

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

生物圈核種外釋傳輸模擬評估技術
之審查要項研究

計畫編號：102FCMA004

報告編號：102FCMA004-04

執行單位：核能研究所

計畫主持人：周鼎

子項工作負責人：吳禮浩

報告作者：吳禮浩、陳智隆

報告日期：中華民國 102 年 12 月

[本頁空白]

The Study of Review Points of Biosphere Nuclide Migration Analysis Technology

Li-Hao Wu and Chih-Lung Chen

ABSTRACT

This report based on the possible biosphere environment of the radioactive waste repository in Taiwan to perform the biosphere dose assessment. The performed biosphere dose assessment included nuclide migration models within surface soil, groundwater, river water, river sediment, marine salty water, and marine sediment environment. The considered potential exposure groups were farming group, fresh fishing group, and marine fishing group. We applied GoldSim platform software to calculate individual annual dose rate. The results show (A) GoldSim could build up biosphere assessment model reliably and flexibly. The model also considers nuclide decay chain friendly. (B) We develop a linkage technology between GoldSim and Excel spreadsheet, which is benefit for the consistency of the model parameters, reducing manual input errors and improving parameter management. The biosphere assessment model can be constructed on GoldSim platform flexibly. In the future, the biosphere assessment model links with the assessment model of source term, near field, and far field on the GoldSim. The total system performance assessment can be done really, and that will contribute to our radioactive waste final disposal work.

Keywords: Biosphere, Dose Assessment

Institute of Nuclear Energy Research

生物圈核種外釋傳輸模擬評估技術之審查要項研究

吳禮浩、陳智隆

摘 要

本報告依據我國低放射性廢棄物最終處置場址可能的生物圈環境進行劑量評估技術演練，經由演練過程建立生物圈劑量評估技術，並瞭解審查工作進行時應注意的審查要項。劑量評估必須考量表層土壤、地下水、河水、河流沉積物、濱海鹽水和濱海沉積物等可能的核種遷移環境，並探討在這些環境中，耕種、淡水捕魚和濱海捕魚三種主要的可能曝露群體受到的影響。運用 GoldSim 全系統安全評估平台進行劑量計算，結果顯示：(A) GoldSim 可確實且彈性地建構生物圈評估模型，同時考慮模型中核種衰變鍊關係；(B) 本研究建立 GoldSim 與 Excel 表格的連結技術，有助於模型參數使用的一致性，降低人工輸入的失誤並加強參數管理，增益審查工作進行的效能。

運用 GoldSim 彈性建構生物圈評估模型的能力，未來再連結源項、近場與遠場的評估模型於 GoldSim 平台上，將可確實地進行處置場全系統劑量評估計算，有助於我國低放射性廢棄物最終處置工作的進行。

關鍵字：生物圈、劑量評估

核能研究所

目 錄

ABSTRACT	i
摘 要	ii
目 錄	iii
圖 目 錄	v
表 目 錄	vi
1. 前言與目的	1
2. 生物圈評估文獻回顧	2
2.1 IAEA 生物圈研究計畫	2
2.2 美國雅卡山計畫	5
2.3 國際間的其他處置計畫	7
2.4 我國生物圈評估技術發展	7
2.5 小 結	8
3. 分析案例說明	11
3.1 生物圈參考案例說明	11
3.1.1 參數	11
3.1.2 衰變鍊	12
3.2 模型建立	12
3.3 模型驗證	13
4. 分析應用	37
4.1 劑量轉換因子	37
4.2 傳輸情節比較	37
5. 結 論	38
6. 建 議	39
參考文獻	40

附件一：耕種曝露群體的劑量

附件二：不同曝露群體的劑量轉換因子

附件三：耕種群體的不同曝露途徑之劑量轉換因子

附件四：生物圈評估技術要項問與答(Q&A)

圖目錄

圖 3-1 H12 中的生物圈核種遷移概念	14
圖 3-2 H12 中的人員曝露途徑	14
圖 3-3 在 GoldSim 平台上建立分析案例	15
圖 3-4 在[RN_Biosphere_Transport]資料夾中建立核種遷移路徑關聯	15
圖 3-5 在[Intake_Pathway]資料夾中關鍵群體的曝露途徑關聯	16
圖 3-6 耕種曝露群體的劑量比較.....	17
圖 3-7 不同曝露群體的劑量轉換因子比較	18
圖 3-8 耕種群體的不同曝露途徑之劑量轉換因子比較	19

表目錄

表 2-1 雅卡山計畫 SR 階段生物圈評估程式比較表.....	9
表 2-2 ERMYN 與其他模型的比較	10
表 3-1 介質特性參數表.....	20
表 3-2 遷移特性參數表.....	21
表 3-3 劑量轉換係數.....	22
表 3-4 成人對各類食物攝食量.....	23
表 3-5 不同沉積物對各種元素的吸附係數	24
表 3-6 各種元素從土壤傳輸到農作物的濃度轉換因子	25
表 3-7 各類動物產品的各元素轉換因子.....	26
表 3-8 淡水生物的各元素濃度轉換因子.....	28
表 3-9 濱海生物的各元素濃度轉換因子.....	29
表 3-10 成人生活習慣可能接觸核種的相關參數	30
表 3-11 牲畜生活習慣可能接觸核種的相關參數.....	31
表 3-12 農作物特性相關的參數.....	32
表 3-13 農作物的風化速率.....	33
表 3-14 農作物的各元素轉換比.....	34
表 3-15 農作物處理成食物的損失率.....	35
表 3-16 海水水霧強化因子.....	36

1. 前言與目的

本研究係配合放射性物料管理局 102 年度「精進放射性物料安全管制技術發展」委託研究計畫而執行，為其所屬「低放射性廢棄物處置安全審查關鍵議題研究」子項計畫研究項目之一。

放射性核種在生物圈的傳輸路徑通常相當複雜，本研究初步著重於河流/濱海的核種傳輸路徑，作法係參考有關文獻並引用其參數，以 GoldSim 安全評估整合平台進行分析，藉由分析過程與結果驗證河流/濱海核種傳輸路徑評估的正確性。由此技術發展，瞭解生物圈河流/濱海的核種傳輸機制。此外，此技術發展奠基於 GoldSim 平台，可以連結已經發展的近場、遠場評估技術，未來在同一安全評估平台上，可以進行低放處置場全系統安全評估。

研究範疇包含下列三項：

(1)生物圈核種外釋傳輸模擬技術分析：參考日本案例，發展 GoldSim 與 MS Excel 表格的連結技術、區塊沉積物核種傳輸技術等。完成生物圈之河流/濱海核種傳輸情節案例分析。

(2)生物圈核種外釋評估審查要項建立：根據前項分析案例，瞭解情節分析與安全審查需注意要項，據以提供審查單位未來進行安全評估報告審查的參考。

(3)綜合分析前述研析成果與我國現行技術規範，研擬「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則（第 0 版）」安全評估相關章節之精進建議。

本報告研究的具體作法是參考日本 H12 案例，以 GoldSim 平台建立河流/湖泊核種傳輸情節之生物圈評估技術；技術發展內容包括建立 GoldSim 與 excel 表格的連結技術、區塊沉積物核種傳輸技術等，並完成生物圈之河流/濱海核種傳輸情節案例分析；接著根據前項分析案例，瞭解情節分析必要的相關傳輸機制、參數種類和參數數量等要項，同時透過運跑案例之經驗回饋，探討安全審查時需注意的要項，據以提供審查單位未來進行安全評估報告審查的參考。

2. 生物圈評估文獻回顧

2.1 IAEA 生物圈研究計畫

IAEA 對生物圈的研究主要區分成 5 個時期，說明如下

(1) BIOMOVIS (1985 – 1990)

BIOMOVIS (**BI**ospheric **M**odel **V**alidation **S**tudy) 是一個國際合作研究計畫，最初由瑞典輻射管理局(Swedish Radiation Authority)於 1985 年發起，之後由 IAEA 贊助此研究計畫。計畫區分成 BIOMOVIS 和 BIOMOVIS II 兩階段。此計畫主要進行放射性核種與其他微量元素在環境中的轉移，以及生物累積機制量化之模式設計，其中包括：(A) 測試環境評估模型的預測精度；(B) 建議未來的研究重點，用以改善這些預測的準確性；(C) 說明本研究中不同模式預測結果的差異(BIOMOVIS II, 1996)。

(2) VAMP (1988 – 1994)

鑑於車諾比事件(Chernobyl accident)，在 1988 年國際核安全諮詢組(International Nuclear Safety Advisory Group, INSAG)建議 IAEA 成立「陸地、城市與水文環境之放射性核種遷移模型驗證及有關資料彙整(The Validation of Models for the Transfer of Radionuclides in Terrestrial, Urban and Aquatic Environments and the Acquisition of Data for that Purpose)」計畫，該計畫簡稱為 VAMP (**V**alidation of **M**odel **P**redictions)。該計畫主要目的在運用前蘇聯和許多歐洲國家在車諾比事件後之核種活度測量結果，作為放射性核種的環境行為評估模型的可靠性測試，並用以評估所的核燃料循環的放射性影響。

該計畫區分成四個研究小組，包括陸地環境工作小組、城市環境工作小組、水文環境工作小組和多途徑評估工作小組(Multiple Pathways Assessment Working Group)。計畫整體目標為：(A) 運用因車諾比事件造成之核種遷移環境資訊作為評估模型的驗證機制；(B) 基於前述目的，從受影響國家彙整有關資訊；(C) 彙整當時環境模型作成報告，並作為車諾比事件後

改進模型的依據(IAEA, 1995)。

(3) BIOMASS (1996 – 2002)

IAEA 於 1996 年開始 BIOMASS (**BIO**sphere **M**odelling and **ASS**essment) 計畫，此計畫主要著重於發展與增進對放射性核種在環境中遷移的預測能力，該計畫區分成三個研究主題(IAEA, 2003)：

主題 1：放射性廢棄物處置。目標在發展一個標準或參考生物圈的概念，用以進行處置場長期安全評估，為達成此目標，在此主題下籌組 6 個工作小組，包括：關鍵群體和其他曝露群體的界定原則小組(Principles for the Definition of Critical and Other Exposure Groups)、評估模型資料運用原則小組(Principles for the Application of Data to Assessment Models)、考量替代評估範圍小組(Consideration of Alternative Assessment Contexts)、生物圈系統定義與識別小組(Biosphere System Identification and Justification)、生物圈描述小組(Biosphere System Descriptions)以及模式發展小組(Model Development)。

在此主題下提出下列三種參考生物圈案例(Example Reference Biosphere, ERB)：

- ERB 1 – 飲用水井深入受污染的含水層
- ERB 2A – 農業灌溉水井深入受污染的含水層
- ERB 2B – 從受污染的含水層產生之天然補注進入不同的棲息地，包括耕地，牧場，半天然濕地和湖泊等

ERB 1 又區分成兩種情形，ERB 1A：假設地質模型可供推算井內的核種濃度；ERB 1B：假設生物圈模型範圍含括提供飲用井水的近地表含水層。

主題 2：環境外釋。BIOMASS 提供一個有助於增進環境外釋之輻射曝露評估方法與模型信心的國際論壇，此主題下有兩個小組關注於重建人類接受過去外釋於環境的放射性核種產生的輻射劑量，及評估其補救措施效益的議題。

主題 3：生物圈進程。此主題目標在增進生物圈特定部份的核種遷移模

擬能力，此生物圈特定部份與模式建構可能有程度上的差距。此主題下有三個小組分別測試以下模型：環境中氙長期的擴散行為模型、經由水果攝入放射性核種的模型，以及森林生態內的放射性核種遷移和累積模型。

(4) EMRAS I (2003 – 2007)

EMRAS I (Environmental Modelling for Radiation Safety)計畫主要延續 BIOMASS 放射性生態學的(Radioecological)評估與模擬研究計畫，EMRAS I 主要著重於模型預測能力的不確定性，特別是特定環境型態之放射性核種外釋可能造成的結果、具放射性核種殘留的場址復原及對非人類物種的影響(IAEA, 2012)。此計畫區分成三個主題：

主題 1：放射性外釋評估。此主題下有四個小組

- IAEA 第 364 號技術報告(溫帶環境核種遷移預測參數使用手冊) 改版
- 氙和碳-14 遷移至生物群體和人類的模擬
- 車諾比碘-131 外釋之模式驗證與評估
- 河流與河口環境的核種遷移模型驗證

主題 2：具放射性核種殘留的場址復原。此主題下有二個小組

- 天然存在之放射性物質外釋模擬，及採礦污染場址復原效益模擬
- 城市地區受核種擴散性污染的復原評估

主題 3：環境保護。主要進行生物群體劑量評估的模型驗證。

EMRAS I 的主要目標有：

- 透過模型測試、模型比較等方式來增進模型的建構方法
- 在適當的條件下，對於環境模型建構邏輯、假設和參數值，發展國際共識
- 量化環境遷移模型的不確定性
- 發展資料叢集用以測試環境遷移模型
- 發展生物圈核種遷移評估方法
- 提供作為環境評估模型知識和資訊交換的平台

(5) EMRAS II (2009 - 2011)

EMRAS II 延續前述計畫，對於環境模擬的主要目標為(IAEA, 2013)：

- 測試用以評估環境內核種遷移和對人類與環境造成放射性衝擊之模擬模型的性能
- 發展與改進針對特定環境的模擬模型
- 提供作為經驗、想法和研究訊息交流的國際論壇

計畫共區分成三個主題：

主題 1：人員劑量評估參考方法。此主題下有三個工作小組：

- 例行排放之控制排放參考方法
- 對特定場址管理與復原的模擬參考作法
- 廢棄物處置參考模型

主題 2：生物群劑量評估參考作法。此主題下有三個工作小組：

- 生物群模擬
- 野生動物遷移係數手冊
- 生物群劑量效應模擬

主題 3：評估緊急狀況的作法。此主題下有三個工作小組：

- 氙事故
- 環境敏感度
- 城市區域

2.2 美國雅卡山計畫

儘管美國雅卡山(Yucca Mt.)計畫目前被暫停中，但該計畫暫停以前已執行至申請執照階段，故該計畫的執行成果仍值得參考。該計畫在建議場址(Site Recommendation, SR)階段對當時的生物圈評估軟體進行分析，以選擇適用的分析工具，其篩選條件為：

- 1.以環境劑量評估為主要目的並為監管機關可接受
- 2.使用特定條例(如 ICRP-30)指定的方法論

- 3.可考慮雅卡山計畫的全部或大部分重要情節
- 4.可評估長期緩慢的外釋情節
- 5.可進行序率模擬(Stochastic Modelling)的不確定分析
- 6.以食物和飲水型態反應特定群體(Critical Group)的特徵
- 7.以地下水中的放射性核種濃度當作地下水污染情節的源項(Source)
- 8.是已有的電腦軟體

評估的電腦程式有橡樹嶺國家實驗室發展的 AIRDOS-PC(ORNL, 1990)、CAP-88PC(ORNL, 1995)和 RASCAL(ORNL, 1998)，及 RESRAD (Yu et al., 1993)、MEPAS(Buck et al. 1995)、GENII (Napier et al., 1988)和 GENII-S (Leigh et al., 1993)，評估結果列於表 2-1，由該表可知僅 GENII-S 符合所有條件(Schmitt et al., 2000)，故雅卡山計畫在 SR 階段選用 GENII-S 程式，根據雅卡山場址生物圈特性，計算劑量轉換因子(Dose Conversion Factor, DCF)供作全系統安全評估之生物圈劑量評估使用(CRWMS M&O, 1999)。

IAEA 在 2000 年受美國能源部(DOE)委託對雅卡山計畫的生物圈模擬評估計畫進行專家審查(Peer Review)，其發現 GENII 和 GENII-S 有一些缺點(IAEA, 2001)：

- 該程式模擬方式較固定，甚難對具體或尚未發現的需要進行調整，如因土壤侵蝕導致之核種外釋情形或替代處置方式等。
- 該程式一次僅能針對一個核種進行模擬，顯而易見的，該程式無法模擬核種衰變狀況。
- 該程式無法輕易的獲取計算過程中的成果，特別是 GENII-S。如此甚難明白核種在生物圈內的遷移行為，和模式模擬的效果。

因此，DOE 發展 ERMYN (Environmental Radiation Model for Yucca Mountain Nevada)以取代 GENII-S(NRC, 2004)。ERMYN 本質上就是使用 GoldSim 軟體進行生物圈模型的建構。ERMYN 根據雅卡山場址的生物圈特性及考量的情節，在 GoldSim 平台上建構完成後，再與五個其他程式 (GENII/GENII-S/GENII Version 2、BIOMASS ERB2A、EPRI-YM、RESRAD

和 NCRP-129) 依據相同情節建構的模型進行比較。EPRI-YM 是美國電力研究所(Electric Power Research Institute, EPRI)從 1996 年開始發展用以模擬雅卡山場址的地下水外釋情形，主要根據 BIOMASS ERB2A 進行發展(EPRI, 2002)，另外發展火山噴發情節之核種外釋分析模型(EPRI, 2004)。NCRP-129 由美國輻射防護與測量國家委員會(National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP)發展，主要針對土壤污染情節進行分析(NCRP, 1999)。ERMYN 與其他模型的比較結果示於表 2-2 中，ERMYN 僅三個評估路徑情節無法達成優於其他模型，其中空氣曝露情節和浸水曝露情節造成的劑量遠低於土壤曝露情節的劑量，且該地區並不食用內臟，故該三種情節應可予以排除(Rasmuson et al., 2007)。

