

油氣鑽井工程

陳裕國

一般的建築工程大都是向上與天爭空間，完工後可以摸得到、看得到。油氣鑽探工程恰好相反，它是向下與大地搶資源，完工了只能見到佇立在那裡的聖誕樹（井口設備的暱稱）或磕頭機默默地流著一點都不起眼的黑金。

鑽井

絕大多數的油氣探勘或開發生產都必須透過鑽井才能找到油氣。此外，地熱發電、地下水資源開發及地質研究也需要鑽井來達成目的，因此鑽井工程可說是地下資源探探的重要技術。

由於鑽井工程必須仰賴特殊且龐大的設備和專業技術團隊，相較於震波測勘等其他油氣探探活動，其所耗的資金更高。再加上鑽井的成功率、作業效率與成本管控不但左右油氣探勘的成敗，也左右著油氣開發生產投資及經營績效，因此石油公司對於鑽井工程的經營管理非常重視。

台灣第一口油井是 1861 年邱苟在苗栗縣公館鄉出礦坑所挖的一個 3 公尺深的油井，這也是亞洲第一口，全世界第二口的油井。1877 年（光緒 3 年），清朝向美國買了一台頓鑽機，並聘請 2 名技師到台灣協助開發出礦坑的油田，鑽深達 300 公尺，日產 1,500 公斤原油。

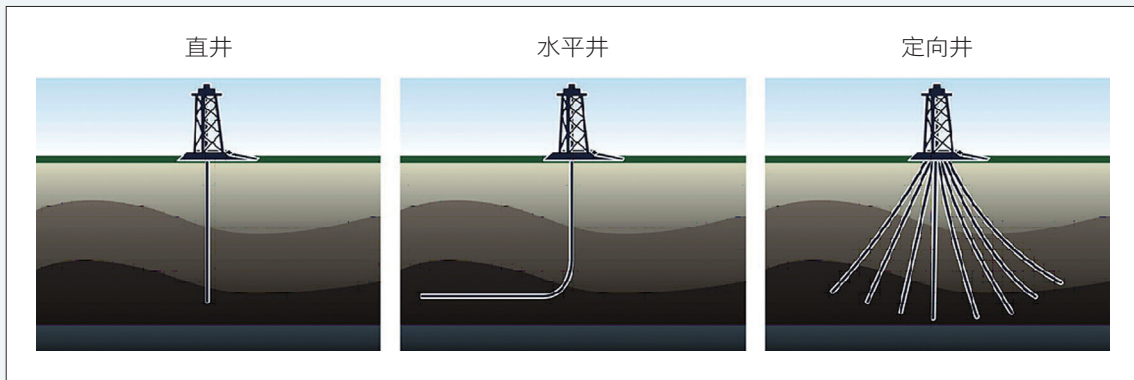


台灣的第一口油井



世界最深的直井，SG-3。

鑽井的成功率、作業效率與成本管控不但左右油氣探勘的成敗，也左右著油氣開發生產投資及經營績效。



鑽井型態

世界最深的直井是前蘇聯在科拉半島鄰近挪威國界的摩爾曼斯克州扎波利亞爾內市西邊 10 公里地區的一口科學鑽探井，稱為超深井 SG-3。這口井從 1970 年 5 月 24 日啟動鑽井，至 1989 年鑽深達 12,262 公尺，井的上部直徑是 92 公分，下部直徑是 21.5 公分。世界最長的斜井則是 2012 年在俄國庫頁島 Sakhalin 外海（Okhotsk sea）Chayvo 油田所鑽的油井 Z-44 井，鑽深達 12,376 公尺。

鑽井型態

鑽井依據井孔軌跡（井程）可概分為直井、水平井及定向井 3 大類型。直井顧名思義就是向下垂直鑽鑿的井，水平井是井程達到水平以後，井孔繼續朝固定方向延伸一定長度的井。水平井多用於增加在某一油氣層中的井程，以提升產量；定向井則是具有特定角度的斜井。

