

出國報告（出國類別：實習）

## 參加岩石物理分析研習課程報告書

服務機關：台灣中油公司探採研究所

姓名職稱：伍允豪 地球物理探勘師

派赴國家：馬來西亞

出國期間：106年10月1日至10月7日

報告日期：106年10月23日

## 摘要

裸孔影像解釋在石油探勘工作中，主要倚靠鑽井後，於裸孔內進行不同井測工具施作，獲取井下隨深度變化之地層電性、物性、傾角、連續性，甚至沉積環境與層序地層之相關資訊。在影像部分，雖最早期有光學影像，近期均使用電阻率作為量測，並搭配不同泥漿測錄環境區分為：水基與油基泥漿；物性則主要為聲波測錄，包含縱波與橫波，以及不同頻段之聲波；橫波量測部分也具有方向性，可量測快慢波速度差異，以瞭解岩石非均向性之特徵。傾角則主要應用於解釋井位隨深度地下可能鑽遇褶皺、斷層、交互層之資訊，提供缺乏或搭配震測資料相輔相成。連續性的資訊則可提供裂隙種類如開口/填充，或地層不整合面、斷層、破裂帶等重要結果。沉積環境與層序地層之相關資訊則需搭配先備之區域地質架構，針對地質環境、條件對於裸孔影像資料分析和解釋，可作為鑽井後井下地質報告與後續油氣探勘、生產開發時選定井位之相關重要資訊。

## 目次

摘要.....	2
目次.....	3
目的.....	4
過程.....	5
出國行程.....	5
課程內容.....	5
心得與建議 .....	14

## 目的

本計畫預計參加參與 Schlumberger 公司所屬 NExT 訓練機構所開設之「裸孔影像應用於油氣探勘與生產」Applications of Borehole Imaging to Hydrocarbon Exploration & Production 課程。該課程以油藏開發為最終目標，為了充分了解儲油氣層特性與擬定開發計畫，故結合并下影像測井、常規井下測井、傾角測井、油層物理資料、震測解釋及震測層序分析等數據進行統整性分析講解。

本所近年來各項研究題目，無論是石油探勘相關或者是地熱潛能研究等項目，皆積極朝向建立符合或接近地下實際狀態之數值模型之目標。為達成此目標，各項研究編組力求打破學科藩籬進行跨領域重整以求廣泛認識研究標的。岩石物理（rock physics）與大地力學（geo-mechanics）在石油地質、地球物理、地球化學、鑽採工程各探勘領域中之應用極為廣泛，其研究範圍主要是針對儲集層及其周遭圍岩物理特性進行分析。關於石油系統中的沉積環境、盆地埋藏作用，利用井下量測與分析可得基本石油物理參數，而結合地球物理震測資料逆推所得之岩石物理彈性參數，並可推測儲集層空間分布位置與蘊藏量；此外，藉由盆地深埋、成岩作用、油氣生成或鑽井工程施作，流體擾動原始岩層，造成孔隙水壓變化、水導裂隙（hydraulic fracturing）生成，這是天然裂隙與人造裂隙對於油氣蘊藏量、開發生產重要的評估項目。該項技術對於頁岩油、頁岩氣、重油、地熱能源等之開發十分重要。

本計畫預計參與之課程即專門針對地球科學研究人員、現場工程人員與技術人員開設，授課內容高度著重於實際發生於探勘作業之實例並據以分析研究。除了針對井下影像與傾角測井進行解釋外，更融合了岩心分析、井下測井、沉積相分析、裂縫識別成果與高解析度震測資料進行統合解釋，最終利用前述成果改善油藏模型。因此，該課程之講授內容極為貼近本項出國計畫之目的。以表定授課內容而言，該課程預計講授三角洲環境、濱海相環境、陸棚相環境、深海相環境及裂隙儲集層所進行之實例分析，有助於本所近年來聚焦之台南盆地和台灣西南部探勘研究。

## 過程

### 出國行程

起迄日期	天數	到達地點	地區等級	詳細工作內容
106/10/01	1	吉隆坡	174	啟程(桃園-吉隆坡)
106/10/02 106/10/06	5	吉隆坡	174	參加 Schlumberger NExT 課程 (Applications of Borehole Imaging to Hydrocarbon Exploration & Production)
106/10/07	1	台北	174	返程(吉隆坡-桃園)