2.3 國際間的其他處置計畫

高放射性廢棄物處置生物圈安全評估：瑞典 Ecolego、MIKE SHE、PANDORA 和 ERICA；日本 AMBER；西班牙 GIS、UNTAMO、PANDORA 和 EIKOS；芬蘭 UNTAMO、SHYD、PANDORA 和 Ecolego，各國使用在生物圈安全評估的分析軟體各有差異。而 GoldSim 平台的被使用情形，除美國運用建構在 GoldSim 平台上的 ERMYN 進行生物圈分析外；西班牙則運用 GoldSim 進行遠場核種傳輸評估並作為安全評估的整合介面；芬蘭在 2011 年的報告中也運用 GoldSim 作為核種在近場和遠場的安全評估計算。

在低放處置方面，以加拿大中低階放射性廢棄物 DGR(Deep Geologic Repository)最終處置場的安全評估為例，其考量的生物圈情節有：(1) 含有核種的地下水外釋至鄰近的休倫湖之湖水外釋情節；(2) 人類抽取地下水進行農耕、畜牧等的井水情節，其選用 AMBER 作為安全評估分析程式(Quintessa Ltd. et al., 2011)。

2.4 我國生物圈評估技術發展

我國生物圈評估技術主要隨著「我國用過核子燃料最終處置計畫」的研究進程而發展。在「調查實施與技術發展」階段，生物圈輻射劑量評估

主要以 GENII 為主軸，並進行有關的環境參數蒐集(汪子文，2002；龔繼康等，2003)；在「潛在母岩特性調查與評估」階段，引進 AMBER 程式並根據 IAEA BIOMASS 方法，建構 ERB 1A 和 ERB 1B 飲水情節(馬志銘和張經昌，2007)。

2.5 小結

由前述 IAEA 對於 BIOMASS 的參考生物圈案例的描述可知，其區分成三階段(ERB 1, ERB 2A, ERB 2B)或四階段(ERB 1A, ERB 1B, ERB 2A, ERB 2B)乃是提供作為建構生物圈評估時，不同複雜程度的階段區別之用，並非特定分析模式；而 GENII 因無法有效考量核種衰變鍊關係而被 DOE 以 ERMYN 取代；AMBER 為另一套廣泛用在進行生物圈評估的軟體，日本、西班牙、加拿大 DGR 和我國都曾使用過，AMBER 主要以區塊模式(Compartmental Model)模擬核種遷移現象，GoldSim 的區塊模組(Cell Module)也具有相同功能(陳智隆和賴仁杰，2008a)，但 GoldSim 另外具備與 FracMan/PAWorks 直接連結的功能，可進行裂隙網路的主要路徑核種遷移現象模擬(陳智隆和賴仁杰，2008b)。儘管 AMBER 也可以被 GoldSim 平台直接呼叫運跑並成果展示(陳智隆，2007)，但基於生物圈評估所需參數眾多並需要進行機率分析，因此，在 GoldSim 單一平台上進行是較為可行的。

表 2-1 雅卡山計畫 SR 階段生物圈評估程式比較表

程式名稱	程式主要 功能簡介	篩選條件							
		1	2	3	4	5	6	7	8
CAP-88PC	計算長期空氣外釋核種造成的個人與群體最大劑量	○	○		○		○		○
AIRDOS-PC	計算長期空氣外釋核種造成的個人與群體最大劑量	○	○		○				○
RASCAL	計算放射性意外事件造成之劑量	○	○						○
RESRAD	計算特定場址居民受輻射污染劑量	○	○		○		○		○
MEPAS	計算放射性或化學意外事件經空氣和水文傳輸途徑造成之健康風險	○	○	○	○		○	○	○
GENII	計算來自空氣和水文不同傳輸途徑之劑量	○	○	○	○		○	○	○
GENII-S	具序率分析能力的 GENII	○	○	○	○	○	○	○	○

註：○表示符合條件

表 2-2 ERMYN 與其他模型的比較

路徑		ERMYN	GENII	BIOMASS	EPRI-YM	RESRAD	NCRP-129
外部 曝露	受污染的土壤	○	○	○	○	○	○
	空氣曝露	×	○	×	×	×	×
	浸水曝露	×	○	○	×	×	×
吸入 劑量	粉塵	○	○	○	○	○	○
	放射性氣體 (C-14, Rn-222)	○	×	×	×	○	○
	蒸發的水氣	○	×	○	×	×	×
吸入 劑量	土壤	○	○	○	○	○	○
	飲用水	○	○	○	○	○	×
	葉菜植物	○	○	○	○	○	○
	根莖植物	○	○	○	○	○	○
	水果	○	○	×	○	×	○
	穀類	○	○	○	○	×	○
	畜用新鮮飼料	○	○	○	○	○	○
	禽用貯備飼料	○	○	×	○	×	×
吸入 劑量	肉類	○	○	○	○	○	○
	奶類	○	○	○	○	○	○
	內臟	×	×	○	○	×	×
	家禽	○	○	×	○	×	×
	蛋	○	○	×	○	×	×
	魚	○	○	○	○	○	×
總劑量	全部	○	○	○	○	○	○

註：

○ 表示符合條件

× 表示不符合條件

3. 分析案例說明

經濟部於 100 年 3 月 29 日公告「建議候選場址遴選報告」，建議將台東縣達仁鄉及金門縣烏坵鄉列為建議候選場址(經濟部，2011)，其中，台東縣達仁鄉境內多溪流，該地區考量的曝露途徑除地下水的飲用情節外，河流遷移情節可能是另一個需要考量的重要情節。國際間討論此重要情節有充足的參數資料且相關的研究並不多見，日本 H12 是其中之一，該報告生物圈評估假設的參考案例，假設核種外釋於河流，且河流流經人類居住地，在人類居住地因人類飲用河水、利用河水灌溉作物或眷養牲畜，而導致人類接觸核種，造成人員劑量(JNC, 2000)。本研究即參考此案例在 GoldSim 平台上建立生物圈評估模型。

3.1 生物圈參考案例說明

3.1.1 參數

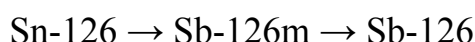
該案例假設核種經由地下含水層直接流入河水，並在河岸表層土壤、土壤內的飽和帶地下水、河水、河流沉積物、濱海鹽水和濱海沉積物之間遷移(見圖 3-1)。關鍵群體接受的劑量來自嚥入(Ingestion)、吸入(Inhalation)和接觸三種不同途徑，並依不同的關鍵群體特性有不同特性的接受劑量途徑，如圖 3-2 所示。案例中使用的參數包括：(1) 介質特性參數(表 3-1)、(2) 遷移特性參數(表 3-2)、(3) 從土壤到作物的劑量轉換係數(表 3-3)、(4) 成人對各類食物的攝食量(表 3-4)、(5) 不同沉積物對各種元素的吸附係數(表 3-5)、(6) 各種元素從土壤傳輸到農作物的濃度轉換因子(表 3-6)、(7) 各類動物產品的各元素轉換因子(表 3-7)、(8) 淡水生物的各元素濃度轉換因子(表 3-8)、(9) 濱海生物的各元素濃度轉換因子(表 3-9)、(10) 成人生活習慣可能接觸核種的相關參數(表 3-10)、(11) 牲畜生活習慣可能接觸核種的相關參數(表 3-11)、(12) 農作物特性相關的參數(表 3-12)、(13) 農作物的風化速率(表 3-13)、(14) 農作物的各元素轉換比(表 3-14)、(15) 農作物處理成食物的損失率(表 3-15)以及(16) 海水水霧強化因子(表 3-16)。

累計前述參數數量表 3-1：48 個、表 3-2：13 個、表 3-3：136 個、表 3-4：21 個、表 3-5：57 個、表 3-6：114 個、表 3-7：152 個、表 3-8：38 個、表 3-9：76 個、表 3-10：24 個、表 3-11：24 個、表 3-12：24 個、表 3-13：57 個、表 3-14：76 個、表 3-15：57 個、以及表 3-16：19 個，合計 936 個。

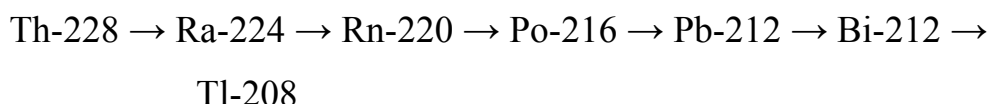
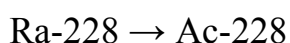
3.1.2 衰變鍊

案例使用的衰變鍊如下所列：

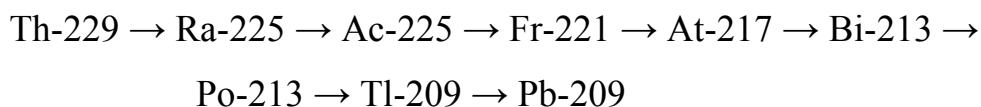
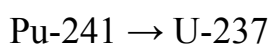
(1)活化與分裂產物



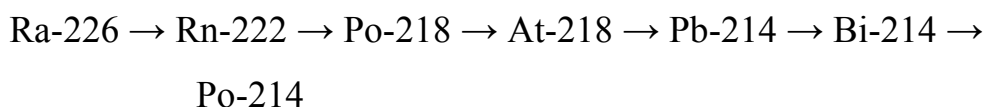
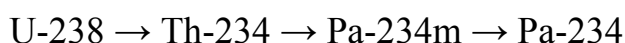
(2)4N 系列



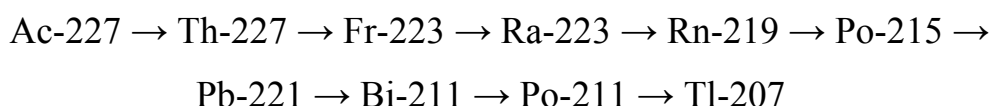
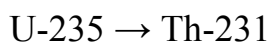
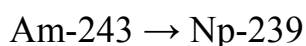
(3)4N+1 系列



(4)4N+2 系列



(5)4N+3 系列



3.2 模型建立

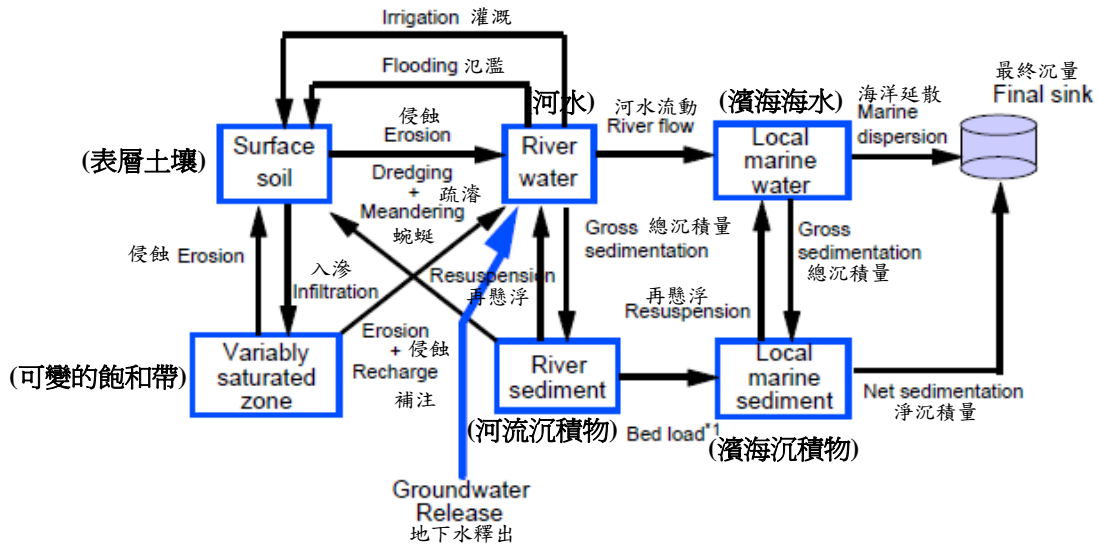
GoldSim 平台於劑量評估方面的運用已有諸多研究案例，包括驗證與增進 GoldSim 平台的質傳管流模式(陳智隆等，2005)、區塊傳輸模式(AMBER)與管流傳輸模式(GoldSim)的比較研究(陳智隆和賴仁杰，2008a)、建立與驗證 GoldSim 平台的離散裂隙網路技術(陳智隆和賴仁杰，2008b)、FEHM 與 GoldSim 的一維核種傳輸模擬比較與驗證研究(陳智隆和賴仁杰，2008c)、發展具代表性放射性廢棄物處置評估模型之技術驗證(陳智隆，2009)和放射性廢棄物處置多核種安全評估模型之技術發展(陳智隆，2011)等。

因此，如前所述，將生物圈評估模式建立在 GoldSim 平台上，將有助於全系統安全評估的進行。本分析模型即建構在 GoldSim 平台上(圖 3-3)。在 GoldSim 平台上依不同參數種類與特性以資料夾方式進行分類。其中在 [RN_Biosphere_Transport] 資料夾中，根據圖 3-1 的描述，建立核種在河岸表層土壤、土壤內的飽和帶地下水、河水、河流沉積物、濱海鹽水和濱海沉積物之間遷移路徑關聯(見圖 3-4)。再依圖 3-2 所示之不同群體接受不同途徑的劑量特性，建構不同的劑量曝露途徑於[Intake_Pathway]資料夾中，結果示於圖 3-5。

3.3 模型驗證

將本研究分析結果與參考案例之分析結果進行比較。(1) 耕種曝露群體的劑量結果示於圖 3-6，分析數值列於附件一，此圖顯示本研究分析結果主要核種的分佈情形與劑量率數值大致與參考案例的結果相似；(2) 不同曝露群體的劑量轉換因子比較結果示於圖 3-7，分析數值列於附件二，此圖亦顯示本研究分析結果大致趨勢與參考案例的結果相近；(3) 圖 3-8 顯示耕種群體的不同曝露途徑之劑量轉換因子比較，分析數值列於附件三，結果亦顯示本研究分析結果與參考案例的分析結果極為相近。

由上述三種不同分析結果的比較顯示，本研究的分析結果與參考案例分析結果相近，證實確實可以在 GoldSim 平台上建立生物圈評估模型，並證明本研究已具有建立生物圈評估模型的技術能力。



*1 The process shows that the solid phase is moved by carrying sediments drawn along the bottom of the water. 傳輸作用顯示固相以沉積物形式沿水體底部搬移

