

出國報告（出國類別：研究）

## 美國油氣開發技術觀摩與研究

服務機關： 台灣中油股份有限公司探採事業部  
姓名職稱： 陳信忠 石油開採工程師  
派赴國家： 美國  
出國期間： 108 年 10 月 5 至 12 月 23 日  
報告日期： 109 年 1 月 17 日

## 摘要

本次專題研究駐紮於美國休士頓，期間參與上游油氣專業培訓機構的課程，以及試井解釋軟體培訓課程，訓練期間空檔，前往本公司位於美國之分公司 Opicoil，學習及討論美國礦區經營之現況及未來展望。研究方向分為油氣田生產之工程技術及礦區經濟效益分析及風險管控。

生產操作涉及的範圍很廣，必須從探勘及生產資料中，彙整並設計出適當之開採方式，並評估未來可能面對之生產狀況，事先預防遠比事後處理來的簡易且便宜。在評估礦區價值時，亦應該從有限的資料中預估開發方式及對應的生產營運費用，以使成本估計符合現實，提高礦區評估的準確性。

經濟分析相關的研究，釐清許多基礎觀念，並深入學習進階技能，將統計觀念帶入經濟分析模型，將經濟分析得到的單一解轉換為一個連續分布的範圍，有助於對經濟效益有更宏觀的分析。決策分析的工具有助於公司做出正確決策，好的決策不一定會有好的結果，好的結果也不代表好的決策，但若能持續應用決策分析選擇對公司有利的方向，長遠下來公司必定會正向的成長。

訓練過程中，與世界各國油公司的專業人員交流與討論，互相交流工作概況及探勘策略，從中學習及借鏡亦收穫良多。

# 目次

摘要.....	1
一、目的.....	1
二、過程.....	1
三、具體成效.....	2
生產操作(Production Operation).....	2
經濟分析及決策分析(Petroleum Economics & Decision Analysis).....	14
四、心得與建議.....	23

## 一、目的

藉由赴國外專業油氣訓練機構，學習油氣開採之技術及評估方式，課程選擇著重於兩個主題。首先為油氣田開採之工程技術，本公司探勘標的遍及全球，各種不同之油氣伴隨著相對應的開採方式，陸上或海域、原油或天然氣、輕油或重油、傳統或非傳統等，開採方式皆有各自的特性，為了精進礦區評估之精準度，有必要涉略各種生產操作技術，才能準確評估礦區未來潛能；第二個選課方向為礦區經濟效益分析及風險管控，經濟分析是所有礦區評估工作的彙整，亦是我過去鑽研的項目，然而在工作中仍覺得專業知識有所不足，因此安排相關訓練課程，期許能對相關知識有更深入的理解，做出更精準的判斷及分析，以協助公司進行風險管控及決策分析。

## 二、過程

本次專題研究駐紮於美國休士頓，期間參與上游油氣專業培訓機構 PetroSkills 的課程，以及 KAPPA Engineering 試井解釋軟體培訓課程，KAPPA Engineering 是一間油層軟體及顧問公司，全球共有 600 間油氣公司使用其開發的軟體。訓練期間空檔，前往本公司位於美國之分公司 Opicoil，學習及討論美國礦區經營之現況及未來展望。

日期	訓練內容
10月7日~10月11日	PetroSkills 課程：Well Test Design and Analysis
10月14日~10月18日	PetroSkills 課程：Expanded Basic Petroleum Economics
10月21日~10月25日	KAPPA Engineering 課程：Pressure Transient Analysis and Rate Transient Analysis Module 1 course
10月28日~11月8日	PetroSkills 課程：Production Operations 1
11月11日~11月22日	PetroSkills 課程：Applied Reservoir Engineering
11月25日~11月27日	Opicoil 礦區經營研習及討論
12月2日~12月6日	PetroSkills 課程：Petroleum Risk and Decision Analysis
12月9日~12月13日	PetroSkills 課程：Advanced Decision Analysis with Portfolio and Project Modeling
12月16日~12月20日	PetroSkills 課程：Well Log Interpretation

### 三、具體成效

依據訓練及研究內容，將相關知識分類為生產操作、經濟及決策分析兩大類，並將課程重點及收穫摘要如下：

#### 生產操作(Production Operation)

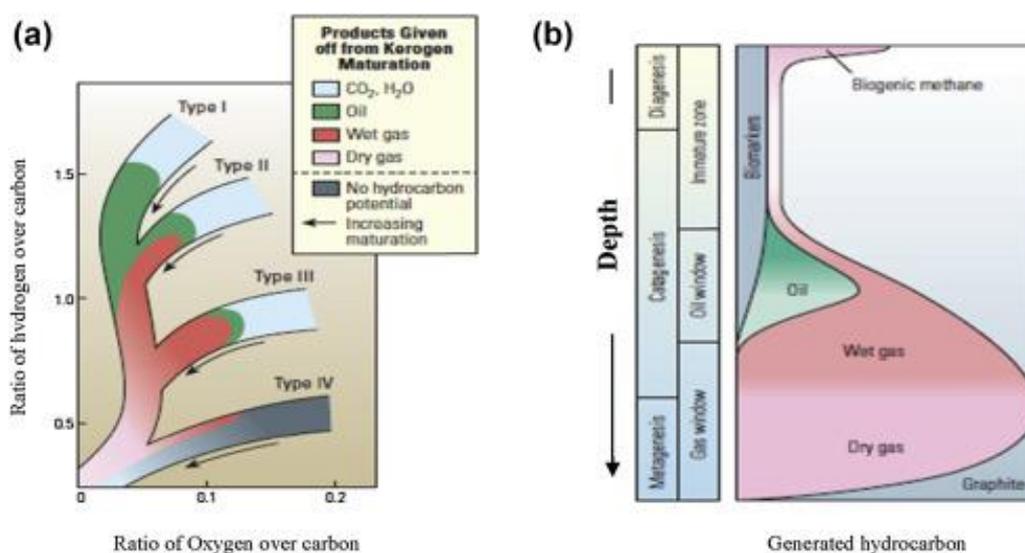
油氣田的生產(Production)是所有探勘工作的總結，藉由在探勘中收集的所有資訊，設計合理的生產方式，其中必須連結地質(Geology)、鑽井(Drilling)、完井(Completion)、油層(Reservoir)、設施(facility)等知識，與各個專業人員溝通協調，以使油氣田順利開發生產。

在礦區評估的範疇內，生產操作設計的恰當與否，直接影響預估的成本是否能夠符合現況，對於探勘礦區應能估計探勘費用及開發成本；生產中礦區則要能估計操作費用及預估產量，因此對生產操作有全面性的理解，將可更精準評估經濟效益。

#### (一) 生產地質學

生產工程師必須對礦區地質條件具備基礎的了解，方能設計相對應的生產計畫，提早預防各種生產狀況，以提高採收率及降低生產成本。

油氣田的生成須包含生、儲、蓋、移棲等要素。所有的生油岩都是沉積岩(Sedimentary rock)，其僅佔了地殼的 5%但覆蓋地球表面 75%，透過自然力量的侵蝕(Erosion)、沉積(Deposition)、成岩作用(Diagenesis)，在厭氧環境下經過壓力、溫度及熱成熟作用下形成油氣。



油母質與熱成熟度

儲集岩除了少數火成岩裂隙的例子，主要仍以沉積岩為主，可分為砂岩(Sandstone)、碳酸岩(Carbonate)、頁岩(Shale)，目前全球已產油氣依多到少排序為碳酸岩、砂岩、頁岩，全球油氣儲藏量排序則為頁岩、砂岩、碳酸岩，碳酸岩油氣主要貢獻來自於中東地區的眾多碳酸岩油氣田，然而隨著開採技術的進步及突破，以非傳統方式開採的頁岩油氣，已得到更多重視並影響未來全球油氣局勢。

砂岩孔隙率以原生孔隙率為主(Primary Porosity)，其孔隙率受埋深之物理壓密作用而使孔隙率減少外，亦受溫壓變化引發成岩作用而使孔隙率變差(如方解石膠結或石英增生等)，此外受到沉積環境顯著影響，一般較年輕之沉積砂岩及淘選度(Sorted)越好的砂岩具有較好的孔隙率，從砂岩的分布來看，沉積環境又可分為河系沉積相如河道(Channel)、三角洲系沉積相(Deltaic)、海相(Marine)沉積，一般而言海相沉積具有良好之側向連續性，三角洲沉積相則以古河口為主，部分可延伸到海域陸棚區，河道砂則僅以古河道為主要分布區。碳酸岩的孔隙率常因沉積環境的差異變化很大，一般生物礁層有較佳的孔隙率，但台地相則較差，但若有因溶解和再沉澱所形成的次生孔隙率(Secondary)則變得較佳，一般而言缺乏側向連續性。

封閉機制主要以構造封閉(Structural)、地層封閉(Stratigraphic)及構造地層聯合封閉為主，構造封閉由褶皺或斷層(Deformation)所形成之封閉，如背斜封閉及斷層封閉；地層封閉則由岩性變化所形成之封閉，如不整合封閉、尖滅封閉等，聯合封閉則多為兩者共生之構造。

