

110 年度核電廠除役期間廠址地下水 防護管制特性研析

期末報告(定稿版)

受託單位：國立中央大學

計畫執行期間：110 年 1 月 29 日至 110 年 12 月 30 日

110 年度核電廠除役期間廠址地下水
防護管制特性研析

期末報告(定稿版)

受託單位：國立中央大學

計畫執行期間：110 年 1 月 29 日至 110 年 12 月 30 日

中華民國 110 年 12 月

行政院原子能委員會
110 年度核電廠除役期間廠址地下水防護管制特性研析
期末報告(定稿版)

目 錄

第一章	計畫目的與工作.....	1-1
1.1	計畫緣起與目的.....	1-1
1.2	計畫工作內容.....	1-2
1.3	報告章節說明.....	1-3
第二章	研究理論與文獻資料蒐集整理.....	2-1
2.1	地下水傳輸基本理論.....	2-1
2.2	核種衰變鏈傳輸.....	2-10
2.3	解析解與數值解模式.....	2-11
2.4	場址概念模型與水文地質調查.....	2-13
2.5	文獻資料蒐集整理.....	2-20
第三章	評估我國核電廠於除役期間地下水文特性之重要參數.....	3-1
3.1	RESRAD 發展演進過程與概念化.....	3-1
3.2	RESRAD 除役期間地下水重要參數.....	3-2
第四章	檢視目前國內進入除役期間之核一廠地下水傳輸模式與防護監測方 案之內容.....	4-1
4.1	核一廠地下水傳輸模式簡介.....	4-1

4.2	核一廠地下水傳輸模式評析	4-6
4.3	核一廠防護監測方案簡介	4-7
4.4	核一廠防護監測方案評析	4-9
4.5	研擬除役廠址地下水防護管制建議	4-13
第五章 結論與建議		5-1
參考文獻		參-1
附錄		
附錄一 EPRI「Groundwater Protection Guidelines for Nuclear Power Plants」中 文翻譯精簡版		
附錄二 詞彙表		
附錄三 地下水流方程式詳細推導		
附錄四 地下水流污染傳輸方程式詳細推導		
附錄五 歷次工作會議審查意見回覆		

圖目錄

圖 2.1-1 地下水在含水層孔隙間穿梭流動示意圖	2-2
圖 2.1-2 放射性核種從「放射性核種來源區」經由「環境介質」、「曝露途徑」最後到達受體的過程.....	2-13
圖 3.2-1 廠外曝露情境的各個曝露位置	3-3
圖 3.2-2 廠內曝露情境的各個曝露位置	3-3
圖 3.2-3 環境途徑與曝露位置	3-4
圖 3.2-4 RESRAD 概念化主要污染與蓋層區.....	3-5
圖 3.2-5 主要污染區相對於地下水位面的三種可能位置	3-5
圖 3.2-6 主要污染區之三種外釋：(1)地下水外釋；(2)大氣外釋；(3)地表逕流外釋	3-6
圖 3.2-7 RESRAD-OFFSITE 地下水傳輸概念	3-7
圖 3.2-8 RESRAD-OFFSITE 地下水傳輸重要參數	3-11
圖 4.1-1 水平線源示意圖	4-2
圖 4.1-2 核一廠地下水傳輸模型	4-5
圖 4.1-3 假設的分析源點污染濃度曲線.....	4-5

計畫摘要

核一廠運轉期間已發展廠區地下水宿命傳輸模式，並建立地下水防護計畫以監測地下水相關特性參數。除役期間可能因為危害物質進入地下水系統而改變地下水特性，導致除役計畫時程延遲與需投入資金成本提高。本計畫目的為依據美國核能電廠除役期間地下水防護相關指引文件，評析指引文件中所採行之實務作法，藉以檢視目前國內除役電廠地下水宿命傳輸模式以及防護監測方案，並研擬除役廠址地下水防護管制建議。計畫將完成二個重要工作項目，工項一為評估我國核電廠於除役期間地下水文特性的重要參數，工項二為檢視目前國內進入除役期間的核一廠地下水傳輸模式與防護監測方案之內容，並提出管制建議。本計畫的研究成果可協助原子能委員會掌握核電廠於除役期間地下水文特性重要參數，並提供地下水宿命傳輸模式與防護監測方案精進的建議。

Abstract

During the operation of the Chinshan Nuclear Power Plant (CNPP), a CNPP site-specific groundwater fate and transport model have been developed. Moreover, a groundwater protection program have been established to monitor groundwater characteristic parameters. During the decommissioning of the CNPP, the groundwater characteristics may be changed in response to the inadvertent release of hazardous material into the subsurface system, which will delay the schedule of decommissioning and raise the cost. This project targets to evaluate the current groundwater fate transport model and groundwater protection program based on the study and the practices of groundwater protection guideline documents for decommissioning nuclear power plants in the US.

Two major tasks are completed in the project. Task 1 identifies the important groundwater hydrological parameters during decommissioning process. Task 2 evaluates the currently developed groundwater fate and transport model as well as esatblishes groundwater protection program, thus a regulatory strategy is created. The results of this project can help Atomic Energy Commission understand the important groundwater hydrological parameters and provide suggestions for improving the groundwater fate and transport model as well as groundwater protection program.

第一章 計畫目的與工作

1.1 計畫緣起與目的

在天然能源缺乏的台灣，核能電廠的興建為台灣工商發展與人民生活便利提供穩定電源供應。然而，就如同許多興建核能電廠國家，台灣也面臨核能電廠運轉執照屆期後即進入除役(decommissioning)階段的後續議題。為保護地下水環境安全與民眾健康，台灣電力公司(以下簡稱台電)已依據行政院原子能委員會(以下簡稱原能會)的要求建立地下水防護方案。鑒於美國核能電廠運轉期間曾因設備劣化造成的洩漏而導致氙核種污染廠區地下水，且美國各核能電廠自願參照美國電力研究所(Electrical Power Research Institute, EPRI)的核能電廠地下水防護指引「Groundwater Protection Guidelines for Nuclear Power Plants」與美國核能協會(Nuclear Energy Institute, NEI)的核能界地下水防護倡議「Industry Ground Water Protection Initiative」建立地下水防護方案，原能會於民國 97 年要求台電公司參照上述地下水防護的指引與方案文件建立各核能電廠的地下水防護方案。台電公司除建立核一廠地下水防護方案(核能一廠，2010)，也建立核能電廠廠區地下水傳輸基準版概念模式，希望核電廠若發生洩漏情境需評估外洩核種風險或進行較高密度的地下監測時，可精進地下水宿命傳輸數值模式(Numerical Modeling of Fate and Transport in Groundwater)作為地下水污染遷移預測工具。

雖然過去核一廠運轉期間，台電公司已建立地下水防護計畫以監測地下水相關特性參數，掌握廠址若發生放射性核種洩漏情境，進入地下水系統狀況下，可藉由核電廠的地下水監測系統加以確認，並建立防範地下水污染擴大情形的應變處理機制。除役拆除過程可能產生不同類型的危害物質，這些危害物質可能到達地下水系統而造成地下水特

性的改變，而地下水特性的改變將延遲除役計畫的時程與增加投入的資金成本。許多國外除役的經驗也顯示除役階段的活動都有可能改變核電廠區的地下水的特性，因此了解核電廠除役階段可能改變廠區下地下水特性是重要工作。除役電廠地下水傳輸概念模式建立與防護監測方案的加強可以預防地下水特性改變，或在發現地下水特性改變時採取應變措施，做好地下水防護的工作，對於除役資金成本控制與避免複雜化除役過程都是非常重要的工作。

1.2 計畫工作內容

本服務案名稱為「110 年度核電廠除役期間廠址地下水防護管制特性研析」，依據工作說明書所列的「背景」說明我國核一廠 1、2 號機運轉執照分別於 107 年 12 月 5 日及 108 年 7 月 15 日屆滿，依據「核子反應器設施管制法」的規定，台電公司應於運轉執照屆滿之三年前向主管機關提出除役計畫。核能電廠於運轉期間已參考美國核能工業界與電廠相關經驗，建立地下水傳輸概念模式與防護監測方案，藉由對廠區地下水放射性物質含量的監測，以了解是否有放射性物質外釋至廠區地下水之情形，達到即時預警之功能。

核能電廠運轉執照屆期後即進入除役階段，除役期間作業之樣態可能與運轉期間不同。參考國外核電廠除役期間作法，其除繼續執行既有之防護監測方案之外，另再就除役作業之情境，檢視相關作業程序。

為掌握國際間除役電廠地下水傳輸模式與防護監測方案等資訊，本計畫團隊參考國內過去原能會與台電公司相關文獻報告，同時也研析美國核能電廠依除役期間地下水防護相關指引文件與資訊所採行之實務作法，以地下水污染物遷移理論與模式為基礎，檢視目前國內除役電廠地下水傳輸模式與防護監測方案，並研擬除役核電廠廠址地下水

防護方案之管制建議，以強化我國對除役電廠地下水防護方案之管制技術與能力。

本計畫將於決標日起至 110 年 12 月 30 日止執行完成，依服務案的工作說明書本計畫的工作內容為：

- 一、參考原能會「109 年核電廠除役期間廠址地下水防護管制特性研析」研究報告，及美國核能工業界實務經驗，評估我國核電廠於除役期間地下水文特性之重要參數。
- 二、檢視目前國內進入除役期間之核一廠地下水傳輸模式與防護監測方案之內容，並提出管制建議。

1.3 報告章節說明

本報告分為 5 章與 5 個附錄，第一章為「計畫目的與工作」，主要說明計畫緣起與目的、計畫工作內容與報告章節組成。第二章為「研究理論與文獻資料蒐集整理」，主要說明地下水傳輸基本理論、核種衰變鏈傳輸、解析解與數值解模式、場址概念模型與水文地質調查，另外也說明本計畫所蒐集、整理與研讀的相關文獻資料。第三章為「評估我國核電廠於除役期間地下水文特性之重要參數」，主要以目前核電廠除役地下水防護常使用的地下水傳輸模式 RESRAD 的相關使用手冊為主要的參考文獻，分別說明了 RESRAD 的發展演進過程、場址概念模式理論及除役期間地下水重要參數。第四章為「檢視目前國內進入除役期間之核一廠地下水傳輸模式與防護監測方案之內容」，主要先簡介核一廠現有的地下水傳輸模式，並詳實檢視核一廠地下水傳輸模式並給予評析建議。另外也簡介美國獨立研究機構「電力研究所(Electric Power Research Institute, 簡稱 EPRI)」的「核電廠地下水防護指引(Groundwater Protection Guideline for nuclear power plant)」，並以此「核電廠地下水防

護指引」審視核一廠現有的地下水防護方案，也給予客觀的評析與具體的建議。第五章為「結論與建議」，主要針對總結整個計畫的執行工作，並在相關重要的地下水文參數、核一廠地下水傳輸模式與地下水防護方案的未來可行工作給予建議。報告也另外提 5 供個附錄，分別為「EPRI:Groundwater Protection Guidelines for Nuclear Power Plants 中文翻譯精簡版」、「詞彙表」、「地下水流方程式詳細推導」、「地下水流污染傳輸方程式詳細推導」與「歷次工作會議審查意見回覆」。

第二章 研究理論與文獻資料蒐集整理

2.1 地下水傳輸基本理論

除役電廠地下水防護管制最主要的工作是掌握可能進入地下水而改變地下水特性的危害物質的洩漏來源，並釐清這些危害物質由來源洩漏後進入至非飽和層土壤或更進一步遷移到地下水含水層後的行為。對地下水的防護管制工作而言，避免危害物質的洩漏進入土壤或地下水，當然就不會有改變地下水特性之虞。然而，當危害物質進入地下水時，了解危害物質在地下水的遷移機制，掌握危害物質的時間與空間分布，對於除役電廠的地下水的防護管制工作非常重要。危害物質進入地下水後會隨著地下水流動在地質介的孔隙間穿梭遷移，因此危害物質在地下水遷移過程受地下水流動的各種機制與過程而影響。

地下水傳輸模式是以數學方式近似真實世界危害物質於地下水遷移行為簡化表示，地下水傳輸模式的基礎是藉由控制容積(control volume)的質量守恆(mass balance)概念並納入各種現象關係表示方程式以描述影響地下水系統污染物遷移的各種物理、化學與生物過程以描述污染物在地下水中移動與時空分布。地下水系統是由礦物顆粒固體堆疊組合形成骨架，在骨架間就會形成許多相互連通或相互不連通的孔隙空間(pore space)，地下水就在相互連通的孔隙空間流動(圖 2.1-1)。

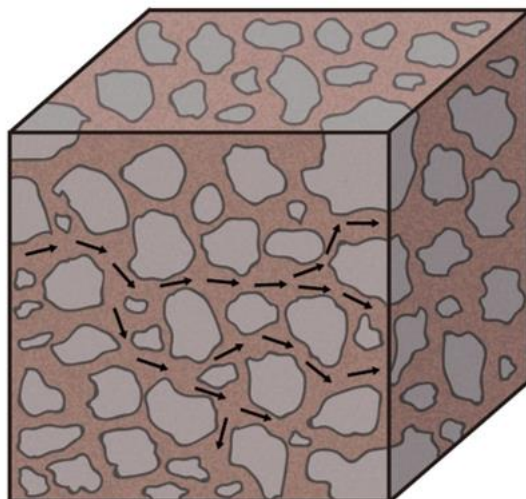


圖 2.1-1 地下水在含水層孔隙間穿梭流動示意圖

由於真實含水層礦物顆粒幾何形狀與大小、孔隙空間大小與孔隙連通性的複雜度，因此目前對於地下水的流動機制現今的科學發展仍然無法以孔隙尺度來描述個別孔隙空間內的地下水穿梭流動行為。Darcy (1956)定律為目前描述地下水流動的主流方法，Darcy (1956)定律為實驗室管柱試驗觀測所建立的理論，一般表示為：

$$v = -\frac{K}{\phi} \frac{h_2 - h_1}{L} \quad (2-1)$$

此處 v 為滲流速度(seepage velocity)[L/T]； K 為水力傳導係數(hydraulic conductivity)[L/T]； ϕ 為孔隙率(porosity)； h_1 為上游觀測點(點 1)的水頭(hydraulic head)[L]； h_2 為下游觀測點(點 2)的水頭[L]； L 為上、下游兩觀測點(點 1 與點 2)之間的距離[L]。

Darcy 定律進一步可以微分的型式表示為

$$v_x = -\frac{K}{\phi} \frac{dh(x)}{dx} \quad (2-2)$$

上述方程式(2-2)主要是以一維系統(x 方向)來描述地下水的流動，在真實含水層系統，地下水流動通常為三維(直角座標系統 x 、 y 與 z 三軸)問題，因此水力傳導係數通常具有異向性，也就是沿著 x 、 y 與 z 方向的水力傳導係數不會相同($K_{xx} \neq K_{yy} \neq K_{zz}$)，而 Darcy 定律也可以進一步表示為：

$$v_x = -\frac{K_{xx}}{\phi} \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2-3a)$$

$$v_y = -\frac{K_{yy}}{\phi} \frac{\partial h}{\partial y} \quad (2-3b)$$

$$v_z = -\frac{K_{zz}}{\phi} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2-3c)$$

此處 v_x 、 v_y 與 v_z 分別為 x 、 y 與 z 方向地下水滲流速度的分量。

在方程式(2-3a)、(2-3b)與(2-3c)的基礎與考慮質量守恆可推導飽和含水層三維地下水流動控制方程式，地下水流方程式詳細推導過程參見附錄三。飽和含水層三維地下水流動控制方程式表示為

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + q_s = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2-4)$$

其中 t 為時間[T]； q_s 為單位體積之抽水或注水流通量[1/T]； S_s ：為比貯水率[1/L]。

方程式(2-4)配合適當初始與邊界條件可求解水頭的時間與空間分布 $h(x, y, z, t)$ ，解得的水頭 $h(x, y, z, t)$ 依照(2-3a)、(2-3b)與(2-3c)可以計算地下水滲流速度。

由 Darcy 定律所得的流速如果用來預測污染物移動稱為移流傳輸 (advective transport)，一般表示為

$$f_{adv,x} = \phi v_x C \quad (2-5a)$$

$$f_{adv,y} = \phi v_y C \quad (2-5b)$$

$$f_{adv,z} = \phi v_z C \quad (2-5c)$$

此處 $f_{adv,x}$ 、 $f_{adv,y}$ 、 $f_{adv,z}$ 為以 Darcy 定律計算的地下水流速所造成單位面積、單位時間通過的危害物質移流(advection)通量(flux)[$ML^{-2}T^{-1}$]； ϕ 為孔隙率(porosity)； C 為危害物質的水溶液相濃度[M/L^3]。

實際上由於地質介質的異質性(heterogeneity)所造成的孔隙通道大小差異、危害物質於連通孔隙遷移長度不同與同一孔隙通道摩擦阻力不同所造成的地下水非均勻流動，因此不會每一個危害物質點跟地下水流有相同的遷移速度，因此 Darcy 定律所計算的移流傳輸無法完整描述個別溶質質點的實際遷移。認知移流並無法描述個別危害物質質點的實際移動，水力延散(hydrodynamic dispersion)的理論開始發展於 1950 年代，許多關於水力延散的實驗室實驗與理論研究於 1960 年前陸續完成。目前的水力延散理論考慮延散通量 f_{dis} 遵循 Fick 定律，表示為

$$f_{dis,x} = -D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} - D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} - D_{xz} \frac{\partial C}{\partial z} \quad (2-6a)$$

$$f_{dis,y} = -D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} - D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} - D_{yz} \frac{\partial C}{\partial z} \quad (2-6b)$$

$$f_{dis,z} = -D_{zx} \frac{\partial C}{\partial x} - D_{zy} \frac{\partial C}{\partial y} - D_{zz} \frac{\partial C}{\partial z} \quad (2-6c)$$

此處 $f_{dis,x}$ 、 $f_{dis,y}$ 、 $f_{dis,z}$ 為以 Fick 定律所造成單位面積單位時間通過的危害物質水力延散通量(flux) [$M/L^2/T$]； D_{ij} 為水力延散張量(tensor)，定義為

$$D_{xx} = a_L \frac{v_x^2}{|v|} + a_{TH} \frac{v_y^2}{|v|} + a_{TV} \frac{v_z^2}{|v|} \quad (2-7a)$$

$$D_{yy} = a_L \frac{v_y^2}{|v|} + a_{TH} \frac{v_x^2}{|v|} + a_{TV} \frac{v_z^2}{|v|} \quad (2-7b)$$

$$D_{zz} = a_L \frac{v_z^2}{|v|} + a_{TV} \frac{v_x^2}{|v|} + a_{TV} \frac{v_y^2}{|v|} \quad (2-7c)$$

$$D_{xy} = a_L \frac{v_x v_y}{|v|} + a_{TH} \frac{v_x v_y}{|v|} \quad (2-7d)$$

$$D_{xz} = a_L \frac{v_x v_z}{|v|} + a_{TV} \frac{v_x v_z}{|v|} \quad (2-7e)$$

$$D_{yz} = a_L \frac{v_y v_z}{|v|} + a_{TV} \frac{v_y v_z}{|v|} \quad (2-7f)$$

$$\text{此處 } |v| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \text{。}$$

地下水中溶解的污染物在某種程度下會因為靜電力或化學力而從水溶液中移除，並以不移動的方式附著在礦物顆粒內或表面，包含固體表面吸附(adsorption)與固體內吸收(absorption)兩過程，這樣的過程稱為吸附(sorption)過程。反之，當污染物由吸附的固體顆粒表面脫離而再進入溶解相，這樣的過程則稱為脫附(desorption)。

一些化學反應如放射性衰變(radioactive decay)、水解(hydrolysis)、與一些生物降解反應可以一階不可逆(first-order irreversible)過程來描述，即

$$r_w = -\lambda_w C \quad (2-8a)$$

$$r_s = -\lambda_s S \quad (2-8b)$$

此處 r_w 為單位體積的質量變化率 $[M/L^3/T]$ ， λ_w 為溶解相的一階衰變常數， r_s 為單位土壤顆粒質量的質量變化率 $[M/L^3/T]$ ， λ_s 為吸附相的一階衰變常數。

根據上面的移流、延散、吸附與一階不可逆反應等機制過程的數學描述，考慮控制容積的質量守恆，則可以推導

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi C}{\partial t} + \rho_b \frac{\partial S}{\partial t} = & -\frac{\partial \phi v_x C}{\partial x} - \frac{\partial \phi v_y C}{\partial y} - \frac{\partial \phi v_z C}{\partial z} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(\phi D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + \phi D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} + \phi D_{xz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(\phi D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + \phi D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} + \phi D_{yz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(\phi D_{zx} \frac{\partial C}{\partial x} + \phi D_{zy} \frac{\partial C}{\partial y} + \phi D_{zz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) \\ & - \lambda_w \phi C - \lambda_s \rho_b S \end{aligned} \quad (2-9)$$

此處 S 為吸附相濃度 $[M/M]$ ； ρ_b 為每單位體積孔隙介質的土壤顆粒重量 $[ML^{-3}]$ ，也稱為土壤顆粒的乾容積密度(bulk density)。地下水流污染傳輸方程式詳細推導過程參見附錄四。

要描述吸附一般可考慮線性平衡吸附，使用分配係數(partition coefficient)來描述，

$$K_d = \frac{C}{S} \quad (2-10)$$

此處 S 為吸附相濃度 $[M/M]$ 。

代入(2-8)式，且假設孔隙率 ϕ 為常數，則可簡化為

$$\begin{aligned}
 R \frac{\partial C}{\partial t} = & -\frac{\partial v_x C}{\partial x} - \frac{\partial v_y C}{\partial y} - \frac{\partial v_z C}{\partial z} \\
 & + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) \\
 & + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) \\
 & + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{zx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial C}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) \\
 & - (\lambda_w + \lambda_s \frac{\rho_b K_d}{\phi}) C
 \end{aligned} \tag{2-11}$$

$$\text{此處 } R = 1 + \frac{\rho_b K_d}{\phi} \text{。}$$

R 為遲滯因子(retardation factor)，此因子代表相較於非吸附污染物因為吸附作用所造成污染物傳輸的延遲現象，例如 R 等於 2 則表示遲滯傳輸速度為未受遲滯影響的 1/2。

如果水流為穩態均勻流(uniform flow)且沿著 x 方向($v_x = v$ ， $v_y = 0$ ， $v_z = 0$)，則可以簡化為

$$\begin{aligned}
 R \frac{\partial C}{\partial t} = & -v \frac{\partial C}{\partial x} + D_{xx} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_{yy} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_{zz} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \\
 & - (\lambda_w + \lambda_s \frac{\rho_b K_d}{\phi}) C
 \end{aligned} \tag{2-12}$$

此時延散係數張量為

$$D_{xx} = a_L |v| \tag{2-13a}$$

$$D_{yy} = a_{TH}|v| \quad (2-13b)$$

$$D_{zz} = a_{TV}|v| \quad (2-13c)$$

$$D_{xy} = D_{yx} = D_{xz} = D_{zx} = D_{yz} = D_{zy} = 0 \quad (2-13d)$$

對放射性核種溶解相的一階衰變常數與為吸附相的一階衰變常數可以考慮相同，即 $\lambda_s = \lambda_w = \lambda$ ，則(2-12)式可簡化為