圖 3-1 參考案例的生物圈核種遷移概念

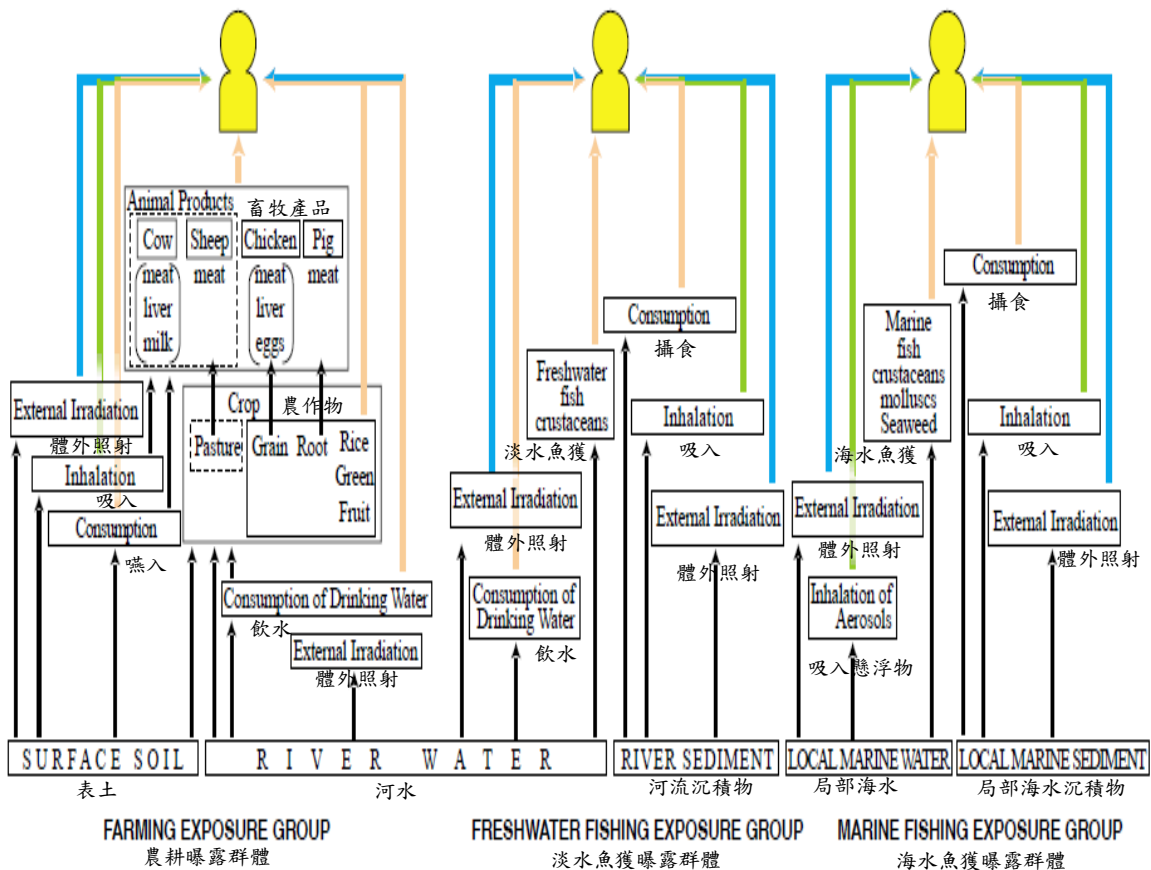


圖 3-2 參考案例的人員曝露途徑

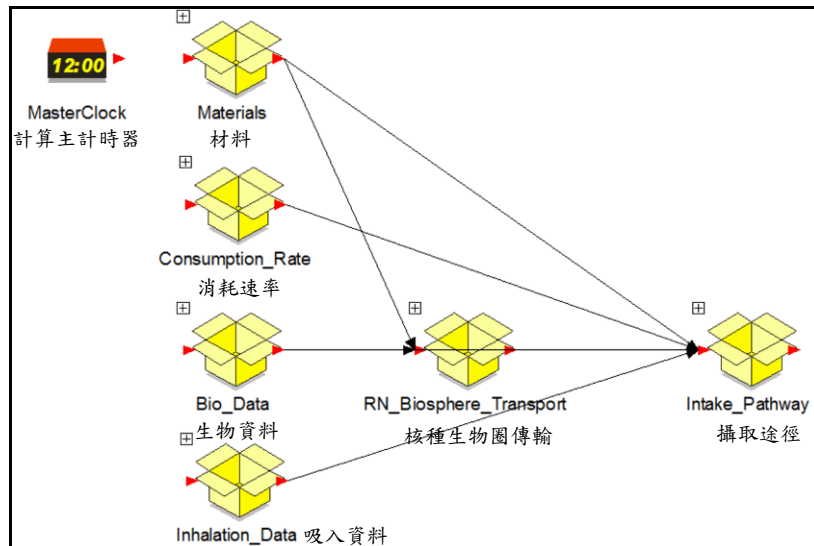


圖 3-3 在 GoldSim 平台上建立分析案例

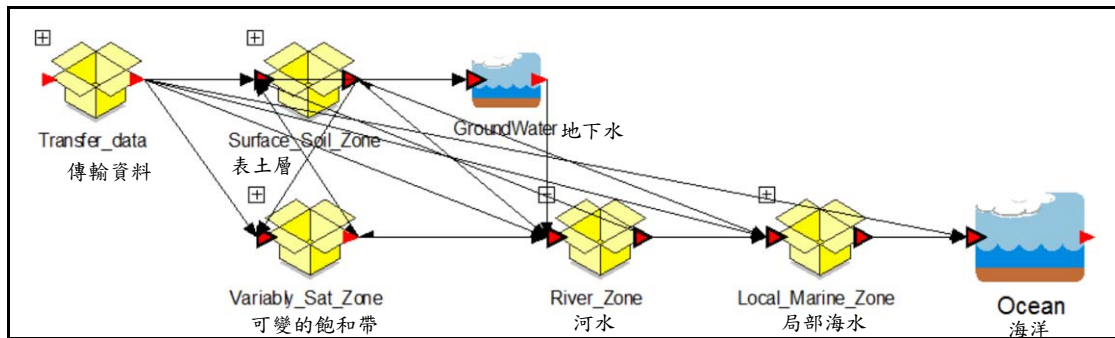


圖 3-4 在[RN_Biosphere_Transport]資料夾中建立核種遷移路徑關聯

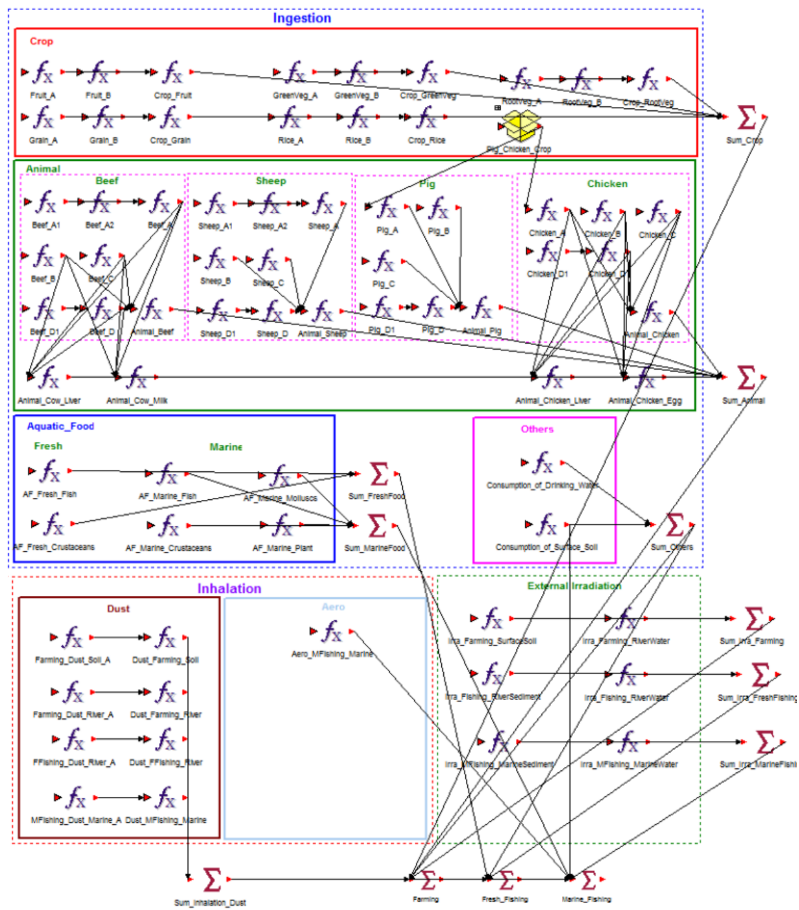
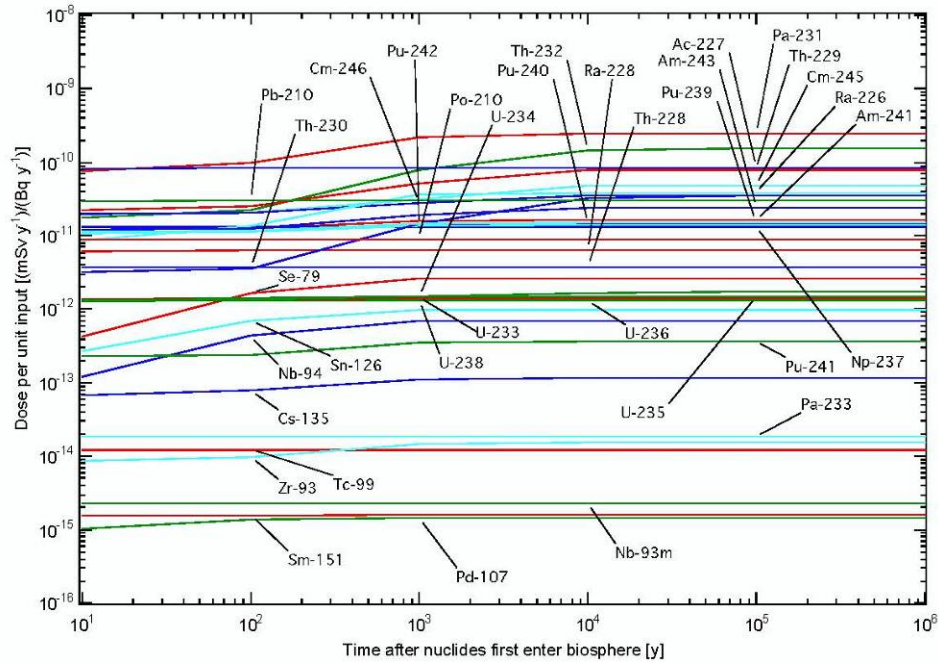


圖 3-5 在[Intake_Pathway]資料夾中關鍵群體的曝露途徑關聯

(a) H12



(b) 本研究

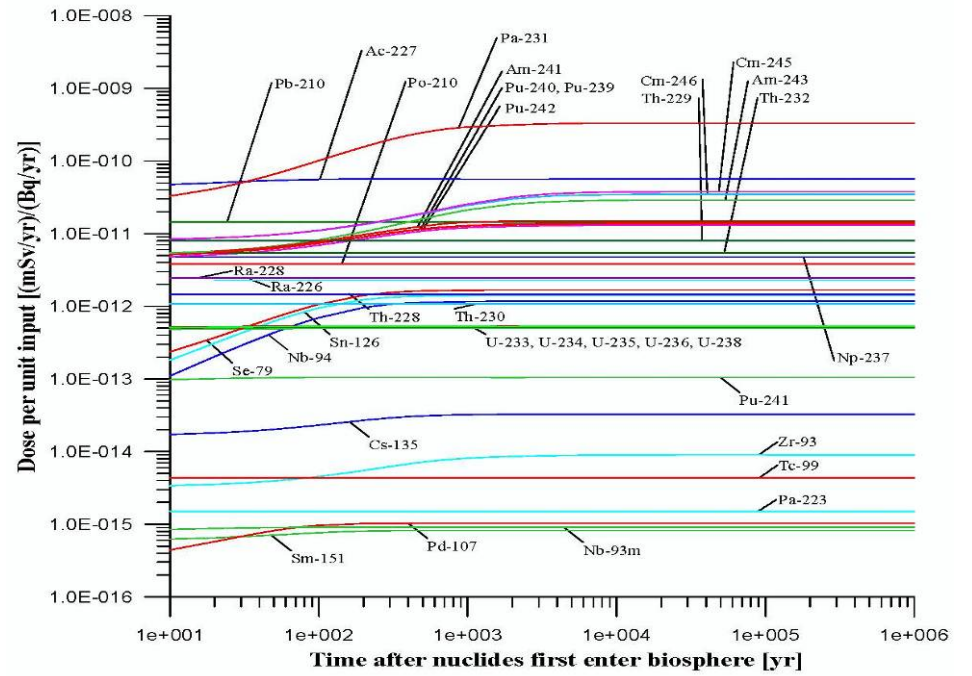
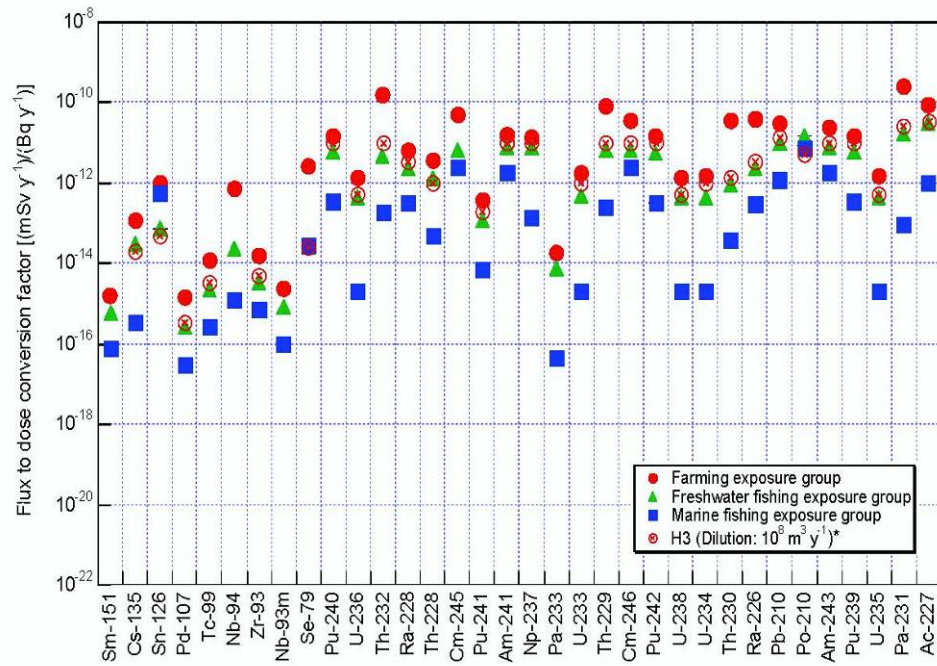


圖 3-6 耕種曝露群體的劑量比較

(a)H12



(b)本研究

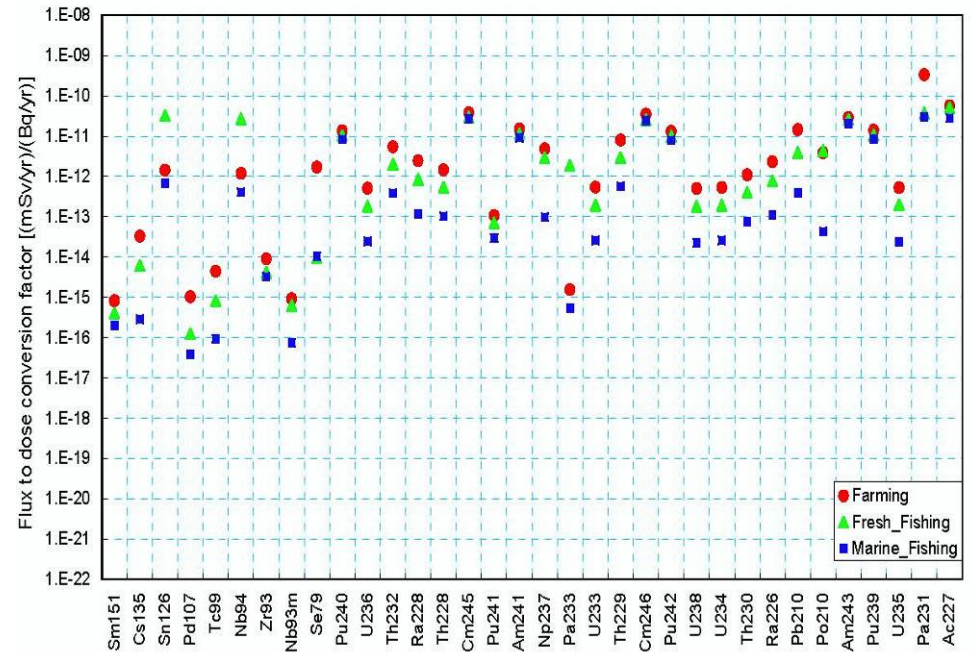
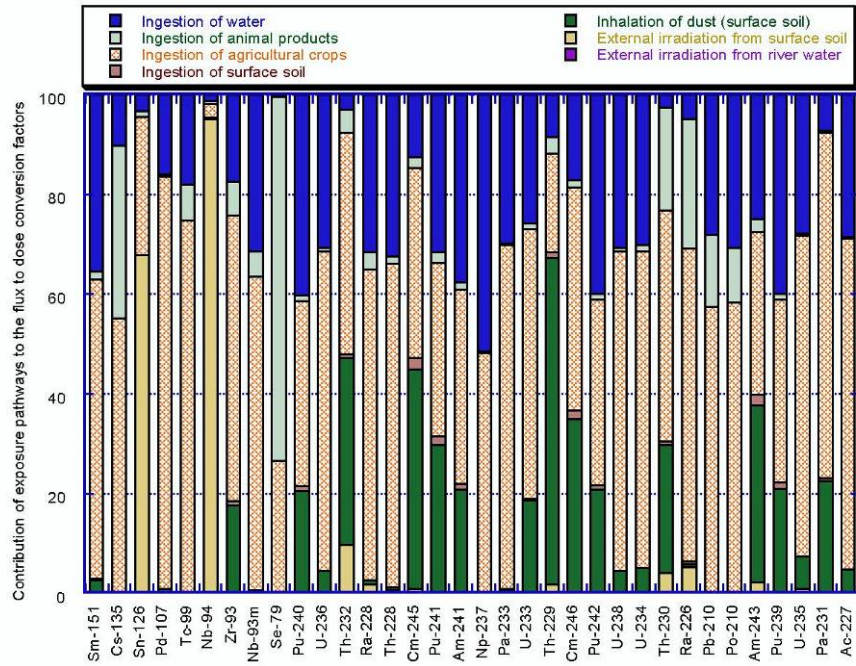


