏土	0.34	- 0.57	0.42	0.01	- 0.18	0.06
石灰石	0.07	- 0.56	0.30	~0 - 0.36		0.14
風化土壤						
黃土	-	-		0.14	- 0.22	0.18
風化砂	-	-		0.32	- 0.47	0.38
凝灰岩	-	-		0.02	- 0.47	0.21
火成岩						
風化石	0.34	- 0.57	0.45	-	-	
風化輝長岩	0.42	- 0.45	0.43	-	-	
玄武岩	0.03	- 0.35	0.17	-	-	
變質岩						
片岩	0.04	- 0.49	0.38	0.22	- 0.33	0.26

^a 第 4 章探討有效孔隙。

^b 連字號表示無資料

來源: McWorter and Sunada (1977).

3.2 量測方法論

FUSRAP 的標準試驗法量測總孔隙率可見於附錄 II DOA (1970)。其中更多的討論可見 Danielson and Sutherland (1986)。

總孔隙率的定義為直接量測孔隙體積(V_p)和總體積(V_t)即可獲得總孔隙體積。總孔隙體積可以藉由量測土樣總體積被計算出來，但土樣必須是完全飽和狀態。事實上，土樣很難達到完全飽和狀態，因此，總孔隙率很少直接量測。通常總孔隙率是間接獲得的，參閱(DOA 1970, Appendix II; Danielson and Sutherland 1986)。

$$P_t = \left(1 - \frac{V_s}{V_t}\right) = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}\right) \quad (3.2)$$

其中 p_t 為總孔隙率； V_s 為乾土壤體積， V_t 為土樣總體積， ρ_s 土樣固體密度， ρ_b 為土樣乾土單位重。(其中式 3.2 可由式 2.3 求得)。此方法可藉由實驗室及現場量測 ρ_s 和 ρ_b 得總孔

隙率 pt 。

3.3 RESRAD 輸入資料的需要條件

RESRAD 之使用，使用者可自行定義或採用總孔隙率之預設值於以下五種條件：(1) 覆蓋物質 (2) 污染區 (3) 非飽和區 (4) 飽和區 (5) 建物基礎材質 (例如：混凝土)。

在 RESRAD，總孔隙度輸入為小數而不是百分比。RESRAD 採用預設值 $n = 0.4$ 作為前四項條件之輸入而 $n = 0.1$ 為建物基礎材質之輸入值。一般使用的 RESRAD 預設值用以解決缺值等問題。為了更準確的使用 RESRAD，特定於站點的數據應該被使用。

如果土壤型態知道卻沒有現地量測資料，可參閱表 3.1 及表 3.2 作為推估總孔隙率用。然而，如果沒有可用土壤的類型信息，對總孔隙率的值應通過試驗以第 3.2 節提出的方法操作。

4 有效孔隙率 EFFECTIVE POROSITY

4.1 定義

有效孔隙度， P_e ，也稱為動態孔隙率，多孔介質中被定義為孔的體積，其中水可循環到的孔隙體積與總體積的比值。在自然多孔系統，如地下土壤，其中造成水的流動得靠毛細管壓，和重力而效孔隙率可以近似為比儲水係數或排水率，其被定義為水的體積從飽和土壤排出的量。

有效（運動）孔隙率的定義是與孔隙流體位移的概念有關，而不是由孔隙佔據的總體積的比例。由孔隙流體可通過該多孔介質循環所佔據的孔體積小於總孔隙空間，所以有效孔隙率一定小於總孔隙率。在兩相組成的飽和土壤系統(固相及液相)其中(1) V_s 固相體積，(2) $V_w = (V_{iw} + V_{mw})$ 液相體積。

$$P_e = \frac{V_{mw}}{V_t} = \frac{V_{mw}}{V_s + V_{mw} + V_{iw}} \quad (4.1)$$

(3) V_{iw} 為流體於無法流動的孔隙內的體積(4) V_{mw} 為流體於可流動之孔隙內的體積 (5) $V_t = (V_s + V_{iw} + V_{mw})$ 為總體積,有效孔隙率可表示為(式 4.1):

另一個關於有效孔隙率之土壤參數—田間容水量(field capacity θ_r),也稱為比保水量(specific retention), 為不可縮減體積含水量, 或殘留水含量其被定義為水保持於土壤樣品中的體積比, 當所有重力排水結束後所剩餘的水含量。考慮以上提及飽和土壤系統, 總孔隙率 p_t 和田間容水量 θ_r 可表示為以下:

$$P_t = \frac{V_{mw} + V_{iw}}{V_t} \quad (4.2)$$

$$\theta_r = \frac{V_{iw}}{V_t} \quad (4.3)$$

$$p_e = p_t - \theta_r \quad (4.4)$$

因此, 有效孔隙率與總孔隙率和田間含水量有關

土壤系統有幾個方面影響其有效孔隙率的值:(1) 水對礦物的黏性 (2) 在粘土礦物晶格中吸收的水,(3) 未連接孔隙的存在,(4) 死端孔隙的存在。在土壤中粘合於土壤中的水是通過分子引力附著在土壤顆粒表面(Marsily 1988)。無法流動之流體體積系統(V_{iw}) 為黏著於土壤顆粒及死端孔隙之水體積的總和。詳細孔隙率值呈現於表 3.2。

計算有效孔隙率 p_e 可間接量測總孔隙率 p_t 及田間含水量 θ_r 然後由式 4.4 計算求得 p_e 。總孔隙率是根據第 3.2 節中描述的方法測定土壤密度而間接獲得。為了確定土壤田間含水量, 土樣首先加水達飽和狀態, 然後使其完全在重力的作用下排水, 直到土樣的飽和度達到不變之情況。 θ_r 值可以根據用於測量體積含水率的方法獲得如 6.2 章節所述。

4.3 RESRAD 數據輸入的要求

使用 RESRAD, 則需要定義(或使用預設值)三個不同的材料的有效孔隙率:(1) 汙染區,(2) 飽和區 (3) 非飽和區。在 RESRAD, 有效孔隙度值輸入為小數而不是百分比。RESRAD 採用 $p_e = 0.2$ 作為三種材料的預設值。RESRAD 提供預設值取代缺值。對於 RESRAD 的準確率, 特定站點的數據應該被使用。

如果現地特定數據不可獲得, 但土壤類型是已知的, 可查表 3.2 估計有效孔隙率。然而, 如果沒有可用的土壤類型, 那麼有效孔隙率的值應通過試驗根據第 4.2 節提出的方法來確立。有效孔隙率不應當大於總孔隙率。總孔隙率在第 3 節中有討論。

5 水力傳導係數 HYDRAULIC CONDUCTIVITY

5.1 定義

土壤的水力傳導係數說明水在土壤中流動的能力。水力傳導係數由達西定律定義，以下為垂直方向達西速度式：

$$U = -K \frac{dh}{dz} \quad (5.1)$$

其中 U 為達西速度 h 為水頭高, z 為土樣垂直方向距離。比例係數 K 為水力傳導係數 (hydraulic conductivity)。滲透係數一詞有時也被用作水力傳導係數之同義詞。(式 5.1) 所述被定義為達西速度為所施加的水頭梯度的比值與水力傳導係數之積。水力傳導係數單位與速度單位相同 (IT^{-1})。

水力傳導係數是土壤的水力特性之一；在特定條件下這些特性決定了土壤系統內流體的行為。更具體地來說，水力傳導係數確實決定土壤流體的下一個指定水力梯度通過土壤系統之流動能力；土壤流體殘留特性決定土壤在一定壓力下的容水力。

水力傳導率取決於土壤顆粒尺寸、土壤基質中的結構，及土壤內流體飽和度的相對量。關於土壤的固體基質的重要性質包括孔隙尺寸分佈，孔隙形狀，曲折度，比表面積和孔隙度。關於土壤中的流體其中重要的性質包括流體密度 ρ ，和流體黏滯度 μ 。對於飽和地下流體系統水力傳導係數可表示為式 5.2 (Bear 1972)：

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \quad (5.2)$$

其中 k ，為土壤固有滲透率取決於固體基質的性質，同時 $\rho g/\mu$ 稱為液體的流動性，代表滲透流體的屬性。水力傳導係數 K 表示單位時間的長度 (IT^{-1})，滲透係數 k 單位為 l^2 ，流動性 $\rho g/\mu$ 單位為 $l^{-1}T^{-1}$ 。藉由(式 5.2)，達西定律可被改寫為(式 5.3)。

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} = \frac{|U|}{|dh/dz|} \quad (5.3)$$

當密度和粘度的流體特性是已知的，式 5.3 可以用來實驗性確定的土壤滲透性 k 和水力傳導係數 K 的值。飽和水力傳導係數於土壤中的值為階的幾個數量級範圍內之變化，這取決於土壤的材料。表 5.1 列出了水力傳導係數對各種鬆散或固結土壤材料之預期值的範圍。 K 對於不同紋理的土壤材料的水力傳導係數值列於表 5.2。詳細之水力傳導係數代表值，土壤顆粒尺寸分佈、土壤材料和粉粒含量詳細列表如表 5.3 和 5.4。同時第 2.1.2 節討論了土壤質地分布。由於空間變異通常在地質形成的土壤中需要被考慮的，而飽和導水係數值也顯示該變化的整個變化範圍內的地下地質構造的空間領域。

表 5.1 各種不同材質之飽和土壤水力傳導係數值

土壤型態	飽和土壤水力傳導係數 K (m/yr)
非壓密之沉積	
礫石	$1 \times 10^4 - 1 \times 10^7$
砂	$1 \times 10^2 - 1 \times 10^5$
粉砂	$1 \times 10^1 - 1 \times 10^4$
泥砂, 黃土	$1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^2$
冰磧	$1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^1$
未風化的海洋粘土	$1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-2}$
岩石	
頁岩	$1 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-2}$
非裂縫變質岩和火成岩	$1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-3}$
砂岩	$1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^1$
石灰石和白雲石	$1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^1$
斷裂變質火成岩	$1 \times 10^{-1} - 1 \times 10^3$
透水玄武岩	$1 \times 10^1 - 1 \times 10^5$
喀斯特石灰岩	$1 \times 10^1 - 1 \times 10^5$

來源: Adapted from Freeze and Cherry (1979).

表 5.2 不同土壤質地之飽和水力傳導係數

土壤質地	飽和土壤 水力傳導 係數 K (m/yr)
砂	5.55×10^3
壤質砂土	4.93×10^3
沙壤土	1.09×10^3
粉質壤土	2.27×10^2
壤土	2.19×10^2
砂質粘壤土	1.99×10^2
粉砂質粘壤土	5.36×10^1
粘壤土	7.73×10^1
砂質粘土	6.84×10^1
粉質粘土	3.21×10^1
黏土	4.05×10^1

來源: Clapp and Hornberger (1978).

一般地質構造屬異質性(heterogeneous)，相反的地質結構均一不變即稱為地質均質性(homogeneous)。如地質構造被認為是各方向性之地質條件皆相等，稱為等向性。在所述介質中任意點，飽和水力傳導係數(K)的值皆是獨立的。同樣，一般非受壓土層之排列其地質條件屬非等向。各向異質性的地質構造中，飽和水力傳導係數值的垂直分量通常是較水平分量來的小。

5.2 量測方法論

飽和土壤之水力傳導係數可以通過現場和實驗室試驗來測定。無論哪種方式，K (或 k) 的實驗測量包括確定用於達西公式的係數的數值。不管如何，K 值的實驗測量包括確定達西定律的數值：

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} = \frac{|U|}{|dh/dz|} \quad (5.4)$$

用於任一實驗室或現地實驗，實驗測定 K (或 k) 的方法是基於以下步驟 (Bear 1972): 假設 (例如一維流動中的多孔介質中)，其可以由達西定律解析地描述一個流程模式圖。在式 5.4 進行實驗再現所選擇的流動圖案，並測量所有可測量的量，包括流體密度，動力黏滯度，流速，及水頭梯度。

經測量的量代入上式 5.4，計算係數 K (或 k)。

許多不同的實驗室或現場試驗可用於確定係數 K (或 k)。

表 5.3 推估細顆粒飽和土樣之水力傳導係數

顆粒尺寸	飽和土樣
	水力傳導係數 $K (10^3 \text{ m/yr})$
黏土	<0.0001
粘質泥土	0.1 - 0.4
泥土, 略有沙質	0.5
泥土, 適度沙	0.8 - 0.9
泥土, 多砂	1.0 - 1.2
砂質粉土	1.2
粉砂	1.4

來源: EPA (1986).

在相應的測量方法用於實驗室和現場實驗已有廣泛的討論, 分別是提出在 Klute and Dirksen (1986) 和 Amoozegar and Warrick (1986)。對於 FUSRAP 現地, 用於標準方法來確定飽和土料滲透係數是美國測試和材料協會 (ASTM 1992 年 a-O), 美國環境保護署 (EPA 1986), 美國陸軍 (DOA 1970 年), 和內政部的美國能源部 (DOI 1990 年 a, b) 編寫所示。簡要描述這些相關標準方法列於表 5.5。

實驗室測試進行了在取芯鑽探計劃採集的土壤材料的小樣本。由於小尺寸, 在實驗室處理的土樣, 這些測試的結果被認為是土壤性質之單點表示。如果在實驗室試驗中所用的土壤樣品是真正的原狀樣品 K (或 k) 的測量值應該是在現地飽和土壤中水力傳導係數在該現場採樣點的真實表示, 可代表現地。

實驗室方法可用於評估土壤樣品中的垂直和水平的水力傳導率。例如, 無論是內聚或粘性土樣中, K 的值通過實驗室試驗中得到對應於在該樣品被採取的性質物理方向, 通常是垂直的。在不受干擾的 (天然) 土壤中的水平方向物理量在實驗室中得到粘性土的樣品的水力傳導係數可以用來近似實際值 (DOA 1970)。對於細顆粒土壤, 原狀粘性樣品可以相應地定向, 以獲得所述的水力傳導係數在任一垂直或水平方向。

在對比實驗方法測定水力傳導率的土壤樣品中, 現地方法, 在一般情況下, 涉及的土壤的區域較大。因此, 從現地的方法得到的結果應該反映在垂直和水平方向上的影響, 表 K 的平均值, 這種情況是在特別重要的。

表 5.4 砂和礫石根據排序和含沙量度^a估計飽和土樣中水力傳導係數

土壤顆粒	飽和土樣水力傳導係數, K (10^3m/yr)					
	等級分類			含沙量		
	差	中等	好	輕微	中等	高
非常細砂	1	2	3	3	2	1
非常細砂~細砂	3	3	.b	3	2	1
非常細~中砂	4	5	-	4	3	2
非常細~粗砂	5	-	-	4	3	3
非常細~非常粗砂	7	-	-	6	4	3
非常細~細礫石	8	-	-	7	6	4
砂子很細至中礫石	11	-	-	9	7	5
砂子很細到粗砂礫	14	-	-	12	10	7
細砂	3	4	6	4	3	2
細~中砂	6	7	-	5	4	3
細~粗砂	6	8	-	6	5	4
細~非常粗砂	8	-	-	7	5	4
細砂~細礫石	10	-	-	8	7	5
細砂~中礫石	13	-	-	10	8	6
細砂~粗礫	16	-	-	12	10	8
中砂	7	9	10	7	6	4
中砂~粗砂	8	10	-	8	6	5
中砂~非常粗砂	9	12	-	8	7	5
中砂~細礫石	11	-	-	9	8	6
中砂~中礫石	15	-	-	13	9	7
中砂~粗礫石	18	-	-	15	12	9
粗砂	9	12	15	10	8	6
粗砂~非常粗砂	10	15	-	10	8	6
粗砂~細礫石	13	16	-	12	10	8
粗砂~中礫石	16	-	-	13	10	8
粗砂~粗礫石	20	-	-	15	11	10
非常粗砂	12	16	21	13	10	8
非常粗砂~細礫石	15	24	-	13	12	10
非常粗砂~中礫石	19	25	-	16	14	11
非常粗砂~粗礫石	23	-	-	18	15	12
細礫石	18	24	30	25	16	12
細礫石~中礫石	22	37	-	22	19	15
細礫石~粗礫石	27	37	-	26	21	16
中礫石	27	26	45	27	22	18
中礫石~粗礫石	33	52	-	33	27	21
粗礫石	37	52	67	37	32	26

^a 如果顆粒是次棱角狀降低 10% 傳導率。

^b 連字符表示沒有數據可用。

來源: EPA (1986).

表 5.5 土壤材料標準試驗和現場方法測量飽和水力傳

方法	詳述	應用	備註	參考
實驗室	定水頭水力傳導測試採用滲透儀	無干擾之無黏性之粗顆粒土壤 $K > 1.0 \times 10^2$ m/yr.	所測量的傳導率對應於其中的樣品被採取的方向(通常垂直);在定水頭或便水頭流動條件也可以進行,這取決於樣品的估計的傳導率。 應只在那些原本完全飽和的土壤;可以裝載預期在該領域的條件下進行;沿著樣品的側面洩漏,能夠防止;通常水頭下降流動的條件下進行。	DOA (1970) EPA (1986) ASTM (1992f) Klute and Dirksen (1986)
	水頭水力傳導測試採用滲透儀	無干擾無黏性之細顆粒土壤 $K < 1.0 \times 10^2$ m/yr.	干擾(重塑)粘性土的傳導性,通常使用近似原理,不受干擾的狀態的傳導性,水平方向為主要	DOA (1970) EPA (1986) ASTM (1992m) Klute and Dirksen (1986)
	水力傳導測試	非擾動及擾動法之飽和細顆粒	干擾(重塑)粘性土的傳導性,通常使用近似原理,不受干擾的狀態的傳導性,水平方向為主要	DOA (1970)
	壓力室	黏滯性土壤	施用於土壤樣品的孔隙流體的額外壓力(背壓),降低了氣泡中的孔的大小,增加水的程度飽和度;通常恆定頭流動的條件下進行。	DOA (1970) EPA (1986) DOA (1970) EPA (1986) ASTM (1992m)
	背壓水力傳導測試	不完全飽和情況下非擾動及擾動法之細顆粒壓縮		

表 5.5 (Cont.)

方法	詳述	應用	備註	參考
實驗室	固結之水力傳導測試	完全飽和隙顆粒土樣	可作為一種替代方法，以與壓力室中的導電性試驗	DOA (1970)
現地	粒徑尺寸經驗法	評估固有滲透率 k ，土壤材料	k 可被預測藉由 $k = cd^n$ 範圍介於 1.65 ~ 1.85	ASTM (1992n)
	螺旋鑽洞的方法	在淺水表的在飽和的近地表土壤物質	所述方法包括井水位以下的螺旋孔中的水，然後測量水在孔中的上升率的；使用最廣泛的方法來測量飽和土的飽和水力傳導係數；測得的結果由曲線的水平傳導率平均值表示。	Amoozegar and Warrick (1986)
	壓力法	在淺水表的在飽和的近地表土壤物質	該方法包括安裝一個測壓管或管與空腔在底部的螺旋孔；水從管中取出，並在水在管內的上升率進行測量；可用於測量水平或垂直的水力傳導率；在分層的土壤中，Amoozegar 和瓦里克 (1986) 的方法可以用於在每個單獨的層來測量 K 值。	Amoozegar and Warrick (1986)

表 5.5 (Cont.)

方法	詳述	應用	備註	參考
現地	單井 (尾水試驗) 且於非拘限含水層	飽和土壤 K 於非拘限含水層處	抽水測試方法開發主要開發地下水系統；該方法	EPA (1986)

單井 (尾水試驗)且於非 拘限含水層	適度的飽和導水率的土 料在密閉條件下，以井屏 幕或開井完全開放下的 測試區。	包括在瞬間從井中除去 水和測量水在井的回收; 適用於淺層含水層井的 全部或部分滲透率;所測 K 主要反映在水平方向 上的值。 泵出的測試方法開發主 要用於地下水系統;該方 法包括在瞬間從井中除 去水和測量水在井的回 收;受壓含水層 (密閉條 件下土壤為飽和) 中使 用;該方法假定該測試區 所有徑向方向是均勻的。 抽水的測試方法開發 的，主要用於地下水系 統;該試驗是通過突然加 壓土壤區中的一個井孔 或井的限定區域內的一 部分，然後監測壓力衰減 後受壓含水層的情形。	EPA (1986)
單井(調整式尾水試驗) 於拘限含水層內且地層 結構緊密	適用低 K 值 $<1.0 \times 10^{-5}$ m/yr		EPA (1986)

表 5.5 (Cont.)

方法	詳述	應用	備註	參考
現地	定水頭導水法	測量地面附近的非飽和 區土料場，飽和導水率 土壤型態: 砂土、泥土和 粘土 $K > 1.0 \times 10^0$ m/yr 至於乾砂或砂礫石 $K < 1.0 \times 10^4$ m/yr.	泵機測試包括測量在其 中水流出無套管的井成 恆定頭流動條件下的土 壤的速率;專門用於測定 土壤中的不飽和區域中 的字段飽和水力傳導率 (但也可以在飽和區使 用);一個非常高的地下水 條件，一個“泵出”測試	Amoozegar and Warrick (1986) ASTM (1992) DOI (1990a)

雙管法

測量土質中的地表附近不飽和區飽和水力傳導率，。

飽和土，往往比任何“泵入”型式試驗的比較滿意的；計算出的 K 由土壤剖面的最可滲透層的導電性支配；在均勻的土壤中，測得的 K 反映了在水平方向上的導電性；需要大量的水和一長的執行時間（數天）。

利用安裝在螺旋鑽孔兩個同心圓柱體；水被引入到這些氣缸和 K 是通過測量在所述氣缸內的流動進行評價；可以在水平及垂直方向上測量 fieldsaturated K 表；該方法需要超過 200 升的水和兩個到六個小時完成。

Amoozegar and Warrick (1986)
ASTM (1992n)

表 5.5 (Cont.)

