

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

106 年低放射性廢棄物坑道處置安全
審驗技術建立之關鍵課題研析
子計畫五：低放射性廢棄物坑道處置生物圈
情節分析審查技術研究(修訂版)

計畫編號：105FCMA011

計畫主持人：董家鈞

子計畫五主持人：林文勝

受委託機關(構)：社團法人中華民國大地工程學會

報告日期：中華民國 106 年 12 月

106 年低放射性廢棄物坑道處置安全

審驗技術建立之關鍵課題研析

子計畫五：低放射性廢棄物坑道處置生物圈

情節分析審查技術研究

受委託單位：社團法人中華民國大地工程學會

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 106 年 2 月至 106 年 12 月

研究經費：新臺幣 850,952 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 106 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	VII
ABSTRACT	VIII
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. 研析國際坑道處置生物圈之特徵、作用與交互作用	9
2.1. 生物圈組件	9
2.1.1. 表土層	9
2.1.2. 表土層水	10
2.1.3. 地表水	10
2.1.4. 氣體和當地大氣	10
2.1.5. 初級生產者	10
2.1.6. 分解者	10
2.1.7. 濾食性動物	11
2.1.8. 草食動物	11
2.1.9. 肉食動物	11
2.1.10. 人類	11
2.1.11. 邊界組件	12
2.1.11.1. 地質圈	12
2.1.11.2. 外部條件	12
2.2. 特徵	12
2.3. 生物圈作用	13
2.3.1. 生物作用	13
2.3.2. 與人類行為有關的作用	17
2.3.3. 化學、力學和物理作用	18
2.3.4. 傳輸作用	20
2.3.5. 熱和輻射作用	23
2.3.6. 地景開發作用	24
2.4. 生物圈交互作用	25
2.4.1. 一般生物圈交互作用矩陣	25
2.4.2. 生物圈物理組件之間交互作用	36
3. 研析國際坑道處置技術報告生物圈情節分析與劑量評估審驗技術	50
3.1. SR-PSU 生物圈情節分析	50
3.1.1. 生物圈情節分析方法	51
3.1.2. 潛在曝露點和環境介質區域	51
3.1.3. 人體曝露途徑分析	53
3.2. 生物圈安全評估與輻射劑量標準	55
3.2.1. SR-PSU 生物圈安全評估計畫對人體之輻射劑量	55
3.2.1.1. 對人體之輻射劑量	55
3.2.2. SR-PSU 生物圈安全評估計畫對非人類生物群之輻射劑量	61
3.2.2.1. 對非人類生物群之輻射劑量	61
3.2.2.1.1. 背景	61

3.2.2.1.2 ERICA 劑量測定模型納入 Ecolego	61
3.2.2.1.2.1. 基本概念	62
3.2.2.1.2.2. 計算內部曝露	62
3.2.2.1.2.3. 計算外部曝露	63
3.2.2.1.2.4. 總劑量率計算	64
3.2.2.1.2.5. 生物圈物體生態系統的過渡	65
4. 研析國際坑道處置生物圈之特徵、事件及作用與模式發展建議	66
4.1. 特徵、事件及作用對應到 SR-PSU 生物圈建模	66
4.2. SR-PSU 生物圈建模作業	68
4.3. SR-PSU 生物圈組件、特徵與對應之模式發展建議	72
4.3.1. 生物圈組件與對應之模式發展建模作業	72
4.3.2. 生物圈特徵與對應之模式發展建模作業	79
4.3.3. 生物圈作用與對應之模式發展建模作業	82
4.3.4. 生物圈核種傳輸之模式發展建議	104
5. 提出我國低放坑道處置生物圈情節分析審查重點或注意事項	105
5.1. 提出我國低放坑道處置生物圈情節分析審查重點	105
5.2. 提出我國低放坑道處置生物圈情節分析審查注意事項	105
5.2.1. 生物圈建模作業是否完整進行審查	105
5.2.2. 生物圈評估建構交互作用矩陣之系統方法是否完整進行審查 ...	106
5.2.3. 生物圈評估情節分析之曝露途徑是否完整進行審查	107
6. 結論與建議	108
7. 參考文獻	111

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).....	3
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).....	4
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	6
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	7
圖 6 生物圈潛在的曝露途徑示意圖	51
圖 7 評估放射性核種釋出對非人類生物群的影響.....	61
圖 8 SR-PSU 安全評估計畫廢棄物體、近場、遠場地質圈、生物圈與氣候之評估模式流程圖(AMF).....	71

表目錄

表 1 SR-PSU 主報告和主要參考報告清單	5
表 2 生物圈交互作用矩陣	33
表 3 生物圈交互作用矩陣(IM)中的作用的簡要定義。	34
表 4 地質圈對其他物理組件之作用	36
表 5 表土層對其他物理組件之作用	37
表 6 表土層水對其他物理組件之作用	38
表 7 地表水對其他物理組件之作用	39
表 8 氣體及當地大氣對其他物理組件之作用	40
表 9 初級生產者對其他物理組件之作用	41
表 10 分解者對其他物理組件之作用	43
表 11 濾食性動物對其他物理組件之作用	44
表 12 草食動物對其他物理組件之作用	45
表 13 肉食動物對其他物理組件之作用	46
表 14 人類對其他物理組件之作用	47
表 15 外部條件對其他物理組件之作用	48
表 16 陸域環境的環境介質及其相關的環境類型	52
表 17 水環境的環境介質及其相關的環境類型	52
表 18 陸域生態環境中的曝露途徑情節（以 TER-1 至 TER-29 標示）和相關活動	53
表 19 水域生態環境中的曝露途徑情節（以 AQ-1 至 AQ-15 標示）和相關活動 .	54
表 20 經由攝食、吸入與外部曝露的母核種劑量係數	58
表 21 經由攝食、吸入與外部曝露的短半衰期子核種劑量係數	59
表 22 經由攝食、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 .	60
表 23 組件、特徵和作用對應到 SR-PSU 生物圈中的不同的建模作業。	66
表 24 SR-PSU 生物圈建模作業之評估模式流程(AMF)對應項目及參考文獻說明	69

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，蒐集有關低放射性廢棄物坑道處置生物圈情節分析安全評估技術報告，以 R13-18 及 R14-02 報告，針對放射性核種於生物圈之特徵、事件與作用(FEPs)及生物圈情節分析審查技術進行研析。工作項目包含：進行研析國際坑道處置生物圈之特徵、作用與交互作用；研析國際坑道處置技術報告生物圈情節分析與劑量評估審驗技術；研析國際坑道處置生物圈之特徵、事件及作用(FEPs)與模式發展建議；提出低放射性廢棄物坑道處置生物圈劑量評估要項建議。研究結果顯示，特徵、事件及作用對於放射性核種在生物圈中之傳輸和累積與對於人類和非人類生物群的劑量暴露分及途徑具有重要性。在生物圈交互作用矩陣中，包括：10 物理組件(2 個邊界組件)、6 個特徵變量和 50 個作用歷程。生物圈評估對於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，需考慮不同的生態系統之間的曝露途徑的組合。本研究成果可提供物管局低放射性廢棄物處置輻射劑量評估安全審查之應用

ABSTRACT

This project investigated the safe analysis for SFR long-term safety assessment, and gathered the reports of exposure pathway analysis and dose assessment of biosphere in SR-PSU which are priority in the technical reports of R13-43, R14-02 focused on the biosphere FEPs and exposure route cases. Mover, the study also focused on the collecting and aggregating the component, feature, processes and interactions in the biosphere. Research and analysis on the biosphere exposure route case and dose assessment of tunnel disposal technical report, and analysis about international tunnel disposal technical report on the biosphere features, events and processes (FEPs) and model development 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: Biosphere features, events and processes (FEPs) important for radionuclide transport and accumulation in the biosphere and exposure of humans and non-human biota are identified and defined. In the interaction matrix (IM), the biosphere is divided into 10 physical components (surrounded by 2 boundary components), 6 variables (features) acting on the physical components and 50 processes whereby the physical components can affect each other. The future biosphere conditions for calculations of consequences for human beings and the environment should be selected in agreement with the assumed climate state. Consideration should also be taken to the possibility of individuals being exposed to combinations of exposure pathways within and between different ecosystems. The results of the report can provide regulatory departments as references for the safety plan review of radiological dose assessment in low-level radioactive waste disposal.

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，來圍隔與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離起來，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阻滯核種的目的。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，須逐步建立相關安全管制技術規範及技術，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安全管制技術規範的編訂方面，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。105 年度以瑞典 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。本(106)年度將蒐集瑞典 SR-PSU 有關低放射性廢棄物坑道處置生物圈情節分析安全評估技術報告，以 R13-18 及 R14-02 報告，針對放射性核種於生物圈之特徵、事件與作用(FEPs)及生物圈情節分析審查技術進行研析。進行研析國際坑道處置生物圈之特徵、作用與交互作用、研析國際坑道處置技術報告生物圈情節分析與劑量評估審驗技術、研析國際坑道處置生物圈之特徵、事件及作用(FEPs)與模式發展建議，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 個貯存倉(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 個貯存倉存放中放射性廢棄物、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。

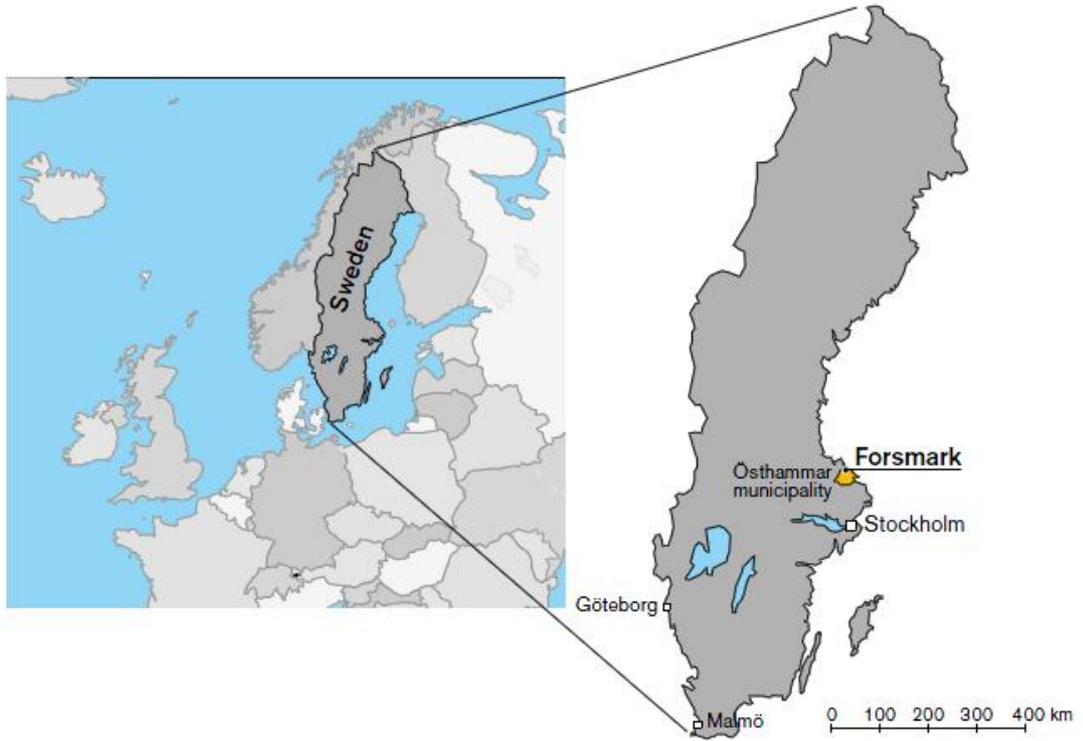


圖 1 瑞典 Forsmark 中低放射性廢棄物最終處置場位置示意圖(SKB, 2013)



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

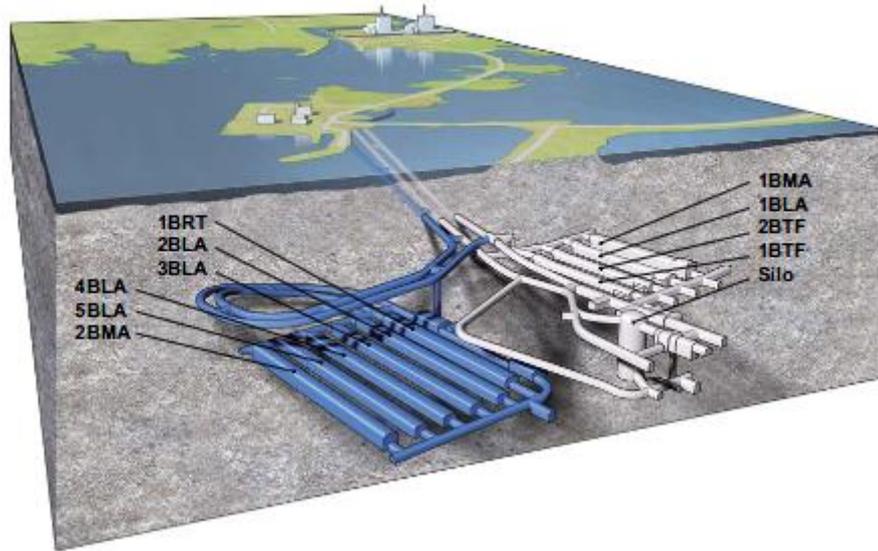


圖 3 SFR 設施概念示意圖（灰色是目前已營運中的 SFR1，藍色是規劃中的 SFR3）
(SKB, 2014a)

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)，未來人類活動之 FHA 報告 (Future human actions) (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廢棄物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 1.4×10^{-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。

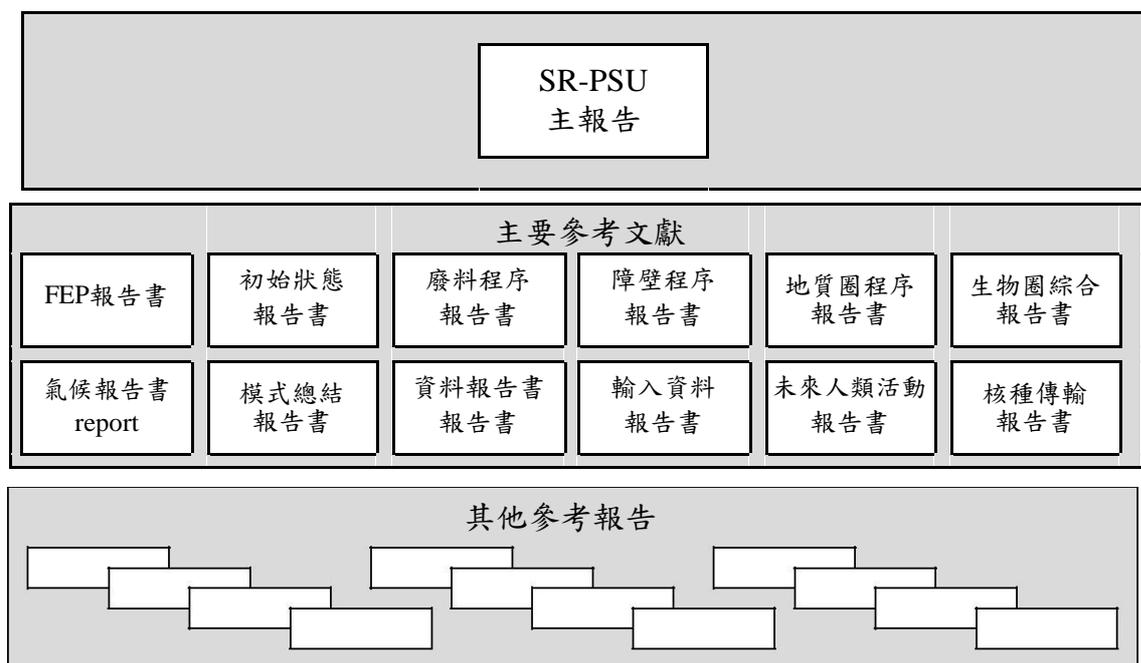


圖 4 SR-PSU 計畫主報告、主要參考文獻與其他參考報告階層示意圖

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，本計畫歷年來研究已蒐集如表 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)，本年度計畫將研析 R13-43、R14-02 報告，針對放射性核種於生物圈之特徵、事件與作用(FEPs)及生物圈情節分析審查技術進行研究。

R13-43 這份報告係針對生物圈組件間之特徵、作用和交互作用進行研析，其描述 Forsmark 地區放射性廢棄物處置有關生物圈組件間的作用過程和相互影響作用之安全評估。這份報告以交互矩陣(IM)描述生物圈組件及相互作用。其章節包括：第 1 章「介紹 SKB 工作與生物圈組件相互作用交互矩陣(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，表土層或地表水)」、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」。

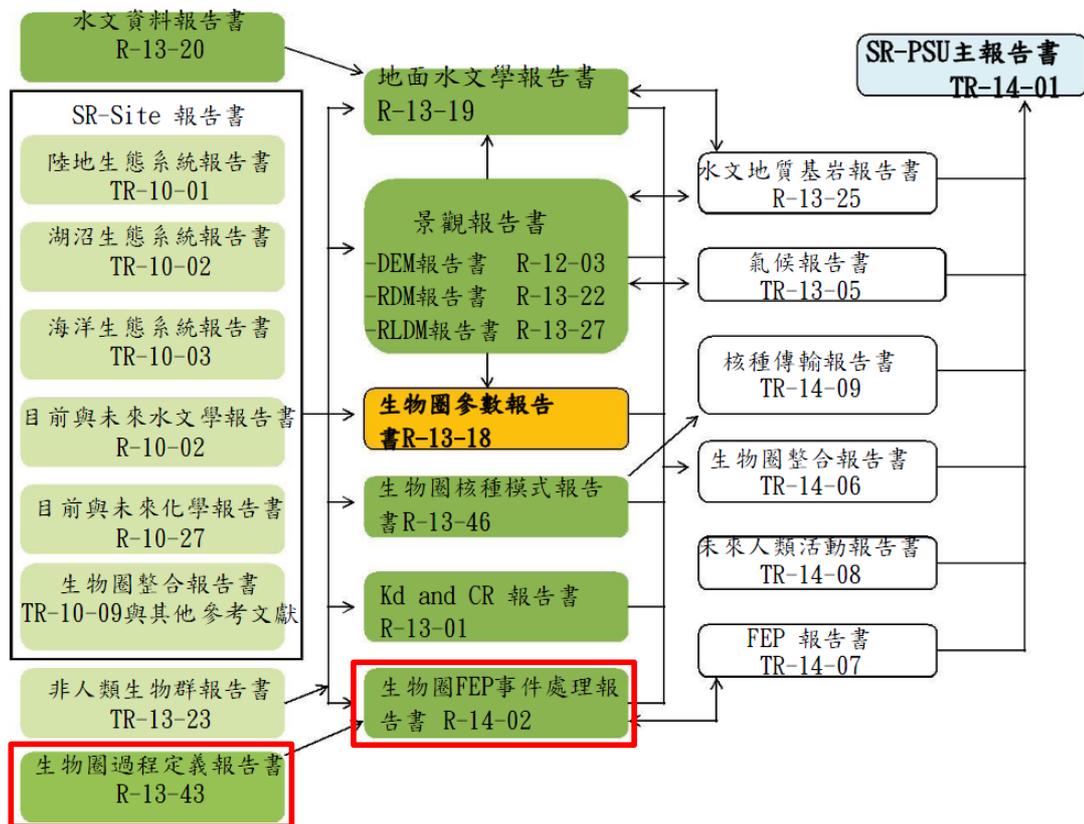


圖 5 SR-PSU 有關核種傳輸與生物圈輻射劑量評估相關報告關聯圖

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

R14-02 這份報告是 SR-PSU 生物圈、特徵、事件及作用(FEPs)與模式發展建議，可提供生物圈評估之曝露途徑情節分析。本報告提出生物圈模型的發展假設與曝露途徑情節，並評估各種曝露途徑核種傳輸至受影響最大的人類群體之輻射劑量。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「曝露於泥炭或木材燃燒之受污染的空氣」、第 6 章「濕地轉變至農業用地」、第 7 章「水流至表土層離散化與區域描繪的敏感度」、第 8 章「生物圈有經驗數據自然碳循環之放射性核種傳輸模式模擬比較」、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」。

前述報告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之生物圈特徵、事件及作用與模式發展建議，提供生物圈評估之核種遷移途徑、曝露途徑分析和傳輸至受影響最大之人類群體劑量分析。

由於生物圈的特徵、事件與作用，係探討核種在環境中遷移及累積，進而評估人類受到的健康及安全的影響。在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。研析核種於生物圈之特徵、事件與作用可建立系統方法，瞭解核種遷移、累積及進入生態系統後，對於人類造成曝露的各種作用。生物圈評估需建構交互作用矩陣 (Interaction Matrix, IM)，確認可能影響核種累積及曝露的各種成分及途徑。在生物圈交互作用矩陣中，包括：10 物理組件 (2 個邊界組件)、6 個特徵變量和 50 個作用歷程，本計畫針對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。工作項目如下：

- 研析國際坑道處置生物圈之特徵、作用與交互作用
- 研析國際坑道處置技術報告生物圈情節分析與劑量評估審驗技術
- 研析國際坑道處置生物圈之特徵、事件及作用 (FEPs) 與模式發展建議
- 提出我國低放坑道處置生物圈情節分析審查重點或注意事項

2. 研析國際坑道處置生物圈之特徵、作用與交互作用

為研析坑道處置生物圈之特徵、作用與交互作用，蒐集 SR-PSU 之 R13-43 報告。R13-43 報告描述 Forsmark 地區放射性廢棄物處置生物圈組件 (Components) 間的過程和相互作用之安全評估。這份報告以交互作用矩陣 (IM) 描述生物圈組件相互作用。其章節包括：第 1 章「介紹 SKB 工作與生物圈組件交互作用矩陣 (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，表土層或地表水）」、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、地景開發、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「生物圈交互作用矩陣 (IM) 圖」、附錄 B「交互作用矩陣 (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「交互作用矩陣 (IM) 圖中的專有名詞列表」。

2.1. 生物圈組件

共 10 個組件代表不同的環境媒介（表土層、表土層水、地表水、氣體和當地大氣）和生物群體（初級生產者、分解者、濾食性動物、草食動物、肉食動物、人類），另外還有 2 個邊界組件（地質圈和外部條件）包含在交互作用矩陣 (IM) (如表 2) 中，以下簡介說明。

2.1.1. 表土層

表土層由風化的岩石碎片組成並覆蓋其下的岩石、以及冰川和後冰期的沉積物。新形成的土壤和沈積物包括死亡的有機物質。另外，岩石露出的表面包含在 SKB 調查資料中。地形，即包括土地的地勢和形狀在內的幾何程度，即基座和表土層表面的位置 (x, y, z)。而且，各種各樣包括人造結構，例如道路，房屋等。表土層的幾何、構造和孔隙度包含在對角線元素中。這個對角線元素稱為第四紀沉積物 (QD) 在 SKB 的初始生物圈 IM 中，並以表土層名詞定義。

2.1.2. 表土層水

表土層水是表土層內飽和水和非飽和的孔隙水，包括冰霜和冰。井列在 IM 的對角線元素中，但深鑽入地質圈的井則為地質圈對角線元素。這個對角線元素在表土層中包括數量和組成（作為水組成的特徵）。表土層水不包括基岩中的水，因為這是在地質圈矩陣中處理的。這個對角線元素不應該與地下水的傳統定義混淆，不包括在非飽和區的孔隙水，但包括地質圈的深層地下水。

2.1.3. 地表水

地表水在這裡定義為陸地表面以上的水，存在地面、溪流、河流、濕地、湖泊、開放水域和海洋中，而不是在岩石、表土層或大氣中的水 (Heath, 1987)。岩石表面上的雨水，陸地和水面上的雪和冰，以及水滴在植被上等皆係屬於地表水。該對角線元素包含地表水的數量和化學成分之溶解元素和顆粒物質。顆粒物質不視為一個單獨的區塊，就像在表土層中的表土層和水一樣，因為顆粒物質在水中是一小部分並且隨著水流被帶動。同樣的，水和大氣中的顆粒不被視為單獨的區塊。這有助於將對角線元素的數量保持為可管理的數量，但會導致一些過程（例如：吸附）發生在對角線元素內。考慮水的所有物理狀態，即這個對角線元素還包括冰霜和冰，而大氣水屬於組成氣體和當地的大氣。

2.1.4. 氣體和當地大氣

包含表土層及表土層水之大氣氣體及地表水氣泡。氣體流和氣體組成亦包括在該元素中，所以亦包括風和當地大氣中顆粒，即水滴、花粉等。水中氣泡包含在此 IM 對角線元素中，故地表水中溶解氣體亦包括在此對角線元素的“地表水”中。當地大氣被定義為研究區域之上與與研究區域氣體產生交換的大氣層，此區域被大氣包圍，屬於生物圈的邊界系統並包含在對角線元素的外部條件中。

2.1.5. 初級生產者

初級生產者是指能夠利用陽光或無機化合物氧化的自營生物，作為從無機碳源合成有機化合物的能源。該有機化合物作為細胞呼吸和生長的燃料。初級生產者包括綠色植物、藻類和自營細菌。初級生產者的特性包括物種、數量（即生物質）和幾何。實例包括草、草本植物、灌木叢、樹木、浮游植物、微絨毛、水生植物和大型藻類。

2.1.6. 分解者

分解者是以死亡植物和動物為食物來源的有機體（細菌、真菌或動物），並將複雜的有機化合物分解成二氧化碳、水和無機化合物。在某種意義上，大多數肉食動物獵食已死亡的獵物，植物物質在草食動物攝食之前已經死亡。然而，分解者不會主動影響其食物資源的可利用率，但取決於其他因素，如動植物衰老、疾病及動物打鬥或植物葉片的破碎；而草食動物、濾食性動物和肉食動物直接影響其資源的利用率以利可食用。分解者的特徵包括物種、數量（即生物量）和幾何形狀。作為分解者實例是細菌、土壤動物群（如蚯蚓），以及一些水生底棲動物群。

