テクノウインドー；解説

アンダーバランス掘削技術 (2)

西 野 卓 也*

(Received February 6, 1997 ; accepted July 22, 1997)

Underbalanced drilling technology

Takuya Nishino

Abstract : Underbalanced drilling is one of the quickly developing technologies in the world. It enables to lower the development cost by increasing the oil production per well and by avoiding the possibility of drilling hazards such as lost circulation, differential sticking. Further, production impairment reduction is significant in underbalanced drilling because no fluid invasion occurs. This paper introduces surface and downhole equipment, tripping procedure, limitation of the existing underbalanced drilling and completion technology.

Key words : drilling, underbalance, underbalanced drilling, air drilling, aerated mud drilling, foam drilling, mist drilling, open loop system, closed loop system

1. はじめに

本編では、アンダーバランス掘削に必要な各種機器、トリッピング方法、仕上げ方法などについて紹介する。

2. アンダーバランス掘削に使用される掘削リグ

アンダーバランス掘削は、ジョイントパイプを使用した通常のロータリー掘削リグあるいはコイルドチュービング掘削リグを使用して実施されている。

どちらも一長一短があり、実作業に求められる条件に応じて選定する必要がある。

ロータリー掘削リグを使用した場合には、比較的自由的な坑井形状の掘削ができるものの、特にドリルストリングスインジェクション法を採用し、掘削流体としてエアレーテッドマッドを使用している場合にはドリルパイプのコネクションやトリッピングのたびに掘削流体の循環を停止しなければならず、その時点でアンダーバランス状態を失う不具合が生じる。この場合、坑内を常に確実

にアンダーバランス状態に維持するためには、スナビングユニットとの併用が推奨されるが、その実施例はごくまれである。

コイルドチュービング掘削リグを使用した場合は、使用する掘削流体が何であれ、作業の都合で循環を停止する必要はなく、坑内を常にアンダーバランス状態に維持することができる。その反面、使用するコイルドチュービングのサイズによって、坑井形状、坑径、掘削深度に制限が生じる。ちなみに最大外径 4-1/2" のものが存在するものの、いまだ使用実績はない。

使用状況を見てみると、ロータリー掘削リグの使用が全体の 85~90% を占めている。スナビングユニットを併用するケースはごくまれである。コイルドチュービング掘削装置の使用は、全体の 10~15% 程度であるが、これは、コイルドチュービング掘削装置の稼働台数が非常に限られていることによる。

掘削リグを使用し、液化窒素を使用したエアレーテッドマッド掘削時の典型的な敷地配置図を図 1 に示す。

3. アンダーバランス掘削システム

3.1 地表循環システム

アンダーバランス掘削における地表循環システムは、

*石油資源開発(株)作井部 Drilling Department, Japan Petroleum Exploration Co., Ltd.

図1 エアレーテッドマッド掘削時の敷地配置図

セパレーター使用の有無によって、オープンループシステム (open loop system) とクローズドループシステム (closed loop system) に二分される。

オープンループシステムは、比較的初期のころのアンダーバランス掘削において使用されていた地表循環システムで、現在でもエアードリリングや空気を使用したフォームドリリングなどでは盛んに使用され、エアレーテッドマッドドリリングにおいてもたまに使用されることがある。このシステムでは、リターンがブルイライン (blooie line) を介してすべてビットに流される。ブルイライン出口にて気体は燃やされ、カッティングスと液体はビットにて沈殿分離後、必要であれば液体のみ再利用される。典型的なオープンループシステムを図2に示す。

クローズドループシステムは、リターンをすべてセパレーターにて処理するシステムであり、エアレーテッドマッドドリリング、フォームドリリング、サワー環境下でのオペレーションにおいて使用される。典型的なクローズドループシステムを図3に示す。

3.2 ガスインジェクションシステム

アンダーバランス掘削で、窒素および天然ガスなどのガスを掘削流体に使用する場合、ガス送入のための地表システムを以下に紹介する。

3.2.1 リキッドナイトロジェンインジェクションシステム

リキッドナイトロジェンインジェクションシステムは、アンダーバランス掘削において最も一般的な、液化窒素を気化して送入するシステムであり、液化窒素の輸送コストがかからなければ比較的安価である。しかしながら、液化窒素の製造プラントからの距離が遠くなると輸送費がかさみ、効率的でなくなるとともに、必要量の安定供給が難しくなる。

