資 料

SPE・石油技術協会・石油公団による ATW 開催報告

— 業際的アプローチによる油ガス田開発 —

在原 典男*・登坂 博行**・星 一良***

難波 隆夫****・佐藤 光三*****

(ATW 運営委員会)

(Received August 25, 1998; accepted September 21, 1998)

Technical summary of SPE-JAPT-JNOC Applied Technology Workshop on
“Field development planning: multidisciplinary team approach”

Norio Arihara, Hiroyuki Tosaka, Kazuyoshi Hoshi, Takao Namba and Kozo Sato

Abstract: The SPE-JAPT-JNOC Applied Technology Workshop, held on 5-8 April 1998 in Chiba, was attended by 64 multidisciplinary professionals, representing 27 companies and 5 universities from 12 countries. This intense and focused two and a half days workshop provided an excellent opportunity for participants to share their experiences and ideas, both through presentation of case studies and subsequent discussions, and to practice a multidisciplinary team approach in syndicate sessions. Participants had indicated their expectations of workshop, confirming among others two key interests: reservoir characterization and subsurface uncertainties. Technical sessions were tailored to meet those expectations, including the goals and objectives of the SPE ATW. The technical agenda was arranged to cover key elements of technology for field development planning.

Key words: multidisciplinary team approach, field development planning, reservoir characterization, subsurface uncertainties, 3-D seismic, sequence stratigraphy, core-log correlation, geostatistical modeling, scale, management of uncertainty, life cycle of field development, multi-company team

1. はじめに

SPE (Society of Petroleum Engineers), 石油技術協会および石油公団共催による Applied Technology Workshop は、平成10年 4 月 5 日から 8 日の間、千葉市幕張の石油公団石油開発技術センターにおいて挙行された。参加者は表 1 のように 12 か国から 64 名、所属は 27 会社および 5 大学であった。ワークショップの実質的な討議は 2 日半であった。6 日と 7 日の両日は朝 8 時から夕刻 7 時まで、参加者の知識と経験に基づく質の高い油田実例の提示と意見交換がなされた。また、syndicate session では実油田のデータを用いて、実際にマルチ

* 早稲田大学理工学部 School of Science and Engineering, Waseda University, 石油技術協会会長

** 東京大学工学系研究科地球システム工学専攻
Department of Geosystem Engineering, Graduate School of Engineering, University of Tokyo

*** 石油資源開発(株)探鉱部 Exploration Department, Japan Petroleum Exploration Co., Ltd.

**** 石油公団石油開発技術センター Technology Research Center, Japan National Oil Corporation

***** 帝国石油(株)技術部 Engineering Department, Teikoku Oil Co., Ltd.

表1 ワークショップ参加者

(a) 国別参加者数	
Australia	5
Brunei	3
Indonesia	4
Japan	29
Malaysia	3
Oman	1
Saudi Arabia	4
UAE	5
UK	3
USA	3
Venezuela	2
Vietnam	2
Total	64
(b) 専門分野別参加者数	
Geophysics	5
Geology	12
Production & Facility	6
Reservoir Engineering	27
Reservoir Management	11
Others	3
Total	64

ディシプリナリー・チーム・アプローチ（業際のアプローチ）の演習がなされた。

会議に先立ち、参加者はワークショップに期待する成果として「油層キャラクタリゼーション」および「地下の不確定性（subsurface uncertainties）」の2つのキーワードを挙げており、それに沿った形で4セッションおよびパネルディスカッションが設定された。

以下にワークショップの成果を要約して報告する。

2. セッション1：油田発見・見積・評価 (discovery, evaluation and appraisal)

技術報告およびケースヒストリーの提示が行われ、特に油層キャラクタリゼーションについて以下のような技術的要素が強調された。

2.1 三次元地震探査

(1) サウジアラビアにおける例として、等走時（iso-chronal）手法による油層岩相分布図の作成が報告された。

(2) ブルネイのチャンピオン南東油田は成長断層を有し、断層の封鎖性（シール）の分析がマルチラテラルおよびスプリッター（splitter）坑井を導入する上で有効であった。このような新技術により、既存のプラット

フォームから油層内の新しい地層目標に到達することが可能になった。

(3) 衝上断層の分布図が坑井計画において重要な要素となったベネズエラの例が報告された。

(4) 震探データの振幅および極性分析は、油水界面の動きの監視に有効であった。

(5) 高精度震探データを得るには、三次元探査および最適設計が基礎となる。探査の評価とフローチャートの形で概要が示された。また、データ試験の手法、および速度分析などのデータ処理最適化について報告された。最近の新技術として、探鉱段階における高精度データ、深度の異なる目標のための可変長ストリーマーなどは、結果の改善につながるものである。その他の新技術としては、海底センサー（四次元震探）および震探船上におけるデータ解釈が挙げられる。

