

鳳山構造氣井完井設計與生產開發規劃研究

陳進發、黃乙倫、吳偉智、田志明、張國峯、黃啟倫

陳冠志、李佳勳

台灣中油股份有限公司探採研究所

摘要

近年來國內外油氣探勘活動發展蓬勃，加上鑽井與生產技術之快速提升，使得非典型油氣資源也日益受到重視。然而開發非典型油氣資源過程中，需面臨到非一般傳統油氣地層特性之油氣層，故開發與生產過程中常面臨技術與工程之挑戰。本研究計畫主要選定鳳山構造，進行液裂防砂完井設計及生產開發規劃，期能有效開發鳳山氣田，且研究成果可作為台灣中油公司日後執行液裂防砂增產之依據。本計畫選定之目標油氣層為鳳山氣田出砂地層，藉由井、電測與岩力資料進行單井產能分析、出砂預測、力學及液裂防砂分析，期以微液裂施作達成出砂控制及增加油氣進入井孔之通路。因此，本計畫主要規劃一系列技術評估，透過於選定場址進行包括「現有井試驗與資料分析」、「單井產能分析」、「岩石特性分析及生產出砂預測」、「防砂完井設計評估」及「整體生產開發規劃」等研究工作，評估選定之場址是否具液裂防砂之潛能與效益。研究結果發現，在經濟條件可行下，可進一步規劃前述方案供現場單位作為未來施作之參考依據。

關鍵詞：液裂防砂、鳳山、出砂預測、產能分析、生產開發

一、背景說明

隨著全球經濟與商業之發展，傳統石化能源已達高度探勘與開發。在此全球化競爭之商業與經濟環境下，石化能源之角色與其開發應用，將主導此微利時代之商業行為。因此台灣中油公司除積極透過檢視企業體經營之三大要素：『目標、資源與環境』，瞭解企業所處之優勢、機會、劣勢與挑戰外，並以國營事業應穩定台灣市場經濟與商業發展為使命，積極研究與發展全球化營運策略及石化能源開發技術。

綜觀目前新能源技術尚無法立即可取代油氣之資源，加上油氣之不可再生性以及全球油氣蘊藏有限，油氣資源在民生與國家經濟發展上扮演相當重要之角色。因此如何增加油氣產量與穩定油氣供應為目前世界各國均極為重視之課題。由於近年來國內外油氣探勘活動發展蓬勃，加上鑽井與生產技術之提升，使得非典型油氣資源也日益受到重視。

然而開發非典型油氣資源過程中，需面臨到非一般傳統油氣地層特性之油氣層，且於開發與生產過程中常面臨有關技術與工程之挑戰。本計畫『鳳山構造氣井完井設計與生產開發規劃研究』依循增加油氣產量與穩定油氣來源之理

念，針對選定之非典型油氣資源鳳山氣田作為研究對象，研究氣田開發過程中生產井所面臨之地層特性問題挑戰，並提出對應之生產技術及其可行性評估。研究所獲得之成果，可提升氣井開發與生產效率，供後續油氣構造開發技術應用與增產之參考。

因此本研究計畫主要針對鳳山構造地質特性所產生之工程問題，如目標地層岩石固結不佳、地層鬆軟、岩石粒徑之均勻係數差，影響油氣田完井及後續生產之相關議題進行研究與探討。綜觀國外類似案例、現行或正處於發展中之技術，主要目的為防止油氣井生產過程中，嚴重出砂影響生產效率。另外，國內部分非典型油氣田開發時，地層之出砂問題嚴重，故此研究有非常之必要性，須積極分析此種類地層之生產層特性、出砂特性機制、地層力學特性，尋求技術上及經濟上最適合之防治機制與工法應用，提高生產效益。

二、研究技術說明

本研究計畫選定高雄鳳山構造做為研究對象，因該氣田具前述歸納之地層複雜性與生產挑戰性，加上此氣田之目標油氣層屬南部之典型帶泥質之粉砂岩地層，有必要針對此氣田之生產特性、地層特性及出砂特性加以瞭解，以尋求技術及經濟上最適合之防治機制與工法應用，以利後續整體生產規劃設計。本研究計畫主要選定 2013 年 9 月鑽井及完井後之鳳山三號 B 探勘井(以下簡稱 FS-3Bw)作為本計畫之研究對象。FS-3Bw 於完井過程中，共進行二層穿孔(上層：1,526 m~1,531 m；下層：1,677.8 m~1,682.8 m 處)，加上鑽井過程取岩心時研判目標層具有出砂潛能，因此於完井時即設置防砂篩管進行防砂作業。

但於完井後地層測驗發現此井具有嚴重之出砂現象發生，設置之最密防砂篩管並無法有效阻擋地層出砂，研判地層內應具有一定之比例細顆粒岩體組成。倘若忽略此出砂問題恐造成後續生產過程油管及地面設備之磨蝕與阻塞。故此，有必要針對 FS-3Bw 之地層特性、生產特性、應力特性及對應之出砂行為機制進行分析與探討，並針對 FS-3Bw 之上述特性進行有效之完井防砂技術評估。

綜合鳳山氣田之地層特性、出砂及生產問題，本計畫訂定鳳山氣田之完井設計及生產開發內容各階段主要之目標與研究方法，分述如下：

(一)現有井試驗及資料分析

進行候選井及地層有關完井設計與生產評估時，首先必須瞭解候選目標井生產層中，有關生產井油氣層之相關地層特性參數及油氣成份相關參數，其地層特性參數包括如：生產層滲透率、孔隙率、生產層靜壓、砂層厚度、淨厚度及膚表效應(Skin effects)等地層特性；而油氣成份參數包括如：天然氣比重、油比重、水鹽分比重及氣油比特性等參數，因為這些均是影響生產井產能之主要因素。

現有井試驗及資料分析主要為提供本研究計畫項目中「單井產能分析」、「出砂探討與預測」及「防砂完井設計」等工作項目一重要井特性基礎，

供後續評估選定場址之防砂或液裂防砂增產潛能。

地層特性參數估算通常透過鑽井岩心試驗分析，及生產井現場井壓測試 (Well testing) 資料分析來取得上述資訊。因岩心試驗僅能獲得鑽井所在點之地層參數資料，井孔以外之油氣層相關地層參數與生產層壓力相關資料則無法得知。因此，需透過整理該生產井之壓力測試噴流試驗 (Flowing test) 數據並進行資料分析，以計算選定場址之相關地層特性參數。

井壓測試主要方法乃藉由下井底測壓儀後，改變油氣井之產率並觀察其壓力變化，求得瞬時壓力數據資料 (transient pressure data)。接著透過相關作圖法、壓力試驗分析理論，或利用商業化軟體進行壓力資料分析，以獲得相關地層參數，供場址液裂防砂項目中各子項目需求，進而評估場址目標地層之生產潛能，以及相關出砂探討與預測、防砂完井設計及生產開發可行探討。

(二) 單井產能分析模式

主要利用節點分析 (Nodal Analysis) 軟體，計算單井之 Inflow Performance Relationship (IPR) 及 Vertical Lift Performance (VLP)。IPR 曲線代表流體從地層流入井底之行為模式，意指油氣從地層進入井孔之部分。其主要理論依據為達西定理 (Darcy's Law)，以數學方程式來描述之，亦可將其數學關係式以壓力對產率之圖形表示之。因此，目標油氣層之生產指數，可透過 IPR 曲線斜率分析，可了解單井之生產指數，即單井之生產潛能高低指標。

