

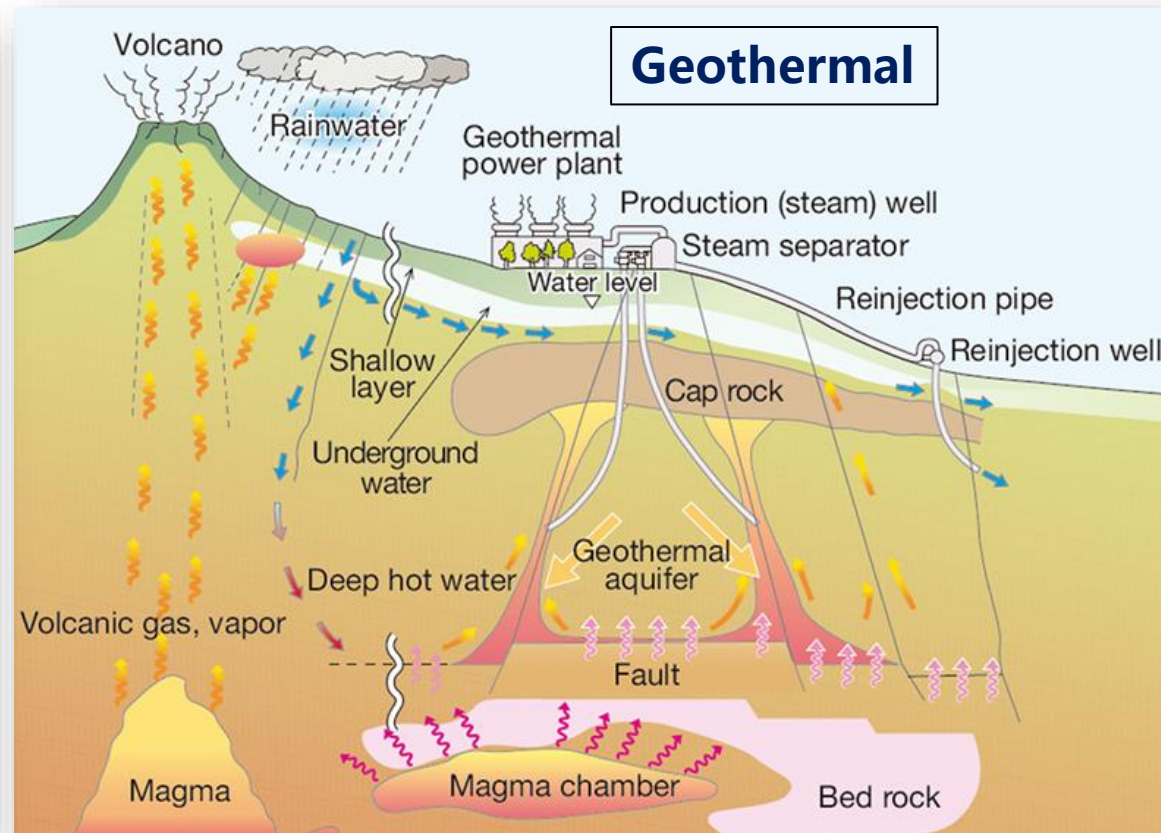
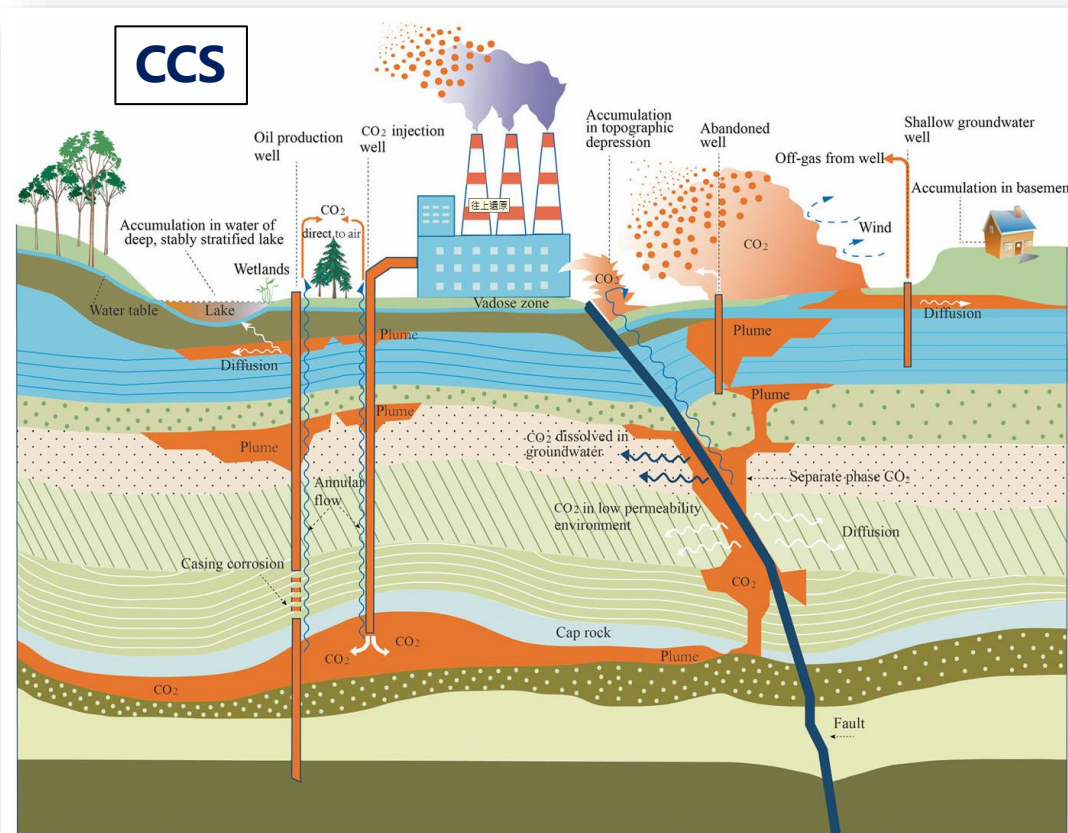
# 二氧化碳封存與地熱系統之 地下流體行為與多物理耦合模擬

國立台灣大學新碳勘科技研究中心

郭家瑋副研究員

2026/05/14

# 地下工程的共同問題：流體會往哪裡走？



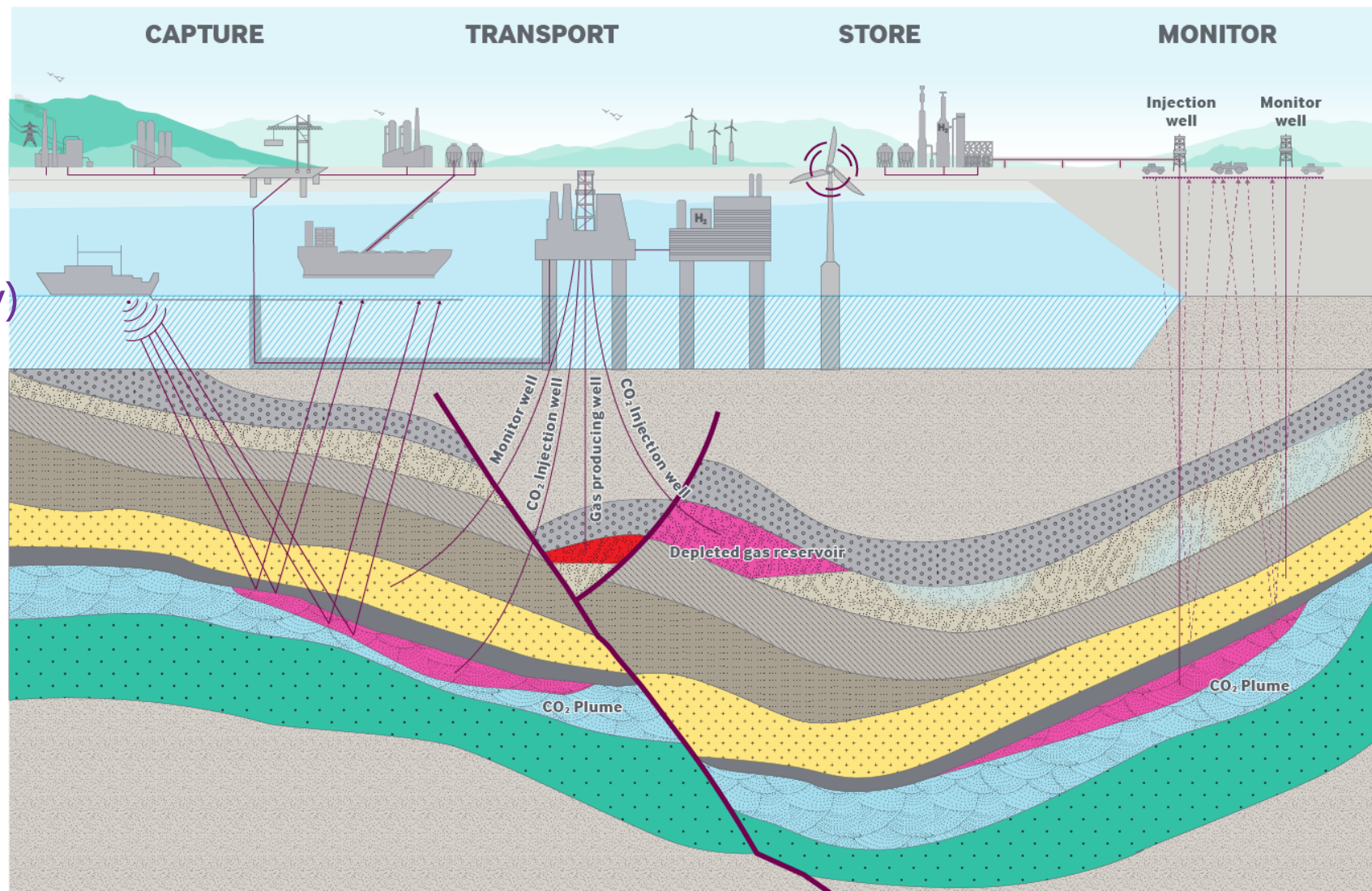
地下不是透明的 但我們卻要做很大的工程決策

看不到  
很複雜  
決策成本高

共同點：都牽涉地下流體在複雜地層中的遷移、壓力傳播與長期演化

# 如果要把CO<sub>2</sub>存進地下，你最想先知道什麼？

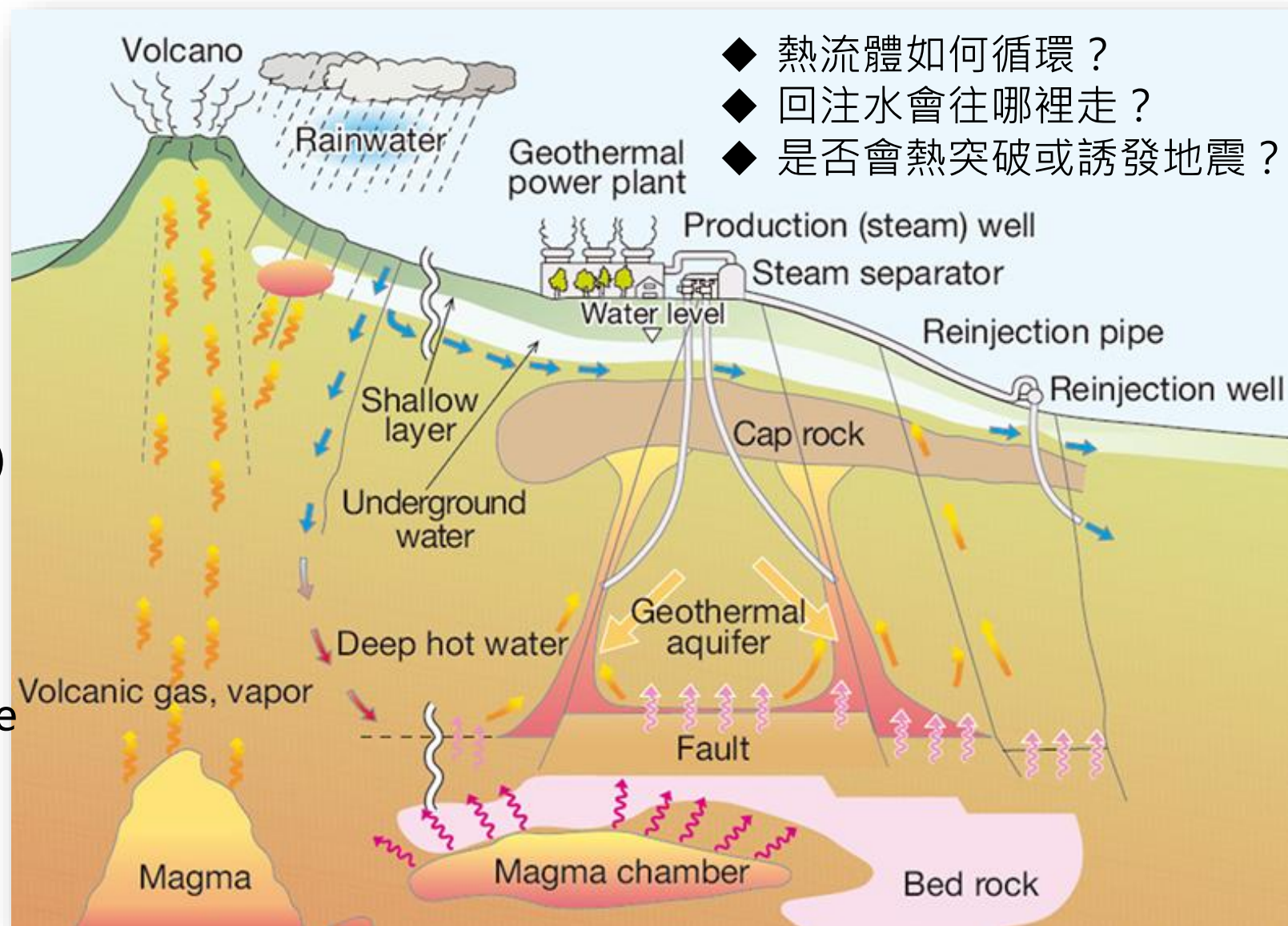
- 儲集層Reservoir  
(Permeability & Volume)
  - 蓋層Caprock  
(Clay Seal/Low permeability)
  - 流體通道Fluid Pathways  
(Faults/Fractures)
- 
- ◆ CO<sub>2</sub> 注入後會往哪裡移動？
  - ◆ 壓力會傳多遠？
  - ◆ 能否長期封存？



