

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

低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術建立之

國際資訊研析

子計畫五：低放射性廢棄物坑道處置生物圈與

劑量評估審驗技術建立之資訊研析(修訂版)

計畫編號：104FCMA019

計畫主持人：董家鈞

子計畫五主持人：林文勝

受委託機關(構)：國立中央大學

報告日期：中華民國 105 年 12 月

# 低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術建立之 國際資訊研析

## 子計畫五：低放射性廢棄物坑道處置生物圈 與劑量評估審驗技術建立之資訊研析

受委託單位：國立中央大學

計畫主持人：董家鈞

子計畫五主持人：林文勝

研究期程：中華民國 105 年 1 月至 105 年 12 月

研究經費：新臺幣 82 萬元(子計畫五經費)

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

中華民國 105 年 12 月

(本報告內容純係作者個人之觀點，不應引申為本機關之意見)

## 目錄

摘要 .....	X
ABSTRACT .....	XI
1.前言 .....	1
1.1.研究背景與目的 .....	1
1.2.瑞典 SFR 處置場擴建之 SR-PSU 安全評估計畫 .....	2
2.國外放射性廢棄物坑道處置生物圈劑量評估技術蒐集及彙整 .....	7
2.1.蒐集 SR-PSU 針對核種傳輸與生物圈輻射劑量評估報告 .....	7
2.2.生物圈安全評估與輻射劑量標準 .....	10
3.研析國際坑道處置技術報告關於生物圈劑量評估要項 .....	12
3.1.生物圈評估內容和特定地點之特徵 .....	12
3.1.1.評估目的及終端 .....	12
3.1.2.場址特性 .....	13
3.1.2.1.Forsmark 場址 .....	13
3.1.2.2.場址說明 .....	13
3.1.2.3.未來氣候 .....	14
3.1.2.4.地貌景觀發展 .....	14
3.1.3.生物圈物體 .....	15
3.1.4.曝露途徑 .....	19
3.1.4.1.人類居住地區 .....	19
3.1.4.2.非人類生物群 .....	19
3.1.5.生物圈之特徵、事件與作用 .....	20
3.2.生物圈核種傳輸模型 .....	20
3.2.1.影響核種傳輸之生物圈作用因子 .....	23
3.3.核種於水中之平流與擴散傳輸 .....	24
3.3.1.生態系統內核種平流傳輸 .....	25
3.3.2.於生態系統與生物圈物體間之平流傳輸 .....	27
3.3.2.1.介於海洋盆地之傳輸 .....	27
3.3.2.2.在土地期間物體之間傳輸 .....	27
3.3.2.3.在生物圈物體內於湖泊與沼澤生態系統之間傳輸 .....	28
3.3.3.生態系統內核種擴散傳輸 .....	28
3.4.水域生態 .....	30
3.4.1.放射性核種量的數學表示式 .....	30
3.4.1.1.地面水[Water and PMorg] .....	30
3.4.1.2.水域初級生產者[PPplank,micro,macro] .....	31
3.4.1.3.上部沈積物[RegoUp, RegoUporg] .....	32
3.4.1.4.後冰期水體沉積物(粘土腐殖土)[RegoPG, RegoPGorg] .....	33
3.4.1.5.冰期粘土[RegoGL] .....	33
3.4.1.6.冰積土[RegoLow] .....	33
3.4.2.放射性核種通量的數學表示式 .....	33
3.4.2.1.植物吸收 .....	33
3.4.2.2.落葉呼吸/釋放 .....	34
3.4.2.3.落葉產生 .....	35

3.4.2.4. 沉降 (Sedimentation) .....	36
3.4.2.5. 再懸浮 (Resuspension) .....	36
3.4.2.6. 埋藏 .....	36
3.4.2.7. 生物擾動 .....	37
3.4.2.8. 礦化 .....	38
3.4.2.9. 與大氣之氣體交換 .....	38
3.4.2.10. 脫氣 .....	39
3.4.2.11. 氣體吸收 .....	39
3.5. 沼澤生態 .....	40
3.5.1. 放射性核種量的數學表示式 .....	40
3.5.1.1. 沼澤初級生產者 (Mire Primary Producers [PP]) .....	40
3.5.1.2. 泥炭[RegoUp, RegoUporg, RegoPeat, RegoPeatorg] .....	41
3.5.1.3. 後冰期沉積物[RegoPG, RegoPGorg] .....	43
3.5.1.4. 冰期沈積物[RegoGL] .....	43
3.5.1.5. 冰積土[RegoLow] .....	43
3.5.2. 放射性核種通量的數學表示式 .....	44
3.5.2.1. 植物吸收 .....	44
3.5.2.2. 落葉呼吸/釋放 .....	46
3.5.2.3. 落葉產生 .....	46
3.5.2.4. 埋藏 .....	47
3.5.2.5. 礦化 .....	48
3.5.2.6. 脫氣 .....	48
3.5.2.7. 氣體吸收 .....	49
3.5.2.8. 從湖泊到沼澤之漸變 .....	49
3.5.2.9. 沼澤植被之增生 .....	50
3.6. 農業生態 .....	51
3.6.1. 內部-外地農業 .....	52
3.6.1.1. 農業土壤[RegoUp, RegoUporg] .....	52
3.6.1.2. 施肥 .....	54
3.6.1.3. 落葉呼吸(C-14)/釋放(other RN) .....	54
3.6.1.4. 落葉產生 .....	55
3.6.1.5. 滲漏 .....	55
3.6.1.6. 礦化 .....	56
3.6.1.7. 脫氣 .....	56
3.6.1.8. 穩態時活度濃度 .....	57
3.6.2. 湖泊-沼澤系統的排水與培養 .....	57
3.6.2.1. 農業土壤(RegoUp, RegoUporg) .....	58
3.6.2.2. 地下水攝取 .....	60
3.6.2.3. 滲漏 .....	61
3.6.2.4. 礦化 .....	61
3.6.2.5. 脫氣 .....	61
3.6.2.6. 排水後前 50 年的平均活度濃度 .....	62
3.6.3. 菜園種植 .....	64
3.6.3.1. 栽培土壤[RegoUp, RegoUporg] .....	64

3.6.3.2.施肥 .....	65
3.6.3.3.灌溉 .....	67
3.6.3.4.葉子持留 .....	67
3.6.3.5.葉子脫氣 (C-14) .....	68
3.6.3.6.滲漏 .....	68
3.6.3.7.礦化 .....	69
3.6.3.8.脫氣 (土壤) .....	69
3.6.3.9.從燃燒釋放到大氣 .....	70
3.6.3.10.灌溉和施肥的平均活度濃度 .....	70
3.7.地面大氣 .....	72
3.7.1.表面大氣高於植被的土地 .....	72
3.7.1.1.C-14 冠層中的比活度 .....	73
3.7.1.2.C-14 釋放到冠層 .....	73
3.7.1.3.至初級生產者的通量 .....	74
3.7.1.4.紊流通量 .....	74
3.7.1.5.平流通量 .....	76
3.7.1.6.活度濃度 .....	77
3.7.2.水體表面上大氣 .....	78
3.7.2.1.大氣中的活度濃度 .....	78
3.7.2.2.紊流通量 .....	78
3.7.2.3.平流通量 .....	79
3.8. SR-PSU 安全評估計畫之輻射劑量與風險標準 .....	80
3.8.1. SR-PSU 安全評估計畫情節分類 .....	84
3.8.2.近場、遠場及生物圈輻射劑量全系統安全評估架構 .....	84
3.8.3.SR-PSU 近場、遠場及生物圈全系統之模式 .....	85
3.8.4.SR-PSU 生物圈安全評估計畫對人體之輻射劑量 .....	88
3.8.4.1.對人體之輻射劑量 .....	88
3.8.4.2.暴露人群和土地使用變量 .....	94
3.8.4.3.狩獵採集者 .....	96
3.8.4.4.自我維持農業 .....	98
3.8.4.4.1.水、土壤和空氣的活度濃度 .....	98
3.8.4.4.2.來自耕地食物中的活度濃度和潛在稀釋 .....	100
3.8.4.5.菜園區住家 .....	102
3.8.5. SR-PSU 生物圈安全評估計畫對非人類生物群之輻射劑量 .....	103
3.8.5.1.對非人類生物群之輻射劑量 .....	103
3.8.5.1.1.背景 .....	103
3.8.5.1.2.ERICA 劑量測定模型納入 Ecolego .....	104
3.8.5.1.2.1.基本概念 .....	104
3.8.5.1.2.2.計算內部暴露 .....	105
3.8.5.1.2.3.計算外部暴露 .....	106
3.8.5.1.2.4.總劑量率計算 .....	107
3.8.5.1.2.5.生物圈物體生態系統的過渡 .....	107
4.研析國際坑道處置技術報告關於生物圈參數使用於核種傳輸與劑量評估要 項 .....	108

5.提出低放射性廢棄物坑道處置生物圈劑量評估要項建議 .....	121
6.結論與建議 .....	124
參考文獻 .....	126

## 圖目錄

圖 1	瑞典 FORSMARK 中低放射性廢棄物最終處置場位置示意圖(SKB, 2013).....	2
圖 2	FORSMARK 之 SFR 設施地表部分示意圖(SKB, 2013).....	3
圖 3	SFR 設施概念示意圖 (灰色是目前已營運中的 SFR1, 藍色是規劃中的 SFR3) (SKB, 2014A).....	3
圖 4	SR-PSU 計畫主報告、主要參考文獻與其他參考報告階層示意圖 .....	5
圖 5	SR-PSU 有關核種傳輸與生物圈輻射劑量評估相關報告關聯圖 .....	6
圖 6	SR-PSU 的安全評估資料與模式架構 .....	8
圖 7	SR-PSU 模式銜接概念架構示意圖 .....	10
圖 8	FORSMARK 處置場址生物圈物體配置示意圖 .....	16
圖 9	生物圈物體 (藍色或黃色) 及其相關的原始海洋盆地 (灰色) 示意圖 .....	17
圖 10	在淹沒期間地下水從岩石圈到達生物圈之流出及放射性核種傳輸之概念模型 .....	18
圖 11	在陸域期間地下水從岩石圈到達生物圈之流出及放射性核種傳輸之概念模型 .....	18
圖 12	水域與陸域生態系核種傳輸區塊示意圖 .....	21
圖 13	農業生態系核種傳輸區塊示意圖 .....	22
圖 14	描述在生物圈物體於湖-沼澤階段之地面水的流動之水平衡概念模型圖 .....	25
圖 15	計算放射性核種進出湖泊-沼澤階段生物圈物體傳輸通量示意圖 .....	26
圖 16	沼澤生態系統中, 模擬放射性核種傳輸模型與累積示意圖。 .....	41
圖 17	生物圈物體 116 從海洋盆地到湖泊/沼澤生態之發展歷程 .....	50
圖 18	內部-外地農業生態系統放射性核種模擬傳輸和累積模型示意圖 .....	52
圖 19	沼澤排水農業生態系統中的核種傳輸和累積的模型示意圖 .....	58
圖 20	種植園點相關的核種傳輸和累積的模型示意圖 .....	64
圖 21	計算表面大氣高於植被土地之 C-14 傳輸結果模型概念示意圖 .....	73
圖 22	處置場系統輻射劑量風險評估時間尺度 .....	80
圖 23	主要情節與低發生率情節之總風險對應示意圖 .....	82
圖 24	比較主要情節與低發生率情節之年最大輻射劑量風險 .....	83
圖 25	SR-PSU 安全評估計畫廢料體、近場、遠場地質圈、生物圈與氣候之評估	

模式流程圖(AMF).....	87
圖 26 自然生態和農業生態暴露途徑示意圖 .....	94
圖 27 評估放射性核種釋出對非人類生物群的影響.....	104



## 表目錄

表 1	SR-PSU 主報告和主要參考報告清單.....	4
表 2	生物圈放射性核種傳輸模式之區塊模型名稱與說明.....	23
表 3	放射性核種通量傳輸模式及作用過程之整體概念表.....	24
表 4	低發生率情節和情節組合的概率.....	81
表 5	主要情節與低發生率情節對人體接受者年最大輻射劑量風險.....	82
表 6	SR-PSU 安全評估計畫安全報告 SFR 處置場址安全評估所應用的模式.....	86
表 7	經由攝取、吸入與外部曝露的母核種劑量係數.....	91
表 8	經由攝取、吸入與外部曝露的短半衰期子核種劑量係數.....	92
表 9	經由攝取、吸入與外部曝露的核種(包括母核種與子核種輻射)劑量係數 ...	93
表 10	放射性核種比參數.....	111
表 11	生物圈物體的幾何參數.....	111
表 12	風化層土壤特性參數.....	111
表 13	水文參數.....	112
表 14	元素比參數.....	113
表 15	水域生態參數.....	115
表 16	沼澤與農業區生態參數.....	116
表 17	人類居住特性參數.....	118
表 18	非人類生物群的參數.....	119
表 19	非人類生物群劑量係數.....	119
表 20	替代計算案例參數.....	120

## 摘要

本計畫分析瑞典 Forsmark 擴建 SFR 中低放處置場已完成 SR-PSU 之安全評估計畫，蒐集 SR-PSU 針對核種傳輸與生物圈輻射劑量評估報告及劑量評估技術，以 R13-18、R13-46 及 TR14-01 報告為主，其他相關報告(如 R13-43、R14-02、TR14-06、TR14-09)為輔。進行國外放射性廢棄物坑道處置生物圈劑量評估技術蒐集及彙整、研析國際坑道處置技術報告關於生物圈劑量評估要項、研析國際坑道處置技術報告關於生物圈參數使用於核種傳輸與劑量評估要項、提出低放射性廢棄物坑道處置生物圈劑量評估要項建議，以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。研究結果顯示：SR-PSU 安全評估計畫以區塊模式(Compartment models)建置放射性核種於近場、遠場和生物圈遷移模型。SR-PSU 安全評估計畫考慮空氣，土壤和水傳輸途徑，藉由各種評估模式分析廢料體、近場、遠場之核種傳輸，然後模擬得到進入生物圈的核種濃度，再利用核種劑量係數(Dose coefficient)與食物攝取率等參數計算對於人體輻射劑量。曝露於環境中的放射性核種的總劑量包括攝取水、攝取食物、外部曝露和吸入等四部分。有關生物圈放射性核種遷移模擬所需使用的所有參數：包括「放射性核種參數」、「景觀幾何形狀」、「土壤特性」、「水文參數」、「元素比參數」、「水域生態參數」、「陸域生態系統參數」、「人類居住特性參數」、「非人類生物群的參數」、「參數在替代計算案例使用」等。

## **ABSTRACT**

This project investigated the safe analysis for SFR long-term safety assessment, and gathered the reports of radionuclide transport and dose assessment of biosphere in SR-PSU which are priority in the technical reports of R13-18, R13-46 and TR14-01 main report, and minor in the other reports (such as R13-43, R14-02, TR14-06, TR14-09) as the supplement. Mover, the study also focused on the collecting and aggregating the dose assessment techniques of biosphere in foreign radioactive waste tunnel disposal. Research and analysis on the biosphere dose assessment of tunnel disposal technical report, and analysis about international tunnel disposal technical report on the biosphere parameters used in the nuclide transport and dose assessment are also included. Finally, we proposed the suggestions of biosphere dose assessment for low-level radioactive waste disposal. This study results are as follows: SR-PSU uses the compartment model for radionuclide transport and safety assessment in total system of near-field, far-field and biosphere. In all ecosystem, fluxes of radionuclides are primarily associated with mass fluxes (of water, soil and gas). Radionuclides in the environment may lead to both external and internal exposure. The total dose from exposure to radionuclides in the environment is the sum from exposure through ingestion of water, ingestion of food, external exposure and inhalation. Biosphere parameters used in radionuclide transport modelling and dose calculations in SR-PSU include radionuclide-specific parameters, landscape geometries, regolith characteristics, hydrological parameters, element-specific parameters, aquatic ecosystem parameters, terrestrial ecosystem parameters, human characteristics, non-human biota parameters, alternative calculation cases.

# 1. 前言

## 1.1. 研究背景與目的

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

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

為提升管制技術及持續精進管制規範，已於 102 年度起就低放射性廢棄物處置輻射劑量評估安全審查模式之研究，透過蒐集、研析國際重要文獻及技術研發重點彙整，開始逐步建立 RESRAD 程式輻射劑量評估審查技術，再於 103 年度完成 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。104 年度針對近岸與離島環境低放射性廢棄物處置之釋出核種濃度與輻射劑量轉換技術研析、低放射性廢棄物處置之輻射劑量與風險評估轉換技術之斜率因子研析、研擬低放射性廢棄物坑道處置之生物圈輻射劑量結合近場及遠場全系統安全評估架構，相關成果回饋於「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版)」安全評估章節之精進建議。本年度將以瑞典 SR-PSU 安

全評估計畫報告為基礎，針對國外放射性廢棄物坑道處置生物圈劑量評估技術蒐集及彙整、研析國際坑道處置技術報告關於生物圈劑量評估要項、研析國際坑道處置技術報告關於生物圈參數使用於核種傳輸與劑量評估要項、提出低放射性廢棄物坑道處置生物圈劑量評估要項建議，以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。

## 1.2. 瑞典 SFR 處置場擴建之 SR-PSU 安全評估計畫

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



圖 1 瑞典 Forsmark 中低放射性廢棄物最終處置場位置示意圖(SKB, 2013)



圖 2 Forsmark 之 SFR 設施地表部分示意圖(SKB, 2013)

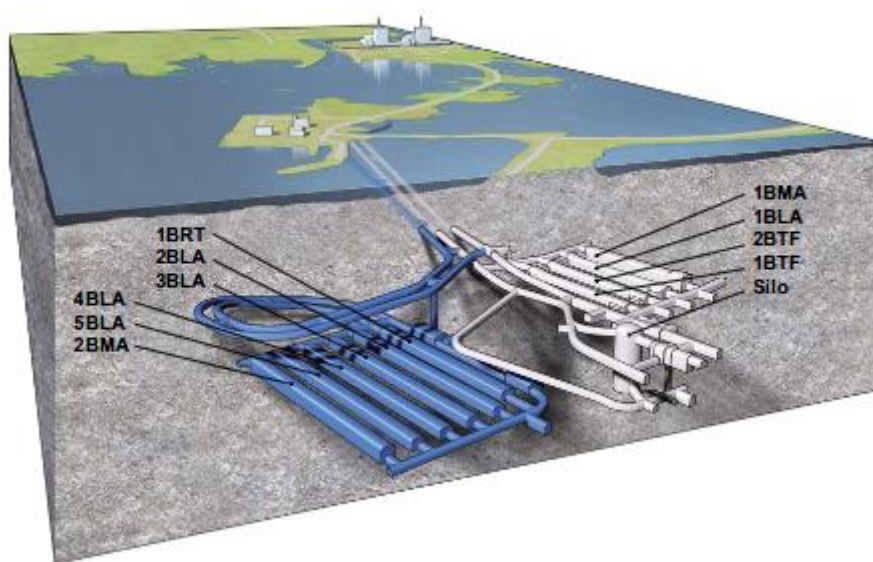


圖 3 SFR 設施概念示意圖（灰色是目前已營運中的 SFR1，藍色是規劃中的 SFR3）（SKB, 2014a）

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

SKB 已經完成 SR-PSU 計畫以作為 SFR 的擴建的使用執照申請文件。SR-PSU 的目的是評估 SFR 最終處置場未來的長期安全評估，即現有的 SFR1 和規劃中的

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

表 1 SR-PSU 主報告和主要參考報告清單

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

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

SR-PSU 安全評估計畫報告，共計十二章，合計約五百多頁，另有主要參考報告十二冊，合計超過三千餘頁。SR-PSU 計畫報告的內容如圖 4 所示。SR-PSU 安全評估之目的係為擴建 SFR 最終處置場長期安全評估結果能符合監管標準，其主要結論有三大重點：

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

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

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

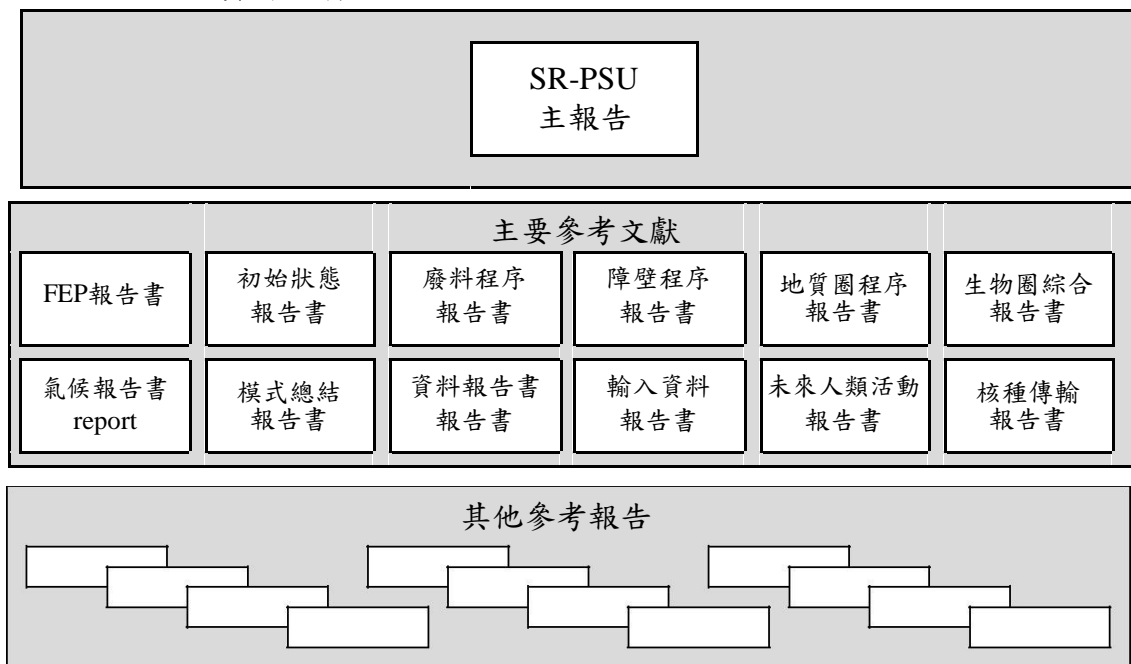


圖 4 SR-PSU 計畫主報告、主要參考文獻與其他參考報告階層示意圖

除了這些主要參考文獻中，安全評估報告還包括 SKB 很多背景調查報告和其他參考文獻。對於表 1 所列 SR-PSU 主報告和主要參考報告清單，有關核種傳輸與生物圈輻射劑量評估報告，依據 SR-PSU 整理結果列於圖 5，本計畫蒐集表 1 與圖 5 之生物圈及輻射劑量安全評估相關報告(如 R13-18、R13-43、R13-46、R14-02、TR14-01、TR14-06、TR14-09)，本年度計畫將針對核種傳輸與生物圈輻射劑量評估報告及劑量評估技術蒐集，以 R13-18、R13-46 及 TR14-01 報告為主，其他相關報告(如 R13-43、R14-02、TR14-06、TR14-09)為輔。包括 SR-PSU 報告安全評估有關生物圈部分放射性核種模擬所需使用的所有參數蒐集及研析，與生物圈模式對於核種傳輸與劑量評估等。



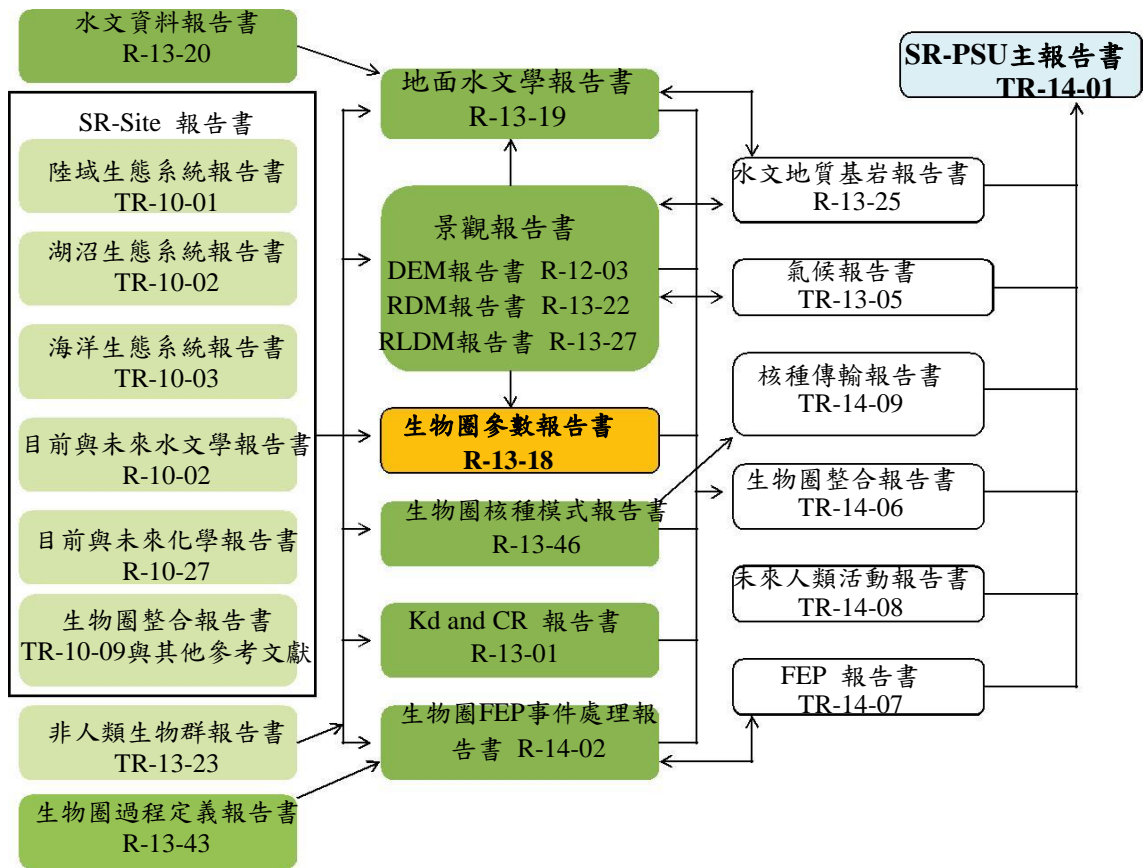


圖 5 SR-PSU 有關核種傳輸與生物圈輻射劑量評估相關報告關聯圖  
 其中：深綠色方框為生物圈報告、橘色方框為生物圈參數報告，淺綠色方框為 SR-Site 生物圈有關報告可作為 SR-PSU 生物圈補充報告，其他報告為 SR-PSU 有關報告與主報告

## 2. 國外放射性廢棄物坑道處置生物圈劑量評估技術蒐集及彙整

### 2.1. 蒐集 SR-PSU 針對核種傳輸與生物圈輻射劑量評估報告

蒐集 SR-PSU 針對核種傳輸與生物圈輻射劑量評估報告及劑量評估技術，以 R13-18、R13-46 及 TR14-01 報告為主，其他相關報告(如 R13-43、R14-02、TR14-06、TR14-09)為輔。底下針對 R13-18、R13-46、TR14-01、R13-43、R14-02、TR14-06、TR14-09 報告之廢棄物坑道處置生物圈劑量評估之內容進行摘述說明。

R13-18 這份報告是 SR-PSU 有關生物圈之安全評估，主要介紹在生物圈放射性核種遷移模擬所需使用的所有參數。其章節包括：第 1 章「SR-PSU 安全評估介紹」、第 2 章「提出參數設置條件和一般的假設之總體介紹」、第 3 章「放射性核種參數」、第 4 章「景觀幾何形狀」、第 5 章「土壤特性」、第 6 章「水文參數」、第 7 章「元素比參數」、第 8 章「水域生態參數」、第 9 章「陸域生態系統參數」、第 10 章「人類居住特性參數」、第 11 章「非人類生物群的參數」、第 12 章「參數在替代計算案例使用」、與附錄 A「參數列表」、附錄 B「計算氣候改變的情況下參數」、附錄 C「時間相關的參數」、附錄 D「水文數據」、附錄 E「非人類生物群係數」、附錄 F「概率參數」。

R13-46 這份報告利用生物圈放射性核種傳輸與劑量評估模式，評估證明擴充 SFR 場址 (SFR 1 和 SFR 3) 長期符合法規標準之安全性。其章節包括：第 1 章「介紹的 SR-PSU 項目，評估目的、現狀和預期發展」、第 2 章「介紹評估環境的概述、特定地點的特性和分析、說明生物圈放射性核種曝露途徑」、第 3 章「介紹區塊模式和用於模擬核種通量傳輸和在生態系統的放射性核種累積」、第 4 章「平流擴散傳輸：描述與地下與地表水間水域與沼澤生態系統的傳輸作用描述了生態系統和生物圈物體之間垂直和水平傳輸過程的水文連通性」、第 5 章「水域生態系統描述：海、湖泊和河流生態系統子模型」。第 6 章「沼澤濕地生態系統描述：濕地生態系統子模型」、第 7 章「農業生態系統：農業生態系統的子模型」、第 8 章「提供地表計算大氣子模型，其中氣態放射性核種使植物吸收或大氣層發生交換作用造成人類吸入之曝露」、第 9 章「人類居住區劑量計算」、第 10 章「非人類生物群劑量計算」、第 11 章「結論」，與附錄 A「區塊模式原理」、附錄 B「二氧化碳在孔隙氣體的比率」、附錄 C「放射性核種在作物的比率」、附錄 D「穩態濃度狀態下非飽和土壤脫氣」、附錄 E「生物圈過程審核」、附錄 F「用於

SR-PSU 在生物圈模型描述之術語和縮寫詞彙」、附錄 G「在自然景觀演替的過渡期生態特性和地表水通量」

TR14-01 這份報告是 SFR 長期安全分析(SR-PSU 安全評估主報告)。其章節包括：第 1 章「引言」、第 2 章「方法」、第 3 章「特徵事件作用的處理」、第 4 章「處置場及其周圍初始狀態」、第 5 章「安全功能」、第 6 章「正常演化」、第 7 章「情節選擇」、第 8 章「計算案例說明」、第 9 章「放射性核種傳輸與劑量計算」、第 10 章「風險評估」、第 11 章「結論：進一步的研究需要和設計、建造、營運和廢棄物的要求」，與附錄 A「SR-PSU 從 2008 年 SSMFS 2008:21 的規定要求」、附錄 B「SR-PSU 2008 年 SSMFS 2008:37 的規定要求」、附錄 C「SAR-08 禁令處理」、附錄 D「SR-PSU 依據 SAR-08 的審查意見處理」、附錄 E「專有名詞術語和縮略語」、附錄 F「特徵事件作用的彙整總表」、附錄 G「評估模型流程圖：AMF」、附錄 H「Forsmark 區地圖」、附錄 I「SFR 處置場址 pH 值和纖維素最大量的要求」。該技術報告對我國低放處置場審查作業極具參考價值，該審查報告內容共十二章，其中第八章至第十一章與安全評估相關的內容。本計畫已彙整該報告安全評估有關章節內容，將子計畫四之近場工程障壁、遠場地質圍安全評估內容與本子計畫 5 生物圈安全評估內容，於主計畫附錄內。SR-PSU 的安全評估資料與模式架構如圖 6 所示，由水文地質概念模型提供遠場流場模擬，再提供遠場傳輸模擬所需與導引近場流場模擬，近場傳輸模擬後將提供遠場傳輸模擬，再銜接生物圈劑量模式最後得到劑量評估，從模式架構而言，最外圈是區域流場模擬，也就是遠場含整個處置場之流場模擬。所採用之模式為區塊模式(compartment model)。

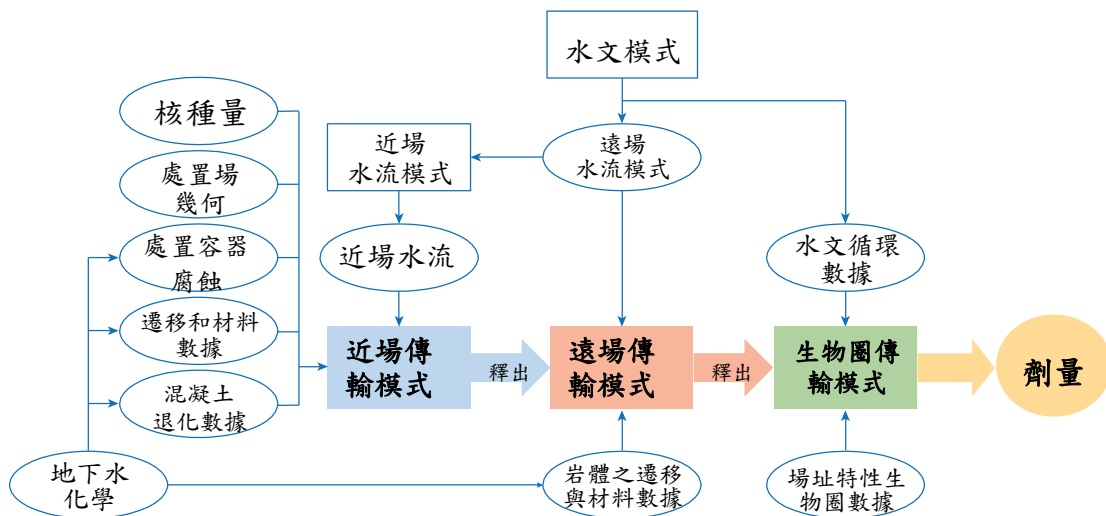


圖 6 SR-PSU 的安全評估資料與模式架構

R13-43 這份報告對於生物圈中組件間的特徵、作用和交互作用，描述 Forsmark 地區放射性廢棄物處置生物圈組件間的過程和相互作用之安全評估。這份報告以交互矩陣 (IM) 描述生物圈組件相互作用。其章節包括：第 1 章「介紹 SKB 工作與生物圈組成物相互作用交互矩陣 (IM) 背景和歷史」、第 2 章「讀者的指南」、第 3 章「介紹 IM 的概念與其發展所採用的方法」、第 4 章「SKB 定義生物圈的物理組件：該生物圈的物理組件屬於生物圈的一部分，並與其他物理特性是不同的（如初級生產者，風化層或地表水）」、第 5 章「介紹影響生物圈的發生、速度以及過程方向（例如幾何形狀，溫度）的特徵（變量）」、第 6 章「介紹生物圈安全性評估的過程：生態影響、景觀開發、轉移和生態系統中放射性核種的累積，或人類和其他生物的輻射曝露」、第 7 章「介紹生物圈 IM，描述生物圈物理組件間相互作用過程」、第 8 章「總結生物圈安全評估是重要的過程」、附錄 A「生物圈交互矩陣 (IM) 圖」、附錄 B「交互矩陣 (IM) 圖中在安全評估認定為需要的生物圈進程」、附錄 C「描述的特徵（變量）進程，反之亦然的影响表」、附錄 D「交互矩陣 (IM) 圖中的專有名詞列表」。

R14-02 這份報告是 SR-PSU 生物圈特徵事件作用(FEPs)與模式發展建議，可提供生物圈評估之要徑路線圖。提供曝露途徑分析和曝露途徑劑量傳輸至受影響最大的人類群體、提出生物圈模型的發展假設、從其他模擬分析結果瞭解放射性核種傳輸模擬不確定性之研究議題。其章節包括：第 1 章「引言」、第 2 章「SR-PSU 生物圈特徵事件作用之處理」、第 3 章「曝露途徑分析」、第 4 章「農地灌溉」、第 5 章「曝露於受污染的空氣泥炭或木材燃燒」、第 6 章「濕地轉型為農業用地」、第 7 章「水流至風化層土壤離散區劃定及敏感度分析」、第 8 章「自然碳循環有經驗數據之生物圈放射性核種傳輸模式之模擬比較」、第 9 章「總結」、附錄 A「Forsmark 地質處置場在安全評估之生物圈的交互作用矩陣需考慮事項」、附錄 B「評估模型流程圖：AMF」、附錄 C「參數值」。

TR14-06 這份報告是 SR-PSU 安全評估生物圈綜合報告。其章節包括：第 1 章「引言」、第 2 章「評估背景」、第 3 章「場址描述-在 Forsmark 目前條件」、第 4 章「場址開發-未來條件和系統」、第 5 章「模擬景觀的開發和土地利用」、第 6 章「景觀建模生物圈物體」、第 7 章「特徵事件作用處理、曝露途徑分析和生物圈計算案例」、第 8 章「生物圈的放射性核種傳輸模式」、第 9 章「生物圈評估之數據使用」、第 10 章「單位

釋出結果分析」、第 11 章「總結和不確定性的討論」、附錄 1「Forsmark 區地圖」、附錄 2「SR-PSU 生物圈專有名詞及縮寫說明」、附錄 3「描述生成未來景觀之方法」、附錄 4「景觀劑量轉換因子(LDFs)數據資料使用並與先前評估比較」

TR14-09 這份報告是 SR-PSU 安全評估之核種傳輸與劑量評估計算。其章節包括：第 1 章「引言」、第 2 章「評估方法和建模方法」、第 3 章「放射性核種庫存量和放射性核種傳輸模式的選擇」、第 4 章「計算案例說明」、第 5 章「主要情節模擬之計算結果」、第 6 章「低發生率情節模擬之計算結果」、第 7 章「剩餘情節結果模擬之計算結果」、第 8 章「對非人類生物群劑量率」、第 9 章「模式」、第 10 章「總結和結論」、附錄 A「輸入數據」、附錄 B「輔助計算」、附錄 C「對於遠場模型轉移係數」、附錄 D「混凝土裂縫的傳輸作用」、附錄 E「結果匯集」、附錄 F「敏感度分析」。本報告內有關遠場、近場、核種傳輸、劑量評估間的架構如圖 7 所示(TR14-09-Fig.9.1)，主要使用模式在遠場流場模擬使用 DarcyTools 軟體、生物圈地表水文使用 Mike-She 軟體、近場流場模擬使用 Comsol-Multiphysics 軟體(為 3 維有限元素法架構)、近場與遠場核種傳輸模擬使用 Ecolego 軟體、生物圈核種傳輸與劑量評估也使用 Ecolego 軟體。

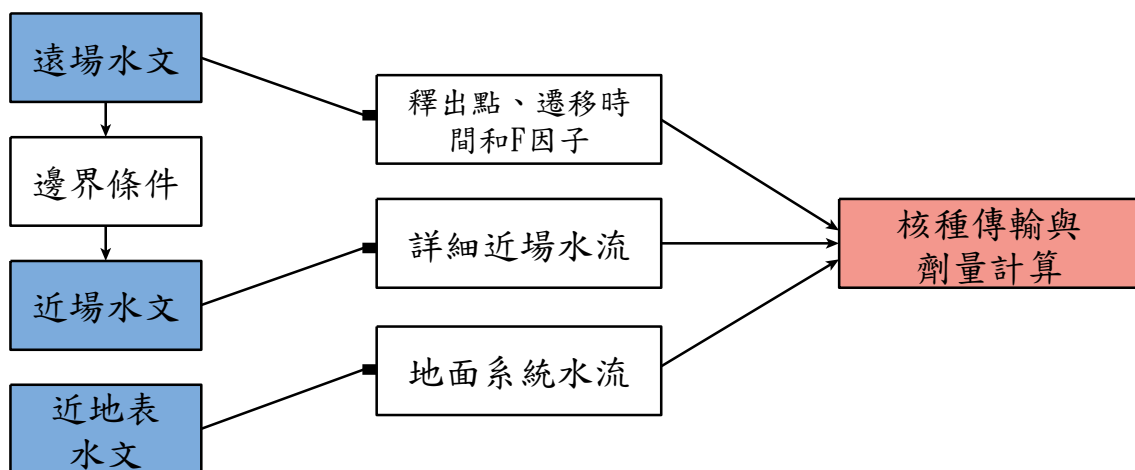


圖 7 SR-PSU 模式銜接概念架構示意圖

## 2.2. 生物圈安全評估與輻射劑量標準

SR-PSU 安全評估計畫係依據 IAEA(2007)定義曝露途徑，指輻射或放射性核種可以達到生物圈導致人類曝露。SSM (2008) (2008 年 SSMFS：37，一般建議) 定義更詳細的曝露途徑：放射性物質從場址遷移至人類居住地方，或由環境保護法規所涵蓋

的生物體存在的地方。這過程作用，包括在地質障壁的延散作用，流動傳輸與氣體傳輸與生態系統內的遷移作用，與人類或非人類生物於環境中的攝取作用。

SSM (2008) 提出生物圈條件和環境的保護指導方針：1.對人類和環境變化計算需與未來生物圈條件的假設氣候狀態一致。目前場址生物圈條件和周圍環境應進行評估，包括：農業用地，森林，濕地（沼澤），湖，海或其他相關的生態系統等。亦須考慮土地隆起（或沉陷）等可預見的變化。2.風險分析包括有限選擇的曝露途徑，但這些選擇，應根據的目前瑞典環境中所發生的人類使用和自然資源的多樣性的分析。需考慮不同的生態系統之間的曝露途徑的組合。

SR-PSU 安全評估計畫依據 ICRP60(1991)針對處置場封閉後之年風險限值不得超過  $10^{-6}$ ，大約等於自然存在之背景輻射的 1% (SSMFS 2008:37 法規限值)。有效劑量與風險的轉換因子為 0.073 /Sv，因此前述風險現值約等於  $1.4 \times 10^{-5}$  Sv/yr 的有限劑量。

### 3. 研析國際坑道處置技術報告關於生物圈劑量評估要項

#### 3.1. 生物圈評估內容和特定地點之特徵

##### 3.1.1. 評估目的及終端

SR-PSU 安全評估計畫係為確保人體健康和環境保護，免受來自於 Forsmark 地區已存在和計畫中之低放及中放處置場輻射和放射性有害物質之影響。SR-PSU 評估的目的是要確認符合監管要求，根據瑞典法規，對用過核子燃料或核廢料處置場址設計，針對處置場封閉後之年風險限值不得超過  $10^{-6}$  (SSMFS 2008:37)。然而，如果曝露群組只是少數個體，其年風險限值則降低為不得超過  $10^{-5}$ 。該定量監管要求是對人類的風險標準。其風險轉化因子為 0.073 /Sv (ICRP 1991)，所以年風險限值  $10^{-6}$  轉換成有效劑量為每年為  $14\mu\text{Sv}$  的有限劑量。

對環境的保護，包括生物多樣性保護和可持續利用生物資源 (SSMFS 2008:37)。然而，對於非人類生物群的保護，並沒有提出劑量率（或風險）限值。SKB 目前利用 ERICA 模式之方法，已提出篩選劑量率  $10\mu\text{Gyh}^{-1}$ ，篩選劑量率表示為無影響的閾值，低於該閾值對非人類生物影響之輻射劑量會很小，並再指出即使劑量率超過，並不意味著會發生顯著不利影響。(SKB, 2013c)

不同種類放射性核種釋出到人類和非人類生物圈之輻射劑量必須加以評估。但是，該輻射劑量取決於環境介質和生物棲息地及生活習慣。生物圈放射性核種輻射劑量模型計算之重點係採用最大曝露群組之代表個體劑量與參考生物體。

對於未來地面生態系統到核種可能釋出的區域、未來人類居住地區和非人類生物群之安全評估、不確定分析等，由於需要考慮很長的時間尺度，必須採取簡化問題及假設各種傳輸途徑。這些假設需高估放射性核種輻射劑量而避免低估劑量影響。因此評估的理念是依據法規限值要求，充分有力合理論證傳輸途徑及生物圈評估。

SKB 提出合理完整的自然生態系統傳輸模式及相關的模式參數，期能趨近於現場模型構造、核種主要傳輸途徑、地貌景觀發展。然而，劑量計算已經基於的分析潛在的曝露途徑，而不是試圖明確預測生活條件和該地區未來產生的生活習慣。因此，曝露人群都是被解釋為可信邊界的情況下（相對於確定的曝露途徑），SKB 並說明該安全評估終端，無法提供人類及非人類生物群於未來風險及劑量率之實際估算結果。(SKB,

2013c)。估算劑量結果不能用來預測個人、群體或生態系統的未來健康的影響。相反的，估算結果應看做量化現有和計畫處置場功能安全及防護性能的評估工具。

### 3.1.2. 場址特性

#### 3.1.2.1. Forsmark 場址

SR-PSU 計畫已完成 SFR1 及 SFR 擴建工程(SFR3)場址之放射性核種釋出後對於地表生態系統影響調查研究。對於目前及未來之詳細調查研究結果可參考生物圈綜合報告之第 3 章至第 5 章 (SKB, 2014a)，場址與未來預期發展之簡短說明介紹如下。

#### 3.1.2.2. 場址說明

Forsmark 場址是為處置低放和中放射性廢棄物之 SFR 處置場址所在地，位於瑞典北部地區烏普蘭之波羅的海（博滕海）海岸線附近。在 Forsmark 於 2004-2010 年之年平均氣溫大約為+ 7°C，植物生長期（平均氣溫高於+ 5°C）大約從五月持續到九月。