### 課程內容

裂縫儲集層是除了普通儲集層所具有的基質孔隙率及滲透率外，裂縫系統也對儲集層提供孔隙率及滲透率，特別是滲透率的提高。一般而言，裂縫儲集層的基質孔隙率愈高，裂縫性油氣藏貯能力愈大。裂縫儲集層的裂縫類型依其對儲集層的重要性來說，最主要的是與褶皺或斷層有關的構造裂縫，其次為區域裂縫，再其次為收縮裂縫。根據基質及裂縫孔隙率與滲透率在裂縫儲集層中所起的作用，可以把裂縫儲集層分為 4 類 (Neoson, 1985)：(1)第 1 類為裂縫構成主要孔隙率及滲透率；(2)第 2 類為裂縫構成主要滲透率；(3)第 3 類為裂縫提供的滲透率只起輔助作用於已可生產儲集層；(4)第 4 類為裂縫不提供額外的孔隙率、滲透率，反而造成儲集層非均向性（阻擋生產流動）。而第 1 類即一般所謂的無孔隙（non porous）裂縫儲集層，第 2 及第 3 類為孔隙（porous）裂縫儲集層。

第 1 類裂縫儲集層油氣全部貯藏在裂縫孔隙之中，原生的岩石基質孔隙幾乎不貯藏油氣，由裂縫提供主要孔隙及滲透性。這種類型的裂縫儲集層一般油氣貯藏能力小，所形成的油氣田規模不大。在短時間裡油氣產量特別高，採收率最高，但油氣產量下降快，

下降曲線急降，穩產時間短，每口井的儲集層厚度及掃排面積是關鍵。開發初期可能發生地層水入侵，在裂縫密度高時才會有具經濟價值的儲集層，需要準確的裂縫孔隙率評價。值得注意的是此類型裂縫儲集層若生產層厚度大，而油氣田面積也長的時候，也能產生巨型油氣田。

第 2 類裂縫儲集層的岩石為滲透性低的沉積岩，其油氣全部貯藏在原生的岩石基質孔隙之中，由裂縫提供主要滲透性，因此裂縫孔隙的油氣貯藏量可忽略。這種類型的裂縫儲集層，一般油氣貯藏能力大，產量特別高，但產量下降之快慢、穩產時間長短及採收率高低，均與基質滲透率的大小及基質孔隙與裂縫孔隙連通的良窳有關，連通不好會導致不良基質採收及致命性二次採收。開發初期可能發生地層水入侵，產率需控制，裂縫的密度及傾斜重要，開發型式需針對儲集層特性而設計。

第 3 類裂縫儲集層為滲透性佳的沉積岩，其油田主要貯藏在原生的岩石基質孔隙之中，裂縫孔隙的油氣貯量一般可忽略，但裂縫提供輔助滲透性。此類型的裂縫儲集層油氣貯藏能力大，產量高，產量下降慢，穩產時間長，但採收率較低。裂縫系統的存在往往被忽略，二次採收常見異常反應，掃排面積多呈高度橢圓形，儲集層多層且連通，需要準確的裂縫孔隙率評價。此類型的裂縫儲集層為許多巨型油氣田的主要生產層。

## Day 1

早上八點半報到，換證後抵達 Schlumberger 吉隆坡訓練中心西翼之 14 樓訓練教室 (Level 14, East Wing, Schlumberger Office Building, Rohas PureCircle, No. 9 Jalan P. Ramlee, 50250 Kuala Lumpur, Malaysia)。

本日的課程內容針對裸孔影像技術進行介紹。講師藉由解釋不同裸孔 (borehole) 井測工具如：傳統電纜井測 (wire-line logs) 以及隨鑽井測 (log-while drill, LWD) 種類的工具、輸出的結果加以介紹，以及因兩大迥然不同之電阻率井測泥漿環境：「水基泥漿」(water-based mud, WBM) 和「油基泥漿」(oil-based mud, OBM) 的工具種類、發展進程加以介紹與講解；如果需要針對裂隙辨識是否為開口 (open fracture)、充填 (cemented fracture) 或閉合 (closed fracture)，則需要 UBI\* (ultra-sonic borehole imager) 進行搭配電阻率裸孔影像量測才能進行分析與解釋 (如圖 1)。隨後針對井程傾斜儀 (inclinometry) 以及輸出結果該如何進行質控 (quality control, QC) 與解釋進行講述，並利用實際習題 (exercise) 加強分析辨別與處理能力。