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = -v \frac{\partial C}{\partial x} + D_{xx} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_{yy} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_{zz} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \lambda RC \quad (2-12a)$$

上述(2-11)式的移流-延散方程式或(2-12a)式的移流-延散方程式須在合適的初始條件(initial condition)或邊界條件(boundary condition)下以求解偏微分方程式。

當利用移流-延散方程式模擬暫態地下水傳輸問題時，給定初始條件為方程式求解的首要工作，初始條件通常可表示成

$$C(x, y, z, t = 0) = C^0(x, y, z) \quad \text{on} \quad \Omega \quad (2-14)$$

此處 $C^0(x, y, z)$ 為已知的初始濃度空間分布， Ω 代表模擬地下水傳輸問題系統的全部區域。

給定初始條件後，必須另外再給定邊界條件才能求解，通常在模擬地下水傳輸問題常用有三種型式邊界條件。第一類是給定邊界已知濃度值，即 Dirichlet 條件；第二類為給定邊界已知濃度梯度(concentration gradient)值，即 Neumann 條件；第三類為給定邊界濃度與濃度梯度的

關係式，即 Cauchy 條件。

對 Dirichlet 條件而言，其數學表示式為

$$C(x, y, z, t) = c(x, y, z) \quad \text{on } \Gamma_1 \text{ for } t > 0 \quad (2-15)$$

此處 Γ_1 表示模擬地下水傳輸問題系統的一個邊界， $c(x, y, z)$ 沿著 Γ_1 給定的濃度分布，當不同時間有著不同的邊界濃度分布時必須將 $c(x, y, z)$ 考慮為隨時間變化分布的邊界條件 $c(x, y, z, t)$ 。

在模擬地下水傳輸問題時，定濃度邊界會提供所模擬的地下水系統內部污染物質量的來源/外釋。其中由定濃度邊界所造成的延散傳輸主要是由邊界與系統內邊界相鄰點的濃度差所造成，如果定濃度邊界上的濃度比系統內邊界相鄰點的濃度高時，此時邊界將提供內部系統污染物質質量來源；反之如果定邊界上濃度比系統內邊界相鄰點濃度低時，此時系統內的污染物質質量將經由邊界外釋。

如果邊界的流速不是零時，將會有移流傳輸發生，當地下水是往系統內流動，此時邊界提供污染物的質量來源；反之，當地下水是由系統內往邊界流動，邊界將造成系統內污染物質質量的外釋。

Neumann 條件給定垂直於邊界的濃度梯度，也就是須已知通過邊界的延散傳輸通量(flux)，其數學表示式為

$$-D_{ij} \frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial x_j} = f_i(x, y, z) \quad \text{on } \Gamma_2 \text{ for } t > 0 \quad (2-16)$$

此處 Γ_2 表示模擬地下水傳輸問題系統的一個邊界， $f_i(x, y, z)$ 為一已知濃度梯度函數，表示垂直 Γ_2 的延散傳輸。同樣地，當不同時間有不同的延散傳輸通量時必須將 $f_i(x, y, z)$ 考慮為隨時間變化的分布的邊界條

件 $f_i(x, y, z, t)$ 。此類邊界條件的其中一特例為污染物由地下水系統往外流出的邊界，此時 $f_i(x, y, z) = 0$ 。

Cauchy 條件表示濃度與濃度梯度的關係式為已知，也就是移流傳輸與延散傳輸的總通量為已知，其數學表示式為

$$-D_{ij} \frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial x_j} + v_i C(x, y, z, t) = g_i(x, y, z) \quad \text{on } \Gamma_3 \text{ for } t > 0 \quad (2-17)$$

此處 Γ_3 表示模擬地下水傳輸問題系統的一個邊界， $g_i(x, y, z)$ 為一已知函數，表示垂直 Γ_3 的污染物總傳輸通量(包括移流與延散)。當不同時間有著不同的污染物總傳輸通量時必須將 $g_i(x, y, z)$ 考慮為隨時間變化 $g_i(x, y, z, t)$ 。此型式邊界條件的特例為一不透水的邊界，同時移流傳輸與延散傳輸的總傳輸通量為零，此時 $g_i(x, y, z) = 0$ 。

2.2 核種衰變鏈傳輸

污染物在傳輸過程中會發生各類型的化學反應，因此較真實描述污染物的傳輸行為必需綜合考慮所在地下水系統相關的所有發生反應的污染物/物種(species)，因此要有一組偏微分程式來描述每一個污染物的傳輸與此污染物與其它污染物的交互反應過程，由於放射性核種最主要的反應為其可因衰變而轉換至其它的放射性產物或穩定的核種，此即所謂的子核種(progeny)而形成所謂的衰變鏈(decay chain)。這種衰變鏈在模擬鈾系(actinides)或超鈾(transuranics)放射性核種的遷移特別重要，忽略母核種與子核種間的交互作用，就無法較真實且準確分析放射性核種衰變的傳輸行為，進而造成在預測衰變鏈中各個成員的核種濃度的重大誤差。考慮衰變鏈具有 N 個成員核種 $\text{Nuclide 1} \rightarrow \text{Nuclide 2} \rightarrow \dots \rightarrow \text{Nuclide N}$ ，則可以針對除 Nuclide 1 外的其它核種衰變鏈成員，在(2-12)的移流-延散方程式加入來自上一代核種衰變的貢獻，則可

以下 N 個偏微分程式表示為

$$R_1 \frac{\partial C_1}{\partial t} = -v \frac{\partial C_1}{\partial x} + D_{xx} \frac{\partial^2 C_1}{\partial x^2} + D_{yy} \frac{\partial^2 C_1}{\partial y^2} + D_{zz} \frac{\partial^2 C_1}{\partial z^2} - \lambda_1 R_1 C_1 \quad (2-18a)$$

$$R_i \frac{\partial C_i}{\partial t} = -v \frac{\partial C_i}{\partial x} + D_{xx} \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} + D_{yy} \frac{\partial^2 C_i}{\partial y^2} + D_{zz} \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} - \lambda_i R_i C_i + \lambda_{i-1} R_{i-1} C_{i-1} \quad i=2, \dots, N \quad (2-18b)$$

此處 C_i 為衰變鏈第 i 個成員核種的水溶液相濃度； λ_i 為衰變鏈第 i 個成員核種的一階衰變常數； R_i 為衰變鏈第 i 個成員核種的遲滯因子。

2.3 解析解與數值解模式

解析解(analytical solution)為移流-延散方程式與採用的初始與邊界條件的特解(particular solution)能很清楚明白的以相關的參數與變數的數學函數表示而不須有數值離散近似(numerical discretization approximation)，也就是說解是時間與空間連續。解析解最常用的求解方法為各種積分轉換(integral transform)的方法移除微分方程式的時間或空間微分項以方便求解，常用的積分轉換方法則包括 Laplace 轉換、Fourier 轉換與 Hankel 轉換。

數值解(numerical solution)為移流-延散方程式與採用的初始與邊界條件的特解藉由數值解方法求得數值離散近似值，也就是說解為時間與空間不連續，只是在相關離散的特定空間位置與時間段計算得數值。數值方法求解移流-延散方程式可以大致區分成 Eulerian、Lagrangian 或混合的 Eulerian-Lagrangian 三種方法，Eulerian 方法主要是移流-延散方程式是在固定的空間網格(spatial grid)求解，主要的方法為有限差分法(finite difference method，簡稱 FDM)與有限元素法(finite

element method，簡稱 FEM)。Eulerian 法採用固定空間網格優點為質量守恒 (mass conservation)，且可有效處理延散主控 (dispersion-dominated) 的問題，通常此方法較容易編寫成程式與執行。然而對許多現地情況常見的移流-主控 (advection-dominated) 問題，Eulerian 方法會產生數值延散 (numerical dispersion) 或人工震盪 (artificial oscillation) 數值誤差問題。為解決這些數值誤差問題，通常須採用較細密空間網格與較小的時間步階 (time step)，但此也會大量增加電腦計算負擔，因此造成不容易進行現地尺度三維地下水傳輸問題模擬。

解析解主要優點解為時間與空間連續且每一個的計算都是獨立，因此解的計算較為快速。相對而言解析模式的缺點則為其受到許多限制條件，所考慮的地質條件為均質 (homogeneous) 的地質介質 (即相關模式輸入參數不隨空間變化) 且為均勻流 (uniform flow field) 的流場，且為單點連續污染源，其模式另外考慮線性平衡吸附 (linear equilibrium sorption) 與一階衰減反應。解析解的最大價值在於容易學習了解各個參數對模擬結果的各種可能變化的情況，以及做為在現地污染場址資料有限下，初步評估篩選級別 (screening level) 的評估工具。

數值解可適用較複雜的移流-延散方程式，數值解的優點為可以模擬較複雜的情境，且對於模擬地下水系統的幾何形狀與異質性的限制較少，可隨時間與空間改變的地下水流場、水力梯度與補注條件，甚至可考慮較為複雜的人為工程或天然過程與機制，數值方法最大的缺點為進行模擬所需的計算時間 (對於較複雜的情境其所需時間可能達數天或數週)。另外利用數值方法求解方程式的過程會引入數值近似的誤差，而數值誤差的大小取決為空間離散 (spatial discretization) 尺寸與時間步階大小，加空間網格數可減少數值誤差，但也造成計算時間的增加。雖然數值方法可以考慮較複雜的情境，但相對也增加模擬所需的資料需

求與增加模式需輸入的參數。

2.4 場址概念模型與水文地質調查

一般要進行核電廠地下水防護須了解放射性核種可能外洩後從「放射性核種來源區(source region)」經由「環境介質(environmental media)」、「曝露途徑(exposure pathway)」最後到達「受體(receptor)」的過程(如圖 2.1-2)。

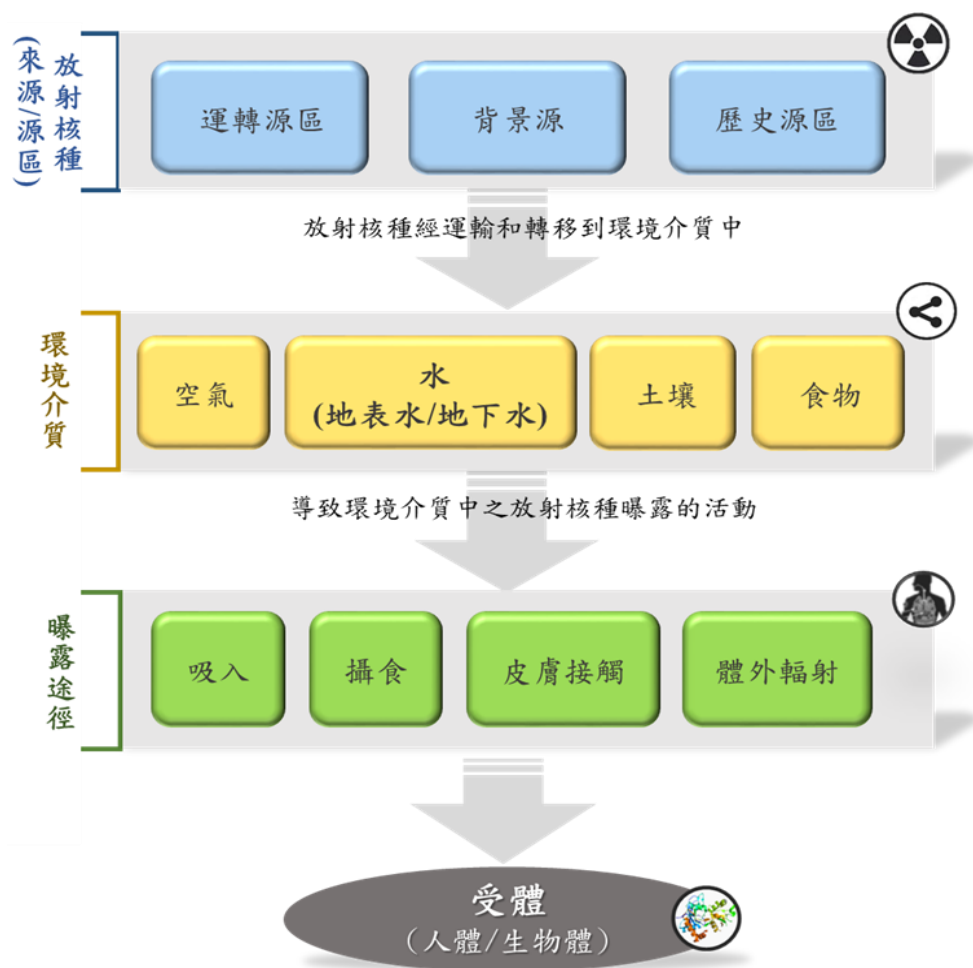


圖 2.1-2 放射性核種從「放射性核種來源區」經由「環境介質」、「曝露途徑」最後到達受體的過程

以下就地下水防護的幾個重要工作項目進行說明：

一、潛在地下環境外釋污染源的評估

地下環境污染來源絕大多數來自於地面上的人為活動，因此只要能將地面污染源控制，則就可以減少地表下的土壤與地下水污染的問題，因此地下水防護最重要的工作重點應該在於控制可能外釋的污染源，避免污染物排入土壤或進一步進入地下水含水層。因此地下水防護的首要工作項目為評估可能地下環境外釋污染源，主要的污染源可先從相關記錄文件或實際透過與場址員工訪談，以了解場址歷史污染源洩漏和傾洩發生的時間、地下污染事件的位置和規模。為了進一步執行地下水防護，應評估系統、結構與組件(systems, structure and component，簡稱 SSC)對土壤或地下水影響的可能性，另外也應評估工作作業(work practice)以分析其造成地下水污染的可能性。

二、建立場址概念模型

「場址概念模型(site conceptual model，SCM)」主要是建立放射性核種由「放射性核種來源區」經由「環境介質」、「曝露途徑」最後到達「受體」的過程的模型。由於場址底下地層的異質性(heterogeneity)、外在對含水層地下水補注(recharge)與流出(discharge)的時空變化、與核種與所在地層與地下水間可能各種反應，使得水文地質過程(hydrological process)變得非常複雜，因此要以每寸的小尺度詳細描述了解整個含水層系統污染物分布與傳輸型式在實務上實不可行。從工程實務的觀點，分析的目標精度應該是足以了解地表下放射性核種的傳輸過程，並進而採取有效的措施控制污染物的遷移，以達到保護民眾健康與環境。

場址水文地質調查(hydrological investigation)目的為針對污染物於地下水流系統中的遷移(contaminant plume migration)狀況進行探討，並進一步發展「場址概念模式」。地下環境的「場址概念模式」的發展應該要包括下列三個主要的資訊。

- (一) 地質：地下流體流動的地層架構
- (二) 水文：流體在地質架構的遷移
- (三) 化學：在流體遷移水文系統污染物跟隨流體傳輸、和污染物自我衰變、以及污染物與地層固體可能的化學和物理交互作用。

所以藉由系統性處理這三個主要資訊以發展場址概念模式，首先須分析場址地表下地層順序剖面並判斷那些地層可能是流體流動的通道與可能影響污染物移動的地質特徵。再者，須量測飽和層流體的水頭分布以決定這些流體流動於地層的實際流速與方向。緊接著，進行地下水水質樣品採集以了解污染物在流體遷移系統的水流水平側向與垂直向的空間分布。

在獲取這三類資訊有些工作會有所重疊，且在實務上，這三類資訊常常同時進行收集。例如：建置監測井(monitoring well)的鑽孔過程可同時採集岩心以分析地層的順序剖面，而且可以用來進行含水層試驗(aquifer test)以了解地下水流動的水力特性，另外也可以監測井本身最重要的功能則是採集含水層的代表性水樣(representative sample)。由於建立場址概念模式所須進行水文地質調查以採集地質、水文與化學三類型的資訊通常是耗費大量的金錢、人力與時間，因此須一個良好設計的水文地質調查計畫可在有限的資源下最大化所能採集到的地質、水文與化學資訊。根據所採

集的資訊場址工程師或科學家可挑選相關的資訊建立地表下地下水流動與污染物傳輸過程有意義且準確的圖像。

為了使水文地質調查工作的以具成本效益的方式執行，在進行所需的現地或實驗室工作前必須事先擬定策略。一開始，關於地表下地質、地下水流動與污染物外釋的特性、範圍與時間的所有可獲得的場址資訊都應該整合在一起以決定地下水採樣的位置，資料品質目標(data quality objectives)與適當的採樣與試驗技術必須確保所收集的數據可以不只符合工程而且是法規的需求。

場址概念模型須整合包括關切污染物(contaminant of concern，簡稱 COC)、核電廠的 SSC、歷史和可能正在進行的污染外釋以及場址水文地質所有可取得的資料以形成「統一假說(unifying hypothesis)」以解釋所觀察到的地下水污染物分佈、污染源區域、傳輸途徑、污染物在環境中的宿命以及受體的風險等。「統一假說」必須經由所收集的資訊加以確認，這樣的過程仰賴重覆逐一進行下列順序工作：(I)所研究的物理系統的觀測；(II) 形成「統一假說(unifying hypothesis)」；(III)實驗測試或否定假說：以及(IV)修正假說以解釋實驗數據。

三、 地下水監測井位置決定、建置和試驗

要進行地下水防護，在主要的 SSC 區域地下水流下游建置監測井有助於確認來自 SSC 的核種傾洩、外溢對地下水的影響。如果有 2 個或更多的優先 SSC 彼此之間非常鄰近，設置一個監測井位於這些 SSC 的地下水流下游，可能適度可決定是否這些 SSC 有傾洩或外溢發生，如果地下水監測確定有洩漏發生，則須設置更多的監測井以利決定那一個 SSC 為地下水污染的來源。

通常必需至少有三口監測井以決定理論的地下水位面(water table)的平面並推測地下水流方向，然而地形與場址地層的變化都將影響地下水流與決定地下水流方向改變所必需的井的數目。

從污染來源往地下水流下游建置監測井為污染來源辨識的基本工作，然而因為污染物的水力延散行為，通常會導致距污染源越遠的下游有較大範圍的污染團。因此，可在避免設備、結構與其它障礙物下，往旁邊些許距離(約 3 公尺)設置監測井以示蹤污染團。

建置監測井首先需鑽鑿井孔(borehole)，由於地質的情況一般非常複雜，因此需選用適合地質狀況的鑽孔機具鑽鑿井孔，井孔的深度需達到目標含水層，而井孔的半徑必須大於井管的半徑，以方便將井管垂入井孔中。井管的透水部分稱為井篩(screen)，一般可用切割機在 PVC 管切割出具均勻間隙的開縫。通常井篩段需置於目標含水層的深度範圍，而井篩的長度與口徑需依設井目的而定。井篩與地面之間則用沒有開縫的管或其他材料的水管銜接連通。井管置入井孔後，用乾淨、渾圓、粗糙的石英砂填充井篩段的外圍空間，以利地下水流進或流出井篩。而井管的外圍空間則用水泥、皂土或乾淨的泥土填實，以固定井管。皂土又稱做膨脹土，是一種黏土含量極高的材料，遇水時會膨脹形成透水性極差的阻水層。

四、 建立地下水採樣和分析過程

地下水水質採樣的目的是為了採集鄰近監測井周遭含水層內的「代表性地下水樣」(Yeskis and Zavala, 2002)。因為含水層地下水流速一般非常緩慢，因此自然情況下，含水層中地下水水質隨時間變化也相當緩慢，因此一般地下水水質採樣的頻率約為數週至數月，不需太頻繁。一般而言，在未進行地下水水質採樣期間，含

水層的地下水會仍會經由井篩(screen)流入/流出監測井，因此監測井的井篩段的水會一直被置換，但監測井內井管(casing)內的地下水(簡稱井管積水)幾乎未被含水層的地下水置換。井管積水會與空氣或井管材質接觸，經過一段時間後可能會有一些化學反應產生，改變原有的井管積水的水質特性，因此井管積水的水質特性不會與含水層的地下水的真實水質特性相同，因此無法代表緊鄰監測井周遭含水層內的實際地下水水質，故在採集水樣之前必須進行洗井(purge)，以讓含水層的地下水置換井管內的積水，然後抽取由含水層流入監測井中的「新鮮」地下水作為代表性水樣(USEPA, 1982, 1991, 1992; Barcelona et al., 1985; Barcelona and Helfrich, 1986; Feld et al., 1987)。

井柱體積法(well-volume approach)與微洗井(micro purge approach)為台灣現行採用的地下水採樣方法，井柱體積法在採樣前用小流率(< 2.5 公升/分鐘)抽水移除 3 至 5 倍的井管積水體積進行洗井。小流率洗井的主要目的為有效減少抽水的影響範圍，避免抽取到距離監測井較遠處含水層「非代表性水樣」，此方法較適合井管積水體積不大的監測井。微洗井方法又稱為低流率洗井與採樣方法(Low-Flow Purging and Sampling Method)，微洗井採樣方法使用相當小的抽水率(微流率)完成洗井，微洗井採樣方法是將合適的抽水泵置於井篩段中間，直接由井篩段以 0.1~0.5 L/min 的微小流率抽水進行洗井，因為抽水泵位於井篩中間，故所得的地下水樣代表井篩中點附近的代表性水樣。在洗井期間需同時量測井內水位洩降與水質指標參數變化。洗井期間井內最大洩降不得超過 0.125Ls(八分之一井篩長)的極限值(ASTM,2003; D6771-02)。在此限制洗井時間內，檢測汲出之地下水水質指標參數(酸鹼度、導電

度、溶氧及氧化還原電位)是否達到水質穩定標準而定。水質穩定標準如酸鹼度為 ± 0.2 pH 值，導電度為 $\pm 3\%$ 讀值、溶氧為 $\pm 10\%$ 讀值與氧化還原電位為 ± 20 mV。當水質指標參數達到水質穩定標準即表示洗井完成，即可進行地下水採樣，完成微洗井與採樣工作。微洗井採樣方法無須抽除 3~5 倍井管積水體積。因為在井篩段以微小流率抽水並不會造成井管內劇烈的水位下降，而使得井管積水幾乎維持「停滯狀態」。亦即，微小流率洗井並不會導致井管積水大量與井篩內新鮮地下水混合，因此可由井篩段直接採得「新鮮」代表性地下水水樣。

2.5 文獻資料蒐集整理

依據本計畫的主要工作內容：

- 一、參考原能會「109 年核電廠除役期間廠址地下水防護管制特性研析」研究報告，及美國核能工業界實務經驗，評估我國核電廠於除役期間地下水文特性之重要參數。
- 二、檢視目前國內進入除役期間之核一廠地下水傳輸模式與防護監測方案之內容，並提出管制建議。

本計畫收集、研讀與評析的主要文獻如下：

- 一、「109 年核電廠除役期間廠址地下水防護管制特性研析」(原子能委員會，中華民國 109 年)
- 二、「建立核能電廠廠區地下水傳輸基準版概念模式」(台灣電力股份有限公司，中華民國 101 年)；
- 三、核一廠地下水防護方案
- 四、「USER's Manual for RESRAD Version 6」(Argonne National Laboratory, 2001)

