

(出國類別：研究)

石油生產工程與完井工程專題研究

服務機關：台灣中油股份有限公司探採事業部

姓名職稱：丁志強 機械工程師

派赴國家：加拿大

出國期間：107 年 5 月 25 日至 107 年 10 月 1 日

報告日期：107 年 10 月 18 日

摘要

本專題研究為幫助了解石油生產工程及完井工程可能遭遇的問題，各種人工提舉設備的使用時機，學習加拿大石油探勘的管理方式，及探究北美陸上發展強化採油的潛力。研修課程包括三門由 PetroSkills 公司舉辦之生產工程與完井工程系列課程（生產操作、人工提舉系統、完井與修井），及由 Max-Wells 公司舉辦之六門石油工程系列課程（上游石油工業概論、油層工程基礎、地層損害與激勵生產、頁岩油氣與緻密油氣的探勘開發、重油採收法及強化採油概論等）。期間並參加 2018 年度全球石油展，參加 CMG 公司油層模擬軟體公司一日簡介及訓練課程，拜訪 Husky 公司聽取相關業務簡報、進行討論及參觀其鑽井現場，參訪亞伯達省能源局岩心研究中心等。藉此行程安排，可增進對先進生產技術之認知，瞭解國際石油公司的發展，快速拓展視野，並有助於提升個人探勘職能。

目次

壹、 目的	1
一、 解決油田生產操作問題.....	1
二、 在技術先進的國家作有效率的學習.....	1
貳、 過程	2
一、 訓練計畫安排	2
二、 重點內容介紹	9
(一) 生產曲線與油層驅動機制.....	9
(二) 人工提舉設備	11
(三) 採油階段.....	20
(四) 油層工程與油藏分類.....	22
(五) 地層損害.....	25
(六) 完井工程.....	26
(七) 穿孔作業.....	29
參、 具體成效	33
一、 強化本職學能並與國際接軌	33
二、 與國際石油公司交流並建立連繫管道.....	33
三、 分享課程內容並擴大學習成效	33
四、 學習油田開發技術並緊密結合公司之需要	34
肆、 心得及建議.....	35
一、 參加 PetroSkills 課程應注意事項.....	35
二、 生產操作一 (Production Operations 1) 課程的比較.....	36
三、 PetroSkills 生產與完井系列課程適合參訓的人員.....	36
四、 Max-Wells 公司訓練課程的特色	38
五、 北美石油公司透過輪調制度培養新進工程師	39
六、 傳統資源探勘與舊油田強化採油比較.....	39
七、 亞伯達省能源局獨步全球的岩心管理.....	40
八、 Husky 公司的先進作風及其鑽井現場的管理.....	41
九、 在 2018 全球石油展看見石油生產技術的突飛猛進	43
十、 CMG 服務公司技術不斷求新.....	44

壹、目的

一、解決油田生產操作問題

本次專題研究及安排的參訓課程，都是為了解決生產操作、完井工程等相關問題，尤其對即將開發生產的油田必有顯著助益。與油田生產有關之課程項目如下：生產地質、油層工程、與地層測驗、完井設計、油管串及井下設備、套管水泥工程、油氣井穿孔作業、鋼線作業與撓曲油管作業設備、完井修井流體、人工提舉設備等。此外，亦深入探討於生產操作過程中可能發生的問題，其項目如下：地層損害、垢的沉澱與產水處理、石蠟與瀝青質沉澱、酸處理與液裂、防砂控制等。

二、在技術先進的國家作有效率的學習

選擇赴加拿大亞伯達省的卡加利市進行專研究之原因是，加拿大盛產石油，包括傳統油氣與油砂重油等，且國際石油探勘公司林立，擁有先進的探勘生產技術，特別是加拿大的油砂開採須運用「熱採收法」相關技術，例如：蒸氣輔助重力驅排（SAGD）、蒸氣循環激勵法（CSS）等，更在全世界居領導地位。藉由與當地資深顧問專家研究討論、參與一流的技術訓練相關專業密集課程（PetroSkills）等，能有效率地獲取最先進的生產開發知識，對本公司即將進行之新礦區生產開發工作（如查德礦區等）必有直接效益。借重加拿大生產開發經驗，除了引進一流技術並分享同仁外，亦能降低未來的生產開發風險，顯著地降低生產成本，及提高公司油田的整體開發效益。

貳、過程

一、訓練計畫安排

本次研習課程共分四大部分（詳如下表），並將訓練內容、講師經歷及相關照片分述如下：

部份	時間	課程名稱	授課機構
一	107年5月28日至 107年6月8日	生產操作一 Production Operations 1	PetroSkills Alliance
二	107年6月25日至 107年6月29日	人工提舉系統 Artificial Lift Systems	PetroSkills Alliance
三	107年8月13日至 107年8月17日	完井與修井 Completions and Workovers	PetroSkills Alliance
四	107年6月11日至 107年6月22日、 107年7月2日至 107年8月10日、 107年8月20日至 107年9月28日	油層工程、生產工程基礎 與非傳統資源概論 Fundamentals of Reservoir Engineering, Production Engineering, Introduction to Unconventional Resources	Max-Wells Technology Ltd.

(一) 第一部分：

1. 課程內容

- (1) 生產地質 (Production geology)
- (2) 油層工程與地層測驗 (Reservoir engineering and well testing)
- (3) 完井設計考量與策略 (Well completion design factors and strategy)

- (4) 油管串、填塞器、井下控制設備 (Tubing strings, packers, subsurface control equipment)
- (5) 初次下水泥與修補水泥作業 (Primary and remedial cementing)
- (6) 油氣井穿孔作業 (Perforating oil and gas wells)
- (7) 修井、完井與鋼線作業設備 (Workover and completion rigs, wireline and workover systems)
- (8) 完井與修井流體 (Completion and workover fluids)
- (9) 井問題分析與人工提舉 (Well problems and artificial lift)
- (10) 地層損害 (Formation damage)
- (11) 油田使用的表面活性劑 (Oilfield surfactants)
- (12) 結垢、除垢、防垢與產水處理 (Scale deposition, removal, prevention and produced water handling)
- (13) 石蠟與瀝青質 (Paraffins and asphaltenes)
- (14) 生產測井與分析 (Production logging measurement and analysis)
- (15) 酸處理 (Acidizing)
- (16) 防砂控制 (Sand control)
- (17) 液裂工程 (Hydraulic fracturing)
- (18) 非傳統油氣資源-頁岩油氣、重油與瀝青質 (Unconventional resources - shale gas and shale oil, heavy oil and bitumen)

2. 講師經歷簡介

Dr. John Robert (Bob) Nichol 擁有 35 年現場生產操作、油層工程及研究相關的經驗，服務過的油公司包括 BP、Exxon、Imperial Oil (ESSO) 等，現今自行成立顧問公司 “Petrobob Consulting Ltd.”。

3. 上課照片分享



▲ PetroSkills Production Operations 1 上課照片。

(二) 第二部分：

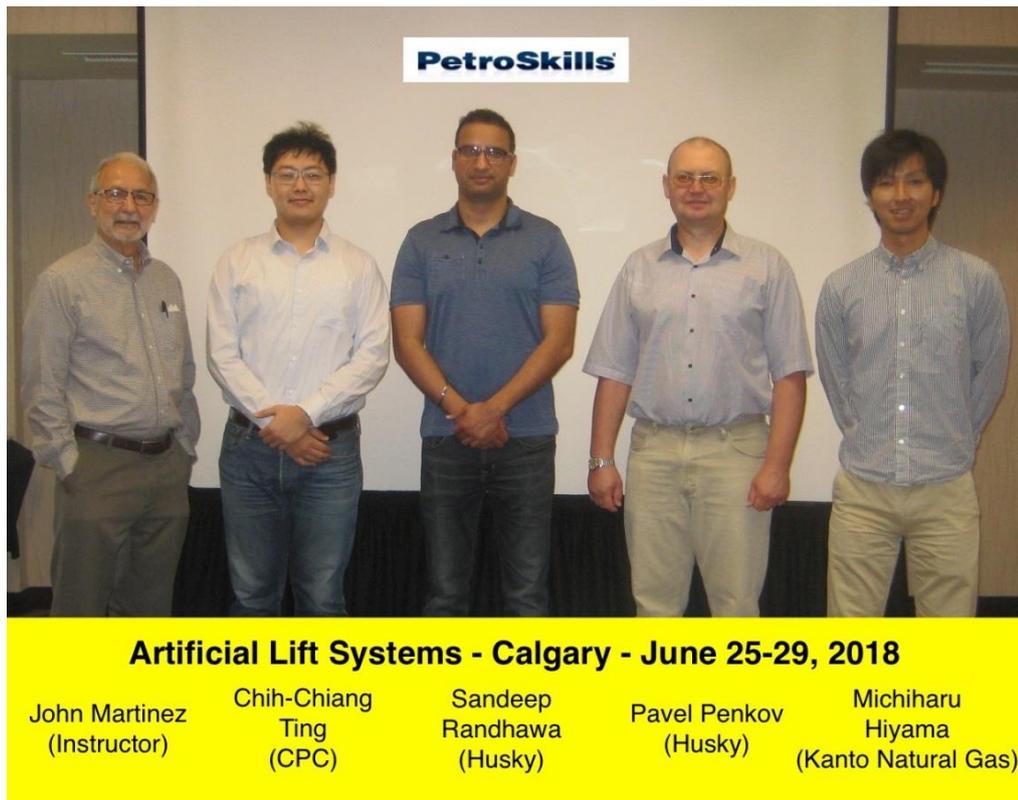
1. 課程內容

- (1) 人工提舉簡介與油層工程基礎 (Introduction and reservoir fundamentals)
- (2) 抽油桿泵 (Sucker rod pump)
- (3) 柱塞提舉 (Plunger lift)
- (4) 電潛泵 (ESP)
- (5) 氣舉法 (Gas lift)
- (6) 液壓提舉系統 (Hydraulic system)
- (7) 螺桿泵 (PCP)
- (8) 電潛螺桿泵 (ESPCP)
- (9) 人工提舉選擇 (Selection of artificial lift)

2. 講師經歷簡介

Mr. John Martinez 擁有 38 年的油田生產經驗，碩士畢業後於 Exxon 石油公司擔任生產工程師 10 年，後專職於生產工程顧問，專門協助改善生產設備及人工提舉設備操作流程。專長的項目包括：油氣井生產力測試、瞬變壓力測試、井下設備評估及選用等，對氣舉法方面的知識尤其專精且經驗豐富。擁有許多地面設備相關的設計經驗，其中包括設計多相流體管線、分離器、流量計、壓縮機、脫水設備、水處理與棄置、泵浦等。他也是校訂 API（American Petroleum Institute）人工提舉相關規範的成員之一。

