

出國報告（出國類別：開會）

參加 Baker Hughes 公司舉辦之地熱及 CCS 技術研討會

服務機關：台灣中油股份有限公司採採事業部鑽探工程處

姓名職稱：王崇興 / 處長

江川毅 / 石油開採工程師

許瑞育 / 石油開採工程師

派赴國家 / 地區：印尼 / 雅加達

出國期間：114 年 11 月 17 日至 11 月 21 日

報告日期：114 年 12 月 19 日

摘要

本次研討會針對中油在東部地熱探勘與 CCS 鑽井中面臨的高溫、漏泥及硬岩挑戰，前往印尼與 Baker Hughes 公司交流關鍵技術。

鑽井液（泥漿）漏失頻繁的問題，由於傳統膨潤土（Bentonite）水化耗時，改用「聚合物泥漿（Polymer）」以達成快速製備、抗高溫及環保的優勢，建議地熱鑽井應以聚合物泥漿為主，雖成本較高，但具備製備速度快（即時應對漏泥）、場地需求小及可重複利用等優勢，能有效解決傳統膨潤土泥漿應變不及的問題。

套管水泥作業上，為解決高溫質變、環境腐蝕與水泥流失，能使用抗 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 的 PermaSet 水泥系統，以及具觸變性的 Thixofil 防漏水泥技術、或使用可酸洗的堵漏材料（Magnelink）以保護地層滲透率。

變質岩鑽進率低的問題，建議採用結合 PDC 切削力與三錐穩定性的「複合式鑽頭（Hybrid Bit）」，並可依地層特性分段選用：淺層用 PDC、深層硬岩用三錐、複雜地層用複合式鑽頭，以平衡成本與鑽進效率。

目錄

壹、 目的.....	(04)
貳、 過程.....	(05)
參、 具體成效.....	(06)
肆、 心得及建議.....	(18)

壹、目的

因應全球能源轉型及淨零排放目標，中油公司於國內積極布局地熱能源探勘及研究 CCUS（Carbon Capture, Utilization and Storage），旨在捕獲工業製程或發電廠排放的二氧化碳，並將其儲存於地質構造中，或再利用於其他產品的生產中，以減少溫室氣體排放。

探採事業部為配合政府能源政策及公司規劃，已於台灣東部地區持續執行地熱井探勘工程，及於苗栗鐵砧山構造區鑽鑿1口 CCS（碳封存）先導試驗井。由於地熱井及碳封存井與傳統油氣井其探勘目標地層性質不同，故鑽井過程中所面臨的工程問題也不同，如地熱井常遇到漏泥、泥漿高溫變質，碳封存井有套管抗腐蝕…等問題。

為尋求有效解決鑽井問題，鑽探工程處積極與能源技術公司如 Schlumberger、Baker Hughes、Halliburton 等國際大公司技術交流及尋求合作，其中 Baker Hughes 於印尼有相當多的地熱井及碳封存井的經驗，且印尼與台灣同屬環太平洋火山帶，所面臨的地層風險相當類似，故本次回應 Baker Hughes 公司之邀請，前去其印尼雅加達分公司做參訪、技術研討及交流。

貳、過程

本次奉派印尼雅加達參加「Baker Hughes 公司舉辦之地熱及 CCS 技術研討會」，自114年11月17日至11月21日，包括啟程、返程時間共5天。實際行程如下：

日期	地點	詳細工作內容
114.11.17	台灣/桃園 - 印尼/雅加達	啟程
114.11.18 - 20	印尼/雅加達	<ol style="list-style-type: none">1. 拜訪 Baker Hughes Indonesia 公司及業務交流。2. 技術研討會，主題包括：<ul style="list-style-type: none">➤ 鑽頭。➤ RSS 定向技術。➤ 地熱井增產工法。➤ 地熱 / CCS 井套管水泥。➤ 地熱井鑽井液。➤ 側鑽工法。3. 參觀 Baker Hughes Narogong 工廠<ul style="list-style-type: none">➤ 高壓泵設備、電測設備、撓曲油管設備。➤ 鑽井液實驗室、水泥實驗室。
114.11.21	印尼/雅加達 - 台灣/桃園	返程

參、具體成效

目前鑽探工程處於地熱井探勘，遇到較為困擾的主要問題包括：

1. 鑽井液（泥漿）漏失及性質不佳。
2. 套管水泥品質不佳。
3. 鑽進率無法有效提升。
4. 設備改善與精進。

一、鑽井液（泥漿）漏失及性質不佳。

探採事業部目前地熱井探勘目標層，大多為裂隙發達地層，此外井場位置也常靠近河床沖積層，例如宜蘭土場、台東紅葉谷、宜蘭員山，這也意味著泥漿漏失（lost circulation）情況容易發生。