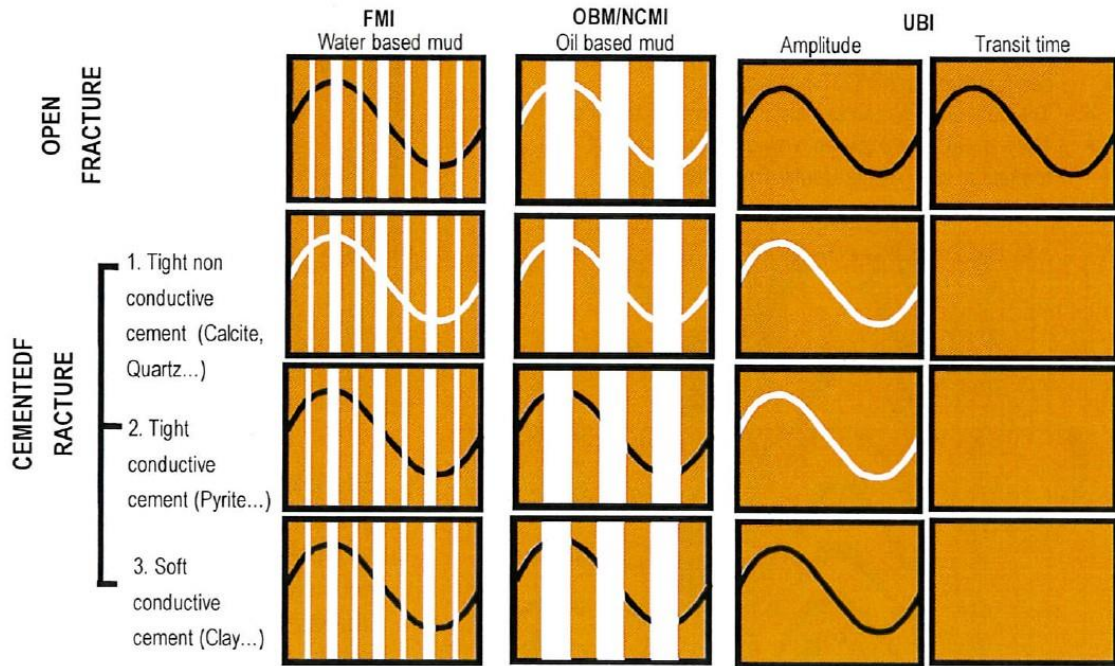


圖 1，不同泥漿環境裸孔影像與 UBI 工具搭配解釋之結果。

在 WBM 環境中，電阻率裸孔影像主要施測儀器由較小井孔覆蓋率的 FMS-2\*於 1984 年前後發展，隨後有 FMS-4\* (1986)、FMI\* (1991) 一直演進至近期高覆蓋率以及高解析影像 FMI-HD\* (2011)；而在 OBM 環境中，則由低覆蓋率的 OBDT\* (1988)、UBI\* (1993)、OBMI\* (2001)、OBMI-2\* (2004) 至最新的 Quanta Geo\* 又稱 NGI\* (2014) 的井測儀器。

井程傾斜儀主要利用井測工具 (general purpose inclinometry tool, GPIT) 中的加速度儀 (accelerometer) 與磁力儀 (magnetometer) 計算井孔隨深度位置的井傾 (HDEV) 與井偏 (HAZI)。利用這些數據資料可進行井孔影像成像處理校正，當如果沒有處理中心進行修正，在鑽井現場則可利用這些資訊如何快速解讀井測資料與辨識。

## Day 2

地層傾斜儀 (dipmeter) 計算與解釋原則。在影像井測發展在 1980 年代之前，地層傾斜解釋 (dips) 是井測不同方位的電阻率測錄曲線，利用數學相關性統計的方式搭配 GPIT 資訊將地層傾斜資料解釋出來。而利用裸孔電阻率影像資料則可更精確辨識地層構造傾角資訊，如構造傾角、斷層、不整合面等等，更可以藉此進行沉積環境與構造解釋。

## 裸孔影像之構造解釋

構造分析包含辨識與特徵分類構造形貌，如構造傾角、不整合面、斷層與應力方向。講解一般構造分析流程，通過不同統計工具，可以藉由傾角與影像資料繪製可能的構造形貌。藉由立體網狀圖（Schmidt stereonet）可繪製褶皺軸（fold axis）、軸面（axial plane）以及裂隙與層面之間相關性（如圖 2、3）。

