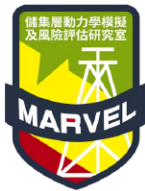




Multidisciplinary Coupling of Well Logging Data with PetraSim and FLAC3D for Enhanced Geomechanical Reservoir Characterization



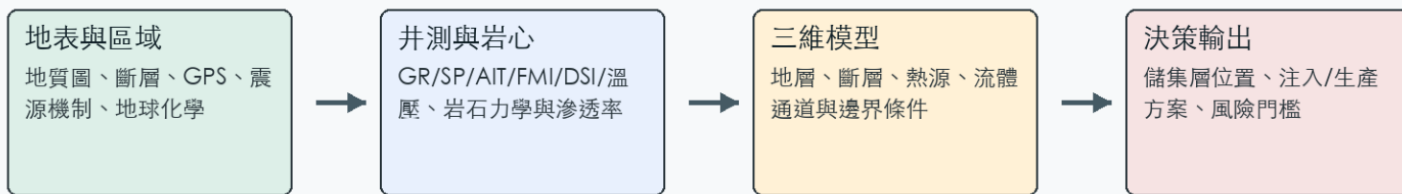
National Cheng-Kung University

Hung-Yu Wu

1931

Before Building the Model

地下資料證據鏈：從井場到模型



核心訊息

- 井測不是附屬資料，而是校正地質模型與地力模型的唯一井下證據。
- 地熱與 CCUS 共用同一套地下資料邏輯：可注/可產、可控、可驗證。
- 模型必須被現地資料反覆更新，才能從概念圖走向可審查工程設計。

地下資料證據鏈

從政策到井場的共通邏輯

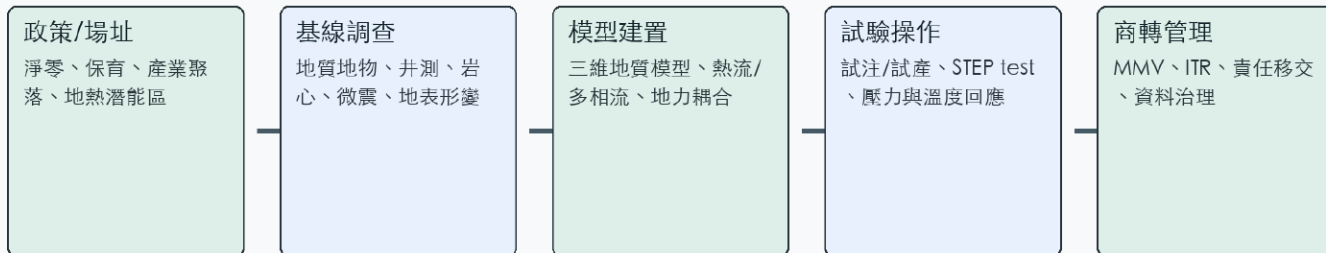
地熱：目標不是裝置容量，而是真實且可持續的發電量

CCUS：目標不是理論蘊藏量，而是真實且可監測的灌注量

兩者都必須回答三件事：可注/可產、可控、可驗證

井測、岩心、壓力測試與地表/井下監測，是讓模型具備工程可信度的資料鏈

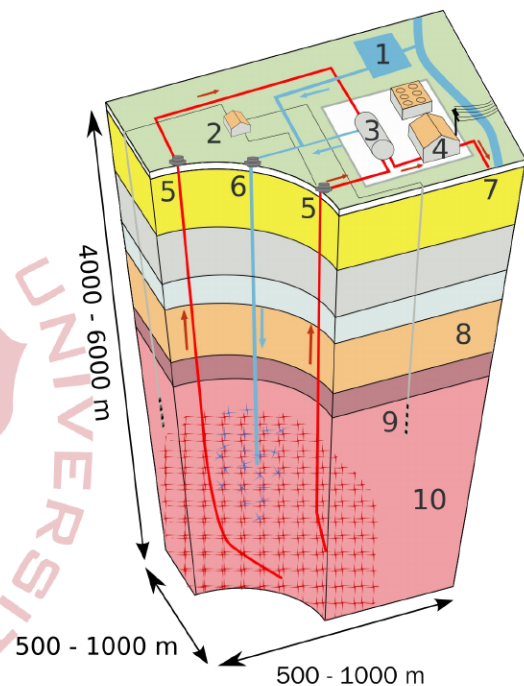
台灣地熱與 CCUS 的共同技術路徑



綜合判斷：地熱追求真實發電量；CCUS 追求真實灌注量。兩者都必須回到可驗證的地下模型。

台灣地熱探勘瓶頸

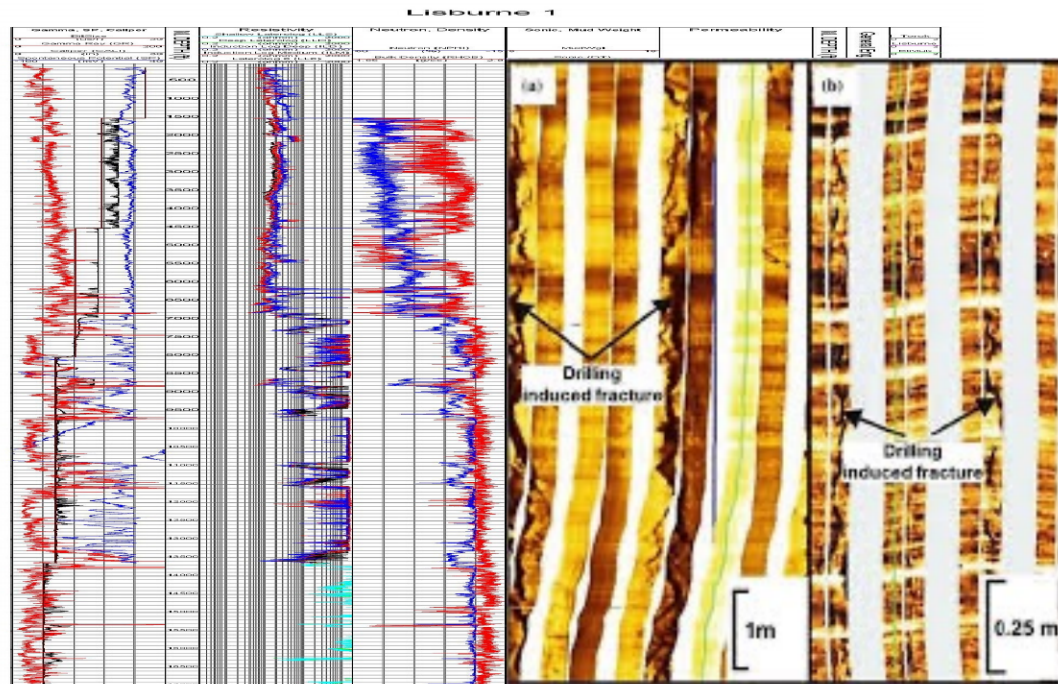
- 地質複雜：變質岩、火成岩、沉積岩、斷層、褶皺與裂隙系統交互控制熱流
- 儲集層不確定：熱源、蓋層、通道、裂隙開口與連通性難以只靠地表資料判讀
- 鑽井成本高：錯估目標深度、裂隙位置或流體通道會直接造成投資風險
- 保育與社會接受度：國家公園或敏感區需以基線資料與低衝擊工程回應疑慮



