講 演
 Lecture

勇払一大深度フラクチャー貯留層開発へのチャレンジ*

平 田 実 雄**

(Received July 1, 2009 ; accepted September 4, 2009)

Yufutsu-Challenge to development of the deep fracture reservoir

Atsuo Hirata

Abstract : About 20 years have been passed since Yufutsu Oil & Gas Field was discovered in 1988. After the first stage development until 1997, total 11 wells were drilled and Yufutsu Field has been producing oil and gas, due to several problematic producers and continuous rise of local demand for natural gas, however, JAPEX resumed the second stage development from the well "Numanohata SK-6D" in 2005 and total 6 wells have been drilled so far.

At the first development stage, JAPEX encountered numbers of difficulties arising from formation properties, pressure and reservoir characteristics and overcame some, however there has been still existing some of these difficulties. At the second stage development, from new standpoint of well integrity which focuses on total well life and much stricter well conditions, cutting edge technologies and concepts have been applied in order to conquer these remaining difficulties and eventually achieved considerable results that include not only drilling but also both G & G and production phases.

This paper addresses the basic direction of these achievements and further concerns for the development of the field.

Keywords : Yufutsu Oil & Gas Field, well integrity, new technologies and concept for development

1. はじめに

勇払ガス田の開発が始まって約 20 年が経ち、第 2 期ともいうべき平成 17 年の沼ノ端 SK-6D 掘削以降、勇払地域においては 6 坑が連続掘削されている。ここでは、沼ノ端 SK-6D 以降採用してきた新しい技術、コンセプトを、①掘削作業上、②生産性改善・回収率アップ、③ロケーション選定の精度アップ、といった観点から紹介する。

2. 勇払坑井の難しさ

まず、これまでの勇払開発の歩みの中で掘削上の困難に対して数々の対策が採られ、多くのものが解決されてきたが、いまなお残る問題点について以下にまとめる (図 1)。

2.1 20"ケーシングセットまで

第 4 系 (萌別層) の未固結な礫層では崩壊を伴った大逸泥が起きるため、高濃度ベントナイト泥水を用いて厚い泥壁で崩壊と逸泥を抑えながらの掘進となる。そのため崩壊による抑留の危険とともに、ケーシングセット後の 1st ステージセメンチングでは、厚い泥壁と、長時間滞留によりゲル化した泥水がセメントの置換効率を悪くし、シュー

スクリューを行わなければ次セクション掘削に必要なシュー強度が確保できない。また、2nd ステージセメンチングでは、上部にある水層とのセパレーションのため、上記逸泥層の上からセメントを立ち上げるデザインを採用しており、セメンチング中の逸泥が問題となる。

2.2 13-3/8"ケーシングセットまで

滝ノ上層中に存在する高圧層のため高泥水比重が必要となり、上記シュースクイズを行う要因の 1 つともなっている。また、アニュラーガスフロー対策を施したセメンチングも必要である。WBM (Water Base Mud) 使用時には崩壊や張り付き、ハイドロリクス不足も大きな問題であったが、SBM (Synthetic Base Mud) の使用によりほぼ解消された。掘進率は PDC の使用によりかなり改善されているが、まだ一部で低掘進率区間があることが課題として残っている。

2.3 12-1/4"坑

泥岩層の崩壊、夾炭層の崩壊と差圧抑留が大きな問題であったが、これらも SBM の使用によりかなり改善され、坑壁安定性が向上した。夾炭層の低掘進率も課題の 1 つである。

2.4 8-1/2"坑

礫岩、花崗岩共に、低掘進率、崩壊、逸泥、花崗岩でのビットのゲージ落ちなどが問題点である。リザーバー区間であるため、あまり強く逸泥を抑えるとフォーメーション

*平成 21 年 6 月 3 日、平成 21 年度石油技術協会春季講演会井部門シンポジウム「掘削技術の現状と課題」で講演 This paper was presented at the 2009 JAPT Drilling Symposium entitled "Current status and challenges in drilling technologies" held in Tokyo, Japan, June 3, 2009.