Forsmark 區域特徵為低海拔高度、小區域的地形，位於最後冰期之最高海岸線之下。大部分地表景觀是由薄薄風化層形成，係於冰期的最後階段覆蓋形成。Forsmark 區域之陸域平均風化層深度是 4m，在海濱地區為 8m。在 Forsmark 區域的海底北部可被發現冰積土和冰期粘土，具有高碳酸鈣(CaCO<sub>3</sub>)成分，其源自古生石灰石。在 Forsmark 之地表水和淺層地下水都是呈弱鹼性(pH 為 7-8)，並有高濃度溶解鹽類成分。Forsmark 已劃定為 25 個湖泊流域和分集水區。這些流域內，地下水位在 1m 之內，於於風化層以下形成地下水流動系統。Forsmark 沿岸海洋生態系統為苦鹹水的條件、淺水、水深偏淡、限制光線的穿透和上湧。這使得近岸區具有豐富的初級生產者，動物種類多樣性是比較低的，因為很少生物體適於微鹹水的條件。底棲生物，如巨大和微小藻類和維管植物，主宰初級生產。然而水平流運動之碳循環通量比生物通量更重要，尤其是在近海盆地。Forsmark 區域湖泊小而淺（平均深度通常小於 1m），它們的特徵是具有高濃度的鈣和低濃度的營養素，為貧營養硬水湖泊。湖底海藻茂密，初級生產者主導生物量，所有湖泊都被蘆葦帶所包圍。在 Forsmark 河川都很小，夏季很多流呈乾枯狀態。初級生產者於許多湖泊大量繁殖，對於一些較大的湖泊，其初級生產者之碳通量比周邊集水區大。

陸域植被受地形、風化層特徵和人類土地利用所影響。石灰質的影響是烏普蘭



(Uppland) 東北部典型特色，並導致了豐富的沼澤地。濕地覆蓋較大流域面積的 10-20%，在一些地方集水區高達 25-35%。濕地的主要組成部分是針葉林沼澤和開放沼澤的混合，林地是由針葉林為主。陸域生態系統中最大的碳通量是由初級生產者吸收攝取；在所有調查地區，植被被作為碳固定的匯點。林業在該地區擁有悠久的歷史且砍伐頻繁。耕地和牧場地點接近早期人們的定居處。牧場曾經非常興盛，但目前是屬於廢棄的農田一部分。目前唯一的農業活動位於 Storskäret，其活動主要是肉製品生產和植物生長期間，牛在戶外吃草。

冰期後的隆起作用與地勢平坦地區的結合，導致在該地區海岸線迅速位移。其結果是，當代土地生態系統是年輕的，海底新領土不斷湧現，形成新的湖泊和濕地（見下文景觀開發）。

### 3.1.2.3. 未來氣候

Forsmark 區過去和未來預計的氣候變化詳細見 SKB TR-13-05 安全評估之氣候和氣候有關議題之報告（SKB 2014b）。4 種未來氣候情況描述定義（見下文）。前兩個分別用於 SR-PSU 安全評估報告之主要情節分析。

- 全球暖化氣候情況下
- 早期的冰緣氣候的情況下
- 擴展全球暖化氣候的情況下
- 在 Weichselian 冰期循環氣候情況下

前三種情況被定義為跨越有關未來氣候的演變：低（早期冰緣氣候情況）、中（全球暖化氣候的情況下）和高（擴展全球暖化氣候的情況下）人類碳排放量的範圍內。然而，應該指出的是即使在低的人類碳排放，早期冰緣氣候情況不太可能發生，並且它已被列入，以確保這種可能性是不被忽視。該 Weichselian 冰期循環氣候的情況下，表示為重建末次冰期循環條件。

### 3.1.2.4. 地貌景觀發展

在 SR-PSU 之地貌景觀幾何形狀的連續變化是由風化層湖泊發展模式（RLDM）模擬得到。RLDM 分為海洋模塊和湖泊模塊。海洋模塊開始於當區域已經開始融冰作用，初始條件由風化層深度和地層模型中產生的。隨後，於後冰期沉積物積聚，或再

懸浮，這取決於當地環境隨時間的改變。湖泊模塊開始於海盆被隔離，由粘土-腐殖黑泥的累積和沼澤植被的擴大進入湖泊（和隨後累積）所描述。從海洋和湖泊模塊隨時間變化的輸出的組合，產生表面地質的三維空間結果。由這些預測結果及圖面顯示，例如水深、海岸線存在和湖泊流域的位置，可以生成表面風化層和植被類型存在的厚度（詳見 TR14-06 地貌景觀發展模式之第 5 章，SKB 2014a）。

目前和未來的水文和近地表水文也將受地貌景觀發展和氣候變化所影響。例如，海盆地之間的水交換將隨著土地上升和海峽變窄。對於給定的區域，湖泊充填淤積將影響蒸發量（減少）和逕流（增加）。由海洋變陸域過渡期間之海岸線變化將影響著岩石的上部水力梯度及地下水位。然而，氣候變化對地表水文影響更大，潮濕和溫暖的氣候，或是寒冷的氣候冰緣，預計將有水文通量變化會比其他地貌景觀規模進程有更大改變作用。上述結果是從水流模型得出的海洋盆地和陸域區域，分別由 MIKE 3 FM 和 MIKE SHE 模式模擬得到。西元 2000 年（本條件下）、西元 3000、西元 5000 和西元 11000 年之特定的區域的水流模型，使用氣象數據對於場址點、風化層深度和地層進行詳細描述。

地貌景觀發展和氣候變化影響地表生態系統結構功能（詳見 TR14-06 地貌景觀發展模式之第 4 章，SKB 2014a）。例如，在海、湖盆地的海底地形變化（驅使作用，例如海岸線位移和沈積物淤積）影響著生物量、初級生產者生產率、以及底棲和浮游初級生產者對這些生態系統屬性的相對貢獻。對於沼澤濕地生態系統，係由豐富的沼澤泥炭進行沼澤發展，持續由濕地植被有機物質泥炭造成累積，直到分解率與產生率的平衡作用。富鈣沉積物的影響很可能隨著時間而降低，並可能導致在沼澤和淡水域生態系統的 pH 值降低。此外，顯著溫暖濕潤的氣候可能會導致更高的生物量，和陸域生態系統生產力。相反的，在淡水和沼澤生態系統的生產力可能受寒冷的氣候而減少，於永凍土層種植存活之可能性亦非常有限。

### 3.1.3. 生物圈物體

從處置場址之地下水流出可藉由水文建模方式模擬。這些流出區域的地貌景觀可能是放射性核種從處置場址釋出後達到生物圈的部分，這些在放射性核種傳輸和劑量評估的地區目前被稱為生物圈物體。放射性核種隨著地下水流入與流出生物圈物體，

可以被持留住，但也可以與相鄰的生物圈物體經由地表和地下水傳送過程產生核種積聚和/或再傳輸，生物圈物體的配置圖如圖 8。有關識別 SR-PSU 使用生物圈物體和相關的集水區的劃定，詳見生物圈的綜合報告中描述 (SKB, 2014a)。

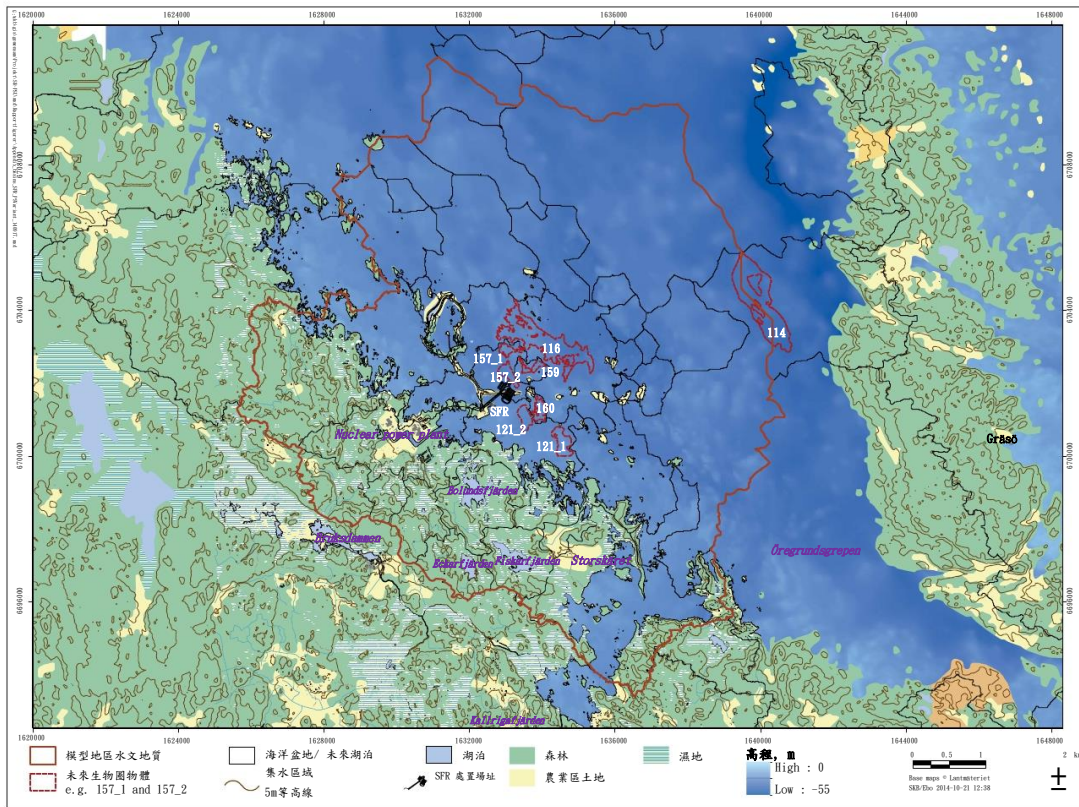


圖 8 Forsmark 處置場址生物圈物體配置示意圖

Forsmark 處置場址在海洋期間共確定七個生物圈物體，如圖 9 所示，生物圈物體（藍色或黃色）及其相關的原始海洋盆地（灰色），於所有確定的生物圈物體，在海洋盆地時期開始，最終於為陸域區域。在陸域形成期間，大部分物體是從複雜的湖泊-沼澤到沼澤階段。從海洋階段變成湖泊/沼澤階段的過渡時間大約持續 500 年。於湖泊到沼澤階段，由於沉積物和濕地植被增生，並取決於每個湖泊盆地物體的大小和深度。

生物圈物體之間傳輸的概念模型，如圖 10 列出在淹沒期間地下水從岩石圈到達生物圈之流出及放射性核種傳輸之概念模型，其中 (A) 為西元 3000 年 Forsmark 場址生物圈物體之地貌景觀和水深，於生物圈物體 157\_2（黑色橢圓形）可接收直接流出量，而在海洋期間，生物圈物體 157\_2 下游處可接收經由地表水流（黑色箭頭）的

放射性核種；(B) 為於風化層與地表水間、介於生物圈物體橫斷面之間和之內的放射性核種傳輸示意圖。對於圖 11 則列出在陸域期間地下水從岩石圈到達生物圈之流出及放射性核種傳輸之概念模型，其中 (A) 為西元 5000 年陸域區域地面到地下水位和水深之概念模型，生物圈物體 157\_2 (紅色橢圓形) 接收直接流出量，而在海洋期間，生物圈物體 157\_1 和 116 下游處可接收經由地表水流的放射性核種。(B) 為於風化層與地表水間、介於生物圈物體橫斷面之間和之內的放射性核種傳輸示意圖。

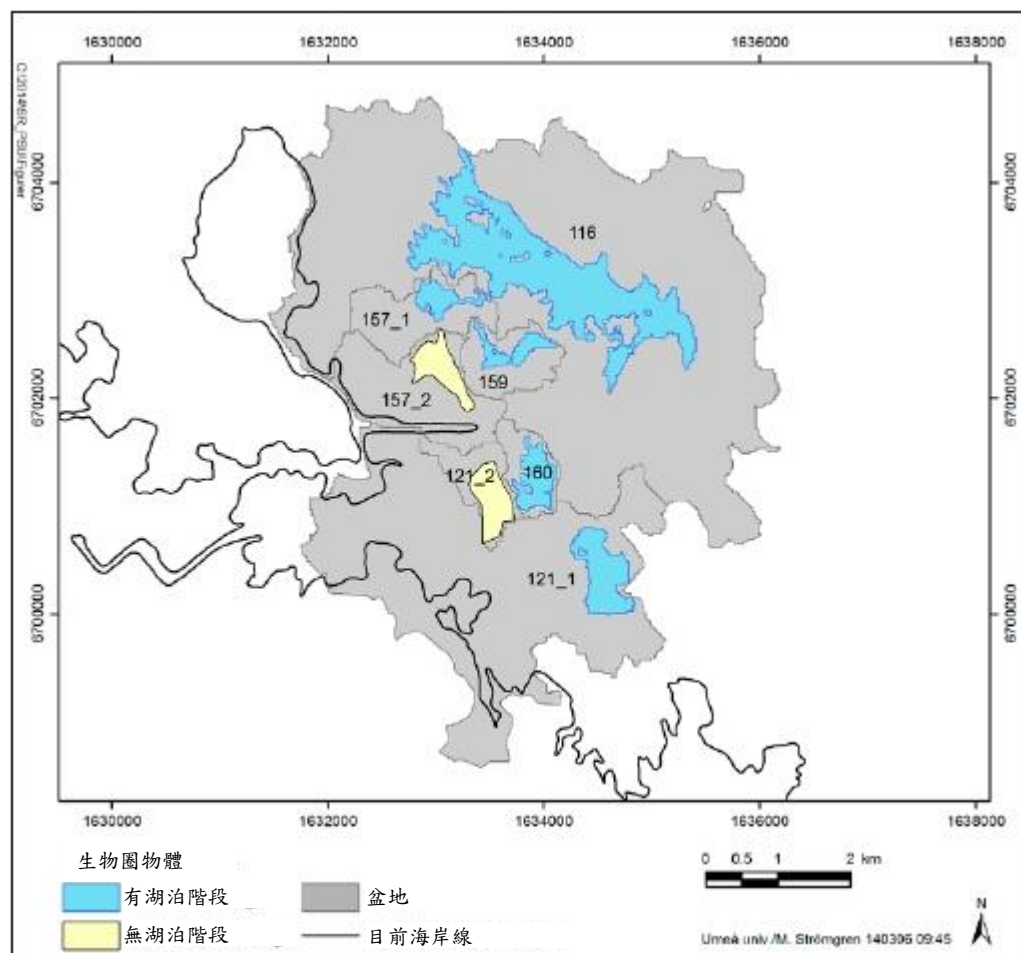


圖 9 生物圈物體 (藍色或黃色) 及其相關的原始海洋盆地 (灰色) 示意圖  
 說明：在海洋期間，盆地設置有限制的生物圈物體，初始的湖泊 (藍色) 或濕地 (黃色) 為土地形成期之生物圈物體概述。

這些模型可作為溫帶氣候條件傳輸模擬之基礎。此外，冰緣氣候條件，其中永凍土限制了地下水流和放射性核種由地質圈到生物圈之傳輸。目前總共八個生物圈物體包含在 SR-PSU 核種傳輸模式中。其有 1 種僅在冰緣氣候條件期間出現，於溫帶期間為 7 個生物圈物體。然而，溫帶條件下放射性核種經地下水流動可傳輸到生物圈物體 157\_2。



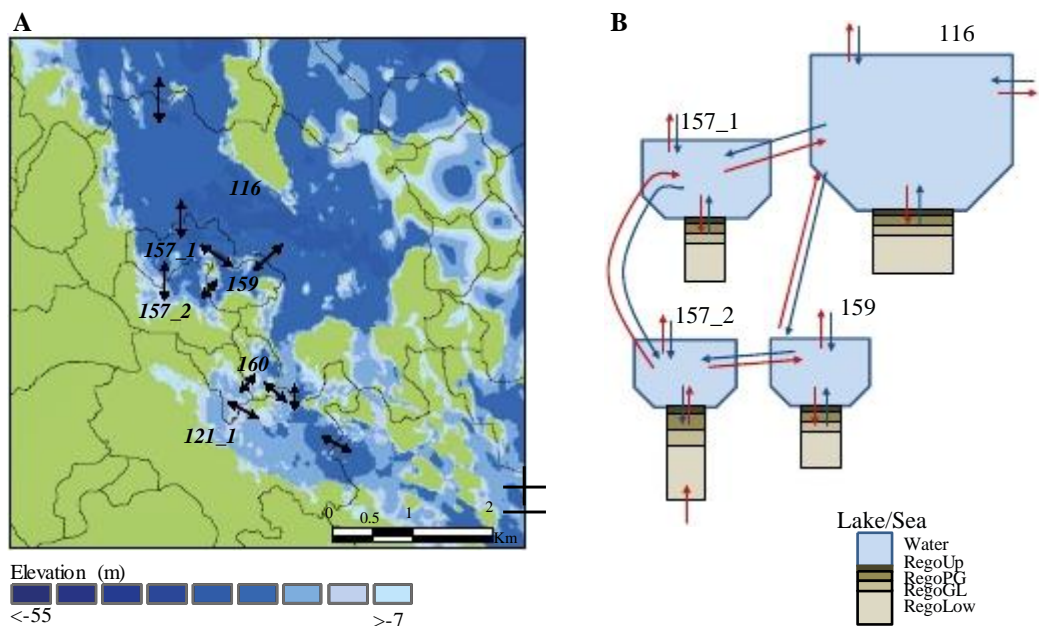


圖 10 在淹沒期間地下水從岩石圈到達生物圈之流出及放射性核種傳輸之概念模型說明：(A) Forsmark 地貌景觀於西元 3000 年之水深：生物圈物體 157\_2 (157\_2 黑色輪廓線) 接收直接流出量，而在海洋期間，生物圈物體 157\_2 下游處接收經由地表水流 (黑色箭頭) 的放射性核種。色階表示水體深度，白色代表土地。(B) 於風化層與地表水間、介於生物圈物體橫斷面之間和之內的放射性核種傳輸示意圖。紅色箭頭代表水流動攜帶放射性核種的運輸，而藍色箭頭表示只有水無放射性核種的初始傳輸，(注意：本圖並非所有的盆地和水流之示意)

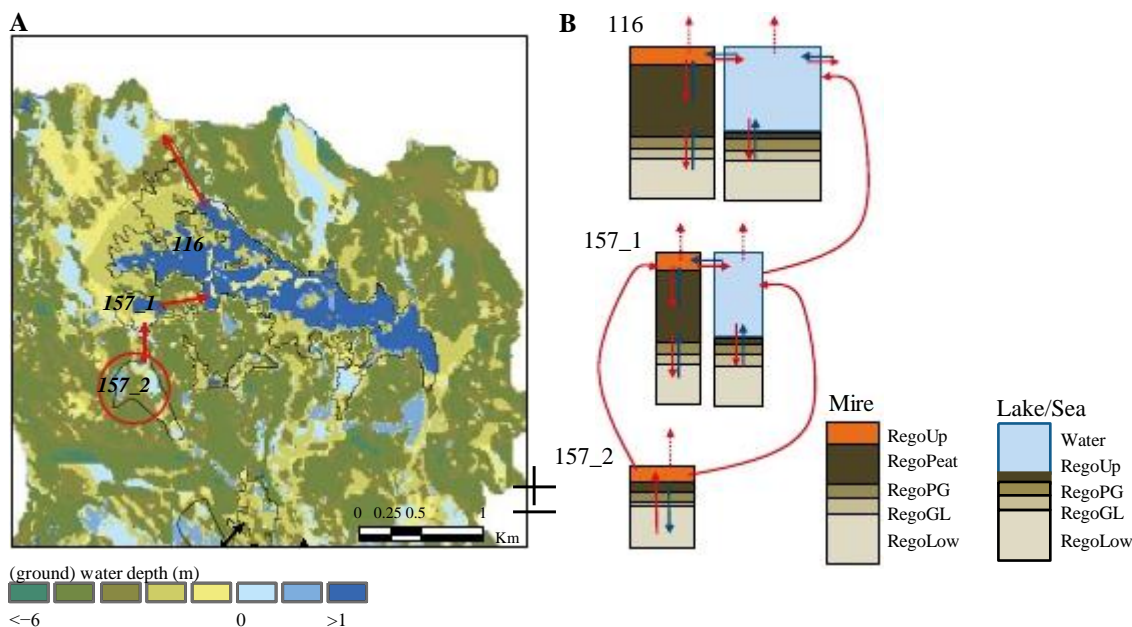


圖 11 在陸域期間地下水從岩石圈到達生物圈之流出及放射性核種傳輸之概念模型說明：(A) 於西元 5000 年之陸域區域地面到地下水位和水深：生物圈物體 157\_2 (紅色橢圓形) 接收直接流出量，而在海洋期間，生物圈物體 157\_1 和 116 下游處接收經由地表水流的放射性核種。(B) 於風化層與地表水間、介於生物圈物體橫斷面之間和之內的放射性核種傳輸示意圖。紅色箭頭代表水流動攜帶放射性核種的運輸，而藍色箭頭表示只有水無放射性核種的初始傳輸

### 3.1.4. 曝露途徑

曝露途徑的過程係指放射性核種從場址釋出至地質圈，經由地表生態系統到造成輻射曝露的生物群（人類和非人類生物）。SR-PSU 的曝露途徑的要素，包括：(1) 放射性核種源或釋出 (2) 核種在地表系統環境之遷移結果 (3) 曝露區域 (4) 輻射進入生物體的曝露途徑或方式，即無論是外部曝露於環境介質中的放射性核種或由生物體吸收放射性核種造成的內部曝露 (5) 潛在可能曝露的種群（詳細可見 R14-02 SR-PSU 生物圈特徵事件作用(FEPs)與模式發展建議之報告。

#### 3.1.4.1. 人類居住地區

SR-PSU 生物圈安全評估已完成人類的潛在曝露途徑分析 (SKB, 2014e)。並已針對四個不同的曝露人群進行評估分析：

1. 狩獵和採集 (HG) - 地貌景觀自然生態系統區域代表的生存空間和食物區域。主要曝露途徑是從覓食地貌景觀 (釣魚，打獵，收集漿果和蘑菇) 和地表飲用水 (河流或湖泊)。
2. 內部-外地農場 (IO) - 耕地作物種植和畜牧之自給農業 (內部)，及作為飼料和有機肥 (農家肥) 的濕地芻草 (外地)。主要曝露途徑是經由牧草、作物、與畜牧業肉類和奶製品之食用，和在生物圈物體的挖掘水井或地表水之飲用。
3. 排水和沼澤培育 (DM) - 濕地排水和農業運用 (包括作物和飼料生產) 之自給農業。主要曝露途徑是放射性核種長時間累積於之生長作物內，和在生物圈物體的水井或地表水之飲用。
4. 住家菜園區 (GP) - 住家自給生產小規模的園藝蔬菜和根莖作物。主要曝露途徑是施肥和作物生長的菜園，和挖掘水井或地表水之飲用。

#### 3.1.4.2. 非人類生物群

SR-PSU 生物圈安全評估也已完成非人類生物群曝露途徑分析 (SKB, 2014e)。已評估放射性核種隨水流入海、湖泊、濕地或環境介質之自然生態系統中的曝露位置。攝食、吸入和外在曝露是主要途徑。SR-PSU 生物圈安全評估已利用 ERICA 模式計算非人類生物群曝露。一些特定的非人類生物已列為曝露群 (例如淡水底棲微藻和歐洲水獺)。選定的生物類型為：

**遠洋海洋生物**生活於海洋內（涉水鳥，哺乳動物，中上層魚類，浮游植物，浮游動物，歐洲水獺和翻石鷸）。

**底棲海洋生物**生活於沉積物表層之上方（底棲魚類，甲殼類，海藻和維管植物），或在海洋沉積物表層（底棲軟體動物和多毛類蠕蟲）。

**遠洋湖沼生物**生活在水裡，湖泊和/或河流生態系統的生物（兩棲類，鳥類，哺乳動物，中上層魚類，浮游植物，浮游動物）。

**底棲湖沼生物**生活於沉積物表層之上方（底棲魚類，腹足，維管束植物和 Microphytobenthos），或在湖泊和/或河流生態系統沉積物表層（雙殼軟體動物，甲殼動物和昆蟲幼蟲）。

**陸域生物**生活在地表泥炭土之上方（兩棲類，鳥類，鳥蛋，飛蟲，腹足，草和草藥，地衣和苔蘚植物，哺乳動物[鹿]，爬行動物，灌木，樹，歐洲水獺，和翻石鷸），或在沼澤生態系統之泥炭表面（食腐質的無脊椎動物，哺乳動物[鼠]，土壤無脊椎動物[蠕蟲]）。

### 3.1.5. 生物圈之特徵、事件與作用

R14-02 報告已具體描述生物圈基本假設及核種傳輸建模主題，完成放射性核種傳輸至生物圈模型的之生物圈特徵、事件與作用(FEPs)與模式發展建議，提供生物圈評估之途徑路線圖、曝露途徑分析和傳輸至受影響最大人類群體之劑量分析。

生物圈的特徵、事件與作用，係探討核種在環境中遷移及累積，進而評估環境中人類的健康及安全。受到核種污染的地下水流入生態系統後，在某些區塊 (compartments) 會造成核種累積。若建立系統方法，瞭解核種遷移、累積及進入或利用生態系統的生物及對人類造成曝露的各種作用有其必要。

生物圈評估需建構作用矩陣(Interaction Matrix, IM)，確認可能影響核種累積及曝露的各種成分及途徑。在生物圈作用矩陣中，包括：10 物理組件、6 個變量和 50 個作用歷程，將於後續章節報告再針對 R14-02 報告有關的生物圈安全評估之特徵、事件與作用的作用矩陣，與對人類和非人類生物群的曝露計算進一步說明。

### 3.2. 生物圈核種傳輸模型

地面生態系統是由生物圈放射性核種模型來表示。包括放射性核種傳輸子模型的

(天然) 地面生態系統，和計算對人類和非人類生物之核種輻射劑量模型。SR-PSU 生物圈的放射性核種的傳輸模型是以 SR-Site 評估模型為基礎使用相對應的生物圈模型，包括：1.生物圈物體隨著海岸線位移和生態系統演替而連續性變化發展，2.放射性核種隨著時間變化於地質圈系統藉由地下水流動而釋出，且核種分佈在非均質地貌景觀，3.核種之傳輸、累積和放射性核種的衰變具有不同的生物地球化學性質，4.放射性核種與水在不同部分地貌景觀之間傳輸係由於陸域環境形成的結果，5.在地貌景觀區域之未來居民曝露和劑量計算。

在 SR-PSU 的生物圈核種傳輸模擬同樣採用區塊模式，主要考慮 2 種生態系統，水域(如海洋、湖泊與河川)與陸域(如泥沼與農業生態系)接收與累積核種之外釋，其概念架構如圖 12 所示，圖中方塊代表不同物理區塊之核種存量，線條箭號方向代表核種傳輸方向，核種在區塊間之傳輸透過(1)氣體(淺藍色)、(2)水體(深藍色)、(3)固體物質(黑色)、(4)有機與無機型態核種之轉換(綠色)、(5)孔隙水擴散(橘色)、(6)濕地植物生長累積(灰色)，大氣為核種的源/匯。圖中各區塊名稱之說明如表 2 所示。

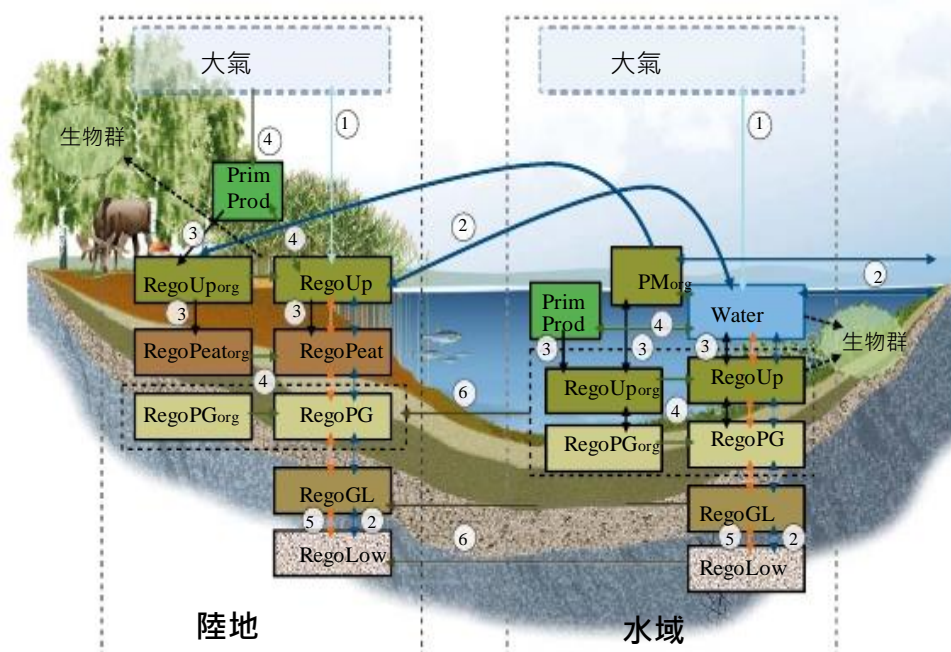


圖 12 水域與陸域生態系核種傳輸區塊示意圖

農業生態系核種傳輸簡化架構如圖 13 所示，核種傳輸透過氣體(淺藍色)、水體(深藍色)、固體物質(黑色)、礦化作用(綠色)，核種來源有(1)灌溉、(2)施肥、(3)湖泊/



泥沼的排水與開墾、(4)取用地下水，作物的活度濃度計算是假設平衡於土壤內與植被層大氣之核種，灌溉水內核種由植被截留，且不同土地利用會有不同之核種來源組成。而圖 12 與圖 13 中各區塊名稱之說明如表 2 所示。

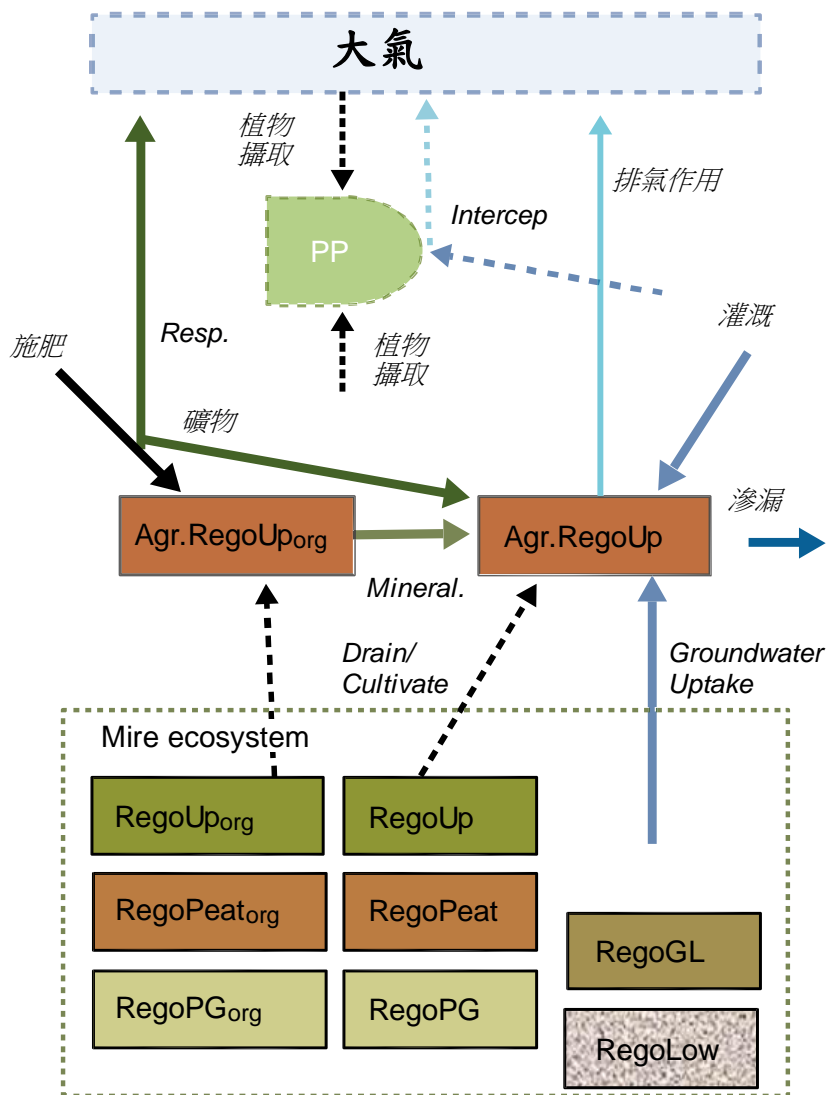


圖 13 農業生態系核種傳輸區塊示意圖

表 2 生物圈放射性核種傳輸模式之區塊模型名稱與說明

區塊模型	說明
<b>水域 Aquatic</b>	
Water	於開放水域(海洋、湖泊、河川)之放射性核種，包含核種溶解於水中與吸附在有機物質
PM <sub>org</sub> <sup>1</sup>	於水中懸浮液內被有機顆粒物質吸附之放射性核種
Prim Prod	貯留在水域之初級生產者內之放射性核種，包括在海洋的核種、海底微觀和宏觀的初級生產者
RegoUp	在水體沉積物之上部好氧生物活性層之放射性核種，包括孔隙水內與吸附在沉積物顆粒的放射性核種
RegoUp <sub>org</sub>	在水體沉積物的上部好氧生物活性層被有機顆粒物吸附之放射性核種。
RegoPG	生物活性層以下於後冰期水體沉積物(粘土腐殖土)之放射性核種，包括孔隙水內與吸附在沉積物顆粒的放射性核種
RegoPG <sub>org</sub>	生物活性層以下於後冰期水體沉積物(粘土腐殖土)內被有機顆粒物吸附之放射性核種。
RegoGL	在冰期粘土內之放射性核種(通常由後冰期沉積物所覆蓋)，包括孔隙水內與吸附在沉積物顆粒的放射性核種
RegoLow	在冰積土內之放射性核種(通常由冰期粘土所覆蓋)，包括孔隙水內與吸附在沉積物顆粒的放射性核種
<b>陸域(沼澤) Terrestrial (mire)</b>	
PrimProd	貯留在沼澤植被生物量的放射性核種，包括地面上方和下方之苔蘚植物，維管束植物，矮灌木和樹木的生物量
RegoUp	在濕地泥炭(acrotelm(活性層)泥炭)上部好氧生物活性層之放射性核種，包括孔隙水內與吸附在泥炭的放射性核種
RegoUp <sub>org</sub>	於泥炭(acrotelm(活性層)泥炭)上部好氧生物活性層內被有機顆粒物質吸附之放射性核種
RegoPeat	在深部、永久厭氧、濕地泥炭(acrotelm(活性層)泥炭)之放射性核種，包括孔隙水內與吸附在泥炭的放射性核種。
RegoPeat <sub>org</sub>	在深部、永久厭氧濕地泥炭(acrotelm(活性層)泥炭)內被有機顆粒物質吸附之放射性核種
RegoPG	於後冰期被濕地泥炭覆蓋沉積物(粘土腐殖土)內之放射性核種，包括孔隙水內與吸附在沉積物顆粒的放射性核種
RegoPG <sub>org</sub>	於後冰期被濕地泥炭覆蓋沉積物(粘土腐殖土)內被有機顆粒物吸附之放射性核種。
RegoGL	被濕地泥炭埋在下面的冰期粘土內之放射性核種，包括孔隙水內與吸附在沉積物顆粒的放射性核種
RegoLow	在冰積土內之放射性核種，被濕地泥炭埋在下面，通常由冰期粘土所覆蓋。包括孔隙水內與吸附在沉積物顆粒的放射性核種
<b>陸域(農業) Terrestrial (agriculture)</b>	
RegoUp	在農業土壤(或頂部土)上層之放射性核種，該土壤受到犁地和生物擾動的影響，本層係農作物主要攝取養分和微量元素之土壤。這一層是排水良好並具有高土壤生物活性。包括孔隙水內與吸附在沉積物顆粒的放射性核種
RegoUp <sub>org</sub>	在農業土壤上層被有機顆粒物吸附之放射性核種

<sup>1</sup> 區塊也可表示為 Water<sub>org</sub> (SKB, 2013c).

### 3.2.1. 影響核種傳輸之生物圈作用因子

對於在水域、沼澤和農業子模型區塊之間動態通量，可由下列 21 個作用過程進行：1. 生物擾動、2. 植物吸收、3. 落葉呼吸/釋放、4. 落葉產生、5. 風化層礦化、6. 植被內生、7. 平流水平傳輸、8. 平流垂直傳輸、9. 滲漏、10. 水分吸收、11. 擴散(垂直)、12. 固-液相分離、13. 沉降、14. 再懸浮、15. 埋藏、16. 脫氣、17. 氣體吸收、18. 排水/耕種、19. 施肥、20. 灌溉、21. 核種衰變/增加，依據該作用過程進行列如

表 3，其說明自然生態系統之間水域、沼澤和農業與生物圈物體之內的放射性核

種的轉移概念說明，與放射性核種通量傳輸模式及作用過程整體概念表。其中，依驅動力分類質量通量：固體通量 (MS)，水通量 (MW) 或氣體通量 (MG)。有機物由於光合作用之產生或釋放 (PP) 和礦化 (Min)。Y 表示在水域、沼澤和農業子模型之動態通量 (區塊之間)。對於「\*」符號係假設該作用過程為穩態。

表 3 放射性核種通量傳輸模式及作用過程之整體概念表

作用	型式	核種通量			SKB 生物圈 FEP (作用)
		水域	沼澤	農業	
生物作用					
生物擾動	MS	Y		Y	1) 生物擾動
植物(根部)吸收	PP	Y	Y	*	15) 吸收 13) 初級生產者
落葉呼吸/釋放	Min	Y	Y		2) 消耗, 3) 死亡 4) 分解
落葉產生	PP	Y	Y	Y1	3) 死亡 5) 排洩, 12) 粒徑事出與捕捉
風化層礦化	Min	Y	Y	Y	4) 分解
植被內生 BTW	MS	Y	Y		13) 初級生產者 33) 覆蓋
水作用					
平流水平傳輸 BTW	MW	Y	Y		32) 平流
平流垂直傳輸	MW	Y	Y	Y2	32) 平流
擴散(垂直)		Y	Y		32) 平流
水分吸收	MW			Y	36) 輸入
固 - 液相分離		*	*	*	26) 反應 27) 吸附/脫附
沉降作用					
沉降	MS	Y			34) 沉降
再懸浮	MS	Y			39) 再懸浮
埋藏	MS	Y	Y		34) 沉降
氣體傳輸					
脫氣	MG	Y	Y	Y	24) 相轉換, 32) 平流
氣體吸收	MG	Y	Y		24) 相轉換
人類行為					
排水/耕種 BTW,INIT				Y	
施肥 BTW	MS			Y	16) 人為釋出 38) 重新配置
灌溉	MW			Y	16) 人為釋出
放射性作用					
核種衰變/增加		Y	Y	Y	41) 衰變

備註說明：

BTW = 介於生態和生物圈物體間之通量；

INIT = 影響初始量(以及通量)；

1 = 於內部-外地農業 (IO) 在沼澤內供作為源項產生之通量；

2 = 作用亦稱為滲漏

### 3.3. 核種於水中之平流與擴散傳輸

最終處置場的放射性核種釋出經由地下水傳輸到地表生態系統，水流帶動放射性

核種遷移於生態系統之間和生態系統之內是主要的傳輸作用。分類核種傳輸到生物圈的四個主要途徑以進行水文和海洋模擬：(1) 基岩水文地質和地表水文模擬組合，以確定地下水流從 SFR 處置場之流出量及流到生物圈物體概略流場(2) 藉由水文模擬得到生物圈物體內部區塊模型之縱向和橫向水流通量(3) 海洋模式模擬以確定浸沒期間淡水海洋盆地之間的水交換量(4) 藉由地表水文模擬確定生物圈物體間之水文連接網絡在土地形成期間。水文和海洋建模的方法和結果詳見 SKB 之 R13-19 (Werner, 2014)，參數詳細說明可見 SKB 之 R13-18(SKB, 2013a) 介紹，流出區域及生物圈物體之說明可見 SKB 之 TR14-06 第 6 章(SKB, 2014a) 描述。

以下將介紹水流傳輸及擴散作用之數學模型，及放射性核種於水域和沼澤生態系統生物圈之數學模型。

### 3.3.1. 生態系統內核種平流傳輸

生物圈物體水平衡概念模型如圖 14 所示，描述在於湖-沼澤階段之地面水的流動，其中細的藍色箭頭表示淨水流量進入並穿過沼澤組件（綠色區域）。厚的藍色箭頭表示溪水進入和退出湖（深藍色區域）。 $Q_{in}$ 、 $Q_{out}$  和  $Q_{catch}$  對應於圖 15 右圖  $WF_{stream}$ ， $WF_{downstream}$  和  $WF_{catch}$ 。 $Q_{mire}$  為  $WF_{up,wat,ter}$  和  $WF_{wat,up,ter}$  之差值。

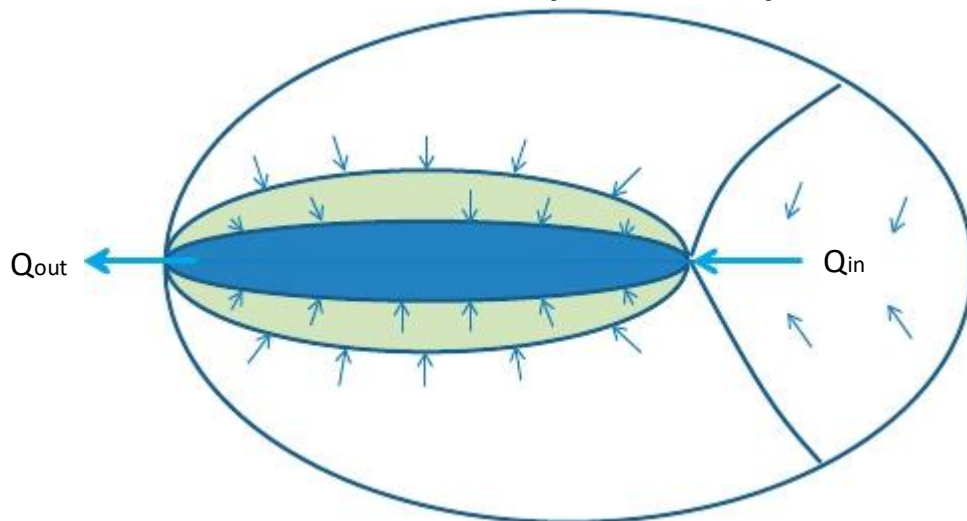


圖 14 描述在生物圈物體於湖-沼澤階段之地面水的流動之水平衡概念模型圖  
說明：細的藍色箭頭表示淨水流量進入並穿過沼澤組件（綠色區域）。厚的藍色箭頭表示溪水進入和退出湖（深藍色區域）。 $Q_{in}$ 、 $Q_{out}$  和  $Q_{catch}$  對應於圖 15 右圖  $WF_{stream}$ ， $WF_{downstream}$  和  $WF_{catch}$ 。 $Q_{mire}$  為  $WF_{up,wat,ter}$  和  $WF_{wat,up,ter}$  之差值

如圖 15 所示，在每個水域和沼澤生態系統之放射性核種傳輸模式共有 8 個垂直通量。對於在任何時間點，從區塊  $i$  到  $j$  放射性核種的通量 ( $Adv_{i,j}$ )，為區塊  $i$  到  $j$  水

流通量乘以區塊  $i$  內的溶解性核種活度：

$$Adv_{i,j} = WF_{i,j} AC_i^D \quad (1)$$

其中：

$WF_{i,j}$  : 在區塊  $i$  和  $j$  之間的水流通量 [ $m^3 y^{-1}$ ],

$AC_i^D$  : 在區塊  $i$  內的溶解性核種活度 [ $Bq m^{-3}$ ],

$i, j$  : 相鄰的風化層區塊(見圖 15)

在區塊  $i$  和  $j$  之間的垂直平流通量可以下式決定

$$WF_{i,j} = q_{i,j,k} area_{obj,k} \quad (2)$$

其中：

$q_{i,j,k}$  : 從區塊  $i$  到  $j$  之單位面積比水流通量 [ $m^3 m^{-2} y^{-1}$ ]

$area_{obj,k}$  : 生物圈物體之水域沈積物或陸域部分的面積 [ $m^2$ ]

$k$  : 生態系統 (海洋、湖泊、陸域、沼澤)

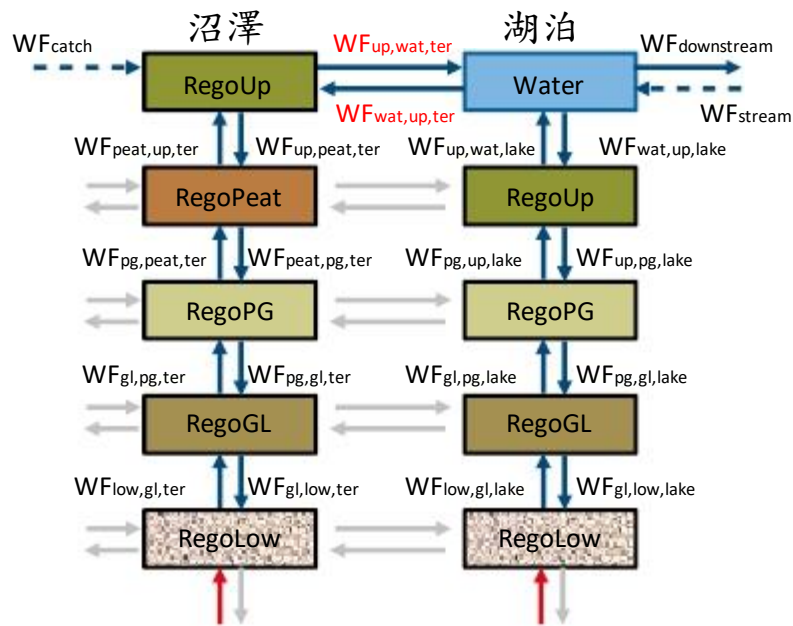


圖 15 計算放射性核種進出湖泊-沼澤階段生物圈物體傳輸通量示意圖

說明：實藍色箭頭為水流通量，紅色箭頭表示從基岩之放射性核種通量 (在主要生物圈物體之源項)。藍色虛線箭頭表示水進入其他生物圈物體。灰色箭頭代表水流通量未發生在放射性核種遷移模式內。