3. 上課照片分享



▲PetroSkills Artificial Lift Systems 上課照片。

(三) 第三部分：

1. 課程內容

- (1) 完井設計 (Well completion design)
- (2) 完井設備 (Well completion equipment)
- (3) 穿孔作業 (Perforating)
- (4) 特殊及先進完井技術 (Specialized and advanced completion technology)
- (5) 地層損害與修井流體 (Formation damage and well servicing fluids)
- (6) 激勵生產 (Well stimulation)
- (7) 出砂與砂遷移 (Sand production and its migration)
- (8) 鋼線作業 (Wireline interventions)
- (9) 撓曲油管 (Coiled tubing)
- (10) 液壓修井機 (Hydraulic workover units)

2. 講師經歷簡介

Mr. Hugo Vargas 擁有 33 年以上的油田工作經歷，服務過的公司包括 Halliburton 與 Repsol 公司等，在地層測驗、下水泥作業、液裂工程、激勵生產及修井作業等方面有豐富經驗。特別是，在全球知名的 Halliburton 公司服務時間長達 30 年，於哥倫比亞、委內瑞拉、巴西、墨西哥、厄瓜多、阿根廷、阿爾及利亞等多個地區服務過，並能流利使用英語、西班牙語、葡萄牙語及法語等。

3. 上課照片分享



▲PetroSkills Completions and Workovers 上課照片。

(四) 第四部分：

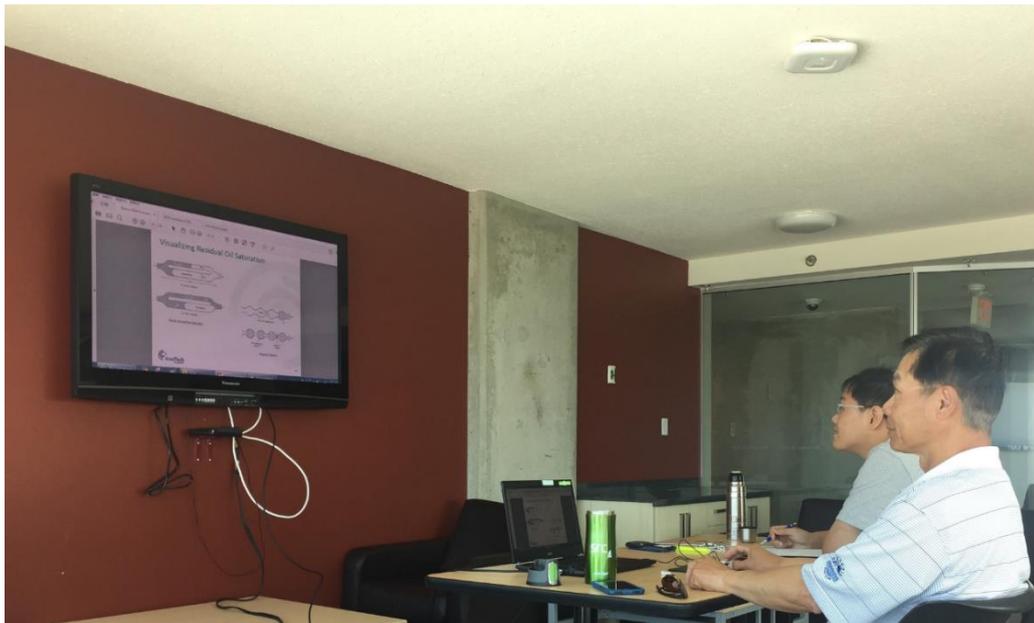
1. 課程內容

- (1) 上游石油工業概論 (Introduction to the upstream petroleum industry)
- (2) 油層工程基礎 (Fundamentals of reservoir engineering)
- (3) 地層損害與激勵生產 (Formation damage and well stimulation)
- (4) 頁岩與緻密油氣探勘開發 (Shale and tight oil and gas exploration and development)
- (5) 重油採收法 (Heavy-oil recovery processes: CHOPS, CSS, SAGD and steam flooding)
- (6) 強化採油概論 (Introduction to enhanced oil recovery)

2. 講師經歷簡介

Mr. Jerry Shaw 在油氣探勘領域服務逾 34 年，服務經歷包括 Petro-Canada Resources 地質師 3 年及資深油層工程師 1 年、Petroleum Recovery Institute 生產部門 12 年（包括擔任經理 4 年）、Adams Pearson Associates 生產顧問 6 年及 Devon Canada 專業技術人員 12 年等，於緻密油氣、重油生產、蒸氣輔助重力驅排（Steam-Assisted Gravity Drainage, 簡稱 SAGD）、地層損害、激勵生產及強化採油等領域有豐富的實驗室研究及現場操作經驗，現自行成立一家顧問公司“Max-Wells Technology Ltd.”。

3. 上課照片分享



▲Max-Wells Technology Ltd. 上課照片

二、重點內容介紹

(一) 生產曲線與油層驅動機制（綜合上述第一、二、三、四課程內容）

1. 主要的油層驅動機制（Major Drive Mechanisms）

地層中油氣的能量來源可分成**溶解氣驅動 (solution gas drive)**、**氣頂驅動 (gas cap drive)**、**水驅 (water drive)** 三大類。**溶解氣驅動**的能量來自於氣體的可壓縮性，當地層減壓時，氣體膨脹而提供能量，並在油管中佔據體積，使生產油柱的重量減輕，減低須克服的柱壓；**氣頂驅動**的能量亦來自於氣體的可壓縮性，當地層因生產而減壓後，氣體會膨脹，推動油氣，幫助油氣流出；**水驅**的能量來自於地層水及水壓，在廣大的底水驅動下生產，生產層每流出一桶油，就有一桶水自底水層流入生產層，維持地層壓力（formation pressure）並幫助生產。

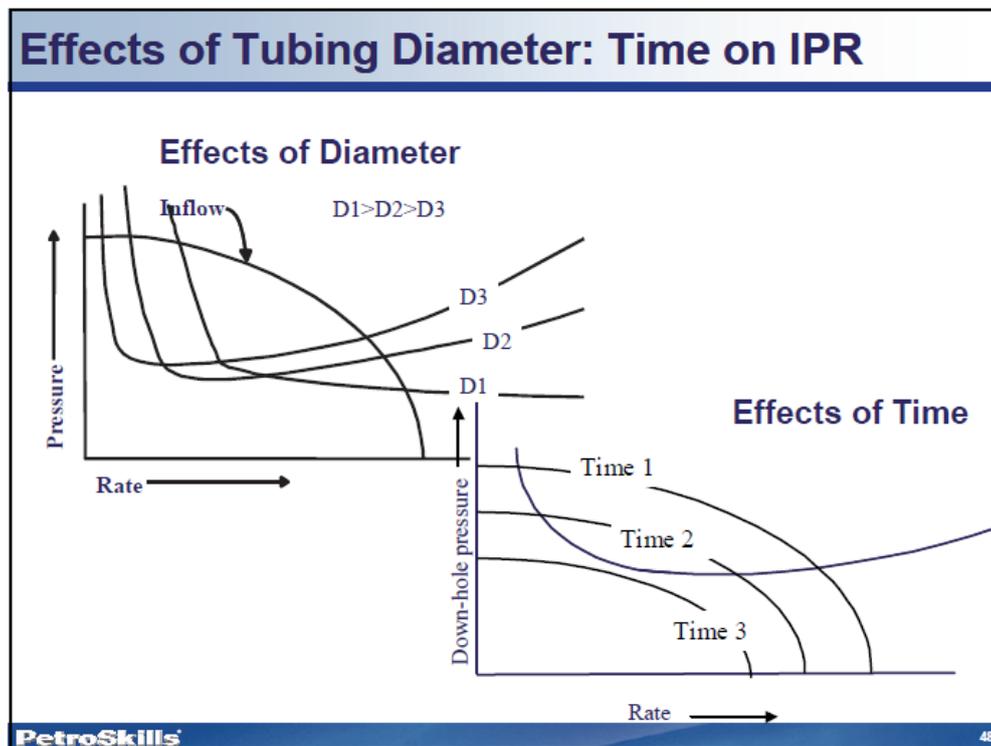
2. 自流井與非自流井

有些油層有自然的能量使其中的油氣能夠流動，此股能量主要來自於地層壓力。在油氣自井底向上流至地面生產設備的過程中，必須先克服油氣的柱壓（油本身的重量）及油管的阻力（管壁對油氣造成的摩擦力），才能以一定的流率成功生產。而不需透過泵浦等方式，即可自然地、具經濟效益的流率流至地表的油氣井，稱為**自流井 (naturally flowing well)**。無法自然流動至地表，或不能以具經濟效益的流率生產的油井，稱為**非自流井 (non-natural flowing well)**。

3. 流入、流出能力關係曲線

每一口油井都有一條可代表其流動能力（從生產層流入井內）的曲線，稱之為**流入能力關係曲線 (Inflow Performance Relationship curve, 簡稱 IPR curve 或 inflow curve)**。此曲線是由油層性質及達西定律

(Darcy's Law) 決定，與生產油管等設備無關。此曲線會隨著生產時間變化（生產時間越久，壓力越降低）。另一條曲線，代表自井底流動到地表生產設備的能力，稱之為**流出能力關係曲線** (Tubing Performance Relationship curve, 簡稱 **TPR curve** 或 **outflow curve**)。一口井是否為自流井，取決於此二曲線是否有交點（如圖一），若沒有交點，代表此井為非自流井，即流體的能源不足以克服柱壓及油管阻力流至地表。若有交點，則代表此井可在該交點對應之井底壓力及流率穩定生產。此曲線的變化與油管的內徑大小有關，油管愈大，油氣愈容易流動至地表。



▲圖一

左圖 「流入能力曲線 (IPR curve)」與流出能力曲線 (Outflow curve) 的交點代表生產的井底壓力及產率。使用不同內徑大小的油管會改變流出曲線的位置，使兩曲線的交點改變，亦即改變油井自流的產率 (桶/日)。內徑愈大，產率也愈大。

右圖 油井的「流入能力曲線 (IPR curve)」隨著生產時間愈久而向內萎縮，至「Time 3 曲線」時，流入能力曲線與流出曲線已無交點，代表此井已無法自流。(資料來源：PetroSkills Artificial Lift Systems course materials)

(二) 人工提舉設備 (綜合上述第二課程內容)

