

出國報告（出國類別：其他(開會)）

2019 年石油工程師協會西部區域會議 出國人員報告書

服務機關：台灣中油股份有限公司

姓名職稱：黃乙倫 研究員

派赴國家：美國

出國期間：108 年 4 月 21 日至 4 月 28 日

報告日期：108 年 5 月 14 日

摘要

如何提高既有礦區產出及增加國外礦區數量以全面提升油氣自給率係本公司探採部門之長期策略目標，故除應多瞭解油氣探採技術發展外，亦須積極爭取可能的礦區合作機會。本次出國參加石油工程師協會西部區域會議，期望透過參與國際性研討會，與國外專家學者交流，瞭解技術成果與研發趨勢。

本屆會議之主題為「透過變革以蓬勃發展：創新、分析與永續」，會中除發表石油工程相關傳統技術論文外，針對當前熱門的資料分析與機器學習議題亦有著墨，使與會者針對各議題進行交流。透過和與會者研討及學習，以瞭解油氣探採技術發展現況及未來研究方向，有助於激發研究想法，以精進本公司之礦區評估與油氣增產技術。

目次

摘要.....	1
目次.....	2
壹、 目的.....	3
貳、 過程.....	4
參、 具體成效.....	9
肆、 心得及建議	35

壹、目的

鑽完井工程與油氣田開發規劃係鑽井採油組核心工作項目，除積極協助探採事業部解決國內外礦區之現場工程問題與導入新技術外，同時，亦完成查德自營礦區之油田開發計畫，協助 OPIC 非洲公司於 2017 年 7 月順利取得開發許可，邁入開發階段，目前該礦區正依循該計畫落實各項工程建設中。其中，個人主要負責油田開發規劃與礦區經濟評估等工作，目前亦擔任探採事業部諮議會議委員，負責礦區併購案之經濟分析與風險評估等內容諮詢與審議。

如何提高既有礦區產出及增加經營礦區數量以便全面提升油氣自給率係本公司探採部門之長期策略目標，故除應多瞭解油氣田鑽採技術發展外，亦須積極爭取可能的油氣礦區合作機會。為達成前述目標，且鑒於美國係目前本公司礦區併購之重點地區，本次出國前往美國加州聖荷西參加石油工程師協會之西部區域會議(SPE Western Regional Meeting)，期望透過參與國際性研討會，多與國外油公司、技術服務公司、顧問公司、研究機構與大專院校交流，汲取實務經驗，以精進油氣鑽採與礦區評估技術。

本次奉派出國參與「石油工程師協會西部區域會議」之主要目的如下：

- 一、瞭解美國油探採技術發展現況與未來研究方向，並蒐集可能研究題材。
- 二、學習最新油氣增產技術，以提升既有礦區之油氣產量。
- 三、瞭解數位化油田管理之實務應用，以評估是否能應用於既有礦區經營管理中。
- 四、瞭解機器學習概念及該方法於油氣探採之相關應用。
- 五、瞭解美國加州油氣設施配置與法規要求，以提升礦區開發規劃與成本預估之合理性。

貳、過程

本次出國為期 8 天，詳細出國行程如下表一所示，主要行程係參加石油工程師協會西部區域會議及附屬課程，為期 5 天(4/22-4/26)。

表一、出國行程

日期	地點	工作內容
4/21	台灣-舊金山-聖荷西	啟程
4/22	聖荷西	參加研討會附屬課程(一) 應用統計模型與數據分析進行儲集層產能分析」(Applied Statistical Modeling and Data Analytics for Reservoir Performance Analysis)
4/23	聖荷西	參加研討會附屬課程(二) 「油氣管線、設施與加州法規要求」(Oil and Gas Pipelines, Facilities and California Regulatory Requirements)
4/24-4/26	聖荷西	參加「石油工程師協會西部區域會議」(SPE Western Regional Meeting)
4/27-4/28	聖荷西-舊金山-台灣	返程

本屆石油工程師協會西部區域會議匯集了各大石油公司、技術服務公司、顧問公司、研究機構與大專院校等經驗豐富之工程師、研究人員與專家學者，會議主題為「透過變革以蓬勃發展：創新、分析與永續」(Thriving Through Change; Innovation, Analytics, and Sustainability)，會中除發表油層工程、生產工程與地面設施等傳統技術論文外，針對目前熱門的數位化油田管理與機器學習等議題亦有著墨，使與會者得以針對各項議題進行研討與交流。此外，有別於過往會議主要的贊助商侷限於油公司與服務公司，Google 公司亦為本次會議之主要贊助者之一(圖一)，可感受到隨著近年大數據分析與人工智慧的發展，科技業對於拓展油氣產業業務之重視。



圖一、會議主題與贊助商

會議議程如表二與表三所示，會議主題包括：

- 一、技術創新(Technology Innovations)
- 二、生產井技術(Wells)
- 三、地層污損(Formation Damage)
- 四、機器學習(Machine Learning)
- 五、強化採油(Enhanced Oil Recovery, EOR)
- 六、模擬(Modeling)
- 七、法規符合性(Regulatory Compliance)
- 八、案例歷史探討(Case Histories)
- 九、地面設施/安全性(Facilities/Safety)
- 十、數位化油田(Digital Oilfield)
- 十一、重油(Heavy Oil)
- 十二、儲集層特性(Reservoir Characterization)
- 十三、非傳統油氣資源(Unconventional)
- 十四、油層工程(Reservoir Engineering)

表二、會議議程(4月24日與25日)

Wednesday, April 24

08:00 - 09:45	Panel Discussion: Digital Transformation Panel: Maximizing Value from Digital Innovation	Oak/Fir +
10:00 - 11:40	01 Technology Innovations	Oak +
10:00 - 11:40	02 Wells	Fir +
10:00 - 11:40	03 Formation Damage	Pine +
12:00 - 13:30	Awards Luncheon	+
13:30 - 17:00	04 Machine Learning	Oak +
13:30 - 17:00	05 EOR	Fir +
13:30 - 17:00	06 Modeling	Pine +

Thursday, April 25

08:00 - 09:45	Panel Discussion - Regulatory Issue Panel: Emerging Regulatory, Stakeholder, and Technology Trends in Air Quality and Climate Change	Oak/Fir +
09:45 - 10:00	Coffee Break	
10:00 - 12:00	07 Regulatory Compliance	Oak +
10:00 - 12:00	08 Case Histories	Fir +
10:00 - 12:00	09 Facilities/Safety	Pine +
12:00 - 13:30	Keynote Luncheon	+
13:30 - 17:00	10 Digital Oilfield	Oak +
13:30 - 17:00	11 Heavy Oil 1	Fir +
13:30 - 17:00	12 Reservoir Characterization	Pine +

資料來源：<https://www.spe.org/events/en/2019/conference/19wrm/schedule-overview.html>

表三、會議議程(4月26日)

Friday, April 26		
08:00 - 12:00	13 Unconventional	Oak +
08:00 - 12:00	14 Heavy Oil 2	Fir +
08:00 - 12:00	15 Reservoir Engineering	Pine +
09:40 - 10:00	Coffee Break	
13:30 - 15:00	16 Unconventional 2	Oak +
13:30 - 15:00	17 EOR 2	Fir +
13:30 - 15:00	18 Reservoir Engineering 2	Pine +

資料來源：<https://www.spe.org/events/en/2019/conference/19wrm/schedule-overview.html>

除前述會議內容外，本次會議亦提供了短期課程供與會者參加，考量個人目前所負責的工作包含了產能評估、開發規劃與經濟分析，故參加4月22日「應用統計模型與資料分析進行儲集層產能分析」(Applied Statistical Modeling and Data Analytics for Reservoir Performance Analysis)與4月23日「油氣管線、設施與加州法規要求」(Oil and Gas Pipelines, Facilities and California Regulatory Requirements)等課程，期望藉此充實新知，學習產能評估新技術與蒐集加州當地法規與設施相關資訊，以應用於後續研究與礦區評估及諮議工作中。

參、具體成效

本次奉派出國除參與石油工程師協會西部區域會議外，亦參加了配合研討會期間所舉辦的短期訓練課程，內容相當豐富，蒐集到許多寶貴的課程資料與簡報檔案，相關資料將存放於本所圖書館，供需要的同仁取閱。茲分述研討會及附屬課程之會議與課程重點如下：