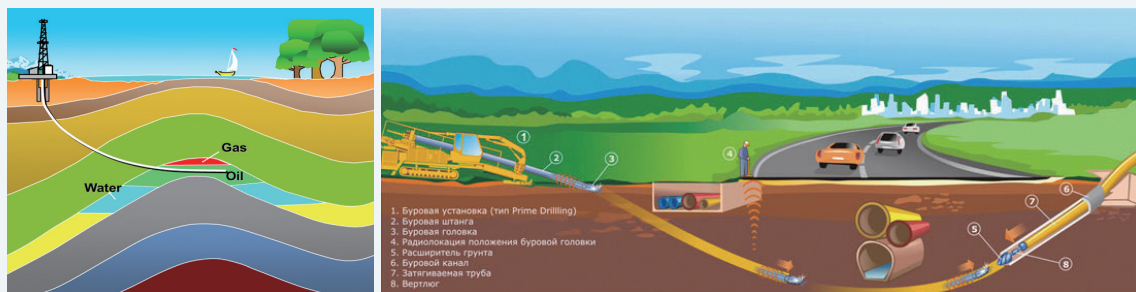
定向井（或水平井）的目的通常是因為受到地面環境條件限制，如油田埋藏在高山、森林、沼澤、溝壑、城鎮、重要建築物底下，難以在地面上組裝鑽機，或受到地下地質條件限制，如直井難以穿過的複雜層、鹽丘、斷層等原因，或考量提升



油氣鑽探工程完工了，只能見到佇立的聖誕樹（井口設備的暱稱）或磕頭機默默地流著一點都不起眼的黑金。

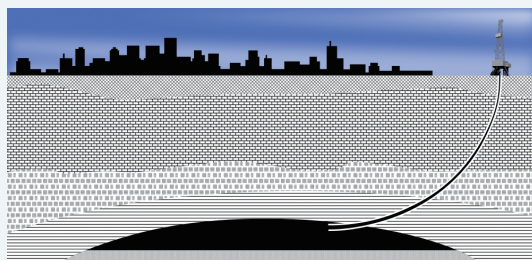


近代石油工業的濫觴始於 1859 年美國賓州泰特斯維爾地區德雷克油井的鑽鑿（約 21.2 公尺）。



各類管線以水平導向鑽掘工法（HDD）穿越道路、河川。

探勘開發油氣田的效益，如針對裂縫性油氣田、低壓、低滲透率及黏稠油田，可讓井孔穿越更多的油氣層，增大油層裸露面積，提高單位生產量和採收率。此外，也可應用於埋設過河管線等其他方面，如在河岸邊先鑽定向鑽井、水平井，再埋設管線。

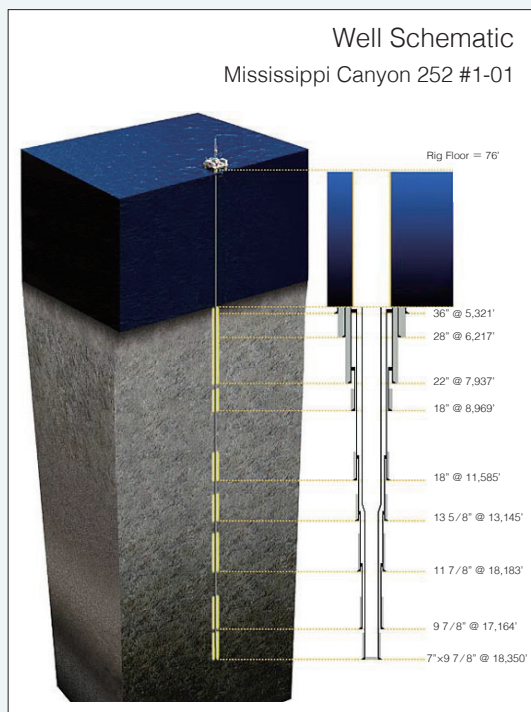


由於地面環境條件限制而採用定向井鑽鑿

鑽井目的

油氣鑽探井依目的可分成探勘井、佐證井、開發井、注入井、監測井等。所謂探勘井就是在經過地球物理、地球化學、地質學等探勘研究後，在可能發現油氣田的範圍內，為確認油氣蘊藏是否存在而鑽的井。在已鑽探發現油氣後，為圈定油氣蘊藏邊界，取得油氣田開發所需地質資料而鑽的井則稱為佐證井。

至於開發井，是為了開採油氣的目的所鑽的井，而注入井是為了提高採收率及開發速度，對油氣田注入液體或氣體以補充地層壓力而鑽的井。監測井則是在油氣田生產過程中，為監測油氣田地下動態如各油氣層的壓力、含水變化規律等所鑽的井。此外，還有為了其他目的所鑽探的各式井，如地熱井、地質井、二氧化碳封存井、救災井等。