2.1.7. 濾食性動物

濾食性動物是食用顆粒狀有機物和小生物（浮游植物）的水生生物和浮游動物經由循環水通過動物系統過濾掉。濾食性動物包括各式各樣的動物，例如雙殼類（例如貽貝）、海綿、甲殼類動物（例如蝦）甚至鯨魚。濾食性動物是水生生態系統中重要的一組生物，它們可以大大影響水中的顆粒物和營養物質的數量，並且傳輸顆粒物從水柱到生物群。因此，它們被視為單獨的對角線元素，儘管它們是混合的分解者、草食動物和肉食動物。濾食性動物的特點包括物種、數量（即生物量）和幾何形狀。

2.1.8. 草食動物

草食動物是食用初級生產者（即植物、藻類和自養細菌）的動物。雜食動物在功能上是草食動物和肉食動物的混合，包括在本段和在肉食動物（見下段文）。特徵包括草食動物的物種和數量（即生物量）。草食動物的種類包括一些昆蟲、嚙齒動物、魚類和較大的哺乳動物。

2.1.9. 肉食動物

肉食動物是食用其他動物的動物。雜食動物在功能上是草食動物和肉食動物的混合，包括在本段和草食動物（見上段文）。特點包括肉食動物的物種和數量（即生物量）。肉食動物的例子包括一些物種昆蟲、鳥類、魚類和哺乳動物。

2.1.10. 人類

人類被定義為經由安全評估，生活在受潛在釋出放射性核種影響地區的所有人類，這個對角線元素包括：特徵、人數以及他們的活動，例如釣魚。抽水和人為排放（例如水，化學物質或熱）包括在水域系統，且還包括農業、灌溉和建築之陸域系統。

2.1.11. 邊界組件

2.1.11.1. 地質圈

地質圈是指圍繞在處置場的基岩，也包括存在於基岩飽和區的深層地下水和氣體。因此，這個 IM 對角線也包括深鑽井元素。地質圈是生物圈的邊界，交界處位於風化岩石的頂部在與表土層的交接處，即地質圈是在沉積物（水域系統）和土壤（陸域生態系統）下面的固體岩石。在 SKB 定義中，岩石露頭是表土層的一部分。然而，只有岩石露頭的頂層被認為是表土層的一部分，所以就在地表以下，岩石露頭成為地質圈的一部分。文獻上，地質圈通常被定義為地球最密集的部分，主要由岩石和表土層組成，因此也偏離了 SKB 的定義。在 SKB 的 IM 中，表土層被視為單獨的對角線元素（見下文）。地質圈的組成部分在 SKB 的技術報告 R-01-13 及 TR-10-45 中進一步描述。

2.1.11.2. 外部條件

在生物圈交互作用矩陣或矩陣內確定受生物圈影響之外部條件，會影響當地條件的外部因素。外部條件包括周圍的生態系統和超出邊界的大氣與當地大氣。它們還包括全球氣候和太陽日照等全球性條件。

2.2. 特徵

特徵是影響生物圈組件之特性、功能、條件或屬性，或影響兩個組件之間的交互作用的速率或方向。許多特徵影響每個物理組件，和物理組件間交互作用。SKB 確定了生物圈組件和作用的六個重要特徵：幾何、材料組成、放射性核種總量、演替階段、溫度和水組成。

Fea 01 幾何

幾何包括景觀的幾何描述，如地形和測深、表土層的深度和體積、泥炭、水等。該特徵還包括生物體的幾何形狀，即它們的形狀、表面積和體積。

Fea 02 材料組成

材料組成包括化學成分（例如礦物質和營養物質的濃度）以及物理特徵如砂粒尺寸和孔隙率。

Fea 03 放射性核種總量

放射性核種總量包括放射性核種及其活度，對所有物理和生物圈系統的生物組件（即

所有物理對角線元素，如表土層，地表水和生物群）所關切的核種。

Fea 04 演替階段

演替階段是生物圈交互作用矩陣的一個特徵，用於確定生態系統之間的差異。Forsmark 的地景不斷演變，由於持續的海岸線位移和相關的生態系統的演替。因此，海洋生態系統通常逐漸轉化為湖泊，陸續變成濕地和森林。此外，濕地被人類排水後於農業使用。不同的交互作用對於生態系統演替不同階段很重要。生物圈交互作用矩陣通常適用於各種生態系統，生態系統的具體作用過程可能足夠重要，並須納入安全評估時，“演替階段”的特徵可納入進行考慮。即演替階段決定生態系統是海洋盆地、湖泊、溪流、森林、濕地或農田。

Fea 05 溫度

溫度一個獨特的物理性質，以決定熱接觸 SKB 的交互作用矩陣中兩個物體之間的熱流方向，溫度僅限於感興趣系統物理組件中的溫度（即所有物理對角線元素，如地質圈，表土層、生物群和水）。溫度取決於氣候，當地地方對氣候的影響與這一溫度特徵有關，而大型氣候系統及其影響屬於對角線元素的“外部條件”。

Fea 06 水組成成分

水組成成分包括生物圈組件中的溶解元素和化合物、膠體和懸浮顆粒（包括死亡的有機物質）。離子和元素的含量決定於如 pH 值、鹽度和營養濃度。因此，水的組成對於生物組件和作用速率的存在和變化程度是重要的。各種傳輸、化學和生物作用過程均影響水的組成成分。

2.3. 生物圈作用

SKB 對於生物圈安全評估提出 50 個作用歷程。生物圈中作用的不同種類的作用，分為以下幾類：(1)生物作用(2)與人類行為相關的作用(3)化學、力學和物理作用(4)傳輸作用(5)熱和輻射。

2.3.1. 生物作用

生物作用是依賴生物體的作用過程。曝露於放射性核種的途徑是經由攝食水和食物，因此生物群的分布和食物鏈網相互作用是重要的。此外，生物群可能會影響非生物池中的放射性核種分佈，如擾亂沉積物或影響水分組成。生物作用過程可能涉及人類和其他

生物體。詳如 2.3.2。

Bio01 生物擾動

生物擾動是經由植物、動物、細菌和真菌混合水域和陸域表土層中的顆粒。這種土壤或沉積物翻轉導致污染物如放射性核種的再分佈。該過程還為土壤和沈積物增加氧氣。生物擾動的例子是蚯蚓利用土壤為食物，蛤蜊在沉積物和人類犁耕田地尋找庇護棲息地。生物擾動會影響表土層土壤化學、空氣和水量。

Bio02 消耗

消耗是由有機體（顆粒物和其他生物）攝食物質。除了攝食外，顆粒（例如風化土壤）也可能被無意地消耗。飲用水、溶解的元素和氣體的攝入量都不包括在消耗量中，但當作為“攝食”（參見 Bio15）。生物體的消耗是從食物鏈的底層向頂級捕食者和人類運送放射性核種的重要途徑。

Bio03 死亡

生物體從活的區塊轉移到死亡的有機物質池。死亡是由有機體死亡產生死的有機物質。死的有機物質可能源自生物體的死亡，但也可以經由散開（例如從樹木落下的葉子和樹枝）產生。死亡有機物質的產生和消耗都可能在生物體之間以及生物與水、土壤和沈積物之間重新分配元素。

Bio04 分解

對死亡有機物質的分解，能將富含能量的有機分子分解成二氧化碳、水和無機營養物質，以及(或)較不複雜的有機分子。與所有其他生物群一樣，分解物的攝食和排泄被視為的以下 Bio15 及 Bio05 的“攝食”和“排泄”作用。然而，除了攝食和排泄之外，分解會影響不可降解物質的可用量，並從有機物質中釋放出水分，這可能會影響表土層水和水的組成成分。此外，分解可能釋放累積在死亡有機物質中的放射性核種。分解速率取決於死亡有機物質的化學特性和環境條件，如氣候和土壤類型。應該注意的是，分解速率可能很重要，降低分解速率可導致碳儲存的產生和增加，和相關的元素累積，例如，泥炭和沈積物。

Bio05 排泄

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。排泄可以經由特殊部位或器官，如植物中的氣孔，動物排泄器官或直接經過細胞膜（例如汗液）發生。排

泄物中含有糞便。經由呼吸作用釋放出二氧化碳也是排泄的一個例子。排泄物會影響水分、氣體、表土層土和生物群的組成。因此，生物群對放射性核種的排泄對於其在生物圈中的傳輸和累積可能是重要的。

Bio 06 食物供應

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，並向消費者提供食物。微生物消耗的溶解元素在 Bio22 “元素供應” 作用中進行。除了供應食物外，人類還可以利用材料和生物進行其他目的，但是在 Bio 11 “材料供應” 作用中會分開處理。

Bio 07 生長

生長是生物體的生成。生長取決於初級生產和消費。然而，光合作用（初級生產總值）固定的所有化學能量並不是轉化為新的生物量；由於細胞呼吸和滲出物大部分也被損失。因此，對於初級生產者而言，生長等於總初級生產減去呼吸（即淨初級生產）減去排泄。同樣，消費者消費的所有材料都不能轉化為新的生物質；一些由於排泄而損失（例如呼吸和糞便）。生長在放射性核種評估中可能是重要的，因為增加的生物量可能會稀釋生物體中的放射性核種。

Bio 08 棲息地供應

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。棲息地的例子是：一塊可耕種的土地、藤壺或墨角藻的岩石底層、昆蟲藏匿樹幹。地表水也可以為生物體提供棲息地，只要水分合適。

Bio 09 侵入

侵入是生物體（包括人類）進入處置場的過程，例如移動、鑽孔或增植。侵入可能影響岩石結構、水力傳導性、侵蝕潛勢、處置場物理和力學特性、氧氣條件和處置場附近生物材料的數量。這是生物圈影響地質圈的進程之一。

Bio 10 材料供應

可讓人類利用的材料量（除餵養以外的目的）。主要生產者通常作為食物以外的其他目的，例如作為紙、建築材料、烹飪火、衣服（例如棉花）。地質圈提供礦物和化石燃料。材料供應的其他例子是當人類利用手工藝品和衣物的動物貝殼、皮膚、毛皮和象牙時。

Bio 11 移動

地表水中生物體的移動。地表水中有機體的存在和移動可能對地表水的流動產生影響。濾食性動物經由其過濾器官產生水流對地表水流動產生影響。在世界某些地區，大型草食動物（如河馬）的運動可能會產生地表水流動。在瑞典亦有大型草食動物和肉食動物，例如麋鹿（麋鹿）、熊和海豹，但是它們不會影響地表水的運動到任何明顯的程度。

Bio 12 顆粒釋放/捕集

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。顆粒的釋放是經由例如破碎、產卵、花粉和種子釋放。在陸地地區，顆粒物的釋放通常是季節性地出現，其中大量釋放，例如：松花粉在春季可以達到大面積釋放。在水域區域，經由產卵動物可以在短時間內釋放出大量的顆粒。生物捕集顆粒，例如毛皮、鰓和粘液。在水域生態系統中，濾食性動物可捕集多數顆粒物，可影響水澄清度、營養濃度，及顆粒物質從水柱到生物群的物質的傳輸。在陸地地區，顆粒也可能被動物身上捕集，但是捕集更多是屬於無意的。顆粒的存在影響水和空氣的組成，這個過程可能對於附著於顆粒表面的放射性核種的傳輸很重要。

Bio 13 初級生產

初級生產（這裡指初級生產總量）是總固定的無機碳。綠色植物、藻類和一些細菌通過光合作用（使用陽光作為能量來源）和化學合成（使用化學化合物作為能源）從無機物質產生有機化合物。這裡的主要生產是指初級生產總量，即初級生產者對無機碳的總固定。淨初級生產量是產生的數量（碳），是從總初級生產中減去呼吸時的淨效應。淨初級生產可以用作草食動物的食物，在 Bio 06 “食物供應”作用中進行處理（見上文）。初級生產率取決於許多因素，其中一些重要的因素是：太陽能日照、氣候、基質以及植物葉片和其他綠色部分面積。經由生物群對許多放射性核種的攝食直接取決於初級生產，使得該過程成為從非生物到生物組件之放射性核種的傳輸途徑。

Bio 14 刺激/抑制

當組件影響另一組件時，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。非生物成分可以通過提供有利的化學條件（例如 pH 和鹽度），有利的溫度，避風等來刺激生物組件。類似地，非生物成分可能通過提供不合適的生活條件來抑制生物群。生物組件也可以刺激或抑制彼此，刺激例子是放牧，其刺激初級生產者的耐放牧物種，甚至可以增加植物群落的生物量和初級生產。生物體可以經

由，例如毒素生產、寄生，和空間與資源競爭。人類對生態系統的刺激和抑制可能對生態系統產生巨大的影響，因為人類利用土地進行糧食和物質生產，而且還有全球性的對自然生態系統土地利用的巨大影響。

Bio 15 攝食

攝食是由生物體（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。生物體可以通過飲用、吸入、根吸收或直接通過細胞膜以吸收水分和物質。有機體吸收和排泄放射性核種會影響生物體內以及生物圈系統其他成分中的放射性核種的濃度。

2.3.2. 與人類行為有關的作用

人類行為可能對生物圈有很大的影響，例如經由引入生物群或化學元素的種類，或經由大量干擾或去除材料。用水、材料使用、人為排放和物種引入/滅絕皆是與人類行為有關的作用。

Bio 16 人為排放

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。人為排放可能會影響環境的化學成分和溫度，這反過來可能對生物組件和生物作用很重要。

Bio 17 材料使用

人類利用濕地乾草、海藻和泥炭或木材。人類利用環境中於餵養以外的目的（見 Bio02 “消費”）、飲用（參見 Bio15 “攝食”）和用水（見下文 Bio19）。地質圈中的礦物和化石燃料、可用於產生能源的風（當地大氣）和生物群、衣服（如毛皮和棉花）、造紙、著色和建築材料（木材、蘆葦、葉子）。這些所有活動都可能影響生物圈系統中放射性核種的累積和傳輸以及對人類的劑量。人類對於材料使用也可能影響物種分佈、生物量和產生。

Bio 18 物種引入/消滅

由於人類活動於處置場內之物種引入或消滅。生物群落被視為處於平衡狀態。物種引入的不同途徑，例如：農業、水產養殖、有害生物控制和其他物種無意中闖入。近年來有的幾個例子的外來物種引進至瑞典並適應了瑞典的新環境。一些最著名的是引進貂（*Mustela vison*），斑馬貽貝（*Dreissena polymorpha*）和小龍蝦（*Pasifastacus leniusculus*）。

雖然上述例子的引入對於生態系統來說已經產生了相當負面影響，但物種的引入也可能對人類產生正面的影響。而從更長的時間來看，瑞典大多數作物物種已被引入。除了引進外來物種之外，人類還可以經過狩獵、收集或擾亂生活棲息地來消除某個地區的物種，例如瑞典和世界各地的一些種群和物種目前正面臨滅絕威脅，在瑞典已經滅絕物種的例子是中點啄木鳥（*Dendrocopos medius*）和歐洲野牛。

Bio 19 用水

在菜園情節中考慮灌溉的影響。用水是人類除了飲用以外的目的所使用的水量。用水的例子是能源生產、灌溉、污水沖洗、洗衣服、淋浴和給水供應鏈中的損失（例如從管道洩漏）。灌溉可能會增加食物中的放射性核種濃度。

2.3.3. 化學、力學和物理作用

化學、力學和物理作用是由於機械力或物理和化學規律而發生的作用過程。化學、機械力和物理作用過程可以影響元素和化合物的狀態，這對於放射性核種的傳輸是重要的。例如，在一些物理化學狀態下，元素與顆粒緊密結合，但在其他狀態下，它們可以容易地被水溶解和傳輸。此外，這些過程可以影響放射性核種的生物利用度，這取決於放射性核種是否以易於被生物體吸收的物理化學形態存在。

Bio 20 壓力變化

壓力是作用於單位面積的力。這裡，壓力是指空氣和水的壓力，壓力的變化是指空氣和水的壓力變化。該方法還包括絕熱溫度變化，即由於壓力變化而導致的升溫或冷卻。空氣所施加的壓力（大氣壓力）在地球上變化很大，其影響氣候、天氣、海平面、水的傳輸等。水對海底施加的壓力取決於海平面大小，這可能是由於天氣和等靜壓的變化（參見 Bio49 “海平面變化”和 Bio48 “岩石表面位置變化”作用）。

Bio 21 壓密

壓密是鬆散的、柔軟的或液體的土壤材料變得聚集堅固和凝聚成岩石的任何過程。該負載過程排出孔隙水和孔隙空氣，並減少表土層土壤體積。對於表土層土壤轉化成固體岩石是一個緩慢的過程，它需要逐漸減小體積和增加密度，並對應為增加的載荷或壓縮應力。這個過程受到表土層土壤的重量（厚度和密度）的影響。由於壓密固結的結果，受放射性核種污染的空氣或水可能與水一起傳輸到表土層。這是生物圈影響地質圈的進程之一，並在地質圈的交互作用矩陣中得到進一步的處理。SKB 亦使用壓密固結來描述

表土層壓實，例如在濕地排水期間。

Bio 22 元素供應

元素濃度被認為是特徵的一部分（例如 CR 值）。來自集水區域可供人類和其他生物使用的元素和其他基質的元素量。元素通常被定義為不能經由化學方法分解成更簡單物質的物質。有些定義更寬泛，除了元素外還包括可被於生物體吸收的液態或氣態的化合物。例如二氧化碳的儲存以及溶解在水中的營養物質，可被水域初級生產者在初級生產中利用，或可讓消費者呼吸的氧氣量。初級生產對營養素的需求往往大於供應量，在這種情況下，元素供應將限制初級生產。

Bio 23 加載

加載是由下層岩石上的材料（表土層或冰）的重量引起的力作用。地層的重量（厚度和密度）影響地球環境中的機械應力，從而影響裂縫發生讓地下水能流到地表面。類似地，在冰川期間冰蓋厚度的變化將影響岩石中的機械應力，這是生物圈影響地質圈的進程之一，並在地質圈的交互作用矩陣中進一步處理。

Bio 24 相變

相變是物質在固體、液體和氣體不同狀態之間的變化。相變是由於溫度和（或）壓力的變化而發生的，有時與反應有關。相變對生物圈內放射性核種傳輸可能是很重要的過程。副作用是蒸發和凝結（即水從液相轉化為氣相，反之亦然），溶解和脫氣（通過水-大氣和土壤-大氣交界面的氣體通量）和水的冷凍。相變會影響濕度和水的化學成分、大氣和表土層。

Bio 25 物理性質變化

在生物圈交互作用矩陣中，物理性質的變化限於水的體積、密度和（或）粘滯度的變化。其他物理性質：顏色、密度、電荷、長度、壓力，則不包括在內。溫度對水的密度有很大的影響，淡水在約 4°C 達到最大密度，水的體積與密度有關，全球暖化導致海平面上升的原因。除了溫度、體積和密度也受壓力和鹽度影響，其中高壓和高濃度的溶解鹽導致密度增加和體積減小。流體粘滯度（流體對剪切力的阻力量度）也受溫度影響並隨溫度降低。

Bio 26 反應

化學反應是一種或多種化學元素或化合物形成新化合物的變化。“反應”在這裡限

於化學反應，不包括風化、分解和光合作用（作為單獨的作用過程處理）。反應可以釋放或消耗熱量。它們影響顏色和密度，並可以誘發相變，反應包括受溫度影響的反應速率。雖然許多反應對放射性核種的傳輸和累積的直接影響有限，但它們對於生態系統功能可能是重要的，因此對放射性核種的傳輸和累積是屬於間接影響。

Bio 27 吸附/脫附

吸附是溶解的物質粘附到表面或被顆粒（例如土壤或沉積物顆粒）吸著的過程，其中，脫附是相反的過程，由此脫附過程物質將被釋出。吸附包括：吸附（由於顆粒表面處的離子交換而引起）、分配（疏水基質與顆粒的表面相關）和吸入（吸附到顆粒內部），所有的最終結果為這三種子過程是物質與顆粒的結合。此外，這些子過程在實際作用中難以相互區分。吸附/脫附受固體物質的化學成分、電荷和表面積以及溶解物質的吸附性質的影響。生物圈系統的不同水分組成和水分中的顆粒數量會影響吸附/脫附，因此影響生物圈系統不同區塊的水中和固相之放射性核種和其他元素的濃度。分配係數 K_d 通常作為這種複雜相互作用的量度。

Bio 28 供水

供水是生態系統（包括人類）中有機體可以利用的水流。供水通常限於人類供水，生物體的供水可以用於飲用（參見 Bio15 “攝食”），人類也可將水用於其他目的，如灌溉、洗滌或工業用途（參見 Bio19 “用水”）。

Bio 29 風化

風化是岩石和碎石分解和分解成更小的顆粒物，這個過程不包括侵蝕。風化可以是化學，力學和/或生物作用，化學風化由於水、氧、二氧化碳和有機酸的化學作用而溶解和分解固體物質；力學風化是由霜凍、溫度變化、風和鹽結晶的物理作用引起的；生物風化是由植物和動物的作用破壞岩石和石頭及其組成礦物。

Bio 30 風應力

風應力是由於風作用產生的機械力並影響生物圈地表面。當風速高時，作用在生物圈上的壓力很高，風應力影響地表水。水波（見 Bio32 “對流”）和海水中含水量（參見 Bio39 “再懸浮”）。

2.3.4. 傳輸作用

傳輸作用是將元素和物質從系統中的一個點運送到另一個點的過程。傳輸過程可能

會對系統中放射性物質的最終位置或者將其從相關系統運出而產生很大的影響。

Bio 31 加速度

加速度是氣體、液體或物體的速度變化隨時間的變化。加速度可以是正或負，即速度的增加或降低。加速度受到生物圈中的生物和非生物組件的影響，如地形、初級生產者的類型和位置、人造建築物等。風和水的速度又影響水柱的混合和停留時間（對流）以及人類和其他生物的生活條件（見 Bio14 之刺激/抑制）

Bio 32 對流

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傳輸以及擴散傳輸。在水文學、海洋學、氣象學和其他大型環境科學中，擴散和對流的過程往往不同。分子擴散傳輸（或混合）是由分子在流體/氣體內的隨機運動引起的，而平流（和對流）傳輸是指通過周圍介質的大量運動傳遞熱量或質量。對流在某些學科中被定義為平流的特殊情況，其中大量運動由其起始在周圍介質中的密度梯度（例如熱或鹽度），導致垂直接流動。在本報告中，所有平流、對流和擴散的傳輸都是一起作用的，以保持作用過程的可管理性，這個過程稱為對流。生態系統對流的例子是河流、地下水抽取/補注，和在湖泊內混合（春季和秋季時之翻轉）。

Bio 33 覆蓋

覆蓋是由諸如冰或植被之類的東西覆蓋在地表面，從而減少入射光以及減少地表水和大氣之間的氣體和顆粒交換的過程。湖上的冰蓋影響可蒸發的水量，大氣和地表水之間的氧氣和二氧化碳的交換以及地表水的流動。初級生產者的密集覆蓋也有類似的影響。

Bio 34 沉積

沉積是由於重力作用將材料或元素傳遞到任何類型的表面。因此，該方法包括沉澱和大氣降水。大氣降水發生是由於乾沉積或濕沉積（雨、雪和冰雹）。沉積受到顆粒的密度和體積以及它們正在下沉的介質密度（空氣、水）所影響。此外，對流和紊流，如風速和氣流，都會影響沉積。沉積物會改變表土層土壤的組成、幾何形狀和孔隙率、地面水流量，以及放射性核種和其他有毒物質在土壤表面上的沉積，可能會改變表面的物理和化學性質（礦物學）。

Bio 35 流出

流出為將某些物質從模型區域流出的作用過程。任何物質都可以流出，例如生物、

水、氣體、元素、化合物和熱量。人類從場區移動出（移出）也包括在這個作用過程中。流出可能是主動方式（生物體強制遷移）或被動的（由風、氣流、下游排水等引起）。非生物作用的流出影響現場的溫度、元素和其他基質的數量。生物作用的流出會影響現場居民的數量和相關過程（如消費和生產）。

Bio 36 流入

流入為將某些物質傳輸到模型區域的過程。任何物質都可以流入，例如生物、水、氣體、元素、化合物和熱量。人類從場區移動入（移入）也包括在這個作用過程中。流入可能是主動的（生物體強制遷移）或被動（由風、氣流、水流等引起）。非生物作用的流入會影響現場的溫度、元素和其他基質的數量。生物作用的流入會影響現場居民的數量和相關過程（如消費和生產）。

Bio 37 截獲

截獲是指所有被植被所截獲/保留元素的所有濕和乾沉積物，不會立即滲入地下或參與地下水傳輸或徑流過程。在植被上保留的降水不受限制，被截留的水和元素的數量受到地上生物量、植被類型、可用葉面積、沉積量、沉積類型（乾或濕）和初級生產者的吸收所影響。放射性核種可存在於大氣中並經由沉積而掉落或存在於灌溉的水中。截獲可能從輻射角度來看是重要的，截留沉積物的比率影響植被中放射性核種的數量，如果植被被消耗，動物和人類的劑量也將受到影響。

Bio 38 搬遷

搬遷是固體物質和固定的生物從一個點轉移到另一個點。搬遷可以經由水或風、冰川侵蝕、滑坡或人類活動如挖掘、土壤傳輸和工業採礦的侵蝕來傳達。搬遷可將污染物和放射性核種釋放到水和空氣中。更細的顆粒被風和水重新懸浮，這被視為一個單獨的作用過程，參見 Bio39 再懸浮。

Bio 39 再懸浮

再懸浮是沉積在表面上的物質重新輸送到上層介質中的過程。在生物圈中，在沉積物和水柱之間，以及表土層土壤和空氣之間的界面再懸浮的作用可能是重要的。在水域環境中，再懸浮增加顆粒和水柱之間表面相互作用，從而影響吸附/脫附作用過程。大量的沉積物質可能在海洋和野生生態系統中發生再懸浮。土壤中顆粒的大小分佈亦會影響在水或空氣中再懸浮的物質量，從而影響水或空氣中的顆粒含量。更大的顆粒在搬遷

(Bio38) 下進行處理。

Bio 40 飽和度

飽和度為表土層土壤含水量的變化。當表土層土壤裡的所有孔隙充滿水時，屬於完全飽和。表土層土壤水流（對流）的大小和方向影響飽和度。水流依賴於降水、蒸散量，土壤的水力特性、孔隙度等。飽和度對於陸域生物群是重要的，因為它決定了植物的生活條件。