3.2.2 ナイトロジェンメンブレンシステム

メンブレン (membrane) ユニットを用いて、クリーンで乾燥させた空気から酸素、二酸化炭素および水蒸気を取り除き、窒素を製造するシステムであり、一般的な窒素の送入レートでは、窒素濃度は約95%にて製造される (残りの5%は、酸素である)。窒素の純度は工程の繰返しで99%まで上げることができるが、システム内の精製工程を繰返すことによって坑井への供給レートが減ってしまうため、非現実的になる (一般的に酸素濃度が5%以上あれば、腐食の原因となったり、ダウンホールファイアーが起こると言われている)。このシステムの欠点は、サービスコストが高価なこと、燃料代がかなりかかることである。したがって、短期間の稼働では非効率的であるが、液化窒素の安定かつ効率的な

供給が困難な地域、または海洋におけるオペレーションでは有効なシステムである。

3.2.3 天然ガスインジェクションシステム

アンダーバランス掘削を実施しようとするフィールドの近傍に、生産中のフィールドか、ガスパイプラインが存在する場合に採用されるシステムである。このシステムでは、ガスをコンプレッサーで圧入圧力まで昇圧しなければならないので、オペレーションの諸パラメーターは、使用されるコンプレッサーの能力によって制限される。リターンガスはセパレーターで分離され、生産施設に送られるか、もしくは燃やされる。ガスを燃やした場合にはコスト高となる。

3.3 リターンガスハンドリングシステム

アンダーバランス掘削では、通常リターンしてきた窒素と天然ガスも、地層からの産出ガスとともに燃やされる。したがって、注入するガスの種類・量によってはコスト高になってしまう。最近開発されたリターンガスを再利用するシステムを紹介する。

3.3.1 ガスリサイクルシステム

このシステムは、リターンしてきた流体中の気体のみをセパレーターで分離後、再圧入するものである。このシステムは、分離した気体から例えば窒素のみを取り出すといったような、ガスの種類ごとに分離して取り出す能力は持たない。このシステムを採用する場合には、例えば酸の存在や、メタンガスなどのガス組成や濃度によっては、トラブルが生じる可能性もある。また、気体は再圧入される前にドライにされる必要がある。

3.3.2 ナイトロジェンリサイクルシステム

このシステムは、最近開発されたシステムで、セパレーターによって分離されたガスのうち、窒素のみをさらに分離し再利用するものである。このシステムにおいては、リアルタイムにガス組成分析を実施し、不要な成分を除去する必要がある。したがって、特に坑井がガス井である場合は適用は困難になる。

3.4 地表機器

3.4.1 ローターティング BOP および ローターティングヘッド

ローターティング BOP (RBOP) および ローターティングヘッドは、リターンしてきた掘削流体を通常の循環経路からダイバートさせるため、BOP と併用されるダイバーターである。両者とも外観はアニュラー BOP に似ており、主要機能は同じであるが、シールラバーの作動性能によって区別されている。

RBOP は、文字どおりアニュラー BOP と同様に、シールラバーが油によって押し出され (エナジャイズされ)、ドリルストリングスをシールするものである。し

たがって、ドリルストリングスの形状が変化しても、それに対応してシールラバーが移動し、十分なシール性能を発揮するものである。典型的な RBOP のシール構造を図4に示す。

ローターティングヘッドは、腕状の可動しないシールラバーを内部に持つものである。このシールラバーは、加圧ポートによって加圧されているため、ある程度のストリングス径の変化にも耐え、ドリルストリングスをシールすることが可能である。しかしながら、ドリルストリングスの径が急激に変化する場合、その変化についていけず、リークを引き起こす危険性がある。ローター

図4 ローターティング BOP

図5 ローターティングヘッド

ティングヘッドのシール構造を図5に示す。

RBOP, ローテティングヘッド共に耐圧仕様自体にはほとんど差がないものの、カナダにおいては、特にサワー環境下でのオペレーションのように、リークによって重大な災害を引き起こされる危険性がある場合には、RBOPの使用が義務づけられている。

