

經濟部「地熱探勘學研合作平臺」成立大會

地熱探勘示範案場進度簡報 —臺東紅葉地區

董倫道

工研院材化所/綠能所、師大葉恩肇教授、衣德成地質技師



工業技術研究院

Industrial Technology
Research Institute

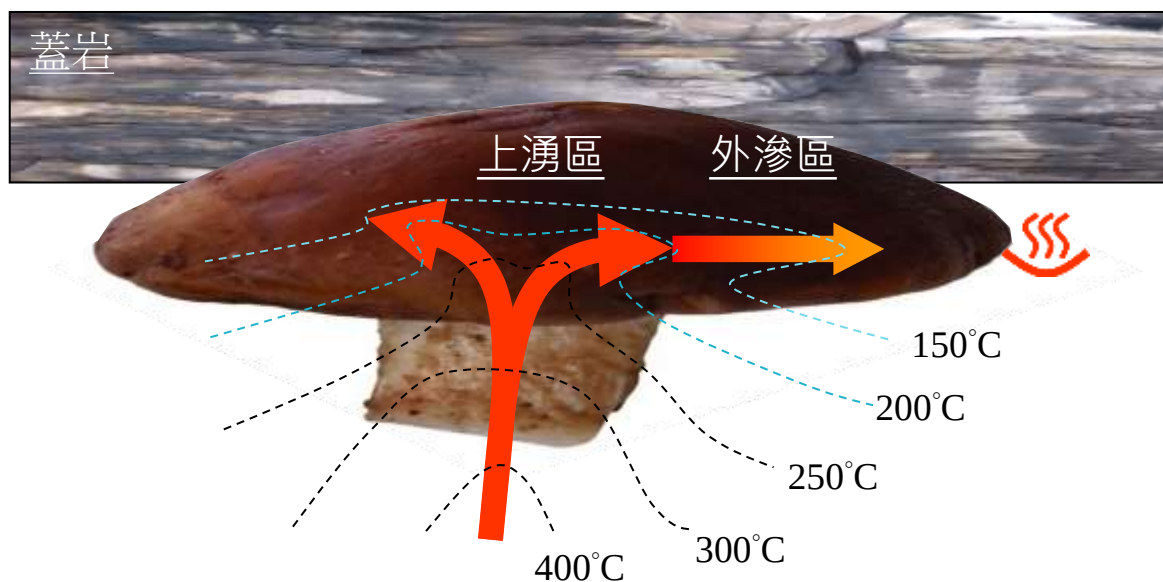
以創新、誠信、分享的信念滿足顧客需求

清水地熱IC20井鑽探 (董倫道攝)

地熱探勘在找什麼？

地熱構造像香菇

- 菇柄是熱水上湧區(up-flow zone) >> **最熱**
- 菇傘是熱水外滲區(out-flow zone) >> **比較不熱**



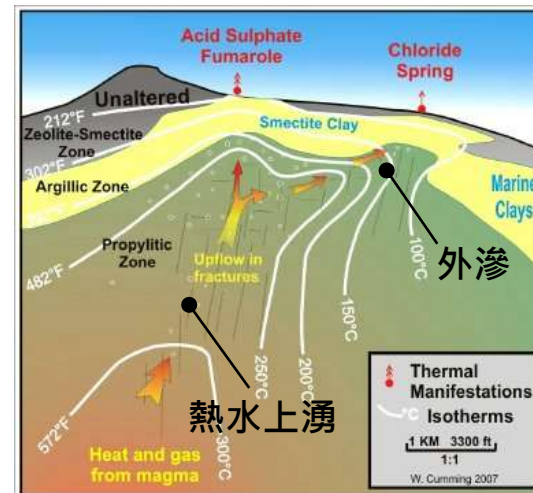
G2/G3/G4

投資決策?

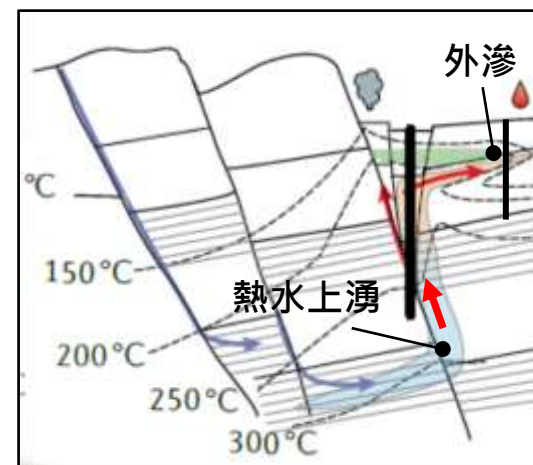
G4/G5

- 找到地熱香菇構造
- 鑽探確認/補充探測
- 區域尺度潛能評估

- 確認熱水儲集層特性
- 確認地熱產能
- 場址尺度潛能評估

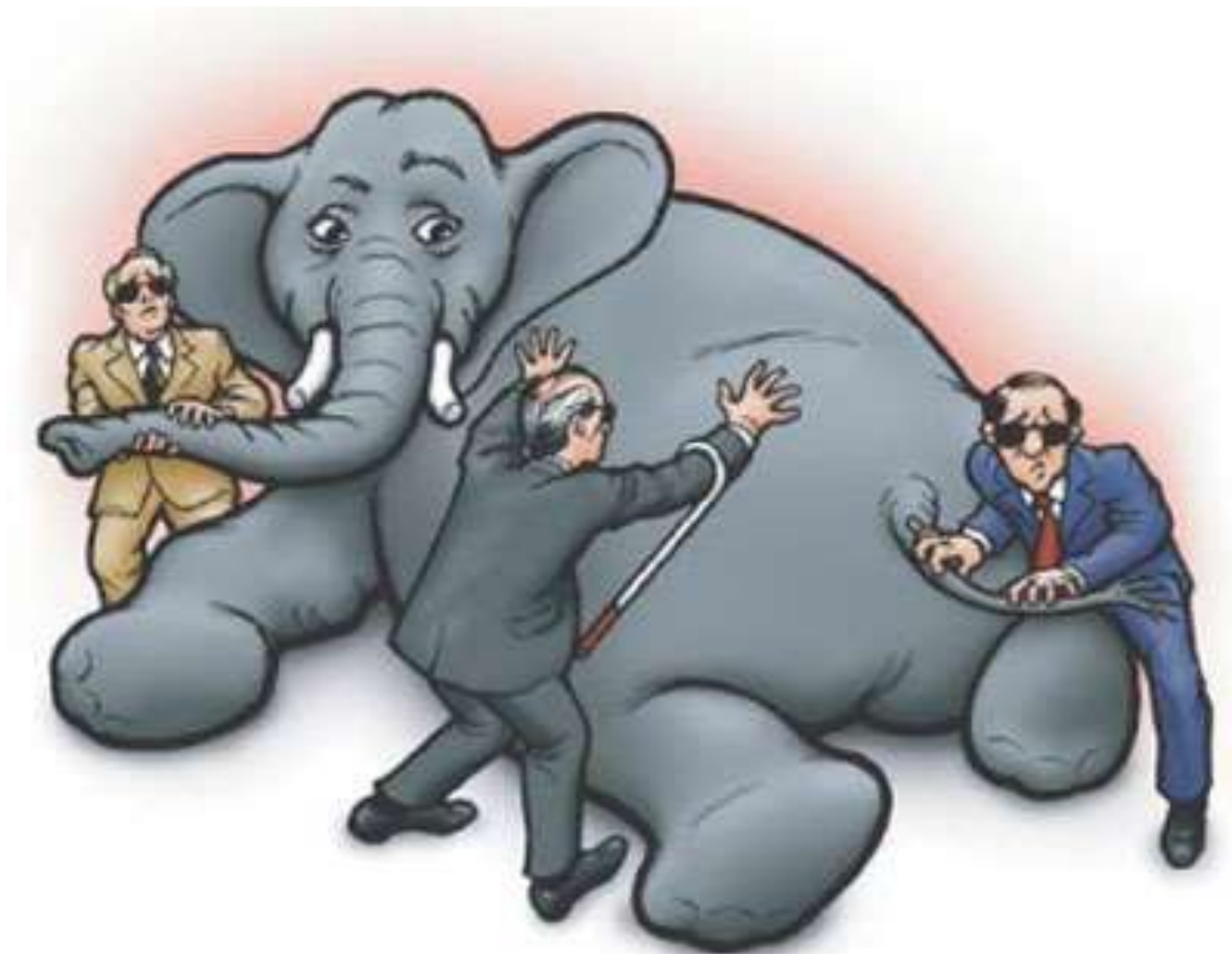


典型火山地熱田的地熱構造
(Cumming and Mackie, 2010)

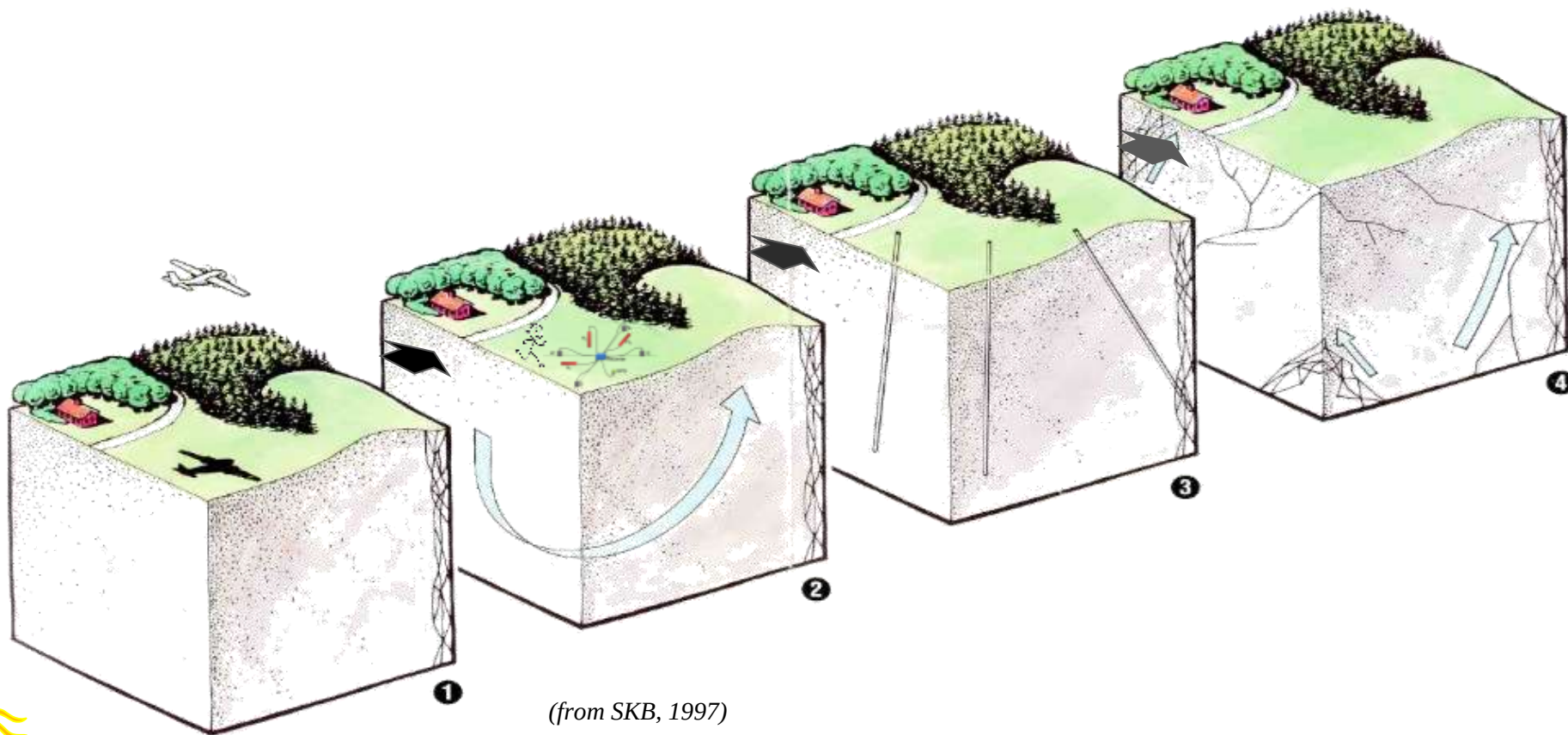
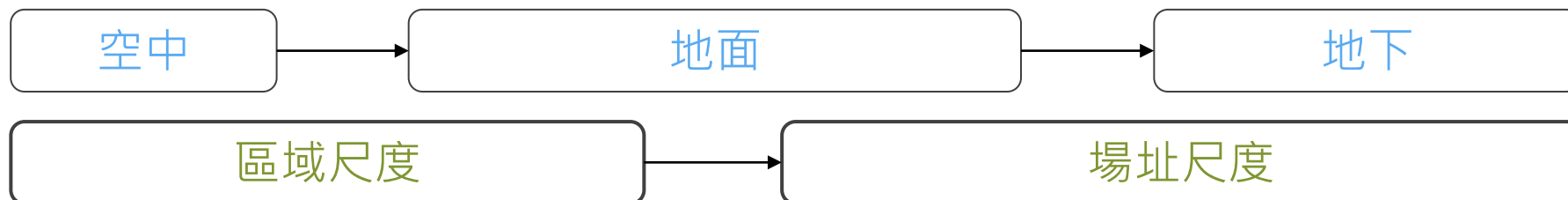


典型**非**火山地熱田的地熱構造
(Jolie et al., 2021)