- 五、 「User's Manual for RESRAD-OFFSITE Code Version 4: Vol. 1 – Methodology and Models Used in RESRAD-OFFSITE Code 」 (Argonne National Laboratory , 2020)
- 六、 「User's Manual for RESRAD-OFFSITE Code Version 4: Vol. 2 – User's Guide for RESRAD-OFFSITE Version 4 」 (Argonne National Laboratory , 2020)
- 七、 「 Groundwater Protection Guidelines for Nuclear Power Plants: Public Edition 」 (Electric Power Research Institute, 2008)
- 八、 「 A Collection of Mathematical Models for Dispersion in Surface Water and Groundwater 」 (U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1981)

第三章 評估我國核電廠於除役期間地下水文特性之重要參數

3.1 RESRAD 發展演進過程與概念化

RESRAD 系列為美國 Argonne 國家實驗室(Argonne National Laboratory)、美國能源部(Department of Energy, DOE)與美國核管會(Nuclear Regulatory Commission, NRC)發展的輻射劑量評估程式工具。RESRAD 系列包含有 RESRAD-ONSITE、RESRAD-OFFSITE、RESRAD-BUILD、RESRAD-BIOTA 與 RESRAD-RDD 等 5 個持續維護與更新的程式。

RESRAD 系列第一個程式為 RESRAD-ONSITE, RESRAD-ONSITE 主要用來評估居住或工作於土壤遭受核種污染區的個體曝露的輻射劑量(radiological dose)與增量致癌風險(excess cancer risk)(Yu et al., 1993; 2001)。RESRAD-ONSITE 在 1980 年代由 Argonne 國家實驗室的環境評估部門(Environmental Assessment Division)發展且自 1989 首次發表後,大量使用於評估輻射污染場址。然後,RESRAD-ONSITE 在回應來自使用者與贊助者的意見回饋下持續進行後續許多精進與開發。

RESRAD 開發團隊參與許多美國國內與國際的模式交互比較測試,在交互比較過程 RESRAD-ONSITE 分析假想與真實污染場址情境。在 1990 年代國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)BIOSphere MOdel Validation Study II (BIOMOVs II) 的比較輻射評估模式研究 RESRAD-ONSITE 演進出 RESRAD-OFFSITE 程式, BIOMOVs II 需要模式能預測位於主要污染區外的受體(receptor)的曝露。

RESRAD-OFFSITE 的發展主要增加廠外土壤累積(offsite soil

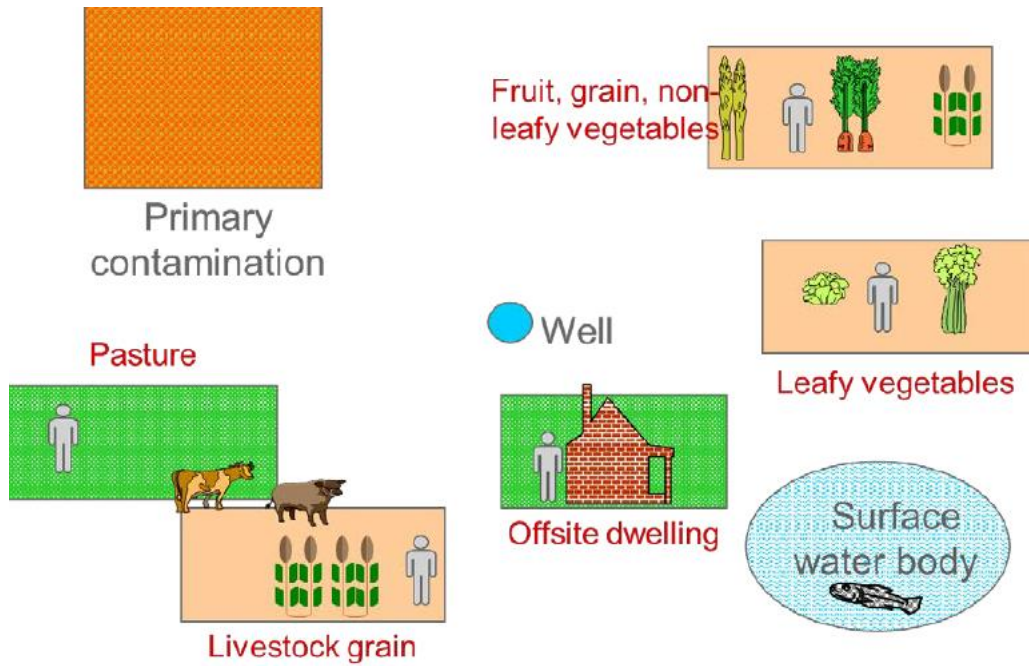
accumulation)次模式(BIOMOVES II 1995)於基本的 RESRAD-ONSITE 模組，然後，加入移流-延散地下水傳輸次模式(BIOMOVES II 1996)，此時期模式也考慮由於污染土壤外釋的時變資料。在多介質模式的比較研究時期，移流-延散地下水傳輸次模式精進為可更合理預測衰變鍊各子核種成員的傳輸。接著增加大氣傳輸 (atmospheric transport)次模式與地表水體累積(surface water body accumulation) 次模式。RESRAD-OFFSITE 3.1 版(Yu et al., 2013; NUREG/CR-7127)可以模擬主要污染區的外釋，考慮延遲或分散時間外釋、平衡脫附(desorption release)，考慮主要污染區地下水的傳輸。RESRAD-OFFSITE 3.2 版可以考慮主要污染區位於地下水位面下，且可選擇用 ICRP 38 與 ICRP 107 為基礎的轉換資料。RESRAD-OFFSITE 4.0 版可模擬溶解度控制的污染源外釋，污染材料擴散外釋與地表水集水區顆粒的沉降。加入這些功能讓 RESRAD-OFFSITE 4.0 版可以更真實評估複雜除役場址的清除濃度與低放射性處置設施的功能表現。

許多原本在 RESRAD-ONSITE 的次模式精進後也整合到 RESRAD-OFFSITE，以方便同時模擬廠內與廠外的曝露情境。RESRAD-ONSITE 與 RESRAD-OFFSITE 都使用解析解而非以有限差分法(finite difference method, FDM)或有限元素法(finite element method, FEM)數值求解方程式。

3.2 RESRAD 除役期間地下水重要參數

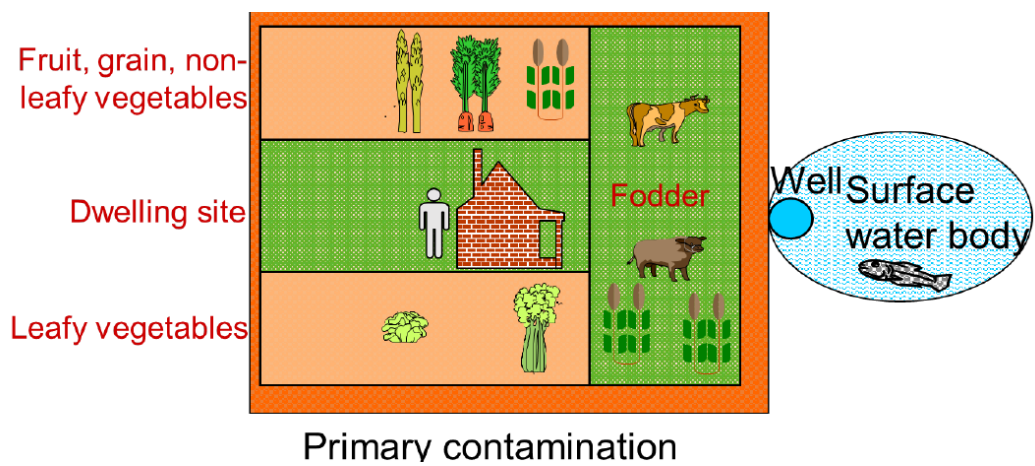
RES RAD-OFFSITE Version 4.0 可以用來評估在主要土壤核種污染區或其外圍居住或工作的個體曝露(exposure)的輻射劑量(radiological dose)與增量致癌風險(excess cancer risk)。所以用水來源或曝露陸地位置可以 (1)完全位於主要污染區的外圍(如圖 3.2-1 所示)；(2)完全位於主要污染區內與其邊界(如圖 3.2-2 所示)；(3)部份位於主要污染區內、

部分位於主要污染區邊界與部分位於主要污染區外(圖 3.2-3)。



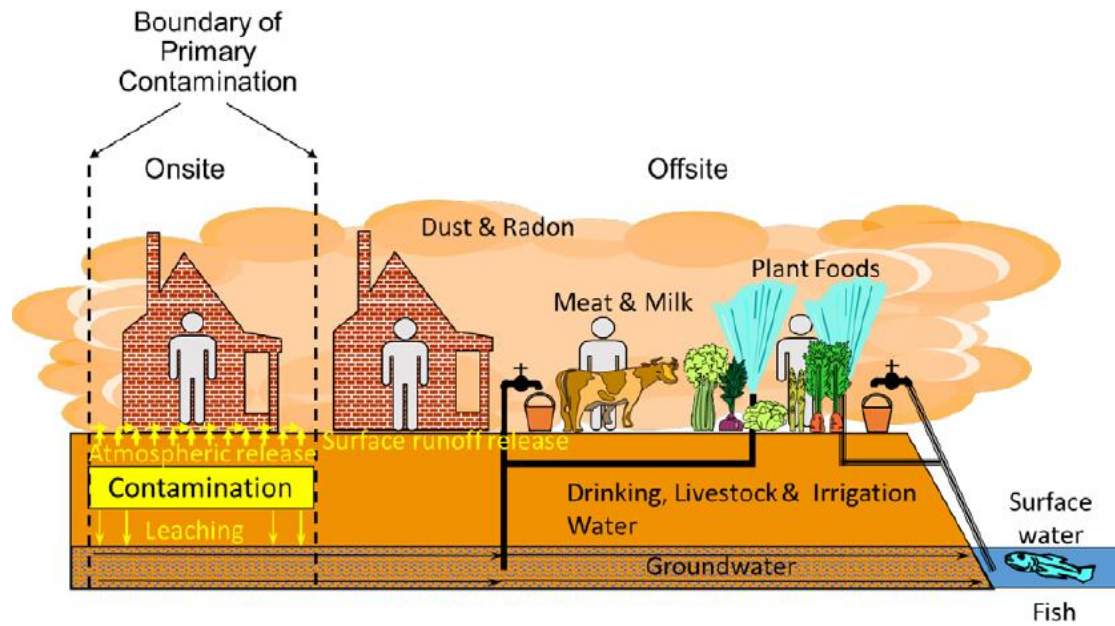
圖片來源：Yu et al., 2020

圖 3.2- 1 廠外曝露情境的各個曝露位置



圖片來源：Yu et al., 2020

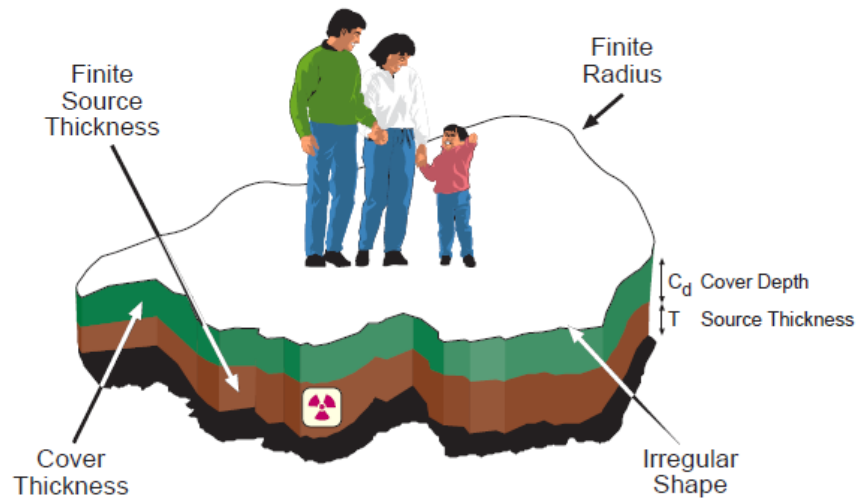
圖 3.2- 2 廠內曝露情境的各個曝露位置



圖片來源：Yu et al., 2020

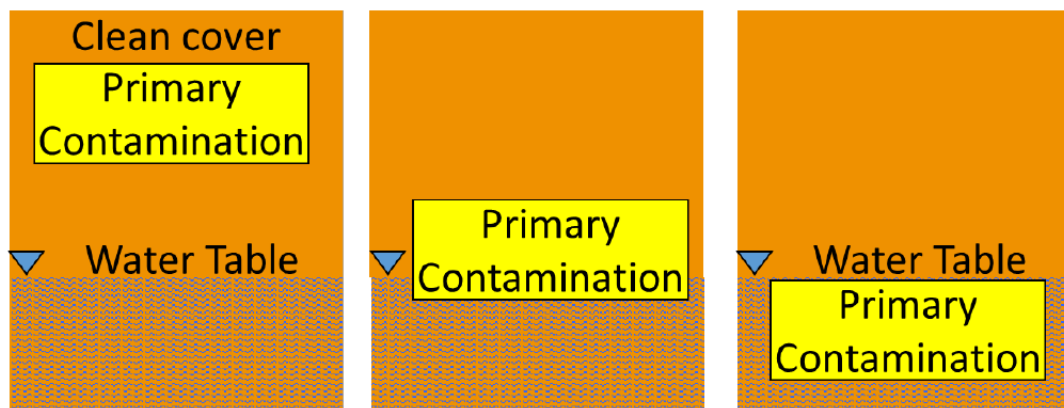
圖 3.2-3 環境途徑與曝露位置

主要污染區(primary contamination)即所謂的初始核種位置，可能是直接被核種污染的土壤或土壤層均勻存在內含核種的材料。RESRAD-OFFSITE 假設主要污染區的污染物分布非常均勻且厚度為常數，在主要污染區的上方可以是一層乾淨的土壤(圖 3.2-4)。主要污染區可以全部位於地下水位面以上、分布於地下水位面間與完全位於地下水位面以下(圖 3.2-5)。



圖片來源：Yu et al., 2020

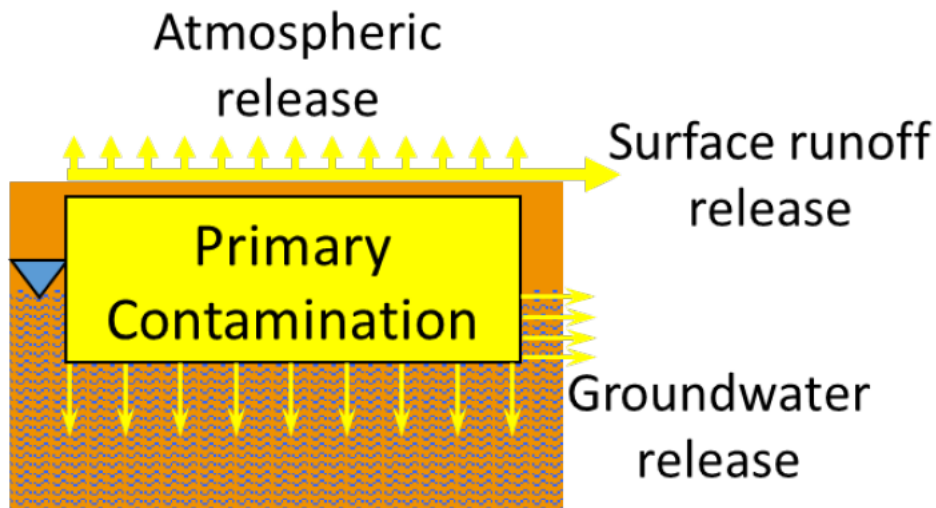
圖 3.2- 4 RESRAD 概念化主要污染與蓋層區



圖片來源：Yu et al., 2020

圖 3.2- 5 主要污染區相對於地下水位面的三種可能位置

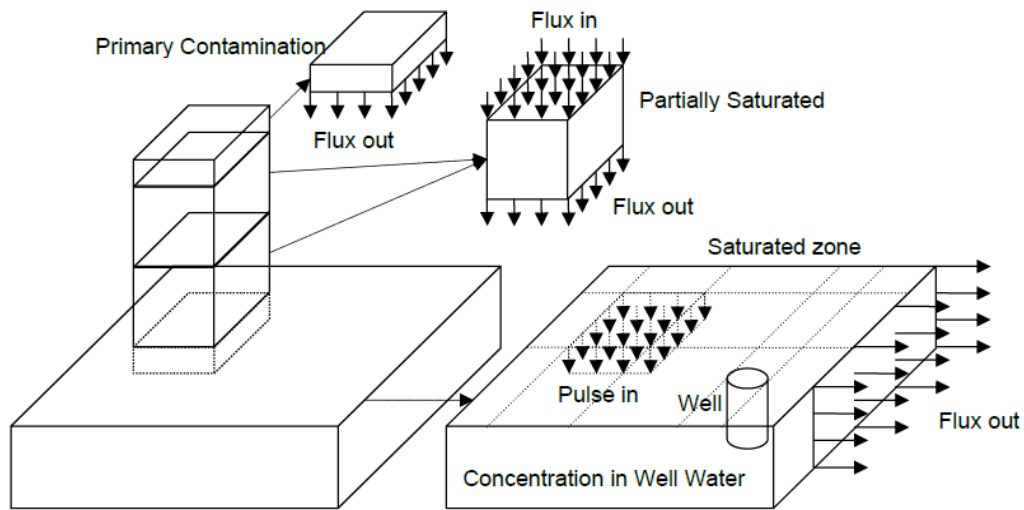
主要污染區的外釋有如圖 3.2- 6 所示的三種方式，分別為(1)地下水外釋(groundwater release)：伴隨流經主要污染的入滲水淋洗(leaching)外釋；(2)大氣外釋(atmospheric release)：顆粒性(包含可吸入與不可吸入)的外釋至空氣；和(3)地表逕流外釋(surface runoff release)：風化材料的外釋至地表逕流。



圖片來源：Yu et al., 2020

圖 3.2-6 主要污染區的三種外釋：(1)地下水外釋；(2)大氣外釋；
(3)地表逕流外釋

RESRAD-OFFSITE 地下水傳輸概念模型如圖 3.2-7 所示，主要區分主要污染區、0~5 層的部份飽和區(partially saturated zone)/未飽和區(unsaturated zone)與 1 個初始未受污染的非受壓(unconfined)完全飽和區(fully saturated zone)。污染物的傳輸情境為主要污染區土壤顆粒的污染物會外釋進入溶解相，進入溶解相的污染物，會伴隨降雨或灌溉的入滲水往下垂直移動進入部份飽和區。進入部份飽和區的污染物會繼續隨著地下水進入飽和區。以下分別就主要污染區、部份飽和區與飽和區說明可能相關的傳輸機制過程與地下水文重要參數。



圖片來源：Yu et al., 2020

圖 3.2- 7 RESRAD-OFFSITE 地下水傳輸概念

(一)主要污染區

RESRAD-OFFSITE 考慮三種概念污染區的方法提供給使用者選擇，三種概念污染區的方法分別為：(1)主要污染區的土壤顆粒完全被污染；(2)內含核種的材料與週遭的土壤有相同的水力傳導性；和(3)內含核種的材料的主要傳輸機制為擴散(diffusion)。

RESRAD-OFFSITE 考慮三種不同的機制來模擬核種由污染的土壤顆粒進入到溶解相(水溶液相)，分別為(1)平衡脫附(equilibrium desorption)；(2)平衡溶解度(equilibrium solubility)；和(3)一階反應速率控制外釋(first-order rate-controlled release)可以讓使用者選擇。本計畫假設核種由污染的土壤顆粒進入到溶解相為可採用平衡脫附描述，主要污染區溶解相的污染物會隨入滲的地下水向下往部份(未)飽和區移動。

主要污染區的(以縮寫 pc 表示)重要參數將為土壤含污染物分

布的範圍(「長(m) L 」、「寬(m) W 」與「高(m) H 」)，RESRAD 假設污染區內土壤污染為均勻分布，因此可以「主要污染區初始平均土壤核種濃度(pCi/g) $C_{i,pc}$ 」表示，因採用平衡脫附描述污染物土壤固體顆粒外釋到溶解相，外釋的量就取決於主要污染區吸附相與溶解相濃度的比值，稱為「主要污染區分配係數 $K_{d,pc}$ (cm^3/g)」，另外由於吸附相濃度的表示方式為每單位質量的污染物(pCi/g)，但溶解相的濃度表示方式為每單位體積的污染物(pCi/ cm^3)，兩者間通常藉由乾容積密度進行轉換，因此要考慮「主要污染區的乾容積密度 $\rho_{b,pc}$ (g/cm^3)」有關，主要污染區溶解相的污染物會隨入滲的地下水向下往部份飽和區移動，因此會跟「主要污染區的垂直方向入滲流速 $v_{z,pc}$ 」有關，「主要污染區的垂直方向入滲流速 $v_{z,pc}$ 」的驅動力來源為「降水率(precipitation rate) P 」與「農業的灌溉率(irrigation rate) I 」。

(二)部份飽和區

部份飽和區(以縮寫 ps 表示)的地下水因受重力影響，所以很明顯主要的地下水流為一維垂直向下入滲，而水平方向的移動幾乎可以忽略。污染物的移動會跟垂直向下的地下水流有關，所以與「部份飽和區的垂直方向入滲流速(m/yr) $v_{z,ps}$ 」，由於假設主要污染區的污染物均勻分布且主要污染區與部份飽和區為均質，所以不會有水平方向的濃度梯度(concentration gradient)產生，所以可以忽略垂直地下水流的側向延散傳輸(水平向 x 與 y 的側向延散傳輸)，只考慮地下水流方向的縱向延散傳輸(垂直 z 的縱向延散傳輸)，因此會與「部份飽和區的垂直 z 的縱向延散係數 $D_{z,ps}$ (m^2/yr)有關」，污染物在部份飽和區的溶解相移動過程會與土壤固體顆粒發生吸附反應，所以會與「部份飽和區分配係數 $K_{d,ps}$ (cm^3/g)」與

「主要污染區的乾容積密度 $\rho_{b,ps}$ (g/cm^3)」相關，污染物在部份飽和區的溶解相移動過程也會發生轉換(衰變反應)，所以會與「核種衰變常數 λ (yr^{-1})」有關。此處須特別注意「部份飽和區垂直方向地下水平均流速 $v_{z,ps}$ 」，其計算須根據 Darcy 定律 $v_{z,ps} = -K_{ps}(\psi) \frac{\partial(\psi + z)}{\partial z}$ ； ψ 為部份飽和區的土壤水份張力(tension)水頭(m)，其值為負； $K_{ps}(\psi) = K_{s,ps} k_{ps}(\psi)$ ； $K_{s,ps}$ 為部份飽和區飽和水力傳導係數(m/yr)； $k_{ps}(\psi)$ 為部份飽和區相對傳導度($0 \leq k(\psi)_{ps} \leq 1$)， $k(\psi) = R_s^{(2b+3)}$ ； R_s 為土壤水份飽和度[-]，定義為部份飽和區的土壤體積含水量 θ_{ps} [-]與部份飽和區土壤飽和體積含水量 $\theta_{sat,ps}$ [-]的比值； $\theta_{sat,ps}$ 等於部份飽和區的總孔隙率； b 為土壤特定指數參數[-]。