增強型地熱系統(EGS)示意圖

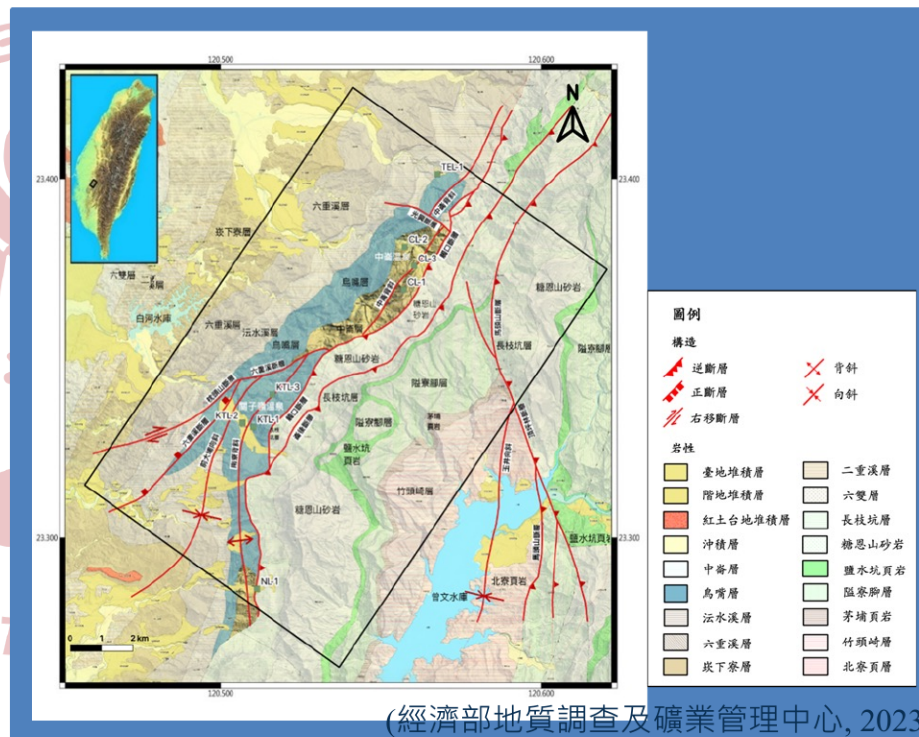
為什麼井測是核心？

- 井測是少數可直接取得地下深度連續資料的方法
- GR/SP/AIT 可判斷岩性、流體與泥漿侵入；FMI/UBI 可辨識裂隙、井壁破壞與應力方位
- DSI/SonicScanner 可推估 P/S 波速、彈性模數、各向異性與現地應力
- 溫壓與流速資料可驗證熱對流、補給通道與儲集層有效深度



關子嶺-中崙三維地質模型

- 關子嶺溫泉位處中崙背斜軸上，在地表主要的地層為鳥嘴層，附近主要有枕頭山斷層與六重溪斷層通過
- 中崙溫泉位於南寮背斜西翼，在地表主要的地層為鳥嘴層，通過附近的斷層為觸口斷層與崙後斷層



把地表剖面、斷層位態與井位資料轉成可供 PetraSim/FLAC3D 使用的幾何基礎

地層岩石特性

- **中崙層:**位於鳥嘴層之下，並與之呈整合接觸，岩石性質為深灰色頁岩與灰色砂質頁岩。
- **鳥嘴層:**伏於澧水溪層下方。該層可分為三段，下段為泥質砂岩組成，中段以頁岩或砂質頁岩為主，上段由細粒塊狀或厚層砂岩構成，由下至上呈現頁砂岩-頁岩-砂岩的岩性變化

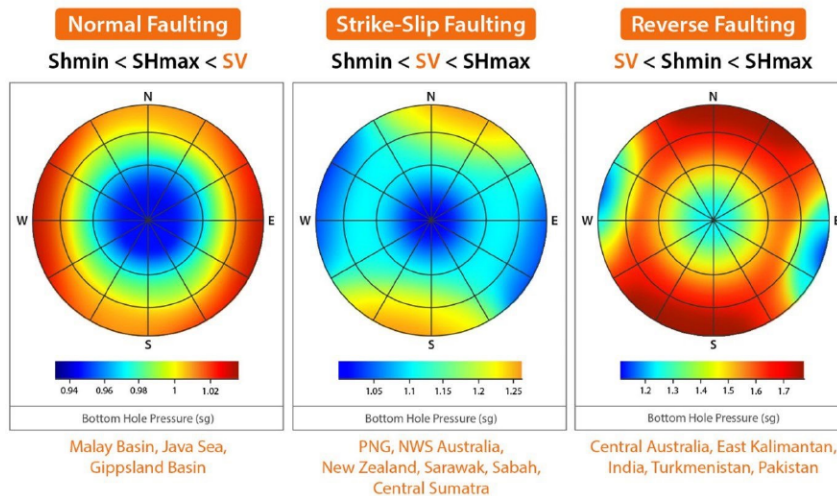
- **澧水溪層:**位於六重溪層之下。該層可分為三段，下段以塊狀砂質頁岩為主；中段則為細粒厚層泥質砂岩；上段由塊狀頁岩以及砂質頁岩組成，由下至上呈現頁岩-砂岩-頁岩的岩性變化
- **糖恩山砂岩:**位於長枝坑層之上，鹽水坑頁岩之下。岩石性質為灰色的堅硬塊狀砂岩，夾有暗灰色泥岩或砂質頁岩，砂岩中富含泥質。

砂岩	砂頁互層 (砂岩為主)	砂頁互層 (頁岩為主)	頁岩
	鳥嘴層	澧水溪層	
糖恩山砂岩	六重溪層	崁下寮層	中崙層
木山層	隘寮腳層	長枝坑層	
	南莊層	南港層	

區域應力與井孔穩定性

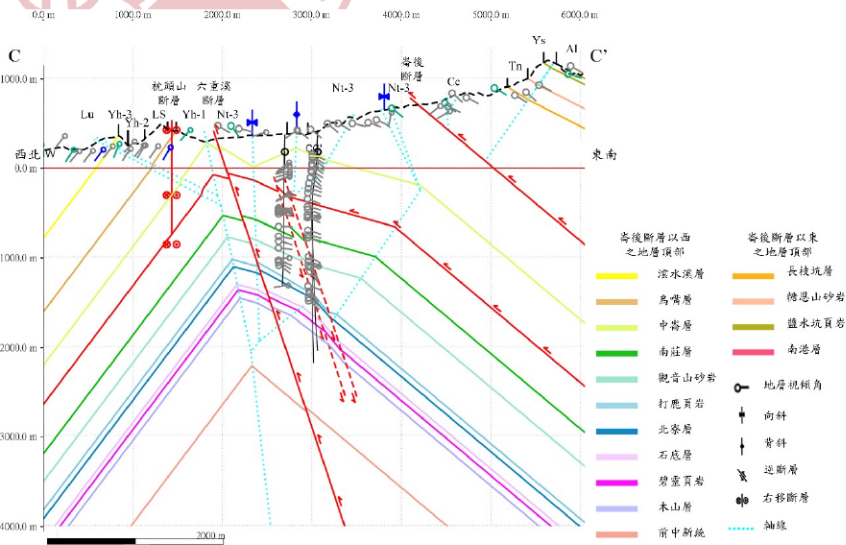
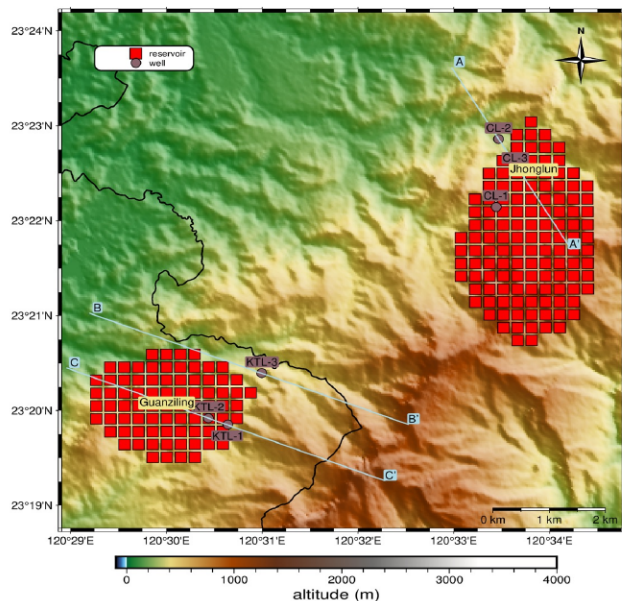
- 關子嶺-中崙區域資料指出西南台灣受壓縮構造控制，最大水平應力約為西北西-東南東方向
- 應力資料來源包含 GPS、震源機制解、世界應力圖、井下電測、與野外節理
- 井孔穩定需同時考慮垂直應力、最大/最小水平應力、孔隙壓力、岩石強度等
- 對地熱井而言，井壁破壞方位也可反推現地應力並校正地質動力學模型