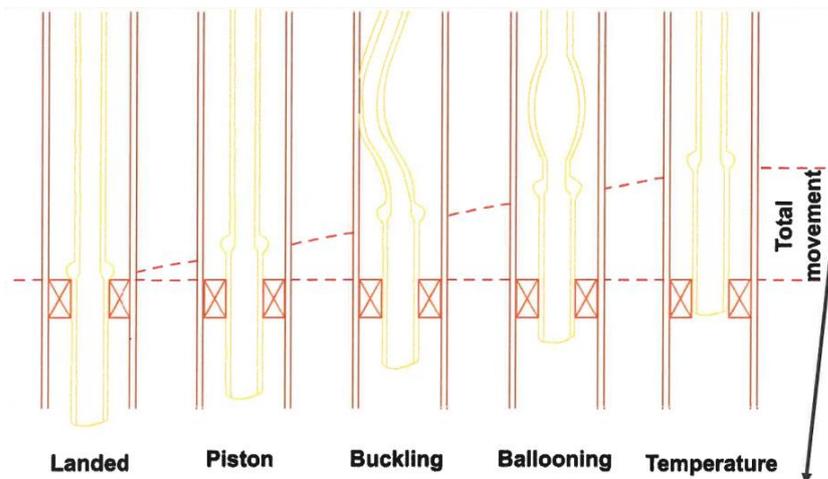
## (二) 完井設計

傳統油氣田之完井設計應建立在安全、符合生產效益、具有操作彈性前提下，盡量維持簡單易操作，並將未來之操作成本納入考量。

生產工程應決定：

1. 完井方式(Completion method)：常見方式包含裸孔完井、篩管完井、襯管完井、套管完井，裸孔完井優點為成本低、地層浸汗低、有效孔徑大、易於加深，缺點為地層必須穩固、難以進行伴產氣或伴產水控制、無法進行部分激勵措施；篩管完井優點相似於裸孔完井但提供了些微的井壁支撐，缺點為較裸孔完井貴、地層不可過於粉碎；襯管及套管完井優點為易於控制伴產氣及伴產水、有效的出砂管控、可用於多串生產，缺點為成本最貴、有部份生產層未能連接至井內。

2. 產層隔絕規範(Barrier policy)：產層隔絕(Barrier)意指將生產層與地表隔離之機制，包含液壓隔離(Hydraulic barrier)如水柱壓、泥漿柱壓等，或是機械隔離(Mechanical Barrier)如閥(Valves)、封塞器(Plugs)、防噴器(BOP)等。為確保生產及操作安全，建議最少須兩種隔離方式，最好是三種以上。
3. 油管移動(Tubing movement)：因不同的井內因素使油管位置產生變異，如在實施激勵注壓時，油管下的壓力把油管往上推(Piston)；井彎曲(Buckling)；注水或激勵的溫度與地層溫度不同時，熱漲冷縮導致油管長度變化(temperature)等。



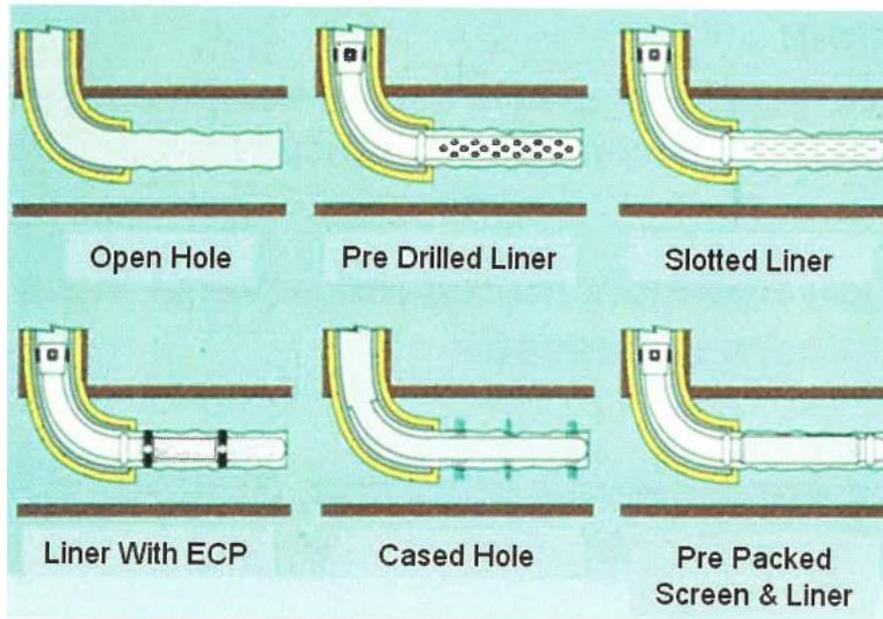
油管移動(Tubing movement)因素

4. 生產層數量(Number of zones)

若有多個儲集層，生產工程須設計適當之生產方式，如單層生產耗竭後，封堵下層再往上層穿孔，或是單串多層、雙串雙層的方式生產，則油管内需設置相對應的填塞器(Packer)、耐蝕管(Blast joint)、導流管(Flow coupling)、側洩循環閥(Sliding side door)、短管(Pup joint)、短座管(Landing nipple)、氣舉管線接管(Side pocket mandrel)、異管牙接頭(Cross over)等設備。

5. 傳統水平井(horizontal well)

傳統之石灰岩和砂岩水平井技術應用於多斷層產層、具氣頂之油層、不易破碎之產層和激勵生產，若能成功完井通常一口水平井可達到三至四口垂直井之產量，但鑽、完井設計及操作須考量更多變數，如垂直滲透率與水平滲透率之比值( $k_v/k_h$ )越低水平井效益越差、泥漿對地層的污染變嚴重等。



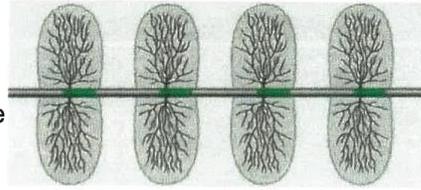
常見傳統水平井完井方式

業界將多層生產技術(Technical Advancement of Multi Laterals, TAML)依照複雜程度分為 Level 1 到 Level 6S 共 7 級，分類如下：

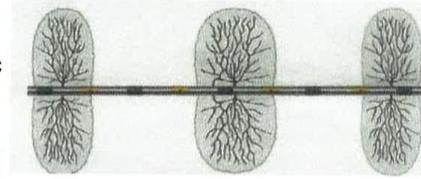
- A. Level 1: Both open hole/ unsupported junction
- B. Level 2: Mother bore cased & cemented/lateral open
- C. Level 3: Mother bore cased & cemented/lateral cased but not cemented
- D. Level 4: Mother bore cased & lateral cased & cemented
- E. Level 5: Pressure integrity at junction (not with cement)
- F. Level 6: Pressure integrity at junction achieved with casing
- G. Level 6S: Downhole splitter

非傳統完井設計除水平井之外還包括液裂工程，應用於低孔隙率及低滲透率的頁岩層，近年由於水平井及液裂技術的提升使得非傳統油氣成為重要的探採標的，目前常見的水平液裂方式有三種，包含 Multi stage single point injection、Ball drop & sleeve completion、Plug & perf completion。三種方法中，Multi stage single point injection 液裂效果容易掌控但成本最貴；Ball drop & sleeve completion 因為沒有穿孔所以液裂的位置無法掌握，液裂段可能在任何位置，所以效益較差；目前業界傾向使用 Plug & perf completion，但其工作包含下水泥、穿孔、液裂等，工作量較多，一般會增加 30% 的工作時間，故成本較 Ball drop & sleeve completion 貴。

**Multi Stage Single Point Injection:**  
isolated zones of cased, cemented, and perforated intervals to develop random frac patterns with known proppant volume and controlled frac growth per stage

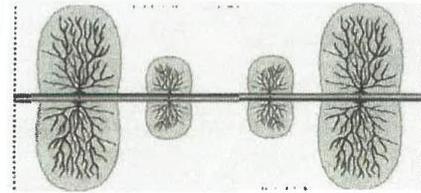


**A. Ball Drop & Sleeve Completion:**  
open hole intervals with isolation packers, dissolvable ball/seat tools, & frac sleeves are run in hole after drilling; less hydraulic control in developing random frac patterns frequently results



**B. Plug & Perf Completion:**  
bridge plug pumped on wireline with perf guns; after plug is set, guns then perforate zone; tools are removed and frac stimulation is pumped with the plug diverting fluids into the zone perfs

**"A" & "B"  
most  
common**

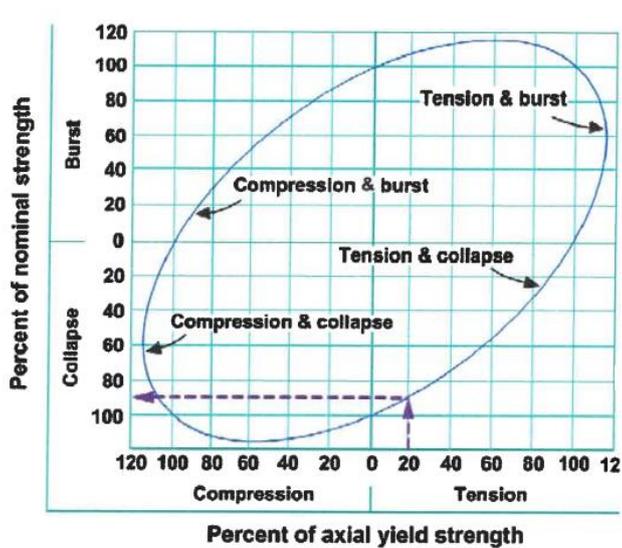


三種常見液裂工法

### (三) 油管、填塞器及井下設備

油管的功能包括控制井況、管控流動效率及產層、防止套管腐蝕、設置人工提舉設備等，油管分為無縫油管(Seamless)及有縫(electric weld)兩種，其中有縫較便宜但強度較低，美國石油協會(American petroleum institute, API)訂有油管標準等級，常見如 H40、J55、C75、L80、N80、C90、P110 等，其英文字母代表油管的化學成分，數字則代表最小屈服應力(yield stress)，單位為千磅每平方英寸(kpsi)，故數值越高強度越強，另有不鏽鋼抗腐蝕材質之油管，用在含高腐蝕性成分之油氣田，如二氧化碳或硫化氫等。

