

行政院所屬各機關因公出國人員出國報告書

(出國類別：實習)

岩體不連續裂隙網路傳輸分析技術研習

服務機關：行政院原子能委員會核能研究所

出國人 職 稱：薦任副研究員

姓 名：曾哲聰

出國地點：美國

出國期間：91年10月26日至91年12月22日

報告日期：92年2月18日

G12/
cc9104963

摘 要

美國 Golder Associates Inc. 公司總部位於亞特蘭大，為一技術顧問公司，其分公司遍佈美國本土，於世界各地也有多處分公司。此次奉派前往西雅圖分公司研習岩體不連續裂隙網路（Discrete Fracture Network, DFN）傳輸分析技術，學習該公司所開發之 FracMan 軟體群組基本原理與模擬分析技術，主要程式有：FracMan、FracWorks/95、PAWorks 及 MAFIC 等。

該公司於國際核能後端領域扮演極重要角色，目前廣為應用於安全評估之程式 GoldSim 即為該公司所開發之另一重要軟體；除放射性廢料處置，該程式也應用於其他領域。Golder 西雅圖分公司主要業務為：水資源研究、礦業、油田開採、土地開發、環境保育、廢棄物處置等。放射性廢料雖僅為其業務項目之一，然而現今投入相關研究之主要國家皆以該公司為技術諮詢與合作對象；譬如瑞典、日本、西班牙、法國、美國雅卡山計畫（Yucca Mt.）等。

就放射性廢料全系統安全評估（Total System Performance Assessment, TSPA）而言，假想放射性核種由廢料罐釋出後，經由緩衝材料及母岩，最後將到達生物圈；其中於母岩之傳輸分析涉及地質特性、母岩裂隙、地下水傳輸等各專業領域。Golder 公司之軟體群組結合地質與統計理論，先模擬產生母岩裂隙，再以有限元素進行傳輸路徑及流體場分析，建立不連續裂隙網路之傳輸途徑。

有關放射性廢料處置場之 TSPA 技術，核研所已具備以 GoldSim 為主體之分析架構，可配合各種情節來分析核種釋出。此次研習重點為放射性廢料於母岩之傳輸分析，目前則已建立 GoldSim 與 PAWorks 之直接連結，並可讀取其傳輸途徑分析結果。而岩體不連續裂隙網路傳輸分析技術基本上並未受限於母岩種類，花崗岩、凝灰岩、砂岩等環境皆有應用實例。

以 FracMan、FracWorks/95、PAWorks、MAFIC 等軟體群組為基礎，連結 GoldSim 程式，藉由此次之研習，進一步建立介於廢料罐與生物圈間之岩體不連續裂隙網路傳輸分析技術；配合未來選址母岩之特性，可應用於國內放射性廢料處置場之安全評估工作。

目 次

(頁碼)

一、目的.....	1
二、過程.....	2
三、心得.....	17
四、建議.....	18

一、目的

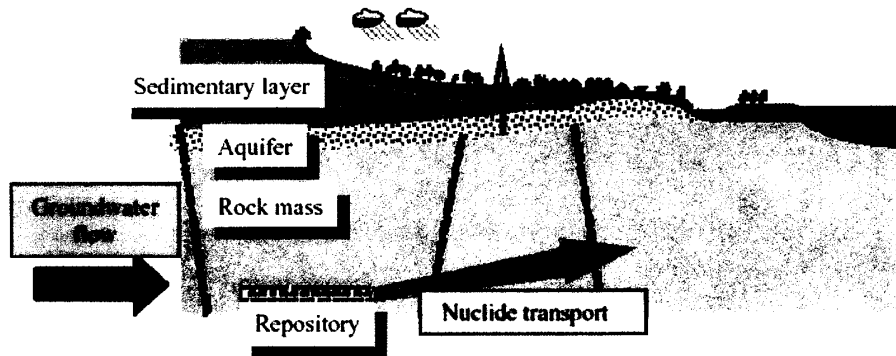
- (一) 研習 Golder 公司開發之 FracMan、FracWorks/95、PAWorks、MAFIC 等岩體不連續裂隙網路傳輸分析軟體群組基本原理與應用。
- (二) 建立放射性廢料處置岩體傳輸與全系統安全評估主體架構程式 GoldSim 之連結分析能力。

二、過程

(一) 軟體群組研習

1. 背景說明

以用過核燃料或高階放射性廢料之深地層處置方法來作說明，其基本觀念如下圖：



資料來源：H 12 Supporting Report Fig. 3.4-1, Japan Nuclear Cycle Limited

而於進行處置場全系統安全評估時，放射性核種由處置區經由地下水傳輸到生物圈即屬於母岩之傳輸分析。

影響母岩傳輸主要因素為地質特性與地下水文。地質特性包括：岩體裂隙形式、裂隙尺寸、裂隙分佈、傳導係數(Transmissivity)、裂隙內寬(Aperture)、導水係數(Conductivity)等，地下水文則涉及水頭(Head)、流量、傳輸途徑等。此次赴美實習重點為學習 Golder 公司所開發之 FracMan 軟體群組，建立岩體之裂隙模擬與傳輸分析技術，以應用於放射性廢料處置安全評估。

