

出國報告（出國類別：實習）

參加「油氣盆地數值模擬課程」心得

服務機關：台灣中油公司探採研究所

姓名職稱：蕭良堅 地球化學探勘師

派赴國家：馬來西亞

出國期間：107年10月28日至107年11月3日

報告日期：107年11月20日

摘要

赴馬來西亞參加油氣盆地數值模擬課程，行程自107年10月28日至107年11月3日為期七日，地點在馬來西亞吉隆坡，Schlumberger公司的NEXT訓練機構。課程總共分成五日，內容涵蓋盆地分析與石油系統模擬兩個部分。課程前三天為盆地分析部分，包括沉積盆地分類、盆地構造與演化、盆地沉積環境、層序地層學、沉積物中的有機物、生油岩與石油地球化學相關分析技術之探討，以及沉積盆地在埋藏過程中孔隙壓實回復，古熱流與古溫度的分析等。接著引入石油系統模擬，討論盆地中油氣生成、移棲與保存，並使用相關知識來解釋模擬結果，以及分析一個含油氣盆地探勘時各要素的不確定性與風險所在。

此課程設計提供一個進行油氣盆地模擬的流程所應具備的項目：包括最初的震測解釋、沉積盆地的構造、沉積過程與熱演化，之後討論盆地中的有機相，生油岩分布，估算油氣生成量、相態，以及計算油氣的運聚，最後並分析該盆地石油系統的各项要素的不確定性；整體過程可作為未來油氣盆地模擬工作的標準流程。未來可應用此模式，由地球物理、盆地分析與地球化學探勘人員組成團隊進行油氣探勘工作。

目次

摘要.....	1
壹、目的.....	3
貳、過程.....	4
參、具體成效.....	27
肆、心得與建議.....	29
伍、附錄.....	30

壹、目的

新技術開發應用為本公司的主要探勘策略之一，台灣中油探採研究所地球化學組目前正進行幾項地球化學探勘技術開發，包括應用氣相層析串聯質譜儀（GC-MS-MS）、氣相層析同位素質譜儀（GC-IRMS）、二維氣相層析飛行質譜儀分析（GC×GC-ToF）、氣相層析-感應電漿耦合質譜儀（GC-ICPMS）以及熱裂氣相層析質譜儀（Py-GC-MS）分析原油、生油岩與環境樣品的碳氫化合物、生物指標、微量元素及其穩定碳、氫同位素組成；除了傳統地化探勘、油源對比外，也能應用在環境整治相關問題上；目前關於技術開發的部分已經有不少成果發表，且這方面的工作也持續進行中。然而這樣的工作通常必須在已取得的礦區，或是鑽井有取樣的情形下才能取得樣本進行；同時採集的樣本來自單一地點或單一深度，往往可能只能反映局部的現象。

除了地球化學分析之外，油氣盆地數值模擬也是探勘活動中不可或缺的一環。油氣盆地數值模擬主要是利用電腦運算能力，基於已建立的地質與沉積模式，配合有機地球化學油氣生成理論，油氣運移與積聚的物理與化學原理，預測目標礦區油氣的生成與移聚，協助探勘工作。油氣盆地數值模擬包括一維、二維與三維數值模擬，一維模擬可以估算單井的生油岩成熟度與油氣生成。二維與三維可以模擬1個二維剖面乃至於整個礦區三維的油氣生、排、移、聚過程，以瞭解礦區石油系統。使用油氣盆地模擬技術可以改善傳統地化分析只有少數點資料的侷限性，有助於全面瞭解礦區油氣運聚分布情形，同時也能與地化實驗分析結果相互印證。加入地球化學分析資料與模擬結果，能補足地質或地球物理探勘缺少油氣相關化學資訊的不足之處。除了公司本身探勘中的礦區外，另外對於尚未進入的礦區也可以現有地質資料進行油氣盆地數值模擬，探討其產油潛力，依其結果來決定是否進入該礦區；同時也能對於即將生產開發的礦區進行油氣盆地數值模擬，擬定適合的開發計畫。綜合以上因素，為了協助公司探勘工作的進行，在傳統地化分析技術之外，油氣盆地數值模擬亦為公司迫切需要發展的技術。惟目前使用此技術的人員少同時也將屆退，因此需要有具備盆地分析與油氣模擬知識的新血接續相關的油氣盆地數值模擬工作。

相對於地化分析，油氣盆地數值模擬除了地球化學知識外，另外也需要具備相關的盆地分析、沉積學、層序地層、構造地質等相關知識，才能設計符合實際狀況的地質模式，以及合乎物理化學原理的油氣生成與移棲數值模式，並對礦區石油系統做通

盤解釋。而盆地分析這部分觀念也是公司從事地球化學探勘的人員相對在專業上較弱的部分。也因此對於「參加油氣盆地數值模擬相關課程」實習計畫，擬參加Schlumberger公司旗下NEXt機構在馬來西亞吉隆坡舉辦的盆地分析與石油系統數值模擬（Basin Analysis and Petroleum Systems Modeling）課程（附件）；該課程主要對油氣盆地數值模擬的工作做設計，除了油氣生成移棲數值模擬外，首先提供一些基礎的盆地分析知識，包括板塊構造、沉積盆地形成與構造、層序地層與沉積環境、有機物來源與有機相、沉積盆地溫度與熱流變化、地層壓力與沉積物壓實的影響等在油氣盆地數值模擬時所需具備的地質學知識。接著進入油氣生成與移棲數值模擬的部分，包括應用石油系統的觀念，探討不同類型沉積盆地、岩性、有機物種類對於油氣生成、排放與移棲的影響；同時包括評估沉積物在埋藏過程中發生的構造活動、熱流變化、孔隙壓實等物理作用對於油氣生成與移聚過程所造成的效應，並包含如何評估數值模擬結果的品質，以及各種要素的風險管理。油氣盆地數值模擬除了油氣生成與移聚外，最重要的是如何使用地質知識來判斷模擬結果的正確性，與進行全面的石油系統解釋。也因此擬定本實習計畫，訓練同時具備盆地分析與石油地球化學專業的人才，從事油氣盆地數值模擬工作，協助公司國內外探勘。

貳、過程

「油氣盆地數值模擬」課程由Schlumberger公司下的NEXt訓練機構所開設，本課程於10月29日至11月2日在馬來西亞吉隆坡舉辦。課程內容共分成5天，前三天著重在盆地分析的部分，包括盆地形成、沉積與構造與演化、基本層序地層學、石油地球化學分析、以及岩石孔隙壓實、熱流史分析等。後兩天著重在盆地模擬部分，包括油氣生成與移棲、探勘風險評估等。每日上課主題如行程表所示；而詳細進行的課程內容將在以下段落分別依日程進行敘述介紹：

第一日（10月29日）：沉積盆地簡介、形成機制與構造分析。

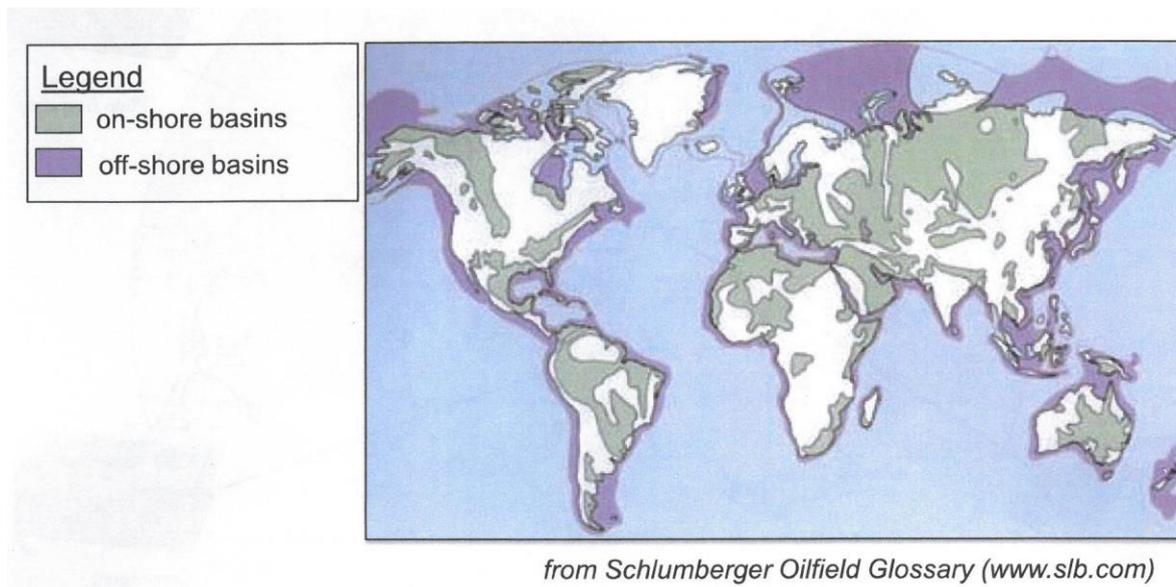
第一日課程主要內容為沉積盆地簡介、盆地形成機制與構造分析。沉積盆地（Sedimentary Basin）為地表上因長期沉降（Subsidence），形成可容納沉積物的空間。全球主要沉積盆地分布如圖一、大部分位於現代大陸棚或大陸內部。其形成原因主要

表一、出國行程表。

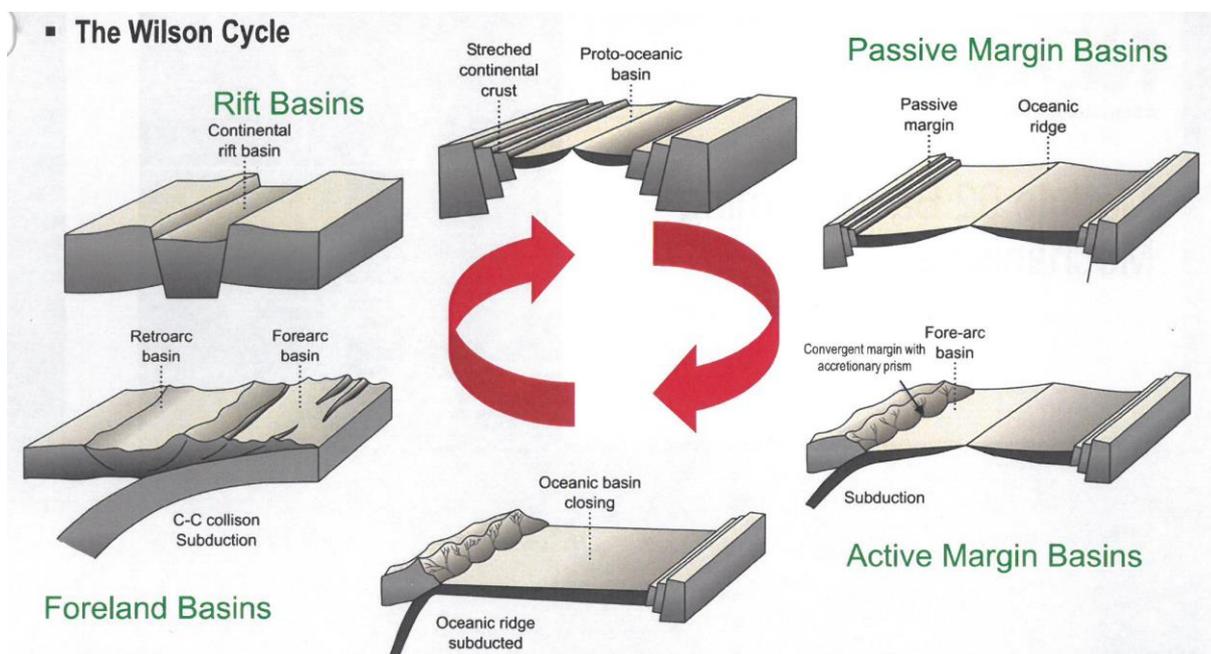
起迄日期	地點	行程、課程內容
2018.10.28	桃園機場出發，前往馬來西亞吉隆坡	啟程
2018.10.29	馬來西亞吉隆坡	沉積盆地簡介、形成機制與構造分析
2018.10.30	馬來西亞吉隆坡	盆地充填、沉積環境與地化分析
2018.10.31	馬來西亞吉隆坡	沉積盆地溫壓變化
2018.11.01	馬來西亞吉隆坡	石油系統模擬 I
2018.11.02	馬來西亞吉隆坡	石油系統模擬 II
2018.11.03	從馬來西亞吉隆坡返國	返程

與全球板塊構造（Plate Tectonics）活動有關；盆地常形成於板塊邊界。板塊邊界有三種，包括分離型（Divergent）、聚合型（Convergent）與錯動型（Transform）邊界。不同類型邊界會有不同類型的盆地形成。如分離型邊界會形成裂谷盆地（Rift Basin），目前有許多大型油氣藏是屬於這種盆地；聚合型邊界由板塊隱沒（Subduction）或碰撞（Collision）所形成，包括弧前盆地（Fore-arc Basin）、弧後盆地（Back-arc Basin）與前陸盆地（Foreland Basin）等均為聚合型板塊邊界所形成。而轉型斷層錯動亦能形成盆地。除了在板塊邊界外，一些古陸（Craton）內部亦可能因地函（Mantle）活動，或是地殼受力形成盆地。對於板塊生成與消滅有一循環過程，稱為威爾森循環（Wilson Cycle），其描述板塊自大陸地殼裂谷活動，之後形成海洋地殼，接著發生隱沒作用形成山脈，形成大陸地殼後再次發生裂谷活動的過程；用來討論板塊生成與消滅過程（圖二）。在這過程中，有不同類型的沉積盆地生成與消失。對於油氣探勘而言，沉積盆地為有機物沉積以及油氣生成與儲聚之處。因此，研究沉積盆地對油氣探勘而言有其重要性。

