

ITRI

Industrial Technology
Research Institute

大屯火山地熱調查 地球物理技術

工業技術研究院綠環所 李奕亨

2015/05/08



報告大綱

- 台灣地熱發展現況
- 地熱地質概念模式
- 地球物理在大屯火山地熱探勘的角色
- sitting 案例-大屯山四磺坪

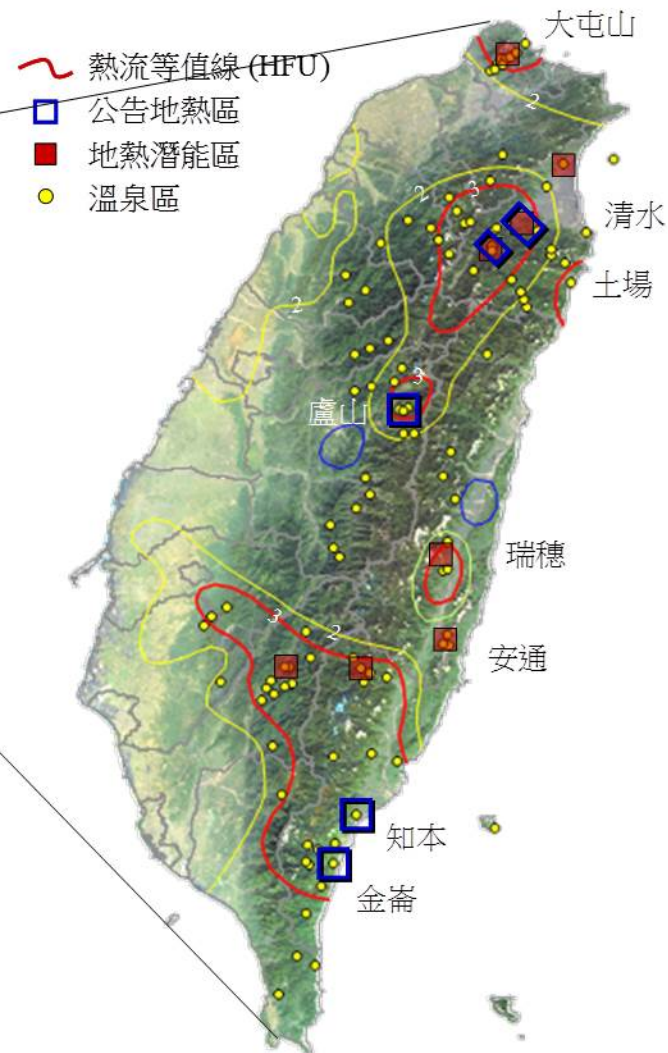
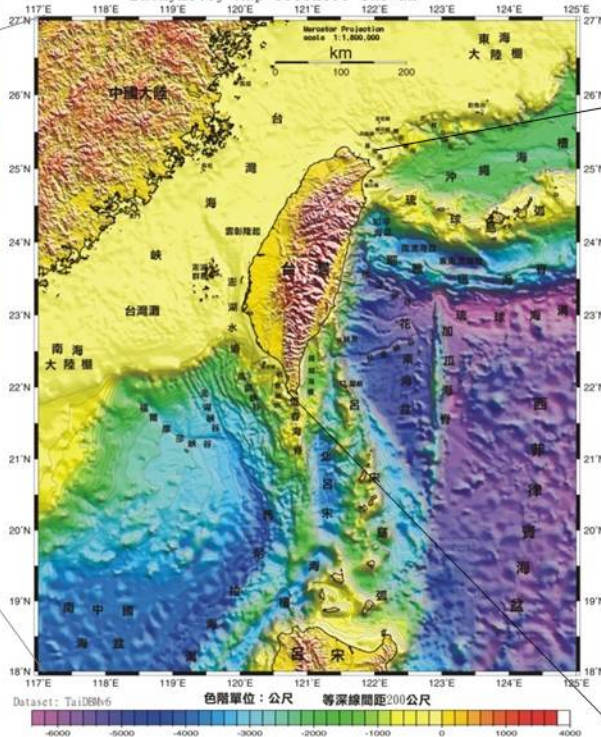
壹、台灣地熱發展現況



前言

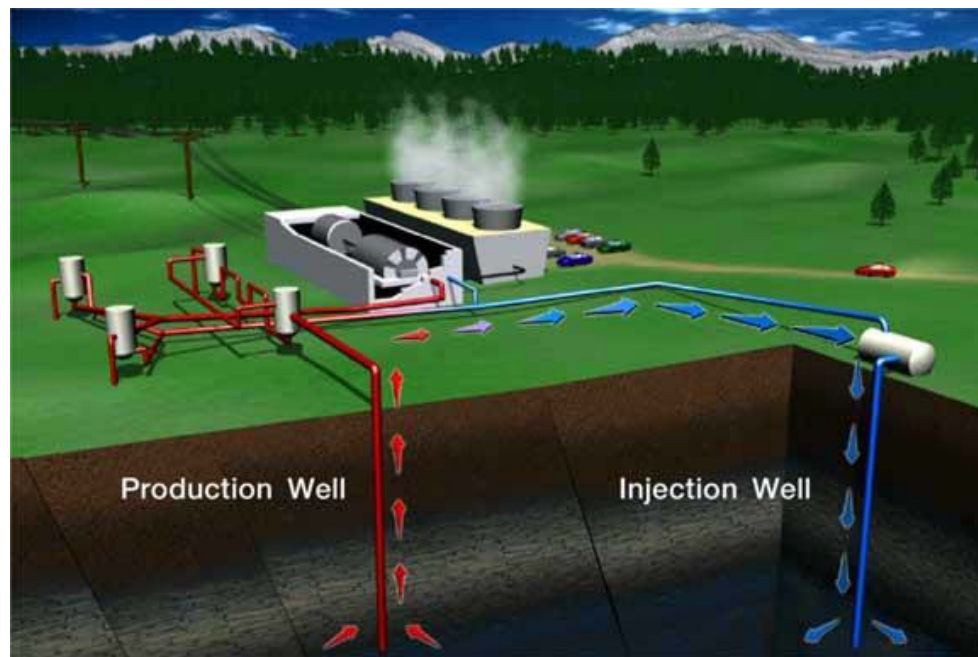
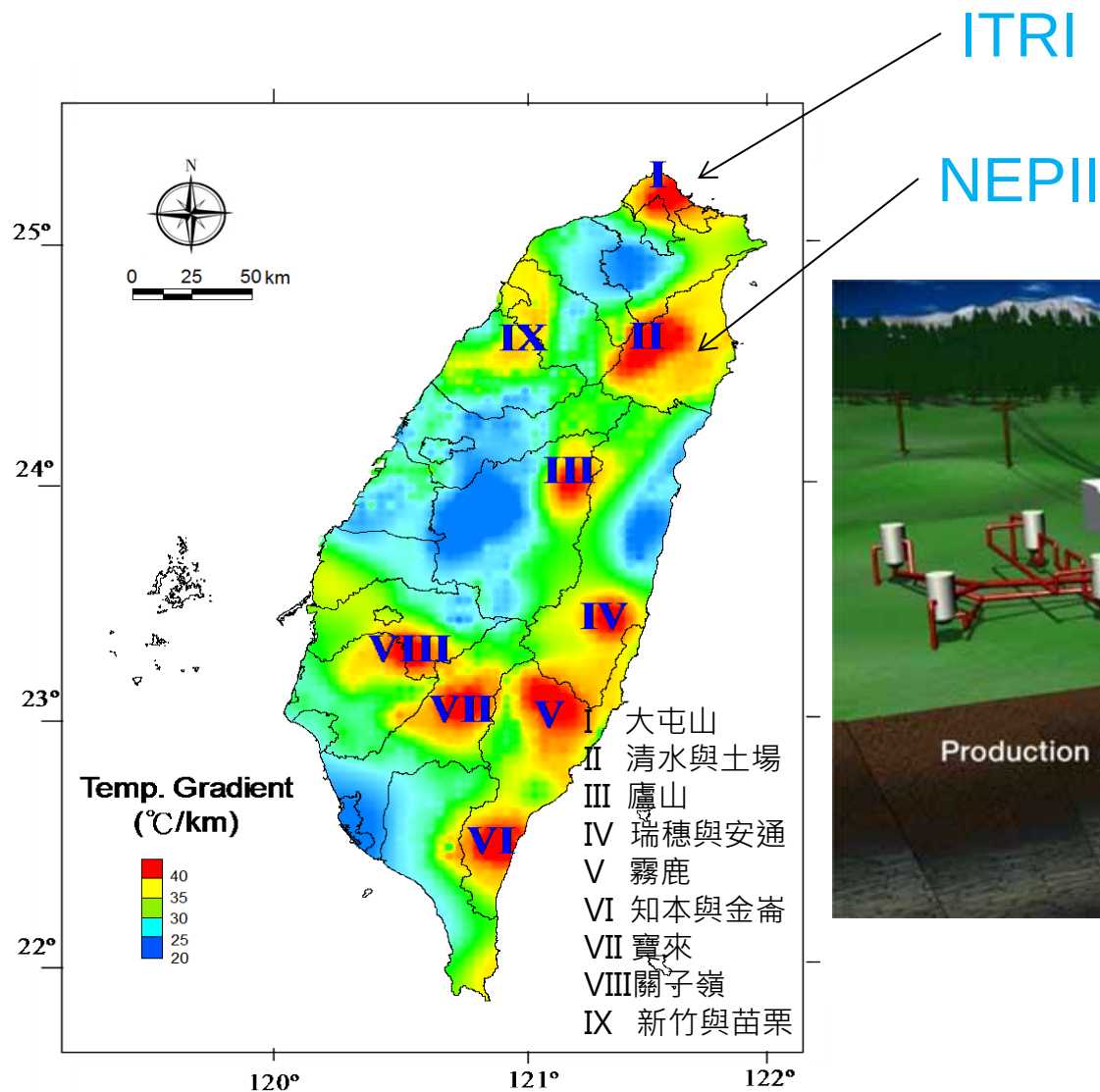
台灣周圍海域海底地形圖

Bathymetry Map Offshore Taiwan



臺灣位於環太平洋火圈地熱帶上，在地熱帶上的國家地熱發電都已蓬勃發展，鄰近的日本、菲律賓都成功地應用地熱發電，做為自主的常備能源。臺灣處處可見地熱徵兆，自應妥善運用天然地熱資源。

臺灣地熱區分布



臺灣地熱區位置與地溫梯度(工研院, 2012)

國內地熱蘊藏潛能

□ 天然地熱區：

1. 台灣約一百三十餘處地熱徵兆分佈於全島，大屯、清水、土場、廬山、知本、金崙等區域之發電潛能約 717 MWe、其他各地熱區之發電潛能總和約 272 MWe、**總發電潛能約 989 MWe**。

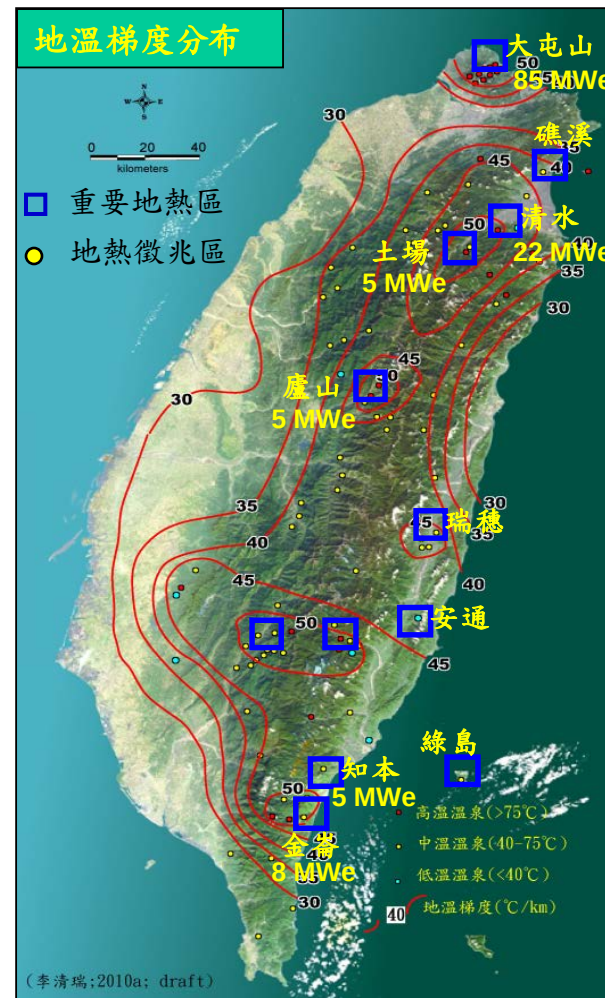
2. **實際可開發之發電潛能(不含深層地熱)約150 MWe**。

地區	溫度(°C)	蘊藏體積(km ³)	儲集熱能(×10 ¹⁸ J)	發電潛能(MWe)
大屯火山	245	40.0	24.3	514
清水	200	6.0	2.9	62
土場	170	3.0	1.2	26
廬山	180	4.5	1.9	41
知本	170	3.0	1.2	26
金崙	160	6.0	2.3	48
其他地熱區總合	--	--	--	272
合計	--	--	--	989

	淺層地熱	深層地熱(EGS)
分布地區	點狀局部	涵蓋範圍廣
分布面積(km ²)	約100	約18,000
分布面積比率(%)	0.27	50

□ 深層地熱(EGS)：

台灣地溫梯度>40°C/km的區域面積大於50%，深層地熱發電潛能約達淺層之數十倍，極具長期開發之優勢。(國科會民國100年初步學理推估我國發電潛能約25GW)



淺層天然地熱區資料來源：工研院，1980~1995

台灣地熱開發史

■大屯地熱

- 1966-1972年礦業研究服務組(綠能所前身)於大屯山地熱區從事地質調查與鑽探工作

■全省地熱普查

- 1973-1979經濟部礦業研究所(綠能所前身)展開全省之地熱基本資料調查研究工作

■清水地熱

- 1975-1980由礦業研究所與中油公司負責地熱資源探勘及開發，台電公司負責地熱電廠營運
- 1977建造國內第一座先導型地熱試驗電廠，發電量達1.5 MWe
- 1980年建造國內第一部商業運轉之地熱發電廠，發電量達3.0 MWe
- 1992年，清水地熱發電廠因產能下降不符經濟效益，停止運轉
- 1997年，清水地熱電廠由台電公司移轉宜蘭縣政府管理
- 2005-2007年，清水地熱發電示範系統及多目標利用規劃

■金崙地熱

- 1980-1984年，礦業研究所及中油公司進行金崙地熱資源探勘評估工作
- 2007-2009年，金崙地熱示範發電系統及多目標利用規劃

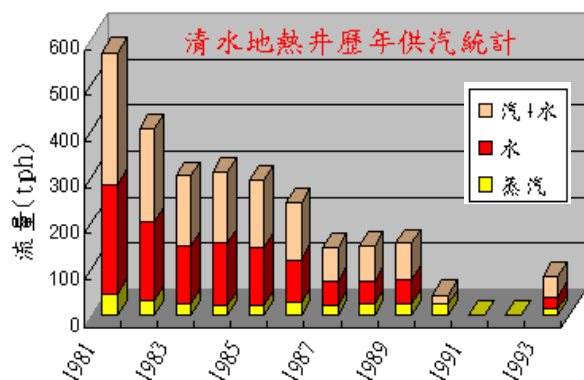
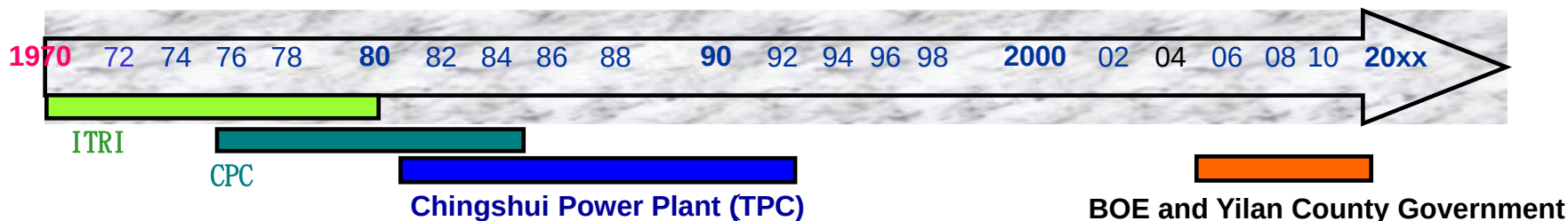
■土場地熱

- 1985-1994年，於土場進行雙循環地熱發電與多目標利用示範研究

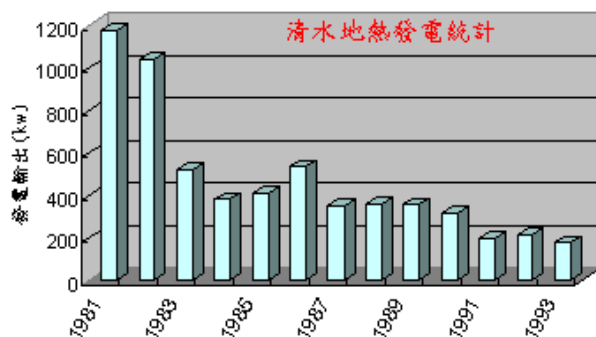
■ 2006清水重啟研究迄今。大屯山、宜蘭及綠島地熱發電廠推動

清水地熱開發歷史

Geothermal Development History



- **July 1981 - 3 MWe Power Plant (single-flash) commenced by TaiPower**
- **Nov. 1993 - decommissioned due to output decline**



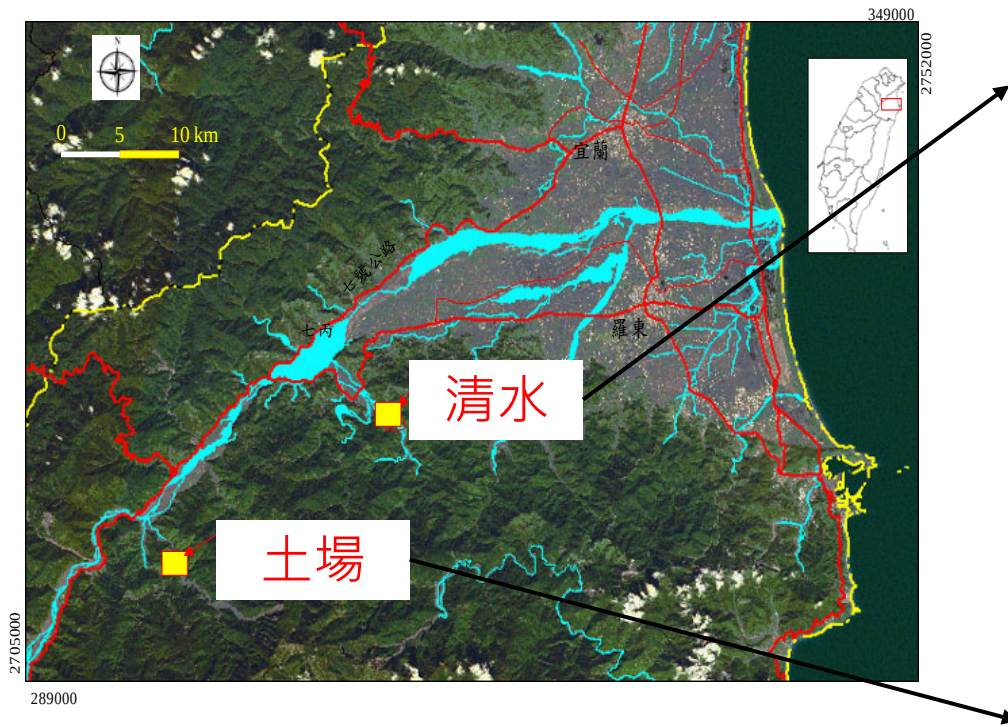
Fluids Production and Power Output



Chingshui geothermal power plant



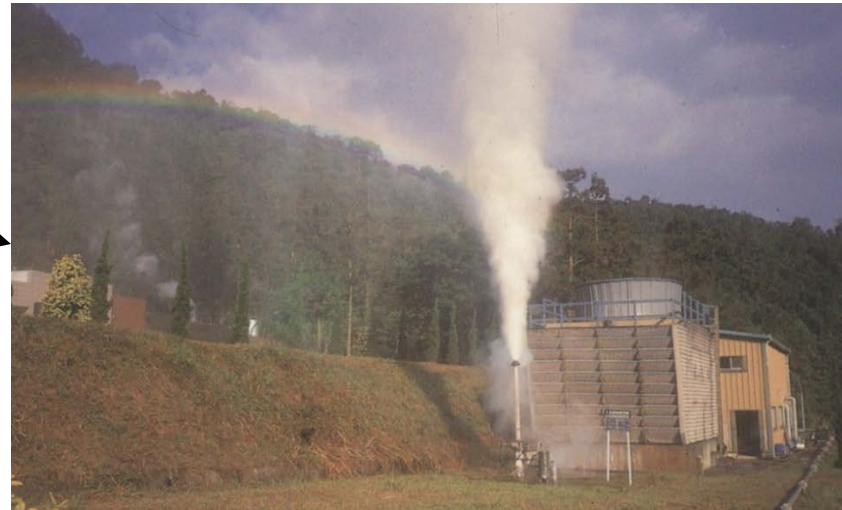
台灣地熱電廠



清水(閃發式): 3MW (1981~1993)



土場(雙循環式): 260kW (1985~1994)



重啟地熱條件？

□ 創新技術驗證

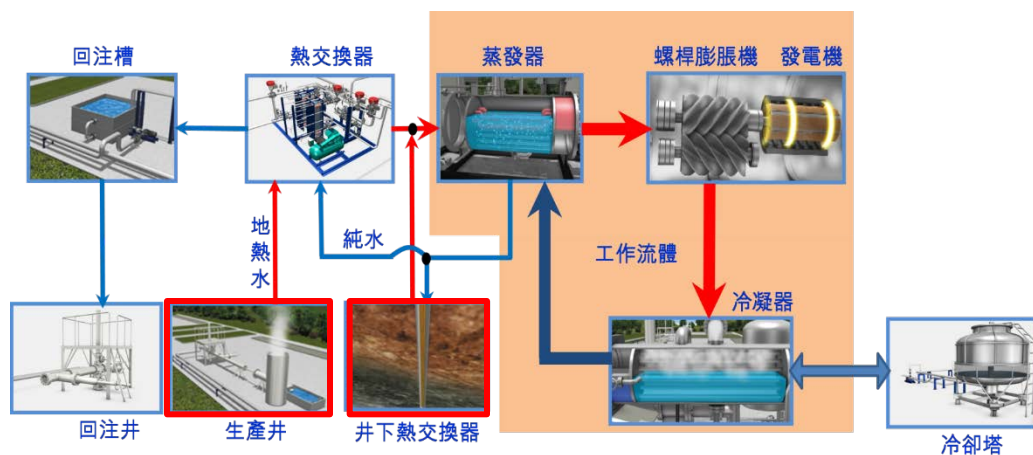
➤ ORC發電系統

- ITRI獨立完成系統規劃與設計
- 針對**不穩定熱源**，開發**智慧機電控制技術**，增加發電效率
- 螺桿膨脹機結合油汽分離器之**動力核心**，可維持高效率運轉

➤ 井下取熱工程

- 新型態取熱系統，置於地熱井內以微量生產達到高發電效能

➤ 儲集層工程、產能復原及耐腐蝕材料技術



清水地熱區雙循環地熱發電示範系統示意圖

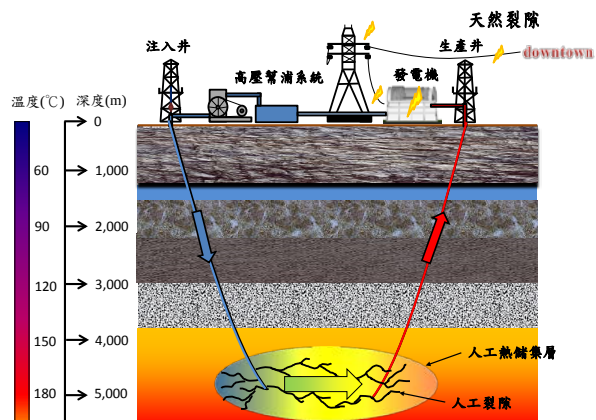
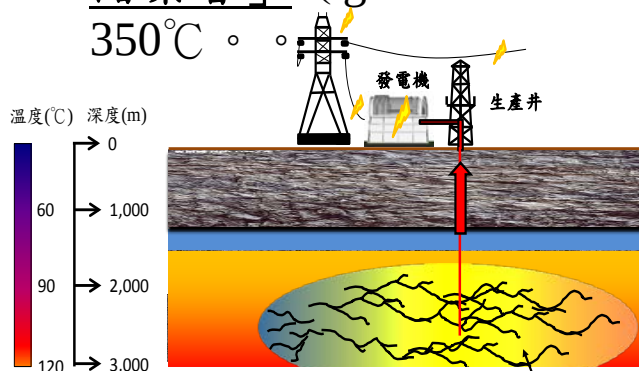


清水地熱區雙循環地熱發電示範系統

地熱形成機制與分類

■ 地熱形成機制：

- 板塊的碰撞區(台灣中央山脈附近)及某些地區因**岩漿入侵**(如火山區；台灣著名為大屯火山)，使得淺層地殼的地溫梯度較高，形成地熱。
- **地下水經熱岩石加熱**後，自地殼的斷層和裂縫處上升至地表。若上升的熱水遭遇不透水的岩層，則被限制在孔隙及裂縫中，形成所謂的「**地熱儲集層**」(geothermal reservoir)，其溫度比地表溫泉高出許多，可達 350°C 。



■ 地熱系統分類

➤ 傳統地熱系統(或淺層地熱系統)：

系統內之**水體豐富**，儲存於裂隙發達且**高溫**地層內，上方被緻密岩層覆蓋，形成地熱儲集層。其開採量與**地底溫度**及**地下水**豐富與否密切相關。

➤ 深層地熱系統(增強型地熱系統EGS)

在**缺乏水體**的**高溫乾熱岩層**中，利用高壓系統製造**人工裂隙**後，將工作水體注入裂隙中擷取乾熱岩層的**熱能**來發電。其開採量與地下水無關。

■ 火山型地熱：

在活火山或休眠火山地區，地層下岩漿活動旺盛，岩漿加熱地下水體，形成溫度250-350°C、水蒸氣含量高的天然熱液。

■ 變質岩裂隙型地熱：

深部高溫岩體(沉積岩)因板塊活動，快速抬升至近地表區域(3公里深度以內)，高溫岩體(此時成為變質岩)加熱地下水體，形成溫度150-200°C、水蒸氣含量低的天然熱液。

國際間已開發地熱發電以火山型地熱佔絕大多數

依據國際地熱協會(IGA)統計，全球傳統地熱總發電裝置量約10GW，其中美國3,098MW、菲律賓1,904MW、印尼1,197MW居前3名，多為火山型地熱，變質岩裂隙型地熱電廠相當少。