圖 3-7 不同曝露群體的劑量轉換因子比較

(a)H12



(b)本研究

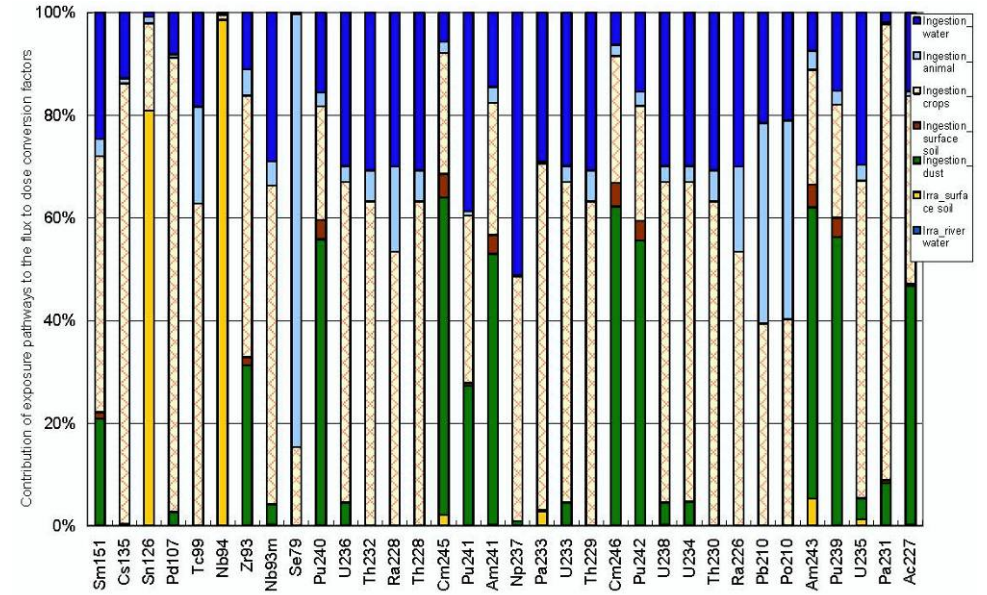


圖 3-8 耕種群體的不同曝露途徑之劑量轉換因子比較

表 3-1 介質特性參數表

Parameter (參數)	Units (單位)	Surface soil (表層土壤)			Saturated zone (飽和帶)		
		Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)
Depth (深度)	m	3.00E-01	1.00E-01	5.00E-01	2.00E+00	1.00E+00	2.00E+01
Area (面積)	m ²	2.00E+04	1.00E+03	1.00E+06	2.00E+04	1.00E+03	1.00E+06
Volume (體積)	m ³	6.00E+03	1.00E+02	5.00E+05	4.00E+04	1.00E+03	2.00E+07
Total porosity (總孔隙率)	-	0.40000	0.10000	0.70000	0.40000	0.10000	0.70000
Water-filled porosity (含水孔隙率)	-	3.00E-01	6.00E-02	4.00E-01	3.50E-01	8.00E-02	4.00E-01
suspended sediment con- centration (懸浮物濃度)	kg/m ³	-	-	-	-	-	-
water density (水密度)	kg/m ³	1.00E+03	-	-	1.00E+03	-	-
sediment grain density (懸浮物顆粒密度)	kg/m ³	2.65E+03	2.60E+03	2.70E+03	2.65E+03	2.60E+03	2.70E+03

Parameter (參數)	Units (單位)	River water (河水)			River sediment (河流沉積物)		
		Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)
Depth (深度)	m	5.00E-01	5.00E-01	5.00E+00	1.00E-01	1.00E-01	5.00E-01
Area (面積)	m ²	1.00E+04	4.00E+03	1.00E+05	1.00E+04	4.00E+03	1.00E+05
Volume (體積)	m ³	5.00E+03	2.00E+03	5.00E+05	1.00E+03	4.00E+02	5.00E+04
Total porosity (總孔隙率)	-	0.99998	0.98867	1.00000	0.50000	0.40000	0.60000
Water-filled porosity (含水孔隙率)	-	1.00E+00	9.89E-01	1.00E+00	5.00E-01	4.00E-01	6.00E-01
suspended sediment con- centration (懸浮物濃度)	kg/m ³	5.00E-02	7.00E-03	3.00E+01	-	-	-
water density (水密度)	kg/m ³	1.00E+03	-	-	1.00E+03	-	-
sediment grain density (懸浮物顆粒密度)	kg/m ³	2.65E+03	-	-	2.65E+03	2.60E+03	2.70E+03

Parameter (參數)	Units (單位)	Local marine water (濱海海水)			Local marine sediment(濱海沉積物)		
		Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)
Depth (深度)	m	5.00E+00	5.00E+00	2.00E+01	5.00E-01	1.00E-01	5.00E-01
Area (面積)	m ²	2.00E+05	2.00E+05	2.00E+07	2.00E+06	-	-
Volume (體積)	m ³	1.00E+06	1.00E+06	4.00E+08	1.00E+06	-	-
Total porosity (總孔隙率)	-	0.99996	0.99996	0.99996	0.50000	0.40000	0.60000
Water-filled porosity (含水孔隙率)	-	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	5.60E+00	4.00E-01	6.00E-01
suspended sediment con- centration (懸浮物濃度)	kg/m ³	1.00E-04	1.00E-04	1.00E-02	-	-	-
water density (水密度)	kg/m ³	-	-	-	1.00E+03	-	-
sediment grain density (懸浮物顆粒密度)	kg/m ³	-	-	-	2.65E+03	2.60E+03	2.70E+03

表 3-2 遷移特性參數表

Liquid transfers (液態遷移)				
Transfer process (遷移程序)	Units (單位)	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)
Irrigation (灌溉)	m ³ /yr	1.50E+04	-	-
Infiltration/Recharge (滲入/補注)	m/yr	7.00E-01	4.50E-01	1.00E+00
Flooding (氾濫)	m ³ /yr	100.00000	10.00000	1000.00000
River flow (河水流動)	m ³ /yr	1.00E+08	3.00E+05	3.00E+10
Marine discharge (濱海洩流)	m ³ /yr	1.00E+10	4.00E+09	2.00E+11

Solid transfers (固態遷移)				
Transfer process (遷移程序)	Units (單位)	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)
Erosion (侵蝕)	m/yr	1.00E-04	6.40E-06	3.40E-03
Dredging/Meandering (疏浚/漫漚)	m ³ /yr	1.6	0.5	5.0
River sediment resuspension (河流沉積物再懸浮)	m/yr	1.00E-04	6.40E-06	3.40E-03
River gross sedimentation (河流總沈積量)	m/yr	1.60E-05	1.60E-06	1.60E-04
Bed-load (河床)	kg/yr	1.60E+05	1.00E+05	2.20E+05
Diffusion due to bioturbation in a local marine environment (濱海環境生物活動造成之擴散)	m ² /yr	3.20E-05	3.20E-06	3.20E-04
Gross sedimentation in a local marine environment (濱海環境的總沈積量)	m/yr	7.50E-05	3.80E-06	3.70E-04
Net sedimentation (淨沈積量)	m/yr	5.00E-05	7.50E-06	3.70E-03

表 3-3 劑量轉換係數

Nuclides (核種)	Ingestion (嚥入, Sv/Bq)	Inhalation (吸入, Sv/Bq)	External Irradiation (體外照射)	
			Soil 土壤 [(Sv/hr)/(Bq/m ³)]	Water 水 [(Sv/hr)/(Bq/m ³)]
Ac227	4.00E-06	1.90E-03	3.90E-14	1.50E-13
Am241	1.00E-06	1.20E-04	8.40E-16	6.80E-15
Am243	1.00E-06	1.20E-04	1.70E-14	7.90E-14
Cm245	1.00E-06	1.30E-04	6.60E-15	3.20E-14
Cm246	1.00E-06	1.30E-04	2.20E-18	3.80E-17
Cs135	1.90E-09	1.30E-09	7.40E-19	4.00E-18
Nb93m	1.20E-10	7.80E-09	2.00E-18	3.70E-17
Nb94	1.40E-09	9.10E-08	1.90E-13	6.00E-13
Np237	1.10E-06	1.30E-04	1.50E-15	8.40E-15
Pa233	9.10E-10	2.40E-09	2.00E-14	7.40E-14
Pa231	2.90E-06	3.60E-04	3.70E-15	1.40E-14
Pb210	1.40E-06	3.60E-06	1.20E-16	7.00E-16
Pd107	3.80E-11	3.60E-09	0.00E+00	0.00E+00
Po210	4.50E-07	2.30E-06	1.00E-18	3.30E-18
Pu239	9.80E-07	1.20E-04	5.70E-18	3.50E-17
Pu240	9.80E-07	1.20E-04	2.80E-18	4.00E-17
Pu241	1.90E-08	2.40E-06	3.60E-19	1.80E-18
Pu242	9.30E-07	1.10E-04	2.50E-18	3.40E-17
Ra226	3.10E-07	2.20E-06	2.20E-13	6.90E-13
Ra228	3.30E-07	1.20E-06	1.20E-13	3.70E-13
Se79	2.40E-09	2.50E-09	3.60E-19	2.10E-18
Sm151	9.30E-11	7.70E-09	1.90E-20	3.10E-19
Sn126	5.40E-09	2.40E-08	2.30E-13	7.60E-13
Tc99	3.60E-10	2.00E-09	2.40E-18	1.10E-17
Th228	2.00E-07	8.40E-05	2.00E-13	6.30E-13
Th229	1.10E-06	5.80E-04	3.10E-14	1.20E-13
Th230	1.50E-07	8.60E-05	2.30E-17	1.40E-16
Th232	7.50E-07	4.50E-04	1.00E-17	7.20E-17
U233	7.20E-08	3.80E-05	2.70E-17	1.30E-16
U234	7.10E-08	3.80E-05	7.70E-18	6.30E-17
U235	6.90E-08	3.30E-05	1.50E-14	6.20E-14
U236	6.80E-08	3.60E-05	4.10E-18	4.20E-17
U238	6.70E-08	3.30E-05	2.90E-15	1.10E-14
Zr93	4.50E-10	8.60E-08	0	0

表 3-4 成人對各類食物攝食量

Foodstuff (食品)		Units (單位)	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)
Agricultural products (農產品)	Rice (米)	kg/yr	59.8	5.0	150.0
	Grain (穀類)	kg/yr	28.5	5.0	150.0
	Root vegetables (根莖類蔬菜)	kg/yr	47.2	5.0	400.0
	Green vegetables (葉類蔬菜)	kg/yr	26.7	25.0	80.0
	Fruits (水果)	kg/yr	28.5	0.0	50.0
Animal products (動物產品)	Beef (牛肉)	kg/yr	8.8	4.0	10.0
	Mutton (羊肉)	kg/yr	0.6	4.0	10.0
	Pork (豬肉)	kg/yr	9.5	4.0	10.0
	Chicken (雞肉)	kg/yr	7.4	4.0	10.0
	Cow liver (牛肝)	kg/yr	0.2	0.0	40.0
	Chicken liver (雞肝)	kg/yr	0.3	0.0	40.0
	Chicken eggs (雞蛋)	kg/yr	15.4	10.0	200.0
	Cow's milk (牛奶)	kg/yr	46.0	20.0	400.0
Freshwater products (淡水產品)	Freshwater fish (淡水魚)	kg/yr	0.4	-	-
	Freshwater crustaceans (淡水甲殼類動物)	kg/yr	0.2	-	-
Marine products (濱海產品)	Marine fish (海水魚)	kg/yr	14.9	-	-
	Marine crustaceans (海水甲殼類動物)	kg/yr	2.9	-	-
	Marine mollusks (海水軟體動物)	kg/yr	1.8	-	-
	Marine plants (seaweed) (海生植物)	kg/yr	1.9	-	-
Others (其他)	Water (水)	m ³ /yr	0.61	0.40	0.75
	Soil (土壤)	kg/yr	0.037	0.001	0.100

表 3-5 不同沉積物對各種元素的吸附係數

單位: m³/kg

Element (元素)	Surface soil, VSZ (表層土壤)			River sediment (河流沉積物)			Local marine sediment (濱海沉積物)		
	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)
Se	0.15	0.0003	3	0.01	0.004	5	1	0	10
Zr	0.6	300	10	10	0.005	10	10	1	5000
Nb	0.16	0.03	6	10	0.01	100	10	1	1000
Tc	0.00014	0	0.4	0.1	0	0.2	0.1	0.01	10
Pd	0.055	0	1	2	0.004	10	50	10	500
Sn	0.13	0.1	1000	10	0.005	50	10	0.02	200
Cs	0.27	0.002	50	2	1	30	3	0.1	20
Sm	0.24	0.001	1000	100	0.01	1000	2000	20	200000
Pb	0.027	0.003	60	10	0.01	10	200	10	10000
Po	0.015	0.006	7	10	0.01	10	200	10	10000
Ra	0.049	0.007	1000	1	0.5	30	5	0.5	500
Ac	0.045	0.4	10	100	0.01	1000	2000	10	10000
Th	3	0.008	5000	5000	0.7	5000	5000	100	10000
Pa	0.054	0.5	6	5000	1	5000	5000	100	10000
U	0.0033	0.00005	20	0.05	0.05	3	0.5	0.1	5
Np	0.0041	0.0001	3	0.5	0.01	50	2	0.2	50
Pu	0.54	0.01	300	100	0.01	100	2000	10	20000
Am	2	0.001	1000	100	0.01	1000	2000	100	20000
Cm	4	0.1	50	100	10	100	2000	0.01	20000

表 3-6 各種元素從土壤傳輸到農作物的濃度轉換因子

單位: (Bq/kg) 農產鮮重/(Bq/kg)土壤乾重

Element (元素)	Root vegetable (根莖類植物)			Green vegetable (葉類蔬菜)			Grain (穀類)		
	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)
Se	1.E+00	1.E-02	1.E+01	1.E+00	1.E-02	1.E+01	1.E+00	1.E-02	1.E+00
Zr	5.E-03	3.E-06	2.E-02	5.E-03	3.E-06	2.E-02	5.E-03	3.E-06	5.E-03
Nb	1.E-02	3.E-03	2.E+00	1.E-02	3.E-03	2.E+00	1.E-02	3.E-03	1.E-02
Tc	1.E+01	4.E-01	5.E+02	1.E+01	4.E-01	5.E+02	1.E+01	4.E-01	1.E+01
Pd	6.E-02	6.E-03	6.E-01	2.E-01	2.E-02	2.E+00	2.E-01	2.E-02	6.E-02
Sn	1.E-01	1.E-03	5.E+00	1.E-01	2.E-03	5.E+00	2.E-01	2.E-03	1.E-01
Cs	3.E-02	1.E-03	1.E+00	3.E-02	1.E-02	1.E+00	2.E-02	1.E-03	3.E-02
Sm	2.E-03	5.E-06	2.E-02	2.E-03	5.E-06	2.E-02	2.E-03	5.E-06	2.E-03
Pb	1.E-02	3.E-04	7.E-02	1.E-02	3.E-04	7.E-02	1.E-02	3.E-04	1.E-02
Po	2.E-04	2.E-06	7.E-03	2.E-04	2.E-06	7.E-03	2.E-04	2.E-06	2.E-04
Ra	4.E-02	5.E-05	8.E-01	4.E-02	7.E-05	8.E-01	4.E-02	7.E-05	4.E-02
Ac	1.E-03	2.E-07	5.E-03	1.E-03	2.E-07	5.E-03	1.E-03	2.E-07	1.E-03
Th	5.E-04	4.E-05	1.E-03	5.E-04	1.E-04	1.E-03	5.E-04	1.E-04	5.E-04
Pa	4.E-02	4.E-04	4.E+00	4.E-02	4.E-04	4.E+00	4.E-02	4.E-04	4.E-02
U	1.E-03	2.E-05	2.E-01	1.E-03	2.E-05	2.E-01	1.E-04	2.E-06	1.E-03
Np	1.E-03	5.E-05	4.E-01	1.E-02	5.E-04	4.E+00	3.E-04	3.E-05	1.E-03
Pu	1.E-03	4.E-08	4.E-02	1.E-04	4.E-08	4.E-02	3.E-05	4.E-08	1.E-03
Am	1.E-03	2.E-07	5.E-03	1.E-03	2.E-07	5.E-03	1.E-05	2.E-07	1.E-03
Cm	1.E-03	2.E-07	5.E-03	1.E-03	2.E-07	5.E-03	1.E-05	2.E-07	1.E-03