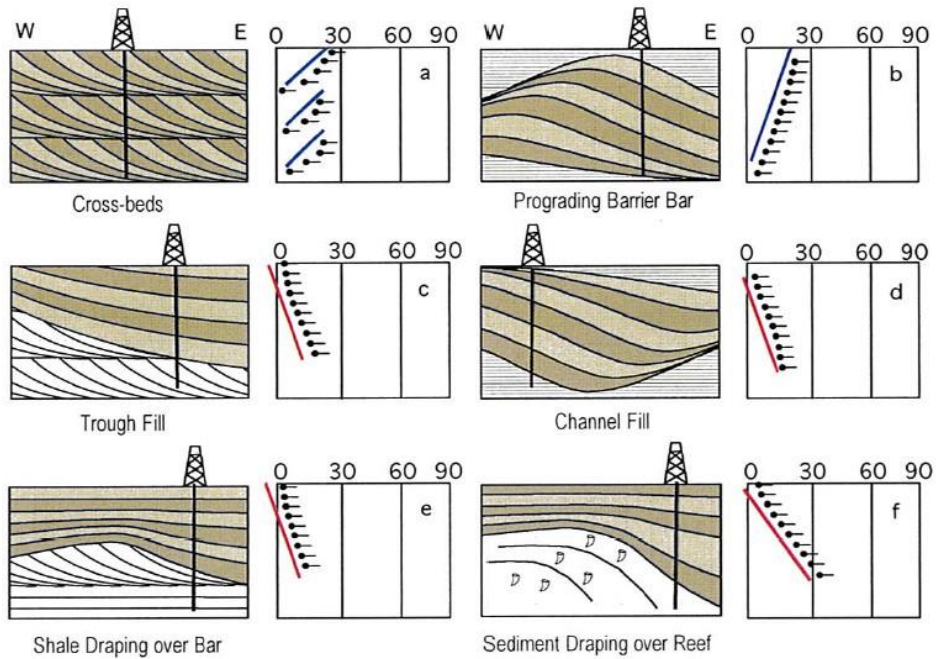


圖 2，地層傾角與裸孔影像工具於構造形貌解釋之結果。



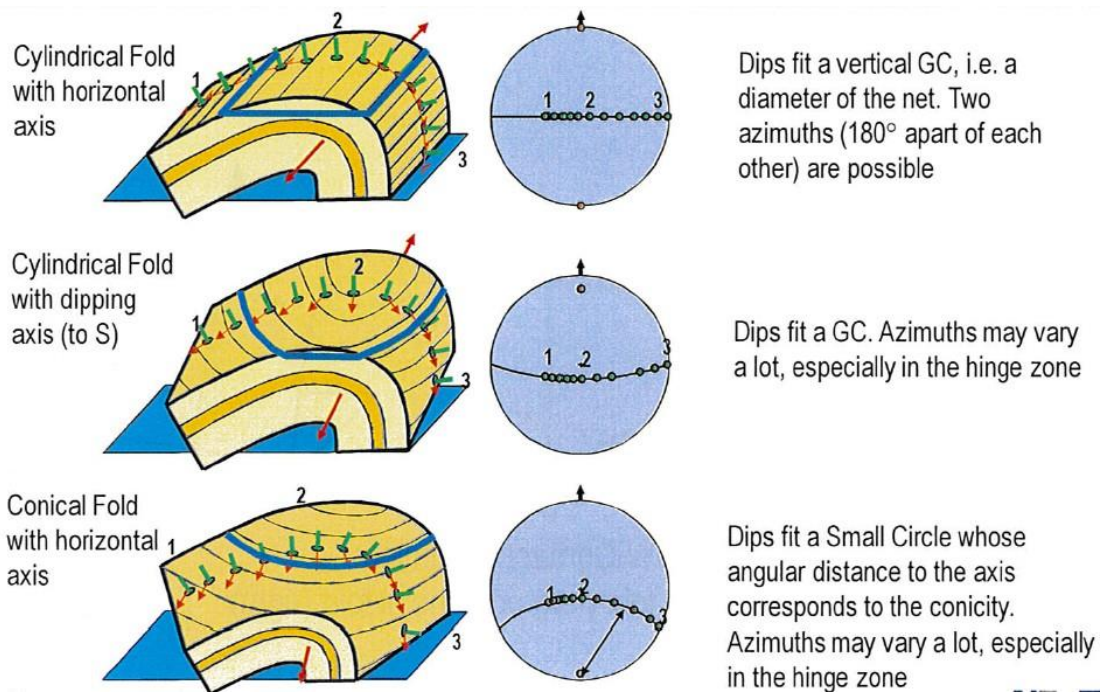


圖 3，地層傾角與裸孔影像工具於褶皺投影解釋之結果。

### Day 3

裸孔影像構造解釋，進一步繪製地層傾角資料於立體網狀圖的方法，來解釋二維和三維構造模型，並介紹如何將此解釋資料應用整合於 **Petrel**\*解釋系統之中。此外，裂隙、斷層以及應力特徵也可以利用裸孔影像資料進行辨識。經過基礎的岩石力學以及岩石破壞力學等介紹，可以依據野外露頭、岩芯與裸孔影像是否有位移的特徵來辨別裂隙與斷層（如圖 4、5），更在課堂之中講述垂直井和水平鑽井在岩石破壞狀況與解釋方法。