當溶解氣驅動 (solution gas drive)、氣頂驅動 (gas cap drive)、水驅 (water drive) 皆無法使油井自流, 或不能以目標流率來維持生產時, 這時候可以在井下安裝泵浦, 用泵浦對油氣施加能量, 使油井能夠穩定流出, 並達到目標產率。其中泵浦又分成抽油桿泵 (sucker-rod pump)、液壓泵 (hydraulic pump)、電潛泵 (ESP) 及螺桿泵 (PCP) 等多種, 分別適合在不同的條件下生產。除了使用泵浦的人工提舉方式之外, 亦有氣舉 (gas lift)、柱塞提舉 (plunger lift) 等不使用泵浦的提舉方式。以下將分別介紹各種提舉方式的特色及適用的情況。

1. 抽油桿泵 (Sucker-Rod Pump, 常見的英文名稱包括 Rod Pump, Beam Pump, Donkey Pump, Pumpjack 等):

抽油桿泵為陸上油井最常見的人工提舉方法, 結構簡單且壽命長為其最大優點。最佳的應用時機為: 低流率、低氣油比 (gas oil ratio) 及淺井。因受惠於正排量式 (活塞式) 的設計, 其強大的吸取能力使其最有利於「油層壓力較低」的生產井中操作。

往復式的活塞設計若遇到氣體, 因氣體的壓縮與膨脹會消耗活塞作功, 使抽油的效率降低, 且有**挫曲 (buckling)** 的風險。在含有硬顆粒或砂粒的生產井, 活塞、缸套、逆止閥、球閥等會加速磨耗, 須注意材質的選用或是使用鍍層, 或增加摩擦機械元件的表面硬度。**反覆應力 (alternate stress)** 是造成抽油桿疲勞斷裂的主因, 透過輸入下列資料數據: 泵浦形式、泵浦深度、地表衝程長度、泵浦直徑、抽油桿設計 (API Rod Number、API Rod Grade)、抽油桿材質 (steel only/ fiberglass and steel)、流體比重、泵浦速度 (衝程/分鐘, SPM 等實際值或推估值), 即可用模擬軟體算出泵浦運轉負載-位置圖 (Dyno Card)、

速度-位置圖、及扭力-角度圖等關係圖，進而優化或調整連桿衝程、轉速、油桿重量分布等，降低設備損耗頻率，延長設備壽命並增加系統可靠度。常見的分析軟體有 LUFKIN SROD™ and DIAG™、ECHOMETER QRod 等。

2. 柱塞提舉 (Plunger Lift)

柱塞提舉適用於低產量、低壓、高氣液比的生產井。例如，當生產井出水過多並累積在油管內，導致柱壓過高並使該井無法自流時，從井口將柱塞 (plunger) 從油管內部送入井底並關井 (shut in)，井內壓力累積至一定程度後，再次開井生產，蓄積的水將被井底的蓄壓流體提舉至井口並排至處理設備後，該井恢復正常生產，柱塞亦會隨著排出的流體浮至井口並被回收。一段時間後，井內出水並再次產生堵塞時，重複上述的步驟。

此種提舉方式最大的特點是，這是所有提舉方式中，唯一不需另外施加能量至生產系統，並完全依靠油層的能量來幫助產油的提舉方式。此法不但可以除液，在柱塞上下過程中還可以清理管內的蠟 (wax)、鹽 (salt) 及結垢 (scaling)。成本低也是此提舉法的一大優點。

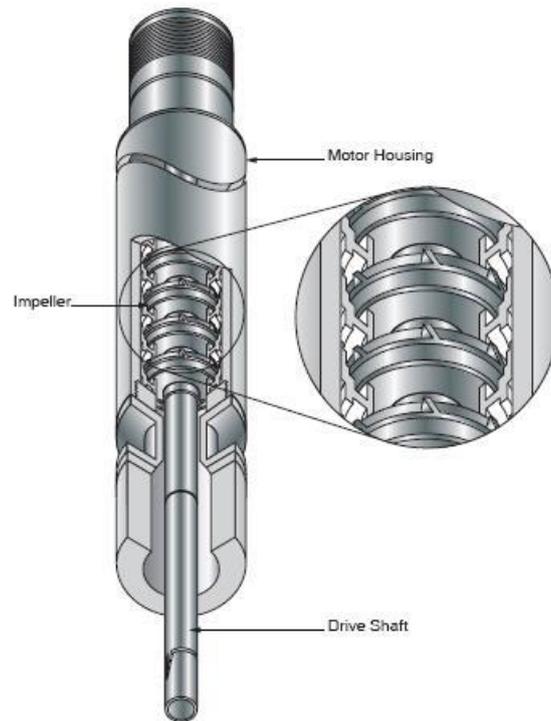
3. 電潛泵 (Electrical Submersible Pump, 簡稱 ESP) (如圖二)

電潛泵為一種置於井底的離心式泵浦，適合用於無砂、低氣油比、產量高、深度較深的陸上油井，並十分適合應用於斜井或水平井的生產。一般來說，日產量超過 1,000 桶原油時，電潛泵可達到 50% 以上的機械效率。使用上的限制包括：井口附近需有高壓電力、顆粒含量及氣油比不能太高、購置成本高、須搭配變頻器 (昂貴) 來維持高效

率等。由於電潛泵的現場維修十分困難，因此較少用於海上平台的生產。

電潛泵抵抗砂粒的能力與流體的種類（油粘度、含水量）、泵浦葉輪的型式（徑流式、混留式）、砂粒的本質（形狀、成份、粒徑分布、硬度）等都有關係；**砂粒愈多，泵浦壽命愈短**。此外，**氣體的存在**，除了會使泵浦機械效率降低之外，造成泵浦**汽蝕、震動**等是降低泵浦壽命的主因。**高溫的流體**，使運轉間隙因金屬零件受熱膨脹而變小，導至抗砂能力降低，並產生額外的磨耗（葉輪耐磨環及止推盤壽命降低），減短電潛泵的使用壽命。

影響電潛泵效率的因素，除了井下電纜的壓降（電壓損耗轉為熱能）以外，不穩定的井下條件（油層壓力、生產力指數），將導致泵浦操作在偏離理想操作範圍（流量），造成機械效率大幅下降。應用**變頻器（Variable Speed Drives, VSD）**，可擴大泵浦轉速的操作範圍，提升了電潛泵的在現場生產的操作彈性。除此之外，變頻器可用於泵浦緩啟動，減緩啟動時泵浦進口的抽吸作用，並能適當控制泵浦進口壓力，提升整體系統可靠度，維持應有的機械效率。



▲圖二

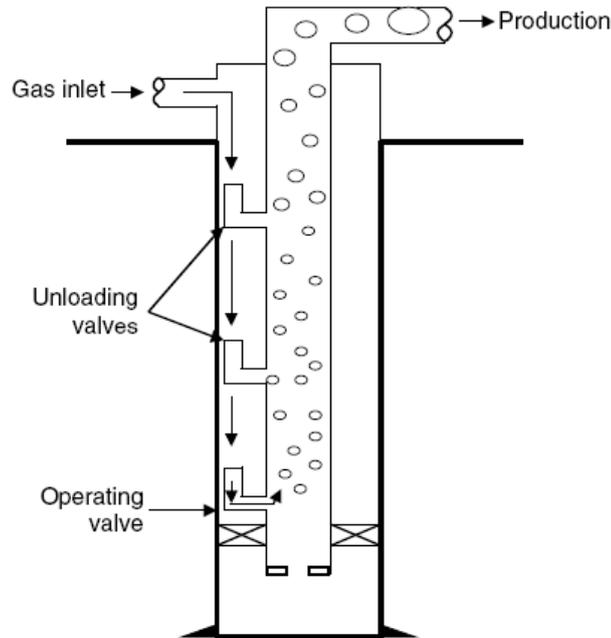
電潛泵（**Electrical Submersible Pump**，簡稱 **ESP**）由數十級至數百級的葉輪（**Impeller**）串至同一軸心所組成，並安裝於油管末端沉放於井下，每級葉輪貢獻之壓力差為一定值；級數愈多，可提供的差壓愈大（提舉能力愈強）。（資料來源：<https://fac.ksu.edu.sa/sites/default/files/3-artificialliftsystems.pdf>）

4. 氣舉法（**Gas Lift**）（如圖三）

氣舉法利用注入氣體至井底，當氣體佔據油管內部分空間後，使生產油管内油柱的重量（柱壓）減少，原油更容易克服重力流至地表。

它的優點包括：可以隨時根據生產條件調整、適合高氣液比的井、井口設備簡單、斜井應用可靠度佳（不會產生與井壁間的磨耗）、鋼線作業設計、一套壓縮機可供多口井同時使用等。缺點則為：不適合單井操作（易導致地面壓縮機設備起動、停機過度頻繁）、不適合高黏度流體（不利油管内氣液均勻混合）等。

需特別注意的是，提升氣體注射率會增加油井產率至某一程度，超過此點後，再增加注氣量的效益將會趨緩，甚至導致油管內因氣體過多而產生額外摩擦阻力，產率反而會降低。



▲圖三

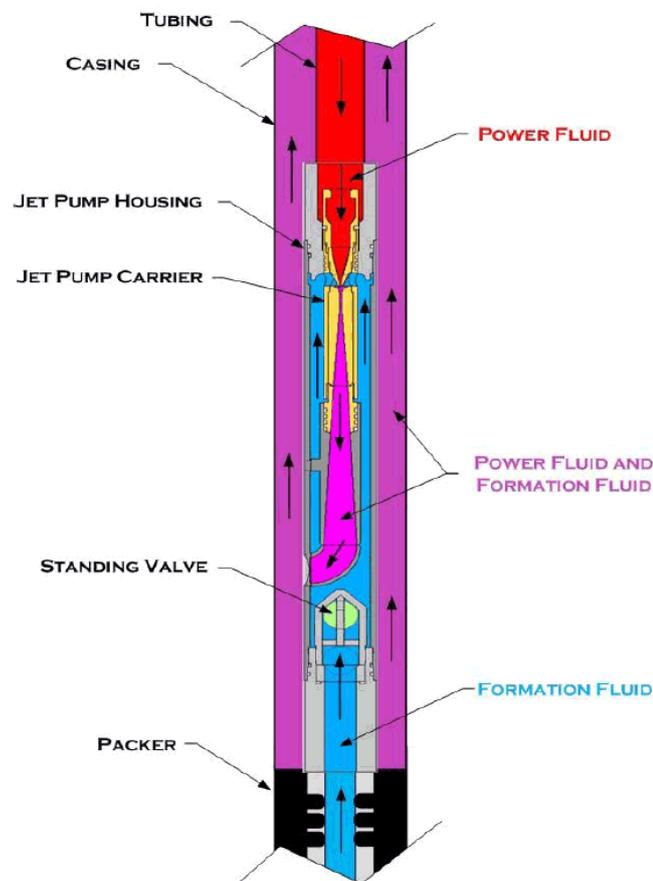
氣舉法 (Gas Lift)，利用注入氣體至井底，當氣體佔據油管內部分空間後，使生產油管內油柱的重量（柱壓）減少，原油更容易克服重力流至地表。(資料來源：<https://fac.ksu.edu.sa/sites/default/files/3-artificialliftsystems.pdf>)