方法	詳述	應用	備註	參考
現地	圓柱滲透儀法	測量地面附近的非飽和區土料場，飽和導水率 $K=1.0 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^3$ m/yr。	該方法包括一個圓筒環放置在土壤表面內積水和測量，以保持一個恆定的頭所需水的體積率；的措施，在接地表面附近的垂直方向上的磁場飽和 K 表；耗時的過程，因此需要過量的 100 升的水；該方法的變型包括單環和雙環滲。	Amoozegar and Warrick (1986) ASTM (1992i,n)
	空氣進入滲透儀法	以測量在地面附近的不	快速的技術來確定現地	Amoozegar and

單井定水頭試驗

飽和（滲流）區土質飽和水力傳導率。

為了測量土質導水率的不飽和（滲流）區域內的任意深度水力傳導率。

K 值;需要大約 10 升的水;是單環入滲方法。

抽水測試,包括將水注入在定水頭流量條件下,土壤或岩石鑽孔的分離間隔;目前唯一可用的測試,可以測量磁場飽和鉀養分的非飽和區域內大量的深度;目的是確定在一個鑽孔的特定間隔 K 的近似值。

Warrick (1986)

ASTM 1992n

Amoozegar and Warrick (1986)

ASTM (1992n)

DOI (1990b)

分層的土壤，其中 K 的距離場的方法測得的值將反映滲透層中的土壤剖面。然而，通過適當地選擇具體的方法將在本領域中使用，K 的垂直和水平分量的原位值可以獨立地在分層土壤中的每一層確定。

要實現的選擇對於特定的應用程序將依賴於目標的具體方法。因為在獲得未固結土壤的一個完全不受干擾的樣品的困難性，通過實驗方法確定的 K 值可能不準確地反映在該領域的相應值。因此，字段的方法時應使用的目的，是在問題為準確地表徵的地下系統的物理特性越好。場的方法，但是，通常比實驗室方法更昂貴，因此，在成本的問題已成為決定性的，或當現場條件實際表示是不是根本的重要性和原位水力傳導率不可用，實驗方法可以用於確定飽和水力傳導率 K。

5.2.1 實驗室法

在實驗室中，K 的值可以通過幾種不同的儀器和方法如滲透計，壓力腔室，和固結 (DOA 1970) 來確定。所有這些方法的共同特點是，土壤樣品被放置在一個小的圓柱形容器表示通過其循環的液體被強制流動的一維土壤結構。取決於通過土壤樣品所施加的流動模式，實驗室方法測量的水力傳導率被劃分為一個常數頭測試用穩態流方案或一個落頭測試用非穩態流動方案。

定水頭的方法主要用於在土壤材料的樣品，估計 1.0×10^2 m/yr 以上的 K，這對應於粗粒土，如乾淨的砂和礫石。水頭下降的方法，在另一方面，用於土壤樣品中具有 K 的估計值低於 1.0×10^2 m/yr (DOA 1970)。標準實驗室方法，用於確定 K，用定水頭和變化水頭的流動條件的列表，示於表 5.5。也列於表 5.5 中，作為實驗室測定方法 K，是晶粒尺寸的基於經驗的方法，其中，所述固有滲透率中，k，土壤樣品，憑經驗從所述的否則實驗室測量的粒度分佈測定土壤樣品。

關於實驗室方法測定 k 重要的考慮是與土壤採樣過程和製備測試樣品的和循環的液體。在採樣過程中，如果沒有適當地進行，通常會干擾在實際的現場條件誤傳的土壤和結果的矩陣結構。土壤原狀採樣是可能的，但它要求使用專門設計的技術和儀器 (Klute and Dirksen 1986)。

在標準方法進行土壤取樣的詳細指南介紹了 ASTM D 4700-91 標準指南從滲流區

(ASTM 1992 升) 土壤取樣。相對原狀土樣，適用於實驗室水力傳導率的測定，可以得到，例如，通過使用薄壁管的採樣方法按照 ASTM D 1587 至 1583 年，標準實踐土壤的薄壁管抽樣 (ASTM 1992c)。在該技術中，通過按下一個薄壁金屬管插入土壤中，除去土壤填充管中，並密封其端部，以防止在土壤基質的物理干擾而獲得的相對原狀土樣。選擇測試液也為實驗室測定飽和水力係數具有根本的重要性。的目標是使測試流體模擬土壤流體的實際性能盡可能接近。當選擇了不適當的試驗流體中，測試樣品可以堵塞與夾帶的空氣，細菌的生長。為了避免這種問題，一個標準的試驗溶液，如脫氣 0.005 mol 硫酸鈣溶液，應在滲透計用飽和的百里酚，除非有特殊原因，而選擇另一種解決方案 (Klute and Dirksen 1986)。

5.2.1.1 定水頭法

在恆定頭測試與滲透計是最常用的方法，用於確定在實驗室粗粒土的飽和水力傳導率之一。測試按照給土壤液體配置表示的一維，穩定一個滲濾液體通過土壤的飽和塔從一個均勻的橫截面面積的流動的直接應用達西定律的操作。在該方法中，橫截面面積 A 和長度為 L 的圓筒形土壤樣品置於不提供到所述流中的任何額外的流體阻力在兩個多孔板之間。恆定水頭差， $H_2 - H_1$ ，然後在整個測試樣品應用。土壤通過測量在時間 t 內流過該系統的測

試液的體積 V ，飽和水力傳導率。 K 可直接從達西公式確定：

$$K = \frac{VL}{[At(H_2 - H_1)]} \quad (5.5)$$

改善的結果，推薦的測試來根據不同的水頭， $H_2 - H_1$ 。此外，還建議了的液體收集到的量應足以提供至少三個顯著附圖中所測得的體積。在恆定頭滲透計的簡單版本， K 的測定的下限是約 $1 \times 10^1 \text{m/yr}$ ，這相當於沙質粘土的土壤的導水率的下限。對於 K 的值越低，則建議滲透計來使用，也可以增強對恆定頭滲透率或下降頭的版本(Klute and Dirksen 1986)。表 5.5 呈現恆定頭的方法，用於測量土壤材料的飽和水力傳導率在實驗室中的變化。

5.2.1.2 落水頭法

在實驗室落水頭測試用的滲透計，主要是用來確定在 K (或 k) 細粒土的值。像定水頭的方法，所述落水頭測試也操作按照直接應用達西定律一維土壤，飽和的柱具有均勻的橫截面面積。所述的落水頭的方法不同於恆定頭的方法在於該滲透過飽和中的液體保持在一個非穩態流量的方案，其中兩個水頭和排出空氣量的測試過程中會發生變化。在落水頭測試方法中，橫截面面積 A 和長度為 L 的圓筒形土壤樣品放置在兩個高導電板之間。土壤樣品柱被連接到立管的橫截面面積，其中，所述滲透流體被引入到系統中。因此，通過測量時間 t 的指定的時間間隔期間在頭部的變化在從 H_1 到 H_2 的豎管，飽和水力傳導率，可以按如下方式確定(Klute and Dirksen 1986):

$$K = \left(\frac{aL}{At} \right) \ln \left(\frac{H_1}{H_2} \right) \quad (5.6)$$

水力傳導係數下限，它可以在一個降頭部滲透計來測量，約為 $1 \times 10^{-2} \text{m/yr}$ 。這個值大約對應於粉砂和粘土粗的水力傳導係數的下限 (Klute and Dirksen 1986)。

在使用任一恆定的頭或落水頭測試用的滲透計中遇到的一個常見問題是關係到飽和的測試過程中的土壤樣品中達到的程度。氣泡通常孔隙空間內捕獲，並且儘管它們往往通過溶解到脫氣水慢慢消失了，它們在系統中存在可能會改變所測量的結果。因此，在使用這些儀器進行測量後，它總是建議該樣品的飽和度通過測量樣品的體積含水率和比較的結果與從顆粒密度中計算出的總孔隙度進行驗證。

對於土壤樣品中的氣泡的存在變得非常關鍵的一個更精確的實驗室測量 K ，用背壓的導電性試驗的建議。在該方法中，附加的壓力（背壓）被施加到土壤樣品，從而降低了氣體的氣泡，在氣泡的大小，並且因此，增加了水的飽和度的孔隙流體。

5.2.2 現地法

為原位測定土壤的飽和水力傳導率開發了幾種方法可分成兩組：(1) 那些適用於接近或低於一個淺水表和位點 (2) 那些適用於站點遠高於深水表或在不存在水的表。更具體地，這些基團也適用於位於分別位點，在土壤中的飽和的和不飽和的區域。在任一組（類似的實驗室方法），是由達西定律測量水頭的梯度在站點和所得到的土壤的水通量後得到的 K 的確定。用於原位測定鉀在土壤中的飽和和不飽和區域表 5.5 列出了幾種標準的方法。

5.2.2.1 現地法使用於飽和區域之土樣

許多現場的方法已經開發了確定內潛水和承壓條件下形成的地下水飽和土的飽和導水率。這些方法包括 (1) 螺旋輸送器孔和測壓的方法，這是在淺水條件下使用 (Amoozegar and Warrick 1986), (2) 良好的抽水試驗，其主要被開發用於含水層性質的潛水和承壓地下水系統的開發中使用的測定(EPA 1986)。

5.2.2.1.1 鑽孔法

螺旋鑽洞的方法是該領域的程序最常用的原位測定土壤飽和導水率。這種方法有許多可能的變化(Amoozegar and Warrick 1986). 在其最簡單的形式，它由一個空腔的製劑的局部穿透含水層，與土壤的干擾最小。製備腔體後，將水在孔中使其平衡與地下水;也就是說，在孔中的電平變為一致的地下水位。實際測試開始通過除去從孔的水的全部量和通過測量空腔內的水位的上升速率。

因為鄰近腔中的水的流動圖案是三維方式的，不存在簡單的等式用於精確地確定導電率。許多可用的半經驗表達式，但是，可用於近似飽和水力傳導率為不同的土壤結構。這些表述是螺旋鑽孔和含水層和所測量的速度的幾何尺寸的函數，在其隨時間的變化的孔中的水位 (Amoozegar and Warrick 1986).

螺旋鑽洞的方法適用於非承壓含水層具有均勻的土壤性質和淺水表。在其最簡單的形式中，這種方法提供了含水層內的土壤的飽和水力傳導率的平均水平分量的估計值。該方法的增強的變型已發展到估層狀土壤和水平或垂直的飽和水力傳導率的成分的測定。由螺旋推運器孔法得到的結果是不可靠的情況，其中(1)地下水位土壤表面上，(2)自流條件存在，(3)的土壤結構是廣泛的分層，和(4)高滲透性的小地層發生。

5.2.2.1.2 壓力法

測壓方法，如螺旋鑽洞的方法，適用於測定土壤的飽和導水率在潛水含水層與淺地下水位。不像螺旋鑽洞的方法，但是，該測壓方法適當地設計用於在分層土壤含水層的應用程序以及用於確定飽和水力傳導率的水平或垂直分量。

該方法包括在安裝一個測壓管或管道進入通過地下系統鑽出的螺旋孔，而不會干擾土壤。該測壓管應足夠長，以部分地穿透潛水含水層。該測壓管的壁被完全封閉，除了在下端，其中，所述管被篩選開，以形成一個筒狀的含水層內半徑 r 和高度 H_c 的空腔。在測壓管的水首先被除去，清潔系統，然後讓其平衡與地下水位。

類似於螺旋鑽通孔的方法，該測壓方法是通過從管中除去水，然後測定水的管內的上升速率進行。然後將飽和水力傳導率的求模腔中的測壓管，所述含水層的尺寸的幾何尺寸的函數，並且在所述管上升水台的測量速率。水力傳導係數值為壓力表壓計算得知 (Amoozegar and Warrick 1986)。取決於腔與它的半徑 (r) 進行比較的相對長度 (H_c)，該測壓法可用於確定飽和水力傳導率的水平或垂直分量。因此，如果相比於 r ， H_c 大時，得到的結果反映 K 的水平分量，否則，如果相比於 r ，則 K 的垂直分量估計 H_c 較小。壓力計方法是特別適合於測定在分層地下系統各個層的導水率。

5.2.2.1.3 尾水試驗法

該井抽水的測試，適用於現場測定的潛水和承壓含水層的土壤物質的飽和導水率。該方法包括從井中移除水段塞瞬時和測量水的油井中回收的。精心抽水試驗的變化，被稱為單井測試 (EPA 1986)，並列於表 5.5。與此相反的螺旋推運器孔和測壓的方法，其結果反映在原地在土壤周圍產生的空腔平均土壤的相對小的區域，以及抽試驗也提供了一種在原位代表性的土壤水力傳導率，但平均土壤的較大體積表徵的 K 測得的結果，主要反映在水平方向上的值。(更進一步的參考文獻可見於 EPA [1986], Freeze and Cherry [1979], and Amoozegar and Warrick [1986])

5.2.2.2 非飽和區現地實驗法

通過原位測量方法位於地下水位以上的非飽和土的飽和導水率比測量 K 中飽和土的難度。重要的區別是，原來的不飽和的土壤必須被人工飽和進行測量。一個額外的大量的水，可能需要飽和的介質，這導致一種更複雜的和費時的測量。這些現場測量的 K 的結果通常被稱為場飽和水力傳導率。

許多的原位方法已經被開發用於確定土壤的不飽和（滲流）區域內的土壤材料的領域飽和水力傳導率。如表 5.4 列出了可用的標準方法，用於測量飽和的 K 包含（1）淺阱泵式或幹式螺旋推運器通孔，（2）雙管，（3）環入滲，（4）的空氣入口滲透儀，和（5）的定水頭試驗中一個鑽孔。比較這些標準方法的完整指南，提出在 ASTM D5126-90 標準指南的領域及方法的確定水力傳導在包氣帶（ASTM 1992n）比較。關於這些標準的方法進一步詳細的討論也可以在 Amoozegar 和瓦里克（1986）中找到。

5.3 RESRAD 輸入資料須知

在 RESRAD，使用者被要求輸入的飽和水力傳導率值中的每一年（m/yr）三個土壤材料的單元：污染區，不飽和區和飽和區。

水的污染的區域內，並通過土壤，隨後的垂直浸出，和污染物的輸送到下層含水層中的不飽和區域中的垂直浸潤有問題的被模擬的重要方面。因此，在 RESRAD，與土壤的污染和不飽和的區域中的飽和水力傳導率值應該代表 K 的垂直分量對於各向同性材料，土壤，K 的水平分量和垂直分量是相同的；對於各向異性的土壤，但是，K 的垂直分量是通常要比水平分量低一個或兩個數量級。飽和區中的主要問題涉及到通過非飽和區滲透並到達含水層中污染物的水平輸送。因此，在飽和區中的土壤材料的飽和水力傳導率（K）的輸入值應反映 K 的水平分量

K 值在 RESRAD 所使用的估算可以在不同層次的位點特異性的精度進行，這取決於可用的信息量。對於一般的用途的代碼，一組 K 個的缺省值被定義為 10m/yr 的污染和不飽和區和 100m/yr 為飽和區。這些值近似表示的各向異性沉積的土壤材料的條件，即，淤泥，黃土，或粉砂，具有 K 的垂直分量是幅度比水平分量低一個數量級。如果地質地層和土壤質地是已知的，一個較好的 K 如表 5.1，5.2，5.3，5.4。然而，如果在文獻值代替實際現場數據的使用，不超過一個顯著位是合適的。

用於 RESRAD 輸入數據的準確位點特異性估計，K 的值要根據在表 5.5 中列出的標準方法中的一種來測量無論是在實驗室或田間試驗。

由於可用於現場測量的在土壤中的非飽和區域字段飽和 K 時的方法的固有的困難，所以建議將被用於確定在被污染的和飽和區域的 K 的垂直分量的實驗室方法。在這些情況下，常數頭或落頭的方法的任一變化，可以使用被測量 K 上的實際值決定。如之前所提，恆定頭的方法更適用在 K 的大值(10^0 - 10^6 m/yr)，並且的落水頭的方法更適用於的 K 值較低 (10^{-2} - 10^2 m/yr)

水力傳導係數在土壤中的飽和區中的水平分量的測定可通過實驗室或野外的方法完成。在實驗室中，K 的粘性土材料的水平分量的值可以通過使滲透計法得到的擾動土樣品的導電率來近似。對於粘性土材料，原狀粘性土樣品可以被定向在水平方向上，以獲得 K 的適當值在該領域，大多數的在飽和區可用於水力傳導係數測定的方法將反映在該值水平方向。

6 體積含水率 VOLUMETRIC WATER CONTENT

6.1 定義

在土壤中的水含量通常可表示為 2 塊或 2 倍體積的任一個無因次的比值，或給定為每單位體積的質量的比值。這些無因次的比值，無論是作為小數或百分比，如果再乘以 100。要避免兩個無因次的含水量比之間的混淆，其基礎應始終加以說明。然而，在沒有給出指示的情況下，數字被假定為基於質量，因為在土壤中的水含量的測定，在質量基礎上的數字，通常獲得的第一，然後轉換為以體積為基礎的數字。在 RESRAD，與在土壤材料中的含水量，輸入數據以體積為基準。在土壤中的水含量以質量計， w 被定義為液相（水）的質量的比值， M_l 給定的土壤樣品與固體物質的質量中， M_s 計算如下：

$$w = \frac{M_l}{M_s} \quad (6.1)$$

$$\theta = \frac{V_l}{V_t} = \frac{V_l}{V_s + V_p} \quad (6.2)$$

土壤體積含水量， θ ，表示土是由包含在土壤中的水佔據的總體積的分數。假設 V_l 處於液相（水）中的土壤樣品和 V_t 的體積樣品的總體積，該體積含水量， θ ，如下定義：

其中 V 和 V_p 乾土體積和孔隙體積，從方程 6.1 和 6.2 給出的定義，體積含水量， θ ，可以表示在質量基礎上的水含量計， w ，根據下面的公式：

$$\theta = \frac{V_l}{V_t} = \frac{M_l / \rho_w}{M_s / \rho_b} = \frac{M_l}{M_s} = w \left(\frac{\rho_b}{\rho_w} \right) \quad (6.3)$$

其中 ρ_b 土壤總體密度而 ρ_w 為水的密度，體積含水量與總孔隙率 p_t 和水飽和度 R_s 有關，如下：

$$\theta = p_t R_s \quad (6.4)$$

$$\theta = p_t R_s = \left(\frac{V_p}{V_t} \right) \left(\frac{V_l}{V_p} \right) = \frac{V_l}{V_t} \quad (6.5)$$

從接近零的可能值 θ 範圍為幹土接近零飽和度，達到了總孔隙度為完全飽和土的價值。的零體積水含量的下限是難以實現的，因為它是難以從土壤完全消除水。在沙質土壤中， θ 的上限，其等於總孔隙度角，是由於消除了以完全飽和它所有的氣泡在土壤中的困難也難以實現的。然而，因為粘性土膨脹潤濕後， θ 的對這些土壤的值可以超過其總孔隙率。

6.2 量測方法論

直接和間接的方法可以用於確定土壤的體積含水量。乾燥和稱重的土壤樣品的已知體積的直接方法基本上由。在間接的方法是基於對與它的含水量土壤的某些物理和物理化學性質的相關性

在直接和間接方法測定土壤中的水含量進行了廣泛討論於 Gardner (1986)。在 FUSRAP 現地，用於確定土壤材料（質量基準）的水含量的標準方法 ASTM D 2216-90 標準測試方法實驗室測定土壤和岩石 (ASTM 1992e) 的水（水分）含量。這種方法涉及到質量為單位水含量的測定，瓦特，而不是向體積含水量， θ ，根據需要在 RESRAD。但是，體積含水量可以從公式 6.3 來確定。當質量為單位的含水量和土壤材料的堆密度（第 2 節）是已知的。通常，在直接測定方法中，土壤樣品的體積含水量 θ 進行評價的三個測量的量的基礎上：(1) W_w , 濕土重; (2) W_d , 烘乾之乾土重; and, (3) V_t , 現地總體積，這些測量的量可用時，液相（水）的體積時， V_l ，樣品中然後可以計算為

$$V_l = \frac{(W_w - W_d)}{\rho_w} \quad (6.6)$$

與體積含水量 (θ) 終於可以從式 6.2 和 6.6 作為確定

$$\theta = \frac{V_l}{V_t} = \frac{W_w - W_d}{V_t \rho_w} \quad (6.7)$$

其中 ρ_w 為水的密度。

在直接的方法，用於確定體積含水量的變化都與收集的土壤樣品中，測量場體積 (V_t) 時，和乾燥該樣品的不同方法。採集的土壤樣本，並測量可能的直接方法已在 2.2 節中關於土壤密度的討論。

乾燥狀態下的土壤樣品（和建立的方法來實現這種狀態的）定義的構成的關鍵問題在確定土壤中的容積含水量。作為一種普遍的做法，諸如在 2.2 節中所描述的，土壤樣品的烘箱乾燥重量是乾燥的樣品在 105°C，直到接近達到恆重（希勒爾 1980 年 b）後進行測定。如由加德納（1986）所討論的，但是，此過程為 oven-dry 方法不夠精確，並且可以創建在上述測定結果的不確定性和不精確性。因此，如果水的含量為某一特定位點的確定被認為是關鍵的，其它程序比 oven-dry 方法應採用（加德納，1986）。

測量的水含量在土壤的間接方法依賴於土壤以及它們相對於體積含水量 (θ) 的某些物理和物理化學性質。通常這些關係是複雜的，並且需要複雜的方法和設備來表達它們。測量體積含水量的間接方法適用於原位，而不是實驗室測定，並涉及測量由所述土壤水分含量的影響，如土壤的一些屬性

(1) 導電度, (2) 中子散射, or (3) 中子和 γ 射線的吸收 (Gardner 1986).

相似的土壤密度的測定的討論，用於測量體積含水量呈現一些優點的其他相關的實驗室技術的間接方法。的主要優點是：(1) 原位評價水含量的 (2) 土壤的干擾最小; (3) 相對較短的測量時間，(4) 適用於更深的地下資源的確定，因為最小挖掘要求的; 及 (5) 非破壞性，以連續或重複測量的在同一地點的可能性。這種間接的方法的缺點是，它們是更複雜的，並且需要昂貴的設備和訓練有素的操作員誰必須能夠處理頻繁的校準程序，該電子設備和取樣設備。在使用放射性的元件的系統的情況下，操作人員必須特別訓練的輻射方面和整個操作的放射保護程序。

6.3 RESRAD 數據輸入的要求

使用 RESRAD，有必要對所述蓋區的土壤和建築物的基礎材料（例如，混凝土）的體積含水率 (θ) 限定的輸入值。在 RESRAD，容積含水量的無量綱值輸入為小數，而不是百分比。

對於一般的使用該模型，對於體積含水量一組缺省值是在內部定義的代碼。預設值是 $\theta = 0.05$ 為覆蓋材料， $\theta = 0.01$ 為建築基礎材料（如混凝土）。考慮到預設值的總孔隙率，0.4 和 0.1 時，體積含水量值對應於 0.125 和 0.1，分別覆蓋材料和混凝土，飽和度。為更準確的使用 RESRAD，所述體積含水量的位點特異性的值應通過試驗根據在第 6.2 節提出的方法確定的。

7 有效氡擴散係數 EFFECTIVE RADON DIFFUSION COEFFICIENT

定義

隨機移動的氡氣體原子混入空氣的結果，在氡氣的朝向其濃度降低的空氣的方向的淨遷移。這種現象被稱為分子或原子的擴散。氡在開放空氣中的擴散可通過 Fick 定律，其中指出，在漫射物質的磁通密度成線性比例的濃度梯度進行說明。Fick 定律可以表示為如下：

$$J = -D_0 \Delta C \quad (7.1)$$

$$D_0 = \frac{|J|}{|\Delta C|} \quad (7.2)$$

為在露天氡擴散，菲克定律獨特地表達，因此，氡在露天，你的擴散係數，也唯一地確定。然而，當施加到多孔介質中，例如在土壤材料氡擴散的條件下，Fick 方程可以寫在不同的方式，這取決於如何變量磁通密度 J 和濃度 C 所定義。Fick 方程可以在多孔介質中施加於分子擴散的現象，這取決於批量或細孔容積是否被用來定義濃度和是否堆積或孔面積被用來定義中的磁通密度被寫入四種不同的方式。這些不同的定義在土壤鉛的氡擴散係數，以選擇一些混亂，並使用這些參數的方式，因為所使用的符號和術語尚未標準化 (Nazaroff et al. 1988)。

確定氡氣在多孔介質中的擴散係數的兩種截然不同的方式已經通過文獻：(1) D_e 為有效氡擴散係數 (2) D 是大量的氡擴散係數。然而，Culot (1976) and Nazaroff et al. (1988) 有關於這兩個係數的定義，並通過多孔介質模型氡氣的擴散中使用的方式指出差異。因此， D_e 和 D 的適用性可見於 Nazaroff et al. (1988)。

因此，有效（或間隙），氡擴散係數， D_e ，從 Fick 方程定義為穿過孔面積，對氡活性的擴散通量密度的比值。氡活度濃度在孔或間隙的梯度空間， ΔC 。並且可以表示如下：

$$D_e = \frac{|J_e|}{|\Delta C|} \quad (7.3)$$

， D 被定義為在整個介質氡活性的擴散通量密度， J_B 的幾何或表面面積的比率， ΔC 的氡活性濃度的梯度，並且可表示如下：

$$D = \frac{|J_b|}{|\Delta C|} \quad (7.4)$$

本體和在土壤中， D 和 D_e 有效氬擴散係數，分別是由土壤總孔隙度，角相關，根據下面的表達式：

$$D = p_t D_e \quad (7.5)$$

在一般情況下，在多孔介質中的擴散係數是擴散物種的性質，孔隙結構，流體存在於所述孔中的類型中，固體基質，所述流體飽和度和溫度的吸附性能。用於多孔介質中的氬擴散，擴散度為氬氣的其它同位素已觀察到相媲美，對同位素氬-222 (Nazaroff et al. 1988). 幾個已嘗試對氬擴散係數在多孔介質中 (D and D_e) 氬於室外擴散係數 (D_o) 總孔隙率 (pt). 這些嘗試都沒有定論。根據 Currie (1960a,b)、Rolston (1986) 和 Nazaroff et al. (1988) 的努力係數 D and D_o 可表為以下：

$$\frac{D}{D_o} = \gamma p_t^\mu \quad (7.6)$$

其中 γ 和 μ 代表土料的孔隙形狀措施。此經驗關係可從廣泛的範圍內的乾燥的多孔材料，其中 γ 的值在 0.8 和 1.0 和 μ 落於 1.0 左右的值之間通常躺在適合的數據。這個經驗關係是不適用的，但對於非常潮濕土壤相當合適 (Rolston 1986)。

氬在土壤中的有效擴散係數的土壤水分含量的影響進行了研究羅傑斯和 Nielson (1991)，誰提出了如下的表達式：

$$D_e = D_o p_t \exp(-6p_t R_s - 6R_s^{14p_t}) \quad (7.7)$$

其中 $D_o = 1.1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 開放空間氬氣擴散係數， pt 總土壤孔隙率，和 R_s 土壤飽和度。

7.2 量測方法論

氬在土壤中的擴散率（或擴散係數）可以通過現場和實驗室試驗來測定。在任一情況下，擴散的實驗評價包括確定出現在 Fick 方程的係數的數值。因為在執行字段方法的困難，實驗室方法通常用來確定在多孔介質中，特別是在土壤材料的氬擴散。