Tendency for Breakout Development in Different Stress Regimes



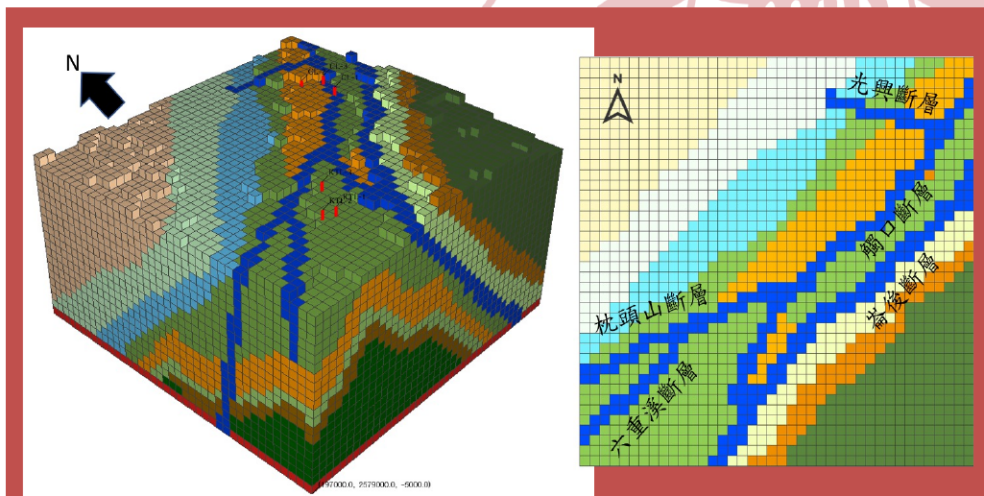
野外地質調查

CC'剖面位於關子嶺地區，長度約為6公里長為西北-東南走向之剖面，與**BB'**剖面互相平行剖面穿過關子嶺二號井(KTL-2)與關子嶺一號井(KTL-1)，並且同樣橫跨南寮背斜，斷層由西至東依序為枕頭山斷層、六重溪斷層與崙後斷層



區域地質模型

本研究模型劃設南北向長10公里，東西向寬10公里，長寬高皆設置為250公尺，在水平方向上，網格數皆被切割為40*40個的區塊；垂直方向上，考量地形起伏高低變化，網格數量在20至25個不等



代碼	地層	圖例
KH	崁下寮層	
LC	六重溪層	
YS	澗水溪層	
NT	烏嘴層	
CLN	中崙層	
NC	南莊層	
NK	南港層	
MS	木山層	
AL	隘寮腳層	
TE	糖恩山砂岩	
CC	長枝坑層	
fault	斷層	

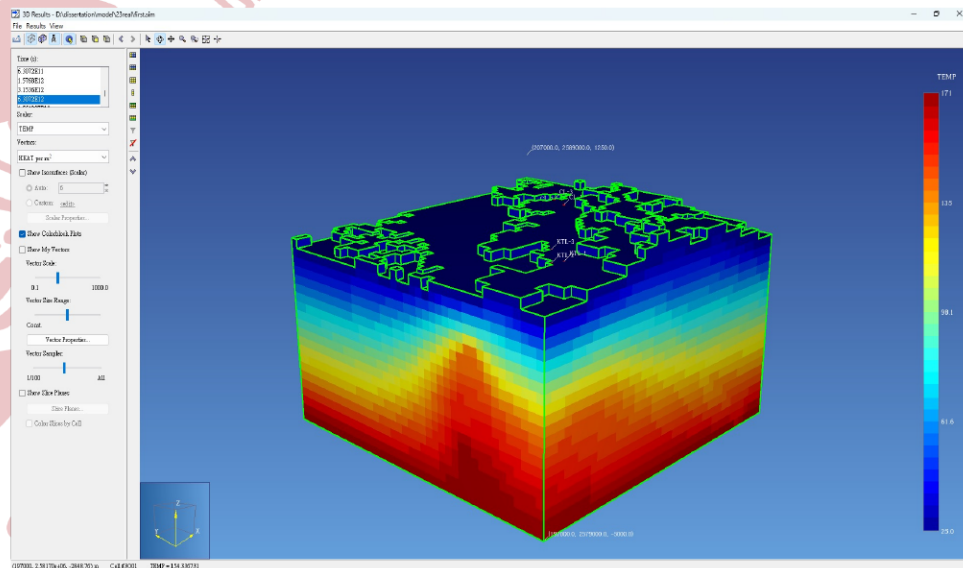
地層參數

	砂岩	砂頁互層 (砂岩為主)	砂頁互層 (頁岩為主)	頁岩	斷層
密度 (kg/m ³)	2,200	2,320	2,460	2,580	2,030
孔隙率	0.17	0.16	0.15	0.14	0.24
滲透率 (mD)	1	0.3	0.1	0.03	30
熱導率 [W/(m*K)]	2.8	2.57	2.35	2.12	1.6
比熱容 [J/(kg*K)]	745	770	795	820	780

- 根據Bär et al. (2020)資料，台灣砂岩密度大約2,200 kg/m³，頁岩密度約為2,580 kg/m³
- 孔隙率同樣根據Bär et al. (2020)資料進行設置
- 依據華智祥 (2022)對台灣各個重要地質區進行的岩性採樣，並量測岩層的熱導率
- 比熱容根據Waples and Waples (2004)文章中砂岩與頁岩的比熱容
- 斷層的參數參考Iwamori et al. (2021)、Tanaka et al. (2007)等人，將岩石性質進行比例計算獲得

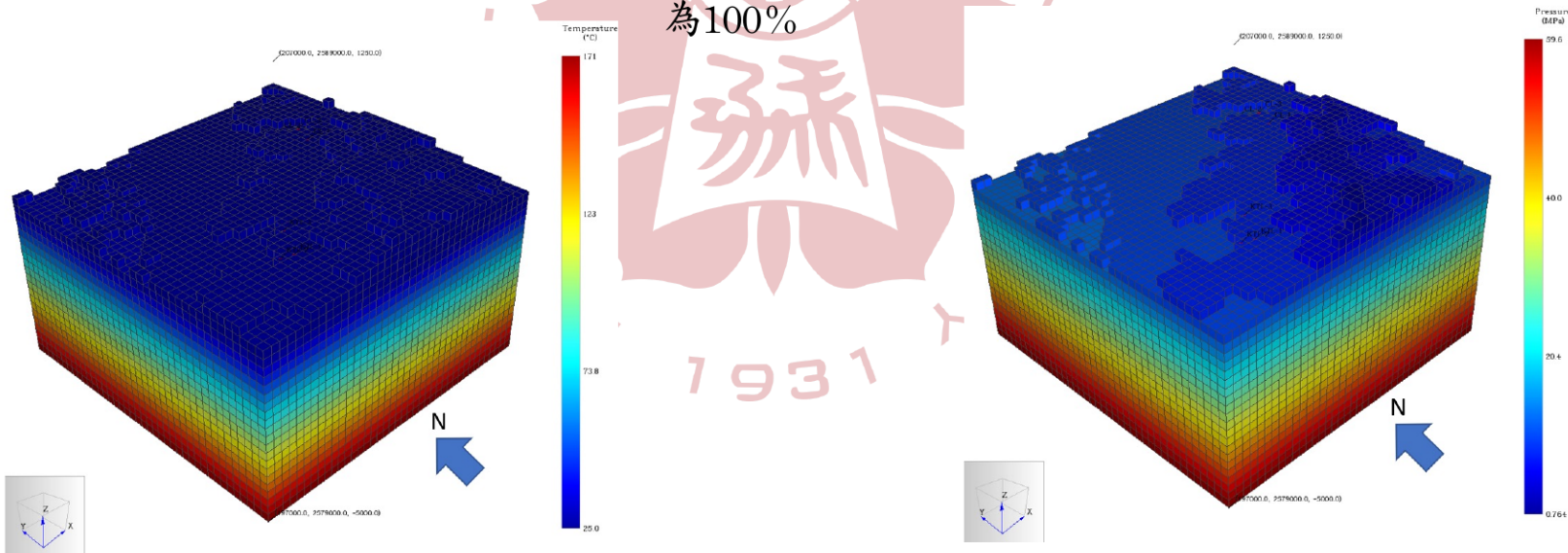
數值模型

- 以PetraSim 作為主要的模擬軟體，該圖形化介面軟體可進行TOUGH3的前處理與後處理的相關作業，且支援多種狀態方程，可以更好的去輔助建立模型的架構
- TOUGH可以處理含水層中的蒸發、凝結、擴散、對流與毛細作用等物理現象，常被用於模擬地層中多相流體與熱的遷移行為
- EOS3是專為模擬水與空氣雙成分系統所設計的狀態方程模組。關子嶺與中崙地區屬於中低溫、淺層熱儲系統，在地層中可能存在水蒸氣與空氣混合物或是含氣裂隙



