

出國報告（出國類別：開會）

參加 **AAPG** 第三屆油氣-地熱跨界技術 研討會

服務機關：台灣中油股份有限公司

姓名職稱：陳炳誠 組長

曾衡之 地物師

派赴國家：瑞士

出國期間：108 年 4 月 8 日至 4 月 12 日

報告日期：108 年 5 月 4 日

摘要

美國石油地質師學會(America Association of Petroleum Geologists, 簡稱 AAPG) 為國際上著名的專業科學家組織, 該學會原為美國境內石油探勘界專業人士所組成之最大石油科技學術團體, 現今已為世界性石油探勘技術學術團體。因石油天然氣探勘與地熱探勘在技術上有許多類似之處, 且油氣探勘之技術已相當成熟, 可用以協助重要之基載綠色能源之地熱能源探勘技術發展, 故 AAPG 舉辦國際油氣-地熱跨界技術研討會, 進行兩種產業之技術人員交流。

本研討會共進行兩天, 討論的主題包含地熱探勘標的的定義及如何在鑽前降低風險、地熱探採技術的運用-如何符合成本效益、地熱鑽井及完井技術及相關案例探討等。由此研討會得知石油天然氣相關產業如何應用其技術, 進行地熱探勘生產、降低地熱探勘風險及進行經濟分析。如果地質風險過高, 或沒有明確的掌控及降低風險, 很容易使地熱之探勘投資由可獲利變為無法獲利的投資案。而石油天然氣公司對地下地質的知識及技術正是可提供給地熱探勘開發之寶貴資源。本公司須善加應用石油天然氣領域的知識、技術及風險管控方法, 才可使地熱探勘開發業務良好的發展。

關鍵詞：地熱、油氣探勘

目錄

一、 出國目的：	5
二、 過程：	6
(一)出國行程	6
(二)參與會議內容	6
三、 具體成效	28
四、 心得及建議	29

圖目錄

圖 1 西加拿大盆地熱流圖.....	8
圖 2 利用岩心資料建立沉積相及沉積環境.....	8
圖 3 Clarke Lake 氣田熱水生產數值模擬結果	9
圖 4 Molasse 盆地震測相分析	11
圖 5 上侏羅紀(Malm)碳酸鹽震測剖面	11
圖 6 上侏羅紀(Malm)碳酸鹽震測剖面與孔內影像比對	12
圖 7 (a)震測屬性圖 (b)設置截切值區分儲層與非儲層	12
圖 8 Williston 盆地的地溫梯度.....	15
圖 9 北達科他州 Williston 盆地熱流圖.....	15
圖 10 Clarke lake 長時間生產水後的儲層壓降曲線	17
圖 11 地熱井抽水泵浦所需電力功率之計算方法.....	18
圖 12 儲層從 DST 及 AOFP 試驗得到的壓力資料.....	18
圖 13 (a)壓力水頭圖 (b)地表到壓力水頭 (c)抽水泵浦所需電力功率	19
圖 14 35 口井的抽水泵浦消耗功率統計	20
圖 15 井孔影像之裂隙與地層傾斜方向拾取結果圖	22
圖 16 利用地層傾斜及一般測井資料分析建立沉積環境	22
圖 17 Storengy 公司研擬地熱最佳化開發策略的工作流程	27

圖 18 Storengy 提供之地熱開發策略評估服務 27

表目錄

表 1 歐洲重要 EGS 地熱開發計畫之失敗關鍵因子分析 24

表 2 地熱開發計畫關鍵風險因子 24

表 3 地熱開發計畫風險評估案例 24

表 4 本次會議案例之地熱開發優勢統整 31

一、 出國目的：

108 年美國石油地質師學會（America Association of Petroleum Geologists，簡稱 AAPG）主辦之第三屆油氣-地熱跨界技術研討會(AAPG 3rd Hydrocarbon - Geothermal Cross Over Technology Workshop)於 4 月 9 日至 10 日於瑞士日內瓦召開，會議議程內容包含幾個面向：

- (一) 探勘標的定義及如何在鑽前降低風險；
- (二) 探勘、鑽井、開發技術的運用-如何符合成本效益；
- (三) 鑽井及完井工程如何降低成本及增加安全性；
- (四) 案例探討等。

AAPG 為國際上著名的專業科學家組織，該學會係由美國境內石油探勘界專業人士所組成之最大石油科技學術團體，也是世界上最大之石油科技學術團體，因此本次大會有石油探勘界專業人士參加，將石油工業的知識有效轉移給地熱工業，以期降低探勘成本、加強地熱儲集層辨識、監測及預測開發過程中的地球物理及地球化學變化。

配合政府積極推動綠色能源，本公司有推動台灣地熱能源開發生產使命，因應近期宜蘭仁澤-土場地熱開發，為能提升地熱探採知識，派員出國了解國際間最新地熱科技與地熱發電發展現況。

此次派員出國目的，希望能了解國際上現今地熱探勘開發生產的先進技術，並評估引進台灣或本公司的可行性。

二、 過程：

(一)出國行程

出國期間:108 年 4 月 8 日至 12 日，共 5 天。

出國行程:

- 1、4 月 8 日(星期一)，自桃園機場搭乘華航 CI 73 班機於 00:10 啟程
- 2、4 月 9 日~10 日，參加 AAPG 第三屆油氣-地熱跨界技術研討會
- 3、4 月 11 日~12 日，搭乘華航 CI 9388 班機返抵桃園機場

(二)參與會議內容

茲挑選數篇成果豐碩，可給予本公司地熱開發新想法的講題做說明。

1.加拿大中泥盆紀 Slave Point 層的地熱資源特性-以英屬哥倫比亞省的 Clarke Lake 氣田為例(Geothermal Resource Characterization of the Middle Devonian Slave Point Formation at Clarke Lake Field, Fort Nelson, B.C., Canada)

西加拿大沉積盆地的中泥盆紀 Slave Point 層為白雲岩儲層，該盆地西北邊地溫梯度相對較高(圖 1)，可達 50°C/km，DST 測試平均溫度 96.2°C。Clarke lake 氣田位在圖 1 中標示“(2)”的位置。

Clarke Lake 油氣田的白雲岩化儲集層顯示出很高的地熱發展潛能，其孔隙率範圍為 5-15%，滲透率為 100 至 4000 md，平均儲集岩溫度為 98.2°C。近期的現地油氣生產試驗更顯示此地區為強水驅的地層。這個試驗原意是想利用增加地層水的產量來降低地層的壓力，以提高天然氣的產量。然而試驗卻發現，儘管生產大量的地層水，但地層壓力卻沒有明顯的下降。顯示地層的產水能力極佳，抽水的產量達 2800m³/day，簡單換算為 116 ton/hr。

接續分析不同白雲岩相的儲層品質，根據它們在礁體沉積的位置、沉積特性、孔隙率與滲透率數值分布等特性，區分為 9 個白雲岩沉積相與 2 個成岩作用相關

相(圖 2)，再挑品質較好的岩相進行 PetralSIM 模擬。

白雲岩化的礁後相與礁緣相顯示，因沉積時海水面上緣附近堆積的層孔蟲生物碎屑被溶蝕，而形成了次生的鑄模孔狀(mouldic)及多孔狀(vuggy)溶蝕孔隙，使孔隙率與滲透率提升。礁後相的平均孔隙率為 6.4%，滲透率為 124 md。成岩作用相顯示，隨著白雲石、螢石、硫化礦物等礦物含量的增加，雖然滲透率提高，但孔隙率卻下降，因這些礦物阻塞了溶蝕孔洞及裂隙。在發生成岩作用的岩相中，平均孔隙率與滲透率為 5.1%與 183 md。高品質的儲集岩通常發生在礁緣相附近，因為熱液換質通常易發生於高孔隙、高滲透的岩性中。如果礁後相沉積環境也有發育高孔滲岩性的話，高品質儲集岩有時也會延伸入其中。

最後模擬 Clarke Lake 儲層岩石生產熱水 25 年的可行性，在流動模擬中輸入岩石物理值，進行兩組簡單 2D 流動模擬及一個高解析度 3D 模擬。第一組 2D 模擬利用單元網格及統計方法，將 Clark Lake 氣田的孔隙率及滲透率統計分布特徵填入網格點。第二組 2D 模擬使用隨機之蒙地卡羅取樣法，以反映熱液換質白雲岩儲層的孔隙率及滲透率分布非均質。第三個流動模擬使用能更代表整體 Clarke Lake 氣田儲層孔隙率及滲透率分布特性的岩石物性模型，用來測試整個氣田的熱水生產潛能跟整體地熱發電量。

初步的模擬結果顯示(圖 3)若在 Clarke Lake 氣田進行 25 年的生產，76 天後開始有冷卻柱(plume)、25 年後冷卻水尚不會影響生產井附近的井溫(thermal breakthrough)。每一對的生產、回注井有 300 kw 的發電潛能，如果利用 4 口回注井及 8 口生產井的配對生產方式，則每群井的發電量為 2400 kw。

