資 料

石油公団石油開発技術センターの掘削
関連研究プロジェクトについて*

畠山 孝**・米澤 哲夫・鈴木 孔***

(Received June 12, 1998; accepted July 13, 1998)

Recent drilling project in Technology Research Center of
Japan National Oil Corporation

Takashi Hatakeyama, Tetsuo Yonezawa and Akira Suzuki

Abstract: Drilling Technology in the oil industry is the technology required to drill wells for exploration and production of oil and gas resources. JNOC-TRC's Drilling and Completion Lab. is engaged in research and development (R & D) with three main goals: drilling cost reduction, drilling in challenging frontiers and environmental safety in drilling. This R & D effort also covers the well completion technology needed to produce oil and gas from the wells drilled. R & D has been carried out to date under the three pillars of basic research, large-scale research and specific (applied) research. Recent trends in R & D including horizontal well technology, slim-hole drilling technology and methane hydrate technology will be introduced here.

Key words: horizontal well, slim-hole, methane hydrate

1. はじめに

石油公団石油開発技術センターは、昭和47年7月に「石油及び可燃性天然ガス資源開発審議会」の答申に基づき、当時の外国石油開発会社と我が国の石油開発会社との間の技術的な格差を早急に解消するために、石油開

発関連技術の開発・導入・向上、石油開発関連企業への技術サービス、石油開発技術者の養成などを集中的、総合的に行うことを目的に設立された。

その後、昭和60年の「石油開発技術研究推進委員会」の答申に沿って、我が国の石油開発技術水準の一層の向上を目指して、昭和63年には石油開発技術センターの新施設を現在の千葉県千葉市に建設し、さらに平成4年には、研究開発成果の実証試験ほかを行う目的で、新潟県柏崎市にテストフィールドを完成するなど、研究開発業務の充実を図ってきた。

さらに平成7年度には、石油開発業界、関連業界、大学、国立研究機関の学識経験者を委員とする「石油・天然ガス開発技術委員会」を新たに設置して、石油探鉱開発技術の総合的かつ中長期的な施策；今後の石油開発技術センターの研究開発業務の進め方；研究評価管理ならびに研究成果の活用および技術サポート業務などの強化策について検討してきた。

その結果、平成8年度から石油開発技術センターでは

* 平成10年6月2日、平成10年度石油技術協会春季講演会作井部門シンポジウム「近年の掘削技術の動向と将来への展望」で講演 This paper was presented at the 1998 JAPT Drilling Technology Symposium entitled "The latest drilling technology and the future prospect" held in Sapporo, Hokkaido, Japan, June 2, 1998.

** 石油公団石油開発技術センター掘削技術研究室（現在、帝国石油(株) Drilling and Completion Laboratory, Technology Research Center, Japan National Oil Corporation, presently Teikoku Oil Co., Ltd.

*** 石油公団石油開発技術センター掘削技術研究室 Drilling and Completion Laboratory, Technology Research Center, Japan National Oil Corporation.

表1 石油開発技術センターの沿革

昭和47年 7月	石油開発公団の付置機関として第21森ビルを仮事務所として発足 「石油及び可燃性天然ガス資源開発審議会」の答申
12月	地質探鉱研究室、開発技術研究室、油層研究室および業務課設置
昭和53年12月	開発技術研究室の室内実験部門を石油資源開発(株)技研に設置
昭和55年 3月	富国生命ビルに移転
昭和60年	「石油開発技術研究推進委員会」の答申
昭和61年 7月	開発技術研究室の一部を水道橋の日本生命ビルに移転
10月	石油公団技術研究所(仮称)用地を取得。(千葉市浜田1-2-2)
昭和61年11月	石油開発技術センターの新研究施設竣工
平成元年 5月	海外技術者研修事業開始
平成4年 8月	柏崎テストフィールド竣工
平成7年 7月	「石油・天然ガス開発技術委員会」の答申
平成8年 5月	採油増進研究室と油層研究室を、油層研究室に合併 開発技術研究室を掘削技術研究室と生産技術研究室に分離 研究評価管理システム、「操業ニーズ支援調査事業」、 「官学交流調査事業」、「フェローシップ事業」

従来の業務に加えて、新たに研究評価管理システムの導入；操業支援型研究開発の拡充を目指した「操業ニーズ支援調査事業」の実施；大学研究者との交流を通じて将来の石油開発技術に応用可能な先端的なし基礎的なシーズの調査を行う「官学交流調査事業」；産油国との人的友好、協力関係を強化するための「フェローシップ事業」などを開始した。

また、時代のニーズにあった研究開発を実施すべく、研究室の再編成として平成8年5月に、採油増進研究室と油層研究室を合併して油層研究室に、開発技術研究室を掘削技術研究室と生産技術研究室に分離した(表1)。

2. プロジェクトの概要

石油開発産業における「掘削技術」とは、石油・ガス資源を採鉱・生産するために不可欠な坑井を掘削する技術を指すが、掘削技術研究室では、掘削した坑井から石油・ガスを生産するための仕上げ技術までを含めて、「コストの削減」、「フロンティアへの挑戦」および「環境への順応」の3つの課題を念頭に研究開発に取り組んでいる。研究テーマについては、経常研究、大型研究、特別研究を3つの柱として、これまでに表2に示すような研究開発を実施している。「経常」は、各研究室独自の基礎的な研究、「大型」は先端かつ広範囲に応用が期待できる研究、「特別」は石油会社の要望に基づき緊急度が高く、操業支援的な研究を目的としたものである。今回はこの中から、特に近年の掘削技術の動向として注目されている「水平坑井開発技術」、「スリムホール掘削技術」および「メタンハイドレート開発技術」につ