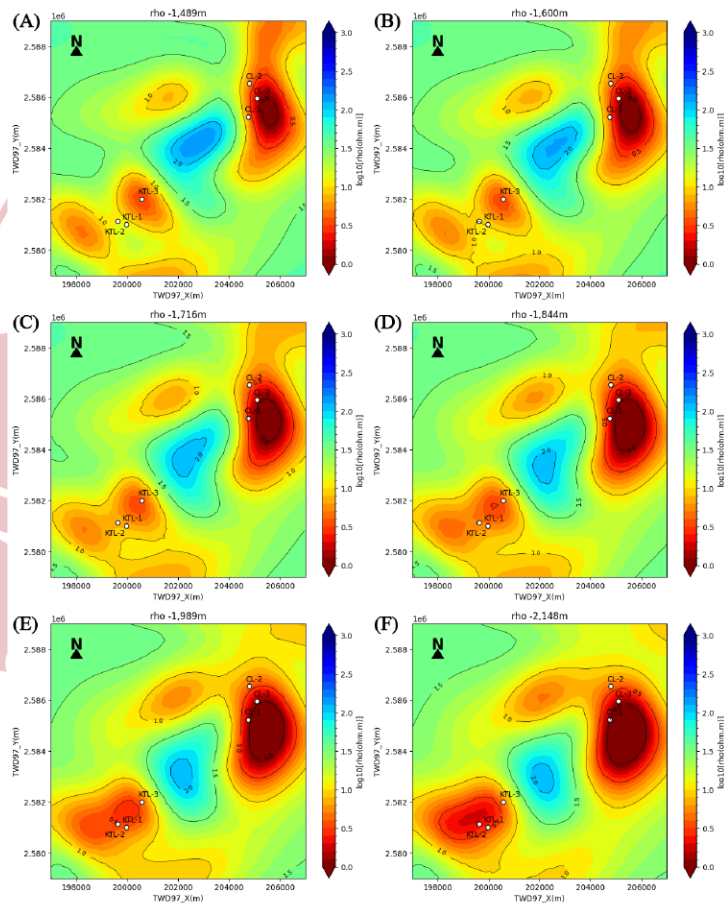
初始溫壓設置

- 地表所有網格初始溫度均維持在 25°C ；地表以下則依據標準地溫梯度，每下潛一公里，溫度增加 30°C ，作為初始溫度分布
- 地表設置為 $1\text{atm}(0.1\text{MPa})$ ，孔隙壓力則設定固定壓力梯度 $9.81\text{MPa}/\text{km}$ ，反映重力影響下的靜水壓力分布
- 假設每個網格孔隙均充滿水($S_w=1$)，水飽和度初始值為 100%



地電阻分析

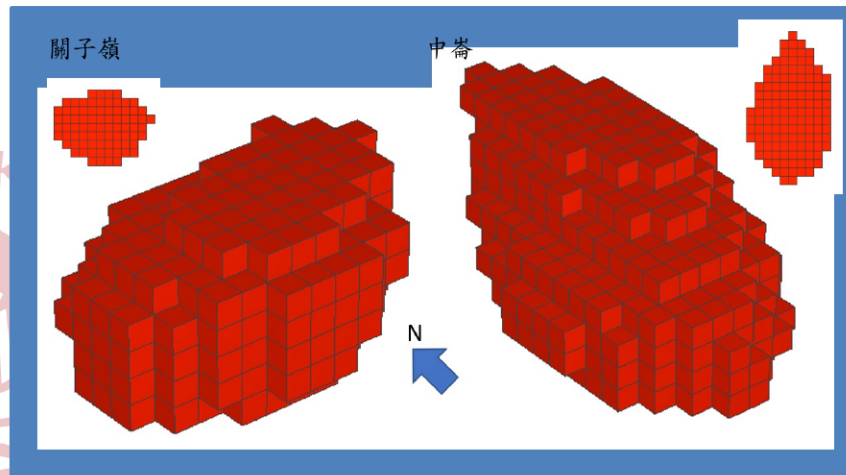
- 資料來自經濟部地質調查及礦業管理中心 (2023)於關子嶺與中崙地區施測的大地電磁法(MT)
- 地熱探勘中，低電阻率常代表著該區域含有高溫流體的地熱儲集層或是流體通道，皆為尋找地熱的重要指標
- 選用30. m作為地熱儲集層界定範圍



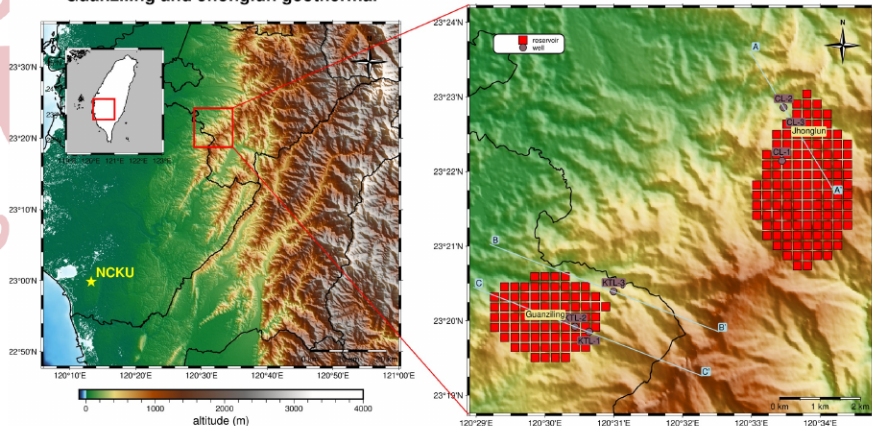
深度1,500-2,150公尺電阻率

地熱儲集層設計

- 中崙溫泉與關子嶺溫泉兩地下方，各別設置地熱儲集層
- 儲集層溫度依過去的研究報告顯示，溫度可以達到 $160\sim 180^{\circ}\text{C}$ 之間，在模擬中將兩個區域的網格溫度皆設為 180°C ，以了解熱在該地區的擴散與對流作用



Guanziling and Zhonglun geothermal



BelowSurface: 1,500公尺

第 1 年(A)

- 溫度場為初始設定，溫度約為60 °C

第 5,000 年(B)

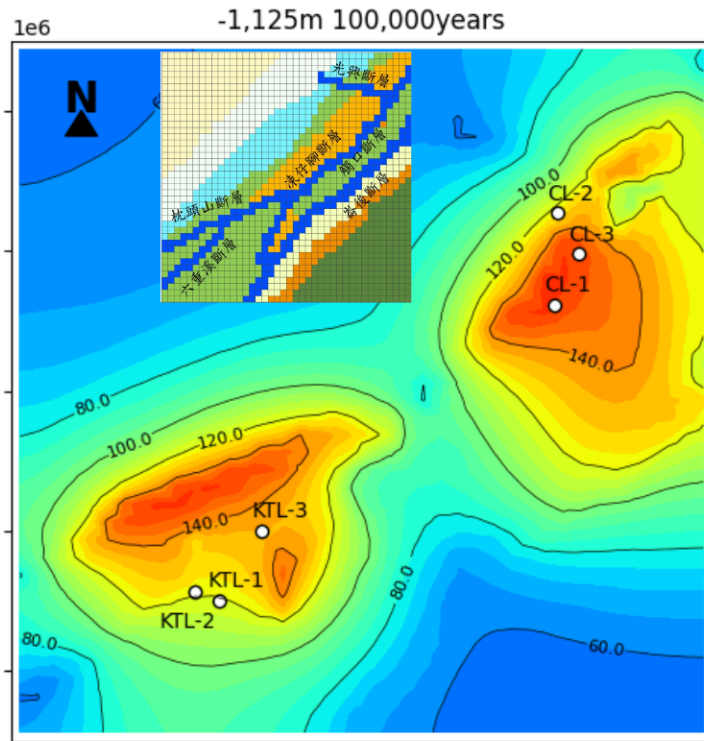
- 中崙地區高溫沿凍仔腳斷層連成長條區域
- 關子嶺地區的枕頭山斷層為主要熱源通道

第 20,000 年(C)

