

出國報告（出國類別：開會）

參加2015年第3屆國際岩石物理研討會 (3rd International Workshop on Rock Physics)

服務機關：中油公司探採研究所

姓名職稱：梁閔森 研究員

派赴國家：澳大利亞

出國期間：104年4月11日至4月18日

報告日期：104年6月5日

參加 2015 年第 3 屆國際岩石物理研討會

(3rd International Workshop on Rock Physics)

摘 要

本出國案主要目的是參加科廷大學(Curtin University)在西澳珀斯舉辦之「3rd International Workshop on Rock Physics」研討會，藉由參與會議機會學習、研討關於實驗室對不同岩石物理特性所設計之量測試驗與分析結果。岩石物理扮演著地質地物探勘與工程開發生產之間的重要連結，實驗室正確且高效率的試驗分析，並應用至震測、井測解釋與油層生產模擬，是提高探勘及開發成功率之不二法門。2015 年第 3 屆岩石物理研討會包含有傳統及非傳統儲集層岩石聲波及彈性波性質分析、岩石孔彈性係數量測技術、岩心孔隙結構三維成像技術、電腦斷層(CT)岩心沖排動態掃描技術、核磁共振(NMR)岩心沖排動態掃描技術、相對滲透率量測技術、岩心應力應變參數分析技術、岩心異質性分析技術及應用至震測解釋與油層模擬之技術研討，參加該研討會可大幅增加本所新購入儀器如岩心沖排試驗系統(Core-flooding system)及核磁共振(NMR)岩心物性量測系統之應用範圍，更可與各油公司進行岩石物性應用在探勘與開發經驗之討論，對於本年度及未來研究方向具有相當影響性。

本次行程主要針對探探研究所 103 年新引進儀器的未來應用進行規劃，目的在使新引進技術可得到最佳化之使用成效，故本出國報告將著重在新引進技術主要量測項目--岩石-流體飽和度關係--之性質上加以著墨。使用穩態與非穩態岩心沖排試驗是瞭解岩石-流體飽和度關係最精確的方法，但在岩心樣本隨沖排過程中的流體飽和度變化，一直以來都是由秤重或質量平衡方法計算而得。隨科技日新

月異，岩心沖排試驗系統與 CT 或 NMR 之結合，使得流體飽和度在微米尺度之變化可以被觀測及掌握，該技術性突破使得毛細力、濕潤特性、孔隙分佈、岩石異質性及流體特性等，對沖排試驗造成之微觀影響能被一一觀察並列入置換效率之計算。另外，該技術突破對於流體在孔隙內之分佈能更進一步地掌握，對於生產中或生產後期之流體飽和度變化，將更能掌握其動向。本報告將針對研討會所蒐集之岩心沖排試驗技術、NMR 技術及 CT 電腦斷層掃描技術作一詳細彙整，也概略簡述其餘岩石物理特性在本次研討會討論要點。

參加 2015 年第 3 屆國際岩石物理研討會 (3rd International Workshop on Rock Physics)

目 次

摘 要	I
壹、目的	1
貳、過程	2
參、心得	5
肆、建議	31

壹、目的

配合 104 年度研究計畫--「水沖排激勵採油技術應用」、104 年度出國計畫「多相流相對滲透率試驗與分析技術」及 104 年度石油基金計畫--「應用核磁共振於儲集層岩石特性研究」之執行，規劃參加西澳科廷大學於柏斯舉辦之「2015 年第 3 屆岩石物理研討會」，學習研討岩石物性之量測技術，及其在石化能源探勘與生產開發之應用。澳洲一直以來是世界礦產資源生產國家，而近年來伴隨許多非傳統石化能源的發現，使產官學界開始致力於這些石化資源儲集岩物理特性之研究。科廷大學由 2013 年開始舉辦岩石物理性質在實驗室分析及其在探勘開發應用之研討會，迄今已達第三年，每年度皆由世界各地產官學不同單位參與，討論由微觀尺度進行觀察，並預測巨觀岩石物性及流體流動之經驗。

藉由參與「2015 年第 3 屆岩石物性試驗」會議，有機會可學習、研討油層岩心樣本在實驗室進行各種岩石物性量測技術之最新進展、多相流體相對滲透率量測技術、結合電腦斷層掃描及核磁共振技術在岩石-流體飽和度性質之量測、岩心異質性在油層模擬之應用及其應用至油氣田生產之突破與研究結果。另外，藉由參加本次研討會可將本公司新購入儀器—岩心沖排試驗系統及 NMR 岩石物性量測試驗系統，做最佳化應用之規劃。藉由上述新引進技術之量測結果與油層模擬技術進行結合，可落實油田異質性描述，使生產及增產模擬更具可靠性。最後，參與本次研討會可認識全球相關領域之學者專家，未來在相關工作若需具有經驗之顧問參與來降低營運風險之需求時，可透過本次會議快速尋得合適人選進行協助，以提升本公司岩石物性量測技術、最佳化本所岩心沖排試驗系統及 NMR 量測系統之應用、結合油層模擬應用至生產及增產之技術，增加公司礦區蘊藏量。

貳、過程

本次出國行程如下表所示。104 年 4 月 11 日由桃園機場搭機，自 4 月 13 日起至 4 月 17 日為期 5 天，參加「3rd International Workshop on Rock Physics」國際研討會，會議全程於澳洲伯斯的Esplanade Hotel Fremantle by Rydges 獵戶座大廳舉行(圖 1)，過程除參與會議，聽取相關研究論文外，並至科廷大學、西澳大學、國家測量中心及二氧化碳封存研究中心之實驗室參觀，與講師及參與學員進行研究討論，並與參與學員交換經驗資訊；行程於 4 月 18 日搭機返國。

出國行程表

日期	地點	工作內容
4/11	台北－澳洲伯斯	啓程
4/12	澳洲伯斯	報到
4/13~4/17	澳洲伯斯	參加 2015 年第 3 屆國際岩石物性試驗研討會
4/18	澳洲伯斯－台北	返程

本次參與會議之研究人員與石油公司分別來自澳大利亞（37）（括號內為人數）、加拿大（3）、中國（16）、捷克（1）、丹麥（5）、法國（4）、德國（2）、印度尼西亞（2）、意大利（1）、日本（1）、紐西蘭（2）、挪威（8）、俄羅斯（2）、新加坡（1）、瑞士（2）、台灣（1）、沙烏地阿拉伯（2）、英國（6）及美國（10）（圖2），共約100多人。會議中共有約13個大議題，由各公司或近來執行實驗室試驗設計、分析技術及探勘開發之應用成果進行簡報與討論。針對多相流相對滲透率試驗與分析技術之重點出國目的，將於本出國報告中摘錄相關成果。



圖 1 Esplanade Hotel(上圖)及 Orion 會議廳(下圖)報到入口



圖 2 會議發表現場

參、心得

研討會開辦歷程及聯合實驗室

澳大利亞擁有豐富的礦產資源，尤其西澳擁有豐富的鐵礦，礦業一直以來都是西澳重要的產業；除無機礦物外，有機礦物的石化能源也持續進行探勘及生產，近年來更有許多非傳統能源如緻密氣、頁岩油氣、碳酸岩油藏及煤層氣等，皆紛紛探勘成功並進行生產開發。研討會開幕時，科廷大學探勘物理系系主任便提及澳洲成熟的礦業管理，西澳在管理礦業的法案主要是1978年的礦業法，礦業法主要針對探勘執照、探測執照、保留執照及採礦租約進行明文規定。前述第一及第二項主要在描述探勘期的規定，依面積大小可區分為4或5年，可申請延長探勘期限一次，面積較大者可視情況不斷延長，保留執照則規定礦區尚未完成商業開採可行性評估時，可透過申請等待更優渥的經濟條件下才進行開發，採礦租約則是規定商業開採年限，最多可達21年並可延長一次。在完整並健全的制度下，西澳的石油探勘開發也持續蓬勃發展中，瞭解石化能源及其所存在的儲集層在地球物理探勘或生產開發過程中的物性變化或反應，是西澳在產官學界近來極力瞭解的重點，也為科廷大學自2013開始致力於岩石物性試驗成果研討之主因。

本次研討會包含一重要行程，便是科廷大學、西澳大學、國家量測中心、CO2CRC合作研究機構、CSIRO聯邦科學工業研究院及IVEC高性能計算機研究中心之聯合實驗室參訪(見圖3)。CO2CRC有限公司是研究二氧化碳捕獲和地質封存的一個合作研究機構，主要是學校與政府間的合資企業，澳洲著名的Otway二氧化碳封存計畫為該公司重點研究項目之一。

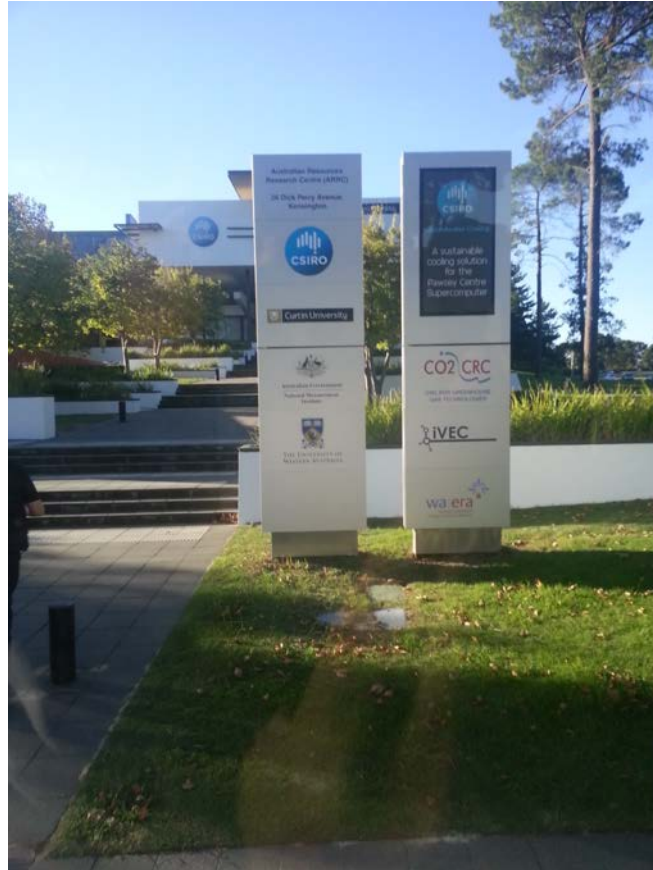


圖 3 科廷大學、西澳大學、國家量測中心、CO2CRC 合作研究機構、CSIRO 聯邦科學工業研究院及 IVEC 高性能計算機研究中心之聯合實驗室

CSIRO聯邦科學工業研究院前身是於1926年成立的科學與工業顧問委員會（Advisory Council of Science and Industry），是澳大利亞最大的國家級科技研究機構，主要角色是通過科學研究和發展，為澳大利亞聯邦政府提供新的科學途徑，以造福於澳大利亞社會，提高經濟效益和社會效益。IVEC高性能計算機研究中心屬於政府部門，是CSIRO，科廷大學和西澳大利亞大學之間的非法人合資企業，主要提供電腦軟硬體支援，以利於上述團隊研究之進行。