2. 軟體群組

不連續裂隙網路是分析岩體地下水流常用模式之一。近年來，由於電腦硬體發展迅速，工作站及個人電腦計算能力大幅提升，使得各種以統計為基礎之運算概念配合有限元素方法，結合相關的邊界與起始條件，建構成實際可行之地質水文模擬分析技術。

岩體傳輸分析涵蓋區域地質特性、岩體裂隙、地下水傳輸等各專業領域，Golder 公司所開發之軟體群組是以現地調查數據為基礎，結合地質學

與統計理論，模擬產生岩體裂隙之後，再以有限元素模擬岩體裂隙，並依據邊界條件進行流體場分析。除獲得流場分佈外，同時建立不連續裂隙網路之傳輸途徑；此外，可以進行質點示蹤分析(Particle Tracking)，也可以連結 GoldSim 程式從事整體評估。

研習 Golder 公司開發應用於岩體不連續裂隙網路傳輸分析軟體分別為 FracMan、FracWorks/95、SamEdit、PAWorks、MAFIC 等程式，這些程式的功能和發展現況如下表：

程式	版本	功能
FracMan	DOS	地質現地調查數據特性分析
FracWorks/95 ¹⁴	Windows	產生岩體模擬裂隙
SamEdit	Windows	空間幾何與流體場邊界條件設定
MeshMaster	DOS	模擬裂隙之三角形有限元素建立
EditMesh	DOS	修改分析邊界條件
PAWorks	Windows	1. 分析傳輸途徑。 2. 產生管路元件提供 GoldSim 進行傳輸分析。
MAFIC	DOS	三維流體場及質點示蹤分析

¹⁴：Golder 公司預定以新版 FracWorks/XP 替代 FracWorks/95，原有程式僅維持現狀，不再進行維護、升級等工作。

而各個程式名稱、對應功能、彼此間介面連結、實際進行岩體不連續裂隙網路傳輸之分析流程如圖一所示。

3. 分析要領

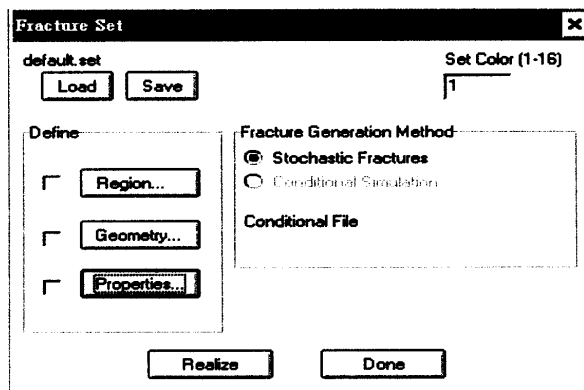
3.1 FracMan/FracSys 程式

FracMan 程式於 DOS 系統下操作，目前只有 FracSys 模組繼續使用，其他選項皆已由具有視窗顯示之軟體替代，各種輸入輸出檔案名稱、用途、分析要領詳如表一。

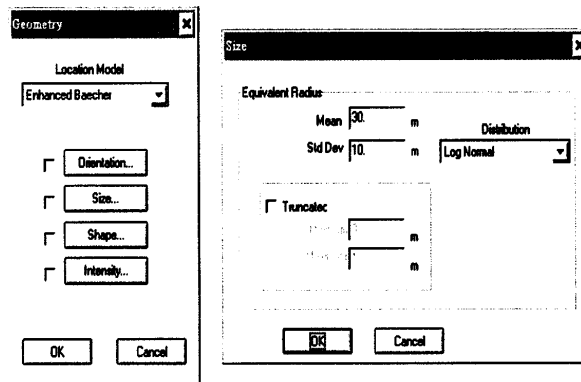
3.2 FracWorks/95 程式

這個程式為視窗操作軟體，主要功能為產生區域裂隙，由於另一版本 FracWorks/XP 已達成熟階段只等待釋出時間，FracWorks/95 僅維持目前之堪用現況，不作任何更新維護。

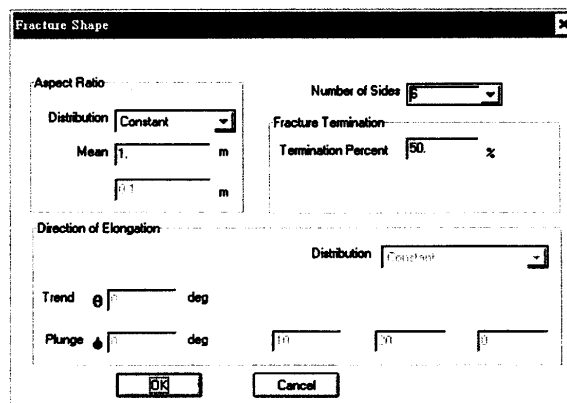
於待分析之區域範圍，定出幾何邊界，依據上一節對現地裂隙特性相關數據之統計分析，逐項於程式中設定。起始設定視窗，含裂隙群組編號、區域大小、模擬裂隙形狀及特性如下：