3.4.2 4相セパレーター

アンダーバランス掘削におけるセパレーターは、クローズドループシステムにおいて、RBOP（またはローテティングヘッド）によってダイバートされたリターン流体を処理するための装置で、カッティングス、水、油、ガスの4種類の流体を処理することから、4相セパレーターと呼ばれる。

4相セパレーターの典型的な内部構造を図6に示す。セパレーター内部は通常いくつかのコンパートメントに分けられている。この例ではセパレーター内が3つのコンパートメントに分けられている。リターンしてくる掘削流体はまず1番めのコンパートメントに入る。ここで流体の流速は激減し、カッティングスと液体分とが比重差によって分離される。液体分はオーバーフローし、2番めのコンパートメントに移動する。ここでは、比重差で油と水とに分けられ、油は3番めのコンパートメントにオーバーフローする。カッティングス、水、油はそれぞれポンプで汲み出され、カッティングスはビット、油はストレージタンクに送られ、水は再利用される。ガスはこれらの工程中に分離され、通常は窒素を含めすべてフレアされる。

フォームを掘削流体として使用している場合には、セパレーターに入る前にフォームブレイカーを混入し、フォームを破壊してからセパレーターで処理する。

3.4.3 モニタリングシステム

アンダーバランス掘削を成功させるかぎは、刻々と変

化する掘削状況に対応し適正なアンダーバランス状態を維持できるかということと、多様なサービス・人員を統括し複雑なオペレーションに対応できるか、という2点にある。そのため、必要なデータおよびパラメーターをリアルタイムにモニタリングするシステムが必要となる。通常、この種のシステムにおいてモニタリングしている項目は、以下のとおりである。

- ・インジェクションガス
フローレート、トータル送入力、インジェクション圧力、温度
- ・送入液体
フローレート、液体比重、トータル送入力、送入圧力、温度
- ・スタンドパイプ圧力
- ・アニュラー圧力
- ・リターンレートおよび温度
- ・セパレーター
セパレーター圧力、液体量
- ・フレアライン
フレアライン圧力、温度、ガスパーセンテージ
- ・硫化水素濃度

こういったモニタリングシステムについては、傾斜掘りサービス、セパレーターサービス、ガス圧入サービスといったアンダーバランス掘削に関係するほとんどのサービス会社が独自のシステムを持っているが、通常はガス圧入サービス会社のモニタリングシステムが使用されている。

3.5 坑内機器

アンダーバランス掘削で使用される坑内機器は、基本的には通常のオーバーバランス掘削にて使用されるものとほぼ同様であるが、特有の機器について以下に述べる。

図6 セパレーター構造

3.5.1 チェックバルブおよびハイドロスタティックコントロールバルブ

アンダーバランス掘削においては、坑底圧は地層圧より低く保たれるため、循環を止めた場合、地層流体がドリルストリングス内に侵入する可能性が生じる。これを防ぐため、通常はビット上もしくはマッドモーター上に最低でも必ず1つは逆流防止用のバルブを設置する必要がある。また、このバルブは循環圧力を保持し、再循環するときにドリルストリングス内を昇圧させるための時間を短縮するためにも使用される。逆流防止用のバルブにはチェックバルブとハイドロスタティックコントロールバルブがある。

チェックバルブは、オーバーバランス掘削で使用されるフロートバルブ同様、一方向にのみ作動するバルブで、フラッパータイプとポペットタイプがある。

ハイドロスタティックコントロールバルブは、チェックバルブ同様、地層流体のドリルストリングス内への侵入を防ぐ機能と、ドリルストリングス内が完全な掘削泥水のフルコラムに置換された場合でも、その泥柱圧が地層に伝わらないようにする機能を持つ両方向のバルブである。このバルブの形状はポペットバルブと似ているが、ある一定の圧力以上がかかった時のみ開く。したがって、スプリング強度の選定に関しては、ドリルストリングス内がフルコラムの泥水に満たされた場合でも、それを保持するだけの強度を持ったものを選定する必要がある。

これらの逆流防止バルブの設置箇所は、通常、ビットもしくはマッドモーター直上に1個もしくは2個、地表付近に1個、残りはオペレーターのポリシーによって、200 m ごとに1つとか、全体でいくつといったように設置される。