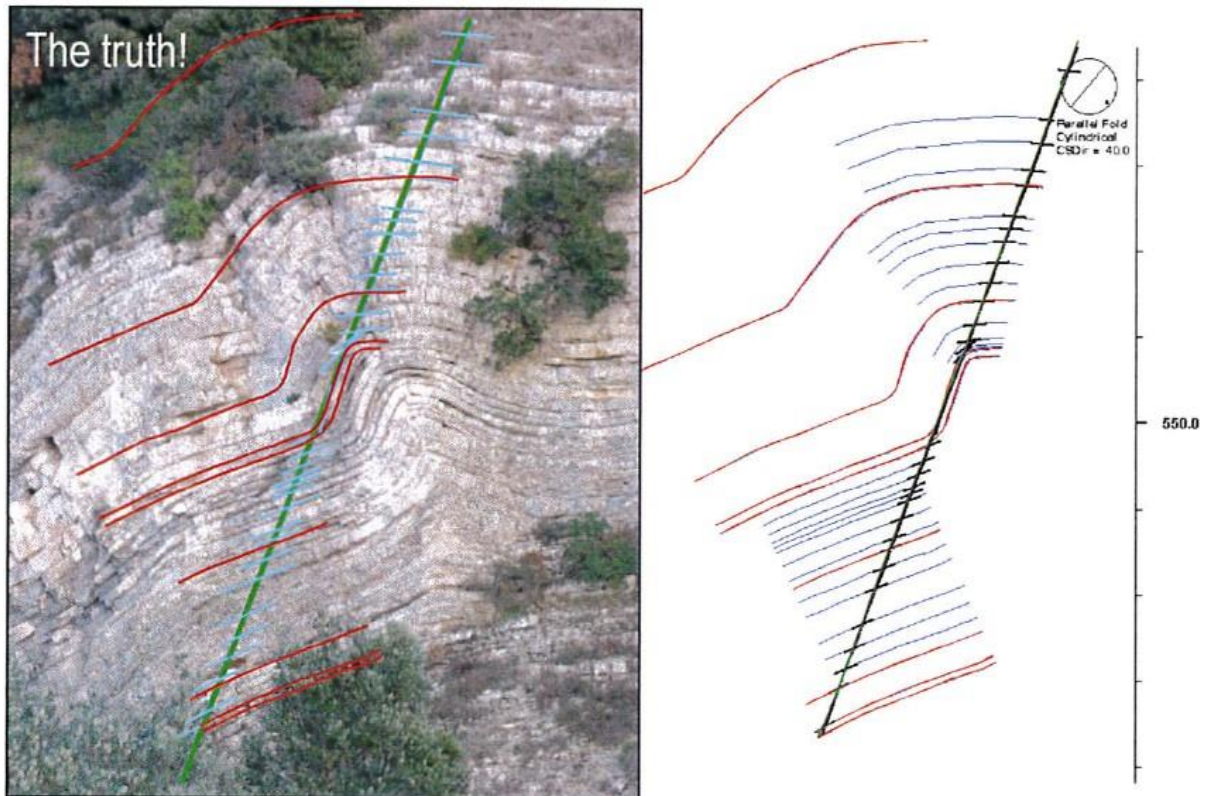


圖 4，真實地層露頭與井下地層傾角解釋結果之比對。

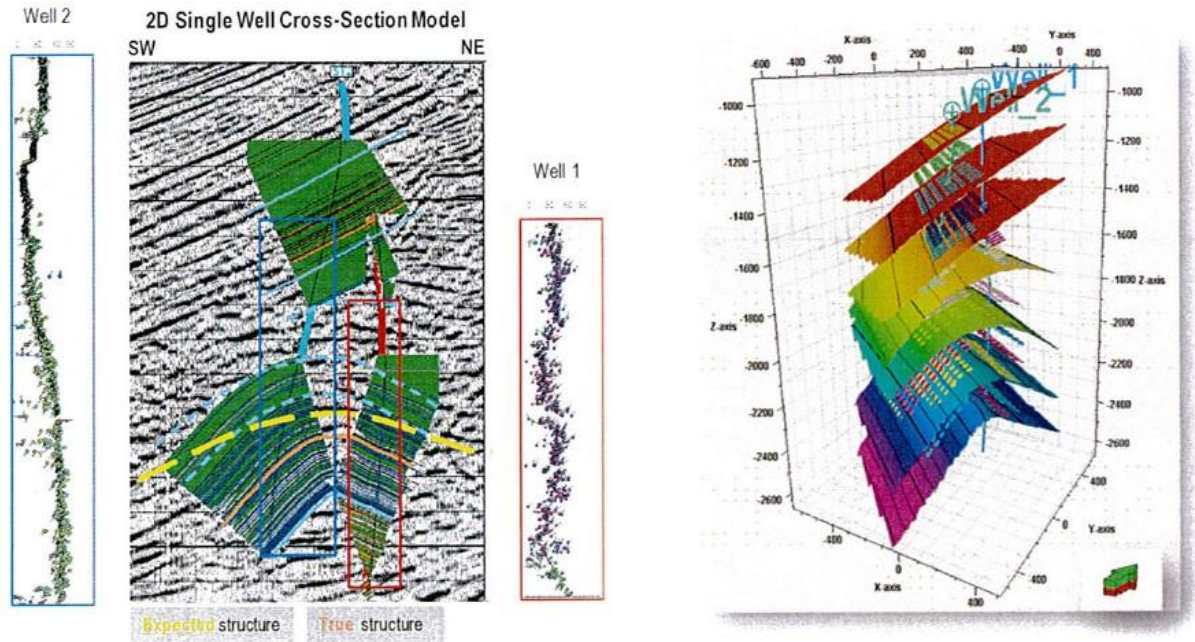



圖 5，震測資料與構造解釋搭配井下地層傾角解釋結果，並輸入至 Petrel\*系統中進行建模。

Day 4

延續第三天的構造解釋方法，介紹不同種類應力相關的構造特徵，並藉此解釋影像井測的輸出解果以及從這些影像資料獲取應力方向與大小的資訊；接著利用這一系列影像井測數據，因其中包含電阻率、泥漿、次生孔隙率（secondary porosity）等資料，可以利用 Archie's 方程評估儲集層滲透率等數據資料（如圖 6、7），並與縱波聲坡或震測資料針對裂隙、斷層、應力相關等特徵構造整合對比與解釋。



Fracture types		Effect on the reservoir
1. Natural open fractures	Continuous	Increase of permeability
	Discontinuous	
	Drilling enhanced	
2. Cemented (sealed) fractures		Permeability barrier
3. Drilling Induced fractures		No effect (very shallow)