而 VLP 曲線則代表流體從井底流至井口之行為模式，乃油氣從井底沿著油管流至井口之部分，亦可以用數學方程式來描述，將其數學關係式以壓力對產率之圖形表示之。因此，IPR 及 VLP 曲線之交點 (稱之為節點)，如圖 1 所示。兩條曲線交點所對應之產量數值，即代表該井之產能或代表該井於該地層壓力及井口流壓條件下之產率。

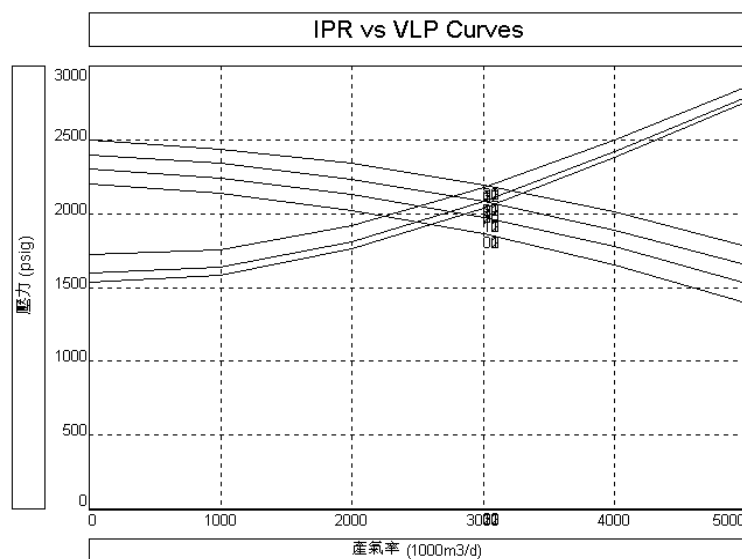


圖 1、流入及流出性能關係曲線

(三)岩石特性分析及生產出砂預測

1.岩石特性分析

(1)岩石粒徑分析

一般油氣層於生產過程中常因許多情況導致出砂問題產生，簡單歸納幾點造成出砂之因素包括：

- 當生產層應力壓密不足或膠結性不佳，導致岩石應力強度不夠，加上若內含細顆粒(如泥質)之砂岩，生產時容易發生出砂；
- 倘若當生產過程因差壓降過大，會導致生產層岩石產生屈服(yield)或破壞(failure)，細顆粒因此而被地層流體帶出；
- 另外於生產後期因地層壓力下降，產生應力狀態改變造成岩體結構弱化(強度與凝聚力弱化)，加上生產過程剪切應力作用，產生結構變差或裂隙因而造成細顆粒被地層流體帶出，如圖 2 所示；
- 生產過程因出水而伴隨出砂。

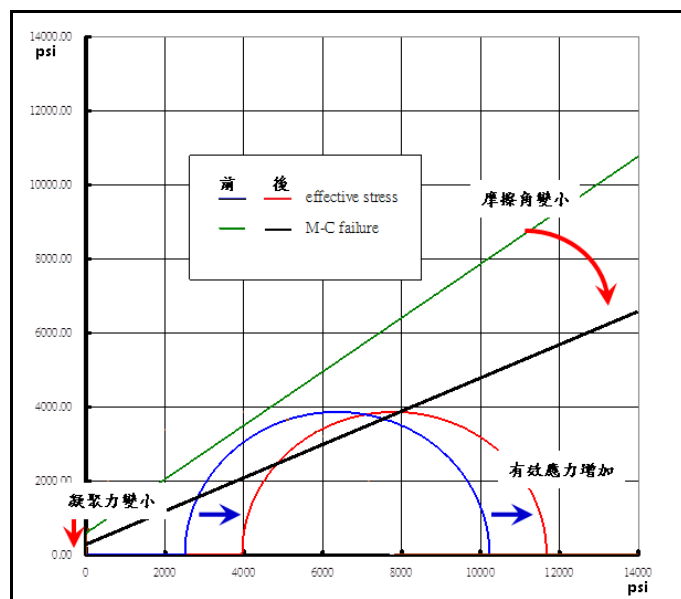


圖 2、地層因孔隙力改變致有效應力突破破壞包絡線

故此透過鑽井採集岩心並取少量產層岩樣進行室內試驗，以瞭解該目標層之粒徑分布特性。針對粒徑分析結果，可獲得幾項重要參考指標以作為後續防砂策略參考準則與依據，指標內容如下：

- d_{50} ：係指地層岩石於粒徑分析過程中，累積通過百分比為 50% 時之粒徑大小上限值；而 d_{10} ：則指通過百分比為 90% 時之粒徑大小上限值，以此類推。
- 淘選係數($C_s = d_{10}/d_{95}$)：此係數乃決定地層在沉積過程中，組成顆粒之淘選程度。一般而言岩石中較粗之顆粒與細粒之比值越近，表示沉積物之淘選程度越好，反之則否。因此該係數值越小即表示淘選度越佳。

- 均勻係數($C_u = d_{40}/d_{90}$)：由接近中值粒徑之二係數進行計算，來判斷沉積物或岩石之粒徑分布之均勻度。當均勻係數其值小於 3 者，其沉積物之特性偏向為均勻砂；而當係數介於 3 之 5 之間，則其特性偏向非均勻砂；當係數大於 5 以上者，則為非常不均勻砂。
- 細粒(fine)：指粒徑分析過程中其粒徑小於 44 微米(μm)之百分比。

(2)礦物分析

除了巨觀的岩性描述之外，本計畫更進一步深入探討生產層之礦物組成分析、黏土含量及顆粒間之膠結狀況等，做為出砂預測及防砂的基本背景資料，有助於在防砂方式篩選時之參考依據。礦物組成及其含量之分析將採用 X 光繞射分析儀(X-ray diffractometer)配合礦物相鑑定軟體及定量分析軟體獲得，而岩石產狀及顆粒膠結狀況則利用目視觀察配合顯微鏡觀測進行描述。

2.生產出砂預測

本研究計畫針對地層出砂與穩定部分，分二部分進行分析探討：(1)針對 FS-3Bw 利用井壁穩定及地層出砂預測技術，計算地層於產氣期間，不發生地層出砂的最大容許壓差及最大容許產率，規劃並建議特定的天然氣生產壓力及流率之限制，確保地層井壁穩定且不出砂。(2)使用 FS-3Bw 現場資料及地層出砂之臨界壓力，計算生產過程中可能的瞬時出砂率，並針對出砂率估算中無法量測或暫無取得之參數進行敏感度分析，提供在資料缺乏情況下生產決策之依據。而預測過程中所需之岩石參數項目與量測方法，如表 1 所示。

表 1、岩石參數項目與量測方法

項 目	實驗量測	理論分析
剪力模數(G)	超聲波檢測	聲波傳遞理論
切向應力與徑向應力之應力差($\sigma_{\theta}-\sigma_r$)	單軸壓縮試驗 巴西式拉伸實驗	孔壁彈性理論
內摩擦角(α)	單軸壓縮試驗 巴西式拉伸實驗	Mohr-Coulomb 強度準則
內聚力強度(C_u)	單軸壓縮試驗 巴西式拉伸實驗	Mohr-Coulomb 強度準則
孔隙率(ϕ)	孔隙度及滲透率分析	實驗量測
蒲松比(ν)	單軸壓縮試驗	實驗量測
地層體積模數(K_b)	超聲波檢測	聲波傳遞理論
地層彈性係數(E)	單軸壓縮試驗	實驗量測
地層降伏應力(σ_y)	單軸壓縮試驗 巴西式拉伸實驗	Mohr-Coulomb 強度準則
地層平均滲透率(k)	孔隙度及滲透率分析	實驗量測

