解 説

Deepwater Completions Workshop の参加報告

— 近年の技術動向と適用事例について —^{*}

古 谷 昭 人^{**}

(Received July 25, 2005 ; accepted September 2, 2005)

Deepwater Completions Workshop by Drilling Training Alliance

Akito Furutani

Abstract : DTA (Drilling Training Alliance) in Houston, USA owned by Chevron and BP started to hold Deepwater Completions Workshop in July 2003. The Workshop includes lectures and discussions in all aspects regarding deepwater completion technologies and operations. In this report, some topics from the Workshop are reported and discussed.

Key words : Deepwater, Completion, Workover

1. は じ め に

Chevron 社と BP 社が共同所有している米国テキサス州ヒューストンの教育施設 Drilling Training Alliance (DTA) にて、平成 15 年 7 月以降定期的に開催されている題記スクール「Deepwater Completions Workshop (大水深仕上げワークショップ)」の第 1 回目に参加した。受講者は総勢 22 名で、うち 17 名が Chevron 社および BP 社の関係者であった。米国 MMS (Minerals Management Service) から今後の大水深仕上げ作業に関する規制の研究という目的で 2 名の参加があった。受講者の多くは Completion Engineer という肩書きであり、その他は新技術開発担当者などであった。

スクールは 5 日間で基本的に講義のみであり、講義項目ごとに異なる講師が一日に 2 ~ 3 人交替で担当した。講師はほとんどが Chevron 社と BP 社の職員で、外部講

師は MI 社 (仕上げ流体) と FMC 社 (サブシーツリー) のみであった。

講義項目および各項目の概要は以下に示すとおりであり、最新の技術動向やフィールド適用事例などの解説も含まれており、非常に興味深い情報が得られた。

① 計画策定

- ・プロジェクトチーム体制
- ・リスクマネジメント
- ・リグ位置保持問題
- ・圧力バリアの考え方
- ・ウェルコントロール
- ・ロジスティクス、資機材ハンドリング

② ライザーシステム

- ・システムのタイプ
- ・ライザー挙動解析
- ・各機器の設計基準
- ・設置・操業
- ・維持・点検

③ フローアシュアランス

- ・ハイドレート
- ・ワックス
- ・アスファルト
- ・スケール

^{*}平成 17 年 6 月 1 日、平成 17 年度石油技術協会春季講演会作井部門シンポジウム「改修と仕上げ技術～坑井の健全性確立への取り組み～」で講演 This paper was presented at the 2005 JAPT Drilling Symposium entitled “Workover and well completion technologies ~ The current and historical approach for trouble-free well completion “ held in Tokyo, Japan, June 1, 2005.

^{**}日本海洋掘削㈱ Japan Drilling Co., Ltd.

- ④ 人工採油
 - ・流体性状と仕上げ設計
 - ・流体の三相状態（地表）
 - ・流体の三相状態（坑内）
 - ・地表設備設計
 - ・システムの選択
- ⑤ チューピング
 - ・腐食性
 - ・VIT（Vacuum Insulated Tubing）
 - ・コネクション
 - ・アニュラス圧力上昇
- ⑥ サブシーツリー
 - ・水平／垂直ツリー
 - ・ウェルヘッドシステムとの関係
 - ・コントロールシステム
 - ・フローラインの接続
 - ・材質
- ⑦ コントロールシステム
 - ・コントロールシステムの形式
 - ・セーフティシステム
 - ・SCSSV（Surface Controlled Subsea Safety Valve）
 - ・コントロールライン
- ⑧ 仕上げ流体
 - ・掘削流体の置換
 - ・仕上げ流体の選択
 - ・脱水コントロール
 - ・パッカー流体
- ⑨ サンドフェイス
 - ・ウェルボアクリーンアウト
 - ・パーフォレーション
 - ・仕上げ方式
 - ・操業
- ⑩ 生産操業
 - ・カンパニーフィロソフィ
 - ・流量や機材の要求仕様
 - ・操業上の制限
 - ・操業要領，経験
- ⑪ インテリジェントウェル
 - ・定義
 - ・適用
 - ・技術レベル
 - ・評価
- ⑫ インターベンション
 - ・インターベンションの要求
 - ・人的資源，経験
 - ・資機材調達