1) 地表層階段（0 - 100M）：

影響初期大孔徑鑽進（26" hole or 17-1/2" hole），漏泥情況下井眼清潔效率差，導致下表層套管（20" CSG or 13-3/8" CSG）時頻繁遇阻，且因為漏泥導致循環排屑效率差，鑽屑沉澱至井底，故套管常無法順利下到最底。

2) 目標層階段：

由於地熱井目標層裂隙發達，同時溫度也相當高（~150℃），因此泥漿會遇到高溫變質狀況，攜帶鑽屑及懸浮能力變差，膠黏力下降，及泥漿漏失狀況，這也表示井眼清潔效率變差，導致鑽頭、管串更甚至扭力數據都會受到干擾影響鑽井參數之判斷，發生工程意外的可能性就會上升。

Baker Hughes 公司在泥漿的使用上有其基礎設計（Basic of Design）流程：

1. 目標地層資料蒐集。
2. 風險評估。
3. 實驗室內試驗。
4. 泥漿體系選擇。
5. 完成泥漿配方設計。

透過不同性質添加劑的組合，來因地制宜選用泥漿系統。

表1. Baker Hughes 水基鑽井液系統。

系統 (System)	主要應用 (Application)	穩定溫度 (Stable up to)	關鍵添加劑 (Components)
AQUA-DRILL	環境敏感區域、深水、高角度井、反應性頁岩。	250°F (120°C)	AQUA-COL series, CLAY-TROL/MAX-GUARD series。
LATIDRILL	側鑽井、非傳統頁岩鑽探。	275°F (135°C)	LATIBASE, LATIMAGIC, LATIRATE。
PERFLEX	井眼穩定性、高反應性地層、深水。	275°F (135°C)	MAX-SHIELD, MAX-GUARD series, PENETREX, KEM-SEAL/KEM-SEAL PLUS, CHEMTROL-X, MIL-TEMP/ALL-TEMP。
PERFORMAX	井眼穩定性、高反應性地層、深水。	275°F (135°C)	MAX-SHIELD, MAX-GUARD series, PENETREX, MAX-PLEX。
PYRO-DRILL	高壓高溫 (HPHT) 地熱應用、環境敏感區域。	600°F (315°C)	MIL-TEMP/ALL-TEMP, KEM-SEAL / KEM-SEAL PLUS, CHEMTROL-X。

