

出國報告（出國類別：國外專題研究）

“氣田生產末期增產研究”進修報告

服務機關：台灣中油公司探採研究所

姓名職稱：范振暉，石油開採工程師

派赴國家：英國

出國期間：96年10月14日~97年4月13日

報告日期：97年7月11日

摘要

本公司國內陸上之油氣田大多已進入生產末期，除鐵砧山氣田已轉為儲氣窖外，其他氣田如出磺坑、錦水、永如山、青草湖等，生產井面臨因出水或氣層壓力降低而停產的情況相當嚴重，導致產量逐年下降。這些停產的生產井或因出水而停產，或因井眼污損或生產層滲透率較差而停產，但部分生產井如經激產措施(Stimulation)處理，應仍具再生產之潛能，因此，為增加產量，提高採收率，延長國內陸上天然氣之生產，修井復產工作亟待展開。

為強化提升在油氣田增產、修井復產技術之能力，本次國外專題研究之重點在於油層工程(Reservoir engineering)及生產工程技術(Production engineering)，因此赴英國倫敦大學帝國理工學院(Imperial College, University of London)之在職進修中心(Centre of Professional Development)與石油工程碩士班合作開設之課程進修上述相關技術。

由於時間與經費之限制以及本專題之研究重點，無法也沒有必要全程參與所有的課程，因此只選讀與研究主題相關之課程，共六門課程，包括：流體在孔隙介質中之流動、測井、生產電測、生產工程與單井生產能力分析、經濟分析及工安環保。

目前國際油價節節高漲，已經逼近每桶原油 150 美元，幾乎是天天都在創歷史新高，雖然說現在的高油價不乏人為政治操作的因素，但是就以供需面來講，油價要再跌回一、二年以前的價位，機會非常渺茫，而且在這樣的高油價的外在條件刺激下，各種替代能源將陸續出現，所以各大油公司莫不卯足全力進行探勘。本公司亦應把握住這個機會，加緊海域 F 構造開發的腳步，同時利用這個機會大量培植中生代及新人，使本公司數十年的探探經驗得以傳承下去。另外，減碳的工作已經成為世界各國不得不面對的挑戰，減碳議題也已經開始在國內延燒。在眾多減碳的方式中，地下封存無疑是現階段減碳技術中最具可行性也最成熟的選項。在台灣，本公司是唯一具有二氧化碳地下封存最全面性相關技術與知識的單位，實應利用現在各界對減碳要求的時機點，主動積極投入二氧化碳地下封存的相關工作，對本公司來說，其實也是為國內的探勘找到一個可能的方向，相當值得公司領導階層好好地思考。

目錄

摘要	2
一、 前言	4
二、 進修課程內容概要	5
(一) 測井分析	5
(二) 流體在孔隙介質中之流動	8
(三) 生產電測	9
(四) 採油工程/產能分析	10
(五) 經濟分析	12
(六) 工安環保	14
三、 心得與建議	15
附件：水沖排簡介—專案報告	17

96 年度國外專題“氣田生產末期增產研究”進修報告

一、前言

本公司國內陸上之油氣田大多已進入生產末期，除鐵砧山氣田已轉為儲氣窖外，其他氣田如出磺坑、錦水、永如山、青草湖等，生產井面臨因出水或氣層壓力降低而停產的情況相當嚴重，導致產量逐年下降。這些停產的生產井或因出水而停產，或因井眼污損或生產層滲透率較差而停產，但部分生產井如經激產措施(Stimulation)處理，應仍具再生產之潛能，因此，為增加產量，提高採收率，延長國內陸上天然氣之生產，修井復產工作亟待展開。

為強化提升在油氣田增產、修井復產技術之能力，本次國外專題研究之重點在於油層工程(Reservoir engineering)及生產工程技術(Production engineering)，因此赴英國倫敦大學帝國理工學院(Imperial College, University of London)之在職進修中心(Centre of Professional Development)與石油工程碩士班合作開設之課程進修上述相關技術。帝國理工學院石油工程碩士班課程包含的領域涵蓋所有石油工程相關技術共五大類二十一門課程，包括基礎類(Fundamentals)之石油地質(Petroleum geology)、岩石特性(Rock properties)、石油地球物理概論(Basic petroleum geophysics)、油氣蘊藏量(Hydrocarbon in place & reserves)、油層流體(Reservoir fluid)、流體在孔隙介質中之流動(Flow in porous media)、油層特性描述類(Reservoir characterization)之生產機制(Production mechanism)、測井(Well testing)、從靜態至動態之不確定性模型分析(Uncertainty modeling from static to dynamic)、岩石物理(Petrophysics)、流體取樣分析(Fluid sampling & analysis)、生產電測(Production logging)、油層模型建立(Integration into reservoir model)、單井表現類(Well performance)之鑽井與完井(Well construction: Drilling and completion)、生產工程與單井生產能力分析(Production engineering/Well performance)、油層表現類(Reservoir performance)之油層生產預測(Reservoir performance prediction)、油層數值模擬(Numerical reservoir simulators)、規模級放(Upscaling)、經濟分析(Economics)以及整體開發類