Element (元素)	Pasture (牧草)			Rice (米)			Fruits (水果)		
	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)
Se	1.E+00	1.E-02	1.E+01	1.E+00	1.E-02	1.E+01	5.E-01	5.E-03	5.E+00
Zr	5.E-03	3.E-06	2.E-02	5.E-03	3.E-06	2.E-02	5.E-03	3.E-06	2.E-02
Nb	1.E-02	3.E-03	2.E+00	1.E-02	3.E-03	2.E+00	5.E-03	3.E-03	2.E+00
Tc	1.E+01	4.E-01	5.E+02	1.E+01	4.E-01	5.E+02	2.E+01	1.E-01	2.E+02
Pd	2.E-01	2.E-02	2.E+00	2.E-01	2.E-02	2.E+00	2.E-01	2.E-02	2.E+00
Sn	2.E-01	2.E-03	5.E+00	2.E-01	2.E-03	5.E+00	1.E-01	2.E-03	5.E+00
Cs	3.E-02	1.E-02	1.E+00	2.E-02	1.E-02	3.E-01	5.E-02	1.E-02	1.E+00
Sm	2.E-03	5.E-06	2.E-02	2.E-03	5.E-06	2.E-02	2.E-03	5.E-06	2.E-02
Pb	1.E-02	3.E-04	7.E-02	1.E-02	3.E-04	7.E-02	1.E-02	3.E-04	7.E-02
Po	2.E-04	2.E-06	2.E-02	2.E-04	2.E-06	7.E-03	2.E-04	2.E-06	7.E-03
Ra	4.E-02	7.E-05	8.E-01	4.E-02	7.E-05	8.E-01	4.E-02	7.E-05	8.E-01
Ac	1.E-03	2.E-07	2.E-02	1.E-03	2.E-07	5.E-03	5.E-04	1.E-07	3.E-03
Th	5.E-04	1.E-04	2.E-03	5.E-04	1.E-04	1.E-03	5.E-04	1.E-04	1.E-03
Pa	4.E-02	4.E-04	4.E+00	4.E-02	4.E-04	4.E+00	4.E-02	4.E-04	4.E+00
U	1.E-03	2.E-05	2.E-01	1.E-04	2.E-06	2.E-02	1.E-04	2.E-06	2.E-02
Np	5.E-03	3.E-04	3.E-01	3.E-04	3.E-05	4.E-02	3.E-04	3.E-05	3.E-02
Pu	1.E-03	4.E-08	4.E-02	1.E-03	4.E-08	4.E-02	1.E-04	1.E-05	1.E-03
Am	5.E-03	1.E-04	5.E-02	1.E-03	2.E-07	5.E-03	1.E-03	2.E-07	5.E-03
Cm	5.E-03	1.E-04	5.E-02	1.E-05	2.E-07	5.E-03	1.E-03	2.E-07	5.E-03

表 3-7 各類動物產品的各元素轉換因子

單位: (Day/Kg)農產鮮重

Element (元素)	Beef (牛肉)			Mutton (羊肉)			Pork (豬肉)		
	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)
Se	5.4E-01	2.0E-04	5.4E-01	1.4E+00	3.0E-02	1.4E+00	7.2E-01	3.2E-01	7.2E-01
Zr	3.1E-03	5.0E-04	2.0E-01	1.0E-02	1.0E-02	3.0E-01	3.5E-03	3.5E-04	3.5E-02
Nb	2.0E-04	1.7E-04	2.5E-01	2.0E-03	2.0E-04	2.0E-02	1.0E-03	5.5E-04	1.0E-03
Tc	6.0E-03	1.3E-06	1.0E-02	8.6E-02	1.0E-02	5.0E+00	1.0E-04	1.0E-04	3.0E-02
Pd	7.1E-05	7.1E-05	1.0E-03	1.0E-04	1.0E-05	1.0E-03	3.6E-05	3.6E-06	3.6E-04
Sn	1.9E-03	2.0E-04	1.0E-02	1.3E-02	3.0E-03	3.0E-02	4.4E-03	4.4E-04	4.4E-02
Cs	5.0E-02	2.0E-03	9.2E-02	3.0E-01	3.2E-04	4.5E-01	2.4E-01	3.0E-02	1.1E+00
Sm	5.1E-04	5.4E-04	5.0E-03	3.2E-04	5.4E-04	5.0E-03	1.0E-04	9.8E-06	9.8E-04
Pb	1.0E-02	1.0E-04	1.0E-02	8.8E-02	3.0E-03	8.8E-02	3.1E-02	3.1E-03	3.1E-01
Po	4.0E-03	4.0E-04	4.0E-02	5.0E-02	5.0E-03	5.0E-01	3.1E-02	3.1E-03	3.1E-01
Ra	1.3E-03	2.0E-05	1.9E-02	9.9E-02	6.0E-03	9.9E-02	3.5E-02	3.5E-03	3.5E-01
Ac	1.6E-04	2.0E-06	1.6E-04	4.7E-04	3.0E-05	3.0E-03	1.7E-04	1.7E-05	1.7E-03
Th	2.7E-03	1.0E-04	2.7E-03	1.3E-02	1.0E-03	6.0E-02	4.6E-03	4.6E-04	4.6E-02
Pa	5.0E-05	2.6E-05	5.0E-03	3.4E-04	3.4E-04	6.0E-02	1.1E-04	1.1E-05	1.1E-03
U	6.9E-04	2.0E-04	3.0E-02	7.4E-03	2.1E-03	4.0E-01	2.6E-03	2.6E-03	6.2E-02
Np	1.2E-04	7.8E-06	5.0E-03	1.4E-04	1.1E-04	6.0E-02	4.5E-05	4.5E-06	4.5E-04
Pu	2.0E-04	5.0E-09	2.0E-04	1.0E-03	6.0E-08	1.0E-03	8.3E-05	4.0E-06	8.3E-05
Am	4.0E-04	2.0E-06	4.0E-04	2.0E-03	3.0E-05	2.0E-03	1.0E-03	1.2E-05	1.0E-03
Cm	9.8E-05	3.0E-06	5.0E-03	3.0E-04	3.0E-05	3.0E-03	9.9E-05	9.9E-06	9.9E-04

Element (元素)	Chicken (雞肉)			Cow liver (牛肝)			Chicken liver (雞肝)		
	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)
Se	8.3E+00	8.3E+00	9.0E+00	1.0E+01	6.0E-03	1.0E+01	7.6E+01	7.6E+00	7.6E+02
Zr	1.4E-01	1.4E-02	1.4E+00	3.1E-03	8.9E-05	3.1E-03	1.4E-01	1.4E-02	1.4E+00
Nb	4.0E-02	2.0E-03	4.0E-02	1.7E-04	1.7E-04	3.0E+00	2.2E-02	2.2E-03	2.2E-01
Tc	1.2E+00	6.0E-02	1.2E+00	2.1E-02	2.1E-03	2.1E-01	1.2E+00	1.2E-01	1.2E+01
Pd	1.4E-03	1.4E-04	1.4E-02	9.8E-03	9.8E-04	9.8E-02	9.8E-01	9.8E-02	9.8E+00
Sn	1.8E-01	1.8E-02	1.8E+00	2.2E-02	2.0E-04	2.2E-02	1.0E+00	1.0E-01	1.0E+01
Cs	1.2E+01	3.0E-01	1.8E+01	3.1E-02	7.0E-03	9.0E-02	1.2E+01	1.2E+00	1.2E+02
Sm	3.9E-03	3.8E-04	3.8E-02	5.8E-01	4.0E-03	5.8E-01	2.6E+00	2.6E-01	2.6E+01
Pb	1.2E+00	1.2E-01	1.2E+01	8.1E-01	2.0E-04	1.3E+00	7.7E+01	7.7E+00	7.7E+02
Po	1.2E+00	1.2E-01	1.2E+01	1.1E-01	4.0E-04	1.6E-01	7.7E+01	7.7E+00	7.7E+02
Ra	4.8E-01	4.8E-02	4.8E+00	1.9E-02	2.0E-05	1.9E-02	4.8E-01	4.8E-02	4.8E+00
Ac	6.6E-03	6.6E-04	6.6E-02	1.4E-01	2.0E-03	2.0E-01	2.7E+00	2.7E-01	2.7E+01
Th	1.8E-01	1.8E-02	1.8E+00	6.3E-02	9.0E-05	6.3E-02	2.1E+00	2.1E-01	2.1E+01
Pa	4.1E-03	4.1E-04	4.1E-02	1.1E-03	6.0E-05	6.0E-03	1.1E+00	1.1E-02	1.1E+00
U	1.0E-01	1.0E-01	1.2E+00	6.9E-04	6.9E-04	3.0E+02	1.0E-01	1.0E-02	1.0E+00
Np	1.7E-03	1.7E-04	1.7E-02	1.5E-02	2.0E-04	1.5E-02	1.3E-01	1.3E-02	1.3E+00
Pu	1.0E-01	1.9E-05	1.0E-01	6.8E-02	2.0E-03	1.0E+00	1.4E+00	1.4E+00	1.4E+02
Am	1.0E-01	2.0E-05	1.0E-01	6.8E-02	2.0E-03	5.3E-01	1.4E+00	1.4E+00	1.4E+02
Cm	4.0E-03	4.0E-04	4.0E-02	3.2E-02	3.2E-03	3.2E-01	6.3E-01	6.3E-02	6.3E+00

表 3-7 各類動物產品的各元素轉換因子(續)

單位: (Day/Kg)農產鮮重

Element (元素)	Cow milk (牛奶)			Chicken eggs (雞蛋)		
	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)
Se	4.0E-03	1.0E-03	6.0E-02	8.3E+00	8.3E+00	9.3E+00
Zr	3.0E-05	3.0E-06	5.0E-04	1.4E-01	1.4E-02	1.4E+00
Nb	2.0E-02	0.0E+00	2.0E-01	2.2E-02	3.0E-03	2.2E-02
Tc	7.5E-03	2.3E-05	4.0E-01	1.2E+00	1.2E+00	3.0E+00
Pd	2.5E-04	2.5E-04	5.0E-03	1.4E-03	1.4E-04	1.4E-02
Sn	1.0E-03	1.0E-04	1.0E-02	1.8E-01	1.8E-02	1.8E+00
Cs	8.0E-03	1.0E-03	2.7E-02	4.0E-01	6.0E-02	1.2E+01
Sm	2.0E-05	2.0E-06	2.0E-04	3.9E-03	3.9E-04	3.9E-02
Pb	3.0E-04	2.0E-05	4.0E-04	1.2E+00	1.2E-01	1.2E+01
Po	3.0E-04	2.0E-05	4.0E-04	1.2E+00	1.2E-01	1.2E+01
Ra	1.3E-03	9.0E-05	1.0E-02	2.5E-01	2.5E-02	2.5E+00
Ac	4.0E-07	4.0E-08	2.0E-05	1.6E-02	1.6E-03	1.6E-01
Th	5.0E-06	5.0E-07	5.0E-04	1.8E-01	1.8E-02	1.8E+00
Pa	5.0E-06	5.0E-07	5.0E-04	4.1E-03	4.1E-04	4.1E-02
U	4.0E-04	4.0E-05	6.0E-04	1.0E-01	1.0E-02	1.0E+00
Np	5.0E-06	5.0E-07	1.0E-04	1.7E-02	1.7E-03	1.7E-01
Pu	5.0E-06	2.0E-09	1.0E-05	8.0E-03	3.3E-05	8.0E-03
Am	5.0E-06	4.0E-08	5.0E-05	3.9E-03	1.0E-03	9.0E-03
Cm	9.0E-06	9.0E-06	1.1E-04	4.0E-02	4.0E-03	4.0E-01

表 3-8 淡水生物的各元素濃度轉換因子

單位: (L/kg)

Element (元素)	Freshwater fish (淡水魚)			Freshwater crustaceans (淡水甲殼類動物)		
	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)
Se	2.0E+02	3.0E+01	3.0E+02	2.0E+03	1.0E+02	1.0E+04
Zr	3.0E+02	1.0E+00	4.0E+02	1.0E+02	1.0E+01	1.0E+03
Nb	3.0E+02	2.0E+01	3.0E+04	1.0E+02	1.0E+01	5.0E+02
Tc	2.0E+01	2.0E+01	8.0E+01	5.0E+00	5.0E-01	1.0E+02
Pd	2.0E+01	2.0E+00	2.0E+02	5.0E+02	5.0E+01	5.0E+03
Sn	1.0E+02	1.0E+02	1.0E+04	1.0E+03	1.0E+02	1.0E+04
Cs	2.0E+02	3.0E+01	1.0E+04	1.0E+03	5.0E+01	1.0E+04
Sm	3.0E+01	1.0E+01	2.0E+02	1.0E+03	1.0E+02	1.0E+04
Pb	3.0E+02	1.0E+02	3.0E+02	1.0E+02	1.0E+01	1.0E+03
Po	5.0E+01	1.0E+01	5.0E+02	2.0E+04	2.0E+03	2.0E+05
Ra	5.0E+01	1.0E+01	2.0E+02	3.0E+02	3.0E+01	3.0E+03
Ac	8.0E+02	5.0E+02	1.0E+03	3.0E+03	3.0E+02	3.0E+04
Th	3.0E+01	3.0E+01	1.0E+04	5.0E+02	5.0E+01	5.0E+03
Pa	1.0E+01	2.0E+00	1.0E+02	1.0E+02	1.0E+01	1.0E+03
U	1.0E+01	2.0E+00	5.0E+01	1.0E+02	1.0E+01	5.0E+03
Np	1.0E+01	1.0E+01	3.0E+03	4.0E+02	4.0E+01	4.0E+03
Pu	4.0E+00	4.0E-01	5.0E+02	1.0E+02	1.0E+01	1.0E+03
Am	8.0E+02	3.0E+01	1.0E+03	3.0E+03	3.0E+02	3.0E+04
Cm	3.0E+01	2.0E+01	3.0E+02	1.0E+03	1.0E+02	1.0E+04

表 3-9 濱海生物的各元素濃度轉換因子

單位: (L/kg)

Element (元素)	Marine fish (海水魚)			Marine crustaceans (海水甲殼類動物)		
	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)
Se	6.0E+03	1.0E+03	1.0E+04	5.0E+03	2.0E+03	1.0E+04
Zr	2.0E+01	1.0E+00	5.0E+01	2.0E+02	5.0E+01	5.0E+02
Nb	1.0E+01	1.0E+00	5.0E+01	2.0E+02	5.0E+01	5.0E+02
Tc	3.0E+01	1.0E+01	2.0E+02	1.0E+03	5.0E+02	5.0E+04
Pd	3.0E+02	3.0E+01	3.0E+03	3.0E+02	3.0E+01	3.0E+03
Sn	5.0E+04	1.0E+03	1.0E+05	5.0E+04	1.0E+03	1.0E+05
Cs	1.0E+02	1.0E+01	3.0E+02	3.0E+01	5.0E+00	1.0E+02
Sm	5.0E+02	2.0E+02	8.0E+05	1.0E+03	1.0E+02	1.0E+04
Pb	2.0E+02	1.0E+01	3.0E+02	1.0E+03	4.0E+01	2.0E+05
Po	2.0E+03	1.0E+02	1.0E+04	5.0E+04	4.0E+02	3.0E+06
Ra	5.0E+02	5.0E+01	1.0E+03	1.0E+02	1.0E+02	1.0E+03
Ac	5.0E+01	5.0E-01	2.0E+02	1.0E+03	1.0E+02	1.0E+04
Th	6.0E+02	1.0E+02	1.0E+04	1.0E+03	1.0E+03	6.0E+03
Pa	5.0E+01	5.0E-01	2.0E+02	1.0E+01	5.0E-01	2.0E+02
U	1.0E+00	1.0E-01	3.0E+04	1.0E+01	2.0E-01	2.0E+05
Np	1.0E+01	1.0E-01	5.0E+01	1.0E+02	1.0E+01	1.0E+03
Pu	4.0E+01	5.0E-01	1.0E+02	2.0E+02	1.0E+01	1.0E+03
Am	5.0E+01	5.0E-01	2.0E+02	5.0E+02	1.0E+02	1.0E+03
Cm	5.0E+01	5.0E-01	2.0E+02	5.0E+02	1.0E+02	1.0E+03

Element (元素)	Marine mollusks (海水軟體動物)			Marine plant(Seaweed) (海生植物)		
	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)
Se	6.0E+03	3.0E+03	1.0E+04	1.0E+03	5.0E+02	5.0E+03
Zr	5.0E+03	1.0E+03	1.0E+05	3.0E+03	5.0E+02	5.0E+03
Nb	1.0E+03	1.0E+03	1.0E+05	3.0E+03	1.0E+02	5.0E+03
Tc	1.0E+03	1.0E+02	1.0E+04	1.0E+03	5.0E+02	1.0E+05
Pd	3.0E+02	3.0E+01	3.0E+03	1.0E+03	1.0E+02	1.0E+04
Sn	5.0E+04	1.0E+03	1.0E+05	2.0E+04	5.0E+03	5.0E+04
Cs	2.0E+01	5.0E+00	5.0E+01	1.0E+02	1.0E+01	1.0E+03
Sm	5.0E+03	1.0E+03	1.0E+04	3.0E+03	3.0E+02	5.0E+03
Pb	1.0E+03	4.0E+01	2.0E+05	1.0E+03	1.0E+03	2.0E+04
Po	1.0E+04	4.0E+02	3.0E+06	1.0E+03	1.0E+03	2.0E+04
Ra	1.0E+03	1.0E+02	1.0E+03	1.0E+02	1.0E+01	1.0E+03
Ac	1.0E+03	1.0E+02	1.0E+04	1.0E+03	1.0E+02	1.0E+04
Th	1.0E+03	1.0E+03	6.0E+03	2.0E+02	1.0E+02	5.0E+02
Pa	5.0E+02	1.0E+02	5.0E+03	1.0E+02	6.0E+00	1.0E+02
U	3.0E+01	1.0E+01	6.0E+03	1.0E+02	5.0E+01	2.0E+02
Np	4.0E+02	1.0E+02	1.0E+03	5.0E+01	1.0E+01	5.0E+02
Pu	3.0E+03	5.0E+02	5.0E+03	2.0E+03	5.0E+02	1.0E+04
Am	2.0E+04	5.0E+03	5.0E+04	8.0E+03	5.0E+03	1.0E+04
Cm	3.0E+04	5.0E+03	5.0E+04	8.0E+03	5.0E+03	1.0E+04

