

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

計畫名稱：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

**Establishment of the reviewing guidelines for performance
and safety assessment of the final disposal of low-level
radioactive waste**

計畫編號：97FCMA006

執行單位：國立中正大學 機械工程學系

計畫主持人：任春平 助理教授

聯絡電話：05-2720411 轉 33322

E-mail address : imecpj@ccu.edu.tw

目錄

目錄.....	1
圖目錄.....	2
壹、緣起與目的	4
貳、研究方法與過程	8
參、結果與分析	16
3-1 文獻收集	16
3-2 低放射性廢棄物最終處置功能安全評估策略.....	19
3-2.1 低放射廢棄物處置功能安全基本概念	19
3-2.2 處置設施功能安全評估分析步驟.....	20
3-3 低放射性廢棄物最終處置功能安全評估初步導則.....	22
3-3.1 低放射廢棄物處置功能安全評估流程	22
3-3.2 低放射廢棄物處置功能評估模型建議.....	28
肆、總結與建議	50
參考文獻.....	56
附錄.....	58

圖目錄

圖 2-1 IAEA針對FEPs所需考量的範圍建議	10
圖 2-2 核種可能的外釋途徑	11
圖 2-3 模式之分析流程圖	13
圖 2-4 模式間的銜接介面示意圖	14
圖 2-5 系統不確定性處理原則	15
圖 3-1 處置場址資料描述示意圖	17
圖 3-2 處置場址模型建立及分析流程示意圖	18
圖 3-3 低放射性廢棄設施結構示意圖	20
圖 3-4 低放射性廢棄物物最終處置功能評估概念模型 (conceptual model) 示意圖	21
圖 3-5 低放射性廢棄物物最終處置功能評估流程	23
圖 3-6 低放射性廢棄物處置設施水文循環示意圖	29
圖 3-7 低放射性廢棄物最終處置設施之滲流分析建議流程	30
圖 3-8 低放射性廢棄物最終處置設施之工程障壁分析建議流 程	31
圖 3-9 低放射性廢棄物最終處置之放射源釋出分析建議流程	34
圖 3-10 低放射性廢棄物處置設施核種可能釋出之機制及介 質	35

圖 3-11 低放射性廢棄物處置設施核種經由大氣傳輸之可能 途徑示意.....	36
圖 3-12 低放射性廢棄物處置設施地下水與表面水傳輸途徑 之功能評估分析程序.....	37
圖 3-13 低放射性廢棄物最終處置設施之可能劑量示意圖 ..	41
圖 3-14 定率式分析流程	43
圖 3-15 機率式分析流程	44
圖 3-16 低放射性廢棄物最終處置設施分析示意圖	46

壹、緣起與目的

隨著人類生活日益進步，對於能源的需求亦與日遽增，在所有能源中，電力可說是與人類有密不可分的關係，除了傳統的火力、水力、天然氣發電外，二十世紀又發展出一新的電力產生方式，也就是核能發電，對於地球上日益消耗殆盡的資源，核能發電不啻提供了一個新的電力產生途徑，對於天然資源並不充分的國家，也大大降低對其他國家資源的依賴性。但是，核能發電就像是一把雙鋒的劍，一方面其可供應比火力發電穩定且乾淨的電源，故發展初期，世界各國莫不爭相發展各式的核能電廠，以供應國內電力所需，但另一方面核能電廠所產生的放射性廢棄物問題，因其處理複雜，且若處理不當，放射性物質將對人體產生傷害。

然而，不論擁有核能電廠的國家對未來核能發電所抱持的態度為何，放射性廢棄物的處理與處置卻是每個國家都必須面對的問題。放射性廢棄物的主要來源為核能電廠，以我國而言，佔所有放射廢棄物的 90% 以上，放射性廢棄物可以廣義的區分為高放射性廢棄物及低放射性廢棄物。高放射性廢棄物為用過核燃料及其經再處理所產生之萃取液或產物，通常包括半衰期較長的核種。低放射性廢棄物則包含了高放射性廢棄物以外的所有放射廢棄物，內含污染衣服、紙張、木材、塑膠等低放射污染物質（劉東山等，1993）。

放射性廢棄物處理的基本目的，為使暴露率及輻射劑量盡可能合理化的抑低，並且在任何環境下，其劑量率小於年劑量限值，處理方法包括了氣體濾淨技術、液態廢棄物的吸附、過濾、沈澱、蒸發及離子交換，與固態廢棄物的除污、壓縮、焚化、固化儲存及處置等。上述對放射性廢棄物的處理，本質上並無法使放射性物質的放射活度減少，處理的目的，只是使放射性廢棄物的體積減少、穩定、以利於搬運與儲存，並對未來的處置工作做一準備。目前對於放射性廢棄物的處置有兩種基本作法，一種是將廢棄物保存在固定的處置位置，並在其四周加設有效的障壁，使得廢棄物得以被長時間的隔離在人類生活區域之外，此種作法稱之為包封或限制；另一種則是讓廢棄物經由自然的傳輸過程來移動，藉由廣大的天然機制，使得核種在遷移期間有足夠的時間將本身的放射性減至對生物無危害的程度，再釋放到生物活動的範圍，此種作法則稱之為延散或稀釋。在廢棄物的處置上，不論僅實施哪種作法，都各有其優缺點，因此目前對於放射性廢棄物處置場的設計上，是考慮將兩種作法同時進行以達成互補的效果。首先將廢棄物固化包封並集中於處置場內加以隔離，使其經過一段長時間的放置而降低放射性活度，之後廢棄物人工障壁因為壽命結束而開始失效，造成核種得以釋出處置場而進入周圍母岩；接著核種藉由地下水的流動，在母岩中進行延散及

擴散等遷移傳輸作用，此時利用天然障壁的遲滯功能，使核種緩慢地向著人類生活圈移動。這種結合各類人工與天然障壁來延遲核種遷移至生物圈的方式，即為多重障壁（multi-barrier）的概念（IAEA, 1984a, b）。

對低放射性廢棄物最終處置，行政院原子能委員會已訂定「放射性物料管理法」、「放射性物料管理法施行細則」及相關行政命令，以有效管理放射性廢棄物。「低放射性廢棄物最終處置設施場址選定條例草案」經立法院三讀通過後，國內低放射性廢棄物處置場的選址與興建，已正式進入實務的執行階段。根據放射性物料管理法的精神，放射性廢棄物的產生機關或單位對於放射性廢棄物需負完全的管理責任，如前所言，我國大部分的放射性廢棄物來自核能發電廠，台灣電力公司身為核能電廠的擁有者，根據法規，勢必在處置工作上需盡最大之責任，以確保處置工作能順利進行，放射性物料管理局為國內放射性廢棄物主要管理機關，針對台電公司後續對於處置場申照、運轉以及封閉等各個階段所提出之功能安全評估需具備獨立審查之能力並提出具體的建議。有鑑於此，本計畫之短程目標為：

- (1) 瞭解國外處置工作發展技術趨勢與現況。
- (2) 釐清低放射性廢棄物最終處置系統中，各子系統與重要因子對於

處置安全之影響。

- (3) 提供處置工作執行者進行功能安全評估時的依據與參考。

由於放射性廢棄物處置工作需長期規劃與研究，因此而在長程方面，本計畫預期之效益：

- (1) 提供審查單位對於最終處置安全審查導則之建議。
- (2) 建立全系統安全評估的標準程序。
- (3) 可協助建立管制單位對於功能安全評估獨立審查及分析之能力。

貳、研究方法與過程

本計畫之短程目標，在於釐清低放射性廢棄物最終處置系統中，各子系統與重要因子對於處置安全之影響，提供審查單位對於最終處置安全審查導則之建議。而在長程方面可協助建立管制單位對於功能安全評估獨立審查及分析之能力。本年度計畫執行項目、方法以及步驟分述如下：

1. 國內外低放射性廢棄物最終處置安全評估之情節、概念模式、核種外釋機制及評估模式等文獻蒐集與分析。

情節與概念模式演繹處置場的變化歷程，在功能安全評估上必需先行確認，之後才能與數學模式進行良好的銜接，並解讀模式運作的結果，本項工作擬針對情節、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相關文獻的研析 (IAEA, 2000; USNRC, 2000; SKB, 2001)，主要研究單位與國家包括 IAEA, NRC, 瑞典以及日本等，原因為 IAEA 為國際組織，其所建議的概念與方法具公信力，NRC 為美國管制單位，其立場與本計畫出發點相同，瑞典、法國以及日本都有實際運轉低放射性廢棄物處置場經驗，值得我國借鏡。圖 2-1 為 IAEA 針對低放射性廢棄物處置安全評估時針對特徵事件 (Features, Events and Processes, FEPs) 所應考量的內容與範圍建議，在整合了可能

的 FEPs 後即構成安全評估的情節(Scenarios)，之後根據情節規劃與設計相關的概念與數學模式，FEPs 與情節的發展技術相當重要，原因在於各個國家其水文地質條件大相逕庭，且考慮國情差異，對於處置方式的考量也有所不同，這些因素都會影響處置場的建造以及評估方式，當然也影響後續的概念、以及數學模式。IAEA 針對低放射性廢棄物最終處置安全評估之 FEPs，所考量的範疇，其內容與範圍整理如下：

(1) 外部因子(External factors)

- (a) 處置場區
- (b) 地質過程及效應
- (c) 氣候影響
- (d) 未來人類活動

(2) 處置系統區域：環境因子(environmental factors)

- (a) 廢料及工程設計
- (b) 地質環境
- (c) 地表環境
- (d) 人類活動(不包含人類闖入情節)

(3) 處置系統區域：核種/污染物因子(radionuclides/contaminants factors)

- (a) 污染物特性

(b) 釋出/遷移之影響因子

(c) 曝露因子

不過，總括來說，在數學模式的設計上，仍以劃分為近場、遠場以及生物圈為基本考量，這種作法，在國際亦有共識，圖 2-2 為針對一個近地表低放處置場所設計之可能核種傳輸途徑 (IAEA, 2004)。

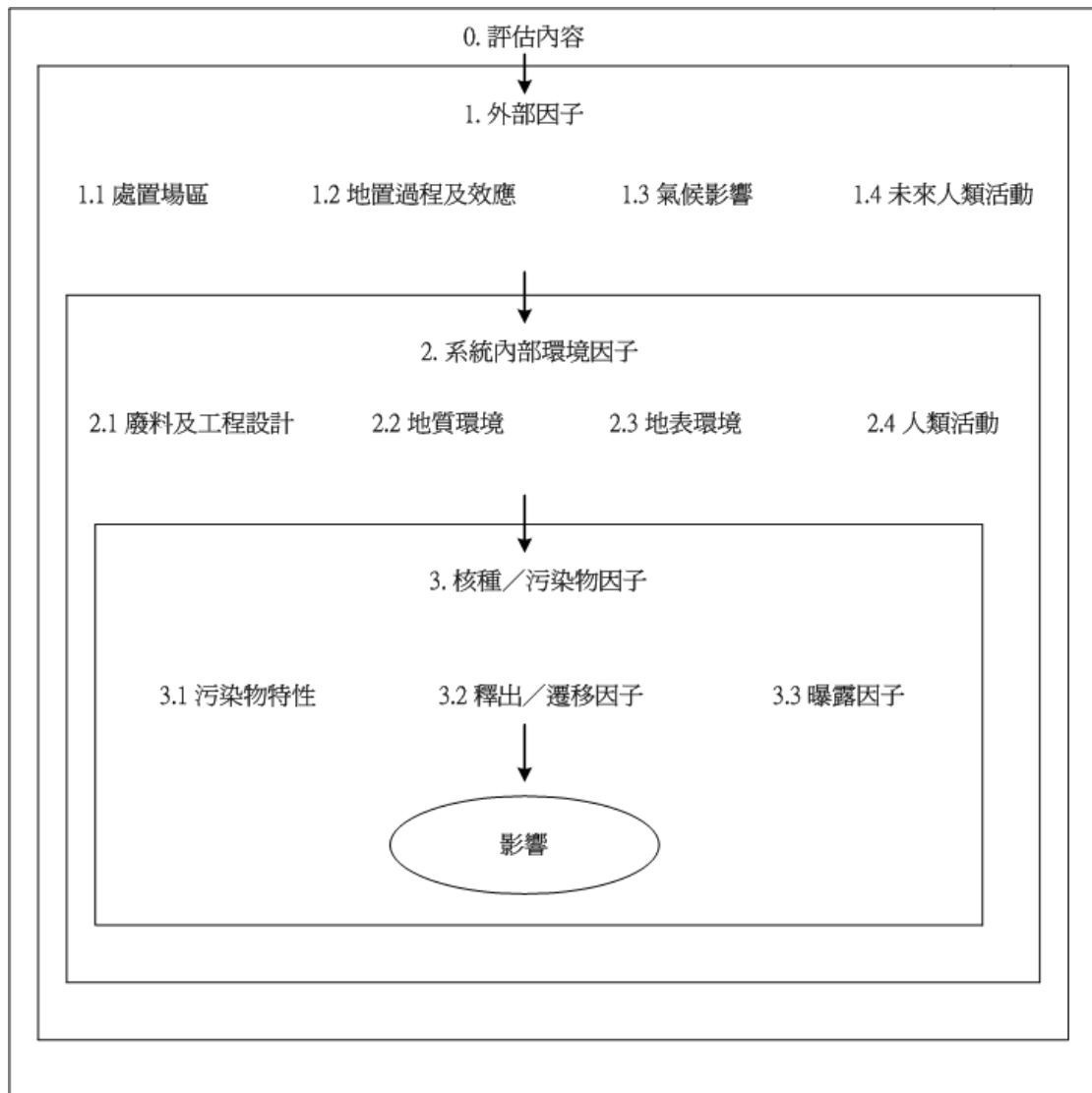


圖 2-1 IAEA 針對 FEPs 所需考量的範圍建議

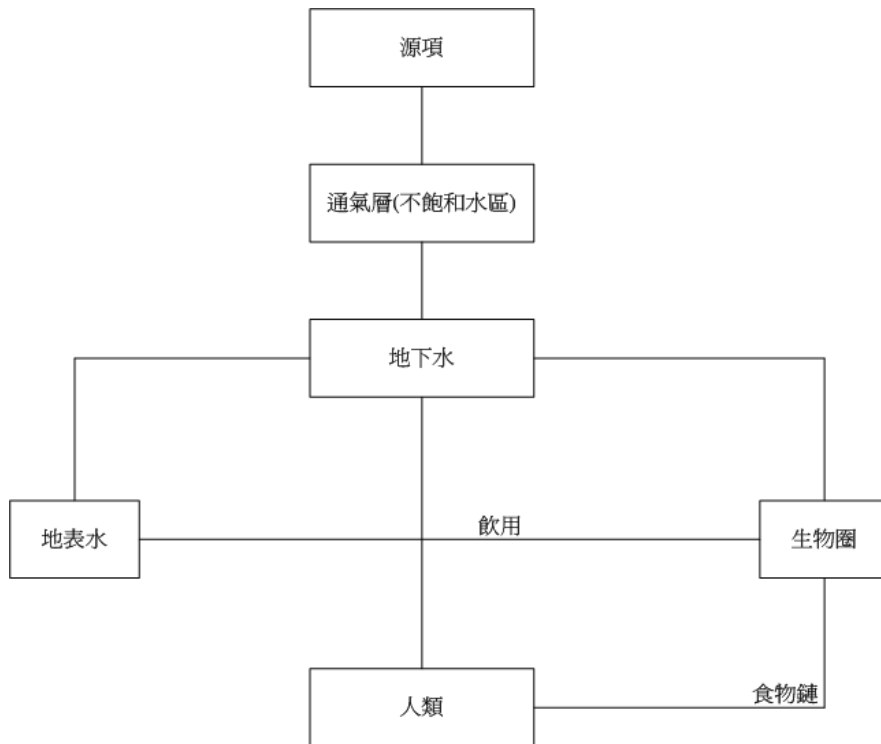


圖 2-2 核種可能的外釋途徑

2. 近場、遠場及生物圈各評估模式匯出/入介面銜接之分析條件與作業要求，及模式驗證與確認(Verification & Validation)審查作業導則之建議。

