

# 模式在地熱與碳封存量化分析時扮演的角色

倪春發 教授

中央大學 地球科學學院/應用地質研究所

May 14, 2026

地熱與碳封存儲集層模擬工作坊 集思台大會議中心 尼采廳(B1)

中華民國地球物理學會、巨科資訊有限公司

# Question?

- 何謂模式?
- 是否使用過地熱與碳封存相關模式?
- 你是模式開發者 or 模式使用者?
- 你知道那些**地熱與碳封存分析**模式?
- 你如何決定該使用哪一個模式?
- 模式可以提供哪些訊息?
- 模式在地熱與碳封存計畫中扮演什麼角色?

# 何謂模式?

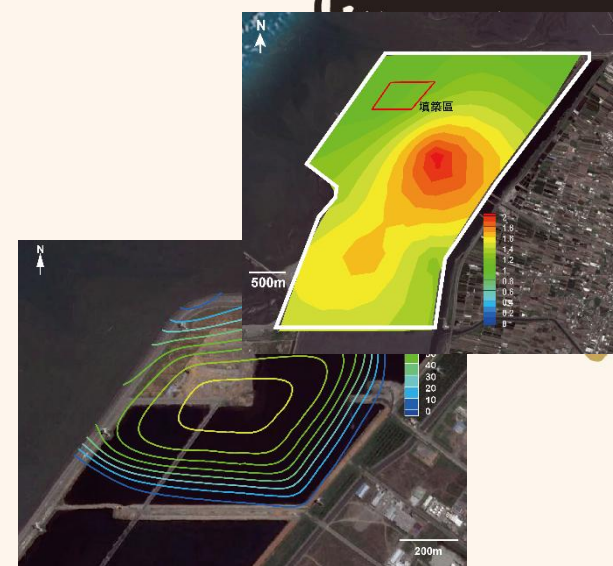
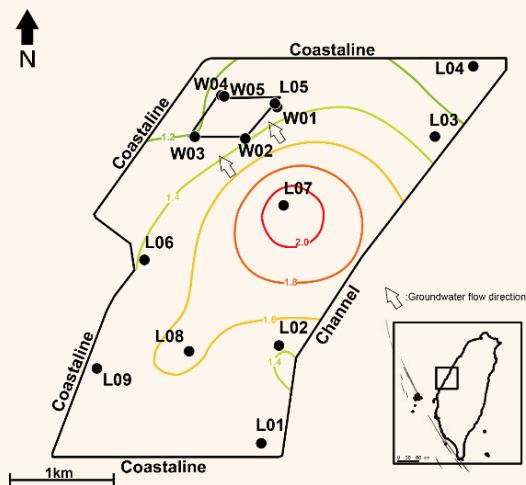
一個模式結果是承接(累積)一連串的假設/資訊

**A model is a simplification of reality (assumptions)**

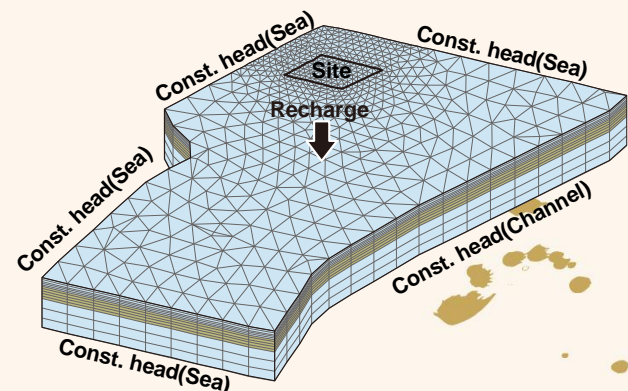
**Physical system**  
真實系統



**Conceptual model**  
概念模式



**Mathematical model**  
數學模式

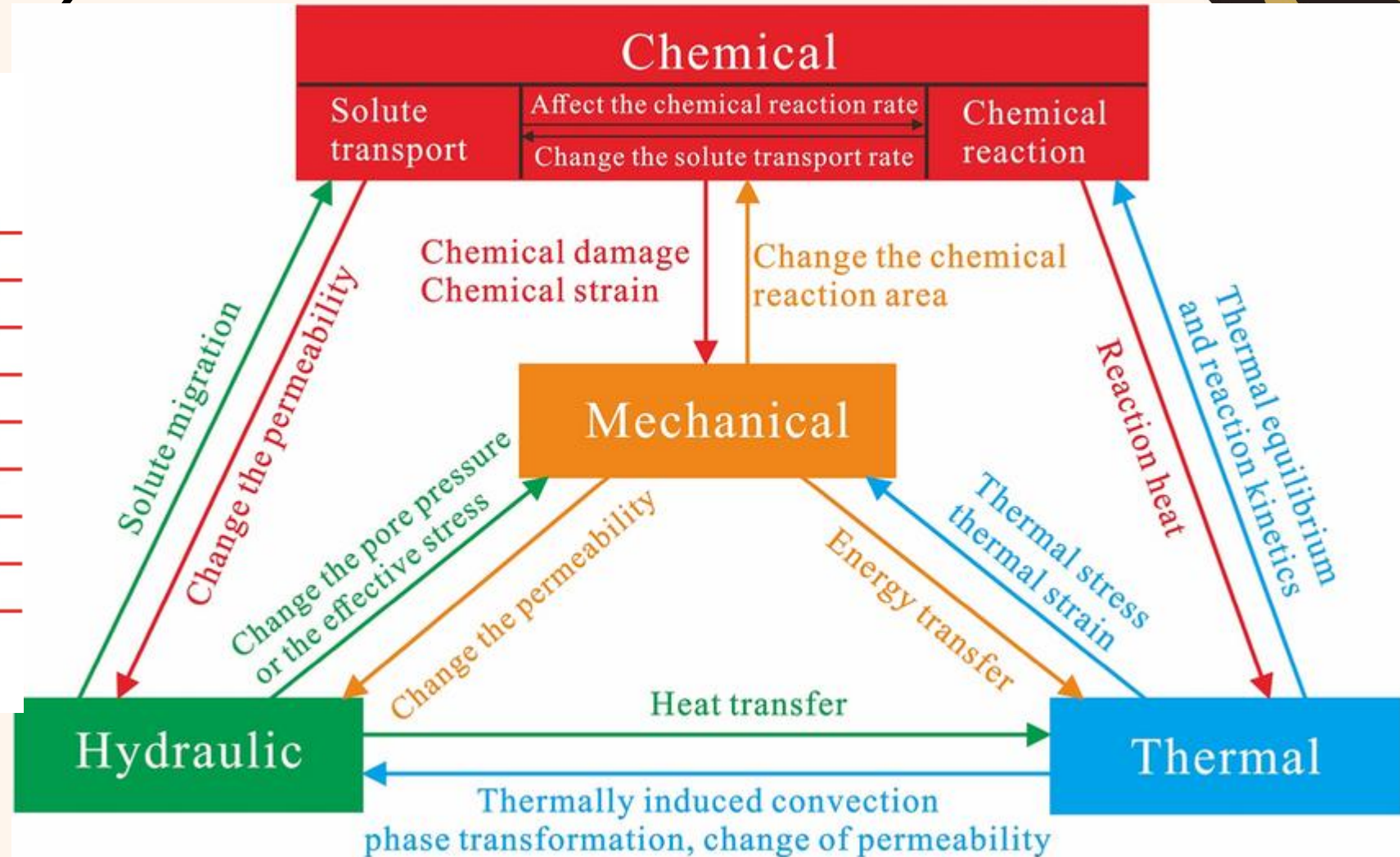
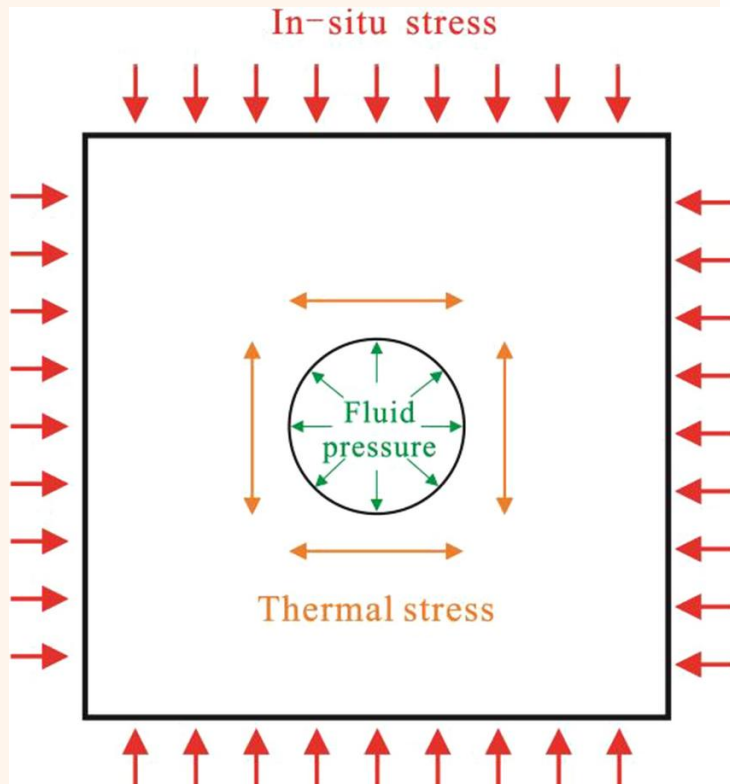


“Every area of science uses models as **intellectual devices for making natural processes easier to understand**. The model that reliably predicts the outcome of real events, or that continues to fit new data, is essentially a kind of theory, a broad statement of how nature works.” - **Jay Lehr (1990) editorial in Ground Water**

# 模式耦合架構 (問題/場址導向)

[Thermal-hydraulic-mechanical-chemical coupled processes and their numerical simulation: a comprehensive review](#)

(Zhang et al., 2023)



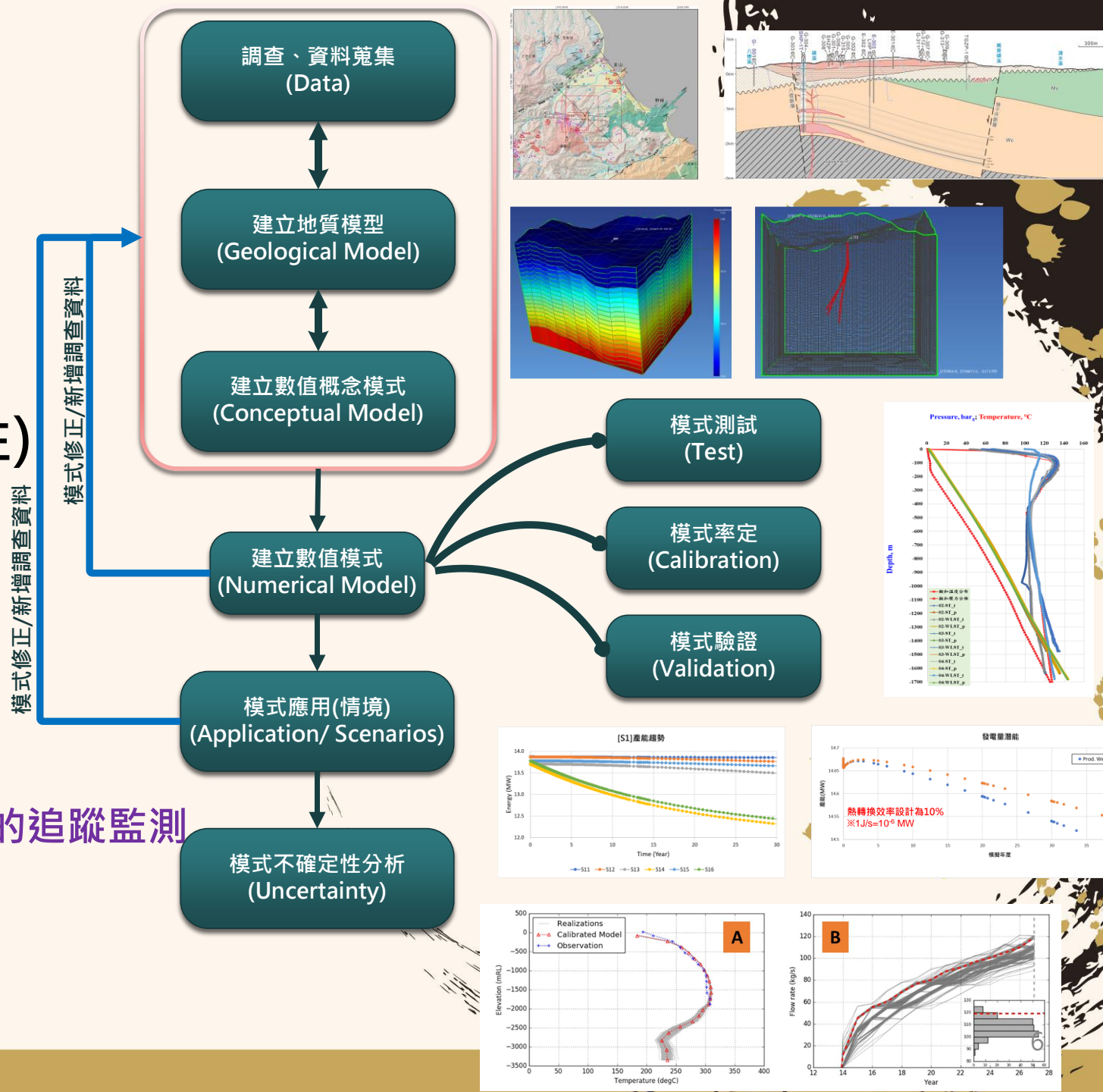
# 角色定位

模式在地熱與碳封存計畫中扮演什麼角色？

---

# 模式扮演角色

- 重現場址系統特徵
  - 驗證假說(熱源/CO<sub>2</sub> 遷移)
  - 情境的量化(方案/不確定性)
  - 協助工程設計(設施/安全)
- 
- 流程須不斷更新修正
    - 從計畫開始至營運甚至是結束後的追蹤監測
    - 通常是數十年以上長期投入



# 模式工作者的責任 Core Responsibilities of the Modeler

- 建立地下儲集層的數值再現 ( Numerical Representation of the Subsurface )
  - 將地質、地球物理、水文數據整合為可計算的模型結構
- 量化不確定性並提供決策所需的情境分析 ( Scenario Analysis )
  - 敏感度分析 ( Sensitivity Analysis ) 與蒙地卡羅模擬 ( Monte Carlo Simulation )
- 向跨學科團隊 ( 地質師、鑽井工程師、政策制定者 ) 溝通模型結果
  - 以視覺化圖表與不確定性區間傳達複雜結果
- 驗證 ( Validation ) 與校準 ( Calibration ) 模型，使其再現已知觀測數據
- 遵循監管框架 ( IEAGHG、ISO 27914、地熱法規 ) 提出模型文件
- 識別模型缺陷並誠實告知利害關係人 ( Stakeholders ) 模型的局限性

# 模式在計畫生命週期中的介入時機

計畫階段	地熱計畫任務	碳封存計畫任務	模型複雜度
場址篩選	地熱梯度與滲透率估算	儲集層容量初估(Screening)	概念模式 / 解析解
可行性評估	熱採出率與回注溫度預測	CO <sub>2</sub> 團塊半徑初估	粗網格數值模型
詳細設計	多井系統干擾模擬	鹽水層壓力累積預測	精細全耦合 THMC 模型
施工監測	抽水試驗解釋與模型更新	注入壓力即時校準	即時資料同化 ( DA )
長期監測	熱衰減預測、沉陷評估	CO <sub>2</sub> 洩漏風險評估 ( MRV )	百年尺度模擬

**模式不應做為計畫工作的附贈工項! 應占各階段工作支出? %**

# 模式不應只是算出結果

## • 幾個反思的問題

- 我們是軟體使用者還是模式使用者?
- 如何跳脫軟體使用者，轉變為模式使用者!
- 如何透過模式回答問題?

## 重要概念：

一個模式的結果是承接(累積)一連串的假設/資訊

評估正確性(或合理性)需回答那些問題?

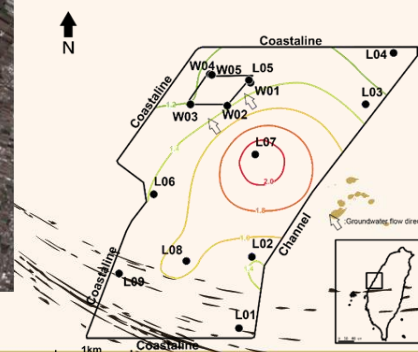
2026/5/12

**Physical system**  
真實系統

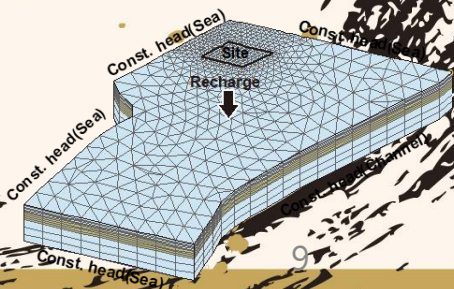
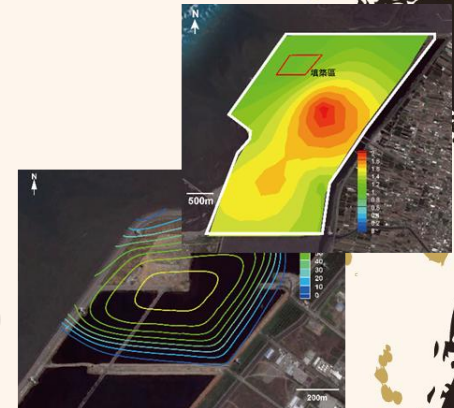


**A model is a simplification of reality (assumptions)**

**Conceptual model**  
概念模式



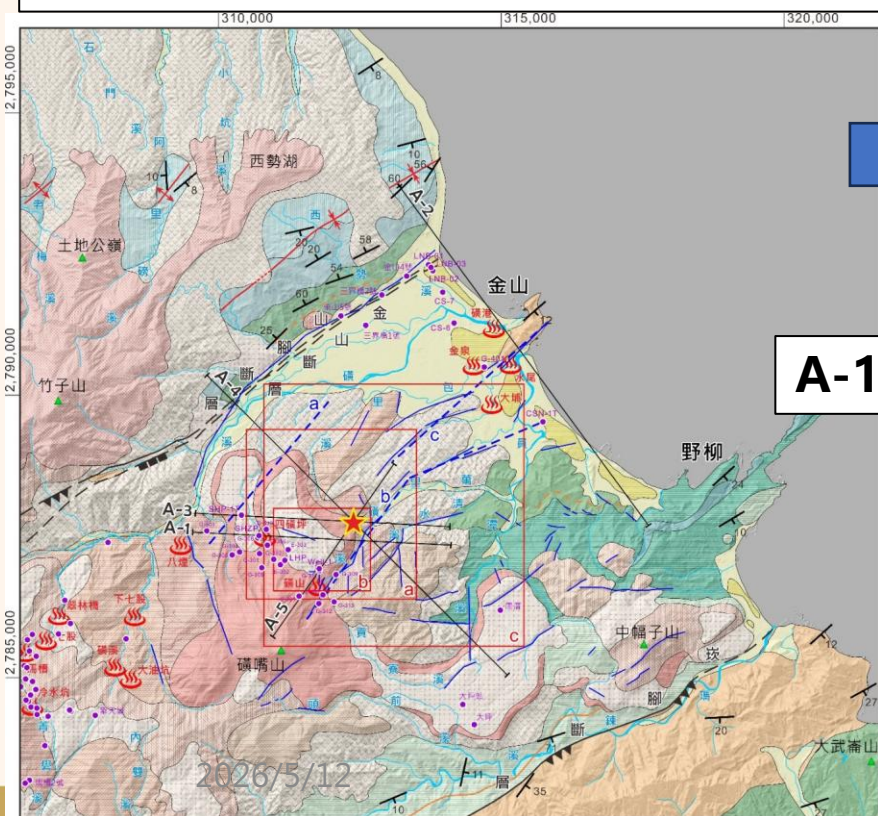
**Mathematical model**  
數學模式



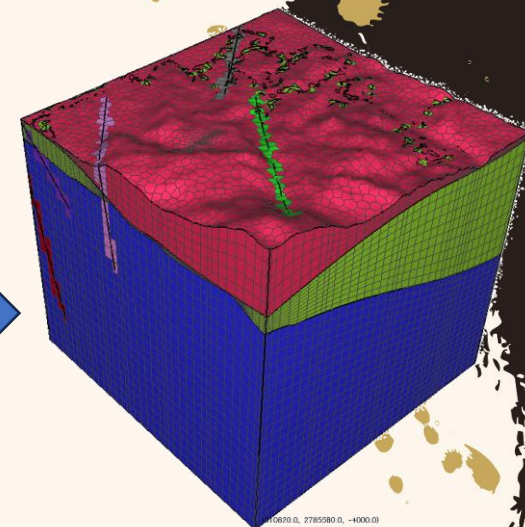
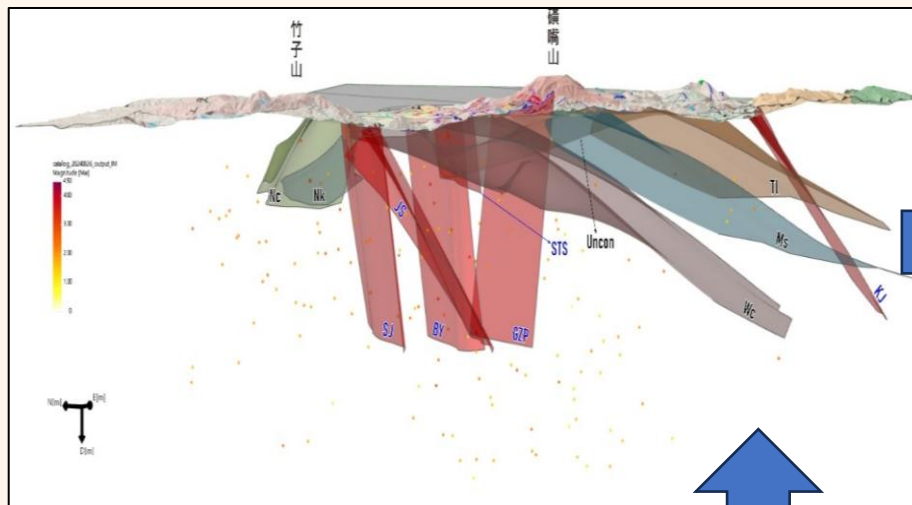
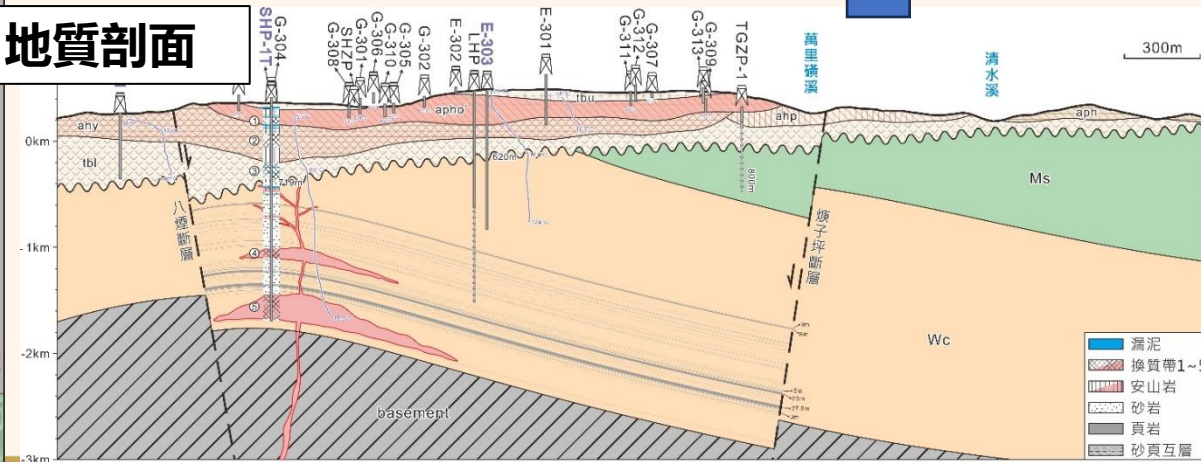
# 地質模型 → 概念模式 → 量化

(地熱地質模型 & CO<sub>2</sub> 封存地質模型) 配合模式參數

大屯火山東北側及鄰近地區區域地質圖



A-1地質剖面

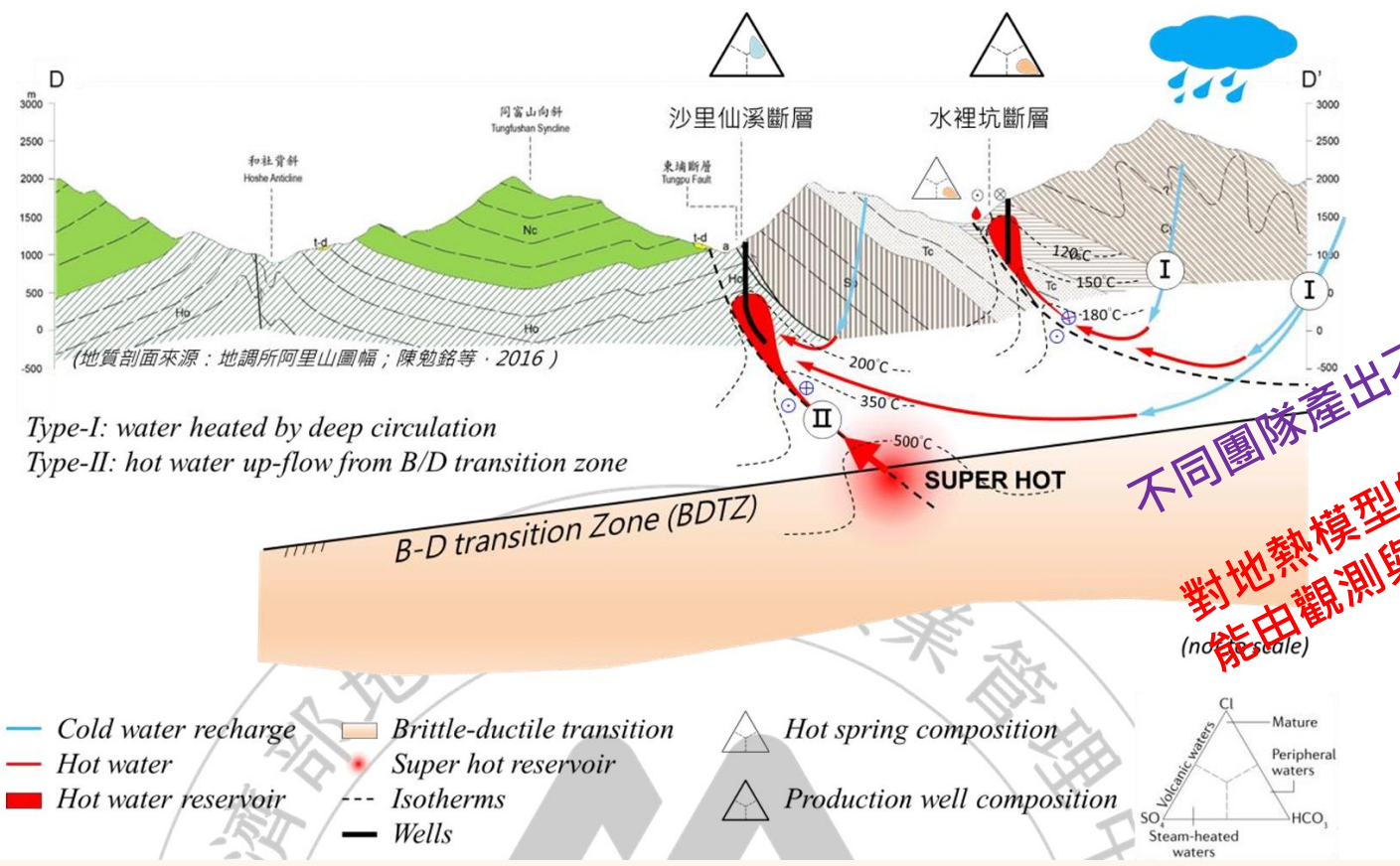


若假設地質模型正確無誤!