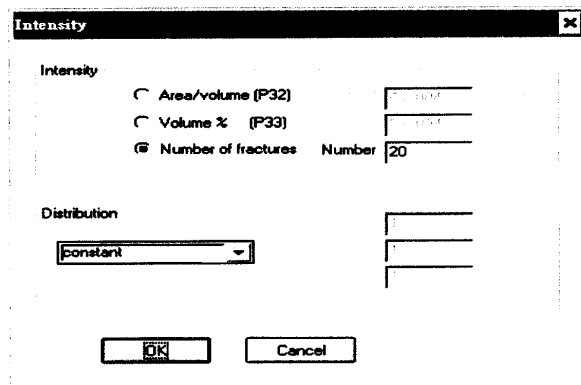
重要裂隙參數譬如方位(Orientation)、長度、形狀、強度(Intensity)等，其設定視窗如下：



裂隙形狀設定視窗如下：



裂隙強度設定視窗如下：



3.3 SamEdit 程式

Golder 公司早期所發展軟體座標系統 X 軸依循地質界慣用指向南方，但主要石油工業客戶則習慣使用 X 軸指向東方，因此運跑 SamEdit 時對未於 .sab 檔案中另作陳述之數據皆認定為指向南方。為此，SamEdit 於建立分析區域大小、流體條件、對應流場之幾何邊界群組、起始條件之後，於儲存檔案時亦提供將座標修正為 X 軸指向南方或東方之選項。但於讀入數據之後，一律指定為 X 軸指向東方。

由於有上述之差異性，於運跑 FracMan 軟體群組時，務必確認 .sab 檔案與 .fab 檔案之 X 軸指向是否一致，否則程式將以 .sab 檔案所述為準。如此，裂隙數據有可能因座標指向不一致而錯讀；程式雖有警告訊息，但於 DOS 作業模式下，訊息一閃而過，極可能為分析人員所疏漏。

SamEdit 建立流場邊界條件程序如下：先設定各種流場條件，再將各個幾何邊界指定分屬於何種流場條件，以此完成邊界條件群組。運跑 SamEdit 時可依需求，於區域內置入圓柱型內部區域形成邊界條件或鑽孔 (Borehole)。兩者雖同為圓柱狀，但前者相對較大，程式僅能以多邊形角柱體近似；後者很小，主要應用於提供流場邊界條件。

以放射性廢料處置應用而言，若廢料罐尺寸與分析區域比例過於懸殊，譬如 1 km 對應於 1 m；分析核種傳輸時，廢料罐應視為區域內置入之鑽孔；並視需要，直接於有限元素節點設定流體邊界條件。

3.4 MeshMaster 程式

本程式以 FracWorks/95 所產生之裂隙為基礎，配合 SamEdit 所建立之

外部與內部幾何邊界將裂隙以三角形有限元素來模擬，而由空間中三角形有限元素之分佈即可串接成流體通道，後續三維流場計算則交由 MAFIC 程式處理。由於有限元素個數會直接影響計算之準確度與運算時間，為得到適當之有限元素切割，本程式運跑時之參數設定相對較為複雜。

3.5 PAWorks 程式

FracWorks/95 於產生所要模擬之岩體裂隙之後，若要產生 GoldSim 模擬分析所需之 .ltx 檔就必須運跑 PAWorks。PAWorks 於叫進 FracWorks/95 之裂隙檔 .fab 之後，開始進行各項參數設定並給予流體與邊界條件，最後建立可執行之 .sab 檔。要產生 .ltx 檔，則應於參數設定時勾選“LTG output”。

PAWorks 顧名思義就是找尋傳輸途徑(Pathway)，先由各個裂隙面彼此之交錯點串接成管路(Pipe)。而除原有之串接管路外，程式另外再產生更有效率的傳輸管路；此時“pipe factor”之設定就會影響到管路數目。若設定為 2，其意義為：3 個交錯點原本串成 2 個管路，但若由第 1 點直接串第 3 點長度小於前兩者長度和之 1/2，程式將自動增加由第 1 點直接串到第 3 點之第 3 管路。

隨後程式將按照設定之管路數量，依據流體邊界條件，尋找可成為通路之傳輸途徑以及具代表性之途徑，程式有三維圖示以提供具體之觀察。

GoldSim 所需之 .ltx 檔僅提供由“Source”到“Sink”有連通之管路編號，意義與傳輸途徑不同。運跑時之設定參數“Peclet threshold”會影響產生之管路數量，務必配合 GoldSim 之使用給予適當數值。

若欲利用所建立之傳輸途徑執行質點示蹤，.sab 檔應完成相關設定於儲存之後另以編輯方式，自行於“Path Search”之後加入數行指令，範例如下：

```
BEGIN particle_tracking_options
  particle_no = 50
  random_num_seed = 94512
END
```

PAWorks 雖有視窗畫面，但產生管路之後有可能因為流體邊界之特殊個案原因而找不到傳輸途徑；由於目前程式之視窗與 DOS 介面不夠完善，此時會連管路輸出也不顯示。這種現象不算程式錯誤，若進入 DOS 系統仍可發現管路分析已執行完畢。所幸這種情形並不常見，筆者曾於研實期

間發生類似情形，經洽請 Golder 公司程式維護人員進行偵錯後花數小時才了解該現象，後來決定以個案處理，不修改程式設計。

3.6 MAFIC 程式

MAFIC 主要功能為進行不連續裂隙網路於特定之幾何與流體邊界條件下之流體分佈計算，主要影響因子有：水頭、地下水流量、裂隙特性、裂隙網路等。流體場計算完成後，可以於特定位置釋放質點源，進行傳輸軌跡追蹤，以了解流體場速度以及傳輸途徑之具體分佈。