註記與心得

利用成岩作用及沉積環境的研究，描繪出 Slave Point 層儲集層的性質，並發現熱液換質的白雲岩有極佳的次生孔隙。初步的數值模擬顯示此處的地熱資料可持續生產 25 年。此研究建立一個由沉積環境及成岩作用預測地熱儲集層性質

及其分佈的良好研究流程，可應用於其它地熱區的研究。

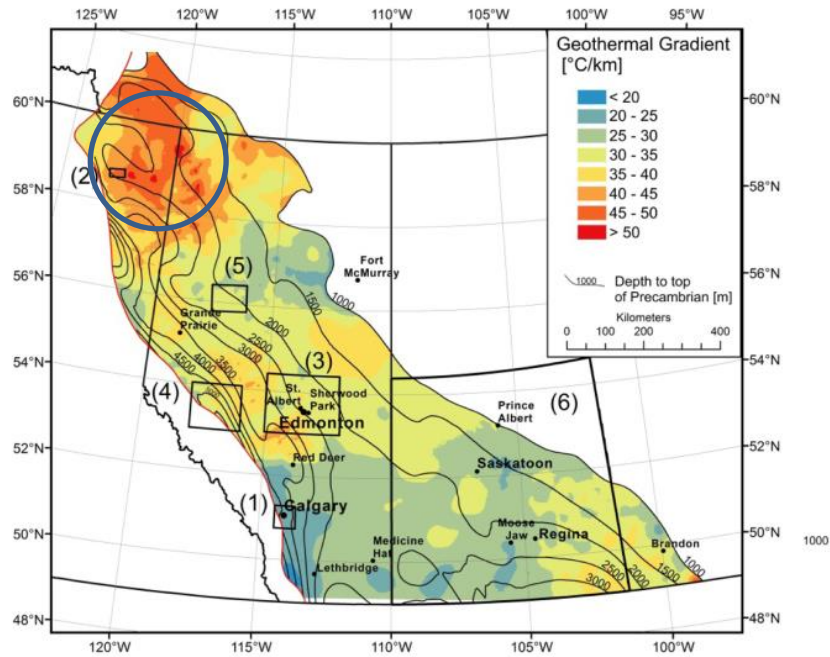


圖 1 西加拿大盆地熱流圖。(S. Weides and J. Majorowicz, 2014)

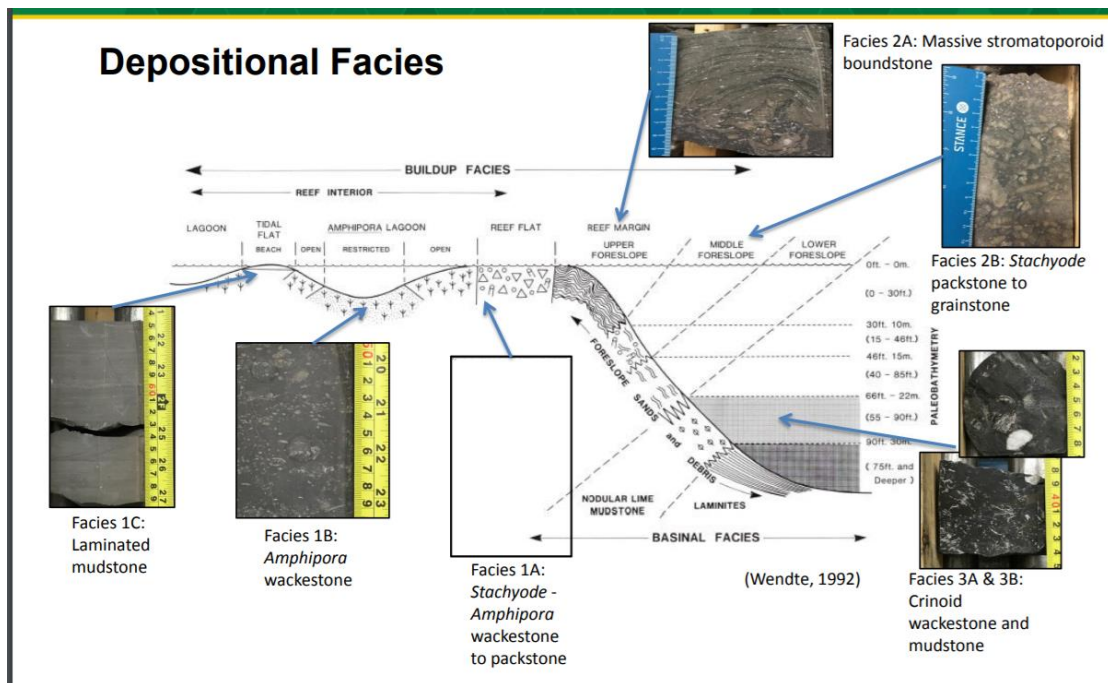


圖 2 利用岩心資料建立沉積相及沉積環境

Time = 1.57286e8 seconds

~5 years

Time = 7.88924e8 seconds

25 years

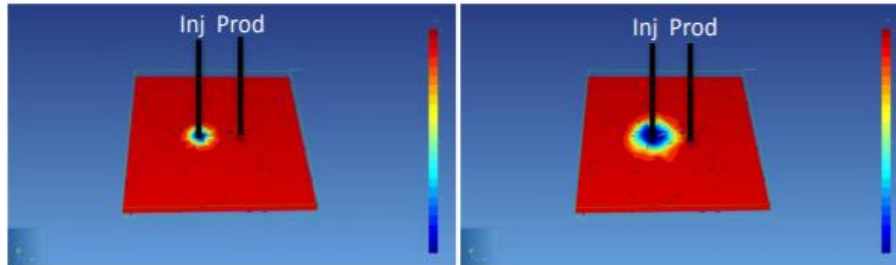


圖 3 Clarke Lake 氣田熱水生產數值模擬結果。顯示本案例地熱尾水回注 25 年尚不會影響生產井附近之井溫，即本案例地熱發電量可穩定生產 25 年。

2. 供碳酸鹽儲集層地熱開發的震測屬性分析-德國 **Molasse** 盆地侏儸紀地層的整合工作流程及案例分析(Seismic Attribute Analysis in Geothermal Exploration for Carbonate Reservoirs: An Integrated Workflow and Case Study From the Molasse Basin (Jurassic, Germany))

上部侏儸紀(Malm)碳酸鹽是德國南部 Molasse 盆地的深層地熱主要探勘目標層。本研究展示新穎且創新的 3D 震測屬性分析工作流程，可以指示塊狀石灰岩/白雲岩(儲層)與層狀泥灰質石灰岩(非儲層)在側向、垂向的分布，並將儲層相、非儲層相的比例定量化。

上部侏儸紀碳酸鹽主要由兩種岩相組成：

- (1)層狀泥灰質石灰岩—為盆地相(basin)
- (2)塊狀石灰岩/白雲岩—為礁相(reef)

塊狀石灰岩/白雲岩由海綿(多孔動物)/微生物的生物岩礁堆起(buildups)組成，且被視為最佳的地熱儲層相。不過生物岩礁內部的非均質性及層序地層結構，對於儲層類型和性質有重大影響。依生物岩礁堆起的所在層位，最高產量大於 100L/s，其與以下作用有關：

- (1)岩溶作用(karstification)
- (2)白雲岩化-提升基質孔隙率

(3)斷層及裂隙

研究使用的資料有 3D 震測、2 口地熱井及其孔內影像與岩屑。以下敘述屬性分析工作流程：

(1) 先分析震測剖面中，各震測訊號特性代表何種岩相(圖 4)

(2) 將震測剖面進行填色，大致區分震測相(圖 5)

(3) 震測屬性分析

A. 將基底的拾取訊號平移 7 層算反射強度(sum of magnitude 屬性)，並分別檢視，以區分儲層(buildup)跟非儲層(basin)相。震測解釋有利用 2 口地熱井的資料做校正(包含孔內影像、井測、岩屑)，如圖 6。區分為 7 層是基於 3D 震測資料的解析度。

B. 利用直方圖及鼠標追蹤看截切值(cut off)該如何設置，以區分盆地相與礁相。區分結果須與孔內影像或井測資料一致(圖 7a)。

C. 辨識各層礁相比例，顯示儲層相與非儲層相在側向、垂向的幾何分布(圖 7b)。

這個震測屬性分析工作流有助於以下 3 點：

(1)在時間上與空間上定量儲層相

(2)應用在類似儲層的地熱探勘

(3)建構可預測性的靜態、動態儲層模型

註記與心得

本研究解釋碳酸鹽岩需經過岩溶作用(karstification)等 3 個作用才会有高孔隙、高滲透特性。若能配合井下和震測資料的對比應用是很重要的。屬性分析工作流程結合了地質資料(露頭及儲層特性)、井孔內影像，並可定量儲層在時間上的變