(Field development)之製程工程與地面設施(Process engineering & surface facilities)及工安環保(Health, safety & environment)等。

二、進修課程內容概要

由於時間與經費之限制以及本專題之研究重點，無法也沒有必要全程參與所有的課程，因此只選讀與研究主題相關之課程，共六門課程，包括：流體在孔隙介質中之流動、測井、生產電測、生產工程與單井生產能力分析、經濟分析及工安環保。茲就上述六門課程之學習研究心得歸納於後。

(一) 測井分析(Well Test Analysis)

本課程之目的在了解測井分析之基本概念，學習可藉由測井分析獲得何種資訊，並且利用各種前人發展出來的方法解釋測井的結果，同時介紹比較目前業界常用的幾種商業測井分析軟體。

測井是油氣田管理中非常重要的一個環節，是油層特性描述以及單井產能分析預測不可或缺的一項工具。所謂測井以及測井分析就是對一口井施以某種生產條件之改變，然後觀測因為此種變化而產生的反應，再藉由兩者的實測資料，以種種方法推導兩者之間可能的關係。舉例來說：

Input (I) → System (S) → Output (O)

當 $I = (1, 2, 3)$, $O = 6$, $S = +$ or x ，屬於雙向關聯的問題(Inverse Problem)，會有不只一個結果；

當 $I = (1, 2, 3)$, $S = +$, $O = 6$ ，屬於單向直接問題(Direct Problem)，只一個結果；

當 $S = +$, $O = 6$, $I = (1, 5)$ or $(2, 4)$ or $(3, 3)$，屬於雙向關聯問題(Inverse Problem)，不只一個結果。

將此概念應用於石油工程，或者更明確地說測井時，Input 可以是人為調整一口井的產率或關井等等，Output 可以是井底流壓的變化，而 System 則是整個油氣層，包含種種特性參數，例如滲透率、均質性、裂縫存在與否及密度等等。透過種種不同的方法與資料，可以建立一

個與真正的系統有相同表現模式的模型，此一步驟稱之為 **Model Identification**。模型建立後，必須經過種種測試以及各種參數的修正，使模擬得到的 **Output (結果)**與真實的 **Output(測量值)**相同，此一步驟稱之為 **Model Parameter Calculation**。第三步驟為模型的驗證(**Model Verification**)，也就是以已知的資料輸入建立的模型，驗證得到的結果是否與實測數據相符，特別要注意的是所採用的模型參數是否在合理範圍。一旦模型成功建立之後，可以做為預測單井甚至油氣田產能表現之工具。

控制影響井的反應的因素可依與井孔之距離分為三大類，分別為井孔周圍效應(**Near wellbore effects**)、油氣層特性行爲(**Reservoir behaviour**)以及邊界效應(**Boundary effects**)，這三大類因素對井所產生的影響會發生在不同的時期，距離近的出現在早期，距離遠者則較晚出現。表一為各類因素之歸納。

表一、

Near Wellbore Effects	Reservoir Behaviour	Boundary Effects
<ul style="list-style-type: none"> ● 井孔容積效應 (Wellbore Storage) ● 膚表因子(Skin) ● 裂縫(Fractures) ● 局部穿孔(Partial Penetration) ● 水平井(Horizontal Well) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 均質(Homogeneous) <ul style="list-style-type: none"> ● 非均質 (Heterogeneous) <ul style="list-style-type: none"> ✓ 雙孔隙率 (2-Porosity) ✓ 雙滲透率 (2-Permeability) ✓ 綜合效應 (Composite) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 無限延伸(Infinite Extent) ● 特定產率(Specified Rates) ● 特定壓力(Specified Pressure) ● 不封閉斷層(Leaky Boundary)
Early Times	Middle Times	Late Times

表二、測井分析技術之發展演化

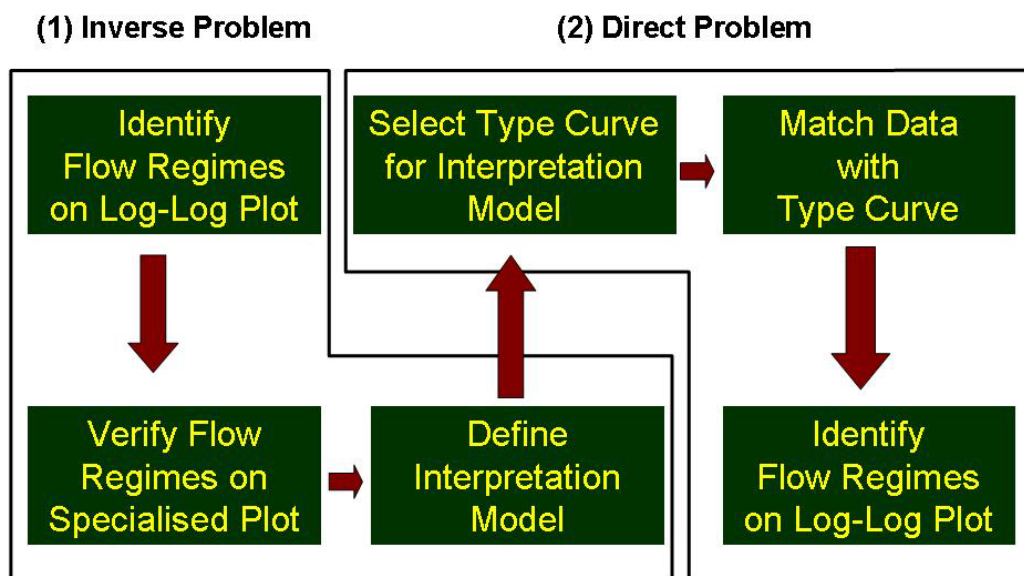
Time	Analysis Method	Identification	Verification
50'	<i>Straight lines</i>	Poor	None
70'	<i>Pressure Type Curves</i>	Fair (limited)	Fair to Good
80'	<i>Pressure Derivative</i>	Very Good	Very Good
00'	<i>Deconvolution</i>	Much Better	Same as Derivative
Next	?	>>>	>>>

