



行政院原子能委員會  
放射性物料管理局

行政院原子能委員會放射性物料管理局

委託研究計畫研究報告

低放射性廢棄物處置安全管制技術發展

子計畫三：低放射性廢棄物處置設施

安全評估審查規範精進之研究

期末報告

計畫編號：103FCMA002

計畫主持人：董家鈞

子計畫三主持人：李明旭、蔡世欽

受委託機關(構)：國立中央大學

報告日期：中華民國 103 年 12 月



## 摘要

子項計畫三之工作在針對低放射性廢棄物處置設施之安全評估審查規範議題，主要工作包含透過蒐集與研析國際原子能總署最新之安全評估模式技術報告、整理與研析處置安全分析相關模式所需關鍵參數、釐清不同處置安全分析模式之產出與不同模式間之關聯、進而研擬處置全系統安全評估模式架構暨整合技術發展精進建議。主要成果在國際原子能總署技術報告研析部分，包含地下水與傳輸模式、地表水與傳輸模式、暴露評估(劑量)等模式研析其所需關鍵參數，與近地表處置安全指引 SSG-29 (IAEA, 2014)中設施封閉後的輻射安全標準，設施經營者、管制機構及政府的權責劃分，處置設施的安全作法，安全分析案例與評估，處置設施階段性發展及達成方法之研析。在關鍵參數整理與研析部分，完成源項模式、近場與遠場模式之銜接架構與相關關鍵參數整理分析，並分析源項模式與處置單元相關(工程設計)之關鍵參數、近場模式與場址特性相關所需參數、近場模式與設施設計相關所需參數、遠場模式與場址特性相關所需參數，裨益回饋子計畫一處置場址特性與子計畫二處置設施設計相關研究參考。在全系統架構應涵蓋源項、近場、遠場與生物圈劑量風險評估模式，在模式選取上應考量不同模式間之輸入與輸出是否可合理銜接，且應建立所選用模式與引用參數之 QA 文件。在整合技術發展精進建議部分，未來應先建立符合國內未來處置工作與水文地質特徵之基本(參考)情節傳輸，確認所需考慮之變異情節組合，釐清影響評估結果之主要不確定性來源，並提出安全評估之整合安全論證。此外，針對國內低放處置現況，應確認所應考慮之變異情節組合是否足以涵蓋未來地質、水文、氣候變遷等自然環境演化對處置安全的可能衝擊，對於人為無意闖入的情節也應提出。在情節發展上應加強海洋外釋情節的發展與建立，未來由於涉及海岸地區、近岸海域、或離島，安全分析模式須能考量特殊之海域與陸域間水體傳輸與交換機制。最後並依上述成果提出低放審查導則(第 0 版)安全分析有關章節與條文內容修訂建議詳述於附錄一，以精進國內在低放射性廢棄物處置安全評估審查技術。

## **Abstract**

Task 3 focuses on standard review plans for the safety analysis report of low-level radioactive waste disposal facilities and includes the following working items: review and analyze safety assessment models newly suggested by the International Atomic Energy Agency (IAEA); identify key parameters required in safety assessment models; build linkages among inputs and outputs of different models, propose a comprehensive structure of safety assessment models and suggest future developments for integration of safety analysis techniques. Major achievements on reviewing the IAEA reports include identifying key parameters required for simulating groundwater flow and transport, surface water flow and transport, exposure dose assessments. Another IAEA report reviewed was the safety guidelines for near-surface disposal (SSG-29). Concise summarization given for the report includes radiation constraints at different stages, safety case and assessment methodology, various step-by-step procedures in developing disposal facilities. Achievements on key parameters required by different safety models include identifying key parameters essential to source-term models, near-field models, and far-field models, as well as, linkages among different models. In additions, how these key parameters required by different models related to engineering designs and site characterizations were clarified to support future studies of site characterization in Task 1 and engineering designs in Task 2. Suggestions on the comprehensive structure of safety assessment models should contain source-term model, near-field model, far-field model, and dose-assessment model. The selection criteria on models are whether outputs from one model can support the input needed by the other model. The QA documents of all models used should be well documented. On future safety assessment technology developments, we suggest the reference FEPs should be constructed with emphases on representing particular hydrogeological characteristics involved in possible disposal sites in Taiwan. Alternative FEPs should be identified with all possible variations which might affect safety function of disposal facilities. Uncertainties involved in different stages of safety assessments should be carefully investigated and taking into consideration of how these uncertainties might affect the overall safety. On the other FEPs developments, one should also consider possible leaching of radiation into the ocean; therefore models selected should be able to simulate interactions between terrestrial water and sea water. Human intrusion FEPs should be developed as well. Based on these achievements, suggestions related to safety analysis involved in the Review Guidelines on Safety Assessment of Low-Level Waste Disposal Repository (0 version) were provided in Appendix I.

# 目錄

摘要 .....	i
Abstract .....	ii
圖目錄 .....	v
表目錄 .....	vi
第一章、前言 .....	1
第二章、國際原子能總署安全評估模式技術報告研析 .....	3
2.1 國際原子能總署近地表處置安全指引(SSG-29) .....	3
2.1.1 設施封閉後的輻射安全標準 .....	3
2.1.2 設施經營者、管制機構及政府的權責劃分 .....	4
2.1.3 達成處置設施安全目標的措施 .....	5
2.1.4 安全論證與安全評估 .....	8
2.1.5 處置設施階段性發展及安全達成方法 .....	9
2.1.5.1 場址特性調查階段 .....	9
2.1.5.2 處置設施設計階段 .....	10
2.1.5.3 廢棄物接收要求 .....	10
2.1.5.4 建造階段 .....	11
2.1.5.5 運轉階段 .....	11
2.1.5.6 封閉及監管階段 .....	12
2.2 國際原子能總署安全評估模式技術報告研析 .....	13
2.2.1 地下水與傳輸模式關鍵參數需求 .....	17
2.2.2 地表水與傳輸模式關鍵參數需求 .....	20
第三章、處置安全分析模式所需關鍵參數整理與研析 .....	21
3.1 源項模式 .....	21
3.1.1 源項模式關鍵因子 .....	22
3.1.1.1 源項模式污染源幾何因子 .....	22
3.1.1.2 源項模式地球化學反應因子 .....	22
3.1.2 源項模式模擬所需參數 .....	23
3.1.2.1 源項模式與處置單元相關參數 .....	23

3.1.2.2 源項模式與場址環境相關參數 .....	23
3.1.2.3 源項模式與核種相關參數 .....	24
3.1.3 常用的源項模式 .....	24
3.2 近場模式 .....	24
3.2.1 近場模式關鍵因子與參數 .....	27
3.2.1.1 近場模式與場址特性相關參數 .....	27
3.2.1.2 近場模式與設施設計相關參數 .....	27
3.3 遠場模式 .....	28
3.3.1 遠場模式與場址特性相關參數 .....	28
3.3.2 生物圈模式與核種相關參數 .....	28
第四章、處置安全分析模式之產出與不同模式間之關聯研析 .....	31
4.1 安全分析模式銜接架構 .....	31
4.1.1 安全分析模式關鍵參數與模式間之關聯 .....	31
4.2 SKB TR-10-51 技術報告研析 .....	32
4.2.1 SKB SR-Site 安全評估所使用模式與目的 .....	33
第五章、處置全系統安全評估模式架構研擬暨整合技術發展精進建議 .....	37
5.1 全系統安全評估程式架構 .....	37
5.1.1 源項模式 .....	37
5.1.2 近場及遠場模式 .....	37
5.1.3 生物圈模式 .....	38
5.1.4 全系統評估整合模式 .....	38
5.2 低放處置安全評估整合技術發展建議 .....	38
第六章、低放審查導則安全分析有關章節與條文內容修訂建議 .....	41
第七章、結論與建議 .....	43
參考文獻 .....	45
附件一 .....	49
附件二 .....	84

## 圖目錄

圖 2.1 近地表處置設施發展階段說明.....	7
圖 2.2 近地表處置設施發展階段各單位權責劃分說明.....	7
圖 2.3 安全論證的執行流程.....	9
圖 2.4 安全評估的執行內容.....	9
圖 2.5 不同功能安全評估模式的關聯.....	14
圖 2.6 低放處置安全評估模式的關聯(來源：任春平，2008).....	15
圖 3.1 放射性核種自廢棄物外釋至周圍污染土壤中之源項示意圖.....	21
圖 3.2 源項模式地化反應.....	22
圖 3.3 部份生物地化反應作用圖.....	23
圖 3.4 低放處置多重障壁概念(來源：中興工程 2013).....	26
圖 3.5 低放處置模式銜接組合.....	26
圖 4.1 低放處置模式關鍵參數與架構.....	32

## 表目錄

表 2.1 核種傳輸過程互動矩陣.....	16
表 2.2 HYDROGEOCHEM 關鍵參數與輸出.....	18
表 2.3 河川與地表逕流模式關鍵參數與輸出.....	20
表 4.1 SKB SR-Site 在開挖/運轉與溫暖期之安全評估模式與模擬目的 .....	34
表 4.2 SKB SR-Site 安全評估模式功能與輸出入資訊整理 .....	34



## 第一章、前言

國內放射性廢料處置依據放射性廢料管理方針第2章第8條所述「放射性廢料之最終處置，採境內、境外並重原則，積極推動；不論境外是否可行，仍應在境內覓妥處置場址備用」。民國95年5月24日所公布之「低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例」，希望藉由法定程序之規定與推動，使最終處置場址之選址工作能達到技術專業化與資訊透明化之要求，使最終處置選址工作得以順利推動，以徹底解決我國低放射性廢棄物處置課題，維護國家永續發展兼顧民眾安全健康與環境保護。經濟部已於99年9月10日公告「台東縣達仁鄉」及「金門縣烏坵鄉」等2處為低放射性廢棄物最終處置設施潛在場址，於101年7月3日核定公告「台東縣達仁鄉」及「金門縣烏坵鄉」2處為建議候選場址。原能會物管局為審查台電公司「低放射性廢棄物最終處置計畫書」之主管機關，積極要求台電公司就現已建置之低放處置技術發展成果加以整合為「低放射性廢棄物最終處置技術可行性評估報告」，以提報物管局備查後公告，並應就各年技術發展成果加以更新，於102年3月底前提報物管局備查後公告，以增進民眾對處置安全性之了解，並提升民眾對低放處置設施接受度(中興工程，2013)。

而在低放射性廢棄物最終處置管制技術規範的研訂方面，物管局於101年度初步完成「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則(第0版)」。目的在依安全管制需求，逐步建立低放射性廢棄物最終處置相關之管制技術規範及審查技術，使設施設計、安全評估及施工營運能確保安全(物管局，2012)。為提升管制技術及持續精進管制規範，子項計畫三針對低放射性廢棄物處置設施安全評估審查規範精進之研究，透過釐清關鍵參數與不同安全評估模式間之連結架構，以提升該項關鍵管制技術之技能與回饋審查規範的精進。

國內多年來在物管局科研經費支持下，針對低放射性廢棄物最終處置設施相關之隧道處置水文地質概念模式審查技術(董家鈞、陳瑞昇，2005)、隧道處置水文地質模擬技術發展現況與國內隧道工程水文地質模擬案例(董家鈞、陳瑞昇，2006)、安全審查規範(李境和，2007)、安全評估模式審查規範(任春平，2008)、道處置技術審查要項(吳禮浩，2009)、坑道處置安全評估關鍵議題(張福麟，2011)、安全分析模式驗證及場址特性調查審查技術(李明旭、董家鈞，2012)、設施安全分析源項審查技術(陳智隆、賴仁杰，2012)、情節分析審查技術發展(吳禮浩，2012)、低放射性廢棄物處置設施安全評估審查規範精進之研究(李明旭、蔡世欽，2013)等議題，雖已投入諸多人力與資源，但由於處置技術之發展除所涉及面向相當廣泛，涵蓋地球科學、水文、地質、工程等，國內已投入之科研人力與資源相對於國外先進技術已純熟國家而言，國內之研發能量仍在起步階段且相對不足。

從國際上在處置設施安全評估之技術發展而言，國際原子能總署(IAEA)之相關技術報告中，針對近地表核廢料處置場安全評估方法即有相關技術報告(IAEA, 2004)，其附錄中即評比相關模式軟體、案例、所需輸入資料與模擬成果等。對於地表核廢料污染場址整治所需相關技術亦有論文集出版(IAEA, 2009)。最新發展為針對處置設施重新定義安全事例與安全評估規範(IAEA, 2012)。此外近年來由於模式發展突飛猛進，IAEA 邀請國際知名學者針對安全分析模式研析相關技術報告(IAEA, 2013)，針對國際上現有應用於放射性污染場址整治所需相關之安全分析模式進行模式評比與檢視。而美國原子能總署(NRC)則對低階核廢料處置場址之安全評估方法建立相關技術導則(NRC, 2000)，針對情節、概念模式發展技巧、核種外釋機制以及相對應的數學評估模式進行探討。2004年NRC邀請跨部會屬在美國新墨西哥州舉辦環境模式國際研討會，針對核種之水力地化反應傳輸模式進行探討(NRC, 2006)。2012年NRC更進一步重新檢討其低放審查導則 10CFR PART61 之修訂，包括處置功能評估期限由先前 1,000yr 提高至 10,000yr 與增加 dose peak after 10,000yr、增加 inadvertent intruder protection、修訂 FEP 情節分析與 waste acceptance criteria (NRC, 2012)，雖尚未核定通過，但從管制觀點而言對輻射安全要求將嚴格 10 倍，其未來衝擊值得國內進一步追蹤。而亞洲鄰近國家日本 JNC 之 H12 (Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan, 2000) 報告雖為針對高階核廢料最終處置所需，但其技術支援報告 3(Safety Assessment of the Geological Disposal System)即為針對安全評估相關議題提供詳細資訊，亦應可提供相當參考依據。

放射性廢棄物最終處置設施安全評估工作在處置作業中扮演相當重要之地位，為確保國內處置安全評估工作之效益，俾益未來整體處置安全評估工作，能通過國際同儕審查與符合國際水平，國內在此方面之技術上，需與國際接軌。因此本計畫近程目標，在於彙整國外放射性廢棄物處置設施安全評估審查技術，研析國內在安全評估審查技術發展所面臨問題與精進對策，而在長程目標可協助管制單位對於處置安全評估建立獨立審查及分析之能力。

## 第二章、國際原子能總署安全評估模式技術報告研析

本章包含二部分，2.1 節為針對國際原子能總署(IAEA)近地表處置安全指引(SSG-29)報告之簡要說明，2.2 節為以國際原子能總署最新版之安全評估模式技術報告初稿「Mathematical Models for Assessing Remediation of Radioactively Contaminated Sites (Draft), Avila et al., 2013」中有關安全分析模式之最新進展進行綜整分析。

### 2.1 國際原子能總署近地表處置安全指引(SSG-29)

國際原子能總署從 90 年代開始對於放射性廢棄物最終處置的安全分析進行研究計畫，針對淺地表處置包括從 1990 到 1995 執行「Near-Surface Radioactive Waste Disposal safety Assessment Reliability Study (NSARS)」的合作研究計畫(Coordinated Research Project, CRP)，以改善安全評估方法的可信度，以及 1997 年到 2004 年之「Improvement of Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities (ISAM)」計畫，從分析模式發展到模式技術之驗證，說明淺地表處置設施用在中低放射性廢棄物處置已是成熟的技術，因此 IAEA 於 2011 年提出 safety standard series No.SSR-5 報告，提出淺地表處置設施各項安全的需求。2014 年更進一步提出具體的安全指引「Specific Safety Guide (SSG-29)」，作為各國管制機構制定法規的參考依據。本節即針對 SSG-29 安全指引的內容重點做概要說明。

#### 2.1.1 設施封閉後的輻射安全標準

IAEA 所訂定的輻射安全標準主要是參考兩個國際性輻射安全組織，即聯合國原子輻射效應科學委員會(United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNCLER)，以及國際放射防護委員會(International Commission on Radiation Protection, ICRP)所提出的輻射防護標準而制定。處置設施的安全設計需維持封閉後的長期安全，以保護公眾所受到的輻射劑量拘束值(dose constraint)及風險拘束值(risk constraint)符合以下的安全標準：

- (a) 處置各個階段作業所可能產生的輻射暴露對公眾所造成的有效劑量(effective dose)，均不能超過每年 1 mSv。
- (b) 為符合上述的輻射安全標準，就處置設施單一輻射來源所制定的劑量約束值，針對未來可能暴露的關鍵族群公眾，不得超過 0.3 mSv/年，或是對應的風險拘束值  $10^{-5}$ /年。
- (c) 對於處置設施封閉後，人員誤入的情節考量，假如其對於設施周圍公眾可能造成的年劑量低於 1 mSv，則設施經營者可以不用提出任何措施以降低人員闖入的可能機率。
- (d) 假如人員誤入情節對於設施周圍公眾可能造成的年劑量高於 20 mSv，則須考量其他的處置方式(地下設施或降低設施內核種的輻射強度)。

- (e) 假如人員誤入情節對於設施周圍公眾可能造成的年劑量介於 1-20 mSv 之間，則在處置設施設計時須提出降低人員闖入可能機率的有效措施。

### 2.1.2 設施經營者、管制機構及政府的權責劃分

#### 政府

在政府方面，

1. 針對不同型態放射性廢棄物長期營運管理，明確訂定國家政策及策略。
2. 對於參與近地表處置設施的單位其法律，技術和財務的責任劃分。
3. 確保財務撥備充足性和安全性，例如通過要求設施經營者提出充分的財務規劃(例如設立獨立基金)。
4. 確定設施發展（選址，設計施工，營運及封閉等）整體過程中，在每一階段設施經營者及管制單位的法律及監管規定，並且讓有興趣第三方參與決策。
5. 確保必要的科學和專業技術，足以提供獨立監管審查。
6. 設施封閉後如有安全考量需進行各項監測措施，需就法律，技術和財務的責任明確劃分。

#### 管制機構

在管制機構方面，管制單位必須在設施發展各階段提出各項指引(guide)及法規(regulation)，以確保符合國家政策及策略。在過程中，管制機構須保持與設施擁有者之間的對話交流，以確保這些法規對於是適當且可執行的，且同時讓利害關係團體可以清楚了解整個過程。管制機構須訂定的指引及規範內容包括：

1. 設施運轉及封閉後的輻射安全及環境保護標準。
2. 設施安全論證(safety case)內容及審查規範，管制機構必須針對安全論證及評估建立獨立的審查能力。
3. 設施發展階段之管制內容。
4. 廢棄物型式、包封、回填等設施工程管制內容。
5. 利害關係團體參與決策程序。

#### 設施經營者

設施經營者必須執行處置設施選址、興建、運轉、封閉、監管各階段的工作，並且在符合國家政策及策略，以及管制機構的法規下，對設施的安全負責。為了達到上述的目的，經營者需要在各個階段建立各項相關技術，經過驗證後提出安全論證及相關佐證之安全分析報告，向管制機構證明設施在封閉之後可以維持長期的安全。詳細的安全論證及相關佐證之安全分析報告內容將在 2.1.4

節中介紹。

IAEA SSG-29 報告將近地表處置設施發展分為三個階段來進行(如圖 2.1 所示)。這三個階段分別為前運轉期(pre-operational period)、運轉期(operational period)，以及後設施封閉期(post-closure period)。三個階段主要進行的工作說明如下，設施經營者、管制機構及政府在這過程中的權責劃分亦同時一併說明(如圖 2.2 所示)。

#### 前運轉期(pre-operational period)

首先須由政府宣示：處置設施的興建是國家必要進行的重大建設。因此，設施經營者居於職責必須開始進行相關的工作。這段期間主要需進行包括：處置概念設計、場址特性調查及確認、設施設計最佳化發展，以及處置設施興建等工作。這段期間，管制機構須掌握兩項決策點(decision point)，分別為場址確認及設施興建。設施經營者在這兩項工作完成後提出對應的安全論證及相關佐證之安全分析報告，提供管制機構審查，審查通過後方能進行下一階段的工作。場址確認後由政府以國家的高度正式公告以宣示其正當性。

#### 運轉期(operational period)

當設施興建完成開始接收廢棄物時，便正式進入運轉期。此階段設施經營者必須依照廢棄物接收標準將廢棄物置放於處置設施中，並進行人員劑量及環境輻射劑量監測，管制機構須則依照輻射防護安全標準審核以確保工作人員及設施周圍公眾的輻射安全。

#### 後設施封閉期(post-closure period)

當處置場接收完最後一批廢棄物後，宣告完成作業設施停止運轉，之後即封閉進入監管期。封閉之後的前數 10 至 100 年稱為主動監管期(active institutional control)，這段期間有人員駐守進行環境的監測，覆蓋層及圍牆的損壞會進行維修，以防止人員及動物的闖入；接著 100~數百年間則是進行被動監管期(passive institutional control)，這段期間不再有人員駐守，覆蓋圍牆的損壞亦不再維修，只保留警示標誌，提醒該地區設有放射性廢棄物處置設施，以降低人員及動物的闖入。IAEA SSG-29 報告指出：主動監管期的監測及設施維護無法維護設施封閉之後的長期安全，被動監管期應藉由各種警示標誌的設計及安置，有效降低人員誤入的可能性，方能有效維護數封封閉後的長期安全。

### **2.1.3 達成處置設施安全目標的措施**

為了達到如 2.1.1 節所提到的設施輻射安全標準，近地表處置設施必須確保以下四項安全目標：

1. 處置設施中的各項措施需有能力將廢棄物與人類生活圈予以圍阻及隔離。

2. 處置設施所在的場址環境需具備阻隔廢棄物中放射性核種傳輸的特性。
3. 含長半化期核種的廢棄物需限制不得存放於近地表處置設施中。
4. 由於近地表處置設施位於人類生活圈範圍內，因此設施需有各種監管或監測措施以防範人員誤闖入處置設施，或是降低闖入的機率。

為了達到上述目標，近地表處置設施採取以下幾項措施：

#### 1. 圍阻(containment)

圍阻的觀念，是憑藉工程障壁設施及選擇合適的自然環境，將放射性核種有效圍阻於處置設施內，直到對人類環境輻射衝擊降低至可以忽略的程度。圍阻的形式包括物理方式(金屬或水泥包封容器等)，或是化學形式(膨脹性黏土對核種的化學吸附等)，考量對外傳輸的途徑包括溶解在地下水及氣體傳輸( $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$  及  $^{129}\text{I}$  等)，例如選擇降雨量極低的場址則是利用自然環境的圍阻形式。

#### 2. 隔離(isolation)

隔離的觀念，是憑藉處置設施的管理措施及天然環境提供的條件，將放射性核種與人類生活圈隔離(至少數百年)，直到對人類環境輻射衝擊降低至可以忽略的程度。因此在管理方面，當設施封閉後主動監管時期有各種監測的措施防範人員誤入；進入被動監管時期後則藉由設置警示標誌提醒公眾不要闖入。除此之外，在選址時要避開地下礦產資源、地熱，及地下水資源等地區，以降低人員闖入的機率。

#### 3. 多重障壁安全設計

這是大家所熟知的多重障壁安全概念，處置設施的安全是包含由人工障壁及天然障壁多重組合的系統，因此處置的安全不能端仰賴單一障壁的安全設計來維持。

#### 4. 被動式的安全觀念

當處置設施結束接收廢棄物的作業後，設施即準備封閉，開始進入監管期。初期處置設施會如同運轉作業時有人員駐守，主動修護設施的覆蓋、圍牆，以及監測系統，然而此階段通常不會維持太久(數十年至最多 100 年)，接著設施的安全就必須依賴各種被動監管的措施來維持長期安全。因此警示標誌是必要的，不只如此，政府、管制機構及利害相關團體應該共同投入，設計出一套管理機制，將這個存放廢棄物處置設施的相關資訊系統化的保存，傳承讓後代子孫充分的了解，這樣才能保持設施封閉後數百年的安全。

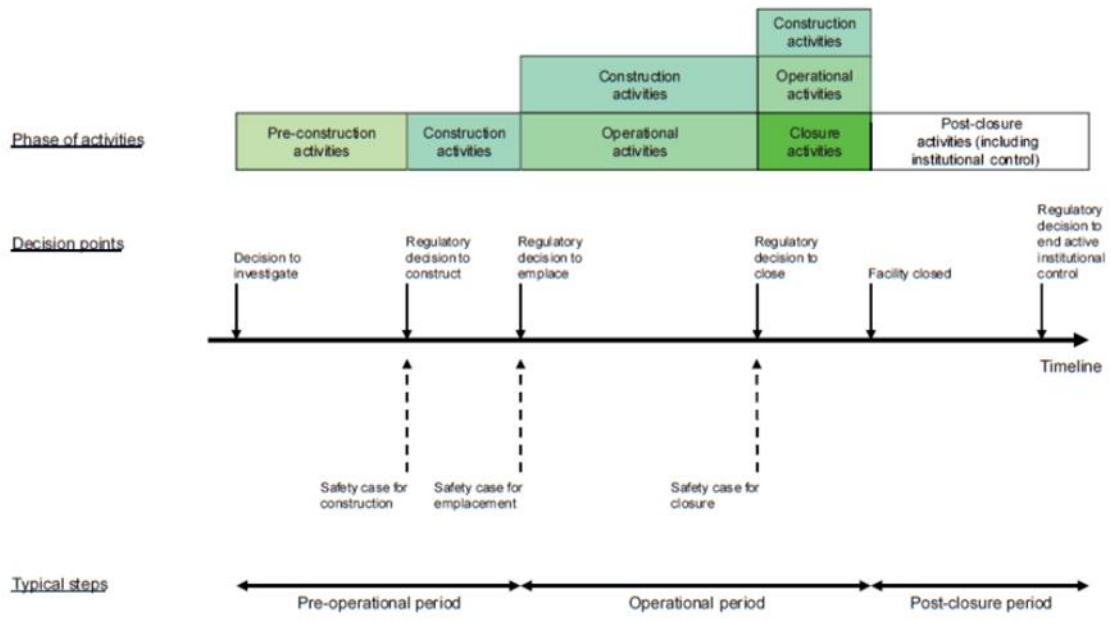


FIG. 1. Timeline to illustrate the development, operation and closure of a near surface disposal facility.