井身結構的設計（圖片來源：www.theoil drum.com）



帶動鑽串旋轉鑽進的轉盤及方鑽桿（圖片來源：www.aed-corp.com）

鑽井方法

鑽井方法的發展是由頓鑽開始再演進到旋轉鑽井。頓鑽起源於 2,000 年前的中國東漢時期，採用原始衝擊鑽具鑽鑿水井以汲取鹽水，同時把發現的天然氣做為燃料提煉食鹽；頓鑽是利用鑽繩連接鑽具，靠鑽頭的上下衝打作用鑽鑿地層，並且在經過一段時間後採用汲沙繩放下汲筒取出岩屑以保持井內乾淨，以此反覆進行向下鑽進。1920 年以後，因設備的改進，頓鑽鑽深可達 3,400 公尺。

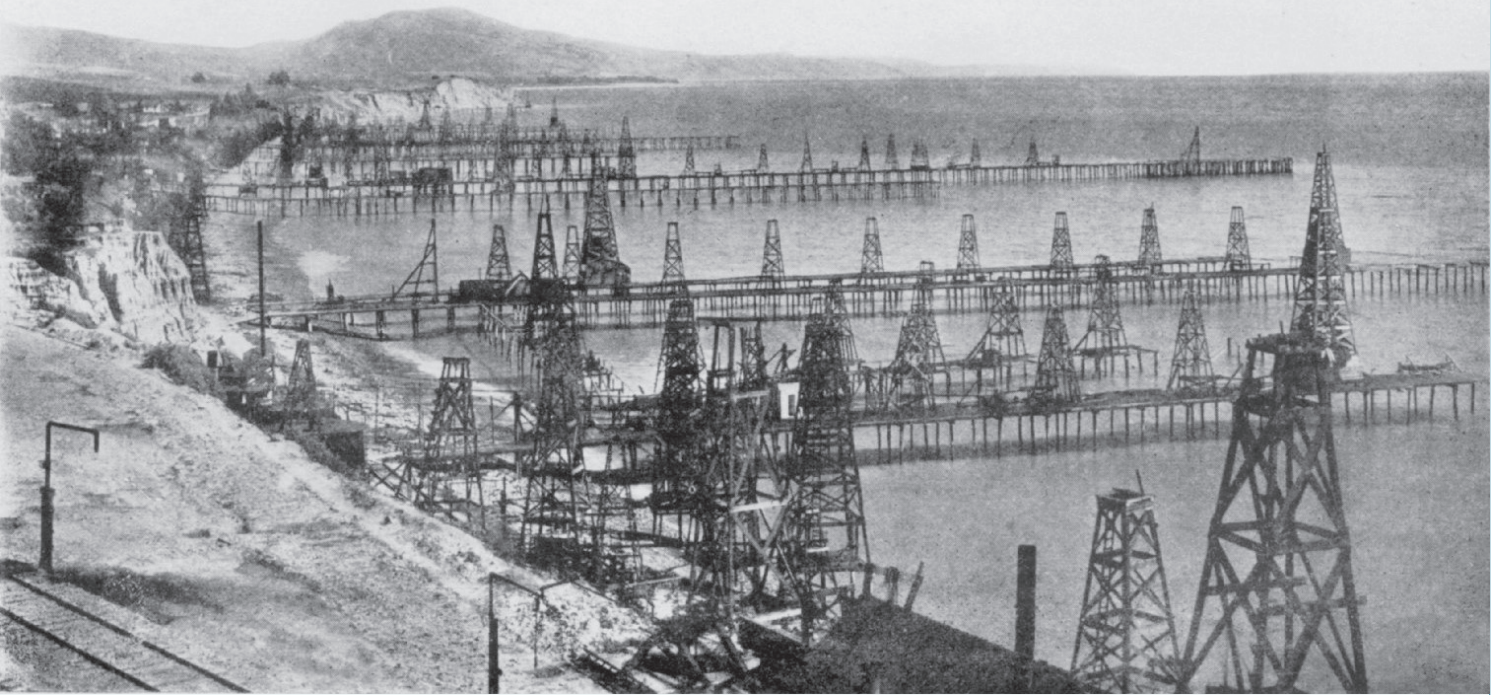
旋轉鑽探是現今最普遍的鑽井方式，是以轉盤旋轉帶動，由鑽鉸及鑽桿傳動旋轉扭力，再施予適當的重量，利用鑽頭向前鑽鑿地層，鑽屑則由泥漿循環帶出。