近場評估主要重點在工程障壁對核種所能提供的遲滯作用，以數學的觀點來看，近場模式的輸出是遠場模式的輸入，由於近場的輸出通常以時間序列方式連續呈現，在數學的處理上須以重疊相加的技巧處理之，以適當反應各個時間點或時間帶的濃度效應，遠場的濃度輸出可經由設計各種途徑進入生物圈，最常見的情節為井水情節，搭配 ICRP 所建議之劑量轉換因子計算輻射劑量，並與現行法規互相比較。模式驗證與確認則建議以分段

方式進行，即透過簡單的程式（可為數值解或解析解），先驗證近場模式之可用性與正確性，其次擴充到遠場模式，生物圈需視所設計的攝入情節設計驗證規範與作法，並兼顧法規面的規定，以符合保守與安全原則。由圖 2-3 可以顯示 (Sandia National Laboratories, SNL, 1995)，針對近場、遠場以及生物圈，我們都可以用不同程式來處理之，端視問題而定，例如：以一個近地表的處置場而言，核種從近場外釋之後，可能必需先經過地質圈的非飽和帶與飽和帶，由於兩個區域的傳輸性質不同，需分開處理，其次進入生物圈，生物圈劑量的累積最常見的為吸入或嚥入，介質則有可能是空氣、水或食物，這些介質帶傳輸過程中可能被稀釋或濃縮，需視所設計之傳輸途徑決定之。圖 2-4 是一般模式連結在數學上的示意圖 (GoldSim Technology Group, 2008)，當第一個模式計算結束後，其計算結果會輸入第二個模式，也就是圖 2-4 中的”傳輸途徑”，”傳輸途徑”接受圖 2-4 左邊的時間序列結果，並當作輸入值開始計算，類似地，計算的結果會產生圖 2-4 右邊的時間序列輸出，這個結果可能是整個模式鏈的最後結果，若不是，則當作下一個模式的輸入值，重複進行，直到整個模式鏈結束為止。一旦進行低放處置功能評估之數值程式選定後，可藉由解出經設計過的簡化案例（可能是數值解或解

析解)，分段方式進行，以證明數學模式之公式可獲得正確地求解。此外，也可採用不同的數值分析方法使用相同的輸入參數，以解得相同的問題，再比較其結果，也可進行程式之驗證 (verification)。而國際性的相互比較與審查可做為程式可用性之確認 (validation)，以建立安全評估的信心。

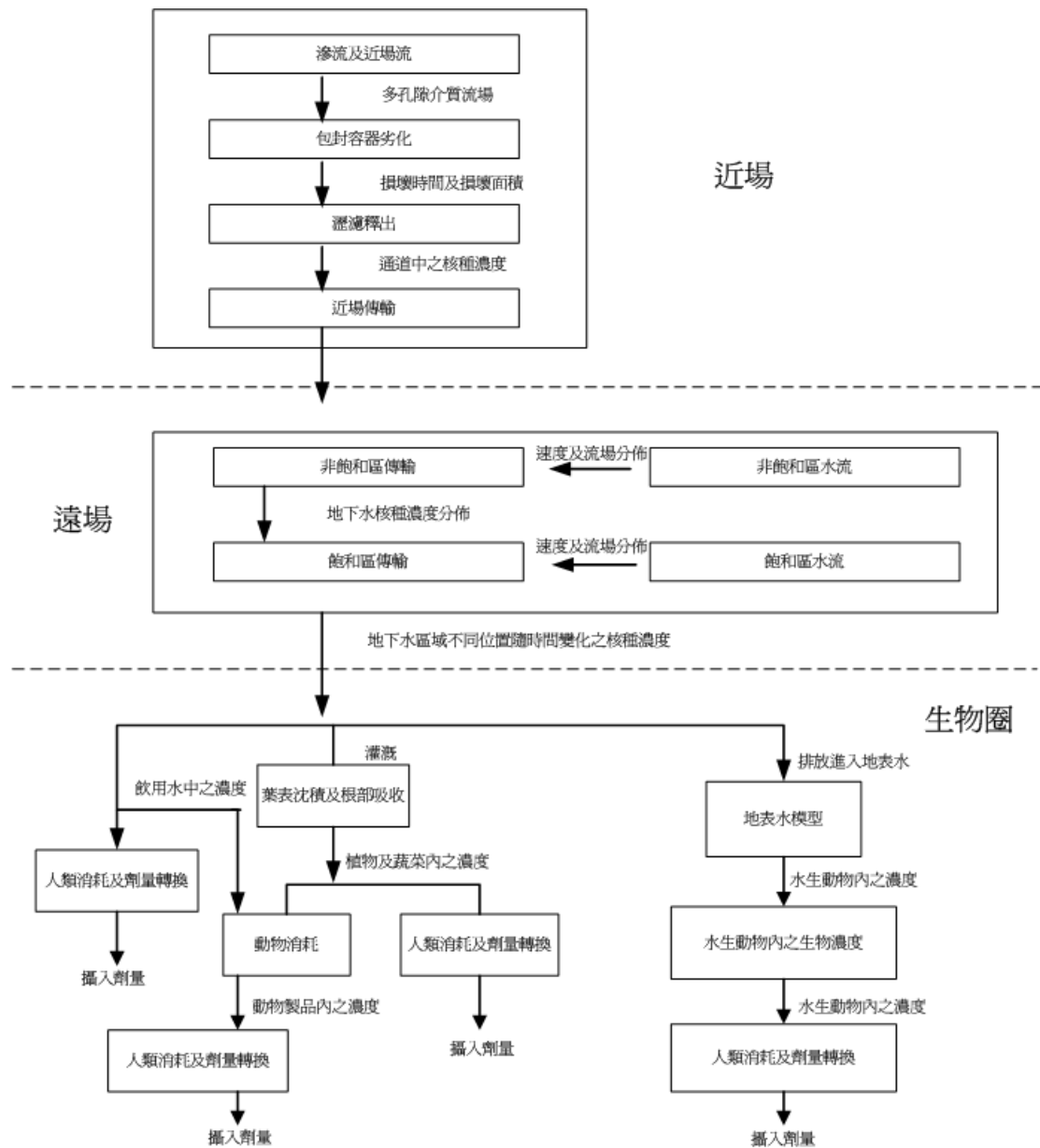


圖 2-3 模式之分析流程圖



圖 2-4 模式間的銜接介面示意圖

3. 水文地質參數不確定(Uncertainty)量化分析方法與結果判讀之 審查建議。

水文地質參數不確定性極大，即使有部分現地調查數據，仍須確認數據的可用性與代表性，在安全評估的概念上中，保守的作法，為在可能的參數值範圍中，做最悲觀的參數選擇，此法可能造成結果過度保守；在機率式分析技巧的使用方面，可透過蒙地卡羅或拉丁超立體取樣針對重要參數作不確定性分析，以統計方式解讀模式運跑結果，並做出判斷。結果判讀為安全評估中最具影響力的工作，牽涉到邊界條件的設定、初始環境的假設以及各種因子間交互影響的結果，甚至整個概念、數學模式正確性，此方面的工作，一般而言，除學理依據外，需依靠有經驗的相關工作人員進行，本計畫擬以專家判斷作為結果解讀主要依據，以學理及模式架構為基礎，並與法規交互參照，逐步回溯各重要因子所帶來的影響性。圖 2-5 為安全評估時，針對系統不確定性的處理原則，由於系統不確定性永遠存在，反覆的驗證可以增加”

安全”的信心，但無法完全避免不確定性，因此在處理這些問題時，以法規或環境背景值當成可容許上限值，也就是說，在執行安全評估時，應盡量讓不確定性落在圖中箭頭左方 (SNL, 1995)。

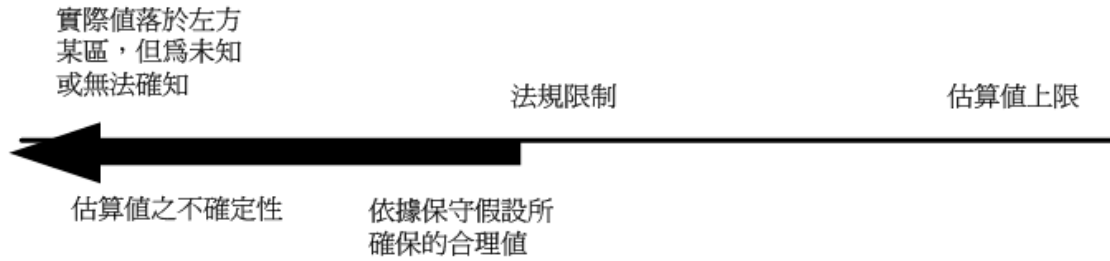


圖 2-5 系統不確定性處理原則

參、結果與分析

3-1 文獻收集

本研究所進行之文獻收集，已收集之文獻包括：

1. International Atomic Energy Agency (IAEA)
 - (1) Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities (vol. 1&2)
 - (2) Technical considerations in the design of near surface disposal facilities for radioactive waste (IAEA-TECDOC-1256)
2. U.S. Nuclear Regulatory Commission (USNRC)
 - (1) Standard Review Plan for the review of a license application for a low-level radioactive waste disposal facility (NUREG-1200)
 - (2) Environmental Standard Review Plan for the review of a license application for a low-level radioactive waste disposal facility (NUREG-1300)
 - (3) U.S. Code of Federal Regulations: Licensing requirements for land disposal of radioactive waste (Title 10, Part 61)
 - (4) A Performance Assessment Methodology for Low-Level Radioactive Waste Disposal Facilities (NUREG-1573)
 - (5) Human-System Interface Design Review Guidelines (NUREG-0700)
 - (6) A Performance Assessment Methodology for Low-Level Waste Facilities (NUREG/CR-5532)
 - (7) Evaluation of a Performance Assessment Methodology for Low-Level Radioactive Waste Disposal Facilities (NUREG/CR-5927)
 - (8) Background Information for the Development of a Low-Level Waste Performance Assessment Methodology (NUREG/CR-5453)
3. Svensk Kärnbränslehantering AB (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, SKB)
 - (1) Radionuclide release and dose from the SFR repository
 - (2) Model summary report for the safety assessment SFR 1 SAR-08
 - (3) Transport properties site descriptive model: Guidelines for evaluation and modelling

(4) Experiences from the safety assessment, construction and operation of the SFR disposal facility for low- and intermediate level waste at Forsmark

就瑞典 SKB 的文獻資料而言，特別對於場址描述(site description)，多所著墨。場址的調查為跨領域之研究分析，包含地質、岩石力學、熱傳特性、水文學、水文地質化學、傳輸特性及地表生態學等，場址之描述如圖 3-1 所示：