(二) 流體在孔隙介質中之流動(Flow in Porous Media)

本課程之主要目的在介紹控制單相流體在孔隙介質中流動的擴散公式，同時提出部分與測井分析相關問題之數學解，並且導出控制多相流以及氣體在孔隙介質中流動的基礎公式。至於本課程的目標為了解擴散公式的推導及其中之基礎參數例如 **Mobility** 與 **Storativity**，同時介紹這些相關數學解的基本假設以及無因次時間與壓力的概念，進一步了解熟悉時間與空間疊加(**Superposition**)概念之應用。

不同的井況、地質條件與油層特性如滲透率、幾何形狀、裂縫等等，會有不同的流動模式(**Flow regime**)，所以當我們要了解並建立油層模型時，首先必須要診斷確認所謂的流動模式。過去前人提出許多不同的方法來達到這個目的，像是 **Log-Log Plot** 或是 **Horner Plot** 等等，藉由這些技巧，配合各種不同條件及情況下之典型曲線(**Type curves**)的比對運用，可以得到最符合真實情況的模型，再依此模型進行後續的工作。

舉例來說，一口井不管是開井生產(產率由小而大)或是關井(產率由大而小)，都有所謂的典型曲線，亦即 **Drawdown Type Curve** 和 **Build-up Type Curve**，代表在某種“典型”條件下生產或關井的反應。從這樣的分析，可以獲得許多資訊，像是膚表因子、地層流動均質性、斷層封閉性等等。圖一為典型曲線分析程序。



圖一、典型曲線分析程序

(三) 生產電測(Production Logging)

生產電測是採油工程及油層工程中非常重要的一項工具，工程師可藉由判讀生產電測得之油氣生產的來源及分配比例，進而了解井底油氣生產狀況，釐定最適當的修井方案，特別是在多層共層生產的生產井。最理想的狀況是單層生產，因為如果出現產率下降或出水、出砂等問題時，可以很明確地判斷問題的根源。但是很多時候，由於單一生產層厚度不足或產率未達經濟規模，因此必須結合數個生產層一起生產才能具生產價值。但也因為如此，當有問題發生時，往往不易確定到底哪一層出問題，又或者所有的層都有狀況。在這種情況下，生產電測是最好的工具去找出發生問題的層次。

本課程的內容主要在介紹生產電測的應用及影響其讀值的因素、普遍使用的生產電測工具及其原理、基本單相流與多相流的判讀，另外亦指出本技術及判讀軟體的一些使用上的限制。

生產電測其實是結合許多種電測技術，對已完井的井施測，以評估井本身或油氣層的生產或擠注能力。其目的在結合以種種測井技術對已完井之生產井或注氣井進行單井產能或整體氣田產能之評估。利用生產電測之技術，提供有關油氣田特性及流體行為儘可能詳盡的資料與知識，將一系列包括流體種類與產率(或注入率)的量測值與井深做圖建立關係，藉以得到井的產能表現，再與初完井時的產能進行對比，以了解該井之產能、產率等是否有改善的空間。

就如同人生病就醫一樣，醫生在做進一步的檢查之前通常會先問診以及了解病患的病史，以便可以找對方向，做出正確的診斷。生產電測就類似這樣進一步的檢查，因此在進行生產電測之前，需要就井的問題做初步的診斷，例如穿孔區間、油氣層之深度、厚度及分佈等等，有了初步的基本資料及問題的了解後，假如是出水的狀況，可以利用生產電測判斷到底水的來源是水錐(Coning)或是貫穿(Channelling)，抑或是套管或填塞器破裂等等原因，再針對原因研擬整治修井的方式。

(四) 採油工程/產能分析(Production Engineering/Well Performance)

油氣生產井簡單來說可以定義為連通地底下儲油氣層與地面油氣處理設備兩者之間的通道。這個連通的介面是要將油氣層中的流體生產至地面所必要的元件，是為公司的有形資產。為達到最佳化的生產，一口井的設計涉及相當多方面的考慮，所謂最佳化的生產指的是達到最大的投資報酬率。