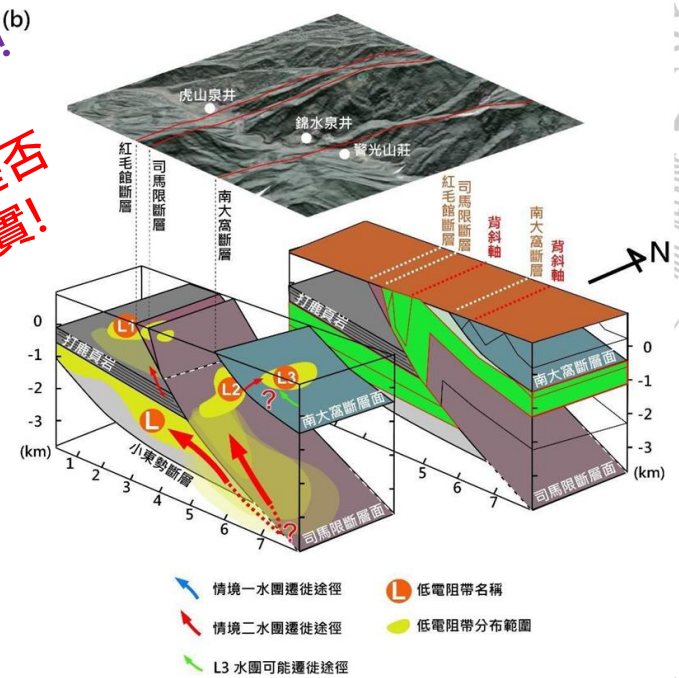
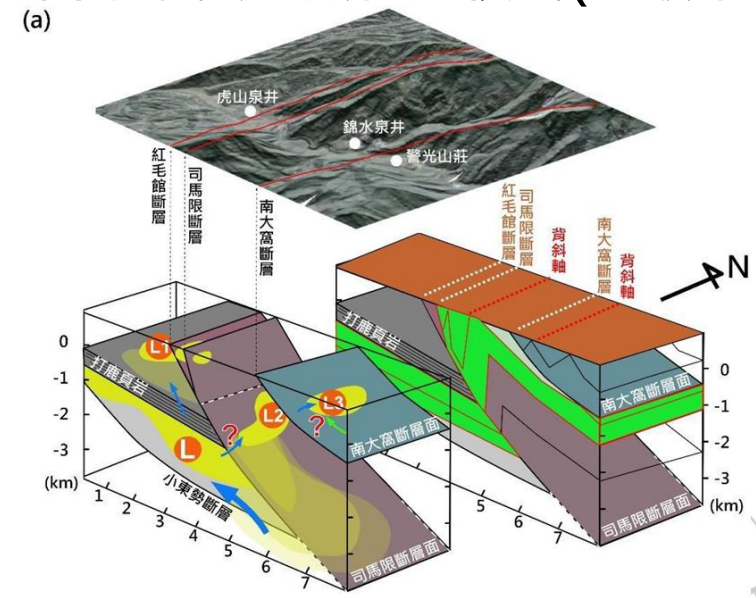
# 淺層地熱地質模型

由地質、地物、地化領域解釋 (沒水文?)

東埔地區地熱概念模式(地礦中心,2024)



不同團隊產出不同解釋!  
 對地熱模型的解釋是否  
 能由觀測與模式證實!



(本報告內容純係作者個人之觀點，不應引申為本機關之意見)

地礦中心

圖 84：苗栗泰安地區地熱地質模式簡圖  
 Figure 88. Geothermal geological conceptual model of Miaoli Taian area.

# 什麼是概念模式？ What is a Conceptual Model?

- 概念模式是對地下系統的文字與圖形描述，**定義系統的幾何架構、水文地質單元與驅動力**
- 它是數值模型的前驅（ Precursor ）—**概念模式正確，數值模型才有意義**
- 概念模式應明確描述以下要素：
  - 水文地質層序（ Hydrostratigraphic Units ）：含水層、隔水層之空間分佈
  - 流體來源與匯（ Sources & Sinks ）：補注（ Recharge ）、排放（ Discharge ）、注入、採出
  - 地熱或地化驅動力（ Thermal / Geochemical Drivers ）
  - 流動路徑與停留時間（ Flow Paths & Residence Times ）
  - 參數
- 常見錯誤：過度簡化地質複雜性，或**將假設視為已知事實**（ Assumption ≠ Fact ）
- 最佳實務：多個替代概念模式（ Alternative Conceptual Models, ACMs ）並行評估

# 案例 地熱儲集層概念模式差異比較

地點 / Location

冰島 Reykjanes 高溫地熱系統 ( >300°C )

模擬目的 / Objective

評估不同概念模式 ( 均質 vs. 裂隙主導 ) 對熱採出率的預測差異

## 概念模式差異設定

模式 M1  
均質多孔介質

假設等向性滲透率  $k = 10^{-14} \text{ m}^2$   
忽略裂隙網絡

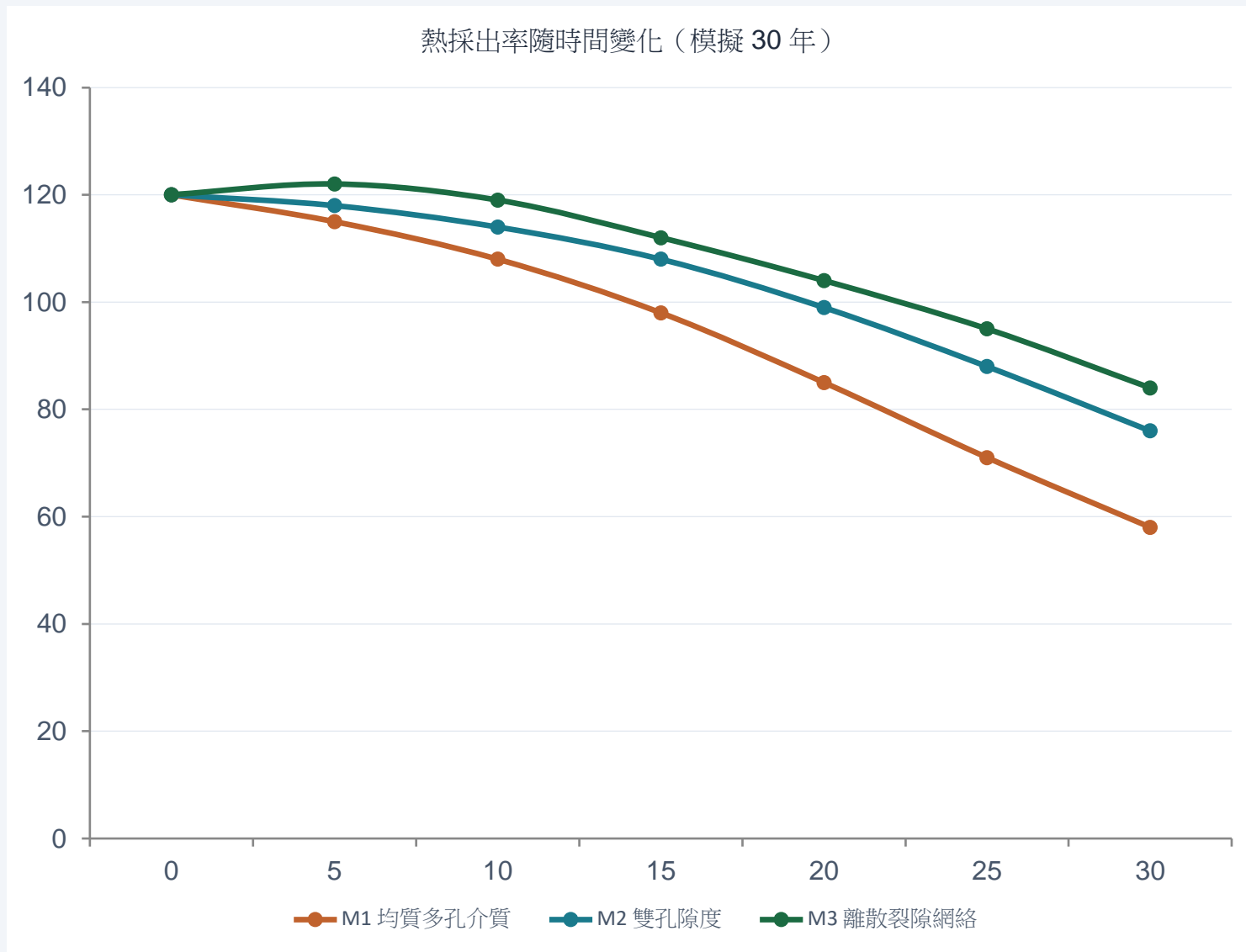
模式 M2  
雙孔隙度模型

基質孔隙 + 裂隙網絡  
裂隙  $k = 10^{-11} \text{ m}^2$  , 交換係數  $\alpha = 0.1$

模式 M3  
離散裂隙網絡

DFN 隨機生成裂隙  
以地震資料約束走向與傾角

# 案例 概念模式差異 → 熱採出率預測結果比較



模式	30年熱採出率 (MWth)	與 M3 差距
M1 均質	58 MWth	-31%
M2 雙孔隙度	76 MWth	-10%
M3 DFN (基準)	84 MWth	基準

概念模式選擇對 30 年預測產生最大  $\pm 31\%$  的差異

建議：進行替代概念模式 (ACM) 分析，以不確定性區間呈報結果

# 邊界條件的種類與水文地質意義

- 第一類邊界 ( Dirichlet / Constant Head or Temperature ) : 指定水頭或溫度
  - 適用 : 與定水位地表水體相連 ; 恆溫底層岩盤
  - 風險 : 刺激源 ( Forcing Source ) 無限制供水 , 可能過高估算流量
- 第二類邊界 ( Neumann / Specified Flux ) : 指定流量或熱通量
  - 適用 : 不透水斷層、隔水基盤 ; 地熱熱通量 ( Basal Heat Flux,  $0.06\text{--}0.12\text{ W/m}^2$  )
  - 風險 : 零流(通)量邊界 ( No-Flow ) 若設置錯誤將人為阻塞流動
- 第三類邊界 ( Cauchy / Mixed / General Head ) : 水頭與流量的線性組合
  - 適用 : 模擬遠場含水層補注 , River Package、Drain Package ( MODFLOW )
- 時間變化邊界 ( Transient BC ) : 降雨補注、潮汐效應、季節性變動或採出
- 常見錯誤 : 選取不當的 BC 類型是模型系統誤差 ( Systematic Error ) 的最大來源之一

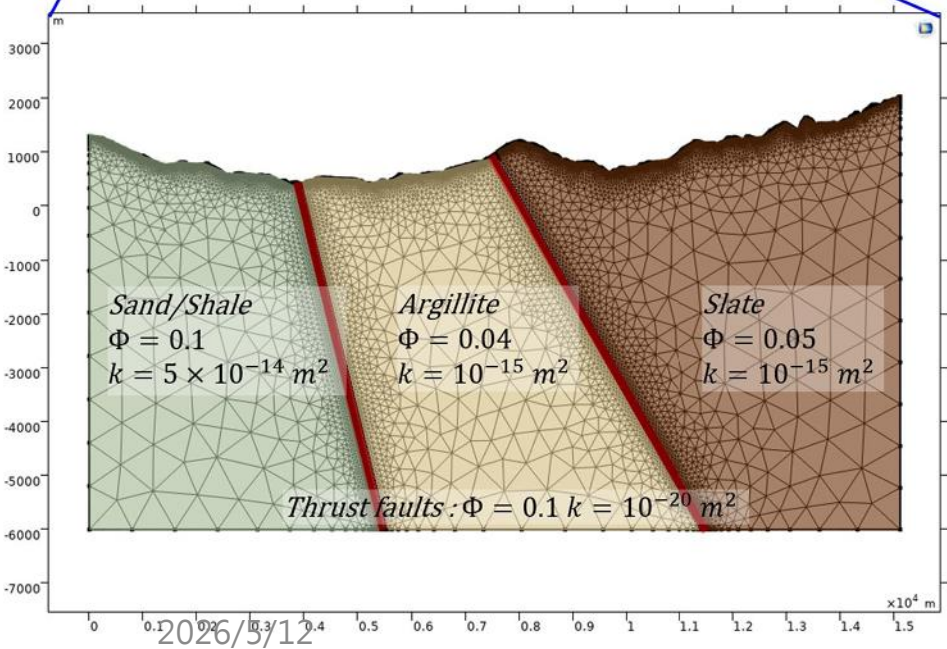


圖 2-58：初步水流場模擬模式

# 邊界條件

\*\*由觀測資料，設定合理的地表及地下水文地質邊界

為何

1. 此 2D 剖面選擇
  2. 水流方向(邊界與水源)
  3. 熱(邊界與熱源)
- ...

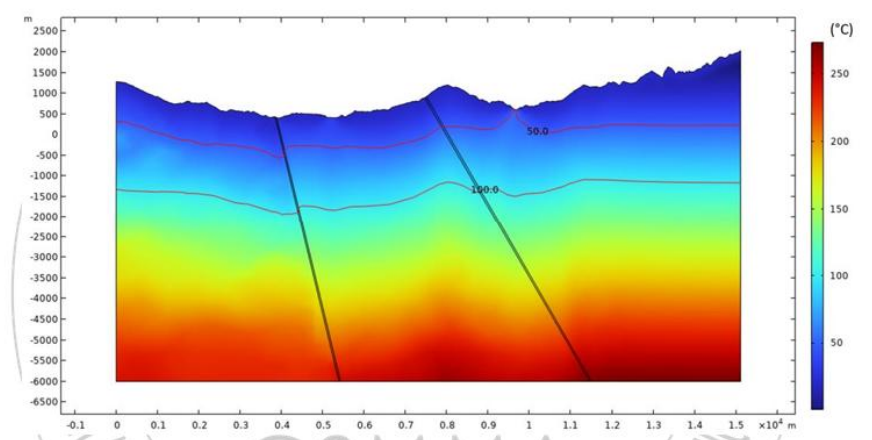
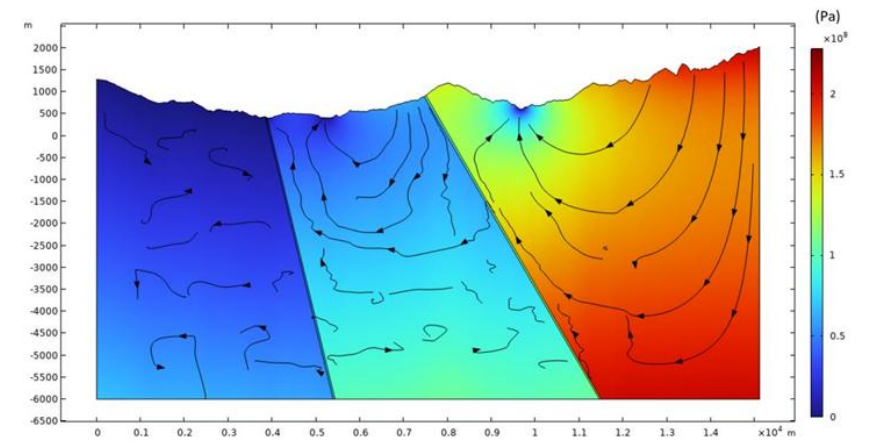


圖 2-59：初步水流場溫度壓力模擬結果  
Figure 2-59: Preliminary modeling results of pressure and temperature field

說明：此模式中地層劃分為3個地質單元：西側沉積岩類、中段樟山層硬頁岩、東側樟山層板岩；潮州斷層及美瓏山斷層均設定為阻水逆斷層。入滲量依水利局建議理論公式假設為 800 mm/yr。河流部分設定為流出處（低水頭）。西側邊界因資料不足，僅假設為靜水壓，東側因相對最高點可假設為分水嶺（對稱邊界），底部則為無流邊界。此模式之熱流，邊界上方溫度設定為 20°C，西側邊界設定地溫梯度 30°C/Km，東側則設定為 35°C/Km。

# 案例 CO<sub>2</sub> 傳輸模擬：邊界條件敏感度

地點 / Location

澳洲 Otway CO<sub>2</sub>CRC 試驗場址 ( Naylor 砂岩儲集層 )

模擬目的 / Objective

比較不同頂部邊界條件對注入後 20 年 CO<sub>2</sub> 傳輸半徑的影響

**BC-1**  
封閉頂部  
( No-flow Cap )

CO<sub>2</sub> 團塊側向擴散  
超壓累積顯著  
 $\Delta P = 4.2 \text{ MPa @ } 20\text{yr}$

**BC-2**  
定壓頂部  
( Constant Pressure )

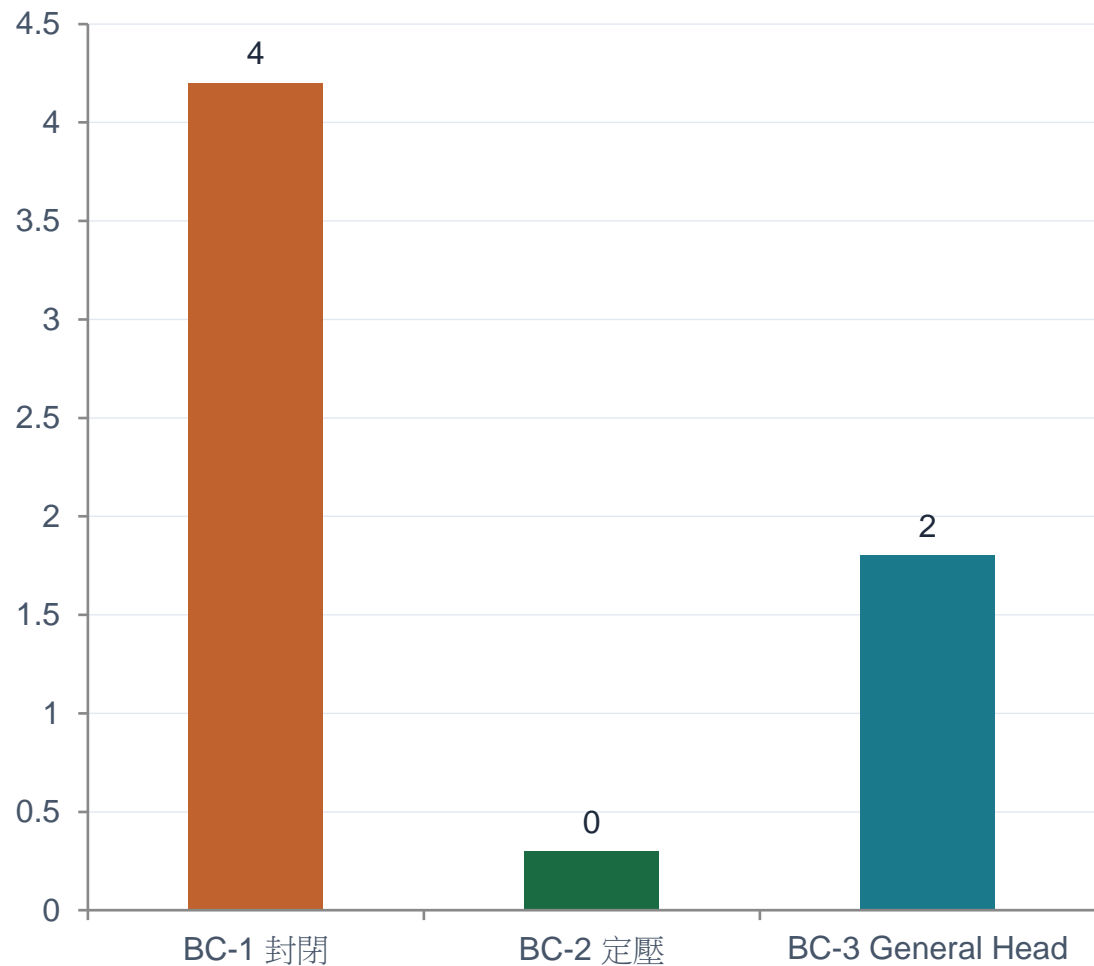
超壓快速消散  
垂直遷移加速  
風險低估溢出

**BC-3**  
General Head  
( 等效含水層連結 )

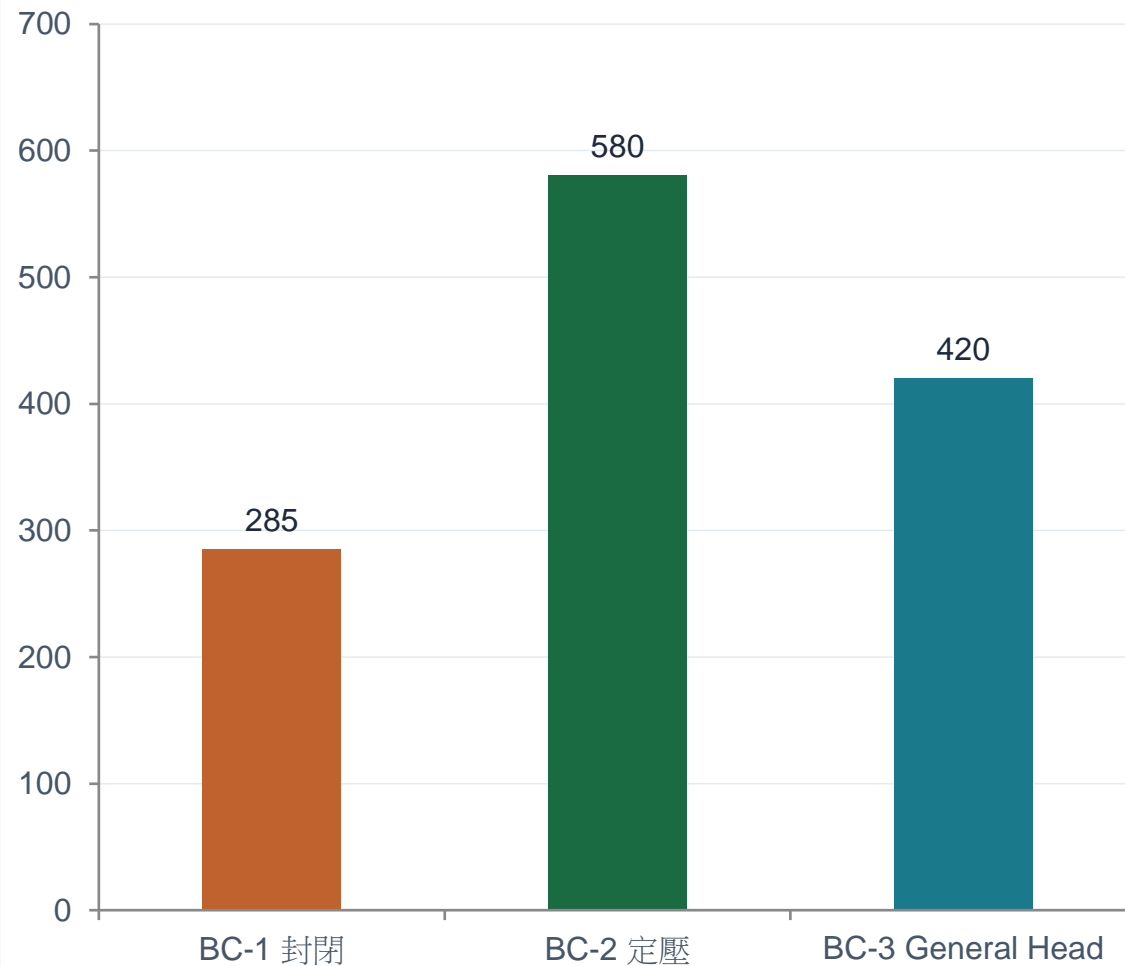
最接近現地觀測  
超壓  $\Delta P = 1.8 \text{ MPa}$   
羽流半徑 420 m

# 案例 邊界條件差異 → CO<sub>2</sub> 超壓與傳輸半徑預測比較

注入 20 年後儲集層超壓 (MPa)



注入 20 年後 CO<sub>2</sub> 團塊半徑 (m)



# 模式結果驗證並修正地熱模型

兩個不同模式的條件差異為何？

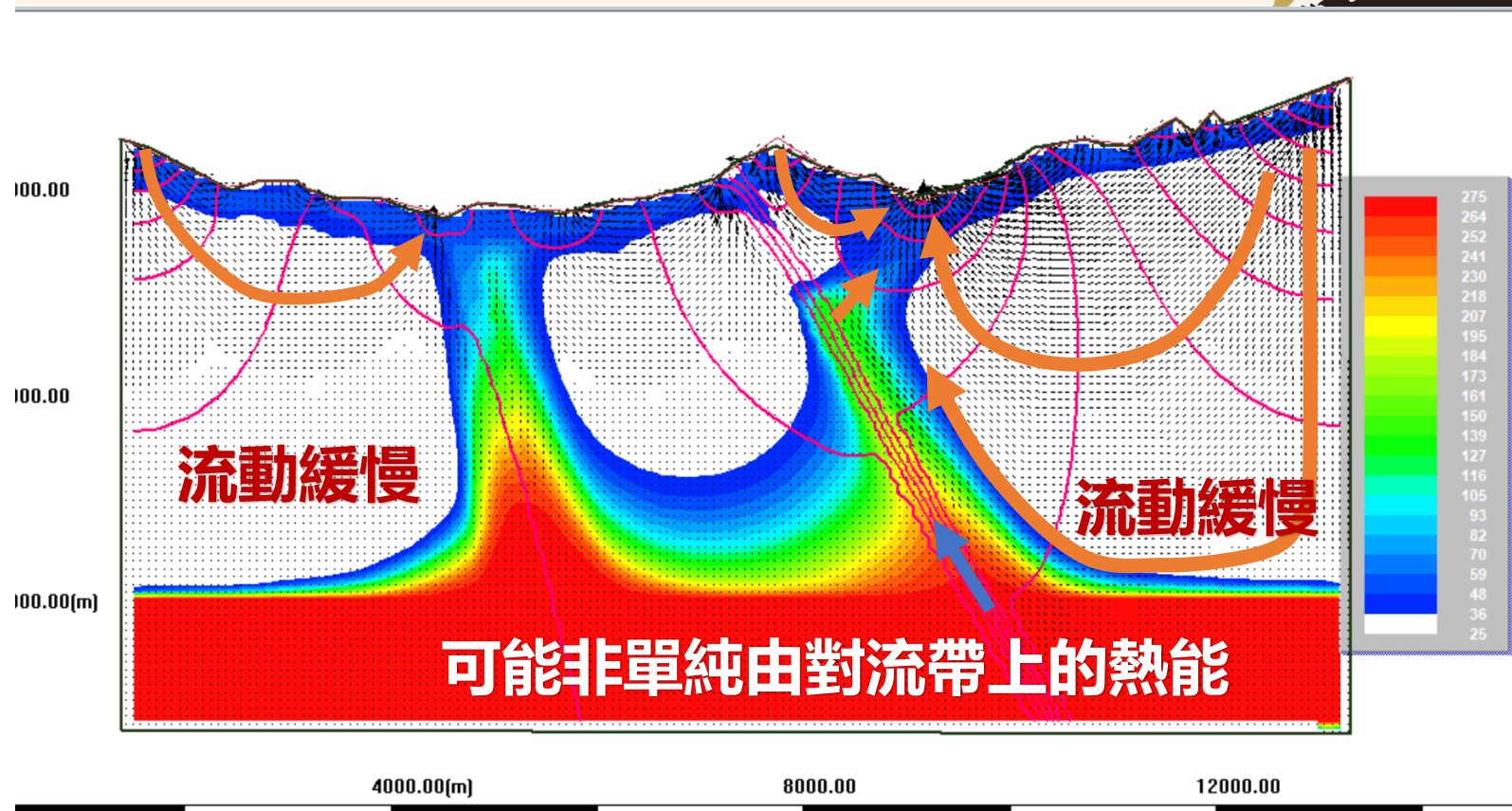
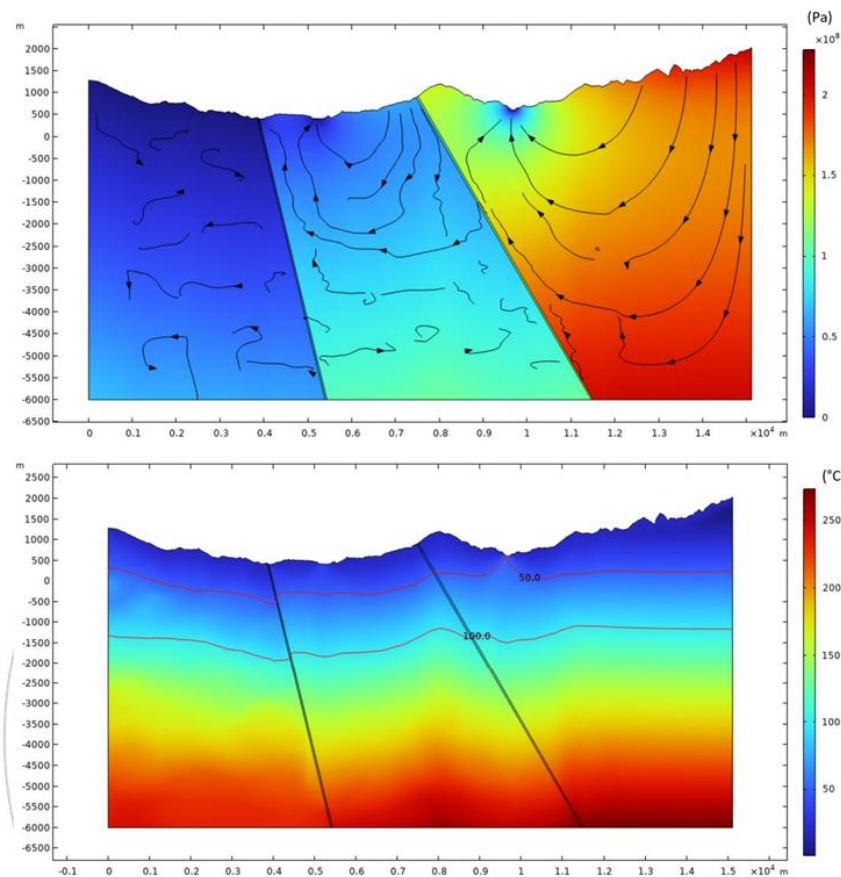