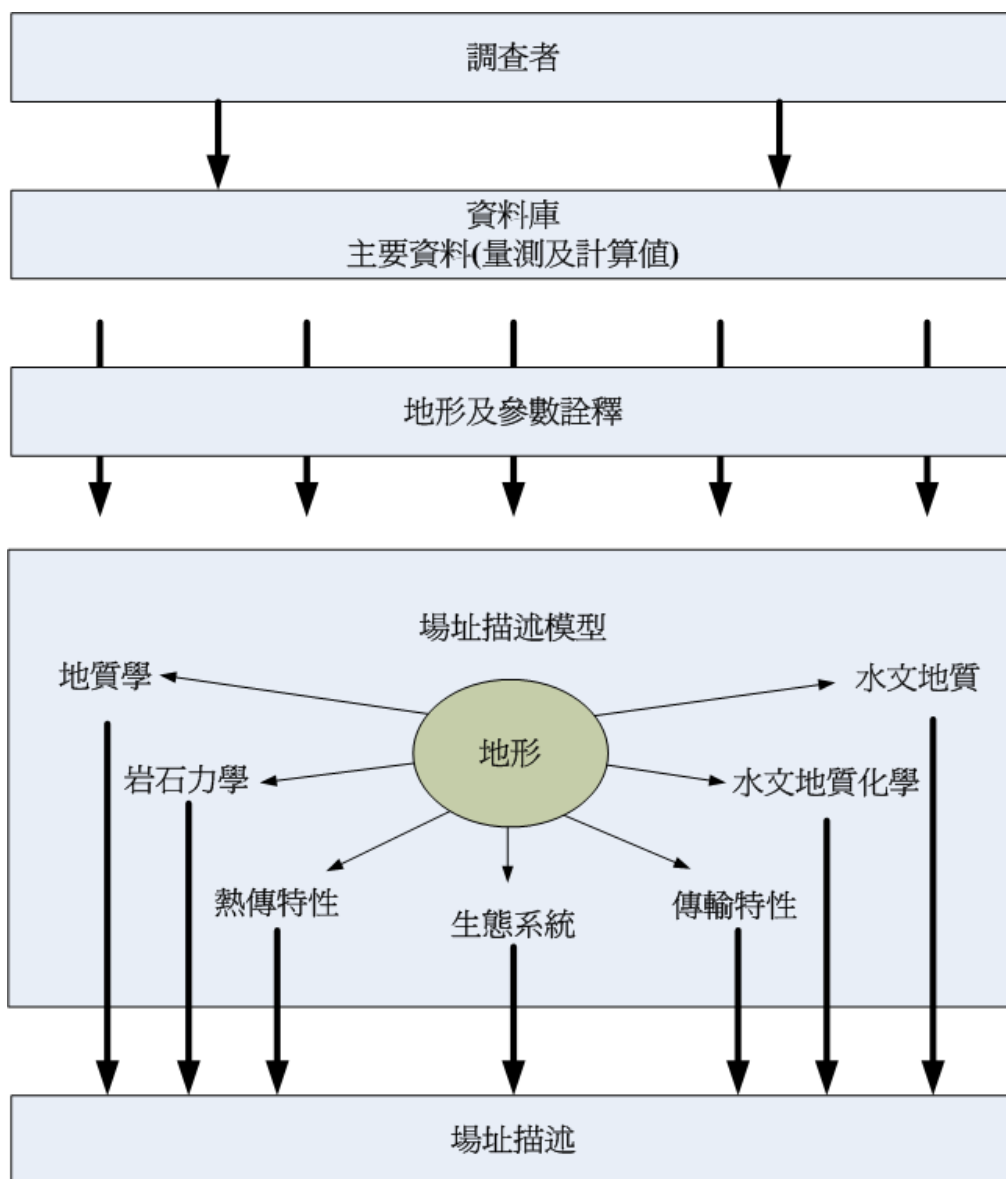


圖 3-1 處置場址資料描述示意圖

在處置場址資料收集後，其主要場址之資訊，將匯入場址的三維概念模型進行不同領域之功能安全評估，其領域概念模型包含；(a)地質場址概念模型；(b)水文地質模型；(c)水文地質化學模型；(d)場址岩石力學模型；(e)熱傳模型；(f)生態學模型；(g)地下水及核種傳輸模型；(h)場址整體評估模型。對於場址模型之功能安全評估，可以下列流程：

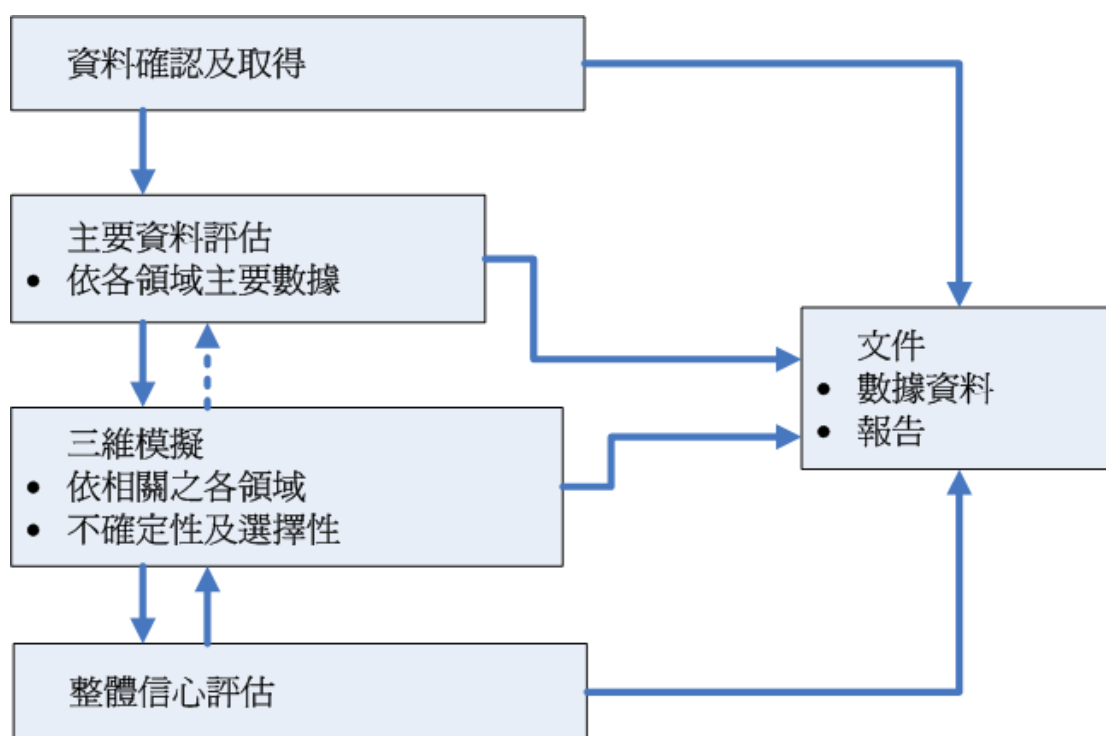


圖 3-2 處置場址模型建立及分析流程示意圖

整體而言，在所收集的各國文獻中，美國 NRC 所出版之 NUREG-1200 與 NUREG-1573 報告內容完整，包括低放射性廢棄物處置工作之法規面與技術面的規劃與建議皆有詳盡的敘述，非常適合我國低放處置現階段工作之參考。因此，本研究擬以此兩

份報告為藍圖撰寫而成。

3-2 低放射性廢棄物最終處置功能安全評估策略

3-2.1 低放射廢棄物處置功能安全基本概念

安全評估之目的在於將可能的風險量化，供場址選擇及設計時之參考。低放射性廢棄物處置設施結構示意如圖 3-3。NRC 建議的功能評估之方法(Performance assessment methodology)為將處置場址分為數個模擬區塊，包含：

- (1) 滲流(infiltration)及非飽和區水流；
- (2) 工程障壁功能評估(與滲流計算結果耦合後估算進入處置單位的水流量)；
- (3) 介質中的傳輸包含：地下水、表面水及大氣傳播；
- (4) 動植物攝入(食物鏈)；
- (5) 人類受到之劑量。

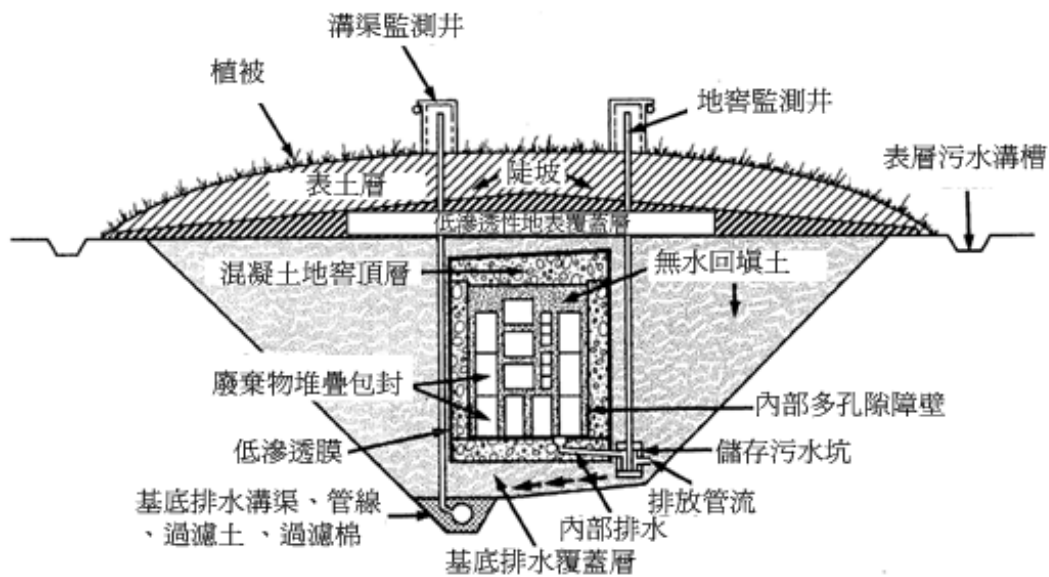


圖 3-3 低放射性廢棄設施結構示意圖

3-2.2 處置設施功能安全評估分析步驟

從 1988 年到 1990 年間，美國 NRC 委託 SNL 進行處置功能評估方法論之建立，內容包括選擇適當模型及數值程式，依不同模式分段分析處置設施系統，依以下五步驟分析：

步驟一：定義人類可能曝露之途徑

步驟二：評估曝露途徑之相對重要性

步驟三：選擇並整合系統各部分之評估模型

步驟四：選擇適用數值分析程式並針對評估模型求解

步驟五：以建議之數值程式進行功能評估

概念模型如圖 3-4 所示。

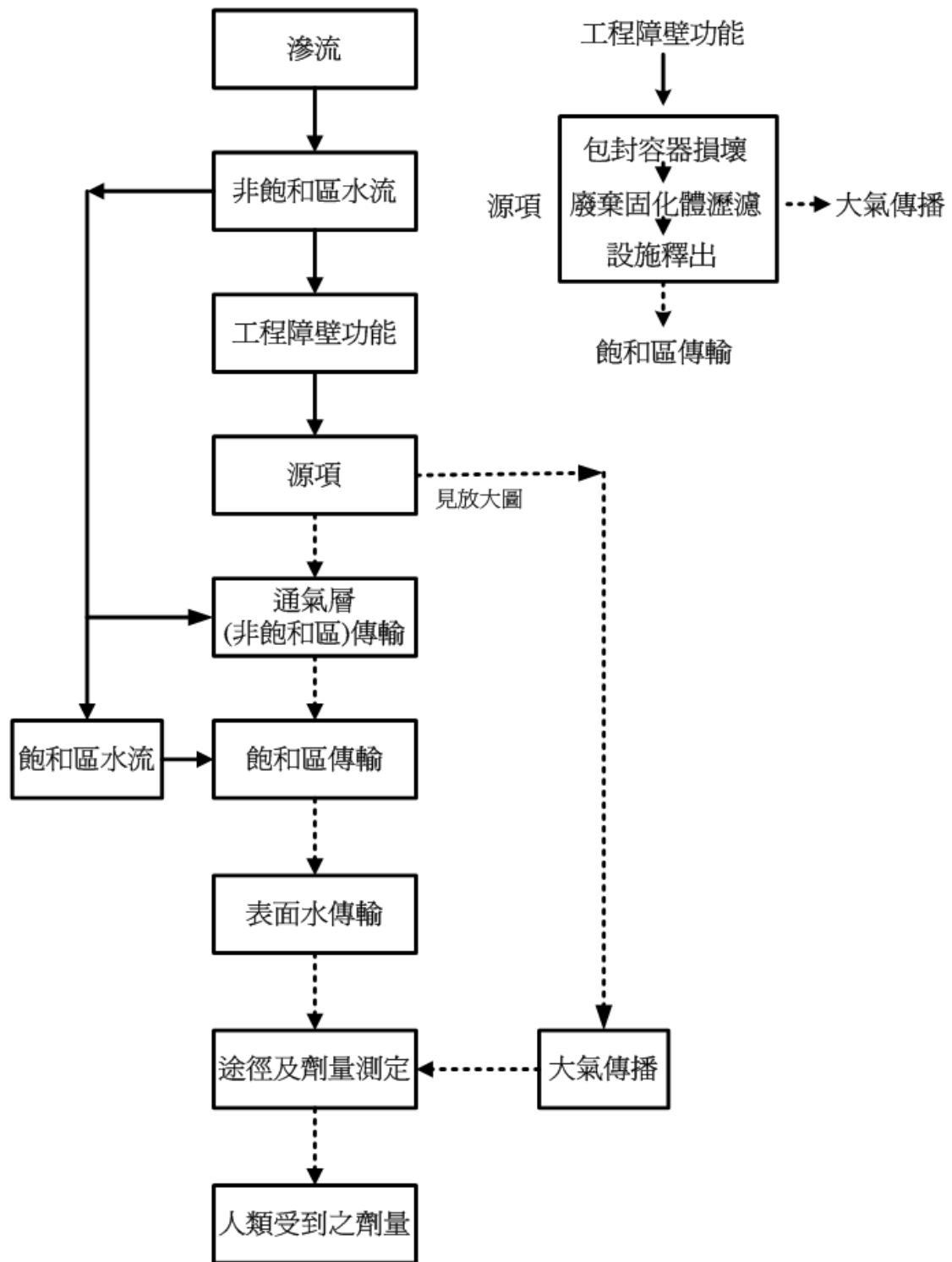


圖 3-4 低放射性廢棄物最終處置功能評估概念模型 (conceptual model) 示意圖

3-3 低放射性廢棄物最終處置功能安全評估初步導則

3-3.1 低放射廢棄物處置功能安全評估流程

所謂的功能安全評估為針對可能之低放處置場址，進行場址功能結構之事先預測，以確保處置系統能正常運作與維持安全，在進行場址選擇時需先進行概括性的安全評估，場址決定後就必須進行細部的各子系統功能評估，而在往後的運轉期間，仍須藉由運轉經驗的累積、監測數據的回饋，來評斷處置場的實際運轉功能。美國 NRC 所建議之功能評估程序如圖 3-5 所示，評估後需滿足美國 10 CFR 61 法規。放射性物料管理局（以下簡稱物管局）為我國處置工作之主管機關，因此，未來處置工作執行者所進行的功能安全評估工作也應通過物管局之審核且符合我國現行法規之需求。