程式群組分為三部份：MeshMaster、EdMesh 與 MAFIC 等。MeshMaster 主要是依據 SamEdit 程式，由 FracWorks/95 所產生之裂隙檔 .fab，配合外部或內部之邊界條件與流體條件建立之 .sab 執行程序檔。而按照程式使用者之指定參數，所有裂隙將以三角形有限元素模擬，建立之節點與有限元素檔案則為 .maf。

運跑 MAFIC 基本資料為裂隙三角形有限元素之幾何座標與特性，含傳導係數與裂隙內寬等。這些數據可以併入 .maf 檔，若數據太多，亦可單獨建立成一個 .dat 檔。所有節點可分為邊界節點與內部節點，而邊界節點可配合流場邊界條件指定為不同之群組。

欲直接由 MAFIC 使用手冊來運跑程式有時容易混淆，其原因為本程式有些設計是配合另一軟體 LTG，而 LTG 為 Golder 公司外購併入之另一種分析選項，日本 Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC) 為主要用戶。兩者觀念上主要差異在於解流體場時，MAFIC 不考慮吸附 (Absorption)、擴散 (Diffusion)、分散 (Dispersion)、遲滯 (Retardation) 等機制；但 LTG 則全都考量，依據 Golder 公司人員經驗，有時若流體邊界條件設計不當，LTG 會解不出來。此外，LTG 只能選擇具代表性之途徑來計算流場，無法像 MAFIC，可以用三維有限元素分析整個流體分佈。

MAFIC 運跑之後若發現需要修改邊界條件或流體場條件，Golder 公司建議使用另一軟體 EdMesh。雖然以一般編輯軟體也可以閱覽或修改 .maf 檔案，但是裂隙之三角形有限元素數量甚多，若以人工方式修改，不容易完整，容易出錯。

MAFIC 之質點追蹤亦可考慮裂隙於縱向 (Longitudinal) 與橫斷方向 (Transverse) 之流動性差異，此外岩體對質點之遲滯效應也可加入。若同時討論放射性核種，其衰變與子核之產生則應同時考量。因此，要特別注意 “IMODE” 設定值以及 prop.cod, retard.cod, decay.cod 等各檔案及內部參數

設定；譬如 prop.cod 中，“NPROC”要定義如何讀入遲滯效應數值。

MAFIC 運跑質點示蹤並考慮遲滯效應時輸入數據關鍵為：

Prop.cod 檔案中要定義“items=?”，“Calcite”與“Chlorite”要由“Fracture Element Properties”之第幾欄讀入，其“Data type”為何？譬如“Real”或“Percentage”。

Retard.cod 檔案定義之數值也會影響計算結果，範例如下：

```
MENU 0 : items = 7
title   = "FRACTURE PROPERTIES"      Null
item 1  = "Transmissivity"           Real
item 2  = "Storativity"               Real
item 3  = "Frac Thickness"           Real
item 4  = "Long Disperse"            Real
item 5  = "Transverse Dispersivity"  Real
item 6  = "Calcite"                  Fraction
item 7  = "Chlorite"                 Fraction
```

如果於 retard.cod 檔案中定義“Calcite”為 0.7，“Chlorite”為 0.5，而“Fracture Data Element 1”中之“Calcite”為 0.8，“Chlorite”為 0.2，(注意：兩者總和應為 1.0)，則整體速度遲滯效應為：

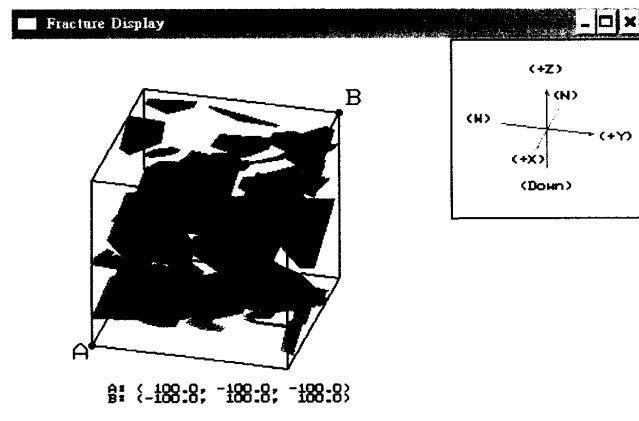
$$\frac{1}{0.7} \times 0.8 + \frac{1}{0.5} \times 0.2 = 1.54$$

MAFIC 進行交談式運跑時，被詢問輸入檔名時應鍵入：xxx.maf；被詢問輸出檔名時，建議鍵入：yyy.out，亦即增加一個附檔名 .out。該程式原始設計並未自動加上附檔名，如此可避免使用者一時未加留意鍵入與輸入檔一樣檔名時，輸入檔會被運跑後自動存下之輸出檔名蓋寫掉。