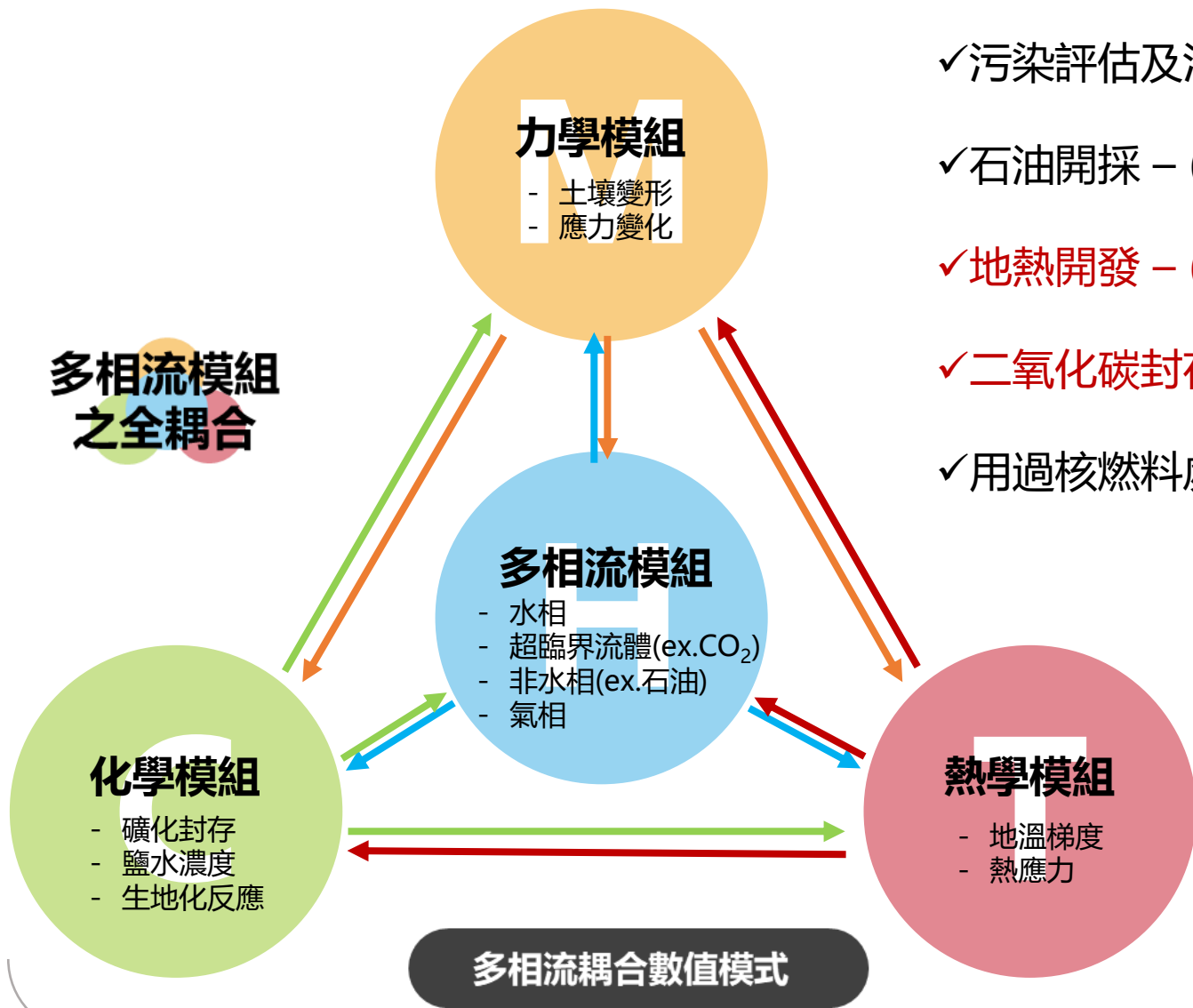
<https://www.rpsgroup.com/sectors/energy-consultants/storage/carbon-capture-and-storage-ccs/>

# 如果要開發一個地熱場址，你最想知道什麼？

- **熱源**Heat Source  
(Magmatic/Tectonic)
- **儲集層**Reservoir  
(Permeability & Volume)
- **蓋層**Caprock  
(Clay Seal/Low permeability)
- **流體通道**Fluid Pathways  
(Faults/Fractures)
- **補注排放**Recharge/Discharge  
(Inflow/Outflow)



# 地下環境議題源自多重耦合過程



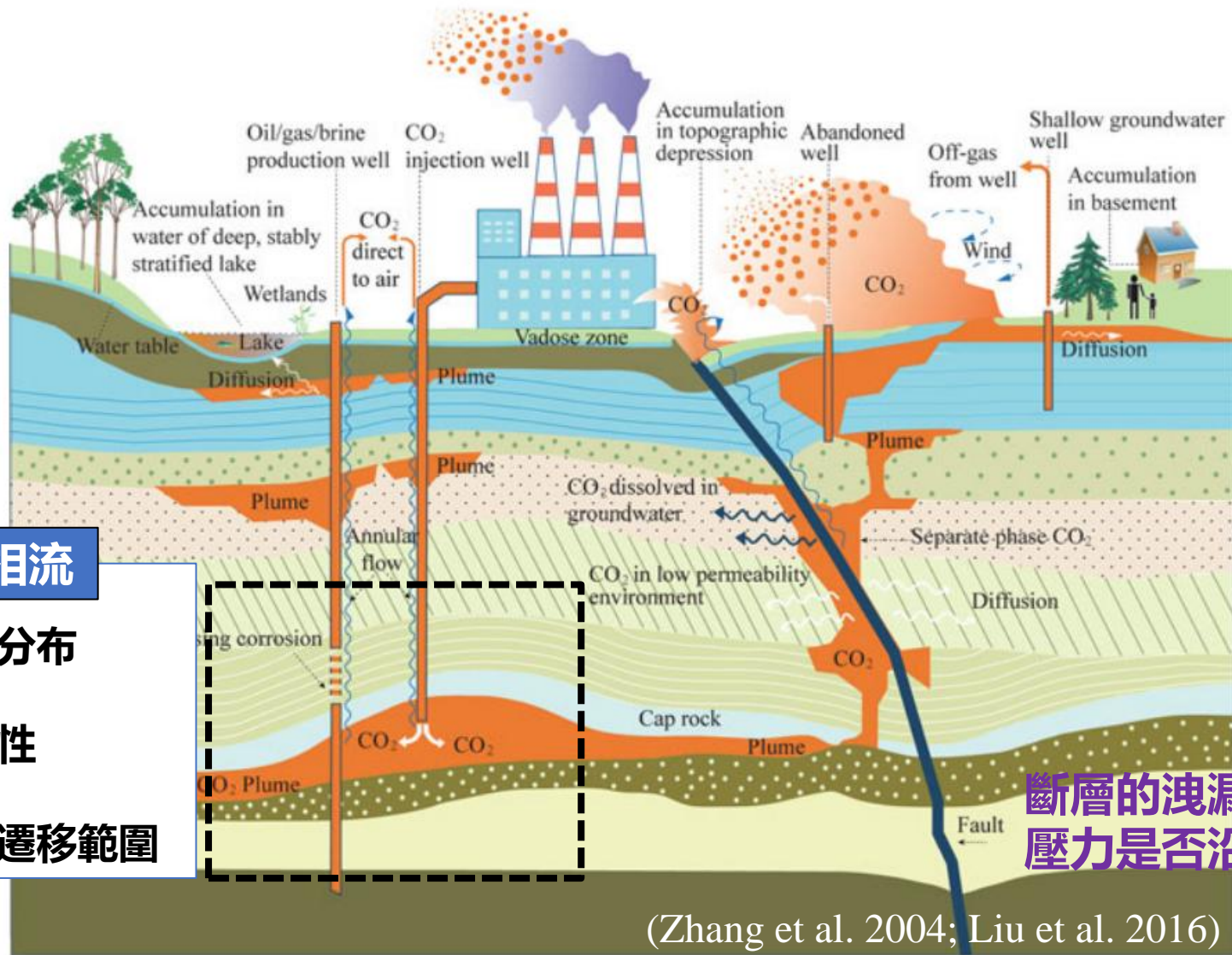
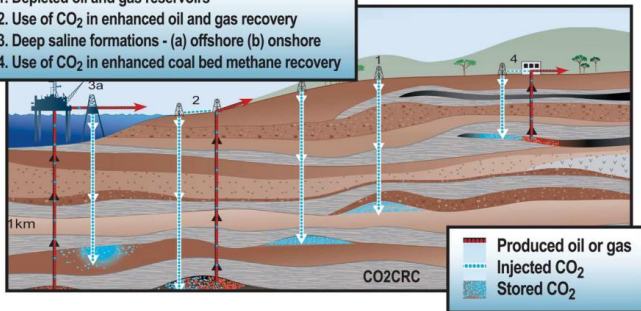
- ✓ 污染評估及污染物整治 (變飽和流/多相流耦合化學反應傳輸)
- ✓ 石油開採 - (多相流耦合熱力化)
- ✓ 地熱開發 - (變飽和流/多相流耦合熱力化學反應)
- ✓ 二氧化碳封存 - (多相流耦合熱力化)
- ✓ 用過核燃料處置 - (變飽和流/多相流耦合熱力化學反應傳輸)

- 熱-水耦合
- 水-力耦合
- 熱-水-力耦合
- 熱-水-化耦合
- 熱-水-力-化全耦合

# Fundamental Subsurface Processes Thermal and Hydrologic Processes

## Overview of Geological Storage Options

1. Depleted oil and gas reservoirs
2. Use of CO<sub>2</sub> in enhanced oil and gas recovery
3. Deep saline formations - (a) offshore (b) onshore
4. Use of CO<sub>2</sub> in enhanced coal bed methane recovery



**Multi-component:**  
CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, dissolved salts in the brine, and rock minerals  
**Multi-phase:** CO<sub>2</sub>-rich phase and brine  
**Integrated Media:**  
Porous Media, fractures, heterogeneity etc.

**多相流**  
溫度壓力分布  
地層構造  
空間異質性  
地質特性  
二氧化碳遷移範圍

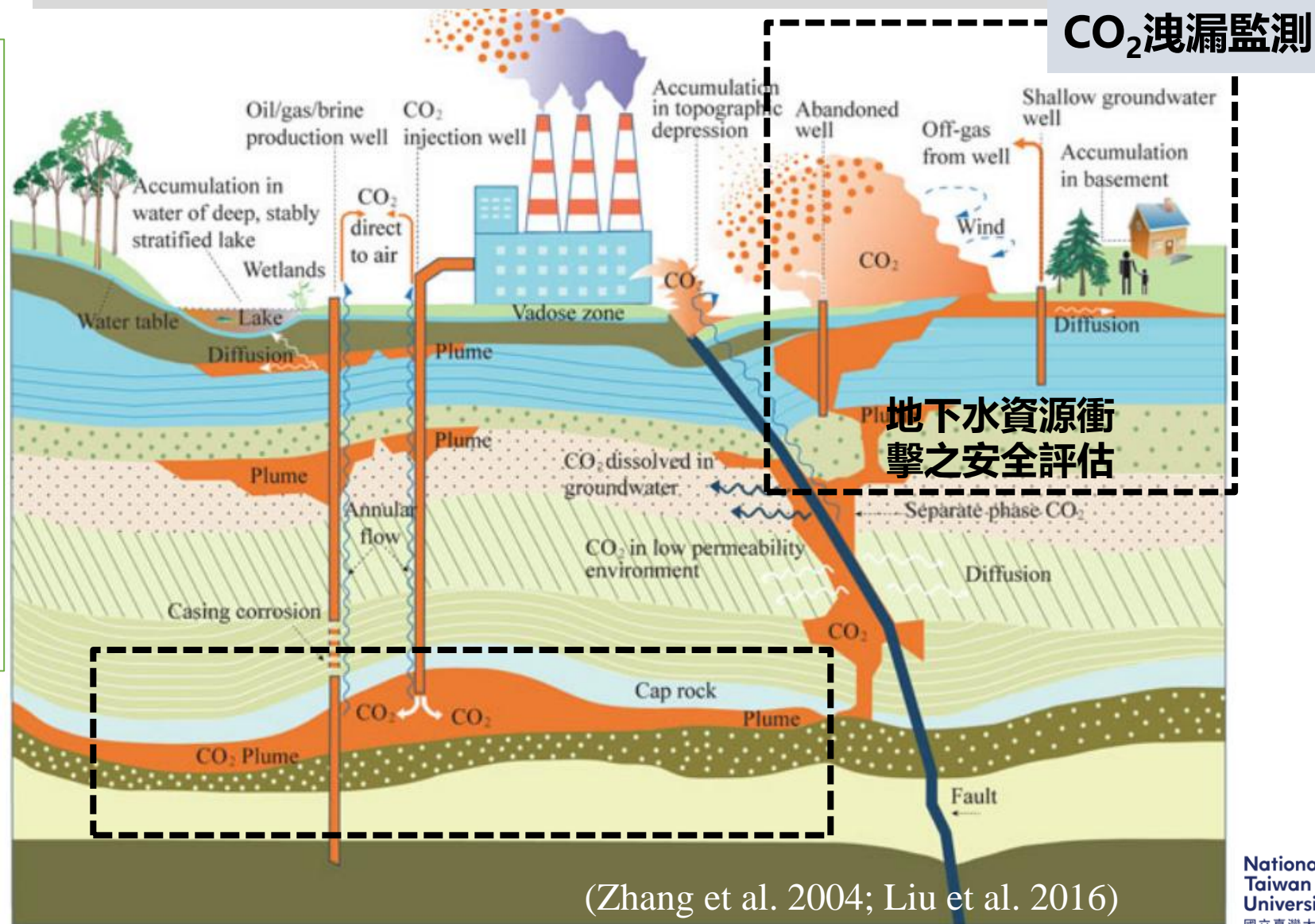
**斷層的洩漏風險**  
壓力是否沿斷層傳播

(Zhang et al. 2004; Liu et al. 2016)

# Fundamental Subsurface Processes Geo-Chemical Processes

## 相關的化學作用

- ✓ 水相錯合反應 ( Aqueous speciation )
- ✓ 礦物的溶解與沈澱反應 ( Dissolution / Precipitation )
- ✓ 微生物介導的氧化還原反應  
( Microbial-mediated redox reactions )
- ✓ 溶液與礦物之間的離子交換作用  
( Ion exchange between solutions and minerals )
- ✓ 發生於多相界面的表面化學反應 ( 例如表面錯合反應與吸附作用，Surface complexation / Sorption )
- ✓ 這些化學過程對孔隙率與滲透率的影響 ( Effects of these processes on porosity and permeability )

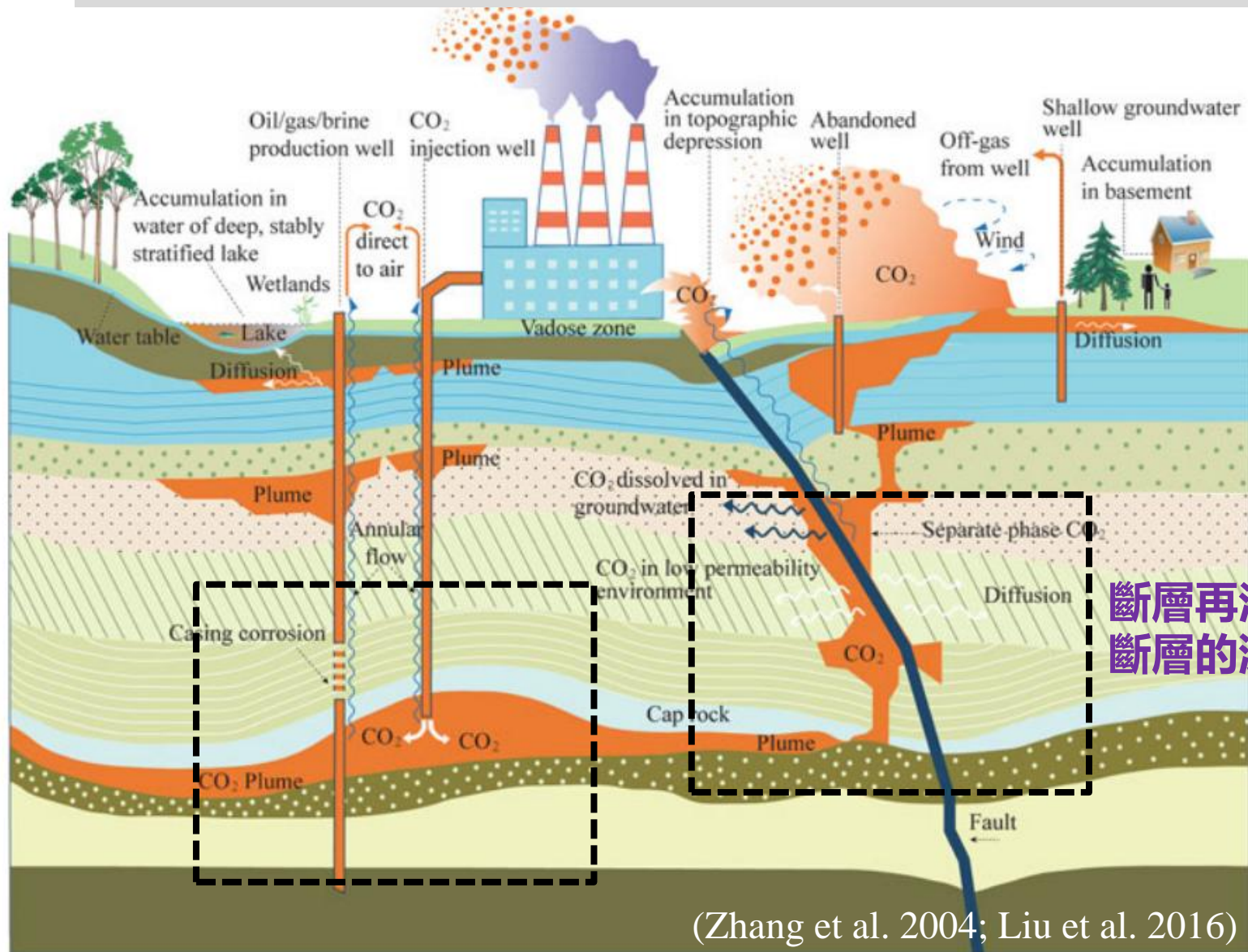


# Fundamental Subsurface Processes Geo-Mechanical Processes

當流體注入或溫度改變時，儲層裡的岩石會受到壓力、熱膨脹或化學變化的影響而變形。要描述這種變形，就需要「應力-應變關係式」，不同的力學模型，就是對這種關係的不同假設。