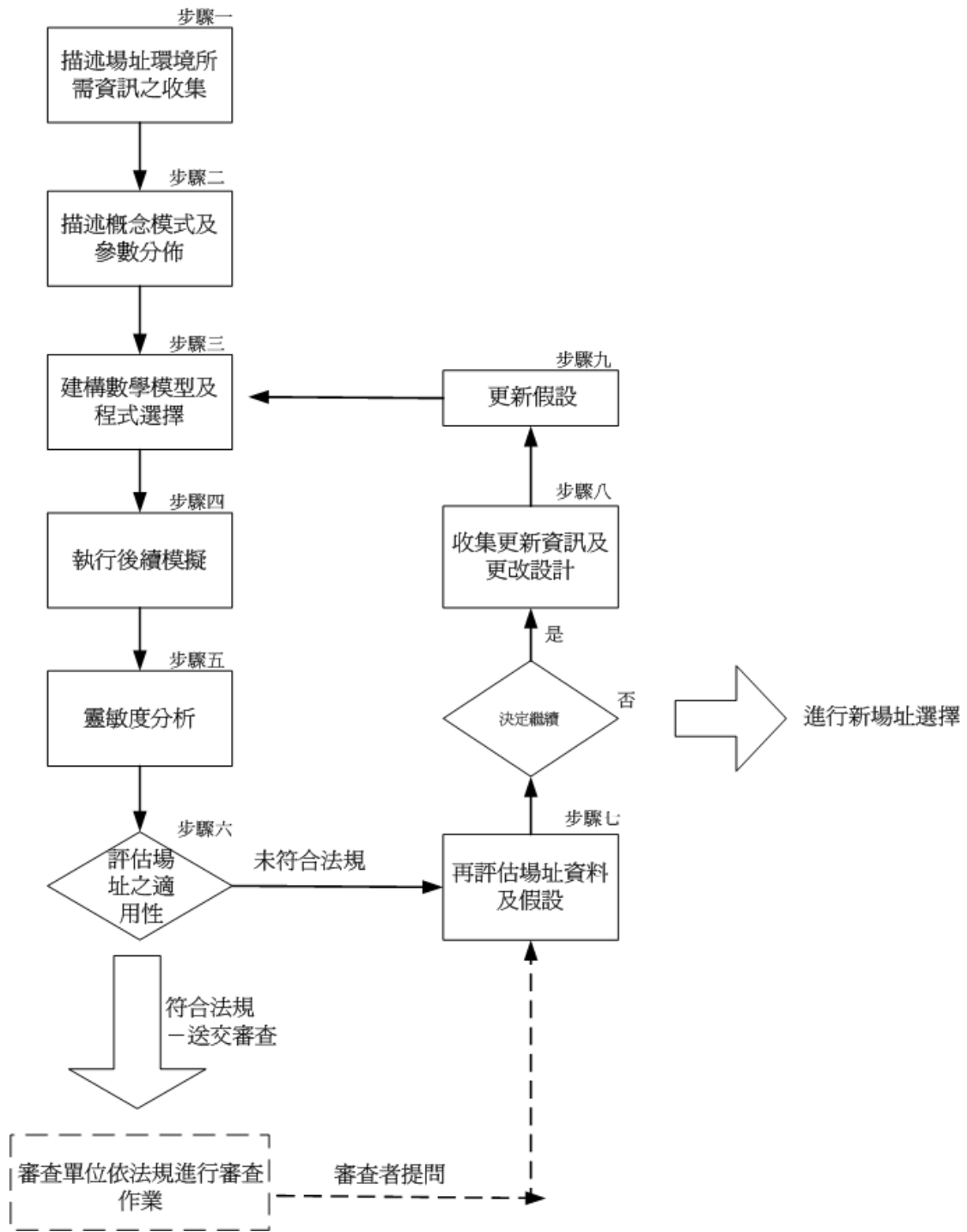


圖 3-5 低放射性廢棄物最終處置功能評估流程

(1) 步驟一：描述場址環境所需資訊之收集。

低放處置場址設施包含許多天然及工程特性之屏障，同時各類放射性廢棄物可能以不同方式處理後儲存於設施中，具有高度的複雜性。因此，首先需定義並考慮主要導致核種釋出的機制，包含隨著時間變化的天然過程與事件對處置場址造成的改變。換言之，第一步驟在針對候選場址之處置系統提出完整的資訊，包含工程與天然障壁之功能，可能之假設與事件，相關參數之定量資訊以供後續數學模式分析之用。

(2) 步驟二：描述概念模式及參數分佈。

由步驟一所得資訊，在此步驟用來建構候選場址的概念模式。若將所有處置場址設施之過程及特性列入考慮，複雜程度太高，根據許多國外的經驗，影響處置設施的因子可能多達數百個或上千個，然而真正主導處置場演變的因子卻相對有限，因此，概念模式需透過許多簡化的假設以獲得處置設施中近似之表現，這方面的工作，除了透過專家的討論以外，國外經驗的汲取也是重要的方式之一。

(3) 步驟三：建構數學模型及程式選擇。

當概念模式確定之後，就可依據概念模式建立數學模型，所謂的數學模型為將文字化或圖像化的概念模式以數學方式描述之，通常，數學模型是依序列的微分方程式，分別描述水流速度、核種平流、延

散、擴散以及衰變等各種反應，當微分方程式確立之後，可根據適當地初始及邊界條件求解，求解的方法有很多種，主要分解析解與數值解，解析解一般用拉普拉司法或者傅立葉法轉換時間域問題，數值法常見的有有限元素以及有限差分等。解析解只能解決簡單的傳輸問題，但卻是極佳的程式驗證工具，國外根據其處置需求也分別利用數值方法發展許多程式，這些程式雖非專為我國處置環境設計，但只要經過細心的篩選，仍可當作我國處置工作的分析工具。

(4) 步驟四：執行後續模擬。

後續模擬之目的在於依可信的概念模型計算場址功能分析。然而，系統本身即具有不確定性 (uncertainty)，分析者有必要透過後續的模擬分析不確定性對於模型與各場址參數之影響。

(5) 步驟五：靈敏度分析(sensitivity analysis)。

靈敏度分析是由步驟四的模擬計算結果，分析何種模型、假設或參數組合對於最終估算出的劑量影響最大。靈敏度分析可提供分析者仔細檢視那些因子對於劑量結果影響最大，以設計最佳處置設施設計組合來有效降低不確定性，也可對於功能評估結果提出較佳的解釋，同時提供資訊以協助尋找適當的近似方式建立模型。

由於處置場所牽涉的內在及外在因子相當複雜，如前所言，這些因子可能高達數百個甚至上千個，因子反應到數學模式上則成為輸入

參數，就數學模式而言，若將這些參數全部輸入，不但沒有意義且無法掌控主要因子的重要性，國際目前的作法，為挑選對處置場影響最深的因子並評估之，評估的方法主要針對參數的靈敏度，參數靈敏度的分析原理乃是評估該變數的一個固定變量對系統的影響，但由於系統參數常是非線性相關，也導致參數靈敏度的分析會有誤差，這方面的工作，除了更新靈敏度的分析技術外，更重要的是專家群的判斷。

(6) 步驟六：評估場址之適用性。

掌握了主要分析參數的變動範圍以及對系統的影響之後，下一步的工作即是評估場址的適用性以及安全性。當執行完安全評估之後，其結果需送交審查單位或專家群作確認，評審標準一般以符合法規為主要需求，但也需遵照合理抑低之精神，根據 NRC 的概念(圖 3-3)，這個工作是遞迴的(Iterative)以及可回溯的(Trace back)，也就是說，當評估結果不符合規範時，必須能即時針對上述工作作修改，並針對修改重新提交評估結果。

(7) 步驟七：再評估場址資料及假設。

當評估結果不符合規範時，原因有很多，必須逐步審視，首先為評估場址資料，由於處置場址牽涉到地表以及地下空間的許多變因，這些資料本身所包含之不確定性極大，分析方法以及分析地點都可能直接或間接影響安全評估結果，再者，基於保守的原則，我們在評估

場址時會進行較悲觀的假設，有時可能因為過度悲觀而導致偏離現實太遠，這些都是導致評估結果不符規範的可能原因，因此，可針對安全評估的結果，合理的作修改。

(8) 步驟八：收集更新資訊及更改設計。

承步驟(7)，當判斷資料不足以描述現階段場址設計時，就必須更新場址資訊，常用的方法包括：實地進行調查，但此項工作花費極大且耗時，但所得資料可信度高，其次，收集其他研究在附近地點或類似環境所作的研究，這個方法得資訊較快，但資訊正確性可能有疑問，且可能發生誤判情形，當資訊更新時，場址的設計也許與原先設想的的不同，更改處置場設計變成可能的手段之一。

(9) 步驟九：更新假設。

承步驟(8)，當場址的資訊或設計變更後，安全評估的處置概念可能也跟著改變，此時需審視概念模式是否能滿足需求，如無法滿足需求時，則需進行修改，數學模式則需呼應概念模式的變更，可能更改的項目包括邊界條件、初始條件以及反應機制等，同樣的所選擇的數值程式也必須能反應這些變更，若無法滿足，則需另選數值程式。

功能安全評估工作並非一蹴可及，必須經過反覆的修正以及審查、確認，直到符合規範為止，這些工作需花費極大的人力以及物力，我國低放射處至工作已進入實務階段，應針對相關工作提早進行規劃

與布局。

物管局擔任我國處置工作審查與管制之權責單位，根據美國 NRC（圖 3-5）之概念，物管局有必要根據現行法規針對處置工作執行單位之工作程序與技術標準進行審查。在程序方面可要求執行單位根據法規需求，落實圖 3-3 所述之各項步驟進行處置工作。在技術標準方面，物管局可建立獨立審查評估模式作為審查標準，要求執行單位提供相關數據與設計，結果與執行單位建立之模式相互比較，以瞭解雙方之異同，並評估是否符合法規之需求。

3-3.2 低放射廢棄物處置功能評估模型建議

(1) 滲流(Infiltration)

當處置設施完成封閉後，部分雨水會穿過地表層入滲至地下水系統中，所謂的滲流在處置方面，意指處置場之上蓋（cap）失效或部分失效導致雨水入侵至處置場區，進而影響核種之穩定性。圖 3-6 為處置設施水文循環示意圖，滲流現象由氣候、土壤特性、植被等因素所影響。

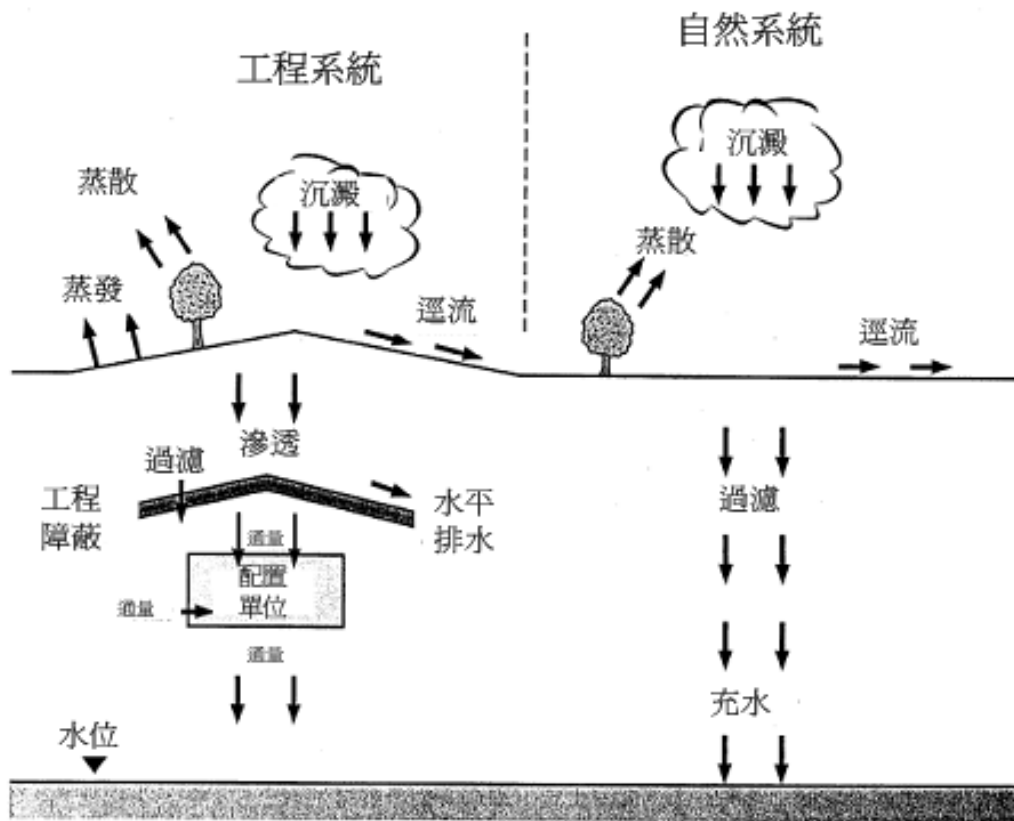


圖 3-6 低放射性廢棄物處置設施水文循環示意圖

滲流現象的分析流程如圖 3-7 所示，其中包含兩重要部分，首先是由場址情況、過程及事件直接影響抑或透過工程障壁設計所造成的暫態滲透率；其次為穩態水流量滲透率之計算分析。滲流的水文分析，首先需採用多維度的計算，以此估算上蓋累積之水量，然而，一旦求得流進處置設施的滲流率後，其後的影響，可適用簡化的一維或二維分析以進行功能評估。

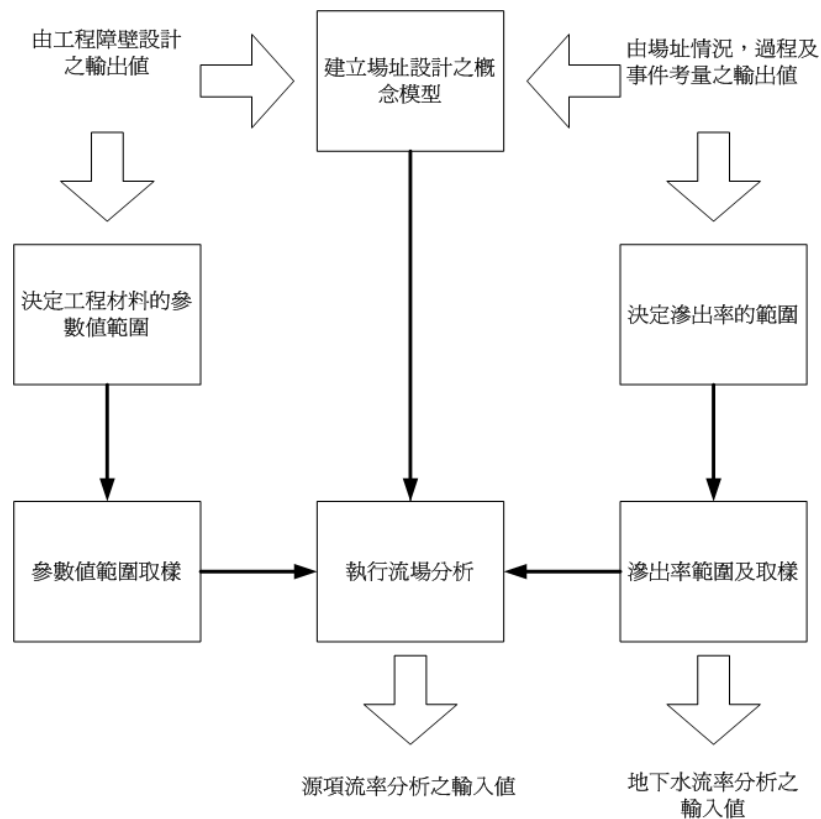


圖 3-7 低放射性廢棄物最終處置設施之滲流分析建議流程

(2) 工程障壁(Engineered barriers)