■ 資源探勘之差異

➤ 傳統地熱系統(或淺層地熱系統)：

須探勘發現「**地熱儲集層**」，利用其天然熱液(熱水與蒸汽)進行發電。

➤ 深層地熱系統(Enhanced or Engineering Geothermal System, EGS)：

須探勘發現**高溫乾熱岩層**(不需考慮地下水是否豐富)，利用高壓系統製造**人工裂隙**，將工作水體注入裂隙中擷取乾熱岩層的**熱能**來發電。

■ 開發步驟及工程差異性

深層地熱較傳統地熱多了**人工裂隙製造**項目。

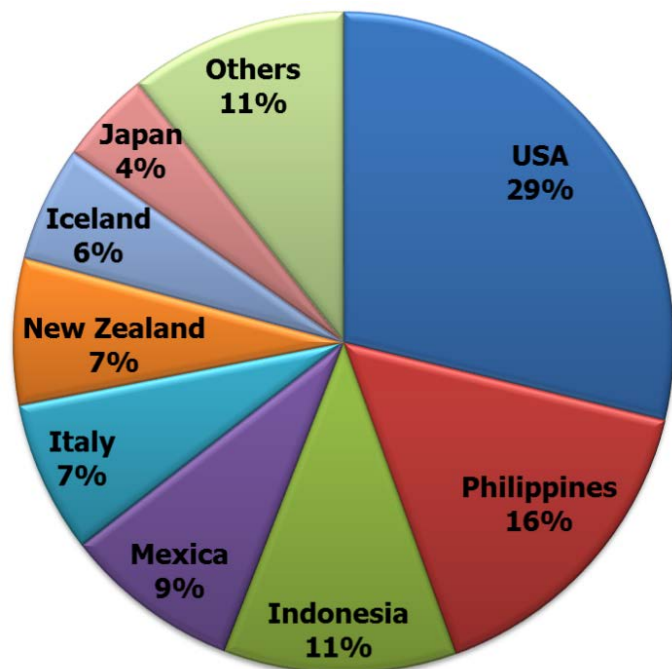
整體系統差異性分析



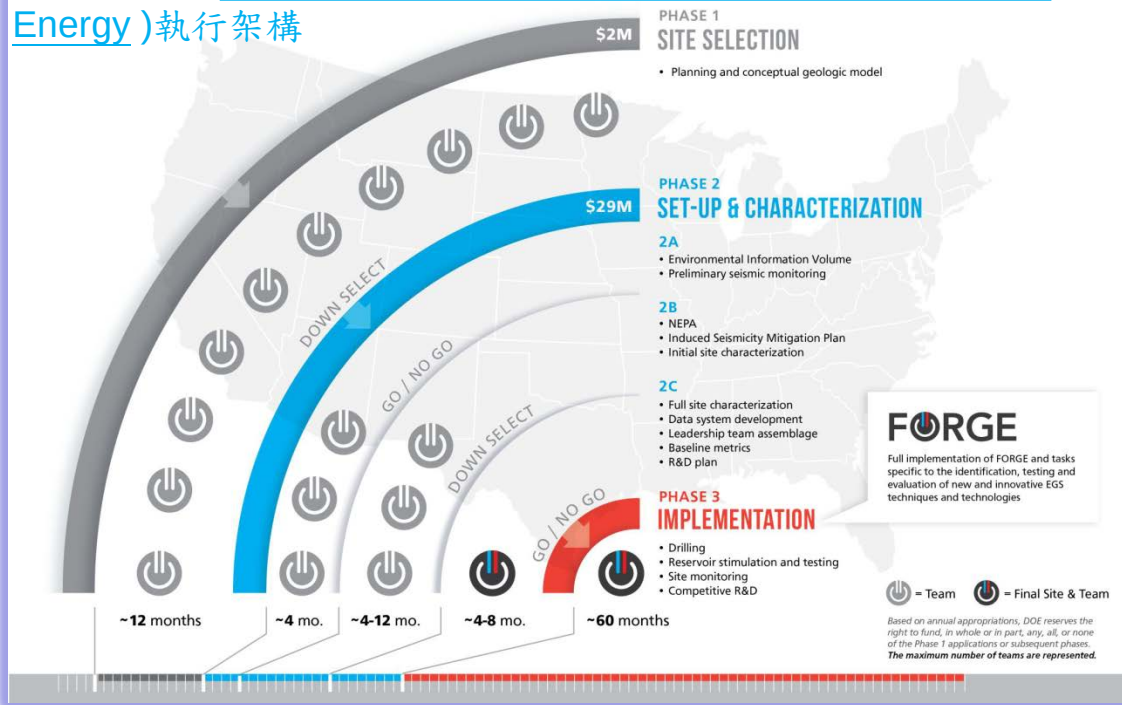
地熱型態	傳統	深層
水體	較充足	幾乎無
裂隙	較發達	不發達
鑽井深度	較淺 ($<3000\text{m}$)	較深 (>3000)
發電型態	蒸汽、複循環 ($100\sim 300^{\circ}\text{C}$)	複循環 ($100\sim 200^{\circ}\text{C}$)

國際地熱進展

- 2015全球裝置容量已達**12,635 Mwe**，前三大地熱發電國家為美國(3,45MW)、菲律賓(1,870MW)、印尼(1,340MW)，
- 全球近年來以每年**4~5%的速率成長**，2015年較2010年增加1,738MW，增加量較多包括肯亞(392MW)、美國(352MW)、土耳其(306MW)、紐西蘭(243MW)，目前全球約有76個國家約700個地熱開發計畫在進行中，**預估2020總容量將增至21,443MW**，顯示全球之地熱開發正逐漸加速當中。
(WGC, 2015)



FORGE計畫 (Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy) 執行架構





我國地熱能發電推廣目標規劃

考量國內潛力等因規劃我國再生能源推廣目標，預估至119年我國再生能源整體推廣目標量為13,750MW。

總設置容量 (MW)	年發電 量 ^{註1} (億度)	發電量占比 ^{註2} (%)	裝置容量 占比 ^{註3}	能源替代		進口能源依存 度下降 ^{註6} (%)	二氧化碳減量 ^{註7} (萬噸)
				煤炭 ^{註4} (萬公噸)	天然氣 ^{註5} (億立方公尺)		
13,750	314	11%	25%	1,383	64	2.59%	1,673

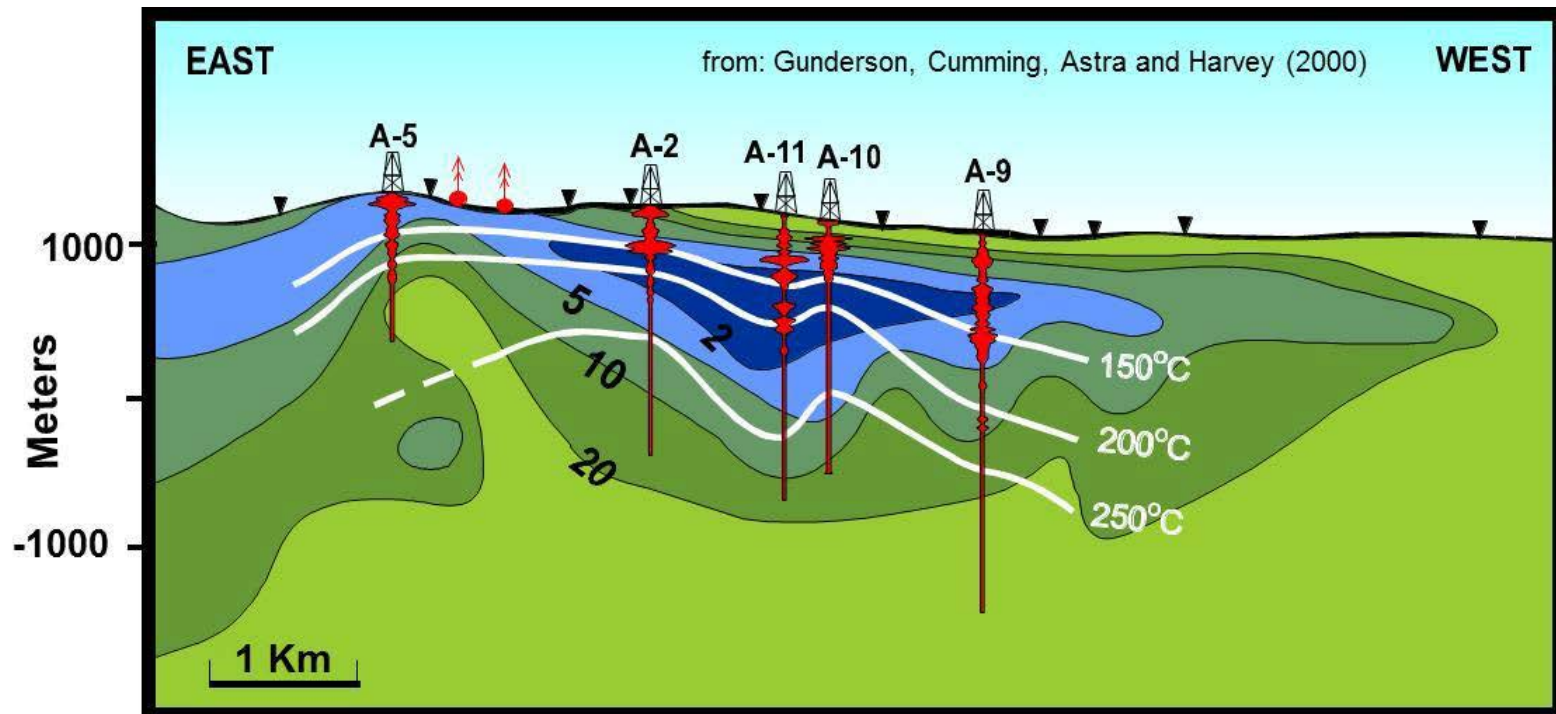
- ✓ 我國推動策略由淺入深。
- ✓ 短、中期(114年以前)主要開發傳統地熱發電150MW，配合國際深層地熱技術之引進，規劃於長期(114-119年)開發約50MW。

年度	99	100	101	102	104	109	114	119
累計裝置容量 (MW)	0	0	0	0	4	66	150	200



貳、地熱地質概念模式

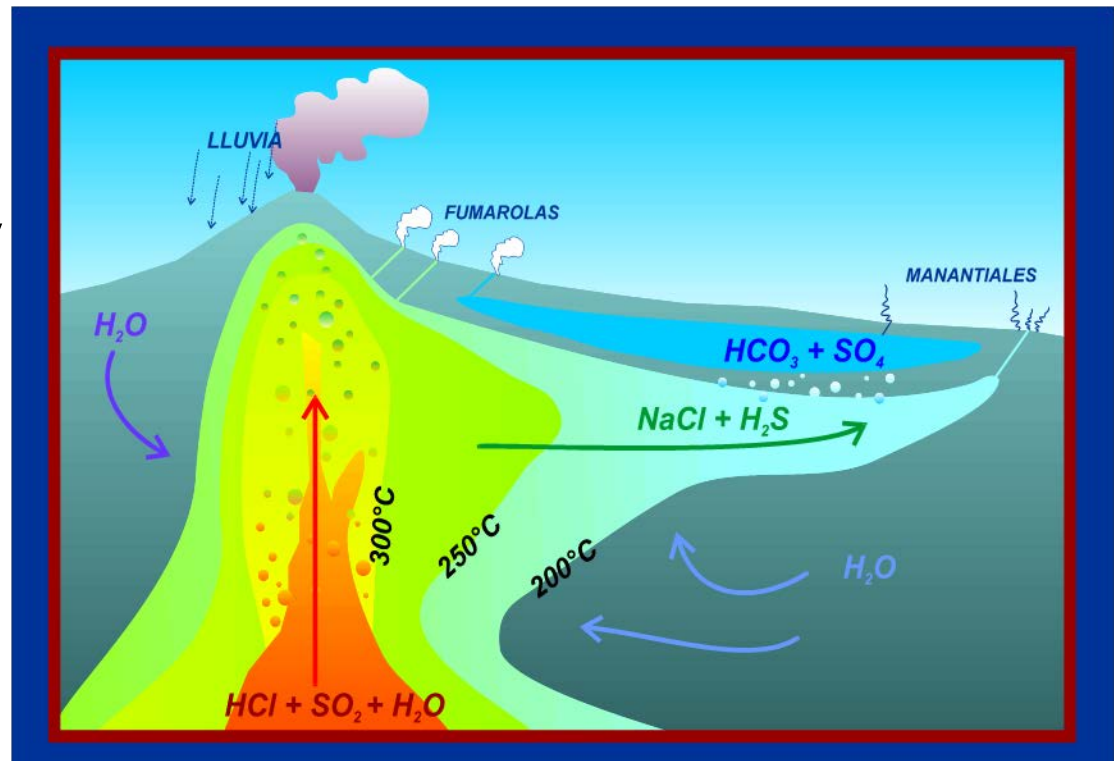
The Conceptual Model



Comparison of resistivities integrated from MT and TDEM surveys, static temperatures derived from well measurements

Key Conceptual Model Elements

- Heat source
- Isotherms
- Fluid flow pathways
- Alteration mineralogy
- Recharge zones
- Outflow
- Fluid chemistry
- Surface thermal features
- Structural features
 - ✓ Flow conduits
 - ✓ Flow boundaries



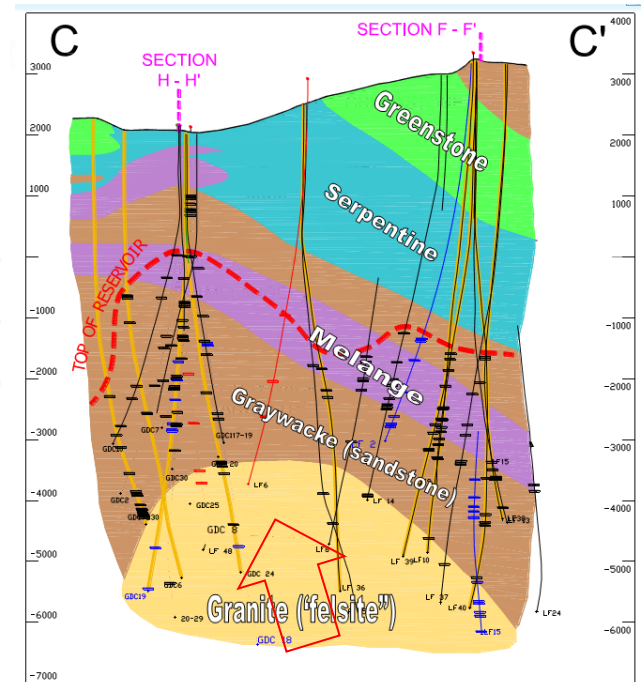
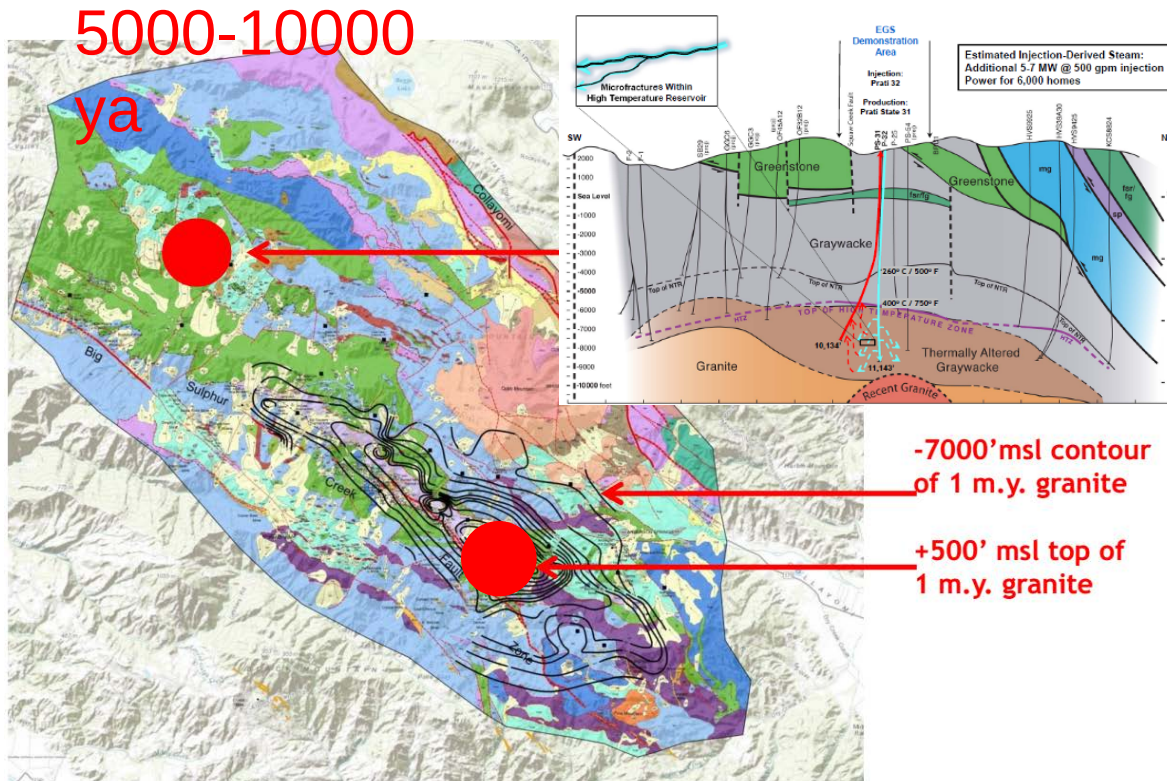
Schematic cross section of volcanic-hosted geothermal system

The Geysers 電廠

- ✓ 加州北部
- ✓ 世界最大傳統地熱田 (100 km²)
- ✓ 1.6 GW 裝置容量
- ✓ 22 座電廠



The Geysers 地質模式



80% of the Geysers reservoir
rocks are graywacke sandstone.

Serpentinite
Pipe Yard

Greenstone
Anderson Creek

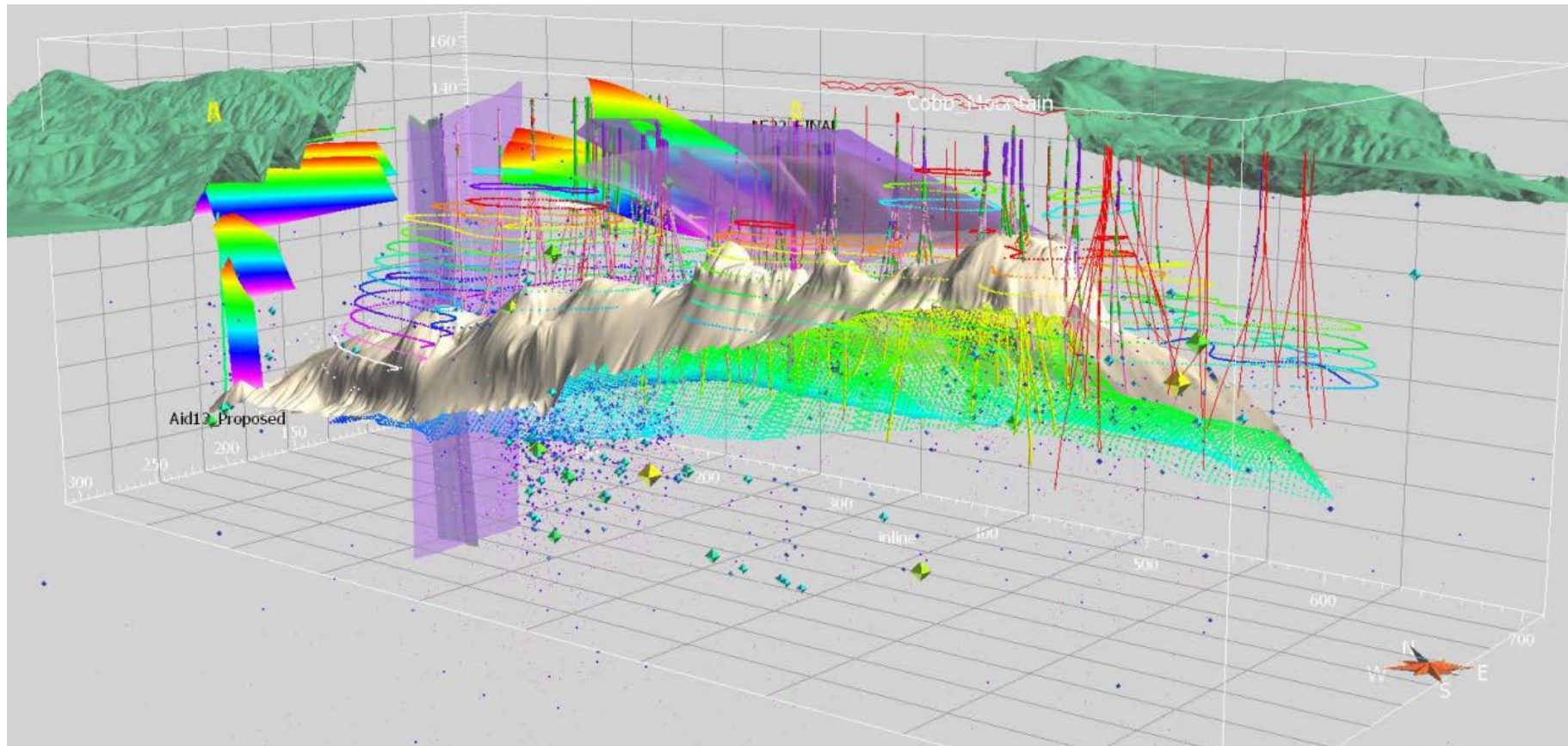
Chert
Burned Mt. Rd.

Graywacke (sandstone)
Calistoga D-Pad Road



三維地熱地質概念模式

1. Calpine主要採用地溫梯度井的資料，進行地熱系統建立及井位規劃。
2. 由大量井錄資料，The Geysers得以透過三維視覺化建模軟體，建立起精確的三維地質概念模式。





叁、大屯火山地熱探勘 地球物理技術

大區域普查 → 場址調查階段

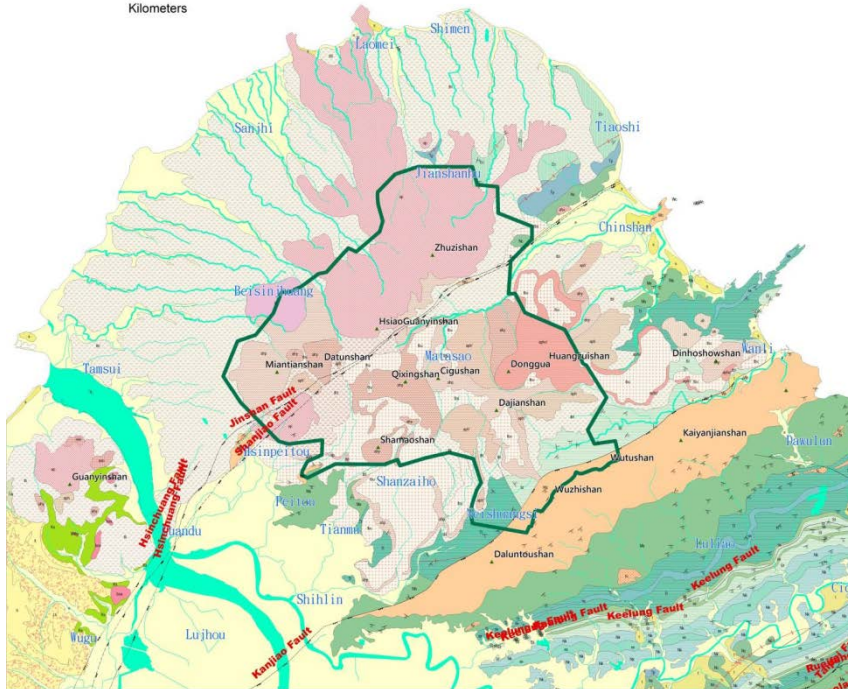
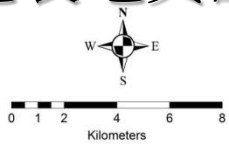
- 確立地熱系統
- 建立地質概念模式