化，以及在側向及垂向的幾何分布，值得參考。

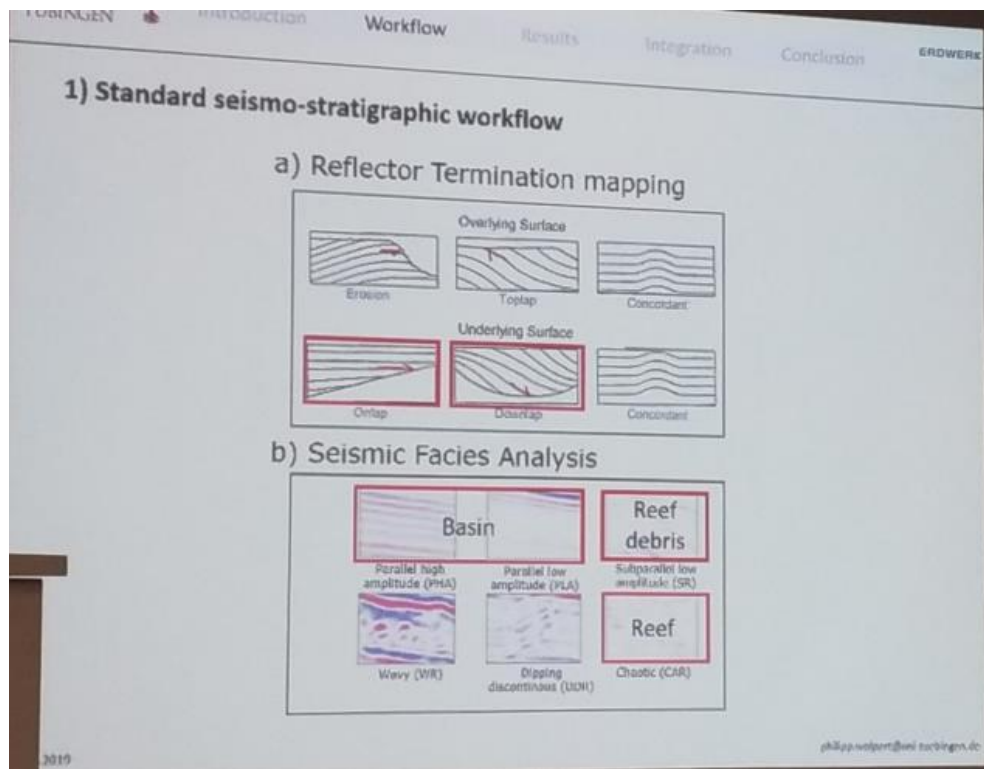


圖 4 Molasse 盆地震測相分析

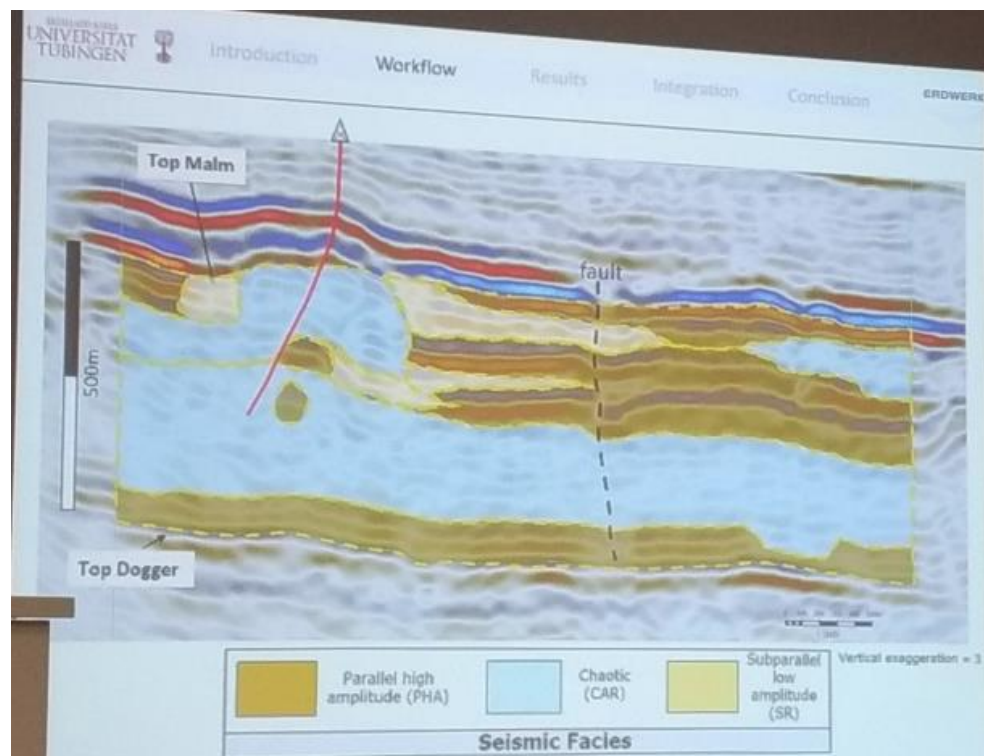


圖 5 上侏羅紀(Malm)碳酸鹽震測剖面

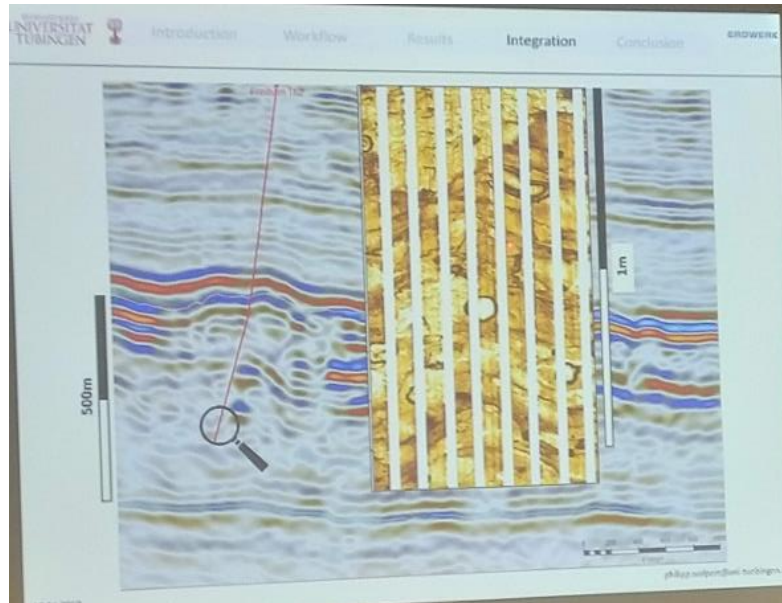


圖 6 上侏羅紀(Malm)碳酸鹽震測剖面與孔內影像比對

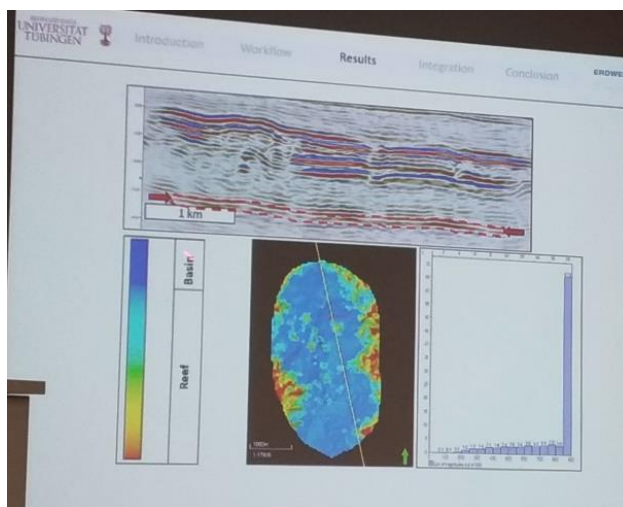
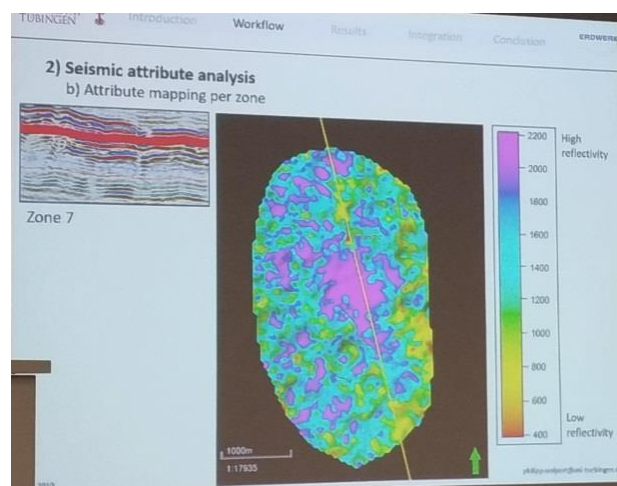


圖 7 (a)震測屬性圖 (b)設置截切值區分儲層與非儲層。統計圖則是每個區間的非儲層相及儲層相的定量。

3. 北達科他大學與大陸資源公司(CLR)在北達科他州 Williston 盆地建置的雙循環地熱電廠(The UND-CLR Binary Geothermal Power Plant in the Williston Basin, ND)

