講 演
Lecture

最近の大水深掘削技術*

古 谷 昭 人**

(Received January 5, 2009 ; accepted February 26, 2009)

Recent deepwater drilling technologies

Akito Furutani

Abstract : Deepwater drilling technology study group in the Drilling Technology Committee of JAPT is participated by a number of members and positively performing its activities including information research, internal studies and publicity of those study results via JAPT web-site. In this paper we will introduce the basics of deepwater drilling technologies and the recent topics among the deepwater drilling technologies including the Deepwater drilling technology study group's achievement.

Keywords : deepwater drilling, managed pressure drilling, drilling cost

1. はじめに

石油技術協会作井技術委員会大水深掘削技術分科会では、多数のメンバーの参加を得て数年間にわたり、最近注目されている大水深掘削技術について、各種情報を入手し勉強会を実施してきている。ここでは、分科会で勉強した情報を含めて、最近の大水深掘削技術の基本および最近の動向を解説する。

石油・天然ガス開発において深海域はかなり以前から注目されてきた未開発フィールドであったが、1990 年代後半以降その探鉱・開発が本格化してきており、掘削水深も 3,000 m クラスに達している (図 1)。一方、1980 年代にも 2,000 m クラスの大水深掘削実績は存在していたが、当時と現在の技術内容は大きく違っている。大水深掘削技術が大きな変化を見せだしてからいまだ十年程度しか経過しておらず、それは日々変化を遂げているといえ、最新の技術情報をとらえ将来動向を予想することは難しい。

大水深を含む海洋掘削技術は、①海上に位置する掘削リグ・掘削機器に関する技術、②海面から海底面の間で使用されるサブシー機器およびその使用技術、③海底下の坑内に関する技術、に大きく分けて考えることができる。

本稿では、それら各種技術要素の基本に触れた後、最近の幾つかのトピックスを紹介する。

2. 大水深掘削の技術課題について

大水深掘削が、陸上掘削あるいは浅水深掘削に比べて何がどのように違うのかを原則に立ち返って考えることにより、大水深掘削の技術課題を解説する。すなわち、大水深掘削は、浅水深掘削に比較して一般に難しいと理解されているが、その理由を具体的に考える。

大水深掘削と浅水深掘削には概略以下のような相違点が挙げられる。これらが大水深掘削技術 / 作業 / 装置にどのような影響を与えるのかを個々に説明する。

- 「地層圧力」と「地層破壊圧力」の関係
- 「地層温度」および「海水温度」の影響
- 大水深「浅部地層」の特徴
- 「水深」そのものの影響
- 「リモートエリア」であること
- 「掘削コスト」への影響

2.1 「地層圧力」と「地層破壊圧力」の関係

大水深掘削における坑内問題の多くは、「地層圧力」と「地層破壊圧力」の関係に起因すると言える。大水深では、地層の上に数百 m 以上の海水が存在することから、掘削装置から見た地層圧力と地層破壊圧力の圧力勾配 (圧力 / 深度) の関係が通常とは異なる。すなわち、地層圧力 (地層孔隙内流体圧力) と地層破壊圧力の相対的な差 (比率) が比較的小さくなっている。

坑井を掘削するためには、坑内の圧力を地層圧力と地層破壊圧力の間に保つことが必要である。一方、現在の掘削技術では、坑内圧力制御のために坑内流体 (掘削泥水) の水頭圧力を用い、その調整は流体比重によって行っている。坑内圧力を許容範囲に維持するために必要な坑内流体比重

*平成 20 年 10 月 28 日、平成 20 年度石油技術協会秋季講演会「高油価環境下での石油天然ガス開発技術」にて講演 This paper was presented at the 2008 JAPT Autumn Meeting entitled "Oil and natural gas development in an environment of high oil prices" held in Tokyo, Japan on October 28, 2008.

