

出國報告（出國類別：實習）

## 參加 PetroSkills 舉辦之 岩石物理訓練課程

服務機關：台灣中油股份有限公司

姓名職稱：涂嘉勝 地質師

派赴國家：馬來西亞 吉隆坡

出國期間：101 年 10 月 14 日至 101 年 10 月 20 日

報告日期：101 年 12 月 11 日

## 摘要

此為 101 年度石油基金「竹東地區複雜構造模擬與油氣潛能分析」計畫編列派員出國計畫：參加井下電測資料分析及解釋訓練課程。岩石物理資料分析為石油公司相當重要的分析技術之一，因台灣麓山帶石油潛能盆地的岩性變化複雜，為能充分整合並應用儲集岩各種地質、岩石物理、流體資料等，乃參與本訓練課程，藉以提升公司此項岩石物理整合應用技術。

本次訓練課程共 5 日，講師 Mr. David Patrick Murphy，於 Shell 公司工作資歷將近 35 年並退休於 Shell 公司，專長為石油生產工程、岩石物理工程，參訓學員共 12 位，分別來自不同公司與國家。上課內容含蓋了現今常見的取岩心類型與分析方式，目前常見電測的施測原理、應用與解釋，地下油氣體積計算與其不確定性。

## 目次

摘要.....	I
目次.....	II
一、目的 .....	1
二、過程 .....	2
(一) 出國流程 .....	2
(二) 上課流程 .....	2
三、課程內容重點摘要 .....	9
(一) 第一天，10 月 15 日，Section 1：Introduction and Quick Look.....	9
(二) 第二天，10 月 16 日，Section 2：Coring and Core Analysis.....	17
(三) 第三天，10 月 17 日，Section 3：Fundamentals of Logging From A to Z – Petrophysical Evaluation .....	22
(四) 第四天，10 月 18 日，Section 3：Fundamentals of Logging From A to Z – Petrophysical Evaluation .....	30
(五) 第五天，10 月 19 日，Section 3：Fundamentals of Logging From A to Z – Petrophysical Evaluation & Section 4：Reserves and Uncertainty .....	38
四、心得與建議 .....	40

## 一、目的

此為 101 年度石油基金「竹東地區複雜構造模擬與油氣潛能分析」計畫編列派員出國計畫：參加井下電測資料分析及解釋訓練課程。岩石物理資料分析為石油公司相當重要的分析技術之一，因台灣麓山帶石油潛能盆地的岩性變化複雜，為能充分整合並應用儲集岩各種地質、岩石物理、流體資料等，乃參與本訓練課程，藉以提升公司岩石物理整合應用技術。

參訓目的期能建立新的岩石物理分析技術與流程，並整合井下電測、岩心、鑽井工程等資料分析儲集岩孔隙率、滲透率、水飽和度等物理性質及儲集岩與流體特性間可能造成之問題，降低國內外礦區評估與生產技術風險。

## 二、過程

### (一) 出國流程

出國期間：101 年 10 月 14 日~101 年 10 月 20 日，共 7 天。

出國行程：

- 1、101 年 10 月 14 日，啓程。
- 2、101 年 10 月 15 日~19 日，參加 PetroSkills 國際石油訓練機構舉辦之岩石物理訓練課程 (Foundations of Petrophysics)，地點：Concorde Hotel Kuala Lumpur，Patio 2 會議室，共 5 天。
- 3、101 年 10 月 20 日，返程。

### (二) 上課流程

本次訓練課程共 5 日，每日上課時間為早上 8 點至下午 4:30，詳細課程表如下頁。第一天 10 月 15 日早上 8 點於上課場地報到，稍待所有學員進入會議室按座位就座後，即由講師 Mr. David Patrick Murphy 先自我介紹、課程內容講解與環境安全宣導後，便換各學員自我介紹，並簡單說明報名此課程原因及希望於獲得什麼樣的知識，以便講師初步了解與認識各學員背景。

上課使用簡報與講義並於其間穿插實際練習，藉由讓學員實際計算、查表、繪圖與分組討論，增加學習成效與發現關鍵問題或參數，同時講師也會提出許多講義上沒有的實際案例與精采照片。上課期間學員若有問題也可隨時提出，講師針對問題無所不答且上課風趣幽默，不愧是累積數十年的教學經驗。

5 天訓練課程結束後，講師提供一份補充教材電子檔案，供學員課後參考，並頒發每一位完成所有訓練與習題的學員課程結業證書 (Certificate of Completion)，作為學員完成參訓之證明與紀念。

表一、訓練課程表

日期	08:00 ~ 12:00	13:00 ~ 16:30
10/15	<b>Section 1 :</b> <b>Introduction and Quick Look</b> - Petrophysics and Economic impact - Petrophysics and the earth model - Lithology and the earth model	<b>Section 1 :</b> <b>Introduction and Quick Look</b> - Petrophysics and Economic impact - Petrophysics and the earth model - Lithology and the earth model
10/16	<b>Section 2 :</b> <b>Coring and Core Analysis</b> - Fundamental concepts, coring and analysis - Analytical Methods - Routine Core Tests - Special Core Tests - Quality Control and data interpretation	<b>Section 2 :</b> <b>Coring and Core Analysis</b> - Fundamental concepts, coring and analysis - Analytical Methods - Routine Core Tests - Special Core Tests - Quality Control and data interpretation
10/17	<b>Section 3.1 :</b> <b>Fundamentals of Logging From A to Z – Petrophysical Evaluation</b> - Evaluation approach and net pay - Porosity - The quest for Rt - Shaly sand evaluation	<b>Section 3.1 :</b> <b>Fundamentals of Logging From A to Z – Petrophysical Evaluation</b> - Evaluation approach and net pay - Porosity - The quest for Rt - Shaly sand evaluation
10/18	<b>Section 3.1 :</b> <b>Fundamentals of Logging From A to Z – Petrophysical Evaluation</b> - Evaluation approach and net pay - Porosity - The quest for Rt - Shaly sand evaluation	<b>Section 3.2 :</b> <b>Fundamentals of Logging From A to Z – Specialized Petrophysical Devices</b> - Nuclear Magnetic Resonance (NMR) Image Logging Tools
10/19	<b>Section 3.3 :</b> <b>Fundamentals of Logging From A to Z – Cased Hole Logs</b> - Gamma Ray - Compensated Neutron / Pulsed Neutron - Through Casing Resistivity - Production Logs (PLT) - Borehole Televiewer	<b>Section 4 :</b> <b>Reserves and Uncertainty</b> - Technical Uncertainty (Risk) Assessment - Volumetric reserves estimation - Reservoir simulation - Net Pay revisited

## 講師介紹：David Patrick Murphy



Mr. David Patrick Murphy 在 Shell 公司工作資歷將近 35 年並退休於 Shell 公司，目前為 PetroSkills 專任講師，專長為石油生產工程、岩石物理工程。過去在任職於 Shell 公司期間也同時在美國休士頓大學石油工程學系教任地層評估 (Formation Evaluation) 等課程，在教學期間曾兩度榮獲傑出教授殊榮，教學經歷 17 年，實務與教學經驗甚為豐富。

David Patrick Murphy 也曾著作過許多專業書籍，如 Advanced in MWD and Formation Evaluation, Nuclear Magnetic Resonance Logging and Core analysis – Simplified, A Geological-Engineering Analysis 等。David Patrick Murphy 也是國際知名學會 Society of Petrophysicists and Well Log Analysts (SPWAL) 與 Society of Petroleum Engineers (SPE) 的榮譽會員與教授級委員，同時亦擔任許多 SPWAL、SPE 短期專業課程講師。

## 學員介紹：

參訓學員共 12 位，分別來自不同公司與國家，簡單介紹如下：

- 1、Mr. Alok Kaushik, Reservoir Engineer, Shell, from India.
- 2、Mr. Masliah Hj Mohd Ali, Exploration Technical Assistant, Shell, from Brunei.
- 3、Mr. Hussain Ameer, Geologist, Kuwait Oil Company, from Kuwait.
- 4、Ms. Reha Yunus, Supporting & Workflow, Shell, from Sarawak.

- 5 · Mr. Bakhtiyar Shakirov, Petrophysicist, Tarbagatay, from Kazakhstan.
- 6 · Ms. Radwa Essam Zidan, Geophysicist, BP, from Egypt.
- 7 · Ms. Abdullah A. Habelreeh, Research Scientist, Schlumberger, from Kingdom of Saudi Arabia.
- 8 · Ms. Ayang Amah, Application Support, Shell, from Brunei.
- 9 · Mr. Allan Mcfarlane, Development Studies Leader, Shell, from Brunei.
- 10 · Mr. Peter Chew, G&G Application Support, Talisman Energy, from Malaysia.
- 11 · Mr. Mazin Mohammed Al-Amri, Petrophysicist, OOCPE, from Oman.



圖 1、訓練課程場地照片

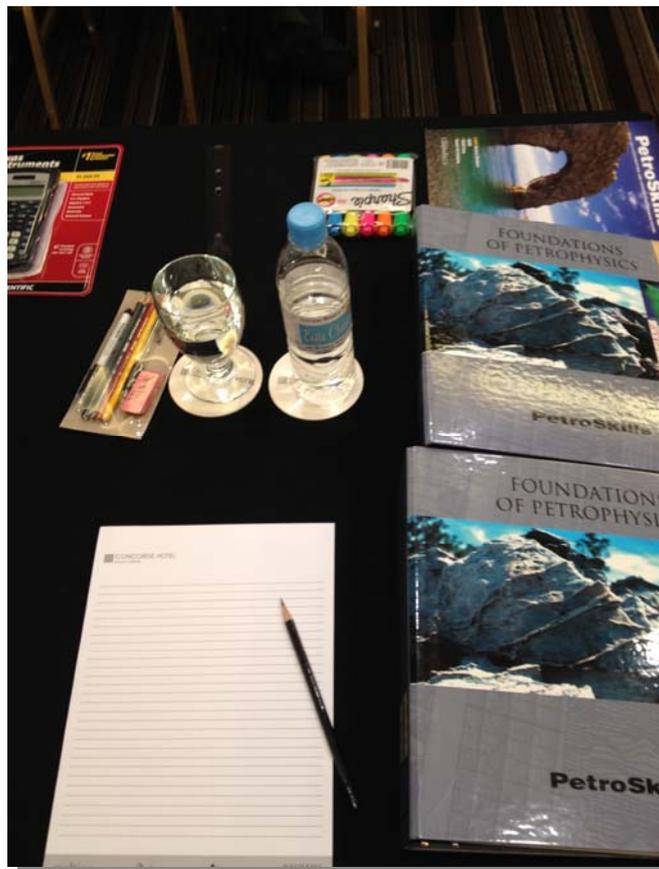


圖 2、訓練單位提供之講義與所需文具



圖 3、學員上課情形



圖 4、課程中實際計算與討論情形



圖 5、講師與學員於午餐時間合照

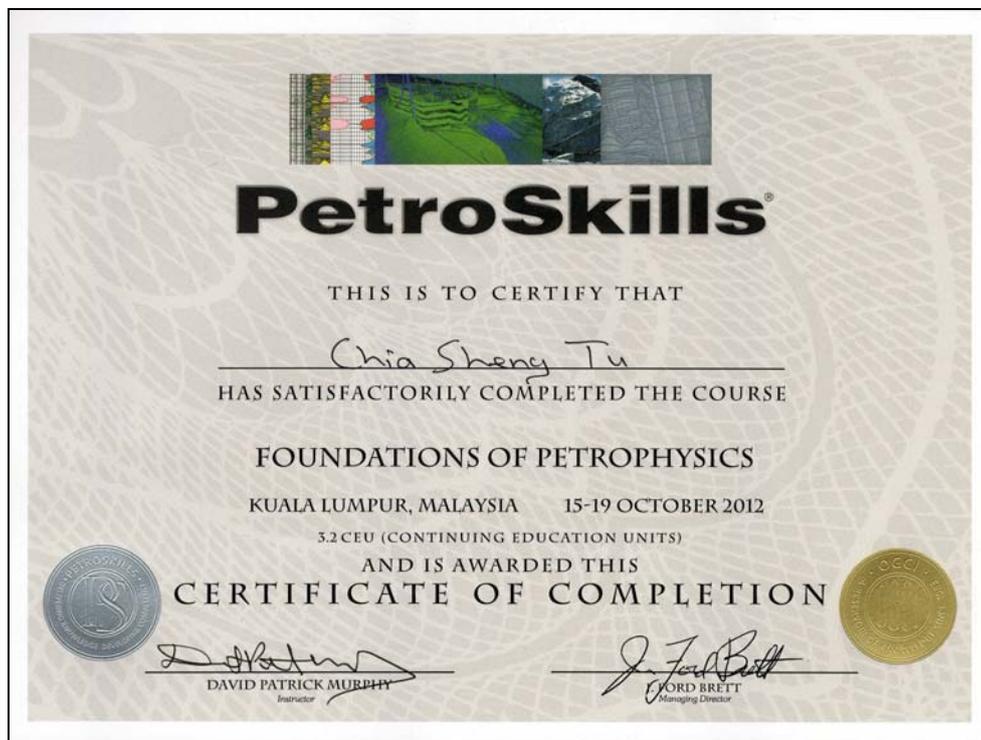


圖 6、完成訓練課程證書

### 三、課程內容重點摘要

#### (一) 第一天，10月15日，Section 1：Introduction and Quick Look

在石油探勘與生產公司的專業人員，約可分為四種類別：地質師、地球物理師、油層工程師、岩石物理師（圖 7），可見岩石物理師在探勘公司相當重要，但本公司探勘專業人員屬岩石物理師者甚少，因此確實有需要加強培育此方面人才，以增加公司探勘人才專業度與廣度，且岩石物理應用範圍甚廣，從初期探勘、開發、生產、二次採油、三次採油至油氣田廢置等皆會應用到。