其中 Baker Hughes 公司推薦於泥漿中使用之關鍵添加劑（Key Additive Information）：

1. 黏土抑制劑 - MAX-GUARD（Clay Inhibition）

MAX-GUARD 是一種聚胺（Polyamine）產品，其作用機制如下：

- ✓ 聚胺與黏土礦物薄片上的活性位點反應。
- ✓ 以靜電方式將薄片結合在一起。
- ✓ 減少黏土吸收水分的傾向。

2. ROP 增進劑 - PENETREX（ROP Enhancer）

PENETREX 是一種提高鑽速（Rate of Penetration, ROP）的增進劑，穩定溫度可達 330°F

（165°C），在鑽頭、BHA 和岩屑的表面形成疏水塗層，以降低鑽頭糊鑽（bit balling）和黏卡的風險，圖1。

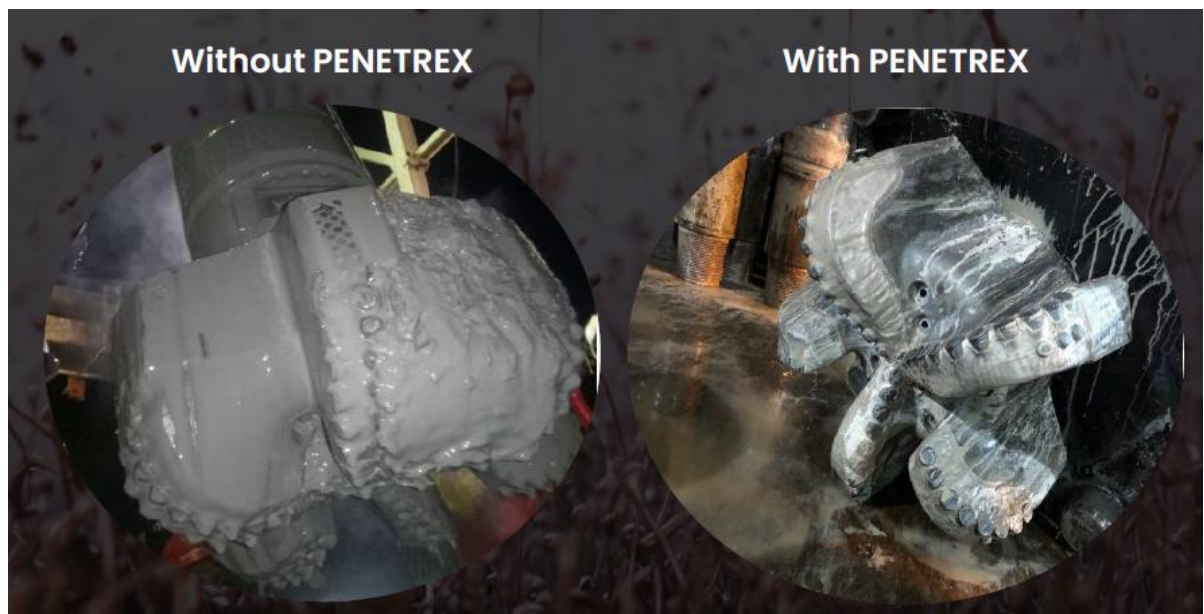


圖1. 泥漿中使用 ROP 增進劑降低鑽頭糊鑽（右）。

由於台灣地區的井場，較無法使用充氣泥漿鑽井（Aerated Mud Drilling）來解決漏泥層問題，遇到地層大漏的情況 Baker Hughes 公司給予建議：

1. 使用碳酸鈣體系的材質進行地層堵漏。

由於碳酸鈣不溶於水但可溶於酸，在進行地層堵漏後，不用擔心把目標生產層給汙損，只要事後用酸洗就可以恢復地層流動性。

2. 使用聚合物（Polymer）體系泥漿。

由於聚合物泥漿水化和建立性能的時間比起膨潤土泥漿（Bentonite）短上非常多，在需要快速製造泥漿的場合非常適合，對於高溫也有較高的穩定性。

二、套管水泥品質不佳。

地熱井套管水泥作業主要會遇到的工程問題如下：

(一) 漏失（Lost Circulation）：水泥流失到地層中，圖2。

針對地熱井常見的破碎地層處理用以下方式：

1. SealBond 隔離液（Spacer）。

- ✓ 具備密封功能的聚合物隔離液，能形成微胞（micelles）。
- ✓ 當壓差增加時，微胞會在地層表面形成一層不滲透的液壓膜，防止流體流失，效果優於傳統隔離液。

2. Thixofil 水泥系統。

- ✓ 具有觸變性（thixotropic）的水泥系統，靜止時能迅速產生凝膠強度（gel strength），防止水泥流失。
- ✓ 用於回填（backfills）和堵漏作業。

3. 堵漏材料。

- ✓ FlowGuard：矽酸鈉材料，與鈣/鎂離子反應形成沉澱物，永久降低漏失層的滲透率，於下套管水泥作業前之預排掃（pre-flush）使用。
- ✓ Magnelink：可酸洗的堵漏材料，在地層中能變成半固態封閉漏泥層，適用於各類型泥漿，100% 可溶於鹽酸，圖3。

(二) 水泥穩定性 (Long Term Cement Integrity)：極端溫度變化下保持水泥強度，圖4。

高溫與應力變化應對 (High Temperature / Extreme Change)：

1. 防止強度衰退：當井底靜止溫度 (BHST) 超過 230°F 時，需添加矽粉 (Silica Flour)。
2. 機械完整性：使用 IsoVision 等井眼應力模型軟體進行模擬。透過調整楊氏模量 (Young Modulus) 和張力強度，確保水泥環能承受溫度循環帶來的應力，防止剝離或破裂。

(三) 腐蝕性環境 (Corrosive Environment)：CO₂ 和 H₂S 對水泥的侵蝕，圖5。

應對腐蝕性環境 (Corrosive Environment Solution)：

PermaSet™ 水泥系統:

- ✓ 專為抗二氧化碳 (CO₂) 和硫化氫 (H₂S) 設計。
- ✓ 抗腐蝕機制：配方中消除了易受酸性流體侵蝕的「氫氧化鈣 (Portlandite, Ca (OH)₂)」，並降低水泥滲透率以減緩腐蝕反應。

(四) 套管擠毀 (Casing Collapse)：由於環孔中滯留的水或泥漿受熱膨脹導致，圖6。

1. 原因：套管環孔中滯留的水或泥漿受熱膨脹，產生高外部壓力導致套管擠毀。
2. 成因：套管水泥環孔排掃替換效果不佳、水泥析出自由水 (free water)。
3. 解決方式：
 - ✓ CMT YP > 1.2 Spacer YP, Spacer YP > 1.2 Mud YP。
 - ✓ 套管水泥後送泥漿時，如水泥未排出至地面，立即關閉環形防噴器，並於環孔反擠1.5倍環孔容量的水至地層中，把環孔清洗乾淨。
 - ✓ 待環孔清除乾淨，進行頂部注水泥 (Top job) 或擠注水泥 (Squeeze cementing)。