**日本マントル・クエスト㈱作業部 Mantle Quest Japan Co., Ltd. Operations Dept.

Worldwide Progression of Water Depth Capabilities for Offshore Drilling & Production (As of March 2008)

図1 大水深掘削・開発記録 (出典: Offshore Magazine, Jul.2008)

図2 大水深での狭いオペレーションウインドー

の範囲は「オペレーションウインドー」と呼ばれる。大水深掘削では、このオペレーションウインドーが非常に小さくなる (図2)。したがって、坑内圧力を許容値内に維持し、安全に抗井を掘削することが非常に難しくなる。

その対応策は大きく2通りに分けられる。まず正攻法としてケーシングパイプを設置して圧力を遮断する方法がある。狭いオペレーションウインドーの坑井を掘削するには、ケーシングパイプを短い間隔で設置することになるが、限られた坑井サイズの中で設置できるケーシング数には制限があるし、当然掘削コストも増大する。

もう1つの対策としては、狭いオペレーションウインドー内から外れないように正確に坑内圧力をコントロールする方法である。そのような考え方は、近年 Managed Pressure Drilling (MPD) と呼ばれ、各種の手法が開発・紹介されている。MPDについては別項で紹介する。

上記の地層圧力と地層破壊圧力の関係が、大水深掘削では最も特徴的な掘削技術課題として存在することを認識しておく必要がある。

2.2 「地層温度」および「海水温度」の影響

一般に坑井掘削では、高温度対策が技術課題の代表的な

対象として認識されている。したがって掘削泥水も常温よりも高温で必要な性状を示すように設計されている。

しかし、大水深掘削では水中、特に海底部の環境温度が低く、低温度が問題になることが多い。すなわち海底坑口装置周辺がしばしば問題になる。低温度が引き起こす問題として以下のような問題が挙げられる。

【ガスハイドレート】

ガスハイドレートとは、高圧力・低温度環境下でガスと水分により生成する固形物であるが、坑内、特に海底坑口装置内で生成すると、坑井の閉塞やサブシー BOP 内部の障害がおこり、BOP の外側で生成するような場合にはサブシー BOP コネクター類の作動不良などにつながる場合がある。

【掘削流体（掘削泥水）の性状変化】

上記のとおり掘削流体は、常温より高温側で所定の流動特性を示す。大水深掘削では掘削泥水は常温より低温環境にさらされる場合があり、坑内流体循環をいったん停止した場合には坑内流体が冷やされて粘性が高くなるため、循環再開時に意図せずに坑内に過大な圧力を与えてしまわないように注意が必要である。

2.3 大水深「浅部地層」の特徴

大水深特有の掘削障害の多くは海底下浅層掘削時に生じるものが多い。浅部地層の掘削は、全工程の中では比較的短時間で終了するものであり、見過ごされがちな作業である。しかし坑口を含む坑井浅部構造は、その後の深部掘削時に坑井全体の基礎となるものであり、もし沈下、傾斜などの問題が起これば、将来改修不能な問題となる。

大水深浅部地層掘削時の代表的なトラブル（ジオハザード）としては、シャローガス、シャローウォーターフロー、ガスハイドレート層などとの遭遇、軟弱・未固結の地層問題などがある。

2.4 水深そのものの影響

次に掘削作業への水深の直接の影響に関する問題点を挙げる。第一には掘削装置（海洋掘削リグ）を定点に保持するシステム、次に掘削リグと海底をつなぐサブシーシステムに関する問題である。最近の大水深掘削リグは従来の海洋掘削リグよりも非常に大型化してきているが、そもそも坑井掘削能力だけを考えれば、大水深でも浅水深でも違いはないはずである。以下にリグが大型化した理由を述べる。

通常、掘削リグの定点保持にはアンカーと係留索による係留システムが使われるが、大水深となると係留索の長大化によるアンカリング装置の大型化とアンカリング作業時間の延伸が問題となり、各種の新規アンカリングシステムが開発・適用されてはいるが限界がある。大水深に適した定点保持システムとしてダイナミックポジショニングシステム（DPS）がある。DPS により事実上定点保持に関する水深の限界はなくなったといえる。従来 DPS の信頼性に懸念が残されていたが、最近は個々の機器の信頼性向上と機器の冗長性確保により、信頼性に疑問が呈されることはほとんどなくなっている。

サブシーシステムとは、サブシー BOP をはじめとする海底坑口装置とそれらと掘削リグを結ぶライザーシステムからなる。水深が深くなることによって直接に変わるの、ライザーパイプが長くなることだけであるが、そのために、ライザーシステムに作用する外力が大きくなり、ライザーパイプ自身とサブシー BOP、ライザーテンションなどその周辺装置も強大な構造が必要となった。さらに連鎖的にそれらをハンドリング、格納するリグ上の機器、さらには掘削リグ自体も大型化する結果となっている。