## 力學

壓力累積誘發地震風險評估  
蓋層完整性評估  
蓋層洩漏風險



斷層再活動  
斷層的洩漏風險

(Zhang et al. 2004; Liu et al. 2016)

地下碳封存系統複雜的原因：

➤ 多重物理過程同時作用

流動、壓力、地化反應與地層應力相互耦合

➤ 流體性質與相態會隨壓力、溫度改變

CO<sub>2</sub> 可呈現超臨界相 / 氣相，並與地層鹽水形成兩相流動

➤ 多成分、多相態流體系統

CO<sub>2</sub>、鹽水、溶解成分與礦物反應共同影響封存行為

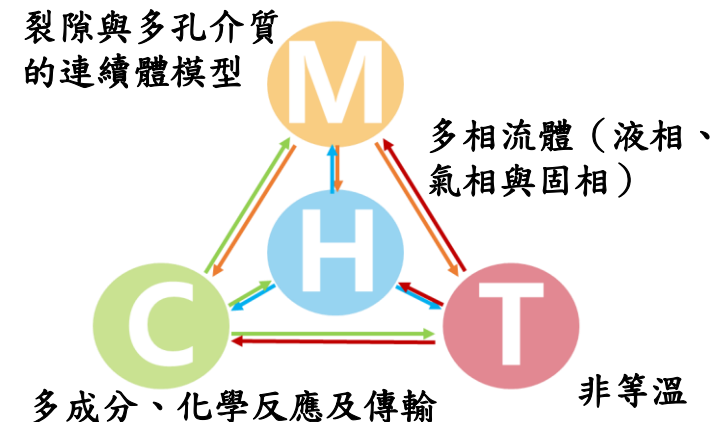
➤ 非線性回饋機制明顯

壓力改變流動與應力，異質性改變 CO<sub>2</sub> 遷移路徑

➤ 地質構造與岩性高度異質

儲集層、蓋層、斷層、裂隙與層狀構造共同控制風險

裂隙與多孔介質  
的連續體模型



**Multi-component:**

CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, dissolved salts in the brine, and rock minerals

**Multi-phase:**

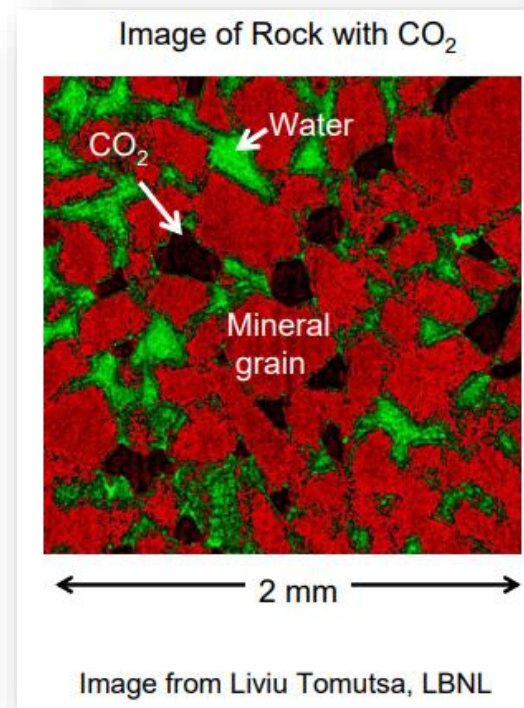
CO<sub>2</sub>-rich phase and brine

**Integrated Media:**

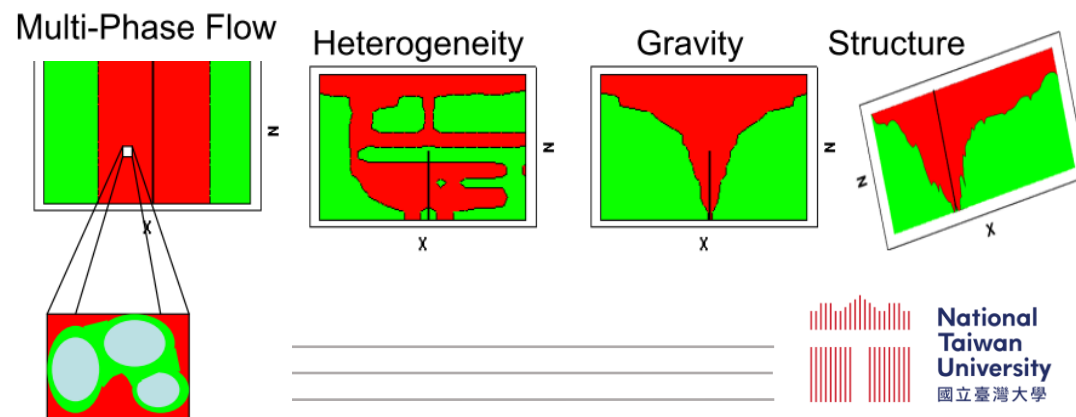
Porous Media, fractures, faults heterogeneity etc.

不同尺度的地質異質性，會控制 CO<sub>2</sub> 羽流遷移、壓力傳播與長期封存安全性

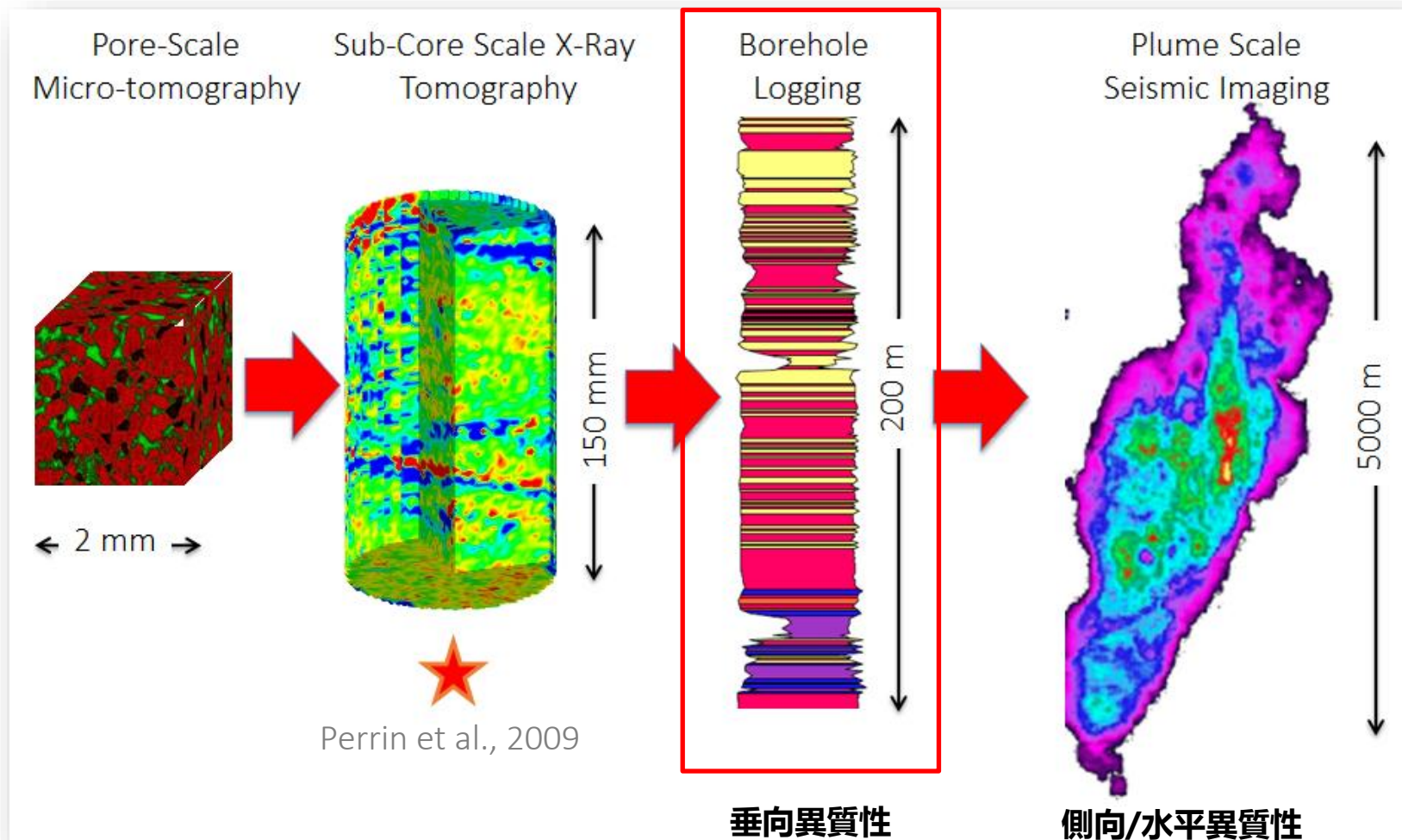
- ◆ CO<sub>2</sub> 羽流會如何遷移？ ( plume migration )
- ◆ CO<sub>2</sub> 能否被長期封存？ ( trapping )
- ◆ 注入後壓力是否會過度升高？ ( pressure buildup )
- ◆ 地層具有高度異質性 ( heterogeneity )
- ◆ 斷層是否可能再活化？ ( fault reactivation )
- ◆ 蓋層封閉性是否足夠？ ( caprock sealing )
- ◆ 地下參數與構造存在不確定性 ( uncertainty )



CO<sub>2</sub> 封存行為受地質構造、地層異質性、多相流與壓力傳播共同控制，因此需要透過數值模擬整合不同尺度的地下資訊。



# 地下異質性存在於不同尺度

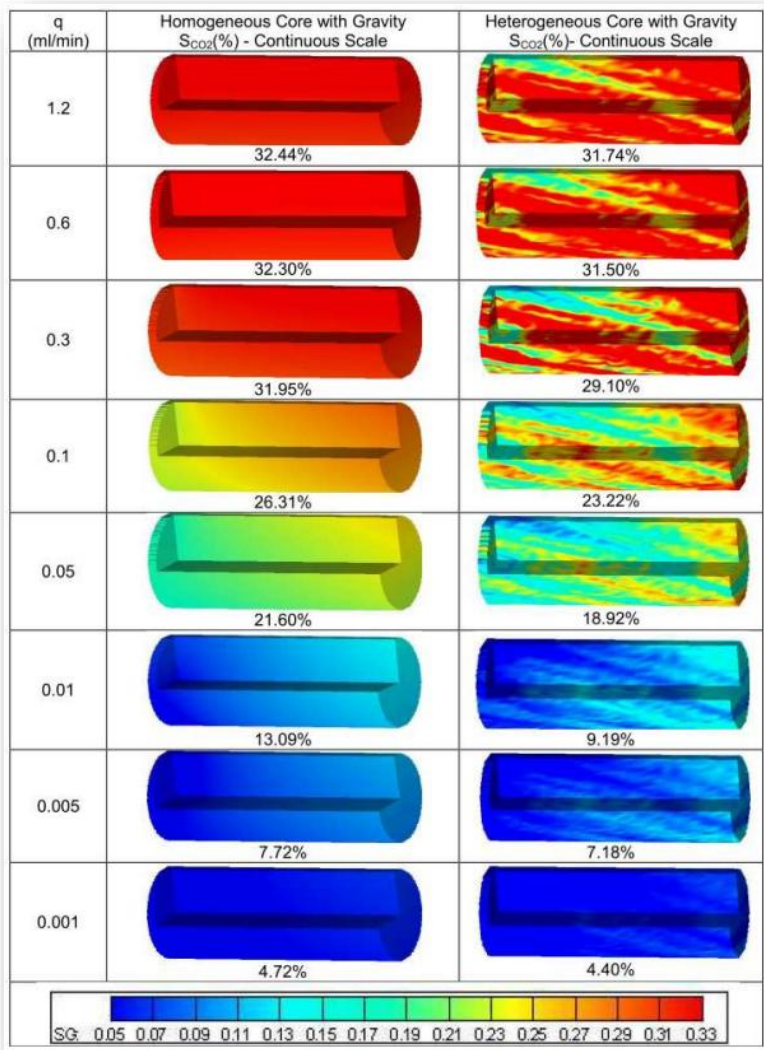


- ◆ 地下不是均質介質  
岩石性質會隨尺度與位置改變
- ◆ 異質性會改變流體怎麼走  
滲透率分布控制 CO<sub>2</sub> 羽流遷移、壓力傳播與地熱流體循環
- ◆ 模型不能只用單一平均值代表地下系統  
需要整合岩心、井測、地物與數值模擬資料