岩石物理意指研究岩石的物理與化學性質以及包含其中的流體性質，並利用岩石的各種特性與關聯性去找出與評估其中的碳水化合物儲集岩、生油岩、封阻層與含水層等 (SPE Reprint No.39, P.3)。岩石物理使用資料類型很多，包含岩屑、碳水化合物分析、岩心、井下電測、震測、流體與壓力測試等，且每項使用的電測工具其規模、大小、水平解析度、垂直解析度皆不一樣（圖 8），如何將這些資料有效的整合及研判，並了解資料品質與風險，為岩石物理分析主要工作。單就岩石物理最常使用的井下電測資料來說，使用工具有分為直接量測與間接量測（佔大部分）兩大類，其測量方式有就有分測量電流、電壓、數量、時間、電阻、密度、聲波速度、岩石淘選度、地層傾角、鹽度等，可見岩石物理為相當複雜的分析技術。

岩石物理中最重要的即是找出岩層中的水飽和度 ( $S_w$ )，岩石物理宗師 Mr. Archie 是第一位發現可利用電阻與孔隙率計算出  $S_w$ ，稱為 Archie's Equation (1942 年)。另一重要的岩石物理特性為岩石孔隙的幾何形態，在沒有取得岩心的情況下，如何正確的預測孔隙的幾何形態為岩石物理相當重要議題，因為單由岩石孔隙與滲透率關係並非為可讓岩石成為儲集岩的要素，主要關鍵仍在於孔隙的幾何形態 (Calhoun, 1960)。

在研究岩石物理之前，需先了解主要影響岩石物理的要素：壓力、溫度、地層水密度、地層水鹽度、井下/地層環境。

1、地溫梯度：依各地區會有所不同 (圖 9、圖 10)，一般情況為 1 ° F/100 ft (1.82° C/100 m)。

在井下因有泥漿循環會冷卻周圍地層，所以一般測量所得井底溫度 (Borehole Temperature, BHT) 會低於真正實際地層溫度 (Formation Temperature) (圖 11)，若須真正量測到真正實際地層溫度須停止泥漿循環待溫度平衡後 (大約 5~10 天甚至更久) 再測量，但此會造成鑽井費用大幅提高。一般測量井底溫度大約僅等待 5~10 小時，便開始測量然後再使用經驗公式進行溫度校正，或者選擇採用 DST 溫度 (較接近地層實際溫度)。真實地層溫度經驗公式校正法：(1) BHT 溫度直接增加 18° C 或 33° F。(2) BHT 溫度增加 10%~15%。(3) 網站 <http://www.zetaware.com> 有提供經驗試算公式。目前量測井底溫度儀器精確度大約為 2.5° C。

使用井下溫度資料，可以用來作為：(1) 其他電測工具環境校正，例如計算電阻時、避免超過量測儀器的工作溫度；(2) 了解流體性質，若地層有天然氣存在，會大大降低量測溫度；但若油存在於地層則會增加溫度；(3) 了解裂縫存在位置 (圖 12)；(4) 了解有無溫度異常地層；(5) 若知某深度之地層溫度、電阻，則可利用 Arp Equation 求得任一溫度之電阻值、鹽度， $R_2=R_1[(T_1+21.5)/(T_2+21.5)]^\circ C$  (圖 13)。

2、地層壓力梯度：1.1 psi/ft (地層埋壓 = 地層壓力 + 地表壓力)

水力梯度：0.43 psi/ft (淡水)、0.465 psi/ft (鹽水@140,000 ppm)、0.35 psi/ft (油)、0.08 psi/ft (天然氣)。

$$\text{Hydrostatic Pressure (kg/cm}^2\text{)} = [\text{Fluid Column (m)} \times \text{Density (g/cc)}] / 10$$

3、地層水密度會隨溫度與鹽度不同而有所變化 (圖 14)，在計算時須注意。

目前大多的岩石物理研究，主要皆集中在孔隙率、滲透率與水飽

和度這三個參數上，此三參數為判斷出岩石是否可以成為有效儲集岩的關鍵因素。

### 1、孔隙率 ( $\phi$ )

孔隙率的量測方式可以分為，岩心分析、井下電測、隨鑽電測 (LWD)、分析井孔密度 (很少使用)。一般情況，孔隙率因埋深壓密作用影響，深度越深孔隙率越低。可再分為總孔隙率 (Total porosity) 與有效孔隙率 (Effective porosity)，如圖 15。

### 2、滲透率 (K)

對於一般傳統油氣田生產層而言，滲透率 = 1,000 mD，屬高；滲透率 = 0.1 mD，屬低。不同碳水化合物最低可生產之滲透率也不一定，油層可生產之最低滲透率約 0.1 mD，天然氣層可生產之最低滲透率約 0.001 mD，甚至可更低。高孔隙率地層並不一定為高滲透率，兩者無絕對直接關係或者相關公式可以計算，了解兩者關係最好的方式為量測大量的孔隙率與滲透率數值並繪出交叉比對圖 (Cross-plot)，孔隙率與滲透率 Cross-plot 也可用來作為岩性的辨別的參考 (圖 16)。滲透率可以再細分為絕對滲透率 (Absolute permeability,  $K_{abs}$ )、有效滲透率 (Effective permeability,  $K_e$ ) 與相對滲透率 (Relative permeability,  $K_r$ )。

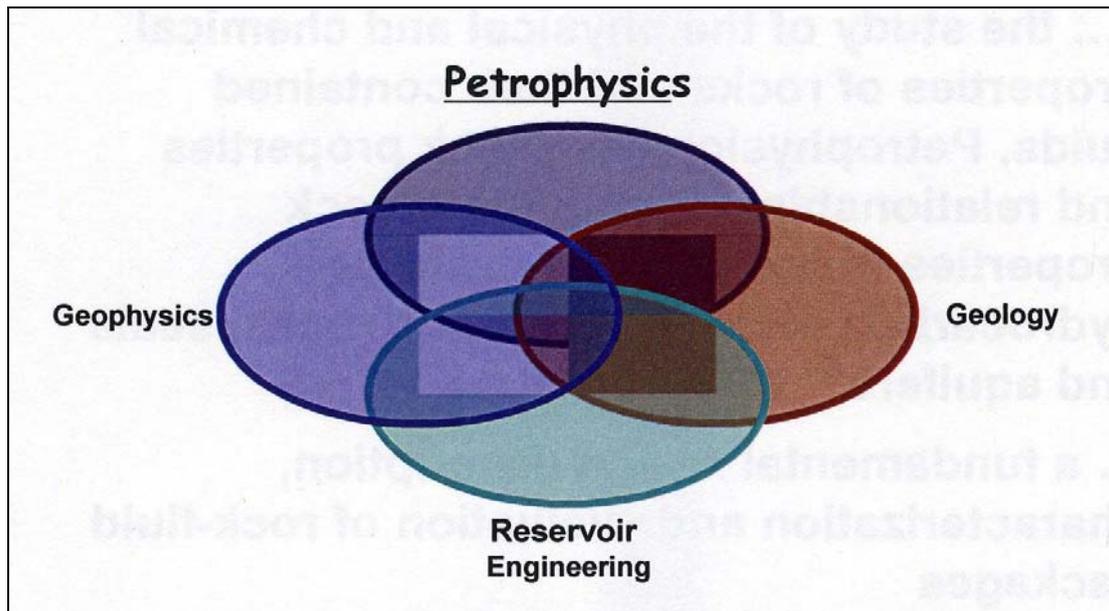


圖 7、石油公司探探人員分類

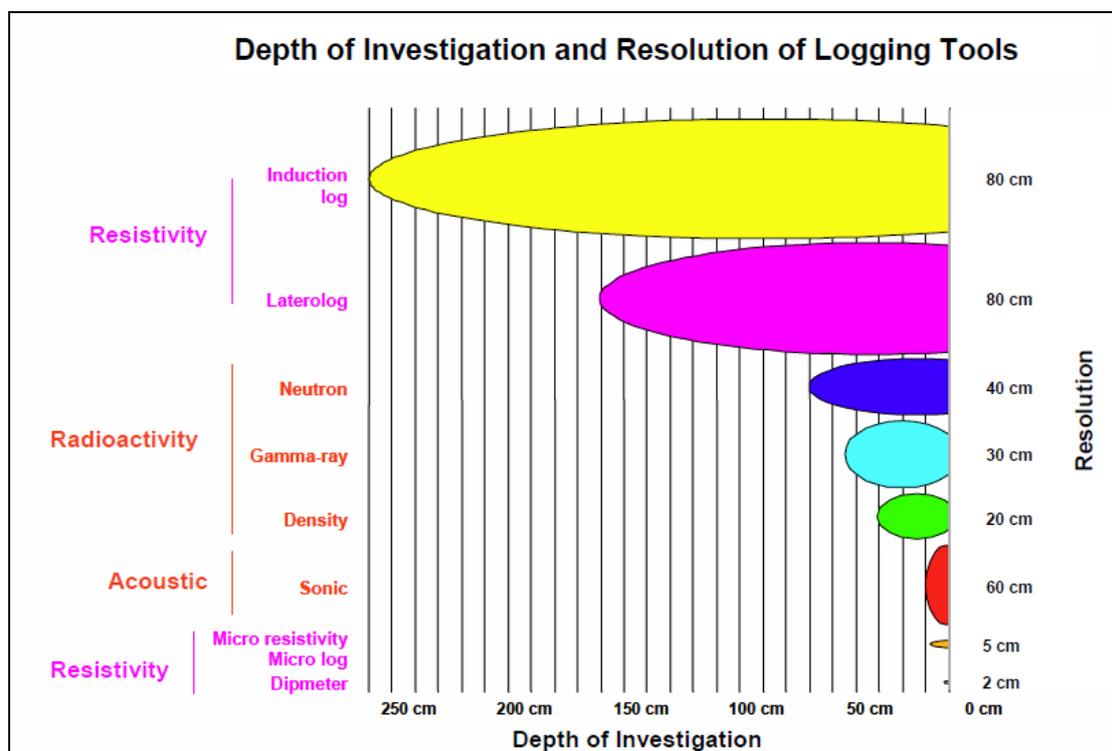


圖 8、不同電測工具之水平與垂直解析度

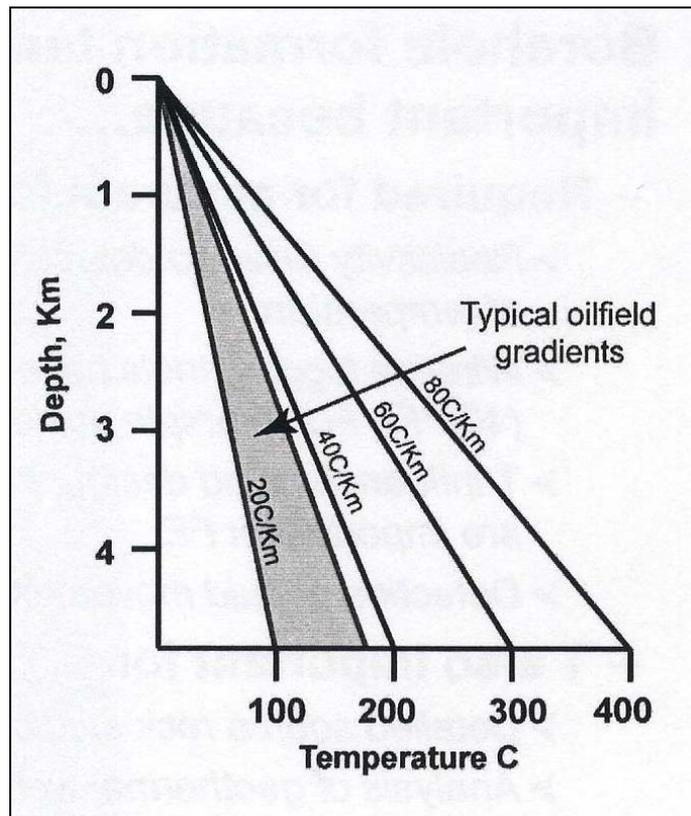


圖 9、地溫梯度曲線

Location	°C/Km	°F/100 ft
Rhine Valley, Germany	66	3.6
Red Sea, Middle East	45	2.5
Central Ruhr, Germany	40	2.2
Alberta Basin, W. Canada	31.8	1.8
Central North Sea, Europe	30	1.7
Mississippi, U.S.A	29	1.6
Louisiana, U.S.A.	24	1.3
E. Canada	22	1.2