2.5 リモートエリアであること

大きな影響のある要素ではないが、一般に大水深探鉱開発エリアは浅水深域と比較してリモートエリアであることも掘削リグの設計に影響している。すなわち、掘削作業中の補給の最小化のために大きな搭載量が要求される場合がある。従来問題となることもあったリモートエリアによる通信手段の問題は、最近の通信技術・通信環境の向上により問題はなくなってきている。

2.6 掘削コストへの影響

大水深掘削技術について各種文献、サイトなどで検索すると、大水深掘削に特有な技術課題の克服に必要な技術だけでなく、それ以外の一般にも適用可能な技術も多く浮き上がってくる。単純にコスト削減・作業時間短縮に関する技術が、大水深掘削に適した技術として紹介されているのである。

大水深掘削作業は、非常に高額な費用を要する作業であり、特に掘削リグをはじめとする各種付帯サービスの時間単価が非常に高く、作業時間短縮がすなわち大きなコスト削減に結びつくためである。従来掘削作業時間短縮のための技術的努力は、掘進率・ビット寿命の向上など掘削作業時間の短縮、すなわち掘削工程表（ドリリングチャート）の傾斜部分の傾斜をより立てることに努力が注がれてきた。また同時に抑留・溢逸泥などの掘削トラブル、機器故障などによる作業休止時間を最小にする努力も行われてきた。しかし最近では、従来手をつけられなかったドリリングチャートの水平部分（ケーシング設置作業など）をも短縮しようという技術開発・努力が行われている。

3. 大水深掘削の技術進歩について

以上のような大水深掘削の技術課題を踏まえて、その解決・問題軽減のために多くの技術開発、技術検討がなされている。以下では、それらの概要について解説する。

- MPD（managed pressure drilling）
- ケーシング計画
- ジオハザード（geo-hazard）対策
- サブシー機器
- 掘削リグ上の掘削機器
- 掘削リグの位置保持
- 安全管理・環境保全
- 作業時間短縮に関する技術

3.1 MPD（managed pressure drilling）

MPD は、最近掘削技術用語としてよく耳にするように

なってきた用語である。MPD とは、明確に特定の技術を指す用語ではなく、ある作業手法あるいはコンセプトを指し示す用語と理解される。前述のとおり大水深掘削ではオペレーションウインドーが狭く、坑内に掛ける圧力を正確に制御しなければならない。そのために坑内圧力制御を正確に実施するための技術を総称して MPD といっていると思われる。

MPD とは、狭義には圧力的に密閉された循環系統（クローズドループ）による循環手法を指すが、広義にはほとんどの掘削計画の要素が含まれることもある。MPD として参照される代表的な技術として、以下のようなものがある。

- ・デュアルデンシティドリリング（dual density drilling）
- ・アンダーバランスドリリング（underbalanced drilling）
- ・ケーシングドリリング（casing drilling）

3.2 ケーシング計画

前述のとおり、ケーシング計画は、大水深掘削での狭いオペレーションウインドーという問題への対策として、MPD とともに考慮されるものである。坑内圧力制御の正攻法としてケーシングを必要な深度インターバルに設置することが要求されるが、大水深ではそのためにケーシング段数が増加し、したがって作業時間およびコストが増加する。

口掘り時のライザーレス掘削時の泥水使用などにより、より深い深度までライザーレスで掘削することにより、全体のケーシング計画に余裕を与えるという手法も、前述のジオハザード（浅部掘削トラブル）との兼ね合いで適用される場合がある。

掘 進 中 の LWD/PWD（logging while drilling / pressure while drilling）を用いた厳密な坑内圧力管理は、MPD に分類される技術であると思われるが、それによってケーシング計画時の安全マージンを小さくすることができ、ケーシング計画を最適化することが可能になる。

3.3 ジオハザード対策

ここで、ジオハザードとは海底下浅部掘削中に遭遇しやすい掘削トラブルを指しており、シャローガス、シャローウォーターフロー、天然メタンハイドレート層などを指す。基本的にはジオハザード層の掘削は避けるべきである。