以單口井而言，其排掃範圍的大小對該井的產能扮演非常重要的角色，一口井與該井排掃範圍內的油氣層組合成一個系統，稱之為生產系統。一個簡化的生產系統包含了以下幾個要素：

- * 孔隙介質(Porous medium)
- * 完井(Completion such as stimulation, perforations and gravel pack)
- * 包含井內安全閥及節流嘴的垂直通道(Vertical conduit with safety valves and chokes)
- * 包含節流嘴的水平管線以及其他的管線元件，例如閥及灣管(Horizontal flowlines with chokes, and other piping components, for example valves and elbows)

在一個油或氣的生產系統中，流體由排掃範圍內之油氣層流到地表的分離器中。排掃範圍內油氣層之平均壓力稱為平均地層壓力，這個壓力控制著生產系統中流體的流動，而且這個壓力通常假設它在生產過程中一段固定的時間內是維持不變的。當平均地層壓力改變，井的產能也會跟著改變，因此需要重新進行產能評估。在正常的生產過程中，平均地層壓力會隨著生產而逐漸遞降，但亦有可能人為的因素而維持甚至增加，例如激勵生產而採取的注水、注氣或者擠注化學物質。而地面分離器的壓力是為为了使生產最佳化，同時使部分較輕的成份保持在液相的設計，當井生產時，油氣層和分離器之間存在一個連續的壓力梯度，在進行分析時，通常假設井口流壓與分離器的壓力相等，這是因為分離器所處的位置常位於井口或者距離井口很近的地方，井口與分離器間管線之壓力漏失可以忽略。

在單井產能評估時最被廣泛應用的技術為節點分析(Nodal analysis)，

所謂節點(Node)指的可以是在一生產系統中介於排掃範圍的邊界到分離器中間的任意一點，而該點的壓力可由一流率之關係式計算出來。在生產系統中的兩的端點分別為排掃範圍的邊界以及分離器，這兩點的壓力分別以平均地層壓力(P_r)及分離器壓力(P_{sep})表示。另外兩個重要的節點為井底以及井口，壓力分別以(P_{wf})及(P_{wh})表示。如果節點處的壓力可確實量測或經由計算而得，則在二節點之間的壓力漏失(Pressure loss)可用一流率(Flow rate)的關係式計算出來。再者，在系統中可能會有一些其他的節點，流體流過這些節點時會有壓力降，例如井內安全閥或者節流嘴等，這些節點稱之為功能性節點(Functional nodes)。系統中的每一個因子例如孔隙介質、完井、油管及節流嘴等，其流率(q)均可由通過該節點差壓降(Δp)的關係式表示：

$$q=f(\Delta p)$$

利用節點分析技術，生產工程師可以對整個生產系統深入了解，並據以做出最佳化的設計與規劃。

(五) 經濟分析(Economics)

經濟分析其實在各行各業都是非常重要而且關鍵的一環，特別是在牽涉到有投資行為發生的時候。一項投資案值不值得、會不會賺錢是公司股東最在意的事情，投資報酬率、還本年限、風險評估等等都是決定一項投資案前不可或缺的，尤其是石油工業的投資往往金額都非常龐大，再加上石油探勘的本質屬性是高風險高利潤，因此事前的經濟分析益發顯得重要。

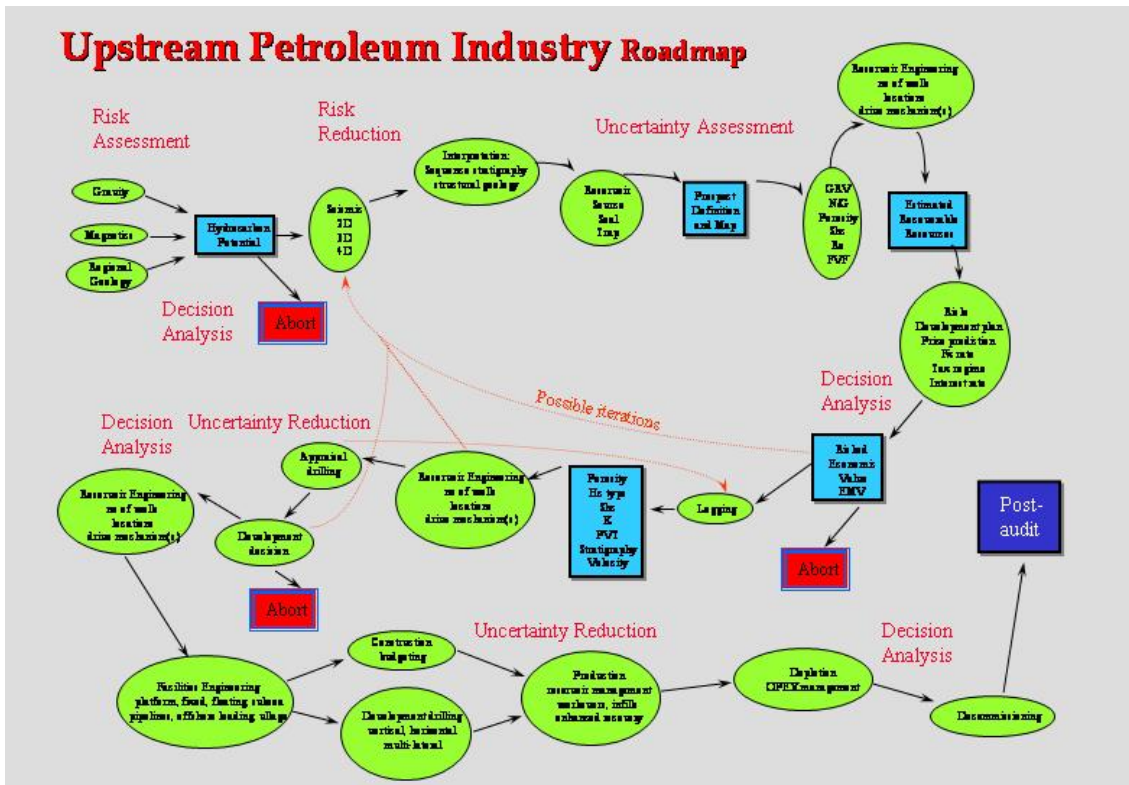
圖二為石油工業上游從探勘一直到生產結束的發展流程，從最初的地質調查、震測到選定井位、鑽井、生產、開發以至於最終生產結束除役是一個非常漫長而繁複的過程，期間的許多環節都必須做出決策，而如何做出正確的決策，有非常大的部分必須依賴正確的經濟分析。

