

出國報告（出國類別：實習）

參加 PetroSkills 舉辦
之井測解釋訓練課程
（Well Log Interpretation）

服務機關：台灣中油公司探採研究所

姓名職稱：李崇豪／石油開採工程師

派赴國家：美國

出國期間：104 年 12 月 06 日至 12 月 13 日

報告日期：104 年 12 月 31 日

參加 PetroSkills 舉辦之井測解釋訓練課程

摘 要

井測解釋分析為石油公司相當重要且為最普遍常見的應用技術之一。台灣西南海域岩性變化複雜，且位於海域其鑽井費用昂貴，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，

雖然處於低油價時代，緻密氣或頁岩油氣等非傳統相關的研究仍是他們感興趣的議題，因此除了傳統的井測解釋的部分之外，講師亦提到如何從井測資料中分辨裂隙與具備較高潛能的層位，例如緻密的砂層的識別可從(1)高電阻值與(2)不同深度電阻幾乎重合(或僅些微分開)的特性，與(3)自然電位等方向著手；而裂隙存在的辨別可以藉由(1)High Uranium, (2) U spikes, (3) Heavy Mud (Barite) from Pe (Photoelectric absorption) spike (4) Correction rho, (5) Spiky caliper (6) High resistivity or high porosity 等方法中辨識。礦物成分的辨識為利用孔隙率井測的結果對孔隙率及礦物的成分進行綜合判定，有時甚至可以辨識出不同流體性質。N-M Plot 跟 MID Plot 甚至使用三種孔隙率井測的資料進行分析。地層水電阻(R_w)為計算含水飽和度之關鍵參數。課程中介紹 5 種可以用於計算地層水電阻的方法，包含 Catelog，Water sampling， R_0 方法， R_{wa} ，Pickett Plot 與 Hingle Plot 以及求得 R_w 最佳化的方法。

此訓練課程可學習並建立新的井測解釋技術，並整合其餘地質、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。此外，藉由此次參與訓練課程的機會與國外專家學者進行技術交流以及經驗交換，成果可直接應用於本公司查德或未來其他油氣田之生產開發工作。

關鍵詞：井測解釋、孔隙率、電阻、含水飽和度

參加 PetroSkills 舉辦之井測解釋訓練課程

目 次

摘 要.....	I
目 次.....	II
壹、目的.....	1
貳、過程.....	3
參、心得與建議.....	25
肆、致謝.....	26

壹、目的

井測(well logging)是地球物理的探測方法之一，是藉由各種探針在井內向上或向下的過程中，藉由量測地層的電阻、自然電位差、聲波速度、放射線強度等特性反映出真實的地層環境。而井測解釋訓練課程(Well Log Interpretation)，即為針對不同井測儀器的原理與應用，整合利用各種井下電測與地質資料，進而綜合分析孔隙率及滲透率儲集岩岩石物理特性與流體成分及含水飽和度等（圖一）。PetroSkills 所舉辦之課程為期 5 天(圖二)，內容主要包含(1)不同井測測量工具的原理與應用，包含 GR、Sonic 等。(2)利用岩石孔隙、滲透、流體特性等電測資料之整合分析各種儲集岩物理特性，藉以了解儲集岩分布特性，降低探勘風險。(3)了解井測解釋上的不確定性與可能誤差。藉此充分整合與應用不同儲集岩特性與其地質、岩石物理、流體特性等資料，並經由課程實際操作，加強井測解釋技術，此將有助於提升本公司現行礦區評估方法，降低未來國內外礦區評估風險。

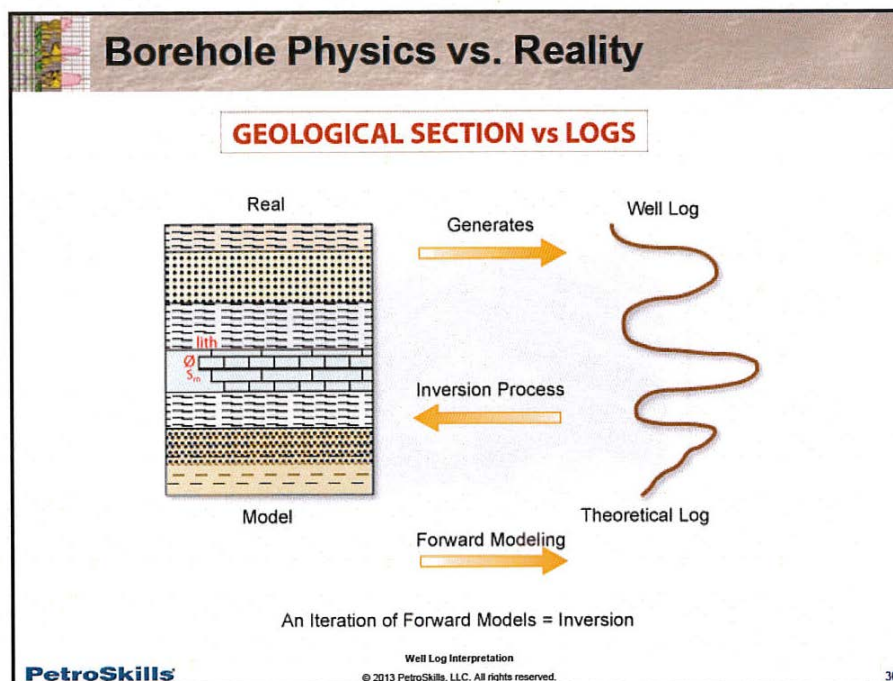


圖 1：井測解釋概念圖

COURSE AGENDA

WELL LOG INTERPRETATION

			Manual	Exercises
Day 1				
A.M.	Intro	Logging objectives and borehole environment	Section i	
	1.	Passive electrical properties of earth materials	Section 1	1-3
	2.	Resistivity logging	Section 2	2-4
P.M.	3.	Spontaneous potential	Section 3	3-3
	4.	Matrix-sensitive logs: Gamma Ray	Section 4	4-13+
Day 2				
A.M.	5.	Depth measurement and control	Section 5	
	6.	Borehole calipers	Section 6	
	7.	Porosity-mineralogy logs	Section 7	2-4
	8.	Porosity determination	Section 8	2-4
P.M.	9.	Identification of mineralogy	Section 9	9-3+
	10.	Energy spectrum radioactivity logs	Section 10	10-13+
Day 3				
A.M.	11.	Formation resistivity factor	Section 11	11-3
	12.	Conductivity of shales	Section 12	
	13.	Water resistivity determination	Section 13	2-4
P.M.	14.	Saturation determination	Section 14	2-4
	15.	Reconnaissance and quicklook techniques	Section 15	2-4
	16.	Porosity-resistivity crossplots	Section 16	2-4
Day 4				
A.M.	17.	Permeability by logging methods	Section 17	chart K-3
	18.	Reservoir delineation by pressure measurements	Section 18	18-3+
P.M.	19.	Nuclear magnetic resonance NMR	Section 19	19-3
	20.	Log analysis by computer	Section 20	
Day 5				
A.M.	21.	Sidewall coring	Section 21	
	22.	Logging while drilling	Section 22	
	23.	Recommended logging programs	Section 23	
	24.	Comprehensive exercise 3-7		3-7

圖 2：PetroSkills 所舉辦之課程內容

貳、過程

本次出國行程如下所示：

12月6日：啟程(台北－休士頓, Houston)

12月7日：第一天的課程主要針對電測，包含電阻(Resistivity)及自然電位(SP)等；亦針對溫度與不同環境對量測結果造成的影響與其校正方式。

12月8日：第二天的課程之重點為孔隙率，包含密度，中子與速度井測；並加入Gamma Ray log及Calipers兩種井測的結果進行解釋。

12月9日：第三天的課程重點為Mineraology，亦即利用聲波、密度、中子井測等孔隙率井測資料作圖進行礦物特性辨識。

12月10日：第三天的授課內容主要針對含水飽和度(Water Saturation)並整理出五種可用於計算含水層電阻的方法。

12月11日：最後一天的課程(第五天)包括地層壓力(利用地層壓力梯度辨識地層流體界面)，滲透率推估，NMR井測與分組測驗(Final Exam)。課程最終的分組測驗為一份800m的井測圖(Exercise 3-7)，要求各組選擇一層最佳的穿孔區間作為地層測試。

12月12~13日：回程(休士頓－台北)

以下按照五天課程中重點摘錄並分別敘述：

DAY 1: SP & Resistivity

油氣可視為絕緣體，不易導電(高電阻)，而鹽水具導電性(低電阻)，因此可以利用電導度或電阻區分出油氣跟鹽水。電阻井測(Electric Log)所量測的地層電阻是電阻係數(歐姆-公尺，ohm-meter)，但為求簡便多以電阻稱之。Conrad Schlumberger自1911年開始研究，並於1927年首先在法國Pechelbronn礦區一口井深500公尺的油井，在不同深度成功量測到電阻(Electrical Resistivity)的資料(圖3)。在鑽井過程中，由於鑽井泥漿滲入，地層由內向外可分成3區。緊鄰井壁的周圍由於受到鑽井泥漿滲入，稱為浸污區(Flushed Zone, R_{xo})，最外側是未浸污區(Un-invaded Zone, R_t)，屬於未受到鑽井泥漿污染的。□中間則部分受泥漿入侵，

稱為過渡帶(Transition Zone)，如圖 4所示。

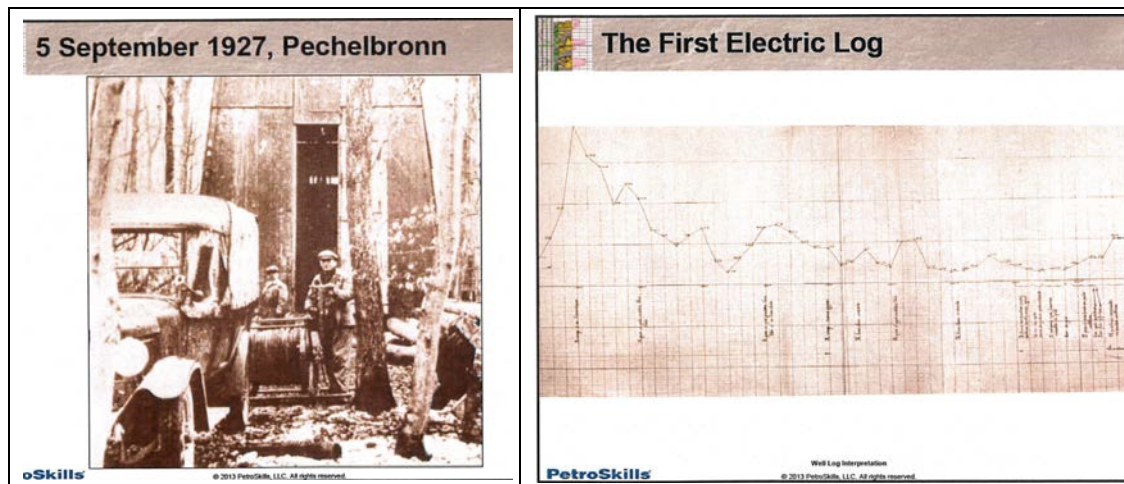


圖 3：1927年首先利用井測在不同深度成功量測到地層電阻的資料

Symbols used in Log Interpretation

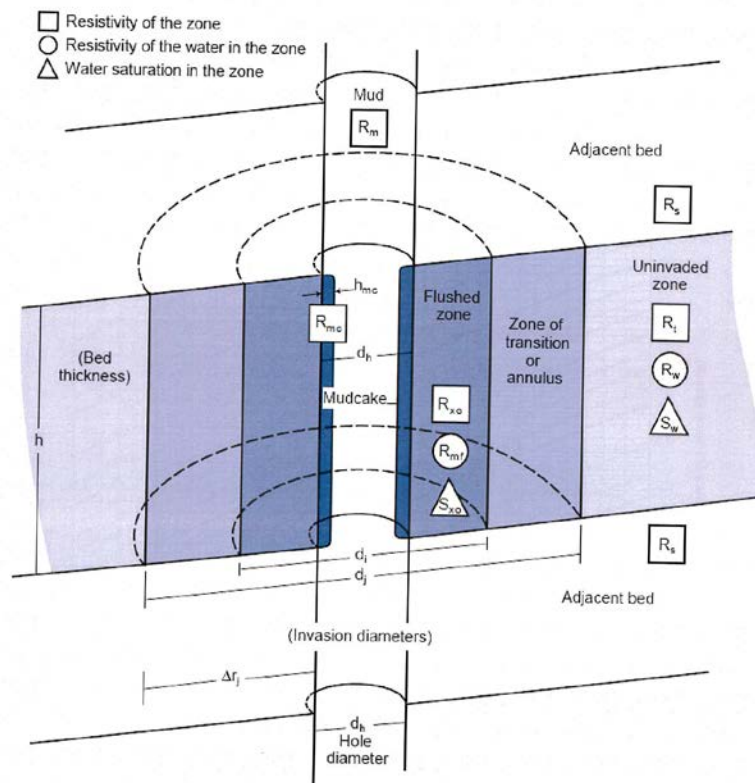


圖 4：鑽井泥漿入侵地層剖面圖

當使用之鑽井泥漿的電阻大於地層水的電阻時($R_{mf} > R_w$)，電阻值在地層剖面的變化可如圖 5 所示。如果地層中的流體為鹽水，可以預期電阻值將隨著井壁側向進入地層後降低，反之若地層中的流體為油氣，可以預期電阻值將變高。