ジオハザード層を避けられない、あるいは検知できなかった場合の対策としては、以下のような十分な対策を講じた上で作業が実施されるべきである。

- ・パイロットホールの掘削
- ・LWD/PWD ツールを用いたトラブル層の検知
- ・ライザーレス掘削での加重泥水の使用
- ・特別な設計の海底坑口装置

3.4 サブシー機器

サブシーシステムは大水深掘削リグに係るハードウェアの中で最も特徴的、かつ重要なシステムである（図 3）。

サブシーウェルヘッドシステム（海底坑口）に関しては、長大なライザーパイプによる外力に耐える強度と多段のケーシングを設置できる構造が要求される。

サブシー BOP スタックに関しては、DPS 掘削リグの定点保持喪失時のライザーパイプ緊急離脱対策のために、ラム BOP が従来の 4 基より 1 基増え、最低 5 基必要になっている。

ライザーパイプに関しては、強度を確保するために管体の肉厚が厚く、コネクター強度を増大させ、管内圧力 / 掘削リグの動揺などの負荷に耐える設計が必要になる。

ライザーテンションも、ライザーシステムの強化にあわせて大容量化が必要になる。

サブシー BOP コントロールシステムは、大水深化による BOP 作動時間の遅れに対処するために Electro Hydraulic Multiplex Control System（EH-MUX）が必要になるほか、DPS 掘削リグの場合には定点保持喪失時の緊急離脱システムのためにも EH-MUX が必要になる。

また、上記のような掘削リグ固有の装備の他に、大水深の場合は ROV（遠隔操作潜水艇）の重要性も特筆されるべきである。

3.5 掘削リグ上の掘削機器

大水深掘削リグに搭載される機器の特徴は、大型化・大容量化 / 機械化・自動化に集約される。その第一原因は、長大なライザーパイプなどサブシーシステムのためのハンドリング機器が必要になることが挙げられる。その他、コスト削減のための作業時間短縮および人員の安全性向上を目的とした泥水ポンプを始め泥水循環のための機器やパイピング、従来 3 本つなぎのドリルパイプを 4 本つなぎにできる櫓高さへ変更、パイプのハンドリングを機械化・自動化するなどの特徴がみられる（図 3）。

3.6 掘削リグの位置保持

大水深掘削リグの位置保持はダイナミックポジショニングシステム（DPS）が主流だが、アンカー係留も有効なオプションである。アンカー係留の場合の特徴は、高把駐力アンカー、高強度合成素材の軽量係留索、アンカー・係留索の事前設置というような特徴・新技術がみられる。

DPS 掘削リグでは、スラストやポジションリファレンスシステムの大型化・大容量化、冗長性の追加がなされている。

3.7 安全管理・環境保全

大水深掘削であることによる安全管理 / 環境保全上の問題も幾つか挙げられる。DPS 掘削リグの定点保持システムやライザーパイプの緊急切り離しシステムの不具合による海洋汚染、大型化し重量の増した掘削資機材による人身災害の可能性などである。また、事故によるダウンタイムは大水深の場合非常に高価になることも事実である。

そのようなリスクへの対策として、ハードウェアの高い冗長性（特に DPS や BOP コントロールシステムなど）や危険作業から人間を遠ざける（ドリルフロアのパイプハンドリングの機械化・自動化）という対策が採られている。現在業界では一般的となっている体系的なリスク管理手法も当然活用される。

3.8 作業時間短縮に関する技術

前述のとおり大水深掘削作業では、作業時間短縮は強く

図3 サブシーシステム（左）とパイプハンドリングシステム（右）

求められる能力の1つである。代表的なアイデアとして以下のようなものがある。

【デュアルアクティビティ（dual activity）】

同時に2つのパイプハンドリング作業を実施できる能力であり、一部の作業を工程のクリティカルパスから省いて、工程の遅延を防ぐ効果が期待できる。すなわち、パイプがリグ上から海底の坑口に辿り着くまでの時間を削減したり、パイプスタンド組み作業時間をクリティカルパスから外したりということが行われる。掘削リグ毎にデュアルアクティビティのレベルの違いがあり、部分的なデュアルアクティビティから完全なデュアルアクティビティまで各種存在する。またデュアルアクティビティリグでは、多くの機器が2セットずつあるので、機器故障時の冗長性確保にも有効である。