井底馬達鑽進則是另一項非傳統的旋轉鑽進，這種方法不靠轉盤帶動鑽串轉動，

而是利用泥漿通過井下鑽具（馬達或渦輪）帶動轉子在定子中旋轉，而讓鑽頭旋轉鑽進。優點包括節省工時、可解決鑽機轉盤旋轉不夠快的問題，並減少管串高速旋轉所產生的高扭力傷害，是近期鑽井作業較常用的鑽進法。此外，還有空氣鑽井法、負壓鑽井法等。

鑽井工程是一個由上向下構建的作業，分階段向下漸層縮徑，隨著深度增加，地層壓力也逐漸增加。井身結構主要包括套管層次、套管對應的井孔尺寸（鑽頭大小）及各層套管水泥封固的高度。合宜的井身結構能保證一口井安全鑽達預定的深度，並防止鑽進時生產層受到汙染等問題。

在套管方面，井身結構設計可分為導管、表層套管、中間層套管、生產層套管等部分。導管通常位於地表下 5 至 10 公尺（海域則是自海床面向下 50 至 80 公尺）處，



1896年加州聖塔巴拉海濱的第一座海上鑽井平台（圖片來源：<http://en.wikipedia.org>）

直捲揚荷重外，尚須注意可承受橫向強風每小時約 160 至 210 公里的能力；底座是用以支撐整個鑽機、轉盤、井架、井台、鑽桿、鑽鉞及其他設備，並在下方容納井口及防噴系統。

井噴通常發生在向下鑽井鑽遇高壓地層時，泥漿柱壓不足以壓制地層壓力導致地層流體侵入井眼的情況。為了避免發生井噴事故，防噴系統通常在井口安裝一組防噴器，當有井噴徵兆時可迅速關閉井口以控制井口壓力。

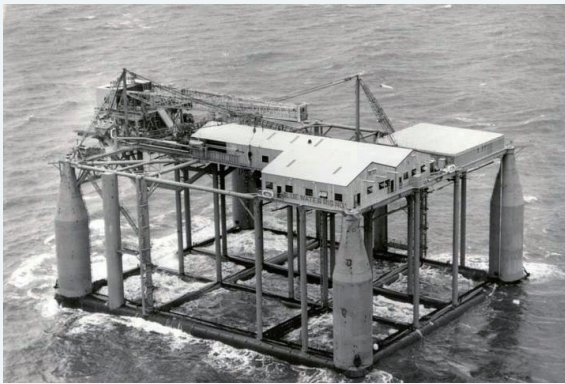
鑽井是一個風險性很高的行業，時常遭受到地層的異常壓力、油氣的衝噴、有毒氣體等危害，為了提前偵知危險並採取適當步驟，常會設置監控系統，透過儀器設備的輔助，感受地層回饋訊息以調整施工步驟。監控系統含括鑽進參數的量測如加重、轉速、扭力、鑽進率、壓力、深度、

抽刷、擠壓等，此外，泥漿循環系統監控如泥漿比重、溫度、體積、泵衝程數、循環時間、環速、噴速等，以及油氣微監控如天然氣、原油、有毒氣體及微量元素。

鑽井作業必須使用包括鑽機等多項特殊設備及專業技術，基於術業有專精的原則以及設備投資龐大、設備利用率等考量，通常無法由石油公司完全自行提供，因此大都採取承攬方式交付各專業工程服務公司。現今鑽井作業市場除鑽機鑽井服務以外，通常會提供泥漿測錄、下水泥、鑽井泥漿、電測及地層測驗 5 項最基本的專業服務。

海域鑽井

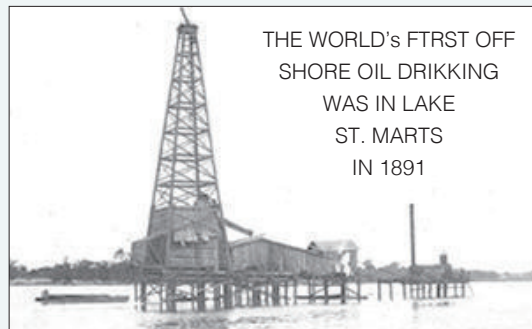
石油探勘領域已由陸地進入到水域，包含湖泊及海域。1891 年在美國俄亥俄州的聖瑪麗湖上開鑽了世界上第一口水域油井，



