

**111 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(修正版)

受託單位：國立中央大學

計畫執行期間：111 年 3 月 01 日至 111 年 12 月 31 日

111 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(修正版)

受託單位：國立中央大學

計畫執行期間：111 年 3 月 01 日至 111 年 12 月 31 日

中華民國 111 年 12 月

行政院原子能委員會
111 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

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	1-2
第二章 評估核電廠除役期間廠址水文地質參數調查	2-1
2.1 除役期間廠址水文地質參數調查	2-1
2.2 受壓含水層抽水試驗	2-4
2.3 非受壓含水層抽水試驗	2-9
2.4 微水試驗	2-13
第三章 檢視除役期間之核二廠地下水傳輸模式與防護監測方案之內容	3-1
3.1 核二廠防護監測方案簡介	3-1
3.2 核二廠防護監測方案評析	3-4
3.3 核二廠地下水傳輸模式說明	3-7
3.4 核二廠地下水傳輸模式評析	3-11
第四章 國際核電廠運轉與除役期廠址地下水防護實務經驗	4-1
4.1 美國 ZION 核電廠	4-1

4.2 南韓 KORI 核電廠.....	4-14
第五章 研究成果彙整.....	5-1
第六章 結論與建議.....	6-1
6.1 結論.....	6-1
6.2 建議.....	6-2

附錄

附錄一 歷次工作會議審查意見回覆

圖目錄

圖 1 受壓含水層 THEIS 標準曲線圖.....	2-7
圖 2 現地時間-洩降曲線	2-7
圖 3 標準曲線與時間-洩降曲線擬合圖	2-8
圖 4 非受壓含水層抽水試驗標準曲線圖.....	2-11
圖 5 非受壓含水層抽水試驗現地時間-洩降曲線	2-12
圖 6 TYPE B 標準曲線與時間-洩降曲線擬合圖	2-12
圖 7 TYPE A 標準曲線與時間-洩降曲線擬合圖	2-13
圖 8 微水試驗示意圖	2-14
圖 9 水平線源示意圖	3-8
圖 10 ZION 電廠廠房配置圖	4-4
圖 11 計算 DCGLs 需要輸入之次要因子	4-17
圖 12 詳細 DCGL 計算程序.....	4-17
圖 13 DCGL 計算每個階段所需的工作程序	4-18

表目錄

表 1 選用的分布係數(ML/G)	4-5
表 2 基準案例模擬成果	4-7
表 3 分母標準化所得結果	4-8
表 4 敏感度分析參數	4-9
表 5 兩個不同的場址再使用混合情境的 6 個核種劑量與 DCGLs ...	4-22

計畫摘要

核電廠運轉和除役期間須建立廠址地下水防護計畫，以監測地下水相關特性之參數，掌握廠址若在發生放射性核種之外釋情境，進入土壤、甚至地下水系統之狀況。本計畫目的為研析核電廠除役期間廠址地下水防護管制特性，計畫完成四項重要工作項目，工作項目一依我國核電廠除役期間廠址特性，探討水文地質參數試驗或評估方法之可行性，並提出調查技術與方法建議。工作項目二檢視目前國內進入除役期間之核二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。工作項目三持續蒐集國際核電廠運轉與除役期廠址地下水防護實務經驗，並據以精進我國核電廠除役期間個廠地下水特性評估的輸入參數。工作項目四彙整本會前三年相關委託研究之分析成果，以提出管制相關之關鍵建議。

Abstract

Development of a site-specific groundwater protection program is imperial for monitoring groundwater characteristic parameter and controlling the possible scenarios of the inadvertent release of hazardous material into the soil and subsequent groundwater system during the operation and decommissioning of a nuclear power plant. This project targets to study the groundwater protection and regulation for decommissioning of nuclear power plants. Four major tasks are completed in this project. Task 1 will explore the tests or methods for determining the hydrogeological parameters. Task 2 evaluates the groundwater transport model and groundwater protection program, accordingly a regulatory strategy is created. Task 3 advances the input parameters for characterization of groundwater characteristic during decommissioning of nuclear power plants via collecting practical experience of groundwater protection for operation and decommissioning of nuclear power plants. Task 4 integrate the results of three projects financially supported by Atomic Energy Commission to provide suggestions for critical regulatory strategy.

第一章 計畫目的與工作

1.1 計畫緣起與目的

核電廠興建為我國經濟發展與人民生活提供穩定的電源供應。然而，經過數十年的運轉，這些過去興建核電廠逐一面臨運轉執照屆期後進入或即將進入除役（decommissioning）階段的課題與挑戰。為落實核電廠地下水防護工作，台灣電力公司(以下簡稱台電)在核電廠興建運轉初期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，後續原能會也於民國 97 年要求台電公司參照國外地下水防護的指引與方案文件建立各核電廠的地下水防護方案。台電公司除建立各核電廠的地下水防護方案外(核能一廠，2010)，也委託核能研究所建立三個核電廠(核一、核二與核三)的廠區地下水傳輸基準版概念模式(Groundwater Transport Baseline Transport Conceptual Model)(核能研究所，2010)。

鑑於核一廠的 2 部機組的除役許可自 108 年 7 月 16 日生效、核二廠 1 號機自 110 年 12 月 28 日起也進入除役期間，在此期間核電廠須持續掌握監測區及廠址周圍環境地下水之放射性核種變化狀況，確認除役作業無放射性物質污染地下水之外釋顧慮。針對國內核電廠除役期間地下水污染情事之防範，有必要了解及掌握核電廠廠址地下水防護之特性與評估，除既有監測管制作業外，持續蒐集及彙整美國業界相關核電廠地下水防護計畫之管制資訊，提出相關廠址地下水防護管制要件與重要參數之管制建議，並彙整原能會前三年相關委託研究案成果，俾供作為審查管制之參考依據，並精進我國除役期間核電廠地下水防護管制監督之技術能力。

1.2 計畫工作內容

本服務案名稱為「111 年度核電廠除役期間廠址地下水防護管制特性研析」，依據工作說明書所書列的「問題背景」說明核電廠在運轉和除役期間須建立廠址地下水防護計畫，以監測地下水相關特性之參數，掌握廠址若在發生放射性核種之外釋情境，進入土壤、甚至地下水系統之狀況，可藉由核電廠地下水監測系統確認並建立防範地下水污染或擴大情形之應變處理機制。

依服務案的工作說明書所說明計畫執行期間將於決標日起至 111 年 12 月 31 日止執行完成。計畫委託工作內容為：

本計畫須研析美國核電廠廠址地下水防護管制相關資訊，並參考原能會「110 年度核電廠除役期間廠址地下水防護管制特性研析」及相關委託研究報告，以適時對我國核電廠除役廠址地下水防護管制提出相關建議供原能會參考，委託研究內容如下：

- 一、依我國核電廠除役期間廠址特性，探討水文地質參數試驗或評估方法之可行性，並提出調查技術與方法建議。
- 二、檢視目前國內進入除役期間之核二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。
- 三、持續蒐集國際核電廠運轉與除役期廠址地下水防護實務經驗，並據以精進我國核電廠除役期間個廠地下水特性評估的輸入參數。
- 四、彙整原能會前三年相關委託研究之分析成果，以提出管制相關之關鍵建議。

1.3 報告章節說明

本報告分為 6 章，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「評估核電廠除役期間廠址水文地質參數調查」，主要內容為除役期間廠址水文地質參數調查、受壓含水層抽水試驗與非受壓含水層抽水試驗、微水試驗等推求水文地質參數方法的執行與分析。第三章為「檢視除役期間之核二廠地下水傳輸模式與防護監測方案之內容」，主要內容包括核二廠地下水傳輸模式簡介、核二廠地下水傳輸模式評析、核二廠地下水防護方案簡介與核二廠地下水防護方案評析。第四章為「國際核電廠運轉與除役期廠址地下水防護實務經驗」，主要包括美國 Zion 核電廠的地下水傳輸模式與南韓 Kori 除役核電廠的初步 DCGLs 的計算。第五章為「研究成果彙整」，主要為彙整原能會相關委託研究的分析成果。第六章為「結論與建議」，主要針對總結整個計畫的執行工作，並在水文地質參數調查、核二廠地下水傳輸模式與地下水防護方案、國際電廠的地下水防護經驗與未來可行工作給予建議。

第二章 評估核電廠除役期間廠址水文地質參數調查

2.1 除役期間廠址水文地質參數調查

除役核電廠地下水防護最主要工作為掌握可能進入地下水而改變地下水特性的危害物質洩漏來源，釐清危害物質洩漏後進入至非飽和層(unsaturated zone)或更進一步遷移到地下水飽和含水層(saturated aquifer)後的行為。當危害物質進入地下環境後，了解危害物質在地下環境的遷移機制並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工作非常重要。

為了解危害物質在地下環境的遷移機制並掌握危害物質的時間與空間分布，就須發展場址概念模型(site conceptual model, SCM)，場址概念模型主要是建立放射性核種由「放射性核種來源(source region)」經由「環境介質(environmental medium)」、「曝露途徑(exposure pathway)」最後到達「受體」的過程的模型(receptor)。「場址概念模式」的發展應該要包括下列三個主要的資訊：

地質：地下水流動的地層架構。

水文：地下水在地層架構的移動。

化學：在地下水流動的水文系統中污染物跟隨地下水流動的傳輸、
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。

對場址概念模式中水文資訊而言最重要就是了解地下水流場(flow field)，所謂地下流場就是了解地下水流動的方向與速度大小。Darcy (1956)定律為目前描述地下水流動的主流方法，在三維直角座標系統，Darcy 定律的數學表示式為：

$$v_x = -\frac{K_x}{\phi} \frac{\partial h(x, y, z)}{\partial x} \quad (2-1)$$

$$v_y = -\frac{K_y}{\phi} \frac{\partial h(x, y, z)}{\partial y} \quad (2-2)$$

$$v_z = -\frac{K_z}{\phi} \frac{\partial h(x, y, z)}{\partial z} \quad (2-3)$$

此處 v_x 、 v_y 與 v_z 分別為地下水滲流速度(seepage velocity)在 x 、 y 與 z 方向的分量； ϕ 為有效孔隙率(effective porosity)[-]； K_x 、 K_y 與 K_z 分別為在 x 、 y 與 z 方向的水力傳導係數(hydraulic conductivity)[L/T]； $h(x, y, z)$ 為座標點 (x, y, z) 的水頭(hydraulic head)[L]，方程式(2-1)、(2-2)與(2-3)中的 $\frac{\partial h(x, y, z)}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial h(x, y, z)}{\partial y}$ 與 $\frac{\partial h(x, y, z)}{\partial z}$ 分別為 x 、 y 與 z 方向的水力梯度(hydraulic gradient)。

地下水流場為除役電廠水文地質調查與污染整治不可或缺的資訊，因為掌握地下水流動的方向與速度大小後，才可能適當安排觀測井、監測井、或整治井的位置與數目以瞭解地下水危害物質的遷移情形。決定地下水流方向主要取決水力梯度，藉由設立觀測井觀測地下水水位變化可以決定地下水流動方向。但仍需有水力傳導係數與孔隙率才能以方程式(2-1)、(2-2)與(2-3)計算地下水流速在 x 、 y 與 z 方向的分量。

水力傳導係數為最重要的水文地質參數，水力傳導係數的調查可藉由含水層試驗(aquifer test)求得，含水層實驗主要利用抽水引發地下水壓力(水頭)變化，有時也稱為抽水試驗(pumping test)。分析抽水試驗的地下水壓力變化可以得知含水層的水文地質參數，含水層實驗是傳統和主流的水文調查技術，抽水試驗可於受壓含水層或非受壓含水層進行，由於含水層型態的不同，因此抽水試驗於受壓含水層或非受壓含水層進行，含水層對抽水的反應也不會相同，因此會有不一樣的洩降反

應行為。除抽水試驗外，微水試驗(slug test)也是決定水力傳導係數的方法，微水試驗在台灣也廣泛應用於相關地下水污染場址。

以下的三個小節將就受壓含水層抽水試驗、非受壓含水層抽水試驗與微水試驗探討相關概念、資料分析理論模式與水文地質參數推估方法說明。

2.2 受壓含水層抽水試驗

完整的抽水試驗包括現地執行抽水試驗工作(抽水、洩降量測與記錄)與分析洩降資料分析並推求水文參數兩部分工作。抽水試驗執行通常是選定一口抽水井利用定流率抽水，如此將造成抽水井水位的下降，此將伴隨抽水井週遭地下水位下降而產生水力梯度，造成地下水往抽水井流動。在適當位置的觀測井量測含水層的洩降(drawdown)變化，這些洩降資料經過符合試驗場址水文地質特徵的水井水力學(well hydraulics)模式分析，可得到相關的流通係數(transmissivity)或水力傳導係數與儲水係數(storage coefficient)或比儲水係數(specific storage)等水文地質相關參數。

在等向、均質與均一厚度且抽水井半徑為無窮下，定流率抽水試驗所造成的地下水位下降可以下述的方程式與初始及邊界條件描述

$$\frac{\partial^2 h(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h(r,t)}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial h(r,t)}{\partial t} \quad (2-1)$$

$$h(r,t=0) = h_0 \quad (2-2)$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} \left(r \frac{\partial h}{\partial r} \right) = \frac{Q}{2\pi T} \quad \text{for } t > 0 \quad (2-3)$$

$$h(r \rightarrow \infty, t) = h_0 \quad (2-4)$$

此處 $h(r,t)$ 為水頭； r 為距抽水井中心距離； t 為時間； T 為流通係數； S 為蓄水係數； h_0 為還沒抽水前的水頭； Q 為抽水率。

(2-1)至(2-4)式可求解得

$$h_0 - h(r,t) = s(r,t) = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (2-5)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (2-6)$$

此處 s 為洩降； $W(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx$ ， $W(u)$ 又稱為水井函數。

(2-5)與(2-6)式為分析洩降資料決定包括流通係數(T)與蓄水係數(S)等水文地質參數的基礎。

(2-5)與(2-6)式分析受壓含水層抽水試驗洩降資料決定水文地質參數的方法有：(1)Theis 標準曲線(type curve)法與(2)Cooper and Jacob (1946)時間-洩降(time-drawdown)法兩種分析方法，以下就兩種方法進行說明。

一、Theis 標準曲線(type curve)法

標準曲線法的分析步驟如下：

- (一)以 $W(u)$ 為縱軸與 $1/u$ 為橫軸繪製標準曲線於全對數紙(圖 1)。
- (二)以洩降(drawdown) s 為縱軸與時間(time) t 為橫軸繪製時間-洩降曲線於全對數紙(圖 2)。
- (三)保持圖 1 與圖 2 的橫座標互相平行(同時縱座標也會互相平行)，直至標準曲與時間-洩降曲現兩者之間有很好的擬合，此時可在擬合圖上任選一點做為套配點(match point)，找出對應此點的 $W(u)$ 、 $1/u$ 、 s 與 t 。
- (四)因為抽水率 Q 可事先量測，且由步驟 3 獲得 $W(u)$ 與 s ，此時可以利用(2-5)計算流通係數 T 。
- (五)因為流通係數 T 已於步驟 4 計算得其值，此時可由步驟 3 獲得 $1/u$ 與 t ，此時可以利用(2-6)計算流通係數 S 。