岩石屬性關係從井測到震測資訊之連結，是影響後續建模時標定地層分佈、孔隙率、流體成分之重要參數。基本的岩石屬性分析起始於震波於岩石傳導的縱波(V_p)及剪切波(V_s)波速，聯合實驗室有相當健全的小、中、大尺度波速量測及

分析研究室，首先參觀的實驗室便是利用小型的震波偵測實驗室(圖4)，該實驗室利用針筒式高壓幫浦注入並維持特定壓力之流體(包含油及水)，並研究岩性、壓力、飽和度及流體變化下之震波屬性量測。圖4右側解說人員手持岩心挾持器，其上下方為震波發射器，挾持器中間有放置接收器接收訊號，使用的岩心為2吋直徑及約20公分長之岩心。圖4為該實驗室小尺寸岩心分析過程，實驗室也可應用圖5大尺寸岩石試驗(圖中為全岩心)研究尺度效應，不同岩心試驗結果最後可藉由研究人員所開發之演算程式，配合IVEC高性能電腦進行大數據分析，藉以瞭解岩石物理特性與尺度效應，是相當健全的合作研究機構。



圖 4 小尺寸岩心之縱波(V_p)及剪切波(V_s)波速量測實驗室



圖 5 全岩心之縱波(V_p)及剪切波(V_s)波速量測實驗室

圖6左側為岩心二維度應力應變試驗，主要在量測彈性係數、楊氏模數及柏松比，圖中正六面體約為邊長5公分之岩心，岩心經切割後於上方置入應變計，試驗藉由變化四支平面壓力軸來控制二維之應力，並藉由記錄應變計變化，分析岩石彈性性質。圖6右圖同樣為大尺度應力應變試驗，岩心為邊長約30公分之正六面體，因高壓力可能導致高危險性，反應器表面為約5公分厚之鋼製反應器。透過不同尺度試驗，後續研究便可將岩石異質性及尺度效應納入考慮，使相關震波測勘之岩石屬性分析，及激勵生產工法如液裂等可更加精確。



圖 6 不同尺寸岩心應力應變分析試驗

接續參觀的實驗室，主要與流體流動研究相關，即滲透率及相對滲透率量測與分析實驗室。使用穩態法或非穩態法岩心沖排試驗是研究相對滲透率之主要試驗手段，使用穩態法必須利用暫停試驗及取出樣本秤重作為定義流體飽和度的方法；使用非穩態法雖是直接利用質量平衡計算，但流出管線的死體積導致注入流體穿越時間難以估計，而使質量平衡計算依舊存在些許差異。近年來NMR及CT的應用(分別為圖7左側及右側)，使流體在岩心中的飽和度及分佈可以即時且直接觀測，省略秤重及穿越時間不易定義之不良因素，大大改善了相對滲透率測量及分析之瓶頸。

其中，NMR在石油天然氣探勘已發展出完整技術，且大量使用於岩心試驗及測井工作。其主要量測項目可為，1)量測束縛水飽和度：定義孔隙中可流動及不可流動之流體，協助滲透率與可回收流體體積之計算；2)孔隙率量測：可定義束縛水體積、自由流體體積及有效孔隙度(常見為Schlumberger公司的CMR測井儀器，及NUMAR的C測井儀器)，協助相關後續之生產開發所需參數；3)量測殘餘油氣飽和度：通常NMR無法良好分辨來自油或水中的氫離子鬆弛時間，導致油/水飽

和度定義較為困難，NMR測井可利用兩段式測井來瞭解不同流體所貢獻之飽和度關係。兩段式測井便是利用第一階段前期測井建立基本訊號，第二階段便是利用可溶解於水之順磁離子(如錳)加入泥漿並循環，該離子溶解於地層水後可加速水的鬆弛衰減，減低水的訊號而加強油的訊號，再實施第二階段NMR測井便可獲得實際油氣飽和度之訊號。4)判識油、氣或水層：利用儲層流體的不同鬆弛時間特性和擴散特性，有可能區分油、氣或水層。例如天然氣相對原油或地層水來說，總是屬於非濕潤相(Non-wetting)，天然氣的T1總是反應體積鬆弛T1B，而表面鬆弛則影響很小。同樣，在T2測量中的表面鬆弛T2S也可忽略，主要反應體積和擴散鬆弛時間。若在實驗室可預先進行岩心試驗獲得經驗參數，應用至NMR測井便可獲得孔隙率、滲透率、毛細壓力及相對滲透率參數之垂向分佈，是相當適用於生產開發之測井儀器。



圖7 NMR(左圖)及CT(右圖)岩心飽和度量測系統

本次參訪因時間緊湊關係，未及順利且清晰拍攝到工作人員與環境，無法在本報告中呈現。但經實地參觀，發現該政府及學術聯合研究機構之分工相當精細與清楚。試驗專責人員、分析專責人員、程式開發人員及綜合解釋人員，每個職位因人制宜且給予發揮空間，每個工作人員也相當認真於自己本位工作。另外，此行發現每個單位部門門口皆有近三年的研究成果海報且每年更新，相當有利於不同組別工作人員互相瞭解、參訪人員對單位的認識及同組人員對於自有成果的審視，相當適合研究單位效法。

研討會討論報告

本次研討會報告內容相當豐富，報告主題包含有地層流體流變特性、岩石物理異質性分析、飽和度對震測之影響、頁岩與泥岩物理特性、碳酸岩物理特性、岩心沖排試驗分析、岩心沖排模擬應用分析、岩心沖排電腦斷層飽和度分析及核磁共振在岩心飽和度分析。研討報告分別在兩個會議廳舉行，本次行程主要專注於岩心試驗之分析部分，並將概述於本報告中，同類型文章將合併說明。

岩心沖排試驗

使用超臨界態二氧化碳注入油田進行增產已證實為可行性相當高的激勵生產技術，該增產技術具有的主要優點包含有：1)因壓力的提升使注入氣溶解入殘餘油中，降低殘餘油黏滯度，減低流動度比(Mobility ratio, M)並增加排掃效率；2)因壓力的提升使注入氣溶解入殘餘油中，使油體積膨脹，導致殘餘油體積大於殘餘油飽和度，並使油產生流動；3)在水無法沖排的微小孔隙中，可利用氣體沖排殘餘油，故孔隙油可因低界面張力(氣油界面張力低於油水界面張力)使殘餘油重新流動，及排掃效率增加。因此，在實驗室進行二氧化碳沖排藉以瞭解沖

排效率，亦或是不同沖排時間岩心所反應的震波特性是常見研究類型。圖8為Sodal等人於試驗室所設計的岩心沖排試驗系統，該系統於岩心膠套上配置有震波接收器，可在動態岩心沖排試驗中蒐集P波及S波資訊進行分析。該試驗重要成果如圖9所示，2吋直徑的岩心樣本首先以地層水預飽和，試驗接續注入二氧化碳進行排退(Drainage)岩心沖排，再利用地層水回注進行浸潤(Imbibition)岩心沖排。試驗發現縱向P及S波無法解析流體飽和度變化，徑向的P波便可以解析飽和度變化，且在動態的浸潤過程會造成波速增加，排退過程則會造成波速下降，此一特性可協助利用震波屬性分析二氧化碳封存或增產施作時，二氧化碳於地層中之分佈，落實二氧化碳移棲監測工作。Kitamura等人根據相同試驗方法於標準岩心，也呈現類似結果如圖10。