從孔隙尺度到場址尺度，異質性共同控制地下流體與物質傳輸行為

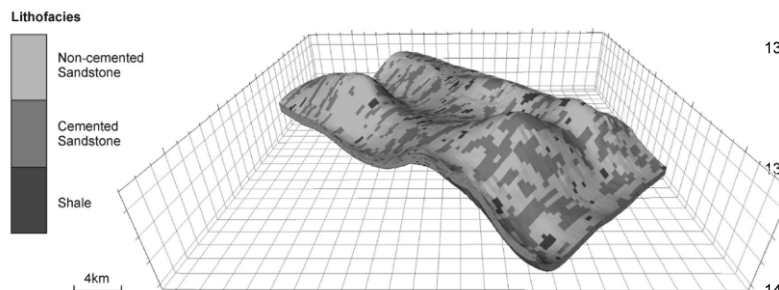
# 從岩心到場址尺度：異質性如何影響地下流體遷移？

## Core-scale heterogeneity

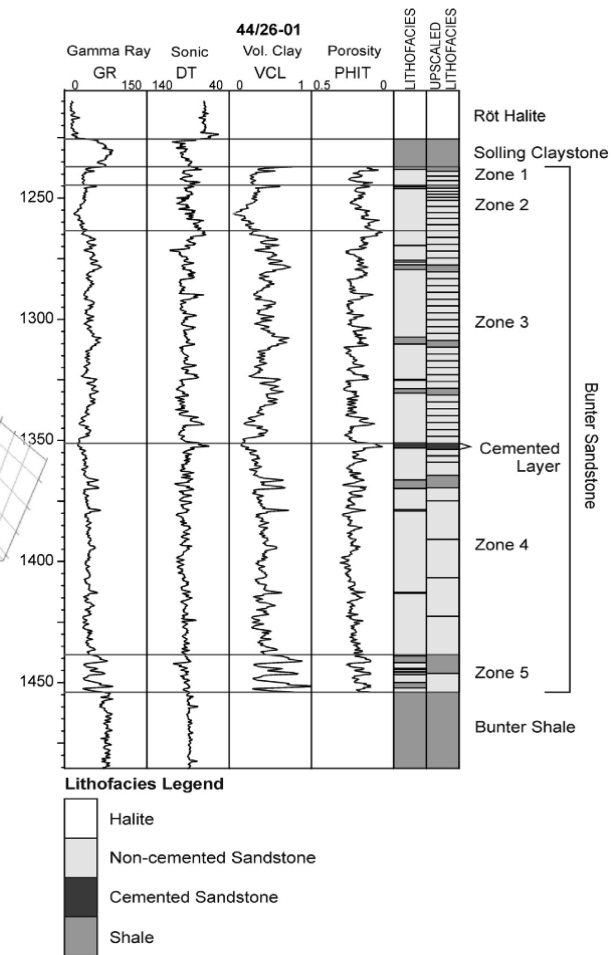


Kuo et al., 2010

## Field-scale heterogeneity

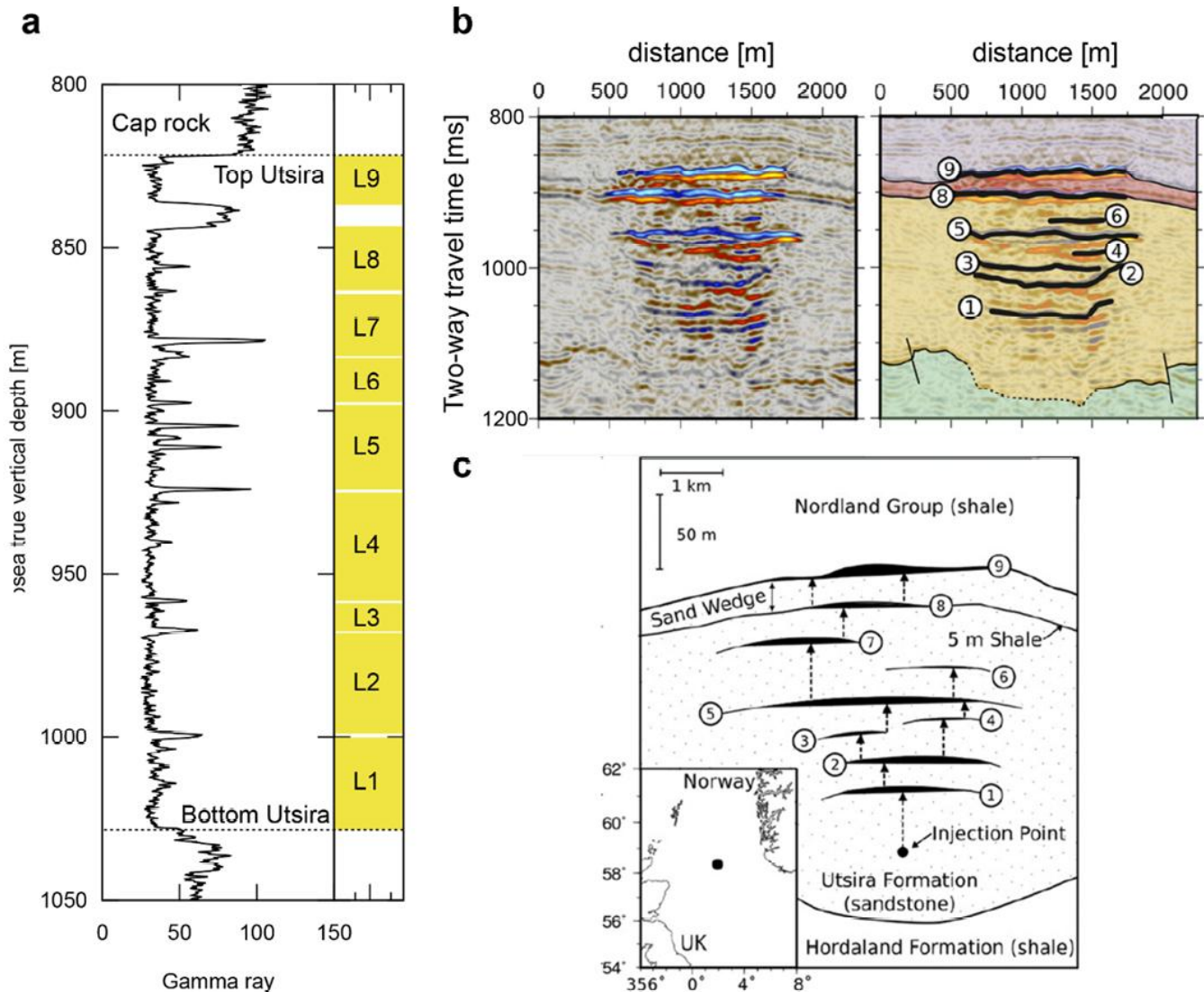


Williams et al. (2012)



異質性是決定 CO<sub>2</sub> 羽流、壓力傳播、地熱流體循環與熱交換效率的關鍵因素

# 薄層頁岩夾層如何控制 CO<sub>2</sub> 羽流分布? —Sleipner 案例

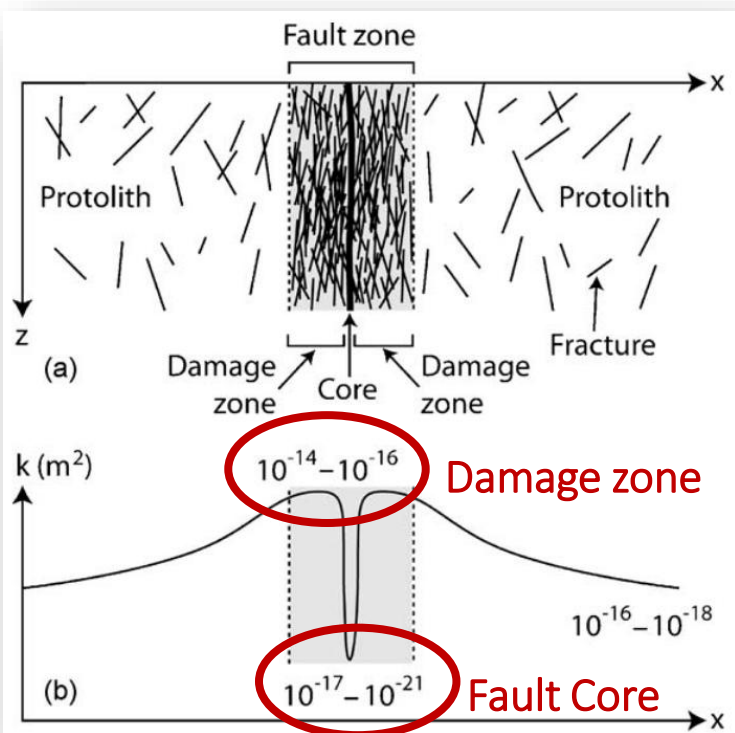


- ◆ Utsira 砂岩內部含多層泥質 / 頁岩夾層  
gamma ray 高值通常對應較高泥質含量與低滲透薄層
- ◆ CO<sub>2</sub> 羽流受到薄層阻隔而分層展布  
CO<sub>2</sub> 不只是單純往上浮，而是在多個層位中側向遷移
- ◆ 4D seismic 可觀測 CO<sub>2</sub> 羽流隨時間演化  
地震監測結果可作為模型校正與驗證的重要資料
- ◆ 異質性必須進入概念模型與數值模型  
若忽略薄層結構，可能誤判 CO<sub>2</sub> 遷移範圍與封存行為

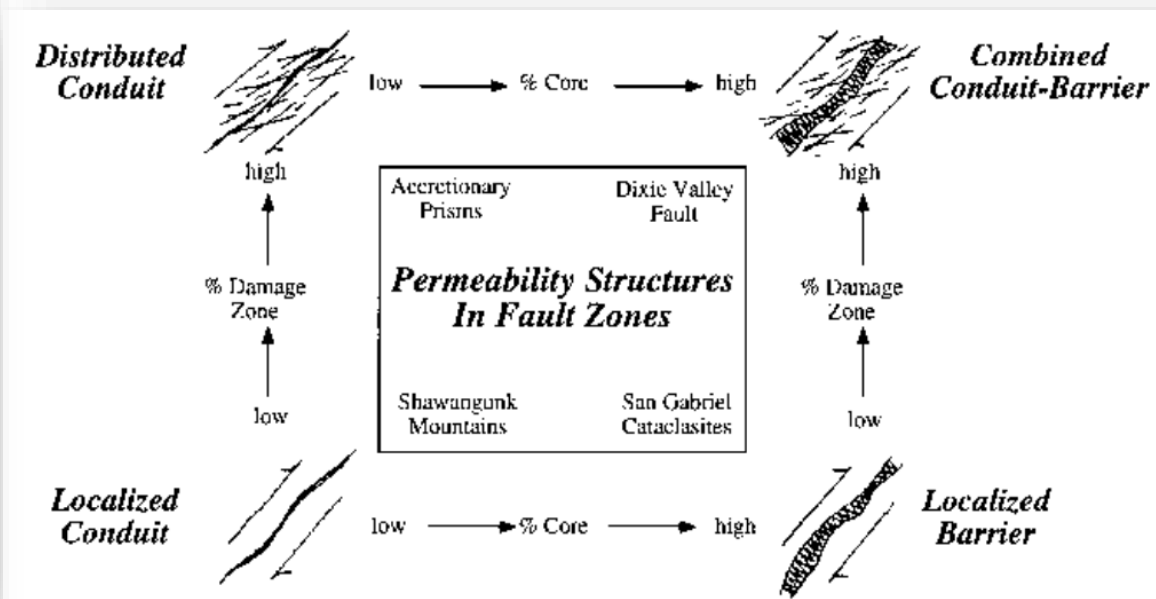
(Akai et al. 2021)

# 斷層可作為流體通道，也可能成為屏障

斷層可能是好的流體通道（高滲透率）也可能是屏障（低滲透率）  
實際行為取決於斷層核心、破碎帶、岩性對比與應力狀態。



Cappa et al. (2011)

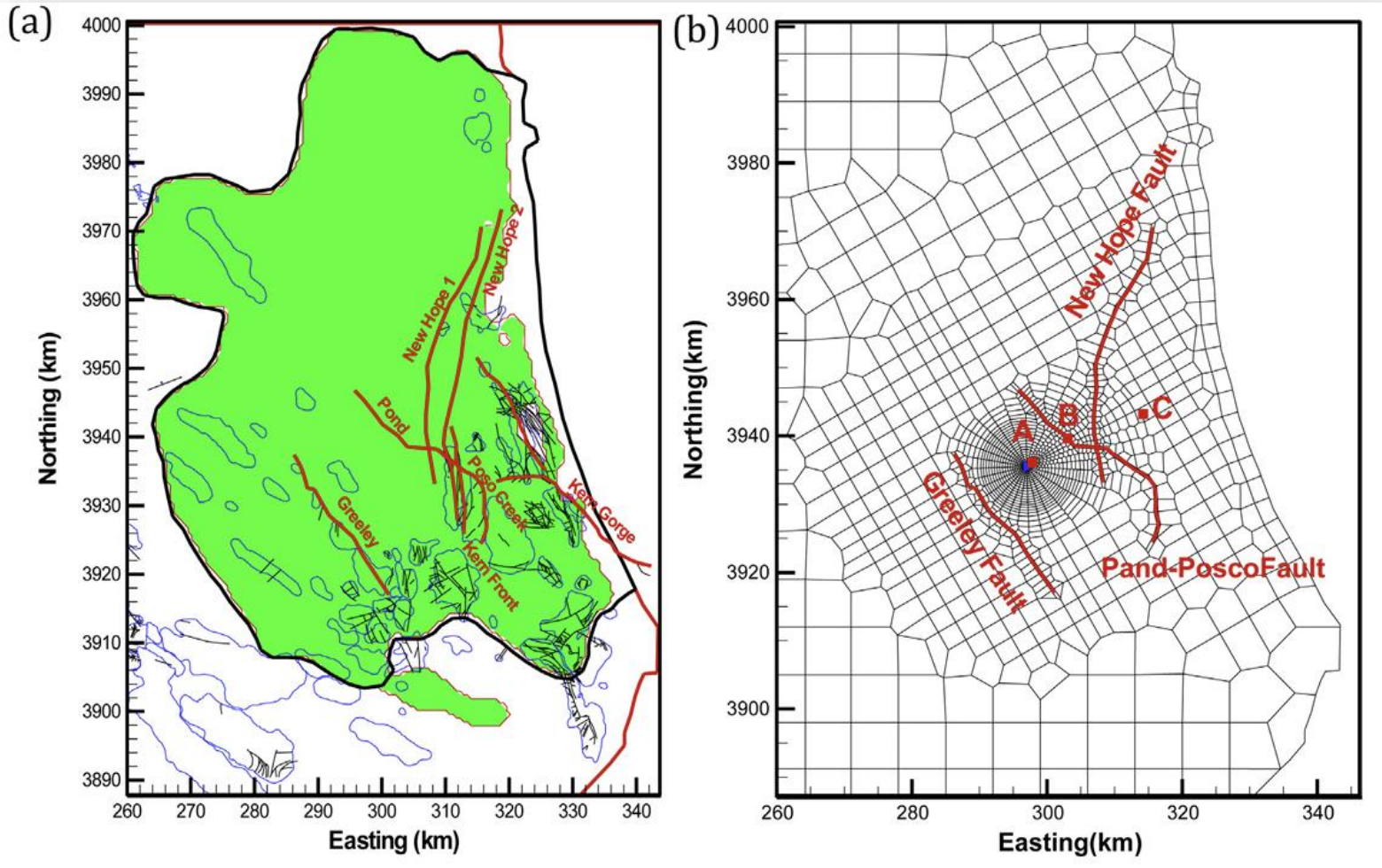


Caine et al. (1996)

不同斷層內部結構會形成不同的滲透率架構：局部導流、分散導流、局部阻隔，或導流與阻隔並存。

在 CCS、地熱與核廢料處置中，斷層是否連通、是否導水，以及在工程擾動下是否再活化，是安全評估的核心問題

# Case Studies: Large-Scale CO<sub>2</sub> Storage Systems at Southern San Joaquin Basin, California

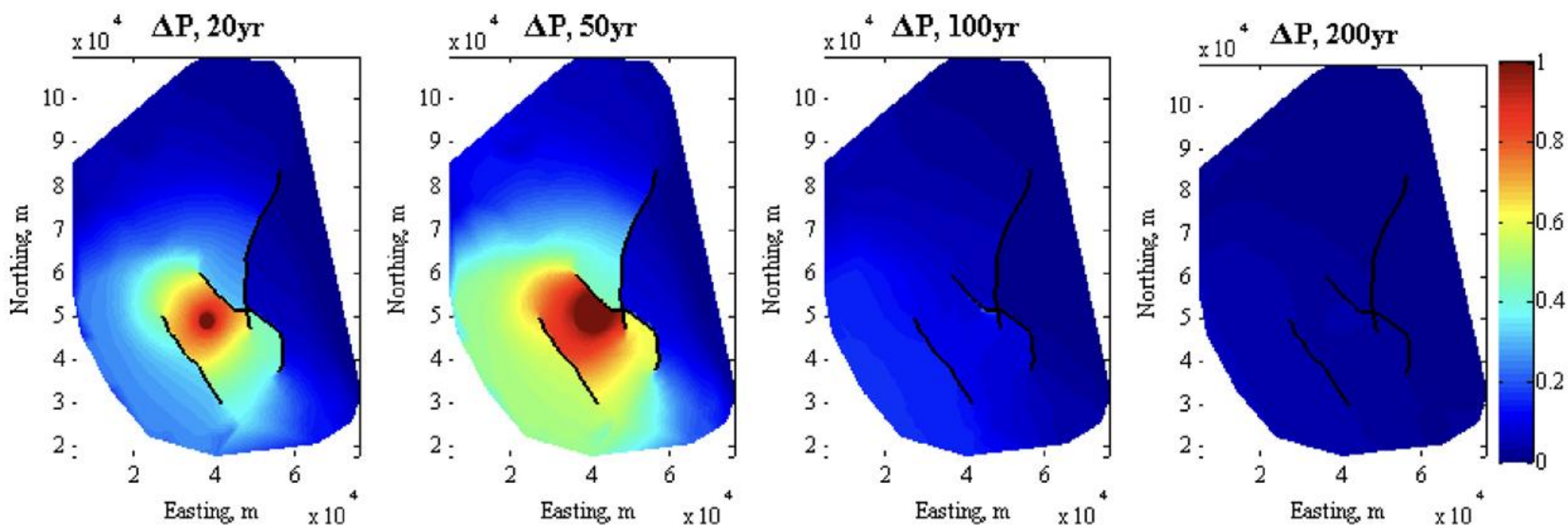


- Model domain: 84km x 112 km
- 12 discontinuous or continuous formations
- **5 Mt/yr injection** for 50 yrs
- Total simulation time **200 years**
- TOUGH2-MP/ECO2N
- 64,214 elements
- **Significant mesh refinement** can be seen in the center of the domain