- ・リグ／サービス船
- ・作業要領

本稿では，上記講義内容のなかから最新の技術動向やフィールド適用事例などで興味深いものをいくつか取り上げて報告する。

2. 計 画 策 定

「Planning」と題された最初のセッションは総括的な内容を含み，最も興味ある部分であった。

2.1 プロジェクトチーム・プロジェクトマネジメント

大水深仕上げは，大水深掘削など最近の先端技術・オペレーションと同じく，多種の技術範囲を含む分野であり，一人の監督者で全ての分野を把握することは不可能である。全分野を把握するのではなく，各分野間の調整能力が大きく求められる。非常に複雑な事業で見落としが懸念されることから，第3者によるピアレビューの有用性が認識されている。

また，事業の進め方としてオペレーショナルモードよりもプロジェクトモードによるということが強調されていた。ちなみにBP社はCVP（Capital Value Process），Chevron社はCPDEP（Project Development & Execution Process）というプロジェクトマネジメントシステムを持ち，それに基づいて運用している。

その他には，義務・責任・指揮系統の明確化や作業効率・安全性向上の努力が求められる。具体的には，アンビリカルチューピングへのバンドルのような仕上げに関する特殊作業の効率性・安全性を高めるために，海洋での作業に先立ち，サービスベンダーの陸上設備を利用して船上作業のリハーサルを行うことなどがある（図1）。

図1 仕上げに関する特殊作業（アンビリカルバンドル作業）

2.2 リスクマネジメント

リスクマネジメントとは、良く目にするようなリスクマトリクスを用いる方法などによってリスクをどのように評価して対処するかというプロセスである。それには会社ごとの HSE (Health, Safety and Environment) フィロソフィが大きく影響する。すなわちリスクを許容しない (Zero Tolerance) のか、それともある程度は許容するのか (LARP: Low As Reasonably Practical) という思想に左右される。

リスクマネジメントを行うためには、リスクの定量的な評価が必要であり、元になる実績作業データは多ければ多いほど好ましい。そのため一社単独でなく、JIP (Joint Industrial Project) によるデータ蓄積が望まれる。

また、フォーマルなリスク分析のために、以下のような分析会議がよく行われる。

- Well flowback HAZID
- Production test facilities design HAZOP
- Production test facilities operations HAZOP
- Crude oil handling system design HAZOP
- Crude oil offloading operations HAZOP
- Well foundation and riser design analysis
- BOP Control system FMECA
- Dual activity planning meeting
- Dual activity HAZID
- Dual riser interference modeling
- Completion operations procedure internal review
- Completion procedure peer assist
- Tree landing string analysis
- Dynamic positioning completion operations quantitative risk analysis
- Review of vender equipment operating procedures
- Deepwater subsea test tree control system FMECA
- Subsea system operations HAZOP
- Subsea procedure peer assist
- Underbalanced perforation HAZID

2.3 リグ位置保持問題

リグ位置の許容範囲 (ワッチサークル) は掘削中よりも仕上げ中が小さくなる。それはサブシー BOP 内に設置する SSTT (Subsea Test Tree) などの存在のためである (図 2)。一般にリグ位置保持の喪失などによるライザー緊急離脱時には、SSTT 切離しの後にライザーを離脱すると理解されている。しかし会社によっては、SSTT 切離し操作は非緊急時 (通常離脱時) のみとし、緊急時には SSTT をシアラムにより切断してライザー切離しを優先するというポリシーを持つ場合もある。

このようにパイプシアは最終手段ではあるが、緊急

図 2 SSTT (Subsea Test Tree) がランディングした状態のサブシー BOP スタック

図 3 シアラムにより切断された SSTT (Subsea Test Tree) のシアサブ部分

時対応能力を制限するものであるため、BOP のパイプシアリング能力は重要な評価要素である。一方、パイプシアによって SSTT の油圧作動液ラインが潰れてプラグ状態になり、油圧の低下により作動するはずのフェールセーフシステムが働かないケースがある (図 3)。また、ライザー離脱後の再接続時には、長時間の放置によって坑内のガスが上昇し、坑口圧が上昇していることが多く