針對湖泊區域之水流通量如下式

$$WF_{i,j,lake} = q_{i,j,lake} area_{obj,aqu}(t) \quad (3)$$

其中：

$q_{i,j,lake}$  : 從區塊  $i$  到  $j$  之單位面積比水流通量 [ $m^3m^{-2}y^{-1}$ ]

$area_{obj,aqu}$  : 湖泊/河川生態系統的表面積 [ $m^2$ ]，將隨時間減少

### 3.3.2. 於生態系統與生物圈物體間之平流傳輸

#### 3.3.2.1. 介於海洋盆地之傳輸

放射性核種從海洋盆地之傳輸可用下式表示：

$$Adv_{water,out} = \sum_i WF_{out,i} AC_{water} \quad , i=\text{相鄰海洋盆地} \quad (4)$$

$$Adv_{water,org,out} = \sum_i WF_{out,i} AC_{water,org} \quad , i=\text{相鄰海洋盆地} \quad (5)$$

其中：

$WF_{out,i}$  : 從盆地到相鄰盆地  $i$  之平流水流通量 [ $m^3y^{-1}$ ]

$AC_{water}$  : 在水中的溶解性和被吸附的核種活度 [ $Bq m^{-3}$ ]

$AC_{water,org}$  : 在有機物質內核種活度 [ $Bq m^{-3}$ ]

#### 3.3.2.2. 在土地期間物體之間傳輸

在土地期間生物圈物體之間傳輸可用下式表示：

$$Adv_{downstream} = WF_{downstream} AC_{water} \quad (6)$$

$$Adv_{downstream,org} = WF_{downstream} AC_{water,org} \quad (7)$$

其中：

$Adv_{downstream}$  : 從目前到下游生物圈物體之平流水流通量 [ $m^3y^{-1}$ ]

並定義為：

$$Adv_{downstream} = WF_{downstream} AC_{UP,ter}^D \quad (8)$$

其中：

$AC_{UP,ter}^D$  : 在地表泥炭土之孔隙水內核種活度 [ $Bq m^{-3}$ ]

從生物圈物體 157\_2 至 157\_1，放射性核種的總通量可以分為兩部分，一為流至沼澤，另一為流至下游生物圈物體之湖泊：

$$Adv_{downstream,ter} = WF_{downstream} AC_{regoUP,ter}^D f_{ter} \quad (9)$$

$$Adv_{downstream,ter} = WF_{downstream} AC_{regoUP,ter}^D (1 - f_{ter}) \quad (10)$$

其中  $f_{ter}$  是生物圈物體之部分區域，即下游物體(157\_1)之沼澤區域

### 3.3.2.3. 在生物圈物體內於湖泊與沼澤生態系統之間傳輸

$$Adv_{UP,ter,water} = WF_{UP,ter,water} AC_{UP,ter}^D \quad (11)$$

其中：

$WF_{UP,ter,water}$  : 從地表泥炭土到開放水體之平流水流通量 [ $m^3 y^{-1}$ ]

$Adv_{UP,ter,water}$  : 在地表泥炭土之孔隙水內核種活度 [ $Bq m^{-3}$ ]

$$Adv_{water,UP,ter} = WF_{water,UP,ter} AC_{water} \quad (12)$$

$$Adv_{water,UP,ter,org} = WF_{water,UP,ter} AC_{water,org} \quad (13)$$

其中：

$AC_{water}$  : 在水中的核種活度 [ $Bq m^{-3}$ ]

$AC_{water,org}$  : 在水中被有機物吸附的核種活度 [ $Bq m^{-3}$ ]

$WF_{water,UP,ter}$  : 於水體和地表泥炭土間之平流水流通量 [ $m^3 y^{-1}$ ]

介於沼澤和河流之間的水平水流通量 ( $WF_{i,k}$ , [ $m^3 y^{-1}$ ]) 是由比面積水流通量乘以生物圈物體面積而得，如下：

$$WF_{i,k} = q_{i,k} area_{obj} \quad (14)$$

其中：

$q_{i,k}$  : 介於沼澤和河流之間比面積水流通量 [ $m^3 m^{-2} y^{-1}$ ],

$area_{obj}$  : 生物圈物體面積 [ $m^2$ ]

$i$  : 通量方向 (從  $RegoUp_{ter}$  到水體, 或是洪水的相反方向)

$k$  : 時間點 (在隔絕區或在沼澤區域)

### 3.3.3. 生態系統內核種擴散傳輸

生態系統內核種擴散傳輸可由下次表示：

$$J = -D_w \frac{\partial C_w}{\partial z} \quad (15)$$

其中：

- $J$  : 核種擴散通量[Bq m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>]  
 $D_w$  : 擴散係數[m<sup>2</sup> y<sup>-1</sup>]  
 $C_w$  : 核種於水中的活度[Bq m<sup>-3</sup>]  
 $z$  : 空間中的位置[m]

將方程式修改為：

$$J = -D_e \frac{\partial C_w}{\partial z} = -D_p \theta \frac{\partial C_w}{\partial z} = -D_w \frac{\delta}{\tau} \theta \frac{\partial C_w}{\partial z} \quad (16)$$

其中：

- $D_e$  : 有效擴散係數[m<sup>2</sup> y<sup>-1</sup>]  
 $D_p$  : 孔隙擴散度[m<sup>2</sup> y<sup>-1</sup>]  
 $\theta$  : 孔隙率[m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>]  
 $\delta$  : 阻塞率[無因次]  
 $\tau$  : 彎曲度[無因次]

可近似表示為：

$$J = -D_e \frac{C_{w,z1} - C_{w,z2}}{\Delta z} \quad (17)$$

其中：

- $C_{w,i}$  : 在區塊  $i$  的孔隙水濃度  
 $\Delta z$  : 兩個區塊的中點距離

在孔隙水沈積物兩個區塊之間的擴散度可以下式表示：

$$Diff_{i \rightarrow j} = \frac{AC_i^D area_{cross,i,j}}{\frac{z_i/2}{D_{e,i}} + \frac{z_j/2}{D_{e,j}}}, \quad (18)$$

(19)



$$Diff_{j \rightarrow i} = \frac{AC_j^D \text{area}_{cross,i,j}}{\frac{z_i/2}{D_{e,i}} + \frac{z_j/2}{D_{e,j}}}$$

其中：

- $AC_i^D$  : 在孔隙水沈積物  $i$  核種活度 [Bq m<sup>-3</sup>]  
 $\text{area}_{cross,i,j}$  : 垂直於擴散方向之沈積物截面積 [m<sup>2</sup>]  
 $D_{e,i}$  : 在沈積物  $i$  的有效擴散係數 [m<sup>2</sup> y<sup>-1</sup>]  
 $z_i$  : 在沈積物  $i$  的深度

對於上層水域的風化層和地表水之間的擴散可以下式表示：

$$Diff_{water \rightarrow UP} = \frac{AC_{water}^D \text{area}_{obj,aqu}}{\frac{z_{regoUP,aqu}/2}{D_{e,regoUP,aqu}}}, \quad Diff_{water \rightarrow UP} = \frac{AC_{regoUP,aqu}^D \text{area}_{obj,aqu}}{\frac{z_{regoUP,aqu}/2}{D_{eff,regoUP,aqu}}} \quad (20)$$

其中：

- $AC_{water}^D$  : 溶解在水域水柱中的核種活度 [Bq m<sup>-3</sup>]  
 $\text{area}_{obj,aqu}$  : 相對於水域水柱之沈積物面積

### 3.4. 水域生態

#### 3.4.1. 放射性核種量的數學表示式

##### 3.4.1.1. 地面水 [Water and PMorg]

$$AC_{water} = \frac{Water}{vol_{water}}, \quad AC_{water,org}^{PM} = \frac{PM_{org}}{vol_{water}} \quad (21)$$

其中：

- $Water$  : 地面水體所含核種的活度 (包括溶解和吸附) [Bq]  
 $PM_{org}$  : 懸浮有機物質內所含核種的活度 [Bq]  
 $vol_{water}$  : 海洋/湖泊或河川生物圈物體之水體體積 [m<sup>3</sup>]

並可定義為：

$$vol_{water} = \text{area}_{obj,aqu} Z_{water} \quad (22)$$

其中：

- $\text{area}_{obj,aqu}$  : 於生物圈物體中之開放水域 (海洋/湖泊或河川) 表面積 [m<sup>2</sup>]

$Z_{water}$  : 水體平均深度[m]

懸浮有機物質內所含核種的活度之關係可以下式表示：

$$AC_{PM,org} = \frac{PM_{org}}{M_{water}^{PM}} \quad (23)$$

其中：

$$M_{water}^{PM} = vol_{water} conc_{PM} \quad (24)$$

其中：

$conc_{PM}$  : 懸浮物質濃度 [ $kg_{DW} m^{-3}$ ] in water.

水體中之核種濃度可以下式表示：

$$AC_{water}^D = \frac{Water f_{water}^D}{vol_{water}} \quad (25)$$

其中：

$f_{water}^D$  : 溶質相內核種佔的比率 [ $Bq Bq^{-1}$ ]

可由下式決定

$$f_{water}^D = \frac{1}{1 + K_{d,PM} conc_{PM}} \quad (26)$$

其中：

$K_{d,PM}$  : 水中核種吸附的分配係數 [ $m^3 kg_{DW}^{-1}$ ].

於水體水柱中吸附在特定物質內之核種活度濃度：

$$AC_{water}^{PM} = \frac{Water^{PM}}{M_{water}^{PM}} \quad (27)$$

其中：

$Water^{PM}$  : 水體水柱中吸附在特定物質內之核種活性

$Water^{PM} = Water(1 - f_{water}^D)$  : 核種吸附於有機物質與溶解核種所佔比率之關係

### 3.4.1.2. 水域初級生產者[PPplank,micro,macro]

核種於水域初級生產者可由下式表示：

$$AC_{biom,i} = \frac{PP_i}{biom_{pp,i} area_{obj,aqu}}, \quad i = \{plank, micro, macro\} \quad (28)$$

其中：

$PP_i$  : 群落  $i$  之總活度 [Bq],

- $biom_{pp,i}$  : 群落  $i$  之生物量比表面積 [kgC m<sup>-2</sup>]  
 $area_{obj,aqu}$  : 於生物圈物體中之開放水域 (海洋/湖泊或河川) 表面積[m<sup>2</sup>]  
 $i$  :  $i$  指數為浮游生物，微觀和宏觀底棲生物群落

### 3.4.1.3. 上部沈積物[RegoUp, RegoUporg]

核種於上部沈積物可由下式表示：

$$AC_{rego\_i,aqu} = \frac{Rego\_i,aqu}{vol_{rego\_i,aqu} dens_{rego\_i,aqu}} \quad (29)$$

其中：

- $Rego\_i$  : 水域風化層  $i$  無積物形式之核種活度 [Bq]  
 $dens_{rego\_i,aqu}$  : 水域風化層  $i$  總體密度 [kgDW m<sup>-3</sup>]  
 $vol_{rego\_i,aqu}$  : 水域風化層  $i$  體積[m<sup>3</sup>]

水中風化層  $i$  體積可由下式表示：

$$vol_{rego\_i,aqu} = area_{obj,sed,aqu} Z_{rego\_i,aqu} \quad (30)$$

其中：

- $area_{obj,sed,aqu}$  : 海洋盆地或湖泊之水域沈積物面積[m<sup>2</sup>]  
 $Z_{rego\_i,aqu}$  : 水域風化層  $i$  深度[m]  
 $i$  : 水域風化層。  $i=Up$  代表水域沈積物上生物活性層 (RegoUp).

$$area_{obj,sed,aqu} = \begin{cases} area_{obj}, & \text{in submerged periods} \\ area_{obj} - area_{obj,ter}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (31)$$

其中：

- $area_{obj}$  : 生物圈物體初始表面積[m<sup>2</sup>]  
 $area_{obj,ter}$  : 生物圈物體被沼澤植被覆蓋後之表面積[m<sup>2</sup>]

核種於固相有機物內之濃度，以下式表示

$$AC_{rego\_i,org,aqu} = \frac{Rego\_i_{org,aqu}}{vol_{rego\_i,aqu} dens_{rego\_i,aqu}} \quad (32)$$

其中：

- $Rego\_i_{org,aqu}$  : 水域風化層  $i$  固相有機物內之核種活度 [Bq]

在風化層區塊孔隙水內固相有機物內之核種濃度，以下式表示

$$AC_{rego\_i,aqu}^D = \frac{Rego\_i_{aqu} f_{rego\_i,aqu}^D}{vol_{rego\_i,aqu} poro_{rego\_i,aqu}} \quad (33)$$

其中：

$poro_{rego\_i,aqu}$  : 水域風化層  $i$  孔隙率 [ $m^3/m^3$ ]

$f_{rego\_i,aqu}^D$  : 核種於水域風化層  $i$  內溶質相狀態的比率 [ $Bq Bq^{-1}$ ]

該比率可以下式表示之：

$$f_{rego\_i,aqu}^D = \frac{1}{1 + \frac{K_{d,rego\_i,aqu} dens_{rego\_i,aqu}}{poro_{rego\_i,aqu}}} \quad (34)$$

其中：

$K_{d,rego\_i,aqu}$  : 水域風化層  $i$  核種吸附的分配係數 [ $m^3 kg_{DW}^{-1}$ ].

#### 3.4.1.4. 後冰期水體沉積物（粘土腐殖土）[RegoPG, RegoPGorg]

後冰期水體沉積物（粘土腐殖土）內核種無機物形式之活度 ( $AC_{regoPG,aqu}$  [ $Bq kg_{DW}^{-1}$ ])、固相有機物核種活動 ( $AC_{regoPG,aqu,org}$  [ $Bq kg_{DW}^{-1}$ ])、( $AC_{regoPG,aqu}^D$  [ $Bq m^{-3}$ ])、核種於  $i$  內溶質相狀態的比率 ( $f_{regoPG,aqu}^D$  [ $Bq Bq^{-1}$ ]) 與方程式(27)至 (34) 類似，其中  $i=regoPG$ 。

#### 3.4.1.5. 冰期粘土[RegoGL]

冰期粘土內核種無機物形式之活度 ( $AC_{regoPG,aqu}$  [ $Bq kg_{DW}^{-1}$ ])、固相有機物核種活動 ( $AC_{regoPG,aqu,org}$  [ $Bq kg_{DW}^{-1}$ ])、( $AC_{regoPG,aqu}^D$  [ $Bq m^{-3}$ ])、核種於  $i$  內溶質相狀態的比率 ( $f_{regoPG,aqu}^D$  [ $Bq Bq^{-1}$ ]) 與方程式(27)至 (34) 類似，其中  $i=regoGL$ 。

#### 3.4.1.6. 冰積土[RegoLow]

冰積土內核種無機物形式之活度 ( $AC_{regoPG,aqu}$  [ $Bq kg_{DW}^{-1}$ ])、固相有機物核種活動 ( $AC_{regoPG,aqu,org}$  [ $Bq kg_{DW}^{-1}$ ])、( $AC_{regoPG,aqu}^D$  [ $Bq m^{-3}$ ])、核種於  $i$  內溶質相狀態的比率 ( $f_{regoPG,aqu}^D$  [ $Bq Bq^{-1}$ ]) 與方程式(27)至 (34) 類似，其中  $i=regoLow$ 。

### 3.4.2. 放射性核種通量的數學表示式

#### 3.4.2.1. 植物吸收

植物吸收（Plant Uptake）核種之濃度，以下式表示：

$$Plant_{UPtake,i} = AC_{NPP,i} NPP_i area_{obj,aqu}, \quad i = \{plank, micro, macro\} \quad (35)$$

其中：

$AC_{NPP,i}$  : 生物量之吸收核種活度[Bq kgC<sup>-1</sup>]  
 $NPP_i$  : 群落  $i$  之淨初級生產者生物量單位面積產生率[kgC m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>],  
 $area_{obj,aqu}$  : 於生物圈物體中之開放水域（海洋/湖泊或河川）面積[m<sup>2</sup>]

以 C-14 的同位素判別，以下式表示：

$$AC_{NPP,i}^{14C} = SA_{water}^{14C}, \quad i = \{plank, micro, macro\} \quad (36)$$

其中：

$SA_{water}^{14C}$  : C-14 比活度[Bq kgC<sup>-1</sup>]

$$SA_{water}^{14C} = \frac{AC_{water}^{14C}}{CONC_{DIC,aqu}} \quad (37)$$

其中：

$AC_{water}^{14C}$  : 溶解無機物的活度濃度[Bq m<sup>-3</sup>]  
 $CONC_{DIC,aqu}$  : 溶解的無機碳在水中的濃度[kgC m<sup>-3</sup>]

$$AC_{NPP,i}^{RN} = AC_{water}^{D,RN} CR_{aqu,pp,i}, \quad i = \{plank, micro, macro\} \quad (38)$$

其中：

$AC_{water}^{D,RN}$  : 溶解的放射性核種的濃度（即溶質相）[Bq m<sup>-3</sup>]，見式（25）  
 $CR_{aqu,pp,i}$  : 水域生物群落的濃度率  $i$  [m<sup>3</sup> kgC<sup>-1</sup>].

### 3.4.2.2. 落葉呼吸/釋放

落葉呼吸/釋放 C-14（Litter respiration [C-14] / release [other RN]），以下式表示：

$$Litter_{resp,i}^{14C} = AC_{biom,i}^{14C} NPP_i area_{obj,aqu} (1 - f_{refrac,i}) \quad (39)$$

其中：

$AC_{biom,i}^{14C}$  : 區域  $i$  C-14 的活度濃度[Bq kgC<sup>-1</sup>]  
 $NPP_i$  : 區域  $i$  特定淨初級生產量[kgC m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>]  
 $area_{obj,aqu}$ : 物體中開放水域（海盆，湖泊或溪流）的表面積[m<sup>2</sup>]

$f_{refrac,i}$  : 區域  $i$  落葉難溶的有機物所佔的比率[ $\text{kgC kgC}^{-1}$ ]  
 $i$  : 區域浮游生物(浮游性)、微生物(微觀)和大型底棲動物的指數(宏觀)

$$Litter_{release,i}^{RN} = AC_{biom,i}^{RN} NPP_i area_{obj,aqu} (1 - f_{refrac,i}) df_{decomp,aqu} \quad (40)$$

其中：

$AC_{biom,i}^{RN}$  : 區域  $i$  的活度濃度[ $\text{Bq kgC}^{-1}$ ]  
 $df_{decomp,aqu}$  : 釋出的放射性核種通過不穩定礦化有機物之比率[ $\text{Bq Bq}^{-1}$ ],  
 $i$  : 區域浮游生物(浮游性)、微生物(微觀)和大型底棲動物的指數(宏觀)

### 3.4.2.3. 落葉產生

落葉產生 (Litter production) C-14 活度  $Litterprod$  [ $\text{Bq y}^{-1}$ ]，以下式表示：

$$Litter_{prod,i}^{14C} = AC_{biom,i}^{14C} NPP_i area_{obj,aqu} f_{refrac,i} \quad (41)$$

$i = \{plank, micro, macro\}$

其中：

$AC_{biom,i}^{14C}$  : C-14 在區域  $i$  生物量中的活度濃度[ $\text{Bq kgC}^{-1}$ ]  
 $NPP_i$  : 單位面積區域特定淨初級生產[ $\text{kgC m}^{-2} \text{y}^{-1}$ ]  
 $area_{obj,aqu}$  : 物體中開放水域 (海盆，湖泊或溪流) 的表面積[ $\text{m}^2$ ]  
 $f_{refrac,i}$  : 區域  $i$  落葉難溶的有機物所佔的比率[ $\text{kgC kgC}^{-1}$ ]

從質量平衡可以看出，難熔耐火材料中的放射性核種 (除 C-14 之外) ( $Litter_{prod,i}^{RN}$ ) 等於死亡有機物中的總通量減去通過不穩定池分解之放射性核種釋放量 (一年內)：

$$\begin{aligned} Litter_{prod,i}^{RN} &= AC_{biom,i}^{RN} NPP_i area_{obj,aqu} - Litter_{release,i}^{RN} \\ &= AC_{biom,i}^{RN} NPP_i area_{obj,aqu} (1 - (1 - f_{refrac,i}) df_{decomp,aqu}) \end{aligned} \quad (42)$$

其中：

$AC_{biom,i}^{RN}$  : 區域  $i$  的活度濃度[ $\text{Bq kgC}^{-1}$ ]  
 $df_{decomp,aqu}$  : 分解期間的鑑別因子[ $\text{Bq Bq}^{-1}$ ]

*i* : 區域浮游生物(浮游性)、微生物(微觀)和大型底棲動物的指數(宏觀)

#### 3.4.2.4. 沉降 (Sedimentation)

沉降 (Sedimentation) 表示核種在地面之懸浮顆粒物質或儲存於顆粒有機物質沉降到水域沈積物之核種活度 [Bq y<sup>-1</sup>]

$$\begin{aligned} \text{Sedimentation} &= sed_{rate} \cdot area_{obj,aqu} \cdot dens_{regoUP,aqu} \cdot AC_{water}^{PM} \\ \text{Sedimentation}_{org} &= sed_{rate} \cdot area_{obj,aqu} \cdot dens_{regoUP,aqu} \cdot AC_{PM,org} \end{aligned} \quad (43)$$

其中：

- $sed_{rate}$  : 單位面積之比體積總沉降速率 [m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>]
- $area_{obj,aqu}$  : 物體中開放水域 (海盆, 湖泊或溪流) 的表面積 [m<sup>2</sup>]
- $dens_{regoUP,aqu}$  : 水域棲息地之上層密度 [kg<sub>DW</sub> m<sup>-3</sup>]
- $AC_{water}^{PM}$  : 無機形式吸附在水中懸浮顆粒物上的放射性核種的濃度 [Bq kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>]
- $AC_{PM,org}$  : 貯存在水中顆粒有機物中放射性核種的濃度 [Bq kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>]

#### 3.4.2.5. 再懸浮 (Resuspension)

再懸浮 (Resuspension) 是指水域沉積物之放射性核種再懸浮到水體水柱內之核種活度 [Bq y<sup>-1</sup>]。

$$\begin{aligned} \text{Resuspension} &= res_{rate} \cdot area_{obj,aqu} \cdot dens_{regoUP,aqu} \cdot AC_{regoUP,aqu} \\ \text{Resuspension}_{org} &= res_{rate} \cdot area_{obj,aqu} \cdot dens_{regoUP,aqu} \cdot AC_{regoUP,org,aqu} \end{aligned} \quad (44)$$

其中：

- $res_{rate}$  : 單位面積之比體積再懸浮率 [m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup> y<sup>-3</sup>]
- $area_{obj,aqu}$  : 物體中開放水域 (海盆, 湖泊或溪流) 的表面積 [m<sup>2</sup>]
- $dens_{regoUP,aqu}$  : 水域上部沉積層的密度 [kg<sub>DW</sub> m<sup>-3</sup>]
- $AC_{regoUP,aqu}$  : 吸附和溶解的放射性核種在上層水域沉積物中無機形式的活度濃度 [Bq kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>]
- $AC_{regoUP,org,aqu}$  : 上層水體沉積物中有機質的活度濃度 [Bq kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>]

#### 3.4.2.6. 埋藏

埋藏 (Burial) 是指放射性核種沉降於水域沉積物內, 吸附於沈積物固體或儲存

於孔隙水內之核種活度 [Bq y<sup>-1</sup>]

$$\begin{aligned} Burial &= net_{sed} area_{obj,aqu} dens_{regoUP,aqu} AC_{regoUP,aqu} & net_{sed} > 0 \\ Burial_{org} &= net_{sed} area_{obj,aqu} dens_{regoUP,aqu} AC_{regoUP,org,aqu} & net_{sed} > 0 \end{aligned} \quad (45)$$

其中：

- $net_{sed}$  : 單位面積之比體積淨沉降率[m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>]  
 $area_{obj,aqu}$  : 物體中開放水域（海盆，湖泊或溪流）的表面積[m<sup>2</sup>]  
 $dens_{regoUP,aqu}$  : 水域上部沉積層的密度[kg<sub>DW</sub> m<sup>-3</sup>]  
 $AC_{regoUP,aqu}$  : 吸附和溶解的放射性核種在上層水域沉積物中無機形式的活度濃度[Bq kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>]  
 $AC_{regoUP,org,aqu}$  : 上層水體沉積物中有機質的活度濃度[Bq kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>]

面積比淨沉降速率為：

$$net_{sed} = sed_{rate} - res_{rate} \quad (46)$$

其中：

- $sed_{rate}$  : 單位面積之比體積總沉降速率[m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>]  
 $res_{rate}$  : 面積比體積總再懸浮率[m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>]

### 3.4.2.7. 生物擾動

由於生物擾動（Bioturbation），好氧層會滲透到厭氧層內，然後形成上部生物活性沉積物的一部分。生物擾動是指核種由粘土腐植黑泥轉換位置到表面沈積物，將會產生再懸浮率作用[kg<sub>DW</sub> y<sup>-1</sup>]，粘土腐植黑泥之核種活度濃度為下式：

$$\begin{aligned} Bioturb &= (res_{rate} - sed_{rate}) area_{obj,aqu} dens_{regoPG} AC_{regoPG,aqu} & net_{sed} < 0 \\ Bioturb_{org} &= (res_{rate} - sed_{rate}) area_{obj,aqu} dens_{regoPG} AC_{regoPG,org,aqu} & net_{sed} < 0 \end{aligned} \quad (47)$$

其中：

- $sed_{rate}$  : 單位面積之比體積總沉降速率[m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>]  
 $res_{rate}$  : 面積比體積總再懸浮率[m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>]  
 $net_{sed}$  : 單位面積之比體積淨沉降率[m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>]  
 $area_{obj,aqu}$  : 物體中開放水域（海盆，湖泊或溪流）的表面積[m<sup>2</sup>]  
 $dens_{regoUP,aqu}$  : 水域上部沉積層的密度[kg<sub>DW</sub> m<sup>-3</sup>]



$AC_{regoPG,aqu}$  : 吸附和溶解的放射性核種在上層水域沉積物中無機形式的活度濃度[Bq kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>]

$AC_{regoPG,org,aqu}$  : 上層水體沉積物中有機質的活度濃度[Bq kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>]

### 3.4.2.8. 礦化

礦化 (Mineralisation) 是指放射性核種來自有機物分解緩慢釋放至水體沉積物。經歷這個過程，儲存放射性核種從有機質風化層釋出到孔隙水、並經由再懸浮作用將放射性核種釋放到海/湖泊水。

$$\begin{aligned} Mineralization_{water} &= PM_{org} minRate_{water,PM} \\ Mineralization_{regoUP,aqu} &= RegoUP_{org,aqu} minRate_{regoUP,aqu} \\ Mineralization_{regoPG,aqu} &= RegoPG_{org,aqu} minRate_{regoPG,aqu} \end{aligned} \quad (48)$$

其中：

$PM_{org}$  : 水柱中懸浮顆粒有機物中的活度[Bq]

$RegoUP_{org,aqu}$  : 上層水體沉積物中有機質的活度[Bq]

$RegoPG_{org,aqu}$  : 水域粘土腐殖土中的有機質的活度[Bq]

$minRate$  : 水柱中表層沉積物中或粘土中的難熔有機物的礦化速率[kgC kgC<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>]

### 3.4.2.9. 與大氣之氣體交換

與大氣之氣體交換 (Gas exchange with the atmosphere) 是指在水柱內和上層大氣之間將存在無機碳的氣體交換。水-空氣氣體交換的淨速率取決於水-空氣邊界層之間的濃度梯度，與兩層內的紊流和擴散性質的組合。水到上層空氣層的氣體的面積比淨通量與大氣之氣體交換可由下式表示：

$$J = piston_{vel,aqu} (Conc_{surface} - Conc_{eqwater}) \quad (49)$$

其中：

$piston_{vel,aqu}$  : 氣體交換係數 (或氣體交換速度)，其是給定溫度及給定氣體下之每單位時間與大氣平衡的水的高度[m y<sup>-1</sup>]

$Conc_{surface}$  : 氣體在地表水中的濃度[mol m<sup>-3</sup>]

$Conc_{eqwater}$  : 氣體在與大氣平衡的水中的濃度[mol m<sup>-3</sup>]

由於活度 (Bq) 放射性核種的摩爾量 (mole) 成正比，在上述方程式可以應用於

無機碳的活度濃度。如下列出方程式：

$$J = piston_{vel,aqu} (Conc_{surface} - 0) - piston_{vel,aqu} (Conc_{eqwater} - 0) \\ = Degassing - GasUptake \quad (50)$$

#### 3.4.2.10. 脫氣

脫氣 (Degassing) 是指由水柱內的氣體與大氣氣體 (匯) 交換造成帶動放射性核種往大氣之傳輸通量。從水到大氣的總通量[Bq y<sup>-1</sup>]是以溶解的 C-14 活度存在於 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 形式，為氣體交換速度和與大氣接觸水表面積的函數

$$Degassing_{aqu}^{14C} = AC_{water}^{D14C} f_{H_2CO_3,aqu} piston_{vel,aqu} area_{obj,aqu} \quad (51)$$

其中：

- $AC_{water}^{D14C}$  : 溶解在水柱中的無機碳的活度濃度[Bq m<sup>-3</sup>]，見式 (25)
- $f_{H_2CO_3,aqu}$  : 以 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 形式的溶解的無機碳的分數[mol mol<sup>-1</sup> or Bq Bq<sup>-1</sup>]
- $piston_{vel,aqu}$  : 氣體交換係數 (即每單位時間與大氣平衡的水的高度) [m y<sup>-1</sup>]
- $area_{obj,aqu}$  : 物體中開放水域 (海盆，湖泊或溪流) 的表面積[m<sup>2</sup>]

#### 3.4.2.11. 氣體吸收

氣體吸收 (Gas uptake) 是指由水柱內的氣體與大氣氣體 (源) 交換造成帶動放射性核種往水柱內之傳輸通量。

$$GasUptake_{aqu}^{14C} = AC_{equilib,aqu}^{14C} piston_{vel,aqu} area_{obj,aqu} \quad (52)$$

其中：

- $AC_{equilib,aqu}^{14C}$  : 水與大氣之預期平衡時水中活度濃度[Bq m<sup>-3</sup>]
- $piston_{vel,aqu}$  : 氣體交換係數[m y<sup>-1</sup>]
- $area_{obj,aqu}$  : 物體中開放水域 (海盆，湖泊或溪流) 的表面積[m<sup>2</sup>]

水中活度濃度 ( $AC_{equilib,aqu}^{14C}$ ) 是大氣活度濃度和溶解度常數的函數：

$$AC_{equilib}^{14C} = AC_{atmos,aqu}^{14C} solubilityCoef_{aqu} \quad (53)$$

其中：

- $AC_{atmos,aqu}^{14C}$  : 水中空氣中的活度濃度[Bq m<sup>-3</sup>]
- $solubilityCoef_{aqu}$  : 溶解度係數[mol m<sup>-3</sup> per mol m<sup>-3</sup>]

### 3.5. 沼澤生態

在福斯馬克地區沼澤生態 (Mire ecosystem)，濕地生態系統於濕地形成後，其特徵就隨著時間而呈現系統性變化，這大致與離海洋之距離成正比。因此，新隔離的淺湖相關的濕地區域係受到密集蘆葦帶 (蘆葦) 所影響及控制，其區域從海岸連續擴展到湖的中央部分。蘆葦被布萊亞萊斯主要的植被群落取代了卡雷克斯物種，形成北方 Upland 特徵的豐富魚類。pH 和養分的含量在蕨類植物中相對較高，這使得它們適合於排水後的生長。泥炭層厚度隨時間增加，方解石富集及地下水減少的影響，富蕨植被貧瘠區域所取代。在營養條件下泥炭層之發育為低營養價值和低 pH，樹木生長可能覆蓋大部分火山表面，但這些時期是相對時間較短而不頻繁，這不被認為是 Forsmark 地區沼澤特別發育成功的階段。來自 SFR 處置場的地下水可通過直接排放到沼澤生態系統基岩，放射性核種可以經由地表水傳輸到下游湖泊和濕地。

以下將特別介紹這些傳輸過程的區塊模型之數學描述。由於碳的生物地球化學循環不同於從其他元素 (例如碳是泥炭的主要組成成分，它是生態系統中能量的主要載體，並且在環境溫度下係以氣態形式存在)。因此，放射性碳 (C-14) 的數學描述經常不同於其他放射性核種，經由放射性核種移流和擴散的描述，還包括生物圈物體之間的放射性核種通量，以及生物圈物體內的湖泊和沼澤生態系統之間通量交換。沼澤生態系統中的傳輸子模型示意圖如圖 16。

#### 3.5.1. 放射性核種量的數學表示式

##### 3.5.1.1. 沼澤初級生產者 (Mire Primary Producers [PP])

沼澤初級生產者之核種活度濃度可以下式表示

$$AC_{PP,ter} = \frac{PP}{biom_{PP,ter} area_{obj,ter}} \quad (54)$$

其中：

- $PP$  : 沼澤植被的活度[Bq]
- $biom_{PP,ter}$  : 陸域初級生產者的面積比生物量[kgC m<sup>-2</sup>]
- $area_{obj,ter}$  : 沼澤的表面積 [m<sup>2</sup>]

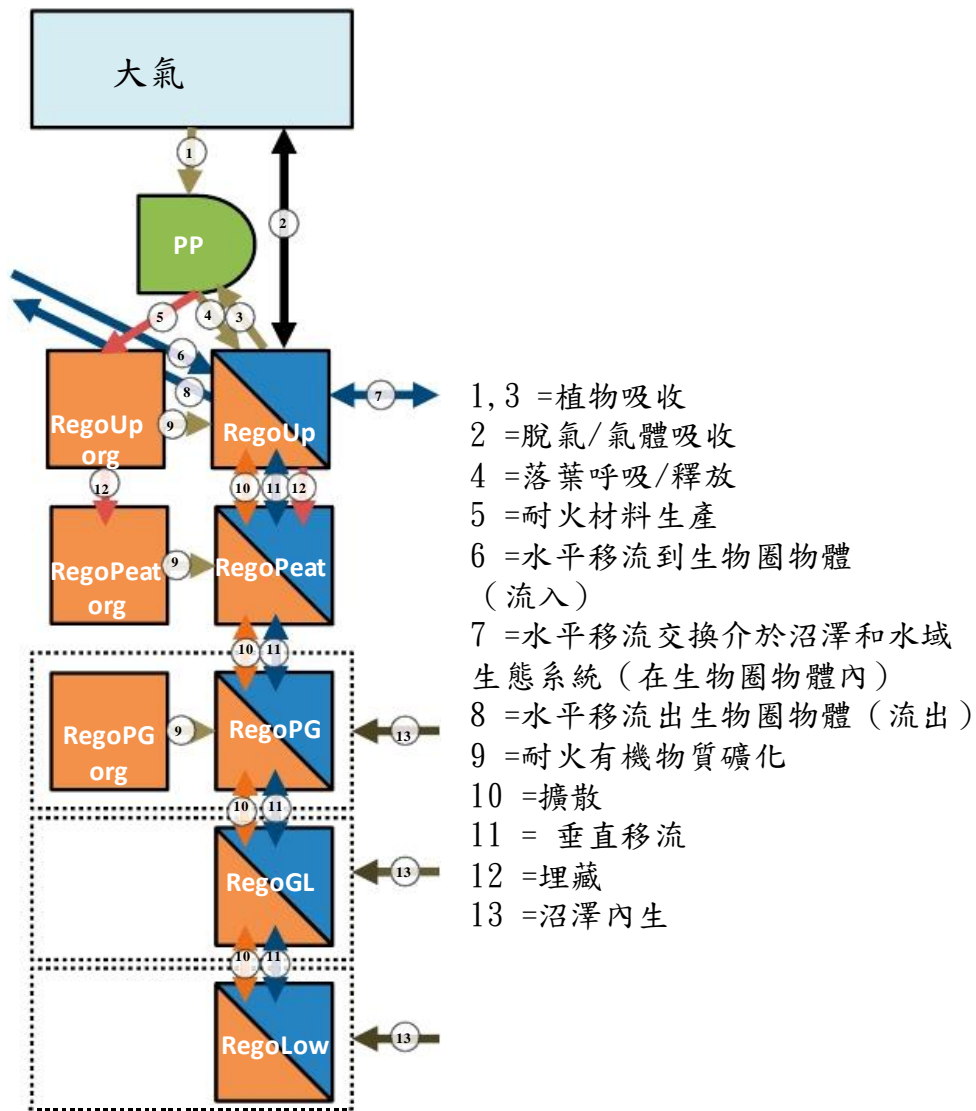


圖 16 沼澤生態系統中，模擬放射性核種傳輸模型與累積示意圖。

框代表放射性核種量（第 3.5.1 節），箭頭放射性核種通量（第 3.5.2 節）。右側方形框代表無機形式的放射性核種，吸附狀態放射性核種（橙色）和水溶液狀態放射性核種（藍色），其之間存在放射性核種分配關係。左欄方形框為有機形式的放射性核種，僅由固體狀態表示（包括主要的生產者）。箭頭（和數字）表示區塊之間的放射性核種通量和通量進入和退出系統。這些通量與氣體（黑色），水（深藍色）和固體物質的質量流量相關（深紅色），放射性核種（棕色）為無機和有機形式的之間的過渡狀態，土壤孔隙水內之擴散作用（橙色），以及濕地植物向內生長（深棕色）。大氣為放射性核種的源和匯項。需注意放射性核種可能經由地下水排放 RegoLow（冰積層土，主要生物圈物體）進入沼澤生態系統或經過水平移流傳輸進入生物圈物體（編號 6，所有生物圈物體）。

### 3.5.1.2. 泥炭 [RegoUp, RegoUporg, RegoPeat, RegoPeatorg]

沼澤有機沈積物之無機部分的活度濃度 [Bq kgDW<sup>-1</sup>]，可由下式表示：

$$AC_{rego\_i,ter} = \frac{Rego\_i_{ter}}{vol_{rego\_i,ter} dens_{rego\_i,ter}} \quad (55)$$

其中：

$$\begin{aligned}
 \text{Rego}_i & : \text{無機形式的放射性核種在沼澤表層土 } i \text{ 中的活度 [Bq]} \\
 \text{dens}_{\text{rego}_i, \text{ter}} & : \text{沼澤表層土 } i \text{ 總體密度 [kg}_{\text{Dw}} \text{ m}^{-3}] \\
 \text{vol}_{\text{rego}_i, \text{ter}} & : \text{沼澤表層土 } i \text{ 體積 [m}^3] \\
 \text{vol}_{\text{rego}_i, \text{ter}} & = \text{area}_{\text{obj}, \text{ter}} z_{\text{rego}_i, \text{ter}}
 \end{aligned} \tag{56}$$

其中：

$$\begin{aligned}
 \text{area}_{\text{obj}, \text{ter}} & : \text{沼澤植被的表面積 [m}^2] \\
 z_{\text{rego}_i, \text{ter}} & : \text{沼澤泥炭層 } i \text{ 深度 [m]} \\
 i & : \text{泥炭層 } i \text{。 } i = \text{Up 和 Peat 分別表示上部生物活性泥炭 (RegoUp) 和} \\
 & \text{深層厭氧泥炭 (RegoPeat)}
 \end{aligned}$$

在時間  $t$  儲存在厭氧深層泥炭層中的穩定碳的量可以藉由下列微分方程求得，其泥炭之初始條件為零：

$$\frac{d\text{RegoPeat}^{\text{SOC}}}{dt} = \text{Burial}^C \text{area}_{\text{obs}, \text{ter}} - \text{RegoPeat}^{\text{SOC}} \text{minRate}_{\text{regoPeat}} \tag{57}$$

其中：

$$\begin{aligned}
 \text{Burial}^C & : \text{單位面積內來自於部分氧化泥炭層土壤有機碳進入缺氧泥炭層的年進入量 [kgC m}^{-2} \text{ y}^{-1}] \\
 \text{RegoPeat}^{\text{SOC}} & : \text{泥炭層土壤有機碳含量 [kgC]} \\
 \text{minRate}_{\text{regoPeat}} & : \text{在泥炭的缺氧環境中難溶有機碳的礦化速率 [kgC kgC}^{-1} \text{ y}^{-1}]
 \end{aligned}$$

該層的厚度源自土壤有機碳的量、沼澤的面積和泥炭的性質：

$$z_{\text{regoPeat}} = \frac{\text{RegoPeat}^{\text{SOC}}}{\text{area}_{\text{obj}, \text{ter}} \text{dens}_{\text{regoPeat}} f_{c, \text{peat}}} \tag{58}$$

其中：

$$f_{c, \text{peat}} : \text{泥炭中碳的比率 [kgC kg}^{-1}].$$

假定溶解的有機碳在模擬的時間內轉化為無機碳。因此，有機物中的所有放射性核種都儲存在難熔耐火固體有機物質中。固體有機物中的活度濃度為：

$$\text{AC}_{\text{rego}_i, \text{org}, \text{ter}} = \frac{\text{Rego}_i}{\text{vol}_{\text{rego}_i, \text{ter}} \text{dens}_{\text{rego}_i, \text{ter}}} \tag{59}$$

其中：

$$\text{Rego}_i : \text{沼澤風化層 } i \text{ 固相有機物內之核種活度 [Bq]}$$

土壤孔隙空間中無機放射性核種量分為水溶性（溶解）和固體（吸附）相，其中兩相之間的平衡由固體/液體分配係數  $K_d$  所決定。由於所有沼澤層都是水飽和的，孔隙水中的活度濃度為風化層區塊核種溶質相的量[Bq]除以孔隙體積[m<sup>3</sup>]，溶解的核種活度濃度為：

$$AC_{rego\_i,ter}^D = \frac{Rego\_i,ter f_{rego\_i,ter}^D}{vol_{rego\_i,ter} poro_{rego\_i,ter}} \quad (60)$$

其中：

$poro_{rego\_i,ter}$  : 沼澤風化層  $i$  孔隙率 [m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>]

$f_{rego\_i,ter}^D$  : 沼澤風化層  $i$  溶質相中放射性核種的比率量[Bq Bq<sup>-1</sup>]

沼澤風化層  $i$  溶質無機形式放射性核種的比率量是分配係數和風化層的物理性質的函數：

$$f_{rego\_i,ter}^D = \frac{1}{1 + \frac{K_{d,rego\_i,ter} dens_{rego\_i,ter}}{poro_{rego\_i,ter}}} \quad (61)$$

其中：

$K_{d,rego\_i,ter}$  : 沼澤風化層  $i$  分配係數[m<sup>3</sup> kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>]

### 3.5.1.3.後冰期沉積物[RegoPG, RegoPGorg]

後冰期沼澤沉積物（粘土腐殖土）內核種無機物形式之活度（ $AC_{regoPG,aqu}$  [Bq kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>])、固相有機物核種活動（ $AC_{regoPG,aqu,org}$  [Bq kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>])、（ $AC_{regoPG,aqu}^D$  [Bq m<sup>-3</sup>])、核種於  $i$  內容質相狀態的比率（ $f_{regoPG,aqu}^D$  [Bq Bq<sup>-1</sup>]) 與方程式(55)及方程式(59)至(61)類似，其中  $i=regoPG$ 。

### 3.5.1.4.冰期沈積物[RegoGL]

冰期粘土內核種無機物形式之活度（ $AC_{regoPG,aqu}$  [Bq kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>])、固相有機物核種活動（ $AC_{regoPG,aqu,org}$  [Bq kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>])、（ $AC_{regoPG,aqu}^D$  [Bq m<sup>-3</sup>])、核種於  $i$  內容質相狀態的比率（ $f_{regoPG,aqu}^D$  [Bq Bq<sup>-1</sup>]) 與方程式(55)及方程式(59)至(61)類似，其中  $i=regoGL$ 。

### 3.5.1.5.冰積土[RegoLow]

冰積土內核種無機物形式之活度（ $AC_{regoPG,aqu}$  [Bq kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>])、固相有機物核種活

動 ( $AC_{regoPG,aqu,org}$  [Bq kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>)、( $AC^D_{regoPG,aqu}$  [Bq m<sup>-3</sup>)、核種於  $i$  內溶質相狀態的比率 ( $f^D_{regoPG,aqu}$  [Bq Bq<sup>-1</sup>) 與方程式(55)及方程式(59)至 (61) 類似，其中  $i=regoLow$ 。

### 3.5.2. 放射性核種通量的數學表示式

在本節中，用數學方程式描述與植物吸收、落葉生產、落葉垃圾分解、埋藏、難熔有機物礦化，與大氣的氣體交換和泥炭植物的向內生長相關的放射性核種通量。

#### 3.5.2.1. 植物吸收

植物吸收 (Plant uptake) 表示無機放射性碳和其他放射性核種在植物生物質中的固定作用並導致淨初級生產作用的結果。它包括大氣 C-14 的固定和所有放射性核種根的吸收。大氣 C-14 的植物吸收[Bq y<sup>-1</sup>]是淨初級生產[kgC y<sup>-1</sup>]和由大氣碳固定產生的新合成生物質中的活度濃度[Bq kgC<sup>-1</sup>]的乘積，由大氣碳吸收率來表示，植物吸收核種之濃度，以下式表示：

$$Plant_{Uptake,ter}^{14C} = AC_{NPP,atm}^{14C} NPP_{ter} area_{obj,ter} (1 - f_{rootUptake}) \quad (62)$$

其中：

$AC_{NPP,atm}^{14C}$  : C-14 在由大氣碳固定產生的新合成生物質中的活度濃度[Bq kgC<sup>-1</sup>]

$NPP_{ter}$  : 沼澤生態系統中特定區域的淨初級生產[kgC m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>]

$area_{obj,ter}$  : 沼澤表面積[m<sup>2</sup>]

$f_{rootUptake}$  : 經由根吸收的碳比率[kgC kgC<sup>-1</sup>]

由於 C-14 的同位素鑑別 (相對於穩定的 C-12) 在光合作用期間很小。植物分配和生物量生產、合成生物量中可以用在大氣覆蓋中的 C-14 的比活度濃度近似：

以 C-14 的同位素判別，以下式表示：

$$AC_{NPP,atm}^{14C} = SA_{atmos,ter}^{14C} \quad (63)$$

類似地，C-14 [Bq y<sup>-1</sup>]的根吸收是淨初級生產[kgC y<sup>-1</sup>]和由固定孔隙水碳產生的合成生物質中的活度濃度[Bq kgC<sup>-1</sup>] 根碳同化分數：

$$Plant_{Uptake,ter}^{14C} = AC_{NPP,root}^{14C} NPP_{ter} area_{obj,ter} f_{rootUptake} \quad (64)$$

其中：

$AC_{NPP,root}^{14C}$  : 由於根系吸收碳而產生的新合成的根生物量中的活度濃度[Bq kgC<sup>-1</sup>]

假設根吸收侷限於部分氧化泥炭層和介於 C-14 和穩定碳 (C-12) 的根吸收之間是為邊際條件，則 C-14 活度濃度由根吸收產生的新合成的生物質，可以經由 C-14 在表面泥炭層比活度近似。這比活度是定義為溶質相中無機碳的活度濃度[Bq m<sup>-3</sup>]和溶解穩定無機碳的濃度 [kgC m<sup>-3</sup>]之比值，如下式：

$$SA_{regoUP,ter}^{D14C} = \frac{AC_{regoUP,ter}^{D14C}}{CONC_{DIC,regoUP,ter}} \quad (65)$$

其中：

$SA_{regoUP,ter}^{D14C}$  : 表層泥炭中溶解無機碳的活度濃度[Bq m<sup>-3</sup>]

$CONC_{DIC,regoUP,ter}$  : 表層泥炭中溶解無機碳的濃度[kgC m<sup>-3</sup>]

對於其他放射性核種，來自表面泥炭的根吸收[Bq y<sup>-1</sup>]也可以從計算淨初級生產[kgC y<sup>-1</sup>]和合成生物質中的活度濃度[Bq kgC<sup>-1</sup>]：

$$Plant_{Uptake,mire}^{14C} = AC_{NPP,root}^{RN} NPP_{ter} \cdot area_{obj,ter} \quad (66)$$

其中：

$AC_{NPP,root}^{RN}$  : 合成生物量中的活度濃度 [Bq kgC<sup>-1</sup>]

$$AC_{NPP,root}^{RN} = AC_{regoUP,ter,tot}^{RN} CR_{ter,pp} \quad (67)$$

其中：

$CR_{ter,pp}$  : 經驗平衡濃度比[kg<sub>DW</sub> kgC<sup>-1</sup>]

$AC_{regoUP,ter,tot}^{RN}$  : 表面泥炭總活度濃度 (包括放射性核種有機和無機形式) [Bq kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>]

$$AC_{regoUP,ter,tot}^{RN} = AC_{regoUP,ter}^{RN} + AC_{regoUP,org,tot}^{RN} \quad (68)$$

$$Plant_{Uptake,mire}^{RN} = \min(AC_{NPP,root}^{RN} NPP_{ter} \cdot area_{obj,ter}, maxplant_{uptake}) \quad (69)$$

$$MaxPlant_{Uptake}^{36Cl} = conc_{Cl,plant} NPP_{ter} \cdot area_{obj,ter} SA_{regoUp,ter}^{D36Cl} \quad (70)$$

$conc_{Cl,plant}$  : 新合成的生物質中穩定氯化物的濃度[kgCl kgC<sup>-1</sup>]，比活度  $SA_{regoUp,ter}^{D36Cl}$  [Bq kgCl<sup>-1</sup>]定義為：

$$SA_{regoUp,ter}^{D36Cl} = \frac{AC_{regoUp,ter}^{D,36Cl}}{conc_{Cl,porewat}} \quad (71)$$



其中：

$SA_{regoUp,ter}^{D36Cl}$  : 表層泥炭中溶解無機 Cl-36 的濃度[Bq m<sup>-3</sup>]

$conc_{Cl,porewat}$  : 孔隙水中表層泥炭穩定氯離子濃度

$$MaxPlant_{uptake}^{RN} = RegoUP_{ter}^{RN} MaxRate_{uptake} \quad (72)$$

其中：

$MaxRate_{uptake}$  : 每年消耗 99% 的無機放射性核種量的速率常數。數值為 4.6 [y<sup>-1</sup>].