一、石油工程師協會西部區域會議

本次會議之研討範圍廣泛，除油層模擬、油氣增產技術、地面工程與非傳統油氣資源等油氣探採研討會常見的主題外，亦涵蓋了目前石油業界極為重視的機器學習與數位化油田等議題，總計 18 場討論會、2 場座談會與 2 場午宴演講，分別於希爾頓逸林酒店之松樹廳(pine)、橡樹廳(oak)與冷杉廳(fir)等三個會場舉行。有幸能參與此次會議，且多數主題均與探採業務密切相關，但受限於本公司只有一人參加，無法全程參與各場次，相當可惜。為有效率地瞭解與個人業務相關或對公司具發展前景的主題，會議開始前須先選擇好欲參加的場次，再視論文發表的順序，以趕場的方式穿梭於各會場參與論文發表與內容研討。

幸好本次會議提供了完整的會議資料，利用報到時所提供的存取代碼，可直接於 OnePetro 網站下載，針對未能參與發表的場次，仍可透過閱讀前述檔案，瞭解該主題所欲傳達之重點資訊。

本報告僅摘錄部分發表內容與討論重點如下：

(一) A Modified Design for Gravel Packing with Expandable Rubber Beads. (SPE-195293-MS)

礫石充填(gravel pack)完井係預防生產井出砂常用的防砂裝置，然而，在安裝與生產的過程中，仍可能會形成熱點(hot spots)，即無效的孔洞(void spots)，其提供了地層砂粒伴隨著油氣生產進入井孔內的通道，降低了此裝置之防砂效率，甚者，更可能造成完全失靈。如何透過創新的方式預防熱點的形成，以維持礫石充填的完整性與防砂效率係相當值得探討的課題。此研究係基於礫石充填搭配可膨脹橡膠珠(expandable rubber bead)以解決熱點形成之專利設計，嘗試透過試驗室分析，篩選出膨脹效果最佳之橡膠珠，並評估摻配量對滲透率之影響，藉此

提出最佳的摻配比例。此研究以柴油作為觸發橡膠珠膨脹的物質，總計分析了 5 種橡膠珠樣本及 9 種摻配比例。試驗分成三階段進行：

1. 量測 5 個橡膠珠樣本的膨脹率與滲透率。量測結果如表四所示，以樣本 3 膨脹效果最佳，但各樣本之滲透率均偏低(樣本 2 實驗失敗，故不計)。此外，值得一提的係滲透率量測係作者基於達西定律(Darcy's law)以 PVC 管自行製作的量測裝置(圖二)，若採用專業儀器量測(如岩心滲透率分析儀與地層反應試驗儀)，應可得到可符合地層實際狀況的結果。

表四、橡膠珠膨脹率與滲透率

Sample	Size	Swelling vol. %	Permeability, D
1	Coarse	35	0.85
3	Fine	50	0.036
4	Medium	46.7	0.072
5	Medium	22	0.033

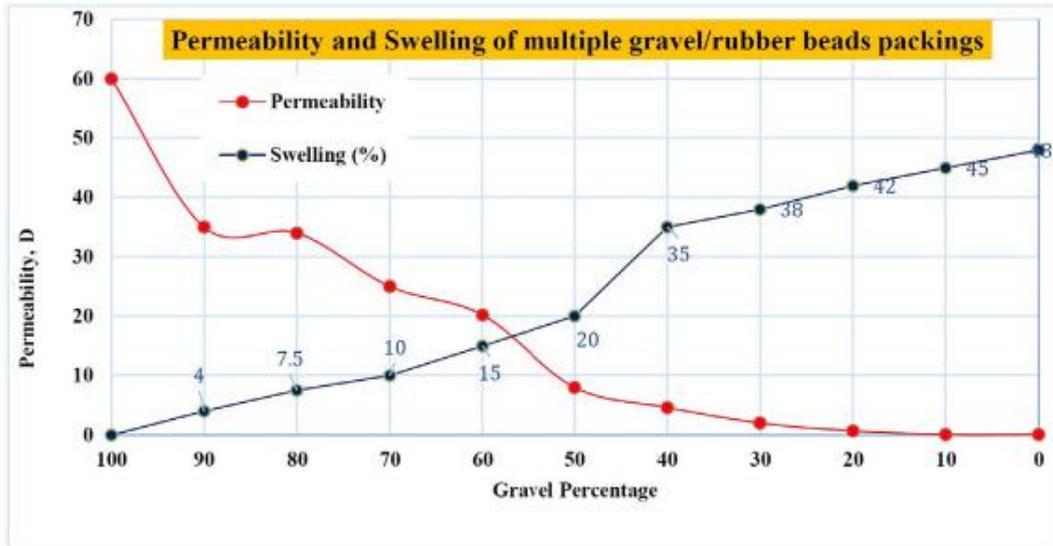
資料來源：“A Modified Design for Gravel Packing with Expandable Rubber Beads” .



圖二、自製滲透率量測裝置

資料來源：“A Modified Design for Gravel Packing with Expandable Rubber Beads” .

2. 以橡膠珠及砂礫進行 9 種不同比例的摻配(橡膠珠比例 10%至 90%)，藉此模擬礫石充填完井方式，並量測其整體膨脹率與滲透率。量測結果如圖三所示，橡膠珠比例 20%至 50%仍可維持較佳的滲透率。



圖三、不同摻配比例之膨脹率與滲透率

資料來源：“A Modified Design for Gravel Packing with Expandable Rubber Beads”。

3. 量測溫度及壓力變化對於橡膠珠比例 20%至 50%之樣本滲透率之影響，分析結果如表五所示，隨著橡膠珠比例的增加，溫度及壓力將對滲透率造成更顯著的影響。

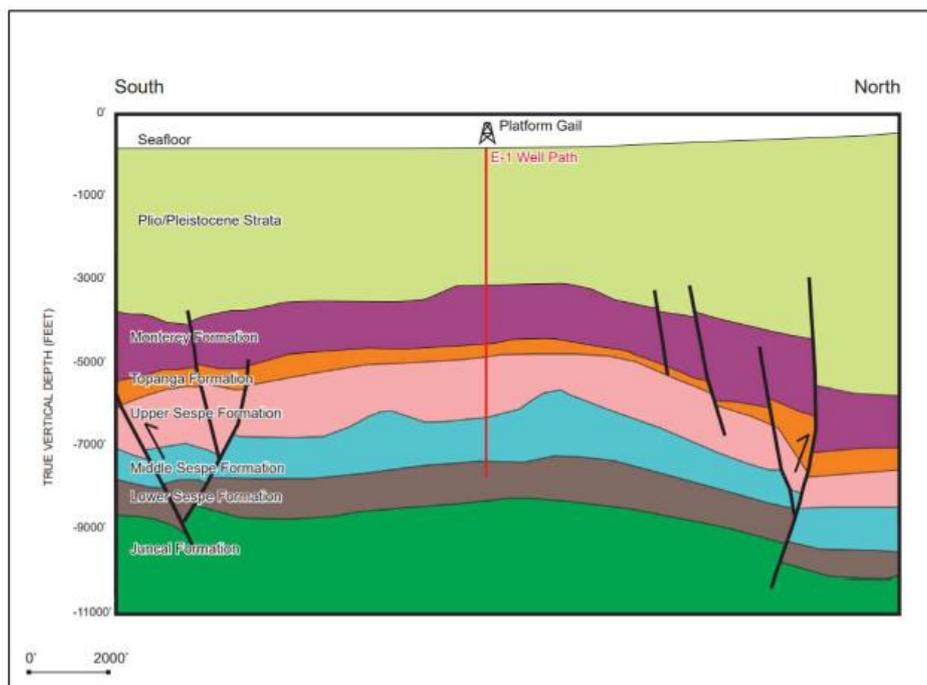
表五、溫度與壓力對滲透率之影響

Mixture		180 F	200F	220F
80% Gravel-20% Rubber Beads	P = 14.7 psi	65 D	60 D	13 D
	P = 250 psi	55 D	52 D	11 D
70% Gravel-30% Rubber Beads	P = 14.7 psi	74 D	44 D	40 D
	P = 250 psi	82 D	37 D	20 D
60% Gravel-40% Rubber Beads	P = 14.7 psi	27 D	17 D	4 D
	P = 250 psi	21 D	17 D	14 D
50% Gravel-50% Rubber Beads	P = 14.7 psi	24 D	3.1 D	1.3 D
	P = 250 psi	22 D	3.3 D	1.1 D

資料來源：“A Modified Design for Gravel Packing with Expandable Rubber Beads”。

(二) Case Study: Natural Gas Storage in Federal Waters Offshore California.
(SPE-195367-MS)