(三)完全飽和區

完全飽和區(縮寫 s)的地下水假設在理想情況其只有水平方向的流動，並無垂直方向(z)的流動，藉由座標的特別安排，使地下水流方向沿座標軸的 x 方向，並無 y 方向的流動，因此在移流傳輸部份只有由 x 方向地下水流動造成，所以只會跟「完全飽和區的水平 x 方向地下水流速(m/yr) $v_{x,s}$ 」有關。在延散傳輸部份，由於地下水流方向沿座標軸的 x 方向，因此會有 x 方向的縱向(地下水流向)延散傳輸，所以要考慮「完全飽和區的水平 x 方向的延散係數(m/yr) $D_{x,s}$ 」；由於完全飽和區的污染物來源為部份飽和區，如圖 3-7 中所示，污染物進入完全飽和區在 y 方向(與地下水流垂直的水平側向)僅分布於一部份區域，會有 y 方向的濃度梯度，因而水平向的側向延散傳輸不能忽略，需要考慮「完全飽和區的水平 y 方向延散係數(m/yr) $D_{y,s}$ 」。由於完全飽和區的污染物來源為來自部份飽和區，在 RESRAD-OFFSITE v4.0 假設污染物由部份飽和區垂直進入到完

全飽和區上部，但是不會完全貫穿分布在整個完全飽和區的垂直方向。因此會有 z 方向(與地下水流垂直的垂直側向)的濃度梯度，因而垂直向的側向延散傳輸不能忽略，須考慮「完全飽和區的垂直 z 方向的延散係數(m/yr) $D_{z,s}$ 」。污染物在完全飽和區的溶解相移動過程會與土壤固體顆粒發生吸附反應，所以會與「完全飽和區分配係數 $K_{d,s}$ (cm³/g)」與「完全飽和區乾容積密度 $\rho_{b,s}$ (g/cm³)」相關，污染物在完全飽和區的溶解相移動過程也會發生轉換(衰變反應)，所以會與「核種衰變常數 λ (yr⁻¹)」有關。此處須特別注意「完飽和區垂直方向地下水流速 $v_{x,s}$ 」，其計算須根據 Darcy 定律

$$v_{x,s} = -K_{x,s} \frac{\partial h}{\partial x}$$

相關的重要地下水文參數，經整理後加入圖 3.2-8 以方便了解。

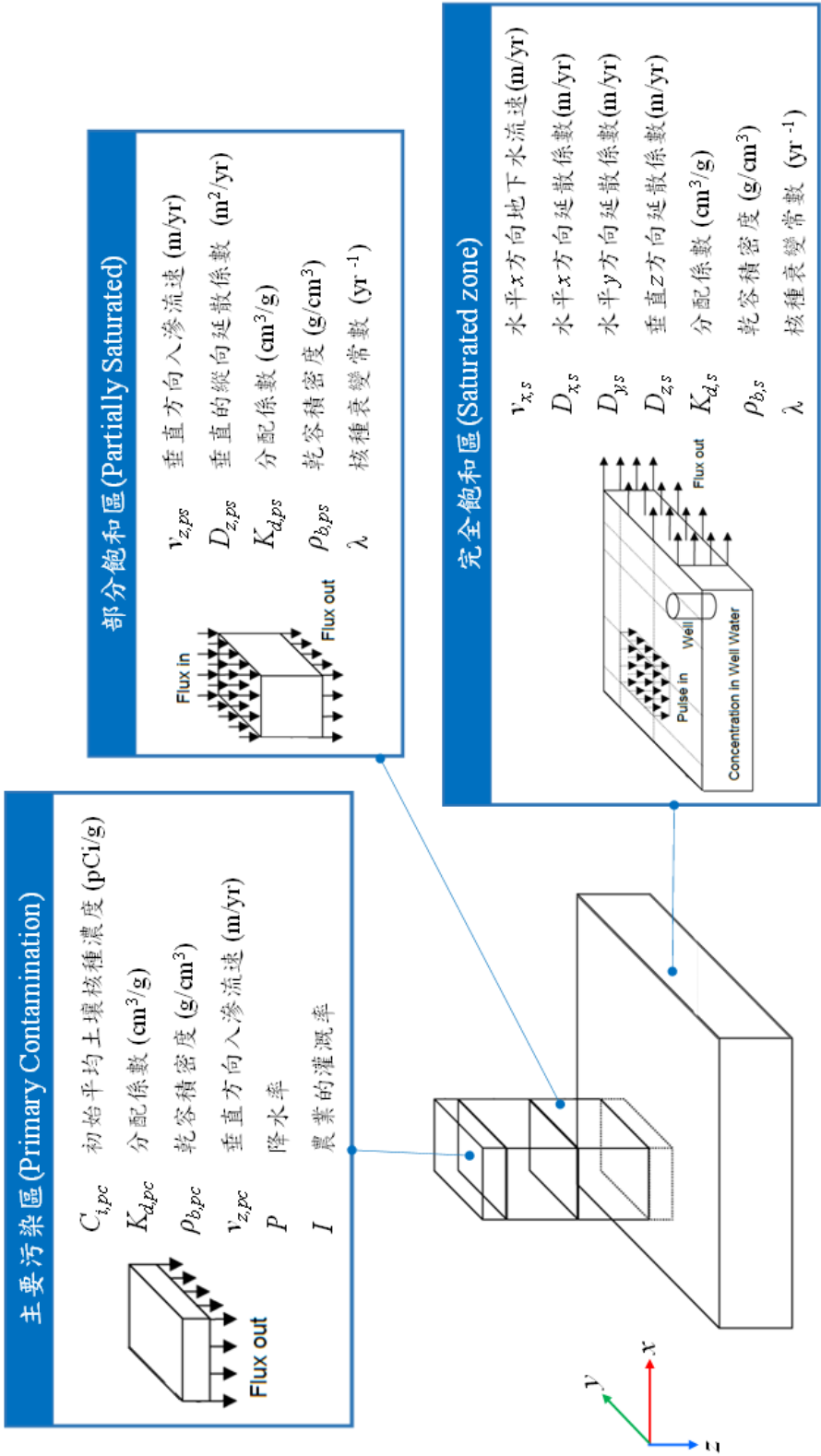


圖 3.2- 8 RESRAD-OFFSITE 地下水傳輸重要參數

第四章 檢視目前國內進入除役期間之核一廠地下水傳輸模式與防護監測方案之內容

4.1 核一廠地下水傳輸模式簡介

目前台電核一廠已建置地下水傳輸基準版概念模式(台灣電力股份有限公司，民國 101 年)，此地下水傳輸基準版概念模式的建立採用美國核能管理委員會(Nuclear Regulatory Commission，NRC)NUREG 0868 報告「A Collection of Mathematical Models for Dispersion in Surface Water and Groundwater」(Codell et al., 1982)的 GROUND 地下水傳輸模式。此報告包含 3 個地表水模式(STTUBE、TUBE 和 RIVLAK)與 2 個地下水模式(GROUND 與 GRDFLX)。地下水模式主要用來評估地下水中核種的傳輸，GROUND 模式主要適用單一方向且未受抽/注水影響的均勻流，因此在鄰近抽/注水井附近並不適用。

GROUND 模式是以解析解為基礎發展，主要考量為(1)資料不足以使用複雜的模式；(2)當時的電腦在進行長時間(百年到千年)的分析，有限差分或有限元素法為基礎的數值模式會耗費大量的計算時間。GROUND 計算不同類型污染源單一放射性核種的濃度與通量(flux)，GRDFLX 計算存在多個核種的低放廢棄物掩埋的濃度與通量，以下就 GROUND 模式的理論進行說明，在說明數學方程式將採用原始文件的符號表示。

GROUND 考慮單一核種傳輸，基本控制方程式為

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{u}{R_d} \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{E_x}{R_d} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{E_y}{R_d} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{E_z}{R_d} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \lambda C \quad (4-1)$$

此處 C 為濃度； u 為滲流速度； E_x 、 E_y 與 E_z 為 x 、 y 與 z 方向的延散係數； R_d 為遲滯因子； λ 為一階衰變反應常數。

(4-1)式的基本假設為地下水流為單一方向均勻流且安排沿著 x 方向，所以沒有 y 方向與 z 方向的分量。

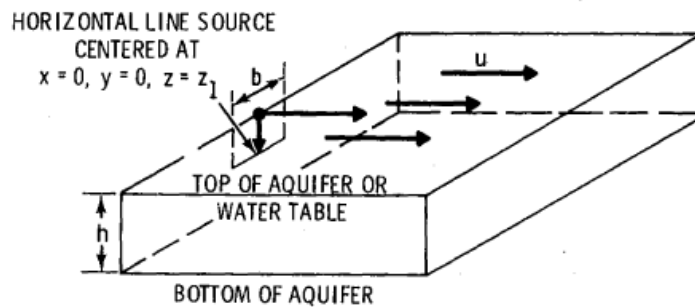
GROUND 地下水模式是利用 Green function 方法求解，考慮如圖 4.1-1 所示的均質含水層系統中心位於處 $(0, 0, z_1)$ 有一水平線污染源，其寬度為 b ，污染源釋放方式為在時間 $t=0$ 瞬時釋放 1 Curie。

考慮的初始與邊界條件為

$$C = 0 \text{ at } t = 0 \quad (4-2)$$

$$C = 0 \text{ at } x = \pm\infty \text{ and } y = \infty \quad (4-3)$$

$$\frac{\partial C}{\partial z} = 0 \text{ at } z = 0 \text{ and } z = h \quad (4-4)$$



圖片來源：R.B. Codell et al., 1981

圖 4.1-1 水平線源示意圖

則相對應的解析解為

$$\begin{aligned}
C(x, y, z, t) = & \frac{1}{2b\phi h R \sqrt{\frac{4\pi D_x t}{R}}} \left\{ \exp \left[-\frac{\left(x - \frac{vt}{R}\right)^2}{\frac{4D_x t}{R}} - \lambda t \right] \right\} \\
& \times \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{\left(\frac{b}{2} + y\right)}{\frac{4D_y t}{R}} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{\left(\frac{b}{2} - y\right)}{\frac{4D_y t}{R}} \right] \right\} \\
& \times \left[1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \exp \left(-\frac{m^2 \pi^2 D_z t}{h^2 R} \right) \cos \left(m \frac{z_s}{h} \right) \cos \left(m \frac{z}{h} \right) \right]
\end{aligned} \tag{4-5}$$

假設垂直方向已均勻混合，則 z 方向的累加項為零，方程式(4-5)可簡化為

$$\begin{aligned}
C(x, y, t) = & \frac{1}{2b\phi h R \sqrt{\frac{4\pi D_x t}{R}}} \left\{ \exp \left[-\frac{\left(x - \frac{vt}{R}\right)^2}{\frac{4D_x t}{R}} - \lambda t \right] \right\} \\
& \times \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{\left(\frac{b}{2} + y\right)}{\frac{4D_y t}{R}} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{\left(\frac{b}{2} - y\right)}{\frac{4D_y t}{R}} \right] \right\}
\end{aligned} \tag{4-6}$$

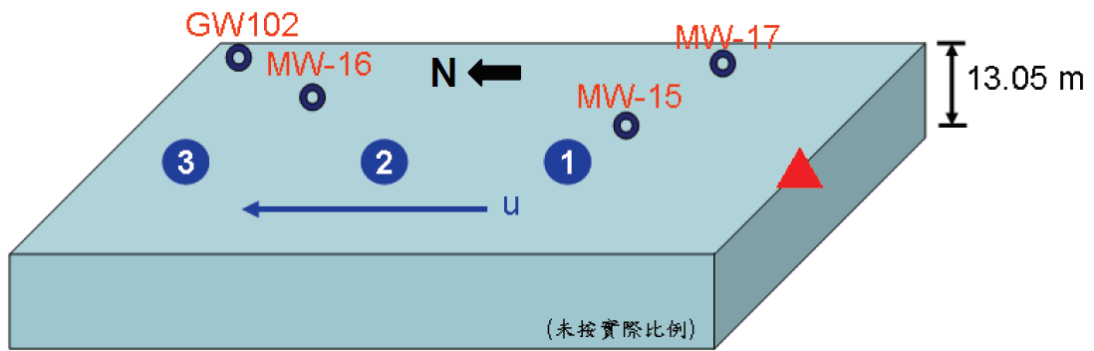
對任意時變的線源，可用(4-6)瞬時注入源進行褶積(convolution)，表示為

$$C(t) = \int_0^t C_i(t-\tau) f(\tau) d\tau \tag{4-7}$$

核一廠的地下水傳輸基準版概念模式報告(以下簡稱核一廠報告)中說明是以式(4-6)(核一廠報告的式(4.4))進行計算，模擬的示意圖如

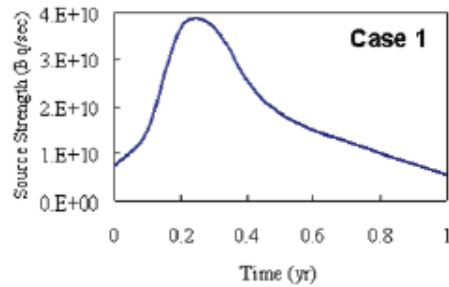
4.1-2 所示(核一廠報告圖 4.3-2)，報告說明假設含水層為均質且具三維延散性的單向流動與傳輸，分析設定主要流向位置為源點至 3 號分析點的連線方向，分析使用的參數(核一廠報告表 4.3-1)。含水厚度為二號機廠房至下處的含水層厚度的平均值，考慮的含水層厚度(h)為 13.3m。流速的計算採用二號機房至下游環境觀測井的水頭差計算水力梯度(表 4.3-1 未提供)，乘上水力傳導度(或係數)，水力傳導係數(K)採用來自為 4.3×10^{-3} cm/sec。有效孔隙率(n_e)採用來自 Haliburton NUS (1993)為 0.25，流速(u)為 6.1×10^{-2} m/day。延散度因為無資料以 NUREG 0868 的參數設定，延散度(dispersivity)在 x 、 y 與 z 方向分別為 60.96 cm、60.96 cm 與 9.14 cm。分析源點為點源，故設定的源頭長度為 0.3 m。模擬的核種為氙，氙的核種半衰(化)期(half-life)為 12.3 年，遲滯因子(R_d 為 1)。污染源位置為含水層最頂端位置 0 m。

分析以假設 3 種不同濃度曲線的形式釋放，濃度最大值 3.7×10^{10} Bq/sec。案例 1 假設一瞬間釋放的污染源，沿地表下滲接觸到地下水後，呈一突破曲線的濃度釋放型式，釋出時間為 1 年。案例 2 假設一持續釋放的污染源，沿地表下滲接觸到地下水後，呈一指數型的濃度曲線，釋出時間為 1 年。案例 3 假設一持續釋放的污染源，沿地表下滲接觸到地下水後，呈一指數型的濃度曲線，釋出時間為 10 年。分析源點污染濃度曲線如圖 4.1-3(核一廠報告圖 4.1-3)所示。

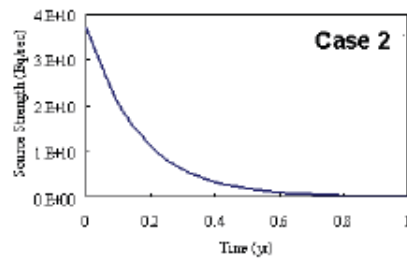


圖片來源：核一廠報告

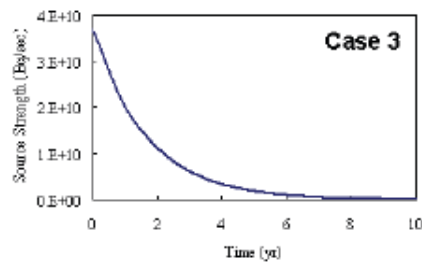
圖 4.1-2 核一廠地下水傳輸模型



(a) 案例1



(b) 案例2



(c) 案例3

圖片來源：核一廠報告

圖 4.1-3 假設的分析源點污染濃度曲線

4.2 核一廠地下水傳輸模式評析

地下水傳輸模擬的信賴有兩個關鍵因素，分別是選用貼進真實場址現況的模式與合理的參數。地下水傳輸基準版概念模式選用的解析解模式雖然是美國核能管理委員會報告的程式，但 1982 年的報告距今接近 40 年。GROUND 模式解析解，主要考量是(1)資料不足以使用複雜的模式；(2)當時的電腦在進行長時間(百年到千年)的分析，有限差分或有限元素法為基礎的數值模式會耗費大量的電腦計算時間。以現在高速電腦的地下水傳輸理論的快速進步與發展，有限差分或有限元素法為基礎的數值模式不再會大量的電腦計算時間，解析解模式已經有許多新世代功能更完善的解析解模式，特別是核種會因為衰變轉換而產生一系列子核種，也就是在含水層系統為多個衰變鏈核種成員共存，RESRAD OFFSITE v4.0 可以計算多個衰變鏈核種成員共存，計畫執行團隊 2021 最新發表的程式 MUST 與論文(Liao et al., 2021)也可執行多個衰變鏈核種成員共存的傳輸。

GROUND 地下水傳輸解析解模式在處理水流方向(x 方向)將邊界條件(式(4-5))設在兩個無窮遠處($-\infty \leq x \leq \infty$) 並不符合真實的現況，且會導致低估污染物濃度(Chen et al., 2012)的結果。相較於 GROUND 模式，STAMOD(STudio of ANalytical MODels) (Šimůnek 1999; van Genuchten, 2012) 免費下載軟體 (<https://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?stanmod>) 提供較合理的半無窮邊界 ($0 \leq x \leq \infty$)，而且有非常便利的使用介面。

核一廠報告對 GROUND 模式的數學推導過程之說明部分應可進一步作確認，核一廠報告的式(4-4)(155 頁)為一忽略垂直 z 方向濃度變化的二維解，從數學表示式可知無相關變數，再者，這個解僅適用瞬間注入源，如有應用於任意時間變化污染源之需求，可進行如本報告說明

的褶積計算(或參考 NUREG 0868 p. 3.21 的式(3-40))。

另外所建立的地下水傳輸基準版概念模式在相關參數的選用可就真實物理現象進行檢視並進一步調整與精進，以延散度而言，就地下水移流-延散傳輸的物理機制，合理的延散度設定應為沿水流 x 方向延散度遠大於 y 與 z 兩個方向，而此處選用 x 方向延散度與 y 方向延散度相同，未能貼切地描述真實物理現象，該參數設定的誤差將會造成水平水流垂直向污染團分布範圍高估與污染物濃度低估的結果。另外在污染源處理部份案例 1 從圖 4.1-3 來看不像一瞬間注入，案例 1 的最高濃度也與核一廠報告所敘述的濃度最大值 3.7×10^{10} Bq/se 有些許誤差。

由於放射性核種最主要的反應為其可因衰變而轉換至其它的放射性產物或穩定的核種，此即所謂的子核種(progeny)而形成所謂的衰變鏈(decay chain)。這種衰變鏈在模擬鈾系(actinides)或超鈾(transuranics)放射性核種的遷移特別重要，忽略母核種與子核種間的交互作用，就無法較真實且準確分析放射性核種衰變的傳輸行為。現代的解析解已經可以考慮核種衰變鏈多子核種的三維傳輸(Chen et al., 2019; Liao et al., 2021)，建議可採用可考慮核種衰變鏈多子核種的三維傳輸解析解模式或更複雜的地球化學數值模式。

4.3 核一廠防護監測方案簡介

關於核一廠防護監測方案本計畫團隊目前已收集並研析民國 99 年的「核一廠之地下水防護方案(修定版 Rev. 3)」與民國 108 年的「核一廠之地下水防護方案(修定版 Rev. 4)」。「核一廠之地下水防護方案(修定版 Rev. 4)」報告中包含「1.0 前言」、「2.0 監測目的」、「3.0 廠區的水文地質環境」、「4.0 電廠系統、結構與組件設計」、「5.0 地下水監測計畫」、「6.0 以往監測結果」、「7.0 報告」與「8.0 附圖、附件、附錄」。

在「1.0 前言」說明主要依據行政院原子能委員會 97 年來函參照美國核電廠「核電廠地下水防護指引(EPRI “Groundwater Protection Guidelines for Nuclear Power Plants”」與美國「核能界地下水防護倡議(NEI 07 07 Industry Ground Water Protection Initiative)」訂定「核一廠的地下水防護方案」。

「2.0 監測目的」則說明在於掌握監測區與廠區周圍環境地下水放射性核種的變化，確保無放射性物質污染地下水之虞，以確保廠區周圍民眾的健康與安全。另外也說明地下水監測計畫執行的成果作為修訂核一廠地下水防護的參考。

「3.0 廠區的水文地質環境」說明廠區的地質屬砂與礫石的沖積層，地下有兩層一為上部的自由區域(推測報告意謂非受壓含水層)，另一為圍束的區域(推測報告意謂受壓含水層與阻水層的組合)。上部地質材料為高滲透性，下部的地下水有自流水壓。地下水位觀測從 1969 年 1 月到 1971 年 4 月施工結束。根據地下水位觀測推測地下水流動是往海邊，自由區域的砂和礫石已移除，剩餘的圍束區域地下水不致有污染發生。另外也說明 EPRI “Groundwater Protection Guidelines for Nuclear Power Plants”依「核能一廠廠區地下水傳輸基準版概念模式報告(修訂四版)」結論，提出核一廠地下水防護方案地下水監測計畫的改善規畫。

「4.0 電廠系統、結構與組件設計」說明電廠系統、結構與組件的現況評估，其中針對廠區各放射性液體的相關系統、結構與組件(SSCs)審慎評估結果為可能潛在洩漏或外釋至地下水的管道為兩部機凝結水儲存槽(CST)區域與洗衣房、一號貯存庫、二號貯存庫的廢水排放管路、兩部機廢液處理系統延伸到廠房外的放射性廢水排放管路。針對過去的外溢與外洩事件評估說明民國 87 年 3 月 10 日，一號機大修期間發生 CST 槽水洩漏事件。另外也說明未來潛在可能的溢與外洩事件評

估，也採取因應作為，防止設備或管路有外洩情形發生。

「5.0 地下水監測計畫」說明依相關法規每年編訂「核一廠環境輻射監測計畫」，水試樣監測類別包括海水、飲水、池水、河水、地下水、定時雨水與定量雨水等七項。其中地下水的取樣站於乾華谷的南北兩端各設1站(共計2站)。後續依「核能一廠廠區地下水傳輸基準版概念模式報告(修訂四版)」結論，提出核一廠地下水防護方案地下水監測計畫的改善規畫，包括地下水監測井的增設4口與地下水監測井的維護6口、地下水監測作業方式與頻次以及改善工作時程。