圖 2.1 近地表處置設施發展階段說明

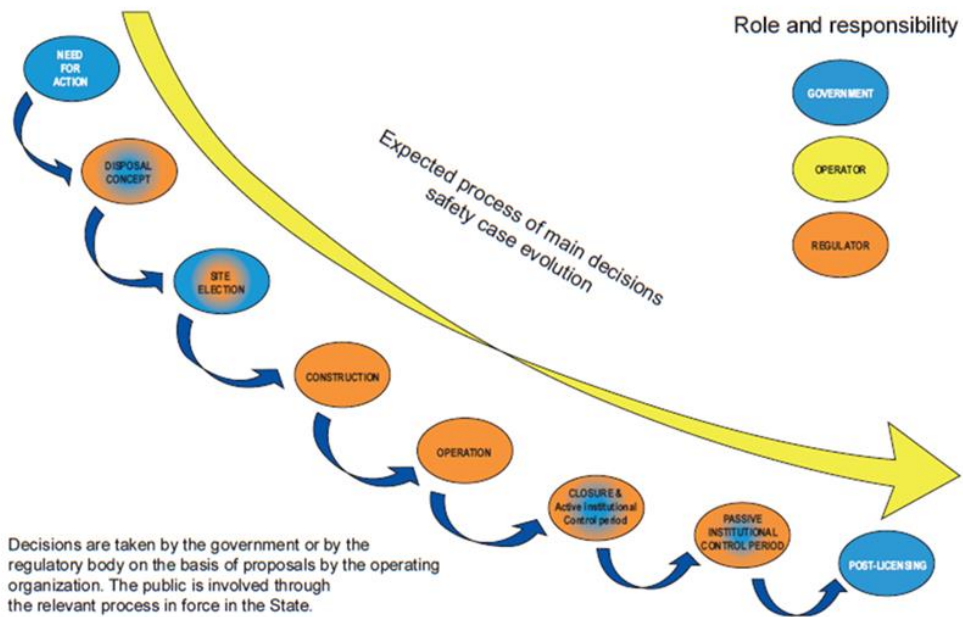


FIG. 2. Typical steps in the process of developing a near surface disposal facility.

圖 2.2 近地表處置設施發展階段各單位權責劃分說明

#### 2.1.4 安全論證與安全評估

根據 2.1.2 節的內容，設施經營者在各階段工作完成後都需提出對應的安全論證及相關佐證之安全分析報告，提供管制機構審查，審查通過後方能進行下一階段的工作。本章節即介紹安全論證的準備流程以及對應之安全評估內容。

##### 安全論證

圖 2.3 為安全論證的執行流程。首先需界定整個安全論證的範疇，並且擬定執行的策略。論證的內容涵蓋處置設施整體的系統描述，以及對應進行的安全評估工作。這個流程涵蓋右邊與設施經營者的管理系統，以及左邊與管制機構及利害關係團體的互動，考慮管理系統的不確定性，與迭代之最佳化設計，最終在符合管制單位的限制條件下整合安全論證的內容。

至於安全分析的工作，根據 1997 年 IAEA 提出之合作研究計畫「Improvement of Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities (ISAM)」，已建立設施封閉後安全評估方法與工具的關鍵性評核。根據 ISAM 的建議，執行者在申請設置低放射性廢棄物最終處置設施時，必須提出該設施的安全評估報告。安全評估工作前須確認下列事項：

- (1) 影響處置場長期功能的特徵(feature)、事件(events)及作用(processes) (FEPs)。
- (2) 影響處置場安全的可能發生情節。
- (3) 核種可能遷移至人類與環境之各種途徑。
- (4) 廢棄物、場址特性及工程材料與結構之資料正確性。
- (5) 處置概念及數學模式之合理性與正確性。

從設施前運轉期開始，到設施封閉之後的長期安全性(如圖 2.1)。一般包括兩個部分：運轉階段的安全及設施封閉後的安全。前者需考慮處置場興建、廢棄物接收、包裝，安置、回填、封埋等作業活動，必要時甚至須考慮重新取出，評估可能導致工作人員及公眾的輻射衝擊；而後者的重要性更大於前者，需考慮預期可能發生正常情節，地震洪水侵蝕等發生機率較低的變異情節，以及人員誤入處置設施的情節。

確認情節之後進入評估模式建立。包括：概念模式發展、數學模式的簡化、以及評估計算如圖 2.4。此外，非輻射造成的環境衝擊也應包含在安全評估的工作內容中。



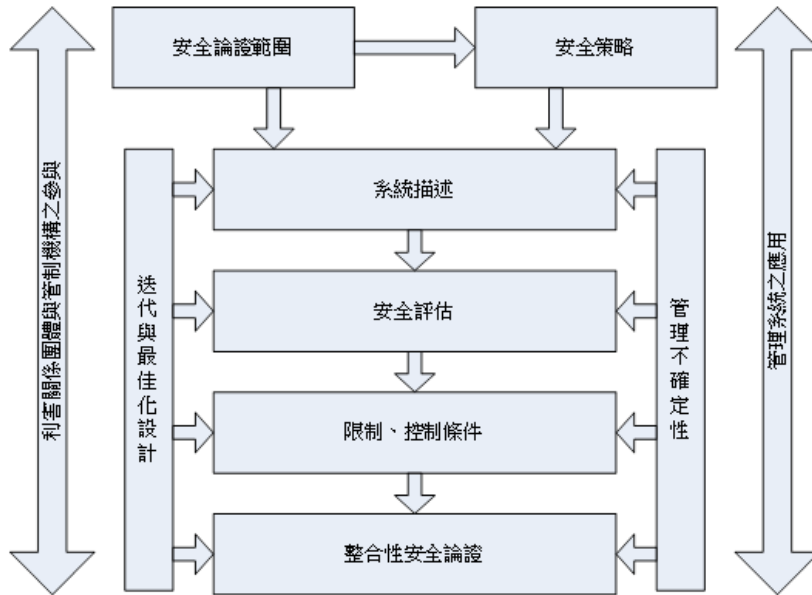


圖 2.3 安全論證的執行流程

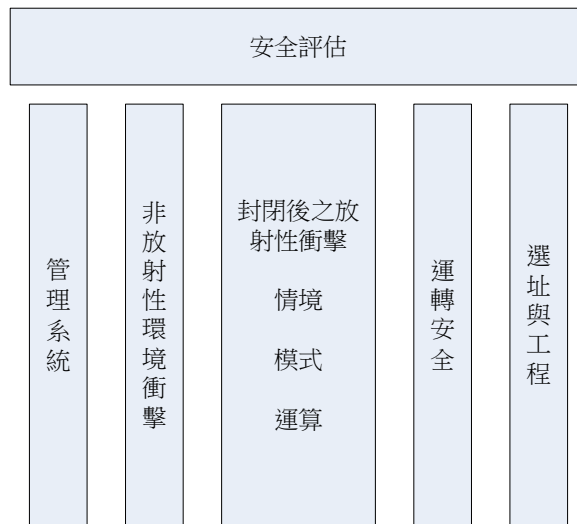


圖 2.4 安全評估的執行內容

### 2.1.5 處置設施階段性發展及安全達成方法

本節整理 SSG-29 報告中將處置設施發展各個階段達成安全目標的考量及達成方法，分述如下：

#### 2.1.5.1 場址特性調查階段

1. 考量廢棄物特性、監管期及場址之工程障壁、地質障壁後，確保廢棄物處置對人類與環境的潛在效應可符合可接受限制與整體安全目標。
2. 對安全評估與設計很重要的場址特性至少應含以下各項：地質、水文

地質、地球化學、構造地質與地震、地表過程、大氣、氣候與對人類活動的影響。

3. 選擇場址的地質特性，應能提供圍阻廢棄物放射性核種外釋的功能，且對處置系統的穩定有貢獻。
4. 地下水與處置設施地質介質的地球化學特性，應考量其限制放射性核種自處置場向外傳輸的潛在貢獻。同時不應危害到工程障壁的壽命。
5. 場址的構造地質與地震特性，應不預期發生顯著的構造地質演化過程與事件（例如斷層、地震活動與火山活動），如其事件強度是否足以危害處置場必要的隔絕能力。
6. 影響處置設施地形穩定性的過程，如洪水、侵蝕（erosion）、地滑（landsliding）或風化（weathering），其頻率與強度不應顯著影響處置系統隔絕廢棄物的穩定性。
7. 位於地表面上的處置設施，應有很好的排水特性，且其地形與水文地質的特性，應使洪水發生的可能性很小。
8. 處置場當地或其附近合理預期會發生的人類活動，應不能危害處置場的隔離能力與增加人員輻射暴露的風險。尤其應考量場址及其附近的可能資源與開發。

#### 2.1.5.2 處置設施設計階段

1. 在考量廢棄物特性、場址特性與適用於處置設施之安全標準下，設施的設計應能提供必要期限內之適當隔離。
2. 處置設施的設計，應考量封閉期後最少必要的積極保養，與環境特性的不足的情況下，降低其環境影響。設計應考量運轉要求、封閉計畫、其他與廢棄物隔絕有貢獻與處置設施穩定性有關的因素。
3. 近地表設施可包括工程障壁，加上安置介質及其環境，以隔絕廢棄物於人類環境外。工程障壁包括廢棄物包件與其他人造設施如處置窖（vaults）、覆蓋、襯砌（linings）、灌漿與回填，以阻止或延遲放射性核種自處置場傳輸至周圍環境。
4. 儘管處置的定義是將廢棄物安置於業經核准的地方，而不打算再取出，然而某些國家的法規仍規範處置場的設計應考量再取出的可能性。因此若要考量處置場之再取出能力，在設計過程應考量不可危害處置場之長期安全功能。
5. 近地表處置設施應實施監測計畫，以確認處置系統在運轉期間與封閉後（若有必要）之圍阻能力。監測計畫不可危害處置設施之長期安全功能。

#### 2.1.5.3 廢棄物接收要求

1. 應訂出處置設施廢棄物接收條件：根據特定場址，並考量適當的輻射

防護標準、營運條件、預定主動監管期、天然障壁特性要求與工程障壁特性要求而發展出來，應經由管制機關核准。

2. 應建立個別廢棄物包件與整個處置場接收廢棄物的放射性核種含量與（或）濃度之授權限制（authorized limits）。
3. 廢棄物包件所含的放射性核種型態、特性與含量，應能提供符合授權限制所需要的準確性來決定，並且做成文件。
4. 廢棄物包件（或任何廢棄物運用送過程中的外包裝）之體外劑量率與表面污染，應符合運送規定與其他對處置場工作人員之輻防規定。
5. 廢棄物包件之設計與建造，其機械強度應能充分負擔近地表處置場的設計負載。
6. 廢棄物體內可能發生化學、生物或輻射分解過程，產生氣體與（或）熱、腐蝕（有害劣化物質的累積）與物質的膨脹，這與廢棄物的含量有關。應建立法規以確保這些過程與產物不致產生廢棄物包件或周圍障壁圍阻特性不可接受的安全危害。廢棄物包件物質的物理與化學特性應適當的做成文件，以確保安全評估中均有考慮這些因素。
7. 應限制廢棄物包件內自由水含量。廢棄物或廢棄物體不需要完全乾燥，但其水分含量不應危害處置設施廢棄物的隔絕特性。
8. 可能會造成化學與生物傷害之處置物質，應符合相關法規，且安全分析應考量這些物質的特性。

#### 2.1.5.4 建造階段

1. 近地表處置設施的建造包括以下活動：場址準備、建築與結構的設計、開挖、壕溝或廢棄物處置模組的建造、排水網路、岩洞開鑿、地下建築與監測系統的設置。
2. 應經適當主管機關之授權，處置設施始得動工建造。亦即詳細設計業經核准，執照審查程序業已完成，且適當的品質保證計畫業已建立。在運轉期間，亦可進行處置設施之擴充建造工程，以提供接收更多廢棄物的處置空間。在建造期間，任何必要的處置場變更設計，均需管制機關的核准。
3. 部分的建造工程是與安全有關。應於詳細設計中，敘述使用材料的適當規格、技術與管制方法。

#### 2.1.5.5 運轉階段

1. 為達到安全運轉的目的，應實施業經認可的技術與管理原則。尤其在試運轉與安置廢棄物期間應維持適當的管制。具備資格人員應適當的補充與訓練，有效的安全措施亦應建立。
2. 管制機關應對必要的環境監測計畫(包括外釋的監測、體外曝露與運轉期間環境影響評估)提供導則。以確保處置場運轉的檢查，是根據執照

中註明之程序或法規授權來實施。

3. 處置設施運轉或任何以後階段所使用資料應予以記錄，並依管制機關之規定進行保存。應考量記錄的形式，以確保資料在必要時可以取得，不致中斷或與遺失。
4. 為確認處置場所觀察到的營運限制與狀況，經營者應根據書面程序與指示來實施。這將確保對處置場安全的適當關心，尤其是在變更儀器與營運程序時。
5. 在營運期間，經營者應負責適當監測系統之設立與保養，以監測處置場之外釋物質。
6. 營運者應建立適當的處置設施場內緊急應變計畫。若有必要，亦應建立處置設施場外緊急應變計畫。
7. 訓練計畫之建立，應確保所有階層的處置場運轉人員具備所需能力。訓練計畫應確認對與安全有關的活動，提供這些活動所需知識與實務經驗，並培養安全文化的發展。訓練計畫應定期更新，以納入系統功能分析所取得的經驗。

#### 2.1.5.6 封閉及監管階段

1. 設施經營者應檢附詳細的封閉計畫，送管制機關核備，執行前應獲得管制機關的核准。詳細的封閉計畫應包括使用可顯示處置設施封閉後安全功能之可用資料與更新的安全評估。封閉計畫應敘述封閉後所有管制措施，包括輻射監測計畫、偵測計畫與記錄保存系統，且應說明負責執行的組織。
2. 封閉計畫應列出封閉方法(包括所使用之材料與技術)。
3. 封閉程序應包括多餘結構、系統與儀器的去污、移除與密封，除污廢棄物的處置，處置檔案的更新與必要之連續監測的實施。
4. 對地表上或近地表處置，封閉應包括處置系統或結構的最終覆蓋的安置。封閉作業完成後，管制機關應根據國家法規，確定封閉作業是以可接受的方式來執行，封閉後的處置場保持良好的狀況，文件可以取得，封閉後的管制已有所準備。
5. 處置封閉後的安全不應依賴主動監管措施。然而，處置場封閉後之繼續管制，可以增進置場安全，尤其是防止人員闖入。監管可分為主動監管(例如監測(monitors)、偵測(surveillance)作業)與被動監管(設立警示標誌及限制土地使用等)兩種。
6. 監管的性質與時間長短，為確保符合安全標準之一種方法，應由管制機關訂定或同意。監管期的長短應考量廢棄物的放射性衰變與其潛在危害性、預估活動與資料保存的過去經驗。
7. 處置場的安全評估，應考量主動監管與被動監管的期程與有效性。經營者應證明，處置設施在監管期後取消管制措施，考量可能影響處置

場圍阻或隔離能力的因素，應仍符合安全標準。

8. 主動監管期自數十年至數百年不等。管制機關可自由裁量(discretion)或於法律中明文規定，要求進行連續的主動監管。
9. 負責組織應實施被動監管，經由限制在一段時間內處置場土地不可以進行某些類型活動，並確保處置場保養知識的保存與土地使用限制的必要記錄之保存。

## 2.2 國際原子能總署安全評估模式技術報告研析

本節針對國際原子能總署最新版之安全評估模式技術報告初稿「Mathematical Models for Assessing Remediation of Radioactively Contaminated Sites (Draft), Avila et al., 2013」中有關安全分析模式之最新進展進行綜整分析，首先說明雖然此報告是以受輻射污染場址之整治所需安全評估模式最新進展進行說明，而不是直接針對任何低放或高放處置設施之安全評估模式介紹，但由於場址整治與處置設施二者所需安全評估模式本質上是有許多共通性，例如皆需考慮污染源項外釋、地下水流、地球化學反應傳輸、地表水流等，因此從安全評估模式所需具備功能而言，子項工作仍將此報告作為重要參考依據之一，目前版本為 2013 年 8 月版電子檔(由中大葉高次講座教授提供)，目前章節編排與 2012 初稿版略有不同，最新章節說明如下：

1. Introduction
2. Use of models in environmental remediation projects
3. Modeling processes
4. Source term models
5. Atmospheric transport
6. Subsurface flow and transport
7. Surface water flow and transport
8. Exposure assessment
9. Study cases
10. Integrated multimedia environmental modeling
11. References

相較於先前的 2012 年版初稿少了敏感度與不確定性的獨立章節，在 2013 年版是將敏感度與不確定性的論述置於 3.7 節提供概念式論述，此外附錄部分也更新包含下：

Appendix A. source term

Appendix B. subsurface models

Appendix C. surface water flow and transport models

Appendix D. parameters used for case studies

從以上所包含章節得知，此報告因是針對受輻射污染場址評估所需模式，因此架構上除源項模式外，主要以大氣傳輸、地下水與傳輸模式、地表水與傳輸模式、暴露評估(劑量)模式為主軸，這和處置場址從源項、近場、遠場的觀念其實並不衝突。若從模式功能與其間之連結而言，源項模式、地表水模式、地下水模式、大氣傳輸模式、劑量評估模式可以建構如圖 2.5 所示。而在任春平(2008)的研究中曾引用 Sandia National Laboratories(1995)針對低放處置安全評估模式的架構如圖 2.6 所示，比較二者架構，近場與遠場的區隔回歸其模式所欲模擬的環境變數本質，其實也與大氣、地表水、地下水或生物圈息息相關。