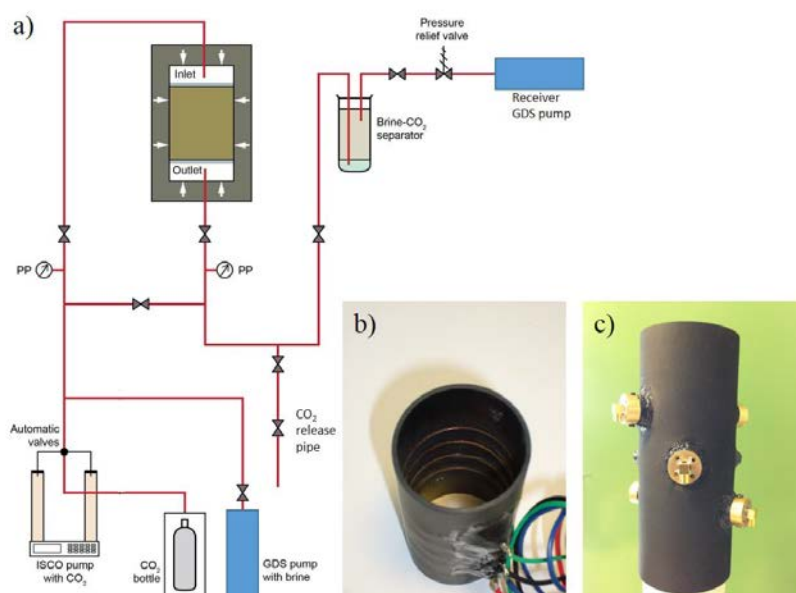


圖 8 二氧化碳沖排試驗岩心震波分析系統

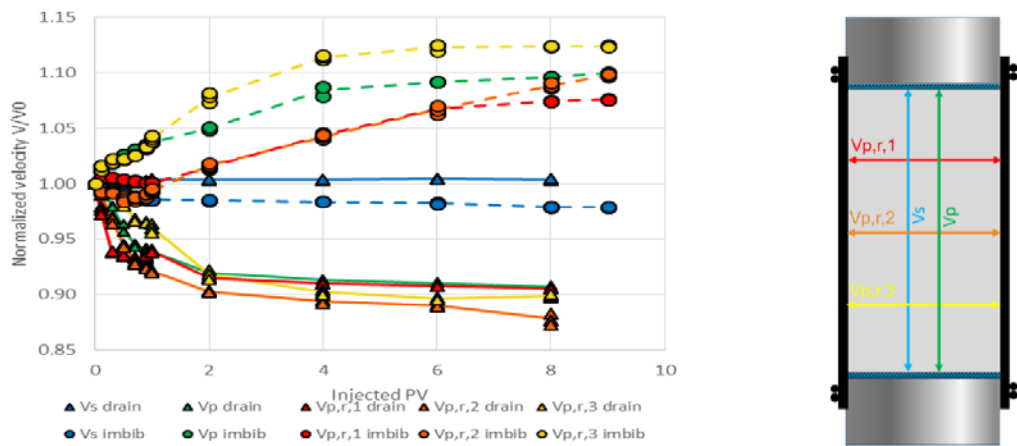


圖 9 岩心縱向 P 波、S 波與徑向 P 波於二氧化碳沖排試驗量測結果

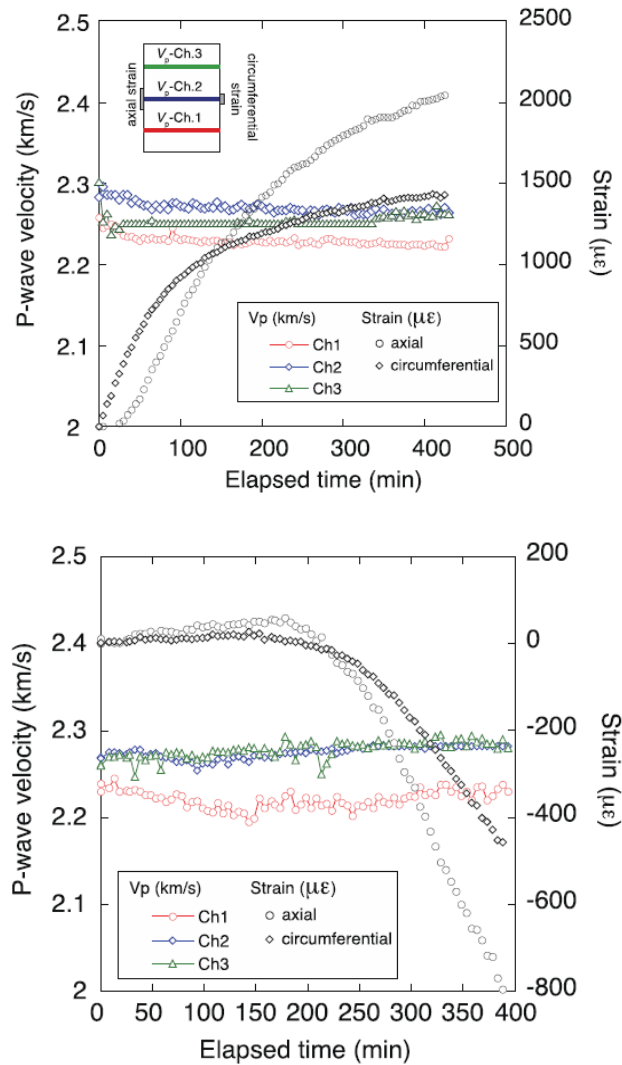


圖 10 標準岩心徑向 P 波與應變參數於二氧化碳排退沖排(上)及浸潤沖排(下)之量測結果

Falcon-Suarez等人設計了圖11的二氧化碳沖排岩心反應系統，該系統可在岩心沖排動態試驗中同時針對岩石物理性質及力學性質進行量測，藉以瞭解動態沖排過程中岩石物理及力學的變化。試驗的圍壓系統及應力提供系統皆為ISCO 260D型針筒式幫浦。根據圖11試驗設計內容，岩心膠套可放置16個電阻率成像量測系統、軸向及橫向應變儀、聲波速度與衰減測量，流體的注入與岩心圍壓系統皆是由ISCO DX-100型針筒式幫浦進行壓力供應，該幫浦可進行定壓模式注入或定流模式注入，壓力最高可達7000 psi，流量最低可達0.001 ml/min，是一精準度相當高的試驗型幫浦，近來也常被使用於超臨界萃取試驗中。

試驗結果於研討會中只介紹地層初期鹽分高的海水沖排替代淡水的過程，用來模擬地層初始海水入侵時的岩性變化。試驗結果如圖12所示，隨淡水被高鹽分海水所取代後，因溶解於鹽水中的離子導致電阻率下降(不同沖排時間的ERT成像可見圖12右圖)，岩心的應變與P波則與沖排時的有效應力趨勢一致，當試驗開始時有效應力達到最大值，壓力的集中導致P波與應變達到最高；隨著時間增加，岩心孔隙中的淡水慢慢被鹽水取代後，應變與P波又開始慢慢上升，推測是因為鹽水中某些礦物的沉澱，導致滲透率下降而改變應變及P波之趨勢，試驗過程滲透率變化可達4倍之多，推測可能含有某些化學反應的發生導致孔隙結構產生變化所導致。作者提及雖還未進行二氧化碳動態注入過程的監測，但前期的觀察可以瞭解地層初始條件形成前，岩心孔隙流體被鹽水取代後的岩石物理參數背景值，甚至是地層水鹽分不高時的物理特性也可窺知一二，瞭解環境背景值的變化將有助於探勘的成功率。另外，也可藉由該試驗瞭解油氣藏進入構造封存前，滲透率的變化背景，未來進行生產，可適當加入激勵工法回復初始高滲透率狀態。

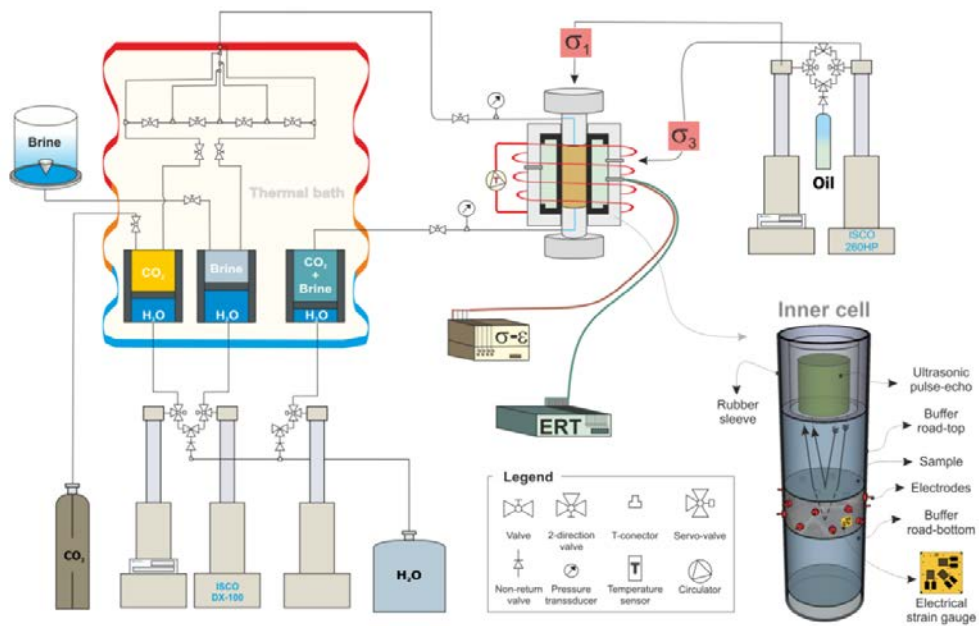


圖 11 岩心沖排之岩石物理及力學性質量測系統

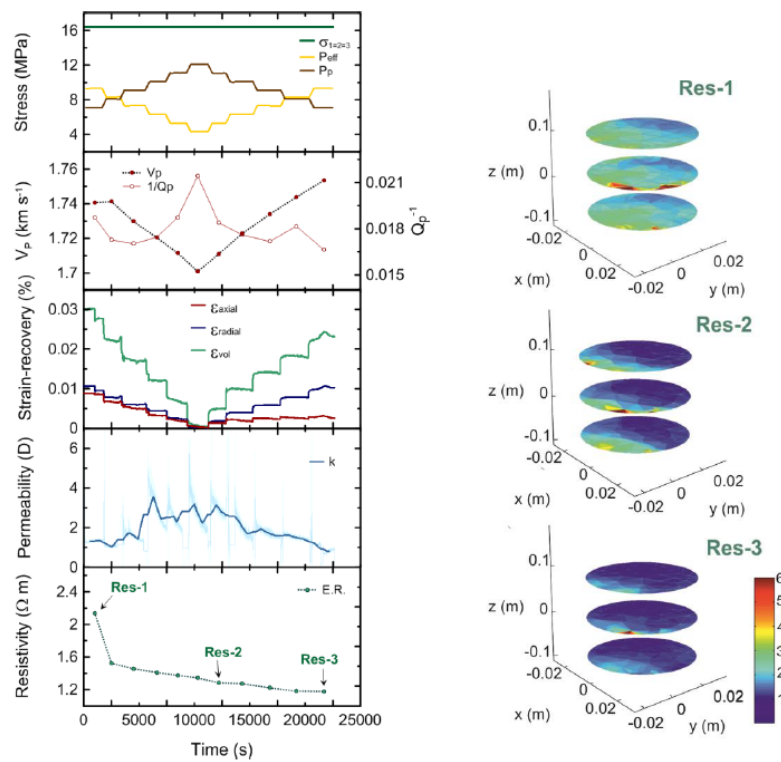


圖 12 鹽水沖排孔隙水之岩石物理及力學性質量測結果

Benson利用二氧化碳與鹽水進行岩心穩態法沖排試驗，並利用X-ray電腦斷層進行飽和度判識與掃描，最後利用油層模擬分析進行相對滲透率影響因子之研究。圖13顯示試驗分別在二氧化碳10 %、90 %及100 %注入流量比率下的電腦斷層掃描與模擬分析結果，結果顯示油層模擬只考慮孔隙率及滲透率異質性時，並無法掌握流體在岩石中的飽和度變化；唯有考慮毛細壓力異質性時，才可與實際流體飽和度變化接近。該結果顯示當生產進入二級及三級採油時，對於油層孔隙率、滲透率甚至毛細壓力分佈都需要有一定的掌握，才可推估殘餘油飽和度高的分佈區，以利增產工程之進行。