The areal extent of the Vedder formation (large permeable sandstone formation)

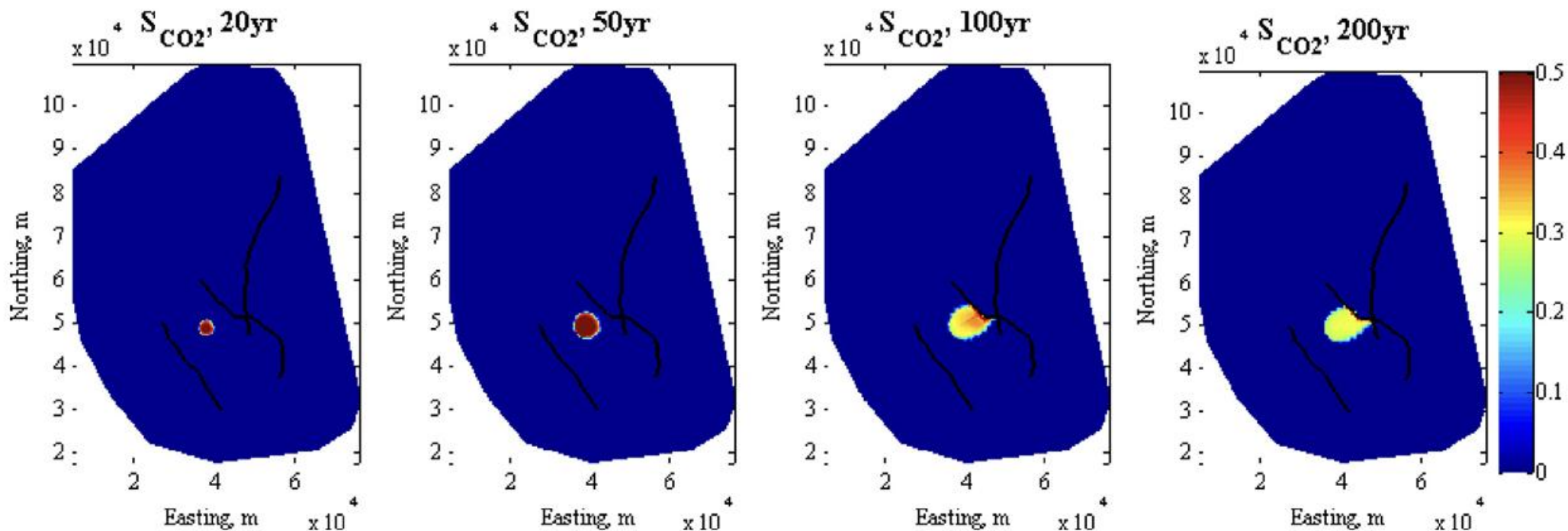
## Evolution of Pressure Buildup

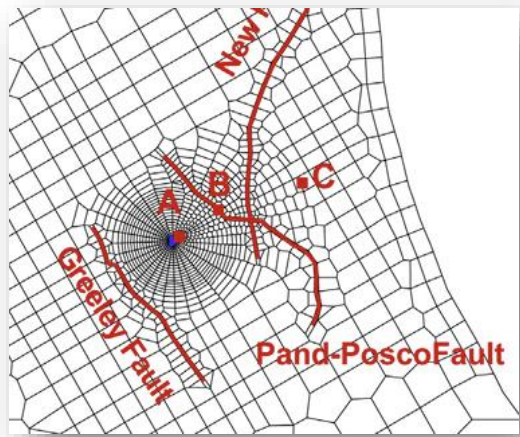
measures the area of an overpressure zone at the reservoir-caprock boundary.



## Evolution of Saturation

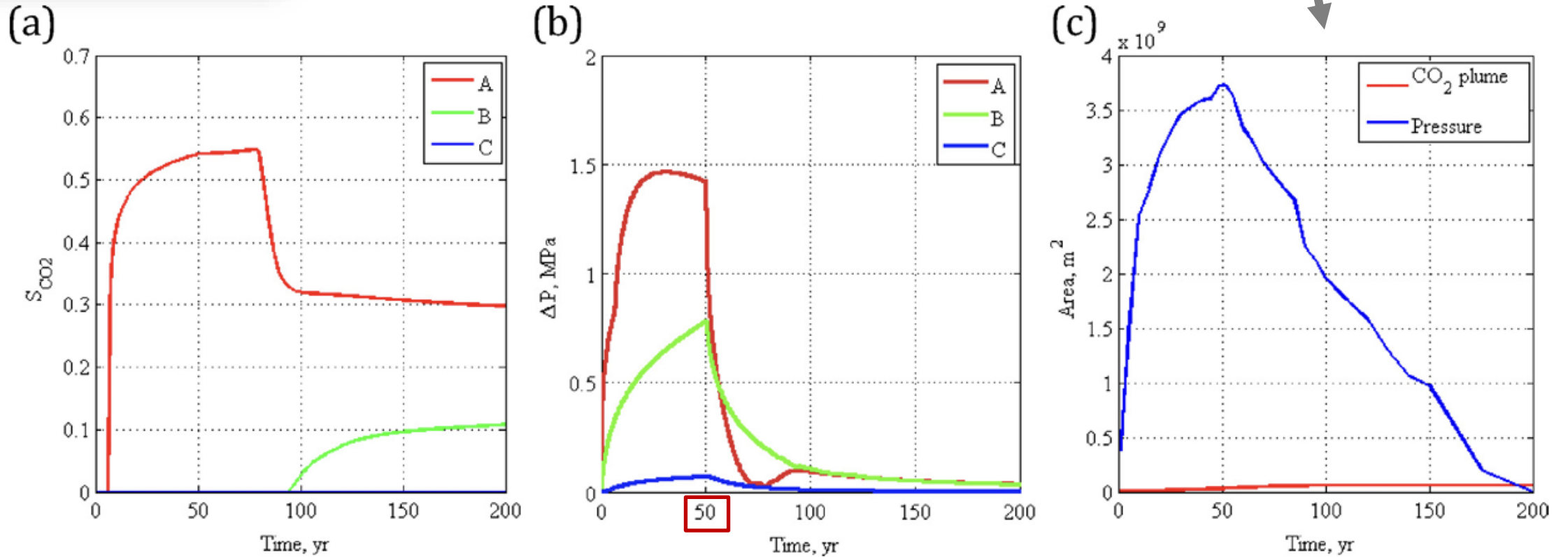
measures the area of the  $\text{CO}_2$  plume at the reservoir-caprock boundary.





A point: 1.8 km (near field)  
 B point: 7.3 km (fault location)  
 C point: 18.9 km (far field)

- measures the area of the CO<sub>2</sub> plume (SG > residual saturation of 0.25)
- measures the area of an overpressure zone (dP > 0.058 MPa)



**Fig. 4.** Time evolution of the performance measures for the reference parameter case: (a) CO<sub>2</sub> saturation ( $S_{CO_2}$ ), (b) pressure buildup ( $\Delta P$ ) and (c) area of CO<sub>2</sub> plume and overpressure zones.

# 碳封存不只處理流體怎麼流動，還包含化學反應

PRIMARY

SECONDARY

#	mineral				
MN 1	Calcite	方解石	$CaCO_3 + H^+ = Ca^{2+} + HCO_3^-$		
MN 2	Chlorite	綠泥石	$(Fe, Mg)_5Al(Si_3Al)O_{10}(OH)_8 + 8 H^+$ $= 3 SiO_{2(aq)} + 2.5 Fe^{2+} + 2.5 Mg^{2+} + 8 H_2O + 2 AlO_2^-$	Chamosite	
MN 3	Hematite	赤鐵礦	$Fe_2O_3 + 4 H^+ = 2 H_2O + 0.5 O_{2(aq)} + 2 Fe^{2+}$		
MN 4	Illite	伊利石	$K_{0.6}(Al, Mg)_2(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2$ $= 1.2 H^+ + 0.25 Mg^{2+} + 0.6 K^+ + 3.5 SiO_{2(aq)} + 0.4 H_2O + 2.3 AlO_2^-$		
MN 5	K-feldspar	鉀長石	$KAlSi_3O_8 = K^+ + 3 SiO_{2(aq)} + AlO_2^-$		
MN 6	Kaolinite	高嶺土	$Al_2Si_2O_5(OH)_4 = 2 H^+ + 2 SiO_2 + H_2O + 2 AlO_2^-$		
MN 7	Oligoclase	奧長石	$5 (Ca, Na)(Al, Si)_4O_8 = 4 Na^+ + 14 SiO_{2(aq)} + Ca^{2+} + 6 AlO_2^-$		
MN 8	Quartz	石英	$SiO_2 = SiO_{2(aq)}$		
MN 9	Smectite-Na	蒙脫石	$(smectite - na) = 0.52 H_2O + 0.29 Na^{2+} + 0.96 H^+ + 0.26 Mg^{2+} + 3.97 SiO_{2(aq)} + 1.77 AlO_2^-$		
MN 10	Albite(low)	鈉長石	$NaAlSi_3O_8 = Na^+ + 3 SiO_{2(aq)} + AlO_2^-$	Low: 低溫產生	
MN 11	Ankerite-2	鐵白雲石	$Ca(Fe, Mg, Mn)(CO_3)_2 + 2 H^+ = 2 HCO_3^- + Ca^{2+} + 0.3 Mg^{2+} + 0.7 Fe^{2+}$	Calibration	
MN 12	Dawsonite	片鈉鋁石	$NaAlCO_3(OH)_2 = H^+ + HCO_3^- + Na^+ + AlO_2^-$	Calibration	
MN 13	Dolomite-2	白雲石	$CaMg(CO_3)_2 + 2 H^+ = Ca^{2+} + Mg^{2+} + 2 HCO_3^-$	CO <sub>2</sub> 會溶解在地下水中 並與岩石礦物發生反應 最後可能形成穩定的礦物 ( 礦化封存 )	
MN 14	Magnesite	菱鎂礦	$MgCO_3 + H^+ = Mg^{2+} + HCO_3^-$		
MN 15	Pyrite-2	黃鐵礦	$FeS_2 + H_2O + 3.5 O_{2(aq)} = Fe^{2+} + 2 H^+ + 2 SO_4^-$		
MN 16	Siderite-2	菱鐵礦	$FeCO_3 + H^+ = Fe^{2+} + HCO_3^-$		
MN 17	Smectite-Ca	蒙脫石	$(smectite - ca) = 0.52 H_2O + 0.145 Ca^{2+} + 0.96 H^+ + 0.26 Mg^{2+} + 3.97 SiO_{2(aq)} + 1.77 AlO_2^-$		

# 礦化封存驗證案例所考慮的70個不同化學物種組成

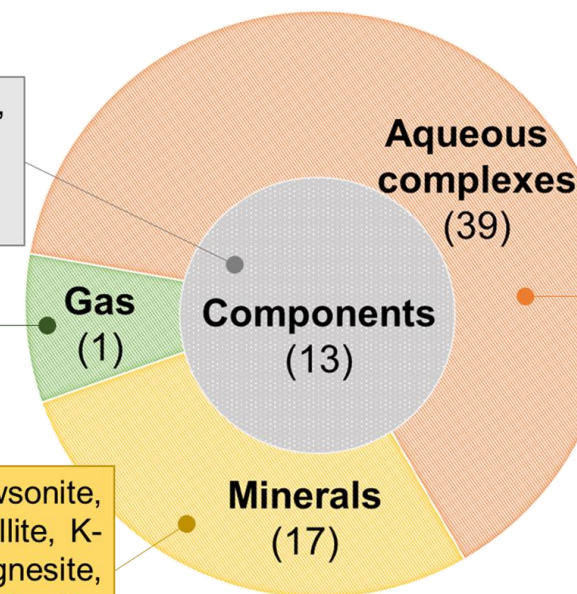
	species
主要組成物 Components	$\text{AlO}_2^-$ 、 $\text{Ca}^{+2}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Fe}^{+2}$ 、 $\text{H}^+$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{+2}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{O}_2(\text{aq})$ 、 $\text{SiO}_2(\text{aq})$ 、 $\text{SO}_4^{-2}$
水相錯和 Aqueous complexes	Acetic~acid(aq)、 $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{aq})$ 、 $\text{Al}^{+3}$ 、 $\text{AlOH}^{+2}$ 、 $\text{CaCl}^+$ 、 $\text{CaCl}_2(\text{aq})$ 、 $\text{CaCO}_3(\text{aq})$ 、 $\text{CaHCO}_3^+$ 、 $\text{CaOH}^+$ 、 $\text{CaSO}_4(\text{aq})$ 、 $\text{CH}_4(\text{aq})$ 、 $\text{CO}_2(\text{aq})$ 、 $\text{CO}_3^{-2}$ 、 $\text{Fe}^{+3}$ 、 $\text{FeCl}^{+2}$ 、 $\text{FeCl}_4^{-2}$ 、 $\text{FeCO}_3(\text{aq})$ 、 $\text{FeHCO}_3^+$ 、 $\text{H}_2(\text{aq})$ 、 $\text{H}_2\text{S}(\text{aq})$ 、 $\text{H}_3\text{SiO}_4^-$ 、 $\text{HAlO}_2(\text{aq})$ 、 $\text{HS}^-$ 、 $\text{HSiO}_3^-$ 、 $\text{KCl}(\text{aq})$ 、 $\text{KSO}_4^-$ 、 $\text{MgCl}^+$ 、 $\text{MgHCO}_3^+$ 、 $\text{MgSO}_4(\text{aq})$ 、 $\text{NaAl}_2(\text{aq})$ 、 $\text{NaAlO}_2(\text{aq})$ 、 $\text{NaCl}(\text{aq})$ 、 $\text{NaCO}_3^-$ 、 $\text{NaHCO}_3(\text{aq})$ 、 $\text{NaHSiO}_3(\text{aq})$ 、 $\text{NaOH}(\text{aq})$ 、 $\text{NaSO}_4^-$ 、 $\text{OH}^-$ 、 $\text{SO}_2(\text{aq})$
礦物 Minerals	Calcite、Albite(low)、Ankerite-2、Chlorite、Dawsonite、Dolomite-2、Hematite、Illite、K-feldspar、Kaolinite、Magnesite、Oligoclase、Pyrite-2、Quartz、Siderite-2、Smectite-Ca、Smectite-Na
氣體 Gas	$\text{CO}_2$

- Components:
- |                         |                               |
|-------------------------|-------------------------------|
| 1. $\text{AlO}_2^-$     | 7. $\text{HCO}_3^-$           |
| 2. $\text{Ca}^{+2}$     | 8. $\text{K}^+$               |
| 3. $\text{Cl}^-$        | 9. $\text{Mg}^{+2}$           |
| 4. $\text{Fe}^{+2}$     | 10. $\text{Na}^+$             |
| 5. $\text{H}^+$         | 11. $\text{O}_2(\text{aq})$   |
| 6. $\text{H}_2\text{O}$ | 12. $\text{SiO}_2(\text{aq})$ |
|                         | 13. $\text{SO}_4^{-2}$        |

$\text{AlO}_2^-$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{O}_2(\text{aq})$ ,  $\text{SiO}_2(\text{aq})$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$

$\text{CO}_2$

Calcite, Ankerite-2, Dawsonite, Dolomite-2, Hematite, Illite, K-feldspar, Kaolinite, Magnesite, Pyrite-2, Quartz, Smectite-Ca, Smectite-Na .....