接著討論盆地分析（Basin Analysis）與盆地模擬（Basin Modeling）的差異。盆



圖一、全球沉積盆地分布圖。

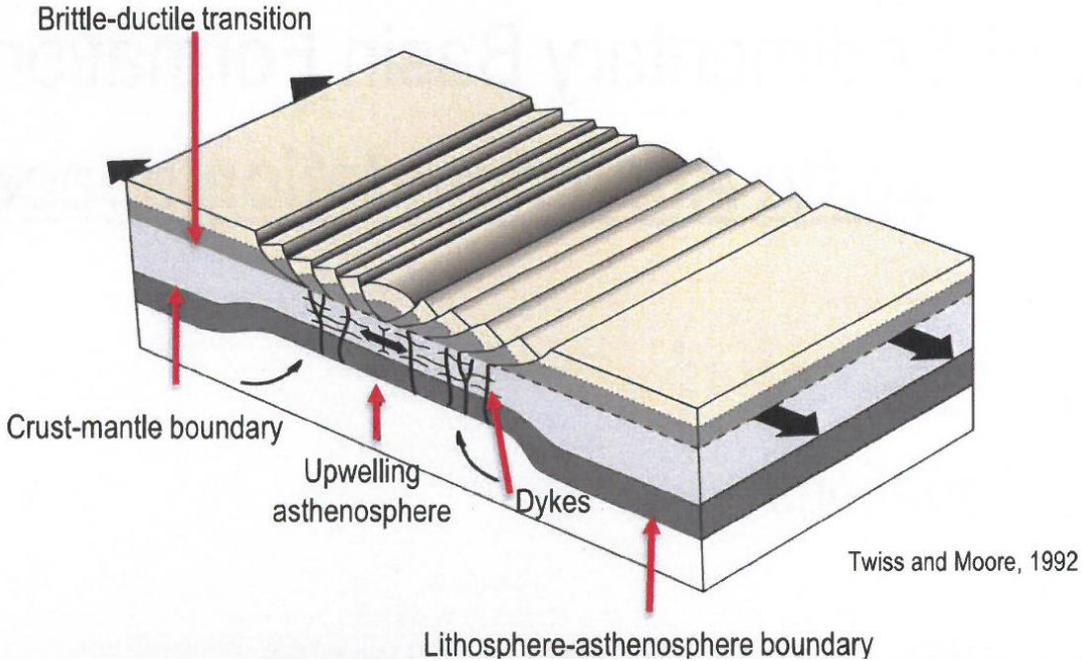


圖二、威爾森循環示意圖。

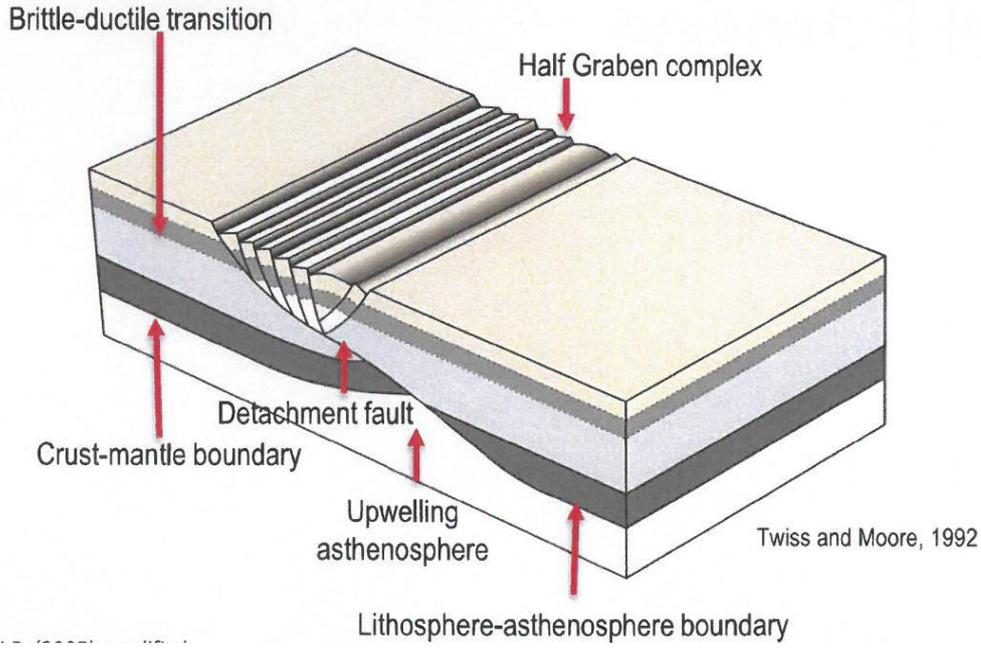
地分析包括三項主要的元素：(1) 構造分析 (Structural Analysis)，討論盆地的幾何外型，斷層、褶皺等構造活動。(2) 地層沉積序列 (Stratigraphy Analysis)，討論盆地區域沉降史。(3) 岩相 (Lithological Facies)，探討不同地層的岩性變化，包括沉積岩中的有機相 (Organic Facies)。盆地分析重要之處在於了解沉積盆地的構造於沉積演化史。然而盆地模擬 (Basin Modeling) 則更進一步整合盆地分析結果，並將其數位化，加入油氣生成與移棲過程後，進一步能探討沉積盆地之石油系統。

關於沉積盆地的構造分析，自地殼開始張裂，形成裂谷後，地殼會逐拉張減薄；

地殼越薄，意謂有較高的熱流（Heat Flow）。對於盆地模擬而言，較高的熱流將影響油氣生成與移棲結果。常用的拉張模式有兩種，其中一種為McKenzie在1978年提出的模式，稱為Pure-shear模式（圖三），主要應用於對稱張裂型態的裂谷；另一種為Wernicke在1985年提出的模式，稱為Simple-shear模式（圖四），主要應用於不對稱張裂型態的裂谷。依據裂谷張裂型態不同，可以選擇不同模式來估算熱流。

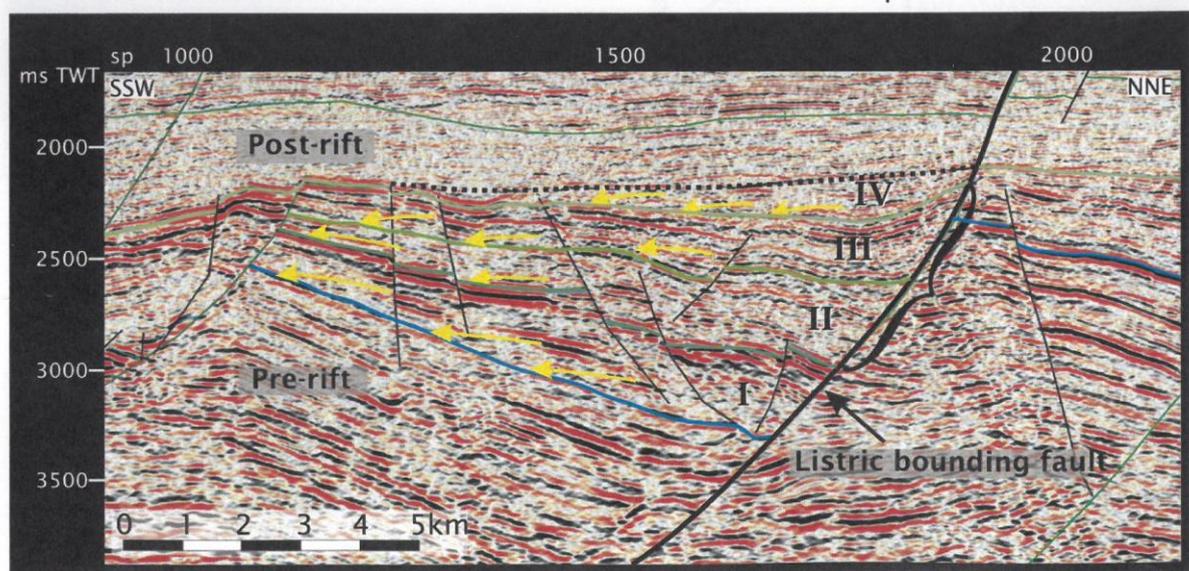


圖三、Pure-shear模式示意圖。



圖四、Simple-shear模式示意圖。

構造分析另一部分就是在震測剖面中判斷斷層所在（圖五），以及沉積層的位態。包括如何在震測剖面中辨識出張裂前期（Pre-rift）與後張裂時期（Post-rift）的沉積，沉積序列與其演化過程，以及地殼與地函分界等。在進行盆地模擬之前，收先沉積盆地的構造分析，瞭解其層序關係，並依此建立地質模型。

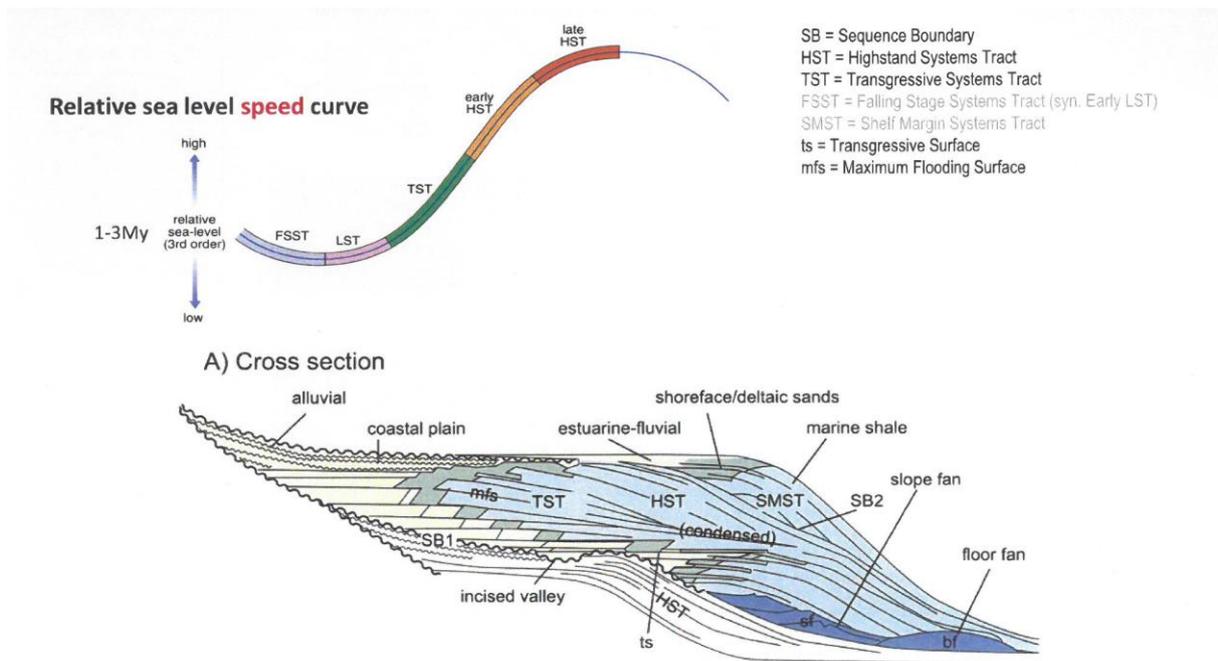


圖五、在震測剖面中辨識不同階段沉積層與斷層。

第二日（10月30日）：盆地充填、沉積環境與地化分析。

第二日課程內容包括盆地充填、沉積環境與地化分析。對於一個盆地的分析除了其構造型態外，另外要考慮的就是沉積物來源與堆積的問題。對於一個盆地能堆積多少沉積物需要考慮納積空間（Accommodation Space）有多大，其空間大小為岩石圈底部與海（湖）水面所控制。若盆地持續沉降，且沉降速率大於沉積速率，則該盆地能容納更多沉積物。至於盆地所接受的沉積物為來自海（湖）水面以上高地的碎屑物質，因海（湖）水面升降變化影響碎屑種類以及沉積速率，而海（湖）水面升降則與氣候或構造活動相關。而研究海（湖）水面升降與沉積物供應關係即為層序地層學（Sequence Stratigraphy）。

層序地層學就是「研究由不整合面或其對應整合面所限制的一套相對完整，成因上具有關聯的等時地層單元」。在學術上主要應用層序地層學來討論沉積盆地型態與盆地充填過程（圖六），而在工業界中進一步應用來進行油氣、煤與其他礦產資源的探勘。對於層序地層學的研究主要使用的工具包括震測、井測、岩心、露頭、地球化學與古生物資料，由以上資料討論盆地中地層沉積時的時空關係。



圖六、層序地層學探討項目示意圖。

另外對於盆地充填需要考慮地為沉積相（Sedimentary Facies）。沉積相是指在一特定地層中，存在一個有其獨特岩性特徵的單位，且能與該地層其他單位明顯區別著。而特定沉積相的形成與沉積環境有關；包括深海、河口灣、珊瑚礁等各有其特殊岩相，而這些岩相的分布則會影響石油系統中生油岩、儲集岩、蓋岩的分布。因此對於沉積相的分析為油氣探勘中相當重要的一環。

本日另外一個重點討論有機地球化學。包括生油岩評估、有機成熟度（Maturity）測量以及油氣岩對比等。對於盆地模擬而言，有機碳含量（Total Organic Carbon Content）、氫指數（Hydrogen Index）、動力學（Kinetics）等皆為必須輸入的重要項目。其中最重要的除了實驗室測量之分析結果外，仍須將有機碳含量與氫指數等重新還原成初始（Initial）狀態，可依據這些經驗公式計算（如圖七所示），如此方能在油氣模擬時應用生烴動力學計算油氣生成量與油氣種類。若不進行初始值還原計算，則油氣生成量計算時會造成低估。

