資 料

大水深掘削の技術課題と展望*

古 谷 昭 人**

(Received June 30, 1995; accepted July 11, 1995)

Deep water drilling technology

Akito Furutani

1. はじめに

海洋石油開発技術の進歩を示す指標として、第一に水深が挙げられる。近年も生産設備に関しては各種の新しいコンセプトが実行に移され、開発対象水深は増加が続いているが、移動式海洋掘削装置による海洋掘削そのものは、世界的に多数の新造リグの開発が望み得ない環境であることから、幾分停滞気味であると思える。しかし少数ながら着実に大水深掘削の検討と実行は行われており、近い将来、それらの技術が広範に必要となることは確実であろう。

大水深掘削に関しては、現在は次のステップへ進むための充電期間であると理解し、現状の大水深掘削での問題点を入手可能な範囲でレビューし、将来の展望を考えるとした。

大水深掘削を考える場合、ツールとしての掘削リグは、浮遊式掘削リグ(セミサブ型、船型)に限定される。それらリグでの大水深掘削上の問題点を考察してみる。

2. 浮遊式掘削リグの現状

大水深掘削の問題点という本題に入る前に、まず現在の海洋掘削リグの現状について考えてみる。Word Oil 誌1994年12月号によると現在市場にある浮遊式海洋掘削リグと呼ばれるものはドリルバージを除くと、セミサブ

*平成7年6月8日、平成7年度石油技術協会春季講演会作井部門シンポジウム「海洋におけるオペレーション」で講演
This paper was presented at the 1995 JAPT Drilling Technology Symposium entitled "Offshore Operation", held in Makuhari, Chiba, Japan, June 8, 1995.

**石油公団地質調査部・技術部 Japan National Oil Corporation

マーンブル137基、ドリルシップ22基である。ここではこれら2種の掘削リグについて様々な角度から観察し、検討してみる。

2.1 最大稼働水深別リグ基数(図1)

最大稼働水深別では、まず1,500 ftまでのものが大部分を占める。次に2,000 ftクラスのリグが約30基あるが、これらは比較的近年建造されたいわゆる第3世代セミサブに属するものと思われる。

2,500 ft以上の稼働水深を持つリグは非常に限られており、これらは最新式の第4世代セミサブとダイナミックポジショニングシステム(DPS)を持つドリルシップであると考えられる。

2.2 建造年代別リグ基数(図2)

現在残っているリグでは、1970年代に建造されたものが過半を占めており、それに次いで1980年代前半の建造のものもかなりの数が見られる。1980年代後半以降はほんのわずかしかなら建造されていない。ドリルシップだけについて見ると、ほとんどのものが1970年代の建造であることが分かる。

2.3 建造年代-稼働水深の対比(図3)

セミサブでは、幅はあるものの年代とともに最大稼働水深は大きくなっている傾向があることが分かる。またドリルシップの場合は、1970年代に非常に大きな稼働水深を持つDPSドリルシップが多く建造されているが、1980年代に入ってから通常係留方式のものがいくつか建造されているのみで、1980年代後半以降は全く建造されていない。

2.4 稼働海域別リグ基数(図4)

浮遊式掘削リグは、北海、アジア海域、メキシコ湾、南米にほとんどが集まっており、アフリカ海域、オース

図1 最大稼働水深別リグ基数

図2 建造年代別リグ基数

トラリア海域がそれに次ぐものである。

ドリルシップは、アジア海域にほとんどが集まっており、逆に北海では全く稼働していない。これは北海における海象条件によると同時に、北海の船舶関係の規制に現在のドリルシップのDPSが適合しないためである。

2.5 BOP 耐圧別リグ基数 (図5, 図6)

BOP の使用耐圧は長らく 10,000 psi がスタンダードであったが、最近では 15,000 psi という高い耐圧を持つものも多くなった。BOP 耐圧はリグの性能を表す1つの指標であると考えられ、それについて分類した。ドリルシップはすべて 10,000 psi の BOP であるため、セミ

サブのみについて検討した。全セミサブの約4割にあたる50基がすでに 15,000 psi の BOP を持つことが分かる。

BOP 耐圧を稼働地域別に分類したものが図6である。北海では3分の2近くに当たる約30基が 15,000 psi であり、15,000 psi の BOP を持つリグのほとんどがここに集まっていることが分かる。他の地域ではまだ数基づつで非常に希少である。

2.6 稼働海域、稼働水深別リグ数 (図7)