低放射性廢棄物最終處置設施之工程障壁的功能評估分析流程

建議如圖 3-8 所示。工程障壁的存在，其目的在於加強處置設施對核種外釋的防堵能力。因此，進行處置設施功能評估時，需瞭解工程障壁材料特性、組成以及與其他設施的交互作用，來估算工程障壁的使用壽命及隨時間變化的相關材料參數。需要考慮的因素包括：(a)材料直接或間接接觸下的相容性；(b)處置設施的建構方式，如建築接合處、幾何變化、穿透深度等影響因子；(c)材料失效或工程障壁的突出物等會影響系統整體表現的因素，以及(d)材料隨時間劣化後會影響工程障壁功能的參數。

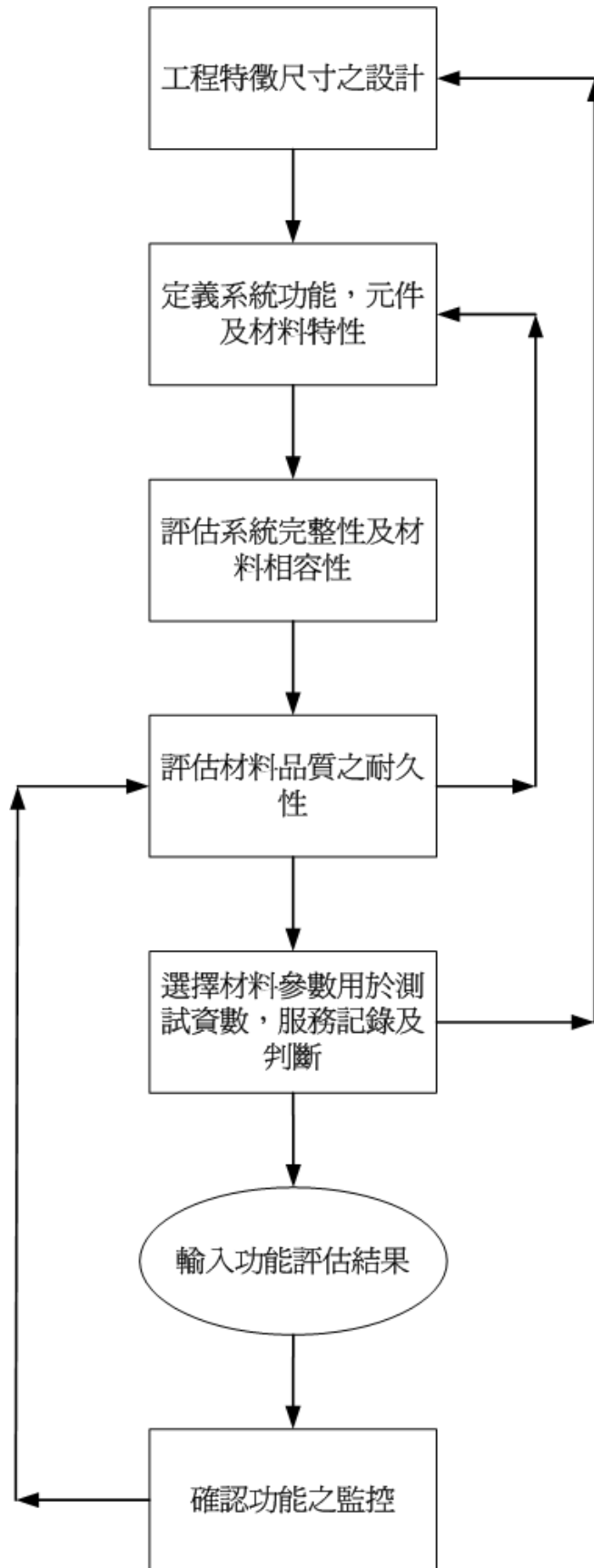


圖 3-8 低放射性廢棄物最終處置設施之工程障壁分析建議流程

(3) 放射源項及廢棄物型態(Source term and waste type)

放射源項的分析，其目的在於估算核種由低放射性廢棄物處置設施單位中隨時間釋出的量，此核種釋出量可作為由處置場址釋出後，其傳輸分析的輸入值。核種可以液相形態釋出，其傳輸過程可由流進處置單元的水流量，有效的控制，然而，核種亦有可能以氣體方式釋出，相對而言，氣體的核種釋出較不易控制，具有較高的流傳（advection）及擴散（diffusion）率。一般而言，考慮到氣體及液體的傳輸特性不同，進行功能評估時，氣液相的釋出採用分別分析的方式進行。其分析建議如圖 3-9 所示。具體而言，在雨水入滲包封容器（container）的過程中，廢棄物包封層因接觸地下水而開始腐蝕，當廢棄物包封層產生穿透性蝕孔或全面性蝕穿時，廢棄物體即開始與地下水接觸。在廢棄物體與地下水的接觸過程中，廢棄物體中之放射性核種逐漸釋出，並以流傳及擴散等機制隨地下水向外界遷移。放射性核種從廢棄物體中釋出之機制可概分為如下三種：(a) 洗刷（rinse）釋出：當廢棄物體與地下水接觸的初期，位於廢棄物體表面的核種會很快溶解於水中並釋出，這一部分的釋出又稱為瞬間釋出（instant release）；(b) 擴散釋出：當廢棄物體全面浸潤了地下水後，廢棄物體內部的核種也會溶於水中，並以擴散機制沿著廢棄物體的貫通孔隙通道，穿透廢棄物體而向外遷移；以及(c) 溶解（dissolution）釋出：當

廢棄物體基質 (matrix) 逐漸溶解於地下水中的同時，廢棄物體基質中所緊緊包裹之核種也隨著釋出。一般而言，擴散與溶解等兩種釋出是一種相對比較緩慢的機制，而且持續的時間也相對的比較長久；而洗刷釋出則相當快速，在相當短的時間內即完成，對於高溶解度、低吸附性的核種會瞬間大量釋出，造成峰狀釋出現象。美國 Brookhaven National Laboratory 針對低放處置所開發的 BLT-MS (Breach, Leach, and Transport - Multiple Species) 程式或 DUST(Disposal Unit Source Term)可處理上述三種外釋機制即：洗刷釋出、擴散釋出、及溶解釋出。我國低放射性廢棄物最終處置場所欲接收的低放射性廢棄物主要來源如下所示：

- (a) 核一、二、三及四廠運轉壽命期間所產生之運轉廢棄物。
- (b) 上述各核電廠除役所產生的低放射性廢棄物。
- (c) 蘭嶼貯存場與減容中心除役所產生之除污暨除役廢棄物。
- (d) 小產源機構，包括核能研究所、清華大學等各核能設施運轉及除役與全國同位素應用界所產生之低放射性廢棄物。

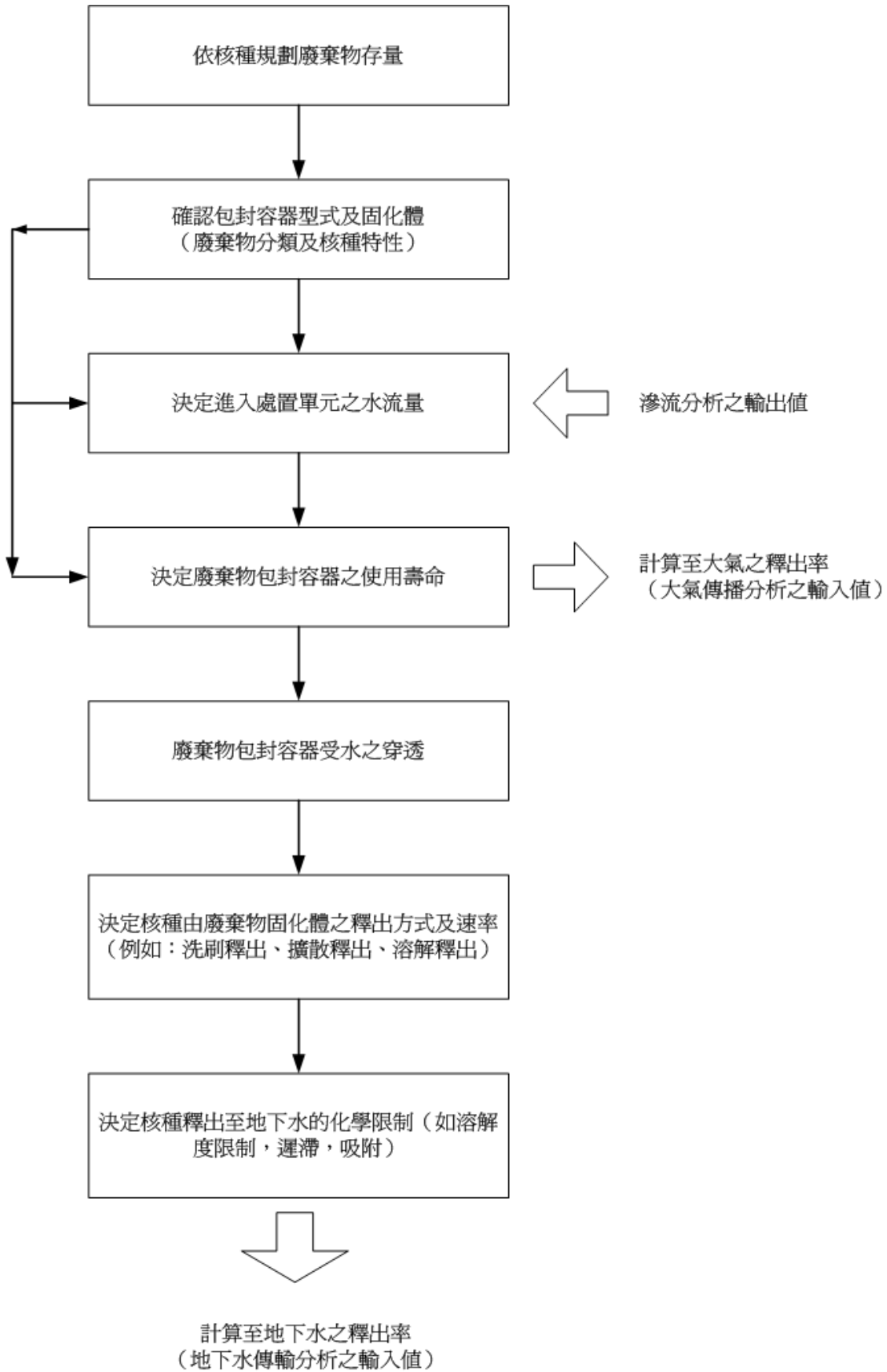


圖 3-9 低放射性廢棄物最終處置之放射源釋出分析建議流程

(4) 傳輸介質(Transport media)

核種傳輸的途徑可以分為：(a)地下水(groundwater)；(b)表面水(surface water)；以及(c)大氣傳播(air transport)。傳輸過程的分析旨在估算水流（或空氣流動）流率，評估特定位置的核種濃度，需考慮水文及地質環境，而大氣傳播則需考慮氣態核種。低放射性廢棄物處置設施核種可能釋出之機制及介質如圖 3-10 所示。大氣傳播部分，可以 GENII 程式分析，一般考慮較簡化的 Gaussian-plume 模型，或將較仔細的大氣資訊列入考慮。而低放射性廢棄物處置設施中，大氣傳輸之可能途徑繪於圖 3-11，而地下水與表面水傳輸途徑之功能評估分析程序如圖 3-12 所示。