いて紹介する。

2.1 水平坑井開発技術

水平坑井は、垂直坑井に比べて、坑井産油能力が大きく、可採埋蔵量の増加および開発投資額の低減をもたらす。当該研究の目的は、掘削技術分野における先進技術を開発し、水平坑井適用技術の向上を図ることである。技術テーマとして、地表から掘進方向(方位・傾斜)の制御が可能な坑底・地上機器開発を中心とした「リモートコントロールダイナミックオリエンテーションシステム(RCDOS)」、適正な仕上げ計画立案のためのガイドライン作成を目的とした「仕上げ技術」、国内石油開発会社の操業支援を目的とした「マルチラテラル坑井の仕上げ技術」などの研究開発を実施している。このうち「仕上げ技術」については、坑井クリーンアップ作業、アンダーバランス掘削技術および大偏距掘削技術についてマニュアル化し、技術普及に努めた。また、地層検層技術では、LWD(logging while drilling)用センサーとしてのパルス中性子センサーの開発を実施している。

2.1.1 RCDOS(リモートコントロールダイナミックオリエンテーションシステム)の研究開発

(1) 目的

水平坑井掘削技術における坑跡制御技術を確立するために、地表から信号を送り、ビットの曲げ角度、ビットフェースおよび方位角を自由に変え、坑跡を制御するシステムを開発することによって、より正確な坑井の方位・傾斜制御を可能にするとともに、掘削効率を改善し、開発コストの減少を図る。

(2) 概要

表2 石油公団の掘削関連プロジェクトの主な研究テーマ（期間）

- * 経常研究「掘削作業効率向上に関する基礎研究」
 - ・掘進率に関する研究（平成1～11年）
 - ・ウェルコントロールに関する研究（平成1～4年）
 - ・掘削データベースに関する研究（平成1～6年）
 - ・掘削試験機概念設計および製作（平成1～3年）
 - ・掘削トラブル防止に関する研究（平成8～9年）
 - ・泥水技術に関する研究（平成9～11年）
- * 大型研究「リアルタイム掘削制御技術」
 - ・EM-MWDの開発（昭和61～平成4年）
 - ・掘削制御プログラムの研究開発（昭和63～平成3年）
- * 大型研究「水平坑井開発技術」
 - ・RCDOS 研究開発（平成1～10年）
 - ・パルス中性子センサーの研究開発（平成1～10年）
 - ・仕上げ技術の研究（平成2～9年）
 - ・ソリッドコントロール監視システムの研究開発（平成2～6年）
 - ・計画坑跡策定プログラムの研究開発（平成2～6年）
 - ・ボアホールレーダの研究（平成4～6年）
- * 大型研究「スリムホール掘削技術」
 - ・コイルドチュービング掘削技術に関する研究開発（平成7～11年）
 - ・高性能ビットの研究開発（平成7～11年）
 - ・アンダーバランス掘削技術に関する研究（平成9～11年）
 - ・ウェルコントロールに関する研究（平成7～11年）
 - ・泥水処理システムの開発（平成6～8年）
 - ・新規泥水システムの研究開発（平成7～8年）
- * 特別研究「EM-MWDの実用化技術」（平成5～8年）
- * 特別研究「メタンハイドレート開発技術」（平成7～11年）
- * 特別研究「異常高圧層検知センサー開発技術」（平成8～10年）

平成元年度より、リモートコントロールで制御する傾斜コントロール坑底機器 RCDOS の研究開発を実施している。これまでに、12-1/4" 坑用プロトタイプおよび 8-1/2" 坑用プロトタイプを製作し、12-1/4" 坑用プロトタイプは、柏崎テストフィールド実験井の掘削試験により、地表坑底間の双方向通信、増角性能などの確認を行った。さらに、水平坑井の坑井軌跡制御技術を完成させるためには、モータを使ったスライディング掘削による方位傾斜制御に加えて、ロータリーモードにおいて同様の制御を可能とするロータリースティアーブルシステムが必要であり、現在開発中である。平成9年度からは、SPERRY-SUN 社と共同開発契約を締結し、同社と石油公団がプロジェクトチームを結成して新たな体制下で、平成10年度内に RCDOS プロトタイプ商用機の完成を目標とした研究開発を進めている。

2.1.2 マルチラテラル坑井の仕上げ技術開発

(1) 目的

中東の巨大油田の上部油層を対象に、各ラテラル坑に

必要に応じてアクセス可能なマルチラテラル井への仕上げ技術の研究開発を行う。マルチラテラル井の坑跡と仕上げ技術の最適化スタディを、地質、油層、掘削・仕上げ各部門の担当者が互いに協力して行い、対象油層の生産能力の増加、回収率の向上、水つき問題の軽減、長期にわたる油層管理を可能とする方策を現地へ提供する。現地への有益な技術移転を行う上で、対象油層のニーズ、環境などを分析すると同時に、他の油層・油田への将来的な適用も考慮に入れ、本研究を推進する。

(2) 概要

ジャパン石油開発(株)と石油公団石油開発技術センターは、中東現地への操業支援の一環として、「マルチラテラル坑井最適化による上部油層挙動の改善」を実施している。当該油田における水平坑井の掘削は平成元年より開始され、現在までマルチラテラル坑井を主体に約70坑の水平坑井が掘削されている。現地では、水平坑井掘削技術の急激な進歩と幾多の知識・経験の蓄積により、掘削上の問題点のほとんどが解決されており、近年の技術