二、Cooper and Jacob (1946)時間-洩降(time-drawdown)法

Cooper and Jacob (1946) 時間-洩降(time-drawdown)法的基礎

$W(u)$ 的近似表示式

$$s = \frac{Q}{4\pi T} (-0.5772 - \ln u) = \frac{Q}{4\pi T} \left(-0.5772 - \ln \frac{r^2 S}{4Tt} \right) \quad (2-7)$$

(2-7)式可進一步簡化為

$$s = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log \left(\frac{2.25Tt}{r^2 S} \right) \quad (2-8)$$

在同一口觀測井(距離井中心, 任選兩個 t_1 與 t_2 的洩降分別為 s_1 與 s_2 , 則有下列兩個關係式

$$s_1 = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log \left(\frac{2.25Tt_1}{r_0^2 S} \right) \quad (2-9)$$

$$s_2 = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log \left(\frac{2.25Tt_2}{r_0^2 S} \right) \quad (2-10)$$

(2-10)式減(2-9)式可得

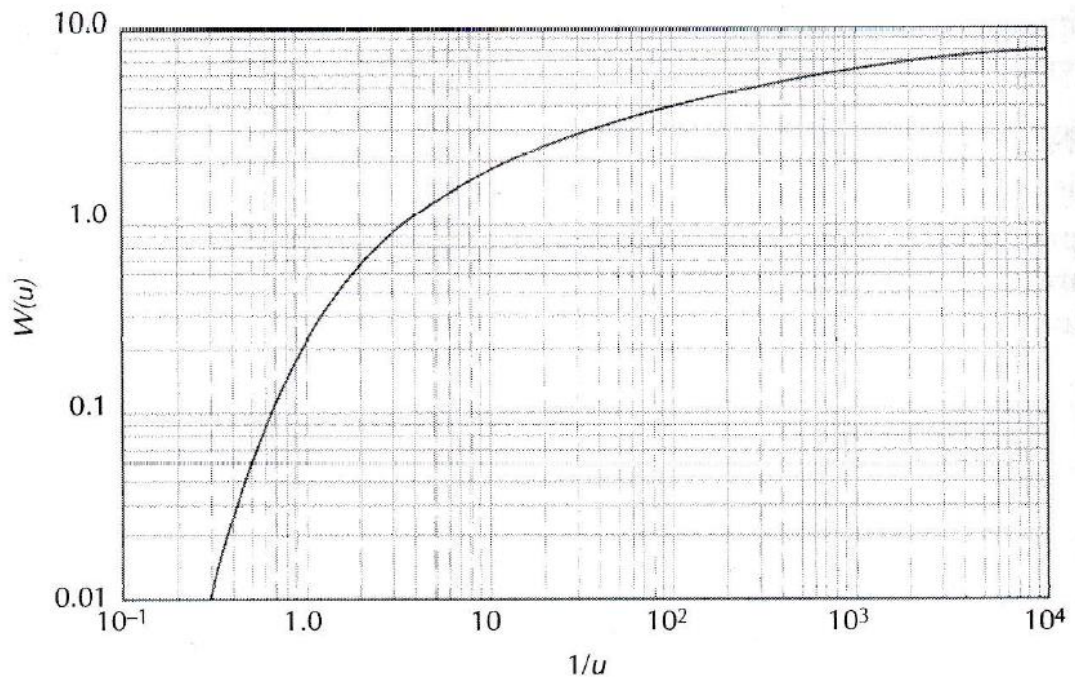
$$s_2 - s_1 = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \quad (2-10)$$

因為抽水率 Q 可事先量測, (2-10)說明由同一口井的兩個不同時間段的洩降可以計算流通係數 T , 可以產生一個圖解法, 也就是把所有的以洩降 s 為縱軸(算術尺度)與時間(time) t 為橫軸(對數尺度)繪製時間-洩降曲線於半對數紙上, 其斜率將為 $\frac{2.3Q}{4\pi T}$, 應用概念為選擇 $t_2 = 10t_1$ 且其計算洩降變化 $\Delta s = s_2 - s_1$, 則

$$\Delta s = \frac{2.3Q}{4\pi T} \quad (2-11)$$

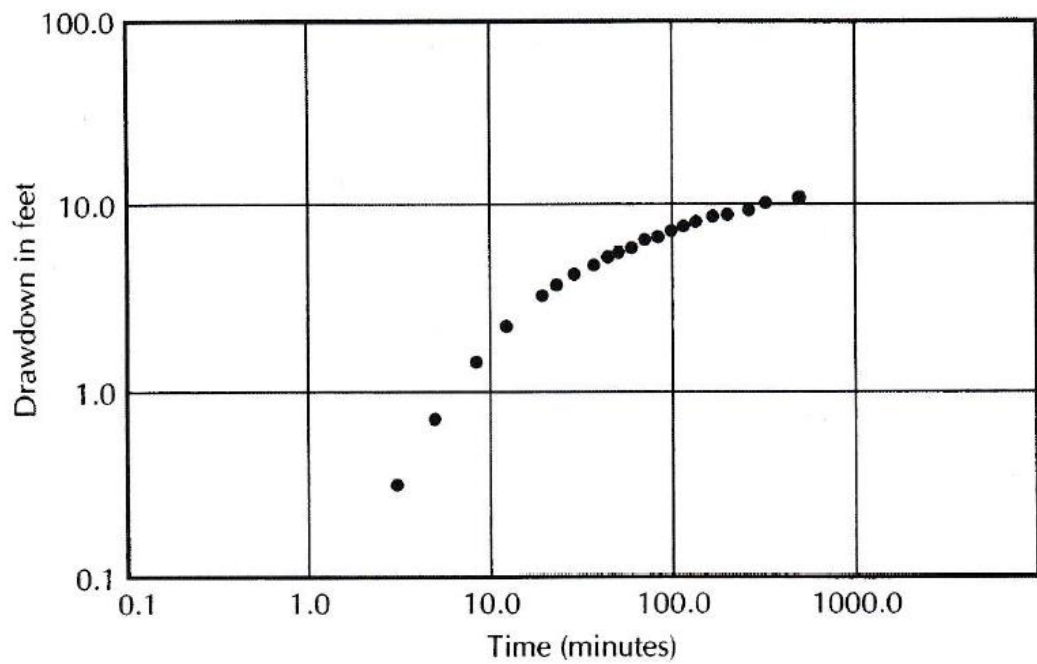
經移項後得

$$T = \frac{2.3Q}{4\pi \Delta s} \quad (2-12)$$



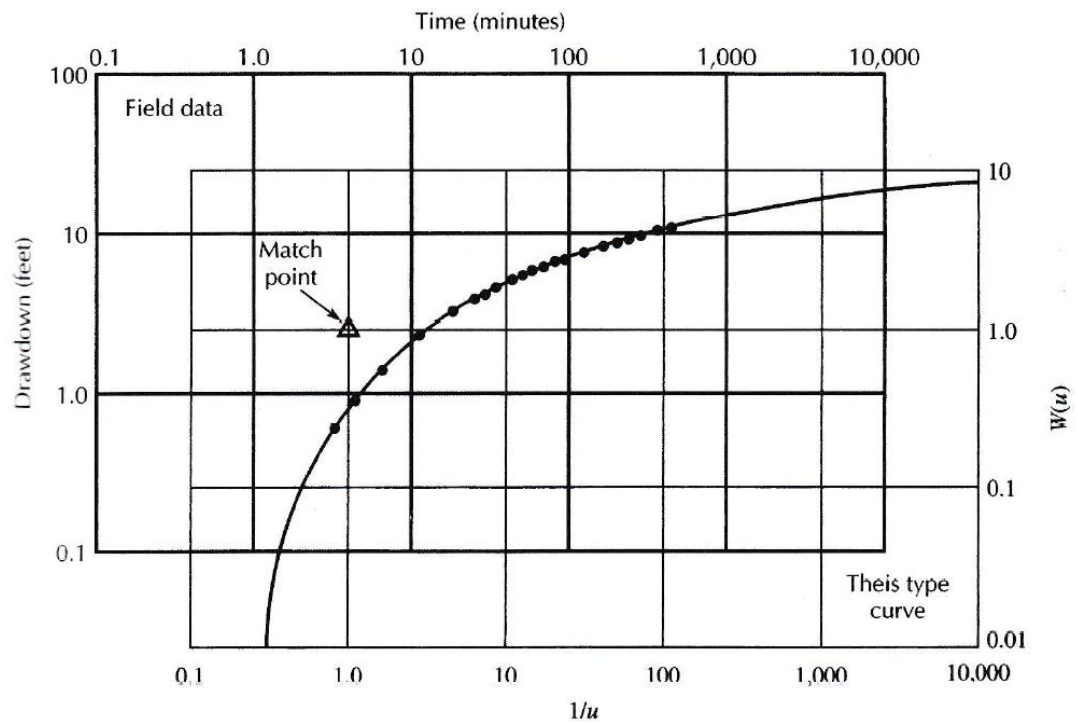
資料來源: Fetter (2018)

圖 1 受壓含水層 Theis 標準曲線圖



資料來源: Fetter (2018)

圖 2 現地時間-洩降曲線



資料來源: Fetter (2018)

圖 3 標準曲線與時間-洩降曲線擬合圖

2.3 非受壓含水層抽水試驗

非受壓含水層抽水試驗過程與執行細節會跟受壓含水層相同，但由於自由地下水位面(water table)為其上邊界，因此在受壓含水層抽水試驗是假設地下水是水平流動，無地下水垂直方向的流動，而非受壓含水層抽水試驗過程會因為抽水過程會有地下水面下降而有地下水垂直方向的流動，其控制方程式為

$$K_r \frac{\partial^2 h(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{K_r}{r} \frac{\partial h(r, z, t)}{\partial r} + K_z \frac{\partial^2 h(r, z, t)}{\partial z^2} = S_s \frac{\partial h(r, z, t)}{\partial t} \quad (2-2)$$

此處 $h(r, z, t)$ 為水頭； r 為距抽水井中心距離； t 為時間； S_s 為蓄水係數； K_r 為水平徑向水力傳導係數； K_z 為垂直方向水力傳導係數。

對完全貫穿的抽水井，其洩降為

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u_A, u_B, \Gamma) \quad (2-3)$$

$$u_A = \frac{r^2 S}{Tt} \quad \text{前期時間} \quad (2-4)$$

$$u_B = \frac{r^2 S_y}{Tt} \quad \text{後期時間} \quad (2-5)$$

$$\Gamma = \frac{K_z}{K_r} \frac{r^2}{b^2} \quad (2-6)$$

此處 s 為洩降； Q 為抽水率； T 為流通係數； $W(u_A, u_B, \Gamma)$ 為水井函數， $W(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx$ ； b 為初始飽和厚度。

非受壓含水層抽水試驗洩降資料決定水文地質參數的方法可採用標準曲線(type curve)法，曲線套配法的過程如下：

- 一、首先要以 Neuman (1975) 以 $W(u_A, u_B, \beta)$ 為縱軸(對數尺度)且 $1/u_A$ 以及 $1/u_B$ 橫軸(對數尺度)繪製標準曲線於全對數紙(圖 4)。早期時間段為 Type A 曲線，而後期為 Type B 曲線。Type A 曲線與 Type B 曲線是由水平近似線連接，Type A 曲線與 Type B 的距離取決於 S/S_y ，當此值為零時，表示曲線是位於無窮水平線的兩

個端點，因此兩個曲線常會以不同的尺度繪製，上面水平橫軸 $1/u_A$ 用來畫 Type A 曲線，下面水平橫軸 $1/u_B$ 用來畫 Type B 曲線(圖 2-4)。

二、以洩降(drawdown) s 為縱軸與時間(time) t 為橫軸繪製時間-洩降曲線於全對數紙。

三、保持圖 2-1 與圖 2-2 的橫座標互相平行(同時縱座標也會互相平行)，直至 Type B 曲線與時間-洩降曲線兩者之間有很好的擬合，此時可在擬合圖上任選一點做為套配點(match point)，找出對應此點的 $W(u_B, \Gamma)$ 、 $1/u_B$ 、 s 與 t 。

四、因為抽水率 Q 可事先量測，且由步驟 3 獲得 $W(u_B, \Gamma)$ 與 s ，此時可以利用下式計算流通係數 T 。

$$T = \frac{Q}{4\pi s} W(u_B, \beta) \quad (2-6)$$

五、因為流通係數 T 已於步驟 4 計算得其值，此時可由步驟 3 獲得 $1/u_B$ 與 t ，此時可以利用(2-5)式計算比出水量 S_y 。

六、保持圖 2-1 與圖 2-2 的橫座標互相平行(同時縱座標也會互相平行)，直至 Type A 曲線與早期時間-洩降曲線兩者之間有很好的擬合，此時可在擬合圖上任選一點做為套配點(match point)，找出對應此點的 $W(u_A, \Gamma)$ 、 $1/u_A$ 、 s 、 t 與 β ，此時可以利用下式計算流通係數 T 。

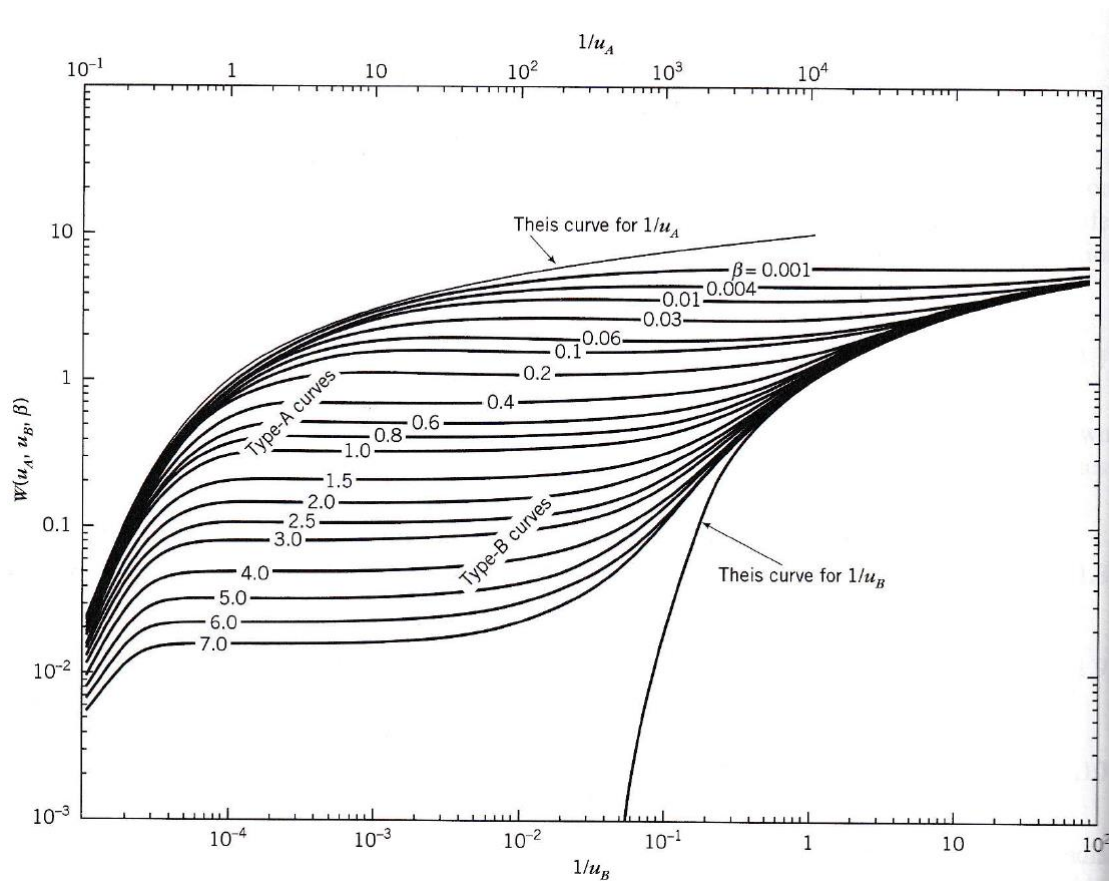
$$T = \frac{Q}{4\pi s} W(u_A, \beta) \quad (2-7)$$