瞎子摸象寓言故事的啟發

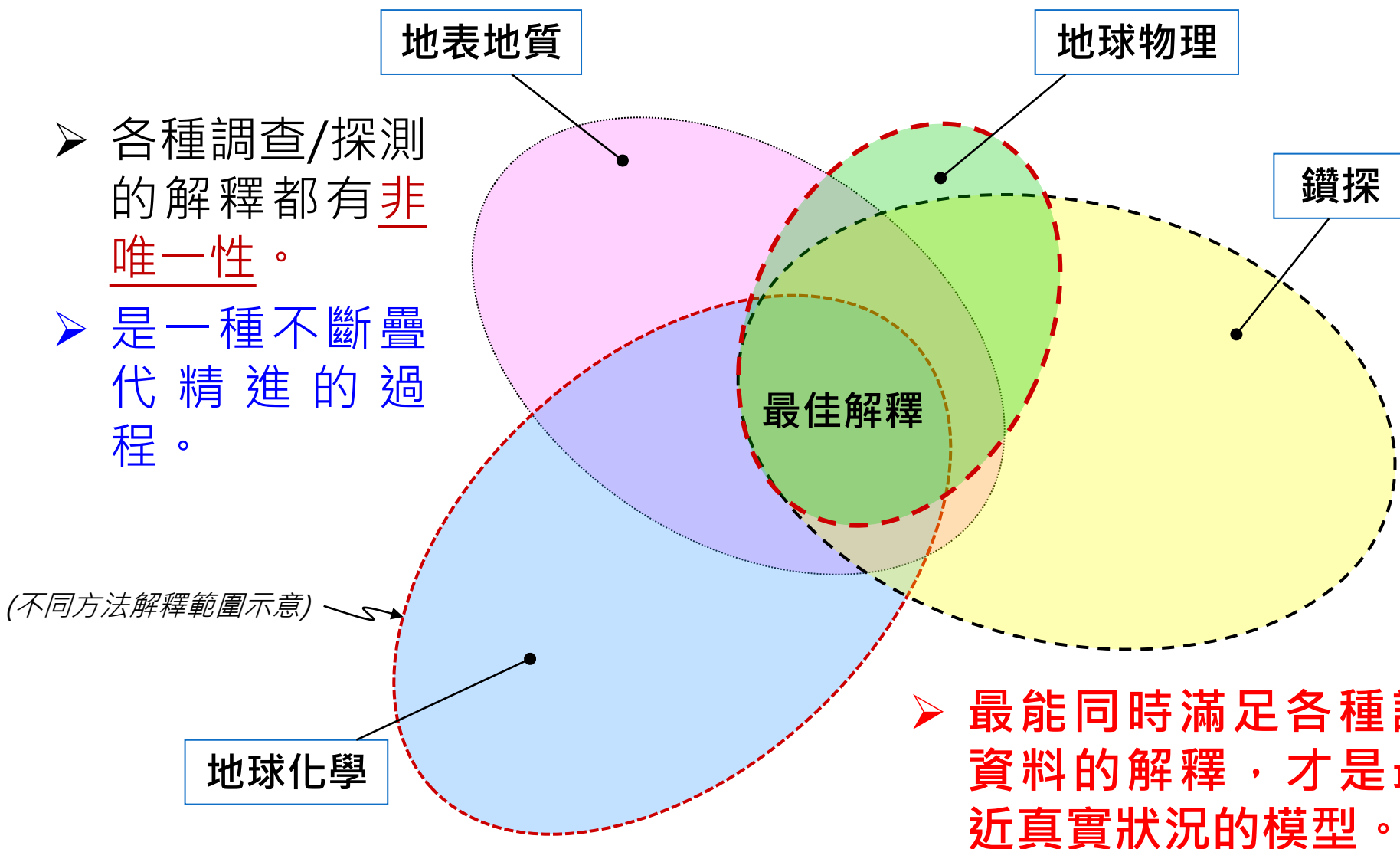


地質探測的策略—由上到下、由大到小



地質探測的策略—整合解釋

- 各種調查/探測的解釋都有非唯一性。
- 是一種不斷疊代精進的過程。



- 最能同時滿足各種調查資料的解釋，才是最接近真實狀況的模型。

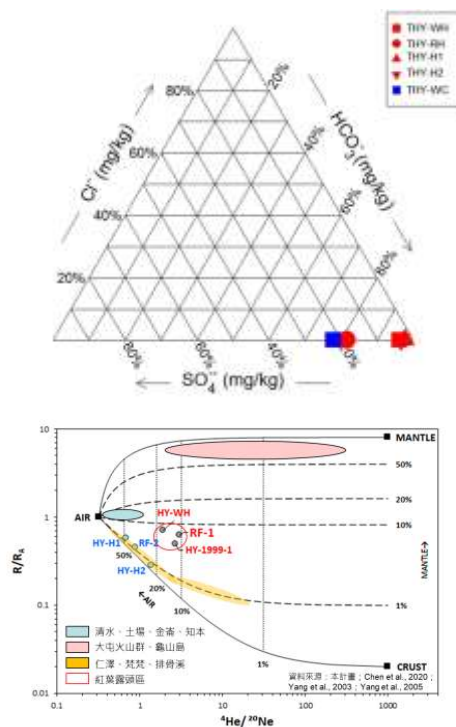


探測場域—台東紅葉

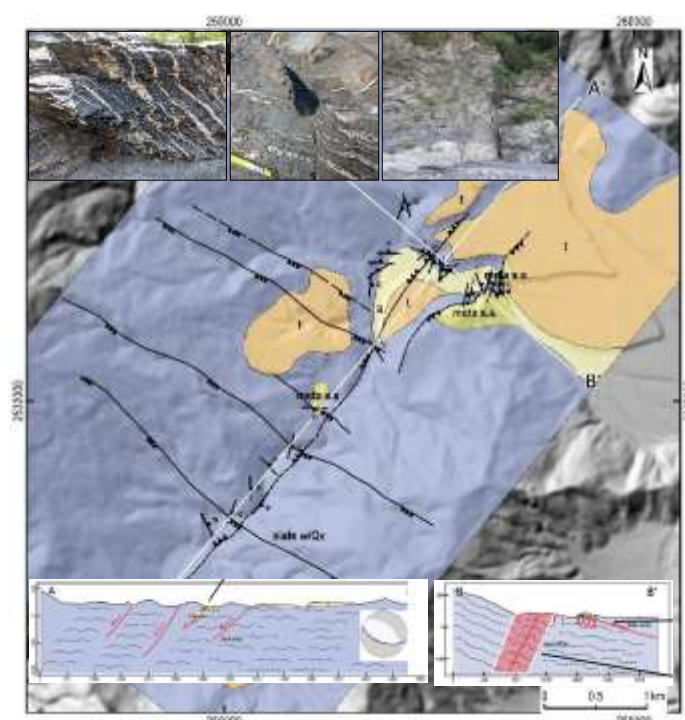


地熱探勘資訊整合的策略

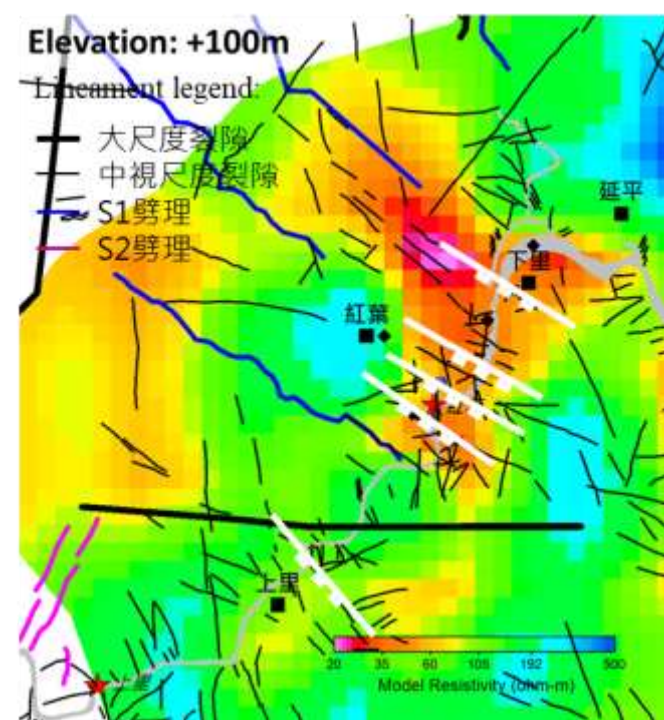
地化 熱水來源、溫度



地質 地熱機制、可能通道



地物 地熱構造空間資訊



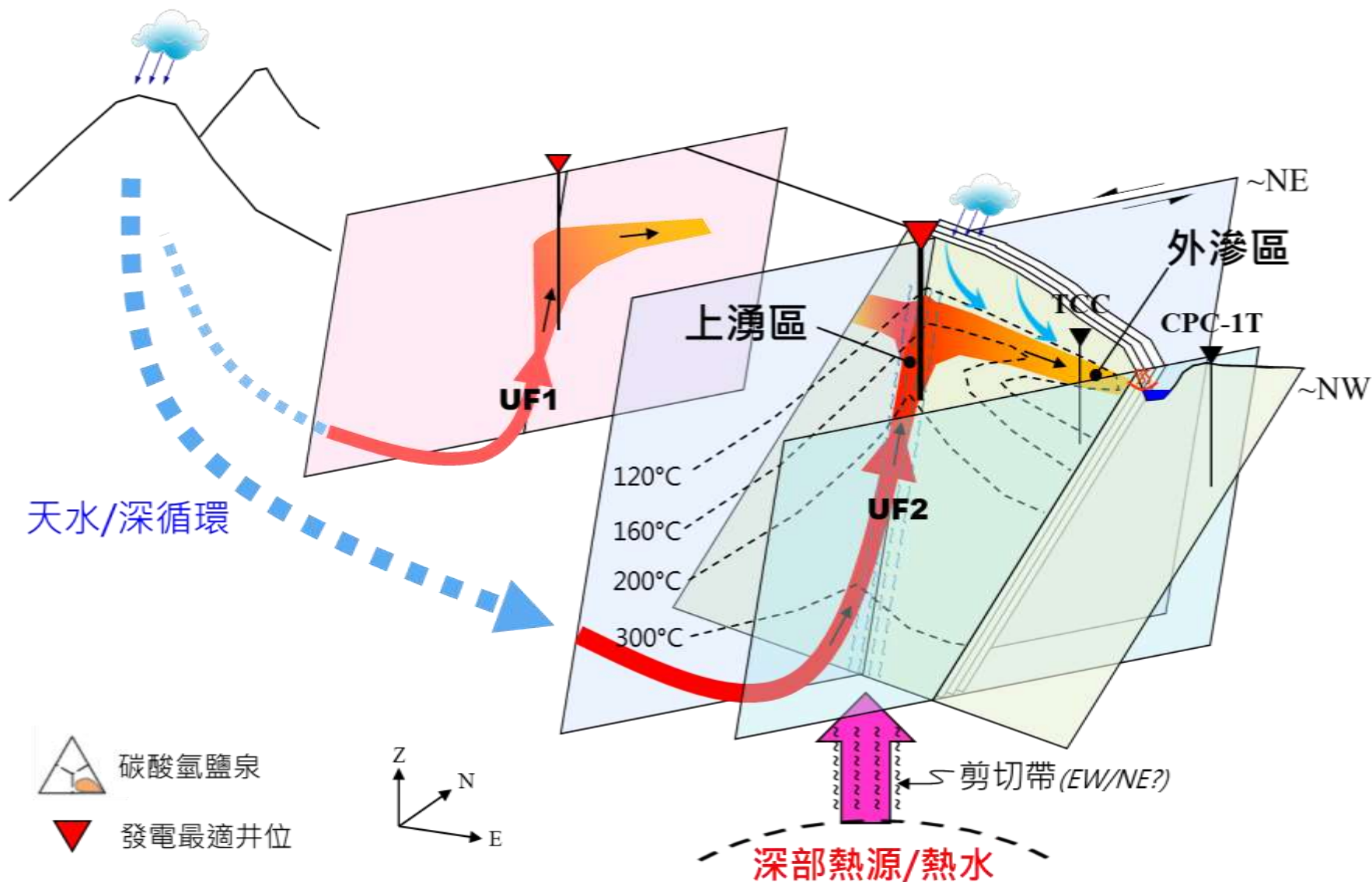
<地質調查與地球物理探測之雙盲實驗>

- 初期各自獨立調查。
- 經由不同途徑得到一致的推論。
- 有助於提高所建立地質模型之科學可信度。

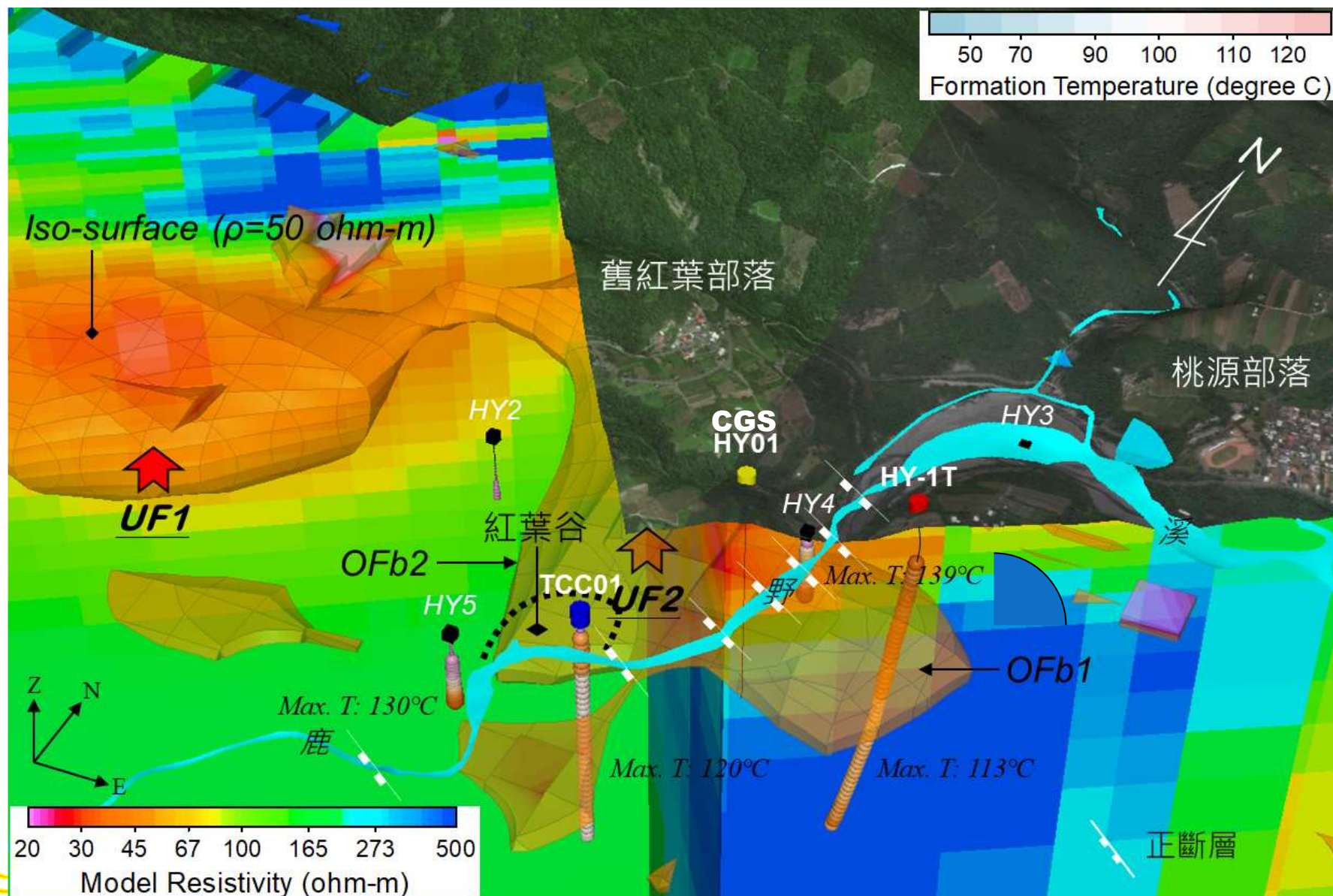
Data Integration:

地質、地化、地物、既有井 + 國內外前人文獻

探勘初步成果—台東紅葉地熱概念模型



探勘初步成果—台東紅葉地熱概念模型



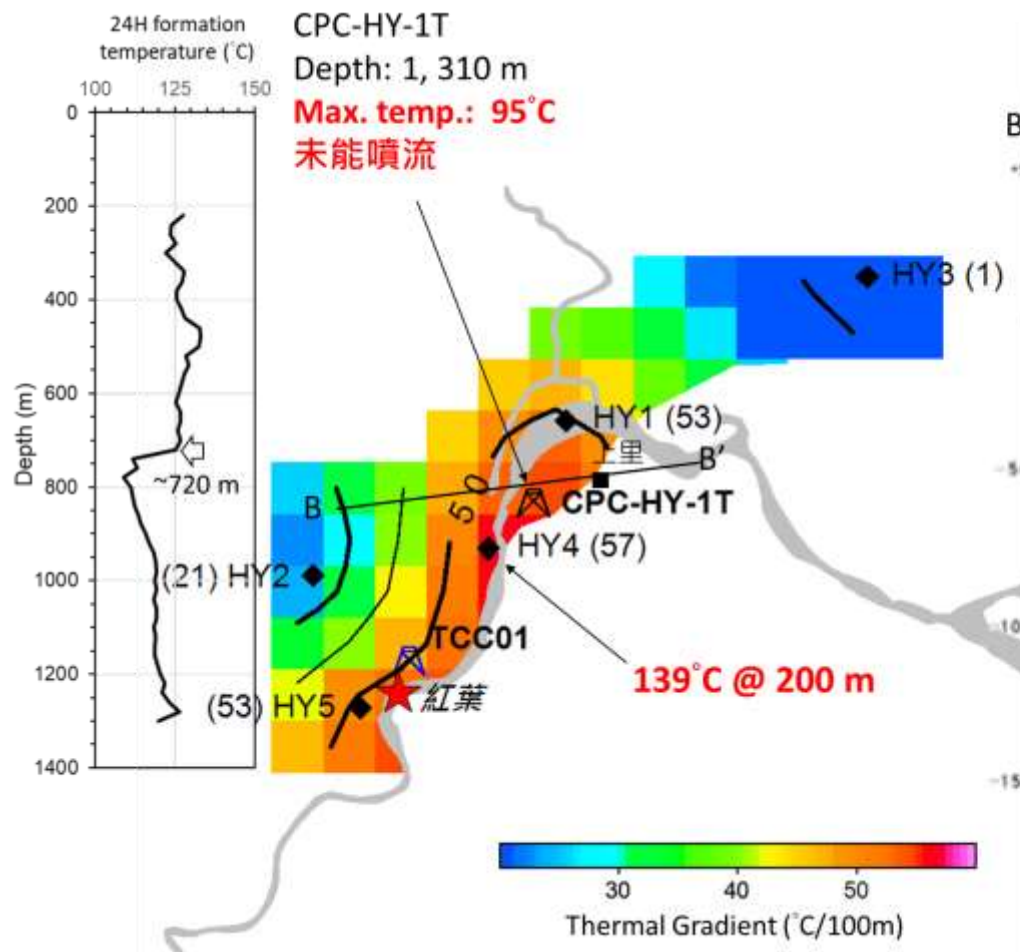
簡報大綱

1. 引言與探勘初步成果
2. 地熱地質探測
 - 2-1 既有資料回顧
 - 2-2 地球化學分析
 - 2-3 地質調查
 - 線型判釋與現地應力分析
 - 構造量測與古應力分析
 - 野外地質調查
 - 2-4 大地電磁探測
 - 2-5 地下水模擬
3. 地熱概念模型
4. 地熱地質圖初稿
5. 三維地熱地質模型
6. 資料庫及展示系統
7. 地質探勘井鑽鑿