圖 10、不同地區之地溫梯度

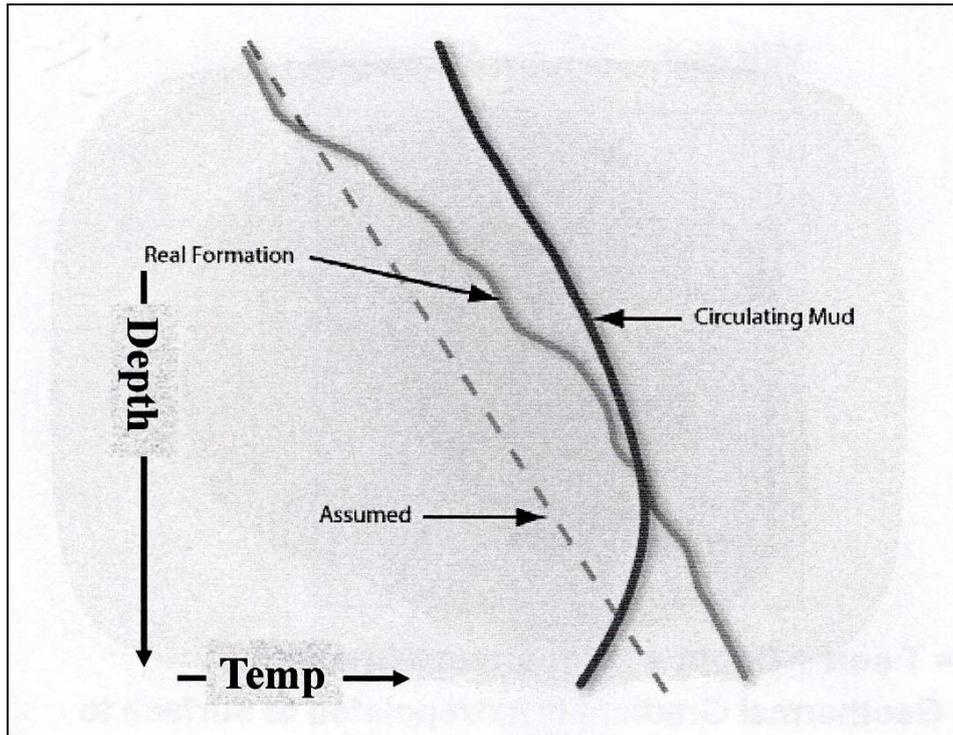


圖 11、量測與真實地溫差異

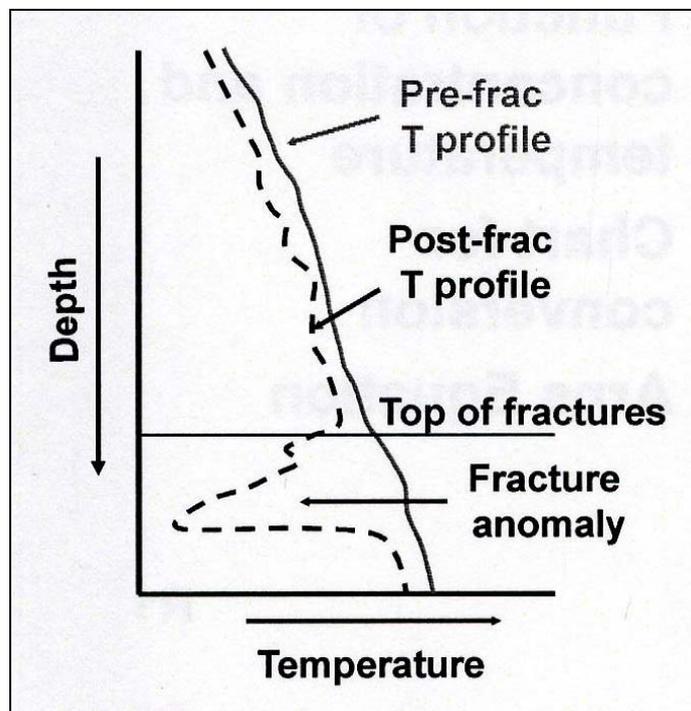


圖 12、若有裂隙存在會造成地層溫度降低

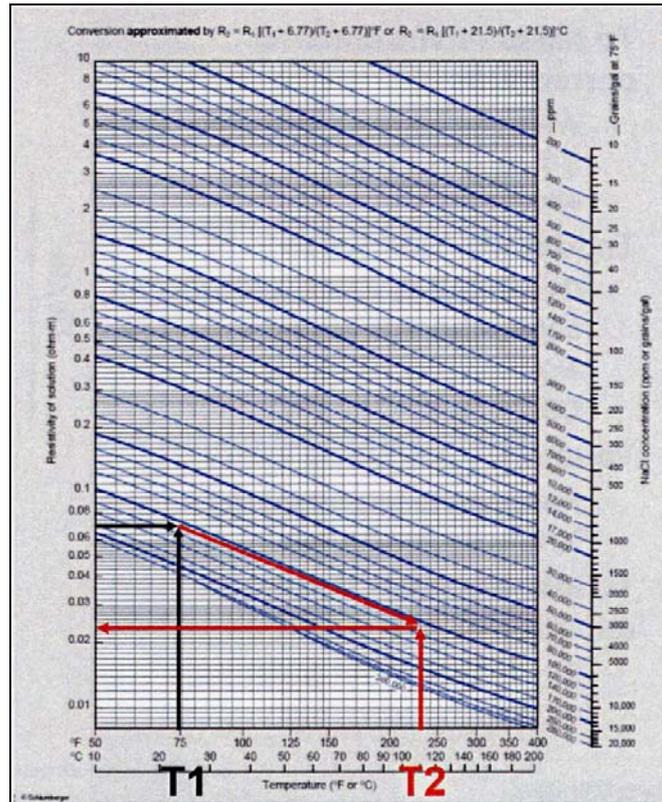


圖 13、Arp Equation Chart

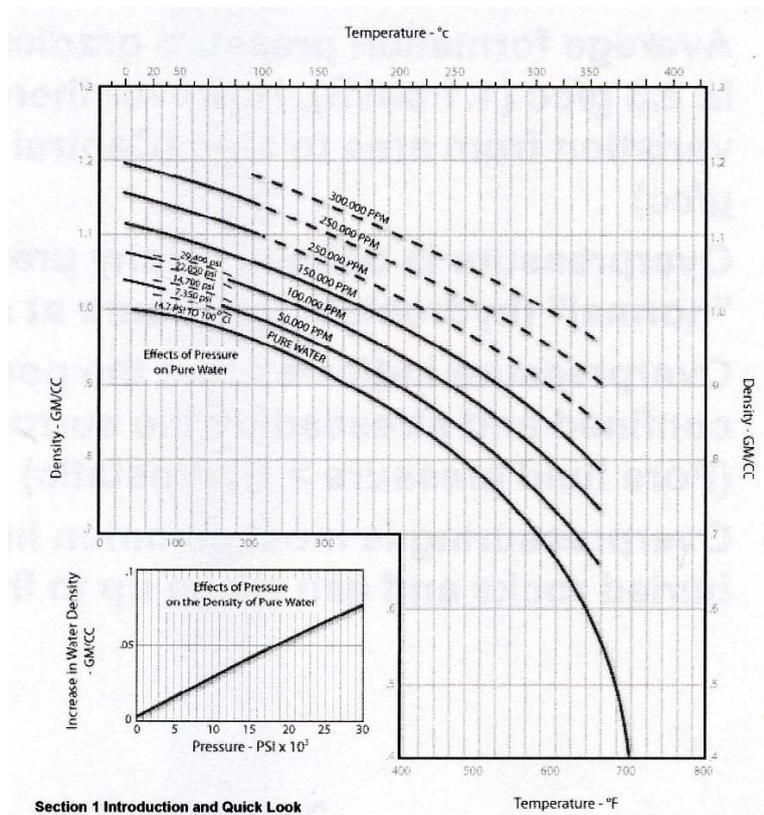


圖 14、地層水密度隨溫度與鹽度變化曲線

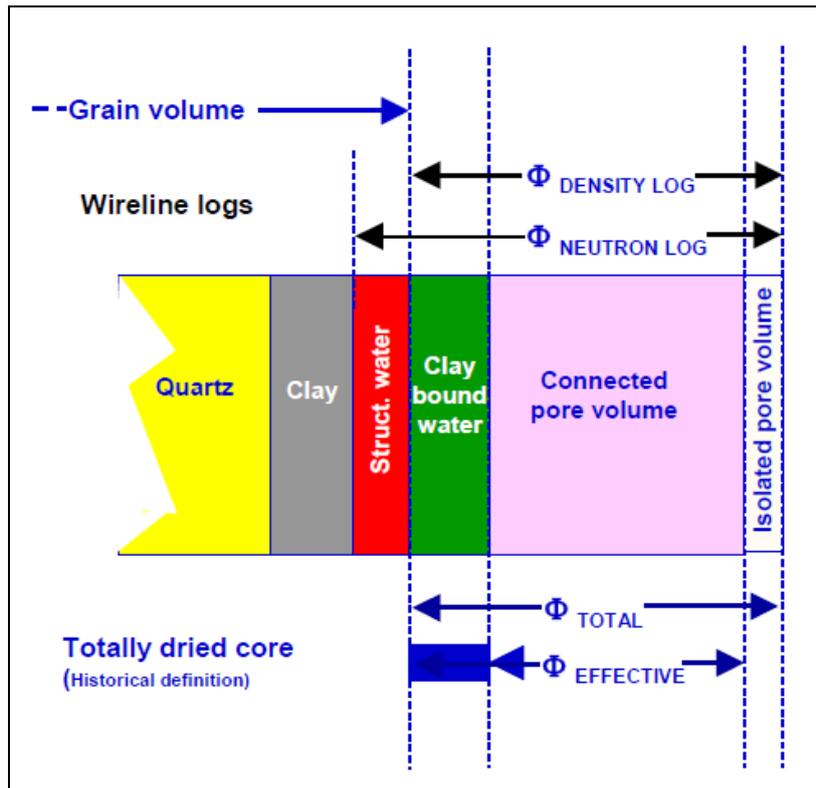


圖 15、碎屑岩沉積環境之孔隙率類型

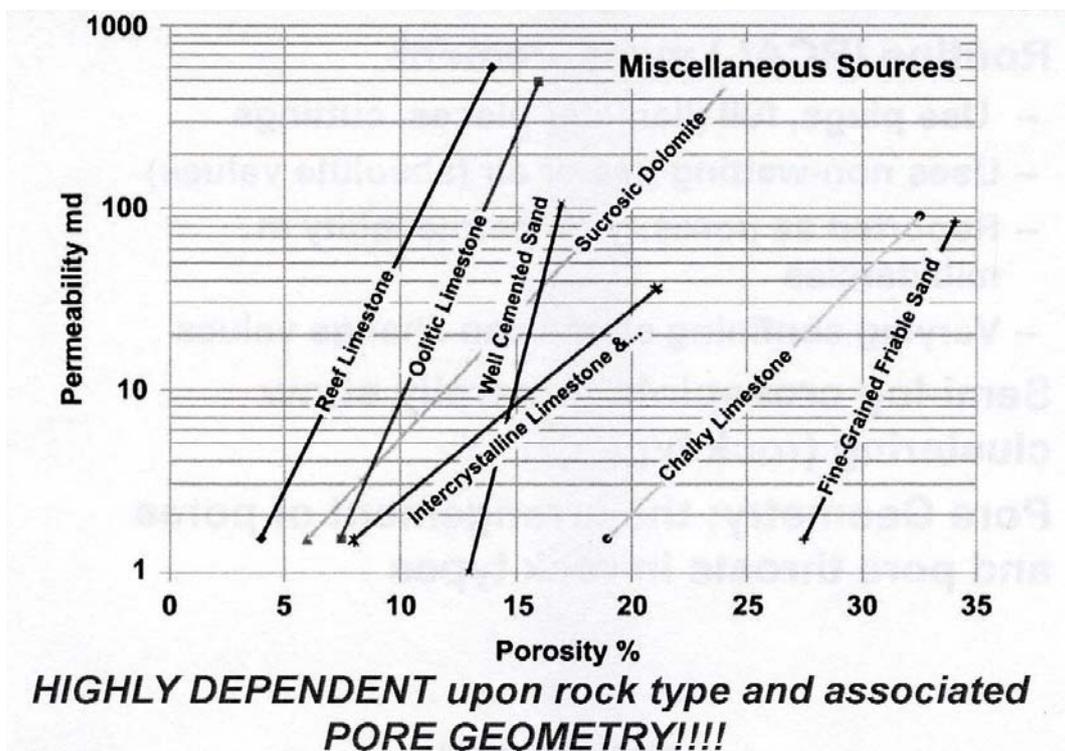


圖 16、孔隙率與滲透率 Cross-plot

## (二) 第二天，10月16日，Section 2：Coring and Core Analysis

今天課程涵蓋了：取岩心的過程與類型、各種岩心實驗設備的原理與作業程序，包含了岩心中液體飽和度的量測程序（岩心處理、清潔、乾燥、取向）、岩心掃描（Gamma ray Scan、CT Scan）、常規岩心分析（孔隙率、滲透率、密度等）、特殊岩心分析（毛細壓力與相對滲透率、孔隙幾何型態等）。