所得流通係數 T 應該與步驟 4 非常接近。

七、因為流通係數 T 已於步驟 6 計算得其值，此時可由步驟 5 獲得 $1/u_A$ 與 t ，並進一步

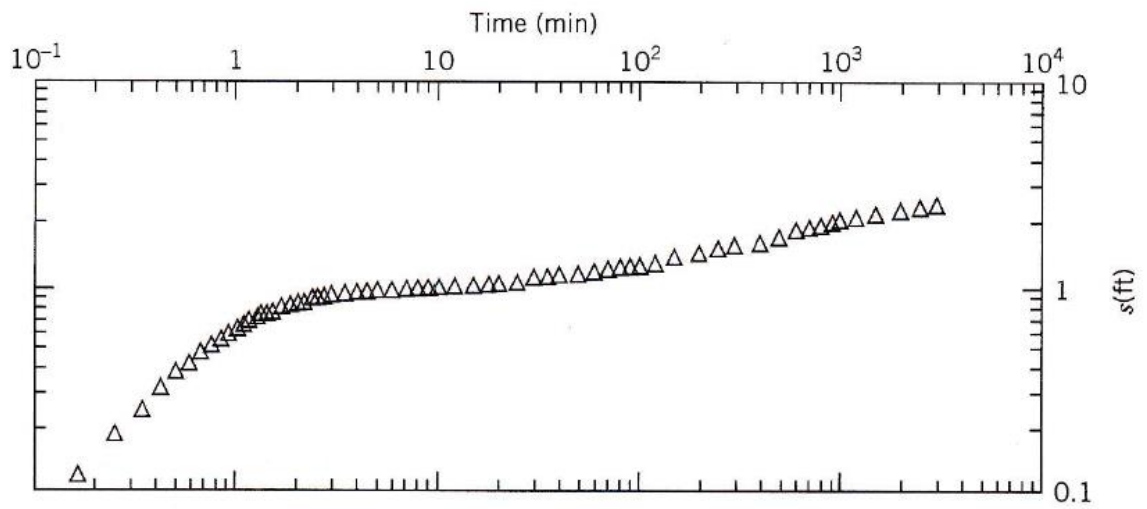
利用(2-4)式計算比出水量 S 。

八、水平的水力傳導係數為 $K_r = \frac{T}{b}$ ，由步驟6套配的 Γ 可計算垂直的水力傳導係數 K_z 。



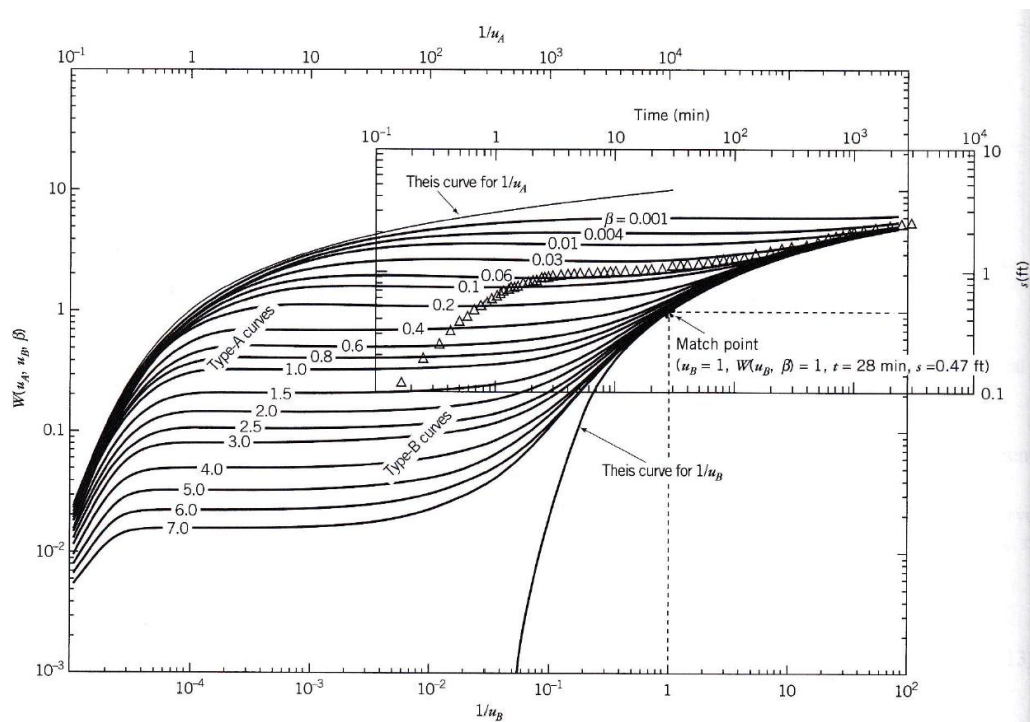
資料來源: Schwartz and Zhang (2003)

圖 4 非受壓含水層抽水試驗標準曲線圖



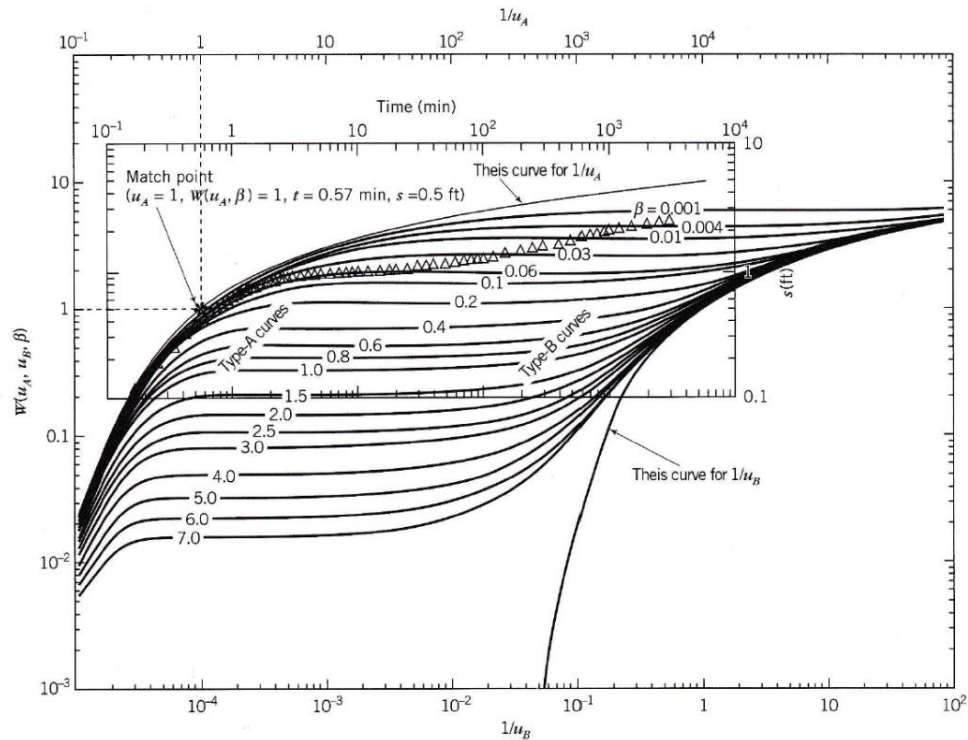
資料來源: Schwartz and Zhang (2003)

圖 5 非受壓含水層抽水試驗現地時間-洩降曲線



資料來源: Schwartz and Zhang (2003)

圖 6 Type B 標準曲線與時間-洩降曲線擬合圖



資料來源: Schwartz and Zhang (2003)

圖 7 Type A 標準曲線與時間-洩降曲線擬合圖

2.4 微水試驗

除抽水試驗外，微水試驗(slug test)也是決定水力傳導係數的方法，微水試驗是在一口井內快速汲取（或注入）一小體積水量，造成井中水位瞬時下降（或上升）（圖 8），然後量測其水位回升（或回降）資料，配合合適的微水試驗理論推估井週邊水力傳導係數。圖中虛線部份為試驗前的地下水水位，實線部份為試驗進行時藉由注氣造成地下水水位的下降。

微水試驗容易受到試驗用井建置的影響，所得到的水力傳導係數值很可能無法準確代表含水層的水力傳導特性，但因微水試驗執行容易，試驗時間短，故仍常被使用。微水試驗之優點為於污染區調查無影響污染帶範圍，不像抽水試驗須處理抽取地下水的問題。

微水試驗在台灣普遍應用於地下水污染場址，其洩降資料分析的

理論較為複雜，但目前已經有非常多的分析軟體(如 AQTESOLV、AquiferTest 等)可協助資料分析。

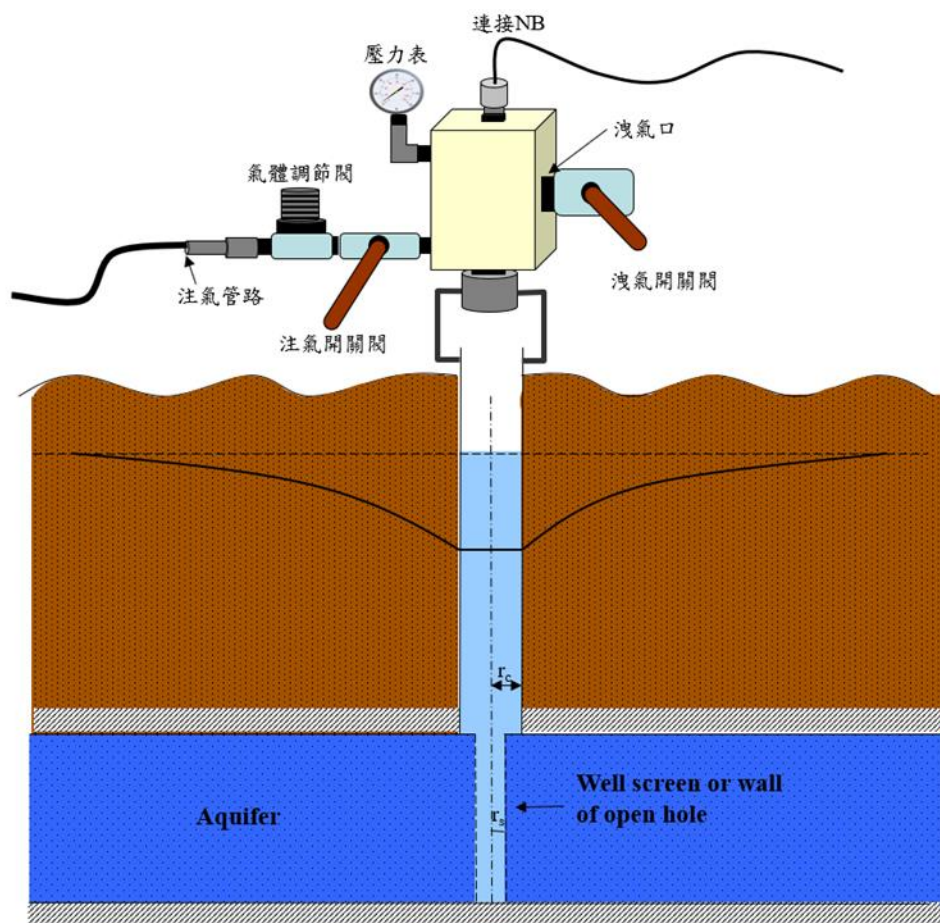


圖 8 微水試驗示意圖

第三章 檢視除役期間之核二廠地下水傳輸模式與防護監測方案之內容

3.1 核二廠防護監測方案簡介

本計畫團隊收集民國 99 年的「核二廠地下水防護方案(修定版 Rev. 3)」並加以研析。「核二廠地下水防護方案(修定版 Rev. 3)」報告中分為 8 個目錄，主要包含「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 附錄、附圖、附件」。

「1.0 前言」說明依據行政院原子能委員會 97/08/19 會核字第 0970013218 號函要求台電公司參照「NEI 07-07 Industry Ground Water Protection Initiative」及「EPRI Groundwater Protection Guidelines for Nuclear Power Plants (Public Edition)」建立「核二廠地下水防護方案」。

「2.0 監測目的」則說明建置監測點以利執行長期性「地下水監測作業」管理機制並適時修正更新「核二廠地下水防護方案」

「3.0 廠區的水文地質環境」說明廠區的地質構成，依 FSAR 報告說明包含厚度在 30m 內的沖積覆蓋層的自由含水層與岩盤的受限含水層。另外也說明美商衛世敦(WESTON)公司的調查報告成果，調查提供 Sr-90 的傳輸模擬於附圖 6，也說明將參考 EPRI 1016099 「Groundwater Protection Guidelines for Nuclear Power Plants」預定於民國 100 年完成的「地下水廠區概念模式之建立」計畫研究成果予以調整與更新。

「4.0 電廠系統、結構與組件設計」說明對於本廠(核二廠)各種可能含有放射性液體的系統、結構與組件(SSCs)經審慎評估結果，計有 2 處暗埋放射性管路，亦針對過去的外洩(外溢)評估事件進行說明。核二廠雜項廢液處理系統於 87 年 7 月 30 日進行設備檢修，因維修人員

疏忽未依正常程序將管路之沖洗水隔離閥復原關閉，使得廠用水持續洩入系統集水池，導致廢水溢流至廠房地面，並流至廠房外之水溝及草地。本次外釋總活度約為 4.8×10^5 Bq，而對廠外民眾影響方面，可能造成民眾個人最大全身劑量約為 $0.673 \mu\text{Sv}$ (遠低於法規限值 $1000 \mu\text{Sv}$)。另外，也說明針對此事件將採取的因應改善措施，相關因應改善措施包括廠內防護因應措施、廠外環境偵測與未來潛在可能的外洩(或外溢)而導致污染環境地下水的綜合性評估。