的関心は、マルチラテラル坑に対し、選択的な坑井刺激、油層モニタリングを可能とする仕上げ技術の導入とその最適化に移行しつつある。特に、当該油田のように海上プラットフォームのスロット数が限られている状況下では、既存井からのマルチラテラル坑の掘削が不可避であり、それに即した仕上げ技術の適用が今後の重要課題となる。既存井から掘削されたマルチラテラル坑井の仕上げ技術に関しては、世界的にもいまだ発展途上にあり、掘削技術に即した仕上げ方法および仕上げ機器に係る研究開発が求められている。

2.1.3 仕上げ技術の研究開発

(1) 目的

水平坑井の仕上げ計画立案において、水平坑井の要素技術や作業実施手順に対する知見を踏まえ、油層特性、目的に即した仕上げ方法および技術を選定するための最適手法を確立すべく、包括的なガイドブックとして「水平坑井仕上げデザインガイド」を作成する。

(2) 概要

水平坑井仕上げ技術に関して、国際共同研究への参加やセミナーの開催などを通じ、仕上げ要素技術の現状および各技術の作業実施手順に重点を置いて最新事例調査研究を実施した。その結果、水平坑井を検討する際、油層特性ほかに関する事前検討が不十分なために、生産目標を達成することができない坑井が少なからず見られ、水平坑井の仕上げ計画立案において、水平坑井の要素技術や作業実施手順に対する知見を踏まえたうえで、油層特性と目的に応じた仕上げ方法を選定することが重要な技術課題であると認識された。そこでこれら課題に対し調査、検討を実施し、油層特性、目的に即した仕上げ方法および技術を選定するための最適手法の確立を目的とした包括的なガイドブックである「水平坑井仕上げデザインガイド」を作成することにした。このため過去の調査、検討結果を踏まえて、特に注目されてきた仕上げ技術分野であるマルチラテラルおよびマルチブランチ技術ならびに油層障害削減について調査し、仕上げ方法および技術を選定するための最適手法の検討を深めた。その内容を「水平坑井仕上げデザインガイド」の一部のデザインガイドとして、マルチラテラルとマルチブランチ技術（デザインガイド VOL.2）および油層障害削減（デザインガイド VOL.3）として補足した。

また「水平坑井仕上げデザインガイド」の検証を目的として、アラビア石油(株)カフジ油田と合同石油開発(株)のエルブンドク油田における最適仕上システムのケーススタディを実施した。

さらに公表文献や訪問調査等による事例調査を行い、掘削、仕上げ計画最適化の検討を深め、「水平坑井仕上

げデザインガイド」の一貫として坑井クリーンアップ作業における新規技術（デザインガイド VOL.4）、アンダーバランス掘削技術（デザインガイド VOL.5）、大偏距掘削技術（デザインガイド VOL.6）、坑井刺激作業における新規技術（デザインガイド VOL.7）および坑井穿孔作業（デザインガイド VOL.8）として補足した。また、最新事例情報収集の一環として欧米の石油会社の最新の実フィールドデータを入手し、その評価や分析に役立てている。

2.1.4 パルス中性子センサーの研究開発

(1) 目的

パルス中性子検層を将来のLWDの重要な検層種目と判断し、LWD用に適した小型のパルス中性子発生器の開発とこれを使用する検層システムの開発を行う。

(2) 概要

検層システムは、検層機能の開発として孔隙率評価、水飽和率評価、油層識別、岩相識別の4種類の検層機能を目標に、モデリングに関する基礎研究、プロトタイプ機設計、およびワイヤーライン検層機とのコンビネーションで測定を行うプロトタイプ機を製作し、実証試験を実施した。ワイヤーラインベース・プロトタイプ機の実証試験の結果を受けて、LWD型のプロトタイプ機的设计および製作を行うとともに、キャラクタリゼーション作業を実施している。パルス中性子発生器の開発としては、小型化改良設計を行って試作するとともに、試作したパルス中性子発生器に対し、LWD用パルス中性子発生器としての性能試験を行い、性能を確認した。

2.2 スリムホール掘削技術

近年、世界的に掘削コストの大幅な削減を目指したスリムホール掘削技術が大きな注目を集めている。当該研究の目的は、スリムホール掘削技術の確立を図るべく、ビット、ドリルストリング、コイルドチュービング、ウェルコントロール、掘削流体システムほかの各要素技術に関して研究開発を実施すること、ならびにスリムホール掘削システムとして、特にコスト効果および応用範囲の広さなどの観点から、最もポテンシャルの高いコイルドチュービング掘削(CTD)に着目して、要素技術の研究開発から得られた成果を活用することにより総合システムとして確立し、国内石油開発会社に技術普及を図ることである。

2.2.1 高性能ビットの研究開発

(1) 目的

高性能スリムホールビットの開発には、硬質岩掘削におけるトリコンビットおよびPDC(polycrystalline diamond compact)ビットの高寿命化が課題である。これらの課題を克服するために、日本が保有する高度なダ

ダイヤモンド焼結技術および CVD (chemical vapor deposit) ダイヤモンド技術を活用し、「PDC ビット用高強度ダイヤモンド焼結体および同ロウ付け技術の開発」ならびに「トリコンビット用 CVD ダイヤモンドコーティングベアリングの開発」について研究開発を実施する。

(2) 概要

ダイヤモンド焼結技術は、超高压・高温環境下でダイヤモンド粉末および結合材（金属または非金属触媒）から、超高压・高温容器を使用して高強度のダイヤモンドを生成する技術である。また CVD は、さまざまな形状に膜状のダイヤモンドを成長させることが可能な応用範囲の広い気相ダイヤモンド合成技術であり、熱フィラメントを使用してコーティングを行う。