此案例為已建置且成功發電之電廠，廠址在北達科他州西南邊的 Williston 盆地。圖 8 顯示 Williston 盆地的地溫梯度靠近正常梯度線。儲層是石灰岩。

Williston 盆地地熱資源的地質關鍵要素，在於滲透性地層的溫度及流體生產能力。盆地內的熱流範圍 $50-70 \text{ mW/m}^2$ 、碳酸鹽岩生產流體的溫度 $100\sim 130^\circ\text{C}$ ，深度 $3\sim 4\text{km}$ 。因儲層上覆低熱導係數的細粒碎屑岩，所以 2km 內有高地溫梯度。層序大致如下：

↑ 碎屑岩(主要為頁岩) 熱導係數約 1.2W/m/k

Lodgepole form. 產水層

↓ 碳酸鹽岩 熱導係數約 3W/m/k

本廠址的地熱水由 2 個裸孔水平井(深約 2.8km 、長約 1.6km)供應，井口溫度 103°C 、距離井口 400 公尺遠的雙循環發電機入口溫度 98°C 。北達科他州跟阿拉斯加一樣具有低的環境溫度，所以井口溫度約 100°C 也能發電。本井是由大陸資源公司(CLR)所鑽，為的是要做水沖排二級採收。先將生產水通過雙循環發電系統做地熱發電後之尾水再注進 Red river 地層，尾水經過發電降溫冷卻，可減少注水泵浦零件所受的熱應力。

叢井中已有 8 個水平井井程，生產層(Lodgepole)的水頭在地表，而兩沉水泵浦分別設置在 735m 、 967m (水平井的垂直段)。

註-雙循環發電系統是採用 Access Energy(Calnetx)的模組，該公司網頁連結有機組的表現 <http://www.access-energy.com/thermapower.html>，裝置容量上限 125kW 。

整理本地熱發電廠數據：

(1) 從兩口鑽到滲透性石灰岩(Madison 群下段，Lodgepole 層)的裸孔水平井

供水。

- (2) 井深 2300m、2400m。
- (3) 生產層 lodgepole 的靜水頭在地表。
- (4) 泵浦設在 735m、967m。
- (5) 發電完後的尾水用在 Cedar Hills Red river B unit 的二級採收。
- (6) 地熱資源為 98°C、流量 51kg/s(兩口)，發電量 250kW(125kW*2)。

本案例成功的關鍵點有二，一為使用既存的基礎設施，減少地熱開發成本，二為水平鑽進到含水層使井孔接觸儲層，顯著提升了流體生產能力。

註記與心得-

分析本案例的價值：

- (1) 利用油田的伴產水進行發電，且儲層也是滲透性碳酸鹽。
- (2) 利用 Access Energy(Calnetx)設備商的高效率 125kW 雙循環發電機組。
- (3) 發電後的尾水用在沖排二級採收，尾水經過發電降溫冷卻，可減少注水泵浦零件所受的熱應力。
- (4) 使用既存的基礎設施，減少地熱開發成本。水平鑽入含水層使井孔接觸儲層，可顯著提升流體生產能力，可達 183.6 噸/小時，發電功率 250kW。

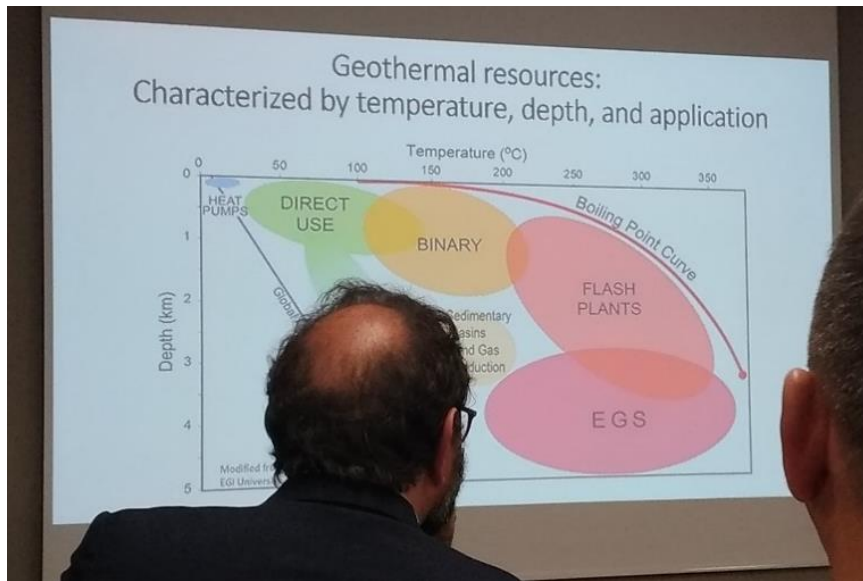


圖 8 Williston 盆地的地溫梯度。(被前方講者遮蓋處)

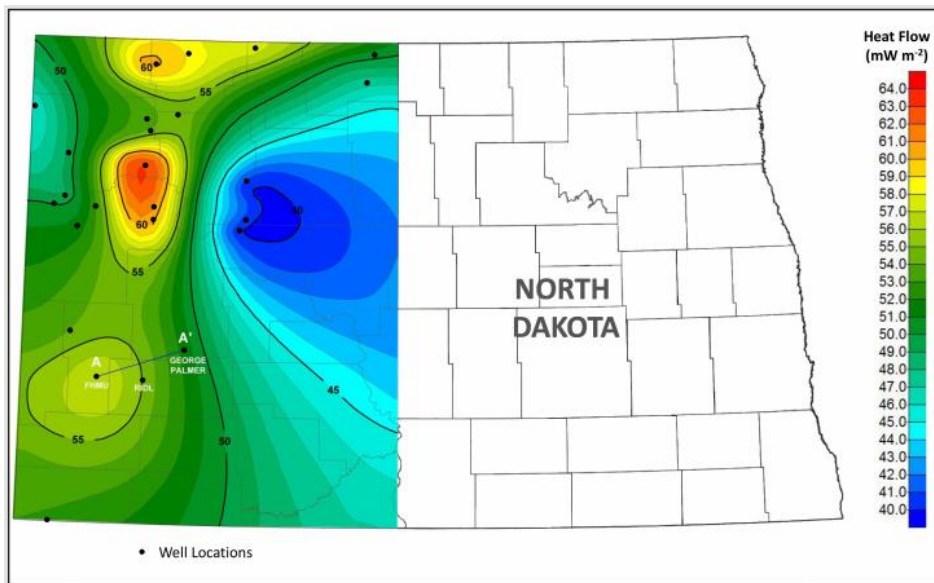


圖 9 北達科他州 Williston 盆地熱流圖(McDonald, 2015)。廠址位在西南側。

4. 估計地熱生產時伴隨所需的電力使用(寄生負載)—以 Clarke Lake 氣田的潛在可能開發之地熱井為例(Estimation of Parasitic Load for the Potential Geothermal Wells of the Clarke Lake Field, British Columbia: A Case Study)

一個成功的地熱開發案，需要注意降低寄生負載、增加能量轉化效率(從熱能轉換為電能)及降低相關部份的成本。在雙循環發電機組中，用在地表泵浦及冷卻設備所必需的能量，可能達到總發電量的 20~30%，而理想的控制目標是 5% 左右。

地熱生產時，電力消耗來源有生產井的泵浦、工作流體的給水泵、冷卻扇等。研究區域與本節第一篇相同，為英屬哥倫比亞省的 Clarke Lake 氣田。本研究建立了一個工作流程，以研究潛在的商業地熱田中，最有潛力的地熱井如果成功生產的話，最可能的寄生負載。

西加拿大沉積盆地橫跨 3 州，地溫梯度大於 50°C /km，從 1957 年以來生產了 1.7 tcf 的天然氣。選擇此場址發展地熱，主要原因是白雲岩化使地層孔隙率、滲透率增強，且有足夠儲層厚度。地下水溫度超過 110 度，孔隙率範圍 5~15%、滲透率 100~4000 mD，為強水驅氣田。假設熱攫取因子(recovery factor)為 10%~25%，則 Clarke lake 具有 12~72 MW 的地熱發電能力。

圖 11 為地熱井抽水泵浦所需電力功率之計算方法，其中需要的儲層壓力資料，由 DST 和 AOFP(back pressure test 回壓試驗)得來(圖 12)。接續繪製的圖幅有：

1. 儲層溫度、壓力—壓力的範圍從 11~19X10³kPa；溫度的範圍從 85~151°C。
2. 壓力水頭(Potentiometric surface)—為受壓含水層假想若有鑽井時的水面高度，範圍從-700m~250m，數值越低水面越低。如圖 13(a)所示。
3. 地表到壓力水頭—範圍從 65m~150m，數值越大意即泵浦要把水提到地表越費工。如圖 13(b)所示
4. 抽水泵浦所需電力功率—從以上儲層溫度、壓力、水頭資料計算得知，範圍從 100kW~950kW。如圖 13(c)所示。