「5.0 地下水監測計畫」說明依相關法規編有「環境輻射監測計畫」，環境監測項目包括氡分析與加馬能譜分析，分析包括海水、飲水、池水、河水、地下水、定時雨水與定量雨水等七項的監測類別。地下水設有 3 處監測點，皆位於廠界內監測區。後續規劃「地下水監測計畫」包括 3 處地下水取樣站持續辦理監測與主體廠房結構四周的 4 口深水井中(東、西、南與北側)規劃南側與北側的兩處深水井藉由手動操作取得地下水樣。

「6.0 以往監測結果」則說明廠區水樣委託「放射實驗室」執行氡分析，歷年監測結果皆無異常，定期清理維護主廠房結構四周的 4 口深水井過去的取樣測試分析紀錄顯示無異常，地下水 3 處取樣站歷年監測結果皆顯示無異常。

「7.0 報告」主要說明例行報告、環境及廠區的地下水監測結果分別納入環境監測報告與輻設安全報告與異常報告。

「8.0 附圖、附件、附錄」包括 8.1 附錄一「核二廠地下水污染防治現況評估」。8.2 附圖 1「核二廠廠區地表高程圖」。8.3 附圖 2「廠區岩盤等高線圖」。8.4 附圖 3「廠區覆蓋層地下水水位等值線圖」。8.5 附圖 4「廠區岩盤地下水水位等值線圖」。8.6 附圖 5「核二廠模

式建立岩盤之地下水流向圖」。8.7 附圖 6「核二廠一號廢棄物貯存庫 Sr90 洩漏之岩盤傳輸結果圖」。8.8 附圖 7「核二廠二號廢棄物貯存庫 Sr90 洩漏之覆蓋層傳輸結果圖」。8.9 附圖 8「核二廠三號廢棄物貯存庫 Sr90 洩漏之覆蓋層傳輸結果圖」。8.10 附圖 9「核二廠廠區地下水監測點分布圖」。8.11 附圖 10「廠區監測區水樣委託放射性氬分析趨勢圖」。8.12 附圖 11「核二廠用過燃料池池水氬比活度趨勢圖」。8.13 附件一、「廠房、廠區之系統設備、結構與組件定期目視檢查表」。8.14 附件二、「環境試樣放射性分析之預警措施基準」。

3.2 核二廠防護監測方案評析

「核二廠之地下水防護方案(修定版 Rev. 3)」參照「NEI 07-07 Industry Ground Water Protection Initiative」與 EPRI 「Groundwater Protection Guidelines for Nuclear Power Plants」，以下就核二廠地下水防護監測方案以 EPRI 的「Groundwater Protection Guidelines for Nuclear Power Plants」第三章至第七章進行比檢核與分析。

EPRI 第三章「潛在地表下外釋評估」包括「歷史洩漏和傾洩評估」、「系統、結構與組件(system、structure and component，SSC)評估」、「工作作業評估與 SSC」與「工作作業優先順序」共 4 節，在「歷史洩漏和傾洩評估」相關工作，「核二廠地下水防護方案(修定版 Rev. 3)」對於已發生的外溢(外洩)事件進行評估，針對核二廠雜項廢液處理系統於 87 年 7 月 30 日進行設備檢修後因維修人員疏忽未依正常程序將管路之沖洗水隔離閥復原關閉，使得廠用水持續洩入系統集水池，並溢流至廠房地面、廠房外之水溝及草地之事件進行說明，並評估外釋的核種濃度、總排放活度以及可能造成民眾個人之最大全身劑量。然而，「工作作業評估與 SSC」與「工作作業優先順序」並未撰寫說明於「核二廠地下水防護方案(修定版 Rev. 3)」，建議後續應納入相關項目說明。

EPRI 第四章「建立場址概念模型」，包含有「發展初版場址概念模型」、「航測照片和工程圖」、「先前的水文地質報告」、「潛在的廠內和廠外地下水污染受體」、「州和地方法規」、「地下水流特性初步評估」、「場址的地下水流況」、「量測物理參數」與「宿命傳輸數值模式」等 9 節。在「發展初版的場址概念模型」部份，「核二廠之地下水防護方案(修定版 Rev. 3)」有簡單進行 Sr-90 的傳輸模擬，也說明預定於民國 100 年完成的「地下水廠區概念模式之建立」計畫研究成果予以調整與更新，在 101 年「建立核能電廠廠區地下水傳輸基準版概念模式」已建立初

版場址概念模型，應可進一步在後續「核二廠之地下水防護方案」後續文件納入相關說明。在「航測照片和工程圖」部份，應於後續「核二廠之地下水防護方案」加以說明。「先前的水文地質報告」部份，「修定版 Rev. 4」說明依照 FSAR 的地質調查結果，包含厚度在 30m 內的沖積覆蓋層的自由含水層與岩盤的受限含水層。在「潛在的廠內和廠外地下水污染受體」及「州和地方法規」部份，應可進一步在「核二廠之地下水防護方案」後續文件加以說明。在「地下水流特性的初步評估」部份，依照 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」有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，有說明用微水試驗(slug test)取得水力傳導係數。

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。「核二廠之地下水防護方案(修定版 Rev. 3)」並未詳細說明「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」，應可進一步在「核二廠之地下水防護方案」後續文件加以說明。

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。「核二廠之地下水防護方案(修定版 Rev. 3)」僅說明廠區三處地下水取樣由放射實驗室進行取樣，南側與北側兩口深水井的地下水取樣分析作業由核二廠以手動操作取得地下水樣辦理。另外有說明檢測項目包括氚分析與加馬能譜分析。但並未詳細說明「地下水採樣的數據品質目標」、「樣品採集程序」、「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」應可進一步在「核二廠之地下水防護方案」後續文件加以說明。

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，「核二廠之地下水防護方案(修定版 Rev.3)」的「6.0 以往監測結果」說明核二廠的廠區水樣歷年監測結果皆顯示無異常，主廠房結構四周的 4 口深水井過去的取樣測試分析紀錄顯示無異常，地下水 3 處取樣站歷年監測結果皆顯示無異常。在「廠內水質指標數據評估」，「核二廠之地下水防護方案」的後續文件應可進一步說明濁度、溫度、pH、氧化還原電位、電導度、溶氧等基本水質指標數據的評估。在「分析數據管理和數據品質評估」部份，「核二廠之地下水防護方案」的後續文件應加入說明。在「環境濃度」與「場址概念模型的審查和修訂」部份，「核二廠之地下水防護方案」的後續文件應可進一步說明。

3.3 核二廠地下水傳輸模式說明

核二廠已經建立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)，核二廠的地下水傳輸基準版概念模式建立也與核一廠的地下水傳輸基準版概念模式相同，採用美國核能管理委員會的 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。GROUND 模式可以用來評估放射性核種於地下水的遷移，GROUND 模式的發展是以解析解為基礎發展，因此須讓地下水流為單一方向的均勻流(uniform flow)，且可以在數學上巧妙安排沿著三維直角座標系統的 x 方向，均勻流的基本假設為並無抽/注水發生，因此不適用鄰近抽/注水井附近的核種遷移。

GROUND 模式的發展的背景是由於人力、時間與經費等諸多原因，常常無法取得充足的現地水文地質調查資料，在現地水文地質調查資料不足下，如果使用複雜的地下水傳輸數值模式，將會有許多參數需使用假設而造成模擬結果充滿不確定性。且以 1980 年代的計算機在以有限差分或有限元素法為基礎的地下水傳輸數值模式進行長時間(百年到千年)的數值模擬分析，會大量耗費計算時間。

以下就 GROUND 模式理論的相關方程式與初始邊界條件簡單說明，由於 NUREG 0868 報告所採用的符號表示與目前地下水領域的主流符號表示方法並不一致，此處採用 NUREG 0868 報告原始文件符號表示進行說明。

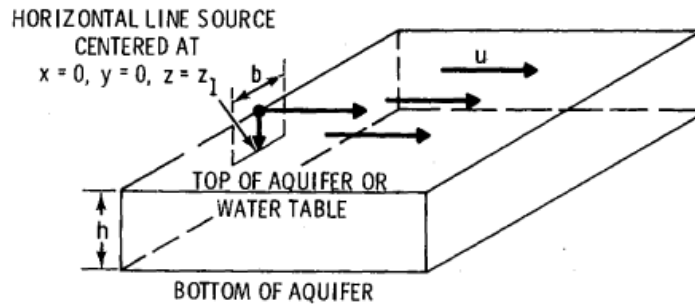
GROUND 模式考慮如圖 9 所示的均質含水層系統，只能考慮單一污染物(核種)傳輸，假設地下水流沿著三維直角座標系統的 x 方向，因此只有沿著 x 方向的一維的移流(advection)傳輸，但水力延散(hydrodynamic dispersion)可以沿著 x 、 y 與 z 方向，溶解相(dissolved phase)

與吸附相 (sorbed phase) 的吸/脫附則以線性平衡等溫吸附 (linear equilibrium isotherm sorption) 描述，在考慮污染物或核種為一階降解或衰變反應下，地下水污染傳輸的控制方程式為

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

此處 C 為污染物溶解相濃度； u 為地下水滲流 (seepage velocity) 速度； E_x 、 E_y 與 E_z 為 x 、 y 與 z 方向的水力延散係數 (hydrodynamic dispersion coefficient)； R_d 為遲滯因子 (retardation factor)； λ 為一階衰變反應常數 (first-order decay rate constant)。

GROUND 模式，考慮圖 4-1 含水層系統有一水平線源 (line source)，水平線源的中心處位於 $(0, 0, z_1)$ ，水平線源寬度為 b ，污染源釋放方式為 1Curi (Ci) 在時間 $t=0$ 瞬時釋放。



資料來源: R.B. Codell et al. (1981)

圖 9 水平線源示意圖

式(4-1)利用下列初始與邊界條件求解

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

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

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

利用 Green function 方法可以求解得

$$\begin{aligned} C(x, y, z, t) = & \frac{1}{2bhn_e R_d \sqrt{4\pi E_x \frac{t}{R_d}}} \left\{ \exp \left[-\frac{\left(x - \frac{vt}{R}\right)^2}{4E_x \frac{t}{R_d}} - \lambda t \right] \right\} \\ & \times \left\{ \operatorname{erf} \left[-\frac{\left(\frac{b}{2} + y\right)^2}{4E_y \frac{t}{R_d}} \right] - \operatorname{erf} \left[-\frac{\left(\frac{b}{2} - y\right)^2}{4E_y \frac{t}{R_d}} \right] \right\} \\ & \times \left[1 + 2 \sum_{m=0}^{\infty} \exp \left(-\frac{m^2 \pi^2 E_z}{h^2 R_d} t \right) \left[\cos \left(m \frac{z_s}{h} \right) \cos \left(m \frac{z}{h} \right) \right] \right] \end{aligned} \quad (4-5)$$

在假設垂直 z 方向已均勻混合，則(4-5)可簡化為

$$\begin{aligned} C(x, y, z, t) = & \frac{1}{2bhn_e R_d \sqrt{4\pi E_x \frac{t}{R_d}}} \left\{ \exp \left[-\frac{\left(x - \frac{vt}{R}\right)^2}{4E_x \frac{t}{R_d}} - \lambda t \right] \right\} \\ & \times \left\{ \operatorname{erf} \left[-\frac{\left(\frac{b}{2} + y\right)^2}{4E_y \frac{t}{R_d}} \right] - \operatorname{erf} \left[-\frac{\left(\frac{b}{2} - y\right)^2}{4E_y \frac{t}{R_d}} \right] \right\} \end{aligned} \quad (4-6)$$

核二廠的地下水傳輸基準版概念模式是以式(4-6)為基礎進行計算，考慮的核種為氙，相關參數為含水層厚度(h)為 8.57m，有效孔隙率(n_e)採用來自(WESTON, 1998)為 0.25，水力傳導係數採用來自(WESTON, 1998)為 2.0 m/day，流速(u)為 2.32×10^{-2} m/day，氙的核種半

衰期(half-life)為 12.3 年，氙無吸附性所以遲滯因子(R_d)為 1，延散度(dispersivity)在 x 、 y 與 z 方向分別為 60.96 cm、60.96 cm 與 9.14 cm，污染源寬度為 $b = 0.3$ m。

3.4 核二廠地下水傳輸模式評析

地下水傳輸模擬的信賴度取決於兩個關鍵因素，分別是選用貼近真實場址污染傳輸的模式與給予合理的參數，以下將針對核二廠地下水傳輸模式選用的模式是否貼近真實場址污染傳輸行為與模式參數值的合理性進行探討。

針對核二廠地下水傳輸模式選用的模式是否貼近真實場址污染傳輸行為，GROUND 地下水傳輸模式在地下水流方向(x 方向)的兩個邊界設定為在兩個無窮遠處($\pm\infty$)，以水平線源外釋點在 $x=0$ (如圖 9 所示)，也就是說當地下流往正 x 方向移動， $x=0$ 注入的污染源將可能因水力延散作用而因此往跟地下水流方向相反的方向(負 x 方向)遷移(逆水流延散)，然而此並不符合真實地下水污染物的遷移現況，且由於本來應該直接由水平線源外釋點往地下水流方向的移動的污染物將因此逆水流延散過程而會造成低估污染物濃度(Chen et al., 2012)。近年來有許多前瞻創新的解析模式與數值解模式，台灣環保署地下環境模式平台也提供前瞻創新的解析模式(快速評估工具)與數值模式(進階評估工具)，建議管制單位可以納入考慮相關工具。

另外在模式給定的參數值有些不合理，其中以延散度參數值的給定最為不合理，就地下水移流-延散傳輸的物理機制而言，由於地下水往前移動時由異質性所造成的縱向延散(longitudinal dispersion)會比由孔隙介質所造成地下水流分歧所導致的側向延散(transverse dispersion)傳輸來得大，因此合理的延散度應該是沿水流方向的延散度(α_x)遠大於其它兩個方向(α_y 與 α_z)，但此處選用 $\alpha_x = \alpha_y = 60.96 \text{ cm}$ 非常明顯是違反真實的物理現象，也就是說錯誤給定參數值，此將會嚴重高估水平水流垂直向(y)污染團分布範圍與低估污染物濃度。

另外核二廠地下水傳輸模式是考慮氚進行相關地下水模擬，氚本

身一般認為不具吸附性，然而在除役電廠可能的關切核種(radionuclide of interest)可能有 Sr-90 或 Cs-137，這些核種本身除具吸附性外，其劑量貢獻度也不會與氡相同，建議應可以考慮其它關切核種進行模擬。

第四章 國際核電廠運轉與除役期廠址地下水防護實務經驗

計畫團隊持續蒐集國核電廠運轉與除役期廠址地下水防護監測方案相關資料，據以精進我國核電廠除役期間地下水特性評估及輸入參數之評估作業程序。計畫分別蒐集美國 Zion 核電廠與韓國 Kori 核電廠相關文獻，以下分別就兩核電廠說明。

4.1 美國 Zion 核電廠

本計畫研析文獻「Evaluation of Potential Radionuclide Release and Transport for the Zion Nuclear Power Station Basement Fill End State: Conceptual Model Development and Sensitivity Analysis」，研析結果分別於下列各小節說明。