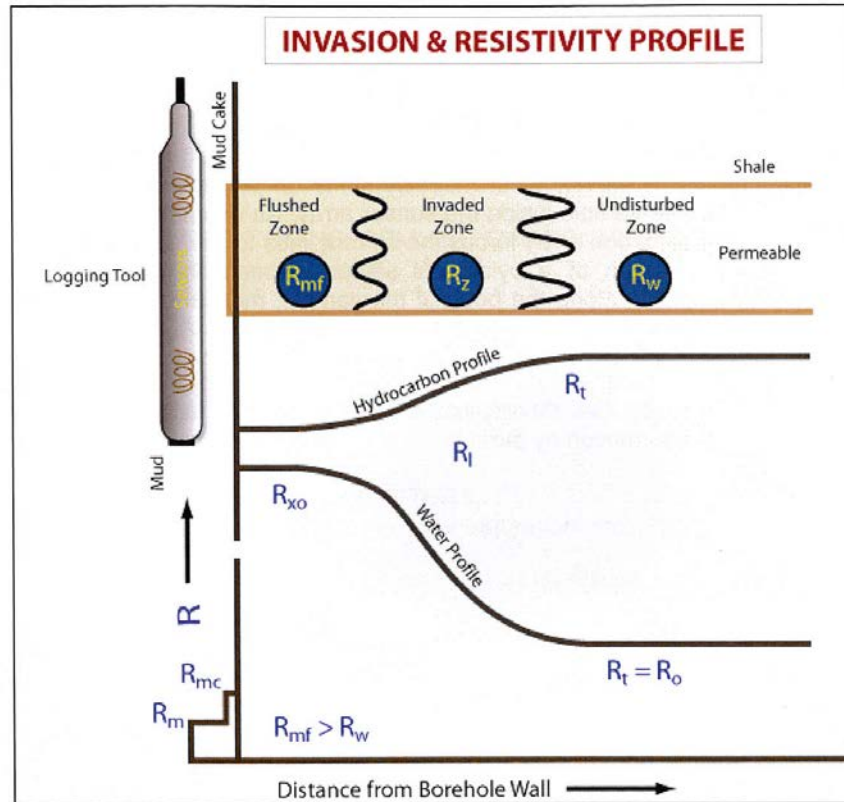


圖 5：鑽井泥漿入侵與地層電阻變化示意圖

感應式(Induction Log)電阻量測地層電導度(Conductivity)，由於油氣或淡水的電導度均低，若泥漿濾液(C_m) + 泥漿壁(C_{mc}) + 浸污區(C_{xo})的電導度量測結果均低時，感應式電阻的數值皆直接反映出地層流體的電導度(C_t)，因此適用於油基泥漿或鹽水基泥漿(中~低電阻，400-500 ohm meter, Ωm)的環境下施測，如圖6(右)所示。反之，焦點式電阻(Laterolog)量測電阻(Resistivity)，若處於泥漿濾液(R_m) + 泥漿壁(R_{mc}) + 浸污區(R_{xo})的電阻量測值均低的環境下，量測的結果可代表地層流體的電阻，因此適用於鹽水基泥漿(中至高電阻，2000 ohm meter, Ωm)的環境下施測，如圖6(左)所示。圖 7 整理焦點式與感應式電阻井測適用範圍。其橫坐標為泥漿濾液的電阻(R_{mf})與地層水電阻(R_w)的比值，往左側代表($R_{mf} < R_w$)，因此

適用於導電度較佳(鹽水基)的泥漿濾液。反之，往右側代表 $(R_{mf}) > (R_w)$ ，因此較適用於導電度較差(油基或淡水基)的泥漿濾液。

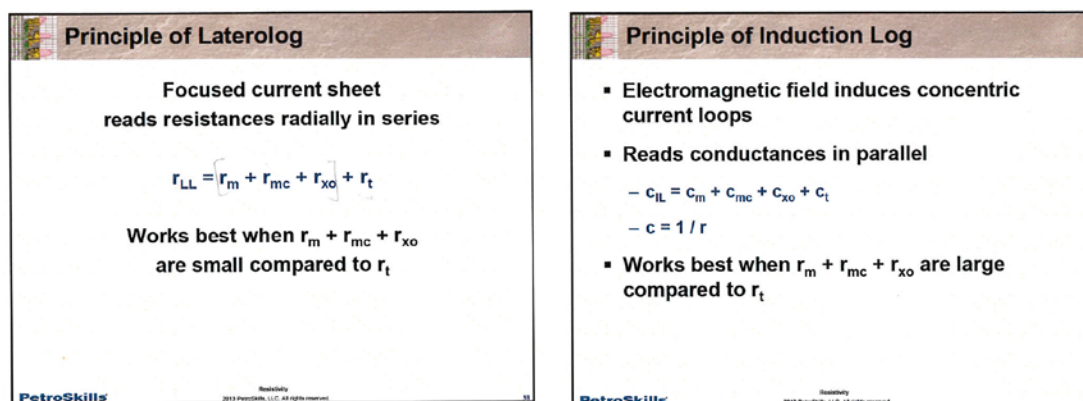


圖 6：焦點式與感應式電阻井測量測原理

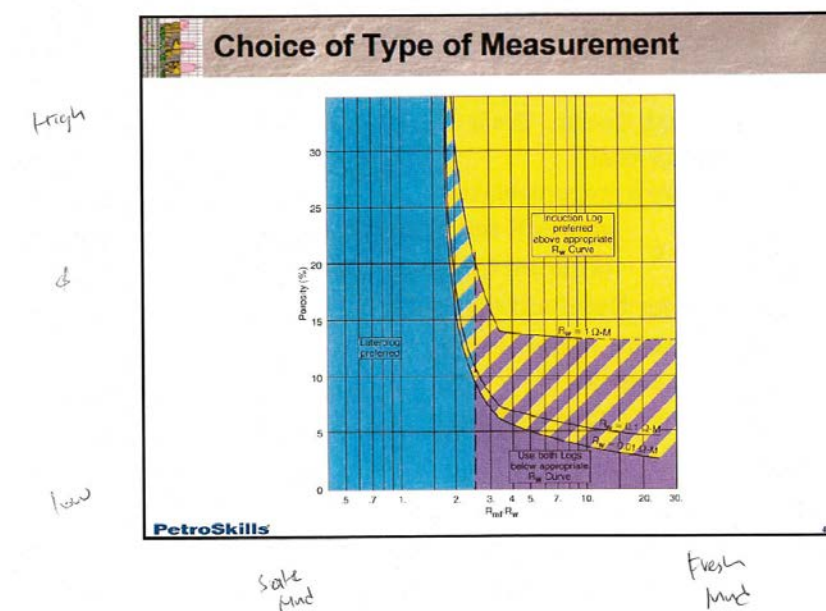


圖 7：水平式與感應式電阻井測適用範圍

由於電阻值(Resistivity of fluids R_{mf} , R_w)隨地溫變化，因此地層溫度的計算與電阻值隨地層溫度改變應校正到正確的狀態，如圖 8所示或者利用Arp's Equation: $R_2 = R_1 * [(T_1 + 6.77) / (T_2 + 6.77)]$ ，其溫度單位為 $^{\circ}F$ 。

Resistivity of NaCl Solutions

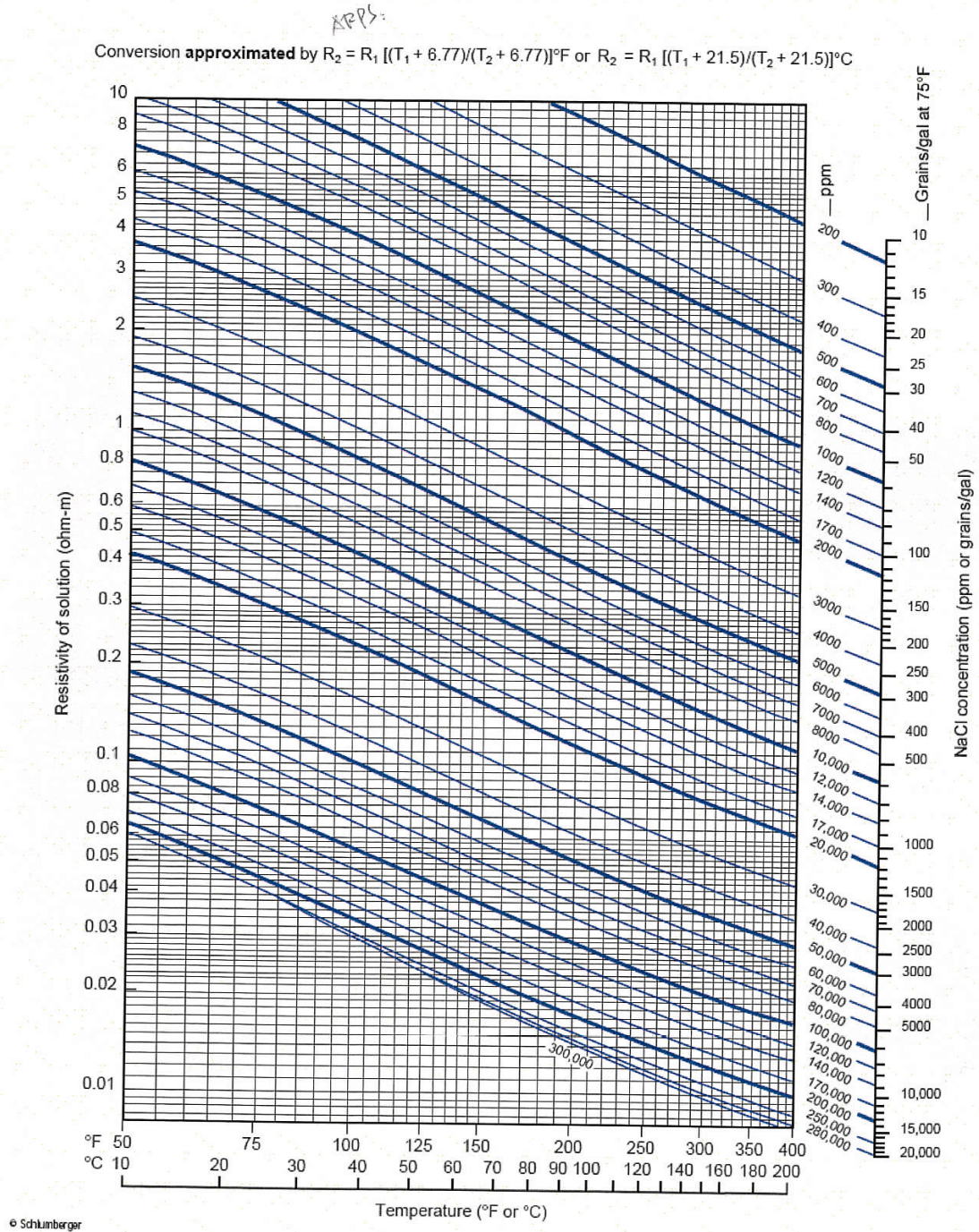


圖 8：電阻與地層溫度變化校正圖

自然電位(SP)可以用於協助辨視地層是否具有滲透性(Permeable)的能力。自然電位差量測必須同時具備(1)流體界面的離子交換(圖9上)與(2)岩層界面的離子交換(圖9下)兩個電位差，因此產生自然電位的條件必須同時包含(1)具導電性的泥漿濾液(Conductive Borehole Fluid)，(2)泥漿濾液電阻與地層的電阻不相同($R_{mf} \neq R_w$)，以及(3)頁岩，滲透性的岩層與井孔同時存在。當地層水的鹽份濃度高於泥漿濾液時($R_{mf} > R_w$)，自然電位的曲線向左(即負電位方向)。反之，則自然電位的曲線向右。