實驗室測量方法的氬擴散多孔介質的變化已制定，目前還沒有標準的方法存在。所有不同的實驗室方法是基於表示在一維結構的擴散過程中的質量平衡方程的解。根據拍攝的時間域的擴散方程的解的近似值，這些方法可以分成兩個不同的組：（1）穩態擴散法和（2）瞬時擴散法(Nielson et al. 1982)。在實驗室中的土壤材料的氬擴散率的測定中使用的穩定狀態的方法是基於在水平方向的一維擴散方程的解，表示為如下所示：

$$\frac{d^2C}{dx^2} - \frac{\lambda}{D_e} C = 0 \quad (7.8)$$

通過連接該一維 Fick 方程得到此穩態方程

$$J_e = -D_e \frac{dC}{dx} \quad (7.9)$$

與一維，穩態，連續方程，

$$\frac{dJ_e}{dx} = -\lambda C \quad (7.10)$$

其中 J_e 為氬活性有效通量密度 (pCi)/(m²·s), C 孔隙中氬活性濃度(pCi/m³), 及 λ 氬衰退係數(1/s)。

穩態擴散法確定在無污染（無氬氣源），土料的有效氬擴散係數（德）由 Silker 和 Kalkwarf 實施（Silker 1981; Silker 和 Kalkwarf 1983）的理論發展科恩的基礎上（1979 年）。在此方法中使用的設備包括公知的深度 d 被密封在一個末端含有一個氬源具有已知和恆定強度已知體積的空氣室的測試土壤的列。試驗土柱的另一端保持開放。作為該系統中的邊界條件，假定在一個穩定狀態的情況下，氬活性在柱的底部的有效磁通密度，提梧，是恆定的，並唯一地依賴於氬源和幾何形狀的強度該系統。此外，在土壤柱的開放端的氬活度濃度被認為是可忽略的（即，零）。

根據這些假設和條件，有效氬擴散係數的基礎上，德，然後可通過下面的公式計算(Silker and Kalkwarf 1983):

$$\lambda d \left(\frac{C_0}{J_{eo}} \right) = \left(\frac{d}{l} \right) \left[\frac{1 - e^{-\frac{2d}{l}}}{1 + e^{-\frac{2d}{l}}} \right] \quad (7.11)$$

其中 C_0 在空氣中的氬活度濃度， l 為氬擴散長度定義如下：

$$l = \sqrt{\frac{D_e}{\lambda}} \quad (7.12)$$

右側方程 7.12 的是一個明確定義的參數比值 d/l 的功能和獨立的 C_0 測量值。在等式的左邊是依賴於所測量的結果。因此，通過選擇土壤試驗樣品的尺寸（即厚度）中， d 氬氣來源和所述柱直徑的強度的基礎上確定有效磁通密度;使有限的幾次測量;方程式 7.9 可以以圖形或數值求解的比值 d/l ，並隨後為 D_e 。

基本上，在 D_e 的測定中使用的土壤樣品具有圓柱形狀，其高度 10 厘米和 14 厘米的內徑。平衡後，在該底室，鈷穩態氬濃度，是通過接管 7 元至 14 天期間多次測量來確定。每個測量包括從典型的 800 立方厘米底腔排出的氣體的大約 5 厘米，通過確定氬濃度的使用一個閃爍瓶中技術（如盧卡斯細胞）或木炭的吸收和伽馬射線光譜量測。

7.3 RESRAD 數據輸入的要求

在 RESRAD，使用者被要求輸入氫的有效擴散係數的值為三種材料：（1）蓋區的土壤，被污染的區域（2）土壤，（3）的建築物的基礎材料（即，混凝土）。德的這些輸入值的尺寸以平方米每秒（米²/秒）為單位。對於所考慮的每個多孔材料，De 的值被假設為是相同的在 RESRAD 處理既氫同位素，即，氫-222 和氫-220。

在多孔介質中的有效擴散係數氫值（土壤和混凝土包含）在寬範圍的大小根據不同的多孔材料，特別是對水的飽和度，其程度幾個數量級。表 7.1 列出了氫氣由不同的研究人員為一系列鬆散土料，混凝土和其他建築材料得到有效擴散係數的代表值。因為在所採用的各種研究的實驗方法學上的差異，這些實驗數據是不容易比較。然而，它們可能給德在該領域所需要的值的指示。

通常情況下，氫疏鬆土壤材料具有低水分含量的有效擴散係數是大約 $10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 。的上限是由在露天，做，這是大約 $1.1 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ 的氫擴散係數表示。在較低的極端情況下，在一個完全飽和的土壤材料的氫擴散係數可低至 $10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ 。在 RESRAD，De 的值等於 $2.0 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 為封面和污染區獲得通過。根據表 7.1 給出的數據，德的這個缺省值將是在土壤中具有較低的水分含量，平均有效氫擴散係數和粉質和粘質砂組成。德的具體變化所觀察到的範圍，如表 7.1 給出，變為從 8.0×10^{-9} 至 $4.0 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ 。De 的值等於 $3.0 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ 獲得通過的 RESRAD 模型來表示具體的有效的氫擴散係數。

有效氫擴散係數（De）的值在 RESRAD 所使用的估算可以在不同層次的位點特異性的精度進行，這取決於可用的信息量。對於一般的用途的 RESRAD，一組德的預設值定義為 $2.0 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 的蓋和受污染的區域和 $3.0 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ 為建築物的基礎（即混凝土）。如果土壤材料中的該站點的類型是已知的。

表 7.1 疏鬆土壤材料和混凝土的有效擴散係數為氬

孔隙材質	有效氬擴散係數, De (m^2s^{-1})	建議	參考
未壓密土壤壓實粉砂岩	$(3.0 \pm 1.3) \times 10^{-6}$	$p_t = 0.29-0.36$ $R_s = 0.05-0.34$	Silker and Kalkwarf (1983)
壓實粘土砂	$(3.2 \pm 1.5) \times 10^{-6}$	$p_t = 0.32-0.39$ $R_s = 0.09-0.55$	Silker and Kalkwarf (1983)
壓實無機粘土	$(2.5 \pm 1.0) \times 10^{-6}$	$p_t = 0.32-0.43$ $R_s = 0.06-0.34$	Silker and Kalkwarf (1983)
	2.7×10^{-6}	$w = 1.5\%$ dry weight	Strong et al. (1981)
	2.5×10^{-7}	$w = 10.5\%$ dry weight	
粉質粘土沙	6.0×10^{-8}	$w = 17.3\%$ dry weight	
鈾礦山尾礦	$(5.4-7.2) \times 10^{-6}$	$w = (0.7-1.5)\%$ dry weight	Strong et al. (1981)
壤土	8×10^{-7}	Dry	Tanner (1964)
泥	5.7×10^{-10}	$\theta = 37\%$	Tanner (1964)
	$(1.1-4.0) \times 10^{-7}$	$p_t = 0.11-0.13$	Poffijn et al. (1988)
	1.2×10^{-8}	$p_t = 0.25$	Culot et al. (1976)
	3.4×10^{-8}	$p_t = 0.05$	Culot et al. (1976)
	3.3×10^{-8}	$p_t = 0.068$	Zapalac (1983)
混凝土	$(0.8-8.4) \times 10^{-8}$		Stranden (1988)
其他			
磚	$(0.8-3.0) \times 10^{-7}$	-	Stranden (1988)
石膏	$(1.0-4.0) \times 10^{-6}$	-	Stranden (1988)

p_t = 總孔隙率, R_s = 飽和水體積, w = 含水重百分比, θ = 含水體積百分比

來源: Adapted from Nazaroff et al. (1988)

D_e 的更準確的估計可與表 7.1 的幫助下進行。對於大多數應用來說，這種方法就足夠了，因為 D_e 的任何特定位點的土壤和建築材料中的自然變異。

在案例中，有合理理由懷疑該有效的氦擴散係數 (DE) 的預設值不反映情況，在一個特定的網站，並有測量德的可能性，該 RESRAD 代碼能夠估計它的內部水飽和度 (從體積水含量計算)，總孔隙率的值的基礎上，根據公式 7.7。要實現此選項，用戶要輸入任何負數作為德的輸入值 RESRAD。

用於將輸入數據到 RESRAD 的準確位點特異性的估計，然而， D_e 的值應在任一所述的實驗室或田間試驗測定。每當必要和可能的，德在土壤覆蓋區的測量 (假定它不與氦源污染的) 應該在實驗室中使用的方法，如 Silker 和 Kalkwarf (1983) 的技術來進行。

8 氦析出係數 RADON EMANATION COEFFICIENT

8.1 定義

氦氣析出係數， ϵ ，是由鐳衰變逸出從土壤顆粒和進入所述介質的孔隙產生氦的總量的比例。它也被稱為所產生的功率，所產生的分數，釋放率，和逃逸到生產比率。氦射氣係數是一個無量綱參數，並表示無論是作為分數或百分比。

氦氣中，氦-222 和氦-220 的兩種最常見的放射性同位素，是由 α 衰變從兩個鐳同位素，鐳-226 和鐳-224，分別是放射性過程中產生的。由於在 α 衰變過程線性動量守恆的，新創建的氦-222 和氦-220 原子只剩下一個動能 (通常稱為“反沖”) 為約 86 和 103 千電子伏特，分別為 (Nazaroff 等能量。1988)。

由此，生成後，氦原子趨向於從原來的位置移開，直至它們的後坐能量被完全轉印到介質。因此，根據不同的土壤，土壤孔隙分佈，土壤水分含量的固相內的原始位置，則新創建的氦原子可最終在它們被創建的同土壤顆粒內，相鄰的土壤顆粒內由於從主機土顆粒逸出，或在介質中的孔之後後部滲透。

報告由若干研究的實驗數據表明，氦析出係數強烈地受到介質的水分含量的影響，特別是在低的水飽和度的範圍內 (Nazaroff 等，1988)。對這種結果的基礎上，已經推測存在的水在孔的數量增加了氦原子穿過它，從而提高了機會，該原子將內終止後座力的反衝能量的吸收水。氦氣在孔隙水和空氣相分配平衡將跟隨其後根據亨利定律。

儘管溫度可影響氦射氣係數的大小，它已經證明，表面土壤的溫度變化的正常範圍內時，這種效果是輕微的重要性 (Nazaroff et al. 1988)。

氦氣析出係數， ϵ ，是確定氦析出的速率進入土壤基質的孔的特性土壤參數之一。相對於氦生產的其它土壤特性參數是鐳的濃度 (鐳-226 和/或鐳-224)，在 RESRAD 土壤顆粒中氦的來源， S_{Ra}

由孔隙空氣產生 \dot{S} (pCi/m^3)，其如下表示為：

$$\dot{S} = \epsilon \rho_s S_{Ra} \lambda \left(\frac{1 - p_i}{p_i} \right) \quad (8.1)$$

在土壤中的氦析出係數的值取決於氦同位素被考慮時，土壤材料，並且將水分含量。 ϵ 在不同的土壤，岩石和其它材料的試驗測量已經報導了許多研究者。表 8.1 列出了這些可用

數據的匯總。因為在所採用的各種調查的實驗方法學上的差異，這些數據是不容易比較。這些數據是不完整的也是，因為它們不反映氦射氣係數為範圍廣泛的土壤物質和岩石不同程度的含水飽和度的所有同位素氦嚴格而系統的分析。雖然不完全的，這些信息可能會在ε的字段中的預期值的指示。

8.2 量測方法論

散發鐳的方法，用於測量氦析出係數的多孔材料的(ε)基本上由密封累積室，其中所述受污染的土壤材料的樣品已經被放置一段時間內測量的氦濃度在空氣中的(4天左右)，直到氦濃度達到平衡。這個方法的一個變體的詳細描述示於強和萊文斯(1982)。他們的實驗裝置包括一個向內生長(積累)室，一個取樣氣缸，隔膜泵，閃爍單元，及電子器件的輻射測量。

8.3 RESRAD 數據輸入的要求

在 RESRAD，使用者被要求輸入的氦析出係數的值(ε)是相關的污染區域的兩個氦同位素，氦-222 和氦-220 的泥土材料。這個參數是無因次的，其值應輸入為一個分數(而不是為百分比)。

在 RESRAD 代碼，鐳-224 被認為是相關的放射性核素，因為它的半衰期小於 1 年半。因此，它的主要母體放射性核素，鈾-228，用作源氦-220。

表 8.1 非受壓土壤之氡散發係數 (Rn-222 and Rn-220)

^a Arithmetic mean (range of values). 來源: Adapted from Nazaroff et al. (1988).

土壤型態	採樣 樣本數	同位素	散發係數 ^a	含水量	參考
非壓密土壤					
砂	7	Rn-222	0.14 (0.06 - 0.18)	Unknown	Sisigina (1974)
沙壤土	7	Rn-222	0.21 (0.10 - 0.36)	Unknown	Sisigina (1974)
粉質壤土	7	Rn-222	0.24 (0.18 - 0.40)	Unknown	Sisigina (1974)
(重型)壤土	12	Rn-222	0.20 (0.17 - 0.23)	Unknown	Sisigina (1974)
粘土	5	Rn-222	0.28 (0.18 - 0.40)	Unknown	Sisigina (1974)
不同的土壤 (丹麥)	70	Rn-222	0.22 (0.02 - 0.70)	0-70% dry wt	Damkjaer and Korsbech (1985)
土壤	21	Rn-222	0.30 (0.03 - 0.55)	Unknown	Barreto (1974)
土壤	2	Rn-220	0.12 (0.09 - 0.15)	Oven-dried	Megumi and Mamuro (1974)
其他					
鈾礦 (碎)	17	Rn-222	0.28 (0.06 - 0.55)	Moist, saturated	Thamer et al. (1981)
鈾礦山尾礦	2	Rn-222	0.14 (0.02 - 0.36) (0.29 - 0.31) (0.067 - 0.072)	Vacuum-dried Saturated Oven-dried	Thamer et al. (1981) Strong and Levins (1982) Strong and Levins (1982)

如表 8.1 所示，在氦析出係數從 0.02 土壤變化到 0.70。ε 的氦-222 的值通常比那些氦-220 相同的情況下更高。在 RESRAD，氦射氣係數 (ε) 為氦氣的通過了預設值的同位素氦-222 和氦-220 分別為 0.25 和 0.15，在被污染的區域的土壤。這些預設值近似地表示具有低水分含量 (即，不乾燥) 在粉質壤土的條件。

ε 的值的氦-222 和氦-220 中 RESRAD 估計為使用可以在不同層次的位點特異性的精度進行，這取決於可用的信息量。對於一般的使用的代碼，用於 ε 一組預設值 (0.25 對氦-222 和 0.15 氦-220) 被定義為大致地表示粉質壤土的條件，在被污染的區域中的水分含量低。

如果土壤材料中的該站點的類型是已知的，ε 的稍微更準確的估計可以與數據的表 8.1 中的幫助下進行。對於大多數應用來說，這種方法就足夠了，因為 ε 的任何特定位點的污染區域的土壤中的自然變異。

在例中，這是絕對必要有 ε 的準確估計，並且有理由懷疑在表 8.1 中的數據沒有反映在特定位點的條件下，ε 的值氦-222 和氦-220 可以在實驗室中使用的強和萊文斯 (1982) 的前面提到的方法，通過實驗確定。

9 降水 PRECIPITATION RATE

9.1 定義

降水 P_r ，水在雨，雪，冰雹，雨雪或每單位面積的和每單位時間在現場落下的平均體積。它的單位是單位面積時間的體積 (IT^{-1}) 的單元。

降水是水循環的主要過程，也就是水通過環境 (海洋，大氣，地表水體和地下土壤系統) 的各種元件的環形移動。水文循環的其他方法包括蒸發蒸騰量，入滲，地表徑流 (徑流)，徑流，深層滲漏和地下水流。這些方法的透徹的描述已經呈現在水文文獻眾多的文本 (週 1964; 林斯利等人 1982; Bedient 和胡伯 1988)

水文循環的簡化描述可以先考慮包含在大氣層中的水蒸汽，從而在適當條件下，凝結和沉澱在海洋和大陸的土地。的水落入在表面地，也就是說，沉澱的部分，隨後通過以下不同的途徑分散。因此，從沉澱，包裹的水被保留在其中沉澱落下並隨後被轉移到大氣中通過蒸發的地方的附近 (即從液體到蒸氣的水的變化在土壤表面) 和蒸騰 (即水蒸汽的間接損失從土壤向大氣通過植物組織)。蒸發和蒸騰作用的綜合效應通常被稱為蒸散。析出水的另一個包裹穿透地下土壤系統，也就是說，深層滲透的過程中，並加入到地下水流系統。最後，沉澱水 (即不被轉移到大氣中，不會滲透進深的土壤中的 1) 的最後一個包裹變得坡面流，也稱為地表徑流，並饋送本地溪流，河流，湖泊或。無論是表面的水走向低海拔的地下流動，最終到達海洋。蒸發量，主要來自海洋和內陸地表水轉移水汽回大氣中，從而完成了水文循環。

水循環的概念可以適用於大規模的水文系統在地球上，並且可以通過基於物質守恆定律一水餘量 (或預算) 方程的數學表示。相同的原理可以應用於任何規模的任何水文系統，無論它是一個很小的盆或大分水嶺，以產生在其最簡單的形式，可以表示如下一個水平衡方程：

$$q_{in} - q_{out} = \frac{ds}{dt} \quad (9.1)$$

其中 q_{in} 水的流入率， q_{out} 為水的流出率，及 ds/dt 為系統內存儲水隨時間的變化。為說明水平衡概念的應用，可以考慮通過灌溉農業用地和水通過它的運動表示的水文系統。根據物質守恆定律， ΔS 的變化 (即，在存儲在每單位土地面積的土壤的水的體積的變化) 在給定的時間段 ΔT 必須等於在在時間和空間上 (即，沉澱，鏟，加上灌溉，IRR，評分) 減去流出速率 (即深層滲透，鏟，外加徑流的 R_r ，和蒸散，ETR，評分) 平均流入流量之間的差異。用於該系統的水平衡方程然後可以表示如下：

$$\frac{\Delta S}{\Delta T} = (P_r + IR_r) - (I_r + R_r + ET_r) \quad (9.2)$$

其中流入及流出率以 IT^{-1} 表示

在一個特定的水文系統的降水是一個不穩定的過程與在時域大的波動。因此，因為前面提到的所有流入和流出的過程都與沉澱，它們也存在較大的和不穩定的變化沿時間。其結果是，在 ΔS 的變化是高度依賴於時間週期 (ΔT) 在考慮之中。時間很短，在土壤 - 水存儲的變化 (ΔS) 也是不穩定的過程，並且可以呈現相對大的值。然而，很長一段時間，如整個季節或一年的整個季節週期，在土壤中的水存儲的變化 (ΔS)，特別是在土壤中的上半部分，很可能是小的相給系統 (希勒爾 1980a) 的總的水平衡。

因此，考慮到在這個假設的水文一個通用的灌溉農地制度的流入和流出水率每年平均數，各用水預算公式可以簡化為以下幾點：

$$P_r + IR_r = I_r + R_r + ET_r \quad (9.3)$$

除了深層滲漏率， IR_r ，公式 9.3 的所有其他條款，可通過直接現場測量，或使用從土壤等環境特性衍生的具體係數來確定。實驗方法學的降水，徑流，灌溉，蒸散速率實地測量在本手冊 (第 9.2, 10.2, 11.2 和 12.2, 分別) 描述。在田間水量平衡的深層滲透 (滲入) 成分的直接場測量還沒有被證明是實用的 (希勒爾 1980a)，因此，在深層滲透速率通常由等式的其它測量部件確定如下：

$$I_r = (P_r + IR_r) - (R_r + ET_r) \quad (9.4)$$

參數 I_r ，或水深層滲透速率，表示的水滲透過土壤的上層的量，並最終被添加到水文系統下方的地下水流動結束。在 RESRAD 模型中，參數的 I_r 用於從被污染的區域和地下水的污染最終計算出的放射性核素的浸出。深層滲透速率內部計算中的代碼作為沉澱 (PR) 的功能和灌溉 (IRR) 率和徑流 (C_r) 和蒸散量 (C_e) 的係數。後兩個參數分別定義如下：

$$C_r = \frac{R_r}{P_r} \quad (9.5)$$

$$C_e = \frac{ET_r}{(1 - C_r)P_r + IR_r} \quad (9.6)$$

灌溉率 (IR_r) 分別列在第 10.1, 12.1 和 11.1 章節。

因此，式 (9.4), (9.5), (9.6) 之深層滲透率 I_r 可表示如下：

土壤深層滲透率可以質量守恆方程式計算獲得 (如式 9.7)

$$I_r = (1 - C_e)[(1 - C_r)P_r + IR_r] \quad (9.7)$$

9.2 量測方法論

降水率在一個位點特異性的位置的測量可以用降水量規，其基本上由具有垂直側壁的容器和用指定的區域中的開口上方來進行。在指定的時間週期，以在開口的容器的頂部的區域收集在容器中的體積之比給出的降水速率在特定的位置和時間點估計。

原則上，任何一個開口向上的容器，加上一個體積測量裝置皆可作為一個降水度量計。因為這些設備中的一些操作簡單，除非它們是相同的形狀和尺寸，降水率的測量通常是不具有可比性 (林斯利等人 1982)。

通過美國國家氣象局的標準降水量計有一個收集器 (接收器) 與一個 8 英寸 (20.3 厘米) 的直徑，並且可以測定沉澱至最接近 0.25 毫米。兩種類型的沉澱計，可以使用，記錄和無記錄。沿時標沉澱的記錄儀，在紙，紙穿孔，或數據記錄器每 0.01 的條帶中最常用的，記錄。(0.0254 厘米)。然後記錄的數據被報告為平均降水率，總體積，或強度變化。

根據 Bedient 和胡伯 (1988)，通常需要在城市地區的每 260 平方公里 (100 英里²) 九時五十五計一個網絡來定義沉澱變性。這種網絡的維護成本高，因此，對於特定的應用，它通常更方便依靠本地收集從現有的網絡中已裝有感興趣的位點附近的應變計的數據。這通常是由城市污水處理廠的維護。

例如當地的雨量計網絡，可以作為對降水率在站點信息的第一來源。在更大的範圍，可以從國家網絡上獲得的沉澱速率的信息。降水規網絡設計提供降水率在美國及其屬地的點估計是由美國國家氣象局和美國地質調查局維持。

從本地或國家網絡得到的沉澱率的點估計數據可以被用來估計平均面積降水率在一個特定的區域。算術平均值，泰森多邊形法，以及 isohyetal 方法：沉澱率的面積分佈平均值可以通過三種方法 (Bedient 和休伯 1988) 來導出。

點位降水率的算術平均值為獲取區域降水率的估計值在某一特定位點的最簡單和最直接的方法。對於其中量筒均勻分佈的點的值具有最小的變化的情況下，這種方法提供了令人滿意的結果。

徐升氏多邊形方法包括稱重面積分佈從每一個計點沉澱。這是最常用的方法，雖然不是最準確的。

該 isohyetal 方法包括繪製等於降水 (等雨量線) 的輪廓線和面積分佈稱量對輪廓線的交叉的部位的區域之間的平均降水所考慮的。它是其中的方法來確定的沉澱率的面積分佈平均值的最準確的，但需要大量的計網絡來精確繪製等雨量線。

年平均降水率在美國大陸領土，從水資源地圖集美國的 (杰拉蒂 1973) 轉錄的值的分佈，如圖 9.1 所示。

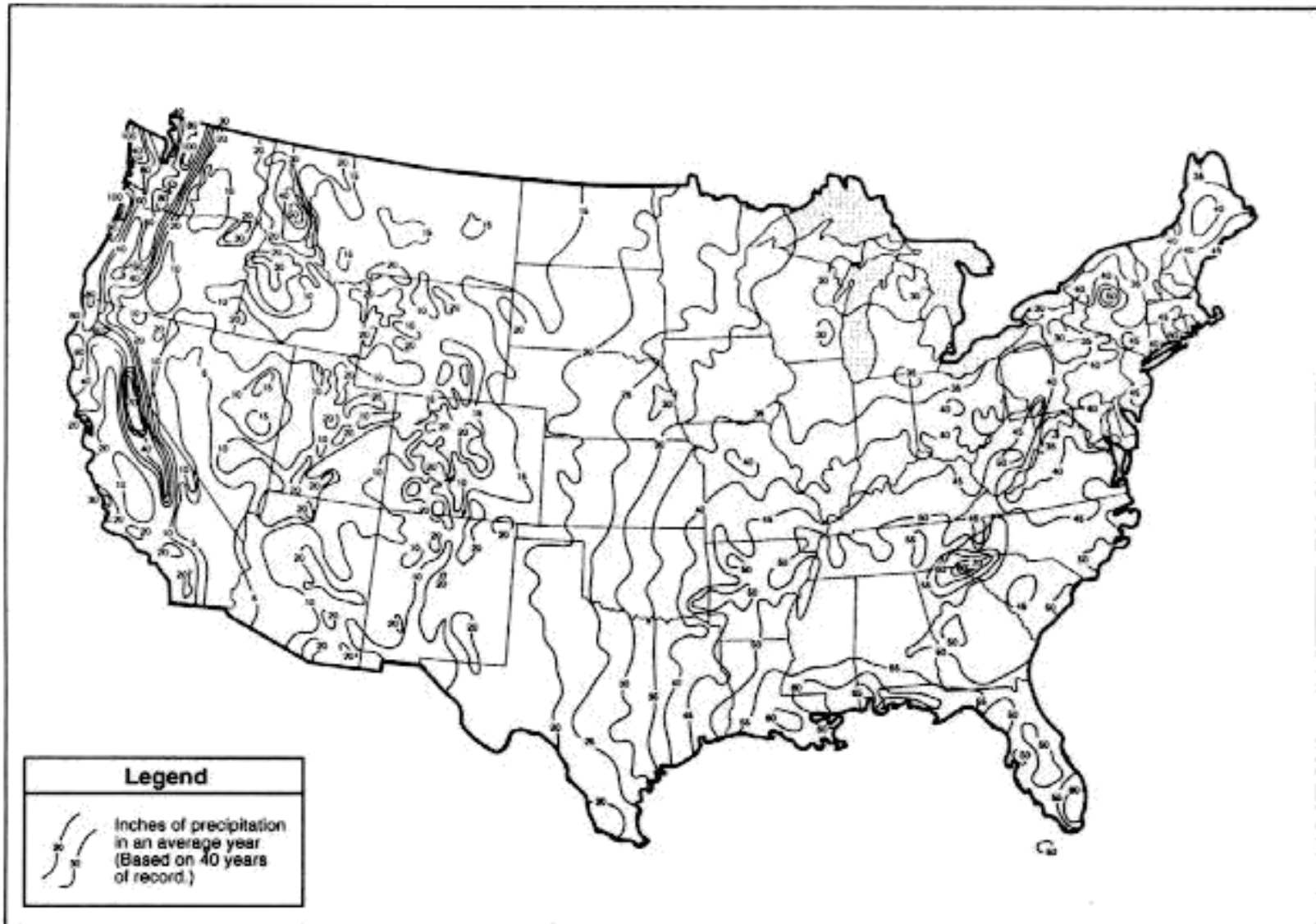


FIGURE 9.1 Distribution of Average Annual Precipitation Rates (in./yr) over the U.S. Continental Territory
 (Source: Modified from Geraghty 1973)

