

摘要

「低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例」於民國 95 年 5 月 24 日公佈施行，明訂由行政院原子能委員會為主管機關、經濟部為主辦機關，成立處置設施場址選擇小組，執行選址工作。處置設施選址工作，包括場址調查、安全分析、公眾溝通、及土地取得等，其中，數學模式是進行環境安全評估的重要工具。本研究計畫的目的係針對低放射性廢棄物與候選場址的特性，蒐集國內外較常用之水文模式，瞭解其理論架構、功能、輸入數據等，並進行模式的功能測試，作為未來環境安全評估之參考。根據國內相關報告的評估結論，並參考美國核能管理委員會採行的方法，本研究篩選 HELP、MODFLOW、FEHM 等地下水與表面水的水流模式，以及 MT3D、BLT-MS、GoldSim-CT 等溶質傳輸模式，完成模式瞭解與測試等工作，做為原子能委員會評估處置場址可能的傳輸行為與影響範圍，以及建立自主性處置場址安全評估的分析與審查能力之參考。

Abstract

Mathematical model is an important tool in evaluating the environmental impact and associated risk when constructing a storage site for low-level radioactive wastes. The objectives of this study are to collect popular hydrological models and understand their theories, functions, and required input data sets. Three surface and subsurface flow models (HELP, MODFLOW, and FEHM) and three contaminant transport models (MT3D, BLT-MS, and GoldSim-CT) are selected and evaluated according to the guidelines of model selection given in literature and the methods developed by US Nuclear Regulation Commission. Finally, this study uses some examples to demonstrate the applications of the selected models.

地下水及表面水程式篩選及國內資料之蒐集

目 錄

中文摘要.....	i
Abstract.....	ii
一、計畫緣起與目標.....	1
1.1 計畫緣起.....	1
1.2 計畫目標.....	2
二、文獻回顧.....	3
三、模式篩選.....	7
3.1 模式目的.....	7
3.2 模式篩選.....	8
四、地下水與表面水的水文模式.....	11
4.1 HELP.....	11
4.2 MODFLOW.....	13
4.3 FEHM.....	15
五、放射性核種傳輸模式.....	17
5.1 MT3D.....	17
5.2 GoldSim Contaminant Transport Model.....	18
5.3 BLT-MS.....	20
六、結論與建議.....	23
6.1 結論.....	23
6.2 建議.....	23
參考文獻.....	24

表目錄

表 2-1 地下水模式綜合評估表(黃佳雯，2005).....	5
表 4-1 HELP 模式測試結果	13

圖目錄

圖 2-1 地下水模式篩選流程示意圖	4
圖 3-1 放射性物質傳輸的概念模型	7
圖 4-1 HELP 概念模式示意圖	12
圖 4-2 MODFLOW 模式測試結果.....	15
圖 4-3 FEHM 模式測試結果	16
圖 5-1 MT3D 模式測試結果	18
圖 5-2 GoldSim-CT 模式測試結果	20
圖 5-3 BLT-MS 模式資料輸入視窗畫面	21
圖 5-4 BLT-MS 模式測試輸出結果的表頭	22

一、計畫緣起與目標

1.1 計畫緣起

放射性廢棄物係指具有放射性或受放射性物質污染的廢棄物，由於具有輻射與長半衰期的特性，人類必須謹慎處理放射性廢棄物的最終處置。各國大都依據放射性廢棄物中所含的放射性活度與核種的類別，將放射性廢棄物分為高放射性廢棄物與低放射性廢棄物兩大類，分別進行處置與管理。在我國，低放射性廢棄物係指除備供最終處置之用過核子燃料或其經再處理所產生之萃取殘餘物以外之放射性廢棄物。

低放射性廢棄物的最終處置是長期性工作，從選擇處置設施的場址開始，到處置設施的運轉、封閉、監管、免於監管，可概分成下列四個階段：「處置設施選址階段」、「處置設施建造階段」、「處置設施運轉階段」、及「處置設施封閉監管階段」。「低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例」(以下簡稱場址設置條例)於民國 95 年 5 月 24 日公佈施行，第一階段已在此條例公佈後進行。場址設置條例明定行政院原子能委員會(以下簡稱原能會)為主管機關、經濟部為主辦機關，應成立處置設施場址選擇小組，執行選址工作。處置設施選址工作，包括場址調查、安全分析、公眾溝通、及土地取得等。其中，進行環境安全評估時，相關的數學模式是不可或缺的工具。目前已發展應用的地表水及地下水模式的種類繁多，且各有其優缺點及適用性，因此若期望較準確地模擬、預測低放射性廢棄物於處置場址的遷移與宿命，則需要調查、蒐集侯選場址之水文地質資料；接著，依據場址與低放射性廢棄物之特性，篩選合適的模式，以進行情境模擬與安全評估。

本報告為國科會與原能會原子能科技學術合作研究計畫「低放射性廢棄物最終處置天然障壁安全評估及其重要參數之研究--地下水及表面水程式篩選及國內資料

之蒐集」之期末報告，計畫期程是自民國 97 年 1 月 1 日起、至民國 97 年 12 月 31 日止。研究工作係針對低放射性廢棄物與候選場址的特性，蒐集國內外較常用之水文模式，並瞭解其理論架構、功能、輸入數據等。此外，進行模式的功能測試與簡單的案例分析，提供原能會評估低放射性廢棄物在處置場址可能的傳輸行為與影響範圍，以及建立自主性處置場址安全評估的分析與審查能力之參考。

1.2 計畫目標

本研究計畫的目標為：

- 回顧國內外常用的水文與溶質傳輸模式
- 建立模式篩選與評估的準則
- 進行假設案例的模擬分析

二、文獻回顧

地下水是水文循環的一個單元，地下水的補注與降水、地表水等息息相關，而地下水的流動與水文地質特性、人為活動、及地表水變化等有關。因此，地下水問題不易以簡化的數學模式來模擬與預測，必須藉由地下水模式才能夠處理不規則形狀的場址範圍、複雜的邊界條件、非均質的地質狀況、及變化的人為活動等問題。目前已發展的地下水模式，包括地下水流模式與溶質傳輸模式，各有其適用性與優缺點。使用這些經過相關驗證的程式，建立解決特定問題的地下水模式，可避免花費時間在程式的發展與驗證，專注在實際問題的瞭解與求解。