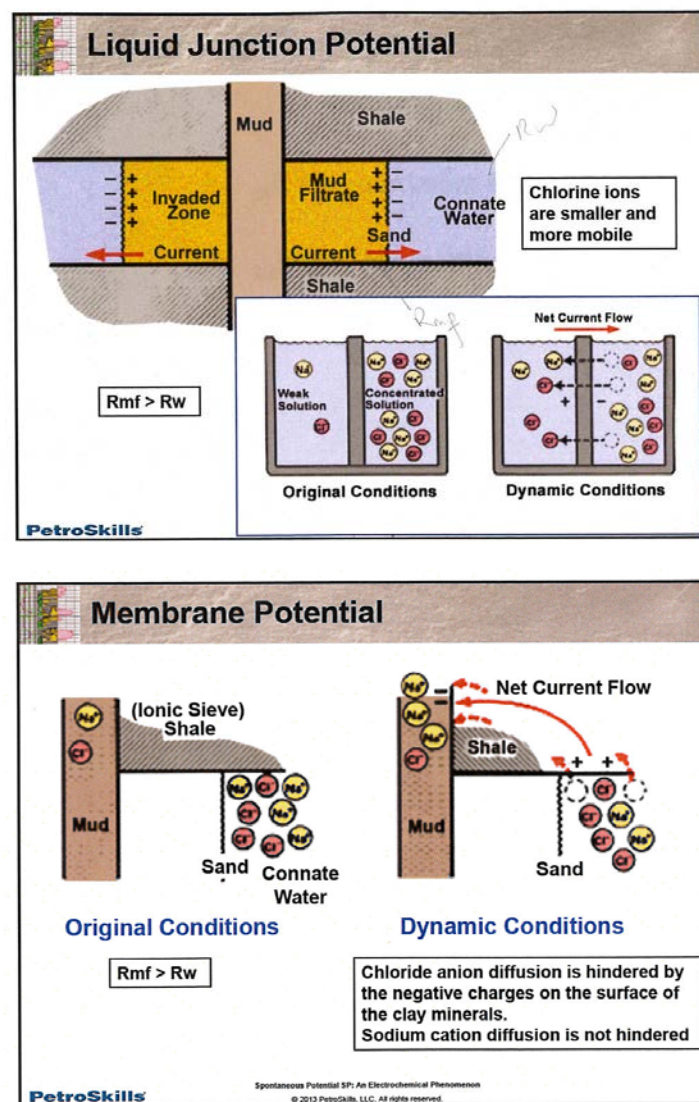


圖 9：兩種自然電位的產生機制

不同深度電阻的分開代表將濾液進入具滲透性的岩層，亦暗示著砂岩的可能存在。如下圖所示，圖中紫色為淺層電阻，藍色為深層的電阻，此兩著在某些位置

分離(未重合)。同時深層電阻小於淺層電阻，亦暗示著此為水層。

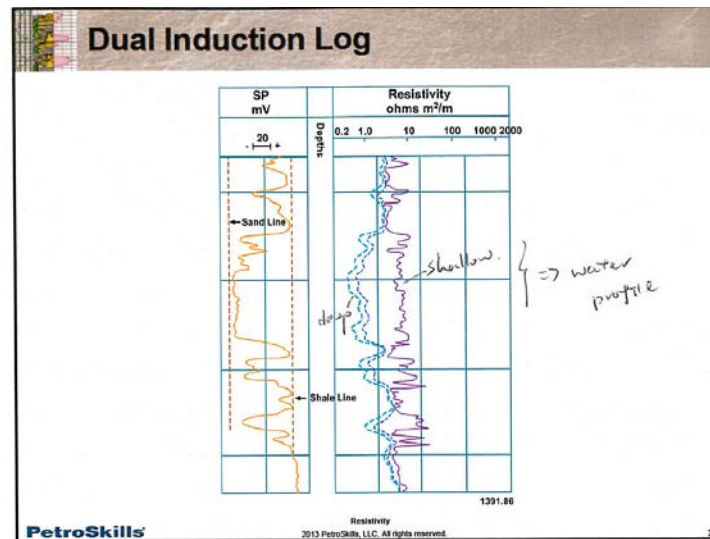


圖 10：不同深度電阻的分開暗示砂岩可能存在

另外在緻密的砂岩層常具備(1)高電阻值與(2)不同深度電阻幾乎重合(或僅些微分開)的特性。以圖 11為例，由於受到緻密砂岩的影響，自然電位在深度 2210m~2240m時呈現傾斜的趨勢，同時不同深度電阻僅些微分開。

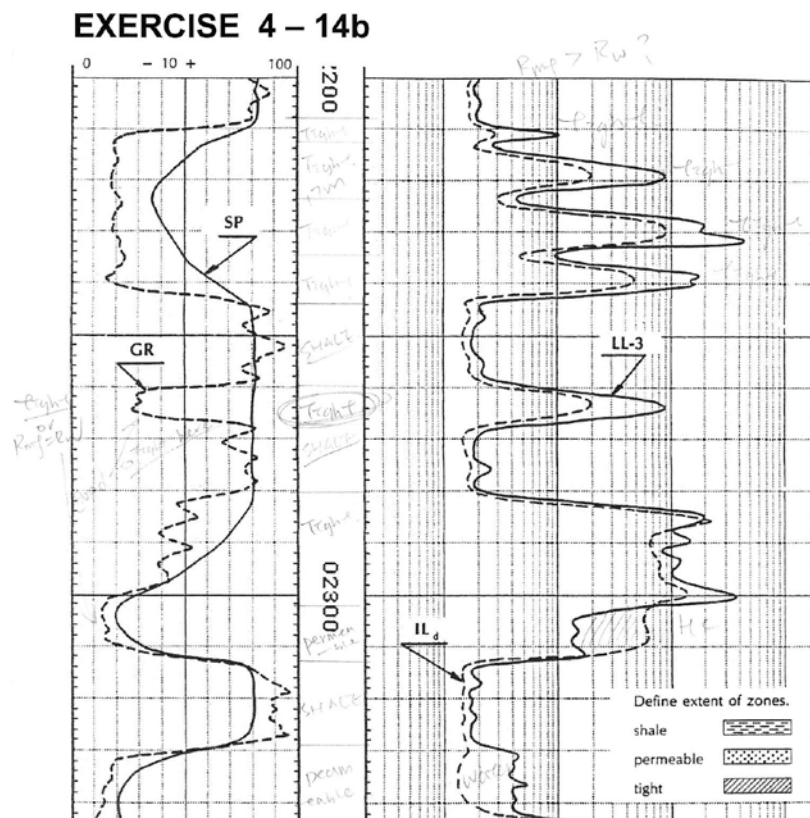


圖 11：利用自然電位與電阻判斷頁岩/滲透性岩層/緻密砂岩(習題4-14b)

DAY 2: Porosity

Gamma Ray(伽瑪井測)是測定地層的鉀(Potassium, K)、鈾(Uranium, U)及釷(Thorium, Th)三種自然伽瑪放射線。通常頁岩(Shale)或黏土所含的放射性元素(例如K)較高，砂岩、白雲石(Dolomite)、岩丘(Salt)等地層裡的Gamma Ray則相對很少，如圖 12所示。

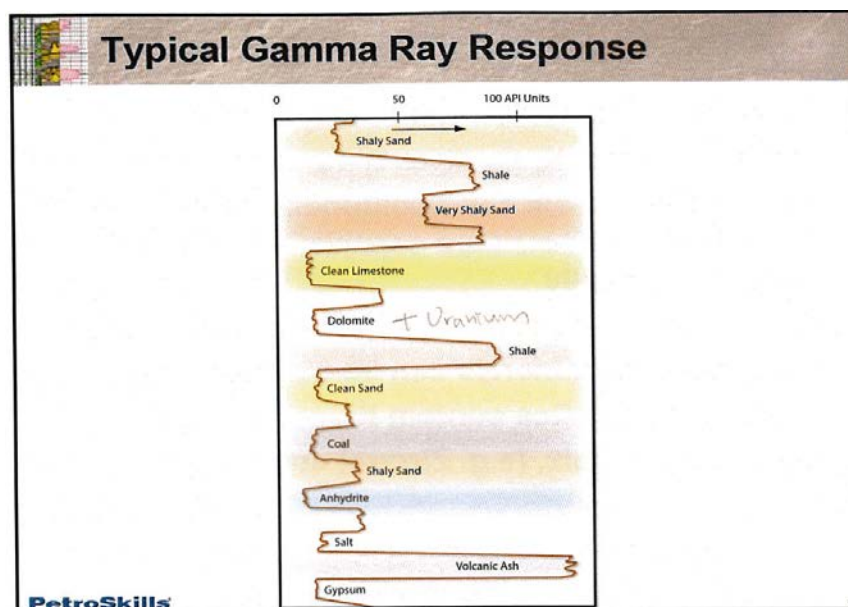
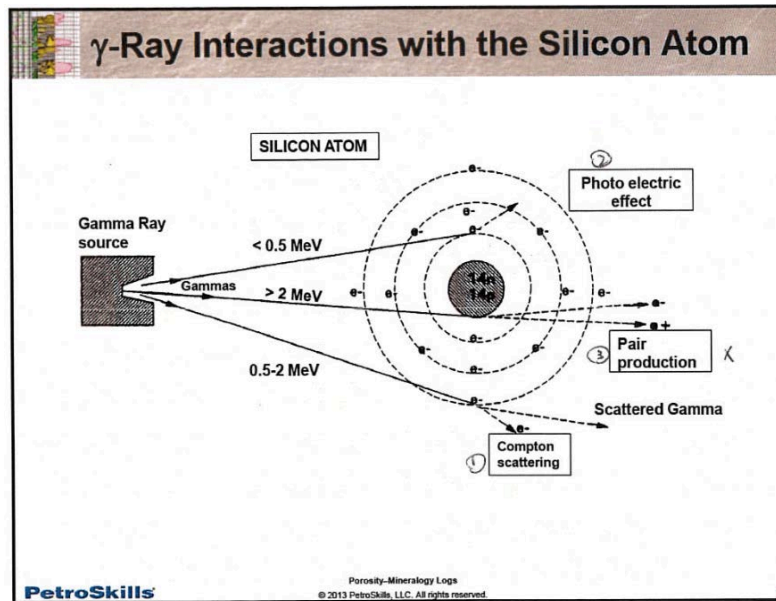


圖 12：不同岩石之Gamma Ray強度示意圖

Gamma Ray雖然可以用於協助辨識岩性，但也有一些例外可能導致誤判。例如白雲石(或裂隙中)的水含有鈾元素；海綠石(Glauconitic)、Granite wash、雲母(Mica)中含鉀元素；或高嶺土中不含鈾釷鉀等三種放射性元素。

孔隙率井測包括聲波、密度及中子3種。密度主要是由發射端放射出的中等強度(0.66 MeV)的Gamma Ray撞擊地層中電子，在這個能量強度下主導的作用為康普頓散射(Compton scattering)，如圖 13(上)，再由接收器計算每秒接收到的次數。在地層密度高的地層，電子密度亦高，因此碰撞次數高。同時利用電子密度與地層密度的相關性轉換成地層密度與孔隙率計算(圖 13下)。密度井測一般根據石灰岩(Limestone)的結果進行校正。由於在這環境下Gamma Ray無法深入地層，因此測距(Depth of Investigation)較短，容易受到泥壁(Mud Cake)與儀器量測位置(Tool Standoff)的影響。



Porosity from Density

Tool Response Equation

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

Rearranging,

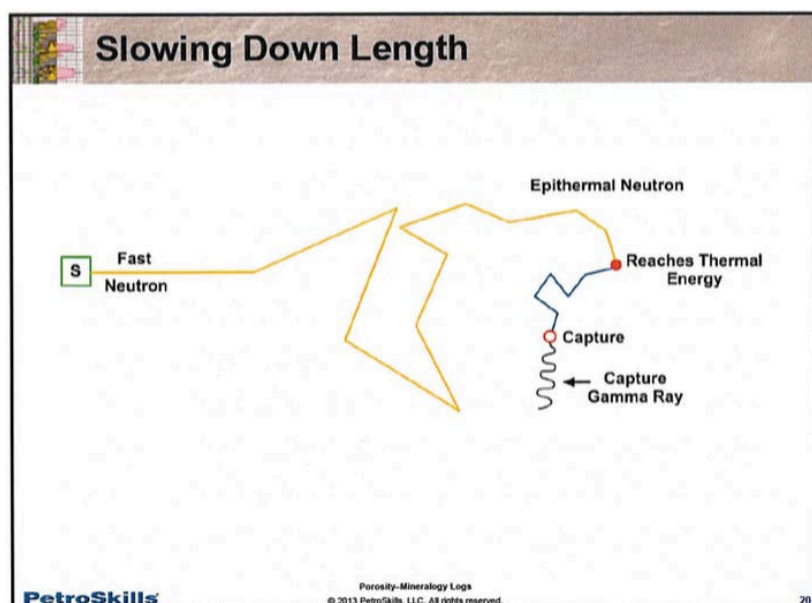
$$\phi_{Dma} = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f}$$

PetroSkills
Porosity
© 2013 PetroSkills, LLC. All rights reserved.