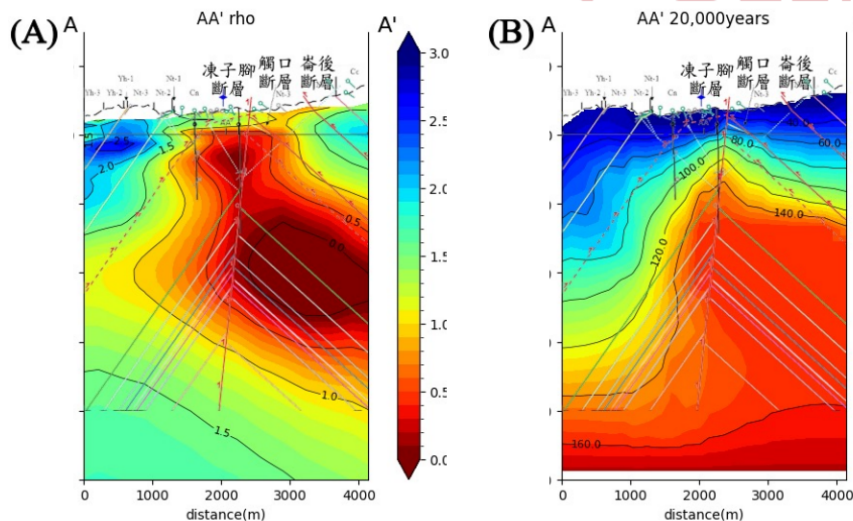
- 高溫範圍進一步擴張
- 沿 枕頭山斷層 與 凍仔腳斷層 擴散
- 兩熱區逐漸融合，形成廣泛高溫帶

第 100,000 年(D)

- 關子嶺與中崙熱區已連結
- 高溫核心穩定分布，範圍擴大
- 系統進入穩態

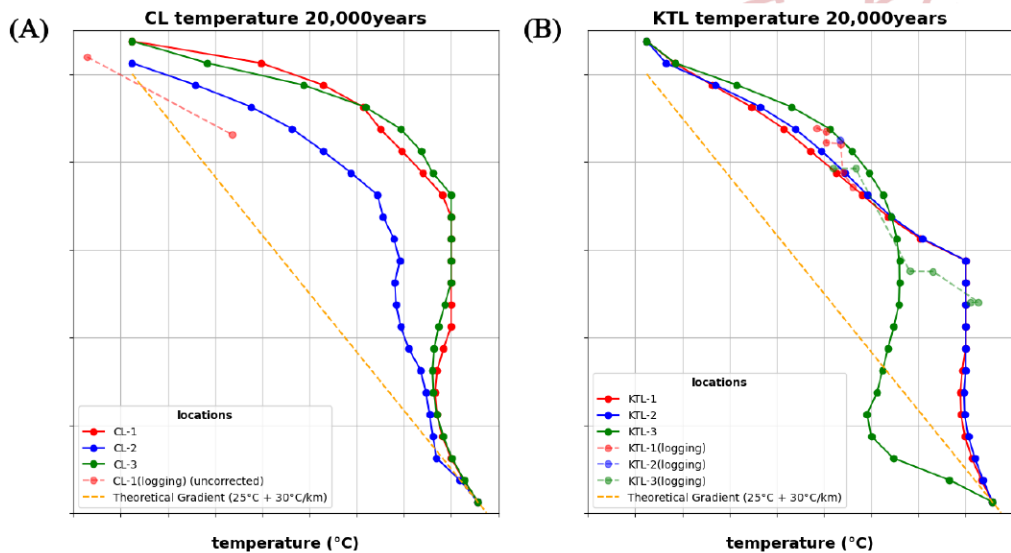


溫度與電阻率對應



- 在AA'剖面中，電阻率剖面顯示出呈L形分布的低電阻帶
- 低阻區域與數值模擬結果中所呈現的高溫區域在空間位置上具有高度一致性
- 在凍仔腳斷層處，模擬所產生的高溫分布恰與低電阻區域相互對應，顯示熱對流所導致之溫度異常，與電阻率異常之間存在良好關聯性

井測資料比對



(A)中崙(B)關子嶺

- 中崙地區可用的井溫資料相當有限，且量測值偏低，甚至有部分資料低於正常地溫梯度
- 關子嶺一號井模擬溫度與實測溫度結果接近，並且趨勢吻合。
- 將模擬結果與井測資料進行分析計算，平均絕對百分誤差(MAPE)為10.09%
- 關子嶺三號井的模擬與實測間展現出高度的趨勢相關性
- 誤差分析計算得到MAPE為6.81%

Summary for PetraSim

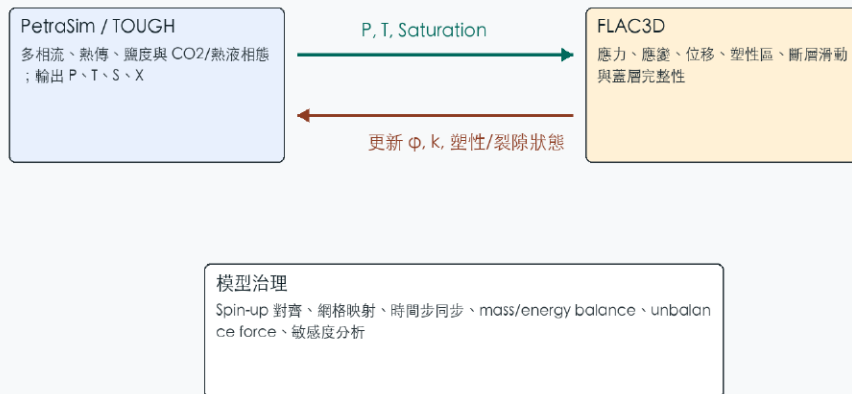
- 整合地質資訊，建構出關子嶺與中崙地區的三維地質模型，並依據電阻率設定潛在儲集層位置，進行熱-流耦合數值模擬
- 中崙地區的凍仔腳斷層，或是關子嶺地區的枕頭山斷層與六重溪斷層，皆呈現出明顯的熱流上升特徵，顯示斷層構造在區域內可能為關鍵的流體通道，對於地熱系統的形成與分布有著重要的影響
- 關子嶺與中崙地區的三條剖面電阻率與模擬溫度進行對比，結果顯示低電阻區與高溫分布在空間上具有高度一致性，數值模擬可信度高，能補足地表觀測限制
- 透過與井測溫度資料之誤差分析結果顯示，本研究所建立之熱傳模型能夠合理重現地下溫度分布，整體模擬結果具備良好的參考價值與應用潛力

PetraSim ↔ FLAC3D 耦合架構

PetraSim:

- 適合處理多相流、熱傳與反應傳輸
- EOS3/EOS4/EWASG ; 深部鹽水層 CCUS 常用 ECO2N
- 模型需先完成 spin-up, 使壓力與溫度場達到合理初始平衡
- 邊界距離、網格加密、相對滲透率、毛細壓是控制重點

PetraSim ↔ FLAC3D 序列耦合架構



FLAC3D:

- 負責應力-應變、塑性破壞、斷層、地表變形評估
- 常用 model 包含 Elastic、Mohr-Coulomb、Ubiquitous-Joint、Hoek-Brown
- 斷層 interface 需合理設定法向/切向剛度與摩擦參數，避免假滑動或收斂問題
- 地力模型範圍通常需大於流體模型，因為力學影響半徑可能比 CO2/熱液羽流更大

Background

Carbon neutrality by 2050

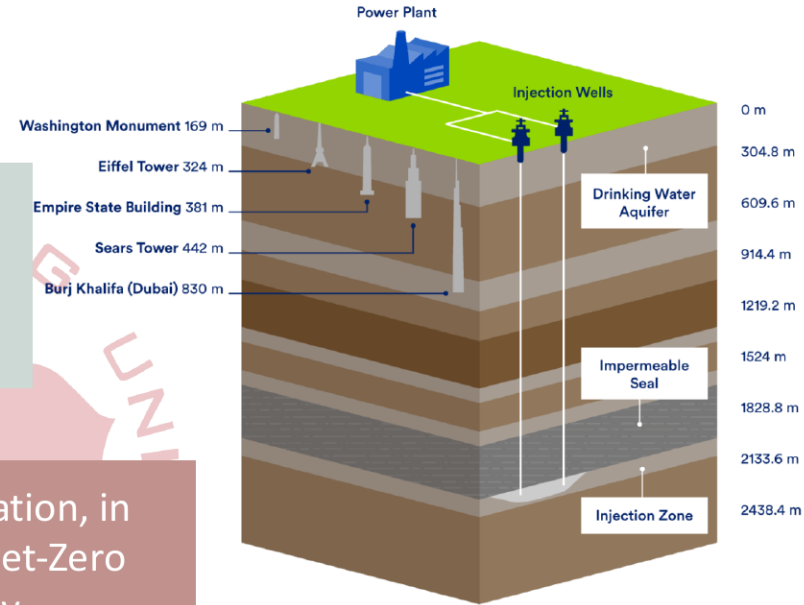
To prevent the worst impacts of climate change and maintain a habitable planet, it is crucial to limit the global temperature increase to 1.5°C above pre-industrial levels as called for in the Paris Agreement.