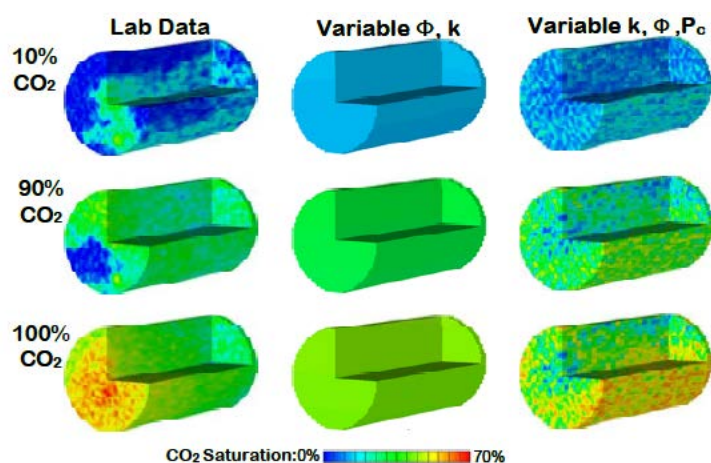


圖 13 二氧化碳岩心沖排飽和度 CT 掃描與油層模擬分析

另由圖13可知，為瞭解飽和度分佈與岩心物理性質關聯性，使用CT或NMR這種過去主要應用於醫療之儀器，已成為主流趨勢。如何在實驗室岩心試驗中以小窺大，是各油公司近年來努力的目標。本公司NMR技術之建立，未來勢必對於探勘及生產開發具有重要的影響性。

電腦斷層與核磁共振之應用

傳統岩心沖排技術不管應用於穩態法或非穩態法相對滲透率求取，或是增產

效率評估，皆存在岩心樣本飽和度分佈不明的瓶頸，故試驗總是假設岩心為均質樣本，飽和度在岩心樣本呈現平均分佈的特性。但在CT與NMR的技術應用到岩心沖排試驗後，對於岩心飽和度的分佈不再是一個“平均”的概念，而是可以被量測的。Watanabe等人利用中東一油氣田的碳酸岩岩心樣本，以穩態法岩心沖排試驗量測相對滲透率參數，所使用的系統設計如圖14所示，岩心注入系統及圍壓系統皆使用針筒式高壓幫浦。岩心夾持器為陶瓷材料，可置入CT進行X-ray掃描。試驗使用2吋直徑3.5吋長之岩心，前置作業便是利用CT先進行孔隙率背景分析，圖15左側便是孔隙率於岩心內部的變化，為後續一維度的油層模擬歷史擬合工作，孔隙率的變化定義為圖15右側隨岩心長度的變化。

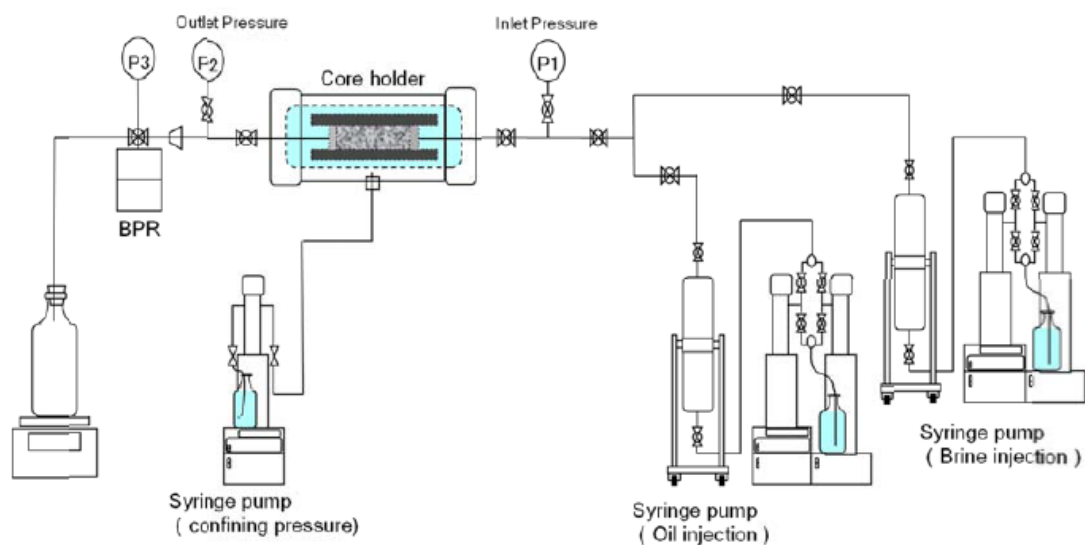


圖 14 穩態法相對滲透率試驗設計圖

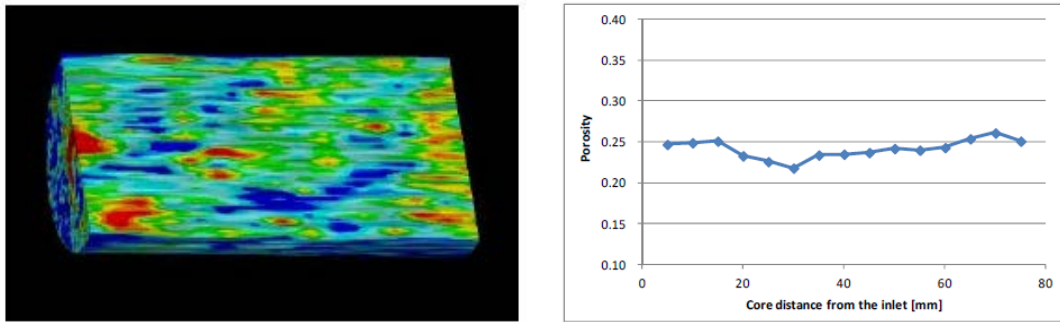


圖 15 碳酸岩岩心孔隙率分佈圖

圖16為試驗岩心利用注水沖排再以CT掃描後的飽和度分佈圖，圖17則是注入不同孔隙體積的水相後，經CT掃描結果推估之一維水飽和度分佈圖（W0-77PV即表示利用水飽和度為0 %之注入流體體積比(油100 %)，在注入77個孔隙體積後的飽和度分佈狀態)，由圖可知隨水相的注入體積比上升，岩心到達穩定狀態後的飽和度分佈基本上與初始孔隙率分佈之趨勢不同，該結果確實反應Benson建議必須把毛細壓力列入量測之結論。另外，不同水相的注入體積比卻可以達到類似的飽和度分佈圖，更顯示主導飽和度分佈的因素應當另有其他參數。試驗結果顯示使用100 %水相的注入體積比時，飽和度分佈趨勢明顯與其他不同，推測可能在岩石的潤濕特性發生了變化所導致。