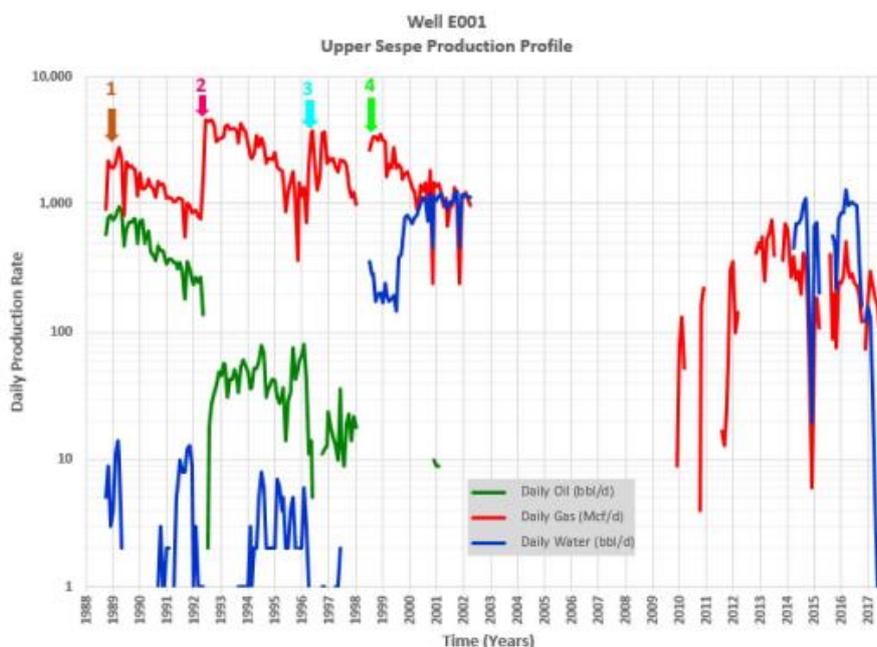
加州海域的太平洋外大陸棚(Outer Continental Shelf, OCS)已有超過 50 年的生產與開發歷史，截至 2018 年為止，已從三個主要沉積盆地生產超過原油 13.5 億桶與天然氣 1.85TCF。海洋能源管理局(the Bureau of Ocean Energy Management, BOEM)要求經營者應以符合環境與經濟責任的方式永續發展 OCS 的能源與礦物資源，並最大化海上基礎設施的效用，遂開始了地下儲氣窖相關計畫。Sockeye 地下儲氣窖係一個替代油氣層使用的獨特方案，它亦是唯一一個位於太平洋 OCS 成功啟用並執行的計畫。Sockeye 油田於 1988 年 8 月投產，至 2017 年 11 月為止，從 Monterey、Topanga 與 Sespe 等三個主要產層(圖四)合計生產了原油 48MMSTB、天然氣 100BCF 及水 220MMSTB。Upper Sespe 被選定作為儲氣窖，其淨砂層厚度約 40-100 英尺，儲氣範圍約 1,000 英畝，平均孔隙率約 20-27%，滲透率約 20-300md，2002 年開始注氣時的壓力為 1,075psi，含水飽和度約 60-70%。



圖四、Sockeye 油田主要產層

資料來源：“Case Study: Natural Gas Storage in Federal Waters Offshore California”

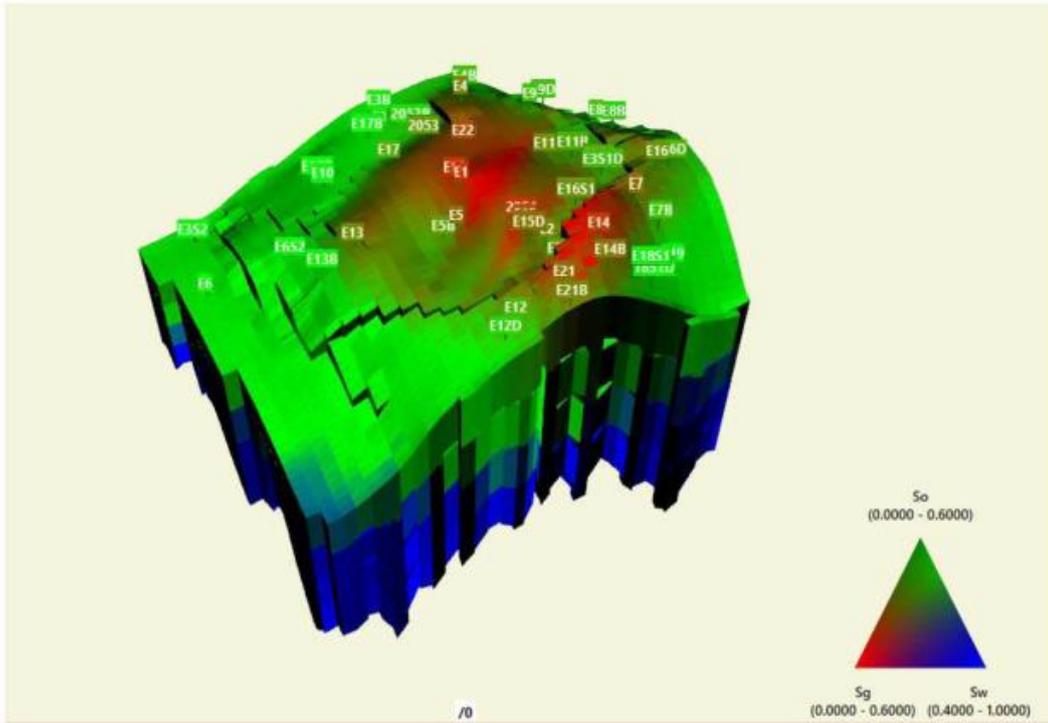
生產 Upper Sespe 的 E001 生產井於 1989 年先生產 zone-1，其後為補充下滑的產率，再依序針對 zone-2、zone-3 與 zone-4 進行穿孔，並均採共串(comingled)生產。該井之產率分析如圖五所示，zone-2 與 zone-3 開始生產時，均造成原油產率大幅下降，顯示此兩層次主要生產乾氣；而 zone-4 開始生產不久，並造成了水量大幅增加。上述結果顯示 zone-2 與 zone-3 較適合作為儲氣窖使用。



圖五、E001 生產井產率分析

資料來源：“Case Study: Natural Gas Storage in Federal Waters Offshore California”。

儲集層的注氣能力與注入的氣體的回收量係地下儲氣計畫成功與否的關鍵要素。為確認注氣能力與驗證回收量，2006 年 8 月執行了一次短期測試，結果顯示油管壓力 1,150psi 時之產氣率為 1.2MMCF/D，證實了注入的氣體可有效回收。此外，此計畫亦整合了三維震測資料、電測資料、生產資料及其他地質資訊等，建立了完整的油層模型(圖六)，藉此分析油氣層的分隔及檢視作為儲氣窖之合適性。此外，歷史擬合的結果亦顯示由於斷層的分隔，注產氣活動並不會干擾到鄰近井的日常生產。此研究證實了天然氣可安全地儲存於 Sespe 地層，並在需要時可有效率地回收注入的天然氣，符合 BOEM 所設定的目標，且為油田經營帶來諸多的效益，例如：在陸上供電短缺時，利用儲氣窖產出的天然氣發電，使得平台仍可維持正常運作，藉此維持原油產量。

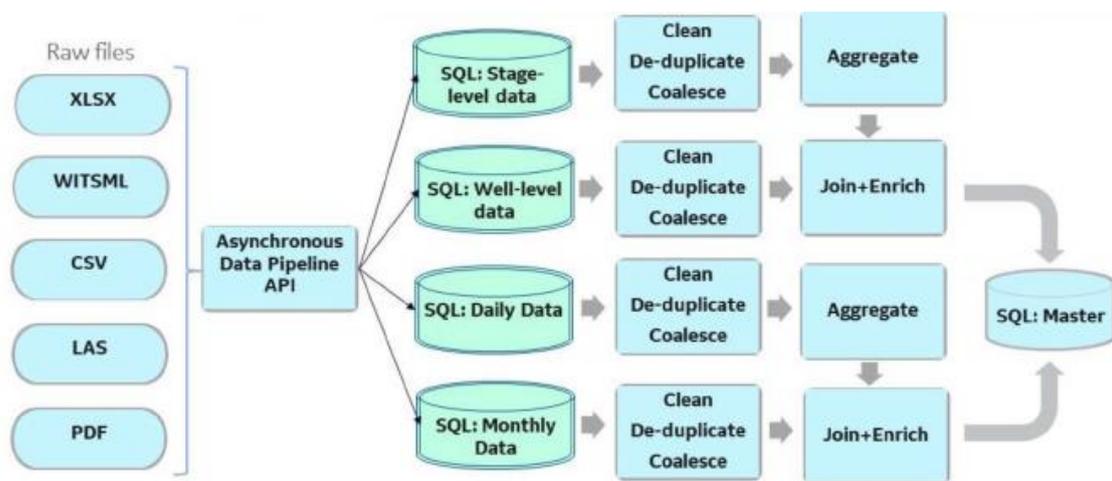


圖六、Upper Sespe 油層模型

資料來源： “Case Study: Natural Gas Storage in Federal Waters Offshore California” .