圖 2-59：初步水流場溫度壓力模擬結果

Figure 2-59: Preliminary modeling results of pressure and temperature field

2026/5/12

- **BC 距離原則**：模型邊界應距主要擾動源（注入井、採出井） $\geq 5$ 倍影響半徑，以降低邊界效應
- **敏感度測試**：對 BC 類型與參數值進行系統性測試（至少 3 種情境）
  - 例：頂部 Cap Rock 的滲透率從  $10^{-20}$  到  $10^{-17} \text{ m}^2$  的效應評估
- **以現地觀測約束 BC**：利用水位計、光纖溫度（DTS）、InSAR 地表形變校正邊界條件
- **遠場補注不確定性**：以機率分佈（Probabilistic BC）取代單一確定值
- **避免「方便性邊界（Convenience BC）」**：不可因計算方便而選取不符地質意義的 BC
- **文件化邊界條件選擇理由**：監管機構要求模型文件需說明 BC 選取依據（IEAGHG 指引）

# 主要數值方法比較 Comparison of Numerical Methods

方法	全名	主要優點	主要限制	適用情境
FDM	有限差分法 Finite Difference	簡單、計算快、 MODFLOW 採用	需規則格網、複雜地 質表現差	區域尺度地下水流、 初步評估
FEM	有限元素法 Finite Element	適應不規則幾何、地 質邊界精確	計算量大、格網生成 複雜	裂隙岩盤、複雜地形
FVM	有限體積法 Finite Volume	保守性 ( Conservation ) 好、TOUGH2 採用	高階精度實作較難	多相流、CO <sub>2</sub> 注入、地 熱模擬
BEM	邊界元素法 Boundary Element	降維計算、適合均質 半無限域	非線性、非均質難處 理	解析驗證、簡單滲流 問題
DFN	離散裂隙網絡 Discrete Fracture Network	明確模擬裂隙幾何	計算量龐大、裂隙參 數難取得	結晶岩地熱、裂隙岩 盤 CO <sub>2</sub>

# 案例 數值方法選擇對地熱雙井系統溫度預測的影響

地點 / Location

台灣東部變質岩地熱區 ( 仁澤地熱系統 , 裂隙主導 )

模擬目的 / Objective

比較 FDM、FEM、FVM 在複雜裂隙場域中的溫度前緣 ( Thermal Breakthrough ) 預測差異

## MODFLOW-USG

( FDM 適應格網 )

規則化格網

裂隙以等效多孔介質處理

計算時間 : 2.1 hrs

## FEFLOW

( FEM 三角格網 )

貼合裂隙幾何

格網沿裂隙細化

計算時間 : 8.4 hrs

## TOUGH2-EOS1

( FVM 非結構格網 )

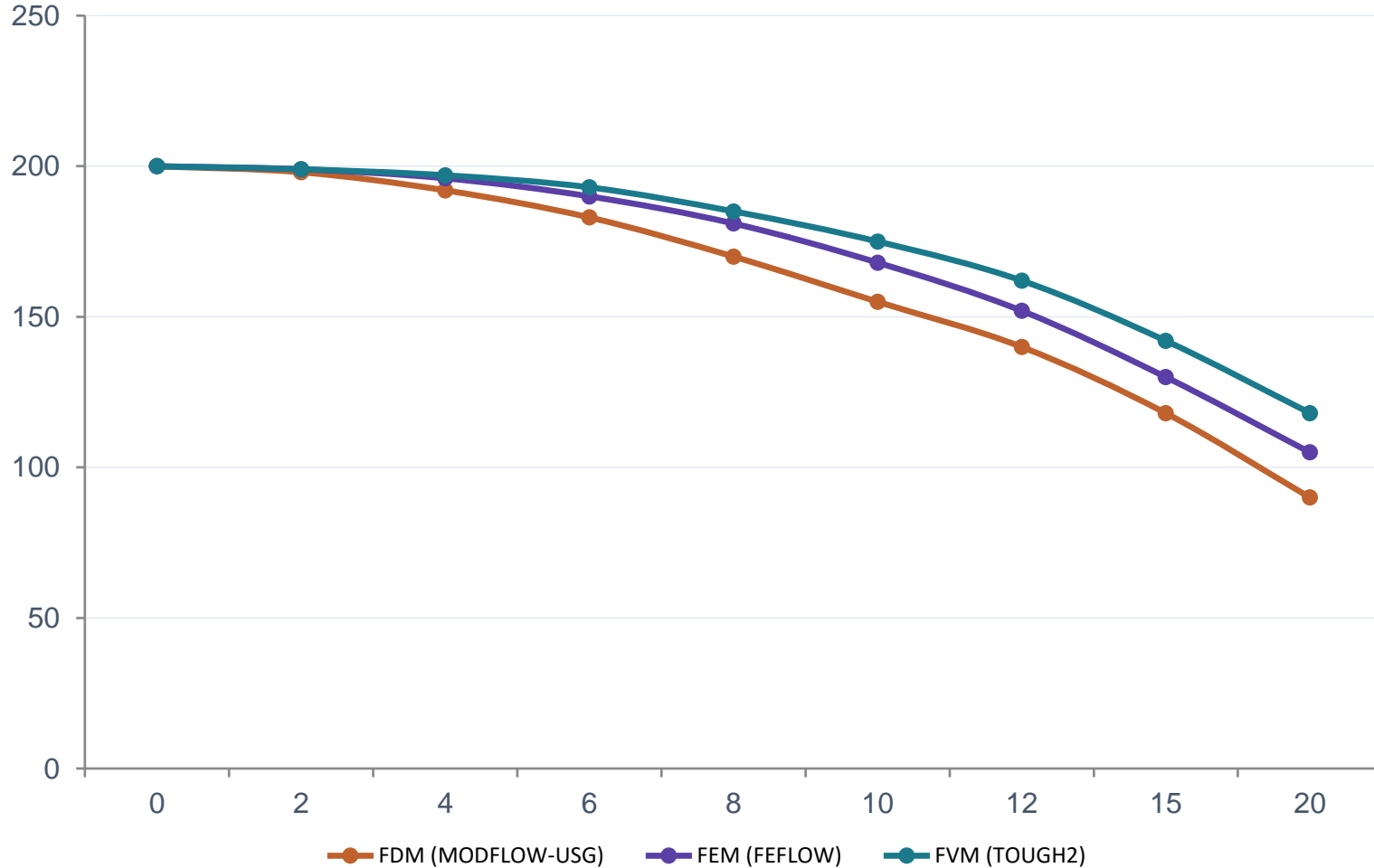
積分有限差分 ( IFD )

多相熱流體全耦合

計算時間 : 11.2 hrs

# 案例 數值方法差異 → 熱突破時間 ( Thermal Breakthrough ) 比較

雙井地熱系統採出溫度隨時間下降 ( 回注溫度 60°C )



方法	20年採出溫度	計算時間
FDM	90°C	2.1 hr
FEM	105°C	8.4 hr
FVM	118°C	11.2 hr

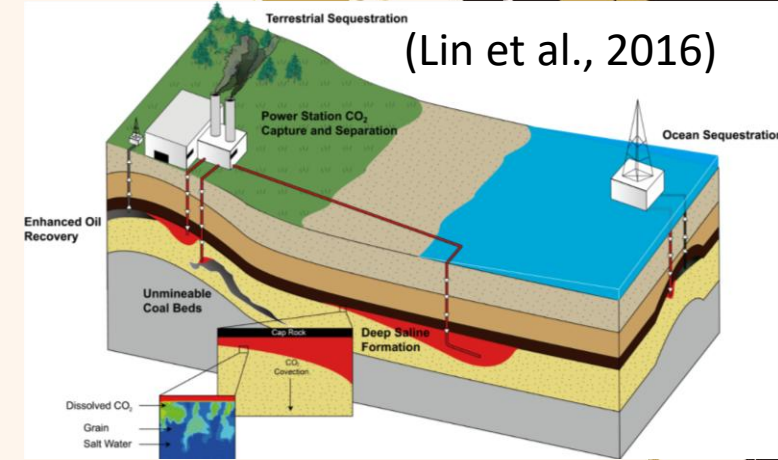
裂隙主導系統中，FDM 等效多孔介質假設導致熱突破預測偏早 28°C ( 過度保守 )  
→ 可能低估地熱開發效益 15–20%

# 模式選用指引 Simulator Selection Guide

- 地下水流模擬（飽和帶）：MODFLOW 6、FEFLOW、TOUGH2
  - MODFLOW 6：美國 USGS 開源、FDM、最廣泛用於區域地下水管理
  - FEFLOW：商業 FEM、適合複雜地質與密度驅動流
- 多相熱流體模擬（地熱 / CO<sub>2</sub>）：TOUGH2/TOUGH+ 系列、OpenGeoSys、ECLIPSE
  - TOUGH2-EOS7：CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-NaCl 三相流，支援碳封存標準情境
  - TOUGH2-EOS1：地熱雙相（蒸汽-液態水）系統標準選擇
  - OpenGeoSys：開源 FEM，支援熱-水-力-化（THMC）全耦合
- 全耦合 THMC 模擬（地表形變、誘發地震評估）：FLAC3D+TOUGH
  - 誘發地震風險評估需考慮孔隙彈性（Poroelasticity）與斷層應力分析
- 軟體選擇原則：計畫需求 > 個人熟悉度 > 計算效率

# 網格、數值收斂條件

- 所有數值方法都是數學方程式的近似解!
- 網格化的解 vs. 數學式的真解



$$S \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathbf{K} \nabla h) + q$$

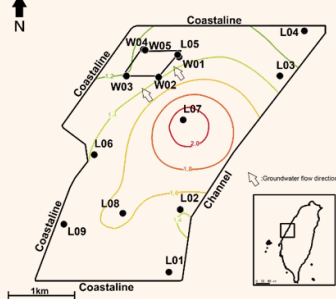
$$\frac{\partial(\theta C^k)}{\partial t} = \nabla \cdot (\theta \mathbf{D} \cdot \nabla C^k) - \nabla \cdot (\mathbf{V} C^k) + q_s C_s^k + \sum_{n=1}^N R_n$$

Physical system  
真實系統

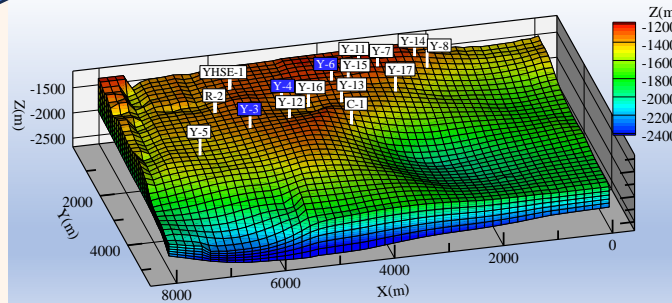
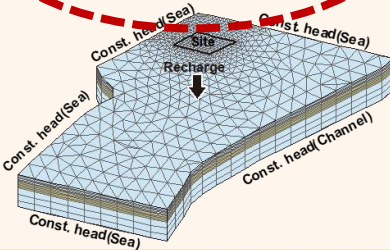


A model is a  
simplification of  
reality (assumptions)

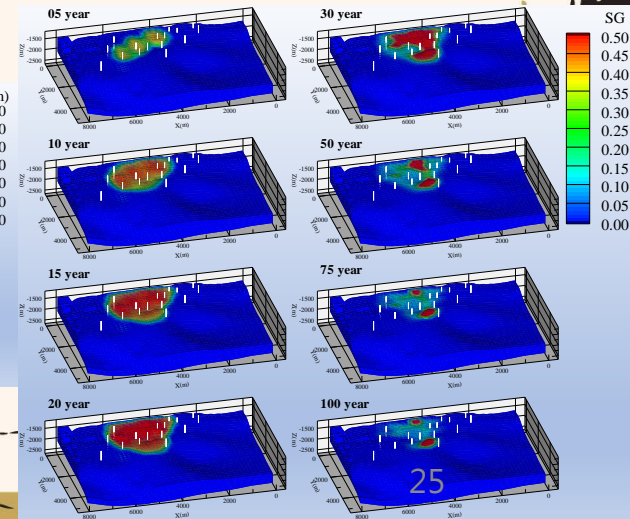
Conceptual model  
概念模式



Mathematical model  
數學模式

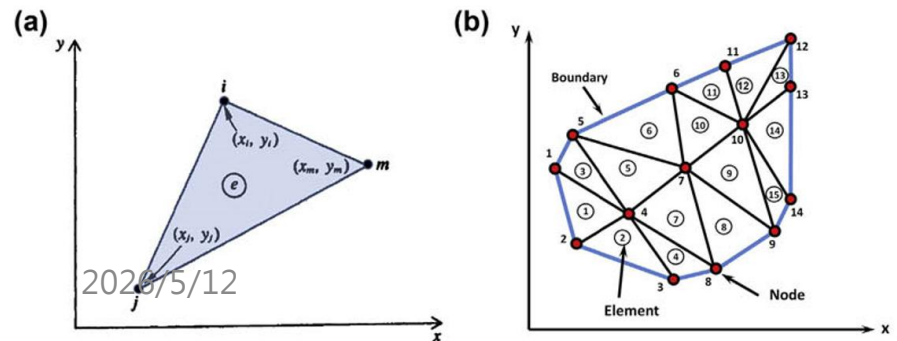
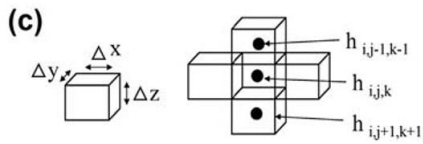
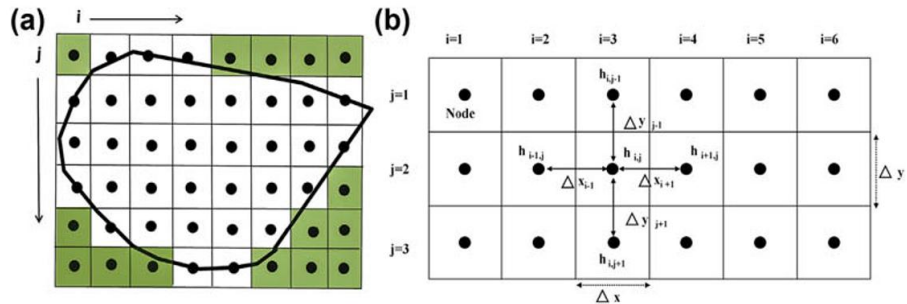


(Ni et al., 2016) ECO2N



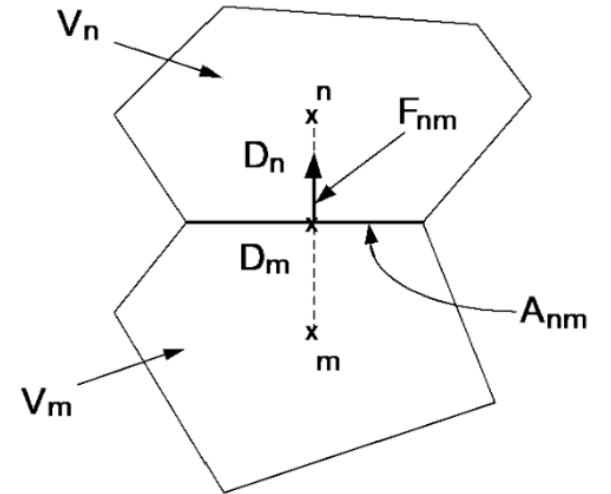
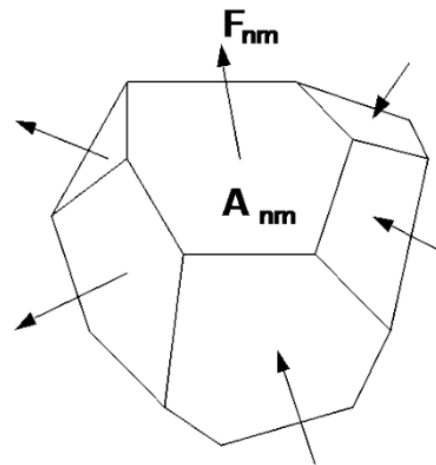
# 網格、數值收斂條件

- 原則：時間、空間尺寸切割精細越好 → 越接近數學方程式
- 有限差分、有限元素、有限體積、積分有限差分



$$\frac{d}{dt} \int M^\kappa dV_n = \int \mathbf{F}^\kappa \cdot \mathbf{n} d\Gamma_n + \int q^\kappa dV_n$$

TOUGH 系列模式  
積分有限差分

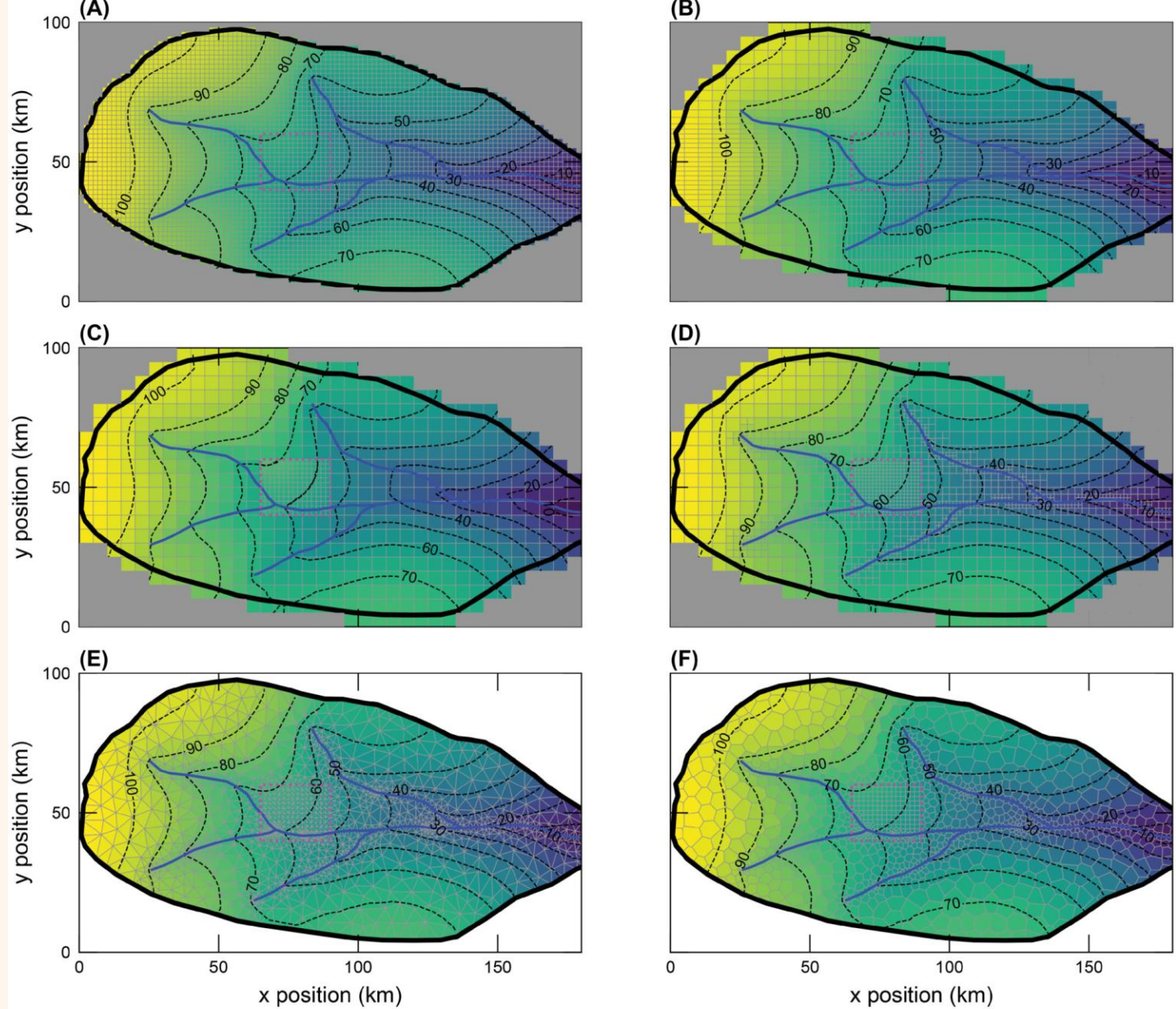
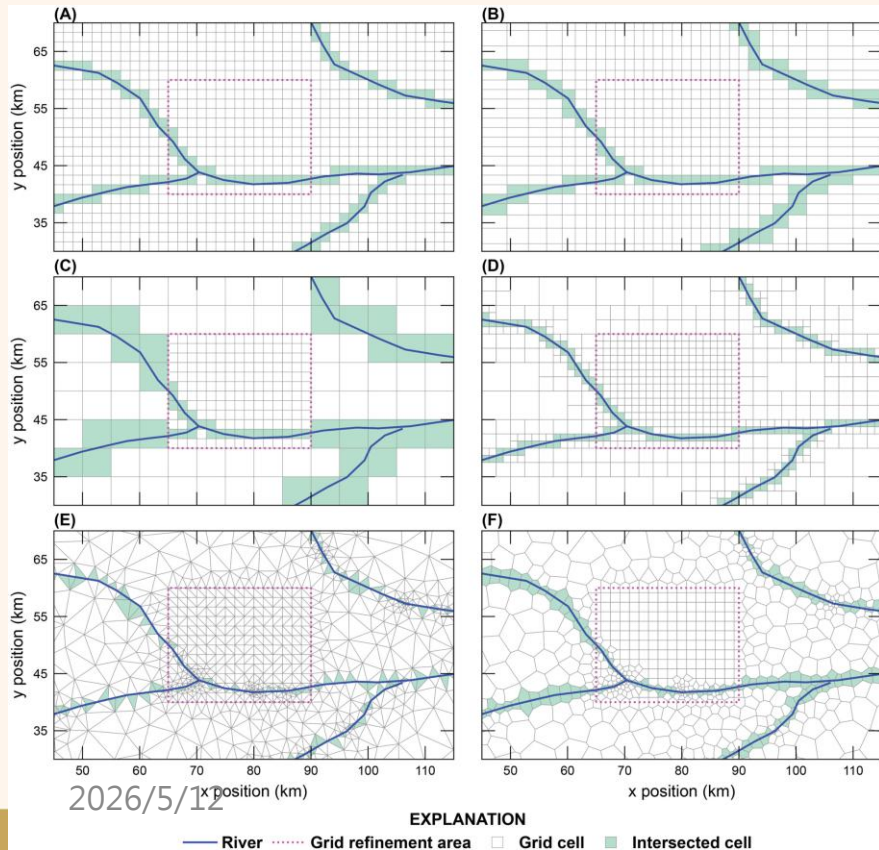


(Wang and Anderson, 1986)

# 不同類型網格

(重要概念：無特定最佳選擇)

- 模式應進行網格收斂性測試 (亦即：兼顧正確性與效率)



(Hughes et al., 2023)

# 格網類型與設計原則 Grid Types & Design Principles

## 結構化格網 ( Structured Grid )

- 規則矩形格網 ( Cartesian Grid ) : MODFLOW 傳統格網，設置最簡單
- 柱形格網 ( Cylindrical / Radial Grid ) : 適合單井抽水模擬，隨距離對數增大
- 缺點：無法精確表達斜交地質邊界與複雜地形
- 適用：區域尺度初步評估、計算資源受限情況

## 非結構化格網 ( Unstructured Grid )

- 三角格網 ( Triangular Mesh ) : 貼合地質界面、斷層、海岸線
- Voronoi 多邊形格網 ( MODFLOW 6 DISU ) : 保持正交性、FVM 精度優
- 局部格網加密 ( Local Grid Refinement, LGR ) : 井附近細化，遠場粗化
- 適用：複雜地質、多井干擾、精確地表形態表達

# 格網尺寸設計準則 Grid Resolution Criteria

區域	建議格網尺寸	依據	注意事項
井附近 ( $r < 10 \text{ m}$ )	0.5–2 m	Peaceman 公式：最小格網 $\geq 2 \times r_w$	格寬比 $< 1:10$ 避免數值誤差
團塊擴散區 ( 10–500 m )	5–50 m	Péclet 數 $Pe = v\Delta x/D \leq 2$	Courant 數與時間間距聯合控制
近場模型 ( 500m–5km )	50–200 m	關注區域解析度需求	LGR 或局部加密過渡帶
遠場邊界區 ( $>5 \text{ km}$ )	200–1000 m	邊界效應最小化	對數外延格寬常見
垂直分層 ( 蓋岩 )	0.5–5 m	浮力驅動流之數值擴散控制	薄蓋岩分 3–5 層以上
垂直分層 ( 儲集層 )	2–20 m	壓力傳播 vs. 密度分層解析	最小 5 層保障垂向解析

# 案例 網格解析度對 CO<sub>2</sub> 傳輸模擬的影響

地點 / Location

挪威北海 Sleipner CO<sub>2</sub> 注入場址 ( Utsira 砂岩儲集層 )

模擬目的 / Objective

比較粗、中、細三種網格在 CO<sub>2</sub> 團塊垂向分佈與側向擴散的模擬差異

## 粗格網

$\Delta x=500\text{m}, \Delta z=10\text{m}$

格點數：12,600

計算時間：0.3 hr

團塊寬高比：2.1

薄層堆疊結構未呈現

## 中格網

$\Delta x=100\text{m}, \Delta z=3\text{m}$

格點數：315,000

計算時間：4.2 hr

團塊寬高比：3.8

可見主要堆疊層 ( 3層 )