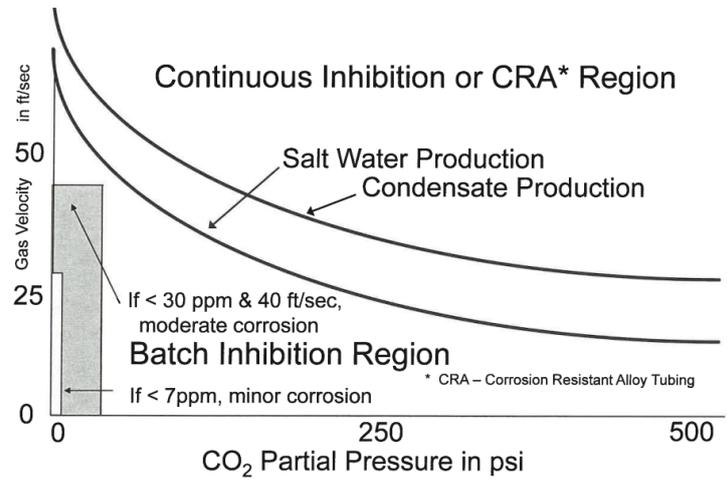
生產設計選擇之油管需考量三種應力強度，伸張強度(Tension)、抗張強度(Burst)、頹毀強度(Collapse)。伸張強度為油管抵抗上下拉張的強度，計算時需一併考慮浮力；抗張強度為油管抵抗內部壓力的強度，計算需考慮施作激勵生產，以及考慮套管內充滿流體但環孔是空的情況；頹毀強度是油管抵抗外部壓力的強度，需考慮環孔充滿流體但套管是空的情況，並考慮油管在受力(Tension)時頹毀強度所受到的影響。



**Biaxial Yield**  
 Ellipse of biaxial stress shows the effect of compression and tension on collapse and burst strength.  
 Greatest effect is collapse strength loss under tensile loading (lower right).

三種應力強度相互作用圖

硫化物應力破碎(Sulfide stress cracking, SSC)通常由硫化氫引起，易受影響的合金(例如鋼)與硫化氫反應，形成金屬硫化物和氫原子作為腐蝕副產物，氫原子在金屬表面結合形成 H<sub>2</sub> 或擴散到金屬基質中。天然氣田含有二氧化碳時，亦須留意含量之佔比及流壓，選擇適當的防腐蝕材質。



二氧化碳腐蝕範圍圖

填塞器(Packer)功能包括控制井況、協助氣舉操作、隔離多產層等，概略可分為永久型的填塞器(Permanent packer)及可回收型填塞器(Retrieveable packer)，設計應以易於維護及提升生產效率為考量，而不僅關注於初期成本，在較為嚴苛的操作環境，應使用永久型的填塞器，在高風險區域或海域，於井下 50~100 公尺應設置可開關之井下安全閥(retrieveable flapper subsurface safety valve)。

#### (四) 水泥封固

水泥封固可說是鑽井及完井過程中最重要的工作，水泥可隔離生產層與其他地層，並保護套管免受地層的侵蝕，若水泥封固稍有不慎，使地層流體有通道連接至地表，將造成嚴重的後果。水泥封固的主要花費包含水泥材料、泵浦設備、鑽機等待費用(wait on cement)及水泥電測。

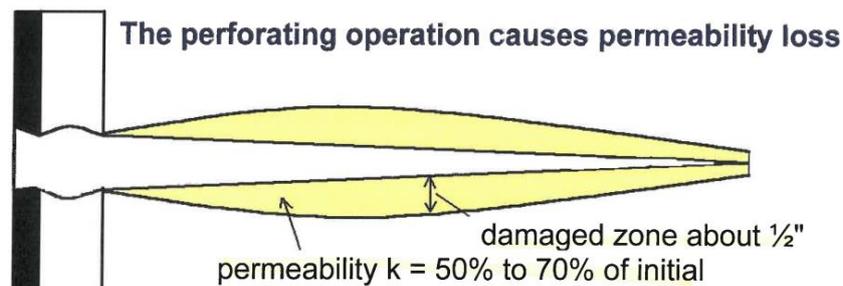
水泥封固可分為 **Primary cementing** 及 **Remedial cementing**(又稱為 **squeeze cement**)，**Remedial cementing** 指初次水泥品質不好，穿孔後局部補封水泥，因從穿孔的縫隙中將水泥擠過套管而填滿環孔，故稱為 **Squeeze**。平均而言，15%的水泥封固需要施作 **squeeze cement**，而其中只有 50% 會成功，一般水泥封固費用占整體鑽井成本的 5%，如果需施作 **squeeze cement**，成本將增加至整體鑽井成本的 17%。故施作水泥封固時應確保可一次到位。

施作水泥封固亦須留意地層特性，若水泥碰到鹽層，清水會溶解鹽層使其產生巨大空洞，鹽層受到地層壓力會緩慢往空洞移動，最終可能將套管擠壓變形。

#### (五) 穿孔

目前主流的穿孔方式共有三種，**Casing guns** 以鋼線將穿孔槍下至生產層，在套管內穿孔，套管內壓力一定要比地層壓力大(正壓)，否則地層流體會衝噴(kick)造成鋼線纏繞；**Tubing guns** 以鋼線將穿孔槍下至生產層，在油管內穿孔，會受到井口高度的限制及油管內徑的限制；**Tubing conveyed perforating** 穿孔槍裝在油管下方，跟隨油管下至穿孔區間穿孔，可負壓(underbalanced)穿孔，避免浸汙生產層(skin 較小)，穿孔槍可留在油管下方，或退扣使穿孔槍掉到井底，亦可起油管卸下穿孔槍再下一次油管，然而就失去負壓穿孔之益處，此方法穿孔槍比較小，所以穿孔深度較短。

一般來說，穿孔會追求較遠的穿孔距離，但生產層若有出砂問題，會追求比較大的孔徑及較近穿孔距離以減少地層壓力降，防止出砂。穿孔會形成約 0.5 英寸厚的浸汙區，滲透率降為原本的 50~70%，若使用負壓穿孔則可避免此問題。



穿孔後地層汙損示意圖

## (六) 人工提舉

目前常見的人工提舉法包含 Rod pump(Beam pump)、Progressing cavity、Gas lift、Plunger lift、Hydraulic piston、Hydraulic jet、Electric submersible pump 等，人工提舉皆須考慮設備腐蝕的問題，提早規劃及預防。

	Beam Lift (Rod Pump)	Progressing Cavity	Gas Lift	Plunger Lift	Hydraulic Piston	Hydraulic Jet	Electric Submersible
Operating Depth (feet)	100-16,000	2,000-6,600	5,000-15,000	4,000 13,000	7,500-17,000	5,000-15,000	1,000-15,000
Operating Volume (Typical, bpd)	5-5,000	5-4,500	200-30,000	1-5	50-4,000	300-15,000	200-30,000
Operating Temperature (F)	100-550	75-250	100-400	500	100-500	100-500	100-400
Corrosion Handling	Good to Excellent	Fair	Good to Excellent	Excellent	Good	Excellent	Good
Gas Handling	Fair to Good	Good	Excellent	Excellent	Fair	Good	Poor to Fair
Solids Handling	Fair to Good	Excellent	Good	Fair	Poor	Good	Poor to Fair
Fluid Gravity (API)	>8	< 32	>15	GLR Required 300 SCF/BBL	>8	>8	>10
Servicing	Workover or Pulling Rig	Workover or Pulling Rig	Wireline or Workover Rig	Wellhead Catcher or Wireline	Hydraulic or Wireline	Hydraulic or Wireline	Workover or Pulling Rig
Prime Mover	IC Engine or Electric Motor	IC Engine or Electric Motor	IC Engine or Electric Motor	Well's Natural Energy	IC Engine or Electric Motor	IC Engine or Electric Motor	Electric Motor
Other Requirements	Fuel Gas or Electrical Power	Fuel Gas or Electrical Power	Natural Gas & Compressor	Solar or Electrical Power for Controller	Fuel Gas or Electrical Power	Crude or Water; Fuel Gas or Electrical Power	Electrical Power
Offshore Application	Limited	Good	(for	N/A	Good	Excellent	Excellent
Overall System Efficiency	45%-60%	40%-70%	10%-30%	N/A	45%-55%	10%-30%	35%-60%

人工提舉適用範圍列表

Rod Pump 又稱為 Beam pump，即是俗稱之磕頭機，是全球使用最普及的人工提舉法，約佔全部的 85%。Rod Pump 不安裝耶誕樹也不設置填塞器(Packer)，因為氣體會影響泵浦效益，故讓氣體由環孔逸散出去。除非地層有出砂問題，一般而言會讓泵浦位於穿孔區間下方，方能讓液氣在環孔中分離，增加泵浦效率。

Plunger Lift 應用於出水之氣井，自動控制關井蓄壓讓 Plunger 掉落至井底後，開井藉由地層壓力及 Plunger 將油管内液體柱壓推至地表，待壓力不足後再關井蓄壓，其驅動力皆來自地層壓力。Plunger Lift 通常不會安裝填塞器(Packer)，目的為藉由環孔液柱壓幫忙推動 Plunger，因此設置時須考量套管腐蝕的問題，特別是氣體中含有二氧化碳或硫化氫。油管内除了底部短座管(Landing nipple)外，不安裝其他短座管及井下安全閥，以免阻礙 Plunger 的移動。