本研究之結論與價值為: (1)對於低溫非自流儲層，深井下泵浦是必須的 (2)展示了詳盡的估算泵浦寄生負載的方法 (3)選 Clarke Lake 氣田是因為有高地溫梯度(大於 50 度/km)和優良的岩石物理屬性 (4)假定流量 60kg/s、泵浦效率 70%，則消耗的電力功率為 60kW~900kW，主要受儲集層壓力控制。(5)部份井甚至要花超過一半的的總功率來把水帶到地表，這將嚴重降低淨發電功率(圖 14)。

註記與心得-

地熱能的開發商常常會忽視泵浦及冷卻設備所需之電力。泵浦的功能為將地熱水抽至地表及回注。忽視泵浦用電會造成淨發電量的估計錯誤。而寄生負載的理想控制目標是 5%左右。

此研究由地層壓力及流體密度計算水頭的高度，以計算抽水泵浦所需的用電。而為求正確的估算地層的壓力，本研究利用此區域的油氣井產能測試得到的地層壓力資料作基礎數據，可得到較正確的結果。

此研究也顯示利用油氣行業的知識與資料，對於地熱能源的幫助是很有效的，也提醒在地熱開發時，由於地熱之投入成本高，生產成本的分析與控制對於生產的經濟效益是很重要的。

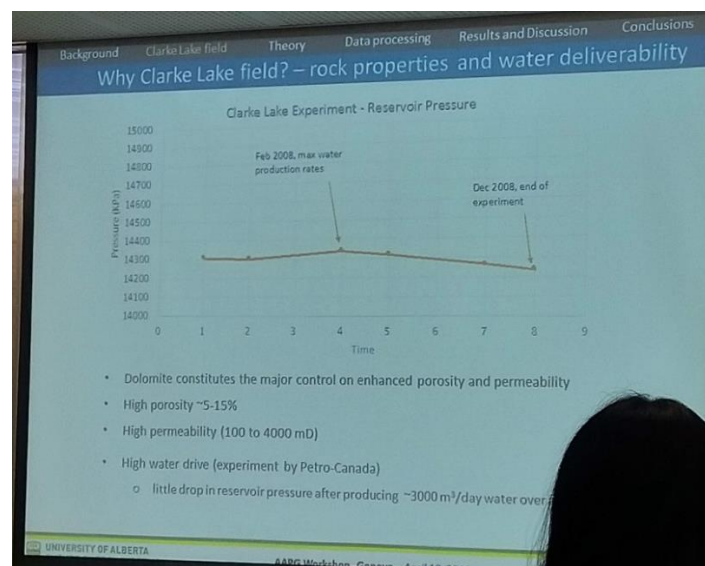


圖 10 Clarke lake 長時間生產水後的儲層壓降曲線。每日生產 3000 m³ 的水，儲層壓降仍非常微小。

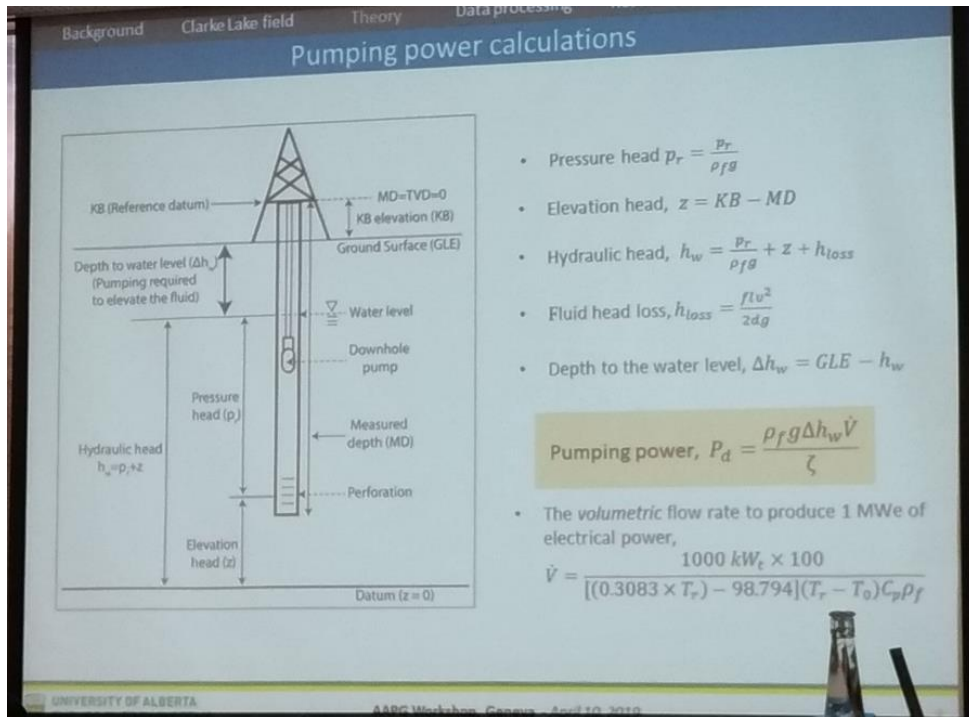


圖 11 地熱井抽水泵浦所需電力功率之計算方法。

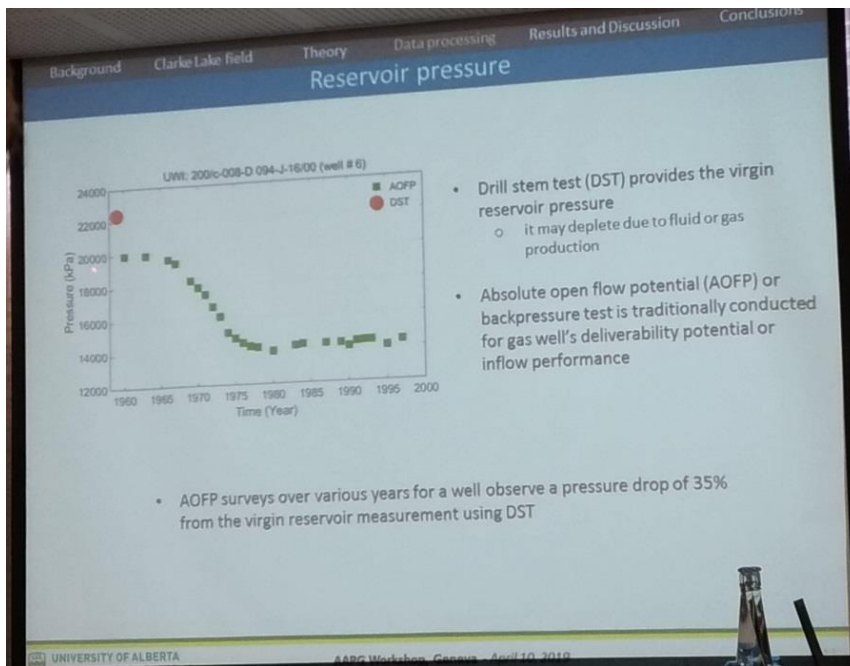


圖 12 儲層從 DST 及 AOFP 試驗得到的壓力資料

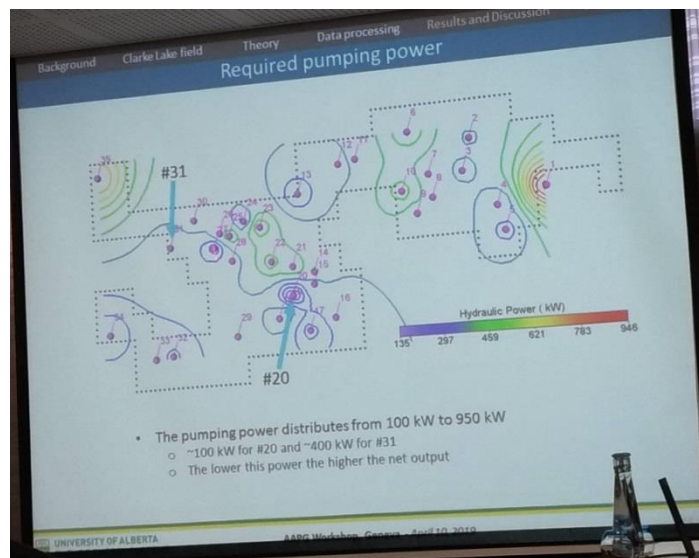
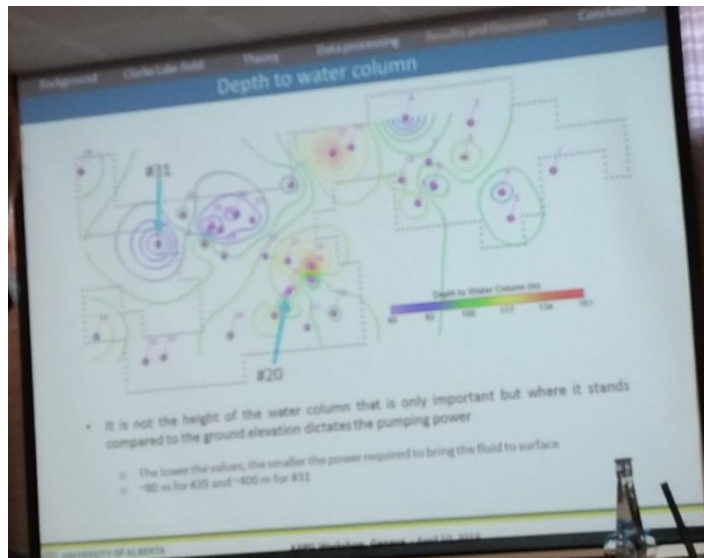
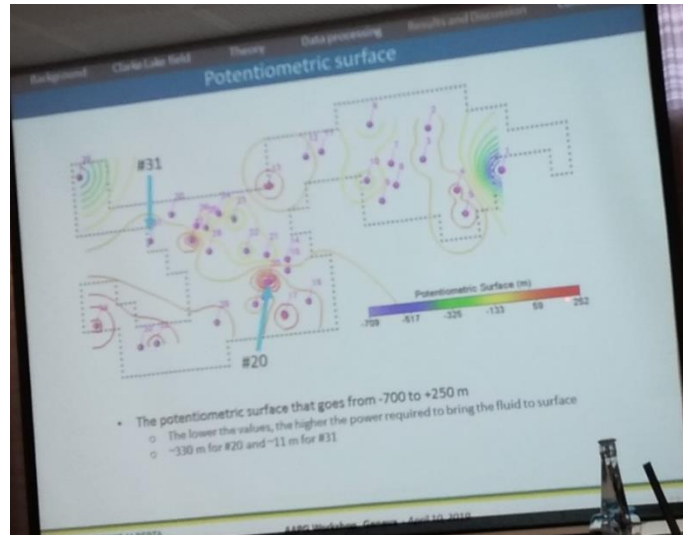