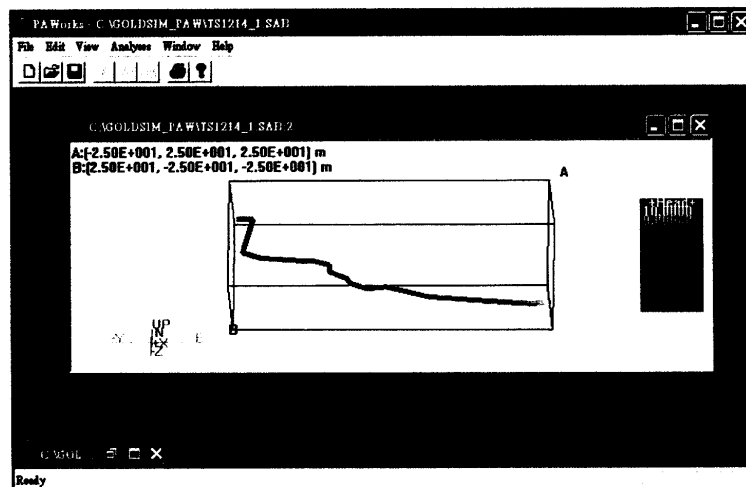
若進行放射核種傳輸分析，重點要確認半衰期數值，(母)子核名稱應與遲滯效應所定義之名稱一致等。此種模擬分析建議於裂隙檔產生後，於建立邊界條件時同樣以 SamEdit 建立模擬貯存罐之內部區域，然後以 MeshMaster 於貯存罐特定表面定義，作為核種起始釋出之位置。

4. 應用實例

以 200 m 為分析範圍，所有參數設定暫以程式內定值，由 FracWorks/95 產生之三組裂隙，可由顏色設定加以區分如下：



一般而言，傳輸途徑不只一個；程式將會依照使用者對搜尋參數之設定，依序列出可以成為通路之途徑，藉由圖示提供具體之傳輸路徑。以 50 m 立方之區域為例，使用 PAWorks 程式由裂隙建立管路後，搜尋得到之傳輸途徑範例如下圖：



(二) 與 GoldSim 之連結

1. 管路元件 (Pipe Element)

進行 TSPA 時，岩體可以用特定數量之管路來進行傳輸模擬，而管路數量則應反應母岩裂隙特性。二. (一). 3.5 節 PAWorks 程式中所述，即

為建立傳輸管路方法之一；經由逐步分析，可以提供 GoldSim 從事 TSPA 所需之管路元件基本資訊輸出。

PAWorks 程式分析原本是以傳輸途徑為重點，但為配合 GoldSim 需求，程式另外搜尋所有由“Source”到“Sink”可以連成通路之管路。這些管路之基本資訊包括：編號、長度、流量、通過面積等，並可追溯到不同特性之裂隙群組。

2. 連結分析

GoldSim 為配合污染傳輸分析，另有 CT 模組選項；該版本中，可以建立“Network Element”，並可以直接讀入擷取 PAWorks 之輸出檔 .ltx。而讀入後可以發現它是管路元件資訊，同時呈現裂隙群組編號；此時如果尚未建立“Fracture Element”，會出現警告訊息。

所建立之“Fracture Set”數量應該與 PAWorks 輸出檔所定義之“Fracture Set”編號數目一致。理論上，FracWorks/95 產生之“Fracture Set”是依據區域代表性，由分析者所下指令，決定組數後建立，這些特性當然應該反應於最後之 PAWorks 運跑與後續之 TSPA。

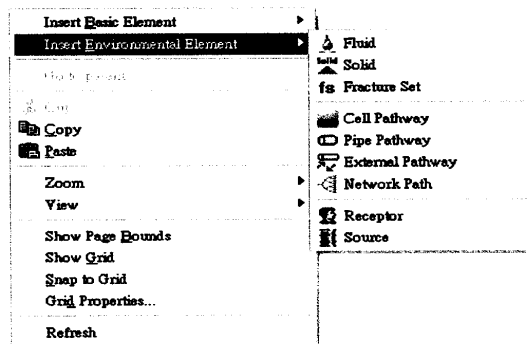
運跑 PAWorks 時，建立傳輸管道之管路元件可能連結到為數甚多之不同“Fracture Set”；因此 GoldSim 建立“Network Element”之後，應依據所讀到“Fracture Set”之組數去建立相對應數量之“Fracture Element”。之後，再視需要，各別去編輯“Fracture Element”並加入對應之裂隙特性。

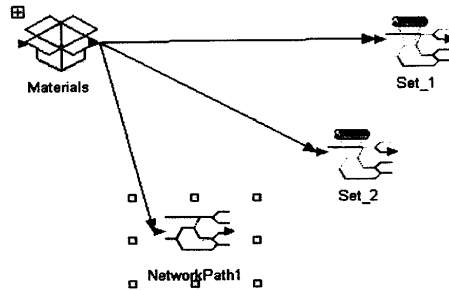
GoldSim 讀入 PAWorks 所產生之 .ltx 檔時，其中之管路元件數量並無限制。但於視窗上之顯示則提供前 1,000 個數據，這是基於電腦記憶體使用上之經濟性考量。此外，GoldSim 不對該檔案作編輯，若有需要進行修正，應另以合適軟體進行。