目前國內外所使用的土壤及地下水模式，依據處理問題的空間維度與時間變量、求解的數值方法、考慮的機制與參數等，可分為許多種類，例如：MOFAT、SUTRA 等模式可處理未飽和層的地下水流或溶質傳輸；VADSAT、PLASM、AT123D、MODFLOW、FEMWATER、MODPATH、MT3D、MOC、BIOSCREEN、BIOPLUME 等模式可處理飽和層的地下水流或溶質傳輸。根據台灣大學環境工程研究所「地下水模式工具於污染控制場址範疇界定之研析」的研究(黃佳雯，2005)，建議使用的地下水模式是 MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988)、MT3D (Zheng, 1990)、FEMWATER (Yeh et al., 1996)、及 AT123D，並且在某加油站地下水污染的案例中，發現 MODFLOW 耦合(couple) MT3D 模式可獲得較佳的模擬結果。該研究是以專家問卷調查、模式應用、敏感度分析等三階段，如圖 2-1 所示進行模式的篩選，摘要說明如下：

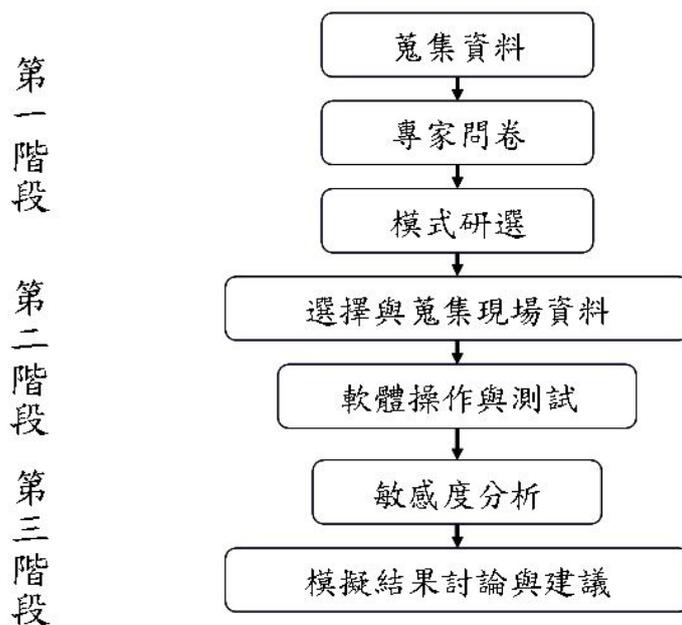


圖 2-1 地下水模式篩選流程示意圖(黃佳雯，2005)

■ 專家問卷

專家問卷的目的是獲得國內地下水領域的專家學者，對目前地下水模式適用性的建議。問卷的內容包括合適程度、使用過或未使用過之模式評論、及建議適當模式等三部分。問卷寄送對象計有 35 位，其中有效問卷為 17 份，表 2-1 是彙整專家學者的回覆結果。將專家學者給予的評論意見，經權重配分的統計結果，得到建議的地下水模式為 MODFLOW、MT3D、FEMWATER、及 AT123D。

■ 模式應用

為驗證建議模式的實用性與準確性，以三組地下水模式，進行新營加油站地下水污染控制場址的污染傳輸模擬，並與現地監測數據比較。三組地下水模式，分別是 AT123D、MODFLOW 耦合 MT3D、及 FEMWATER，首先根據場址的水文地質特性，建立地下水流模式，接著進行地下水中苯污染物質的傳輸模擬，最後累計各監測井的模擬值與檢測值之誤差。

表 2-1 地下水模式綜合評估表(黃佳雯，2005)

模式名稱	優點	使用限制
SUTRA	1.對於未飽和層模擬能力較佳 2.容易套配邊界 3.功能多	1.需輸入的參數多 2.不能處理生物反應的問題
MOFAT	可模擬多相流	1.需輸入的參數多 2.在工程界及學界較少使用
AT123D	1.操作簡單、適用範圍廣 2.被廣泛應用於建立污染場址之清除整治標準 3.可作為初步分析之工具	1.只適用於均質介質 2.解析解模式，模擬能力有限
BIOSCREEN	1.所需參數少，可模擬污染物衰減情形 2.適合模擬油品化合物 3.可模擬不同土壤質地之狀況	1.需有電子接受者的濃度
VADSAT	1.可作風險評估分析 2.可模擬自然衰減及自然生物降解之速率 3.可作為初步分析之工具	1.僅可分析污染物之分佈範圍 2.無法分析抽水井
PLASM	容易模擬地下水流場	僅用於分析地下水流問題
MOC	1.被廣泛使用，功能不斷修改、更新 2.利用特性線法處理污染傳輸	1.無法模擬濃度界面隨深度變化情形與位置 2.無法模擬污染物之降解
BIOPLUME	1.適合模擬生物降解之場址，所考慮之物種反應與機制較完整 2.由 MOC 延伸為自然衰減評估模式，保有 MOC 之功能	僅能模擬二維問題
MT3D	1.MT3D-MS(Multi-species)對模擬油品污染相當適合 2.數值結果較 MOC 精確	1.無法模擬濃度界面隨深度變化情形與位置 2.需結合地下水流模式(例如 MODFLOW)，再計算溶質傳輸
MODPATH	可以推估地下水的流速與流向	為地下水流模擬模式

表 2-1 地下水模式綜合評估表(續)(黃佳雯，2005)

MODFLOW	<ol style="list-style-type: none"> 1.被廣泛使用，擴充性佳 2.可與 MT3D 結合，進行污染模擬 3.數值問題較少，概念簡單、容易操作 	<ol style="list-style-type: none"> 1.為有限差分模式，對不規則場址之模擬誤差稍大 2.為地下水流模擬模式
FEMWATER	<ol style="list-style-type: none"> 1.容易處理複雜邊界 2.可模擬密度流，內建水分特性曲線，適用飽和與非飽和層 	<ol style="list-style-type: none"> 1.不易修正模式網格，模式運算費時 2.需輸入的參數多，且資料取得不易

■ 敏感度分析與不確定性分析

地下水流與溶質傳輸的參數，對模式模擬的結果，會產生影響。利用敏感度分析，可找出敏感度較高的參數，提供使用者執行場址特性調查與模式模擬的參考。

此外，在低放射性廢棄物方面，原能會核能研究所田能全與郭明傳(2006)執行低放射性廢棄物處置場安全評估工作的研究，利用核能研究所與美國 Sandia 國家實驗室合作發展的 BLT-MS 耦合 GoldSim-CT (GoldSim, 2007)程式，進行處置設施場址的風險評估，除解決未來處置場可能遭遇裂縫介質母岩的問題，提供具有不確定參數的機率分析方法。BLT-MS 是模擬侷限在儲存容器的放射性物質，可能因為容器受到腐蝕或劣化的情況下釋出，在一維地下水流場中的傳輸行為。該程式係由美國核能管理委員會(Nuclear Regulatory Commission, NRC)贊助，委由美國能源研究部門之 Brookhaven 國家實驗室發展，作為地表下低放射性廢棄物處置場的安全評估之用。郭明傳、田能全、盧俊鼎等(2007)則 BLT-MS 程式，結合 HELP 與 FEHM 程式，進行離島的淺地層處置之安全評估，其中，HELP 程式計算分析處置場覆蓋層的合理入滲量、FEHM 程式計算處置環境之地下水流流場。