**石油資源開発株式会社 Japan Petroleum Exploration Co., Ltd.

図1 勇払坑井の克服すべき課題

ダメージとなるリスクがある。

2.5 ウェルヘッド、セメントの健全性

掘削後の問題となるが、これまでも幾つかの坑井において地層圧が地表まで導通していることが確認されている。坑口装置でのリークはまだ認められていないが、セメンチングしたセメントの一部がシール性を失っていると判断される。勇払エリアにある生産井は、高温高压化での長期安定生産が求められるため、ウェルヘッドにもより高い信頼性が求められる。また、生産時の温度上昇によるセメントの破壊が原因と考えられるウェルヘッドの浮き上がりも問題となっていた。

3. 新しい技術、コンセプトの導入

3.1 掘削作業上の試み

3.1.1 坑井の健全性向上

まず、坑井の健全性に関する改善としては、ウェルヘッドのシール機構をエラストマータイプから、メタルtoメタルシール（マンドレルタイプ）へ変更したことが挙げられる。これはシールの高温高压下での耐久性、および信頼性の向上を目指したものである。これまでもいくつかの生産井においてセメントからのリークと思われる外圧の上昇が見られており、高温高压下での長期安定生産はもちろん、ウェルヘッド内で圧力の導通が起き、坑井管理や改修などが困難になることを防ぐことが期待できる。セメンチング中に管動できない、ハンガーネックシール部分の差

圧が制限されるといった制約はあるが、これまでのところシール性に関する問題は発生していない。

セメンチングデザインの改善としては、掘削期間だけでなく、その後に続く生産期間や、酸処理などのウェルライフを通した温度・圧力状況を考慮し、より安全性を高めたデザインを導入した。これまでのデザインでは、生産中に外圧が上昇し、温度上昇やケーシングの伸縮・膨張などにより、セメントがシール性を失い地層圧がケーシング管内に導通したと考えられるケースが幾つか見られている。そこで、坑井の代表的な環境下においてセメントに掛かる応力をシミュレーターを用いて検証し、それらに対して健全性を確保できるデザインを採用した。同時に、坑口の浮き上がり現象も問題となっていたため、それを抑えることも考慮した（図2）。以下が主な改善のポイントとなる。

- ・低比重セメントの強度を高めるため、従来の液体添加剤から低比重骨材を用いたセメントデザインを採用した。
- ・セメントのコラム長を調節し、①圧力がトラップされる区間を作らない、②坑口の浮き上がりを抑えるデザインとした。
- ・リザーバー区間とのセパレーションをより確実にするため、弾力性と膨張性を有するセメントを採用した。

20"ケーシング・セメンチング手法の改善としては、セメンチング時に管動できるように降下機材に工夫を加えた。大きな変更点は、ロングエレベーターリンクを採用し、

図2 セメンチングデザイン（Well Life を考慮）

図 3 20" CSG 管動

図 4 SBT 実績

インナーstringを下げた状態でケーシングエレベーターごと吊り上げられるようにしたことである。それに伴い、インナーstringをTDSに接続できるようストロークジョイントの採用と、プラグドロッピングヘッドの改良も行っている（図3）。同時にこのセクションで使用している高濃度ベントナイト泥水による、厚い泥壁、坑壁付近の流動性の悪化、泥水とセメントのコンタミの影響を抑えるため、掘止め後のボトム区間へのポリマー泥水のスポット、ケーシング降下後の低粘性ピルのフラッシュによる坑底周辺の洗浄も実施している。

これまでもシューボンドの改善のため、シュータイプの変更やケーシング降下後の管動、スペーサー、スラリーの改良などを試してきたものの、必ず1回はシューへのスクイズセメンチングが必要だったが、セメンチング中の管動の導入によりスクイズ補強なしでのシューボンドの確保に初めて成功した（図4）。

3.1.2 作業性の向上

掘削作業時の作業性の改善としては、30"降下方法の変更が挙げられる。従来は、ケーシング上部に吊りピースを溶接し、ワイヤーとイコライジングシーブで吊って降下していたが、コネクションが規定トルクでは締め付けられないケースが何度か続き、調査の結果ツールジョイントに多少の歪みがあることが分った。原因としては、ツールジョイントの後に吊りピースを溶接していたため、熱によりツールジョイントが変形していたと考えられた。

この対応策として、①溶接の順番を変える（吊りピースを溶接した後、ツールジョイントを溶接）、②従来の吊りピースを使う降下方法自体を見直し、シングルジョイント/サイドドアエレベーター、ケーシングスリップなどを用いる一般的なケーシング降下方法を採用することを検討し、沼ノ端では②を採用した。

作業面では、1本足場における作業員の負担がやや大きいものの、全体的には大きな問題はなく、TDS（Top Drive System）のスイングが不要、FCT（Fill Up Circulation Tool）を使える、吊りピースの溶断がないことなどから作業時間の短縮にもつながった（図5）。また、ワイヤーを使わないため、ワイヤーの経年劣化を心配する必要がなく、吊具類の許容引張り荷重が大きくなるメリットもある。これはケーシング降下時に荷重が大きい時には、いったん張ったり、上げ下げしながら下げる時の余裕が増すため大きな魅力である。