2.3.5. 熱和輻射作用

熱和輻射作用是涉及溫度、太陽日照和放射性核種特異性特徵的作用過程。

Bio 41 放射性衰變

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。大量不穩定放射性核種的衰變可能會對水的組成產生影響，放射性核種產生衰變熱可能影響生物圈系統不同組件的溫度。

Bio 42 曝露

曝露指生物體或死亡生物體/物質曝露於 α ， β ， γ 或中子輻射的過程。曝露可以是源於體外的外部曝露或源自體內的內部曝露。生物圈系統所有的放射性核種的濃度、位置和類型都會影響外部曝露，而生物體內部放射性核種的濃度、位置和類型會影響內部曝露。在短時間內曝露於高劑量可能會導致確定性的健康影響，從血液細胞數量輕微降低到可能死亡。即使在低劑量下，慢性曝露（或長時間的曝露）被認為是增加曝露個體隨機效應的可能性，如癌症和誘發遺傳異常的可能性。

Bio 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。儲藏溫度影響生物圈不同組件的溫度，包括陸地和水域系統。水的熱儲存能力非常高，超過了幾種物質（如液體 NH_3 ），並且防止水域生態系統溫度的極端變化。此外，水的比熱影響了湖泊和海洋分層、混合以及對流。儘管表土層土壤的熱容量低於水中的熱容量，但是表土層土壤的密度和熱特性決定可儲存的熱量，從而也影響陸地生態系統的溫度。

Bio 44 輻射

輻射（經由電離輻射）是物體曝露於輻射和吸收能量的過程。放射性核種在表土層土壤和水中的輻射作用可能會影響材料的礦物結構。

Bio 45 光相關作用

光相關作用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。光相關作用不包括光合作用（其被視為生物過程，參見 Bio13 的初級生產）。許多因素（如水的組成、植被的程度和類型、雪的存在和水波的形成）影響光反射、散射和吸收的程度。光相關作用又影響生物圈的其他部分，例如：日照度（以及輻射的吸收/散射/反射程度）會影響溫度和光合作用。

Bio 46 輻射分解

輻射分解是由輻射引起分子的分解。原則上，輻射分解可能是水分子以外的分解。在實際狀況案例中，水的輻射分解是最重要的，輻射分解會導致水因放射性作用而分解，從而影響生物圈系統不同組件的水分組成。輻射分解也可以局部改變氧化還原條件，從而改變其他化合物的形態和溶解度。

Bio 47 放射性核種釋出

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。

2.3.6. 地景開發作用

生態系統（海洋、土地或陸地）的類型和地景的幾何影響放射性核種的傳輸和累積。因此，地景開發作用的影響在安全評估中可能很重要。

Bio 48 岩石表面位置變化

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。等靜止反彈是在冰河時期對土地施加的負載的恢復，這導致了地殼的沈陷。一旦冰蓋覆蓋較薄，壓力開始下降，地殼開始反彈（等靜壓反彈）。等靜壓反彈導致海岸線變化（陸地上升），新的陸地和湖泊從海面出現。等靜壓反彈和海平面變化（見 Bio49）是決定海岸線位置的兩個因素，因此對未來生態系統產生重大影響。然而，岩石表面位置的變化也可能發生，而不改變生態系統類型，即在岩石地表位置變化之後，地景中的陸地地點可能繼續是陸地的。處置場誘發的變化，例如，洞穴坍塌導致周圍岩石塌陷或由於地震造成新構造的移動。這會影響周圍岩石的應力狀況，並可能影響到表土層的高度。

Bio 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。由於海洋表面的高度增加（例

如，由於地球表面的幾何形狀的變化，海洋中的水分的增加或降低），海平面上升可能降低海洋的儲存能力和（或）土地高度的下降（例如由於冰蓋加載或構造活動，參見上文 Bio48 “岩石地表位置的變化”）。相反的，由於海洋高度的下降和（或）由於與上述相反的過程而導致相對海平面的下降，陸地表面高度的升高。在任何時間，相對海平面變化的速度由這些因素的組合決定。現在，由於全球變暖造成的大陸冰融化，由於水量隨著氣溫的增加而增加，造成全球海平面上升。相對應地，由於體積減少和水在大陸冰上被束縛，氣候變冷時，海平面會下降。在最近的冰川期間，全球海平面比現在低了 120 米。海平面上升並不是在世界上平均發生，而且受不同尺度的因素的影響：全球（引力場）、區域（等靜壓反彈/沉降）和當地（降水和風力）。

Bio 50 閾值

閾值(Thresholding)受水位、山體滑坡、人類挖掘、水壩和土地上升的影響（後者可能由於不均勻等級隆升引起的傾斜而改變閾值）。人類往往影響過去的閾值，並經由降低閾值獲得新的農田。閾值是重要的，因為它設置了湖泊和海洋之間的邊界，並確定湖泊幾何（體積、面積、深度）。係為水域在海和湖之間的內插值參數。

2.4. 生物圈交互作用

交互作用矩陣(IM)是能系統性識別生物圈作用流程之有用工具。SKB 提供了適用於 Forsmark 場址所有種類生態系統以及其他具有相似條件地理位置之生物圈交互作用矩陣。由對角線元素表示的系統組件可以經由一個或多個進程彼此交互作用。根據生態系統和地理位置，交互作用對於放射性核種的傳輸和累積可能藉以判斷重要或不重要。SKB Forsmark 的處置場（深度>30 米），完成之識別交互作用對於放射性核種的傳輸和累積，及估算對人類和其他生物群的輻射曝露，具有相當之重要性。

2.4.1. 一般生物圈交互作用矩陣

表 2 為 SKB 對於生物圈交互作用矩陣，於前述 2.1 節已提出 10 個組件代表不同的環境媒介（表土層、表土層水、地表水、氣體和當地大氣）和生物群體（初級生產者、分解者、濾食性動物、草食動物、肉食動物、人類），另外還有 2 個邊界組件（地質圈和外部條件）包含在交互作用矩陣（IM）中。另外 2.2 節已提出之 6 個特徵（在對角線上顯示）和 2.3 節已提出之 50 個生物圈作用（變量作用在矩陣之非對角線上之作用過程）。表 3 列出生物圈交互作用矩陣(IM)中的作用的簡要定義。包括作用、定義、矩陣中交互

作用（列：行）編號、FEP 資料庫編號。

表 2 生物圈交互作用矩陣

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	地質圖	Bio48 Bio23 Bio29	Bio32	Bio32	Bio32						Bio10 Bio28	
2	Bio21 Bio32 Bio23	表土層 Fea 01~06	Bio32 Bio24 Bio26 Bio27 Bio50	Bio31 Bio24 Bio26 Bio39 Bio27 Bio50	Bio31 Bio20 Bio24 Bio41 Bio26 Bio39	Bio22 Bio42 Bio08 Bio45 Bio38 Bio14	Bio22 Bio42 Bio06 Bio08 Bio14	Bio42 Bio08 Bio14	Bio42 Bio08 Bio14	Bio42 Bio08 Bio14	Bio42 Bio06 Bio08 Bio10 Bio14	Bio35 Bio50
3	Bio20 Bio32 Bio29	Bio24 Bio38 Bio40 Bio27 Bio29	表土層水 Fea 01~06	Bio32	Bio41 Bio24	Bio22 Bio42 Bio08 Bio14 Bio28	Bio22 Bio42 Bio08 Bio14 Bio28	Bio42 Bio14 Bio28	Bio42 Bio14 Bio28	Bio42 Bio14 Bio28	Bio42 Bio14 Bio28	Bio35
4	Bio20 Bio32 Bio23 Bio29	Bio34 Bio38 Bio39 Bio40 Bio27 Bio29	Bio32	地表水 Fea 01~06	Bio33 Bio24 Bio38 Bio29	Bio22 Bio42 Bio08 Bio45 Bio38 Bio14 Bio28	Bio22 Bio42 Bio06 Bio08 Bio38 Bio14 Bio28	Bio22 Bio42 Bio06 Bio08 Bio38 Bio14 Bio28	Bio22 Bio42 Bio08 Bio38 Bio14 Bio28	Bio22 Bio42 Bio08 Bio38 Bio14 Bio28	Bio42 Bio08 Bio14 Bio28	Bio35 Bio35
5	Bio32	Bio34 Bio26 Bio38 Bio39	Bio32 Bio24	Bio32 Bio34 Bio24 Bio30	當地大氣 Fea 01~06	Bio22 Bio42 Bio38 Bio14	Bio22 Bio42 Bio14	Bio22 Bio42 Bio14	Bio22 Bio42 Bio14	Bio22 Bio42 Bio14	Bio34 Bio22 Bio42 Bio14	Bio35
6	Bio09	Bio01 Bio32 Bio03 Bio45 Bio26	Bio32 Bio05 Bio45 Bio26 Bio27 Bio15	Bio31 Bio32 Bio33 Bio03 Bio05 Bio37 Bio45 Bio26 Bio12 Bio27 Bio15	Bio31 Bio33 Bio05 Bio45 Bio26 Bio12 Bio27 Bio15	初級生產者 Fea 01~06	Bio08 Bio14	Bio06 Bio08 Bio14	Bio06 Bio08 Bio14	Bio14	Bio06 Bio10 Bio14	Bio35
7	Bio09	Bio01 Bio02 Bio32 Bio03 Bio04 Bio05 Bio45 Bio26	Bio32 Bio04 Bio05 Bio45 Bio26 Bio27 Bio15	Bio31 Bio02 Bio03 Bio04 Bio05 Bio45 Bio11 Bio12 Bio26 Bio27 Bio15	Bio05 Bio45 Bio12 Bio26 Bio27 Bio15	Bio14	分解者 Fea 01~06	Bio06 Bio14	Bio14	Bio06 Bio14	Bio06 Bio10 Bio14	Bio35
8	Bio09	Bio01 Bio32 Bio03 Bio45 Bio26 Bio27	Bio32 Bio05 Bio45 Bio26 Bio27 Bio15	Bio31 Bio02 Bio03 Bio05 Bio45 Bio11 Bio12 Bio26 Bio27 Bio15	Bio05 Bio15	Bio02 Bio08 Bio14	Bio02 Bio08 Bio14	濾食性動物 Fea 01~06	Bio02 Bio14	Bio02 Bio06 Bio14	Bio06 Bio10 Bio14	Bio35
9	Bio09	Bio01 Bio32 Bio03 Bio05 Bio45 Bio26 Bio27 Bio15	Bio32 Bio05 Bio45 Bio26 Bio27 Bio15	Bio31 Bio03 Bio05 Bio45 Bio11 Bio12 Bio26 Bio27 Bio15	Bio05 Bio45 Bio12 Bio26 Bio27 Bio15	Bio02 Bio14	Bio14	Bio06 Bio14	草食動物 Fea 01~06	Bio06 Bio14	Bio06 Bio10 Bio14	Bio35
10	Bio09	Bio01 Bio32 Bio03 Bio05 Bio45 Bio26 Bio27 Bio15	Bio32 Bio05 Bio45 Bio26 Bio27 Bio15	Bio03 Bio05 Bio45 Bio11 Bio12 Bio26 Bio27 Bio15	Bio05 Bio45 Bio12 Bio26 Bio27 Bio15	Bio14	Bio02 Bio14	Bio02 Bio06 Bio14	Bio02 Bio14	肉食動物 Fea 01~06	Bio02 Bio06 Bio10 Bio14	Bio35
11	Bio09 Bio11	Bio16 Bio21 Bio17 Bio38	Bio16 Bio15 Bio19	Bio31 Bio16 Bio15 Bio19	Bio16 Bio32 Bio15	Bio02 Bio14	Bio18		Bio02 Bio18 Bio14	Bio18	人類 Fea 01~03	
12	Bio48	Bio48 Bio36 Bio45	Bio36 Bio45 Bio40	Bio32 Bio36 Bio45 Bio49	Bio36 Bio45 Bio26	Bio36 Bio45 Bio14	Bio36 Bio14	Bio36 Bio14	Bio36 Bio14	Bio36 Bio14	Bio36 Bio14	外部條件

表 3 生物圈交互作用矩陣(IM)中的作用的簡要定義。

這些作用過程分為以下幾類：1) 生物作用，2) 與人類行為有關的作用，3) 化學，力學和物理作用，4) 傳輸作用，5) 熱和放射性作用以及地景開發作用。*表示雖然主要與涉及非人類生物群的相互作用相關的過程也可能涉及人類。

作用	定義	交互作用矩陣中（列：行）	FEP 編號
生物作用			
1 生物擾動	生物擾動是水域和陸域表土層藉由植物、動物、細菌和真菌造成之混合作用	6:2, 7:2, 8:2, 9:2, 10:2	Bio01
2 消耗量*	消耗是生物體的物質攝食	7:2, 7:4, 8:4, 8:6, 8:7, 8:8, 8:9, 8:10, 9:6, 10:7, 10:8, 10:9, 10:10, 10:11, 11:2, 11:6, 11:7, 11:8, 11:9, 11:10	Bio02
3 死亡*	生物體從活的區塊轉移到死亡的有機物質	6:2, 6:4, 7:2, 7:4, 8:2, 8:4, 9:2, 9:4, 10:2, 10:4, 11:2, 11:4	Bio03
4 分解	分解者對死亡有機物的分解	7:2, 7:3, 7:4	Bio04
5 排泄*	化學元素和化合物從生物體經由介質釋放到周圍環境中	6:3, 6:4, 6:5, 7:2, 7:3, 7:4, 7:5, 8:3, 8:4, 8:5, 9:2, 9:3, 9:4, 9:5, 10:2, 10:3, 10:4, 10:5, 11:2, 11:3, 11:4, 11:5	Bio05
6 食物供應	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	2:7, 2:11, 4:7, 4:8, 6:8, 6:9, 6:11, 7:8, 7:10, 7:11, 8:8, 8:10, 8:11, 9:8, 9:10, 9:11, 10:8, 10:10, 10:11, 11:10	Bio06
7 生長*	生物體產生生物量	6:6, 7:7, 8:8, 9:9, 10:10, 11:11	Bio07
8 棲息地供應	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。	2:6, 2:7, 2:8, 2:9, 2:10, 2:11, 3:6, 3:7, 4:6, 4:7, 4:8, 4:9, 4:10, 4:11, 6:6, 6:7, 6:8, 6:9, 8:6, 8:7	Bio08
9 侵入*	生物體（包括人類）進入處置場的過程，例如移動、鑽孔或增值	6:1, 7:1, 8:1, 9:1, 10:1, 11:1	Bio09
10 材料供應	可讓人類利用的材料量（除餵養以外的目的）	1:11, 2:11, 6:11, 7:11, 8:11, 9:11, 10:11	Bio10
11 移動*	動物在地面水中移動	7:4, 8:4, 9:4, 10:4, 11:4	Bio11
12 顆粒釋放/捕集*	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。	6:4, 6:5, 7:4, 7:5, 8:4, 9:4, 9:5, 10:4, 10:5, 11:4	Bio12
13 初級生產	初級生產（這裡指初級生產總量）是總固定的無機碳	6:6	Bio13
14 刺激/抑制*	當組件影響另一組件時，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。	2:6, 2:7, 2:8, 2:9, 2:10, 2:11, 3:6, 3:7, 3:8, 3:9, 3:10, 3:11, 4:6, 4:7, 4:8, 4:9, 4:10, 4:11, 5:6, 5:7, 5:8, 5:9, 5:10, 5:11, 6:6, 6:7, 6:8, 6:9, 6:10, 6:11, 7:6, 7:7, 7:8, 7:9, 7:10, 7:11, 8:6, 8:7, 8:8, 8:9, 8:10, 8:11, 9:6, 9:7, 9:8, 9:9, 9:10, 9:11, 10:6, 10:7, 10:8, 10:9, 10:10, 10:11, 11:6, 11:7, 11:8, 11:9, 11:10, 11:11, 12:6, 12:7, 12:8, 12:9, 12:10, 12:11	Bio14
15 攝食*	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	6:3, 6:4, 6:5, 7:3, 7:4, 7:5, 8:3, 8:4, 8:5, 9:2, 9:3, 9:4, 9:5, 10:2, 10:3, 10:4, 10:5, 11:3, 11:4, 11:5	Bio15
與人類行為有關的作用			
16 人為排放	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	11:2, 11:3, 11:4, 11:5	Bio16
17 材料使用	人類利用濕地乾草、海藻和泥炭或木材。	11:1, 11:2, 11:6, 11:7, 11:8, 11:9, 11:10	Bio17
18 物種引進/消滅	由於人類活動於處置場造成物種引進或消滅。	11:6, 11:7, 11:8, 11:9, 11:10	Bio18
19 用水	菜園情節情景中考慮灌溉的影響。	11:3, 11:4	Bio19

作用	定義	交互作用矩陣中（列：行）	FEP 編號
化學、力學和物理的作用			
20 壓力變化	在地表面上空氣和水的壓力變化	2:2, 2:5, 3:1, 4:1, 4:4, 5:5	Bio20
21 壓密	鬆散的土壤材料變得聚集堅固和凝聚成岩石的過程。該過程排出孔隙水和孔隙空氣，並減少表土層土壤體積	2:1, 2:2	Bio21
22 元素供應	來自集水區域可供人類和其他生物使用的元素和其他基質的元素量。	2:6, 2:7, 3:6, 3:7, 4:6, 4:7, 4:8, 4:9, 4:10, 5:6, 5:7, 5:8, 5:9, 5:10, 5:11	Bio22
23 加載	下層岩石上的材料（表土層或冰）的重量引起的力作用。	2:1, 4:1	Bio23
24 相變	相變是物質在固體、液體和氣體不同狀態之間的變化	2:3, 2:4, 2:5, 3:2, 3:3, 3:5, 4:4, 4:5, 5:3, 5:4, 5:5	Bio24
25 物理性質變化	水的體積、密度和（或）粘滯度的變化	2:2, 4:4	Bio25
26 反應	反應”在這裡限於化學反應，不包括風化、分解和光合作用	2:3, 2:4, 2:5, 3:3, 4:4, 5:2, 5:5, 6:2, 6:3, 6:4, 6:5, 6:6, 7:2, 7:3, 7:4, 7:5, 8:2, 8:3, 8:4, 9:2, 9:3, 9:4, 9:5, 10:2, 10:3, 10:4, 10:5, 11:5, 12:5	Bio26
27 吸附/脫附	吸附是溶解的物質粘附到表面或被顆粒（例如土壤或沉積物顆粒）吸著的過程	2:3, 2:4, 3:2, 4:2, 4:4, 5:5, 6:3, 6:4, 6:5, 7:3, 7:4, 7:5, 8:2, 8:3, 8:4, 9:2, 9:3, 9:4, 9:5, 10:2, 10:3, 10:4, 10:5, 11:2, 11:4, 11:5	Bio27
28 供水	生態系統（包括人類）中有機體可以利用的水流，如灌溉	1:11, 3:6, 3:7, 3:8, 3:9, 3:10, 3:11, 4:6, 4:7, 4:8, 4:9, 4:10, 4:11	Bio28
29 風化	風化是岩石和碎石分解和分解成更小的顆粒物	1:2, 2:2, 3:1, 3:2, 4:1, 4:2	Bio29
30 風應力	風作用產生的機械力並影響生物圈地表面。	5:4	Bio30
傳輸作用			
31 加速度	加速度是氣體、液體或物體的速度變化隨時間的變化。加速度可以是正或負，即速度的增加或降低。	2:4, 2:5, 6:4, 6:5, 7:4, 8:4, 9:4, 11:4, 11:5	Bio31
32 對流	物質（例如水）或液體或氣體中的性質（例如溫度）的傳輸	1:2, 1:3, 1:4, 1:5, 2:1, 2:3, 3:1, 3:3, 3:4, 4:1, 4:3, 4:4, 5:1, 5:3, 5:4, 5:5, 6:2, 6:3, 6:4, 7:2, 7:3, 8:2, 8:3, 9:2, 9:3, 10:2, 10:3, 11:2, 11:3, 11:5, 12:4	Bio32
33 覆蓋	冰或植被之類的東西覆蓋在地表面，從而減少入射光以及減少地表水和大氣之間的氣體和顆粒交換的過程	4:5, 6:4, 6:5, 11:4	Bio33
34 沉積	由於重力作用將材料或元素傳遞到任何類型的表面。因此，該方法包括沉降和大氣降水。	4:2, 5:2, 5:4, 5:11	Bio34
35 流出	某些物質從模型區域流出的作用過程	2:12, 3:12, 4:12, 5:12, 6:12, 7:12, 8:12, 9:12, 10:12, 11:12	Bio35
36 流入	將某些物質傳輸到模型區域的過程	4:12, 12:2, 12:3, 12:4, 12:5, 12:6, 12:7, 12:8, 12:9, 12:10, 12:11	Bio36
37 截獲	降雨不會到達地面並保留在植被上	6:4	Bio37
38 搬遷	固體物質和固定的生物從一個點轉移到另一個點	2:2, 2:6, 3:2, 4:2, 4:5, 4:6, 4:7, 4:8, 4:9, 4:10, 5:2, 5:6, 11:2	Bio38
39 再懸浮	沉積在表面上的物質重新輸送到上層介質中的過程	2:4, 2:5, 4:2, 4:5, 5:2	Bio39
40 飽和度	水分含量影響表土層土壤的物理和化學特性	3:2, 4:2, 12:3	Bio40

作用	定義	交互作用矩陣中（列：行）	FEP 編號
熱和輻射作用			
41 放射性衰變	衰變為其他放射性核種或穩定核種	2:2, 2:5, 3:3, 3:5, 4:4, 5:5, 6:6, 7:7, 8:8, 9:9, 10:10, 11:11	Bio41
42 曝露	曝露指生物體或死亡生物體/物質曝露輻射的過程。曝露可以是源於體外的外部曝露或源自體內的內部曝露。	2:6, 2:7, 2:8, 2:9, 2:10, 2:11, 3:6, 3:7, 3:8, 3:9, 3:10, 3:11, 4:6, 4:7, 4:8, 4:9, 4:10, 4:11, 5:6, 5:7, 5:8, 5:9, 5:10, 5:11, 6:6, 7:7, 8:8, 9:9, 10:10, 11:11	Bio42
43 熱儲存	熱儲存再固體和水體	2:2, 3:3, 4:4, 5:5	Bio43
44 輻射	輻射（經由電離輻射）是物體曝露於輻射和吸收能量的過程	2:2	Bio44
45 光相關作用	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。	2:2, 2:6, 4:4, 4:6, 5:5, 6:2, 6:3, 6:4, 6:5, 6:6, 7:2, 7:3, 7:4, 7:5, 8:2, 8:3, 8:4, 9:2, 9:3, 9:4, 9:5, 10:2, 10:3, 10:4, 10:5, 11:5, 12:2, 12:3, 12:4, 12:5, 12:6	Bio45
46 輻射分解	輻射引起分子的分解	3:3, 4:4	Bio46
47 放射性核種釋出	核種從處置場釋出	1:1	Bio47
地景開發作用			
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	1:2, 12:1, 12:2	Bio48
49 海平面變化	海平面相對於陸地表面的上升和下降	12:4	Bio49
50 閾值	水域在海和湖之間的內插值參數	2:3, 2:4, 2:12	Bio50

2.4.2. 生物圈物理組件之間交互作用

系統組件表示對角線元素可以經由一個或多個作用過程彼此相互作用。一些作用過程發生在交互作用矩陣(IM)中的許多地方。以下表 4 至表 15 分別描述表 2 中交互作用矩陣(IM)每個框的意義及交互作用矩陣中（列：行）之說明。

1. 地質圈對其他物理組件之作用

表 4 地質圈對其他物理組件之作用

矩陣中 (列：行)	說明
1：1	地質圈 是一個對角線元素，已在 2.1 生物圈組件中進一步描述。地質圈位於生物圈矩陣的邊界。與生物圈矩陣相關的地質圈內作用是(a)放射性核種釋出。
1：2	地質圈 影響表土層之作用：a) Bio48 岩石表面位置變化，b) Bio23 對流，c) Bio29 風化。
1：3	地質圈 影響表土層水之作用：a) Bio32 對流。

矩陣中 (列：行)	說明
1：4	地質圈影響地表水之作用：a) Bio32 對流。
1：5	地質圈影響氣體及當地大氣之作用：a) Bio32 對流。
1：6	地質圈無影響主要生產者之作用。
1：7	地質圈無影響分解者之作用。
1：8	地質圈無影響濾食性動物之作用。
1：9	地質圈無影響草食性動物之作用。
1：10	地質圈無影響肉食性動物之作用。
1：11	地質圈影響人類之作用：a) Bio10 材料供應，b) Bio28 供水。
1：12	地質圈無影響外部條件之作用。

2. 表土層對其他物理組件之作用

表 5 表土層對其他物理組件之作用

矩陣中 (列：行)	說明
2：1	表土層影響地質圈之作用：a) 壓密，b) 對流，c) 加載。
2：2	表土層是一個對角線元素，已在 2.1 生物圈組件中進一步描述。表土層在內部受幾何、材料組成、溫度、水分、演替階段和放射性核種總量等特徵所影響。受以下作用所影響：a) 壓力變化，b) 壓密，c) 儲熱，d) 輻射，e) 光相關作用，f) 物理性質變化，g) 放射性衰變，h) 搬遷和 i) 風化。
2：3	表土層影響表土層水之作用：a) Bio32 對流，b) Bio24 相變，c) Bio26 反應，d) Bio27 吸附/脫附，e) Bio50 閾值。
2：4	表土層影響地表水之作用：a) Bio31 加速度，b) Bio24 相變，c) Bio26 反應，d) Bio39 再懸浮，e) Bio27 吸附/脫附，f) Bio50 閾值。
2：5	表土層影響氣體與當地大氣之作用：a) Bio31 加速度，b) Bio20 壓力變化，c) Bio24 相變，d) Bio41 放射性衰變，e) Bio26 反應，f) Bio39 再懸浮。
2：6	表土層影響初級生產者之作用：a) Bio22 元素供應，b) Bio42 曝露，