(四)防砂完井設計評估

1.一般防砂：

依據岩體粒徑分析結果與岩性指標，可以進行對應之一般機械防砂規範，如下所述：(1)單獨置放篩管或礫石填充完井；(2)擠注樹脂以固結地層砂；(3)於井眼填充被覆樹脂之礫石；(4)膨脹式防砂篩管(Expandable Sand Screen)；(5)降低產率；(6)關井汲砂。

2.液裂防砂

因候選場址目標生產層屬於固結性差之泥質砂岩，若需防砂時可能需結合微型液裂進行防砂，以有效達到防砂控制目的。對於進行液裂防砂完井設計，可分四個主要步驟，如圖 3 所示。接下來簡要進行介紹，如下所述：

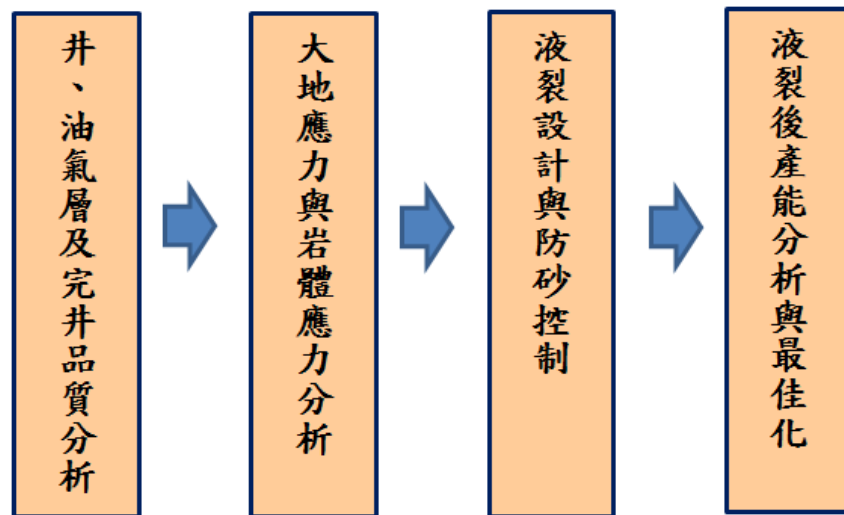


圖 3、液裂防砂完井設計評估流程

(五)氣田整體生產開發規劃

鳳山構造生產開發規劃之方法及步驟如圖 4 所示。首先進行單井產能評估，採用生產模擬軟體模擬液裂增產效果，並計算單井估計最終可採量與最佳排掃面積；再根據地表用地狀況及最佳排掃面積於目標礦區構造範圍內進行佈井規劃，以統計生產井井數與評估該構造估計最終可採量；其次，依估計之最終可採量評估結果進行礦區開發規劃，內容包括生產規劃、生產設備設計(包括井場設備與生產中心)與運輸管線設計，並據此估算此案投資費用；最後，整合前述開發規劃、當地財稅規定與氣價假設等資料執行經濟效益評估。此外，為降低投資風險與引進國外資金，亦將利用前述經濟分析模型，擬定礦區工作權益轉讓策略。



圖 4、生產開發研究流程與方法

三、研究成果

(一)鳳山氣田背景

民國 60 年代台灣中油公司在高屏附近海域實施震波測勘，顯示有多系列東北—西南走向之泥岩貫入構造，泥岩貫入構造體因週期性運動，造成其間之微小盆地之形成並沉積地層，其後與泥岩貫入體及深部地層組構成一石油系統。生油岩可能來自深部頁岩經熱成熟後油氣沿泥岩貫入體(超高壓帶)邊緣向壓力較低處移棲，儲集於微小盆地之上傾儲集層中。而儲集層上面之頁岩及旁側泥岩貫入體之邊壁高壓帶則可為蓋層。綜合言之泥岩貫入體構造，可自成一石油系統，高屏地區泥岩貫入體構造如具上述之機制，其四周之上傾地層應具油氣封閉之條件。依上述探勘概念，鑽探鳳山 3 號井，以證實高屏地區的儲油氣潛能。如圖 5 所示。

鳳山三號井於 2013 年 7 月 16 日啟鑽，2013 年 9 月 12 日鑽進至 2,008 公尺深，其中共可分為三期鑽進。初期鑽進至 306 公尺深於第二期時鑽遇高壓地層，泥漿比重不足，下鑽至 546 公尺，查得溢流 11 公秉，關閉防噴器，以高比重泥漿控壓循環致 9-5/8 吋套管鞋附近發生漏泥，經水泥堵漏沖洗時因地層太鬆軟於深度 294 公尺偏離，故放棄原鑽孔(A 孔)改鑽新孔(B 孔)，以 B 孔最終鑽至(目標地層)2,008 公尺停鑽，故本計畫簡稱鳳山三號 B 井為 FS-3Bw。

當 FS-3Bw 進行完井時，先將 1,820 公尺至 1,725 公尺施以水泥回堵，最後決定分別於深度 1,677.8 公尺~1,682.8 公尺及 1,526 公尺~1,531 公尺各穿孔 56 發。故該井具二層之生產層次，並陸續進行完井後相關之試驗與油氣分析。圖 6 為 FS-3Bw 鑽後，台灣中油公司探採事業部測勘處所重新繪製之實際鑽井之地質剖面圖(FS-3Bw 井下地質報告)。

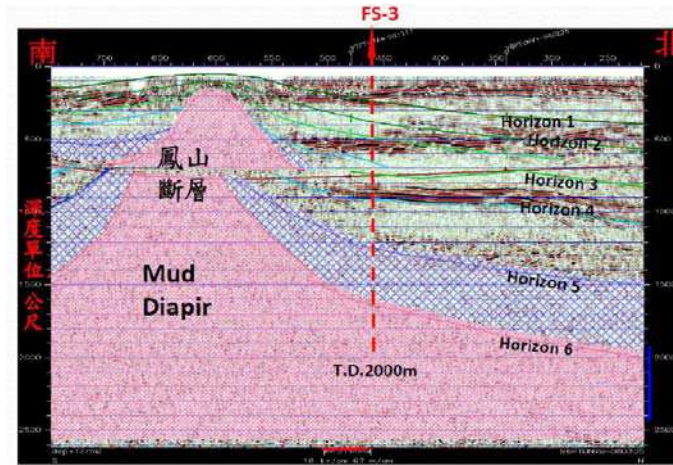


圖 5、鳳山氣田震測地層剖面形貌

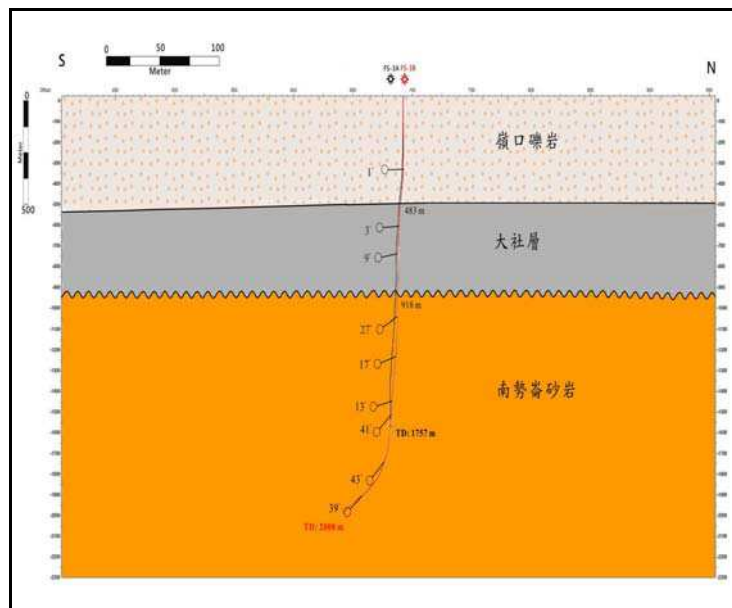


圖 6、鳳山三號井鑽井地質剖面圖

(二)現有井試驗資料分析結果

1.電測分析結果

根據 FS-3Bw 電測資料，包括：Spontaneous Potential(SP); Bit Size (BS); Calibrated Gamma Ray(GR); Caliper(CALI); Apparent Resistivity(RLA); Interval Transit Time(DT); Sonic Porosity(SPHI); Standard Resolution Formation Density(RHOZ); Thermal Neutron Porosity(NPHI); Thermal Neutron Porosity(TNPH)等資料，進行目標地層參數估算，估算結果如表 2 所示。