次に各海域ごとのリグを最大稼働水深別に分類してみた。全体に占める比率で見ると、メキシコ湾、南米では

図3 建造年代-稼働水深の対比

図4 稼働海域別リグ基数

図5

大水深用リグの比率が高く、アジア、北海では比較的低い。これは各地域で開発、探鉱が実施される海域の水深を反映するものであるといえる。

2.7 位置保持方法別リグ基数 (図8, 図9)

リグの性能を表すもう一つの重要な要素として位置保持方法がある。通常のチェーンによるアンカー係留だけでなく、チェーンとワイヤのコンビネーション係留索、スラスタアシスト、さらに DPS なども増えてきている。セミサブについて言えば、約4割がそれらの新しい方法であり、ドリルシップについては、当然ながら約4割がダイナミックポジショニングとなっている。

3. 現状の大水深掘削の問題点と解決策

現在大水深掘削において考慮される問題点、あるいは

図 6 BOP 耐圧-稼働海域別リグ基数

図 7 稼働海域, 最大稼働水深別リグ基数

図 8 位置保持方法別リグ基数 (セミサブ)

図 9 位置保持方法別リグ基数 (ドリルシップ)

今後さらに大水深となった場合に生じるであろう問題点とその解決策について要素ごとに分けて考察する。

3.1 ウェルヘッドシステム

大水深では、海底地質は浅水深以上に軟弱であることが予想され、それに対し、より大型化する BOP の重量、長大なライザーパイプが潮流により受ける外力がすべて坑口にかかることとなり、その安定性が問題となる。安定性の不足により発生する坑口の傾斜、沈下、埋没などの問題への対処策について以下のとおり考察する。

(1) テンポラリーガイドベース (TGB)

掘削開始前に海底面に設置する TGB は、30" ケーシングのスタビングガイド、ランディングサポートとしての機能を果たす。しかしながら軟弱な海底面の場合、沈下・埋没により、用をなさなくなってしまう場合が多く、その対策として一般にマッドマット、ウィングなどと呼ばれる広い面積を持った板を TGB に組み込み、沈下を防ぐことが行われる。また、40~46" ぐらいのコンダクターを TGB に接続してジェットイングセットすることにより、TGB の安定を確保する方法もある (図 10)。この場合ランニングツールにダブル J スロットタイプのものを使用し、ジェットイング編成を 36" 掘進編成にしておけば、コンダクタージェットイングの後、揚管しないでそのまま 36" 坑掘進に移ることができ、掘進編成のリエントリーを 1 回削減することが可能である。

(2) パーマネントガイドベース (PGB)

一般に PGB と呼ばれるものは、各メーカーにより名称や形状も様々であり、また将来の海底仕上げの考慮に

よっても形式が異なってくる。ガイドラインレスの場合 20" ケーシングや BOP を誘導するための漏斗型や逆漏斗型のガイドファンネルが付いており、その構造に様々な工夫がなされている。

PGB は 30" ケーシングに固定して降下されるが、30" ケーシングの設置方法として海底地層が軟弱でセメントの水頭圧に耐えられないような場合は、30" ケーシングのジェットイングセットが選択される。ジェットイングの場合、上記の TGB+コンダクターのジェットイングセット時と同じくダブル J スロットタイプランニングツールの使用により、ジェットイング終了後そのまま 26" 坑掘削を行うことが可能であり、非常に多くの時間を節約することができる。

(3) ライザーによる外力の問題

坑口には、非常に大きな重量を持つ BOP やライザーの挙動により、過大な曲げモーメントなどの力がかかることが予想される。それによるウェルヘッド自体の曲がりや傾きはその後の作業に重大な影響を及ぼす (図 11)。

第 1 の対策として 30", 20" ウェルヘッド間の接続部をより曲げモーメントに対し強い形状とすること、次にそれぞれのウェルヘッドおよびケーシングとの接続部のエクステンションをより強度の高い肉厚のものとし、セントライジングを適切に行うことが必要である。またウェルヘッドの安定性と言う面からは、30" ケーシングはジェットイングよりもセメンチングセットが望ましい。当然 20", 30" ケーシングをより深い深度にセットすること、TGB のセット時にコンダクターを使うことは有効である。

30" ケーシングセット後、ライザーをピンコネクター (ハイドロリックラッチ) により接続してパイロット坑を掘削する方法は、ウェルヘッドの安定性とシャローガスの問題から大水深の場合は勧められない。