圖 6，裂隙種類與油氣生產開發相關滲透率之間的關係。

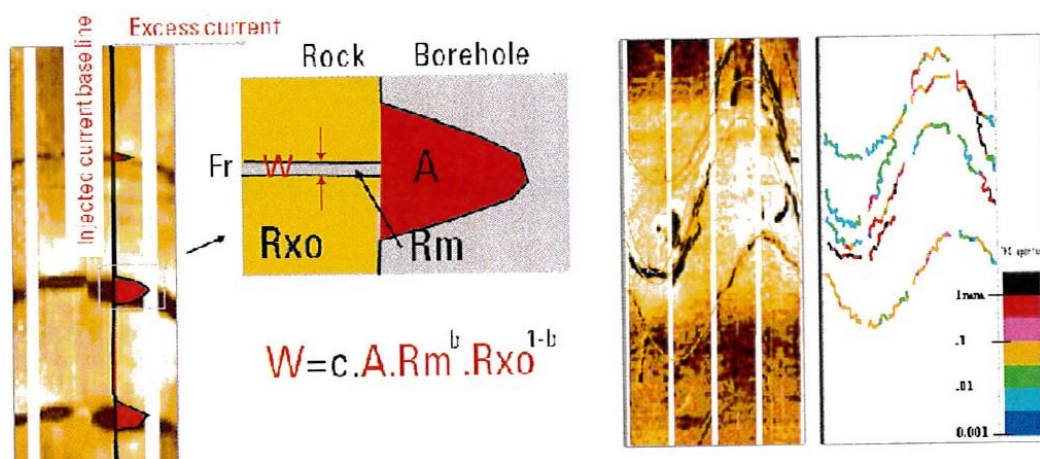


圖 7，利用 Archie's 方程將裂隙分析之結果相互連結，計算石油物理參數如：Rxo、Rm 等資料。

Day 5

本日講述重點為裸孔影像在沉積構造與環境之解釋。課程介紹裸孔影像針對常規沉積分析的工作流程，可依據區域沉積環境與構造背景，在影像中快速搜尋與解釋可能的沉積特徵，並搭配井位及地層序列等時間、空間資訊，給予可能古水流、現地沉積砂體分布以及推求可能砂體延伸的方向等資訊（如圖 8）。例如 continental fluvial, deltaic, shallow marine, deep marine, eolian, carbonate build-up and glacial environments 等不同沉積環境相在裸孔影像中可能的特徵，提供地質師可以快速辨別井位現地可能的沉積環境（如圖 9）；課程最後簡單介紹層序地質學如何與裸孔影像資料進行相互驗證與解釋，並與同期課程參與者合照留念（如圖 10）。