PDC ビット用高強度ダイヤモンド焼結体の開発では、ダイヤモンド焼結体が有する耐熱性、耐衝撃性および圧縮強度の 3 つの特性値について、フィジビリティスタディの開発目標を定めた。これら目標値を達成するために、ダイヤモンド粒子を結合する材料に着目し、炭酸マグネシウム類および希土類燐酸塩類などの非金属触媒を選択した。この結果、耐熱性：1,200℃、耐衝撃性を示す指標として破壊靱性値：11~12（現状 PDC の約 2 倍）および圧縮強度：1,300 kgf/mm²（現状：400 kgf/mm²）という優れた値が得られた。またこの結果を得て、HYCLOG 社との共同研究として高性能 PDC ビットを開発することになり、同社により同焼結体を評価したところ、他社 PDC の 100 倍以上の耐摩耗性を示した。なお今後の大きな課題は、PDC とビットボディとのロウ付け強度である。

トリコンビット用 CVD ダイヤモンドコーティングベアリングの開発では、基礎研究目標を、ベアリングに適用するために最も重要である耐摩耗特性について、泥水中で従来焼き入れ鋼の 10 倍としたが、CVD ダイヤモンドの耐摩耗特性を測定したところ、目標値を大幅に上回る約 500 倍の対摩耗性が得られた。実際のベアリング材料にコーティングを施した耐摩耗試験では、はく離を伴わずに 300 時間以上の長寿命を得ることができた。また実際のビットベアリングを想定したブッシング類の円筒形状内面および平面状のスラストワッシャーへの均一なコーティングが可能であることを確認した。現在、ビットベアリングを試作し、耐久試験を実施している。

2.2.2 ドリルストリングに関する研究開発

(1) 目的

小径ドリルストリングを使用しなければならないスリムホール掘削では、ストリングの強度が従来よりも小さいことから、ドリルストリングは厳しい環境下におかれることとなる。これらに起因するトラブルを回避するた

めに、掘削計画立案時にドリルストリングの応力解析および機械的強度特性の把握を行い、ドリルストリングに発生するトルク、ドラッグおよび、座屈現象などをシミュレートし、ホールクリーニングなどを考慮した上で、これら応力を軽減できる最適な坑跡および最適なドリルストリングを選択するプログラムを開発する。

(2) 概要

最適な坑跡は安全な掘削が可能で、コストが最小となる坑跡であるが、そのためにはトルクドラッグや坑跡長が小さくなるような坑跡を求め、シミュレーションによりその坑跡およびドリルストリングの妥当性を確認する必要がある。そのため本プログラムは、坑跡設計とドリルストリング設計の 2 つの計算機能を有する。坑跡設計では、トルク、フックロードあるいは坑跡長などを最小にする坑跡を、さまざまな制約を満たしながら、最適化計算に有効な非線形計画法を利用して求めることができる。また、本プログラムでは複数の坑跡データを三次元画面に表示することができ、他坑跡との干渉の計算機能が加えられている。ドリルストリング設計では、ユーザーが入力したドリルストリングがさまざまな条件を満足するかどうかをシミュレーションによって確認する。座屈については、基礎的な理論式（オイラーの座屈式）を改良して新しい座屈式を導き、ストリングを分割した各セグメントに対してこれらの式を適用して、ドリルストリング全体の座屈挙動を追跡できるようにした。

2.2.3 高性能コイルドチュービングの研究開発

(1) 目的

近年のコイルドチュービング掘削が適用される石油ガス井の深井戸化に対応するため、高強度でありしかも繰返し使用に耐える高寿命コイルドチュービングを開発する。

(2) 概要

既存のコイルドチュービングは、帯板をロールで成形し誘導加熱により溶接して製造する電縫溶接鋼管 (ERW) が用いられているが、厚肉・高強度 ERW 鋼管を製造することは必ずしも容易でない。一方、中実ピレットを穿孔し圧延によって製造する継目無鋼管は、石油ガス井開発の分野において強度や信頼性が要求される用途に対して幅広く使われており、厚肉・高強度化に対応しやすい特長を持っている。ただし、既存の継目無鋼管は、出荷される製品長さが十数 m と短いため、3,000~4,000 m に及ぶコイルドチュービングとするためには、周溶接によって繰返し接合する必要があり、高強度・高疲労寿命・高能率な周溶接法が必須である。各種溶接法を調査し、板状試験片を用いた溶接継手性能の簡易試験を実施した結果、従来溶接法では GTAW (gas

tungsten arc welding) の疲労寿命特性が優れていた。一方、ADB (amorphous diffusion bonding) で接合した試験片は繰返し曲げ疲労寿命が高く、安定した溶接性能が得られるなどの特長を持つことから、ADB を用いた高性能コイルドチュービング開発のできる可能性が高いと判断し、ADB を高性能コイルドチュービングの製造に応用することにした。当該研究開発を国際共同研究 DEA107 Project として、AGIP, AMOCO, BP, Scottish Enterprise の参加により実施している。本プロジェクトにおいて、ADB と従来溶接法である GTAW の比較試験を実施した結果、ADB が GTAW に比べ 2 倍以上の疲労寿命を有することを見いだした。本プロジェクトの成果として、最適材質および最適接合条件を明らかにし、リールに巻き取った高性能コイルドチュービングを試作する。