矩陣中 (列：行)	說明
	c) Bio08 棲息地供應，d) Bio45 光相關作用，e) Bio38 搬遷，f) Bio14 刺激/抑制。
2：7	表土層影響分解者之作用：a) Bio22 元素供應，b) Bio42 曝露，c) Bio06 食物供應，d) Bio08 棲息地供應，e) Bio14 刺激和抑制。
2：8	表土層影響濾食性動物之作用：a) Bio42 曝露，b) Bio08 棲息地供應，c) Bio14 刺激/抑制。
2：9	表土層影響草食動物之作用：a) Bio42 曝露，b) Bio08 棲息地供應，c) Bio14 刺激/抑制。
2：10	表土層影響肉食動物之作用：a) Bio42 曝露，b) Bio08 棲息地供應，c) Bio14 刺激/抑制。
2：11	表土層影響人類之作用：a) Bio42 曝露，b) Bio06 食物供應，c) Bio08 棲息地供應，d) Bio10 材料供應和 e) Bio14 刺激/抑制。
2：12	表土層影響外部條件之作用：a) Bio35 流出和 b) Bio50 閾值。

3. 表土層水對其他物理組件之作用

表 6 表土層水對其他物理組件之作用

矩陣中 (列：行)	說明
3：1	表土層水影響地質圈之作用：a) Bio20 壓力變化，b) Bio32 對流，c) Bio29 風化。
3：2	表土層水影響表土層之作用 a) Bio24 相變，b) Bio38 搬遷，c) Bio40 飽和度，d) Bio27 吸附/脫附，e) Bio29 風化。
3：3	表土層水是一個對角線元素，已在 2.1 生物圈組件中進一步描述。受幾何、材料組成、演替階段、溫度、水分和放射性核種總量等特徵所影響。水中受以下作用所影響：a) 對流，b) 儲熱，c) 相變，d) 放射性衰變，e) 放射分解和 f) 反應。
3：4	表土層水影響地表水之作用 a) Bio32 對流。
3：5	表土層水影響氣體與當地大氣之作用 a) Bio41 放射性衰變，b) Bio24

矩陣中 (列：行)	說明
	相變。
3：6	表土層水影響初級生產者之作用 a) Bio22 元素供應，b) Bio42 曝露，c) Bio08 棲息地供應，d) Bio14 刺激/抑制，e) Bio28 供水
3：7	表土層水影響分解者之作用 a) Bio22 元素供應，b) Bio42 曝露，c) Bio08 棲息地供應 d) Bio14 刺激/抑制 e) Bio28 供水。
3：8	表土層水影響濾食性動物之作用 a) Bio42 曝露，b) Bio14 刺激/抑制，c) Bio28 供水。
3：9	表土層水影響草食動物之作用 a) Bio42 曝露，b) Bio14 刺激/抑制，c) Bio28 供水。
3：10	表土層水影響肉食動物之作用 a) Bio42 曝露，b) Bio14 刺激/抑制，c) Bio28 供水。
3：11	表土層水影響人類之作用 a) Bio42 曝露，b) Bio14 刺激/抑制，c) Bio28 供水。
3：12	表土層水影響外部條件之作用 a) Bio35 流出。

4. 地表水對其他物理組件之作用

表 7 地表水對其他物理組件之作用

矩陣中 (列：行)	說明
4：1	地表水影響地質圈之作用 a) Bio20 壓力變化，b) Bio32 對流，c) Bio23 加載，d) Bio29 風化。
4：2	地表水影響表土層之作用 a) Bio34 沉積 b) Bio38 搬遷，c) Bio39 再懸浮，d) Bio40 飽和度，e) Bio27 吸附/脫附，f) Bio29 風化。
4：3	地表水影響表土層水之作用。a) Bio32 對流。
4：4	地表水是一個對角線元素，已在 2.1 生物圈組件中進一步描述。為地面收集水或河流、湖泊濕地或海洋中的水，而不是地下水或大氣水。地表水受到內部幾何、材料組成、演替階段、溫度、水分和放射性核種總量等特徵所影響。地表水由以下作用所影響：a) 壓力變化，b) 對流，c) 儲熱，d) 光相關作用，e) 相變，f) 物理性質，g) 放射性

矩陣中 (列：行)	說明
	衰變，h) 放射分解，i) 反應，和 j) 吸附/脫附。
4：5	地表水影響氣體及當地大氣之作用 a) Bio33 覆蓋，b) Bio24 相變，c) Bio38 搬遷，d) Bio39 再懸浮。
4：6	地表水影響初級生產者之作用 a) Bio22 元素供應 b) Bio42 曝露 c) Bio08 棲息地供應 d) Bio45 光相關作用 e) Bio38 搬遷 f) Bio14 刺激/抑制 g) Bio28 供水。
4：7	地表水影響分解者之作用 a) Bio22 元素供應 b) Bio42 曝露 c) Bio06 食物供應 d) Bio08 棲息地供應 e) Bio38 搬遷 f) Bio14 刺激/抑制 g) Bio28 供水。
4：8	地表水影響濾食性動物之作用 a) Bio22 元素供應 b) Bio42 曝露 c) Bio06 食物供應 d) Bio08 棲息地供應 e) Bio38 搬遷 f) Bio14 刺激/抑制 f) Bio28 供水。
4：9	地表水影響草食動物之作用 a) Bio22 元素供應 b) Bio42 曝露 c) Bio08 棲息地供應 d) Bio38 搬遷 e) Bio14 刺激/抑制 f) Bio28 供水。
4：10	地表水影響肉食動物之作用 a) Bio22 元素供應 b) Bio42 曝露 c) Bio08 棲息地供應 d) Bio38 搬遷 e) Bio14 刺激/抑制 f) Bio28 供水。
4：11	地表水影響人類之作用 a) Bio42 曝露，b) Bio08 棲息地供應，c) Bio14 刺激/抑制，d) Bio28 供水。
4：12	地表水影響外部條件之作用 a) Bio35 流出，b) Bio36 流入。

5. 氣體及當地大氣對其他物理組件之作用

表 8 氣體及當地大氣對其他物理組件之作用

矩陣中 (列：行)	說明
5：1	氣體及當地大氣影響地質圈之作用 a) Bio32 對流。
5：2	氣體及當地大氣影響表土層之作用 a) Bio34 沉積，b) Bio26 反應，c) Bio38 搬遷，d) Bio39 再懸浮。

矩陣中 (列:行)	說明
5:3	氣體及當地大氣影響表土層水之作用 a) Bio32 對流和 b) Bio24 相變。
5:4	氣體及當地大氣影響地表水之作用 a) Bio32 對流, b) Bio34 沉積, c) Bio24 相變, d) Bio30 風應力。
5:5	氣體及當地大氣是一個對角線元素, 已在 2.1 生物圈組件中進一步描述。定義為生態系統上方的氣體層, 與水進行氣體交換。氣體組成和氣體流量包含在該元素中, 還包括大氣流和風。受以下作用所影響 a) 變化的壓力, b) 對流, c) 儲熱, d) 光相關作用, e) 相變, f) 放射性衰變, g) 反應, 和 h) 吸附/脫附。
5:6	氣體及當地大氣影響初級生產者之作用 a) Bio22 元素供應, b) Bio42 曝露, c) Bio38 搬遷, d) Bio14 刺激/抑制。
5:7	氣體及當地大氣影響分解者之作用 a) Bio22 元素供應, b) Bio42 曝露, c) Bio14 刺激/抑制。
5:8	氣體及當地大氣影響濾食性動物之作用 a) Bio22 元素供應, b) Bio42 曝露, c) Bio14 刺激/抑制。
5:9	氣體及當地大氣影響草食動物之作用 a) Bio22 元素供應, b) Bio42 曝露, c) Bio14 刺激/抑制。
5:10	氣體及當地大氣影響肉食動物之作用 a) Bio22 元素供應, b) Bio42 曝露, c) Bio14 刺激/抑制。
5:11	氣體及當地大氣影響人類之作用 a) Bio34 沉積 b) Bio22 元素供應, c) Bio42 曝露, d) Bio14 刺激/抑制。
5:12	氣體及當地大氣影響外部條件之作用 a) Bio35 流出。

6. 初級生產者對其他物理組件之作用

表 9 初級生產者對其他物理組件之作用

矩陣中 (列:行)	說明
6:1	初級生產者影響地質圈之作用 a) Bio09 入侵。

矩陣中 (列：行)	說明
6：2	初級生產者影響表土層之作用 a) Bio01 生物擾動，b) Bio32 對流，c) Bio03 死亡，d) Bio45 光相關作用，e) Bio26 反應。
6：3	初級生產者影響表土層水之作用 a) Bio32 對流，b) Bio05 排泄，c) Bio45 光相關作用，d) Bio26 反應，e) Bio27 吸附/脫附，f) Bio15 攝食。
6：4	初級生產者影響地表水之作用 a) Bio31 加速度，b) Bio32 對流，c) Bio33 覆蓋，d) Bio03 死亡，e) Bio05 排泄，f) Bio37 截獲，g) Bio45 光相關作用，h) Bio26 反應，i) Bio12 顆粒釋放/捕集，j) Bio27 吸附/脫附，k) Bio15 攝食。
6：5	初級生產者影響氣體及當地大氣之作用 a) Bio31 加速度，b) Bio33 覆蓋，c) Bio05 排泄，d) Bio45 光相關作用，e) Bio26 反應，f) Bio12 顆粒釋放/捕集，g) Bio27 吸附/脫附，h) Bio15 攝食。
6：6	初級生產者是一個對角線元素，已在 2.1 生物圈組件中進一步描述。內部受到幾何、材料組成、演替階段、溫度、水分和放射性核種總量等特徵所影響。受以下作用所影響：a) 曝露，b) 生長，c) 棲息地供應，d) 光照相關過程，e) 初級生產，f) 放射性衰變，g) 反應，h) 刺激/抑制。
6：7	初級生產者影響分解者之作用 a) Bio08 棲息地供應，b) Bio14 刺激/抑制。
6：8	初級生產者影響濾食性動物之作用 a) Bio06 食物供應，b) Bio08 棲息地供應，c) Bio14 刺激/抑制。
6：9	初級生產者影響草食動物之作用 a) Bio06 食物供應，b) Bio08 棲息地供應，c) Bio14 刺激/抑制。
6：10	初級生產者影響肉食動物之作用 a) Bio14 刺激/抑制。
6：11	初級生產者影響人類之作用 a) Bio06 食物供應，b) Bio10 材料供應，c) Bio14 刺激/抑制。
6：12	初級生產者影響外部條件之作用 a) Bio35 流出。

7. 分解者對其他物理組件之作用

表 10 分解者對其他物理組件之作用

矩陣中 (列：行)	說明
7:1	分解者影響地質圈之作用 a) Bio09 入侵。
7:2	分解者影響表土層之作用 a) Bio01 生物擾動, b) Bio02 消耗, c) Bio32 對流, d) Bio03 死亡, e) Bio04 分解, f) Bio05 排泄, g) Bio45 光相關作用, 和 h) Bio26 反應。
7:3	分解者影響表土層水之作用 a) Bio32 對流, b) Bio04 分解, c) Bio05 排泄, d) Bio45 光相關作用, e) Bio26 反應, f) Bio27 吸附/脫附, g) Bio15 攝食。
7:4	分解者影響地表水之作用 a) Bio31 加速度 b) Bio02 消耗 c) Bio03 死亡 d) Bio04 分解 e) Bio05 排泄 f) Bio45 光相關作用 g) Bio11 移動 h) Bio12 顆粒釋放/捕集, i) Bio26 反應, j) Bio27 吸附/脫附, 和 k) Bio15 攝食。
7:5	分解者影響氣體與當地大氣之作用 a) Bio05 排泄, b) Bio45 光相關作用, c) Bio12 顆粒釋放/捕集, d) Bio26 反應, e) Bio27 吸附/脫附, 以及 f) Bio15 攝食。
7:6	分解者影響初級生產者之作用 a) Bio14 刺激/抑制。
7:7	分解者是一個對角線元素, 已在 2.1 生物圈組件中進一步描述。分解者受到幾何、材料組成、演替階段、溫度、水分組成和放射性核種總量等特徵所影響。分解者受以下作用影響: a) 曝光, b) 生長, c) 放射性衰變, 和 d) 刺激/抑制。
7:8	分解者影響濾食性動物之作用 a) Bio06 食物供應, 和 b) Bio14 刺激/抑制。
7:9	分解者影響草食動物之作用 a) Bio14 刺激/抑制。
7:10	分解者影響肉食動物之作用 a) Bio06 食物供應, 和 b) Bio14 刺激/抑制。
7:11	分解者影響人類之作用 a) Bio06 食物供應, b) Bio10 材料供應, 和

矩陣中 (列：行)	說明
	c) Bio14 刺激/抑制。
7:12	分解者影響外部條件之作用 a) Bio35 流出。

8. 濾食性動物對其他物理組件之作用

表 11 濾食性動物對其他物理組件之作用

矩陣中 (列：行)	說明
8:1	濾食性動物影響水域生態系統地質圈之作用 a) Bio09 入侵。
8:2	濾食性動物影響水域生態系統表土層之作用 a) Bio01 生物擾動，b) Bio32 對流，c) Bio03 死亡，d) Bio45 光相關作用，e) Bio26 反應，f) Bio27 吸附/脫附。
8:3	濾食性動物影響表土層水之作用 a) Bio32 對流，b) Bio05 排泄，c) Bio45 光相關作用，d) Bio26 反應，e) Bio27 吸附/脫附，以及 f) Bio15 攝食。
8:4	濾食性動物影響水域生態系統地表水之作用 a) Bio31 加速度，b) Bio02 消耗 c) Bio03 死亡，d) Bio05 排泄 e) Bio45 光相關作用 f) Bio11 移動 g) Bio12 顆粒釋放/捕集，h) Bio26 反應，i) Bio27 吸附/脫附，和 j) Bio15 攝食。
8:5	濾食性動物影響水域生態系統氣體及當地大氣之作用 a) Bio05 排泄，b) Bio15 攝食。
8:6	濾食性動物影響水域生態系統初級生產者之作用 a) Bio02 消耗，b) Bio08 棲息地供應，以及 c) Bio14 刺激/抑制。
8:7	濾食性動物影響水域生態系統分解者之作用 a) Bio02 消耗，b) Bio08 棲息地供應，以及 c) Bio14 刺激/抑制。
8:8	濾食性動物是一個對角線元素，已在 2.1 生物圈組件中進一步描述。內部受到幾何、材料組成、演替階段、溫度、水分和放射性核種總量特徵所影響。受以下作用所影響：a) 消耗，b) 曝露，c) 食物供應，d) 生長，e) 放射性衰變，f) 刺激/抑制。
8:9	濾食性動物影響水域生態系統草食動物之作用 a) Bio02 消耗，b) Bio14

矩陣中 (列：行)	說明
	刺激/抑制。
8：10	濾食性動物影響水域生態系統肉食動物之作用 a)Bio02 消耗,b)Bio06 食物供應,和 c) Bio14 刺激/抑制。
8：11	濾食性動物影響水域生態系統人類之作用 a)Bio06 食物供應,b)Bio10 材料供應,以及 c) Bio14 刺激/抑制。
8：12	濾食性動物影響水域生態系統外部條件之作用 a) Bio35 流出。

9. 草食動物對其他物理組件之作用

表 12 草食動物對其他物理組件之作用

矩陣中 (列：行)	說明
9：1	草食動物影響地質圈之作用 a) Bio09 入侵。
9：2	草食動物影響表土層之作用 a) Bio01 生物擾動, b) Bio32 對流, c) Bio03 死亡, d) Bio05 排泄, e) Bio45 光相關作用, f) Bio26 反應, g) Bio27 吸附/脫附, h) Bio15 攝食。
9：3	草食動物影響表土層水之作用 a)Bio32 對流, b)Bio05 排泄, c)Bio45 光相關作用, d) Bio26 反應, e) Bio27 吸附/脫附, 以及 f) Bio15 攝食。
9：4	草食動物影響地表水之作用 a)Bio31 加速度, b)Bio03 死亡, c)Bio05 排泄, d) Bio45 光相關作用, e) Bio11 移動, f) Bio12 顆粒釋放/捕集, g) Bio26 反應, h) Bio27 吸附/脫附, 和 i) Bio15 攝食。
9：5	草食動物影響氣體及當地大氣之作用 a) Bio05 排泄, b) Bio45 光相關作用, c) Bio12 顆粒釋放/捕集, d) Bio26 反應, e) Bio27 吸附/脫附, 以及 f) Bio15 攝食。
9：6	草食動物影響初級生產者之作用 a) Bio02 消耗, b) Bio14 刺激/抑制。
9：7	草食動物影響分解者之作用 a) Bio14 刺激/抑制。
9：8	草食動物影響水生生態系統濾食性動物之作用 a)Bio06 食物供應,和 b) Bio14 刺激/抑制。
9：9	草食動物是一個對角線元素, 已在 2.1 生物圈組件中進一步描述。受

矩陣中 (列：行)	說明
	幾何、材料組成、演替階段、溫度、水分和放射性核種總量等特徵所影響。受以下作用影響：a) 曝露，b) 生長，c) 放射性衰變，和 d) 刺激/抑制。
9：10	草食動物影響肉食動物之作用 a) Bio06 食物供應，和 b) Bio14 刺激/抑制。
9：11	草食動物影響人類之作用 a) Bio06 食物供應，b) Bio10 材料供應，和 c) Bio14 刺激/抑制。
9：12	草食動物影響外部條件之作用 a) Bio35 流出。

10. 肉食動物對其他物理組件之作用

表 13 肉食動物對其他物理組件之作用

矩陣中 (列：行)	說明
10：1	肉食動物影響地質圈之作用 a) Bio09 入侵。
10：2	肉食動物影響表土層之作用 a) Bio01 生物擾動，b) Bio32 對流，c) Bio03 死亡，d) Bio05 排泄，e) Bio45 光相關作用，f) Bio26 反應，g) Bio27 吸附/脫附，h) Bio15 攝食。
10：3	肉食動物影響表土層水之作用 a) Bio32 對流，b) Bio05 排泄，c) Bio45 光相關作用，d) Bio26 反應，e) Bio27 吸附/脫附，以及 f) Bio15 攝食。
10：4	肉食動物影響地表水之作用 a) Bio03 死亡，b) Bio05 排泄，c) Bio45 光相關作用，d) Bio11 移動，e) Bio12 顆粒釋放/捕集，f) Bio26 反應，g) Bio27 吸附/脫附，和 h) Bio15 攝食。
10：5	肉食動物影響氣體及當地大氣之作用 a) Bio05 排泄，b) Bio45 光相關作用，c) Bio12 顆粒釋放/捕集，d) Bio26 反應，e) Bio27 吸附/脫附，以及 f) Bio15 攝食。
10：6	肉食動物影響初級生產者之作用 a) Bio14 刺激/抑制。
10：7	肉食動物影響分解者之作用 a) Bio02 消耗，b) Bio14 刺激/抑制。
10：8	肉食動物影響水生生態系統中濾食性動物之作用 a) Bio02 消耗，b)

矩陣中 (列：行)	說明
	Bio06 食物供應，和 c) Bio14 刺激/抑制。
10：9	肉食動物影響草食動物之作用 a) Bio02 消耗，b) Bio14 刺激/抑制。
10：10	肉食動物是一個對角線元素，已在 2.1 生物圈組件中進一步描述。受到幾何、材料組成、演替階段、溫度、水分和放射性核種等特徵所影響。受以下作用所影響：a) 消費，b) 曝露，c) 食物供應，d) 生長，e) 放射性衰變，和 f) Bio14 刺激/抑制。
10：11	肉食動物影響人類之作用 a) Bio02 消耗，b) Bio06 食物供應，c) Bio10 材料供應，d) Bio14 刺激/抑制。
10：12	肉食動物影響外部條件之作用 a) Bio35 流出。

11. 人類對其他物理組件之作用

表 14 人類對其他物理組件之作用

矩陣中 (列：行)	說明
11：1	人類影響地質圈之作用 a) Bio09 入侵，b) Bio17 材料使用。
11：2	人類影響表土層之作用 a) Bio16 人為排放，b) Bio21 壓密，c) Bio02 消耗，d) Bio32 對流，e) Bio03 死亡，f) Bio05 排泄，g) Bio17 材料使用，h) Bio38 搬遷，以及 i) Bio27 吸附/脫附。
11：3	人類影響表土層水之作用 a) Bio16 人為排放，b) Bio32 對流，c) Bio05 排泄，d) Bio15 攝食和 e) Bio19 用水。
11：4	人類影響地表水之作用 a) Bio31 加速度，b) Bio16 人為排放，c) Bio33 覆蓋，d) Bio03 死亡，e) Bio05 排泄，f) Bio11 移動，g) Bio12 顆粒釋放/捕集，h) Bio27 吸附/脫附，i) Bio15 攝食和 j) Bio19 用水。
11：5	人類影響地表水之作用 a) Bio31 加速度，b) Bio16 人為排放，c) Bio32 對流，d) Bio05 排泄，e) Bio45 光相關過程，f) Bio26 反應，g) Bio27 吸附/脫附，h) Bio15 攝食。
11：6	人類影響初級生產者之作用 a) Bio02 消耗，b) Bio17 材料使用，c) Bio18 物種引入/滅絕，d) Bio14 刺激/抑制。
11：7	人類影響分解者之作用 a) Bio02 消耗，b) Bio17 材料使用，c) Bio18

矩陣中 (列：行)	說明
	物種引入/滅絕，d) Bio14 刺激/抑制。
11：8	人類影響水生生態系統中濾食性動物之作用 a) Bio02 消耗，b) Bio17 材料使用，c) Bio18 物種引入/滅絕，d) Bio14 刺激/抑制。
11：9	人類影響草食動物之作用 a) Bio02 消耗，b) Bio17 材料使用，c) Bio18 物種引入/滅絕，d) Bio14 刺激/抑制。
11：10	人類影響肉食動物之作用 a) Bio02 消耗，b) Bio06 食物供應，c) Bio17 材料使用，d) Bio18 物種引入/滅絕，以及 e) Bio14 刺激/抑制。
11：11	人類是一個對角線元素，已在 2.1 生物圈組件中進一步描述。人類在內部受到幾何，材料組成和放射性核種總量的特徵所影響。人類受到以下作用影響：a) 曝露，b) 生長，c) 放射性衰變，和 d) 刺激/抑制。
11：12	人類影響外部條件之作用 a) 流出。

12. 外部條件對其他物理組件之作用

表 15 外部條件對其他物理組件之作用

矩陣中 (列：行)	說明
12：1	外部條件影響地質圈之作用 a) Bio48 岩石地表位置的變化。
12：2	外部條件影響表土層之作用 a) Bio48 岩石表面位置變化，b) Bio36 流入，c) Bio45 光相關作用。
12：3	外部條件影響表土層水之作用 a) Bio36 流入 b) Bio45 光相關作用，c) Bio40 飽和度。
12：4	外部條件影響地表水之作用 a) Bio32 對流，b) Bio36 流入，c) Bio45 光相關作用，d) Bio49 海平面變化。
12：5	外部條件影響氣體與當地大氣之作用 a) Bio36 流入，b) Bio45 光相關作用和 c) Bio26 反應。
12：6	外部條件影響初級生產者之作用 a) Bio36 流入，b) Bio45 光相關作用，c) Bio14 刺激/抑制。
12：7	外部條件影響分解者之作用 a) Bio36 流入和 b) Bio14 刺激/抑制。
12：8	外部條件影響濾食性動物之作用 a) Bio36 流入和 b) Bio14 刺激/抑制。

矩陣中 (列：行)	說明
12：9	外部條件影響草食動物之作用 a) Bio36 流入和 b) Bio14 刺激/抑制。
12：10	外部條件影響肉食動物之作用 a) Bio36 流入和 b) Bio14 刺激/抑制。
12：11	外部條件影響人類之作用 a) Bio36 流入和 b) Bio14 刺激/抑制。
12：12	外部條件是一個對角線元素，已在 2.1 生物圈組件中進一步描述。外部條件位於生物圈矩陣的邊界。應考慮全球氣候變化，社會經濟因素也可能影響示範區域的人類住區的其他因素，這屬於未來人類活動，非 SKB 具體生物圈評估。另還有更為災難性的事件，如隕石影響或人為入侵情境可單獨考慮。為了全面處理這些全球事件，SKB 的 FEP 清單是根據國際 FEP 清單進行檢查的，並由該領域的專家進行審核。

3.研析國際坑道處置技術報告生物圈情節分析與劑量評估審驗技術

3.1. SR-PSU 生物圈情節分析

SR-PSU 提供生物圈評估之情節分析途徑分析和曝露途徑劑量傳輸至受影響最大的人類群體及非人類生物群之劑量評估。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。亦須考慮陸地抬升（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。圖 6 說明人類對某個地區的潛在曝露途徑示意圖。

處置放射性廢棄物需考慮其長期安全性，未來居民的特點和習慣以及污染地區特性，只能基於若干假設（參見 ICRP 1998）。該假設之習慣應該反映所有相關的曝露途徑，且需確定在考慮區域及人體生理方面必須是合理和可持續的要求（ICRP 2006）。藉由識別環境介質無阻礙地和高潛在的核種累積，並且考慮人類的行為因為利用這種受污染的自然資源而導致最大的輻射劑量曝露，概念框架可以做為識別最大曝露的個體的發展應用。安全評估使用交互作用矩陣的系統方法用於識別放射性核種的傳輸和累積，以及人類和非人類生物群的曝露。