海域鑽井設備型式

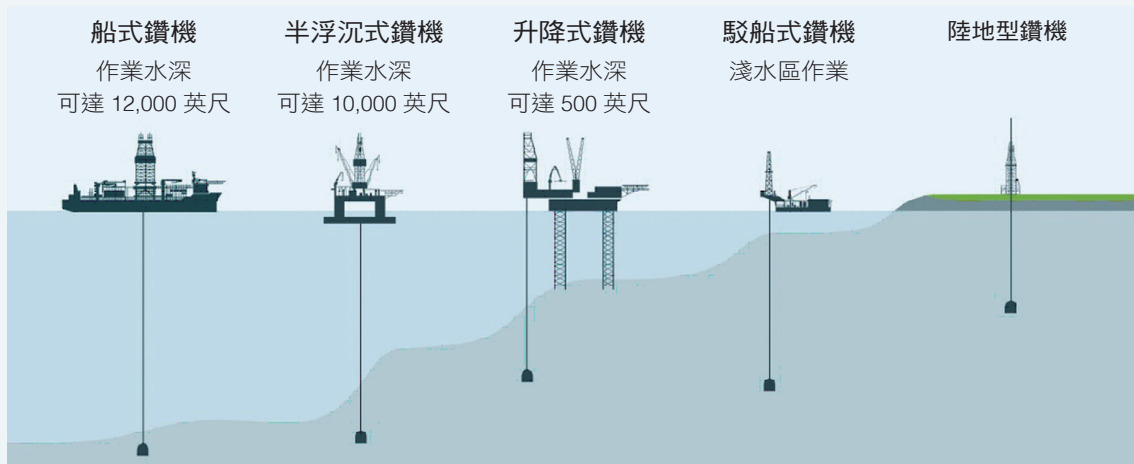
距離 1859 年陸地上第一口油井的鑽鑿（美國賓州）足足相差了 32 年。至於世界上第一座海上鑽井平台，則是 1896 年在美國加利福尼亞海岸的聖塔巴巴拉海濱。1930 年代早期，德士古（今雪佛龍）公司則是在美國墨西哥灣開發了第一條可移動式的鑽井船。

一般海域鑽井作業程序與陸上鑽井並無多大區別，但因工作環境不同，海域鑽井尚需克服海洋惡劣環境的問題，因此作業遠較陸上者艱巨且具挑戰性，成本也高。海域鑽井作業除鑽探人員外，尚須有補給、定位、氣象、海洋工程人員配合，鑽井設備需連結到海床上的固定點，各種設備的材料、設計及作業方式都需考慮暴風雨、洋流、風力、腐蝕作用、低溫、海深等問題。



1891 年俄亥俄州聖瑪麗湖上開鑽了世界上第一口水域油井（圖片來源：<http://mechanicstips.blogspot.com>）

另外應遵守國際公約及國際慣例、重視船舶安全、航海安全及直昇機飛行安全，以及遭遇颱風或發生井噴時的因應措施。



鑽機選擇與水深有密切關係

海域鑽機

陸上鑽井使用的成套鑽機包括井架、鑽機（捲揚機）、發電機、泥泵、泥漿處理設備、防噴器、泥漿儲槽、水槽等，都組成套以便運輸、裝卸及使用。海域鑽井所使用的主要鑽井設備，則是把上述成套設備全部以固定方式安裝在一艘海域鑽機上。

海域鑽井設備型式繁多，大致可分成固定式及可移動式兩大類，分別適合不同的海洋氣候環境及鑽探目的。一般而言，可移動式鑽井設備多用在海水較深的地區，用來鑽探探勘井及佐證井；依設備構造不同又分底撐式及浮式，前者包括升降式和可沉式，後者則有船式和半沉式。

鑽機選擇與水深有密切關係，因為隨著海水深度的增加，鑽井工程的難度與成本也會大幅度地增加。早期水深少於 6 公尺的淺水鑽井是以人工島式或棧橋式來執行；進入 30 公尺水域則使用固定式平台鑽機，水深介於 30 至 120 公尺時則以升降式鑽機為主；1961 年錨碇式半沉式鑽機出現後，因其穩定性可應付較惡劣的天候