目標層油氣特性結果顯示，1,677.8 m~1,682.8 m 處之氣體比重為：0.611；而 1,526 m~1,531 m 及 1,677.8 m~1,682.8 m 處之混合氣體比重結果，則為 0.6；甲烷成份比重則分別為 94.31 Mole%及 94.65%；二氧化碳則分別為 0.18 Mole% 及 0 Mole%；氮氣則均為 0.15 Mole%，(天然氣檢驗報告，2013)。由於 1,526 m~1,531 m 該產層無單獨取樣結果，經上述氣體比重分析結果之數值關係顯示，天然氣比重應略低於 0.6。

表 2、FS-3Bw 測井解釋結果

Depth (m) 自 至		R _t (Ω)	Φ _D (%)	Φ _N (%)	Φ _{DN} (%)	V _{sh}	R _w	NaCl (ppm)	Sw (%)	分層
A 孔										
910	915	10	18	22	19	0.00	0.27	15,000	87	大社層
1,085	1,095	10	18	28	20	0.00	0.26	15,000	80	南勢崙砂岩
1,160	1,170	12	21	26	22	0.00	0.26	15,000	66	南勢崙砂岩
1,239	1,250	15	21	28	23	0.00	0.25	15,000	57	南勢崙砂岩
1,275	1,285	10	21	26	22	0.00	0.25	15,000	72	南勢崙砂岩
1,383	1,385	18	13	24	15	0.00	0.24	15,000	76	南勢崙砂岩
1,446	1,451	19	19	23	20	0.00	0.24	15,000	57	南勢崙砂岩
1,528	1,544	22	20	25	21	0.00	0.24	15,000	49	南勢崙砂岩
B 孔										
910	917	13	9	15	11	0.11	0.28	15,000	94	大社層
1,164	1,169	12	19	21	20	0.08	0.26	15,000	60	南勢崙砂岩
1,238.8	1,248.6	16	18	19	19	0.08	0.26	15,000	55	南勢崙砂岩
1,448.5	1,449.8	23	17	16	17	0.18	0.24	15,000	44	南勢崙砂岩
1,526	1,545	25	17	18	17	0.13	0.24	15,000	45	南勢崙砂岩
1,677	1,685	18	21	21	21	0.00	0.23	15,000	54	南勢崙砂岩
1,791	1,793	10	17	23	18	0.00	0.22	15,000	82	南勢崙砂岩
1,887	1,896	10	13	23	16	0.07	0.22	15,000	87	南勢崙砂岩
1,927	1,936	12	14	22	16	0.03	0.22	15,000	81	南勢崙砂岩

2.油氣測試結果

FS-3Bw 油氣測試結果，如表 3 所示；完井測井結果如圖 7 所示。

表 3、FS-3Bw 試油氣摘要紀錄表

	時間	節流嘴	氣量	井口流壓	井底流壓	井底靜壓	井底溫度
		(1/64")	(SCM/D)	(Psi)	(Psia)	(Psia)	(°F)
FS-3W(L)	102.9.17	6	8,900	1,450	2,051(未穩)	3,050(未穩)	133
		10	16,500	1,170	1,422 (未穩)		133
						2,783(未穩)	
FS-3W(L)	102.9.28	10	12,100	810			
		8	8,700	900			
FS-3W(L+S)	102.10.3	6	10,300	1,620	2,109(未穩)	2,337(近穩)	128
		8	14,100	1,340	1,792(未穩)		128
						2,274(未穩)	

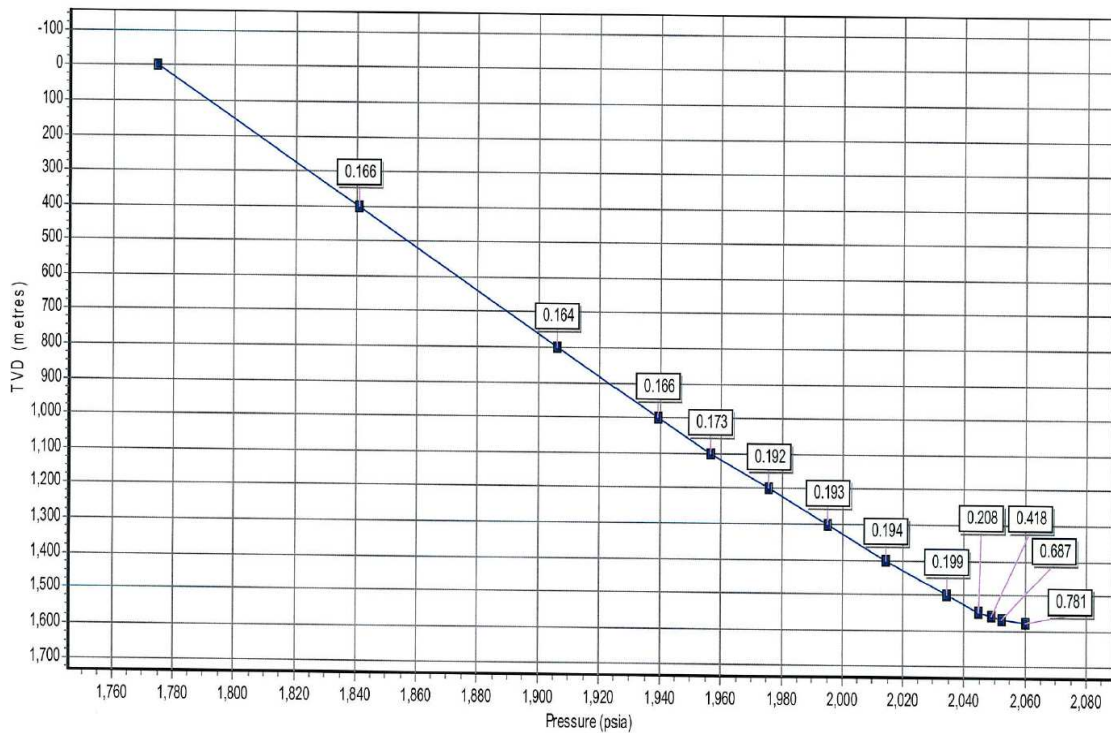


圖 7、FS-3Bw 完井測井梯度分布圖

(三)單井產能分析

1.壓力暫態分析

本研究計畫因 FS-3Bw 地層之特殊性，乃利用有限傳導裂隙模型及軸向複合模型進行壓力暫態分析，共進行 2 次 DST 測試。本研究以第一次 DST 為例，歸納上述兩種模型分析估算所獲得之地層參數，如表 4 所示。