圖 9.1 北美大陸年平均降水率

如果測量是一個特定地點的降水率，用戶被稱為美國能源部環境管理指南（DOE 1991a）對放射性流出物監測。

9.3 RESRAD 數據輸入的要求

在 RESRAD，使用者被要求輸入的年平均面積降水率（ P_r ）的，它代表了在現場條件下的值。沉澱率表現為每年為米（m/yr）單位的年平均增長率。

降水速率和其他輸入參數，如灌溉率和徑流和蒸散係數（分別表示於第 11.1，10.1 和 12.1 章節），用於在 RESRAD 以確定水的深層滲漏率，根據公式 9.7。深滲濾速率最終用於計算污染區域的放射性核素的浸出率和底層的地下水系統中的隨後污染。

對於一般的用途的 RESRAD，降水速率的預設值（ P_r ）的等於 1 米/年（約 40 英寸/年）在 RESRAD 模型可行。該值近似地表示一個相對潮濕的區域的條件。只要有可能，但是，特別是對位於該國的幹區位點，如在美國西部，對 P_r 站點特定的輸入數據應在 RESRAD 計算中使用。

P_r 中的單位年度平均值(英寸/年)為美國大陸領土，現在美國水阿特拉斯(Water Atlas of the United States)有 40 年的記錄（杰拉蒂 1973）。在不存在的位點特異性數據，在該圖譜中提供的信息可以被用作 P_r 中的位點特異性值中的在美國的任何特定位置的估計。

對降水速率在一個站點的位點特異性數據可以從周圍的部位，或從已安裝的網絡，如那些由城市保持安裝了雨量計網絡來獲得。在其中的數據提供全年的平均點降水速率在一個位點附近的特定位置的情況下，用戶可以通過使用在第 9.2 節中所述 3 平均化方法之一估算特定於站點的區域降水率。

如果沒有被收集在一個網站或其附近的降水率（ P_r ）的數據，錯的站點特定的估計可以從美國國家氣象局和美國地質調查局的網絡數據庫中獲得。用戶也可以參考氣候資料，全國匯總和美國的氣候圖集，由美國環境數據服務發布的，對錯的位點特異性的估計，如果沒有本地數據可用。

10 逕流係數 RUNOFF COEFFICIENT

10.1 定義

逕流係數 Cr ，為年平均降雨量與逕流量之比例，年平均降雨量超過土壤入滲量及大氣蒸發散量形成地表逕流量。逕流係數為無因次參數。

在一個良好設計及良好運作的灌溉系統下，降雨量及灌溉所需之水量都是透過排水系統所控制。因此在一般情況，灌溉水量並非主要影響年逕流量之參數。基於上述假設逕流係數 Cr ，可由下列數學方程式定義。

$$Cr = \frac{Rr}{Pr}, \quad (10.1)$$

Rr 為平均年逕流量。

Pr 為平均年降雨量。

因為 Rr 皆小於等於 Pr ，故 Cr 數值介於 0 至 1 之間。

逕流量在特定區域會受區域地形之影響，如坡度、土壤種類、土壤利用種類等。表 10.1 表列出逕流係數在不同土壤及不同土地利用下之數值。

10.2 逕流係數之估算方式

估算逕流係數 Cr 之方法可透過不同土壤種類及土地利用基礎上估算出逕流係數。

10.3 RESRAD 資料輸入之需求

在 RESRAD 模式下，使用者需要輸入代表模擬區域條件下的年平均逕流係數 Cr 數值，其逕流係數為無因次參數，且輸入值應為小數的形式而非輸入百分比。

對一般 RESRAD 模式下，逕流係數預設數值為 0.2。根據表 10.1，預設值 0.2 代表在耕地平坦且為沙壤土之農業地理環境下之數值。然而，依據各特定場址之資訊，可提供給模式更精準之使用。若場址的資料並不適用，表 10.1 可提供平均的逕流係數供一般使用者參考。逕流係數和其他輸入參數，如降雨量、灌溉量以及蒸發散係數(9.1 章,11.1 章,12.1 章)等參數，並根據質量平衡方程式(式 9.7)用來計算決定 RESRAD 模式中水的深層滲漏率。深層滲漏率最終於模式中被使用計算出於污染區域及底層地下水之放射性核種浸出率。

表 10.1 不同土壤種類及土地利用之逕流係數

Type of Area	Coefficient	Value
Agricultural environment ^a		
Flat land with average slopes of 0.3-0.9 m/mi	$c1$	0.3
Rolling land with average slopes of 4.6-6.1 m/mi	$c1$	0.2
Hilly land with average slopes of 46-76 m/mi	$c1$	0.1
Open sandy loam		
Intermediate combinations of clay and loam	$c2$	0.2
Tight, impervious clay	$c2$	0.1
Woodlands		
Cultivated lands	$c3$	0.1
Urban environment		
Flat, residential area — about 30% impervious	Cr	0.4
Moderately steep, residential area — about 50% impervious	Cr	0.65
Moderately steep, built-up area — about 70% impervious	Cr	0.8

^a The runoff coefficient for an agricultural environment is given by $Cr = 1 - c1 - c2 - c3$. Source: Gilbert et al. (1989).

11 灌溉流量 IRRIGATION RATE

11.1 定義

灌溉流量 IRr 為每單位表面積每單位時間平均注入土壤之水體積，在 RESRAD 模式中，單位為公尺每年(m/yr)。

灌溉為乾旱地區或是半乾旱地區農業利用上人為供水的一種方式。灌溉是非常依賴地區之降雨量，在一個良好設計且良好運作的灌溉系統是可優化空間上與時間上之土壤可用水量。

如同章節 9.1 所討論，灌溉系統結合降雨量為水文系統之主要入流量；地表逕流及蒸發散量為系統之主要出流量。灌溉流量及其他輸入參數，如降雨量、灌溉量以及蒸發散係數(9.1 章,11.1 章,12.1 章)等參數，並根據質量平衡方程式(式 9.7)用來計算決定 RESRAD 模式中水的深層滲漏率。深層滲漏率最終於模式中被使用計算出於污染區域及底層地下水之放射性核種浸出率。

11.2 估算方式

一個良好設計及良好運作之灌溉系統必須可以提供植物所需之水量，並足以平衡其蒸騰速率之需求。良好的灌溉分布可達到提供作物生長期間良好之公用，並持續植物維持所需水分。只要植物吸收水分之速率與蒸騰速率保持平衡，就可以維持植物本身之所需水量。一旦植物吸收水分之速率低於蒸騰速率，則植物開始失去水分並影響植物之生長(Hillel 1980a)。

因此所需之灌溉流量是取決於該地區之土壤、植物種類以及氣象條件。土壤種類及植物種類決定植物可從土壤吸收之所需水分。然而氣象條件則支配植物之蒸騰速率，亦為植物生長所需之水分。

現行有許多不同的方法可以估算特地區域之灌溉流量，取決於對該地區所擁有的農業相關資訊。當地區之農業活動資訊皆可用時，灌溉流量可直接從過去運作紀錄取得；若當地農業相關資訊缺乏時，灌溉流量可透過潛在蒸發散量、降雨量與“灌溉係數”估算得出。

灌溉係數為區域消耗失去之水體積(如蒸發散量)與區域總水體積之比值(Hillel 1980a)。灌溉係數與蒸發散係數 C_e (章節 12.1)相似可以下列方程式表示：

$$\text{Irrigation Efficiency} = C_e = \frac{ETr}{(I - Cr)Pr + IRr} \quad (11.1)$$

Hillel (1980a),指出大多數的灌溉計畫都是很低效率的，雖然灌溉係數達到 80~90%時可以有效的提供水灌溉，但平均的灌溉係數僅為 50%。因此，可假設場址之平均灌溉係數為 50% 並得知場址之蒸發散量 ETr 、降雨量 Pr 、逕流係數 Cr ，即可由下列方程式估算出場址之灌溉流量 IRr 。

$$IRr = \frac{ETr}{C_e} - (I - Cr)Pr \quad (11.2)$$

11.3 RESRAD 資料輸入之需求

在 RESRAD 模式下，使用者需要輸入代表模擬區域條件下的年平均灌溉流量 IRr ，單位為公尺每年(m/yr)。RESRAD 模式之預設灌溉流量值為 0.2 m/yr。此為較潮溼地區所需之灌溉流量；對於乾燥地區而言，灌溉流量平均為 1 m/yr。

若場址無灌溉流量之相關資訊，可由下列方程式估算其灌溉流量。方程式所需之參數可假設平均灌溉係數 C_e (一般皆低於 50%)，並透過量測或是推估方式得知潛在蒸發散量 ETr 、

降雨量 P_r 、逕流係數 C_r 、蒸發散係數 C_e

$$IR_r = \frac{ET_r}{C_e} - (1 - C_r) P_r \quad (11.3)$$

12 蒸發散係數 EVAPOTRANSPIRATION COEFFICIENT

12.1 定義

蒸發散是水文循環系統中一個重要的程序，代表了系統中依固定時期水由地表從液態、固態轉化至大氣成氣態的總體積。因此，它代表了兩個獨立過程的組合：

(1) 蒸發(即水液體表面汽化為水蒸氣並從地表傳遞至大氣中)

(2) 蒸騰(即水透過植物和它們的葉子從地面傳遞到大氣中)

在水文文獻中蒸發散也被稱之為“消費性使用”，定義為在一固定周期植物所需之水量，包含植物蒸騰所需之水量以及植物周遭土壤蒸發滲透所消耗之水量。(Veihmeyer 1964).

以下定義兩個有關蒸發散之參數：

(1) 蒸散率， ET_r 。

(2) 蒸發散係數， C_e 。

蒸發散率為結合蒸發及蒸騰傳遞至大氣之水蒸氣總體積，因次為 L/T。RESRAD 程式中並無蒸散率參數之輸入，取而代之的是利用輸入蒸發散係數去估算場址之蒸發散率。為了 RESRAD 程式參數一致性，蒸散率表示為年平均蒸散率單位為(m/yr)。

蒸發散係數為固定期間中蒸發水總體積 ET_r 與根區土壤使用水總體積 $[(1-C_r)P_r + IR_r]$ 之比值，可用下列方程式表示：

$$C_e = \frac{ET_r}{(1 - C_r) P_r + IR_r} \quad (12.1)$$

其中

P_r 為降雨量(m/yr)

IR_r 為灌溉率(m/yr)

C_r 為逕流係數(無因次)

在一個良好灌溉之農業用地上，蒸騰量通常大於蒸發量。在這些情況下，蒸散係數代表由在土壤根區域中可用水實際上是透過在植物系統傳送向大氣中的效率。因此，蒸散量係數也被稱為“灌溉效率”。大多數灌溉項目本質上是低效率的，平均灌溉係數小於 50%(Hillel 1980a)。

蒸發散的過程基本上是由場址中氣象條件以及土壤、植物種類所支配。氣象條件包含氣溫、風速、大氣壓力、空氣濕度、日曬比率等都是決定蒸發散量關鍵的參數。然而，根區土壤使用水會限制蒸發散發生。因此蒸發散量會隨著土壤水分降地而減少，當土壤水含量愈小，土壤中孔隙介質因毛細現象而增加其分子凝聚力。因此，實際蒸散量取決於外部氣候條件和類型和植被覆蓋地表的密度，以及對土壤水分，根系分佈和土壤等特性。

在許多水文文獻中“潛勢蒸發散率 ET_{pr} ”的概念為所謂的土壤氣候所需之水分(Hillel 1980a)。因此，潛勢蒸發散率 ET_{pr} (蒸發至大氣之能量)定義為在充足水分下供應給植物所需之水分之最大蒸發散量。實際蒸發散量為潛勢蒸發散率之函數和在土壤中根區可用水量。

若系統中土壤根區有過多的水分，則實際蒸發散量為最大且等於潛勢蒸發散率，然而過多的水分會滲入至地下水系統。然而，在缺水的時期，實際蒸發散量會小於潛勢蒸發散率故

不會導致多餘水分滲入至地下水系統。

美國的潛勢蒸發散率可由下列文獻查詢，Evaporation Atlas for the Contiguous 48 United States(National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA] 1982a),Mean Monthly Seasonal and Annual Pan Evaporation for the United States (NOAA 1982b), and Water Atlas of the United States (Geraghty 1973).分布如圖 12.1

RESRAD 程式中使用的參數如蒸發散係數、降雨量、灌溉係數、逕流係數主要是要估算滲水率。根據 9.1 章節中的方程式 9.7，滲水率參數最終是用來計算放射性核種在污染區域地下水系統之浸出率。

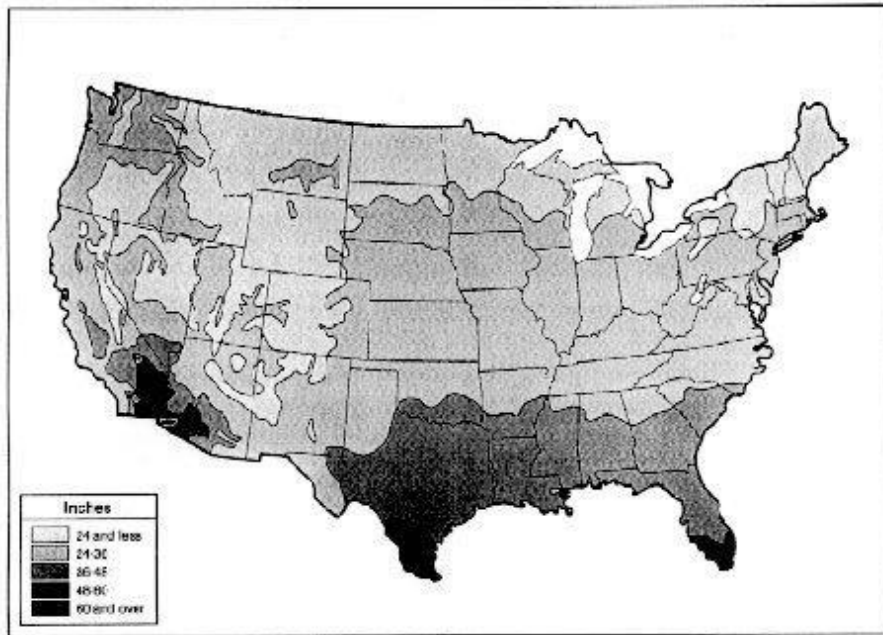


FIGURE 12.1 Distribution of Average Annual Potential Evapotranspiration Rates (in/yr) over the U.S. Continental Territory (Source: Modified from Geraghty 1973)

圖 12.1 美國的潛勢蒸發散率分布

12.2 估算量測方式

根據方程式 12.1 可計算蒸發散係數，但必須先透過量測的方式得到相關參數例如蒸發散係數、降雨量、灌溉率、逕流係數等。

目前許多測量或估計蒸散率和潛在蒸散率的方法。不過沒有任何一種方法是可以滿足所有需求 (Veihmeyer1964)。大多數用於估計蒸散率的方法也可以用於估計潛在蒸散率，條件是觀察區域的可用水於測試期間供應足夠。這些方法可以分為三大類：

理論方法，主要是基於物理原理所估算得出。

解析方法，主要利用質量及能量守恆的方法得出。

經驗法法，主要利用實驗方式回歸得出。

有關量測蒸發散方式主要可分成下列(Veihmeyer 1964):

土壤水分取樣(Soil-moisture sampling)。

蒸滲儀測量(Lysimeter measurement)。

水流入流及出流分析測量(Inflow-outflow measurements)。

積分法(Integration method)。

能量平衡(Energy balance)

蒸氣傳輸分析(Vapor transfer)

地下水波動分析(groundwater fluctuations)

舉例來說，蒸滲儀測量方式包含使用一桶子(或稱為蒸發散表)，填滿直徑約一公尺，深度兩公尺之土壤並埋於地下，並使桶子頂部表面與地表齊平。將特定農作物種植於蒸滲儀附近，蒸發散率即可基於質量平衡，透過測量入滲量及滲出量和降雨率量測得出。

由於場址量測的方法有一定的困難度，因此於實驗室中發展出所多的經驗公式，利用氣象資料(氣溫、日照、風速等)去估算蒸發散。表 11.2 為典型的經驗公式(Veihmeyer 1964, pp. 11-27)。

12.3 RESRAD 資料輸入之需求

於 RESRAD 模式中，使用者輸入值為模擬場址之年平均蒸發散係數，單位為無因次。當於 RESRAD 模式中使用蒸發散係數作為輸入值過程中，假設場址為耕地且土壤中的水份含量保持農作物生長所需量。

考慮中的站點被保持與水分的土壤中的作物的生長和發育所需的水平。這個條件通過自然沉澱或通過沉澱和灌溉的組合來實現。換句話說，假設年平均潛在蒸散量所需含水量為平均保持在土壤中之含水量。

RESRAD 模式預設蒸發散係數為 0.5(無因次)，這代表場址灌溉係數為 50%。基於此條件，土壤根層中的水分會有 50%的水份蒸發至大氣中，而另外 50%的水分則入甚至含水層提供種植農作物使用。

場址量測蒸發散率一般來說皆需花費許多金錢與時間，因此若蒸發散率無法量測時，可參考相關文獻資料取得。使用者可以參考美國領土資料圖表 12.1(Geraghty 1973)或是美國國家海洋和大氣管理局(NOAA 1982a,b)。上述兩個單位提供許多美國區域相關的蒸發散率的數據。在缺少特定場址的資料下，使用公開數據作為平均蒸發散率對模式本身造成不確定性是可以被接受的。

13 土壤特定指數 b 參數 (SOIL-SPECIFIC EXPONENTIAL b PARAMETER)

定義

土壤特定指數 b 參數為估算污染區域放射性核種浸出率之一重要水文參數，此參數為無因次參數，並根據土壤特性被使用來計算土壤飽和比 R_s (為未飽和水利傳導係數與飽和比的關係)。

Clapp and Hornberger (1978) 研究出一經驗公式幂函數計算水利傳導係數如式 13.1。

$$k_s = R(2b+3) \quad , \quad (13.1)$$

其中。

k : 為相對水利傳導係數(或稱滲透率，無因次)。

R_s : 為飽和比(無因次)。

B : 為回歸參數(the fitting parameter), 稱為土壤特定指數 b 參數，為實驗得出。

相對水利傳導係數 k , 為一區域之未飽和水利傳導係數 K 與飽和水利傳導係 K_{sat} 之比值，如式 13.2。

$$k_s = R^{(2b+3)} \quad , \quad (13.1)$$

$$k = K/K_{sat} \quad (13.2)$$

將式 13.1 代入 13.2，可得出式 13.3。

$$R^{(2b+3)} = K/K_{sat} \quad (13.3)$$

或是，

$$R_s = \left(\frac{K}{K_{sat}} \right)^{\left(\frac{1}{2b+3} \right)} \quad (13.4)$$

當水流向下入滲至未飽和層土壤，入率 I_r 約為飽和層之水利傳導係數(Hillel 1980a)，因此將入滲率代入式 13.4，得出式 13.5。

$$R_s = \left(\frac{I_r}{K_{sat}} \right)^{\left(\frac{1}{2b+3} \right)} \quad (13.5)$$

RESRAD 模式利用式 13.5 計算所有為飽和層土壤之飽和比。

13.2 估算量測方式

土壤特定指數 b 參數為一個經驗公式的回歸參數(the fitting parameter)，因此必須透過實驗得出該參數。針對各種不同的土壤種類，利用上述式 13.1 調整回歸最佳擬和值(best-fit value)與曲線得出不同土壤種類的 b 參數。

要透過水利傳導係數公式以及量測特定土壤樣品的滲透率去計算水利傳導係數，在技術上往往會有一定的困難度。然而，相關文獻資料指出(Clapp and Hornberger, 1978) b 參數約介於 0.17-13.6。表 13.1 條列出不同土壤質地種類的 b 參數。

表 13.1 土壤特定指數 b 參數 Soil-Specific Exponential b Parameter

土壤質地	b 參數
------	------

Sand	4.05
Loamy sand	4.38
Sandy loam	4.90
Silty loam	5.30
Loam	5.39
Sandy clay loam	7.12
Silty clay loam	7.75
Clay loam	8.52
Sandy clay	10.40
Silty clay	10.40
Clay	11.40

Source: Clapp and Hornberger (1978).