取岩心主要目的為了解：

- 1、地層孔隙率
- 2、飽和度
- 3、滲透率與相對滲透率
- 4、毛細壓力
- 5、孔隙幾何與顆粒大小
- 6、岩石密度與礦物組成
- 7、Archie's Equation 之  $a$ ,  $m$ ,  $n$  值
- 8、岩石對流體的敏感性
- 9、儲集岩碳水化合物分析

當岩心自油氣儲集岩採取上升到地表後，因溫度與壓力變化會對取獲岩心的含水飽和度或油氣飽和度造成影響（圖 17、18），因此在地表量測岩心所到的飽和度，非等同於實際在儲集岩中的飽和度，需再進行校正或模擬。

取岩心種類主要分為全孔徑岩心（Full Diameter Coring）與側向岩心（Sidewall Coring），側向岩心又可分為 Percussion sidewall coring（SWC）與 Rotary sidewall coring（RSWC）。

- 1、全孔徑岩心（Full Diameter Coring）優點 (1) 可取得長且連續的岩心，(2) 可較有效的保持岩心之原始狀態，(3) 可做對岩心做較多的觀測、取樣（plugs）與測試；缺點 (1) 一次（One Trip）僅可取得 20~30 呎岩心，(2) 取岩心時須起鑽並停止鑽探，花費較多時間，(3) 費用較高（相對於 SWC、RWSC），(4) 取岩

心時有可能會造成卡鑽。

2、SWC 為使用小型中空子彈射入地層中，進而擷取所需層位岩心（圖 19），取得岩心半徑一般約 1 吋大小，SWC 優點 (1) 最多一次可取得 96 個岩心，(2) 可於任何深度進行取樣，(3) 操作溫度可達 500° F，(4) 採取速度快且花費較少，(5) 在鬆軟地層中仍有效；缺點 (1) 因使用火藥的關係，會對岩心造成破壞，(2) 有時會因無法完全射入地層，造成僅取得少許岩心，(3) 在較大的孔徑中，因於儀器與距離井壁較遠，無法有效射入地層。

3、RWSC 為在儀器中一側伸出手臂使其另一側頂住井壁後，伸出一側向小型鑽頭鑽取岩心（圖 20），取得岩心半徑一般約 1 吋大小，長度最多可達 2 吋，RWSC 優點 (1) 取得岩心品質較 SWC 好，(2) 可於任何深度進行取樣，(3) 在緻密地層中特別有效；缺點 (1) 每次最多僅可採 30 個岩心，(2) 在井崩嚴重地層中，因工具無法緊貼井壁，取得岩心較困難，(3) 鬆軟地層較不適用，(4) 費用較高（相較於 SWC）。

岩心自井下取至地表並送至岩心實驗室後，首先會先進行 Gamma-ray 掃描（圖 21），再與井下 Gamma-ray log 比對；或進行 CT 掃描，並與井下 Density log 比對，以進行岩心深度校正且確認是否有岩心缺失，之後才進行各種量測與實驗（圖 22），如孔隙率、水平與垂直滲透率、地層電阻係數、毛細壓力曲線、應力分析、切薄片、螢光掃描、X-Ray 繞射等。

一般常規岩心實驗室分析包含了：孔隙率、滲透率、密度與應力分析量測，而特殊岩心分析 (Special Core Analysis, SCAL) 包含了：毛細壓力與相對滲透率分析、岩石濕潤性 (Wettability)、礦物與岩性分析、孔隙幾何分析等。