「6.0 以往監測結果」則說明環境地下水的氡、Gross α 、 β 與 γ 核種監測結果正常，無發生放射性物質滲入地下水的情形。

「7.0 報告」主要說明例行報告與異常報告。

「8.0 附圖、附件、附錄」包括附圖一「核一廠 The Mean Groundwater Table 圖」、附圖二「核一廠 The Mean Groundwater Table 圖」、附圖三「核一廠環境監測井分佈圖」、附圖四「核一廠廠區環境監測井分佈圖」、附件一「核一廠環境輻射監測項目」、附件二「核一廠廠區及環境地下水監測的作業方式」、附件三「核一廠歷年環境地下水氡分析趨勢」、附件四「環境試樣放射性分析之預警措施基準」與附錄一「核一廠地下水污染防治現況評估」。

4.4 核一廠防護監測方案評析

由於「核一廠之地下水防護方案(修定版 Rev. 4)」參照 EPRI 的「Groundwater Protection Guidelines for Nuclear Power Plants」，因此工作團隊以其來評析核一廠之地下水防護監測方案，本工作團隊已翻議全文，並提供翻譯精簡版於附錄一。

EPRI 的「Groundwater Protection Guidelines for Nuclear Power Plants」

共包含 13 章與 1 附錄，第一章為「前言」、第二章為「地下水防護分級方法」、第三章為「潛在地表下外釋的評估」、第四章為「建立場址概念模型」、第五章為「選定、建置和測試地下水監測井」、第六章為「建立地下水採樣和分析過程」、第七章為「評估採樣和監測數據」、第八章為「方案驗證和審查」、第九章為「利益關係者溝通與監管機構」、第十章為「潛在緩解方案」、第十一章為「參考文獻」、第十二章為「其它技術參考文獻」與第十三章為「詞彙」，附錄 A 為「導則敘述列表」。

核一廠之地下水防護監測方案評析主要以 EPRI 的「Groundwater Protection Guidelines for Nuclear Power Plants」第三章至第七章與地下水防護監測方案實務工作相關的部分進行比較、檢核與分析。

在第三章「潛在地表下外釋的評估」中包括「歷史洩漏和傾洩評估」、「系統、結構與組件(SSC)評估」、「工作作業評估與 SSC」與「工作作業的優先順序」4 節，在「歷史洩漏和傾洩評估」相關工作，民國 108 年的「核一廠之地下水防護方案(修定版 Rev.4)」已說明過去的外溢與外洩事件評估說明民國 87 年 3 月 10 日，一號機大修期間發生 CST 槽水洩漏事件。在「系統、結構與組件(SSC)評估」，「修定版 Rev.4」已針對廠區各放射性液體的相關系統、結構與組件(SSCs)審慎評估，結果為可能潛在洩漏或外釋至地下水的管道為兩部機凝結水儲存槽(CST)區域與洗衣房、一號貯存庫、二號貯存庫的廢水排放管路、兩部機廢液處理系統延伸到廠房外的放射性廢水排放管路。「工作作業評估與 SSC」與「工作作業的優先順序」應可進一步於後續修訂版文件中納入相關說明。

在第四章「建立場址概念模型」中，包含「發展初版的場址概念模型」、「航測照片和工程圖」、「先前的水文地質報告」、「潛在的廠內和廠外的地下水污染受體」、「州和地方法規」、「地下水流特性的初步評估」

「場址的地下水流況」、「量測物理參數」與「宿命傳輸數值模式」9 節。

「發展初版的場址概念模型」部份，在 101 年「建立核能電廠廠區地下水傳輸基準版概念模式」已進行相關工作，應可進一步於後續修訂版文件中納入相關說明。

在「航測照片和工程圖」部份，應可於「修定版 Rev. 4」文件中納入相關說明。「先前的水文地質報告」部份，「修定版 Rev. 4」說明依照 CSNPS-FSAR 的地質調查結果，廠區的地質屬砂與礫石的沖積層，地下有兩層一為上部的自由區域，另一為圍束的區域。上部地質材料為高滲透性，下部的地下水有自流水壓。在「潛在的廠內和廠外的地下水污染受體」及「州和地方法規」部份，應可進一步於後續修訂版文件中納入相關說明。在「地下水流特性的初步評估」部份，依照 CSNPS-FSAR 的調查結果說明地下水流方向，在「建立核能電廠廠區地下水傳輸基準版概念模式」針對地下水流方向有較為詳細的說明。在「量測物理參數」部份，應可進一步於後續修訂版文件中納入相關說明。

「宿命傳輸數值模式」部份於「建立核能電廠廠區地下水傳輸基準版概念模式」已初步建立宿命傳輸數值模式，應可進一步於後續修訂版文件中納入相關說明。

在第五章「選定、建置和測試地下水監測井」中，包括「鑽井的計畫品質目標」、「井建置注意事項」、「監測井的建置」與「監測井維護方案」4 節。「修定版 Rev. 4」文件中說明後續依「核能一廠廠區地下水傳輸基準版概念模式報告(修訂四版)」結論，提出核一廠地下水防護方案地下水監測計畫的改善規畫，包括地下水監測井的增設 4 口與地下水監測井的維護 6 口、地下水監測作業方式與頻次以及善工作時程，其餘工作重點如「鑽井的計畫品質目標」、「井建置注意事項」、「監測井的建置」與「監測井維護方案」等應亦可納入後續修訂版文件中進行相

關說明。

在第六章「建立地下水採樣和分析過程」中，包括「地下水採樣的數據品質目標」、「樣品採集程序」、「分析物清單」、「對於陽性檢測的最低可檢測濃度要求和標準」、「樣品體積、容器和保存要求」、「採樣計畫」與「分析結果的驗證」7 節。「修定版 Rev. 4」在「5.0 地下水監測計畫」有說明地下水取樣站於乾華谷的南北兩端各設 1 站(共計 2 站)。在「地下水採樣的數據品質目標」部份，應可進一步於後續修訂版文件中納入相關說明。在「樣品採集程序」部份，「修定版 Rev. 4」的附件二「核一廠廠區及環境地下水監測的作業方式」說明取樣方式、取樣頻率與相關程序書，其取樣方式為以水樣取樣器汲取水樣至少 5 升，將抽水馬達輕放入水井內，抽取時儘量不接觸井底，以免攪動底泥或沉積物水樣倒入塑膠桶，前 5 分鐘抽出的地下水不應收集，若其後水樣仍渾濁不清，應延後收集時間，直至水樣澄清穩定為止。在「分析物清單」部份，「修定版 Rev. 4」的附件二「核一廠廠區及環境地下水監測的作業方式」有說明分析項目為 α 、 β 與 γ spectrum 與氫。在「對於陽性檢測的最低可檢測濃度要求和標準」部份，「修定版 Rev. 4」已說明分析作業將委託放射試驗室執行，應可進一步針對陽性檢測的最低可檢測濃度要求和標準進行說明。「樣品體積、容器和保存要求」部份，應可進一步於後續修訂版文件中納入相關說明。在「採樣計畫」部份，「修定版 Rev. 4」的附件二「核一廠廠區及環境地下水監測的作業方式」僅說明廠區地下水取樣由核一廠負責，環境地下水取樣分析作業由台電放射試驗室負責。在「分析結果的驗證」部份，應可進一步於後續修訂版文件中納入相關說明。

第七章「評估採樣和監測數據」包括「分析數據評估」、「廠內水質指標數據評估」、「分析數據管理和數據品質評估」、「環境濃度」與「場

址概念模型的審查和修訂」。在「分析數據評估」部份，「修定版 Rev. 4」的「6.0 以往監測結果」說明核一廠環境地下水的氡、Gross α 、 β 與 γ 核種監測結果均屬正常，無發生放射性物質滲入地下水的情形，「附件三 環境地下水氡分析趨勢」有提供分析數據評估。在「廠內水質指標數據評估」，「修定版 Rev. 4」應可進一步針對濁度、溫度、pH、氧化還原電位(ORP)、電導度、溶解氧等基本水質指標數據的評估進行說明。在「分析數據管理和數據品質評估」部份，應可進一步於後續修訂版文件中納入相關說明。在「環境濃度」部份，「修定版 Rev. 4」的「附件四 環境試樣放射性分析之預警措施基準」已考慮水、空氣、農魚產品、蔬菜草樣、奶樣與沉積物。在「場址概念模型的審查和修訂」部份，應可進一步於後續修訂版文件中納入相關說明。

4.5 研擬除役廠址地下水防護管制建議

EPRI 「Groundwater Protection Guidelines for Nuclear Power Plants」以系統式非常詳細說明各種地下水防護執行的步驟、執行導則與細節說明，相關的導則具體可行，也應可適用台灣現有核電廠地下防護相關工作。建議管制單位要求台電公司須強化地下水專業的培育，並能詳細掌握相關導則的目的與執行細節，以精進除役期間地下水防護相關工作。

地下水防護的首要工作為了解可能的污染來源，在污染來源的部份，建議管制單位要求台電公司在完成 SSCs 可能潛在的外釋來源評估後，建立持續盤點確認的機制。

對地下水的防護工作而言，有效的監測井網設置為確實掌握地下水污染動態的工具，地下水監測井網的設置除考慮地下水污染源外，場址概念模型為監測井網設置最重要的參考依據，場址概念模型主要是說明場址的地質、水文與化學。在地質的部份由於幾十年來公共建設的

進行而新增鑽孔、監測井岩心資料以及政府部門(環保署、中央地質調查所與水利署)的地質資料,建議管制單位要求台電公司在更新資訊時,若廠區內部或其他政府單位於鄰近地區有新的地質鑽探資料,則可進行資料比對,並視需要整合有助於建立更具信賴度之地層層序關係的資料。

在水文的部份,由於氣候變遷影響,水文環境的改變也可能改變地下水流向,地下水水位為決定地下水流方向的基本資料,加上地下水位自動記錄與資料的即時傳輸便利性,建議管制單位要求台電公司須加強地下水位的觀測,以確實掌握地下水流動的時空變化。

在整合過去與新增的地質與地下水位資料,應可發展最貼近現況的場址概念模型。有了場址概念模型,地下水(宿命)傳輸模式於評估污染物在地下水遷移的可能動態評估扮演重要的角色。在資料不足時得採解析解作為初步篩選級別評估的工具,建議管制單位要求台電公司須逐步充實資料,並視需要採取數值模式建立地下水污染遷移的預測工具。

地下水污染遷移預測的工具對選定地下水監測井位置非常有幫助,建議管制單位要求台電公司在選定新增地下水監測井位置後,監測井的建置與維護須依據 EPRI 導則內容(包括參考文獻)執行外,另應適切納入國內規定(如環保署相關監測井設置辦法)之考量。

監測井建置最主要是提供地下水水質採樣並送實驗室分析,建議管制單位要求台電公司在地下水水質採樣與樣品的保存須依據 EPRI 導則內容(包括參考文獻)執行外,另應適切納入國內規定(如環保署相關地下水採樣方法說明)之考量。

地下水質採樣的重要目的是要取得緊鄰監測井週邊含水層地下水

的代表性水樣，水質指標參數穩定是確認是否取得代表性水樣的依據，建議管制單位要求台電公司建立具可信度監測數據之適切機制。

我國於民國 89 年通過「土壤與地下水防治法」後，這 20 年來在污染場址的水文地質調查、地下監測井的建置與維護、地下水採樣、樣品的保存與運送，國內業界已建立一套標準流程，其與 EPRI 導則有相同之處，建議管制單位要求台電公司在除役期間進行地下水防護時，應適切納入國內標準流程之考量。

第五章 結論與建議

本計畫執行可以總結三部份成果：

- 一、在評估我國核電廠於除役期間地下水文特性之重要參數，本計畫依場址概念模式，分別考慮主要污染區、部份飽和區與飽和區分析相關地下水文特性之重要參數。
- 二、在檢視目前國內進入除役期間之核一廠地下水傳輸模式，本計畫就模式選用與參數選用的合理性進行評析與應有的修正。
- 三、在核一廠地下水防護監測方案之內容，本計畫以 EPRI 「Groundwater Protection Guidelines for Nuclear Power Plants」為基礎分析相關地下水防護監測方案，提出應依據 EPRI 導則，並適切考量 20 年以來國內土壤及地下水污染整治場址水文地質調查、監測井設置與維護以及地下水採樣的經驗，做為未來管制單位要求台電公司核電廠除役期間地下水防護監測方案精進的可行方向。

本計畫提出以下建議作為後續管制參考：

- 一、建議管制單位要求台電公司強化地下水專業培育，掌握 EPRI 核電廠地下水防護指引目的與執行細節，精進除役期間地下水防護相關工作。
- 二、針對潛在可能污染來源，建議管制單位要求台電公司在完成 SSCs 可能潛在外釋來源評估後，建立持續盤點確認的機制。
- 三、在地質及岩心資料更新時，建議管制單位要求台電公司視實際需要進行資料整合，以建立更具信賴度之地層層序關係及現地資料。
- 四、建議管制單位要求台電公司加強地下水位監測，以更準確掌握

地下水流動的時空變化。

- 五、 資料不足時得採宿命傳輸解析解模式作為初步篩選級別評估工具，建議管制單位要求台電公司後續逐步充實水文地質資料，並視需要建立數值模式作為地下水污染遷移預測工具。
- 六、 廠區地下水監測井設置、監測與維護工作，及地下水水質採樣與樣品的保存等應參考國內外規範，建議納入後續管制之要求。
- 七、 在管制審查時，針對採用 RESRAD 或類似分析評估程式內與場址地下水特性有關之參數(例如地下水滲流速度、延散係數等)，建議採系統化方式建立各廠特定參數，不宜採用分析評估程式提供之預設值。
- 八、 國內業界之標準流程與 EPRI 核電廠地下水防護指引有相同之處，建議未來在除役期間進行地下水防護時，應適切納入國內標準流程之考量

參考文獻

1. Al Ananzeh, N., Bergendahl, J. A., & Thompson, R. W. (2006). Kinetic model for the degradation of MTBE by Fenton's oxidation. *Environmental Chemistry*, 3(1), 40-47.
2. Army, U. S. (1995). Remediation of Contaminated Army Sites: Utility of Natural Attenuation No. Draft Report. US Army Science Advisory Board, Infrastructure and Environmental Group, Department of Army.
3. ASTM, S. (1997). Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. ASTM D790. Annual book of ASTM Standards.
4. Aziz, C.E., C.J., Newell, J.R. Gonzales, P.E. Haas, T.P. Clement, and T. Sun, 2000. BIOCHLOR Natural Attenuation Decision Support System, User's Manual Version 1.0. EPA/600/R-00/008, USEPA Office of Research and Development, Washington D.C.
5. Barnett B., Townley L.R., Post V., Evans R.E., Hunt R.J., Peeters L., Richardson S., Werner A.D., Knapton A. and Boronkay A., 2012. Australian groundwater modelling guidelines. Waterlines Report Series No. 82., National Water Commission.
6. Bedient, P. B., Rifai H. S., and Newell C. J., 1999. Ground Water Contamination: Transport and Remediation, 2nd Ed. PTR Publ., Upper Saddle River, NJ.
7. Bedient, P.B., Rifai, H.S., Newell, C.J., 1994. Ground water contamination: transport
8. Šimůnek, J., M. Th. van Genuchten, M. Šejna, N. Toride, and F. J. Leij, The STANMOD computer software for evaluating solute transport in porous media using analytical solutions of convection-dispersion equation.

- Versions 1.0 and 2.0, IGWMC - TPS - 71, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, 32pp., 1999.
9. van Genuchten, M. Th., J. Šimůnek, F. L. Leij, N. Toride, and M. Šejna, STANMOD: Model use, calibration and validation, special issue Standard/Engineering Procedures for Model Calibration and Validation, Transactions of the ASABE, 5(4), 1353-1366, 2012.
 10. 「USER's Manual for RESRAD Version 6」 (Argonne National Laboratory, 2001)
 11. 「User's Manual for RESRAD-OFFSITE Code Version 4: Vol. 1 – Methodology and Models Used in RESRAD-OFFSITE Code」 (Argonne National Laboratory, 2020)
 12. 「User's Manual for RESRAD-OFFSITE Code Version 4: Vol. 2 – User's Guide for RESRAD-OFFSITE Version 4」 (Argonne National Laboratory, 2020)
 13. 「Groundwater Protection Guidelines for Nuclear Power Plants: Public Edition」 (Electric Power Research Institute, 2008)
 14. 「A Collection of Mathematical Models for Dispersion in Surface Water and Groundwater」 (U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1981)
 15. 環境資訊中心：<https://e-info.org.tw/>。查詢時間：2021/11/06。
 16. 鄭仲庭，2008，異向垂直循環流場溶質傳輸分析，國立中央大學，碩士論文。
 17. 顏丞凱、劉志忠、潘時正，2010，現地化學氧化法實場應用與案例探討，中興工程顧問股份有限公司，桃園縣大學校院產業環保技術服務團環保簡訊，污染防治經驗談，第7期。
 18. 台灣電力股份有限公司，2012，建立核能電廠廠區地下水傳輸基準

版概念模式。

19. 顏永欣，2015，Fenton(芬頓)氧化法整治化學工廠土壤及地下水污染實例研究，崑山科技大學，碩士論文。
20. 台灣電力股份有限公司，2019，核一廠地下水防護方案。
21. 原子能委員會，2020，109 年核電廠除役期間廠址地下水防護管制特性研析。

附錄一、
EPRI 「Groundwater Protection
Guidelines for Nuclear Power Plants」
中文翻譯精簡版

目錄

	頁碼
第一章 前言	1
第二章 地下水防護分級方法	1
第三章 潛在地表下釋放的評估	1
3.1 歷史洩漏和傾洩評估	1
3.2 系統、結構和組件(SSC)評估	2
3.3 工作作業評估	3
3.4 SSC 與工作作業的優先順序	3
第四章 建立場址概念模型	3
4.1 發展初版的場址概念模型	3
4.2 航測照片和工程圖	3
4.3 先前的水文地質報告	4
4.4 潛在的廠內和廠外的地下水污染受體	4
4.5 州和地方法規	4
4.6 地下水流特性的初步評估	4
4.6.1 地下水評估	4
4.6.2 轉前的地下水和地質資料	4
4.6.3 區域的水文地質特性	4
4.7 場址的地下水流況	5
4.7.1 井的設置	5
4.7.2 水平方向的分布與流動	5
4.7.3 垂直方向的分布與流動	5
4.7.4 流態、連通性與水力傳導性	5
4.8 量測物理參數	5
4.8.1 水位傳感器	6
4.8.2 地球物理試驗	6
4.8.3 水力傳導性試驗	6
4.8.4 水文物理試驗	6
4.9 宿命傳輸數值模式	7
第五章 定位、安裝和測試地下水監測井	7
5.1 鑽井的計畫品質目標	7
5.2 井安裝注意事項	7
5.2.1 鑽井配置管理	7
5.2.2 鑽井許可證要求	8
5.2.3 鑽井的位置	8
5.2.4 採樣的可及性	8
5.3 監測井的建置	9

5.4	監測井維護方案	9
第六章	建立地下水採樣和分析過程.....	10
6.1	地下水採樣的數據品質目標	10
6.2	樣品採集程序	10
6.3	分析物清單	11
6.4	對於陽性檢測的最低可檢測濃度要求和標準	11
6.5	樣品體積、容器和保存要求	11
6.6	採樣計畫	11
6.7	分析結果的驗證	12
第七章	評估採樣和監測數據.....	12
7.1	分析數據評估	12
7.2	現場水質指標數據評估	12
7.3	分析數據管理和數據品質評估	13
7.4	環境濃度	13
7.4.1	背景放射性元素濃度	13
7.4.2	與電廠有關放射性元素在大氣中沉積	14
7.4.3	電廠有關的液體通道	14
7.5	場址概念模型的審查和修訂	14
第八章	方案驗證和審查.....	14
8.1	具有獨立審核的方案啟動	14
8.2	重新驗證地下污染的潛在來源	15
第九章	利益關係者溝通與監管機構.....	15
第十章	潛在緩解方案.....	15

第一章 前言

核電廠地下水防護指引為核電廠業者提供在核電廠實施地下水防護方案的指引 (guidelines)。目標是控制放射性物質 (licensed material) 盡量減少電廠運轉對環境的潛在規劃外與不受監測的排放，並盡量減少與潛在地下水和地下污染有關的長期成本。

技術導則(Technical guidance)是為了實施兩階段地下水防護方案。第一階段包括進行評估以進一步瞭解 SSC (系統、結構、組件) 或工作作業對場址土壤或地下水污染的風險。第二階段為提供實施全面的基準地下水監測方案 (comprehensive baseline groundwater monitoring program) 之導則。

第二章 地下水防護分級方法

2.1 基準版方案(Baseline Program)

基準版方案(Baseline Program)是技術健全的地下水防護方案的一個例子，應實施在整個商業核電業界。其他技術健全與有記錄的方案可用於代替此基準版。基準版方案的構成元素相關內容請參見 EPRI 指引。

構成基準版方案的導則說明在第 3 節到第 8 節中確認"[BASELINE]"一詞，相關內容請參見 EPRI 指引附錄 A。

2.2 升級版方案(Elevated Program)

在污染風險較高的場址 (例如，更複雜的水文地質、更接近洩漏/傾洩場址邊界、污染量更大)，需要額外的工具以正確特徵化和預測地下水污染的遷移。"升級版方案(Elevated Program)"是一套更複雜的地下水特徵化方法，可用於此情況下並由持照人自行決定。

第三章 潛在地表下釋放的評估

對潛在地表下釋放的評估至少應包括審查和執行本節中列出的基準版方案要素。

3.1 歷史洩漏和傾洩評估

導則說明 3.1a [基準版]：應評估和記錄潛在釋放場址相關放射性核種到環境的傾洩物與其他地表下污染事件。獲取所有記錄的洩漏之放射性日期、位置、體積和數量的估計。此類資訊若尚未存檔，應在 10 CFR 50.75 (g) 檔中歸檔。

導則說明 3.1b [基準版]：評估針對洩漏而採取的任何補救行動，以確定可能回復的洩漏量，以及仍是地下水污染持續潛在來源的污染量。

3.2 系統、結構和組件(SSC)評估

為了更瞭解 SSC 對土壤或地下水影響的可能性，應考慮採取以下行動。

3.2.1 系統、結構和組件設計的評估

導則說明 3.2.1a [基準版]：應針對包含或可能含有放射性液體的 SSC 進行全面評估，無論高於或低於等級(grade)。只有那些具可信潛能可向土壤或地下水釋放放射性液體的 SSC 才需要在評估中予以考慮。所關注的 SSC 例子包括，但不限於，radwaste 系統、積水(sumps)和排水(drains)、用過燃料儲存池和洩漏檢測系統以及輔助系統(secondary systems)。確認關注的 SSC 並評估其適用元件、位置、年限和目前物理狀況。

導則說明 3.2.1b [基準版]：可能的話，與場址相關的放射性核種的確認 SSC 進行採樣和分析。分析伽馬伽瑪發射體和氬。

導則說明 3.2.1c [基準版]：使用資料庫或試算表工具收集並使用與 SSC 相關的數據，以確保記錄總結果、保留和隨時檢視。

3.2.2 確認現有之預防性維護和檢查方案

為了更佳瞭解現有的 SSC 的預防性維護和檢查方案，應考慮以下行動：

導則說明 3.2.2a[基準版]：對於第 3.2.1 節中確定的每一 SSC，為確保其完整性而制定的預防性維護、監視和檢查計劃進行審查和摘要。確保預防性維護和檢查計劃至少包括定期評估不合格或難以到達之 SSC，以及定期對合格或容易到達 SSC 進行視覺(visual)評估。