13.3 RESRAD 資料輸入之需求

RESRAD 模式中，使用者必須定義土壤特定指數 b 參數的值，包含 1. 污染區域、2. 未飽和層區域、3. 飽和層區域。土壤特定指數 b 參數輸入所需條件為當地下水水位下降速率(18.1 章節)大於 0 時。相關文獻指出 b 參數的值介於 0.17-13.6 (Clapp and Hornberger 1978). 模式預設值為粉質土壤。5.3。相關的 b 參數可以參考表 13.1。

14 侵蝕速率 EROSION RATE

14.1 定義

侵蝕速度定義為因水流、潮汐、風等因素造成土壤移動平均體積。侵蝕速度代表每單位時間地表土壤流失的平均深度，其單位為長度每單位時間(L/T)。

14.2 量測方法

侵蝕速度可以透過通用土壤流失方程式 (USLE) 去計算得出，另有已開發的經驗模式可以估算表層侵蝕或細流侵蝕土壤流失速率。然而，土壤流失方程式的誤差級數並沒有辦法有適當的應用。美國水土保持局提供了一些有關土壤流失方程式 (USLE) 使用方式與導引，並針對一些土壤及覆蓋的種類提供相關土壤流失方程所需的參數數據。

如果特定場址的數據是可靠的，場址的侵蝕速率是可以利用土壤流失方程式 (USLE) 計算得出。Wischmeier and Smith (1978) and Foster (1979) 曾針對密西西比河以東的區域計算侵蝕速率的範圍。舉例來說，針對一個場址斜率為 2%，經方程式計算的出植被的侵蝕速率範圍界於 8×10^{-7} to 3×10^{-6} m/yr。牧場的侵蝕速率範圍界於 1×10^{-5} to 6×10^{-5} m/yr。農作物地區的侵蝕速率範圍界於 9×10^{-5} to 6×10^{-4} m/yr。侵蝕速率上升亦因坡度的不同而改變，斜率 5% 時速率將乘上 3 的上升因子，斜率 10% 時為 7，斜率 15% 時上升因子為 15。在一般農田或是花園的情境下，污染劑量大多都是來自於食物的攝入，在場址斜率 2% 條件下，侵蝕速率約假設為 6×10^{-4} m/yr，換句話說大約每 1000 黏土壤流失約 0.6m。

侵蝕速率的計算在乾旱地區較潮溼地區難估算得出。水的侵蝕通常較風的侵蝕大，但特殊條件下風的侵蝕也可能造成很大的影響。在美國西部水的侵蝕較難使用土壤流失方程式去

計算，因為偶發暴雨導致方程式並不適用。一般來說，乾旱地去的長期侵蝕速率較潮濕地區來的低。有關土壤侵蝕速率的討論及研究可參考土壤物理學 Soil Physics (Marshall and Holmes 1979), 通用土壤方程式，過去、現在及未來 Universal Soil Loss Equation: Past, Present, and Future (Peterson and Swan 1979), 及土壤的本質及特性 the Nature and Properties of Soils (Brady 1984) 等書籍。

14.3 RESRAD 資料輸入需求

在 RESRAD 模式中，使用者必須輸入表面覆蓋區域及污染區的年平均侵蝕速率，輸入的侵蝕速率單位為公尺每年(m/yr)。

對於一般的模式使用，RESRAD 模式預設表面覆蓋區域及污染區侵蝕速率值為 0.001m/yr。預設值可以滿足大部分區域的條件，然而針對特定區域，可調整更精準的侵蝕速率。特定場址的表面覆蓋區域及污染區侵蝕速率可以透過土壤流失方程式 (USLE) 去計算。

15 水力梯度 HYDRAULIC GRADIENT

15.1 定義 DEFINITION

水力梯度是指每單位距離的特定方向地下水流水力揚程的變化。水力坡度 J_x ，在 x 流動方向，表示如下：

$$J_x = \frac{h_1 - h_2}{-x}, \quad (15.1)$$

其中 h_1 、 h_2 分別代表水流在定點 1 及定點 2 的水力揚程， x 為兩點之距離。在數學上，水力梯度為一向量也可表示為 $\text{grad } h$ 。向量範數代表水力梯度最大的斜率，其方向代表沿著最大斜率的方向。水力梯度為一個無因次參數，通常的表示以小數表示，而非百分比表示。在非侷限含水層下，地下水流的水平水力梯度大約等於地下水位的斜率。在侷限含水層下，代表單位距離靜水壓面 (potentiometric surface) 的差異。靜水壓面為假想的等位圖以類比地下水位。一般而言，位於滲透性較高的區域 (例如砂礫地質) 其水力梯度會遠小於滲透性較低的區域 (如泥黏土地質)。

15.2 量測方法

水力揚程在飽和區是可以通過現場安裝水壓計進行測定。水壓計基本上為一個長管其管長足夠通過非飽和層向下引申到飽和層。水壓計之管壁必須完全密封，但其頂部及底部的開口但必須是直接接觸大氣及地下水流。壓力計內的水位測量，與所定義基準水位作比較 (如平均海平面)，使可得到含水層該點的水力揚程。

事實上地下水系統的水力揚程分布是三維空間，因此在特定場址安裝三個含以上的水壓計是可以得出含水層空間分布的水力揚程。在藉由得知各點水壓計之距離，可計算得出場址含水層的水力梯度。更多詳細說明可以參考 (Freeze and Cherry, 1979) 研究資料。

15.3 RESRAD 資料輸入需求

RESRAD 模式中，使用者必須輸入場址含水層中主要優勢地下水流方向的水力梯度，此參數為無因次，且必須以以小數表示，而非百分比表示。

對於一般模式的使用，RESRAD 模式預設值為 0.02。不同的場址其水力梯度相差甚鉅，所以若條件許可應該使用更精準的數據輸入。

特定場址的地下水流及水力梯度可以依上述介紹的安裝水壓計方式取得，RESRAD 的使用者亦可聯繫模擬場址所屬之水利主管機關或是相關水利專家取得相關的有效數據。

16 污染區域平行於含水層之長度 LENGTH OF CONTAMINATED ZONE PARALLEL TO THE AQUIFER FLOW

16.1 定義 DEFINITION

污染區域平行於含水層之長度 l 定義為，污染區域沿著地下水含水層水流方向，從它的上坡處向下坡處的最大水平距離。

此參數使用在 RESRAD 模式為計算非污染區域地下水水流入流至污染區域之稀釋度，採用的模組為 Nondispersion Model。

16.2 量測方法 MEASUREMENT METHODOLOGY

計算污染區域平行於含水層之長度，首要條件須先取得場址的地下水水力梯度。量測水力梯度的方法如章節 15 所述可由安裝水壓計量測。此外，若已知地下水流方向與污染區域水平延伸之長度，污染區域平行於含水層之長度可由直接量測得知。

16.3 RESRAD 資料輸入需求

RESRAD 模式中，使用者必須輸入場址污染區域平行於含水層之長度，此參數單位為公尺(m)。RESRAD 模式預設值為 100m。預設值是假設污染區域面積為 10000m²，其平方根為 100m。若場址條件許可應該使用更精準的數據輸入。

17 河川或池塘的流域面積 WATERSHED AREA FOR NEARBY STREAM OR POND

17.1 定義 DEFINITION

流域面積又稱匯水面積或集水面積，地面上以分水嶺為界之區域稱為流域，流域內之逕流集中於最低點而流出至河川或是湖泊池塘。此參數單位為長度平方。在 RESRAD 模式中，流域面積代表的是該區域流入至附近河川或是池塘的面積。流域面積應用在 RESRAD 模式中主要是要計算附近河川及池塘流入污染區混合後所影響的稀釋倍數。計算地表或是地下水路徑之稀釋倍數主要基於下列之假設：

附近之主要水體為池塘或是湖泊。

入流量及出流量皆保持平衡。

年平均放射性物質進入水體之質量與每年放射性物質浸出量為相同

污染區之入滲方向為垂直向下。

基於上述假設與條件，稀釋倍數定義為年平均水流入滲至污染區域之體積與年平均入流至池塘湖泊之體積。換言之稀釋倍數可作為污染區域面積與流域面積之比。

17.2 量測方法

場址之河川或池塘的流域面積可藉由區域小尺度地勢圖(Small-scale morphologic map of the region.)計算求出。

17.3 RESRAD 資料輸入需求 DATA INPUT REQUIREMENTS

在 RESRAD 模式中，使用者必須輸入場址內流域面積，單位為平方公尺(m²)。模式預設值為百萬平方公尺 1*10⁶ m²。然而，若場址條件許可應輸入更精準之數據

特定場址之流域面積資訊可以透過地勢圖及相關研究得出，在 RESRAD 模式中流域區域之

面積必須大於污染區面積，否則程式相會提示警告訊息至更正完成。

18 地下水水位下降速率 WATER TABLE DROP RATE

18.1 定義 DEFINITION

地下水水位下降速率定義為水為深度下降之速度，單位為 L/T。地下水水位隨著季節及水循環過程變化而波動(章節 9)或是額外使用地下水之行為亦會改變水位。在一般情況下，長期地下水水位應保持穩定。但若是年平均地下水水位下降率不為 0 的狀況下，會使非飽層之厚度增加。

18.2 量測方法 MEASUREMENT METHODOLOGY

場址之地下水下降速率，可以透過安裝監測井量測得出。亦可以參考歷史水位之記錄推估得出。

18.3 RESRAD 資料輸入需求

在 RESRAD 模式中，使用者必須輸入場址地下水下降速率，單位為公尺每年(m/yr)。模式預設值為百萬平方公尺 0.001 m/yr，此數值與侵蝕速率相同。然而，若場址條件許可應輸入更精準之數據。

19 井-泵浦取水深度 WELL-PUMP INTAKE DEPTH

19.1 定義 DEFINITION

井-泵浦取水深度定義為，井於含水層內取水之深度，單位為長度單位(m)。

19.2 RESRAD 資料輸入需求

RESRAD 模式中，使用者必須輸入場址井-泵浦取水深度，此參數單位為公尺(m)。RESRAD 模式預設取水深度為 10m。若場址條件許可應該使用更精準的數據輸入。

20 氡氣垂直高度 RADON VERTICAL DIMENSION OF MIXING

定義 DEFINITION

氡氣垂直高度定義為氡氣與室外空氣混合散發至地面附近大氣邊界層的高度。此參數單位為量測高度 m

20.2 RESRAD 資料輸入需求

RESRAD 模式中，使用者必須輸入場址氡氣垂直高度，此參數單位為公尺(m)。RESRAD 模式預設值為 2m。此預設值採用人類的高度為一個保守推估值。若場址條件許可應該使用更精準的數據輸入。

21 年平均風速 AVERAGE ANNUAL WIND SPEED

21.1 定義 DEFINITION

年平均風速為特定地區一年期間地表附近平均風速，此參數單位為(m/s)。

21.2 RESRAD 資料輸入需求

在 RESRAD 模式中，使用者必須輸入場址年平均風速，單位為公尺每秒(m/s)。模式預設值為 2 m/s。然而，若場址條件許可應輸入更精準之數據。若進行場址平均風速之量測，量測方法必須與 DOE's 指引一致(DOE's guide for radiological effluent monitoring , DOE 1991a)。

特定場址之年平均風速及風向可以透過氣象站安裝風速計量測得出，雖然量測方法很簡單，卻需耗費時間與金錢且需要專業之受訓人員量測。一般估算年平均風速之方法，皆採用區域之氣象站資料(如機場)，年平均風速本身有其內部不確定性，因此採用區域性之數據是可接受的。

22 建築物平均空氣交換率 AVERAGE BUILDING AIR EXCHANGE RATE

定義 DEFINITION

建築物空氣交換率(或是通風率)為建築物總空氣體積與室外空氣在每單位時間交換之總體機。此參數單位為使間倒數，舉例來說，一建築物之空氣交換率為(1/h)，代表此建築物平均每 1 小時可交換總棟建築物總機之空氣量。

影響空氣交換率之重要因素包含建築物的結構及建物本身運轉特性(建齡、門窗之防風雨能力、機械通風設備、壁爐等)同時環境也是重要影相因素之一(大氣壓力、氣溫、風速及風向等)。總空氣交換率主要基於三個因素(Nero 1988):

空氣滲入量(如從小開口或是建築物本身之缺口)

空氣因窗戶、門或是其他大開口所導致。

機械排風設備。

時間季節亦會影響空氣換氣率，在美國各個季節空氣換氣率之範圍約介於 0.1 至 1.0(1/h)

22.2 量測方法 MEASUREMENT METHODOLOGY

空氣換氣率可用 SF₆ 氣體示踪法量測使用，將 SF₆ 注入之建築物中，然後隨著時間量測其

濃度進而推算出空氣換氣率。空氣換氣率速率等於濃度的衰減速率(Nero 1988)。

22.3 RESRAD 資料輸入需求

在 RESRAD 模式中，使用者需要輸入模擬建物之空氣交換率，其單位為每小時(1/h)。對於一般之使用，模式中預設值為 0.5 (1/h)。有關各種類型的建築物空氣交換率數據以及機械通風設備有效性的數據可參考(Godish,1991)。

23 建築物房間高度 BUILDING ROOM HEIGHT

23.1 定義 DEFINITION

建築物房間高度表示總體建築物平均高度，定義為建築物之內部總體積除上建築物樓地表面積。此參數單位為(m)，針對一樓平房無地下室之建築而言，建築物房間高度範圍介於 2.2-3.0 m。

23.2 RESRAD 資料輸入需求

在 RESRAD 模式中，使用者需要輸入場址之建築物房間高度，其單位為公尺(m)。對於一般之使用，模式中預設值為 2.5 m。若場址建築物條件足夠，應盡可能輸入更精準之數據。

24 建築物室內面積因子 BUILDING INDOOR AREA FACTOR

24.1 定義 DEFINITION

建築物室內面積因子定義為建築物覆蓋在汙染區域上之比率。

24.2 RESRAD 資料輸入需求

建築物室內面積因子若為 1 則代表整棟建築物皆建置在汙染區上。若輸入值為 0 則 RESRAD 模式會自動假設其建築物室內面積 100 m² 覆蓋至汙染區域，模式預設值即為 0。

25 未飽和層非污染區域之厚度 THICKNESS OF UNCONTAMINATED UNSATURATED ZONE

定義 DEFINITION

未飽和層非污染區域之厚度為位於地下水位上且污染區域下方之未飽和層之厚度。Resrad 模式中提供五種不同之地下水層，並有不同之參數如下列：

1. 地下水層厚度
2. 土壤密度
3. 孔隙率
4. 有效孔隙率
5. 土壤特定指數 b 參數
6. 水利傳導係數

25.2 RESRAD 資料輸入需求

在 RESRAD 模式中，使用者需要選擇未飽和層非污染區域之類型，輸入非 0 之厚度將可開始設定此參數，反之若不使用此參數請輸入 0。然而強力建議根據場址特性輸入精準數據。

26 建築物地基深度 BUILDING FOUNDATION THICKNESS

26.1 定義 DEFINITION

建築物地基深度為建築物結構地基位於地下土壤之深度。常態地基深度為 0.15m。

26.2 RESRAD 資料輸入需求

在 RESRAD 模式中，使用者需要輸入模擬場址建築物地基深度，此參數之單位為公尺(m)。RESRAD 模式預設值為 0.15m。若場址條件足夠，應盡可能輸入更精準之數據。

26 地基於地表下之深度 FOUNDATION DEPTH BELOW GROUND SURFACE

定義 DEFINITION

地基於地表下之深度定義為土壤從建物最底層至地表之深度。深度範圍約介於 0.0-3.0 m。

27.2 RESRAD 資料輸入需求

在 RESRAD 模式中，使用者需要輸入模擬場址地基於地表下之深度，此參數之單位為公尺(m)。RESRAD 模式預設值為 1.0m。若場址條件足夠，應盡可能輸入更精準之數據。如果輸入負值，模式會自動取絕對值。因為場址覆蓋區域及汙染區域會受侵蝕之影響，所以地基於地表下之深度一般皆會比輸入值還小。

28 室內停留時間比率 FRACTION OF TIME SPENT INDOORS ON-SITE

定義 DEFINITION

室內停留時間比率定義為年平均個體停留於汙染區建築物之時間。一般值為 0.5(無因次)。

28.2 RESRAD 資料輸入需求

在 RESRAD 模式中，使用者需要輸入模擬場址室內停留時間比率，此參數為無因次，且須輸入小數而非百分比。RESRAD 模式預設值為 1.0m。若場址條件足夠，應盡可能輸入更精準之數據。場址內室內停留時間、場址內室外停留時間與場址外之時間總和必需等於 1。REARAD 模式預設值為 0.5，若場址條件足夠，應盡可能輸入更精準之數據。

29 室外停留時間 FRACTION OF TIME SPENT OUTDOORS ON-SITE

定義 DEFINITION

室內停留時間比率定義為年平均個體停留於汙染區建築物外之時間。一般值為 0.25(無因次)。

29.2 RESRAD 資料輸入需求

在 RESRAD 模式中，使用者需要輸入模擬場址室外停留時間比率，此參數為無因次，且須輸入小數而非百分比。RESRAD 模式預設值為 1.0m。若場址條件足夠，應盡可能輸入更精準之數據。場址內室內停留時間、場址內室外停留時間與場址外之時間總和必需等於 1。REARAD 模式預設值為 0.25，若場址條件足夠，應盡可能輸入更精準之數據。

30 污染區域面積 AREA OF CONTAMINATED ZONE

30.1 定義 DEFINITION

污染區域指位於土壤受放射性核種污染之區域，意指污染區域放射性核種濃度明顯超出背景值，其背景值乃參考該場址外平均土壤樣本之放射性核種濃度。如果污染區域土壤超出背景平均值兩倍標準差之濃度則視為明顯超出背景值。

如果用於決定背景濃度的土壤樣品濃度低於所使用儀器檢測 (LLD) 下限時，該區域放射性核種濃度被認為是超出背景值；如果濃度超過了儀器檢測 (LLD) 下限。必須使用符合現行標準較高靈敏度儀器量測。

為使用兩個或更多個污染區域，必須有足夠精準之資料提供處於兩個污染區域中間之區域非受污染。否則，污染區域之特點應當是位置在一個緊湊面積上且包含所有高於背景值之土壤。

30.2 RESRAD 資料輸入需求

RESRAD 模式中輸入時機之污染區域面積，單位為平方公尺(m²)。模式預設值為 10000 平方公尺(m²)。

31 覆蓋深度 COVER DEPTH

31.1 定義 DEFINITION

覆蓋深度為地表至污染區域內放射性核種濃度超出背景值土壤之距離。

31.2 MEASUREMENT METHODOLOGY

因為事實上污染區域之放射性核種濃度分布並非均勻分布，所以於污染區域之覆蓋深度並非相同。對於一個污染區域面積為 200 m²，若每 100 m² 鑽孔量測覆蓋深度，量測出一個以上的值皆為平均深度為 1/3 公尺，則該污染區域之覆蓋深度為 1/3 公尺。有關量測更真實之覆蓋深度可參考 DOE-approved statistically based estimates (DOE 1991a)。

31.3 RESRAD DATA INPUT REQUIREMENTS

在 RESRAD 模式中，使用者必須輸入覆蓋深度，單位為公尺(m)。模式預設值為 0(m)。

32 分佈係數 DISTRIBUTION COEFFICIENTS

32.1 定義 DEFINITION

分佈係數 K_d 為溶質物種吸附或沉積於每單位土壤之質量 S ，與溶質於液體的物種濃度之比值 C 。分佈係數代表溶質於土壤粒子和溶質於土壤水之區分比例。假設土壤和溶質之間存在平衡條件，並且假設離子吸附是可完全可逆，線性 Freundlich 等溫關係方程式可表示 S 與 C 之關係，如下：

$$S = K_d C. \quad (32.1)$$

放射性核種從液相轉換成固相或從固相轉換成液相，皆受控於吸附及沉積機制。分佈係數因次為長度立方/質量(L^3/M)。許多文獻指出，分佈係數可從許多吸附過程量測得出，不過眾所皆知，相關實驗得出分佈係數皆不是常數，主要是依據土壤本身物理及化學特性。土壤本身為動態系統所以長期而言並不會保持恆定。有關影響分佈係數之土壤特性包含土壤質地(砂，壤土，粘土或有機土壤) (Sheppard and Thibault 1991)。土壤有機質含量、pH 值 (Coughtrey et al. 1985)。土壤溶液比例 (Sheppard et al. 1983)。溶液或孔隙水濃度 (Nikula 1982; Hoeffner 1985; Sheppard et al. 1987; Sheppard and Thibault 1990)。

因為土壤本身特性，不同放射性核種土壤之分佈係數在不同條件下可能相差數個級數。

32.2 量測方式 MEASUREMENT METHODOLOGY

32.2.1 實驗方法 Experimental Methods

測定 K_d 值最常見的兩種實驗技術為批次法 batch methods 和柱式法 column methods。通常批次法被用於測量飽和平衡條件下之分佈係數。柱式法是用來接近更“自然”的土壤條件。

32.2.1.1 批次法 Batch Method

任何放射性核種於任何種類土壤皆可以使用批次法求得分佈係數。在大多數情況下，土壤及岩石不斷攪拌以促進混合，在指定的時間達到平衡的條件下將固體和溶液分離，以確定放射性核種之分佈係數。在批次法下，放射性核種脫附及吸附作用會受下列影響：攪拌效果 (Barney and Brown 1980)、固液分離技術及分析測定的限制如多種物種之土壤不能被分化 (Serne and Relyea 1981)。

ASTM D4319 試驗方法已發展一種標準短期批次法 short-term batch method (ASTM 1992) 測量穩態條件下的分佈係數。此方法建議土壤溶液比例比值為 4.0。因為分佈係數隨著土壤溶液比例而改變，此外推薦實驗多種不同比值以求出吸附等溫線。為了證明在短期試驗中可以維持穩定狀態，每一組樣品應分為三組試管。每組試管必須每三天至少 6 小時使用搖動器混合試管內之土壤溶液混。所有試管經過靜置沉澱後，應使用離心器(最小 1400g/20min) 將其土壤溶液混和物分離。分佈係數可以由下列方程式計算：

$$K_d = \frac{\text{mass of solute on the solid phase per unit mass of solid phase}}{\text{mass of solute in solution per unit volume of the liquid phase}}. \quad (32.2)$$

32.2.1.2 柱式法 Column Method

柱式實驗室用來模擬飽和/非飽和條件下，放射性核種之遷移。放射性核種之遷移率不會受土壤顆粒改變而影響，但是如果使用在批次法上，結果將會較有顯著差異。一般柱式實驗會使用到以下設備，包含一個儲存器，一個圓筒形保持器以容納試驗土壤、收集器以收集流出柱體之液體。若試驗低滲透性土壤則必須要有高壓設備相關的設備成本、時間限制、

實驗複雜性和數據不確定性等因素，導致一般較少使用柱式實驗。有關柱式實驗幾個操作問題如下：

填充土壤之均勻性(homogeneity of column packing)

潛在短路效應(potential short-circuit effects)

試驗所需時間(residence time required for experimentation)

理論模式主要用來描述土壤柱內溶質傳輸現象，考慮一示踪劑水流入至土壤柱內，並已知其土壤之密度、含水量。土壤內之放射性核種透過水力延散作用(含動力延散及分子擴散效應)以及吸附作用，使示踪劑由土壤柱體頂端向下蔓延。

液態之放射性核種質量平衡方程式如下：

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (32.3)$$

R: 為阻滯因子(the retardation factor):

D: 水利延散係數

v: 為孔隙水流速

C: 為放射性核種濃度

其中，R 於分佈係數 Kd 關係如下：

$$R = 1 + \frac{\rho b d}{\theta} \quad (32.4)$$

ρb : 土壤密度。

θ : 土壤水含量。

方程式 32.3 利用 Semi-infinite 方法求解(Lapidus and Amundson 1952)

$$C' = C(L, t) / C_0,$$

(32.5)

$$T = vt / L,$$

(32.6)

$$P = vL / D.$$

(32.7)

C_0 : 放射性核種初始濃度

C' : 相對排出濃度

P: 佩克萊特數(Peclet number)

T: 孔隙容量數(the number of pore volumes)

L: 土壤柱體長度。

下列方程式常被用來描述柱式實驗

$$C(x, t) = \frac{C_0}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{Rx - vt}{2(DRt)^{1/2}} \right].$$

(32.8)

當佩克萊特數($P > 20$)方程式 32.8 之解會相當於方程式 32.5。

32.2.2 分配係數實證測定 Empirical Determination of the Distribution Coefficient

除了可以藉由實驗方式求得分佈係數外，Baes et al. (1984) and Sheppard (1989)提供一經驗公式藉由植物/土壤濃度比(B_{iv})計算放射性核種之分佈係數 K_d ，分佈係數與植物/土壤濃度比有很高的關聯性。Sheppard and Thibault (1990)之回歸方程式如下

$$\ln K_d = a + b (\ln B_{iv}), \quad (32.12)$$

其中：

a: 主要依據土壤種類有其不同數值。砂土為 2.11、壤土為 3.36、粘土為 3.78、有機土壤為 4.62。

b: 為常數，數值為-0.5。

表 32.1 表列出文獻常見平均分佈係數(Sheppard and Thibault 1990)，當實驗方法及文獻資料無法提供分佈係數時，可由式 32.12 計算分佈係數。

32.3 RESRAD 資料輸入需求

REARAD 模式預設分佈係數表列於表 32.1 與 32.2，從表單可看出分佈係數變化，分佈係數會隨著不同環境而改變其數值。因為是 RESRAD 最重要的參數之一，影響 RESRAD 輸出結果甚鉅，因此若場址條件許可應輸入更精準之數據。

除了可以直接在 RESRAD 螢幕上輸入分佈係數之外，RESRAD 提供 4 種選擇的方法決定分佈係數。第一種為溶解度極限的方法、第二種為地下水濃度方法、第三種為浸出率方法、第四種為植物/土壤濃度比方法。

表 32.1 不同元素及土壤種類之平均分佈係數(cm^3/g)

元素	沙	壤土	黏土	有機土壤
銅	450	1,500	2,400	5,400
銀	90 ^a	120 ^a	180 ^a	15,000 ^a
銻	1,900 ^a	9,600 ^a	8,400 ^a	112,000 ^a
鉍	250	800	1,300	3,000
鈹	100	450	600	1,500
溴	15	50	75	180
碳	5 ^a	20	1	70
鈣	5	30	50	90
鎘	80 ^a	40 ^a	560 ^a	900 ^a
銻	500 ^a	8,100 ^a	20,000 ^a	3,300 ^a
錳	4,000 ^a	18,000 ^a	6,000	6,000 ^a
鈷	60 ^a	1,300 ^a	550 ^a	1,000 ^a
鉻	70 ^a	30 ^a	1,500	270 ^a
銻	280 ^a	4,600 ^a	1,900 ^a	270 ^a
鐵	220 ^a	800 ^a	165 ^a	600 ^a
鉛	450	1,500	2,400	5,400
鈾	250	800	1,300	3,000

碘	1a	5 ^a	1 ^a	25 ^a
鉀	15	55	75	200
錳	50 ^a	750 ^a	180 ^a	150 ^a
鉬	10 ^a	125	90 ^a	25 ^a
鈮	160	550	900	2,000
鎳	400 ^a	300	650 ^a	1,100 ^a
鏷	5 ^a	25 ^a	55 ^a	1,200 ^a
磷	5	25	35	90
鎂	550	1,800	2,700	6,600
鉛	270 ^a	16,000 ^a	550	22,000 ^a
鈹	55	180	250	670
鈾	150 ^a	400 ^a	3,000	7,300
鈳	550 ^a	1,200 ^a	5,100 ^a	1,900 ^a
鐳	500 ^a	36,000 ^a	9,100 ^a	2,400
銣	55	180	270	670
銿	10	40	60	150
釘	55 ^a	1,000 ^a	800 ^a	6,600 ^a
銻	45 ^a	150	250	550
硒	150	500	740	1,800
矽	35	110	180	400
鈈	245	800	1,300	3,000
錫	130	450	670	1,600
鋨	15 ^a	20 ^a	110 ^a	150 ^a
鉭	220	900	1,200	3,300
鐳	0.1 ^a	0.1 ^a	1 ^a	1 ^a
碲	125	500	720	1,900
鈷	3,200 ^a	3,300	5,800 ^a	89,000 ^a
鈾	35 ^a	15 ^a	1,600 ^a	410 ^a
釷	170	720	1,000	2,600
鋅	200 ^a	1,300 ^a	2,400 ^a	1,600 ^a
鋇	600	2,200	3,300	7,300

從文獻得出之數值，其他數直接使用濃度比預測得出

參考文獻: Sheppard and Thibault (1990).