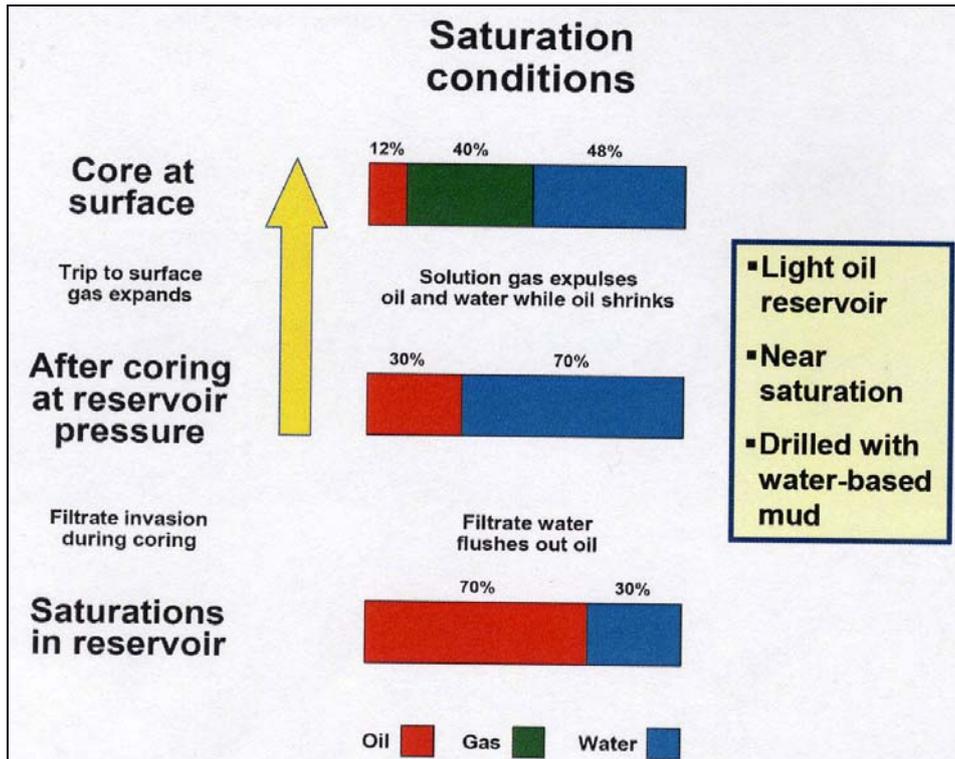


圖 17、儲油層岩心取至地表後，因溫度與壓力變化對飽和度之影響

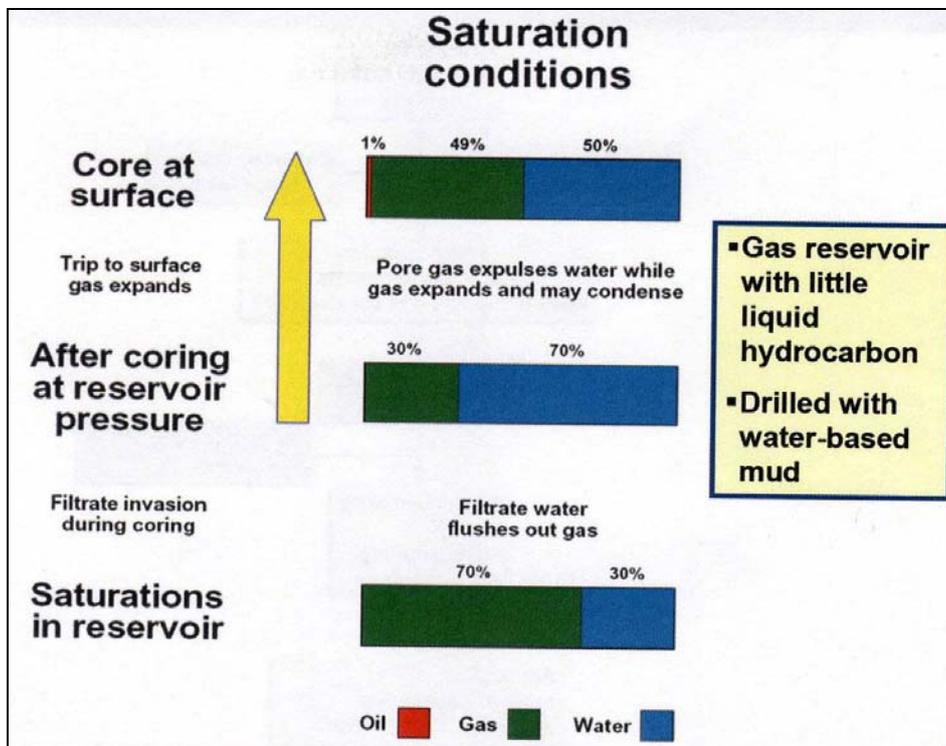


圖 18、儲氣層岩心取至地表後，因溫度與壓力變化對飽和度之影響

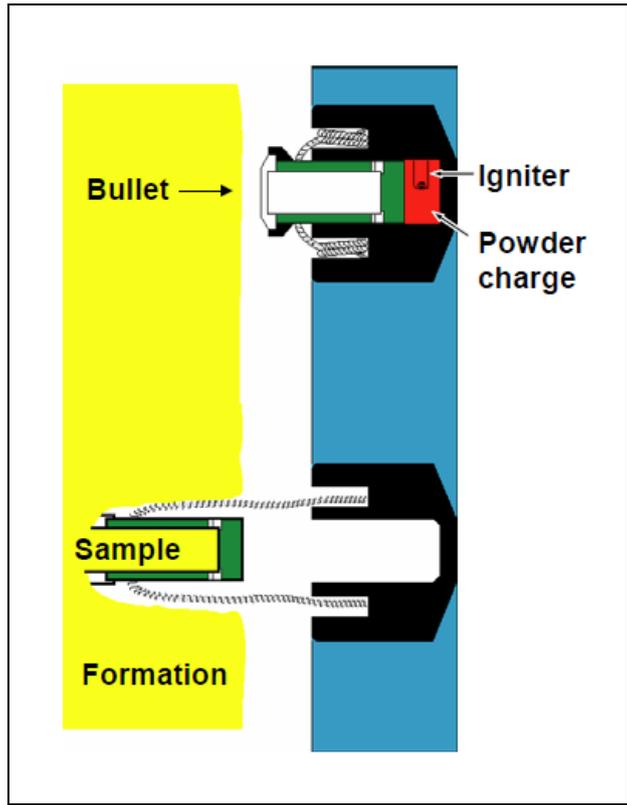


圖 19、Percussion sidewall coring (SWC)儀器示意圖

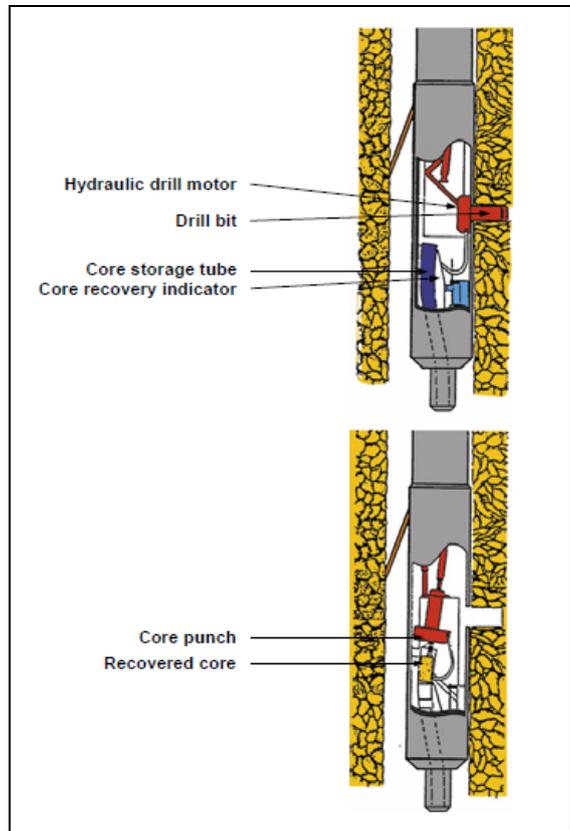


圖 20、Rotary sidewall coring (RSWC)儀器示意圖

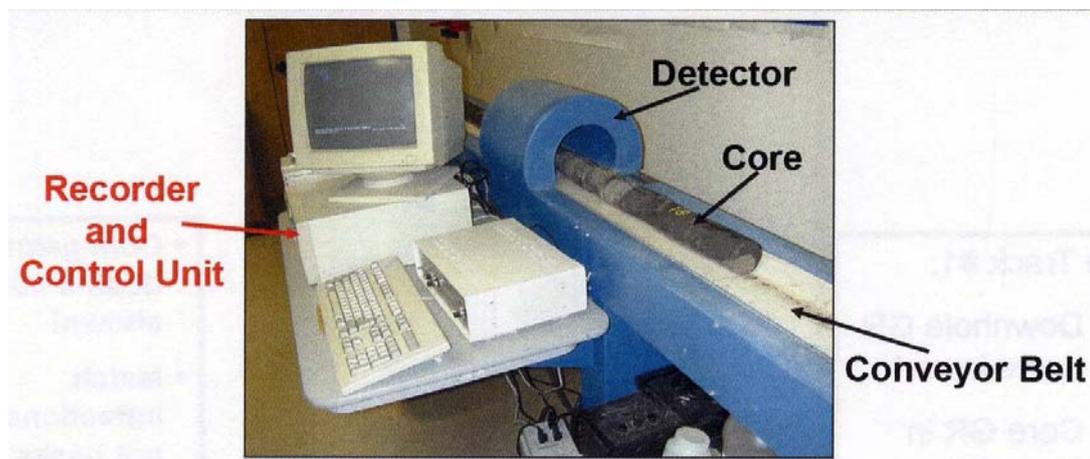


圖 21、Gamma-ray 掃描儀器

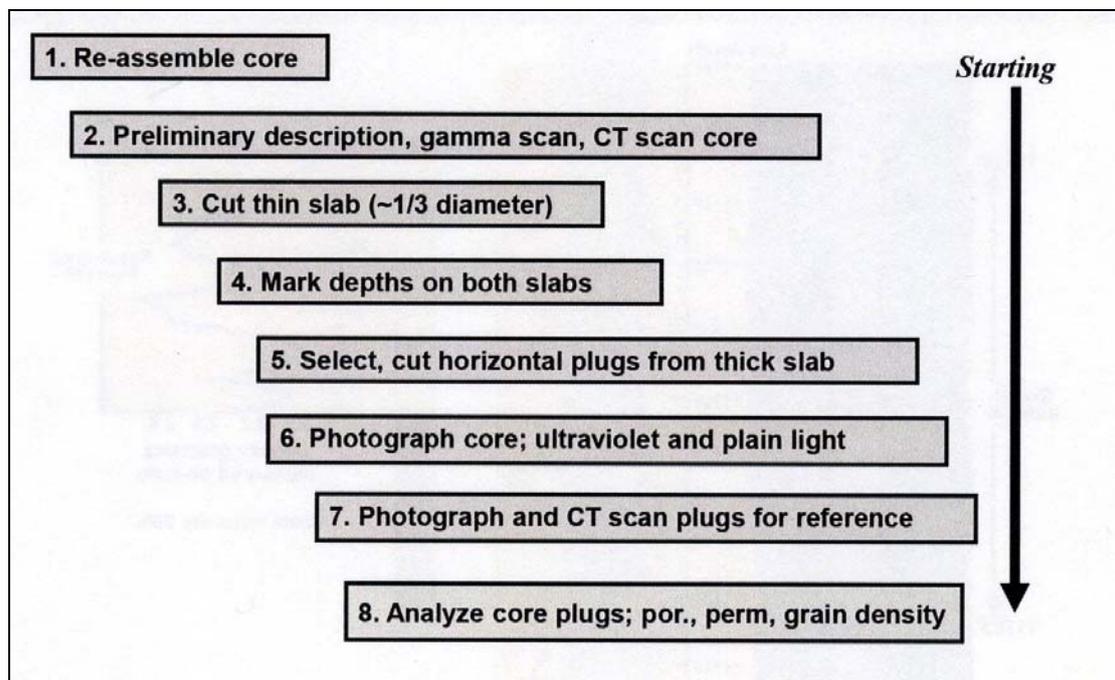


圖 22、岩心實驗流程圖

### (三)第三天, 10月17日, Section 3: Fundamentals of Logging From A to Z – Petrophysical Evaluation

現今主要使用在進行判定油氣層存在位置並定量分析油氣的井下電測可以分爲三大類：**儲油岩厚度**：Gamma-ray Log、SP Log，主要用來區別儲集岩與非儲集岩。**孔隙率**：Density Log、Neutron Log、Sonic Log，用來計算孔隙率、區別岩性與分辨原油或天然氣。**地層電阻**：Laterolog Log、Induction Log、Microresistivity Log，判別油氣存在位置，並與孔隙率資料結合可用來計算油氣飽和度。

其他還有 Side wall core sampler (用來確定岩樣與流體性質)、Formation tester (取得地層壓力與地層流體樣品)、Dipmeter 與 FMS (測量地層傾角與方位角)、VPS 與 Well check shot (與震測資料對比並校正) 等。以下分別介紹上述電測資料之原理與應用：

#### 1、Gamma-ray Log

在地層中含有許多放射性元素，如鈾、釷、鉀等，但大部分的儲油岩皆不含或僅含少量的放射性元素（如砂岩、石灰岩、白雲岩等）而具有較低的 Gamma-ray 放射能量；反之，大部分的非儲油岩含有較高的放射性元素（如頁岩含有大量釷、鉀）等而具有較高的 Gamma-ray 放射能量，此外若有需要也可針對地層中單一的放射性元素進行測量，如鈾 (Uranium log)、釷 (Thorium log)、鉀 (Potassium log)等。Gamma-ray Log 除用來進行岩性判別之外，另外可用來計算地層頁岩百分比 (Vsh) (圖 23)。

#### 2、SP Log

SP Log 的應用與 Gamma-ray Log 類似，主要是用來區別砂岩與頁岩，但因 SP Log 是量測自然電位差，易受地層與地表許多因素影響，而降低資料品質並增加解釋的困難度，因此在目前在區別砂岩與頁岩上，已逐漸被 Gamma-ray Log 取代，但即使不使用 SP Log 來進行解釋，承包商也應提供 SP Log 予合約人，因在國際慣例上，SP Log 屬不收費項目。SP Log 有一個獨特好處是可以用來計算地層水電阻 (Rw)，特別是在 Rw 資料較缺乏、鑽井量

較少的處女地上。SP Log 的資料在水基泥漿的鹽度低於地層水鹽度的井孔中，解釋效果較為良好。

### 3、Density Log

此為使用強的 gamma-ray (銻元素) 射入地層使之與岩石中之電子發生碰撞而被吸收，然後使用接收器接收反射回來之電子密度，進而反推計算岩石密度 (圖 24)。由 Density Log 所量測而得的密度 ( $\rho_b$ , Bulk Density) 與地層的孔隙率 ( $\phi$ )、基質密度 ( $\rho_{ma}$ ) 還有流體密度 ( $\rho_{fl}$ ) 有關，

$$\rho_b = \phi\rho_{fl} + (1 - \phi)\rho_{ma}$$

一般而言，石英基質密度 (matrix density) 為 2.65g/cc，石灰岩基質密度為 2.71g/cc，白雲岩基質密度為 2.87g/cc，純淡水密度為 1.0g/cc，鹽水密度為 1.13g/cc。因 Density Log 工具所量測的深度很淺，一般都在泥漿浸汗帶 (invasion zone) 內，因此在含油地層中流體密度 (apparent  $\rho_{fl}$ ) 約為 0.95 g/cc，在含氣地層中流體密度 (apparent  $\rho_{fl}$ ) 約為 0.74 g/cc。

### 4、Photo-electric Log (Pe Log)

目前的 Density Log 工具除了可發射強的 gamma-ray 外，也具備了可再發射一個弱的 gamma-ray (經由 Photo-electric 來激發)，因此目前的 Density Log 儀器除了可量測地層密度之外，也可以同時量測 Photo-electric 的反應。Pe Log 是一個用來判斷岩性相當好的工具，但在量測上易受泥漿添加物重晶石影響。砂岩 Pe=1.8、石灰岩=5.1、白雲岩=3.1、鹽岩=4.7、硬石膏=5.1。

### 5、Neutron Log

Neutron Log 為使用一個高能量的中子源射入地層中，因中子與地層中之氫原子發生碰撞後，因彼此重量相似，而使中子快速衰減，然後利用近端與遠端接收器接受到的中子能量值相比，即可推算出地層中氫原子的含量，由於地層孔隙中含有之水或碳水化合物皆具有氫原子，因此可以推算出地層中之孔隙率。在計

算孔隙率時，一般皆使用含水之石灰岩進行較正，所以在 Neutron Log 所得的孔隙率單位會使用 (Limestone porosity unit, l.p.u)。

Density Log 與 Neutron Log 雖皆可計算得到孔隙率，但因量測的本質不同 (Density Log 量測體積密度，Neutron Log 量測氫原子數)，因此利用兩者的交叉對比圖 (cross-plot, 圖 25) 可判別代表某些岩性與流體的特性。在資料的展示上也常將 Density Log 與 Neutron Log 繪製於同一欄位上，若兩者比例調整適當，在含氣儲集層可明顯看到兩曲線明顯分開，稱為 Gas Separation (Neutron Log 向右、Density Log 向左)；在頁岩中也可看到兩曲線明顯分開，稱為 Shale Separation (Neutron Log 向左、Density Log 向右)，如圖 26。

## 6、Sonic Log

紀錄聲波在井下地層中之走時，一般單位以 us/ft 或 us/m 表示，此除了可以用來作為合成震波與震測剖面的時深轉換之外，也可用來計算孔隙率 (Wyllie time average equation) (圖 27)，

$$\Delta t_{\log} = \phi \Delta t_{fl} + (1 - \phi) \Delta t_{ma}$$

一般而言，泥漿濾液  $\Delta t_{fl} = 189$  us/ft，砂岩  $\Delta t_{ma} = 54$  us/ft、石灰岩  $\Delta t_{ma} = 45$  us/ft、白雲岩  $\Delta t_{ma} = 41$  us/ft。

在非固結 (Undercompaction) 地層中 Wyllie time average equation 將不再適用，須另外使用一經驗修正參數  $B_{cp}$  進行修正 (圖 28)，稱之為 Raymer-Hunt Correction，越鬆散的地層  $B_{cp}$  值越高。

Sonic Log 也可與 Density Log 配合，計算二次孔隙 (Secondary Porosity)，計算原理為經由 Sonic Log 所求得之孔隙率 ( $\phi_s$ ) 為岩石基質孔隙 (Matrix Porosity)，而由 Density Log 求得之孔隙率 ( $\phi_D$ ) 為岩石總孔隙率 (Total Porosity)，因此將兩者所求得孔隙率相減即為岩石之二次孔隙 (Secondary Porosity Index,  $SPI = \phi_s - \phi_D$ )，亦即在裂隙發達的地層中，所量測而得的  $\phi_D$  會大於

$\phi_s$  °

$\phi_s$  計算公式：

$$\phi_s = \frac{\Delta t_{\log} - \Delta t_{ma}}{\Delta t_{fl} - \Delta t_{ma}} \quad (\text{Wyllie Time-Average Equation, } \Delta t_{fl} \text{ 爲泥漿濾液}$$

聲波走時、爲  $\Delta t_{ma}$  岩石 matrix 聲波走時)

$\phi_D$  計算公式：

$$\phi_D = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_{fl}} \quad (\rho_{fl} \text{ 爲泥漿濾液密度、爲 } \rho_{ma} \text{ 岩石 matrix 密度)}$$