圖 13：密度井測原理與孔隙率計算

中子井測以高速(~5MeV)放射中子以撞擊地層內其他原子核，然後減速，達到熱動力速度時就被擄獲，然後放射出Gamma Ray(圖14)。未被擄獲的中子到達接收器後，就被探測針的中子接收器測定並記錄。當中子與氫原子等質量相同的原子核碰撞時，能量消失最大，而鈣或矽原子等岩石的原子的重量比中子大2.5倍以上，因此其吸收中子的能力非常小。中子井測所測定的讀值與地層的氫原子含量有關，包含岩石基質，流體成分與飽和度等，因此中子井測也可以為稱為氫原子井測(圖 14)。另外一般中子井測為以石灰石(limestone)為基準所測定的讀

值，需經過校正才能反映出地層真實的狀態($\Phi_{NLS} \Rightarrow \Phi_{NSS}$)。



Neutron Logs are Hydrogen Logs

- Neutron Logs are sensitive to...
 - Porosity
 - Matrix material
 - Gas saturation
 - Clay minerals (differently for each type)
 - Light oil
 - Water (Brine)

ANYTHING WITH HYDROGEN ATOMS !

PetroSkills Porosity-Mineralogy Logs © 2013 PetroSkills, LLC. All rights reserved. 35

圖 14：中子井測原理

在天然氣層中，因為天然氣的存在，流體的比重預期低，造成密度井測所計算出來的孔隙率比實際結果偏高。而天然氣(CH_4)的Hydrogen Index比水低，造成中子井測所計算出來的孔隙率比實際結果偏低。兩條井測曲線呈現交錯產生Gas Effect，如圖15中藍色虛線與橘色實線交錯的範圍。

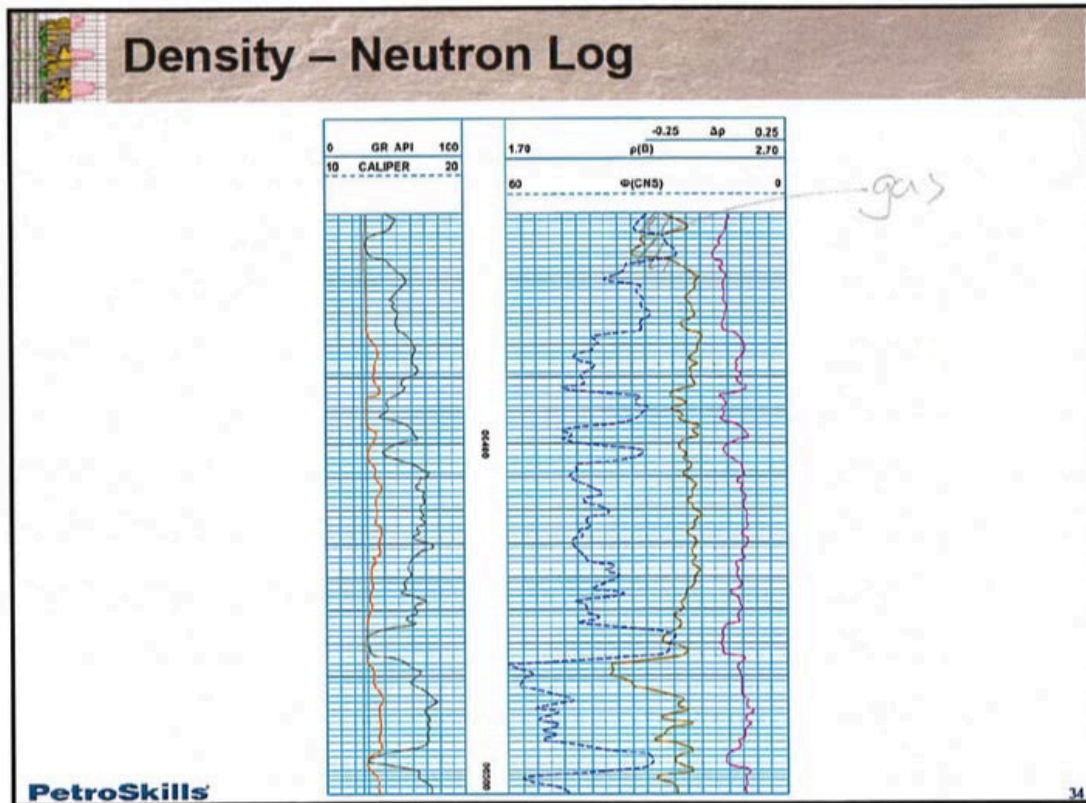


圖 15：密度與中子井測的Gas Effect

聲波井測是量測聲波(通常是壓縮聲波)通過地層所需的傳遞時間，孔隙越大，聲波在地層傳遞時間越長，依此可估算地層的孔隙率。根據聲波(Sonic)井測所記錄的間隔傳遞時間(Δt)、地層的間隔傳遞時間(Δt_{ma})、以及地層流體的間隔傳遞時間(Δt_f)，估算出地層孔隙率，如圖 16所示。

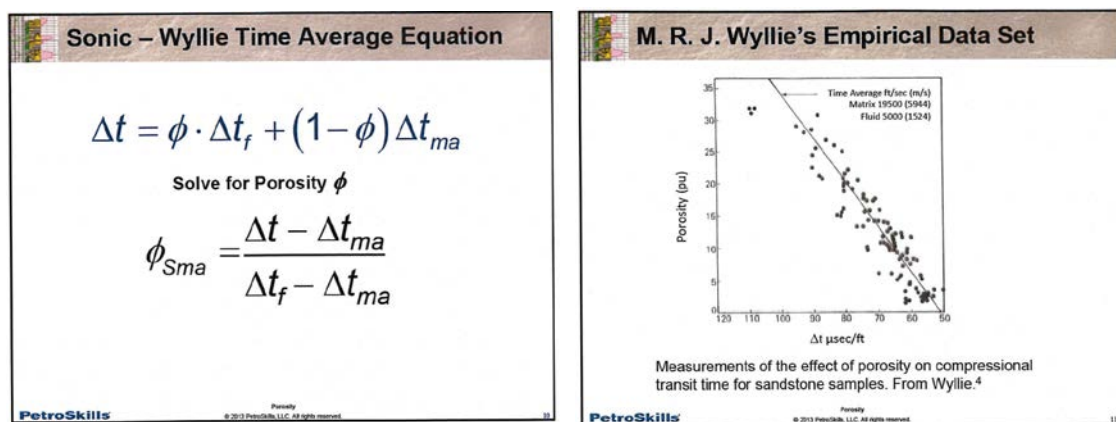


圖 16：聲波井測的計算方法

DAY 3: Mineralogy

沒有一種井測方法是直接對孔隙率進行量測，因此影響孔隙率的量測值除孔隙大小的變化外，岩石礦物成分、流體成分以及孔隙分佈(聲波孔隙率的量測)均可能造成孔隙率的量測值的變化。本節的重點為利用任兩種孔隙率井測的結果對孔隙率及礦物的成分進行綜合判定，有時甚至可以辨識出不同流體性質。圖 17 為中子(橫坐標)與密度(縱坐標)井測結果的交會圖。其中分成三個不同礦物成分的區域，包含石英(砂岩)、方解石(石灰石)、白雲石。藉此除了可以獲得中子-密度孔隙率外，也可以針對岩石礦物成分進行了解，同時若氣體成分增加時，量測點在圖中的位置將朝左上偏移，而當岩層中頁岩的成分增加時，圖中的位置則將朝右下偏移。圖 18 為 N-M Plot(左)與 MID Plot (右)利用三種孔隙率井測結果製圖。圖 19 為利用 N-M Plot 與 MID Plot 進行岩性或礦物成分的辨識。