- 蓋層
- 儲熱地層

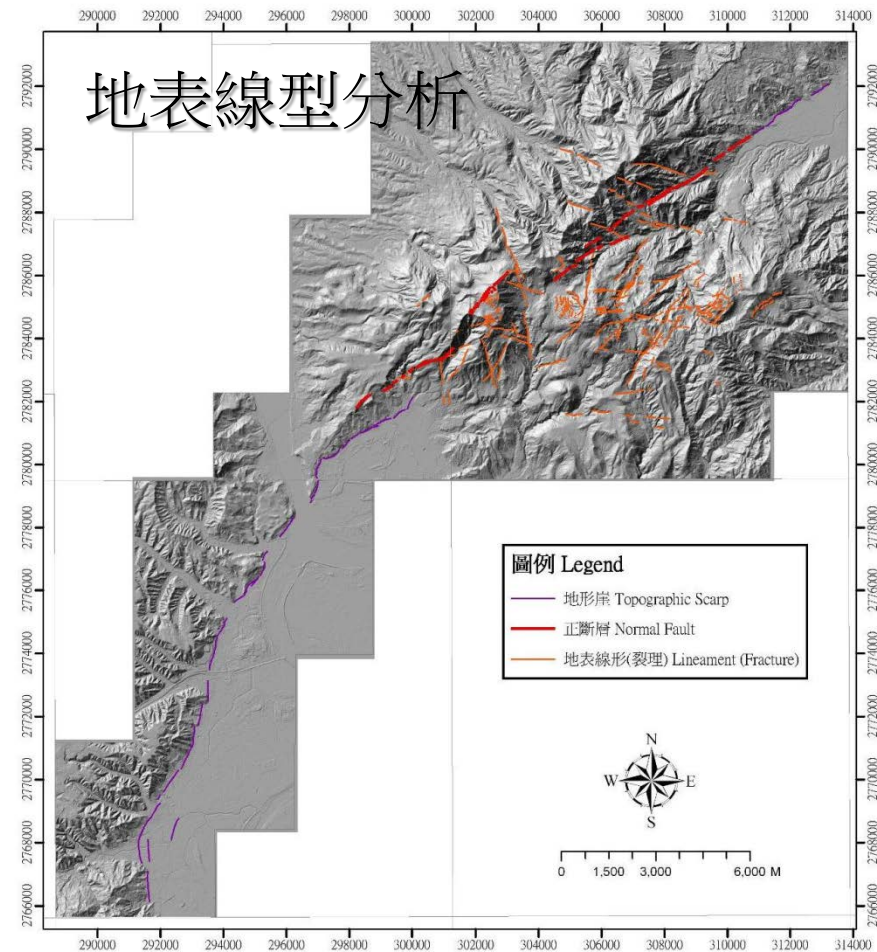
- ✓ 高密度MT
- ✓ 反射震測
- ✓ 地球物理井測

- ✓ MT
- ✓ 空中磁測
- ✓ 重力
- ✓ 微震成像
- ✓ 遙測

地表地質調查



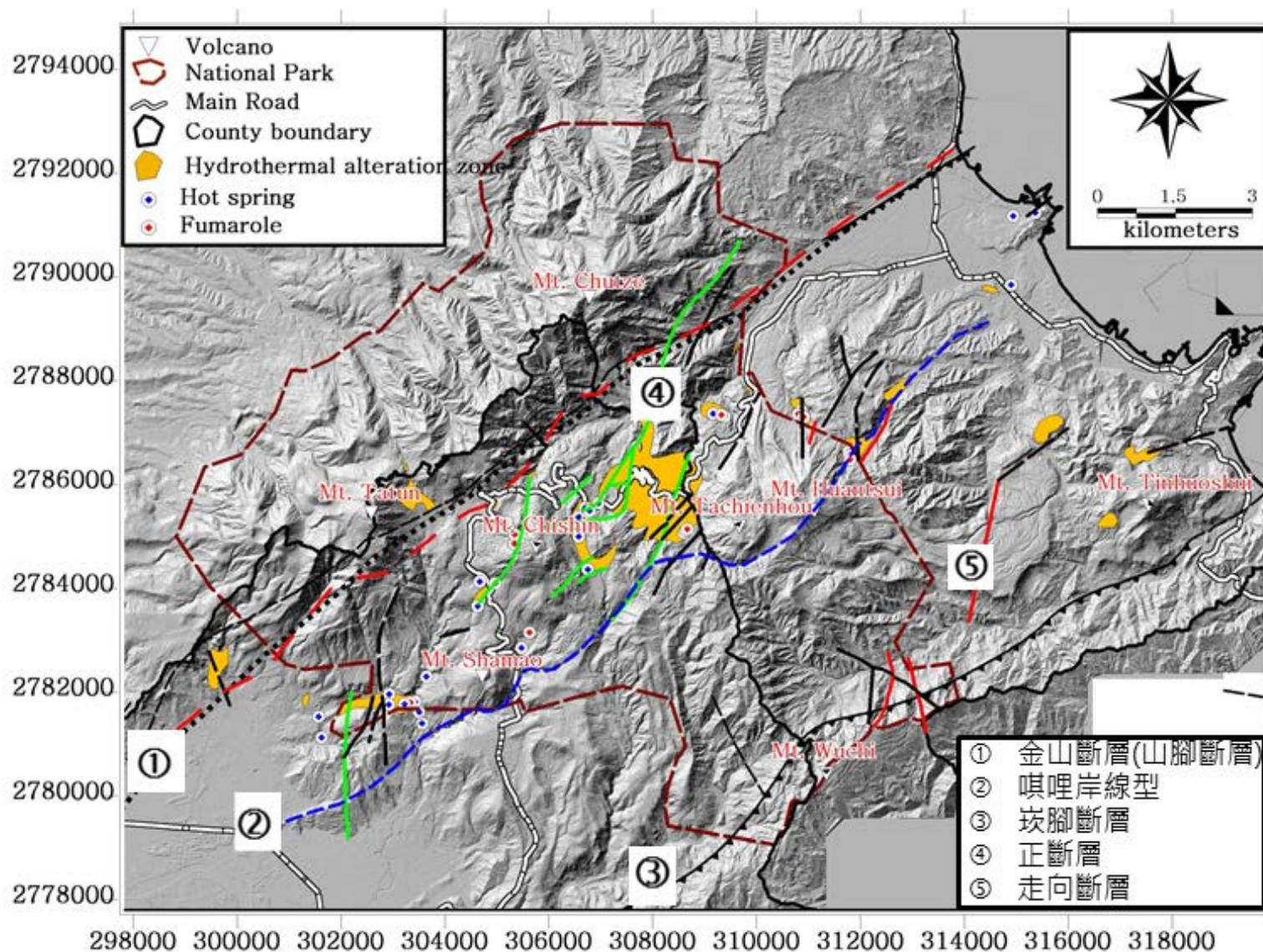
地表線型分析





遙測技術

熱異常、構造線型



空中磁力探測

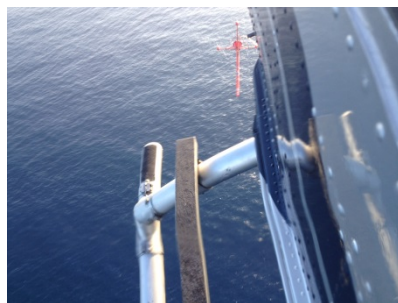


組裝

測試



拂曉出擊

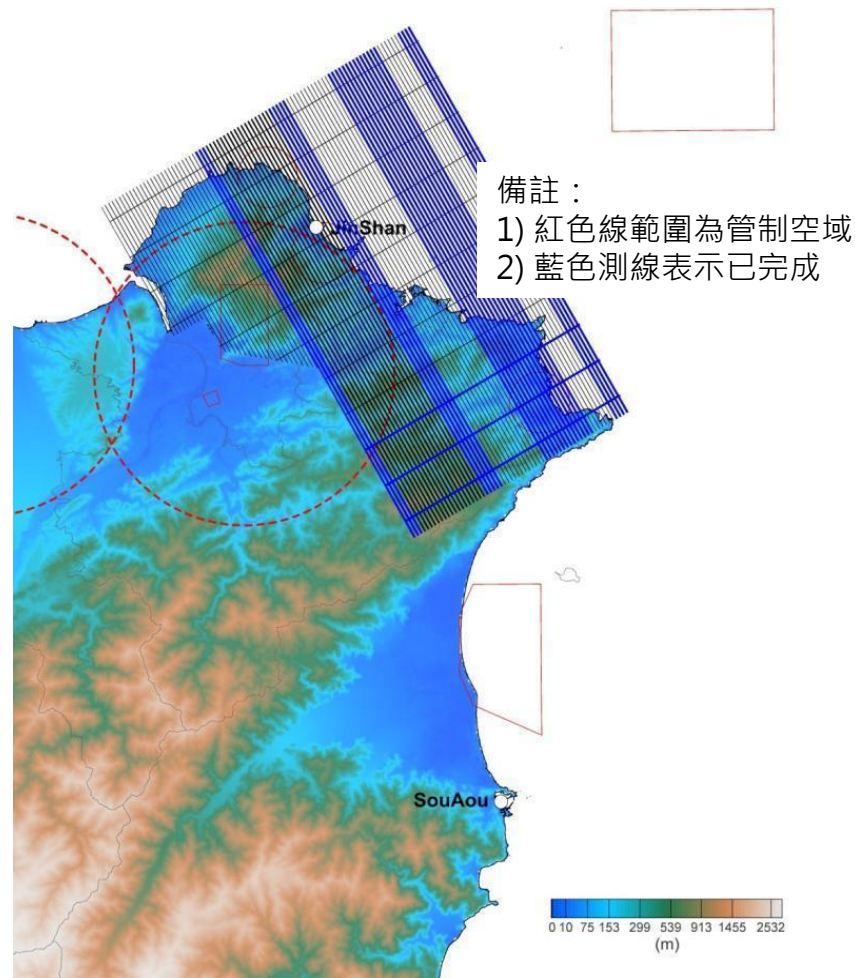


吊掛磁測作業



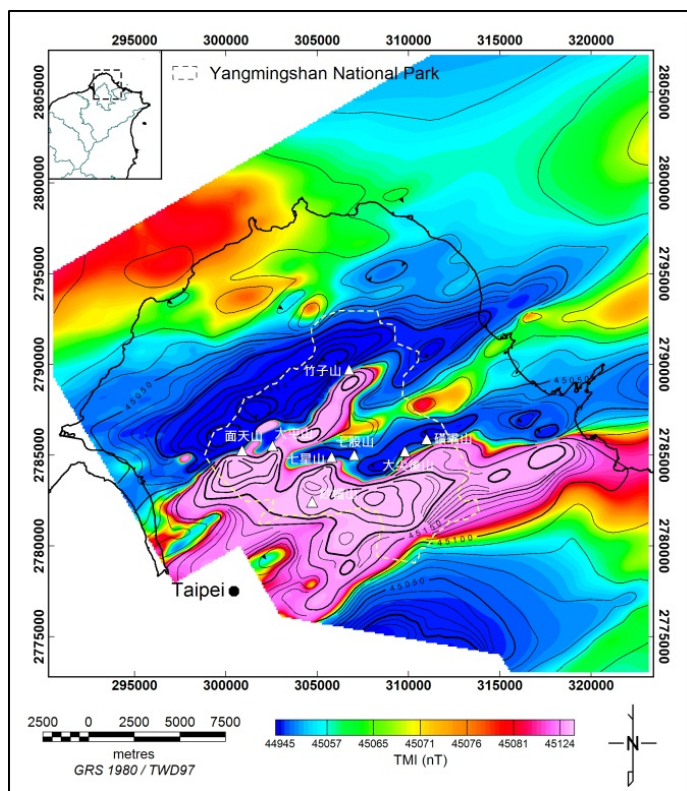
導航

降落

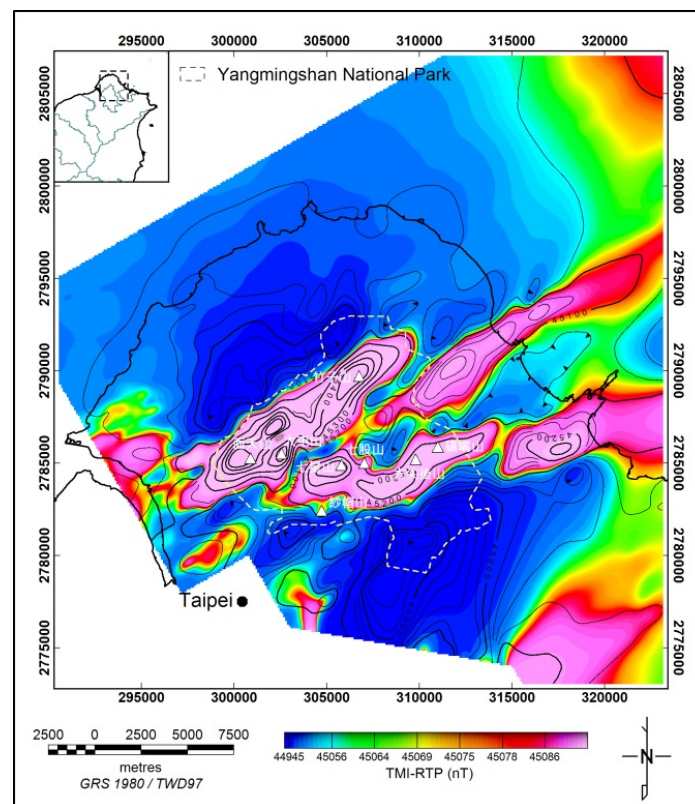


空中磁測資料判釋

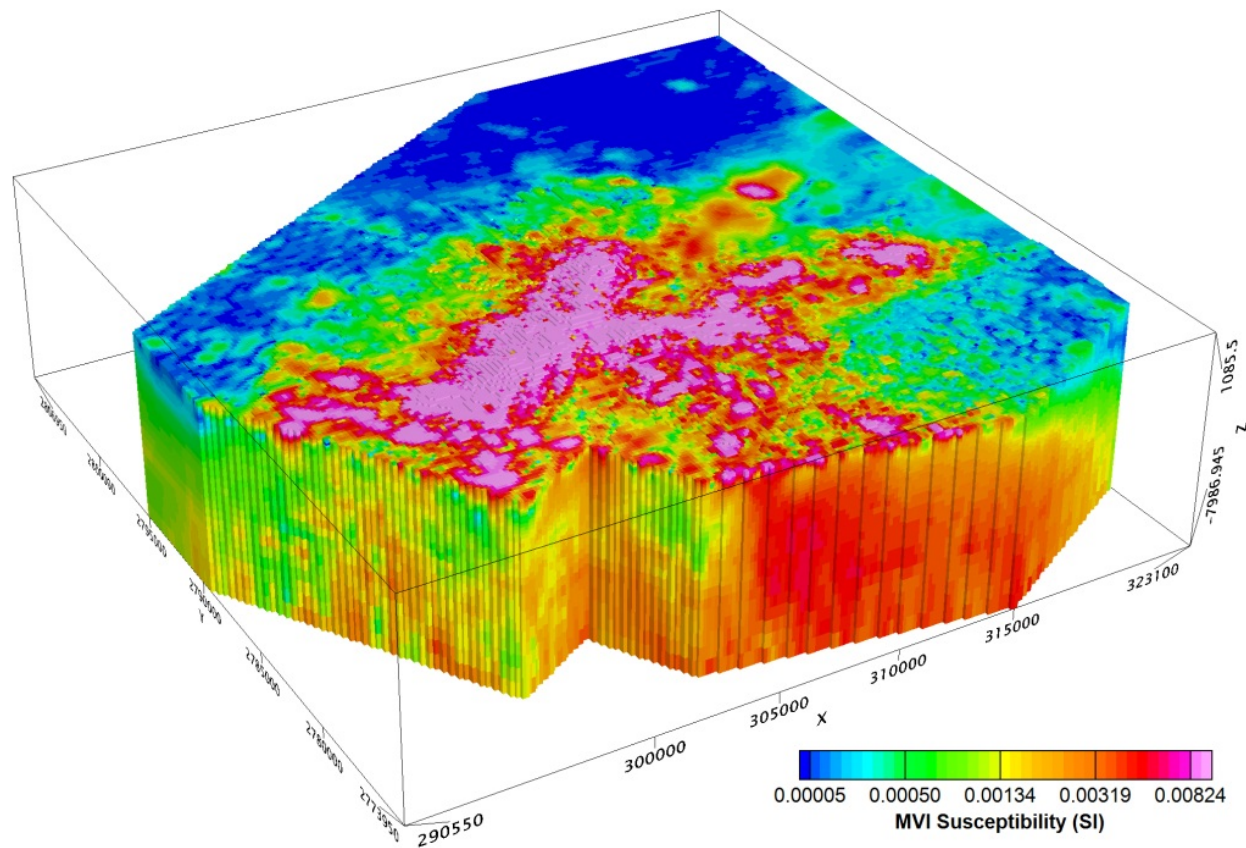
空中磁測資料進行解析，建構火成岩體及構造之地下三維模型。依據磁力特徵與露頭磁力量測，顯示高磁區對應火成岩分布，火山區內低磁區對應熱水變質帶。



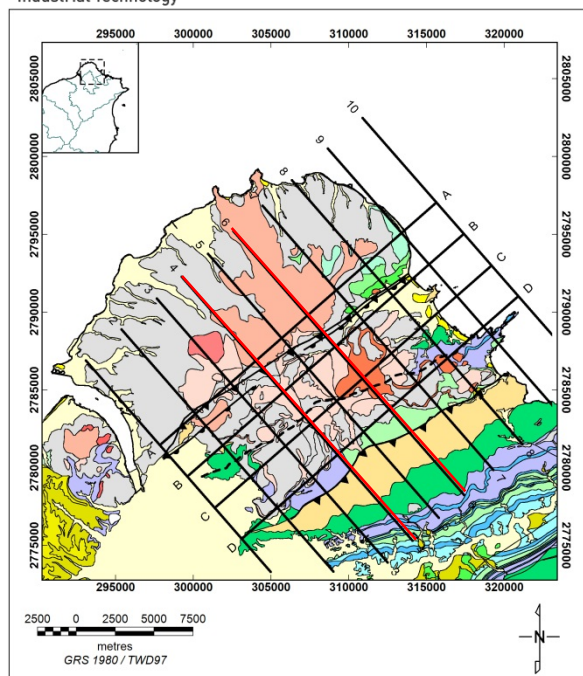
(a)原始全磁力強度圖



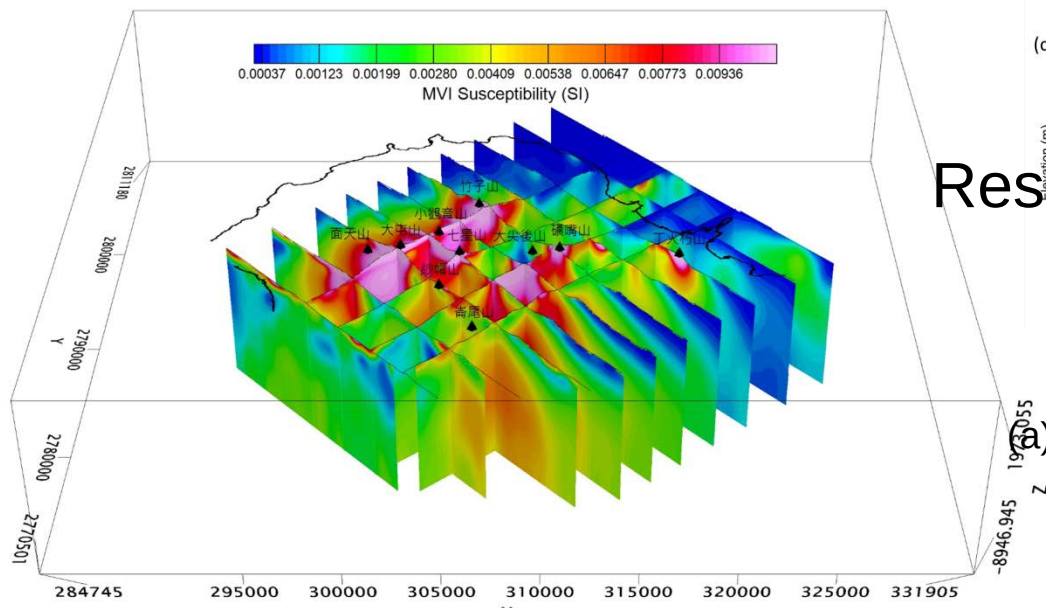
(b)經歸極換算處理後之全磁力強度圖



經三維逆推獲得的三維磁感率模型立體圖



磁感率柵狀立屏

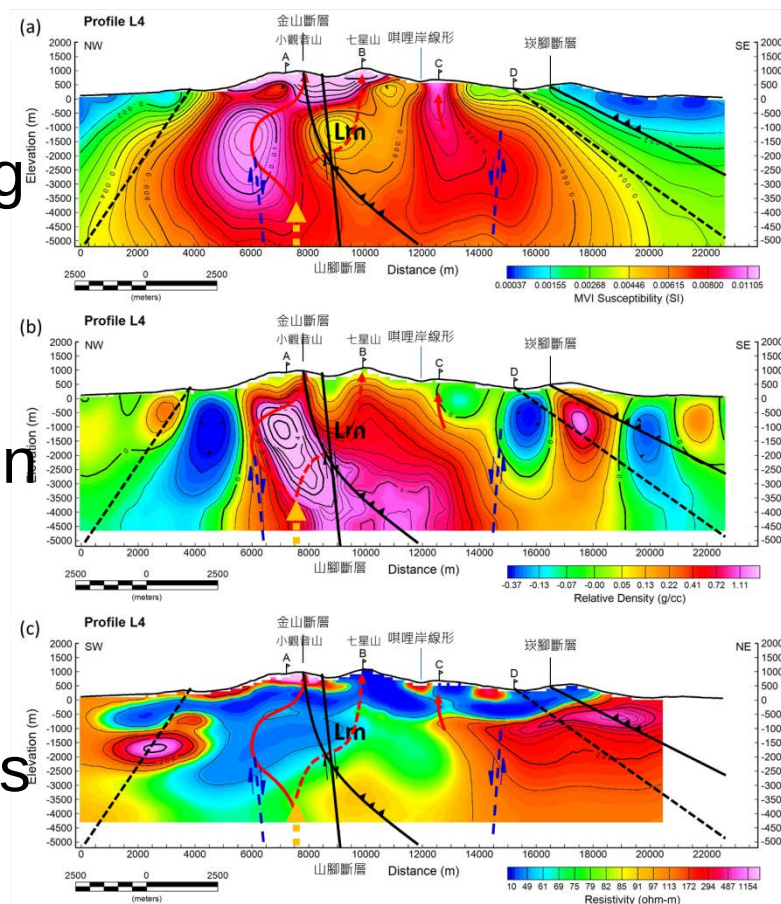


L4

Mag

Den

Res

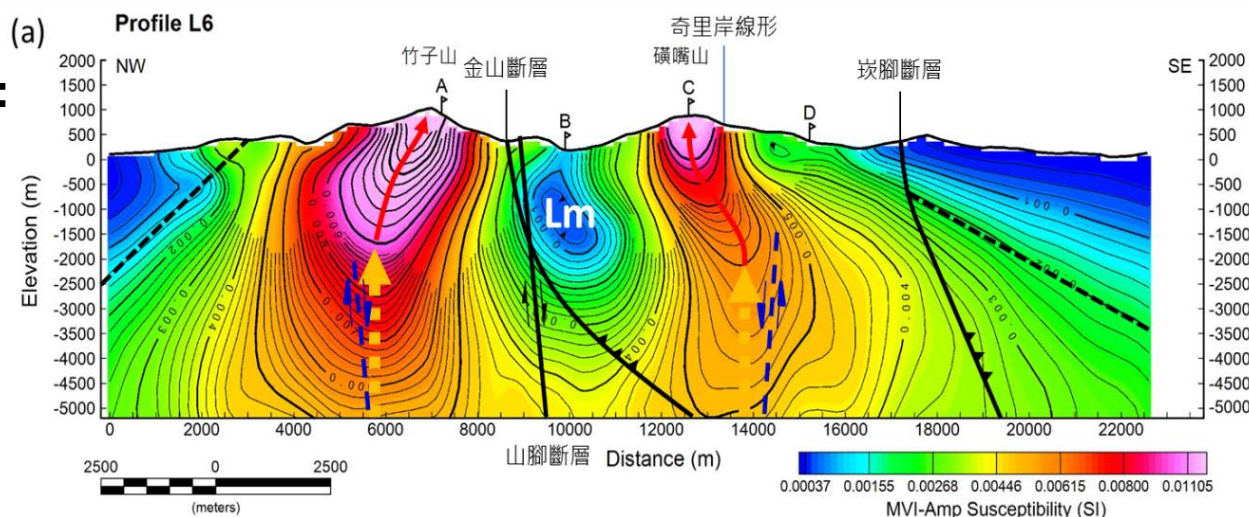


(a)磁感率剖面圖；(b)密度剖面圖；(c)電阻剖面圖。

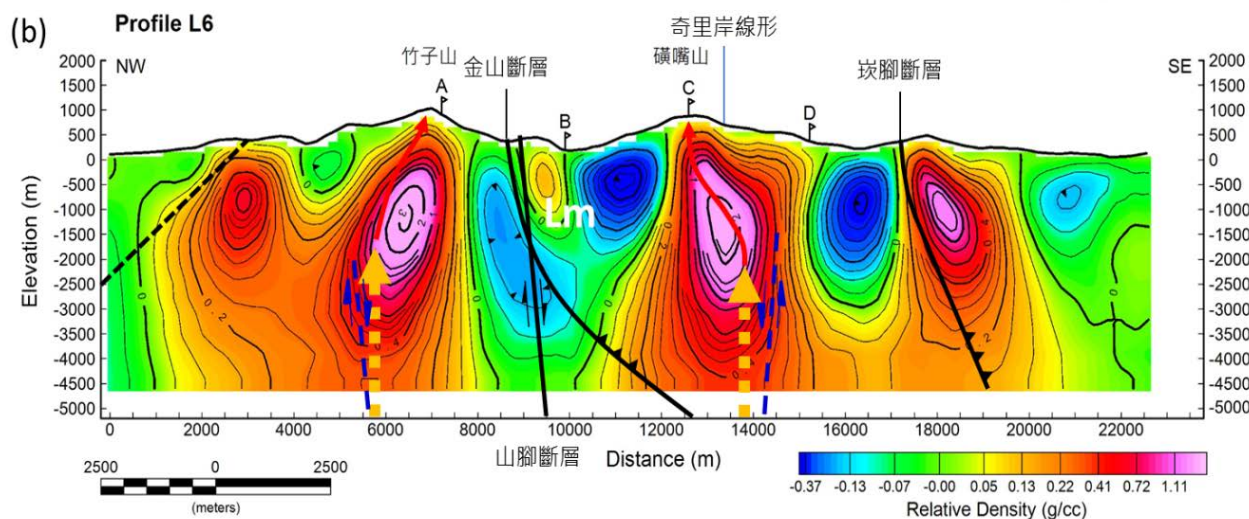
資料解釋 > 大屯山火山區域 > 剖面分析

L6

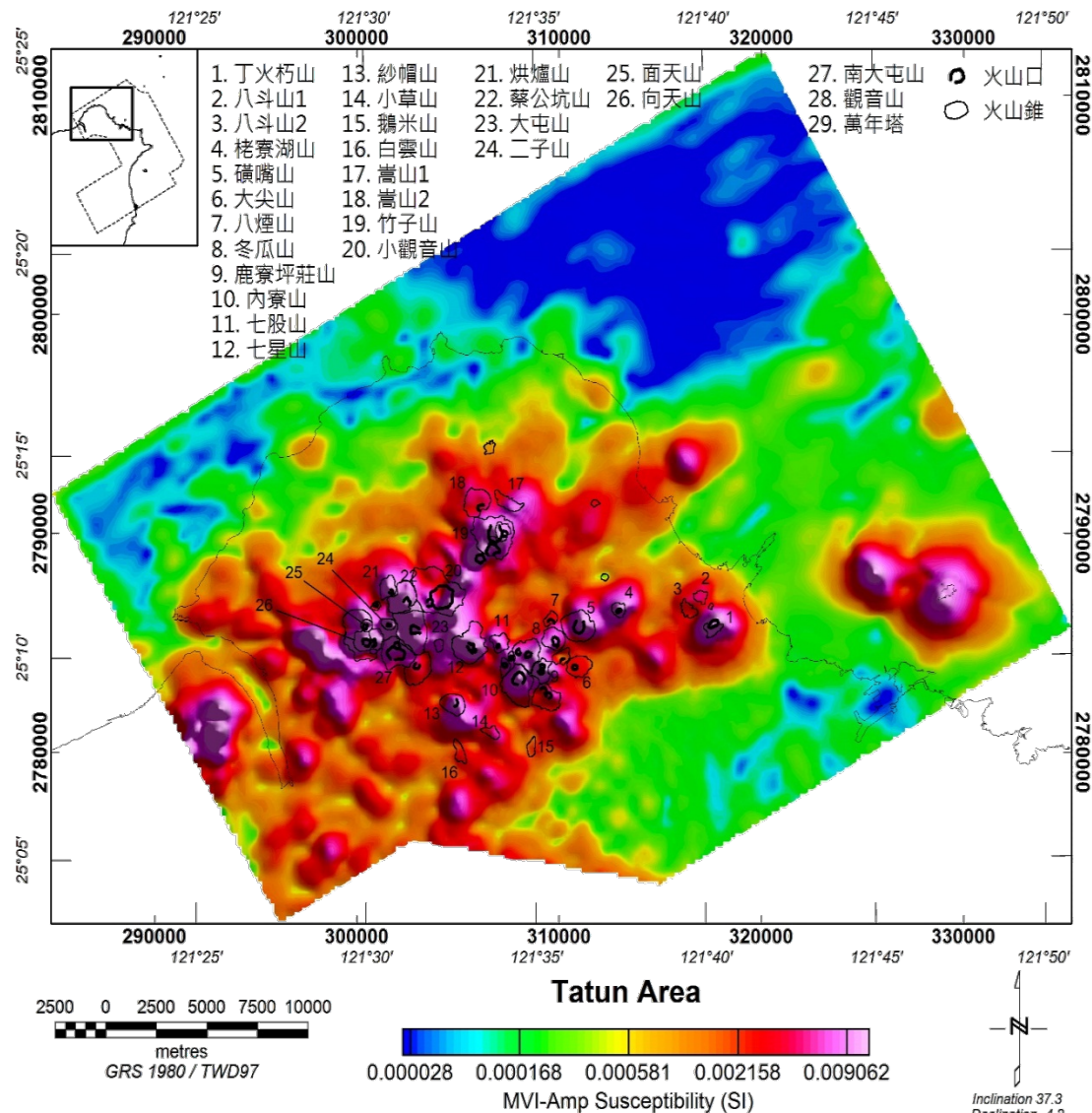
MagSus Section:



Density Section:



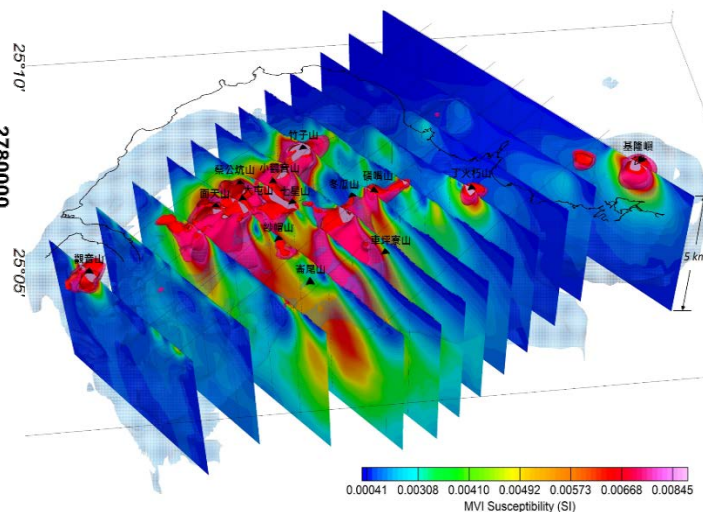
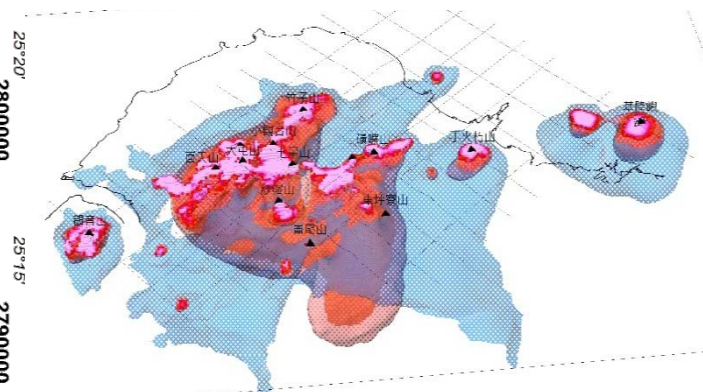
資料解釋 > 大屯山火山區域



➤ Mesh: 100×100×50 m.