在經濟分析裡有幾個觀念非常重要，敘述如下：

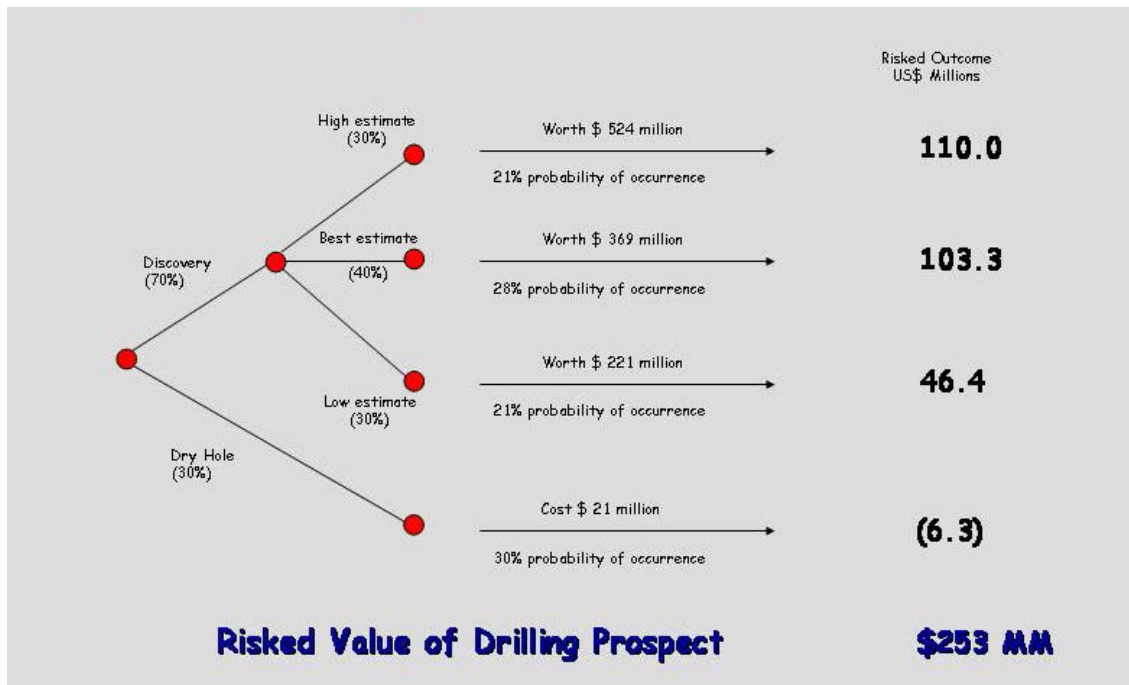
風險：所謂風險是指一件不希望發生的事情發生的機率，舉例來說，鑽一口探勘井，有可能打到油氣，也有可能是乾井，那麼打到乾井就是所謂的風險。

不確定性：不確定性指的是如果風險沒有發生(或真的發生)，那所出現各種不同結果的可能性。以鑽井的例子而言，所謂不確定性是指如果鑽到油氣，蘊藏量可能 10 萬桶，也可能 50 萬桶或是 100 萬桶，那不同蘊藏量所代表的就是不確定性。