3.5.2 プレッシャーホワイルドリリング (pressure while drilling, PWD) センサー

これは、アンダーバランス掘削時の坑底圧測定用に関連されたセンサーである。この機器では、センサー位置でのアニュラー坑底圧力、温度、センサー位置でのドリルストリングス内圧力の測定ができる。アンダーバランス掘削においては、特にリアルタイムに坑底圧の変化を把握していることが重要で、非常に役立つ機器といえる。

3.5.3 エアモーター

エアモーターは、掘削流体中の気体の割合が多い場合に用いられる特殊なモーターである。通常のマッドモーターと異なる点は、ローターとステーター間のクリアランスが広くなっていることである。現状の使い分けとしては、エアドリリングおよびミストドリリングに

おいてエアモーターを使用し、フォームドリリング、エアレーテッドマッドドリリングにおいては通常のマッドモーターを使うことが多いようである。

4. トリップング方法

アンダーバランス掘削におけるトリッピングは、クリーンな掘削流体（ブラインなど）にて坑内をいったん抑圧するか、坑底圧と地層圧がバランスするまで、もしくは若干オーバーバランスぎみになるまでアニュラス部にクリーンな掘削流体をスポットした後、実施される。いずれの方法もハイドロスタティックに坑井を抑圧するものであり、程度の差はあってもフォーメーションダメージを引き起こす可能性を持っている。これを避けるために、多少割高になるがスナビングユニットを使用し、スナブイン、スナブアウトする方法もとられることがある。

坑内をいったん抑圧してしまえばトリッピング手順は通常と同じであるが、アンダーバランス掘削においては特に補水に注意が必要である。

ここでは、坑内をアンダーバランスに保ったままでの一般的なトリッピング手順を示す。

1) 計画段階

- トリップング手順と BHA 計画および BOP 計画は切り離して考えることはできない。特にアンダーバランス状態を維持しながらのトリッピングでは、アニュラー BOP と RBOP 間の距離が重要となるため、必要ならばアニュラー BOP は2段設置する。
- トリップ時のフック荷重をあらかじめシミュレーションし、ドリルストリングスが坑内圧力によって押し上げられるような“パイプライトコンディション”が起きる可能性があるならば、スナビングユニットを準備する。

2) 事前準備

- 外径が均一でない BHA は、複数の BOP および RBOP を交互に開閉し、そのつど脱圧するといったように、段階的に揚管する必要があるため、BOP スタックと BHA の正確な寸法を把握しておく。
- 坑井抑圧に備えて坑井元に必要量の抑圧流体を準備しておく。
- ドリラーがブラインドラム下の圧力を読み取れるようにブラインドラム下に圧力計を取り付けておく。
- トリップシートを準備しておく。

3) 地表付近のチェックバルブがフロアー位置に来るまで RBOP を閉めたままストリップアウトする。(必要があればアニュラー BOP も閉める。)

- 4) 専用のツールを使用してフロートサブ下に残存するトラップガスを払う。
- 5) トリップシートを用い、正確な量の掘削流体を補充する。
- 6) BHA が地表付近に来るまで同様の作業を実施する。
- 7) BHA が坑口を通過する間は、アニュラー BOP と RBOP を交互に開閉し、ストリップアウトする。開閉のつどアニュラーBOPとRBOP間のトラップ圧力を払う。
- 8) ビットがブラインドラム直上に来たらブラインドラムを閉め、ブラインドラムと RBOP 間のトラップ圧力を払う。
- 9) 逆の手順によって降管を行う。

サワー環境下においては、逆流防止バルブのリークによるドリルストリングス内からのフローを防ぐために、ワイヤーラインもしくはポンプダウнтаイプのプラグを、ビット直上もしくはマッドモーター直上といったドリルストリングス先端部に取り付けることを考えなければならない。

ケーシング降下、仕上げ編成降下時にも同様の作業手順がとられる。

5. コネクション手順

ここでは坑内をアンダーバランスに保ったまままでの一般的なコネクション手順を示す。

- 1) コネクション位置までドリルストリングスを引き揚げる。
- 2) 掘削流体の送入を止め、アニュラスを密閉する。
- 3) 気体のみを圧入し、ドリルストリングス内をブローする。
- 4) 気体の圧入を止め、インジェクションバルブを閉じ、アニュラーの圧力上昇を確認する。
- 5) ドリルストリングス内の圧力を払いコネクションを実施する。