3. 應用實例

首先，使用 GoldSim CT 模組建立“Network Path”元件如右圖：

接著編輯“Network Path”，下圖中，元件名稱則定義為“Network Path1”。





範例中定義了兩組裂隙元件：“Set_1”與“Set_2”，讀入 .ltx 檔案內容如下：

Fracture Network

Number of Pipes in the network: 3021

Pipe	Length	Flow	Area	Awet	T	Properties	Source	Sink
1	2.59421	198.805	3.2805e-005	19.4881	8.54e-006	SET_1		
2	5.28895	0.775071	1.37758e-005	15.8248	8.54e-006	SET_1		
3	6.98867	122.76	2.795e-005	45.6909	8.54e-006	SET_1		
4	4.81488	105.111	3.29986e-005	37.2094	8.54e-006	SET_1		
5	5.89035	105.45	2.06497e-005	28.4867	8.54e-006	SET_1		
6	11.7909	200.161	4.58171e-005	125.872	8.54e-006	SET_1		
7	6.88824	197.317	2.6252e-005	42.5919	8.54e-006	SET_1		
8	8.79976	40.6884	1.40254e-005	28.9854	8.54e-006	SET_1		
9	3.37714	131.185	1.51431e-005	10.5948	8.54e-006	SET_1		BCH
10	4.17692	11.0954	2.3582e-005	28.0843	8.54e-006	SET_1		
11	1.78291	251.77	1.44582e-005	6.09692	8.54e-006	SET_1		BCH
12	5.40868	29.5413	1.61662e-005	12.9052	8.54e-006	SET_1		
13	8.18907	54.2854	6.98401e-005	13.394	8.54e-006	SET_1		
14	13.6284	6.31119	1.53346e-005	4.9562	8.54e-006	SET_1		

Network 1 of 1

OK Cancel Help

以“Set_1”為例，進一步定義裂隙特性之範例如下

Fracture Set Properties : Set_1

Definition |

Element ID: Set_1 Appearance...

Description:

Basic Fracture Set Properties

Dispersivity: 0.0 m

Infill:

Fluid Saturation: 1

Advanced Fracture Set Properties

Coating... Suspended Solids...

Matrix Diffusion Zones... Stagnant Zone...

確定 取消 說明

上述元件建構完成後併入 GoldSim 之岩體傳輸模擬，即成為全系統安全評估的一部份；此為 FracMan 軟體群組與 GoldSim 分析連結之標準範例。

(三) 現況與應用

1. 各國方法比較

1.1 西班牙

西班牙 Enresa 公司首先建立地質分析模式，並以 20 km 區域作為分析範圍。岩體三維傳輸模式採用 FracMan 軟體群組，初次分析由 Golder 公司與 Enresa 公司合作進行，後續分析則由 Golder 公司擔任顧問諮詢，協助確認岩體裂隙分類與輸入數據之適用性；而 TSPA 則是以 GoldSim 配合 PAWorks 完成。

1.2 瑞典

由於 Golder 公司於瑞典設有分公司，許多模式發展與分析工作皆由分公司直接參與執行，與 SKB 關係也相當密切。瑞典 SKB 公司曾經進行一個研究計畫 Alternative Models Project (AMP) 以比較三種岩體地下水傳輸模式與分析，模式之一為 DFN，使用程式亦為 FracMan 軟體群組。

由於比較對象為 SKB 自行建立之另外兩個模式，基本理論與詳細內容無法得知。分析範圍為 2 km，深度 1 km，比較結果僅供其內部參考。相對於 SKB 自行開發模式，FracMan 軟體群組比較新，因此成為選項工具之一。

1.3 日本

日本現今並無高階放射性廢料之候選場址，JNC 於平成 12 年發行之 H 12 報告主要在於呈現所建立之分析能力。於岩體地下水傳輸方面，以花崗岩作為模擬分析對象，分析區域則為 100 m 立方。

相對於 JNC 前一版報告 H 3，H 12 報告呈現較為完善之分析工具，並提出頗為具體之概念設計改進建議。日本 JNC 與 Golder 西雅圖分公司維持長期之合作關係，並提供資金開發新版 FracWorks/XP，以及 PAWorks/LTG 之連結。

而於 H 12 報告發行之前，JNC 則是利用釜石 (Kamaishi) 既有礦山建立實驗室，進行地質水文調查與實驗，再以所得數據進行模式驗證，而 Golder 西雅圖分公司則為 JNC 建立程式初次運跑所需數據。

JNC 至今仍持續進行模式驗證，並與 Golder 公司之平行計算進行定期研討。而尚未使用 FracMan 軟體群組之前，JNC 從事 TSPA 時曾以較簡化

特定數量之管路元件進行岩體地下水傳輸一維模擬分析。

1.4 我國評估方法之建議

母岩地下水傳輸分析是 TSPA 的基礎，而 FracMan 軟體群組分析技術則是以 DFN 為理論基礎。瑞典 SKB、西班牙 Enresa 與日本 JNC 之應用雖皆以花崗岩為分析實例，但 FracMan 並未以此為限。核研所目前已經引進 GoldSim，配合 FracMan，TSPA 工具已趨完整。

就高階放射性廢料而言，我國目前亦無特定之候選場址，現階段僅從事處置場潛在母岩特性調查，而建立 TSPA 能力則為當前要務。就發展過程來看，與日本、西班牙極為相近，因此兩國之做法可作為我國之重要參考。建議方法如下：