三、模式篩選

3.1 模式目的

為進行低放射性廢棄物處置設施場址的安全評估，先要建立基本情節與流程，再建立基本的概念模型。淺地層處置的基本情節，首先是假設有雨水滲入處置設施的覆蓋層，進而接觸到廢棄物容器並造成腐蝕，使得雨水可以與廢棄物本體接觸，然後放射性物質逐漸溶解至雨水中，其次，假設有含有放射性物質的雨水進入未飽和層，然後向下滲漏至含水層中，於是放射性物質便隨著地下水進入地質圈，最後因為地下水補注至地表水體或人類抽用地下水，使放射性物質回到人類的生活圈。圖 3-1 為放射性物質傳輸的概念模型。

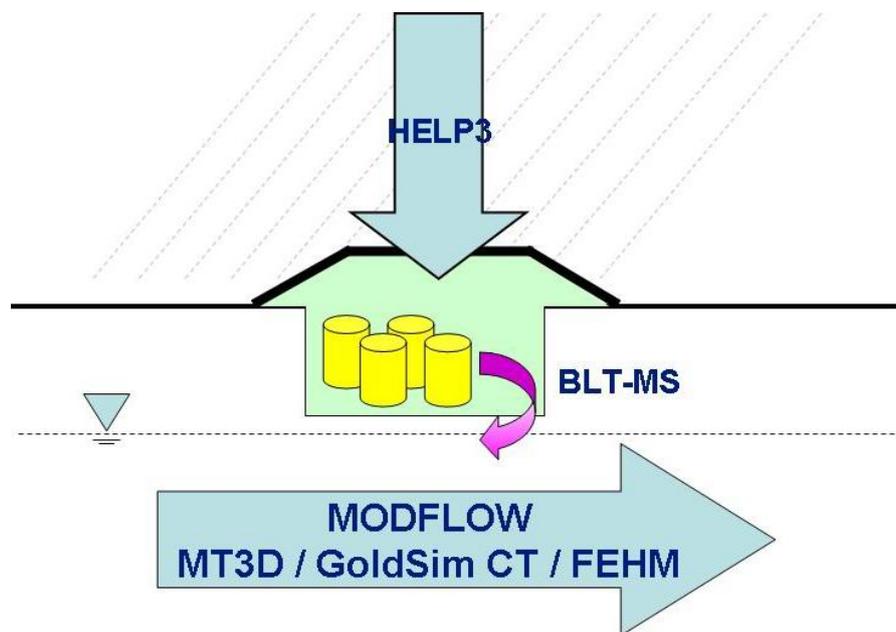


圖 3-1 放射性物質傳輸的概念模型

根據假設的基本情節與流程，進行模擬的模式須包括水文與溶質傳輸等兩部分，其中，水文模式是模擬雨水入滲覆蓋層的入滲量，以及模擬場址地下水的流場；溶質傳輸模式可模擬放射性物質自廢棄物容器洩漏的釋放歷程，並模擬放射性物質在飽和含水層中的傳輸行為。此外，目前處置設施的潛在場址，主要位於東部地區與西部離島，從保守的安全評估觀點，將考慮孔隙介質的地質特性。

3.2 模式篩選

在地下水流與污染傳輸的分析及評估工作，模式是一個相當有用的工具。根據背景資料、現場調查與試驗、及污染檢測結果，先作場址的特性調查，瞭解其水文地質條件與參數值，可進行案例模擬而得到預測結果。模式由於具有預測或評估的功能，可針對地下水的污染現況或假設的污染狀況，推估其時間及空間的傳輸分佈，因此可做為污染防治或整治措施的規劃參考。根據朱文生(1990)及美國環保署(USEPA, 1988)所提出報告之建議，在進行模式篩選時，有下述三個準則：

i. 目標準則(Objective criteria)

目標準則是用來決定相關研究所需的精細程度。若模式是用於調查工作，且有時間緊迫性，可考慮使用解析模式或經簡化且低維度之數值模式。若模式用於研究或風險評估之工作，則應選用限制較少、較符合真實物理現象的數值模式，這種模式通常功能強，但所需輸入的參數值較多。

ii. 技術準則(Technical criteria)

技術準則主要是探討選用的模式是否可以達成計畫之目的，及模式是否能充分描述地下水系統之特性。考慮的重點有包括：

■ 含水層之特性

可區分為受壓含水層(Confined aquifer)、自由含水層(Unconfined aquifer)、半受壓含水層(Semi-confined aquifer)、及多層含水層等

■ 地下水流之特性

區分飽和(Saturated)地下水流和非飽和地下水流及穩態(Steady state)流或非穩態流

■ 地質之特性

考慮土壤質地的均值、非均值、等向或非等向等特性。

■ 污染物之特性

區分可混合、不可混合、保存性、非保存性污染物，及屬於點污染或面污染源等。

■ 污染物與介值間之關係等

探討污染物與介值間是否有吸附或脫附之現象等。

iii. 使用準則(Implementation criteria)

技術準則著重於模式的模擬能力，而使用準則著重於模式是否容易使用。

其考慮之重點包括：模式是否容易取得、是否易於使用及修改、使用手冊是否完善、是否有資料檔範例、理論背景及說明是否完整、模式對資料之需求程度、模式是否經過驗證(Verification)與微調(Calibration)之程序、模式是否曾應用於實際案例分析等。

除上述三個準則外，其他可能影響模式篩選之因子還有：設備(電腦速度及容量)、人員(經驗及對現地的掌握程度)、成本(軟體購置費用或人員教育訓練等)、現地資料的完整性、及資料的適用性等。

依據以上模式篩選準則，解析模式(例如 AT123D)並不適合進行低放射性廢棄物處置設施場址的模擬與評估，而具有一維/二維/三維地下水流與溶質傳輸模擬的地下水模式，較適合用來模擬現地水流與溶質傳輸問題。本研究根據相關報告的評估結論，並參考美國 NRC 採行的方法，篩選出 HELP、MODFLOW、FEHM 等地下水與表面水的水流模式，以及 MT3D、BLT-MS、GoldSim-CT 等溶質傳輸模式。