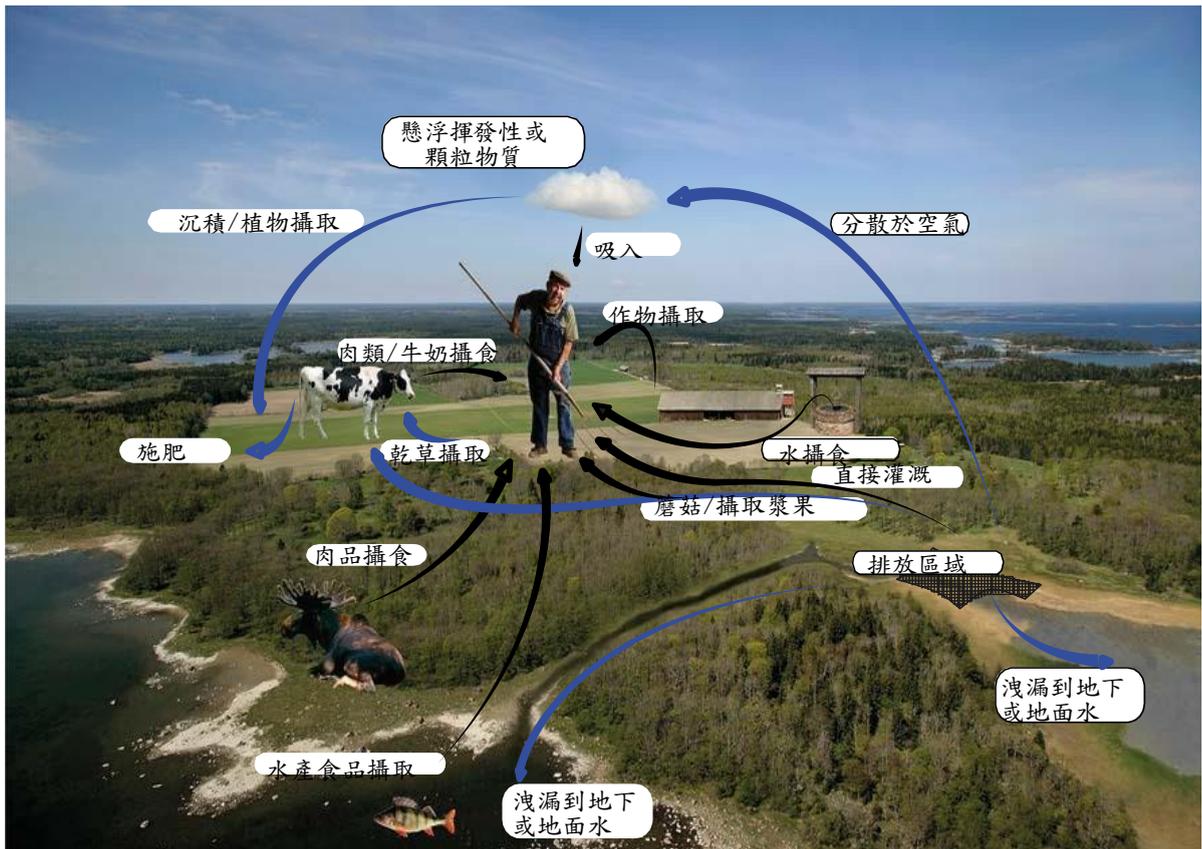


圖 6 生物圈潛在的曝露途徑示意圖

3.1.1. 生物圈情節分析方法

曝露途徑評估的目標是確定可能的位點特異性及曝露情況，並回答下列問題：某個場所的任何人是否會遭受環境污染？這種曝露在什麼條件下？為了分析，方便劃分曝露途徑分為五個要素，如下：

1. 污染源或釋出：來源可能包括廢棄物包裝、廢棄物桶、處置場和許多其他可能將放射性核種釋出到環境中的其他物質。
2. 核種傳輸和宿命：一旦釋放到環境中，放射性核種就會移動通過和跨越不同的介質，也可能會轉變固體狀態和不同的化學形式。
3. 曝露點或區域：這是人類或非人類生物群的具體位置，可能與受污染的介質接觸。
4. 曝露途徑：途徑為人類物理接觸到放射性核種的曝露點（例如經由吸入或攝食）
5. 潛在曝露的人群：即人群可能會或可能已經曝露於輻射。

3.1.2. 潛在曝露點和環境介質區域

識別潛在曝露點或區域以及潛在的污染介質是曝露途徑分析注意的起點，水文地

質模式模擬證明，目前（SFR1）和計畫（SFR3）處置場受污染的地下水很可能會被排放到某些生態系統的次層，即海盆、湖泊和濕地（SKB 2014a）。然後，經由水文循環過程，放射性核種可能被傳輸到地表水和沈積物、泥炭和生態系統的大氣環境，且可經由地表水和地下水流動傳輸到其他地區。此外，人類居民可能會用受污染的植被作為農田的飼料和肥料，用污染的水灌溉花園。為了分析目的，曝露區域的類型分為：

- 陸域環境。子類型包括：沼澤、農地，花園。
- 水域環境。分類：湖、河、溪流和大海。

相關的曝露點可由處置場產生放射性核種污染的不同類型環境介質表示。需要考慮的環境介質，包括大氣、表土層、水和非人類生物群（初級生產者和消費者）。環境介質需進一步的區分環境介質及其相關環境類型，表 16 列出有關陸域環境的環境介質及其相關的環境類型，表 17 則表示有關水生環境的環境介質及其相關的環境類型。

表 16 陸域環境的環境介質及其相關的環境類型

環境介質	環境類型		
	耕地	沼澤	花園地
大氣 - 戶外	X	X	X
大氣 - 室內	X	X	X
表土層 - 土壤	X		X
表土層 - 泥炭土	X	X	X
井水	X		X
主要生產者	X	X	X
消費者	X	X	

表 17 水環境的環境介質及其相關的環境類型

環境介質	環境類型			
	湖	河	溪流	海
大氣 - 戶外	X	X	X	X
地表水	X	X	X	X
表土層 - 沉積物	X	X	X	X
主要生產者	X	X	X	X

3.1.3. 人體曝露途徑分析

建立人體曝露途徑分析，需要選擇有哪些作用會發生輻射曝露。在不同類型的活動中，個體可能曝露於污染環境介質中的放射性核種作用可分為以下幾種：

- 經由呼吸道（吸入）。
- 經由消化道（攝食）。
- 外部輻射曝露。
- 經由皮膚（皮膚吸收）。
- 直接引入身體（經由創傷性或開放傷口異物進入）。

在 Forsmark 地質處置設施的預期劑量評估中，上述五種作用中之前三個作用被認為是相關的，這符合國際建議，例如國際原子能總署指出，與輻射曝露評估相關的主要曝露方式是攝食、吸入和外部輻射曝露；與皮膚和頭髮有關的曝露模式（經過皮膚轉移，對皮膚和毛髮的粘附）被認為是可忽略的（IAEA 2003，SSI 1996）。此外，與經由攝食的環境介質曝露相比，由於放射性核種直接進入身體而導致的曝露風險被認為是可忽略的，例如：飲用水。

有三種相關的接觸方式（攝食、吸入和外部輻射曝露）與環境介質結合在污染物潛在釋放的確定點或區域。組合 Forsmark 的地質處置設施相關的各種環境介質與曝露途徑，即為“曝露途徑情節分析案例”。SR-PSU 提出 29 個陸域環境曝露途徑（如表 18），與 15 個水域環境曝露途徑（如表 19）。此集合包括一些間接曝露途徑情況，其中放射性核種從一種環境介質轉移到另一種環境介質。所有情節相比較後，共有 16 個陸域和 6 個水域情節被認為是有關的，需在安全評估中進一步分析，而前述需要進一步分析以外的其餘情節，被認為是可能性小或是沒有風險。

表 18 陸域生態環境中的曝露途徑情節（以 Ter-1 至 Ter-29 標示）和相關活動

交互作用矩陣給定曝露途徑位置（見 2.4 節生物圈交互作用矩陣）。最後一行給定後續安全評估的建議

環境介質	曝露途徑情節		相關活動	交互作用矩陣	安全評估建議
大氣-戶外	Ter-1	吸入氣體	所有戶外活動	5:11	是
	Ter-2	吸入塵土	所有戶外活動	5:11	是
	Ter-3	外部輻射曝露	所有戶外活動	5:11	否
大氣-室內	Ter-4	吸入氣體	所有戶外活動	5:11	否
	Ter-5	吸入塵土	所有戶外活動	5:11	否
	Ter-6	外部輻射曝露	所有戶外活動	5:11	否

環境介質	曝露途徑情節		相關活動	交互作用矩陣	安全評估建議
表土層-土壤(無機)	Ter-7	故意攝食土壤	攝食	2:11	否
	Ter-8	無意中攝食土壤	攝食，犁，挖，收穫，園藝，玩，聚會，野餐。	2:11	是
	Ter-9	停留在在戶外來自地面的外部輻射曝露	陸域環境存有土壤所有戶外活動	2:11, 3:11	是
	Ter-10	停留在在室內來自地面的外部輻射曝露	所有戶外活動	2:11, 3:11	否
表土層-泥炭土	Ter-11	故意攝食泥炭土	攝食	2:11	否
	Ter-12	無意中攝食泥炭土	攝食，收穫，園藝，玩，聚會，野餐。	2:11	是
	Ter-13	停留在在戶外來自地面的外部輻射曝露	在沼澤中所有戶外活動。	2:11, 3:11	是
	Ter-14	停留在在室內來自地面的外部輻射曝露	所有戶外活動	2:11, 3:11	否
	Ter-15	環境直接汙染 (吸入氣體/ 塵土).	燃燒泥炭	2:11	是
	Ter-16	土壤直接汙染.	用泥炭灰施肥	2:11	是
井水	Ter-17	攝食井水	飲用	1:11, 3:11	是
	Ter-18	來自井水的外部輻射曝露	洗澡和淋浴	1:11, 3:11	否
	Ter-19	作物和土壤間接 ¹ 汙染	攝食用井水灌溉的農作物。	1:11, 3:11	是
	Ter-20	動物飲水間接 ¹ 汙染	攝食已飲用井水的動物肉或其他動物製品 (牛奶，腎臟等)。	1:11, 3:11	是
主要生產者。	Ter-21	攝食作物、漿果和蘑菇	攝食	6:11	是
	Ter-22	來自核種存於植被之戶外外部輻射曝露	環境有植被地方的戶外活動	6:11	是
	Ter-23	來自核種存於植被之室內外部輻射曝露	建築物存有植被地方的室內活動	6:11	否
	Ter-24	來自植被作用建築材料室內之部輻射曝露	木材等植被作為建築材料之建築物的室內活動	6:11	否
	Ter-25	環境間接汙染 (吸入氣體/ 塵土)	燃燒木材和其他植被。	6:11	是
	Ter-26	土壤間接汙染	用來自木材的飼料或灰分的餵養草食動物。	6:11	是
消費者	Ter-27	消費者攝食	攝食	9:11, 10:11	是
	Ter-28	來自動物的戶外外部輻射曝露	與動物接觸 (如畜牧業，騎馬，寵物)	9:11, 10:11	否
	Ter-29	來自動物的室內外部輻射曝露	與動物接觸 (如畜牧業，寵物)	9:11, 10:11	否

表 19 水域生態環境中的曝露途徑情節 (以 Aq-1 至 Aq-15 標示) 和相關活動

交互作用矩陣給定曝露途徑位置 (見 2.4 節生物圈交互作用矩陣)。最後一行給定後續安全評估的建議

環境介質	曝露途徑情節		相關活動	交互作用矩陣	安全評估建議
大氣-戶外	Aq-1	吸入氣體	游泳，划船，釣魚	5:11	否
	Aq-2	吸入氣溶膠	游泳，划船，釣魚	5:11	否
	Aq-3	浸入時的外部輻射曝露	游泳，划船，釣魚	5:11	否
地表水	Aq-4	攝食地表水	飲用	4:11	是
	Aq-5	浸入時的外部輻射曝露	游泳	4:11	否

環境介質	曝露途徑情節		相關活動	交互作用矩陣	安全評估建議
	Aq-6	水面上的外部輻射曝露	划船，釣魚。	4:11	否
	Aq-7	作物和土壤間接污染	攝食用污染地表水灌溉的農作物	4:11	是
	Aq-8	動物飲用污染水的間接污染	攝食已飲用污染地表水的動物肉或其他動物製品（牛奶，腎臟等）。	4:11	是
表土層- 沉積物	Aq-9	來自沉積物的外部輻射曝露	曬日光浴，釣魚，野餐，露營	2:11	是
	Aq-10	故意攝食沉積物	攝食	2:11	否
	Aq-11	無意中攝食沉積物	曬日光浴，釣魚，野餐，露營	2:11	否
初級生產者	Aq-12	攝食食物	攝食	6:11	否
	Aq-13	動物攝食淡水主要生產者的間接污染	攝食已食用污染食物的動物肉或其他動物製品（牛奶，腎臟等）。	6:11	否
	Aq-14	土壤用水域主要生產者進行施肥之間接污染	攝食用污染的水域初級生產者施肥的作用	6:11	是
消費者	Aq-15	攝食受污染消費者。	攝食。	7:11, 8:11, 9:11, 10:11	是

3.2. 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食作用。

3.2.1. SR-PSU 生物圈安全評估計畫對人體之輻射劑量

3.2.1.1. 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棄物體、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) 與食物攝食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食水、攝食食物、外部曝露和吸入等四部分：

$$Dose_{total} = Dose_{ing,water} + Dose_{ing,food} + Dose_{ext} + Dose_{inh} \quad (1)$$

其中：

- $Dose_{ing,water}$: 攝食水途徑的核種劑量[Sv y⁻¹]
- $Dose_{ing,food}$: 攝食食物途徑的核種劑量[Sv y⁻¹]
- $Dose_{ext}$: 外部曝露途徑的核種劑量[Sv y⁻¹]
- $Dose_{inh}$: 吸入途徑的核種劑量[Sv y⁻¹]

攝食水的單一核種劑量取決於用水量[m³ y⁻¹]和所消耗水中核種濃度[Bq m⁻³]，如下式：

$$Dose_{ing,water} = AC_{ing,water} ingRate_{water} doseCoef_{ing,water} \quad (2)$$

其中：

- $AC_{ing,water}$: 飲用水所含核種活度濃度[Bq m⁻³]
- $ingRate_{water}$: 每年飲用水攝食率 [m³ y⁻¹]
- $doseCoef_{ing,water}$: 攝食飲用水中核種的劑量係數[Sv Bq⁻¹]

由於食物攝食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，攝食食物途徑的核種劑量為

$$Dose_{ing,food} = ingRate_c doseCoef_{ing,food} \sum AC_{food,i} f_{cont,food,i}, \quad \sum f_{cont,food,i} \leq 1 \quad (3)$$

其中：

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

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：

$$Dose_{ext} = AC_{ground} dens_{ground} t_{exposure} doseCoef_{ext} \quad (4)$$

其中：

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

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：

$$Dose_{inh} = AC_{air} inhRate t_{exposure} doseCoef_{inh} \quad (5)$$

其中：

- AC_{air} : 空氣中核種活度濃度[Bq m⁻³]
 $inhRate$: 吸入率[m³ h⁻¹]
 $doseCoef_{inh}$: 吸入途徑的核種劑量參數[Sv Bq⁻¹]

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：

$$\begin{aligned} AC_{air}^{RN} &= AC_{ground}^{RN} conc_{Dust} \\ AC_{air}^{14C} &= AC_{atmos,L1}^{14C} + AC_{ground}^{14C} conc_{Dust} \end{aligned} \quad (6)$$

AC_{ground} : 空氣中的活度濃度[Bq m⁻³]
 $conc_{Dust}$: 在空氣中吸入細小土壤顆粒的濃度[kg_{DW} m⁻³]
 $AC_{atmos,L1}^{14C}$: 在空氣中吸入氣態 C-14 活度濃度[Bq m⁻³]
 $doseCoef_{i,agg} = doseCoeff_i \cdot doseinground_{iagri}$ (7)

$doseinground_{iagri}$: 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曝露劑量[Bq Bq⁻¹]

i : 指曝露途徑，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 20 列出攝食、吸入與外部曝露的母核種劑量係數，表 21 列出經由攝食、吸入與外部曝露的短半衰期子核種劑量係數。表 22 列出經由攝食、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，藉由廢棄物體、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 22 核種劑量係數 (Dose coefficient) 與食物攝食率等參數利用方程式(1)-(5)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食水、攝食食物、外部曝露和吸入等四部分輻射劑量。

表 20 經由攝食、吸入與外部曝露的母核種劑量係數

Radionuclide	Half-life	Decay modes ¹	Ingestion Sv Bq ⁻¹	Inhalation Sv Bq ⁻¹	Type	External exposure Sv h ⁻¹ per Bq m ⁻³	Sv h ⁻¹ per Bq m ⁻²
H-3	12.35y	β-	1.8E-11	2.6E-10	S	-	-
C-14	5,730y	β-	5.8E-10	6.2E-12	CO ₂	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⁻¹) for exposure from ingestion (doseCoef_ing) and inhalation (doseCoef_inh) (ICRP 1996). Dose coefficients (Sv h⁻¹ per Bq m⁻³ and Sv h⁻¹ per Bq m⁻²) 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).

¹ 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 21 經由攝食、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 ³	攝食		型式 Type	外部曝露 ²	
			Sv Bq ⁻¹	吸入 Sv Bq ⁻¹		Sv h ⁻¹ per Bq m ⁻³	Sv h ⁻¹ per Bq m ⁻²
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 ¹	2.1E-08 ²	-	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⁻¹) for exposure from ingestion (doseCoef_ing) and inhalation (doseCoef_inh) (ICRP 1996) for short-lived progeny not explicitly modelled. Dose coefficients (Sv h⁻¹ per Bq m⁻³ and Sv h⁻¹ per Bq m⁻²) 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.

¹ (NRC 1999).

² (ICRP 1993) recommended mean value.

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

表 22 經由攝食、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 ⁻¹	吸入 Sv Bq ⁻¹	外在曝露 Sv h ⁻¹ per Bq m ⁻³ Sv h ⁻¹ per Bq m ⁻²	
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 ⁺	3.1E-08	1.6E-07	7.9E-16	4.0E-13
Mo-93	3.1E-09	2.3E-09	8.0E-18	1.4E-14
Nb-93m	1.2E-10	1.8E-09	1.4E-18	2.5E-15
Zr-93	1.1E-09	2.5E-08	—	—
Nb-94	1.7E-09	4.9E-08	1.8E-13	5.4E-12
Tc-99	6.4E-10	1.3E-08	2.1E-18	2.3E-16
Pd-107	3.7E-11	5.9E-10	—	—
Ag-108m ⁺	2.3E-09	3.7E-08	1.7E-13	5.6E-12
Cd-113m	2.3E-08	1.1E-07	1.2E-17	6.4E-15
Sn-126 ⁺	5.1E-09	2.8E-08	2.1E-13	7.1E-12
I-129	1.1E-07	3.6E-08	1.8E-16	7.0E-14
Ba-133	1.5E-09	1.0E-08	3.5E-14	1.3E-12
Cs-135	2.0E-09	8.6E-09	6.2E-19	9.7E-17
Cs-137 ⁺	1.3E-08	3.9E-08	6.2E-14	2.0E-12
Sm-151	9.8E-11	4.0E-09	1.3E-20	1.3E-17
Eu-152	1.4E-09	4.2E-08	1.3E-13	3.9E-12
Ho-166m	2.0E-09	1.2E-07	1.9E-13	5.9E-12
Pb-210 ⁺	6.9E-07	5.6E-06	1.4E-16	1.3E-13
Po-210	1.2E-06	4.3E-06	9.5E-19	2.9E-17
Ra-226 ⁺	2.8E-07	9.5E-06	2.0E-13	6.1E-12
Ac-227 ⁺	1.2E-06	5.5E-04	3.6E-14	1.7E-12
Th-228 ⁺	1.4E-07	4.4E-05	1.9E-13	5.2E-12
Th-229 ⁺	6.1E-07	2.4E-04	2.9E-14	1.2E-12
Th-230	2.1E-07	1.0E-04	2.1E-17	2.3E-15
Pa-231	7.1E-07	1.4E-04	3.4E-15	1.4E-13
U-232	3.3E-07	3.7E-05	1.5E-17	2.9E-15
U-233	5.1E-08	9.6E-06	2.4E-17	2.2E-15
U-234	4.9E-08	9.4E-06	6.6E-18	2.1E-15
U-235 ⁺	4.7E-08	8.5E-06	1.3E-14	5.6E-13
U-236	4.7E-08	8.7E-06	3.4E-18	1.8E-15
Np-237 ⁺	1.1E-07	5.0E-05	1.9E-14	7.6E-13
Pu-238	2.3E-07	1.1E-04	2.2E-18	2.3E-15
U-238 ⁺	4.8E-08	8.0E-06	3.0E-15	4.4E-13
Pu-239	2.5E-07	1.2E-04	5.1E-18	1.0E-15
Pu-240	2.5E-07	1.2E-04	2.2E-18	2.2E-15
Am-241	2.0E-07	9.6E-05	7.2E-16	8.4E-14
Pu-241 ⁺	4.8E-09	2.3E-06	3.3E-19	1.7E-17
Am-242m ⁺	1.9E-07	9.2E-05	1.2E-15	7.5E-14
Pu-242	2.4E-07	1.1E-04	1.9E-18	1.8E-15
Cm-242	1.2E-08	5.9E-06	2.5E-18	2.5E-15
Am-243 ⁺	2.0E-07	9.6E-05	1.6E-14	7.3E-13
Cm-243	1.5E-07	6.9E-05	1.0E-14	4.2E-13
Cm-244	1.2E-07	5.7E-05	1.7E-18	2.3E-15
Cm-245	2.1E-07	9.9E-05	5.9E-15	2.9E-13
Cm-246	2.1E-07	9.8E-05	1.6E-18	2.1E-15

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

⁺ Dose coefficients for exposure from ingestion (doseCoef_ing) and inhalation (dose_coef_inh) (ICRP 1996). Dose coefficients(Sv h⁻¹ per Bq m⁻³ and Sv h⁻¹ per Bq m⁻²) 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

3.2.2.1.2.1. 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曝露， 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 ($\mu\text{Gy/h}$)
- 用於計算由於外部曝露而引起的輻射劑量曝露， 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曝露。在陸域生態系統中，內部和外部曝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。

3.2.2.1.2.2. 計算內部曝露

計算內部曝露以下列方程式表示：

$$DoseRate_{int,j} = w_{low\beta} (DCC_{int,low,\beta,j} + w_{\alpha} DCC_{int,\alpha,j}) AC_j \quad (8)$$

其中：

$w_{low\beta}$ ：內部低能量 β 輻射的加權因子[無單位]

$w_{\beta\gamma}$ ：內部 (高能) β 和 γ 輻射的加權因子[無單位]

w_{α} ：內部 α 輻射的加權因子[無單位]

$DCC_{int,low,\beta,j}$ ：生物體 j 的內部低 β 輻射的劑量轉換係數 [$\mu\text{Gy h}^{-1}$ per Bq kg_{FW}^{-1}]

$DCC_{int,\beta,\gamma,j}$ ：生物體 j 的內部 β 和 γ 輻射的劑量轉換係數 [$\mu\text{Gy h}^{-1}$ per Bq kg_{FW}^{-1}]

$DCC_{int,\alpha,j}$ ：生物體 j 的內部 α 輻射的劑量轉換係數 [$\mu\text{Gy h}^{-1}$ per Bq kg_{FW}^{-1}]

AC_j ：全身生物體中的放射性核種活度濃度 [Bq kg_{FW}^{-1}]

$$AC_j^{RN} = CR_j^{RN} AC_{water}^{D,RN} \quad (9)$$

其中：

CR_j^{RN} ：生物體 j 的放射性核種 x 的濃度比 [$\text{kg}_{\text{DW}} \text{kg}_{\text{FW}}^{-1}$]

$AC_{\text{water}}^{D,RN}$ ：溶解的放射性核種在水中的活度濃度 [Bq m^{-3}]

$$AC_{\text{water}}^D = AC_{\text{regoUp,ter,tot}}^D \quad (10)$$

$$AC_j^{RN} = CR_j^{RN} AC_{\text{regoUp,ter,tot}}^{RN} \quad (11)$$

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 [$\text{Bq kg}_{\text{DW}}^{-1}$]

$$AC_j^{14C} = SA_{\text{water}}^{14C} f_{C,j} = \frac{AC_{\text{water}}^{D,14C}}{\text{conc}_{\text{DIC,aqu}}} f_{C,j} \quad (12)$$

其中：

SA_{water}^{14C} ：溶質相中無機碳在水中的比活性 [Bq kgC^{-1}]

$AC_{\text{water}}^{D,14C}$ ：溶解的無機碳-14 在水中的活度濃度 [Bq m^{-3}]

$\text{conc}_{\text{DIC,aqu}}$ ：溶解的無機碳在水中的濃度 [kgC m^{-3}]

$f_{C,j}$ ：生物體整體碳的分數 j [$\text{kgC kg}_{\text{FW}}^{-1}$]

$$AC_j^{14C} = AC_{\text{pp,ter}}^{14C} f_{C,j} \quad (13)$$

其中：

$AC_{\text{pp,ter}}^{14C}$ ：C-14 在初級初級生產者中的活度濃度 [Bq kgC^{-1}]

$f_{C,j}$ ：全身碳的分數 [$\text{kgC kg}_{\text{FW}}^{-1}$]

$$AC_j^{3H} = \frac{AC_{\text{water}}^{D,3H}}{\text{dens}_{\text{water}}} (1 - f_{\text{DW},j}) \quad (14)$$

其中：

$AC_{\text{water}}^{D,3H}$ ：氚在水中的活度濃度 [Bq m^{-3}]

$\text{dens}_{\text{water}}$ ：水的密度 [kg m^{-3}]（參數值 1000kg m^{-3} ）

$f_{\text{DW},j}$ ：物群全身乾重的分數 [$\text{kg}_{\text{DW}} \text{kg}_{\text{FW}}^{-1}$]

3.2.2.1.2.3. 計算外部曝露

計算外部曝露以下列方程式表示：

$$\text{DoseRate}_{\text{ext},j}^{\text{aqu}} = (0.001 \text{m}^3 \text{l}^{-1}) (w_{\text{low}\beta} \text{DCC}_{\text{ext,low}\beta,j} + w_{\beta\text{r}} \text{DCC}_{\text{ext,\beta\text{r},j}}) AC_{\text{occup},j} \quad (15)$$

其中：

$0.001 \text{m}^3 \text{l}^{-1}$ ：單位變換因子

$w_{low\beta}$: 外部低能 β 輻射的輻射權重因子[無單位]

$w_{\beta r}$: 外部 β 和 γ 輻射的輻射權重因子[無單位]

$DCC_{ext,low\beta,j}$: 生物體 j 的外部低 β 輻射的劑量轉換係數[$\mu\text{Gy h}^{-1}$ per Bq l^{-1}]

$DCC_{ext,\beta r,j}$: 生物體 j 的外部 β 和 γ 輻射的劑量轉換係數[$\mu\text{Gy h}^{-1}$ per Bq l^{-1}]