(4) リエントリーの問題

坑口へのリエントリー方法は、アンカー係留の場合は

図10 コンダクターのジェットイング

図11 ウェルヘッドにかかる外力

図12 水中カメラによるエントリー

ガイドラインまたはガイドラインレスの両方が可能であるが、DPS の場合はガイドラインレスに限定される。

ガイドラインレスの場合は、坑口への誘導は ROV (Remotely Operated Vehicle)、水中カメラ、ソナーに頼ることになる。海底面近くの懸濁によって視界が悪いときは、まずソナーにより出来るだけ近づき、その後に水中カメラにより視認することになる(図12)。海底面の懸濁層を避けるための手段として、坑口を海底より若干上げる方法が考えられるが、その場合ケーシングの無支持部分の強度に問題が発生する。

いずれにしても作業手順の工夫により、リエントリー回数を可能な限り削減することが時間の節約にもなり、重要であると考えられる。

(5) その他の坑口機器

一般に坑口機器ランニングツールズ類は、大水深ではトルクによる操作は難しいため、ハイドロリック作動のものが望ましい。ケーシングハンガーやバックオフアッセンブリーなどもトルクセットよりウエイトセットが望まれる。また、長いライザー内を降下させるため、バックオフアッセンブリーなどの降下中のダメージも考慮しなければならない。

3.2 ライザーシステム

(1) 付属サービスライン

大水深用ライザーでは、通常のものに比べ BOP 作動液供給ライン、泥水ブースターライン、浮力体用エア供給ラインなど追加の付属ラインが必要となり、より複雑な構造となる。

(2) 強度の問題

強度の点では、一般的な20"ライザーより軽量の18"ライザーが有利であるが、18"ライザーでは掘削作業においてアンダーリーミングが必要となるなど問題もあり、現在20"のライザーがスタンダードになっていることから、今後もこのサイズが基本となるものと考えられる。

大水深では、ライザー重量によるトップテンションの増加のほかに泥水比重による内外圧の差が非常に大きくなることも考慮しなければならない。

またライザーコネクションは強度上カムロックよりもボルトによるフランジ形式のものが有利である。

ライザーのトップテンションを軽減するための浮力体として一般に使用されるシンセティックフォームは、水深の増加とともに強度・浮力効率が劣化するが、水深2,000 m 程度までは対応可能と言われている。より高い浮力効率と浮力の調節が可能という利点を持つエアカン方式は非常に優れたものではあるが、構造が複雑であり、取り扱い、メンテナンスが難しく高価でもあり、問題は多い。

(3) ライザー緊急離脱

掘削作業中におけるライザー切り離し作業には、決まった手順によって行える時間的余裕がある計画された切り離しと、ドリフトオフのような全く緊急の切り離しの2種が考えられる。

後者の場合、リグパワーがシャットダウンしているような場合でも簡単な操作だけで、自動的に安全な手順で切り離しを行う RDMS (Riser Disconnect Manage-

ment System)が必要となる。RDMSは、緊急離脱時以外にも、通常の離脱、ライザーテンショナーの破断、ライザーの破断時などに安全に衝撃力を吸収し、ライザーおよびリグに損傷を与えないためのシステムである。

安全にライザーを離脱した後でも、船体の動揺や潮流によりライザーに異常な力がかかったり、ムーンプールなどにぶつかり、ライザー自身や船体を損傷するという問題が考えられる。これは離脱によりライザー内の泥水が逃げ出し、ライザー重量が軽くなることが原因でもあるため、可能であればライザーの浮力を減らしたり、離脱前にLMRP (Lower Marine Riser Package) のアニューラー BOP を密閉してライザー内に泥水を満たしたままにしておくなどの対策が考えられる。またムーンプールへの衝突に関しては、ライザーを強制的に保持して防ぐことが出来るが、その場合ムーンプールの下にアッパーフレキシブルジョイントが不可欠となる。

30°や20°ケーシングの降下時にも同様の問題が考えられるが、DPSリグの場合ケーシングの重量がつくまでリグを潮流に流してパイプがムーンプールに接触するのを防ぐ方法がとられる。

(4) ライザーハンドリング

大水深では、ライザーの揚降時間が非常に長くなり、その削減が求められる。したがって、接続時間削減のため、ジョイント長は65~75 ftと長くなる傾向にある。また、離脱による待機時などでも、可能であればライザーすべてを回収せず、ハンゴオフしたままで待機できれば、効率的である。

3.3 BOP スタック

(1) アレンジメントの問題

大水深用 BOP スタックのアレンジメントを考える場合、まずその回収が非常に長時間を要する困難な作業であることから、十分にバックアップを考えた設計になっていることが必要であるが、それ以外に以下のことが考えられる。