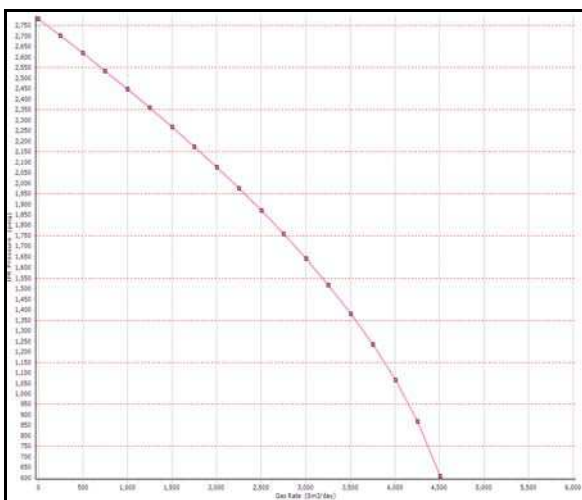
2.FS-3Bw 單井產能分析

本研究計畫彙整 FS-3Bw 單井資料後，輸入 Petroleum Expert 公司所發展之節點分析軟體 Prosper 進行 FS-3Bw 之單井產能分析。在現場與井壓測試分析基本參數條件下，進行 FS-3Bw 單井產能分析結果。圖 8 為參數校正前及結合噴流資料在不同井口壓力與天然氣流率下，參數校正後之產能分析結果比較。

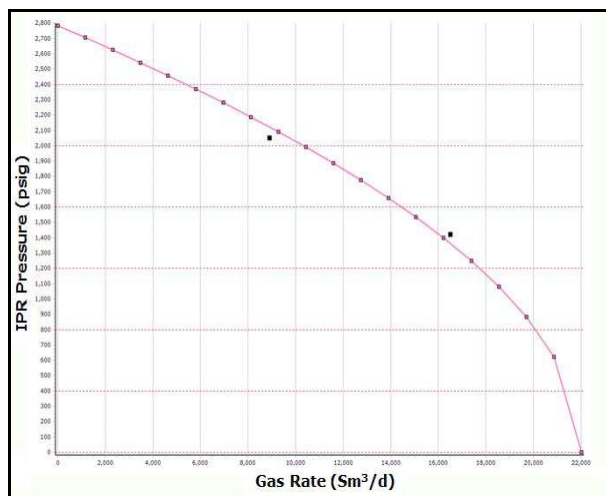
結果顯示，當地層原始靜壓為 2,783 psig 時，以壓力暫態分析獲得之參數進行產能分析結果顯示，FS-3Bw 井全開噴流(Absolutely Open Flow Performance, AOFP)量僅 4.5KSCM/D，與現場實際噴流時井之產能差異太大。最後井本研究進行產能分析校正後，在滲透率 $k=1.1$ md、 $Skin=7$ 之參數條件下，獲得全開噴流量為 22KSCM/D，並且得到甚佳之擬合。

表 4、第一次 DST 壓力暫態分析結果

FS-3W_DST1		FS-3W_DST1	
Analysis	Finite Conductivity	Analysis	Radial Composite
Selected Model		Selected Model	
Model Option	Standard Model	Model Option	Standard Model
Well	Fracture - Finite condu	Well	Vertical, Changing Storage (Hegeman)
Reservoir	Homogeneous	Reservoir	Radial composite
Boundary	Infinite	Boundary	Infinite
Top/Bottom	No flow/No flow	Top/Bottom	No flow/No flow
Main Model Parameters		Main Model Parameters	
TMatch	1.33E+6 [hr] ⁻¹	TMatch	0.664 [hr] ⁻¹
PMatch	1.51E-8 [psi ² /cp] ⁻¹	PMatch	1.16E-8 [psi ² /cp] ⁻¹
C	0.128 bbl/psi	C	0.132 bbl/psi
Total Skin	4.47	Total Skin	2.91
k.h, total	7.49 md.ft	k.h, total	5.76 md.ft
k, average	0.457 md	k, average	0.351 md
Pi	3043.12 psia	Pi	3048.07 psia
Model Parameters		Model Parameters	
Well & Wellbore parameters (Tested w		Well & Wellbore parameters (Tested well)	
C	0.128 bbl/psi	C	0.132 bbl/psi
Cv/Cf	0.452	Cv/Cf	0.444
delta_t	2.01 hr	delta_t	2.18 hr
Skin	0.0232	Skin	2.91
Geometrical S	4.45	Reservoir & Boundary parameters	
Xf	0.00895 ft	Pi	3048.07 psia
Fc	385 md.ft	k.h	5.76 md.ft
Reservoir & Boundary parameters		k	0.351 md
Pi	3043.12 psia	Ri	24.7 ft
k.h	7.49 md.ft	M	0.304
k	0.457 md	D	0.365
Derived & Secondary Parameters		Derived & Secondary Parameters	
Rinv	89.6 ft	Delta P (Total	733.549 psia
Test. Vol.	0.0221131 MMB	Delta P Ratio (0.525801 Fraction
Delta P (Total	881.512 psia		
Delta P (Skin)	4.24679 psia		
Delta P (Geom)	876.443 psia		
Delta P Ratio (0.642456 Fraction		



(a) 參數校正前



(b) 參數校正後

圖 8、FS-3Bw 參數校正前後單井產能分析結果

(四)岩體特性分析及出砂探討與預測

1.礦物分析結果

根據岩心取樣並過篩後之樣本取樣，以進行樣品粉體之 X 光繞射儀(以下簡稱 XRD)及傅里葉轉換紅外光譜進行分析(以下簡稱 FTIR)。XRD 結果顯示，FS-3Bw 的井底砂樣主要成份為石英；而其餘波峰經過比對後結果，其成份為鈉長石；FTIR 為分析是否礦物成份中具有 OH 基。圖 9 為 FTIR 分析結果，結果顯示 OH 官能基波峰位於 3,600cm⁻¹ 處，顯示 FS-3Bw 之井底砂樣含有 5%以下之黏土礦物存在。根據礦物分析結果，可供未來 FS-3Bw 若欲進行地層處理時，重要之參考依據。

2.岩石粒徑分析結果

以 FS-3Bw 下層(1,677.8m~1,682.8m)出砂地層進行岩心取樣進行粒徑分析，並估算相關粒徑參數指標。本研究計畫綜合歸納 1,677m 至 1,681m 段取樣分析結果，如表 5 所示。分析結果顯示，FS-3Bw 目標地層下層之地層岩體淘選度甚差；且岩體屬於非常不均勻砂體；細粒百分比佔整體 69.1%；岩體粒徑中值落於 27.3 μ m，屬於粉砂岩範圍。

