

出國報告（出國類別：實習）

岩石資料、電測及地層測試資料的整合  
(Integration of Rocks, Logs and Test  
Data)

服務機關：台灣中油股份有限公司

姓名職稱：地質師 李珀儂

派赴國家：美國

出國期間：106年11月12日至11月19日

報告日期：107年1月10日

## 摘要

為提高本公司的高階電測解釋能力，測勘處擬定 106 年出國計畫「油層高階電測解釋技術研習」。選派本人於 106 年 11 月 12 日至 11 月 19 日赴美國休士頓 Petroskills 機構，參加「岩石資料、電測及地層測試資料的整合(Integration of Rocks, Logs and Test Data)」課程。

此課程著重複雜儲集層於探勘、佐證及生產階段的評估與生產挑戰。課程將回顧解決複雜儲集層問題之岩石性質、電測儀器及工程資料的基礎知識，同時討論複雜儲集岩油氣田的實例。此課程以工作坊的型式進行，培養解決問題的能力。參訓人員來自世界各地，除幾家美國當地油公司派員參加之外，尚有菲律賓、韓國及德國國家研究機構人員，其中佔多數的是奈及利亞國家油公司的同業(一共派出 8 員)。足見各地油氣田皆面臨複雜儲集層之生產開發問題。

## 目次

目的 .....	1
過程 .....	2
心得及建議 .....	7

## 目的

台灣中油股份有限公司(以下簡稱：本公司)為提高高階電測解釋能力，本公司探採事業部測勘處擬定 106 年出國計畫「油層高階電測解釋技術研習」。選派李員於 106 年 11 月 12 日至 11 月 19 日赴美國休士頓 Petroskills 機構，參加「岩石資料、電測及地層測試資料的整合(Integration of Rocks, Logs and Test Data)」課程。此課程主要邀請對岩石物理學、地質學及石油工程學具有基本認知的岩石物理師、儲集岩工程師、地質師與地球物理師，透過課程講解與討論，將學會整合不同資料體得以更合理解釋整體儲集岩表現。

此課程講授的背景知識，足以讓學員於探勘、佐證及生產階段時針對複雜儲集層的評估與生產挑戰進行解釋。為解決上述問題，課程將回顧岩石特性、電測儀器與工程資料等基本知識。隨著課程進行，複雜儲集岩的概念將由一系列真實案例所闡述。

此堂課程的主要目的如下：

1. 根據生產差異來分辨碎屑質儲集岩與碳酸質儲集岩。
2. 決定關鍵性岩石物理參數得以更準確地進行儲集岩評估。
3. 使用岩屑、側採岩心與傳統岩心來決定儲集岩特性。
4. 設計整合型解釋流程。
5. 計算黏土礦物體積(Vclay)。
6. 利用孔隙率井測資料計算複雜儲集岩之孔隙率。
7. 決定生產之有效孔隙率。
8. 利用不同的方法計算水飽和度。
9. 將岩石及井測資料與生產表現做連結。

## 過程

岩石資料、電測及地層測試資料的整合(Integration of Rocks, Logs and Test Data)課程於 106 年 11 月 13 日至 11 月 17 日舉行,地點位在美國休士頓西側的凱蒂市。課程舉辦單位為 Petroskills, 乃係一間以教授完整石油業技術聞名國際的私人機構。

本公司派遣一員(即本人)參加本次訓練課程。本人於 106 年 11 月 12 日從桃園國際機場出發,並於 106 年 11 月 17 日由休士頓機場返程,抵臺時間為 106 年 11 月 19 日上午。

課程舉行之日程為上午 8 時至 11 時 30 分,下午 1 時至 4 時 30 分。授課講師為 John S. Sneider, 目前為 Sneider Exploration 公司之總裁,同時也是 Petroskills 的合夥人。從事石油相關事業近 30 年,學經歷皆相當豐富。Sneider 先生為 5 天的課程設計了 11 個主題,將分別敘述如下:

### Section 1 : Introduction

#### 1-1 : 課程簡介

五天課程的整體介紹與重點提醒。

#### 1-2 : 從失敗中學習

舉列說明失敗的可能原因有哪些。如:地球科學與工程資料的整合不佳、岩石物理模式選用錯誤、水飽和度錯估、錯估被破壞的儲集層為低滲透率層、低估生產層的孔隙與水飽和度....等。

### Section 2 : Fundamentals

#### 2-1 : 岩石成分

包含組成岩石的主要礦物:石英質(Quartz)、長石質(Feldspar)、岩屑質(Rock Fragments)。岩石的結構(Texture)指的是礦物的尺寸、淘選、形狀、圓度、球度及排列方式。其中礦物尺寸與淘選度在分辨沉積環境與原始孔隙率上是最常被運用的。