(6) 三次元地震探査の属性から信頼性のある岩石特性分布図を構築するには、さらに基礎的な実験と理論が必要である。

2.2 シーケンス層序

サウジアラビア、アブダビおよびチモール海の例として、シーケンス層序に基づく地質の枠組み（framework）が岩相分布図の構築のためのかぎとなることが示された。

2.3 フォーメーション・マイクロ・イメージング（FMI）検層

(1) チャンネル砂層の古流向（paleo-current）分析により、チモール海における油層内の砂層連続体（sand body）分布図が作成された。

(2) FMI ではフラクチャーは検出されず、坑井テストにより二重孔隙系が判別された例が、ジャワにおける溶脱を受けた貯留層において見られた。

(3) サウジアラビアの油田において、過去30年間にわたる生産期間中に判別されなかった複合（multiple）フラクチャーがFMIにより確認された。

2.4 コア分析

アブダビ沖における非均質性炭酸塩岩油層について、岩石タイプ定義の最適化により、現実的な三次元フローユニットモデルが構築された。薄板状研磨コアを用いて岩石記載を行い、8種の岩石粒子タイプから10種の岩相が見いだされ、さらに孔隙率と浸透率データに基づくフローゾーン指標FZI（flow zone indicator）から、6種の岩石タイプに分類された。層厚分布および海面変化曲線から、岩相と岩石タイプの分布図および主要層の浸透率分布図が構築された。

2.5 坑井テスト

評価井における坑井テストのストラテジーが開発井の

テストと対比して論じられた。開発井では生産性を最大にするために、最適な仕上げ位置と区間を選定することが坑井テストの主要な目的である。他方、評価井では、油層の広がり、確認や、水押し、強さ、縦方向浸透率、油層境界、坑井間の浸透率など、油層評価に必要な情報を得ることがテストの目的である。目的に従ってテストプログラムとコストの最適化を図るための戦略が討議された。

2.6 地質推計学による油層モデル化

地質推計学は従来の地質解釈のアプローチを排除するものではなく、必要なデータ量を減らすものでもない。また、地質推計学は作業時間や作業量を削減するものでもない。他方、地質推計学による油層モデル化により、地下の不確定性を減少させ、少なくとも不確定性の記述をより正しくすることが可能である。その結果、リスクの判定を向上させ、より現実的な埋蔵量予測をすることができる。

2.7 マルチディシプリナリー・チーム・アプローチ

(1) ジオサイエンティストとエンジニア間で目的が異なる場合がある。同様に、国有と民間石油会社間、コントラクターとサービス会社間でも異なる。基本的に重要なことは、すべてのチーム構成員にとって目的が明瞭であることである。

(2) チームの規模が大きくなるとよく機能しない。8名以下が望ましい。

(3) インドネシアのマージナル油田開発で実際によく機能した例として、操業会社と国有会社間のジョイントチームについて報告された。状況によって、タスクフォース、エリートグループ、プロジェクトチーム(single project team)、および地方・領域グループ(district/area group)の4種のチームの形が有効であるとされた。

3. セッション-2：油層キャラクタリゼーション

震探法、地質モデル化、コア・検層データの統合、流体・岩石特性分析、地質推計学、および油層シミュレーションのサブテーマを通じて、マルチディシプリナリー・アプローチに焦点が当てられた。油層キャラクタリゼーションには、地質堆積モデルを用いるアプローチ、坑井データのみを尊重する古典的地質推計学アプローチ、あるいは岩相記載も制約条件とするハイブリッドな地質推計学アプローチなどさまざまな形態がある。また、サブセッション名からも分かるように、油層キャラクタリゼーションはマイクロからメガスケールにわたる異種のスケールを扱うもので、スケールの差により次のように分類される。

(1) ミクロ・スケール

- ・岩石粒子の分類によるフローユニットの定義

(2) マクロ・スケール

- ・検層データの主成分分析による浸透率予測
- ・検層データの非パラメトリック回帰分析による浸透率予測
- ・特殊コア分析および一般コア分析による岩相組成の定義