今後は、1本足場の作業員の負担を減らす工夫（ダブルドアタイプのエレベーター採用など）を考え、さらに安全性・作業性の向上を目指したい。

3.1.3 坑壁安定性の改善・工程短縮—SBMの導入

SBMの使用は、あけぼのSK-4D以降5坑目となる。SBMの紹介、その効果の詳細については、すでに何度か報告されているため省略するが、ここでは1点、坑内状況の改善によって夾炭層でもPDC掘削が可能となり工程短縮につながったことについて報告する。

従来のWBMを使用している時から、幌内層ではPDC＋モーターで掘進率を稼いでおり、SBM使用後も1坑目は同様に夾炭層に入るまでPDCを使用し、その後インサートビットに交換したが、2坑目は幌内層が短かったこともありPDCでそのまま夾炭層も掘ってみたところ、予想

図 5 30" 降下時間実績

外にスムーズに掘進できることが確認された。これにより、従来なら夾炭層でインサートビット×10丁前後使用していたところをPDC×1丁+インサートビット×1丁程度ですみ、進捗率もこれまでの約2倍と大きな改善を見た。

また、SBMによって夾炭層の崩壊が抑えられ、よりゲージホールに近い坑井が掘れるようになったことで、セメンチング時の置換効率も改善され、夾炭層のガスの地上への導通リスクを抑えるだけでなく、9-5/8"ケーシング下部からのサイドトラック時に、夾炭層より低いリザーバーの地層圧に合わせて泥水比重を下げて掘進する際、夾炭層のガスがリークするリスクを下げることに役立っている。

3.1.3.1 SBM カッティングス処理方法の変遷

SBM 導入に係る問題点の1つに、カッティングスの処理がある。

SBMは単価が高く、カッティングスに付着しているSBM分が多いと、その分調泥剤コストが高むことと、カッティングスに含まれる油分＝SOC (Synthetic on Cutting) が5%以上だと、比較的安価な埋立て処分が使えず、高額な焼却処分にしなければならないことから、SBM開始当初からできるだけSOCを小さくすべく幾つかのカッティングス処理システムを試してきた。

1坑目と2坑目に試した装置、遠心分離式ドライヤーとバキューム式ドライヤーでは、資機材と人員が多過ぎる、多少でもLCMやセメントが混じると処理できない、装置の能力不足でSOC<5%を達成できないといった問題から、回収できるSBMの価値とは全く見合わない費用が掛かった。そこで3坑目では、できるだけシンプル、低コストを目指し、一般的なシェーカー (Drying Shaker と呼称) 2台をザク溜めに設置し、いったん上段にあるリグのソリッドコントロールシステムのシェーカーで処理したカッティングスを再度下段のDrying Shakerで処理し、それに固化材を混ぜてSOCを5%以下とする方法を採用した。これによってシステムのランニングコストを抑え、カッティングスの焼却処分もほとんど不要となり、大幅にコストを下げることに成功した。

3.1.4 坑跡デザインの高度化

ここでは、①リザーバー区間をより長く掘削して、メガフラクチャーネットワークに遭遇する可能性を高める。②TVDをできるだけ浅く保って着水のリスクを抑えることを目的とした高傾斜化、マルチレグ・サイドトラックへ向けた試みについて述べる。

3.1.4.1 RST (Rotary Steerable Tool), 高トルクモーターの採用

以前から12-1/4"坑での2ndキックオフについては、モーターのストール、スタビライザーのハングオフなどが激しく、かなり難しいことが分かっていたため、最初はBHI (Baker Hughes Inteq) のRSTを採用して同区間での2ndキックオフを試みた。結果として、1回目はRST下部にあるパッドのハングアップが激しいため使用を断念した。次にモーター編成を下げたがやはりストールが激しく、しばらく

ロータリー掘進したあと、再度2式目のRSTを下げ2ndキックオフを試みたところスムーズな増角に成功した。1回目の失敗については、地質由来 (柔らかく若干浸透性が高い+高比重) とツールの不調が考えられているが、明確な判断はできない。次の坑井でも同様にRSTを用い、1トリップにて2ndキックオフに成功し、さらに高傾斜な坑井の掘削に成功している。なお、現在のSBM環境下では、高価なRSTを使用しなくても、高トルクモーターで同様の坑跡コントロールを達成することが可能となっている。