圖 13 (a)壓力水頭圖 (b)地表到壓力水頭 (c)抽水泵浦所需電力功率

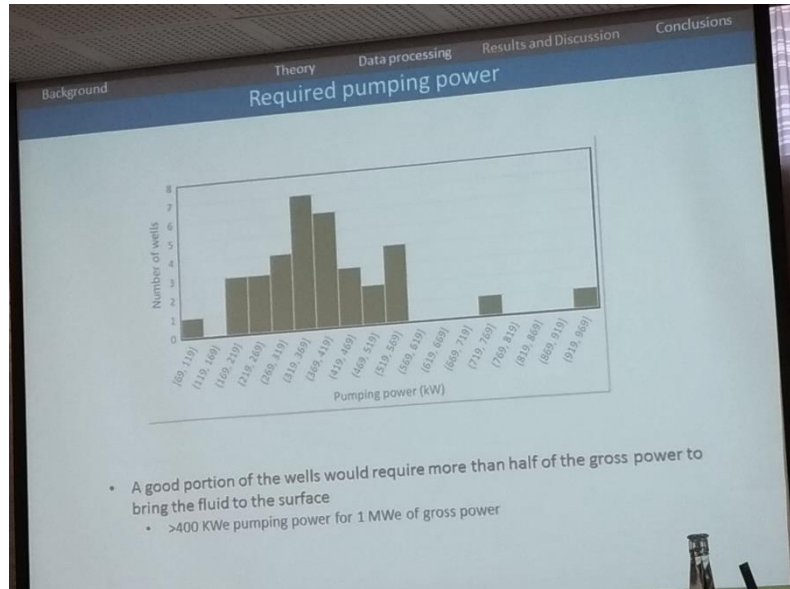


圖 14 35 口井的抽水泵浦消耗功率統計

5. 井孔電測影像的地質解釋—北海地區之整合研究案例(Geological interpretation of borehole image logs-an integrated approach demonstrated from a North Sea Case study)

本研究由挪威 Eriksfiord 顧問公司之研究人員發表。井孔電測影像分析包含斷層、裂隙、地層層面、沉積構造(例如交錯層)及影像電測相等地質現象的辨視與空間分佈研究。這些資料可以跟震測資料或岩心資料相比較，或直接作為 3 維儲集岩模型的直接輸入參數。

由電測影像獲得的地層位態資料可用來評估構造的傾動、斷裂或破裂的發生，也可用來評估沉積物搬運方向與沉積環境。另外現地應力場也可以用井孔的崩落及誘導裂隙結合聲波影像及其它岩石力學性質資料來獲得。基於近期的北海案例，此研究提出一個整合性的研究流程。

由電測影像解釋獲得的構造傾動，會隨著切過井發生的斷層作用或過交角不整合面而產生變化。有明顯位移的斷層帶會造成地層的變形，也會造成不同岩層的錯置，而對儲集層的流動效率產生影響(地層的錯置可能提高也可能降低流體流動能力)。裂隙通常伴隨斷層帶出現，並反應斷層發生當時的應力場。開放性

裂隙與封閉裂隙兩者間的不同位態，通常指示是不同期的破裂活動造成的，另外這個現象也指示應力場方有隨著時間而變化。由測井影像分析得到的裂隙走向、裂隙密度、裂隙開度及裂隙孔隙率都是裂隙模擬的相關輸入參數。

現今的應力場可以由垂直井的測井影像及偶極聲波資料共同結合分析而得到。剪力波的完整特性對於進一步的研究是很重要的。鑽井誘發的鑽井裂隙及井孔崩落很容易被辨視出來。在電測過程的時間長度中，鑽井誘發的鑽井裂隙及井孔崩落也是現地應力方向的可靠指標。

而對大角度定向井及水平井來說，完整的應力張量及大小對於精確的計算現地應力場的走向是必需的。完整的應力張量測量使我們得以評估泥漿比重以用於大角度定向井及水平井的井程設計中。

從地層傾斜角度的數據中，將構造傾動的影響去除後，可得到交錯層或崩移的方向，可以用來評估沉積物的來源方向。將其與其它標準測井資料結合後，得到的測井影像沉積相及不同影響沉積相之間的堆疊關係，可以用以解釋沉積環境及地層沉積體系。例如 Cook 層的上部顯示出西北-東南向的潮汐影響。這些資料可用以進行古地理的重建。將上述的電測影像沉積相資料與岩心資料相結合，可以形成高解析度的強有力的資料集，其尺度從小尺度的岩心一直到大尺度的震測資料，最後再整合入儲集岩模形中。

另外微電阻影像的電阻變化與其它傳統測井資料相比，是有相當高的解析度的，其以岩性與孔隙流體有關。因此高解析度的影像資料統計分析，就可以進行薄層的分析及高解析度的儲層分析，以進行溶洞孔隙率分析，此種類型的研究方法對於地熱及油氣的儲集層性質了解有很大的幫助。