Taiwan's response

In response to the international trend of net-zero transformation, in addition to the government's announcement of the "2050 Net-Zero Emission Pathway", the government have announced "12 Key Strategies for Net-zero Transition". In which, Carbon capture, utilization and sequestration is one of the Key strategies.

Carbon capture and sequestration

Carbon capture and sequestration (CCS) is one of the most direct methods of reducing carbon emissions, which includes a series of engineering processes and ultimately a geological site to inject CO_2 into for long term storage.

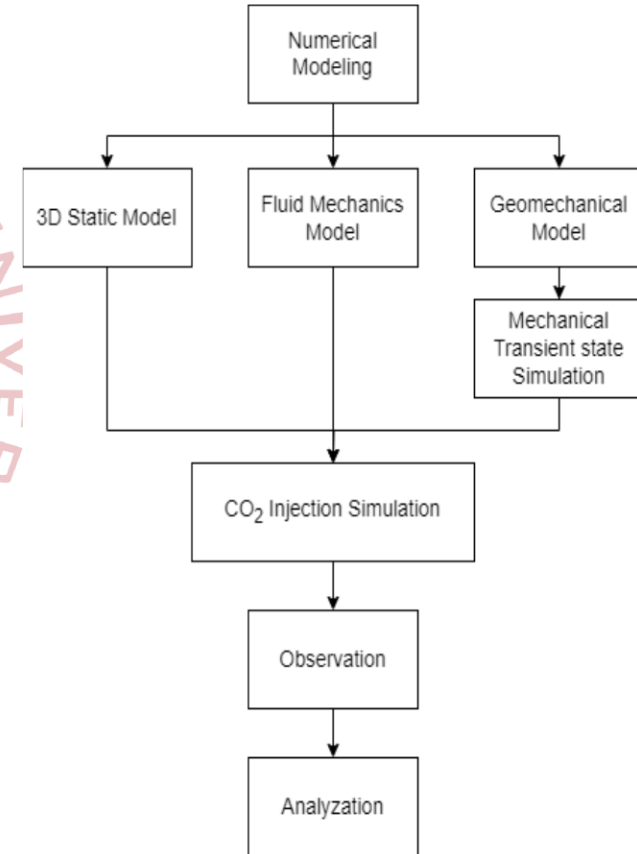


Remslie. (2022, January 13). *Geologic storage of carbon dioxide in Europe: FAQ*. Clean Air Task Force.

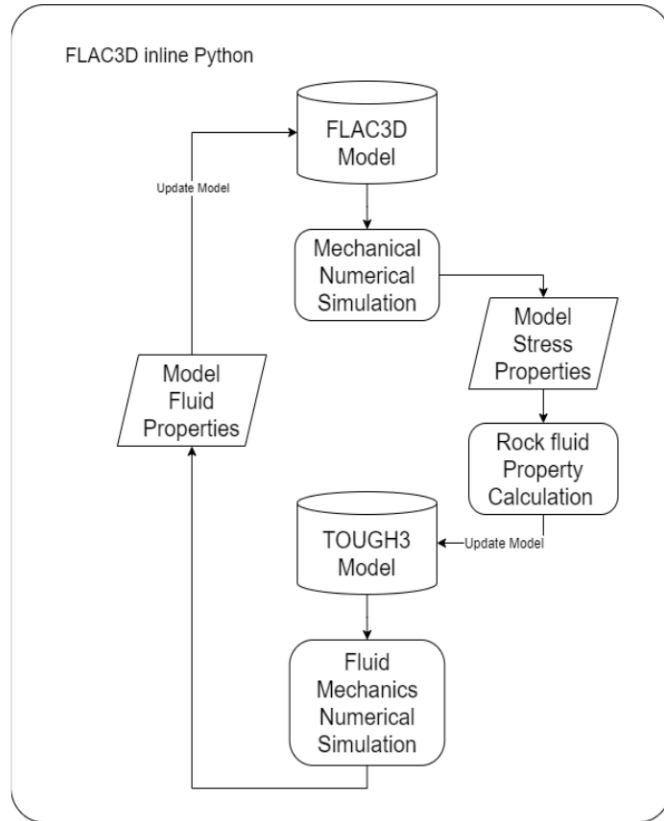
Research Methods



- FLAC3D, a software developed by Itasca Consulting Group, Inc. The FLAC3D simulator uses the Finite Volume Method to calculate the changes in deformation and stress conduction in the model under stress, and FLAC3D will be used in this study for the analysis of the geomechanical impacts on the ground.
- The TOUGH3 simulator uses the Finite Difference Method to calculate the flow and dispersion behavior of multi-component, multi-phase formation fluids in formation pore volumes, and in this study, TOUGH3 was used to simulate CO₂ injection and migratory behavior.
- Simulator equations provided in appendix section A.



Research Methods – Coupling

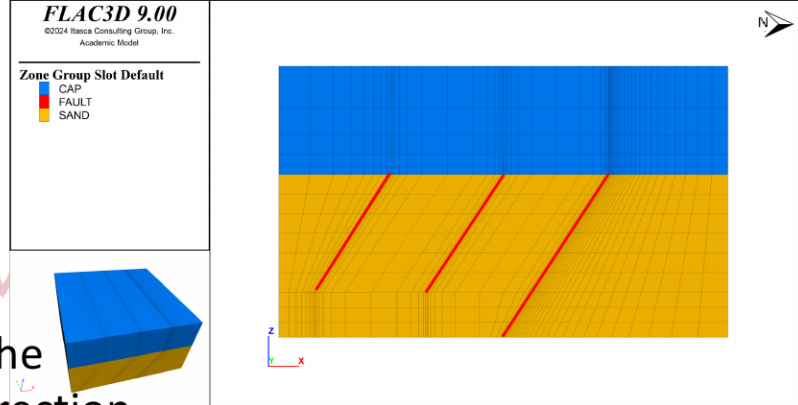


- Two-way coupling
- Sequentially coupled
- FLAC3D inline Python

Coupling time step	2.592e6 s
Total time steps	1800

Research Methods

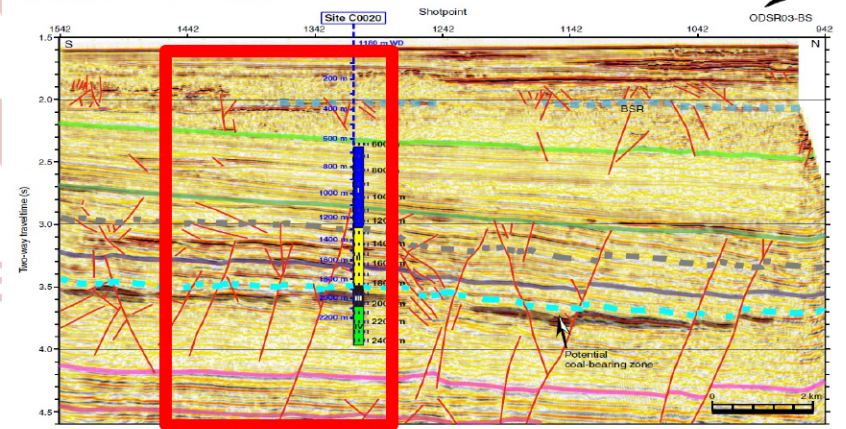
- Model Area



- Model area is the red box as shown in the figure on the bottom, with the boundary of 5 km in north-south direction, 5 km in east-west direction and 3 km deep from seafloor.