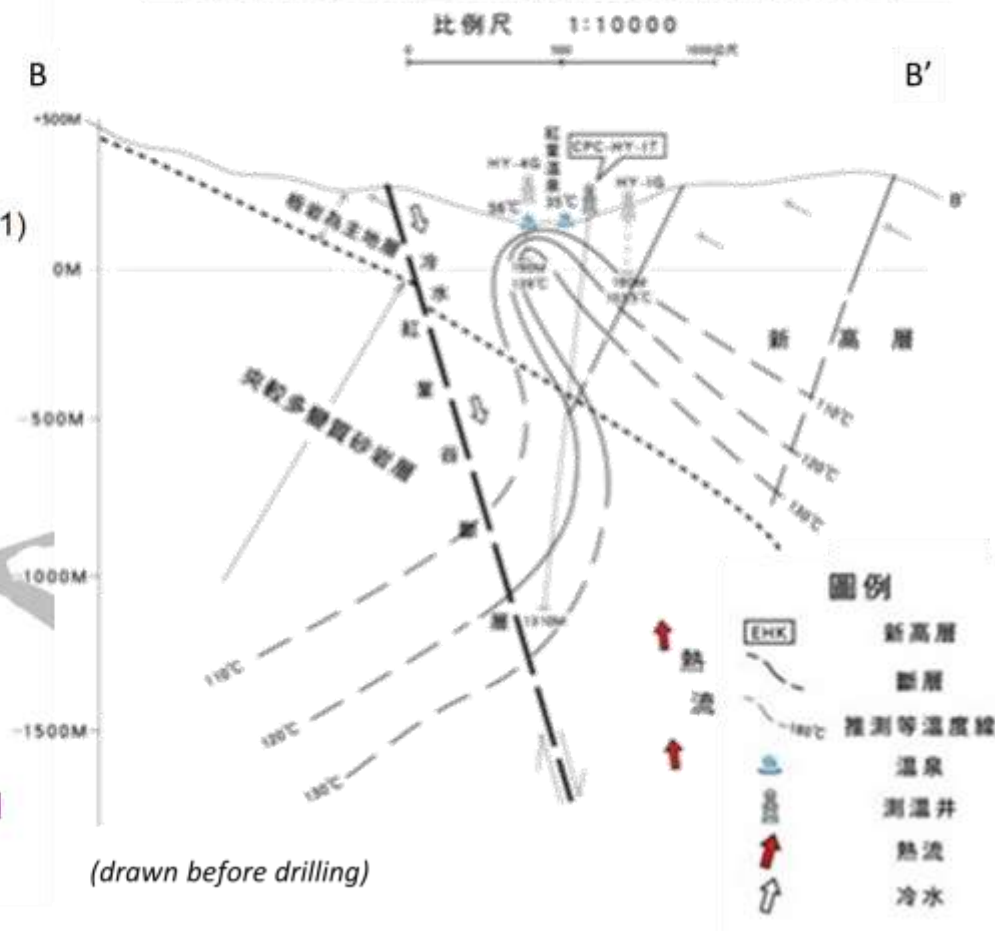


大地電磁探測

2-1 既有資料回顧 > 七十年代中油鑽探

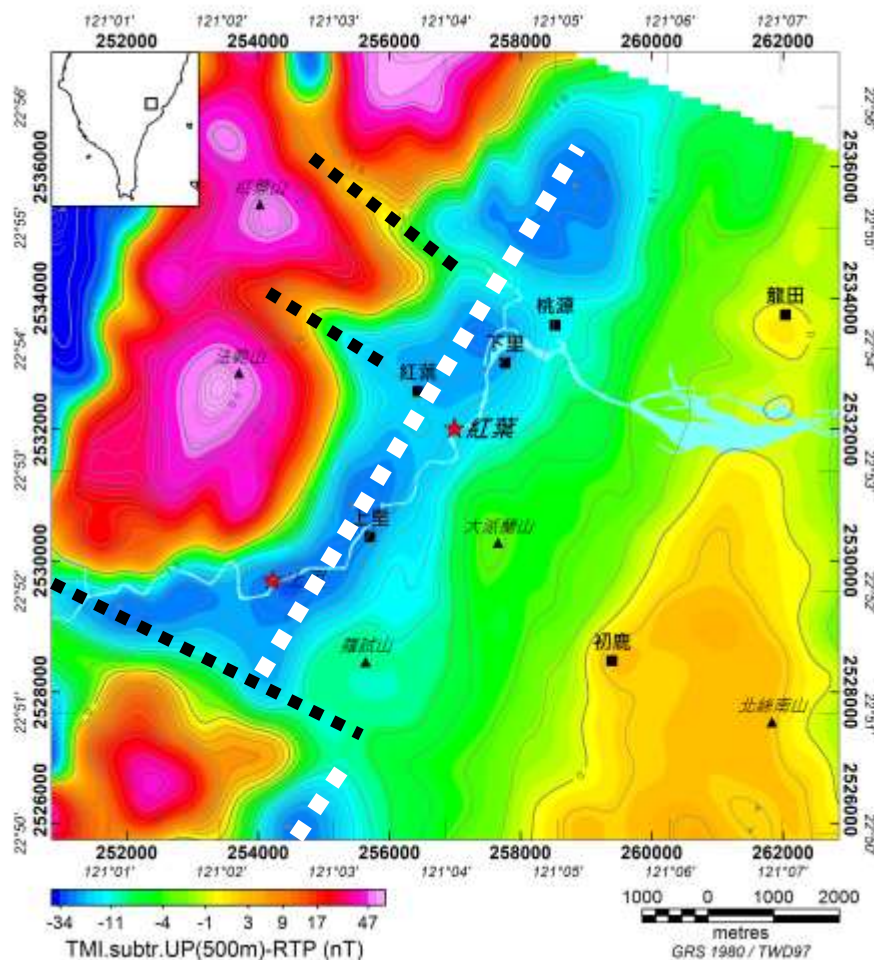


台東縣紅葉地熱區B-B'線地質及推測溫度剖面圖



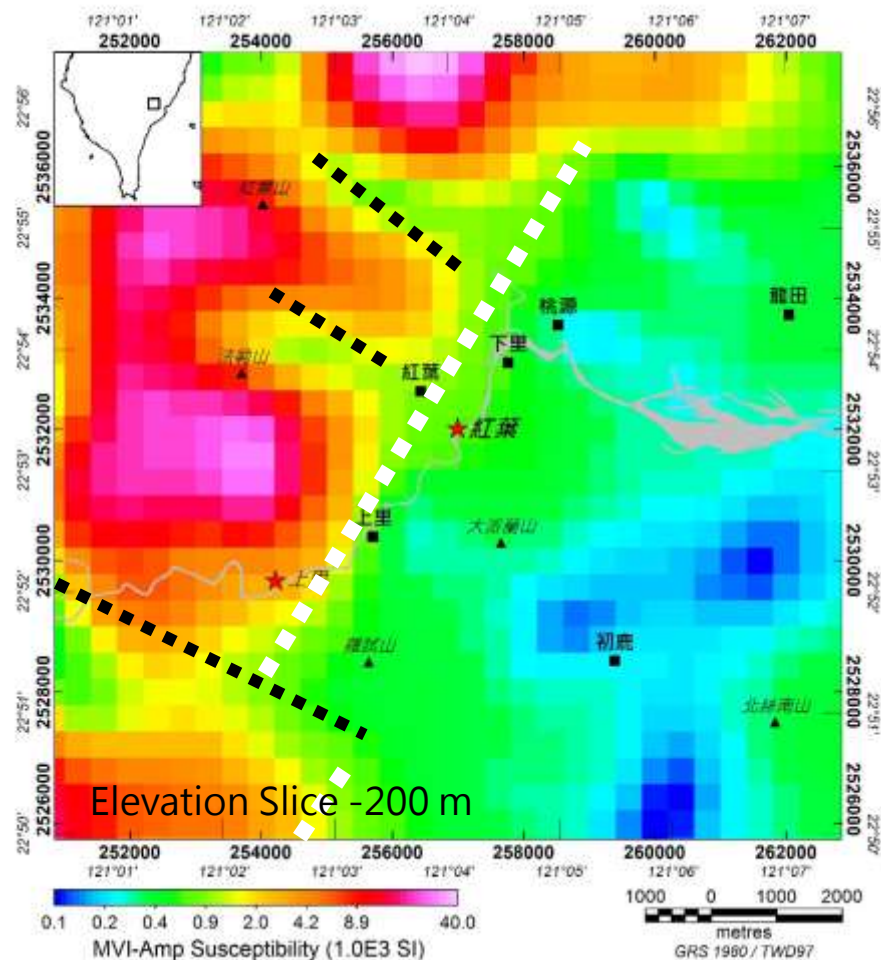
2-1 既有資料回顧 > 磁力異常圖

➤ 一系列的NW、NE構造



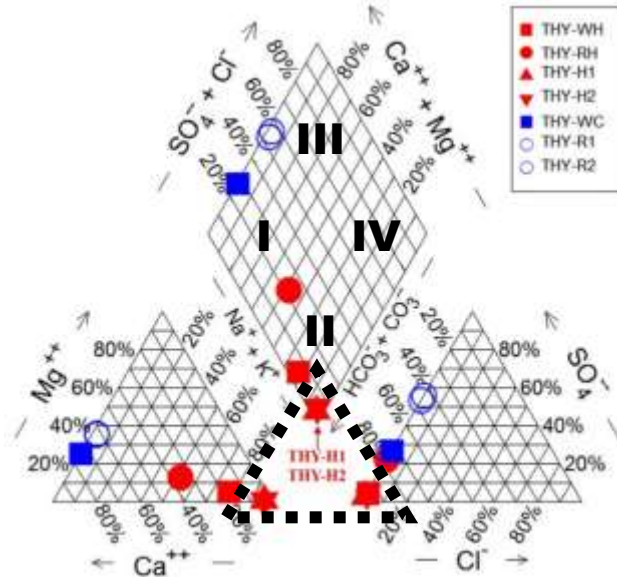
剩餘磁力異常圖

(資料：地調所，2020)



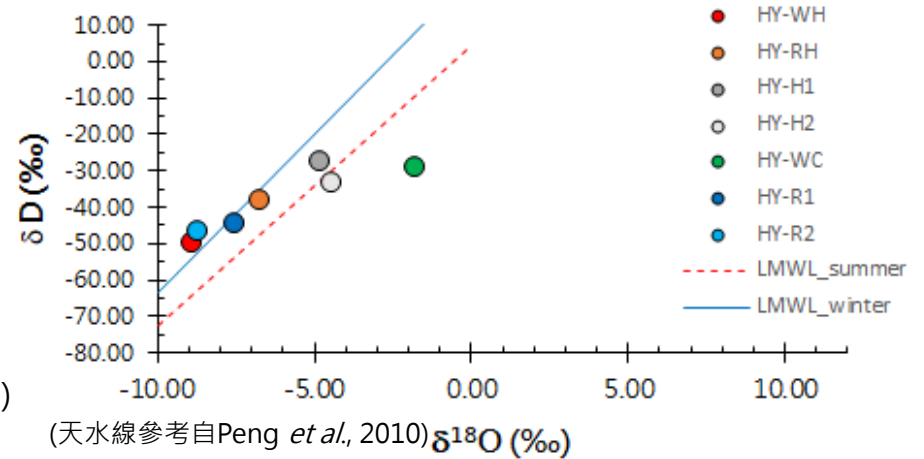
磁化向量磁感率切面圖

2-2 地球化學 > 水質及熱水來源



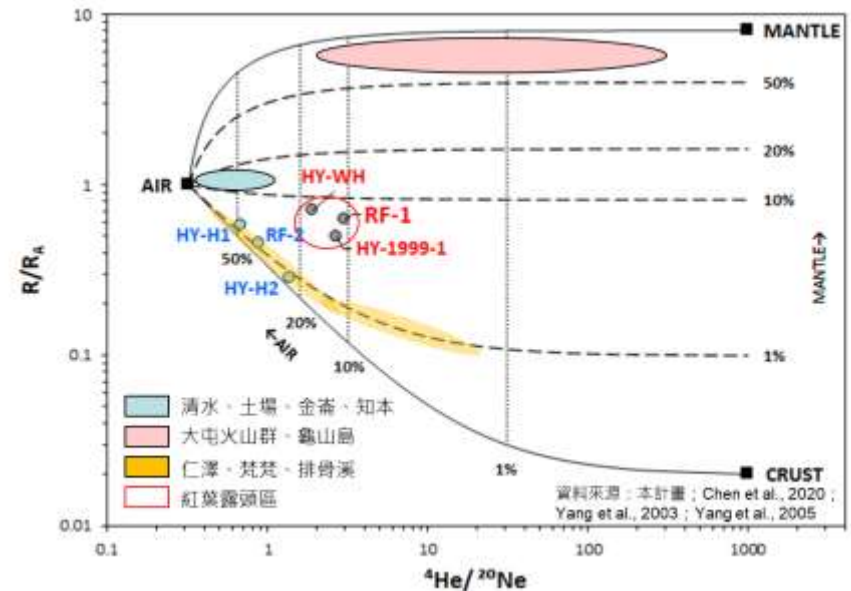
紅橋溫泉(THY-RH)
白橋溫泉(THY-WH)
溫泉井(THY-H1, THY-H2)
山泉水(THY-WC)
溪水(THY-R1, THY-R2)。

台東紅葉溫泉水氫氧同位素關係圖



(天水線參考自Peng *et al.*, 2010)

- 氫氧同位素比值 >> 大多位於天水線區間
- 溫泉水/熱水 >> 偏中性至弱鹼性碳酸氫鹽泉
- 溫泉氣體來源主要為地殼和大氣端混合，具有些微的地函端成分的貢獻(6%)
- 熱水來源以地下水經深循環加熱為主，**並局部混合來自深切地殼構造的深部熱水。**



紅葉地熱區氦氖同位素關係圖



2-2 地球化學 > 熱水儲集層溫度估算

常見的水化學地質溫度計有二氧化矽地質溫度計和陽離子(鈉-鉀)地質溫度計。以玉髓地質溫度計推估白橋溫泉區顯示熱水儲集層溫度達95℃。而依鈉鉀地質溫度計初步結果顯示露頭區白橋溫泉和紅橋溫泉分別為182℃和209℃，而溫泉旅館區溫度稍低為108℃。

地點	T _{outlet}	Na	K	Ca	SiO ₂	T _{SiO₂} (Eq.1)	T _{Na-K} (Eq.2)
白橋溫泉	63	322	16	63	77	95	182
紅橋溫泉	46	138	10	84	41	65	209
溫泉旅館-1	55.5	184	2	5	38	61	108
溫泉旅館-2	57	184	2	6	34	55	108

註1：溫度單位為℃。

註2：離子濃度單位為mg/L。

註3：地質溫度計公式如下。

$$(1) \text{ 玉髓地質溫度計： } T = \frac{1112}{4.91 - \log(\text{SiO}_2)} - 273.15 \text{ (Arnorsson, 1983) (Eq.1)}$$

$$(2) \text{ 鈉鉀地質溫度計： } T = \frac{1390}{\log\left(\frac{\text{Na}}{\text{K}}\right) + 1.750} - 273.15 \text{ (Giggenbach, 1988) (Eq.2)}$$



2-3 地質調查 > 岩性差異與熱流遺跡

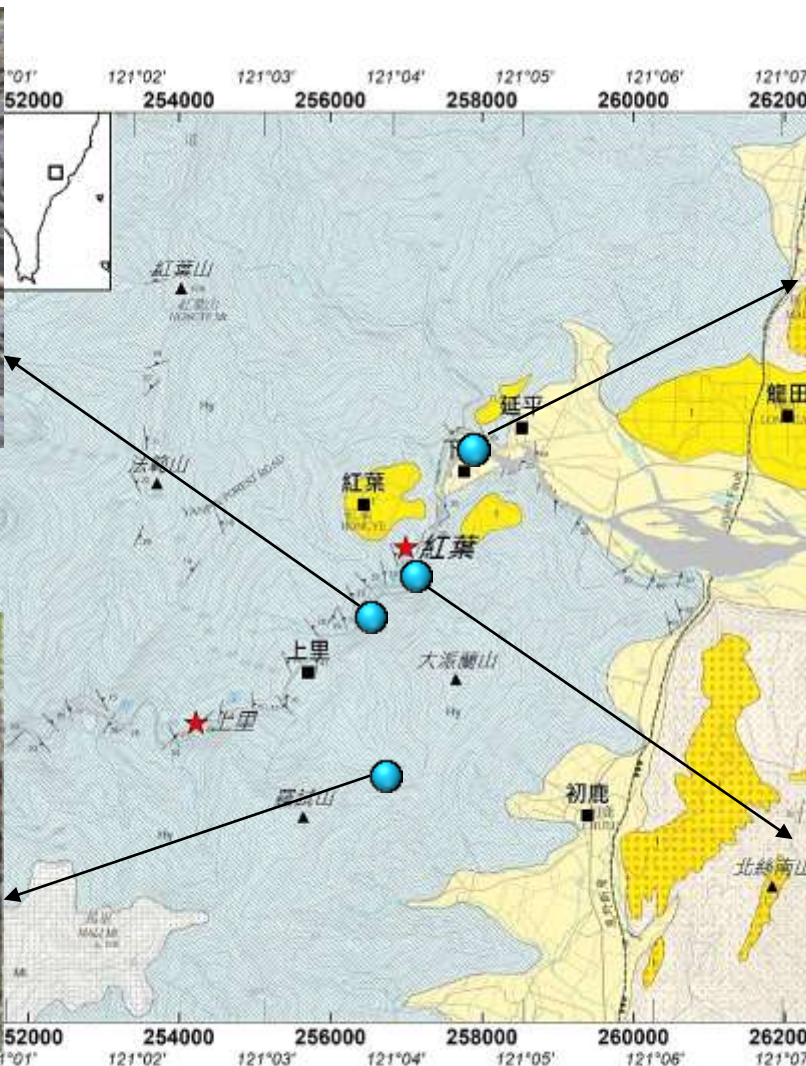


板岩、千枚岩與薄層變質砂岩
(剪切帶內富含石墨及碳酸鹽礦脈，
呈過壓破裂構造)



馬里層/紅葉層

厚層板岩與變質粉砂岩
(岩層等斜褶皺分布，碳酸鹽及石
英礦脈較少)

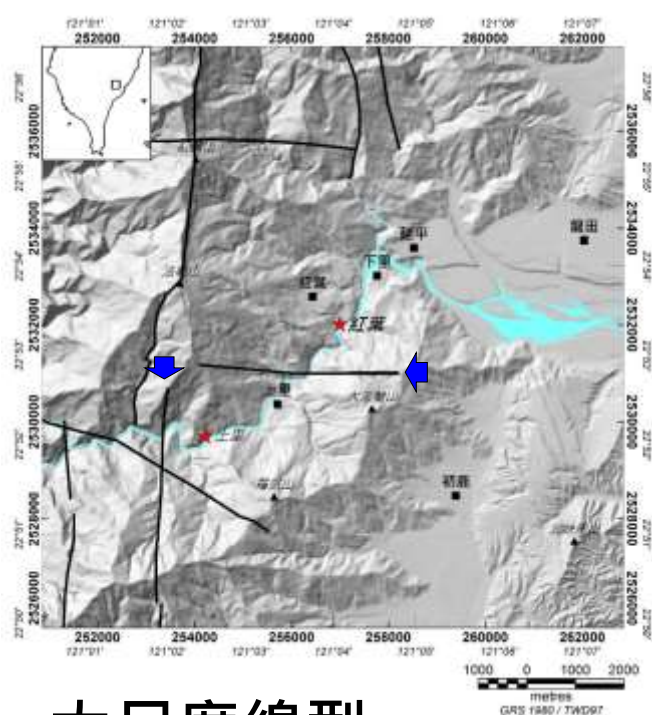


厚板岩偶夾薄變質砂岩千枚岩
(局部石英-碳酸鹽礦脈系統，富集在
剪切帶附近)