4.1.1 文獻的背景與目的

Zion 核電廠包含兩個反應爐圍阻體(reactor containment buildings)、一個燃料廠房(fuel building)、一個輔助廠房(auxiliary building)和一個可能被污染的汽機廠房(turbine building)。除役計畫會把所有地面結構拆除到地表下 3ft 的深度，剩餘的地下結構將以乾淨、無放射性物質的混凝土拆除碎片(clean concrete demolition debris, CCDD)填充，然而剩餘的結構將包含低量殘留的核照放射性物質(licensed radioactive material)，對除役過程非常重要的一件事為要佐證確認任何後續的活動將不會引起假設的個體所接收到的劑量超過 10CFR 20 Subpart E 所規範的 25 mrem / y (0.25 mSv/y)。

為了佐證 10CFR 20 Subpart E，因此就需要進行放射性物質外釋與傳輸至受體(receptor)的模擬工作，模擬工作將包括分析現地的廠房量化殘留的放射性活度，模擬放射性活度自混凝土的外釋與經由地下水至受體用井或臨近水體。暴露情境將包括將來住民的吸入、攝食或者外

部暴露來自殘留污染的輻射，也就是說井水可能用來做為飲用、灌溉與作物生長。

因此相關工作包括蒐集來自地下結構的分析結果定義殘留的污染(射源項，source term)，利用場址的有效孔隙率(effective porosity)、總體密度(bulk density)、水力梯度(hydraulic gradient)與水力傳導係數(hydraulic conductivity)的水文地質傳輸性質與與吸附(sorption)化學傳輸性質計算放射性物質的傳輸，根據分析資料與傳輸參數發展了簡單的場址概念模型(conceptual site model)且利用 DUST-MS 計算在不同受體位置的地下水污染濃度。

因此報告目的為(1)發展簡單的場址概念模型，可以提供在不同受體位置的地下水污染濃度上限；(2)建立反應場址概念模型與場址傳輸特性的基準傳輸情境；(3)進行關鍵傳輸參數與來源項空間分布的敏感度分析以確認這些參數值改變對濃度的影響；(4)提供隨時間改變的水濃度以執行劑量評估計算。

模式計算將估計現地水井的尖峰地下水濃度，計算的濃度可直接結合 RESRAD OFFSITE 來估算一位假設的個體可能接受來自所有暴露途徑的劑量。以 DUST-MS 結合 RESRAD OFFSITE 也可以與直接用 RESRAD OFFSITE 計算地下水濃度並進而計算劑量的結果相互比較。

4.1.2 概念模型

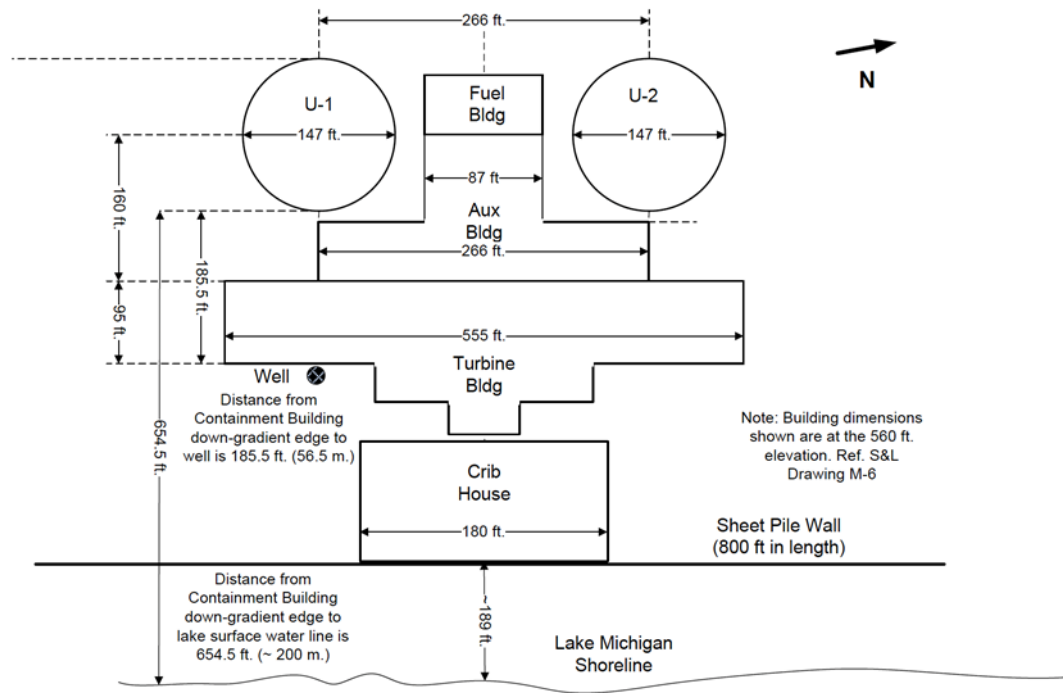
Zion 電廠的配置圖如圖 10 所示，它位於密西根湖的湖畔，主要包括兩個反應器圍體(U-1 與 U-2)，一個燃料廠房(fuel building)、一個輔助廠房(auxiliary building)、一個汽機廠房(turbine building)、一個倉儲室(crib house)與板樁牆(sheet pile wall)阻隔地下水與密西根湖。

提出的計畫包括分析在 Zion 地下結構的殘留污染，雖然高濃度的污染物在整治過程中移除，但還是會有一些污染原地殘留(表面或體內)，這些殘留的污染將為地下水中放射性活度的潛在來源。這些結構將會回填未受污染混凝土拆除碎片與砂混合物以改良流動能力與填充孔隙。

初步的分析資料建議反應器圍阻體具有最高濃度的污染，中濃度污染於輔助廠房與燃料廠房，低濃度污染於渦輪廠房。自然地下水為流向湖泊且垂直於湖邊，因此由來自兩個反應爐的外釋將不會互相混合。概念場址模式以一個反應器圍阻體的外釋為基礎，主要是基於(1)兩個反應器建築的外釋途徑是彼此獨立且(2)反應器圍體是污染最嚴重的廠房。概念模式假設一個單位來源項(unit source term)但可以實際量測分析的活度依比例計算。對單一圍阻體(直徑 147ft)相當於 $7.1\text{E-}08$ Ci 的總盤存量(total inventory)，目前估算在反應器圍阻體中 Cs-137 污染物估計低於 10 Ci。

選用 DUST-MS 計算程式做為估算來源項外釋與傳輸至受體井，DUST-MS 為一維模式，受污染的表面積為 $1.58\text{E}07\text{ cm}^2$ ，相當於半徑為 73.5 ft 的圓的表面積，受體的位置分別設在 2、25、56.5 與 100m 處(圖 2)。考慮分析的核種為 H-3、Fe-55、Co-60、Ni-63、Sr-90 與 Cs-137。考慮氫(H-3)主要是其與地下水流動一致且有最快的到達時間與最少的稀釋，考慮鐵主要是在核電廠常發現，由於長時間的停機且鐵的半衰期(2.7 years)，導至大量的衰變使其並未在場址的分析資料確認。而 Co-

60、Ni-63、Sr-90 與 Cs-137 等的選取主要是根據初步的分析資料。



資料來源: Sullivan (2013)

圖 10 Zion 電廠廠房配置圖

4.1.3 基準案例

基準案例是以單位來源項且場址可能的量測值做為模式參數值，基準案例主要是做為與敏感度分析比較用，在敏感度分析參數值是每次改變以釐清其影響。基準案例意謂濃度保守估計的上限值。

在初始條件部份假設所有考慮的核種一開始都不存在地下水中，在邊界條件，假設模擬系統上游邊界為零通量(no flux)，也就是沒有核種由此處進/出模擬系統，模擬系統下游邊界則考慮為零濃度邊界，此種邊界條件將使離開此邊界的通量為最大。來源項是以 1 dpm/100 cm² 單位的盤查存量，假設來源項均勻分配於整個圍阻體的地板，來源項考慮為瞬時外釋，假設瞬時外釋通常會造成較高的濃度，考慮的地下流速度為 8.03 m/y (現地量測的水力傳導係數為 5.00E-3 cm/s 與水力梯度 0.0051)，擴散係數 1.0E-10 cm²/s，延散度假設為 1m，原始土壤的有效孔隙率(θ)為 0.167，原始土壤的總體密度(ρ_b)為 2.12 g/cm³，回填材料的有效孔隙率為 0.25，回填材料的總體密度為 1.5 g/cm³。核種的半衰期(half life)為影響其在地下水的傳輸，H-3 的半衰期為 12.3 year，Fe-55 為 2.7 year，Co-60 為 2.7 year，Ni-63 為 100 year，Sr-90 為 29 year，Cs-137 為 32 year。分布係數(Kd)為控制污染物傳輸的重要參數，BNL 對 5 個核種(未考慮 H-3，因未具吸附性)進行相關分析，樣本包括 2 種混凝土碎屑與 4 種土壤，此處選用土壤或混凝土的 Kd 較小值，相關 Kd 選用如表 1 所示。

表 1 選用的分布係數(ml/g)

	H-3	Fe-55	Co-60	Sr-90	Ni-63	Cs-137
Minimum Soil	0	2.85E+03	1.16E+03	2.3	62	527
Minimum Concrete	0	1.60E+04	1.16E+03	10.4	3440	45
Selected Backfill	0	2.85E+03	1.16E+03	2.3	62	45

資料來源: Sullivan (2013)

4.1.4 基準案例模擬結果

模擬成果可以表 2 說明，表 2 為 6 個核種在 5 個不同受體位置(2 m、25 m、56.5 m、100 m 與 200 m)處的尖峰濃度(peak concentration)與尖峰濃度時間(time of peak)，模擬時間為 300 年。模擬結果顯示在最近的 2m 處 Fe-55 與 Co-60 溶解相濃度非常低(已低於 10^{-10} pCi/L)，因此不須考慮為主要的關切污染核種，此低濃度原因為因為 Fe-55 與 Co-60 採用非常大的分布係數(超過 $1000\text{cm}^2/\text{g}$)，因此會有大量的 Fe-55 與 Co-60 吸附到固體相，在溶解相中 Fe-55 與 Co-60 相對量較少，因此不會有太多污染物被地下水帶走，此即所謂的 Fe-55 與 Co-60 具有較大的遲滯因子。Ni-63 大概 2m 與 25m 處其濃度還高於 10^{-10} pCi/L，但 56.5m、100m 與 200 m 其濃度就低於 10^{-10} pCi/L，Ni-63 於 2m 處約在 58 year 會出現尖峰濃度，但在 25 m、56.5 m、100 m 與 200 m 則 300 年內不會出現尖峰濃度。Cs-137 大概 2m 處其濃度還高於 10^{-10} pCi/L，但 25m、56.5m、100m 與 200 m 其濃度就低於 10^{-10} pCi/L，Cs-137 在 2m 處約在 58 year 會出現尖峰濃度。H-3 在 2m、25 m、56.5 m、100 m 與 200 m 其濃度都高於 10^{-2} pCi/L，相對於其它的核種其濃度為最高的主要原因為其不具有吸附性，在 56.5m 處到達尖峰濃度時間約 2 年，這主要因為模擬考慮的地下水(Darcy)流速為 8m/day，在孔隙率約為 0.167 下，此約為孔隙(滲流)速度 48 m/day，此也反應 200m 處到達尖峰濃度時間約 5 年，另外值得注意處為從 2m 到 56.5m 處尖峰濃度只減為一半，顯示濃度的下降非常緩慢，其主因為無吸附性。Sr-90 在 2m、25 m、56.5 m、100 m 與 200 m 其濃度都高於 10^{-4} pCi/L，其主要原因是相較於所有具吸附性核種(Fe-55、Co-60、Ni-63 與 Cs-137) 其採用較小的吸附常數(2.3 ml/g)，其在 56.5m 處到達尖峰濃度時間約 42 年，相較於 H-3 不具吸附性所以在 56.5m 處到達尖峰濃度時間約 2 年，此反應因為吸附

所造成的污染物移動的遲滯現象。

美國環保署對 H-3 與 Sr-90 設定的飲用水水質標準為 4 mrem/y，以此為基準對攝食而言約為 H-3 濃度 20,000 pCi/L 與 Sr-90 濃度 8 pCi/L，對 H-3 在 2m 處要達到 20,000 pCi/L，則來源項濃度為 $2.50E5$ dpm/100 cm²，相當於 0.18 Ci 的總盤存量。如果以 Sr-90 在 56.5 處濃度要達 8 pCi/L，則來源項濃度為 4300 dpm/100 cm² 相當於 $3.0E-4$ Ci 的總盤存量。

表 2 為基準案例模擬成果，表左邊為不同核種在不同受體位置的尖峰濃度，右邊為尖峰濃度發生的時間。

表 2 基準案例模擬成果

Nuclide	Peak Concentration (pCi/L)					Time of Peak (years)				
	2 m	25 m	56.5 m	100 m	200 m	2 m	25 m	56.5 m	100 m	200 m
H-3	7.9E-02	5.1E-02	4.1E-02	3.2E-02	2.1E-02	1	2	2	3	5
Fe-55	8.1E-13	1.1E-83	0	0	0	15	185	N/A	N/A	N/A
Co-60	6.2E-10	9.8E-53	0	0	0	26	> 300	N/A	N/A	N/A
Ni-63	1.5E-04	6.6E-06	2.0E-12	3.2E-31	0	58	> 300	> 300	> 300	N/A
Sr-90	6.0E-03	3.6E-03	1.9E-03	8.1E-04	1.4E-04	7	23	42	69	130
Cs-137	7.2E-06	4.7E-24	3.0E-70	0	0	75	> 300	> 300	N/A	N/A

資料來源: Sullivan (2013)

表 3 為不同核種在不同位置以 2m 處濃度為分母標準化後所得的結果，此可以反應延散、吸附與衰變所造成濃度的下降，H-3 的下降非常緩慢(40%在 100m 處)，其它核種具吸附性因此濃度下降的非常快，Sr-90 的低吸附性使其在 100m 處仍有 12.8%)，Ni-63 在 25m 處下降為 0.04，顯示有機會測得濃度，但更遠的距離應不易測得濃度。Cs-137、Fe-55 與 Co-60 在 25 處其相對濃度非常低，因此應該不易測到濃度。

根據 Zion 電廠現有資料，H-3 的濃度很低，因此 Sr-90 是較為可能超過飲用水水質標準的核種，以這樣的理由須特別關注 Sr-90。

表 3 分母標準化所得結果

Normalized Concentration				
Nuclide	2 m	25 m	56.5 m	100 m
H-3	1	0.64	0.52	0.40
Fe-55	1	1.41E-71	N/A	N/A
Co-60	1	1.59E-43	N/A	N/A
Ni-63	1	0.044	1.32E-08	2.15E-27
Sr-90	1	0.57	0.29	0.128
Cs-137	1	6.47E-19	4.15E-65	N/A

資料來源: Sullivan (2013)