注意が必要である。

大水深における位置保持には、ダイナミックポジショニングとアンカー係留の選択肢があるが、本質的にはアンカー係留が信頼性は高い。大水深用アンカー係留には種々のレベルがあり、通常のカテナリ係留だと約1,500 mまで、合成繊維ロープなどの使用により約2,000 mまで、トートレグ（直線的な係留索の展張）だと約2,500 mまでの係留が可能といわれている。アンカー自体にも通常のドラッグアンカーのほかパイルアンカー、サクションパイル、VLA（Vertical Loaded Anchor）やアンカーと係留索の Pre-laying という選択肢がある。

2.4 圧力バリアの考え方

仕上げ時の圧力バリアの構成は、掘削時よりも複雑になる傾向がある。すなわち、サブシーツリーの形式（垂直型/水平型）、仕上げ作業進捗につれて圧力バリアの構成が変化する点、法規制上二重の圧力バリアが要求されるケースがあることなどのためである。圧力バリアを構成する要素についても議論がある。流体コラム、ケーシング、BOPやサブシーツリーのゲートバルブなどについては問題無く圧力バリアとして認められるが、SCSSV（Surface Controlled Subsurface Safety Valve）については議論がある。SCSSVは仕様上わずかな漏洩は許容されているケースがあり、会社によって圧力バリアと見なすかどうかについて考え方が異なっている。また、一連の仕上げ作業の中でパーフォレーションを実施するタイミングによっても圧力バリアの構成は違ってくる。

その他に留意すべきリスクとしては、BHAやパーフォレーションガンなどBOPのシアラムでシアできないツールのBOP通過時、BOPの取り外し作業時、サブシーツリーの袖バルブなどの水中落下物による損傷などが挙げられる。

2.5 ウェルコントロール

大水深仕上げに関連するウェルコントロール関係の留意点としては以下のような点が挙げられる。

大水深では掘削中でもライザーマージンの確保は困難であり、ライザー離脱時は水頭圧不足分をBOPによる圧力のトラップで補うという考え方を採る。しかし、BOPで密閉しても時間とともに坑底圧は地層圧と釣り合い、ガスが坑内に侵入して上昇し、再進入時にはガスが坑口に存在することが考えられるため、十分な注意が必要である。

BOPの密閉性の面では、チュービングにアンピリカルが沿わされているとシールが得にくいこと、チュービングハンガーランディング作業中はBOPを閉められないことなどの問題がある。

また、一般に坑内がクリアな仕上げ流体であるためにガスの上昇速度が通常よりも速いことに注意が必要である。

2.6 ロジスティクス

大水深のために高仕様なリグ、ボート、ROV（Remotely-Operated Vehicle）などのアベイラビリティに留意が必要であり、アベイラビリティの注意深い監視や他のオペレータとのシェアを検討する必要がある。

船上作業では、各種の坑内ツールが長尺となるため、そのハンドリングやデッキスペース・レイアウトをあらかじめ検討しておく必要がある。また、掘削流体と仕上げ関連流体の貯蔵のためのリグの流体貯蔵量が問題となり、その制限によって、複数坑井仕上げの場合、掘削・仕上げを連続するか、バッチ作業とするかの選択に影響する。

大水深仕上げ作業には、多数の各種サービス人員が乗船するためにリグの居住区容量も問題になる。人員計画を考える際には気象海象により人員交替が滞ることもあらかじめ考慮しておく必要がある。

3. フローアシュアランス

3.1 ハイドレート

生産停止によりチュービング内の温度がハイドレート生成領域に下がるまでの時間のことをクールダウンタイムと呼ぶ。クールダウンタイムは、図4のように海底下（坑内）より水中部分（ライザー内）のほうが短い。海底下では生産中の生産流体の熱が地層に蓄えられるために温度低下が遅く、水中部分はライザーが海水と接しているために速く熱を奪われるためである。