5. 液壓泵 (Hydraulic Pump)

液壓泵的系統在地面上需有動力設備，用水或生產的油當作動力流體 (power fluid) 產生高壓，透過油管串送入井下供給井下泵浦，泵浦將此高壓流體的能源傳給生產的流體。液壓泵可分為兩種：**噴射泵 (jet pump)** 及 **往復式泵 (reciprocating pump)**。液壓泵最大的特點是，不論是噴射泵還是往復式泵，都可以用動力流體將泵浦從井下泵送至地面，不須進行鋼線作業。

(1) 噴射泵（如圖四）

使用一個噴嘴（nozzle）及一個文氏管（Venturi tube）【註：文氏管為一漸縮漸擴管構造】，井下高壓流體通過漸縮構造後形成高速流體及局部低壓並汲取原油，原油跟高壓動力流體混合，並通過漸擴構造後回復為高壓流體送至地表，原油分離後新鮮動力流體再被送入井下循環使用。

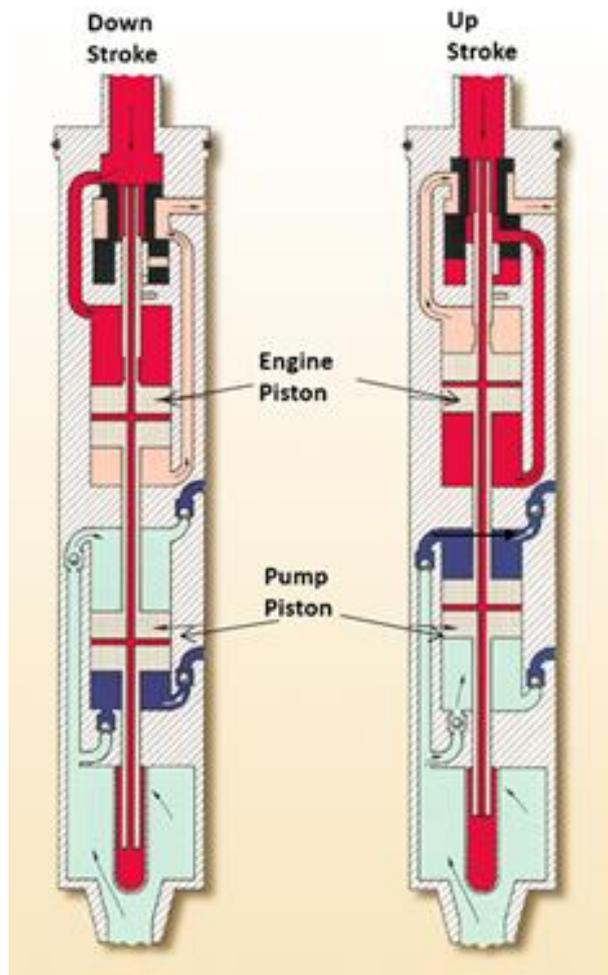


▲圖四

噴射泵（jet pump）安裝於生產油管末端，當動力流體（power fluid）通過文氏管（Venturi tube）構造時，因產生局部低壓，吸入地層流體（formation fluid）並與之形成混和流體，從油管外環狀空間流至地表後再將油氣分離出來，動力流體亦將被循環利用。（資料來源：<http://j-jtech.com/frac-flowback-27-day/>）

(2) 往復式泵（如圖五）

往復式泵為一種正排量式泵浦(**positive displacement pump**)【註：正排量式泵浦，將流體吸入並侷限在固定空間內，再透過空間變化將該流體強迫排出】，如針筒般利用負壓將油吸入泵內，透過單向閥及換向閥的設計，將井液排出送至地表。



▲圖五

往復式泵 (**reciprocating pump**) 安裝於生產油管末端，動力流體進入上方活塞 (**engine piston**) 空間帶動活塞運動，帶動安裝於同一心軸上的下方活塞 (**pump piston**) 吸入並泵送油氣至地表。(資料來源：

<http://npsportal.net/dover-artificial-lift/en/gn/product-solutions/hydraulic-lift/reciprocating-pumps/downhole-piston-pumps>)

液壓泵與往復式泵最大的不同之處在於噴射泵的動力流體會跟井液混合，通常每泵送一個單位體積的井液，需用大約四倍體積的動力流體來混合泵送，大幅增加地面設備處理量之要求（如分離器），也因此噴射泵是系統效率相對較低的提舉方式。往復式泵中的動力流體則不會跟井液接觸。

6. 螺桿泵（Progressing Cavity Pump, PCP）

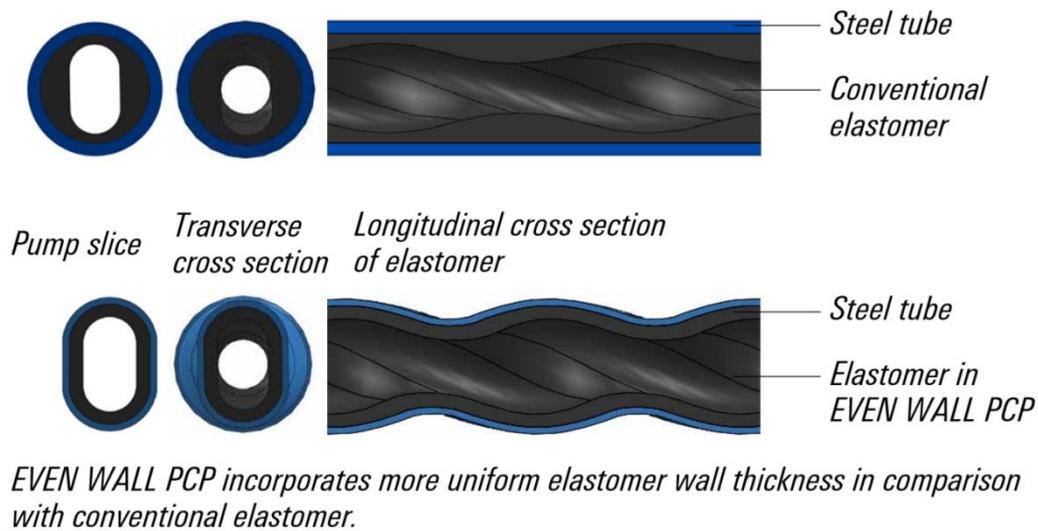
(1) 螺桿泵

最佳的應用時機為「含砂重油」的生產。其設備的資本支出及營業費用低、維護成本低、地面設備體積小（較不影響人文景觀）、噪音低、效率高、能耗低、抽吸能力強、安裝容易、便攜性佳等都是其優點。泵浦本體由**橡膠定子(stator)**及**鍍硬鉻的金屬轉子(rotor)**組成。

螺桿泵的使用限制與「操作環境、油品成份」有直接的關係，以橡膠定子為例，橡膠的壽命隨著溫度上升而降低，而**芳香烴(aromatics)**的存在會使橡膠**膨脹**，**二氧化碳(CO₂)**會導致橡膠**爆炸性減壓(explosive decompression)**【註：因減壓過程太快而使困在橡膠內的二氧化碳劇烈膨脹導致橡膠損壞】，**高溫環境及硫化氫(H₂S)**會使橡膠**硬化(hardening)**，**熱水**的存在亦會使橡膠**剝離(debonding)**等，以上都是選用螺桿泵時須考慮的因素。

(2) 等壁厚螺桿泵（Even Wall PCP）（如圖六）

等壁厚螺桿泵的橡膠設計，因各處的壁厚相等，摩擦產生的熱量分布均勻，使各處橡膠膨脹量相同，定子與轉子之間間隙維持良好，螺桿泵的使用壽命得以延長。整體而言，相較於傳統螺桿泵，等壁厚螺桿泵有**更好的耐高溫能力**。



▲圖六

在傳統的螺桿泵中（上圖），摩擦產生的熱量容易蓄積在厚度較大的橡膠中，導致橡膠膨脹不均勻，定子與轉子之間間隙不足，減短使用壽命。等壁厚螺桿泵的橡膠設計（下圖），因各處的壁厚相等，摩擦產生的熱量分布均勻，各處橡膠膨脹量相同，定子與轉子之間間隙維持良好，延長泵浦的使用壽命。（資料來源：Schlumberger）

(3) 全金屬螺桿泵（All Metal PCP）

定子及轉子材質都是金屬。此設計中由於定子材質為金屬，耐高溫能力遠高於橡膠材質。此種設計的螺桿泵能夠泵送高溫、高粘度重油、熱水等流體，其耐高溫程度可達 300°C，是蒸汽輔助重力驅排（SAGD）生產常用的人工提舉設計之一。

7. 人工提舉方式的比較與選擇

選擇一個適切的提舉方式，必須考慮多項因素。例如：尚有開採價值之油氣體積、油層壓力、油層深度、井生產力、預期或目標產率、流體性質（包含原油比重、含水率、含砂量、氣油比、黏度）等。另外，物流及後勤也是考慮的重要因素之一，例如，海上井與陸上井的

成本不同。陸上井需考慮的是，與煉製設備的距離、安裝及營運成本、是否容易聘請到訓練有素的人員、鄰近地區是否可提供天然氣或電力、儲存或運送油氣的設施、甚至當地的法規要求等。海上井除上述幾點外，設備安全性及機械可靠度等尤為重要。

各種提舉方式都有其優缺點，效率有高有低，各有其適用的場合。除了經濟面（成本及獲利）的考量外，環境保護及景觀地貌考量等也是選擇提舉方式的重要因素。若以產量來區分，電潛泵、氣舉、噴射泵適合用在高產率的油井；而螺桿泵、抽油桿泵、柱塞提舉、往復式液壓泵等較適合用在低產率的油井。