## 細格網

$\Delta x=25\text{m}, \Delta z=0.5\text{m}$

格點數：8.1×10<sup>6</sup>

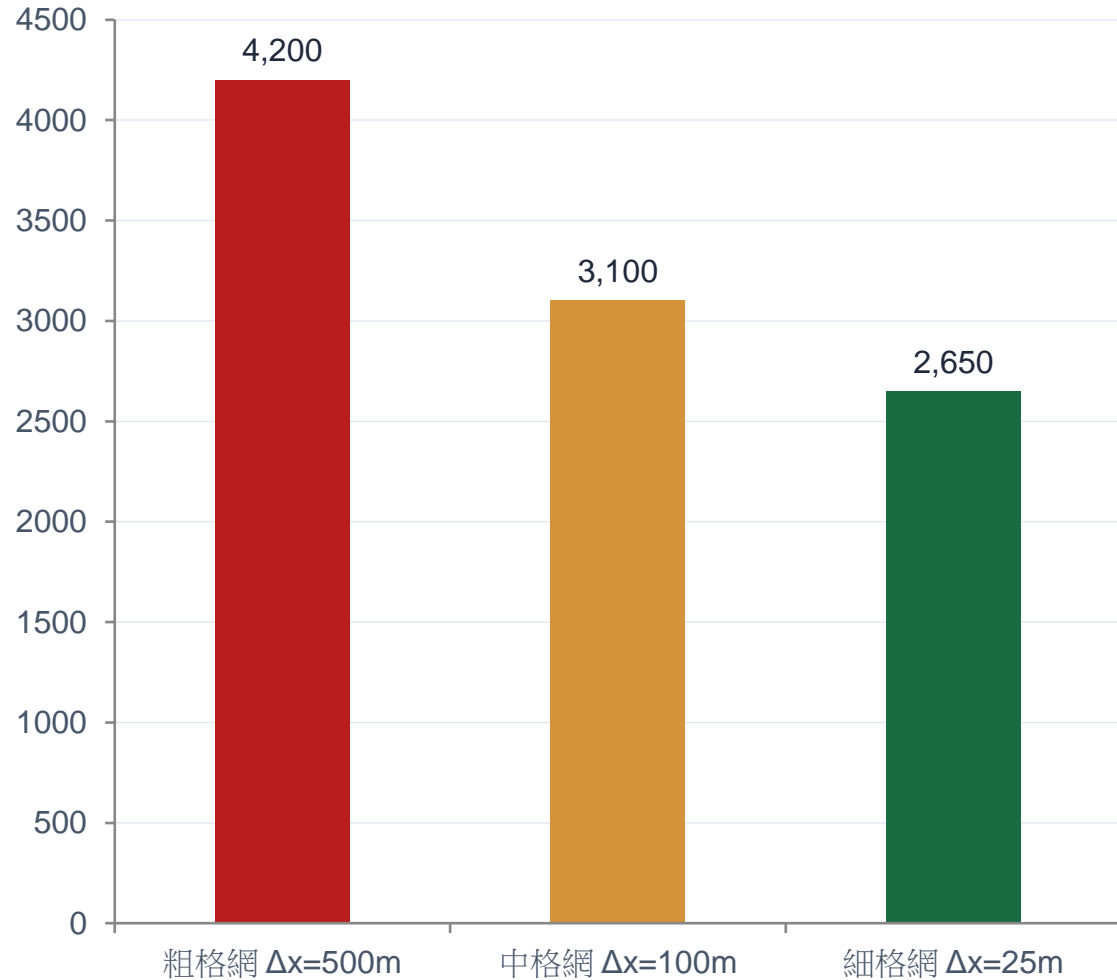
計算時間：62 hr

團塊寬高比：5.2

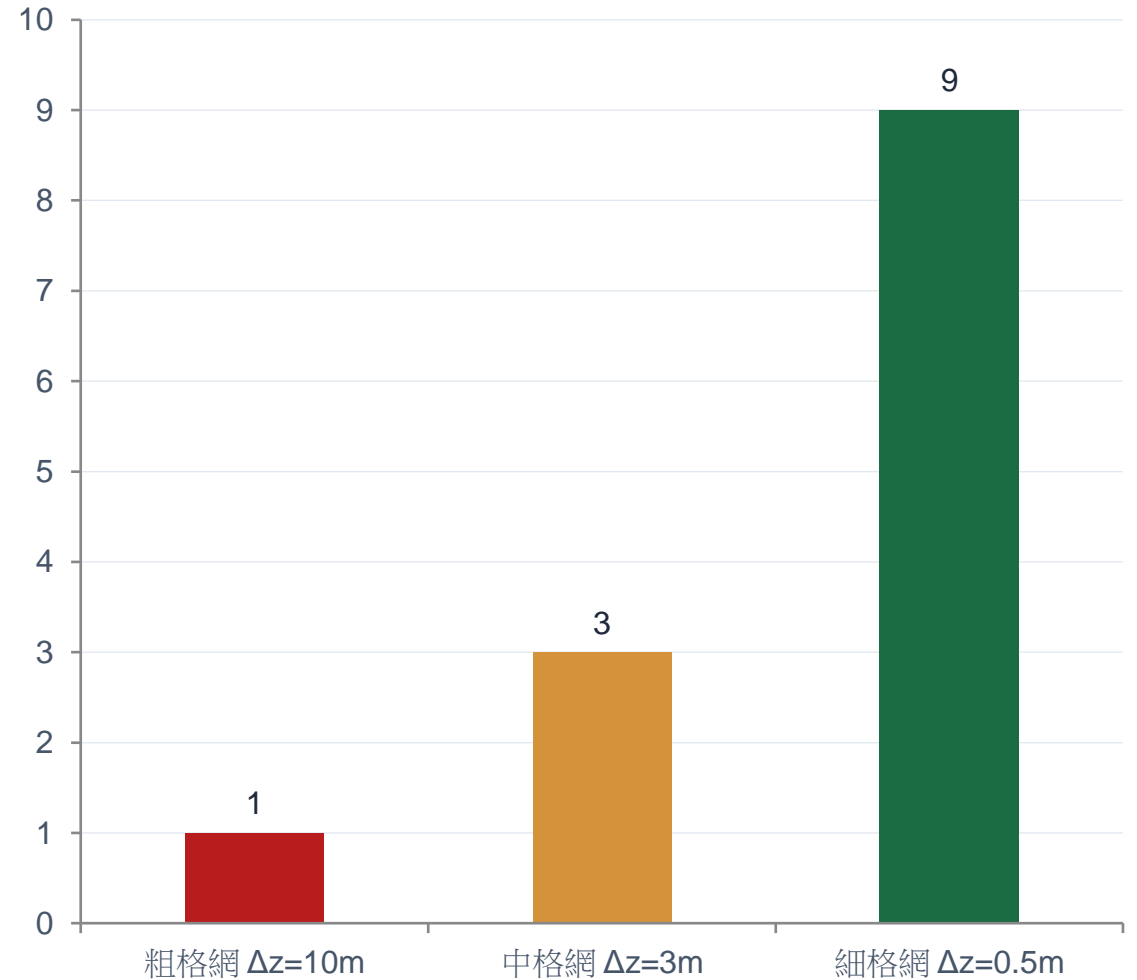
薄泥岩阻擋效應明顯

# 案例 網格解析度差異 → CO<sub>2</sub> 橫向團塊半徑與垂向分層比較

CO<sub>2</sub> 橫向擴散半徑 (粗格網造成數值擴散 +58%)



識別 CO<sub>2</sub> 薄層堆疊層數 (細格網接近實際 9 層)



# 數值擴散 ( Numerical Dispersion ) : 格網過粗的效應

- 定義：因格網尺寸過大，人工引入的等效延散係數，使濃度/溫度前緣人為展平
- 格網 Péclet 數準則： $Pe = v \cdot \Delta x / D \leq 2$  ( 對流-擴散問題的格網穩定準則 )
  - 若  $Pe > 2$ ，數值擴散超過物理擴散，模擬結果可靠性存疑
  - 實務中以  $Pe < 4$  作為容許上限，同時配合高階數值格式補償
- 在 CO<sub>2</sub> 模擬中的意涵：
  - 數值擴散使 CO<sub>2</sub> 前緣過於分散 → 高估殘餘封存 ( Residual Trapping )
  - 高估 CO<sub>2</sub> 團塊半徑 → 高估對鄰近含水層的壓力影響範圍
- 在地熱模擬中的意涵：
  - 熱突破 ( Thermal Breakthrough ) 預測偏早 → 低估地熱發電年限，商業評估失準
- 解決方案：**格網加密 + 高階對流格式 ( TVD 、 QUICK ) + 局部格網加密 ( LGR )**

# 時間間距的基本概念與穩定性準則

- 顯式法 ( Explicit, Forward Euler ) : 穩定性受 Courant 數嚴格約束
  - Courant 數  $Cr = v \cdot \Delta t / \Delta x \leq 1$  ( 否則數值振盪、發散 )
  - 步長受最細格網與最大流速限制，通常極小，地下儲集層問題不常用
- 隱式法 ( Implicit, Backward Euler ) : 無條件穩定，為地下儲集層模擬主流
  - MODFLOW、TOUGH2、FEFLOW 均採隱式時間積分格式
  - 時間步長可選擇較大，但精度為一階 ( 截斷誤差  $O(\Delta t)$  )
- Crank-Nicolson 格式 : 二階精度 (  $O(\Delta t^2)$  )、無條件穩定，適合擴散主導問題
- 自適應時間步長 ( Adaptive Time-stepping ) : 根據非線性收斂情況自動縮放步長
  - TOUGH2 採用 DELTEX 自動步長策略，MODFLOW 6 支援 STO package 動態步長
- 相態轉換 ( Flash Point ) 附近需特別細化 : 蒸汽-液體相態邊界處非線性最強
- 強刺激源引入的初始模擬階段

# 案例 時間間距對地熱注入壓力響應預測的影響

地點 / Location

紐西蘭 Wairakei 地熱田 ( 液態主導雙相水熱系統 )

模擬目的 / Objective

比較  $\Delta t = 1$ 天、1月、6月、1年 四種時間間距對注入後壓力與溫度動態的預測差異

$\Delta t = 1$  天  
( 細步長 )

步數 : 7,300 步  
計算時間 : 18.5 hr  
精確捕捉瞬時壓力  
相態轉換模擬正確

$\Delta t = 1$  月  
( 中步長 )

步數 : 240 步  
計算時間 : 2.1 hr  
月尺度動態可靠  
短暫超壓峰值略遺漏

$\Delta t = 6$  月  
( 粗步長 )

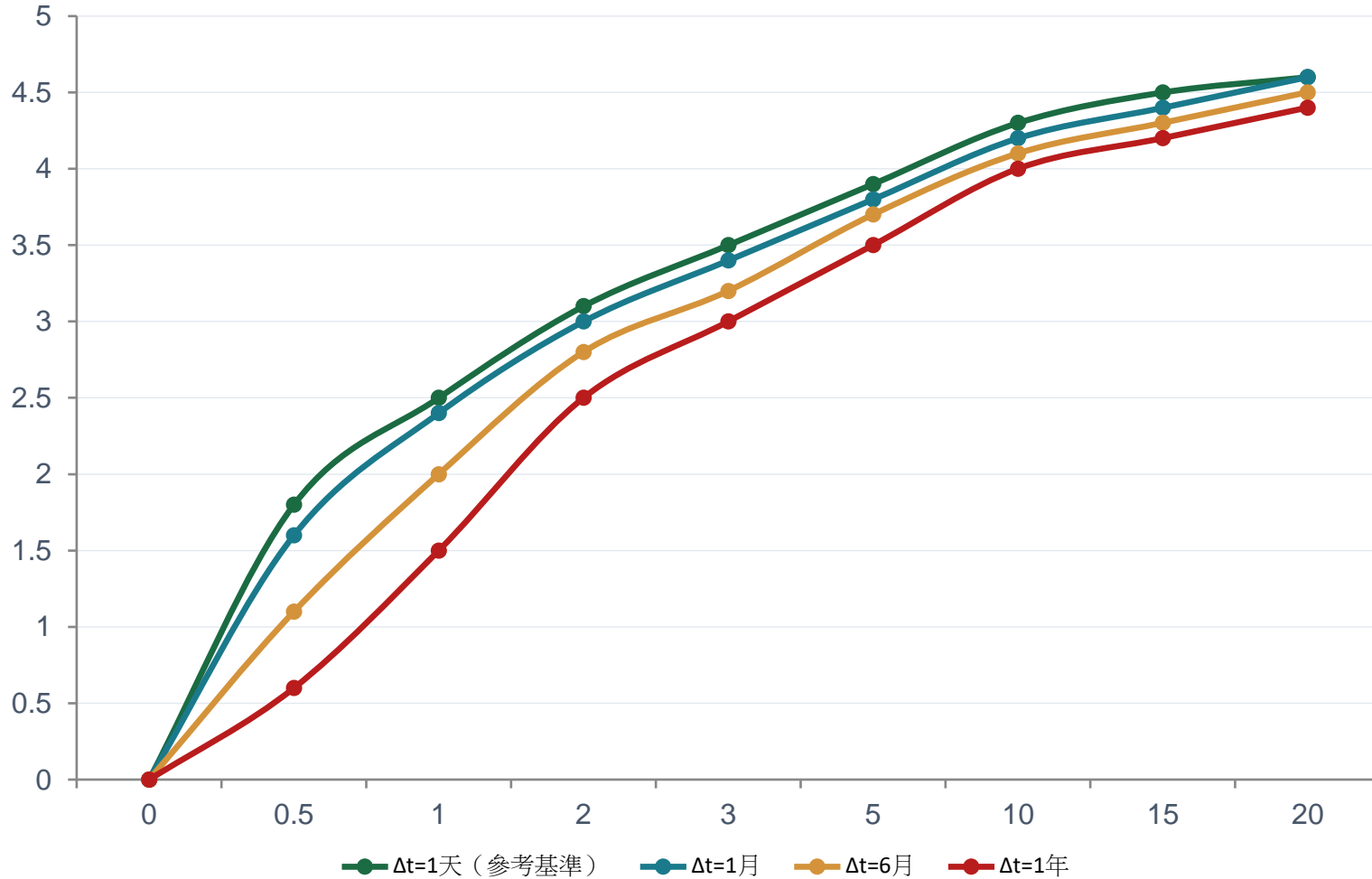
步數 : 40 步  
計算時間 : 0.5 hr  
季節訊號喪失  
溫度前緣高估  $18^{\circ}\text{C}$

$\Delta t = 1$  年  
( 極粗步長 )

步數 : 20 步  
計算時間 : 0.2 hr  
嚴重低估瞬時效應  
僅適合長期趨勢評估

# 案例 時間間距差異 → 注入壓力累積誤差隨時間演進

不同時間間距下的注入壓力動態 (以  $\Delta t=1$ 天為參考)



$\Delta t$	誤差@1年	誤差@5年
1月	4%	2%
6月	20%	5%
1年	40%	10%

建議：注入啟動後前 2 年，採  $\Delta t \leq 1$ 月；  
長期 (>5年)  
趨勢分析可放寬至 6月

→ 自適應步長 (Adaptive  $\Delta t$ )  
可兼顧精度與效率

# 自適應時間步長策略 Adaptive Time-stepping Protocol

- 1 注入啟動前：穩態 ( Steady-State ) 模擬建立初始壓力與溫度基準場
- 2 啟動後 0–30 天： $\Delta t = 1 \text{ hr} \rightarrow 1 \text{ 天}$  ( 捕捉瞬時超壓峰值，監測潛在斷層活化訊號 )
- 3 30 天–1 年： $\Delta t = 1 \text{ 天} \rightarrow 1 \text{ 週}$  ( 壓力傳播前緣推進，相態轉換帶監測 )
- 4 1–5 年： $\Delta t = 1 \text{ 週} \rightarrow 1 \text{ 月}$  ( 溫度前緣、 $\text{CO}_2$  團塊側向擴散，季節效應 )
- 5 5–20 年： $\Delta t = 1 \text{ 月} \rightarrow 3 \text{ 月}$  ( 長期儲存效能與壓力耗散趨勢 )
- 6 20–100 年： $\Delta t = 6 \text{ 月} \rightarrow 1 \text{ 年}$  ( 監管要求之長期安全性評估，MRV 報告週期 )

# 模擬決策敏感度矩陣 Simulation Decision Sensitivity Matrix

模型決策項目	低敏感情境	高敏感情境	最大結果差異	對策
概念模式	均質砂岩儲集層	裂隙主導岩盤	±31% 熱採出率	多 ACM 並行評估
頂部邊界條件	定壓 ( 開放 )	封閉 ( No-flow )	團塊半徑差 2倍	General Head BC
儲集層滲透率	P50 中值	P10 悲觀值	注入壓差 $\Delta P$ 差 15 MPa	P10 作安全基準
數值方法	FDM 等效多孔	FEM/FVM/ DFN裂隙	熱突破差 28°C	配合概念模式選擇
橫向格網尺寸	$\Delta x = 500 \text{ m}$	$\Delta x = 25 \text{ m}$	團塊半徑差 +58%	Pe 數準則設計
垂向格網分層	$\Delta z = 10 \text{ m}$	$\Delta z = 0.5 \text{ m}$	識別堆疊層數差 9 倍	蓋岩至少 3-5 層
時間間距	$\Delta t = 1 \text{ 年}$	$\Delta t = 1 \text{ 天}$	短期壓力誤差達 40%	自適應步長策略

# 案例 綜合案例：台灣深層鹽水層 CO<sub>2</sub> 封存可行性模擬

## 地點 / Location

台灣西部麻豆海盆深層砂岩儲集層 ( 深度 ~2,000 m , 厚度 ~150 m )

## 模擬目的 / Objective

整合概念模式、BC、參數不確定性、FVM 方法、格網設計與時間步長進行全流程情境分析

## 模擬軟體

TOUGH2-ECO2N ( CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-NaCl 三相流 )

## 格網設計

橫向  $\Delta x=50\text{m}$  ( 近場 )  $\rightarrow 500\text{m}$  ( 遠場 )  
垂向  $\Delta z=2\text{m}$  ( 蓋岩 )  $\rightarrow 10\text{m}$  ( 儲集層 )

## 時間策略

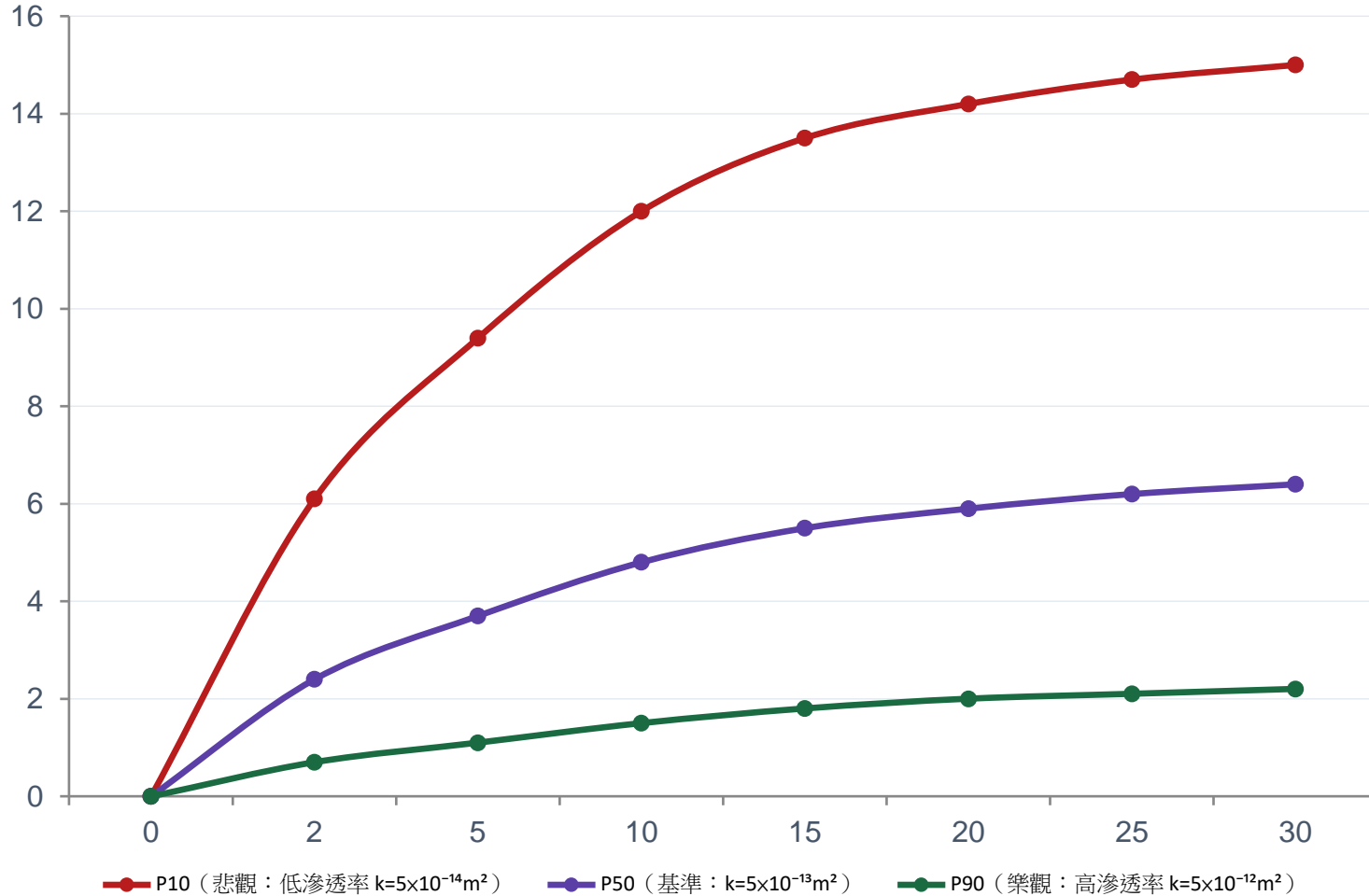
自適應：1hr ( 啟動前30天 )  $\rightarrow$  1年 ( 30年後 )

## 邊界條件

頂部：蓋岩 General Head ( 等效滲透率  $10^{-20} \text{ m}^2$  )  
側向：定水頭 ( 遠場含水層 )

# 案例 台灣 CO<sub>2</sub> 封存模擬 — 注入壓力與團塊半徑情境比較

注入速率 0.5 Mt/yr · 30 年期間不同滲透率情境



## 模擬關鍵結論

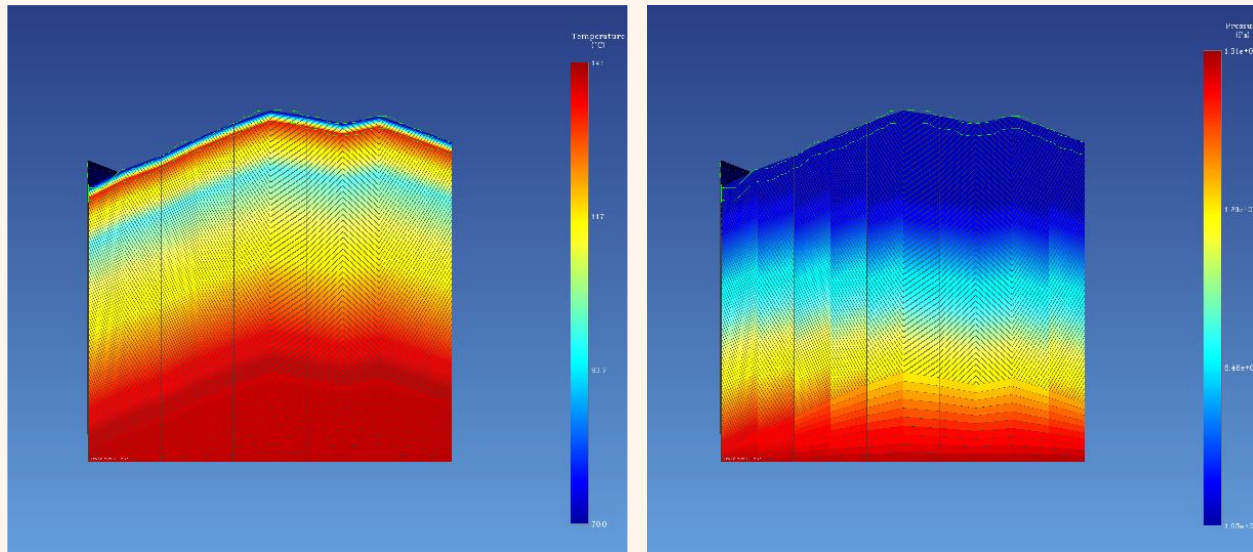
- P10 情境：30年後  $\Delta P=15$  MPa，超過砂岩蓋岩毛細入口壓力（估計約 8–12 MPa）→ 洩漏風險
- P50 情境： $\Delta P=6.4$  MPa，在安全範圍內，團塊半徑約 3.8 km
- P90 情境： $\Delta P=2.2$  MPa，壓力衰減快，團塊半徑約 6.2 km（需評估側向遷移）
- 結論：以 P10 作為注入壓力設計上限，限制注入速率避免  $\Delta P > 8$  MPa
- 監測建議：部署井下壓力計 + InSAR 地表形變監測

# 模型驗證 ( Verification ) 與確認 ( Validation ) 的差異

- Verification ( 驗證 ) : **確認「模型解決方程式是否正確 ( Solving the equations right ) 」**
  - 以解析解 ( Analytical Solution ) 或基準測試 ( Benchmark Test ) 比較數值解
  - 代表性標竿 : TOUGH2 vs. Buckley-Leverett 解析解 ; MODFLOW vs. Theis 公式
- Validation ( 確認 ) : **確認「模型是否解決了正確的問題 ( Solving the right equations ) 」**
  - 以獨立現地觀測資料 ( 非校準期資料 ) 驗證預測能力
  - 注意 : 校準良好的模型不代表預測正確 , 需使用預測期資料驗證
- History Matching ( 歷史配合 ) : 以注入前後壓力、溫度、CO<sub>2</sub> 飽和度配合模型參數
  - Sleipner 案例 : 以地震探勘 ( 4D Seismic ) 團塊形態作為比較目標
- 不確定性量化 ( UQ ) 報告 : 以 P10/P50/P90 呈報關鍵指標 , 不以單一確定值呈報