3.出砂探討與預測

本研究計畫根據地層出砂理論，探討目標地層臨界壓降出砂及瞬時出砂。以下進行二理論介紹及預測結果討論，分述如下：

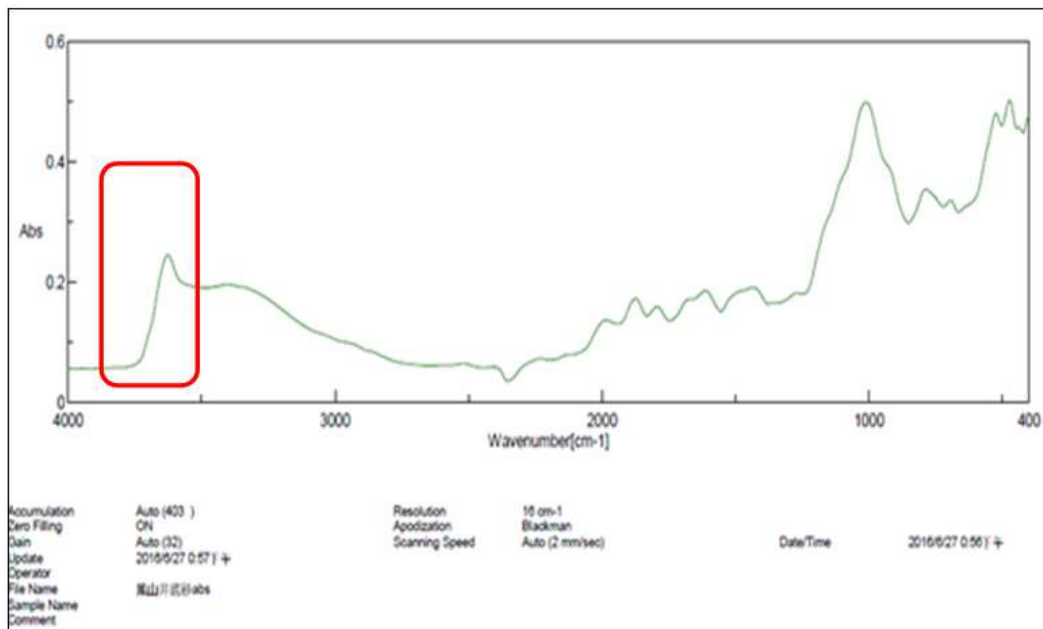


圖 9、FS-3Bw 砂樣傅里葉轉換紅外光譜進行分析(FTIR)圖

表 5、FS-3Bw 下層(1,677m 至 1,681m)取樣粒徑分析參數結果

係數 \ 深度	1677.4m		1678.6m		1679.5m		1680.7m		平均值	鑽桿沾泥	過篩管砂
	取樣1	取樣2	取樣1	取樣2	取樣1	取樣2	取樣1	取樣2			
d ₁₀ (μm)	100	70	30	24	101	87	102	101	76.9	32	60
d ₄₀ (μm)	51	41	14	12	45	45	52	33	36.6	15	22
d ₅₀ (μm)	40	31	11	10	34	32	35	25	27.3	13	17
d ₉₀ (μm)	5	5.1	2	3.2	5	5.5	5	5.5	4.5	4	4
d ₉₅ (μm)	2	3.4	1	2.4	2.5	4	3	4	2.8	2.4	2
Cu	50	20.6	30	10	40.4	21.8	34	33.7	30.1	13.3	30
Cs	10.2	8	7	3.8	9	8.2	10.4	7.3	8	3.8	5.5
細粒百分比(%)	55	63	97.5	98	57.5	57	55	70	69.1	95	84

非常不均勻砂 不均勻砂 (接近均勻) 不均勻砂

(1) 臨界壓降預測

根據 Weingarten and Perkins (1992) 「臨界壓降預測法」結合達西定律、天然氣狀態方程式、岩石力學平衡方程式及 Mohr-Coulomb 屈服法則而推導出之預測準則：

$$\left(\frac{P_a}{C_u}\right)^{m+1} + \left(\frac{P_a}{C_u}\right)^m \frac{4 \cos \alpha}{1 - \sin \alpha} (m + 1) - \left(\frac{P_b}{C_u}\right)^{m+1} = 0$$

其中：m 值(天然氣=1)、地層孔隙壓力(P_b)、近井孔流壓(P_a)、內摩擦角(α)及內聚力強度(C_u)

表 6 為臨界壓降出砂預測分析結果。分析結果顯示任意條件下，當井底靜壓與流壓差為 283.8 psi 時即會產生出砂破壞。對照前述第一次 DST 條件下，最低生產之井底流壓為 2,499psig；而對應臨界不出砂之產率介於 1,160~1,320 SCM/D 之間。

(2) 瞬時出砂預測

根據 van den Hoek 於 2003 年提出瞬時出砂量預估模式，且假設砂模型為一圓柱模型：

$$q_s = \frac{\frac{\delta}{\varepsilon} p_c \left[1 - \frac{1}{2} \gamma_p + \frac{1}{4} \frac{\gamma_p}{\ln(r_e/r_w)} \right] - \left[UCS^{(p)} - \frac{k_i \phi_i}{k_p \phi_p} \frac{p_e - p_w}{\ln(r_e/r_w)} \right] \left(1 + \frac{1}{2} T \right)}{\frac{\mu}{2\pi k_p \phi_p (1 - \phi_p)} \left[\frac{1}{2} T + \frac{1}{2} \gamma_p - \frac{1}{4} \frac{\gamma_p}{\ln(r_e/r_w)} \right]}$$

其中： $\varepsilon=R/r_w-1$ 、 $\delta=1-p_w/p_c$ 、塑性區半徑(R)、井孔流壓(p_w)、臨界壓力(p_c)及彈性區地層壓力(p_e)、單壓強度(UCS)。

圖 10 為瞬時出砂率與井底天然氣產率分析結果。根據數學模式估算塑性區之單壓強度為 271psi，當井底流壓為 2,600psig 時即會產生瞬時出砂。對應圖 10 之結果，當井底流壓 $P_{wf}=2,500$ psig 時，瞬時出砂率=每小時每公尺瞬時出砂 1 公升，天然氣產率為 900SCM/D。

表 6、臨界壓降出砂預測結果

計算結果	地層資料	岩樣資料
臨界壓差 ΔP (以 DST1 時 $P_i=2,783$ psi)		283.8 psi
井底最低生產壓力 (p_w)		2,499.1 psi
井口最低生產壓力 (p_h)		2,199.1 psi

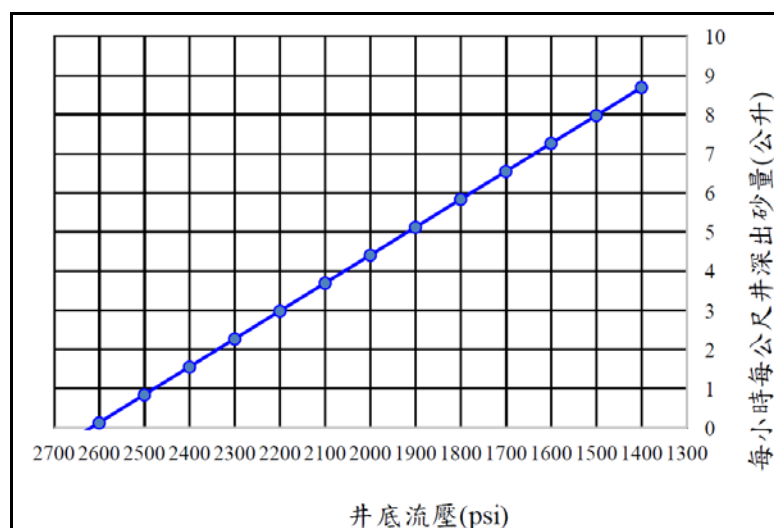


圖 10、瞬時出砂率與井底天然氣產率關係圖

(五)防砂完井設計評估

針對油氣開發產業有關防砂機制進行評估，以應用於鳳山構造油氣井生產防砂，以下分一般防砂完井及液裂防砂完井評估。

1.一般防砂完井

一般油氣井進行防砂時需針對目標層進行岩石粒徑分析，如表 5 所示。根據表 5 獲得之岩石指標參數後，參照業界常用防砂方式篩選原則進行篩選，如圖 11。圖 11 對應之規範及機械形式包括：獨立篩管(Stand Alone Screen, SAS)、礫石充填法(Gravel Pack, GP)及礫石充填結合地層處理等三種形式。根據表 5 之結果，FS-3Bw 適合應用礫石充填結合地層處理方法。但是考量細粒百分比過高，加上生產時壓差梯度過高造成細粒易阻塞井眼附近地層，因此一般機械防砂恐無法有效阻擋，故此本研究進而評估液裂防砂。