4.1.5 敏感度分析

雖然已經有相關 Zion 場址參數，然而在土壤系統與回填材料仍然可能存在變異性，為了瞭解這些變異性的影響，因此進行敏感度分析，敏感度分析相關參數如表 4 所示。

表 4 敏感度分析參數

參數	基準案例	敏感度分析範圍
來源項分布	均勻分布	總活度不變但 90% 集中較下方的 10% 來源區
地下水流速	8.03 m/y	4-16.9 m/y
土壤有效孔隙率	0.1674	0.06-0.25
土壤總體密度	2.12 g/cm ³	1.5 g/cm ² - 2.3 g/cm ³
土壤分配係數	量測值	1/2-2 的量測值
回填土有效孔隙率	0.25	0.15-0.35
回填土總體密度	1.5 g/cm ²	1.2 g/cm ² - 1.8 g/cm ²
回填土分配係數	量測值	1/2-2 的量測值

資料來源: Sullivan (2013)

4.1.6 敏感度分析結果

H-3 的尖峰濃度對均勻分布來源項非常敏感，均勻分布來源項造成在 2m 處尖峰濃度增加了 66%，然而在 200m 處只增加了 11%，其主要原因為當污染物傳輸距離越遠，非均勻分布來源項的影響會因為延散作用而減弱。H-3 不具吸附性因此對總體密度與分配係數的變化不受影響(無敏感度)，當地下水流速度增加 2 倍，會導致尖峰濃度下降 20%，當地下水流速度減少 2 倍，會導致尖峰濃度上升 20%，此現象主要也是延散作用所造成。由於在傳輸方程式中延散係數是假設正比於地下水流速度，因此較高的流速將有較大的延散係數，因此會導致尖峰濃度的下降。尖峰濃度也會受孔隙率影響，較小的孔隙率將會有較大的尖峰濃度，反之較大的孔隙率將會有較小的尖峰濃度，其主因為低孔隙率將會在地層中較少的水，因此無法稀釋污染物濃度。

F-55 對土壤的 K_d 非常敏感，會導致多個數量(order)的土壤濃度，其主因為高 K_d 值與短半衰期(2.7 year)，在污染源區尖峰濃度是線性正比於 K_d 值，將 K_d 值加倍將減少尖峰濃度為 1/2，土壤總體密度也展現同樣的效果，因為遲滯因子($R=1+\frac{\rho_b K_d}{\theta}$ ， ρ_b 為孔隙率， K_d 為分配係數， θ 為孔隙率)。Co-60 因為其分配係數大於 1,000 g/cm³，因此其敏感度分析與 Fe-55 類似。

Ni-63 的尖峰濃度土壤 K_d 值與土壤密度最為敏感，將 K_d 值減半可能導致尖峰濃度有好多個數量(order)的變化，然而由於其尖峰濃度非常低(在距離污染源區 56 m 處小於 10⁻⁶ pCi/L)，非均勻分布來源項對尖峰濃度也展現影響，其影響約可達數倍。雖然 Ni-63 的 K_d 值稍高(62 cm³/g)，但 1,000 年的半衰期使其不會在 300 年的模擬時間完全衰變，因此會到達受體井，由於較長的半衰期(有限的衰變)，因此尖峰濃度也會受地下水流速影響。

Sr-90 在敏感度分析呈現最為有趣的結果，由於其 K_d 值不高($2.3 \text{ cm}^3/\text{g}$)且半衰期達 29 year，因此在不同範圍的不同參數皆對預測濃度有影響。Sr-90 的尖峰濃度對土壤與回填土的 K_d 與密度、地下水流速、非均勻分布來源項皆屬敏感，導致在來源區尖峰濃度增加 9 倍，在 2 m 處增加 3 倍，但在 56.5 m 只有增加 50%。尖峰濃度的改變與在來源區 K_d 值的改變呈現線性正比，尖峰濃度與改變土壤的 K_d 值呈現一個非線性反應，其變化比來源區更為敏感，這主要展現衰變的影響，對低的 K_d 值，由於到受體的時間相對較短，因此並沒有太多的時間發生衰變。地下水流速對尖峰濃度的影響也是類似，改變孔隙率對尖峰濃度的影響相對不明顯。

Cs-137 在土壤有較高的 K_d 值($527 \text{ cm}^3/\text{g}$)與在回填土有較低的 K_d 值($45 \text{ cm}^3/\text{g}$)，高的 K_d 值使得在 2m 外尖峰濃度幾乎可以忽略，儘管對 K_d 與其它參數的敏感都非常高(相較於基準案例大於好多個數量)，然而由於在 2m 外尖峰濃度非常低(小於 10^{-10} pCi/L)。在 2m 的受體位置處，尖峰濃度對回填土或土壤的 K_d 敏感，在 2m 處將 K_d 減少為 1/2，將會導致尖峰濃度增加 2 倍。

4.1.7 報告討論

研究中針對 6 個核種與多個關鍵傳輸參數進行詳細的敏感度分析，H-3 與 Sr-90 的結果較值得注意，H-3 因為沒有吸附性所以顯示出地下水流速與孔隙率的重要性，Sr-90 的弱吸附性顯示 Kd 與總體密度的重要性，對於吸附的核種，孔隙率不是重要的參數，所有污染物都對污染源的空間分布敏感，但其影響會隨距離而減少。對於 Co-60、Ni-63、Sr-90 與 Cs-137 等核種因為有高的 Kd 值所以尖峰濃度極低，儘管對某些參數其尖峰濃度的變化非常敏感，相較於基準案例可能呈現好幾個 order 的變化，但因為濃度極低因此可以忽略。

4.1.8 報告結論

此報告主要說明發展 Zion 電廠除役地下水污染預測基準案例模式，預測模式建立主要利用一維有限差分 DUST-MS 模擬軟體計算在地下水系統核種的外釋與傳輸，模式是基於假設 $1\text{dpm}/100\text{ cm}^2$ 的來源項於一個反應爐圍阻建築的地板，核種假設核種來源存量是瞬時進入地下水系統。主要考慮於基準案例模式參數主要基於現有的場址資料來估算不同距離地下水污染濃度，另外也考慮了 9 個關鍵參數 17 個不同的案例進行敏感度分析。

基準案例與敏感度分析雖然是基於一單位的來源項，但其結果可以場址監測到實際來源項的濃度依基準案例比例換算各距離地下水污染，分析結果顯示在 Fe-55、Co-60、Ni-63 與 Cs-137 等核種由於濃度極低不會是關切的污染物，而 H-3 與 Sr-90 則為較須關切的核種。

敏感度分析結果雖顯示 Fe-55、Co-60、Ni-63 與 Cs-137 對 K_d 值與地下水流速度敏感，然而因為在受體處的濃度極低，因此以相對於 25 mrem/yr 的標準來說，其可貢獻的劑量是可以忽略的。H-3 沒吸附性但對地下水流速與土壤孔隙率敏感，在 2m 處 H-3 的尖峰濃度對污染源的非均勻分布敏感。污染源的非均勻分布對 H-3 的尖峰濃度相關效應會隨著受體距離增加而減少，Sr-90 對 K_d 值、土壤總體密度與地下水流速度敏感。

相關模擬所得與來源項不同距離的濃度資料可做為 RESSRAD-OFFSITE 的輸入參數以進行相關劑量評估。

4.2 南韓 Kori 核電廠

本計畫研析文獻「Calculation of preliminary site-specific DCGLs for nuclear power plant decommissioning using hybrid scenarios」(Seo and Sohn, 2019)，研析結果分別於下列各小節說明。

4.2.1 文獻背景

南韓為全球第 5 大核電生產國家，目前共有 24 部核電機組運轉中，分布在 4 座核電廠，生產超過 25%以上之電力。2011 年福島事故後，在 2017 年 Kori 核電廠 1 號機組的除役典禮上宣布南韓「不延不建，逐步脫核」的目標，2038 年時運轉中核電機組的數量將減少至 14 部。Kori 電廠 1 號機是南韓第一座核電機組，自 1978 年開始商業運轉，2007 年時獲准延役 10 年，經過 40 年的運轉後已於 2017 年 6 月宣布永久停機並開始進行除役計畫，此為韓國第一個面臨除役的核電廠。針對南韓 Kori 電廠除役工作的最終目標，需將除役過程中產生的放射性廢棄物進行安全處置，並將場址上的殘留輻射量減少到符合場址外釋標準，達到取消相關管制措施之目的；除役工作也要確保在核設施除役期間可能造成工作者和居民的安全，以及最終根據規定的外釋標準使場址恢復其原始狀態。除役完成後，需要根據預期在該場址存在或可能檢測到的放射性核種導致的劑量以評估居民在外釋場址的安全性。

南韓監管機構要求，對於核電廠除役工作需將 DCGL 值納入電廠最終除役計畫。在南韓國核能安全委員(Nuclear Safety and Security Commission)的 Notice No. 2016-33 (NSSC, 2016)將不受限制和限制場址外釋標準(unrestricted and restricted site release criteria)設定為 0.1 mSv/y，美國核管會設定不受限制場址外釋標準為 0.25 mSv/y，IAEA 安全指引(WS-G-5.1)推薦場址外釋標準為 10-300 μ Sv/y (IAEA, 2006)。由

於劑量難以量測，因此須利用量測的核種濃度依據如 DCGL 的場址外釋標準。為因應預計 2022 開始的除役工作，須進行初步的場址 DCGL 計算以準備最終除役計畫。

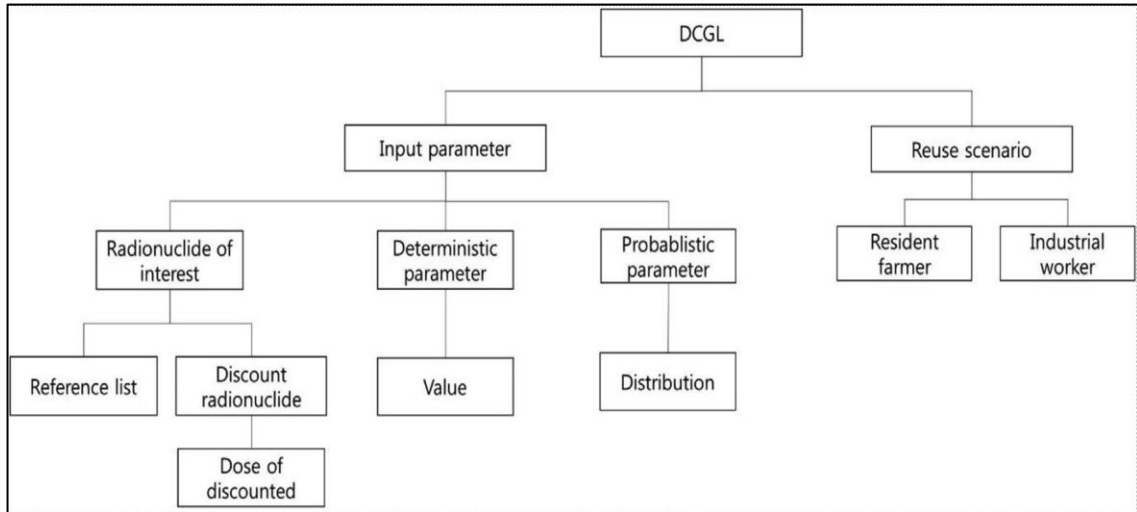
此文獻目的為提出那些是計算 DCGLs 所需的輸入因子與場址可能存在核種的 DCGLs，DCGLs 的計算利用 RESRAD-ONSITE 作為工具，計算 DCGLs 須能貼近場址的特性，考慮如關切核種(radionuclide of interest)、機率式(probabilistic)參數與合適的場址再使用情境。

4.2.2 計算 DCGLs 的流程與重點參數

RESRAD 是由美國能源部(Department of Energy, DOE) 與美國核管會經費支持 Argonne 國家實驗室(Argonne National Laboratory, ANL) 所開發，可作為估算在不同暴露途徑下的放射性污染場址可能產生的劑量，RESRAD 已經使用進行計算場址的 DCGLs，在南韓也可能用以作為場址之許可與再使用情境評估工具。

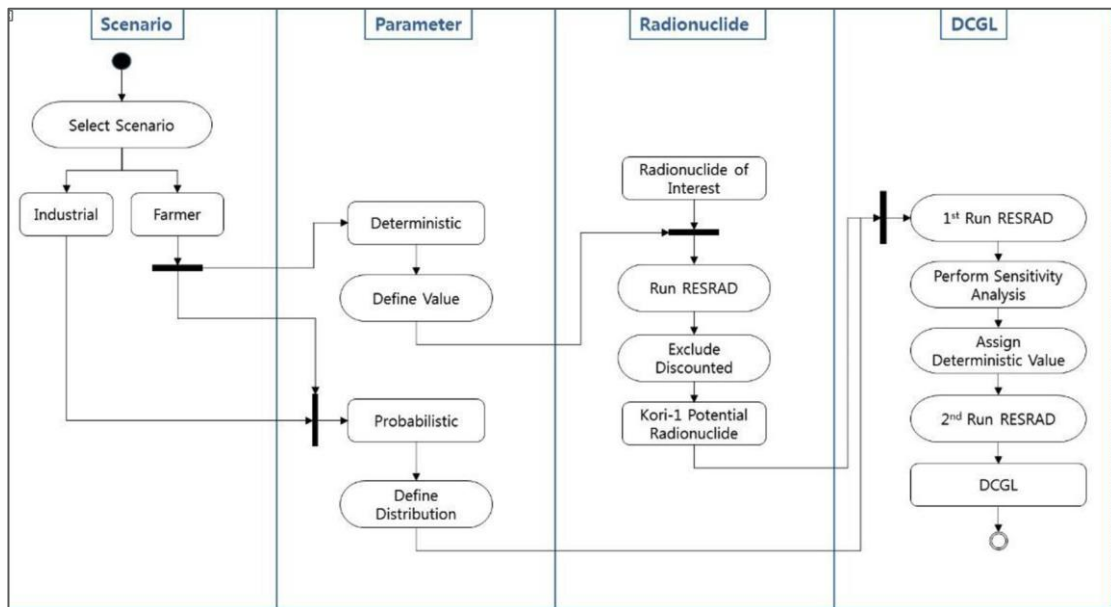
為了使用 RESRAD 須分析那些輸入因子是計算 DCGLs 所必須，其中最基本的是輸入參數，由於需貼近場址真實狀況，且相關場址調查具不確定性，除執行定率式(deterministic)計算，也可能需要執行機率式(probabilistic)計算，場址可能存在核種也會影響到 DCGLs；另外未來不同場址的再使用方式可能會影響到暴露情境，並進而影響 DCGLs 的計算，因此也要納入考慮計算 DCGLs 的相關分析。綜合上述，準確計算 DCGLs 的相關輸入因子將包括輸入參數、定率式分析與機率式分析與場址再使用情境。