表 32.2 RESRAD 預設值分佈係數值 K_d

元素	RESRAD ^a K_d	K_d 範圍
氫	0	NA ^c
碳	0	1 - 70

鈉	20	NA
氯	0.1	NA
鉀	5	15 - 200
鈣	50	5 - 90
錳	200	50 - 750
鐵	1,000	165 - 800
鈷	1,000	60 - 1,300
鎳	1,000	300 - 1,100
鋇	30	15 - 150
鈮	0	160 - 2,000
鐳	0	0.1 - 1
釷	0	55 - 66,000
錒	0	45 - 550
碘	0.1	1 - 25
銫	500	170 - 4,600
銻	1,000	500 - 20,000
釷	0	245 - 3,000
釷	0	NA
鉛	100	270 - 22,000
鐳	70	500 - 36,000
鈾	20	450 - 5,400
釷	60,000	3200 - 89,000
釷	50	550 - 6,600
釷	50	15 - 1,600
釷	0	5 - 1,200
釷	2,000	550 - 5,100
釷	20	1900 - 112,000
釷	0	4000 - 18,000
釷	200	NA

參考文獻: Baes and Sharp (1983), Nuclear Safety Associates (1980), Isherwood (1981), U.S. Nuclear Regulatory Commission (1980), Gee et al. (1980), and Staley et al. (1979).

參考文獻: Sheppard and Thibault (1990).

NA: 無法使用

33. 地下水放射性核種濃度 RADIONUCLIDE CONCENTRATION IN GROUNDWATER

33.1 定義 DEFINITION

此參數為量測於污染區域井位之主要放射性核種濃度。放射性核種於地下水之濃度以及土壤濃度應同時量測，因為 RESRAD 模式需要這兩參數估算分佈係數。任何天然或非現場有關的地下水污染源也應考慮，因為這些來源可能增加地下水的濃度，從而導致錯誤分配係數。

33.2 RESRAD 資料輸入需求

地下水放射性核種濃度參數單位為每公升微居禮(pCi/L)。模式中必須輸入地下水放射性核種濃度，當廢棄物停留時間放置所經過時間大於零。

主要放射性核種於土壤濃度非為零時，其地下水放射性核種濃度亦非為零。這些參數將被用來計算土/水分之分佈係數，且計算出之分佈係數將會取代原分佈係數輸入值。

34. 浸出率 LEACH RATE

34.1 定義 DEFINITION

浸出率為放射性核種於污染區域每單位時間浸出比率。其假設浸出過程是由土壤顆粒與土壤水分之間污染物的平衡分佈驅動。RESRAD 模式使用浸出率計算放射性核種濃度因子以調整污染區域內之放射性核種濃度。

34.2 RESRAD 資料輸入需求

在 RESRAD 模式中浸出率之輸入單位為時間倒數，當於模式中輸入浸出率為 0 時，模式將使用一階浸出模型與土壤/水分佈係數計算污染區域浸出率。如果模式中輸入浸出率大於 0，模式將利用一階浸出模型與輸入值計算出土壤/水分佈係數並去取代原本之分佈係數。

因為浸出率與土壤/水分佈係數為影響場址水相關路徑最重要的兩個參數，因此應盡可能使用場址精準數據。RESRAD 模式預設浸出率數值為 0。

RESRAD 模式使用一階離子交換浸出模型計算浸出率及其他參數。若場址無浸出率相關資料可用，則輸入場址之分佈係數 K_d 亦可滿足計算之需求。

35 吸入之質量負荷 MASS LOADING FOR INHALATION

35.1 定義 DEFINITION

質量負荷參數為土壤粒子在空氣中之濃度，此參數通常是透過歷史資料及經驗公式取得，質量負荷之單位為每立方公尺克(g/m³)。

有三種模式可模擬土壤粒子於空氣之過程，其中之一為懸浮因子模式(resuspension factor model)，利用懸浮因子(Rf)方程式求出土壤粒子在空氣中之濃度(C_{dust})，方程式為

$$C_{dust} = Rf d r \rho_b \quad . \quad (35.1)$$

其中

$d r$ 為懸浮灰塵層之有效深度。

ρ_b 土壤密度。

第二種模式為懸浮速率模式，利用懸浮速率 R_r 方程式求出土壤粒子在空氣中之濃度，方程式為：

$$C_{dust} = R_r \sigma_s / V d \quad . \quad (35.2)$$

其中

σ_s 為表面土壤粒子濃度($\sigma_s = \rho_b d r$)。

$V d$ 為平均沉積速率。

第三種模式為 RESRAD 內建模組，透過經驗數據估算土壤粒子在空氣中之濃度。使用經驗數據可以忽略許多懸浮機制的細節，例如懸浮灰塵層之有效深度。平均而言，城市空氣中懸浮土壤粒子範圍介於 3.3×10^{-5} 至 2.54×10^{-4} g/m³ (Gilbert et al. 1983), Anspaugh et al. (1974) and Healy and Rodgers (1979) 使用 1×10^{-4} g/m³ 作為空氣中懸浮土壤粒子濃度，美國國家環境保護局亦也使用相同數值(EPA 1977)。

空氣中懸浮土壤粒子會隨著人類活動而有波動，例如犁地、耕種或是行駛至未鋪設道路等

活動。建設活動平均空氣中懸浮土壤粒子為 $6.0 \times 10^{-4} \text{ g/m}^3$; 暴露至未鋪設道路交通之平均空氣中懸浮土壤粒子為 $4.0 \times 10^{-4} \text{ g/m}^3$; 農業活動平均空氣中懸浮土壤粒子為 $3.0 \times 10^{-4} \text{ g/m}^3$ (Oztunali et al. 1981) 煤炭開採作業平均空氣中懸浮土壤粒子為 $1.8 \times 10^{-3} \text{ g/m}^3$ (Oztunali et al. 1981), 翻耕活動中平均空氣中懸浮土壤粒子為 1.3 g/m^3

35.2 RESRAD 資料輸入需求

Gilbert et al. (1983) 建議使用 $2.0 \times 10^{-4} \text{ g/m}^3$ 視為高質量負荷環境或是一般農業活動之平均空氣中懸浮土壤粒子濃度。RESRAD 模式預設值即為 $2.0 \times 10^{-4} \text{ g/m}^3$, 然而, 若場址條件許可應輸入更精準之數據。

36. 吸入路徑之遮蔽係數 SHIELDING FACTOR FOR INHALATION PATHWAY

36.1 定義 DEFINITION

遮蔽係數為室內懸浮土壤粒子與室外懸浮土壤粒子之比值。主要基於建築物可提供遮蔽室外懸浮土壤粒子。因此, 計算因吸入路徑所造成之有效劑量必須考量其遮蔽影響。吸入路徑中之居留因子 FO_2 , 亦可藉由下列方程式於 RESRAD 模式中計算得出

$$FO_2 = TF_1 \times 1 + TF_2 \times 0.4 + TF_3 \times 0, \quad (36.1)$$

其中:

TF_1 : 場址戶外活動時間(章節 29),

TF_2 : 場址室內活動時間 (章節 28),

TF_3 : 場址外活動時間(章節 28.29).

36.2 RESRAD 資料輸入需求

RESRAD 遮蔽係數參數輸入範圍為 0 至 1, 模式預設值為 0.4, 其假設為室內懸浮土壤粒子為室外之 40%。(Alzona et al. 1979).

37 根系深度 DEPTH OF ROOTS

37.1 定義 DEFINITION

此參數為各式植物於污染區域內之根系深度。根系深度會因不同種類之職務而有所變化。對於相同之植物如甜菜、胡蘿蔔、萵苣等, 其根系深度約為 0.3 公尺。其他果樹其根系深度為 2 至 3 公尺。農作物(如紫花苜蓿)之根系深度約為 5 公尺。大部分之植物皆是由根系吸收成長所需營養。然大多數植物其根系深度約為 1 公尺

這個參數主要是計算植物、肉類及牛奶路徑之覆蓋因子及深度因子。因為可食用植物可以在污染區域透過根系吸收放射性核種。植物根系假定僅能在污染區域接觸到污染土壤情況下能從根系攝取吸收放射性核種。

37.2 RESRAD 資料輸入需求

RESRAD 模式中必須輸入平均根系深度, 其單位為公尺(m)。模式之預設值為 0.9 公尺(m)。

38 土壤攝入率 SOIL INGESTION RATE

38.1 定義 DEFINITION

土壤攝入率代表不經意誤食入土壤或是灰塵量。根據許多文獻指出, 有很多廣泛的物質經常被攝入如土壤、黏土、沙子、灰塵、草、葉子、石膏、毛髮、油漆碎片、線、肥皂、木材、粉末、碳酸鈣和紙等等。許多的觀察資料指出, 年齡 1 到 6 歲的孩童最有可能攝入土壤(Cooper 1957; Sayre et al. 1974; Charney et al. 1980; Walter et al. 1980). Paustenbach (1986)

指出年齡超過 6 歲之孩童會涉入非食物的物質多半是不慎食入或成長發育問題。Vermeer and Frate (1979)發現生長環境問題亦為影響孩童攝入土壤之重要因素，並說明農村孩童通常涉入較高之土壤。Hawley (1985)針對以往孩童及成人土壤攝入率文獻分別做了情境模擬試驗，將一年分成兩個期間，其一為 5 月至 10 月，此期間通常會有比較多的戶外活動；另一個期間為 11 月至 4 月，因為天候條件的關係，此其間的戶外活動時間會相對比較少。Hawley 研究發現年齡約 2.5 歲孩童(體重 13.2 公斤)於 5 月至 10 月期間平均土壤攝入率為 250 mg/d。於 11 月至 4 月期間平均土壤攝入率為 100 mg/d。年齡約 6 歲孩童(體重 20.8 公斤)於 5 月至 10 月期間平均土壤攝入率為 50 mg/d，另外室內活動平均土壤攝入率為 3 mg/d。成人在未乾淨區域工作下之平均土壤攝入率為 110 mg/d，在生活空間環境下約為 0.56 mg/d。於 5 月至 10 月期間戶外活動平均土壤攝入率為 480mg/d。根據 Binder et al. (1986)研究孩童平均土壤攝入率為 108 mg/d(範圍為 4-708 mg/d)。Clausing et al. (1987)推估孩童平均土壤攝入率為 105 mg/d(範圍為 23-362mg/d)。上述文獻之平均土壤攝入率並未考慮因不正常之行為因素(如異物癖)。

EPA 於 1990 年參考眾多文獻後，認為 Binder et al. (1986)與 Clausing et al. (1987)之研究較為可信並推估低於 7 歲以下兒童之平均土壤攝入率為 0.2mg/d，攝入率上限值為 0.8 mg/d。針對其他大於 7 歲之孩童，其平均土壤攝入率為 0.1mg/d，並已包含室內及室外因素。在 RESRAD 模式中，當污染區域土壤與非污染區域土壤沒有區別時，就必須輸入平均土壤攝入率，RESRAD 會依據面積因子、居住因子及覆蓋-深度因子自動計算調整平均土壤攝入率並僅考慮污染區域的來源。模式攝入率輸入值完全取決於假設情境，針對居住情境暴露期間為 30 年的假設條件下，根據 EPA 建議，RESRAD 模式的平均土壤攝入率為： $(36.5 \text{ g/yr} + 24 \text{ yr} + 73 \text{ g/yr} - 6 \text{ yr})/30 \text{ yr} = 43.8 \text{ g/yr}$ 。EPA (1991)參考 Calabrese et al. (1990)試驗研究，採用 50 mg/d 作為成人平均土壤攝入率。此數據是假設於商業/工業情境下

38.2 量測方法 MEASUREMENT METHODOLOGY

Lepow et al. (1975)利用標籤量測孩童手部灰塵，藉由量測標籤前後重量灰塵去除量。並且觀察孩童手指含口的行為約每天 10 次會將手指含入口部，推算土壤攝入率。Day et al. (1975)以及 Duggan and Williams (1977)觀察孩童手部量測其攝入率。事實上，目前並沒有一種可以廣泛被接受的方法，去決定每日土壤攝入率。

38.3 RESRAD 資料輸入需求

RESRAD 模式中必須輸入平均土壤攝入率，其單位為克每年(g/yr)。模式之預設值為 36.5 g/yr，代表平均每天土壤攝入率為 0.1g，曝露期間為 1 年。0.1g/d 為 EPA 估算成人於居住環境下之攝入量。

39 污染區域之厚度 THICKNESS OF CONTAMINATED ZONE

39.1 定義 DEFINITION

這參數為含有放射性核種之污染區域最上層至最下層之土壤厚度，為了確認污染區域之放射性核種濃度高於背景值，必須使用 DOE 認可之統計分析方式比較(DOE 1991a, 章節 7)。如果放射性核種之濃度高於平均背景值濃度兩個標準差，則認定該區域污染值高於背景值。

39.2 量測方法 MEASUREMENT METHODOLOGY

當要估計土壤放射性核種濃度分布或是趨勢時，主要使用 DOE 認可之統計方式(DOE 1991a, 章節 7)。針對計算污染區域面積大於 100 平方公尺之污染區域深度，則每 100 平方公尺鑽孔取土壤樣本計算，如果一個以上之樣本值大於平均深度三倍，則將採用最大値之三分之

一代表污染區域厚度。針對計算小於 100 平方公尺之污染區域，可是使用平均採樣深度或是最大深度之三分之一(當量測深度大於平均深度 3 倍以上時)代表污染區域厚度。

39.3 RESRAD 資料輸入需求

RESRAD 模式中必須輸入污染區域之厚度，其單位為公尺(m)。模式之預設值為 2 公尺(m)。

40. 輻射劑量限值 RADIATION DOSE LIMIT

RESRAD 模式之輻射劑量為有效劑量，相當於外部輻射量加上內部之有效劑量。

(International Commission on Radiological Protection [ICRP] 1984).

在 REARAD 中預設 30 mrem/yr (0.3 mSv/yr)為輻射劑量限值。然而 DOE Order 5400.5 則是設定輻射劑量限值为 100 mrem/yr。輻射劑量限值 100 mrem/yr 是用來計算 DCGs(derived concentration guides)並也代表一個合理的上限濃度。

41 海鮮食物消耗率 SEAFOOD CONSUMPTION RATE

41.1 定義 DEFINITION

美國國家海洋漁業局(NMFS)在 1985 調查全國沿海地區休閒捕撈數據，NMFS 於 1966 透過訪查漁民及電話住戶民調調查全國沿海地區休閒捕撈數據(NMFS 1986)。NPD Research, Inc 在 1973 至 1974 年間進行一年研究調查總魚量消耗量。

Javitz (1980)使用 NPD Research, Inc 研究資料計算平均及 95 百分比數值作為海鮮食物消耗率，分別為 14.3 g/d (5.2 kg/yr)及 41.7 g/d (15.2 kg/yr)。平均海鮮食物消耗率 14.3 其中包含 2.1 為非魚類之海鮮如龍蝦，牡蠣，扇貝，蝦，魷魚等。不過 NPD Research, Inc.原始海鮮食物消耗資料無法區分為休閒捕撈魚量或是販賣魚量，因此差異性並不會反應至平均及 95 百分比數值。

Puffer et al. (1982)於洛杉磯港區針對漁民進行 1059 個面談，訪談後發現漁民捕獲魚類約保留百分之 67 至 89%，而貝類約保留 97%。中數及 90 百分比海鮮食物消耗率(包含魚類與貝類)分別為 37g/d、225 g/d。

Pierce et al. (1981)在 Tacoma 海灣做過其他有關海鮮食物消耗之研究調查，調查樣本數量(304 漁民)跟比上述 Puffer et al. (1982)研究來的小且採樣頻率也較低。發現超過一半的漁民每周會捕獲或是消耗魚量。結論出平均海鮮食物消耗量為 23 g/d，90 百分比之數值為 54 g/d。

雖然 Puffer et al.與 Pierce et al.研究界接受限至美國西海岸，但美國國家環境保護局認為這些研究可以代表漁民實際上每年消耗率。平均上述兩個研究資料，美國國家環境保護局建議之海鮮食物消耗平均為 30 g/d (11 kg/yr)，90 百分比之數值為 140 g/d (51 kg/yr)。

因為漁民家庭會比一般民眾消耗較大的海鮮食物，美國國家環境保護局建議可以使用上述兩個研究資料做為參考對比其他地區之海鮮食物消耗率。

美國核能管理委員會(NRC, 1977)使用 2.2 kg/yr、5.2 kg/yr 及 6.9 kg/yr，分別代表平均孩童；青少年及成人個體之魚類消耗率。其他海鮮食物消耗率分別為 0.33 kg/yr、0.75kg/yr、及 1.0 kg/yr。

RESRAD 模式中輸入海鮮食物消耗率為每年總消耗率，且不考慮污染區域及非污染區域之差異。模式中假設地表水體(如池塘)位於場址內，則提供百分之 50 的消耗海鮮食物。若模式使用者需要改變此比例，可修改場址提供之水生食物比率(the fraction of aquatic food from

the site)以符合實際情況。

41.2 RESRAD 資料輸入需求

RESRAD 模式中必須輸入海鮮食物消耗率，其單位為公斤每年(kg/yr)。模式之預設值魚類為 5.4(kg/yr)，其他海鮮食物預設值為 0.9(kg/yr)。

42 水果、蔬菜、糧食消耗率 FRUIT, VEGETABLE, AND GRAIN CONSUMPTION RATE

42.1 定義 DEFINITION

根據美國國家園藝協會之研究 the National Gardening Association (1987)，美國於 1986 有百分之 38 或是 3 千 4 百萬戶美國家庭參與園藝種植活動。家庭種植面積規模從 1982 年 600 平方英尺至 1986 下降至 325 平方英尺。家庭種植會因地理環境而不同，大部分集中於中西部及南部地區，且鄉村地區家庭種植頻率數量也都比都市地區家庭還多。此現在造成鄉村地區自家種植的水果蔬菜佔地區大部分之平均消耗量。

美國國家環境保護局基於兩份研究資料來源 Foods Commonly Eaten by Individuals: Amount Per Day and Per Eating Occasion (Pao et al. 1982) and Food Consumption: Households in the United States, Seasons and Year 1977-1978 (USDA 1983)建議自產自銷水果及蔬菜的消耗率。另美國農業部 USDS 調查發現常見自家種植深綠色蔬菜有芥菜、甘藍、球莖甘藍、花椰菜等。自家種植農作物佔最大比例為玉米、黃瓜，四季豆，西紅柿等。自產自銷水果為草莓、桃子、梨和柑橘類水果等。

根據 EPA 研究，平均每人蔬菜消耗率為 200 g/d (73 kg/yr)，其中自家種植部分佔 25%約為 50 g/d (18 kg/yr)。平均每人每日水果攝取率為 140 g/d (51 kg/yr)，其中自家種植部分佔 20%約為 28 g/d (10 kg/yr)。表 42.1 列出 EPA 建議數據。

上述 EPA 研究沒有提供糧食消耗率，美國核能管理委員會(NRC, 1977)依年齡層區分水果，蔬菜，糧食總消耗率，孩童平均為 200 kg/yr、青少年為 240 kg/yr、成人為 190 kg/yr。針對最壞情境各年齡層之最大消耗率分別為 520、630、520 kg/yr。最大消耗率中水果消耗率佔 22%、蔬菜消耗率佔 54%、糧食消耗率為 24%。

為執行 RESRAD 模式，必須輸入每年平均水果，蔬菜，糧食消耗率並不考慮污染區域及非污染區域之差異。面積係數會自動計算調整其消耗率，模式中假設若面積大於 1000 平方公尺，其中 50%水果，蔬菜，糧食消耗率會來自場址污染區域；若面積小於 1000 平方公尺，其比率為污染區域面積除以 2000 平方公尺。RESRAD 模式之水果，蔬菜，糧食消耗率會來自場址污染區域比率上限值為 50%。

表 42.1 蔬菜及水果攝取率 Vegetable and Fruit Intake Rates

項目	平均總攝取率		平均自家種植攝取率		最壞情況自家種植攝取率	
	(g/d)	(kg/yr)	(g/d)	(kg/yr)	(g/d)	(kg/yr)
蔬菜	200	73	50	18	80	29
水果	140	51	28	10	42	15
總計	340	124	78	28	122	44

42.2 RESRAD 資料輸入需求

RESRAD 模式中必須輸入水果、蔬菜、糧食消耗率，其單位為公斤每年(kg/yr)。模式之預設值為 160(kg/yr)。

43 吸入率 INHALATION RATE

43.1 定義 DEFINITION

吸入率會依人體活動程度、年齡、體重、性別和一般身體狀況變化。人體測量數據(EPA 1985)曾提出多種方程式計算人體休息時之吸入率。一般情況下，該公式從相對小樣本測量得出，並僅限於計算人體休息時之吸入率

EPA 從早期研究中已經編譯出許多可用數據，將吸入率劃分年齡/性別以及活動程度。並依男性成人(體重 70 公斤)做為參考標準。表 43.1 彙總不同性別/年齡/活動程度之吸入率(EPA 1985)，活動程度劃分，休息狀態如睡覺、觀看電視、閱讀等。輕微活動如走路、洗碗、洗衣、做家事、攝影、室內維修、簡單房屋整修等。中度活動如爬樓梯、搬運東西等。重度活動如運動、重量訓練、騎腳踏車、跳舞等等。

表 43.1 人體吸入率(m³/h)

	活動程度			
	休息	輕微	中度	重度
男性成人	0.7	0.8	2.5	4.8
女性成人	0.3	0.5	1.6	2.9
平均成人	0.5	0.6	2.1	3.9
孩童, 6 歲	0.4	0.8	2.0	2.4
孩童, 10 歲	0.4	1.0	3.2	4.2

參考來源: EPA (1985).