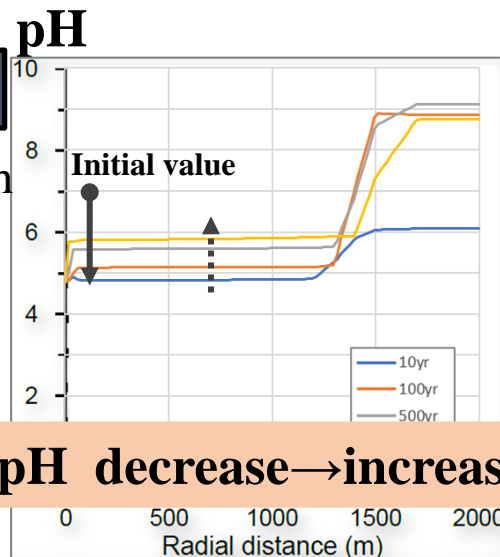
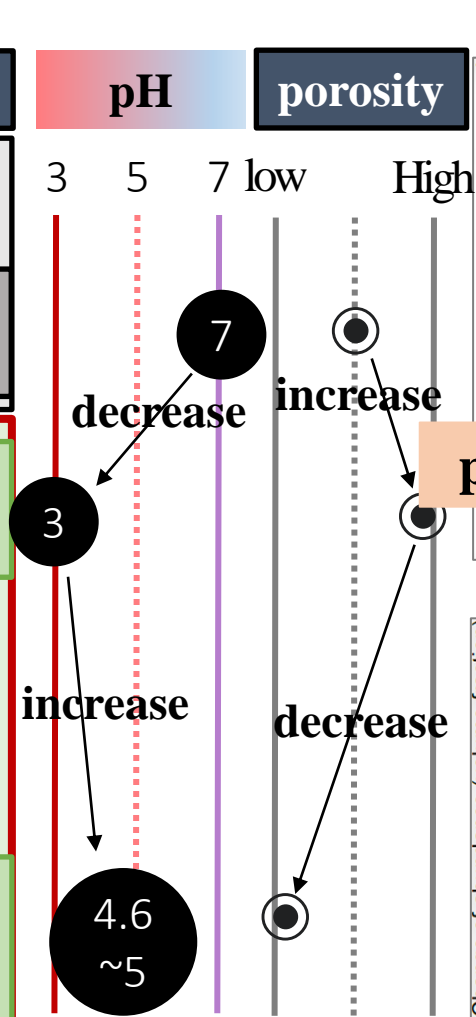
$\text{Al}(\text{OH})_2^+$ ,  $\text{CaCl}_2(\text{aq})$ ,  $\text{CaCO}_3(\text{aq})$ ,  $\text{CaHCO}_3^+$ ,  $\text{CaOH}^+$ ,  $\text{CaSO}_4(\text{aq})$ ,  $\text{CO}_2(\text{aq})$ ,  $\text{CO}_3^{-2}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{FeCl}^{+2}$ ,  $\text{FeCl}_4^{-2}$ ,  $\text{FeHCO}_3^+$ ,  $\text{H}_2\text{S}(\text{aq})$ ,  $\text{H}_3\text{SiO}_4^-$ ,  $\text{HS}^-$ ,  $\text{HSiO}_3^-$ ,  $\text{KCl}(\text{aq})$ ,  $\text{KSO}_4^-$ ,  $\text{MgCl}^+$ ,  $\text{MgHCO}_3^+$ ,  $\text{MgSO}_4(\text{aq})$ ,  $\text{NaAl}_2(\text{aq})$ ,  $\text{NaAlO}_2(\text{aq})$ ,  $\text{NaHCO}_3(\text{aq})$ ,  $\text{NaHSiO}_3(\text{aq})$ ,  $\text{NaOH}(\text{aq})$ ,  $\text{NaSO}_4^-$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{SO}_2(\text{aq})$  .....

# Geochemical Results of Mineral Trapping

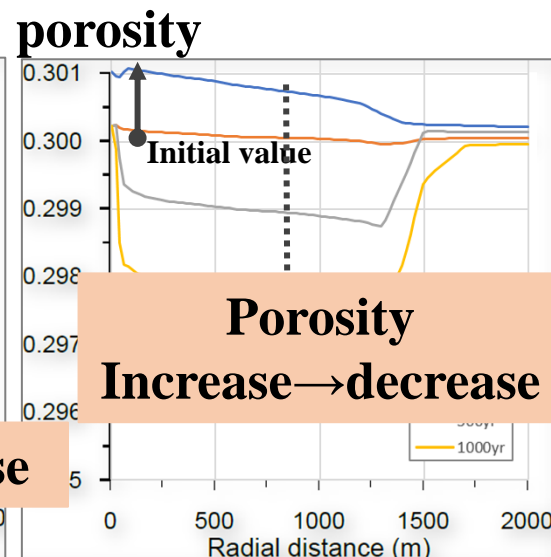
(DePaolo & Cole, 2013; Xu et al. 2004)

Reaction pathway of CO <sub>2</sub> sequestration	Type
CO <sub>2</sub> injected into reservoir	
CO <sub>2</sub> plume migration ▶ density difference, capillary pressure...	structural trapping
<b>CO<sub>2</sub> dissolving</b> & producing HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ▶ ex. (1) $CO_2 + H_2O \leftrightarrow HCO_3^- + H^+$	Solubility trapping
Primary minerals Dissolution of mineral in reservoir releasing metal ions (Ca, Mg, Fe...) ▶ ex. (2) $H^+ + CaAl_2Si_2O_8 + H_2O \leftrightarrow Ca^{2+} + Al_2Si_2O_5(OH)_4$	
Secondary minerals Recombination into <b>mineral precipitation</b> ▶ (3) $Ca^{2+} + HCO_3^- \leftrightarrow CaCO_3 + H^+$	Mineral trapping
(1)+(2)+(3): $CO_2 + CaAl_2Si_2O_8 + H_2O \leftrightarrow Al_2Si_2O_5(OH)_4 + CaCO_3 + H^+$	

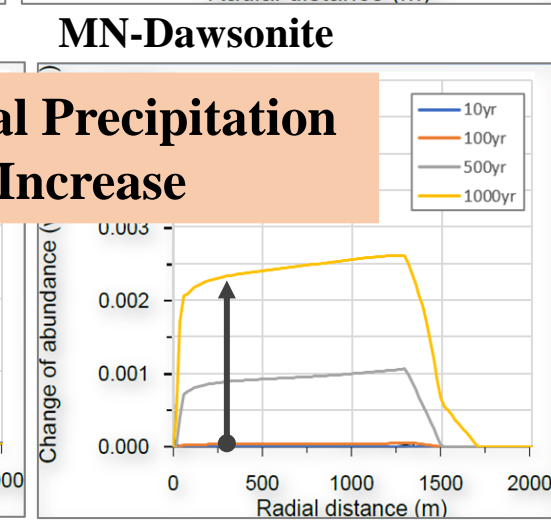
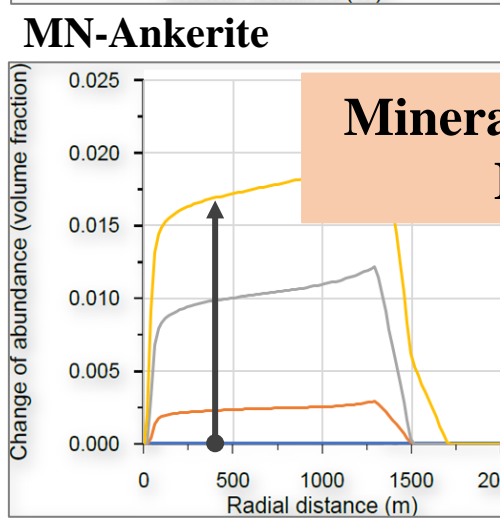
Case of Mineral trapping



pH decrease → increase



Porosity Increase → decrease



Mineral Precipitation Increase

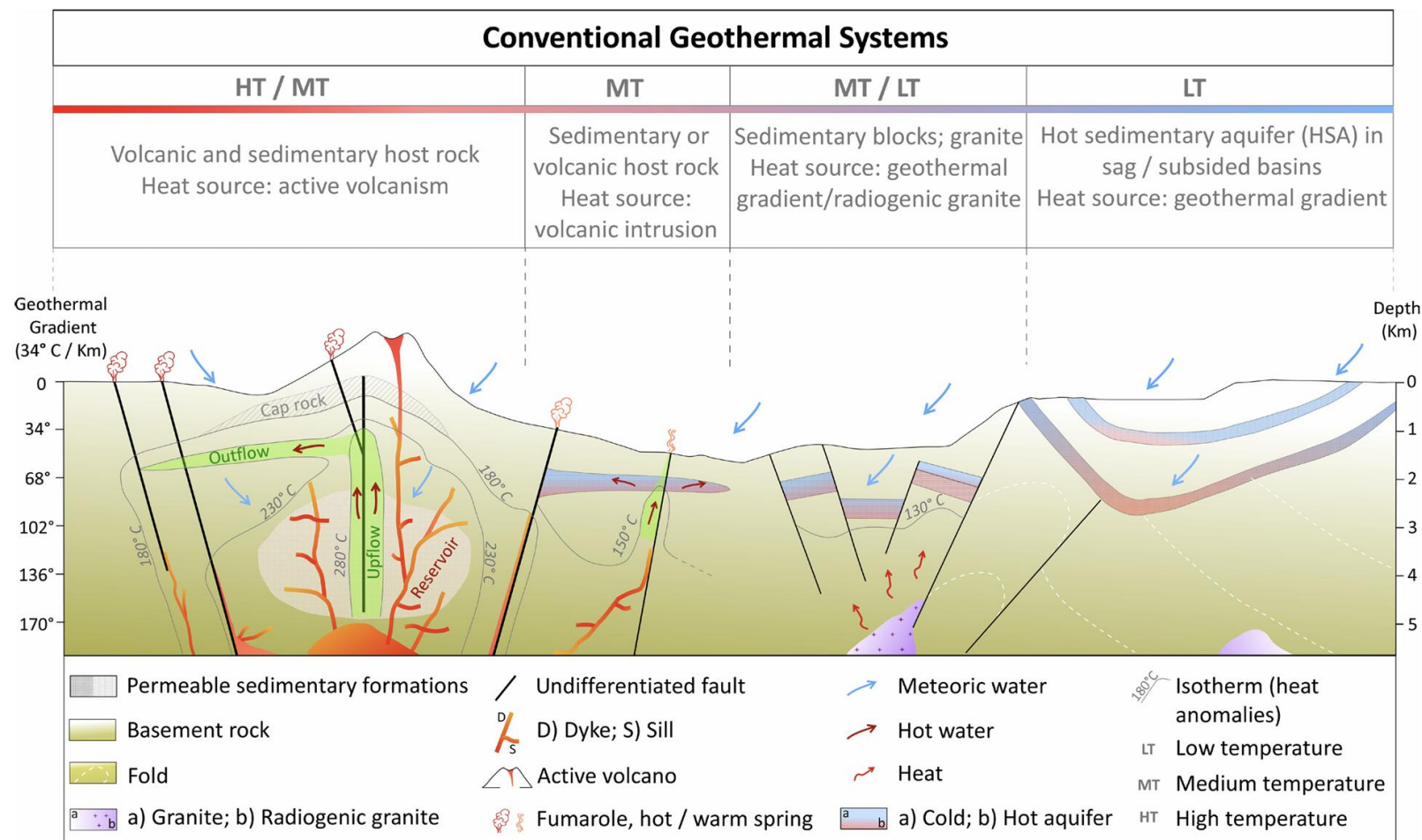
# 數值模擬在地熱中的應用

## 注入流體與現有儲層流體以及儲層岩石的相互作用

地熱系統中涉及的物理機制包括熱、流體、力學及化學過程，如

- ✓ 裂隙/多孔介質中的單相或多相流動 (水-蒸氣系統)
- ✓ 局部或非局部熱平衡 (熱源、自然對流)
- ✓ 反應性或非反應性化學物質傳輸 (矽酸鹽溶解、方解石沉澱、水岩反應、腐蝕)
- ✓ 應力相關的孔隙變形，裂隙開合

熱如何驅動水流  
地層熱擾動可造成流體重新分布



**Figure 1.** Conventional geothermal systems: Low-temperature and hot sedimentary aquifer, medium temperature, and high-temperature resources with their magmatic and non-magmatic heat sources.

## 地熱系統複雜的原因：

### ➤ 多重物理過程同時作用

流動、熱傳、地化反應與地層應力彼此耦合

### ➤ 多成分、多相態流體系統

液態水、蒸氣、溶解礦物與氣體共同影響熱儲層行為

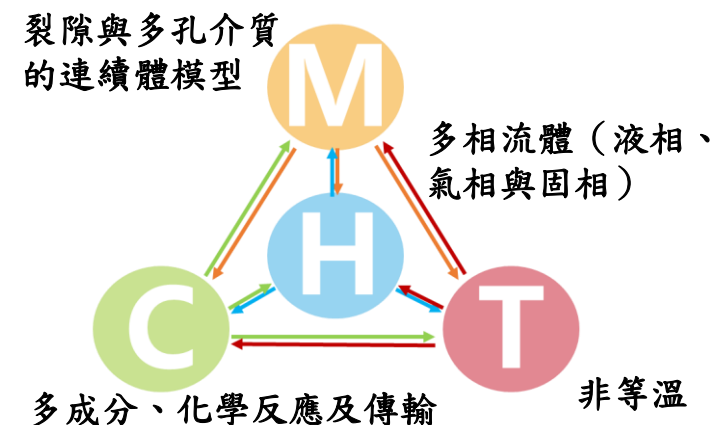
### ➤ 非線性回饋機制顯著

生產與回注會改變壓力、溫度、滲透率與流動路徑

### ➤ 裂隙與地質構造高度異質

斷層、裂隙與破碎帶控制熱流體循環與熱能開採效率

不同尺度的裂隙與地質異質性，會控制熱流體流動、熱交換效率與地熱系統長期表現



#### Multi-component:

H<sub>2</sub>O (liquid & vapor), dissolved minerals (SiO<sub>2</sub>, CaCO<sub>3</sub>), gases (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S)

#### Multi-phase:

Liquid water, steam, two-phase flow (boiling & condensation)

#### Integrated Media:

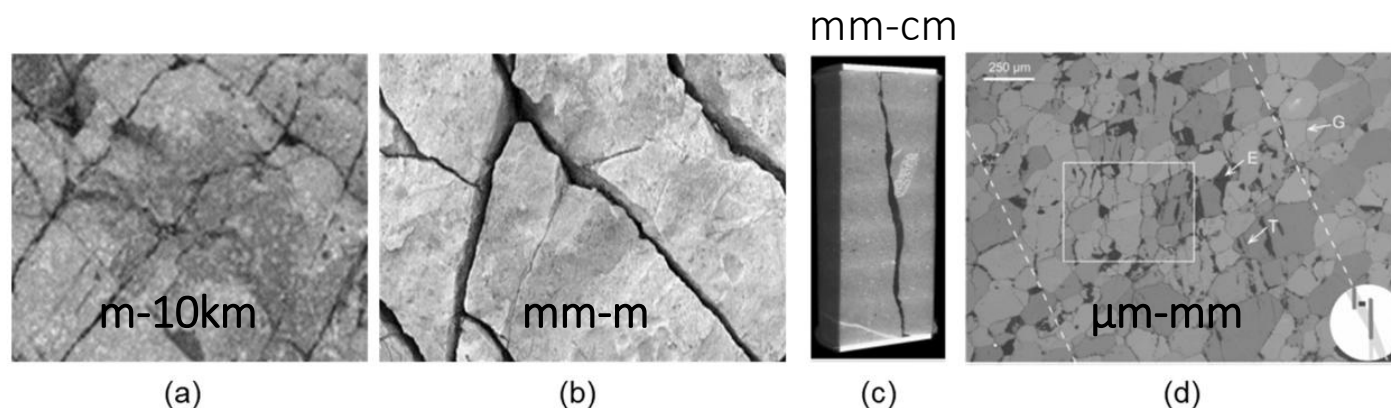
Porous Media, fractures, faults heterogeneity etc.