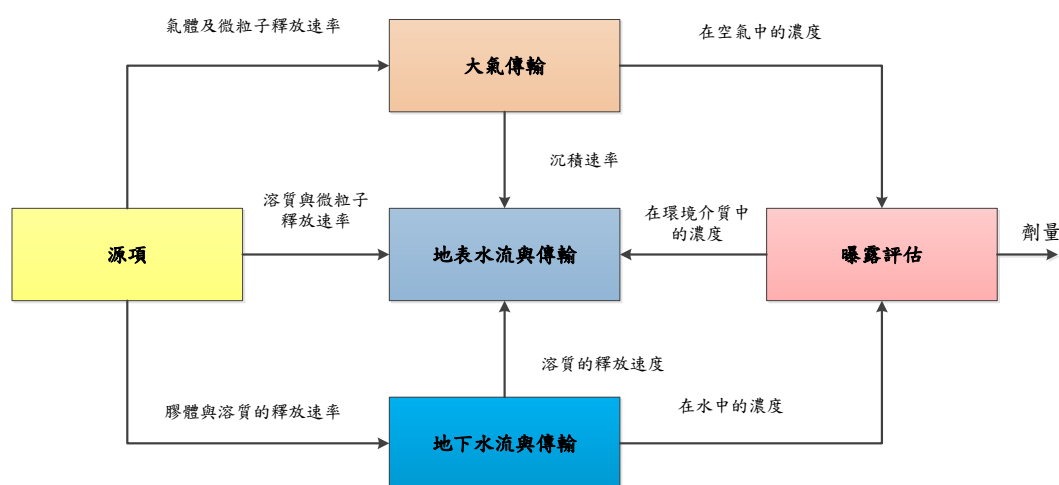


圖 2.5 不同功能安全評估模式的關聯

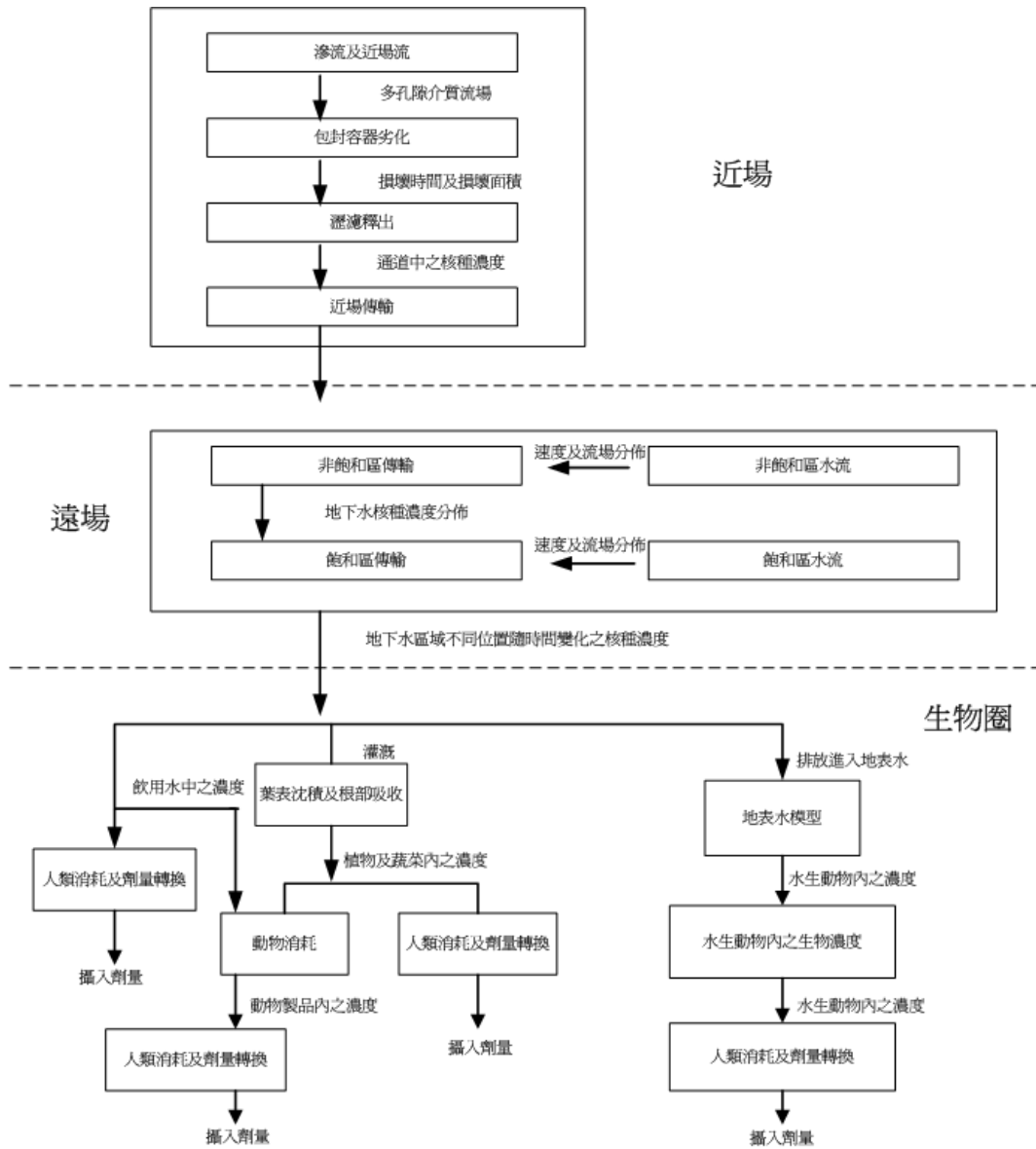


圖 2.6 低放處置安全評估模式的關聯(來源：任春平，2008)

若進一步以互動矩陣呈現，圖 2.5 中涉及核種傳輸過程與機制可以如表 2.1 所示。

表 2.1 核種傳輸過程互動矩陣

大氣	濕沉降 乾沉降 氣體吸收			濕沉降 乾沉降 氣體吸收	濕沉降 乾沉降 氣體吸收	外部輻射 吸入
再懸浮 揮發/放射 蒸發 蒸散	源	滲漏 (percolation) 對流 擴散 延散 膠體傳輸		侵蝕 地表逕流		外部輻射 吸入
		未飽和層 (vadose)	流出 (recharge) 對流 擴散 延散 膠體運輸			外部輻射
		毛細上升 (capillary rise) 對流 擴散 膠體 (colloid)傳 輸	地下水	灌溉	地下水出 流 (discharge)/ 滲流 (seepage)	水攝取
再懸浮 揮發 (volatilization) /發射 (emanation) 蒸發 蒸散		入滲 對流 (advection) 擴散 (diffusion) 延散 (dispersion) 膠體傳輸		地表	地表逕流	外部輻射 吸入 食物攝 取
氣體釋放			流出	灌溉 洪水	地表水	外部輻射 吸入 食物攝 取
						人類



模式選取時所需考慮的關鍵因子，報告中建議如下：

1. 場址水文地質條件(Site hydrogeologic conditions)：所選用模式須能掌握場址之水文地質特性，且須考慮未來核種移棲所可能涵蓋之不同水文地質條件。
2. 所涉及汙染物特性與範圍(Nature and extent of contamination)：不同種類核種會有不同之流場與傳輸行為與對環境之衝擊，因此所選取模式須能掌握不同核種之移棲特性與機制。
3. 管制需求(Regulatory requirements)：管制架構與需求通常會影響場址經營者所選用模式之類型(解析解或數值模式、短期封閉前評估或長期劑量峰值評估、或特殊軟體需求)。因此報告中建議管制機構應持續維持一定技術人力在安全評估模式專業知識領域，或透過學術機構以提升管制端在模式技術能力的認知。
4. 經濟條件的限制(Economic constraints)：場址整治需考量成本效益，整治技術不同也影響所選用模式，因此若引論至本研究所涉及的處置設施而言，處置設施設計須考量成本效益，尤其是長期效益，不同處置設計也影響所選用之模式功能，包含近場與遠場模式功能。
5. 利害關係人的參與(Stakeholder input)：透過利害關係人參與討論並獲致共識，尤其是在決策初期就應邀請利害關係人參與，也將影響所選用的模式。反應在處置議題，利害關係者在選址階段就應開始參與。

### 2.2.1 地下水與傳輸模式關鍵參數需求

本節摘錄說明此 IAEA 安全評估模式技術報告初稿 6.3 節地下水與傳輸模式之關鍵參數需求如下：

#### (1). 地下水關鍵參數需求

1. 幾何形貌：影響地下水流的場址的幾何形貌與空間分布，透過概念模型是否足以簡化為一維或二維流場。
2. 土壤水力參數：水桶模式(bucket model)或串聯模式(cascade model)需要較少參數，某部分此類型模式僅需要孔隙率(或飽和含水量)及田間含水量，少部分非線性的串聯模式會需要水力傳導係數與含水量之關係。而以 Richard 方程式為主之模式則需要較多資訊，包含土壤壓力水頭與含水量、水力傳導係數與土壤壓力水頭(或含水量)之非線性關係。
3. 邊界條件：邊界上之水流通量，包含可能涉及之降水、潛勢能蒸發散、截留(interception)、穿落雨(throughfall)。不考慮未飽和層之地下水模式則需要來自未飽和層之地下水補注量作為外部邊界入流，且需要知道地下水位面。可同時考慮未飽和層與變動地下水位的模式則不需要前述資訊。
4. 初始條件：初始狀態之土壤壓力水頭或含水量分布。

(2). 地下水傳輸關鍵參數需求

1. 傳輸參數：水相與氣相之核種擴散係數(除與不同核種有關外，在氣相之擴散係數比在水相大上好幾個數量級)、核種延散係數(與不同材質特性有關)。延散係數又具有尺度相依的特性，不容易由實驗數據直接取得，實驗室尺度之破除曲線雖可協助推估，但要應用至現場尺度通常都會有尺度的問題。縱向延散(longitudinal dispersivity)係數通常可由實驗室管柱試驗的 1 公分至現場土壤的 5~10 公分，甚至至區域地下水的數百公尺。若無資訊可供參考，縱向延散係數可估計為傳輸距離的 1/10，橫向延散(transverse dispersivity)係數可估計為傳輸距離的 1/100 供模擬校驗。
2. 初始條件：初始狀態之汙染物分布
3. 邊界條件：邊界上之汙染物通量或源匯項通量與位置。

在地下水流與傳輸部分，該 IAEA 報告在附錄 B 進一步針對 HYDROGEOCHEM (Yeh et al., 2004a, 2004bm 2009)進行關鍵參數整理於表 B.3，整理如下表 2.2：

表 2.2 HYDROGEOCHEM 關鍵參數與輸出

項目	流場模組	熱傳模組	化學傳輸模組	生地化模組
場址幾何形貌與邊界	場址與邊界資訊提供數值格網劃分			
材質	影響流場的材質數目	影響熱傳的材質數目	影響化學傳輸的材質數目	影響生地化的材質數目
材質參數	材質與流體壓縮性、孔隙率、飽和水力傳導係數張量、參考流體密度、動黏滯係數、碎形指數(fractal exponent)	縱向與橫向熱傳延散係數、分子熱傳擴散係數、流體比熱、乾材質比熱、熱傳導係數張量	縱向與橫向延散係數、分子擴散係數、擾曲度 (tortuosity)	離子交換部位與吸附部位數目與相關參數 (no. of site, site density, capacitances and surface areas of each site)
材質特性曲線	飽和度與壓力水頭、相對水力傳導係數與壓力水頭、密度與動黏滯係數之溫度函數		溫度之焓(enthalpy)曲線 (即生地化反應隨溫度之變化關係)	

生地化	物種密度曲線 (species dependent density curve)、物種黏滯度曲線 (species dependent dynamic viscosity curve)	所有反應之焓(enthalpy) 關係	物種數目、物種參數(可存在相、反應式數目、反應式、反應參數)	
初始條件	壓力水頭	溫度場	所有物種濃度場	
內部源匯	抽水與灌注量與位置	伴隨灌注之流體溫度	與源匯相關之所有水相物種濃度	
邊界條件	Dirichlet 邊界壓力水頭	Dirichlet 邊界溫度	Dirichlet 邊界所有水相物種濃度	
	Cauchy 邊界體積通量	Cauchy 邊界熱通量	Cauchy 邊界所有水相物種質量通量	
	Neumann 邊界體積梯度	Neumann 邊界熱梯度	Neumann 邊界所有水相物種質量梯度	
	變動邊界之積水深度、降雨強度、最低壓力水頭、潛勢蒸發散	變動邊界之入流溫度	所有水相物種在變動邊界之入流濃度	
	與地表水交界面之地表水深、底泥厚度與水力傳導係數	與大氣交界面之輻射、氣溫、風速、雲量、反照率 (albedo)	所有水相物種在變動邊界之入流濃度	
數值	數值方法選項參數、迭代參數與次數、流場模擬容許誤差	數值方法選項參數、迭代參數與次數、熱傳模擬容許誤差	數值方法選項參數、迭代參數與次數、地化反應傳輸模擬容許誤差	
輸出	壓力水頭、總水頭、流場、含水量	溫度場與熱傳通量	任意格點位置與時間之動態反應物種濃度與主成分物種濃度	任意格點位置與時間之所有物種濃度

## 2.2.2 地表水與傳輸模式關鍵參數需求

摘錄該 IAEA 報告中 7.3 節與附錄 C 中河川與地表逕流模式關鍵參數表 C.3 整理如下表 2.3：

表 2.3 河川與地表逕流模式關鍵參數與輸出

項目	流場模組	化學傳輸模組	生地化模組
場址幾何形貌與邊界	場址與邊界資訊提供數值格網劃分		
材質	影響流場的材質數目	影響生地化反應傳輸的材質數目	
材質參數	土地利用分布供決定地表 Manning 糙度參數	縱向與橫向延散係數、分子擴散係數	離子交換部位與吸附部位數目與相關參數(no. of site, site density, capacitances and surface areas of each site)
地形	數值地形高程		
生地化	物種密度曲線 (species dependent density curve)	物種數目、物種參數(可存在相、反應式數目、反應式、反應參數)	
初始條件	水深與流場	所有物種濃度分布	
內部源匯	人為灌注、降水、蒸發散、或地下水開採之源匯	與源匯相關之所有水相物種濃度	
邊界條件	Dirichlet 邊界之水位高程	所有水相物種在 Dirichlet 邊界之濃度	
	通量邊界之通量值	所有水相物種在 Cauchy 邊界之質量通量	
	下游開放邊界之率定曲線	所有水相物種在 Neumann 邊界之質量梯度	
	水工結構物高程與水位-流量率定曲線	所有水相物種在變動邊界之入流濃度	
	採用動力波模擬時水位、流速或率定曲線	所有水相物種在變動邊界之入流濃度	
輸出	水深與流場	任意格點位置與時間之動態反應物種濃度與主成分物種濃度	任意格點位置與時間之所有物種濃度

### 第三章、處置安全分析模式所需關鍵參數整理與研析

安全評估從源項、近場、遠場到生物圈涉及許多不同模式之整合應用，處置場址特性與工程障壁參數將影響安全評估過程模式參數之需求，應先釐清不同安全分析模式所需之關鍵參數。其中，例如源項以廢棄物污染源特性(放射性核種)相關參數為主；近場主要需考量工程障壁功能參數；遠場及生物圈則主要為場址特性參數為主，最終由輻射劑量的計算來評估不同外釋情節可能造成的輻射衝擊。在釐清不同安全分析模式的關鍵參數時，可依據上述的分類進行整理研析，釐清主要關鍵參數的特性，除可回饋場址特性與處置設施工作之需求，並可提供審查時的檢核參考

#### 3.1 源項模式

源項模式的目的是主要描述放射性核種自廢棄物外釋至周圍污染土壤中，再經由各項途徑傳播至大氣、地表逕流、地下水等生物環境中(如圖 3.1 所示)。

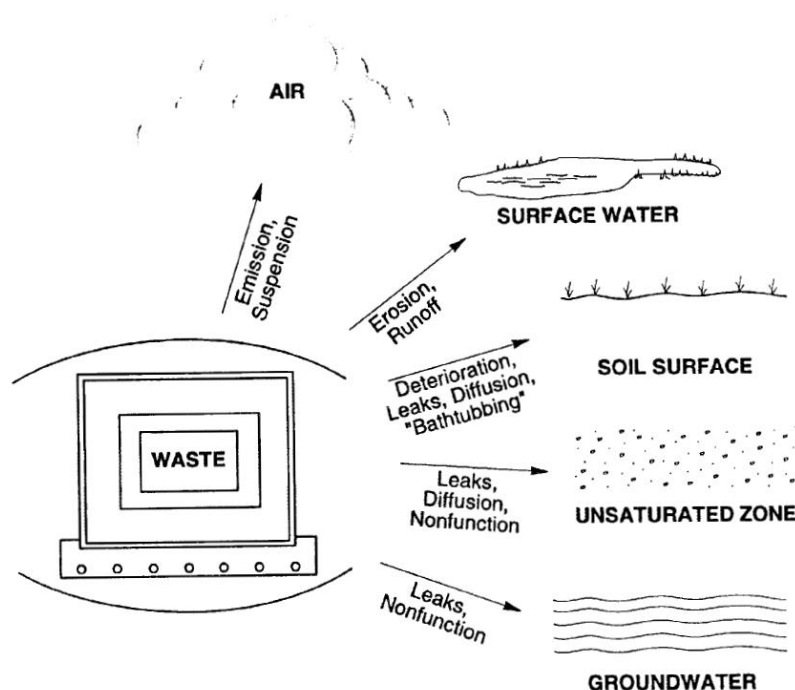


Fig. 2.2. Examples of pathways for contaminant release to the environment.  
(Courtesy of ORNL Waste Management and Remedial Action Division)

圖 3.1 放射性核種自廢棄物外釋至周圍污染土壤中之源項示意圖

根據上述說明，IAEA 最新版之安全評估模式技術報告「Mathematical Models for Assessing Remediation of Radioactively Contaminated Sites (Draft), Avila et al., 2013」的源項評估將所需要考慮的關鍵因子可劃分為兩類：源項模式污染源幾何因子與源項模式地球化學反應因子，3.1.1 節進一步說明。

### 3.1.1 源項模式關鍵因子

#### 3.1.1.1 源項模式污染源幾何因子

本項因子是考慮放射性核種外釋至周圍土壤中，影響區域即形成一個污染源，因此評估時即須考量此污染源的以下特性：包括污染區域空間尺度、廢棄物特性、容器尺寸與物理化學特性、核種空間分布情形、時間依存(time dependence)因子，以及污染區域重新分布因子等。

#### 3.1.1.2 源項模式地球化學反應因子

污染放射性物種(species)與地層介質、地下水三者之間的地球化學反應是評估核種釋出時的重要考量。圖 3.2 及圖 3.3 中描述這些不同過程與機制。例如放射性物種在地下水環境中可能形成可溶性自由離子(free ion)及離子對(ion pair)，然後與層狀矽酸鹽類黏土進行離子交換作用，或是與各種氧化物介質進行吸脫附反應而形成表面物種，或是與腐植質進行吸脫附反應鏈結，或是沉澱於地下水中。此外，礦物溶解和沉澱會改變地層介質的特性，各種氧化物礦物和營養物質，微生物的生長、微生物介導的氧化還原可能對污染物的轉化和傳輸造成重要作用。

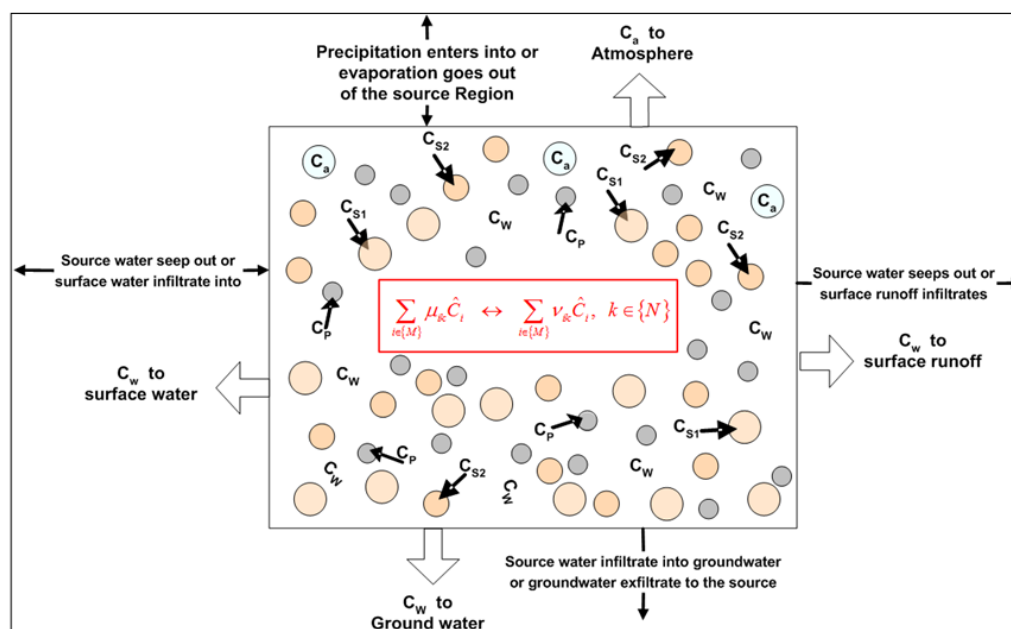


圖 3.2 源項模式地化反應

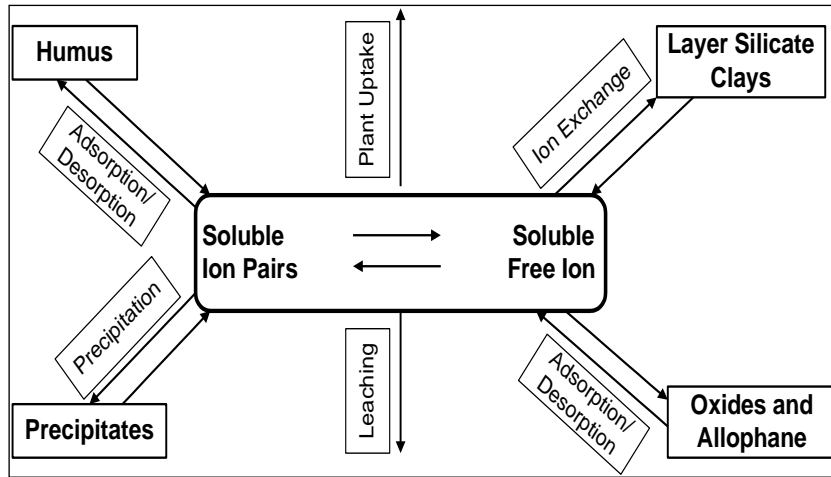


圖 3.3 部份生物地化反應作用圖

### 3.1.2 源項模式模擬所需參數

#### 3.1.2.1 源項模式與處置單元相關參數

這部分參數是與工程設計及輻射障蔽設計所需相關參數，包括：

- (1) 汙染區域空間尺度(長、寬、深度等)，包括：核種在廢棄物體內之盤存量(inventory)、輻射特性，確定空間尺度後可用來計算汙染區域造成的外釋輻射劑量。
- (2) 廢棄物特性。核種在廢棄物體內之盤存量、輻射特性、廢棄物形式(是否固化?固化劑種類?是否為活性金屬?)
- (3) 容器尺寸與物理化學特性。容器種類(金屬、水泥等)、容器大小尺寸、容器腐蝕率、容器使用年限(假定容器在使用年限之前可以有效將核種隔絕於容器內)
- (4) 核種空間分布函數。如果核種在汙染區域的分布為均勻分布(uniform distribution)，則汙染區域即可簡化為一個圓柱形放射源；如果核種的分布是不均勻分布，則汙染區域為非均質，需劃分為數個區塊來進行評估。

#### 3.1.2.2 源項模式與場址環境相關參數

這部分主要是與場址相關參數，包括：

- (1) 覆蓋土壤侵蝕率。近地表處置設施上方的覆蓋土壤提供設施封閉後直接輻射的屏蔽，以及防止人員闖入作業的防護，經過長期侵蝕作用覆蓋厚度減少後將影響其屏蔽功能。
- (2) 人類擾動因素。人員闖入是處置設施封閉階段後需要防範或降低的情節。人員闖入進行構築、農耕等活動會導致覆蓋厚度重新分布，對於放射性核種釋出至鄰近土壤造成影響。

### 3.1.2.3 源項模式與核種相關參數

#### 1. 溶出率(leach rate)

核種的溶出率是源項核種釋出評估的一項非常關鍵的因子。一般溶出現象依照核種與廢棄物的鍵結程度可由三項機制來解釋，即表面沖刷(surface wash)、擴散(diffusion)及溶解(dissolution)。如果核種與廢棄物是鬆散的結合，則當水入滲與廢棄物接觸時，核種即可藉由表面沖刷直接進入到污染區域；如果是屬於水泥固化體廢棄物時，則入滲水與固化體接觸時，核種需先透過擴散的過程到固化體表面，然後由表面沖刷帶至污染區域；如果廢棄物是屬於活化金屬類，則核種是固著於污染物的表面，因此需藉由溶解過程方能將核種釋出至污染區域，此時不同核種的溶解度及溶解度限制將是主要的決定參數。

#### 2. geochemical 及部分 biogeochemical 反應參數

地球化學及微生物作用需考慮的參數非常複雜，包括：錯合反應，表面吸脫附，離子交換，沉澱，溶解，地球化學氧化還原，酸鹼反應，微生物介質的氧化還原，終端電子接受過程 (TEAPs) 生物動力學，氮循環，磷循環，碳循環，氧循環，礦物循環，光效果等相關參數，都是應該納入考量的重要因素。