導則說明 3.2.2b[基準版]：對於未執行檢查和驗證的 SSC，根據 SSC 提出的條件和意外釋放的潛在可能性評估此類活動的必要性。

3.2.3 潛在持續釋放之評估

為了更瞭解 SSC 關於持續釋放可能性的情況，應考慮以下操作：

導則說明 3.2.3 [基準版]：評估導則之第 3.2.1 節執行期間確定的 SSC，針對可能洩漏到環境或現有未分析的路徑。考慮 SSC 的年限、當前物理狀況、維護之歷史以及任何洩漏測試或其他驗證 SSC 完整性方法的結果。

3.3 工作作業評估

導則說明 3.3 [基準版]:應評估工作作業以評估其造成地下水污染的可能性。其中只考慮那些有可信潛力導致或允許放射性液體釋放到土壤或地下水中的工作作業。如果證實地下水污染，則考慮先前的工作作業不能再使用。記錄此工作作業評估的結果。

3.4 SSC 與工作作業的優先順序

決定 SSC 或工作作業相對優先順序的因素可能會隨時間的而改變，可能是設備老化、程序和流程的修改、地方、州或聯辦法規的改變、利益相關者的構成或觀點的改變以及其他原因造成的。因此，應定期重新評估導致 SSC 或工作作業優先順序的相對風險因素。

第四章 建立場址概念模型

場址概念模型(Site conceptual model, SCM)整合了關切污染物、核電廠的 SSC(系統、結構與組件)，歷史和潛在的持續進行的污染釋放、以及現場水文地質，形成統一的假說解釋了所觀察到的地下水污染物分佈、污染源區、傳輸途徑、環境中的污染物宿命以及受體的風險等的可取得資訊。

場址概念模型為場址水文地質調查設計的基礎，場址概念模型可幫助決定監測井的鑽孔位置與深度、應取樣的樣品、收集樣品的頻率、以及什麼類型的地球物理或水力試驗可能有用。

4.1 發展初版的場址概念模型

導則說明 4.1 (基準版):應該要發展初版的場址概念模型

初版的場址概念模型為非數值的場址水文地質模型，當與其他資料結合使用時，試圖對污染物釋放的方式和地點、發生或可能發生的情況、污染物如何在環境中的移動或可能移動、以及污染物對人類健康和環境可能產生的影響提出初步的假說。

4.2 航測照片和工程圖

導則說明 4.2 (基準版):檢視例如現存場址建造建築時期的照片、航測照片和工程圖等參考資料，這些參考可以呈現地下水位以下且可能會改變的場址地下水和污染物移動的基礎、管路，導管，雨水溝渠和其他 SSC（系統、結構與組件）

4.3 先前的水文地質報告

導則說明 4.3a (基準版):檢視(如果可以取得)場址先前的水文地質調查報告

導則說明 4.3a (基準版):如果監測井的建置是在以前場址的水文地質研究且將使用於場址地下水防護計劃中，須驗證監測井是否按照現行標準建置。

4.4 潛在的廠內和廠外的地下水污染受體

導則說明 4.4a (基準版):確定公眾接觸的來源的可能代表的水源(例如飲用水或食物/飼料灌溉用水)。包括廠內與公用設施所有者控制的物業附近水源。確認此類水源的用途。

導則說明 4.4b (基準版):編譯、記錄並定期重新驗證廠內和臨近廠內的水井和湧泉的位置，深度，用途和出水量。

導則說明 4.4c (基準版):確定場址下游是否有濕地或河口的存在。

4.5 州和地方法規

導則說明 4.5 (基準版):查看與地下水的放射性污染有關的州和地方的適用法規。

4.6 地下水流特性的初步評估

4.6.1 地下水評估

導則說明 4.6.1 (基準版):評估與地下水位高程相關的記錄。在評估中記錄包括顯示地表水和地形的場址地圖或區域地圖，施工前的鑽孔資料、位置、深度，在建造水坑和豎管時的靜態水位高程，活動水坑和供水井的位置和工作水位以及鄰近地表水、未加襯砌的蓄水池和運河的高程。

4.6.2 運轉前的地下水和地質資料

導則說明 4.6.2 (基準版):評估在電廠的初始選址調查的地質研究。

4.6.3 區域的水文地質特性

導則說明 4.6. 3a (基準版):審視美國聯邦地質調查局和州地質調查局的報告以及地圖

導則說明 4.6. 3b (基準版):確保適用場址許可執照依據文件與參考的區域報告中包含的資訊一致。

將提供有關場址所在區域的地質資訊，有助於了解影響流經場址地下水流的地質材料構造與分佈。

4.7 場址的地下水流況

4.7.1 井的設置

調查井和監測井均可用於收集以用於發展特場址的地下水流況所需的資訊。

4.7.2 水平方向的分布與流動

導則說明 4.7.2 (基準版):尋找監測井，以便充分分析水平地下水流。

監測井可充分分析水平地下水流。初步檢測放射性污染的工作可能針對在地下水位（淺）含水層，因為該含水層將最靠近位於地表或附近污染物來源，如果檢測到污染物則需進行其它新增調查，這些新增的調查可能包括在淺層含水層鑽數口井以劃定了影響的範圍。如果確認有污染，則應該在下方的地層新增鑽孔，以分析污染物的垂直分佈遷移。水平流的方向和污染物傳輸潛勢可以藉由測量同一含水層中完成得幾口井的水位的高程來確認。

4.7.3 垂直方向的分布與流動

導則說明 4.7.3 (升級版):如果在淺層含水層檢測到污染則建置其它監測井以分析污染團的垂直範圍，且更完整分析水平範圍。

如果在淺層含水層檢測到污染則建置其它監測井以分析污染團的垂直範圍，且更完整分析水平範圍。在淺層和深層含水層中分析物濃度的量測將可呈現在地下水流區域內污染物垂直傳輸的範圍，含水層間垂直方向流動的潛勢的方向和污染物的傳輸潛勢，都可以藉由比較在不同含水層內完成的幾口井中的水位高程來估算。

4.7.4 流態、連通性與水力傳導性

導則說明 4.7.3 (升級版):如果多個含水層輻射污染確認，在各個岩層中進行含水層試驗，以確認是否各地層間存在水力連通。

如果已確認多個含水層區域受到放射性污染，則含水層試驗有助於辨識各含水層區域之間的水力連通。含水層試驗也將提供一種量測含水層地質材料水力傳導性的方法。這些資料有助於分析場址下方地質材料的水力傳導特性，並深入了解可能進入地下水流系統污染物的可能流動路徑，這些資料可以用來做為建構水流系統數值模型的輸入參數，有關含水層試驗和水力傳導的相關資訊。

4.8 量測物理參數

包括水位傳感器、地球物理試驗、水力傳導性試驗與水文物理試驗。

4.8.1 水位傳感器

井和地表水體中的水位為水流潛勢和方向的重要指標，水位會隨著包括降水補注、地下水退水、潮汐流和鄰近井的抽水等幾個過程而連續波動。

導則說明 4.8.1 (升級版*):考慮使用數據記錄壓力傳感器記錄選定監測井中水位的變化。

4.8.2 地球物理試驗

導則說明 4.8.2 (升級版*):分析地下水系統的詳細水力特性，如果具有基岩或場址特定的地層學複雜性等特徵可能會影響污染物流動以及需要進一步評估。

除了鑽井、含水層試驗以及環境介質採樣和分析之外，地球物理方法是決定地下水系統水力特性的另一種方法。

4.8.3 水力傳導性試驗

含水層試驗可用來決定各類含水層參數，水力傳導係數因為可用於計算地下水流動速率因此通常最受關注，可以藉由含水層試驗決定水力傳導係數，但水力傳導係數也可以使用孔隙率和粒徑數據來決定。

導則說明 4.8.3 (升級版):考慮進行含水層試驗以估算地下水流速率。

含水層試驗要求以已知的速率將一口井抽水一段時間，抽水時間範圍可從幾個小時到幾天，在抽水期間和抽水後都要量測抽水井和鄰近井的水位，量測結果繪製在水文圖上以顯示出水位隨時間變化，這些水位圖可以用來評估以計算包括水力傳導係數等的含水層參數。

由於含水層試驗是一項相對複雜的工作，因此只有有限數量的試驗進行，這些試驗通常在關注的特定區域的選定井中進行，這些區域可能包括已確認的污染團、可能預期地下水整治的區域，或者對建立污染物遷移數值模式須詳細估算含水層水力參數的區域，進行含水層試驗可能因抽水試驗中所產生的水力梯度進而會造成污染物從較高污染區域往較低污染區域遷移的風險。

4.8.4 水文物理試驗

在那些已經證實破裂基岩含水層中有污染的電廠，詳細流動區域特性分析為必需的，水文物理試驗是成功用於達成該詳細分析的一種技術。

導則說明 4.8 (升級版):水文物理試驗進行可以識別在固結基岩地層中的含水裂縫和裂縫帶。

這種地下測量工具最常應用於未安裝井篩和套管前的開放基岩鑽孔之前，以便可以直接進行測量基岩地層。

水文物理試驗可以使用精確定量地層內單個裂縫或裂縫帶的比出水量和水

力傳導係數，鑽孔內的水文物理試驗結果可以使研究人員準確地識別出井孔和周圍裂隙基岩地層中含水特徵的大小和位置。該試驗方法可用於選定的基岩井中，以識別污染物傳輸發生的那些離散的區域(例如在確定的污染團)、可能預期需要進行地下水進行整治的區域、可能需要對地下水進行整治的區域，或者對建立污染物遷移模型須進行了詳細估算含水層水力參數的區域。

4.9 宿命傳輸數值模式

導則說明 4.9 (升級版):評估是否有宿命傳輸數值模式的需要，並在適合情況下發展宿命傳輸數值模式。

污染物宿命和傳輸數值模式為了解及預測在地下水中污染物濃度的時空變化重要工具，宿命和傳輸數值模式可藉由預測在選定的合規點的污染物的遷移時間和濃度，並提供圖示污染團範圍做為聯結場址狀況與利益相關者重要工具。場址的地下水污染物濃度低且充分了解污染團特性，可能不太需要費力去發展宿命和傳輸數值模式。

第五章 定位、安裝和測試地下水監測井

建立有效的地下水監測井網應包括至少本章列出的基準方案元素的審查和執行。

5.1 鑽井的計畫品質目標

導則說明 5.1 [基準]:考慮建立和記錄鑽井的資料品質目標(data quality objectives, DQO) 流程

“DQO 流程，可指引管理人員或員工以資源有效率的方式獲取環境資料方案的一系列邏輯步驟…資料品質目標用於建立收集足夠質與量的資料以做為設計方案的基礎的功能表現和接受標準。”

5.2 井安裝注意事項

5.2.1 鑽井配置管理

導則說明 5.2.1.a [基準版]:記錄監測井建置細節

對井建置細節的了解有助於評估從監測井中所取得樣本的分析結果，包括以下內容：

- 鑽井方法
- 總井深度
- 井在含水層的開篩深度間距(井篩區)
- 井中地下水的大致深度

- 井篩區附近的任何濾料的類型和厚度
- 將井篩區與上方或下方地層完全隔離的任何阻水材料的類型和厚度
- 完井的方法

導則說明 5.2.1.a [基準版]:建立資料庫供收集和使用井的施工資料，以確保扼要結果得以記錄、保留和方便檢索。

5.2.2 鑽井許可證要求

導則說明 5.2.2 [基準版]:審查州和地方機構的法規確定鑽探地下水監測井的管轄要求。

5.2.3 鑽井的位置

導則說明 5.2.3 [基準版]:根據場址概念模型與每個 SSC 和工作實務的評估結果決定井的位置。

根據場址概念模型與每個 SSC 和工作實務的評估結果決定井的位置。

相較於監測井，位於 SSC 附近且下游的確定為優先的一口或多口井被，將有助於確認可能對地下水產生影響的洩漏、溢出或來自 SSC 未經分析的路徑。如果兩個或多個較高等級的 SSC 非常接近，則位於兩個或多個較高等級的 SSC 的點下游的監測井非常適合用來決定是有洩漏發生，如果經地下水監測確認污染，可能需要額外的井才能確定那個 SCC 是污染來源。

至少需要三個井來描述理論“地下水位”的平面，並且推斷地下水流向，地形和地層的變化將影響地下水流量並影響確定關注區域地下水流與污染物流向變化所需的水井數量。在污染物從來源外釋的流動路徑中設置井是確定來源的基本工作，然而在非固結土壤中，地下水流擴散橫越流動的前緣。通常會導致距離污染源下游污染團變寬。因此，為仍提供有用的資料示踪污染團，井的位置通常可偏移十英尺(3 公尺)或更多以避免設施、結構和其他障礙物。這種普遍性不太適用於裂隙基岩，在裂隙基岩污染物離散裂隙流動，可能不允許在寬廣的流動前緣上擴散，裂隙趨勢的方向可能與主要地下水流方向不同。如果該場址的水文地質剖面確認飲用水井位於所有者控制的財產內或之外以及潛在污染團地下水的流動路徑之內，應將監測井放置在水井的上游但是在潛在污染源的上游，以監控對他們的潛在影響。

5.2.4 採樣的可及性

導則說明 5.2.4 [基準版]:驗證監測井安裝是否有足夠的直徑以進行適當的採樣。

5.3 監測井的建置

導則說明 5.3a [基準版]:在合格的地球科學家/工程師指導下安裝並記錄監測井。

導則說明 5.3b [基準版]:按照公認的標準建造和維護調查井與監測井。

公認的標準包括有關設置監測井的州指引或規定，ASTM D5092-04 “Standard Practice for Design and Installation of Ground Water Monitoring Wells” (參考文獻 7)，ASTM D5978-96(2005) “Standard Guide for Maintenance and Rehabilitation of Ground-Water Monitoring Wells” (參考文獻 8)，USEPA “Handbook of Suggested Practices for the Design and Installation of Ground Water Monitoring Wells” (參考文獻 9)。

導則說明 5.3c [基準]:以合適的尺寸和深度的置具，且井篩是在最有可能到電廠外釋的影響區域安裝調查井和監測井。

導則說明 5.3d [基準]:在調查和監測井時鑽孔時貫穿地質材料的採樣、檢視和記錄。

5.4 監測井維護方案

導則說明 5.3a [基準版]:製定並執行監測井維護方案

地表水可能會經由破裂的井套管或密封不當地表完工而進入監測井可能會污染當地地下水或改變其化學物質，必須確定從監測井中取樣的地下水是代表鄰近井含水層內的水質，重要的是要保持定期檢查這些組件，以確保井套管和地表完工的完整性，並立即開始任何必要的維修，如參考文獻 8 和 11 所述。

同樣，受污染的地表水也會通過管線或電線桿設施貫穿過混凝土或瀝青鋪面的不透水的表面入滲進入地下水，這被污染的水會影響臨近的監測井，需要注意確保一般不透水表面的貫穿已適當密封。

如果要依靠地下水樣本的分析結果來建立關於地下水污染的是否存在意見，無論監測井的類型如何，確保證進行施工和維護實務的品質是必要的，

藉由直接貫入方法建置的調查井的安裝過程雖然與其他方法不同，但要防止地表水入滲，要準備井口保護，並確認井深隨時間推移保持一致（以呈現井篩沒有充滿粉土）通常對所有類型的監測井都是必要。根據 ASTM-5978 採樣並趨勢化井的物理化學特性(參考文獻 8)。

導則說明 5.4b [基準]:使用有執照的鑽井承包商或在合格的地球科學家/工程師指引下建置監測井地表完工。

導則說明 5.4c [基準]:包括在場址地下水監測方案所有井的表面完工檢查作為正式且有文件證明的檢查程序。

導則說明 5.4d [基準版]:根據適當的標準不再使用於預期目地的退役監測井。

第六章 建立地下水採樣和分析過程

6.1 地下水採樣的數據品質目標

導則說明 6.1 [基準版]：以採樣計劃或程序的形式，對於每個採樣活動建立並記錄數據品質目標(DQO)或等效策略。

通過 DQO 流程確定並記錄以下地下水採樣特性：

- 樣品目的和目的
- 代表性數據所需的樣本數量
- 採樣方法
- 採樣過程中要測量的水質指標及其接受標準
- 管理採樣廢棄物的方法
- 樣品分析物
- 樣品保留時間
- 所需水樣容量、容器類型及保存
- 現場品質控制樣品的數量和類型
- 樣品處理、標籤、存儲、運輸和監管鏈程序
- 採樣人員的資格和培訓要求
- 適用的法規限制
- 分析方法和所需最低可偵測濃度(MDC)
- 所需的分析方法不確定性
- 實驗室品質控制樣品的數量和類型，以及分析的接受標準
- 每個分析批次所需的樣品數量
- 如果無法獲得樣品，則應採取的替代措施
- 如果未達到 MDC，則應採取的替代措施
- 樣品分析結果的驗證方法

6.2 樣品採集程序

導則說明 6.2a [基準版]：建立一般和特殊監測地下水採樣程序，並處理以下項目：

- 採樣計劃
- DQOs（如果適用）
- 樣品採集方法
- 採樣過程中檢測水質指標及其接受標準
- 樣品分析物
- 樣品存放時間
- 所需樣品容量、容器類型和保存
- 現場品質控制樣品的數量，例如重複樣品、基質添加樣品、設備沖洗空白

和分樣樣品

- 採樣人員的資格和訓練要求
- 採樣廢棄物的管理，包括洗井水
- 樣品處理、標籤、存儲和運輸
- 保管鏈
- 分析數據的接收和審查

導則說明 6.2b [基準版]：在地下水污染地區進行採樣時，在收集樣品之前應適當控制從井中抽取的水，請適當評估洗井水之處置。

6.3 分析物清單

導則說明 6.3a [基準版]：至少根據以下內容選擇分析物：SSC 中所含的放射性元素是地下水污染的潛在來源，始終包括氚及 γ 放射性元素，在分析物列表中包括感興趣 SSC 的過去和目前來源，對場內洩漏、傾洩或未分析路徑的歷史分析，以及對土壤、地下水和其他環境樣品介質中放射性核元素陽性檢測的回顧。

對於選擇採樣位置，因為大量存在主要冷卻水中和在地下水系統中流動性，氚一直被認為是主要分析物。半衰期少於幾天的放射性元素通常不適合用於地下水監測，可將地下水中相對不移動的放射性元素從分析物列表中移除。

導則說明 6.3b [基準版]：定期重新評估分析物清單，如果已經進行了幾次檢測放射性元素分析，而始終沒有檢測到放射性元素，則可以考慮從分析物列表中刪除該放射性元素。或者，電廠改變過程或先前未發現污染物的檢測可能促使分析物列表中增加放射性元素。

6.4 對於陽性檢測的最低可檢測濃度要求和標準

導則說明 6.4 [基準版]：對於建立 MDC 的理由之建立並記錄，以及當統計上有效分析結果的決定標準。

建立用於分析每種放射性元素的 MDC，是任何採樣活動 DQO 流程中一個要素。當分析結果為陽性檢測，相關元素是決定標準。該標準基於分析測量不確定性，該不確定性隨著 MDC 的降低而增加。

6.5 樣品體積、容器和保存要求

導則說明 6.5 [基準版]：記錄用於確定最低樣本體積量、容器類型和地下水樣本保存要求的理由和依據。

最小樣品體積量、容器類型和保存要求部分取決於所選分析方法的 MDC 和實驗室規定。如果樣品要分裝(例如，與監管機構合作)，則需要相應地調整樣品體積量和容器數量。

6.6 採樣計畫

導則說明 6.6 [基準版]：制定與每個採樣點和分析物的既定 DQO 或採樣要

求相一致的書面採樣計劃和採樣計劃。

採樣點可以包括監測井、供水井、地表水體、泉水、基礎排水管、雨水排水管、污水坑、結構或組件的滲漏，以及地下滲漏的地下水層或牆。

採樣頻率可以基於現場目標，但是通常每季採樣是一個很好的初始方法，採樣頻率將取決於特定地點的條件，例如土壤類型、水力梯度、鄰近污染源及優勢遷移路徑的存在。如果污染物濃度隨季節變化，則經過數年各季採樣後，數據的周期性可能會變得明顯。在積累了數年的數據後，如果污染物濃度似乎處於平衡或呈下降趨勢，則採樣頻率通常會降低。

6.7 分析結果的驗證

導則說明 6.7 [基準版]：建立一致的文件化過程以審查分析數據。包括以下項目：

- 分析結果清單，以確保分析實驗室報告所有數據
- 對已完成的實驗室 MDC 的評估
- 評估實驗室 QC / QA 數據
- 評估任何拆分、重複、空白或添加樣品的結果
- 評估以確定是否達到每個品質控制樣品的接受標準

第七章 評估採樣和監測數據

7.1 分析數據評估

導則說明 7.1 [基準版]：在評估分析數據之前，請驗證數據並包括與管制標準的比較。

該評估可以包括常態性、分析偏差、水平和垂直空間相關性的確定、採樣點內污染物濃度的時間序列圖以確定時間趨勢等統計分析。

除地下水外，其他環境的分析數據也可能對評估環境影響具有參考價值。這些環境可能包括測量水位及地表水、海水、降水、雨水和建築物滲透的化學或放射學量。

7.2 現場水質指標數據評估

導則說明 7.2 [基準版]：根據適用的管理機構規定或許可條件收集地下水樣品，以下參數是一般水質的有用指標，可以在收集地下水樣本進行放射分析之前進行測量和評估，以確保獲得代表性樣本：

- 濁度
- 溫度
- pH
- 氧化還原電位(ORP)

- 電導度
- 溶解氧濃度

7.3 分析數據管理和數據品質評估

導則說明 7.3a [基準版]：分析數據項目記錄包括以下：

- 樣品確認
- 樣品位置或井確認
- 採樣日期和時間
- 報告結果包括所有放射性元素的測量濃度(無論是否高於檢測標準，或是陽性或陰性)
- 測量不確定度
- 達到 MDC
- 數據確認及驗證記錄
- 任何經過驗證的分析結果是否超出適用的現場操作水準
- 遺失樣品結果確認

導則說明 7.3b [基準版]：進行管理數據，以確保摘要結果被記錄、保留及方便檢索。

7.4 環境濃度

7.4.1 背景放射性元素濃度

導則說明 7.4.1a [基準版]：確定放射性元素分析物的背景濃度。

背景中發現的放射性元素可能是環境中自然存在，也可能是人為來源。地下水中背景放射性的可能來源包括：

- 土壤和岩石中的礦物質
- 高空大氣的宇宙形成過程
- 大氣核武器測試
- 核事故(例如 Chernobyl)
- 從上游的核電廠、醫院、美國國防部設施、美國能源部設施或其他放射性物質來源的設施釋放放射性核元素
- 上游水處理廠和垃圾掩埋場釋放的放射性元素(例如，放射性藥物和核出口標誌)