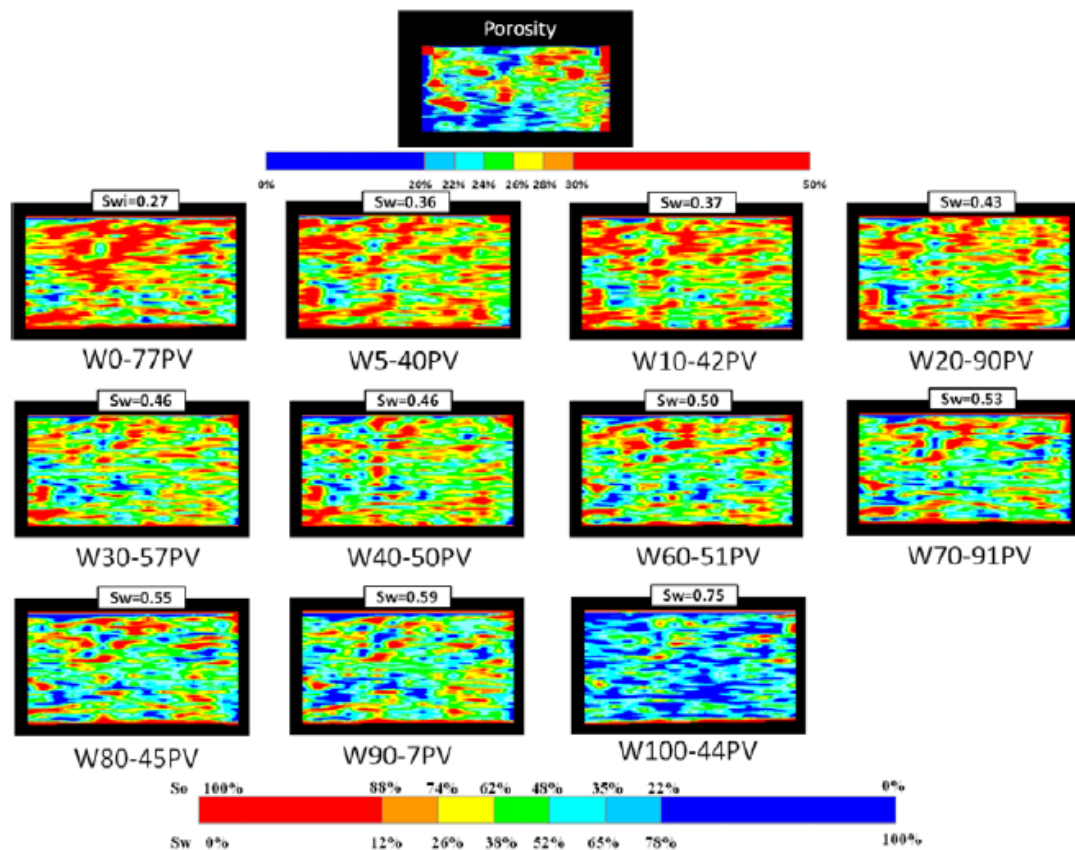


圖 16 不同水飽和度與注入不同孔隙體積後 CT 掃描結果

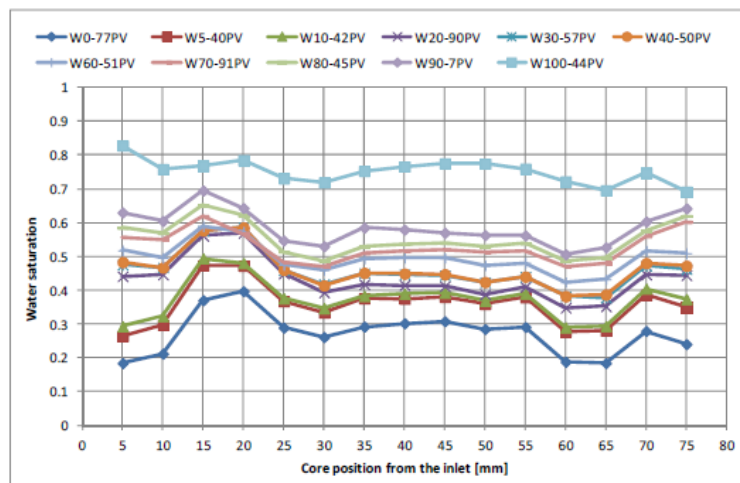


圖 17 一維度穩態法岩心沖排試驗水飽和度分佈圖

後續Watanabe等人利用試驗所計算而得的相對滲透率參數(圖18)進行歷史擬合，擬合結果發現當注入水體積比低於90 %時，試驗量測值與歷史擬合相當接近；但注入水之體積比為100 %時，岩心飽和度的量測結果是實驗值大於計算值(圖19)，推測試驗過程中的高注入水體積比導致岩石表面特性發生變化，使岩石變得比較親水而導致。亦即使用二級採油的注水沖排，會使岩石表面性質慢慢發生變化，使岩石表面的濕潤特性變成較為親水，該現象將有利於後續的激勵生產工法。

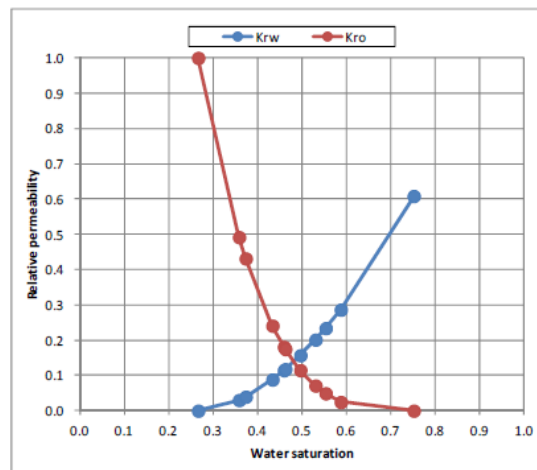


圖 18 Watanabe 岩心沖排試驗之相對滲透率量測結果

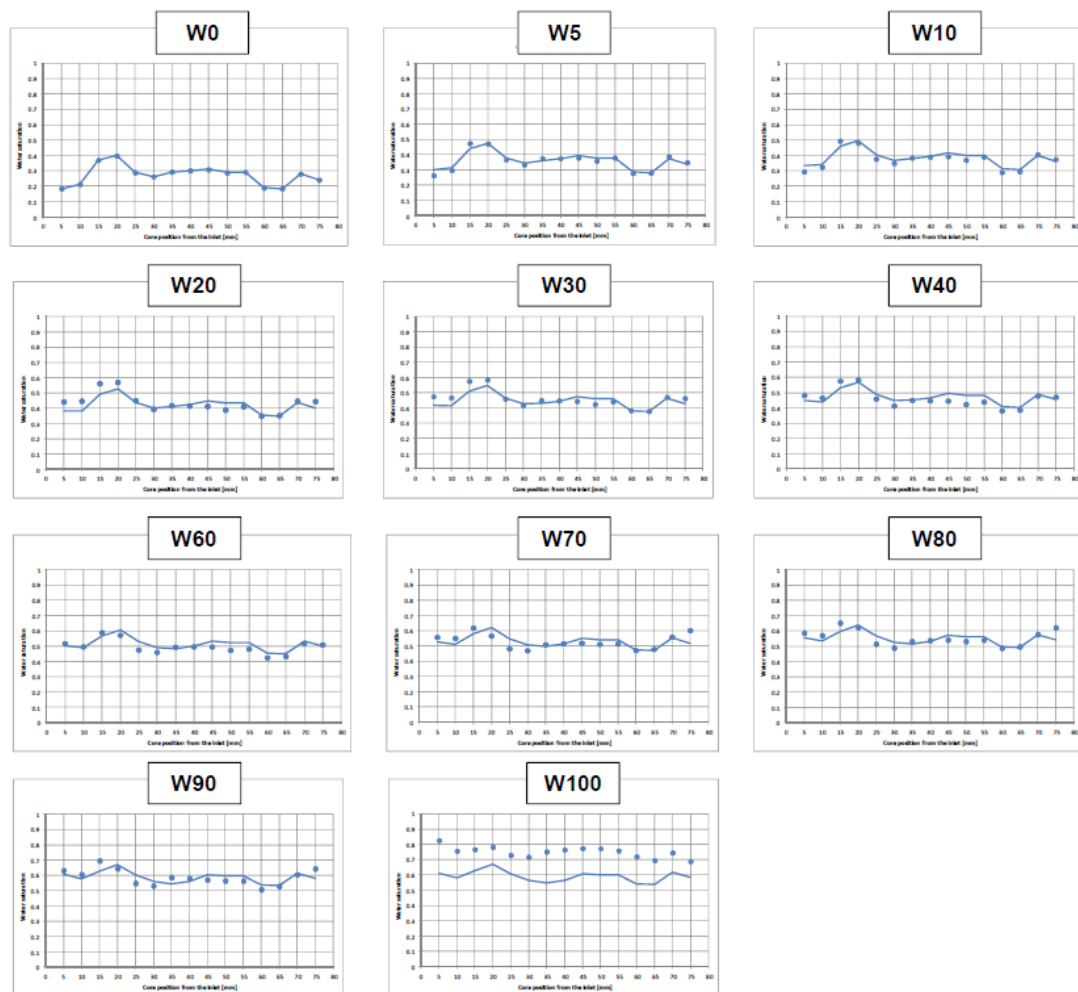


圖 19 Watanabe 岩心沖排試驗之水飽和度量測與歷史擬合結果

瞭解溫度的變化對相對滲透率參數的影響，可應用於熱攻或蒸氣注入之增產效率推估。Vega等人針對矽藻石岩心進行溫度40°C至250°C變化下之穩態法相對滲透率岩心沖排試驗，試驗達穩定狀態時並利用CT電腦斷層掃描飽和度的變化，藉以瞭解溫度變化對於飽和度的影響。圖20為Vega等人所設計之岩心沖排試驗系統，岩心圍壓與背壓系統與其他報告者不同，是使用氣動幫浦，岩心挾持器表面纏有加熱帶可控制溫度變化。岩心為直徑1英吋及長度2英吋之矽藻土樣本，孔隙率經前處理量測結果約為63 %，滲透率則是相當低的0.7 mD。使用的油相流體是除氣後的原油，黏滯度在45°C、120°C及230°C分別為7.2、2.59及1.27 cp；水相