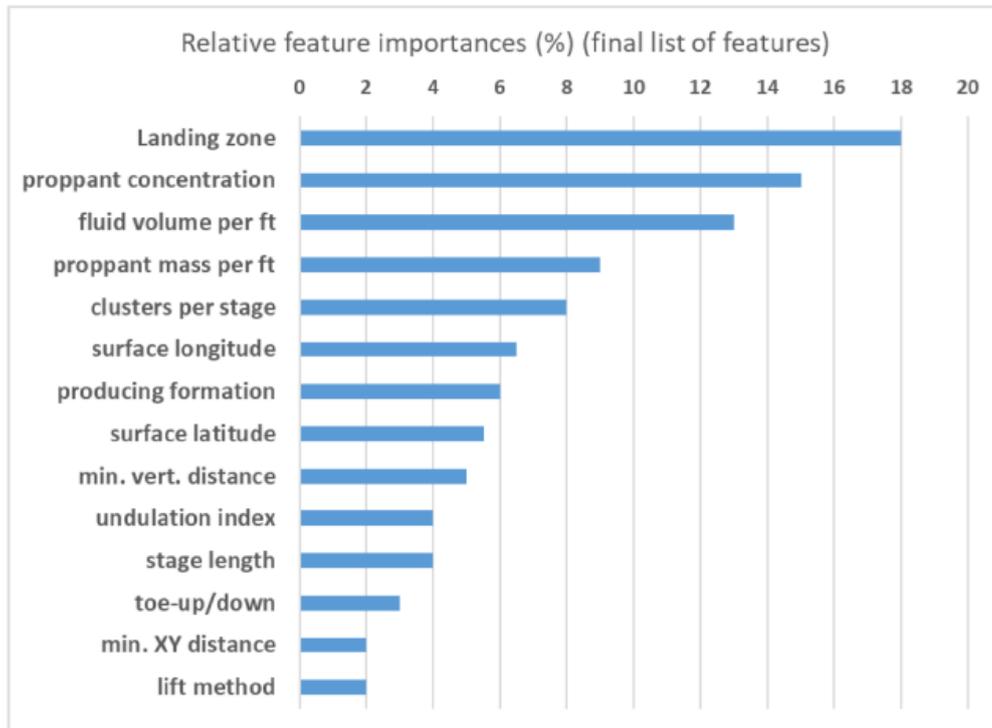
(三) Prescriptive Analytics for Completion Optimization in Unconventional Resources (SPE-195311-MS)

此研究針對非傳統油氣資源完井最佳化建立了一個完整的處方分析 (prescriptive analytics) 架構，研究內容包含三個部分。首先，將各類型的資料進行處理，並將其納入資料庫(圖七)；其次，應用 AutoML 產生準確的機器學習模型；最後，針對成本最小化與產量最大化進行決策參數的最佳化。其中，輸入機器學習模型的參數包括系統參數(如井位、井程與人工舉升的類型)與決策參數(如液裂階段數與液裂材料用量等)。AutoML 係 Google 公司針對企業所提供的機器學習服務，該程序從多種機器學習演算法中搜尋最佳的演算法與超參數 (hyperparameter)，讓企業得以在不具備機器學習專業知識與程式語言撰寫能力的情形下，只須瞭解建置預測模型的概念，就能打造符合企業需求的機器學習模型。此研究以 Permian 盆地的真實案例作為研究標的，並以最大化 12 個月原油產量與最小化完井成本為目標。機器學習模型展示了各種屬性的重要性(圖八)，符合預期的是完井相關屬性(如支撐劑與液體注入量、支撐劑濃度與液裂階段數等)之重要性均較高。最終，研究結果雖顯示上述兩目標相互衝突，但亦提出了一套解決方案供決策者權衡，使其能達成最小化完井成本的目標，同時不犧牲太多原油產量。



圖七、資料處理與納入資料庫流程

資料來源：“Prescriptive Analytics for Completion Optimization in Unconventional Resources”



圖八、屬性重要性

資料來源：“Prescriptive Analytics for Completion Optimization in Unconventional Resources”

二、短期課程(一)應用統計模型與資料分析進行儲集層產能分析

以統計模型與資料分析來分析油氣層性能的趨勢越來越明顯，其目的係挖掘資訊以發展出資料驅動(data-driven)的模型，藉此瞭解及最佳化油氣層反應。該過程包括獲取和管理大量、多元且更新快速的資料，及採用統計方法去發現這些大型、複雜且多變量資料集合所隱含的關聯模式。然而，對於大多數的石油工程師與地球科學家來說，這個主題仍然是一個謎，因為繁瑣的統計學術語及使用了複雜的演算法。為使石油產業從業人員得以迅速瞭解統計建模與數據分析之內涵，此課程先簡介大數據資料分析與統計學概念，再說明機器學習之基礎理論與方法，最後透過案例研究展示前述方法的應用。詳細課程如表六所示，主要的課程主題包括：

- 統計建模與資料分析之術語與基礎概念(Terminology and basic concepts of statistical modeling and data analytics)
- 多變數資料刪減與叢集以找到具相同屬性之次集合(Multivariate data reduction and clustering for finding sub-groups of data that have similar attributes)
- 用於迴歸與分類的機器學習從生產數據發展資料驅動的投入-產出模型以作為以物理為基礎之模型的替代品(Machine learning for regression and classification for developing data-driven input-output models from production data as an alternative to physics-based models)
- 以實驗設計進行代理建構(Proxy construction using experimental design)
- 性能預測的不確定性量化(Uncertainty quantification for performance forecasting)

表六、短期課程(一)課程表

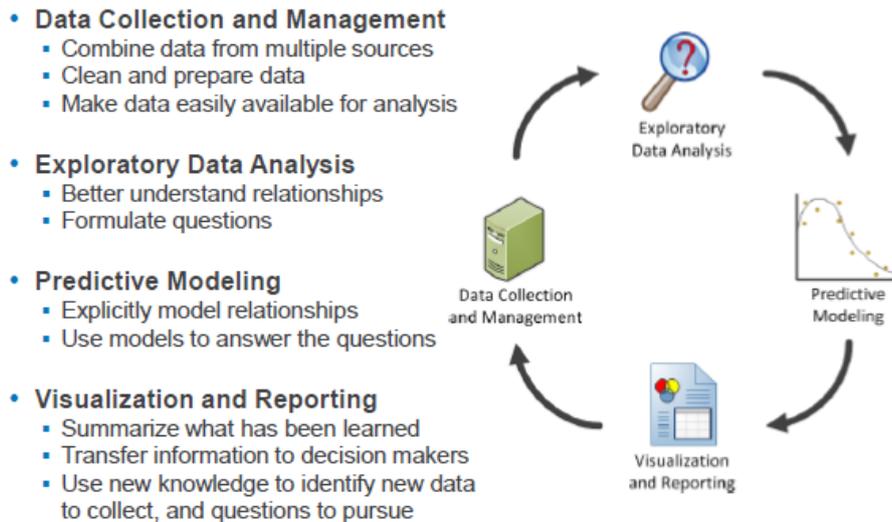
830 – 900	Introduction – statistics and big data concepts
900 – 1000	Statistical foundations + regression modeling
1000 – 1015	Break
1015 – 1100	Data reduction, clustering, visualization
1100 – 1200	Machine learning basics + techniques
1200 – 100	Lunch
100 – 300	Machine learning – case studies
300 – 315	Break
315 – 400	Uncertainty quantification
400 – 430	Wrap up

資料來源：“Applied Statistical Modeling and Data Analytics for Reservoir Performance Analysis” 課程資料。

課程講師 Srikanta Mishra 博士為俄亥俄州巴特爾紀念研究所(Battelle Memorial Institute)油層科學與資料分析之資深研究員兼研究團隊負責人，並與 Akhi Datta-Gupta 共同撰寫「應用統計模型與資料分析：油氣地球科學之實務指南」(Applied Statistical Modeling and Data Analytics: A Practical Guide for the Petroleum Geoscience)，此課程即係以該書籍為基礎，簡要說明統計模型與資料分析之基礎概念，以及在油氣探採產業之應用。

傳統的資料分析循環主要分為四大步驟(圖九)：

- 資料的蒐集與管理(Data Collection and Management)：整合來自眾多來源之資料，並將其妥善整理，以方便後續分析使用；
- 探索性資料分析(Exploratory Data Analysis)：瞭解資料間的關係，並形成問題；
- 預測性建模(Predictive Modeling)：建立適合的模型明確地模擬資料間的關係，並透過模型回答前述問題；
- 視覺化與報告(Visualization and Reporting)：摘錄模擬結果，並將資訊提供給決策者，同時，利用模型所產生的知識鑑別需蒐集的資料與需探索的問題。