### 3.1.3 常用的源項模式

早期由 ORNL 所發展的 SOURCE 程式可以用來評估水泥功能的失效；BNL 所發展的 DUST 及陸續演變的 DUST-MS 程式則可以用來進行評估容器的腐蝕及核種的溶出率；在暴露劑量評估方面，RSICC 提供 FOOD、GENII 2.06、INTRUDE-ANS，瑞典的 BIOMOV5 及 IAEA 的 BIOMASS 等程式針對不同的暴露情節進行劑量評估，目前由美國 Argonne 實驗室發展的 RESRAD 是最廣泛使用的污染場址劑量評估程式；在地球化學反應評估方面，PHREEQC 是最廣泛使用的地球化學平衡反應計算程式；水文傳輸及地化反應耦合程式則有 TOUGREACT、STORM 等，目前以 BIOGEOCHEM 的功能最為完整，此程式從以前的版本 (EQMOD, KEMOD 和 BIOKEMOD) 持續精進超過十餘年，應該是最完整的地化耦合反應程式，可同時考慮地球化學平衡反應與動態反應及與微生物反應。

## 3.2 近場模式

在概念上近場模擬工作主要需考量工程障壁功能參數，而在 IAEA(1985) 的一份文件中有定義「近場」所涵蓋的範疇，引述原文如下：

*The near-field is defined as “the excavated repository, including the waste package, filling or sealing materials, and those parts of the host medium whose characteristics have been or could be altered by the repository or its contents.”*



由上述原文定義「近場」為開挖場址，包含廢料包件、回填與封閉材料、與受開挖擾動之地質圈，而針對廢料包件則定義如下：

*The waste package includes the waste form, its container, and any additional barriers, provided they are integral parts of the package.*

承上原文，廢料包件包含廢料體、容器、與構成包件之任何額外障壁。上述的探討目的在釐清源項、近場與遠場模式間之連結與分界，由於近場模式連結源項與遠場模式，因此對近場的定義有必要釐清，也影響所選用之近場模式所需之功能。引用中興工程(2013)對低放處置多重障壁概念如圖 3.4 所示。從模式選取與功能而言，如圖 3.5 所示以 A 組合與 B 組合為例：

1. 在 A 組合下，若源項模式的模擬功能涵蓋固化體、盛裝容器、填充材料與處置窖，則近場模式可以從緩衝材料開始模擬，而將整體處置窖視為內部輻射源以源項模式推估核種外釋率。
2. 在 B 組合下，若源項模式的模擬功能僅涵蓋固化體、盛裝容器與填充材料，則近場模式須從處置窖開始模擬，而將所有填充材料與其所包覆之所有內盛裝容器視為一個整體的內部輻射源，以源項模式推估核種外釋率。

因此近場模擬的核種進入區域端視源項模式可以提供在多重障蔽的哪個位置的核種外釋速率資訊而定。而在近場與遠場銜接部分，A 組合或 B 組合的差異主要在受擾動地質圈的模擬是否要全由遠場模式負責，但如 IAEA(1985)的建議，受擾動地質圈屬近場範疇，因此包含在近場模式似乎較合理，而遠場模式專注在較大尺度由未擾動地質圈至人類生活圈之核種移棲(migration)模擬工作為主。因此一般而言，B 組合應為較合理的源項、近場與遠場模式銜接架構，不過還是須依所選取模式的功能，主要在源項模式的功能是要僅提供估計由填充材料與盛裝容器開始的核種外釋率，還是要由處置窖開始的核種外釋率。

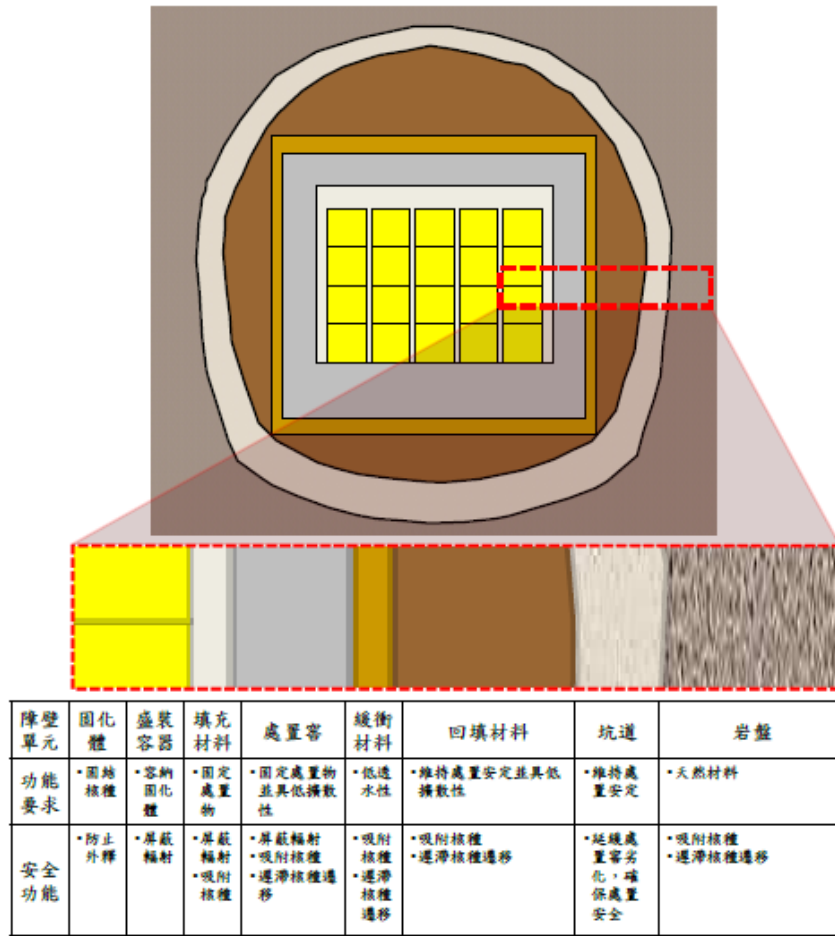


圖 3.4 低放處置多重障壁概念(來源：中興工程 2013)

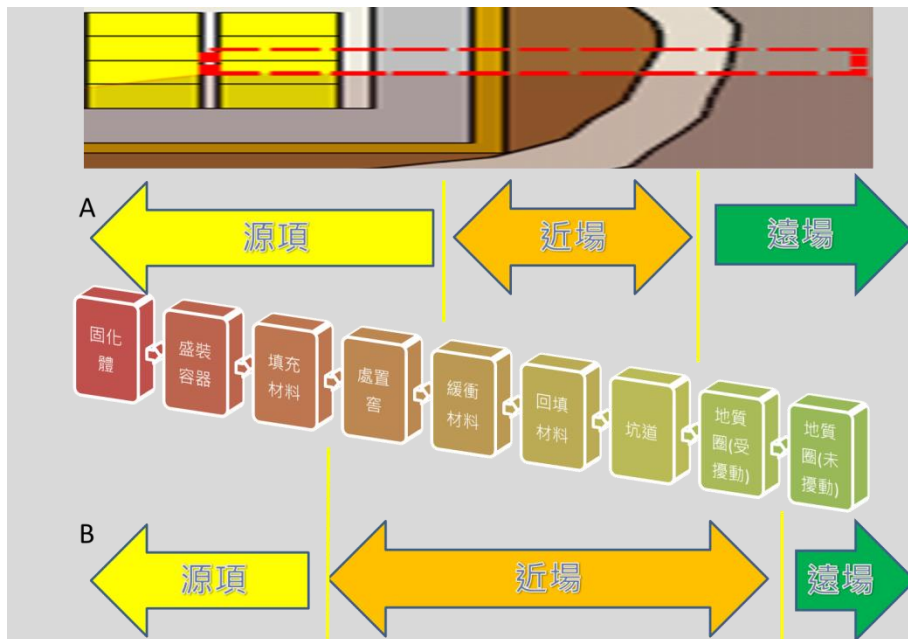


圖 3.5 低放處置模式銜接組合

### 3.2.1 近場模式關鍵因子與參數

近場模式所需考慮關鍵因子，可分為與場址特性相關及與設施設計相關二大類。與場址特性相關的關鍵因子，包含水文氣象資料、水文地質參數、與所考慮之生地化反應系統。與設施設計相關的關鍵因子包含緩衝回填材料的物理及化學特性、處置窖的幾何形貌等。上述關鍵因子從模式角度而言，即是進行近場模擬所需之關鍵參數，進一步說明如下。

#### 3.2.1.1 近場模式與場址特性相關參數

近場模式與場址特性相關之關鍵參數如下：

1. 水文地質參數
  - 水文地質模型、地下水位面
  - 水相主要物種、土壤主要礦物組成
  - 孔隙率、水力傳導係數、未飽層水力特性參數
  - 延散係數、擴散係數
  - 異質性、非等向性
  - 與鄰近地表水體之關係
2. 水文氣象參數
  - 降水、蒸發散、風速、相對溼度、淨輻射量
3. 生地化反應參數
  - 主要物種反應方程式
  - 動態反應速率、平衡常數
  - 吸脫附模型與參數、離子交換部位
  - 遲滯係數或適用之等溫吸附模型與參數

#### 3.2.1.2 近場模式與設施設計相關參數

近場模式與設施設計相關之關鍵參數如下：

1. 緩衝回填材料
  - 厚度
  - 孔隙率、水力傳導係數
  - 延散係數、擴散係數
  - 化學成分組成
  - 遲滯係數或適用之等溫吸附模型與參數
2. 處置窖幾何形貌
  - 盛裝容器排列方式
  - 長、寬、高
  - 幾何形狀

### 3.3 遠場模式

從 3.2 節的討論延伸，遠場模式涵蓋從處置場址鄰近之未擾動地質圈以外之區域至核種移棲路徑所可能影響之人類生活圈，例如鄰近之飲用水井或地表水體。而近年來隨著數值模式的進展與功能日益增強，遠場模式所需的功​​能是某些近場模式可以同時達成的，以 HYDROGEOCHEM(Yeh et al., 2004a, 2004bm 2009)為例，是可以同時作為近場模式與遠場模式使用，在空間數值離散由於採用有限元素法，因此非常適合用於近場與遠場整合模擬，主要優勢在於處理近場尺度較精細的異質工程障壁特性時，可以採用較細網格以反應場址的多重障蔽概念下之空間異質性，而到遠場尺度時，可以採用較大網格以達計算效益。

若以 HYDROGEOCHEM 作為遠場模式，其關鍵參數如表 2.2 所整理，從遠場模式角度主要與場址特性相關。

#### 3.3.1 遠場模式與場址特性相關參數

近場模式與場址特性相關之關鍵參數如下：

1. 水文地質參數
  - 水文地質模型、地下水位面
  - 水相主要物種、土壤主要礦物組成
  - 孔隙率、水力傳導係數、未飽層水力特性參數
  - 延散係數、擴散係數
  - 異質性、非等向性
2. 水文氣象參數
  - 降水、蒸發散、風速、相對溼度、淨輻射量
3. 生地化反應參數
  - 主要物種反應方程式
  - 動態反應速率、平衡常數
  - 吸脫附模型與參數、離子交換部位
  - 遲滯係數或適用之等溫吸附模型與參數
4. 生物圈相關參數
  - 鄰近地表水體位置
  - 鄰近飲用水井位置、抽取率

#### 3.3.2 生物圈模式與核種相關參數

生物圈模式中，與核種特性相關之關鍵參數為暴露途徑劑量轉換係數(Biological Pathway Dose Conversion Factor, BDCF)，說明如下：

暴露途徑劑量轉換係數的定義為：當核種在生物圈中傳輸時，根據其在生物圈傳播的媒介，依照不同進入人體的途徑，可組合成各種暴露途徑劑量轉換係數(Biological Pathway Dose Conversion Factor, BDCF)，如下所示：

$$\text{BDCF}_{nr} = \sum_p F_{np} \times \text{DCF}_{nrp} \quad (3-1)$$

式中，BDCF<sub>nr</sub> 意義為：第 n 個核種濃度在生物圈媒介為 1 單位時，對於人體第 r 個器官造成的輻射劑量(單位為 mSv/yr/Ci/m<sup>3</sup>)。由於核種自生物圈媒介中進入人體，可能有數道的曝露途徑，因此 BDCF<sub>nr</sub> 可表示為數個途徑使用因數與劑量轉換因數的累積。

F<sub>ip</sub>：第 p 個途徑，n 核種的傳輸轉換因數(單位為 m<sup>3</sup>/yr)。

DCF<sub>irp</sub>：第 n 個核種，第 r 個器官，第 p 個途徑的基本劑量轉換因數(mSv/Ci)。基本的 DCF 共有 5 個，分別為 DCF1(嚥入, ingestion)，DCF2(吸入, inhalation)，DCF3(直接曝露 direct exposure-體射源, body source)，DCF4(地表輻射 surface radiation, -面射源, surface source)，DCF5(空浮浸身, air immersion-體射源, body source)。



## 第四章、處置安全分析模式之產出與不同模式間之關聯研析

安全評估從源項、近場、遠場到生物圈涉及許多不同模式之整合應用，除了各階段所使用模式須通過基準校驗(benchmark)外，更重要的是模式與模式間之串接與整合，也就是不同功能模式之關聯與輸出入資訊之連結需加以釐清，以檢核整合架構是否足以達到安全評估之目的。本項工作主要在釐清全系統架構下，不同階段模式間之資訊(輸出與輸入)整合是否完整與一致，以避免由於某一模式之誤差或資訊之不足與不一致而造成系統性之誤差累積，而模式所需與產出資訊間之關聯包含不同之時間與空間解析度差異。此外，本章亦摘要整理瑞典 SKB 的 TR-10-51 技術報告，該報告對 SR-Site 所使用安全評估模式有清楚的關聯說明可供參考。

### 4.1 安全分析模式銜接架構

從 3.2 節的討論，可以得知安全分析模式架構下源項、近場與遠場如何連結實與各模式之功能有關，若採用如圖 3.5 的 B 組合，則源項模式可涵蓋核種自填充材料與盛裝容器之外釋率，則近場模式則涵蓋處置窖、緩衝材料、回填材料、坑道、受擾動地質圈，而遠場模式則涵蓋未擾動地質圈。

#### 4.1.1 安全分析模式關鍵參數與模式間之關聯

以圖 3.5 的 B 組合下模式銜接架構為例，以心智圖源繪製源項模式、近場與遠場模式三者間之銜接架構如圖 4.1 所示。分述如下：

##### 1. 源項模式

- ▶ 廢棄物描述需包含種類、數量、活度與特性等資訊，此部分為對應於審查導則廢棄物描述小節內容
- ▶ 盛裝容器包含尺寸、壽命與盛裝容器之物理特性與化學特性
- ▶ 填充材料包含其厚度、物理特性與化學特性

而源場模式須提供關鍵核種溶出速率，包含位置、關鍵核種種類與其發生時間與歷程，以供近場模擬所需。

##### 2. 近場模式

- ▶ 處置窖、緩衝材料、回填材料、坑道等多重障蔽須包含其厚度、物理特性與化學特性
- ▶ 受開挖擾動地質圈包含受擾動範圍、水力傳導係數、孔隙率、延散係數、擴散係數，有涉及未飽和含水層則須未飽和層水力特性
- ▶ 水文氣象參數可包含降水、蒸發散、風速、相對溼度、淨輻射量等
- ▶ 地化反應系統參數包含反應方程式、平衡常數、吸脫附模型、遲滯係數

近場模式須提供關鍵核種溶入遠場之速率，包含位置、關鍵核種種類與其發生時間與歷程，以供遠場模擬所需。

### 3. 遠場模式

- 未受開挖擾動地質圈包含受擾動範圍、水力傳導係數、孔隙率、延散係數、擴散係數、未飽和層水力特性
- 水文氣象參數可包含降水、蒸發散、風速、相對溼度、淨輻射量等
- 地化反應系統包含反應方程式、平衡常數、吸脫附模型、遲滯係數

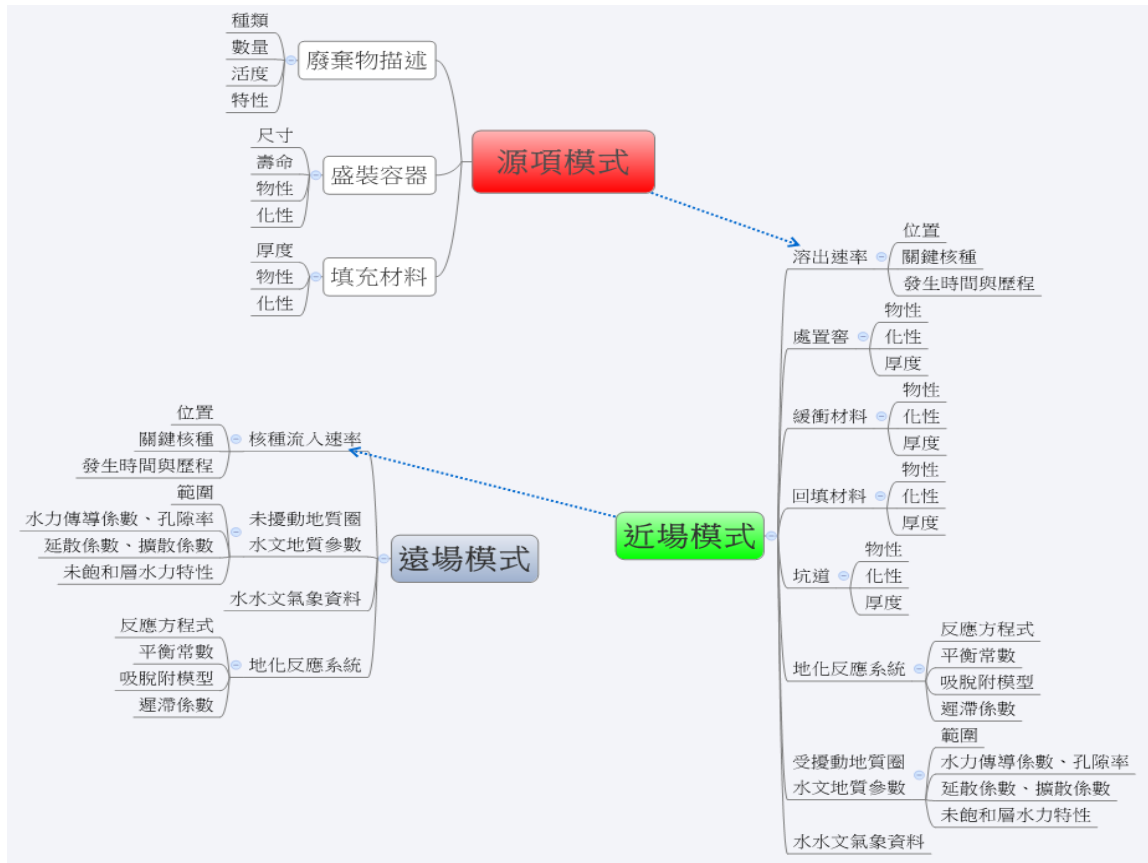


圖 4.1 低放處置模式關鍵參數與架構

### 4.2 SKB TR-10-51 技術報告研析

SKB TR-10-51(2010)為 Model summary report for the safety assessment SR-Site 的技術報告，此報告綜整應用於 SR-Site 之安全分析模式及相關模式之 QA 程序與相關文件。模式之 QA 須滿足以下要求：

1. 需論證所使用程式適用於其目的
2. 需論證所使用程式有被適當使用
3. 需論證程式的發展有適當之程序與該程式可產出正確結果
4. 必須描述資料如何在不同計算模式間轉換

由於整個 SR-Site 評估報告中使用的模擬程式非常多，為了滿足上述 QA 的要求，SKB 考量程式的屬性、發展過程及適用範圍等，將這些程式依照 QA



的重要性予以分級，並因此建立對應的品保文件，QA 分級的考量如下：

1. 1 級：一般電腦作業系統(OS)及資料庫，無須納入 QA 文件。
2. 2 級：單位轉換及輸入/出介面處理程式，可以簡單手算驗證，無須納入 QA 文件。
3. 3 級：普遍使用之商業軟體或公開原始程式碼之公用軟體，無須納入 QA 文件。
4. 4a 級：針對 SR-Site 安全評估由商用軟體修改之程式，修改之部分須納入 QA 文件。
5. 4b 級：針對 SR-Site 安全評估自行以 C 或 Fortran 語言發展之程式，需完整納入 QA 文件。

TR-10-51 報告中也對 QA 文件的撰寫內容建立樣板(template)格式，樣板內容如下：

1. 程式介紹：內容需涵蓋以下幾項：
  - 簡要說明該程式在 SR-Site 報告中的功能
  - 如果是取代過去 SKB 或其他相關評估報告所使用的程式，須說明理由。
  - 程式的版次及使用的作業平台
  - 程式的 QA 分級
2. 程式適用性：內容須說明該程式所解析的問題，包括概念模式甚至數學公式，程式中的輸入參數及數值適用範圍也需涵蓋在內。
3. 程式使用說明：如果是公用軟體程式，則可以直接引用該程式使用手冊，也可以利用 EXCEL 等工具建立簡易的說明表單。
4. 程式發展過程、驗證及確認：程式各版本的發展過程、與解析解或其他程式的驗證及確認均須納入文件中。如果該程式是由 SKB 的合作單位所發展，可以該單位的相關文件直接納入。
5. 程式輸出入值的處理說明：這部分的內容主要是說明該程式與其他上下游程式的輸出入數值處理方式及結果。
6. SR-Site 報告使用此程式的考量

#### 4.2.1 SKB SR-Site 安全評估所使用模式與目的

表 4.1 為摘錄 TR-10-51 報告中表 2-1 內容針對開挖/運轉期與溫暖期所需模擬目的與所使用安全評估模式，報告中另有針對永凍與冰河期所使用模式，此節以溫暖期所使用模式為例說明。力學與熱力關係主要由 3DEC 模式負責；緩衝與回填材料的飽和 THM 模擬使用 Abaqus；飽和地下水流場與鹽度由 DarcyTools 執行，該模式為 SKB 與其他機構合作研發產出；水泥剝蝕模擬與膨脹模擬使用 CODE\_BRIGHT；緩衝材料化學與移棲模擬採用 PHAST 與 TOUGHREACT；近場核種傳輸模擬採用 COMP23；遠場核種傳輸模擬使用 FARF31 與 MARFA。

表 4.1 SKB SR-Site 在開挖/運轉與溫暖期之安全評估模式與模擬目的

Modelling activity in AMF	Code used
Buffer and rock temperature	3DEC
THM saturation (buffer and backfill)	Abaqus
Near-field stresses (geosphere)	3DEC
Reactivation	3DEC
Fracturing (spalling)	3DEC
FPI calculations: calculation of the occurrence of Full Perimeter Intersecting fractures in deposition tunnels	FPI script in MATLAB
Chemical alterations during saturation (geosphere)	PHAST
Grout degradation	CODE_BRIGHT
Groundwater flow and salinity during saturation	DarcyTools
Swelling	Abaqus CODE_BRIGHT
Buffer chemistry and migration in buffer	PHAST, TOUGHREACT
Consumption of initially entrapped oxygen (buffer and backfill)	PHAST
Corrosion calculations (including buffer erosion calculations)	Analytical expressions (Excel)
Hydro temperate domain	ConnectFlow
Groundwater composition over glacial cycle	PHREEQC
Solubilities	Simple Functions
Radionuclide transport, near-field	COMP23
Radionuclide transport, far-field	FARF31 MARFA
Biosphere landscape model	Ecolego MIKE_SHE Pandora Erica