圖三是一個由風險與不確定性概念構成的簡單的決策樹案例，其中發現油氣的機率為 70%，打到乾井的機率則為 $1-0.7=30\%$ ，所以發生風險的機率為 30%。如果打到油氣，有 30%的機會有高蘊藏量，40%的機會是最可能的蘊藏量，另外 30%的機率是不如預期的低蘊藏量，這就是所謂的不確定性。在經由各不同蘊藏量以及相對的獲利得到一個可能的獲利，加總之後便可以知道這樣一個投資案是否可行。當然在實際執行時，必須考慮的因素遠遠比上述的範例多而且複雜，必須掌握種種資訊，但是其基本的原理是相同的。



圖二、石油工業上游流程圖



圖三、風險、不確定性之決策樹範例

(六) 工安環保(Health, Safety & Environment)

工安環保問題一直都是本公司非常重視的議題，董事長、總經理三申五令要求各級單位落實工安，但是工安事故的發生還是時有所聞。其實最有效的工安政策是不能靠上級長官的要求，而是要每一位員工都要有正確的工安觀念。

要做好公安環保，首先必須對幾個名詞有正確的概念：

災害(Hazards)：是指意外事故發生的種類，例如高空作業最可能發生的災害為墜落，水電工程作業有可能是觸電，化工廠的作業員有可能吸入有毒氣體或是與毒性化學物質接觸等等。

風險(Risks)：是指發生某種災害的可能性。風險的四種要素為 1.某種災害發生的機率；2.如果發生災害，其對人造成的後果與嚴重性；3.受到災害影響人數的多寡；以及 4.暴露於災害的可能時間長短。

從災害及風險的定義中可以知道，如果可以減少災害的因子，那自然就可以避免災害發生的風險，也就是說**沒有災害就沒有風險**。但是在現實生活中，尤其是在職場上，有些災害是無法避免的，因此我們就必須了解什麼樣的災害會有多大的風險。有些災害會導致數種不同的風險，而這些風險有些是可以透過不同的方法或措施加以控制、降低甚至消彌，這就是我們必須去做的。當然這必須有賴遠見、技巧、工安知識以及落實執行才有可能達到。透過教育及訓練，讓員工對於災害及風險的辨識以及預防控制才是最有效降低風險的做法。

三、心得與建議

本次國外研究專題進修，因為時間以及經費的關係，共選修六門課程，分別為測井分析、流體在孔隙介質中之流動、生產電測、採油工程/產能分析、經濟分析以及工安環保，這些課程對我在工作上的幫助非常的大。因為本身在大學及研究所時並非主修石油工程，大部分的相關知識都是進入公司後靠自修、前輩的經驗傳承教導以及參與現場實務工作摸索而來，頗有點半路出家的味道，但是又因為接觸的是實際現場的工作，所以比起在校的學生又多了實務經驗，因此再回過頭來從基本功夫學起，可以有較深入的體會。舉例來說，當課程介紹到人工誘噴(Artificial lift)或者是生產電測時，大部分的學生可能連什麼是撓曲油管都不清楚，也沒見過電測儀器的實體，比較不容易進入狀況。而我在過去幾年的現場工作卻以對這些東西相當熟悉，很快就可以掌握老師上課的重點。因此這次為期六個月的在職進修對我裨益良多。

目前國際油價節節高漲，已經逼近每桶原油 150 美元，幾乎是天天都在創歷史新高，雖然說現在的高油價不乏人為政治操作的因素，但是就以供需面來講，油價要再跌回一、二年以前的價位，機會非常渺茫，而且在這樣的高油價的環境條件刺激下，各種替代能源將陸續出現，所以各大油公司莫不卯足全力進行探勘。本公司亦應把握住這個機會，加緊海域 F 構造開發的腳步，同時利用這個機會大量培植中生代及新人，使本公司數十年的探探經驗得以傳承下去。

另外，減碳的工作已經成為世界各國不得不面對的挑戰，減碳議題也已經開始在國內延燒。在眾多減碳的方式中，地下封存無疑是現階段減碳技術中最具可行性也最成熟的選項。在台灣，本公司是唯一具有二氧化碳地下封存最全面性相關技術與知識的單位，實應利用現在各界對減碳要求的時機點，主動積極投入二氧化碳地下封存的相關工作，對本公司來說，其實也是為國內的探勘找到一個可能的新方向，相當值得公司領導階層好好地思考。茲就此次進修提出以下幾點建議：

- ※ 多派稍具探探實務經驗的人員出國在職進修，培養未來接班世代人才的國際觀。

- ※ 加強與國外公司或機構的合作聯繫管道。
- ※ 建立公司內部專業人才資料庫，善用人才。
- ※ 積極進行國外油氣田的併購，並參與實際生產開發工作，延續國內探勘的命脈，掌握自有油源。
- ※ 加強引進國外探採技術應用於國內氣田，提高油氣田可採蘊藏量及採收率，延長老舊氣田的生產壽命。
- ※ 探採研究所與探採事業部人員進行交流輪調，使研究與實務能緊密結合，不致產生脫節。
- ※ 加速海域 F 構造的開發，同時利用此機會大量培植中生代及新生代的探採專業人員，使本公司數十年的經驗得以傳承。
- ※ 爭取進用新人，提升員工士氣，強化公司競爭力。
- ※ 利用國際與國內減碳要求聲浪的力量，積極投入二氧化碳地下封存市場，為國內日漸低糜的探勘拓展新方向。

附件：水冲排簡介—專案報告

Introduction to Water Flooding

Chen-Hui Fan
Project presentation

Why Waterflooding?