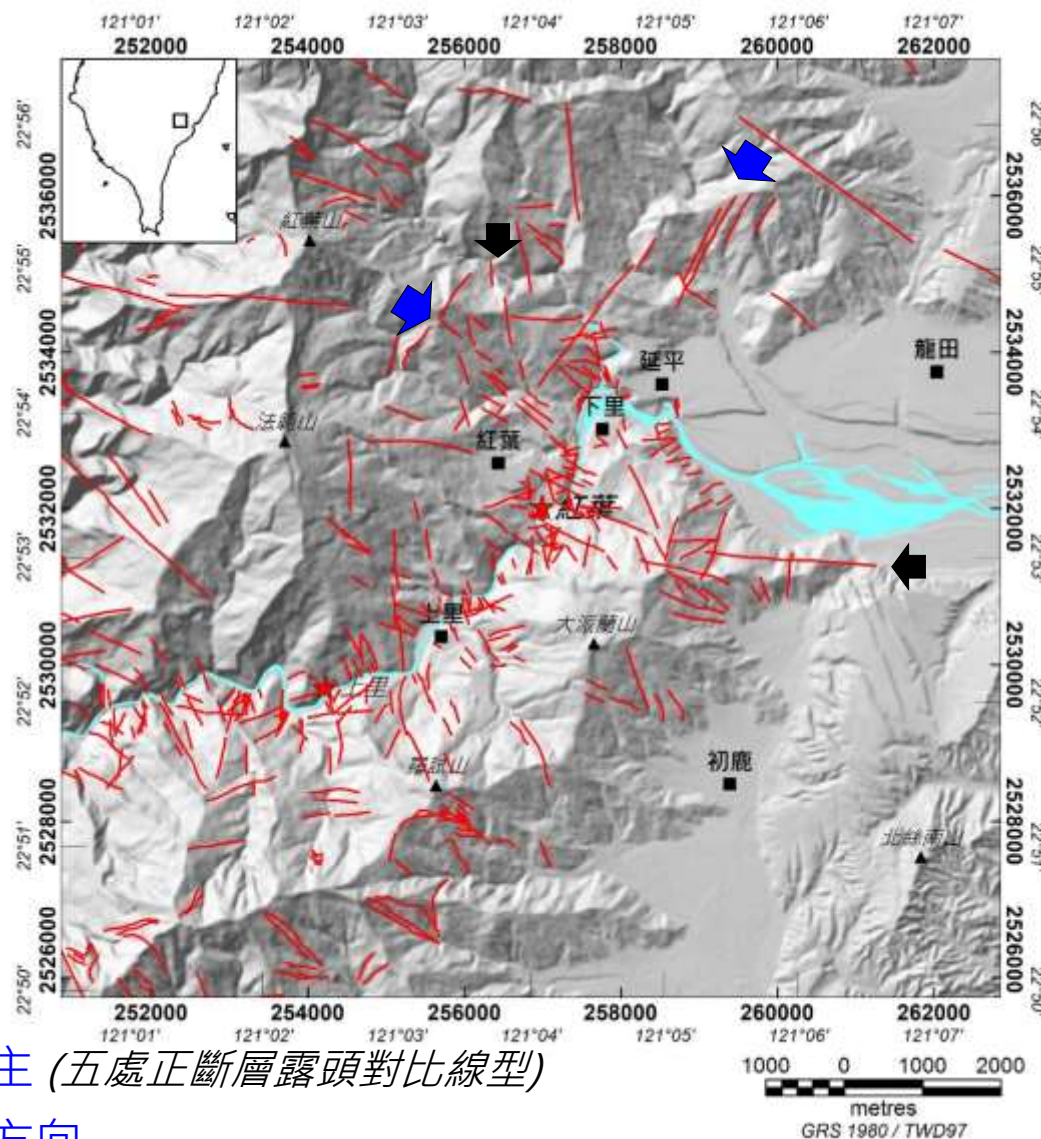
千枚岩夾變質粉砂岩
(早期剪切帶內富含碳流體，後期則
充填碳酸鹽礦脈)

2-3 地質調查 > 線型判釋 > 大尺度線型



大尺度線型

> 近東西向、近南北向

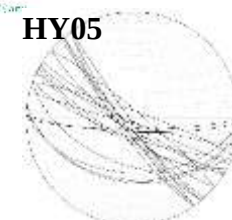
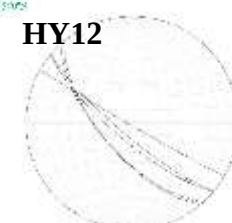
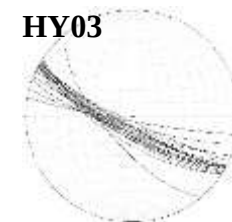
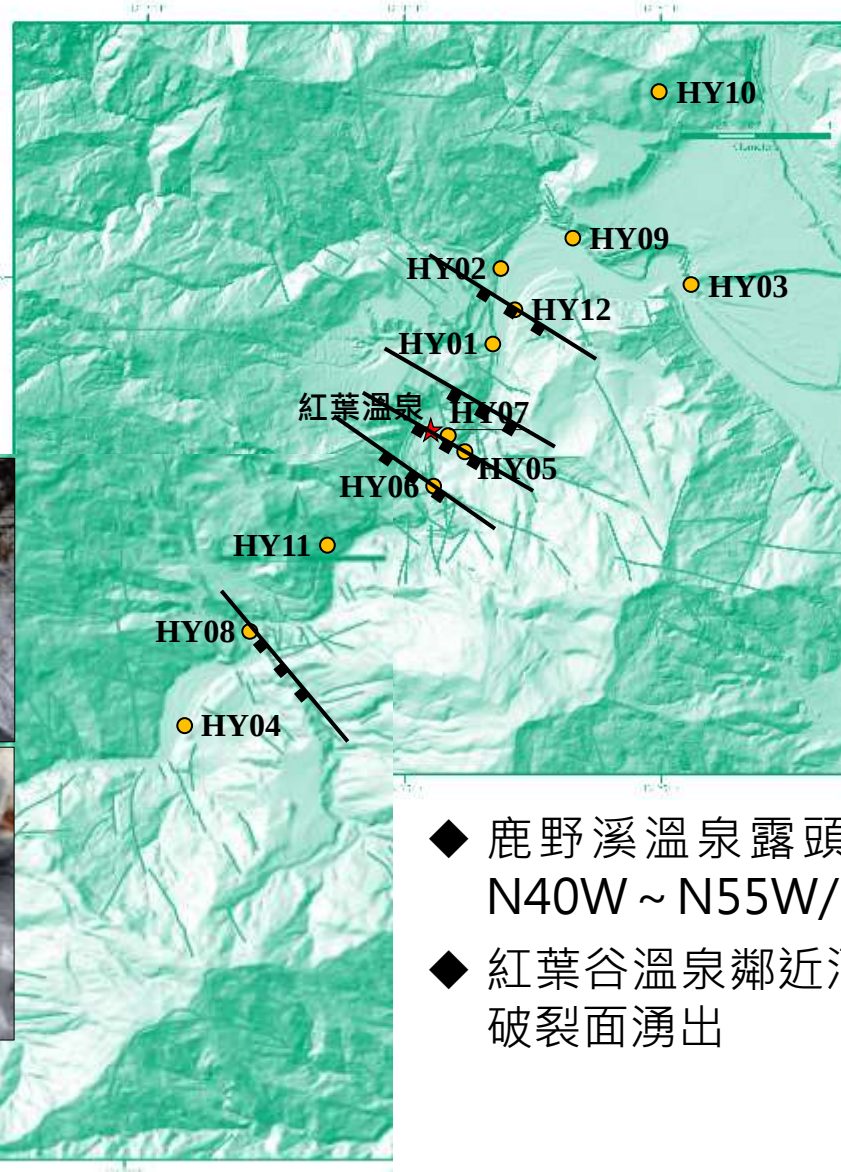
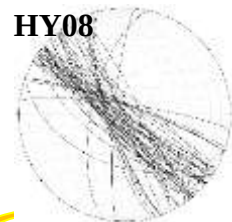
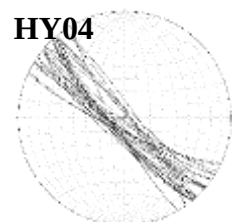
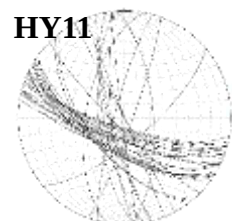
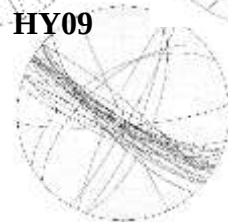
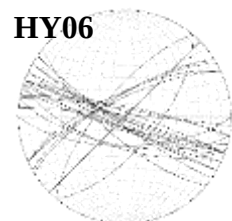
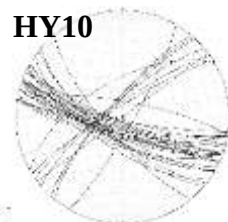
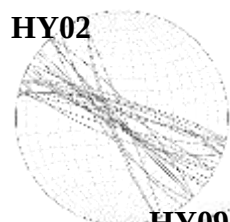
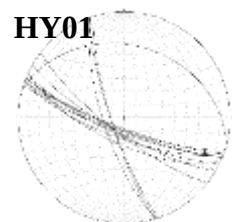


中視尺度線型

> 北東、北西方向為主 (五處正斷層露頭對比線型)

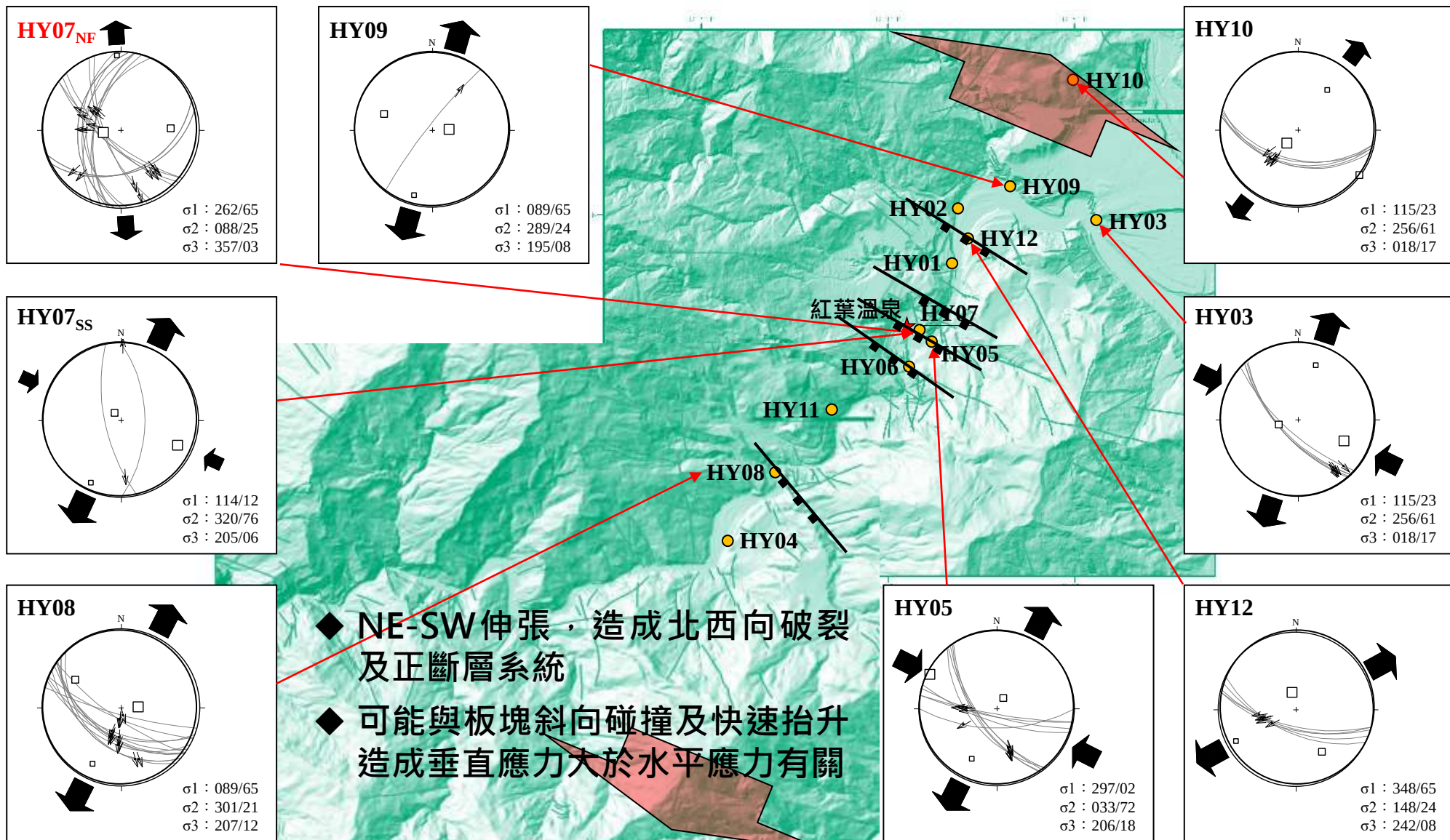
> 部份近南北、東西方向

2-3 地質調查 > 構造量測



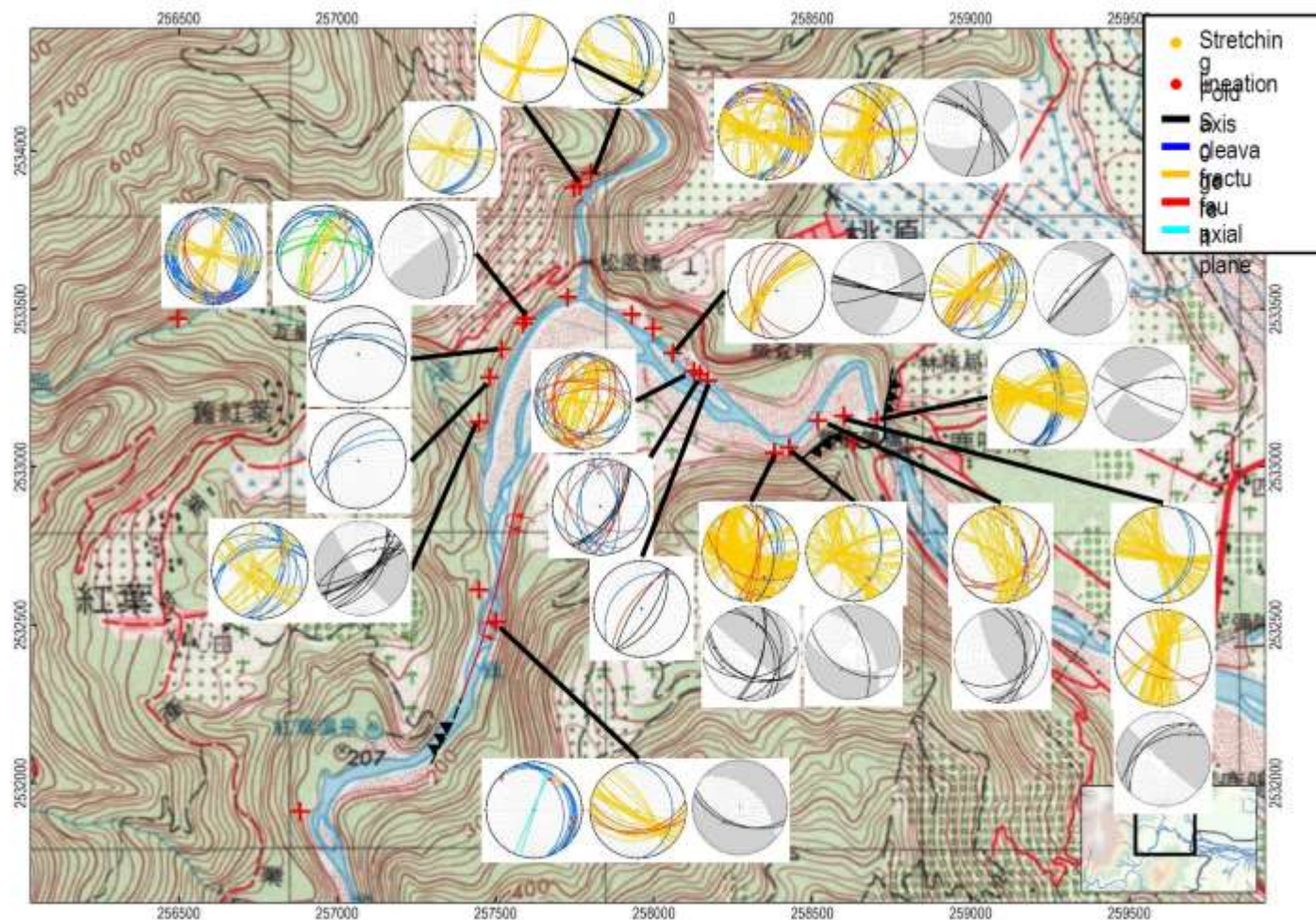
- ◆ 鹿野溪溫泉露頭鄰近可見數條 N40W ~ N55W/SW 正斷層
- ◆ 紅葉谷溫泉鄰近河床可見熱水自破裂面湧出

2-3 地質調查 > 古應力分析



2-3 地質調查 > 野外地質調查

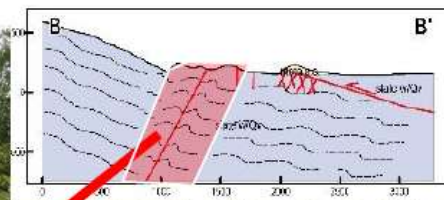
1. 透過大量觀測，顯示鹿野溪走向、溫泉分布與構造位態息息相關。
2. 岩體沿次水平波浪狀劈理運動，因而具有逆滑移、正滑移形式。
3. 走向滑移之斷層面解顯示，西南方為伸張作用，造成岩體減薄。



2-3 地質調查 > 野外地質調查

北東走向背衝斷層/褶皺

- 松楓橋下游北岸。
- 北東、西傾，早期，較大尺度高角度構造。
- 東側S1劈理緩、西側陡。
- 高角度破裂面連通低角度熱流通道。



鹿野溪西側: 中等傾角劈理

S1

推定背衝斷層/褶皺
軸面跡

鹿野溪東側: 低傾角劈理

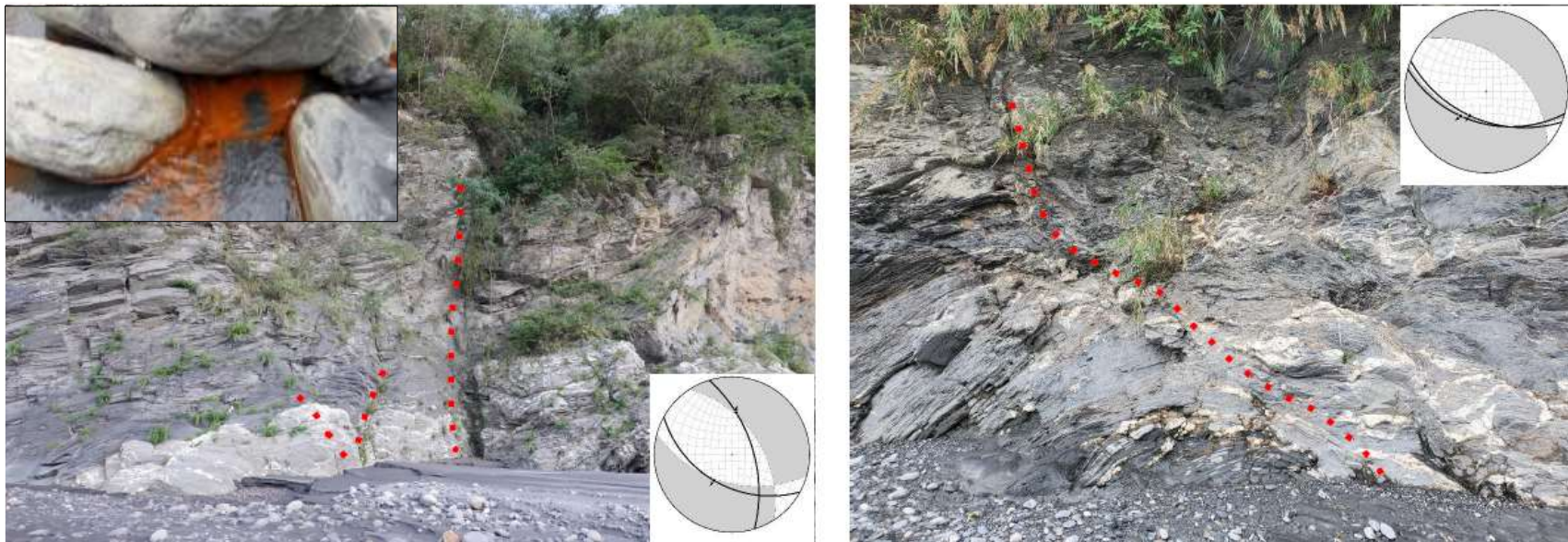
S1

(鹿野溪，自南向北望；依德成攝)