(三) 採油階段（綜合上述第四課程內容）

1. 一期採油（Primary Recovery）

第一階段的油氣採收，是使用油層本身的能量來生產，如**溶解氣驅動、氣頂驅動、水驅等**。在生產初期，油層壓力遠高於井底壓力，此自然的壓力差能驅動油氣進入井孔（wellbore）並流至地表。一段時間後，油層因持續釋放油氣使油層壓力大幅降低，產率也隨之下降。油層壓力下降至某一階段後，油氣進入井孔後之殘餘壓力就不足以克服重力及油管摩擦力流至地表，此後便須仰賴人工提舉設備輔助產油，直至產率不符合經濟效益為止，至此皆為首採階段。一般而言，**僅靠溶解氣驅動的採收率約在 20% 以內；氣頂驅動的採收率約為 30%；水驅者採收率最高可達 60% 左右（視水體大小及強度而定）。**

2. 二期採油（Secondary Recovery）

第二階段的油氣採收，即透過**水沖法（waterflood）或維持壓力（pressure maintenance）**生產。二期採油的採收率約為 15%。水沖法，

指以特定的注水井井型 (**injection pattern**)，以水掃排並置換原油。維持壓力最常見的作法，是在氣頂注氣或在生產層底層注水，以維持油層壓力。生產一段時間後，水沖法或維持壓力已無法再產出更多的原油，此時的含油飽和度稱為**殘餘油飽和度 (residual oil saturation, 簡稱 S_{or})**，此即為水沖法的採收極限。

3. 三期採油 (**Tertiary Recovery**) 或強化採油 (**Enhanced Oil Recovery**)

第三階段採收，或稱**強化採油 (簡稱 EOR)**，指以注入水以外的物質來提高採收率 (降低殘餘油飽和度)，其中包括**混溶沖排法 (miscible flooding)**、**化學沖排法 (chemical flooding)** 等其他方式。一般來說，注射能力佳、水沖法生產成效良好的油田，即是進行強化採油的最佳人選。無論是混溶沖排法或是化學沖排法，原理不外乎透過降低界面張力 (**interfacial tension, 簡稱 IFT**) 來提高置換效率 (**displacement efficiency**)，或透過降低流動性比 (**mobility ratio**) 來提高掃排效率 (**sweep efficiency**)。強化採油的採收率約為 15%。

混溶沖排，例如注入乙烷 (**ethane**)、丙烷 (**propane**) 等碳氫化合物氣體、或超臨界二氧化碳流體 (**supercritical CO₂**)【註：壓力超過 7.39 MPa、溫度超過 31.1°C，具有類氣體的膨脹性質、類液體的密度】，降低沖排流體與原油之間的界面張力。

化學沖排，例如交替注入鹼液 (**alkali**)、表面活性劑 (**surfactant**) 及聚合物 (**polymer**) 沖排等 (例如 **polymer flood**、**ASP flood** 等)。鹼液有二項功能，一是可以**提高沖排流體 (水) 的 pH 值**，使之與原油中的**酸性物質**反應，製造**現地表面活性劑 (in-situ surfactant)** 來降低界面張力；二是可以**產生乳化液 (emulsion)** 來降低流動性比。在非

酸性原油中，則可透過注入表面活性劑來降低界面張力。注射聚合物則能增加沖排流體（水）的黏度，使流動性比降低。

(四) 油層工程與油藏分類（綜合上述第一、四課程內容）

1. 油層工程師的主要工作

透過研究、實驗、採樣及油層模擬等方法，盡可能了解油層流體的性質及流體在岩石孔隙中流動的能力。在生產過程中，油層的能量（如溶解氣、氣頂、底水等）會因生產而減低，工程師必須費心蒐集相關資料如壓力遞減曲線、氣水比變化等，來了解油層中油氣性質的變化。此對於中期、長期的生產規劃有深遠的影響。

2. 決定生產策略的基本參數

(1) 油藏原始總量（**Original Oil in Place, 簡稱 OOIP**）與氣藏原始總量（**Original Gas in Place, 簡稱 OGIP**），公式如下：

$$OOIP = 7758 A h \phi (1 - S_w) / B_o$$

$$OGIP = 43560 A h \phi (1 - S_w) / B_g$$

A ：油層面積(acres, 英畝)

S_w ：含水飽和度

h ：生產層厚度(呎, ft)

B_o ：地層體積因子(reservoir bbl/STB)

ϕ ：孔隙率

B_g ：地層體積因子(reservoir ft³/scf)

(2) 岩層性質：

岩層性質包括岩石的種類、油層壓力梯度、油層溫度梯度等。

(3) 流體性質：

流體性質包括油氣的相態行為（phase behavior）、流體的可壓縮性（compressibility）、油的溶解氣油比（solution gas-oil ratio）、油的

黏度變化 (viscosity)、流體的收縮因子或地層體積因子 (shrinkage factor or formation volume factor) 等。

(4) 滲透率：

a. 滲透率或絕對滲透率 (permeability, or absolute permeability)：

流體在岩石孔隙中的流動能力。

b. 有效滲透率 (effective permeability)：

某一特定流體與其它不與之混溶的流體 (immiscible fluid) 共存於岩石中時，此特定流體在岩層孔隙中流動的能力。有效滲透率會受到該流體飽和度 (saturation) 及岩石性質的影響。

c. 相對滲透率 (relative permeability)：

某一特定流體，在特定飽和度下的有效滲透率，與該流體在完全飽和狀態下之絕對滲透率的比值。

(5) 流動性比 (Mobility Ratio, M)：

沖排流體 (水) 的流動性與被沖排流體 (油) 流動性的比值。流動性比愈低，指侵 (Viscous Fingering) 的情況愈少，掃排效率愈高。公式如下：

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

k_{rw} ：水的相對滲透率

μ_w ：水的黏度

k_{ro} ：油的相對滲透率

μ_o ：油的黏度

3. 地層測驗 (Formation Testing, or Well Testing)

地層測驗的種類，可依油田的開發階段及測驗目的分為：**探勘及佐證 (exploration and appraisal)**、**油田開發 (development)** 階段等。

在**探勘及佐證階段**，地層測驗的主要目的為獲取油層壓力數據、採集油氣樣本 (fluid samples) 及模擬完井時的生產狀況。**鑽桿測驗 (drillstem test, 簡稱 DST)** 為此階段常見的一種測驗方式。取得壓力-深度圖 (pressure - depth plots) 後，即可幫助建立地層壓力梯度 (formation fluid gradient) 及識別在油層中的流體界面。此階段的測試可讓石油公司透過**產率 (production rate)** 及預估的油氣資源量 (**volume of hydrocarbon in place**) 了解此剛發現的油田是否有開發潛力與經濟價值。如果測驗的產率很低，必須探究是因油層的生產力差 (low productivity) 或高膚表因子 (high skin factor) 所致；若測驗結果顯示預估的油氣資源量很低，則表示此油田無進一步開發價值 (即使產率很高)。另外，於探勘階段取得油氣樣本格外重要。由於地層從未生產過，因此油層尚未減壓，此時取得的油氣樣本最適合用來分析油層特性 (**reservoir characterization**)。

在油田開發階段，石油公司必須透過地層測驗，進一步了解各油氣井之間的**連通性 (hydraulic communication)** 來建立油層特性與地質建模 (**geological model**) 之間的**關聯**。此階段測驗通常在完井的狀態下進行 (即下水泥工作、穿孔作業、填塞器等皆已設置完畢並進入正常生產狀態)，能更準確評估各項油層數據。另外，此階段測驗亦可透過**霍納圖 (Horner plot)** 了解膚表因子的高低程度，以利後續規劃**激勵生產 (well stimulation)** 措施，降低膚表因子並恢復油氣井的生產力。

4. 油藏分類

石油中包括石蠟 (paraffin)、環狀烴 (cyclic hydrocarbon)、焦油腦 (naphthalenes) 及芳香烴 (aromatics) 等，依不同比例混合形成不同性質的原油。依油的顏色、氣油比及 API 比重 (API Gravity) 可粗略區分為重油 (black oil)、揮發性油 (volatile oil)、反凝析油 (retrograde gas condensate)、濕性天然氣 (wet gas)、乾性天然氣 (dry gas) 等五種。(如表一)

表一 油氣藏分類					
Type	Dry Gas	Wet Gas	Retrograde Gas Condensate	Volatile Oil	Black Oil
Appearance	Colorless gas	Colorless gas & liquid	Colorless liquid	Brown & red/green liquid	Black viscous liquid
GOR (SCF/STB)	N/A	>15000	3000-15000	2500-3000	100-2500
API Gravity	N/A	60-70	50-70	40-50	<40

(資料來源：Allan P. Roberts and Thomas O. Allen (2012). Production operation vol.1.)

(五) 地層損害 (綜合上述第一、三、四課程內容)

油氣井的生產力下降可能來自於兩種損害，一者為假損害 (pseudo damage)，另一者為地層損害 (formation damage)。

1. 假損害 (Pseudo Damage)

假損害，是指在非因滲透率減低的條件下，導致產量減少的一種情形。理想的完井方法與實際完井的方法常有很大的不同，時常有因採用部分完井 (partial completion) 而產生假損害的情況。例如部分穿孔 (partial perforation)，為了避開生產層的底水層 (bottom aquifer)

或油層上方的氣頂時，刻意只在整個生產層厚度（pay thickness）的一部分穿孔。由於生產層中的流體可流入井孔的總面積不足，產生額外的阻力，雖未造成滲透率的減低，但會導致產量減少，此即一種假損害。另外，在流速太快的井孔附近，容易產生紊流（turbulent flow），紊流會在井孔附近造成壓降，亦即油氣流入井孔時必須克服額外的阻力，最終導致產量減少，此為另一種假損害。其他會造成假損害的情形，包括因使用井下節流嘴、結垢、石蠟或瀝青質沉澱等，造成井孔限縮，使油氣因摩擦損耗過多而產生壓降。

2. 地層損害（Formation Damage or True Formation Damage）

任何鑽井、穿孔、完井等作業都可能造成地層損害，此種損害對生產井（或注射井）的生產力有極大的影響。地層損害其中一個較廣泛的定義是：任何非刻意造成井孔流入（或流出）的阻抗。這些阻抗的來源，一者為井孔附近的絕對滲透率（absolute permeability）減低，另一者為由井孔附近相對滲透率（relative permeability）改變所造成（油氣相態變化所致）。導致滲透率減低的原因，可能來自鑽井作業、水泥作業、穿孔作業、完井及修井作業、微粒運移（fines migration）、蠟或瀝青質沉澱、乳化物形成、細菌堵塞、潤濕度（wettability）改變等。