### 3.5.2.2. 落葉呼吸/釋放

植物快速（於一年內）凋落的落葉分解導致放射性核種的礦化和釋放到飽和表面泥炭的水中。在一年的時間尺度上，初級生產者生物量是假定處於平衡狀態，這意味著淨初級生產量（NPP，kgC y<sup>-1</sup>），是由消費者和落葉產生的生物量損失達成平衡狀態。落葉呼吸/釋放 C-14，以下式表示：

$$Litter_{resp,ter}^{14C} = AC_{PP,ter}^{14C} NPP_{ter} area_{obj,ter} (1 - f_{refrac,ter}) \quad (73)$$

其中：

$AC_{PP,ter}^{14C}$  : 沼澤植被中 C-14 的活度濃度[Bq kgC<sup>-1</sup>]

$NPP_{ter}$  : 地區特定的沼澤植被的淨初級生產[kgC m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>]

$area_{obj,ter}$  : 沼澤地區的表面積[m<sup>2</sup>]

$f_{refrac,ter}$  : 在一年內是耐火的和不礦化的植物生物量的比率 [kgC kgC<sup>-1</sup>]

$$Litter_{release,ter}^{RN} = AC_{PP,ter}^{RN} NPP_{ter} area_{obj,ter} (1 - f_{refrac,ter}) df_{decomp,ter} \quad (74)$$

其中：

$AC_{PP,ter}^{RN}$  : 沼澤植被中活度濃度[Bq kgC<sup>-1</sup>]

$df_{decomp,ter}$  : 釋放出的放射性核種通過不穩定有機物礦化物的比率[Bq Bq<sup>-1</sup>]

### 3.5.2.3. 落葉產生

落葉產生 C-14 活度  $Litterprod$  [Bq y<sup>-1</sup> ]，以下式表示：

$$Litter_{prod,ter}^{14C} = AC_{PP,ter}^{14C} NPP_{ter} area_{obj,ter} f_{refrac,ter} \quad (75)$$

其中：

- $AC_{PP,ter}^{14C}$  : 在沼澤植被 C-14 的活度濃度[Bq kgC<sup>-1</sup>]  
 $NPP_{ter}$  : 地區特定的沼澤植被的淨初級生產[kgC m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>]  
 $area_{obj,ter}$  : 沼澤地區的表面積[m<sup>2</sup>]  
 $f_{refrac,ter}$  : 沼澤植被之耐火有機物的所佔的比率[kgC kgC<sup>-1</sup>]

$$\begin{aligned} Litter_{prod,ter}^{RN} &= AC_{PP,ter}^{RN} NPP_{ter} area_{obj,ter} - Litter_{release,ter}^{RN} \\ &= AC_{PP,ter}^{RN} NPP_{ter} area_{obj,ter} (1 - (1 - f_{refrac,ter}) df_{decomp,ter}) \end{aligned} \quad (76)$$

其中：

- $AC_{PP,ter}^{RN}$  : 沼澤植被活度濃度[Bq kgC<sup>-1</sup>]  
 $df_{decomp,ter}$  : 分解期間的鑑別因子[Bq Bq<sup>-1</sup>]

### 3.5.2.4. 埋藏

埋藏是指放射性核種於沼澤沉積物內，吸附於沈積物固體之核種活度 [Bq y<sup>-1</sup>]

$$Burial^C = NPP_{ter} f_{refrac,ter} - RegoUp_{ter}^{SOC} minRate_{regoup,ter} \quad (77)$$

其中：

- $NPP_{ter}$  : 地區特定的沼澤植被的淨初級生產[kgC m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>]  
 $f_{refrac,ter}$  : 沼澤植被之耐火有機物的所佔的比率[kgC kgC<sup>-1</sup>]  
 $minRate_{regoup,ter}$  : 耐火有機表面泥炭的礦化速率[kgC kgC<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>]  
 $RegoUp_{ter}^{SOC}$  : 表層泥炭中土壤有機碳的面積特定量[kg C m<sup>-2</sup>]

$$RegoUp_{ter}^{SOC} = z_{regoup,ter} dens_{regoup,ter} f_{c,peat} \quad (78)$$

其中：

- $z_{regoup,ter}$  : 表面泥炭厚度[m]  
 $dens_{regoup,ter}$  : 表層泥炭層的密度[kg<sub>DW</sub> m<sup>-3</sup>]  
 $f_{c,peat}$  : 表面泥炭層中碳的比率量[kgC kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>]

$$Burial_{org}^C = AC_{regoup,org,ter}^C Burial^C area_{obj,ter} \quad (79)$$

$$Burial = AC_{regoup,ter}^C Burial^C area_{obj,ter} \quad (80)$$

其中：

$area_{obj,ter}$  : 沼澤表面積[m<sup>2</sup>]

$AC_{regUp,org,ter}^C$  : 表面泥炭之碳比活度濃度[Bq kgC<sup>-1</sup>]

$$AC_{regUp,org,ter}^C = \frac{RegoUp_{org,ter}}{RegoUp_{ter}^{SOC} area_{obj,ter}} \quad (81)$$

$$AC_{regUp,ter}^C = \frac{RegoUp_{ter}}{RegoUp_{ter}^{SOC} area_{obj,ter}} \quad (82)$$

其中：

$RegoUp_{org,ter}$  : 表面泥炭土壤有機碳之活度[Bq]

$RegoUp_{ter}$  : 表面泥炭中無機形式的活度[Bq]

$RegoUp_{ter}^{SOC}$  : 表層泥炭中土壤有機碳的面積特定量[kgC m<sup>-2</sup>]

### 3.5.2.5. 礦化

礦化方程式可用下式表示：

$$Mineralization_{regUp,ter} = RegoUP_{org,ter} minRate_{regUp,ter} \quad (83)$$

$$Mineralization_{regPeat,ter} = RegoPeat_{org,ter} minRate_{regPeat,ter} \quad (84)$$

$$Mineralization_{regPG,ter} = RegoPG_{org,ter} minRate_{regPG,ter} \quad (85)$$

其中：

$RegoUP_{org,ter}$  : 表層泥炭有機質活度[Bq]

$RegoPeat_{org,ter}$  : 深層泥炭有機質活度[Bq]

$RegoPG_{org,ter}$  : 在粘土腐殖土中的有機物的活度[Bq]

$minRate_i$  : 表層泥炭、深泥炭或泥灰土中難熔有機物的礦化速率[kgC kgC<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>]

### 3.5.2.6. 脫氣

脫氣是指由水柱內的氣體與大氣氣體（匯）交換造成帶動放射性核種往大氣之傳輸通量。

$$Degassing_{ter}^{14C} = AC_{regUp,ter}^{D14C} f_{H_2CO_3,ter} piston_{vel,ter} area_{obj,ter} \quad (86)$$

其中：

- $AC_{regoUp,ter}^{D14C}$  : 溶解在表層泥炭孔隙水中的無機碳的活度濃度[Bq m<sup>-3</sup>]
- $f_{H_2CO_3,ter}$  : 表面泥炭孔隙水中所含 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 形式的溶解無機碳比率量  
[mol mol<sup>-1</sup> or Bq Bq<sup>-1</sup>]
- $piston_{vel,ter}$  : 與大氣接觸泥炭的氣體交換係數（即每單位時間與大氣平衡的上層泥炭層的高度）[m y<sup>-1</sup>]
- $area_{obj,ter}$  : 沼澤面積[m<sup>2</sup>]

### 3.5.2.7. 氣體吸收

氣體吸收是指由水柱內的氣體與大氣氣體（源）交換造成帶動放射性核種往水柱內之傳輸通量。

$$GasUptake_{ter}^{14C} = AC_{equib,ter}^{14C} piston_{vel,ter} area_{obj,ter} \quad (87)$$

其中：

- $AC_{equib,ter}^{14C}$  : 與沼澤上方大氣平衡的地表水中的活度濃度[Bq m<sup>-3</sup>]
- $piston_{vel,ter}$  : 氣體交換係數[m y<sup>-1</sup>]
- $area_{obj,ter}$  : 沼澤面積[m<sup>2</sup>]

$$AC_{equib}^{14C} = AC_{atmos,ter,CA}^{14C} solubilityCoef_{ter} \quad (88)$$

其中：

- $AC_{atmos,ter,CA}^{14C}$  : 在空氣中（上面冠層）的活度濃度[Bq m<sup>-3</sup>]
- $solubilityCoef_{ter}$  : 上部泥炭層的溶解度係數[mol m<sup>-3</sup> per mol m<sup>-3</sup>]

### 3.5.2.8. 從湖泊到沼澤之漸變

濕地植被可拓殖海洋和湖岸及底部。湖泊浮葉植物會產生凋落物，並累積在底部。由於貧氧條件分解是緩慢的，因此，泥炭腐質黑泥開始填補湖盆。湖泊到沼澤之漸變持續進行著。（如圖 17）。

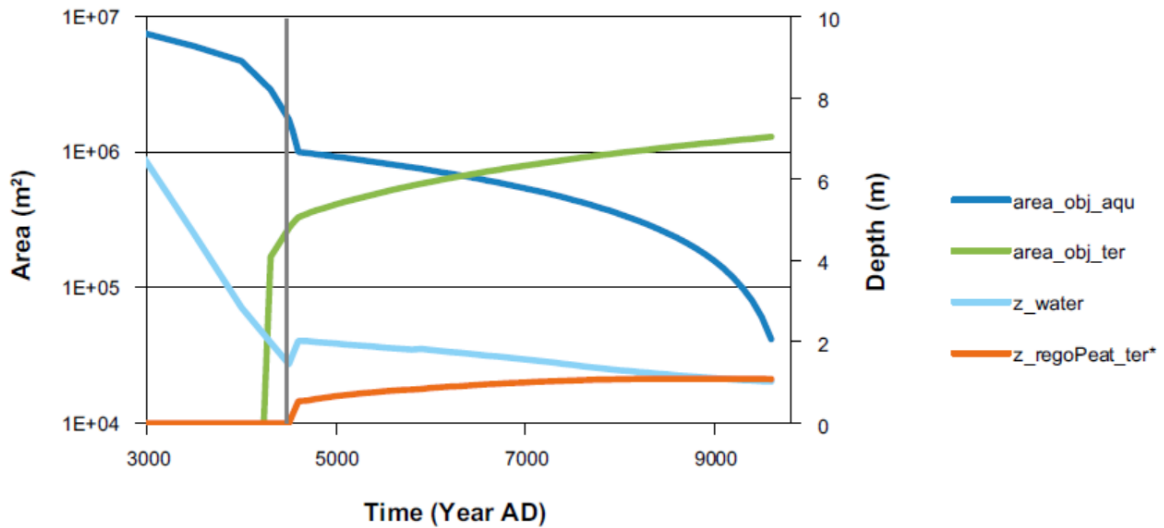


圖 17 生物圈物體 116 從海洋盆地到湖泊/沼澤生態之發展歷程

### 3.5.2.9. 沼澤植被之增生

在該模型中，出現的濕地植被的向內生長率 $[m^2y^{-1}]$ （和軟底部的發展）作為水域生態系統到沼澤生態系統的區域的過渡過程。假設放射性核種濃度在上部水域沉積物中是均勻的，每年由沼澤植被覆蓋的放射性核種量、沈積物中的面積比活度濃度 $[Bq m^2]$ 和水平泥炭生長到湖區的速率 $[m^2 y^{-1}]$ 成正比。因此，放射性核種 $[Bq y^{-1}]$ 從最上面兩個水域沉積物轉移可以表示用上層水體沉積物中面積比活度濃度 $[Bq m^{-2}]$ 和水平沼澤植物進入湖區膨脹速率 $[m^2 y^{-1}]$ 的乘積來表示：

沼澤植被之增生可由下式表示：

$$Ter_{ingrowth,PG} = \frac{RegoUp_{aqu} + RegoPG_{aqu}}{area_{obj, sed, aqu}} Ter_{growth} \quad (89)$$

$$Ter_{ingrowth,PG,org} = \frac{RegoUp_{org,aqu} + RegoPG_{org,aqu}}{area_{obj, sed, aqu}} Ter_{growth} \quad (90)$$

其中：

$RegoUp_{aqu} RegoPG_{aqu}$  : 在水域風化層區塊無機形式之活度 $[Bq]$

$RegoUp_{org,aqu} RegoPG_{org,aqu}$  : 在水域風化層區塊有機形式之活度 $[Bq]$

$area_{obj, sed, aqu}$  : 水域沉積物的表面積 $[m^2]$

$area_{obj, aqu}$  : 沼澤表面積 $[m^2]$

$Ter_{growth}$  : 沼澤植被向內生長的水平速率 $[m^2 y^{-1}]$

$$Ter_{growth} = \frac{\partial area_{obj,ter}}{\partial t} \quad (91)$$

將放射性核種從致礦物的水域沉積物（冰川粘土和直徑）轉移到相對應的與濕地植被擴張有關的風化地層，可以用類似的表達方式描述：

$$Ter_{ingrowth, GL} = \frac{RegoGL}{area_{obj, sed, aqu}} Ter_{growth} \quad (92)$$

$$Ter_{ingrowth, regoLow} = \frac{RegoLow}{area_{obj, sed, aqu}} Ter_{growth} \quad (93)$$

### 3.6. 農業生態

農業土地是景觀中最密集管理的土地類型和提供人類的食物直接作為作物生產或作為家畜飼料生產的主要提供者。可耕地包括集約耕地和牧場或草地。耕地是定期的犁田和收穫，而用於家畜放牧或乾草的草地則較少進行管理。目前，在福斯馬克地區最大的可耕地單位屬於粘土質地。基於對目前和過去農業實施的了解，有可能確定幾個未來 Forsmark 景觀中與放射性核種相關的暴露途徑。然後可以將這些暴露途徑組合成代表作為集合農業土地利用暴露群體的變量。例如，深層地下水的排放通常發生在與湖泊複合物相關的地形低窪地區。這些區域可用於收集冬季飼料的濕地草和莎草（即乾草）。當排放區域已經排放於在海平面之上（將使得鹽水不可能侵入），湖泊-沼澤系統的排水作用和培養過程是其相關的暴露途徑（第 7.2 節）。在瑞典中部，大量灌溉穀物或飼料生產土地是相當罕見的。然而，土豆和蔬菜卻是經常進行灌溉，且菜園的灌溉被認為是單獨的暴露途徑。

農業生態系統中放射性核種的傳輸機制及區塊模式。在本章中，這些區塊和通量的數學描述為三個單獨的培養系統。數學模型描述放射性核種的動態傳輸和累積（經由差分方程式）在耕地土壤的最高生物活性層。假定植物吸收和凋落物釋放處於平衡條件狀態。

放射性核種分佈於植物和土壤由代數表達式描述（詳如 SKB R13-46 附錄 C）。描述耕地土壤之放射性核種累積的微分方程相對簡單。因此，代數表達式可以用於評估期每個時間點經由種植土壤之暴露結果，而不必進動態模擬。碳的生物地球化學循環與其他元素的生物地球化學循環顯著不同（例如碳是土壤有機質中的結構成分，並且在環境溫度下以氣態形式存在）。因此，涉及放射性碳（C-14）的數學描述不同其

他放射性核種。農業運輸子模型的示意圖生態系統如圖 13 所示。

### 3.6.1. 內部-外地農業

內部-外地農業系統的特點是集中施肥的耕地為封閉性的農業區（內部），另也包括牲畜放牧附近的牧場和森林（外地）。其特點是耕地營養草地和牧場，是經由使用動物糞便作為有機肥料。濕地植被對家畜和農業土壤對於農業內部系統的暴露途徑提供了一個合理的概念模型。下面我們描述用於計算上限的簡單區塊模型（如圖 18）做為農業土壤活度濃度的邊界，以及無機 C-14 的釋放到覆蓋作物上部大氣內，給予內部-外地農業系統之輸入值。雖然生物圈物體中沼澤植被是放射性核種源的土地利用變量，但沒有明確的位置的內部陸域。相反的，在景觀充足的高度地區可以簡單地假定栽培發生在合適的土壤區域，以避免週期性的鹽水侵入。

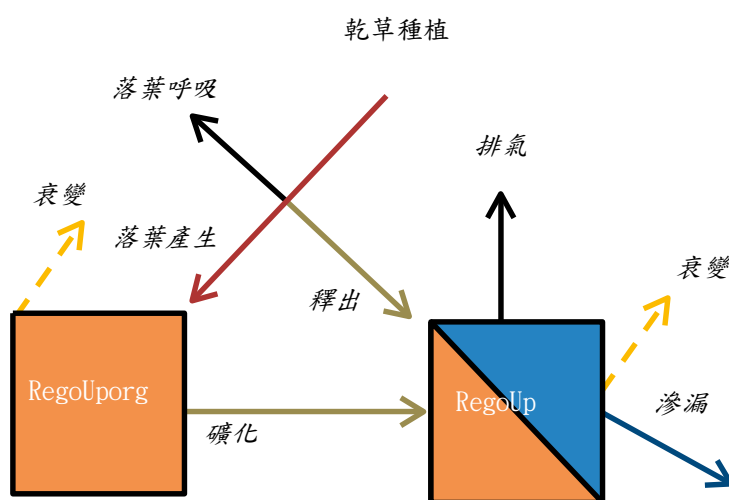


圖 18 內部-外地農業生態系統放射性核種模擬傳輸和累積模型示意圖

說明：框代表放射性核種清單和箭頭表示放射性核種通量。右框代表無機形式的放射性核種，這些是在吸附的放射性核種（橙色）和溶液（藍色）中的放射性核種之間分配。放射性核種有機形式僅由固體狀態表示（左框）。箭頭表示放射性核種通量在區塊之通量進入和離開系統。這些通量與氣體的質量通量相關為（黑色），水（深藍色）和固體物質（深紅色），以在無機和有機形式之間轉換的放射性核種為（棕色），放射性衰變（黃色）。大氣層作為放射性核種的匯項。但須注意的是，對於碳 C-14 僅考慮其落葉呼吸和排氣作用。

#### 3.6.1.1. 農業土壤[RegoUp, RegoUp<sub>org</sub>]

農業土壤(或頂土)上層的放射性核種庫存量由區塊 *RegoUp* 和 *RegoUp<sub>org</sub>* 所代表。

頂部風化層代表土壤的一部分受耕作和生物擾動的影響，作物主要攝取營養和微量元素。該層被假定為良好排水並且具有高的土壤生物活性。對於與有機物相關的放射性核種僅考慮固相，而無機物區塊包括孔隙水中的活度和吸附到固相的活度。

農業土壤的放射性核種活度濃度[Bq kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>]從土壤區塊中的放射性核種量[Bq]和土層質量[kg<sub>DW</sub>]所決定，如下式：

$$AC_{regoUp,IO}^{RN} = \frac{RegoUp_{10}^{RN} (1 - f_{cereal})}{area_{10} z_{regoUp,IO} dens_{regoUp,IO}} \quad (94)$$

$$AC_{regoUp,IO}^{14C} = \frac{RegoUp_{10}^{14C}}{area_{10} z_{regoUp,IO} dens_{regoUp,IO}}$$

$$AC_{regoUp,org,IO} = \frac{RegoUp_{org,IO}}{area_{10} z_{regoUp,IO} dens_{regoUp,IO}}$$

其中：

$AC_{regoUp,IO}^{RN}$  : 無機形式的放射性核種 RN 在栽培土壤中的活性[Bq],

$AC_{regoUp,IO}^{14C}$  : 無機 C-14 在栽培土壤中的總活性[Bq],

$AC_{regoUp,org,IO}$  : 儲存在土壤有機物中的放射性核種（包括 C-14）的活性[Bq],

$area_{10}$  : 耕地的表面積[m<sup>2</sup>]

$Z_{regoUP,IO}$  : 生物活性層的厚度[m]

$dens_{regoUp,IO}$  : 土壤密度[kg<sub>DW</sub> m<sup>-3</sup>]

$f_{cereal}$  : 分配到穀物中的無機放射性核種的分數[Bq Bq<sup>-1</sup>]

$$f_{cereal} = \frac{biom_{cereal,IO}}{biom_{cereal,IO} + \frac{z_{regoUp,IO} dens_{regoUp,IO}}{CR_{agri,cereal}}} \quad (95)$$

其中：

$biom_{cereal,IO}$  : 以碳單位表示的特定的穀物作物生物量[kgC m<sup>-2</sup>],

$CR_{agri,cereal}$  : 作物生物量和平衡土壤中的濃度之間的比率[kg<sub>DW</sub> kgC<sup>-1</sup>]

無機碳和其他放射性核種在農業土壤溶質相中的活度濃度， $AC_{regoUp,IO}^{DRN}$  可用下式表示：

$$AC_{regoUp,IO}^{DRN} = \frac{RegoUp_{10}^{RN} (1 - f_{cereal}) f_{regoUp}^D}{area_{culti} z_{regoUp,IO} Poro_{regoUp,IO} S_{w,regoUp,IO}} = \frac{f_{regoUp,IO}^D dens_{regoUp,IO}}{poro_{regoUp,IO} S_{w,regoUp,IO}} AC_{regoUp,IO}^{RN} \quad (96)$$

對於 C-14 可用下式表示：



$$AC_{regoUp}^{D14C} = \frac{RegoUp_{IO}^{14C} f_{regoUp,IO}^D}{area_{IO} z_{regoUp,IO} poro_{regoUp,IO} S_{w,regoUp,IO}} = \frac{f_{regoUp,IO}^D dens_{regoUp,IO}}{poro_{regoUp,IO} S_{w,regoUp,IO}} AC_{regoUp,IO}^{14C} \quad (97)$$

其中：

$dens_{regoUp,IO}$ ：土壤密度[kg<sub>DW</sub> m<sup>-3</sup>]

$poro_{goUp,IO}$ ：土壤孔隙度[m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>]

$S_{w,regoUp,IO}$ ：飽和度[m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>]

$f_{regoUp,ter}^D$ ：培養土壤中溶質相中放射性核種的分數[Bq Bq<sup>-1</sup>]

$$f_{regoUp,IO}^D = \frac{1}{1 + \frac{Kd_{d,regoUp,IO} dens_{regoUp,IO}}{poro_{regoUp,IO} S_{w,regoUp,IO}}} \quad (98)$$

其中：

$K_{d,regoUp,IO}$ ：耕地土壤中的分佈係數[m<sup>3</sup> kg<sub>DW</sub>]

### 3.6.1.2. 施肥

施肥方程式可用下式表示：

$$Fertilization_{hay} = AC_{hay} demand_{hay} a_{hay} \quad (99)$$

其中：

$AC_{hay}$ ：在具有最高濃度的放射性核種的區域中生長的初級生產者，在乾草中的活度濃度[Bq kgC<sup>-1</sup>]

$demand_{hay}$ ：是針對耕地有機施肥的冬季飼料中特定區域需求[kgC m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>]

$a_{hay}$ ：沼澤的乾草的分數[m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>]

$$a_{hay} = \begin{cases} 1, & area_{obj,ter} N_{group,IO} area_{support} \\ \frac{area_{obj,ter}}{N_{group,IO} area_{support}}, & area_{obj,ter} N_{group,IO} area_{support} \end{cases} \quad (100)$$

其中：

$area_{ob,j,ter}$ ：濕地面積[m<sup>2</sup>]

$N_{group,IO}$ ：內外農場群體中暴露的的個體數量

$area_{support}$ ：暴露群體中個體相關牲畜的冬季飼料所需的濕地面積[m<sup>2</sup>]

$$AC_{hay} = AC_{PP,ten} \quad (101)$$

### 3.6.1.3. 落葉呼吸(C-14)/釋放(other RN)

C-14 於落葉呼吸/釋放 (Litter respiration / release) 方程式可用下式表示：

$$Litter_{resp}^{14C} = Fertilization_{hay}^{14C} area_{IO} N_{oup,IO} (1 - f_{refrac,ter}) \quad (102)$$

$fertilization_{hay}^{14C}$  : C-14 對土壤侵蝕的面積比輸入( $Bq\ m^{-2}\ y^{-1}$ )

其中：

$area_{10}$  : 農民的耕地面積[ $m^2$ ]

$N_{group,IO}$  : 內外農場群體中暴露的的個體數量

$f_{refrac,ter}$  : 難熔有機物的分數[ $kgC\ kgC^{-1}$ ]

$$Litter_{release}^{RN} = Fertilization_{hay}^{RN} area_{10} N_{group,IO} (1 - f_{refrac,ter}) df_{decomp,ter} \quad (103)$$

其中：

$df_{decomp,ter}$  : 可通過礦化的不穩定有機物質釋放放射性核種的分數[ $Bq\ Bq^{-1}$ ]

#### 3.6.1.4. 落葉產生

落葉產生 (**Litter production**) 方程式可用下式表示：

$$Litter_{reod}^{14C} = Fertilization_{hay}^{14C} area_{10} N_{group,IO} f_{refrac,ter} \quad (104)$$

其中：

$fertilization_{hay}^{14C}$  : 起源自濕地乾草作為動物飼料之每年單位面積 C-14 進入內部農業之土壤之活度 [ $Bq\ m^{-2}y^{-1}$ ]

$area_{10}$  : 支持一個個體的耕地的表面積[ $m^2$ ]

$N_{group,IO}$  : 暴露群組中的個體數

$f_{refrac,ter}$  : 難熔有機物的分數[ $kgC\ kgC^{-1}$ ]

$$Litter_{prod}^{RN} = Fertiliz_{hay}^{RN} area_{10} N_{group} - Litter_{release}^{RN} = Fertiliz_{hay}^{RN} area_{10} N_{group} (1 - (1 - f_{refrac,ter}) df_{decomp,ter}) \quad (105)$$

其中：

$df_{decomp,ter}$  : 可通過不穩定有機物礦化而釋放的放射性核種的分數[ $Bq\ Bq^{-1}$ ]

#### 3.6.1.5. 滲漏

滲漏方程式可用下式表示：

$$Leaching = AC_{regoUP}^D percolation_{agri} M_{group,IO'} \quad (106)$$

其中：

$AC_{regoUP,IO}^D$  : 無機碳或其他放射性核種在農業土壤溶質相中的活度濃度[ $Bq\ m^{-3}$ ]見 (94) 式。

$percolation_{agri}$  : 栽培土壤的水的面積，特定的向下流量[ $m^3\ m^{-2}\ y^{-1}$ ]

$area_{10}$  : 一個個體的耕地的表面積[ $m^2$ ]

$N_{group,IO}$  : 暴露組中的個體數。

$$\begin{aligned}
Leaching^{RN} &= RegoUp_{10}^{RN} \frac{(1 - f_{cereal}) f_{regoUp}^D percolation_{agri}}{Z_{regoUp,IO} poro_{regoUp,IO} S_{w,regoUp,IO}} = RegoUp_{10}^{RN} K_{leach}^{RN} \\
Leaching^{14C} &= RegoUp_{10}^{14C} \frac{f_{regoUp}^D percolation_{agri}}{Z_{regoUp,IO} poro_{regoUp,IO} S_{w,regoUp,IO}} = RegoUp_{10}^{14C} K_{leach}^{14C}
\end{aligned}
\tag{107}$$

其中：

$RegoUp_{10}$ ：栽培土壤中的無機形式的活性[Bq]

$f_{ereal}$ ：是在穀物中分離的放射性核種存量的分數[Bq Bq<sup>-1</sup>]

$Z_{regoUp,IO}$ ：生物活性層的厚度[m]

$poro_{goUP,IO}$ ：農業土壤的土壤孔隙度[m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>]

$S_{w,regoUp,IO}$ ：農業土壤的土壤孔隙度[m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>]

$f_{regoUp,IO}^D$ ：農業土壤溶質相中放射性核種的分數[Bq Bq<sup>-1</sup>]

### 3.6.1.6. 礦化

礦化方程式可用下式表示

$$Mineralisation_{regoUp,org} = Re_{goUporg,IO} minRate_{10}
\tag{108}$$

其中：

$Re_{goUporg,IO}$ ：土壤有機質的總活度[Bq]

$minRate_{10}$ ：與土壤有機質相關的礦化速率[kgC kgC<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>]

### 3.6.1.7. 脫氣

脫氣方程式可用下式表示

$$degassing_{10}^{14C} = 2 \frac{RegoUp_{10}^{14C} f_{gas} D_{CO_2,soil,IO}}{Z_{regoUp,IO}^2 poro_{regoUp,IO} (1 - solubilitycoef_{ter})}
\tag{109}$$

其中：

$RegoUp_{10}^{14C}$ ：無機 C-14 在農業土壤中的活性[Bq]

$D_{CO_2,soil,IO}$ ：土壤中二氧化碳的擴散率 [m<sup>2</sup> y<sup>-1</sup>]

$poro_{regoUp,IO}$ ：土壤孔隙度[m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>]

$S_{w,regoUp,IO}$ ：填充水的孔隙的分數[m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>]

$Z_{regoUp,IO}$ ：生物活性層的厚度[m]

$f_{gas}$ ：可用於脫氣的非固體無機碳的分數

$$f_{gas} = 2 \frac{1 - S_{w,regoUp,IO}}{1 - S_{w,regoUp,IO} (1 - solubilityCoef_{ter})}
\tag{110}$$

其中：

$solubilityCoef_{ter}$  : 放射性核種 RN 的放射性衰變的損失[ $\text{mol m}^{-3}$  per  $\text{mol m}^{-3}$ ]

### 3.6.1.8. 穩態時活度濃度

穩態時活度濃度方程式可用下列各式表示

$$Litter_{prod} = decay_{org} + Mineralization_{RegoUp,org}$$

$$Mineralization_{RegoUp,org} = Decay + Leaching + Degassing^{14C} \quad (111)$$

$Decay_c = l^{RN} RegoUp_c^{RN}$  : 是放射性衰變的損失[Bqy<sup>-1</sup>]

$$RegoUp_{org,IO}^{14C*} = \frac{Litter_{prod}^{14C}}{(l^{14C} + minRate)} \quad (112)$$

$$AC_{regUp,org,IO}^{14C*} = \frac{Fertilization_{hay}^{14C} f_{refrac,ter}}{(l^{14C} + minRate) Z_{regUp} dens_{regUp}} \quad (113)$$

$$RegoUp_{IO}^{14C*} = \frac{Litter_{prod}^{14C} minRate}{(l^{14C} + minRate)(l^{14C} + k_{degass}^{14C} + k_{leach}^{14C})} \quad 7-20$$

$$AC_{regUp,IO}^{14C} = \frac{Fertilization_{hay}^{14C} f_{refrac,ter} minRate}{(l^{14C} + minRate)(l^{14C} + K_{degass}^{14C} + k_{leach}^{14C}) Z_{regUp} dens_{regUp}} \quad (114)$$

$$RegoUp_{org,IO}^{RN*} + \frac{Litter_{prod}^{RN}}{(l^{RN} + minRate)} \quad (115)$$

$$AC_{regUp,org,IO}^{RN*} = \frac{Fertilization_{hay}^{14C} (1 - (1 - f_{refrac,ter}) Df_{decomp,ter})}{(l^{14C} + minRate) Z_{regUp} dens_{regUp}} \quad (116)$$

$$RegoUp_{IO}^{RN*} = \frac{\frac{Litter_{prod}^{RN}}{(l^{RN} + minRate)} minRate + Litter_{release}^{RN}}{l^{RN} + K_{leach}^{RN}} \quad (117)$$

$$AC_{regUp,IO}^{RN*} = \frac{Fertilization_{hay}^{RN} \left( \frac{minRate + ((1 - f_{refrac,ter}) Df_{decomp,ter}) l^{RN}}{l^{RN} + minRate} \right)}{(l^{RN} + K_{leach}^{RN}) Z_{regUp} dens_{regUp}} \quad (118)$$

### 3.6.2. 湖泊-沼澤系統的排水與培養

瑞典在 19 世紀末之前，沼澤主要用於乾草堆。20 世紀上半，許多濕地排水後，湖泊水位降低，由於高需求食品生產，沼澤增加排水的技術提升。為了滿足作物種植

的要求，濕地和湖岸的地下水位必須降低，排水後農業耕作土地。非常長的時間（幾個數千年）需培養濕地區域，在沼澤而形成有機質泥炭質。沼澤排水農業生態系統中的核種傳輸和累積的區塊模型（圖 19）。

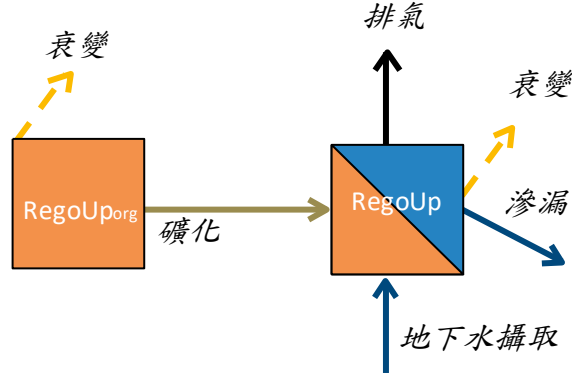


圖 19 沼澤排水農業生態系統中的核種傳輸和累積的模型示意圖

說明：框代表放射性核種量，箭頭表示放射性核種的通量。右框代表無機形式的放射性核種，吸附放射性核種（橙色）和溶液（藍色）中的放射性核種之間以分配係數關係。放射性核種有機形式僅由固態表示（左框）。箭頭表示區塊之間的放射性核種通量和通量進入和離開系統。氣體的質量流量（黑色），和水（深藍色），無機和有機形式的放射性核種以（棕色）表示，放射性衰變以（橘色虛線）表示。大氣層作為放射性核種的匯項。注意：脫氣僅考慮碳（C-14）。

### 3.6.2.1. 農業土壤(RegoUp, RegoUp<sub>org</sub>)

農業土壤方程式可用下列各式表示：

$$\begin{aligned} \text{RegoUp}_{org,DM,t_0} &= (\text{RegoUp}_{org,ter} + \text{RegoPeat}_{org} w_1 + \text{RegoPG}_{org,ter} w_2) f_{area} \\ \text{RegoUp}_{DM,t_0} &= (\text{RegoUp}_{ter} + \text{RegoPeat} w_1 + \text{RegoPG}_{ter} w_2 + \text{RegoPGL}_{ter} w_3) f_{area} \end{aligned} \quad (119)$$

$$w_1 = \begin{cases} \frac{Z_{drain,agri}}{Z_{regoPeat} compact_{peat}}, & \text{if } z_{regoPeat} compact_{peat} > z_{drain,agri} \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$w_2 = \begin{cases} 0, & \text{if } Z_{regoPreat} compact_{peat} > Z_{drain,agri} \\ 1, & \text{if } Z_{rego,agri} - Z_{regoPreat} compact_{peat} > Z_{regoPG,ter} compact_{gyttja} \\ \frac{z_{drain,agri} - Z_{regoPreat} compact_{peat}}{Z_{regoPG,ter} compact_{gyttja}} \end{cases}$$

$$w_3 = \begin{cases} 0, & \text{if } Z_{regoPreat} compact_{peat} + Z_{regoPG,ter} compact_{gyttja} > Z_{drain,agri} \\ 1, & \text{if } Z_{rego,agri} - (Z_{regoPreat} compact_{peat} + Z_{regoPG,ter} compact_{gyttja}) > Z_{regoPG,ter} \\ \frac{z_{drain,agri} - compact_{peat} Z_{regoPreat} - compact_{gyttja} Z_{regoPG,ter}}{Z_{regoGL,ter}} \end{cases} \quad \text{otherwise}$$

(120)

其中：

$Z_{rego\_j,ter}$ ：火山岩層的原始厚度[m]

$Z_{drain,agri}$ ：是下沉後排水和耕作土層的深度[m]

$$f_{area} = \begin{cases} \frac{support\_area_{DM} N_{group}}{area_{obj,ter}}, & \text{if } area_{obj,ter} > support\_area_{DM} N_{group} \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (121)$$

其中：

$area_{obj,ter}$ ：濕地的表面積[m<sup>2</sup>],

$support\_area_{DM}$ ：單一個體的耕地面積 [m<sup>2</sup>]

$N_{group}$ ：於最大暴露時之群體中的個體數量。

$$\begin{aligned} AC_{regoUp,org,DM} &= \frac{RegoUp_{org,DM}}{area_{cult} Z_{drain,agri} dens_{regoUp,DM}'} \\ AC_{regoUp,DM}^{14C} &= \frac{RegoUp_{DM}^{14C}}{area_{cult} Z_{drain,agri} dens_{regoUp,DM}'} \\ AC_{regoUp,DM,i}^{RN} &= \frac{RegoUp_{DM}^{RN} (1 - f_i)}{area_{cult} Z_{drain,agri} dens_{regoUp,DM}'} \quad , \quad i = \{fodder, tuber, cereal\}, \end{aligned} \quad (122)$$

其中：

$AC_{regoUp,DM,i}^{RN}$ ：上部農業土壤中的總活度[Bq]

$Z_{drain,agri}$ ：不飽和農業土層的深度（壓實後）[m]

$dens_{regoUp,DM}$ ：耕作有機土壤的密度[kg<sub>DW</sub> m<sup>-3</sup>]

$f_i$ ：固定在作物中土壤放射性核種清單的分數[Bq Bq<sup>-1</sup>]

$$f_i = \frac{biom_{DM,i'}}{biom_{DM,i'} + \frac{Z_{drain,agri} dens_{regoUp,DM}}{CR_{agri,i}}} \quad (123)$$

其中：

$i$ ：是飼料，土豆和穀物的指數

$biom_{DM,i'}$ ：是以碳為單位的面積特定作物生物量[kgC m<sup>-2</sup>]

$CR_{agri,i}$ ：作物生物量和平衡土壤之間的比率[kg<sub>DW</sub> kgC<sup>-1</sup>]

$$AC_{regoUp,DM}^{D,14C} = \frac{RegoUp_{DM}^{14C} RegoUp^{14C} f_{regoUp,DM}^D}{area_{cult} Z_{drain,agri} poro_{regoUp,DM} S_{w,regoUp,DM}}$$

$$AC_{regoUp,DM,i}^{RN} = \frac{RegoUp_{DM}^{RN} (1 - f_i)}{area_{cult} Z_{drain,agri} dens_{regoUp,DM}}, \quad i = \{fodder, tuber, cereal\}, \quad (124)$$

其中：

$poro_{regoUp,DM}$ ：耕作有機土的孔隙度[m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>]

$S_{w,regoUp,DM}$ ：飽和度

$f_{regoUp,DM}^D$ ：是溶質相中放射性核種的分數[Bq Bq<sup>-1</sup>]

$$f_{regoUp,DM}^D = \frac{1}{1 + \frac{K_{d,regoUp,DM} dens_{regoUp,DM}}{poro_{regoUp,DM} S_{w,regoUp,DM}}} \quad (125)$$

其中：

$K_{d,regoUp,DM}$ ：耕作有機土中的分佈係數[m<sup>3</sup> kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>]

$$poro_{regoUp,DM} = w_4 poro_{regoUp,peat} + (1 - w_4) poro_{regoUp,clay} \quad (126)$$

$$dens_{regoUp,DM} = w_4 dens_{regoUp,peat} + (1 - w_4) dens_{regoUp,clay} \quad (127)$$

$$w_4 = \begin{cases} 1, & \text{if } z_{regoPeat}^{compact}{}_{peat} > z_{drain,agri} \\ \frac{z_{regoPeat}^{compact}{}_{peat}}{z_{drain,agri}}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (128)$$

### 3.6.2.2. 地下水攝取

地下水攝取 (Groundwater uptake) 方程式可用下列各式表示：

$$GW_{uptake,i}^{14C} = Flux_{water,satsoil,agri} area_{DM} N_{group,DM} AC_{soil,saturated}^{D,14C}$$

$$GW_{uptake,i}^{RN} = Flux_{water,satsoil,agri} area_{DM} N_{group,DM} AC_{soil,saturated}^{D,RN}$$

$$AC_{soil,saturated}^{D,14C} = \begin{cases} AC_{regoGL,ter}^D & w_3 < 1 \\ AC_{regolow,ter}^D & w_3 = 1 \end{cases} \quad (129)$$

其中：

$Flux_{water,satsoil,agri}$ ：飽和區到不飽和區的水通量[m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>]

$area_{DM}$ ：每個人的耕地濕地的表面積[m<sup>2</sup>]

$N_{group,DM}$ ：最大暴露組中的個體數[-]

$f_{area,i}$ ：是用於飼料，馬鈴薯和穀物生產面積的分數[-]

$AC_{soil,satur}^D$ ：挖溝深度以下水飽和層中溶質相的活度濃度[Bq m<sup>-3</sup>]

$AC_{regoGL,ter}^D$ ：陸界冰川風化層孔隙水中的活度濃度[Bq m<sup>3</sup>]

$AC_{regoLow,ter}^D$  : 陸域下部風化層孔隙水中的活度濃度[Bq m<sup>3</sup>]

$w_3$  : 結合在耕地土壤中的冰川地幔的分數

$i$  : 作物的指標，飼料、馬鈴薯和穀物。

### 3.6.2.3. 滲漏

滲漏 (Leaching) 方程式可用下列各式表示：

$$\begin{aligned} Leaching_{regoUp,DM,i}^{14C} &= \frac{RegoUp_{DM,i}^{14C} f_{regoUp,DM,i}^D Percolation_{agri}}{Z_{drain,agri} poro_{regoUp,DM} S_{w,regoUP,DM}} = RegoUp_{DM,i}^{14C} k_{leach}^{14C} \\ Leaching_{regoUp,DM,i}^{RN} &= \frac{RegoUp_{DM,i}^{RN} (1 - f_i) f_{regoUp,DM}^D Percolation_{agri}}{Z_{drain,agri} poro_{regoUp,DM} S_{w,regoUP,DM}} = RegoUp_{DM,i}^{RN} k_{leach}^{RN} \end{aligned} \quad (130)$$