【ウェルヘッド関連ツール】

海洋掘削では海底坑口にアクセスする作業が多くあるが、大水深となると海底までパイプを揚降する時間は水深に比例して相当長く無視できないものとなる。対策として、ウェルヘッドにアクセスする各種ツールに複数の機能を持たせて海底へのパイプ揚降回数を減らすという方法があり、大水深用ウェルヘッド関連ツールにはそのようなアイデアが適用されている。

【生産試験・坑井仕上げ関連技術】

一般に生産試験や坑井仕上げ作業は、固定的に相当の長時間を要する作業である。各サービス会社からはそれら作業を少ないパイプ揚降回数で短時間に実施可能とするツールやサービスが多く提供されている。大水深坑井では作業時間の短縮がコスト削減に強いインパクトを持つため、サービス会社はそれらサービスを大水深坑井に適した技術として紹介している。

4. 最近の大水深掘削技術動向

最近の大水深掘削技術動向を把握することを目的に SPE

(Society of Petroleum Engineers) にて発表されている技術文献から deepwater および drilling というキーワードで検索・抽出された文献の数および内容を整理・検討した。

まず、1990 年以降の全 SPE 論文数、そのうち deepwater & drilling で検索された論文数および全数に対するその割合をグラフにした（図4）。2008 年は約半年分のデータのため、該当数は少なくなっているが、1990 年代後半以降全論文数は年間 2,000 件前後に対し、deepwater & drilling 文献は急激に増加して 200 件前後、その割合は全体の 10% を超えるようになってきている。それまでは約 2% 以下だったことから、その時期以降大水深掘削に対する技術的関心が非常に高まっていることがわかる。

次に、抽出された deepwater & drilling 論文の対象とする技術要素を整理した（表1）。整理したデータは都合により 2007 年および 2008 年の各前半のみであるが、おおむね傾向は示していると思われる。SPE 論文であるために大部分は掘削技術・作業とは直接関係しない生産や油層に関する内容であるが、それ以外の掘削関連技術の中でどのような要素技術が注目されているかの参考になるとと思われる。

次に、約 10 年前から急激に増えだした大水深掘削作業

図4 SPE 全論文数に占める deepwater & drilling 論文数の推移

表 1 deepwater & drilling 論文の内容内訳

	Jan. - Aug. 論文数	
	2007 年	2008 年
Production, Reservoir	87	64
Development System	6	8
MPD	7	11
Drilling Fluid	7	10
Cement	10	6
Other Technologies	13	17
Hydrate	1	1
Safety	1	3
Blowout	1	0
Waste Injection	2	0
Operations	2	13
Drill String	3	10
Rig	1	11
General	1	3
TOTAL	142	157

とそれに伴う各種課題をとらえるために、業界技術文献より典型的な大水深掘削技術上の課題を纏めたものを抽出し、比較検討することにより、現在までの技術動向を把握することを試みた（表 2）。

一方の文献（SPE/IADC 52782 Problems of Ultra-Deepwater Drilling）は、大水深掘削が本格的に増えだした直後の 1999 年に発表され、もう一方（SPE/IADC 105792 More Ultra-deepwater Drilling Problems）は、それから 8 年を経過した 2007 年に発表されている。すなわち、大水深掘削という新たな事業が発足した直後に懸念されていた問題点と、十分に成熟した後に依然残されている問題点を比較することができ、非常に興味深い内容となっている。以下に両論文の概要を紹介する。

《SPE/IADC 52782 Problems of Ultra-Deepwater Drilling》

この時点での 5,000 ft を超える水深での掘削実績は 58 坑、最大水深記録は 7,718 ft であり、主な坑井種別は探掘井であった。

Rig Positioning Problems

DPS に関して懸念されていた問題点として、エンジ

ンをはじめとするパワーマネジメントシステムの信頼性、FMEA（Failure Mode and Effects Analysis）の重要性、Differential Global Positioning System（DGPS）や音響測位システムの信頼性などであった。また、人的要素、機器メンテナンスなども懸念されていた。

Metocean Considerations

メキシコ湾においては、潮流、ハリケーンなどの気象海象問題も懸念されていた。避難手順、潮流計測技術、VIV（Vortex Induced Vibration）対策などが検討対象であった。ライザー降下中などの潮流対策としては潮流の流れに乗るドリフティングが有効と考えられていた。