在不同地下工程中，裂隙可能是資產，也可能是風險

**裂隙是地下最微小的結構，卻常主導整個系統的行為**

它決定了：

- **流體與熱能是否能有效傳輸**  
地熱開發中的流體循環與熱萃取效率
- **注入流體是否沿高滲透路徑遷移**  
CCS 中的 CO<sub>2</sub> 羽流、壓力傳播與封存完整性
- **污染物或核種是否能被長期隔離**  
核廢料處置中的地下水流動與物質傳輸風險
- **斷層或裂隙是否可能被重新活化**  
注入 / 回注造成壓力與應力改變時的安全議題



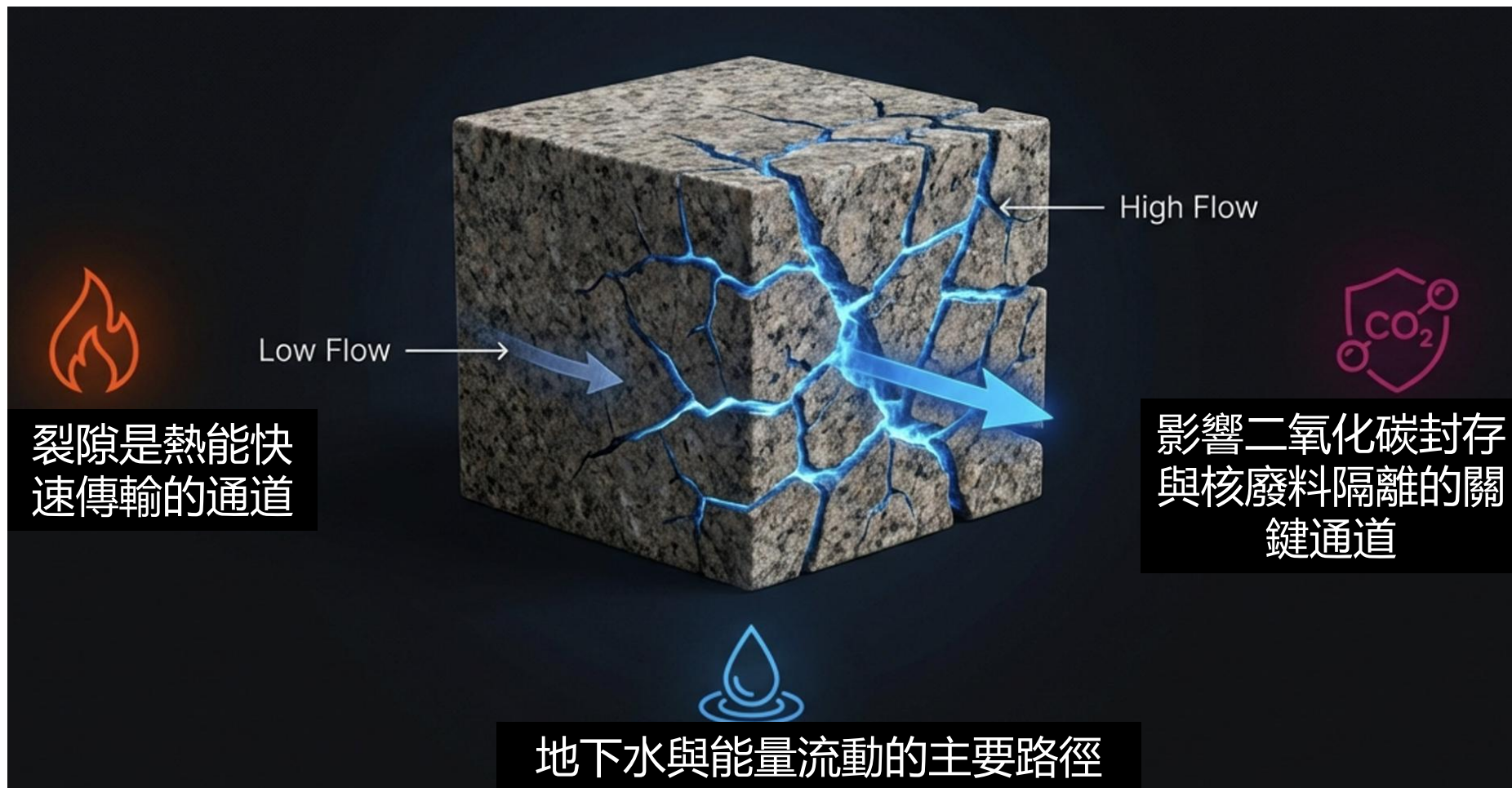
Fractures at different scales: a a discrete fracture network (m–10 km), b dominant rough fractures (mm–m), c a dominant fracture at the core scale (mm–cm, Ajo-Franklin et al. [2018](#)), and (d) a damage zone at micro-grain scale (μm–mm, Cheng and Wong [2018](#))

**裂隙從微米到公里尺度皆可能影響地下流動  
與傳輸行為**

(Hu and Rutqvist, 2021)

# 裂隙也是地下熱能、流體與物質傳輸的隱形通道

溫度決定能量潛力，裂隙決定能否安全、有效地利用地下系統。



In geothermal systems, heat provides the energy potential, but fractures control fluid circulation, heat extraction, and operational sustainability.

# Why is modeling fractured geothermal reservoirs difficult?

We are not dealing with one medium, but two interacting systems: the matrix and the fractures.

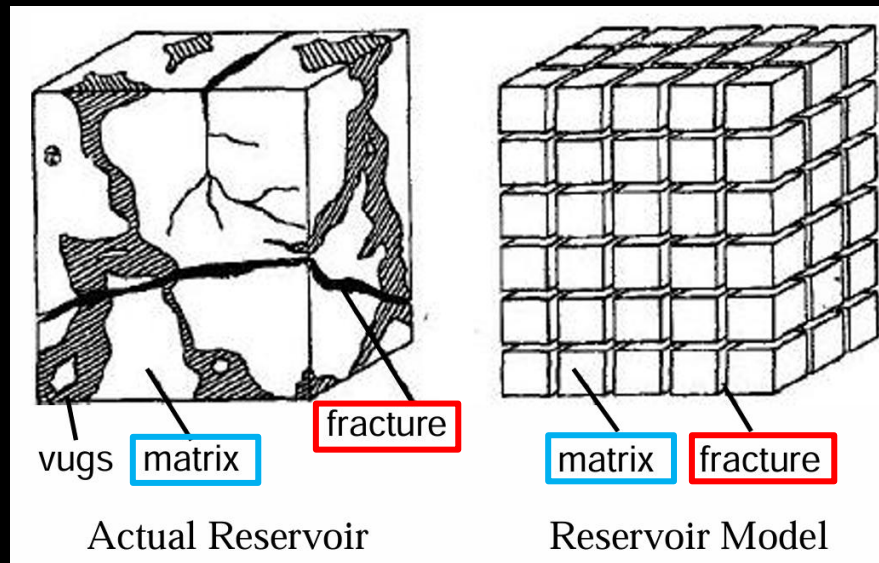
## 基質系統

### (Matrix System)

相對低滲透率: 流動速度緩慢

高儲存容量:

儲存大部分流體與熱能



## 裂隙系統

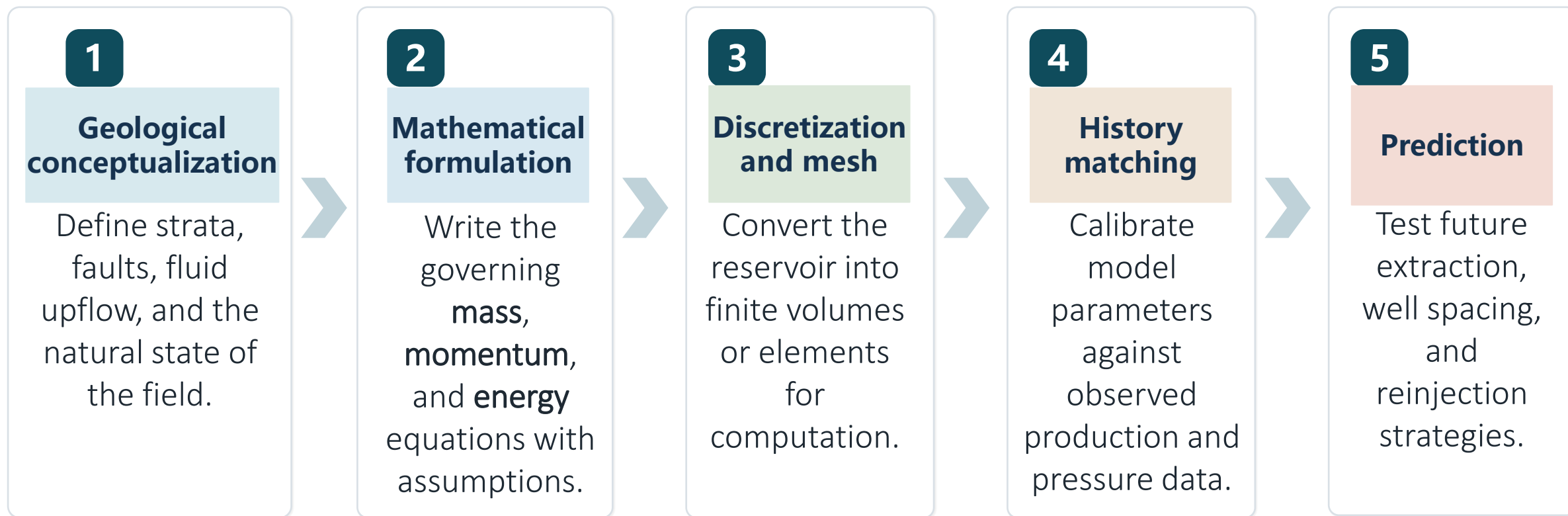
### (Fracture System)

高滲透率:

提供主要快速流動通道

低儲存容量: 孔隙體積占比小

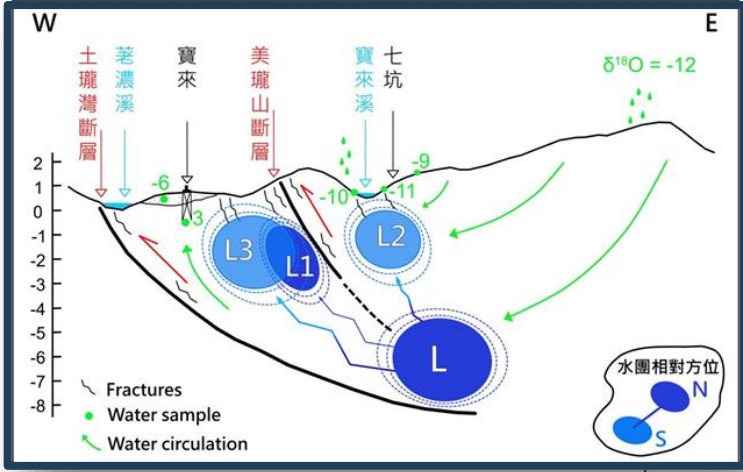
地下流體行為，來自這兩個系統的共同作用



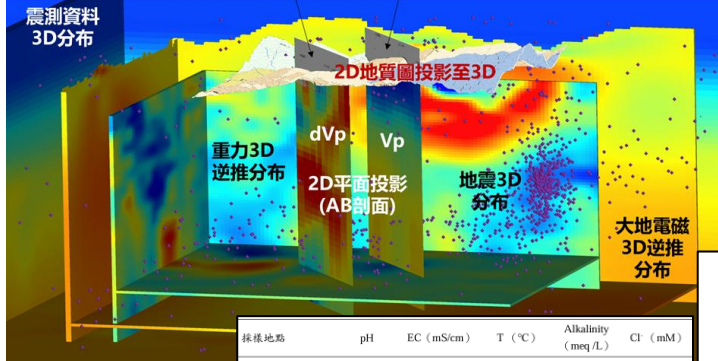
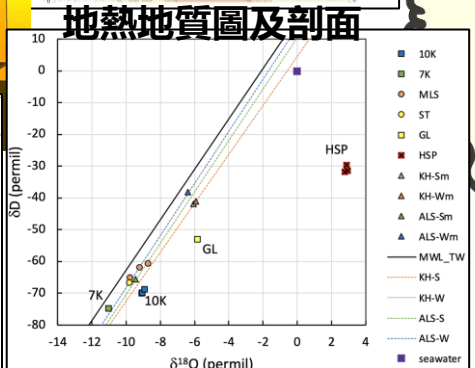
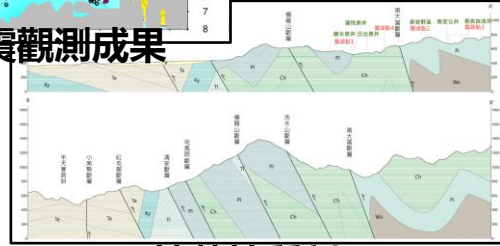
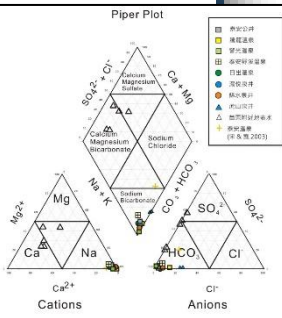
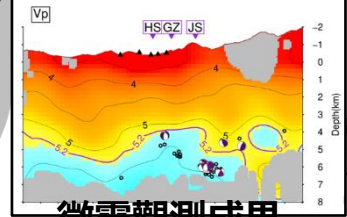
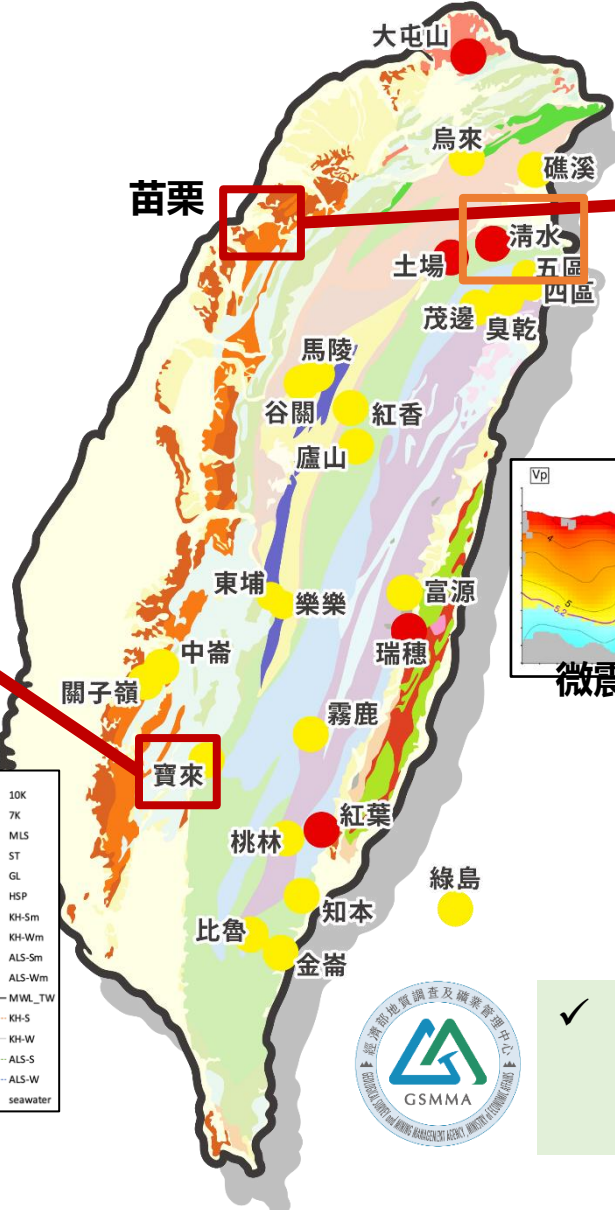
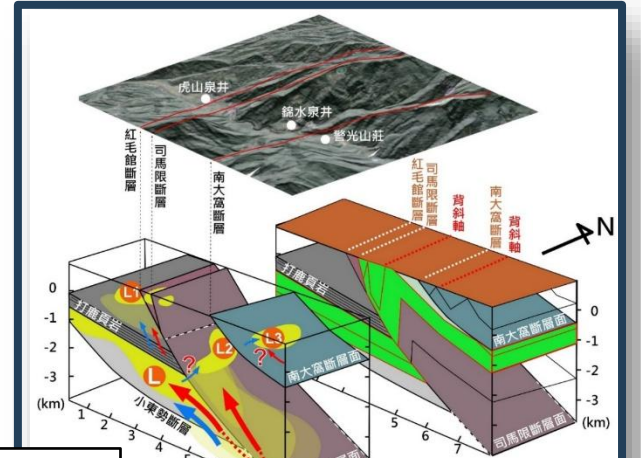
**Core idea:** A good geothermal model moves from geology to equations, then to calibration and scenario testing.