導則說明 7.4.1b [基準版]：評估型 I 錯誤（假陽性檢測）的分析數據

如果使用 2 個標準差(95%信賴區間)定義陽性檢測會導致統計上誤認為假陽性結果的 5%。可能需要來自採樣程序的幾輪分析數據來識別型 I 錯誤，由於這些誤差是隨機分佈，因此通常會在不同監測井中，針對不同採樣事件報告同一分析物的假陽性檢測結果。

7.4.2 與電廠有關放射性元素在大氣中沉積

導則說明 7.4.2 [基準版]：評估並記錄電廠相關放射性元素在大氣中的沉積意義。

從電廠(如從通風煙囪、冷卻塔或冷凝器空氣噴射器)受控制空氣釋放可能導致在所有者控制區域附近，產生可測量與電廠有關大氣放射性元素(包括氫)的沉積。

7.4.3 電廠有關的液體通道

導則說明 7.4.3 [基準版]：在這些過程發生的地方，評估並記錄冷卻水排放及隨後在電廠系統或現地飲用水中再利用所產生潛在影響。

使用湖水、冷卻塔或冷卻水排放再循環的電廠可以測量其他電廠系統中與電廠相關的再循環放射性元素，儘管此過程可能不會對健康和安全造成威脅，但它可能會通過包括受影響的電廠系統在內的途徑釋放放射性元素，通過這種機制釋放的放射性元素可能解釋來源尚未確定低水準污染存在。

7.5 場址概念模型的審查和修訂

導則說明 7.5a [基準版]：根據數據評估的結果定期評估場址概念模型，如果發現重大偏差，請考慮對該模型進行修訂。

場址特性是一個反覆的過程，每次通過鑽探新監測井、取樣土壤、測試含水層參數、查看電廠建設記錄或在飽和區中進行定期地下水監測等活動來開發新數據時，都應在當前場址概念模型的背景下對這些數據進行評估。如果數據與概念模型不一致，則應修改模型以反映新數據。

導則說明 7.5b [基準版]：在以下任一情況之後，請審查場址概念模型：

- 現場大量的施工或現場或現場附近性質的干擾
- 廠區或鄰近廠外用水的重大改變
- 廠區或鄰近廠外井的抽水率發生重大改變

導則說明 7.5c [基準版]：如果修改場址概念模型，請評估是否需要修改適用的場地許可基礎文件和作為電廠設計基礎文件一部分的適當場址地圖。

第八章 方案驗證和審查

8.1 具有獨立審核的方案啟動

導則說明 8.1a [基準版]：在完成並記錄了本指引第3節中描述的初始審核，並建立了廠址概念模型後，請進行獨立審核。

電廠可以與廠址內部或外部人員進行獨立審核，但前提是審核小組成員必須具有相關經驗，而不是從事原來工作的人員。評審應由在系統操作和設計、輻射

防護、化學和水文地質方面具有相關經驗的個人進行。

導則說明 8.1b [基準版]:在建立場址概念模型之後，應完成獨立的程序審查。

一些電廠可能選擇在鑽探監測井之前進行獨立審查，如此有關井位、進行分析的放射性元素清單、使用的採樣技術及地下水防護方案其他要素的決策，將受益於審核小組的評估。在鑽井活動之後，其他電廠可能會選擇進行審核，建議在建立場址概念模型後的兩年內完成獨立程序的審查。

8.2 重新驗證地下污染的潛在來源

導則說明 8.2a [基準版]:建立並記錄審查週期，以確定地下污染的潛在來源，記錄選擇審查頻率和方法的理由。審查週期頻率不應超過五年。

審查週期的頻率可能取決於許多因素，包括電廠建設計畫、設計改變、運轉改變、來源改變、人員改變、業界事件和學習經驗及法規改變(地方、州或聯邦)。

導則說明 8.2b [基準版]:如果現場條件導致 SSC 或工作作業的可能放射性影響發生重大變化，或者如果確定以前未知洩漏、傾洩或未分析的途徑，則重新評估可能受影響的 SSC 並應按照第 3 節中所述執行工作作業。

第九章 利益關係者溝通與監管機構

應根據《核能協會(NEI)業界地下水防護倡議——定稿版》(Reference 26)、NRC 與有關州和地方官員進行自願性溝通。此文件亦規定在年度輻射環境監測方案(REMP)報告、年度放射性排放技術規範(RETS)報告和書面 30 天報告以及向 NRC、州和地方官員透過非正式溝通發出通知的標準。許多執照者已準備了進行這些通訊協定的程式和協定。

第十章 潛在緩解方案

下列是可考慮對已知地下水污染地點採取的緩解措施。

- 修復洩漏
- 透過重要更換或設計變更來補救洩漏的根本原因
- 強調未分析的途徑
- 清除污染源區內之污染土壤
- 啟動監測自然衰減計畫

這種方法需依賴稀釋、分散、吸附和放射性衰變等自然發生過程隨時間降低放射性污染物的濃度。地下水監測計劃基本上可提供數據以證明這種方法的有效性。若污染物團一般是處於平衡狀態、受體風險較低、污染物濃度足夠低、可以在合理的時限內達到合理的法規標準，則使用此技術可能是適當的。

- 在污染源區附近抽出處理(Pump and treat)(或釋放)。

此方法應謹慎使用，因為污染物可能重新分配 (re-distributing)。在採用這種技術之前，應充分瞭解地下水流域。

- 在污染團進一步進入場址邊界時抽出地下水以攔截污染團。

因為污染物可能重新分配 (re-distributing)，因此應謹慎使用這種方法。在採用這種技術之前，應充分瞭解地下水流域。

- 安裝薄漿隔牆 (grout curtains) 或板材打樁 (sheet piling)，建置低滲透邊界，從而轉移地下水流量。這種技術通常還需要泵送和處理攔截污染團

- 植物污染整治 (phytoremediation) 計劃。該技術使用植被來發散 (transpire) 地下水和淺層地下溶解污染物。這項技術導致部分污染物釋放到大氣中，一部分累積在植物組織中。

附錄二、詞彙表

參數名稱	定義
來源	
核種濃度 Nuclide concentration	污染區放射性核種濃度。
來源釋出-釋出至地下水	
主要污染分配係數 Distribution coefficient in primary contamination	主要污染區土壤中吸附相污染物濃度與土壤水相污染物濃度之比
釋放率 Leach rate	同位素可溶濃度
來源釋出-由表層釋出	
可釋放之放射性核種 Radionuclide becomes available for release	放射性核種如何從表層釋放
場址	
主要污染之X尺度 X dimension of primary contamination	在模式中主要污染用於大氣釋放和傳輸計算的矩形範圍內，矩形邊長用於定義大氣傳輸計算的矩形區域，面積是這兩個垂直維度的乘積。
主要污染之Y尺度 Y dimension of primary contamination	同上
主要污染	
主要污染面積 Area of primary contamination	均勻污染場址總面積，由主要污染的 X 和 Y 尺度計算。
與含水層流平行的污染長度 Length of contamination parallel to aquifer flow	垂直於含水層流動方向兩條平行線間距離，一條在污染區上游邊緣，另一條在污染區下游邊緣
蒸發散係數 Evapotranspiration coefficient	降水和灌溉水因蒸發散作用而流失到大氣中之比例
逕流係數 Runoff coefficient	年平均降水量中因不透水表層土壤造成地表徑流離開模擬區域的部分
入滲率 Infiltration rate	每年由地表入滲至部分飽和層的量
降雨率 Precipitation rate	模擬區域每年降雨量
灌溉率 Irrigation rate	模擬區域每年灌溉量
污染層	
污染層厚度 Thickness of contaminated zone	放射性核種濃度明顯高於背景值最上層和最下層土壤間距離
污染層乾容積密度 Dry bulk density of	污染層土壤乾容積密度

參數名稱	定義
contaminate zone	
污染層侵蝕率 Contaminated zone erosion rate	每單位地表面積和每單位時間去除核種物質平均體積
乾淨覆蓋土	
乾淨覆蓋土厚度 Thickness of clean cover	地表到污染區的距離
乾淨覆蓋土乾容積密度 Dry bulk density of clean cover	覆蓋材料乾容積密度
乾淨覆蓋土體積含水量 Volumetric water content of clean cover	乾淨覆蓋土孔隙介質中的體積含水量，代表被水佔據孔隙介質總體積的一部分
乾淨覆蓋土侵蝕率 Cover erosion rate	每單位地表面積和每單位時間去除核種物質平均體積
部份飽和帶	
在初步輸入表格中設置的未飽和區數量 Number of unsaturated zones set in preliminary inputs form	未飽和區的數量，未飽和區定義為位於污染區和含水層間的水平未污染層。
未飽和區厚度 Unsaturated zones thickness	未飽和區的厚度
未飽和區土壤乾容積密度 Unsaturated zone dry bulk density	未飽和區土壤乾容積密度
未飽和區總孔隙度 Unsaturated zone dry bulk density	未飽和區孔隙體積與污染區總體積的比值
未飽和區有效孔隙度 Unsaturated zone effective porosity	地下水在可以循環孔隙體積與未飽和區總體積的比值。
未飽和區水力傳導係數 Unsaturated zone hydraulic conductivity	未飽和區土壤在承受水力梯度時傳輸水分的能力。
未飽和區土壤 b 參數 Unsaturated zone soil b parameter	經驗且無因次參數，根據傳導函數的土壤特性曲線評估土壤的飽和度（或體積含水飽和度）
未飽和區縱向延散度 Unsaturated	沿主要地下水流方向分散混合過程，即縱向延散係數與孔隙水流速之比

參數名稱	定義
zone longitudinal dispersivity	
未飽和區分配係數 Unsaturated zone distribution coefficient	未飽和區土壤中吸附相污染物濃度與土壤水相污染物濃度之比。
非受壓的飽和帶	
飽和區厚度 Thickness of saturated zone	飽和區的厚度
飽和區土壤乾容積密度 Dry bulk density of saturated zone	飽和區土壤乾容積密度
飽和區總孔隙度 Saturated zone total porosity	飽和區孔隙體積與污染區總體積的比值
飽和區有效孔隙度 Saturated zone effective porosity	地下水可以循環的孔隙體積與未飽和區總體積的比值。
飽和區水力傳導係數 Saturated zone hydraulic conductivity	飽和區土壤在承受水力梯度時傳輸水分的能力
飽和區水力梯度 Saturated zone hydraulic gradient	地下水位面斜率
飽和區縱向延散度 Saturated zone longitudinal dispersivity to well	沿主要地下水流方向分散混合過程，即縱向延散係數與孔隙水流速之比
飽和區橫側向延散度 Saturated zone horizontal lateral dispersivity to well	是橫側向延散係數與孔隙水流速之比，大約是縱向延散係數的 10 分之 1-3。
飽和區垂側向延散度 Saturated zone vertical lateral dispersivity to well	是垂側向延散係數與孔隙水流速之比。
飽和區分配係數 Saturated zone distribution coefficient	飽和區土壤中吸附相污染物濃度與土壤水相污染物濃度之比。

附錄三、地下水流方程式詳細推導

考慮如圖 A3-1 所示的飽和含水層地下水流系統的控制體積，沿著 x 、 y 與 z 方向進入控制體積的地下水質量率分別為

$$W_x = \phi \rho_w v_x \Delta y \Delta z \quad (\text{A3.1})$$

$$W_y = \phi \rho_w v_y \Delta x \Delta z \quad (\text{A3.2})$$

$$W_z = \phi \rho_w v_z \Delta x \Delta y \quad (\text{A3.3})$$

其中 ϕ 為孔隙率， ρ_w 為水流密度， v 為滲流速度。根據 Taylor 級數理論，可以用一無窮級數的累加將一函數 $f(x)$ 表示為

$$f(x) = f(a) + f'(a)(x-a) + \frac{f''(a)}{2!}(x-a)^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(a)}{n!}(x-a)^n + \dots \quad (\text{A3.4})$$

當 $a = x$ ， $x = x + \Delta x$ ，式(A3.4)可改寫為

$$f(x + \Delta x) = f(x) + f'(x)\Delta x + \frac{f''(x)}{2!}\Delta x^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(x)}{n!}\Delta x^n + \dots \quad (\text{A3.5})$$

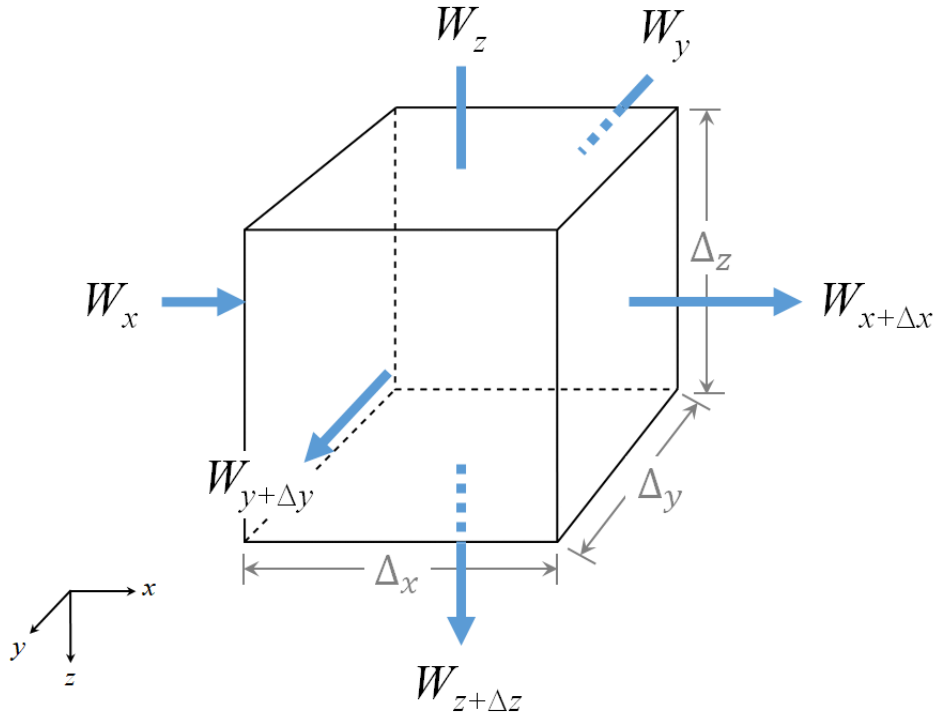


圖 A3-1 飽和含水層地下水流系統控制體積(Control volume)

根據式(A3.5)，在 Δx 極小時可忽略高階項，則沿著 x 、 y 與 z 方向離開控制

體積的地下水質量率分別為

$$W_{x+\Delta x} = W_x + \frac{\partial W_x}{\partial x} \Delta x \quad (\text{A3.6})$$

$$W_{y+\Delta y} = W_y + \frac{\partial W_y}{\partial y} \Delta y \quad (\text{A3.7})$$

$$W_{z+\Delta z} = W_z + \frac{\partial W_z}{\partial z} \Delta z \quad (\text{A3.8})$$

淨流入量(net mass flux)為進入控制體積的地下水質量率與離開控制體積的地下水質量率相減，可得

$$\text{net mass flux} = -\frac{\partial W_x}{\partial x} \Delta x - \frac{\partial W_y}{\partial y} \Delta y - \frac{\partial W_z}{\partial z} \Delta z \quad (\text{A3.9})$$

將(A3.1)-(A3.3)代入(A3.9)則

$$\begin{aligned} \text{net mass flux} &= -\frac{\partial(\phi \rho_w v_x \Delta y \Delta z)}{\partial x} \Delta x - \frac{\partial(\phi \rho_w v_y \Delta x \Delta z)}{\partial y} \Delta y - \frac{\partial(\phi \rho_w v_z \Delta x \Delta y)}{\partial z} \Delta z \\ &= -\frac{\partial(\phi \rho_w v_x)}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z - \frac{\partial(\phi \rho_w v_y)}{\partial y} \Delta x \Delta y \Delta z - \frac{\partial(\phi \rho_w v_z)}{\partial z} \Delta x \Delta y \Delta z \end{aligned} \quad (\text{A3.10})$$

控制體積內地下水質量表示為

$$M_w = \phi \rho_w \Delta x \Delta y \Delta z \quad (\text{A3.11})$$

則控制體積內地下水質量隨時間的變化率為

$$\frac{\partial M_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho_w \Delta x \Delta y \Delta z) \quad (\text{A3.12})$$

假設控制體積只有在 z 方向改變，即 Δx 與 Δy 為常數、與時間 t 變化無關，而 ϕ 、 ρ_w 及 Δz 為時間 t 的函數，則

$$\frac{\partial M_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho_w \Delta z) \Delta x \Delta y \quad (\text{A3.13})$$

可將式(A3.13)整理為

$$\frac{\partial M_w}{\partial t} = \left[\rho_w \Delta z \frac{\partial \phi}{\partial t} + \phi \Delta z \frac{\partial \rho_w}{\partial t} + \phi \rho_w \frac{\partial \Delta z}{\partial t} \right] \Delta x \Delta y \quad (\text{A3.14})$$

控制體積之固體相體積 V_s 可表示為

$$V_s = (1 - \phi) \Delta x \Delta y \Delta z \quad (\text{A3.15})$$

假設含水層可壓縮或膨脹，但僅限於孔隙率會改變，則對式(A3.15)進行對

時間 t 微分可得

$$\frac{d}{dt} V_s = \frac{d}{dt} (1 - \phi) \Delta x \Delta y \Delta z \quad (\text{A3.16})$$

因礦物顆粒的固體相體積不會改變，為一固定常數，可將式(A3.16)簡化為

$$0 = \Delta x \Delta y \frac{d}{dt} (1 - \phi) \Delta z \quad (\text{A3.17})$$

最後整理式(A3.17)，可將 ϕ 及 Δz 隨時間的變化關係表示為

$$\frac{d\phi}{dt} = (1 - \phi) \frac{1}{\Delta z} \frac{d(\Delta z)}{dt} \quad (\text{A3.18})$$

水的壓縮性一般以 β 表示，定義為密度變化量 $(\frac{d(\rho_w)}{\rho_w})$ 隨水壓 p 的改變 (dp)

$$\beta = \frac{\frac{d\rho_w}{\rho_w}}{dp} \quad (\text{A3.19})$$

經整理後加入對時間 t 微分可得

$$\beta \rho_w \frac{dp}{dt} = \frac{d\rho_w}{dt} \quad (\text{A3.20})$$

含水層的壓縮性一般以 α 表示，在控制體積只有在 z 方向改變的假設下，

α 表示 z 方向 $(\frac{d(\Delta z)}{\Delta z})$ 變化量隨水壓 p 的改變 (dp)

$$\alpha = \frac{\frac{d(\Delta z)}{\Delta z}}{\frac{dp}{p}} \quad (\text{A3.21})$$

經整理後加入對時間 t 微分可得

$$\alpha \Delta z \frac{dp}{dt} = \frac{d(\Delta z)}{dt} \quad (\text{A3.22})$$

將(A3.18)、(A3.20)與(A3.22)代入(A3.14)並經過簡化可得

$$\frac{\partial M_w}{\partial t} = \left[\rho_w \alpha \frac{dp}{dt} + \phi \beta \rho_w \frac{dp}{dt} \right] \Delta x \Delta y \Delta z \quad (\text{A3.23})$$

代入水壓 p 與水頭 h 關係 $p = \rho_w g h$ ，因此

$$\frac{\partial M_w}{\partial t} = [\rho_w \alpha g + \phi \beta \rho_w g] \rho_w \Delta x \Delta y \Delta z \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{A3.24})$$

地下水流場中任一點均符合質量守恆定律，故控制體積內地下水質量變化

率應與淨入流量(net mass flux)及源/匯相所造成的質量變化率相等。配合式

(A3.10)及(A3.24)，可將控制體積內的質量守恆關係表示為

$$\begin{aligned} & - \left[\frac{\partial}{\partial x} (\phi \rho_w v_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\phi \rho_w v_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\phi \rho_w v_z) \right] \Delta x \Delta y \Delta z + \rho_w q_s \Delta x \Delta y \Delta z \\ & = [\rho_w \alpha g + \phi \beta \rho_w g] \rho_w \Delta x \Delta y \Delta z \frac{dh}{dt} \end{aligned} \quad (\text{A3.25})$$

其中 q_s 為單位體積之抽水或注水流通量，經整理可得

$$- \left[\frac{\partial}{\partial x} (\phi v_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\phi v_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\phi v_z) \right] + \rho_w q_s = \rho_w S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{A3.26})$$

此處 $S_s = \rho_w \alpha g + \phi \beta \rho_w g$ 。

假設水流密度 ρ_w 為常數，則

$$- \left[\frac{\partial}{\partial x} (\phi v_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\phi v_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\phi v_z) \right] + q_s = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{A3.27})$$

根據 Darcy 定律

$$v_x = -\frac{K_x}{\phi} \frac{\partial h}{\partial x} \quad (\text{A3.28})$$

$$v_y = -\frac{K_y}{\phi} \frac{\partial h}{\partial y} \quad (\text{A3.29})$$

$$v_z = -\frac{K_z}{\phi} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (\text{A3.30})$$

將 Darcy 定律(A3.28)- (A3.30)代入(A3.27) 即可得

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) \right] + q_s = S_s \frac{dh}{dt} \quad (\text{A3.31})$$

附錄四、地下水流污染傳輸方程式 詳細推導

考慮如圖 A4-1 所示的地下水流污染傳輸系統的控制體積，污染傳輸機制主要包括移流、延散、吸附與衰變，則沿著 x 、 y 與 z 方向進入控制體積的質量分別為

$$M_x = \phi f_x \Delta y \Delta z \quad (\text{A4.1})$$

$$M_y = \phi f_y \Delta x \Delta z \quad (\text{A4.2})$$

$$M_z = \phi f_z \Delta x \Delta y \quad (\text{A4.3})$$

其中 ϕ 為孔隙率， f 為地下水流速造成的單位面積、單位時間通過的危害物質通量。根據 Taylor 級數(series)理論，可以用一無窮級數的累加將一函數 $f(x)$ 表示為

$$f(x) = f(a) + f'(a)(x-a) + \frac{f''(a)}{2!}(x-a)^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(a)}{n!}(x-a)^n + \dots \quad (\text{A4.4})$$

當 $a = x$ ， $x = x + \Delta x$ ，式(A4.4)可改寫為

$$f(x + \Delta x) = f(x) + f'(x)\Delta x + \frac{f''(x)}{2!}\Delta x^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(x)}{n!}\Delta x^n + \dots \quad (\text{A4.5})$$