ガスキック排出後の BOP 内に残留するいわゆるトラップガスは大水深の場合には非常に危険なものとなるので、その量を最小にするため、アッパーアニューラー BOP の直下にキルチョークラインを設ける必要がある。次にライザー離脱回収後の LMRP 再降下時のキルチョークラインの圧力テストを可能とするため、LMRP にキルチョークバルブを設置する必要がある。また、逸泥時やガスキック時にライザー内が空になることによって起こるライザーの圧潰を防止するため、ライザーフィルアップバルブは必要である。

(2) BOP の強度

BOP は長大なライザーより受ける力に耐えなければならないため、その接合部やフレームの強度も十分考慮されなければならない。一般に接合部はクランプよりもフランジが高い強度を持っている。

3.4 BOP コントロールシステム

(1) 応答時間の問題

現在多く使用されているパイロットドハイドロリック方式は水深約 600 m を超えると、応答時間の問題が生じると言われている。この問題の解決策としてファーストレスポンスハイドロリックシステムとして知られるバイアスシステムなども考案されているが、大きな改善には結びついていない。

現在大水深用コントロールシステムとして主流となりつつあるマルチプレックスエレクトロハイドロリック方式 (MUX) により、この問題はほぼ解決される。すなわちパイロットドハイドロリック方式では水深とともに増加する信号伝達時間を MUX では水深に関係なくほぼゼロにすることができる。

MUX での問題点は、コストが高いこと、およびシステムが複雑であるためより十分なメンテナンスが必要となることである。また海底に設置するコントロールボッドがより複雑で大型なものになるため、従来のようにボッドのみの回収ができなくなることもメンテナンスの必要性につながる。

(2) ROV の問題

ROV は補助的なコントロールシステムとして、ダイバー作業の不可能な大水深作業の場合に非常に有効なものである。ROV により可能な作業は、坑口などの監視・観察、ガスケット交換、セメントサンプル採取、BOP 操作など多岐にわたるが、その中でも大水深では非常時の BOP 操作 (BOP インターベンション) 能力が要求されることになると思われる。BOP インターベンション能力としては、LMRP やウエルヘッドのコネクター解除、ガスケット解除やシアラム密閉などが最小限可能なことが要求される。坑口周辺の監視・観察作業は BOP などに設置した TV カメラでも可能ではあるが、ROV では様々な角度から全体像を観察可能であるという利点がある。

大水深作業では、ROV 機器の信頼性はもちろんのこと、潮流の影響、海底近傍の視界が悪い場合が問題となるであろう。

(3) ボトムアキュムレータの問題

大水深用 BOP コントロールシステムでの大きな問題の 1 つは、ボトムアキュムレータ容量の確保であると思われる。大水深による大きな水頭圧により、アキュムレータボトル 1 本あたりの使用可能量が減少するため、

より高いブリチャージ圧と多数のボトルが必要となる。緊急時にアコースティックコントロールシステムを使用するような場合には、ボトムアキュムレータはさらに重要なものとなる。

3.5 掘削機器

掘削機器においては、大水深であるために要求される機能は特に無いと言えるが、あえて問題点を挙げると、以下のようなことが考えられる。

(1) ドリルストリング

大水深でライザーパイプを使用しないで掘削する場合は、周囲に支持のないドリルストリングに大きな挙動が発生し、ツールジョイントなどに損傷が発生することが考えられる。

(2) 泥水関係機器

大水深では、ライザーパイプ内の泥水容量が膨大なものとなること、および大径のライザーパイプ内の掘屑回収に十分な泥水流量が必要であることから、より高い泥水貯蔵能力、ポンプ能力が必要となる。

3.6 位置保持システム

3.6.1 係留システム

(1) 係留索

係留設計の基礎は、必要とされる復元力がいくらになるかで決められ、稼働海域により大きく異なる。例えば、チェーンシステムは北海では水深 600 m 程度が限度であるが、西アフリカ海域では 1,400 m 程度まで稼働可能であり、チェーンワイヤコンビネーションシステムは北海では 1,400 m まで、西アフリカでは 2,000 m までという報告もある。

(2) チェーンシステム

チェーンのみの係留索による係留システムでは、ある解析によると水深約 200 m で最大の復元力を示し、それ以深では水深とともに復元力は低下することが分かっている。また水深が大きくなると、船体にかかる垂直方向の力が大きくなり、リグの搭載能力に影響が出る。さらに水深の増加とともに必要なチェーンの長さが増大するので、それをハンドリング可能なアンカーハンドリングベッセル (AHV) が制限されるという問題もある。