Gas lift 為氣舉法，利用環孔注入高壓氣體，氣體通過油管底部氣閥進入油管，藉由氣體帶動油管内原油的流動，通常會設置三個氣閥，因壓差作用最終只有最底部之氣閥會作用。

Progressing Cavity Pumps (PCP)用於重油、淺井、出砂井，目前主要應用於油砂之開採，極限深度約為 6000 英尺，適用於 API 小於 32 度的油田。

Electric submersible pump 常縮寫為 ESP，由地面連接控制線(Cable)至井底驅動泵浦。ESP 地面設備包含 Power support、VSD/control Panel、transformer、Junction Box，若地層氣體體積大於 5%，ESP 需安裝井下分離器，設置於 intake 和泵浦之間。由於 ESP 於運作時溫度會升高，將影響泵浦運作及壽命，所以讓油柱高於 ESP 將有助於降溫。控制線(Cable)位於環孔內，須有特別的材質及保護機制防止斷裂或腐蝕，通常是 ESP 裡面最貴的部分。更換及維修 ESP 的成本很高，因此在評估時應考量未來之操作費用。

### (七) 地層汙損(formation damage)

地層汙損是指在井壁週圍因人為或天然因素，造成有效滲透率的改變，影響生產井的產率，生產工程可以藉由洽當的操作減少地層汙損。辨識地層汙損的來源，可由試井資料、完井報告、生產數據、岩心及流體資料等探討各種可能性，並仔細的評估和預防。

地層汙損可以分為三類，絕對滲透率汙損(Absolute permeability damage)、相對滲透率汙損(Relative permeability damage)和黏度汙損(Viscosity damage)，絕對滲透率汙損為物理性質的汙損，例如黏土礦物(clay)、結垢(scale)、石蠟(Paraffin)、瀝青質(Asphaltenes)等堵塞油氣通道；相對滲透率汙損為可濕性(wettability)及流體飽和度(Saturation)所造成之流動性變化，如凝結油在井壁周圍稀出(Condensate banking)，或是井壁周圍的地層水累計，隨著其相對滲透率將增加，油氣越難產出(water block)；黏度汙損為乳化(Emulsion)、發泡(forming)及膠化(Gel)造成之流動性降低。

除了上述三種真正的汙損之外，還有一種 Pseudo skin，其並非真正的汙損，主要來自於完井方式、井斜、流體力學、井內設計所造成的流動性增加或減少。

依照儲層的沉積環境不同，面臨不同的地層汙損原因，亦有不同的解決方法，例如砂岩常含有較多的黏土礦物，而石灰岩則少有黏土礦物的問題。大部分的儲層初始皆為親水性(water wet)，其有助於油氣的流動，但油基泥漿有可能改變儲層性質變為親油性(oil wet)。注水井也會有地層汙損，水內離子有可能會因為壓力、溫度變化在管線內結垢，亦可能因細菌形成硫化氫，堵塞通道降低滲透率。

表面活性劑(Surfactant)是介面活性的媒介，可用來改變液氣之間的表面張力(Surface tension)、兩種液體間的内聚力(Interfacial tension)或液固之間的可濕性

(wettability)，表面活性劑可用來改變產層及流體性質，預防乳化及發泡作用，然而，錯誤的使用表面活性劑會有嚴重的反效果，在相同油氣田內也可能會有不同結果，因此在施作之前要對地層及井況全面的了解。

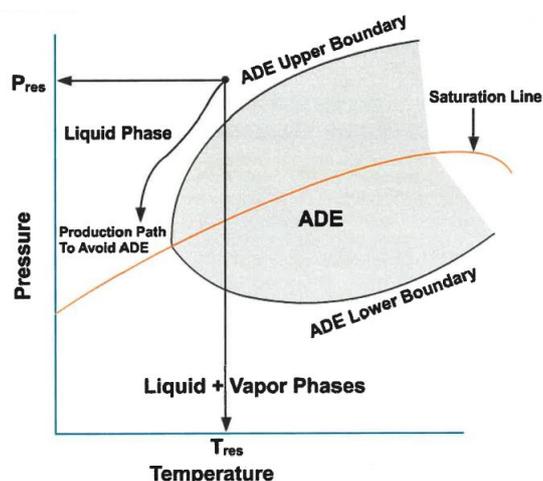
#### (八) 結垢、石蠟和瀝青質

結垢(Scale)與油氣田中的伴產水有關，其發生的原因包含溫度或壓力變化、不同層的地層水混和、酸鹼值變化、蒸發作用、成核作用(Agitation & Nucleation)、氧化等，結垢會堵塞油管、井下設備及地面管線，顯著影響油氣流動。

結垢的徵兆包含產量不正常的遞降、伴產水性質變化、井下泵浦失效、地面或井下設備結垢，面對結垢的問題，預防成本遠比治療便宜，因此確保在投產前分析伴產水的成分，並預先規劃對策，預防的方式包括酸鹼值控制、螯合作用(chelation)、門檻效應(threshold effect)等。

石蠟(Paraffin)是一種烷類(alkanes)的混合物，特性為在很窄的溫度範圍內才會溶解、高溫液態時黏度低、碰觸到熱煙易燃燒，主要因溫度降低而從溶液中稀出，常發生於間歇生產時、油氣與較冷的水層接觸時及管壁內粗糙處，相同油田內石蠟的問題可能不一樣，原因為原油成分不同、壓降不同或處理方式不同。常見的處置方法為添加溶劑(Solvent)，以及由環孔注入熱油或熱水(200°F 以上)，由油管循環出，以溶解石蠟。然而，若要添加溶劑去抑止石蠟，要考慮油氣中瀝青質(asphaltenes)的含量，溶劑可能會惡化瀝青質的問題。

瀝青質(asphaltenes)為原油中重成分的沉積，莫爾重介於 10,000 到 100,000 之間，特性為溶解速度慢，發生於原油成分改變或與酸液接觸時，瀝青質可溶於芳(香)族溶劑，不溶於烷烴(alkanes)、柴油(diesel)、煤油(kerosene)等。石蠟和瀝青質預防成本也較處理便宜，故在投產前應確實分析油氣成分。



瀝青質(asphaltenes)沉積之溫度及壓力圖

## (九) 腐蝕

腐蝕(Corrosion)是指設備及管線因化學或電化學原因發生金屬減少，可能發生在管線內部或外部，腐蝕有多種形式如 erosion、abrasion(金屬對金屬)、chemical、galvanic coupling(金屬電位差)、metal alteration 等，流體酸鹼值(pH)越低越容易發生腐蝕。水切也是顯著影響腐蝕的因素，隨著伴產水增加腐蝕率跟著上升，水切同時減少收入、降低人工提舉效率、增加處理費及防蝕費用，使操作更加困難。

電位差造成的腐蝕，常發生於材質不同之零件上，如短座管、置中器(Centralizers)、泵浦、填塞器等，也常發生在接觸海水或是埋管處，腐蝕是造成套管失效最主要的原因。如果經濟效益許可，添加防蝕劑(corrosion inhibition)是最好的抑制腐蝕方法，亦可在管線內設置 Corrosion coupon，監測腐蝕的嚴重程度。

## (十) 生產電測

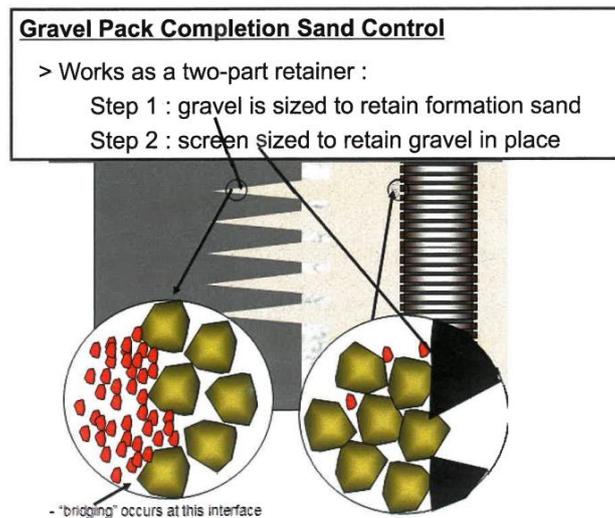
生產電測(Production Logging)是用於檢測井況及評估井內流體，功能包括評估各層貢獻、判斷雙層或多層流體是否相互連接(Cross-flow)，判斷水層或氣頂是否進入井內、井況檢測等。

常見的生產電測包含 Noise log 檢測微量之氣體滲漏；temperature log (High Resolution Thermometer Tool, HRT log)檢測水泥頭高度；Spinner flowmeter tools 測量井下各層流量；Gradiomanometer 壓差密度計，量測井下密度變化，可偵測地層是否有油氣產出；Radioactive tracer logs 用於追蹤注入井；Pulsed neutron log 脈衝中子電測等。