在瞭解各模式的程式特性後，本研究自 U.S. Army Corps of Engineers 的 Environmental Laboratory 下載 HELP 程式(Version 3.07)、自 Los Alamos 國家實驗室取得 FEHM 程式、自 Brookhaven 國家實驗室取得 BLT-MS 程式，以及自 GAI 購買 GoldSim 與 CT Module 等程式，而 MODFLOW 與 MT3D 程式則分別自美國地質調查局(USGS)及 Alabama 大學的地質科學系(Department of Geological Sciences of the University of Alabama)下載，並以 PMWin 軟體(Chiang and Kinzelbach, 1993)為介面，耦合 MODFLOW 及 MT3D，以推求污染物在地下水系統的傳輸行為。

四、地下水與表面水的水文模式

根據模式篩選的結果，採用的地下水及表面水程式，包括 HELP 程式評估覆蓋層的地表水體入滲量，MODFLOW 與 FEHM 程式分析地下水流場。以下分別說明 HELP、MODFLOW、及 FEHM 等三個程式。

4.1 HELP

本模式全名為 The Hydrology Evaluation of Landfill Performance model (Schroeder et al., 1994)，是一個擬二維(Quasi-2D)之水文模式，主要模擬水流進入、經過、及流出地層之行為。本模式所需的輸入數據有兩大類：

1. 氣象資料，包括降雨、溫度、土壤蒸發散量(evapotranspiration)、濕度、及日照數據等；
2. 土壤與設計數據，包括土壤分層數目、各層土壤的型態、及各層厚度等，透過給定的數據，HELP 模式可計算曲線號碼(curve number)及逕流係數等。此外，HELP 模式在模擬過程中，可將多種現象加入模式中，包括地表蓄水效應、雪水融化、逕流、入滲、及非飽和層的垂直排水等。

圖 4-1 為 HELP 的概念模式示意圖，圖中顯示 HELP 可以模擬水在多層土壤中流動的情形。例如第一層為通氣層(未飽和層)，水在垂直方向流動至第二層；第二層為飽和層，且下方為黏土層(不透水層)，由於坡度的關係，呈現水平流動的現象。此外，若有廢棄物堆置(如第五層)，也可透過 HELP 計算流過廢棄物的水量，進而計算可能的污染物散佈狀況。

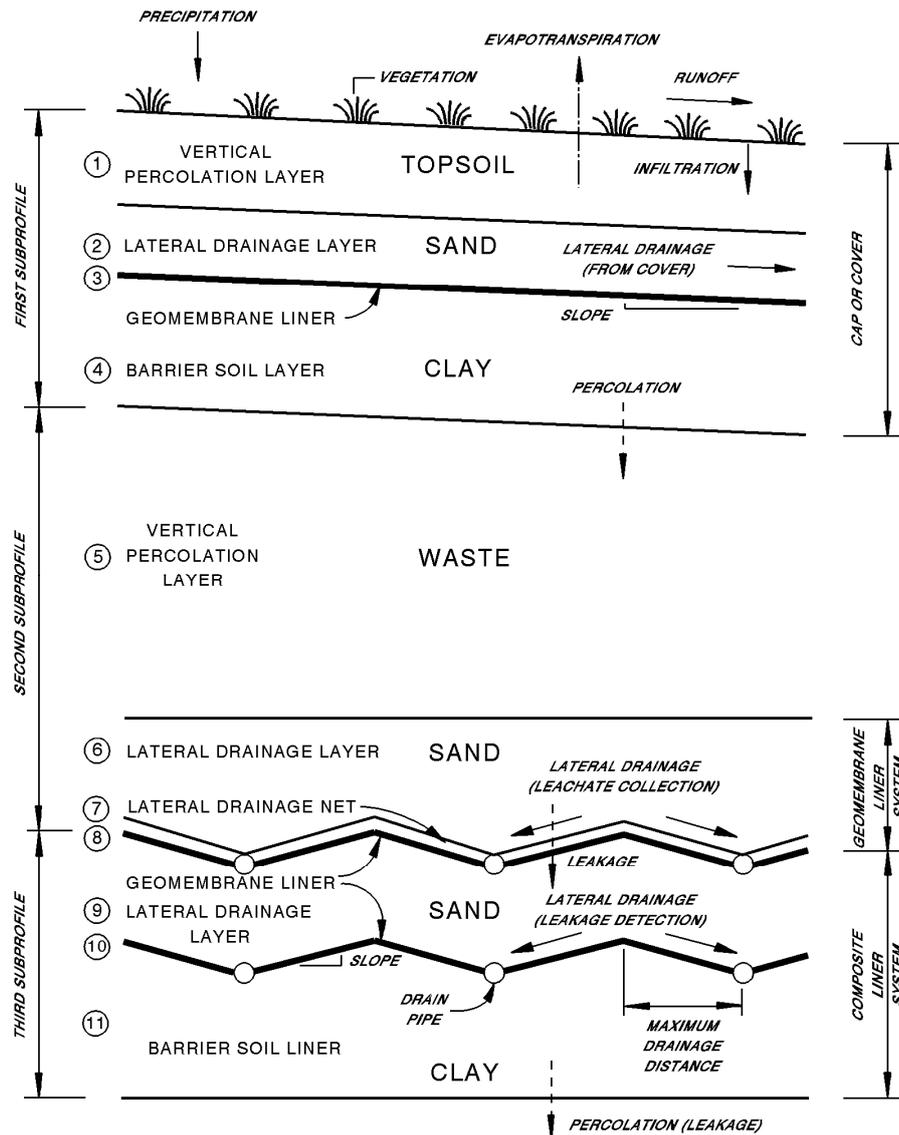


圖 4-1 HELP 概念模式示意圖

本研究設計一個 200 m × 100 m 之土壤層，由上到下分為三層：第一層為通氣層，厚度為 2 m；第二層為飽和層，厚度為 15 m；第三層為不透水層，厚度為 5 m。各層的水文地質參數則參考 HELP 內建的土壤質地(soil texture)表設計之。配合台東氣象站 2007 年之氣象數據，包括雨量、濕度、及日照數據等，計算各土層中水量的變化，如表 4-1 所示。從表 4-1 可看出 2007 年各月份的平均降雨、逕流、蒸發散量、及流入第二層和第三層的水量，這些數據可用於模擬地下水流場的來源項