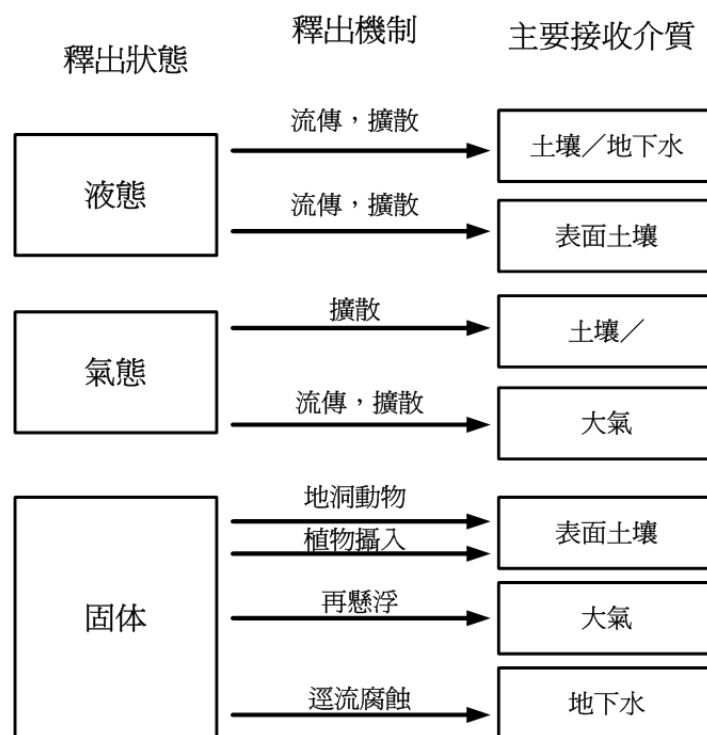


圖 3-10 低放射性廢棄物處置設施核種可能釋出之機制及介質

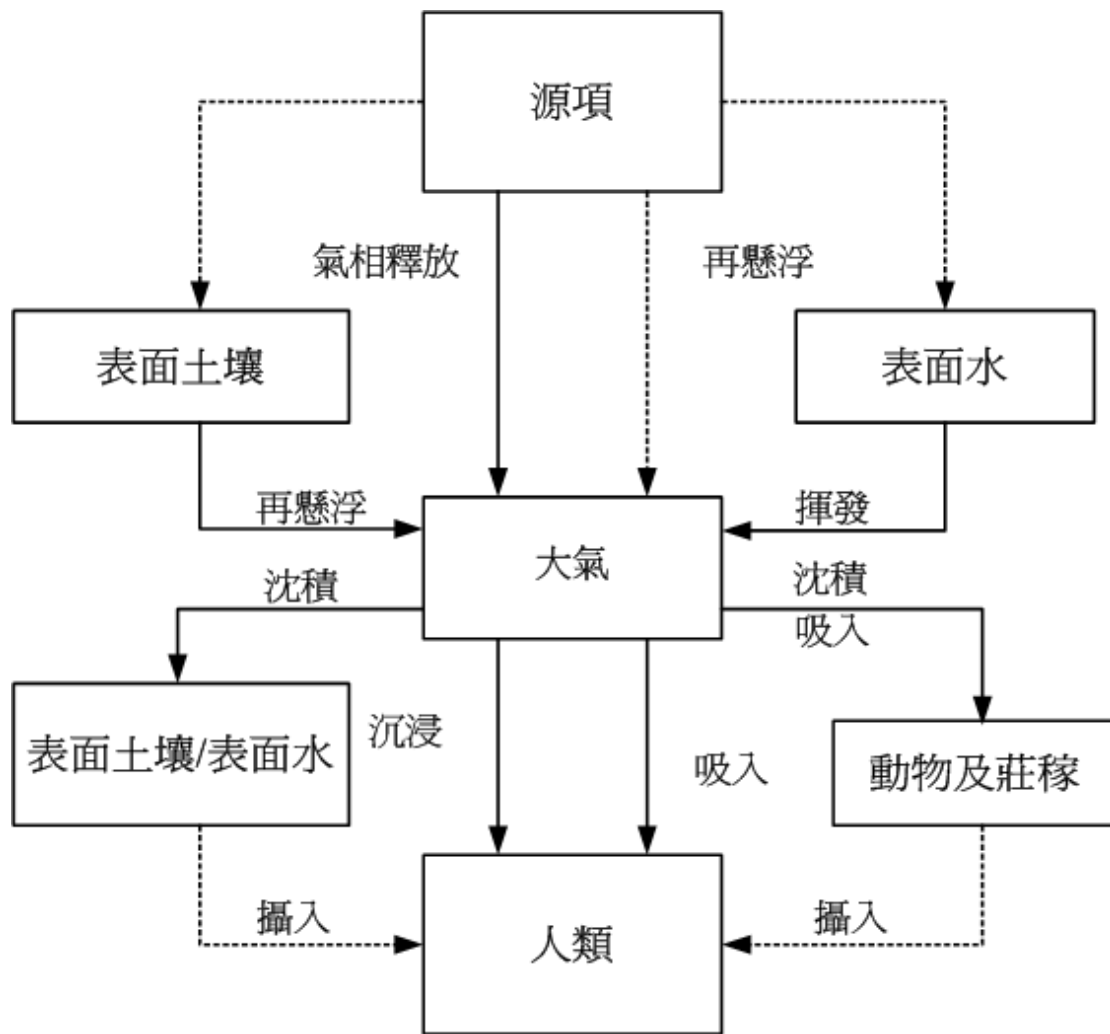


圖 3-11 低放射性廢棄物處置設施核種經由大氣傳輸之可能途徑示意

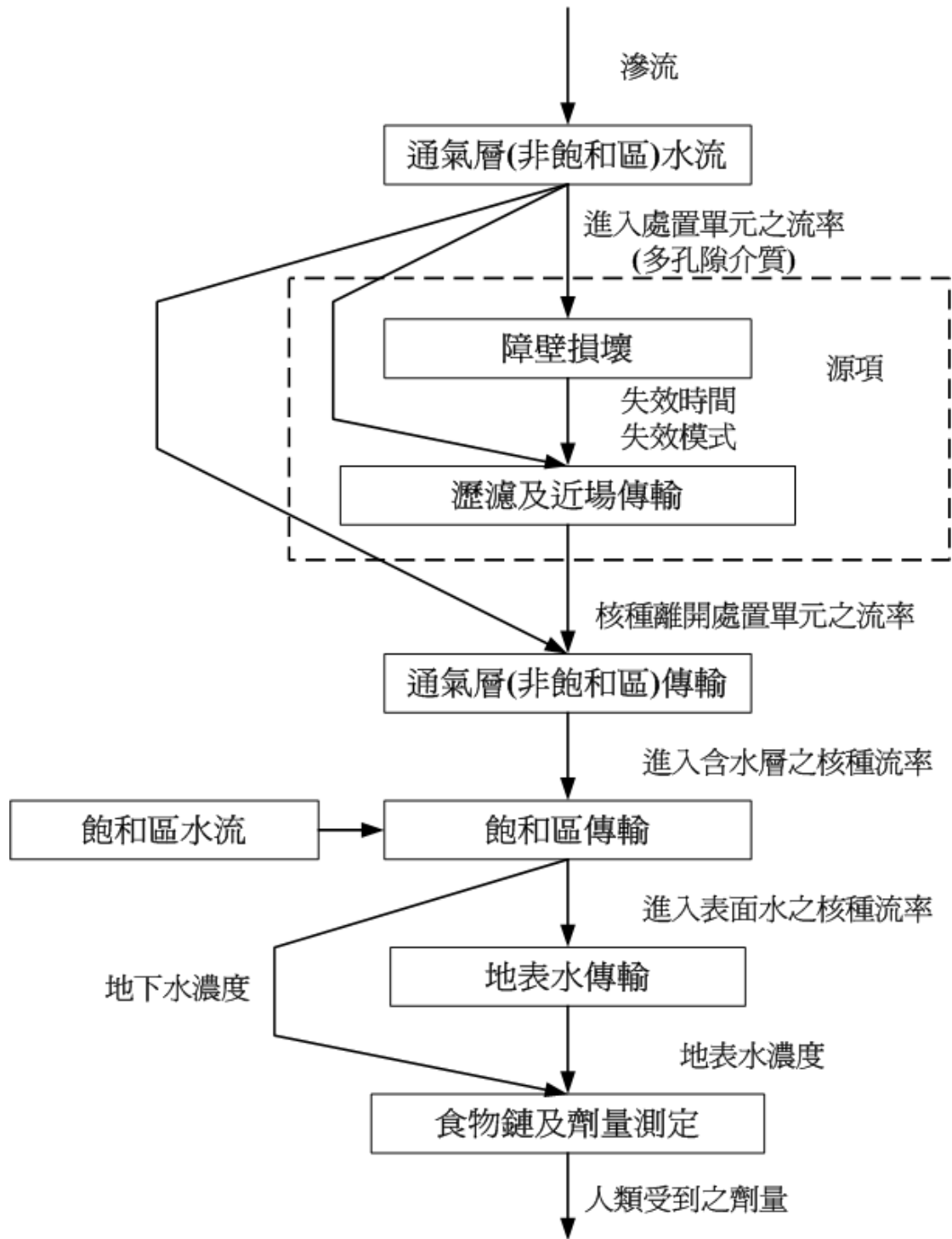


圖 3-12 低放射性廢棄物處置設施地下水與表面水傳輸途徑之功能評估分析程序

在安全評估中，地下水的流動與主要與水力(hydraulic force)大小有關，因此，水頭(hydraulic head)分布直接主導水流速度的大小，也影響核種的傳輸。在多孔性介質中，地下水流速度，以下式計算之：

$$v = \frac{v_d}{\eta\theta}$$

v ：地下水流平均速度(L/T)；

v_d ：達西速度(Darcy's velocity)(L/T)；

$$v_d = K \frac{dh}{dx}$$

K ：滲透係數(hydraulic conductivity)(L/T)；

h ：水頭(L)；

η ：多孔性介質中，孔隙中含水的比例；

θ ：孔隙度。

而核種於傳輸過程中的吸附(sorption)，是指存在於地下水中的核種被固相介質捕獲的過程，包含化學性吸附(chemisorption)及物理性吸附(physisorption)。要精確的描述吸附作用並不容易，因為，其中牽涉太多物理、化學反應。主要的物理性吸附形式包括：凡得瓦力(van der Waals force)、氫離子束縛以及離子耦合(ion dipole)等；化學性吸附則常伴隨著固體表面與核種間的化學鍵形成。一般而言，核種於地下水中對固相介質(母岩)的吸附可簡單地假設為瞬間可逆平衡，並將所有的物理、化學反應以一個簡化的分配係數，(distribution coefficient)來表示，亦即：

$$C_s = Kd \cdot C_q$$

C_s ：吸附於母岩的核種濃度(M/M)；

C_q ：地下水中的核種濃度(M/L³)。

在安全評估中，利用分配係數來描述核種的吸附行為，主要的原因為：(a)一般評估模式大部分無法完整地描述所有的吸附反應；(b)目前技術所能得到的資料，無法有效解釋更複雜吸附模式所得到的結果。利用分配係數的概念來描述核種的吸附行為雖然簡單，但分配係數值是一個不確定性相當大的參數，即使反覆進行實驗，所得到的分配係數值不準度仍然相當大。在安全評估中，保守的使用較小的分配係數值，為世界上進行處置場安全評估國家普遍認同的概念。此外，由於核種濃度梯度會造成分子擴散，分子擴散通量可用飛克第一定律(Fick's first law)來描述如下：

$$J_m = -D_m \nabla C$$

J_m ：分子擴散通量(M/T/L²)；

D_m ：分子擴散係數(L²/T)；

C ：核種濃度(M/L³)

當使用飛克定律來描述核種的擴散行為時，如何定義分子擴散係數成為首要的工作。當核種與介質不發生吸附反應時，分子擴散係數的定義為有效分子擴散係數(effective molecular diffusion)，考慮的因

子為介質的孔隙度(porosity)及孔隙曲折度(tortuosity)。若核種的吸附反應被考慮時，定義的分子擴散係數則稱為顯性(apparent)分子擴散係數。在地質、水文條件不明的介質中，分子擴散係數大多採用自由水(free water)中量得之數值。使用自由水中量得之分子擴散係數數值是一個保守的假設，因為有效分子擴散係數通常小於自由水中之分子擴散係數。

上述的核種傳輸機制，流傳、吸附以及分子擴散，此外尚有核種本身的衰變現象，為建立核種傳輸模式時非常重要的基本因子，需於功能評估時，考慮於分析程式中。

(5) 劑量(Dose)

低放射性廢棄物最終處置所釋出對人類造成輻射劑量可能的途徑如圖 3-13 所示，包含直接與間接的暴露。生物圈劑量與其傳輸途徑及情節有密切關係，國際知名模式包括：GENII 以及 AMBER，傳輸途徑情節以及劑量計算。

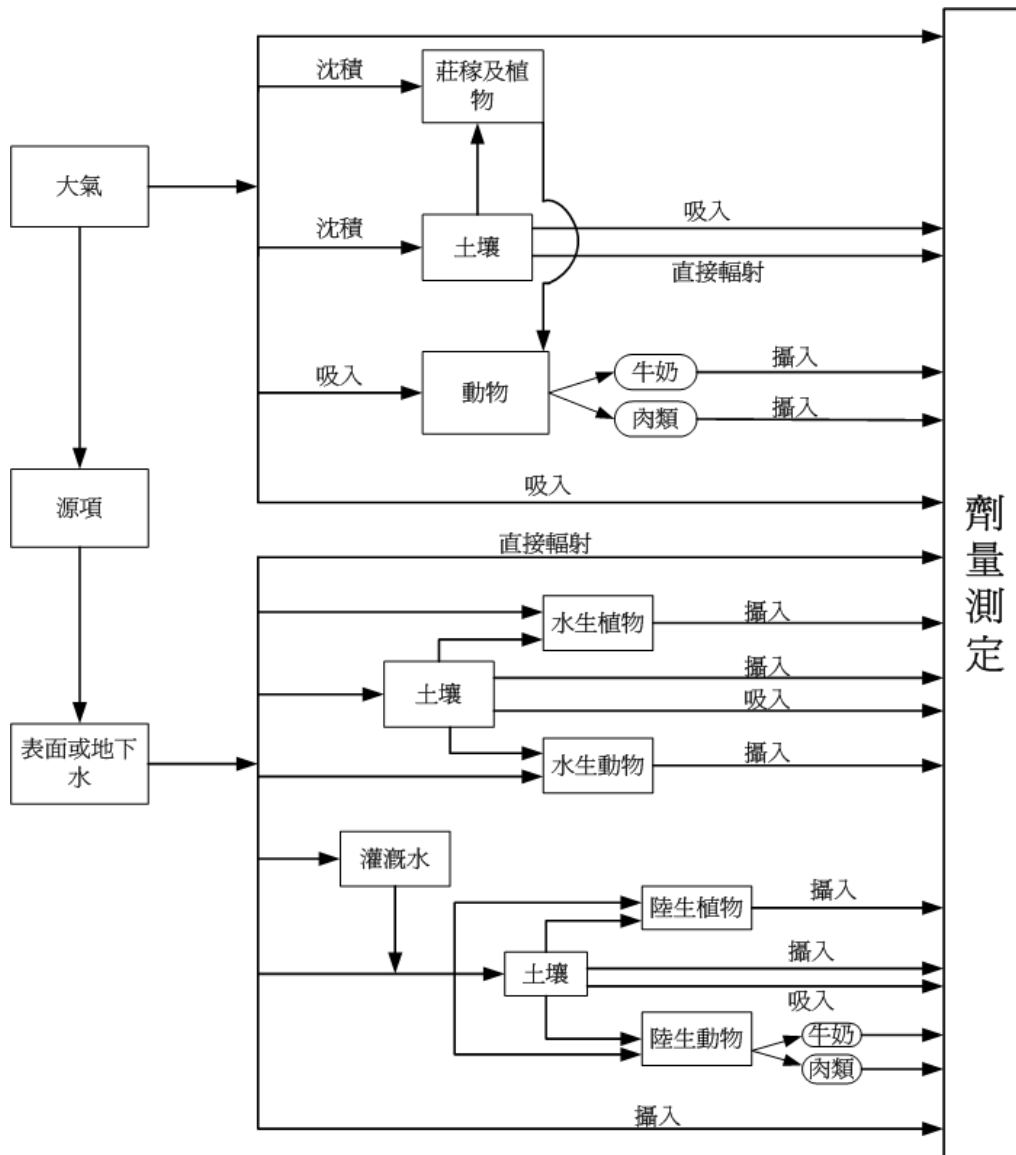


圖 3-13 低放射性廢棄物最終處置設施之可能劑量示意圖

(6) 不確定性及靈敏度分析(Uncertainty and sensitivity analysis)