## (十一) 出砂控制

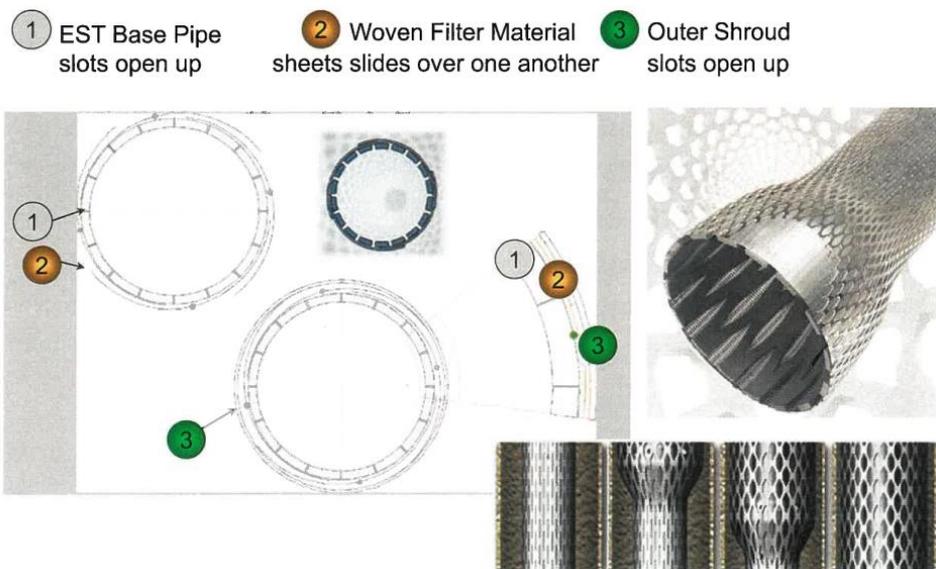
出砂是油氣生產常見之問題，砂礫可能會堵塞生產設備影響產量、引發地層下陷、套管損壞，也可能因砂粒持續沖蝕生產管線及設備，損壞設備甚至穿破管壁，增加維護成本。出砂的原因是由流動或其他因素造成壓力的不平衡，使固粒脫離原本的位置，常見的原因包地層壓力擠壓、地層環孔壓差、相對滲透率改變、鍵結力降低(酸洗或水沖排)造成。固結不良的砂層(Unconsolidated sand)容易有出砂的問題，通常為 2400 公尺以上的淺層，在鑽井時就難以維持井壁穩固，同時難以取岩心，穿孔時會立即坍塌，任何的流體移動造成的壓差都會影發出砂。

防止出砂的方法包括下防砂篩管、樹脂塗布(Resin-coated sand)、礫石隔砂(Gravel Pack)、液裂礫石隔砂(Frac pack)、擴張型防砂篩管(Expandable sand screens, ESS)等。礫石隔砂是以礫石填充於裸孔或套管外，再以一層篩管隔離礫石；液裂礫石隔砂則為在填充礫石之前先施作液裂，再以礫石填充液裂所形成之裂縫。礫石的粒徑選擇原則，依岩樣的粒徑分布取中值乘以 6 為礫石隔砂粒徑，依粒徑分布取中值乘以 8 為液裂礫石隔砂粒徑，防砂網目數則取岩樣的粒徑分布最小的 50%~75%。若岩樣的粒徑分布過大，防砂可能會失敗，此外，防砂也會形成地層汗損(Skin)。



礫石隔砂(Gravel Pack)示意圖

擴張型防砂篩管(ESS)屬於近年的新技術(10~15 年)，目前應用仍不多，其原理為將篩管在井下以器材撐開貼合井壁，避免井壁崩塌出砂，理論上可達到無汗損(0 skin)。



擴張型防砂篩管(ESS)結構圖

## (十二) 生產操作總結

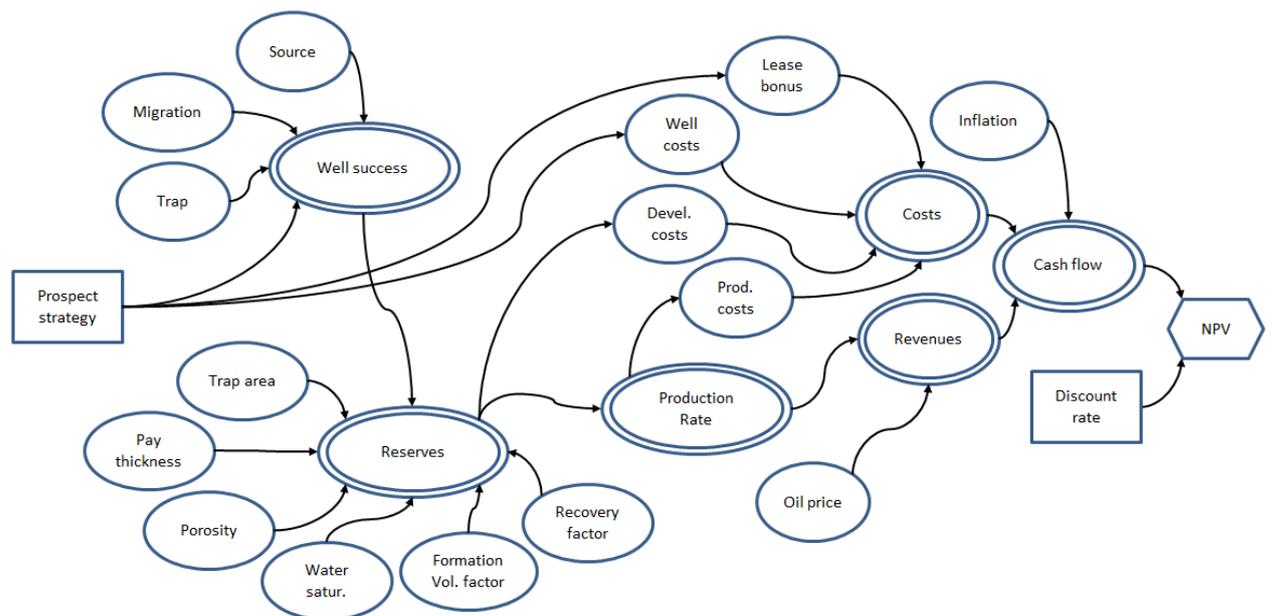
生產操作涉及的範圍很廣，必須從地質、震測、電測、鑽井、試油氣、完井、生產等資料中，彙整並設計出適當之開採方式，並評估可能面對之生產狀況，事先預防遠比事後處理來的簡易且便宜。在評估礦區價值時，亦應該從有限的資料中預估開發方式及對應的生產營運費用，以使成本估計符合現實，提高經濟評估的準確性。

### 經濟分析及決策分析(Petroleum Economics & Decision Analysis)

經濟分析是我任職於礦區拓展處主要之工作，在努力鑽研之後仍覺得自己有所不足，亦常時懷疑自己是否考慮足夠周延，想到公司的投資決策就建立在我計算出的數字，不免令我戒慎恐懼如履薄冰。因此在選擇本次研究內容時，也特別納入經濟分析相關之課程，期許自己能對相關知識有更深入的理解，以下即摘要課程重點及學習心得：

#### (一) 經濟分析概述

相較於會計是計算公司過去的收支，經濟分析則是預測未來，油氣資產評估的變數包含地質地物條件、油氣蘊藏量、開發計畫、財稅條款、油氣價等，所有的參數都是估值且具有不確定，因此無論經濟分析模型做得再仔細，其結果絕對是錯的。然而，如何計算出足夠接近現實的數字，以供公司做為決策判斷，則需靠經濟分析人員的專業及努力。

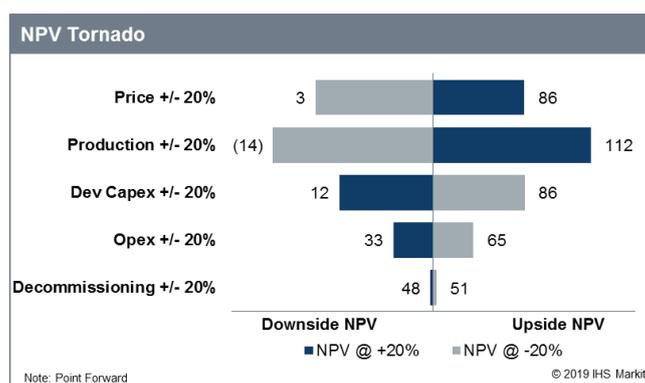


經濟分析流程

目前國際上最常使用之經濟分析工具，第一個為淨現值(Net present value, NPV)，此方法的是將未來的現金流量，全部折現成投資初始日的價值，假設加總的現值為正數，代表該油氣資產值得投資，值得注意的是折現率的使用，一般來說，折現率應該貼近公司的自有資金成本率，過去有些做法是將礦區風險反應在折現率裡，但折現率應只反映通貨膨脹的風險，地質及開發風險應以其他方式計算，另外，Excel 內計算 NPV 的公式易有誤導，其計算公式將第一個數字視為第一年年底折現了一次，使用 Excel 時需注意此誤差；第二種分析工具為折現投資報酬率(Discounted return on investment, DROI)，其原理相似於投資報酬率(Return on investment, ROI)，將報酬折為現值以考慮時間成本，其公式為  $DROI = NPV / (PV \text{ of investment})$ ，investment 定義通常指全案的資本支出(Capex)，但若只是比較各投資案的排序，只要計算基礎一樣即可，一般油公司在 DROI 30%~40% 以上才會考慮投資；第三種分析工具則為本公司常用的內部投資報酬率(Internal Rate of Return, IRR)，原理是利用內插法計算折現率，使投資的淨現值恰好等於零，其折現率即為內部投資報酬率。