#### 2-2 : 流體能量與沉積物粒徑

在用來定義許多沉積環境的物理關係中,其中一項就是討論流體的流速與其所作用的沉積物。沉積物在垂向上的粒徑變化與淘選度常被用來定義沉積環境與沉積作用。

#### 2-3 : 岩石結構與初始孔隙率及滲透率的關係

孔隙率的定義是岩石孔隙的體積佔總體積的比值。其中岩石的孔隙是由礦物排列的間隙所形成。滲透率是對岩石的一種定量數值,定義為在固定壓差下,單位長度面積的岩石能夠允許流體通過的難易度。

#### 2-4 : 泥土與黏土礦物

泥土是指粒徑小於 0.004 mm 的礦物。黏土礦物是水和的鋁質矽酸鹽類。泥

土礦物在石油地質與石油工程上是相當重要的議題，舉凡封閉作用、流體屏障作用、井測校正、沉積環境解釋與完井設計。

#### 2-5：孔隙率與滲透率

這一節主要是介紹孔隙率與滲透率的實驗方法。其中孔隙率有三種測量方法：Boyle's Law Method、Liquid Porosity、Porosity Measurement in Shales。滲透率則有兩種方法：Steady-State Method 與 Unsteady-State Method。

### Section 3：Summary of Basic Logging Tools

#### 3-1：岩性指標井測

此節主要談論兩種基本的井測數據：自然電位測井數據(Spontaneous Potential Log)與伽瑪測井數據(Natural Gamma Ray Log)。這兩種數據在儲集層評估的運用上有很大的功用，例如：辨識具有潛能的高孔高滲儲集岩、定義層界與連井對比、定量地描述岩段之泥含量、決定水層電阻、評估可能的礦物....等。

#### 3-2：電阻率井測

此節主要談論電阻率井測儀器與其運用。電阻率測井數據可用來進行地層對比與決定含水孔隙的體積。電阻率測井儀器可分為三大類：電導性(Induction)、橫向性(Laterolog)與微電阻性(Microresistivity)。

#### 3-3：孔隙率井測

此節主要談論評估岩層孔隙率的井測數據，包含聲波走時井測數據(Acoustic Log)、密度井測數據(Density Log)與中子井測數據(Compensated Neutron Log)。聲波走時數據主要是紀錄聲波在岩石中傳遞的時間，而傳遞的時間長短則隨著岩石的礦物組成與孔隙率等特性相關，因此可進一步推估岩石的孔隙率。密度測井儀器則是藉由發射伽瑪射線進入地層，然後再偵測返回探測器的射線量，岩石密度愈高，探測器接收的返回量就愈少，藉此推估岩石之總體積密度(Bulk Density)，再以此進行孔隙率評估。中子井測儀器發射中子射線，並探測返回接收器的中子量，當地層的氫含量愈高(可能指示含水層或是黏土礦物)則接收到愈多返回中子，因此可進一步推估地層的孔隙率。

#### 3-4：核磁共振井測(NMR)

此節主要談論核磁共振井測數據(Nuclear Magnetic Resonance)的原理與應用。原子核裡的氫原子可看似小的棒形磁鐵一般，且原本是無方向性地隨機排列，但在外加磁場後，氫原子開始順著磁場排列(低能階)或逆著磁場排列(高能階)，當外加磁場消失後，這些高能階的氫原子開始不再逆著磁場排列，而逐漸變成順著磁場或隨機排列，這個過程中所釋放出的能量即被 NMR 儀器所接收。與常規井測不同的是，NMR 直接量測岩石空隙中的氫原子，因此可以高精度的評估孔隙率與滲透率。

### Section 4：Subsurface Pressure Data

#### 4-1：儲集岩流體特性

在不同的溫度與壓力狀況下，碳氫化合物會以氣態、液態或兩者混和的狀態下存在。當儲集岩中的油被生產至地表時，有些氣體會跟著伴產，致使油的體積縮減。同樣地，當天然氣被生產至地表時，也會伴產油。隨著不同的流體性質，儲集岩也因此被歸類為：產氣儲集岩層(Gas Reservoirs)、伴產油之產氣層(Gas Condensate Reservoirs)與產油層(Volatile Oil Reservoirs)。

#### 4-2：毛細壓力

以毛細壓力曲線量測岩石孔隙粒徑的分布情形，有助於開發工程師與生產地質師對以下項目進行計算與評估：儲集岩品質、淨產層厚度(Net Pay)、岩石與斷層的封阻能力、儲集岩內流體的屏障、油-氣-水過度帶的厚度及位置、不同岩石品質的儲集岩之油氣回收狀況。