安全評估不確定性的來源包含：將真實系統簡化為可用數學形式描述過程中所造成的不確定性，即所謂模型之不確定性(model uncertainty)，以及，模型中使用之資料、參數及係數之不確定性，稱為參數不確定性(parameter uncertainty)。關於參數不確定性分析，依據美國雅卡山計畫，可採用以情節為主的功能評估(scenario-based

performance assessment) 或以模擬為主的性能評估(simulation-based performance assessment)。建議的分析方式有二：(a)定率式分析：此種模式的輸入參數值都是單一的，在輸入參數為固定且對該參數之數值具信心時，或者研究人員想要針對某一個現象或機制作深入探討時，此種模式常被使用，定率式分析流程如圖 3-14。(b)機率式分析(Stochastic analysis)；以現地資料為參數範圍及分布主要依據，但若現地資料不足，可以根據學理(Theories)或專家判斷(Expert judgments)決定參數的範圍及分佈，之後以隨機取樣方式，例如；蒙地卡羅取樣(Monte Carlo)或拉丁超立體取樣(Latin Hypercube)，針對每個參數隨機取值，執行多重計算，每一次計算的參數值組合皆不相同，此類模式稱為機率式分析，機率式分析流程如圖 3-15。情節為主的性能評估多以定率式分析方式，評估特定事件(如地震、火山活動等)對“安全”之影響，通常目的為將該特定事件之影響量化。一般進行步驟為，首先必須收集相關資料並經由專家評估事件發生之機率或頻率(Probability/Frequency)，若有多個事件同時發生，則以樹狀圖分析各事件發生之機率或頻率與其產生之後果(Consequence)之組合。而以模擬為主的性能評估多採用如圖 3-15 所示之機率式分析，兩者作法並不容易評價其優劣，需視現有資料，包括情節、概念模式及擁有的參數數量而定。

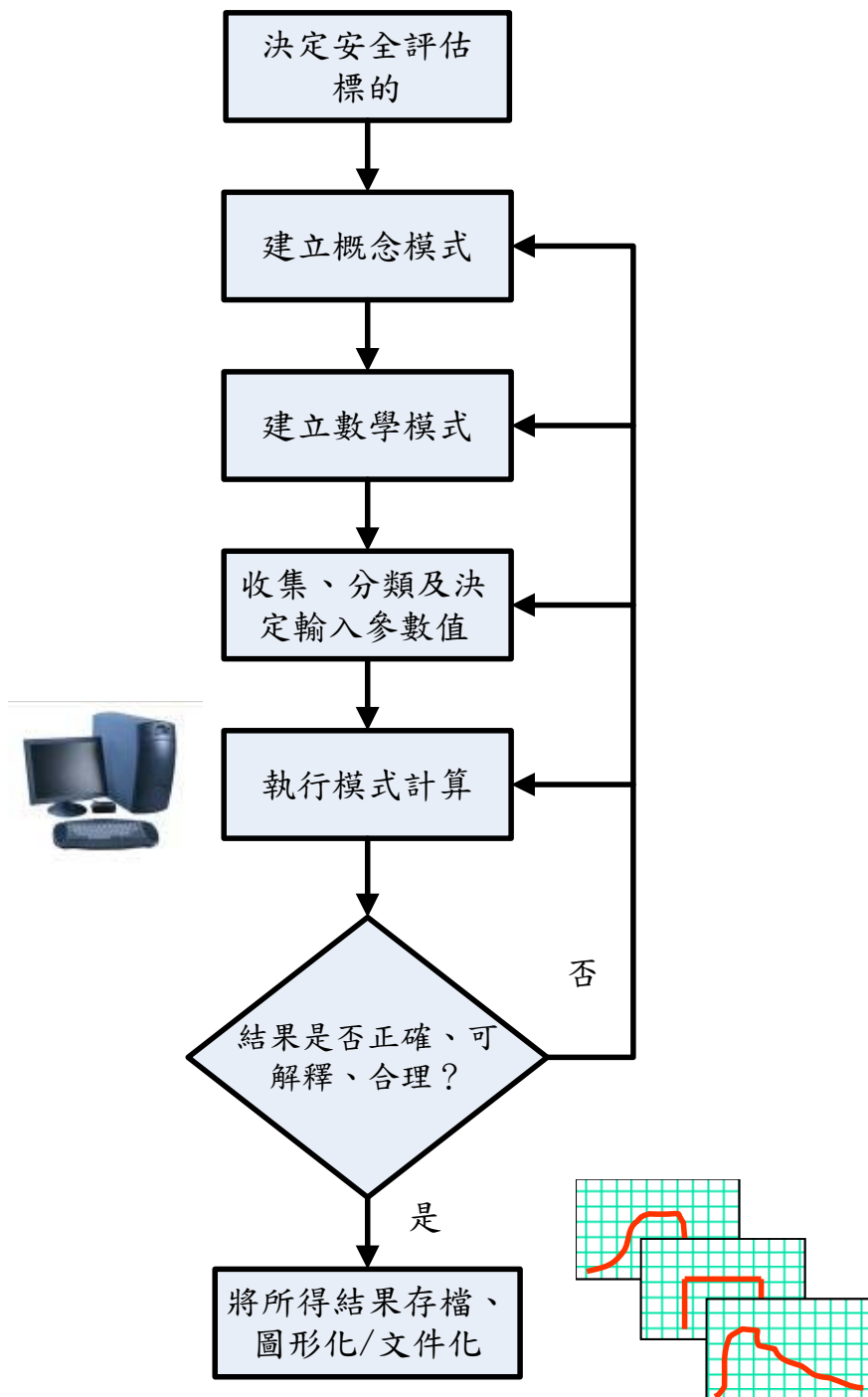


圖 3-14 定率式分析流程

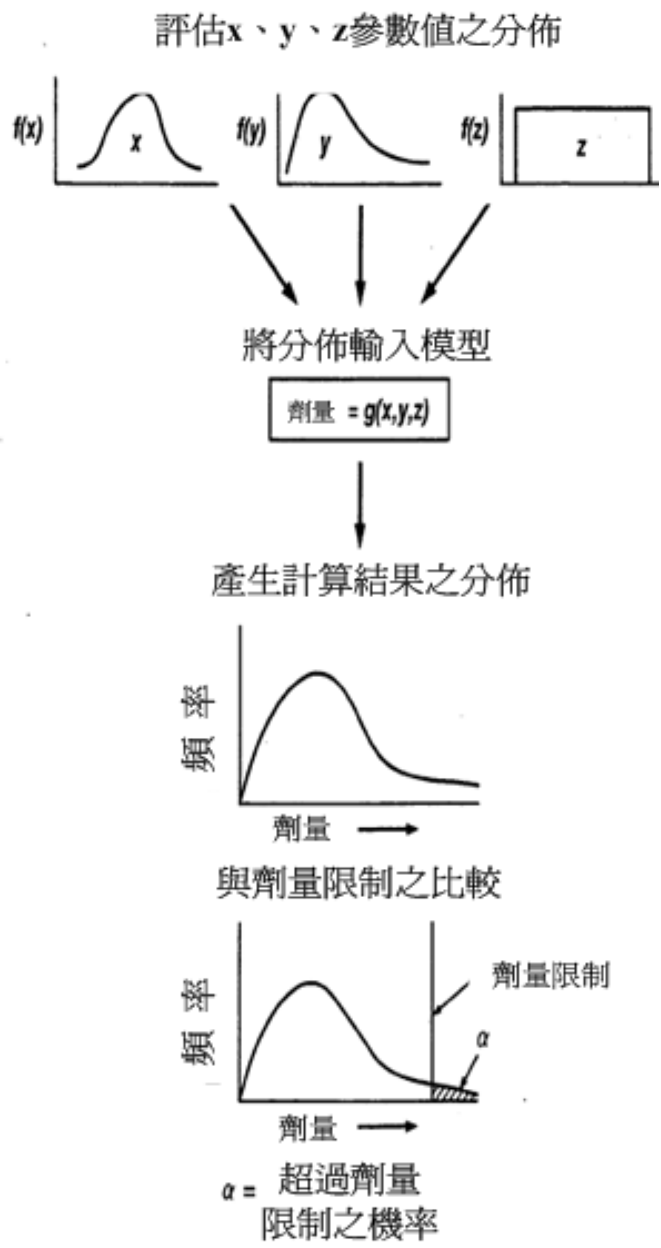


圖 3-15 機率式分析流程

不確定分析與靈敏度分析的動機不同，靈敏度分析之目的在於確定在功能評估中，何種參數的影響較大。

(7) 模式驗證(verification)與確認(validation)

若處置方式選擇近地表方式時，需計算處置場上方蓋層(Cap)的

滲流量(infiltration)，可使用的軟體例如：HELP。滲流量需跟水流模式結合(FEHM, TOUGH2)，以決定整個處置系統的流場。此外，BLT-MS 或 DUST 是一個專門處理低放射性廢棄物最終處置設施功能評估的軟體，其模式著重在近場工程障壁的分析，但傳輸可延伸到遠場，但流場需結合其他水流模式。生物圈劑量與其傳輸途徑及情節有密切關係，國際知名模式包括：GENII 以及 AMBER，傳輸途徑情節以及劑量計算。上述數值程式(HELP, BLT, DUST, FEHM, TOUGH2, GENII, AMBER)目前雖尚未確定為 NRC 明訂採用之程式(即所謂 licensed code)，然 IAEA 及 NRC 文獻中 (IAEA, 2004: NUREG/CR-5453; NUREG-1573; NUREG-1200)對以上數值程式皆已進行討論及提出使用之建議，我國實施低放射性廢棄物處置工作時，建議可由以上程式開始著手。建議流程如圖 3-16 所示。

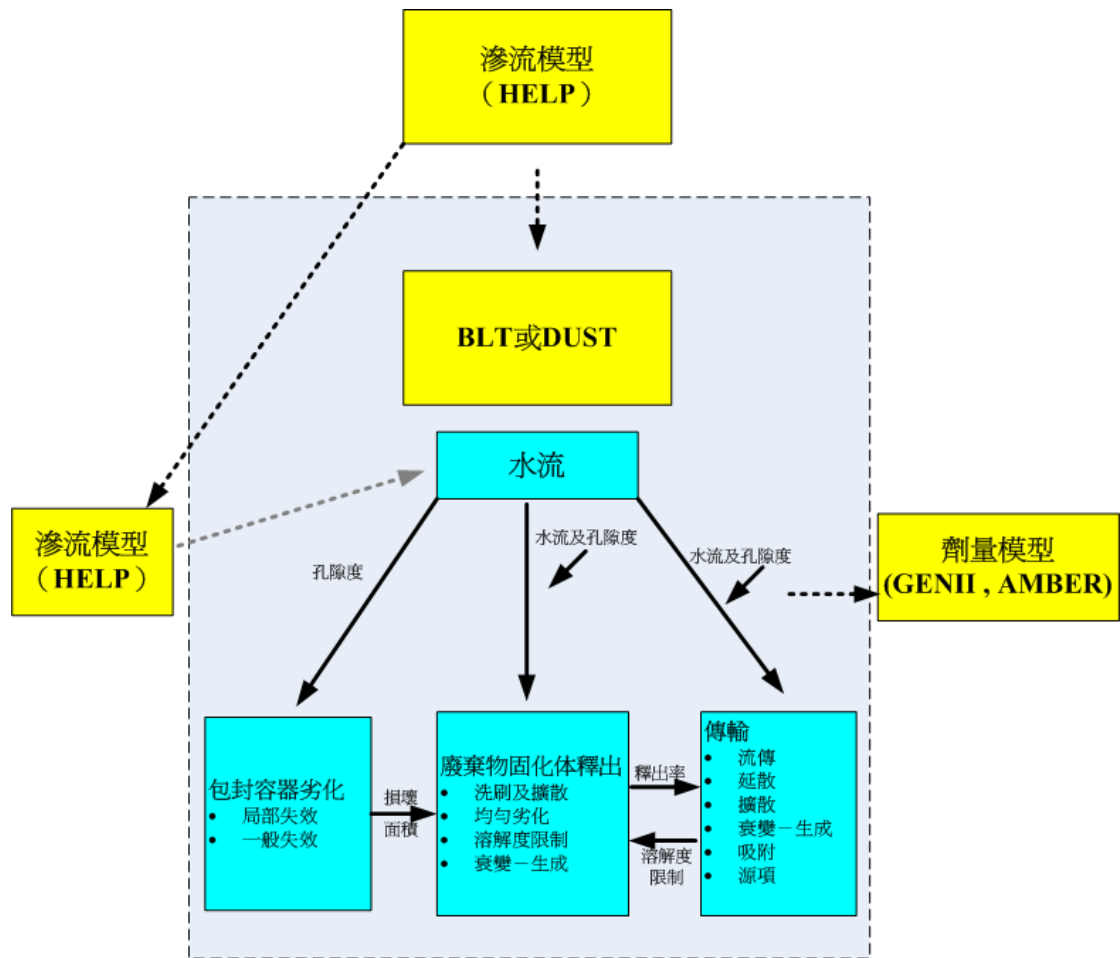


圖 3-16 低放射性廢棄物最終處置設施分析示意圖

低放處置功能評估之數值程式選定後，計算工具的驗證與確認便必須開始進行。所謂的驗證(verification)，在處置功能評估作業中，意指對與環境安全評估有關的放射性核種，以地下遷移等之電腦程式證明其正確性。驗證的方式，一般而言，以解析解為首選，可藉由經過簡化的問題，就理想邊界條件求概念模式之解析解相比較，其次為與其他驗證過的程式進行標準程式(benchmark)驗證。程式的確認(validation)，則是指確定程式或模型能確實反應真實情況的程序。而確認方式，可採用對其他處置場址之功能評估進行求解，並與該場址

之數據進行比對，亦即針對同一場址重複運算比較；此外，國際性的相互比較與審查可做為程式確認，以建立安全評估的信心。

(8) 品質保證(quality assurance, QA)與品質管制(quality control, QC)