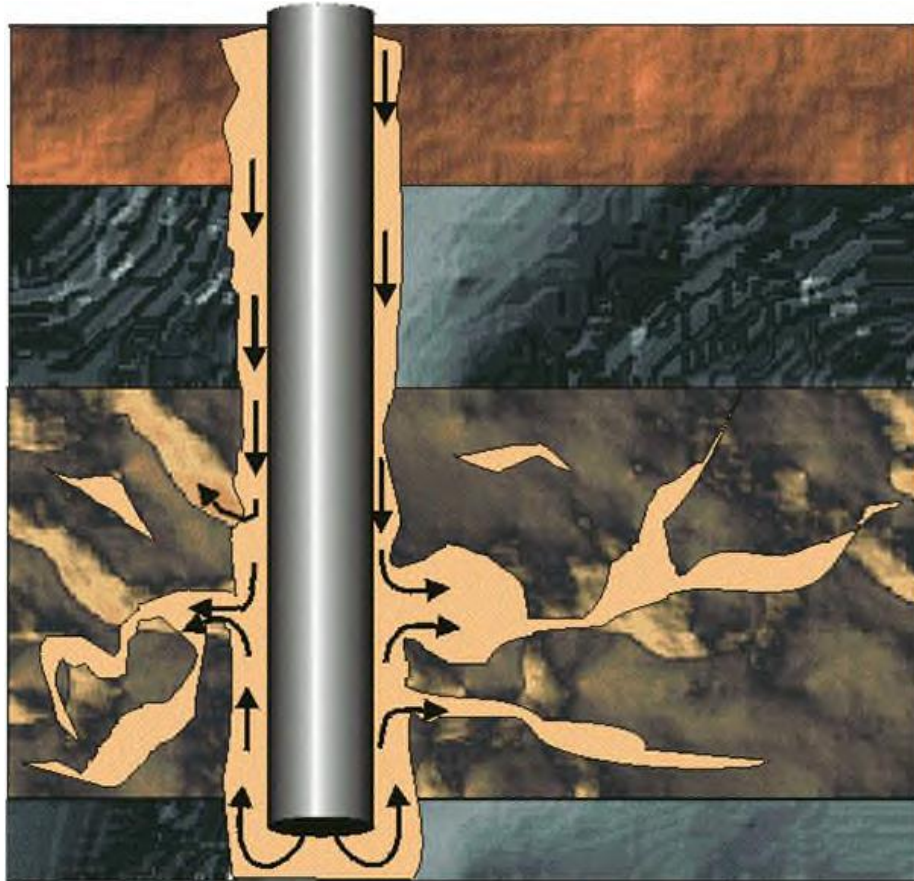


圖2. 漏泥至地層示意圖。

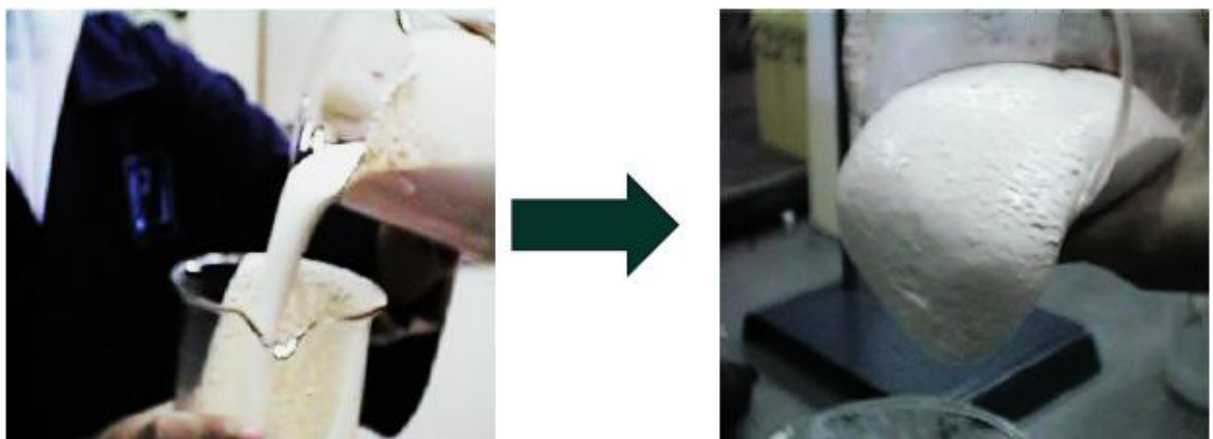


圖3. 可酸洗的堵漏材料，從液態變半固態示意圖。



圖4. 水泥穩定性，高溫下套管水泥能承受套管膨脹變化。



圖5. 腐蝕性環境示意圖。

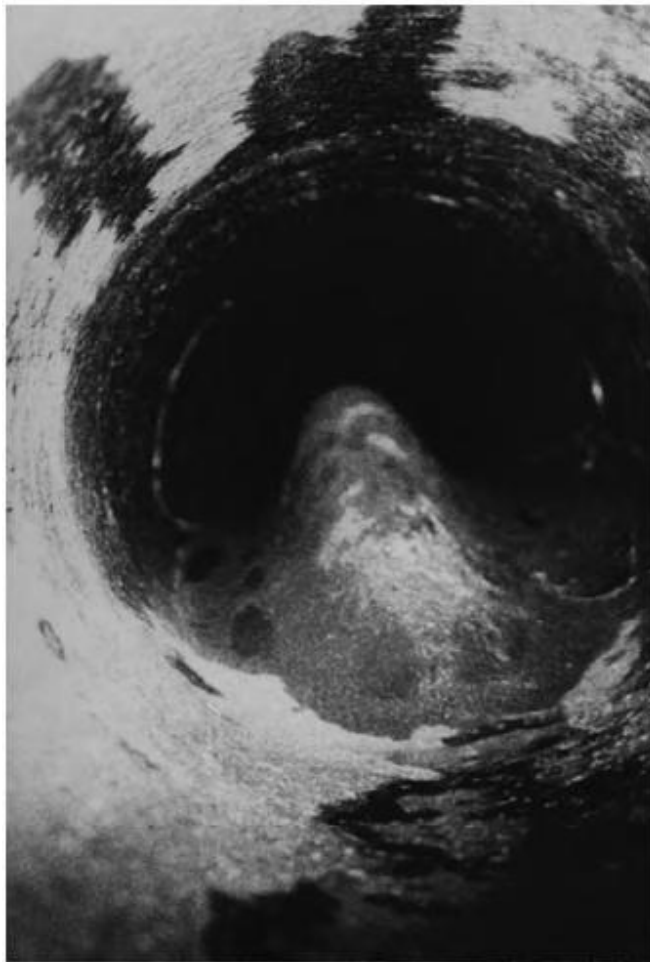


圖6. 套管擠毀示意圖。

三、鑽進率無法有效提升。

由於台灣東部地層多為變質岩，其中尤以變質石英砂之四稜砂岩層最為堅硬，其鑽進率非常低（ $ROP < 1.5\text{m/hr}$ ），屬於相當難打穿的地層，且台灣地層交錯情況多，在 PDC 鑽頭的使用上較為不利，而傳統三錐鑽頭的耐用性及鑽進率又相對不高。

Baker Hughes 在鑽頭使用上推薦：

1. PDC 鑽頭：Talon Strike、Dynamus、PermaFORCE。
2. 三錐鑽頭：Vanguard。
3. 複合式鑽頭：Kymera Mach 6。

VMG – Vanguard 地熱三錐鑽頭：

為地熱、高溫等苛刻環境設計的 VMG – Vanguard 地熱三錐鑽頭，核心特點在於其出色的耐高溫性能，並根據循環溫度提供了四種不同的密封/設計建議，以確保鑽頭在極高溫度下（例如超過 $550^{\circ}\text{F}/288^{\circ}\text{C}$ ）仍能有效運作。主要著重於提升鑽井效率與可

用性，包括在高溫、高轉速環境下更長的連續運作時間、提高鑽進率、減少振動、延長切削結構壽命，以及以金屬密封軸承於高溫中之耐用性。

Kymera Mach 6 複合鑽頭：

複合式（Hybrid）鑽頭，結合了 PDC 鑽頭的旋轉切削侵略性，和三錐鑽頭平穩低扭矩特性，其複合式設計在扭矩力的利用上更加平滑有效率，大幅減少鑽井振動、黏滑（stick-slip），達到更高的鑽進動力、良好的工具面控制以利於定向，和更高的鑽進率，適用於堅硬地層、交錯地層，以及定向井，圖7。