- X axis is modeled to be north-south bound with the grid length of 2~325 m, y axis is oriented in east-west bound with the grid length of 100 m, z axis is the depth axis with the grid length of 90~460 m.

Figure F2. Seismic profile in the vicinity of Site C0020 off Shimokita Peninsula. Gray zones = potential coal-bearing zone, WAD = water depth, BSR = bottom-simulating reflector.



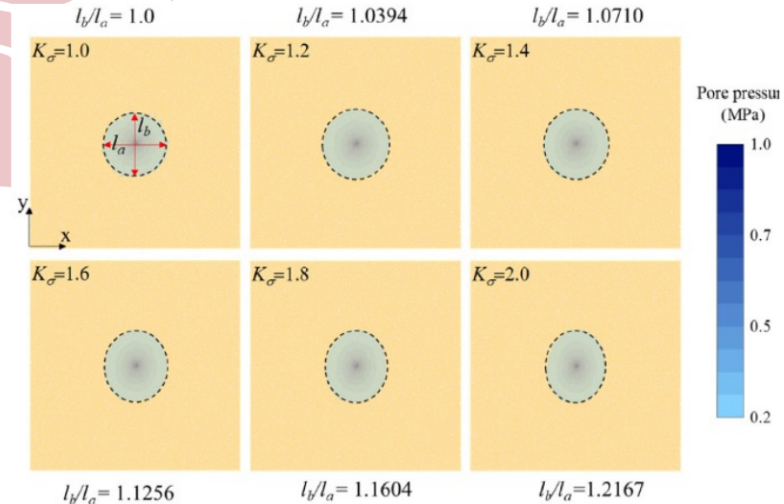
Site C0020 seismic profile · the red frame indicates the model limits (5*5km*3km deep).
337 Preliminary Report, 2012

Base Case



- Injection ran for ~ 120 yrs., total injected CO_2 yielded around 148 Mtons.

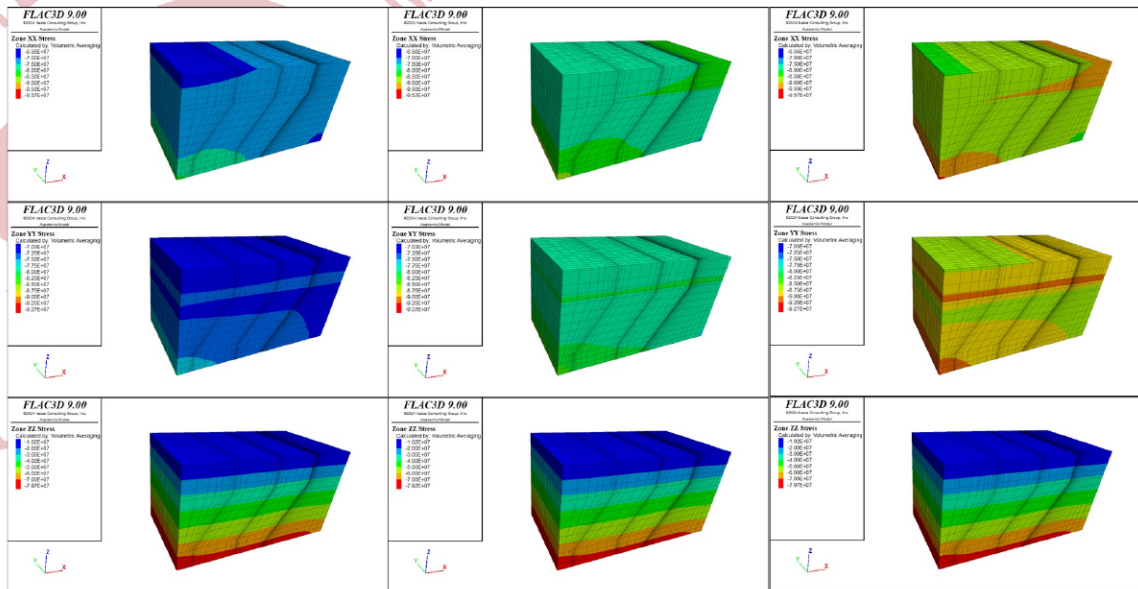
- Plume migrated 2480 m N-S, 2000 m E-W, which can correspond to the difference in horizontal stresses (**stress dependence**).



Base Case - Stress

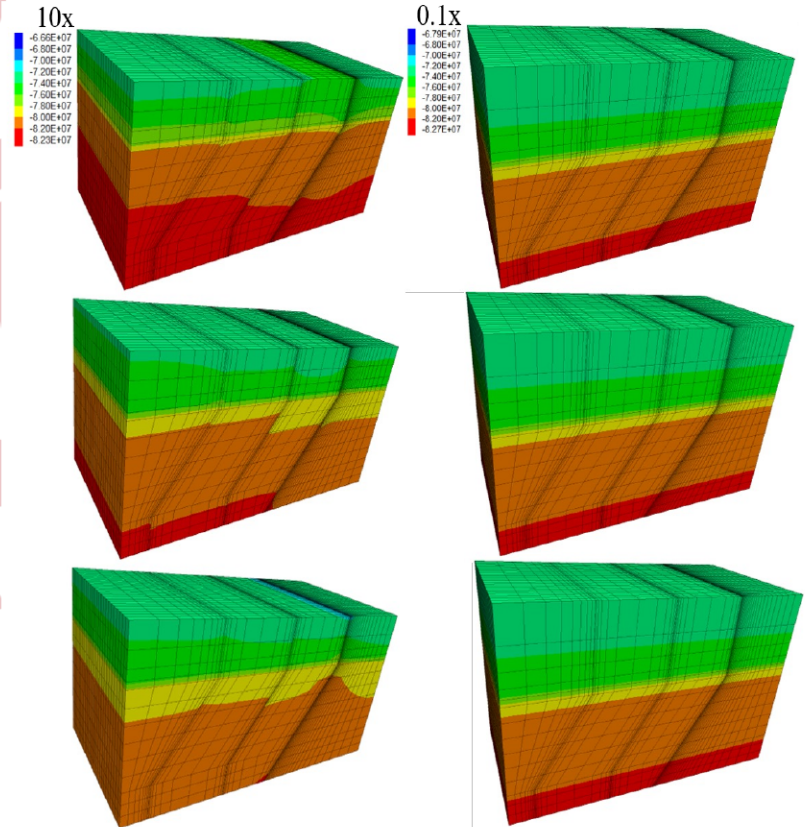
- At year 50 the X-axis and Y-axis stresses increase throughout the model, but the Z-axis stresses are very similar from the initial state.
- At simulation time 120 yr, there is no significant accumulation of stress in the Z-axis direction, but the X-axis and Y-axis directions show high stress at the junction of the caprock and sandstone layers.
- In addition, a decrease in compressive stress around the injection grid can be observed in the X-axis and Y-axis.

UNIVERSITY OF HONG KONG



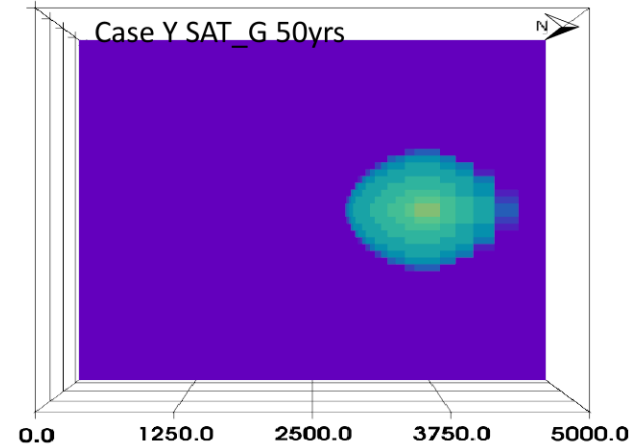
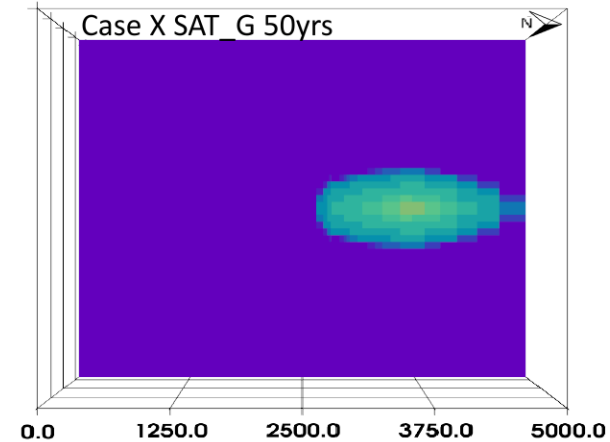
Permeability Case– Stress inj.