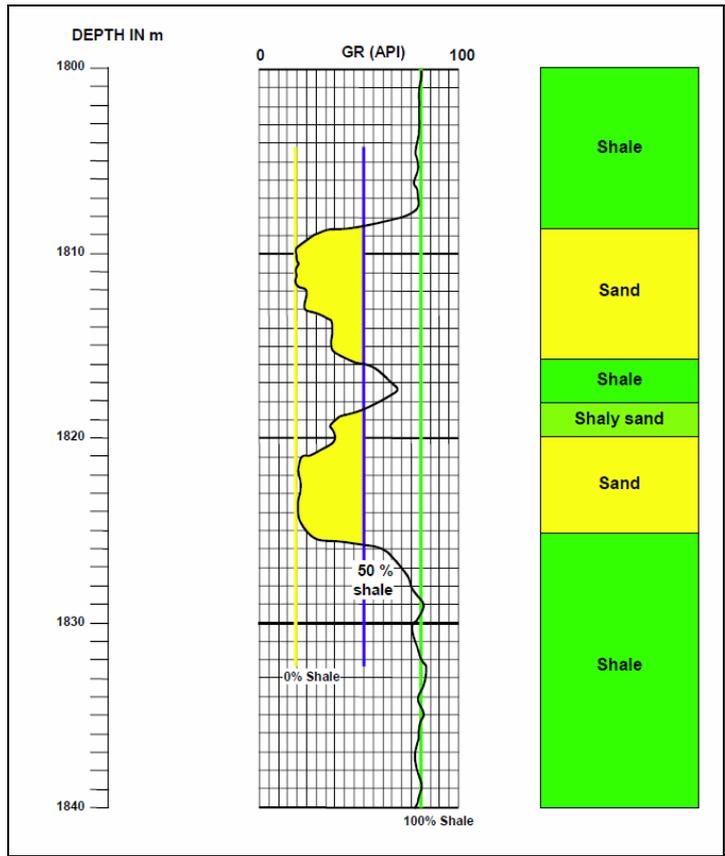


圖 23、利用 Gamma-ray 進行砂岩與頁岩解釋

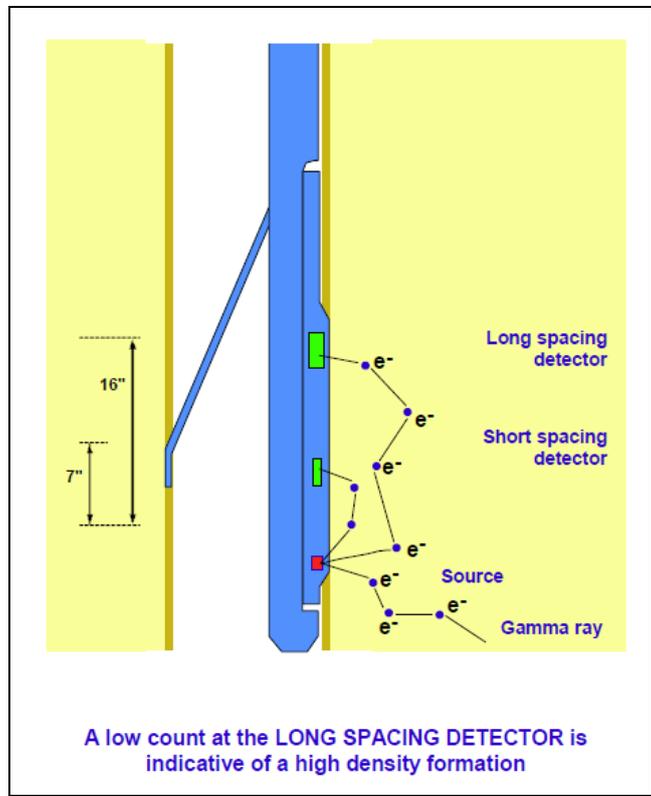


圖 24、Density Log 施測原理

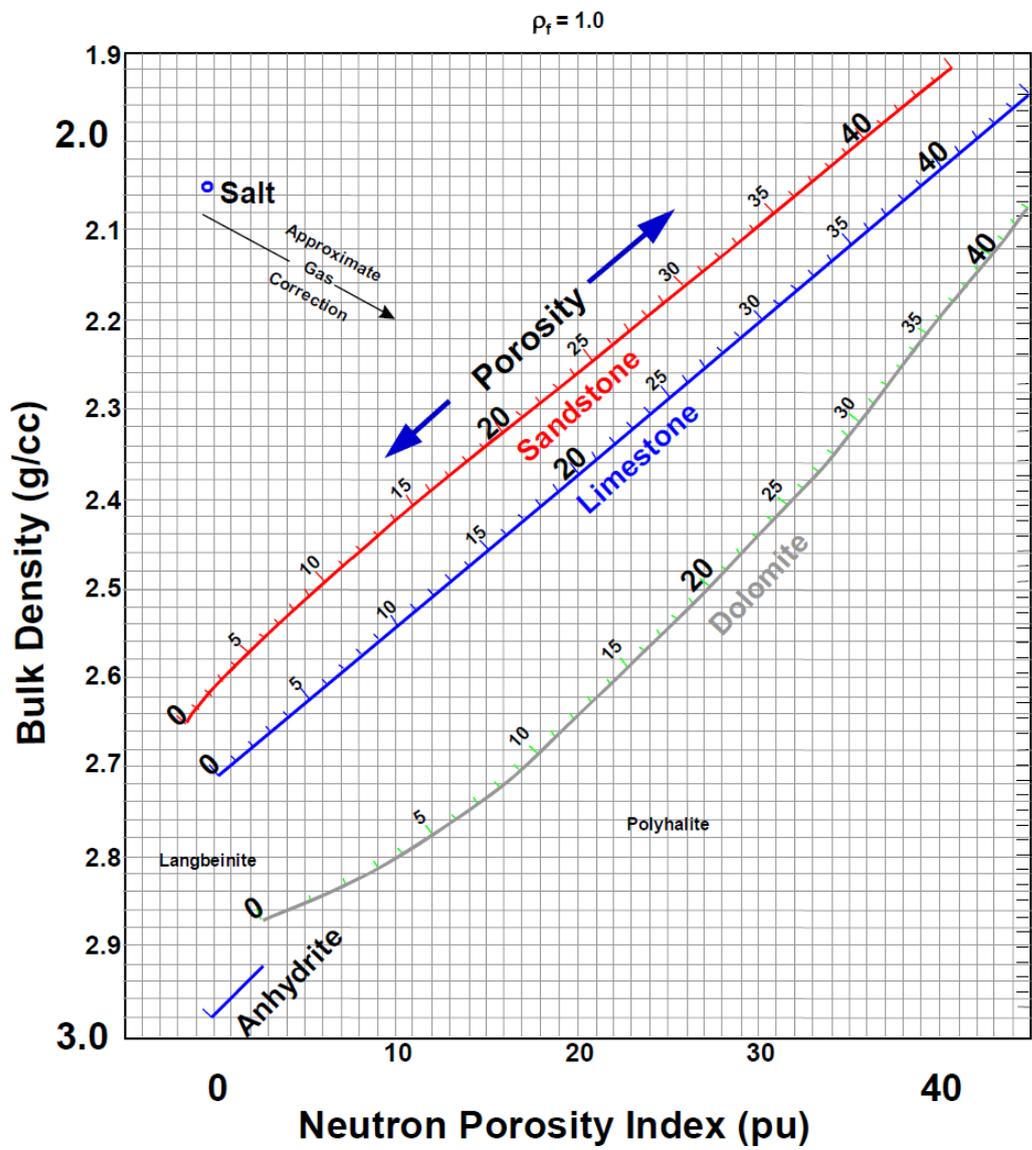
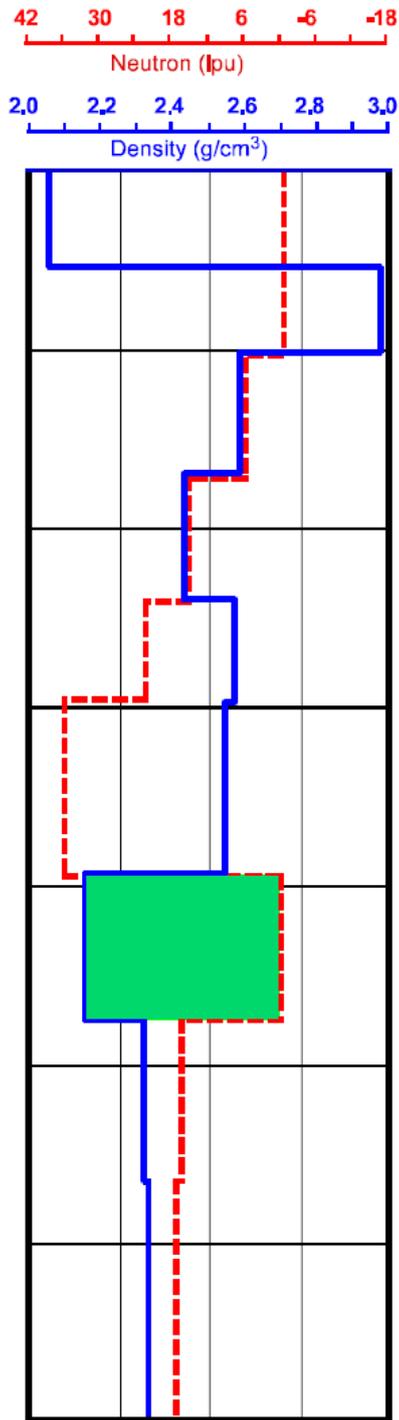


圖 25、Density Log 與 Neutron Log 交叉對比圖 (cross-plot)



Lithology	Porosity	Fluid
Salt		
Anhydrite		
Limestone	5 %	Water
Limestone	15 %	Water
Dolomite	15 %	Water
Shale		
Sandstone	20 %	Gas
Sandstone	20 %	Oil
Sandstone	15 %	Water

圖 26、Density Log 與 Neutron Log 在不同岩性的的反應

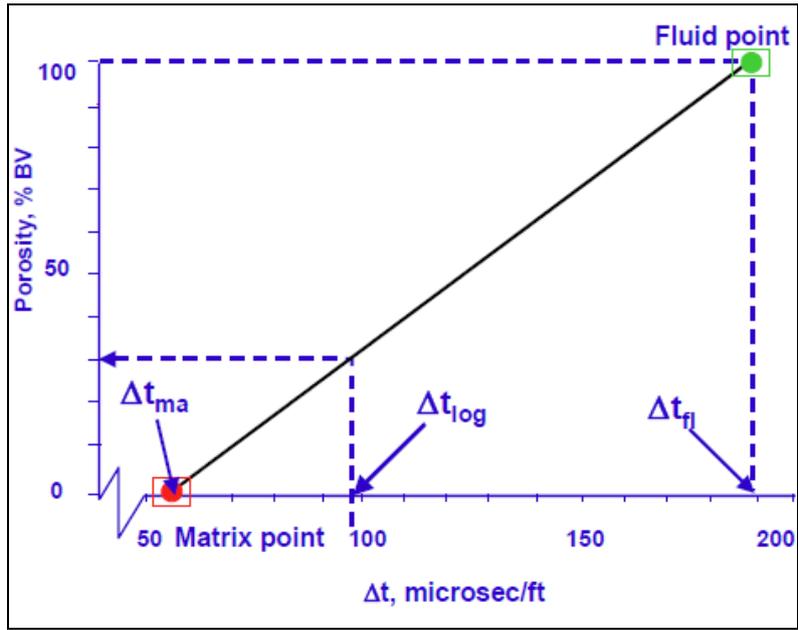


圖 27，Wyllie time average equation 計算原理

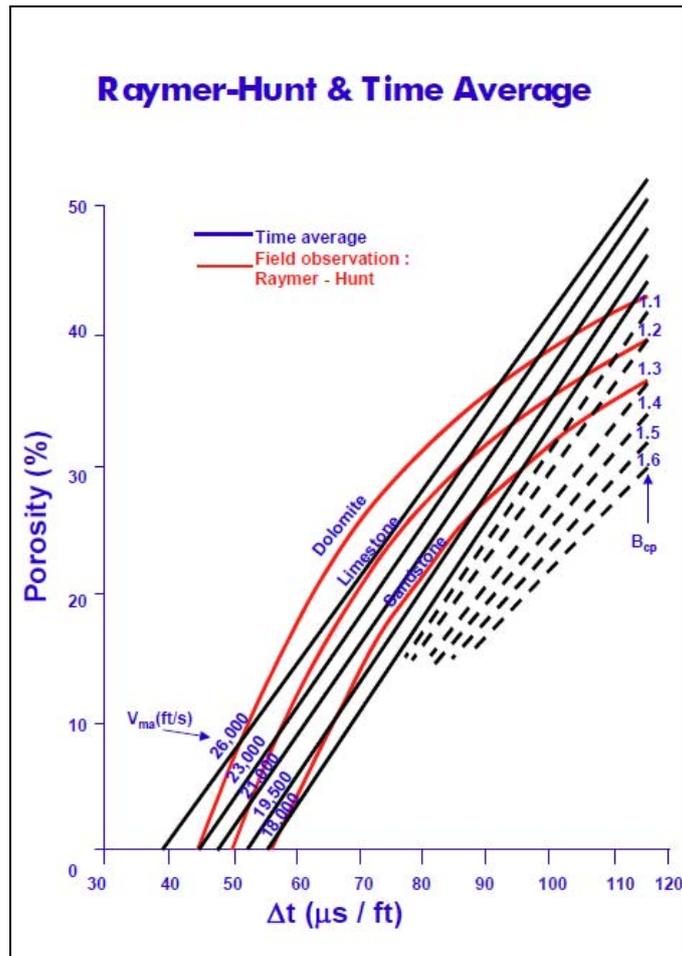


圖 28，在非固結 (Undercompaction) 地層中須使用 Raymer-Hunt Correction

(四)第四天, 10月18日, Section 3: Fundamentals of Logging From A to Z –  
Petrophysical Evaluation

今天接續講解昨天尚未上過的電測施測原理與應用。

7、Resistivity Log

大部分地層水皆帶有點鹽度, 可導電, 電阻低, 但油氣不導電, 電阻高, 所以地層中若存在高電阻, 即可能含有油氣。地層電阻是在計算油氣飽和度中最重要的資料, 但電阻量測卻很容易受井下各種狀況影響, 如井孔狀況、泥漿浸汗帶深淺、上下地層影響、薄層儲集岩、地層傾角, 井程等, 因此在使用與解釋上須更加小心。

測量電阻依儀器種類可分為兩種：

(1) Laterolog, 主要使用在鹽水泥漿中, 測量發射源與接收器間的電流量, 而計算出不同地層的電阻值, 一般施測分為 LLD (Laterolog deep)、LLS (Laterolog shallow) 與 MSFL (Micro-spherically focused log) 三種, 分別代表不同量測深度。一般若地層厚度大 100 呎於則不需進行修正, 在地層厚度大於 30 呎時, 須利用淺部電阻作為修正 (Tornado correction chart) 來求得地層真實電阻 ( $R_t$ ), 但若地層厚度小於 30 呎時, 則需使用模擬或逆推方式 (圖 29) 來求得真實電阻 ( $R_t$ )。