2.2.4 ウェルコントロールに関する研究

(1) 目的

ハイドロリクス、ウェルコントロール手法、キック検知技術について、各要素技術を組み合わせ、スリムホールを安全に掘削するためのウェルコントロール手法の確立を目指す。

(2) 概要

コンベンショナルホールと比べ、スリムホールはドリルパイプと坑壁のクリアランスが小さい。したがってパイプの回転と坑内におけるパイプの偏心（エキセントリシティ）に伴うアニユラス圧力損失およびパイプ揚降管中に起こるサージ圧、スワブ圧などのハイドロリクスのモデル化、精度よいキック検知技術の確立、ガスマイグレーションスピードの把握等が重要であり、これらを考慮したスリムホール独自のウェルコントロール技術の開発が望まれている。ハイドロリクス、キック検知システム、ウェルコントロール手法の現状技術動向を調査した結果、既存モデルの活用を含め、スリムホールウェルコントロールマニュアルの作成、ならびにスリムホールウェルコントロール教育システムの構築などが重要と判断した。マニュアルの作成では、キックの早期検知用機器を考慮し、既存のキックシミュレーターを活用しながら、特定のスリムホール掘削におけるキックの防止方法、キックの早期検知方法、キック発生時のコントロール方法などを網羅したスリムホールウェルコントロールマニュアルを作成した。また教育システムの構築では、スリムホールにおけるキックコントロールの問題点・重要性、その具体的コントロール方法などを網羅し、掘削クルーなどにもより理解しやすい教育システムを製作した。今後、スリムホールにおけるキックコントロール手法やキック検知方法を検証するため、実験内容、方法、

実験設備、人員計画、データ解析方法などを中心に柏崎テストフィールドの既存井を利用した実証実験を実施する予定である。

2.2.5 環境融和型泥水システムの開発

(1) 目的

泥水コスト削減のために、1 坑井の掘削作業において、1 種類の泥水システムで掘削が可能でかつ各種添加剤類は有害物を含まない環境融和型泥水システムを開発する。

(2) 概要

泥水コントロールにおいて、高温・高比重になった場合には、泥水流動性のコントロールのため必然的に分散剤が使用されるが、最も代表的に使用されるのが重金属を一部含む分散剤である。しかしながら世界的に環境保護規制が強化されつつある状況で、これと同等機能を有する代替品を開発することが必要である。また 1 坑井の掘削においては坑井条件が種々変化するため、1 種類の泥水システムで掘削されることはまれで、通常 2～3 種類の泥水システムが組み合わされて使用されており、泥水コストを増加させる要因となっている。このため現在、一般的に使用されているクロムリグノスルフォネート泥水中のクロム含有添加剤（分散剤）に替わる新規および既存分散剤の評価試験を実施し、有効性の高い分散剤の選択を実施し、清水および塩水ベース（KCl を含む）で、175℃で安定な泥水システムを構築した。また泥水添加剤の変更のみで泥水システムを変換する技術を確立した。

2.2.6 泥水処理技術の開発

(1) 目的

経済的かつ効率的な泥水の処理技術の確立はもとより、産業廃棄物処分場の確保難を考慮し、処理物の減容化ならびに再資源化をも可能とする処理技術を開発する。

(2) 概要

現在、国内で一般的に実施されている廃泥水の圧入処理については、その安全性については是非が問われており、将来的に廃止される可能性が高く、安価でかつ効率的な処理技術の確立が望まれている。また国内では蒸発濃縮式による廃泥水処理技術が開発されたが、本装置では固形分 30% 程度までの濃縮が限界であり、濃縮物については固化処理されて産業廃棄物処分場へ搬入し処分されている。しかし近年、産業廃棄物処分場の確保することが困難になりつつあり、搬入する廃棄物の受け入れ単価や運搬費の高騰を考えた場合、廃棄物の減容化が求められているところである。さらに蒸発濃縮装置の 1 日当たりの処理能力は 72 kl が最大であるため、これを超え

る分については圧入処理との併用を行っているのが現状である。したがって蒸発濃縮式による廃泥水処理の実用化には難題が課せられている。このような背景から、国内の汚泥処理会社および処理装置の製造・販売会社を調査し、高圧ポンプを使用した脱水処理装置、および汚泥改質固化処理装置が泥水処理システムとして有望であると判断した。ラボテストによって高圧脱水処理装置に関しては、処理量、ランニングコストとも満足できる結果が得られたが、ろ水の品質などの課題があり、フィールドテストによってコストを含む総合評価を行う必要がある。汚泥改質固化処理装置に関しては、処理量は現状以上のものが得られ、かつ再資源化に最も近い処理方法であるが、ランニングコストが従来の約2倍となった。これは坑井内における処理コストはほぼ同様であるが、坑井敷地外に搬出するための運搬費が約2倍になるためである。いずれの装置も処理面での効率は確認できたが、まだ経済的な課題があり、今後、フィールドテストを通じて実用化の検討を実施する予定である。

2.2.7 コイルドチュービング (CT) 掘削技術の研究

(1) 目的

コスト効果および汎用性において、今後の掘削作業に有効利用が期待される CT 掘削技術について、本邦石油開発会社などに技術普及を図る。

(2) 概要

高性能 CT の研究開発、CT 坑底機器および CT 掘削リグの調査、CT 掘削マニュアルの作成、ならびにアンダーバランス掘削技術の研究開発を行い、これらの成果を活用し、総合システムとして確立すべく研究開発を実施している。上述した高性能 CT の研究開発のほかに、CT 坑底機器に関しては、国際共同研究としての PROJECT HELIX において、ダウンホールモータ、MWD (measurement while drilling) などの概念設計を実施した。またアンダーバランス掘削技術の研究開発では、ベネズエラ国 INTEVEP との共同研究として、ホールクリーニングおよびハイドロリックコントロールを目的とした多相流体挙動シミュレータの開発を実施している。