其中：

$i$  : 是飼料，馬鈴薯或穀物的指數，

$Percolation_{agri}$  : 耕地土壤的特定向下水流通量 (徑流) [m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>]

$RegoUp_{DM,i}$  : 無機形式的放射性核種在栽培土壤中的活度[Bq]

$Z_{drain,agri}$  : 排水所需的挖溝深度 (在壓實之後) [m]

$poro_{regoUp,DM}$  : 耕作有機土的孔隙度[m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>]

$S_{w,regoUP,DM}$  : 飽和度，

$f_{regoUp,DM}^D$  : 溶質相中放射性核種分數[Bq Bq<sup>-1</sup>]

$f_i$  : 分配給作物的放射性核種存量分數[Bq Bq<sup>-1</sup>]

### 3.6.2.4. 礦化

礦化方程式可用下式表示：

$$Mineralisation_{regoUp,org} = RegoUp_{org,DM} minRate_{DM} \quad (131)$$

其中：

$RegoUp_{org,DM}$  : 土壤有機質中總放射性核種活度，

$minRate_{DM}$  : 排水和耕作時與泥炭和冰川後沉積物的礦化速率[kgC kgC<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>]

### 3.6.2.5. 脫氣

脫氣方程式可用下列各式表示：

$$Degassing^{14C} = 2 \frac{RegoUp_{DM}^{14C} f_{gas} D_{CO_2,soil,DM}}{Z_{drain,agri}^2 poro_{regoUp,DM} (1 - S_{w,regoUP,DM})} = RegoUp_{DM}^{14C} k_{degass}^{14C} \quad (132)$$

其中：

$RegoUp_{DM}^{14C}$  : 無機 C-14 在農業土壤中的活度[Bq]



$D_{CO_2,soil,DM}$  : CO<sub>2</sub> 在土壤中的擴散係數，

$poro_{regoUp,DM}$  : 土壤孔隙度[m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>]

$S_{w,regoUp,DM}$  : 是填充水的孔隙的分數[m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>]

$z_{drain,agri}$  : 排水所需的挖溝深度[m]

$f_{gas}$  : 可用於脫氣的非固體無機碳分數

### 3.6.2.6. 排水後前 50 年的平均活度濃度

排水後前 50 年的平均活度濃度可用下列各式表示：

$$\begin{aligned} \frac{dRegoUp_{org,DM}}{dt} &= -decay_{regoUp,org} - Miner_{regoUp,org} \\ \frac{dRegoUp_{DM}^{14C}}{dt} &= Miner_{regoUp,org}^{14C} + GW_{uptake}^{14C} - Decay_{regoUp,org} - Leaching_{regoUp}^{14C} - Degassing_{regoUp}^{14C} \\ \frac{dRegoUp_{org,DM}^{RN}}{dt} &= Miner_{regoUp,org}^{RN} + GW_{uptake}^{RN} - Decay_{regoUp,i}^{RN} - Leaching_{regoUp,i}^{RN} \end{aligned} \quad (133)$$

其中：

$RegoUp_{org,DM} i$  : 耕作土壤中無機 C-14 的清單[Bq]

$RegoUp_{org,DM}^{RN}$  : 作物 i 的栽培土壤中無機形式的放射性核種的清單[Bq]

$Decay_{regoUp,org} = \lambda RegoUp_{org,DM}$  : 衰變表示放射性核種的損失 [Bq y<sup>-1</sup>]

$Decay_{regoUp} = \lambda RegoUp_{DM}$  : 從有機庫存到無機庫存的通量[Bq y<sup>-1</sup>]

$Miner_{regoUp,org} = minRateRegoUp_{org,DM}$

$GW_{uptake}$  : GW 表示無機形式的放射性核種與地下水[Bq y<sup>-1</sup>]

$Leaching_{regoUp}$  : 表示由於地下水的滲透導致的放射性核種的損失[Bq y<sup>-1</sup>]

$Degassing_{regoUp}$  : 由脫氣而導致的無機 C-14 [Bq y<sup>-1</sup>]的損失。

$$RegoUp_{org,DM}(t) = RegoUp_{org,DM,t_0} e^{-(1+minRate)t}$$

$$RegoUp_{DM}^{14C}(t) = RegoUp_{DM,t_0}^{14C} e^{-(l^{14C} + k_{leach}^{14C} + k_{degass}^{14C})t}$$

$$+ GW_{uptake}^{14C} \frac{1 - e^{-(l^{14C} + k_{leach}^{14C} + k_{degass}^{14C})t}}{l^{14C} + k_{leach}^{14C} + k_{degass}^{14C}}$$

$$+ RegoUp_{org,DM,t_0}^{14C} \frac{minRate}{k_{leach}^{14C} + k_{degass}^{14C} - minRate} \frac{e^{-(1+minRate)t} - e^{-(l^{14C} + k_{leach}^{14C} + k_{degass}^{14C})t}}{k_{leach}^{14C} + k_{degass}^{14C} - minRate}$$

(134)

$$\begin{aligned}
RegoUp_{DM,i}^{RN}(t) &= RegoUp_{DM,t_0}^{RN} e^{-(l^{RN} + k_{leach}^{RN})t} \\
&+ GW_{uptake}^{RN} \frac{1 - e^{-(l^{RN} + k_{leach}^{RN})t}}{l^{14C} + k_{leach}^{14C} + k_{degass}^{14C}} \\
&+ RegoUp_{org,DM,t_0}^{RN} minRate \frac{e^{-(l^{RN} + minRate)t} - e^{-(l^{RN} + k_{leach}^{RN})t}}{k_{leach}^{RN} - minRate} \\
i &= \{fodder, tuber, cereal\} \\
RegoUp_{org,aver,DM} &= \frac{\int_{t_0}^{t_{50}} RegoUp_{org}(t)dt}{t_{50} - t_0} = RegoUp_{org,t_0} f_{regUp,org,aver}
\end{aligned} \tag{135}$$

$$\begin{aligned}
f_{regUp,org,aver} &= \frac{1 - e^{-(l + minRate)(t_{50} - t_0)}}{(l + minRate)(t_{50} - t_0)} \\
RegoUp_{aver,DM}^{14C} &= \frac{\int_{t_0}^{t_{50}} RegoUp_{DM}^{14C}(t)dt}{t_{50} - t_0} \\
RegoUp_{i,aver,DM}^{RN} &= \frac{\int_{t_0}^{t_{50}} RegoUp_{DM,i}^{RN}(t)dt}{t_{50} - t_0}, \quad i = \{fodder, tuber, cereal\}
\end{aligned} \tag{136}$$

$$\begin{aligned}
RegoUp_{aver,DM}^{14C} &= \frac{\int_{t_0}^{t_{50}} RegoUp_{DM}^{14C}(t)dt}{t_{50} - t_0} \\
RegoUp_{i,aver,DM}^{RN} &= \frac{\int_{t_0}^{t_{50}} RegoUp_{DM,i}^{RN}(t)dt}{t_{50} - t_0}, \quad i = \{fodder, tuber, cereal\}
\end{aligned} \tag{137}$$

$$\begin{aligned}
f_{regUp,aver} &= \frac{1 - e^{-(l + k_{leach} + k_{degass})(t_{50} - t_0)}}{(l + k_{leach} + k_{degass})(t_{50} - t_0)} \\
AC_{regUp,aver,DM}^{14C} &= \frac{RegoUp_{i,aver,DM}^{RN}}{area_{DM} N_{group,DM} z_{drain,agri} dens_{regUp,DM}}, \\
AC_{regUp,i,aver,DM}^{RN} &= \frac{RegoUp_{aver,DM}^{14C}}{area_{DM} f_{area,i} N_{group,DM} z_{drain,agri} dens_{regUp,DM}}, \quad i = \{fodder, tuber, cereal\} \\
AC_{regUp,org,aver,DM} &= \frac{RegoUp_{org,aver,DM}}{area_{DM} N_{group,DM} z_{drain,agri} dens_{regUp,DM}},
\end{aligned} \tag{138}$$

其中：

$area_{DM}$ ：每個人的耕地濕地的表面積[m<sup>2</sup>]

$N_{group,DM}$ ：最大暴露組中的個體數[-]

$dens_{regUp}$ ：耕作有機土的密度[-]

$z_{drain,agri}$ ：排水所需的挖溝深度[m]

### 3.6.3. 菜園種植

可能會影響未來永久居民輻射劑量暴露的幾種可能的途徑，這些暴露途徑包括灌溉，生物質燃料燃燒和土壤改良，海藻施肥及灰回收。對於安全評估，種植園自給生產小規模的園藝蔬菜和根莖作物，曝露途徑是施肥和作物生長的菜園，和挖掘水井或地表水之飲用。生物量和泥炭是可用於產生熱量和能量自然資源，因此，以一個家庭似乎是合理的單位，評估燃燒氣體吸入和菜園因使用灰作為肥料之暴露評估。海洋藻類（如海藻）已經是波羅的海沿岸肥料的重要來源，所以，合理的假設會發生在當地從海藻用作肥料的放射性核種暴露。圖 20 描述種植園點相關的核種傳輸和累積的模型示意圖。另外由於使用的土地資源和挖掘或鑽井的壽命，50 年繼續使用（即成人的壽命），對於放射性核種積累在這片土地利用變量的時間評估基礎。

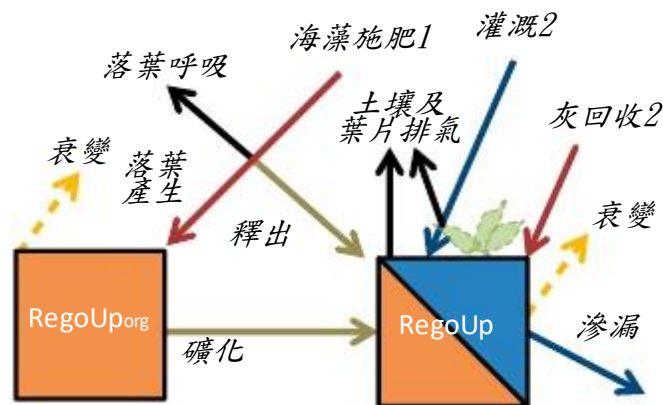


圖 20 種植園點相關的核種傳輸和累積的模型示意圖

說明：框代表放射性核種量，箭頭表示放射性核種的通量。右框代表無機形式的放射性核種，以區塊方式被分隔。吸附的放射性核種（橙色）和溶液中的放射性核種（藍色）。有機形式的放射性核種僅由固態表示（左框）。箭頭表示區塊之間的放射性核種通量進入和離開系統。氣體的質量流量（黑色），和水（深藍色）和固體物質（深紅色），無機和有機形式的放射性核種以（棕色）表示，放射性衰變以（橘色虛線）表示。大氣層作為放射性核種的匯項。注意：(1) 在淹沒期間藻類施肥的生物質需被考慮，(2) 灰回收和灌溉係為當生物園物體從海中出來時才會出現。落葉呼吸和土壤及葉片脫氣，僅考慮碳（C-14）核種。

#### 3.6.3.1. 栽培土壤[RegoUp, RegoUp<sub>org</sub>]

栽培土壤（或頂土）上層的放射性核種量由區塊  $RegoUp$  和  $RegoUp_{org}$  所代表。頂部風化層代表土壤受挖掘和生物擾動的影響，及作物主要攝取營養物和微量元素。該層被假定為良好排水並且具有高的土壤生物活性。有機物相關的放射性核種，僅考慮

固相，而無機物區塊包括孔隙水中的活度和吸附到固相的活度。

栽培土壤中放射性核種活度濃度，包括： $AC_{regoUp,GP}$  和  $AC_{regoUp,org,GP}$  [Bq kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>]，該溶質相中的活度濃度  $AC_{regoUp,GP}^D$  [Bq m<sup>-3</sup>]，由方程式 (94) 及 (96) 計算，分別使用菜園地塊和兩個相關作物（馬鈴薯和蔬菜）的參數。

### 3.6.3.2. 施肥

施肥導致海洋生態系統的海藻放射性核種進入耕地，或深泥炭或生物質灰之放射性核種從沼澤生態系統進入到耕地。放射性核種在藻類生物質最初是有機形式，但經過快速分解大部分成無機型式或大氣（C-14）。燃燒後留在灰中的放射性核種是無機形式，海洋植物施肥、回收灰從住宅加熱之方程式表示如下

#### 1. 海洋植物施肥

$$Fertilisation_{algae} = AC_{biom,macro} demand_{AlgFertil} \quad (139)$$

其中：

$AC_{biom,macro}$ ：藻類肥料中的活度濃度[Bq kgC<sup>-1</sup>]

$demand_{AlgFertil}$ ：每平方米菜園地塊的化肥需求量[kgC m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>]

$\alpha_{AlgFertil}$ ：源自生物圈物體的肥料分數[kgC y<sup>-1</sup> per kgC y<sup>-1</sup>]

$$\alpha_{AlgFertil} = \frac{supply_{algFertil}}{demand_{AlgFertil} area_{GP} N_{group,GP}} \quad (140)$$

其中：

$N_{group,GP}$ ：菜園家庭中的個人數

$area_{GP}$ ：每戶每戶的園地面積[m<sup>2</sup>]

$supply_{algFertil}$ ：藻類化肥的供應[kgC y<sup>-1</sup>]

$$supply_{AlgFertil} = NPP_{macro} area_{obj,aqu} \quad (141)$$

其中：

$NPP_{macro}$ ：水域植物區域特異性淨初級生產[kgC m<sup>-2</sup> y<sup>-2</sup>]

$area_{obj,aqu}$ ：生物圈物體的水域部分的表面積[m<sup>2</sup>]

#### 2. 回收灰從住宅加熱

$$Fertilisation_{ash,type} = \frac{AC_{fuel,type} (1 - f_{combust}) fuel_{cons,type}}{area_{GP} N_{group,GP}}$$

$type = \{peat, wood\}$

(142)

其中：

$AC_{fuel}$  : 用作生物質燃料泥炭和木材中的活度濃度[Bq kg<sup>-1</sup>]

$f_{combust}$  : 木材或泥炭燃燒後結束於飛灰和氣體中燃料庫存的一部分[kg<sub>DW</sub> kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>]

$fuel_{cons}$  : 通過燃燒泥炭或柴火來加熱家庭所需的生物質燃料 (約 20,000kWh) 的消耗[kg<sub>DW</sub> y<sup>-1</sup>]

$area_{GP}$  : 菜園的面積[m<sup>2</sup>]

$N_{group,GP}$  : 菜園家庭中的個人數

$$AC_{fuel,wood} = AC_{pp,ter} f_{C,pp,ter} a_{fuel,wood}$$

$$AC_{fuel,wood} = AC_{regoPeat,tot} a_{fuel,wood}$$

( 143 )

其中：

$AC_{pp,ter}$  : 泥沙植被中的活度濃度[Bq kgC<sup>-1</sup>]

$f_{C,pp,ter}$  : 沼澤植被的單位乾重的碳量[kgC kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>]

$a_{fuel}$  : 由生物圈物體中的燃料資源限制的潛在稀釋因子[Bq kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>]

$$AC_{regopeat,tot} = AC_{regoPeat,ter} + AC_{regoPeat,org,ter}$$

( 144 )

其中：

$AC_{regoPeat,ter}$  : 無機形式的放射性核種濃度[Bq kgC<sup>-1</sup>]

$AC_{regoPeat,org,ter}$  : 深部泥炭泥中有機形式的濃度[Bq kgC<sup>-1</sup>]

$$a_{ash,wood} = \begin{cases} 1, & area_{obj,ter} > N_{group} area_{support} \\ \frac{area_{obj,ter}}{N_{group} area_{support,wood}}, & area_{obj,ter} < N_{group} area_{support,wood} \end{cases}$$

( 145 )

$$a_{ash,wood} = \begin{cases} 1, & supply_{peat} > N_{group} demand_{peat} \\ \frac{supply_{peat}}{N_{group} demand_{peat}}, & supply_{peat} < N_{group} demand_{peat} \end{cases}$$

其中：

$area_{obj,ter}$  : 生物圈物體的濕地面積[m<sup>2</sup>]

$area_{support,wood}$  : 支持一個家庭對木柴需求的區域[m<sup>2</sup>]

$demand_{peat}$  : 在 50 年期間為每個人家庭加熱所需的泥炭質量[kg<sub>DW</sub>]

$supply_{peat}$  : 已經積累在生物圈物體中的泥炭質量[kg<sub>DW</sub>]

$$supply_{peat} = area_{obj,ter} z_{regoPeat} dens_{regopeat}$$

( 146 )

其中：

$z_{regoPeat}$  : 已經積累在生物圈物體中的泥炭質量[m]

$dens_{regopeat}$  : 累積泥炭的密度[kg<sub>DW</sub> m<sup>-3</sup>]

### 3.6.3.3. 灌溉

灌溉之方程式可用下式表示：

其中：

$$Irrigation_{crop} = amount_{irrig} area_{GP} N_{group} f_{area,crop} AC_{water,irrig} \quad (147)$$

$amount_{irrig}$  : 每年使用的總面積特定量的水[m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>]

$area_{GP}$  : 每個人的園地面積[m<sup>2</sup>]

$N_{group}$  : 一個家庭中的個人數量

$f_{area,crop}$  : 用於耕種蔬菜或土豆的菜園地塊分數，[m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>]

$AC_{water,irrig}$  : 灌溉水的活度濃度[Bq m<sup>-3</sup>].

### 3.6.3.4. 葉子持留

葉子持留 (Leaf retention) 方程式可用下列各式表示：

其中：

$$LeafRetention^{RN}(t) = AC_{water,irrig} LeafStoreCapacity_{veg} LAI_{veg} e^{-washoffcoef}, \quad (148)$$

$AC_{water,irrig}$  : 灌溉水中的活度濃度[Bq m<sup>-3</sup>].

$LeafStoreCapacity_{veg}$  : 葉蔬菜的葉容量[m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup>]

$LAI_{veg}$  : 葉面積指數，土壤每單位表面積的葉面積[m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>]

$washoffcoef$  : 葉菜蔬菜活度隨時間下降的速率常數[y<sup>-1</sup>],

$t$  : 最後一次灌溉事件以來的時間[y]

$$AC_{LeafRet} = \frac{\int_0^{time_{IP}} LeafRetention(t) dt}{time_{IP} (NPP_{ag,veg} / N_{irrig})} \quad (149)$$

其中：

$NPP_{ag,veg}$  : 每年地上蔬菜產量[kgC m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>]

$time_{IP}$  : 兩個灌溉事件[y]之間的時間段[y]

$$time_{IP} = time_{vegPeriod} / N_{irrig} \quad (150)$$

$time_{vegPeriod}$  : 植被的生長周期[y]。

$AC_{LeafRet} =$

$$\frac{AC_{water,irrig} LeafStoreCapacity_{veg} LAI_{veg} N_{irrig} (1 - e^{-washoffcoef time_{IP}})}{time_{IP} NPP_{ag,veg} washoffCoef} \quad (151)$$

### 3.6.3.5. 葉子脫氣 (C-14)

葉子脫氣 (Leaf degassing) (碳-14)之方程式可用下列各式表示：

$$LeafDegassing^{14C} = Irrigation f_{Leafintercepted} \quad (152)$$

其中：

$Irrigation$  : C-14 年灌溉用水的年度量[Bq y<sup>-1</sup>]

$f_{Leafintercepted}$  : 葉子截留灌溉水的分數[無因次]

$$f_{Leafintercepted} = \frac{LeafStoreCapacity_{crop} LAI_{crop}}{amount_{irrig} / N_{irrig}} \quad (153)$$

其中：

$LeafStoreCapacity_{crop}$  : 作物的葉存儲容量[m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup>]

$LAI_{crop}$  : 葉面積指數，葉面的每單位面積[m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>]

$amount_{irrig}$  : 每年使用的水，總面積比表面積[m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>]

$N_{irrig}$  : 植被期間的灌溉事件的數量[y<sup>-1</sup>]

$LeafDegassing_{crop}^{14C}$

$$N_{irrig} area_{GP} N_{group} f_{area,crop} AC_{water,irrig} LeafstoreCapacity_{crop} LAI_{crop} \\ crop = \{tuber, vegetables\} \quad (154)$$

其中：

$AC_{water,irrig}$  : 灌溉水中的活度濃度[Bq m<sup>-3</sup>]

$area_{GP}$  : 每個人的菜園地塊的面積[m<sup>2</sup>]

$N_{group}$  : 一個家庭中的人數

$f_{area,crop}$  : 用於栽培蔬菜或土豆的菜園地塊面積的分數[m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>]

### 3.6.3.6. 滲漏

滲漏之方程式可用下列各式表示：

$$Leaching_{regoup,GP,crop}^{RN} = \frac{RegoUp_{GP,crop}^{RN} (1 - f_{crop}) f_{regoup,GP}^D percolation_{agri}}{z_{regoup,GP} poro_{regoup,GP} S_{w,regoup,GP}} \\ = RegoUp_{GP,crop}^{RN} k_{leach,crop}^{RN} \\ Leaching_{regoup,crop}^{14C} = \frac{RegoUp_{GP,crop}^{14C} f_{regoup,GP}^D percolation_{agri}}{z_{regoup,GP} poro_{regoup,GP} S_{w,regoup,GP}} \\ = RegoUp_{GP,crop}^{14C} k_{leach,crop}^{14C} \quad (155)$$

其中：

$percolation_{agri}$ ：水的面積特定向下流量[m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>]

$RegoUp_{GP}$ ：耕地土壤中的無機活度[Bq]

$z_{regUp,GP}$ ：生物活性層的厚度[m]

$poro_{regUp,GP}$ ：耕地土壤的孔隙度[m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>]

$S_{w,regUp,GP}$ ：耕地土壤飽和度[m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>]

$f_{regUp,GP}^D$ ：栽培土壤中溶質相中放射性核種的分數[Bq Bq<sup>-1</sup>]

$percolation_{agri}$ ：耕地土壤中面積特定的向下流量[m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>]

$k_{leach}$ ：從與蔬菜或土豆的土壤浸出的比例速率常數。

### 3.6.3.7. 礦化

礦化之方程式可用下列各式表示：

$$Mineralisation_{regUp,org} = RegoUp_{org,GP} minRate_{GP} \quad (156)$$

其中：

$RegoUp_{org,GP}$ ：土壤有機質中總放射性核種活度

$minRate_{GP}$ ：在排水和耕作時與泥炭和冰川後沉積物的礦化速率[kgC kgC<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>].

### 3.6.3.8. 脫氣（土壤）

脫氣（土壤）之方程式可用下列各式表示：

$$Degassing^{14C} = 2 \frac{f_{regUp,GP}^D f_{gas,GP} D_{CO_2,soil,GP} RegoUp_{GP}^{14C}}{z_{regUp,GP}^2 poro_{regUp,GP} (1 - S_{w,regUp,GP})} = RegoUp_{GP}^{14C} k_{degass}^{14C} \quad (157)$$

其中：

$RegoUp_{GP}^{14C}$ ：無機 C-14 在耕地土壤中的活度[Bq]

$D_{CO_2,soil,GP}$ ：CO<sub>2</sub> 在土壤中的擴散係數[m<sup>2</sup> y<sup>-1</sup>]

$poro_{regUp,GP}$ ：耕作土壤的孔隙度[m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>]

$S_{w,regUp,GP}$ ：耕地土壤飽和度[m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>]

$z_{regUp,GP}$ ：生物活性層的厚度[m]

$f_{regUp,GP}^D$ ：溶質（非固相）土壤中 C-14 的分數[Bq Bq<sup>-1</sup>]

$f_{gas,GP}$ ：可用於脫氣的非固體無機碳的分數

$$f_{gas,GP} = \frac{1 - S_{w,regUp,GP}}{1 - S_{w,regUp,GP}^{(solubilityCoefier)}} \quad (158)$$



$solubilityCoef_{ter}$  :

### 3.6.3.9. 從燃燒釋放到大氣

從燃燒釋放到大氣之方程式可用下列各式表示：

$$\begin{aligned} Release_{combust,wood} &= fuel_{cons,wood} f_{combust} AC_{pp,ter} a_{fuel,wood} \\ Release_{combust,peat} &= fuel_{cons,bust} f_{combust} AC_{regoPeat,tot} a_{fuel,peat} \end{aligned} \quad (159)$$

其中：

$fuel_{cons,type}$ ：是經由燃燒泥炭或柴火加熱家庭所需的生物質燃料的消耗率（～20,000kWh）[kgDW y<sup>-1</sup>]

$AC_{pp,ter}$ ：沼澤植被的活度濃度[Bq kgC<sup>-1</sup>]

$f_{C,pp,ter}$ ：每單位乾重的沼澤植被的碳質量[kgC kg<sup>-1</sup>]

$AC_{regoPeat,tot}$ ：泥炭中的總活度濃度[Bq kgDW<sup>-1</sup>]

$f_{combust}$ ：燃燒後在飛灰和氣體中燃料量的含量分數[kgC kg<sup>-1</sup>]

$a_{fuel,type}$ ：由於生物圈物體中的燃料資源的限制潛在稀釋因子[無因次]

### 3.6.3.10. 灌溉和施肥的平均活度濃度

灌溉和施肥的平均活度濃度之方程式可用下列各式表示：

$$\begin{aligned} \frac{dRegoUp_{org,GP}^{14C}}{dt} &= Input_{Fertil,org}^{14C} - Decay_{regoUp,GP}^{14C} - Miner_{regoUp,GP}^{14C} \\ &= Input_{Fertil,org}^{14C} - RegoUp_{org,GP}^{14C} (\lambda^{14C} + minRate_{regoUp,GP}) \\ Input_{Fertil,org}^{14C} &= \begin{cases} Fertil_{algae}^{14C} area_{GP} N_{group} f_{refrac,ter} & \text{during submerged period} \\ 0 & \text{during land period} \end{cases} \end{aligned} \quad (160)$$

$$\begin{aligned} \frac{dRegoUp_{GP}^{14C}}{dt} &= irrig^{14C} + Miner_{regoUp,GP}^{14C} - Decay_{regoUp,GP}^{14C} - Leach_{degass}^{14C} \\ &\quad - Degass_{regoUp,GP}^{14C} \\ &= Irrig^{14C} + Miner_{regoUp}^{14C} - RegoUp^{14C} (\lambda^{14C} + k_{leach}^{14C} + k_{degass}^{14C}) \end{aligned} \quad (161)$$

$$\begin{aligned} \frac{dRegoUp_{org,GP}^{RN}}{dt} &= Input_{Fertil,org}^{RN} - Decay_{regoUp,GP}^{RN} - Miner_{regoUp,GP}^{RN} \\ &= Input_{Fertil,org}^{RN} - RegoUp_{org,GP}^{RN} (\lambda^{RN} + minRate_{regoUp,GP}) \\ Input_{Fertil,org}^{RN} &= \begin{cases} Fertil_{algae}^{RN} area_{GP} N_{group} (1 - (1 - f_{refrac,ter}) df_{decomp,ter}) & \text{during submerged period} \\ 0 & \text{during land period} \end{cases} \end{aligned} \quad (162)$$

$$\begin{aligned}
\frac{d\text{RegoUp}_{orgGP}^{RN}}{dt} &= f_{area,crop} (\text{Input}_{Fertil,org}^{RN} + \text{irrig}^{RN} + \text{Miner}_{regUp,GP}^{RN}) \\
&\quad - (\text{Dacay}_{regUp,GP}^{14C} + \text{Leach}_{regUp,GP,crop}^{14C}) \\
&= f_{areacrop} (\text{Input}_{Fertil,org}^{RN} + \text{Irrig}^{RN} + \text{Miner}_{regUp,GP}^{RN}) \\
&\quad - \text{RegoUp}^{14C} (\lambda^{14C} + k_{leach,crop}^{14C}) \\
&\quad \text{crop} = \{\text{vegetables,tuber}\}
\end{aligned} \tag{163}$$

$$\text{AC}_{regUp,org,GP}^{14C}(t) = (\text{input}_{Fertil,org}^{14C}) \frac{1 - e^{-(\lambda^{14C} + \text{minRate})t}}{(l^{14C} + \text{minRate})Vr} \tag{164}$$

$$\text{AC}_{regUp,GP}^{14C}(t) = (\text{irrig}^{14C} + \text{Miner}_{regUp,GP}^{14C}) \frac{1 - e^{-(\lambda^{14C} + k_{leach}^{14C} + k_{degass}^{14C})t}}{(l^{14C} + k_{leach}^{14C} + k_{degass}^{14C})Vr} \tag{165}$$

$$\text{AC}_{regUp,org,GP}^{RN}(t) = (\text{input}_{Fertil,org}^{RN} +) \frac{1 - e^{-(\lambda^{RN} + \text{minRate})t}}{(l^{14C} + \text{minRate})Vr} \tag{166}$$

$$\text{AC}_{regUp,crop,GP}^{RN}(t) = (\text{input}_{Fertil}^{14C} + \text{Irrig}^{RN} + \text{Miner}_{regUp,GP}^{RN}) \frac{1 - e^{-(\lambda^{RN} + k_{leach,crop}^{RN})t}}{(l^{RN} + K_{leach,crop}^{RN})Vr} \tag{167}$$

$$Vr = z_{regUp} \text{area}_{cult} N_{group} \text{dens}_{regUp} \tag{168}$$

$$\begin{aligned}
\overline{\text{AC}}_{\text{RegoUp,org,GP}} &= \frac{1}{(t_{end} - t_0)} \int_{t_0}^{t_{end}} \text{AC}_{\text{RegoUp,org}}(t) dt = \{t_0 = 0\} \\
&= \frac{\text{input}_{Fertil,org} f(\text{area}_{GP} N_{Group})}{(l + \text{minRate}) z_{regUp} \text{dens}_{regUp}} f_{regUp,org,dynam}
\end{aligned} \tag{169}$$

其中：

$f_{regUp,org,dynam}$ ：描述穩態條件核種庫存量的偏差

$$f_{regUp,org,dynam} = 1 - \frac{1 - e^{-(l + \text{minRate})t_{end}}}{(l + \text{minRate})t_{end}} \tag{170}$$

$$\begin{aligned}
\overline{\text{AC}}_{\text{RegoUp,GP}} &= \frac{1}{(t_{50} - t_0)} \int_{t_0}^{t_{50}} \text{AC}_{\text{RegoUp}}(t) dt = \{t_0 = 0\} \\
&= \frac{\sum \text{Input} / (\text{area}_{cult} N_{group})}{(l + k_{degass} + k_{leach}) z_{regUp} \text{dens}_{regUp}} f_{regUp,dynam}
\end{aligned} \tag{171}$$

$$f_{regoUp,dynam} = 1 - \frac{1 - e^{-(l+k_{degass}+k_{leach})tend}}{(l+k_{degass}+k_{leach})tend} \quad (172)$$

$$k_{degass}^{14C} = \frac{2f_{regoUp}^D f_{gas} D_{CO_2,soil}}{z_{regoUp}^2 poro_{regoUp} S_{w,regoUp}} \quad (173)$$

$$k_{leach,crop} = \frac{(1-f_{crop})f_{regoUp}^D percolation_{cult}}{z_{regoUp} poro_{regoUp} S_{w,regoUp}} \quad (174)$$

$$\sum input = Input_{Fertil} + irrigation + Mineralis_{RegoUp} \quad (175)$$

$$\begin{aligned} Mineralis_{regoUp} &= \overline{AC}_{RegoUp,org} V_{rminRate} \\ &= \frac{Input_{Fertil,org} minRate}{l + minRate} f_{regoUp,org,dynam} \end{aligned} \quad (176)$$

### 3.7. 地面大氣

本節說明  $^{14}CO_2$  在近地表大氣中活度濃度的子模型（和比活度）的計算。在大氣中氣體與土壤和水交換，其中發生植物吸收和人類可能由於吸入而暴露於氣態形式的放射性核種。這裡提出兩個模型：i) C-14 從植被土壤和植物葉片脫氣釋放到大氣中，ii) C-14 經由水脫氣釋放到水體（如湖）上方的大氣層。

#### 3.7.1. 表面大氣高於植被的土地

植被土地上近地表大氣概念模型包括三個氣層（如圖 21）。C-14 釋放到最接近地表面的冠層（見下文），並假定 C-14 將在大氣層中與所有的穩定碳（C-12）充分混合。兩種同位素經過空氣垂直紊流和橫向平流通量，與安全性評估相關的時間尺度（超過生長季節或一年）是假定發生穩態傳輸過程。模型模擬的目的是 C-14 活度濃度於初級生產者中的研究，以用於計算食物攝入和大氣中的劑量。

第一大氣層-冠層（Canopy layer, CA）：從土壤表面延伸到的頂部樹冠，這是在空氣和土壤之間發生氣體交換的層，其中初級生產者經由光合作用以固定大氣碳。第二層（冠層上方一層）：從頂部延伸植被的冠層到地面以上之 2.5 公尺位置，由於安全評估中考慮低於 1 公尺所有植被類型冠層，所以在第二層位置，人類會吸入到氣態 C-14 造成暴露。第三層是用於表示 C-14 的再循環的紊流傳輸，該層假定厚度對預測的影

響較小。

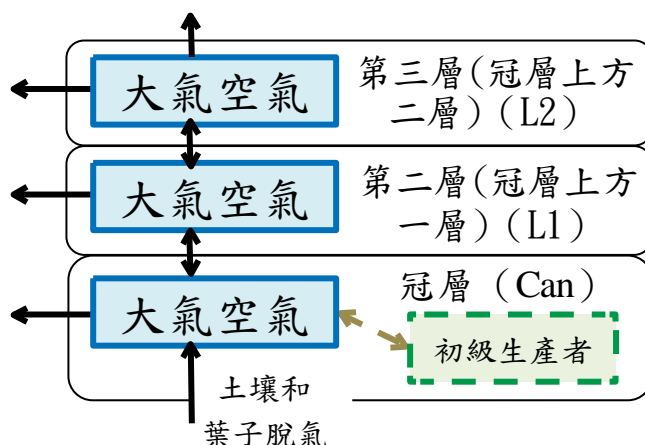


圖 21 計算表面大氣高於植被土地之 C-14 傳輸結果模型概念示意圖

說明：框代表放射性核種量和箭頭表示放射性核種通量。假定初級生產者於冠層經由光合作用及呼吸作用（棕色虛線箭頭）與大氣進行穩態交換。垂直和水平箭頭代表由垂直紊流和側向平流空氣流（黑色箭頭）以驅動 C-14 通量。C-14 向冠層的釋放是經由從土壤中脫氣和經由灌溉過程葉子攔截水產生脫氣作用（僅發生於田園）

### 3.7.1.1.C-14 冠層中的比活度

冠層中的比活度可以用下列方程式表示：

$$SA_{atmos,can,i}^{14C} = \frac{ReleaseRate_i}{Flux_{pp,i}Flux_{turb,i} + Flux_{adv,i}} \quad (177)$$

其中：

$ReleaseRate$ ：C-14 對冠層的面積歸一化釋放速率 [ $kgC\ m^{-2}\ y^{-1}$ ]

$Flux_{pp}$ ：從冠層空氣到初級生產者的穩定碳面積歸一化淨通量 [ $kgC\ m^{-2}\ y^{-1}$ ]

$Flux_{adv}$ ：通過平流運輸從冠層空氣的穩定碳面積歸一化淨通量 [ $kgC\ m^{-2}\ y^{-1}$ ]

$Flux_{turb}$ ：通過紊流運輸從冠層空氣中得到的穩定碳面積歸一化淨通量 [ $kgC\ m^{-2}\ y^{-1}$ ]

$i$ ：是指在栽培系統(cereal10, cerealDM, tuberDM, tuberGP, vegetablesGP, fodderDM) 中代表沼澤或作物的指數。

### 3.7.1.2.C-14 釋放到冠層

釋放到冠層可以用下列方程式表示：

$$\begin{aligned}
ReleaseRate_{ter} &= \frac{Degassing_{ter}^{14C}}{area_{obj,ter}} \\
ReleaseRate_{IO} &= \frac{Degassing_{IO}^{14C} + Litter_{resp,IO}^{14C}}{area_{obj,ter}} \\
ReleaseRate_{DM} &= \frac{Degassing_{DM}^{14C}}{area_{DM} gN_{group,DM}} \\
ReleaseRate_{GP} &= \frac{Degassing_{GP}^{14C} + Litter_{resp,GP}^{14C} + LeafDegassing^{14C}}{area_{GP} ? N_{group,GP}}
\end{aligned} \tag{178}$$

其中：

$Degassing$  : C-14 從土壤到冠層的釋放速率[Bq y<sup>-1</sup>]

$Litter_{resp}$  : C-14 從不穩定有機物質分解的釋放速率[Bq y<sup>-1</sup>]

$area_{obj,ter}$  : 濕地的表面積[m<sup>2</sup>]

$area_{IO/DM/GP}$  : 每個個體的培養表面積[m<sup>2</sup>]

$N_{group}$  : 最大暴露組中的個體數量[無單位]

### 3.7.1.3. 至初級生產者的通量

至初級生產者的通量可以用下列方程式表示：

$$Flux_{pp,i} = NPP_i (1 - f_{rootUptakes}) \tag{179}$$

其中：

$NPP$  : 生態系統 i 的面積中特定淨初級生產量[kgC m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>]

$f_{rootUptakes}$  : 通過根吸收同化的碳的分數[kgC m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>]

$i$  : 是指在栽培系統(cereal10, cerealDM, tuberDM, tuberGP, vegetablesGP, fodderDM)中代表沼澤或作物的指數。

### 3.7.1.4. 紊流通量

至初級生產者的通量可以用下列方程式表示：

$$Flux_{trub} = Vel_{exch,Ca,L1} \times Conc_{C,atmos} (1 - RF_{L1ToCA}) \tag{180}$$

其中：

$Conc_{C,atmos}$  : 大氣中的碳濃度[kgC m<sup>-3</sup>]

$Vel_{exch,Ca,L1}$  : 在冠層和冠層上方一層之間的空氣交換速度[m y<sup>-1</sup>]

$RF_{L1ToCA}$  : 冠層上方一層到冠層的碳循環因子[無單位]。

$$RF_{L1ToCA} = \frac{Vel_{exch,Ca,L1}}{Vel_{exch,L1,L2} (1 - RF_{L2ToL1}) + Vel_{exch,Ca,L1} + Vel_{AdvL1}} \tag{181}$$

$Vel_{exch,L1,L2}$  : 冠層上方一層及二層之間的空氣交換速度[m y<sup>-1</sup>]

$Vel_{AdvL1}$  : 冠層上方一層的空氣交換速度[m y<sup>-1</sup>]

$RF_{L2ToL1}$  : 是從第二上冠層到第一上冠層的碳再循環因子。[無單位]

$$RF_{L2ToL1} = \frac{Vel_{exch,L1,L2}}{Vel_{exch,L2,Upp} + Vel_{exch,L1,L2} + Vel_{AdvL2}} \quad (182)$$

$Vel_{exch,L2,Upp}$  : 冠層上方二層和大氣層的上層之間的空氣交換速度。[m y<sup>-1</sup>].