1. Fractional Conversion f

$$f = 1 - \frac{HI^x (1200 - (HI^o / (1 - PI^o)))}{HI^o (1200 - (HI^x / (1 - PI^x)))}$$

HI^x = measured HI
 HI^o = original HI
 PI^x = measured PI
 PI^o = original PI

2. Original TOC

$$TOC = \frac{83.33(HI^x)(TOC^x)}{(HI^o(1-f))(83.33 - TOC^x) + HI^x(TOC^x)}$$

TOC^x = measured TOC
 83.33 = % of carbon in generated Petroleum

From: Peters et al. 2005

圖七、初始有機碳回復計算方式之一。

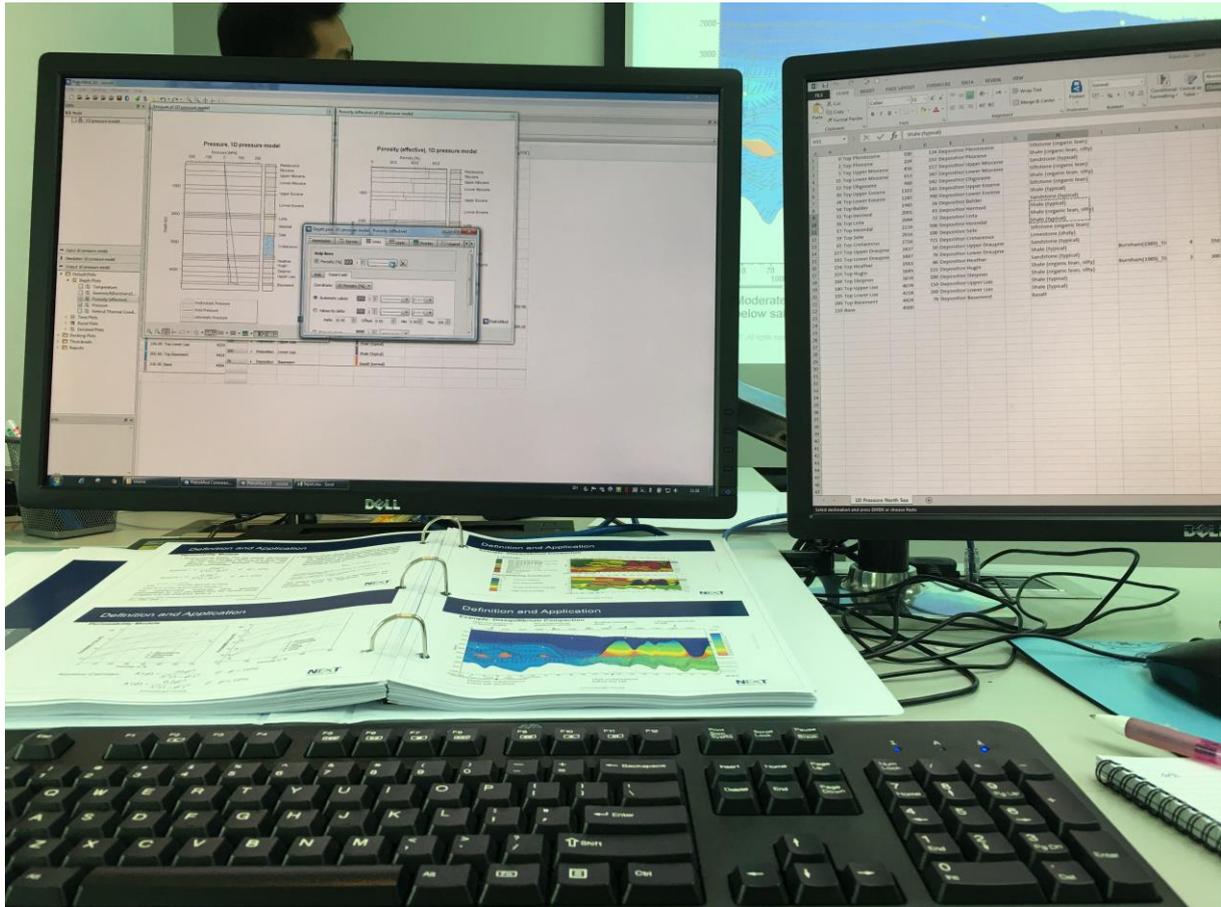
第三日（10月31日）：沉積盆地溫壓變化。

第三日主要討論盆地的壓力與溫度變化，從此日開始的課程也在講授理論的同時操作PetroMod軟體配合教學（圖八）。關於盆地壓力的部分，討論盆地在埋藏過程中壓力變化情形。主要需要考慮的壓力項目包括靜水壓力（Hydrostatic Pressure）、孔隙壓力（Pore Pressure）與靜岩壓力（Lithostatic Pressure）（圖九）。在盆地埋深過程中，若不同地層岩性具有差異，如孔隙率與滲透力都低的頁岩覆蓋在砂岩之上，則會使地層中的流體因無法自由流動造成較高的孔隙壓力，超過了靜水壓力，因而產生超壓（Overpressure）現象，同時岩石有效應力（Effective Stress）會減小。地層中的有效壓力強度會影響孔隙率與地層的壓實作用（Compaction）（圖九）。同時若超壓超過岩石之破裂強度，也會導致岩石發生破裂，增大孔隙率。此外，超壓也會改變原先埋藏的材料產生物理與化學的變化，如礦物再結晶，油氣生成與裂解，以及流體運移等。目前有超壓現象主要屬於有快速沉積與沉降，受構造擠壓影響的新生代盆地。

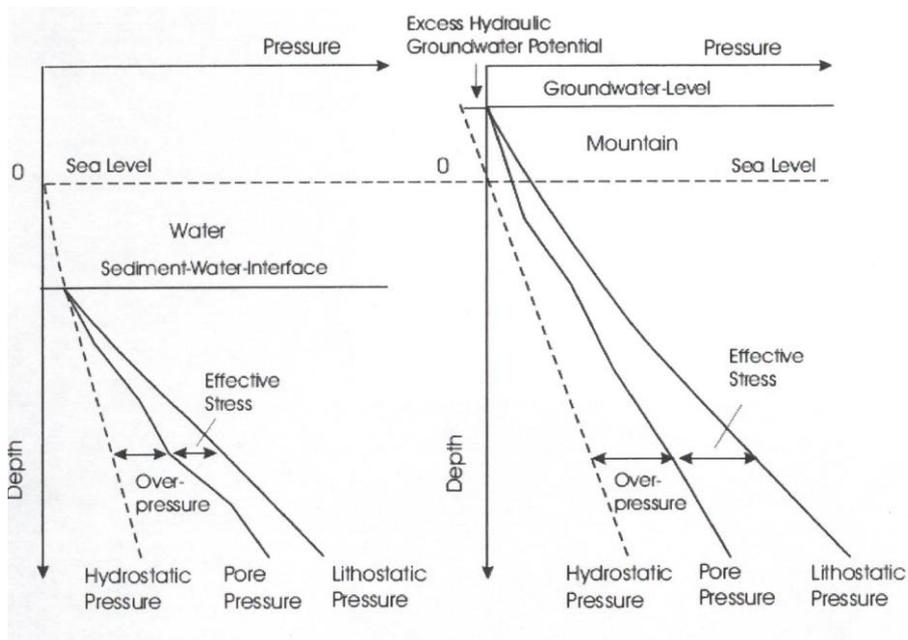
地層壓力造成的影響最顯著的部分是機械壓實（Mechanical Compaction）作用。在埋藏過程中，當地層中有效壓力增加時，沉積顆粒間的孔隙體積逐漸縮小，因而使得地層厚度減小。可用Athy定律表示：

$$\phi(z) = \phi_0 \cdot e^{-k \cdot z}$$

ϕ_0 : initial porosity (%) k : compressibility factor (-)
 ϕ : porosity (%) at depth z z : depth (m)

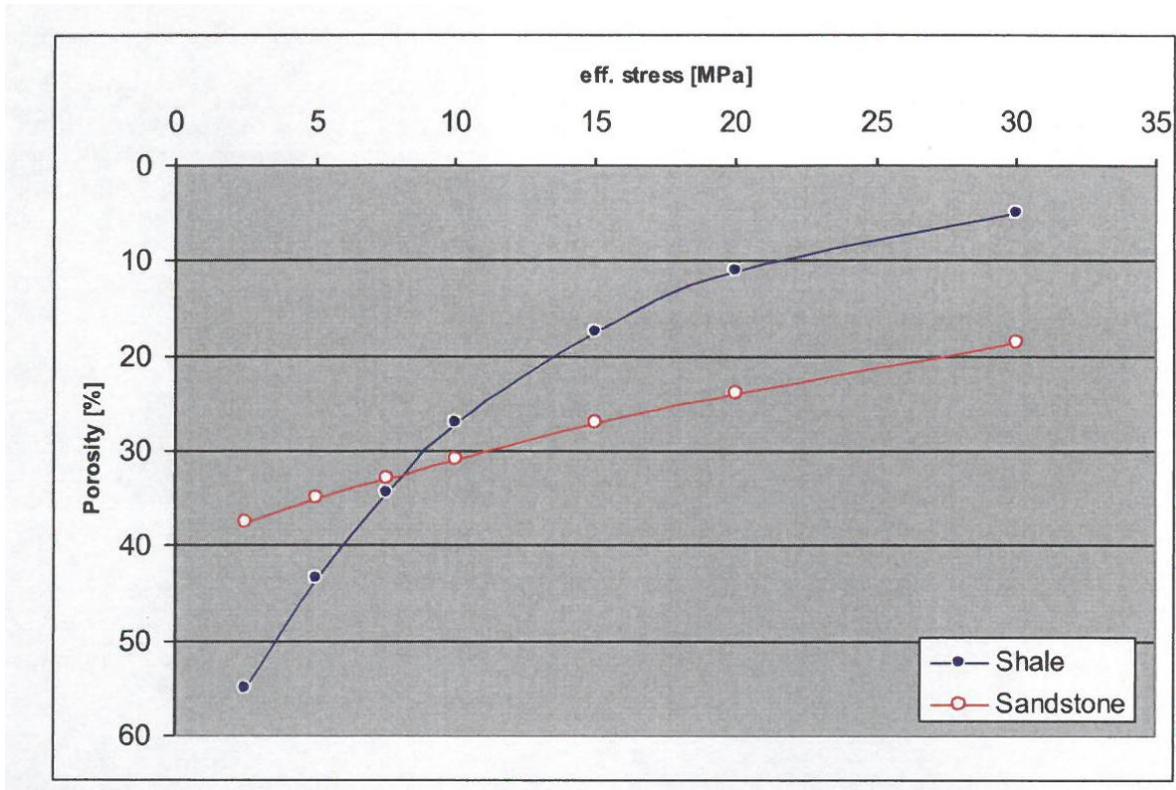


圖八、以PetroMod軟體進行教學。

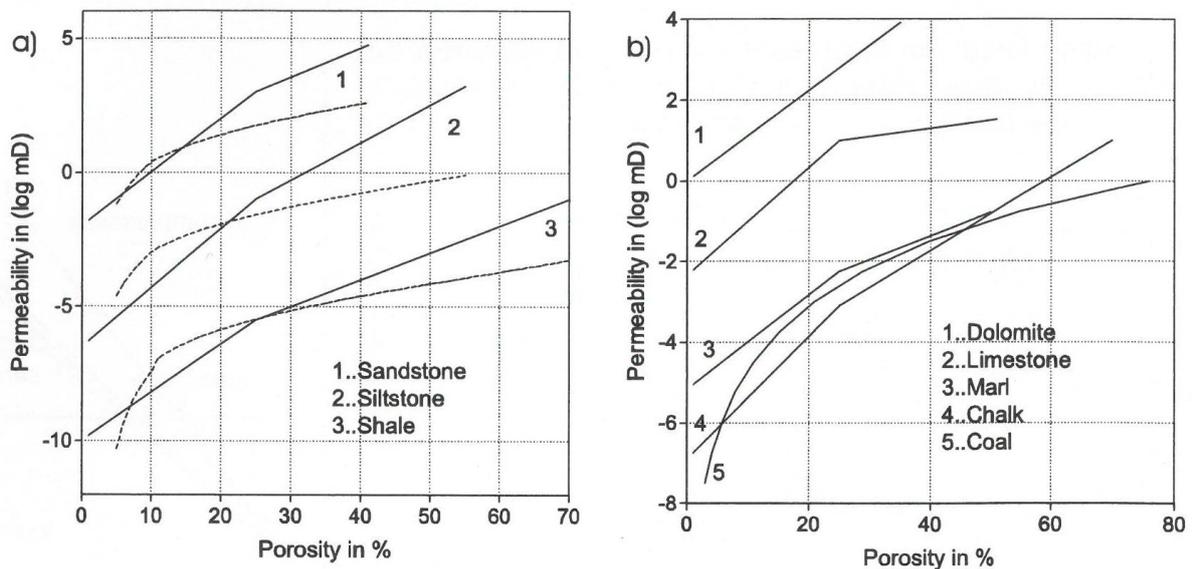


圖九、地層中靜水壓力、靜岩壓力、孔隙壓力、超壓與岩石有效應力關係。而不同岩性的有效壓力與孔隙率關係也會不同，如頁岩有效壓力增加對孔隙率的影響大於砂岩（圖十）。孔隙率的變化也會影響滲透率的變化；當孔隙率增加，滲透率也