- 粒徑分佈及細粒 (Fine, <44 μ m) 含量：
 - ◆ $D_{50} > 75\mu$, $C_s(d_{10}/d_{95}) < 10$, $C_u(d_{40}/d_{90}) < 5$, Fine content < 5%——SAS
 - ◆ $D_{50} < 75\mu$, $C_s(d_{10}/d_{95}) > 10$, $C_u(d_{40}/d_{90}) > 5$, Fine content > 5%——GP
 - ◆ $D_{50} < 75\mu$, $C_s(d_{10}/d_{95}) > 20$, $C_u(d_{40}/d_{90}) > 5$, Fine content > 10%——GP+Under-reaming

圖 11、一般防砂篩選原則

2.液裂防砂設計

針對液裂防砂之設計過程中，所需之設計資料與需求進行介紹，說明如下：(1)單井資料處理品質確認(地層與油氣特性與參數、孔隙壓力、天然裂縫分析)；(2)一維大地應力模式分析—分析項目包括應力分析(三軸向主應力分析、岩石破裂相關參數分析)；(3)完井設計需求—於目標氣井進行完井設計(包含液裂合適穿孔之建議、儲層品質檢驗)；(4)液裂設計需求—根據目標氣井其油氣層及地層描述來完成整體分析，進行液裂增增產設計。液裂泵壓時程安排，主要設計之目的乃欲用以確定液裂的幾何結構和導流性；(5)液裂設計模擬與最佳化—對於目標氣井，根據液裂設計建立單井地質模型，並將其運用於產能分析模擬以獲得井之生產剖面。

根據液裂設計程序完成單井模型建置、電測資料解釋與校正、大地應力分析、地層條件分析及液裂程序建置後，進行三維數值模擬，圖 12 為 FS-3Bw 三維裂縫數值模擬結果。

本研究計畫根據三維液裂建置之模型，進行液裂前後產能分析模擬，圖 13 為 FS-3Bw 液裂前後產能分析結果比較。模擬結果顯示：(1)三維靜破裂壓為 390psi，數學法為 400psi；(2)地面外加清水泵壓為 2,200psig(高泵注長寬)，滲漏試驗則為 1,100psig；(3)案例設計單井最終產能(10 年)由

54.8MMSCM 提升至 107.8 MMSCM，增產率達 98%；(4)液裂前最大產率 (50,000SCM/d)僅維持 1 季便開始衰退，相較下液裂後能維持最大產率 5 年左右；(6)結果顯示液裂防砂對於單井增產之效果，有相當高的附加效益。此外，藉由液裂防砂完井，可降低生產過程之壓降梯度，其方法比較一般機械防砂而言，更具防砂控制效果、增加單井產能、縮短生產時間。

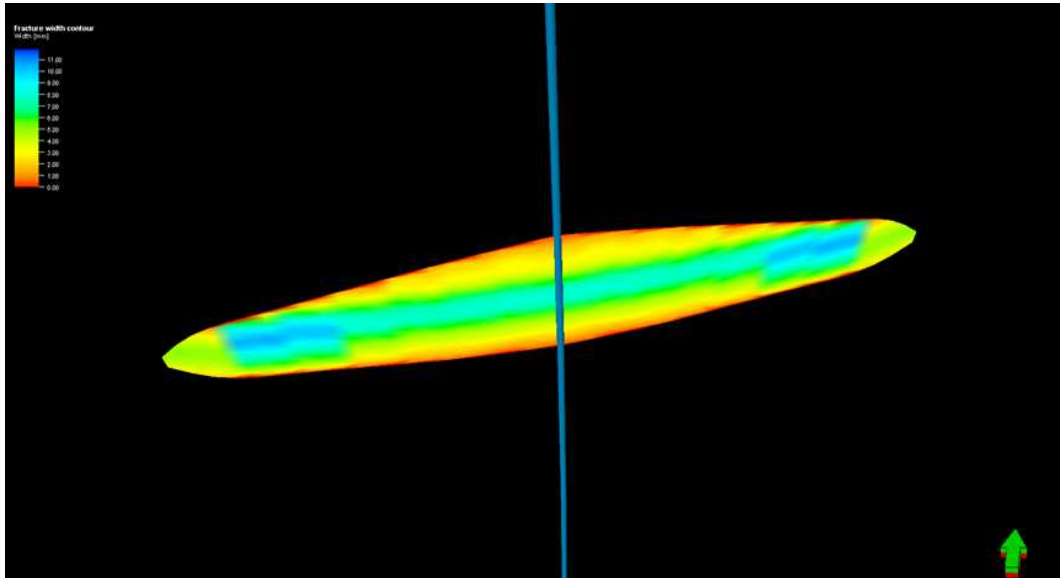


圖 12、FS-3Bw 三維裂縫數值模擬結果

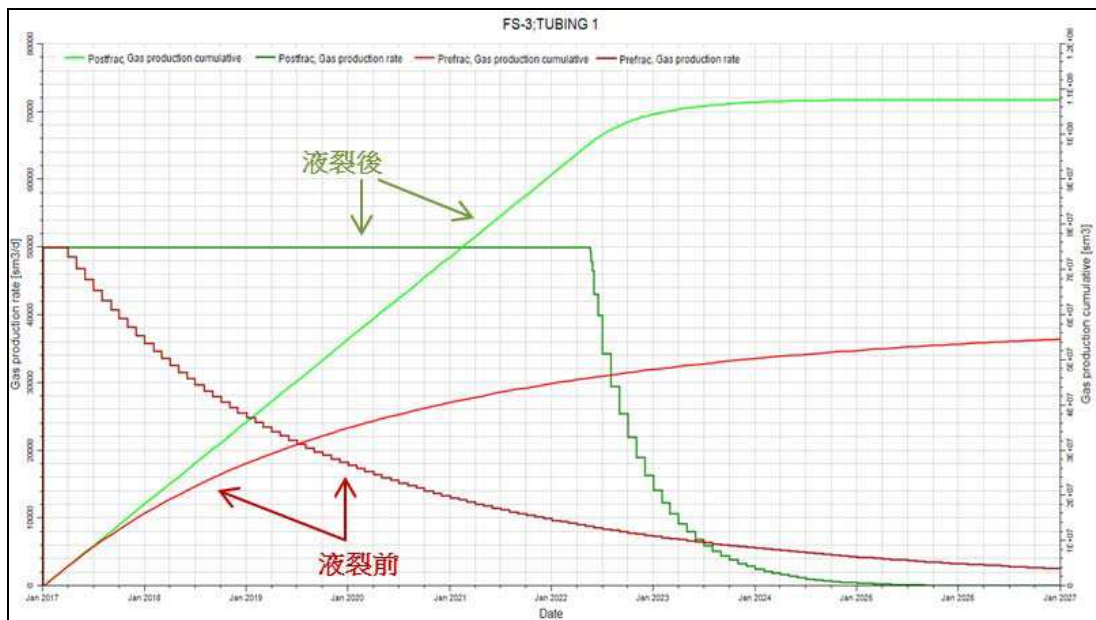


圖 13、FS-3Bw 液裂前後產能分析結果比較

(六)鳳山氣田整體生產開發規劃

1.單井產能及生產井佈井規劃

考量鳳山氣田所生產之天然氣主要供應對象為一般民生與鄰近工業用戶，其較重視長期且穩定之供氣，基於前述液裂模擬結果，本研究於開發規劃方面擬將單井最高產率設定為 63,000SCM/d(年產量約 22MMSCM)，生產高原期 10 年，生產年限 15 年，單井估計最終可採量為 259MMSCM。此外，在生產井佈井規劃方面，本研究利用 Google Earth 軟體套疊鳳山氣田之 DST1 與 DST2 構造範圍，以描繪出兩者之交集區域，同時，並排除區域內之河道、住宅區、工業區與墓地等地表建物，藉此分析可做為未來生產井井坪之位置。於目標區域範圍內初步規劃可配置 8 口生產井，以單井估計最終可採量 259MMSCM 估算，鳳山氣田估計最終可採量約為 2,072MMSCM，生產規劃如圖 14 所示。