(source/sink term)。

表 4-1 HELP 模式測試結果

```

*****
MONTHLY TOTALS (MM) FOR YEAR 2007
-----
                JAN/JUL FEB/AUG MAR/SEP APR/OCT MAY/NOV JUN/DEC
PRECIPITATION      21.2   16.0   19.1   39.4   113.2  123.2
                   4.0   618.9  362.4   95.3   300.0  19.6
RUNOFF              0.00   0.00   0.00   0.00   0.00   0.00
                   0.00   2.05   6.82   0.00   19.69   0.00
EVAPOTRANSPIRATION 23.10  13.52  22.28  29.64  39.74  68.89
                   16.13  110.74  61.94  41.72  34.89  19.61
LATERAL DRAINAGE COLLECTED
FROM LAYER 2        4.446  21.106  22.888  21.586  21.687  17.847
                   21.041  10.320  28.944  49.202  45.688  57.536
PERCOLATION/LEAKAGE THROUGH
LAYER 3             3.121  4.386  4.826  4.634  4.749  4.309
                   4.684  3.680  4.866  6.182  5.838  6.532
-----
MONTHLY SUMMARIES FOR DAILY HEADS (CM)
-----
AVERAGE DAILY HEAD ON
TOP OF LAYER 3      82.638 406.450 400.845 393.984 386.597 331.151
                   374.408 186.959 438.591 654.055 626.201 719.497
STD. DEVIATION OF DAILY
HEAD ON TOP OF LAYER 3 145.512 1.360 1.913 2.106 2.216 75.744
                   47.320 164.304 207.974 3.981 101.850 5.559
*****

```

4.2 MODFLOW

本模式全名為 MODular three-dimensional finite-difference ground-water FLOW model (McDonald and Harbaugh, 1988)，用來模擬地下水在含水層流動的現象。MODFLOW 是採用體心式有限差分法(block-centered finite-difference approach)來進行地下水流控制方程式之求解計算。需輸入數據包括含水層形式、網格大小、邊界條件、水文地質參數、初始條件、模擬時間、及求解方法等。MODFLOW 可模擬井抽水、大範圍抽水(Rational withdraw)、蒸發散、與河流之效應等。MODFLOW 的含水層形式可分為六種，包括：

- (1) 受壓含水層(confined aquifer)
- (2) 自由含水層(unconfined aquifer)

(3) 受壓－自由含水層(confined/unconfined aquifer)

(4) 型式(1)+半受壓層(semi-confining layer)

(5) 型式(2)+半受壓層(semi-confining layer)

(6) 型式(3)+半受壓層(semi-confining layer)

本研究設計之數值算例，為一個 580 m × 600 m 的含水層，由上而下分別為自由含水層、第一受壓含水層、第二受壓含水層等三層，其中，第二層與第三層之水力傳導係數不同，以模擬含水層非均值(heterogeneity)的現象。左右邊界為定水頭(左：9 m；右：8 m)，上下邊界為零流量。在座標(500 m，300 m)位置設置一完全貫穿之抽水井。利用 MODFLOW 計算在一特定抽水量的狀況下，被抽水井捕捉的區域(capture zone)，如圖 4-2 所示。圖 4-2 顯示被抽水井收集的水之流線，第一層為藍色，第二層為綠色、第三層為紅色，圖形右方和下方的子圖為不同截面的結果，此圖形可應用在污染整治時之參考。

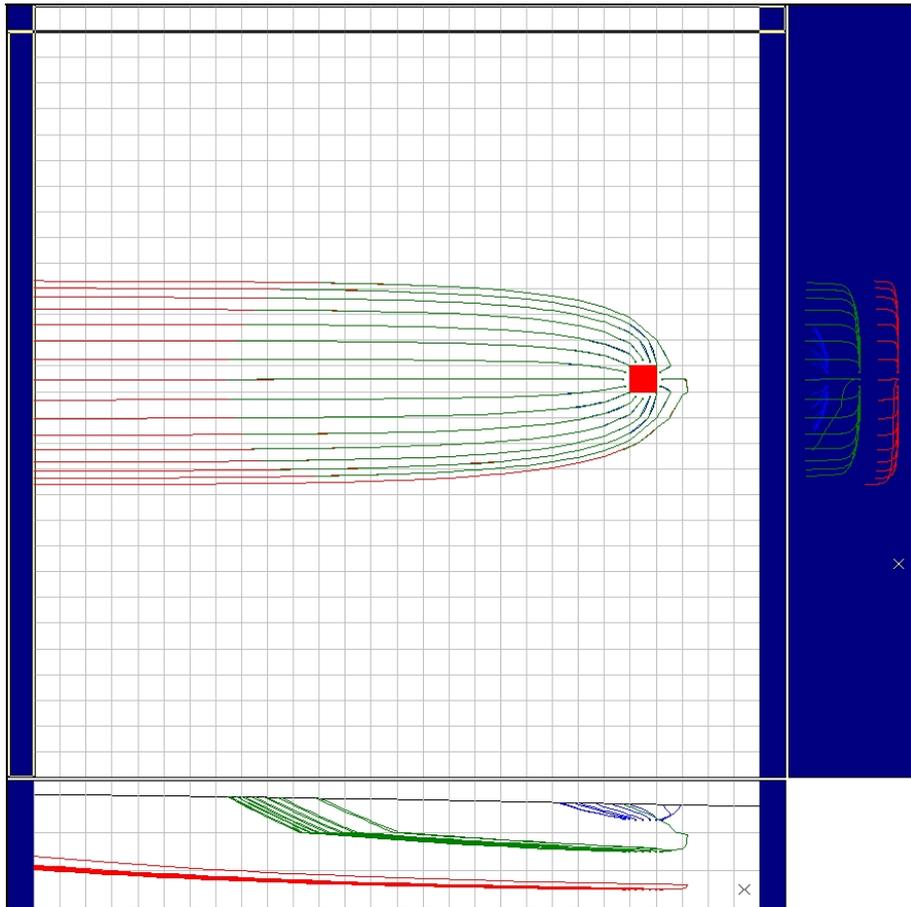


圖 4-2 MODFLOW 模式測試結果

4.3 FEHM

本模式全名為 Finite Element Heat and Mass transfer code (Dash, 2003)，是利用有限元素法所寫的地下水流、空氣、熱、與污染物傳輸模式。模式所需的輸入數據為網格大小、格點座標、組成元素的格點號碼、邊界條件、溫度、起始條件、模擬時間、及求解方法等。FEHM 可以模擬氣體、水流、油(oil)、熱的流動，及多種化學的反應。此外，含水層的形式包括了飽和/非飽和含水層。

本研究設計之案例，為一個 200 m × 100 m 之土壤層，水力傳導係數為定值，左右邊界為定水頭(左：10 m；右：8 m)，上下邊界為自由流通，含水層之水頭分佈如圖 4-3 所示。