則是鹽分440 ppm之地層水配方，黏滯度在45°C、120°C及230°C分別為0.57、0.24及0.12 cp。圖21為初始CT掃描之孔隙率分佈量測圖。

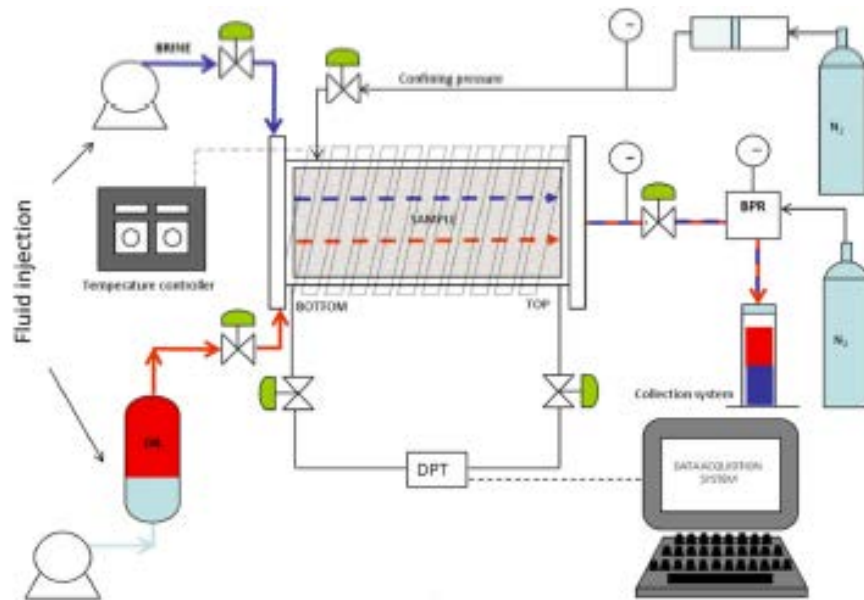


圖 20 Vega 等人設計在不同溫度下之穩態法相對滲透率試驗設計圖

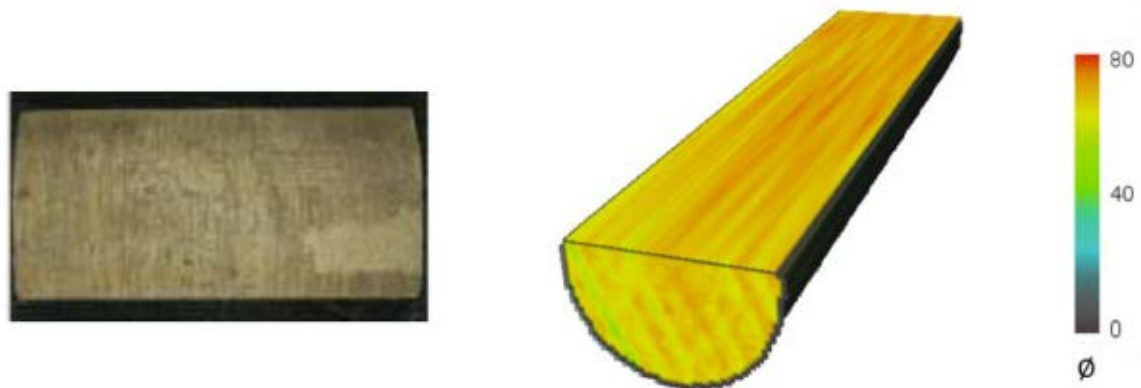


圖 21 矽藻土岩心之 CT 掃描孔隙率量測結果

圖22為試驗溫度45°C，注入水體積比由左至右分別為0 %、50 %及100 %之CT掃描結果，由圖可知即使注入100 %鹽水，高含水飽和度(紅色)與低含水飽和度(綠色)依舊存在明顯差異，推測其滲透率也存在著差異性。圖23為不同試驗溫度下，由左至右分別為45°C、120°C及230°C，注入水體積比分別為0 %、50 %及100 %之一維度岩心孔隙水飽和度量測結果。結果顯示隨著溫度增加，岩心表面趨向

於親水性，即原生水飽和度也隨之增加，該結果將有利於增產工法的施作。圖24為不同溫度下，水相的相對滲透率參數計算結果，結果除顯示原生水飽和度增加外，曲線的曲率也有增加的趨勢，該結果顯示水的流動性隨溫度增加呈現下降趨勢，表示岩心表面將與水相更穩定的吸附，親水性的增加使水相難以流動。但根據圖24結果，水相相對滲透率的端點值隨溫度增加並無呈現直線相關，作者推測可能矽藻土在試驗過程中會排出細粉，導致孔隙結構變化，尤其在岩性是趨向親水性的變化時，將使端點值影響因素更難以預測。圖25為不同溫度下，油相的相對滲透率參數計算結果，結果除顯示殘餘油飽和度下降外，曲線的曲率也有降低的趨勢，該結果顯示油的流動性隨溫度增加呈現上升趨勢，表示岩心表面將與水相更穩定的吸附，親水性的增加使油相更易於流動。相同地，油相相對滲透率曲率的降低非常有可能是因為矽藻土在試驗過程中排出細粉，導致孔隙結構變化，在孔隙度增加的情況下，連通油的體積增加，致使溫度升高後的親水性變化導致更多油品被排出。另外，油相相對滲透率的端點值由圖25可知隨溫度上升而降低，作者推論該參數的影響因子仍難以確認，可能與注入條件、岩心數次試驗導致孔隙結構改變或溫度有關，也建議是將來可以研究的方向。最後，圖26為毛細管數(N_c , Capillary number)對應不同溫度及注入條件下的計算結果，毛細管數為黏滯力與界面張力之比值，毛細管數的降低可提高油相的流動，增加油水置換的效率。根據圖26的試驗與計算結果，注入水流量的增加(黏滯力增加)將導致毛細管數的升高，並增加水相端點滲透率值，結果將使油相的置換效率不佳；但若增加環境溫度，可使毛細管數及水相端點值快速下降，使油相的置換效率提升。