會增加，且不同岩性變化亦有別（圖十一）。



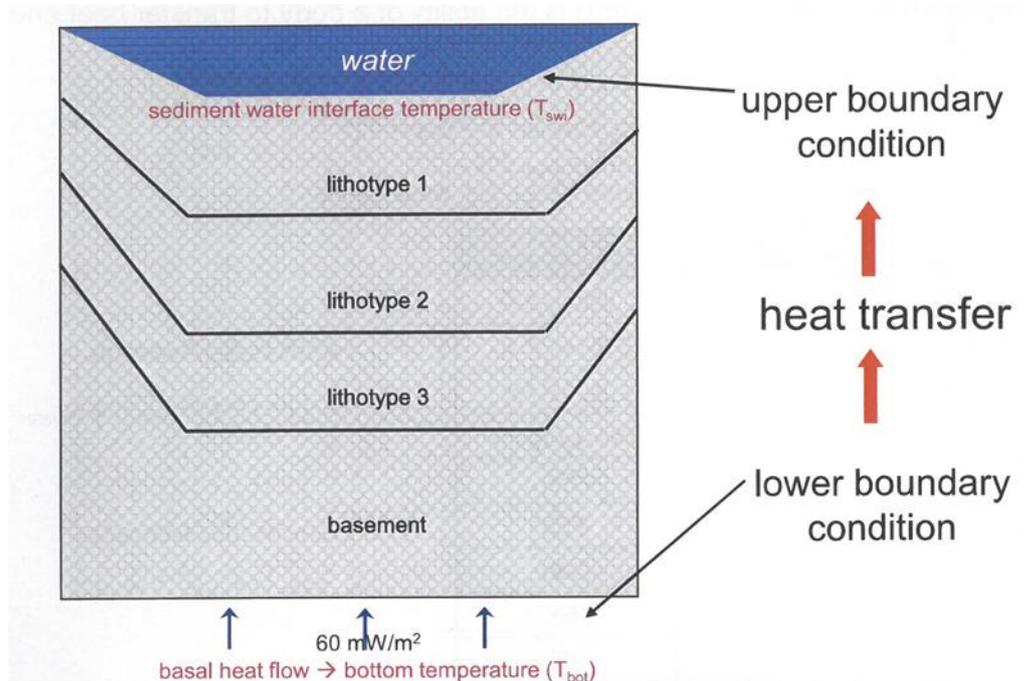
圖十、砂岩與頁岩有效應力與孔隙率的關係。



圖十一、不同岩性孔隙率與滲透率的關係示意圖。

本日課程另一部分是討論溫度變化。溫度為進行油氣盆地模擬的一項重要參數，為必須設定之邊界條件。在油氣盆地模擬中，溫度由兩項邊界條件所控制（圖十二）。第一項為表面溫度，為地表或水體與沉積物介面溫度（Sediment Water Interface

Temperature, SWIT), 是為上邊界條件; 第二項為盆地底部的熱流, 地殼與地函交界之基底熱流 (Basal Heat Flow)。SWIT主要受古水深控制。古水深的判斷可由鑽井地質紀錄, 如珊瑚礁、化石, 岩性等, 並使用模擬計算。



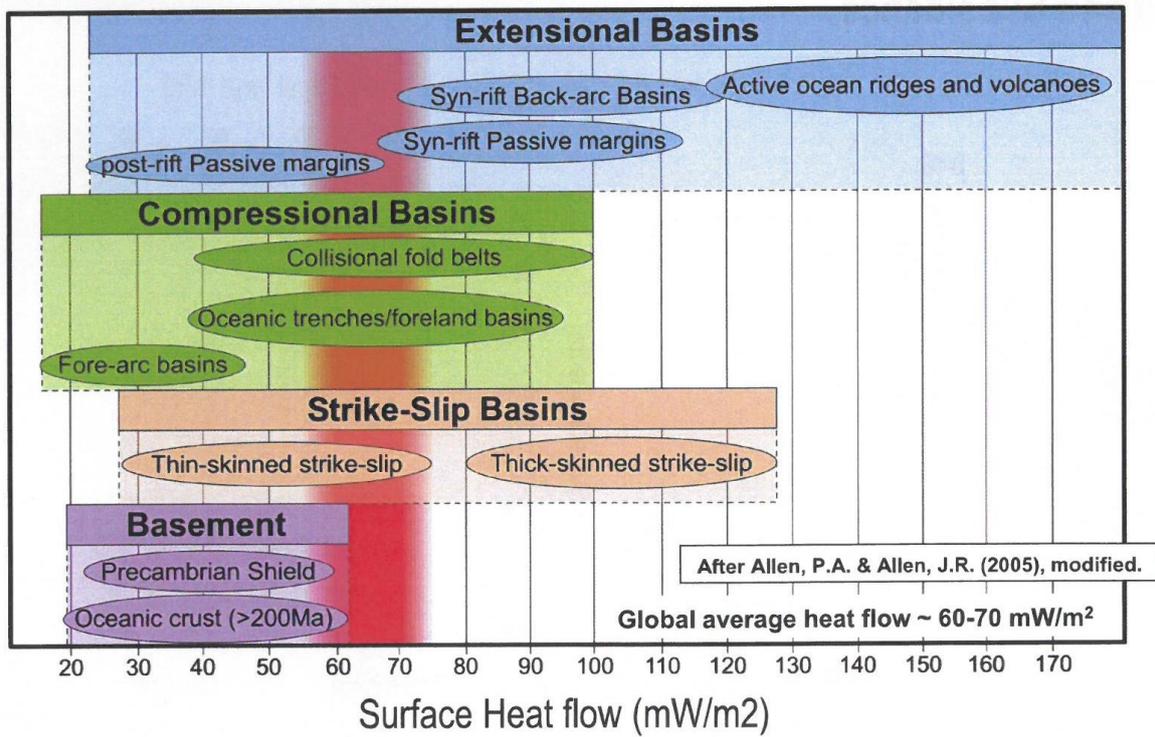
圖十一、油氣盆地模擬中的熱邊界條件示意圖。

另一項控制因素是考慮地殼與地函交界處的基底熱流, 受構造活動所控制。地殼張裂活動處因地函隆起, 會有相對較高的熱流。而張裂構造有不同的理論模型, 如McKenzie的Pure-shear模型或Wernickle的Simple-shear模型, 在形成裂谷後, 因地殼在不同地質時期的拉張程度不同而有不同的拉張係數 β 值, 故 β 值可以用來估算地質時期的熱流變化。目前全球地殼與地函介面基底熱流平均值在 $60\sim 70 \text{ mW/m}^2$ 之間 (圖十二), 其中以張裂盆地的熱流較高, 壓縮形盆地, 如聚合板塊邊界或轉型斷層邊界的熱流較低。

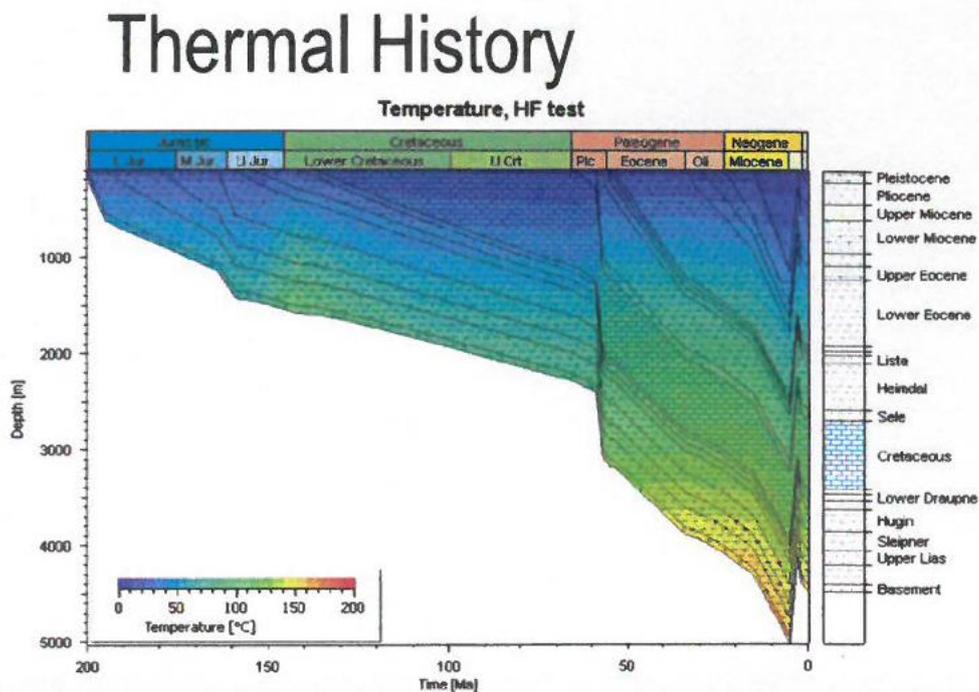
壓力與溫度是盆地模擬時常用的參數, 實際在進行一維盆地模擬時也常利用鑽井時進行DST測試所量測的孔隙壓力、溫度、以及實驗室分析有效孔隙率、與鏡煤素反射率 (Vitrinite Reflectance, VR) 實測資料來進行校正。一般先校正壓力與孔隙率, 再校正溫度與成熟度。

另外在一維盆地模擬進行時, 有一重要項目即為進行埋藏史 (Burial History) 重建 (圖十三), 從埋藏史之中, 可以看到盆地沉積、抬升侵蝕、沉積間斷等過程。同時以現在模擬軟體的功能, 也能同時顯示在埋藏過程中與油氣生成有關的變化 (圖十