# 率定與驗證

- 率定模式參數 (與觀測資料擬合)
- 自然條件下觀測的壓力、變形、溫度、
- 人為干擾條件下的觀測

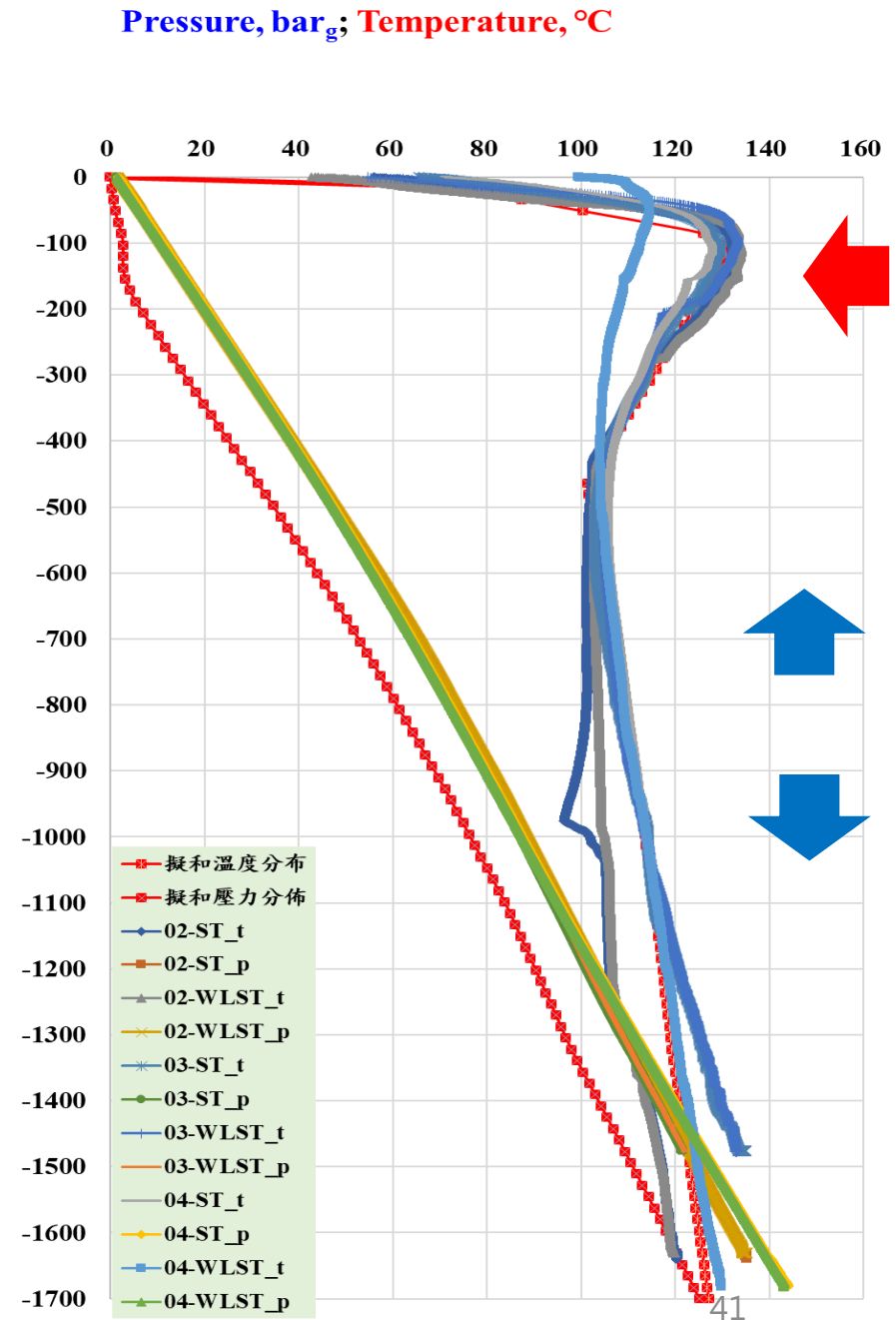


2026/5/12

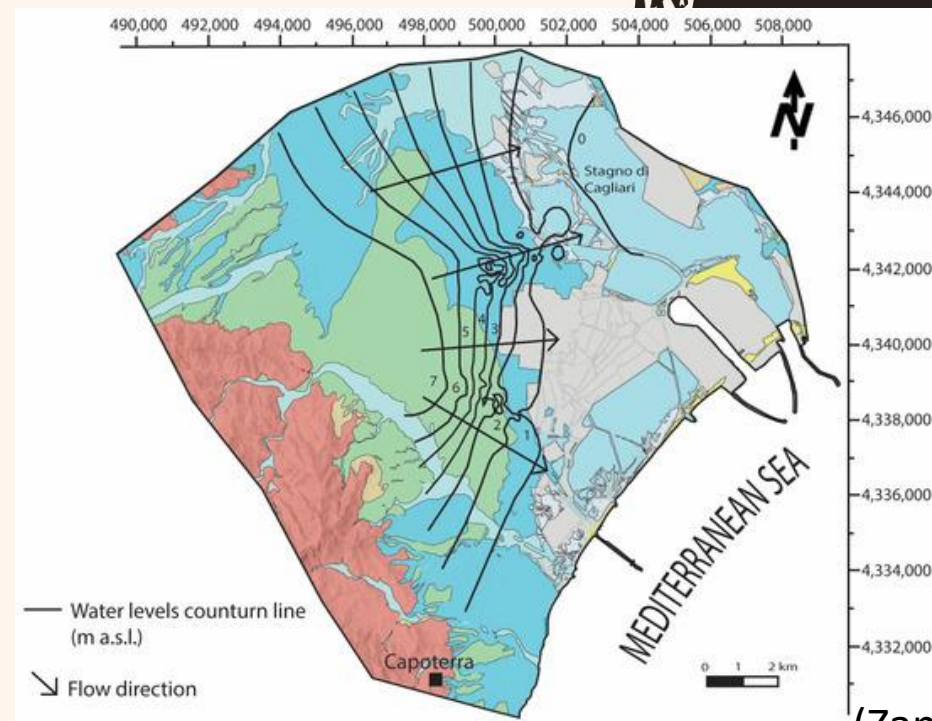
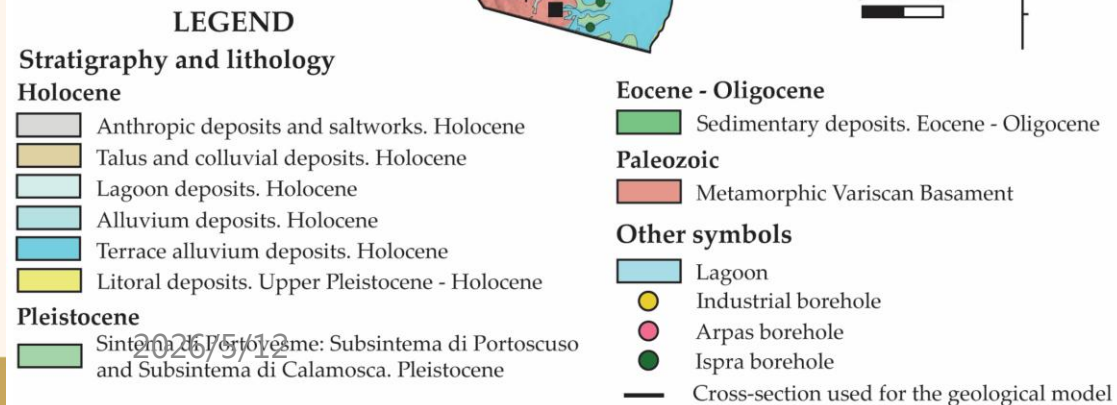
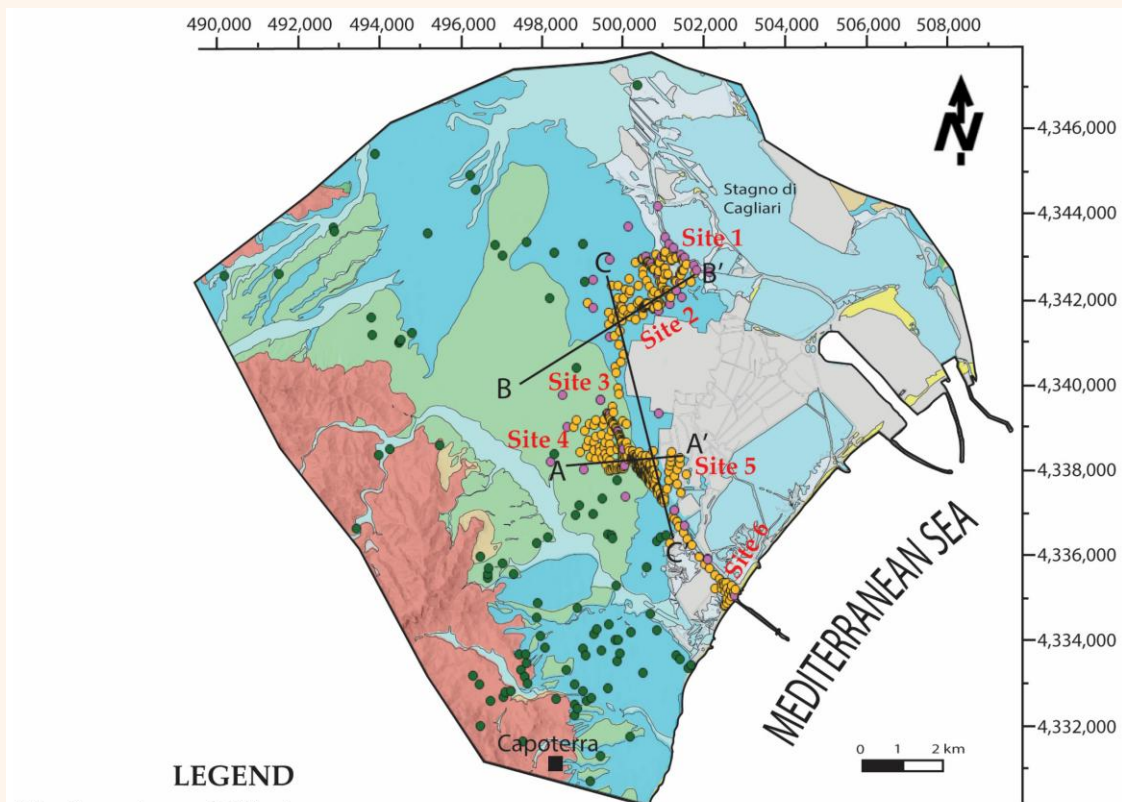
(a)

(b)

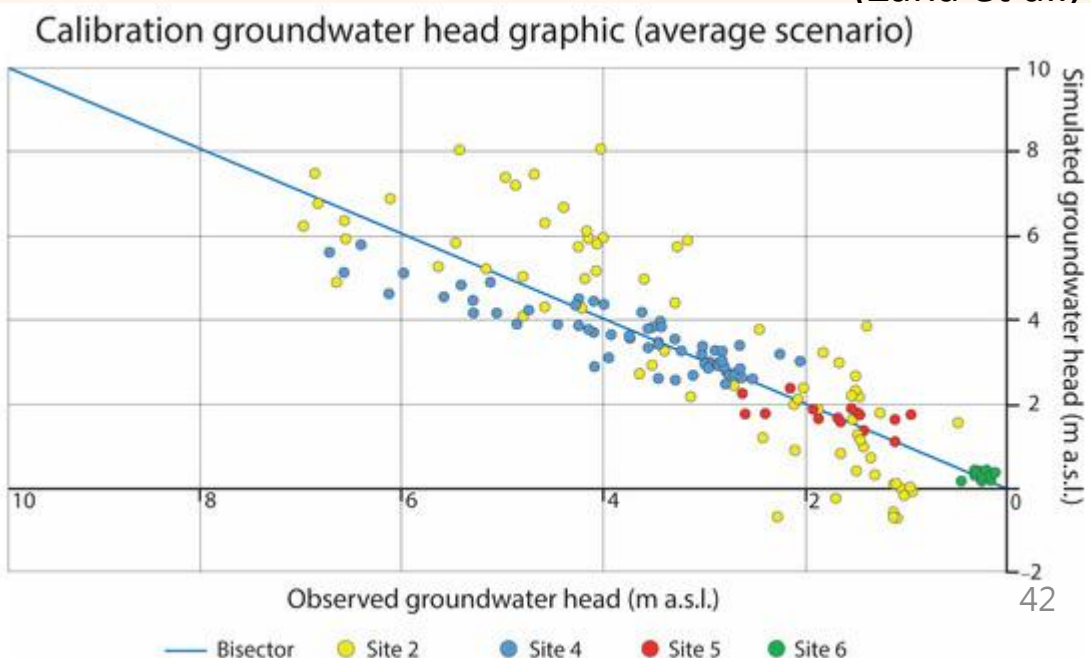
Depth, m



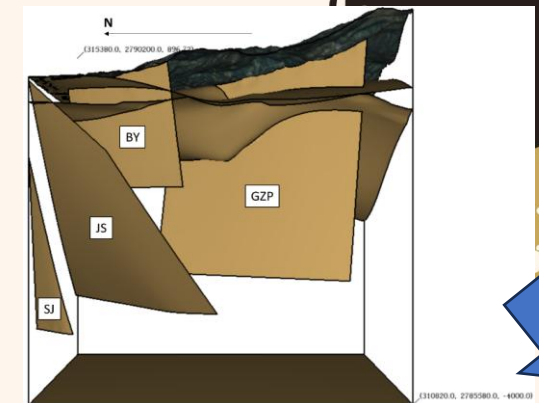
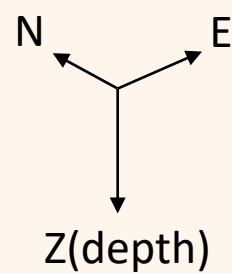
# 率定與驗證



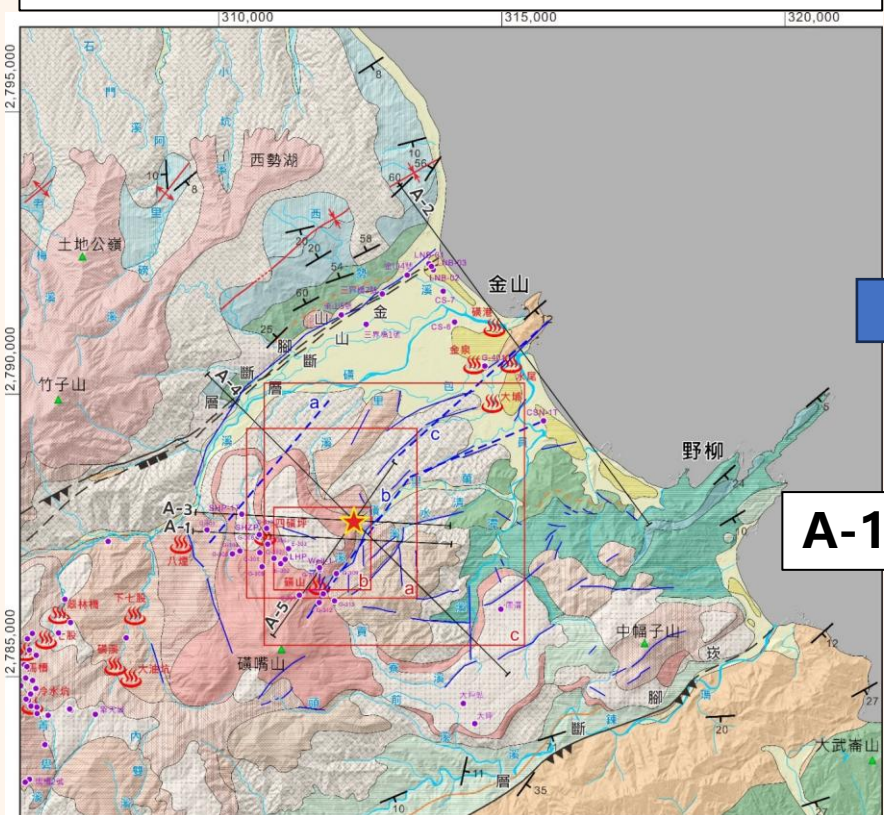
(Zana et al., 2025)



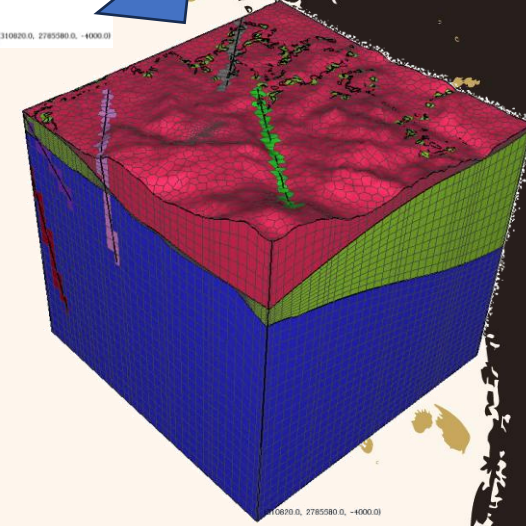
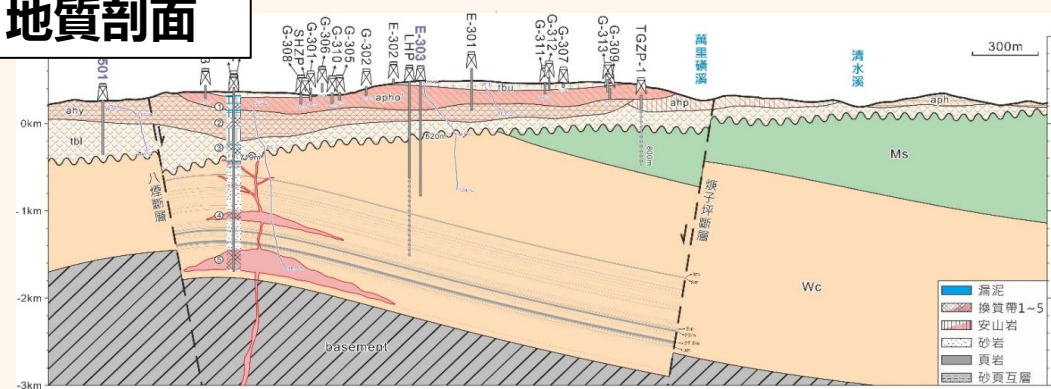
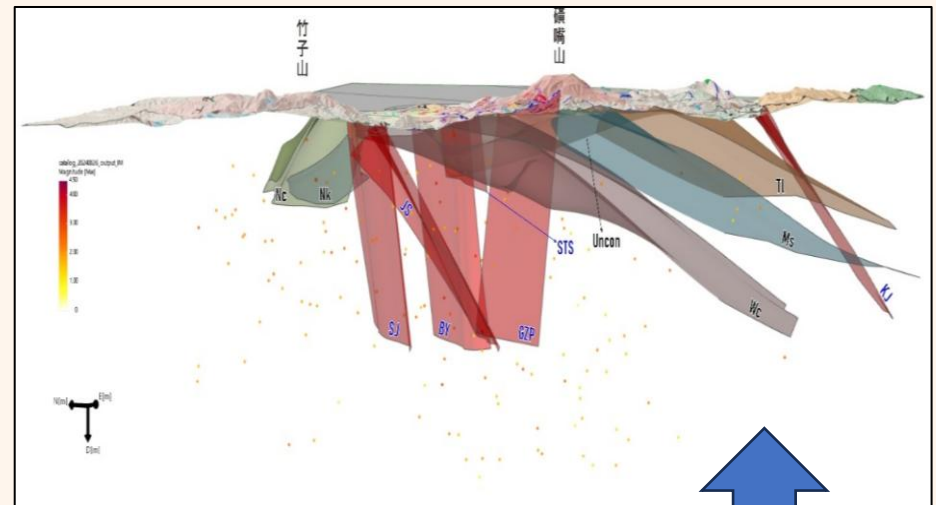
# 應用案例



大屯火山東北側及鄰近地區區域地質圖

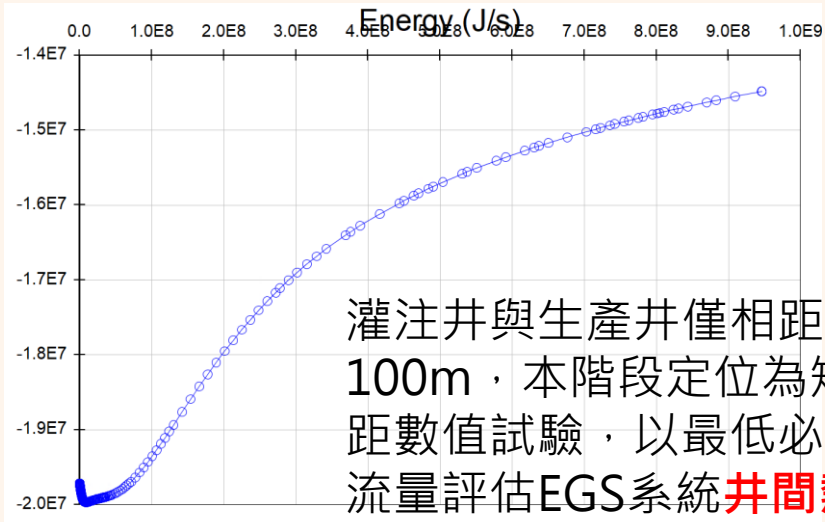


A-1地質剖面

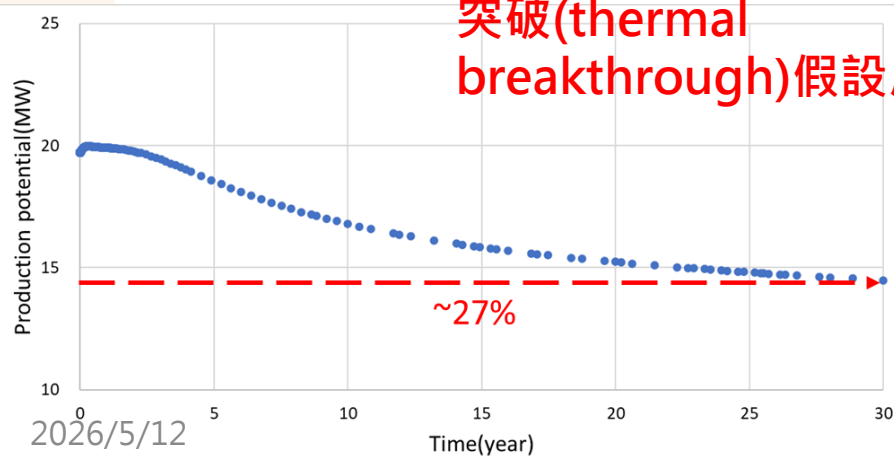


# 應用案例

- 生產井

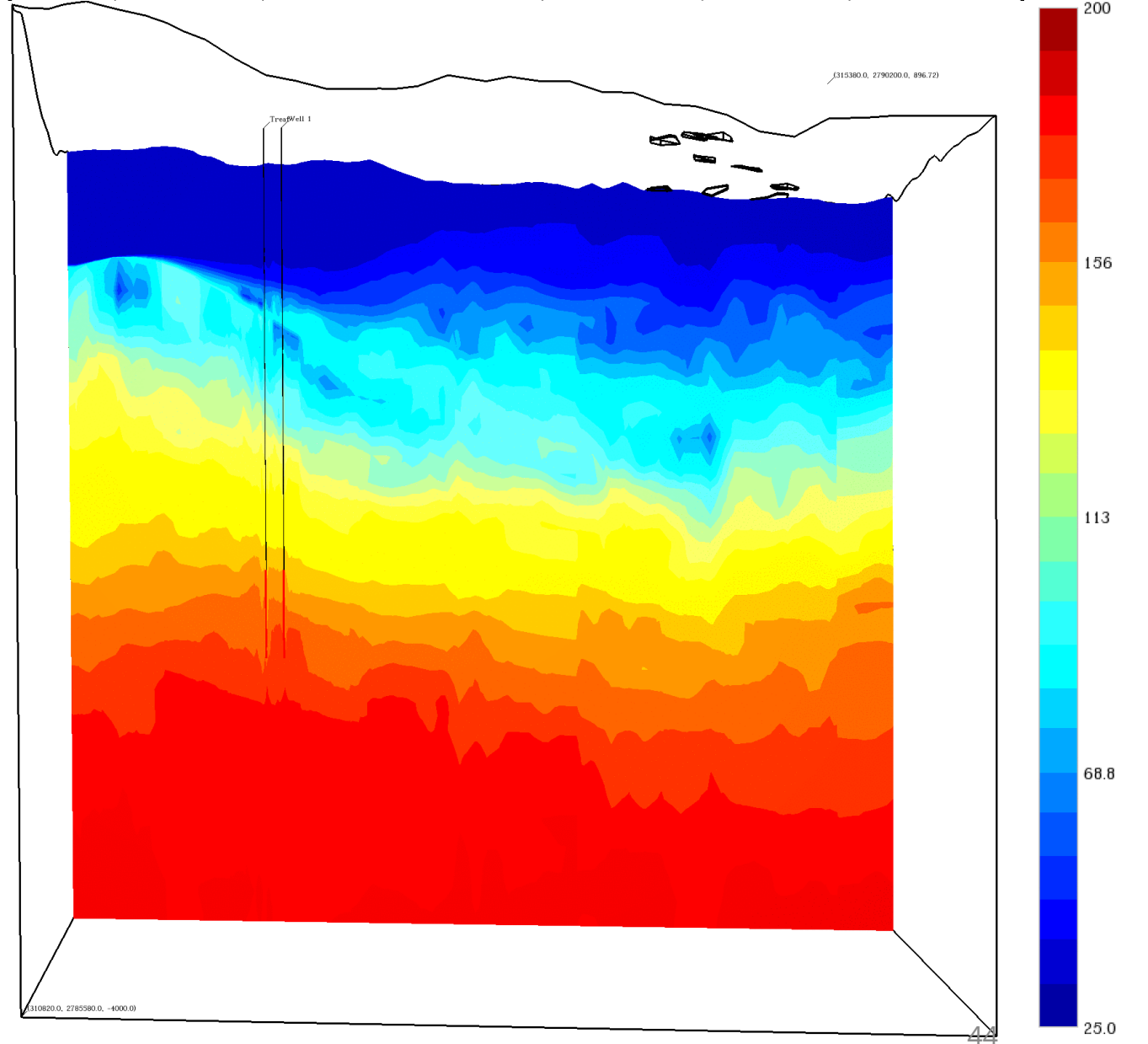


灌注井與生產井僅相距  
100m，本階段定位為短井  
距數值試驗，以最低必要  
流量評估EGS系統**井間熱  
突破(thermal  
breakthrough)**假設風險。



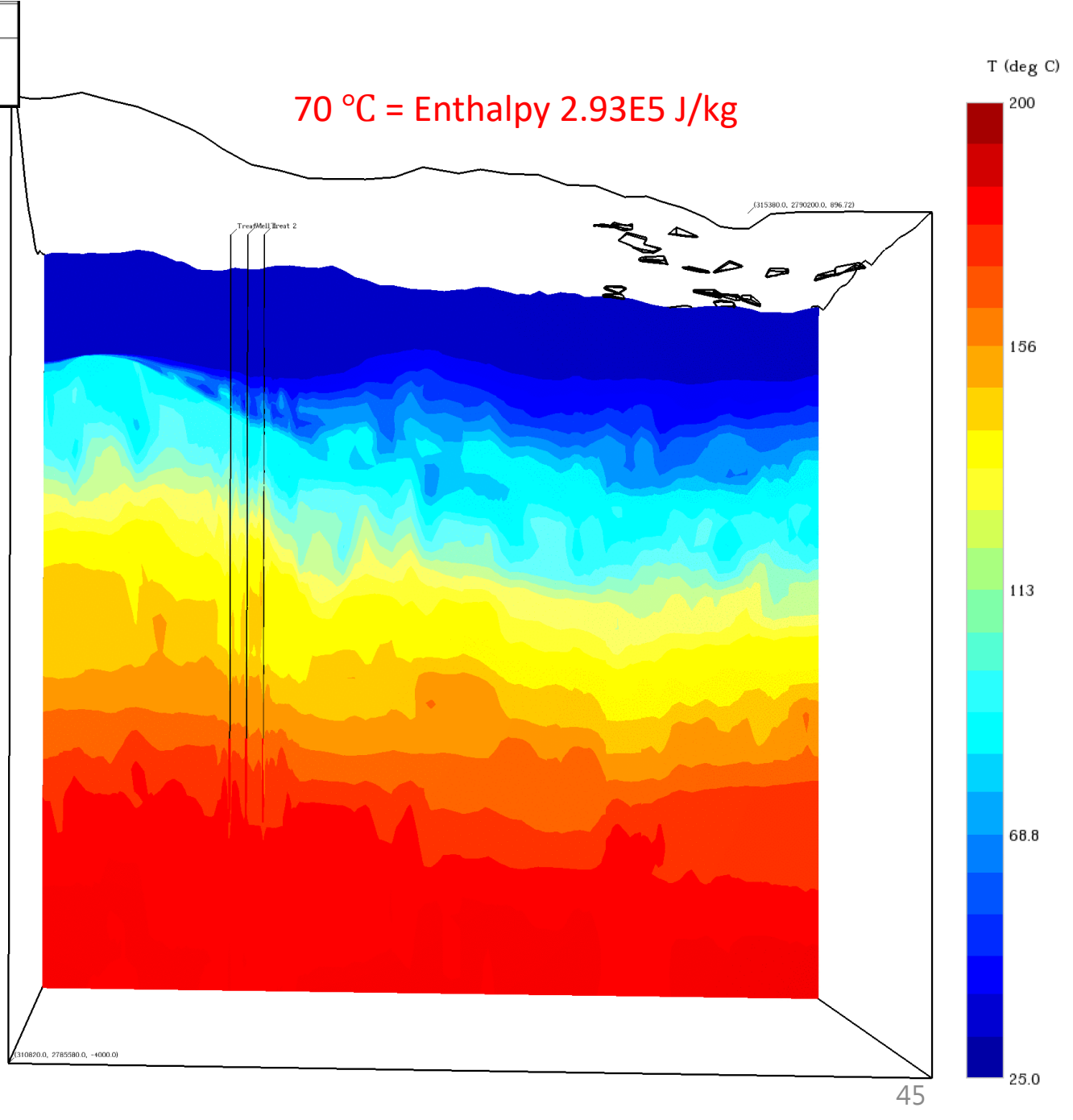
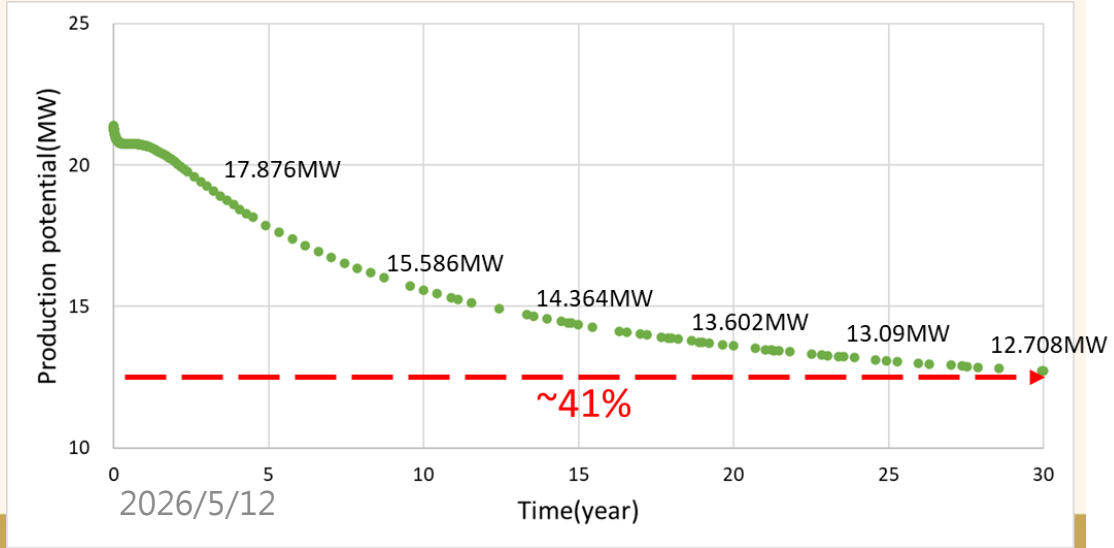
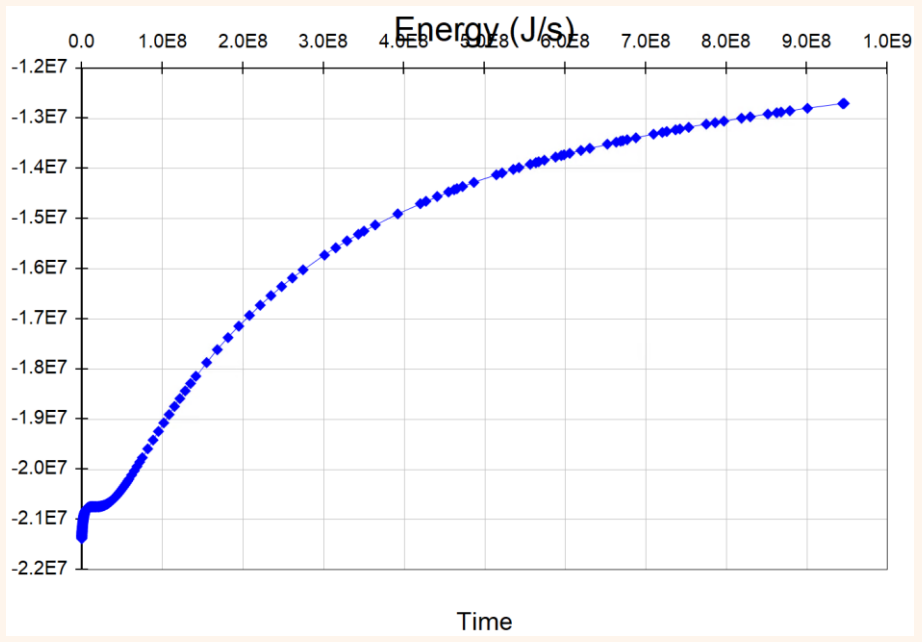
2026/5/12