BOP Control Related Problem

BOP コントロールシステムに関する課題としては、DPS トラブル時にどのように対応すべきかということであり、MUX BOP Control System の使用とその FMEA の重要性が指摘されていた。ハードウェアに関する焦点は、サブシーコントロールボッド、サブシー BOP スタックのフレーム、サブシーアキュムレータボトルなどの仕様にあった。また、非常時のバックアップコントロールシステムとして、ROV インターベンション機能、デッドマンシステム、アコースティックコントロールシステムなどのオプションが用意されていた。

Riser Management Problems

長大なライザーが各種状態でどのような挙動を示すのか不明点が多くあり、各種の影響・対策の検討が行われていた。例えば、リグの動揺周期に近い縦方向のライザー固有周期、ライザー上下端傾角の管理、ライザー緊急切離し時のリコイルシステム（反動緩衝システム）、DPS リグの回頭がライザーシステムにトルクを掛ける問題、VIV が与える影響、ライザー内部に加重泥水がある状態でライザーを切離した場合のライザーと泥水の挙動など。

Well Control Related Problem

大水深ウェルコントロールに関する問題としては、チョーク / キルラインの圧力損失が低海水温による泥水粘性の問題とあいまって懸念されていた。キル・チョークライン内径は従来の 3 インチから 4.5 インチが普通になってきている。その他の懸念事項としては、ガスハイドレート

表 2 SPE/IADC 52782 と SPE/IADC 105792 の内容（見出し）の比較

Problems of Ultra-Deepwater Drilling	More Ultra-deepwater Drilling Problems
SPE/IADC 52782, March, 1999, by Amoco, Transocean	SPE/IADC 105792, February 2007, by BP, Chevron, Anadarko
① Rig Positioning Problems	① Environmental/Weather Issues
② Metocean (Environmental) Considerations	② Mechanical Issues - Rig
③ BOP Control Related Problems	③ Mechanical Failures - Subsea Equipment
④ Riser Managemant Problems	④ Mechanical Issues - Wellbore
⑤ Well Control Related Problems	⑤ Casing Problems
⑥ BOP Test Considerations	⑥ BOP Issues
⑦ Well Control Related Problems	⑦ Formation Issues
⑧ Production Problems	⑧ Formation Evaluation Issues
⑨ Miscellaneous	⑨ Riserless and Cementing Issues
⑩ Personnel Requirements - Training and Safety	⑩ Subsea Wellheads

の生成、BOPのスタックコネクタの強度、ライザーパイプ圧壊の問題、BOP内へのトラップガスの問題、ダイバースシステムの処理能力の問題などがあつた。

BOP Test Considerations

BOPおよびライザーシステムの中は、掘削中加重泥水で満たされており、その水頭圧差によりBOP加圧以前に相当の圧力差がBOP内外に発生している。したがって、BOPテスト時にどこまでの加圧をすべきかが検討課題として示されていた。

Wellbore Construction Problems

地層破壊圧力のマージンが小さいことによる各種トラブルに対する懸念・対策案が示されていた。坑口に掛る大きな荷重と軟弱な海底下浅部地層への対策として、高強度スタックコネクタの開発やコンダクターに柔軟性を持たせるアイデアなどが紹介されている。また、ライザー緊急切離しのタイミングについてもそれら強度限界やスリップジョイント、ライザーテンションのストローク限界と組合せて議論されている。

Personal Requirements – Training and Safety

今後5,000～6,000人のリグクルーが25～30基の大水深リグのオペレーションに求められるとしている。特にそれらクルーにはDPS、ライザーシステム、BOPコントロールシステムなどに関し専門的なトレーニングを受けた者が必要とされる。

Conclusion

約20年前にも2,000m以上の大水深掘削は行われていたが、その当時においては、大水深の探索と開発の成功や経済性に大きなインパクトを持つ主要な問題（Loop current, Shallow gas flow）にはいまだ気づいていなかった。

《SPE/IADC 105792 More Ultra-deepwater Drilling Problems》

SPE/IADC 52782が発表されてから8年間の経過し、多くの大水深掘削作業が行われ、当初予期されなかった新たなトラブルを経験している。すなわち、機器不具合や人的トラブル、ソルト/タール層の問題などである。