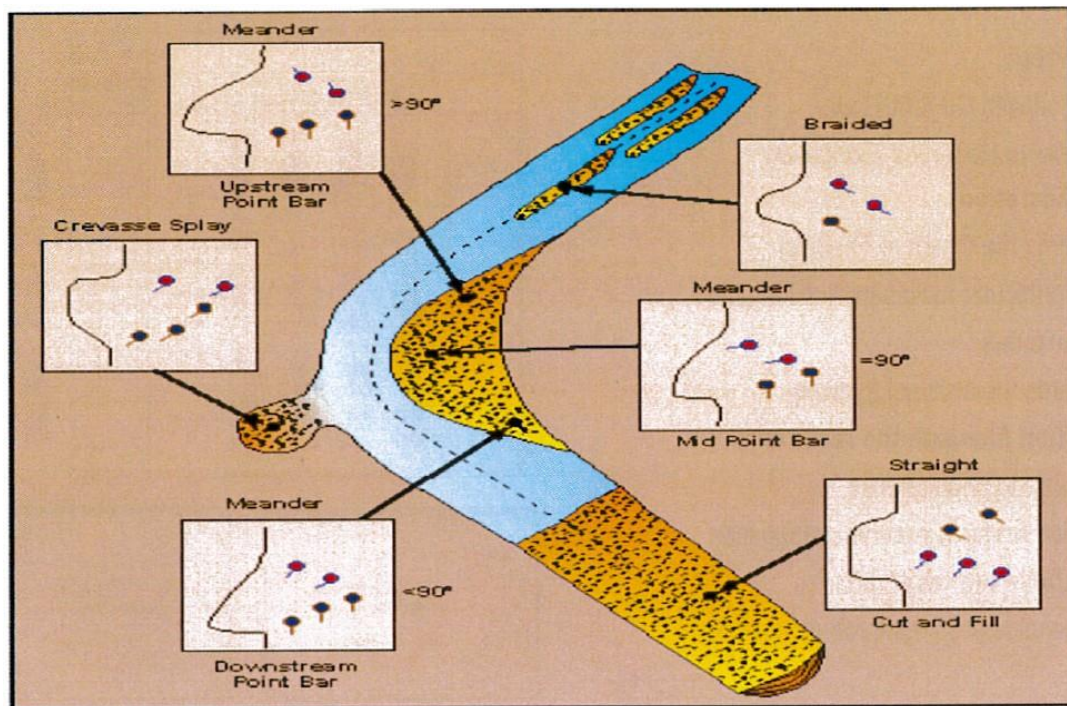


圖 8，井下地層傾角解釋結果與河道沉積環境之比對關係。

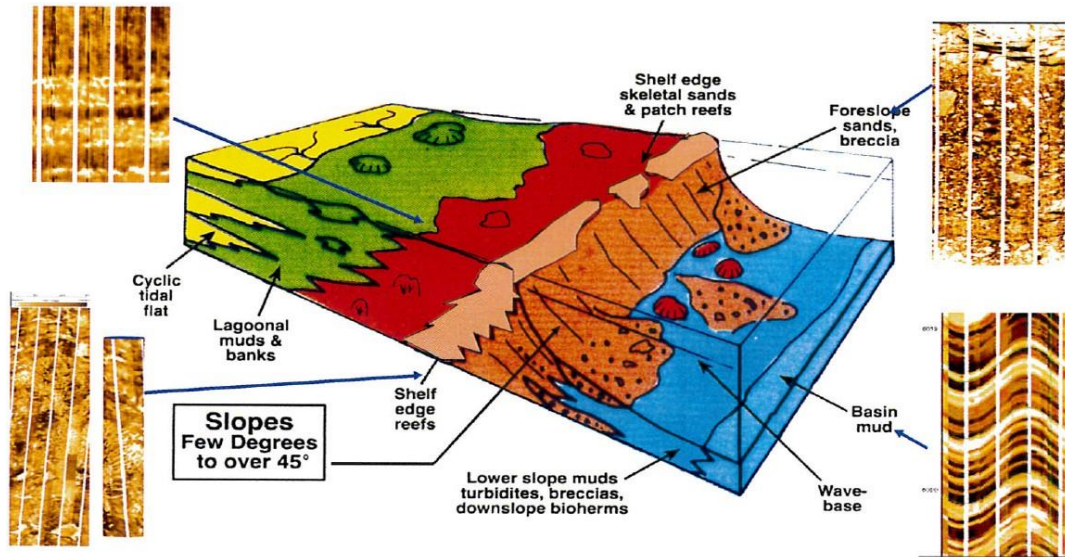


圖 9，裸孔影像之類型與解釋在沉積環境上之對比。



圖 10，課程參與者結訓證書合影，由左側依序為講師、SLB 駐 Petronas 工程師、本人、邱維毅、賴光胤。

## 心得與建議

本出國計畫原任務為：參加美國地球物理學會(SEG)舉辦之岩石物理課程與年會，課程名為：「Rock Physics, Geomechanics, and Hazard of Fluid-Induced Seismicity」，講者是德國柏林自由大學地球物理學教授：Serge A. Shapiro 博士。後因故改派參與實習項目，該設計課程為：「地下層相分析-整合影像測井、常規井下測井、油層物理特性及震測資料以建立地質模型」(Subsurface Facies Analysis - Integrating Borehole Images & Well Logs with Petrophysical and Seismic Data to Develop Geologic Models)；但因近期國際原油價格持需低迷，全球石油探勘專業課程均無法如期開課，且依公司內部規定出國前三個月內陳核申請，在實際執行工作上國際課程培訓中心均無法立即保證開課。