$Vel_{AdvL2}$  : 通過平流輸送的冠層上方二層的空氣交換速度[m y<sup>-1</sup>]

$$Vel_{exch,Ca,L1} = \frac{I}{0.5(res_{CA} + res_{L1})} \quad (183)$$

$$Vel_{exch,L1,L2} = \frac{I}{0.5(res_{L1} + res_{L2})} \quad (184)$$

$$Vel_{exch,L2,Upp} = \frac{I}{0.5? res_{L2}} \quad (185)$$

其中：

$res_{CA}$  : 冠層對紊流運輸的阻力[y m<sup>-1</sup>]

$res_{L1}$  : 冠層上方一層對紊流運輸的阻力[y m<sup>-1</sup>]

$res_{L2}$  : 冠層上方二層對紊流運輸的阻力[y m<sup>-1</sup>]

$$res_{CA} = \frac{z_{CA}}{D_{CA}} \quad res_{L1} = \frac{z_{L1}}{D_{L1}} \quad res_{L2} = \frac{z_{L2}}{D_{L2}} \quad (186)$$

$$D_{L1} = \frac{Karman_{const} \times Vel_{frict} \times Z_{L1}}{\ln\left(\frac{height_{L1} - height_{displ}}{height_{CA} - height_{displ}}\right)}$$

$$D_{L2} = \frac{Karman_{const} \times Vel_{frict} \times Z_{L2}}{\ln\left(\frac{height_{L2} - height_{displ}}{height_{L1} - height_{displ}}\right)} \quad (187)$$

其中：

$Karman_{const}$  : 卡門常數[無單位]，

$Vel_{frict}$  : 摩擦速度[m y<sup>-1</sup>]

$height_{CA/L1/L2}$  : 是冠層的上邊界，L1 和 L2 層的地面上的高度[m]

$height_{displ}$  : 位移平面的高度假定為冠層高度的 75%[m]

$$Vel_{frict} = \frac{karman_{const} \cdot Vel_{wind,height,ref,ter}}{\ln\left(\frac{height_{ref,ter} - height_{displ}}{z_0}\right)} \quad (188)$$

其中：

$Vel_{wind,height,ref,ter}$ ：是在參考高度  $height_{ref,ter}$  處的風速

$height_{ref,ter}$ ：參考高度[m]，

$z_0$ ：是粗糙度長度，假定為冠層高度的 10%

$$D_{CA} = \frac{D(z_{CA}) \times Coeff_{ext}}{e^{Coeff_{ext}} - 1}$$

$$D(z_{CA}) = karman_{const} \times Vel_{frict} \times (z_{CA} - height_{displ}) \quad (189)$$

其中：

$D(z_{CA})$ ：冠層高處的渦流擴散係數[m<sup>2</sup> y<sup>-1</sup>]

$Coeff_{ext}$ ：消光係數[無單位]。

$$coeff_{ext} = \sqrt{\frac{dragcoef \times LAI \times z_{CA}}{L_m}} \quad L_m = \sqrt{\frac{4 \times leaf_{width} \times z_{CA}}{p \times LAI}} \quad (190)$$

$LAI$ ：沼澤植被或栽培物種的冠層的葉面積指數[m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>]

$L_m$ ：冠層內部的平均混合長度[m]

$leaf_{width}$ ：形成樹或植被，栽培物種的葉寬度[m]

### 3.7.1.5. 平流通量

活度濃度可以用下列方程式表示：

$$Flux_{adv} = Vel_{Adv,CA} \times conc_{C,atmos} \quad (191)$$

其中：

$conc_{C,atmos}$ ：冠層中的碳濃度[kgC m<sup>-3</sup>]

$Vel_{Adv,CA}$ ：平流運輸的冠層的空氣交換速度[m y<sup>-1</sup>]

$$Vel_{Adv,i} = \frac{Vel_{wind,i} \times z}{\sqrt{area_j}} \quad i = \{CA, L1, L2\} \quad (192)$$

其中：

$Vel_{wind}$ ：三個大氣層中的平均風速[m y<sup>-1</sup>]

$i$ ：是冠層的索引，上面的第一個和上面的第二個冠層，

$j$ ：是沼澤或耕作系統的指標

$area$ ：是泥土或耕地（包括不受作物影響的所有耕作區）的面積[m<sup>2</sup>]

$$area_j = \begin{cases} area_{obj,ter} & j = ter \\ \min(area_{obj,ter} \cdot area_j N_{group,j}) & j = DM \\ area_j N_{group} & j = \{IO, GP\} \end{cases} \quad (193)$$

$$Vel_{wind,L1} = \frac{Vel_{frict}}{Karman_{const}} \left( \left( \frac{HAD_{L1}}{z_{L1}} \right) \left( \ln \left( \frac{HAD_{L1}}{z_0} \right) - 1 \right) - \left( \frac{HAD_{CA}}{z_{L1}} \right) \left( \ln \left( \frac{HAD_{CA}}{z_0} \right) - 1 \right) \right)$$

$$HAD_{CA} = height_{CA} - height_{displ} \quad HAD_{L1} = height_{L1} - height_{displ}$$

$$Vel_{wind,L2} = \frac{Vel_{frict}}{Karman_{const}} \left( \left( \frac{HAD_{L2}}{z_{L2}} \right) \left( \ln \left( \frac{HAD_{L2}}{z_0} \right) - 1 \right) - \left( \frac{HAD_{L1}}{z_{L2}} \right) \left( \ln \left( \frac{HAD_{L1}}{z_0} \right) - 1 \right) \right)$$

$$HAD_{L2} = height_{L2} - height_{displ}$$

$$heights_{displ} = 0.75 \times height_{CA} \quad z_0 = 0.1 \times height_{CA}$$

(194)

其中：

$Karman_{const}$ ：卡門常數[無單位]

$height_{CA/L1/L2}$ ：冠層的上邊界，L1 和 L2 層的地面上的高度[m]

$height_{displ}$ ：位移平面的高度，假定為冠層高度的 75% [m]

$z$ ：大氣層的厚度（冠層，在冠層上方的第一和第二層）[m]

$z_0$ ：粗糙度長度，假定為冠層高度的 10% [m]

$$Vel_{wind,CA} = Vel_{wind}(z_{CA}) \frac{e^{-coeff_{ext}}}{Coeff_{ext}}$$

(195)

其中：

$Vel_{wind}(z_{CA})$ ：冠層高度的風速[m y<sup>-1</sup>]

$Coeff_{ext}$ ：消光係數[無單位]

$$Vel_{wind}(z_{CA}) = \frac{Vel_{frict}}{karman_{const}} \cdot \ln \left( \frac{z_{CA} - height_{displ}}{z_0} \right)$$

(196)

### 3.7.1.6. 活度濃度

活度濃度可以用下列方程式表示：

$$AC_{atmos,CA,i}^{14C} = SA_{atmos,can,i}^{14C} \cdot conc_{C,atmos}$$

(197)

其中：

$AC_{atmos,can}^{14C}$ ：在冠層大氣中的 C-14 比活度[Bq kgC m<sup>-3</sup>]

$conc_{C,atmos}$ ：空氣中的碳濃度[kgC m<sup>-3</sup>]

$i$ ：是指栽培系統作物的指數。



$$AC_{atmos,L1,i}^{14C} = AC_{atmos,CA,i}^{14C} \cdot RF_{L1ToCA,i} \quad (198)$$

其中：

$RF_{L1ToCA,i}$ ：從第一上述冠層到冠層的碳循環因子[無單位]。

### 3.7.2. 水體表面上大氣

#### 3.7.2.1. 大氣中的活度濃度

大氣中的活度濃度可以用下列方程式表示：

$$AC_{atmos,L1}^{14C} = \frac{ReleaseRate}{Vel_{exch,L1,L2}(1 - RF_{L2ToL1}) + Vel_{Adv,L1}} \quad (199)$$

其中：

$RF_{L1ToCA,i}$ ：C-14，從水到 L1 層的面積歸一化釋放速率[Bq m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>]

$Vel_{exch,L1,L2}$ ：通過紊流傳輸在第一層 L1 和第二層 L2 之間的空氣交換速度[m y<sup>-1</sup>]

$Vel_{Adv,L1}$ ：通過平流傳輸[m y<sup>-1</sup>]的 L1 層的空氣交換速度[m y<sup>-1</sup>]

$RF_{L2ToL1}$ ：通過紊流運輸從第二層到第一層的空氣再循環因子[m y<sup>-1</sup>]

#### 3.7.2.2. 紊流通量

紊流通量可以用下列方程式表示：

$$RF_{L2ToL1} = \frac{Vel_{exch,L1,L2}}{Vel_{exch,L2,Upp} + Vel_{exch,L1,L2} + Vel_{Adv,L2}} \quad (200)$$

其中：

$Vel_{exch,L1,L2}$ ：通過紊流傳輸在第一和第二層之間的空氣交換速度[m y<sup>-1</sup>]

$Vel_{exch,L2,Upp}$ ：通過紊流傳輸在大氣的第二層和上層之間的空氣交換速度[m y<sup>-1</sup>]

$Vel_{Adv,L2}$ ：通過平流傳輸的第二層的空氣交換速度[m y<sup>-1</sup>]

$$Vel_{exch,L1,L2} = \frac{1}{0.5(res_{L1} + res_{L2})} \quad (201)$$

$$Vel_{exch,L2,Upp} = \frac{1}{0.5 \cdot res_{L2}} \quad (202)$$

其中：

$res_{L1}$ ：第一層對紊流傳輸的電阻[y m<sup>-1</sup>]

$res_{L2}$ ：第二層對紊流傳輸的電阻[y m<sup>-1</sup>]

$$res_{L1} = \frac{z_{L1}}{D_{L1}} \quad res_{L2} = \frac{z_{L2}}{D_{L2}} \quad (203)$$

其中：

$z$ ：大氣層的厚度 [m]

$D$ ：相應層的渦流擴散係數[m<sup>2</sup> y<sup>-1</sup>]

$$D_{L1} = \frac{Karman_{const} \cdot Vel_{frict} \cdot z_{L1}}{\ln\left(\frac{z_{L1}}{z_{L0}}\right)}$$

$$D_{L2} = \frac{Karman_{const} \cdot Vel_{frict} \cdot z_{L2}}{\ln\left(\frac{z_{L1} + z_{L2}}{z_{L1}}\right)} \quad (204)$$

其中：

$Karman_{const}$ ：卡門常數[無單位]

$Vel_{frict}$ ：摩擦速度[m y<sup>-1</sup>]

$z_0$ ：粗糙度長度[m]

$$Vel_{frict} = \frac{Karman_{const} \cdot Vel_{wind,height,erf,ter}}{\ln\left(\frac{height_{ref,ter}}{z_0}\right)}$$

(205)

$Vel_{wind,height,erf,ter}$ ：風速參考高度[m y<sup>-1</sup>]

$height_{ref,ter}$ ：參考高度[m]

### 3.7.2.3. 平流通量

平流通量可以用下列方程式表示：

$$Vel_{Adv,i} = \frac{Vel_{wind} \cdot z_i}{\sqrt{area}} \quad i = \{L1, L2\} \quad (206)$$

$Vel_{wind}$ ：兩個大氣層中的平均風速[m y<sup>-1</sup>]

其中：

$z$ ：L1 和 L2 層的厚度[m]

$area$ ：水體的表面積[m<sup>2</sup>]

$i$ ：第一和第二層的指數。

$$Vel_{wind,L1} = \frac{vel_{frict}}{karman_{const}} \left( \left( \ln\left(\frac{z_{L1}}{z_0}\right) - 1 \right) + \frac{z_0}{z_{L1}} \right)$$

$$Vel_{wind,L2} = \frac{vel_{frict}}{karman_{const}} \left( \left( \frac{z_{L1} + z_{L2}}{z_{L1}} \right) \left( \ln\left(\frac{z_{L1}}{z_0}\right) - 1 \right) - \left( \frac{z_{L1}}{z_{L2}} \right) \left( \ln\left(\frac{z_{L1}}{z_{z_0}}\right) - 1 \right) \right) \quad (207)$$

其中：

$vel_{frict}$ ：摩擦速度[m y<sup>-1</sup>]

$karman_{const}$ ：卡門常數

$z$ ：L1 和 L2 層的厚度[m]，

$z_0$ ：粗糙度長度[m]

### 3.8. SR-PSU 安全評估計畫之輻射劑量與風險標準

封閉後每年的輻射風險限值為  $10^{-6}$ ，大約等於自然存在之背景輻射的 1% (SSMFS 2008:37 法規限值)。有效劑量與風險的轉換因子為 0.073 /Sv，因此前述風險限值約等於  $1.4 \times 10^{-5}$  Sv/yr 的有限劑量。依照 SSM's General Guidance，其風險發生機率須於 10 萬年內不能超過法規限值。SR-PSU 安全評估計畫基本上可以將劑量評估結果的時間序列乘上各種處置設施演化的概率加權計算而得到風險隨時間的變化。圖 22 表示處置場系統輻射劑量風險評估時間尺度。在營運階段，處置場系統和內部元件的狀態描述係基於最初的參考設計。操作營運階段未包含在關閉後的安全評估，但是此階段需要評估其演化過程，以便瞭解處置場系統關閉和飽和之後的初始狀態描述。從處置場關閉到冰河週期狀態是基於初始狀態和參考演化的描述。在後冰河週期，為簡化描述、演化及模擬。對於生物圈人類接受者的劑量和風險，係藉由模擬計算得到核種洩漏所造成的劑量與風險。

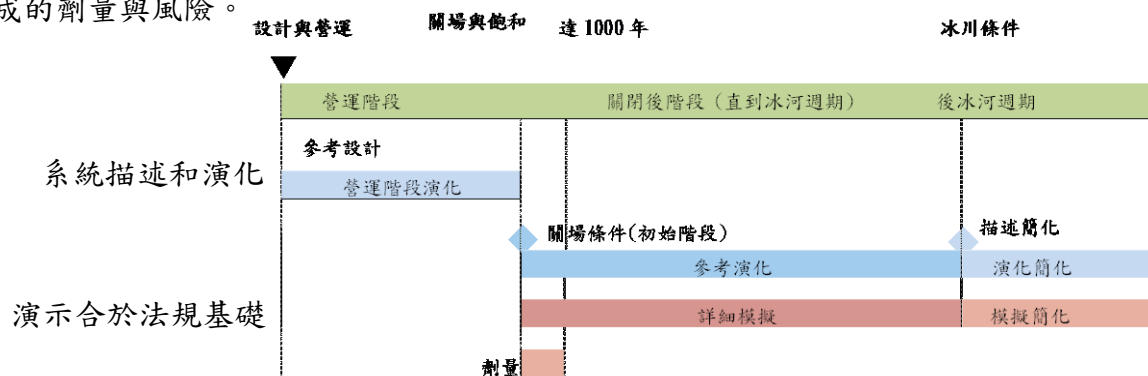


圖 22 處置場系統輻射劑量風險評估時間尺度

除了地震情節以外，對於低發生率情節，其發生風險的計算與主要情節相同，乘以情節的概率(如表 4 所示)，可得到情節的最終風險估計值。地震情節以較為保守的方式估算風險，由模式估算各個模擬時間的最大劑量值乘上發生地震事件綜合概率，將可以得到地震造成輻射劑量的風險。主要情節與低發生的情節之總風險對

應示意圖（如圖 23），藉以評估不同情境風險，希望能獲得總輻射劑量的風險值。

總風險可以主要情節和這些低發生的情節，由它們各自的概率加權的總和得到，如下式所示：

$$Risk_{Total} = Risk_{Main\_scenario} \left( 1 - \sum_{\substack{\text{less} \\ \text{probable} \\ \text{scenario}(i)}} P_i \right) + \sum_{\substack{\text{less} \\ \text{probable} \\ \text{scenario}(i)}} (P_i Risk_i) \quad (208)$$

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

$$Risk_{Well} = Risk_{Main\_scenario} + \sum_{\substack{\text{Well} \\ \text{scenario}(i)}} (P_i Risk_i) \quad (209)$$

主要情節與低發生率情節對人體接受者年最大輻射劑量風險列於表 5 及圖 24，發現最大輻射劑量風險值  $4.0 \times 10^{-7}$  發生於主要情節，第二大的輻射劑量風險值  $2.6 \times 10^{-7}$  發生於 1BLA 的入侵井情節。

表 4 低發生率情節和情節組合的概率

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

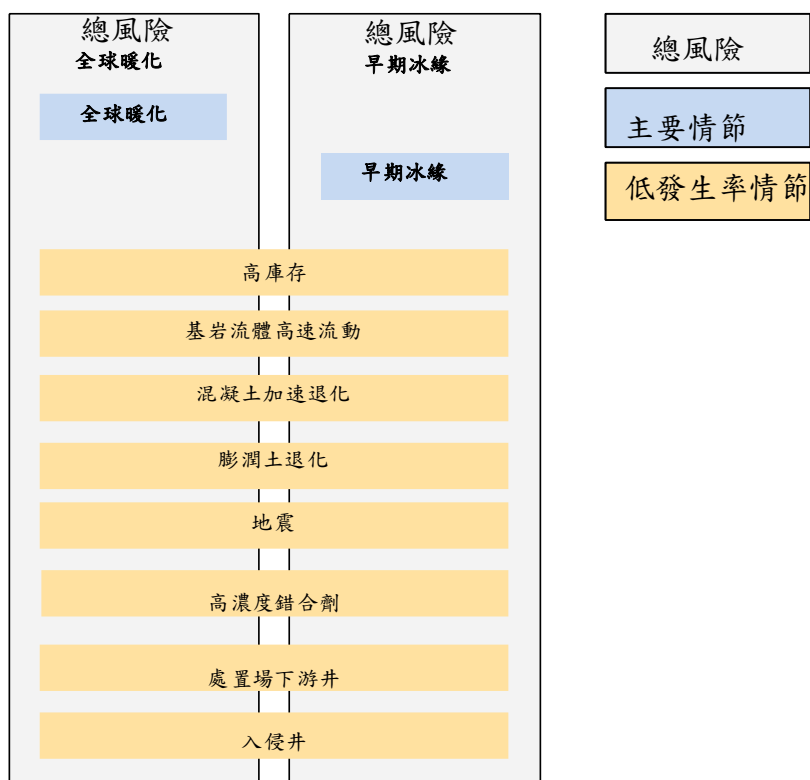


圖 23 主要情節與低發生率情節之總風險對應示意圖

表 5 主要情節與低發生率情節對人體接受者年最大輻射劑量風險

情節	最大輻射劑量風險	最大風險發生時間[AD]
<b>主要情節</b>		
全球暖化變異	$4.0 \cdot 10^{-7}$	6,200
早期冰緣變異	$9.0 \cdot 10^{-9}$	17,800
<b>少發生情節</b>		
高庫存		
基岩流體高速流動	$5.4 \cdot 10^{-8}$	5,900
混凝土加速退化	$5.7 \cdot 10^{-8}$	5,250
膨潤土退化	$4.2 \cdot 10^{-8}$	6,250
地震	$2.5 \cdot 10^{-8}$	58,500
高濃度錯合劑	$7.6 \cdot 10^{-8}$	44,500
處置場下游井	$1.4 \cdot 10^{-7}$	5,000
入侵井- 處置窖	$1.9 \cdot 10^{-8}$	4,400
入侵井 - 1BMA	$8.4 \cdot 10^{-8}$	4,100
入侵井 - 1BLA	$2.6 \cdot 10^{-7}$	3,050
入侵井 - 1BTF	$7.8 \cdot 10^{-9}$	3,250
入侵井 - 2BTF	$1.1 \cdot 10^{-8}$	3,850
入侵井 - BRT	$8.3 \cdot 10^{-10}$	3,250
入侵井 - 2BMA	$1.6 \cdot 10^{-9}$	86,000
入侵井 - 2BLA	$2.0 \cdot 10^{-8}$	3,450
入侵井 - 3BLA	$1.9 \cdot 10^{-8}$	3,400

情節	最大輻射劑量風險	最大風險發生時間[AD]
入侵井 - 4BLA	$1.6 \cdot 10^{-8}$	3,550
入侵井 - 5BLA	$2.1 \cdot 10^{-8}$	3,550
<b>情節組合</b>		
情節組合 1	$8.9 \cdot 10^{-9}$	5,700
情節組合 2	$9.7 \cdot 10^{-9}$	40,000

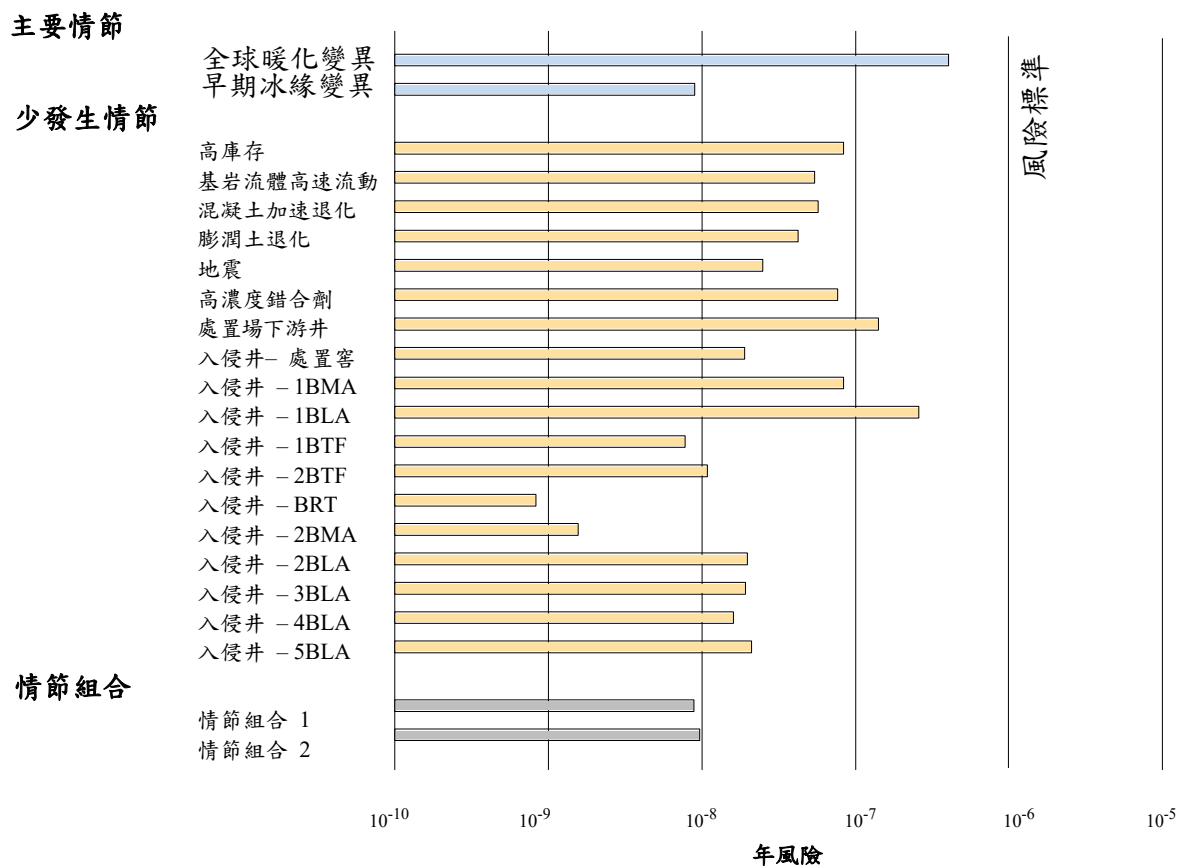


圖 24 比較主要情節與低發生率情節之年最大輻射劑量風險

### 3.8.1. SR-PSU 安全評估計畫情節分類

SR-PSU 安全評估計畫對於近場、遠場及生物圈輻射劑量全系統安全評估架構，以區塊模式(Compartment models)分類，建置放射性核種於近場、遠場和生物圈遷移模型。該區塊模式建置放射性核種於近場、遠場和生物圈遷移模型類似。SR-PSU 安全評估計畫提出三個情節分類：主要情節、低發生率情節與其他情節或剩餘情節，對於 SFR 處置場系統進行長期安全性評估。

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

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

### 3.8.2. 近場、遠場及生物圈輻射劑量全系統安全評估架構

SR-PSU 安全評估計畫對於近場、遠場與生物圈核種傳輸計算之模式與資料關聯圖，詳細的評估模式流程圖如圖 25。對於近場、遠場與生物圈系統以區塊模式(Compartment models)分類，建置放射性核種於近場、遠場和生物圈遷移模型。

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

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

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

射性核種通量。

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

區塊系統放射性核種含量的變化率可由以下公式說明：

$$\dot{A}_i^n = \sum_{j \in N_i} Tr_{ji}^n - \sum_{j \in N_i} Tr_{ij}^n + \sum_{p \in P_n} Br_p^n \lambda^n A_i^p - \lambda^n A_i^n + r_i^n \quad (210)$$

其中：

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

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

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

$N_i$  = 一組區塊室連接到區塊系統  $i$ , [無因次],

$P_n$  = 一組母核種  $n$ , [無因次],

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

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

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

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

### 3.8.3. SR-PSU 近場、遠場及生物圈全系統之模式

SFR 處置場址的內外部與世界其他國家（如美國 Yucca Mountain）不同，所以 SR-PSU 安全評估計畫安全報告中所用的模式，係採用符合瑞典國內處置系統地質狀況的模式。由於 Forsmark 處置場址位於波羅的海海岸，非美國沙漠大陸型氣候特性，而是屬於海洋性氣候條件。並考慮未來冰川運動和海水入侵對處置場系統的影響。有些模式雖是非自主發展，但應用前皆經過驗證程序。表 6 列出 SR-PSU 安全評估計畫安全報告 SFR 處置場址安全評估所應用的模式，包含廢料體、近場、遠場及生物圈，並沒有使用美國 Yucca Mountain 計畫所開發的 Goldsim 程式。



表 6 SR-PSU 安全評估計畫安全報告 SFR 處置場址安全評估所應用的模式

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

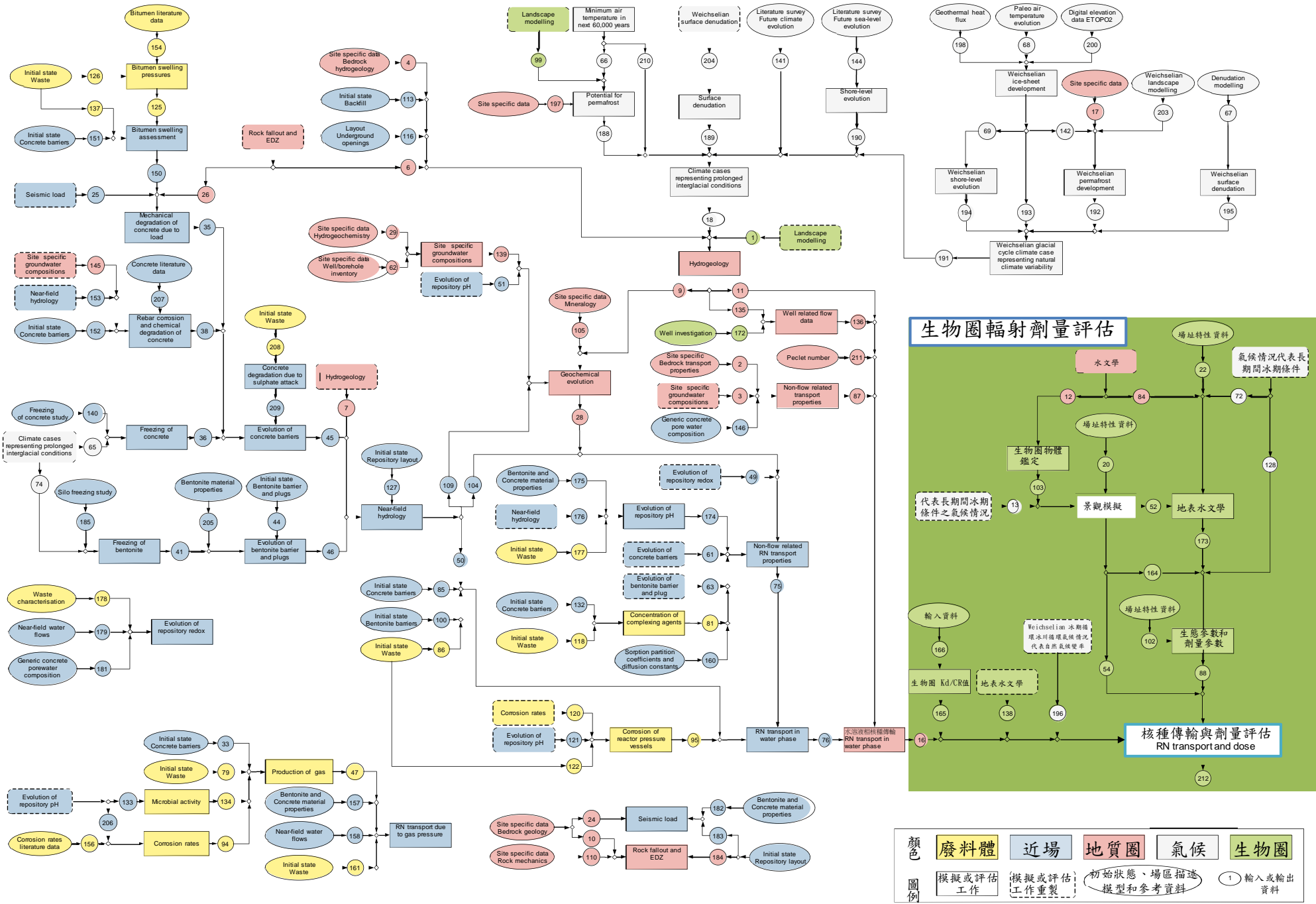


圖 25 SR-PSU 安全評估計畫廢料體、近場、遠場地質圈、生物圈與氣候之評估模式流程圖(AMF)

### 3.8.4. SR-PSU 生物圈安全評估計畫對人體之輻射劑量

#### 3.8.4.1. 對人體之輻射劑量

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

$$Dose_{total} = Dose_{ing,water} + Dose_{ing,food} + Dose_{ext} + Dose_{inh} \quad (211)$$

其中：

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

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

$$Dose_{ing,water} = AC_{ing,water} ingRate_{water} doseCoef_{ing,water} \quad (212)$$

其中：

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

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

$$Dose_{ing,food} = ingRate_C doseCoef_{ing,food} \sum AC_{food,i} f_{cont,food,i}, \quad \sum f_{cont,food,i} \leq 1 \quad (213)$$

其中：

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

外部曝露由表土土壤的核種活度濃度、上層土壤的密度、於地表停留時間與外在

接觸的劑量參數所決定，外部曝露途徑的核種劑量為：

$$Dose_{ext} = AC_{ground} dens_{ground} t_{exposure} doseCoef_{ext} \quad (214)$$

其中：

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

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

$$Dose_{inh} = AC_{air} inhRate t_{exposure} doseCoef_{inh} \quad (215)$$

其中：

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

氣體形式的放射性核種 (C-14) 和吸附到塵埃顆粒 (其他放射性核種) 的放射性核種都會有空氣活度濃度劑量：

$$AC_{air}^{RN} = AC_{ground}^{RN} conc_{Dust}$$

$$AC_{air}^{14C} = AC_{atmos,L1}^{14C} + AC_{ground}^{14C} conc_{Dust} \quad (216)$$

$AC_{ground}$  : 空氣中的活度濃度[Bq m<sup>-3</sup>]

$conc_{Dust}$  : 在空氣中吸入細小土壤顆粒的濃度[kg<sub>DW</sub> m<sup>-3</sup>]

$AC_{atmos,L1}^{14C}$  : 在空氣中吸入氣態 C-14 活度濃度[Bq m<sup>-3</sup>]

$$doseCoef_{i,agg} = doseCoeff_i \cdot doseinground_{iagri} \quad (217)$$

$doseinground_{iagri}$  : 一個比例因子，在 50 年內栽培土壤中累積的子放射性核種的暴露劑量[Bq Bq<sup>-1</sup>]

$i$  : 指暴露途徑，即外在、攝食和吸入

SR-PSU 安全評估計畫劑量係數依據 ICRP (1996 年) 建議值，在表 7 列出攝取、吸入與外部曝露的母核種劑量係數，表 8 列出經由攝取、吸入與外部曝露的短半衰期子核種劑量係數。表 9 列出經由攝取、吸入與外部曝露的核種(包括母核種與子核種輻射)劑量係數，SR-PSU 安全評估計畫考慮空氣，土壤和水傳輸途徑，藉由廢料體、近場、遠場各種評估模式分析核種洩漏出近場後於遠場傳輸，當得到核種進入生物圈核種濃度後，再利用表 9 核種劑量係數 (Dose coefficient) 與食物攝取率等參數利用方程式(211)-(215)計算對於人體曝露於環境中的放射性核種的總劑量包括攝取水、攝取食物、外部曝露和吸入等四部分輻射劑量。

表 7 經由攝取、吸入與外部曝露的母核種劑量係數

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

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

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

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

表 8 經由攝取、吸入與外部曝露的短半衰期子核種劑量係數

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

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

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

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

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

表 9 經由攝取、吸入與外部曝露的核種(包括母核種與子核種輻射)劑量係數

核種	攝食 Sv Bq <sup>-1</sup>	吸入 Sv Bq <sup>-1</sup>	外在曝露 Sv h <sup>-1</sup> per Bq m <sup>-3</sup>	Sv h <sup>-1</sup> per Bq m <sup>-2</sup>
H-3	1.8E-11	2.6E-10	—	—
C-14	5.8E-10	6.2E-12	2.1E-19	4.6E-17
Cl-36	9.3E-10	7.3E-09	4.8E-17	4.0E-14
Ca-4...1	1.9E-10	1.8E-10	—	—
Ni-59	6.3E-11	4.4E-10	—	—
Co-60	3.4E-09	3.1E-08	3.0E-13	8.3E-12
Ni-63	1.5E-10	1.3E-09	—	—
Se-79	2.9E-09	6.8E-09	2.9E-19	5.9E-17
Sr-90 <sup>+</sup>	3.1E-08	1.6E-07	7.9E-16	4.0E-13
Mo-93	3.1E-09	2.3E-09	8.0E-18	1.4E-14
Nb-93m	1.2E-10	1.8E-09	1.4E-18	2.5E-15
Zr-93	1.1E-09	2.5E-08	—	—
Nb-94	1.7E-09	4.9E-08	1.8E-13	5.4E-12
Tc-99	6.4E-10	1.3E-08	2.1E-18	2.3E-16
Pd-107	3.7E-11	5.9E-10	—	—
Ag-108m <sup>+</sup>	2.3E-09	3.7E-08	1.7E-13	5.6E-12
Cd-113m	2.3E-08	1.1E-07	1.2E-17	6.4E-15
Sn-126 <sup>+</sup>	5.1E-09	2.8E-08	2.1E-13	7.1E-12
I-129	1.1E-07	3.6E-08	1.8E-16	7.0E-14
Ba-133	1.5E-09	1.0E-08	3.5E-14	1.3E-12
Cs-135	2.0E-09	8.6E-09	6.2E-19	9.7E-17
Cs-137 <sup>+</sup>	1.3E-08	3.9E-08	6.2E-14	2.0E-12
Sm-151	9.8E-11	4.0E-09	1.3E-20	1.3E-17
Eu-152	1.4E-09	4.2E-08	1.3E-13	3.9E-12
Ho-166m	2.0E-09	1.2E-07	1.9E-13	5.9E-12
Pb-210 <sup>+</sup>	6.9E-07	5.6E-06	1.4E-16	1.3E-13
Po-210	1.2E-06	4.3E-06	9.5E-19	2.9E-17
Ra-226 <sup>+</sup>	2.8E-07	9.5E-06	2.0E-13	6.1E-12
Ac-227 <sup>+</sup>	1.2E-06	5.5E-04	3.6E-14	1.7E-12
Th-228 <sup>+</sup>	1.4E-07	4.4E-05	1.9E-13	5.2E-12
Th-229 <sup>+</sup>	6.1E-07	2.4E-04	2.9E-14	1.2E-12
Th-230	2.1E-07	1.0E-04	2.1E-17	2.3E-15
Pa-231	7.1E-07	1.4E-04	3.4E-15	1.4E-13
U-232	3.3E-07	3.7E-05	1.5E-17	2.9E-15
U-233	5.1E-08	9.6E-06	2.4E-17	2.2E-15
U-234	4.9E-08	9.4E-06	6.6E-18	2.1E-15
U-235 <sup>+</sup>	4.7E-08	8.5E-06	1.3E-14	5.6E-13
U-236	4.7E-08	8.7E-06	3.4E-18	1.8E-15
Np-237 <sup>+</sup>	1.1E-07	5.0E-05	1.9E-14	7.6E-13
Pu-238	2.3E-07	1.1E-04	2.2E-18	2.3E-15
U-238 <sup>+</sup>	4.8E-08	8.0E-06	3.0E-15	4.4E-13
Pu-239	2.5E-07	1.2E-04	5.1E-18	1.0E-15
Pu-240	2.5E-07	1.2E-04	2.2E-18	2.2E-15
Am-241	2.0E-07	9.6E-05	7.2E-16	8.4E-14
Pu-241 <sup>+</sup>	4.8E-09	2.3E-06	3.3E-19	1.7E-17
Am-242m <sup>+</sup>	1.9E-07	9.2E-05	1.2E-15	7.5E-14
Pu-242	2.4E-07	1.1E-04	1.9E-18	1.8E-15
Cm-242	1.2E-08	5.9E-06	2.5E-18	2.5E-15
Am-243 <sup>+</sup>	2.0E-07	9.6E-05	1.6E-14	7.3E-13
Cm-243	1.5E-07	6.9E-05	1.0E-14	4.2E-13
Cm-244	1.2E-07	5.7E-05	1.7E-18	2.3E-15
Cm-245	2.1E-07	9.9E-05	5.9E-15	2.9E-13
Cm-246	2.1E-07	9.8E-05	1.6E-18	2.1E-15

<sup>+</sup> Dose coefficients include contribution from short-lived radioactive progeny assuming secular equilibrium.

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



### 3.8.4.2. 暴露人群和土地使用變量

為達保護的目的，需對來自群體中處於高度暴露（即最暴露的群體）的代表性個體進行個體潛在暴露評估。由於長半衰期固體放射性廢棄物考慮的時間尺度很長，未來居民的習慣和特性只能基於一些假設。

下面我們描述如何計算四個暴露人口的劑量，每個對應一個獨特的土地利用變量，即狩獵採集者、內部-外地農業、排水和湖泊-沼澤變化和小規模園藝。前三種土地利用變量屬於攝食暴露的主要來源，其來自於抽取地下水使用情況。第四變量為關於從基岩中的井孔暴露情況，但也包括海藻培育和生物燃料燃燒後的暴露結果。暴露途徑的全面分析在SKB (2014e) 之 SKB R14-02 報告中，其提出 SR-PSU 生物圈 FEPs 和推薦模式之發展介紹，並在 SKB (2014a) 生物圈安全整合報告進行總結。評估過程之暴露途徑概述如圖 26 和表 10 所示。

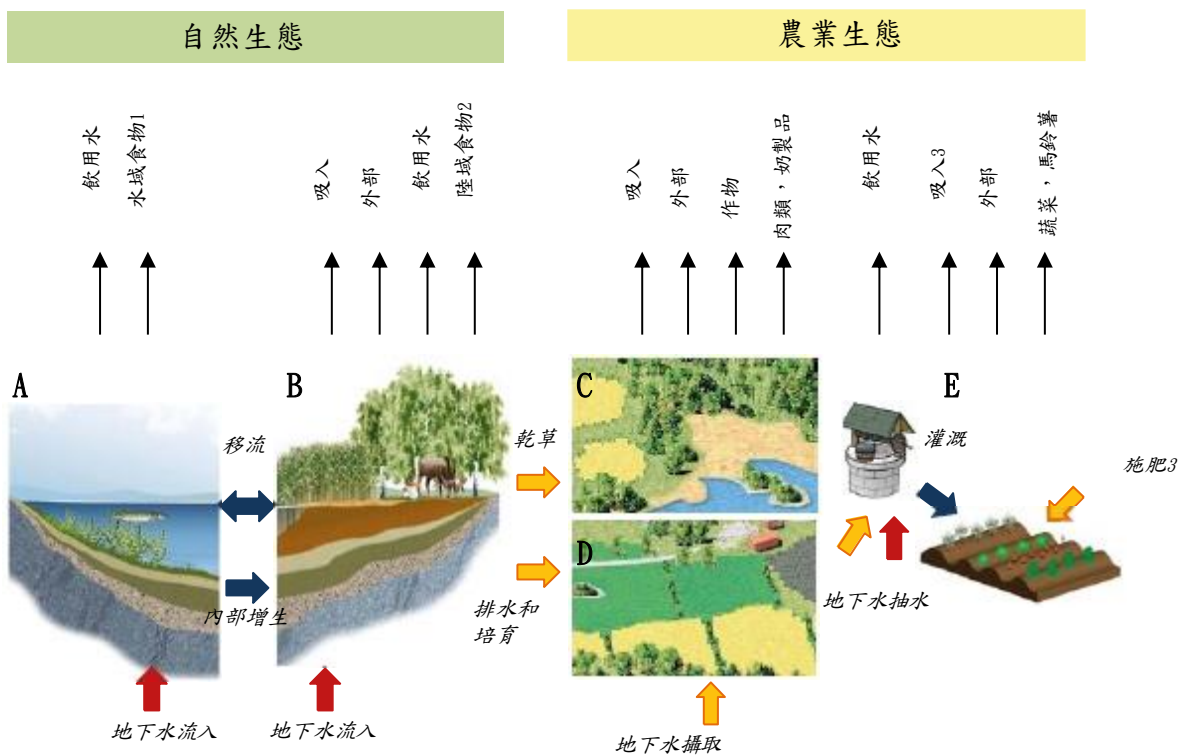


圖 26 自然生態和農業生態暴露途徑示意圖

說明：(A) 狩獵採集者使用自然生態水域生態系統、(B) 沼澤生態系統，而其他三個暴露的人群代表不同的耕地用途，即：(C) 內部-外地農業、(D) 排水和湖泊-沼澤變化 (E) 小規模園藝在菜園田地。粗箭頭表示來自基岩（紅色），來自天然的放射性核種的輸入生態系統或深層片岩沉積物（橙色）或放射性核種的水結合轉移，球體（藍色）。細箭頭（頂部）表示暴露途徑。1=魚和小龍蝦，2=獵物，漿果和蘑菇，3=吸入和施肥包括來自生物燃料燃燒的放射性核種。

表 10 從源頭到潛在暴露人群的暴露途徑

說明：途徑說明該各劑量暴露點發生或起源的表面生態系統。 暴露人群（或土地利用變量）縮寫為：HG = 狩獵和採集，IO = 內部-外地農業，DM = 排水和沼澤培育，GP = 種植園地。

生態系統	來源型式	來自於	劑量暴露點 1 (環境介質)	暴露途徑				暴露人群 (土地使用)
				攝食食物	攝食水	吸入 2	外部 輻射	
海	地下水排放或地表水	基岩或盆地附近	海水	魚	-	-	-	HG
湖泊/河川	地下水排放或地表水	基岩或上游區	湖/河水	魚和小龍蝦	飲用水	-	-	HG
				牲畜 3				IO, DM, GP
沼澤	地下水排放或地表水	基岩或上游區	表面泥炭	獵物, 漿果 & 蘑菇	-	氣體/灰塵顆粒	表面泥炭	HG
	-	-	-	-	-	-	-	IO
	挖井	土壤地下水	深風化層 (耕種)	牲畜 3	飲用水	-	-	IO, DM, GP
	乾草生長	表面泥炭	沼澤濕地植被	牲畜	-	-	-	IO
	生物燃料燃燒	沼澤植被化或泥炭	大氣 5	-	-	氣體 4/灰塵顆粒	-	GP
農業	沼澤培育	風化層 (沼澤)	耕地土壤	穀物, 馬鈴薯, 牲畜	-	氣體 5/灰塵顆粒	耕地土壤	DM
	地下水攝取	深風化層 (沼澤)						IO
	施肥	乾草生長 (沼澤)		穀物				GP
		生物燃料灰 (沼澤)						蔬菜, 馬鈴薯
		海藻 (海)						
	灌溉	污染水 6		-				-
基岩	鑽井	基岩	深層地下水	牲畜 3	飲用水	-	-	DM, GP

1 = 傳輸計算的端點。

2 = 用於吸入的暴露點 (環境介質) 是所列介質之上的大氣

3 = 不包括在 GP 土地利用類型中的家畜飲用水

4 = 大氣下風家庭

5 = 揮發性放射性核種

6 = 地表水, 或鑽井/鑽井的水。

### 3.8.4.3. 狩獵採集者

$$AC_{ing,water} = AC_{watersurface} \mid_{time > threshold_{isolation}} \quad (218)$$

$AC_{ing,water}$  : 在地表水活度濃度[Bq m<sup>-3</sup>]

$threshold_{isolation}$  : 當湖泊隔離出海上的時間點，在正常的海平面下此生物圈物體是完全乾燥狀態。

在飲用水的核種活度，包括在溶液中放射性核種及吸附在粒子並存儲在有機顆粒的核種。如果生物圈物體沒有湖泊或河流水之後，泥炭孔隙水則用作飲用水源之安全評估（物體編號 121\_2 和 157\_2）。活度濃度在地表水被定義為

$$AC_{water,surface} = \begin{cases} AC_{regoUp,ter}^D, & \text{if object in } \{121\_2, 157\_2\} \\ AC_{water} + AC_{water,org}^{PM}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (219)$$

其中：

$AC_{regoUp,ter}^D$  : 在表面泥炭的孔隙水[Bq m<sup>-3</sup>]

$AC_{water}$  : 在開放水域以無機形式放射性核種的濃度（它包括在溶液中的放射性核種和吸附在顆粒物質）[Bq m<sup>-3</sup>]

$AC_{water,org}^{PM}$  : 在懸浮的有機顆粒物放射性核種的活度濃度[Bq m<sup>-3</sup>]

$$AC_{regoUp,tot,ter} = AC_{regoUp,ter} + AC_{regoUp,org,ter} \quad (220)$$

$AC_{regoUp,ter}$  : 在表面泥炭無機形式活度濃度[Bq m<sup>-3</sup>]

$AC_{regoUp,org,ter}$  : 在有機物相對應的活度濃度[Bq m<sup>-3</sup>]

$$AC_{air}^{RN} = AC_{regoUp,tot,ter}^{RN} \text{conc}_{Dust,ter}$$

$$AC_{air}^{14C} = AC_{atmos,ter,L1}^{14C} + AC_{ground}^{14C} \text{conc}_{Dust,ter} \quad (221)$$

其中：

$\text{conc}_{Dust,ter}$  : 濕地植被上面空氣中細顆粒土的濃度[kg<sub>DW</sub> m<sup>-3</sup>]

$AC_{ground}^{14C}$  : 在濕地上方的空氣冠層 C-14 氣態形式的活度濃度[Bq m<sup>-3</sup>]

$AC_{atmos,ter,L1}^{14C}$  : 在田間層的冠層上方大氣 C-14 的活度濃度[Bq m<sup>-3</sup>]

$$f_{cont,i} = \frac{\text{area}_{obj,aqu} \text{prod}_{edib,i}}{N_{group} \text{ingRate}_c}, \quad i = \{\text{crayfish, fish}\}$$

$$f_{cont,j} = \frac{\text{area}_{obj,aqu} \text{prod}_{edib,i}}{N_{group} \text{ingRate}_c}, \quad j = \{\text{berry, game, mush}\} \quad (222)$$

其中：

$area_{obj,aqu}$  : 生物圈物體的水域部分的表面積[m<sup>2</sup>]，包括全海盆地在淹沒期間，[m<sup>2</sup>]

$area_{obj,ter}$  : 在生物圈對象濕地/沼澤[M]的表面積[m<sup>2</sup>]

$prod_{edib,i}$  : 關於食品 i 的區域特定可持續產量[ kgC m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>]

$N_{group}$  : 是在狩獵採集群個體數[-]

$ingRate_C$  : 能量的年需求量[kgC y<sup>-1</sup>]

$$f_{cont,fish} = \min \left( \frac{area_{obj,aqu} prod_{edib,fish}}{N_{group} ingRate_C}, f_{diet, fish, max} \right) \quad (223)$$

其中：

$f_{cont,fish}$  : 對應於最大健康蛋白質消耗魚的分數

$$AC_i^{RN} = AC_{water}^{DRN} CR_{aqu,i}, i = \{fish, cray\} \quad (224)$$

其中：

$AC_{water}^{DRN}$  : 是在水中溶解的放射性核種的濃度[Bq m<sup>-3</sup>]

$CR_{aqu,i}$  : 是魚和小龍蝦[M]平衡濃度比[m<sup>3</sup> kgC<sup>-1</sup>]

$$AC_{berry}^{RN} = AC_{PP,ter}^{RN}$$

$$AC_{mush}^{RN} = (AC_{regoUp,ter}^{RN} AC_{regoUp,org,ter}^{RN}) CR_{ter,mush}$$

$$AC_{mush}^{RN} = AC_{diet,herbiv}^{RN} CR_{food,herbiv}$$

$$AC_{diet,herbiv}^{RN} = f_{mush,herbiv} AC_{mush}^{RN} + (1 - f_{mush,herbiv}) AC_{PP,ter}^{RN} \quad (225)$$

其中：

$AC_i^{RN}$  : 每單位生物量碳的活度濃度沼澤植被，人類食物（漿果，蘑菇和食草動物）[Bq kgC<sup>-1</sup>]

$AC_{regoUp,ter}^{RN}$  : 是在上部泥炭層的無機活度濃度[Bq kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>]

$AC_{regoUp,org,ter}^{RN}$  : 是在上部泥炭層的有機活度濃度[Bq kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>]

$CR_{ter,mush}$  : 是食用菌和土壤[kg<sub>DW</sub> kgC<sup>-1</sup>]

$CR_{food,herbiv}$  : 是草食動物和他們的飲食[KGC KGC 之間的平衡濃度比[kgC kgC<sup>-1</sup>]

$f_{mush,herbiv}$  : 蘑菇是在草食動物飲食分率[kgC kgC<sup>-1</sup>]

$$AC_{fish}^{14C} = AC_{cray}^{14C} = AC_{PP,aqu}^{14C} = \frac{\sum_i AC_{biom,i}^{14C} NPP_i}{\sum_i NPP_i}$$

$$i = \{plank, micro, macro\} \quad (226)$$

其中：

$AC_{biom,i}^{14C}$  : 每單位碳活度濃度[Bq kgC<sup>-1</sup>]

$NPP_i$  : 單位面積水中區域  $i$  的淨初級生產 [ $\text{kgC m}^{-2} \text{y}^{-1}$ ]

$$AC_{berry}^{14C} = AC_{mush}^{14C} = AC_{herbiv}^{14C} = AC_{diet,herbiv}^{14C} = AC_{PP,ter}^{14C} \quad (227)$$

$AC_{PP,ter}^{14C}$  : 碳 14 的每單位陸域生物初級生產者活度濃度 [ $\text{Bq kgC}^{-1}$ ]

假設氚 (H-3) 濃度主要是生活中重水的形式組織，魚中的活度濃度 ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ) 被描述為液體氚、魚的濃度 ( $\text{Bq kgH}_2\text{O}^{-1}$ ) 和液體碳的比率 ( $\text{kgH}_2\text{O kgC}^{-1}$ ) 之乘積：

$$AC_{fish}^{3H} = AC_{fish,wet}^{3H} f_{fish,wet}, \quad (228)$$

其中：

$AC_{fish}^{3H}$  : 在魚的液體部分的活度濃度 [ $\text{Bq kgH}_2\text{O}^{-1}$ ]

$f_{fish,wet}$  : 魚中液體與碳的比率 [ $\text{kgH}_2\text{O kgC}^{-1}$ ]

$$AC_{fish,wet}^{3H} = \frac{AC_{water}^{3H}}{dens_{water}}, \quad (229)$$

$AC_{water}^{3H}$  : 在水活度濃度 [ $\text{Bq m}^{-3}$ ]