地層損害難以避免，只能加以控制或盡量降低其損害程度。為了減少地層損害，必須深入了解地層的性質（岩石性質、孔隙率、潤濕度等）及欲進行的井下作業相關基礎知識如：泥漿性質、酸鹼度、穿孔作業壓力等。

（六）完井工程（綜合上述第一、三、四課程內容）

1. 完井種類

在同一個礦區，完井的種類會因目的或功能需求不同而有差異。探勘時期的鑽井，通常將完井重點放在「**如何在最短時間內取得大量的油層資料**」。在生產期，完井可分為生產井、注射井或監測井。有些井在完井時即被設計成生產井或注射井；有些注射井，是在生產井產油一段時間後，才透過修井修改為注射井；另外，也有將注射井或生產井修改為觀察井的情況。

2. 生產井的完井目的、考量與設計限制

(1) 目的

a. 井的控制與安全操作（**well control and safe operation**）：

良好的完井設計可大幅降低井噴及工安事故發生的機率，不但可避免財產損失，更可保護公司最重要資產－人員－免於傷亡。

b. 控制產率（**control of production or injection rate**）：

根據地面設備負荷狀況或其他油氣井的產率變化，適時調整各個生產井（或注射井）的產率（或注射率），以達成油田的產量控制。在井的生產操作出現問題時，亦可透過流量的調整來因應各種狀況，並找尋問題所在。

c. 掌握各產層貢獻（**control of zonal contributions**）：

當一口井有數個不同的生產層時，可利用各種完井方式來隔離不同生產層，如此可掌握各生產層的產率及壓力變化，進而幫助擬定未來的生產策略（如採用水沖法或其他強化採油法）。

(2) 考量因素

a. 井的完整性（**well integrity**）：

保持井完整性是完井最重要的考量。品質好的完井可將井液限制於井內，避免井噴或土壤污染。

b. **經濟效益 (economics) :**

成本是所有決策的重要考量之一。石油公司應透過成本效益分析來決定使用何種完井設計，以最小的成本獲得最大的收益。

c. **油田的開採年限 (life of well or oilfield) :**

如果石油公司只在某礦區生產十年，其完井及生產的目標將可能是如何在這十年內使採收率最大化；如果沒有生產時間限制，目標則是如何使總石油採收率最佳化，並獲得最大利益。

d. **未來的操作變化 (future operation change) :**

因已預期將來可能進行的生產、修井或廢井作業，在完井設計中放入如循環側閥 (sliding sleeve door)、短座管 (landing nipple) 或氣舉閥 (gas lift mandrel) 等元件，減少未來進行井干預的成本。又例如，使用電潛泵作為人工提舉生產設備，需考慮井孔內徑尺寸是否大於馬達本身加上電纜寬度等。

(3) **設計限制**

a. **地區法規 (local regulations) :**

指礦區所在地區的法規。有些國家 (如加拿大) 在一般情況下不允許不同產層混合生產 (commingled production)，因為以此方式生產將不利於取得各產層壓力及產率，致無法有效率規畫二期及三期採油措施，影響井的最終採收率 (ultimate recovery)。

b. **後勤及物流 (logistics) :**

礦區的地理位置、環境、進出口難易度，及維修廠商的支援能力等，都會影響完井工程及生產操作設備維護的可行性。

c. **採購 (procurement) :**

採購交貨日、廠商庫存量等皆應列入完井設計考慮。在時間或庫存有限的情況下，最理想化的工程設計不一定符合公司利益。

3. 井下的設計

(1) 井底 (**Bottom hole**) 設計

分為裸孔完井 (open hole completion)、篩管完井 (screen completion)、套管水泥完井 (casing-cemented completion) 等設計。

(2) 生產導管 (**Production conduit**) 設計

分為無油管完井 (tubingless completion)、油管無填塞器完井 (tubing completion without packer)、有油管含填塞器完井 (tubing completion with packer) 等三大類。

(七) 穿孔作業 (綜合上述第一、三、四課程內容)

在生產套管及水泥工作完成後，生產層油氣被套管隔離。穿孔作業的主要目的即是重新建立井孔與地層間的連結。

1. 輸送穿孔槍的主要方式分為下列三種： (如圖七)

(1) 過套管穿孔 (**Through-casing perforation**):

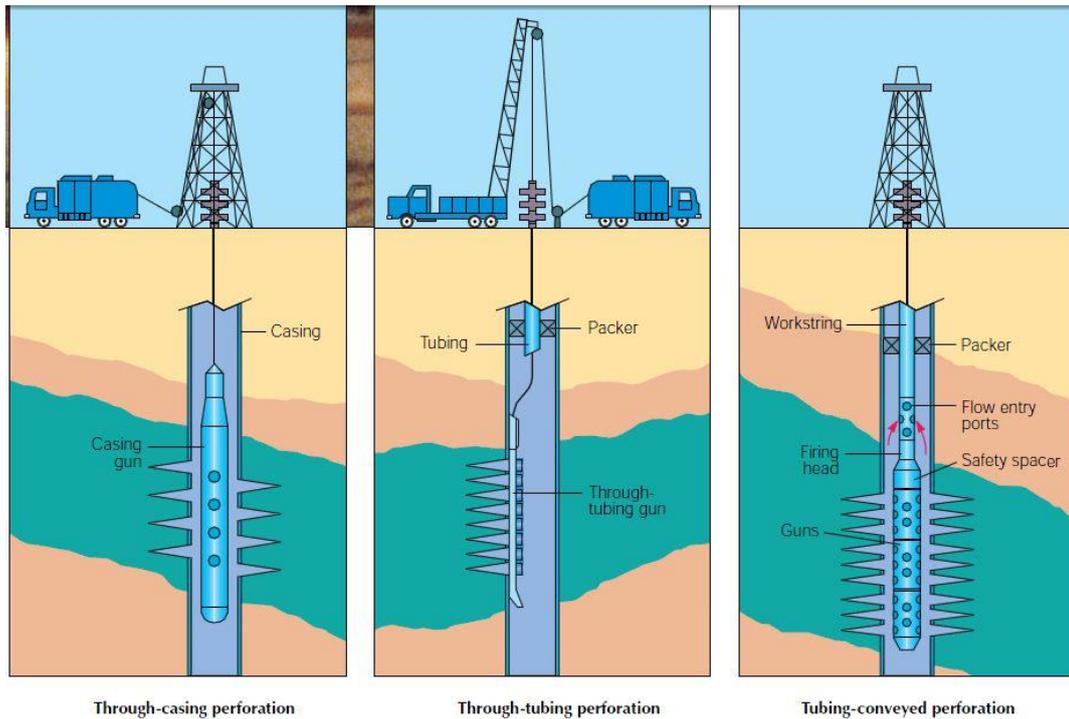
- a. **優點**：可使用直徑較大的穿孔槍。
- b. **缺點**：在井斜大的井中較難放置到定位、作業深度受限於穿孔槍的重量與鋼線強度、須進行正壓穿孔 (碎片有可能塞住穿孔) 等。

(2) 過油管穿孔 (**Through-tubing perforation**):

- a. **優點**：可進行負壓穿孔作業。
- b. **缺點**：穿孔槍的尺寸受限於油管大小、穿孔槍回收作業較耗時。

(3) 油管輸送穿孔 (**Tubing-conveyed perforation**):

- a. **優點**：穿孔槍放置深度不受地層深度及井斜限制、穿孔相位容易控制、穿孔槍容易控制在井孔中心。
- b. **缺點**：穿孔作業較耗時。



□ Three conveyance methods for perforating guns: through-casing and through-tubing, and tubing-conveyed systems. The through-tubing gun shown is held against the casing magnetically. The others hang free.

▲圖七

左圖 利用鋼線作業將穿孔槍放置於指定深度後穿孔，整個過程不使用填塞器（Packer），因此必須進行正壓穿孔。此法優點為可使用較大的穿孔槍。缺點是在井斜大的井中較難放置到定位，且穿孔槍放置的深度受限於穿孔槍總成的重量與鋼線強度。

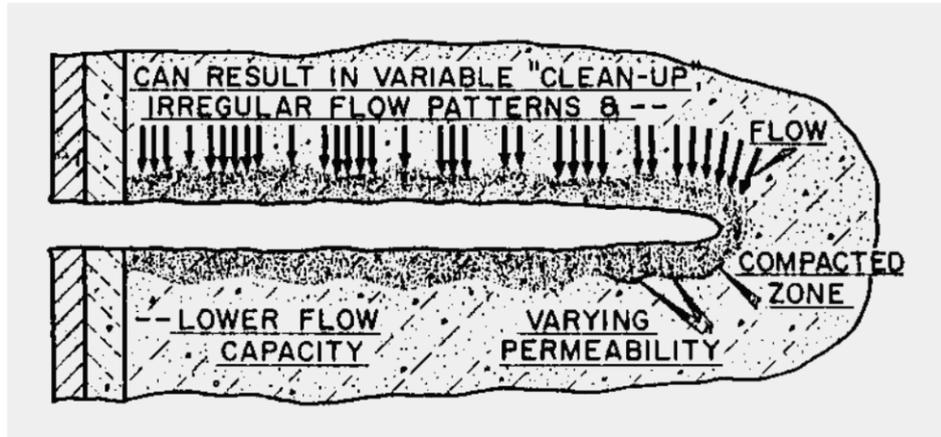
中圖 利用鋼線作業將穿孔槍自油管內部傳遞至指定深度後穿孔，過程中有使用填塞器，因此可進行負壓穿孔。缺點是取回穿孔槍作業較費時。圖中的穿孔槍是利用磁鐵吸附至套管上。

右圖 將穿孔槍總成接在組立的油管末端，利用油管將穿孔槍下降至指定深度後穿孔，過程中有使用填塞器，因此可進行負壓穿孔。穿孔深度不受深度及井斜限制，且較容易將穿孔槍總成放置在套管的中心。缺點是整體作業較費時（成本更高）。
(資料來源：<http://www.geosketchnote.net/2017/12/perforation-strategy.html>)

2. 穿孔破碎區（Perforation Crushed Zone）：（如圖八）

由於穿孔作業造成的碎片會在穿孔孔壁上造成擠壓（compaction），產生一個破碎區（crushed zone），此破碎區的滲透率（ K_c , Permeability

of crushed zone) 將造成額外的流動阻力，並會大幅低於原本地層的滲透率。影響此破碎區的滲透率的因素包括地層的性质、炸藥表面金屬材質、在負壓或正壓下進行穿孔作業。