表 3-10 成人生活習慣可能接觸核種的相關參數

Exposure Group (曝露群體)	Compartment (區塊)	Inhalation rate (吸入速率) (m ³ /hr)			Occupancy (發生頻率) (hr/yr)		
		Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)
Farming (耕種)	River water (河水)	0.5	0.4	0.5	1.2E+02	3.7E+01	1.8E+02
	Surface soil (表層土壤)	1.8	1.2	2.4	1.3E+03	7.3E+02	4.4E+03
Freshwater Fishing (淡水捕魚)	River water (河水)	1.2	1.1	1.3	2.2E+03	7.3E+02	3.7E+03
	River sediment (河流沉積物)	1.2	1.1	1.3	2.2E+03	7.3E+02	3.7E+03
Marine Fishing (濱海捕魚)	Local marine water (海水)	1.2	1.1	1.8	2.2E+03	7.3E+02	3.7E+03
	Local marine sediment (海洋沉積物)	1.2	1.1	1.8	2.2E+03	7.3E+02	3.7E+03

Exposure Group (曝露群體)	Compartment (區塊)	Dust level (粉塵程度) (kg/m ³)			Aerosol level (氣霧程度) (m ³ /m ³)		
		Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)
Farming (耕種)	River water (河水)	5.0E-08	5.0E-09	2.0E-06	0	-	-
	Surface soil (表層土壤)	2.0E-06	5.0E-09	5.0E-05	0	-	-
Freshwater Fishing (淡水捕魚)	River water (河水)	0	-	-	0	-	-
	River sediment (河流沉積物)	5.0E-08	5.0E-09	5.0E-07	0	-	-
Marine Fishing (濱海捕魚)	Local marine water (海水)	0	-	-	1.0E-11	1.0E-12	1.00E-10
	Local marine sediment (海洋沉積物)	1.0E-07	5.0E-09	5.0E-06	0	-	-

表 3-11 牲畜生活習慣可能接觸核種的相關參數

Animal (動物)	Fodder (飼料) (kg/day)			Soil (土壤) (kg/day)			Water (水) (m ³ /day)		
	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)
Cow (牛)	50	9	300	0.6	0.1	2.2	0.07	0.02	0.2
Sheep (羊)	7	3.5	14	0.08	0.08	0.3	0.004	0.002	0.008
Pig (豬)	10	5	20	0.2	0.1	0.4	0.005	0.0025	0.01
Chicken (雞)	0.3	0.07	0.6	0.02	0.1	0.4	0.0005	0.0002	0.001

Animal (動物)	Inhalation rate (吸入速率) (m ³ /hr)			Occupancy (發生頻率) (hr/day)			Stocking density (放養密度) (1/m ²)		
	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)
Cow (牛)	5.4	-	-	2.4	-	-	4.E-04	-	-
Sheep (羊)	0.36	-	-	2.4	-	-	5.E-04	-	-
Pig (豬)	0.5	-	-	2.4	-	-	4.E-04	-	-
Chicken (雞)	0.01	-	-	2.4	-	-	3	-	-

表 3-12 農作物特性相關的參數

Crops (農作物)	Soil contamination (土壤污染) (kg _{soil dry weight} /kg _{crop fresh weight})			Edible plant yield (食用植物產量) (kg/m ²)		
	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)
Root vegetable (根莖蔬菜)	1.50E-04	-	-	2.4	2	5
Green vegetable (葉類蔬菜)	1.00E-04	-	-	3.1	0.8	50
Grain (穀類)	9.00E-05	-	-	0.4	0.2	0.6
Pasture (牧草)	3.40E-03	-	-	3.9	-	-
Rice (米)	9.00E-05	-	-	0.5	-	-
Fruit (水果)	1.50E-04	-	-	1.4	-	-

Crops (農作物)	Depth of irrigation water applied 使用的灌溉水深度 (m)			Fraction of irrigation water in- tercepted (-) 阻截的灌溉水深度		
	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)
Root vegetable (根莖蔬菜)	0.7	-	-	0.3	0.2	0.6
Green vegetable (葉類蔬菜)	0.7	-	-	0.3	0.2	0.6
Grain (穀類)	0.7	-	-	0.05	0.01	0.06
Pasture (牧草)	0	-	-	0	-	-
Rice (米)	1.9	-	-	0.05	-	-
Fruit (水果)	0.7	-	-	0.5	-	-

表 3-13 農作物的風化速率

單位: (L/kg)

Element (元素)	Root vegetables & Pasture (根莖蔬菜和牧草)			Green vegetables & Fruits (葉類蔬菜和水果)			Grain & Rice (穀類和米)		
	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)
Se	18	9	30	18	9	30	8.4	-	-
Zr	18	9	30	18	9	30	8.4	-	-
Nb	18	9	30	18	9	30	8.4	-	-
Tc	18	9	30	18	9	30	8.4	-	-
Pd	18	9	30	18	9	30	8.4	-	-
Sn	18	9	30	18	9	30	8.4	-	-
Cs	18	9	30	18	9	30	8.4	-	-
Sm	18	9	30	18	9	30	8.4	-	-
Pb	18	9	30	18	9	30	8.4	-	-
Po	18	9	30	18	9	30	8.4	-	-
Ra	18	9	30	18	9	30	8.4	-	-
Ac	18	9	30	18	9	30	8.4	-	-
Th	18	9	30	18	9	30	8.4	-	-
Pa	18	9	30	18	9	30	8.4	-	-
U	18	9	30	18	9	30	8.4	-	-
Np	18	9	30	51	30	80	51	30	80
Pu	18	9	30	51	30	80	51	30	80
Am	18	9	30	51	30	80	51	30	80
Cm	18	9	30	18	9	30	8.4	-	-

表 3-14 農作物的各元素轉換比

Element (元素)	Root vegetables (根莖蔬菜)			Green vegetables & Pasture (穀類和牧草)		
	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)
Se	0.068	0.068	0.1	0.3	0.3	0.8
Zr	0.53	0.01	0.53	0.13	0.013	1.3
Nb	0.53	0.01	0.53	0.52	0.01	0.52
Tc	0.11	0.011	1.1	0.28	0.1	0.28
Pd	0.039	0.0039	0.39	0.37	0.037	3.7
Sn	0.22	0.022	2.2	0.22	0.022	2.2
Cs	0.3	0.1	0.85	0.19	0.019	1.9
Sm	0.02	0.002	0.2	0.076	0.0076	0.76
Pb	0.022	0.002	2.2	0.22	0.022	2.2
Po	0.22	0.022	2.2	0.22	0.022	2.2
Ra	0.099	0.01	0.099	0.18	0.018	1.8
Ac	0.29	0.029	2.9	0.45	0.045	4.5
Th	0.29	0.029	2.9	0.38	0.0038	0.38
Pa	0.29	0.029	2.9	0.45	0.045	4.5
U	0.043	0.043	0.1	0.36	0.036	3.6
Np	0.29	0	0.29	0.45	0.045	4.5
Pu	0.043	0	0.043	0.36	0.036	3.6
Am	0.29	0	0.29	0.28	0.02	0.28
Cm	0.11	0	0.11	0.27	0.027	2.7

Element (元素)	Grain & Rice (穀類和米)			Fruits (水果)		
	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)
Se	0.13	0.13	0.7	0.12	0.012	1.2
Zr	0.056	0.0056	0.56	0.062	0.0062	0.62
Nb	0.056	0.0056	0.56	0.062	0.0062	0.62
Tc	0.12	0.012	1.2	0.12	0.012	1.2
Pd	0.17	0.017	1.7	0.16	0.016	1.6
Sn	0.1	0.01	1	0.11	0.011	1.1
Cs	0.088	0	0.4	0.098	0.0098	0.98
Sm	0.048	0.0048	0.48	0.029	0.0029	0.29
Pb	0.1	0.01	1	0.11	0.011	1.1
Po	0.1	0.01	1	0.11	0.011	1.1
Ra	0.08	0.008	0.8	0.073	0.0073	0.73
Ac	0.2	0.02	2	0.21	0.021	2.1
Th	0.13	0.013	1.3	0.13	0.013	1.3
Pa	0.2	0.02	2	0.21	0.021	2.1
U	0.16	0.016	1.6	0.19	0.019	1.9
Np	0.2	0.02	2	0.21	0.021	2.1
Pu	0.16	0.016	1.6	0.19	0.019	1.9
Am	0.13	0.03	0.13	0.13	0.025	0.13
Cm	0.2	0.02	2	0.21	0.021	2.1

表 3-15 農作物處理成食物的損失率

Element (元素)	Root vegetables & Fruits (根莖蔬菜和水果)			Green vegetables (葉類蔬菜)			Grain & Rice (穀類和米)		
	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)
Se	0	-	-	0.9	0.7	0.95	0.85	0.5	0.9
Zr	0	-	-	0.9	-	-	0.85	-	-
Nb	0	-	-	0.9	0.7	0.95	0.85	0.5	0.9
Tc	0	-	-	0.9	0.7	0.95	0.5	0.5	0.9
Pd	0	-	-	0.9	0.7	0.95	0.85	0.5	0.9
Sn	0	-	-	0.9	0.7	0.95	0.85	0.5	0.9
Cs	0	-	-	0.9	0.7	0.95	0.5	0.5	0.9
Sm	0	-	-	0.9	-	-	0.85	-	-
Pb	0	-	-	0.9	0.7	0.95	0.85	0.5	0.9
Po	0	-	-	0.9	0.7	0.95	0.85	0.5	0.9
Ra	0	-	-	0.9	0.7	0.95	0.85	0.5	0.9
Ac	0	-	-	0.9	0.7	0.95	0.85	0.5	0.9
Th	0	-	-	0.9	0.7	0.95	0.85	0.5	0.9
Pa	0	-	-	0.9	0.7	0.95	0.85	0.5	0.9
U	0	-	-	0.9	0.7	0.95	0.85	0.5	0.9
Np	0	-	-	0.9	0.7	0.95	0.9	0.5	0.9
Pu	0	-	-	0.9	0.7	0.95	0.9	0.5	0.9
Am	0	-	-	0.9	0.7	0.95	0.9	0.5	0.9
Cm	0	-	-	0.9	-	-	0.85	-	-

表 3-16 海水水霧強化因子

Element (元素)	Sea-spray enhancement factors (海水水霧強化因子)		
	Best Est. (計算值)	Min. (最小值)	Max. (最大值)
Se	1	1	3
Zr	1	1	3
Nb	1	1	3
Tc	1	1	3
Pd	1	1	3
Sn	1	1	3
Cs	1	1	3
Sm	1	1	3
Pb	10	3	50
Po	10	3	50
Ra	10	3	50
Ac	10	3	50
Th	10	3	50
Pa	10	3	50
U	10	3	50
Np	10	3	50
Pu	10	3	50
Am	10	3	50
Cm	10	3	50

4. 分析應用

4.1 劑量轉換因子

生物圈的安全評估模型通常以劑量轉換因子作為代表。經由本研究的案的建立與分析過程可知，核種在河岸表層土壤、土壤內的飽和帶地下水、河水、河流沉積物、濱海鹽水和濱海沉積物之間複雜的遷移過程，以及最終對耕種、淡水捕魚和濱海捕魚三種可能曝露群體造成的劑量結果，此乃功能評估模型的分析結果；而安全評估模型所使用的劑量轉換因子結果則如圖 3-7 所示，由 1 Bq/yr 的不同核種透過生物圈傳輸途徑針對不同曝露群體獲得此不同核種的劑量轉換因子，如此無論處置場安全評估中的源項、近場或遠場的核種存量或遷移途徑改變，皆不影響生物圈的安全評估結果，最終的曝露群體劑量只要根據進入生物圈不同核種的年活度乘上劑量轉換因子即可獲得。隨著生物圈模型與模型使用的參數和數值不同，會有不同的劑量轉換因子。

4.2 傳輸情節比較

由圖 3-8 針對耕種曝露群體的不同曝露途徑造成之劑量轉換因子比較結果可知，整體來說對於耕種曝露群體造成的劑量主要來自飲水、攝取農作物及吸入塵土，其次才是攝取牲畜有關產品，而其中的特例是 Se-79，其影響主要來自攝取牲畜有關產品；Nb-94 和 Sn-126 的主要影響來自表土的曝露。由上述的結果可知對於不同核種各有不同的重要傳輸路徑，而針對這些不同路徑的影響參數需有不同的重要程度。

5. 結論

本報告依據我國處置場可能的生物圈環境並根據參考案例相關情節與資料，探討包含河岸表層土壤、飽和帶地下水、河水、河流沉積物、濱海鹽水和濱海沉積物環境之核種遷移路徑，和耕種、淡水捕魚和濱海捕魚三種可能的曝露群體，運用 GoldSim 平台生物圈劑量分析案例建立，結果顯示：

- (A)經評估國際間的生物圈評估使用的分析軟體，以及美國 DOE 對生物圈評估分析軟體的比較結果，建議我國未來可使用 GoldSim 平台作為生物圈評估的分析軟體之用。
- (B)GoldSim 確實可有效且彈性地建構生物圈評估模型，且分析過程可輕易地建立核種衰變鍊關係。
- (C)由本生物圈評估模型案例的建構與運跑結果，證實本研究已建立 GoldSim 與 Excel 表格的連結技術，此技術的使用將有助於模式參數使用的一致性，降低人工輸入的失誤並增加參數的管理效能。

由前述生物圈評估模型案例的建構與相關運用可知，在 GoldSim 平台上可彈性建構生物圈功能評估與安全評估模型，未來再連結源項、近場與遠場的評估模型，即可確實地進行處置場全系統劑量評估計算，有助於我國進行放射性廢棄物的最終處置工作。

本報告另將生物圈評估技術要項研究成果整理如附件四的問與答(Q&A)，以利專家學者進行意見交流與研討。

6. 建議

由於本研究主要與「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第0版)」中,「第七章處置設施之安全評估」之「(五)核種外釋到達人類活動範圍之傳輸機制」的其他傳輸機制項目有關。在其他傳輸機制中的生物傳輸,需進行生物傳輸機制分析,本報告即針對此機制探討耕種群體、淡水捕魚群體和濱海捕魚群體可能受到的劑量曝露機制分析。比較不同群體對不同傳輸機制造成的劑量,可瞭解產生人員劑量的主要核種傳輸途徑。

由本研究的演練可知,導則對生物圈評估的要求內容甚為合理,無論是傳輸機制說明、輸入資料、輸出資料、評估結果或使用之評估程式皆為進行劑量計算時必須交待的內容。因此,經由本研究之查核結果提出建議,認為對於審查導則(第0版)現有內容,應能符合處置設施安全分析審查工作之需要。

參考文獻

- 汪子文，”生物圈輻射劑量初期評估模式技術，調查實施與技術發展階段第三工作年度計畫”，SNFD-INER-90-509 (2002)。
- 馬志銘、張經昌，”生物圈輻射劑量評估技術，潛在母岩特性調查與評估階段一發展初步功能/安全評估技術(94-96 年計畫)”，SNFD-INER-90-572 (2007)。
- 陳智隆、蘇碩懿、劉育銓，”驗證與增進 GoldSim 平台的質傳管流模式”，台電工程月刊，第 688 期，第 100-110 頁 (2005)。
- 陳智隆，”在 GoldSim 平台建立與應用遠場(INPAG-F)與生物圈(AMBER)評估程式整合介面”，INER-4751R (2007)。
- 陳智隆、賴仁杰，”區塊傳輸模式(AMBER)與管流傳輸模式(GoldSim)的比較研究”，台電核能月刊，第 302 期，第 28-43 頁 (2008a)。
- 陳智隆、賴仁杰，”建立與驗證 GoldSim 平台的離散裂隙網路技術”，台電核能月刊，第 307 期，第 38-57 頁 (2008b)。
- 陳智隆、賴仁杰，”FEHM 與 GoldSim 的一維核種傳輸模擬比較與驗證研究”台電核能月刊，第 312 期，第 25-58 頁 (2008c)。
- 陳智隆，”發展具代表性放射性廢棄物處置評估模型之技術驗證”，台電核能月刊，第 317 期，第 21-38 頁 (2009)。
- 陳智隆，”放射性廢棄物處置多核種安全評估模型之技術發展”，台電工程月刊，第 750 期，第 41-51 頁 (2011)。
- 經濟部，”建議候選場址遴選報告”，低放射性廢棄物最終處置設施場址選擇小組 (2011)。
- 龔繼康、汪子文、方新發，”生物圈輻射劑量初期評估模式技術，調查實施與技術發展階段第四工作年度計畫”，SNFD-INER-90-535 (2003)。
- BIOMOVS II, “An Overview of the BIOMOVS II Study and its Findings. Stockholm”, Swedish Radiation Protection Institute, BIOMOVS II Technical Report No. 17

(1996).

J.W. Buck, G. Whelan, J.G. Droppo, D.L. Jr. Strenge, K.J. Castleton, J.P. McDonald, C. Sato and G.P. Streile, “Multimedia Environmental Pollutant Assessment System (MEPAS) Application Guidance, Guidelines for Evaluating MEPAS Input Parameters for Version 3.1”, Pacific Northwest Laboratory PNL- 10395 (1995).