## (二) 敏感度分析

面對經濟分析的不確定性，過去我們的作法是先以繪出單變數的龍捲風圖，計算顯著影響經濟效益的因子，再以雙變數運算列表計算顯著因子變化時，經濟分析結果的變化。



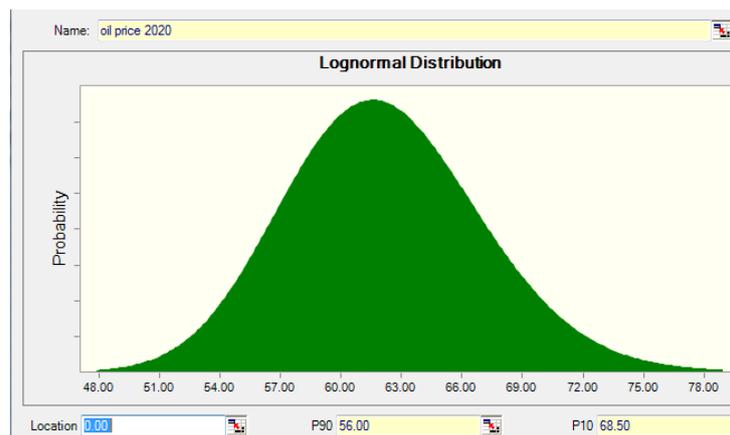
單變數龍捲風圖

		Price				
		-20%	-10%	0	10%	20%
Production	-20%	-53.0	-32.7	-14.3	2.1	16.6
	-10%	-24.9	-2.3	18.3	36.2	51.6
	0	2.6	27.7	49.4	68.6	85.5
	10%	30.8	57.1	80.8	101.9	120.4
	20%	57.6	86.1	111.8	134.7	154.6

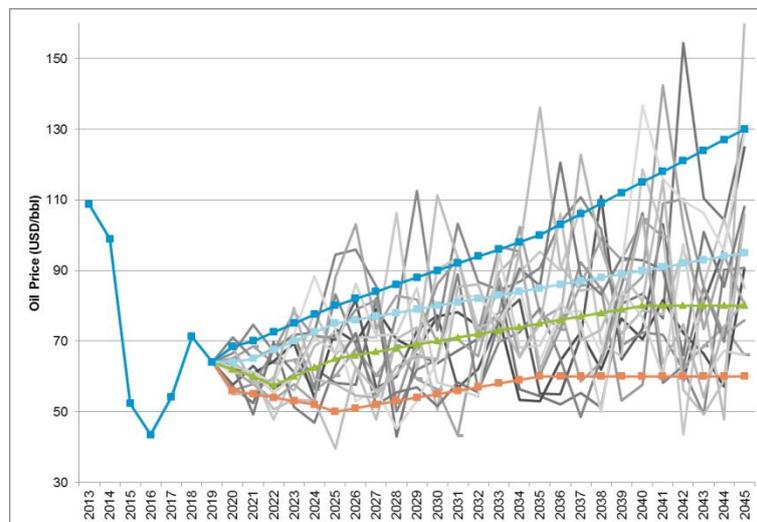
雙變數敏感度分析

除了單變數和雙變數敏感度分析之外，蒙地卡羅法(Monte Carlo method)也可以應用於經濟分析。蒙地卡羅法又稱統計模擬法、隨機抽樣法，以電腦依照特定的機率分布選擇隨機數，多次計算結果並統計其分布，將不確定性的因素轉變為直觀的數值。油層中的體積法即運用蒙地卡羅法，將儲層厚度、面積、孔隙率、水飽和度、體積因子、採收率等，隨機取樣後相乘計算蘊藏量，計算多次(一千次以上)統計其結果分布，取得蘊藏量的 P10、P50、P90、Pmean。

蒙地卡羅法應用於經濟分析，可利用其隨機取樣的特性，使預測更符合真實情況，舉例來說，過去經濟分析油價會以本公司內部評估或第三方之估計值，通常會依照不同的情境，並以一個固定的增長率(escalation)，計算未來油價。然而實際的油價一定會有上下波動，所以可以利用蒙地卡羅法，將每一年度的油價設為一個機率分布，將悲觀的油價預測設為 P90、樂觀的油價預測設為 P10 的對數常態(lognormal)分布，意思是 90%的機率油價會大於悲觀的預測，10%的機率會大於樂觀的油價，依照該機率由電腦隨機選取。

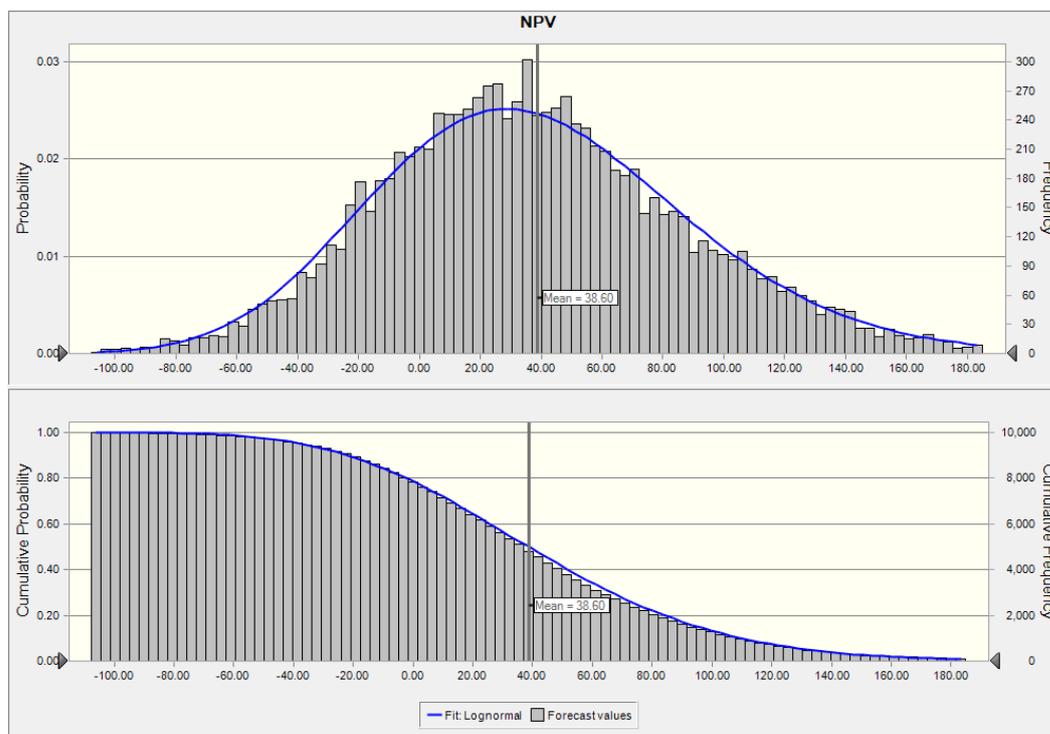


單年度油價 lognormal 分布



4 種油價預測及以蒙地卡羅法取樣 15 次之油價分布

我們無法預測未來真實的狀況，但是藉由蒙地卡羅法的隨機取樣，取得可能的機率分布，因此除了油價之外，蘊藏量、探勘費用、開發費用、操作費用、封廢費用、通貨膨脹率皆可套用適當的機率分布，並計算一萬次淨現值(NPV)，取得其分布作為決策的依據。



蒙地卡羅法計算一萬次淨現值分布圖

Statistic	Fit: Lognormal	Forecast values	Percentile	Fit: Lognormal	Forecast values
Trials	---	10,000	P100	-369.79	-151.68
Mean	38.60	38.60	P90	-25.51	-22.79
Median	35.32	34.78	P80	-5.74	-4.34
Mode	28.84	62.42	P70	9.22	9.94
Standard Dev	52.06	52.27	P60	22.50	22.45
Variance	2,710.17	2,732.37	P50	35.32	34.77
Skewness	0.3845	0.5110	P40	48.56	47.19
Kurtosis	3.26	3.96	P30	63.21	61.12
Coeff. of Vari	1.35	1.35	P20	81.00	79.31
Minimum	-369.79	-151.68	P10	106.90	106.66
Maximum	正無窮大	335.42	P0	正無窮大	335.42
Mean Std. Err	---	0.52			

蒙地卡羅法計算一萬次淨現值統計結果

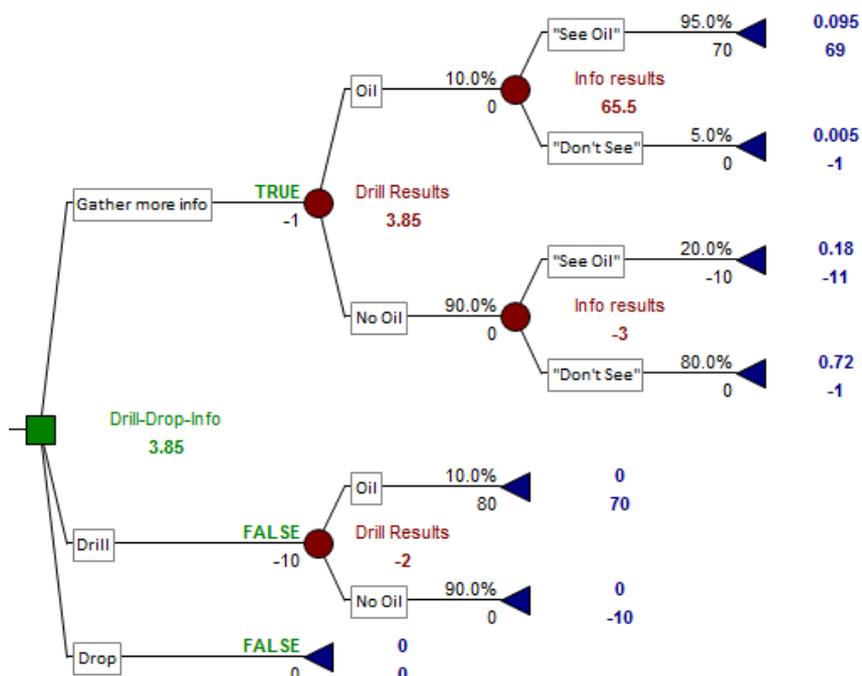
依據蒙地卡羅法計算一萬次後，可以得知本案例的平均淨現值(Pmean)為 38.6 百萬美元，P70 開始淨現值為正值，意思就是本案有 70%的機率為正收益。目前本事業部尚未建立依據蒙地卡羅法所訂定的決策標準，但此方法可輔助以較宏觀的角度檢視經濟分析結果，跳脫原本以單一數值做決策的盲點。