(3) メガ・スケール

- ・極小分割モデルのための並列シミュレーション
- ・細グリッドから粗グリッドへのスケールアップ
- ・地質推計学による油層モデル化

(4) ギガ・スケール

- ・四次元震探による油層監視
 - ・油田規模のシミュレーションによる油層挙動予測
- 専門分野の違いにより、それぞれ扱うスケールが異なる。したがって、マルチディシプリナリー・アプローチには常にスケールの違いによる問題が付随する。例えば、コア浸透率と検層浸透率の相関のような比較的簡単な作業の場合でも、参加者間でスケールについての認識の違いがみられた。「専門分野 (discipline)」に加えて、「スケール」も多面的なもの (multi-faceted) として認識すべき要素である。

4. セッション-3：油田開発計画

まず、埋蔵量予測、油層計画 (subsurface planning)、および施設の選択に付随する不確定性・リスクを強調する形で、探鉱の成功から油の最初の生産に至る油田開発計画の概観が述べられた。特に、キーとなる要因について、世界の実例による説明がなされた。

再生 (reactivation) プロジェクトの例として、短期間に、評価、間掘り、廃坑、二次回収の開始、施設建設などを含む、異例な圧縮ライフサイクルのケースが紹介され、種々の専門分野の統合の重要性が強調された。

4.1 回収の最適化

回収率の最大化を図るには、油層内における置換プロセスの理解と設計が極めて重要である。日本における実例として、複雑な地層および流体挙動を示すガス田において、詳細なシミュレーションによって決定された坑井配置の成功例が示された。さらに、単一坑井からの水圧入によって回収率を向上させるためのシミュレーション結果が示された。

油田開発の最適化のケースヒストリーとして、詳細な油層キャラクタリゼーションに基づいてマルチラテラル坑井が設計された例が報告された。

4.2 坑井処理 (well intervention) に関する設計

生産井における水遮断問題にかかわる油層の記述と管理法について実例が示され、特にマルチディシプリナリーかつマルチカンパニー・チームの必要性が強調された。また、水平坑井における水浸入区間を判別するための最新の検層法について実例が示された。

4.3 施設の選択

油田開発計画のコンピュータシステムおよび大水深開発例の紹介と検討がなされた。また、限定した費用と時間内に開発された小規模なケーソン型生産施設の成功例が報告された。特に、その開発に伴う経済性、リスク、および波及効果についての検討結果が示された。

4.4 リスクの識別および不確定性の管理

地質および地質技術 (geotechnical) 面の不確定性に関して、坑井掘削前に行った評価と掘削後の実際の結果が示され、検討された。また、技術的および非技術的な不確定性の管理のための方法論について、油田開発ケーススタディが例示された。

5. セッション4: 技術の応用および革新

5.1 オフショア技術革新

東カリマンタン沖において実用化された新技術として、単孔 (monobore) 掘削、小規模油田開発のための SPS (subsea production system) 構造物、従来型のテンダーリグによる小水深掘削システムが紹介された。これらの技術は、3,000ft に達する大水深での試掘井に適用され、探鉱の経済性改善に貢献している。将来の大水深開発では、ミニタイプの TLP (tension leg platform) 坑口プラットフォームとテンダーリグによる方法も可能である。

新技術による生産監視システムの一環として、オフショア生産プラットフォームにおける耐出砂型 (sand-durable) の多相流メーターの導入の例が報告された。

6. パネルディスカッション: 成功につながるマルチディシプリナリー・アプローチ

マレーシア国有石油会社ペトロナス、ブリティッシュペトロリアム (BP)、およびジャバン石油開発の3人のパネリストがまずそれぞれの見解を述べ、油田開発ライフサイクルのあらゆる時点におけるマルチディシプリナリー・チーム・アプローチの重要性を強調した。

マルチディシプリナリー・チームの利点および弱点は次のように指摘された。

(1) プラス面

- ・全体としてよりよい解答につながる。
- ・専門分野の縦割りのな取り組みに比べて、繰り返し

作業が少ない。

- ・より大きな達成感が得られる。
- ・初心者にとって、より望ましい環境を提供する。

(2) 監視すべき点

- ・技能の低いメンバーは有効な連携の弱点となり、効率を低下させる。
- ・権威的なメンバーは要注意。
- ・経験年数上位の者が常に正しく、リーダーたるべきという慣習に引きずられること。
- ・データが一部の者に独占され、権力源となること。

(3) 他の留意すべき点

- ・関係者全員を会議に招く必要はない (例えば法律家を専門的な技術会議に招くべきではない)。
- ・チームの規模が大きくなれば効率が低下する。
- ・望ましいチーム規模は4ないし5名、最大8名。
- ・会議開始前に、基本的なルールを設定すること。