本研究進一步將 SKB SR-Site 安全評估所使用模式進行屬性歸類、模式功能、輸出入整理及 QA 等級如表 4.2。

表 4.2 SKB SR-Site 安全評估模式功能與輸出入資訊整理

模式	屬性	功能	Input SKB 資料庫	Output SKB 資料庫	QA 等級
3DEC	近場	近場緩衝材料和開挖擾動帶岩體等不連續介質應力分析	1.靜態： DOKUMENT\Project\3DEC SR-site\data 2.動態： DOKUMENT\Project\3DEC dynamik\DATA\Input files (TR-08-11)	1.靜態 (SKBdoc 1264505) 2.動態 (SKBdoc 1264508)	4a

Abaqus	源項 近場	近場廢料罐與緩衝回填材料之熱-水-力耦合作用之沉陷(sinking)及回脹(swelling)分析	SKBdoc 1265608	SKBdoc 1258988	3 及 4a
Analytical model for quantification of buffer erosion and canister corrosion	源項	廢料罐腐蝕及緩衝材料侵蝕	SKBdoc 1260297 , 1256019	SKBdoc 1265612 (Excel)	4b
CODE_BRIGHT	源項 近場	緩衝回填材料熱-水-力耦合作用模擬	DOKUMENT\Projekt\THM SR-site modelling\DATA\	SKBdoc 1265606	3 及 4a
ConnectFlow	近場	離散裂隙網路(Discrete Fracture Network)地下水水流模擬	SVN / SR-SiteDataStorage	SKBdoc 1256019	3
DarcyTools	近場	飽和地下水水流和鹽度傳輸模擬	SVN/SR-SiteDataStorage	SKBdoc 1256019	4b
Ecolego	遠場	陸域生物圈劑量評估	SKBdoc 1263189		3
ERICA Tool	遠場	生物圈環境影響評估	SKBdoc 1263189		3
FARF31	遠場	三維放射性核種遠場傳輸模擬	SKBdoc 1256019 SKBdoc 1260297	SKBdoc 1260295	4b
MARFA	遠場	放射性核種遠場傳輸模擬	SKBdoc 1256019, 1266150		4b
MATLAB – COMP23	源項 近場	放射性核種近場傳輸模擬	SKBdoc 1260297	SKBdoc 1260295	4a

MATLAB – FPI	源項	廢料罐因地震產生變形斷裂模擬	SKBdoc 1264530, 1264531, 1264532	4b
MATLAB – Pandora	遠場	生物圈地貌 (landscape) 模式(放射性衰變地景模式, 尤其是高階核廢)	SKBdoc 1263189	4a
MIKE SHE	近場 遠場	近地表水文地質模擬	SKBdoc 1263189	3
Numerical GIA model	遠場	海平面及海岸線長期演化預估	SKBdoc 1265613, 適用於三種程式: 冰原 (Ice sheet) 模式、GIA (Glacial Isostatic Adjustment) 模式及永凍層 (Permafrost) 模式	4b
Numerical permafrost model	近場 遠場	永凍層 (Permafrost) 形成及發展分析	SKBdoc 1265613, 同上	4a
PHAST	近場	飽和層核種傳輸/反應模擬	SKBdoc 1265689(氧入滲岩石裂隙模擬) SKBdoc 1265807(地下水與膨潤土交互作用模擬)	3
PHREEQC	近場	地球化學平衡反應計算分析	SKBdoc 1262945, 1265689	3
Solubility model (Simple Functions)	近場 遠場	核種溶解度限制計算分析	SKBdoc 1265616	4b
TOUGHREACT	近場	緩衝材料核種傳輸/反應模擬	SKBdoc 1265618	3
UMISM	近場 遠場	動態冰原 (ice-sheet) 模擬分析	SKBdoc 1265613	4b

由表 4.2 的整理可以發現，TR-10-51 報告不僅對所使用的模式提供清楚檢核，包含適用於源項、近場或遠場模擬外，針對各模式功能、主要輸入與輸出也提供說明，也同時檢核其 QA 等級，未來國內在低放處置安全評估工作所使用的模式群，也應提供相關的模式工具技術支援報告，清楚說明類似 TR-10-51 報告中所陳述的要項。

## 第五章、處置全系統安全評估模式架構研擬暨整合技術發展精進建議

本章將綜整前述關於安全分析模式與資訊成果，研擬符合國內潛在處置場址特性與可能處置方式之全系統安全評估模式架構，包含所需模式、關鍵參數與不同模式間之連結，進而檢視國內處置設施安全分析相關模式之技術不足，以提出未來整合技術發展精進建議。

### 5.1 全系統安全評估程式架構

綜整前述研析結果，全系統架構應涵蓋源項、進場、遠場與生物圈劑量風險評估模式，選用這些模式時應考量以下幾點：

1. 不同模式間之輸入與輸出是否可合理銜接
2. 所選用模式與引用參數須建立相關 QA 文件
3. 考量我國可能的處置場址可能位於離島的特性，以及採用坑道的處置方式，瑞典 SFR、加拿大 DGR 等坑道處置設施的評估模式考量就更值得審慎參考；另一方面，由於放射性廢棄物本質上的差異，日本高放射性廢棄物 H12 的源項及近場安全評估技術不適用低放射棄廢棄物，但是地質圈(處置母岩及其地質環境)及生物圈的評估技術則是可納入考量的。

#### 5.1.1 源項模式

根據前文 3.1 的研析結果，建議源項模式的模擬功能僅涵蓋固化體、盛裝容器與填充材料，處置窖之後納入近場模式模擬，而以盛裝容器與填充材料處為內部輻射源銜接源項模式輸出。因此，源場模式由統計廢棄物種類、數量、活度與特性等資料後，計算出核種的盤存量(inventory)，然後根據盛裝容器的尺寸、壽命與物理化學特性，計算關鍵核種自廢料體溶出後，配合容器的腐蝕率與填充材料的遲滯功能推估，計算出不同時間及位置核種的外釋率，以供近場模擬所需的輸入。

早期由 ORNL 所發展的 SOURCE 程式可以用來評估水泥功能的失效；BNL 所發展的 DUST 及陸續演變的 DUST-MS 程式則可以用來進行評估容器的腐蝕及核種的溶出率。上述這些程式發展時期較早，且大都應用於近地表處置方式；SKB SR-Site 報告則是以解析解程式來進行計算。本研究建議可採用解析解程式來模擬計算，這樣與近場模式的輸出入介面銜接較具有彈性。

#### 5.1.2 近場及遠場模式

目前的研析結果，近場及遠場模式大都採用不同的模擬程式，例如：近場以 TOUGHREACT、ConnectFlow 等；遠場則有 FARF31、MARFA 等，然近年來隨著數值模式的進展與功能日益增強，以 HYDROGEOCHEM 為例，是可以同時作為近場模式與遠場模式使用。本研究已經將 HYDROGEOCHEM 之關鍵參數進行統整，近遠場之間的參數輸出及輸入介面可以充分銜接。

此外若單就近場工程障蔽功能安全評估角度，由於工程障蔽的特性參數較易掌握，例如在日本 NUMO TR-10-03(低放地質處置的處置技術與安全性報告中)，則採用近似解析解以相當豐富的篇幅探討近場工程障蔽的安全性與敏感性，因此近場安全評估若採用解析解，也是選項之一。

### 5.1.3 生物圈模式

在生物圈評估方面，RSICC 提供 FOOD、GENII 2.06、INTRUDE-ANS，瑞典的 BIOMOV5 及 IAEA 的 BIOMASS 等程式針對不同的暴露情節進行劑量評估，目前由美國 Argonne 實驗室發展的 RESRAD 是最廣泛使用的污染場址劑量評估程式，也最符合 IAEA 安全模式報告的功能架構。RESRAD 可以考慮多路徑之劑量與風險評估，包含來自土壤、空氣、地下水、植物與動物。模式以解析解計算核種在地下水傳輸，模式給定土壤中之核種初始濃度，再計算經由地下水、空氣與食物鏈到人類之暴露劑量，可以考慮的暴露路徑包含經由受污染的土壤、吸收土壤或水產透過飲用水、作物灌溉、土壤直接輻射、粉塵吸入、氬氣吸入、作物生產與畜牧生產。

### 5.1.4 全系統評估整合模式

上述各個模式最後需要由一個全系統的作業平台，將各個模式串聯起來。目前這樣功能的整合平台有 AMBER 及 GOLDSIM 兩種。這兩個程式都有共同的特點，使用者可藉由圖形輸入介面，將源項、近場、遠場以及生物圈等子系統建成各項區塊(compartment)後串聯成一完整全系統評估程式。

## 5.2 低放處置安全評估整合技術發展建議

綜整前述研析結果，提出國內低放處置安全評估整合技術發展建議，有以下幾點：

1. 全系統安全評估架構應涵蓋源項、進場、遠場與生物圈劑量風險評估模式，國內在各單項模式上雖都有專門技術或人力，但主要問題在欠缺技術整合能力，因此系統整合工作需積極投入。
2. 系統整合過程，應建立所選用模式與引用參數之 QA 文件，類似 SKB TR-10-51 的模式技術支援報告。
3. 系統整合應在模式選取時考量不同模式間之輸入與輸出是否可合理銜接，避免不同模式間整合過程的誤差累積與傳遞，過度解釋或過度保守的解釋不同模式的輸出或作為其他模式的輸入，都會影響整體安全評估的結果。
4. 國內在情節發展上亦較不足，應先建立符合國內未來處置工作與水文地質特徵之基本(參考)情節傳輸，對於各情節所選用參數也應清楚說明其來源，是實驗、文獻或假設取得。
5. 針對國內低放處置現況，應確認所應考慮之變異情節組合是否足以涵

蓋未來地質、水文、氣候變遷等自然環境演化對處置安全的可能衝擊，對於人為無意闖入的情節也應提出。

6. 針對國內低放處置現況，建議在情節發展上應加強海洋外釋情節的發展與建立，未來由於涉及海岸地區、近岸海域、或離島，安全分析模式須能考量特殊之海域與陸域間水體傳輸與交換機制。
7. 全系統安全評估架構下，應釐清影響評估結果之主要不確定性來源與敏感性分析。
8. 應提出安全評估之整合安全論證，此部分之方法論與程序應建立。





## 第六章、低放審查導則安全分析有關章節與條文內容修訂建議

本章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)」處置設施安全評估相關章節之精進建議。並配合「低放射性廢棄物安全管制技術發展分項計畫」所召開的審查導則修訂學者專家委員會議，提出本子項計畫之研究成果，以確認審查導則安全評估章節的修訂項目與內容。

此部分工作已配合總計畫彙整前一年度成果提出安全評估章節修訂建議於 2014 年 5 月 9 日之審查導則修訂學者專家委員會議中討論，並也於 2014 年 9 月 18 日之子計畫三內部工作會議中再次討論審查導則修訂，文字修訂請參閱附件一之修正條文與說明。

2014 年 5 月 9 日之審查導則修訂會議中討論「審查導則草案」第七章「處置設施之安全評估」章節修訂方向建議重點如下：

1. 本章主題為處置設施之安全評估，建議將所有章節都應加入安全評估，以及增列安全評估範疇於 7.1 節最前面合先敘明，其修訂後章節依序為 7.1 安全評估範疇、7.2 輻射劑量安全評估、7.3 操作安全評估、7.4 入侵者安全評估及 7.5 長期穩定安全評估。
2. 建議本章節處置設施之安全評估增列意外事故評估項次。
3. 輻射劑量安全評估之第一子節廢棄物描述部分內容與其他章節重複，建議該章節內容需加以調整。
4. 建議本章所提及概念模式另增新章節。
5. 本章之內容所提及運轉、監測、監管、封閉與長期穩定等時限應參考處置安全規則之規範。
6. 建議長期穩定章節將坑道處置概念納入之審查要項。

2014 年 9 月 18 日之子計畫三工作會議中，再次針對 2014 年 5 月 9 日之審查導則修訂會議作修訂方向建議重點如下：

1. 建議新增 7.1 安全評估範疇，先述明安全評估審查範疇
2. 7.1 輻射劑量評估小節之廢棄物描述部分內容與第二、五、十一章內容相關，建議未來跨章節修訂。
3. 7.4 長期穩定性小節應包含監測計畫與項目審查，建議未來修訂，以及建議維持邊坡穩定性較適合淺地表處置所需，未來應針對坑道處置增列條文。



## 第七章、結論與建議

1. 在國際原子能總署安全評估模式技術報告研析部分：針對 IAEA(2013)最新之安全評估模式技術報告(初稿)主要針對地下水與傳輸模式、地表水與傳輸模式、暴露評估(劑量)等模式研析其所需關鍵參數。也針對近地表處置安全指引 SSG-29 (IAEA, 2014)中設施封閉後的輻射安全標準，設施經營者、管制機構及政府的權責劃分，處置設施的安全作法，安全分析案例與評估，處置設施階段性發展及達成方法。
2. 在處置安全分析模式所需關鍵參數整理與研析部分，完成源項模式、近場與遠場模式關鍵參數整理分析，並討論三者間之銜接架構與 IAEA 對近場之定義說明。
3. 在處置安全分析模式之產出與不同模式間之關聯研析部分，先建構了源項模式、近場與遠場模式之銜接架構，並以心智圖架構建立三者間之連結參數架構。
4. 源項模式與處置單元相關(工程設計)之關鍵參數為固化體、盛裝容器尺寸與物理化學特性、處置窖尺寸等，與場址環境相關(場址調查)有覆蓋土壤侵蝕率、人類擾動因素等，與核種相關有溶出率、暴露途徑轉移係數、生地化反應參數等。
5. 近場模式所需參數與場址特性相關在水文地質參數有水文地質模型、地下水位面、水相主要物種、土壤主要礦物組成、孔隙率、水力傳導係數、未飽層水力特性參數、延散係數、擴散係數、異質性、非等向性、與鄰近地表水體之關係等，在水文氣象參數有降水、蒸發散、風速、相對溼度、淨輻射量等，在生地化反應參數有主要物種反應方程式、動態反應速率、平衡常數、吸脫附模型與參數、離子交換部位、遲滯係數或適用之等溫吸附模型與參數等。
6. 近場模式所需參數與設施設計相關在緩衝回填材料有厚度、孔隙率、水力傳導係數、延散係數、擴散係數、化學成分組成、遲滯係數或適用之等溫吸附模型與參數等，在處置窖幾何形貌有盛裝容器排列方式、長、寬、高、幾何形狀等。
7. 遠場模式所需參數與場址特性相關在水文地質參數有水文地質模型、地下水位面、水相主要物種、土壤主要礦物組成、孔隙率、水力傳導係數、未飽層水力特性參數、延散係數、擴散係數、異質性、非等向性等，在水文氣象參數有降水、蒸發散、風速、相對溼度、淨輻射量等，在生地化反應參數有主要物種反應方程式、動態反應速率、平衡常數、吸脫附模型與參數、離子交換部位、遲滯係數或適用之等溫吸附模型與參數等，與生物圈相關參數有鄰近地表水體位置、鄰近飲用水井位置、抽取率等。
8. 針對安全評估所涉及之不同模式關鍵參數研析成果，未來可提供安全評估所需與場址特性及設施設計相關之關鍵輸入參數需求，回饋子計畫一處置場址特性與子計畫二處置設施設計相關研究參考。

9. 瑞典 SKB TR-10-51(SKB, 2010)綜整應用於 SR-Site 之安全分析模式及相關模式之 QA 程序與相關文件，對於如何建立模式之 QA 程序以及模式的屬性歸類、模式功能與輸出入整理均有詳細的說明，提供未來安全評估應有類似 QA 程序與文件的參考。
10. 在整合技術發展精進建議全系統架構應涵蓋源項、進場、遠場與生物圈劑量風險評估模式，在模式選取上應考量不同模式間之輸入與輸出是否可合理銜接，且應建立所選用模式與引用參數之 QA 文件。未來應先建立符合國內未來處置工作與水文地質特徵之基本(參考)情節傳輸，確認所需考慮之變異情節組合，釐清影響評估結果之主要不確定性來源，並提出安全評估之整合安全論證。
11. 針對國內低放處置現況，應確認所應考慮之變異情節組合是否足以涵蓋未來地質、水文、氣候變遷等自然環境演化對處置安全的可能衝擊，對於人為無意闖入的情節也應提出。
12. 針對國內低放處置現況，建議在情節發展上應加強海洋外釋情節的發展與建立，未來由於涉及海岸地區、近岸海域、或離島，安全分析模式須能考量特殊之海域與陸域間水體傳輸與交換機制。
13. 在審查導則修訂部分主要建議有(1)增列安全評估範疇說明於7.1節最前面；(2)增列意外事故評估項次；(3)輻射劑量安全評估之第一子節廢棄物描述部分內容與其他章節重複，建議該章節內容需加以調整；(4)本章所提及概念模式另增新章節；(5)所提及運轉、監測、監管、封閉與長期穩定等時限應參考處置安全規則之規範；(6)長期穩定章節將坑道處置概念納入之審查要項；(7)針對坑道處置應增列相關條文。
14. 在審查導則修訂部分，除已配合總計畫提出安全評估章節修訂建議於 2014 年 5 月 9 日之審查導則修訂學者專家委員會議中討論，並另於 2014 年 9 月 18 日之子計畫三內部工作會議中再次討論審查導則修訂，修正建議詳如附件一。

## 參考文獻

1. 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設施安全分析報告審查導則(第0版)，中華民國101年2月。
2. 吳禮浩，2012，情節分析審查技術發展，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，101FCMA006-08。
3. 陳智隆、賴仁杰，2012，設施安全分析源項審查技術發展，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，101FCMA006-09。
4. 李明旭、蔡世欽，2013，低放射性廢棄物處置設施安全評估審查規範精進之研究，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，102FCMA008。
5. 李明旭、董家鈞，2012，放射性廢棄物處置安全分析模式驗證及場址特性調查審查技術之研究，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，101FCMA008。
6. 吳禮浩，2009，低放射性廢棄物坑道處置技術審查要項研究，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，98FCMA001。
7. 任春平，2008，低放射性廢棄物最終處置功能安全評估模式審查技術之建立，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，97FCMA006。
8. 李境和，2010，坑道式最終處置設施安全評估審查要項研究，行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫。
9. 李境和，2007，低放射性廢棄物最終處置設施安全審查規劃研究，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，96FCMA001。
10. 董家鈞、陳瑞昇，2006，低放射性廢棄物隧道處置水文地質模擬技術發展現況與國內隧道工程水文地質模擬案例研究，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，952006FCMA002。
11. 董家鈞、陳瑞昇，2005，低放射性廢棄物隧道處置水文地質概念模式審查技術之建立，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，942005FCMA002。
12. 中興工程顧問股份有限公司，2013，低放射性廢棄物最終處置技術可行性評估報告。
13. Anderson, D.L. and Becker, B.H., "Source-Release Modeling Report for Operable Unit 7-13/14," ICP/EXT-05-01039, 2006.
14. Icenhour, A.S. "Analysis of Source Term Modelling for Low-Level Radioactive Waste Performance Assessments," ORNL/TM 12908, 1995.
15. IAEA, 1985, IAEA Bulletin,  
<http://www.iaea.org/Publications/Magazines/Bulletin/Bull272/27204693540.pdf>
16. IAEA, 2011, Disposal of Radioactive Waste, Safety Standard Series No.SSR-5,

Vienna.

17. IAEA, 2004, Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities.
18. IAEA, 2009, Remediation of Land Affected by Radioactive Residues, Proceedings of an International Conference on the Remediation of Land Affected by Radioactive Residues Organized by the IAEA, Hosted by the Government of Kazakhstan and held in Astana, 18-22 May 2009.
19. IAEA, 2012, The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards.
20. IAEA, 2013, Mathematical Models for Assessing Remediation of Radioactively Contaminated Sites (draft), edited by R. Avila, H. Monken-Fernandes, D. Jacques, B. Newman, J. Simunek, G. Yeh, C. Yu, M. Zhu.
21. IAEA, 2014, Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste Specific Safety Guide, IAEA Safety Standards Series No. SSG-29.
22. Japan Nuclear Cycle Development Institute, 2000, H12: Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Supporting Report 3: Safety Assessment of the Geological Disposal System, JNC-TN1410 2000-04, 458 pp.
23. NUMO, 2011, 地層処分低レベル放射性廃棄物に関わる処分の技術と安全性, TR-10-03, 日本原子力発電環境整備機構。
24. NRC, 2012, Regulatory Analysis for Proposed Revisions to Low Level Waste Disposal Requirements (10 CFR PART 61).
25. NRC, 2000, A Performance Assessment Methodology for Low-Level Radioactive Waste Disposal Facilities, NUREG- 1573, Division of Waste Management, Office of Nuclear Material Safety and Safeguards, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC 20555-0001.
26. NRC, 2006, Proceedings of the International Workshop on Conceptual Model Development for Subsurface Reactive Transport Modeling of Inorganic Contaminants, Radionuclides, and Nutrients, NUREG/CP-0193, Division of Systems Analysis and Regulatory Effectiveness, Office of Nuclear Regulatory Research, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC 20555-0001.
27. Sandia National Laboratories (SNL), 1995, Evaluation of a Performance Assessment Methodology for Low Level Radioactive Waste Disposal Facilities, SAND91-2802.
28. SKB, 2010, Model summary report for the safety assessment SR-Site, SKB technical report, TR-10-51.
29. Yeh, G. T., J. T. Sun, P. M. Jardine, W. D. Burger, Y. L. Fang, M. H. Li, and M. D. Siegel, 2004a. HYDROGEOCHEM 4.0: HYDROGEOCHEM 4.0: A Coupled

Model of Fluid Flow, Thermal Transport, and HYDROGEOCHEMical Transport through Saturated-Unsaturated Media: Version 4.0. ORNL/TM-2004/103, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831.

30. Yeh, G. T., J. T. Sun, P. M. Jardine, W. D. Burger, Y. L. Fang, M. H. Li, and M. D. Siegel, 2004b. HYDROGEOCHEM 5.0: A Three-Dimensional Model of Coupled Fluid Flow, Thermal Transport, and HYDROGEOCHEMical Transport through Variably Saturated Conditions - Version 5.0. ORNL/TM-2004/107, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831.
31. Yeh, G. T., J. T. Sun, P. M. Jardine, W. D. Burger, Y. L. Fang, M. H. Li, and M. D. Siegel, 2009. HYDROGEOCHEM 5.5: A Three Dimensional Model of Coupled Fluid Flow, Thermal Transport, and HYDROGEOCHEMical Transport through Variably Saturated Conditions Version 5.5. Dept. of Civil and Environ. Engineering, University of Central Florida, 4000 Central Florid Blvd, Orlando, FL 32816.