2-3 地質調查 > 野外地質調查

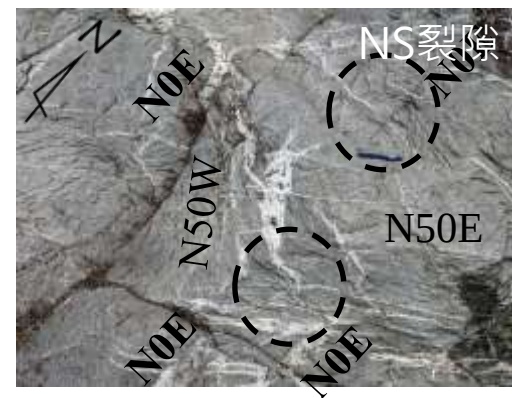
北西走向正斷層

- 高角度共軛破裂面、伸張破裂面、角礫岩帶、擦痕。
- 較晚期淺部構造，鹿野溪沿岸普遍可見，控制鹿野溪流向及湧泉位置。
- 鹿鳴橋至紅橋間河岸正斷層露頭可見湧泉，或碳酸鈣膠結在破裂面上，顯示為熱水有效通道。

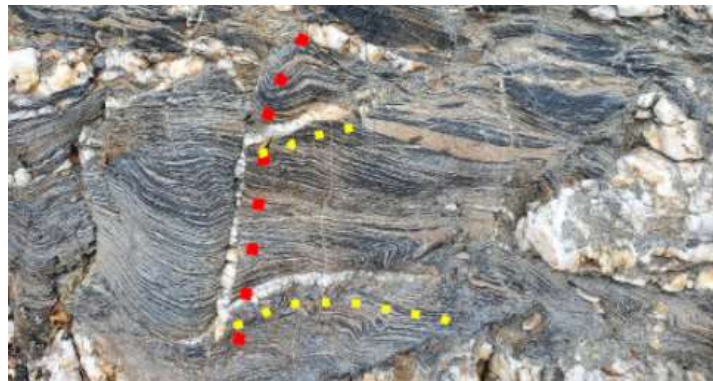


2-3 地質調查

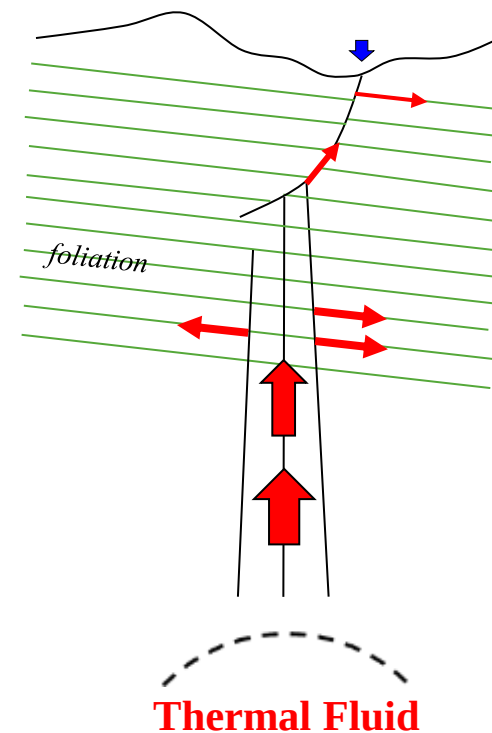
晚期的NW或NS、EW方向破裂帶成為熱水主要通道，交織成熱水儲集層。但同時也可能成為天水入滲的通道。



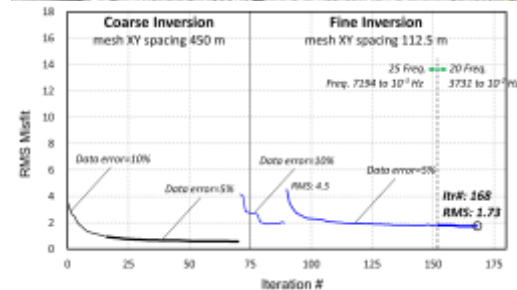
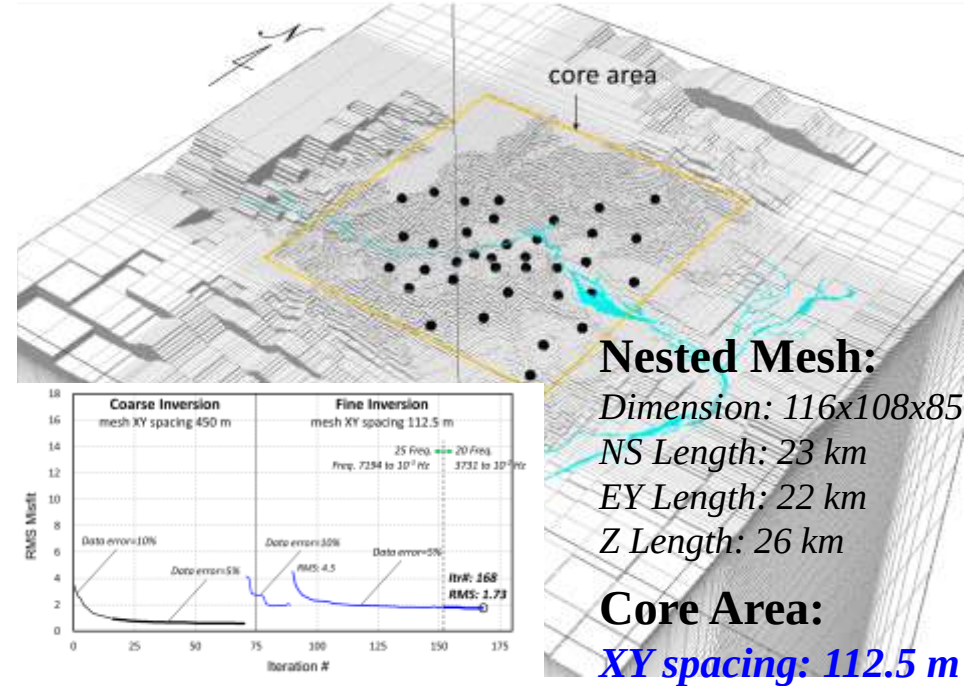
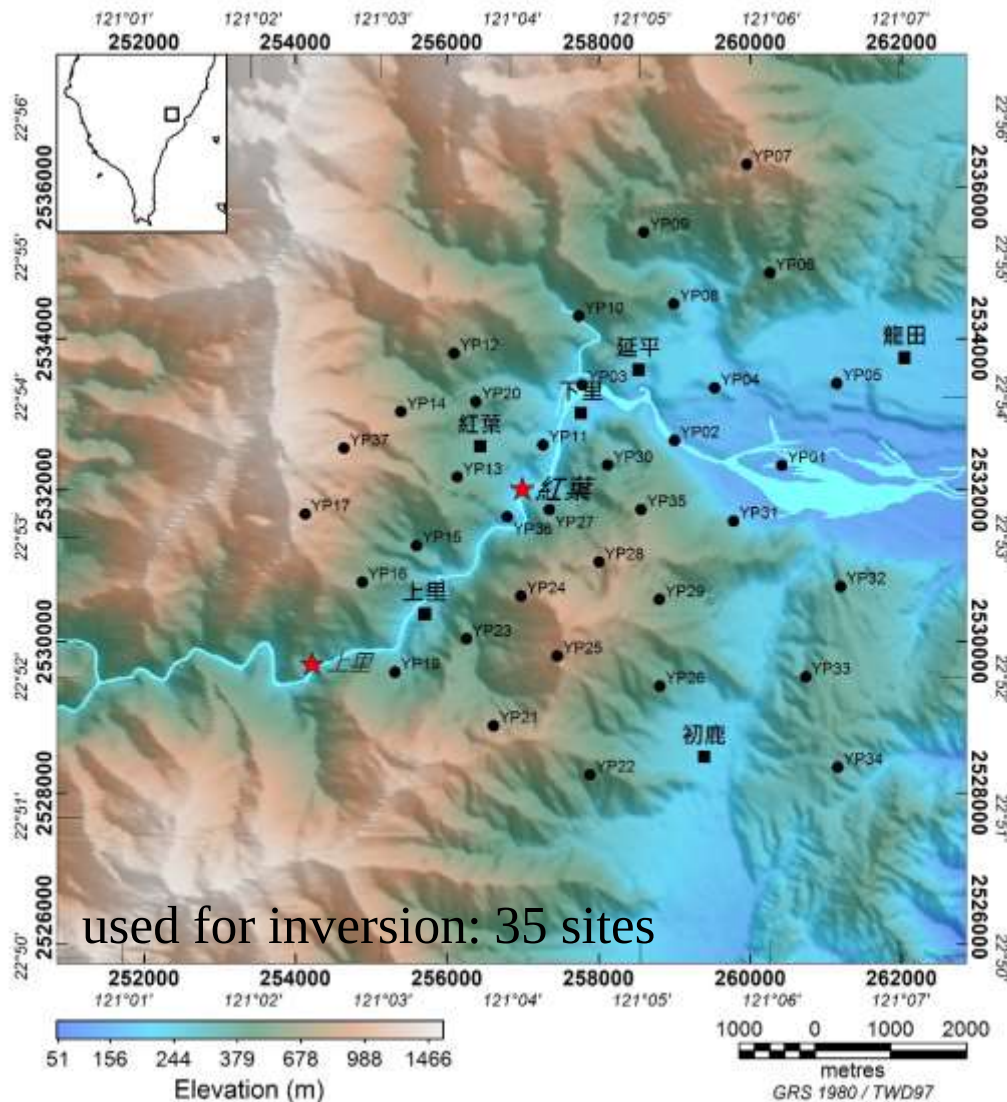
早期的NE大尺度構造與平行葉理面的礦脈，顯示高角度破裂面連通低角度熱流通道。



初期垂直剪切帶可能是深部熱水上湧的通道。



2-4 大地電磁探測

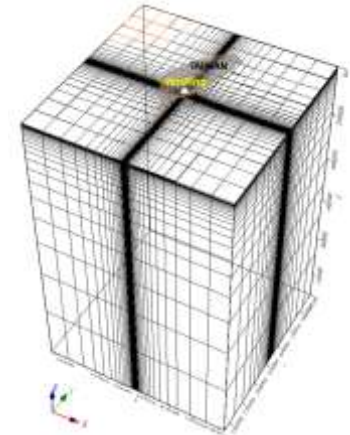


Full Mesh:

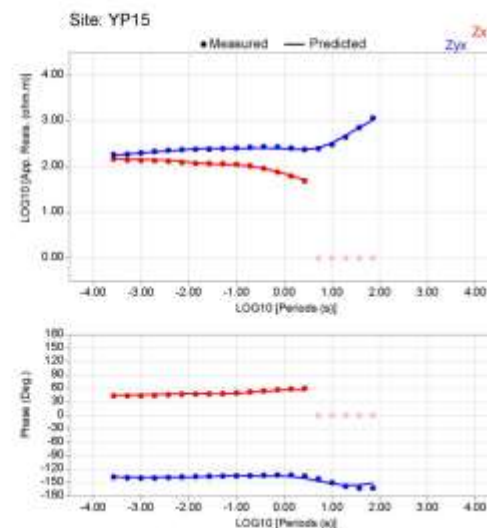
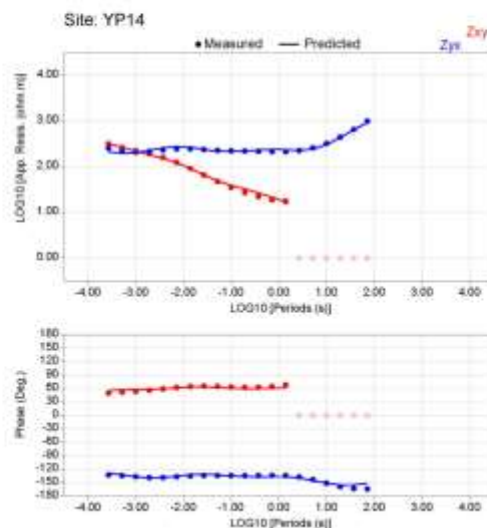
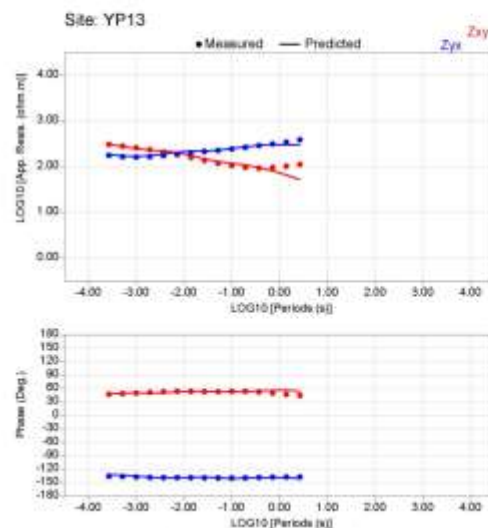
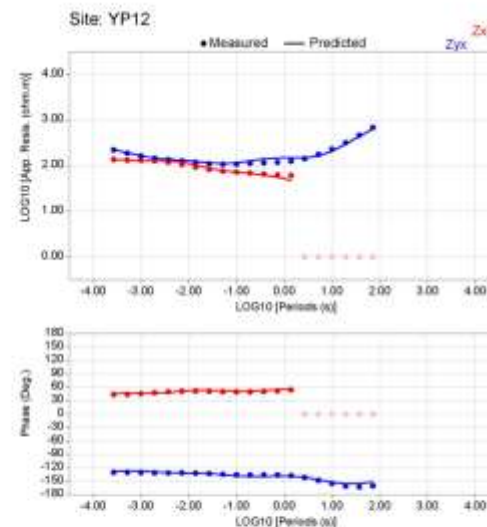
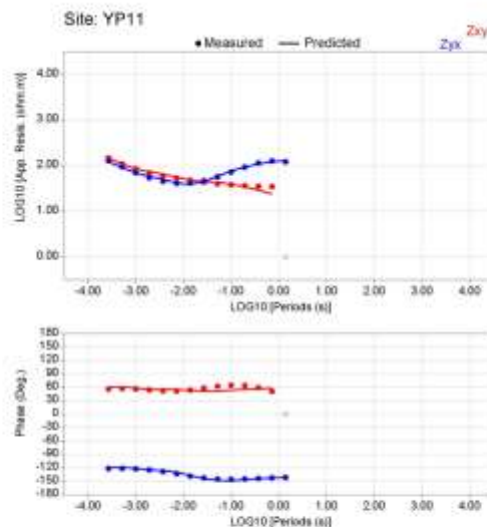
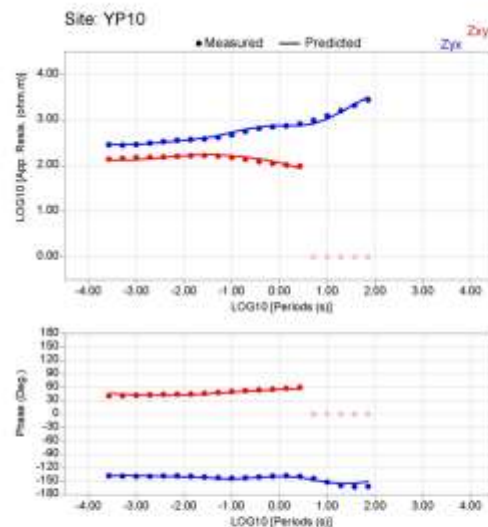
Dimension: 65x63x100
NS Length: 749 km
EY Length: 748 km
Z Length: 1134 km
1st Layer thickness: 25 m

Core Area:

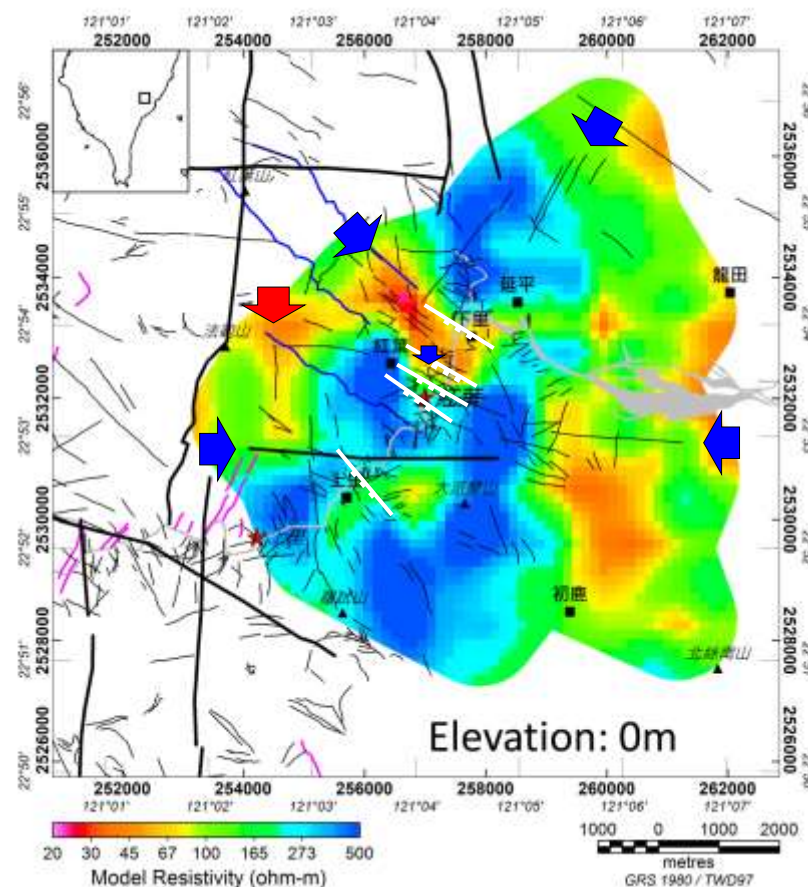
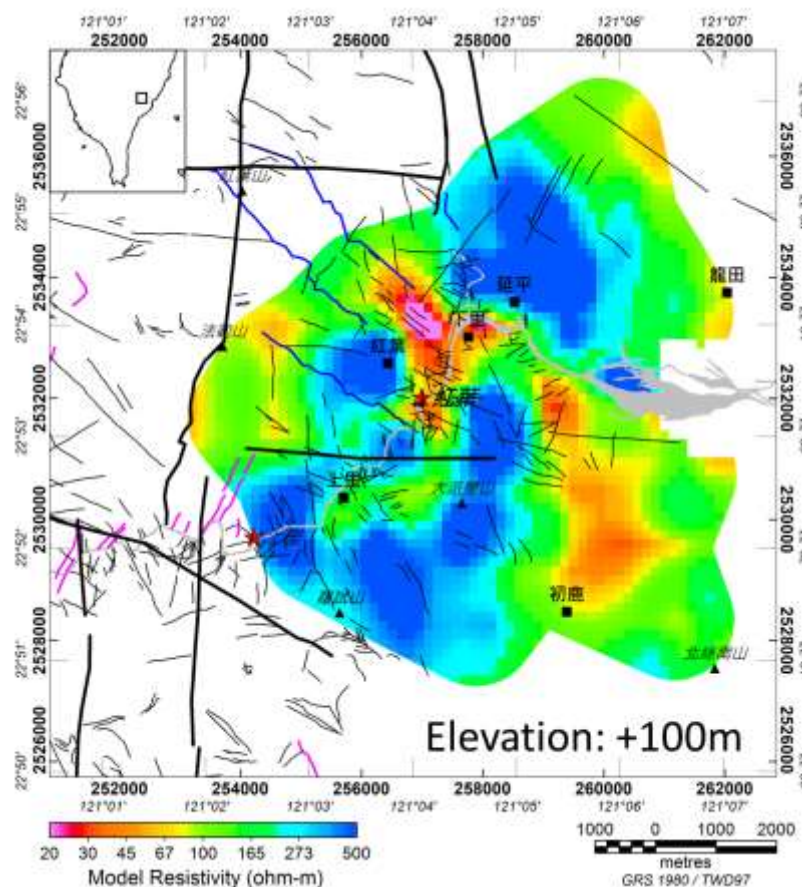
XY spacing: 450 m



2-4 大地電磁探測



2-4 大地電磁探測 > 低電阻條帶分布



線型類型：

- 大尺度裂隙
- 中視尺度裂隙
- S1劈理
- S2劈理

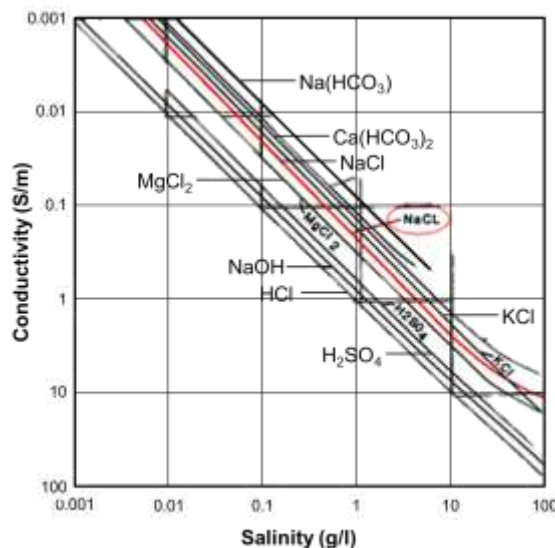
- 紅葉部落東北側條帶狀低電阻帶對比北西向系列線型/斷層。
- 部份南北、東西向及北東向線型可能與地電阻構造的條帶低區或側向不連續有關。

2-4 大地電磁探測 > 低電阻異常帶成因

影響地層電阻率的主要因子：

1. 岩層的孔隙率(porosity)
2. 孔隙水的飽和度(water saturation)
3. 孔隙水的鹽度(salinity)
4. 溫度
5. 岩水相互作用與蝕變(alteration)
6. 壓力
7. 水中蒸汽含量

} 一般含水破碎帶的電阻率約為完整岩體電阻率的十分之一。
(Flóvenz et al., 1985)

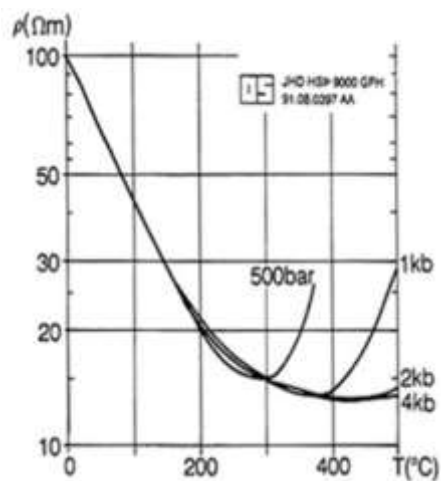


溶液電阻率與鹽度關係圖

➤ 裂隙中水的電阻率與水的鹽度成反比，鹽度每升高十倍，水的電阻率相對約降低為原來的十分之一。

(Hersir and Björnsson, 1991)

- ✓ 破碎帶控制的地熱水，擁有上述三個令地層電阻率降低的關鍵因子：破碎帶、高溫、高鹽度。
- ✓ 三個因素組合，初步估算足以令變質岩的岩體電阻率由數千ohm-m，在熱水通道處大幅降低至數十ohm-m，

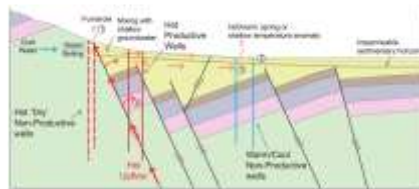


地層電阻率與溫度關係圖

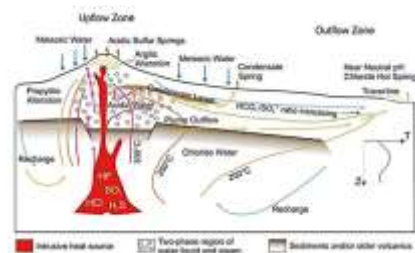
➤ 溫度升高100°C，地層電阻率約下降六成。

(Hersir and Björnsson, 1991)

> 低電阻條帶vs地熱構造

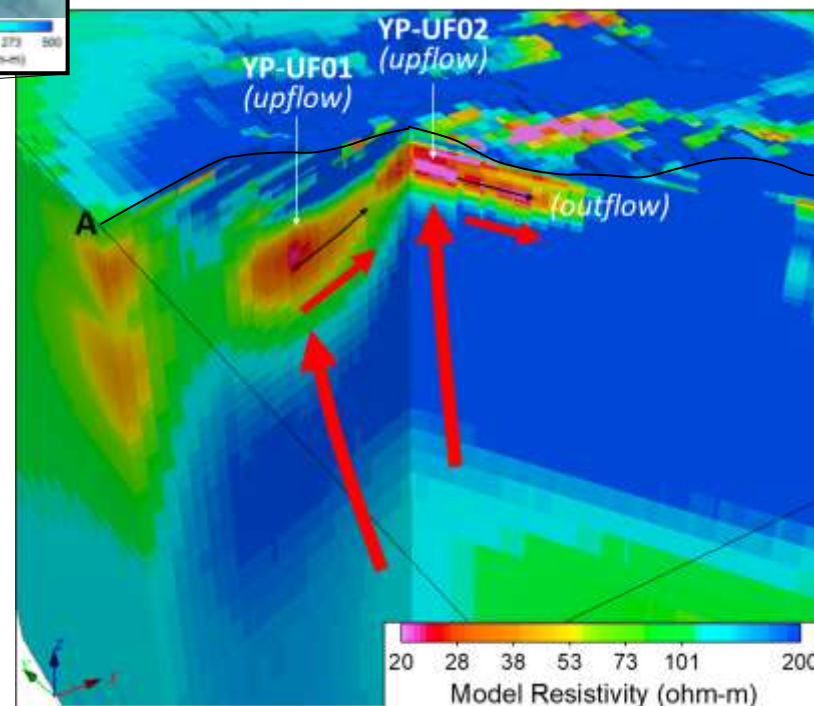


Siler et al. (2019)



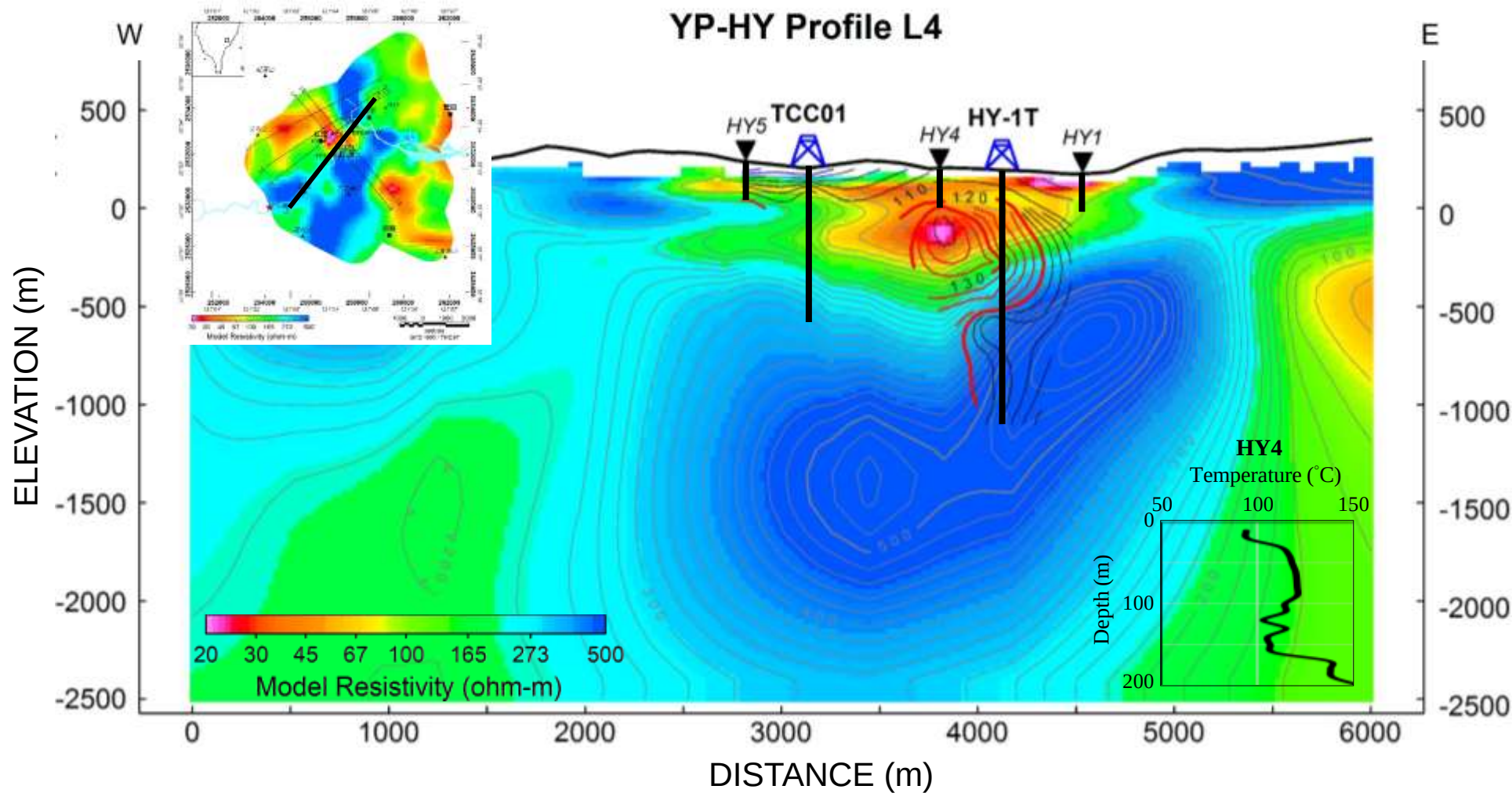
國際參考案例： *Hilman et al. (2020)*

- 破裂帶控制的地熱系統。
- 紅葉地區二個解釋上湧區。
- YP-UP01向東北東及南方向外滲。
- YP-UP02向西北，也向東南及南與東方向向外滲。

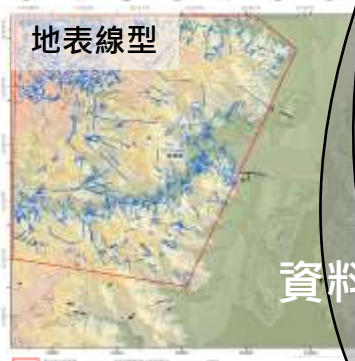
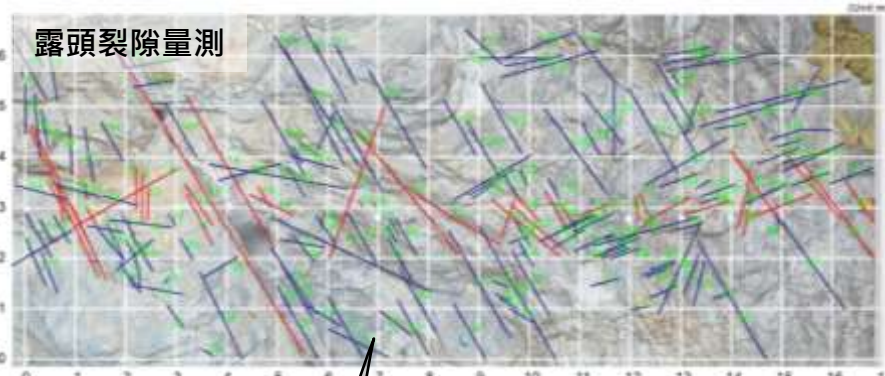




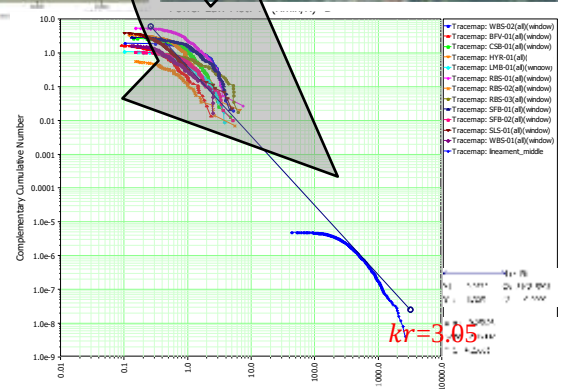
2-4 大地電磁探測 > 低電阻與地溫分布



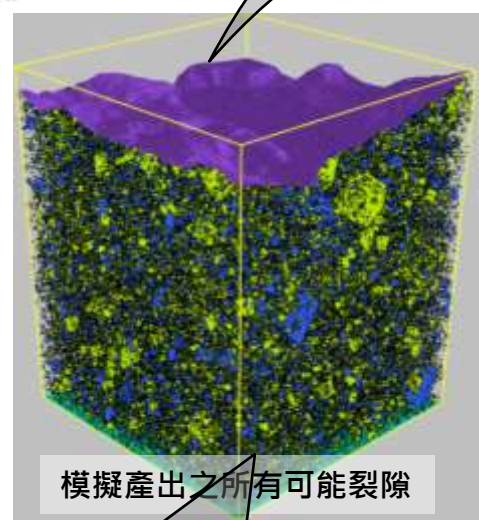
2-5 地下水模擬 > 裂隙量測與離散裂隙模型



資料統整

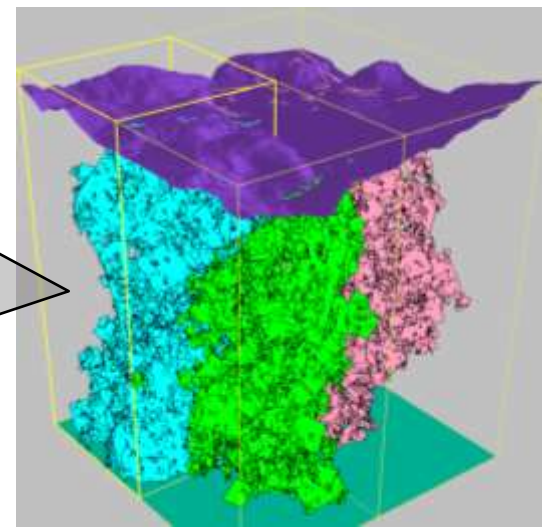


軌跡長度冪方率

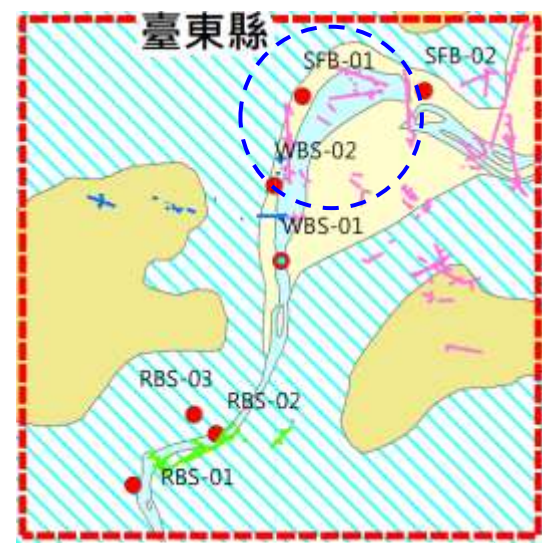


統計模擬

篩選

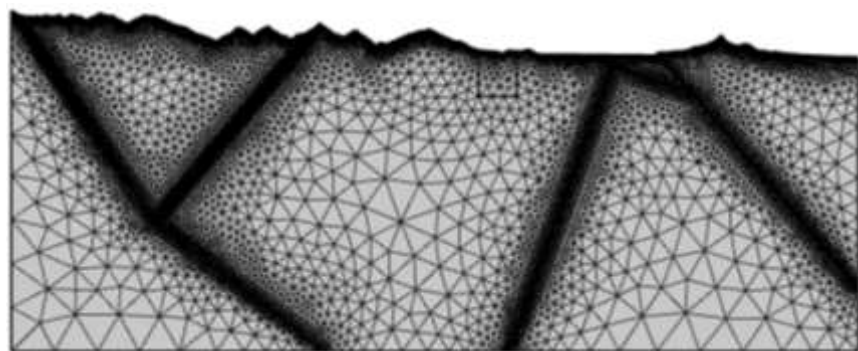
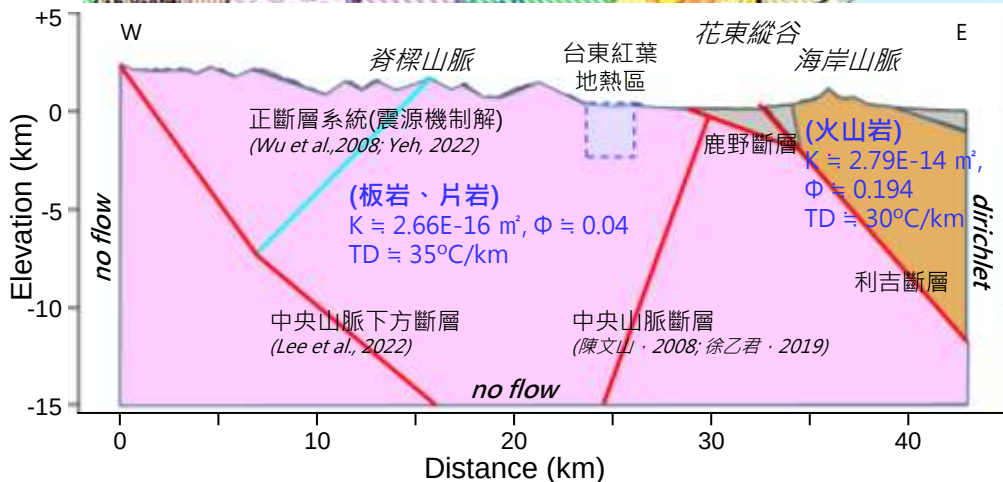