CT 掘削は現段階では、ある限られた適用において非常に有効な手段となっている。当初はコンベンショナルリグの欠点を補う目的によるものが多かったが、今日では単一システムとしても経済性および技術的信頼性が向上しつつある。一方、アンダーバランス掘削を経済的に総合評価することは非常に難しいが、CT がアンダーバランス掘削を行うための最も優れたツールであることは確かである。今後も CT 掘削の技術発展および適用数増加が予測され、コンベンショナル掘削にはない利点を

持っていることから、その動向について継続的に着目していくことが重要である。

2.3 メタンハイドレート開発技術 (掘削技術関連)

近年、非在来型のエネルギー資源として世界的にも脚光を浴びているメタンハイドレートは、我が国でもその存在が知られており、未来のエネルギー源として注目されている。この開発技術を確立することを目的として、掘削技術研究室だけでなく TRC 全体の研究テーマとして取り組んでいる。掘削技術分野では、坑内温度・圧力シミュレーション技術およびキックコントロール技術について研究を実施するとともに、セメンチングおよびケーシングデザインに関する調査、泥水システム、泥水冷却装置およびコアサンプラーの開発を実施している。

2.3.1 坑内温度・圧力シミュレーション技術の研究

(1) 目的

メタンハイドレート層掘削を含む大水深掘削の状況を正確に模擬し、泥水物性値の温度依存性やライザー・チョークラインの伝熱現象ほかを正確に表現して坑内温度・圧力の計算ができるコンピュータシミュレーションプログラムを開発する。

(2) 概要

メタンハイドレートの分解・生成は、主に圧力のみを考慮すればよい通常のガス層と異なり、圧力のみならず温度にも大きく依存する。したがって、メタンハイドレート層の掘削・仕上げ作業を計画する際は、その作業ごとに、坑井内の圧力と温度の両方を正確に知り、メタンハイドレートの原位置での状態を推測して、作業を安全に進められるかどうかの判断をする必要がある。坑内温度・圧力シミュレーションプログラムを製作し、計算部とグラフィカルユーザーインターフェイス (GUI) 部とを結合した1つのシステムとして構築するとともに、基礎試錐「南海トラフ」の予想掘削データセットを作成・入力し、その機能を検証しながらシステム調整を実施している。

2.3.2 キックコントロール技術の研究

(1) 目的

大水深掘削に対応したメタンハイドレート層掘削作業に必要な不可欠なキックコントロールシミュレーションプログラムを開発する。

(2) 概要

メタンハイドレート層掘削におけるキックコントロールは、分解・生成という物性上の特徴を持つメタンハイドレート自身についての考慮が必要なことはもちろんのこと、その賦存環境である大水深海域での掘削についての考慮 (長大なチョークラインによる摩擦損失の増大、地層破壊圧の低下、低温環境など) も必要になるという

特殊性を持つ。したがって、ハイドレート層掘削を安全に遂行するには、これらの特殊性を考慮したキックコントロール方法をシミュレーションで検討し、安全で確実なキックコントロール手法をあらかじめ確立しておく必要がある。キックコントロールシミュレーションプログラムを製作し、計算部とグラフィカルユーザーインターフェイス (GUI) 部とを結合した1つのシステムとして完成し、この中で温度データをリンクする圧力・温度インターフェイスモジュールを組み込んだ。さらにシミュレーション実験データを入力し、実験結果を検証しながらシステム調整を実施している。

2.3.3 セメンチング技術の調査

(1) 目的

メタンハイドレート坑井のセメンチングに求められる要件と技術を、セメント硬化熱、断熱性、低温強度発現、大水深対応、アニュラーガスフロー防止などの観点から検討し、海上基礎試錐の坑井条件に最適と考えられるセメンチングシステムを確立する。

(2) 概要

メタンハイドレート坑井のセメンチングには、一般的な油・ガス井の場合に必要な要件に加えて、坑井からの熱伝導によるメタンハイドレートの分解を最小にする断熱性、大水深の海底付近の低温環境での良好な流動特性や物理的性状、大水深の浅層部における強度の弱い地層を破壊しない低比重性ほかの要件を満たすセメンチングシステムが要求される。永久凍土地域や大水深海域などでのセメンチングの実績と技術の現状について調査し、永久凍土あるいは大水深自体に特有の問題の克服を意図するスラリー以外は、通常の油・ガス井と同様なセメントや添加剤が使われていることを確認した。これらの調査検討に基づき、日本近海のメタンハイドレート坑井のセメンチングは、業界ですでに実用化されている技術を適用するのが妥当であろうと判断した。

2.3.4 ケーシングデザイン技術の調査

(1) 目的

メタンハイドレートが分解・生成した場合に坑井内のケーシングが受ける影響を検討し、メタンハイドレート坑井に適用すべきケーシング設計方法を確立する。

(2) 概要

メタンハイドレートが分解・生成した場合に、坑井内に設置されたケーシングが受ける影響とその要因について検討し、またメタンハイドレート層掘削に関連したケーシングの使用実績と事故事例の調査、断熱ケーシング/チュービングの構造、性能、使用実績などを調査した。これらの調査検討の結果、メタンハイドレートの分解・生成によるケーシング事故の実例はなく、またハイ