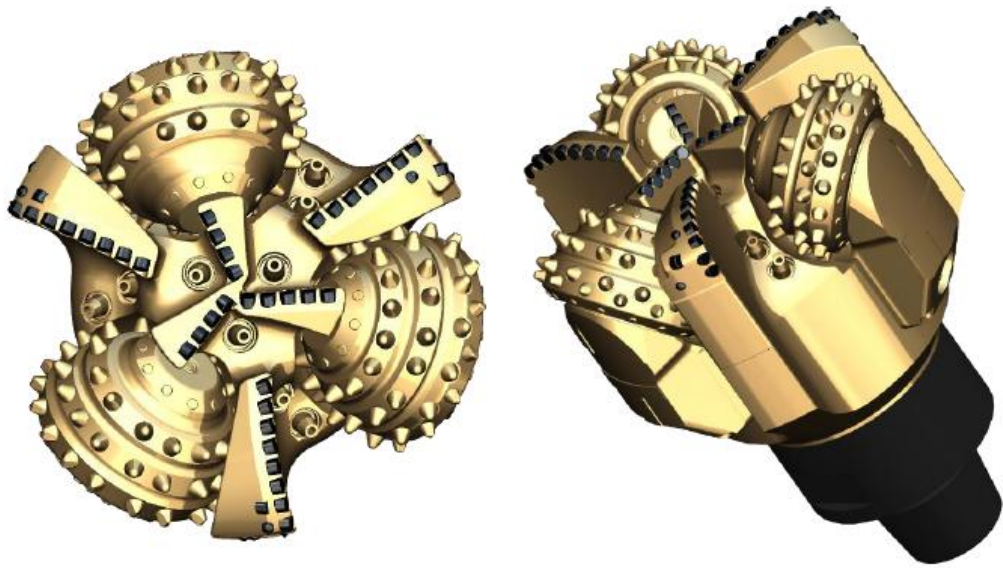


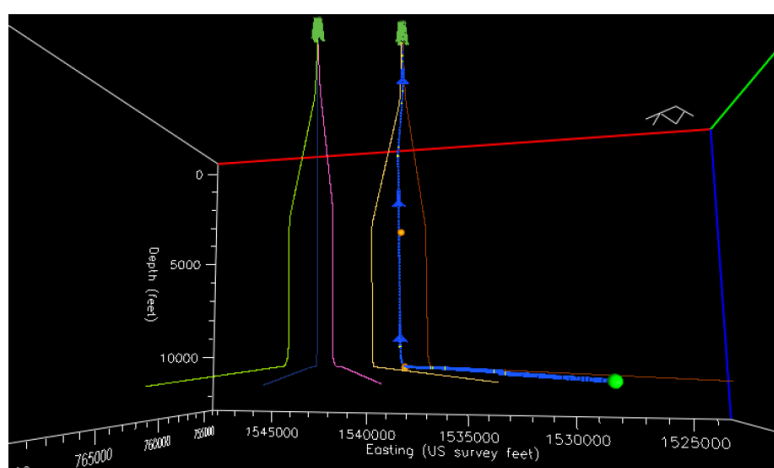
圖7. 複合式鑽頭示意圖

四、設備改善與精進：

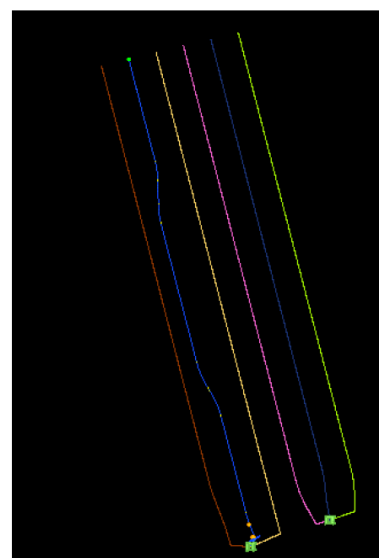
1. 定向鑽井

目前中油定向工具通常用的是井底馬達（Down Hole Motor），量測工具可搭配隨鑽測量設備 MWD（Measurement While Drilling）以及測斜儀（目前中油有單多點測斜儀、自浮式測斜儀，均僅能取得測點之傾斜角度；無方位資料）。MWD，主要用途是在鑽井過程中，可隨時獲取井下定向數據（如井斜角、方位角、溫度，目前本公司設備於8年前購入，目前僅能測得這些參數），及工程參數（如鑽壓、扭矩、轉速），以利定向井鑽進過程中可隨時調整，若是可結合地層信息（如伽馬射線、電阻率），可進一步提升**控制井程曲線**，亦可實現地質導向。目前國際主流以 LWD（隨鑽測井儀）以及 RSS（旋轉導向系統），使用於**大斜度井、水平井和複雜井（如圖8）**，以提升鑽井效率，提高勘探成功率，安全高效地鑽達目標層。LWD，一般可分為推靠式（透過工具上的翼片隨井成調整高低）以及指向式（透過鑽頭轉向），以調整鑽井方向及角度，而 Baker Hughes 公司已整合此二種型式，整合其優點，可使在增角段、穩斜段之井程更為平順（如圖9）、節省鑽進時間，同時取得近鑽頭之測井資料，無線傳輸回地面控制室，亦可透過乙太網路進行遙控方式操作。