6. 仕上げ方法

アンダーバランス掘削の適用例のうち、ほとんどの場合において、ケーシングもしくはライナーを降下しない裸坑仕上げが採用されている。スロットドライナーを降下するほとんどの場合において、仕上げ作業前に、坑井はいったんクリーンな流体で抑圧される。通常、アンダーバランス掘削を実施した坑井においては、フォーメーションダメージを伴うセメンチングは実施されない。

7. アンダーバランス掘削技術の現状の課題

現状のアンダーバランス掘削技術は、以下の点において課題を抱えている。

1) 仕上げ方法

前述したように、アンダーバランス掘削における仕上げ方法は簡単なものが多く、複雑な仕上げが必要な場合の手順は、いまだ確立されていない。

2) ボアホールスタビリティ

坑内がアンダーバランス状態になった場合、オーバーバランス掘削で得られていた坑内の安定性は失われる。特に未固結な地層の場合には、崩壊などによってドリルストリングスが抑留される可能性が生じる。また、シェールでも問題を起こした例が報告されている。

3) シミュレーションソフトウェアの開発の必要性

現在使用されているシミュレーションプログラムは、あらゆるケースに対応できるというわけではないため、多くの会社が、アンダーバランス掘削に適用可能なシミュレーションソフトウェアを開発中である。

開発を要するシミュレーションプログラムの代表的なものに、トルク & ドラグプログラムがある。一般的に、アンダーバランス掘削におけるトルクおよびドラグの値は、通常のオーバーバランス掘削での値より大きいといわれている。

4) 地表機器の能力限界

アンダーバランス掘削時の差圧は、実質的に地表機器の圧力限界によって制限される。特に、これに影響を及ぼすものはセパレーターである。通常、セパレーターの圧力限界は 200~250 psi (14~18 ksc) であり、最近開発された高圧仕様のセパレーターでも最大圧力 500 psi (35 ksc) にすぎない。仮に、これを超える圧力が必要とされるならば、カスタムメイドのセパレーターを製造しなければならない。

5) エロージョン

アンダーバランス掘削では、ガスを送入（混入）したり、地層内からガスの流入が起こるために、オーバーバランス掘削よりも掘削流体の流速は速くなる。したがって、ドリルストリングスに対するエロージョンの危険性が増す。さらに、カッティングスやソリッド分を、RBOP からセパレーターに至るまで、限られた径の循環経路内で取り扱う必要が生じてくるため、リターン経路においてもエロージョンが問題となる。

6) 腐食

掘削流体として、たとえ少量であっても空気、天然ガス、排気ガスを使用する場合には、腐食が重要な問題となる。また、地層から流入してくる流体のドリルストリ

ングスおよび地表機器に対する腐食性も、十分に把握しておく必要がある。

7) 疲 労

掘削流体中の気体量が多くなれば、循環時のドリルストリングスのバイブレーションが増大する。このバイブレーションがドリルストリングスの疲労に、どのような影響を及ぼすか解明される必要がある。

8. おわりに

アンダーバランス掘削は世界中のあらゆる地域とあらゆる地層において有効な掘削方法であるというわけではないので、アンダーバランス掘削技術を導入しようとするならば、事前に十分な検討を加える必要がある。レザバーが枯渇している場合や、逸泥が大きな問題になる場合においては、有効な技術であるといえるが、生産性の

改善を目的とするならば、カナダにおける 500 本以上の適用のうち、成功したのは約半数であるという事実を認識しておく必要がある。失敗に終わった理由は、以下の 3 点にまとめられる。

- 1) レザバー性状が悪く適用に不向きであった。
- 2) アンダーバランス状態を 100% 維持できなかった。
- 3) 災害対策の不徹底。

しかし、これらは十分な事前スタディ、適切な計画立案・実行によって解消できる問題であり、本技術について悲観する必要は全くない。

アンダーバランス掘削技術は、他のどの技術もそうであったように、現在はまだ開発途上の技術であり、解決すべき課題は多くあるが、大油田の発見が困難になってきている折、将来の発展性を秘めている技術であり、今後の推移を注意深く見守っていく必要がある。