### Section 5：Basic Methodology for an Integrated Interpretation

#### 5-1：岩石分類

1968年 Shell Oil 公司的兩位工程師，開始對生產油田及野貓區域所採集到的岩石進行分類。這項計畫最終形成了 Shell Oil 公司的“世界性岩石目錄”。這項計畫的主要目的有二：其一為在那些目前正在進行儲集層的水驅、氣驅及化學藥劑驅動的產區裡，評估額外具有潛能的儲集層；其二為期望對孔隙率、滲透率、毛細壓力及其他岩石參數有更進一步的瞭解，藉此提高對野貓井及產區擴展的潛力儲集層的評估能力。

#### 5-2：有效孔隙率(Effective Porosity)

目前為止，有效孔隙率的定義並未達到一致的認知。因此有效孔隙率的定義隨使用者而定。實際上，有效空隙度的定義應該要著重於“有效”這兩個字，到底對甚麼東西而言，孔隙率可再區分為有效與無效。

Schlumberger 公司對有效孔隙率的定義如下：岩石中彼此相連接的孔隙，且對流體流動與滲透率有正向貢獻；有效孔隙率排除被孤立的孔隙以及黏土礦物填充的孔隙；全孔隙率(Total Porosity)是指岩石內“所有的”孔隙；有效孔隙率通常比全孔隙率小。

### Section 6：Measurement and Selection of Key Petrophysical Parameters

#### 6-1：地層因素(Formation Factor) F 與膠結參數(Cementation Factor) m

Archie 發現地層因素或是地層電阻率是指一個孔隙充滿水(100% saturated)的岩石之電阻率( $R_o$ )與地層流體之電阻率( $R_w$ )的比值。所以  $F = R_o / R_w$ 。此外，在多孔隙的岩石中，電流採取曲折的路徑運行；再者 Archie 假設岩石的基質(Matrix)並不導電。

Archie 另外發現地層因素與孔隙率( $\Phi$ )與膠結參數(m)的關係式如下： $F = a / \Phi^m$ 。一般而言，a 數值大多維持在 1，而 m 則是隨岩石的膠結情形而不同，膠節愈好的岩石 m 愈大，則 F 愈小，表示為較不佳的儲集層。

#### 6-2：水飽和度參數(Saturation Exponent) n

根據實驗室量測飽和與部分飽和的砂岩及碳酸鹽的電阻率數據，Archie 推論水飽和度(Water Saturation)與電阻率的比值( $R_t / R_o$ )呈 power function。在未侵蝕帶包含碳氫化合物的水飽和度與電阻率的關係如下： $S_w^{-n} = R_t / R_o$ 。

### 6-3： $Q_v$ 與陽離子交換能力(Cation Exchange Capacity, CEC)

儲集岩中的某些礦物(例如：黏土與黃鐵礦)有導電性。當岩石中含有黏土時，岩石本身便會導電，因此在計算導電率或是電阻率時必須將這點考慮進去。這個修正對於泥質砂岩的儲集岩評估是相當重要的步驟。岩石的這種傳導性稱為  $Q_v$  或是 CEC。關係式如下： $Q_v = (CEC_{rock} * (1 - \Phi) * \rho_{matrix}) / \Phi_t$ ，其中 CEC 是岩石的陽離子交換能力，而  $Q_v$  是單位總孔隙率的陽離子交換能力。

## Section 7：Evaluating Test Data

### 7-1：鑽桿測試(Drill Stem Tests)

鑽桿測試是一種暫時性的完井測試，主要設計來評估產層內的流體的可能經濟生產能力。DST 測試模擬真實完井的生產狀況，因此對於產層的生產力可提供定性且定量的資訊。

一個 DST 測試可以提供如下的資訊：地層壓力與流體含量、地層滲透率(K)與能力(K\*h)、井孔破壞狀況、儲集岩的規模、生產時可能遇到的屏障(如：斷層、孔隙率改變、地層尖滅)。

## Section 8：Overview of Fractured Reservoirs

### 8-1：裂隙型儲集岩是甚麼

裂隙型儲集岩可分為兩種型式：簡單型，裂隙除了提供流體通道外，也扮演流體儲存的角色，這型儲集岩的裂隙通常不會大於孔隙率的 1%；其他型，裂隙除了扮演流體通道外，偶爾也儲存少量流體，基本上流體以儲存在裂隙間的基質為主。

依照裂隙的形成機制，可再細分如下：板塊運動裂隙(Tectonic Fractures)，這類型的裂隙與區域的構造活動歷史相關，且多為剪力裂隙；區域型裂隙(Regional Fractures)，這類型的裂隙以節理的形式展現；壓縮型裂隙(Contractional Fractures)，這類型的裂隙與岩體體積改變所形成作用力相關。

## Section 9：Calculation of VClay/VShale, Calibration of Core and Logs

### 9-1：VClay 與 VShale 的比較

在計算與評估生產層或是水飽和度估算時，決定黏土礦物的體積(VClay)以及頁岩的體積(VShale)是相當重要的步驟。另外，VClay 與 VShale 還可以運用在其他的方面，諸如：決定淨生產層厚度、決定生產層與否的參考數據、利用孔隙率來估算滲透率時所需要的參數、有效孔隙率、計算儲集岩的導電性時所需要的參數。