一般にハイドレート生成防止のために断熱パイプの使用を考えるが、各種の断熱パイプの中でもVIT（Vacuum Insulated Tubing）が最も断熱性が高い。VITの使用により生産中の生産流体の温度は上がるが、それと同時にアニュラス流体の温度上昇を防ぐ働きを持つ。VITの使用はアニュラス温度上昇によるアニュラス圧力上昇を防ぐことが主目的ともいわれる。一方、逆に海底下の部分のクールダウンタイムが短くなってしまうこともあり、注意が必要である。

3.2 ワックス、アスファルト、スケール

ワックス、アスファルト、スケール（図5）の対策としては温度管理、機械的対策、科学的対策、その他の新規方法がある。

温度管理による対策としては、断熱性のあるパッカー流体、VIT、PIP（Pipe In Pipe）、電磁誘導加熱などがある。機械的排除による対策としては、ワイヤラインやピグによる排除がある。化学的対策での留意点としてはインヒ

図4 大水深坑井での生産停止後のチュービング内温度変化

ピタ相互間のコンパチビリティがある。その他の新規対策には、パイプの表面処理、磁気による付着対策、アコースティックによる排除、化学的・電気的手段による内部発熱による排除などの方法が考えられている。

4. 人工採油 (Artificial Lift)

4.1 仕上げデザイン

大水深であることにより影響を受ける仕上げデザイン要素としては、まずケーシングサイズの制約がある。大水深のためケーシングサイズ、さらにチュービングサイズが制約される。対策としては、アニュラスから生産するリバースフローや複数の坑内ポンプを直列使用してポンプ圧力を上げる方法などがある。

大水深の未固結な貯留層での出砂対策としては、坑内ポンプの材質や仕様の最適化がなされる。

圧力バリアに関しては、法規制（2重バリアの要求）によって、ガスリフトやリバースフロー時の圧力バリアの考え方が問題となる。

4.2 人工採油方法の選択

従来は、ガスリフトが海洋での人工採油方法の標準的選択肢であった。しかし、近年は海洋でも ESP (Electric Submersible Pump) の適用が増えている。その高ポン

図5 ワックス、アスファルト、スケールによる問題

プレートが海洋油田の稼働条件に適しているためである。大水深の海底坑口井に適用する場合の問題点は、坑口におけるケーブルの接続部であろう。HSP (Hydraulic Submersible Pump) という選択肢もあるが、意外に船上に広いデッキスペースが必要であり、ポンプレートが低いことが欠点である。

5. チューピングデザイン

チューピングデザインに関して、大水深に特徴的なものは、VIT (Vacuum Insulated Tubing) などの断熱パイプの使用であろう。その使用目的は、先に述べたようにフローアシユアランス(チューピング内の保温)とアニュラス圧力上昇防止(アニュラスの温度上昇防止)の2つがある。一方、問題点としてはジョイント部における温度の不均一性や熱膨張も併せた複雑な機械的特性の問題が挙げられる。

6. サブシーツリー

海底仕上げのためのサブシーツリーは、Vertical Tree, Horizontal Tree に分類され、それぞれ設置・改修作業性などに関し特徴を持つ(図6)。大水深での仕上げ費用の特徴は、設備費よりも設置費の影響が大きいことである。サブシーツリーのタイプの選択は、それら総合的な生涯費用の評価により判断される。設置にかかる作業時間が大きなインパクトを占めることから、デュアルアクティビティリグの効果は大きい。大水深の高コスト作業では必要な作業時間はコンピュータプログラムによりモ

デリングされることがある。

サブシーツリーに関連する機器で大水深に特有の能力を要求される機器としてウェルヘッドシステムがある。大きな外力と軟弱な海底地質に対処するために、高強度大型化、肉厚化、30" (36") 低圧ハウジングと20" 高圧ハウジングのリジッドな接続などの機能を持つことになる。また、作業時間短縮のためのトリップセービング、マルチファンクションツールなどがある。例えば、ROV による TA Cap (仮廃坑キャップ) の設置、掘削編成によるウェアブッシング回収などの機能がある。