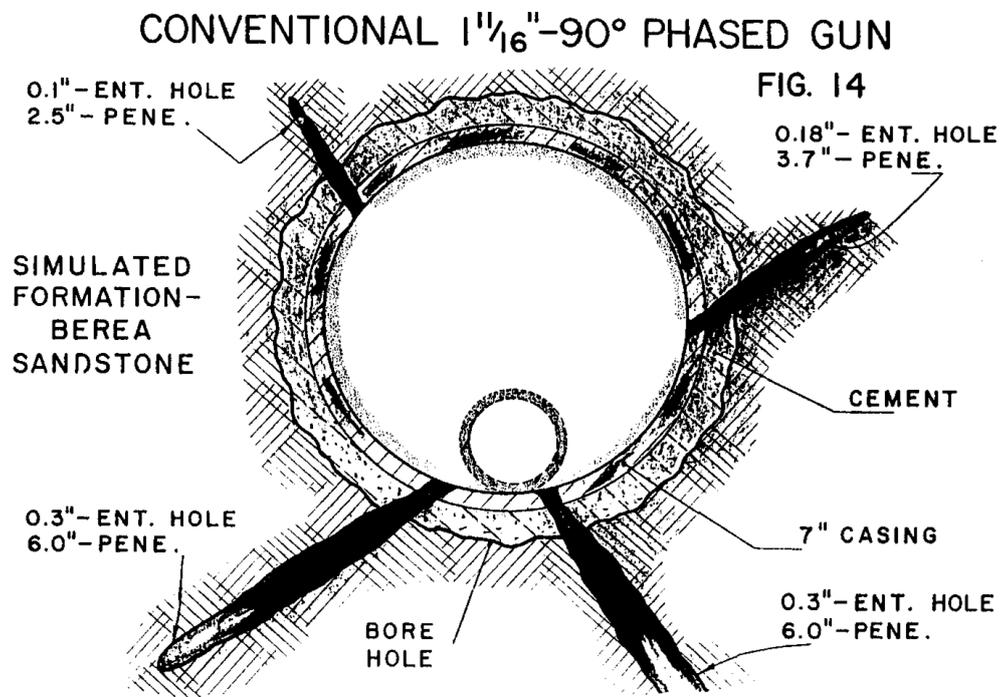
▲圖八

在正壓下進行穿孔作業，易造成炸藥表面的金屬材質破碎後擠壓至穿孔周圍區域，造成油氣流動阻力。破碎區的滲透率約為地層滲透率的 1/3 至 1/10。(資料來源：Jerry Shaw (2000), Adams Pearson Associate)

3. 穿孔設計：

- (1) 穿孔深度 (**Deep Penetration**)：深度深、孔徑小，目的為穿過地層損害區域。
- (2) 穿孔直徑 (**Big Hole**)：深度淺、孔徑大，目的為提供後續工作（如液裂或防砂）提供足夠大小孔徑供支撐物 (**proppant**) 進入。
- (3) 穿孔相位 (**Phasing**)：常見的角度有 0 度、90 度、180 度等。井孔愈大，穿孔相位對於油氣井生產力的影響愈大；滲透率的非均向性 (**permeability anisotropy**) 程度愈大，穿孔相位的影響也愈明顯。其中 0 度穿孔的效果較不理想，因油氣需克服較大的井孔附近阻力（繞過無穿孔區）才能自穿孔流入井孔。

(4) 穿孔密度 (Shot Density)：穿孔密度對產率的影響，與穿孔深度及穿孔相位成正相關。



▲圖九

穿孔槍非位於井孔中心、且以 90 度相位穿孔之結果示意圖。(資料來源：Jerry Shaw (2000), Adams Pearson Associate)

參、具體成效

一、強化本職學能並與國際接軌

本次出國訓練課程領域包含：石油地質、井測、油層工程、地層損害、激勵生產、強化採油、液裂工程、水平鑽井工程、防砂設計、非傳統油氣資源、油砂生產原理、人工提舉設備、完井工程及修井工程等，有助於在短時間內快速了解上游石油工業各領域的樣貌。個人具機械工程背景及擁有六年煉油廠設備維修經驗，在先進產油國家學習石油開發專業知識，能瞭解國際最新動態，收穫良多。

二、與國際石油公司交流並建立連繫管道

本次出國訓練，認識多位來自不同石油公司的學員，其中包括 Husky 鑽井部門主管、Total 岩石物理師、Chevron 的油層工程師、ConocoPhillips 井務工程師、INPEX 生產工程師、C-FER 的研究員等，透過課堂上的分組討論及課後的充分交談，除了相互交換名片外，因深入交談，已建立良好友誼，可促進未來雙方公司之交流。此外，藉由參訪 CMG 公司、與中油公司有合作之 Husky 公司及亞伯達省能源局岩心倉庫等，認識許多不同領域的專業人士、瞭解國外能源公司的作法，這對公司日後之石油探勘開發工作必有助益。

三、分享課程內容並擴大學習成效

本次出國訓練包括眾多生產工程相關課程，多數課程皆十分昂貴。以 PetroSkills 為例，一門五日的課程之註冊費約為台幣十五萬元，如邀請外國講師至本公司開班授課，每班二十人開課約需花費台幣三百萬元。

若有機會將本次出國的部分所學於公司內部分享，將可為公司減少人事訓練費用支出，並節省同仁各自出國研習旅費及寶貴時間。

四、學習油田開發技術並緊密結合公司之需要

新開發礦區（如查德）投入生產時，需投入各式各樣專業人才並共同努力才能取得佳績。本次課程多屬石油探勘及生產基礎知識，但亦橫跨生產工程、人工提舉、完井工程、激勵生產及強化採油等數個領域，有助於未來投入規劃初期生產人工提舉設備、中期注水沖排或後期強化採油等相關工作，這些都是石油公司正迫切需求的技術。

肆、心得及建議

一、參加 PetroSkills 課程應注意事項

PetroSkills Alliance 於 2001 年由殼牌公司 (Shell)、英國石油公司 (BP) 及 OGCI (Oil and Gas Consulting International) 共同成立，至今已有 30 個會員公司 (這些公司生產的油氣占全球總產量的 40%)，提供石油業界各領域的專業技能培訓課程。其課程可依參訓人員經驗之深淺分為四個程度：基本 (Basic)、基礎 (Foundation)、中級 (Intermediate) 及專業 (Specialized) 等，學員可依其工作經驗，選擇各種不同程度及領域的課程。該訓練機構採網路報名方式，並可依開課地點、時間、程度、領域等搜尋有興趣的課程，並可預覽講師經歷及專長。值得一提的是，無論報名何種課程，PetroSkills 都會在課程舉辦日的前一個月再次以電子郵件確認各學員是否如期參訓，如參訓人數不足將會通知課程取消並退費。

本次參訓之三門 PetroSkills 課程 (生產操作一、人工提舉系統、修井與完井) 皆屬於基礎課程 (foundation)，並同屬於生產及完井領域的系列課程 (production and completion discipline)，提供宏觀石油上游生產領域的完整介紹。參訓人數為 8 人 (生產操作一)、4 人 (人工提舉系統) 及 4 人 (修井與完井)。學員來自 Chevron、Total、ConocoPhillips、INPEX、Kanto Natural Gas、Husky、C-FER、Tundra Oil & Gas、Obsidian Energy 等公司。

與 PetroSkills Alliance 相似的石油訓練機構，尚包括施蘭卜吉公司旗下的 NExT、法國石油研究院的 IFP Training 等。除此之外，在美國及加拿大地區顧問公司眾多，大部分的顧問公司皆由業界資深專業人士成立，亦可提供其他訓練管道。

二、生產操作一（**Production Operations 1**）課程的比較

民國 89 年台探總處海工組組長黃崇友參加美國休士頓生產操作課程（由 OGCI 舉辦），當時共有 35 位（盛況可見）來自不同國家的學員，來自北美洲、南美洲、中亞、非洲、亞洲等地區，由兩位經驗豐富的講師共同授課。

本次（107 年）加拿大卡加利相類的生產操作課程（由 PetroSkills 舉辦），共有 8 位學員參與，分別來自加拿大、日本及台灣。學員的年齡分布大約在三十歲上下，工作經驗大約是五到十五年，多半畢業於機械、化工、或石油工程等工程相關科系。講師曾任職於 BP、Exxon、Imperial Oil (ESSO) 等公司，具有 35 年生產操作及油層工程的研究經驗，現自行成立一家顧問公司“Petrobob Consulting Ltd.”。上課當中，學員之間互動熱絡，與講師有充分的討論。另外，該訓練課程近二十年內學員人數驟減，原因之一是，石油業景氣循環起落很大，導致各石油公司人事訓練費用緊縮，但仍有部分規模較大之油公司將本課程列為「員工正式訓練必修課程」的一環，顯示本課程對於石油探勘領域訓練的重要性。

三、PetroSkills 生產與完井系列課程適合參訓的人員

生產操作、人工提舉系統、完井與修井等三門課程內容環環相扣，「生產操作課程」提供石油上游工業各項議題；「人工提舉課程」就生產井應用的各種提舉方式及油井流入流出節點分析作詳盡介紹；「完井與修井課程」則分享了許多的工程實務案例。此三門課程同屬於 PetroSkills 的生產與完井系列（**Production and Completion Discipline**）課程，提供從事上游生產各領域人員一套完整的生產工程訓練。

(一) 生產操作課程

此課程雖僅以生產為名，但為期兩週的課程(共十天)，其內容包含：石油地質、油層工程基礎、油管強度計算、完井泥漿、套管水泥、穿孔作業、生產節點分析、人工提舉、地層損害、材料與腐蝕、石蠟與瀝青質沉澱、防砂控制、酸處理與液裂、非傳統油氣資源介紹等基礎概念，屬於概括式的教學，適合剛接觸上游探勘領域的學員參與。由於每個主題都是專門學問，對於較深入的議題，講師沒有太多時間多做說明或讓學員發問，但本課程提供豐富的參考資料，並可在短時間內讓學員了解生產工程的全貌及其牽涉的課題，非常適合剛踏入生產工程的專業人員參加。

本課程學員共有八位，分別來自 Chevron、INPEX、C-FER(二位)、Kanto Natural Gas、Tundra Oil & Gas、Obsidian Energy 及 CPC 等公司，資歷約為五至十年，其中包括生產工程師、油層工程師、設備工程師、鑽井與完井研究工程師及生產研究工程師等。