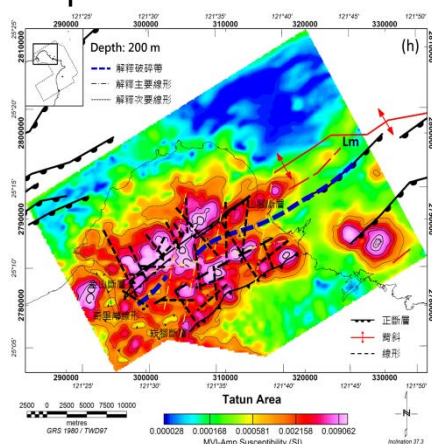
➤ Total 5,190,426 nodes.

➤ Linear trend removed

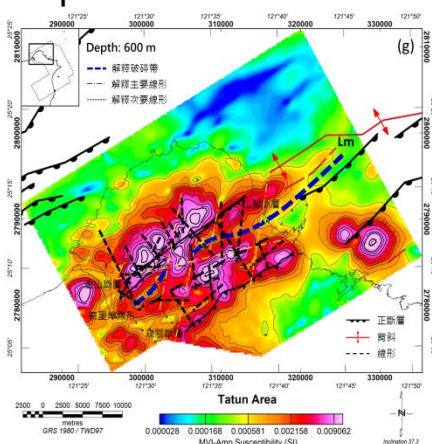


資料解釋 > 大屯山火山區域 > 等深度切面圖

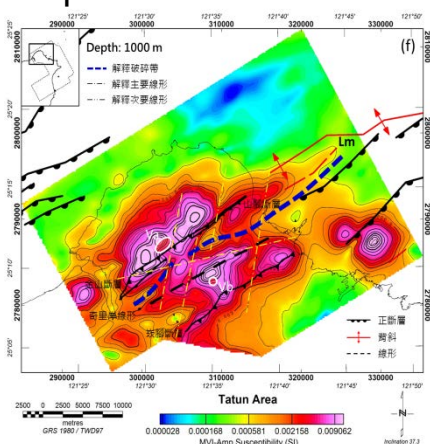
Depth= 200 m



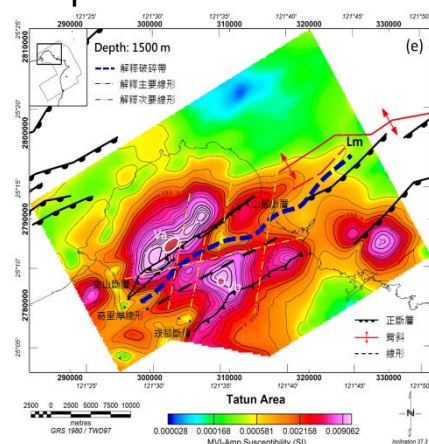
Depth= 600 m



Depth= 1000 m



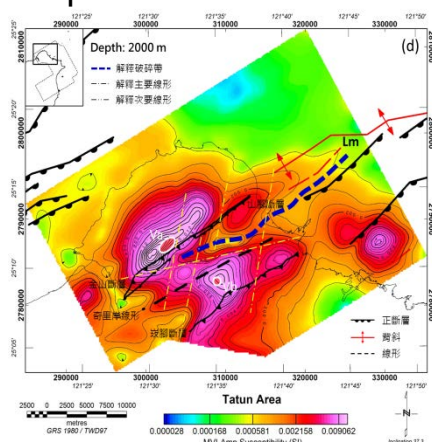
Depth= 1500 m



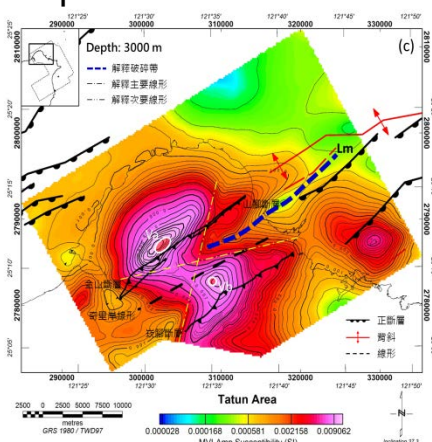
➤ 深部與淺部的斷層走向並不完全相同。

➤ 前者反應第三紀晚期受因板塊推擠變形形成主要構造，後者第四紀受張裂期次生斷層構造。

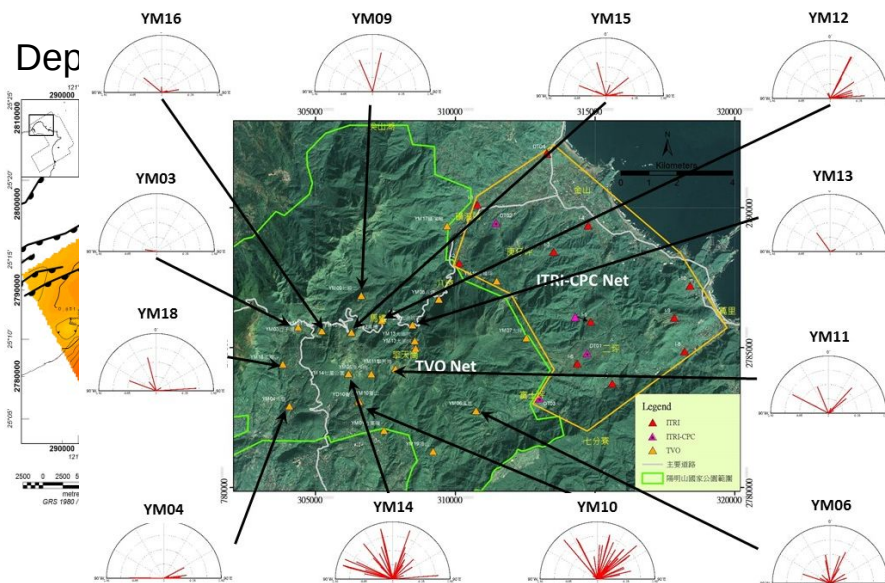
Depth= 2000 m



Depth= 3000 m



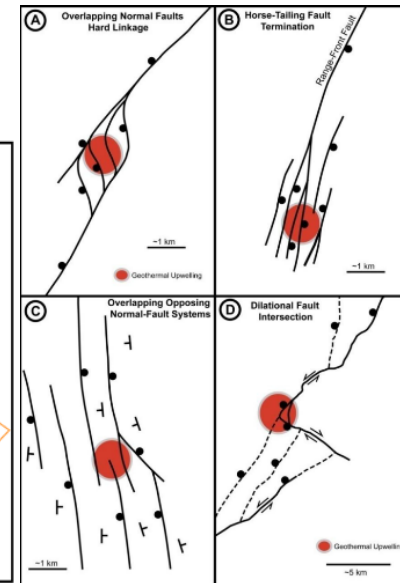
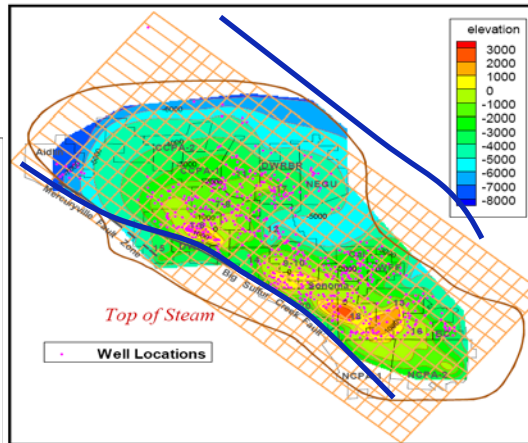
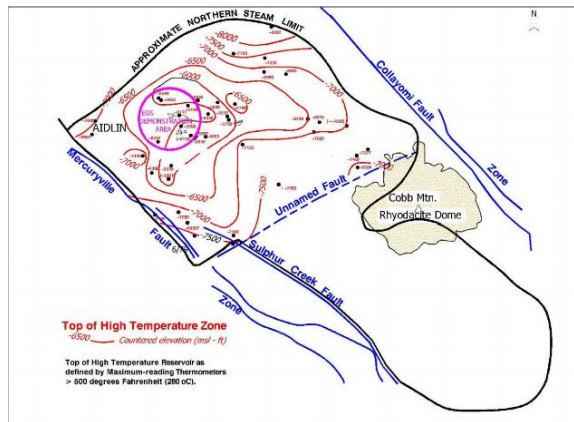
Dep



地質構造特徵

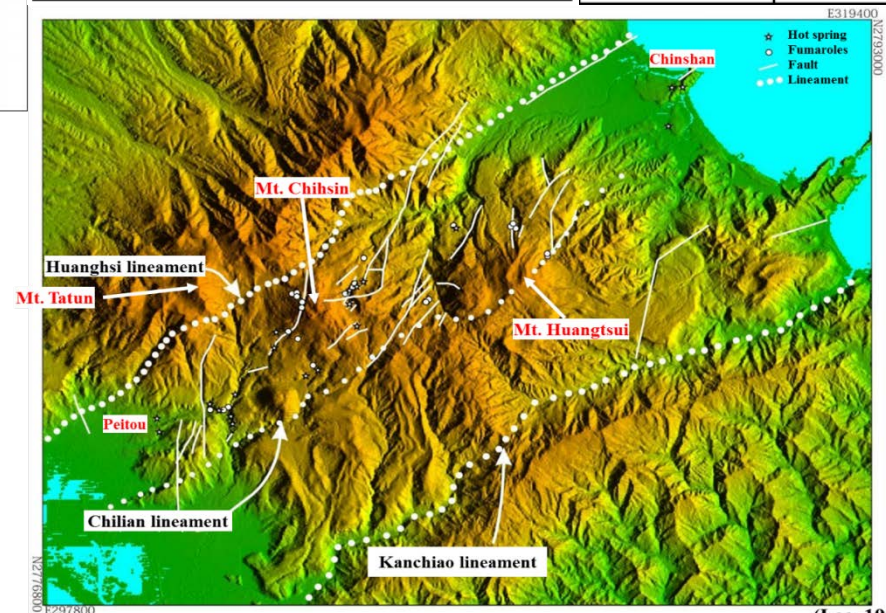
主要的地質構造對於地熱系統的邊界
評估伴演著重要的角色

Mercuryville Fault/ Sulfur Creek
Fault/ Collayomi Fault



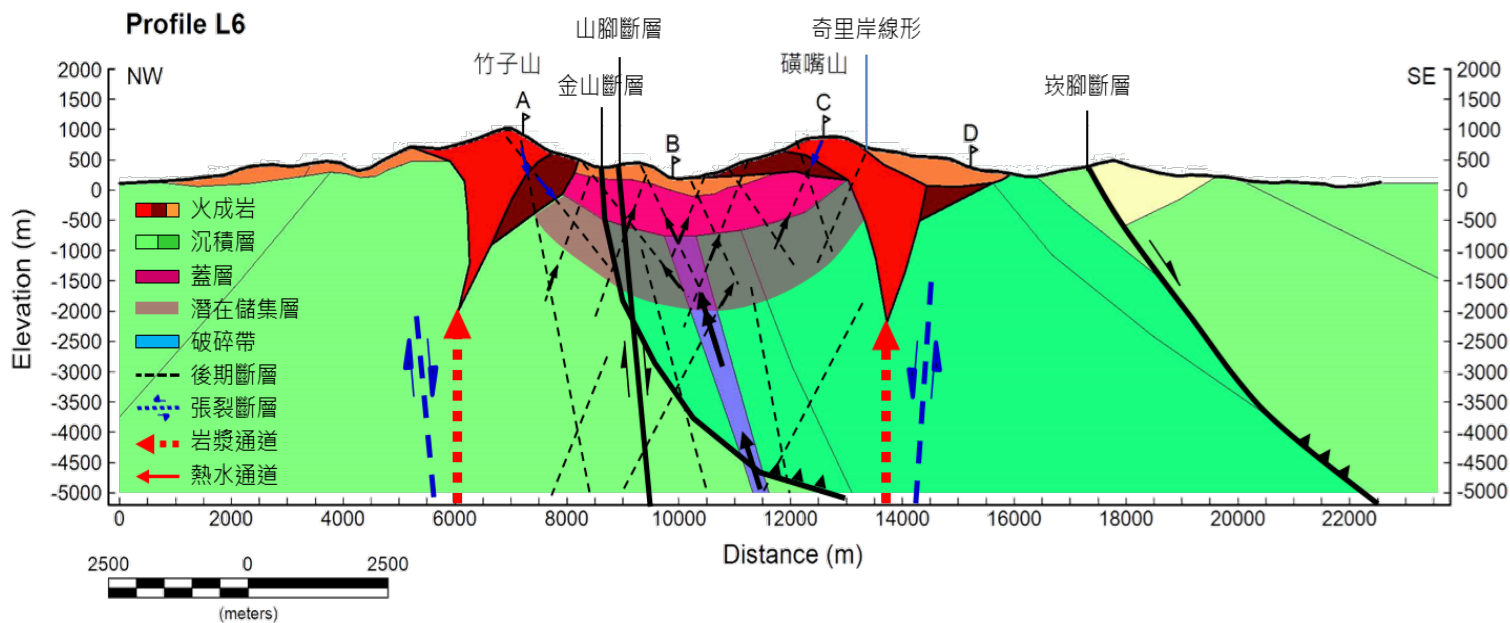
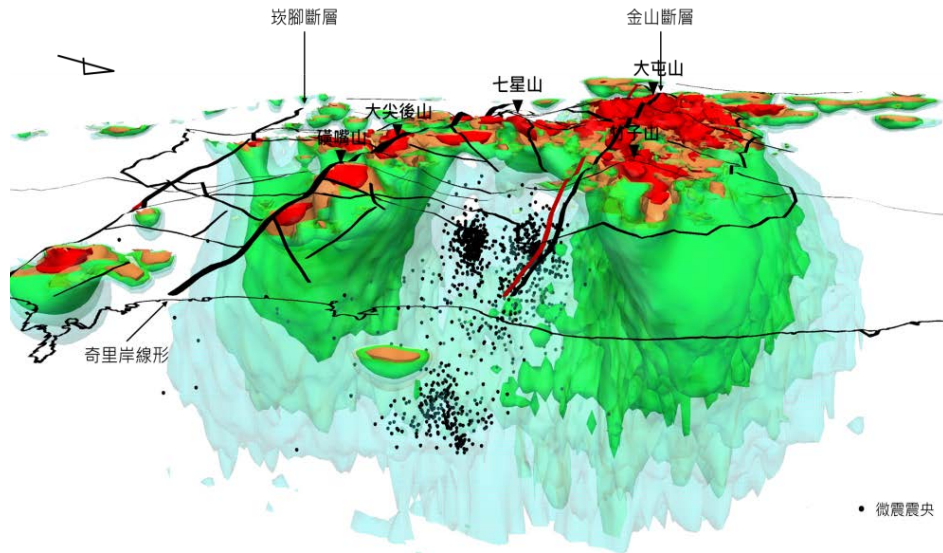
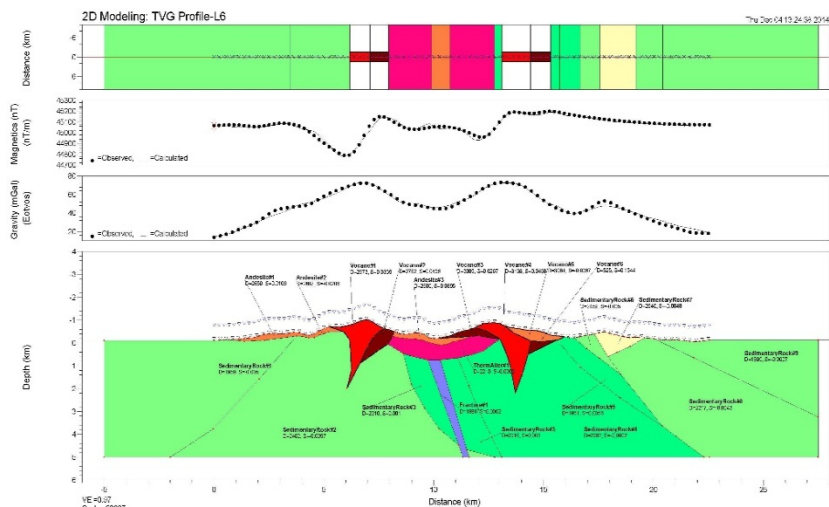
大屯火山群:

金山斷層/山腳斷層/磺溪線型主要的斷層系統間，經常伴隨著垂直走向的次生斷層。這些斷層系統的地下構造可能造成儲集層間的阻隔，或將其劃分為數個次儲熱層區域，需納入評估因素。



(Lee, 1996)

資料解釋 > 大屯山火山區域 > 概念模型





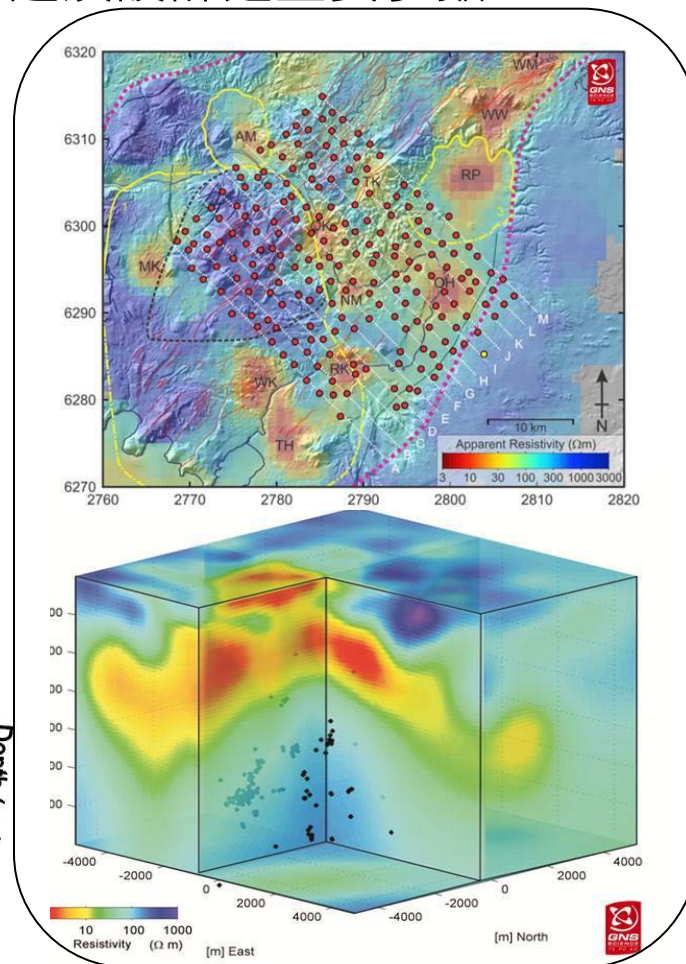
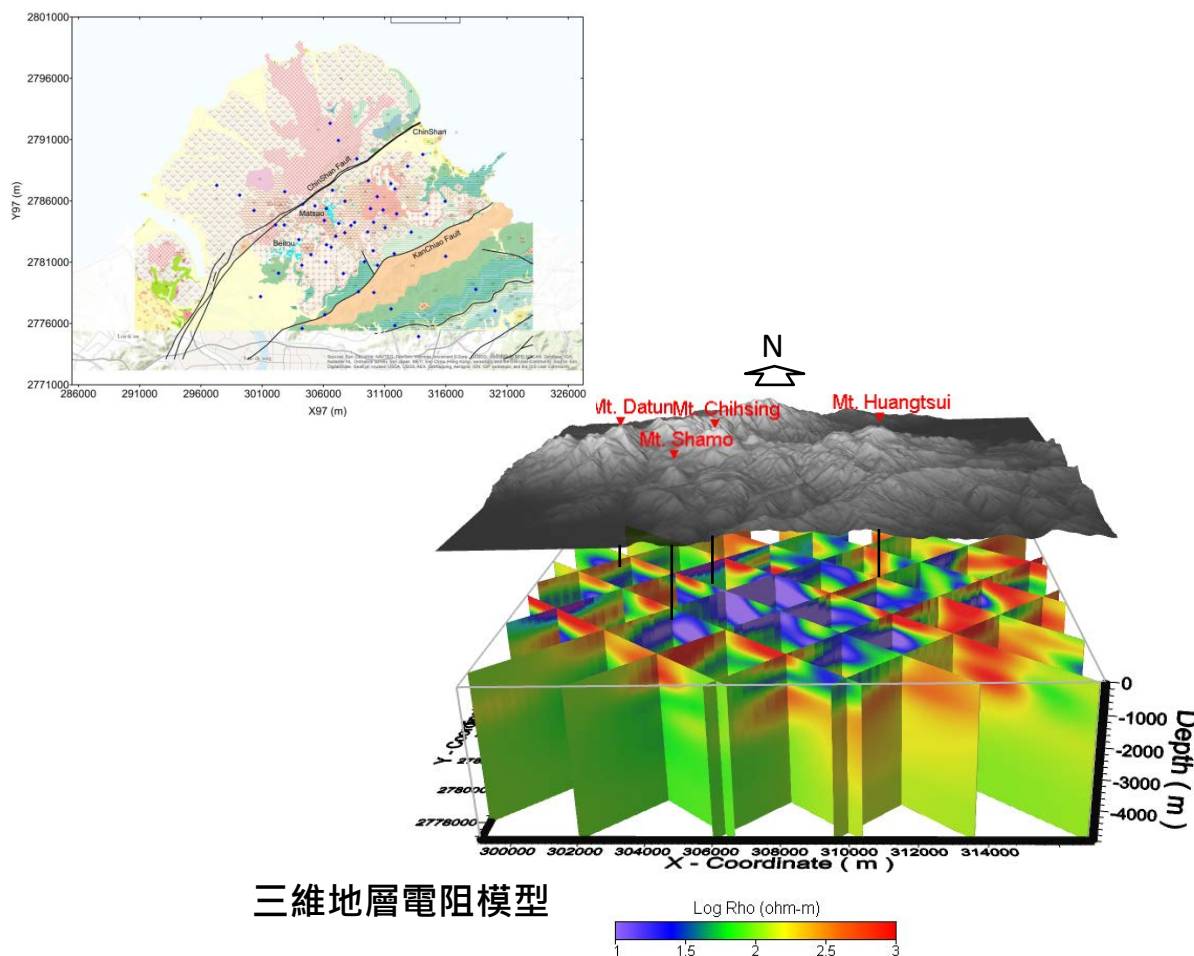
空中磁測資料判釋

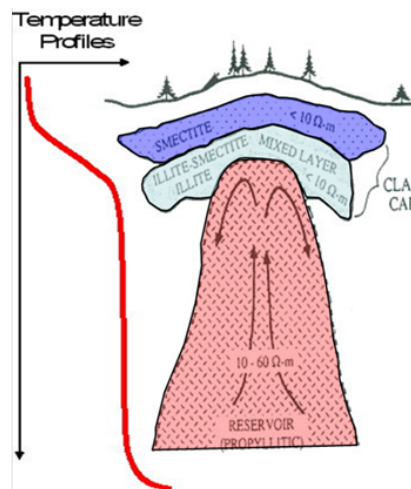
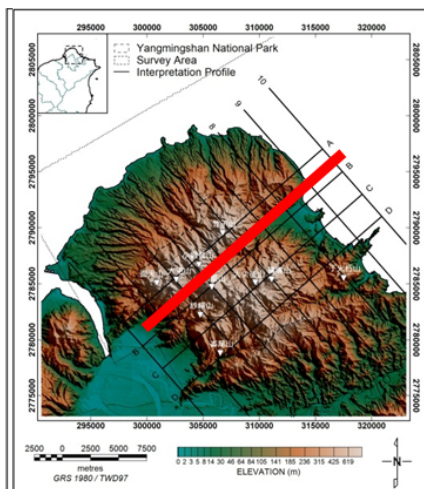
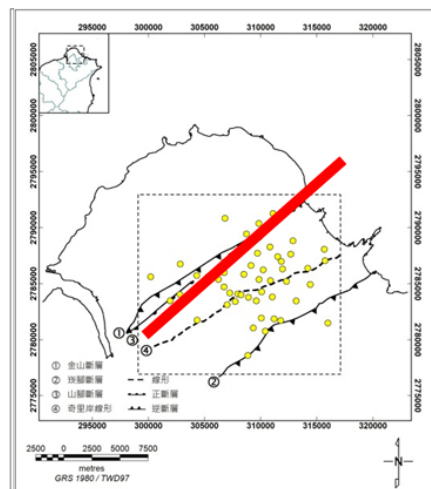
火山活動與熱流(大屯火山區域)：

1. 新鮮安山岩的磁感率約數百倍至千倍於沉積岩的磁感率，磁測資料能有效反應**火成岩的地下分布**。火山區內的**低磁區對應受熱水變質的岩層**，可做為分析熱水通道分布的指標。
2. 大屯火山區地下火成岩具有高磁力特性，並呈現兩條帶狀分布，概略以**大屯山及五指山為中心**，分別向東北-西南及東-西兩方向延伸。
3. 高磁的不連續線形，推測對應後期斷層構造，主要以近南北方向偏東或偏西方向之正斷層或帶平移分量之斷層為主，暗示**後期熔岩流被新期斷層構造破壞後，形成網狀的熱水通道**。
4. 觀音火山岩體的規模相對小且淺，由地下高磁性岩體分布，推測**岩漿來自東側深部**。巨觀角度推測大屯火山區之居里深度約10公里上下。