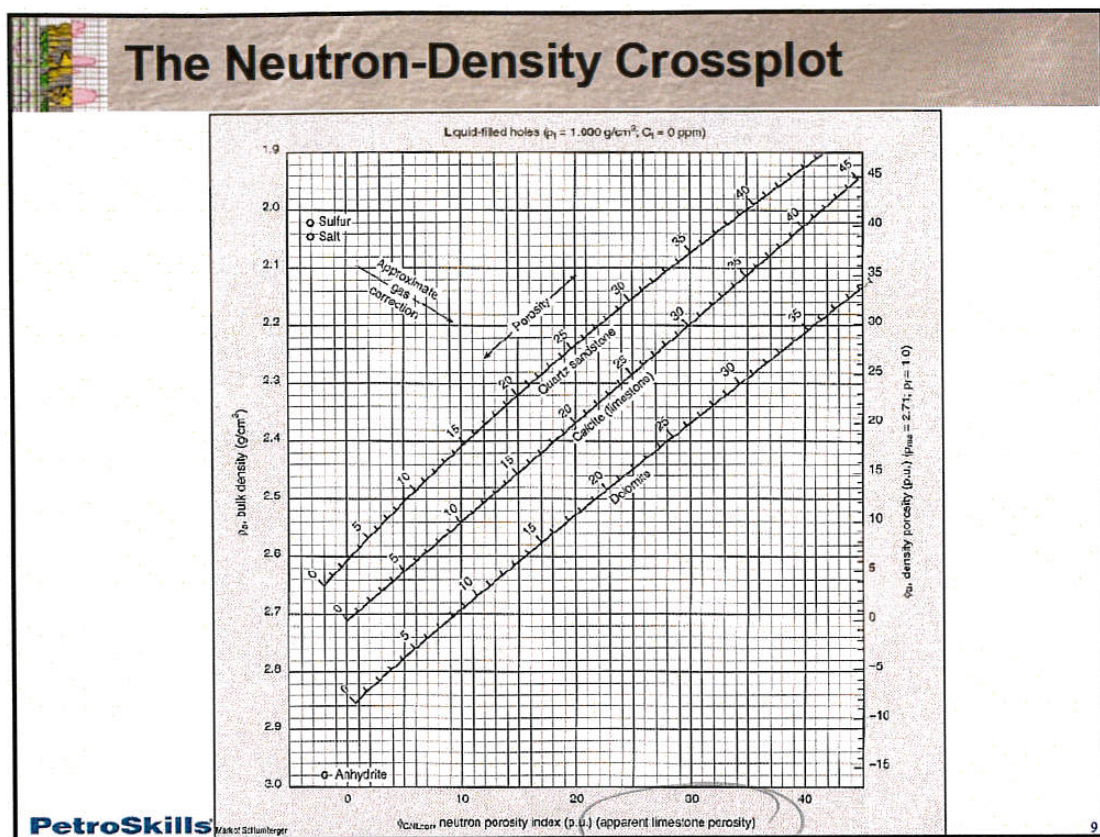


圖 17：中子跟密度井測的2D圖

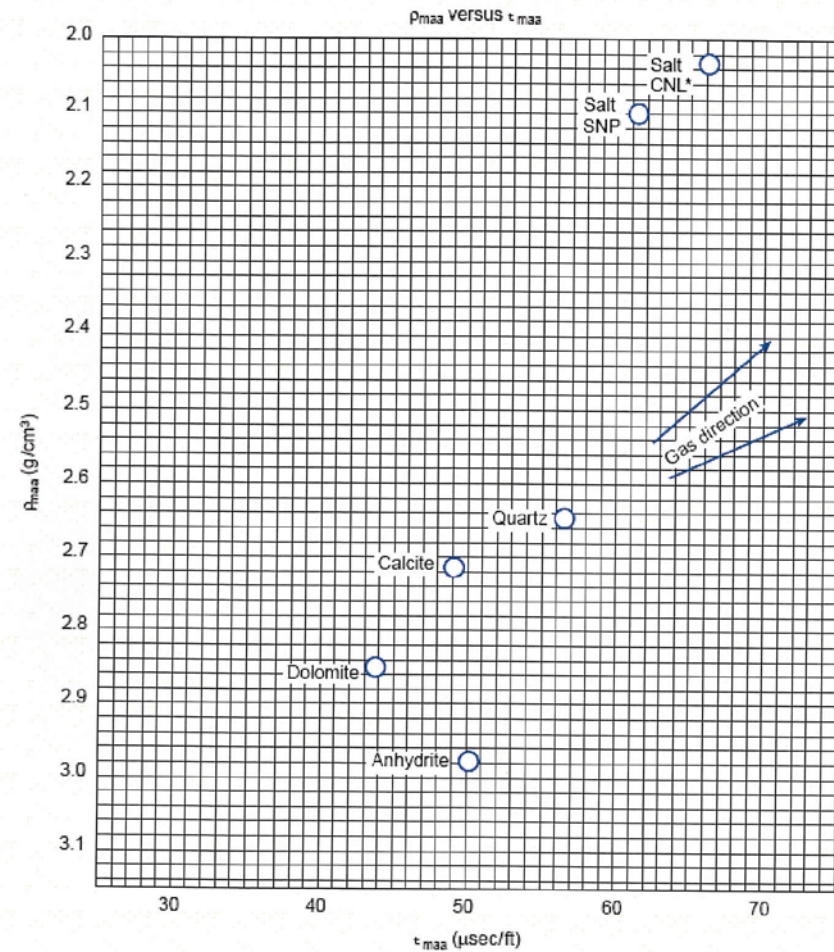
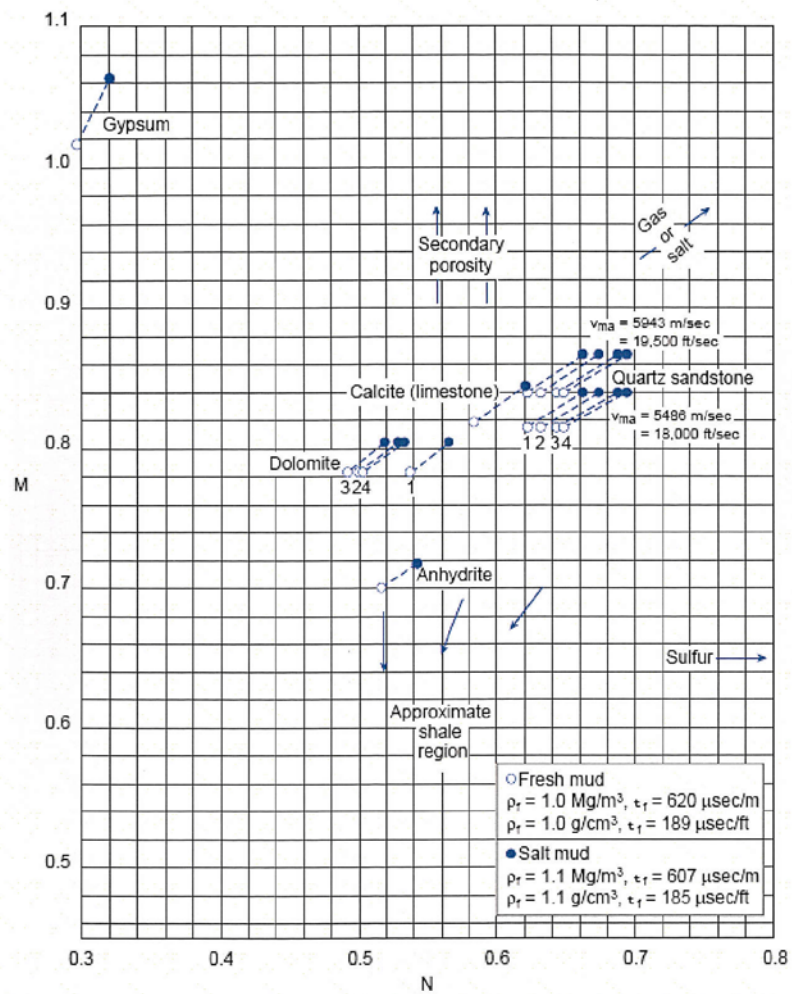


圖 18：利用M-N Plot (左)跟MID Plot (右) Plot於礦物成分的

EXERCISE 9 – 6

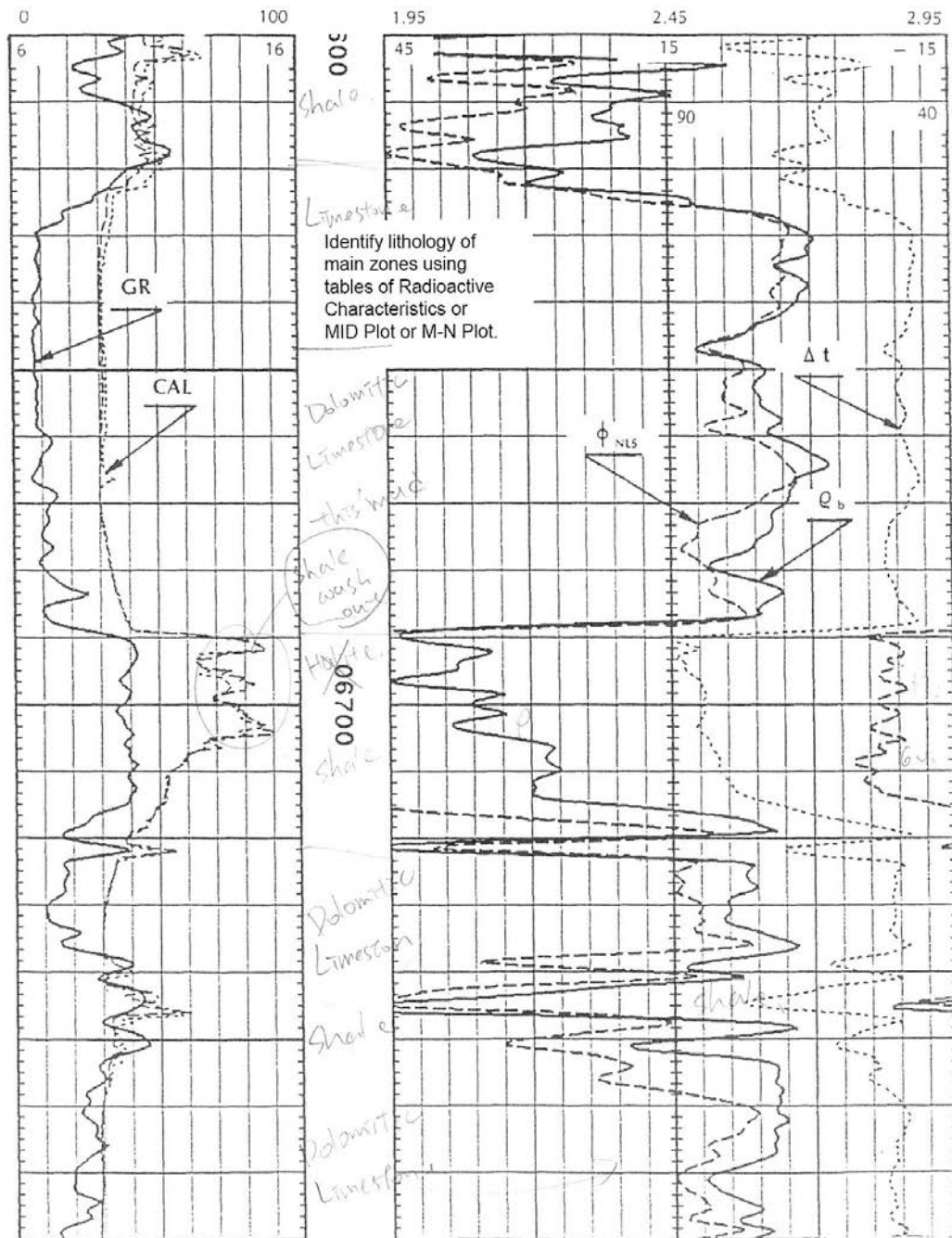


圖 19：利用MID Plot 與M-N Plot

Pe (Photoelectric absorption)是一種屬於岩性辨識的井測，主要受原子數 (Atomic Number, Z)以及低於0.1MeV的Gamma Ray的影響，僅些微因地層孔隙率與流體成分改變產生的影響。典型Pe的量測值如石英(1.81)、方解石(5.08)、白雲石(3.14)，如圖18所示，唯井壁上的厚泥壁(重晶石)可能對量測結果造成影響。