サブシーツリーによる海底仕上げにおけるもう1つの重要要素は、ツリー間の接続 (Flowline Tie-in System) である。サプライヤー間の規格統一、フレキシブル/ハードパイプの選択、断熱処理などが懸案事項となっている。

7. コントロール/セーフティシステム

コントロールシステムの選択肢には、掘削リグのサブシー BOP と同じく、ダイレクトハイドロリック、パイロットハイドロリック、EH マルチプレックスなどがある。それらの選択における評価項目には、信頼性、坑井数(設置費用)、フィールドレイアウト、ホストプラットフォームの位置、水深、ファンクション/モニタ項目数、プラットフォームのデッキスペースなどがある。

8. インテリジェントウェル

インテリジェントウェルコンプリーション (IWC) やスマートウェルは、良く使われる言葉であるが、明確な

図6 垂直型サブシーツリー (左) と水平型サブシーツリー (右)

定義や分類法は存在しない。今後クラシフィケーションシステムの整備が必要であると考えられている。一般には、IWC とはダウンホールフローコントロールバルブかダウンホールセンサーを持つことであると考えられている（図7）。

IWC の目的・効果としては、坑井改修費の削減、生産促進、操業費削減、レザバーマネジメント向上、水・ガス付き緩和、クロスフローやコミングルの制御、回収率最適化、ビルドアップテストなどの実施、選択的生産・圧入、マルチラテラル井からの生産制御などが挙げられる。

IWC の費用は、一般に一生産層あたり \$0.5 ～ 1.0MM であり、信頼性も向上してきており、高くても信頼性が低いという当初の消極的姿勢は変わりつつある。

IWC の要素技術としてのモニタリングは、ウェルボアモニタリングとレザバーマニタリングに分けられる。ウェルボアモニタリングのモニタ項目には、温度、圧力、流量、水付きなどがあり、レザバーマニタリングには微小地震波、比抵抗、クロスウェルトモグラフィなどがある。坑内センサーに関する将来の開発動向には、サブシー光ケーブルのポンプダウンシステム、光ケーブルの水中接続、光ケーブルによる DPS（Distributed Pressure Sensing）などの光ケーブルによる坑井制御、各種データ伝送システムなどがある。

生産制御のための機器としては、ICV（Interval Control Valve）として、Sliding Sleeve, Rotary Sliding Sleeve, Need-

le Valve などのタイプがある。油圧のほか、電気駆動のもの、On / off タイプから無段階可変開閉機能を持つものまである。

生産最適化とは、モニターデータを分析し生産を最適化するために、ICV 操作データを得ることであり、リアルタイムのデータを用いてレザバフローの最適化が行われる。

9. ウェルインターベンション

大水深でのウェルインターベンションに必要な要素（Intervention Readiness を構成する要素）として、以下の5項目が挙げられている。

第1にインターベンションが必要となるケースをモデリングして予知すること。第2に人的資源 / スキルの調達。第3に必要な資機材の調達、第4にリグ、支援船、ROV 機材などの調達、第5に作業実施要領であり、それには HSE システム、カンパニーポリシー、法規・基準などが含まれる。

10. ま と め

「大水深仕上げ」は、決して新しい技術分野ではないが、近年、定着・拡張しつつある分野である。それは本「Deepwater Completions Workshop」が開催され始めたことから理解できる。しかし未だ大水深仕上げに関する特段の基準・規則などはできていない。

大水深仕上げ技術の特徴としては、坑内技術だけでな

図7 インテリジェントウェルコンプリーション（IWC）の例

くサブシー技術の比重が高いこと、操業コストが高いため作業時間の短縮が重要であること、改修作業費用も高く改修の削減が重要であること、フローアシュアランス、温度の管理が重要であることなどがある。一方、大水深仕上げに関し十分な知識・経験を持つ人的資源が世界的に不足していることも挙げられている。

謝 辞

なお、このワークショップへの参加は、メタンハイドレート資源開発研究（MH21）の平成 15 年度研究課題「フェーズ 2 海洋産出試験準備」における技術動向調査の一環として行ったもので、本シンポジウムでの発表を許可していただいた経済産業省および MH21 コンソーシアムの関係各位に深くお礼申し上げます。