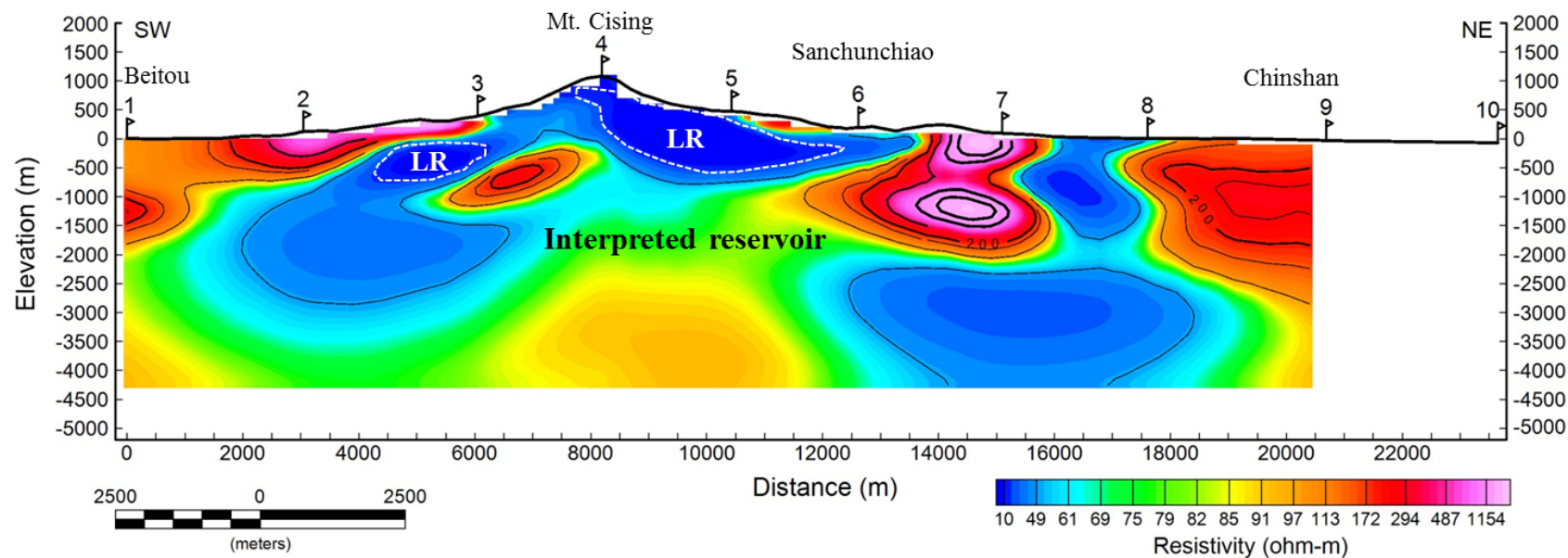
MT調查

- ✓ 掌握大屯山地下熱源分布與地下水補注及循環模式，建立大屯山地熱生成概念模式。
- ✓ 評估地熱潛能區與開發可行性，提供探勘井位研選及設計之重要參數。

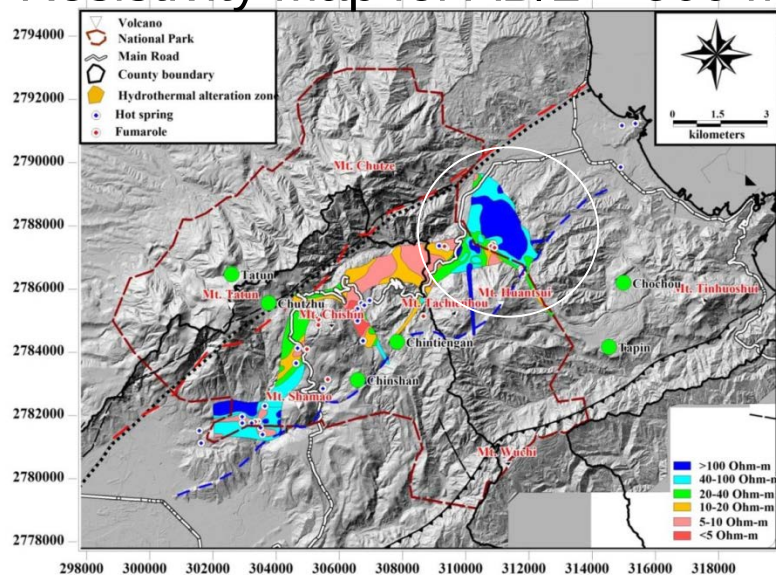




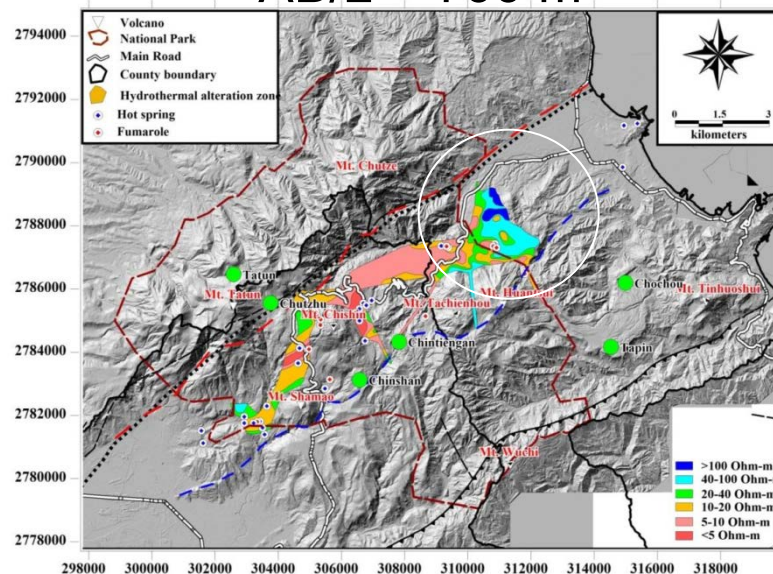
Profile TB



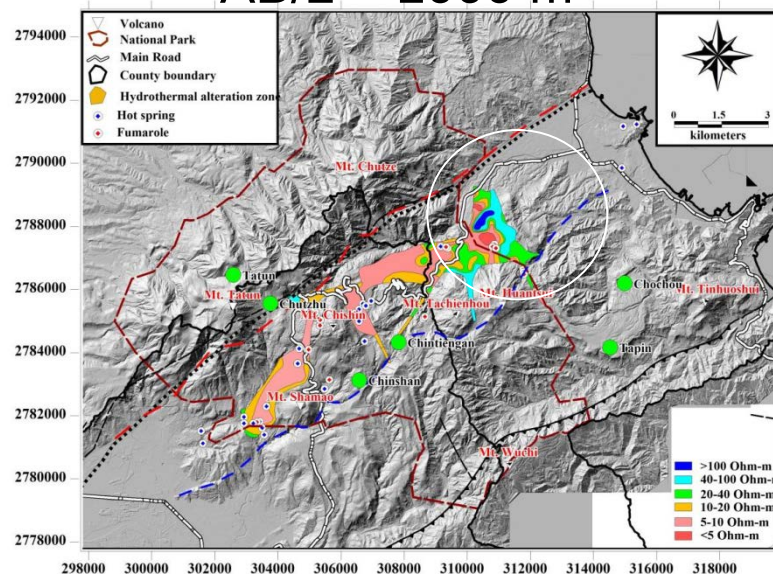
Resistivity map for AB/2 = 500 m



AB/2 = 700 m

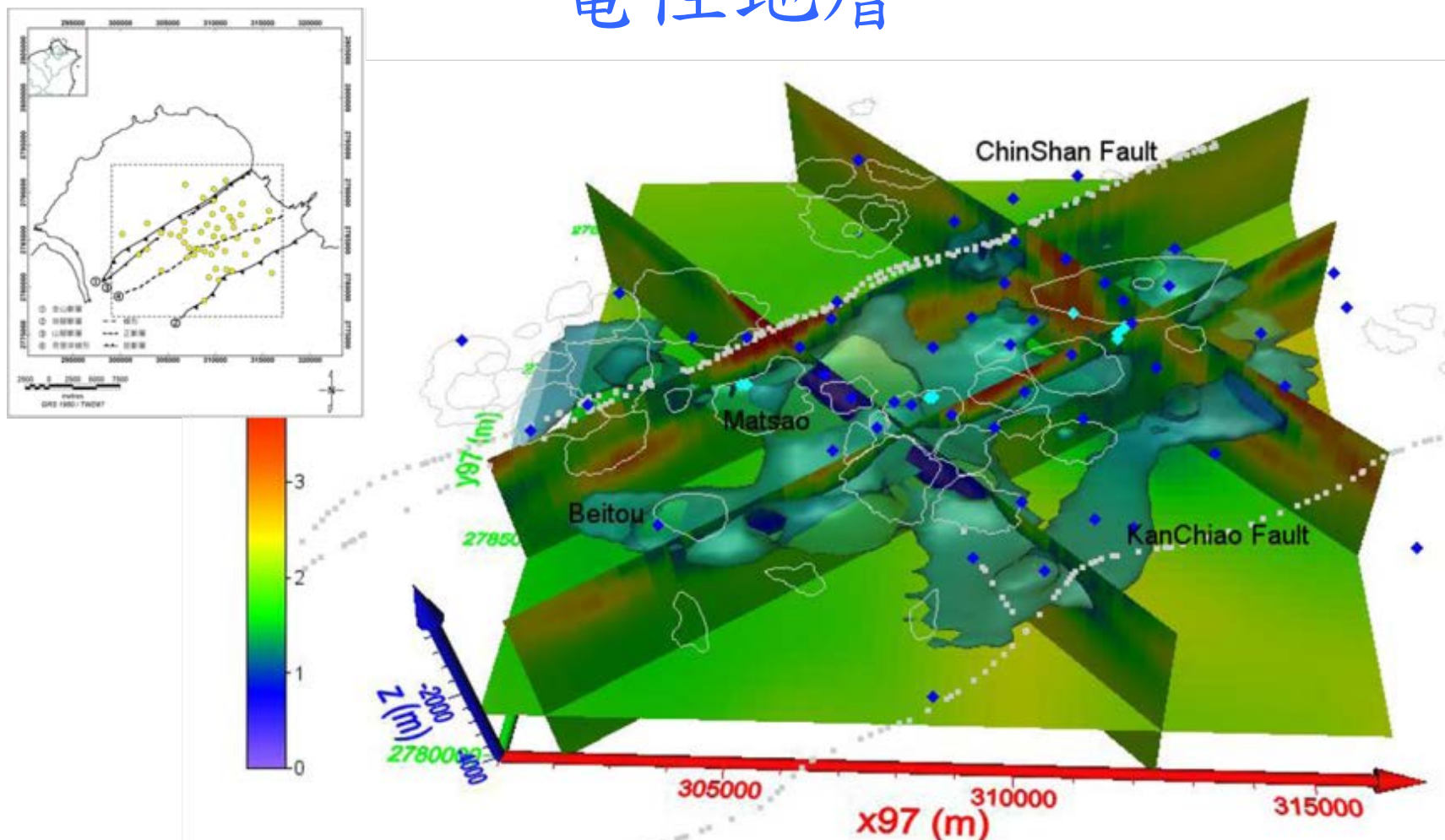


AB/2 = 1000 m



直流電阻法(1970)

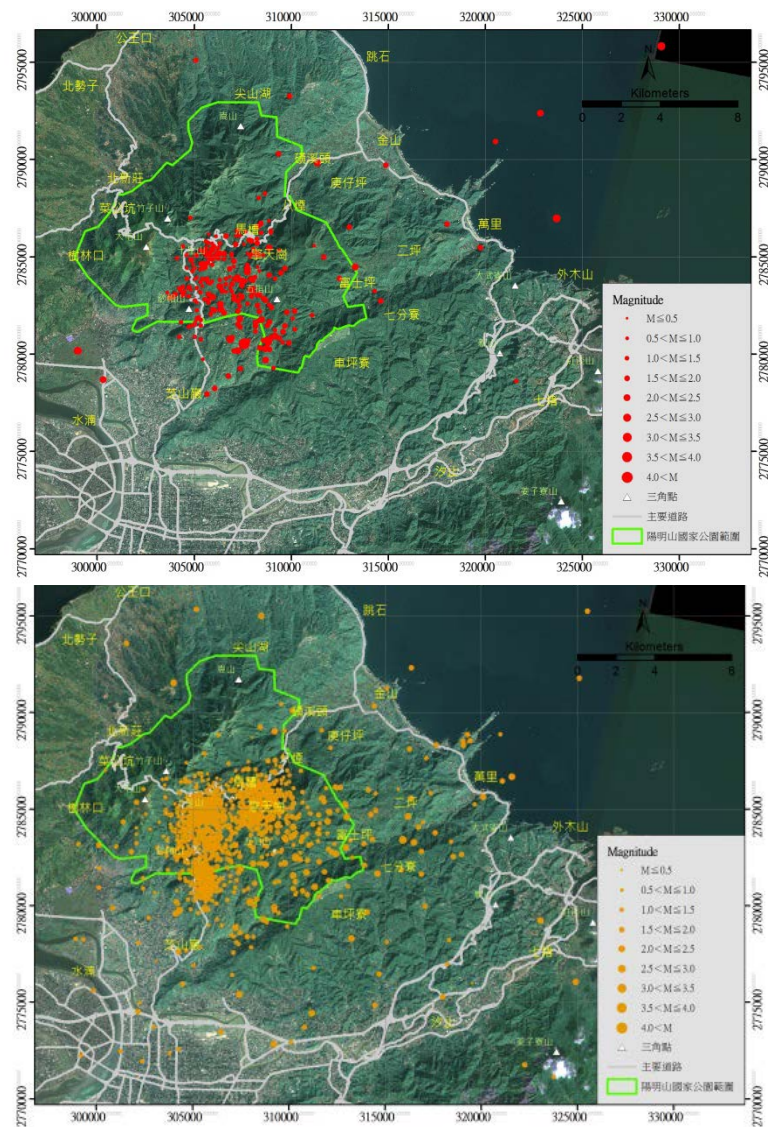
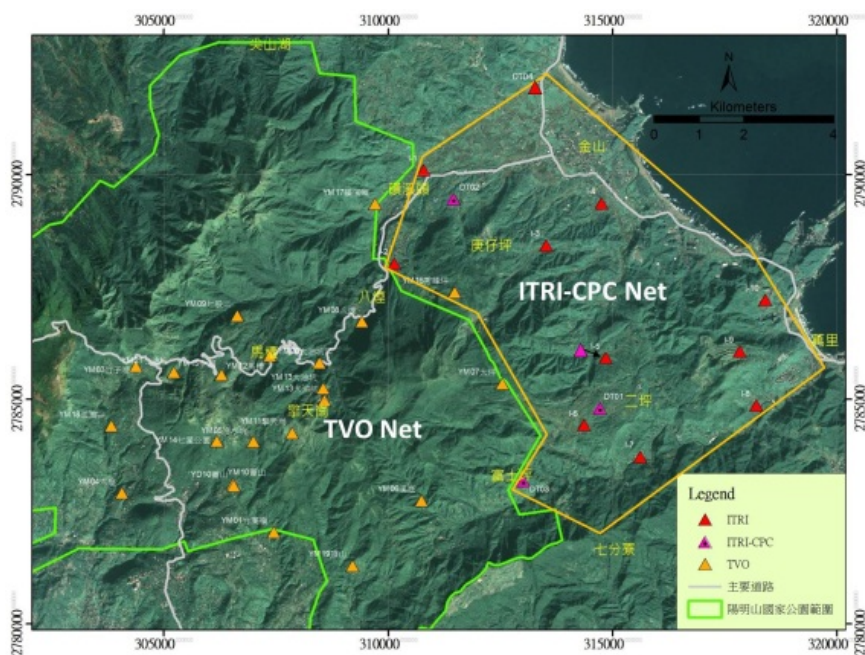
電性地層

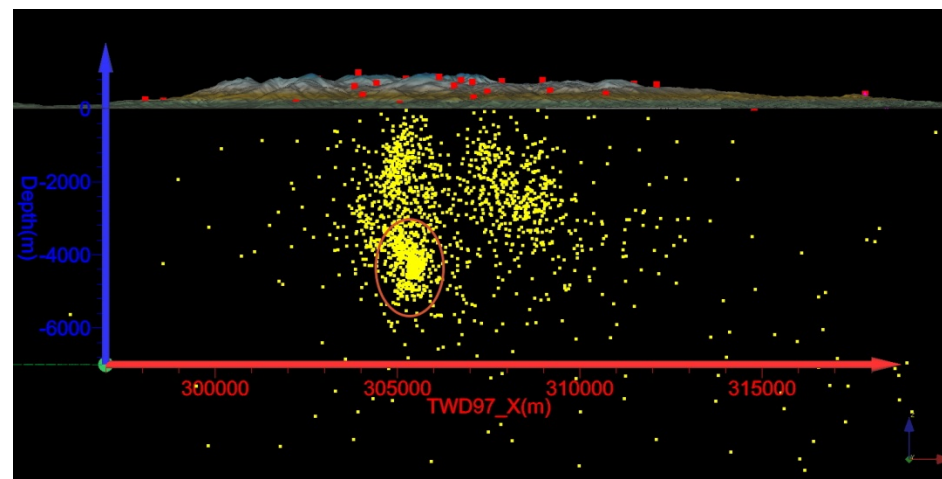
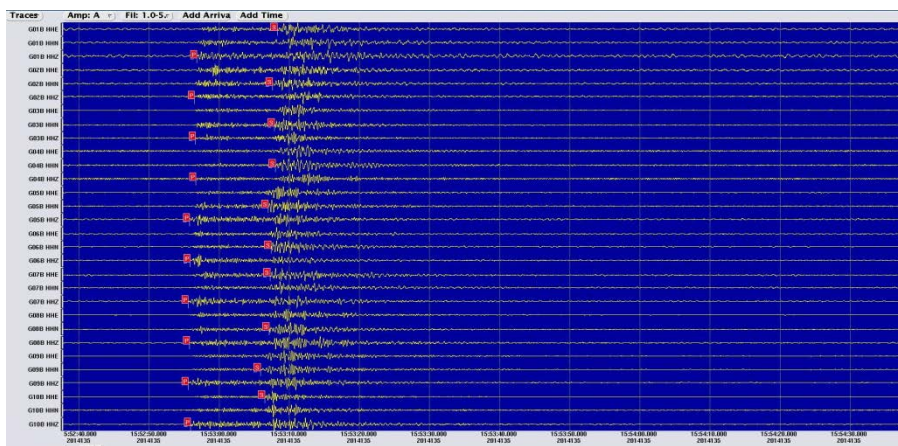
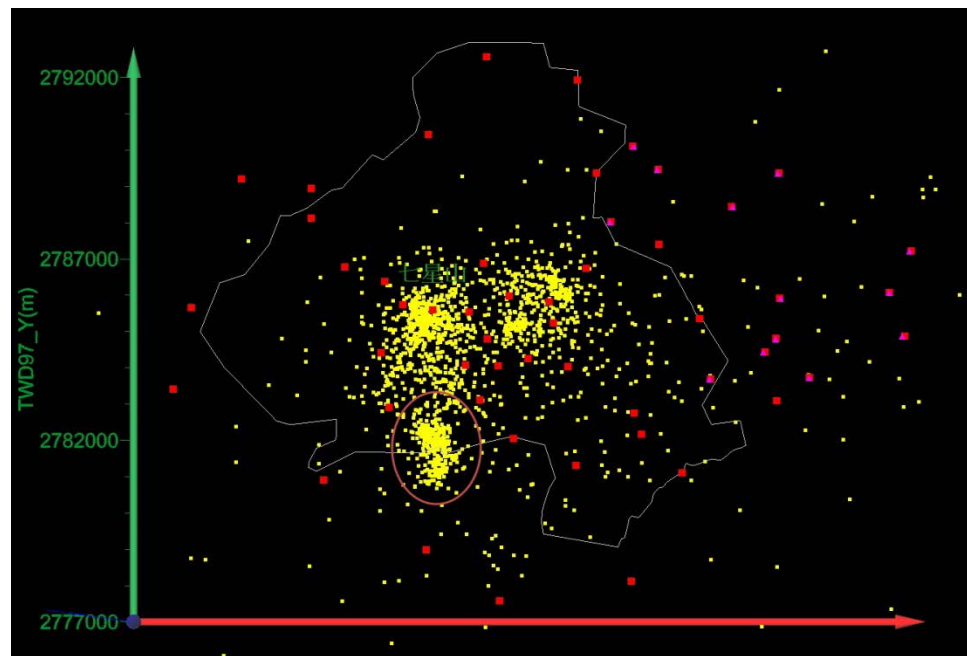


- 15 Ohm-m 等電阻面顯示蓋層分布。
- 低電阻蓋層構造以七星山-馬槽-大油坑區域為中心，往東北-西南方向帶狀延展且變深，指示地熱潛能區之分布。

微震層析成像

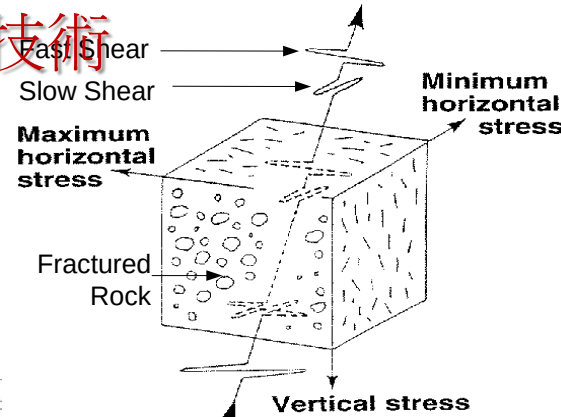
- ✓ 微震可以在評估選址及O&M階段皆扮演重要角色。
- ✓ 以大屯火山實測微震資料，進行地熱區岩體速度參數成像分析。以準確**掌握熱液活動裂隙位置及深層蘊熱岩體特性**，作為後續深層地熱開發及生產監測的參考依據。



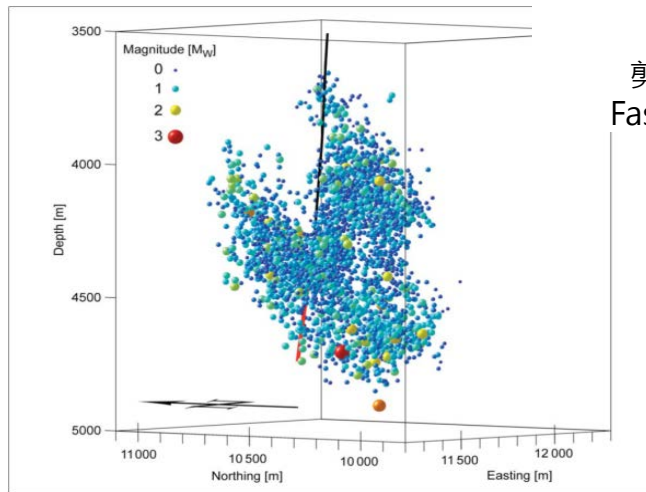


技術發展重點：

- 雙重差分定位成像技術
- 剪力波分離解析技術

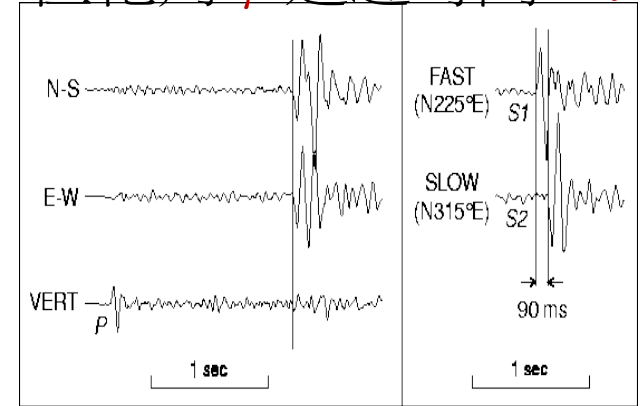


剪力波經破碎地層分離成
Fast Shear and Slow Shear

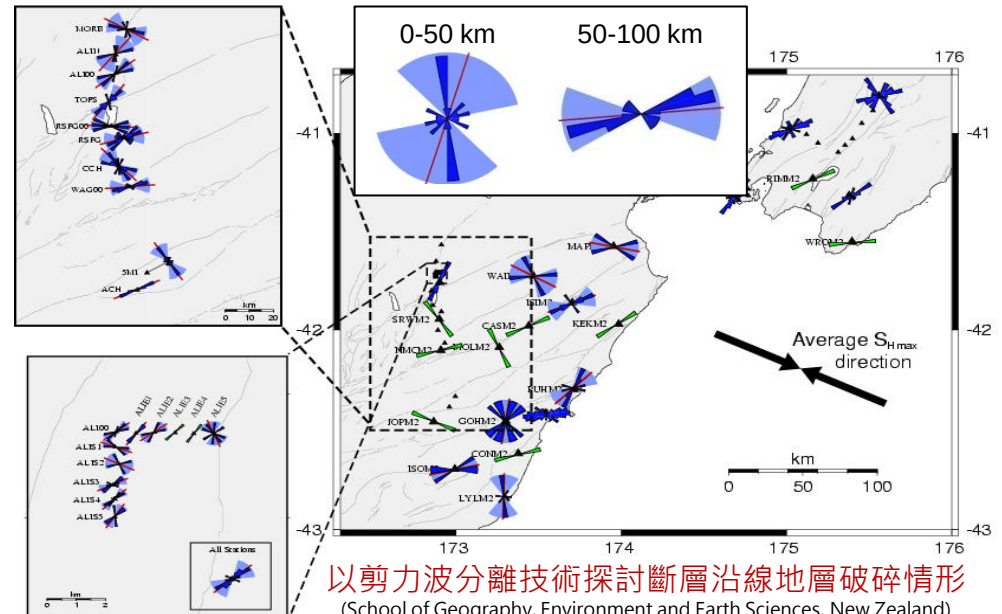


微震監測因注入引起的地層破裂情形 (Dyer, et al, 2008)