- (1) 參考他國設計，提出我國第一版概念設計。
- (2) 以 GoldSim 與 FracMan 作為主要分析工具。
- (3) 選取潛在母岩種類，譬如花崗岩；使用公開文獻對地質、岩體特性之描述，進行小區域約 100 m 規模之 DFN 傳輸分析。
- (4) 視需要，以實驗室級小規模傳輸實驗驗證岩體地下水傳輸模式。
- (5) 結合 TSPA 結果，調整岩體特性，了解影響傳輸之關鍵參數，建議應進一步調查之地質特性項目。
- (6) 確認 TSPA 工具與分析模式之適用性與合理性，修正概念設計，精進分析能力以協助最終處置工作。

2. 其他應用實例

於 Golder 公司研習期間巧遇一以色列研究生，正以 FracMan 軟體群組進行該國某化工廠廢棄物貯存場污染傳輸研究。

2.1 現況說明

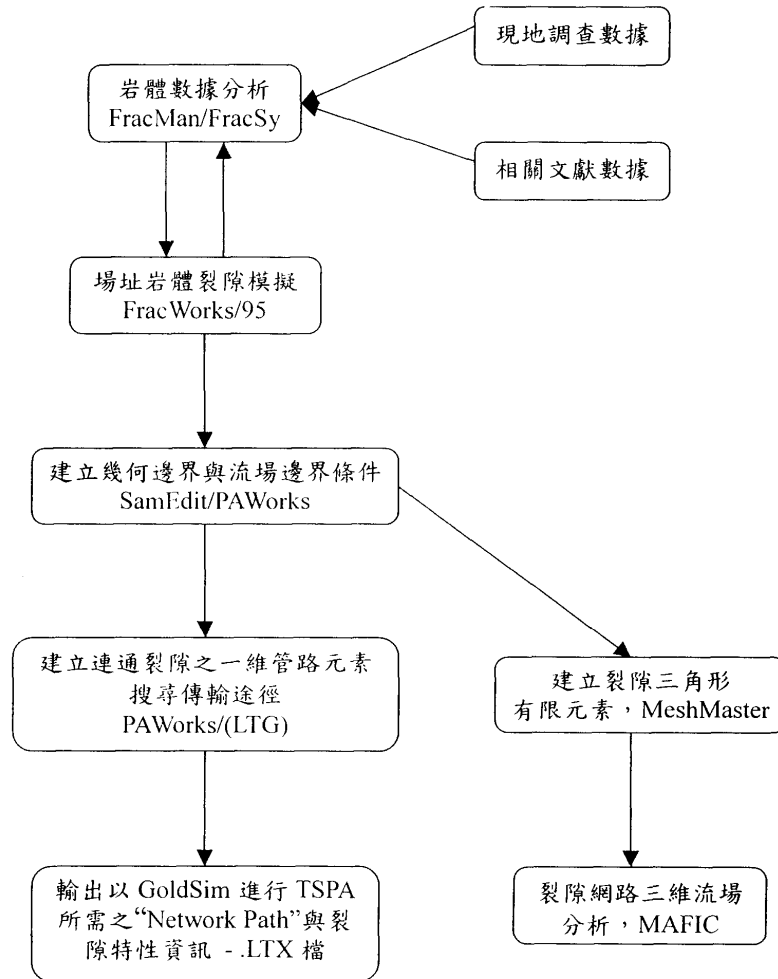
該化工廠已運轉 20 餘年，廢棄物貯存場就在工廠附近，近年來發現有蒸發與釋出之污染現象，於是投入相關研究。因 Golder 西雅圖公司地質專家 Bill Dershowitz 為共同指導教授，因此在該公司以 FracMan、FracWorks /95、MAFIC 等程式進行該化工廠廢棄物貯存場之傳輸研究。

2.2 研究過程

- (1) 研究區域垂直走向之裂隙於岩壁以噴漆紀錄，涵蓋面積約 60 m x 20 m；裂隙面使用極性 (Pole) 方向來分類，可歸納為 2 組。
- (2) 因無空照設施或其他資源可以協助其建立裂隙描繪面 (Trace Plane)，僅

能以人工方式進行，共建立兩組裂隙描繪數據。

- (3) 以 Enhanced Becher 關係式進行裂隙數據分析，再以 FracWorks/95 產生模擬裂隙。
- (4) 比較兩種裂隙強度 $P_{32}(\text{cm}^2/\text{cm}^3)$ 與 $P_{21}(\text{cm}/\text{cm}^2)$ ，確認模擬產生裂隙之適用性。
- (5) 於裂隙垂直方向進行四個鑽孔，與地面約成 70 度走向，用以確認裂隙彼此交錯程度。鑽孔深入地表約 30 ~ 50 m，因為處於高地，對應海平面標高實際約為 250 m。
- (6) 應用鑽孔進行裂隙之傳導係數量測，20 ~ 30 m 處呈現較高數值；另外也量測導水係數。
- (7) 依據上述地區之裂隙特性，正於 Golder 公司使用 MAFIC 進行流場計算與污染傳輸分析。