此篇文獻以圖 11 說明執行 DCGLs 所需相關次因子，在輸入參數部份可以區分為關切核種、定率式參數與機率式參數，定率式參數給單一值，而機率式參數則給定參數值的機率分布，而場址再使用情境則是在計算劑量過程中的重要元素。執行 DCGLs 計算的相關程序可進一步以圖 12 說明，在第一階段先決定場址的兩種再使用情境，分別為居住農夫(resident farmer)與工廠工人(industrial worker)。對居住農夫可以選用定率式分析，再依居住農夫情境的劑量估算擇定可能的關切核種，RESRAD 以選定的核種辨識敏感參數，對辨識的敏感參數給定單一值，然後執行第二次的 RESRAD 計算 DCGLs。相關工作程序可以圖 13 更進一步說明。



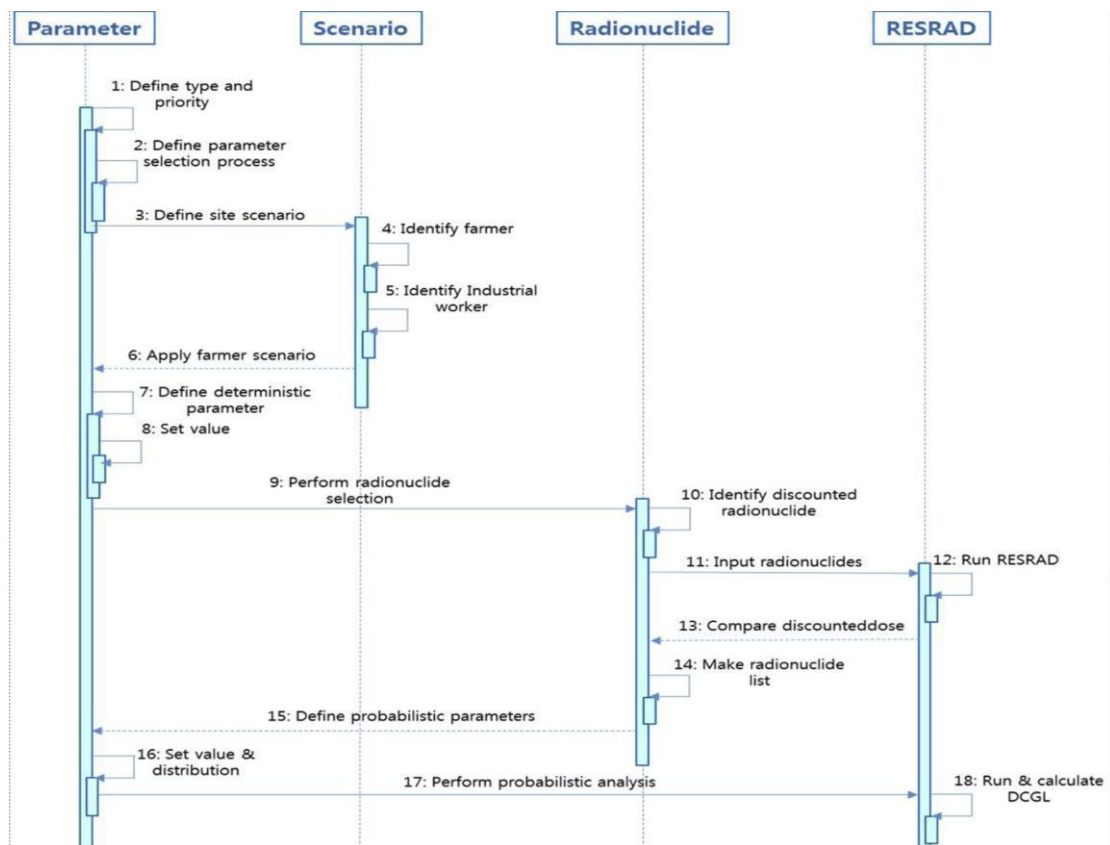
資料來源: Seo and Sohn (2019)

圖 11 計算 DCGLs 需要輸入之次要因子



資料來源: Seo and Sohn (2019)

圖 12 詳細 DCGL 計算程序



資料來源: Seo and Sohn (2019)

圖 13 DCGL 計算每個階段所需的工作程序

在決定輸入參數前，須區別定率式參數與機率式參數，也就是要參考每一個參數型態與分類，並以此進行參數選用過程，參數值或分布取決於所應用的情境。RESRAD 將輸入參數分為行為(behavioral)、代謝(metabolic)與物理性(physiocal)參數三大類。行為參數取決於受體的行為與情境。因此，輸入值可能因同一組受體的不同情境而有所不同，代謝參數有別於情境或場址條件，代表受體新陳代謝的特徵，如劑量轉換因子(dose conversion factor)、食物攝入率(food intake rate)和吸入率(inhalation rate)。物理參數不會因為受體改變，代表由該場址的來源、位置和地質特徵而決定的變數。

RESRAD 參數的優先順序是根據符合分析目標的重要性分為三個：優先順序 1(高)、優先順序 2(中)和優先順序 3(低)。此外，分級判斷有助於決定參數為定率式或機率式之參數處理。定率式分析使用每個輸入參數的單一值計算出劑量值，機率式分析則使用每個輸入參數的機率分佈產生一定範圍呈現(機率)的劑量值。

輸入參數的選用過程如圖 13 所示，此過程可根據參數的型態與優先性而採定率式分析或機率式分析。對行為參數與代謝參數給予定率式參數值，對物理參數而言，若現地參數值可取得就給予定率式參數值，否則就依其優先順序給予定率式值或機率式分布：優先順序 1 與優先順序 2 給予機率式分布值，而優先順序 3 就給予定率式值。優先順序 1 與優先順序 2 再根據敏感度分析結果區分為敏感參數或非敏感參數。

除役計畫完成後的場址再使用可能會有幾種情境，其中以居住農夫的情境為最保守的估算方式，此情境考慮了所有可能暴露途徑(exposure pathway)；但是，特定場址之實際再使用情境應考慮到許多相關因子，如場址的位置、使用類型、範圍和物理特徵，因此場址特性與真實的場址再使用情境應反應於 DCGL 的計算。

Kori 場址有 6 個反應爐，其中 1 號反應爐已永久停機，其餘 5 個反應爐仍然在運轉中。考慮此狀況 Kori 場址採用兩種情境進行劑量計算，分別是假設 2032 年至 2040 年的工廠工人情境與 2040 年後的居住農夫情境。最保守的居住農夫情境將導致估算之 DCGL 值為最低，因此工廠工人情境之 DCGL 值可能為較合理之結果。

4.2.3 輸入參數值

執行 RESRAD 的主要參數值包括核種、場址物理參數、場址環境參數、外部暴露相關參數與攝食相關參數等。為了準確劑量評估，所考慮參數值須包含場址地質調查與環境特性，因此歷史場址評估 (historical site assessment, HSA) 與核種在地下水傳輸的評估資料亦應納入考慮。評估也考慮了由南韓管制機構 (Korean Institute of Nuclear Safety, KINS) 相關文獻 (KINS, 2002; 2005; 2014)，及 RESRAD 手冊 (ANL, 2001)、RESRAD 的資料收集手冊 (ANL, 2015)。在劑量計算除選用 RESRAD 的劑量轉換因子資料庫，ICRP-60 的劑量轉換因子被應用於外部暴露，ICRP-72 的劑量轉換因子則應用於吸入與攝食。

根據場址 HSA，污染區面積為 $50,000 \text{ m}^2$ ，污染厚度為 0.15 m ；為了得到保守的評估結果，假設受體直接暴露於污染源 (無覆蓋層)，而總孔隙率、田間容水量 (field capacity)、水力傳導係數與污染區的分布係數等，在考慮 Kori 場址的污染區土壤材料為砂土的前提下，由 RESRAD 的資料收集手冊 (ANL, 2015) 進行選用。根據水文地質資料，污染區下方的非飽和層厚度與飽和層厚度設定為 3.82 m ，非飽和層假設為位於污染區與地下水位間之單一層。考慮 Kori 場址的非飽和層土壤材料為砂土，其相關參數選用為依據 RESRAD 的資料收集手冊 (ANL, 2015) 之場址的物理資料，而飽和層的水力傳導係數之依據主要奠基於飽和層為一般土壤之假設。

核種的選用參考 Rancho Seco 場址、Humbolt Bay 電廠與 Zion Station 之廠址除役經驗，在 Kori 電廠 DCGLs 分析計算中，考慮了 6 種放射性核種，分別是 C-14、Co-60、Ni-63、Cs-134、Cs-137 與 Sr-90。初始的核種濃度設定為 1 Bq/g ，而對於機率式分析，RESRAD 則採用拉丁超立方 (Latin hypercube sampling) 作為抽樣方法。

4.2.4 DCGLs 計算的結果分析

本報告僅摘錄此文獻中最重要的 DCGLs 的計算結果，在兩個不同的場址再使用混合情境下之 6 個核種劑量與 DCGLs 結果彙整於表 5，其中 Co-60、Ni-63、Cs-137 與 Sr-90 最大劑量都發生於 2040 年的居住農夫情境開始，此意謂此 4 個核種在 2032-2040 居住農夫情境相較於工廠工人有較高的劑量；C-14 最大劑量發生在 2040 後，Cs-134 最大劑量則發生於工廠工人情境開始時；表中也顯示了劑量大小的排列，依序為 Sr-90、Co-60、Cs-137、Cs-134、Ni-63 與 C-14。DCGLs 計算結果整理於表 5 的最右側欄位。

表 5 兩個不同的場址再使用混合情境的 6 個核種劑量與 DCGLs

Radionuclide	Dose of Industrial Worker (mSy/y)/(Bq/g)		Dose of Residential Farmer (mSy/y)/(Bq/g)		Max. Dose (mSy/y)/(Bq/g)	DCGL (Bq/g)
	0-8 years	At 8 years	At 8 years	8-1000 years		
C-14	2.80E-06	2.19E-06	1.97E-04	4.20E-04	4.20E-04	2.83E+02
Co-60	5.10E-01	1.77E-01	5.17E-01	5.17E-01	5.17E-01	1.93E-01
Ni-63	1.27E-06	1.18E-06	1.18E-03	1.18E-03	1.18E-03	8.47E+01
Cs-134	2.81E-01	1.90E-02	5.82E-02	5.82E-02	2.81E-01	3.56E-01
Cs-137	1.19E-01	9.83E-02	3.79E-01	3.79E-01	3.79E-01	2.64E-01
Sr-90	1.91E-03	1.47E-03	8.46E-01	8.46E-01	8.46E-01	1.18E-01

資料來源: Seo and Sohn (2019)

4.2.5 總結

合理的參數選用過程除應進行完整的歷史場址評估(HSA)之外，所考慮參數值尚須包含場址地質調查與環境特性，才可能提供核種在地下水傳輸的現地水文地質相關資訊，並在各情境模擬中給定合理參數值。在地下水傳輸現象的過程，水力傳導係數為最重要的水文地質參數，因此模式所考慮之水力傳導係數須可真實反應現地場址之特性；然而地下環境中存在許多影響該參數值的因子，如土壤質地、孔隙率、土壤顆粒大小、組成及排列方式等，皆隨各場址水文環境與地質歷史事件而不同。若使用單一材料特性進行假設與參數設定，將無法正確建立水文地質模式，後續亦無法正確模擬地下水流向並進行污染物移動行為與濃度之推估；其次，雖水文參數有其合理值範圍，但其合理範圍一般而言可涵蓋數個量級，數值分布隨地質條件不同會有很大的差異，因此即使參數選用於合理值範圍內，仍不建議直接使用參考值，應依當地場址特性進行實驗與分析以獲得正確的參數。

另外，在核電廠除役計畫過程中應正確估算反應場址特點的DCGL值，其對於核電廠準備除役階段進行場址之殘餘放射性評估、除役後如何最終外釋場址與未來場址重新再利用之議題為一重要工作。

第五章 研究成果彙整

原能會前三年在核電廠除役地下水保護管制相關委託研究報告包含「核電廠除役管制各階段工程技術與分析應用研究:子項計畫四-3 核電廠除役期間廠址地下水特性研析」、「109 年核電廠除役期間廠址地下水防護管制特性研析」及「110 年核電廠除役期間廠址地下水防護管制特性研析」，本計畫工作團隊彙整原能會前三年相關委託研究之分析成果及報告如下：

一、核電廠除役管制各階段工程技術與分析應用研究:子項計畫四-3 核電廠除役期間廠址地下水特性研析

此計畫的重點結論如下：

- (一)相較於 NRC 的法規，IAEA 對於地下水的規範較少，建議將目前需要監測土壤、地表水等法規上加入地下水的元素，並讓持照者自行判斷、研究該電廠的地質、水文條件來制定專屬於該電廠的地下水除役方針，再交由管制單位審查即可。
- (二)參考美國電廠洩漏的經驗，由於長期微量的洩漏量較難檢測，但結果仍會對地下水造成重大影響，因此定期性對容易洩漏點進行檢測，除了預防洩漏外，若可即早發現污染，則污染較容易得到控制。
- (三)核電廠進入除役階段後，土壤、岩石及地下水的污染會影響核電廠除役規劃與期程，且整治作業程序對除役資金成本也需要審慎考量。因此若能即時發現污染源或預防任何汙染物洩漏，將可大量降低核電廠除役作業的複雜性與成本，除役階段之管理與監控勝於後續整治作業。

二、109 年度核電廠除役期間廠址地下水防護管制特性研析

此計畫的重點結論如下：

- (一)參考美國業界作法包括 NEI07-07 指引，建立除役核電廠定期自我評估機制，針對地下水防護計畫與地下水監測計畫，採文件審查、定期/不定期專案視察等管制措施，確認核電廠除役期間地下水防護方案的符合性。
- (二)為精進核電廠除役的相關管制作業，建議持續蒐集國際間地下水防護方案相關資訊，以持續強化核電廠在除役期間地下水防護方案的管制效能。

三、110 電廠除役期間廠址地下水防護管制特性研析

此計畫的重點結論如下：

- (一)計畫以場址概念模式，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)檢視目前國內進入除役期間的核一廠地下水傳輸模式，就模式選用與參數選用的合理性進行評析與建議應有的修正。
- (三)在核一廠地下水防護監測方案的內容，藉由 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。

彙整上述三年報告，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加強地下水專業人才團隊培育，正確

解讀並詳實掌握 NEI07-07 指引與 E PRI 核電廠地下水防護指引的精神、目的與相關地下水保護工作的執行方法與細節，持續精進除役期間地下水防護相關工作。

- 二、建議管制單位要求台電公司詳實進行資料盤點、整合與保存，以作為後續持續精進的參考依據。
- 三、建議管制單位要應求台電公司依過去的資料，擬定需要逐步加強監測井的建置與岩心採樣，並利用所有可用的監測井進地下水水位與地下水水質監測，以更準確掌握地下水流動的方向與地下水質的時空變化。
- 四、建議管制單位要求台電公司充實水文地質資料，應視需要精進場址概念模式與地下水傳輸模式作為地下水污染遷移預測工具，以進行後續的可能決策。
- 五、地下水監測井的設置與維護工作以及地下水水質採樣與樣品的保存工作，國內其它水資源或環境領域有合理的規範與參考導則，建議管制單位後續要求台電公司適切納入參卓國內現有的標準流程。