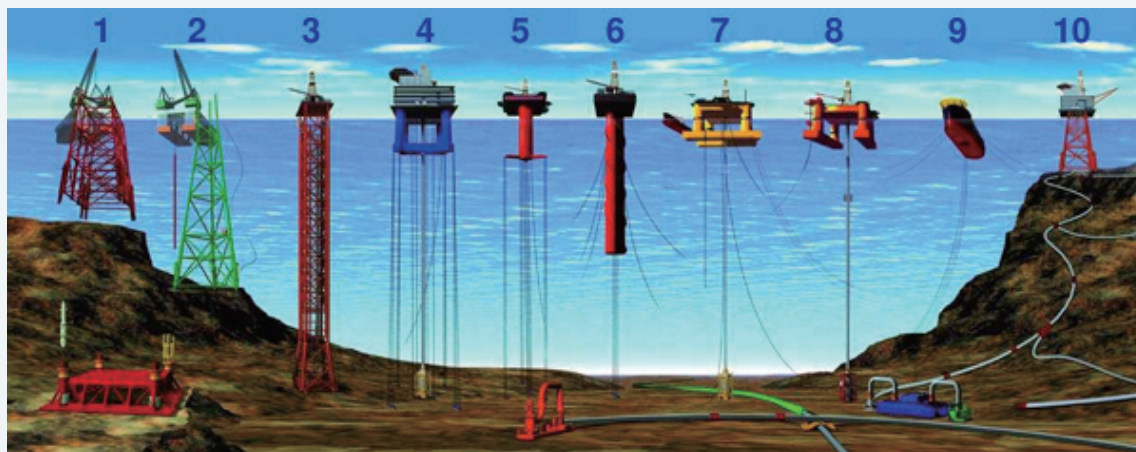
環境，所以探勘工作便朝更深的海域延伸。近期又有配備動力定位系統的鑽井船及半沉鑽機應運而生，可適用於深水鑽探，最深可超過 3,000 公尺。

鑽井生產平台在淺海及大陸棚地區仍以固定式腳架生產平台為主，深水及超深水部分則採用錨碇張力式平台或水下完井以管線輸運至淺水平台。

海域鑽井與陸上鑽井的差異

海域與陸上鑽井最大的差異就在那一層水的阻隔，因此無論是工程本身、運輸方式、開發成本、環境因素、適用法規及人身安全上都有很大的差異。前者的工程費用暨開發成本遠較後者高，甚至可達 5 至 10 倍以上。因為，海域鑽井深受海洋環境的影響，風、浪、流都會影響船體穩定性，同時須面對海上颶風或颱風的威脅，要想順利完成鑽井作業需要很高的費用。

此外，海域及陸上鑽井作業都須符合美國石油協會的工業標準，海域鑽探尚需遵循驗船協會制定的海域鑽機設備規範與



鑽井生產平台。傳統腳架固定式平台（1, 2）、順波塔式平台（3）、垂直錨碇張力腳平台（4, 5）、spar（6）、半浮沉式（7, 8）、浮式生產儲運船（9）、水下完井暨回接生產平台（10）。（圖片來源：<http://en.wikipedia.org>）

相關國際公約及國內法令，如中華民國專屬經濟海域及大陸礁層法、海域石油礦探採條例施行細則、海洋污染防治法等之規範。

海域鑽井的後勤支援

海域鑽井因作業現場遠在外海，受到環境限制，無法在鑽機有限的空間裡備齊所有鑽井必需的器材及補給品，因此必須設置陸上補給基地。此外，工作人員換班和鑽井器材補給都需要直昇機或補給船做為交通工具。

為確保補給作業的效率及降低補給的成本，陸上補給基地一般都設在距海域鑽井現場最近的深水港口。以中油公司為例，北部深澳港和南部高雄港兩處專用港和專用碼頭就是支援海域鑽井作業相當理想的補給基地。海域通訊系統目前仍以無線通訊為主，尤以衛星通訊最為廣泛使用，若能再輔以高頻無線電、超高頻無線電話，甚至微波通訊系統，應可確保海域鑽井現場生命線的暢通。

鑽井工程是石油探勘的實踐，是一門科學也是一門藝術，它集合多種專業技術於一身，如藉著儀器設備的輔助感受金屬在岩石間的異同、藉著地層給的訊息判斷與調整施工步驟、由岩屑解讀地層岩性、由電測推斷地層的物性、由泥漿得知油氣徵兆與預知危險、由套管水泥保護這一期的成果，這些成果共同為下一階段的作業成功發現油藏進而開發生產打下良好的基礎。總而言之，鑽井工程是一個團隊整合作業，彼此需相輔相成才能達到工作目標。

陳裕國

台灣中油股份有限公司探採事業部