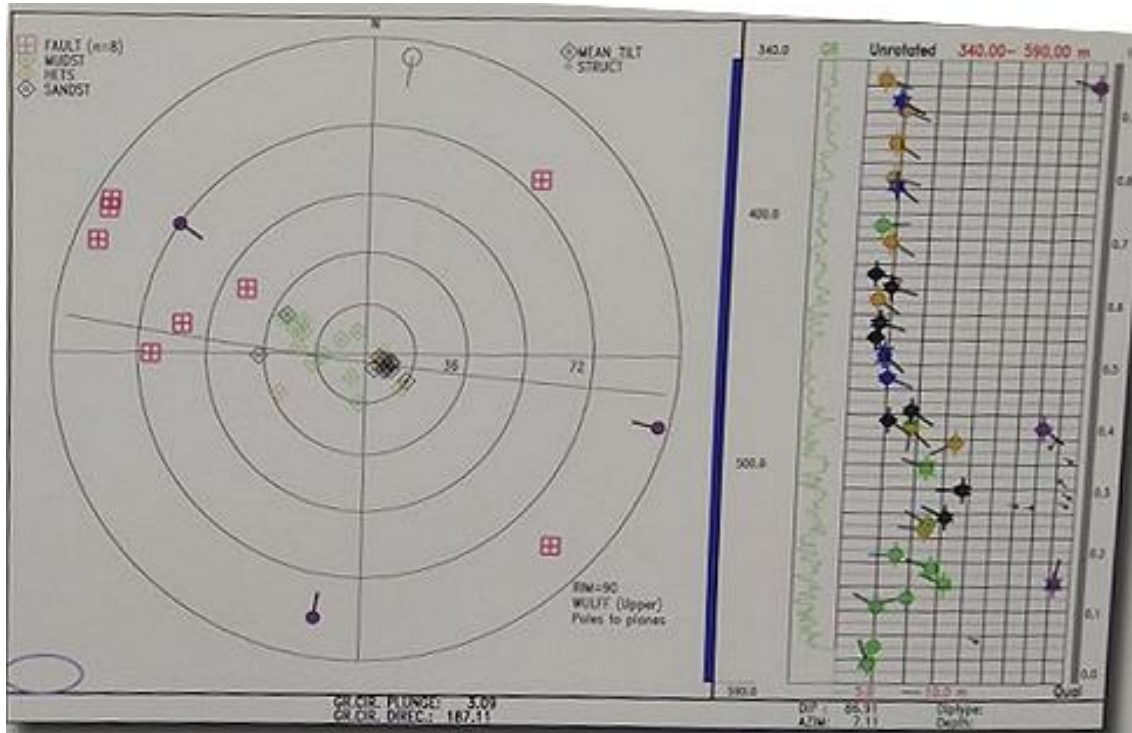


圖 15 井孔影像之裂隙與地層傾斜方向拾取結果圖

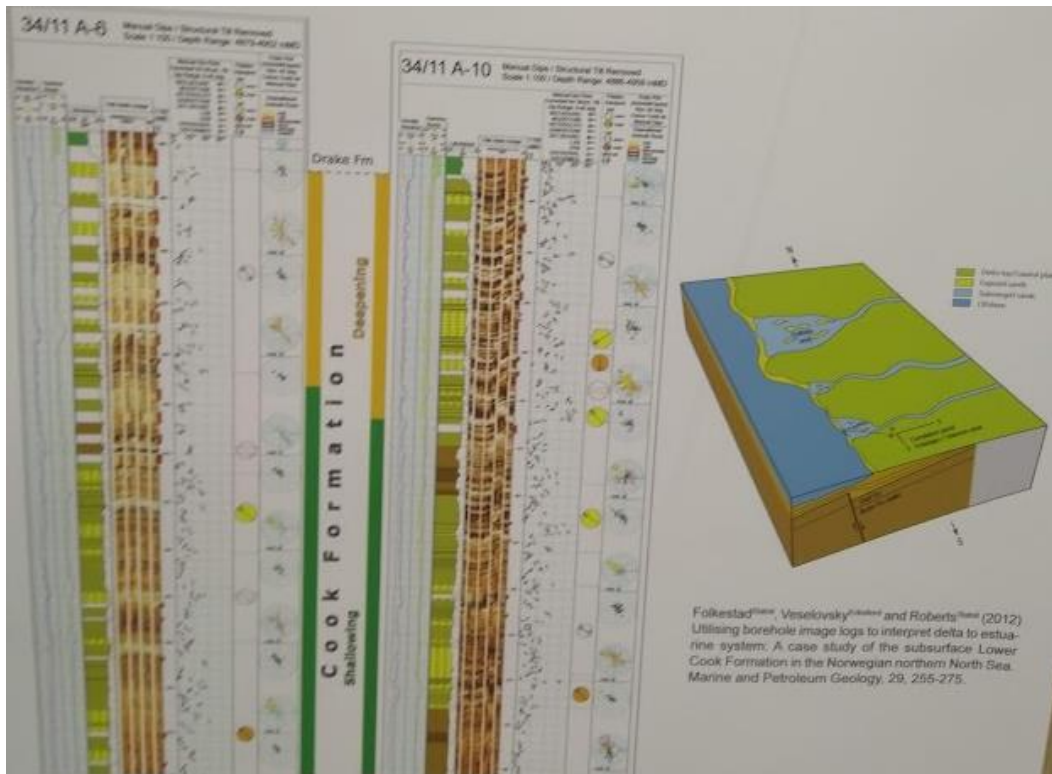


圖 16 利用地層傾斜及一般測井資料分析建立沉積環境

6. 地熱資源探勘及將地熱資源商業化生產面臨的挑戰—預先計劃的重要性 (Challenges in finding and commercially developing geothermal resources: Planning for success)

與其它行業類似，一個成功的商業地熱計畫，需要許多完善之時地物相配合才能達成。然而考量到地熱計畫是極高投入成本，降低失敗因素是先決條件。

這裡所謂的失敗包含了各種大小程度不同的可能失誤，因為即使是一個很小的事件或意外，也可能最終導致整個計畫的停擺。尤其是當這些失誤是從未被料及的，而且也沒有已被設想過的風險管理因子。

如果可被避免的風險因子實際上卻非預期性的發生了，可能會對我們要取得再生能源的工作進程造成重大的負面影響。因此要先辨識出任何直接或間接、可能單獨或合併發生的風險，並進行實際的評估。最重要的是在計畫階段就應該設法進行風險管控。現已建立並證實有效的風險評估與管控的方式，以提高計畫的成功率。

由於地熱與石油行業有類似的探勘、開發及生產地下資源的流程及工作方法，利用石油行業已超過一個世紀以來所建立的知識利用於地熱計畫上是相當重要的。對於計畫的漫不經心通常是造成失敗的因素，尤其是在複雜的計畫上更是如此。

而一個被證明有效的計畫風險管控方式為 **TECOP** 矩陣，其使用的是跟多領域的分析方法。這個方法分析造成失敗的不同原因，包含技術、環境、商業、執行及社會風險因子。此案例闡明地熱與油氣專案之主要風險因子與專案管理應注意的面向。

表 1 歐洲重要 EGS 地熱開發計畫之失敗關鍵因子分析

計畫名稱	主要的失敗原因
Bruhl	鑽井工程、開發許可、當地社區、時程過長與成本太高
Landau	鑽井工程品質、誘發地震、營運作業、當地社區
Basel(x-over)	誘發地震、無法證實 EGS 概念
St. Gallen(x-over)	出現氣切及井噴意外、誘發地震

表 2 地熱開發計畫關鍵風險因子

風險因子群	關鍵風險因子
科技、技術	地下模型、鑽井設計、流體、地表設備、設備操作技術，地質風險、地質假設
成本	成本假設、營收模型、政府補貼、財稅模型、經濟情境分析、失敗情境分析、計畫延誤之成本
商業效益	補貼、保險、委外之契約與採購、財稅與市場
組織	政府、政治、法規、工安環保、組織可靠度
社會	當地社區、公眾、媒體、計畫透明度、交流溝通

表 3 地熱開發計畫風險評估案例

	技術	經濟	商業	組織	社會
地質評估	1	2	----	3	4
租地	----	5	----	6	7
生產權	----	8	----	----	9
鑽井作業	10	11	12	13	14
生產設備	----	----	----	----	15

7. 技術和經濟的不確定性評估-以獲得高熱焓地熱專案的最佳開發策略 (Technical and Economic Uncertainties Assessment to Derive a High Enthalpy Geothermal Project Optimal Development Scheme)

本研究由法國天然氣蘇伊士集團(ENGIE)旗下的 Storengy 公司報告，主要是講述該公司提供從儲層特徵描述、生產預測(含不確定性分析)、到考慮發電機組及經濟分析服務的能力。要帶入的參數有資本支出、營業費用、流速、衰減速率、井數、儲層資料、稅率等等。最後得到輸出功率、現金流、淨現值等結果。

使用的軟體有 Eclipse 及該公司自有代理(proxy)模型、最佳化及不確定分析軟體。(圖 17)

進行敏感度分析時的參數有：

- (1) 地質及油藏工程-滲透率、生產衰減速率等
- (2) 可控變數-生產流速、井數、井距等
- (3) 經濟-資本支出等

軟體的功能有模型實體化，結果展示介面、累積現金流圖表、電廠輸出功率(MW)圖表。針對淨現值的不確定性分析亦可得龍捲風圖、雷達圖。軟體可應用於地熱專案的最佳化開發策略、最大化專案的淨現值。圖 18 為該公司官網上宣傳提供的服務模式。

獲得可靠的生產預測及溫度預測是任何地熱專案的關鍵。選擇適當的發展策略(如生產井數、井配置、回注模式)以獲得最佳化累積生產是很重要的，同時確保專案有好的收益率。在選擇地熱田開發策略前，需要進行儲層評估、經濟分析及不確定性分析。

本次展示是應用雙循環發電機組的高熱焓地熱專案。製作一個完整整合井、泵浦、雙循環機組的系統數值模型，包含了技術跟經濟的輸入參數，最終得到典型的經濟分析圖表，可供管理決策。