ドレート再生時の膨張圧もケーシングに与える影響は大きくないものと判断した。これらの結果から、掘削中、掘削停止期間中を通じて、メタンハイドレート層がケーシングに与える強度的影響はほとんどなく、ハイドレート平衡圧力に耐える管種を選びさえすれば通常のケーシング設計法を適用するだけでよいことが明らかとなった。

2.3.5 泥水システムの開発

(1) 目的

メタンハイドレート層を掘削する上で、地層中のメタンハイドレートを分解させず、かつ坑井内にハイドレートを生成させないという相反する要求を満たす掘削泥水システムを構築する。また泥水中でのメタンハイドレートの生成分解曲線、泥水の熱物性、そして低温下における流動特性などを明らかにする。

(2) 概要

メタンハイドレート層の掘削においては、地層中に存在する天然ハイドレートの分解を極力抑制することによって、研究対象であるハイドレートをそのままの状態ですぐに地上に回収するとともに、分解ガスによるガスキックないしブローアウトの危険を生じさせない、という配慮が必要である。一方、ハイドレート賦存環境の特徴である大水深の高圧・低温環境においては、噴出防止装置やチョークラインの中などで泥水中にハイドレートが生成して、それらを閉塞してしまう危険性があることにも配慮しなければならない。これらの相反する要求を同時に満たすためには、ハイドレートの熱力学的平衡条件のみならず、速度論的生成抑制条件をも考慮した新しいタイプの泥水システムを構築する必要がある。また、従来の油・ガス井掘削に用いられた泥水では、主として高温下での特性が問題になったが、ハイドレート坑井の掘削泥水では、低温下における流動特性などの性質を明らかにする必要がある。大水深掘削用泥水の実績調査をもとに、ハイドレートの生成抑制泥水の基本となる泥水として2種類のポリマー泥水を選択し、低温下における流動特性や脱水特性などの評価試験を実施し、掘削泥水として問題がないことを確認した。ハイドレート安定促進剤 (分解抑制剤) の候補物質の調査検討を行った結果、天然高分子ポリマーが速度論的安定促進剤として実用可能性があることを確認した。

2.3.6 泥水冷却技術の開発

(1) 目的

日本周辺海域でのハイドレート坑井掘削に使用できる実用的な泥水冷却システムを設計・製作する。海洋掘削リグに搭載するという条件から、冷却能力だけでなく、搭載重量、消費電力、設置スペースほかの制約について

も配慮する。

(2) 概要

地層中のメタンハイドレートをできるだけ分解させないように坑井を掘削するためには、掘削泥水を冷却してハイドレート層の温度上昇を防ぎ、相平衡状態をハイドレートの分解抑制側に維持することが最も有効な方法の1つとされている。日本近海でのハイドレート坑井の掘削には非現実的とも言えるほど巨大な泥水冷却装置が必要になるという計算結果が得られ、冷却方法の最適化と装置の規模縮小の必要性が指摘され、泥水冷却装置の小型化の検討を実施した。この結果、「表層海水利用＋予冷却方式」の装置について設計を実施している。

2.3.7 コアサンプル採取技術の開発

(1) 目的

原位置状態でのメタンハイドレートサンプルを確実に採取するためのコアサンプラーとして、圧力と温度を原位置状態に維持したままのコア採取が可能な、ワイヤライン回収方式のコアサンプラーを設計・製作する。

(2) 概要

メタンハイドレートの成因、物性、地層中での分布などの研究を進めるとともに、その資源としてのポテンシャルを調査するためには、原位置状態の圧力と温度を維持したメタンハイドレートのコアサンプルを採取することが不可欠である。

既存の圧力・温度保持コアサンプラーの市場調査を実施し、圧力保持に関してはODP (ocean drilling program) のワイヤライン回収方式のものと、BHI社のドリルパイプ揚降管方式の2種類があり、温度保持機能を持つコアサンプラーはないことが判明したため、圧力・温度保持コアサンプラー (PTCS) の設計・製作を実施した。PTCSワイヤライン回収方式、コア径2-5/8", コア採取長3m, 圧力保持能力3,500psi, ビット径10-5/8", および使用ドリルパイプ径6-5/8"などの仕様である。またコアサンプラーの組立・分解用ツールなどの付随ツールズ類とサービスユニットの設計・製作、ならびにインナーバレルの昇降を可能にする大内径のドリルパ

イプとドリルカラーの選定・調達が必要である。一方、カナダの実証井にて実際にコアリングを行い、コアサンプラーおよび付随ツール/設備の各種機能を検証・評価したところ、種々の問題点が発見され設計変更が行われている。

3. 将来への展望

掘削技術研究室における研究開発の目的は、石油・ガスの探鉱開発において新たな価値を生み出すことである。そして研究開発の内容は、上述したような新技術の開発・検証のほかに、既存技術の改良・応用、基礎研究の実施であり、成果物として掘削機器、プログラム、マニュアルおよび新しい知見などが開発・構築され、また国内石油開発関連会社に技術移転されている (表3, 表4)。これら個々の成果が本邦石油開発業界に普及し、少なからず当研究室がその役割を果たしていると確信するものの、本当にそれが十分に業界に反映されているか疑問視されていることも否めない。このような状況を改善するために、今後は個々の成果物の普及だけでなく、これらの技術を含む掘削作業全般および生産性向上について、コスト計算を伴う総合的な評価を実施するほうが業界に対する貢献度が高いと考える。しかしその実施に際しては、国内石油開発会社のフィールド条件および開発方針などにおいて数々の制約があり、国内では困難であると予想される。したがって研究開発成果の総合評価に関しては、産油国との共同研究として海外のフィールドにおいて推進することが望ましいと考えている。このような産油国との共同研究が、本邦石油開発会社による新規油田の開発ならびに枯渇油田の再開発のような事業に結びつく端緒となることを期待したい。