極化角 ϕ 延遲時間 Δt

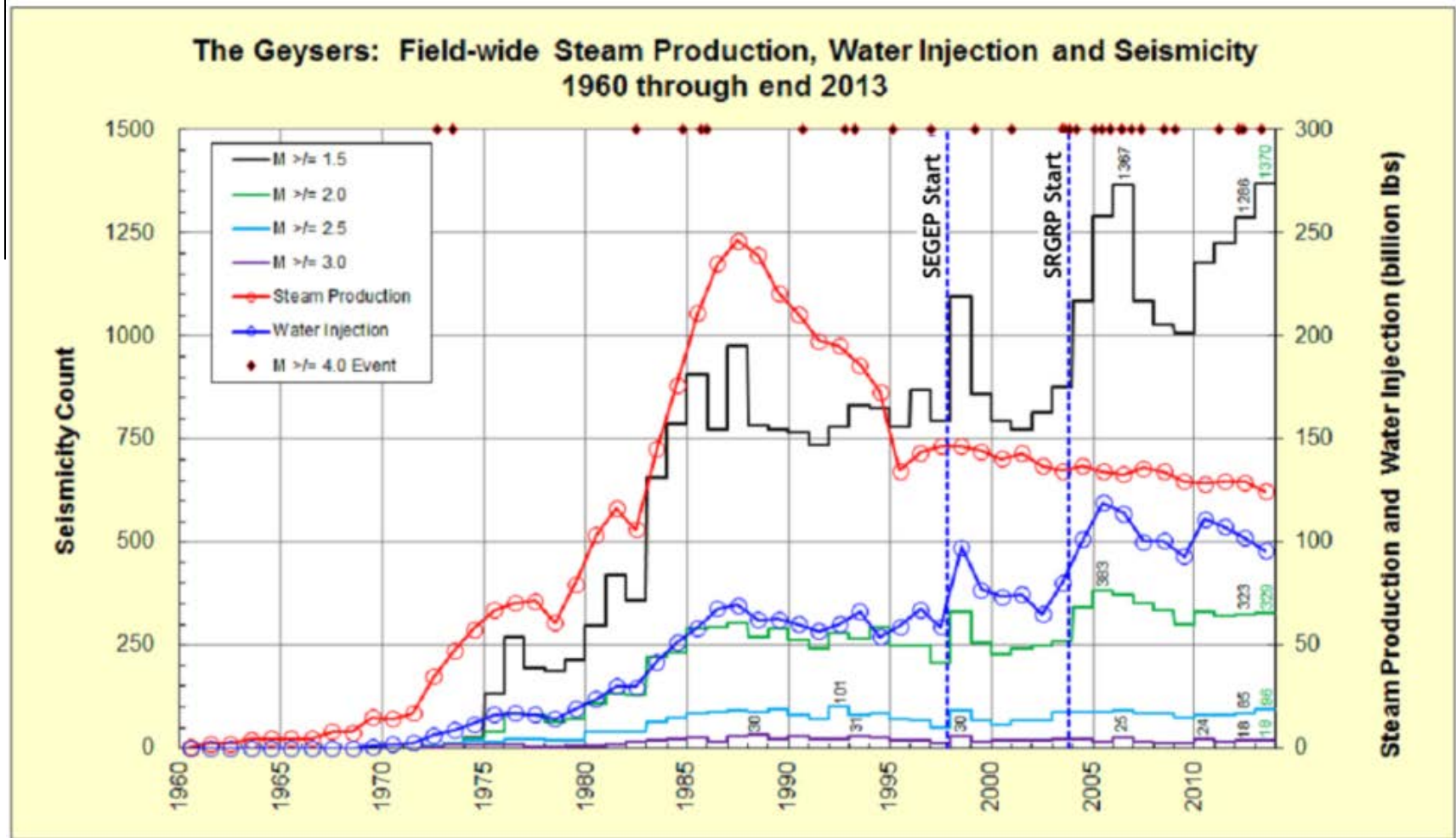


(左)原始地震波紀錄；(右)經分離處理之快波與慢波

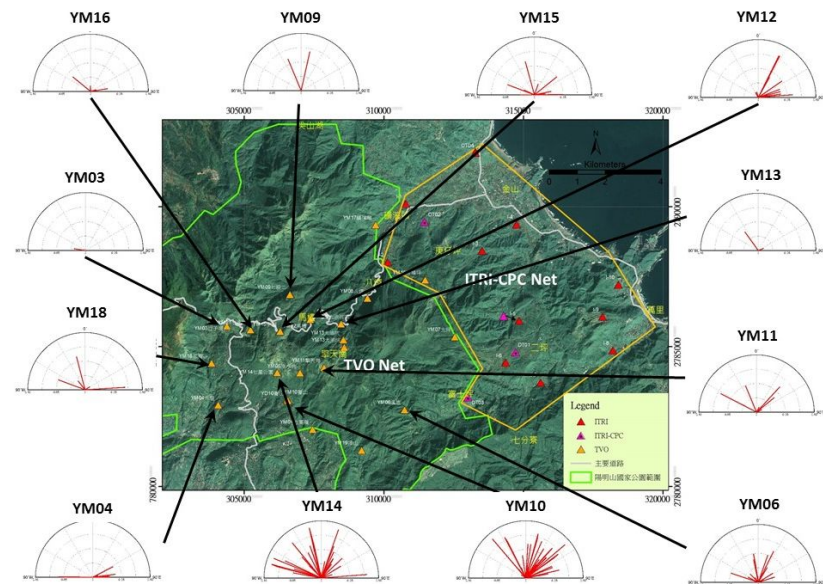
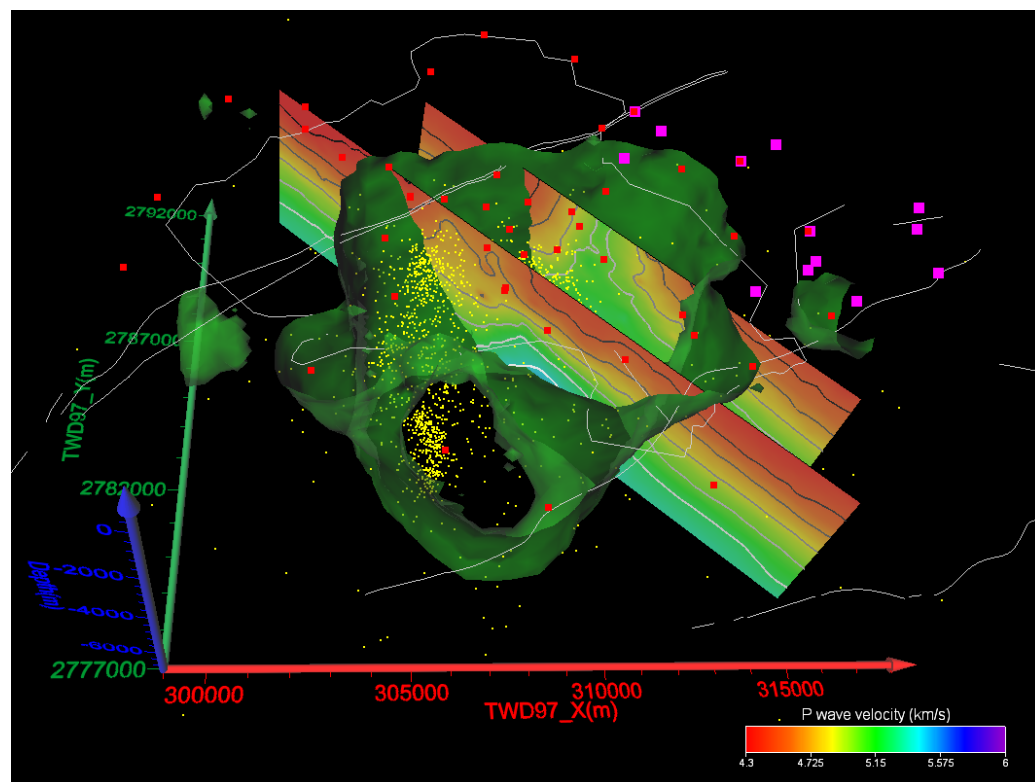


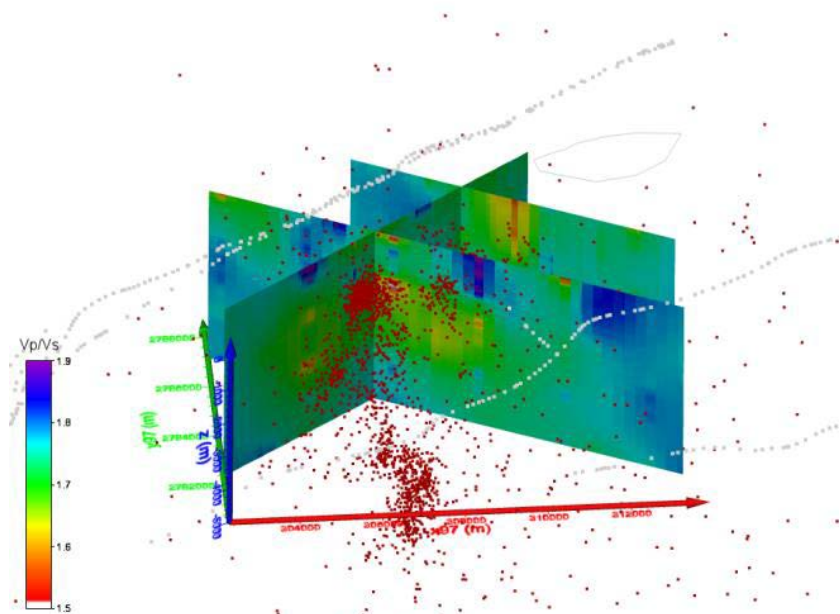
以剪力波分離技術探討斷層沿線地層破裂情形
(School of Geography, Environment and Earth Sciences, New Zealand)

Geyzers 電廠注水與引發微震



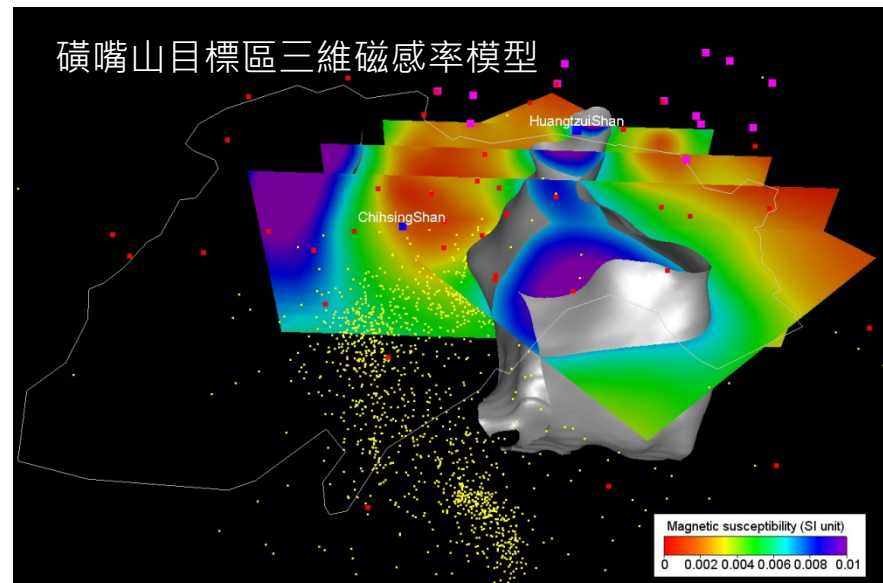
大屯山速度成像與裂隙特性



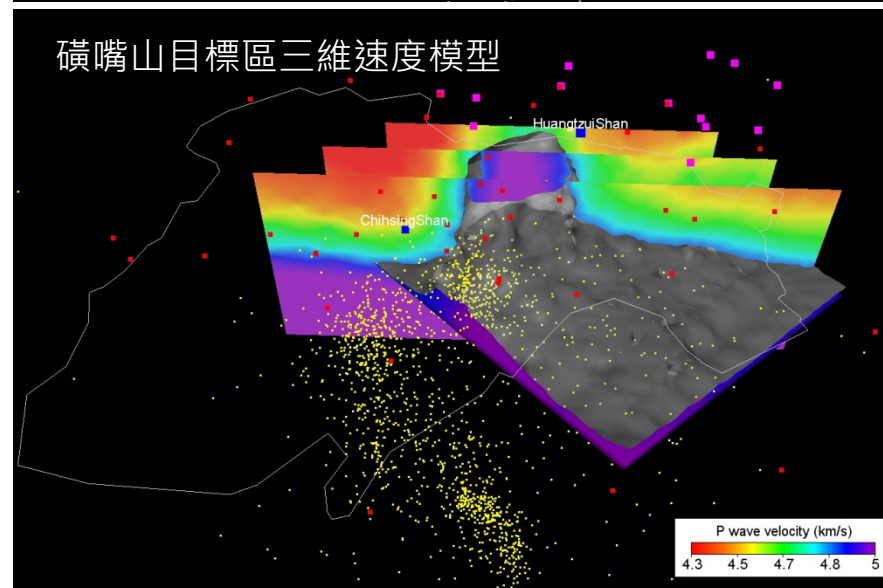


Vp/Vs distribution and earthquake locations (red dots) at the TVG.

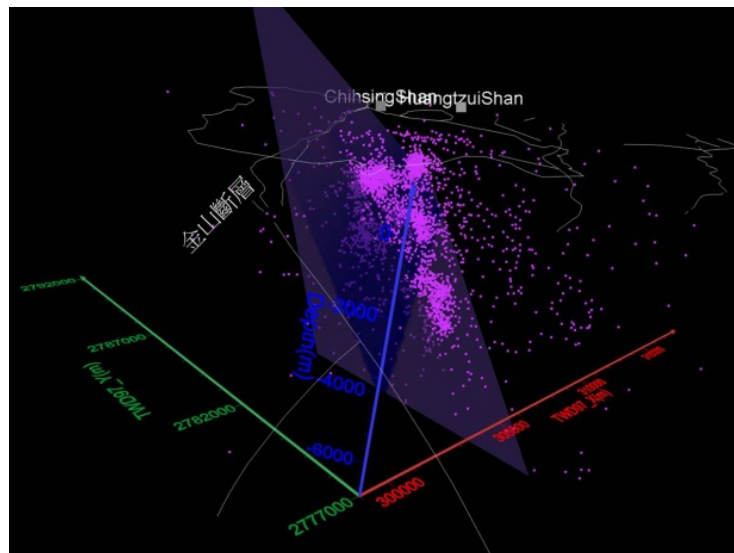
磺嘴山目標區三維磁感率模型



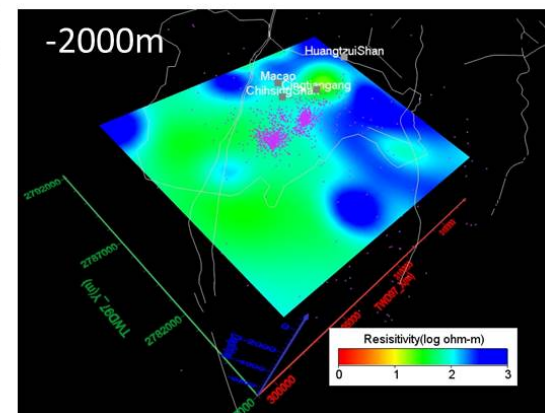
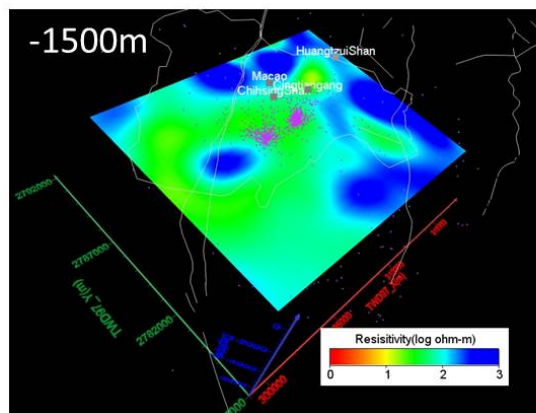
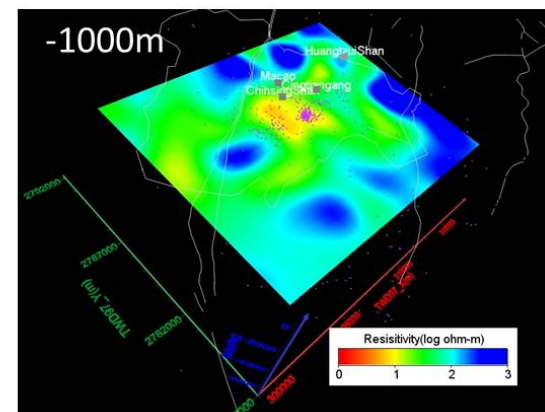
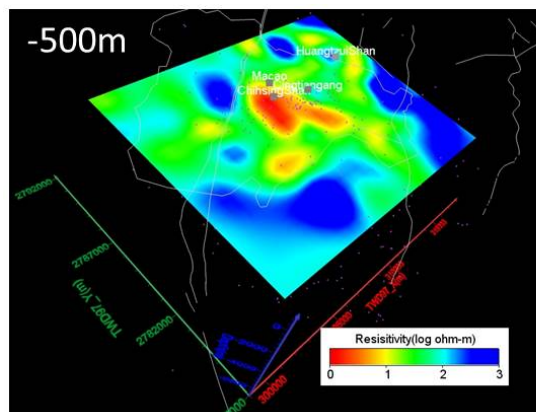
磺嘴山目標區三維速度模型



大屯山微震分布與地層速度



微震活動與虛擬金山-山腳斷層面相關圖

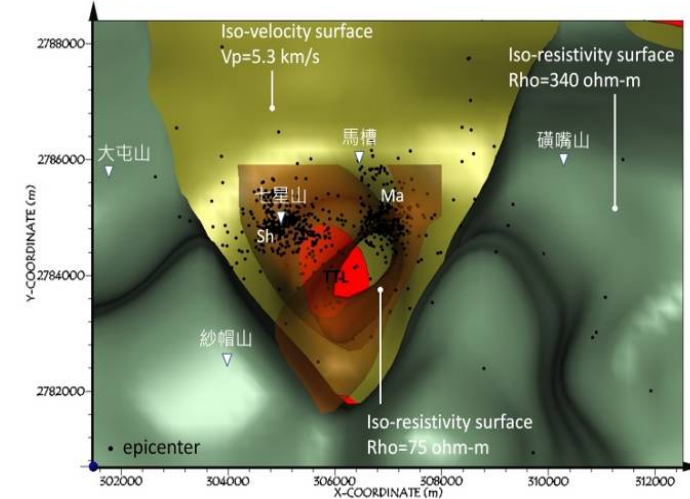
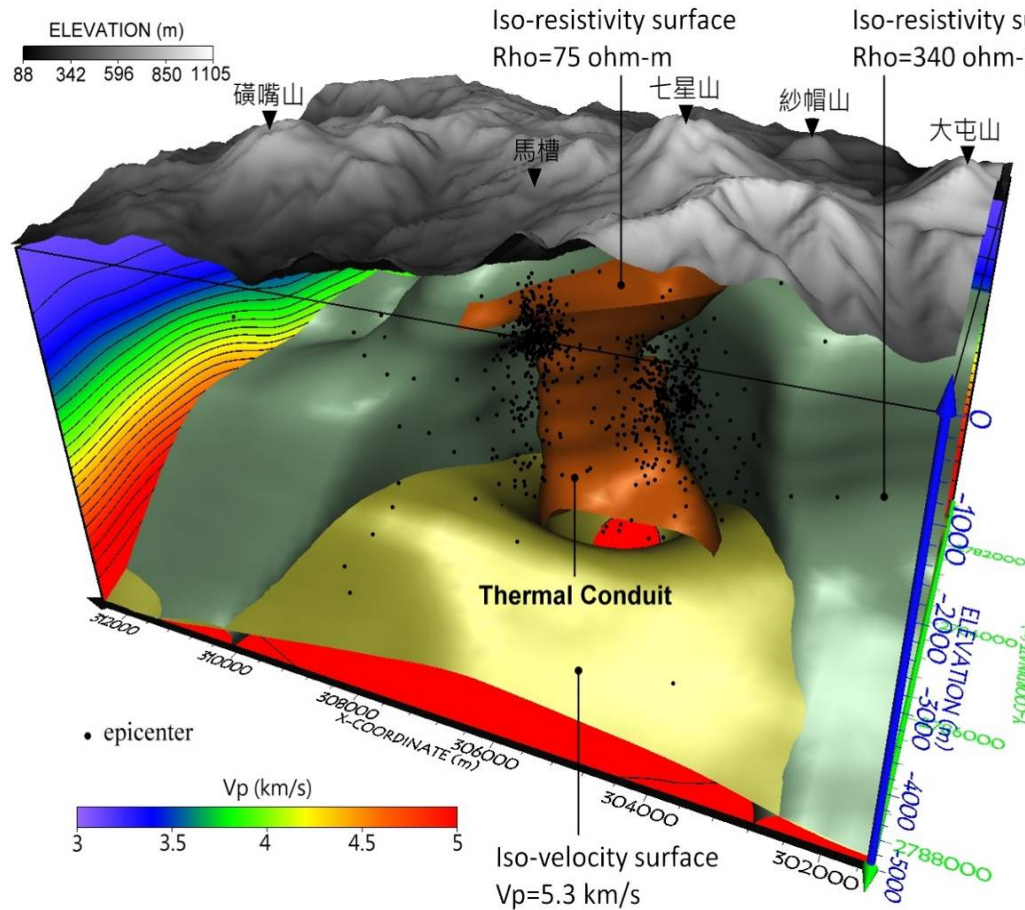


低電阻異常帶與熱微震活動相關性

- 震源深度大多淺於5公里，從地震活動集中趨勢，約略可分為數群地震叢集，分別位於**七星山**、**馬槽**與**大油坑**底下，前兩群地震淺於2公里，**大油坑**下方之微震叢集相對較深，約在3公里附近。
- 由微震活動與虛擬**金山-山腳斷層面**相關圖顯示，主要微震活動分布在斷層面**東南側**及其深度延伸方向。

大屯山微震分布與速度/電阻

大屯山測試成果



三維速度/電性構造及震央分布正視圖

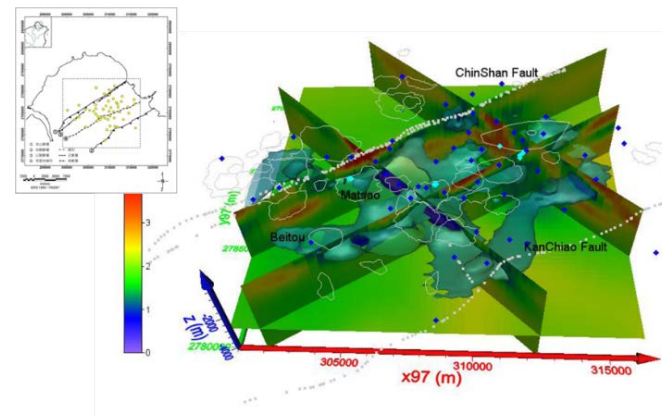
3D速度/電性/構造及震央分布（視角由東北向西南方向觀察）



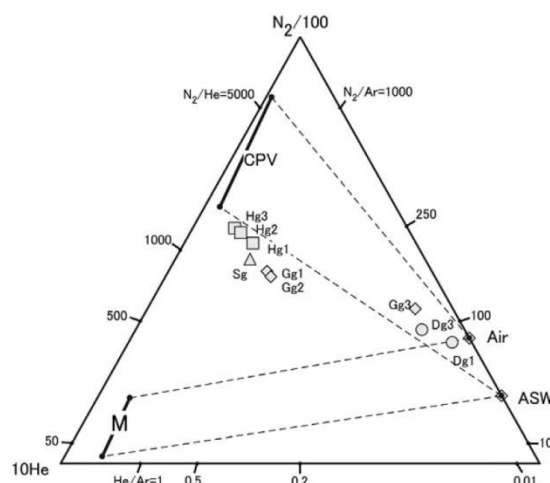
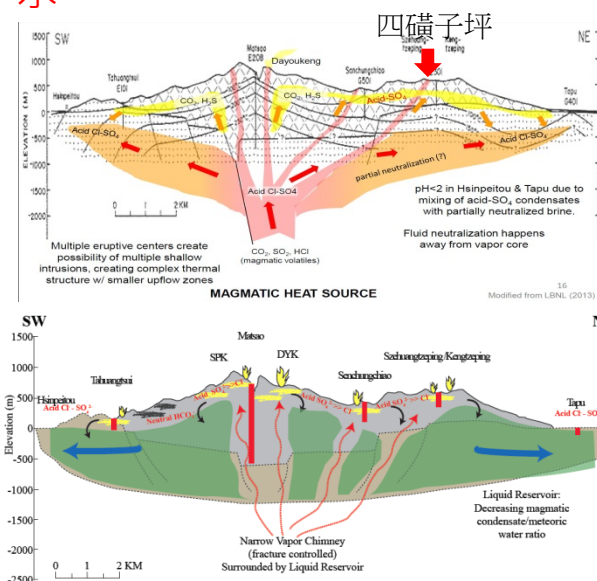
肆、大屯山四磺坪鑽井

初步地熱概念模式

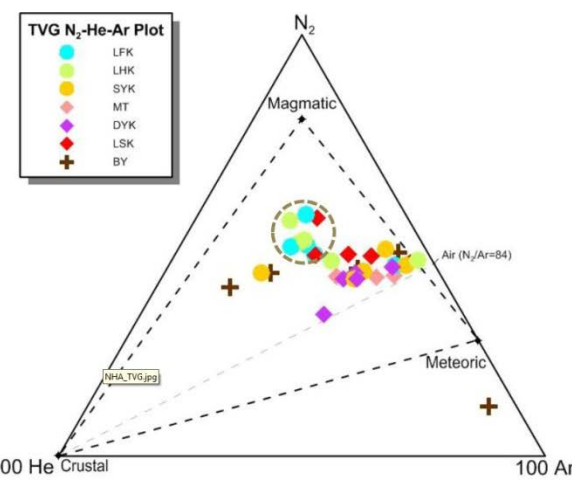
- **熱源:**大屯火山以大油坑為噴發中心，向東北之金山及西南新北投地區火山成分漸減
- **水文:**以七股-冷水坑一帶分為南坡與北坡兩個獨立水文系統，二地區之水體來源不同
- **蓋層:**低電阻帶以七星山-馬槽-大油坑區域為中心，往東北-西南方向帶狀延展且變深，指示地熱潛能區之分布。
- **溫度:**由氣體地體溫度計算，推測大屯山地區的地下氣體平衡溫度約在200-300°C範圍
- **儲集層:**火成岩下方之五指山層為潛在的地熱儲集層，由G501岩心具備碳酸鈣推測，儲集層之地熱流體應為中性鹼水