此外，本實習課程因開課前一個月，原講師因病無法如期開課，得要求課程項目更改、改期亦或更改上課地點，本公司在行政流程手續上之彈性相當困難，面對近年來國際低油價探勘派訓等狀況，建議公司能給予相當的彈性與時間來處理較為合適。倘若往後還有機會，本人依舊薦請公司派員參與原設計課程：「地下層相分析-整合影像測井、常規井下測井、油層物理特性及震測資料以建立地質模型」，此為更進一步整合、解釋與整合建立地質模型等應用課程。

關於課程介紹之內容，對於公司探勘已鑽測之 FMS/FMI 資料，強烈建議需指派專門沉積、構造解釋之地質專門研究人員進行重新檢視與深入探討，並對於此種數據資料妥善保管與傳承至目前井測及震測構造解釋系統之中，可提供沉積環境、水流、構造、應力、儲層模擬等基礎工作提供更強而有力的支持。而在未來鑽井施作井測項目中，如須檢視與調查裂隙、斷層、沉積環境、可能含油氣之砂體延續性相關研究，除搭配震測資料外，建議探勘井測項目中，若鑽井工程為水基泥漿，除包含 FMI\*等標準裸孔影像測錄工具外，需施作 DSI\*與 UBI\*等井測工具的量測，可提供探勘井研究時，完整的數據，做為區域沉積、層序、構造地質等基礎研究背景驗證與重要數據。

## 參考文獻

Nelson, R. (2001). *Geologic analysis of naturally fractured reservoirs*. Gulf Professional Publishing.

江天才、湯守立、徐永耀 (2001)，台南盆地緻密裂縫砂層之電測解釋，中國地球物理學會－油氣探勘技術研討會會議資料。

李重毅、紀文榮、吳榮章、陳瑞瓊 (1993)，裂縫儲集層，中國石油公司探採研究所八十二年度研究報告。