圖九、資料分析循環

資料來源：“Applied Statistical Modeling and Data Analytics for Reservoir Performance Analysis” 課程資料。

隨著大數據時代的來臨，資料來源變得更加多元，種類繁多且分散，資料更新速度加快，使得資料量大增，如何更有效率地分析資料間的關係與隱藏的模式，並將其轉換成可供決策參考之重要知識，以創造資料之價值，此係資料分析之重要課題，亦是發展機器學習之主要目的。

(一) 機器學習簡介

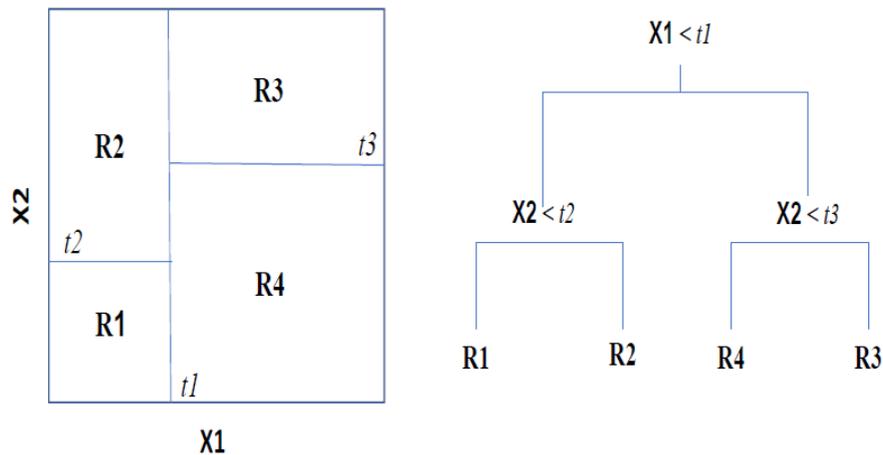
古典統計學必須要針對模型假定獨立(預測)變數與相依(反應)變數，然而，資料驅動的模型則傾向超越線性迴歸，以因應維度更複雜的資料集，在概念上係期望在不做任何假設的前提下，從資料中萃取出模型。故機器學習係透過樣本訓練機器以辨識出資料背後運作的模式(模型)，而非基於特定規則來建構模型。機器學習的主要優點如下：

- 避免明確定義變數轉換
- 捕捉變數間非線性的關係
- 自動處理預測變數間的關聯
- 確認資料間的隱藏模式
- 引導/自動調整模型

茲說明常用的機器學習方法如下：

1. 分類與迴歸樹(Classification and Regression Tree, CART)

CART 係一種簡單的解釋性模型，用於描述預測變數如何影響反應變數。其作法係將預測者的範圍拆分為嵌套的(nested)矩形區域(圖十)，接著在每個矩形區域內以一個常數預測反應變數。

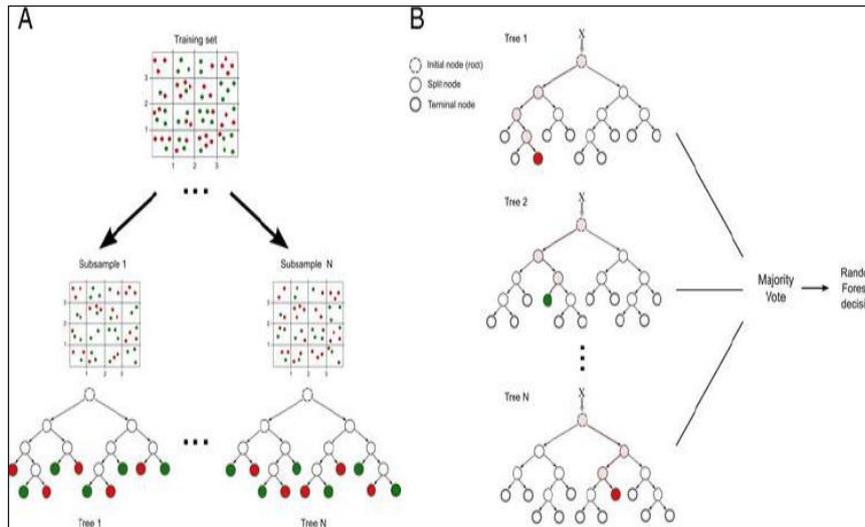


圖十、RT 示意圖

資料來源：“Applied Statistical Modeling and Data Analytics for Reservoir Performance Analysis” 課程資料。

2. 隨機森林迴歸(Random Forest, RF)

RF 係一個結合多棵分類與迴歸樹的方法(圖十一)，藉此提升單一樹的效能，其結果係由個別樹輸出結果的平均值。此外，因每顆樹僅以一部分的資料進行訓練，未作為訓練的資料稱為袋外樣本(out-of-bag samples)，被視為獨立測試資料，可用來驗證模型的效能。

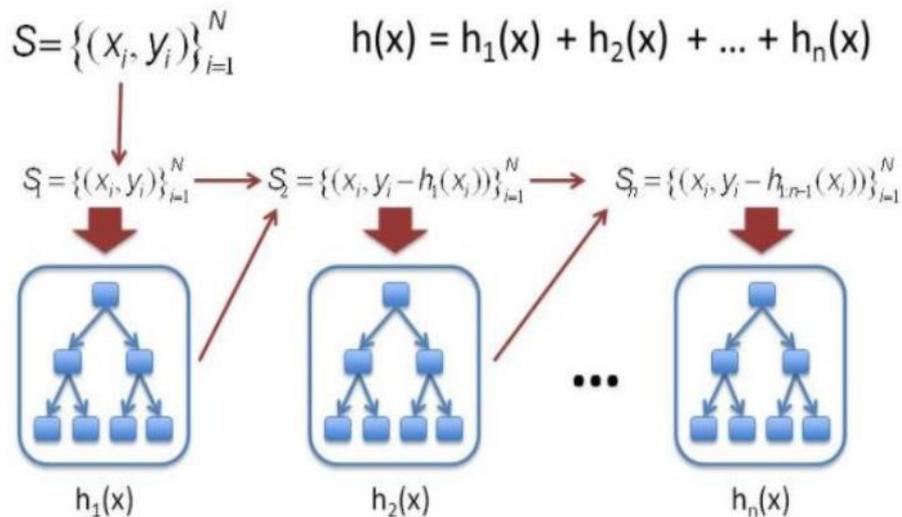


圖十一、RF 示意圖

資料來源：“Applied Statistical Modeling and Data Analytics for Reservoir Performance Analysis” 課程資料。

3. 梯度提升機器(Gradient Boosting Machine, GBM)

GBM 係一種依序改善模型效能的方法，每個模型被訓練來克服前一模型的弱點(圖十二)，藉此逐漸提升模型的表現。

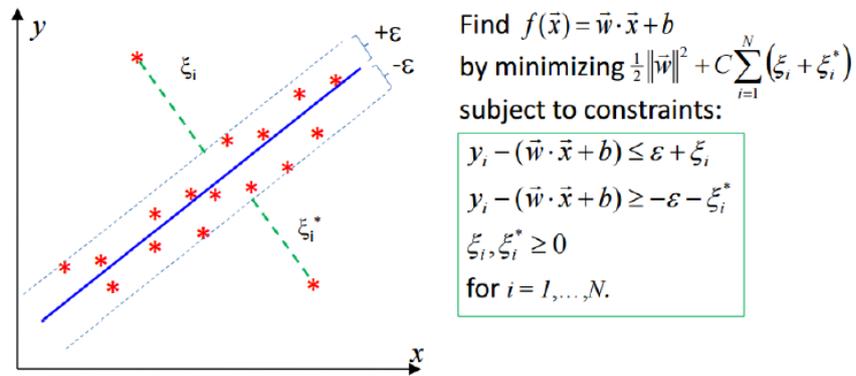


圖十二、GBM 示意圖

資料來源：“Applied Statistical Modeling and Data Analytics for Reservoir Performance Analysis” 課程資料。

4. 支持向量迴歸(Support Vector Regression, SVR)