善用油氣產業已有的工作流程以評估地下及經濟不確定性，藉由最佳化程序，同時考慮技術上與經濟上兩類不確定性，可得出一個最佳化發展策略。

註記與心得-

地熱產業目前已有企業成立專門的評估服務公司，藉由善用油氣產業已有的經濟評估流程，整合地質、工程、經濟三方面的參數，進行全套的不確定性分析，以得出最佳化發展策略。

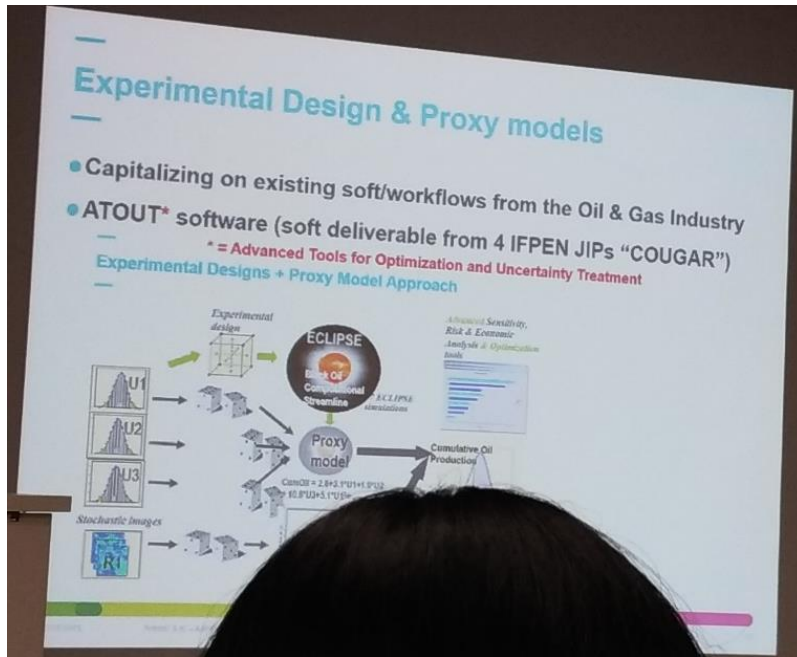


圖 17 Storengy 公司研擬地熱最佳化開發策略的工作流程

Services tailored to your needs

Storengy's multidisciplinary teams manage geothermal projects from subsurface exploration through to operations. They complement and collaborate with other ENGIE businesses on heating network and power generation projects. As an industrial operator, Storengy is a key partner in ENGIE's integrated service offering for geothermal projects, managing the subsurface risks inherent to these projects throughout their lifetime.

Main project phases

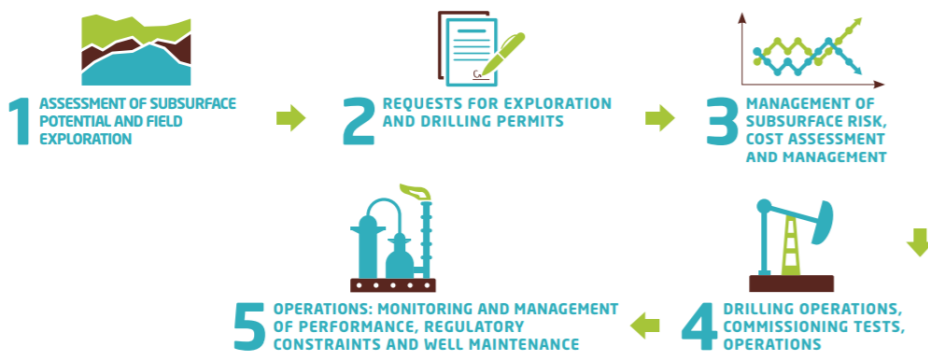


圖 18 Storengy 提供之地熱開發策略評估服務

三、具體成效

由於地下油氣資源的探勘開發已有上百年的歷史，且同屬開發地下資源的地熱產業及油氣產業有部分的知識與經驗是重疊的。參加此研討會，學習到世界上各石油公司及服務公司，如何利用油氣產業已歷百年的工業知識與工作流程，幫助尚屬萌芽期的地熱探勘開發相關技術、降低探勘及生產風險及商業化。由這個研討會的研習內容及和與會人員的交流可以了解，以本公司原有的石油天然氣探勘生產的專業出發，經由油氣探採的地質及地物評估流程，分析沉積環境與孔滲特性、了解儲層分布、做屬性分析。可降低地熱探勘的風險，及依類似的開發流程規劃，降低成本。

地熱的探勘開發在先天上與油氣產業相同，都需要昂貴的鑽井來確認地下的資源量，因此探勘及鑽井的風險及成本在兩個產業是類似的。但每單位的油氣資源經濟價值卻比地熱資源的單位經濟價值為高，所以地熱探勘開發的投資風險掌控及成本掌控較油氣產業重要的多。如果地質風險過高，或沒有明確的掌控及降低風險，很容易使地熱之探勘投資由可獲利變為無法獲利的投資案。此次參加會議了解到，國際上的地熱公司最重視的即是探勘風險及探勘開發成本的管控，油氣探勘以 30 %的成功機率來說，對石油公司可能即有獲利的機會，但對地熱來說幾乎不允許失敗的機會，故技術風險的管控及成本的管控相當重要，也是本公司未來應該要著重的方向。

四、心得及建議

- (一) 本研討會中，德國 Erdwerk GmbH 地熱公司的專家提出，要能發現石油，需要石油系統中的「生、移、儲、蓋、封閉等」要素都要成功，缺一不可，但地熱的探勘卻只要有「大量的熱水」即可，照理來說應相對簡單。然而問題點在於「熱水汽每單位之經濟價值」與「地熱探勘、鑽井、設立發電廠之整體風險及成本」相比相當的低，所以需要每口井都可生產出非常大量的熱水，以地質來說，可以滿足這種先天地質條件的地區就相當少了。
- (二) 以歐美來說，因其土地廣大，可先探勘尋找滲透性好、水頭高、水量豐沛的合適深度地層，以取得可生產大量地熱水的機會。以美國北達科他州的電廠，地溫梯度甚至接近正常梯度線。但不管德國南部、北達科他州或是加拿大的地熱田，雖然地熱田的地熱水溫可能僅約攝氏 100-120°C 間，但因其生產的水量大且環境溫度低，仍可達到一定的發電規模。
- (二) 本次會議案例之地熱開發優勢統整於表 4。分享案例多為碳酸鹽儲集層，以加拿大 Clarke lake 來說，白雲岩化使孔隙率、滲透率都不錯，在水量 116 ton/hr 的條件下，就算是低溫資源，一對生產、回注井的發電量也可達 300kW，經 Petrasim 模擬可維持生產 25 年。該研究建立了一個由沉積環境及成岩作用對地熱儲集層性質預測及分佈預測的良好研究流程，可應用於其它地熱區的研究上。
- (三) 不同地質及地球物理資料的整合應用相當重要，例如 2D、3D 震測、井測、井內影像、露頭資料、岩心及岩屑等皆應共同進行分析。例如本研討會中的 Clarke lake 油氣井的地層壓力與溫度資料，可用來計算寄生負載；Molasse 盆地的震測資料、井內影像及岩屑等可用來校正地熱儲層相的劃分等。
- (四) 以本研討會宗旨來看，從石油業出發，的確可從舊有的油氣田挖掘新資源。

不僅地質及地物評估流程類似，如：分析沉積環境與孔滲特性、了解儲層分布、震測資料屬性分析等。既存的基礎設施也可以共用，降低地熱開發成本。伴產水可拿來作為二級採收，而且水經過發完電降溫冷卻，可減少注水泵浦零件所受的熱應力。

(五) 本研討會也顯示利用油氣行業的工作流程，如：儲集層建模、生產模擬、不確定性分析及淨現值計算，都是可以應用於地熱能源探勘開發。由於地熱相對油氣來說經濟效益較低，因此生產成本分析與寄生負載的控制對於生產的經濟效益很重要。另外油氣行業的水平鑽進技術，對於地熱產業來說，亦有讓產水能力大幅上升的效果。

(六) 本次研討會中，不僅有設備商推廣正商轉中的高效率 125kW 雙循環機組，也發現地熱產業目前已有企業成立專門的評估服務公司，藉由善用油氣產業已有的經濟評估流程，整合地質、工程、經濟三方面的參數，進行全套的不確定性分析，以得出最佳化發展策略。

(七) 全球地熱的發展，除了傳統地熱之已開發國家如冰島、義大利及美國等大國，其它主要的歐陸國家，因為地熱潛能並不高，乃是近 20 年來因應綠色能源及永續發展的需求，才由政府支持而逐步推展。然而地下油氣資源的探勘開發，在歐陸卻已有上百年的歷史。因此同屬開發地下資源的地熱及油氣產業有部分的知識與經驗是重疊的。此會議的目的即在藉油氣產業已歷百年的工業知識與工作流程，用以幫助尚屬萌芽期的地熱開發工業。而地熱的探勘開發在先天上與油氣產業的異同在於都需要昂貴的鑽井來確認地下的資源量，但每單位的油氣資源經濟價值卻比地熱資源高的多。

(八) 地熱探勘開發的投資風險掌控及成本掌控較油氣產業還要重要。如果地質風險過高，或沒有明確的掌控及降低風險，很容易使地熱之探勘投資由可獲利變為無法獲利的投資案。而石油天然氣公司在油氣探勘開發領域累積的經驗

及知識正是可提供給地熱公司之寶貴資源。地熱公司應良好應用石油天然氣領域的知識、技術及風險管控方法，才可使地熱產業可以良好的發展。

表 4 本次會議案例之地熱開發優勢統整

優勢	案例
具優良孔隙率或滲透率的碳酸鹽地層	Clarke lake、Williston basin、Molasse Basin、其他未摘錄的數篇如 Po Plain
強水驅或產水能力極強不壓降	Clarke lake、Williston basin(兩井達 183.6 噸/小時)
偏高地溫梯度	Clarke lake(大於 50 度/km)
水平鑽進到滲透性含水層，提升生產能力	Williston basin
生產水用於二級生產等附加價值	Williston basin
共享既存基礎設施	Williston basin