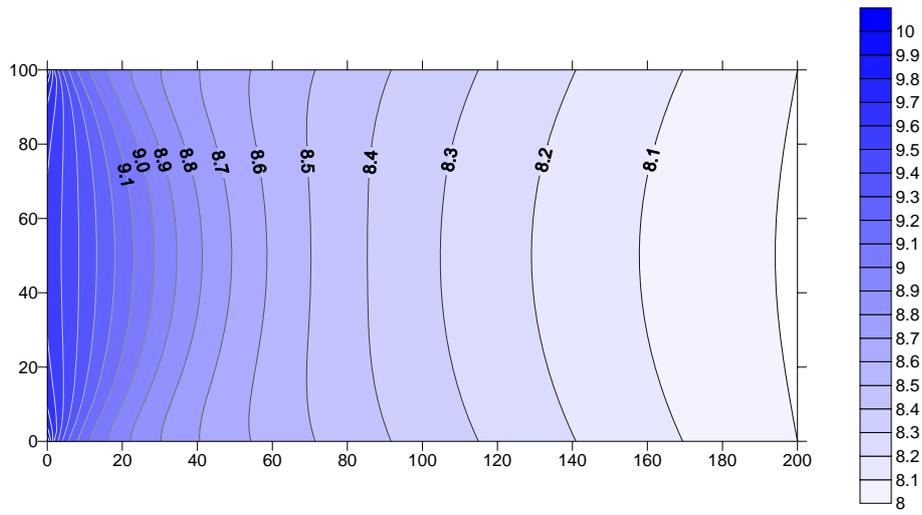


圖 4-3 FEHM 模式測試結果

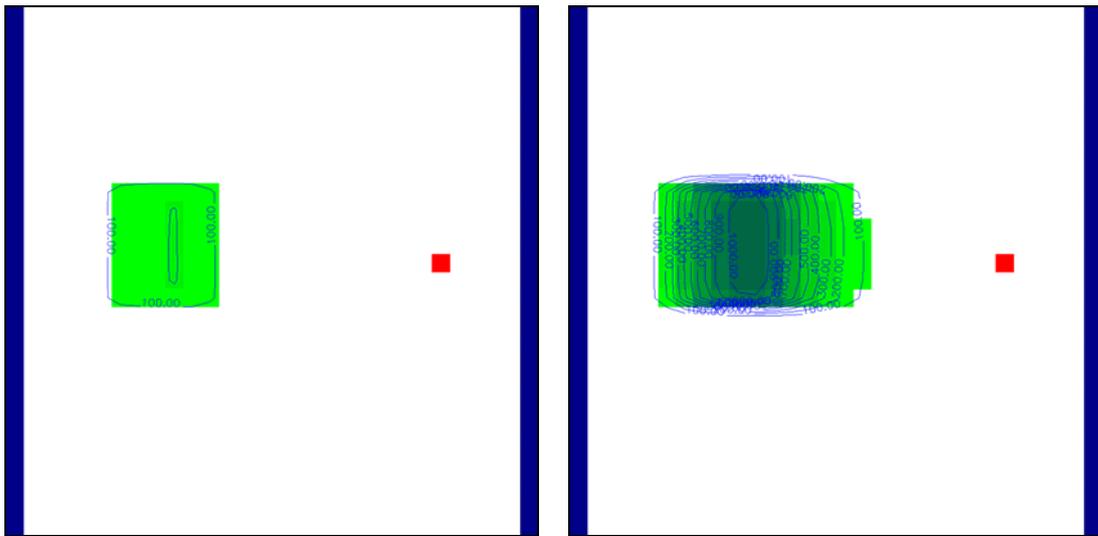
五、放射性核種傳輸模式

根據模式篩選的結果，採用的溶質傳輸模式有 MT3D、GoldSim-CT、及 BLT-MS 等，分別說明如下：

5.1 MT3D

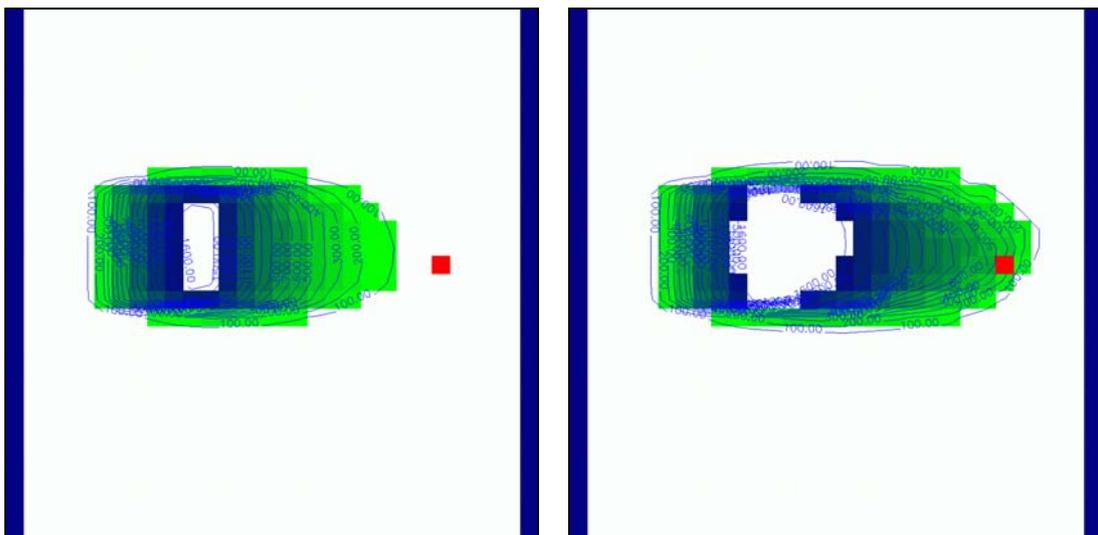
本模式全名為 A Modular Three-Dimensional Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reaction of Contaminants in Groundwater Systems (Zheng, 1990)，MT3D 是一基於特性法(Method of characteristics)、粒子追蹤演算法 (particle tracking algorithm)、及有限差分方法，處理數值問題的三維地下水污染物傳輸模式。用於模擬污染物在非等向性(anisotropic)、非均質(heterogeneous)、層化(layered)含水層中的濃度變化。MT3D 可以模擬污染物在含水層中的對流(advection)、延散(dispersion)、吸附(sorption)、及衰解(decay)等影響污染物濃度變化的機制，其中，吸附限於平衡狀態下的線性或非線性作用，衰減為一階不可逆的放射性衰變(radioactive decay)或生物降解(biodegradation)。MT3D 假設濃度場的變化不會顯著的影響地下水流場，因此任何使用體心式(block center method)有限差分法的水流模式，均可以搭配 MT3D 進行污染物傳輸模擬，例如 MODFLOW。MT3D 所需輸入的數據，除了水流模式之輸出結果外，還包括設定各網格的初始濃度、污染物來源(sink/source)的流入率、求解方法、延散係數、及化學作用參數等。