$dens_{water}$  : 水的密度 [ $\text{kgH}_2\text{O m}^{-3}$ ]

$$f_{fish,wet} = \frac{1 - f_{DW,FW, fish}}{f_{C, fish} \cdot f_{DW,FW, fish}}, \quad (230)$$

$f_{DW,FW, fish}$  : 乾重與鮮重比 [ $\text{kg}_{DW} \text{kg}_{FW}^{-1}$ ]

$f_{C, fish}$  : 碳與乾重的比例 [ $\text{kgC kg}_{DW}^{-1}$ ]

#### 3.8.4.4. 自我維持農業

一旦生物圈物體已經湧現出了海面並開發成湖-沼澤系統，或直接形成沼澤，對於人類定居者，濕地草收穫和莎草可提供了一個接觸途徑。泥炭可持續種植是不可能在年輕湖沼澤或沼澤系統內，然而，當排水區域足夠高於海平面，使鹽水入侵不大可能，則排水和泥炭種植被認為是相關的接觸途徑，假設最大暴露群體在這土地利用變異過程，為了農業生產而使用有機土壤之作物種植和飼料產生提供所有居住人群。

##### 3.8.4.4.1. 水、土壤和空氣的活度濃度

$$AC_{ing,water,IO} = \max(AC_{water,well,dug} \mid time > t_{jreshold}_{well} AC_{water,surface} \mid time > threshold_{isolation} \quad (231)$$

$$AC_{ing,water,DM} = \max(\max(AC_{water,well,dug} AC_{water,well,drilled}) | time > threshold_{well} AC_{water,surface} | time > threshold_{stop}) \quad (232)$$

其中：

$AC_{water,well,dug}$ ：生物圈物體在挖掘井中溶解的放射性核種活度濃度 [Bq m<sup>-3</sup>]

$AC_{water,surface}$ ：地表水（湖泊或溪流）的活度濃度[Bq m<sup>-3</sup>]

$threshold_{isolation}$ ：當湖泊隔離出海上的時間點，在正常的海平面下此生物圈物體是完全乾燥狀態[y]

$threshold_{well}$ ：可建井的時間點[y]

$threshold_{stop}$ ：可排水和沼澤培養的時間點[y]

$$AC_{water,well,dug} = AC_{regolow,ten}^D \text{ if } time > threshold_{well} \quad (233)$$

$$AC_{water,well,drilled} = \frac{\sum_i f_{well,agri,Release_i}}{q_{well}}, \text{ if } time > threshold_{well} \quad (234)$$

$Release_i$ ：放射性核種釋出到生物圈-地質圈界面[Bq y<sup>-1</sup>]

$f_{well,agri,i}$ ：釋出進入井的分數[Bq y<sup>-1</sup> per Bq y<sup>-1</sup>]

$q_{well}$ ：井體抽水率[m<sup>3</sup> y<sup>-1</sup>]

$i$ ：處置場庫的筒倉指標（包括：BRT, 1BTF, 2BTF, 1BMA, 2BMA, 1BLA, 2BLA, 3BLA, 4BLA and 5BLA）

$$\begin{aligned} AC_{ground,IO,agri} &= f_{time,agri} (AC_{regoup,IO} + AC_{regoup,org,IO}) \\ AC_{ground,IO,mire} &= f_{time,hay} (AC_{regoup,ter} + AC_{regoup,org,ter}) \end{aligned} \quad (235)$$

其中：

$AC_{regoup,IO}$ ：耕地土壤的放射性濃度[Bq kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>]

$AC_{regoup,org,IO}$ ：在表面泥炭的活度濃度[Bq kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>]

$f_{time,agri}$ ：花時間在工作的耕地的時間分數[y y<sup>-1</sup>]

$f_{time,hay}$ ：花時間在濕地收集乾草的時間分數[y y<sup>-1</sup>]

$$AC_{ground,DM} = \sum_i f_{area,i} (AC_{regoup,DM,i} + AC_{regoup,org,DM,i}), \quad i = \{cereal, tuber, fodder\} \quad (236)$$

$f_{area,i}$ ：用於作物  $i$  的生產性耕地（非休耕）的分數 [m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>]

$AC_{regoup,DM,i}$ ：在栽培泥炭土中的無機形式的活度濃度[Bq kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>]

$AC_{regoup,org,DM,i}$ ：相應的有機形式的濃度[Bq kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>]

$i$ ：栽培作物的類型

$$\begin{aligned}
AC_{air,IO,agri}^{RN} &= f_{time,agri} (AC_{regoUp,IO}^{RN} + AC_{regoUp,org,IO}^{RN}) conc_{dust,IO} \\
AC_{air,IO,mire}^{RN} &= f_{time,hay} (f_{time,hay} (AC_{regoUp,org,ter}^{RN} + AC_{regoUp,ter}^{RN}) conc_{dust,ter} \\
AC_{air,IO,agri}^{14C} &= f_{time,agri} \left( (AC_{regoUp,IO}^{14C} + AC_{regoUp,org,IO}^{14C}) conc_{dust,IO} + AC_{atmos,L1,ter}^{14C} \right)
\end{aligned} \tag{237}$$

$conc_{dust,IO}$  : 是在穀物田中空氣細小土壤顆粒的濃度 [ $kg_{DW} m^{-3}$ ]

$conc_{dust,ter}$  : 濕地植被中空氣細小土壤顆粒的濃度 [ $kg_{DW} m^{-3}$ ]

$AC_{atmos,L1,ter}^{14C}$  : 在沼澤層空氣的活度濃度 [ $Bq m^{-3}$ ]

$AC_{atmos,L1,IO}^{14C}$  : 高於作物冠層的空氣活度濃度 [ $Bq m^{-3}$ ]

$AC_{air,DM}^{RN} = AC_{ground,DM}^{RN} conc_{dust,DM}$ ,

$$\begin{aligned}
AC_{air,DM}^{14C} &= \sum_i f_{area,i} (AC_{ground,DM,i}^{14C} conc_{dust,DM,i} + AC_{atmos,L1,DM,i}^{14C}), \\
i &= \{cereal, potato, fodder\}
\end{aligned} \tag{238}$$

$conc_{dust,DM,i}$  : 高於栽培泥炭土上方空氣細小土壤顆粒的濃度 [ $kg_{DW} m^{-3}$ ]

$AC_{atmos,L1,DM,i}^{14C}$  : 在作物  $i$  的冠層上方空氣之活度濃度 [ $Bq m^{-3}$ ]

#### 3.8.4.4.2. 來自耕地食物中的活度濃度和潛在稀釋

來自耕地食物中的活度濃度和潛在稀釋可用下列方程式表示：

$$Dose_{total} = Dose_{ing,water} + \alpha_{drained,mire} (Dose_{ing,food} + Dose_{ext} + Dose_{inh}) \tag{239}$$

其中：

$\alpha_{drained,mire}$  : 是一個稀釋係數，取 1 之間的值（來自生物圈物體所有食物被攝食）和 0（來自生物圈物體所有食物沒有被攝食）：

$$\alpha_{drained,mire} = \begin{cases} 1, & \text{when } area_{obj,ter} \geq N_{group} area_{support} \\ \frac{area_{obj,ter}}{N_{group} area_{support}}, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{240}$$

其中：

$area_{obj,ter}$  : 生物圈物體濕地面積 [ $m^2$ ]

$area_{support}$  : 需要支持一個人所需能量的耕地需求面積 [ $m^2$ ]

$N_{group}$  : 在最大暴露群體中的個體數量

$$AC_{cereal,IO}^{14C} = (1 - f_{rootUptake}) SA_{atmos,CA,IO}^{14C} + f_{rootUptake} \frac{AC_{regoUp,IO}^{D14C}}{conc_{DIC,regoUp,IO}} \tag{241}$$

其中：

$f_{rootUptake}$  : 來自根吸收的生物質中的碳的分數（相對於從大氣中吸收 [ $kgC kgC^{-1}$ ]

$SA_{atmos,CA,IO}^{14C}$  : 穀類冠層空氣中的比活度濃度[Bq kgC<sup>-1</sup>]

$AC_{regoUp,IO}^{D14C}$  : 溶解的 C-14 在土壤孔隙水中的活度濃度[Bq m<sup>-3</sup>]

$conc_{DIC,regoUp,IO}$  : 土壤孔隙水中溶解無機碳的濃度[kgC m<sup>-3</sup>]

$$AC_{i,DM}^{14C} = (1 - f_{rootUptake})SA_{atmos,CA,DM,i}^{14C} + (f_{rootUptake}) \frac{AC_{regoUp,DM,i}^{D14C}}{conc_{DIC,regoUp,DM}}$$

$$i = \{cereal, tuber, fodder\} \quad (242)$$

$$AC_{cereal,IO}^{RN} = (AC_{regoUp,IO} + AC_{regoUp,org,IO})CR_{agri,cereal} \quad (243)$$

$AC_{regoUp,IO}$  : 耕地土壤中無機形式的活度濃度[Bq kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>]

$AC_{regoUp,org,IO}$  : 相應的有機形式的濃度[Bq kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>]

$CR_{agri,cereal}$  : 土壤和穀物之間的濃度比[kg<sub>DW</sub> kgC<sup>-1</sup>]

$$AC_{i,DM}^{RN} = (AC_{regoUp,DM,i} + AC_{regoUp,org,DM,i})CR_{agri,i}, i = \{cereal, tuber, fodder\} \quad (244)$$

在生物圈物體（或從生物圈物體吃乾草）和/或飲用地表水的牲畜，將暴露於來自生物圈物體的水中的放射性核種，使得放射性核種累積在身體組織中。累積的程度取決於攝取的水、飼料和土壤中的活度濃度，可用下式表示：

$$AC_{meat,IO}^{14C} = AC_{milk,IO}^{14C} = AC_{hay}^{14C} \alpha_{hay} f_{meadow} \text{ and } \{AC_{hay}^{14C} = AC_{PP,ter}^{14C}\} \quad (245)$$

其中：

$AC_{hay}^{14C}$  : 從沼澤中乾草（或初級生產者）的比活度[Bq kgC<sup>-1</sup>]

$\alpha_{hay}$  : 乾草對生物圈物體相對於冬季總需求量[(kgC y<sup>-1</sup>)/(kgC y<sup>-1</sup>)]

$f_{meadow}$  : 乾草（冬季飼料）對年度飼料需求率分數

$$AC_{i,IO}^{RN} = (AC_{hay} \alpha_{hay} f_{meadow} ingRate_{C,cattle} + AC_{ing,water,cattle}^{RN} ingRate_{water,cattle}) \frac{TC_i}{conc_{c,i}} \quad (246)$$

其中：

$AC_{ing,water,cattle}^{RN}$  : 家畜飲用水中的活度濃度[Bq m<sup>-3</sup>]

$ingRate_{C,cattle}$  : 以牛的單位表示的牛的日能量需求[kgC d<sup>-1</sup>]

$ingRate_{water,cattle}$  : 牛的日常需水量[m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup>]

$TC_{milk} TC_{meat}$  : 從飼料和水中的放射性核種攝食量到牛奶轉移係數[d l<sup>-1</sup>]

$conc_{c,milk}$  : 牛奶中碳的濃度[kgC l<sup>-1</sup>]

$TC_{meat}$  : 從飼料和水中放射性核種攝取到牛肉的轉移係數[d kg<sub>FW</sub><sup>-1</sup>]



$conc_{c,meat}$  : 肉中碳的濃度[ $kgC\ kg_{FW}^{-1}$ ]

$$AC_{meat,DM}^{14C} = AC_{milk,DM}^{14C} = AC_{fodder,DM}^{14C} \quad (247)$$

其中：

$AC_{fodder,DM}^{14C}$  : 飼料中的比活度[ $Bq\ kgC^{-1}$ ]

$$AC_{i,DM}^{RN} = \frac{TC_i}{conc_{C,i}} \left( \left( AC_{regoUp,fodder,DM}^{RN} + AC_{regoUp,org,fodder,DM}^{RN} \right) ingRate_{soil,cattle} \right) + AC_{fodder}^{RN} ingRate_{C,cattle} + AC_{ing,water,cattle}^{RN} ingRate_{water,cattle} \quad (248)$$

$$AC_{ing,water,cattle,i}^{RN} = AC_{ing,water,i}^{RN}, \quad i = \{IO, DM\} \quad (249)$$

### 3.8.4.5. 菜園區住家

菜園區住家核種量可用下列方程式表示：

$$Dose_i = \begin{cases} Dose_i^{fert,sea,macro}, & \text{before } threshold_{isolation} \\ \max(Dose_i^{comb,peat}, Dose_i^{comb,wood}) + Dose_i^{irrig}, & \text{after } threshold_{isolation} \end{cases}, \quad i = \{ingfood, ih, ext\} \quad (250)$$

$$AC_{ing,water,GP} = \max(\max(AC_{water,well,dug}, AC_{water,well,drilled}) | time > thresgold_{well}, AC_{water,surface} | time > threshold_{isolation}) \quad (251)$$

其中：

$AC_{water,well,dug}$  : 溶解的放射性核種在井中到生物圈物體風化層的活度濃度 [ $Bq\ m^{-3}$ ]

$AC_{water,surface}$  : 地表水（湖泊或溪流）中的活度濃度[ $Bq\ m^{-3}$ ]

$thresgold_{well}$  : 適合鑿井的時間點[y]

$threshold_{isolation}$  : 當湖泊隔離出海上的時間點，在正常的海平面下此生物圈物體是完全乾燥狀態[y]

$$AC_{ground,GP} = \sum_i f_{area,i} (AC_{regoUp,GP,i} + AC_{regoUP,orgGP,i}), \quad i = \{vegetable, tuber\} \quad (252)$$

其中：

$f_{area,i}$  : 用於作物 i 的可耕地的比例[ $m^2\ m^{-2}$ ]

$AC_{regoUp,GP,i}$  : 菜園土壤中無機形式的活度濃度[ $Bq\ kg_{DW}^{-1}$ ]

$AC_{regoUP,orgGP,i}$  : 相應的有機形式的濃度[ $Bq\ kg_{DW}^{-1}$ ]

$i$  : 菜園產地的類型

$$AC_{i,GP}^{14C} = (1 - f_{rootUptake}) SA_{atmos,CA,GP,i}^{14C} + (f_{rootUptake}) AC_{regoUp,GP,i}^{D14C} / conc_{DIC,regoUp,GP} \quad i = \{veg, tuber\} \quad (253)$$

其中：

$f_{rootUptake}$  : 源自根吸收的生物質中碳的分數[ $\text{kgC kgC}^{-1}$ ]

$SA_{atmos,CA,GP,i}^{14C}$  : 冠層空氣中作物的比活度濃度[ $\text{Bq kgC}^{-1}$ ]

$SA_{regoUp,GP,i}^{14C}$  : 溶解的 C-14 在土壤孔隙水中的活度濃度[ $\text{Bq m}^{-3}$ ]

$conc_{DIC,regoUp,GP}$  : 土壤孔隙水中穩定溶解無機碳的濃度[ $\text{kgC m}^{-3}$ ]

$$AC_{vegetable,GP}^{RN} = (AC_{regoUp,GP,veg}^{RN} + AC_{reogUp,org,GP,veg}^{RN})CR_{agri,veg} + AC_{Leaf Ret}$$

$$AC_{tuber,GP}^{RN} = (AC_{regoUp,GP,tub}^{RN} + AC_{reogUp,org,GP,tub}^{RN})CR_{agri,tuber} \quad (254)$$

其中：

$CR_{agri,i}$  : 土壤與作物 i 的濃度比[ $\text{kg}_{\text{DW}} \text{kgC}^{-1}$ ]

$AC_{Leaf Ret}$  : 蔬菜葉片上的活度濃度[ $\text{Bq kg}_{\text{DW}}^{-1}$ ]

$$AC_{air,GP}^{14C} = AC_{ground,GP}^{14C} conc_{dust,GP} + \sum_i f_{area,i} AC_{atmos,L1,GP,i}^{14C}, \quad i=\{\text{tuber,vegetables}\} \quad (255)$$

其中：

$conc_{dust,GP}$  : 在栽培泥炭土上方空氣中細小土壤顆粒的濃度[ $\text{kg}_{\text{DW}} \text{m}^{-3}$ ]

$AC_{atmos,L1,GP,i}^{14C}$  : 作物 i 冠層上方空氣中的活度濃度[ $\text{Bq m}^{-3}$ ]

$$Dose_{ing,GP} = Dose_{inh,air,GP} + Dose_{inh,comb}$$

$$Dose_{inh,comb} = \max \begin{cases} AC_{fuel,peat} f_{combust} doseCoef_{combPeat} \\ AC_{fuel,wood} f_{combust} doseCoef_{combWood} \end{cases} \quad (256)$$

其中：

$Dose_{inh,air,GP}$  : 來自庭院地塊上方的空氣吸入的劑量，其中放射性核種源自施肥和/或灌溉[ $\text{Sv y}^{-1}$ ]

$Dose_{inh,comb}$  : 吸入來自燃燒生物質燃料的放射性核種的劑量貢獻 [Sv y<sup>-1</sup>]

$AC_{fuel,type}$  : 由泥炭或木材燃燒產生底灰的活度濃度[ $\text{Bq kg}_{\text{DW}}^{-1}$ ]

$f_{combust}$  : 在木材或泥炭燃燒結束後於飛灰和氣體中的燃料存量的分數[ $\text{kg}_{\text{DW}} \text{kg}_{\text{DW}}^{-1}$ ]

$doseCoef_{combType}$  : 用於泥炭或木材燃燒的劑量係數[ $\text{Sv y}^{-1} \text{ per Bq kg}_{\text{DW}}^{-1}$ ]

### 3.8.5. SR-PSU 生物圈安全評估計畫對非人類生物群之輻射劑量

#### 3.8.5.1. 對非人類生物群之輻射劑量

##### 3.8.5.1.1. 背景

以人類中心主義觀點保護環境持有觀點已有轉變（如 ICRP1977），ICRP（2007）指

出，其目的應該是維護生物的影響微乎其微，維持生物的多樣樣、保護物種和自然棲息地，以及區域的健全狀態和生態系統維護。

### 3.8.5.1.2. ERICA 劑量測定模型納入 Ecolego

SR-PSU 相對於非人類的生物安全性評估是基於 ERICA 評估方法。簡言之，ERICA 吸收劑量率，包括：核種從地質圈釋出後、核種在環境介質中的濃度（土壤、沈積物、水和空氣），對於內部劑量率，係由生物群質量和幾何、濃度比率、內部劑量轉換參數、核種在生物群內濃度求算而得。對於外部劑量，係由棲息地居住（土壤、沈積物、水和空氣）、生物群質量和幾何、外在劑量轉換參數、棲息地居住因子求算而得，該評估方法如圖 27 所示，先針對個別核種算出劑量，在總和每個核種造成的劑量總和。ERICA 劑量測定模型目前已納入 Ecolego 安全評估模式中。

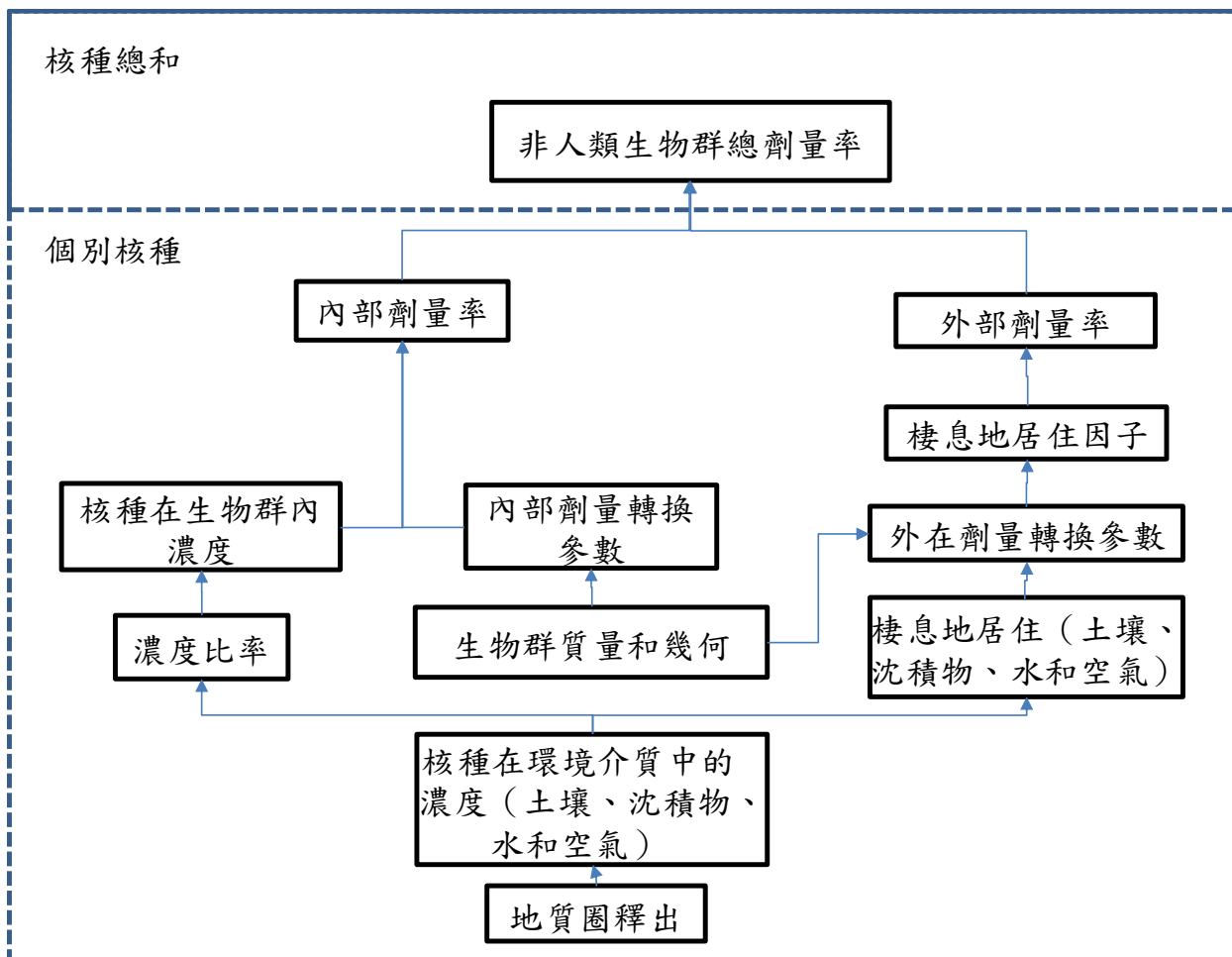


圖 27 評估放射性核種釋出對非人類生物群的影響

#### 3.8.5.1.2.1. 基本概念

在 ERICA 工具中每個被考慮的生物體幾何數據，以及放射性核種衰變性質、棲息地

居住的資料、生物體類型及劑量轉換係數 (Dose conversion coefficients, DCC)，這些數據與放射性核種在環境介質中、或在生物體內活度濃度，到劑量率計算有關。在 ERICA 中，兩組劑量轉換係數定義如下：

- 用於計算由內部輻射引起的輻射劑量暴露， $DCC_{int}$  定義為一生物體內每單位活度濃度 (Bq/kg fw) 吸收劑量率 ( $\mu\text{Gy/h}$ )
- 用於計算由於外部暴露而引起的輻射劑量暴露， $DCC_{ext}$  定義為一環境介質中每單位濃度 (Bq/kg 或 Bq/l fw) 的外部吸收劑量率 ( $\mu\text{Gy/h}$ )。

水域表層沉積物中的活度濃度，係對生活在沉積物中或沉積物上的生物體的外部暴露。在陸域生態系統中，內部和外部暴露則使用表面泥炭中的放射性核種濃度計算。主要生物圈物體 (157\_2) 沒有確定的湖泊狀態，因為它從海洋灣演變成濕地地區。然而，由於淺表面水棲息地 (池塘) 在土地形成期間很可能形成生物圈物體，所以沼澤的孔隙水濃度用於計算這個生物圈物體中的林地生物群的劑量率。淡水域物體到沉積物則使用表面泥炭中的放射性核種濃度進行計算。

### 3.8.5.1.2.2. 計算內部暴露

計算內部暴露以下列方程式表示：

$$DoseRate_{int,j} = w_{low\beta}(DCC_{int,low,\beta,j} + w_{\alpha}DCC_{int,\alpha,j})AC_j \quad (257)$$

其中：

$w_{low\beta}$ ：內部低能量  $\beta$  輻射的加權因子[無單位]

$w_{\beta\gamma}$ ：內部 (高能)  $\beta$  和  $\gamma$  輻射的加權因子[無單位]

$w_{\alpha}$ ：內部  $\alpha$  輻射的加權因子[無單位]

$DCC_{int,low,\beta,j}$ ：生物體  $j$  的內部低  $\beta$  輻射的劑量轉換係數 [ $\mu\text{Gy h}^{-1}$  per Bq  $\text{kg}_{FW}^{-1}$ ]

$DCC_{int,\beta,\gamma,j}$ ：生物體  $j$  的內部  $\beta$  和  $\gamma$  輻射的劑量轉換係數 [ $\mu\text{Gy h}^{-1}$  per Bq  $\text{kg}_{FW}^{-1}$ ]

$DCC_{int,\alpha,j}$ ：生物體  $j$  的內部  $\alpha$  輻射的劑量轉換係數 [ $\mu\text{Gy h}^{-1}$  per Bq  $\text{kg}_{FW}^{-1}$ ]

$AC_j$ ：全身生物體中的放射性核種活度濃度 [Bq  $\text{kg}_{FW}^{-1}$ ]

$$AC_j^{RN} = CR_j^{RN} AC_{water}^{D,RN} \quad (258)$$

其中：

$CR_j^{RN}$ ：生物體  $j$  的放射性核種  $x$  的濃度比 [ $\text{kg}_{Dw} \text{kg}_{FW}^{-1}$ ]

$AC_{water}^{D,RN}$ ：溶解的放射性核種在水中的活度濃度 [Bq  $\text{m}^{-3}$ ]

$$AC_{water}^D = AC_{regoUp,ter,tot}^D \quad (259)$$

$$AC_j^{RN} = CR_j^{RN} AC_{regoUp,ter,tot}^{RN} \quad (260)$$

其中：

$CR_j^{RN}$  : 生物體 j 的放射性核種的濃度比 [ $\text{kg}_{\text{DW}} \text{kg}_{\text{FW}}^{-1}$ ]

$AC_{\text{regoUp,ter,tot}}^{RN}$  : 上層泥炭層中放射性核種的總活度濃度，包括有機和無機活度 [ $\text{Bq kg}_{\text{DW}}^{-1}$ ]

$$AC_j^{14C} = SA_{\text{water}}^{14C} f_{C,j} = \frac{AC_{\text{water}}^{D,14C}}{\text{conc}_{\text{DIC,aqu}}} f_{C,j} \quad (261)$$

其中：

$SA_{\text{water}}^{14C}$  : 溶質相中無機碳在水中的比活性 [ $\text{Bq kgC}^{-1}$ ]

$AC_{\text{water}}^{D,14C}$  : 溶解的無機碳-14 在水中的活度濃度 [ $\text{Bq m}^{-3}$ ]

$\text{conc}_{\text{DIC,aqu}}$  : 溶解的無機碳在水中的濃度 [ $\text{kgC m}^{-3}$ ]

$f_{C,j}$  : 生物體整體碳的分數 j [ $\text{kgC kg}_{\text{FW}}^{-1}$ ]

$$AC_j^{14C} = AC_{\text{pp,ter}}^{14C} f_{C,j} \quad (262)$$

其中：

$AC_{\text{pp,ter}}^{14C}$  : C-14 在初級初級生產者中的活度濃度 [ $\text{Bq kgC}^{-1}$ ]

$f_{C,j}$  : 全身碳的分數 [ $\text{kgC kg}_{\text{FW}}^{-1}$ ]

$$AC_j^{3H} = \frac{AC_{\text{water}}^{D,3H}}{\text{dens}_{\text{water}}} (1 - f_{\text{DW},j}) \quad (263)$$

其中：

$AC_{\text{water}}^{D,3H}$  : 氚在水中的活度濃度 [ $\text{Bq m}^{-3}$ ]

$\text{dens}_{\text{water}}$  : 水的密度 [ $\text{kg m}^{-3}$ ] (參數值  $1000 \text{kg m}^{-3}$ )

$f_{\text{DW},j}$  : 物群全身乾重的分數 [ $\text{kg}_{\text{DW}} \text{kg}_{\text{FW}}^{-1}$ ]

### 3.8.5.1.2.3. 計算外部暴露

計算外部暴露以下列方程式表示：

$$\text{DoseRate}_{\text{ext},j}^{\text{aqu}} = (0.001 \text{m}^3 \text{l}^{-1}) (w_{\text{low}\beta} \text{DCC}_{\text{ext,low}\beta,j} + w_{\beta\gamma} \text{DCC}_{\text{ext,\beta\gamma,j}}) AC_{\text{occup},j} \quad (264)$$

其中：

$0.001 \text{m}^3 \text{l}^{-1}$  : 單位變換因子

$w_{\text{low}\beta}$  : 外部低能  $\beta$  輻射的輻射權重因子 [無單位]

$w_{\beta\gamma}$  : 外部  $\beta$  和  $\gamma$  輻射的輻射權重因子 [無單位]

$\text{DCC}_{\text{ext,low}\beta,j}$  : 生物體 j 的外部低  $\beta$  輻射的劑量轉換係數 [ $\mu\text{Gy h}^{-1}$  per  $\text{Bq l}^{-1}$ ]

$\text{DCC}_{\text{ext,\beta\gamma,j}}$  : 生物體 j 的外部  $\beta$  和  $\gamma$  輻射的劑量轉換係數 [ $\mu\text{Gy h}^{-1}$  per  $\text{Bq l}^{-1}$ ]

$AC_{\text{occup},j}$  : 生物體 j [ $\text{Bq m}^{-3}$ ] 居住修正的活度濃度 [ $\text{Bq m}^{-3}$ ]

$$AC_{\text{occup},j} = \left( v_{\text{water},j} + \frac{v_{\text{wat.surf},j}}{2} + \frac{v_{\text{sed.surf},j}}{2} \right) AC_{\text{water,surf}} + \left( \frac{v_{\text{sed.surf},j}}{2} + v_{\text{sed},j} \right) AC_{\text{regoUp,tot,aqu}} \quad (265)$$

其中：

$v_{water,j}$  : 棲息地水中生物體  $j$  的居住因子[無單位]  
 $v_{wat.surf,j}$  : 生物體  $j$  在其表面的棲息地水中的居住因子[無單位]  
 $v_{sed.surf,j}$  : 生物體  $j$  在其表面的棲息地沉積物中的居住因子[無單位]  
 $v_{sed,j}$  : 棲息地中生物體  $j$  的居住因子[無單位]  
 $AC_{water,surf}$  : 水中總放射性核種活度濃度[Bq m<sup>-3</sup>]  
 $AC_{regoUp,tot,aqu}$  : 表面沉積物中總放射性核種活度濃度[Bq m<sup>-3</sup>]

$$AC_{regoUp,tot,aqu} = AC_{regoUp,aqu} + AC_{regoUp,org,aqu} \quad (266)$$

其中：

$AC_{regoUp,aqu}$  : 表面沉積物中無機形式的活度濃度[Bq kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>]  
 $AC_{regoUp,org,aqu}$  : 有機物中相應的活度濃度[Bq kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>]  
 $DoseRate_{ext,j}^{ter} = (w_{\beta r} DCC_{ext,\beta r,onsoil,j} v_{onsoil,j} + w_{\beta r} DCC_{ext,\beta r,insoil,j} v_{onsoil,j} + w_{\beta r} DCC_{ext,\beta r,inAir,j} v_{onsoil,j}) AC_{regoUp,tot,ter}$

(267)

其中：

$w_{\beta r}$  : 外部  $\beta$  伽馬輻射的輻射權重因子 [無單位]  
 $DCC_{ext,\beta r,k,j}$  : 生物體  $j$  在棲息地  $k$  (在土壤上, 在土壤內或空氣中) 的外部  $\beta$  和  $\gamma$  輻射的劑量轉換係數[ $\mu\text{Gy h}^{-1}$  per Bq kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>]  
 $v_{k,j}$  : 棲息地  $k$  中的生物體類型  $j$  的居住因子[無單位]  
 $AC_{regoUp,tot,ter}$  : 表面泥炭中總放射性核種活度濃度[Bq kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>]

#### 3.8.5.1.2.4. 總劑量率計算

總劑量率計算可由下列方程式表示：

$$DoseRate_{total,j} = DoseRate_{ext,j} + DoseRate_{int,j} \quad (268)$$

$DoseRate_{ext,j}$  : 生物體類型  $j$  [ $\mu\text{Gy h}^{-1}$ ] (方程式 264 或 267) 中的加權外部劑量率[ $\mu\text{Gy h}^{-1}$ ]  
 $DoseRate_{int,j}$  : 生物體類型  $j$  [ $\mu\text{Gy h}^{-1}$ ] (方程式 257) 中的加權內部劑量率[ $\mu\text{Gy h}^{-1}$ ]

#### 3.8.5.1.2.5. 生物圈物體生態系統的過渡

生物圈物體生態系統的過渡, 是指當物體完全出現在正常的海平面時, 在劑量率的計算需考慮進來, 當生物圈物體從海洋狀態, 直至達到湖泊的閾值, 或為沒有適當的湖泊階段的生物圈物體。在海洋期間, 劑量率估計僅為海洋生物。但非海洋階段之後, 對湖泊-沼澤, 劑量率的計算需考慮淡水域物體。陸域生態系統 (例如濕地物種), 在第一個陸域的物體形成後一年, 陸域部分已經出現生物圈物體中, 劑量率的計算需考慮陸域生物。

#### 4. 研析國際坑道處置技術報告關於生物圈參數使用於核種傳輸與劑量評估要項

放射性核種從場址釋出至地質圈，經由地表生態系統到造成輻射曝露的生物群（人類和非人類生物），SR-PSU 的生物圈核種傳輸模擬係採用區塊模式，考慮 2 種生態系統，水域(如海洋、湖泊與河川)與陸域(如泥沼與農業生態系)接收與累積來自處置場之外釋核種，其概念架構如第 3 章之圖 12 所示，且經由生物圈之曝露途徑，傳輸至受影響最大人類群體之劑量及非人類生物群。在水域 Aquatic、陸域（沼澤）Terrestrial (mire)、陸域（農業）Terrestrial (agriculture)已定義下列參數特性：

##### 1. 水域 Aquatic

Water（水體）：於開放水域(海洋、湖泊、河川)之放射性核種，包含核種溶解於水中與吸附在有機物質

PMorg（水域內有機物質吸附之核種）：於水中懸浮液內被有機顆粒物質吸附之放射性核種

Prim Prod（水域初級生產者內之核種）：貯留在水域初級生產者內之放射性核種，包括在海洋的核種、海底微觀和宏觀的初級生產者

RegoUp（水域好氧生物活性層之核種）：在水體沉積物之上部好氧生物活性層之放射性核種，包括孔隙水內與吸附在沉積物顆粒的放射性核種

RegoUporg（水域好氧生物活性層有機物質吸附核種）：在水體沉積物的上部好氧生物活性層被有機顆粒物吸附之放射性核種。

RegoPG（水域水體沉積物之核種）：生物活性層以下於後冰期水體沉積物（粘土腐殖土）之放射性核種，包括孔隙水內與吸附在沉積物顆粒的放射性核種

RegoPGorg（水域水體沉積物有機物質吸附之核種）：生物活性層以下於後冰期水體沉積物（粘土腐殖土）內被有機顆粒物吸附之放射性核種。

RegoGL（水域冰期粘土內之核種）：在冰期粘土內之放射性核種（通常由後冰期沉積物所覆蓋），包括孔隙水內與吸附在沉積物顆粒的放射性核種

RegoLow（水域冰積土內之核種）：在冰積土內之放射性核種（通常由冰期粘土所

覆蓋)，包括孔隙水內與吸附在沉積物顆粒的放射性核種

## 2.陸域（沼澤）Terrestrial (mire)

PrimProd（沼澤植被之核種）：貯留在沼澤植被生物量的放射性核種，包括地面上方和下方之苔蘚植物，維管束植物，矮灌木和樹木的生物量

RegoUp（濕地泥炭上部好氧生物活性層之核種）：在濕地泥炭（acrotelm(活性層)泥炭）上部好氧生物活性層之放射性核種，包括孔隙水內與吸附在泥炭的放射性核種

RegoUporg（濕地泥炭上部好氧生物活性層有機物質吸附之核種）：於泥炭（acrotelm(活性層)泥炭）上部好氧生物活性層內被有機顆粒物質吸附之放射性核種

RegoPeat（深部泥炭之核種）：在深部、永久厭氧、濕地泥炭（acrotelm(活性層)泥炭）之放射性核種，包括孔隙水內與吸附在泥炭的放射性核種。

RegoPeatorg（深部泥炭有機物質吸附之核種）：在深部、永久厭氧濕地泥炭（acrotelm(活性層)泥炭）內被有機顆粒物質吸附之放射性核種

RegoPG（後冰期被濕地泥炭覆蓋沉積物內之核種）：於後冰期被濕地泥炭覆蓋沉積物（粘土腐殖土）內之放射性核種，包括孔隙水內與吸附在沉積物顆粒的放射性核種

RegoPGorg（後冰期被濕地泥炭覆蓋沉積物內有機物質吸附之核種）：於後冰期被濕地泥炭覆蓋沉積物（粘土腐殖土）內被有機顆粒物吸附之放射性核種。

RegoGL（冰期粘土內之核種）：被濕地泥炭埋在下面的冰期粘土內之放射性核種，包括孔隙水內與吸附在沉積物顆粒的放射性核種

RegoLow（冰積土內之核種）：在冰積土內之放射性核種，被濕地泥炭埋在下面，通常由冰期粘土所覆蓋。包括孔隙水內與吸附在沉積物顆粒的放射性核種

## 3.陸域（農業）Terrestrial (agriculture)



RegoUp (農業土壤上層之核種): 在農業土壤 (或頂部土) 上層之放射性核種, 該土壤受到犁地和生物擾動的影響, 本層係農作物主要攝取養分和微量元素之土壤。這一層是排水良好並具有高土壤生物活性。包括孔隙水內與吸附在沉積物顆粒的放射性核種

RegoUporg (農業土壤上層有機物質吸附之核種): 在農業土壤上層被有機顆粒物吸附之放射性核種

SR-PSU 對於在水域、沼澤和農業子模型區塊之間動態通量, 可由下列 21 個作用過程進行: 1. 生物擾動、2. 植物吸收、3. 落葉呼吸/釋放、4. 落葉產生、5. 風化層礦化、6. 植被內生、7. 平流水平傳輸、8. 平流垂直傳輸、9. 滲漏、10. 水分吸收、11. 擴散 (垂直)、12. 固-液相分離、13. 沉降、14. 再懸浮、15. 埋藏、16. 脫氣、17. 氣體吸收、18. 排水/耕種、19. 施肥、20. 灌溉、21. 核種衰變/增加。並由第三章所述之生物圈核種傳輸模型, 模擬自然生態系統之間水域、沼澤和農業與生物圈物體之內的放射性核種的轉移。第三章已列出生態系統內核種平流傳輸、生態系統內核種擴散傳輸、水域生態內放射性核種量變化、沼澤生態內放射性核種量變化, SR-PSU 安全評估計畫之主要情節、低發生率情節與其他情節。SR-PSU 安全評估計畫亦考慮空氣, 土壤和水傳輸途徑, 藉由各種評估模式分析廢料體、近場、遠場之核種傳輸, 然後模擬得到進入生物圈的核種濃度, 再利用核種劑量係數 (Dose coefficient) 與食物攝取率等參數計算對於輻射劑量。曝露於環境中的放射性核種的總劑量包括攝取水、攝取食物、外部曝露和吸入。

所以核種傳輸與劑量評估需要甚多參數, 本報告研析 R13-18 報告有關生物圈放射性核種遷移模擬所需使用的所有參數: 包括「放射性核種參數」、「景觀幾何形狀」、「土壤特性」、「水文參數」、「元素比參數」、「水域生態參數」、「陸域生態系統參數」、「人類居住特性參數」、「非人類生物群的參數」、「參數在替代計算案例使用」等。本報告列於表 11 至表 21, 配合第三章之生物圈放射性核種傳輸與劑量評估模式數學模型, 瞭解「區塊模式於模擬核種通量傳輸和在生態系統的放射性核種累積」、「生態系統和生物圈物體之間垂直和水平傳輸過程的水文連通性」、「水域生態系統描述: 海、湖泊和河流生態系統子模型」、「沼澤濕地生態系統描述: 濕地生態系統子模型」、「農業生態系統: 農業生態系統的子模型」、「地表計算大氣子模型, 其中氣態放射性核種使植物吸收或大氣層發生

交換作用造成人類吸入之曝露」、「人類居住區劑量計算」、「非人類生物群劑量計算」之相關參數。

表 11 放射性核種比參數

參數	說明	單位
doseCoef_ext	外在曝露劑量係數	(Sv h <sup>-1</sup> ) (Bq m <sup>-3</sup> ) <sup>-1</sup>
doseCoef_ing	攝食劑量係數	Sv Bq <sup>-1</sup>
doseCoef_inh	吸入劑量係數	Sv Bq <sup>-1</sup>
doseCoef_combPeat	泥炭燃燒劑量係數	(Sv year <sup>-1</sup> ) (Bq kgdw <sup>-1</sup> ) <sup>-1</sup>
doseCoef_combWood	木材燃燒劑量係數	((Sv year <sup>-1</sup> ) (Bq kgdw <sup>-1</sup> ) <sup>-1</sup>
doseCoef_ext_surf	單位面積外在曝露劑量係數	(Sv h <sup>-1</sup> ) (Bq m <sup>-2</sup> ) <sup>-1</sup>
dose_ingrowth_agri_ext	核種(包含子核種)於農業土地經由外在曝露之劑量平均分布率	無因次
dose_ingrowth_agri_inh	核種(包含子核種)於農業土地經由吸入之劑量平均分布率	無因次
dose_ingrowth_agri_ing	核種(包含子核種)於農業土地經由攝食之劑量平均分布率	無因次
doseCoef_ing_water_14C	水中碳-14 經由攝食之劑量係數	Sv Bq <sup>-1</sup>

表 12 生物圈物體的幾何參數

參數	說明	單位
<b>Time dependent</b>		
area_obj_aqu	水域物體表面積	m <sup>2</sup>
area_obj_ter	陸域物體表面積	m <sup>2</sup>
res_rate	單位表面積總再懸浮率	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
sed_rate	單位表面積總沉降率	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
z_water	平均水深	m
z_regoPG_aqu	後冰期沉積物水域深度	m
z_regoPG_ter	後冰期沉積物陸域深度	m
Ter_growth	沼澤內植被生長之年增加(或減少)面積	m <sup>2</sup> year <sup>-1</sup>
<b>Constant over time</b>		
area_obj	湖泊物體面積	m <sup>2</sup>
z_RegoLow	冰碛土平均深度	m
z_RegoGL	冰期黏土深度	m
threshold_start	海灣形成湖泊之起始年代	year
threshold_stop	海灣形成湖泊之最終年代	year
threshold_isolation	海灣已經形成湖泊後之某個年代	year
threshold_land	蘆葦區域開始出現在物體內年代	year
threshold_end	陸域植被生長之最終年代	year
threshold_well	某處鑿井抽水時間點	year

表 13 風化層土壤特性參數

參數	說明	單位
<b>Non-cultivated soils</b>		
dens_regoLow	低於表皮土層的密度	kgdw m <sup>-3</sup>

參數	說明	單位
dens_regoGL	冰川黏土的密度	kgdw m <sup>-3</sup>
dens_regoPG	後冰期沉積物的密度	kgdw m <sup>-3</sup>
dens_regoPeat	陸域泥炭層密度	kgdw m <sup>-3</sup>
dens_regoUp_lake	水表土層上層5公分的密度(湖)	kgdw m <sup>-3</sup>
dens_regoUp_sea	水表土層上層10公分的密度(海)	kgdw m <sup>-3</sup>
dens_regoUp_ter	地層沉積物(泥炭)上層氧化層密度	kgdw m <sup>-3</sup>
poro_regoLow	下部石英層的孔隙率	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>
poro_regoGL	冰川黏土的孔隙度	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>
poro_regoPG	後冰期沉積物的孔隙度	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>
poro_regoPeat	陸域表土層上層的密度	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>
poro_regoUp_lake	水表土層上層5公分的孔隙度(湖泊)	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>
poro_regoUp_sea	水表土層上層10公分的孔隙度(海)	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>
poro_regoUp_ter	陸域表土層上層含氧層的孔隙度	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>
<b>Infield-outland</b>		
dens_regoUp	早期農業活動中冰川黏土的密度	kgdw m <sup>-3</sup>
poro_regoUp	冰川黏土在早期農業活動中的孔隙度	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>
S_w_regoUp	早期農業活動中砂土上層的飽和度	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>
D_CO2_soil	土壤中二氧化碳的擴散率，基於土壤的孔隙率和含水量	m <sup>2</sup> year <sup>-1</sup>
<b>Drained mire</b>		
poro_regoUp_clay	農業土壤中腐植黏土的孔隙度	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>
poro_regoUp_peat	農業土壤中泥炭的孔隙度	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>
dens_regoUp_clay	農業土壤中腐植黏土的密度	kgdw m <sup>-3</sup>
dens_regoUp_peat	農業土壤中泥炭的密度	kgdw m <sup>-3</sup>
S_w_regoUp_peat	工業農業社會中上層土壤飽和度	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>
compact_gyttja	農業土壤在最初時將土壤壓實使氧化減少(腐植)	m m <sup>-1</sup>
compact_peat	農業土壤在最初時將土壤壓實使氧化減少(泥炭)	m m <sup>-1</sup>
D_CO2_soil_clay	土壤中二氧化碳的擴散率，基於土壤的孔隙率和含水量	m <sup>2</sup> year <sup>-1</sup>
D_CO2_soil_peat	土壤中二氧化碳的擴散率，基於土壤的孔隙率和含水量	m <sup>2</sup> year <sup>-1</sup>
<b>Garden plot</b>		
poro_regoUp	現代廚房菜園中的土壤孔隙度	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>
dens_regoUp	現代廚房菜園中的土壤密度	kgdw m <sup>-3</sup>
S_w_regoUp	現代廚房菜園中的土壤飽和度	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>
D_CO2_soil	土壤中二氧化碳的擴散率，基於土壤的孔隙率和含水量	m <sup>2</sup> year <sup>-1</sup>