(3) ワイヤシステム

解析によると、復元力は比較的良好なことが分かっているが、海底面でワイヤが損傷しやすいこと、チェーン以上に長いワイヤが必要なことから、現在はほとんど使用されていない。

(4) コンビネーションシステム

チェーンやワイヤのみの係留索による問題に対処するために、チェーンとワイヤを組み合わせたコンビネーションシステムが適用されている。アンカー近傍部分に

チェーンを用いたワイヤチェーンシステムが一般的であるが、チェーンのみの係留索に比べ復元力は高く、AHV でのハンドリングも比較的容易である。逆にリグにワイヤドラムとチェーンウインチの両方の設備が必要となるという問題点もある。

両端部にチェーンを用い、間をワイヤでつないだチェーンワイヤチェーンシステムもあるが、チェーンとワイヤの接続などハンドリングが面倒である。

(5) アンカーハンドリングの問題

大水深では、アンカーハンドリングは非常に長時間の作業となるので、その短縮に努力する必要がある。

まず、長大な係留索を扱うために大きな牽引力、デッキスペース、その他の設備を持つ高性能の AHV が必要となると同時に効率的な作業のためには熟練した AHV クルーの必要性も忘れてはならない。また大水深では孫アンカーの使用は非常に時間のかかる作業となり、現実的ではないことから、高いメインアンカーの把持力が要求される。

他にアンカーハンドリングによるリグの拘束時間を最小にするという観点から、掘削ロケーションへのリグ到着前にあらかじめアンカーを海底に設置し、係留索を海底に寝かせておき、リグ到着後海底の係留索を引き上げ、リグに接続するというプレデプロイメント方式と呼ばれるアンカリング方式も考えられる。

3.6.2 DPS

(1) DPS の特徴

DPS の利点としては、実用上稼働水深が制限されないこと、アンカリングの時間が不要であること、係留索の垂直力による搭載力への影響がないこと、海底敷設物を避けるためのアンカーパターンの検討が不要であることなどが挙げられる。

問題点としては、稼働期間中における燃料消費の問題、非常に複雑なシステムであることからそのメンテナンスと操作人員の確保の問題、およびドリフトオフなどが考えられる。

(2) ドリフトオフの問題

DPS での最大の問題点としてドリフトオフ (漂流)、ドライブオフ (暴走) が考えられる。それは海象気象による外力がスラスターの推力を超えた場合、システム故障によりスラスターの推力が無くなったりコントロールを失った場合に起こりうる。

あるフィールドでの統計によると、この種の事故は 6 基の DPS リグの稼働で年間平均数回発生している。中にはライザーパイプの緊急離脱システムが作動せず、ライザーを損傷する大事故も報告されている。事故原因の内訳は、リグパワーシャットダウンが 25%、DPS トラ

ブルやオペレーションが32%、気象海象が43%となっている。このようにドリフトオフなどは一度起これば、大事故となりかねないため、十分な対策が要求される。特に近傍にプラットフォームなどがある場合は、DPSでもアンカーを1点打っておき、ドリフトオフした場合でも衝突を防ぐような対策が必要である。

また位置を検知する方法も現在は、海底に設置したビーコン、人工衛星、ライザーアングルの3種のデータを用い信頼性を高めている。

しかしDPSにおいては、ドリフトオフは常に起こりうる問題であるため、緊急時の通報システムや離脱システムは常に整備されている必要がある。

3.7 掘削リグの浮体

大水深リグでは、長大なライザーパイプの搭載、大量の泥水貯蔵、係留索の垂直力の増加などにより、通常のリグよりも大きな搭載能力とデッキスペースが必要とさ

れることは明らかである。また、より稼働率を高めコストを削減するため、動揺性能や移動速度も重要な要素となろう。

4. ま と め

近年大水深海域での探鉱の重要性が叫ばれてはいるものの、最近の数年間における大水深掘削の実績には特に目新しいものは無く、大水深掘削リグも少数が建造されているにすぎない。本文で検討したような大水深掘削に関する技術課題と対策は、部分的には実行に移され成果を挙げているが、実施例は限られているものと思われる。これら新技術をより洗練されたものとし、さらに新たな課題を抽出するためには、今後の大水深掘削実績の積み重ねが必要であり、それらにより、より安全・効率的な大水深掘削が日常のものとなる日が来ることを期待するものである。