Lateral Spacing

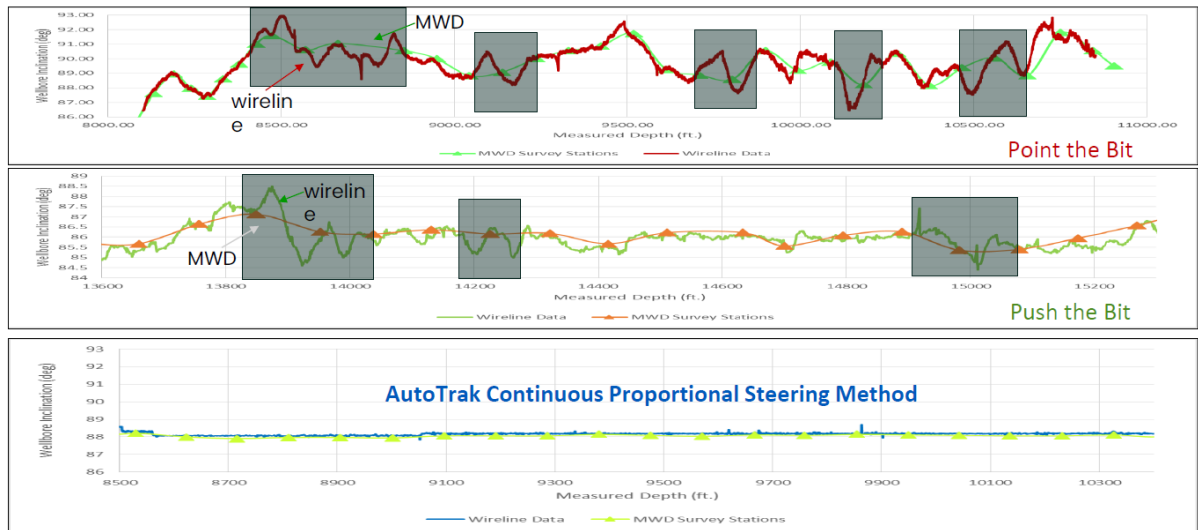


25 Copyright 2019 Baker Hughes Company. All rights reserved.



Baker Hughes

圖8. 為同一井坪中，分別以2台鑽機，鑽進6口井，其分支井之水平方向均不同，以取得最大的經濟效益/掃排面積，並計算安全合理之間距。



SPE/IADC-189408-MS (Effect of the Rotary Steerable System Steering Mechanism on Wellbore Tortuosity in Horizontal Wells, 29-31 Jan 2018, Abu Dhabi, UAE)

Baker Hughes

圖9. 以 RSS 鑽進，取得個深度測點角度資料，上方為指向式、中間為推靠式、下方為 Baker Hughes 之 AutoTrak 鑽進結果，可發現 AutoTrak 之井程更為平順。

2. 下水泥作業

目前中油現有2台雙高壓水泥乳混溶泵，係由 Baker Hughes 分別於110年、112年交貨，雖日前使用有些操作上的問題，但目前大致已克服，主要原因是操作習慣不同，原廠設定以離心泵抽水泥乳，離心泵壓力約120psi，當水泥比重較為不足時，人員會將緩衝罐（Surge Tank）的刀閥（Knife Gate）開度開至全開或全關（國外技師表示應漸漸縮小或慢慢開大），導致落粉時太多或不足時，造成堵塞或水流往緩衝灌湧入之情形。目前調整為：先以一側高壓水泥泵抽水泥乳，以壓力約600~800psi，迅速抽吸落粉，形成近乎真空之吸力，將抽到的水泥乳於2公秉儲桶內先作混溶，經此調整方式，因吸力較大水泥落粉時馬上被抽吸到儲桶內，目前不曾堵塞，遇比重不足或偏高時，亦有儲桶內之水泥乳可作緩衝，近期下水泥作業均順利。

本次前往 Baker Hughes 印尼分公司，在工廠有約200BBL（約32公秉）之水泥攪拌桶，對於水泥乳使用量低於32公秉之作業，亦可以此設備取代水泥泵，直接於此攪拌桶中注入清水、水泥粉、及水泥乳之藥水亦可於此內進行攪拌，此種攪拌桶尤其適合用於顆粒較大、易沉澱之水泥乳，如矽砂水泥、抗酸水泥等，以及腹地面積較小之井坪，亦不失為值得考慮的作業方式。



圖10. Baker Hughes 人員向與會人員介紹水泥攪拌桶，可供應相當體積之水泥乳亦可進行攪拌，特別適用於顆粒較大、易沉澱之水泥乳，如矽砂水泥、抗酸水泥等。

肆、心得及建議

一、鑽井液（泥漿）系統心得及建議

目前鑽探工程處在地熱井使用的泥漿系統大多為傳統使用的膨潤土泥漿（Bentonite），其特色為成本較低，在充分時間水化後可形成穩定的膠體懸浮液，具備高黏度，在泥漿使用上是最常見的系統。

地熱井在鑽井過程中往往會漏泥，導致需要在短時間內做出新泥漿以補充使用，目前做法仍以重新製作膨潤土泥漿為主，但該類型泥漿初步水化時間至少要1小時，完全水化則要24小時，現場為求快速幾乎是尚未水化就直接使用，短時間內雖然能恢復循環鑽進，但是治標不治本，尚未水化的泥漿在性質上相當不好，靜置時容易和水分離沉澱，導致產生其他工程問題如泵壓變高、扭力變高、沉澱埋沒等影響。