SVR 係透過最小化資料點到迴歸線的總距離建構迴歸模型(圖十三)。

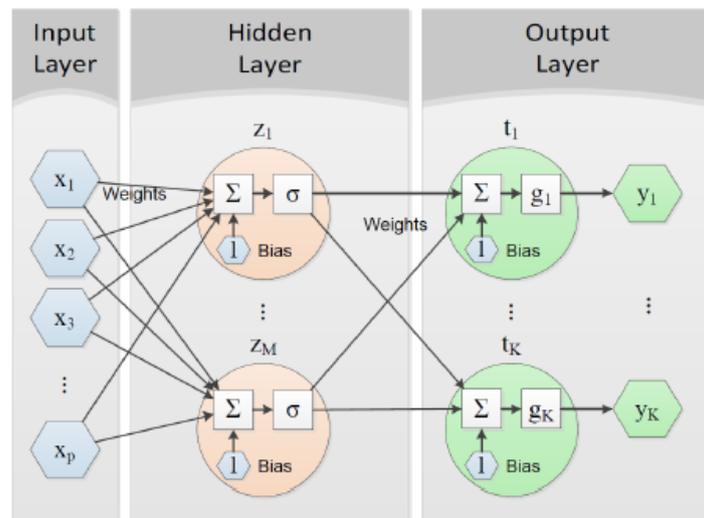


圖十三、SVR 示意圖

資料來源：” Applied Statistical Modeling and Data Analytics for Reservoir Performance Analysis” 課程資料。

5. 人工神經網路(Artificial Neural Networks, ANN)

ANN 係模仿生物神經網路之結構與功能的計算模型(圖十四)，神經元蒐集來自周圍細胞的電子脈衝(Σ)，這些脈衝再以非線性的方式結合(σ)，其概念係針對外部資訊改變內部的結構，即調節神經元間的連結強度(weights, bias)。



圖十四、ANN 示意圖

資料來源：” Applied Statistical Modeling and Data Analytics for Reservoir Performance Analysis” 課程資料。

上述方法之優缺點與適用性比較彙整如表七與圖十五所示：

表七、機器學習方法優缺點比較

	優點	缺點
CART	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 容易擬合，評估迅速 ➤ 可解讀 ➤ 確認重要預測變數與關鍵值 ➤ 對輸入單調的變化保持不變 ➤ 抗拒異常值 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 準確度低於其他模型 ➤ 需透過修剪(pruning)避免過度擬合(overfitting)
RF	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 能夠處理高度非線性行為 ➤ 有用的內建方法(交叉驗證、變數重要性、近似量測、遺失數據的插補) ➤ 對輸入單調的變化保持不變 ➤ 抗拒異常值 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 不容易解讀 ➤ 擬合較慢 ➤ 對於某些類型的表面會有模擬問題
GBM	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 對輸入變數的所有單調轉換保持不變 ➤ 容易處理遺失的數據 ➤ 具有用的內建方法(與 RF 同) ➤ 對存在不相關的輸入變數保持健全 ➤ 較準確 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 易過度擬合 ➤ 不易解讀
SVR	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 能捕捉非線性行為 ➤ 較其他方法準確 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 不易解讀 ➤ 預測需要大量的訓練資料 ➤ 會受到異常值的影響
ANN	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 分類性能佳 ➤ 可快速調整，適應新問題 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 需大量資料進行訓練 ➤ 模型難以解讀內部機制

資料來源：整理自” Applied Statistical Modeling and Data Analytics for Reservoir Performance Analysis” 課程資料及「機器學習各類演算法優缺點 (<https://www.itread01.com/content/1546431330.html>)」。

	CART	RF	GBM	SVM	ANN
Handling of mixed data	▲	▲	▲	▼	▼
Handling of missing values	▲	▲	▲	▼	▼
Robustness to outliers	▲	▲	▲	▼	▼
Insensitivity to monotone transformations of inputs	▲	▲	▲	▼	▼
Computational scalability	▲	◆	◆	▼	▼
Ability to deal with irrelevant inputs	▲	▲	▲	▼	▼
Ability to extract linear combinations of features	▼	▼	▼	▲	▲
Interpretability	◆	▼	▼	▼	▼
Predictive power	▼	▲	▲	▲	▲

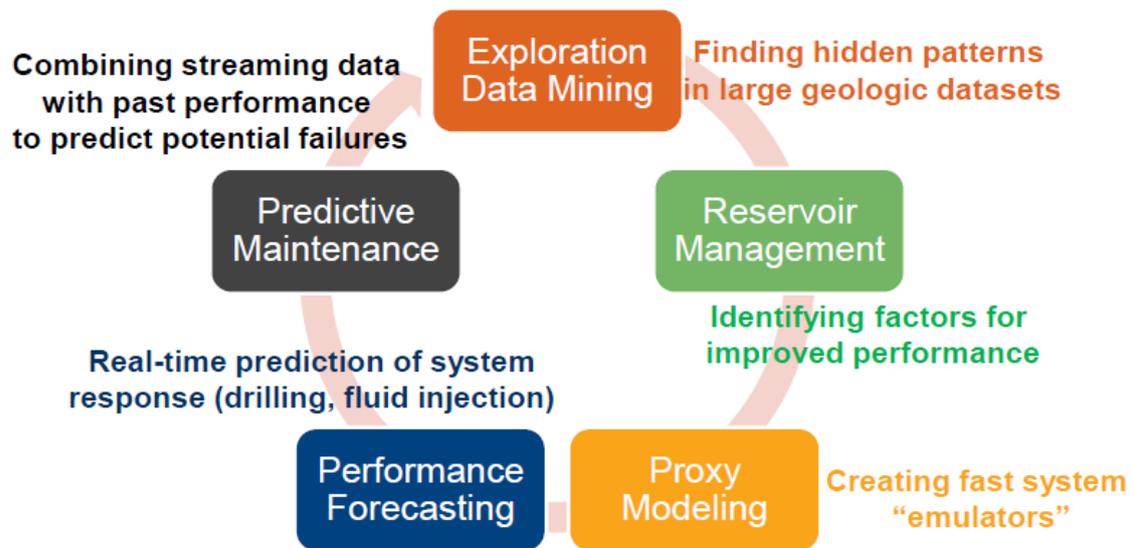
圖十五、機器學習方法適用性比較

資料來源：“Applied Statistical Modeling and Data Analytics for Reservoir Performance Analysis” 課程資料。

(二) 資料分析於油氣探採業應用

資料分析於油氣探採之應用可分為五大類型(圖十六)：

1. 探勘資料採礦(Exploration Data Mining)：利用機器學習發現大量地球科學資料(如震測、電測)的隱藏模式。
2. 油層管理(Reservoir Management)：透過機器學習鑑別可提升油氣層產能之關鍵要素。
3. 代理模型(Proxy Modeling)：以代理模型處理資料以提升既有模擬軟體之計算速度。
4. 性能預測(Performance Forecasting)：針對現場作業採集的資料，即時進行相關分析，以評估生產能力與鑽進率。
5. 預測性維護(Predictive Maintenance)：整合串流資料與過往的表現預估潛在的故障情形與可能性，以排定設備維修或修井計畫。



圖十六、大數據分析於油氣探採業之應用

資料來源：“Applied Statistical Modeling and Data Analytics for Reservoir Performance Analysis” 課程資料。

三、短期課程(二)油氣管線、設施與加州法規要求

鑒於美國加州油氣市場日趨熱絡，有越來越多的油公司有興趣參與該州境內之石油探勘與開發活動，此課程之目標係由來自加州保育部(Department of Conservation)石油、天然氣與地熱資源司(Division of Oil, Gas, and Geothermal Resources, DOGGR)之專案經理與資深工程師透過過往案例說明加州政府對於油氣管線與基礎設施相關法規與資料之要求，期望能使油公司更瞭解現行管線與地面設施管理法規，以及 DOGGR 有提供哪些線上資源供油公司搜尋與使用。

詳細課程表如表八所示，課程內容先回顧油氣生產管線與基礎設施，其主題包括上游地面設備之適當設計與正確操作，其次，再全面性地回顧有關地面設施之現行與新法規之差異，使與會者能夠清楚地瞭解加州當地對於油氣管線與地面設施之要求。

表八、課程表

Introduction	0.25 hours	Robert Schaaf
Pipelines and Regulatory Requirements (AB1420)	1.75 hours	Mike Edwards
Pipeline Management Plans	1.00 hours	Kathleen Andrews
Pipeline GIS Data – Requirements/Inputs	1.00 hours	Mike O’Neill
Lunch	1.00 hours	
Tanks	1.00 hours	Robert Schaaf
Sumps/Berms	0.50 hours	Robert Schaaf
Spill Contingency Plans	1.00 hours	Kathleen Andrews
Out-of-Service Facilities	0.50 hours	Robert Schaaf
DOGGR Pipeline and Facilities Program	0.75 hours	Mark Steinhilber
Conclusion	0.25 hours	Robert Schaaf

資料來源：“California Oil and Gas Surface Facilities Regulation Update Pipelines” 簡報檔。

(一)管線與法規要求(Pipelines and Regulatory Requirements)

管線係最便宜、最安全且碳足跡最低的油氣輸送方式，為確保管線安全，DOGGR 對於管線之設計與建造、檢查、測試、管線管理計畫與除役等項目訂定了完整的管理法規。此外，依據 DOGGR 的統計，造成管線洩漏的主要原因包括侵蝕(含磨蝕與腐蝕)、機械故障、衝擊損壞與其他等，其中又以侵蝕為最大宗。為落實管線機械完整性測試(Mechanical Integrity Testing, MI)，以降低洩漏的可能性，DOGGR

針對特定區域類型、管線內容物、管線尺寸及功能等(表九)，訂定了不同的測試區間。

表九、管線機械完整性測試週期



Designated Area	Pipeline Contents	Nominal Diameter	Function	Maximum MIT Interval**
Environmentally Sensitive	Oil*	> 1"	Gathering Lines	2 years
Sensitive	Gas	> 1"	All	2 years
Urban	Gas or Oil*	> 4"	All	2 years
Other within field boundary	Gas or Oil*	> 1"	All	<=8CCR§6533*** Rqmts.