假設一天 16 小時為輕微活動，8 小時為休息狀態，則男性成人每日吸入率為 23-m³/d、女性成人為 21-m³/d，平均為 22 m³/d(ICRP, 1981)。EPA 針對休息狀態及輕微活動採用較低的吸入率，應用在上述假設平均吸入率為 14 m³/d。EPA 另外也估算中度活動及重度活動的吸入率，並建議最大吸入率大約為平均吸入的兩倍。依據 EPA 估算結果，在活動程度未知條件下，成人平均吸入率為 20 m³/d (7,300 m³/yr)、最壞情況之平均吸入率為 30 m³/d (11,000 m³/yr)。若是在活動程度分布已知條件下，應該使用表 43.1 來估算每日吸入率。

43.2 RESRAD 資料輸入需求

RESRAD 模式中必須輸入平均吸入率，其單位為立方公尺每年(m³/yr)。模式之預設值為 8,400 m³/yr。模式中是使用每年平均吸入率，此參數包含代表室內及室外活動。因此，輸入的數值可以依據假設的情境得知。此外場址內花費時間及場址外花費時間並不會影響此參數。

44 有葉蔬菜消耗率 LEAFY VEGETABLE CONSUMPTION RATE

44.1 定義 DEFINITION

有葉蔬菜消耗率為人類食用如菠菜和生菜的消耗率。根據美國核能管理委員會(NRC, 1977)依年齡層區分有葉蔬菜消耗率，孩童平均為 26 kg/yr、青少年為 42 kg/yr、成人為 64 kg/yr。另根據 NRC 進行核場址環境輻射劑量分析數據(Streng 1987)，假設平均有葉蔬菜消耗率分別為孩童平均為 10 kg/yr、青少年為 20 kg/yr、成人為 30 kg/yr

44.2 RESRAD 資料輸入需求

RESRAD 模式預設值為 14 kg/yr。45 牛及乳牛飲水攝入率 LIVESTOCK WATER INTAKE RATE FOR BEEF CATTLE AND MILK COWS

45.1 定義 DEFINITION

根據美國核能管理委員會(NRC, 1977)，牛的飲水攝入率為 50 L/d、乳牛的飲水攝入率為 14 gal/d 且乳牛每產生 3 lb 牛奶時會增加 1 gal 的飲水攝入率(Great Lakes Basin Commission 1975)。若假設乳牛每日產出 10gal，則該乳牛飲水攝入率為 160 L/d (Gilbert et al. 1983)。

45.2 RESRAD 資料輸入需求

RESRAD 模式中必須輸入牛及乳牛飲水攝入率，其單位為公升每日(L/d)。模式之預設值為牛的飲水攝入率為 50 L/d、乳牛飲水攝入率為 160 L/d。46 牛肉和禽肉消耗率 MEAT AND POULTRY CONSUMPTION RATE

46.1 定義 DEFINITION

USDA 於 1977-1989 期間進行全國食物消費調查，調查平均牛肉及乳製品消耗速率，此調查數據後來被 EPA 採用。根據 900 家鄉間牧場調查結果，每年消耗量有 44% 為自家畜牧牛肉，每年牛肉平均消耗率為 100 g/d (36.5 kg/yr)，換算自家畜牧牛肉消耗為 44 g/d (EPA 1990)。針對最壞情境自家畜牧牛肉消耗率為 75 g/d (27 kg/yr)，此數據僅針對牛肉部分。根據美國核能管理委員會(NRC, 1977)平均牛肉和禽肉消耗率，孩童平均為 37 kg/yr、青少年平均為 59 kg/yr、成人平均為 95 kg/yr。最大消耗率孩童平均為 41 kg/yr、青少年平均為 65 kg/yr、成人平均為 110 kg/yr。

在 RESRAD 模式中，若污染區域面積大於 20000 m²，則假設所消耗的肉類皆遭受污染。如果污染區域小於 20000 m²，則依據實際面積除上 20000 m² 推算肉類遭受污染比例。

46.2 RESRAD 資料輸入需求

RESRAD 模式中必須輸入平均牛肉和禽肉消耗率，其單位為公升每日(kg/yr)。模式之預設值為 63 kg/yr。

47 牛奶消耗率 MILK CONSUMPTION RATE

47.1 定義 DEFINITION

根據 EPA 及 Fries (1986) 研究，牛奶消耗率範圍介於 254 g/d 至 1,000 g/d，平均為 305 g/d (110 L/yr)。另根據 USDA (1966) 調查總牛奶消耗率中 40% 為農場自家消耗，換算之消耗率為 44 L/yr。

根據美國核能管理委員會(NRC, 1977) 平均牛奶消耗率，孩童平均為 170 L/yr、青少年平均為 200 L/yr、成人平均為 110 L/yr。最大消耗率孩童平均為 330 L/yr、青少年平均為 400 L/yr、成人平均為 330 L/yr。

在 RESRAD 模式中，若污染區域面積大於 20000 m²，則假設所消耗的牛奶皆遭受污染。如果污染區域小於 20000 m²，則依據實際面積除上 20000 m² 推算牛奶遭受污染比例。

47.2 RESRAD 資料輸入需求

RESRAD 模式預設牛奶消耗率為每人每年 92 公升(92 L/yr per person)。

48 外部 GAMMA 射線之遮蔽係數 SHIELDING FACTOR FOR EXTERNAL GAMMA RADIATION

48.1 定義 DEFINITION

遮蔽係數為室內外部 GAMMA 射線與室外外部 GAMMA 射線之比率。主要是建築物之遮蔽可以阻擋 GAMMA 射線穿透至室內。因此計算地表路徑之有效劑量時，必須考慮到遮蔽係數的影響。

居住因子 FO1 可由下列方程式得出：

$$FO_1 = TF_1 \times 1 + TF_2 \times 0.7 + TF_3 \times 0, \quad (48.1)$$

其中：

TF1: 場址戶外活動時間(章節 29),

TF2: 場址室內活動時間 (章節 28),

TF3: 場址外活動時間(章節 28.29).

48.2 RESRAD 資料輸入需求

此參數必須輸入小數，範圍介於 0 至 1。模式預設值為 0.7，其假設為室內外部 GAMMA 射線小於室外外部 GAMMA 射線 30%。

49 廢棄物放置的經過時間 ELAPSED TIME OF WASTE PLACEMENT

49.1 定義 DEFINITION

廢棄物放置的經過時間為放射性核種放置在場址和放射性量測的持續時間。放射性廢棄物可有不同的來源及放置時間，在此情況下，應該使用平均值或是其他具代表性的數值。

當使用 RESRAD 模式時，放射性量測時間所取得的信息將被用來推導土壤淨化標準。

這些信息包含土/水分佈係數、土壤放射性核種濃度。一般廢棄物放置的經過時間為 0 的情況下，分佈係數主要是用來計算地下水上升及穿透時間，另外也用預測計算地下水放射性核種濃度。另一方面，只有當場址分布係數不可用且放射性量測的核種濃度大於背景值時，廢棄物放置的經過時間才需輸入非 0 之數值。

49.2 RESRAD 資料輸入需求

RESRAD 模式廢棄物放置的經過時間單位為年(yr)，模式預設值為 0。

50 形狀因子(外部 GAMMA)SHAPE FACTOR (EXTERNAL GAMMA)

50.1 定義 DEFINITION

形狀因子是以圓形區域作為基礎上，用來修改校正非圓形污染區域。圓形區域的形狀因子為 1.0。表 50.1 列出不同半徑圓形污染區域之面積因子。對於非規格形狀之污染區域，可先將該區域劃分出不同圓型環狀並涵蓋整個區域，將該圓面積乘上污染比率，加總各項乘積後，除上同等面積之環狀面積因子，即可得出非規格形狀區域之形狀因子

如果一個非規格形狀污染區域(如圖 50.1)面積為 191.4 m²，將該區域劃分成四個圓型環狀，每個環狀之污染比率分別為 1、1、0.97、0.22。其該污染區域面積因子為：

$$\sum_{i=1,4} (area\ factor) \times (contamination\ fraction)_i \quad (50.1)$$

$$= (0.016 \times 1) + (0.4 - 0.016) \times 1 + (0.55 - 0.4) \times 0.97 + (0.8 - 0.55) \times 0.22$$

$$= 0.601 .$$

接下來求解同等面積之環狀面積因子即為面積 191.4 m² 環狀面積因子，利用表 50.1 及內插法可得出

$$(0.8 - 0.55) / (13 - 5.6) \times (7.8 - 5.6) + 0.55 = 0.62 . \quad (50.2)$$

將污染區域面積因子除上同等面積之環狀面積因子，得出該區域之形狀因子，如式 50.3。

$$0.601 / 0.62 = 0.97 . \quad (50.3)$$

最後得出該區域之形狀因子為 0.97。

50.2 RESRAD 資料輸入需求

RESRAD 模式預設污染區域面積為 10000m²，其面積大於 1200m² (如表 50.1)面積因子等於 1。因為面積因子以等於 1，所以預設形狀因子等於 1。

如果輸入的形狀因子為負的(即介於 0 至-1 之間)，則 SOILD 模組(Chen 1991)將會取代 RESRAD 預設模組，計算外部輻射之有效劑量。

在這種情況下，形狀因子實際上沒有在 SOILD 模組使用。因此，使用者應該提供更詳細之環狀面積污染比率，已得出更精準之計算結果。

表 50.1 污染區域外部 GAMMA 輻射之面積因子

污染區域面積 (m ²)	半徑 ^a (m)	面積因子, FA ^b
1	0.56	0.016
25	2.8	0.4

100	5.6	0.55
500	13	0.8
1,200	20	1.0

圓形污染區域之半徑

線性內插的中間值

參考來源: Napier et al. (1984).

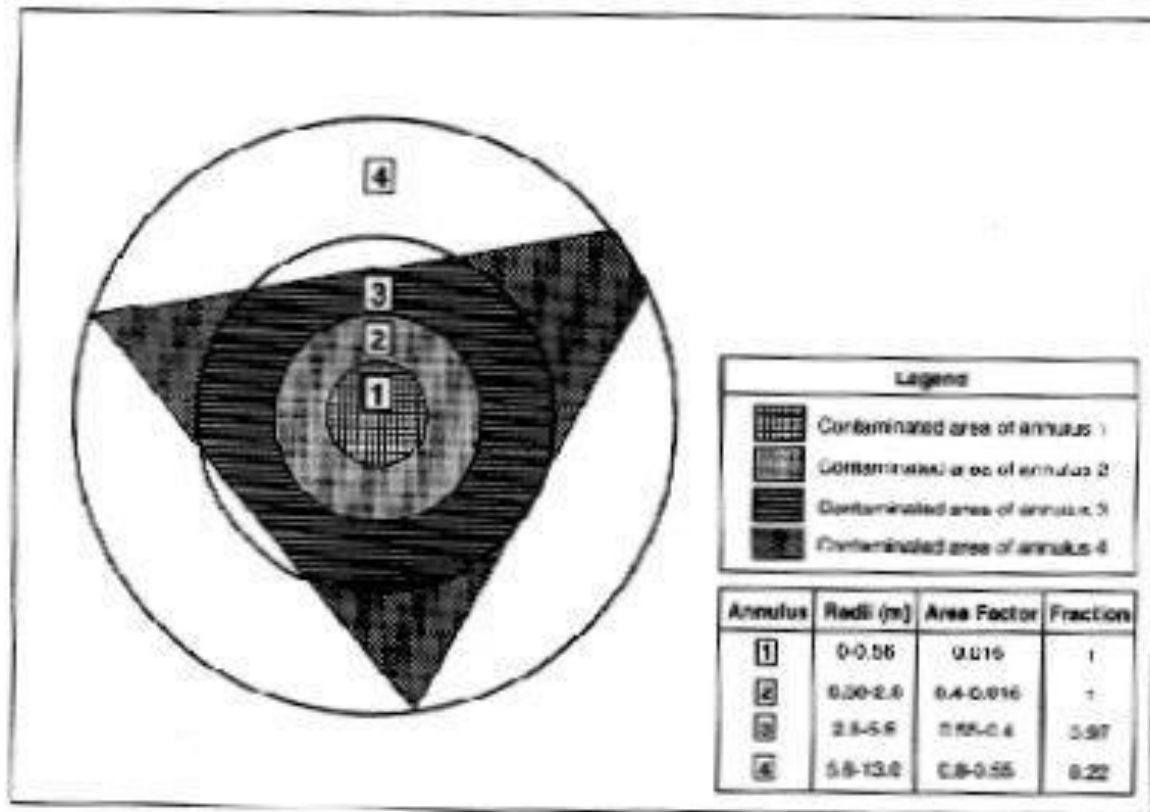


FIGURE 50.1 Irregularly Shaped Contaminated Zone Enclosed by Four Annuli

圖 50.1 示意圖_非規格形狀污染區域環繞並分成四個圓型環狀

51 主要放射性核種初始濃度 INITIAL CONCENTRATIONS OF PRINCIPAL RADIONUCLIDES

51.1 定義 DEFINITION

主要放射性核種為半衰期超過1.5年以上之核種。其餘相關核種為半衰期小於1.5年之核種。假設其所有放射性核種(除了氦子核種)皆在污染區域以及人體暴露位置，因此只有在污染區域之放射性核種才需要輸入其濃度。

單核素土壤準則不依賴於放射性核素濃度的土壤中。即使在放射性核素的濃度是未知的，因為這些準則的值可以通過輸入的任何非零的放射性核素的濃度來獲得。所計算的劑量，然而，依賴於放射性核素的濃度;因此，劑量由 RESRAD 計算才有效，如果土壤中放射性核素的濃度是已知的。當該放射性核素的濃度在土壤和地下水中一起使用的廢物放置所經

過的時間以得到土壤/水分配係數，主核素的初始濃度的值必須是已知的，以獲得精確的測量只有當土壤內之放射性核種濃度是已知條件下，RESRAD 模式所計算出之劑量才為有效。

當土壤及地下水核種濃度與廢棄物放置經過時間一起被使用來推算分佈係數時，必須知道核種初始濃度已獲得較精準之計算結果。

計算土壤核種濃度時，DOE 認可之統計方法(DOE 1991a, 第七章節)應該被優先考量。以下另外提供其他可以決定土壤濃度之方法，這些方法會計算出相對較保守之有效劑量。

主要放射性核種初始濃度可由下列方法決定，對於污染區域大於 100 m²，每 100 平方公尺鑽孔取土壤樣本量測，如果一個以上之樣本值大於平均濃度三倍，則將採用最大値之三分之一代表平均核種濃度。針對計算小於 100 平方公尺之污染區域，平均核種濃度為最大平均核種濃度。

51.2 RESRAD 資料輸入需求

RESRAD 模式必須輸入污染區域內之主要核種初始濃度，單位為微西佛/克(pCi/g)。模式假設污染區域每一節點皆均勻污染。

52 飲用水攝入率 DRINKING WATER INTAKE RATE

52.1 定義 DEFINITION

EPA 採用 2 L/d 作為成人平均飲用水攝入率，其中包含由果汁或是飲料所吸收之水分。然而，這個數值是美國陸軍決定區域內每個人的所需水量，一般認此數值應有高估。

(NAS,1977)計算出於溫暖地區每人平均飲用水攝入率為 1.63 L/d。雖然 1.63 L/d 值比較有科學根據，但是 NAS 仍然採用較大值 2 L/d 作為大部分人的平均飲用水攝入率。

其他仍有許多文獻提供有關平均飲用水攝入率，The National Cancer Institute (NCI)研究膀胱癌與飲用水之關係，問卷訪談 9000 位成人，並得知平均自來水飲用量為 1.39 L/d (Cantor et al. 1987)。根據研究資料 90 百分比數值為 2.0 L/d。

Gillies and Paulin (1983)在紐西蘭之調查飲用水攝入率為 1.256 (+ 0.39) L/d，90 百分比數值為 1.9 L/d。

Pennington (1983)基於美國食藥局的飲食研究報告，發表平均飲水消耗率(包含食物的水分)為 1.2 L/d。ICRP 指出在一般條件下成人平均飲水消耗率介於 0.4 L/d 至 2.2 L/d。

EPA(1984)利用美國食藥局在 1977-1978 調查每日飲水量，成人每日飲水量介於 1.24 至 1.73 L。EPA(1990)建議平均成人飲用水攝入率為 1.4 L/d，在最壞情況下成人飲用水攝入率為 2.0 L/d，這數值相當於 510 L/yr、730 L/yr。

Pennington (1983) and Cantor et al. (1987)研究指出成人飲用水攝入率介於 1.7 至 1.87 L/d。

.RESRAD 模式之平均飲用水攝入率並沒有分污染區域及非污染，場址實際的飲用水比例被用來調整飲用水受污染之比例，此外，應盡可能使用場址精準數據已反應場址真實條件。

52.2 RESRAD DATA INPUT REQUIREMENTS

RESRAD 模式平均飲用水攝入率單位為公升每年(L/yr)，模式預設值為 510 L/yr。

53 參考文獻 REFERENCES

Agneessens, J.P., et al. 1978, "Modelisation de la Migration d'Elements dans les Sols. II. Determination du Coefficient de Dispersion et de la Porosite Efficace," *Pedologie* 27:373-388.

Alzona, J., et al., 1979, "Indoor-Outdoor Relationships for Airborne Particulate Matter of Outdoor Origin," *Atmospheric Environment* 13:55-60.

American Industrial Hygiene Association, 1971, "Ergonomics Guides: Ergonomics Guide to Assessment of Metabolic and Cardiac Costs of Physical Work," *American Industrial Hygiene Association Journal* 32:560-564.

American Society for Testing and Materials, 1992a, "Standard Test Method for Specific Gravity of Soils (D 854-91)," in *1992 Annual Book of ASTM Standards*, Sec. 4: Construction, Vol. 8: Soil and Rock; Dimension Stone; Geosynthetics, ASTM, Philadelphia, Penn.

American Society for Testing and Materials, 1992b, "Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by the Sand-Cone Method (D 1556-90)," in *1992 Annual Book of ASTM Standards*, Sec. 4: Construction, Vol. 8: Soil and Rock; Dimension Stone; Geosynthetics, ASTM, Philadelphia, Penn.

American Society for Testing and Materials, 1992c, "Standard Practice for the Thin-Walled Tube Sampling of Soils (D 1587-83)," in *1992 Annual Book of ASTM Standards*, Sec. 4: Construction, Vol. 8: Soil and Rock; Dimension Stone; Geosynthetics, ASTM, Philadelphia, Penn.

American Society for Testing and Materials, 1992d, "Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by the Rubber Balloon Method (D 2167-84)," in *1992 Annual Book of ASTM Standards*, Sec. 4: Construction, Vol. 8: Soil and Rock; Dimension Stone; Geosynthetics, ASTM, Philadelphia, Penn.

American Society for Testing and Materials, 1992e, "Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock (D 2216-90)," in *1992 Annual Book of ASTM Standards*, Sec. 4: Construction, Vol. 8: Soil and Rock; Dimension Stone; Geosynthetics, ASTM, Philadelphia, Penn.

American Society for Testing and Materials, 1992f, "Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head) (D 2434-68)," in *1992 Annual Book of ASTM Standards*, Sec. 4: Construction, Vol. 8: Soil and Rock; Dimension Stone; Geosynthetics, ASTM, Philadelphia, Penn.

American Society for Testing and Materials, 1992g, "Standard Test Methods for Density of Soil and Soil-Aggregate in Place by Nuclear Methods (Shallow Depth) (D 2922-91)," in *1992 Annual Book of ASTM Standards*, Sec. 4: Construction, Vol. 8: Soil and Rock; Dimension Stone; Geosynthetics, ASTM, Philadelphia, Penn.

American Society for Testing and Materials, 1992h, "Standard Test Method for Density of Soil in Place by the Drive-Cylinder Method (D 2937-83)," in *1992 Annual Book of ASTM Standards*, Sec. 4: Construction, Vol. 8: Soil and Rock; Dimension Stone; Geosynthetics, ASTM, Philadelphia, Penn.

American Society for Testing and Materials, 1992i, "Standard Test Method for Infiltration Rate of Soils in Field Using Double-Ring Infiltrometers (D 3385-88)," in *1992 Annual Book of ASTM Standards*, Sec. 4: Construction, Vol. 8: Soil and Rock; Dimension Stone; Geosynthetics, ASTM, Philadelphia, Penn.

American Society for Testing and Materials, 1992j, "Standard Test Method for Distribution Ratios by the Short-Term Batch Method (D 4319-83)," in *1992 Annual Book of ASTM Standards*, Sec. 4: Construction, Vol. 8: Soil and Rock; Dimension Stone; Geosynthetics, ASTM, Philadelphia, Penn.

American Society for Testing and Materials, 1992k, "Standard Test Method for Density of Soil in Place by the Sleeve Method (D 4564-86)," in *1992 Annual Book of ASTM Standards*, Sec. 4: Construction, Vol. 8: Soil and Rock; Dimension Stone; Geosynthetics, ASTM, Philadelphia, Penn.

American Society for Testing and Materials, 1992l, "Standard Guide for Soil Sampling from the Vadose Zone (D 4700-91)," in *1992 Annual Book of ASTM Standards*, Sec. 4: Construction, Vol. 8: Soil and Rock; Dimension Stone; Geosynthetics; ASTM, Philadelphia, Penn.

American Society for Testing and Materials, 1992m, "Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter (D 5084-90)," in *1992 Annual Book of ASTM Standards*, Sec. 4: Construction, Vol. 8: Soil and Rock; Dimension Stone; Geosynthetics, ASTM, Philadelphia, Penn.

American Society for Testing and Materials, 1992n, "Standard Guide for Comparison of Field Methods for Determining Hydraulic Conductivity in the Vadose Zone (D 5126-90)," in *1992 Annual Book of ASTM Standards*, Sec. 4: Construction, Vol. 8: Soil and Rock; Dimension Stone; Geosynthetics, ASTM, Philadelphia, Penn.

American Society for Testing and Materials, 1992o, "Standard Test Method for Density of Soil and Rock In-Place at Depths Below the Surface by Nuclear Methods (D 5195-91)," in *1992 Annual Book of ASTM Standards*, Sec. 4: Construction, Vol. 8: Soil and Rock; Dimension Stone; Geosynthetics, ASTM, Philadelphia, Penn.

Amoozegar, A., and A.W. Warrick, 1986, "Hydraulic Conductivity of Saturated Soils: Field Methods," in *Methods of Soil Analysis: Part 1, Physical and Mineralogical Methods*, 2nd ed., A. Klute (editor), American Society of Agronomy, Inc., and Soil Science Society of America, Madison, Wis., pp. 735-770.

Anspaugh, L.R., et al., 1974, "Evaluation of the Resuspension Pathway toward Protective Guidelines for Soil Contamination with Radioactivity," presented at the *International Atomic Energy Agency/World Health Organization Symposium on Radiological Safety Evaluation of Population Doses and Application of Radiological Safety Standards to Man and the Environment*, Portoraz, Yugoslavia, May 20-24.

Aris, R., 1958, "On the Dispersion of Linear Kinematic Waves," *Proceedings of the Royal Society of London*, Series A, 245:268-277.

ASTM: See American Society for Testing and Materials.

Baes, C.F., and R.D. Sharp, 1983, "A Proposal for Estimation of Soil Leaching and Leaching Constants for Use in Assessment Models," *Journal of Environmental Quality* 12(1):17-28.

Baes, C.F., III, et al., 1984, *A Review and Analysis of Parameters for Assessing Transport of Environmentally Released Radionuclides through*

Agriculture, prepared by Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn., for Martin Marietta Energy Systems, Inc., under U.S. Department of Energy Contract No.DE-AC05-84OR21400.

Bartrop, D., 1966, "The Prevalence of Pica," *American Journal of Diseases in Children* 112:116-123.

Barney, G.S., and G.E. Brown, 1980, "The Kinetics and Reversibility of Radionuclide Sorption Reaction with Rocks," Progress Report for Fiscal Year 1979, in *Task 4, Third Contractor Information Meeting*, J.F. Relyea (editor), Vol. II, PNL-SA-8571, Pacific Northwest Laboratory, pp. 261-308.

Barreto, P.M.C., 1974, *Emanation Characteristics of Terrestrial and Lunar Materials and the Radon-222 Loss Effect on the Uranium-Lead System Discordance*, Ph.D. dissertation, Rice University, Houston, Texas.

Bear, J., 1972, *Dynamics of Fluids in Porous Media*, American Elsevier Publishing Company, Inc., New York, N.Y. (reprinted by Dover Publications, Inc., 1988).

Bedient, P.B., and W.C. Huber, 1988, *Hydrology and Floodplain Analysis*, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Mass.

Behrman, L.E., and V.C. Baughan, III, 1983, *Textbook of Pediatrics*, W.B. Saunders Company, Philadelphia, Penn.

Bellinger, D., et al., 1986, "Correlates of Low-Level Lead Exposure in Urban Children at 2 Years of Age," *Pediatrics* 77:826-833.

Bicknell J., 1974, "Lead Poisoning in Childhood," *Update (England)* 9:653-659.

Binder, S., et al., 1986, "Estimating Soil Ingestion: The Use of Tracer Elements in Estimating the Amount of Soil Ingested by Young Children," *Archives of Environmental Health* 41:341-345.

Blake, G.R., and K.H. Hartge, 1986a, "Bulk Density," in *Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods*, 2nd ed., A. Klute (editor), American Society of Agronomy, Inc., and Soil Science Society of America, Madison, Wis., pp. 363-376.

Blake, G.R., and K.H. Hartge, 1986b, "Particle Density," in *Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods*, 2nd ed., A. Klute (editor), American Society of Agronomy, Inc., and Soil Science Society of America, Madison, Wis., pp. 377-382.

Bond, W.J., and D.E. Smiles, 1988, "Predicting the Average Movement of Reactive Solutes in

Soils," *Soil Use Management* 4:115-120.

Brady, N.C., 1984, *The Nature and Properties of Soils*, 9th ed., MacMillan Publishing Company, New York, N.Y.

Calabrese, E.J., et al., 1990, "Preliminary Adult Soil Ingestion Estimates: Results of a Pilot Study," *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 12:88-95.

Campbell, G.S., 1974, "A Simple Method for Determining Unsaturated Conductivity from Moisture Retention Data," *Soil Science* 117:311-314.

Cantor, K.P., et al., 1987, "Bladder Cancer, Drinking Water Source, and Tap Water Consumption: A Case-Control Study," *Journal of the National Cancer Institute* 79:1269-1279.

Charney, E., et al., 1980, "Increased Lead Absorption in Inner City Children: Where Does the Lead Come From?" *Pediatrics* 65:226-231.

Chen, S.Y., 1991, "Calculation of Effective Dose Equivalent Responses for External Exposure from Residual Photon Emitters in Soil," *Health Physics* 60:411-426.

Cheng, J.-J., et al., 1991, *RESRAD Parameter Sensitivity Analysis*, ANL/EAIS-3, prepared by Argonne National Laboratory, Argonne, Ill., for U.S. Department of Energy, Office of Environmental Restoration and Waste Management, Aug.

Chow, V.T., 1964, *Handbook of Applied Hydrology*, McGraw-Hill, New York, N.Y.

Clapp, R.B., and G.M. Hornberger, 1978, "Empirical Equations for Some Soil Hydraulic Properties," *Water Resource Research* 14:601-604.