### (三) 經濟分析常見偏差

Edward Merrow 在著作 Mega Project 中，統計了油氣產業中超過 10 億美金的投資案，超過 80% 的案子投資額超過預算 35%、時間延遲了 35%、產量低於預期 35%。顯示人們通常會低估極限值的可能性，例如預測油價分布的上下限通常過於保守，常見的偏差可分為無意識及有意識，無意識偏差包含過度自信、定錨點、經驗法則、自我說服等，有意識的偏差包含目的導向、隱藏資訊、壓力、保守等。要避免機率估計的偏差，可以藉由同儕審查(Peer review)來檢視資料的合理性，亦可以藉由訓練提高評估人員對機率的敏感度，並且評估時數值應盡量建立在專業且符合實際，決策時才決定以保守或積極的態度看待投資機會。

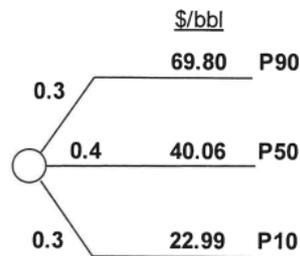
### (四) 決策分析工具

1. 決策樹：決策樹是常見的風險分析及決策輔助工具，繪製時通常包含三種類型的節點，決策節點用矩形框來表示；機會節點用圓圈來表示；終結點用三角形來表示。決策和風險分析中，審視未來並試圖了解可能發生的事以及其關鍵與否，決策樹分析是一種簡單且可以量化的技術，且其視覺化的圖表易於理解和解釋，並且可以應用於許多狀況。然而其缺點為對於連續性(Continuous event)的資料較難處理，並且當決策及機會節點太多時，決策樹將難以處理且容易犯錯。



決策樹範例

2. Swanson-Megill Method : Swanson-Megill Method 是一種經驗法則，用於處理連續性(Continuous event)的資料，適用於母體資料以對數常態(lognormal)分布時，在機會節點分別給 P10、P50、P90 數值 30%、40%、30%的機率，其意義為用 P10 的數值代表前 30%機率的平均，以此類推。



Swanson-Megill Method 範例

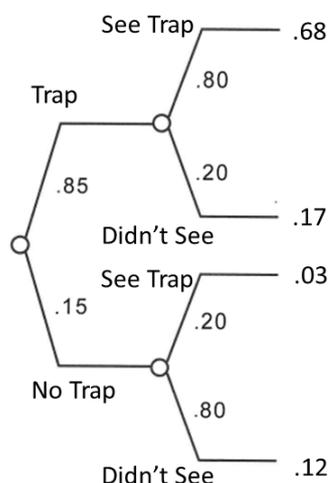
3. EMV : Expected monetary value 預期貨幣值，又稱風險期望值，是將風險與機會定量分析的一種方法，常和決策樹一起使用，它是將特定情況淨現值和發生概率相乘，意即淨現值的期望值 E(NPV)。注意決策樹中僅有 Pmean 可以互相加減，故每一個終結點應是該條件機率的 Pmean 值。

4. Bayes' theorem : 貝氏定理用以描述事件 A 與事件 B 條件機率之間的關係。

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)}$$

$$\text{或是, } P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B|A)P(A) + P(B|\bar{A})P(\bar{A})}$$

其中 P(A| B)是條件機率(conditional probability)，意思是已知事件 B 發生的情況下，事件 A 發生的機率。貝氏定理的應用範例如下，假設已知某礦區的蓋岩有 85%的機會存在，而地球物理師在蓋岩真實存在的情況下，有 80%的機率判斷其有蓋岩；在蓋言並不存在的情況下，有 20%的機率判斷其有蓋岩，以決策樹分析列出可能性：



帶入貝氏定理公式：

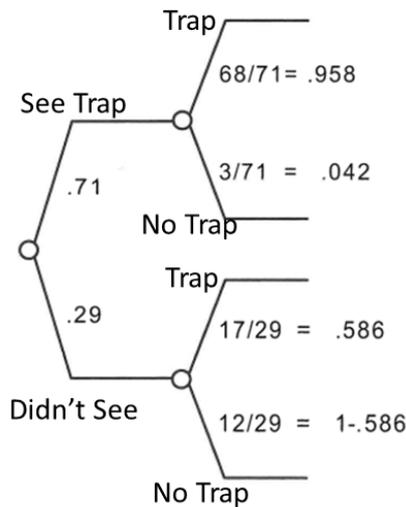
$$P(T|\bar{S}) = \frac{P(\bar{S}|\bar{T})P(\bar{T})}{P(\bar{S}|\bar{T})P(\bar{T}) + P(\bar{S}|T)P(T)} = \frac{P(\bar{S}|\bar{T})P(\bar{T})}{P(\bar{S})}$$

$$= \frac{0.8 \times 0.15}{0.8 \times 0.15 + 0.2 \times 0.85} = \frac{0.12}{0.12 + 0.17} = 0.414$$

以表格重寫各發生機率：

	See Trap	Didn't See	
Trap	.68	.17	.85
No Trap	.03	.12	.15
	.71	.29	1.00

以決策樹重新分配可能性：



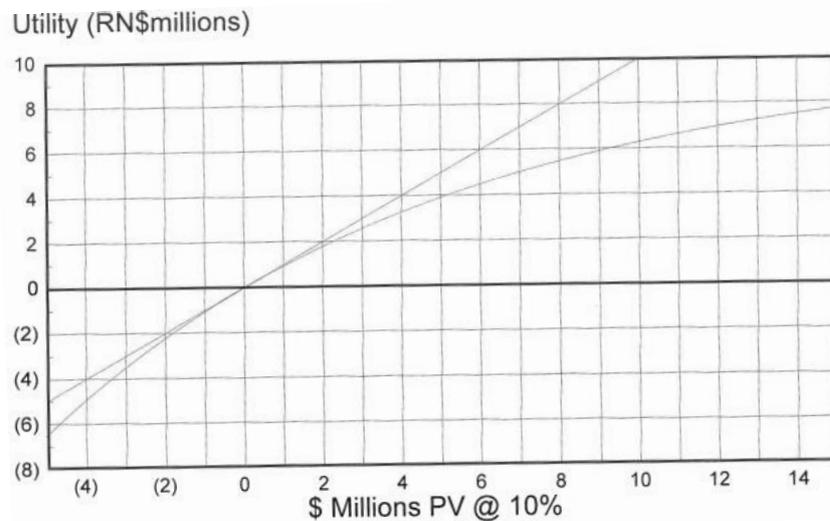
經貝氏定理分析後，我們可以得到結論地球物理師有 71%的機率會判斷本礦區有蓋岩，而其中 95.8%的機率會判斷正確，而 29%的機率會判斷沒有蓋岩存在，但事實上其中 58.6%有蓋岩。依據貝氏定理的應用，我們可以更準確地給予決策樹中的可能機率。

5. Risk Tolerance Coefficient：可簡稱為 R value，數值越高代表公司可承受的風險越高，單位是金額，數值本身並無意義，其目的為將風險承受計算入決策樹中的期望值，使其成為可比較之數字，通常小公司因風險承受度較低，比較注重 R value 的訂定。將 R value 帶入 Exponential utility function 如下：

$$EU(x) = r \times (1 - e^{-x/r})$$

其中 x 為現值(Present value, PV)，r 為 R value，e 為自然對數的底數。

現值經 R value 轉換後，可以畫出下表，當正收益越高時，增加的收益效益越小，當有負收益時，每增加的損失將影響更大。

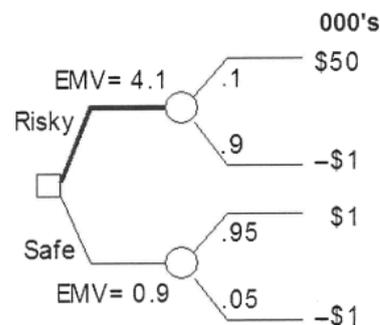


EMV 及 EU 比較圖

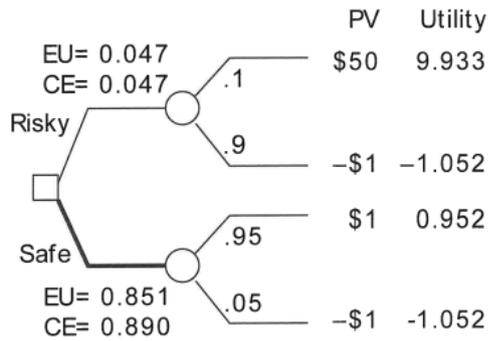
6. Certain equivalent, CE：可翻譯做確定性等值，是 R value 的延伸，經公式換算後，可以得到一數值，其意義為公司以該無風險的金額放棄未來的期望值，以礦區舉例，若某公司的探勘礦區具有 1000 萬的期望值，但願意現在以 300 萬的現金轉讓，則 300 萬即為該公司對此探勘礦區的確定性等值。其公式如下：

$$CE = -r \times \ln(1 - EU/r)$$

R value 和 CE 之應用以範例說明如下，若有 1 k 美元可以投資，選擇高風險的標的可得到 4.1 k 美元的期望值，低風險的標的可得到 0.9 k 美元，依期望值(EMV)判斷應選擇高風險標的：