# 地質模型其實是「根據有限資料，對地下做出的最合理空間假設」

地熱地質概念模型



地熱地質概念模型



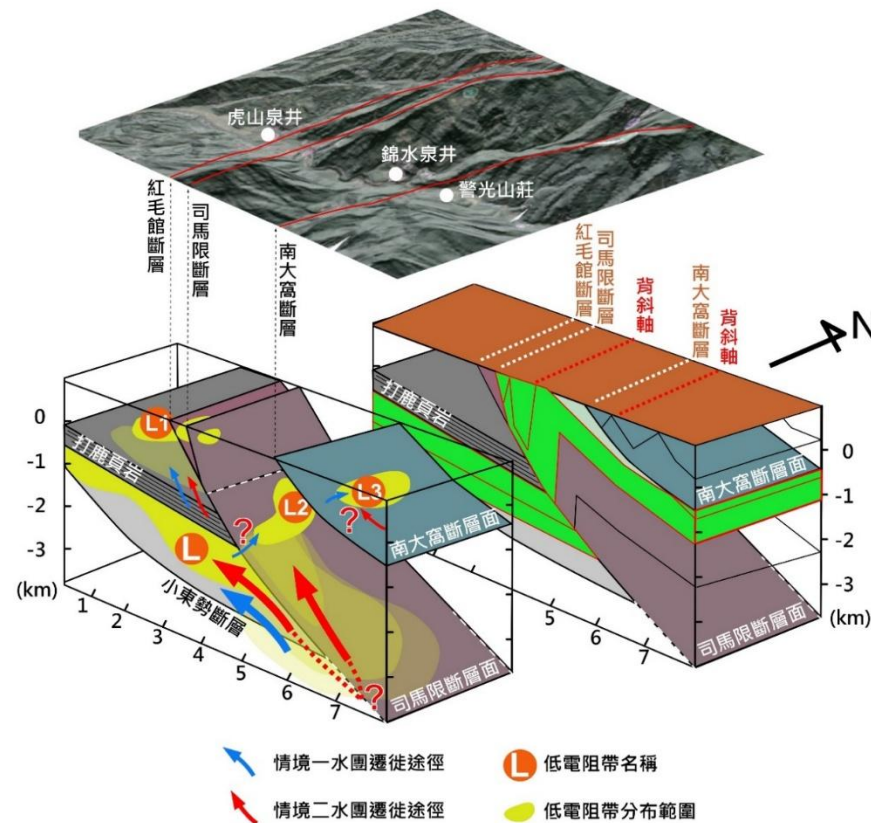
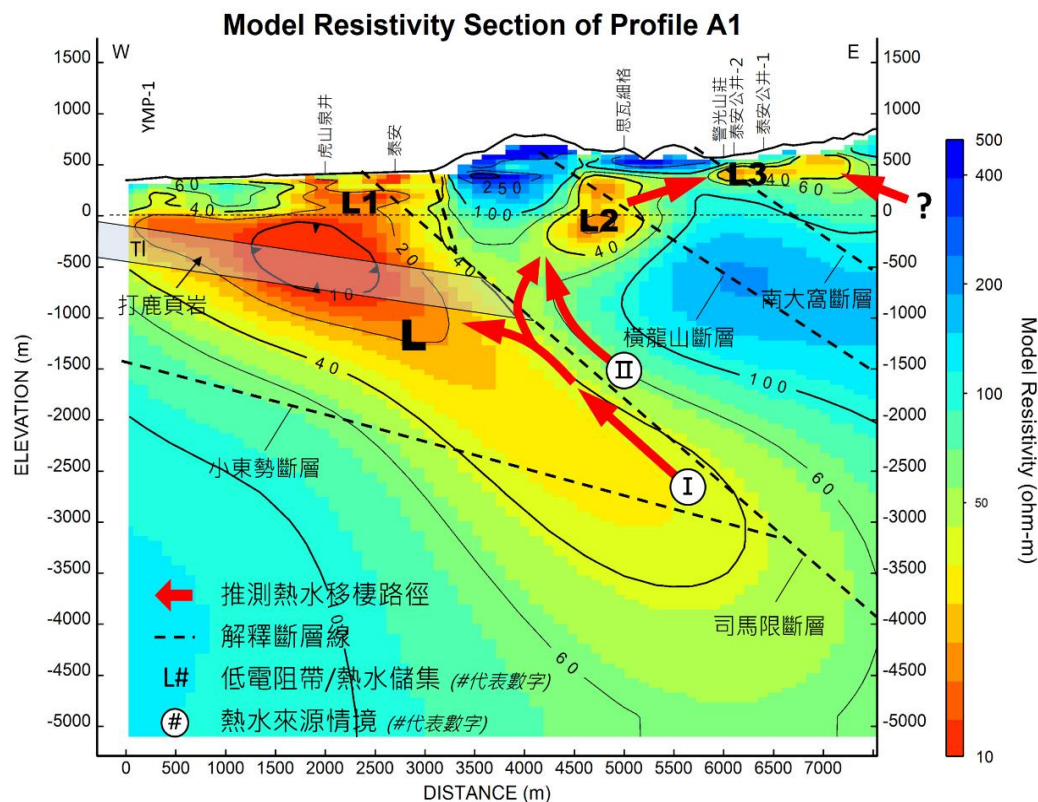
採樣地點	pH	EC (mS/cm)	T (°C)	Alkalinity (meq/L)	Cl (mM)
寶來十坑	6.84-7.72	2.56-3.34	40.0-51.1	14.3-17.6	9.4-9.8
寶來七坑	7.22-7.83	2.09-2.48	63.0-63.2	19.15	0.10
寶來溫泉公園新井	7.38-7.43	16.1-18.7	54.0-65.1	68.0-69.6	99.7-102.1
寶來溫泉公園舊井	7.34-7.75	16.0-18.7	48.0-50.6	60.2-64.1	100.7

採樣分析

地熱地質概念模型建置

✓ 整合地質調查、地球物理探勘、地球化學採樣分析和鑽井等成果資料，建置三維地熱地質模型，並做熱儲量評估。



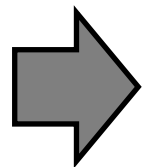


- 概念模型用來描述地下結構與流動框架
- 流動路徑是根據資料推測，需要透過模擬驗證
- 斷層需轉換為模型參數（滲透率、方向性、連通性）
- 地物異常提供線索，但仍需物理解釋
- 不同概念模型可透過模擬比較其影響

地質模型告訴我們「地下可能長什麼樣」，數值模擬則幫助我們理解「如果是這樣，會發生什麼事」。

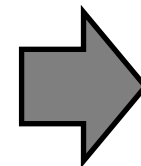
## 宜蘭清水地熱概念模式

- ✓ 地質構造/斷層系統
- ✓ 地層分布
- ✓ 儲集層位置深度溫度
- ✓ 熱源
- ✓ 水的補助及循環



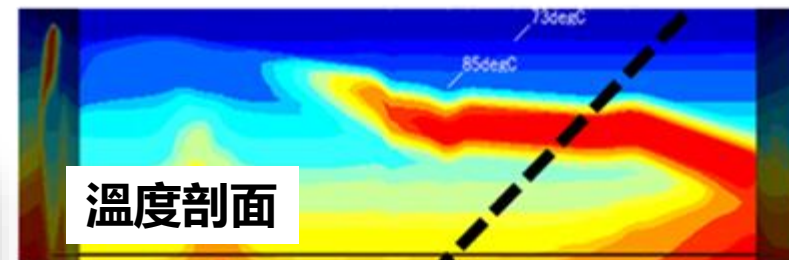
## TOUGH系列軟體

- 多相流(水、蒸氣、非凝結性氣體)
- 相變化
- 熱傳導/熱對流
- 地下水流動/尾水回注
- 裂隙
- 熱-水耦合過程



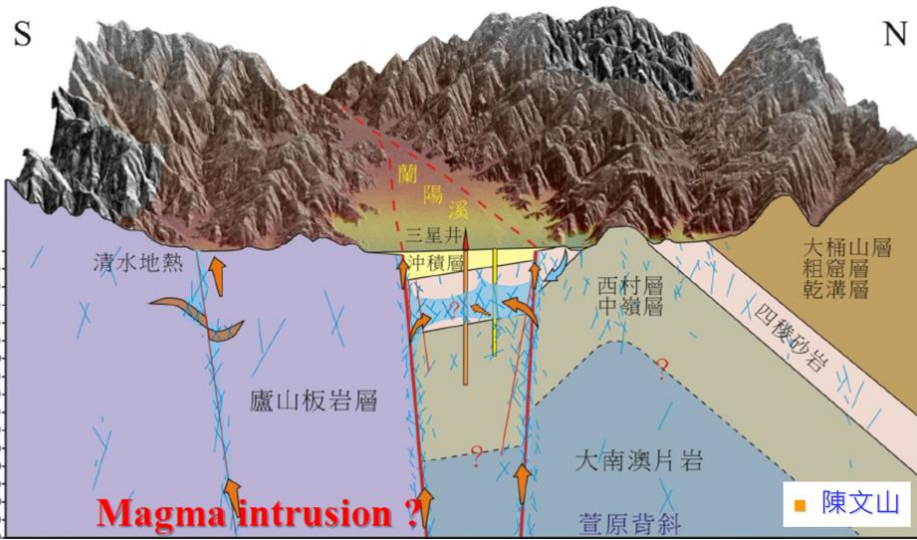
## 模擬結果輸出

- 計算不同取水量及不同回注量條件下
- 地下水流速方向的改變
- 溫度分布壓力變化範圍

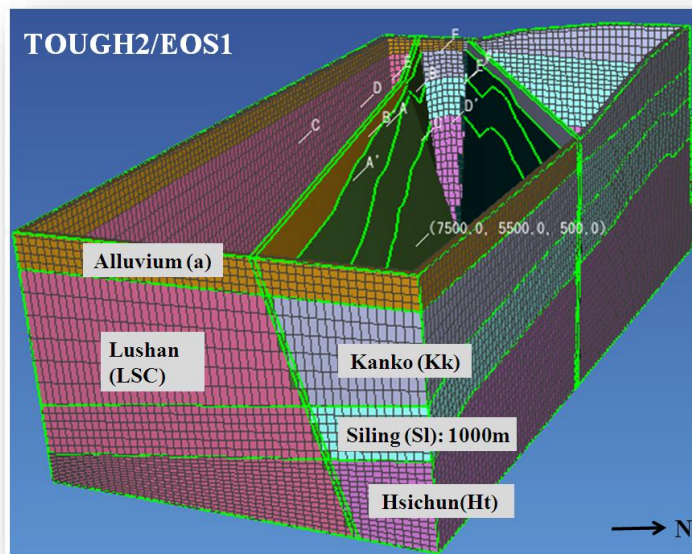


模擬 → 整合調查成果、延伸到預測

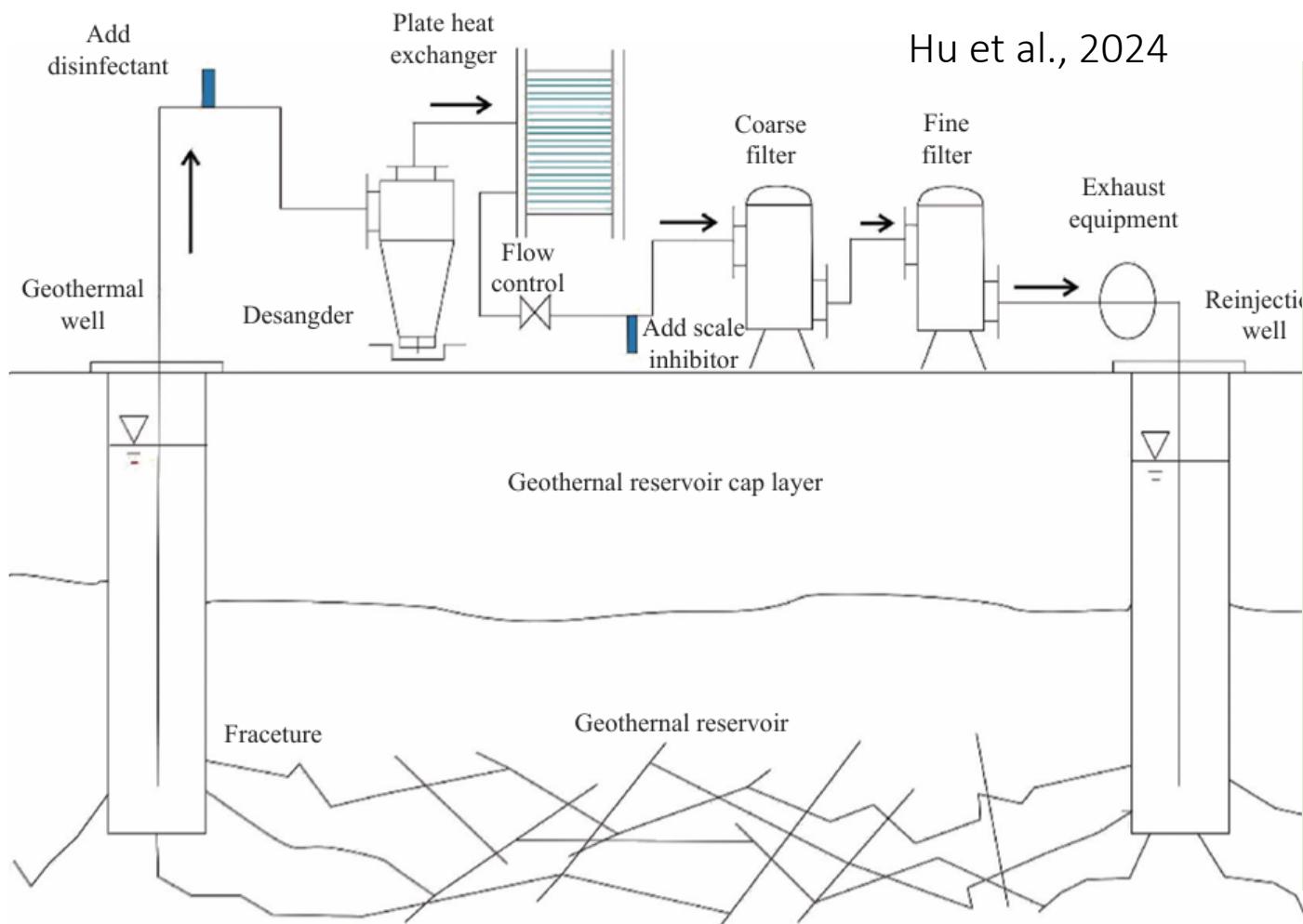
目標：提升調查效能、支撐工程決策



三維地熱地質概念模型示意圖(宜蘭地區為例)



# 地熱回注如何影響壓力、溫度與裂隙系統？



## 地熱回注的主要影響

### ◆ 壓力支撐與永續生產

回注可補充儲層壓力，延長地熱場使用年限

### ◆ 產能維持與補注管理

適當回注有助於維持熱流體供應，但需避免井間干擾

### ◆ 熱突破風險

若冷水沿高滲透裂隙快速返回生產井，可能造成局部降溫與產能衰退

### ◆ 誘發地震與斷層再活化

回注造成壓力與溫度變化，可能改變裂隙 / 斷層穩定性

### ◆ 水質與地化反應

回注水可能造成結垢、礦物沉澱、腐蝕或地下水質影響

Fig. 1 Principle of geothermal reinjection and schematic diagram of water quality detection and filtration (Chitgar et al. 2023)

## 預測地下流體行為

CO<sub>2</sub> 羽流遷移、壓力傳播、熱流體循環

## 支援工程設計與操作策略

注入量、回注位置、生產 / 回注配置

## 管理長期安全與永續性

封存完整性、熱突破、誘發地震與不確定性

1. CCS 與 geothermal 的核心都在於理解地下流體行為。
2. 真正重要的不是模型做得多複雜，而是有沒有抓到主控機制。
3. 多物理耦合不是越多越好，而是要和問題相匹配。
4. 模擬不能取代調查，但能整合資料、測試情境、提升決策品質。