大水深掘削記録は、10,011 ftとなり、稼働水深5,000 ft以上の大水深掘削リグは74基となっている。ちなみに1990年代に掘削された水深4,000 ft以上の坑井数は148坑だったが、その後2006年中までに524坑が掘削されている。上記坑井のうち291坑が本文献著者の3社（BP, Chevron, Anadarko）による。

またメキシコ湾では大水深坑井の掘削深度も非常に大きくなっており、最深は34,189 ftMDとなっている。そのような大水深・大深度掘削のために大径ドリルパイプがECDと強度確保のために開発されている。

Environmental/Weather Issues

当初予期されたとおりメキシコ湾の潮流は課題となっており、ドリフティングによるライザーパイプ降下などはよく実施されている。潮流によるライザーフレックスジョイント角度のためのライザー摩耗の問題に対してはNon-Rotating DP protectorが対策として考えられるほか、ライザーフェアリングも用いられている。サーフェスケーシ

ング降下作業をデュアルアクティビティ機能によりクリティカルパスから外す工程も採用されているが、VIVによりケーシングが戻って脱落するという事故も報告されている。

2004年、2005年のハリケーンによる大きな被害はよく知られるところであるが、それにより安全基準が強化され、8～9点係留が、12点係留にされるなどの変更が施されている。

DPSに関しては当初懸念されていたようなトラブルは報告されていない。FMEAやセンサー技術の進歩のほか、音響信号干渉の問題も解決されているためである。従来は、アンカー係留のオプションがあればDPSを選ぶことは避けられていたが、現在はそのようなことはなくなってきている。DPSの優位性としては、能力を持ったリグの市場でのアベイラビリティ、運用の自由度、海底の攪乱がないなどの点がある。

Mechanical Issues – Rig

高性能パイプハンドリングシステムとトップドライブは、大水深リグに欠かせない、かつクルーの安全性確保に不可欠な重要機器であるが、主要なダウンタイムの多くの原因にもなっている。機能が複雑化したためのトラブルであるが、主にはソフトウェアトラブルが原因であり、修復プログラムの入手が対応手段になる。十分な知識を持ったコンピュータテクニシャンが重要となる。

特にトップドライブは、荷重、トルク、圧力など設計能力一杯で使用される場合が多く、当初予想より寿命が早く訪れるようになっている。トップドライブのダウンタイムは、即クリティカルパスの停止につながるため、高価なダウンタイム回避のために機器修理よりもユニット・モジュールの交換という手段が優先される。

Mechanical Failures – Subsea Equipment

SPE/IADC 52782発表以降、2件のライザー脱落事故が報告されている。ひとつはDiscoverer Enterprise (2003, BP)が水深6,034 ftのロケーションで水深3,200 ftの位置でライザーが切断したものである。ライザーフランジボルトのBox側（Insert）の損傷（材質硬度、応力、Hydrogen charge）が原因と特定された。その結果、ボルト・ナットの材質、サイズが設計変更された。また事故の際、BOPバックアップ制御システムであるデッドマンシステムの有効性が確認された。

2件目の事故についての詳細は不明（メキシコ湾）である。気象の急激な変化によるLMRP離脱時にキルラインがリリースせず、坑口が曲がってしまったという事故であった。教訓として気象海象予知の重要性と余裕を持った離脱が認識された。

Mechanical Issues – Wellbore

メキシコ湾では大水深に向かうと同時に掘削深度も増加してきたため、設置するケーシング重量が増加し、そのためランディングストリングの能力向上が要求された。従来の1.35 MM (6-5/8" 34#) から2 MM (6-5/8" 50.4#) のものまでが開発された。そのハンドリング方法に関して

も Slip crashing, Uniform contact, Double shoulder & elevator system などが研究されている。

Casing Problems

ケーシングに関しては、さまざまなトラブルが報告されている。海底坑口直下のケーシングにクラックが発生した事故があった。原因はヒートチェックングとみられ、ケーシングを肉厚にするなどの対応が考えられた。トップドライブによる高回転ドリルパイプとの接触によってケーシングがダメージを受けるものと想像された。