連通至地表的裂隙



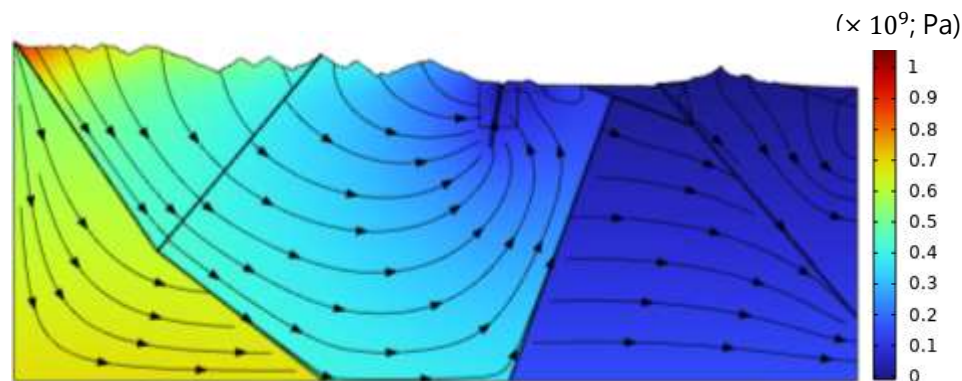
上述裂隙與地表相交的軌跡

2-5 地下水模擬 > 地下水深循環

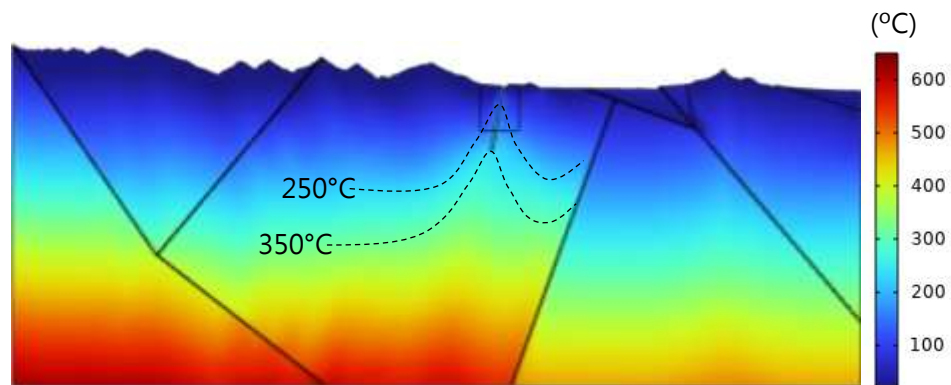


非結構性網格

地下水流場受大尺度構造控制，模擬結果顯示天水經十公里深循環加熱後，向上移棲形成地熱田是可能的機制。



地下水流模擬結果



地溫分布模擬結果

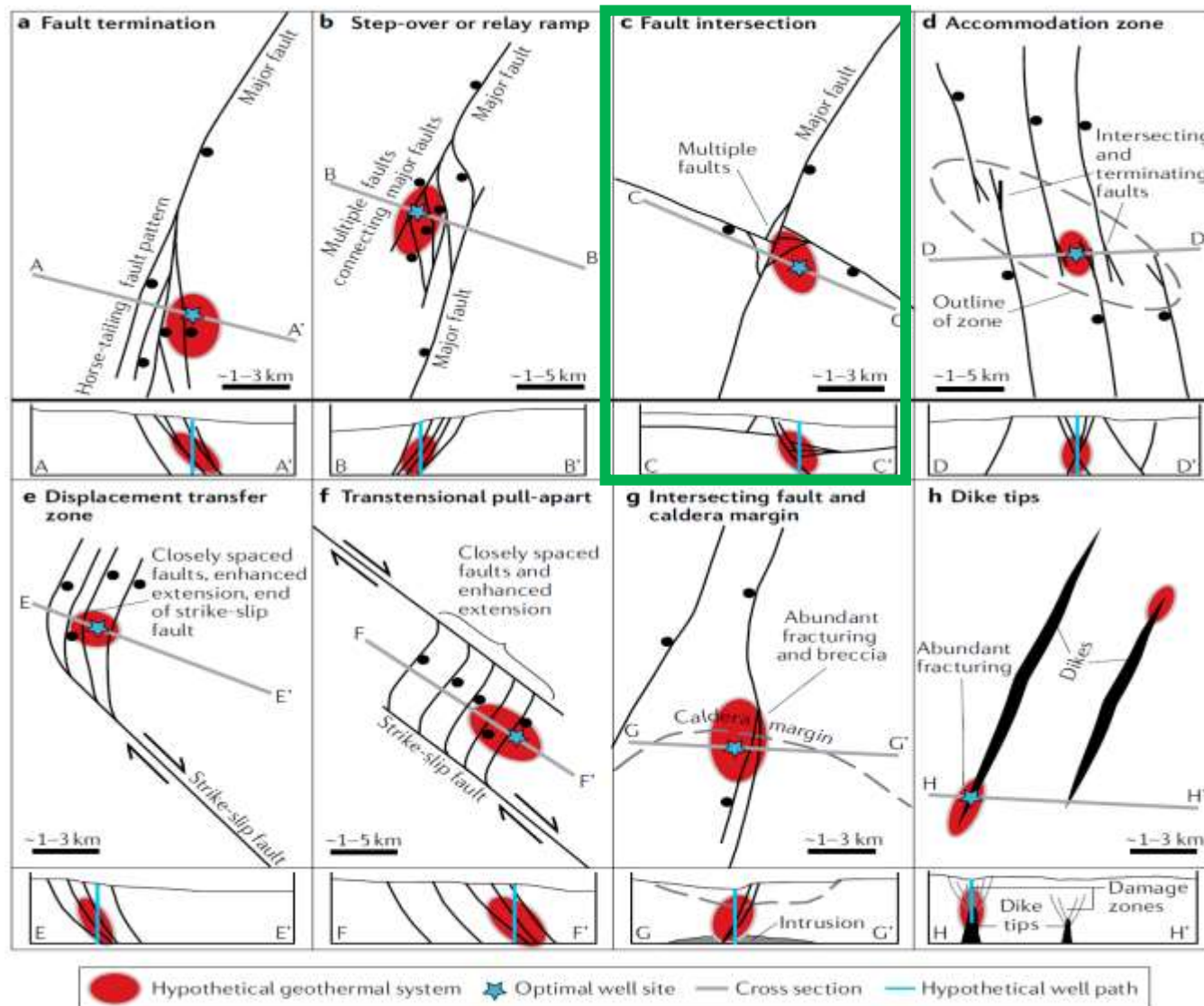
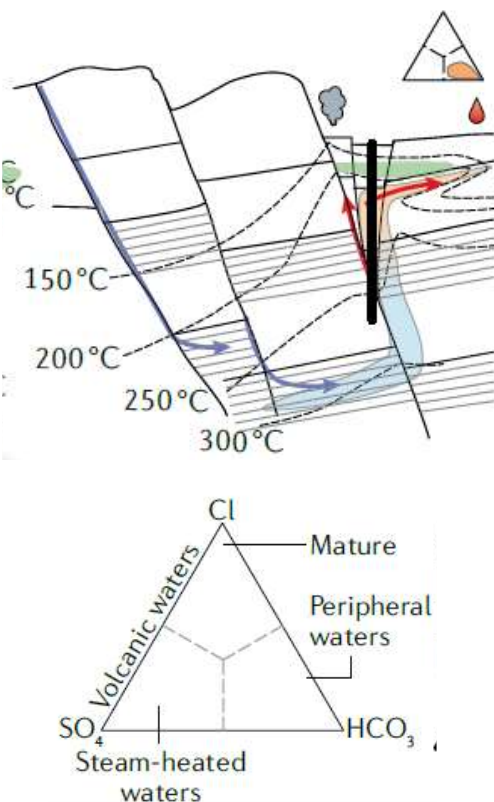
(黃淞洋 · 2022)

3. 地熱概念模型 > 非火山型地熱田

Amagmatic geothermal systems

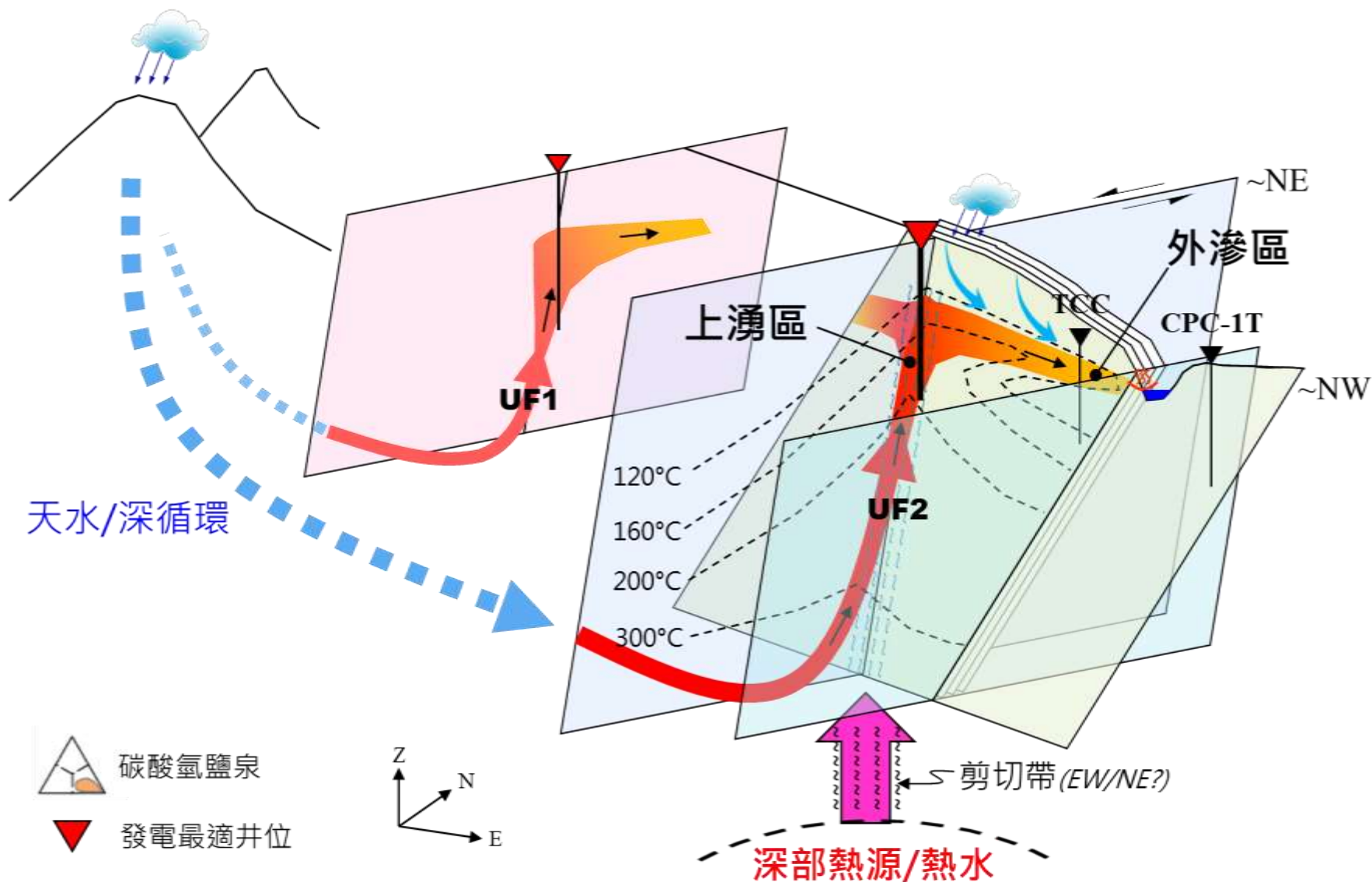
iii. Extensional

Production well composition



(from Jolie et al., 2021)

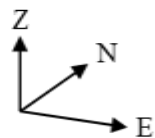
3. 地熱概念模型 > 台東紅葉



碳酸氫鹽泉



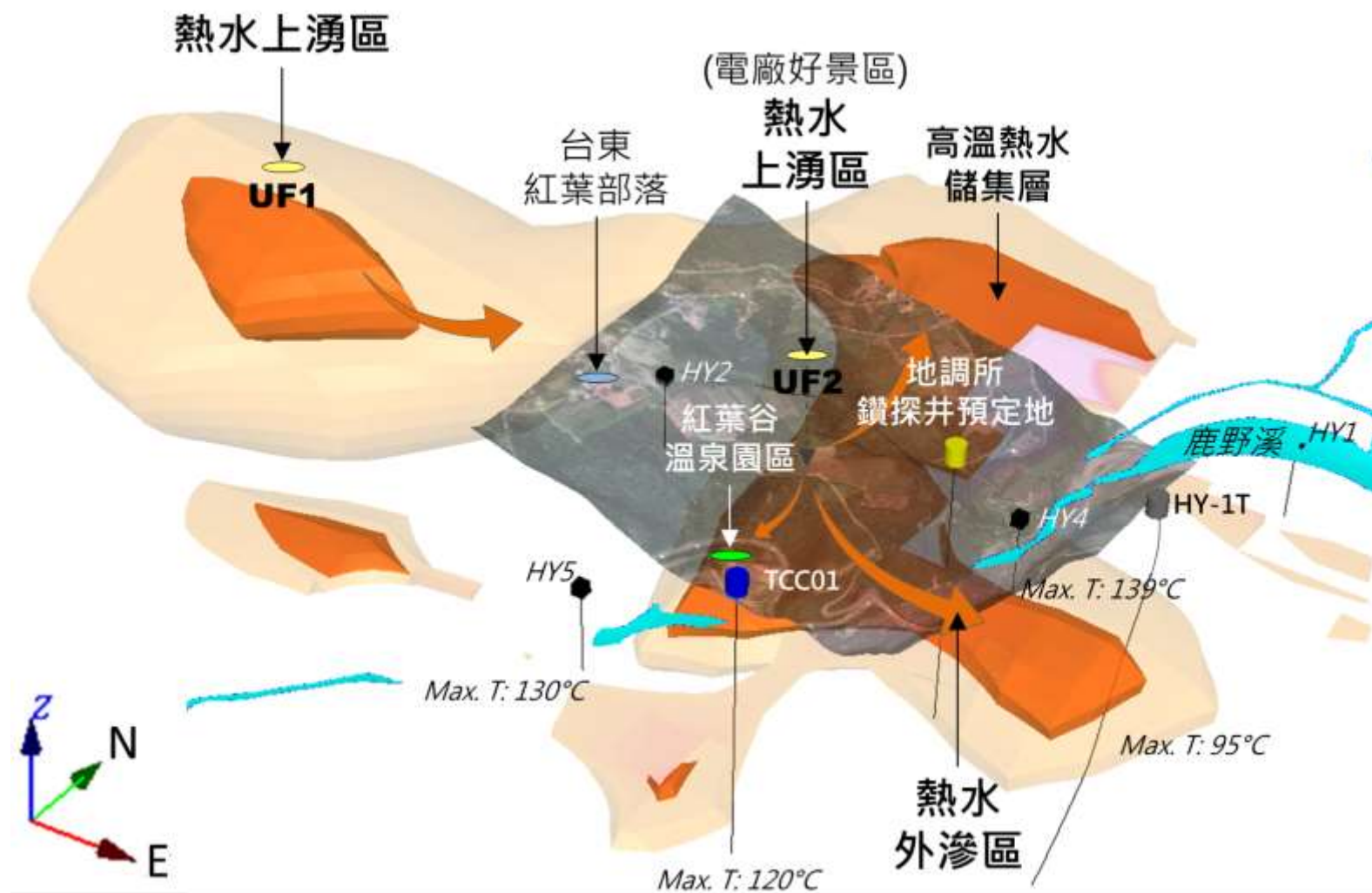
發電最適井位



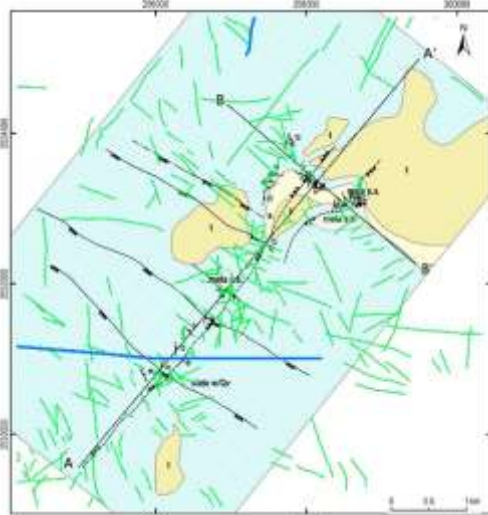
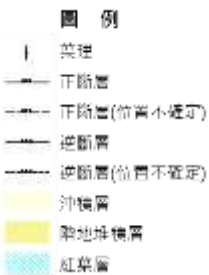
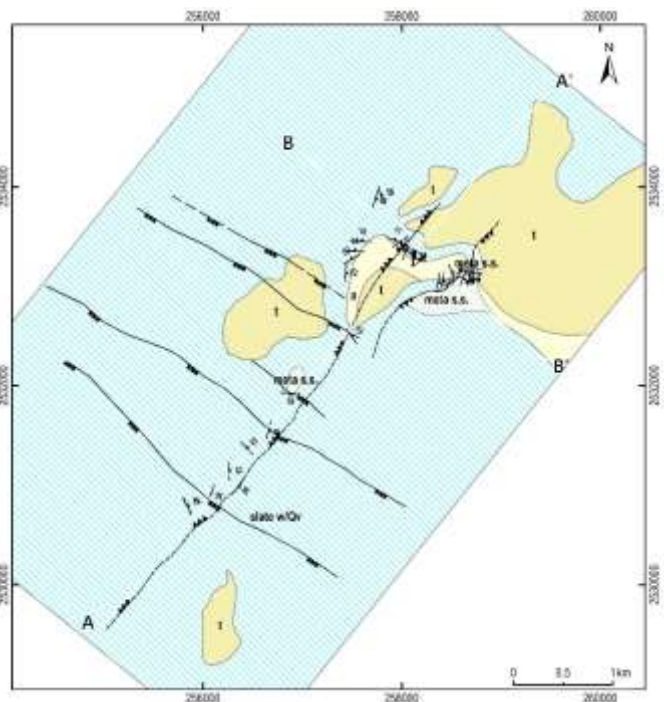
剪切帶 (EW/NE?)