圖一 Golder 公司 DFN 軟體群組與分析流程

表一 FracMan/Fracsys 程式分析概述

分析選項	功能	輸入檔案	輸出檔案	說明
ISIS	依據使用者之參數設定比重將岩體分組(set)	Brief file: .ors, Complete file: .isi, .i sp, files, .	.sts, .ors	1. .ors 檔第一數字為負值不作 Terzaghi 方位修正，第二數字為 pole 或 dip 2. 會查證.ors 與.sab 檔案中，pole 與 dip 之 orientation 定義是否一致 3. 各種代碼於進入畫面後按 F10 4. .isp 為 JNC 特定使用檔案，岩石特性詳細 5. 由各項統計結果作成特性分組
FRACSIZE	分析裂隙長度與分佈近似模擬	.ors, .sab	.sts	1. .ors 檔案可能只有裂隙長度 2. 須配合 trace plane 位置座標
OXFILET	計算 transmissivity 分佈， <u>Q</u> snes E <u>x</u> traction from F <u>i</u> xed-I <u>n</u> terval-L <u>e</u> n <u>g</u> th E <u>f</u> fec- t <u>i</u> ve T <u>r</u> ansmissivity	.fil	.sts	1. 連續於 Borehole 特定固定深度測量測出水量，用於計算 transmissivity 2. 不一定需要描述 borehole 之 .sab 檔案
HETERFRAC	1. 讀入 trace plane 裂隙數據或 multi-plane 上數據 2. 讀入岩石 roughness 資料用於分析 trasmissivity 與 aperture 對空間之依存性 3. 對 borehole 數據目前不用	.f2d, .p2d.	.sts	1. Trace plane 數據處理可由 geoFratat 完全替代 2. Trace Analysis 有數種不同選項：statistics, Baecher, Levy/Lee, Variogram, Nearest Neighbor, War Zone 等 3. Borehole 數據處理可由 geoFratat 完全替代 4. Geostatistical- Roughness 分析時，1/2/3 分別對應於 transmissivity, stochastic, aperture；分析時對 fracture plane 分佈假設有不同選項 5. Borehole geostatistics 分析選項沒有提供 sample data
FRACDIM	目前不使用	略	略	略

三、心得

- (一) FracMan、FracWorks/95、MAFIC、PAWorks 等軟體，基本原理來自地質學、地質探勘數據、統計學、蒙地卡羅計算、岩體裂隙模擬、有限元素法、地下水流場原理與模式、流體場計算、污染物傳輸等領域，是一種介於科學與工程間的一種分析技術。
- (二) 1980 年代中期，由於電腦硬體發展迅速，工作站及個人電腦運算能力大幅提升，使得地下水傳輸模擬運算概念結合相關地質特性成為實際而可以運作之分析模式與技術。
- (三) Golder 公司這方面之應用涵蓋：水資源研究、石油探勘與開採、礦業、水壩建造、隧道工程、污染追蹤與評估、國家地質研究、土地開發、廢棄物處置等，而與美國國家地質調查所 (U. S. Geological Survey, USGS) 也一直維持長年之合作關係。在放射性廢料方面，委託國家則有：瑞典、西班牙、日本、美國雅卡山計畫等。
- (四) 日本與 Golder 公司關係尤其密切，現在之 JNC 以及前身 PNC 皆給予長期之委託工作。據觀察，日本幾乎是主導了該公司近年來 FracMan 相關程式之發展方向，頗有配合需求而為其發展的趨勢。以 FracWorks/XP 為例，為 FracWorks 最新版本軟體，圖示功能甚強，但受限與 JNC 之協定，Golder 公司尚未決定對外釋出時間。
- (五) 日本低階與高階放射性廢料雖然分別由 Japan Nuclear Fuel Limited, (JNFL) 與 JNC 負責規劃與營運，然而實際參與處置場安全評估與建造機構甚多；譬如大成建設、清水建設等民間公司，因人員長期投入相關工作，應該是國內安全評估比較容易之資訊來源。
- (六) 由於 GoldSim 與 FracMan 等軟體群組已規劃使用於日本 JNFL 六所村低階放射性廢料處置場第三期掩埋區之評估工作，若核研所因應國內需求被賦予相關任務，應可迅速投入必要工作。

四、建議

- (一) 核研所已擁有放射性廢料最終處置全系統安全評估工具 GoldSim，於引進母岩裂隙模擬與流體傳輸分析技術之後，宜妥善規劃穩定的研發團隊以因應未來後端處置長期工作。此外，對上游之地質調查與探勘，也應適度參與；除能以本土數據進行分析外，也能迅速提供建議，以從事最有貢獻之現地探勘。
- (二) 核研所 TSPA 主要工具 GoldSim 與 FracMan 軟體群組皆由美國 Golder 公司開發，目前也應用於美國、日本、西班牙、瑞典、法國等主要核能國家。對程式之版本更新與技術諮詢宜與該公司維持緊密聯繫，保持一定程度之顧問關係，以便對模擬分析工作提供改進建議。
- (三) 有關放射性廢料後端處置，成本實為重要之考量。國內相關工作於建立技術之同時，宜參考西班牙與日本做法，運用國際現有資訊，提出第一版最終處置概念設計。除可作為政策宣告外，亦可釐清關鍵性與有待建立之相關技術，使放射性廢料後端處置工作安全上能獲得最佳保障，經費能發揮最大效益。
- (四) 日本高階放射性廢料深地層處置之研發報告 H 12 由 JNC 主導，結合國內外不同機構，具相關專長及不同領域人員共同完成。由 H 12 報告來看，日本於分析技術方面已相當完備，所欠缺的只是真正可用於分析的候選場址。我國目前發展走在日本之後，技術未完備，人員經驗缺乏。長期而言，若能與日本建立正式合作管道，應是後端處置工作最快速也是最經濟的發展方式。