3.1.4.2 マルチレグ・サイドトラック

ある坑井では、1本の井戸から期待する生産量が確保できなかった場合の生産量の増加を期待し、マルチレグによる生産が可能となるよう9-5/8"CSG下部からのサイドトラックシステムを準備した。ツールスはケーシング切削部の形状がきれいで、許容トルクが大きい先付けタイプのラッチカップリング (LC) を持っているシステムを採用した。LCは、9-5/8"ケーシング下部にバックアップを含めて2式セットしたが、管内のセメントを切削後、LCのクリーニングとラッチ・方位確認作業を行うためラッチ・キーを下げた際、どちらのLCに対しても1回ずつしかラッチできなかった。後日受領したメーカーからのレポートでは、機材の耐久性に問題があったことが原因と報告されている。

別の坑井では、排泥結果が不調だったため、実際にサイドトラックを実施した。その際使用したツールスは、先付けタイプではないホイップストックとケーシングミルが一体となったタイプである。選定の理由としては、実際に作業すると決まってから短期間で動員でき、1トリップでホイップストックセットからウィンドウカットまで可能なこと、ホイップストックのセット位置に制限が少ないことが挙げられる。CBLによるビハインドケーシングのセメント状況や夾炭層の出現深度を確認した後にキックオフポイントを決められることは、成功確率を上げる上で大きなメリットとなる。

実際のサイドトラック作業では、高圧夾炭層下部からのウィンドウカット (上に蹴り出し、減角する)、大深度の礫岩・花崗岩での方位・傾斜コントロールを行ったが、はじめは夾炭層の影響によるトリップガスがかなり出たものの次第に収まり、高トルクモーターとHWDPを多く使用した柔軟なBHAの採用により、元穴以上のROPと低トルクを実現した (図6)。

今後のさらなる高傾斜化 (≡水平掘り)、3D坑跡の実現可能性を検討するため、TAD (Torque & Drag) シミュレーションの精度向上の努力も行っている。

3.1.5 騒音対策

都市化する勇払エリアでの掘削作業で近年特に注意を払わなければならないものの1つに、周辺民家に対する騒音対策があり、それについて簡単に紹介する。

まず、専門業者とともにリグの騒音測定、騒音源の特定と騒音対策の検討を十分行い、それに基づいて大容量発電機、セメンチングポンプ、TDSパワーユニットなどの単

図 6 サイドトラック坑跡

体そのもので大きな騒音源となるものや、電気リグでは DW モーターを含めたドリルフロア、エンジンリグではエンジン全体などを吸音壁で覆う、比較的民家が近い場所では、敷地境界に防音壁を設置するなどの対策を実施することで、かなり騒音削減に効果を挙げている（図 7）。

3.2 生産性改善，生産率アップの試み

主に掘削後となるが、生産部門や技術研究所などと協力して行っている勇払開発に対する試み、検討項目としては以下が挙げられる。

3.2.1 生産性の改善

3.2.1.1 酸処理

主目的であるスキンドメージの除去はもちろん、低スキンではあるが生産性も低い坑井に対して、ステップレート圧入テストと酸処理を併用する試みも行っている。

3.2.1.2 フラクチャリング・ステップレート圧入テスト

この分野では、フラクチャリング・ポンプとタンクを大量に準備した、大規模な海水圧入によるせん断滑り型フラクチャリングによるフラクチャーネットワークの拡大の試みや、リグポンプで行える小規模のステップレート圧入テストによるフラクチャーネットワークの刺激・活性化、またいったん大逸泥したもの、LCM やバライトにより閉塞したと思われるメガフラクチャーに対する、高比重ブラインを用いたフラクチャーの再開口、およびクリーニングなどを行っている。

ここでは、高比重ブラインを用いたフラクチャーの再開口・クリーニング作業について紹介する。同作業は、TD 近くで発生した大逸泥箇所（＝メガフラクチャー）に対して用いられた。このフラクチャーは逸泥対策による LCM とバライトの沈殿によって、排泥時には埋没し、生産に寄与していないことが確認されたため、Coiled TBG (CT) を用いてクリーニング作業を実施したが、状況が改善されなかった。そこで、フラクチャーの開口する圧力勾配（ ± 1.53 sg）より重い高比重ブライン（ 1.80 sg）を用いた高圧圧入作業を実施し、選択的に深部にあるターゲットであるメガフラクチャーを開口・クリーニングさせることに成