本模式測試的案例與 MODFLOW 相同，但是在場址左方釋放一面污染源。應用 MODFLOW 計算的流場，進行污染物傳輸的模擬，模擬時間共三年。圖 5-1(a)-(d) 顯示在第三含水層之污染團隨時間移動的情形，可以看出當右方的抽水井不斷抽水時，將使得污染物隨著水流方向往右移動，同時因為延散效應，污染團的面積不斷增加，並向左方擴散。



(a) 污染傳輸連續釋放源位置

(b) 污染傳輸第一年模擬結果



(c) 污染傳輸第二年模擬結果

(d) 污染傳輸第三年模擬結果

圖 5-1 MT3D 模式測試結果

5.2 GoldSim-CT

本模式全名為 GoldSim Contaminant Transport Module (Sullivan et al., 1996)，其中，GoldSim 是由美國能源部(Dep. of Energy)委託美國高得聯合公司(Gold Associates Inc., GAI)開發的物件導向電腦軟體，可支援機率式參數取樣，提供蒙地卡羅(Monte

Carlo)法或拉丁超立體(Latin hypercube)的取樣模式(sampling technique)，進行與機率分析(probabilistic analysis)有關的模擬。此外，GoldSim 亦可應用定率分析(deterministic analysis)所建立的程式，經由動態連結(dynamically linked library)功能與 GoldSim 整合，進行敏感度與不確定分析，來反應程式參數的不確定對於結果的影響。例如核能研究所與美國 Sandia 國家實驗室，即利用此動態連結技巧，合作發展出一套以 BLT-MS 與 GoldSim 兩個程式耦合的模式(田能全與郭明傳，2006)。

在模擬污染傳輸部分，GoldSim有兩種方式，第一種是利用前述的DLL與外部的污染傳輸模式耦合，本計畫不討論這個部分；第二種是利用GoldSim發展的污染物傳輸模組(Contaminant Transport Module)，直接與GoldSim掛接(add-on)，因此不需要透過動態連結功能，即可進行機率式的污染物傳輸模擬。污染物傳輸模組有兩個版本，包括污染傳輸模組(contaminant transport module, CT Module)與核種傳輸模組(radionuclide transport module, RT Module)，在GoldSim的架構下，可以依據場址特性，模擬溶解相污染物質或放射性核種在環境介質中的傳輸行為，進行污染傳輸模擬與風險評估分析。本研究使用CT Module，因此簡稱為GoldSim-CT傳輸模式。

本模式測試的模擬情境是假設垃圾場滲出水中的有機物，連續釋入土壤質地為黏質壤土的飽和含水層，利用 GoldSim-CT 進行水中總有機碳的健康風險評估，其中，影響轉換因子(impact conversion factor)假設為 10^{-6} L/mg/yr，延散度(dispersivity)的機率分佈假設為常態分佈(Normal distribution)，其平均值與標準偏差值分別為 200m 與 50m，蒙地卡羅取樣次數(realizations)設定為 100。此外，土柱是利用傳輸選項中的「導管(pipe)」功能，模擬垃圾場滲出水在此一維流場中，受到流傳與延散機制的影響。圖 5-2 為 GoldSim 執行本測試例的概念模式與輸出結果。

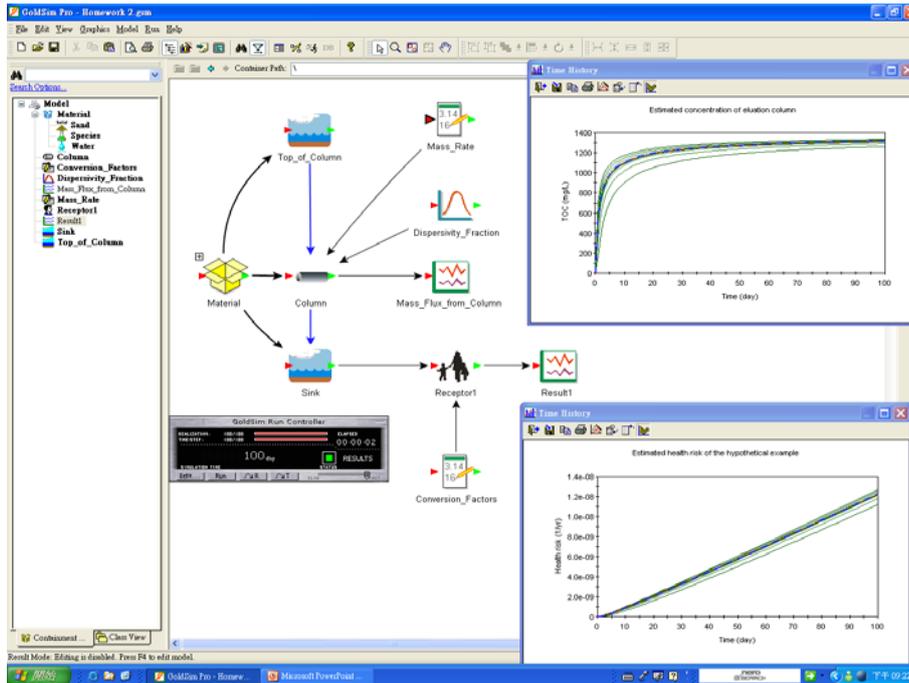


圖 5-2 GoldSim-CT 模式測試結果

5.3 BLT-MS

本模式全名為 Breach, Leach, and Transport-Multiple Species (Sullivan et al., 1996)，主要是模擬處置設施場址內的儲存容器，受到腐蝕、劣化的情況下，放射性物質外釋的濃度分佈(液相)，容器的劣化模式可模擬局部腐蝕或全面腐蝕的程度與時間，外釋的瀝濾模式包括淋洗分配、擴散、均勻劣化、溶解度限度外釋分析。此外，BLT-MS 還可以模擬外釋核種在地下水系統中的傳輸行為，考慮的機制有流傳、延散、擴散、核種生成與衰變、外在污染源與沈源(sink source)等。BLT-MS 的輸入資料是由 23 個資料集(data set)所組成，來描述水流、容器特性、污染物特性、及傳輸機制等四個主要外釋程序，各資料集均包括必須給定的參數，完整描述核種運輸的歷程，以及相關的物理、化學、或水文性質。

本模式的測試案例是取自 BLT-MS 的使用指引(Sullivan et al., 1996)，模擬 Am-241、Pu-241、及 Pu-240 等三種核種自儲存容器外釋，經一維傳輸的濃度分佈。