Scenario	Well type	Coordinate	Screen	Flow rate	Enthalpy
1	Production	(312036.689, 2788076.731)	-2000~-2500m	100 TPH	-
	Injection #1	(311936.689, 2788076.731)		100 TPH	2.931E5 J/kg



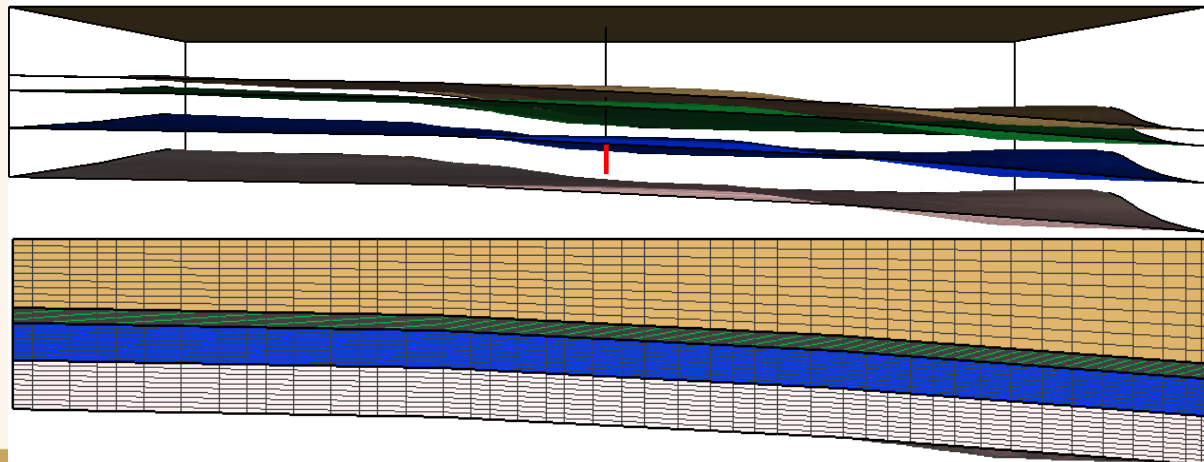
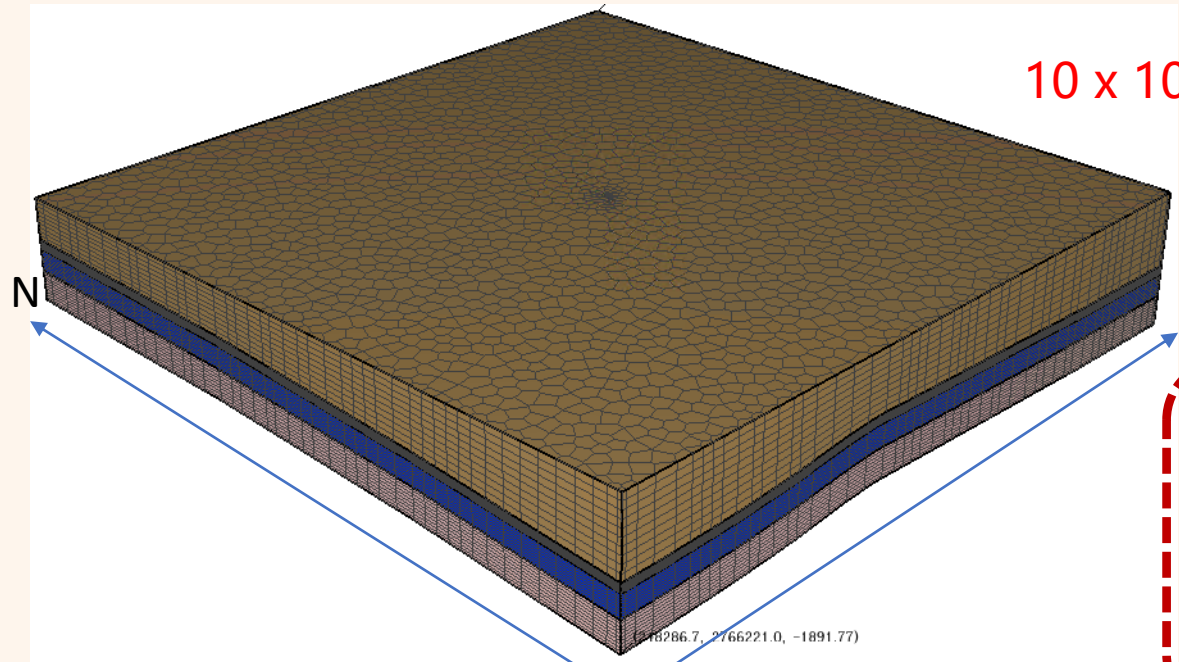
3	Production	(312036.689, 2788076.731)	-2500~-3000m	100 TPH	-
	Injection #1	(311936.689, 2788076.731)		50 TPH	2.931E5 J/kg
	Injection #2	(312136.689, 2788076.731)			

70 °C = Enthalpy 2.93E5 J/kg



# 桃園CO<sub>2</sub> R2 系統注儲

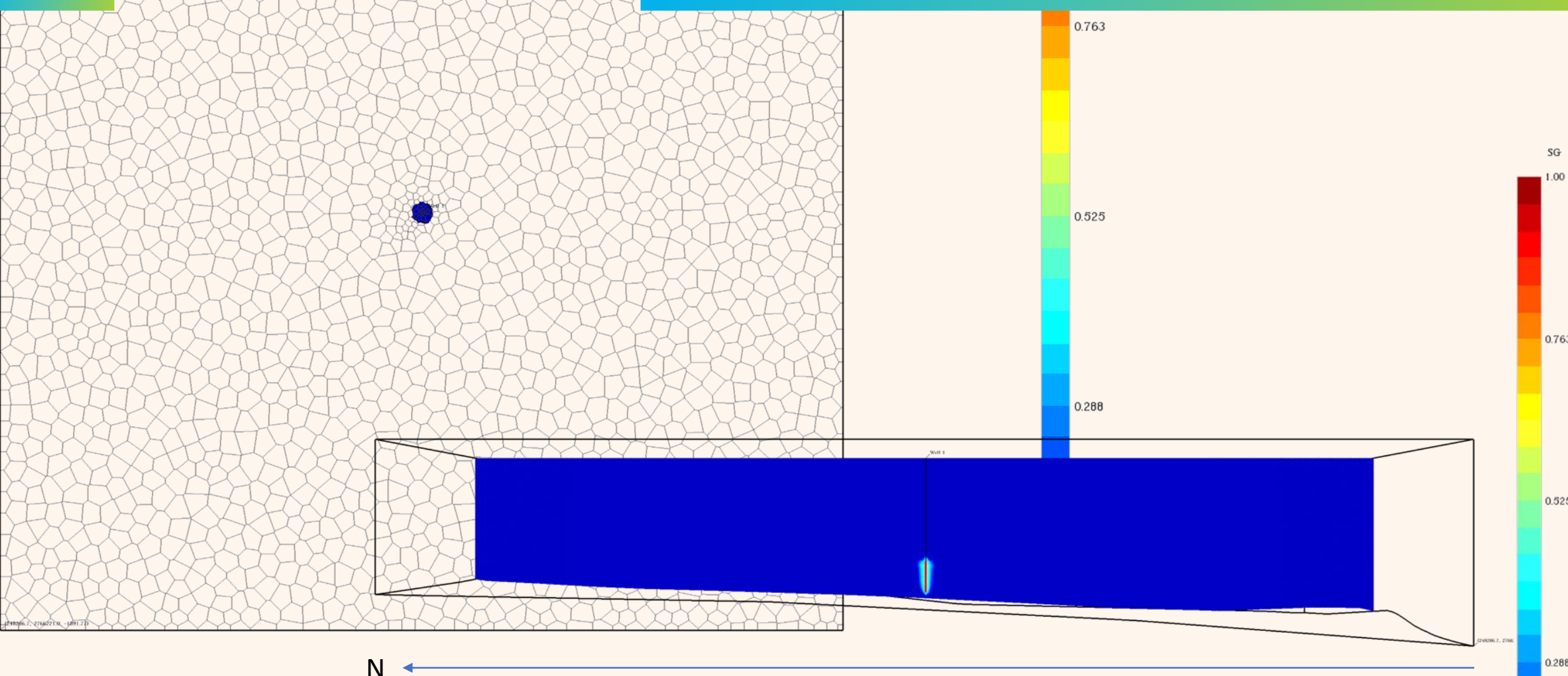
- 以南庄層作為注儲層，設計南庄層灌注井為全開篩條件
- 灌注深度 -1637m 至-1966m。
- 灌注量設計每年一百萬噸，灌注30年



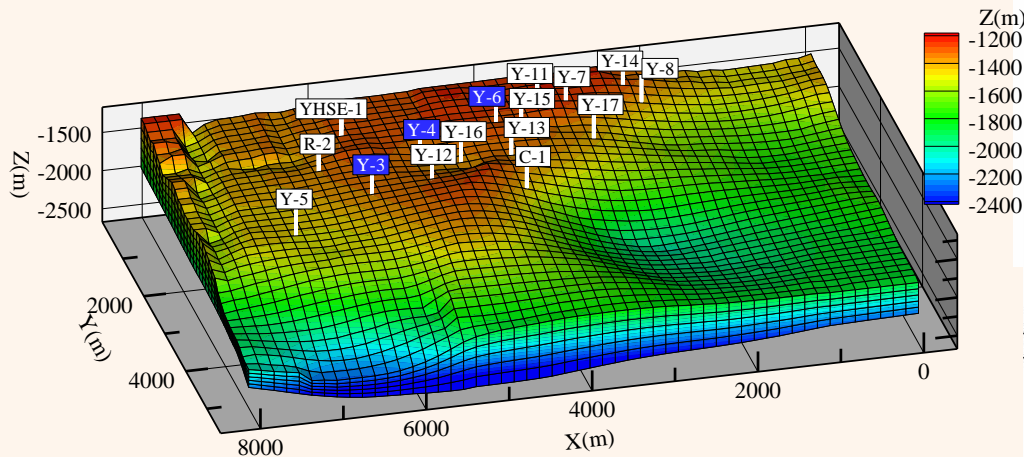
10 x 10 公里

時間 (百萬年)	時代	西部麓山帶		性 屬	系 統
		中部			
0.46	第四紀	更新世	頭嵙山層	X	R1
		早期	卓蘭層	X	
2.588	上新世	晚期	錦水頁岩	蓋	R2
3.58		早期	桂竹林層	儲集	
5.30		南莊層			
11.2	漸新世	中期	觀音山砂岩	蓋	R3
16.4	早期	打鹿頁岩			
23.8	古近紀	漸新世	北寮層	儲集	R4
		早期	石底層	蓋	
		木山層	儲集		
33.7	始新世	早期	五指山層	蓋	
			始新世凝灰岩		

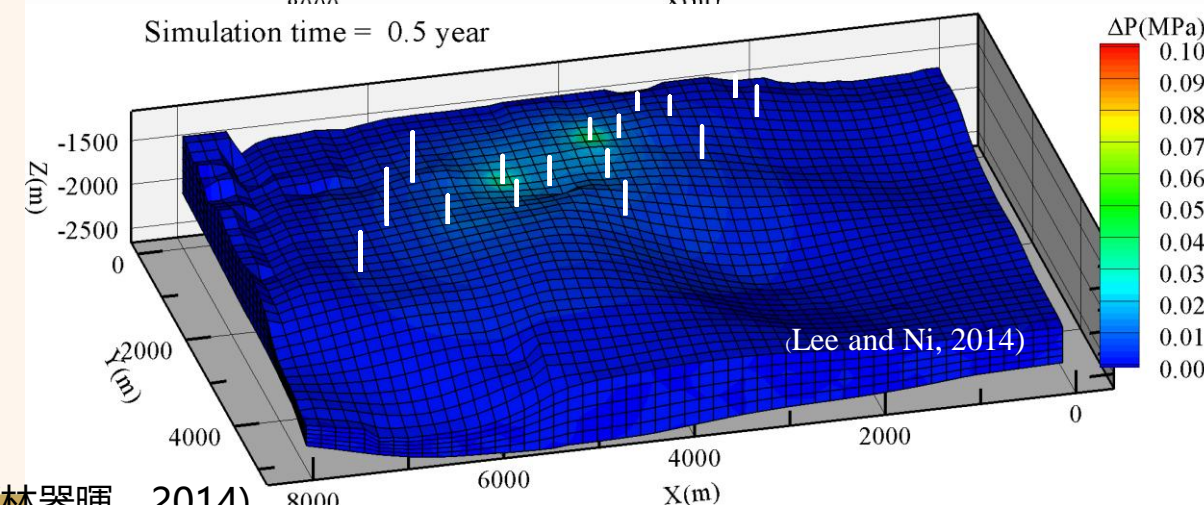
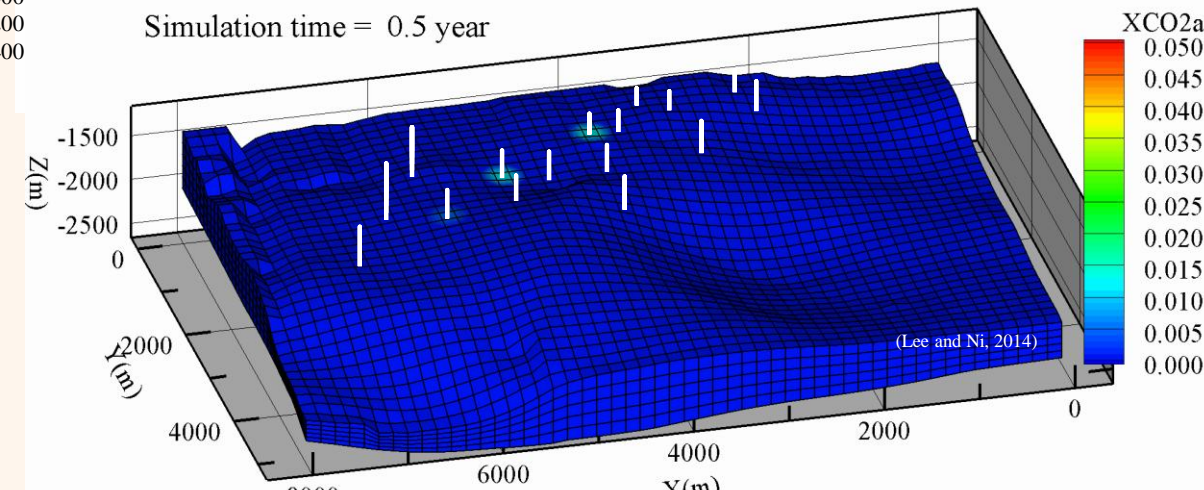
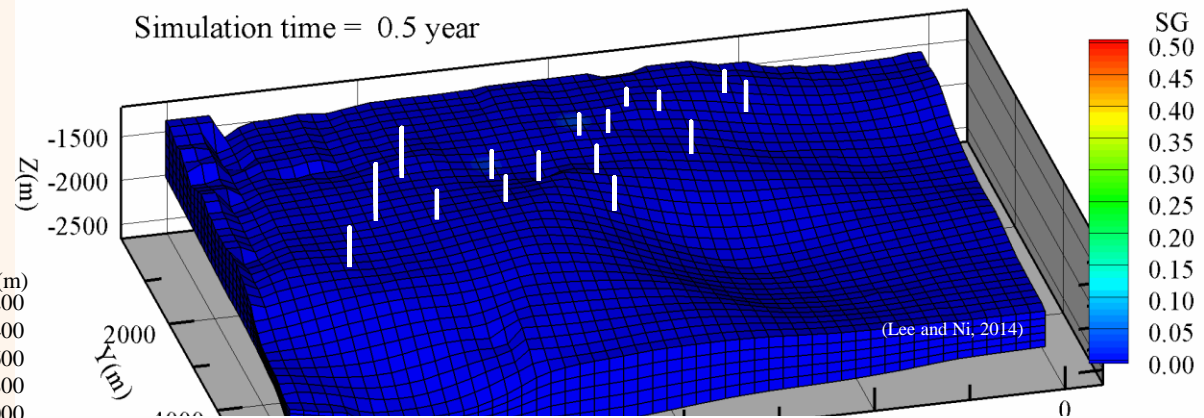
# 二氧化碳移棲推估



# 二氧化碳移棲推估 (永和山桂竹林層)



Three injection wells (Y3, Y4, Y6)  
 Injection rate = 3.6 Mton/year  
 Injection time = 20 years

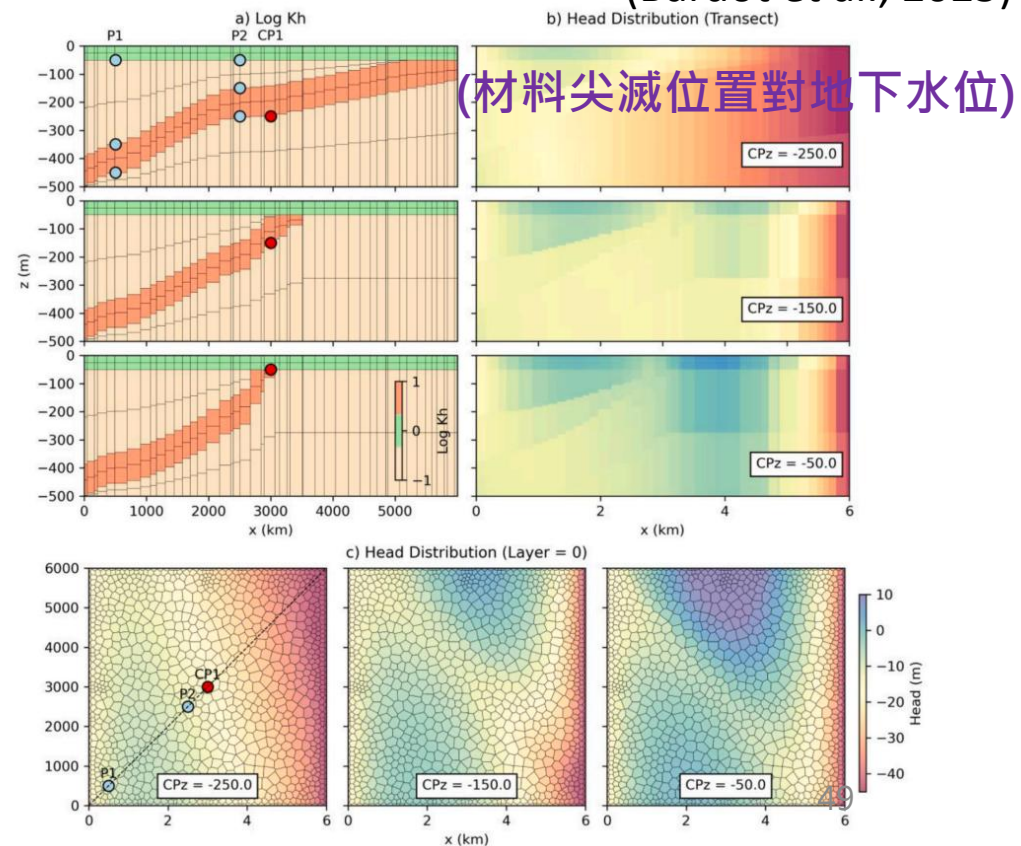
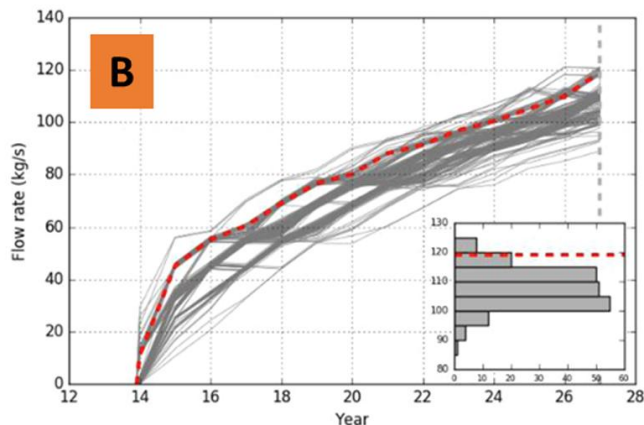
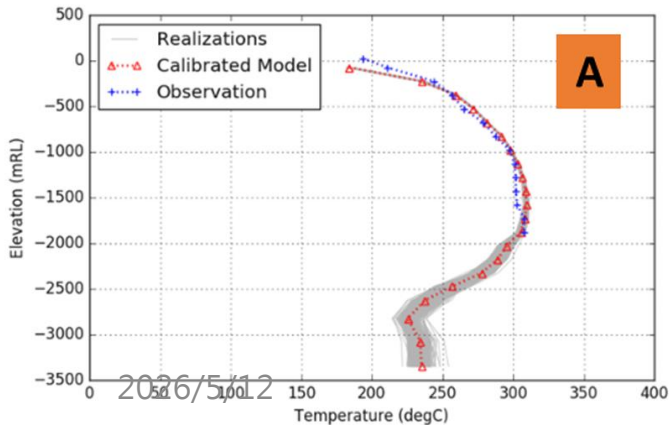


# 敏感度與不確定性分析

- 敏感度與不確定性有何差異？
- 不確定性輸入及輸出因子為何？ (例如：材料參數對產能) (Bardot et al., 2025)
  - 參數、邊界條件、網格(簡單)
  - 模式範圍及地質模型(較困難)

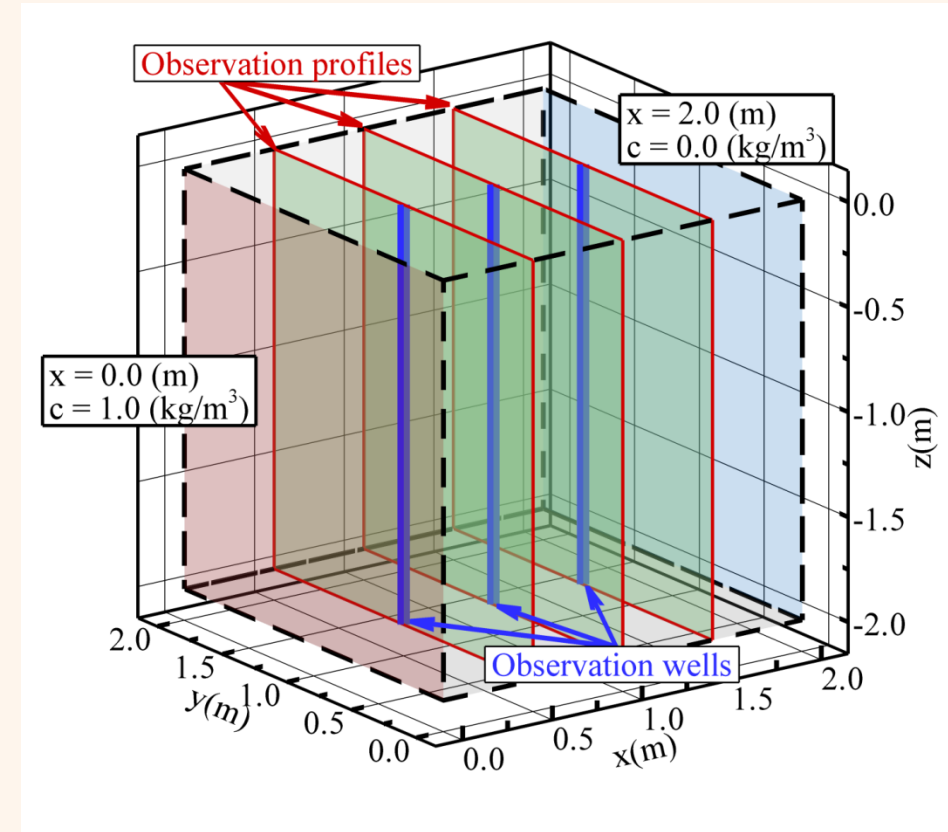
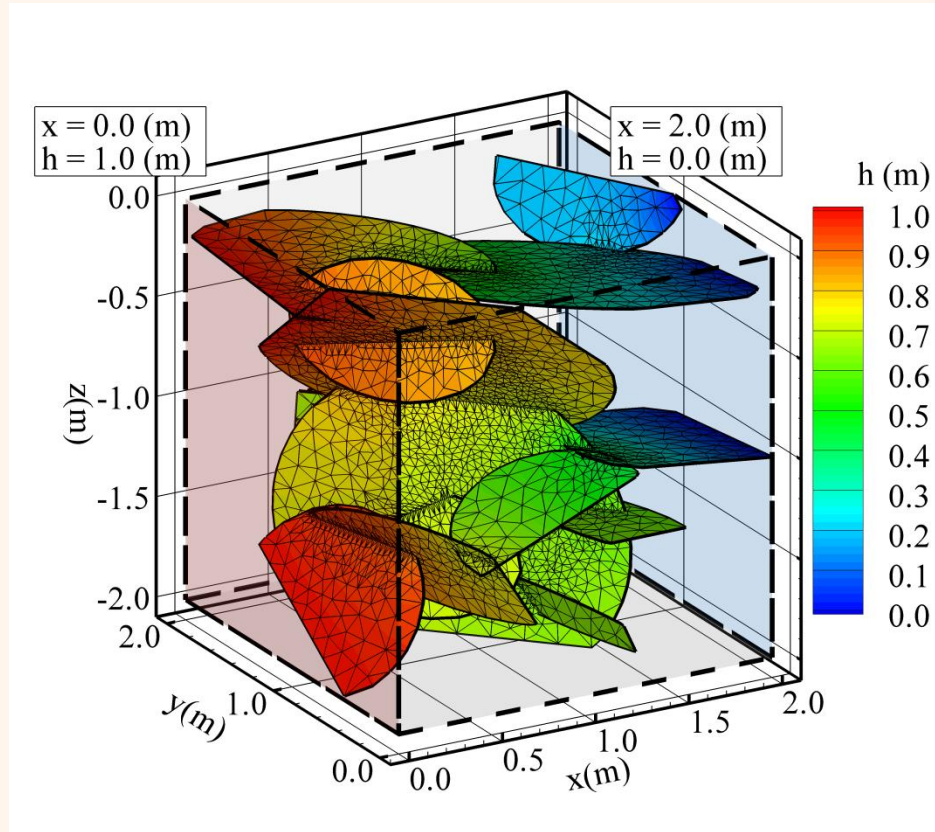
(生產及回注井情境對熱的分布)