附件一

「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則」(第0版)

第七章處置設施之安全評估修訂草案對照表

修正條文	現行條文	說明
<p>7.1 輻射劑量評估：說明廢棄物性質與場區之可能核種傳輸路徑及特性，並分別評估運轉期(廢棄物接收、暫存、吊卸、處理、處置、除汙排水)及封閉後正常與異常狀況下對工作人員及民眾輻射劑量之影響，並與現行法規做比較。</p> <p>一、廢棄物描述： 包括總數量、總活度、廢棄物特性基本假設等。 廢棄物為處置設施安全評估的重要資料，應提供充足資料供審查，以確保處置安全。為妥善描述處置的低放射性廢棄物，本節內容應提供下列資料，若在其他章節已提出可免提供，但請說明出處。</p> <p>(一)提供資料</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 申請處置設施前，國內各設施已產生的低放射性廢棄物：內容包括廢棄物種類、數量、特性、活度及貯存位置。</li> <li>2. 國內已存在或可能新增設施，預估可能產生的低放射性廢棄物及其未</li> </ol>	<p>7.1 輻射劑量評估：說明廢棄物性質與場區之可能核種傳輸路徑及特性，並分別評估運轉期(廢棄物接收、暫存、吊卸、處理、處置、除汙排水)及封閉後正常與異常狀況下對工作人員及民眾輻射劑量之影響，並與現行法規做比較。</p> <p>一、廢棄物描述： 包括總數量、總活度、廢棄物特性基本假設等。 廢棄物為處置設施安全評估的重要資料，應提供充足資料供審查，以確保處置安全。為妥善描述處置的低放射性廢棄物，本節內容應提供下列資料，若在其他章節已提出可免提供，但請說明出處。</p> <p>(一)提供資料</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 申請處置設施前，國內各設施已產生的低放射性廢棄物：內容包括廢棄物種類、數量、特性、活度及貯存位置。</li> <li>2. 國內已存在或可能新增設施，預估可能產生的低放射性廢棄物及其未</li> </ol>	<p>一、該節部分內容與第二、五、十一章內容相關，建議未來跨章節修訂。</p>

<p>來趨勢：內容包括廢棄物種類、數量、特性及活度。</p> <p>3. 廢棄物種類資料，包括廢棄物的來源、處理方式、固化劑、螯合劑成分、盛裝容器(是否為高完整性盛裝容器)、及其分類。</p> <p>4. 廢棄物數量資料，包括廢棄物處理後的體積、重量及包裝後的數量。</p> <p>5. 廢棄物特性資料，包括廢棄物的組成及其物理與化學特性、自由水含量、抗壓強度、瀝濾指數、耐火性、耐水性、耐候性、耐輻射、耐菌性等資料。</p> <p>6. 廢棄物活度資料，包括主要核種(含難測核種)的名稱、半衰期、推估處置時之<u>初始活度</u>及平均濃度。</p> <p>7. 處置設施內的廢棄物之處置相關規劃。</p> <p>8. 處置設施運轉期間，接收、貯存及處置廢棄物之規劃。</p> <p>9. 處置設施封閉時所產生之廢棄物規劃。</p> <p>(二)審查作業</p> <p>1. 若提供資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</p>	<p>來趨勢：內容包括廢棄物種類、數量、特性及活度。</p> <p>3. 廢棄物種類資料，包括廢棄物的來源、處理方式、固化劑、螯合劑成分、盛裝容器(是否為高完整性容器)、及其分類。</p> <p>4. 廢棄物數量資料，包括廢棄物處理後的體積、重量及包裝後的數量。</p> <p>5. 廢棄物特性資料，包括廢棄物的組成及其物理與化學特性、自由水含量、抗壓強度、瀝濾指數、耐火性、耐水性、耐候性、耐輻射、耐菌性等資料。</p> <p>6. 廢棄物活度資料，包括主要核種(含難測核種)的名稱、半衰期、推估處置時之活度及平均濃度。</p> <p>7. 處置設施內的廢棄物之處置相關規劃。</p> <p>8. 處置設施運轉期間，接收、貯存及處置廢棄物之規劃。</p> <p>9. 處置設施封閉時所產生之廢棄物規劃。</p> <p>(二)審查作業</p> <p>1. 若提供資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</p>	<p>二、於「低放射性廢棄物坑道處置安全評估關鍵議題初步探討」研究報告中，建議使用名詞「初始活度」較為適當。</p>
--	---	--

<p>2. 提供資料中廢棄物種類、數量、特性、活度之預估資料<u>應合理且足夠設施安全評估之使用。</u></p> <p>3. 已產生的廢棄物資料<u>應足以判斷運轉期間預期接收低放射性廢棄物規劃之適當性。</u></p> <p>4. 場址內特定核種之總存量(至少包括「<u>低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則</u>」之附表一及附表二核種)或<u>某些 A 類廢棄物</u>之結構穩定性之要求，可列入處置設施之運轉執照內之限制條件。</p> <p>5. 處置設施場址封閉時所產生之廢棄物之種類、型態及數量等資訊，應至少足以判斷封閉計畫的合理性。</p>	<p>2. 提供資料中廢棄物種類、數量、特性、活度之預估資料，是否合理？是否足夠用於設施之安全評估？</p> <p>3. 已產生的廢棄物資料，是否足以判斷運轉期間預期接收低放射性廢棄物規劃之適當性？</p> <p>4. 場址內特定核種之總存量(如 C-14、H-3、Tc-99 或 I-129)或某些 A 類廢棄物之結構穩定性之要求，可列入處置設施之運轉執照內之限制條件。</p> <p>5. 處置設施場址封閉時所產生之廢棄物之種類、型態及數量等資訊，應至少足以判斷封閉計畫的合理性。</p>	<p>三、改以正面肯定敘述之形式做文字說明。</p> <p>四、改以正面肯定敘述之形式做文字說明。</p> <p>五、完整列入「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」之附表一及附表二核種。</p>
<p><b>二、核種傳輸特性：</b>          評估處置設施工程與天然障壁在設施運轉及封閉後，地下水滲流、擴散、延散與遲滯吸附等特性參數，以模擬分析地下水滲流機制、核種傳輸及處置設施之長期穩定性。  <u>核種藉水與空氣介質的移流及擴散作用傳輸</u>，外釋到<u>生物圈</u>。水介質是重要的傳輸機制，所以須提供<u>評估模式所需的</u>，如：水與核種在工程障壁與天然障壁間的</p>	<p><b>二、核種傳輸特性：</b>          評估處置設施工程與天然障壁在設施運轉及封閉後，地下水滲流、擴散、延散與遲滯吸附等特性參數，以模擬分析地下水滲流機制、核種傳輸及處置設施之長期穩定性。          核種藉水與空氣介質的傳輸，外釋到人類的活動範圍。水介質是重要的傳輸機制，所以須提供水與核種在工程障壁與天然障壁間的滲流、擴散、延散等特性，</p>	<p>六、於「低放射性廢棄物坑道處置安全評估關鍵議題初步探討」研究報告中，指出核種主要藉由移流及擴散作用傳輸至生物圈活動範圍。</p>

<p><u>水力</u>、擴散、延散、<u>核種遲滯因子</u>等特性，及其流場與流量等資料；對處置場的安全評估甚為重要，至少應提供下列資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 處置場址附近<u>至少連續一年的水文與氣象資訊</u>：水從處置設施覆蓋層(或坑道壁上層)的地表滲漏到處置單元之滲漏分析數據與滲漏分析方式。</p> <p>(1) <u>核種</u>滲漏分析數據：包含地質統計技術、近似值、處理、數據產生及/或消去、保守估計、以及為達到較佳模擬結果而將現地資訊或實驗室數據所做之<u>最佳化調整與不確定性分析</u>。</p> <p>(2) 滲漏分析方式：其描述包含<u>資料、假設、模式、驗證及校正</u>。</p>	<p>及其流場與流量等資料；對處置場的安全評估甚為重要，至少應提供下列資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 處置場址附近的氣象資訊：水從處置設施覆蓋層(或坑道壁上層)的地表滲漏到處置單元之滲漏分析數據與滲漏分析方式。</p> <p>(1) 滲漏分析數據：包含地質統計技術、近似值、處理、數據產生及/或消去、保守估計、以及為達到較佳模擬結果而將現地資訊或實驗室數據所做之最佳化調整。</p> <p>(2) 滲漏分析方式：其描述包含文件、假設、驗證及校正。</p>	<p>七、於「放射性廢棄物處置安全分析模式驗證及場址特性調查審查技術之研究」研究報告中，4.2 節修正建議，除了滲流、擴散、延散等特性外，應包含「核種遲滯因子」較為適當。</p> <p>八、於「放射性廢棄物處置安全分析模式驗證及場址特性調查審查技術之研究」研究報告中，4.2 節修正建議，除了氣象資訊外，應還需包含「水文資訊」較為適當；於「低放射性廢棄物最終處置場址之環境安全因子審查技術規範研議」研究報告中，指出至少要有一年連續紀錄的長期性氣象資料內容較完整。</p> <p>九、明確指出是「核種滲漏」。</p> <p>十、於「放射性廢棄物處置安全分析模式驗證及場址特性調查審查技術之研究」研究報告中，4.2 節修正建議，除了最佳化調整外，應還需包含「不確定性分析」較為適當。</p> <p>十一、於「放射性廢棄物處置安全分析模式驗證及場址特性調查審查技術之研究」研究報告中，4.2 節</p>
---	---	--

<p>2. 提出滲漏時進入處置單元之水流體積以及滲漏之時間與空間分佈之預測。包括最大降雨量、可能降雨之時間分佈。</p> <p>3. 評估工程覆蓋層(或坑道壁上層)材料的侵蝕、穴居動物、植物生態對滲漏之影響。</p> <p>4. 覆蓋層(或坑道壁上層)之工程設計：包含厚度、橫向延伸、材料粒徑、邊坡、總孔隙度與有效孔隙度、水力傳導係數以及含水量與毛細勢能與水力傳導係數之關係。</p> <p>5. 工程障壁材料與天然障壁對地下水之擴散與延散參數值。</p> <p>6. 工程障壁材料與天然障壁對<b>關鍵</b>核種的<b>遲滯因子參數值</b>。</p> <p>7. 預估滲漏引起的地層下陷。</p> <p>(二)審查作業</p> <p>1. 若提供資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</p> <p>2. 用於估算場址滲漏量之數據及分析技術是否合</p>	<p>2. 提出滲漏時進入處置單元之水流體積以及滲漏之時間與空間分佈之預測。包括最大降雨量、可能降雨之時間分佈。</p> <p>3. 評估工程覆蓋層(或坑道壁上層)材料的侵蝕、穴居動物、植物生態對滲漏之影響。</p> <p>4. 覆蓋層(或坑道壁上層)之工程設計：包含厚度、橫向延伸、材料粒徑、邊坡、總孔隙度與有效孔隙度、水力傳導係數以及含水量與毛細勢能與水力傳導係數之關係。</p> <p>5. 工程障壁材料與天然障壁對地下水之擴散與延散參數值。</p> <p>6. 工程障壁材料與天然障壁對<b>重要</b>核種的遲滯吸附參數值。</p> <p>7. 預估滲漏引起的地層下陷。</p> <p>(二)審查作業</p> <p>1. 若提供資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</p> <p>2. 用於估算場址滲漏量之數據及分析技術是否合</p>	<p>修正建議，使用名詞「資料」較為適當，並其描述應還需包含「模式」較為完整。</p> <p>十二、「重要」建議修改為「關鍵」。修改為「遲滯因子」。</p>
---	--	--

<p>理，驗證覆蓋層系統之物理特性並確認其數值足夠保守或真實。</p> <p>3. 覆蓋層(或坑道壁上層)是否具降低滲漏及導引滲漏水流遠離廢棄物之能力。</p> <p>4. 擴散、延散與<u>遲滯因子</u>參數值是否合理且足以提供合理之準確度或保守之分析。若場址參數無法取得，應確認採適當保守假設，若參數存在不確定性或不一致，其數值應與文獻中所得之相似地質介質數值範圍相比較，<u>並估計其可信賴度</u>。</p> <p>5. 水流透過覆蓋層(或坑道壁上層)系統導致之下陷效應預估是否合理。</p> <p><b>三、正常狀況之輻射劑量：</b>評估處置設施運轉期及封閉後在正常狀況之輻射劑量，包括傳輸機制說明、情節分析、<u>概念模式說明、分析模式及電腦程式說明</u>、輸入資料、輸出資料、敏感度分析、不確定性分析、評估結果及使用之評估程式。</p> <p>處置設施核准運轉後，包含五個時期，分別為運轉期，封閉期、觀察及監測期，主動監管期(或稱監管期)及被動監管期(或稱被動期)。運轉期間，將接收廢棄物進</p>	<p>理，驗證覆蓋層系統之物理特性並確認其數值足夠保守或真實。</p> <p>3. 覆蓋層(或坑道壁上層)是否具降低滲漏及導引滲漏水流遠離廢棄物之能力。</p> <p>4. 擴散、延散與遲滯吸附參數值是否合理且足以提供合理之準確度或保守之分析。若場址參數無法取得，應確認採適當保守假設，若參數存在不確定性或不一致，其數值應與文獻中所得之相似地質介質數值範圍相比較。</p> <p>5. 水流透過覆蓋層(或坑道壁上層)系統導致之下陷效應預估是否合理。</p> <p><b>三、正常狀況之輻射劑量：</b>評估處置設施運轉期及封閉後在正常狀況之輻射劑量，包括傳輸機制說明、情節分析、輸入資料、輸出資料、敏感度分析、不確定性分析、評估結果及使用之評估程式。</p> <p>處置設施核准運轉後，包含五個時期，分別為運轉期，封閉期，觀察及監測期，主動監管期(或稱監管期)及被動監管期(或稱被動期)。運轉期間，將接收廢棄物進</p>	<p>十三、修改為「遲滯因子」。</p> <p>十四、強調應考慮參數的可信賴度。</p> <p>十五、增加概念模式、分析模式及電腦程式驗證及確認之審查條文。</p>
---	--	--

<p>行處置，對場外民眾有直接曝露的風險；對場內工作人員，可能造成體內曝露與體外曝露。曝露途徑有地下水、空氣、地表水、直接輻射、生物等途徑。</p> <p>場址封閉期時，對場址內土地除污及/或結構拆除，仍會產生一些放射性廢棄物並須處置。對場外民眾有直接曝露的風險；對場內工作人員，可能造成體內曝露與體外曝露。</p> <p>為降低對民眾與工作人員之輻射劑量，所以處置場須採多重障壁的防護措施。須評估處置設施運轉期及封閉後在正常狀況下對民眾與工作人員之輻射劑量，為使輻射劑量評估合理及保守，須提供下列資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 處置設施運轉期及封閉後在正常狀況之核種傳輸機制說明：包含地下水、空氣、地表水、直接輻射、生物及其他傳輸機制。</p> <p>(1) 地下水：(a)定義並量化處置單元中重要核種藉地下水外釋之排放點、(b)考慮螯合劑之影響或其他可能提高放射性核種遷移之化學媒介時，所使用的</p>	<p>行處置，對場外民眾有直接曝露的風險；對場內工作人員，可能造成體內曝露與體外曝露。曝露途徑有地下水、空氣、地表水、直接輻射、生物等途徑。</p> <p>場址封閉期時，對場址內土地除污及/或結構拆除，仍會產生一些放射性廢棄物並須處置。對場外民眾有直接曝露的風險；對場內工作人員，可能造成體內曝露與體外曝露。</p> <p>為降低對民眾與工作人員之輻射劑量，所以處置場須採多重障壁的防護措施。須評估處置設施運轉期及封閉後在正常狀況下對民眾與工作人員之輻射劑量，為使輻射劑量評估合理及保守，須提供下列資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 處置設施運轉期及封閉後在正常狀況之核種傳輸機制說明：包含地下水、空氣、地表水、直接輻射、生物及其他傳輸機制。</p> <p>(1) 地下水：(a)定義並量化處置單元中重要核種藉地下水外釋之排放點、(b)考慮螯合劑之影響或其他可能提高放射性核種遷移之化學媒介時，所使用的</p>	
---	---	--

<p>放射性核種外釋模型及參數值、(c)滲漏進入處置單元之水量、<u>自處置單元向天然障壁流出之水量及其</u>與放射性核種外釋之關係資料。</p> <p>(2) 空氣：(a)定義並量化處置單元中重要核種藉空氣外釋之排放點與排放區域、(b)廢棄物分解產生的放射性氣體、處置單元或集水坑積水之蒸發氣體、(c)場址污染土壤、地表、與建築物之釋出空浮、(d)植物根部或穴居動物或昆蟲挖掘造成污染物之空浮、(e)封閉作業時，建築物除污或拆除作業造成污染物之空浮。</p> <p>(3) 地表水：(a)處置單元中的排水、排水層或集水坑以及有可能接觸到廢棄物之地表水、(b)場址污染土壤、地表、與建築物透過地表水傳輸之污染物、(c)植物根部或穴居動物或昆蟲挖掘之</p>	<p>放射性核種外釋模型及參數值、(c)滲漏進入處置單元之水量與放射性核種外釋之關係資料。</p> <p>(2) 空氣：(a)定義並量化處置單元中重要核種藉空氣外釋之排放點與排放區域、(b)廢棄物分解產生的放射性氣體、處置單元或集水坑積水之蒸發氣體、(c)場址污染土壤、地表、與建築物之釋出空浮、(d)植物根部或穴居動物或昆蟲挖掘造成污染物之空浮、(e)封閉作業時，建築物除污或拆除作業造成污染物之空浮。</p> <p>(3) 地表水：(a)處置單元中的排水、排水層或集水坑以及有可能接觸到廢棄物之地表水、(b)場址污染土壤、地表、與建築物透過地表水傳輸之污染物、(c)植物根部或穴居動物或昆蟲挖掘之</p>	<p>十六、處置設施於運轉期及封閉後，在正常狀況下，工程障壁仍保有其功能，滲漏進入處置單元之水地下水，可能受到工程障壁阻絕而減少流出之水量，進而降低放射性核種的外釋量，因此須考慮自處置單元向天然障壁流出之水量。</p>
---	--	---



<p>污染物經地表水的傳輸、(d)封閉作業時，建築物除污或拆除作業透過地表水傳輸之污染物。</p> <p>(4) 直接輻射：(a)廢棄物運送車輛之加馬輻射、(b) 部分場址運轉時之加馬輻射、(c) 主動監管期間，處置單元上衰減之加馬輻射與場址污染地表或建物之加馬輻射。</p> <p>(5) 生物：定義並定量直接經由生物途徑將污染物外釋及傳輸至場址外，如穴居動物由場址帶走污染物後，被獵人宰食。</p> <p>2. 正常情節(或稱設計情節)分析：</p> <p>(1) 選用國際常用的低放射性廢棄物處置的<u>特徵、事件及作用等組合(FEP)通用表</u>(如 IAEA 或國際組織)。</p> <p>(2) 經學者專家就處置場的氣候與地質特性、周圍環境及處置場設計，從國際常用的 FEP 通用表篩選出與該處置場正常情況相關的 FEPs，並記錄任何</p>	<p>污染物經地表水的傳輸、(d)封閉作業時，建築物除污或拆除作業透過地表水傳輸之污染物。</p> <p>(4) 直接輻射：(a)廢棄物運送車輛之加馬輻射、(b) 部分場址運轉時之加馬輻射、(c) 主動監管期間，處置單元上衰減之加馬輻射與場址污染地表或建物之加馬輻射。</p> <p>(5) 生物：定義並定量直接經由生物途徑將污染物外釋及傳輸至場址外，如穴居動物由場址帶走污染物後，被獵人宰食。</p> <p>2. 正常情節(或稱設計情節)分析：</p> <p>(1) 選用國際常用的低放射性廢棄物處置的特徵事件過程(FEP)通用表(如 IAEA 或國際組織)。</p> <p>(2) 經學者專家就處置場的氣候與地質特性、周圍環境及處置場設計，從國際常用的 FEP 通用表篩選出與該處置場正常情況相關的 FEPs，並記錄任何</p>	<p>十七、於「低放射性廢棄物坑道處置安全評估關鍵議題初步探討」研究報告中，指出情節(Scenario)是對影響處置場功能之可能未來的描述，包含特徵(Feature)、事件(Event)及作用(Process)等的組合，即為 FEP。</p>
--	--	---

<p>FEP 被排除的原因。</p> <p>(3) 選出處置系統的重要組件(如廢棄物體、各種工程障壁(近場)、天然障壁(遠場)、生物圈等),分析並說明重要組件的特徵、正常情況下重要組件經常發生及緩慢發生的事件、各重要組件間的互相作用過程。</p> <p>(4) 因放射性核種在各重要組件內傳輸可分為氣體、液體與固體的形態;考量選出的 FEPs,以合理的邏輯方法,繪出放射性核種傳輸的路徑,並建構出氣體傳輸正常情節、液體傳輸正常情節、固體傳輸正常情節。</p> <p>3. 提出正常情節輻射劑量評估程式及其輸入資料與輸出資料。</p> <p>4. 對正常情節輻射劑量評估程式的參數,進行敏感度分析。</p> <p>5. 對敏感度高的參數,考量參數的分布狀況,進行個人有效劑量的不確定性分析。</p> <p>6. 民眾與工作人員之輻射劑量評估結果。</p>	<p>FEP 被排除的原因。</p> <p>(3) 選出處置系統的重要組件(如廢棄物體、各種工程障壁(近場)、天然障壁(遠場)、生物圈等),分析並說明重要組件的特徵、正常情況下重要組件經常發生及緩慢發生的事件、各重要組件間的互相作用過程。</p> <p>(4) 因放射性核種在各重要組件內傳輸可分為氣體、液體與固體的形態;考量選出的 FEPs,以合理的邏輯方法,繪出放射性核種傳輸的路徑,並建構出氣體傳輸正常情節、液體傳輸正常情節、固體傳輸正常情節。</p> <p>3. 提出正常情節輻射劑量評估程式及其輸入資料與輸出資料。</p> <p>4. 對正常情節輻射劑量評估程式的參數,進行敏感度分析。</p> <p>5. 對敏感度高的參數,考量參數的分布狀況,進行個人有效劑量的不確定性分析。</p> <p>6. 民眾與工作人員之輻射劑量評估結果。</p>	
--	--	--

<p>(二)審查作業</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 若提供資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</li> <li>2. 正常狀況之核種傳輸機制說明： <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 提供的核種傳輸機制(地下水、空氣、地表水、直接輻射、<u>植物吸收或穴居動物挖掘</u>)資料是否足以供進行獨立的安全評估。</li> <li>(2) 放射性核種傳輸機制是否合理且保守。</li> </ol> </li> <li>3. 正常情節分析： <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 篩選出與該處置場正常情況相關的 FEPs，是否經由專家學者所確認：被排除的 FEPs 之原因是否合理。</li> <li>(2) 處置設施重要組件的特徵事件與過程是否已充分考量。</li> <li>(3) 氣體傳輸正常情節、液體傳輸正常情節、固體傳輸正常情節是否合理。</li> </ol> </li> <li>4. <u>應根據場址資訊與合理性研擬正常狀況下之概念模式，說明如何根據其結果建構分析模式。</u></li> <li>5. <u>應根據分析模式的結果</u></li> </ol>	<p>(二)審查作業</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 若提供資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</li> <li>2. 正常狀況之核種傳輸機制說明： <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 提供的核種傳輸機制(地下水、空氣、地表水、直接輻射、生物)資料是否足以供進行獨立的安全評估。</li> <li>(2) 放射性核種傳輸機制是否合理且保守。</li> </ol> </li> <li>3. 正常情節分析： <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 篩選出與該處置場正常情況相關的 FEPs，是否經由專家學者所確認：被排除的 FEPs 之原因是否合理。</li> <li>(2) 處置設施重要組件的特徵事件與過程是否已充分考量。</li> <li>(3) 氣體傳輸正常情節、液體傳輸正常情節、固體傳輸正常情節是否合理。</li> </ol> </li> </ol>	<p>十八、於「低放射性廢棄物最終處置場址之環境安全因子審查技術規範研議」研究報告中，指出核種遷移的可能途徑，如經由空氣、地下水、地表水、植物吸收或穴居動物挖掘等，說明傳輸途徑的模式、假設條件及劑量評估方式。</p> <p>十九、增加概念模式、分析模式及電腦程式驗證及確認之審查條文，新增第 4 點與第 5 點，原第 4 點與第 5 點改成第 6 點與第</p>
---	---	---