目前國際間對於功能安全評估與設施之設計、建造與運作所適用的品質管理(即 QA/QC)並無明確之分野，仍以國際標準化組織(International Standards Organization, ISO)發布之 ISO 9000 系列之標準進行品質保證及管制(IAEA, 2004)。國際標準化組織對 9000 族系列標準進行「有限修改」後，於 1994 年正式頒佈實施 ISO9000 族系列標準，即 94 版。在廣泛徵求意見後，再進行了修訂策略的第二階段，即所謂「徹底修改」。1999 年 11 月提出了 2000 版 ISO9000、ISO9001 和 ISO9004 國際標準草案。此草案經充分討論並修改後，於 2000 年 12 月 15 日正式發佈實施。ISO 規定自正式發佈之日起三年內，94 版標準和 2000 版標準將同步執行，同時鼓勵需要認證的企業，從現在開始可按 2000 版申請認證。IAEA 則進一步建議可依據 ISO9001:2000 之品質管理八大原則納入考量所建立之標準落實推展，八大原則如下：

原則一、顧客為重 (Customer Focus)

原則二、領導統御 (Leadership)

原則三、全員參與 (Involvement of People)

原則四、流程方法 (Process Approach)

原則五、系統流程方法之管理 (System Approach to Management)

原則六、持續改進 (Continual Improvement)

原則七、決策根據事實 (Factual Approach to Decision Making)

原則八、與供應商互利關係 (Mutually Beneficial Supplier Relationships)

上述 ISO 之品質管理原則，係指一般公司之準則，處置工作的進行需兼顧安全面與經濟面，因此在規範上所涉及層面更廣。其中，原則一：顧客為重，就處置工作而言，工作進行為保護全民之安全，因此，功能安全評估需確保國人安全及福祉。原則二：領導統御，對於處置工作的執行，執行單位必須有效地分工及統整，以貫徹全面的規劃。原則八：與供應商互利關係，具體而言，在考慮技術現狀、改善公共衛生及安全之經濟效益以及社會與社會經濟因素之下，盡一切合理之努力，以維持輻射曝露在實際上遠低於法規之劑量限度，即所謂合理抑低之概念。功能安全評估工作，在進行品質管理後，需確保：

- (1) 所有輸入參數需確實檢查並列入文件紀錄；
- (2) 情節選擇與發展需列入文件紀錄；
- (3) 適當地選擇計算工具（方法、準則或決策）及傳輸途徑；
- (4) 選擇特殊計算程式之理由需列入文件紀錄；

- (5) 所有輸入參數及來源需列入文件紀錄；
- (6) 用來驗證計算程式之測試案例需進行解析；
- (7) 所有功能安全評估之結果必須可與輸入參數資料對應。

肆、總結與建議

本研究根據物管局之委託進行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，研究對象主要為美國 NRC 相關之報告與技術研究，其中 NUREG-1200 與 NUREG-1573 所列之建議與執行方式最符合我國目前之需求。有鑑於此，本計畫針對此兩份報告文件進行深入之分析與研究，提出對物管局對於處置執行單位所提交之功能安全評估審查導則建議如下，首先針對安全評估的技術方面，本計畫之執行獲得一些結論，整理如下：

- (1) 根據國際趨勢，因處置場所涵蓋之空間域與時間域廣泛，並不適合以單一程式進行預算以避免程式不易偵錯，因此處置場擬規劃為近場、遠場以及生物圈各子系統評估之，各子系統特性不同，因此所利用的程式也不相同。
- (2) 低放射性廢棄物處置設施之子系統分析，可分為近場、遠場及生物圈。近場部分包含處置設施上蓋之滲流、源項、廢棄物包封容器與工程障壁；遠場包含地質圈與地下水系統；生物圈包含核種進入人類生活圈內，例如飲用水、透過動植物被人類攝取之劑量。
- (3) 在圖 3-5 中，NRC 已建議一般功能安全評估的實施方式與步驟，這些步驟主要針對全系統安全評估而言，但細觀其項目以及步驟不難發現，其方法論同樣適用與各子系統的評估，例如：以近場

而言，我們需要滲流、工程障壁及源項的資訊，之後形成概念模式以及數學模式，並以數值程式計算之，NRC 採用的數值程式為 HELP (用於滲流)，BLT 或 DUST (用於工程障壁及源項)。同理，在獲得遠場地質水文資訊後，經由適當的概念模式與數值程式 (如：FEHM 或 TOUGH2) 進行功能評估。而生物圈部分，需先定義輻射劑量曝露途徑，再以數值程式 (如：AMBER) 求解，並以 ICRP 建議之劑量轉換因子 (Dose conversion factors)，轉換成曝露劑量。物管局可依處置執行單位所提交之資料，評估計算結果是否恰當，如不恰當，則可要求執行單位更改概念、程式或設計。如此逐步為之，可確保場址之最適化。

(4) 呼應上述，在利用程式進行計算時，需注意程式之可用性以及正確性的驗證(Validation and Verification)，所謂可用性指的是程式是否符合評估的目的與要求，例如以 FEHM 以及 TOUGH2 而言，分別被應用在美國雅卡山計畫，以評估飽和以及非飽和層的水流，其用在低放處置場的水流評估上可用性高，且具公信力，而在正確性驗證上，一般盡可能與解析解作比對，但若無法求得解析解，則需與其他經驗正過之程式作為基準檢查程式(Benchmark)進行平行計算，以確保計算結果正確。

(5) 各子系統因組成複雜，因此，在使用各子系統的模式時，需先研

析適合之輸入參數，以免發生過於保守或低估的現象，參數的決定，主要可依靠現地調查、文獻收集以及專家群判斷等，其中，專家群判斷應列為工作進行時之重要項目。

(6) 既使經過在詳細的調查，所獲得的參數也只能增加信心，但卻無法消弭不確定性的存在，在安全評估的技巧上，可以用統計的方式對於系統進行靈敏度及不確定性分析，靈敏度分析可在眾多參數中決定主要影響性參數有哪些，不確定分析則將這些參數以統計方法決定數值分佈，之後以蒙地卡羅或拉丁超立體取樣，所得之分析結果為一分佈值，即可瞭解超過法定規範之機率值，概念如圖 3-15 所示，便可決定系統施可能的風險（Risk）或劑量（Dose）。

透過各國文獻資料之研析，本計畫建議，處置執行單位需提交予物管局審查之功能安全評估資料，其所需執行工作及步驟如前節說明，且相關資料至少需包含：

- (1) 處置場址之現地調查及實驗資料，如地質、水文、岩石及土壤之物化特性，地下水文、核種於岩層傳輸特性，氣候、地震、生態及植被以及場址周邊之天然資源、人口分佈、土地使用情形與文化環境等相關資訊。
- (2) 低放射性廢棄物最終處置方式說明，及處置設施全系統與各

子系統分析模式。

- (3) 處置設施之工程設計、建造、材料與使用壽命等相關資料。
- (4) 廢棄物接收作業說明，及其種類、固化方式、放置設計，處置單位設計、防止意外闖入設計等資料。
- (5) 低放射性廢棄物最終處置安全評估之 FEPs 與情境考量。
- (6) 核種傳輸途徑、人類可能曝露途徑之概念模式與理論數學模型建立。
- (7) 數值程式選擇理由與說明，以及程式之驗證與確認。
- (8) 低放射性廢棄物最終處置各子系統及全系統之功能安全評估結果。
- (9) 處置設施功能安全評估相關參數之靈敏度與不確定性分析報告。
- (10) 處置設施功能安全評估過程中，所有設計參數與輸入數值程式之參數，以及所得之輸出，相關數據資料皆須提交。
- (11) 低放射性廢棄物處置功能安全評估之品質管理(QA/QC)報告。

而就技術審查部分，本研究並建議物管局，在接受處置單位提供之審查資料後，可自行或委託學者專家透過保守假設下之解析解，抑或數值程式（可採用與執行單位使用之相同或不同數值程式）進行功能評估，並與執行單位提交之資料比較。目前國際間之標準，除採用

年劑量限制之外，亦可採用風險值限制加以規範(OECD, 2007)，如此，可雙管齊下，有助於功能安全評估之完整性。

而在一般審查概念方面，本研究之執行則獲致以下結論，並條列建議如下：

- (1) 根據美國 NRC 之概念，物管局在我國具有與 NRC 類似之位階與責任，有必要根據現行法規針對處置工作執行單位之工作程序與技術標準進行審查。
- (2) 在程序方面可要求執行單位根據法規需求，落實圖 3-5 所述之各項步驟進行處置工作。
- (3) 在技術標準方面，物管局可建立獨立審查評估模式作為審查標準，要求執行單位提供相關數據與設計，結果與執行單位建立之模式相互比較，以瞭解雙方之異同，並評估是否符合法規之需求。
- (4) 應針對不同處置方式與設計，由法規面對處置執行單位要求提出背景報告，並由物管局審核報告之可行性及合法性。
- (5) 物管局應針對處置工作之進行方式與程序對處置執行單位進行要求以利處置工作之進行。
- (6) 處置工作牽涉之學門廣泛且變因眾多且複雜，物管局身為我國處置管制機關，應廣邀各界學者專家組成諮詢或審查團隊。

由於各國國情不同，因此針對處置工作進行之策略與方法，亦

不盡相同，美國為世界核能先進國家之前瞻，在進行低放射性廢棄物處置上具有實務經驗，國內低放射性廢棄物處置場的選址與興建，已正式進入實務的執行階段。根據放射性物料管理法的精神，放射性廢棄物的產生機關或單位對於放射性廢棄物需負完全的管理責任，物管局在處置工作中，扮演監督與審查之角色，除參考國外之經驗，也應針對我國之民情與水文地質特性，積極進行相關研究以利後續審查工作之進行。

參考文獻

- [1] 劉東山、蔡昭明，1993，放射性廢料管理，曉園出版社，台北。
- [2] GoldSim Technology Group, Contaminant Transport Module, 2008.
- [3] IAEA, 1984a, Safety Analysis Methodologies for Radioactive Waste Repository in Shallow Ground, Safety Series No. 64, Vienna.
- [4] IAEA, 1984b, Design, Construction, Operation, Shutdown and Surveillance of Repositories for Solid Wastes in Shallow Ground, Safety Series No. 63, Vienna.
- [5] IAEA, 2000, Model Formulation, Implementation and Data for Safety Assessment of Near Surface Disposal Facilities, ISAM/MDWG/WD01.
- [6] IAEA, 2004, Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities, Volume 1, ISBN 92-0-104004-0.
- [7] Sandia National Laboratories (SNL), 1989, Background Information for the Development of Low Level Radioactive Performance Assessment Methodology, SAND89-2509.
- [8] Sandia National Laboratories (SNL), 1995, Evaluation of a Performance Assessment Methodology for Low Level Radioactive Waste Disposal Facilities, SAND91-2802.
- [9] SKB, 2001, Project SAFE, Radionuclide Release and Dose from the SFR Repository, SKB Rapport R-01-18.
- [10] US NRC, 2000, A Performance Assessment Methodology for Low-Level Radioactive Waste Disposal Facilities: Recommendations of NRC's Assessment Working Group, NUREG-1537.
- [11] Brookhaven National Laboratory, 1996, BLT-MS (Breach, Leach

and Transport-Multiple Species) Data Input Guide: A Computer Model for Simulating Release of Contaminant from Subsurface Low-Level Waste Disposal Facility, NUREG-CR-6492.

- [12] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), 2007, Regulating the Long-term Safety of Geological Disposal- Towards a Common Understanding of the Main Objectives and Bases of Safety Criteria.

附錄

行政院原子能委員會放射性物料管理局

「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」

審查意見表

編號	1	章節	貳	頁碼	8	行數	
審查意見							
在「研究方法與過程」內，雖敘述「國內外低放射性廢棄物最終處置安全評估之情節」，也有參考 IAEA，NRC，瑞典以及日本等國家，是否可舉例說明此些國家中對 PA 之相關審查技術。							
已補充說明，於修正版第 17、18 頁。							

編號	2	章節	貳	頁碼	9	行數	1
審查意見							
報告內容請補述 IAEA 針對低放射性廢棄物最終處置安全評估之 FEPs 所應考量的內容與範圍建議，方能構成安全評估的情節？							
已補充說明，於修正版第 9、10 頁。							

編號	3	章節	貳	頁碼	11	行數	1
審查意見							
在計算工具(computer code)的確認與驗證(validation and verification)要求上，請提供兩者之差異處與作業規定，以為本局訂定技術導則之參考。							
已補充說明，於修正版第 46、47 頁。							

編號	4	章節	參	頁碼	19	行數	
審查意見							
建議在「低放射性廢棄物最終處置功能安全評估初步導則」最後再將此一節內需要初步評估之各要項以精簡條列列出，以便在評估時或審查時，能提升作業效率。							
已補充說明，於修正版第 52、53 頁。							

編號	5	章節	參	頁碼	25	行數	
審查意見							
Nureg-1200 或 Nureg-1573 有無提及執行 PA 之 QC/QA 程序要求或建議？另外，如未來擬規劃進行獨立審查或平行驗證之相關作業，請提供建議作法？							
QC/QA 程序建議已補充說明，於修正版第 47、48、49 頁。 驗證相關作業已補充說明，於修正版第 53 頁。							

編號	6	章節	參	頁碼	38	行數	
審查意見							
報告內容請補述機率式分析法 Scenario PA 及 Simulation PA 之方法與適用性？							
已補充說明，於修正版第 41、42 頁。							

編號	7	章節	肆	頁碼	44	行數	
審查意見							
<ol style="list-style-type: none"> HELP, BLT, DUST 是否明確為 NRC 同意可採用之數值程式(licensed code)? 請提供相關參考文件? 報告內容提及「物管局可訂定各種標準」其意指何類標準? 除年劑量限度 0.25mSv/yr 外, 國際間有否訂定其他設計基準? 標準值為何? 							
<ol style="list-style-type: none"> 目前尚未確定為NRC明訂採用之程式(即所謂licensed code), 相關說明於修正版第45頁。 國際間其他設計基準, 已補充說明, 於修正版第54頁 							

編號	8	章節		頁碼		行數	
審查意見							
<ol style="list-style-type: none"> p.19 倒數第三行中「放射性廢棄物料管理局」請更正為「放射性物料管理局」。 p.22 第一行之「當為方程確立後」請更正為「當微分方程式確立後」; 第二行之「邊界條見」請更正為「邊界條件」。 p.25 倒數第二行與 p.26 圖 3-4 中之「水力循環」建議改為「水文循環」。 p.27 倒數第二行「材料隨時間衰降」建議改為「材料隨時間劣化」。 p.29 第五行「處置單位」建議改為「處置單元」。 p.35 倒數第五行中之「清離子」請更正為「氫離子」。 本篇報告所有流程圖均具審查作業參考價值, 建議應盡量翻成中文, 俾利一般民眾瀏覽。 							
已依建議修正。							