(Omagbon et al., 2021)

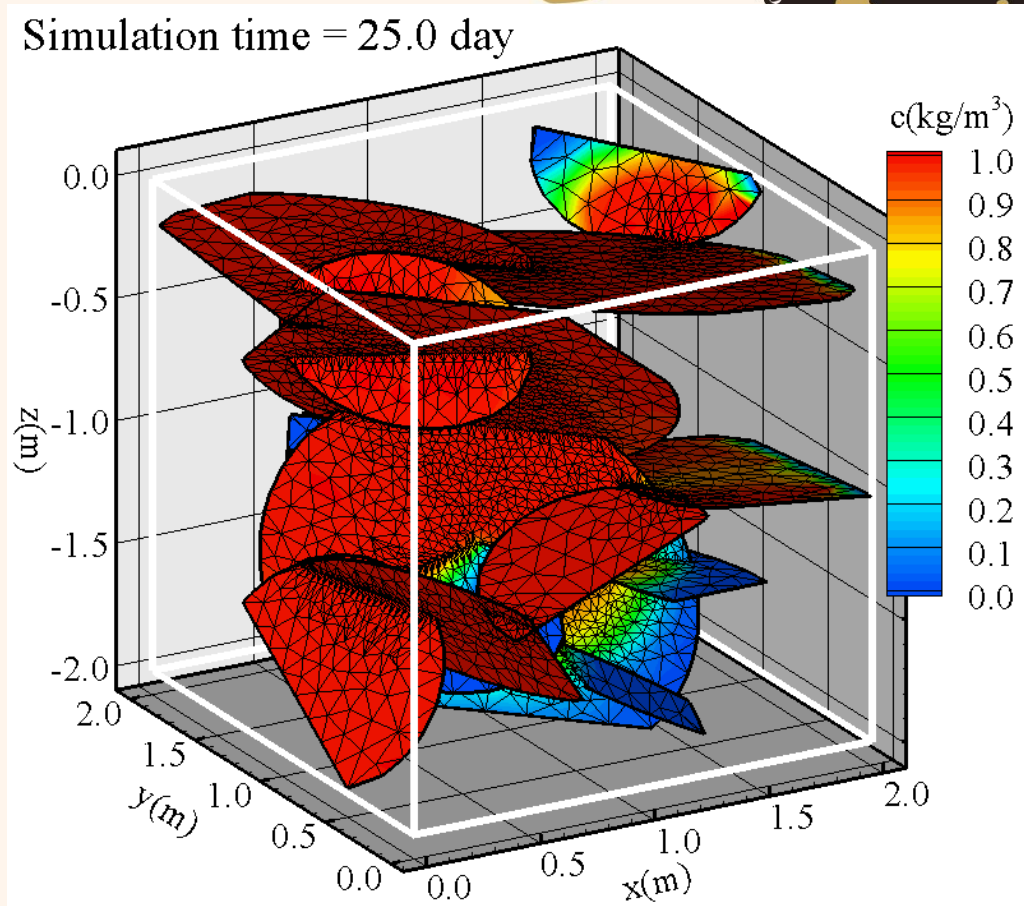
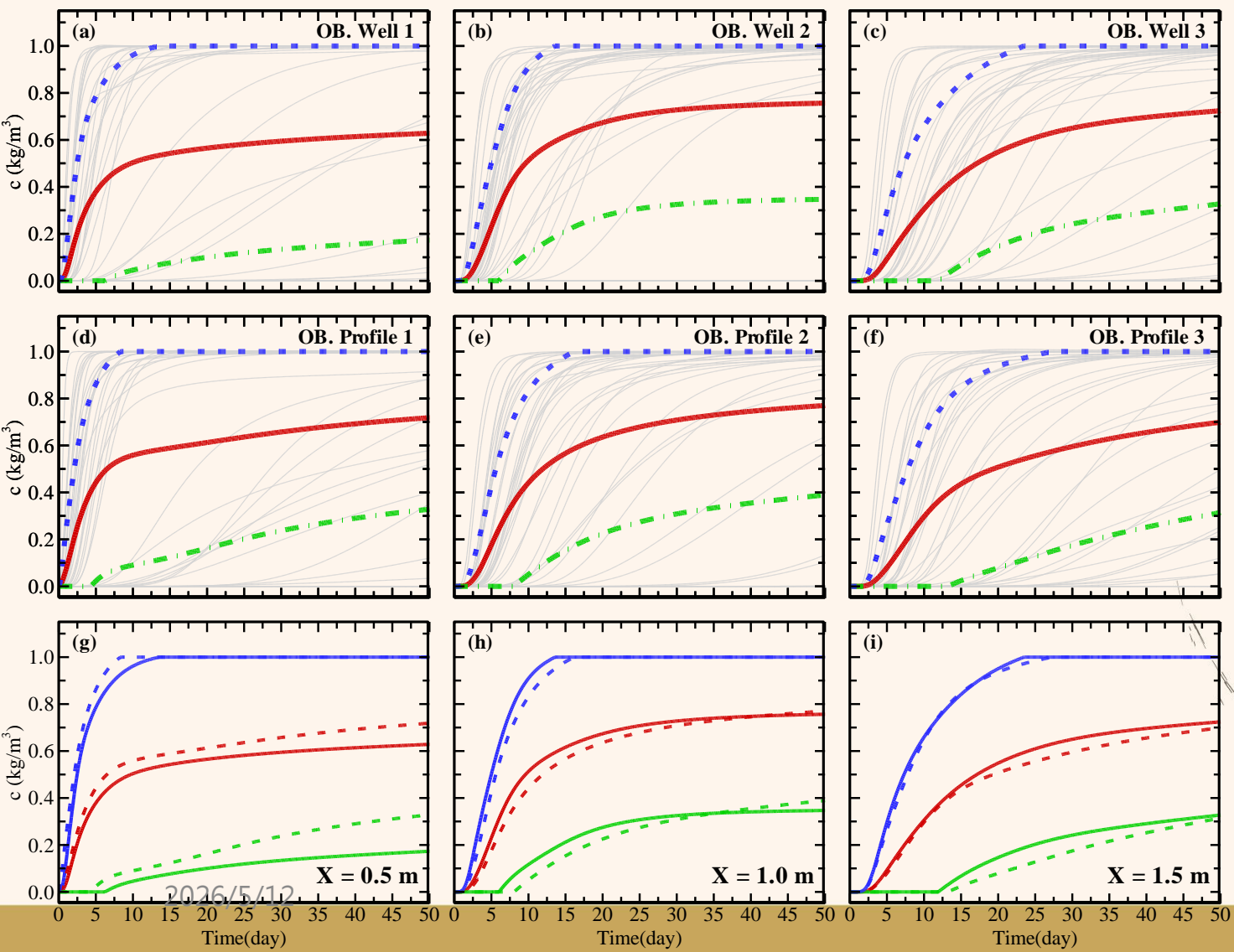


(材料尖滅位置對地下水位)

# Flow and transport model in 3D DFNs



# Uncertainty of concentration



# 地熱與碳封存模擬的關鍵水文地質參數

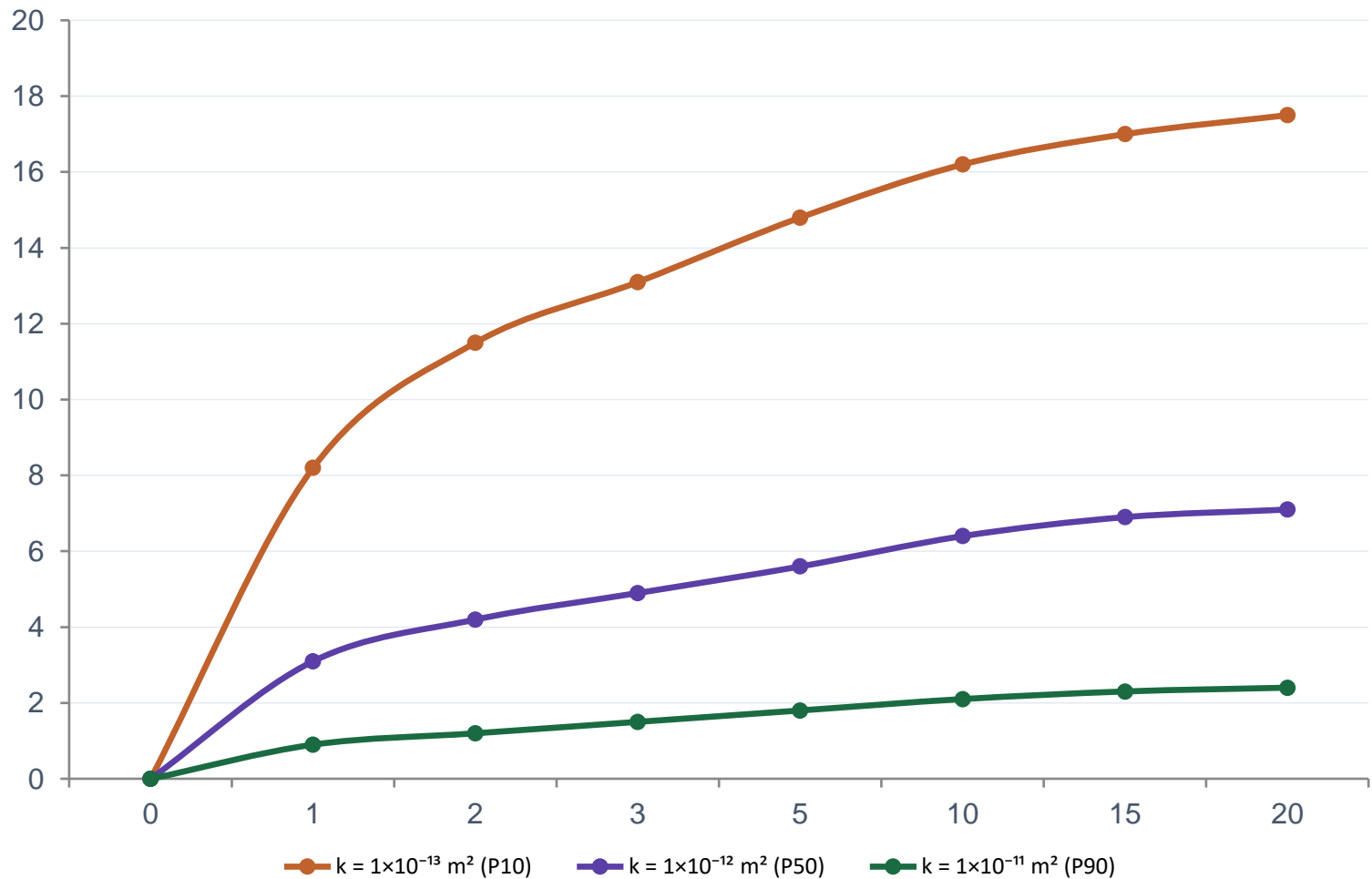
參數	符號	典型範圍	量測方法	不確定性等級
滲透率 ( Permeability )	k	$10^{-20}$ – $10^{-12}$ m <sup>2</sup>	壓力脈衝試驗、注水試驗	極高 ( 4–8 個數量級 )
孔隙率 ( Porosity )	$\phi$	0.01–0.35	岩心、中子測井	中 ( 1–2 個數量級 )
壓縮係數 ( Compressibility )	Ss	$10^{-8}$ – $10^{-4}$ m <sup>-1</sup>	水位回復試驗	高 ( 3–5 個數量級 )
熱傳導係數 ( Thermal Conductivity )	$\lambda$	0.5–6.0 W/m·K	探針法、岩心測量	中
相對滲透率 ( Relative Permeability )	kr(Sw)	0–1 ( 飽和度函數 )	特殊岩心分析& 試驗	極高
毛細壓力 ( Capillary Pressure )	Pc(Sw)	0–20 MPa	SCAL、汞注入	高
殘餘 CO <sub>2</sub> 飽和度 ( Residual Saturation )	Sgr	0.05–0.35	CT 掃描岩心實驗	高

# 滲透率不確定性對注入壓力預測的影響

## Pressure

# Permeability Uncertainty vs. Injection

CO<sub>2</sub> 注入速率 5 kg/s · 不同儲集層滲透率情境



## 關鍵發現

- P10 vs P90 壓力差異達 15 MPa
- 超過蓋岩毛細進入壓力 ( ~8 MPa ) 即有洩漏風險
- 滲透率每差一個數量級，注入壓力相差約 5–8 MPa
- 建議：以 P10 情境作為安全設計基準
- 現地取芯並進行壓力脈衝試驗為降低不確定性的最有效途徑
- 現地試驗 Pilot site

# 參數校準策略 Parameter Calibration Strategies

- 自動化反演 ( Automated Inverse Modelling ) : 使用 PEST、iTOUGH2、DREAM 等工具
  - 最小化觀測值 ( 水頭、溫度、壓力 ) 與模型預測值的加權殘差平方和
- 地質統計約束 ( Geostatistical Constraints ) : 以 Sequential Gaussian Simulation 生成空間連續場
  - 半變異元函數 ( Variogram ) 決定空間相關長度 ( Correlation Length )
- 貝氏更新 ( Bayesian Updating ) : 結合先驗分佈 ( Prior ) 與觀測似然函數 ( Likelihood )
  - 特別適合注入早期資料稀少的階段性更新
- 正則(規)化 ( Regularization / Tikhonov ) : 避免參數過擬合 ( Overfitting )
- 可識別性分析 ( Identifiability Analysis ) : 確認哪些參數可被現有觀測約束，哪些無法
- ⚠ 警告：高度校準的模型不等於正確的模型 ( Equifinality 問題 )

# 不確定性來源 (Sources of uncertainty)

模擬決策的每一步都引入不確定性  
—如何識別、量化、並溝通？

---

# 不確定性來源 ① ② 概念模式 ( Conceptual Model ) 與源匯項 ( Sources & Sinks )

## 📁 概念模式 Conceptual Model

極高

### 不確定性來源

- 地質層序解釋不唯一 ( 多解性 )
- 裂隙幾何 / 連通性未知
- 非均質性簡化 ( EPM vs. DFN )
- 水文地質單元邊界位置不確定
- 熱液蝕變帶分佈難以量測

### 對結果的影響

- 熱採出率預測差異可達  $\pm 31\%$
- $\text{CO}_2$  傳輸路徑可能完全不同
- 滲漏風險評估嚴重失準
- 所有後續參數校準均在錯誤架構下進行

### 降低策略

- 建立  $\geq 2$  個替代概念模式 ( ACM )
- 以地球物理 ( 震測、MT、DTS、ERT等 ) 約束地質模型
- 以 P10/P50/P90 涵蓋替代模式結果
- 定期隨新資料更新概念模式

不確定性等級：

極高

高

中

低

## 💧 源匯項 Sources & Sinks

高

### 不確定性來源

- 自然補注 ( Recharge ) 量時空分佈
- 鄰近抽水井的疊加效應
- 斷層導水 / 阻水性質不確定
- 深部熱液上升通量估算
- 注入/採出井篩管位置與效率

### 對結果的影響

- 壓力場基準條件 ( Baseline ) 錯誤
- 多井干擾計算偏差累積
- 長期水平衡 ( Water Balance ) 失準
- 熱量平衡 ( Heat Balance ) 計算誤差

### 降低策略

- 水平衡分析驗證 ( 含誤差估算 )
- 抽水試驗解析確認井效率
- 示蹤試驗確認補注路徑
- 敏感度分析涵蓋源匯項  $\pm 50\%$

# 不確定性來源 ③ ④ 邊界條件 ( Boundary Conditions ) 與參數設定 ( Parameters )

## □ 邊界條件 Boundary Conditions

高

### 不確定性來源

- BC 類型選擇 ( Dirichlet / Neumann / Cauchy )
- 定水頭值估算不確定性
- 遠場補注大小與空間分佈
- 時間變化 BC ( 降雨、潮汐 ) 的季節性
- 蓋岩滲透率 ( No-flow 假設是否成立 )

### 對結果的影響

- 儲集層超壓：封閉 vs. 開放 BC 差達 14 MPa
- CO<sub>2</sub> 傳輸半徑差異達 2 倍
- 補注量錯估使長期水位預測失真
- 邊界過近引入人為邊界效應

### 降低策略

- 模型邊界距擾動源  $\geq 5$  倍影響半徑
- BC 類型敏感度測試 (  $\geq 3$  種情境 )
- 以水位歷史資料約束遠場 BC
- 利用 InSAR / GPS 確認蓋岩完整性假設

## ⚙ 參數設定 Hydrogeological Parameters

極高

### 不確定性來源

- 滲透率空間非均質性 ( 4–8 個數量級 )
- 相對滲透率曲線 (  $k_r-S_w$  ) 測量誤差
- 毛細壓力 (  $P_c-S_w$  ) 滯後效應
- 熱傳導率與比熱容實驗誤差
- 尺度效應：實驗室  $\rightarrow$  現場 ( REV 問題 )

### 對結果的影響

- 注入壓力預測 P10 vs. P90 差達 15 MPa
- 殘餘 CO<sub>2</sub> 飽和度影響礦化捕獲量
- 熱突破時間誤差可達數年至數十年
- 地面沉陷量級預測嚴重失準

### 降低策略

- 現地取芯 + 壓力脈衝(水力)試驗 ( Pulse Test ) 或產能測試
- PEST 自動校準 + 地質統計技術約束
- 貝氏理論更新 ( 隨注入資料漸進修正 )
- 確認哪些參數可被觀測約束

# 不確定性來源 ⑤ ⑥ 數值方法 ( Numerical Methods ) 與計算網格 ( Grid Design )

## ⑤ 數值方法 Numerical Methods

中

### 不確定性來源

- 空間離散格式 ( FDM / FEM / FVM ) 選擇
- 線性求解器收斂準則過鬆
- 非線性疊代 ( Newton-Raphson ) 截斷誤差
- 等效多孔介質(EPM)假設於裂隙(Fractured)場域之適用性
- 多相流 Flash 計算之熱力學近似模式

### 對結果的影響

- 裂隙場域熱突破預測差 28°C ( FDM vs. FVM )
- 數值擴散使 CO<sub>2</sub> 傳輸半徑高估 ≤ 58%
- 相態計算不穩定導致壓力振盪
- 不同軟體間結果無法直接比較

### 降低策略

- 以解析解 / 基準案例測試 ( Benchmark ) 驗證
- 收斂準則：殘差 < 10<sup>-6</sup> ( 壓力 )
- 裂隙系統採 FEM / FVM / DFN 優先
- 多軟體比對 ( Code-to-code Comparison )

## ⑥ 計算網格 Grid Resolution

高

### 不確定性來源

- 橫向格網尺寸  $\Delta x$  控制數值 Péclet 數
- 垂向分層數影響密度驅動對流解析
- 蓋岩薄層 ( < 5 m ) 無法以粗格網表達
- 不規則地形 / 斷層的格網解析誤差
- 長寬比 ( Aspect Ratio ) 過大引入各向異性數值誤差

### 對結果的影響

- 傳輸半徑高估達 +58% (  $\Delta x=500\text{m}$  vs. 25m )
- 溶解態封存量低估達 9 倍 (  $\Delta z=10\text{m}$  vs. 0.2m )
- 熱突破時間過早預測 ( 數值擴散 )
- 蓋岩薄弱帶洩漏路徑無法解析

### 降低策略

- $Pe = v \cdot \Delta x / D \leq 2$  作為格網設計準則
- LGR(Local grid refinement)：井附近  $\Delta x \leq 2\text{ m}$ ，遠場逐步放大
- 蓋岩至少 3–5 層；溶解對流帶  $\Delta z \leq 1\text{ m}$
- 格網收斂測試 ( Grid Convergence Test ) **重要!**

# Benchmark case

## Call for participation: Verification benchmarks for single-phase flow in three-dimensional fractured porous media

Inga Berre<sup>1,5</sup>, Wietse Boon<sup>2</sup>, Bernd Flemisch<sup>2,\*</sup>, Alessio Fumagalli<sup>1</sup>, Dennis Gläser<sup>2</sup>, Eirik Keilegavlen<sup>1</sup>, Anna Scotti<sup>3</sup>, Ivar Stefansson<sup>1</sup>, and Alexandru Tatomir<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Department of Mathematics, University of Bergen, Allégaten 41, 5007 Bergen, Norway

<sup>2</sup>Department of Hydromechanics and Modelling of Hydrosystems, University of Stuttgart, Pfaffenwaldring 61, 70569 Stuttgart, Germany

<sup>3</sup>Laboratory for Modeling and Scientific Computing MOX, Politecnico di Milano, p.za Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano, Italy

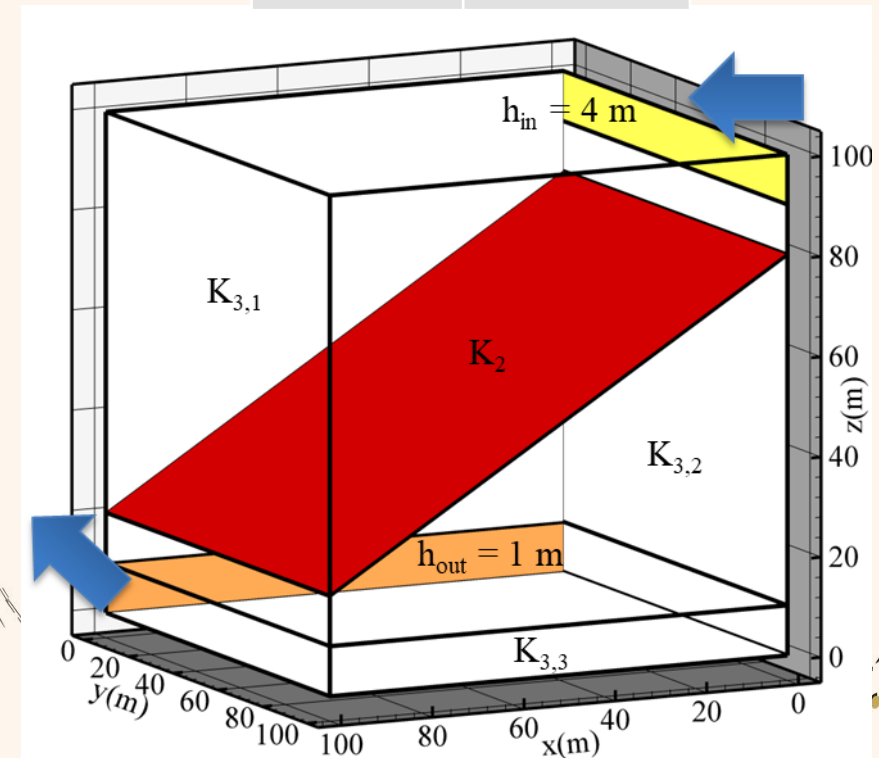
<sup>4</sup>Department of Applied Geology, Geosciences Center, University of Göttingen, Goldschmidtstrasse 3, 37077 Göttingen, Germany

<sup>5</sup>Christian Michelsen Research, Bergen, Norway

\*bernd@iws.uni-stuttgart.de

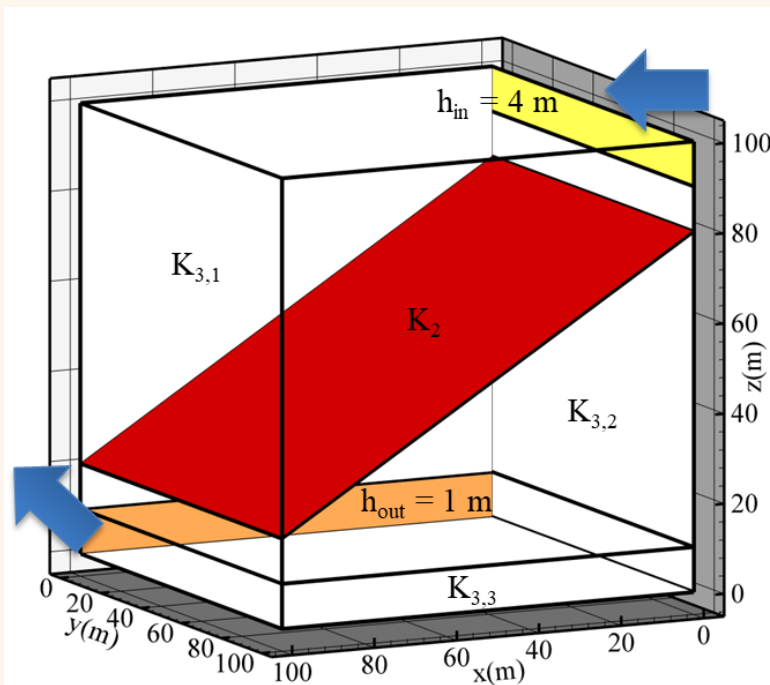
(Berre et al., 2019)

Parameter	Value (m/s)
$K_{3,1}$ , $K_{3,2}$	$1 \times 10^{-6}$
$K_{3,3}$	$1 \times 10^{-5}$
$K_2$	$1 \times 10^{-3}$