若在相同的條件下，我們若設定 R value 為 10 k 美元帶入公式， $EU(x) = 10 \times (1 - e^{-50/10}) = 9.933$ ，可將各現值(PV)換算，重新計算出 EU 值，相比較後可得出原本期望值較高的高風險標的，其 EU 值低於低風險標的(0.047 < 0.851)，因此低風險標的成為較好的選擇。



計算出 EU 後，可再帶入 CE 公式， $CE = -10 \times \ln(1 - 0.851/10) = 0.89$ ，即表示該公司訂定 R value 為 10 k 美元的情況下，若能以 0.89 k 美元以上售出低風險標的，將比投資 1 k 美元在低風險標的更為有利。CE 值亦可用來檢視 R value 訂定是否符合公司的風險管控策略。

7. 模擬及最佳化(Simulation and optimization)：在決策影響因子太多，或者可選擇的方案太多時，決策樹將變得太大且容易出錯，因此可以利用軟體進行模擬分析及最佳化。案例如下，若有 20 個探勘標的，其個別有不同的探勘成本、探勘成功率，並可決定工作權益及是否要讓出權益分攤風險：

Project	CoS	Test	Success cases		Project Years					Success NPV	Failure NPV	EMV	PI
			InvYr1	OCFYr1	OCFYr2	OCFYr3	OCFYr4	OCFYr5					
1	20%	49.5	150	57	305	162	107	55	368.6	-47.2	36.0	0.45	
2	25%	30.7	283	102	613	331	197	103	798.5	-29.3	177.7	1.75	
3	15%	18	115	45	239	144	92	59	341.1	-17.2	36.5	1.04	
4	5%	20.7	169	61	274	180	118	76	390.6	-19.7	0.8	0.03	
5	20%	5.2	26	11	49	32	19	12	69.9	-5.0	10.0	0.96	
6	16%	35.2	63	27	137	84	48	27	169.0	-33.6	-1.2	-0.03	
7	42%	29.3	73	31	125	83	43	25	152.9	-27.9	48.0	0.80	
8	27%	4.6	42	16	55	34	22	14	70.2	-4.4	15.7	0.98	
9	48%	3.7	36	14	66	35	21	14	84.4	-3.5	38.7	1.84	
10	8%	48.7	282	91	608	380	223	129	841.6	-46.4	24.6	0.35	
11	21%	40.5	54	25	136	86	49	29	173.4	-38.6	5.9	0.11	
12	18%	40.9	69	32	219	134	93	50	320.3	-39.0	25.7	0.48	
13	16%	19.4	89	27	208	123	85	50	293.1	-18.5	31.4	0.93	
14	16%	0	0	7	52	31	21	13	99.7	0.0	16.0	100.00	
15	49%	32.2	34	15	120	80	41	24	163.2	-30.7	64.3	1.32	
16	8%	31.9	236	75	419	289	159	103	588.0	-30.4	19.1	0.38	
17	20%	11.2	19	6	32	21	11	6	33.0	-10.7	-2.0	-0.13	
18	22%	9.6	30	15	40	25	15	8	46.9	-9.2	3.1	0.19	
19	38%	0.2	2	1	3	2	1	1	4.4	-0.2	1.5	1.56	
20	22%	7.3	40	13	67	40	23	13	81.8	-7.0	12.5	0.78	

在探勘預算有限的情況下，必須排列探勘標的的優先順序，而我們可以藉由軟體的協助，設定不同的變數值，藉由蒙地卡羅法的基礎，持續測試以找出最佳解。

#### (五) 經濟分析及決策分析結論

本次透過參與經濟分析及決策分析課程，協助我釐清許多基礎觀念，並學習將統計觀念帶入經濟分析模型，將經濟分析得到的單一解轉換為一個連續分布的範圍，有助於對經濟效益有更宏觀的分析。

決策分析的工具在過去雖然有使用，但並未被重視，事實上決策分析可以應用在很多面向，其有助於公司做出正確決策，好的決策不一定會有好的結果，好的結果也不代表好的決策，但若能夠持續應用決策分析選擇對公司有利的方向，長遠下來公司必定會正向的成長。

#### 四、心得與建議

本次專題研究計畫在初期規畫時，將重點放在強化經濟分析專項及非傳統油氣的技術及評估，並希望能實際至礦場觀摩非傳統油氣的開發及生產，可惜本公司取得美國頁岩氣資產時程未如預期，失去了前往現場實習的機會，原本安排了數個非傳統油氣相關訓練也因人數不足相繼取消。慶幸轉而參加生產開發及油層工程訓練，仍收穫良多，對於油氣開發、設計重點、人工提舉技術、生產阻礙及排除方法有全面性的認識，強化了整體礦區評估的專業知識。

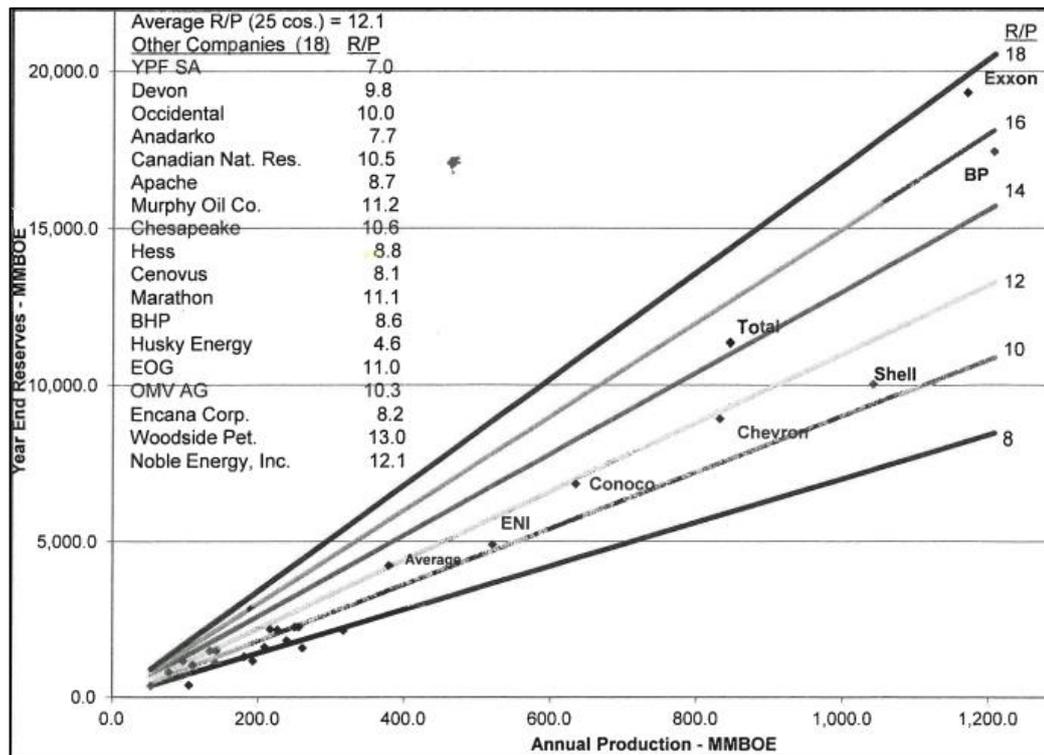
經濟分析相關的研究，則深入學習進階技能，尤其是統計學及蒙地卡羅法的應用，可使經濟分析結果由點變成線，由更宏觀的觀點檢視經濟分析結果，並且導入決策分析的應用，將線提升至面的層次。過去本事業部較少在工作中應用決策分析技術，然而其應是一個強而有力的工具，尤其油氣探勘是一個高風險高報酬的產業，因此，未來嘗試將決策分析導入礦區評估中，期許藉由數值分析研判，讓礦區評估之決策更為精準且正確。

參與訓練的學員來自世界各國的油公司，各有不同專業背景、專研不同礦區，課程中藉由小組討論激起許多火花，學習到了各個公司的現況、分工、文化、技術特長，以及如何培養專業人才。在訓練過程中也遇到台灣的同業，互相交流工作概況及探勘策略，發現有許多值得本公司師法的地方，該同業除了參與訓練課程外，安排數週前往該公司持有工作權益的礦場，學習現場經驗及累計經營技術，有規劃地朝著擔任美國礦區經營人而佈局，從討論中可以感受到他們對技術及市場都有很深的見解。

相對而言，本公司除了自己擔任經營人的礦區，應思考如何從參加中礦區向經營人學習更多的專業技術。本公司持有的礦區涵蓋全球陸上及海域礦區，且投入了大量金額，若未能向經營人學習相關技術，實屬可惜。當然，經營人不見得都願意分享關鍵技術，甚至借調人員也可能不被重視，但公司若能建立良好的態度及積極度，讓經營人了解我們是能提供建樹及幫助，建立雙方互信，相信經營人不只是願意提供技術的交流，甚至是其他礦區的合作機會及市場資訊。就我所

了解，本公司在洽談中的美國礦區設有由經營人代訓之條款，過去也曾經派員至厄瓜多礦區訓練，期望公司未來能善用這些資源，培養年輕新進人員，使本公司技術能接軌國際。

在經濟分析課程中，導師介紹了全球大油公司的年度蘊藏量及產量比，顯示了一個成熟且成功的上游油氣公司，其年度蘊藏量及產量比應介於 10~12 之間，我們應努力向此目標看齊。



2015 年度油公司蘊藏量及產量比

最後，感謝長官及公司給予我此次機會，願能不負公司的培育，將我所學應用於工作之中，為公司做出貢獻。