此案例假設核種在 $x = 0$ 的位置外釋，模擬 273 年後，在 70 公尺範圍內的核種分佈。由於 BLT-MS 輸入的資料量是複雜、龐大，因此可利用視窗介面的資料前處理程式(如圖 5-3 所示)，方便使用者依序完成 23 個資料組的輸入工作。執行 BLT-MS 的程式，可得到一個純文字的輸出檔，顯示所有的輸入資料與模擬結果，這些數據必須再經過處理，才能以圖形方式展現。圖 5-4 為輸出結果的表頭資料。



圖 5-3 BLT-MS 模式資料輸入視窗畫面

```

PROBLEM 1 Prob2: Three species decay chain. Containers

**** BASIC INTEGER PARAMETERS ****
NUMBER OF NODAL POINTS. . . . . 213
NUMBER OF ELEMENTS. . . . . 140
NUMBER OF DIFFERENT MATERIALS . . . . . 1
NUMBER OF CORRECTION MATERIALS. . . . . 0
VELOCITY INPUT CONTROL. . . . . -1
GRID CONTROL: =0 READ cards; =1, automatic generation 0

**** NUMERICAL MODEL SELECTION PARAMETERS ****
STEADY-STATE CALCULATION. . . KSS . . . 1; 1=NO,0=YES
UPSTREAM WEIGHTING INDICATOR, IWET. . . 1; 0=GALERKIN,1=UPSTREAM
LUMPING INDICATOR, ILUMP. . . . . 1; 0=NO, 1=YES
TIME-DIFFERENCE INDICATOR, IMID . . . . 0; 0=NO, 1=YES
WEIGHTING FACTOR OPTIMIZING INDICATOR . 1; 0=NO, 1=YES
IS FLUX-SOLVING MATRIX LUMPED? . . . . 0; 0=NO, 1=YES

**** CONTAMINANT INFORMATION ****

FLAG FOR MASS INPUT(MASS=0, ACTIVITY=1) 0

NUCLIDE      ATM      DECAY-CONSTANT      CSAT
-----      ---      -
Am241        241.      5.073E-11           1.000E+00
Pu241        241.      1.464E-09           1.000E+00
Pu240        240.      3.358E-12           1.000E+00

**** DECAY CHAINS ****

NUMBER OF DECAY CHAINS(0=NO, > 1=YES) . . 1

DECAY CHAIN NUMBER 1 - LENGTH OF CHAIN IS 3
Chain 1: Am241 DECAYS TO Pu241 WITH A BRANCHING FRACTION OF 1.000
Chain 1: Pu241 DECAYS TO Pu240 WITH A BRANCHING FRACTION OF 1.000

```

圖 5-4 BLT-MS 模式測試輸出結果的表頭

六、結論與建議

6.1 結論

本研究根據國內相關報告與的評估結論，並參考美國核能管理委員會採行的方法，篩選 HELP、MODFLOW、FEHM 等地下水與表面水的水流模式，以及 MT3D、BLT-MS、GoldSim-CT 等溶質傳輸模式，進行模式瞭解與測試工作，根據實際的操作經驗和檢視模式輸出的結果，這些模式可以進行模擬情境的地下水流與污染傳輸模擬，以及安全評估所需要的機率分析，或能滿足在遴選低放射性廢棄物與場址時的需要，並做為原子能委員會建立自主性處置場址安全評估的分析與審查能力之參考

6.2 建議

每一個地下水流模式或溶質傳輸模式，均有其特定的數學模式與選用的數值方法，所需要輸入的參數極為繁複，欲瞭解程式的限制並能夠解讀模擬的結果，除了要具備放射性廢棄物與地下水的基礎知識外，還需要長時間的研究、演練、及實做。因此，建議主管機關繼續進行長期的人員培訓與養成，協助研究單位與產業機構累積研究能力，同時辦理國內外的技術交流會議，將有助於我國未來放射性廢棄物處置的評估與管理。

參考文獻

- 田能全、郭銘傳，2006。BLTMS-GoldSim 低放處置機率式分析模式之建立，台電核能月刊，288。
- 朱文生，1990。地下水污染模式評估與選擇之研究，環保署。
- 黃佳雯，2005。地下水模式工具於污染控制場址範疇界定之研析，台大環工所碩士論文。
- 郭明傳、田能全、盧俊鼎，2007。低放射性廢棄物淺地層處置之安全評估案例探討，台電核能月刊，294。
- Chiang, W. H. and Kinzelbach, W., 1993. Processing Modflow (PM), Pre- and postprocessors for the simulation of flow and contaminant transport in groundwater system with MODFLOW, MODPATH and MT3D. Distributed by Scientific Software Group, Washington, DC.
- Dash, Z.V., 2003. Software User's Manual for the FEHM Application Version 2.21, 10086-UM-2.21-00, Los Alamos National Laboratory.
- EPA, 1988, Selection criteria for mathematic models used in exposure assessments: Groundwater models, EPA/600/8-88/075 Exposure Group, office of Health and Environmental Assessment, US EPA, Washington, DC.
- Javandel et al., Groundwater transport: Handbook of mathematical models, American Geophysical Union, 1984.
- Mattie, P.D., R.G. Knowlton, and B.W. Arnold, 2007. A user's guide to the GoldSim/BLT-MS integrated software package: A low-level radioactive waste disposal performance assessment model, Sandia National Lab., SAND2007-1354.
- McDonald, M.G. and A.W. Harbaugh, 1988. A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model, U.S. Geological Survey, Virginia.

- Meyers, 1996. Hydrologic evaluation methodology for estimating water movement through the unsaturated zone at commercial low-level radioactive waste disposal sites, NUREG/CR-6346, PNL-10843, US Nuclear Regulatory Commission.
- Schroeder, P.R., N.M. Aziz, C.M. Lloyd, and P.A. Zappi, 1994. The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model: User's Guide for Version 3. EPA/600/R-94/168a, September 1994, U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development, Washington, DC.
- Sullivan, T.M., R.J. MacKinnon, and R.R. Kinsey, 1996. BLT-MS (Breach, Leach, and Transport-Multiple Species) data input guide, NUREG/CR-6492, BNL-NUREG-52509, US Nuclear Regulatory Commission.
- U.S. Geological Survey, 2009. Water Resources Ground Water Software, http://water.usgs.gov/software/lists/ground_water.
- Yeh, G. T., Cheng, J. P. and Jones, N. L., 1996. "FEMWATER: a three-dimensional finite element computer model for simulating density dependent flow and transport", US Army Engineer Waterways Experiment Station, Pennsylvania State University, Brigham Young University.
- Zheng, C., 1990. MT3D: A Modular Three-Dimensional Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems. Report to the USEPA.