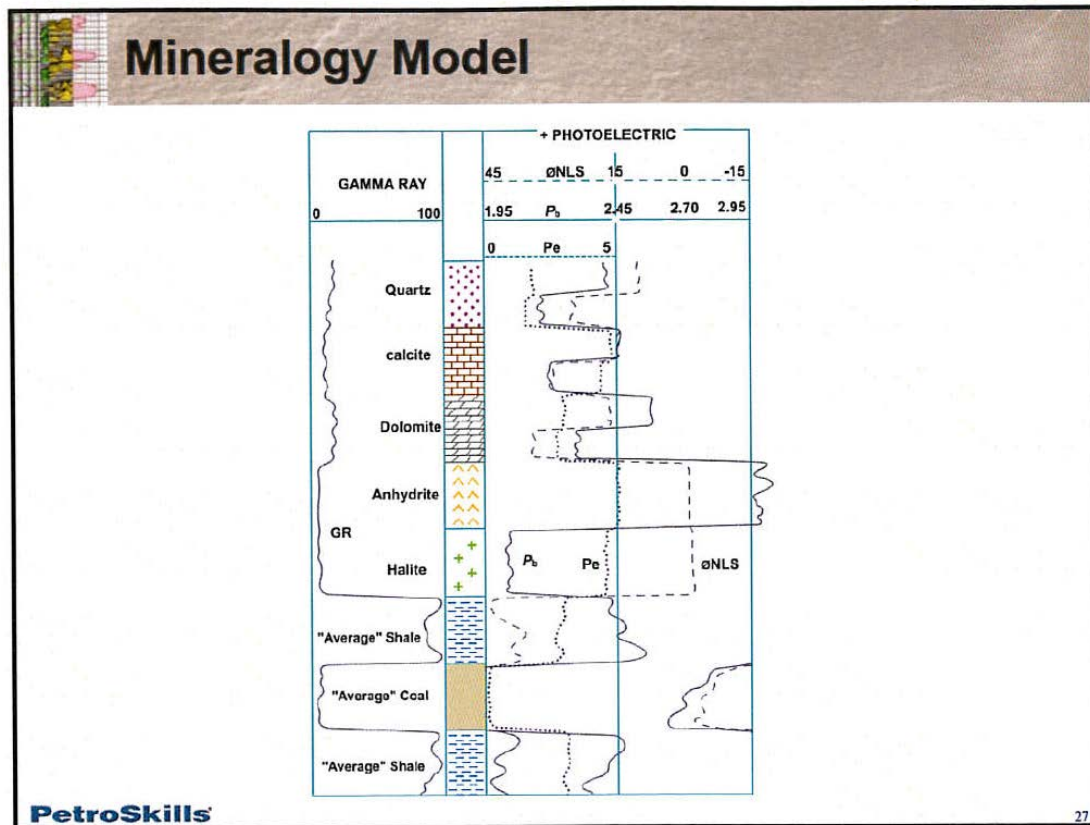


圖 20：Pe井測對不同礦物的量測結果

在進行礦物成分的辨識之前需確認尺度是否合理。如圖 19左右兩側分別為石灰岩與砂岩常用的Scales，上下則分別為密度與中子孔隙率對應的尺度。

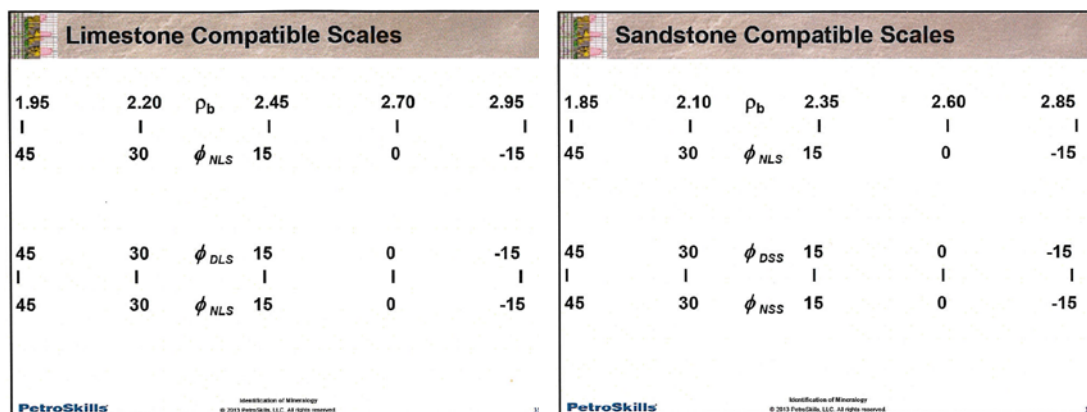


圖 21：密度以及中子井測的尺度對照

Spectral Gamma Ray (伽瑪射線頻譜)為將Gamma Ray拆解成鈾，鈷及鉀三種自然伽瑪放射線，可以應用於(1)裂隙的識別(利用鈾元素)，或(2)頁岩與白雲石(鈾)，(3)不整面(鈷)，(4)生油岩潛能(鈷)，(5)V shale (remove K) 及(6) Micas (鉀)的識別。

裂隙存在的辨別可以藉由(1)High Uranium, (2) U spikes, (3) Heavy Mud (Barite) from Pe (Photoelectric absorption) spike (4) Correction rho, (5) Spiky caliper (6) High resistivity or high porosity等方法中辨釋。以圖 23為例，密度井測有一個尖峰(Spike)，而鈾元素在相同位置也有類似反應，暗示著裂隙的存在。

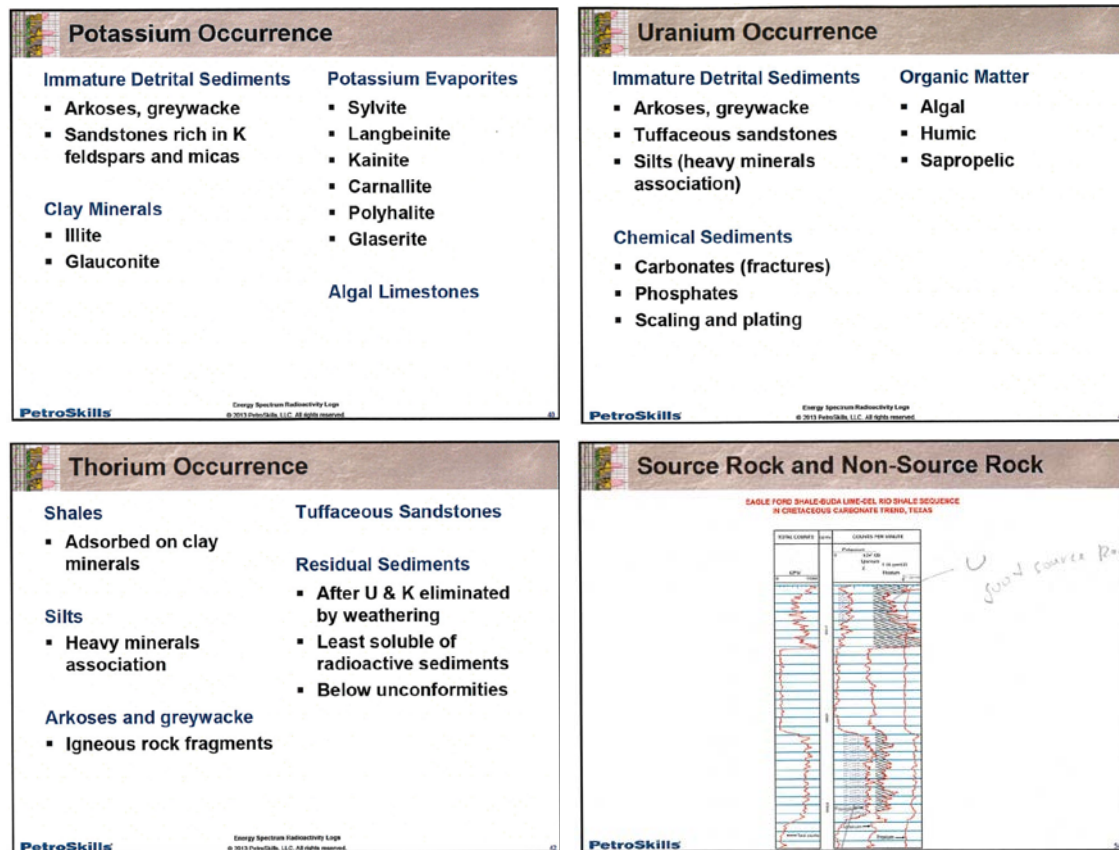


圖 22：鈾，鈷及鉀存在環境的對照

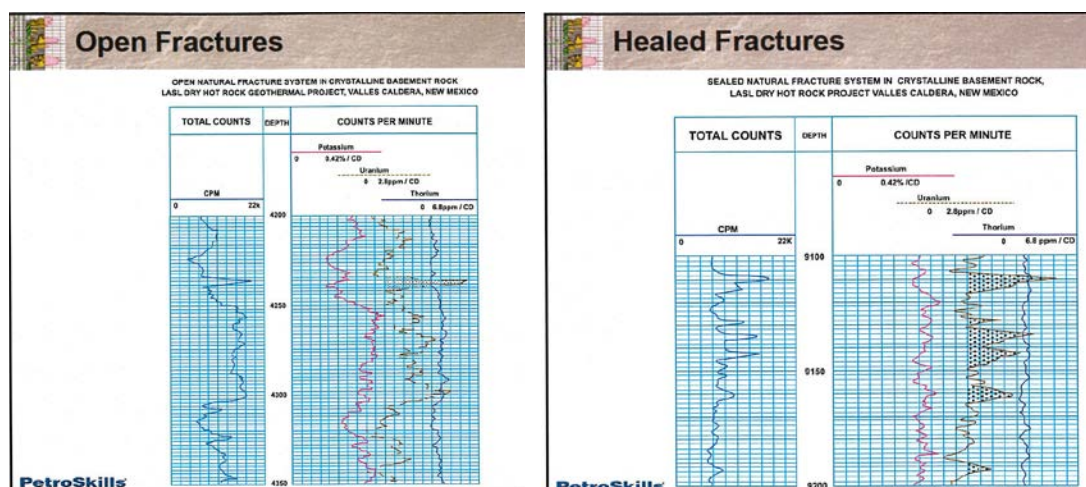


圖 23：裂隙辨識的範例

DAY 4: Water Saturation

利用 Archie Equation 進行含水飽和度(S_w)的計算所需要的參數包含孔隙率、地層電阻(R_t)及地層水電阻(R_w)，以及 m 與 n 兩個指數分別反應出孔隙扭曲度(Tortuosity)與親濕性(Wettability)。其中孔隙率可利用中子與密度的井測結果計算，地層電阻可從電阻井測求得。地層水電阻(R_w)為單位體積內充滿水的環境下所量測到的電阻值(圖24 左上)， R_0 則為在孔隙充滿水的環境下所量測到的電阻值(圖24 右上)，兩者的比值稱為地層電阻係數(Formation Resistivity Factor, F)，此係數也可轉換成導電度以及使用在浸污區(R_{xo} R_{mf})的環境中(圖24 左下)。由於 R_0 與孔隙率的倒數成正比，因此地層電阻係數也可以表示成如圖24 右下的關係式。其中參數 a 代表者不同的岩石性質。對於參數 a 與 m 的估算可以將已知的地層電阻係數與孔隙率在雙對數座標上作圖，在孔隙率上的交點與直線斜率則分別代表參數 a 與 m 。圖右中參數 $a \neq 1$ ，代表同時擁有許多不同的岩石性質。

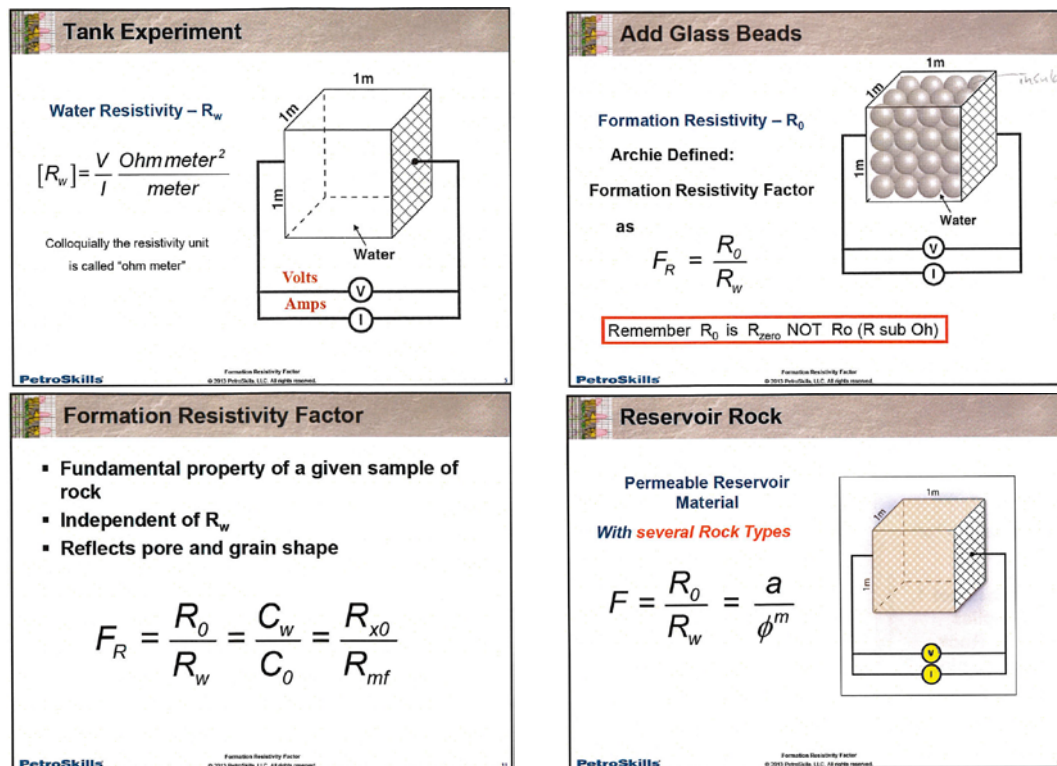


圖 24：Formation Resistivity Factor 的示意圖

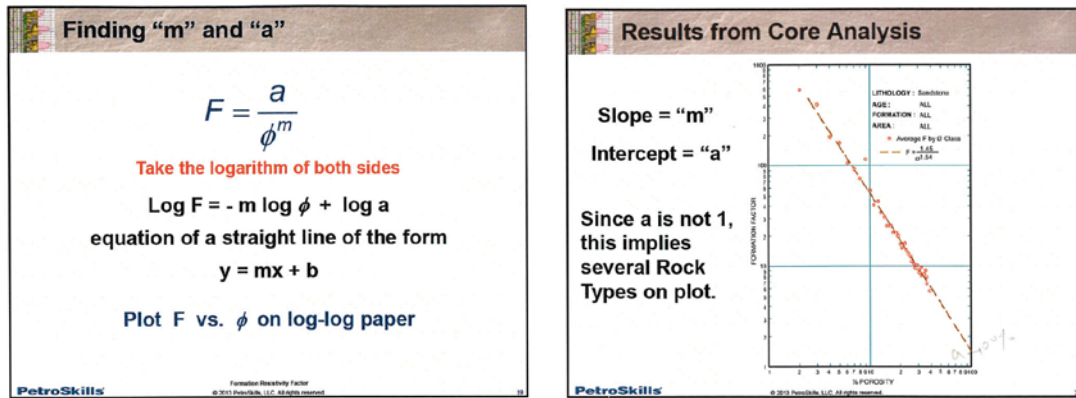


圖 25：地層電阻係數的參數a與m的估算方法

課程中一共介紹5種常用於地層水電阻參數的方式可以互相比較包含

(1)Water Catalog , (2) Water Sampling , (3) SP , (4) R_0 method , (5) R_{wa} Method ,