$AC_{occup,j}$: 生物體 j [Bq m^{-3}] 居住修正的活度濃度[Bq m^{-3}]

$$AC_{occup,j} = \left(v_{water,j} + \frac{v_{wat.surf,j}}{2} + \frac{v_{sed.surf,j}}{2} \right) AC_{water,surf} + \left(\frac{v_{sed.surf,j}}{2} + v_{sed,j} \right) AC_{regoUp,tot,aqu} \quad (16)$$

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^{-3}]

$AC_{regoUp,tot,aqu}$: 表面沉積物中總放射性核種活度濃度[Bq m^{-3}]

$$AC_{regoUp,tot,aqu} = AC_{regoUp,aqu} + AC_{regoUp,org,aqu} \quad (17)$$

其中：

$AC_{regoUp,aqu}$: 表面沉積物中無機形式的活度濃度[$\text{Bq kg}_{\text{DW}}^{-1}$]

$AC_{regoUp,org,aqu}$: 有機物中相應的活度濃度[$\text{Bq kg}_{\text{DW}}^{-1}$]

$$DoseRate_{ext,j}^{ter} = (w_{\beta r} DCC_{ext,\beta r,onsoil,j} v_{onsoil,j} + w_{\beta r} DCC_{ext,\beta r,insoil,j} v_{onsoil,j} + w_{\beta r} DCC_{ext,\beta r,inAir,j} v_{onsoil,j}) AC_{regoUp,tot,ter} \quad (18)$$

其中：

$w_{\beta r}$: 外部 β 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 β 和 γ 輻射的劑量轉換係數[$\mu\text{Gy h}^{-1}$ per $\text{Bq kg}_{\text{DW}}^{-1}$]

$v_{k,j}$: 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[$\text{Bq kg}_{\text{DW}}^{-1}$]

3.2.2.1.2.4. 總劑量率計算

總劑量率計算可由下列方程式表示：

$$DoseRate_{total,j} = DoseRate_{ext,j} + DoseRate_{int,j} \quad (19)$$

$DoseRate_{ext,j}$: 生物體類型 j [$\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$] (方程式 264 或 267) 中的加權外部劑量率 [$\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$]

$DoseRate_{int,j}$: 生物體類型 j [$\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$] (方程式 257) 中的加權內部劑量率 [$\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$]

3.2.2.1.2.5. 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. 研析國際坑道處置生物圈之特徵、事件及作用與模式發展建議

4.1. 特徵、事件及作用對應到 SR-PSU 生物圈建模

SR-PSU 已建立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、事件及作用與模式發展建議，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。

生物圈評估需建構交互作用矩陣(Interaction Matrix,IM)，確認可能影響核種累積及曝露的各種成分及途徑。在生物圈交互作用矩陣中，包括：10 物理組件(及 2 個邊界組件)、6 個變量和 50 個作用歷程，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 (生物圈物體曝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 個作用如表 23 對於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。

表 23 組件、特徵和作用對應到 SR-PSU 生物圈中的不同的建模作業。

組件、變量和作用係按 SKB FEP 數據庫編號 CompBio =生物圈的組件，VarBio =生物圈的變量，Bio =生物圈的作用。 Aqua=水域生態系統，Mire=沼澤生態系統，Agri=農業系統，NHB=非人類生物群，Kd/CR=吸附/脫附值和濃度比。

組件、特徵、作用		核種模式					支持核種模式建模作業						
		傳輸模擬			劑量計算		地景模擬	水文模擬	生態系統特定參數				
		水域 Aqua	沼澤 Mire	農業 Agri	人類	非人類生物群 NHB			水域 Aqua	沼澤 Mire	農業 Agri	Kd/CR	人類 NHB
組件													
CompBio01	地質圈				X		X	X					
CompBio02	表土層	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
CompBio03	表土層水	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
CompBio04	地表水	X	X	X	X	X	X	X	X			X	

組件、特徵、作用		核種模式					支持核種模式建模作業						
		傳輸模擬			劑量計算		地景模擬	水文模擬	生態系統特定參數				
		水域 Aqua	沼澤 Mire	農業 Agri	人類	非人類 生物 群 NHB			水域 Aqua	沼澤 Mire	農業 Agri	Kd/CR	人類 NHB
CompBio05	氣體和當地大氣	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
CompBio06	初級生產者	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
CompBio07	分解者				X						X	X	
CompBio08	濾食性動物				X			X			X	X	
CompBio09	草食動物				X	X		X	X		X	X	
CompBio10	肉食動物				X	X		X	X		X	X	
CompBio11	人類				X			X	X	X		X	
CompBio12	外部條件	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
特徵													
VarBio01	幾何	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	
VarBio02	材料組成	X	X	X			X	X	X	X	X		
VarBio03	放射性核種總量	X	X	X	X	X							
VarBio04	演替階段	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	
VarBio05	溫度	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
VarBio06	水組成成分	X	X	X	X	X		X	X	X	X		
生物作用													
Bio01	生物擾動	X		X				X		X			
Bio02	消耗	X	X		X	X	X	X	X	X		X	
Bio03	死亡	X	X				X	X	X				
Bio04	分解	X	X	X			X	X	X	X			
Bio05	排泄	X	X					X	X	X	X		
Bio06	食物供應				X		X	X	X	X			
Bio07	生長						X			X			
Bio08	棲息地供應				X	X	X	X	X	X		X	
Bio09	侵入			X	X							X	
Bio10	材料供應				X		X	X	X	X		X	
Bio12	顆粒釋放/捕集	X	X					X	X	X			
Bio13	初級生產	X	X				X	X	X	X			
Bio14	刺激/抑制						X	X	X	X			
Bio15	攝食	X	X		X	X		X	X	X	X	X	
與人類行為有關的作用													
Bio16	人為排放			X	X					X		X	
Bio17	材料使用			X	X					X		X	
Bio18	物種引入/消滅				X	X		X		X			
Bio19	用水			X	X							X	
化學、力學和物理作用													
Bio21	壓密			X						X			
Bio22	元素供應						X	X	X	X	X		
Bio24	相變	X	X	X				X	X	X	X		
Bio25	物理性質變化	X	X	X				X	X	X	X		

組件、特徵、作用		核種模式					支持核種模式建模作業						
		傳輸模擬			劑量計算		地景模擬	水文模擬	生態系統特定參數				
		水域 Aqua	沼澤 Mire	農業 Agri	人類	非人類 生物 群 NHB			水域 Aqua	沼澤 Mire	農業 Agri	Kd/CR	人類 NHB
Bio26	反應	X	X	X					X	X	X	X	
Bio27	吸附/脫附	X	X	X	X	X						X	
Bio28	供水				X	X	X	X					X
Bio29	風化								X	X	X	X	
Bio30	風應力						X		X	X	X		
傳輸作用													
Bio31	加速度							X					
Bio32	對流	X	X	X				X	X	X	X		
Bio33	覆蓋	X	X				X	X	X	X			
Bio34	沉積	X	X				X	X	X	X			
Bio35	流出	X	X	X			X	X					
Bio36	流入	X	X	X			X	X					
Bio37	截獲			X				X			X		
Bio38	搬遷			X			X				X		
Bio39	再懸浮	X			X		X		X				
Bio40	飽和度						X	X			X		
輻射和熱作用													
Bio41	放射性衰變	X	X	X	X	X							X
Bio42	曝露				X	X							X
Bio43	熱儲存								X	X			
Bio45	光相關作用								X	X	X		
Bio47	放射性核種釋出	X	X	X									
地景開發作用													
Bio48	岩石表面位置變化						X	X					
Bio49	海平面變化						X	X					
Bio50	閾值						X	X					

4.2. SR-PSU 生物圈建模作業

SR-PSU 進行大規模建模工作，所有建模作業都詳列在評估模式流程圖(AMF;如圖 8) 其中有關生物圈建模作業標記為綠色。以下對於生物圈建模作業進行簡短描述，而完整的描述則見表 24 生物圈建模作業評估模式流程(AMF)說明。

放射性核種傳輸模擬(Radionuclide transport modelling)：

計算放射性核種經由生物圈物體內的環境介質進行遷移，並在環境中隨著時間傳輸和

濃度累積。

劑量計算(Dose calculations)：

利用模擬之放射性核種傳輸濃度，計算核種於人類或非人類生物群之劑量率。劑量計算參數來自於 Forsmark 地表地景輸入參數及劑量轉換參數。

地景模擬(Landscape modelling)：

地面地景係隨著時間而演變，前一次冰期循環以來的海岸線演化以及湖泊生態系統的演替，發現整體地貌地景正在轉向濕地（進一步描述可參閱 SKB 2014a）。地景模擬可提供地景幾何隨時間演變的資訊。

水文模擬(Hydrological modelling)

放射性核種傳輸主要係由水流所帶動。水文模擬提供場址於不同時間點（即地景於海洋、湖泊和陸地階段）水流資訊。

生態系統特定參數(Ecosystem-specific parameters)

生態系統特定的參數包括支持放射性核種傳輸模擬和劑量計算所提供的參數。生態系統特定參數涵蓋生態系統中的化學和生物各種參數以及與人類特徵相關的參數。生態系統特定參數是生態系統內的初級生產和礦化、分配係數和元素濃度比參數（Kd 和 CR）和劑量係數。場址特定資料係來自場址調查，並盡可能使用於描述參數和特定參數值。無法預測未來動態變化的生態系統詳細參數值。相反的，來自該場址點和附近生態系統的數據被作為未來的生態系統天然類比的參數。這是基於假設物種之間的所有相關的相互作用和生物與非生物環境之間包含在這些類比生態系統中。

生物圈建模活動列在表 24 中，並附有相關參考文獻報告可資參考，每個建模作業都詳列在評估模式流程圖（AMF）如圖 8，AMF 概述了所有的模擬流程及評估作業。

表 24 SR-PSU 生物圈建模作業之評估模式流程(AMF)對應項目及參考文獻說明

安全評估 模式建立	說明	參考文獻	評估模式流程之建模作業
核種傳輸 模擬	為模擬核種於生物圈環境介質之濃度的核種傳輸模式	SKB R-13-46	•放射性核種傳輸和劑量

安全評估 模式建立	說明	參考文獻	評估模式流程之建模作業
劑量計算	由放射性核種傳輸模式的濃度應用於對人類和非人類生物群的劑量計算	SKB R-13-46	•放射性核種傳輸和劑量
地景模擬	數值高程模型 (DEM) 描述了當前地景的高程	SKB R-12-03	•地景發展 •生物圈物體識別
	表土層深度模型(RDM) 描述 Forsmark 表土層的地層和深度	SKB TR-13-20	
	從過去和現在 Forsmark 表土層湖泊發展模型 (RLDM) 描述了未來湖泊的表土層深度	SKB R-13-27	
	地景發展模式 (LDM) 識別生物圈物體 (放射性核種可能進入生物圈的區域), 描述生物圈物體的發展, 並為放射性核種傳輸模型提供輸入參數。	SKB TR-14-06	
水文模擬	Forsmark 的現在和未來的水文合成被用於放射性核種傳輸模型的輸入	SKB R-13-19	• 地表水文 • 良好調查
生態特定 參數	Kd and CR 於 SR-PSU 生物圈的傳輸計算。為放射性核種傳輸建模提供輸入參數	SKB R-13-01	• 生物圈 Kd/CR
	生物圈參數用於放射性核種傳輸建模和劑量計算。描述生態系統參數的計算, 如初級生產和礦化, 人類特徵 (食物需求) 和劑量係數	SKB R-13-18	•生態系統參數和劑量係數 • 場址特性定資料 • 輸入參數

4.3. SR-PSU 生物圈組件、特徵與對應之模式發展建議

生物圈有共有 10 個組件代表不同的環境媒介（表土層、表土層水、地表水、氣體和當地大氣）和生物群體（初級生產者、分解者、濾食性動物、草食動物、肉食動物、人類），另外還有 2 個邊界組件（地質圈和外部條件）。生物圈特徵是影響生物圈組件之特性、功能、條件或屬性，或影響兩個組件之間的交互作用的速率或方向。生物圈 6 個重要特徵：幾何、材料組成、放射性核種總量、演替階段、溫度和水組成。生物圈 45 個作用

前述 10 個組件及 6 個重要特徵對應之模式發展建議，包括：放射性核種傳輸模擬、劑量計算、地景模擬、水文模擬、生態系統特定參數，分述如下：

4.3.1. 生物圈組件與對應之模式發展建模作業

4.3.1.1. 表土層

1. 來源對應：SKB R-13-43 4.1 節；SKB FEP 資料庫編號: CompBio02。

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：在放射性核種傳輸中每層表土層由（一個或多個）區塊代表。

最頂層的區塊由沉積物在水域生態系統和泥炭在陸地生態系統中所組成。含氧頂部表土層分為兩個區塊：一個是放射性核種吸附在固體上或溶解孔隙水（表土層水，見下一節），一個是有機物中的放射性核種。底層沉積物或泥炭是冰期沉積物的一個組成部分，分為兩個區塊：一個是放射性核種吸附在固體上/溶解在孔隙水中，一個是有機物質中的放射性核種。後期冰層下面較古老的沉積物主要包括冰磧物和冰川粘土，且分屬兩個不同的區塊。

(2) 劑量計算：地面的外部曝露包括在人類劑量計算中。上層表土層（頂層表土層成分）

也被認為是非人類生物群落的棲息地，因此，分析上層表土層放射性核種的濃度有助於棲息生活在上層表土層上面或其裡面生物體之劑量率計算。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：表土層深度模式描述目前 Forsmark 地區之表土層類型和深度。地景發展模式模擬未來 Forsmark 地貌地景表土層分布，分為冰川粘土、湖泊後期冰川粘土和極地起源和泥炭。

(2) 水文模擬：表土層土壤包含在水文模式模擬區域內。

- (3) 生態系統特定參數：不同的表土層特性定義為不同的區間，例如孔隙率、密度、水飽和度和礦化率，還有現場觀測生物擾動深度用於定義上層表土層。固體/液體分配係數(Kd)用於建立放射性核種於表土層土壤中的吸附模型。

4.3.1.2. 表土層水

1. 來源對應：SKB R-13-43 4.2 節；SKB FEP 資料庫編號: CompBio03。

2. 放射性核種模式：

- (1) 放射性核種傳輸模擬：放射性核種的傳輸是由表土層土壤水流所帶動。在表土層內的放射性核種部分被表土層固體部分吸附，或溶解在表土層水中。利用固體/液體分配係數 (Kd) 來模擬核種溶解和吸附之間的分佈。抽水井（即從表土層中抽水）亦包含在放射性核種傳輸模式中，井水用途為灌溉田園使用。
- (2) 劑量計算：從井水包括在劑量計算中，劑量來自作為人類吃的牲畜動物食品，該牲畜先食用井水和人類直接飲用井水。上層表土層（包括表土層水）也被認為是非人生物群的棲息地並存有放射性核種的濃度，因此對於棲息於表土層土壤的生物體造成劑量率。

3. 支持核種模式建模作業

- (1) 地景模擬：濕地指標識別作業考慮表土層水用於劃定濕地地區生物圈物體之地表地景。
- (2) 水文模擬：於表土層區塊之飽和區和未飽和區利用水文模擬水流。介於不同表土層區塊之間水流速度參數，用於放射性核種傳輸模式內。
- (3) 生態系統特定參數：固體/液體分佈係數 (Kd) 用於模擬表土層水中放射性核種的溶解濃度。農地是唯一處於飽和/未飽和狀態是生態系統，孔隙水含量參數使用於農地系統。

4.3.1.3. 地表水

1. 來源對應：SKB R-13-43 4.3 節；SKB FEP 資料庫編號: CompBio04

2. 放射性核種模式：

- (1) 放射性核種傳輸模擬：海洋盆地、湖泊和河流中的放射性核種模型都包括地表水的環境傳輸媒介。地表水包括水中的溶解元素和化合物以及顆粒物質。並假設平

衡條件下之分配係數 (Kd) 表示一個區塊內液相和固相放射性核種之分佈。另考慮到耐火性有機顆粒物中所含放射性核種可能不一定與地表水達到液相和固相濃度平衡狀態，所以以一個區塊代表放射性核種 (包括 C-14) 儲存在有機物中。

(2) 劑量計算：地表水被人類和牲畜所攝取，並造成人體的輻射劑量。地表水也是非人類生物群的棲息地，因此地表水中放射性核種的濃度對生活在地表水中的生物物種具有輻射劑量率。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：地景發展模式描述了地貌地景之地表水的演變發展。

(2) 水文模擬：本質上，水文模式模擬地表水和地下水所有水流來源及所有不同水流來源之間水文變化。在淹沒狀態佔主要的時期，模擬跨流域的水流水文變化。對於地表地貌已經高於海平面以上的時間段，則主要需要模擬地表水流量 (河流和陸地流量) 模擬。

(3) 生態系統特定參數：放射性核種傳輸模式需要的參數，包括 Forsmark 地表水的特徵、固體/液體分配係數 (Kd 值) 用於評估放射性核種在地表水中固體顆粒物質上的吸附狀態。

4.3.1.4. 氣體和當地大氣

1. 來源對應：SKB R-13-43 4.4 節； SKB FEP 資料庫編號: CompBio05

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：SKB 已經開發完成一個新的大氣概念和數值模型，為 SR-PSU 安全評估的一部分，需要區分不同的大氣層 (見 SKB R-13-46 生物圈核種模式報告)。然而，大氣動力學的速度很快，與大氣層上層的交換幅度比與地表水的交換大很多。因此，為了模式目的，在模擬過程大氣可以被視為生態系統區塊模型的匯 (或源)，以及當地大氣中揮發性放射性核種的濃度是使用穩態解計算。

(2) 劑量計算：曝露在大氣中的氣體包括在對人類劑量及對非人類生物的劑量率。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：不包含。

(2) 水文模擬：當地的大氣蒸發散量是影響當地水平衡的重要因素。

(3) 生態系統特定參數：氣體交換和當地大氣的特性係由生態系統特定參數所決定。

4.3.1.5.初級生產者

1. 來源對應：SKB R-13-43 4.5 節； SKB FEP 資料庫編號: CompBio06
2. 放射性核種模式：
 - (1) 放射性核種傳輸模擬：初級生產者當作模式模擬的區塊。
 - (2) 劑量計算：初級生產者在很多情況下是人類和草食動物最重要的食物來源，因此是劑量計算的重要組成部分，例如在描述由於從乾草從濕地到動物食品的放射性核種轉移，或經由攝食栽培作物而引起的輻射曝露。在非人類生物群劑量評估中亦考慮不同初級生產者造成的劑量率。
3. 支持核種模式建模作業
 - (1) 地景模擬：這個模型描述了淺海灣和湖泊蘆葦和泥炭的演變發展。這種向內生長是由初級生產者的增長和有機物質的累積所造成的。
 - (2) 水文模擬：初級生產者經由諸如根系吸收和蒸散等過程來影響水平衡，這些作用過程都包括在水文模擬建模中。
 - (3) 生態系統特定參數：初級生產者按生物量和淨初級生產量來描述。初級生產者對放射性核種的吸收利用元素濃度比參數（CR）進行模擬。

4.3.1.6.分解者

1. 來源對應：SKB R-13-43 4.6 節； SKB FEP 資料庫編號: CompBio07
2. 放射性核種模式：
 - (1) 放射性核種傳輸模擬：分解者將有機部分中結合的放射性核種分解，並由此作用過程轉移至表土層土壤區塊模式內的無機部分。然而，放射性核種在分解者和其他生物群中的濃度量，與生物圈的其他區塊相比是較小的。因此，雖然考慮了解析過程，但分解者本身並不包括在放射性核種傳輸模型中。
 - (2) 劑量計算：在非人生物群劑量評估模式中計算分解者的劑量率。
3. 支持核種模式建模作業
 - (1) 地景模擬：不包含。
 - (2) 水文模擬：不包含。
 - (3) 生態系統特定參數：利用分解者的元素濃度比參數（CR）之活性濃度以進行非人

類生物群劑量評估。在劑量計算中需包括分解者的特徵（如尺寸和形狀）。

4.3.1.7. 濾食性動物

1. 來源對應：SKB R-13-43 4.1 節； SKB FEP 資料庫編號: CompBio03
2. 放射性核種模式：
 - (1) 放射性核種傳輸模擬：放射性核種在濾食性動物和其他生物群中的濃度量，與生物圈的其他區塊相比是較小的。因此，雖然考慮了濾食性動物作用過程，但濾食性動物本身並不包括在放射性核種傳輸模型中。
 - (2) 劑量計算：在非人生物群劑量評估模式中計算濾食性動物的劑量率。
3. 支持核種模式建模作業
 - (1) 地景模擬：不包含。
 - (2) 水文模擬：不包含。
 - (3) 生態系統特定參數：濾食性動物沒有明確包含在人類的傳輸或劑量計算中，但它們是水域生態系統中食物鏈的一部分，可能會影響與顆粒物質濃度和分解有關的參數估計值，這需要使用場址特定參數數據。此外，利用濾食性動物的元素濃度比參數（CR）之活性濃度以進行非人類生物群劑量評估。

4.3.1.8. 草食動物

1. 來源對應：SKB R-13-43 4.8 節； SKB FEP 資料庫編號: CompBio09
2. 放射性核種模式：
 - (1) 放射性核種傳輸模擬：放射性核種在草食動物和其他生物群中的濃度量，與生物圈的其他區塊相比是較小的。因此，雖然考慮了草食動物作用過程，但草食動物本身並不包括在放射性核種傳輸模型中。
 - (2) 劑量計算：草食動物對人類的劑量有影響，因為畜養草食動物、魚類和野味是人類飲食的一部分。草食動物的劑量率也計算在非人類生物群評估中。
3. 支持核種模式建模作業
 - (1) 地景模擬：不包含。
 - (2) 水文模擬：不包含。
 - (3) 生態系統特定參數：草食動物沒有明確包含在人類的傳輸或劑量計算中，但它們

是陸域和水域生態系統中食物鏈的一部分，並可能影響生物量和淨初級生產。利用草食動物的元素濃度比參數（CR）之活性濃度以進行非人類生物群劑量評估。另外，在生物圈物體中草食動物係為人類的食物來源，在人類劑量評估需納入考慮。

4.3.1.9. 肉食動物

1. 來源對應：SKB R-13-43 4.9 節； SKB FEP 資料庫編號: CompBio10

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：放射性核種在肉食動物和其他生物群中的濃度量，與生物圈的其他區塊相比是較小的。因此，雖然考慮了肉食動物作用過程，但肉食動物本身並不包括在放射性核種傳輸模型中。

(2) 劑量計算：肉食動物（例如食魚魚類如鱸魚和梭魚）對人類的劑量有影響，因為是人類食物的一部分。食肉動物的劑量率也計算在非人類生物群評估中。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：不包含。

(2) 水文模擬：不包含。

(3) 生態系統特定參數：肉食動物在陸域和水域生態系統中的存在可能在一定程度上影響不同參數的估算，這可藉由使用場址特定參數以間接含括。預計對於福斯馬克周邊地區的影響不大，該原因係由於較大的肉食動物的數量規模很少，有時甚至可以忽略不計。利用肉食動物的元素濃度比參數（CR）之活性濃度以進行非人類生物群劑量評估。另外，在生物圈物體中肉食動物係為人類的食物來源，在人類劑量評估需納入考慮。

4.3.1.10. 人類

1. 來源對應：SKB R-13-43 4.10 節； SKB FEP 資料庫編號: CompBio11

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：雖然考慮到人為行為作用過程並影響放射性核種傳輸，但人類本身並不包括在放射性核種傳輸模型中。

(2) 劑量計算：計算對人類的輻射劑量，以關鍵群體為代表性。詳細人類曝露途徑分析

可見本報告之第三章。

3. 支持核種模式建模作業

- (1) 地景模擬：不包含。人類可能會影響地景，例如排水和耕種土地。但是，在地景模型作用過程係由人類所造成，但模型內不考慮人類形體構造及數量。
- (2) 水文模擬：不包含。人類可能會影響水文通量，例如阻塞水體或利用水井。然而，在水文模型作用過程係由人類所造成，但水文模型中沒有考慮人類形體構造影響及人類數量。
- (3) 生態系統特定參數：描述居住在受影響地區人類社區的參數被定義。例如，人數、不同食物和水的攝取率，及在污染土地上工作的時間。

4.3.1.11.地質圈

1. 來源對應：SKB R-13-43 4.11.1 節； SKB FEP 資料庫編號: CompBio01

2. 放射性核種模式：

- (1) 放射性核種傳輸模擬：地質圈不包括在生物圈的放射性核種傳輸模型中。
- (2) 劑量計算：地質圈不包括在生物圈的放射性核種模型中。然而，位於地質圈的水井用於生物圈的劑量計算。

3. 支持核種模式建模作業

- (1) 地景模擬：基岩作為模擬區域建模的邊界條件。
- (2) 水文模擬：水文模型包括深達 150 公尺的基岩。
- (3) 生態系統特定參數：不包含。

4.3.1.12.外部條件

1. 來源對應：SKB R-13-43 4.11.2 節； SKB FEP 資料庫編號: CompBio12

2. 放射性核種模式：

- (1) 放射性核種傳輸模擬：外部條件包括在放射性核種傳輸模型中，例如考慮不同氣候情境及不同氣候條件。在 SR-PSU 氣候報告（SKB TR-13-05）中定義用於模擬未來不同的氣候發展影響氣候情境案例，在 SKB TR-14-06 則應用氣候情境案例於生物圈模擬的處理。
- (2) 劑量計算：氣候影響人類的行為，因此也影響劑量計算。

3. 支持核種模式建模作業

- (1) 地景模擬：在地景建模中考慮氣候條件，並針對不同的氣候演變描述替代情境案例發展（參見 SKB TR-14-06 和 SKB R-13-27）。
- (2) 水文模擬：使用不同的氣候條件研究氣候對水文流量的影響。模擬相對於當前溫暖/潮濕的氣候和永久凍土條件。
- (3) 生態系統特定參數：許多使用的參數都和氣候有關。因此，替代參數值用於不同氣候條件下生物圈計算模擬應用。

4.3.2. 生物圈特徵與對應之模式發展建模作業

4.3.2.1. 幾何

1. 來源對應：SKB R-13-43 第 5.1 節; SKB FEP 數據庫：VarBio01。

2. 放射性核種模式：

- (1) 放射性核種傳輸模擬：放射性核種模式中之模擬區域必須確認幾何形狀，包括生物圈系統的生物圈物體、水體和表土層的幾何形狀。另外，在參數化放射性核種輸運模式時需考慮不同生物圈組件的幾何形狀。
- (2) 劑量計算：劑量計算時需考慮幾何形狀，例如，生物圈物體中的人類居民的數量和來自生物圈物體的食物量取決於其幾何大小。包括在劑量評估中的非人類生物群係由形狀、體積和表面積所確定。