チームのワークプランおよび目的の設定に当たって、不確定要因の摘出とそれらの優先順位づけが必要であることなど、主要な問題点が提示された。特に、メンバー間のオープンな情報交換と意見交換、ならびに専門用語の共通の理解が必要である。

操業会社の参加者からの指摘として、個々の技術者の経験と技能レベルの違いと縦割り組織から生じる問題は石油産業に共通のもので、チームアプローチを困難にしている点が挙げられた。

マルチディシプリナリー・チーム・アプローチは、プロジェクトの初期段階での導入が困難な反面、最終的には効率の改善と、より最適な油田開発につながることが例示された。

7. 油田開発の模擬 (syndicate) 実習

演習の目的は、沖合い油田における開発後の再評価と、二次的な開発フィージビリティに関する要件の理解と認識である。このような目的に沿って、評価井の選定と必要なデータ測定、埋蔵量再評価や坑井仕上げなどに関する適正な油層計画、ならびに経済性検討について、マルチディシプリナリー・アプローチによる検討の実習となるように、ケーススタディ問題が準備された。対象はすでに経済限界まで生産が行われたチモール海のマージナルな実油田 Skua 油田である。水深は85mで、6本のライザーを持つ FPSO (floating production, storage and off-loading) を使って3坑井から5年間にわたり生産が行われた。究極回収量は2,020万 bbl (回収率約40%) である。

専門分野と経験のレベルを考慮して、約15名ずつの4シンジケート・グループに分けて演習を行い、各チーム

図1 1987年時点の Skua 油田構造解釈

図2 1988年時点の Skua 油田構造解釈

図3 1990年時点の Skua 油田構造解釈

図4 1992年時点の Skua 油田断面図

図5 ワークショップ会場前（休憩中）

図7 シンジケートワーク(1)

図6 パネルディスカッション

図8 シンジケートワーク(2)

は約5時間の作業で開発計画を作成し、結果をマネジメントサマリーの形で報告した。

演習の目的は次の2つの部分からなっている：

- ・既存の2坑井および二次元地震探査のデータ解釈（図1）に基づく最適な評価プログラムの策定
- ・第3坑井掘削後の解釈（図2）に基づく坑井計画（開発井の数、タイプおよび位置）および生産スキームからなる油層開発計画の作成

このため、油層挙動および坑井挙動の分析により、埋蔵量見積もりと生産予測を行った。これらの予測結果および別に与えられた開発費データを用いて経済評価が行われた。

各チームは15分程度にまとめて、それぞれの開発計画を発表した。各チームとも、実際に行われた評価井掘削（図3、図4）および開発（北部の小孤立構造を放棄し、主構造を3生産井によって開発する。ピークレートは25,000 bbl/day.）にほぼ一致した結果を得たが、考慮されなかった重要な点は、小規模なガスキャップのブローダウンによる生産スキームであった。

主要な結論は次の3点に要約される：

(1) 与えられたオーストラリア大陸棚におけるオフショア油田の場合、オーストラリア会計法の条件下で経済性が成り立つには、高生産性油層であって最小限2,000万 bblが必要である。

(2) オフショア油田の開発には三次元震探が必須である。リスクを最小化できるかどうかは別にして、評価井の数を最小限にし開発計画を最適化するために、三次元震探はできるだけ早期に実施する必要がある。

(3) ガスキャップが小さく ($m < 0.1$)、水押し強い油田の開発は、坑井仕上げをガス油界面付近にして、ガスキャップのブローダウン（早期にガスキャップガスを抜いてしまう方式）によって最適化することができる。

8. おわりに

本ワークショップは我が国で開催された初めての公式 SPE 国際会議となった。参加者全員、短時間の昼食時間と休憩のみで、精力的に議論と作業にあたった（図5～8）。海外からの参加者には、経験とセンスに大変秀でた方々がおり、日本人参加者に強い印象を残したようである。難しいテーマであり、運営委員一同、不慣れな点が多かったと思うが、幸いにも終了後のアンケートでは、内容・運営について高く評価していただいた。ATW 準備委員会委員をはじめとした関係各位に深謝の意を表する。

SI 単位換算係数

$$\begin{array}{ll} \text{ft} \times 3.048^* & \text{E}-01 = \text{m} \\ \text{bbl} \times 1.589874 & \text{E}-01 = \text{m}^3 \end{array}$$

* は正確な値