(6)Porosity Resistivity Cross Plot。(1)Water Catalog以及(2)Water Sampling分別為利用鄰近井的資料進行類比，與直接取採樣地層水(例如DST)進行電阻量測。SP(自然電位)的方法為先利用含水層的自然電位推估 R_{mf}/R_{we} (圖24左)，其中 R_{mf} 為校正到地層溫度的泥漿電阻，再利用 R_{we} 與 R_w 之相關性(圖24右)求得地層水的電阻值。

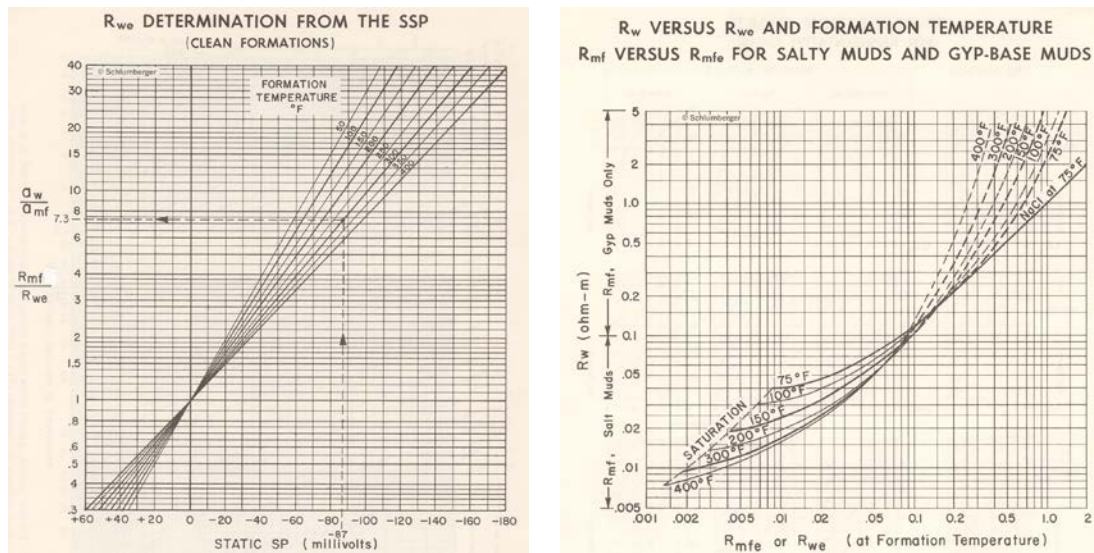


圖 26：SP與 R_{we} 相關性圖(左)以及 R_w 與 R_{we} 之相關性圖(右)

R_0 method為針對某一含水層的位置已被確認的狀態下用以推估地層水的電阻值。計算方法為 $R_w=(R_0*\Phi^m)/a$ 。其中 $R_0=R_t$ ，同時 R_{wa} method與 R_0 method之差異在於 R_{wa} method同時選取許多可能的含水層進行辨識，可結合 $F_R(F_R = R_{xo}/R_{mf})$ 與 $F_P(F_P = a/\Phi^m)$ 成為Quicklook Methods，如下表所示。2576m以下的區域其 F_R 與 F_P 的比值均接近於1，亦驗證含水層存在的可能性，並可用於計算地層水的電阻值。若比值大於1，則暗示著可能有油氣存在。

Zone		Log Readings							Porosity		Quicklook Methods				
No.	Depth	GR API	SP mV	Φ_{NLS} V/V	ρ_b g/cm ³	Δt μ sec/ft	R_t ohmm	R_{xo} ohmm	Φ_{NO} V/V	Φ_{BO} V/V	F_R	F_P	F_R/F_P	R_{wa} ohmm	Sw Ratio V/V
1	2556.0	32	-52	11.0	2.20		140.0	11.0	0.152	0.273	36.7	13.4	2.73	10.413	0.078
2	2558.0	31	-52	11.5	2.21		150.0	12.0	0.159	0.267	40.0	14.1	2.84	10.667	0.079
3	2560.0	30	-51	20.7	2.26		85.0	20.0	0.251	0.236	66.7	17.9	3.72	4.749	0.156
4	2563.0	33	-52	22.8	2.18		80.0	13.0	0.272	0.285	43.3	12.3	3.52	6.491	0.123
5	2565.0	31	-51	20.8	2.24		95.0	11.0	0.252	0.248	36.7	16.2	2.26	5.866	0.100
6	2568.5	31	-51	24.5	2.19		50.0	12.0	0.290	0.279	40.0	12.9	3.11	3.886	0.158
7	2573.0	34	-31	19.2	2.25		80.0	180.0	0.238	0.242	600.0	17.0	35.26	4.702	0.638
8	2576.0	31	-43	3.0	2.54		12.0	65.0	0.068	0.067	216.7	225.0	0.96	0.053	1.105
9	2579.0	36	-52	6.0	2.50		8.5	40.0	0.100	0.091	133.3	121.0	1.10	0.070	1.012
10	2581.5	42	-52	17.5	2.34		1.9	10.0	0.220	0.188	33.3	28.3	1.18	0.067	1.086
11	2587.0	32	-56	21.4	2.22		0.9	5.0	0.259	0.261	16.7	14.7	1.13	0.061	1.123
12	2591.5	31	-56	30.0	2.10		0.6	2.8	0.343	0.333	9.3	9.0	1.04	0.067	1.007
13	2593.5	39	-55	26.2	2.17		0.8	3.5	0.308	0.291	11.7	11.8	0.99	0.063	1.007
14	2595.5	33	-54	22.5	2.25		1.1	6.0	0.270	0.242	20.0	17.0	1.18	0.065	1.110
15	2600.0	35	-54	23.0	2.23		1.0	5.2	0.276	0.255	17.3	15.4	1.12	0.065	1.077
16	2602.5	34	-53	25.2	2.20		0.9	5.0	0.298	0.273	16.7	13.4	1.24	0.067	1.123
17	2606.0	43	-54	13.7	2.41		3.0	14.0	0.180	0.145	46.7	47.3	0.99	0.063	1.007
18	2609.0	45	-53	10.2	2.46		5.0	24.0	0.143	0.115	80.0	75.4	1.06	0.066	1.025
19	2612.0	41	-49	16.6	2.34		2.0	10.5	0.210	0.188	35.0	28.3	1.24	0.071	1.084
20															

(習題2-4a)

Pickett Plot 與Hingle Plot皆為常見的孔隙率-電阻分布圖，Pickett Plot為將中子孔隙率與地層電阻值繪製於雙對數座標中，可用於計算Archie Equation中的參數 m ，地層水電阻與含水飽和度。從圖27(左)的方程式中可以發現將Archie Equation會至於雙對數座標中之後，井測的量測數據點之斜率將成為參數 m ，含水層的飽和度為1，在取對數之後變成零。另外假設乾淨砂岩層($a=1$)，而截距即為 R_w 。

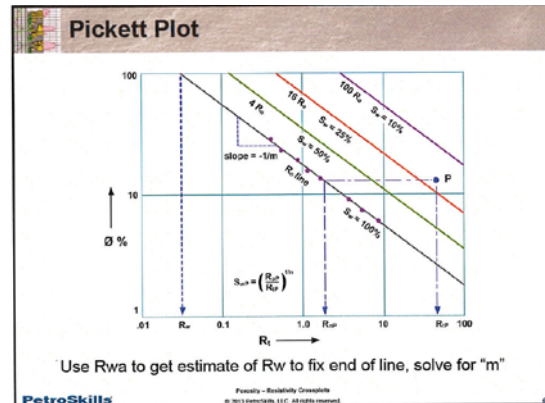
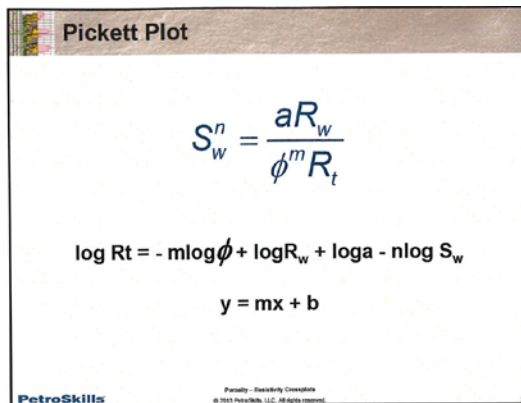


圖 27：Pickett Plot (孔隙率-電阻分布圖)

Hingle Plot則繪製孔隙率與電阻資料於單對數座標中(圖 28)，但不侷限於孔隙率-電阻的相關性，可以用於所有與孔隙率相關的井測資料無論速度，密度或中子井測均可，同時不需礦物或岩性資料輸入，因此適用於岩性複雜的環境中。 R_w 的最佳化為整合 R_{wa} 、Pickett與Hingle Plot三種方法。首先用 R_{wa} 方法計算 R_w ，再以Pickett Plot以計算出來 R_w 獲得算參數 m ，接著再以Hingle Plot求得密度(Grain Density)，再依此結果校正孔隙率，所得的孔隙率結果再回饋到 R_{wa} 方法形成一個迴圈直到變異變成最小(圖 29)。

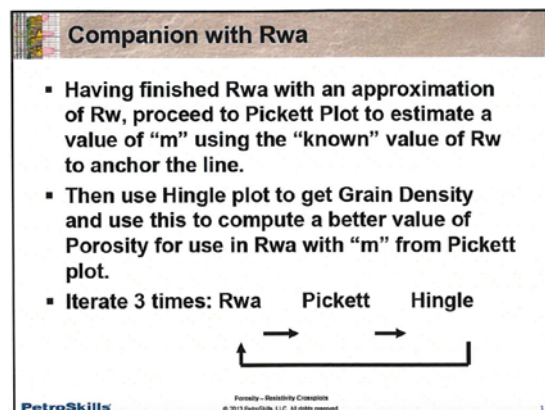
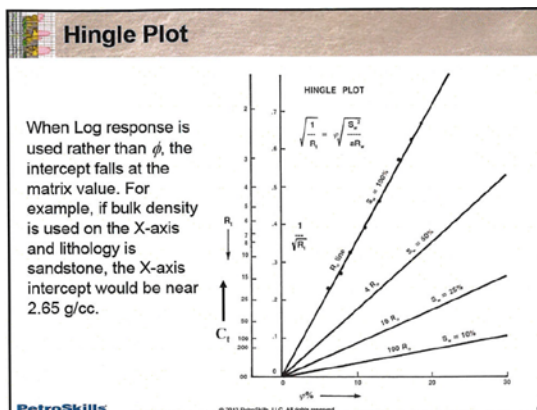


圖 28：Hingle Plot (孔隙率-電阻分布)

圖 29： R_w 的最佳化流程

同時可利用相同的方法對浸污區(Flushed Zone)，以 R_{xo} 與 R_{mf} 進行飽和度的估算，含水飽和度的計算結果如圖 30(左)所示。因此可以輕易地辨識出孔隙中油氣與水可以移動與無法流動的體積，如圖 30(右)所示。圖 31為利用圖 30結果所繪製的孔隙中可以移動與無法移動的流體分布。