*Regulated liquid products per 1760(m)
 **For pipelines 10 or more years old
 ***Cal-OSHA Petroleum Safety Order, Drilling and Production, Article 9

資料來源：“California Oil and Gas Surface Facilities Regulation Update Pipelines”簡報檔。

(二)管線管理計畫(Pipeline Management Plans)

管線管理計畫係一份呈現維護與測試之最低要求的文件，其內容須包括：

- 管線必要的敘述性資訊(如：內容物、類型、等級、實際或預估的架設日期、設計與操作壓力、任何可提供的洩漏、維修、檢查與測試歷史等)。
- 測試時程表與方法。
- 相關附件或設備(如：閥、儀表、感應器及陰極防護系統)的預防性維護及定期檢查、維護與校正計畫。
- 包含所有管線及其經過的特定區域(敏感區域、環境敏感區域、城市區與特定水道)之清單與地圖(須明確標示比例尺與相對位置)。

2018 年新修定的法規(California Code of Regulations (CCR) section 1774.2)要求油氣礦區的經營者必須提交所有管線(舊法條未要求天然氣管線)之管理計畫予主管機關。此外，為協助礦區經營者有效率地撰寫一份好的管線管理計畫，DOGGR 已將計畫樣版上載於網頁中，供需要的油公司選用，但此僅為鼓勵性

質，若油公司自行設計的格式能夠符合 DOGGR 的資料要求，仍可繼續沿用。

(三)管線地理資訊系統數據需求與輸入(Pipeline GIS Data - Requirements/Inputs)

加州法規於 2018 年之前僅要求油氣礦區之經營者需針對敏感區域內的使用中的天然氣管線提交圖資，檔案類型可為圖檔或 pdf，而截至 2017 年年底，已有 50 個經營者提交了 72 個油氣礦區之圖資，但內容混雜，資料難以整合與判讀。為提高管線圖資之可用性，DOGGR 目前已建置天然氣管線圖資系統(Gas Pipeline Mapping System, GPMS)，並將透過新法規要求經營者提交管線之 GIS(Geographic Information System)資料，以便整合管線屬性與座標，同時要求經營者需每年更新，以確保資料之即時性。相較於其他管線管理系統，GPMS 對於 GIS 資料的要求更高(節點設定較精細，並須訂出敏感區範圍)，且具有更高精確度(表十)。DOGGR 預計今年年底將把管線相關資料及管理計畫整合至 WellSTAR 資料庫中，以方便油公司上傳與搜尋各項資訊

表十、NPMS、SPMS 與 DOGGR GPMS 比較表

Items	NPMS	SPMS	DOGGR - GPMS
Scope	Hazardous liquid and gas transmission pipelines (exclude gathering line), ...	Hazardous liquid pipelines (NOT require Natural Gas Lines or Liquefied Natural Gas facilities)	Active gas pipelines in " <u>sensitive areas</u> " (>1 inch)
GIS Data Requirements	Line + attribute tables	Line, point (Start and end node), and event tables with measures of (commodity, diameter, age, and length)	Line, point (nodes show facility type), and polygon (Sensitive area); require more attributes to reflect the needs for PMP, SCP
Potential Accuracy	± 500 feet	± 100 feet	± 10 feet (<i>preferred</i>) ± 100 feet (<i>minimum</i>)

NPMS = National Pipeline Mapping System, SPMS = California State Pipeline Mapping System

資料來源：“Pipeline Mapping & Data” 簡報檔

(四)儲槽(Tanks)

儲槽是油田營運不可或缺的一部分。常用的儲槽包含焊接儲槽(welded tanks)、螺栓接合儲槽(bolted tanks)、玻璃纖維儲槽(fiberglass tanks)與塑膠儲槽(plastic tanks)等四類，其適用液體及優缺點彙整如表十一。

DOGGR 法規對於儲槽的要求包括：

1. 儲槽建造與洩漏偵測(CCR 1773.2)

- 新儲槽之間必須保留空間以供人員能安全進入進行維護、檢查、測試與維修等作業。
- 槽體底座必須有能有效支撐及墊高。
- 槽體底座下方需有不可滲透的屏障以防止液體溢出時向下遷移。
- 透過目視檢查或洩漏偵測感應器檢查槽液體是否洩漏。
- 地區代表可能考量槽體年限、液體種類與鄰近地下水等因素，要求槽底須裝洩漏偵測系統。

2. 儲槽維修與檢查(CCR 1773.3)

- 儲槽應標註識別碼、類型與物質危險標示牌。
- 每月進行檢查，項目包括：底座、接縫、管線與其他地方之洩漏；腐蝕與外殼變形；油漆、絕緣與接地系統之狀態。
- 洩漏的儲槽應在 48 小時內向 DOGGR 報告，並停止使用，同時指定為停止使用的(out-of-service)儲槽。
- 木塞或旋入式插頭不得作為永久性維修。

3. 儲槽測試與槽壁厚度最低要求(CCR 1773.4)

- 針對腐蝕率未知的儲槽，每 5 年需進行一次壁厚測試。
- 若腐蝕率已知，經主管機關許可可延長壁厚測試間隔，但最長不得超過 15 年。
- 槽體壁厚至少需大於 0.06 英吋。

- 槽體內部檢查不得少於每 20 年 1 次。
- 若有洩漏偵測系統且密封，槽底厚度需達 0.05 應大於 0.05 英吋；若無洩漏偵測系統，槽底厚度須達於 0.1 英吋。
- 若槽體檢查不合格且 60 天內未維修完成，應被指定為停止使用的儲槽。
- 玻璃纖維或其他抗腐蝕儲槽不在此條文在管轄範圍內，但需遵守製造商的建議。

表十一、常用儲槽優缺點比較

類型	示意圖	適用液體	優點	缺點
焊接儲槽		<ul style="list-style-type: none"> ➢ 油 ➢ 水 ➢ 熱液 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 堅固 ➢ 耐久 ➢ 大容量 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 昂貴 ➢ 建造時間長 ➢ 不易維修且費用高 ➢ 尚無良好的方法塗覆槽體下方
螺栓接合儲槽		<ul style="list-style-type: none"> ➢ 油 ➢ 水 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 便宜 ➢ 容易建造 ➢ 連接與維修相對容易 ➢ 能夠塗覆整個槽體 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 最大使用年限為 20 年
玻璃纖維儲槽		<ul style="list-style-type: none"> ➢ 伴產水 ➢ 化學品 ➢ 腐蝕性液體 ➢ 油 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 耐腐蝕 ➢ 耐久 ➢ 容易維護 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 需於工廠製造 ➢ 需運送至現場(限制尺寸) ➢ 僅適用於 40~150°F ➢ 受衝擊易損壞 ➢ 火災時融化迅速
塑膠儲槽		<ul style="list-style-type: none"> ➢ 伴產水 ➢ 化學品 ➢ 腐蝕性液體 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 便宜 ➢ 耐腐蝕 ➢ 搬遷容易 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 必須預製(pre-fabricated) ➢ 需運送至現場(限制尺寸) ➢ 僅適用於 40~140°F ➢ 受衝擊易損壞 ➢ 火災時融化迅速

資料來源：整理自 “Tanks” 簡報檔。

(五)集液坑(Sumps)

集液坑係指用於蒐集與儲存流體之露天坑(open pit)，依據功能性可分為以下幾種：

- 鑽井池(drilling sump)係與鑽井作業結合之集液坑。
- 操作池(operations sump)係與廢井或修井作業結合之集液坑。
- 蒸發池(evaporation sump)係指用蒸發淡水或鹽水之集液坑。
- 防溢池(catch basin)係用於防止意外溢出的情況。