比較膨潤土泥漿和聚合物泥漿：

泥漿系統	膨潤土泥漿（Bentonite）	聚合物泥漿（Polymer）
主要成分	膨潤土黏土（主要成分為蒙脫石）。	合成聚合物（如聚丙烯醯胺）與水的混合物。
穩定機制	在井壁上形成一層低滲透性的濾餅（Filter Cake）。	依靠其黏度和剪切稀化特性，以及對土壤顆粒的吸附，形成濾餅較薄。
製備時間	需要較長的水化時間（1 - 24 小時）才能達到預期的性能。	水化和建立性能的時間較短。
溫度穩定性	在高溫下失去部分性質。	通常具有較好的溫度穩定性，適用於更廣泛的溫度範圍。
用量與佔地	需要較高體積量才能達到所需性能，因此所需的材料量較大。需要更大的場地空間來儲存和處理泥漿。	使用體積量極低（液態，膨潤土的1/20到1/50），因此材料消耗量和場地佔地面積較小。
成本	材料成本通常較低。	材料成本通常較高。
廢棄物處理	廢棄泥漿量大，處理成本高，需要額外的時間和人力進行清運和處理。	多數聚合物是可生物降解的，且可使用氧化劑（如漂白水/次氯酸鹽）分解，聚合物泥漿可以重複使用多次。

鑽探工程處雖然也有聚合物泥漿（PHPA），但通常都是拿來與膨潤土泥漿進行混和使用，不是純粹使用聚合物泥漿，雖然較為節省，但在性質及水化時間上比不上純使用聚合物泥漿。由比較表可以看出聚合物系統泥漿有環保、易於處理、製備速度快、場地需求小、可重複使用等等的優勢，雖然較為昂貴。

整體來說，建議未來使用的泥漿體系應以聚合物泥漿為主。鑽井初期階段準備時

間較長情況下，泥漿能夠充分水化時，先以膨潤土泥漿作為開鑽選擇，後續一旦產生漏泥，在新製作的泥漿則改以聚合物泥漿為主，以確保能在短時間內做出性質合用的泥漿，避免其他工程問題。

二、地熱井鑽頭心得及建議

在地熱鑽井工程中，適合的鑽頭使用是控制成本與提高鑽井率（ROP, Rate of Penetration）的關鍵。地熱環境通常具有高溫、岩石硬度高（如火成岩、變質岩）以及地層研磨性強的特性。

比較地熱井三錐鑽頭（Tricone / Roller Cone）、PDC 鑽頭（Polycrystalline Diamond Compact）與 複合鑽頭（Hybrid Bit）：

鑽頭型式	三錐鑽頭 （Tricone）	PDC 鑽頭	複合鑽頭 （Hybrid）
破岩方式	壓碎、鑿擊 （Crushing）	剪切、刮削 （Shearing）	壓碎 + 剪切 （Mixed）
適用地層	極硬、高研磨性、破碎地層	軟至中硬、均質地層	軟硬交錯、非均質複雜地層
地熱優勢	結構強健，不怕硬岩衝擊	鑽速快，無軸承失效風險	鑽進平穩，壽命與速度的折衷
地熱劣勢	高溫導致軸承/密封失效	硬岩震動導致崩齒 （Impact damage）	價格昂貴，結構複雜
鑽進率 （ROP）	低（慢）	高（快）	中等（穩定）
抗震動能力	高	低（易發生 Stick-slip）	高
成本	低	中/高	極高

這三種鑽頭的選擇使用，依照預期地質條件，建議如下：

1. 淺層或沈積岩層：優先選擇 PDC 鑽頭。因為此階段溫度尚未變高，且岩石硬度適中，PDC 能提供最快的鑽速，大幅縮短工期。
2. 深部硬地層（如變質岩）或破碎帶：選擇三錐鑽頭，雖然鑽進率較慢，但能穩定鑽磨硬岩，需選用耐高溫密封軸承（High-temp seal）的鑽頭。
3. 複雜交錯地層：當地層忽軟忽硬，或者需要更好的井程品質與方向控制時，複合鑽頭是最佳解。雖然相當昂貴，但能避免頻繁起鑽換鑽頭（Tripping）所浪費的時間成本，以減少工程不穩定因素。

三、目前本公司新鑽機已購入，屬於液壓式之自動化鑽機，部分鑽井設備及下套管工具也已升級為液壓式，對於習慣操作傳統機械設備的人員，新設備、新動力型態的後續保養維護，著實重要也是相當挑戰，建議視實際需求提出相關技術服務人員，從旁協助，循序漸進建立完整的後勤保養人力。

四、未來新材料、新設備的引進，也是可借鏡國外專家經驗，如泥漿材料、水泥配方、水泥混溶設備等，如在溫度較高、易漏泥之地熱井、高角度地向井、CCUS 酸性環境之注入井，應適時調整泥漿材料及配方，以提高工程之安全性。