CRWMS M&O, “Dose Conversion Factor Analysis: Evaluation of GEN II -S Dose Assessment Methods”, ANL-MGR-MD-000002 REV 00 (1999).

EPRI, “Evaluation of the Proposed High-Level Radioactive Waste Repository at Yucca Mountain Using Total System Performance Assessment”, Phase 6, EPRI TR-1003031 (2002).

EPRI, “Potential Igneous Processes Relevant to the Yucca Mountain Repository: Extrusive-Release Scenario”, EPRI TR-1008169 (2004).

IAEA, “Validation of models using Chernobyl fallout data from the Central Bohemia region of the Czech Republic Scenario CB, First report of the VAMP Multiple Pathways Assessment Working Group, Part of the IAEA/CEC Co-ordinated Research Programme on the Validation of Environmental Model Predictions (VAMP)”, IAEA-TECDOC-795 (1995).

IAEA, “An International Peer Review of the Biosphere Modelling Programme of the US Department of Energy’s Yucca Mountain Site Characterization Project”, Report of the IAEA International Review Team (2001).

IAEA, ““Reference Biospheres” for solid radioactive waste disposal, Report of BIOMASS Theme 1 of the BIOSphere Modelling and ASSESSment (BIOMASS) Programme”, Part of the IAEA Co-ordinated Research Project on Biosphere Modelling and Assessment (BIOMASS), IAEA-BIOMASS-6 (2003).

IAEA, “Environmental Modelling for Radiation Safety (EMRAS) - A Summary Report of the Results of the EMRAS Programme (2003–2007)”, IAEA - TECDOC-1678 (2012).

- IAEA, <http://www-ns.iaea.org/projects/emras/emras2/> (2013)
- JNC, “H12: Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan” (2000).
- C.D. Leigh, B.M. Thompson, J.E. Campbell, D.E. Longsine, R.A. Kennedy and B.A. Napier, “User’s Guide for GENII-S: A Code for Statistical and Deterministic Simulations of Radiation Doses to Humans from Radionuclides in the Environment”, Sandia National Laboratories SAND91-0561 (1993).
- B.A. Napier, R.A. Peloquin, D.L. Strenge and J.V. Ramsdell, “Conceptual Representation. Volume 1 of GENII: The Hanford Environmental Radiation Dosimetry Software System”, Pacific Northwest Laboratory PNL-6584 (1988).
- NCRP, “Recommended Screening Limits for Contaminated Surface Soil and Review of Factors Relevant to Site-Specific Studies”, NCRP Report No.129 (1999).
- NRC, “ENCLOSURE 1: RESPONSE TO ADDRESS KEY TECHNICAL ISSUE (KTI) AGREEMENT TOTAL SYSTEM PERFORMANCE ASSESSMENT AND INTEGRATION (RESPONSE TO TSPA1 1.02)” (2004).
- ORNL, “RISCC Computer Code Selection: AIRDOS-PC Clean Air Act Compliance Software for Personal Computers”, Oak Ridge National Laboratory CCC-551 (1990).
- ORNL, “RISCC Computer Code Selection, CAP88-PC Clean Air Act Assessment Package”, Oak Ridge National Laboratory CCC-542C (1995).
- ORNL, “RISCC Computer Code Selection, RASCAL 2.2 Radiological Assessment for Consequence Analysis”, Oak Ridge National Laboratory CCC-553 (1998).
- Quintessa Ltd., Geofirma Engineering Ltd. and SENES Consultants Ltd., “OPG’s Deep Geologic Repository for Low and Intermediate Level Waste – Postclosure Safety Assessment”, NWMO DGR-TR-2011-25 (2011).
- K.E. Rasmuson, K.R. Rautenstrauch, A.J. Smith, M.A. Wasiolek and D.W. Wu, “Biosphere Model Report”, Sandia National Laboratories, MDL-MGR-MD-000001 REV 02 (2007).
- J.F. Schmitt, C.H. Tung and G.T. Hanson, “Biosphere Process Model Report”, TRW

Environmental Safety Systems Inc., TDR-MGR-MD-000002 REV00 ICN01 (2000).

C. Yu, A.J. Zielen, J.J. Cheng, Y.C. Yuan, L.G. Jones, D.J. LePoire, Y.Y. Wang, C.O. Loureiro, E. Gnanapragasam, E. Faillace, A. Wallo, W.A. Williams and H. Peterson, “Manual for Implementing Residual Radioactive Material Guidelines Using RESRAD”, ANL/EAD/LD-2 (1993).

附件二：不同曝露群體的劑量轉換因子

RNs	Farming	Fresh Fishing	Marin Fishing	RNs	Farming	Fresh Fishing	Marin Fishing
Ac225	2.98E-05	2.24E-05	1.07E-06	Po218	3.36E-09	3.44E-09	1.5E-10
Ac227	5.61E-05	5.05E-05	2.79E-05	Pu239	1.39E-05	1.05E-05	8.5E-06
Ac228	2.98E-05	2.24E-05	1.07E-06	Pu240	1.36E-05	1.02E-05	8.23E-06
Am241	1.5E-05	1.15E-05	9.12E-06	Pu241	1.05E-07	7.05E-08	2.98E-08
Am243	2.9E-05	2.63E-05	2.07E-05	Pu242	1.31E-05	9.82E-06	7.91E-06
At217	98.323	4.41E-18	8.04E-19	Ra223	2.56E-06	7.93E-07	1.56E-06
At218	109.71	4.92E-18	8.04E-19	Ra224	2.3E-06	7.82E-07	1.1E-07
Bi210	98.323	4.41E-18	8.04E-19	Ra225	2.3E-06	7.82E-07	1.1E-07
Bi211	99.574	4.46E-18	1.07E-17	Ra226	2.3E-06	7.82E-07	1.1E-07
Bi212	98.318	4.41E-18	8.03E-19	Ra228	2.45E-06	8.32E-07	1.17E-07
Bi213	98.323	4.41E-18	8.04E-19	Rn219	99.79	4.47E-18	1.14E-17
Bi214	101.53	4.55E-18	8.07E-19	Rn220	98.318	4.41E-18	8.03E-19
Cm245	3.78E-05	2.97E-05	2.69E-05	Rn222	98.323	4.41E-18	8.04E-19
Cm246	3.46E-05	2.55E-05	2.4E-05	Sb126	267.53	1.2E-17	3.21E-17
Cs135	3.29E-08	6.17E-09	2.83E-10	Sb126m	99881	4.48E-15	1.05E-15
Fr221	98.323	4.41E-18	8.04E-19	Se79	1.69E-06	9.63E-09	1.03E-08
Fr223	322.8	1.45E-17	3.42E-16	Sm151	8.17E-10	4E-10	1.99E-10
Nb93m	9.09E-10	6.2E-10	7.45E-11	Sn126	1.42E-06	3.23E-05	6.84E-07
Nb94	1.18E-06	2.67E-05	4.02E-07	Tc99	4.38E-09	8.14E-10	9.27E-11
Np237	4.78E-06	2.84E-06	9.61E-08	Th227	7.74E-06	2.73E-06	4.54E-05
Pa231	0.000333	3.72E-05	3.01E-05	Th228	1.45E-06	5.28E-07	1.02E-07
Pa233	1.51E-09	1.84E-06	5.37E-10	Th229	7.97E-06	2.9E-06	5.63E-07
Pa234	2.27E-06	2.29E-07	1.82E-07	Th230	1.09E-06	3.96E-07	7.68E-08
Pa234m	2.19E-06	1.96E-07	1.71E-07	Th231	1.35E-06	4.93E-07	1.39E-06
Pb209	1.45E-05	3.84E-06	3.98E-07	Th232	5.43E-06	1.98E-06	3.84E-07
Pb210	1.45E-05	3.84E-06	3.98E-07	Th234	5.61E-06	2.04E-06	7.76E-07
Pb211	1.47E-05	3.88E-06	5.3E-06	Tl207	99.58	4.46E-18	1.06E-17
Pb212	1.45E-05	3.83E-06	3.98E-07	Tl208	98.318	4.41E-18	8.03E-19
Pb214	1.53E-05	4.06E-06	3.99E-07	Tl209	98.323	4.41E-18	8.04E-19
Pd107	1.03E-09	1.23E-10	3.79E-11	U233	5.36E-07	1.92E-07	2.56E-08
Po210	3.84E-06	4.35E-06	4.28E-08	U234	5.29E-07	1.89E-07	2.56E-08
Po211	2.43E-07	1.97E-08	1.82E-08	U235	5.19E-07	1.97E-07	2.39E-08
Po213	3.05E-09	3.09E-09	1.49E-10	U236	5.07E-07	1.81E-07	2.42E-08
Po214	3.14E-09	3.19E-09	1.5E-10	U237	5.96E-06	2.05E-06	2.89E-07
Po215	2.44E-07	1.97E-08	1.83E-08	U238	4.99E-07	1.8E-07	2.26E-08
Po216	3.03E-09	3.09E-09	1.48E-10	Zr93	8.97E-09	4.09E-09	3.2E-09

附件三：耕種群體的不同曝露途徑之劑量轉換因子

RNs	Ingestion water	Ingestion animal	Ingestion crops	Ingestion surface soil	Ingestion dust	Irra surface soil	Irra river water
Sm151	2.01E-10	2.75E-11	4.07E-10	1.02E-11	1.71E-10	1.46E-13	3.45E-16
Cs135	4.22E-09	3.18E-10	2.82E-08	1.47E-10	1.08E-11	4.01E-12	2.80E-15
Sn126	1.19E-08	1.79E-08	2.41E-07	3.85E-10	2.42E-10	1.15E-06	1.02E-09
Pd107	8.38E-11	6.57E-12	9.12E-10	1.15E-12	2.78E-11	0.00E+00	0.00E+00
Tc99	8.02E-10	8.28E-10	2.75E-09	9.81E-15	1.32E-14	4.57E-15	5.21E-15
Nb94	3.09E-09	2.78E-09	1.03E-08	1.22E-10	1.06E-09	1.16E-06	7.97E-10
Zr93	9.92E-10	4.61E-10	4.57E-09	1.39E-10	2.81E-09	0.00E+00	0.00E+00
Nb93m	2.63E-10	4.28E-11	5.64E-10	1.59E-12	3.57E-11	1.85E-12	7.46E-15
Se79	5.35E-09	1.42E-06	2.60E-07	6.96E-11	6.91E-12	7.30E-13	9.88E-16
Pu240	2.13E-06	3.62E-07	3.01E-06	5.07E-07	7.60E-06	1.01E-10	9.33E-14
U236	1.51E-07	1.57E-08	3.16E-07	4.42E-10	2.31E-08	1.86E-12	2.01E-14
Th232	1.67E-06	3.28E-07	3.43E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.40E-14
Ra228	7.35E-07	4.07E-07	1.31E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.72E-10
Th228	4.46E-07	8.75E-08	9.16E-07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.79E-10
Cm245	2.17E-06	8.18E-07	8.91E-06	1.74E-06	2.34E-05	8.05E-07	3.40E-11
Pu241	4.08E-08	8.82E-10	3.44E-08	5.76E-10	2.88E-08	7.63E-13	2.46E-16
Am241	2.17E-06	4.67E-07	3.84E-06	5.51E-07	7.90E-06	3.24E-08	4.56E-12
Np237	2.45E-06	8.36E-09	2.28E-06	9.95E-10	4.42E-08	9.48E-11	4.51E-12
Pa233	4.40E-10	6.79E-12	1.02E-09	2.74E-14	5.12E-12	4.21E-11	1.01E-14
U233	1.60E-07	1.67E-08	3.34E-07	4.67E-10	2.44E-08	1.23E-11	6.23E-14
Th229	2.45E-06	4.81E-07	5.04E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.67E-11
Cm246	2.17E-06	7.54E-07	8.56E-06	1.60E-06	2.16E-05	2.46E-10	3.70E-14
Pu242	2.02E-06	3.62E-07	2.93E-06	5.09E-07	7.28E-06	9.56E-11	8.39E-14
U238	1.49E-07	1.55E-08	3.11E-07	4.35E-10	2.12E-08	1.32E-09	5.27E-12
U234	1.58E-07	1.64E-08	3.30E-07	4.61E-10	2.44E-08	3.50E-12	3.02E-14
Th230	3.34E-07	6.56E-08	6.87E-07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.62E-14
Ra226	6.91E-07	3.82E-07	1.23E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.26E-10
Pb210	3.12E-06	5.67E-06	5.72E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.30E-13
Po210	8.06E-07	1.49E-06	1.54E-06	1.07E-10	6.16E-09	1.66E-14	1.27E-16
Am243	2.17E-06	1.05E-06	6.48E-06	1.29E-06	1.64E-05	1.54E-06	1.24E-10
Pu239	2.13E-06	3.76E-07	3.06E-06	5.28E-07	7.85E-06	2.15E-10	8.50E-14
U235	1.54E-07	1.60E-08	3.20E-07	4.48E-10	2.12E-08	6.81E-09	2.97E-11
Pa231	6.26E-06	1.45E-06	2.95E-04	1.81E-06	2.76E-05	1.62E-07	3.94E-11
Ac227	8.61E-06	4.78E-07	2.06E-05	1.76E-07	2.61E-05	1.20E-07	3.56E-11

附件三：耕種群體的不同曝露途徑之劑量轉換因子(續 1)

RNs	Ingestion water	Ingestion animal	Ingestion crops	Ingestion surface soil	Ingestion dust	Irra surface soil	Irra river water
Sm151	24.65%	3.37%	49.83%	1.25%	20.89%	0.02%	0.00%
Cs135	12.83%	0.97%	85.71%	0.45%	0.03%	0.01%	0.00%
Sn126	0.84%	1.26%	16.97%	0.03%	0.02%	80.81%	0.07%
Pd107	8.12%	0.64%	88.44%	0.11%	2.69%	0.00%	0.00%
Tc99	18.32%	18.90%	62.78%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Nb94	0.26%	0.24%	0.88%	0.01%	0.09%	98.46%	0.07%
Zr93	11.06%	5.14%	50.94%	1.55%	31.31%	0.00%	0.00%
Nb93m	28.96%	4.71%	62.02%	0.17%	3.93%	0.20%	0.00%
Se79	0.32%	84.30%	15.38%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Pu240	15.63%	2.66%	22.13%	3.72%	55.86%	0.00%	0.00%
U236	29.91%	3.11%	62.34%	0.09%	4.56%	0.00%	0.00%
Th232	30.76%	6.04%	63.20%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Ra228	30.02%	16.60%	53.37%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%
Th228	30.75%	6.04%	63.19%	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%
Cm245	5.73%	2.16%	23.54%	4.61%	61.83%	2.13%	0.00%
Pu241	38.69%	0.84%	32.63%	0.55%	27.29%	0.00%	0.00%
Am241	14.49%	3.12%	25.66%	3.68%	52.82%	0.22%	0.00%
Np237	51.21%	0.17%	47.67%	0.02%	0.92%	0.00%	0.00%
Pa233	29.07%	0.45%	67.36%	0.00%	0.34%	2.78%	0.00%
U233	29.91%	3.11%	62.35%	0.09%	4.54%	0.00%	0.00%
Th229	30.76%	6.04%	63.20%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Cm246	6.26%	2.17%	24.70%	4.61%	62.25%	0.00%	0.00%
Pu242	15.40%	2.76%	22.35%	3.88%	55.60%	0.00%	0.00%
U238	29.92%	3.11%	62.37%	0.09%	4.24%	0.26%	0.00%
U234	29.89%	3.10%	62.31%	0.09%	4.60%	0.00%	0.00%
Th230	30.76%	6.04%	63.20%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Ra226	30.02%	16.60%	53.36%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%
Pb210	21.50%	39.08%	39.42%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Po210	20.99%	38.80%	40.05%	0.00%	0.16%	0.00%	0.00%
Am243	7.49%	3.63%	22.35%	4.46%	56.76%	5.30%	0.00%
Pu239	15.25%	2.70%	21.98%	3.78%	56.29%	0.00%	0.00%
U235	29.64%	3.08%	61.79%	0.09%	4.08%	1.31%	0.01%
Pa231	1.88%	0.44%	88.79%	0.54%	8.29%	0.05%	0.00%
Ac227	15.36%	0.85%	36.64%	0.31%	46.62%	0.21%	0.00%

附件四：生物圈評估技術要項問與答(Q&A)

Q1：生物圈評估不是就是 BIOMASS 和 ERB 1 模型？

A1：

BIOMASS 只是 IAEA 生物圈研究的階段性專案(Project)名稱，而 ERB 1 只是 BIOMASS 中的一個參考生物圈案例。詳細說明如下。

IAEA 對生物圈的研究主要區分成 5 個時期，說明如下：

(1) BIOMOVS (1985 – 1990)

BIOMOVS (**B**IOspheric **M**odel **V**alidation **S**tudy)是一個國際合作研究計畫，最初由瑞典輻射管理局(Swedish Radiation Authority)於 1985 年發起，之後由 IAEA 贊助此研究計畫。計畫區分成 BIOMOVS 和 BIOMOVS II 兩階段。此計畫主要進行放射性核種和其他微量元素在環境中的轉移和生物累積機制量化之模式設計，其中包括：(A) 測試環境評估模型的預測精度；(B) 建議未來的研究重點，用以改善這些預測的準確性；(C) 說明本研究中不同模式預測結果的差異。