3. 支持核種模式建模作業

- (1) 地景模擬：隨時間演變的地貌地景元素的相關幾何形狀係由地景開發模式模擬定義。
- (2) 水文模擬：在 MIKE SHE 水流模擬中，每個時間段的地形、水深、表土分佈和深度都需要被計算出來。
- (3) 生態系統特定參數：生態系統特定的參數被用來定義表土層的厚度、初級生產者的數量和生物量等。生物的大小、形狀和表面積是用於特定的生態系統之非人類生物群的劑量計算。

4.3.2.2. 材料組成

1. 來源對應：SKB R-13-43 第 5.2 節; SKB FEP 數據庫：VarBio02。

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：表土層和水域區塊的化學成分包括在放射性核種傳輸模擬中，例如有機質含量、溶解無機碳濃度和顆粒物質含量。

(2) 劑量計算：不包含。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：根據地景中不同表土層的分佈來確定物理特性的組成。

(2) 水文模擬：在計算流量時，在水文建模中需使用表土層的粒徑大小和孔隙率。

(3) 生態系統特定參數：使用元素特定的固體/液體分配係數（Kd 值）和元素濃度比參數（CR）來計算土壤和顆粒物質的吸附以及生物的攝取。這些參數取決於表土層/水域區塊的化學成分，因此模式模擬應用 Kd 和 CR 值時需要間接使用到材料組成（化學組成物、礦物成分和營養物成分，物理特性如孔隙率、粒徑大小和孔隙水含量等）。表土（硬質土底或軟質土底、養分含量等）的物質組成可能會影響初級生產者的類型和數量。這些被假定為間接包括在放射性核種模式模擬之生物質和食物生產的參數中，因為這些參數是由於這些材料組成影響的現場數據，也包括孔隙率、粒徑大小和孔隙水含量參數。

4.3.2.3. 放射性核種總量

1. 來源對應：SKB R-13-43 第 5.3 節; SKB FEP 數據庫：VarBio03。

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：放射性核種總量包含放射性核種傳輸模型的區塊內。

(2) 劑量計算：計算出的放射性核種總量用於估算對人類的劑量和對非人類生物群的劑量率。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：不包含。

(2) 水文模擬：不包含。

(3) 生態系統特定參數：不包含。

4.3.2.4. 演替階段

1. 來源對應：SKB R-13-43 第 5.4 節; SKB FEP 數據庫：VarBio04。

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：本演替階段之放射性核種模型中係指從水域生態到陸域生態系統過渡過程，並將該地區轉化為農田。

(2) 劑量計算：演替階段會影響人類的土地利用因此會影響有效曝露途徑，也會影響非人類生物群可用的棲息地類型，因此也會影響對非人類生物群的劑量率計算。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：地景開發模式包括海洋盆地、湖泊和沼澤的開發。

(2) 水文模擬：水文模擬進行了三個時間步驟，以涵蓋從海洋經由湖泊演替至陸地的條件，因此包括演替階段。

(3) 生態系統特定參數：演替階段影響海洋生物、湖泊生物或陸地生物是否存在於生物圈物體。此外，它影響生物圈物體的幾何形狀，從而影響生物量、淨初級生產量和生物類型，包括濕地被人類排水後於農業使用狀態。演替階段也影響到該地區人口的數量和特徵。

4.3.2.5. 溫度

1. 來源對應：SKB R-13-43 第 5.5 節; SKB FEP 數據庫：VarBio05。

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：在放射性核種模型中使用氣候情節案例來評估在地貌地景中不同溫度對放射性核種傳輸的影響。

(2) 劑量計算：劑量計算中考慮氣候因素，因為在冰緣條件下農業係假定為不能實施耕種。同樣，目前的生物群亦與氣候因素有關。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：地景發展模式描述的地貌地景比現在氣候更加溫暖和寒冷的氣候條件。

(2) 水文模擬：氣溫數據用於水文模擬。

(3) 生態系統特定參數：溫度包含在氣體交換的計算中。一些特定生態系統參數的替代參數值用於冰緣和擴展的全球暖化條件。

4.3.2.6. 水組成成分

1. 來源對應：SKB R-13-43 第 5.6 節; SKB FEP 數據庫：VarBio06。

2. 放射性核種模式：

- (1) 放射性核種傳輸模擬：水組成成分之濃度包括在放射性核種模型中參數值，應用顆粒物質含量和溶解的無機碳濃度參數值。
- (2) 劑量計算：水組成成分間接包括在人類和非人類生物群的劑量計算中。當水中含有核種時，水是一種曝露途徑。

3. 支持核種模式建模作業

- (1) 地景模擬：不包含。
- (2) 水文模擬：不包含。
- (3) 生態系統特定參數：生態系統特定的參數。水組成成分係根據溶解的無機碳和顆粒物質的濃度作為參數值。也可在計算其他參數，如 pH 和鹽度，以及計算空氣/水交界面的物質質量交換。特定元素的固體/液體分配係數(Kd 值)和濃度比(CR)被用來計算顆粒物質的吸附和水生生物的攝取取決於水隔室的化學成分。因此，水組成成分應用於 Kd 和 CR 值來進行模型參數化。

4.3.3. 生物圈作用與對應之模式發展建模作業

如表 23 所示生物圈作用分為以下幾類：(1)生物作用(2)與人類行為相關的作用(3)化學、力學和物理作用(4)傳輸作用(5)熱和輻射，共有 45 個作用與對應之模式發展建模作業分述如下：

4.3.3.1. 生物擾動

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.1.1 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio01

2. 放射性核種模式：

- (1) 放射性核種傳輸模擬：生物擾動係於放射性核種模式中用於農業生態系統的計算，當沼澤排水和湖泊沉積形成耕地時，來自於上層的表土層核種量，混合於生物活動耕地層內。生物擾動也用於水域生態系統計算放射性核種，由於水域環境底部之上層沉積物發生再懸浮作用，生物擾動使得氧氣前沿滲透進入底層沉積物，導致放射性核種從缺氧土層明顯遷移到上層、生物活動層、沉積層。

(2) 劑量計算：不包含。

3. 支持核種模式建模作業

- (1) 地景模擬：不包含。
- (2) 水文模擬：不包含。
- (3) 生態系統特定參數：定義水域生態系統中上土層的深度為上氧化層，即與生物擾動深度相同。犁耕田地深度定義為農田中的生物擾動區。

4.3.3.2. 消耗

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.1.2 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio02

2. 放射性核種模式：

- (1) 放射性核種傳輸模擬：分解者消耗係在後面所述之分解作用描述，這裡所指的攝食消耗作用並非為放射性核種傳輸模式的一部分，但攝食消耗作用會影響從初級生產者（該作用包括在區塊之內）到表土層的有機物流量。從初級生產者到表土層有機物流量都包括在水域和陸域之放射性核種傳輸模式中，其中非礦化的淨初級生產量（數量與消耗、死亡、分解、排泄和顆粒釋出有關）都沉積在表土層上。
- (2) 劑量計算：在劑量計算中考慮了人類的攝食消耗。從攝食家畜（奶牛）的消耗也納入人類劑量計算，在非人類生物群的劑量計算亦考慮攝食消耗。

3. 支持核種模式建模作業

- (1) 地景模擬：在淺海灣、湖泊地景模擬中需要考慮使用發生消耗作用現場數據資料，該消耗作用會影響生長（初級生產者的生物量受到消耗、死亡和分解的間接影響）。
- (2) 水文模擬：不包含。
- (3) 生態系統特定參數：主要是草食動物的消耗對生態系統特定參數的影響。草食動物的消耗間接包括有機植物在表土層之生物量和淨初級生產量。牛和人類定義為消耗的參數，並作為劑量計算的輸入參數。

4.3.3.3. 死亡

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.1.3 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio03

2. 放射性核種模式：

- (1) 放射性核種傳輸模擬：死亡導致落葉凋落並包括在放射性核種傳輸模式中。從初級生產者到表土層流量包括在水域和陸域放射性核種傳輸模式，其中非礦化淨初級生產（數量與消耗、死亡、分解、排泄和顆粒釋出有關）都沉積在表土層上。

(2) 劑量計算：不包含。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：在淺海灣、湖泊生長（初級生產者的生物量受到消耗、死亡和分解）在景觀開發模式中描述。

(2) 水文模擬：不包含。

(3) 生態系統特定參數：有機體的死亡被認為是有機物從生物到表土層的轉移，其中部分的主要生產者在初始發生消耗和礦化作用之後，在不同環境介質中仍保留部分未分解的有機體。

4.3.3.4. 分解

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.1.4 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio04

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：分解作用在所有生態系統放射性核種傳輸模式從有機物轉成表土層無機部分的風化層（明確地說包括作為礦化率）中被考慮。分解作用影響生物轉成表土層之有機物通量包括在放射性核種傳輸模式中。從初級生產者到表土層的流量包括在水域和陸域放射性核種傳輸模式中，其中非礦化淨初級生產（數量與消耗、死亡、分解、排泄和顆粒釋出有關）都沉積在表土層上。

(2) 劑量計算：不包含。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：泥炭在湖泊增加量係為初級生產者的死亡和分解的函數，有機物分解產生泥炭，當泥炭地排水時將產生沉陷包含在地景模擬中。

(2) 水文模擬：不包含。

(3) 生態系統特定參數：對於不同物理組件（上部表土層、後冰期沉積物 and 水中顆粒物）由分解有機質之礦化率參數使用在核種模式中）。

4.3.3.5. 排泄

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.1.5 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio05

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：在放射性核種傳輸模式中排泄是代表從生物到表土層的通

量，從初級生產者到表土層的流量包括在水域和陸域放射性核種傳輸模式中，其中非礦化淨初級生產（數量與消耗、死亡、分解、排泄和顆粒釋出有關）都沉積在表土層上。

(2) 劑量計算：不包含。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：不包含。

(2) 水文模擬：不包含。

(3) 生態系統特定參數：排泄是在放射性核種模型中從生物區到表土層之有機物的轉移，其中部分主要生產者最初的消耗和礦化作用之後，在不同的環境介質中仍然是未分解的有機物。元素的排泄也可能影響呼吸、以及大氣和水的組成。經使用現地特性資料，排泄作用假設間接地影響水化學參數值，例如，排泄或吸收 CO₂ 影響 pH 值。CR 值取決於攝取、排泄和吸附/脫附，CR 值係由現地特性資料數據所得，以上這些所有作用過程都間接包括在所有生態系統類型中，並作為生態系統特定參數。

4.3.3.6. 食物供應

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.1.6 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio06

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：食品供應不是直接在放射性核種傳輸模式中模擬，但係來自放射性核種傳輸模式模擬結果（例如：食物中的核種濃度可以由環境介質模擬計算得到）並用於劑量計算。

(2) 劑量計算：在劑量計算中考慮從放射性核種傳輸模式模擬之生物圈物體的食物供應，與人類劑量有關的食物供應之四種曝露途徑：狩獵與採集、內部-外地農場、排水及沼澤培育、住家菜園區。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：提供食物供應的生產地，如農田、沼澤和湖泊，都地景模擬中確定。

(2) 水文模擬：不包含。

(3) 生態系統特定參數：利用植物和動物食用的產生量計算來自農田、湖泊和沼澤的食物供應。

4.3.3.7. 生長

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.1.7 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio07
2. 放射性核種模式：
 - (1) 放射性核種傳輸模擬：生長沒有包括在放射性核種傳輸模式中模擬，但是地景模擬及生態系統特定參數計算生長狀態和參數定義。
 - (2) 劑量計算：不包含。
3. 支持核種模式建模作業
 - (1) 地景模擬：蘆葦叢生長是湖泊和淺海灣陸域化的第一步並在地景模式中進行模擬。
 - (2) 水文模擬：不包含。
 - (3) 生態系統特定參數：在生物群中生物群的生長可能會稀釋放射性核種的濃度。對於大多數計算情況，假定生物量處於穩定狀態，但是，需要參數化灌溉影響及主要生產者生長過程之元素（營養素）截取損失量。

4.3.3.8. 棲息地供應

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.1.8 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio08
2. 放射性核種模式：
 - (1) 放射性核種傳輸模擬：棲息地供應沒有包括在放射性核種傳輸模式中模擬，但是地景模擬及生態系統特定參數計算棲息地供應和參數定義。
 - (2) 劑量計算：對於非人類生物的劑量計算，需要考慮生物的棲息地。對於人類的劑量計算，棲息地係定義為人類行為和曝露途徑。
3. 支持核種模式建模作業
 - (1) 地景模擬：在地景發展過程中棲息地由地景模擬得到。
 - (2) 水文模擬：不包含。
 - (3) 生態系統特定參數：生物圈物體內可用棲息地已納入水域生物量和生產參數計算，並於放射性核種模式使用（例如：考慮陽光照射區的面積和深度）。在沼澤和農業生態系統中的棲息地並沒有區別，但是這些生態系統之生物量被認為是同質且與生態系統的面積成比例。計算非人類生物劑量率，係利用生物體在不同棲息地中所佔的數量作為參數。

4.3.3.9. 侵入

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.1.9 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio09
2. 放射性核種模式：
 - (1) 放射性核種傳輸模擬：將井鑽入處置場或處置場下游區，可能導致核種釋出造成放射性核種濃度升高。已被列為放射性核種傳輸情節分析案例（BCC5，參見 SKB TR-14-06 第 7.4.5 節），井水作為飲用和灌溉住家菜園區。未來侵入行為將進一步在人類入侵報告分析（參見 SKB -14-08）。
 - (2) 劑量計算：劑量計算來自攝取井水和井水作為灌溉用水。
3. 支持核種模式建模作業
 - (1) 地景模擬：不包含。
 - (2) 水文模擬：不包含。
 - (3) 生態系統特定參數：定義井水攝取量和作為灌溉的水量參數以評估侵入井的影響。

4.3.3.10. 材料供應

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.1.10 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio10
2. 放射性核種模式：
 - (1) 放射性核種傳輸模擬：材料供應沒有包括在放射性核種傳輸模式中模擬。
 - (2) 劑量計算：劑量來自使用材料（泥炭/木材、糞肥和海藻）係包括在人類的劑量計算，在生物圈物體中提供泥炭/木材的數量是否足以供應人類的數量需求（由地景模擬參數來完成）。
3. 支持核種模式建模作業
 - (1) 地景模擬：地景模擬確定不同的表土層和水源、適合的林業地區、木材砍伐燃燒成泥炭區、畜牧區。
 - (2) 水文模擬：不包含。
 - (3) 生態系統特定參數：泥炭、木材、糞肥和海藻的數量需要由人類行為決定（見材料使用），但供應量是由生物圈物體的生態系統所定義，與生態系統參數和地景參數有關。另對於農業生態系統所提供動物糞便的數量需要定義為參數。

4.3.3.11. 顆粒釋放/捕集

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.1.12 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio12

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：放射性核種傳輸模式中從生物體到表土層的通量以顆粒釋放來代表。從初級生產者到表土層的流程包括在放射性核種傳輸模式的水域和陸域部分，其中非礦化淨初級生產（數量與消耗、死亡、分解、排泄和顆粒釋放有關）沉積在表土層上。

(2) 劑量計算：不包含。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：不包含。

(2) 水文模擬：不包含。

(3) 生態系統特定參數：從生物體到表土層之有機物轉移過程考慮了生物體的顆粒釋放，其中部分主要生產者最初的消耗和礦化作用之後，在不同的環境介質中仍然是未分解的有機物，所以形成顆粒物。地表水和大氣中的顆粒含量以參數表示在放射性核種傳輸模式中，這個作用隱含地受到生物捕集顆粒和從生物體釋放所影響。在放射性核種模式中有關於顆粒濃度的參數值是基於現場數據，所以顆粒捕集/釋放的影響是間接包含在參數值中。

4.3.3.12. 初級生產

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.1.13 節； SKB FEP 資料庫編號: CompBio13

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：在放射性核種傳輸模式中碳的固定，係為放射性核種傳輸模式水域和陸域部分的植物吸收。淨初級生產也會造成落葉呼吸/釋放和落葉產生。

(2) 劑量計算：不包含。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：地景模式模擬湖泊中的泥炭向內生長是初級生產、死亡和分解的函數。

(2) 水文模擬：不包含。

(3) 生態系統特定參數：參數化陸域和水域生態系統之初級生產，使用於放射性核種傳輸模式中。另外，主要生產可用於計算來自水域、陸域和農業系統的可食用食物的數量。

4.3.3.13. 刺激/抑制

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.1.14 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio14

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：生物群落被視為處於平衡狀態隱含地考慮了刺激和抑制。

因此，刺激/抑制需要在不同分析模式詳細的表示，而未列入放射性核種傳輸模式。

(2) 劑量計算：不包含。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：在地景模擬中考慮了刺激/抑制，藉由使用現地數據隱含地已經考慮了刺激/抑制作用，因此這個作用係間接包括在地景模擬內。例如：向內生長受到需要更深的深度所抑制，沉積受到深度所影響，表土層的養分與土壤深度有關，而且太淺的表土可能會抑制人類利用農業用地。

(2) 水文模擬：不包含。

(3) 生態系統特定參數：刺激/抑制作用係間接含括在現地使用的數據參數內。

4.3.3.14. 攝取

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.1.15 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio15

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：在水域生態系統中植物從周圍的水份攝取溶解的放射性核種。在沼澤生態系統中植物從上部土壤層（根攝取）和樹冠層大氣（經由樹葉）攝取放射性核種。大氣乾沉降隱含在根系攝取放射性核種之濃度比參數 CR 經驗值（見下文）。

(2) 劑量計算：劑量包括農作物和家畜攝取核種及人類直接攝食核種。在非人類生物的劑量計算中也考慮生物攝取溶解的放射性核種。

3. 支持核種模式建模作業

(4) 地景模擬：不包含。

(5) 水文模擬：不包含。

(6) 生態系統特定參數：非人類生物對放射性核種的攝取，係由多個作用影響的濃度比參數 CR 值模擬得到，放射性核種之濃度比參數 CR 值間接含括在現地數據內，

人類需水量是劑量計算的輸入參數。另外，攝取化學物質是重要影響因子，例如：
攝取二氧化碳影響 pH 值。

4.3.3.15. 人為排放

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.2.1 節； SKB FEP 資料庫編號: CompBio16

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：在農業生態系統放射性核種的釋出係由於施肥肥料含有已污染的濕地乾草和受污染灌溉水，並已納入放射性核種傳輸模式模擬。前者的施肥是屬於內部-外地農業之耕地作物種植和畜牧的自給農業（內部）及作為飼料和有機肥的濕地乾草農業（外地）的曝露途徑，後者是屬於住家菜園區挖掘水井或地表水灌溉的曝露途徑。

(2) 劑量計算：由施肥造成人為排放引起的劑量，泥炭和木材燃燒及灌溉都包含在對人體的劑量計算中。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：不包含。

(2) 水文模擬：不包含。

(3) 生態系統特定參數：參數化含有放射性核種灌溉水及參數化含有放射性核種的糞肥和海藻的施肥，以及泥炭和木材的燃燒被用來評估人為排放。

4.3.3.16. 材料使用

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.2.2 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio17

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：放射性核種傳輸模式模擬有關含有核種糞肥和海藻的施肥情況。

(2) 劑量計算：利用泥炭和木材燃燒已納入劑量計算。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：不包含。

(2) 水文模擬：不包含。

(3) 生態系統特定參數：參數化泥炭和木材燃燒和參數化農業土壤施肥以納入核種模

式建模作業。

4.3.3.17.物種引入/消滅

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.2.3 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio18

2. 放射性核種模式：

- (1) 放射性核種傳輸模擬：生物群落被視為處於平衡狀態，物種引進和（或）滅絕的建模需要長期性具代表性的群落結構，但開放的邊界允許生物從更廣泛的生態範圍進入，即大規模的詳細完整模擬。因此，物種引入或滅絕會需要在不同分析模式詳細的表示，而未列入放射性核種傳輸模式。
- (2) 劑量計算：在劑量計算中考慮物種引入，當沼澤轉化為農地，農作物是屬於被引入到生物圈物體，且也假設引入小龍蝦至人類生態系統，以謹慎完整地考慮來自水域生態系統對於人類所有可能的曝露途徑。對於非人類生物劑量計算，目前 Forsmark 不考慮物種引進和滅絕的作用。

3. 支持核種模式建模作業

- (1) 地景模擬：不包含。
- (2) 水文模擬：不包含。
- (3) 生態系統特定參數：不要低估未來可能的食物來源，所以估計來自該區域其他存在小龍蝦地點，假設小龍蝦可引入至人類生態系統，參數化小龍蝦的生物量和產量作為生態系統特定參數，參數化作物生物量和產量作為農地生態系統特定參數。

4.3.3.18.用水

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.2.4 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio19

2. 放射性核種模式：

- (1) 放射性核種傳輸模擬：灌溉已納入放射性核種模式中作為住家菜園區挖掘水井或地表水用水灌溉的曝露途徑。
- (2) 劑量計算：灌溉的影響被考慮為住家菜園區曝露途徑。

3. 支持核種模式建模作業

- (1) 地景模擬：不包含。
- (2) 水文模擬：不包含。

(3) 生態系統特定參數：參數化社區未來的用水型式和用水率。

4.3.3.19. 壓密

1. 來源對應：SKB R-13-43 4.1 節； SKB FEP 資料庫編號: CompBio03

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：在沼澤排水過程中表土層的壓實已納入放射性核種傳輸模式中。

(2) 劑量計算：不包含。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：不包含。

(2) 水文模擬：不包含。

(3) 生態系統特定參數：農業系統表土層中泥炭的壓實，定義為參數值以作為生態系統特定參數。

4.3.3.20. 元素供應

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.3.3 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio22

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：假設釋出到生物圈的放射性核種的數量相對於天然存在的元素的蘊藏量而言，釋出放射性核種量為小，且沒有對元素（營養素）供應產生影響。物質組成物（元素供應）中的營養素可利用性可能限制初級生產者的生產，從而影響放射性核種向生物群的傳輸。因此，元素供應需要在不同分析模式詳細的表示，而未列入放射性核種傳輸模式。

(2) 劑量計算：不包含。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：地景模式可以鑑定各種有特定性質生態系統的位置，影響著元素（營養素）供應，所以元素供應取決地景模式的模擬結果。

(2) 水文模擬：不包含。

(3) 生態系統特定參數：元素供應對有機體生產力非常重要，經使用現地資料或來自類比地點的資料（例如附近地區的其他湖泊或類似的濕地類型），以預測同一地點

在未來發生的情況，所以元素（營養素）供應狀態間接影響在環境條件下生物量。對於水域生物，在冬季和水域生態系統的最小深度，氧氣供應成為限制條件，對魚類和小龍蝦種群存在數量有所影響，元素供應也影響特定地點的 Kd 和 CR 值，該種群存在數量作為劑量計算的輸入參數。

4.3.3.21. 相變

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.3.5 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio24
2. 放射性核種模式：
 - (1) 放射性核種傳輸模擬：當模擬地表水（包括孔隙水）和大氣之間的氣體交換，在沼澤、農業和水域生態系統中需要考慮相變的影響。
 - (2) 劑量計算：不包含。
3. 支持核種模式建模作業
 - (1) 地景模擬：不包含。
 - (2) 水文模擬：相變在水文模擬作用過程，包括：蒸散和冰覆蓋的作用。
 - (3) 生態系統特定參數：生態系統特定的參數被用來模擬相變的影響。碳可以在溶解相和氣相之間交換，與風場有關的活塞速度(Piston velocity)是用來量化這種氣體交換過程。在湖泊的冰覆蓋期間，從固態冰相變成液態水的過程，相變影響納入在沼澤、農業和水域生態系統計算。

4.3.3.22. 物理性質變化

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.3.6 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio25
2. 放射性核種模式：
 - (1) 放射性核種傳輸模擬：在放射性核種傳輸模式考慮，當沼澤土層已排水並形成耕地時土壤性質（孔隙率和密度）發生變化，與當海洋盆地變成湖泊時沉積物的性質發生變化。
 - (2) 劑量計算：不包含。
3. 支持核種模式建模作業
 - (1) 地景模擬：不包含。
 - (2) 水文模擬：在水文模擬中，不同的表土層有不同的孔隙率。

- (3) 生態系統特定參數：參數化不同的表土層經由排水產生壓實的土層特徵。粘滯度和鹽度的變化包括在生態系統參數。例如，在海洋湖泊階段之間，粘滯度和鹽度的變化會影響與風場有關的活塞速度。

4.3.3.23. 反應

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.3.7 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio26
2. 放射性核種模式：
 - (1) 放射性核種傳輸模擬：放射性核種傳輸模式中，反應導致放射性核種從一種介質轉移到另一種介質。核種在固相和液相的反應由分配係數（Kd）來代表，在生物體及其周圍介質之間的濃度由濃度比參數（CR）來代表。在放射性核種傳輸模式中亦模擬空氣-水交界面上產生二氧化碳平衡濃度的反應。
 - (2) 劑量計算：不包含。
3. 支持核種模式建模作業
 - (1) 地景模擬：不包含。
 - (2) 水文模擬：不包含。
 - (3) 生態系統特定參數：生物圈內有很多反應間接包含在參數化的現地數據中。例如，參數涉及到二氧化碳的平衡。大量的反應用經驗 Kd 和 CR 值來表示。

4.3.3.24. 吸附/脫附

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.3.8 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio27
2. 放射性核種模式：
 - (1) 放射性核種傳輸模擬：放射性核種傳輸模式中，吸附/脫附反應導致放射性核種從一種介質轉移到另一種介質。吸附/脫附作用由分配係數（Kd）來代表。
 - (2) 劑量計算：在人體的劑量計算中考慮吸附/脫附（例如吸附到皮膚），非人類生物群則使用生物體及其周圍介質之間的濃度比參數（CR）來考慮放射性核種吸附。
3. 支持核種模式建模作業
 - (1) 地景模擬：不包含。
 - (2) 水文模擬：不包含。
 - (3) 生態系統特定參數：核種在固相和液相的反應由分配係數（Kd）用於模擬吸附/脫