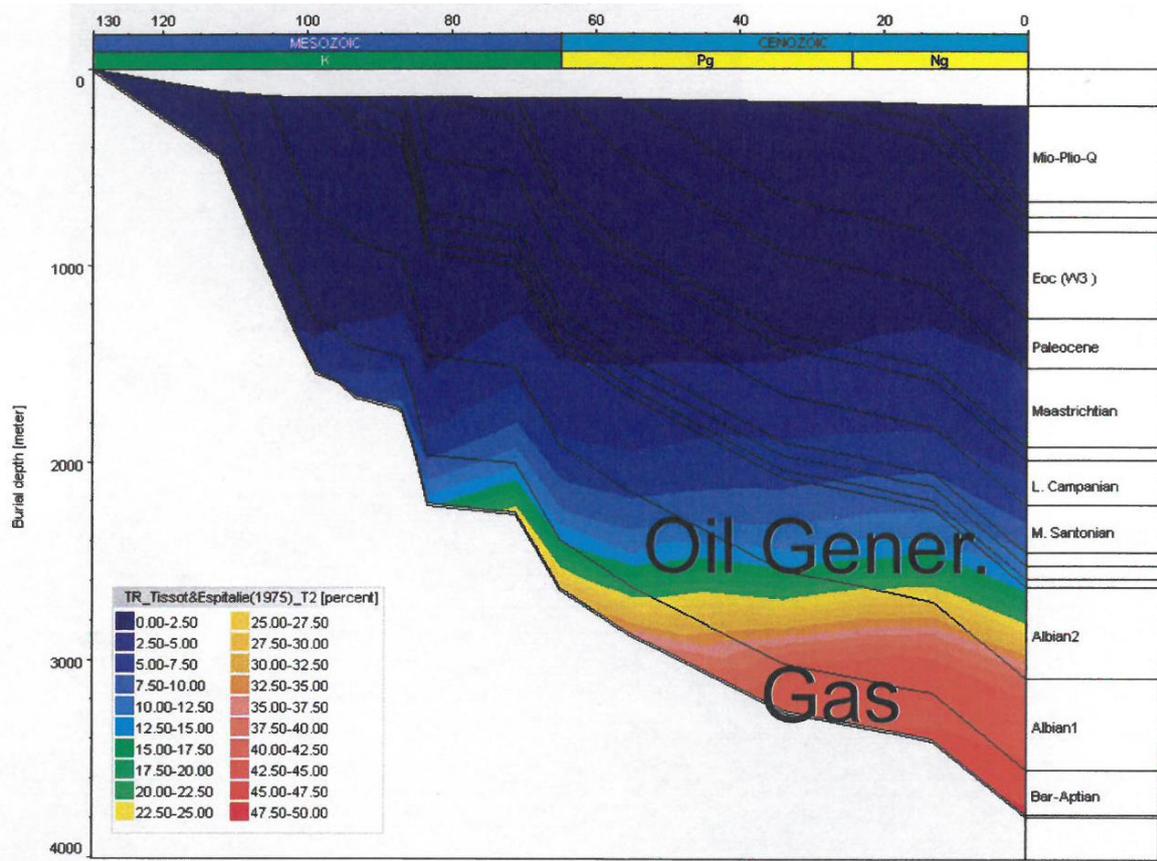
四)，以及相關參數隨時間的變化等（圖十五）。



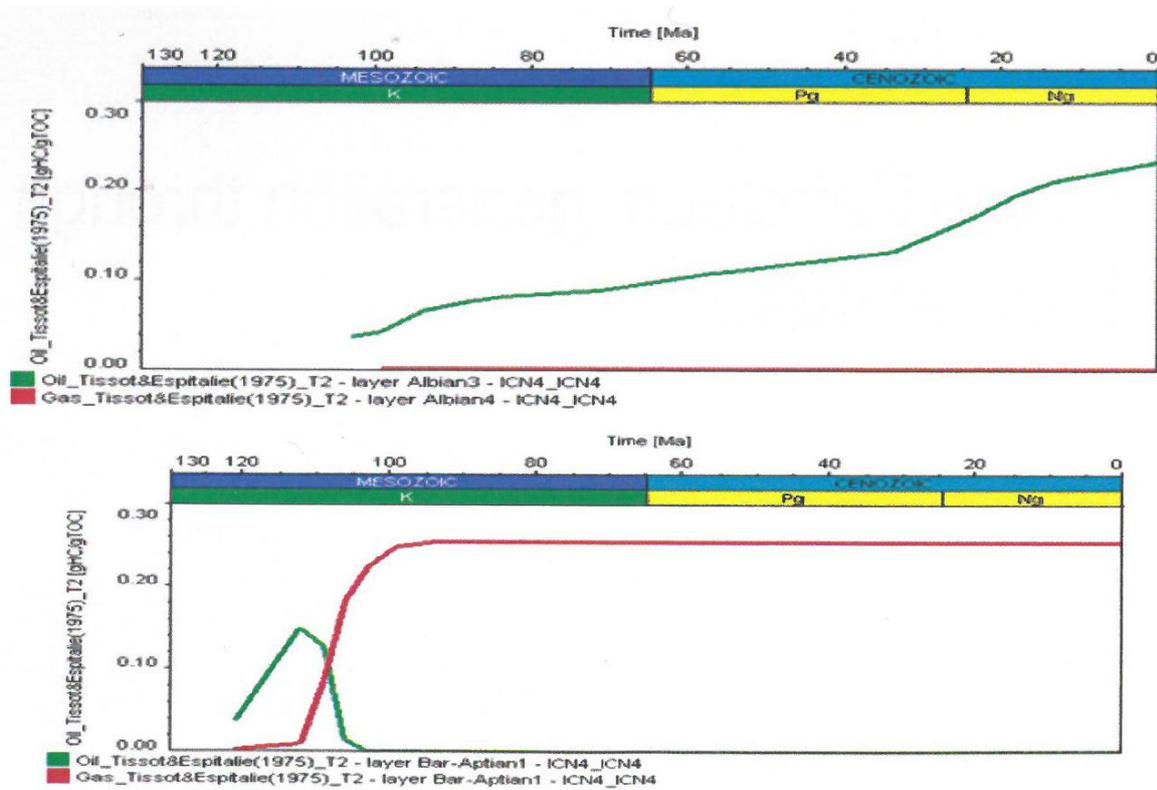
圖十二、全球基底熱流分布。



圖十三、埋藏史圖，本圖指示溫度隨埋藏過程之變化。



圖十四、埋藏過程中不同地層油氣轉化率的變化。

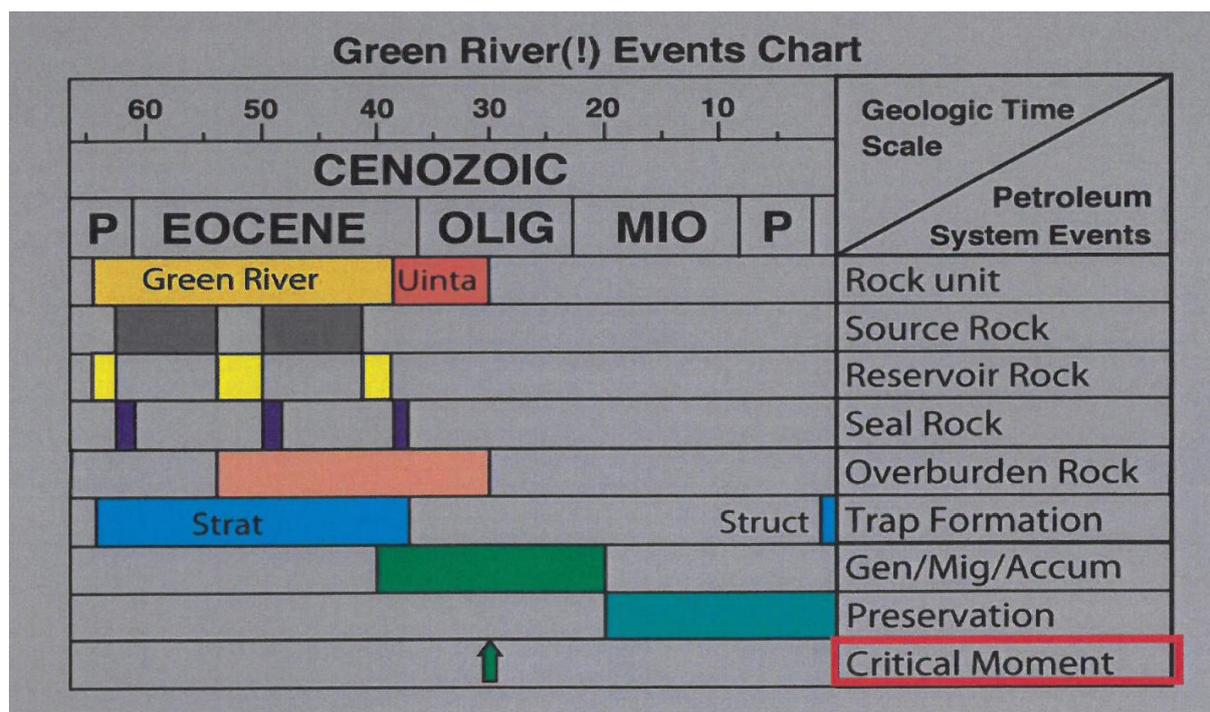


圖十五、不同生油岩油氣生成量隨時間演變曲線圖。

第四日（11月1日）：石油系統模擬 I。

本日討論石油系統模擬，主要介紹石油系統（Petroleum System）的觀念，油氣生成與移棲。

石油系統包括生油岩（Source Rock）、儲集岩（Reservoir）、蓋岩（Seal）與上覆岩（Overburden Rock）四個基本要素。生油岩是指有機物富集的沉積岩，經過埋藏與熱成熟作用後可將其有機物轉化成油氣。儲集岩是指油氣生成後，經運移最後埋藏積聚之處。蓋岩是指可防止儲集岩油氣散失的緻密岩層，上覆岩為覆於生油岩之上的岩層，可使生油岩埋深，在高溫高壓下生成油氣。在上述四個石油系統要素均形成後，尚有有一個重要的觀念—關鍵時間（Critical Moment），這是指一個石油系統中油氣生成—運移—積聚最重要的時段，這時開始有大量油氣生成並運移到儲集層。另外尚有油氣保存時間，封閉形成等條件，影響油氣是否能保存到現代。對於一個石油系統各要素與過程隨時間的關係可用圖十五的方式呈現。

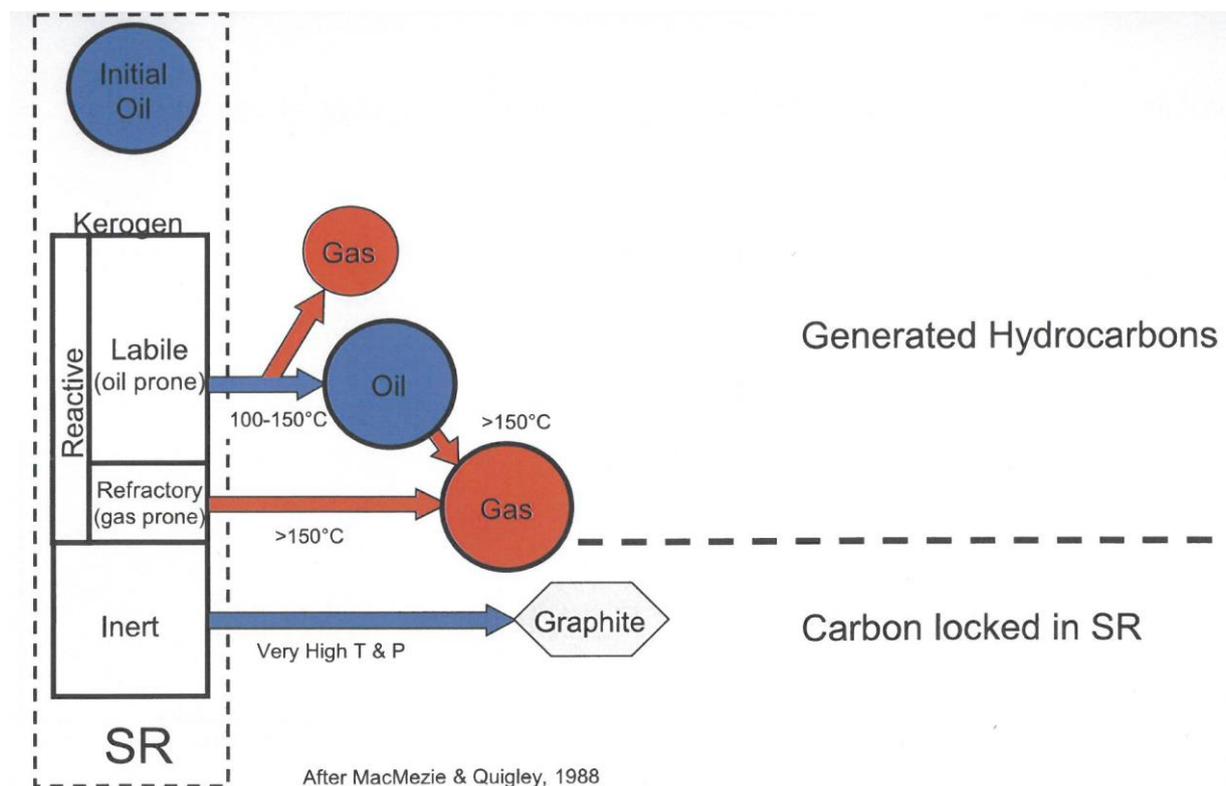


圖十五、石油系統各要素與過程隨時間的關係示意圖。

油氣來自於生油岩中的有機物，當沉積的有機物在埋藏過程中轉為油母質，持續埋藏受熱後，其中部分油母質會裂解形成油氣，其他無法裂解的部分形成石墨，保存於地層中（圖十六）。油氣排放量可以經計算所得，油氣排放量計算方式如下式：

$$M_E = \sum (P_o)(PGI)(PEE_n)(\rho_{ROCK})(y)(AREA)$$

需要考慮項目包括初始油氣潛能（Initial Petroleum Potential），油氣生成指數（Petroleum Generation Index, PGI, 可被轉換成碳氫化合物之比例），淨油氣排放率（Net Petroleum Expulsion Efficiency, PEE, 油氣可自生油岩排出之比例），生油岩厚度，成熟生油岩面積。其中PGI計算時需要考慮無法排放油氣之耐火油母質（Refractory Kerogen）與可排放油氣之具活性油母質（Labile Kerogen）的比例，以及初始與活性油母質之比例。同時油母質類型與初始有機碳含量對於PGI與PEE的亦有相當影響，影響油氣生成時機。



圖十六、油氣生成示意圖。

另外需要考慮生油岩在移棲過中失去的量，計算損失量需考慮傳輸層孔隙率，殘餘飽和度 f 與油氣移棲區域的岩石體積，計算方式如下式：

$$V_L = \phi f V_D$$

將生成的量減去失去之量即為可充注到好景區的量。移棲所成損失的量與充注到好景區的量計算方式如下：

$$V_C = V_E - V_L$$

油氣生成量是指油固態油母質轉化為液態或氣態之油氣量，油氣生成量的計算使

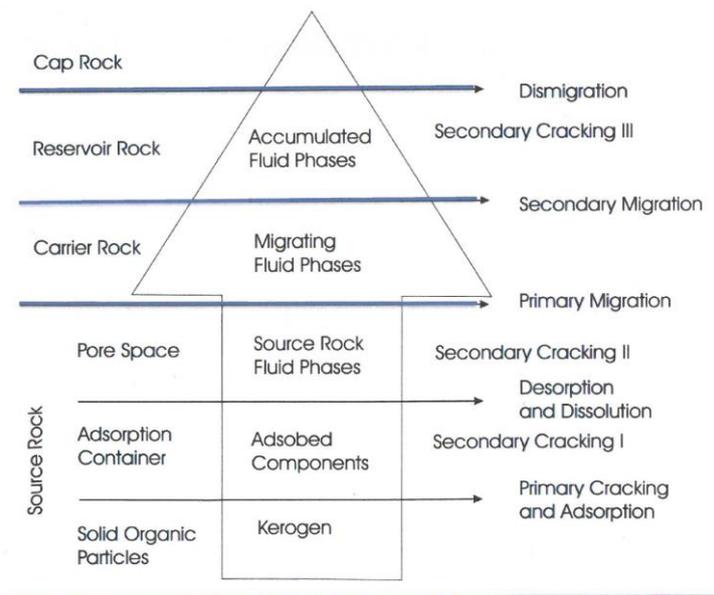
用Arrhenius一級動力學方程式計算：

$$k = A \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot T}}$$

A...Frequency Factor; E_i...Activation Energy
R... Boltzmann Gas Constant (8.314 Ws/mol/K).