以上の構想を踏まえて、掘削技術研究室では、平成12年度からの研究開発テーマとして以下のような新規テーマを提案する。

3.1 新規研究開発テーマについて

近年の石油の探鉱開発作業における特殊水平坑井の採用や大水深掘削などの必要性の増加により、掘削技術は

表3 掘削技術研究室が開発した主なソフトウェア

プログラム名	内 容
・ビットハイドロリクス最適化プログラム	泥水循環系の圧力損失を計算し、インパクトフォースや水馬力が最大になるポンプレートなどを求める
・キックコントロールシミュレーションプログラム	二相流モデルによるキックコントロールシミュレーション
・簡略解法による三次元BHA挙動解析プログラム	支配方程式を簡略化して線型方程式でBHA挙動を求める
・有限要素法による三次元BHA挙動解析プログラム	有限要素法によりBHA挙動を動的に解析する
・J-CASING	水平坑井/高傾斜井用ケーシングプログラム
・J-DRILL	坑跡最適化およびドリルストリングデザインプログラム

表4 掘削技術研究室関連の特許

研究課題	共同研究先	特許件数	備考
・ EM-MWDの研究開発	三菱電気(株)	特許取得 (20件) 特許申請中 (8件) 実用新案申請中 (3件)	海外 (6件) 海外 (1件)
・ 水平坑井開発, 技術の研究開発	新日本製鐵(株)	特許申請中 (1件)	
・ 水平坑井掘削, 技術の開発	住友金属(株) 新日本製鐵(株)	特許申請中 (11件) 特許申請中 (2件)	海外 (3件)
・ スリムホール掘削技術	ニューダイヤモンド フォーラム 住友工電(株) 三菱マテリアル(株) 新日本製鐵	特許申請中 (1件) 特許申請中 (2件) 特許申請中 (2件) 特許申請中 (2件)	公団内手続き中 公団内手続き中

従来より高度かつ複雑なものとなっており、新技術のみならず既存技術においても石油会社やサービスカンパニー/コントラクターによる技術革新が求められている。また本邦石油会社は経験の少ない地域で発生する掘削上の作業障害へのスピーディーかつ効果的な対応も求められている。そこで掘削作業の計画段階で作業障害を未然に防止し、実作業において作業障害に遭遇した場合にも、過去の経験や知見をもとに迅速に対策を講ずることが可能となり、掘削作業の効率化やコスト削減あるいは最新技術の有効活用に結びつくように本邦石油会社の操業を支援する。

3.3.1 掘削作業障害対策技術の研究開発

石油会社においては、坑井の大深度化、大水深化、特殊坑井化、あるいは経験の少ない地域での掘削作業の増加などにより、掘削作業中に遭遇する作業障害の増加が懸念されている。そのような状況下で地域的な特性により、幾つかの事例として、次のような新たな掘削作業障害が摘出され最新技術の採用が求められている。

- ・ 火山岩掘削時の低掘進率 (日本やベトナム)
- ・ 応力場起因する坑壁の不安定性 (南米や中央アジア)
- ・ セメンチングの不良によるケーシングの腐食 (中東)
- ・ 環境保護の高まりによる HSE (health, safety and environment) 基準の再構築 (北海や中東)
- ・ 生産性向上のための坑井の特殊化 (中東)

よって、本研究開発テーマでは、これらの作業障害対策技術や作業障害を引き起こすことなく最新技術が採用できるように、それぞれの課題について調査および研究開発を進める。

3.3.2 掘削作業支援システムの研究開発

上述した研究開発より得られる知見は、石油会社各社

が基礎となる技術情報を共有し、それらを効率的に利用できてはじめて有効なものとなり、掘削作業の計画段階あるいは実作業における掘削作業障害の対策技術として利用可能となる。そこで、石油会社が基礎となる技術情報を共有し、国内外での掘削作業を効率的に実施することができるよう、掘削作業にかかわる新技術、最新情報や本邦の掘削技術者により有効活用が望まれる掘削ソフトウェア、データ集、マニュアル集、サービスカンパニー/コントラクター情報などを総合的に蓄積し、開示できるシステムを構築する。さらに、掘削作業障害に遭遇した場合や新たな技術を導入する際、TRC と本邦石油会社との技術的な検討が可能となるようなコミュニケーションシステムを併せ持つものとする。同システムを構成する情報は以下のとおりである。

掘削最新技術 (大水深 [海底仕上げ], コイルドチュービング, アンダーバランス, マルチラテラル [仕上げ] 水平掘, エクステンダーリーチウェル, 低比重セメントスラリー, HSE 対策ほか), 掘削作業障害対策技術 (抑留, 暴噴, 逸泥, セメンチング不良, 坑壁の不安定性, 低掘進率ほか), 掘削作業障害事例集, 作井データ集, 掘削作業マニュアル集, 国内の石油関連会社活動状況, TRC の研究内容, コントラクター・サービスカンパニーのサービス情報, 各種エンジニアリング用ソフトウェア。

なお、これらの研究開発は特別研究として予定している。

SI 単位換算係数

$$\begin{aligned} \text{inch} \times 2.54^* & \quad \text{E}-02 = \text{m} \\ \text{psi} \times 6.894757 & \quad \text{E}+03 = \text{Pa} \\ \text{kgf} \times 9.80665^* & \quad = \text{N} \end{aligned}$$

* は正確な値