<p><u>說明選用之電腦程式，該程式需經過專業之驗證及確認後方能使用於此評估報告。</u></p> <p>6. 正常情節輻射劑量評估程式的輸入資料是否符合場址資訊與合理性，其輸出資料是否合理。</p> <p>7. 是否進行參數敏感度分析與不確定分析，分析結果是否合理。</p> <p><b>四、異常狀況之輻射劑量：</b>評估處置設施運轉期及封閉後在意外事故或異常狀況下之輻射劑量，包括傳輸機制說明、意外事故或異常狀況之發生頻率、情節分析、<u>概念模式說明、分析模式及電腦程式說明</u>、輸入資料、輸出資料、敏感度分析、不確定性分析、評估結果及使用之評估程式。</p> <p>處置設施在運轉期，封閉期，觀察及監測期，主動監管期及被動監管期，可能發生人為或天然的意外事件。這些人為或天然的意外事件，通常發生的機率都很低，若其發生所產生的後果影響輕微，則可忽略不計；若發生所產生的後果影響嚴重，則應評估其影響。故此處的異常狀況之輻射劑量，係針對發生機率低後果影響嚴重的人為或天然意外事件，對民眾與工作人之輻射劑量評估。</p>	<p>4. 正常情節輻射劑量評估程式的輸入資料是否符合場址資訊與合理性，其輸出資料是否合理。</p> <p>5. 是否進行參數敏感度分析與不確定分析，分析結果是否合理。</p> <p><b>四、異常狀況之輻射劑量：</b>評估處置設施運轉期及封閉後在意外事故或異常狀況下之輻射劑量，包括傳輸機制說明、意外事故或異常狀況之發生頻率、情節分析、輸入資料、輸出資料、敏感度分析、不確定性分析、評估結果及使用之評估程式。</p> <p>處置設施在運轉期，封閉期，觀察及監測期，主動監管期及被動監管期，可能發生人為或天然的意外事件。這些人為或天然的意外事件，通常發生的機率都很低，若其發生所產生的後果影響輕微，則可忽略不計；若發生所產生的後果影響嚴重，則應評估其影響。故此處的異常狀況之輻射劑量，係針對發生機率低後果影響嚴重的人為或天然意外事件，對民眾與工作人之輻射劑量評估。</p>	<p>7 點。</p> <p>二十、增加概念模式、分析模式及電腦程式驗證及確認之審查條文。</p>
--	---	---

<p>(一)提供資料</p> <p>1. 處置設施運轉期及封閉後，意外事故或異常狀況之預測：包括事故種類(如運轉時廢棄物從吊車墜落；<u>封閉後發生有害地震、海嘯或暴潮溢淹處置場、人類無意入侵處置場、豎井或調查井發生回填失效</u>)及發生頻率。</p> <p>2. 處置設施運轉期及封閉後，依事故種類說明意外事故或異常狀況之核種傳輸機制。</p> <p>3. 異常情節(或稱替代情節)分析：處置設施運轉期及封閉後，意外事故或異常狀況之處置情節。</p> <p>(1) 選用國際常用的低放射性廢棄物處置的<u>特徵事件及作用(FEP)通用表</u>(如IAEA 或國際組織)。</p> <p>(2) 經學者專家從國際常用的FEP通用表篩選出與該處置場異常情況相關的FEPs。</p> <p>(3) 選出處置系統的重要組件(如廢棄物體、各種工程障壁(近場)、天然障壁</p>	<p>(一)提供資料</p> <p>1. 處置設施運轉期及封閉後，意外事故或異常狀況之預測：包括事故種類(如運轉時廢棄物從吊車墜落；封閉後發生有害地震、海水淹沒處置場、人類無意入侵處置場)及發生頻率。</p> <p>2. 處置設施運轉期及封閉後，依事故種類說明意外事故或異常狀況之核種傳輸機制。</p> <p>3. 異常情節(或稱替代情節)分析：處置設施運轉期及封閉後，意外事故或異常狀況之處置情節。</p> <p>(1) 選用國際常用的低放射性廢棄物處置的<u>特徵事件過程(FEP)通用表</u>(如IAEA 或國際組織)。</p> <p>(2) 經學者專家從國際常用的FEP通用表篩選出與該處置場異常情況相關的FEPs。</p> <p>(3) 選出處置系統的重要組件(如廢棄物體、各種工程障壁(近場)、天然障壁</p>	<p>二十一、海嘯或暴潮溢淹；於「低放射性廢棄物坑道處置安全評估關鍵議題初步探討」研究報告中，指出在處置場封閉後，出現破壞情節的狀況包含：因人類不經意的入侵行為、豎井或調查井發生回填失效、及發生垂直斷層等主客觀因素。</p> <p>二十二、於「低放射性廢棄物坑道處置安全評估關鍵議題初步探討」研究報告中，指出情節(Scenario)是對影響處置場功能之可能未來的描述，包含特徵(Feature)、事件(Event)及作用(Process)等的組合，即為FEP。</p>
--	--	--

<p>(遠場)、生物圈等),分析並說明重要組件的特徵、異常情況下重要組件發生的事件、各重要組件間的互相作用過程。</p> <p>(4) 考量選出的異常情況相關的 FEPs 及各重要組件與其間的特徵與作用過程,以合理的邏輯方法,繪出放射性核種傳輸的路徑,並建構出異常情節。</p> <p><b>4. 應根據場址資訊與合理性研擬正常狀況下之概念模式,說明如何根據其結果建構分析模式。</b></p> <p><b>5. 應根據分析模式的結果說明選用之電腦程式,該程式需經過專業之驗證及確認後方能使用於此評估報告。</b></p> <p>6. 提出異常情節輻射劑量評估程式及其輸入資料及其輸出資料。</p> <p>7. 對異常情節輻射劑量評估程式的參數,進行敏感度分析。(若正常情節已分析過的參數,可不必再進行敏感度分析)</p> <p>8. 對敏感度高的參數,考量參數的分布狀況,進行個人有效劑量的不確定性分析。</p> <p>9. 考量事件發生的機率,</p>	<p>(遠場)、生物圈等),分析並說明重要組件的特徵、異常情況下重要組件發生的事件、各重要組件間的互相作用過程。</p> <p>(4) 考量選出的異常情況相關的 FEPs 及各重要組件與其間的特徵與作用過程,以合理的邏輯方法,繪出放射性核種傳輸的路徑,並建構出異常情節。</p> <p>4. 提出異常情節輻射劑量評估程式及其輸入資料及其輸出資料。</p> <p>5. 對異常情節輻射劑量評估程式的參數,進行敏感度分析。(若正常情節已分析過的參數,可不必再進行敏感度分析)</p> <p>6. 對敏感度高的參數,考量參數的分布狀況,進行個人有效劑量的不確定性分析。</p> <p>7. 考量事件發生的機率,</p>	<p>二十三、增加概念模式、分析模式及電腦程式驗證及確認之審查條文,新增第 4 點與第 5 點,原第 4 點至第 7 點改成第 6 點至第 9 點。</p>
--	--	--

<p>提出民眾與工作人員之輻射劑量(風險)評估結果。</p> <p>(二)審查作業</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 若提供資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</li> <li>2. 事故種類與發生頻率之預測是否可考量場址特性及氣象條件，其參考文獻及假設是否合理。</li> <li>3. 異常狀況之核種傳輸機制是否合理且保守。</li> <li>4. 異常情節建構是否經由專家學者所確認、意外事故或異常狀況之重要組件特徵事件與過程是否已充分考量、異常情節建構是否合理。</li> <li>5. 異常情節輻射劑量風險評估程式的輸入資料是否符合場址資訊與合理性，其輸出資料是否合理。</li> <li>6. 是否進行參數敏感度分析與不確定分析，分析結果是否合理。</li> </ol> <p><b>五、核種外釋到達人類活動範圍之傳輸機制：</b> 包括地下水、空氣、地表水、其他傳輸機制，及直接輻射與向天輻射對個人之曝露，並描述各傳輸機制之概念模式、數學模式及分析</p>	<p>提出民眾與工作人員之輻射劑量(風險)評估結果。</p> <p>(二)審查作業</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 若提供資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</li> <li>2. 事故種類與發生頻率之預測是否可考量場址特性及氣象條件，其參考文獻及假設是否合理。</li> <li>3. 異常狀況之核種傳輸機制是否合理且保守。</li> <li>4. 異常情節建構是否經由專家學者所確認、意外事故或異常狀況之重要組件特徵事件與過程是否已充分考量、異常情節建構是否合理。</li> <li>5. 異常情節輻射劑量風險評估程式的輸入資料是否符合場址資訊與合理性，其輸出資料是否合理。</li> <li>6. 是否進行參數敏感度分析與不確定分析，分析結果是否合理。</li> </ol> <p><b>五、核種外釋到達人類活動範圍之傳輸機制：</b> 包括地下水、空氣、地表水、其他傳輸機制，及直接輻射與向天輻射對個人之曝露，並描述各傳輸機制之概念模式、數學模式及分析</p>	
---	---	--

<p>所需之參數。 地下水、空氣、地表水、其他傳輸機制概念模式、數學模式及分析所需之參數的正確性，影響處置設施之輻射劑量安全評估，故請提供下列資料，供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 地下水</p> <p>(1) <u>依場址地質及水文地質特性所建構之水文地質模型與假設。</u></p> <p>(2) <u>依所建構水文地質模型描述潛在的核種遷移地下水途徑。</u></p> <p>(3) 地下水之流場、流速與流向之分布與數值。</p> <p>(4) 核種藉地下水之傳輸模式。</p> <p>(5) 人類或生物圈可能接觸到地下水位置及場界位置之核種濃度<u>以及可能稀釋地下水的地表水流量。</u></p> <p>(6) <u>說明長期變動現象(例如地質環境、氣候與海平面變化、地形變化等)對地下水流之影響。</u></p>	<p>所需之參數。 地下水、空氣、地表水、其他傳輸機制概念模式、數學模式及分析所需之參數的正確性，影響處置設施之輻射劑量安全評估，故請提供下列資料，供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 地下水</p> <p>(1) 依場址地質及水文地質特性，描述潛在的核種遷移地下水途徑。</p> <p>(2) 地下水之流場、流速與流向之分布與數值。</p> <p>(3) 核種藉地下水之傳輸模式。</p> <p>(4) 人類或生物圈可能接觸到地下水位置及場界位置之核種濃度。</p>	<p>二十四、於「放射性廢棄物處置安全分析模式驗證及場址特性調查審查技術之研究」研究報告中，4.2節修正建議，應需先建構水文地質模型與假設，再描述潛在的核種遷移地下水途徑較為適當。增加第(2)點，原第(2)、(3)點改為第(3)、(4)點。</p> <p>二十五、地下水中的核種濃度會於地下水流到地表(生物圈)時，被流出點的地表水(河川、湖泊等陸水或海水)稀釋，故劑量評估時需取得流出點之地表水流量。</p> <p>二十六、增加第(6)點，長期環境變動現象(例如地質環境、氣候與海平面變化、地形變化等)可能會使地下水流場或地下水的組成產生改變，進而影響核種遷移的過程。</p>
---	---	--



<p>2. 空氣</p> <p>(1) 估算大氣傳輸及放射性核種外釋到大氣之延散，所使用的模式、電腦程式與計算方式。</p> <p>(2) 大氣傳輸及擴散模式應包括：(a)放射性核種釋出之時間與頻率變化之計算方式，(b)放射性核種釋出高度，(c)放射性污染源之幾何形狀，(d)再懸浮射源之排放率及基準，(e)考量射源與監測點間之地形及結構之影響，(f)關鍵群體與鄰近場址外監測點之位置及高度，(g)放射性污染雲煙(plume)濃度的計算方式，(h)以處置場址為中心，十六個 22.5 徑度扇形區域中，每個區域之人口分佈，(i)空氣傳輸與擴散模擬之移除機制與微粒沉積速率，(j)用於量化移除機制、乾濕沉積速率及單位面積沉積量之計算模式。</p> <p>(3) 可代表場址環境並用於大氣傳輸與擴散分析之氣象數據。</p>	<p>2. 空氣</p> <p>(1) 估算大氣傳輸及放射性核種外釋到大氣之延散，所使用的模式、電腦程式與計算方式。</p> <p>(2) 大氣傳輸及擴散模式應包括：(a)放射性核種釋出之時間與頻率變化之計算方式，(b)放射性核種釋出高度，(c)放射性污染源之幾何形狀，(d)再懸浮射源之排放率及基準，(e)考量射源與監測點間之地形及結構之影響，(f)關鍵群體與鄰近場址外監測點之位置及高度，(g)放射性污染雲煙(plume)濃度的計算方式，(h)以處置場址為中心，十六個 22.5 徑度扇形區域中，每個區域之人口分佈，(i)空氣傳輸與擴散模擬之移除機制與微粒沉積速率，(j)用於量化移除機制、乾濕沉積速率及單位面積沉積量之計算模式。</p> <p>(3) 可代表場址環境並用於大氣傳輸與擴散分析之氣象數據。</p>	
--	--	--

<p>(4) 預估空浮的表面沉積濃度與場址外個人的劑量。</p> <p>3. 地表水</p> <p>(1) 核種遷移的所有可能的地表水概念模式。</p> <p>(2) 用於分析場址下游適當位置核種濃度之具有空間與時間分佈的<u>地表水水流與傳輸模式</u>。</p> <p>(3) <u>地表水水流與傳輸模式</u>之源項輸入參數，須包括地表水釋出速率、與<u>地下水界面之源/匯項</u>。</p> <p>(4) <u>經地表水水流與傳輸模式</u>計算所得的核種濃度。</p> <p>4. 其他傳輸機制：包括直接輻射、向天輻射與生物傳輸。</p> <p>(1) 加馬輻射的曝露模式(含電腦程式、污染源、接受者的模型建構)。</p> <p>(2) 在運轉期間，場外個人的曝露。主要考量的情節有二： (a)廢棄物運送至場區的載運車輛停車曝露，(b)吊掛作業所可能產生之曝露。</p> <p>(3) 在主動監管期間，工作人員的劑量分析，主要途徑來自</p>	<p>(4) 預估空浮的表面沉積濃度與場址外個人的劑量。</p> <p>3. 地表水</p> <p>(1) 核種遷移的所有可能的地表水概念模式。</p> <p>(2) 用於分析場址下游適當位置核種濃度之具有空間與時間分佈的地表水傳輸模式。</p> <p>(3) 地表水傳輸模式之源項輸入參數，須包括地表水釋出速率、與地下水界面之源項。</p> <p>(4) 經地表水傳輸模式計算所得的核種濃度。</p> <p>4. 其他傳輸機制：包括直接輻射、向天輻射與生物傳輸。</p> <p>(1) 加馬輻射的曝露模式(含電腦程式、污染源、接受者的模型建構)。</p> <p>(2) 在運轉期間，場外個人的曝露。主要考量的情節有二： (a)廢棄物運送至場區的載運車輛停車曝露，(b)吊掛作業所可能產生之曝露。</p> <p>(3) 在主動監管期間，工作人員的劑量分析，主要途徑來自</p>	<p>二十七、於「放射性廢棄物處置安全分析模式驗證及場址特性調查審查技術之研究」研究報告中，4.2節修正建議，地表水傳輸模式應修改為「水流與傳輸模式」，並於模式之源項輸入參數中，地下水界面部分新增「匯項」。</p>
---	--	---

<p>場址土壤的直接輻射；場外個人的劑量分析，除來自場址土壤的直接輻射外，亦須考量向天輻射。</p> <p>(4) 在被動監管期間，須考量人員無意闖入的劑量分析，<u>包括農耕、居住、鑽井或其他合理可預見的活動，並提供防止入侵者障壁系統的有效性時間。</u></p> <p>(5) 生物傳輸機制分析，包含由處置設施遷移出去的受污染生物，成為食物鏈的一環。</p> <p>(二) 審查作業</p> <p>1. 地下水</p> <p>(1) 若提供地下水資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</p> <p>(2) 是否完整並清楚定義核種傳輸之所有可能的地下水途徑。</p> <p>(3) 地下水概念模式中之水文地質、地質及地球化學資訊是否與安全分析報告中場址特性之數據</p>	<p>場址土壤的直接輻射；場外個人的劑量分析，除來自場址土壤的直接輻射外，亦須考量向天輻射。</p> <p>(4) 在被動監管期間，須考量人員無意闖入的劑量分析。</p> <p>(5) 生物傳輸機制分析，包含由處置設施遷移出去的受污染生物，成為食物鏈的一環。</p> <p>(二) 審查作業</p> <p>1. 地下水</p> <p>(1) 若提供地下水資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</p> <p>(2) 是否完整並清楚定義核種傳輸之所有可能的地下水途徑。</p> <p>(3) 地下水概念模式中之水文地質、地質及地球化學資訊是否與安全分析報告中場址特性之數據</p>	<p>二十八、參照 10 CFR 61.13(b)</p>
--	--	-------------------------------

<p>一致。</p> <p>(4) 地下水模式之輸入參數值是否合理且足以提供合理之準確度或保守之分析。若場址參數無法取得，應確認採適當保守假設，若輸入參數存在不確定性或不一致，其數值應與文獻中所得之相似地質介質數值範圍相比較。</p> <p>(5) 確認地下水模式之程式符合物理、化學及數學原則(並經過驗證)，且正確地使用程式。</p> <p>2. 空氣</p> <p>(1) 空氣途徑分析資料是否完整。</p> <p>(2) 大氣傳輸及延散所使用之模式與計算方式之描述是否正確。</p> <p>(3) 模式是否可模擬由射源至監測位置之大氣傳輸及延散。</p> <p>(4) 大氣傳輸模式內參數的靈敏度分析，確保可有效預估其傳輸行為。</p> <p>(5) 地表釋出與通風口有效釋出、不同幾何污染源，以及模擬長短時間之計</p>	<p>一致。</p> <p>(4) 地下水模式之輸入參數值是否合理且足以提供合理之準確度或保守之分析。若場址參數無法取得，應確認採適當保守假設，若輸入參數存在不確定性或不一致，其數值應與文獻中所得之相似地質介質數值範圍相比較。</p> <p>(5) 確認地下水模式之程式符合物理、化學及數學原則(並經過驗證)，且正確地使用程式。</p> <p>2. 空氣</p> <p>(1) 空氣途徑分析資料是否完整。</p> <p>(2) 大氣傳輸及延散所使用之模式與計算方式之描述是否正確。</p> <p>(3) 模式是否可模擬由射源至監測位置之大氣傳輸及延散。</p> <p>(4) 大氣傳輸模式內參數的靈敏度分析，確保可有效預估其傳輸行為。</p> <p>(5) 地表釋出與通風口有效釋出、不同幾何污染源，以及模擬長短時間之計</p>	
--	--	--

<p>算方式是否可被接受。</p> <p>(6) 量化移除機制、乾濕沉積速率、面沉積及雲煙之數學方法(須考慮核種釋出的類型、場址降水資料、污染源到接受點的距離、空氣穩定度分級)。</p> <p>(7) 由乾濕沉積導致表面污染之計算方式(須考慮核種種類特性、場址氣象情況與地理環境)。</p> <p>(8) 空氣傳輸與擴散模式中使用的氣象資訊是否合理且足夠。</p> <p>(9) 模式中，場址及其環境之氣象數據是否具代表性。</p> <p>(10) 風速與風向之量測時間及間隔是否合理。</p> <p>(11) 用於計算空氣傳播及擴散之延散參數及空氣穩定度等級是否正確。</p> <p>(12) 大氣傳輸及擴散模式應符合下列要求：(a)模式中使用的場址輸入數據具代表性；(b)模式已考慮場址之物理特性，如</p>	<p>算方式是否可被接受。</p> <p>(6) 量化移除機制、乾濕沉積速率、面沉積及雲煙之數學方法(須考慮核種釋出的類型、場址降水資料、污染源到接受點的距離、空氣穩定度分級)。</p> <p>(7) 由乾濕沉積導致表面污染之計算方式(須考慮核種種類特性、場址氣象情況與地理環境)。</p> <p>(8) 空氣傳輸與擴散模式中使用的氣象資訊是否合理且足夠。</p> <p>(9) 模式中，場址及其環境之氣象數據是否具代表性。</p> <p>(10) 風速與風向之量測時間及間隔是否合理。</p> <p>(11) 用於計算空氣傳播及擴散之延散參數及空氣穩定度等級是否正確。</p> <p>(12) 大氣傳輸及擴散模式應符合下列要求：(a)模式中使用的場址輸入數據具代表性；(b)模式已考慮場址之物理特性，如</p>	
--	--	--

<p>結構、不規則地形、乾濕沉積， (c)模式已考慮釋出放射性核種之物理及化學特性。</p> <p>3. 地表水</p> <p>(1) 若提供地表水資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</p> <p>(2) <u>參數選擇與使用</u>是否採用保守原則，未來所有可能的地表水改變(降水量變化或已知未來建造水井、水庫、取水口等)是否能於計算中反應。</p> <p>(3) 藉地表水核種遷移分析是否包括：(a) 描述延散特性及在正常與意外情形下於現存或未來使用者位置地表水環境的稀釋能力，(b) 提供現存或未來使用者位置在正常與意外情形下，年平均與最大濃度(意外時)估計與基準，(c) 定義可能污染地表水使用者之途徑，與(d) 描述數據之參考來源。</p>	<p>結構、不規則地形、乾濕沉積， (c)模式已考慮釋出放射性核種之物理及化學特性。</p> <p>3. 地表水</p> <p>(1) 若提供地表水資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</p> <p>(2) 係數選擇與參數使用是否採用保守原則，未來所有可能的地表水改變(降水量變化或已知未來建造水井、水庫、取水口等)是否能於計算中反應。</p> <p>(3) 藉地表水核種遷移分析是否包括：(a) 描述延散特性及在正常與意外情形下於現存或未來使用者位置地表水環境的稀釋能力，(b) 提供現存或未來使用者位置在正常與意外情形下，年平均與最大濃度(意外時)估計與基準，(c) 定義可能污染地表水使用者之途徑，與(d) 描述數據之參考來源。</p>	<p>二十九、於「放射性廢棄物處置安全分析模式驗證及場址特性調查審查技術之研究」研究報告中，4.2節修正建議，使用名詞「參數」較為適當。</p>
--	---	--