三維低電阻分布圖

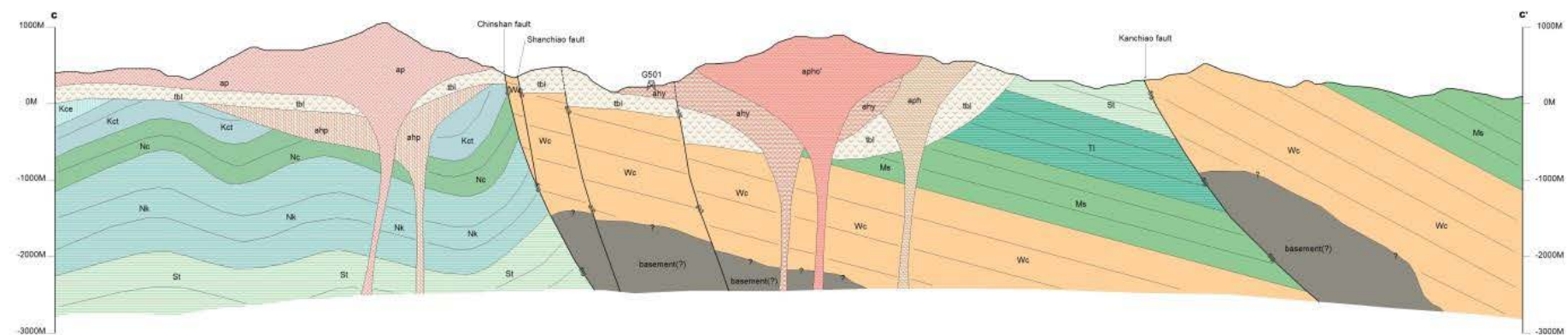
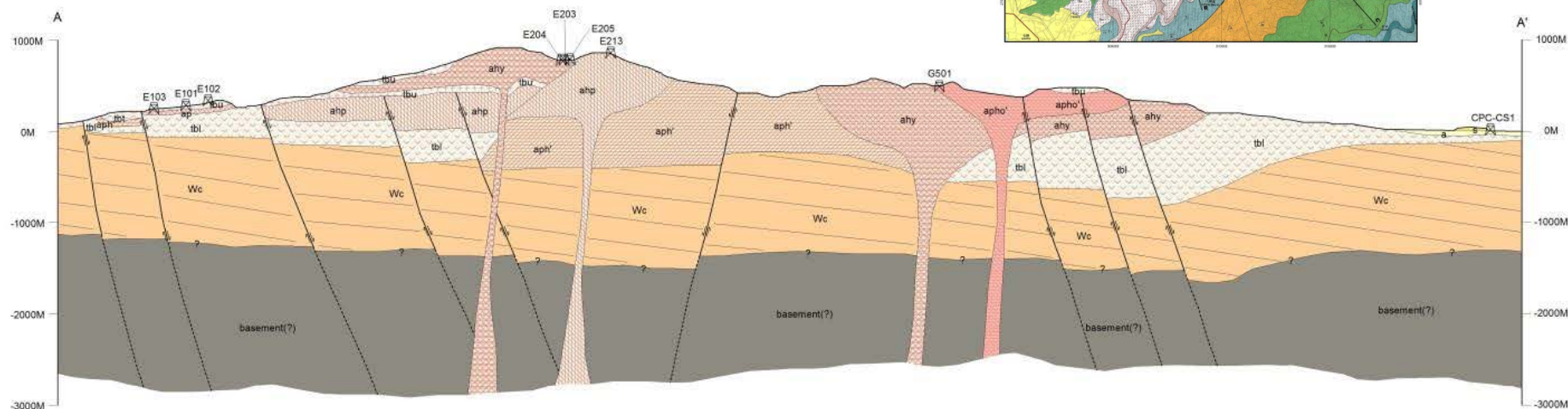
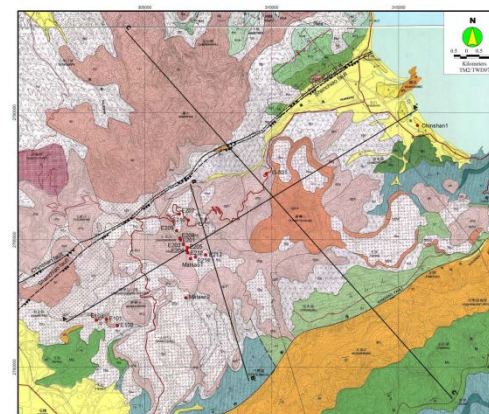


THE FUMAROLIC GASES SAMPLED ARE PRODUCTS OF ANDESITIC GASES MIXED WITH AIR OR AIR SATURATED WATER



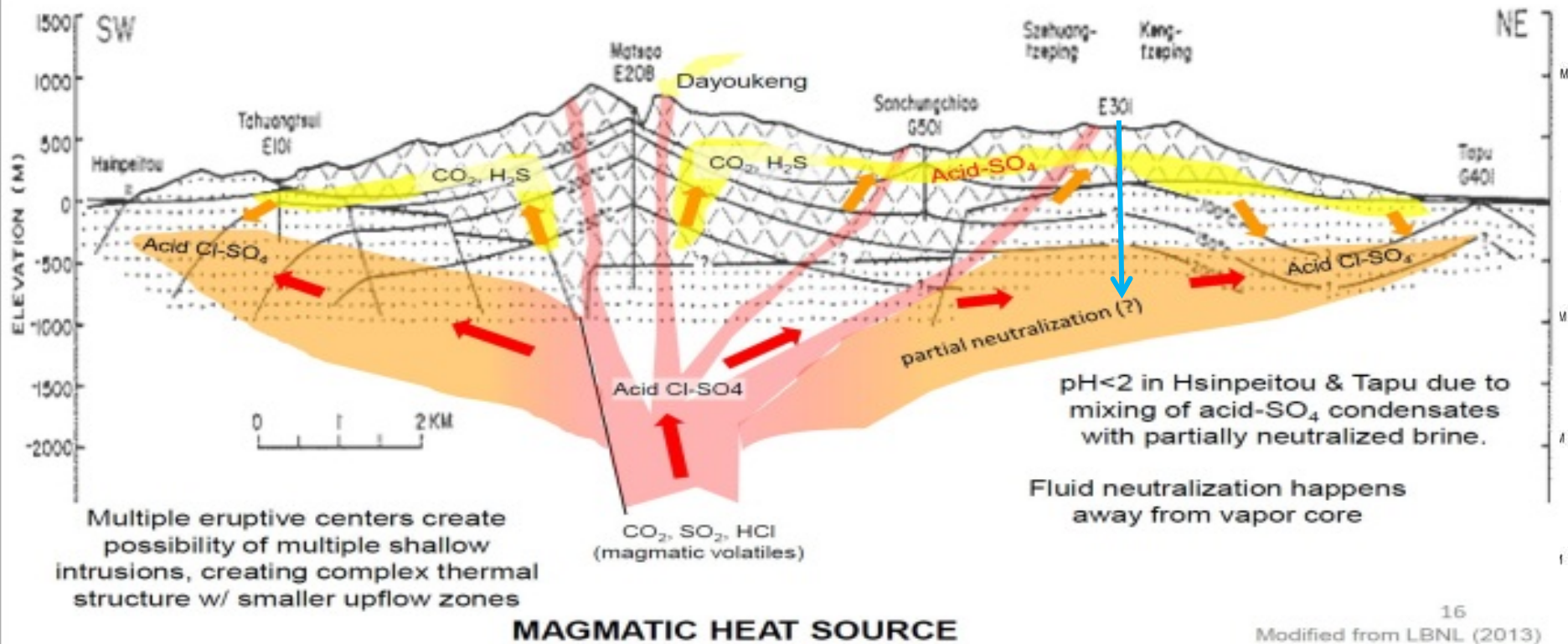
THE MORE PRONOUNCED SHIFT TOWARDS MAGMATIC APEX OF LOWER ELEVATION FUMAROLIC GASES MAY BE REFLECTIVE OF PRIMARY RESERVOIR

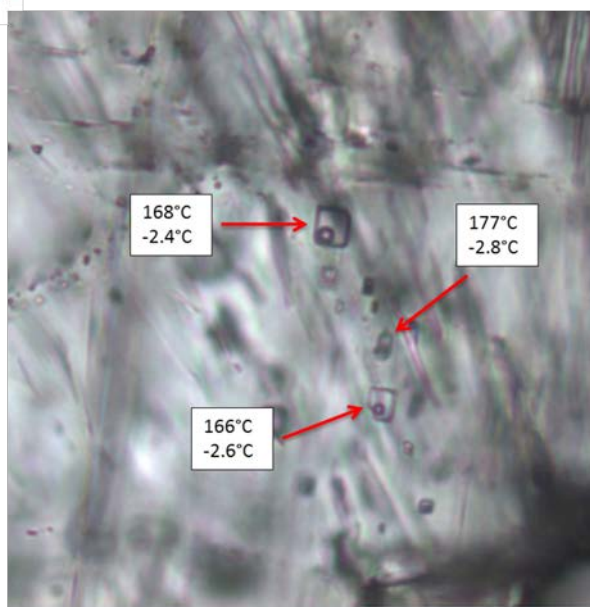
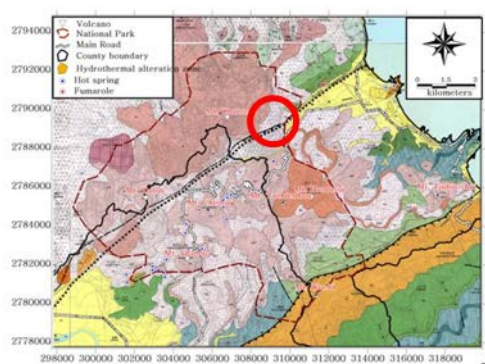
大屯火山初步地熱概念



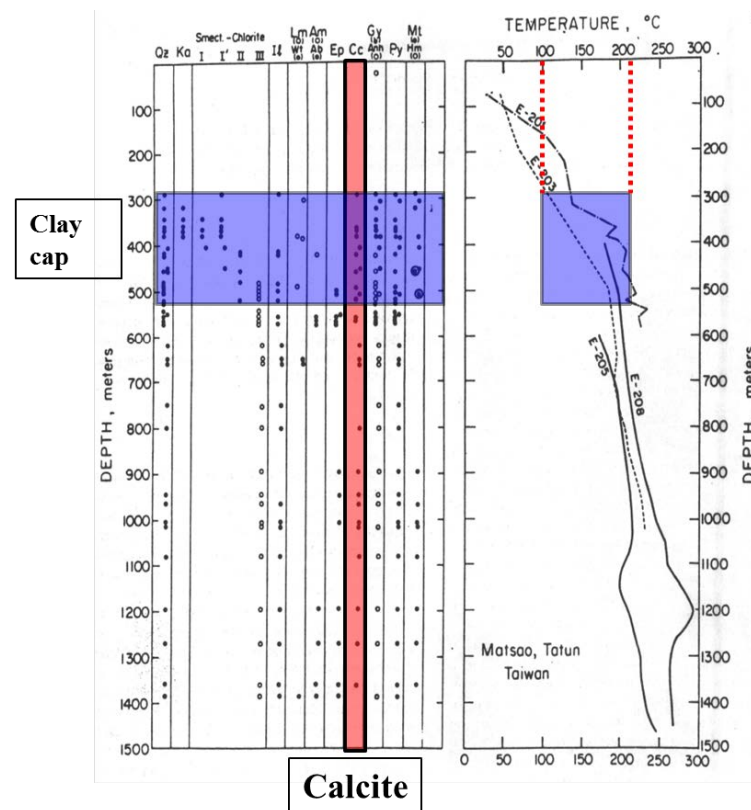
SW

NE





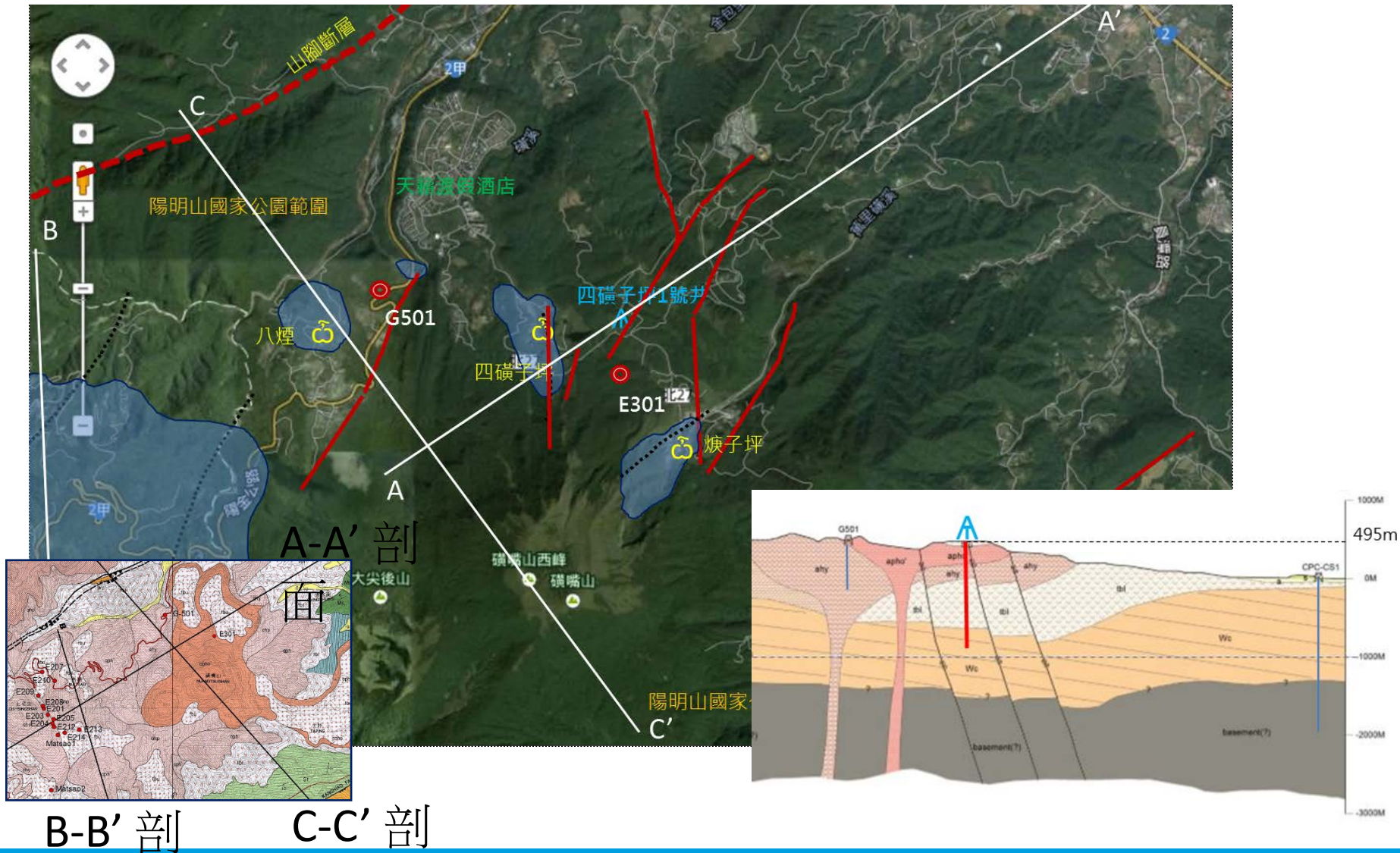
地熱探勘井編號G501深度589公尺處碳酸鈣岩脈液包體溫度分析



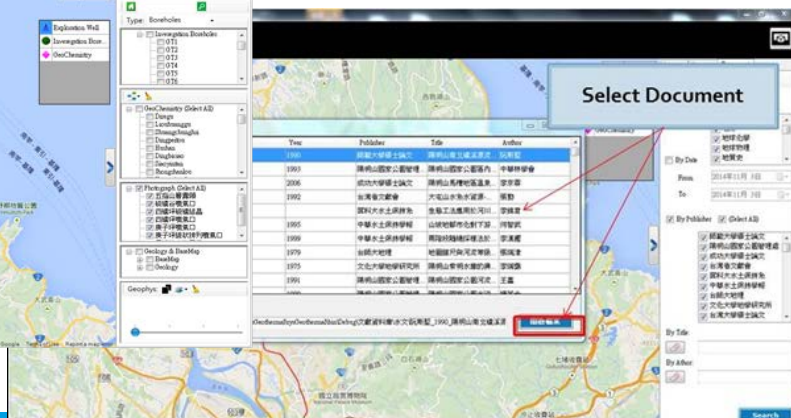
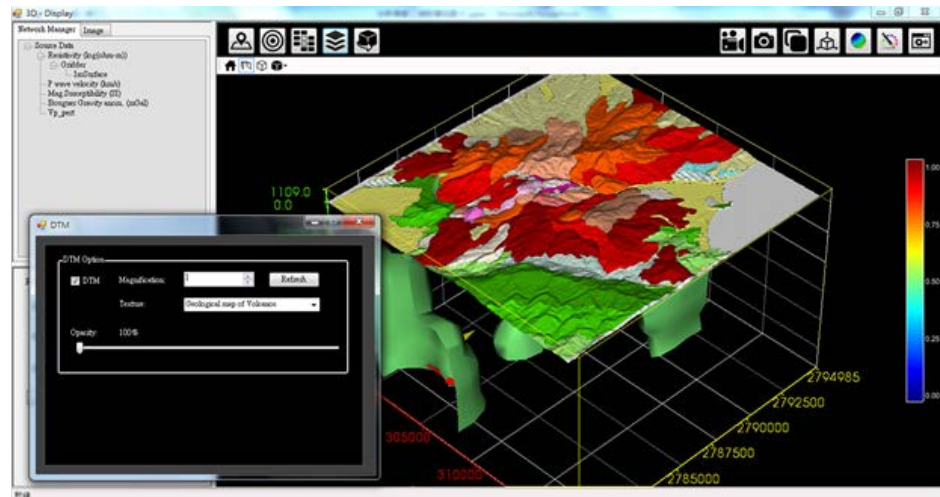
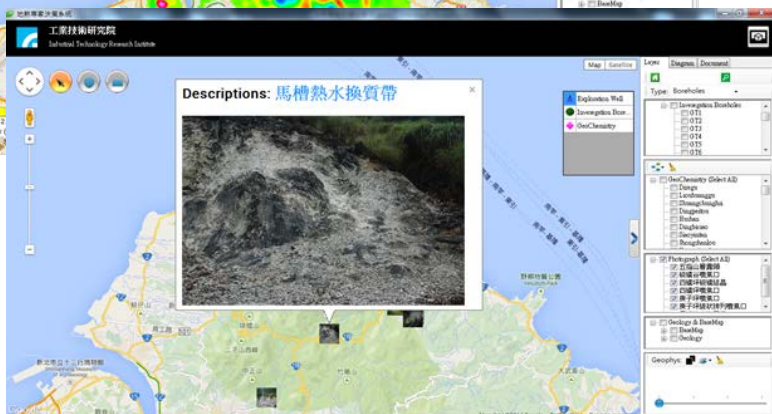
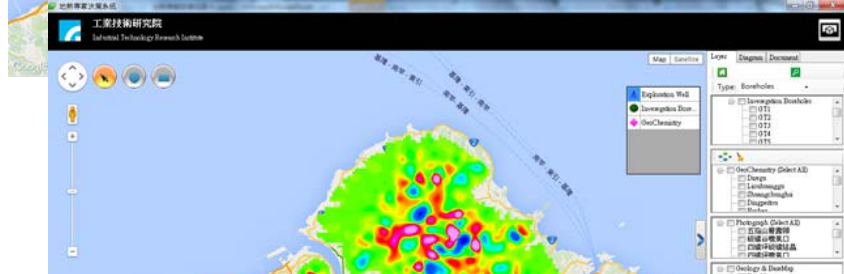
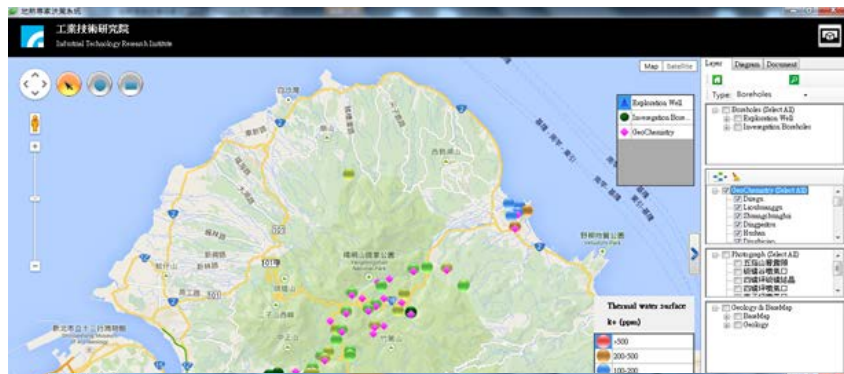
馬槽地區岩屑XRD分析與溫度分布圖

地質構造

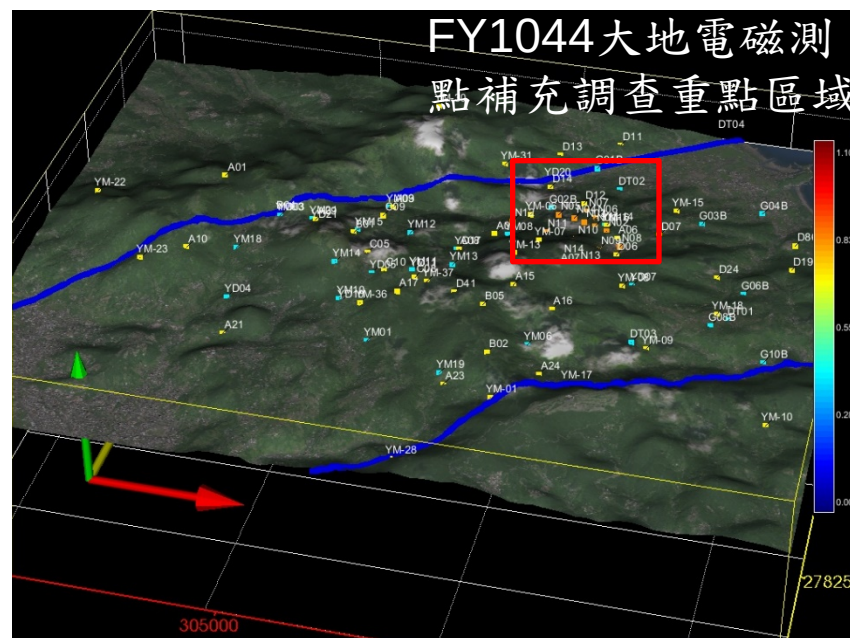
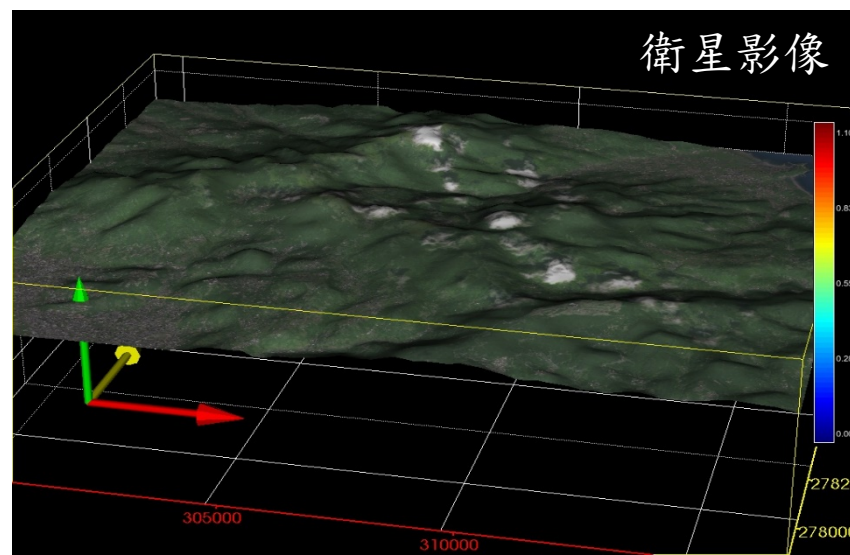
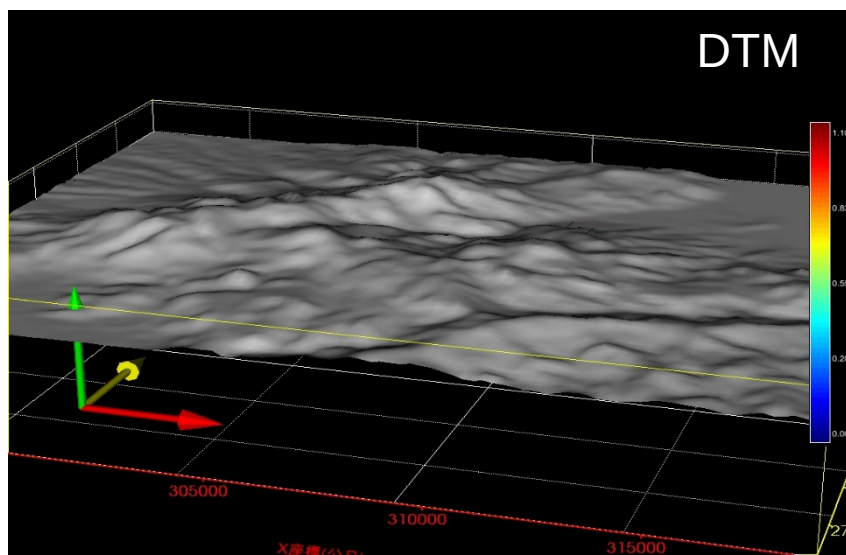
- 依據初步地質剖面推估，新井可鑽穿火成岩到達目標層五指山層



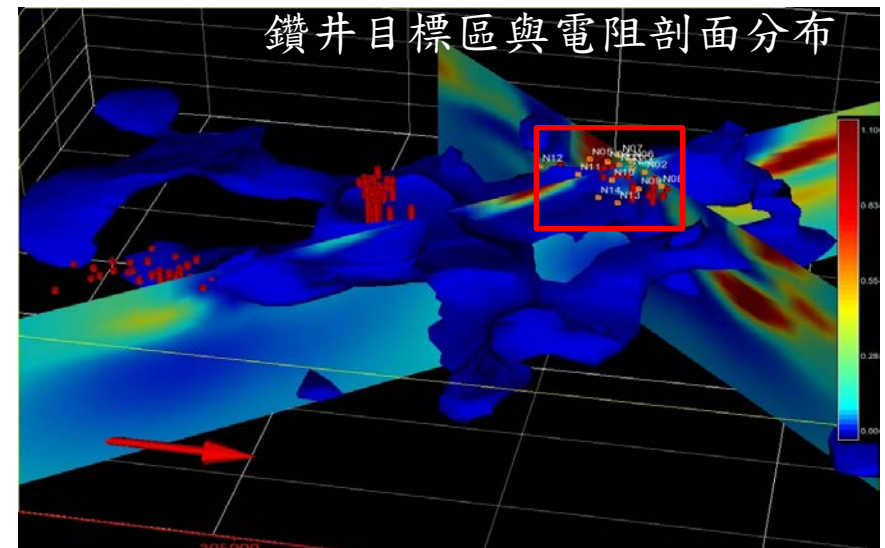
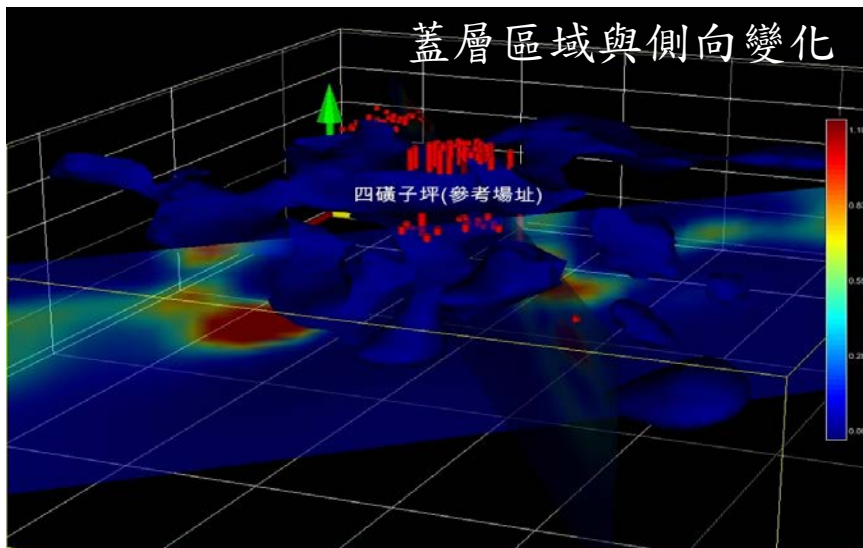
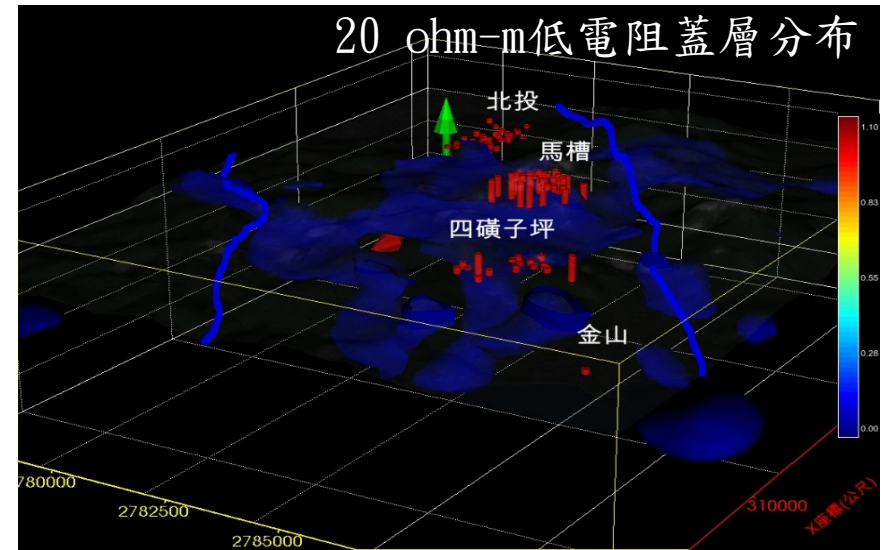
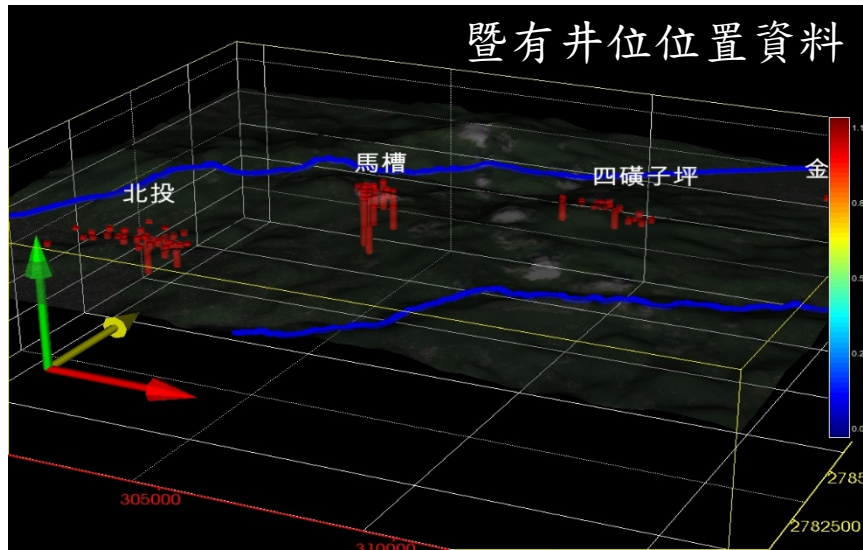
專家決策輔助系統