深部熱源/熱水

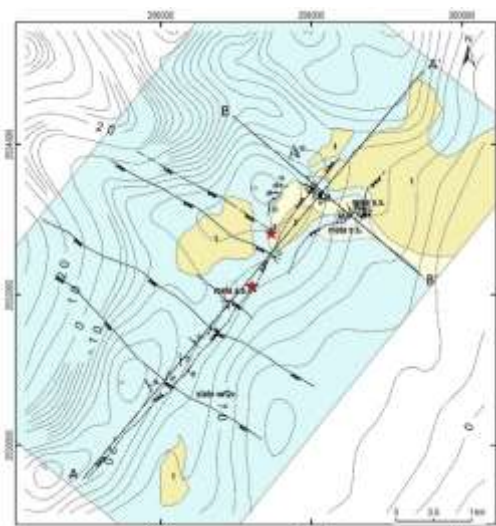
3. 地熱概念模型 > 台東紅葉



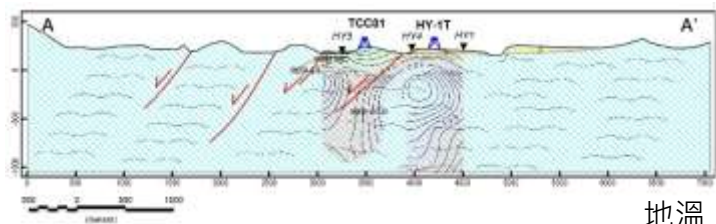
4. 地熱地質圖初稿



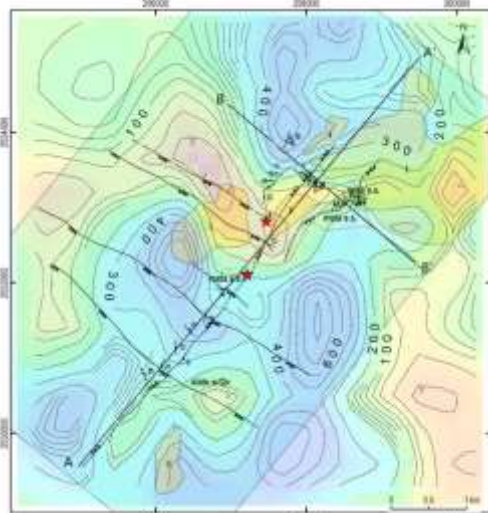
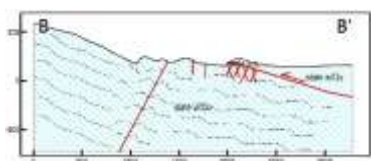
地表線型



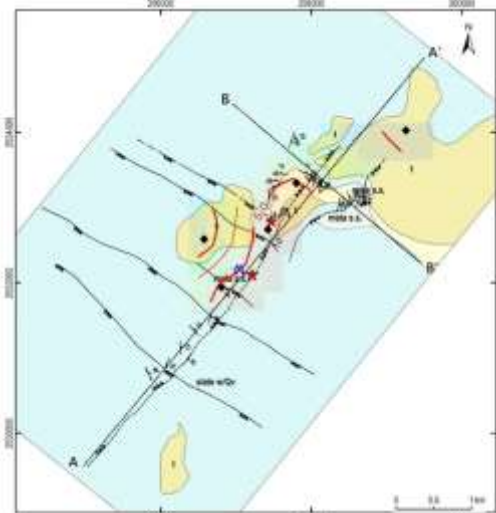
剩餘磁力異常



地温



地電阻切面



地溫梯度



5. 三維地熱地質模型

Leapfrog Geothermal

■ 基本圖...

- 20m數值地形模型
- 衛星影像

■ 地質...

- 地質圖
- 地質剖面
- 斷層
- 地表線型
- DFN模型

■ 鑽井...

- 鑽井位置
- 井偏資訊
- 岩性井柱
- 溫度

■ 地球化學...

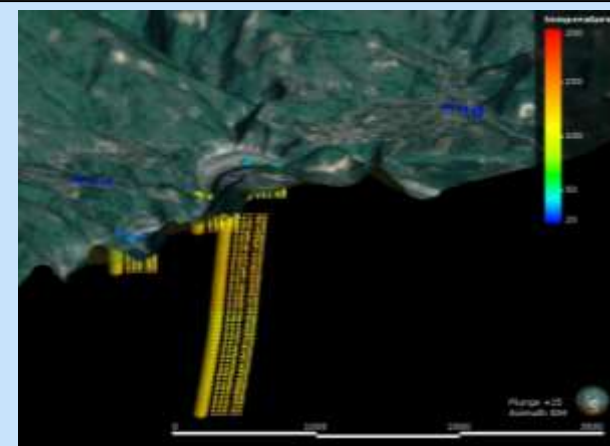
- 溫泉位置
- 井下溫度
- 採樣點位

■ 地球物理...

- MT佈測點位分布
- 磁感率模型
- 地電阻模型
- 地物剖面



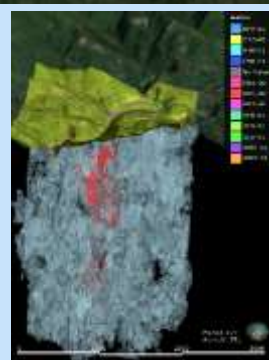
• 線型資料與溫泉露頭



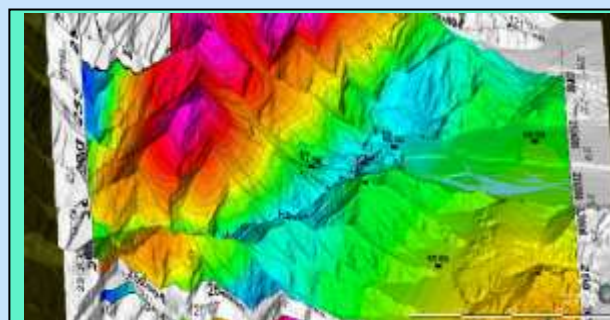
• 井下溫度資料



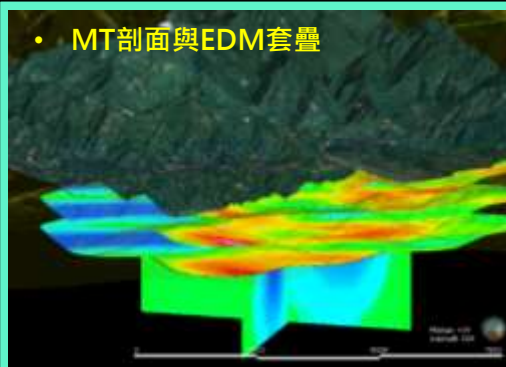
• MT佈測點位分布



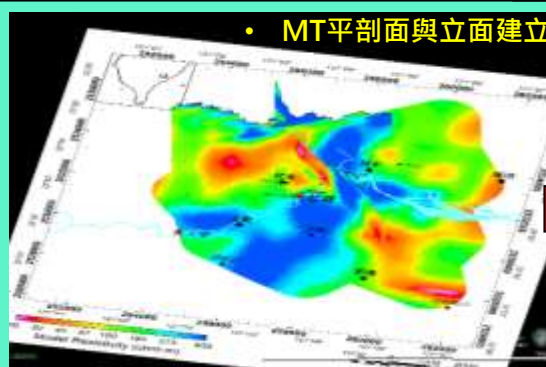
• 視窗量測點位與DFN成果



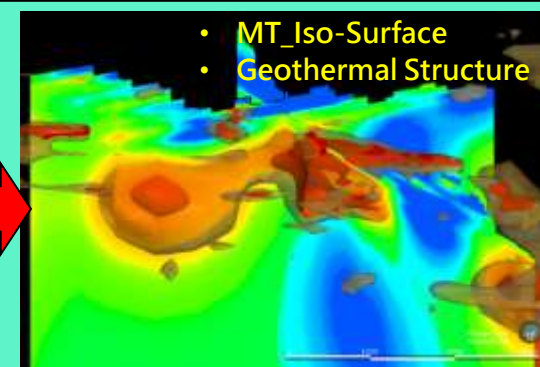
• 歸極換算後磁力異常圖



• MT剖面與EDM套疊



• MT平剖面與立面建立



• MT_Iso-Surface
• Geothermal Structure

6. 資料庫及展示系統



圖層管理

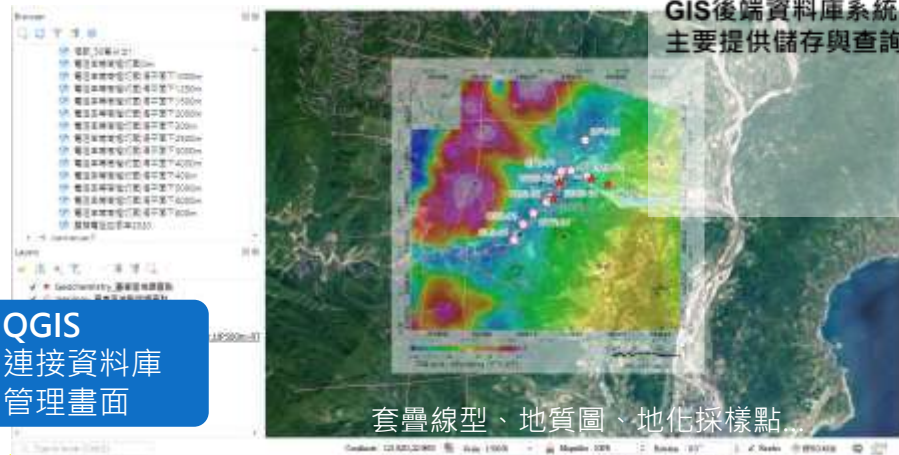
GIS前端伺服器
可提供各種服務WFS、WMS等



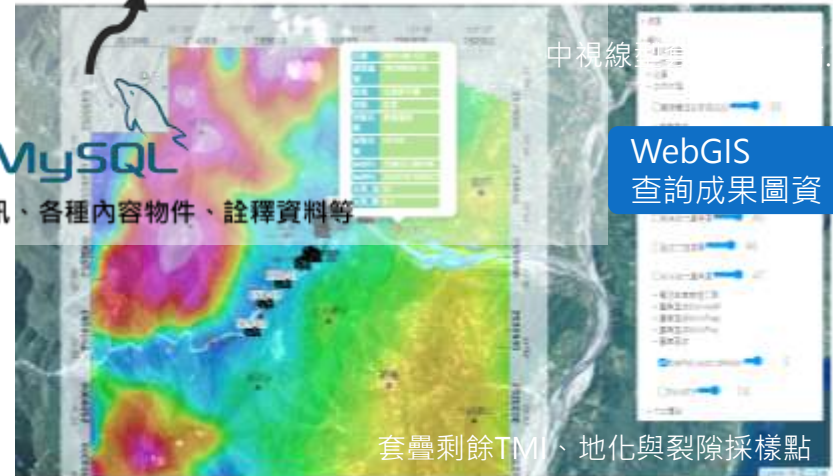
網站系統彙整與提供
資料庫展示查詢功能



資料庫與線上查詢內容



PostgreSQL
GIS後端資料庫系統
主要提供儲存與查詢GIS類資料



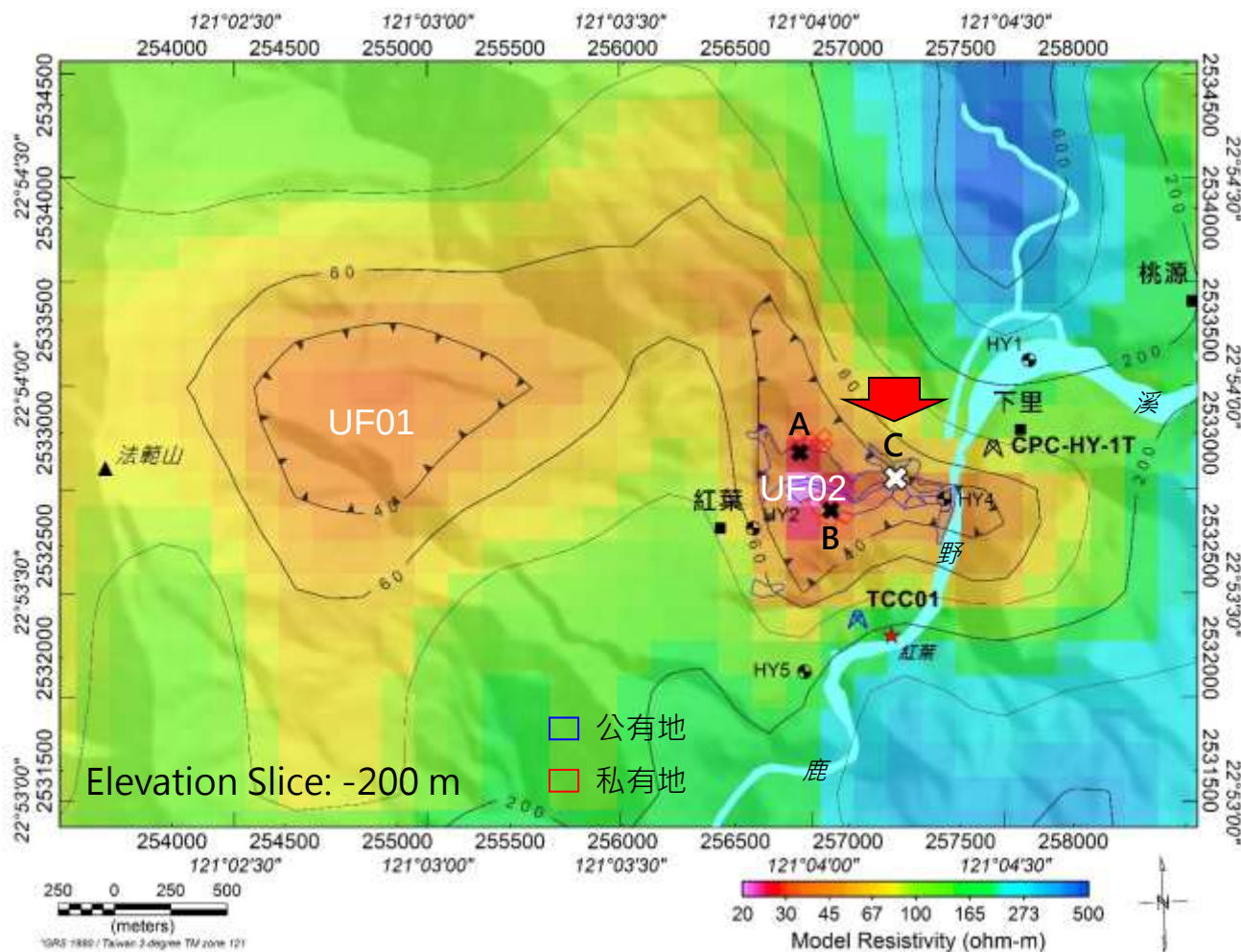
7. 地質探勘井鑽鑿>鑽探目的與井位

鑽探目的

- (1) 進一步確認地熱概念模式中相對關鍵的“熱水上湧區”及“熱水外滲區”之空間分布與特徵。
- (2) 取得地下溫度資訊。
- (3) 作為修訂地熱概念模式的重要參考依據。
- (3) 據以規劃補充探勘計畫。
- (4) 分析地電阻構造與地熱構造間關聯性。
- (5) 分析岩石物化特性與地熱構造間關聯性。
- (6) 分析孔內熱水湧入帶(feed zone)與地表線型及裂隙量測成果間關聯性。
- (7) 分析井下裂隙空間分布與地表裂隙間關聯性。
- (8) 分析熱源與熱水通道的可能機制，並探討更深層地熱潛能的可能性。
- (9) 後續地熱探勘井或地熱生產井規畫之參考依據。

井位篩選原則：

公有地 + 增進對地熱構造之瞭解



結 語

- 沒有十全十美的探勘方法，適當且正確地運用各種方法 + 整合才能發揮最大功效。
- 按步就班不誇大才是良策。



Sustainable - Renewable - Clean

Thank you for your attention.



工業技術研究院

Industrial Technology
Research Institute

以創新、誠信、分享的信念滿足顧客需求

MIT野外工作 (郭泰融攝)