(2) Induction log, 主要使用在淡水泥漿與油基泥漿中, 此為使用電磁感應原理來量測地層電阻, 可以量測到相當深的地層電阻 (6~7 呎), 因鹽水泥漿會因感應而產生電流, 因此 Induction log 僅適用於非導電性質的泥漿。傳統的 Induction log 工具為 DIL (Dual Induction Log, 圖 30), 可同時量測深部電阻 (ILD, Induction Log Deep) 與淺部電阻 (ILM, Induction Log Medium), 目前較多使用陣列方式, 可量測更多不同深度之電阻, 例如 AIT (Array Induction Imager Tool) 可量測 5 種不同深度之電阻 (10、20、30、60、90 吋), 且具有不同的垂向解析度。

在非儲油岩中，如頁岩、硬石膏、鹽岩，由於滲透率相當低，幾乎不會產生無泥漿浸汙帶，因此不論是 Laterolog 或 Induction log 所得到的深到淺部電阻曲線皆會重疊再一起；但在孔隙良好的儲油岩中，深到淺部電阻曲線皆會明顯的分開（圖 31）。一般而言，MSFL 可以代表受浸汙儲油岩的電阻 ( $R_{xo}$ )，LLD 代表儲油岩的真實電阻 ( $R_t$  或  $R_o$ )

### 快速井下電測綜合評估步驟：

#### 1、檢視所有電測資料

- (1) 確認資料品質、檢查資料檔頭 (header)、量測深度、比例尺，若有備註欄位也記得要檢視。
- (2) 查看 Mud Log 資料，確認是否有明顯油氣顯示、泥漿漏失、儲集岩存在。
- (3) 若有鄰近井位之電測資料，先找出明顯異常區或儲油岩區，以方便比對。

#### 2、使用 Gamma-ray 找出儲油岩

- (1) 使用 Gamma-ray 分辨有可能儲油岩存在的地區
- (2) 若砂岩存有明顯放射性物質，須使用鈾 (Uranium log)、釷 (Thorium log)、鉀 (Potassium log)，以區分砂岩與頁岩。或者使用 Density-Neutron 交叉對比圖 (cross-plot) 來確認頁岩位置。

#### 3、分辨儲油岩區段

- (1) 低電阻代表含水層，一般情況 Resistivity 與 Density Log 會朝同方向變化；高電阻代表含油氣層，Resistivity 與 Density Log 會朝反方向變化（圖 32）。
- (2) 在鹽水泥漿中，電阻量測使用 Laterolog；在淡水泥漿

與油基泥漿中，則使用 Induction log。

(3) 若深部到淺部電阻明顯分開代表可能有油氣存在。

#### 4、含油或含氣層辨別

(1) 在 Density-Neutron 曲線分辨上，含氣層的分離 (Gas Separation) 較含油層明顯 (圖 33)。但在含有頁岩的儲集層中，此現象較不明顯，因為頁岩會提高 Neutron Log 的數值 (曲線偏向左)。

(2) 在 Sonic Log 上，含氣層會造成數值明顯增加 (偏向左)，因氣體會急遽降低地層速度。

#### 5、計算孔隙率與判別岩性

(1) 使用 Density Log 計算目標層孔隙率，若有 Neutron Log 則一併使用。

(2) 基質密度與流體密度可從 Density Log 或實驗室之岩心資料得知。

(3) 根據泥漿濾液鹽度與電阻 (電阻 vs. 鹽度圖)，估算浸汗帶流體密度。

(4) 在儲油氣層，浸汗帶流體密度=0.7 泥漿濾液密度+0.3 油氣密度。若在儲油氣層中，未進行修正，使用流體密度=1.0g/cc，會高估地層孔隙率 (圖 34)。

(5) 在儲氣層中，因 Density-Neutron 曲線分開，可使用孔隙率 =  $\frac{2}{3}$ Density Porosity +  $\frac{1}{3}$  Neutron Porosity 方式修正 (圖 35)。

#### 6、計算地層水電阻

(1) 找出水飽和度 100%之地層，並計算其孔隙率。

(2) 估計 m 值，若有岩心實驗資料更佳。

- (3) 從深部電阻讀出該區段之數值 ( $R_o$ )。
- (4) 若該地層可找出不同數值之  $R_o$  與孔隙率，則利用 Pickett plot 找出  $R_w$ 。
- (5) 若僅有少數資料點，則取平均值，再使用 First Archie's equation，計算  $R_w$ 。

$$R_w = R_o \Phi^m$$

## 7、計算含油氣層之水飽和度

- (1) 找出含油氣層位置並計算孔隙率。
- (2) 估算  $m$  與  $n$  值，若無岩心實驗可以得知  $m$  與  $n$  值，則使用砂岩  $m=n=1.8$ ，碳酸岩  $m=n=2.0$ 。
- (3) 假設上述步驟算出之  $R_w$  與此地層相同。
- (4) 從深部電阻讀出該區段之數值 ( $R_t$ )。
- (5) 使用 Archie's equation 計算水飽和度  $S_w$ ，若無岩心實驗可以得知  $m$  與  $n$  值

$$S_w = \left( \frac{R_w}{R_t \phi^m} \right)^{\frac{1}{n}}$$

## 8、進行地層測試

- (1) 使用各式電測曲線找出氣油水界面，並找出可能的過渡帶 (圖 36)。
- (2) 使用側向岩心 (SWC)、MDT、液體取樣等確認油氣存在與地層壓力分佈。注意電測解釋與計算之不確定性較高的層段，特別是油氣飽和度介於 50~70% 區段。

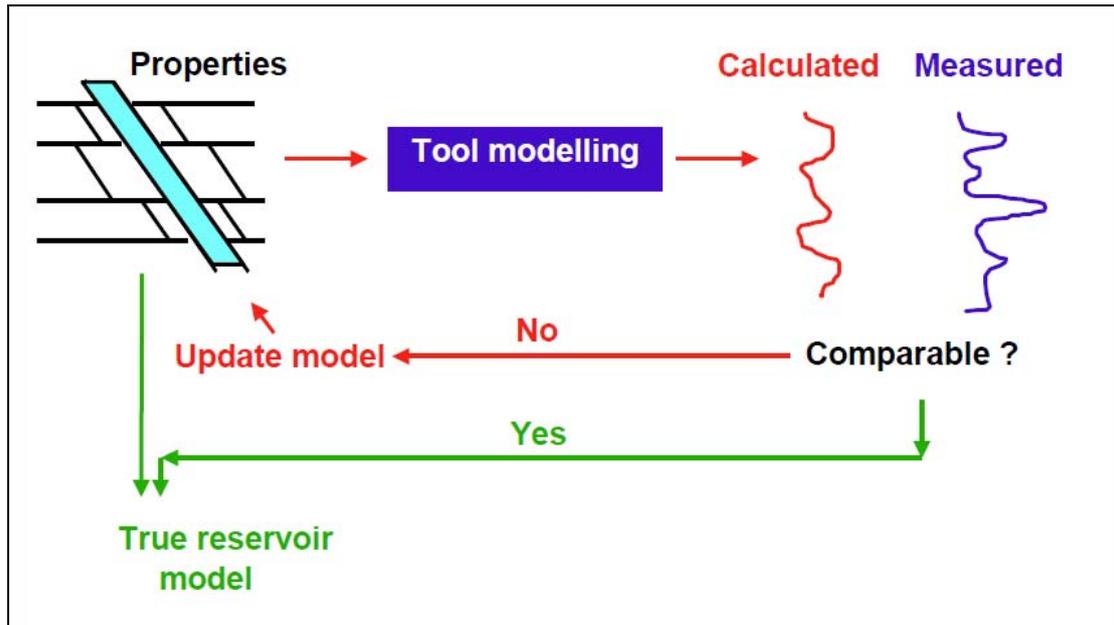


圖 29、地層厚度小於 30 呎時，則需使用模擬或逆推方式來求得真實電阻 ( $R_t$ )