DPS リグが回頭することによって坑口にトルクがかかり、コンダクター/サーフェスケーシングが戻ってしまうという事故もあった。潮流によって受ける力によってライザーテンションのフルイドベアリングが効かなくなっていた。アンチローテーションキーをケーシングに装備したり口元までセメンチングしたりするなどの対策がとられた。

その他には、ソルト層、キック層、廃坑時、LMRP 回収時などのケーシング圧潰が報告されている。

BOP Issues

BOP に関する事故として、2000 年にメキシコ湾で、2 件の不慮のライザー切離し事故が発生している。いずれも人的要素が原因であり、その後ファンクション方法などのインターフェイスが検討されている。

大水深用サブシー BOP の特徴として、ケーシング降下中の DPS トラブルに伴う緊急離脱対策としてのケーシングシアラムの装備が挙げられる。しかし、メキシコ湾では高いグレードのケーシングが使用されるケースが多くケーシングシアラムがあっても使用できないケースが多かった。実際にも DPS トラブルによりケーシングシアラムの使用が求められた例はなかった。

また、アニュラー BOP 密閉時のドリルパイプ回転時に 2 件のドリルパイプ損傷事故が報告されている。熱の影響とアニュラーパッカーのフィンガーによる損傷が原因とみられている。

Formation Issues

大水深の狭いオペレーションウインドー対策として PWD が活用され、ECD 管理が厳密に行われるようになっている。またエクスパンドブルケーシングは、その使用により追加のケーシング設置が可能となるために、有効なコンティンジェンシーとして考えられている。

その他にメキシコ湾で遭遇するトラブル地層としてタール層、ソルト層がある。両者とも坑内へのせり出し、パックオフ、掘り抜き後の高圧層遭遇などが問題となり、いかに掘り抜いて無事ケーシングをセットするかが問題となる。

Riserless and Cementing Issues

シャローウォーター層掘削の経験により、その掘り抜きには、フローさせながら掘るよりも止めるほうが良いとい

う理解になってきた。ライザーレスで加重泥水をポンプしながら掘削する (Pump & Dump)、ROV で操作する坑口のアニュラーシールバルブの使用、高い掘進率でカッティングスにより高い ECD を保って掘進し、その後加重泥水に入れ替える (First Drill & Pad Mud) などの対策がある。

大深度化により大径ケーシングセメンチングが必要になるが、大径セメンチングプラグがトラブルにつながるケースが多いため、インナーストリングセメンチングが考慮される場合が多い。

Summary

大水深掘削作業が非常に高価なものになり、かつ作業・機器が複雑となるためにダウンタイムに繋がりが易くなっている。対策としては、可能な限りの付帯作業をオフラインオペレーションとして問題発生時の影響を最小限とすること、サードパーティ機器の品質管理を厳しくすること、エクスパンドブルケーシング、予備ケーシング (ライナー)、採揚機器、逸泥防止剤、代替掘削ロケーション、サスペンド用パッカーなど、を準備しておくことが挙げられる。

5. ま と め

水深 1,000 m クラスの大水深掘削は、もはや特別なものではなくなっている。大水深掘削の要素技術は非常に多岐にわたり、従来浅海では遭遇しなかった、あるいは重要視されなかった課題多数を含んでいる。さらに 1990 年代後半より最大稼働水深 3,000 m 級の大水深掘削リグが多数建造され、水深 3,000 m クラスの大水深掘削は実証済みとはいえ、実績はいまだ乏しい。

油ガス田開発コストの中で掘削コストは大きな部分を占めており、大水深掘削コストの低減、掘削作業の安全性を高める新規技術導入が進められている。

一方、大水深掘削リグの市場は依然タイトな状況であり、掘削リグのデイレートが高騰。リグだけでなく掘削関連の資機材価格 / 各種サービス価格、サプライポートや ROV などの関連サービスも同様である。各種サービスのアベリビリティや資機材の長納期化も重大問題となっている。このように技術的問題よりもロジスティクス問題が重要なケースが多いといえる。

6. JAPT 作井技術委員会 大水深掘削技術分科会について

石油技術協会大水深掘削技術分科会では、上記のような内容の勉強会を継続して、世界の大水深掘削技術動向を今後もフォローしていこうと考えています。分科会活動の成果は、石油技術協会ウェブサイトにて随時アップデートしております。石油技術協会各位のご協力をよろしくお願い致します。