Clausing, P., et al., 1987, "A Method of Estimating Soil Ingestion by Children," *International Archives of Occupational and Environmental Health* (W. Germany) 59:73-82.

Cohen, B.L., 1979, "Methods for Predicting the Effectiveness of Uranium Mill Tailings Covers," *Nuclear Instrumentation and Methods* 164:595-599.

Cooper M., 1957, *Pica*, Charles C. Thomas, Springfield, Ill.

Coughtrey, P.J., et al., 1985, *Radionuclide Distribution and Transport in Terrestrial and Aquatic Ecosystems, A Compendium of Data*, A.A. Balkema, Netherlands.

Culot, M.V.J., 1976, "Effective Diffusion Coefficient of Radon in Concrete: Theory and Method for Field Measurements," *Health Physics* 30:263-270.

Currie, J.A., 1960a, "Gaseous Diffusion in Porous Media. Part 1. A Non-Steady State Method," *British Journal of Applied Physics* 11:314-317.

Currie, J.A., 1960b, "Gaseous Diffusion in Porous Media. Part 2. Dry Granular Materials," *British Journal of Applied Physics* 11:318-324.

- Damkjaer, A., and U. Korsbech, 1985, "Measurement of the Emanation of Radon-222 from Danish Soils," *Science of the Total Environment* 45:343.
- Danckwerts, P.V., 1953, "Continuous Flow Systems," *Chemical Engineering Science* 2:1-13.
- Danford, D.E., et al., 1982, "Pica and Mineral Status in the Mentally Retarded," *American Journal of Clinical Nutrition* 35:958-967.
- Danielson, R.E., and P.L. Sutherland, 1986, "Porosity," in *Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods*, 2nd ed., A. Klute (editor), American Society of Agronomy, Inc., and Soil Science Society of America, Madison, Wis., pp. 443-462.
- Danilk, W.R., 1981, *Laboratory Studies of Radionuclide Media, Oct. 1, 1979-Sept. 30, 1980*, LA-8586-PR, Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, N.M.
- Day, J.P., et al., 1975, "Lead in Urban Street Dust," *Nature* 253:343-345.
- DOA: See U.S. Department of the Army.
- DOE: See U.S. Department of Energy.
- DOI: See U.S. Department of the Interior.
- Duggan, M.J., and S. Williams, 1977, "Lead-in-Dust in City Streets," *Science of the Total Environment* 7:91-97.
- EPA: See U.S. Environmental Protection Agency.
- Feldman M.D., 1986, "Pica: Current Perspectives," *Psychosomatics (USA)* 27:519-523.
- Forfar, J.O., and G.C. Arneil (editors), 1984, *Textbook of Pediatrics*, 3rd ed., Churchill Livingstone, London.
- Foster, G.R., 1979, "Sediment Yield from Farm Fields: The Universal Soil Loss Equation and Onfarm 208 Plan Implementation," in *Universal Soil Loss Equation: Past, Present, and Future*, Soil Science Society of America Special Publication No. 8, pp. 17-24.
- Freeze, R.A., and J.A. Cherry, 1979, *Groundwater*, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.
- Fries, G.F., 1986, "Assessment of Potential Residues in Foods Derived from Animals Exposed to TCDD-Contaminated Soil," presented at *Dioxin 87: 6th International Symposium on Chlorinated Dioxin and Related Compounds*, Fukuoka, Japan, Sept.
- Gardner, W.H., 1986, "Water Content," in *Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods*, 2nd ed., A. Klute (editor), American Society of Agronomy, Inc., and Soil Science Society of America, Madison, Wis., pp. 493-544.

Gee, G.W., et al., 1980, Interaction of Uranium Mill Tailings Leachate with Soils and Clay Liners, NUREG/CR-1494, PNL-3381, prepared by Pacific Northwest Laboratory, Richland, Wash., for Office of Nuclear Regulatory Research, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C.

Gee, G.W., et al., 1983, "Mobility of Radionuclides in Soil," in *Chemical Mobility and Reactivity in Soil Systems*, Soil Science Society of America Special Publication No. 11:203-227.

Geraghty, J.J., et al., 1973, *Water Atlas of the United States*, Water Information Center, Port Washington, N.Y.

Gilbert, T.L., et al., 1983, *Pathways Analysis and Radiation Dose Estimates for Radioactive Residues at Formerly Utilized MED/AEC Sites*, ORO-832 (Rev.), prepared by Argonne National Laboratory, Argonne, Ill., for U.S. Department of Energy, Oak Ridge Operations, Oak Ridge, Tenn., March (reprinted with corrections January 1984).

Gilbert, T.L., et al., 1989, *A Manual for Implementing Residual Radioactive Material Guidelines*, ANL/ES-160, DOE/CH/8901, prepared by Argonne National Laboratory, Argonne, Ill., for U.S. Department of Energy, Washington, D.C., June.

Gillies, M.E., and H.V. Paulin, 1983, "Variability of Mineral Intakes from Drinking Water: A Possible Explanation for the Controversy over the Relationship of Water Quality to Cardiovascular Disease," *International Journal of Epidemiology* 12:45-50.

Glickman L.T., 1981, "Pica Patterns, Toxocariasis, and Elevated Blood Lead in Children," *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene* 30:77-80.

Godish, T., 1991, *Indoor Air Pollution Control*, Lewis Publishers, Chelsea, Mich.

Great Lakes Basin Commission, 1975, *Great Lakes Basin Commission Framework Study, Appendix 6: Water Supply — Municipal, Industrial, and Rural*, sponsored by U.S. Environmental Protection Agency, Region V, Public Information Office, Ann Arbor, Mich.

Hauth, J.J., 1967, "Vibrational Compaction of Nuclear Fuels," pp. 253-276, in *Vibratory Compacting*, H.H. Hausner, K.H. Roll, and P.K. Johnson (editors), Plenum Press, New York, N.Y.

Hawley, J.K., 1985, "Assessment of Health Risk from Exposure to Contaminated Soil," *Risk Analysis* 5:289.

Healy, J.W., and J.C. Rodgers, 1979, *Limits for the Burial of the Department of Energy Transuranic Waste*, LA-UR-79-100, Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, N.M.

Hillel, D., 1980a, *Applications of Soil Physics*, Academic Press, Inc., New York, N.Y.

Hillel, D., 1980b, *Fundamentals of Soil Physics*, Academic Press, Inc., New York, N.Y.

Hoeffner, S.L., 1985, *Radionuclide Sorption on Savannah River Plant Burial Ground Soil — A Summary and Interpretation of Laboratory Data*, DP-1702, Savannah River Laboratory, E.I. du Pont de Nemours and Co., Aiken, S.C.

ICRP: See International Commission on Radiological Protection.

International Commission on Radiological Protection, 1981, *Report of the Task Group on Reference Man*, ICRP Publication 23, Pergamon Press, New York, N.Y.

International Commission on Radiological Protection, 1984, *A Compilation of the Major Concepts and Quantities in Use by ICRP*, ICRP Publication 42, Pergamon Press, Oxford, United Kingdom.

Isherwood, D., 1981, *Geoscience Data Base Handbook for Modeling a Nuclear Waste Repository*, NUREG/CR-0912, Vols. 1 and 2, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C.

Jackson, R.D., et al., 1962, "A Mechanized Device for Packing Soil Columns," *U.S. Department of Agriculture Bulletin* 41-42.

Javitz H., 1980, *Seafood Consumption Data Analysis*, prepared by SRI International, Stanford, Calif., for U.S. Environmental Protection Agency Office of Water Regulations and Standards, EPA Contract 68-01-3887.

Jury, W.A., and G. Sposito, 1985, "Field Calibration and Validation of Solute Transport Models for the Unsaturated Zone," *Soil Science Society of America Journal* 49:1331-1341.

Kirkham, D., and W.L. Powers, 1972, *Advanced Soil Physics*, Wiley-Interscience, New York, N.Y.

Klute, A., and C. Dirksen, 1986, "Hydraulic Conductivity and Diffusivity: Laboratory Methods," in *Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods*, 2nd ed., A. Klute (editor), American Society of Agronomy, Inc., and Soil Science Society of America, Madison, Wis., pp. 687-734.

Knight, M.J., 1983, *The Effect of Soil Erosion on the Long-Term Stability of FUSRAP Near-Surface Waste-Burial Sites*, ANL/EIS-18, Revised, prepared by Argonne National Laboratory, Argonne, Ill., for U.S. Department of Energy, Oak Ridge Operations Office, Oak Ridge, Tenn., April.

Lapidus, L., and N.R. Amundson, 1952, "Mathematics of Adsorption in Beds. IV. The Effect of Longitudinal Diffusion in Ion Exchange Chromatographic Columns,"

Journal of Physical Chemistry 56:984-988.

Lepow M.L., et al., 1975, "Investigations into Sources of Lead in the Environment of Urban Children," *Environmental Research* 10:415-426.

- Linsley, R.K., et al., 1982, *Hydrology for Engineers*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, N.Y.
- Marshall, T.J., and J.W. Holmes, 1979, *Soil Physics*, Cambridge University Press, New York, N.Y.
- Marsily, G. de., 1986, *Quantitative Hydrogeology*, Academic Press, Orlando, Fla.
- McWorter, D.B., and D.K. Sunada, 1977, *Groundwater Hydrology and Hydraulics*, Water Resources Publications, Fort Collins, Colo.
- Megumi, K., and T. Mamuro, 1974, "Emanation and Exhalation of Radon and Thoron Gases from Soil Particles," *Journal of Geophysical Research* 79:3357.
- Napier, B.A., et al., 1984, *Intruder Dose Pathway Analysis for the Onsite Disposal of Radioactive Wastes: The ONSITE/MAXII Computer Program*, NUREG/CR-3620, PNL-4054, prepared by Pacific Northwest Laboratory, Richland, Wash., for Division of Waste Management, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C.
- NAS: See National Academy of Sciences.
- National Academy of Sciences, 1977, *Drinking Water and Health, Volume 1*, National Academy Press, Washington D.C.
- National Gardening Association, Inc., 1987, *National Gardening Survey: 1986-1987*, National Gardening Association, Inc., Burlington, Vt.
- National Marine Fisheries Service, 1986, *Fisheries of the United States, 1985*, Current Fisheries Statistics No. 8368, U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Washington, D.C.
- National Oceanic and Atmospheric Administration, 1982a, *Evaporation Atlas for the Contiguous 48 United States*, NOAA Technical Report NWS 33, U.S. Department of Commerce, Washington, D.C.
- National Oceanic and Atmospheric Administration, 1982b, *Mean Monthly, Seasonal, and Annual Pan Evaporation for the United States*, NOAA Technical Report NWS 34, U.S. Department of Commerce, Washington, D.C.
- Nazaroff, W.W., et al., 1988, "Soil as a Source of Indoor Radon: Generation, Migration, and Entry," in *Radon and Its Decay Products in Indoor Air*, W.W. Nazaroff and A.V. Nero (editors), John Wiley & Sons, New York, N.Y.
- Nero, A.V., 1988, "Radon and Its Decay Products in Indoor Air: An Overview," in *Radon and Its Decay Products in Indoor Air*, W.W. Nazaroff and A.V. Nero (editors), John Wiley & Sons, New York, N.Y.
- Nielson, K.K., et al., 1982, "Comparison of Radon Diffusion Coefficients Measured by Transient-Diffusion and Steady-State Laboratory Methods," NUREG/CR-2875, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C.

Nikula, A., 1982, *Sorption in Typical Finnish Soils and Some Fracture Filling of Bedrock* (in Finnish), Imatra Power Company, Helsinki, Finland.

NMFS: See National Marine Fisheries Service.

NOAA: See National Oceanic and Atmospheric Administration.

NRC: See U.S. Nuclear Regulatory Commission.

Nuclear Safety Associates, Inc., 1980, *Comparison of Alternatives for Long-Term Management of High-Level Radioactive Waste at the Western New York Nuclear Service Center*, prepared by Nuclear Safety Associates, Inc., Bethesda, Md., for Argonne National Laboratory, Argonne, Ill., Appendix III C.

Oztunali, O.I., et al., 1981, *Data Base for Radioactive Waste Management, Impacts Analyses Methodology Report*, NUREG/CR-1759, Vol. 3, prepared by Dames and Moore, White Plains, N.Y., for Office of Nuclear Material Safety and Safeguards, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C.

Pao, E.M., et al., 1982, *Foods Commonly Eaten by Individuals: Amount Per Day and Per Eating Occasion*, Home Economics Report No.44, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.

Paustenbach, D.J., et al., 1986, "A Critical Examination of Assumptions Used in Risk Assessments of Dioxin Contaminated Soil," *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 6:284-307.

Pennington, J.A.T., 1983, "Revision of the Total Diet Study Food List and Diets," *Journal of the American Dietetic Association* 82:166-173.

Peterson, A.E., and J.B. Swan (editors), 1979, *Universal Soil Loss Equation*, Soil Science Society of America, Madison, Wis.

Pierce, R.S., et al., 1981, *Commencement Bay Seafood Consumption Report*, preliminary report, Tacoma-Pierce County Health Department, Tacoma, Wash.

Poffijn, A., et al., 1988, "On the Exhalation and Diffusion Characteristics of Concrete," *Radiation Protection Dosimetry* 24:203-206.

Puffer H., et al., 1982, *Consumption Rates of Potentially Hazardous Marine Fish Caught in the Metropolitan Los Angeles Area*, EPA-600/3-82-070, prepared by U.S. Environmental Protection Agency for Coruallis Environmental Research Laboratory, Ore.

Rifai, M.N.E., et al., 1956, "Dispersion Phenomena in Laminar Flow through Porous Media," *Engineering Research Series* No. 93(2), Sanitary Engineering Research Laboratory, University of California, Berkeley, Calif.

Ripple, C.D., et al., 1974, "Packing-Induced Radial Particle-Size Segregation: Influence on Hydrodynamic Dispersion and Water Transfer Measurement," *Soil Science Society of America*

Proceedings 38:219-222.

Robischon, P., 1971, "Pica Practice and Other Hand-Mouth Behavior and Children's Developmental Level," *Nursing Research* 20:4-16.

Rogers, V.C., and K.K. Nielson, 1991, "Multiphase Radon Generation and Transport in Porous Materials," *Health Physics* 60:807-815.

Rolston, D.E., 1986, "Gas Diffusivity," in *Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods*, 2nd ed., A. Klute (editor), American Society of Agronomy, Inc., and Soil Science Society of America, Madison, Wis., pp. 1089-1102.

Rouston, R.C., et al., 1984, "Radionuclide Sorption on Low-Exchange Capacity Hanford Site Soils," *Communication in Soil Science Plant Analysis* 15:375-400.

Saxena, S.K., et al., 1974, "Experimental Evaluation of Chemical Transport in Water-Saturated Porous Media: 1. Nonsorbing Media," *Soil Science* 118:120-126.

Sayre, J.W., et al., 1974, "House and Hand Dust as a Potential Source of Childhood Lead Exposure," *American Journal of Diseases in Children* 127:167-170.

Sehmel, G.A., 1980, "Particle Resuspension: A Review," *Environment International* 4:107-127.

Serne, R.J., and J.F. Relyea, 1981, "The Status of Radionuclide Sorption-Desorption Studies Performed by the WRIT Program," in *The Technology of High-Level Nuclear Waste Disposal*, P.L. Hoffman (editor), Vol. I, DOE/TIC-4621, National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce, Springfield, Va.

Sheppard, M.I., and D.H. Thibault, 1990, "Default Soil Solid/Liquid Partition Coefficients, K_{ds} , for Four Major Soil Types: A Compendium," *Health Physics* 59:471-482.

Sheppard, M.I., and D.H. Thibault, 1991, "A Four-Year Mobility Study of Selected Trace Elements and Heavy Metals," *Journal of Environmental Quality* 20:101.

Sheppard, M.I., et al., 1983, "Technetium and Uranium: Sorption by and Plant Uptake from Peat and Sand," *Health Physics* 44:635-643.

Sheppard, S.C., and M.I. Sheppard, 1989, "Impact of Correlations on Stochastic Estimates of Soil Contamination and Plant Uptake," *Health Physics* 57:653-657.

Sherman, M.H. (editor), 1990, *Air Change Rate and Airtightness in Buildings*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Penn.

Silker, W.B., 1981, *A Radon Attenuation Test Facility*, NUREG/CR-2243, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C.

Silker, W.B., and D.R. Kalkwarf, 1983, "Radon Diffusion in Candidate Soils for Covering

Uranium Mill Tailings," NUREG/CR-2924, PNL-4434, prepared by Pacific Northwest Laboratory for U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C.

Sisigina, T.I., 1974, "Assessment of Radon Emanation from the Surface of Extensive Territories," in *Nuclear Meteorology*, Israeli Program of Scientific Translations, Jerusalem, p. 239.

Skopp, J., 1985, "Analysis of Solute Movement in Structured Soils," in *Proceedings of International Society of Soil Science Symposium on Water and Solute Movement in Heavy Clay Soil*, J. Bouma and P.A.C. Raats (editors), International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, Netherlands, pp. 220-228.

Staley, G.B., et al., 1979, "Radionuclide Migration from Low-Level Waste: A Generic Overview," in M.W. Carter et al. (editors), *Management of Low-Level Radioactive Waste*, Pergamon Press, New York, N.Y., pp. 1041-1072.

Stranden, E., 1988, "Building Materials as a Source of Indoor Radon," in *Radon and Its Decay Products in Indoor Air*, W.W. Nazaroff and A.V. Nero (editors), John Wiley & Sons, New York, N.Y.

Streng, D.L., et al., 1987, *GASPAR II — Technical Reference and Users Guide*, NUREG/CR-4653, PNL-5907, Pacific Northwest Laboratory, prepared for U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C.

Strong, K.P., and D.M. Levins, 1982, "Effect of Moisture Content on Radon Emanation from Uranium Ore and Tailings," *Health Physics* 42:27-32.

Strong, K.P., et al., 1981, "Radon Diffusion through Uranium Tailings and Earth Cover," in *Radiation Hazards in Mining: Control, Measurement, and Medical Aspects*, M. Gomez (editor), Society of Mining Engineers, New York, N.Y., p. 713.

Tanner, A.B., 1964, "Radon Migration in the Ground: A Review," in *Natural Radiation Environment*, J.A.S. Adams and W.M. Lowder (editors), University of Chicago Press, Chicago, Ill., p. 161.

Thamer, B.J., et al., 1981, *The Effects of Moisture on Radon Emanation, Including the Effects of Diffusion*, Report BuMines OFR 184-82, PB83-136358, U.S. Department of Commerce, National Technical Information Service, Springfield, Va.

Uchida, S., and H. Kamada, 1987, "Sorption of Strontium on Soils in Layered and Aerated Zones," *Hoken Butsuri* 22:179-187.

USDA: See U.S. Department of Agriculture.

U.S. Department of Agriculture, 1966, *Household Food Consumption Survey, 1965-1966, Report 12, Food Consumption of Households in the United States — Seasons and Year, 1965-1966*, Government Printing Office, Washington, D.C.

U.S. Department of Agriculture, 1983, *Food Consumption: Households in the United States, Seasons, and Year 1977-1978*, Government Printing Office, Washington, D.C.

U.S. Department of the Army, 1970, *Engineering and Design: Laboratory Soils Testing*, EM 1110-2-1906, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.

U.S. Department of Energy, 1990, "Radiation Protection of the Public and the Environment," U.S. Department of Energy Order 5400.5.

U.S. Department of Energy, 1991a, *Environmental Regulatory Guide for Radiological Effluent Monitoring and Environmental Surveillance*, DOE/EH-0173T, U.S. Department of Energy, Washington, D.C.

U.S. Department of Energy, 1991b, *Guidance for Implementation of ALARA Requirements for Compliance with DOE 5400 Service Orders: For Interim Use and Comment*, memorandum from R.F. Pelletier, Director, Office of Environmental Guidance, for distribution, Washington, D.C.

U.S. Department of the Interior, 1990a, "Procedure for Performing Field Permeability Testing by the Well Permeameter Method (USBR 7300-89)," in *Earth Manual, Part 2, A Water Resources Technical Publication*, 3rd ed., Bureau of Reclamation, Denver, Colo.

U.S. Department of the Interior, 1990b, "Procedure for Constant-Head Hydraulic Conductivity Tests in Single Drill Holes (USBR 7310-89)," in *Earth Manual, Part 2, A Water Resources Technical Publication*, 3rd ed., Bureau of Reclamation, Denver, Colo.

U.S. Environmental Protection Agency, 1977, *Proposed Guidance on Dose Limits for Persons Exposed to Transuranium Elements in the General Environment*, Office of Radiation Programs, Criteria and Standards Division, Washington, D.C.

U.S. Environmental Protection Agency, 1984a, *An Estimation of the Daily Average Food Intake by Age and Sex for Use in Assessing the Radionuclide Intake of Individuals in the General Population*, EPA-520/1-84-02, Washington, D.C.

U.S. Environmental Protection Agency, 1984b, *Tolerance Assessment System: Crop to Food Map*, draft report, Aug. (Data analyzed were compiled in the *USDA Nationwide Food Consumption Survey, 1977-1978*), Washington, D.C.

U.S. Environmental Protection Agency, 1984c, *An Estimation of the Daily Food Intake Based on Data from the 1977-1978 USDA Nationwide Food Consumption*

Survey, EPA-520/1-84-021, Office of Radiation Programs, Washington, D.C.

U.S. Environmental Protection Agency, 1985, *Development of Statistical Distributions or Ranges of Standard Factor Used in Exposure Assessments*, EPA-600/8-85-010, Washington, D.C.

U.S. Environmental Protection Agency, 1986, "Method 9100: Saturated Hydraulic Conductivity, Saturated Leachate Conductivity, and Intrinsic Permeability," in

Test Methods for Evaluating Solid Waste, Volume IC: Laboratory Manual Physical/Chemical Methods, EPA SW-846, Part 3 of 4, 3rd ed., Washington, D.C.

U.S. Environmental Protection Agency, 1990a, *Exposure Factors Handbook*, EPA 600/8-89/043, Office of Health and Environmental Assessment, Washington, D.C.

U.S. Environmental Protection Agency, 1990b, *Risk Assessment Guidance for Superfund, Vol. I— Human Health Evaluation Manual, Part A*, OSWER Directive 9285.6-01, Washington, D.C.

U.S. Environmental Protection Agency, 1991, *Risk Assessment Guidance for Superfund, Vol. I: Human Health Evaluation Manual, Supplemental Guidance — Standard Default Exposure Factors*, OSWER Directive 9285.6-03, Washington, D.C.

U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1977, *Calculation of Annual Doses to Man from Routine Releases of Reactor Effluents for the Purpose of Evaluating Compliance with 10 CFR 50, Appendix 2*, Regulatory Guide 1.109, Office of Standards Development, Rev. 1, Washington, D.C., Oct.

U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1980, *Final Generic Environmental Impact Statement on Uranium Milling — Vol. 1, Summary and Text; Vol. 2, Appendices A-F; Vol. 3, Appendices G-V*, NUREG-0706, Office of Nuclear Material Safety and Safeguards, Washington, D.C.

Valocchi, A.J., 1985, "Validity of the Local Equilibrium Assumption for Modeling Sorbing Solute Transport through Homogeneous Soils," *Water Resources Research* 21:808-820.

Van Genuchten, M. Th. V., and P.J. Wierenga, 1986, "Solute Dispersion Coefficients and Retardation Factors," in *Methods of Soil Analysis, Part I: Physical and Mineralogical Methods*, 2nd ed., A. Klute (editor), American Society of Agronomy, Inc., and Soil Science Society of America, Madison, Wis.

Veihmeyer, F.J., 1964, "Evapotranspiration," in *Handbook of Applied Hydrology*, V.T. Chow (editor), McGraw-Hill, New York, N.Y.

Vermeer, D.E., and D.A. Frate, 1979, "Geophagia in Rural Mississippi: Environmental and Cultural Contexts and Nutritional Implications," *American Journal of Clinical Nutrition* 32:2129-2135.

Walter, S.D., et al., 1980, "Age-Specific Risk Factors for Lead Absorption in Children," *Archives of Environmental Health* 35:53-58.

Wischmeier, W.H., and D.D. Smith, 1978, *Predicting Rainfall Erosion Losses — A Guide to Conservation Planning*, Agricultural Handbook No. 537, prepared for U.S. Department of Agriculture by Science and Education Administration, Washington, D.C.

Yu, C., et al., 1984, "Simultaneous Determination of Dispersion Coefficients and Retardation Factors for a Low-Level Radioactive Waste Burial Site,"

Radioactive Waste Management Nuclear Fuel Cycle 4:401-420.

Yu, C., et al., 1993, unpublished information, Argonne National Laboratory, Argonne, Ill.

Zapalac, G.H., 1983, "Time-Dependent Method for Characterizing the Diffusion of Rn-222 in Concrete," *Health Physics* 45:377-383.

Ziai, M., 1983, *Bedside Pediatrics*, Mohsen Ziai, Rochester, N.Y