附。用於模擬生物群吸收的濃度比（CR）也取決於吸附/脫附。Kd 和 CR 值都盡可能基於現場數據，其中吸附/脫附作用已包含在實驗量測。

4.3.3.25. 供水

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.3.9 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio28
2. 放射性核種模式：
 - (1) 放射性核種傳輸模擬：供水沒有包括在放射性核種傳輸模式中模擬，但是劑量計算模擬供水中放射性核種的濃度和利用。
 - (2) 劑量計算：在劑量計算中要考慮實際用水量，在地景模式考慮不同曝露人群（例如一些人群的鑽井取水，但其他人只有使用地表水源）用水型態。
3. 支持核種模式建模作業
 - (1) 地景模擬：地景模擬確認潛在的海灣、湖泊和河流位置並可作為人類的水源，藉由用水型態不同以模擬實際用水量。
 - (2) 水文模擬：使用水文地質性質數據及水文模擬來估算未來地下水和地表水的水量。
 - (3) 生態系統特定參數：對於生態系統不同的曝露變化和地景用水需求，參數化人類用水需求（攝取和用水）。

4.3.3.26. 風化

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.3.10 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio29
2. 放射性核種模式：
 - (1) 放射性核種傳輸模擬：風化作用並未建模，而是模擬風化作用對於經驗參數值的影響，例如 Kd 值。
 - (2) 劑量計算：不包含。
3. 支持核種模式建模作業
 - (1) 地景模擬：不包含。
 - (2) 水文模擬：不包含。
 - (3) 生態系統特定參數：放射性核種從沼澤排水中之滲漏可以是一種風化類型。沼澤和表土層中的溶解無機碳濃度（放射性核種遷移模式作為參數）係為碳酸鈣溶解的結果。風化會影響吸附/脫附過程，這些影響都包含在 Kd 值中。

4.3.3.27.風應力

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.3.11 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio30
2. 放射性核種模式：
 - (1) 放射性核種傳輸模擬：風應力沒有包括在放射性核種傳輸模式中，但是間接使用在地景模擬和生態系統參數。
 - (2) 劑量計算：不包含。
3. 支持核種模式建模作業
 - (1) 地景模擬：地景模擬中，由風應力決定在何處發生冰川和冰後期粘土的堆積。
 - (2) 水文模擬：不包含。
 - (3) 生態系統特定參數：風應力係對於水-空氣交界面上的氣體交換重要因子，其作用係以速度參數納入在放射性核種傳輸模式中進行核種傳輸模擬。

4.3.3.28.加速度

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.4.1 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio31
2. 放射性核種模式：
 - (1) 放射性核種傳輸模擬：加速度沒有包括在放射性核種傳輸模式中模擬，但是間接在水文模擬作用過程使用的參數。
 - (2) 劑量計算：不包含。
3. 支持核種模式建模作業
 - (1) 地景模擬：不包含。
 - (2) 水文模擬：模擬在海洋盆地內加速度影響水柱的混合和停留時間（對流）以及人類和其他生物的生活條件，並藉由不同的測深的速度變化以計算海洋盆地停留時間。
 - (3) 生態系統特定參數：不包含。

4.3.3.29.對流

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.4.2 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio32
2. 放射性核種模式：
 - (1) 放射性核種傳輸模擬：在海盆與下游平流水間的水交換，放射性核種傳輸模擬包括地下水垂向平流、孔隙水擴散和脫氣。對流作用已包含在大氣平衡濃度的表達

式中。揮發性放射性核種也適用於大氣傳輸。

(2) 劑量計算：不包含。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：不包含。

(2) 水文模擬：暴露途徑分析的係起於地下水從處置場釋出污染物到達地表環境。粒子跟踪是用於估計岩石和風化層的地下水中的流動時間。模擬在表土層內地下水水平流傳輸水流。水文模式亦模擬海盆之間的水交換。

(3) 生態系統特定參數：利用水文參數（由水文模式得到）在放射性核種傳輸模式進行模擬建模。然而，在不同的生態系統內空氣-水交界面的氣體交換係使用速度參數化進行模擬。

4.3.3.30. 覆蓋

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.4.3 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio33

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：放射性核種傳輸在湖泊轉換到沼澤環境（向內生長）模擬覆蓋作用造成核種傳輸。模擬考慮冰覆蓋情況下之覆蓋作用影響脫氣和氣體吸收之生態系統參數值。

(2) 劑量計算：不包含。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：地景模擬蘆葦湖的生長擴張。

(2) 水文模擬：水文模式模擬湖泊和海洋灣的冰蓋。

(3) 生態系統特定參數：冰覆蓋物影響水-空氣交界面上的氣體交換。在設定參數值時考慮湖泊和海洋盆地的冰期覆蓋以計算空氣-水交界面的氣體交換。

4.3.3.31. 沉積

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.4.4 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio34

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：放射性核種傳輸於水域生態系統中模擬沉積物沉積作用造成核種傳輸，在沼澤系統中為落葉產生通量。降雨過程則在水文模式中模擬。

(2) 劑量計算：不包含。

3. 支持核種模式建模作業

(4) 地景模擬：地景模擬有機和無機物質沉積在海洋和湖泊底部。

(5) 水文模擬：水文模式模擬降水過程。

(6) 生態系統特定參數：死亡的有機物沒有立即被降解作為沉積物，此過程已參數化在水域和沼澤生態系統中。

4.3.3.32. 流出

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.4.5 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio35

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：放射性核種傳輸模式中之流出作用，係指與水和氣體流動有關的放射性核種流出通量，包括：沉積物流出海洋盆地、水從生物圈物體流出至下游區與土壤水滲漏和脫氣有關的放射性核種通量。濃度很低之稀釋核種經由固相物質帶離或生物群體移動至模擬區域外，可以在放射性核種傳輸模式中忽略。

(2) 劑量計算：不包含。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：地景模擬計算沉積物流出海洋盆地。

(2) 水文模擬：水文模擬生物圈物體的徑流流出。

(3) 生態系統特定參數：不包含。

4.3.3.33. 流入

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.4.6 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio36

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：放射性核種傳輸模式中之流入作用，包括：放射性核種經由地下水流出(釋出)或抽取地下水、海水交換、來自上游地表水和吸收氣體等方式，進入生物圈物體。有關農業生態系統的流入來源係為的人為排放作用。

(2) 劑量計算：不包含。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：地景模擬計算沉積物流入海洋盆地。

(2) 水文模擬：水文模擬計算地表水流經模擬區域邊界變化。

(3) 生態系統特定參數：不包含。

4.3.3.34. 截獲

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.4.7 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio37

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：經由灌溉過程截獲放射性核種的影響包含在住家菜園區蔬菜葉片持留模擬。

(2) 劑量計算：不包含。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：不包含。

(2) 水文模擬：截獲作用是經由水文模式計算的。

(3) 生態系統特定參數：參數在描述由於風、降雨和植物增長的影響，隨著時間的變化蔬菜葉片由灌溉所截獲的核種活性濃度減少，包含在放射性核種模式中。

4.3.3.35. 搬遷

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.4.8 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio38

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：核種伴隨著有機物的搬遷經由施肥過程（糞便肥料和海藻）在內部（耕地自給農業）-外地（作為飼料和有機肥的溼地芻草）農業中是曝露的源項。從地景模式中模擬冰期和後期期沉積物侵蝕的參數值間接包含在放射性核種傳輸模式中。

(2) 劑量計算：不包含。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：地景模式模擬冰期和後期期沉積物侵蝕作用。

(2) 水文模擬：不包含。

(3) 生態系統特定參數：糞便肥料和海藻的施肥參數。

4.3.3.36. 再懸浮

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.4.9 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio39

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：上層沉積物的放射性核種再懸浮作用包含在放射性核種傳輸模式模擬。

(2) 劑量計算：塵土中細顆粒物的再懸浮作用在曝露劑量納入計算。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：再懸浮作用納入沈積物厚度變化的計算。

(2) 水文模擬：不包含。

(3) 生態系統特定參數：定義水域生態系統再重懸率參數使用於放射性核種模式中。

4.3.3.37.飽和度

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.4.10 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio40

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：在放射性核種模式中沒有對飽和度進行模擬，但是由水文模式模擬得到之飽和度作用納入核種傳輸模擬歷程。

(2) 劑量計算：不包含。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：在生物圈物體識別中考慮飽和度。

(2) 水文模擬：水文模式計算表土層的含水飽和度。

(3) 生態系統特定參數：海洋、湖泊和沼澤生態系統內的土層屬於飽和狀態，飽和度之定義係指土壤孔隙中的含水量，該參數使用於放射性核種傳輸模式農業耕地土壤。

4.3.3.38.放射性衰變

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.5.1 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio41

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：放射性核種總量的放射性衰變正比於其盤存量，而衰變所增加子核種與母核種的盤存量成正比。

(2) 劑量計算：子核種半衰期遠小於母核種半衰期並處於永久平衡(secular equilibrium)，短半衰期放射性核種之子核種劑量包含在母核種劑量係數的劑量計算中，以此方式考慮放射性核種衰變鏈之組合效應。對於長半衰期的放射性核種，衰變鏈的子

核種須在劑量計算納入計算處理。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：不包含。

(2) 水文模擬：不包含。

(3) 生態系統特定參數：半衰期用來模擬放射性核種的放射性衰變。

4.3.3.39. 曝露

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.5.2 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio42

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：不包含。

(2) 劑量計算：從放射性核種濃度在食物和環境中計算內部和外部曝露，對人類和非人類生物群都是如此方法。曝露途徑分析已確認利用四種不同土地使用方式及使用已限定的情境，以評估人類最大曝露劑量和非人類生物群的劑量率。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：不包含。

(2) 水文模擬：不包含。

(3) 生態系統特定參數：幾種劑量係數已被參數化，例如：攝食、吸入和非人類生物體吸收。

4.3.3.40. 熱儲存

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.5.3 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio43

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：熱儲存不包含在放射性核種傳輸模式，但是對於特定生態系統參數在各個階段需要考慮水的儲熱能力，如下所述。

(2) 劑量計算：不包含。

3. 支持核種模式建模作業

(4) 地景模擬：不包含。

(5) 水文模擬：不包含。

(6) 生態系統特定參數：在水域和沼澤生態系統中，水的儲熱會影響水體生物的豐度

和類型，即水的儲熱抑制氣溫變化大所造成的影響。在使用生物豐度和類型的現場數據時，儲熱作用是間接包含在放射性核種傳輸模式所使用的生物質參數值中。而溫度是直接包含在放射性核種傳輸模式中每個核種溶解度係數和熱流速度之計算。

4.3.3.41. 光相關作用

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.5.5 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio45
2. 放射性核種模式：
 - (1) 放射性核種傳輸模擬：不包括在內，但所利用的生態系統參數則間接考慮這個作用。
 - (2) 劑量計算：不包含。
3. 支持核種模式建模作業
 - (1) 地景模擬：不包含。
 - (2) 水文模擬：不包含。
 - (3) 生態系統特定參數：在放射性核種傳輸模式使用初級生產者的計算參數，當使用現地資料時，光相關作用需要被考慮（且由此展現在不同生態系統初級生產者之光相關作用條件）。

4.3.3.42. 放射性核種釋出

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.5.7 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio47
2. 放射性核種模式：
 - (1) 放射性核種傳輸模擬：放射性核種從處置場釋出係為源項，並用於放射性核種模式中。另請參閱前述的流入和人為排放。
 - (2) 劑量計算：不包含。
3. 支持核種模式建模作業
 - (1) 地景模擬：不包含。
 - (2) 水文模擬：不包含。
 - (3) 生態系統特定參數：不包含。

4.3.3.43. 岩石表面位置變化

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.6.1 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio48
2. 放射性核種模式：
 - (1) 放射性核種傳輸模擬：計算土地劇變對區域幾何形狀、表土深度和相關作用的影響，以用於幾個與時間有關的地景和水文參數，但該影響作用並沒有在放射性核種傳輸模式進行建模。
 - (2) 劑量計算：不包含。
3. 支持核種模式建模作業
 - (1) 地景模擬：岩石表面位置的變化由地景模式中的海岸線位移來描述。
 - (2) 水文模擬：計算岩石表面高程隨時間的變化以用於水文模擬。
 - (3) 生態系統特定參數：不包含。

4.3.3.44. 海平面變化

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.6.2 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio49
2. 放射性核種模式：
 - (1) 放射性核種傳輸模擬：自然擾動（例如：由於風暴的頻率和大小）引起的海平面變化明確沒有包括在放射性核種傳輸模式中。但是有包括影響海平面變化的地景參數閾值，用來描述湖泊由海洋區隔出來的開始和結束狀態。
 - (2) 劑量計算：不包含。
3. 支持核種模式建模作業
 - (1) 地景模擬：海平面變化由地景模式中的海岸線位移來描述。由地景幾何參數定義海平面模型區域並使用於放射性核種傳輸模式。
 - (2) 水文模擬：計算海平面隨時間的變化以用於水文模擬。
 - (3) 生態系統特定參數：不包含。

4.3.3.45. 閾值

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.6.3 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio50
2. 放射性核種模式：
 - (1) 放射性核種傳輸模擬：閾值並未在放射性核種傳輸中進行模擬，但是係為界定海洋盆地和湖泊位置的地景參數。

(2) 劑量計算：不包含。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：地景模式中定義地景狀態的閾值，閾值對於鑑別海灣和湖泊係為一重要因子。

(2) 水文模擬：計算每個時間段的湖泊閾值（湖泊和海洋之間的設置邊界）以用於水文模擬。

(3) 生態系統特定參數：不包含。

4.3.4. 生物圈核種傳輸之模式發展建議

綜合本章有關生物圈核種傳輸之模式發展建模作業，需先建立生物圈基本假設及核種傳輸建模主題，針對放射性核種傳輸至生物圈模型的之生物圈特徵、事件及作用進行分析，瞭解生物圈的特徵、事件與作用與核種在環境中遷移及累積狀態。所以需要建立交互作用矩陣系統方法，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，確認可能影響核種累積及曝露的各種成分及途徑。生物圈交互作用矩陣中，包括：10 物理組件(及 2 個邊界組件)、6 個特徵變量和篩選出 45 個作用歷程，建議對於生物圈模式發展，應針對前述生物圈的組件、特徵與作用，發展生物圈放射性核種模式，包括：放射性核種傳輸模擬及劑量計算，並發展支持核種模式建模作業之地景模擬（即：對於地面地景隨時間演變，注意冰期循環以來的水域及陸地生態系統的環境演替之地景模擬）、水文模擬（即：評估水文循環過程，模擬水流變化）和生態系統特定參數（即：生態系統內的初級生產和礦化、分配係數和元素濃度比參數（Kd 和 CR）和劑量係數等提供放射性核種傳輸模擬和劑量計算的參數）。

5. 提出我國低放坑道處置生物圈情節分析審查重點或注意事項

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功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 是目前的所規定劑量限值，並應合理抑低。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低放坑道處置生物圈情節分析，提出我國低放坑道處置生物圈情節分析審查重點或注意事項。

5.1. 提出我國低放坑道處置生物圈情節分析審查重點

審查重點一：

對於目前低放坑道處置生物圈情節分析，推測生物圈系統為陸域生活型態，包括人類可能藉由嚥入、吸入及曝露放射性核種之途徑。由於核種劑量評估為各種傳輸途徑的組合，所以生物圈核種傳輸途徑之審查重點，除了考慮湖泊地面水外，需再考慮鑿井飲水或鑿井取水灌溉的情節分析。

審查重點二：

對於目前低放坑道處置，放射性核種會隨著地下水的流動或擴散作用，從處置場內部遷移到處置場外部的地下水含水層，進而接觸生物圈。對於模式模擬過程，母核種衰變成子核種是否有考慮，子核種傳輸模擬及劑量是否有包括，並將子核種納入生物圈劑量評估計算。

審查重點三：

低放坑道處置生物圈情節分析之設計情節，需考慮不同位置關鍵群體的差別，生物圈之傳輸途徑，生物圈群體之取用水源，情節分析過程有無鑿井取水等。

5.2. 提出我國低放坑道處置生物圈情節分析審查注意事項

5.2.1. 生物圈建模作業是否完整進行審查

本計畫分析 SR-PSU 生物圈情節分析方法瞭解，欲進行生物圈情節分析審查需根據建模作業之評估模式流程圖 (AMF;如圖 8)。該生物圈建模作業之情節分析審查需分別針對下列建模作業是否完整進行審查。

1. 放射性核種傳輸模擬：放射性核種在環境介質進行遷移隨著時間傳輸和濃度累積。
2. 劑量計算：利用遠場模擬得到之放射性核種傳輸至生物圈濃度，計算於人類或非人類生物群之劑量。
3. 地景模擬：地面地景係隨著時間而演變，古氣候之演變與地景模擬極為重要，應注意冰期循環以來的水域及陸地生態系統的環境演替。
4. 水文模擬：利用水文模擬評估水文循環，可掌握水流帶動放射性核種傳輸遷移過程。
5. 生態系統特定參數：根據 SR-PSU 生物圈情節分析方法，生態系統內的初級生產和礦化、分配係數和元素濃度比參數 (Kd 和 CR) 和劑量係數，支持放射性核種傳輸模擬和劑量計算所提供的參數。

5.2.2. 生物圈評估建構交互作用矩陣之系統方法是否完整進行審查

本計畫瞭解 SR-PSU 已建立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、事件及作用與模式發展建議，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。由於生物圈的特徵、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。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。所以生物圈評估需建構交互作用矩陣(Interaction Matrix,IM)，確認可能影響核種累積及曝露的各種成分及途徑。依據 SR-PSU 在生物圈作用矩陣中，包括：10 物理組件(及 2 個邊界組件)、6 個變量和 50 個作用歷程。所以生物圈評估建構交互作用矩陣之系統方法是否完整進行審查：

1. 定義物理組件、變量和作用歷程是否完整。
2. 對於坑道處置有關之生物圈組件、生物圈特徵、生物圈作用過程，研析生物圈模型發展假設與曝露途徑情節是否完整。
3. 評估各種曝露途徑核種傳輸至受影響最大的人類群體之輻射劑量之方法是否完整。

5.2.3. 生物圈評估情節分析之曝露途徑是否完整進行審查

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。所以根據前述生物圈條件和環境的保護指導方針原則進行情節分析之曝露途徑審查。

根據本計畫瞭解生物圈輻射劑量曝露途徑評估的目標，是為確定可能的位點特異性及曝露情況，並回答下列問題：某個場所的任何人是否會遭受環境污染？這種曝露在什麼條件下？所以曝露途徑審查可針對下列五個要素進行審查，以利確認是否完整。

- 1.污染源或釋出：來源可能包括廢棄物包裝、廢棄物桶、處置場和許多其他可能將放射性核種釋出到環境中的其他物質。
- 2.核種傳輸和宿命：一旦釋放到環境中，放射性核種就會移動通過和跨越不同的介質，也可能會轉變固體狀態和不同的化學形式。
- 3.曝露點或區域：這是人類或非人類生物群的具體位置，可能與受污染的介質接觸。
- 4.曝露途徑：途徑人類物理接觸到放射性核種的曝露點（例如經由吸入或攝食）
- 5.潛在曝露的人群：即人群可能會或可能已經曝露於輻射。

6. 結論與建議

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 計畫作為 SFR 的擴建的使用執照申請文件。蒐集報告包括以 R13-43 (生物圈中組件間的特徵、作用和交互作用)、R14-02 (SR-PSU 生物圈特徵、事件及作用與模式發展建議) 為主。進行國際坑道處置生物圈之特徵、作用與交互作用研析，國際坑道處置技術報告生物圈情節分析與劑量評估審驗技術研析，國際坑道處置生物圈之特徵、事件及作用(FEPs)研析與模式發展建議，提出我國低放坑道處置生物圈情節分析審查重點或注意事項。本計畫報告完成下列工作：

1. 研析國際坑道處置生物圈之特徵、作用與交互作用

本項工作完成 R13-43 報告研析。針對 SKB 對於坑道處置有關之生物圈組件、生物圈特徵、生物圈作用過程，與生物圈內交互作用過程進行研析，對於生物圈組件物交互作用矩陣 (IM) 背景和歷史、IM 的概念與其發展所採用的方法進行研析，並再對 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，與其他物理特性是不同的(如初級生產者，表土層或地表水)，與研析影響生物圈的發生、速度以及過程(例如幾何形狀、溫度)的特徵(變量)。

2. 研析國際坑道處置技術報告生物圈情節分析與劑量評估審驗技術

本項工作完成 R14-02 報告研析。對於曝露途徑情節分析與劑量評估技術。依據前述 R13-43 這份報告，在生物圈作用矩陣中，定義出 10 物理組件(2 個邊界組件)、6 個變量和 50 個作用歷程，針對 SKB 對於坑道處置有關之生物圈組件、生物圈特徵、生物圈作用過程，研析生物圈模型發展假設與曝露途徑情節，評估各種曝露途徑核種傳輸至受影響最大的人類群體之輻射劑量。

3. 研析國際坑道處置生物圈之特徵、事件及作用(FEPs)與模式發展建議

本項工作完成 R14-02 報告研析。SKB 對於生物圈安全評估提出 50 個作用歷程，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 (生物圈物體曝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)，針對該提出 45 個

特徵、事件及作用 (FEPs) 進行說明。提出生物圈組件、變量和 FEPs 對應到 SR-PSU 生物圈中的不同的建模活動。對於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列表進一步說明。

SR-PSU 所有建模作業都詳列在評估模式流程圖，完成生物圈建模作業描述，包括：放射性核種傳輸模擬、劑量計算、地景模擬、水文模擬、生態系統特定參數。生物圈建模作業都詳列在評估模式流程圖 (AMF) 內。

生物圈有共有 10 個組件代表不同的環境媒介 (表土層、表土層水、地表水、氣體和當地大氣) 和生物群體 (初級生產者、分解者、濾食性動物、草食動物、肉食動物、人類)，另外還有 2 個邊界組件 (地質圈和外部條件)。生物圈 6 個重要特徵：幾何、材料組成、放射性核種總量、演替階段、溫度和水組成。完成該對應之模式發展建議，包括：放射性核種傳輸模擬、劑量計算、地景模擬、水文模擬、生態系統特定參數。

4. 提出我國低放坑道處置生物圈情節分析審查重點或注意事項

本計畫研究人員參與低放射性廢棄物最終處置技術評估報告審查，提出有關生物圈情節分析審查重點。提出我國低放坑道處置生物圈情節分析注意事項，包括：

- (1) 生物圈建模作業是否完整進行審查：本計畫分析 SR-PSU 生物圈情節分析方法瞭解，欲進行生物圈情節分析審查需根據建模作業之評估模式流程圖。該生物圈建模作業之情節分析審查需針對建模作業是否完整進行審查。
- (2) 生物圈評估建構交互作用矩陣之系統方法是否完整進行審查：本計畫瞭解生物圈評估需建構作用矩陣，確認可能影響核種累積及曝露的各種組件及途徑。所以生物圈評估建構交互作用矩陣之系統方法是否完整進行審查：定義物理組件、變量和作用歷程；對於坑道處置有關之生物圈組件、生物圈特徵、生物圈作用過程，研析生物圈模型發展假設與曝露途徑情節；評估各種曝露途徑核種傳輸至受影響最大的人類群體之輻射劑量。
- (3) 生物圈評估情節分析之曝露途徑是否完整進行審查：SSM (2008) 提出生物圈條件和環境的保護指導方針原則 (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；風險分析包括有限選擇的曝露途徑) 進行情節分析之曝露途徑審查。本計畫瞭解生物圈輻射劑量曝露途徑評估的目標，是為確定可能的位點特

異性及曝露情況，並回答下列問題：某個場所的任何人是否會遭受環境污染？這種曝露在什麼條件下？所以曝露途徑審查可針對五個要素（核種污染源或釋出狀態、核種傳輸和宿命、曝露點或區域、曝露途徑、潛在曝露的人群）進行審查，以利確認是否完整。

7.參考文獻

- 台電公司，2010，低放射性廢棄物處置關鍵核種篩選報告（A版），台灣電力公司。
- 行政院原子能委員會放射性物料管理局，「低放射性廢棄物處置輻射劑量評估安全審查模式之研究」研究報告，行政院原子能委員會放射性物料管理局，2013，P297
- 行政院原子能委員會放射性物料管理局，參加美國德州安德魯低放射性廢棄物處置場審照研討會報告，行政院原子能委員會放射性物料管理局，2011，P42
- Altmann, S., 2008. 'Geo'chemical research: A key building block for nuclear waste disposal safety cases, *Journal of Contaminant Hydrology* 102, p174–179.
- Chang, Y.-S., et al., 1998, Evaluation of the Area Factor Used in the RESRAD Code for the Estimation of Airborne Contaminant Concentrations of Finite Area Sources, ANL/EAD/TM-82, Argonne National Laboratory, Argonne, Ill., July.
- Eckerman, K.F., and J.C. Ryman, 1993, External Exposure to Radionuclides in Air, Water, and Soil, Exposure to Dose Coefficients for General Application, Based on the 1987 Federal Radiation Protection Guidance, EPA 402-R-93-076, Federal Guidance Report No. 12, prepared by Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn., for U.S. Environmental Protection Agency, Office of Radiation and Indoor Air, Washington, D.C.
- Eckerman, K.F., et al., 1988, Limiting Values of Radionuclide Intake and Air Concentration and Dose Conversion Factors for Inhalation, Submersion, and Ingestion, EPA-520/1-88-020, Federal Guidance Report No. 11, prepared by Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn., for U.S. Environmental Protection Agency, Office of Radiation Programs, Washington, D.C.
- Eckerman, K.F., et al., 1999, Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure to Radionuclides, EPA-402-R-99-001, Federal Guidance Report No. 13, prepared by Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn., for U.S. Environmental Protection Agency, Office of Radiation Programs, Washington, D.C.
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 2001, "Risk Assessment, Radionuclide Table Slope Factors Download Area," April 16. Available at <http://www.epa.gov/radiation/heat/download.htm>.
- Hull, L.C., Schafer A.L., 2008. Accelerated transport of ⁹⁰Sr following a release of high ionic strength solution in vadose zone sediments, *Journal of Contaminant Hydrology* 97, p135–157.
- ICRP(International Commission on Radiological Protection), 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).