図 7 騒音対策

図8 ヘビーブラインによる圧入

功した（図8）。

3.2.2 生産量・回収率アップ

3.2.2.1 回収率の高い生産スケジュール

以前より、リザーバーの物理的性状、各坑井の圧力変化と地層水の産出状況などからシミュレーションを用いたりリザーバー全体の将来的な生産予測を行い、各坑井の生産スケジュールを調整してできるだけ油ガスの回収率を高める努力が行われており、絶えず新しいデータに基づいて精度アップされている。

3.2.2.2 ガスサイクリング

夏場などの余剰生産能力を利用してガスを地下圧入することによる、コンデンセートの回収率アップを目指したガスサイクリングシステムの導入も、近い将来実現すべくタイミングを図っている段階である。

3.3 ロケーション選定の精度アップ

G & G 関連についても、まだ克服すべき課題は多く、3D サイズミックスの導入による勇払構造解釈の精度はかなり向上し、ほぼ予想した位置で目的の断層を掘り抜くことができるようになった一方、生産に寄与するフラクチャーネットワークにヒットすることは、いまだに大きな課題となっているのが現状である。フラクチャーの成因の検討、サイズ（メガ/メジャー/マイナー）、開口/閉塞、方向などの特徴で分類分けしてフラクチャーを精査し直すことでネットワークの発達に対する理解を深める努力と平行して、大局的にフラクチャーネットワークを把握する試みも行っている。1つは、生産シミュレーションの精度をさらにアップさせることによってネットワークの粗密、地域性・方向性を推測し、構造解釈と合わせて評価する作業で、もう1つは、ジオメカニカルシミュレーション—広域応力場、断層、摩擦係数との相互作用により、断層滑り、同滑りに伴う応力・歪場の2次的な乱れを評価するもので、開口/閉塞フラクチャーの予測に利用できる可能性がある。—と、構造解釈を有効に組み合わせてフラクチャーネットワークの広がり进行评估する試みである。後者は、まだ始まって間もない段階であるが、将来的にターゲット選定の有効なツールとなることが期待されている。

4. まとめ、今後の方向性

今後、勇払開発が進むべき方向性としては、まず、坑井の健全性をさらに高め、より安全・効率的な掘削を実現することが基本となる。その上で、成功確率のアップを目指し、ロケーション選定の考え方を整理・精度アップするとともに、坑跡デザインとしては、3Dや水平井に近い坑跡で着水を抑えながらリザーバー内での距離をさらに稼ぐことや、サイドトラックやマルチレグによって、1本の坑井から何本かの足を延ばして生産量の不足をカバーすることなどへ挑戦していきたい。それには、TADシミュレーションの活用などの他、より潤滑性のある泥水の検討や仕上げ方法の見直しなどの実際の掘削手段の改善も必要となる。

掘削後の生産性や回収率のアップについては、それぞれの坑井にあわせて酸処理やフラクチャリング（ステップレート圧入テスト）をデザインして活用していくことが求められる。また、各坑井の生産スケジュールを適切に組み合わせ、できるだけ水の生産量を抑えて油ガスの回収率を高めるとともに、早い段階でガスサイクリングシステムを軌道に乗せ、コンデンセートの回収率を高めることも求められる。

これらの勇払で培ったノウハウや技術力を、海外を含めた他のフィールドへ展開することによって、さらに新しい可能性を広げ、よりいっそう当社の技術力の向上につなげていくことを期待している。

引用文献

- 1) 寒河井正・青山榮享, 1998: 先進技術と新しい発想による北海道勇払の天然ガスおよびコンデンセートの開発, 石技誌, 63(2), 105-110.
- 2) 藤井 健・森谷信明, 1998: 勇払開発10年のあゆみ, 石技誌, 63(5), 369-375
- 3) 手塚和彦・玉川 哲也, 2004: 油ガス田におけるAE法によるフラクチャー計測の可能性, 石技誌, 69(6), 635-646.
- 4) 菅野 俊, 2005: 勇払油ガス田～あけぼの地区におけるスルーチュービング改修作業, 石技誌, 70(5), 417-425.
- 5) 渡邊則昭・平野伸夫・玉川哲也・手塚和彦・土屋範芳, 2006: 封圧下透水実験に基づいたき裂型油ガス貯留層の生産性予測に関する基礎的研究, 石技誌, 71(2), 217-226.
- 6) 今里昌幸, 2007: 国内初SBMの導入と使用実績, 石技誌, 72(5), 445-458.
- 7) 今里昌幸, 2009: 本邦初のSBM導入, 石技誌, 74(2), 135-143.