從方程式中，可觀察到油氣生成與反應物的活化能及溫度有關。而反應物活化能的分布範圍與油母質類型有關，依此可計算油氣的生成量。

在瞭解自油氣自生油岩生成量與排放過程之後，接著就是模擬油氣的移棲方式。影響油氣移棲的因素包括油氣流體的相態、以及油氣的種類、通道與儲集岩的岩性、孔隙率、滲透率、溫度與壓力等物理性質。油氣移棲包括四種過程，分別為初次移棲（Primary Migration），二次移棲（Secondary Migration）、三次移棲（Tertiary Migration）以及再移棲（Remigration）。油氣初次移棲只油氣自生油岩被排出至傳輸層或儲集層的過程；二次移棲是指油氣在傳輸層中移動到儲集層的過程；三次移棲則為油氣自儲集層在次移棲到地表的過程；再移棲則是指油氣自一個儲集層中移到另一儲集層的過程。油氣移棲方式是由高位勢（Higher Potential）移到低位勢（Lower Potential），油氣流體的流動受到浮力、毛細壓力、超壓與擴散等因素影響，實際的流動方式為以上各項目交互作用所致。油氣排出後除了運移外，也可能為圍岩所吸附，亦可能在埋藏或移棲時裂解。在油氣生成後所發生的過程如圖十七所示。



圖十七、油氣生成後地旁放與移棲過程。

要模擬油氣在盆地中的運移，首先必須瞭解盆地類型；在張裂型盆地有油氣以向上移棲為主，而在老的沉降盆地則油氣側向傳輸為主；而壓縮型盆地油氣則可能同時

向上或側向移動。

目前盆地模擬中油氣移棲的模擬方式主要有三種；第一種稱為流線法（Flow Path），此方法油氣移棲之物理機制單純，只有浮力作用。因此其流動方向以和地形與地層走向有很高的關聯性，油氣以垂直等深線的方向自生油岩向地形高區移動。若高區已有圈閉形成，則可匯聚形成油氣藏。使用這種方式的好處是計算速度快，尤其是在高解析度的模式能解較多計算時間，同時形成油氣藏時也能與儲集層的幾何型態相對應。然而此種方法有些缺點存在，包括物理上油氣運移只考慮流體的浮力是不夠的，同時要考慮流體在孔隙的運動與毛細壓力（Capillary Pressure）的作用。再者，模式設計的人為影響很大，如蓋岩的設置會影響是否有圈閉存在。而且對於複雜的石油系統並不適合只用流線法來模擬流體運動，這過於簡化的流體移棲模式並不能反映在複雜地質條件油氣移棲真實的狀態。

第二種方法為Darcy法，基於流體在孔隙中流動的Darcy定律而來。使用這種方式考慮流體在孔隙中傳輸的過程，在物理上比流線法只單純考慮浮力更符合真實狀況，對於不同相態的流體傳輸行為預測功能較佳，同時在模式運作中也能結合地層與壓力預測結果。在模式中使用Darcy法進行預測呈現方式易不同於流線法，在網格中以Darcy法對於油氣的積聚是流體的飽和度（Saturation）呈現，不同於流線法顯示方式為流體充注整個圈閉。而Darcy法缺點在於及算時間長，若用於複雜、網格數量多的模式需要較多計算時間。同時對於部分較薄的儲集層，油氣的累積與突破蓋層預測準確度較低。

第三種方法為滲透法（Invasion Percolation），此種方法只考慮流體在岩石中以毛細壓力進行。其優點在於對於單相的油或氣移棲之計算快速，適用於高解析度的模式，亦能快速地測試不同的油氣充注模式。然而其缺點為對於多相態的的流體也需要較長的運算時間較長，同時對於高解析度的震測剖面所建立的地質模式，其油氣充注方式會呈現出體積較小的油氣藏，可能導致失真。

另外亦有結合以上三種不同方式的流體運移模式，如結合流線法與Darcy法的Hybrid法。油氣自生油岩生成，排放，經由傳輸層移動到儲集層的過程同時會受到浮力與Darcy定律控制，也因而衍生出Hybrid這種計算方式。此外尚有結合Darcy法與滲透法的模式，稱為Combined法。在應用上對滲透率低的地層使用Darcy法，而滲透率高的地層使用滲透法計算，計算時間亦較Darcy法與Hybrid法更短。

對於三維模型與石油系統要素使用不同流體運移方式的比較如表一。可以發現對於三維模型，單獨使用流線法、Darcy法與滲滲法都無法有效表示三維模型完整結果。因此對於不同石油系統要素需要有不同的流體的運算方式，最重要的是要考慮盆地尺度的構造與地層，以及在模擬時使用何種相態的油氣，依油氣相態與地質條件選擇運移模式，方能符合真實的結果。

表一、三維模擬中不同流體運移模式的優缺點比較。

3D Modeling Requirements:	<i>Darcy</i>	<i>Flowpath</i>	<i>Percolation</i>
<i>Dynamics</i>	++	-	-
<i>Scaling</i>	-	+	+
<i>Processing speed</i>	--	+	+ -
<i>Data availability</i>	+	+	+

Petroleum Systems Components:			
<i>Source and expulsion</i>	+	-	-
<i>Migration – low perm. units</i>	+	--	+
<i>Migration – high perm. carriers</i>	-	++	+
<i>Reservoir bodies</i>	--	++	+

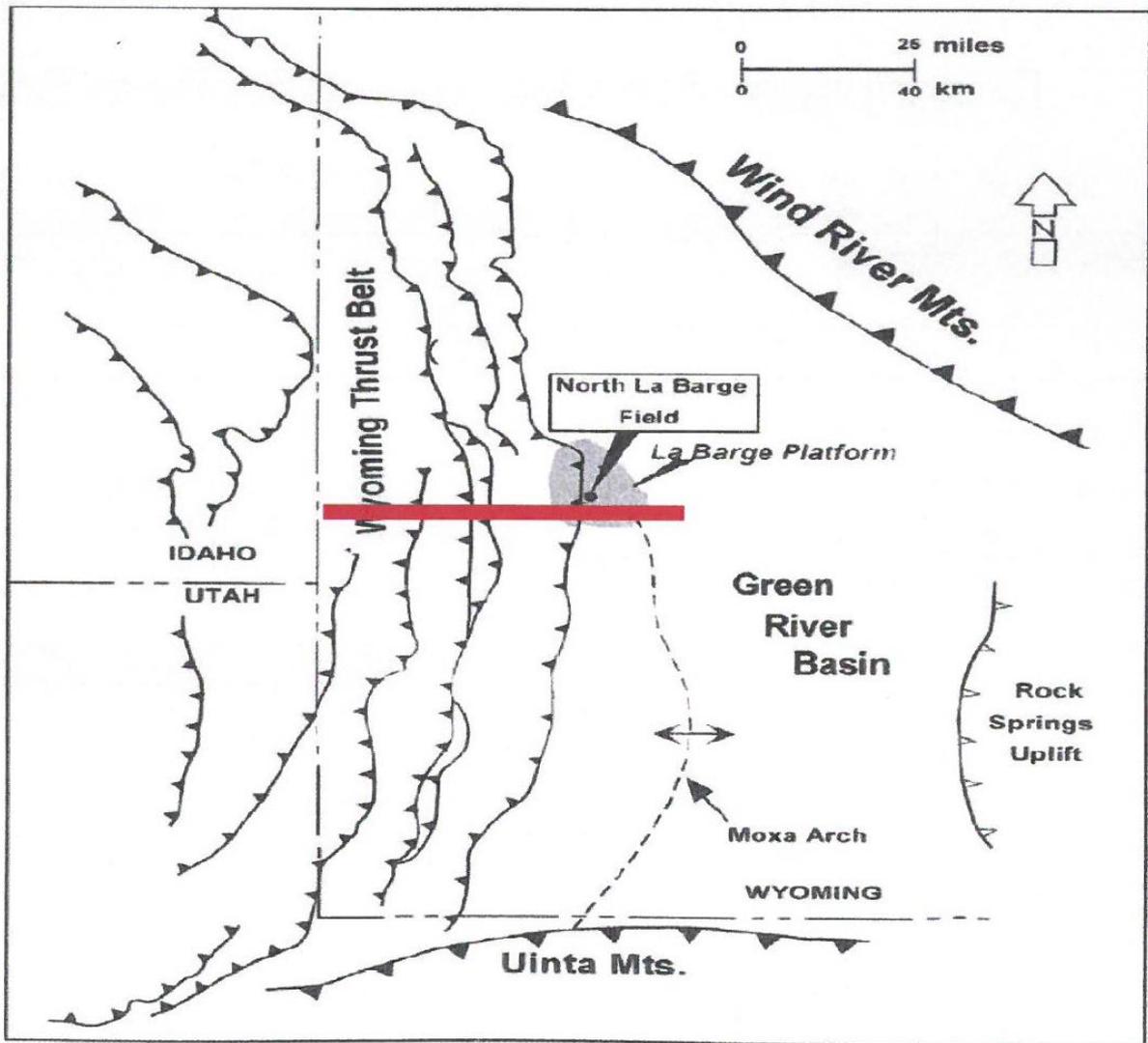
第五日（11月2日）：石油系統模擬 II。

本日主要課程包括以PetroMod軟體進行應用實例探討，以及影響油氣盆地模擬的風險評估。

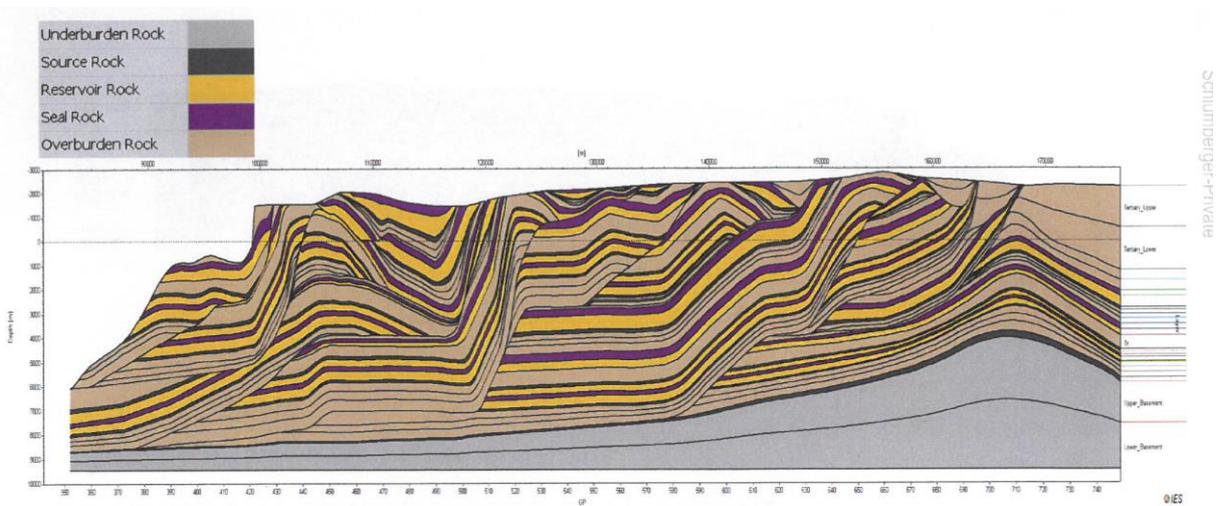
實例介紹部分分為一維、二維與三維部分。在一維部分介紹以軟體分析盆地埋藏史。從埋藏史圖可以顯示埋藏過程發生的地質事件，包括沉積間斷（hiatus），抬升侵蝕作用等事件。以及如何使用鑽井實測資料進行校正，建立盆地石油系統等。這部分在課程中亦有實作。

在二維部分則以美國Wyoming-Utah逆衝斷層帶為例（圖十八）。由於這是一個逆衝斷層系統，因此必須先進行構造回復，將受逆衝斷層影響的地層回復，建立受逆衝斷層影響的地質模式（圖十九）；接著進行井下校正（圖二十），再進行油氣生成與移棲模擬。模擬結果如圖二十一。其中對於逆衝斷層帶，由於逆衝斷層活動造成的地層快速埋藏，可能導致埋藏時的溫度無法與單純埋藏所計算的溫度平衡（圖二十二）