- General availability of water
- Relatively easy to inject due to its hydraulic head in the injection well
- The ability to spread through an oil-bearing formation
- Its efficiency in displacing oil

History and Development

- First waterflood occurred in Pithole City, Pennsylvania, 1865. A result of accidental water injection.
- 1880, J.F. Carll raised the possibility of increasing oil recovery by injecting water into reservoir to displace oil to producing wells.
- Circle Flooding: water injected at a single well.
- Line drive: a series of wells subject to water injection at one time.
- Five-spot pattern: first attempted at Bradford field, 1924.
- 1950's general applicability of waterflooding became recognized.

Association with Reservoir engineering

- Investigate flooding patterns
- Select location of injection wells
- Estimate the injectivity
- Recommend additional wells
- Produce detailed prediction of the oil recovery performance by waterflooding, which gives the basis for economic projection of the profitability of waterflood
- Responsible for continuous review of reservoir performance, updating and modifying expected performance

Association with Production engineering

- Selection and testing of water supply source
- Design and sizing of water treatment equipment
- Specification of metering and testing facility
- Investigation of corrosion or scaling tendencies
- Review of existing wells to determine required remedial work
- Operation of surface injection and production facilities.

Objectives

- Prediction of water injection rates
- Oil producing rates
- Producing water-oil ratios
- Cumulative oil recovery at various times in the future

Basic Water-Oil Flow Properties of Reservoir Rock

- Properties of the rock skeleton alone
 - Porosity
 - Permeability
 - Pore size distribution
 - Surface area
- Combined rock-fluid properties
 - Capillary pressure characteristics (static)
 - Relative permeability characteristics (flow)

Some basic definition

- **Absolute permeability**
 - Permeability of rock saturated completely with one fluid
- **Effective permeability**
 - Permeability of rock to one fluid when the rock is only partially saturated with that fluid
- **Relative permeability**
 - Ratio of effective permeability to some base value
- **Porosity**
 - Portion of rock bulk volume composed of interconnected pores

Basic Water-Oil Flow Properties of Reservoir Rock

- **Rock wettability**
- **Fluid distribution**
- **Capillary pressure**
- **Relative permeability (two-phase & three-phase)**
- **Connate water saturation**

Efficiency of Oil Displacement by Water

- Frontal Advanced Theory
 - Fractional Flow Equation

$$f_w = \frac{1 + \frac{kk_{ro}}{u_t \mu_o} \left(\frac{\partial P_c}{\partial L} - g \Delta \rho \sin \alpha_d \right)}{1 + \frac{\mu_w}{\mu_o} \frac{k_o}{k_w}}$$

- f_w : fraction of water in the flowing stream passing any point in the rock (ie. watercut)
- k : formation permeability
- k_{ro} : relative permeability to oil
- k_o : effective permeability to oil
- k_w : effective permeability to water
- μ_o : oil viscosity
- μ_w : water viscosity
- u_t : total fluid velocity (ie q/A)
- P_c : capillary pressure = $P_o - P_w$ = pressure in oil phase minus pressure in water phase
- L : distance along direction of movement
- g : acceleration due to gravity
- $\Delta \rho$: water-oil density differences = $\rho_w - \rho_o$
- α_d : angle of the formation dip to the horizontal

Mobility Ratio Concept

- The mobility of a fluid is the effective permeability of the rock to the specific fluid divided by the fluid viscosity.
- Water mobility: k_w/μ_w , oil mobility: k_o/μ_o
- The value of mobility is dependent upon the fluid saturation.
- The mobility ratio is the mobility of the displacing fluid divided by that of the displaced fluid.
- It is generally accepted that the term “mobility ratio” is taken to mean that ratio prior to water breakthrough.

$$M = \frac{k_w}{\mu_w} \frac{\mu_o}{k_o} = \frac{k_{rw}}{\mu_w} \frac{\mu_o}{k_{ro}}$$

Areal Sweep Efficiency

Pattern	Ratio of producing wells to injection wells	Drilling pattern required
Four-spot	2	Equilateral triangle
Skewed four-spot	2	Square
Five spot	1	Square
Seven spot	1/2	Equilateral triangle
Inverted seven –spot (ingle inj. Well)	2	Equilateral triangle
Nine-spot	1/3	Square
Inverted mini-spot (single inj. Well)	3	Square
Direct line drive	1	Rectangle
Staggered line drive	1	Offset lines of wells

Guideline for the Selection of Waterflood Pattern

- Desired oil production capacity
- Sufficient water injection rate to yield desired oil production
- Maximize oil recovery with a minimum of water production
- Take advantage of known reservoir non-uniformities---- ie., directional permeability, regional permeability differences, formation fractures, dip, etc.
- Be compatible with the existing well pattern and require a minimum of new wells.
- Be compatible with flooding operations of other operators on adjacent leases.