Zone		Water Saturation				B.V.W.	
No.	Depth	Sw Pickett V/V	Sw Hingle V/V	Sw Archie V/V	Sxo Archie V/V	$\Phi^* S_w$ BV V/V	$\Phi^* S_{xo}$ BV V/V
1	2556.0	0.080	0.080	0.079	0.606	0.022	0.165
2	2558.0	0.080	0.080	0.078	0.593	0.021	0.158
3	2560.0	0.120	0.110	0.117	0.518	0.028	0.122
4	2563.0	0.100	0.100	0.100	0.533	0.029	0.152
5	2565.0	0.110	0.110	0.105	0.665	0.026	0.165
6	2568.5	0.130	0.140	0.129	0.567	0.036	0.158
7	2573.0	0.120	0.120	0.118	0.168	0.029	0.041
8	2576.0	1.050	1.100	1.104	1.019	0.074	0.068
9	2579.0	0.950	0.990	0.962	0.953	0.087	0.087
10	2581.5	0.990	0.990	0.984	0.922	0.185	0.173
11	2587.0	1.020	1.050	1.031	0.940	0.269	0.245
12	2591.5	0.990	0.990	0.987	0.982	0.329	0.327
13	2593.5	1.000	1.000	1.012	1.006	0.294	0.293
14	2595.5	1.000	1.000	1.003	0.922	0.243	0.224
15	2600.0	1.000	1.000	1.002	0.944	0.255	0.240
16	2602.5	0.990	0.980	0.985	0.898	0.269	0.245
17	2606.0	1.000	1.010	1.012	1.006	0.147	0.146
18	2609.0	0.990	1.000	0.990	0.971	0.114	0.112
19	2612.0	0.980	0.980	0.960	0.900	0.180	0.169
20							

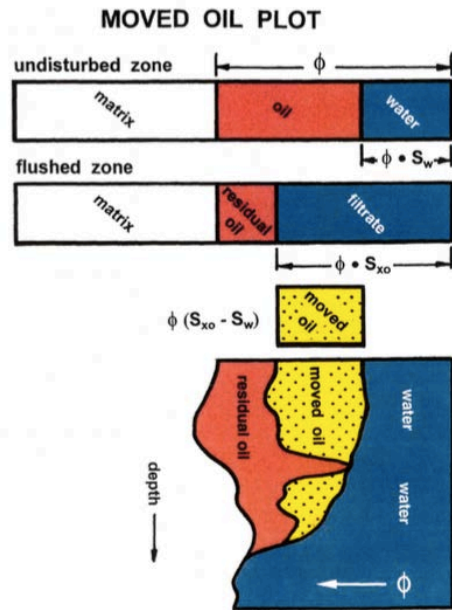


圖 30：飽和度計算結果(左)與孔隙中可以移動與無法移動的流體分布(右)

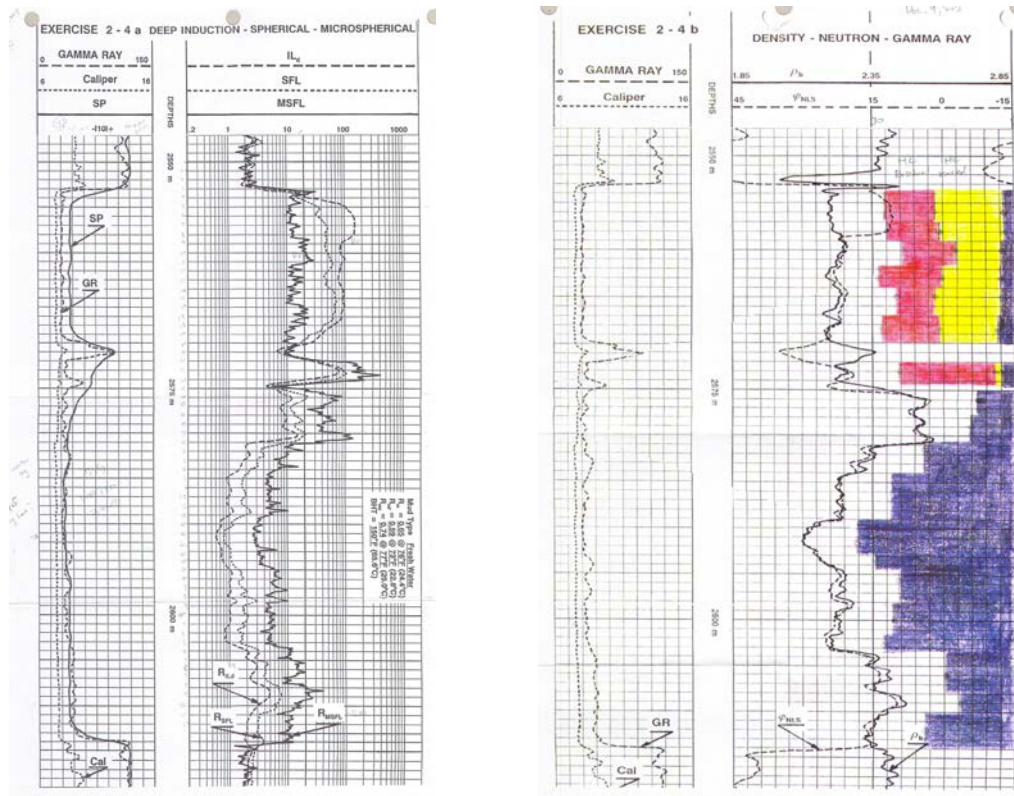


圖 31：Gamma Ray，SP與電阻(左)與孔隙中可移動油氣與水之分布(右)

DAY 5:

最後一天的課程(第五天)包含地層壓力(利用地層壓力梯度辨識地層流體界面)，滲透率推估，NMR井測與分組測驗(Final Exam)。地層壓力梯度為透過MDT等井測儀器量測地層壓力，由於氣/油/水的密度不同，因此當繪製地層壓力與深度變化關係圖時，若遭遇不同流體環境會產生不同的壓力梯度，如圖32所示。

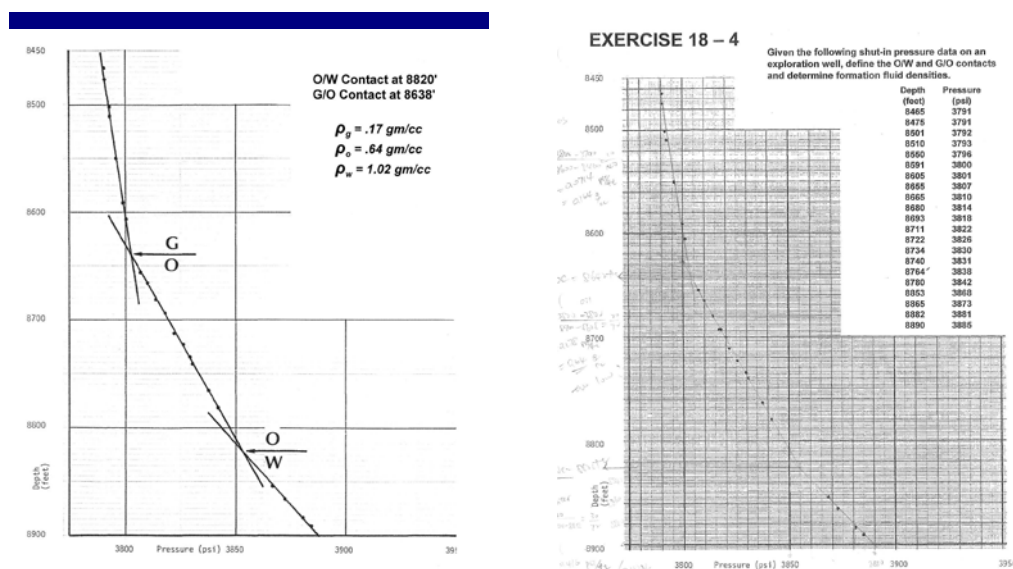


圖 32：地層壓力梯度示意圖(左)與地層壓力梯度習題18-4(右)

核磁共振(NMR)是一種快速且非破壞性的量測技術，可以提供更多的儲集層岩石的相關訊息。主要量測在經過特定的脈衝序列(CPMG)過程之中，氫的原核子的磁矩所產生的共振訊號回復到原始平衡狀態所需要的時間。由於岩石孔隙越大，所含的氫核子也越多，訊號回復到平衡狀態的時間也較長。因此透過反衍之後可以推得孔隙分布，如圖 33(左)所示。有別於傳統滲透率的計算多以總孔隙率或束縛水飽和度進行計算，核磁共振所計算出的滲透率為藉由不同的截取值(Cut-off)，求得自由流體與束縛流體體積的關係計算滲透率。

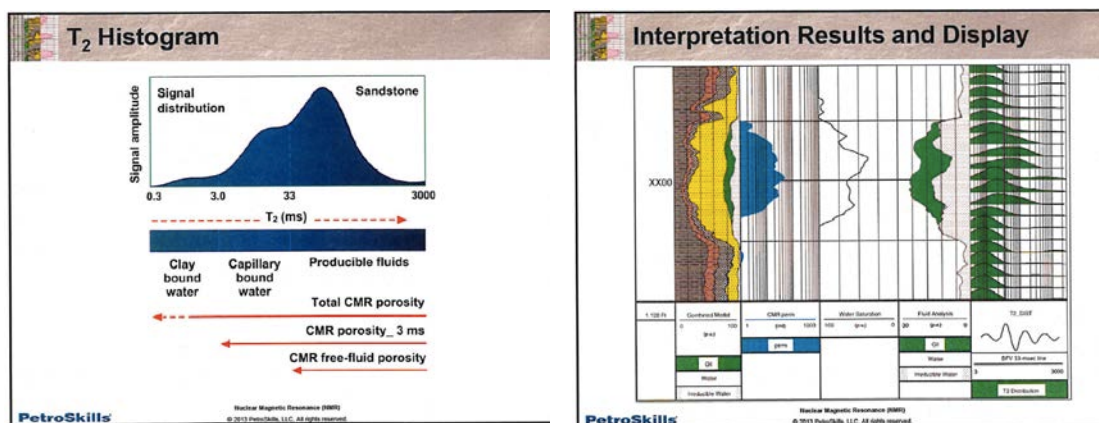


圖 33：孔隙分佈(左)與核磁共振井測結果(右)

參、心得與建議

1. PetroSkills 為國際知名的石油工程訓練機構。本次井測解釋訓練課程共有 16 位地質、鑽井工程、油層工程許多不同領域的人員參加，且均任職於 Chevron，ExxonMobil，Shell，Repsol 及 BG 等知名石油公司。因此除了學習相關技能外，亦藉此機會了解國外油公司如何培養專業人才，未來可持續以 e-mail 與他們保持聯繫，相信對往後之工作也會有所幫助。
2. 此次藉由參與課程的機會進行有系統性的學習，同時亦利用機會與相關領域之專家研討及交換心得，吸取他們之技術經驗、增加資訊及知識的雙向交流，使深度與廣度都得以提昇、拓展人脈關係及研究資源，並期許未來能將本趟出國所學習之技術應用於相關研究，拓展本公司的自有能源。
3. 雖然處於低油價時代，緻密氣或頁岩油氣等非傳統相關的研究仍是他們感興趣的議題，因此除了傳統的井測解釋的部分之外，講師亦提到如何從井測資料中分辨裂隙與具備較高潛能的層位，例如利用 Pe, Spectral Gamma Ray 及 Moved Oil Plot，或利用其他新技術如 NMR 等協助辨識。
4. 緻密的砂岩層常具備(1)高電阻值與(2)不同深度電阻幾乎重合(或僅些微分開)的特性。以圖 11 為例，由於受到緻密砂岩的影響，自然電位在深度 2210m~2240 時呈現傾斜的趨勢。

5. 裂隙存在的辨別可以藉由(1)High Uranium, (2) U spikes, (3) Heavy Mud (Barite) from Pe (Photoelectric absorption) spike (4) Correction rho, (5) Spiky caliper (6) High resistivity or high porosity 等方法中辨釋。
6. 礦物成分的辨識為利用孔隙率井測的結果對孔隙率及礦物的成分進行綜合判定，有時甚至可以辨識出不同流體性質。N-M Plot 與 MID Plot 甚至使用三種孔隙率井測的資料進行分析。
7. 地層水電阻(R_w)為計算含水飽和度之關鍵參數。課程中介紹 5 種可以用於計算地層水電阻的方法包含 Catellog, Water sampling, R_0 方法, R_{wa} , Pickett Plot 與 Hingle Plot。另外 R_w 的最佳化程序為整合 R_{wa} 、Pickett 與 Hingle Plot 三種方法。首先用 R_{wa} 方法計算 R_w ，再以 Pickett Plot 以計算出來 R_w 獲得算參數 m ，接著再以 Hingle Plot 求得密度(Grain Density)，再依此結果校正孔隙率，所得的孔隙率結果再回饋到 R_{wa} 方法形成一個迴圈直到變異變成最小。

肆、致謝

感謝所內長官給予這次機會，與所有在會期間提供之相關的建議。