CCR 1770 針對集液坑與防溢池的要求如表十二所示

表十二、集液坑與防溢池之法規要求

類型	法規要求
一般性	<ul style="list-style-type: none">➤ 不允許設置於自然排水渠道。➤ 無襯裡蒸發池不可設置於與淡水含水層連通處。➤ 若作為其他設施的一部分，且該設施已設置適當的圍籬，則不須再設置獨立圍籬。
鑽井池	<ul style="list-style-type: none">➤ 在鑽機與井分離 30 天內，所有的自由流體應從鑽井池中移除。
操作池	<ul style="list-style-type: none">➤ 在鑽井拆除或作業完成 14 天內，所有的自由流體應從操作池中移除。
蒸發池	<ul style="list-style-type: none">➤ 城市區：必須用鏈環圍籬封閉，大門必須上鎖。➤ 非城市區：應採用鐵絲網圍欄，以保護人員、牲畜與野生動物。➤ 有油或油和水混合物的水坑應覆蓋，以防止野生動物進入。
防溢池	<ul style="list-style-type: none">➤ 任何外溢都應進行疏散與清潔。

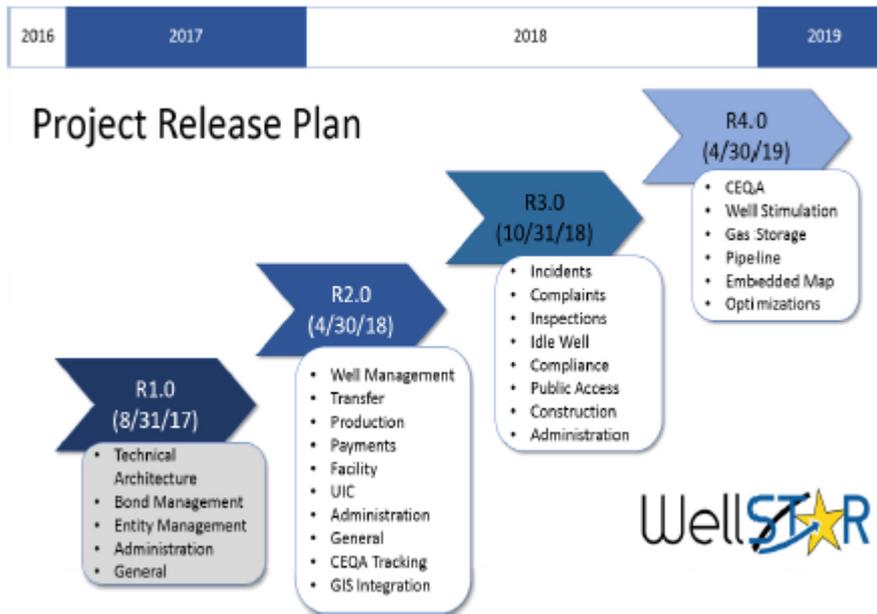
資料來源：整理自“Sumps”簡報檔

(六)原油外洩緊急應變計畫(Spill Contingency Plans)

California Public Resource Code 3270.1 要求經營者應在收購生產設施或投產前的三個月內向主管機關提交原油外洩緊急應變計畫。此項課程主要說明撰寫原油外洩緊急應變計畫常犯的缺失，而為了協助經營者撰寫一份完整且能獲得批准的原油外洩緊急計畫，DOGGR 已將計畫樣版上載於網頁中供需要的油公司選用。

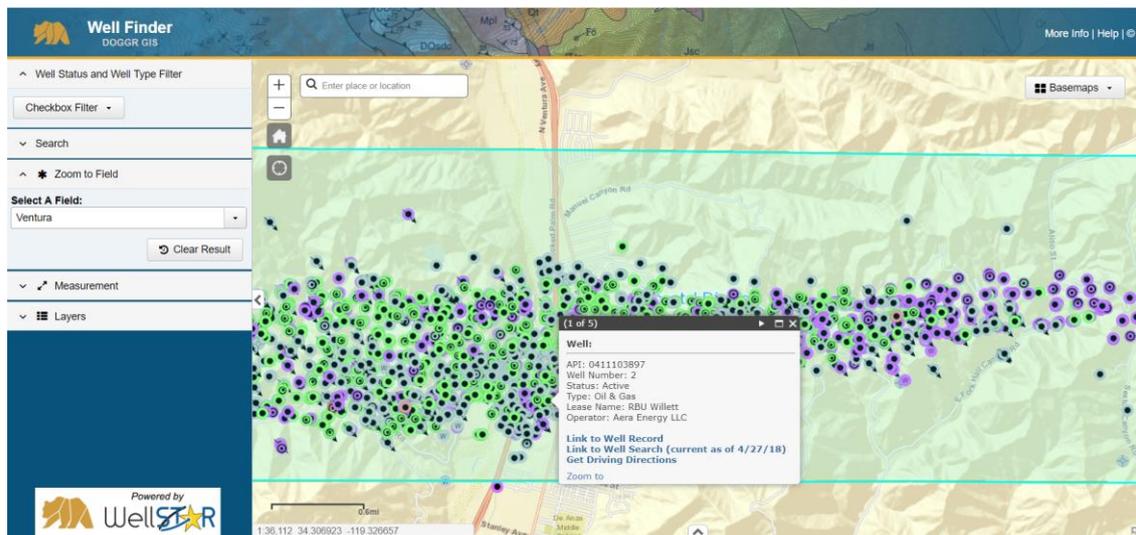
(七)WellSTAR 系統簡介

WellSTAR 係 DOGGR 為蒐集與分析油氣田相關資訊所建構數位資料庫，其全名為全州追蹤與報告系統(Well Statewide Tracking and Reporting System)。此系統的第一版於 2017 年上線(圖十七)，初期僅提供油氣田經營人之一般性資訊，歷經一年多的升級與改善，目前已涵蓋了油氣井與地熱井相關技術資訊(如井位、電測資料、生產量與注入量等)，且 DOGGR 表示後續版本的更新，將再納入更多的運輸管線及地面設施之技術資料，以方便經營者進行資訊共享，未來亦將適度地開放一般民眾使用。此外，隨著 GIS 資料的整合，使得操作介面更為人性化，資料搜尋更為方便。儘管 WellSTAR 的完整功能目前僅開發給油氣礦區經營者使用，但一般民眾可使用基於 WellSTAR 的 Well Finder 應用程式搜尋各井相關資訊(圖十八)，有意投資加州油氣礦區的投資者亦可透過此管道瞭解目標礦區及其臨近油氣田的生產情形及蒐集與分析其他技術資料，藉此提升礦區評估的準確度。



圖十七、WellSTAR 歷年更新內容

資料來源：“DOGGR Pipeline and Facilities Program” 簡報檔



圖十八、Well Finder 使用介面

資料來源：

<https://maps.conservation.ca.gov/doggr/wellfinder/#openModal/-119.27606/34.32241/14>

肆、心得及建議

本次奉派出國參與石油工程師協會西部區域會議，有機會與美國油氣探採與資料分析領域之專家學者進行面對面交流，對於技術發展現況與未來研究方向有了更進一步的認識，茲提出心得與建議如下：

一、善用免費資源，廣泛蒐集資料

加州政府為有效率地管理與分析油氣礦區生產井、管線與地面設備相關資訊，建立了 WellSTAR 資料庫，本公司雖非當地經營人，尚無法使用其完整功能，但仍能使用 Well Finder 系統，蒐集油氣礦區相關資訊，建議未來可應用於加州礦區評估案中。

二、礦區併購或購買設備前，應檢視原持有者是否符合各項法規要求

依據 DOGGR 分享的案例，曾有併購礦區或採購二手生產設備時，交易完成後，才發現原持有者未依規定完成相關文件或檢驗，使得買方需增加預算，補齊相關程序。為避免此情況，建議於採購前要求原持有者提供相關證明文件。

三、結合外部資源，落實機器學習應用

機器學習為油氣產業技術發展趨勢之一，在公司內部缺乏專業資料分析師的情形下，建議可採兩階段進行，第一階段先委託外部講師講授資料分析技術概念與應用，使同仁對此技術有基礎的認識，並嘗試提出期望此技術能夠解決的工作問題；第二階段採委託研究的方式與資料分析專業公司或學術單位合作解決上述問題，並落實於實際工作中。

四、鼓勵並補助同仁參加石油工程師協會

SPE 針對會員提供了許多免費學習與技術資源，成為該協會的正式會員將有助於提升同仁專業能力，並增進與石油工程領域的國外專家技術交流。此外，亦可以較便宜的費用參與 SPE 所舉辦的各項研討會與訓練課程。

五、鼓勵同仁參與國際研討會並發表論文

國際研討會係油公司與服務公司展現新技術與研究成果的最佳場合，藉由與該領域的專家學者研討與交流，除可精進是項技術及激發可能的研究想法外，亦可增加公司曝光度，擴展潛在客源。