2.地面設備規劃與投資費用估算

油氣層流體自井口產出時，通常為油、氣與水之混合物，並伴隨著泥沙等雜質，為避免地面設備與管串腐蝕及阻塞，及維持最大輸送效率與符合管線輸送規範，一般而言，原油之泥水含量不宜超過 3%，天然氣含水量不宜超過 4~7lb/MMSCF、硫化氫含量不宜超過 25ppm wt.，二氧化碳含量約為 2~3mole%(石油探採，2017 年)。此外，天然氣常含有乙烷、丙烷、丁烷及天然氣油等高價值烴類，但為了確保熱值穩定，在供應客戶前，必須透過油氣處理予以脫除並回收，其中，加熱器與高壓分離器設置生產井井場，將油氣預做分離，接著再對油與氣進行個別計量，並運送往生產中心進行後續處理。生產井、生產中心與運輸管線示意圖及預定場址規劃如圖 15 所示。本研究採用 IHS QUESTOR 油氣田開發規劃軟體設計鳳山氣田開發規劃，並結合服務公司所提供的液裂防砂技術服務費用，估算此開發案之投資費用與進行後續經濟效益評估。

3.經濟分析

本研究僅探討鳳山氣田整體開發之工程建設規劃，並未考量環境影響評估、相關行政作業及申請程序(如礦區申請)。工程建設之時程規劃方面，預計分 3 年鑽鑿 8 口生產井，並分別於第 2 年開始建設生產中心及第 3 年鋪設外輸管線，預計第 3 年之第 4 季前可完成所有工程建設並展開試俾，預計第 3 年底至第 4 年年初正式投產。

整合前述礦區開發規劃及本礦區適用的礦產權利金與財稅規定，建構經濟分析模型，在固定氣價假設新台幣 8 元/立方公尺的條件下，由本公司獨資執行此開發案之現金流量如圖 16 所示，內部投資報酬率(Internal Rate of Return, IRR)為 28.5%，淨現值(Net Present Value, NPV)新台幣為 94.7 百萬元，還本年限(Payback Period)為 6 年。

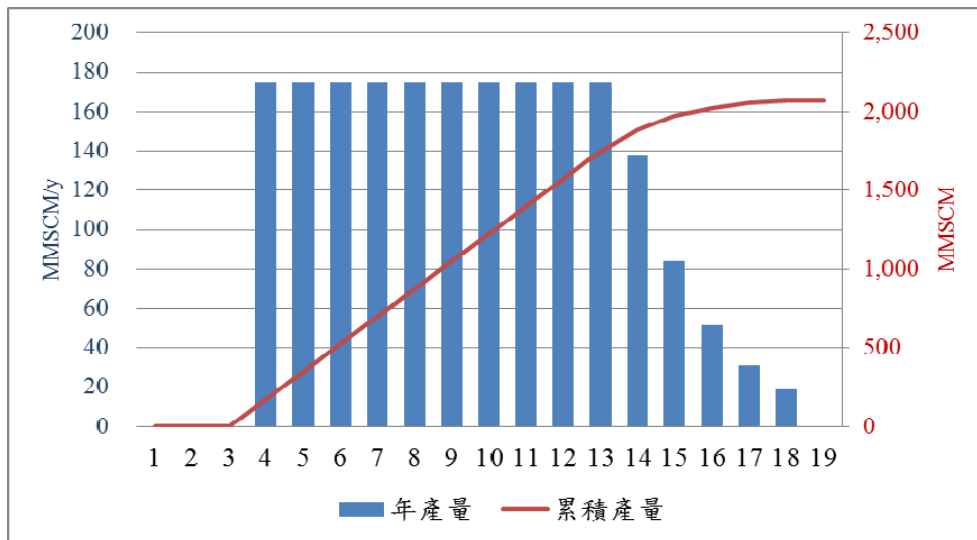


圖 14、鳳山氣田生產規劃

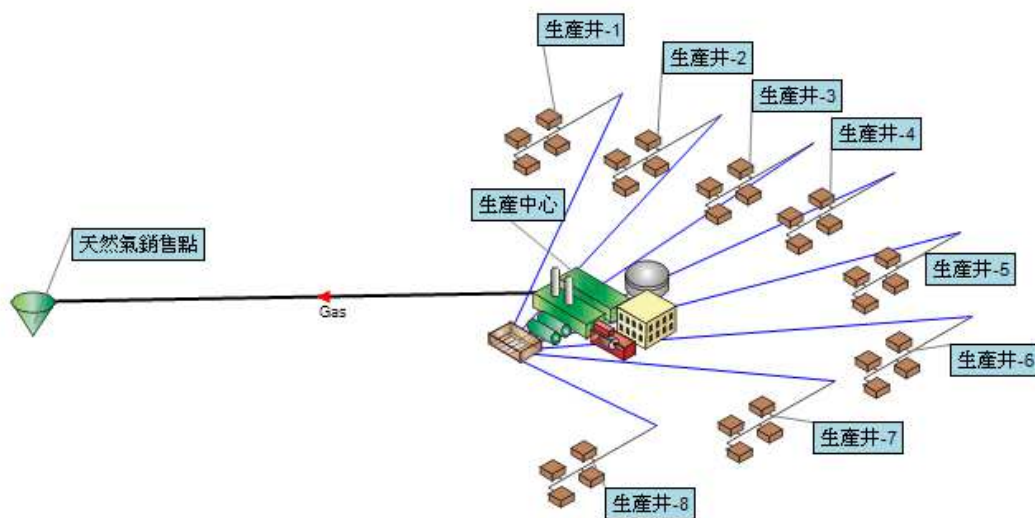


圖 15、地面設施配置示意圖

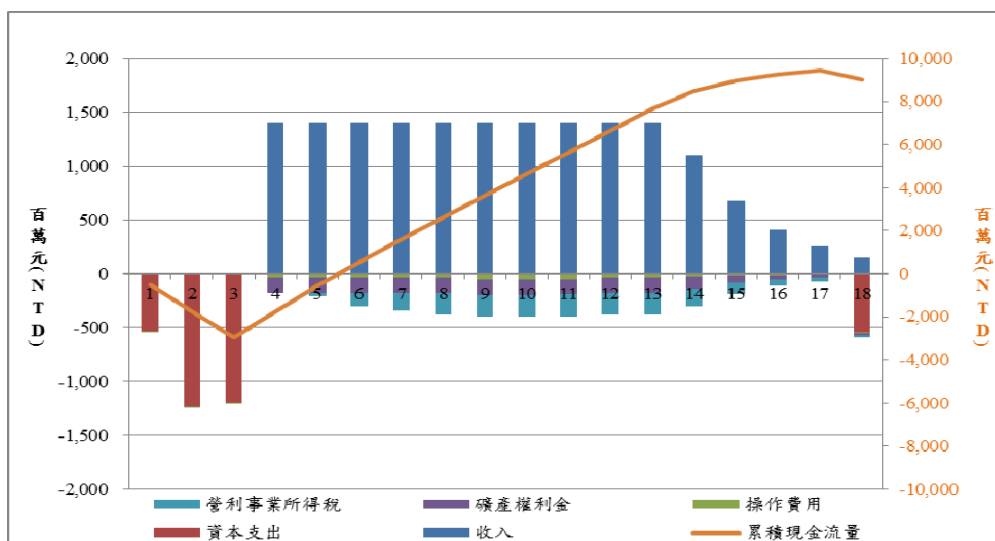


圖 16、現金流量圖