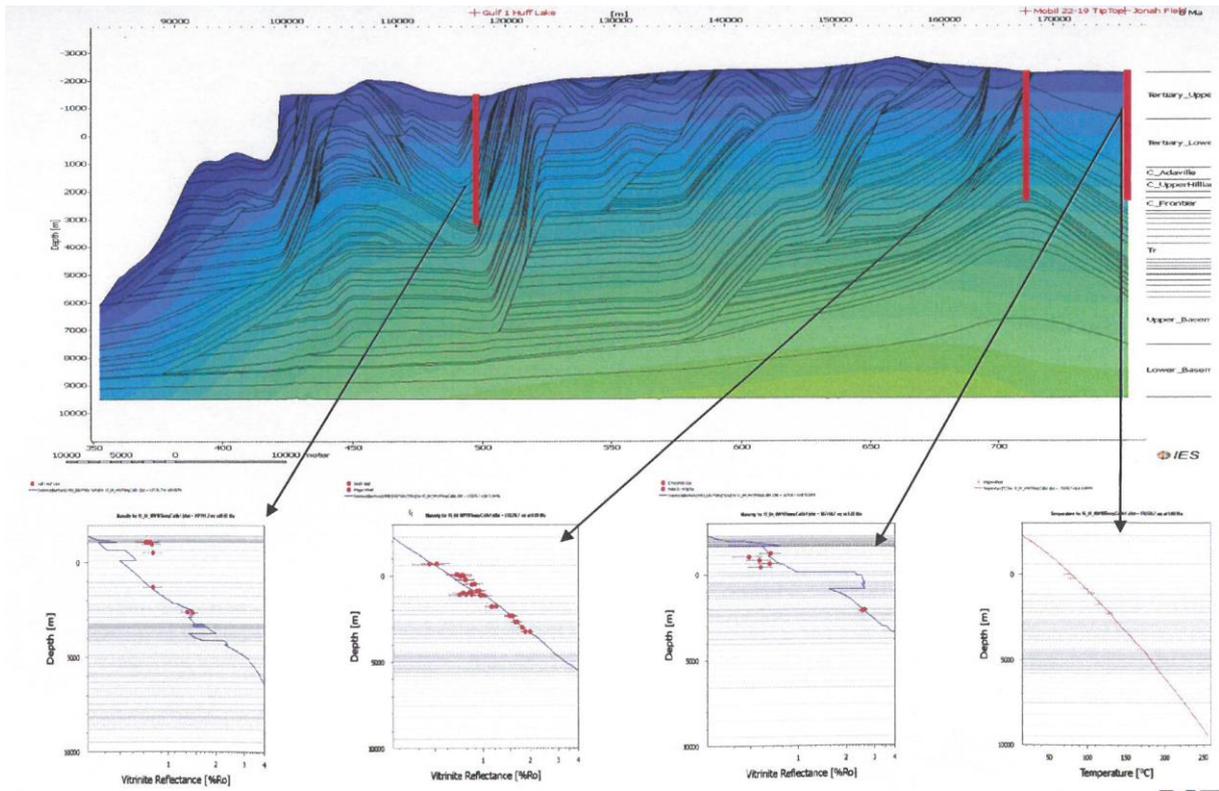
；如此對於油氣生成與移棲可能會有一些影響。



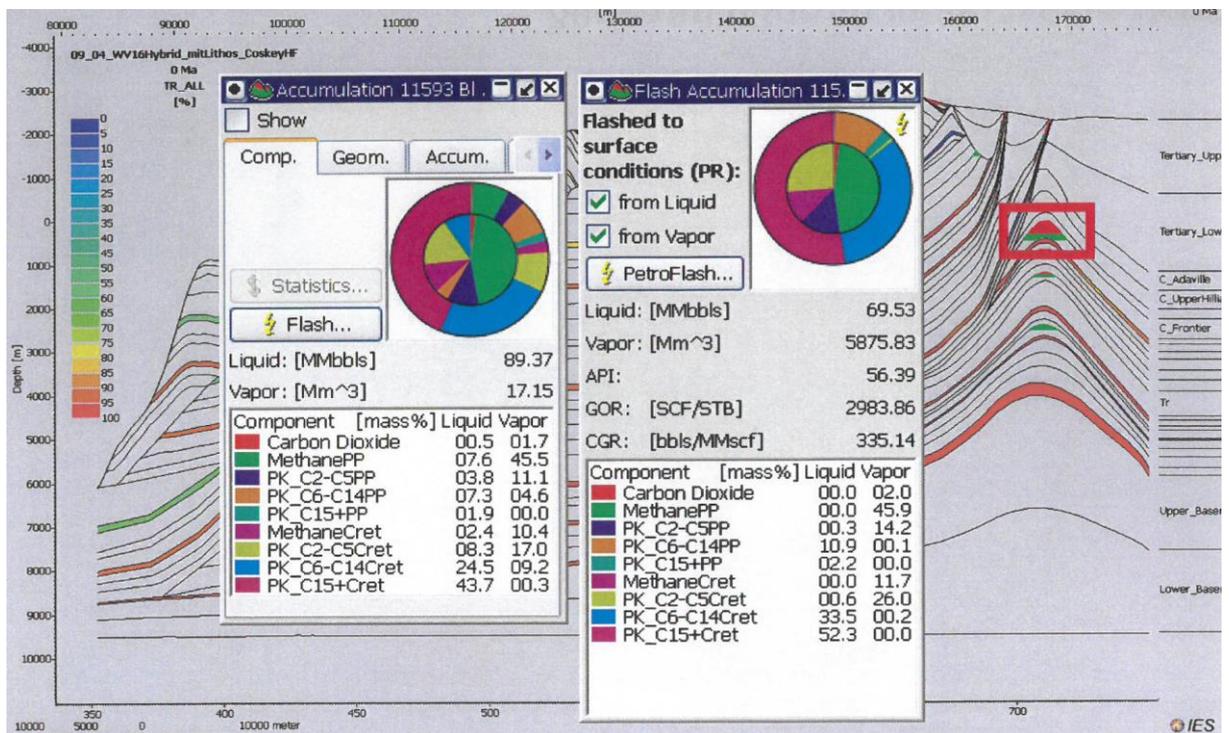
圖十八、Wyoming-Utah逆衝斷層帶平面圖。



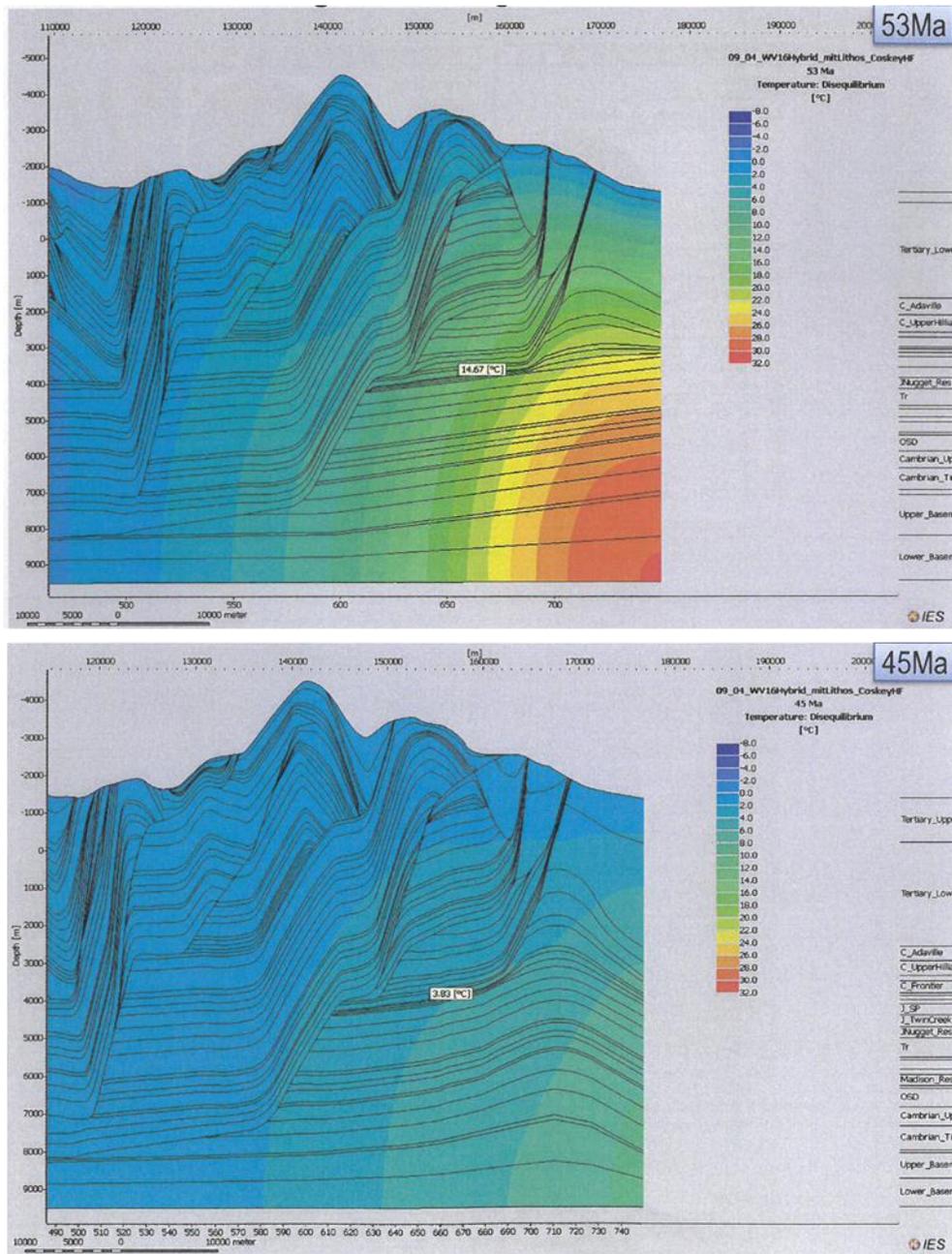
圖十九、Wyoming-Utah逆衝斷層帶地質模式。



圖二十、Wyoming-Utah逆衝斷層帶鑽井結果資料校正示意圖。



圖二十一、Wyoming-Utah逆衝斷層帶油氣模擬之油氣轉化率與組成結果。

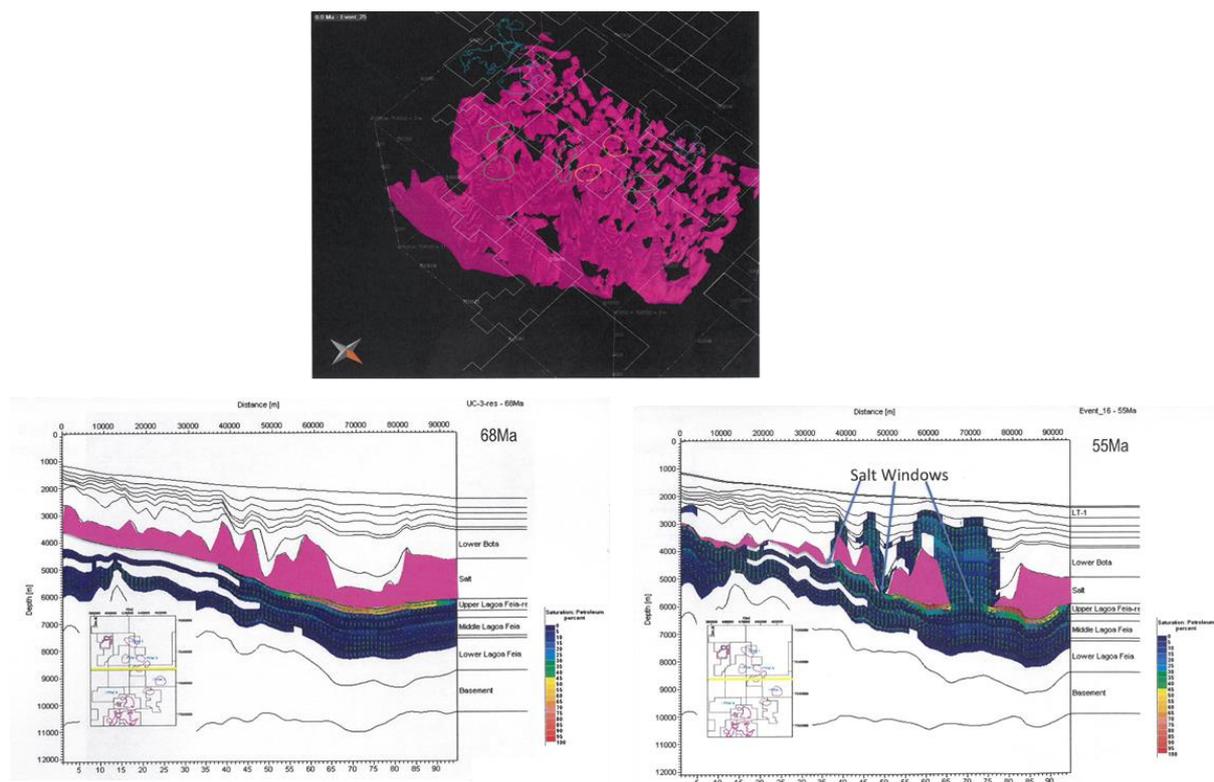


圖二十二、Wyoming-Utah逆衝斷層帶快速埋藏過程中造成的地層溫度異常。

三維部分則舉1個巴西外海，地層中有鹽丘（salt dome）存在的案例。岩鹽有可塑性，埋藏過程受壓力影響會穿入其他地層，其緻密度高，可在不同時期形成油氣移棲的蓋層或移棲的通道（圖二十三）。同時以軟體的設計，若將岩鹽的岩性置換為泥岩，亦能探討泥貫入體對於油氣移棲與保存的影響。

最後對於油氣盆地模擬的結果，有一點很重要的地方就是探討各項因素的不確定性與風險。風險的評估是指以上的因素是否存在，發生機率為何來評估。表示方式舉例而言：這樣的條件下，圈閉不存在的機率為30%。不確定性則以一個值來表示，指

若有發生，可能變動範圍為何；如蘊藏量估計為 150 ± 30 百萬桶。



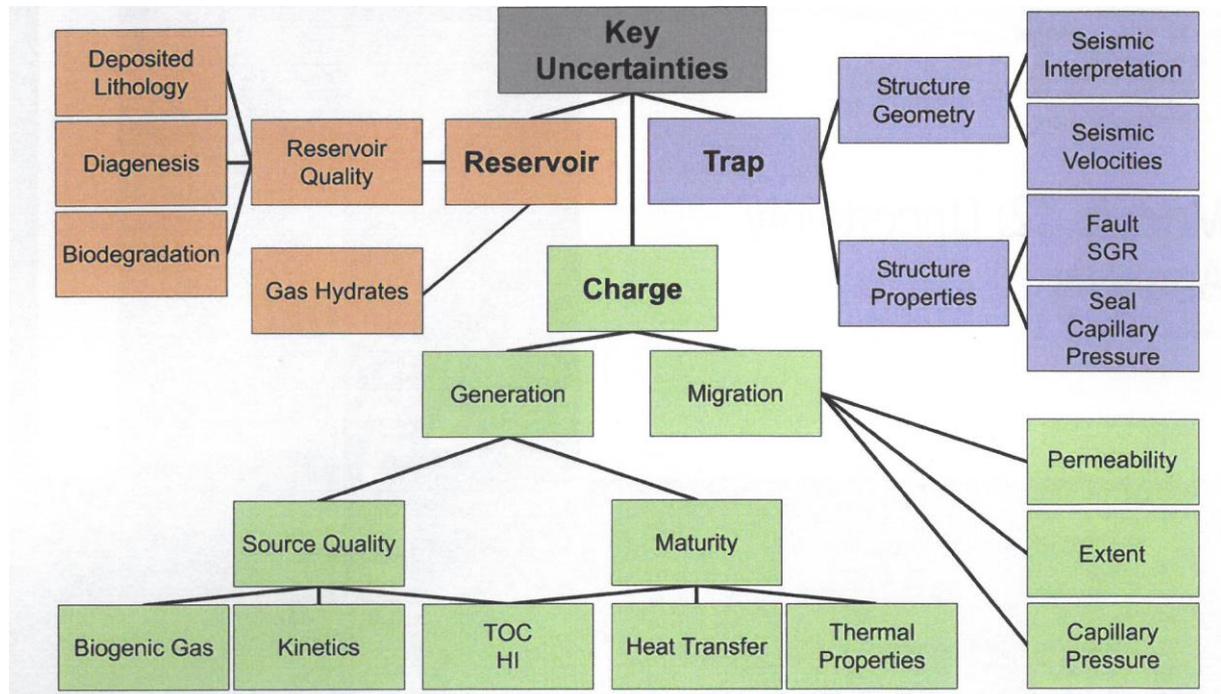
圖二十三、巴西外海案例，岩鹽層在不同時期分別做為油氣蓋層與通道。

不確定性最主要的來源包括儲集岩、封閉構造（trap）以及油氣充注（charge）（圖二十四）。影響儲集岩品質的因素包括儲集岩岩性，成岩作用（diagenesis）是否發生，以及是否發生生物降解（biodegradation）。儲集岩若以砂岩為主，則有較大孔隙率可儲存油氣；而成岩作用會影響孔隙大小，如孔隙中的石英或方解石膠結沉澱於孔隙中，會減少油氣儲存空間。而儲集層深度較淺則可能會受微生物影響，使原油降解成重油或餘下瀝青質。除此之外，也包括天然氣水合物（gas hydrate）的形成與否。在低溫高壓的環境有利於水合物生成，可能於油氣移棲通道生成後，阻止油氣進一步移棲。