- The increase of stress in high permeability setting is more rapid, but both ultimately reach similar magnitude.
- The stress in high perm. setting dissipates to a larger area, while the low perm. setting only showed a tiny drop around the injection area.
- The final stress contour slightly resembles the CO₂ plume shape, in high permeability case, a bulge on the injection site, in low permeability, shows a flat contour.



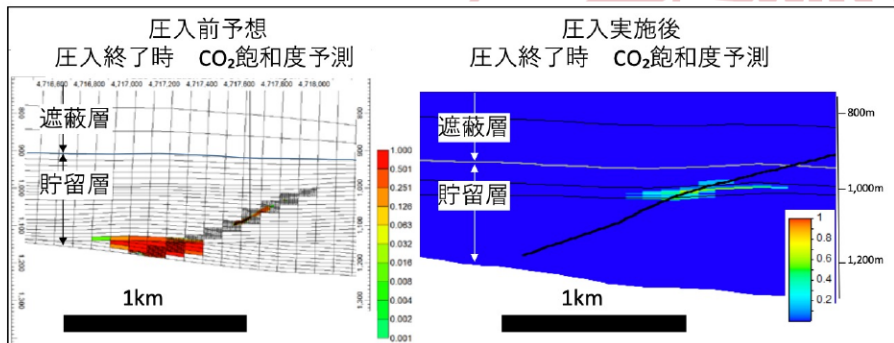
Stress Ratio Case – SAT_inj.

- In Case X, CO₂ plume showed a obvious N-S flowing tendency, which reacted according to the change in stress ratio.
- In Case Y, the flow anisotropy is less obvious.
 - The long to short axes ratio of Case X and Case Y's migratory distance is 1.783:1 & 1.200:1.
 - Possible reason is the difference in grid dimensions, resulting in fluid flow is slower in Y direction than in X direction.



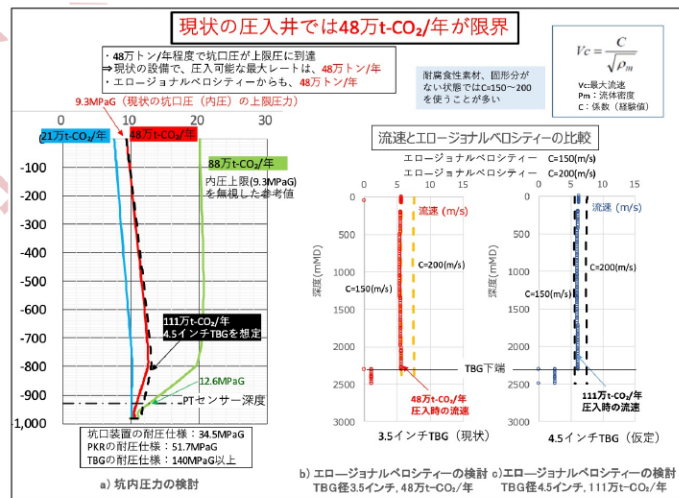
日本Tomakomai CCS模擬案例

- 既有模擬建立含蓋岩層、砂岩儲集層與假想高滲透斷層的海域封存模型
- 每年約 50 萬噸 CO₂(Total 30萬噸)、注入 50(10)年、觀察 150(20)年的情境顯示 CO₂ 主要受蓋岩封阻並沿構造移棲
- 因**假設斷層未貫穿蓋岩**，模擬期內未出現穿越蓋層洩漏
- 此案例說明斷層幾何、蓋層連續性與應力場評估需共同判斷，**不能只看儲集層容量**



注) 左図は萌別層圧入井 IW-2 のデータを考慮し、CO₂ 圧入開始前に実施したシミュレーションによる 50 万 t 圧入時の CO₂ 飽和度分布予測断面図。右図は CO₂ 圧入開始後に実施したシミュレーションによる 30 万 t 圧入時の CO₂ 飽和度分布予測断面図。CO₂ 圧入前には、主に圧入井の下部から CO₂ が圧入されると推定していたが、圧入開始後には圧入井の上部から圧入されていると考えている。

図 3.3-6 萌別層圧入井 IW-2 掘削後、圧入開始前後の圧入区間の予測



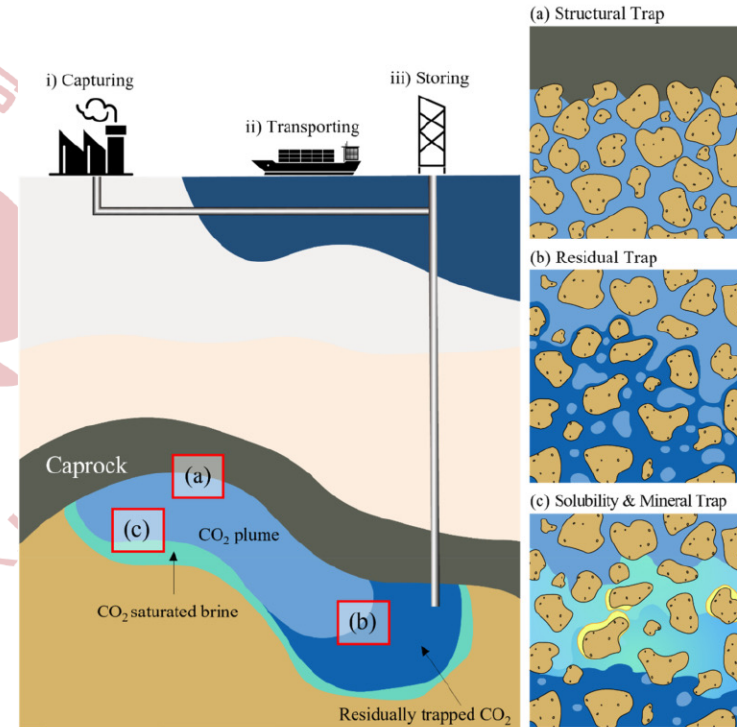
a) 坑内圧力の検討 b) エロージョナルペロシティーの検討 c) エロージョナルペロシティーの検討
TBG径3.5インチ、48万t-CO₂/年 TBG径4.5インチ、111万t-CO₂/年

Summary for Flac3D model

1. It was observed that the increased mobility caused by the increased permeability of the formation may be the reason for the larger area of influence of the model by the CO₂ plume as well as the larger change in stress and strain.
2. In order to make a trade-off between the numerical simulation computation time and the model resolution, a gradient mesh design is adopted.
3. In this study, we observed the migration anisotropy due to geomechanical stress with the same three-axis permeability settings by means of the mechanical coupling method, and thus demonstrated that the importance of geomechanics in the simulation.

耦合模型的實務檢核

- 兩端 spin-up 必須同步：PetraSim 壓力/溫度平衡，FLAC3D 初始應力平衡
- 變數交換需明確：PetraSim 輸出 P、T、S；FLAC3D 回傳體積應變、塑性應變、孔隙度與滲透率更新
- 時間步需依操作階段調整：注入/試產初期加密，穩態後拉長
- 敏感度至少涵蓋滲透率、Biot 係數、摩擦係數、斷層導通性與熱邊界條件



建議的整合工作流程

1. 彙整既有地質、地物、井測、岩心、壓測與溫壓資料，建立可追溯資料庫
2. 建立三維地質模型，明確定義地層、斷層、裂隙、熱源/注入層與邊界
3. 使用 PetraSim 建立熱-流體/多相流模型，完成 spin-up 與 mass/energy balance 檢核
4. 使用 FLAC3D 建立地力模型，完成初始應力場、斷層 interface 與井孔穩定分析
5. 執行序列耦合與敏感度分析，形成決策門檻與監測計畫

結論

- 以井測資料校正地質模型，再透過 PetraSim 與 FLAC3D 連結流體、熱與地力行為
- 地熱與 CCUS 雖然操作目標不同，但地下工程判斷共享同一套證據鏈
- 把每個案場都應該以「問題-資料-模型-決策」作為工程實務的工作流
- 對外溝通的核心句：地下能源與封存工程的成敗，取決於模型是否能被井下資料與監測資料持續驗證