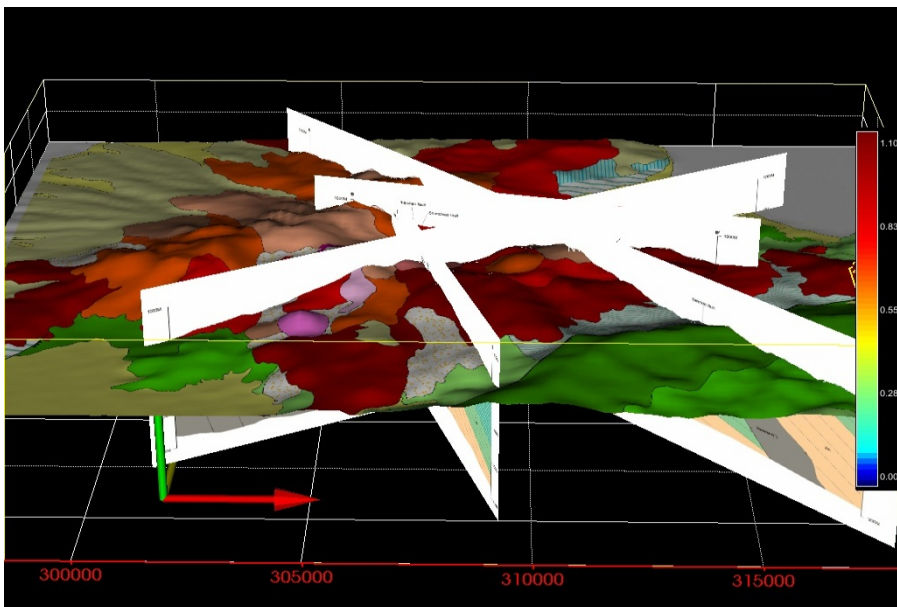
地熱輔助決策系統大屯山地熱鑽井選址



地熱輔助決策系統大屯山地熱鑽井選址



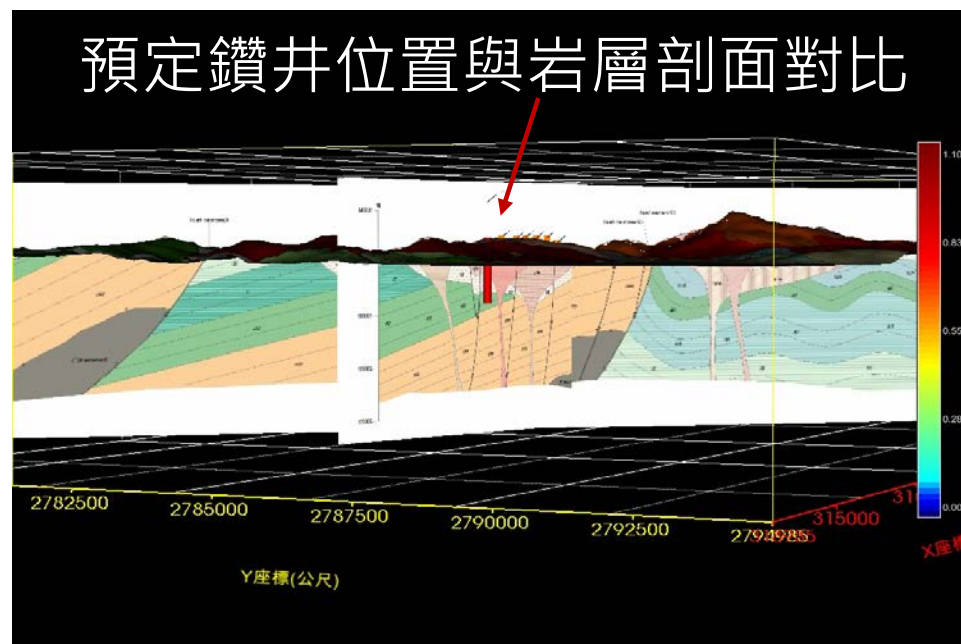
地熱輔助決策系統大屯山地熱鑽井選址



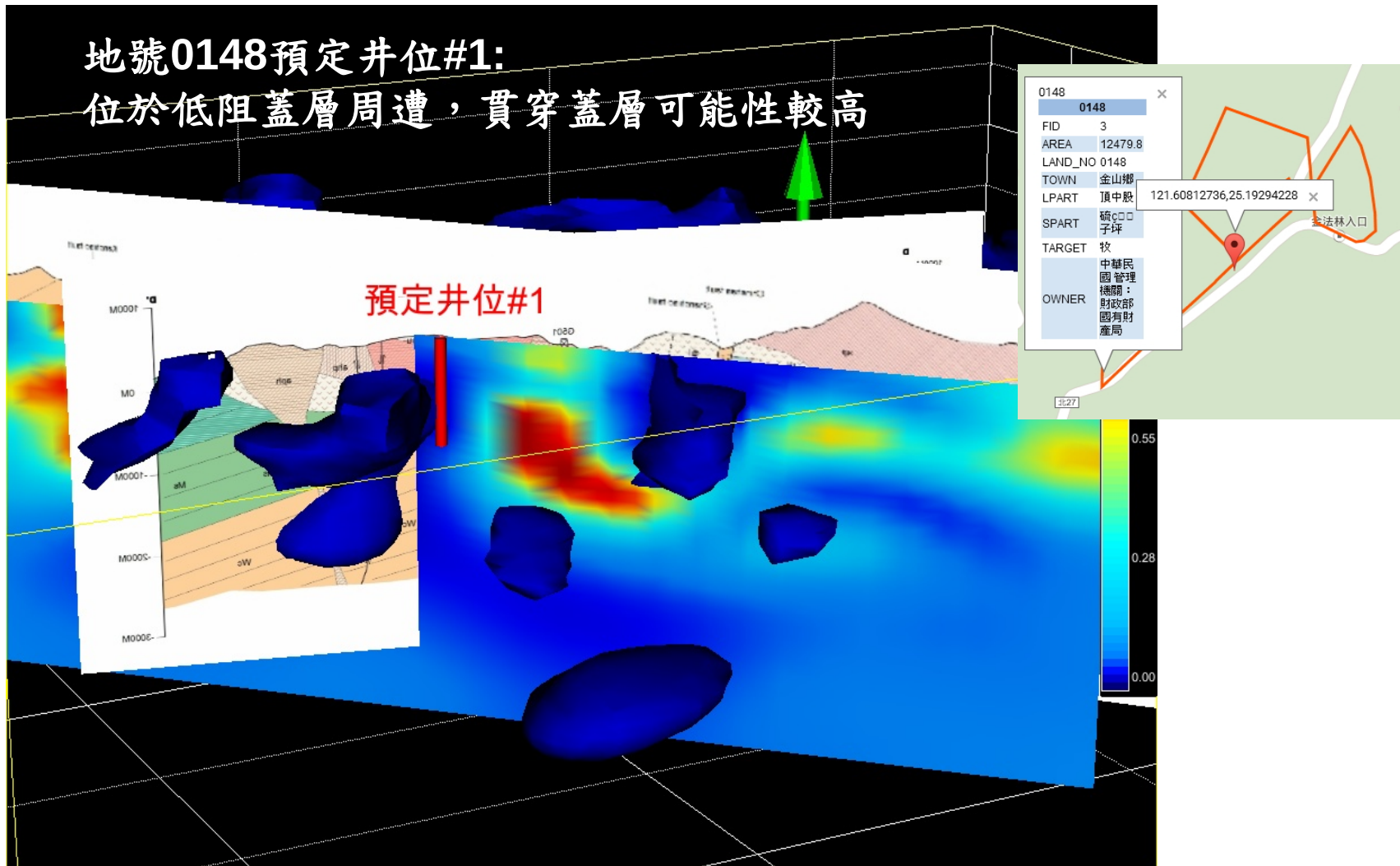
二維地質圖空間化與三維資料結合：

- 建立三維地質空間架構
- 提供空間圖資檢核平台
- 了解可能鑽遇之地質岩性
- 評估鑽井可能風險

預定鑽井位置與岩層剖面對比

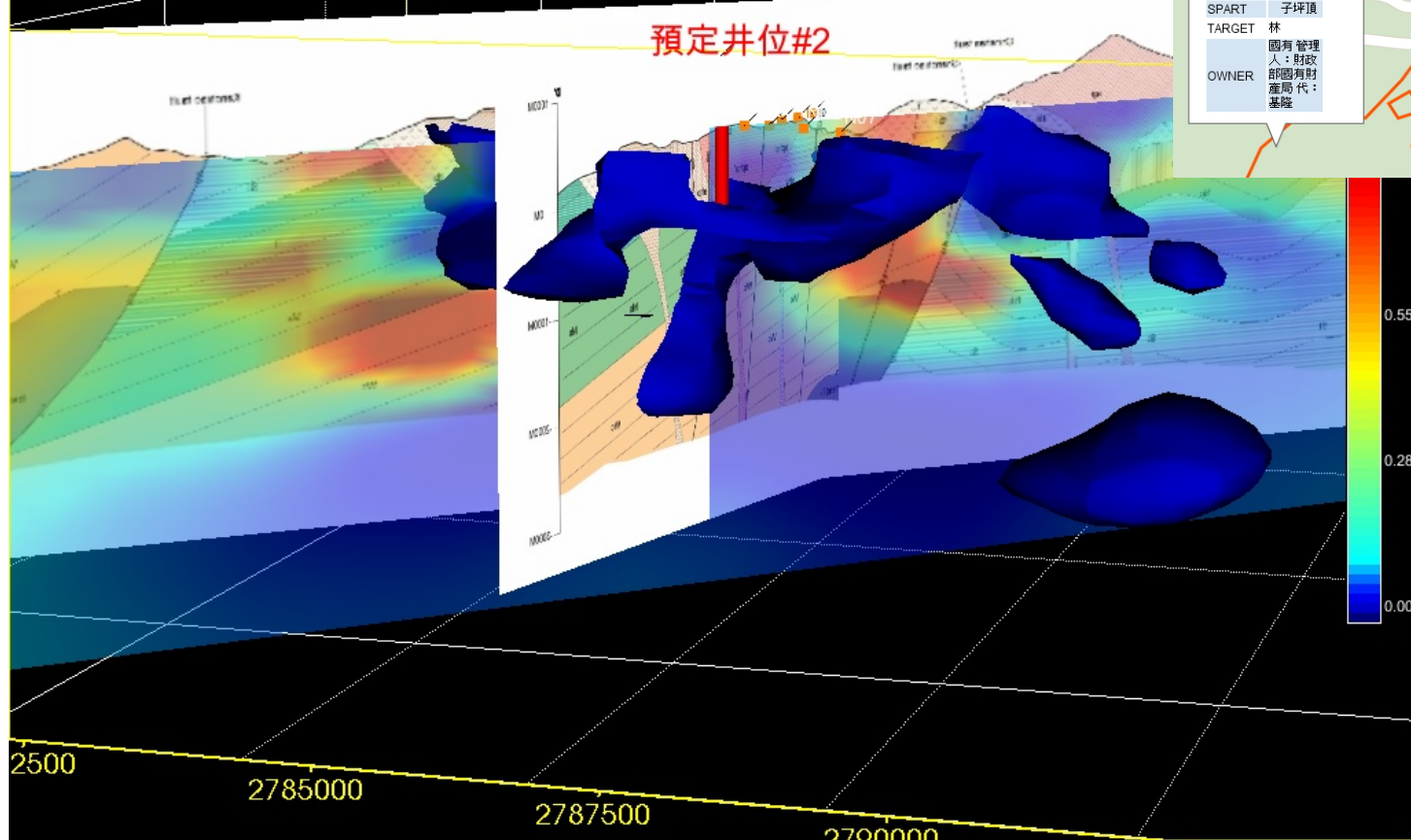


地熱輔助決策系統大屯山地熱鑽井選址

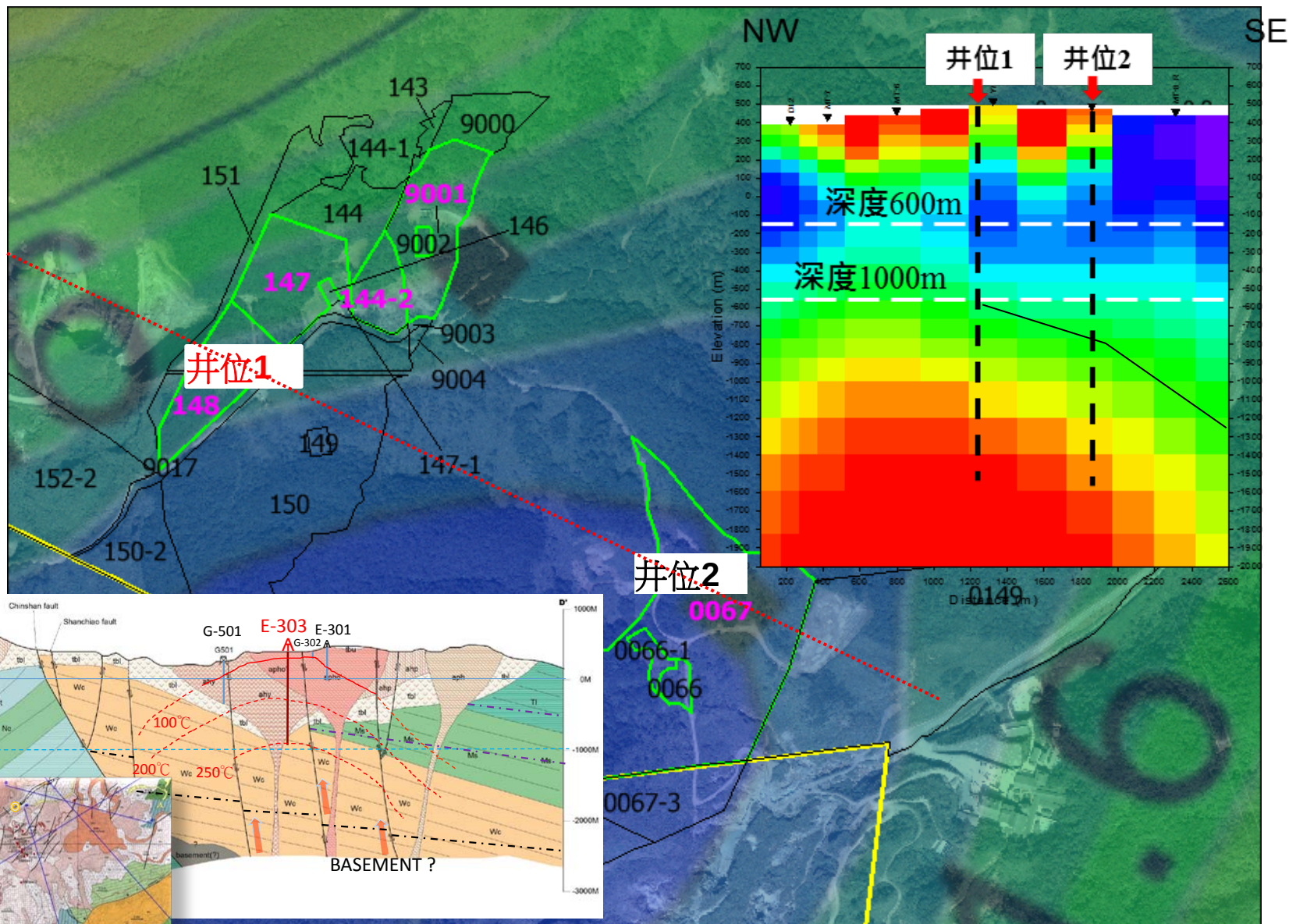


地熱輔助決策系統大屯山地熱鑽井選址

地號0067評估井位#2:
可能深入低阻蓋層頸部，預定1300m井
深可能無法打穿蓋層。



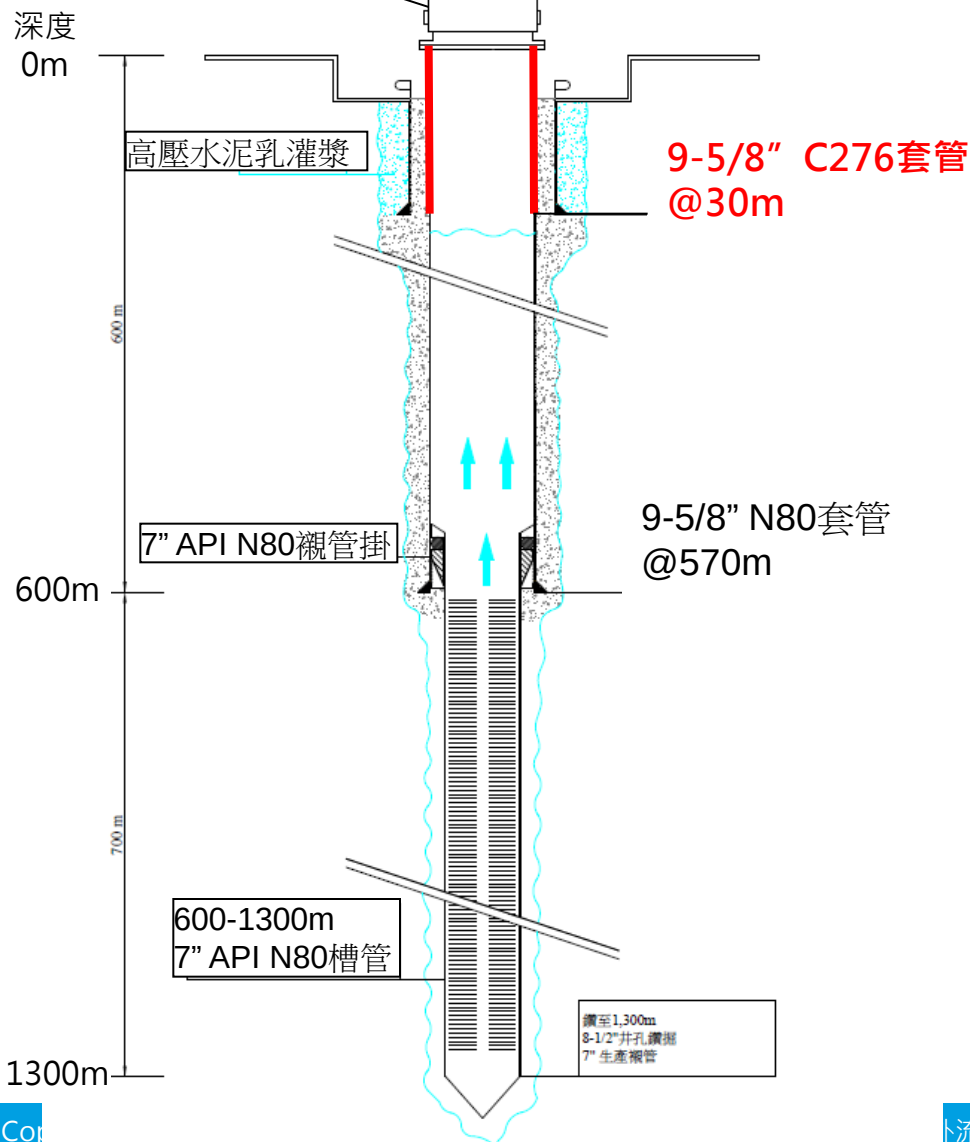
MT低電阻區_1000m深





鑽井規格與進尺規劃

8" C276@600LB
閥門



取岩心

pH v.s 深度推估

溫度壓力量測

裸孔電測(<70°C)

鑽進到600公尺後以水泥封閉
600公尺-650公尺取岩心

取岩心

pH v.s 深度量測

溫度壓力量測

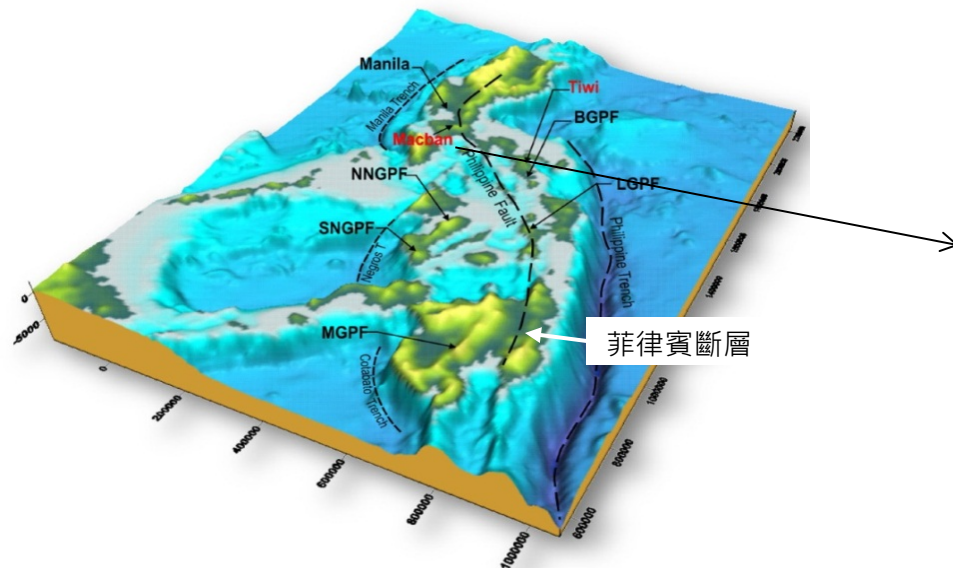
產能測試

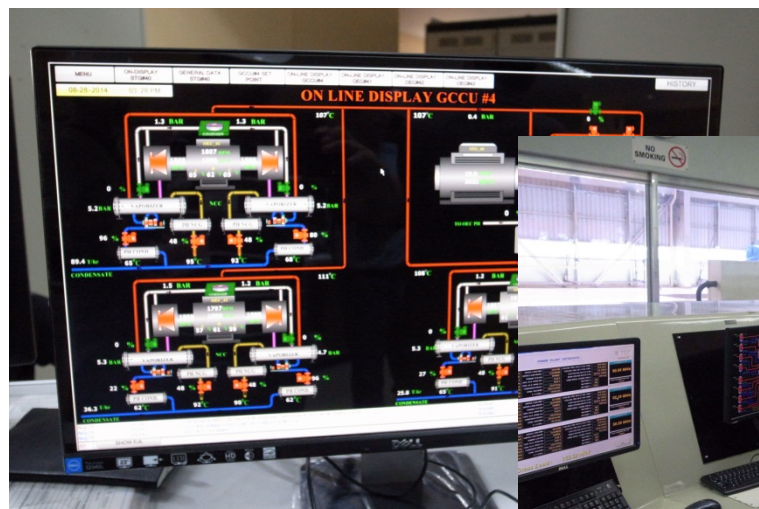
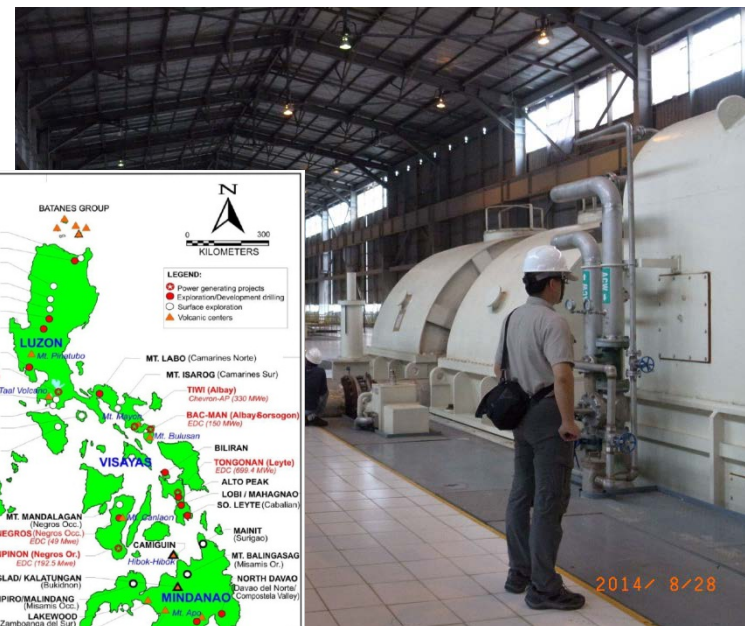
井下原液採樣

FY104

FY105

PetroEnergy, MGI, Macban Philippine







謝謝各位

地球物理領域的現在與未來？

防災 環境

- ✓ CCS二氧化碳封存
- ✓ 用過核燃料封存場址

資源技術

- ✓ 地熱開發與營運
- ✓ 風力開發
- ✓ ...