<p>4. 其他傳輸機制</p> <p>(1) 若提供加馬輻射與經由生物途徑的傳輸的描述及資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</p> <p>(2) 加馬輻射的傳輸機制中屏蔽增建因子與其數學模式，體外曝露模式，射源模式，輸入參數是否正確。</p> <p>(3) 加馬輻射與生物傳輸之相關假設，是否保守。</p> <p>六、述明各種傳輸機制之評估結果，是否符合法規限值，提供下列資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 彙整 7.1 中一至<u>五</u>節之分析結果。確認最大個人劑量位置，主要放射性曝露介質，<u>主要攝入途徑，與不確定性分析結果</u>。</p> <p>2. 劑量評估分為(1)運轉期與封閉後正常情節最大個人劑量，(2)運轉期與封閉後異常情節最大輻射劑量(風險)。</p>	<p>4. 其他傳輸機制</p> <p>(1) 若提供加馬輻射與經由生物途徑的傳輸的描述及資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</p> <p>(2) 加馬輻射的傳輸機制中屏蔽增建因子與其數學模式，體外曝露模式，射源模式，輸入參數是否正確。</p> <p>(3) 加馬輻射與生物傳輸之相關假設，是否保守。</p> <p>六、述明各種傳輸機制之評估結果，是否符合法規限值，提供下列資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 彙整 7.1 中一至六節之分析結果。確認最大個人劑量位置，主要放射性曝露介質，主要攝入途徑。</p> <p>2. 劑量評估分為(1)運轉期與封閉後正常情節最大個人劑量，(2)運轉期與封閉後異常情節最大輻射劑量(風險)。</p>	<p>三十、誤植更正「五」。於「放射性廢棄物處置安全分析模式驗證及場址特性調查審查技術之研究」研究報告中，4.2 節修正建議，應需包含提供「不確定性分析結果」資料，以供審查是否符合法規限值。</p>
---	---	---

<p>(二)審查作業</p> <p>1. 運轉期正常情節工作人員最大個人劑量，須小於游離輻射防護安全標準之職業輻射年有效劑量。</p> <p>2. 運轉期與封閉後正常情節場外一般民眾最大個人劑量，須小於低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則中第八條之規定，場外一般民眾年有效劑量，不得超過 0.25 毫西弗。</p>	<p>(二)審查作業</p> <p>1. 運轉期正常情節工作人員最大個人劑量，須小於游離輻射防護安全標準之職業輻射年有效劑量。</p> <p>2. 運轉期與封閉後正常情節場外一般民眾最大個人劑量，須小於低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則中第八條之規定，場外一般民眾年有效劑量，不得超過 0.25 毫西弗。</p>	
--	--	--



修正條文	現行條文	說明
<p><b>7.2 設備操作：依據處置設施之設備特性及操作程序，評估運轉期設備操作之安全性。</b></p> <p>處置設施內重要設備之良好特性、正確地使用操作，涉及處置場運轉安全，所以要求評估運轉期設備操作之安全性，故應提供下列資料供審查：</p> <p>(一)提供資料</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 說明廢棄物桶暫存與處置之吊升或堆貯設備的特性、功能與使用方法。</li> <li>2. 說明填充廢棄物桶間隙之填充機設備的特性、功能與使用方法。</li> <li>3. 說明處置設施內公用系統與輔助系統中電力、供水、廢水收集等設備的特性、功能與使用方法。</li> <li>4. 說明並表列處置設施內重要設備之已完成的操作與維護程序書。</li> <li>5. 評估處置設施內重要設備之使用壽命，並說明更換作業之方法。</li> </ol>	<p><b>7.2 設備操作：依據處置設施之設備特性及操作程序，評估運轉期設備操作之安全性。</b></p> <p>處置設施內重要設備之良好特性、正確地使用操作，涉及處置場運轉安全，所以要求評估運轉期設備操作之安全性，故應提供下列資料供審查：</p> <p>(一)提供資料</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 說明廢棄物桶暫存與處置之吊升或堆貯設備的特性、功能與使用方法。</li> <li>2. 說明填充廢棄物桶間隙之填充機設備的特性、功能與使用方法。</li> <li>3. 說明處置設施內公用系統與輔助系統中電力、供水、廢水收集等設備的特性、功能與使用方法。</li> <li>4. 說明並表列處置設施內重要設備之已完成的操作與維護程序書。</li> <li>5. 評估處置設施內重要設備之使用壽命，並說明更換作業之方法。</li> </ol>	

<p>(二)審查作業</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 處置設施內重要設備的特性與功能，是否考量場址特性與要求，足以符合設計目的與安全目標。</li> <li>2. 檢視重要設備之操作與維護程序書，是否具有合理的保證，運轉作業不會中斷，及不允許因為重要與必要設備缺乏或故障，而發生不安全的狀況。</li> <li>3. 重要設備使用壽命之評估是否合理。</li> </ol>	<p>(二)審查作業</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 處置設施內重要設備的特性與功能，是否考量場址特性與要求，足以符合設計目的與安全目標。</li> <li>2. 檢視重要設備之操作與維護程序書，是否具有合理的保證，運轉作業不會中斷，及不允許因為重要與必要設備缺乏或故障，而發生不安全的狀況。</li> <li>3. 重要設備使用壽命之評估是否合理。</li> </ol>	
--	--	--

修正條文	現行條文	說明
<p><b>7.3 闖入者防護：描述在處置設施營運中、封閉後，防止無意闖入者接近廢棄物所採行之防護設計及措施，並評估其功能。</b></p> <p>在處置設施營運中，只要有堅固的場界圍籬與標示，即可防止無意闖入者接近廢棄物；在處置設施封閉後，則須提供合理的防護措施，才能防範非刻意之入侵行為。因此須提供下列資料，供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 處置場界圍籬與標示的材質與方法。</li> <li>2. C類廢棄物處置位置與深度之規劃。</li> <li>3. C類廢棄物障壁的材質、設計與施工方法。</li> </ol> <p>(二)審查作業</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 處置場界圍籬與標示的材質、維護與設置方法，是否能夠堅固保存至處置場免於監管期，並能確保其功能。</li> <li>2. 坑道處置，C類廢棄物須處置在坑道最內部，不易接觸的位置；淺地處置，C類廢棄物須處置在覆蓋層頂部下方至少5公尺以上。在C類廢棄物處置區是否建造</li> </ol>	<p><b>7.3 闖入者防護：描述在處置設施營運中、封閉後，防止無意闖入者接近廢棄物所採行之防護設計及措施，並評估其功能。</b></p> <p>在處置設施營運中，只要有堅固的場界圍籬與標示，即可防止無意闖入者接近廢棄物；在處置設施封閉後，則須提供合理的防護措施，才能防範非刻意之入侵行為。因此須提供下列資料，供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 處置場界圍籬與標示的材質與方法。</li> <li>2. C類廢棄物處置位置與深度之規劃。</li> <li>3. C類廢棄物障壁的材質、設計與施工方法。</li> </ol> <p>(二)審查作業</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 處置場界圍籬與標示的材質、維護與設置方法，是否能夠堅固保存至處置場免於監管期，並能確保其功能。</li> <li>2. 坑道處置，C類廢棄物須處置在坑道最內部，不易接觸的位置；淺地處置，C類廢棄物須處置在覆蓋層頂部下方至少5公尺以上。在C類廢棄物處置區是否建造</li> </ol>	

<p>防止入侵者障壁系統，妥善區隔，達到防護之目的。</p> <p>3. <u>C類廢棄物之防止入侵者障壁系統</u>在場址封閉後是否能保持 500 年的功能性與完整性，是否能滿足需求。並檢視所有使用的數據與假設及計算方法之適用性，以及分析結果之合理性。</p>	<p>防止入侵者障壁系統，妥善區隔，達到防護之目的。</p> <p>3. 入侵者工程障壁在場址封閉後是否能保持 500 年的功能性與完整性，是否能滿足需求。並檢視所有使用的數據與假設及計算方法之適用性，以及分析結果之合理性。</p>	<p>三十一、應是防止入侵者障蔽系統，而非處置單元之工程障蔽，並參照 10 CFR 61.7(e)(3)。</p>
---	--	---

修正條文	現行條文	說明
<p>7.4 長期穩定性：評估並分析處置設施於運轉期間及封閉後之長期穩定性與安全性。分析時應說明分析方法、輸入參數、假設狀況、適用範圍、模式分析結果及不確定性等。</p> <p>安全分析報告提出可能影響處置設施長期穩定性與安全性的事件，應審查每一事件評估與分析是否符合長期穩定性的安全要求。影響處置設施長期穩定性的因素有：水的侵蝕、邊坡穩定性、地層沉陷與下陷、<u>地層抬升、海平面上升、地球化學環境</u>，因此須提供下列資料供審查，以確保處置場封閉後之長期穩定性與安全性。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 水的侵蝕</p> <p>(1) 處置場可能洪水之預估分析：包括：降水量、降水損失、逕流反應特性、渠道洪水聚積、<u>洪水侵蝕的地形變遷</u>、水位分析、流速分析、處置場的最大可能洪水量(probable maximum flood, PMF)、設計洪水量</p>	<p>7.4 長期穩定性：評估並分析處置設施於運轉期間及封閉後之長期穩定性與安全性。分析時應說明分析方法、輸入參數、假設狀況、適用範圍、模式分析結果及不確定性等。</p> <p>安全分析報告提出可能影響處置設施長期穩定性與安全性的事件，應審查每一事件評估與分析是否符合長期穩定性的安全要求。影響處置設施長期穩定性的因素有：水的侵蝕、邊坡穩定性、地層沉陷與下陷，因此須提供下列資料供審查，以確保處置場封閉後之長期穩定性與安全性。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 水的侵蝕</p> <p>(1) 處置場可能洪水之預估分析：包括：降水量、降水損失、逕流反應特性、渠道洪水聚積、不穩定性地形的類型、水位分析、流速分析、處置場的最大可能洪水量(probable maximum flood, PMF)、設計洪水量</p>	<p>三十二、長期穩定性應包含監測計畫與項目審查。</p> <p>三十三、於「低放射性廢棄物處置設施安全評估審查規範精進之研究」研究報告中，修正建議影響處置設施長期穩定性的因素，應包含「地層抬升、海平面上升、地球化學環境」方面資料較為完整。</p> <p>三十四、於「低放射性廢棄物坑道處置技術審查要項研究」研究報告中，指出可能的地形變遷造成場址受到洪水與侵蝕的影響，包括：(i)不穩定性地形的類型；(ii)地形變化對洪水與洪水流速的影響；(iii)降低或控制地形不穩定性的改善程序，故應將「不穩定性地形的類型」更改為「洪水侵蝕的地形變遷」。</p>

<p>與降低或控制地形不穩定性的改善程序。</p> <p>(2) 上游若有水庫，提供水庫的位置與大小、<u>水庫潰壩之出尖峰流量、分析水庫潰壩機率與損壞情形</u>。</p> <p>(3) 侵蝕防護設計：包括附近溪流洪水的侵蝕防護、排水渠道的侵蝕防護、壕溝與覆蓋層邊坡的侵蝕防護、隧道上層的侵蝕防護、侵蝕防護的耐久性。</p> <p>2. 邊坡穩定性</p> <p>(1) 場址/邊坡區域特性：(a)場址地質對於穩定性可能的影響、(b)場址調查所使用之大地工程與地球物理技術、(c)邊坡穩定性材料與土壤參數、(d)邊坡區域的地下水位面位置以及變動範圍、(e)邊坡使用借土材料的特性、(f)夯實工作與夯實後材料的強度。</p> <p>(2) 邊坡穩定性：(a)邊坡所採用之有關土壤與岩石之參數、(b)邊坡靜態穩定性分析、(c)地震及</p>	<p>與降低或控制地形不穩定性的改善程序。</p> <p>(2) 上游若有水庫，提供水庫的位置與大小、水庫瞬間損壞提出尖峰流量、分析水庫損壞的影響。</p> <p>(3) 侵蝕防護設計：包括附近溪流洪水的侵蝕防護、排水渠道的侵蝕防護、壕溝與覆蓋層邊坡的侵蝕防護、隧道上層的侵蝕防護、侵蝕防護的耐久性。</p> <p>2. 邊坡穩定性</p> <p>(1) 場址/邊坡區域特性：(a)場址地質對於穩定性可能的影響、(b)場址調查所使用之大地工程與地球物理技術、(c)邊坡穩定性材料與土壤參數、(d)邊坡區域的地下水位面位置以及變動範圍、(e)邊坡使用借土材料的特性、(f)夯實工作與夯實後材料的強度。</p> <p>(2) 邊坡穩定性：(a)邊坡所採用之有關土壤與岩石之參數、(b)邊坡靜態穩定性分析、(c)地震及</p>	<p>三十五、於「放射性廢棄物處置安全分析模式驗證及場址特性調查審查技術之研究」研究報告中，4.2節修正建議，使用專有名詞「水庫潰壩」較為適當。</p> <p>三十六、建議維持邊坡穩定性較適合淺地表處置所需，未來應針對坑道處置增列條文。</p>
---	--	--

<p>地層移動的邊坡動態穩定性分析、(d)場址下方土壤液化分析。</p> <p>3. 地層沉陷與下陷</p> <p>(1) 場址特性、處置場建造、運轉以及處置單元開挖相關資訊。</p> <p>(2) 長期可能發生沉陷區域之模擬與分析。</p> <p>(3) 沉陷之監控與改善計畫。</p> <p>4. <u>地層抬升</u></p> <p>(1) <u>場址特性、處置場建造、運轉以及處置單元開挖相關資訊。</u></p> <p>(2) <u>長期可能發生抬升區域之模擬與分析。</u></p> <p>5. <u>海平面上升</u></p> <p>(1) <u>鄰近海岸地區之處置場址應提供海平面上升速率之推估。</u></p> <p>6. 地球化學環境</p> <p>(1) <u>處置設施建設前的地球化學環境背景資料。</u></p> <p>(2) <u>處置場封閉後的地球化學環境監測計畫。</u></p>	<p>地層移動的邊坡動態穩定性分析、(d)場址下方土壤液化分析。</p> <p>3. 地層沉陷與下陷</p> <p>(1) 場址特性、處置場建造、運轉以及處置單元開挖相關資訊。</p> <p>(2) 長期可能發生沉陷區域之模擬與分析。</p> <p>(3) 沉陷之監控與改善計畫。</p>	<p>三十七、增加第 4、5、6 點，於「低放射性廢棄物處置設施安全評估審查規範精進之研究」研究報告中，修正建議影響處置設施長期穩定性的因素中，所需提供資料，應包含「地層抬升、海平面上升、地球化學環境」方面資料較為完整。如何模擬與分析亦需說明。</p>
--	--	--

<p>(二)審查作業</p> <p>1. 水的侵蝕</p> <p>(1) 設計洪水量須大於 PMF；若設計洪水量低於 PMF，則應審查設計洪水量的合理性，另外，<u>排水設施與區域設置也應一併考量</u>。</p> <p>(2) 上游水庫的影響，必須是在處置場洪水設計可容許範圍內。</p> <p>(3) 資料是否足以在洪水以及侵蝕議題上提供足夠的安全證據。侵蝕設計應能合理確保處置場封閉的長期穩定，免於主動維護的需求。</p> <p>(4) 為了防範風蝕與水的侵蝕，壕溝覆蓋層之設計應審慎考量，包括坡度與厚度等。</p> <p>2. 邊坡穩定性</p> <p>(1) 場址/邊坡區域特性：(a)是否有充足的地質相關工作足以描述場區的地質特性。(b)是否有場址附近的調查位置(鑽孔、探針、試坑、槽溝、震測線、水壓觀測井)、地質剖面、穩定性調查的邊坡位置等，應</p>	<p>(二)審查作業</p> <p>1. 水的侵蝕</p> <p>(1) 設計洪水量須大於 PMF；若設計洪水量低於 PMF，則應審查設計洪水量的合理性，另外，排水區域也應一併考量。</p> <p>(2) 上游水庫的影響，必須是在處置場洪水設計可容許範圍內。</p> <p>(3) 資料是否足以在洪水以及侵蝕議題上提供足夠的安全證據。侵蝕設計應能合理確保處置場封閉的長期穩定，免於主動維護的需求。</p> <p>(4) 為了防範風蝕與水的侵蝕，壕溝覆蓋層之設計應審慎考量，包括坡度與厚度等。</p> <p>2. 邊坡穩定性</p> <p>(1) 場址/邊坡區域特性：(a)是否有充足的地質相關工作足以描述場區的地質特性。(b)是否有場址附近的調查位置(鑽孔、探針、試坑、槽溝、震測線、水壓觀測井)、地質剖面、穩定性調查的邊坡位置等，應</p>	<p>三十八、於「放射性廢棄物處置安全分析模式驗證及場址特性調查審查技術之研究」研究報告中，4.2節修正建議，應包含「排水設施與區域設置」較為完整。</p>
---	---	--



<p>有清楚的描述並繪製成圖，剖面圖展現邊坡的地層。(c)邊坡穩定性材料與土壤參數之測試，是否符合相關大地工程專業規範。(d)是否充分考慮地下水對邊坡穩定性設計的影響。(e)借土材料穩定性與強度參數，是否經過適當的材料樣品測試。(f)材料選擇、夯實準則、溼度、級配、品保測試頻率等是否均有詳細施工規範。</p> <p>(2) 邊坡穩定性：(a)邊坡土壤是否經具有靜態與動態性質與岩石組成之說明，分析參數是考量實驗室或現地實驗資料。(b)邊坡靜態穩定性分析，是否包括不同的土壤介質以及作用力之邊界與材料特性、預期荷重條件下的最小安全係數。(c)動態穩定性分析，是否包括地震所引發之加速度與震波速度之分析。(d)場址下方土壤液化分析是否經現地或實驗室測試。</p>	<p>有清楚的描述並繪製成圖，剖面圖展現邊坡的地層。(c)邊坡穩定性材料與土壤參數之測試，是否符合相關大地工程專業規範。(d)是否充分考慮地下水對邊坡穩定性設計的影響。(e)借土材料穩定性與強度參數，是否經過適當的材料樣品測試。(f)材料選擇、夯實準則、溼度、級配、品保測試頻率等是否均有詳細施工規範。</p> <p>(2) 邊坡穩定性：(a)邊坡土壤是否經具有靜態與動態性質與岩石組成之說明，分析參數是考量實驗室或現地實驗資料。(b)邊坡靜態穩定性分析，是否包括不同的土壤介質以及作用力之邊界與材料特性、預期荷重條件下的最小安全係數。(c)動態穩定性分析，是否包括地震所引發之加速度與震波速度之分析。(d)場址下方土壤液化分析是否經現地或實驗室測試。</p>	
--	--	--

<p>(3) 確認天然與人為邊坡之長期穩定。</p> <p>(4) 邊坡分析符合保守原則，且引用數據確實可用。</p> <p>(5) 邊坡坡度、受力等分析應合理且保守，對於可能引發之負面效應，有足夠安全係數。</p> <p>(6) 借土材料之選用、開挖、夯實等有適當之品管計畫。</p> <p>3. 地層沉陷與下陷</p> <p>(1) 開挖相關資訊是否足夠供審查者進行沉陷與下陷相關事項審查。</p> <p>(2) 長期可能發生沉陷區域之模擬，是否合理且保守、是否考量其不確定性。</p> <p>(3) 岩層中是否有潛在溶解洞穴可能造成下陷？</p> <p>(4) 防止沉陷與下陷之材料是否已經過詳細與合理的實驗與分析？所提供之數據是否足以支持相關之設計？</p> <p>4. <u>地層抬升</u></p> <p>(1) <u>相關資訊是否足夠供審查者進行地層抬升相關事項審查。</u></p> <p>(2) <u>長期可能發生抬升區域之模擬，是否</u></p>	<p>(3) 確認天然與人為邊坡之長期穩定。</p> <p>(4) 邊坡分析符合保守原則，且引用數據確實可用。</p> <p>(5) 邊坡坡度、受力等分析應合理且保守，對於可能引發之負面效應，有足夠安全係數。</p> <p>(6) 借土材料之選用、開挖、夯實等有適當之品管計畫。</p> <p>3. 地層沉陷與下陷</p> <p>(1) 開挖相關資訊是否足夠供審查者進行沉陷與下陷相關事項審查。</p> <p>(2) 長期可能發生沉陷區域之模擬，是否合理且保守、是否考量其不確定性。</p> <p>(3) 岩層中是否有潛在溶解洞穴可能造成下陷？</p> <p>(4) 防止沉陷與下陷之材料是否已經過詳細與合理的實驗與分析？所提供之數據是否足以支持相關之設計？</p>	<p>三十九、增加第 4、5 點，於「低放射性廢棄物處置設施安全評估審查規範精進之研究」研究報告中，修正建議影響處置設施長期穩定性的因素中，所需審查作業，應包含「地層</p>
--	---	---

<p><u>合理且保守、是否考量其不確定性。</u></p> <p>5. <u>海平面上升</u></p> <p>(1) <u>鄰近海岸地區之處置場址應考慮海平面上升之影響</u></p> <p>6. <u>地球化學環境</u></p> <p>(1) <u>應考慮地球化學環境可能對工程障壁之長期影響分析</u></p>		<p>抬升與海平面上升」方面資料較為完整。如何模擬與分析亦需說明。如何模擬與分析的相關資料亦需提供說明。</p> <p>四十、增加第6點，處置設施的建造可能對周遭環境造成地球化學環境上的改變，例如設施周邊岩盤的飽和與未飽和的狀態變化、因飽和與未飽和變化造成的氧化還原狀態改變、深層地下水沿著水路上昇所造成的水質變化等，而影響工程障壁的狀態。由於利用地下水流動解析預測設施周邊岩盤的地球化學環境變化時，因地球化學環境會隨著處置設施的建設逐漸變化，較難以坑道開挖前的資料驗證模型的正確性。因此，需於設施建設後，持續監測孔隙水壓、飽和度等地球化學環境變化，並將監測結果反饋至地球化學環境變化之預測模式中。</p>
--	--	---

## 附件二

### 放射性廢棄物處置輻射劑量與風險評估安全審查技術建置

#### 期末報告審查意見與答復說明

項次	審查意見	委辦單位答復說明
子計畫三：低放射性廢棄物處置設施安全評估審查規範精進之研究		
1	圖3.5及圖4.1之圖名相同，建議4.1節可直接引用圖3.5。	原圖 4.1 已依審查意見刪除，直接引用圖 3.5，並修訂相關文字。
2	建議於特殊專有名詞如P.17之燒杯模式、P.34之腫脹、P.36之冰蓋建膜...等，附上原文(中英對照)，俾利於讀者了解。	特殊專有名詞已依審查意見修訂並加註英文原文，如原文 P.17 之「燒杯或區塊模式」，已修正為水桶模式(bucket model)或串聯模式(cascade model);P.34 與 P.36 原表 4.2 內專有名詞已修訂並加註英文原文。
3	P.33第4行溫暖其，請修訂為溫暖期；第4行衝，請修訂為緩衝；P.37之5.1.1節第2行進場，請修訂為近場。	文字誤植，已依審查意見修訂更正。