頁岩(Shale)的定義如下：一種碎屑性沉積岩，主要由黏土、粉砂或泥的硬



化作用形成。主要特徵是紋層狀的頁理構造。在現有的文獻紀錄裡，對於頁岩的定義尚未達到共識。

泥岩(Clay)的定義如下：一種岩石、礦物或是泥土礦物的顆粒。粒徑小於最細的粉砂，通常小於 4 microns。一般而言，泥岩的成分有超過 50% 是由黏土礦物所組成。

#### Section 10 : Porosity Determination with Unknown or Multiple Lithologies

此節因為上課時間不足，故授課講師略過。

#### Section 11 : Calculation of Saturation

##### 11-1 : Archie 水飽和度公式

在這個章節，主要討論碳氫化合物的飽和狀況。需要考慮的參數包含孔隙率、地層因素(Formation Factor, F)、膠結參數(Cementation Factor, m)、電阻率指標(I)、飽和度指數(Saturation exponent, n)以及黏土含量。

基本的流程如下述：經由岩心、聲波井測數據、密度井測數據與中子井測數據來估算孔隙率( $\Phi$ )。接著是經過岩心分析、交錯投圖等方法來估算膠結參數(m)，而地層因素  $F = 1/\Phi^m$ 。接著透過生產資料，可以取得水電阻參數( $R_w$ )，而  $R_o = F * R_w$ 。最後透過電導井測或電阻率數據可以估算真實地層電阻率( $R_t$ )，而水飽和度  $S_w = (R_o/R_t)^{1/n}$ 。

## 心得與建議

獲派參加這次的高階井測解釋訓練，本人感到十分榮幸。正式上課後，與許多同業交談後才知，每位都是主管級的資深人員，不論是井測解釋或是油田經營的經驗都讓我無法望其項背。但儘管如此，各油公司或是服務公司都還是願意派員來參加這場所費不貲的訓練課程，足以知道井測解釋在石油業界所佔有地位是相當重要。

本次共五天的課程，Sneider 講師提供了厚厚一本共 11 個章節 775 頁的講義與一堆課後習題，實在是相當扎實的內容與豐富的經驗傳承。對於工作上的運用，我覺得最直接的運用便是在老油田新觀念的重開發上，除了加入新的地質觀念與導入不同的構造解釋外，井測數據的重新檢核與解釋也應是本公司需迅速投入人力研究的重點項目。特別是針對過往那些不具經濟開發的儲集層以及可能被錯誤評估的潛力儲集層，都值得再次審慎評估。另外，本課程投入一定程度的時間於 DST 與完井壓力測試資料的解釋，經驗熟稔的油公司對於這部分的解釋人員是相當重視，而且解釋人員的背景必須得橫跨地質、地物與工程，因此建議本公司在這部分的解釋可廣納各方人才，在不違背最基本的解釋原則下：任何合理的解釋都不能違背地質等實際觀察資料(如：岩屑的岩性判定、震測資料的斷層解釋....等)，進行整合性的解釋(Integrated Interpretation)。再者，本次課程的重點之一便是複雜儲集岩的井測解釋與評估，我想這點對於本公司於查德礦區的開發應有實質幫助，特別是查德礦區的儲集岩並非簡單的塊狀儲集岩，而是以砂泥互層的複雜儲集岩層為主。上完課後，除了許多觀念與定義得到澄清與改正之外，透過失敗案例的學習過程，對日後油藏評估更起到警惕的作用。

由於此次課程不僅包含井測原理介紹與數據解釋，還包含大量 DST 及完井測試資料，所以建議下次參訓人員的選派可以同時具有井測與完井測試經驗的同仁為優先。另外，此次五天課程較類似整合性的課程，其中有不少單獨章節的重要性就需要數周的課程講解(如第 11 章\_含水飽和度的計算，是個 4 周的訓練課程)，因此建議長官可持續派員學習完整且詳細的油氣評估技術(如：壓力資料的評估、岩石物理參數的量測與選擇、毛細壓力、含水飽和度的計算...等)。再者，以 Sneider 講師為例，他本身是一位地質學者，在博士求學階段即投入大量心力於層序地層(Sequence Stratigraphy)的研究，這門學科對於油氣藏的環境解釋(可進一步推估儲集岩品質、規模及分布型態等重要資訊)運用已相當成熟，但本公司至今鮮有人力致力於此學科，因此建議長官能派人參加層序地層學方面的課程。

最後，測勘處已規劃 107 年辦理「電測解釋訓練班」訓練課程，將以本次課程之內容為藍本進行培訓。