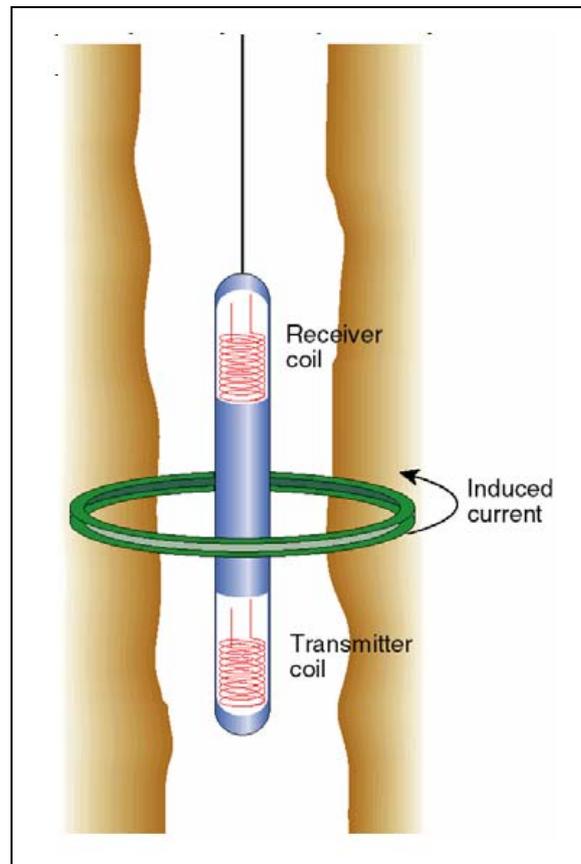


圖 30、Induction Log 施測原理

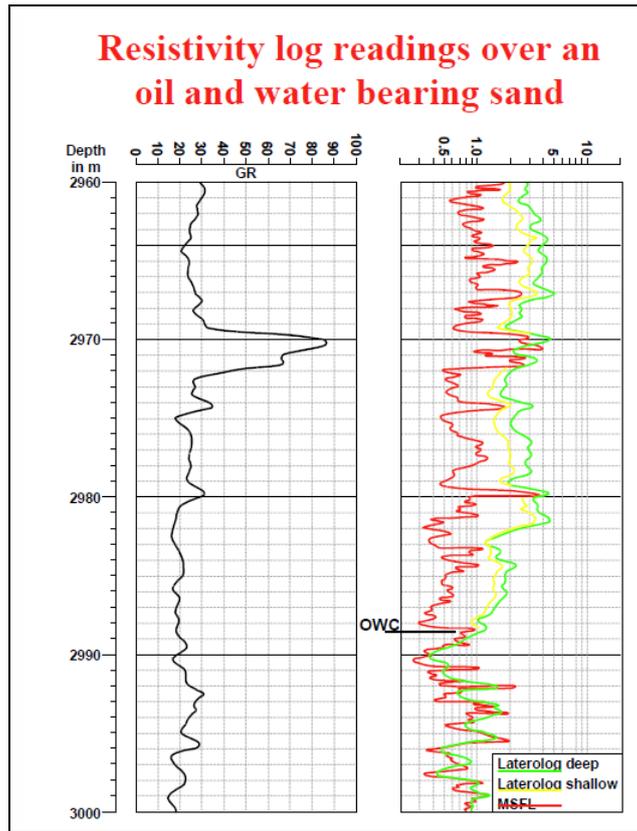


圖 31、含油氣儲油岩會造成深到淺部電阻曲線明顯分開

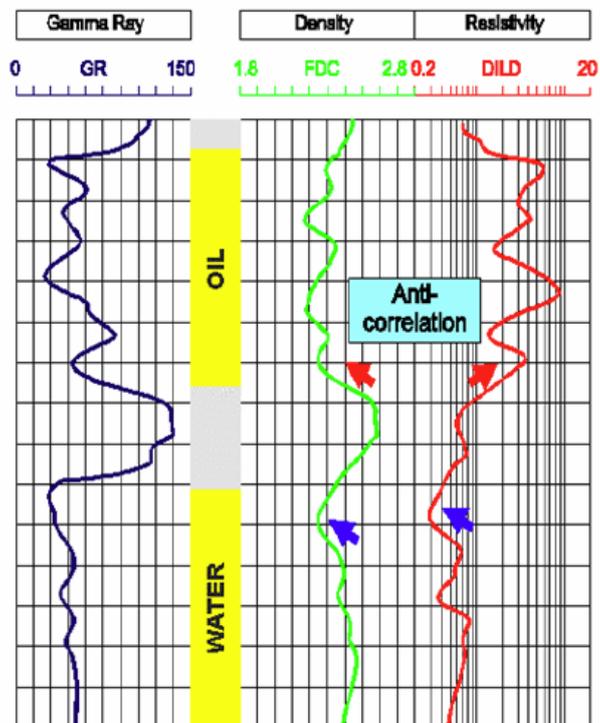


圖 32、含油氣時，Resistivity 與 Density Log 變化情形

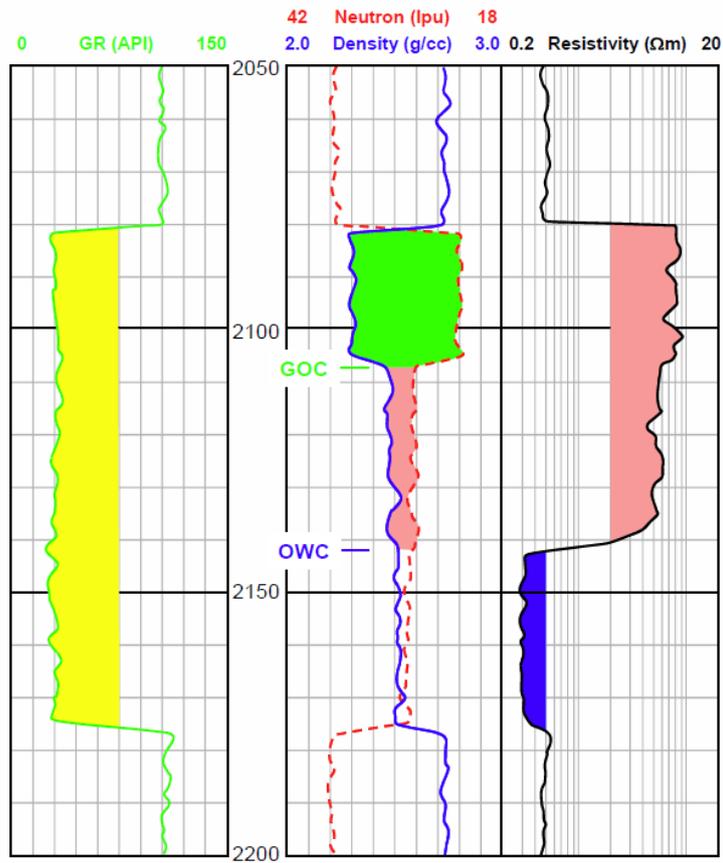


圖 33、含油氣時， Neutron-Density Log 與 Resistivity 變化情形

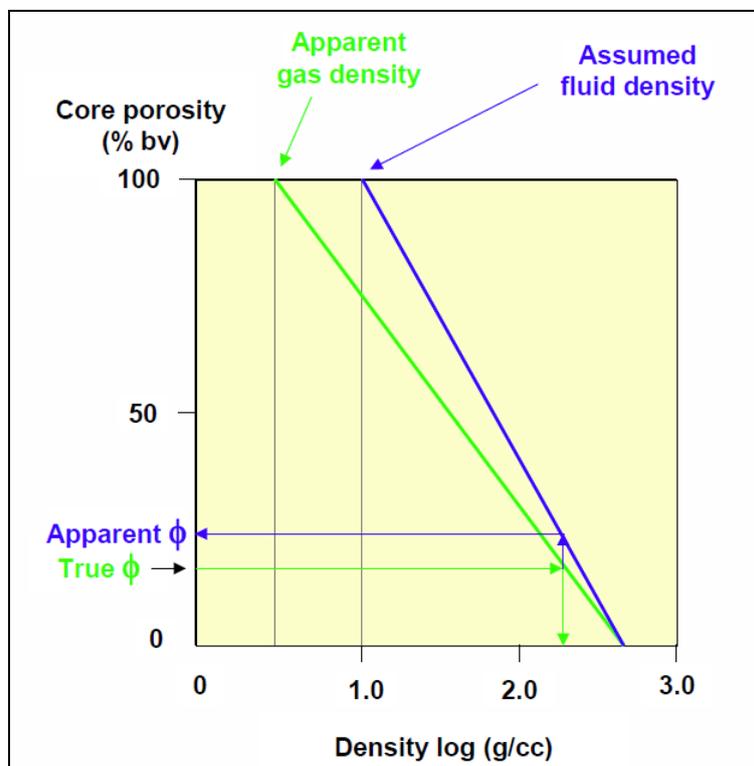


圖 34、天然氣對 Density Porosity 之影響

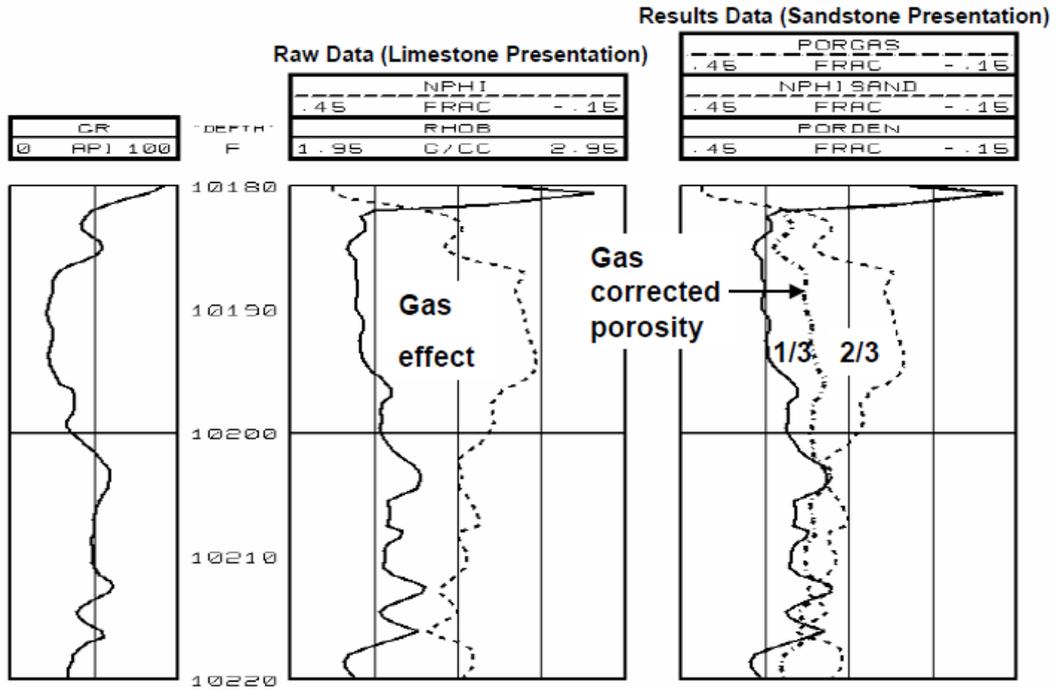


圖 35、在含氣層中，快速估算孔隙率範例

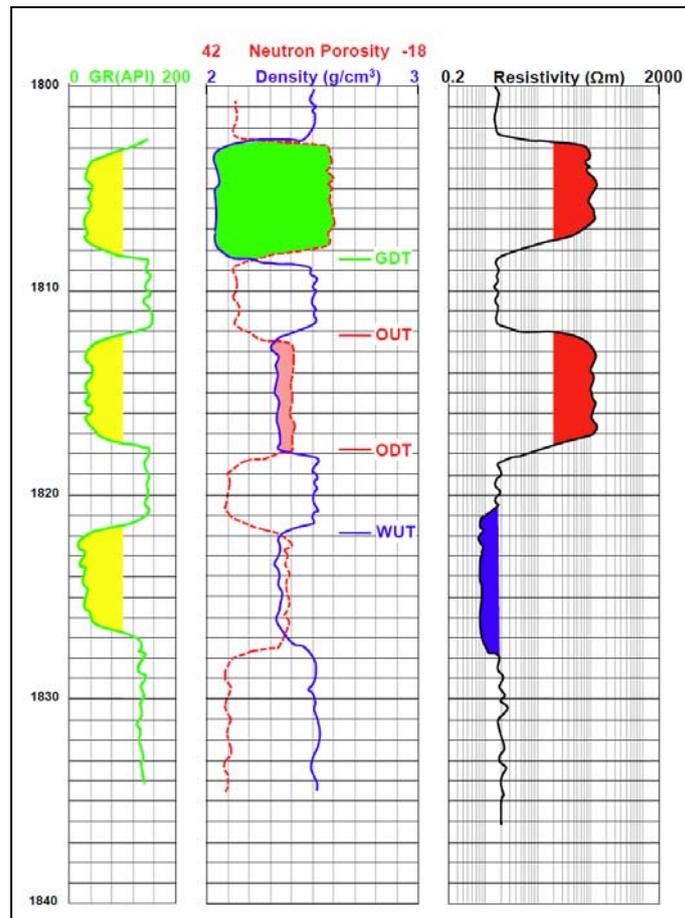


圖 36、各含油氣層之界面

(五)第五天, 10月19日, Section 3: Fundamentals of Logging From A to Z –  
Petrophysical Evaluation & Section 4: Reserves and Uncertainty

岩石物理所計算而得的數值的不確定性經常會被低估, 在許多的情形下經常需進行各種參數的敏感性分析。在計算地下碳水化合物體積, 一般最常用使用 Monte Carlo 統計法, 計算出 P10、P50、P90, 因使用數據皆有其不確定性 (圖 37) 甚至無法避免, 所以在使用時必須先了解所有可能產生不確定性的原因與誤差, 才能將風險減至最小或可以接受的程度, 通常採用以下公式計算儲集岩碳水化合物體積:

$$\text{HC Volume} = A * H * (N/G) * \phi * (1 - S_w)$$

其中 A = 儲油岩面積

H = 儲油岩厚度

N/G = 儲油岩淨砂比 (net to gross ratio)

$\phi$  = 孔隙率

$S_w$  = 水飽和度

進行評估時, 若小心注意以下幾點則可有效減少評估時的不確定性:

- 1、確認所有量測工具皆有妥善的校正。
- 2、所有電測資料皆須合適的進行環境校正, 特別是在泥漿有額外添加物時, 如重晶石、KCL 等, 會嚴重影響資料數值。
- 3、注意承包商的資料處理, 有可能會過濾掉某些資料卻未告知。
- 4、注意可能會發生的錯誤 (如資料數化、錯誤的資料格式、錯誤的資料檔頭)。
- 5、若有薄層儲油氣層存在須特別小心處理。
- 6、各種工具皆有其限制, 如施測溫度、水平與垂直解析度等, 別太相信承包商所宣稱之理想數據。
- 7、量測所得數據在特殊的環境下, 如高溫高壓、井孔過小、水平井, 通常資料品質較差, 不確定性大。

# Petrophysical Uncertainties

## The Process

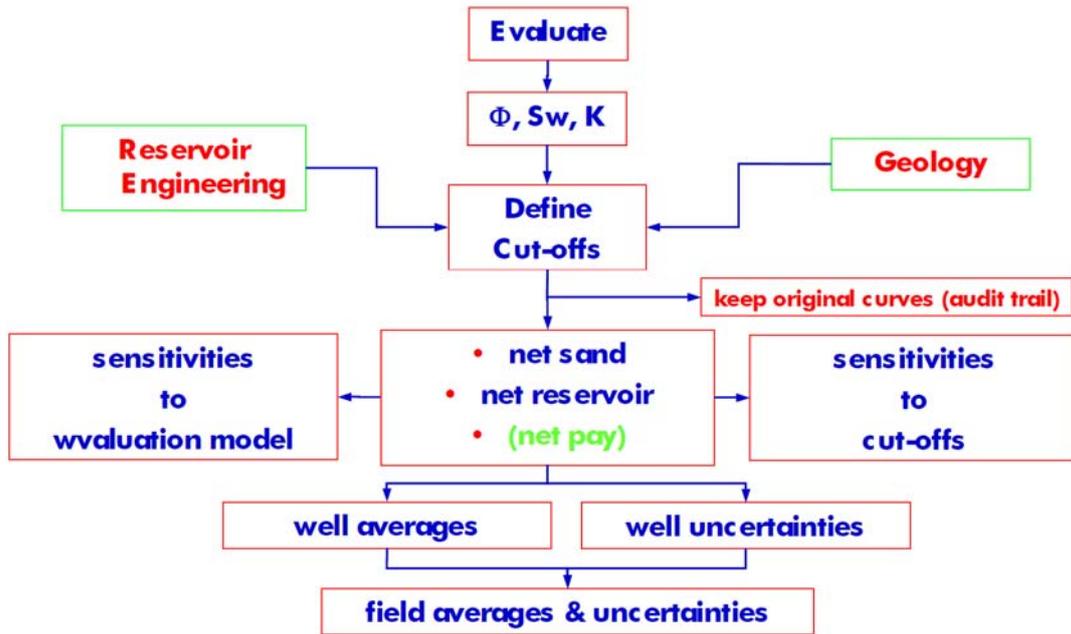


圖 37、岩石物理使用參數與不確定性

#### 四、心得與建議

進中油公司服務已將近五年，期間上過許多公司內部的專業訓練課程，但講師大多是公司資深專業人員，且課程內容多集中於地質與地球物理的解釋與軟體操作，對於電測解釋與應用或岩石物理訓練課程很少，因此過去有關電測資料與岩石物理的知識都是自己從工作中找答案，或詢問資深人員而來，但這樣常常是一知半解，似懂非懂，無法有系統全面性了解其中奧妙關鍵之處，甚至更不清楚在資料解釋與應用上有何限制或陷阱。

接受這次 5 天訓練課程之後，終於解決過去許多的疑惑並矯正錯誤的觀念，收穫很多。而且除了專業上的收穫外，在上課討論與休息時間可以與不同國家與公司的人員進行交流，了解不同領域人員對於岩石物理著重的地方及國外石油公司的現況與做法，增廣見聞。

建議公司往後可多編列訓練預算，讓更多人員可參與類似訓練課程，培養員工專業技能，同時也可藉由受訓期間與各國不同石油公司人員交流，提升公司專業人員國際觀。