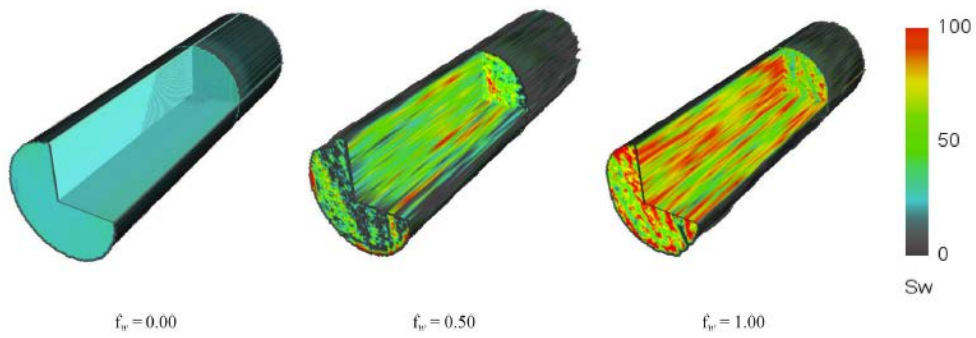


圖 22 試驗溫度 45°C，注入水體積比 0、50 及 100 %之穩態法沖排試驗 CT 掃描結果

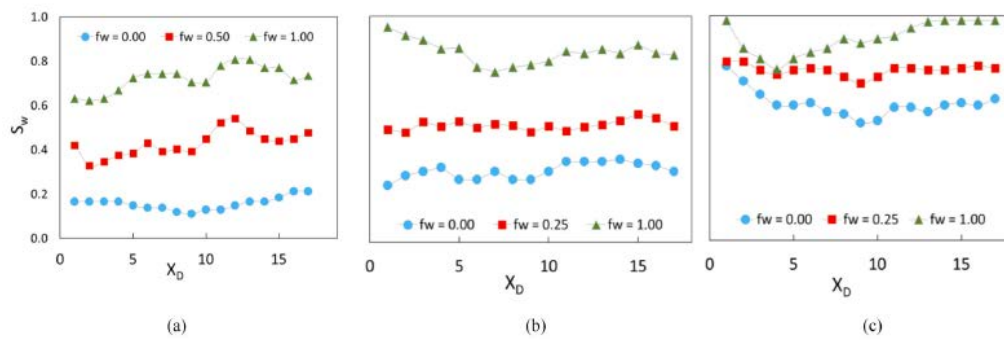


圖 23 (a)45°C、(b)120°C、(c)230°C 試驗溫度下，穩態法沖排試驗飽和度計算結果

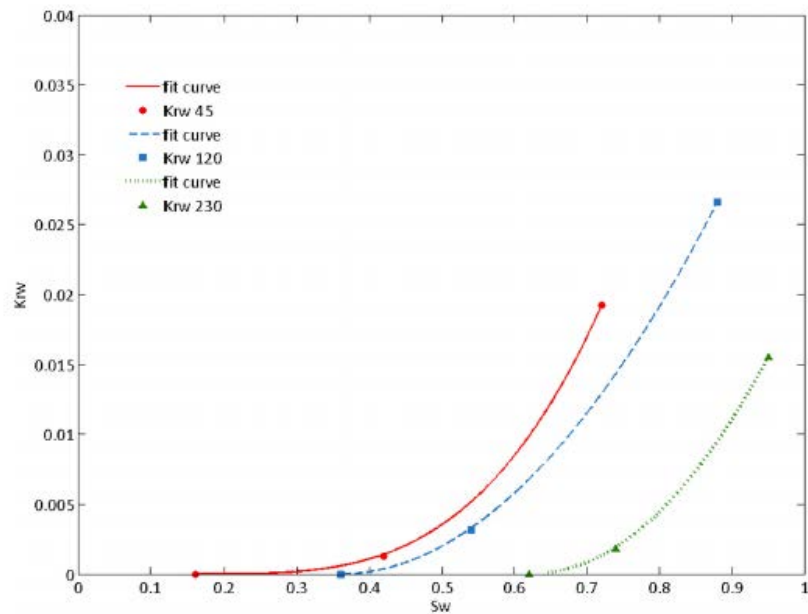


圖 24 不同試驗溫度下，穩態法沖排試驗水相相對滲透率計算結果

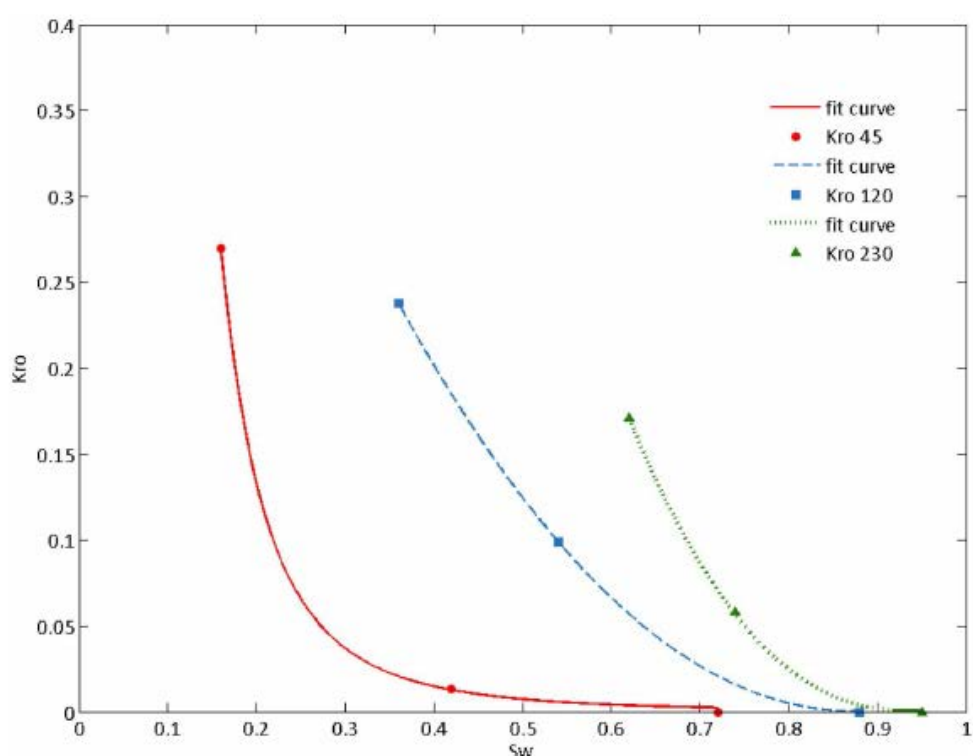


圖 25 不同試驗溫度下，穩態法沖排試驗油相相對滲透率計算結果

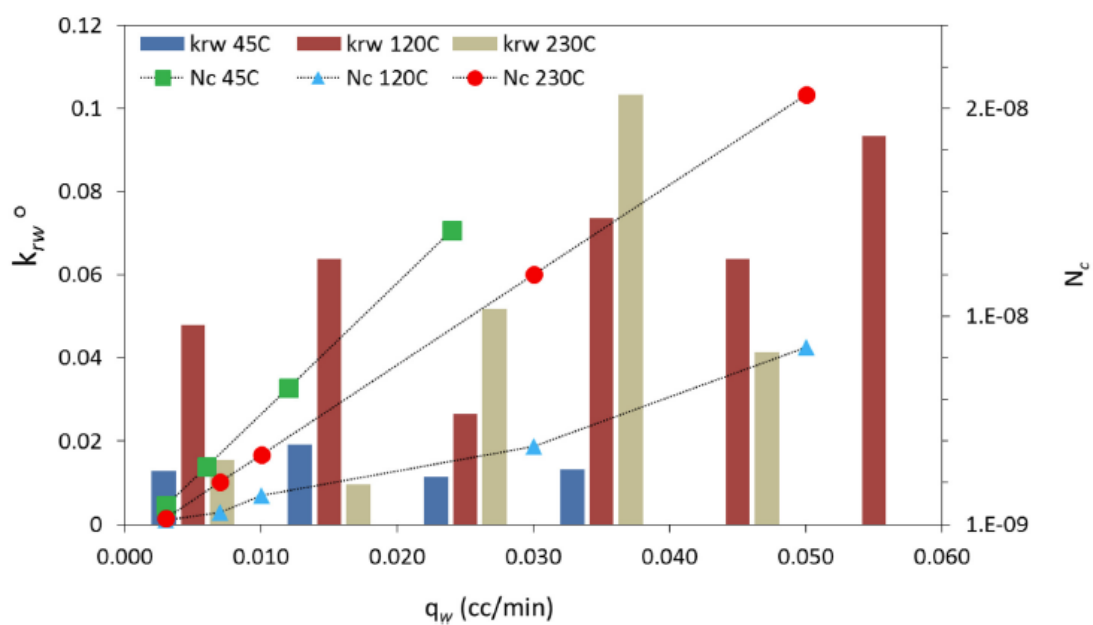


圖 26 不同試驗溫度下，穩態法沖排試驗毛細管數計算結果

核磁共振NMR原理基本上與CT雷同，CT使用的是伽瑪射線衰減技術，NMR則為氫原子因磁場造成旋轉後的鬆弛衰減技術。NMR技術已成熟地被使用於石油探勘測井工作，及實驗室岩心的參數量測工作，所量測項目可包括含水飽和度、原生水飽和度、孔隙率、滲透率、毛細壓力及相對滲透率。Olsen等人利用NMR技術於現地岩心量測毛細壓力，圖27為Olsen等人之岩心沖排試驗系統，由於NMR主要量測參數是孔隙中氫原子鬆弛時間，所以直接反應的是流體飽和度分佈情形，製造岩心內部的流體飽和度變化及使用經驗公式是NMR推估動態參數(滲透率、毛細壓力及相對滲透率)的作業流程。報告指出適合分析岩心中流體飽和度的模組為CSI1D脈衝序列模組，該模組可順利剔除雜訊波，並分離出可計算的脈衝波。試驗使用70000 ppm鹽水及Isopar試驗用油作為沖排試驗用流體，報告提及的試驗皆是排退作用的沖排試驗(油沖水)，注入流量約為1~4 ml/hr，試驗天數約為12天。試驗設計如圖27所示，利用氣體鋼瓶提供圍壓壓力，再利用注入幫浦擠注油進入鹽水飽和的岩心，藉以沖排置換孔隙水。

圖28為沖排試驗進行4天後，利用NMR進行一維飽和度掃描的結果，試驗過程約在第20小時便發現穿越現象，試驗最後的10小時並無觀測到孔隙水流出。但根據圖28飽和度掃描結果，飽和度於岩心中的分佈並未平均分佈，而是在出流端有很高的端點效應，即進流端水飽和度約為27 %，但出流端水飽和度為100 %。圖29為利用圖28孔隙水飽和度分佈進行演算的毛細壓力曲線，及其與離心法及壓汞法的比較，由圖可知NMR量測之毛細壓力與離心法相當吻合，與壓汞法稍有差距，作者提及主要是壓汞法需經由流體界面張力轉換，假設的參數可能導致其差異性。作者接續利用多階段不同流量之注入試驗，注入流量隨時間之變化圖如圖30

所示，所獲得的岩心含水飽和度如圖31所示，由上而下分別為注入流量1 ml/hr、2 ml/hr及4 ml/hr所掃描的結果，根據圖31飽和度曲線可計算出毛細壓力曲線與離心法的比較如圖32所示，在較低的水飽和度狀態下，NMR毛細壓力比離心法低，該狀態是較為準確的，主要是離心法在低飽和度的情況下很難界定離心穩定時間，而使得試驗較為不準確。