第六章 結論與建議

6.1 結論

本計畫執行可以四部份成果做為總結：

- 一、本計畫針對除役期間廠址水文地質參數調查說明常用的受壓含水層抽水試驗、非受壓含水層抽水試驗與微水試驗三個水文地質參數調查執行方法與資料分析方法。
- 二、檢視目前國內進入除役期間的核二廠地下水傳輸模式，本計畫就模式選用與參數選用的合理性進行專業評析與並提出相關修正建議。在核二廠地下水防護監測方案，本計畫以 EPRI 導則「Groundwater Protection Guidelines for Nuclear Power Plants」為基礎分析核二廠地下水防護監測方案，建議未來管制單位可以要求台電公司詳實解讀 EPRI 導則，做為核二廠除役期間地下水防護監測方案精進參考依據。
- 三、本計畫分別分析美國 Zion 核電廠與南韓 Kori 核電廠除役的相關文獻報告，並說明 Zion 核電廠的地下水傳輸模式與 Kori 核電廠的初步 DGCLs 計算；此外亦探討 Zion 核電廠的地下水傳輸模式與 Kori 核電廠的初步 DGCLs 計算，及其所考慮的關切核種與模擬輸入參數，並說明這些參數的可能影響，藉由國際的相關經驗以精進我國核電廠除役期間核電廠地下水特性評估的輸入參數。
- 四、本計畫彙整前三年成果提出後續管制建議。

6.2 建議

- 一、本計畫參考地下水領域經典教科書提出水文地質參數調查方法，建議管制單位可要求台電公司以此為基礎，應用於後續擴增水文地質參數調查。
- 二、針對核電廠地下水防護方案，建議管制單位要求台電公司對所有核電廠應建立公版的 EPRI 導則的中文文件，並協助相關核電廠依此文件詳實落實地下水防護相關工作。
- 三、從美國 Zion 電廠與南韓 Kori 電廠計算 DGCLs 的經驗，建議管制單位要求台電公司確實掌握關切核種，並納入地下水傳輸模式的建立或 DCGLs 的計算。
- 四、台灣環保署地下環境模式平台建置有污染場址管理工具、領先全球最前瞻的地下水傳輸快速評估工具與進階地下水傳輸工具，建議管制單位要求台電公司參卓使用。

參考文獻

1. ANL, 2015, Data Collection Handbook to Support Modeling Impacts of Radioactive Material in Soil and Building Structures, Argonne National Laboratory.
2. ANL, 2015, Data Collection Handbook to Support Modeling Impacts of Radioactive Material in Soil and Building Structures, Argonne National Laboratory.
3. ANL, User's Manual for RESRAD Version 6, Argonne National Laboratory, 2001.
4. Codell, R.B., Key, K.T., Whelan, G., 1982. A collection of Mathematical Models for Dispersion in Surface Water and Groundwater, U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG-0868.
5. Chen, J.S., Liu, C.W., Liu, Y.H., 2012. Comments on “A New Method for Laboratory Estimation of the Transverse Dispersion Coefficient” by Marco Massabò, Federico Catania, F., Paladino, May–June 2007, v. 45, no. 3: 339–347. Ground Water, 50 (2), 177-178.
6. Fetter, C.W., 2018, Applied Hydrogeology, Fourth Edition, Waveland Press, Inc., Long Grove, Illinois.
7. KINS, 2014, Supplementation an V&V of Integrated Dose Assessment Code Package, Korea Institute of Nuclear Safety, KINS/HR-1357.
8. KINS, 2002, Development of Regulatory Requirements for Clearance of Radioactive Waste, Korea Institute of Nuclear Safety, KINS/RR-144.
9. KINS, 2005, Development of Technology in Radiation Safety

Regulations, Korea Institute of Nuclear Safety, KINS/GR-297, 2005, pp. 391e405.

10. Schwartz, F.W., Zhang, H., 2003, Fundamentals of Ground Water, John Wiley & Sons, Inc., New York.
11. Seo, H.W., Sohn, W., 2019. Calculation of preliminary site-specific DCGLs for nuclear power plant decommissioning using hybrid scenarios. Nucl. Eng. Technol., 51, 1098–1108.
12. Sullivan, T., 2013, Evaluation of potential radionuclide release and transport for the Zion Nuclear Power Station basement fill end state: Conceptual model development and sensitivity analysis. United States: N. p., 2013. Web. doi:10.2172/1132370.
13. Sullivan, T., 2014, Screening evaluation of radionuclide groundwater concentrations for the end state basement fill model: Zion nuclear power station decommissioning project.
14. Sullivan, T., 2016, Evaluation of maximum radionuclide groundwater concentrations for basement fill model (Revision1): Zion station restoration project.
15. Weston, Roy F., Inc. 1998. Final Report: Groundwater/ Surface Water Interactions, Conceptual Models and Assessment Endpoints. USEPA Work Assignment No. 3-353. July 1998.
16. IAEA, Release of Sites from Regulatory Control on Termination of Practices, International Atomic Energy Agency, 2006, pp. 5e7. No. WS-G-5.1.

17. NSSC, Criteria for Reuse of Site and Buildings after Completion of Decommissioning of Nuclear Facilities, Nuclear Safety and Security Commission, 2016.
18. Groundwater Protection Guidelines for Nuclear Power Plants: Public Edition, Electric Power Research Institute, 2008.
19. Industry groundwater protection initiative – Final guidance document, Rev. 1., NEI 07-07(Rev 1), Nuclear Energy Institute, 1201 F Street, NW Suite 1100 Washington D.C. (202.739.8000), March 2019.
20. 核二廠地下水防護方案(修訂版 Rev.3)附件 2(台灣電力公司第二核能發電廠，2010)
21. 核電廠除役管制各階段工程技術與分析應用研究:子項計畫四-3 核電廠除役期間廠址地下水特性研析(行政院原子能委員會，2019)。
22. 109 年度核電廠除役期間廠址地下水防護管制特性研析(行政院原子能委員會，2020)。
23. 110 電廠除役期間廠址地下水防護管制特性研析(行政院原子能委員會，2021)。

附錄、歷次工作會議審查意見回覆

「111 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	為有效掌握本案進度，在執行期間內，原則上每 2 個月召開一次工作討論會議，本會得視需要，於工作期間加開工作會議，請中央大學配合提報工作進度。	遵照辦理。
2	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。
3	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 111 年 8 月 23 日配合計畫相關人員之規畫，完成教育訓練課程辦理。
4	為掌握計畫執行方向與進展，本計畫預訂於 5 月中旬辦理第 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 111 年 5 月 10 日配合辦理第 2 次工作進度會議並提報計畫工作進度。

「111 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	水文地質參數試驗或評估方法之可行性，建議針對 RASRAD-OFFSITE 參數資料及 Yu et al(2000)、Biwer(2002)、Yu et al(2003)等參數使用研究進行評論，再針對我國核電廠地質特性提出調查技術與方法建議。	遵照辦理。
2	針對 Zion 電廠分析使用之放射性核種及參數，請再進一步研析，以精進我國核電廠除役期間地下水評估的輸入參數。	遵照辦理。
3	參與計畫人員的教育訓練，請以符合本計畫執行目標為考量，並隨計畫進展再滾動式檢討。而訓練時間暫定於七~八月辦理，並視疫情狀況調整辦理方式。	遵照辦理，本團隊已於 111 年 8 月 23 日配合計畫相關人員之規畫，完成教育訓練課程辦理。
4	核二廠廠址地下水監測之現場訪查，本會將視疫情與計畫執行狀況，再適時滾動調整。	謝謝委員，執行團隊全力配合核二廠廠址地下水監測之現場訪查作業。
5	依契約第五條規定，廠商應於 111 年 6 月 30 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。	遵照辦理，執行團隊已於 111 年 6 月 15 日提送期中進度簡報並提報計畫工作進度。

「111 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

項次	審查意見	回應說明及修正做法
1	2020 年 11 月美國核管會發布 NUREG-1757, Volume 2, Revision 2 草案版, 增加 App. F“SURFACE WATER AND GROUNDWATER CHARACTERIZATION”, 請掌握並納入後續研究方向之規劃。	遵照辦理, 執行團隊已詳細研讀該參考文獻相關資料, 並參酌納入本次期末報告中。
2	針對評估核電廠除役期間廠址水文地質參數調查, 請掌握 Argonne 實驗室之“Data Collection Handbook to Support Modeling Impacts of Radioactive Material in Soil and Building Structures”, 並可考量納入後續研究方向之建議。	遵照辦理。針對核電廠除役期間廠址水文地質參數調查評估, 執行團隊持續掌握該手冊相關資料, 並已於期中進度會議中詳細說明。
3	請掌握 Zion 電廠執行地下水傳輸概念模式, 以明瞭取得相關參數方法之資訊(例如哪些參數使用現地參數, 哪些參數以 default 值或有其他參考資料), 並可考量納入後續研究方向之建議。	遵照辦理。團隊持續蒐集國際核電廠除役期間廠址地下水防護實務經驗, 彙整 Zion 及 Kori 電廠地下水傳輸概念模式及相關參數之取得方法, 並於期末報告中具體說明。

「111 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	期中進度審查意見第 1~3 項，請中央大學於下次會議報告後續辦理情形。	遵照辦理，已於第五次工作進度會議報告審查意見後續辦理情形。
2	本案地下水傳輸教育訓練，請配合並協助參與計畫人員有關教育訓練規劃與安排。	遵照辦理，本團隊已於 111 年 8 月 23 日配合計畫相關人員之規畫，完成教育訓練課程辦理。
3	為掌握本案計畫執行方向與進展，預訂於 10 月中旬辦理第 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，執行團隊已於 111 年 10 月 6 日前提送第 5 次工作進度會議簡報並提報計畫工作進度。

「111 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	依契約第五條規定，廠商應於 111 年 12 月 5 日前，親赴本會(或因應疫情影響，得採視訊方式)說明本計畫委託工作項目執行成果，並提送期末報告簡報紙本 6 份及電子檔 1 份、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。	遵照辦理。
2	本案地下水傳輸請中央大學提送期末報告前，先自我比對報告內容相似度。	遵照辦理。

「111 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

項次	審查意見	回應說明及修正做法
1	報告格式請比照本會委託研究報告格式撰寫。	謝謝委員意見，遵照辦理。
2	簡報第 7 頁，2020 年 11 月美國核管會發布 NUREG-1757, Volume 2, Revision 2 草案版，請再補充不納入期末報告之說明。	遵照辦理，已將該文獻不納入期末報告之說明補充於期末報告簡報中。
3	第 9 頁，2.2 節，W(.)又稱為水井函數，請修正為 W(u)。	遵照辦理，已於內文 2-5 頁完成修正。
4	第 14 頁，2.3 節，請補充各參數定義說明。	謝謝委員建議。已於內文 2-9 頁完成補充及修正。
5	第 19 頁，2.4 節，微水試驗內容請再補充說明，並增加其他分析軟體名稱，同時刪除連結網頁資訊。	謝謝委員意見，遵照辦理。已於內文 2-13 頁完成修正。
6	第 22 頁，3.1 節，雜項廢液處理系統廢液溢流事件，請參考核二廠除役計畫第三章 p3-17~3-19 內容修正。	謝謝委員意見。已於內文 3-1 及 3-4 頁完成內容修正。
7	第 33 頁，3.4 節，提及「GROUND 地下水傳輸模式在地下水流方向(x 方向)的兩個邊界設定為在兩個無窮遠處，以水平線源釋放點在 x=0(如圖 4-1 所示)」，其中圖 4-1 應為圖 3-1，請修正。	謝謝委員意見，遵照辦理。已於內文 3-11 頁完成修正。

8	第 33 頁，3.4 節，提及「台灣環保署地下環境模式平台也提供前瞻創新的解析模式(快速評估工具)與數值模式(進階評估工具)，建議台電公司可以納入考慮相關工具」，本報告相關評析非提供台電公司參考，建議修訂以上敘述。	謝謝委員建議，已於內文 3-11 頁完成修正。
9	第 35、38 頁，4.1.1 節，提及「Zion 核電廠包含兩個反應爐圍阻體(reactor containment buildings)、一個燃料建築物(fuel building)、一個輔助建築物(auxiliary building)和一個可能被污染的渦輪機建築物(turbine building)」，請修訂為「Zion 核電廠包含兩個反應爐圍阻體廠房(reactor containment buildings)、一個燃料廠房(fuel building)、一個輔助廠房(auxiliary building)和一個可能被污染的汽機廠房(turbine building)」。	謝謝委員意見。已於內文 4-1 及 4-3 頁完成修正。
10	第 36 頁，4.1.1 節，conceptual site model 翻譯為「概念場址模型」，然報告其他部分係使用「場址概念模型」一詞，建議統一用語。	謝謝委員建議，已統一用語為「場址概念模型」並完成內文修正。
11	第 36 頁，4.1.1 節，「來源項，source term」，請修正為「射源項，source term」	謝謝委員建議。已於內文 4-2 頁完成修正。

12	第 48 頁，4.1.6 節，提及「Sr-90 在敏感度分析呈現最為有趣的結果，由於低的 Kd 值(2.3 cm ³ /g)與的非太短的半衰期(29 year)，使其有非常完整的濃度剖面」，建議清楚說明其中「非太短的半衰期」、「濃度剖面」之意涵。	謝謝委員意見。已於內文 4-11 頁完成修正。
13	第 54 頁，4.2.1 節，提及「考慮如關切核種(radionuclide of interest)、機率式(deterministic)參數與合適的場址再使用情境」，其中「機率式(deterministic)」有誤，請修正。	謝謝委員意見。已於內文 4-15 頁完成修正。
14	第 54 頁，「南韓核能安全委員會將非限制性與限制性場址外釋標準設定為 0.1 mSv/y」，請確認非限制性與限制性外釋標準均為 0.1 mSv/y。	謝謝委員建議。團隊已再次進行確認，非限制性與限制性外釋標準均為 0.1 mSv/y。
15	第 64 頁，請補充說明 Zion 電廠及 Kori 電廠使用地下水參數之相關意見，例如報告第 61 頁 Kori 電廠將水力傳導係數與污染區的分布係數選用 RESRAD 的資料手冊，而非現地資料，研究團隊對此類做法之意見，以符合委託工作項目(三)之內容。	謝謝委員建議。已於內文 4-23 頁補充說明使用地下水參數之相關意見。
16	第 72 頁，參考文獻，請將美國 Zion 電廠、韓國 Kori 電廠及其他研究過程參考之報告(含台電報告)列入參考文獻。	遵照辦理。已將美國 Zion 電廠、韓國 Kori 電廠及其他相關文獻列入期末報告參考文獻中。

17	技術用語或專有名詞之誤譯需更正如下： (1) 美國「核管處」，建議修訂為「核管會」。 (2) 「釋放」標準，建議修訂為「外釋」。 (3) 「建築物」，建議修訂為「廠房」。 報告中存在諸多錯別字、缺漏字、贅字，請全面檢視並修正。	謝謝委員意見，遵照辦理。
----	--	---------------------