表 14 水文參數

參數	說明	單位
q_low_gl_sea	海相中從下部表土層到冰川黏土層的水通量	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
q_gl_low_sea	水相從冰川黏土層到下部地表土層	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
q_gl_pg_sea	水相從冰川黏土到海相的後冰期黏土層	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
q_pg_gl_sea	從後冰期黏土到海相冰川黏土層的水通量	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
q_pg_up_sea	從後冰期黏土到海相中沉積層的水通量	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
q_up_pg_sea	海相中上層沉積層到後冰期黏土層的水通量	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
q_up_wat_sea	海相中上層沉積層到水柱的水通量	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
q_wat_up_sea	海相中從水柱到上沉積層的水通量	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
q_low_gl_lake	下表土層到冰川表土層的水通量	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
q_gl_low_lake	冰川黏土層到下表土層的水通量	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
q_gl_pg_lake	冰川黏土到後冰期黏土層的水通量在淡水相中	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
q_pg_gl_lake	後冰期黏土層到冰川黏土層的水通量在淡水相中	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
q_pg_up_lake	後冰期黏土層到上層層積層的水通量在淡水相中	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
q_up_pg_lake	上層沉積層到後期冰期黏土層的水通量在淡水相中	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
q_up_wat_lake	上層泥層到水層的水通量	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
q_wat_up_lake	水柱到上層沉積層的水通量在淡水相中	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
q_downstream_iso	湖相中下游水柱的水通量	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
q_low_gl_ter_iso	陸域淡水相中從下層表土層到冰川黏土層的水通量	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
q_gl_low_ter_iso	陸域淡水相中從冰川黏土層到下層表土層的水通量	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>

q_gl_pg_ter_iso	陸域淡水相中從冰川黏土層到後冰期黏土層的水通量	$m^3 m^{-2} year^{-1}$
q_pg_gl_ter_iso	陸域淡水相中後冰期黏土層到冰川黏土層的水通量	$m^3 m^{-2} year^{-1}$
q_up_wat_ter_iso	陸域淡水相中上層泥炭層到水柱的水通量	$m^3 m^{-2} year^{-1}$
q_wat_up_ter_iso	陸域淡水相中水柱到上層泥炭層的水通量	$m^3 m^{-2} year^{-1}$
q_pg_peat_ter_iso	陸域淡水層中冰川黏土層到泥炭層的水通量	$m^3 m^{-2} year^{-1}$
q_peat_pg_ter_iso	陸域淡水相中後泥炭層到後冰期黏土層的水通量	$m^3 m^{-2} year^{-1}$
q_peat_up_ter_iso	陸域淡水相泥炭層到上層泥炭層的水通量	$m^3 m^{-2} year^{-1}$
q_up_peat_ter_iso	陸域淡水相中上層泥炭層到泥炭層的水通量	$m^3 m^{-2} year^{-1}$
q_downstream_end	流相中下游水柱的水通量	$m^3 m^{-2} year^{-1}$
q_low_gl_ter_end	在沼澤相的陸域部分從地下部分到冰川黏土層的水通量	$m^3 m^{-2} year^{-1}$
q_gl_low_ter_end	在沼澤相的陸域部分從冰川黏土層到地下部分的地下部分的水通量	$m^3 m^{-2} year^{-1}$
q_gl_pg_ter_end	在沼澤相的陸域部分從冰川黏土到後冰期黏土層的水通量	$m^3 m^{-2} year^{-1}$
q_pg_gl_ter_end	在沼澤相的陸域部分從後冰期黏土到冰川黏土層的水通量	$m^3 m^{-2} year^{-1}$
q_up_wat_ter_end	在沼澤相的陸域部分從上泥炭層到水柱的水通量	$m^3 m^{-2} year^{-1}$
q_wat_up_ter_end	在沼澤相的陸域部分從水柱到上泥炭層的水通量	$m^3 m^{-2} year^{-1}$
q_pg_peat_ter_end	在沼澤相的陸域部分從後冰期黏土到泥炭層的水通量	$m^3 m^{-2} year^{-1}$
q_peat_pg_ter_end	在沼澤相的陸域部分從泥炭到後冰期黏土層的水通量	$m^3 m^{-2} year^{-1}$
q_peat_up_ter_end	在沼澤相的陸域部分從泥炭到上泥炭層的水通量	$m^3 m^{-2} year^{-1}$
q_up_peat_ter_end	在沼澤相的陸域部分從上泥炭到泥炭層的水通量	$m^3 m^{-2} year^{-1}$
WF_lobjXX	水流從lobjxx生物圈物體到lobjyy生物圈物體	$m^3 year^{-1}$

表 15 元素比參數

參數	說明	單位
<b>Concentration ratios</b>		
cR_agri_cereal	土壤和穀物之間的濃度比	kgdw kgC <sup>-1</sup>
cR_agri_fodder	土壤和飼料之間的濃度比	kgdw kgC <sup>-1</sup>
cR_agri_tuber	土壤和土豆之間的濃度比	kgdw kgC <sup>-1</sup>
cR_agri_veg	土壤和蔬菜的濃度比	kgdw kgC <sup>-1</sup>
cR_food_herbiv	草食動物和他們減少飲食的濃度比	kgdw kgC <sup>-1</sup>
cR_lake_cray	湖水中小龍蝦的濃度比	m <sup>3</sup> kgC <sup>-1</sup>
cR_lake_fish	湖水中魚類的濃度比	m <sup>3</sup> kgC <sup>-1</sup>
cR_lake_pp_macro	湖水中大型植物的濃度比	m <sup>3</sup> kgC <sup>-1</sup>
cR_lake_pp_micro	湖水中微膠體的濃度比	m <sup>3</sup> kgC <sup>-1</sup>
cR_lake_pp_plank	水中浮游生物的濃度比	m <sup>3</sup> kgC <sup>-1</sup>
cR_sea_fish	海水中魚類的濃度比	m <sup>3</sup> kgC <sup>-1</sup>
cR_sea_pp_macro	海水中大型植物的濃度比	m <sup>3</sup> kgC <sup>-1</sup>
cR_sea_pp_micro	海水中微膠體的濃度比	m <sup>3</sup> kgC <sup>-1</sup>
cR_sea_pp_plank	海水中浮游生物的濃度比	m <sup>3</sup> kgC <sup>-1</sup>
cR_ter_mush	食用菌與土壤的濃度比	kgdw kgC <sup>-1</sup>

參數	說明	單位
<b>Transfer coefficients</b> cR_ter_pp	初級生產者和土壤的濃度比	kgdw kgC <sup>-1</sup>
TC_meat	從飼料和水中放射性核種攝入到牛肉的轉移係數	d kgfw <sup>-1</sup>
TC_milk	從飼料和水中的放射性核種到牛奶的轉移係數	day L <sup>-1</sup>
<b>Kd (soil/liquid distribution coefficients)</b>		
kD_PM_lake	湖水中顆粒物的分佈係數	m <sup>3</sup> kgdw <sup>-1</sup>
kD_PM_sea	海水中顆粒物的分佈係數	m <sup>3</sup> kgdw <sup>-1</sup>
kD_regoGL	冰川粘土的分佈係數	m <sup>3</sup> kgdw <sup>-1</sup>
kD_regoLow	下表土層的分佈係數 (冰磧土)	m <sup>3</sup> kgdw <sup>-1</sup>
kD_regoPeat	陸域 (泥炭) 分佈係數缺氧層	m <sup>3</sup> kgdw <sup>-1</sup>
kD_regoPG	後冰期層積物的分部係數	m <sup>3</sup> kgdw <sup>-1</sup>
kD_regoUp_aqu	上層水域棲息地分佈係數	m <sup>3</sup> kgdw <sup>-1</sup>
kD_regoUp_ter	陸域含水層中泥炭的分部係數	m <sup>3</sup> kgdw <sup>-1</sup>
kD_regoUp, Drained mire	工業農田中耕地泥炭土的分佈係數	m <sup>3</sup> kgdw <sup>-1</sup>
kD_regoUp, Garden plot	現代廚房菜園中土壤的分佈係數	m <sup>3</sup> kgdw <sup>-1</sup>
kD_regoUp, infield-outland	早期農田中沙質土分佈係數	m <sup>3</sup> kgdw <sup>-1</sup>
<b>Diffusivity</b> D_water	Diffusivity 擴散率	m <sup>2</sup> year <sup>-1</sup>
<b>Concentration ratios for non-human biota calculations</b>		
cR_Lake_amph_NHB	湖水和兩棲動物之間的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Lake_bent_fish_NHB	湖水和底棲魚之間的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Lake_bird_NHB	湖水與鳥類的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Lake_bivalve_NHB	湖水和雙殼類的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Lake_crust_NHB	湖水和甲殼類動物的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Lake_Fish_NHB	水和魚類的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Lake_gastr_NHB	湖水和腹足類動物之間的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Lake_ins_larvae_NHB	湖水和昆蟲幼蟲的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Lake_mammal_NHB	水和哺乳動物的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Lake_pel_fish_NHB	湖水和上層魚之間的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Lake_pp_plank_NHB	湖水和浮游植物的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Lake_pp_vasc_NHB	湖水和維管植物之間的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>

參數	說明	單位
cR_Lake_zoopl_NHB	湖水和浮游動物之間的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Sea_bent_fish_NHB	海水和底棲魚之間的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Sea_bent_moll_NHB	海水和底棲軟體的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Sea_bird_NHB	海水和鳥類的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Sea_crust_NHB	海水和甲殼類動物的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Sea_Fish_NHB	海水和魚類的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Sea_mammal_NHB	海水和哺乳動物的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Sea_pel_fish_NHB	海水和中上層魚之間的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Sea_polych_NHB	海水和多毛蟲的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Sea_pp_macro_NHB	海水和大型植物之間的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Sea_pp_plank_NHB	海水與浮游植物的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Sea_pp_vasc_NHB	海水和維管植物之間的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Sea_zoopl_NHB	海水和浮游動物之間的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Ter_amph_NHB	土壤和兩棲動物之間的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Ter_bird_egg_NHB	土壤和鳥蛋之間的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Ter_bird_NHB	土壤和鳥類之間的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Ter_detr_inv_NHB	土壤和有害無脊椎動物之間的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Ter_fl_ins_NHB	土壤和飛蟲之間的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Ter_gastr_NHB	土壤和腹足動物之間的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Ter_mammal_large_NHB	土壤和大型哺乳動物之間的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Ter_mammal_small_NHB	土壤，草和草本之間的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Ter_pp_grass_NHB	土壤、地衣和苔蘚植物的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Ter_pp_lich_NHB	土壤和初級生產者之間的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Ter_pp_NHB	土壤和灌木之間的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Ter_pp_shrub_NHB	土壤與樹木的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Ter_pp_tree_NHB	土壤和爬行動物之間的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Ter_rept_NHB	土壤和爬行動物之間的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
cR_Ter_soil_inv_NHB	土壤和土壤無脊椎動物之間的濃度比	kgdw kgfw <sup>-1</sup>

表 16 水域生態參數

參數	說明	單位
biom_pp_macro	微生物群落在每單位水的表面積中的生物量	kgC m <sup>-2</sup>
biom_pp_micro	微生物群落在每單位水的表面積中的生物量	kgC m <sup>-2</sup>
biom_pp_plank	遠洋中每單位水表面積的生物量	kgC m <sup>-2</sup>

參數	說明	單位
NPP_macro	每單位水表面積中底棲生物群落的淨初級生產量	kgC m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
NPP_micro	每單位水表面積中微生物群落的淨初級生產量	kgC m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
NPP_plank	每單位水表面積中初級生產單位的量	kgC m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
conc_DIC_lake	湖水中溶解無機碳的濃度	kgC m <sup>-3</sup>
conc_DIC_sea	海水中溶解無機碳的濃度	kgC m <sup>-3</sup>
conc_PM_lake	湖中懸浮物濃度	kgdw m <sup>-3</sup>
conc_PM_sea	海中懸浮物濃度	kgdw m <sup>-3</sup>
f_C_fish	魚中碳的淨重分數	kgC kgdw <sup>-1</sup>
f_DW_FW_fish_lake	魚在湖中的淨重到鮮重的分數	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
f_DW_FW_fish_sea	海魚中乾重與鮮重的比例	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
f_H2CO3_lake	CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 中溶解無機碳在湖水中的分數	Bq Bq <sup>-1</sup>
f_H2CO3_sea	CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 中溶解無機碳在海水中的分數	Bq Bq <sup>-1</sup>
f_refrac_macro_lake	湖中初始礦化後大型底棲生物的有機物分數	kgC kgC <sup>-1</sup>
f_refrac_macro_sea	海中初始礦化後大型底棲生物的有機物分數	kgC kgC <sup>-1</sup>
f_refrac_micro_lake	湖中初始礦化後初級生產者的有機物含量分數	kgC kgC <sup>-1</sup>
f_refrac_micro_sea	海水中初始礦化後初級生產者的有機物含量分數	kgC kgC <sup>-1</sup>
f_refrac_plank_lake	湖泊中上層中初級生產者的有機物含量分數	kgC kgC <sup>-1</sup>
f_refrac_plank_sea	初始礦化後的水在海洋中上層初級生產者的有機物含量	kgC kgC <sup>-1</sup>
height_ref_aqu	用於定義風速的參考高度	m
minRate_regoPG_lake	湖中後冰期沉積物的礦化速率	kgC kgC <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup>
minRate_regoPG_sea	海中後冰河沉積物的礦化速率	kgC kgC <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup>
minRate_regoUp_lake	湖中上層區域的礦化速率	kgC kgC <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup>
minRate_regoUp_sea	海洋中上層礦物的礦化速率	kgC kgC <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup>
minRate_water_PM_lake	湖水中特定物質的礦化率	kgC kgC <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup>
minRate_water_PM_sea	海水中特定物質的礦化速率	kgC kgC <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup>
piston_vel_lake	與大氣接觸湖水的氣體交換係數	m year <sup>-1</sup>
piston_vel_sea	與大氣接觸海水的氣體交換係數	m year <sup>-1</sup>
prod_edib_cray_lake	湖中單位面積可食用小龍蝦的持續產量	kgC m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
prod_edib_fish_lake	湖中每單位面積可食用魚的持續產量	kgC m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
prod_edib_fish_sea	在海中每單位面積的可食用魚的持續產量	kgC m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
solubilityCoef_lake	湖水中二氧化碳的溶解度係數（溫度，鹽度等）	(mol m <sup>-3</sup> ) (mol m <sup>-3</sup> ) <sup>-1</sup>
solubilityCoef_sea	海水中二氧化碳的溶解度係數（溫度，鹽度等）	((mol m <sup>-3</sup> ) (mol m <sup>-3</sup> ) <sup>-1</sup>
vel_wind_height_ref_aqu	參考高度處的風速	m s <sup>-1</sup>
z_min_prod_edib_cray_lake	在湖中生產龍蝦的最小水深	m
z_min_prod_edib_fish_lake	在湖中生產魚的最小水深	m
z_min_prod_edib_fish_sea	在海中生產魚的最小水深	m
z_regoUp_lake	湖中上層氧化層的深度	m
z_regoUp_sea	海中上層氧化層的深度	m

表 17 沼澤與農業區生態參數

參數	說明	單位
<b>Mire ecosystem</b>		
biom_pp_ter	每單位面積陸域初級生產者的總生物量	kgC m <sup>-2</sup>
conc_C_atmos	大氣中的碳濃度 (地上)	kgC m <sup>-3</sup>
conc_Cl_PP_ter	植被中氯的濃度	gCl kgC <sup>-1</sup>
conc_Cl_regoUp_ter_D	泥沼中溶解氯的濃度	gCl m <sup>-3</sup>
conc_DIC_regoUp_ter	泥漿氧化泥炭層中溶解的無機碳濃度	kgC m <sup>-3</sup>
conc_Dust_ter	濕地植被中空氣中細小土壤顆粒的濃度	kgdw m <sup>-3</sup>
dragCoef	拖曳冠層的係數	無因次
f_C_peat	泥炭中碳的淨重比	kgC kgdw <sup>-1</sup>
f_H2CO3_ter	CO <sub>2</sub> / H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 中溶解泥炭在湖水中的分數	Bq Bq <sup>-1</sup>
f_mush_herbiv	草食動物減少食用蘑菇的分數	kgC kgC <sup>-1</sup>
f_refrac_ter	初始礦化後初級生產者所留下的有機材料分數	kgC kgC <sup>-1</sup>
f_rootUptake	通過根吸收而同化新合成生物量中碳的分數	kgC kgC <sup>-1</sup>
height_CA_ter	在沼澤中的冠層的地面高度	m
height_L1_ter	距離第一上層冠層的地面的高度	m
height_L2_ter	距離第二上層冠層的地面的高度	m
height_ref_ter	用於定義風速的參考高度	m
karman_const	常數	無因次
LAI_ter	植被的總上葉面積除以沼澤表面積的比值	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup>
	植被生長 (葉面積指數)	
leaf_width_ter	陸域植被的葉寬	m
minRate_regoPeat	泥炭礦化率	year <sup>-1</sup>
minRate_regoPG_ter	後冰期沉積物中的礦化速率	kgC kgC <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup>
minRate_regoUp_ter	上層地殼中的礦化速率	kgC kgC <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup>
NPP_ter	陸域生態系統中的初級生產總量 (地上和地下)	kgC m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
piston_vel_ter	與大氣接觸的泥炭孔隙水的氣體交換係數	m year <sup>-1</sup>
prod_edib_berry	每單位面積可食用漿果的持續產量	kgC m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
prod_edib_game	每單位面積可食用遊戲的可持續產量	kgC m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
prod_edib_mush	每單位面積可食用蘑菇的可持續產量	kgC m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
solubilityCoef_ter	孔隙水中二氧化碳的溶解度係數	(mol m <sup>-3</sup> ) (mol m <sup>-3</sup> ) <sup>-1</sup>
vel_wind_height_ref_ter	參考高度處的風速	m s <sup>-1</sup>
z_regoUp_ter	含氧和生物活性泥炭層的深度	m
df_decomp	有機物可通過不穩定礦化釋放的放射性核種的分數	
<b>Agricultural ecosystem (common parameters for all agricultural societies)</b>		
height_CA_cereal	地面到穀物的冠層的高度	m
height_CA_fodder	地面到飼料的冠層的高度	m
height_CA_tuber	地面到冠層塊莖的高度	m
LAI_cereal	植被的總上層葉面積除以植被生長的農田面積的比例 (葉面積指數)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup>
LAI_fodder	植被的總上層葉面積除以植被生長的農田面積的比例 (葉面積指數)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup>
LAI_tuber	植被的總上層葉面積除以植被生長的農田面積的比例 (葉面積指數)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup>
leaf_width_cereal	穀物的葉寬	m
leaf_width_fodder	飼料葉寬	m
leaf_width_tuber	塊莖葉寬	m
ingRate_C_cattle	以碳單位表示牛的每日的能量需求	kgC day <sup>-1</sup>
ingRate_soil_cattle	牛的每日攝入率(從土中)	kgdw day <sup>-1</sup>
ingRate_water_cattle	牛的每日攝入率(從水中)	m <sup>3</sup> day <sup>-1</sup>
conc_C_meat	肉中的碳濃度	kgC kgfw <sup>-1</sup>
conc_C_milk	牛奶中碳的濃度	kgC kgfw <sup>-1</sup>
dens_milk	牛奶密度	kgfw L <sup>-1</sup>
dens_water	水密度	kg m <sup>-3</sup>
<b>Drained mire</b>		
biom_cereal	被末期單位面積穀物生物量 (排流線)	kgC m <sup>-2</sup>
biom_fodder	被期結束時單位面積飼料生物量產量 (排流線)	kgC m <sup>-2</sup>
biom_tuber	植被周期結束時單位面積塊莖的生物量產量 (排流線)	kgC m <sup>-2</sup>
conc_DIC_regoUp	耕地泥炭層中溶解的無機碳的濃度	kgC m <sup>-3</sup>
conc_Dust	農田土壤中細小土壤顆粒的濃度	kgdw m <sup>-3</sup>
Flux_water_satSoil_agri	生長穀物從飽和到不飽和區生長穀物的水通量	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>



minRate	耕地泥炭的礦化率	kgC kgC <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup>
NPP_cereal	耕地泥炭中穀物的初級生產總量（地上和地下）	kgC m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
NPP_fodder	耕地泥炭中飼料的初級生產總量（地上和地下）	kgC m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
NPP_tuber	耕地泥炭塊莖總初級淨產量（地上和地下）	kgC m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
percolation_agri	農業產業化中從泥炭土中向下流動的水	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
z_drain_agri	壓實後的溝槽深度	m
<b>Garden plot</b>		
amount_irrig	植被周期間所有灌溉事件的總用水量	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
biom_tuber	植被期結束時單位面積塊莖的生物量產量（園地）	kgC m <sup>-2</sup>
biom_veg	植被期末單位面積蔬菜生產量（現代廚房菜園）	kgC m <sup>-2</sup>
conc_DIC_regoUp	現代廚房菜園中溶解的無機碳濃度	kgC m <sup>-3</sup>
conc_Dust	細小的土壤顆粒在現代廚房菜園之上的空氣中的集中	kgdw m <sup>-3</sup>
f_area_tuber	用於塊莖的面積比例	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup>
f_area_veg	用於蔬菜的面積的分數	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup>
height_CA_veg	從地面到蔬菜冠層的高度	m
LAI_veg	葉面積指數	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup>
leaf_width_veg	蔬菜的葉寬	m
LeafStoreCapacity_tuber	塊莖葉存儲容量	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup>
LeafStoreCapacity_veg	葉蔬菜的葉容量	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup>
minRate	農業土壤（目前菜園田園）礦化率	kgC kgC <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup>
N_irrig	灌溉事件數	year <sup>-1</sup>
NPP_ag_veg	蔬菜在園地裡的地上淨初級生產	kgC m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
NPP_tuber	菜園內塊莖的總初級淨產量（地上和地下）	kgC m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
NPP_veg	蔬菜的初級生產總量（地上和地下）	kgC m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
percolation_agri	農業產業化中，水的向下流動	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
time_vegPeriod	植被時間	year year <sup>-1</sup>
washoffCoef	從植物葉表面去除沉積的放射性核種	year <sup>-1</sup>
z_regoUp	農業土壤在目前菜園田園中的深度	m
<b>Infield-outland</b>		
biom_cereal	植被期結束時單位面積穀物的產量（內陸 - 外田）	kgC m <sup>-2</sup>
conc_DIC_regoUp	生物活性泥炭層中溶解的無機碳濃度	kgC m <sup>-3</sup>
conc_Dust	農田土壤砂土中空氣中細小土壤顆粒的濃度	kgdw m <sup>-3</sup>
demand_hay	冬小麥對內外系統有機施肥的需求	kgC m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
f_loss_orgFert	當將肥料施用於耕地時，乾草中原始的活度濃度保持不變	Bq Bq <sup>-1</sup>
minRate	與有機肥料相關的礦化率	kgC kgC <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup>
NPP_cereal	砂質土壤中穀物的總初級淨產量（地上和地下）	kgC m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
percolation_agri	現代產業中土壤向下流動的水	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
z_regoUp	早期農業社會中農業土壤的深度	m
<b>Combustion parameters</b>		
f_C_wood	陸域生產者於木柴的生產淨重，例如：挪威雲杉詞根木頭	kgC kgdw <sup>-1</sup>
fuel_cons_peat	每年消耗的泥炭燃料產生20000千瓦	kgdw year <sup>-1</sup>
fuel_cons_wood	每年消耗木材燃料的干重產生20,000千瓦	kgdw year <sup>-1</sup>
area_support_wood	此區域家庭的每個人需要木柴加熱量(相當於20,000千瓦/年)	m <sup>2</sup> ind <sup>-1</sup>
demand_peat	每個人在50年內（相當於每年20,000千瓦時）為家庭供暖所需的泥炭質量	kgdw ind <sup>-1</sup>
demand_AlgFertil	內陸系統中有機施肥的需求代數	kgC m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>
f_combust	木材或泥煤燃燒後結束於飛灰和氣體中的燃料庫存的分數	

表 18 人類居住特性參數

參數	說明	單位
ingRate_C	成年個體以碳為單位的年能源需求	kgC year <sup>-1</sup>
ingRate_water	人類每年的攝入水量	m <sup>3</sup> year <sup>-1</sup>
inhRate	人體吸入的空氣量	m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>

參數	說明	單位
<b>Drained mire</b>		
time_exposure	在工業時代農業系統與受污染地面（耕地）接觸的時間	h year <sup>-1</sup>
N_group	農業產業化中最大的暴露人數	無因次
f_diet_tuber	由塊莖消耗覆蓋的每年能量需求的分數	kgC kgC <sup>-1</sup>
f_diet_milk	每年消耗牛奶所覆蓋的能源需求的分數	kgC kgC <sup>-1</sup>
f_diet_meat	每年消耗肉類所覆蓋的能源需求的分數	kgC kgC <sup>-1</sup>
f_diet_cereal	每年穀物消費覆蓋的年能量需求的分數	kgC kgC <sup>-1</sup>
f_area_tuber	塊莖的面積比例	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup>
f_area_fodder	飼料的面積分數	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup>
f_area_cereal	穀物的面積的分數	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup>
area_support	排水濕地區域的個人最大暴露量	m <sup>2</sup>
<b>Hunter gatherer</b>		
time_exposure	在狩獵採集區與污染地區（露營地）接觸所花費的時間	h year <sup>-1</sup>
N_group	獵人與採集者中最大的暴露的個體數	無因次
f_diet_fish_max	魚在飲食中相對於最大健康蛋白質的消耗分數	kgC kgC <sup>-1</sup>
<b>Garden plot</b>		
time_exposure	戶外菜園被污染的水灌溉的時間	h year <sup>-1</sup>
N_group	菜園中受暴露最多的個體數	無因次
f_diet_veg	每年消耗蔬菜所需的能量分數	kgC kgC <sup>-1</sup>
f_diet_tuber	每年消耗根莖類所需的能量	kgC kgC <sup>-1</sup>
area	一人所需蔬菜之農業土地面積大小	m <sup>2</sup>
<b>Infield-outland</b>		
time_exposure	在戶外與農業系統中與污染物接觸的時間	h year <sup>-1</sup>
N_group	早期農業暴露的個體數	無因次
f_time_hay	在內部-外地農業系統中收集受污染乾草的時間比例	year year <sup>-1</sup>
f_time_agri	在內部-外地農業系統中花費在耕地上的工作時間	year year <sup>-1</sup>
f_meadow	乾草（冬季飼料）對年飼料需求的貢獻	無因次
f_diet_milk	每年消耗牛奶所需的能源	kgC kgC <sup>-1</sup>
f_diet_meat	每年消耗肉類所需的能源分數	kgC kgC <sup>-1</sup>
f_diet_cereal	每年消耗穀物所需求的能源分數	kgC kgC <sup>-1</sup>
area_support	有關最大暴露群個體在支持牲畜冬季飼料需求之沼澤面積	m <sup>2</sup>
area	暴露群體中（內陸）每個人的農業土地面積	m <sup>2</sup>
demand_hay	內部-外地農業系統冬小麥有機施肥的需求	kgC m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>

表 19 非人類生物群的參數

參數	說明	單位
f_DW_org	生物體中的乾重分數 (kgdw) (kgfw)	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
f_C_org	生物體中的碳分數 (kgC) (kgfw)	kgdw kgfw <sup>-1</sup>
OCC	生物在棲息地的佔有率	無因次
w_alpha	放射性核種內部 $\alpha$ 的加權因子 $i$ 。	無因次
w_beta_gamma	放射性核種內部 $\beta/\gamma$ 伽馬的加權因子 $i$ 。	無因次
w_low_beta	放射性核種內部低能 $\beta$ 的加權因子 $i$ 。	無因次

表 20 非人類生物群劑量係數

參數	說明	單位
<b>All organisms</b>		
DCC_int_alpha	DCC對於 $\alpha$ 輻射的內部暴露	( $\mu$ Gy h <sup>-1</sup> )/(Bq kgfw <sup>-1</sup> )
DCC_int_beta_gamma	DCC對於 $\beta/\gamma$ 輻射的內部曝光	( $\mu$ Gy h <sup>-1</sup> )/(Bq kgfw <sup>-1</sup> )
DCC_int_low_beta	DCC對於低 $\beta$ 輻射的內部暴露	( $\mu$ Gy h <sup>-1</sup> )/(Bq kgfw <sup>-1</sup> )

<b>Terrestrial organisms</b>		
DCC_ext_in_air_beta_gamma	在陸域生態系統的空氣中DCC對於 $\beta/\gamma$ 輻射的外部暴露	$(\mu\text{Gy h}^{-1})/(\text{Bq m}^{-3})$
	在陸域生態系統的土壤中DCC對於 $\beta/\gamma$ 輻射的外部暴露	
DCC_ext_in_soil_beta_gamma		$(\mu\text{Gy h}^{-1})/(\text{Bq kgdw}^{-1})$
DCC_ext_on_soil_beta_gamma	在陸域生態系統的土壤中的DCC對於 $\beta/\gamma$ 輻射的外部暴露	$(\mu\text{Gy h}^{-1})/(\text{Bq kgdw}^{-1})$
<b>Aquatic organisms</b>		
DCC_ext_low_beta	在水域生態系統中DCC對於低 $\beta$ 輻射的外部暴露	$(\mu\text{Gy h}^{-1})/(\text{Bq L}^{-1})$
DCC_ext_beta_gamma	在水域生態系統中DCC對於 $\beta/\gamma$ 輻射外部暴露	$(\mu\text{Gy h}^{-1})/(\text{Bq L}^{-1})$

表 21 替代計算案例參數

參數	說明	單位
<b>Well in discharge plum</b>		
q_well	鑽井水提取率	$\text{m}^3 \text{ year}^{-1}$
well_interaction_area	-	m
p_well_interaction_area	-	無因次
f_well_agri	進入井的釋放的分數	無因次
f_well_interaction	-	無因次
<b>Distribute release</b>		
f_release	釋放物件的分數	$(\text{Bq year}^{-1}) (\text{Bq year}^{-1})^{-1}$
<b>Alternative object delineation</b>		
area_obj	-	m
minRate_regoPeat	-	$\text{kgC kgC}^{-1} \text{ year}^{-1}$
z_regoGL	-	m
z_regoLow	-	m
q_downstream_end	-	$\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ year}^{-1}$
q_downstream_iso	-	$\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ year}^{-1}$
q_gl_low_ter_end	-	$\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ year}^{-1}$
q_gl_low_ter_iso	-	$\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ year}^{-1}$
q_gl_pg_ter_end	-	$\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ year}^{-1}$
q_gl_pg_ter_iso	-	$\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ year}^{-1}$
q_low_gl_ter_end	-	$\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ year}^{-1}$
q_low_gl_ter_iso	-	$\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ year}^{-1}$
q_peat_pg_ter_end	-	$\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ year}^{-1}$
q_peat_pg_ter_iso	-	$\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ year}^{-1}$
q_peat_up_ter_end	-	$\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ year}^{-1}$
q_peat_up_ter_iso	-	$\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ year}^{-1}$
q_pg_gl_ter_end	-	$\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ year}^{-1}$
q_pg_gl_ter_iso	-	$\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ year}^{-1}$
q_pg_peat_ter_end	-	$\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ year}^{-1}$
q_pg_peat_ter_iso	-	$\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ year}^{-1}$
q_up_peat_ter_end	-	$\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ year}^{-1}$
q_up_peat_ter_iso	-	$\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ year}^{-1}$
q_up_wat_ter_end	-	$\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ year}^{-1}$
q_up_wat_ter_iso	-	$\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ year}^{-1}$
q_wat_up_ter_end	-	$\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ year}^{-1}$
q_wat_up_ter_iso	-	$\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ year}^{-1}$
<b>Timedependent</b>		
area_obj_ter	-	$\text{m}^2$
z_regoPG_ter	-	m
WF_lobj157_1	-	$\text{m}^3 \text{ year}^{-1}$
Ter_growth	-	$\text{m}^2 \text{ year}^{-1}$

## 5. 提出低放射性廢棄物坑道處置生物圈劑量評估要項建議

針對低放射性廢棄物處置場址安全輻射劑量評估安全審查，係為審照作業重要之程序過程。藉由評估瞭解有多少的核種濃度可由近場釋出遷移至生物圈，與釋出的核種濃度有多少的輻射劑量對於人體有影響，將可決定低放處置設施效能及安全處置環境之是否能滿足處置要求。因此所有的低放處置設施必須被管理及處置到對人體及環境為最低危害劑量，0.25 mSv/year 是目前的所規定的最低劑量。本計畫針對瑞典 Forsmark 擴建 SFR 中低放處置場之 SR-PSU 安全評估計畫成果，蒐集 SR-PSU 針對核種傳輸與生物圈輻射劑量評估報告及劑量評估技術，以 R13-18、R13-46 及 TR14-01 報告為主，其他相關報告(如 R13-43、R14-02、TR14-06、TR14-09)為輔。SKB 對於生物圈安全評估原提出 50 個作用歷程，SKB 經評估後刪去 5 個，包括：Bio11 (動物在地表水系統移動)、Bio20 (地面上空氣或水之壓力改變)、Bio23 (由材料重量引起影響底層岩石之荷重)、Bio44 (生物圈物體暴露於電離輻射和吸收能量的作用)、Bio46(放射性核種衰變能量引致分子分解引起)，提出 45 個 FEPs。依據 R13-46 附錄 E 綜整 SR-PSU 放射性廢棄物坑道處置生物圈劑量評估審查，係 SKB(2014e)提出放射性廢物處置安全評估 45 個 FEP 之特徵事件作用案例與生物圈劑量評估要項相關，本計畫經整理該 R13-46 附錄 E 及 R14-02 提出低放射性廢棄物處置場址安全輻射劑量評估安全審查建議如表 22。

表 22 審查生物圈作用可能影響地表生態系統之放射性核種傳輸過程

說明：生態系統(水域、陸域及農業)的傳輸模型之放射性核種通量用 Y 表示，沒有在模型中顯示的作用則以空白表示。這些傳輸作用主要的影響係由特定地點獲取的參數值來決定。

作用(Process)	核種通量(Radionucl. Flux)				
	FEP 編號/名稱	水域 Aqua	陸域 Ter	農業 Agri	說明.
<b>生物過程</b>					
1 生物擾動	Y		Y	生物擾動是水域和陸域風化層藉由植物、動物、細菌和真菌造成之混合作用。	
2 消耗量	Y	Y		消耗是生物體的物質攝食。	
3 死亡	Y	Y		死亡是生物體從活的區塊轉移到死亡的有機物質池。	
4 分解	Y	Y	Y	分解是分解者對死亡有機物的分解。	
5 排泄	Y	Y		排泄是化學元素和化合物從生物體經由介質釋放到周圍環境中。	
6 食物供應				食品供應是食品的生產和供應的過程並提供給消費者使用。初級生產者、動物和死亡有機物可以作為食物來源使用。	
7 生長				生長是生物體產生生物量	

8 棲息地供應				棲息地供應是指環境中的生物體或非生物成分提供其他生物體的基質或掩蔽物。
9 侵入			Y	侵入在這裡定義為生物體（包括人類）進入處置場的過程，例如移動、鑽孔或增值
10 材料供應				材料供應是可讓人類利用的材料量（除餵養以外的目的）。
12 顆粒釋放/ 捕集	Y	Y		顆粒釋放/捕集是顆粒從生物體釋放到環境中，或由生物體捕集環境中的顆粒。
13 初級生產	Y	Y		初級生產（這裡指初級生產總量）是總固定的無機碳。
14 刺激/抑制				當組成物影響另一組成物時，發生刺激/抑制（正或負），例如：生物群可能競爭空間，從而抑制彼此影響生物量和生產。
15 攝取	Y	Y	Y	吸收是由生物體（包括人類）引入來自周圍介質的元素或水。它包括飲用、吸入和皮膚轉移。
<b>與人類行為有關的過程</b>				
16 人為釋放			Y	由於灌溉和施肥釋放的放射性核種。燃燒而釋放到大氣中的泥炭或柴火，包括在劑量計算中。
17 材料使用			Y	人類利用濕地乾草、海藻和泥炭或木材。
18 物種引進/ 消滅				由於人類活動於處置廠內之物種引入或消滅。生物群落被視為處於平衡狀態。
19 水的使用			Y	在菜園情節情景中考慮灌溉的影響。
<b>化學，機械和物理的過程</b>				
21 合併			Y	考慮濕地/湖泊的影響
22 元素供應				元素濃度被認為是特徵的一部分（例如 CR 值）。
24 相變	Y	Y	Y	相變包括在表面之間的氣體交換中 水/土壤孔隙水和大氣。
25 物理性能 變化	Y	Y	Y	土壤性質（孔隙度和密度）。（模型參數描述了地基的密度和孔隙度如何變化與自然生態系統之間的過渡情形）。
26 反應	Y	Y	Y	「反應」限於化學反應，不包括風化、分解和光合作用（作為單獨的過程處理）。
27 吸附/脫附	Y	Y	Y	固體和液體之間的平衡濃度比值（Kd），包括吸附/脫吸的結果。
28 供水				人類和牲畜消費/使用水。（井水的提取速率被作為模型參數）。
29 風化				風化是岩石和碎石分解和分解成更小的顆粒物。風化可以是化學，力學和/或生物作用。
30 風應力				考慮風速對氣體交換的影響
<b>傳輸過程</b>				
31 加速				加速度不被認為與時間分率相關
32 對流	Y	Y	Y	對流定義為物質（例如水）或液體或氣體中的性質（例如溫度）的傳輸。定義包括對流和平流運輸以及擴散運輸。

33 覆蓋	Y	Y		包括湖跟沼澤。冰蓋的影響詳見脫氣和氣體吸收的參數值。
34 沉積				水域生態系統沉積。
35 出口	Y	Y	Y	水和氣體的相關的放射性核種流量，包括：海平面和下游流交換的流量
36 導入	Y	Y	Y	放射性核種經由以下方式進入生物圈物體：地下水排放或地下水吸收，來自上游的物體 (Adv_water_in)，和氣體吸收。
37 截取			Y	菜園情節中灌溉對放射性核種的影響。
38 搬遷			Y	經由施肥（乾草、海雜草、灰分）而讓放射性核種移動，為內部-外地農場和菜園區之核種源項。
39 懸浮	Y			上部懸浮沉積物的放射性核種。 特定物質在灰塵中的暴露/劑量計算。
40 飽和度				飽和度定義為地層的水含量的變化
放射和熱過程				
41 衰變	Y	Y	Y	放射性核種衰變為其他放射性核種或穩定核種。衰變過程會使放射性核種轉化並導致核種活度降低。
42 暴露				暴露指生物體或死亡生物體/物質暴露於 $\alpha$ ， $\beta$ ， $\gamma$ 或中子輻射的過程。暴露可以是源於體外的外部暴露或源自體內的內部暴露。
43 熱儲存				熱儲存（熱容量）是材料（固體、氣體或液體）存儲熱能的能力。
45 光相關過程				光相關過程是指涉及光進入生物圈（日光）的過程和與此相關的過程，即吸收，散射和反射。光相關過程不包括光合作用（其被視為生物過程，參見初級生產）。
47 放射性核種釋放	Y	Y	Y	放射性核種釋放是從處置場之固體放射性廢棄物釋放核種經由地質圈到生物圈。
景觀開發過程				
48 岩石表面位置的變化				岩石表面位置的變化是指岩石表面位置的垂直變化。由於構造、等靜壓反彈或處置場引起的變化。
49 海平面變化				海平面變化是海平面相對於陸地表面的上升和下降。
50 閾值				水域參數在海和湖之間的內插值

## 6. 結論與建議

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

瑞典 Forsmark 擴建 SFR 中低放處置場已完成 SR-PSU 安全評估計畫。本計畫蒐集 SR-PSU 主報告和主要參考報告清單，蒐集 SR-PSU 針對核種傳輸與生物圈輻射劑量評估報告及劑量評估技術，以 R13-18、R13-46 及 TR14-01 報告為主，其他相關報告(如 R13-43、R14-02、TR14-06、TR14-09)為輔。進行國外放射性廢棄物坑道處置生物圈劑量評估技術蒐集及彙整、研析國際坑道處置技術報告關於生物圈劑量評估要項、研析國際坑道處置技術報告關於生物圈參數使用於核種傳輸與劑量評估要項、提出低放射性廢棄物坑道處置生物圈劑量評估要項建議。本計畫報告已完成下列工作：

1. 蒐集 SR-PSU 計畫作為 SFR 的擴建的使用執照申請文件。蒐集報告包括核種傳輸與生物圈輻射劑量評估報告及劑量評估技術蒐集，以 R13-18、R13-46 及 TR14-01 報告為主，其他相關報告(如 R13-43、R14-02、TR14-06、TR14-09)為輔。包括包括 SR-PSU 報告安全評估有關生物圈部分放射性核種模擬所需使用的所有參數蒐集及研析，與生物圈模式對於核種傳輸與劑量評估等。研析 SSM (2008) 提出生物圈條件和環境的保護指導方針、輻射劑量與風險限值。
2. 配合主計畫及子計畫四研讀瑞典 SFR-PSU 主報告(TR-14-01)安全評估：8-11 章納入主計畫附錄內，已完成並送交主計畫。
3. 研析完成瑞典 SR-PSU 技術報告 TR-14-01 主報告、R13-18 報告有關生物圈放射性核種遷移模擬所需使用的所有參數。R13-46 報告有關生物圈放射性核種傳輸與劑量評估模式。
4. 提出放射性廢物處置安全評估 45 個 FEP 之特徵事件作用案例與生物圈劑量評估要項相關，經整理提出低放射性廢棄物處置場址安全輻射劑量評估安全審查要項建議。

5. 透過彙整得到放射性核種模擬所需參數，包含放射性核種參數、景觀幾何形狀、土壤特性，以及水文、元素比、水陸域生態、人類及非人類生物群等參數可供國內坑道處置技術之參考。另外，生物圈模式對於核種傳輸與劑量評估，其中對於平流擴散傳輸、水域生態系統、沼澤濕地生態系統、農業生態系統等各項模式，對於人類及非人類生物群體計算已獲得重要的成果，以供未來低放射性廢棄物處置輻射劑量評估安全審查之應用。



## 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/heast/download.htm>.
- Hull, L.C., Schafer A.L., 2008. Accelerated transport of  $^{90}\text{Sr}$  following a release of high ionic strength solution in vadose zone sediments, *Journal of Contaminant Hydrology* 97, p135–157.
- ICRP(International Commission on Radiological Protection), 1977. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Oxford: Pergamon. (ICRP Publication 26; Annals of the ICRP 1)
- ICRP, 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, 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, 1991. *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Oxford: Pergamon. (ICRP Publication 60; *Annals of the ICRP* 21)
- 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.
- ICRP, 2007. *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Oxford: Elsevier. (ICRP Publication 103; *Annals of the ICRP* 37(2-4)).
- SKB, 2013a. *Biosphere parameters used in radionuclide transport modelling and dose calculations in SR-PSU*. SKB R-13-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2013b. *Components, features, processes and interactions in the biosphere*. SKB R-13-43, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2013c. *The biosphere model for radionuclide transport and dose assessment in SR-PSU*. SKB R-13-46, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014a. *Biosphere synthesis report for the safety assessment SR-PSU*. SKB TR-14-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014b. *Climate and climate related issues for the safety assessment SR-PSU*. SKB TR-13-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014c. *FEP report for the safety assessment SR-PSU*. SKB TR-14-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014d. *Handling of future human actions in the safety assessment SR-PSU*. SKB TR-14-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014e. *Handling of biosphere FEPs and recommendations for model development in SR-PSU*, SKB R-14-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014f. *Radionuclide transport and dose calculations for the safety assessment SR-PSU*. SKB TR-14-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014g. *Safety analysis for SFR. Long-term safety. Main report for the safety assessment SR-PSU*. SKB TR-14-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Werner K, Sassner M, Johansson E, 2014. *Hydrology and near-surface hydrogeology at Forsmark – synthesis for the SR-PSU project. SR-PSU Biosphere*. SKB R-13-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SSMFS 2008:1. The Swedish Radiation Safety Authority's regulations concerning safety in nuclear facilities. Stockholm: Strålsäkerhetsmyndigheten (Swedish Radiation Safety Authority).

SSMFS 2008:21. The Swedish Radiation Safety Authority's regulations concerning safety in connection with the disposal of nuclear material and nuclear waste. Stockholm: Strålsäkerhetsmyndigheten (Swedish Radiation Safety Authority).

SSMFS 2008:37. The Swedish Radiation Safety Authority's regulations concerning the protection of human health and the environment in connection with the final management of spent nuclear fuel and nuclear waste. Stockholm: Strålsäkerhetsmyndigheten (Swedish Radiation Safety Authority).