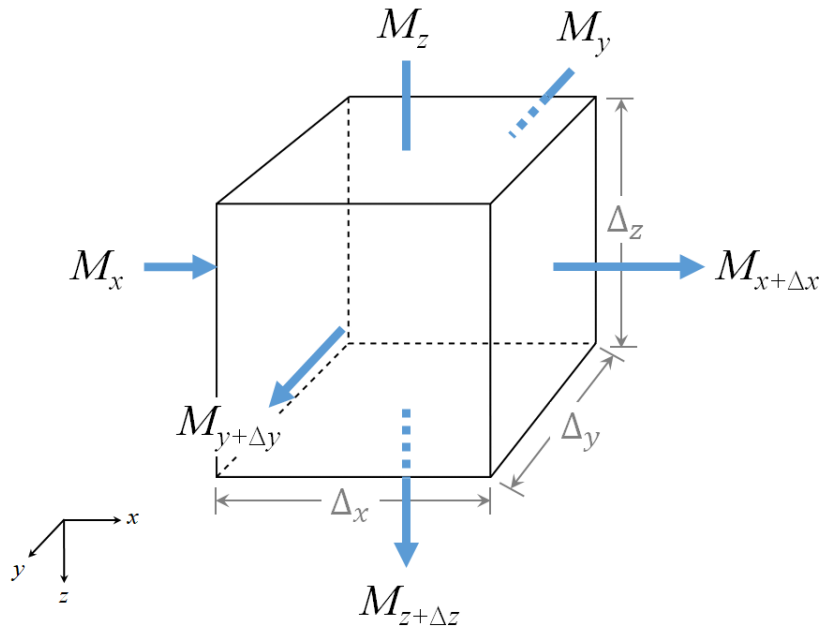


圖 A4-1 地下水流污染傳輸系統控制體積(Control volume)

根據式(A3.5)，在 Δx 極小時可忽略高階項，則沿著 x 、 y 與 z 方向離開控制

體積的質量為

$$M_{x+\Delta x} = M_x + \frac{\partial M_x}{\partial x} \Delta x \quad (\text{A4.6})$$

$$M_{y+\Delta y} = M_y + \frac{\partial M_y}{\partial y} \Delta y \quad (\text{A4.7})$$

$$M_{z+\Delta z} = M_z + \frac{\partial M_z}{\partial z} \Delta z \quad (\text{A4.8})$$

淨流入量(net mass flux)為進入控制體積的質量與離開控制體積的質量相減，

可得

$$\text{net mass flux} = -\frac{\partial M_x}{\partial x} \Delta x - \frac{\partial M_y}{\partial y} \Delta y - \frac{\partial M_z}{\partial z} \Delta z \quad (\text{A4.9})$$

將(A4.1)-(A4.3)代入(A4.9)則

$$\begin{aligned} \text{net mass flux} &= -\frac{\partial(\phi_f x \Delta y \Delta z)}{\partial x} \Delta x - \frac{\partial(\phi_f y \Delta x \Delta z)}{\partial y} \Delta y - \frac{\partial(\phi_f z \Delta x \Delta y)}{\partial z} \Delta z \\ &= -\frac{\partial(\phi_f x)}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z - \frac{\partial(\phi_f y)}{\partial y} \Delta x \Delta y \Delta z - \frac{\partial(\phi_f z)}{\partial z} \Delta x \Delta y \Delta z \end{aligned} \quad (\text{A4.10})$$

污染傳輸過程主要考慮移流與延散現象，則

$$f_x = v_x C - D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} - D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} - D_{xz} \frac{\partial C}{\partial z} \quad (\text{A4.11})$$

$$f_y = v_y C - D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} - D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} - D_{yz} \frac{\partial C}{\partial z} \quad (\text{A4.12})$$

$$f_z = v_z C - D_{zx} \frac{\partial C}{\partial x} - D_{zy} \frac{\partial C}{\partial y} - D_{zz} \frac{\partial C}{\partial z} \quad (\text{A4.13})$$

v 為地下水滲流速度， C 為危害物質的水溶液相濃度， D 為水力延散張量(tensor)。控制體積內危害物質質量的變化率包括水溶液相與吸附相濃度隨時間

的變化

$$\text{mass change rate} = \frac{\partial(\phi C \Delta x \Delta y \Delta z)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_b S \Delta x \Delta y \Delta z)}{\partial t} \quad (\text{A4.14})$$

S 為危害物質的吸附相濃度。控制體積內的水溶液相與吸附相質量會因衰變而減少，這裡以一階不可逆(first-order irreversible)過程來描述，可表示為

$$\text{mass reduction due to decay} = -\lambda_w \phi C \Delta x \Delta y \Delta z - \lambda_s \rho_b S \Delta x \Delta y \Delta z \quad (\text{A4.15})$$

λ_w 為水溶液相的一階衰變常數， λ_s 為吸附相的一階衰變常數。地下水流場中任一點均符合質量守恆定律，故控制體積內危害物質質量變化率應與淨入流量(net mass flux)及衰變所造成的質量變化率相等。配合式(A4.10)、(A4.14)及(A4.15)，可將控制體積內的質量守恆關係表示為

$$\begin{aligned} & -\frac{\partial(\phi f_x)}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z - \frac{\partial(\phi f_y)}{\partial y} \Delta x \Delta y \Delta z - \frac{\partial(\phi f_z)}{\partial z} \Delta x \Delta y \Delta z \\ & - \lambda_w \phi C \Delta x \Delta y \Delta z - \lambda_s \rho_b S \Delta x \Delta y \Delta z \\ & = \frac{\partial(\phi C \Delta x \Delta y \Delta z)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_b S \Delta x \Delta y \Delta z)}{\partial t} \end{aligned} \quad (\text{A4.16})$$

等號兩邊同除 $\Delta x \Delta y \Delta z$ ，可將式(A4.16)簡化為

$$\begin{aligned} & -\frac{\partial(\phi f_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\phi f_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\phi f_z)}{\partial z} - \lambda_w \phi C - \lambda_s \rho_b S \\ & = \frac{\partial(\phi C)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_b S)}{\partial t} \end{aligned} \quad (\text{A4.17})$$

將式(A4.11)-(A4.13)代入式(A4.17)可得

$$\begin{aligned}
& -\frac{\partial}{\partial x} \left(\phi v_x C - \phi D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} - \phi D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} - \phi D_{xz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) \\
& -\frac{\partial}{\partial y} \left(\phi v_y C - \phi D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} - \phi D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} - \phi D_{yz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) \\
& -\frac{\partial}{\partial z} \left(\phi v_z C - \phi D_{zx} \frac{\partial C}{\partial x} - \phi D_{zy} \frac{\partial C}{\partial y} - \phi D_{zz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) \\
& -\lambda_w \phi C - \lambda_s \rho_b S \\
& = \frac{\partial(\phi C)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_b S)}{\partial t}
\end{aligned} \tag{A4.18}$$

式(A4.18)經整理可得內文第二章式(2-9)所示之結果

$$\begin{aligned}
& -\frac{\partial(\phi v_x C)}{\partial x} - \frac{\partial(\phi v_y C)}{\partial y} - \frac{\partial(\phi v_z C)}{\partial z} \\
& + \frac{\partial}{\partial x} \left(\phi D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + \phi D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} + \phi D_{xz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) \\
& + \frac{\partial}{\partial y} \left(\phi D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + \phi D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} + \phi D_{yz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) \\
& + \frac{\partial}{\partial z} \left(\phi D_{zx} \frac{\partial C}{\partial x} + \phi D_{zy} \frac{\partial C}{\partial y} + \phi D_{zz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) \\
& -\lambda_w \phi C - \lambda_s \rho_b S \\
& = \frac{\partial(\phi C)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_b S)}{\partial t}
\end{aligned} \tag{A4.19}$$

附錄五、歷次工作會議審查意見回覆

「110年度核電廠除役期間廠址地下水防護管制特性研析」案
第一次工作會議
審查意見對照表

項次	審查意見	回應說明及修正做法
1	計畫參考美國核能工業界實務經驗方面，建請中央大學再加以考量 RESRAD 程式，並盤點有關地下水防護相關重要參數特性與來源基準。	本團隊參考 RESRAD 程式並盤點有關地下水防護相關重要參數特性與來源基準，完成我國核電廠於除役期間地下水文特性重要參數之評估，已於期末報告具體說明。
2	請中央大學查詢美國除役電廠採用 GROUND 地下水傳輸模式之最新版本。	經查詢並無新的 GROUND 地下水傳輸模式之最新版本。
3	中央大學於執行計畫需要之相關資料，請本會同仁視需要協助提供，以利執行。如因計畫案而取得或知悉之資料文件，請妥為保管並遵守保密之規定。	遵照辦理，本團隊將妥為保管相關文件並遵守保密之規定。
4	為瞭解核一廠除役期間地下水傳輸概念模式與防護監測方案執行情形，如需要進行核一廠廠址地下水監測之現場訪查，視實際需求安排於7~8月期間辦理。	原規劃於7~8月期間辦理核一廠廠址地下水監測之現場訪查，後因疫情影響及防疫需要暫緩。
5	請配合並協助參與計畫人員有關教育訓練規劃與安排。	遵照辦理，本團隊已於110年6月28日、7月2日及10月28日配合計畫相關人員之規畫，完成教育訓練課程辦理。
6	為掌握計畫執行方向與進展，本計畫預訂於5月17~21日(擇一日)辦理第2次工作進度會議，屆時請中央大學配合提報進度，會議辦理時間再另行通知。	本團隊已於110年5月18日配合辦理第2次工作進度會議並提報計畫工作進度。

「110年度核電廠除役期間廠址地下水防護管制特性研析」案

第二次工作會議

審查意見對照表

項次	審查意見	回應說明及修正做法
1	RESRAD 程式地下水污染傳輸過程之相關參數，請列表並說明相關參數數值的決定作法。	本團隊已針對 RESRAD 程式的重要參數說明及其決定過程進行探討，並於期末報告中詳細說明。
2	NUREG-0868包括 GROUND 共有五個模式，請檢視並比較優缺點，以確認對現行除役需求之適切性。	已針對 NUREG-0868包括 GROUND 共有五個模式做詳細確認，並於期末報告中詳細說明。
3	本案研究過程中，所蒐集的文獻資料，請整理加以分類(如導則、程式、方法論…等)，並於期末成果報告之光碟文獻資料庫呈現。	遵照辦理，本團隊已針對重要文獻資料加以詳細說明，並將文獻資料庫呈現於期末成果報告光碟。
4	參與計畫人員教育訓練的需求，請以符合本計畫執行目標的地下水傳輸基礎理論與 MUST 模式獨立運跑訓練為優先考量，並隨計畫進展再滾動式檢討。而訓練時間暫定於六月中下旬辦理，並視疫情狀況調整。	本團隊已於110年6月28日、7月2日及10月28日配合計畫相關人員的需求，完成線上教育訓練課程辦理。
5	報告書撰寫內容，主文以符合核定研究計畫書之一般性考量為主，專業技術、方法論等深度研究則可採附錄方式呈現。	謝謝委員意見，遵照辦理。
6	核一廠廠址地下水監測之現場訪查，原規劃安排於7~8月期間辦理，本會將視疫情與計畫執行狀況，適時滾動調整。	原規劃於7~8月期間辦理核一廠廠址地下水監測之現場訪查，後因疫情影響及防疫需要暫緩。
7	依契約第五條規定，廠商應於110年7月16日前，親赴本會說明期中進度，並提送期中進度簡報紙本6份及電子檔1份。屆時請中央大學配合提報進度簡報，會議時間地點將另函通知，會議方式將視疫情發展狀況而定。	因應疫情發展狀況需要，本團隊已於110年7月13日配合辦理第3次線上工作進度會議並提報計畫工作進度簡報。

「110年度核電廠除役期間廠址地下水防護管制特性研析」案

第三次工作會議

審查意見對照表

項次	審查意見	回應說明及修正做法
1	本案期中進度簡報經審查會議審查結果同意，惟請依審查意見(另函送)儘速提出期中進度簡報修訂版。	遵照辦理，已依審查意見修訂期中進度簡報，並於110年7月28日提出期中進度簡報修訂版。
2	核一廠廠址地下水監測之現場訪查，本會將視後續疫情狀況調整訪查期程。	原規劃於7~8月期間辦理核一廠廠址地下水監測之現場訪查，後因疫情影響及防疫需要暫緩。
3	本案地下水傳輸第3次教育訓練，規劃於9月中下旬辦理	本團隊已於110年10月28日完成第3次教育訓練課程辦理。
4	為掌握本案計畫執行方向與進展，預訂於9月13日前辦理第4次工作進度會議，屆時請中央大學配合提報進度，會議通知將另函送。	遵照辦理，本團隊已於110年9月9日配合辦理第4次工作進度會議，並提報計畫工作進度簡報。

「110年度核電廠除役期間廠址地下水防護管制特性研析」案

第四次工作會議

審查意見對照表

項次	審查意見	回應說明及修正做法
1	請建立我國核電廠於除役期間地下水文特性之重要參數及取決作法，並補充 RESRAD 預設值(需加以說明是否適合我國地質條件)、使用範圍、對應 RESRAD 程式模組與版本及 RESRAD 章節編號。	本團隊已針對 RESRAD 程式模組及地下水文特性重要參數與其決定過程進行探討，並於期末報告中詳細說明；而地下水文參數的決定需透過大量資料收集及參數校正，依現場水文地質條件進行現地實驗，方可合理評估。
2	期中進度審查意見第2~5項，請中央大學於下次會議報告後續辦理情形。	遵照辦理，期中進度審查意見第2~5項已於期中報告回覆及說明，本次期末報告將追蹤並說明後續辦理情形。
3	本案地下水傳輸第3次教育訓練，請配合並協助參與計畫人員有關教育訓練規劃與安排。	本團隊配合並協助參與計畫人員，於110年10月28日完成第3次教育訓練課程辦理。
4	為掌握本案計畫執行方向與進展，預訂於11月9日前辦理第5次工作進度會議，屆時請中央大學配合提報進度，會議通知將另函送。	遵照辦理，本團隊已於110年11月4日配合辦理第5次工作進度會議，並提報計畫工作進度簡報。

「110年度核電廠除役期間廠址地下水防護管制特性研析」案

第五次工作會議

審查意見對照表

項次	審查意見	回應說明及修正做法
1	第一~四次工作討論會議之審議意見，請中央大學依據本會意見辦理研析及修正，並提出意見回覆對照表。	遵照辦理，本團隊將針對歷次工作討論會議之審議意見提出意見回覆對照表，並補充於期末報告。
2	依契約第五條規定，廠商應於110年12月10日前，親赴本會說明本計畫委託工作項目執行成果，並提送期末報告(初稿)紙本6份及電子檔1份。屆時請中央大學配合辦理，會議時間地點將另函通知。	本團隊於110年12月3日親赴貴會說明計畫委託工作項目執行成果，並提送期末報告(初稿)紙本6份及電子檔1份。

「110年度核電廠除役期間廠址地下水防護管制特性研析」案
期中進度審查會議
審查意見對照表

執行廠商：國立中央大學		
計畫名稱： 110年度核電廠除役期間廠址地下水防護管制特性研析		
項次	審查意見	回應說明及修正做法
1	請說明以數值法解析地下水傳輸方程式與解析法之比較，並說明何種情況下使用解析法較不適用。	謝謝委員意見，不管以數值解方法或解析解方法求解同樣的地下水傳輸方程式，兩者的結果絕對會一樣，一般而言解析解模式是在比較嚴謹的數學過程獲得，其正確性無庸質疑，反之數值解易受網格大小與離散時間段長短等因素影響其計算值，因此如何選用數值模式合理的網格大小與離散時間段長短，通常可藉由解析解協助去確認網格大小與離散時間段長短加以確認。 數值解模式相較解析解模式可應用較複雜的問題，但解析解模式仍廣泛應用各種實務問題，主要是因為再複雜的數值解模式如果無法取得足夠的參數，其模式功能仍無法發揮，因此在美國許多地下水污染場址解析模式廣泛使用，如果除役電廠地下水的流動型態符合解析解模式的基本假設時，解析解模式仍可適用，此時管制單位使用解析解模式配合正確的參數選用絕對可面對外界的挑战與質疑。像 RESRAD 也是解析解模式但也實際應用於許多場址。如果除除役電廠地下水的流動型態不符合解析解模式的基本假設時，管制單位也可選用數值解模式避免質疑或挑戰，相關工作管制也可藉由委託研究計畫去執行，所得的結果也可做為管制單位審查電廠除役相關地下水傳輸模擬交叉比較驗證的最重要參考依據。相信只要用科學的方法態度，選用合適的模式與合理的參數與情境，絕對可以面對外界的挑战與質疑。

2	主要污染區在未飽和層中，且全部在地下水位面以上，及在降雨後地下水位上升之地下水位面上下方或全部地下水水面以下等情況，請說明各狀況下之污染物於地下水系統傳輸情形。	謝謝委員意見，意見提及之降雨後地下水位上升等複雜情境仍可依實際情況進行模擬，惟情境假設不會影響地下水文參數，而若污染物因降雨後地下水位上升而進入至飽和層中，則須就污染程度探討模式適用性及換用之必要性；但在模擬實務上來說這問題以中央大學高等模式研發應用中心葉高次教授團隊所研發的變飽和地下環境分析模式 THMC 即可模擬相關現象。
3	RESRAD 使用手冊所列參數，請整理列表分類及詳細解說，並納入本計畫期末報告之附錄文件中。	謝謝委員意見，本計畫已盤點 RESRAD 使用手冊所列參數，依三個分區與參數的重要性整理分類並詳細說明整理分類原則，相關分類結果已納入期末報告中。
4	有關地下水重要參數部分，NUREG/CR-6697彙整 RESRAD 所有參數，並依據參數類型(物理型、代謝型、行為型)、參數相關性、數據可取得性、對劑量的影響等四項評估標準決定重要性排序(1~3級，1級最重要)。建議本計畫彙整的參數可進一步分類，以判斷哪些參數應使用現地資料。	謝謝委員意見，經計劃執行團隊分析探討，因其他參數類型(物理型、代謝型、行為型)皆非地下水文參數，且不確定性並未如地下水文參數高，影響程度有限，故本團隊仍依計畫工項內容僅考慮地下水文參數。
5	建議將去年蒐集美國除役電廠資料回饋至本計畫中，檢視地下水傳輸概念模式是否因電廠進入除役階段而有調整，進而提出核一廠的建議。	謝謝委員意見，本計畫採用去年蒐集美國除役電廠資料並檢視地下水傳輸概念模式是否因電廠進入除役階段而有調整，已於期末報告提出研析結果與對核一廠的地下水傳輸模式的建議。

6	解析解模式及數值解模式各有其優點，一般來說解析解模式較簡易且容易上手，若管制機關使用解析解模式時，是否會受到外界挑戰或質疑，請提出相關建議。	數值解模式相較於解析解模式可應用較複雜的問題，但解析解模式仍廣泛應用各種實務問題，主要是因為再複雜的數值解模式如果無法取得足夠的參數，其模式功能仍無法發揮，因此在美國許多地下水污染場址解析模式廣泛使用，如果除役電廠地下水的流動型態符合解析解模式的基本假設時，解析解模式仍可適用，此時管制單位使用解析解模式配合正確的參數選用絕對可面對外界的挑战與質疑。像 RESRAD 也是解析解模式但也實際應用於許多場址。如果除除役電廠地下水的流動型態不符合解析解模式的基本假設時，管制單位也可選用數值解模式避免質疑或挑戰，相關工作管制也可藉由委託研究計畫去執行，所得的結果也可做為管制單位審查電廠除役相關地下水傳輸模擬交叉比較驗證的最重要參考依據。相信只要用科學的方法態度，選用合適的模式與合理的參數與情境，絕對可以面對外界的挑战與質疑。
7	請說明使用 RESRAD 進行核種傳輸模擬時，僅能考慮不同遲滯因子或僅考慮延散之原因。	RESRAD 僅能考慮不同遲滯因子或僅考慮延散這是使用手冊中所建議，就計畫主持人在模式求解的長期經驗，應該是在求解多個成員核種的衰變鏈、多個耦合方程式過程所用的變數變換，須在每個物種有相同的遲滯因子的情況才能適用。而這樣的遲滯因子的限制在本團隊的 MUST 模式已克服。
8	請說明取得縱向及側向水力延散係數時，所考慮之地下水流方向有無差異性。	縱向及側向水力延散係數基本上都是藉由示蹤劑試驗取得其參數值，其值確實受試驗的地下水流影響，另外延散係數值非常容易受觀測的尺度影響，一般稱為尺度延散效應(scale-dependent dispersion)，計畫主持人曾研析不同地下水流場的尺度延散實際現地問題，並發表於相關頂尖水資源期刊，可提供參考。 示蹤劑試驗是耗費時間金錢且不易執行成功的工作，因此並不建議執行示蹤劑試驗，建議應以使用合理經驗公式計算合理的選用延散係數值。

9	簡報內容誤繕須更正如下： (1) P13，B 點水頭符號，請修正。 (2) P23，延散通量公式中縱向延散係數 D_x 之 x 符號，請用下標表示。 (3) P30，地下水傳輸方程式移流-延散公式，遺漏數學符號“+”，請修正。 (4) P37，第二段部分文字內容，請潤飾修正。 (5) P48，RESARD-OFFSITE 文字有遺漏字母，請修正。 (6) P63，核種入滲外釋之三種取決參數，請配合 P56修正。 (7) P71，“退役”用語，請查明並修正。 (8) 報告內所用孔隙率、平均流速、地下水滲流速度等各符號，均請統一用法。	謝謝委員指正，簡報內容誤繕部份已修正。
---	--	----------------------------

「110年度核電廠除役期間廠址地下水防護管制特性研析」案 期末成果報告審查意見對照表

執行廠商：國立中央大學		
計畫名稱： 110年度核電廠除役期間廠址地下水防護管制特性研析		
項次	審查意見	回應說明及修正做法
1	請再檢視確認中、英文摘要部分，並視需要做修訂。	遵照辦理，已重新檢視中文及英文摘要並完成修訂。
2	P1-1，「希望核電廠若發生洩漏情境需評估外洩核種風險或進行較高密度的地下監測時，可以地下水傳輸基準版概念模式為基礎，發展地下水傳輸進階版概念模式」，請使用業界專業用語修飾文字。	遵照辦理，已重新檢視內容，使用業界專業用語並完成修訂。
3	P1-3，報告章節說明之第三章部分，請確認所述之「基準案例測試與應用案例」有無於第三章本文內容中。	謝謝委員意見，第三章本文內容未包含「基準案例測試與應用案例」，已完成文字內容修正。
4	P1-3~4，「本報告分為5章與4個附錄…」、「報告也另外提供2個附錄…」，請再確認報告附錄總數。	謝謝委員意見，經確認及修訂後，本報告包含5個章節與5個附錄。已完成內文修正。
5	P2-14，「系統、構造與元件(systems, structure and component，簡稱 SSC)」，請修訂為系統、結構與組件，以與國內法規用語一致，報告其他章節有出現 SSC 中文翻譯之處亦請一併修訂。	謝謝委員意見，遵照辦理。
6	P4-5，圖4.1-2核一廠地下水傳輸模型，請註明資料來源出處。	謝謝委員意見，已補充資料來源出處。
7	P-4-13~15，第4.5節請再補充第4.5節有關管制建議內容之說明。	謝謝委員意見，已完成第4.5節管制建議內容之說明。

8	P5-1，結論與建議，請再補充論述。	已完成第5章結論與建議之補充論述。
9	附錄三，請將歷次工作會議決議事項與答覆說明納入。	遵照辦理，歷次工作會議決議事項與答覆說明已修訂為附錄五，並已納入歷次工作會議審查意見回覆。
10	請增加「地下水流方程式詳細推導」與「地下水流污染傳輸方程式詳細推導」之附錄。	謝謝委員意見，遵照辦理。