(二) 人工提舉系統課程

此門課程重點在介紹各種人工提舉設備的優劣及適用環境，其中包括：抽油桿泵、柱塞提舉、液壓泵、電潛泵、螺桿泵等。在課程當中，講師藉由引導學員使用 SNAP（生產模擬軟體）來演練習題，使學員能夠較快進入狀況。由於上課步調適中，講師每每結束一個章節後會讓同學們自由發問，因此講師與學員之間的交流相當踴躍。在課程接近尾聲時，講師安排了一次分組上台報告（二人一組，共二組），要求學員在給定的油層及生產條件下選擇適合的人工提舉方式，並適當闡述選擇的理由後，再由另一組學員於台下發問。本課程雖包含較多機械設備的介紹，但講師授課方式深入淺出，亦適合稍有生產現場經驗的專業人士參訓。

本課程僅有四位學員參加，分別來自 Husky(二位)、Kanto Natural Gas 及 CPC 等公司，其中三位資歷約為五至八年，一位資歷為十五年 (Husky 鑽井工程師)，職務內容包括儲集岩工程師、設備工程師及鑽井工程師等。

(三) 完井與修井課程

本課程的講師具有豐富的現場完井及修井操作經驗，並透過大量的切身經歷來輔助學員了解課程內容。課程內容包括介紹地面上及井下各項設備的功能、下套管水泥的要點、穿孔設計的考量、液裂工程、防砂控制等，課程內容精采務實，學員間討論熱絡。講師每日早上會以 Kahoot.it (學習互動網頁) 來與學員作課堂小考以複習昨日上課內容，學員僅需使用自己的手機即可作答，十分輕鬆有趣。本課程牽涉較多現場實務經驗，建議具有工程背景或相當現場經驗的專業人士報名參加。

本課開課前一個月收到 PetroSkills 的來信確認是否如期參訓，可見本課程有最低開課學員數量限制。參加本課程的學員共有四位，分別來自 Chevron、Total、ConocoPhillips 及 CPC，工作資歷約五至九年，包括生產工程師、井務工程師及岩石物理師等。

四、Max-Wells 公司訓練課程的特色

本課程包括六項主題：上游石油工業概論、油層工程、地層損害與激勵生產、頁岩油氣與緻密油氣探勘開發、重油採油法、強化採油概論等。講師擁有豐富的研究及現場應用經驗，並且是非傳統資源 (如頁岩氣) 及傳統油田強化採油等方面的專家。授課時經常以其自身工作經驗舉例，以深入淺出的方法，提高學員的學習效率。上課期間講師常採取問答方式，一方面可確認學員的學習狀態，一方面讓學員有機會就其有

興趣之議題作更深入的探討。除此之外，本課程也包含兩日野外實習，一日至坎莫爾（Canmore）實地進行野外實習，觀看著名的逆斷層（McConnell thrust fault）之形貌及格拉西湖（Grassi Lakes）的石灰岩露頭、另一日至馬蹄峽谷（Horseshoe Canyon）實地觀察出露的煤層。

五、北美石油公司透過輪調制度培養新進工程師

透過與上課學員及講師交流得知，加拿大有許多石油公司會安排其新進人員至其公司各部門進行工作輪調（Engineer-in-Training Rotation），至各不同部門學習不同領域基礎知識。以 Devon Canada 公司為例，該公司招募新進工程師後，會安排他們在四年時間內，到三至四個不同的部門工作，包含一年半至兩年的油田現場歷練。此舉有助於新進人員學習公司內各部門的運作方式及瞭解其工作內容，認識各部門同仁並建立良好關係，以利日後工作交流。

六、傳統資源探勘與舊油田強化採油比較

取得新油田或與其他公司合資經營，向來是各大石油公司的重點業務。發現有生產經濟價值的新油田往往十分振奮人心，並且是公司探勘事業單位價值提升的根本。幾十年來，品質較佳（滲透率高、蘊藏量大）的陸上油田幾乎都已被各大石油公司發現及開發，如今想若取得好的新油田愈來愈困難。而海上油田的探勘及開發成本及風險很高，海上各種作業（如三維震測、海上鑽井等）的服務價格，更是高出陸上探勘作業甚多。

在加拿大已有一種新興的石油公司（如 Enhance Energy Inc. 公司等），其旨不在發現新的油氣資源，而是將營業重點放在收購已採收（含一期

與二期採油)枯竭的油田,並以適當的強化採油方式進行增產。此種行業經營成功的關鍵在於如何識別品質良好、適合強化採油的油田,並以符合經濟效益的價格取得礦權,其優點是不需承擔探勘失敗的風險。

當被運用的強化採油技術包括:二氧化碳沖排法、化學沖排法(注入鹼液、表面活性劑、聚合物)等。值得一提的是,二氧化碳沖排法不但可以用來生產原油,亦可響應世界減碳潮流,將碳封存於枯竭的油田。已有許多歐美先進國家開始課徵碳稅(Carbon Tax),以二氧化碳沖排法產油,恰可為石油公司賺取碳排放額度(Carbon Credit),間接減低生產成本。

七、亞伯達省能源局獨步全球的岩心管理

加拿大的礦區資源皆為國有,自1960年起,亞伯達省政府規定,於該省取出的岩心及鑽井資料皆須繳納亞伯達省能源局(Alberta Energy Regulator,簡稱AER)岩心研究中心(Core Research Centre,簡稱CRC)【註:AER前身為Energy Resources Conservation Board,簡稱ERCB】。繳納岩心的期限為鑽井後三個月內(非傳統礦區為六個月內),如為新開發油田並涉及探勘機密者,石油公司可向AER申請保密一年,保密期限過後即解密,所有資料將對外開放。開放的資料包括岩心(core)、岩屑(drill cuttings)、鑽井及完井資料(Tour report)、測井(well logging)及實驗結果(test results)等。

至2018年一月為止,亞伯達省共計已鑽了432,463口井,有岩心或岩屑資料的共計194,579口井,最古老並擁有岩心資料的井可回溯至1925年十月。該機構另有6間機密岩心研究會議室(confidential core research rooms)租借服務,可提供石油公司研究人員在安全及保密的空間裡進行研究及討論。如有自行攜帶的實驗儀器或顯微鏡,亦可放置在

專用置物櫃中上鎖存放，方便地質師數日或數週於此地工作。成立此岩心研究中心及訂定相關管理法規的宗旨是，讓各石油探勘公司能共享探勘資料並鼓勵創新及競爭，堪為世界上油氣探勘之典範。



▲岩心。



▲岩屑。



▲鑽井及完井資料。

八、Husky 公司的先進作風及其鑽井現場的管理

Husky Energy 的前身 “Husky Refining Company” 成立於美國懷俄明州，以煉油為主要業務，如今已是一個涵蓋上游（探採）及下游（煉油）的整合型公司（integrated company），總部位於加拿大卡加利市，員工約有五千人。除了陸上傳統油氣及油砂生產以外，亦致力於海上油田開發，目前為加拿大東岸外海 White Rose 油田的經營人。

Husky 的探勘部門經理 Gareth Lewis 等幾位資深人員，運用亞伯達省能源局的公開資料，建立一套可協助礦區投資組合的篩選資料庫系統軟體 “SAGE tool”。根據 Gareth Lewis 所述，他們總共花了約兩年時間，其中有百分之七十以上的時間，投入在資料的品質管理。一開始是與不同部門的同仁合作，發展至一定成果後，Husky 公司才設立專職部門負責維護此系統資料庫。此資料庫可協助分析各種投資組合，並

整合了礦區產量、地層壓力的歷史數據、敏感度分析、經濟分析等，甚至還可查詢各礦區業者的開採權到期日（Expiry date），以利日後事先規畫取得礦區所需預算。

參訪的鑽井現場過程中，能體會到 Husky 公司對於工安的嚴格要求，如同各大石油公司，視其工作人員為公司最重要的資產，各種個人防護具應有盡有，以個人防護具的護目鏡為例，還分為一般型與戴眼鏡型（較大）。參觀的現場正在鑽一對相隔 180 度的多分支井（multi-lateral wells），每口分支井鑽進時間預估為 15 日。現場工作時間為兩班兩輪制，每連續工作十日後，連續休息十日。工作人力相當精簡，每班包括 Husky 監工 2 人及鑽井承包商組員 5 人，現場駐有一名醫護人員。



▲Husky Ansell 區域附近鑽井現場。

九、在 2018 全球石油展看見石油生產技術的突飛猛進

北美一年一度在加拿大卡加利舉行的「全球石油展（Global Petroleum Show 2018）」，目的是為了讓石油業中的經營人、服務公司及其他業界人士齊聚一堂交流討論，除了可以激發出新的經營概念或技術合作，設備公司也藉此機會展示更新、更成熟的產品，激發出更多合作商机。此外，展出單位也邀請各界專家講述各國的能源開發潛能、探勘最新動態及新興技術應用成果等。

今年展示的設備產品包括砂處理設備（EnerCorp 公司）、臥式三相離心機（Allied Centrifuge 公司）、撓曲油管注射頭（Celtic Pride 公司）、螺桿泵（Hebei Jerry Machinery 公司）、井下溫度及壓力探測器（DataCan 公司）、鑽頭（ACE Drilling Tools 公司）、複合材料油管（SHAWCOR 公司）、地面燃燒塔（Total Combustion Inc.公司）、自主流入控制閥與防砂濾網（Exceed 公司）、螺旋式輸油泵（Blackmer 公司）、泥漿或液裂泵浦及撓曲油管設備（SERVA 公司）等。



▲EnerCorp 臥室砂濾機。



▲SERVA 撓曲油管設備。

十、CMG 服務公司技術不斷求新

CMG (Computer Modeling Group Ltd.) 是一家以開發油層模擬軟體為主要業務的公司，總部座落於加拿大卡加利大學旁，致力於開發各種油層模擬專業軟體套件，應用領域包括液裂 (fracturing)、水沖法 (waterflood)、注氣 (gas injection)、二氧化碳強化採油 (CO₂ EOR)、化學強化採油 (Chemical EOR)、蒸氣輔助重力驅排 (SAGD)、地熱 (geothermal) 等。本公司探採研究所亦有購置該公司生產工程之軟體。

該公司至今已有四十年的歷史 (1978 年至今)，員工人數兩百人，銷售的套裝軟體包括 IMEX、GEM、STARS、BUILDER、RESULTS、WINPROP、CMOST 及 COFLOW 等。每項軟體各有其專精的功能及特殊的目的，可依需求同時使用數個軟體來完成一件工作，並且軟體的功能還在持續拓展進步中。目前該公司正致力於推展雲端運算，並已有許多石油公司擁有安裝於 CMG 大樓機房的專屬雲端伺服器，客戶可在世界各地將專案送至雲端運算後，再於當地讀取結果，加速油田評估流程，使石油公司的管理與運作更有效率。