封閉構造這部分的風險在於構造之幾何形態與性質。構造之幾何形態通常由震測解釋而來；人為判斷，或是速度模型的計算都會影響一個封閉構造解釋的結果。而在構造的性質部分，主要與斷層或是蓋岩的封閉能力有關。若斷層能作為通道，則遊憩會因此散逸。而蓋岩緻密程度不夠，油氣會從蓋岩脫離儲集層。

油氣充注的部分的影響可分為2個部分，首先是油氣生成。在油氣生成項目中又分為生油岩品質（source quality）與成熟度兩大部分。生油岩品質討論生油岩與產油

氣有關的性質，包括有機碳含量，氫指數高低等有機物豐度特性等，尚有有機物類型及其生煙動力學，以及對於產生物氣地層而言，影響生物氣生成的控制因素為何等。接著是成熟度，成熟度需達這與區域的熱流還有岩性與埋深深度有關。



圖二十四、油氣盆地模擬之不確定性因素。

關於油氣充注風險第二項所要考慮的為油氣移棲。移棲過程和地層的孔隙、滲透率，地層延續性與毛細壓力有關。這幾個項目受地質條件控制，包括岩性、構造活動等。

在盆地模擬中，通常影響結果最大的因素為生油岩與熱歷史。在生油岩的部分，以地質條件來看，影響因素包括水平或垂直有機相的變化，以及厚度、延伸範圍等。舉例而言；如在一個湖盆，通常湖盆中心有較多有利產油之有機物，盆地邊緣則有較多來自高等植物、傾向產氣之有機物。或是遇上砂頁岩互層時，生油岩應如何設定？此外尚有實驗室分析造成的影響，以及在回復有機碳含量初始過程造成之誤差；這部分在設定時也會有人為主觀認定。

熱歷史的決定也是油氣盆地模擬的一個難題。如上邊界的溫度之設定受制於過去古水深，這本身就不是一個很容易確定的資訊。下邊界之基底熱流隨時間演化也難以確認；若是在簡單的張裂盆地，可以從理論估算拉張係數來取得熱流演化史。但若是複雜構造，或有造山運動，沉積速率高低，沉積間斷或地層缺失對於熱流估算將會很

困難。此外、此項變化若無鑽井資料，很多參數如熱導係數、上覆岩厚度的估算也都有相當的誤差。

以上各項探勘的風險基本上都與地質條件有關，這有賴於進行油氣盆地模擬之前對於各項輸入資料品質的控制。然而很多情況通常都沒有鑽井資料，甚至在鑽井後亦無法得到需要的答案，也因此在這種情況下，通常可對會造成風險的項目，如生油岩各項性質，包括年代、有機碳含量、體積、有機物種類與生烴動力學、熱流等進行多種狀況模擬，並對這些模擬結果進行敏感度分析（sensitivity analysis），排出最可能影響結果的因素之順序（表二），以作為下一步探勘計畫進行的參考。

整體而言，這五日的課程提供詳實的油氣盆地模擬內容之基礎觀念。從最初的沉積盆地之構造與沉積演化分析，接著導入油氣盆地模擬的部分；包括使用軟體建立模型，使用實際資料校正模型，以及分析模擬取得結果。課程安排本身提供一個進行油氣盆地模擬時的工作流，以及需要注意的事項；可以將之運用在未來進油氣盆地模擬的工作上。同時除了油氣模擬外，盆地模擬所提供的分析結果也能探討盆地演化史，提供相關資料給的地質人員使用。

表二、敏感度分析的實例。此案例以生油岩品質對模擬結果影響最大。

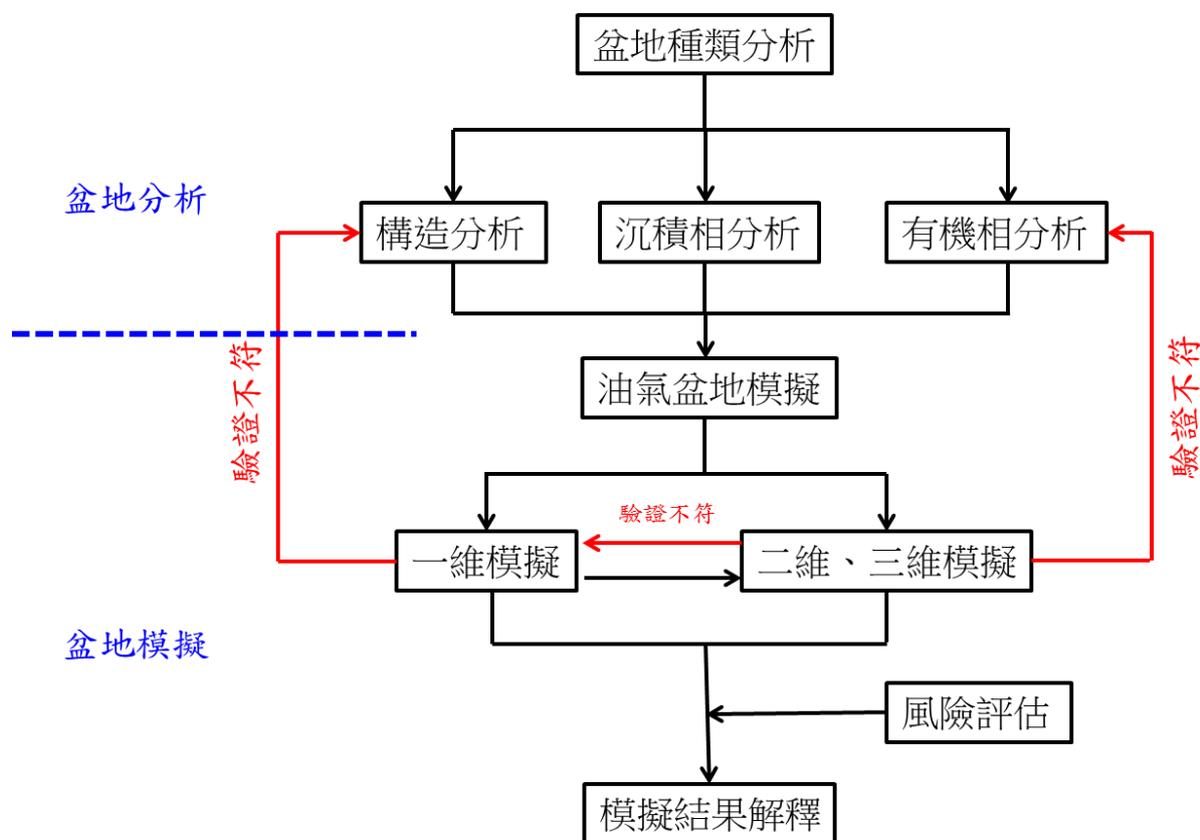
Effects of a 10% change in the input parameters:

Input Factor	Effect on Results %	Order of Importance
Stratigraphic age source rock	< 1	5
Source rock quality	30-60	1
Source rock volume	10	4
Generation/Expulsion kinetics	20-50	2
Source temperature history	10-40	3

參、具體成效

本計畫「參加油氣盆地數值模擬課程」所得的具體成效是取得一個進行油氣盆地模擬時的工作流程概念。首先需要進行盆地分析，瞭解的是進行中的礦區是屬於什麼類型的盆地，如裂谷盆地，弧前盆地，前陸盆地等。瞭解欲進行模擬的盆地類型，有助於之後以震測資料進行構造與沉積演化之解釋。接著需要瞭解盆地的沉積相，以及構造演化歷史。沉積相影響著盆地的埋藏過程，沉積地層中的岩性，以及盆地中的有機相變化；構造活動控制盆地中斷層、褶皺等分布，影響盆地中是否有封閉可形成並儲存油氣，以及是否有通道可供油氣移棲。在這一步主要工作為取得進行模擬所需輸入的資料。接著使用軟體進行模擬時，首先從一維模擬開始，以鑽井或露頭實際測量資料，校正模擬結果，取得正確的輸入參數。接著進行二維或三維模擬，在模式中輸入實際資料，以及一維模擬校正所取得的結果，進行油氣生成與移棲模擬；接著對於盆地中各項地質因素進行風險評估，若有鑽井則與鑽井結果比較。流程如圖二十五所示。

由於進行油氣盆地模擬首先要做的是盆地分析，也因此以探採研究所目前的組織



圖二十五、油氣盆地模擬工作流程圖。

架構而言，針對需要進行油氣盆地模擬之類的工作研究計畫，對於人員必須進行跨組的

整合編組。如在初期盆地分析時，地物師進行震測結果解釋，地質師進行沉積相解釋，地化師分析有機相；在這個部分主要工作是進行盆地分析，決定要輸入模式的資料為何。在這個部分為盆地分析階段。接著將從盆地分析階段取得的資料輸入模式，並使用一維模式進行孔隙率、壓力以及熱史校正，取得邊界條件等資料。接著以校正過條件，輸入二維或三維模式進行油氣生成與移棲模擬，同時也包括盆地演化史的模擬。之後以實際資料驗證，以及分析模式中各地質條件的風險。而在模擬部分也須由地質師、地物師與地化師共同合作，討論模擬結果的正確性，風險所在，以及如何進行修正。如此將有助於油氣盆地模擬工作進行，增進探勘工作效率。

肆、心得與建議

本次出國實習時間共7日，因事前已做好規劃與準備，因此行程、課程等均順利進行，全程專心參與油氣盆地數值模擬課程，獲致心得如下：

1. 油氣盆地模擬為油氣探勘工作中不可或缺的一環。相較於一般以地球物理或地質學進行探勘時只著重在尋找封閉構造或油氣徵兆，油氣盆地模擬則能整合有機相與地球化學結果，進一步探討盆地的石油系統，包括石油系統組成要素之生油岩、儲集岩、蓋岩與上覆岩關係，還有石油系統之油氣的生、排、移、聚過程，以及盆地的沉積與構造演化情形。如此整合後更有機會增加探勘成功率。
2. 進行油氣盆地模擬的工作量大，同時需要不同專長的人員同時進行；因此未來研究計畫若須進行油氣盆地模擬，對於人力可進行跨組任務編組，使不同專長研究人員共同合作。
3. 油氣盆地模擬除了用來瞭解油氣生成與移棲外，亦可應用在盆地分析上，瞭解盆地的地質過程。如盆地模擬中所建立的埋藏史可用來瞭解盆地沉積時所發生的沉積間斷，或是侵蝕等事件；亦能使用模擬所計算的結果來討論油氣流體在地層中物理性質等。可推薦有需要的同仁多多利用油氣盆地模擬軟體協助研究進行。
4. 目前中油公司內使用油氣盆地模擬技術進行礦區評估的機會較少，可推廣增加其應用，在礦區評估時使用對方提供資料進行模擬以作為加入的參考。

伍、附錄

課程介紹：

Basin Analysis and Petroleum Systems Modeling

The quality of a numeric computer model is highly dependent on the quality of the input data. This 5-day course covers the key aspects of basin analysis and subsequent basin and petroleum systems modeling from input to output. We will discuss basin evolution beginning with plate tectonics, all the way to petroleum generation and migration. We will look at how risks and uncertainties influence our understanding of the petroleum systems within a basin and how we can quantify those uncertainties.

The aim of this course is to provide the basic geoscience background needed by anyone engaged in Petroleum Systems Modeling. Attendees will learn what kinds of questions to ask, what kind of data is needed to build models and solve particular problems and to apply geological reasoning to quantifying uncertainties.

課程內容：

Day 1

Introduction to Sedimentary Basins

- Definitions
- Plate Tectonics

Basin Forming Mechanisms

- How are basins formed?
- Where are basins formed?

Basin Classification and Structural Analysis

- Nomenclatures
- Structural styles within sedimentary basins

Day 2

Basin Fill

- Sequence Stratigraphy
- Depositional Environments

Geochemical Analysis

- Organic Matter in Sediments
- Source Rocks
- Geochemical Analysis for Petroleum Exploration

Day 3

Temperatures in Sedimentary Basins

- Pressure and Compaction
- Heat Flow
- Temperatures

Day 4

Petroleum Systems Modeling

- Hydrocarbon Generation
- Hydrocarbon Migration
- The Petroleum System Approach
- Uncertainty Management and Quantification

Day 5

Petroleum Systems Modeling

- Hydrocarbon Generation
- Hydrocarbon Migration
- The Petroleum System Approach
- Uncertainty Management and Quantification