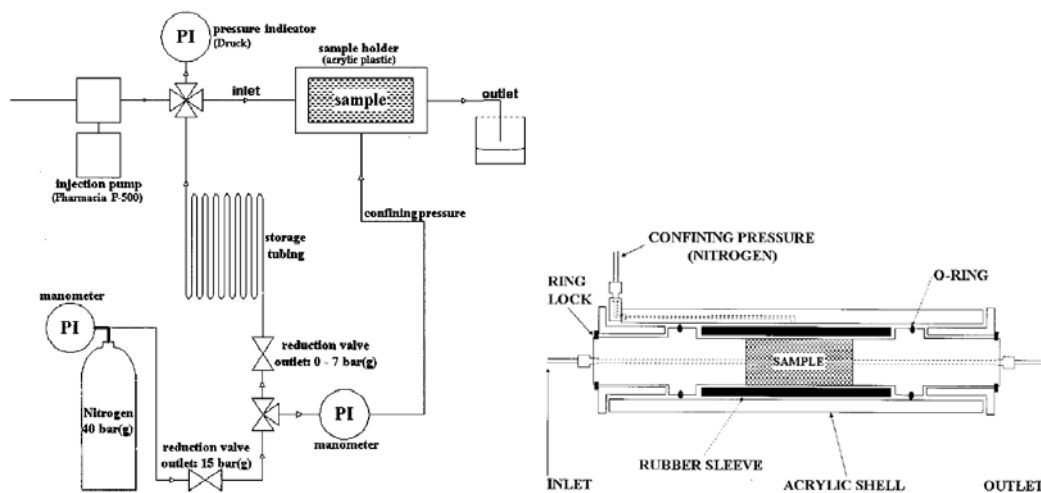


圖 27 Olsen 等人之毛細壓力岩心沖排試驗系統

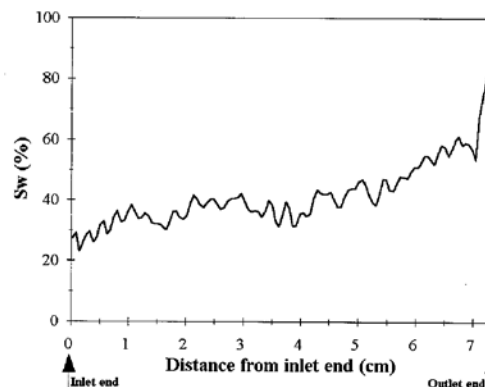


圖 28 NMR 量測之岩心含水飽和度分佈圖

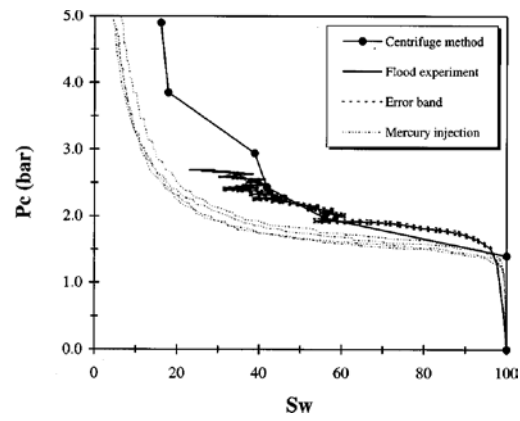


圖 29 利用 NMR 含水飽和度推算之毛細壓力曲線

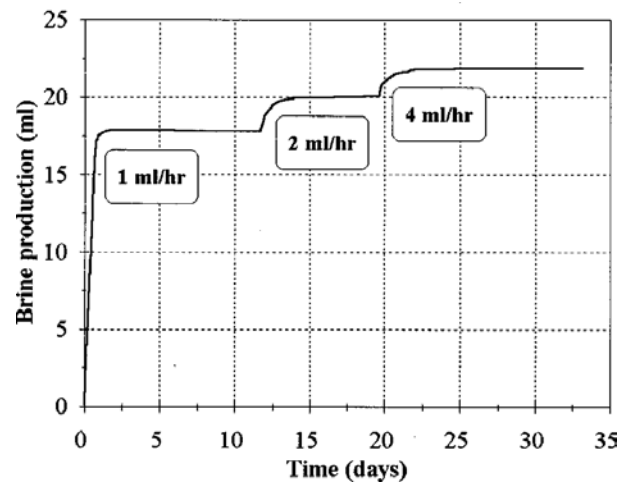


圖 30 變流量設計之岩心沖排試驗

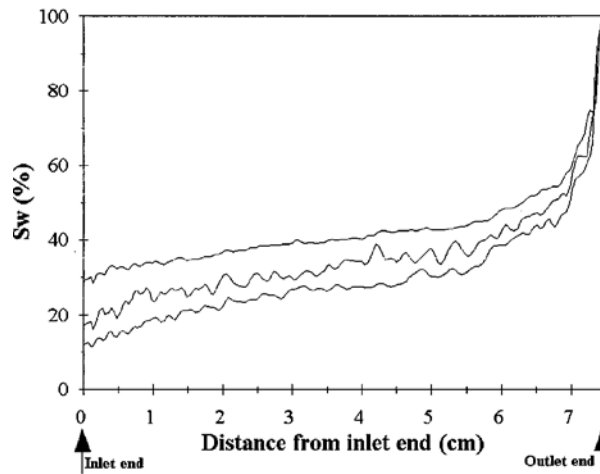


圖 31 不同注入流量之 NMR 含水飽和度量測結果

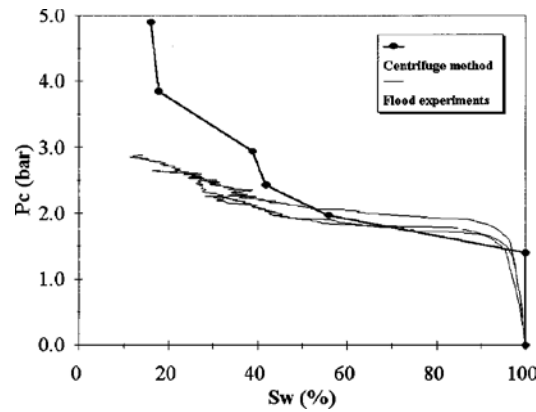


圖 32 變流量條件下利用 NMR 含水飽和度推算之毛細壓力曲線

Alizadeh等人發表利用NMR徑向觀測飽和度變化後，以經驗公式計算滲透率，並加以推算電導度及體積模數之試驗。圖33為NMR成像結果，其中(a)及(e)為斷層照片、(b)及(f)為徑向開放邊界試驗、(c)及(g)為徑向封阻邊界試驗、(d)及(h)為徑向距離分級圖，圖33上排為A樣本，下排為B樣本。利用飽和度掃描推算之滲透率、電導度及體積模數結果如圖34所示，圖34左側為A樣本，右側為B樣本，由結果可知不同的邊界條件導致幾何中心的滲透率、電導度及體積模數差異極大，但幾何中心外的參數便相當一致且不受邊界條件影像。NMR技術的應用可求取的參數相當多，將來可利用本所NMR儀器進行各種參數求取，待技術建立

後，可應用至NMR測井工作使參數獲得之層面更廣，更有利於儲集層描述。

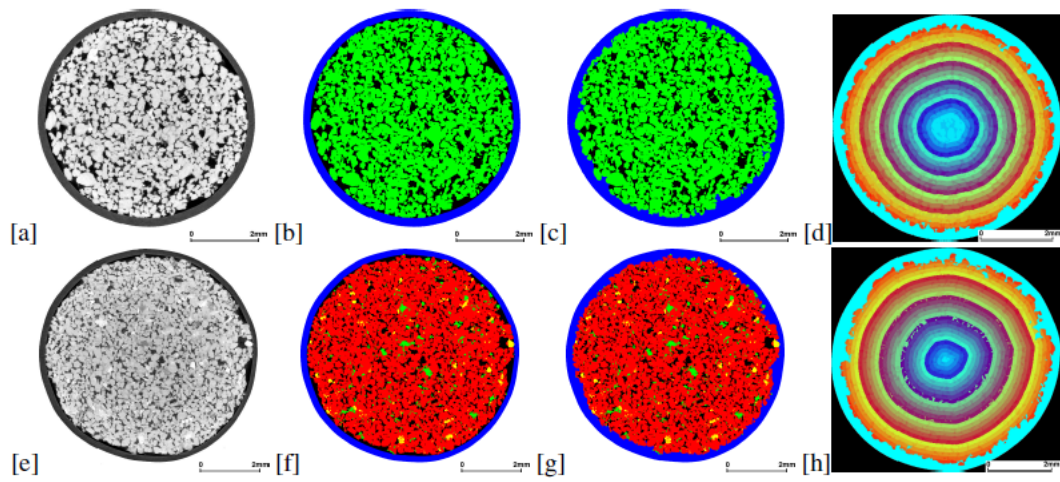


圖 33 現地岩心樣本 NMR 成像技術

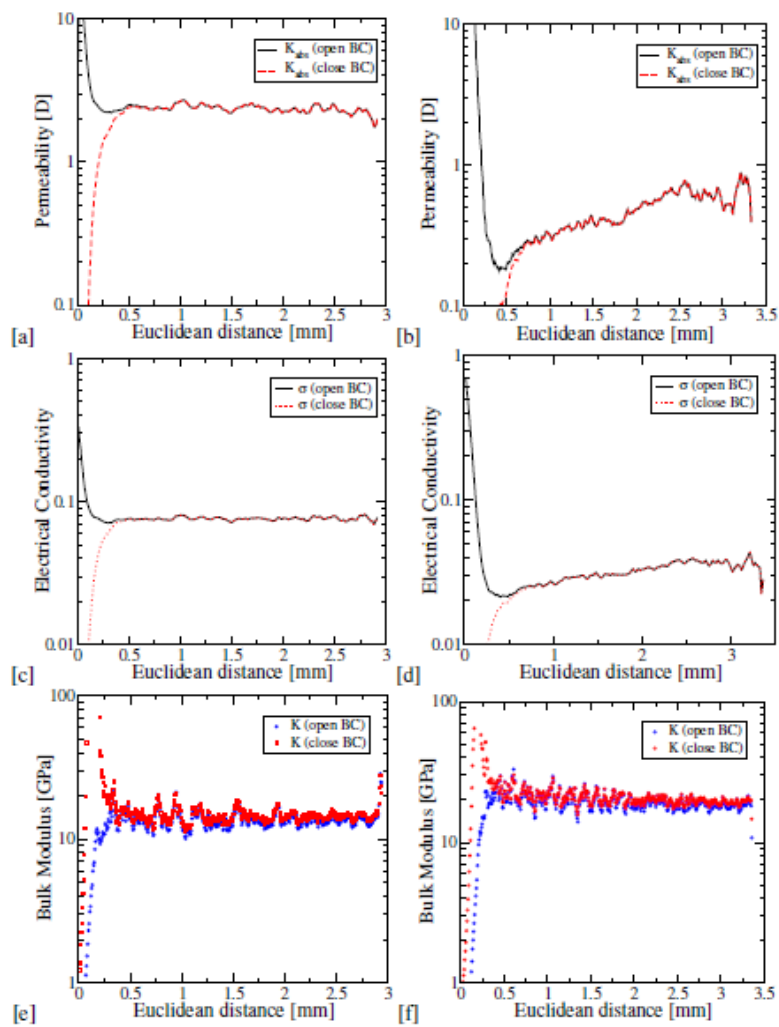


圖 34 岩心樣本滲透率、電導度及體積模數推估結果

肆、建議

1. 本次研討會主旨是討論岩石物理特性在石化資源探勘與開發之應用，本次行程發現不論學術單位或石油公司皆會針對地球物理性質如震波特性和力學應力應變特性及電阻特性等，結合岩心沖排試驗進行量測。針對量測結果，可在初期震測與井測的解釋更具精確性，甚至結合岩心沖排試驗結果，更可應用於生產階段的地物量測工作，使二級採油之後的激勵生產工程更能掌握流體飽和度分佈，使高殘餘油飽和度區域能精確地被調查出來。本公司已具備有完整的岩心沖排試驗技術與經驗，若可加入地物參數量測系統，相信在探勘與開發方面的研究應用更能具備完整性，也更能提升地層評估的精確度。
2. 目前石油產業正處於低油價狀態，如何在現有的生產開發技術中創造高回收效率是石油公司努力的目標。岩心利用不同增產技術所改變的相對滲透率參數，是決定回收效率的重要指標。過去的技術總是假設岩心樣本是最小的均質單位，但在 CT 電腦斷層及 NMR 核磁共振技術的應用後，岩心樣本已可準確地定義異質性，微米級的飽和度分佈也可被量測出，如何由岩心試驗瞭解油層尺度的異質性是將來主要的研究方向。本所目前擁有岩心沖排試驗系統及 NMR 核磁共振岩心掃描儀，將兩項技術結合是與國際接軌重要的目標，在各別的技術完成建立後，必須加速整合兩項技術。
3. 本次行程參觀了整合產官學界的聯合實驗室，不管在人員、軟體及硬體方面皆完整的具備。硬體方面不管微觀尺度、中尺度及巨觀尺度的試驗儀器皆有設計、試驗及解釋專責人員；軟體方面不管電腦性能、配合試驗需求的軟體開發

及整合性的商用軟體應有盡有，產官學的合作可想像其工作效率將高於我國數倍之多，也是我們可以學習的方向。

4. 參觀聯合實驗室的過程當中，發現不管是放置儀器的實驗室、軟體開發人員的辦公室、高速電腦中心、石化資源的探勘辦公室、生產開發的辦公室、專責二氧化碳封存工作的實驗室及土壤地下水污染防治辦公室等，皆放置有各自近三年的研究成果海報，使參觀人員即使匆匆走過也能清楚瞭解該單位近期的主要方向與成果。中油公司如果在各事業單位，或是公司內部各子單位也可比照辦理，相信對於不同單位的人員更能加深彼此認識，業務的合作更能順利推動，也可提升研究單位的專業形象。