(2) VAMP (1988 – 1994)

鑑於車諾比事件(Chernobyl accident)，在 1988 年國際核安全諮詢組(INSAG)建議 IAEA 成立「陸地、城市與水文環境之放射性核種遷移模型驗證及有關資料彙整計畫，該計畫簡稱為 VAMP (**V**Alidation of **M**odel **P**redictions)。該計畫主要目的在運用前蘇聯和許多歐洲國家在車諾比事件後之核種活度測量結果，作為放射性核種的環境行為評估模型的可靠性測試，並用以評估所有的核燃料循環的放射性影響。

該計畫區分成四個研究小組，包括陸地環境工作小組、城市環境工作小組、水文環境工作小組和多途徑評估工作小組。該計畫整體目標為：(A) 運用因車諾比事件造成之核種遷移環境資訊作為評估模型的驗證機制；(B) 基於前述目的，從受影響國家彙整有關資訊；(C) 彙整

當前環境模型作成報告，並作為車諾比事件後改進模型的依據。

(3) BIOMASS (1996 – 2002)

IAEA 於 1996 年開始 BIOMASS (**B**IOsphere **M**odelling and **A**S-**S**essment)計畫，此計畫主要著重於發展與增進對放射性核種在環境中遷移的預測能力，該計畫區分成三個研究主題：

主題 1：放射性廢棄物處置。目標在發展一個標準或參考生物圈的概念，用以作為處置場長期安全評估，為達成此目標，在此主題下籌組 6 個工作小組，包括：關鍵群體和其他曝露群體的界定原則小組、評估模型資料運用原則小組、考量替代評估範圍小組、生物圈系統定義與識別小組、生物圈描述小組、以及模式發展小組。

在此主題下提出下列三種參考生物圈案例(Example Reference Biosphere, ERB)：

- ERB 1 – 飲用水井深入受污染的含水層。
- ERB 2A – 農業灌溉水井深入受污染的含水層。
- ERB 2B – 從受污染的含水層產生之天然補注進入不同的棲息地，包括耕地，牧場，半天然濕地和湖泊等。

ERB 1 又區分成兩種情形，ERB 1A：假設地質模型可供推算井內的核種濃度；ERB 1B：假設生物圈模型範圍含括提供飲用井水的近地表含水層。

主題 2：環境外釋。BIOMASS 提供一個有助於增進環境外釋之輻射曝露評估方法與模型信心的國際論壇，此主題下有兩個小組關注於重建人類接受過去外釋於環境的放射性核種產生的輻射劑量，及評估其補救措施效益的議題。

主題 3：生物圈進程。此主題目標在增進生物圈特定部份的核種遷移模擬能力，此生物圈特定部份與模式建構可能有程度上的差距。此主題下有三個小組分別測試以下模型：環境中氫長期的擴散行為模

型、經由水果攝入放射性核種的模型，以及森林生態內的放射性核種遷移和累積模型。

(4) EMRAS I (2003 – 2007)

EMRAS I (**E**nvironmental **M**odelling for **R**adiation **S**afety)計畫主要延續 BIOMASS 的放射性生態學評估與模擬研究計畫，EMRAS I 主要著重於模型預測能力的不確定性，特別是特定環境型態之放射性核種外釋可能造成的結果、具放射性核種殘留的場址復原及對非人類物種的影響。此計畫區分成三個主題：

主題 1：放射性外釋評估。

主題 2：具放射性核種殘留的場址復原。

主題 3：環境保護。主要進行生物群體劑量評估的模型驗證。

(5) EMRAS II (2009 - 2011)

EMRAS II 延續前述計畫，對於環境模擬的主要目標為：

- 測試用以評估環境內核種遷移和對人類與環境造成放射性衝擊之模擬模型的性能。
- 發展與改進針對特定環境的模擬模型。
- 提供作為經驗、想法和研究訊息交流的國際論壇。

共區分成三個主題：

- 主題 1：人員劑量評估參考方法。
- 主題 2：生物群劑量評估參考作法。
- 主題 3：評估緊急狀況的作法。

Q2：美國雅卡山(Yucca Mt.)計畫的生物圈評估分析軟體為何？

A2：

美國 DOE 目前以 GoldSim 軟體建構一套針對雅卡山場址的生物圈特性及考量情節的模型 ERMYN (Environmental Radiation Model for Yucca Mountain Nevada)。美國 DOE 對生物圈評估軟體的詳細選擇過程與考量如下所述。

美國雅卡山(Yucca Mt.)計畫目前被暫停中，但該計畫被暫停以前已執行至申請執照階段，故該計畫的執行成果仍值得參考。該計畫在建議場址(Site Recommendation, SR)階段對當時的生物圈評估軟體進行分析，以選擇適用的分析工具，其篩選條件為：

- 1.以環境劑量評估為主要目的並為監管機關可接受
- 2.使用特定條例(如 ICRP-30)指定的方法論
- 3.可考慮雅卡山計畫的全部或大部分重要情節
- 4.可評估長期緩慢的外釋情節
- 5.可進行序率模擬(Stochastic Modelling)的不確定分析
- 6.以食物和飲水型態反應特定群體(Critical Group)的特徵
- 7.以地下水中的放射性核種濃度當作地下水污染情節的源項(Source)
- 8.是已有的電腦軟體

評估的電腦程式有橡樹嶺國家實驗室發展的 AIRDOS-PC、CAP-88PC 和 RASCAL，及 RESRAD、MEPAS、GENII 和 GENII-S。評估結果僅 GENII-S 符合所有條件，故雅卡山計畫在 SR 階段選用 GENII-S 程式，根據雅卡山場址生物圈特性，計算劑量轉換因子(Dose Conversion Factor, DCF)供作全系統安全評估之生物圈劑量評估使用。

IAEA 在 2000 年受美國能源部(DOE)委託對雅卡山計畫的生物圈模擬評估計畫進行專家審查，其發現 GENII 和 GENII-S 有一些缺點：

- 該程式模擬方式較固定，甚難對具體或尚未發現的需要進行調整，

如因土壤侵蝕導致之核種外釋情形或替代處置方式等。

- 該程式一次僅能針對一個核種進行模擬，顯而易見的，該程式無法模擬核種衰變狀況。
- 該程式無法輕易的獲取計算過程中的成果，特別是 GENII-S。如此甚難明白核種在生物圈內的遷移行為，和模式模擬的果效。

因此，DOE 發展 ERMYN (Environmental Radiation Model for Yucca Mountain Nevada)以取代 GENII-S。ERMYN 本質上就是使用 GoldSim 軟體進行生物圈模型的建構。ERMYN 根據雅卡山場址的生物圈特性及考量的情節，在 GoldSim 平台上建構完成後與五個其他程式建構模型 (GENII/GENII-S/GENII Version 2、BIOMASS ERB2A、EPRI-YM、RESRAD 和 NCRP-129)進行比較。EPRI-YM 是美國電力研究所(EPRI)從 1996 年開始發展用以模擬雅卡山場址的地下水外釋情形，主要根據 BIOMASS ERB2A 進行發展，另外發展火山噴發情節之核種外釋分析模型。NCRP-129 由美國輻射防護與測量國家委員會(NCRP)發展，主要針對土壤污染情節進行分析。ERMYN 與其他模型的比較結果顯示，ERMYN 僅三個評估路徑情節無法達成優於其他模型，其中空氣曝露情節和浸水曝露情節造成的劑量遠低於土壤曝露情節的劑量，且該地區並不食用內臟，故該三種情節應可予以排除。

Q3：國際間的其他處置計畫所使用的生物圈評估分析軟體為何？

A3：

各國在生物圈評估上使用的軟體各有其特殊考量。在功能評估上：西班牙使用 TOUGH，瑞士用 TAME，而加拿大以 BIOTRAC、BIOTRAC2 計算生物圈內含水層內核種濃度。安全評估上：瑞典 Ecolego、MIKE SHE、PANDORA 和 ERICA；日本 AMBER；西班牙 GIS、UNTAMO、PANDORA 和 EIKOS；芬蘭 UNTAMO、SHYD、Pandora 和 Ecolego，各國使用在生物圈安全評估的分析軟體各有差異。另外，GoldSim 平台亦普遍被使用，除美國運用建構在 GoldSim 平台上的 ERMYN 進行生物圈分析外；西班牙則運用 GoldSim 進行遠場核種傳輸評估並作為安全評估的整合介面；芬蘭在 2011 年的報告中也運用 GoldSim 作為核種在近場和遠場的安全評估計算。

在低放處置方面，以加拿大中低階放射性廢棄物 DGR(Deep Geologic Repository)最終處置場的安全評估為例，其考量的生物圈情節有：(1)含有核種的地下水外釋至鄰近的休倫湖之湖水外釋情節；(2)人類抽取地下水進行農耕、畜牧等的井水情節。並以 AMBER 作為安全評估分析程式。

Q4：我國的生物圈評估技術發展歷程？

A4：

我國生物圈評估技術主要隨著「我國用過核子燃料處置計畫」的研究進程而發展。在「調查實施與技術發展」階段，生物圈輻射劑量評估主要以 GENII 為主軸，並進行有關的環境參數蒐集；在「潛在母岩特性調查與評估」階段，引進 AMBER 程式並根據 IAEA BIOMASS 方法，建構 ERB 1A 和 ERB 1B 飲水情節。

Q5：對我國的生物圈評估技術發展的建議？

A5：

由 IAEA 對於 BIOMASS 的參考生物圈案例的描述可知，其區分成三階段(ERB 1, ERB 2A, ERB 2B)或四階段(ERB 1A, ERB 1B, ERB 2A, ERB 2B)乃是提供作為建構生物圈評估時，不同複雜程度的階段區別之用，並非特定分析模式；而 GENII 因無法有效考量核種衰變鍊關係而被美國 DOE 以 ERMYN 取代；AMBER 為另一套進行生物圈評估的軟體，日本、西班牙、加拿大 DGR 和我國都曾使用過，AMBER 主要以區塊模式(Compartmental Model)模擬核種遷移現象，GoldSim 的區塊模組(Cell Module)也具有相同功能，但 GoldSim 另外具備與 FracMan/PAWorks 直接連結的功能，可進行裂隙網路的主要路徑核種遷移現象模擬。儘管 AMBER 也可以被 GoldSim 平台直接呼叫運跑並成果展示，但基於生物圈評估所需參數眾多並需要進行機率分析，因此，建議在 GoldSim 單一平台上進行生物圈評估技術發展是較為可行的。

Q6：如何在 GoldSim 平台上建構生物圈評估模型？

A6：

經濟部於 100 年 3 月 29 日公告「建議候選場址遴選報告」，建議將台東縣達仁鄉及金門縣烏坵鄉列為建議候選場址。其中，台東縣達仁鄉境內多溪流，該地區考量的曝露途徑除地下水的飲用情節外，河流遷移情節可能是另一個需要考量的重要情節。國際間討論此重要情節有充足的參數資料且相關的研究並不多見，日本 H12 是其中之一，該報告生物圈評估假設的參考案例，假設核種外釋於河流，且河流流經人類居住地，在人類居住地因人類飲用河水、利用河水灌溉作物或眷養牲畜，而導致人類接觸核種，造成人員劑量。因此，參考此案例在 GoldSim 平台上建立生物圈評估模型，詳細內容如下。

(1)參數

該案例假設核種經由地下含水層直接流入河水，並在河岸表層土壤、土壤內的飽和帶地下水、河水、河流沉積物、濱海鹽水和濱海沉積物之間遷移。關鍵群體接受的劑量來自嚥入(ingestion)、吸入(inhalation)和接觸三種不同途徑，並依不同的關鍵群體特性有不同特性的接受劑量途徑。案例中使用的參數包括：(1)介質特性參數、(2)遷移特性參數、(3)從土壤到作物的轉換因子、(4)成人對各類食物的攝食量、(5)不同沉積物對各種元素的吸附係數、(6)各種元素從土壤傳輸到農作物的濃度轉換因子、(7)各類動物產品的各元素轉換因子、(8)淡水生物的各元素濃度轉換因子、(9)濱海生物的各元素濃度轉換因子、(10)成人生活習慣可能接觸核種的相關參數、(11)牲畜生活習慣可能接觸核種的相關參數、(12)農作物特性相關的參數、(13)農作物的風化速率、(14)農作物的各元素轉換比、(15)農作物處理成食物的損失率以及(16)海水水霧強化因子。

(2)衰變鍊

案例使用的衰變鍊包含：(1)活化與分裂產物、(2)4N 系列、(3)4N+1 系

列、(4)4N+2 系列、(3)4N+3 系列。

(3) 案例模型建立

將生物圈評估模式建立在 GoldSim 平台上，將有助於全系統安全評估的進行，因此，本分析案例即建構在 GoldSim 平台上。在 GoldSim 平台上依不同參數種類與特性以資料夾方式進行分類。案例模型建立核種在河岸表層土壤、土壤內的飽和帶地下水、河水、河流沉積物、濱海鹽水和濱海沉積物之間遷移路徑關聯。再依不同群體接受不同途徑的劑量特性，建構不同的劑量曝露途徑。

Q7：如何得到生物圈的劑量轉換因子？

A7：

生物圈的安全評估模型通常以劑量轉換因子作為代表。經由本研究的案例的建立與分析過程可知，核種在河岸表層土壤、土壤內的飽和帶地下水、河水、河流沉積物、濱海鹽水和濱海沉積物之間複雜的遷移過程，以及最終對耕種、淡水捕魚和濱海捕魚三種可能曝露群體造成的劑量結果，此乃功能評估模型的分析結果，而安全評估模型所使用的劑量轉換因子結果乃由 1 Bq/yr 的不同核種透過生物圈傳輸途徑針對不同曝露群體獲得此不同核種的劑量轉換因子，如此無論處置場安全評估中的源項、近場或遠場的核種存量或遷移途徑改變，皆不影響生物圈的安全評估結果，最終的曝露群體劑量只要根據進入生物圈不同核種的年活度乘上劑量轉換因子即可獲得。隨著生物圈模型與模型使用的參數和數值不同，會有不同的劑量轉換因子。

Q8：生物圈核種外釋評估審查要項

A8：

生物圈核種外釋評估需注意(1)分析軟體(2)參數數量(3)主要情節與參數。詳細說明如下。

(1)分析軟體

從生物圈分析評估模型案例建構在 GoldSim 平台上，及分析運跑過程發現，生物圈內的核種傳輸行為以 GoldSim 的區塊模組(Cell module)足以模擬，由區塊間的固體沈積物傳輸理論驗證亦已證實 GoldSim 區塊模組可以進行固體沈積物的核種遷移模擬；GoldSim 內的方程式模組可以方便地計算群體接觸核種的各類曝露途徑；另外，分析參數敏感度時，亦可在 GoldSim 平台內輕鬆地加入參數取樣分佈模組，並連結該參數的取樣計算方式。生物圈的分析評估模型在 GoldSim 平台乃隨使用者依實際模擬需要進行建構，並未受限於某特定核種傳輸途徑或曝露途徑，此部份對於我國目前處置場可能影響的生物圈位置未明朗前，確實可以有很大的彈性發展空間。

(2)參數數量

由前述生物圈分析評估模型案例說明可知，所有使用的參數近千個，若再考量各參數可能的分佈上限值和下限值，則需要的參數數量將再增加約 2 倍。因此，參數的引用來源與管理將成為很重要的一環，此部份亦是進行生物圈評估時很龐大的工作。從在 GoldSim 平台上建構生物圈分析評估模型案例的經驗，顯示經由 GoldSim 以呼叫 Excel 表格的連接方式來進行相關參數的輸入，不僅可節省在 GoldSim 內建構模型時輸入參數的時間，對於參數的引用可避免人工輸入的錯誤，亦有助於模型參數的維護和管理，此點也是使用 GoldSim 進行生物圈評估分析的一大優點。

(3)主要情節與參數

不同曝露群體受核種輻射作用的主要曝露途徑不同，因此，對於主要傳輸或曝露途徑的掌握有助於規劃生物圈的研究方向。另外，透過參數敏

感度分析將有助於瞭解在整個生物圈模型中那些參數對結果的影響最明顯，而參數分佈的均值化有助於結果的比較以及明白參數之間的分佈範圍差異，這些結果皆可提供作為生物圈中參數深入研究的規劃參考依據。

Q9：低放射性廢棄物審查導則安全評估章節之精進建議

A9：

本研究主要與「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版草案)」中，「第七章 處置設施之安全評估」之「(三)正常狀況之輻射劑量」、「(四)異常狀況之輻射劑量」以及「(五)核種外釋到達人類活動範圍之傳輸機制」有關。導則中要求輻射劑量評估需包括傳輸機制說明、情節分析、輸入資料、輸出資料、敏感度分析、不確定性分析、評估結果及使用之評估程式等。

由本研究的演練可知，導則的要求內容皆為合理，且符合進行劑量計算時所必須應有的作為。因此，經由本研究之查核結果提出建議，認為對於審查導則(第 0 版)現有內容，應能符合處置設施安全分析審查工作之需要。