Reservoir Heterogeneity

- Areal Permeability Variations
 - Individual well data across the entire reservoir
 - Regression analysis technique
 - Permeability anisotropy
 - Lateral & Vertical inhomogeneities
 - Pressure transient technique
- Vertical Permeability Stratification
 - Information such as degree of stratification, lateral extent of shale breaks and continuity of zones of specific permeability to be obtained by the examination of the formation outcrop.
- Reservoir Scale Fractures and Directional Permeability
 - Difficult to fully identify during primary depletion but might play an important role when injection pressure is applied.

Vertical and Volumetric Sweep Efficiency

- Vertical sweep efficiency
 - The cross-sectional area contacted by the injected fluid divided by the cross-sectional area enclosed in all layers behind the injected fluid front.
- Volumetric sweep efficiency
 - The pore volume contacted by the injected fluid divided by the total pore volume of a pattern or portion of the reservoir of interest.

Factors Affecting Volumetric Efficiency

- Mobility ratio
- Gravity
- Capillary pressure
- Cross flow
- Injection rate
- Layer selection
- Fractures
- Existence of gas cap
- Existence of underlying water

- The last three factors are naturally occurred and no method available to accurately and quantitatively measure the effects.

- The water-oil mobility ratio is a measure of the water injectivity of a well relative to its oil productivity.
- After the gas space is filled with liquid, the injectivity variation of a well will depend upon the mobility ratio.
- After fillup, the injectivity will remain constant if the mobility ratio is unity, will increase if $M > 1$, and will decrease if $M < 1$.

- Injected water would tend to move preferentially along the bottom of a formation due to its high density.
- The degree of gravity segregation of the injected fluid, measured in terms of the volumetric sweep efficiency at breakthrough depends upon the ratio of viscous forces to gravity forces, $\Delta P_h / \Delta P_v$
- Higher rate, higher volumetric sweep efficiency.

Methods of Predicting Waterflood Performance

- Methods primarily concerned with reservoir heterogeneity
 - Yuster-Suder-Calhoun Method
 - Prats-Matthews-Jewett-Baker Method
 - Stiles Method
 - Dykstra-Parsons Method
- Methods primarily concerned with areal sweep
 - Muskat Method
 - Hurst Method
 - Caudle et al. Method
 - Aronofsky Method
 - Deppe-Hauber Method

Methods of Predicting Waterflood Performance

- Methods dealing primarily with displacement mechanism
 - Buckley-Leverett Method
 - Craig-Geffen-Morse Method
 - Rapoport-Carpenter-Leas Method
 - Higgins and Leighton Method
- Methods involving mathematical models
 - Douglas-Blair-Wagner Method
 - Hiatt Method
 - Douglas-Leaceman-Rachford Method
 - Warren and Cosgrove Method
 - Morel-Seytoux Method

Methods of Predicting Waterflood Performance

■ Empirical prediction methods

■ Guthrie-Greenberger Method

$$E_R = 0.2719 \log k + 0.25569 S_w - 0.1355 \log \mu_o - 1.5380 \phi - 0.0003488 h + 0.11403$$

■ Schauer Method

■ API Statistical Study

$$E_R = 54.898 \left[\frac{\phi(1-S_w)}{B_{oi}} \right]^{0.0422} \left[\frac{k\mu_{wi}}{\mu_{oi}} \right]^{0.0770} (S_w)^{-0.1903} \left(\frac{p_i}{p_a} \right)^{-0.2159}$$

where E_R is the fractional recovery efficiency, k is in darcies. This correlation for waterflood recovery expressed as a logarithmic-type equation depends upon porosity, connate water saturation, permeability, oil and water viscosity, initial pressure (p_i) and pressure at depletion (p_a).

Questions to be answered before performing waterflood

- Is the reservoir likely to perform as a series of independent layers, or as zones of differing permeability with fluid crossflow?
- Are there zones of high gas saturation or high water saturation that could serve as channels for bypassing water?
- Does the reservoir contain long natural fractures or directional permeability that could cause preferential areal movement in some direction?
- Are there areas of high and of low permeability that might cause unbalanced flood performance?
- Is crossbedding present to the degree that fluid communication between injection and producing wells might be impaired?
- Is the reservoir likely to contain planes of weakness or closed natural fractures that would open at bottom-hole injection pressure?

Design of Waterflood

- Evaluation of the reservoir, including primary production performance.
- Selection of potential flooding plans.
- Estimation of injection and production rates.
- Projection of oil recovery over the anticipated life of the project for each flooding plan.
- Identification of variables that may cause uncertainty in the technical analysis.

Viscous Fingering

- A phenomenon occurred when the viscosity ratio of displaced fluid to displacing fluid is much larger than 1.0
- The initiation and growth of viscous fingering is caused by instabilities at the interface between displacing fluid and displaced fluid whenever the viscosity of the displacing fluid is much less than that of displaced fluid.

Pattern selection with anisotropic permeability or oriented fracture system