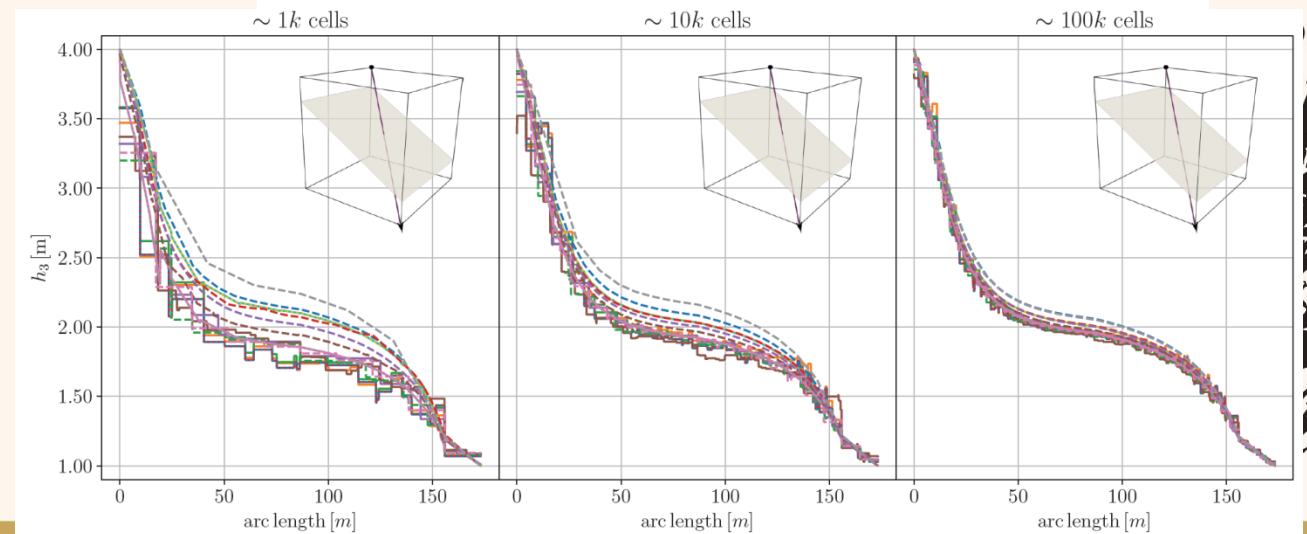
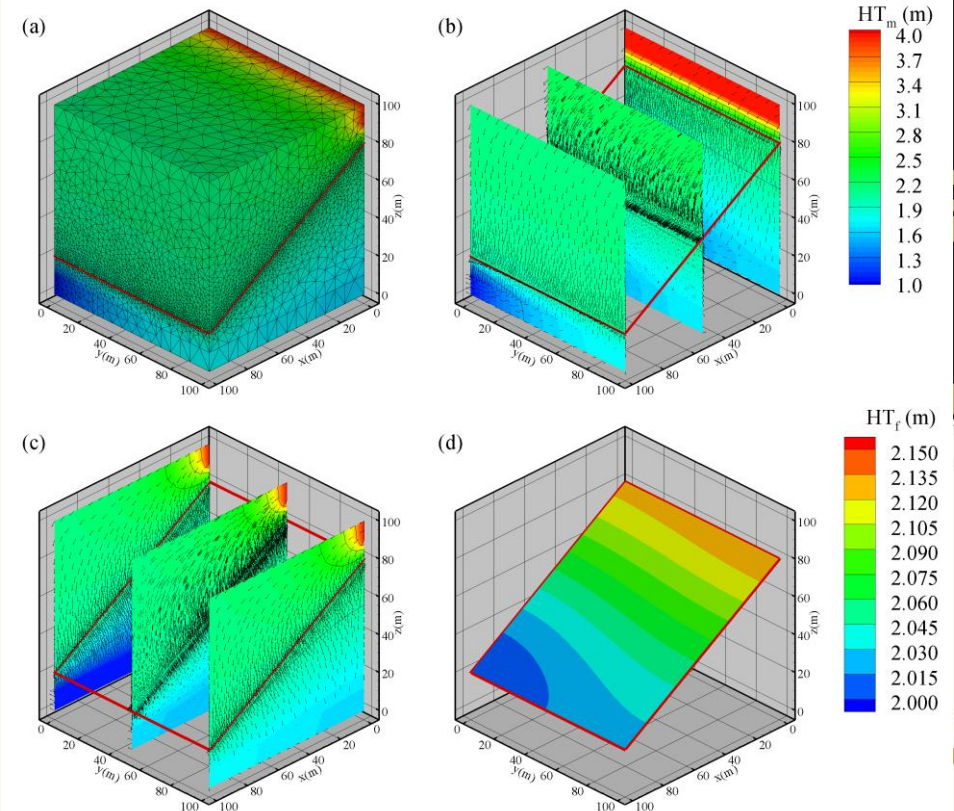


(Bodin et al., 2003, p418-p423)

# Benchmark case



Parameter	Value
$K_{3,1} \cdot K_{3,2}$	$1 \times 10^{-6} (\text{m/s})$
$K_{3,3}$	$1 \times 10^{-5} (\text{m/s})$
$K_2$	$1 \times 10^{-3} (\text{m/s})$
aperture	0.01 (m)



- UiB-TPFA
- USTUTT-TPFA\_Circ
- UNICE\_UNIGE-HFV\_Cont
- - - UNICAMP-Hybrid\_Hdiv
- UiB-MPFA
- - - LANL-MFD
- ···· UNICE\_UNIGE-VAG\_Disc
- - - UNIL\_USI-FE\_AMR\_AFC
- UiB-MVEM
- - - NCU\_TW-Hybrid\_FEM
- ···· UNICE\_UNIGE-HFV\_Disc
- - - INM-EDFM
- ···· UiB-RTO
- UNICE\_UNIGE-VAG\_Cont
- - - ETHZ\_USI-FEM\_LM
- - - DTU-FEM\_COMSOL
- USTUTT-MPFA

# 不確定性來源 ⑦ + 綜合傳播 時間間距 ( Time-stepping ) 與不確定性累積效應

## 🕒 時間間距 Time-stepping

中

### 不確定性來源

- 固定步長忽視非線性強度變化
- 相態轉換 ( Flash/閃發 ) 前後時間步長不足
- 注入啟停瞬時壓力尖峰遺漏(無法解析)
- 長步長造成一階截斷誤差累積
- 數值振盪

### 對結果的影響

- 短期 ( 1年內 ) 壓力誤差達 40% (  $\Delta t=1yr$  vs.  $1day$  )
- 相態計算失穩 → 模擬中斷 (crash)
- 季節性補注訊號完全遺漏
- 瞬時超壓峰值低估 → 斷層風險評估失準

### 降低策略

- 自適應步長 ( Adaptive  $\Delta t$  ) : 隨收斂調整
- 啟動後 30 天  $\Delta t = 1$  hr ; 穩定後放大
- **Flash Zone 附近自動縮小 10–100 倍**
- 格網收斂測試同步進行時間收斂測試

## 七大不確定性來源的綜合傳播矩陣

不確定性來源	等級	主要傳播路徑	最大結果差異
概念模式	極高	所有模型輸出	熱採出率 $\pm 31\%$
源匯項	高	壓力場 / 水平衡	水頭誤差 $\pm 5-20$ m
邊界條件	高	超壓分佈、傳輸形態	傳輸半徑 $\times 2$ 倍
參數設定	極高	流速場 / 相態分佈	注入壓差 $\pm 15$ MPa
數值方法	中	溫度/濃度前緣擴散	熱突破差 $28^\circ\text{C}$
計算網格	高	傳輸形態 / 溶解捕獲	儲集量差 9 倍
時間間距	中	瞬時壓力、相態穩定性	短期壓力誤差 40%

\*\*不確定性具有傳播性：概念模式的誤差會放大後續所有決策的不確定性 ( Error Propagation ) 。  
建議順序：先確認概念模式 → 再優化網格與步長 → 最後精化參數校準。

# 未來趨勢

## 模式分析與調查技術整合 的未來發展方向

從數位孿生、物聯網感測、機器學習到多物理場全耦合—  
下一代地熱與碳封存儲集層管理的技術

---

# 調查技術革新① 從被動量測到主動感知的現地調查技術

## 光纖分佈式感測 DTS / DSS

商業應用

分佈式溫度感測 ( DTS )  
與應變感測 ( DSS ) 沿  
整支鑽孔連續量測

- 空間解析度 0.5–1 m
- 採樣頻率可達 1 min
- 同步取得溫度剖面  
與孔壁應變場
- 配合數值模型即時  
更新 BC 與熱通量

研究階段

成熟度

## InSAR 衛星干涉雷達 地表形變監測

商業應用

Sentinel-1 / ALOS-2  
毫米級地表形變監測

- 精度  $\pm 2-5$  mm
- 覆蓋面積達數百 km<sup>2</sup>
- 時間序列 ( TS-InSAR ) 偵  
測緩慢地層下陷
- 反演地下壓力場變化
- 約束孔隙彈性模型 Biot 係  
數校準

成熟度

商業應用

成熟度

## 4D 時間推移地震 4D Time-lapse Seismic

試驗導入

重複地震探勘捕捉 CO<sub>2</sub> / 熱液飽和度變  
化

- 時間解析度：1–5 年 ( 成本限制 )
- 波阻抗變化對應飽和度  $\Delta S_g \geq 5\%$
- Sleipner 已驗證 9 層薄層 CO<sub>2</sub> 堆疊結  
構
- 未來趨勢：建立永久節點 ( Node )  
陣列實現年度動態監測
- 與 TOUGH2 傳輸預測疊合驗證概念  
模式

成熟應用

成熟度

# 調查技術革新② 地球物理、地化示蹤與遙測技術的多源整合

## ⚡ 大地電磁法 MT / AMT

商業應用

電阻率成像捕捉熱液與 CO<sub>2</sub> 飽和度分佈；深度可達 10 km

- 2D/3D 反演精度提升
- 可偵測導電地熱蝕變帶
- 台灣花東裂谷已成功應用

## 🧪 地化示蹤劑監測 Geochemical Tracers

商業應用

SF<sub>6</sub>、PFT、放射性示蹤劑量測流速、孔隙體積與流動路徑

- 示蹤穿透曲線 (BTC) 校準 延散係數與 Péclet 數
- CO<sub>2</sub> 碳同位素 (δ<sup>13</sup>C) 追蹤地下封存形態

## 🔑 熱紅外遙測 Thermal IR Remote Sensing

試驗導入

無人機 (UAV) 載熱像儀識別地表熱異常與洩漏點

- 空間解析度 0.1–0.5 m
- 配合 CO<sub>2</sub> 通量量測
- 地熱井場地表溫度製圖

## 🌐 微地震陣列 Microseismic Monitoring

商業應用

孔內式 (Downhole) 3C 感測器陣列定位微地震事件

- 識別新活化裂隙(斷層)走向
- 反演局部應力場 (Focal Mechanism)
- 即時觸發 Traffic Light Protocol
- 與孔隙壓力模型耦合 評估誘發地震風險

## 📏 重力 / 磁力時間 推移監測

試驗導入

絕對重力儀 (FG-5 / A-10) 精度 ±1–5 μGal

- 捕捉地下流體密度變化 CO<sub>2</sub> 注入 ΔP ≈ -300 kg/m<sup>3</sup>)
- 差分磁力測量偵測 熱液磁鐵礦溶解/沉澱
- 可作為地下質量守恆的獨立驗證工具

## 📶 物聯網感測網路 IoT Sensor Network

試驗導入

低功耗廣域網路 (LoRaWAN) 部署 100+ 感測節點

- 壓力、溫度、流量即時串流
- 邊緣計算 (Edge Computing) 異常偵測與預警
- 感測數據自動觸發模型更新 (Adaptive DA)
- 降低傳統人工監測成本 70%

紅綠燈協定 (Traffic Light Protocol, TLP) 旨在促進潛在敏感資訊的更廣泛共享和更有效的協作。

# 模式分析革新① 人工智慧輔助建模、數位學生與貝葉斯數據同化

## AI / ML 輔助儲集層模擬

### 代理模型 ( Surrogate / Emulator )

以神經網路 ( DNN、CNN、LSTM... ) 取代昂貴全物理模擬；訓練後推論速度提升  $10^4$ – $10^6$  倍，支援蒙地卡羅 ( 10,000 次模擬 )

### 物理資訊神經網路 ( PINNs )

損失函數同時包含物理方程式殘差 ( PDE loss ) 與觀測誤差；無需大量標記訓練數據，可外推物理行為

### 深度學習歷史配合 ( DL History Matching )

Convolutional Encoder-Decoder 自動識別最優參數空間分佈；取代傳統 PEST 疊代，計算時間從數天縮至數小時

### 強化學習注入優化 ( RL-based Injection Optimization )

以 Deep Q-Network 動態調整注入速率與井位，最大化熱採出率或 CO<sub>2</sub> 封存量，同時滿足壓力約束

## 數位學生 Digital Twin

即時感測數據 ( IoT / DTS / InSAR ) 持續同化更新的動態數值模型

- 物理模型 ( TOUGH2 / OpenGeoSys ) + ML 代理模型雙引擎架構
- 感測異常 → 自動觸發局部模型重算 ( Targeted Re-simulation )
- 決策支援面板 ( Dashboard )：壓力、傳輸、形變即時預警
- Equinor ( Sleipner )、Chevron ( Gordon LNG ) 已進入試驗導入階段

## 貝氏數據同化 Bayesian Data Assimilation

以新注入資料漸進更新參數後驗分佈 ( Posterior )，取代一次性校準

- 集成卡爾曼濾波 ( EnKF )：高效線性更新，適合高維參數場
- 粒子濾波 ( Particle Filter )：保留非線性、非高斯不確定性
- Ensemble Smoother + Multiple Data Assimilation ( ES-MDA ) 已整合進 ECLIPSE / INTERSECT 商業平台
- 每次監測事件後 P10/P50/P90 自動更新，縮小不確定性區間

# 西部風場模式結合觀測分析



Ease網站由中央大學  
倪春發教授團隊開發



繪圖工具



10km



© Mapbox © OpenStreetMap Improve this map



使用者



logout



Simulation 狀態列

# 污染物質點傳輸線上即時分析

The screenshot displays a GIS web application interface. At the top, there is a navigation bar with the 'ase' logo and menu items: '檔案總管', '數據加值', '動畫管理', and '手繪工具'. A user ID 'SFDF327' is visible in the top right corner. On the left side, there is a sidebar with a file explorer. Under '資料夾 Folder', there is a folder '01 農試所'. Under '地圖集 Documents', there are several files listed, including 'farm02', 'con001.glb', '測試溶質傳輸', '質點傳輸.glb', '農田.json', and '穩態地下水流場.glb'. The main area shows a topographic map with a blue shaded region. The map includes labels for '沿山公路', '東山', 'Nanshan', 'Shinankeng', 'Nanhe', 'Jiuqijia', and 'Liti'. A search bar and map controls (satellite, OSM, zoom) are on the right. A blue banner at the bottom left contains the text '載入2D圖資'. The bottom right corner shows 'Zoom 13.5' and map data attribution: '© Mapbox © OpenStreetMap Improve this map'.

資料夾 Folder

- 01 農試所

地圖集 Documents

- 01 farm02
- 01 con001.glb
- 02 測試溶質傳輸
  - 01 質點傳輸.glb
  - 02 農田.json
  - 03 穩態地下水流場.glb

載入2D圖資

Zoom 13.5

© Mapbox © OpenStreetMap Improve this map

# 社會溝通與策略推動

## 模擬結果如何說服社會、促成策略推動？

儲集層模擬從實驗室走向政策文件、  
公民說明會與法規審查的歷程

### 案例①

冰島 Reykjanes

地熱景觀保護 & 居民溝通

### 案例②

挪威 Sleipner

歐盟 ETS 政策驗證

### 案例③

台灣花東地熱

原住民族諮詢 & 地方創生

### 案例④

澳洲 CarbonNet

州選址政策 & 漁業協商

## 社會 / 政策挑戰

HS Orka 計畫擴大 Reykjanes 地熱產能至 180 MWe，但鄰近聯合國教科文組織地質公園（UNESCO Geopark），居民擔憂地表沉陷、硫磺異味與熱液噴口破壞。

## 模擬模型在溝通中扮演的角色

- 建立 TOUGH2-EOS1 雙相地熱儲集層模型，模擬不同採出速率下未來 30 年地表熱異常（Fumarole）流量與溫度的變化
- 製作「地表沉降地圖動畫」：以 InSAR 觀測校準孔隙彈性模型，生成年度沉降量等值線圖（精度  $\pm 3$  mm/yr）
- 在公民說明會上逐格展示開發「互動式情境選擇器（Interactive Scenario Tool）」：居民可在觸控螢幕上選擇「採出速率 × 回注位置 × 時間」組合，即時顯示對熱噴口流量的影響預測
- 提供 P10/P50/P90 不確定性區間，誠實告知模型限制，避免「假確定性」

## 主要利害關係人（Stakeholders）

地方居民	地表沉降、熱噴口消失、硫磺異味頻率增加
UNESCO	地質公園完整性、世界遺產申請資格維護
HS Orka	擴產許可、投資回報率、環評通過
環境署	熱液排放量、重金屬（汞、砷）地化監測

## 模擬產出的溝通工具

- 30 年地表沉降等值線動畫（1 cm/yr 安全線標示）
- 熱噴口流量 P10/P50/P90 預測圖
- 互動式公民情境選擇工具（Web App）

## 政策 / 社會成果

- 環評委員會採納 P10 情境為許可條件上限，注入速率不得超過 520 kg/s
- HS Orka 同意設立「地質公園模型監測委員會」，每年公開更新模擬結果

## 案例 延伸 模式扮演溝通角色——讓地下的不確定性可被「感受」

### ■ 模擬工作者的社會溝通心得

- 視覺化優先：等值線動畫比數字表格更能讓居民理解「沉降量 1 公分」的意義
- 不確定性不是弱點：主動展示 P10/P50/P90，反而建立信任，「我們不確定，但範圍在這裡」比假確定性更有公信力
- 給居民「操控感」：互動式情境工具讓社區代表親身體驗「我的選擇會影響結果」，降低抵制情緒
- 長期承諾比報告更重要：年度公開更新模擬 = 持續對話機制，而非單次環評後消失的技術文件
- 模擬工程師不是律師：需清楚說明「模型無法預測天然地震觸發的意外噴發」

### 現場聲音 / 政策關鍵語

「說明會上，一位 70 歲漁夫說：  
『我第一次看懂我家附近地下在發生什麼事。』  
這比任何技術報告都有說服力。」

— HS Orka 社區關係主任，公民說明會記錄，2021

### 可移植原則

模型輸出必須以「情境故事 ( Scenario Narrative ) 」包裝，讓非專業利害關係人能具體想像  
「若我們選擇 A，未來 20 年將是……」

## 社會 / 政策挑戰

Equinor 每年注入約 100 萬噸 CO<sub>2</sub> 至 Utsira 砂岩，為全球首座商業規模

CCS 設施。歐盟碳排放交易體系(EU ETS) 碳信用 ( Carbon Credit ) 的核發需要模擬數據作為「永久封存」的技術背書；若封存無法驗證，碳配額將被撤銷。

## 🔍 模擬模型在溝通中扮演的角色

- TOUGH2-ECO2N 多相流模型：每 3 年更新一次，以 4D 地震成像
- 傳輸形態重現歷史過程，驗證 CO<sub>2</sub> 未洩漏至鄰近含水層
- 蒙地卡羅法 ( 500 次模擬 )：計算 1,000 年後 CO<sub>2</sub> 殘留在儲集層的機率分佈 ( P90 > 97% 永久封存 )
- 製作「監管報告 ( Policy Brief )」：將複雜數值結果轉化為歐洲議會立法者可理解的風險矩陣 ( 3×3 可能性 × 後果矩陣 )
- 向 IEAGHG 和 EU Innovation Fund 提交第三方模型審核報告
- 確立 CCS 技術「可計量、可報告、可驗證 ( MRV )」標準

## 👥 主要利害關係人 ( Stakeholders )

歐洲議會	碳信用有效性、CO <sub>2</sub> 實際是否永久封存
Equinor	碳信用價值 ( €70–90/tCO <sub>2</sub> )、監管合規
挪威石油部	挪威 CO <sub>2</sub> 稅 ( NOK 1,200/tCO <sub>2</sub> ) 的合理依據
環保 NGO	CO <sub>2</sub> 洩漏風險、海洋生態影響

## 📄 模擬產出的溝通工具

- 4D 地震成像 × TOUGH2 團塊(plume)疊合驗證 ( 年報附件 )
- 千年封存機率圖 ( P10/P50/P90 )
- 3×3 風險矩陣：洩漏可能性 × 環境後果

## ✅ 政策 / 社會成果

- 成為歐盟 CCS ( Directive 2009/31/EC ) 技術附件的核心引用案例
- 奠定 IEAGHG 「最佳實務指引」中 MRV 模型驗證章節的框架
- Sleipner 碳信用通過歐盟 ETS 審查，累積核發超過 2,700 萬噸 CO<sub>2</sub> 信用

## 案例 延伸 讓模擬結果成為「可被監管機構使用」的政策工具

### ■ 社會溝通心得

- MRV 是核心：模擬輸出必須對應「可計量（ Measurable ）  
、可報告（ Reportable ）  
、可驗證（ Verifiable ）」三個政策要求
- 第三方審核不可少：內部模擬結果需經獨立專家審查才具政策效力；監管機構不接受「廠商自說自話」
- 千年尺度的溝通難題：如何讓立法者理解「1,000 年後仍封存的97% 機率」？→ 用「失敗的 3% 等於多少噸 CO<sub>2</sub> 排回大氣」具體化風險矩陣比數字更有力：3×3 矩陣讓政策制定者在 30 秒內理解風險的「量級與緊迫性」
- 預先建立模型更新承諾：「每 3 年更新一次，結果公開發表」是維持政策信任的關鍵機制

### 現場聲音 / 政策關鍵語

「模擬告訴我們，我們注入的每一噸 CO<sub>2</sub> 都在哪裡、會在哪裡待多久。這是我們對下一個世紀的責任。」

— Equinor CCS 技術總監，歐洲議會聽證，2022

### 可移植原則

模型輸出必須以「情境故事（ Scenario Narrative ）」包裝，讓非專業利益相關方能具體想像「若我們選擇 A，未來 20 年將是……」

## 社會 / 政策挑戰

台灣東部地熱潛能區（仁澤、瑞穗、知本）多位於原住民族傳統領域，

《原住民族基本法》第 21 條要求「開發前應取得部落同意（FPIC）」。

開發商的技術語言與部落文化認知之間存在嚴重鴻溝。

## 🏗️ 模擬模型在溝通中扮演的角色

- 建立 FEFLOW 三維地熱儲集層模型，預測鑽井對溫泉（聖地 / 生計）的水溫與流量影響，以「部落生活用水影響評估報告」格式呈現
- 製作「溫泉水位預測動畫」：以阿美族語、排灣族語配音旁白，搭配模擬結果示意圖，在部落會議中播放（非技術語言溝通）
- 情境比較：「有地熱開發 vs. 無地熱開發 vs. 限制深度開發」三種情境的溫泉流量 20 年預測，讓部落自主選擇可接受方案
- 建立「部落監測共治機制」：訓練部落青年擔任現地感測器讀數員，讓部落擁有第一手數據詮釋權

FPIC 是「自由、事先、知情同意」（Free, Prior and Informed Consent）的縮寫

## 👥 主要利害關係人（Stakeholders）

阿美族部落	溫泉聖地保護、傳統領域主權
地熱開發商	鑽探許可、融資需要 FPIC 文件
原民會	FPIC 程序合法性、部落諮詢完整性
縣政府	地方稅收、綠能配額達成、觀光結合

## 模擬產出的溝通工具

- 族語配音溫泉流量 20 年動畫（3 種情境）
- 部落可讀版「溫泉健康評估書」（非技術語言）
- 即時 IoT 溫泉水位 App（部落共同管理）

## ✅ 政策 / 社會成果

- 知本部落 2022 年完成諮詢同意，成為台灣第一個完成 FPIC 程序的地熱案場
- 原民會以此案為範本，修訂「原住民族土地能源開發諮詢作業指引」
- 模擬結果納入地熱潛能區劃設法規，要求新案場提交溫泉影響評估模型

# 案例 延伸 跨越技術語言障礙：讓模擬對話部落文化

## ■ 模式工作者社會溝通心得

- **語言是第一道牆**：族語配音旁白不是「翻譯」，是尊重—部落長老才願意坐下來聽完 30 分鐘動畫
- **文化敏感的指標設計**：「溫泉流量下降 20%」對工程師是數字，對部落是「**祭典能否舉辦**」的生死問題—模擬結果必須對應文化意涵，不能只呈現 m<sup>3</sup>/day
- **共治數據是真正的授權**：讓部落青年讀感測器數據，等於讓部落擁有「資訊主權」，改變權力結構
- **FPIC ≠ 公聽會**：需要多輪深度諮詢；模擬工程師必須願意重返部落說明 → 修改模型 → 再說明
- **地方創生視角**：地熱 + 溫泉觀光 + 部落品牌可整合，模擬需同步提供「開發效益分配」情境分析

## 現場聲音 / 政策關鍵語

「他們第一次拿著平板，  
看到地下溫泉流向我們祖先的聖地，  
那條藍色的線。長老說：  
『這和我們的故事是一樣的。』」

— 台灣原住民地熱諮詢計畫田野調查員，2022

## 可移植原則

模型輸出必須以「情境故事 ( Scenario Narrative ) 」  
包裝，讓非專業利害關係人能具體想像  
「若我們選擇 A，未來 20 年將是.....」

## 社會 / 政策挑戰

澳洲 CCUS 政策計畫 CarbonNet 在 Gippsland 盆地離岸評估 CO<sub>2</sub> 地質封存潛能，但漁業社區強烈反對，擔心 CO<sub>2</sub> 洩漏影響漁場與海洋生態；維多利亞州需要技術依據才能推進選址立法。

## 🔬 模擬模型在溝通中扮演的角色

- TOUGH2-ECO2N 離岸儲集層模型：模擬 50 年注入後 CO<sub>2</sub> 傳輸在 Seaspray 背斜構造的擴散範圍，確認構造完整性
- 洩漏情境分析 ( Leak Scenario Analysis )：刻意模擬最壞情境
- ( 蓋岩出現  $10^{-16}$  m<sup>2</sup> 滲漏裂縫 )，量化海水 pH 值變化幅度，與自然 CO<sub>2</sub> 滲出背景值比較，論證「可接受風險」
- 漁場影響疊圖：將 CO<sub>2</sub> 羽流邊界與漁業捕撈區 GIS 圖層疊合，製作「禁捕影響面積 vs. 注入速率」關係圖
- 公民科學監測方案：提出「漁船兼任海底 pH 感測器佈設平台」計畫，將漁民轉化為 CO<sub>2</sub> 洩漏監測的主動參與者

**CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) 是澳大利亞聯邦科學與工業研究組織，是澳洲最大的國家級科技研究機構，也是世界頂尖的科研組織之一。**

## 👥 主要利害關係人 ( Stakeholders )

漁業社區	漁場毀損、CO <sub>2</sub> 洩漏致魚群死亡、漁業生計
維多利亞州	CCUS 立法依據、離岸礦業法修訂
CSIRO	技術中立評估、科學公信力維護
環保團體	海洋保護區 CO <sub>2</sub> 洩漏風險、EIA 充分性

## 📊 模擬產出的溝通工具

- CO<sub>2</sub> 傳輸邊界 x 漁業捕撈區 GIS 疊合圖
- 最壞情境 pH 變化 vs. 自然背景值比較表
- 漁民兼任監測員計畫書 ( 公民科學方案 )

## ✅ 政策 / 社會成果

- 維多利亞州 2025 年通過《離岸 CCS 法》，明確選址評估需提交「漁業影響量化模擬報告」作為必要文件
- 漁業社區代表加入 CarbonNet 「地方監督委員會」，獲得模型原始數據查閱權
- CSIRO 以本案建立澳洲 CO<sub>2</sub> 封存「社區影響評估標準方法論」

# 案例 延伸 讓反對者成為監測者：衝突轉化與模型透明化

## ■ 模擬工程師的社會溝通實戰心得

- 最壞情境是最好的溝通策略：主動模擬「萬一洩漏」的後果，並論證其仍在可接受範圍 → 比隱瞞風險更能贏得信任
- GIS 疊圖是利害關係人的共同語言：漁民看不懂 MPa 和  $m^3$ ，但看得懂「這片漁場不受影響」的綠色區域
- 將反對者轉化為共同監測者：漁民監測 pH 感測器，等於讓他們擁有「發現異常的第一通報權」，從對立到合作技術中立機構（CSIRO）是關鍵背書：開發商模型需要第三方背書；漁民不信 Equinor，但信任 CSIRO
- 不確定性的誠實溝通：「我們的模型預測不到天然斷層活動，這是為什麼我們需要持續監測」— 誠實才能長期對話

## 現場聲音 / 政策關鍵語

「當我們拿到那張 GIS 地圖，看到我們的漁場在安全線外，不是說我們完全放心了，但至少我們知道這不是黑盒子。」

— 吉普斯蘭漁業協會主席，澳洲參議院聽證，2024

## 可移植原則

模型輸出必須以「情境故事（Scenario Narrative）」包裝，讓非專業利害關係人能具體想像

「若我們選擇 A，未來 20 年將是……」



敬請指教!

- ◆ Email: [nichuenfa@geo.ncu.edu.tw](mailto:nichuenfa@geo.ncu.edu.tw)
- ◆ Tel: +886-3-4227151 ext. 65874
- ◆ Fax: +886-3-4263127

CONTACT/JOIN US