講 演
 Lecture

掘削関連技術動向の推移と技術開発の歴史*

北村 龍太^{**†}・稲田 徳弘^{**}・佐藤 亮介^{**}

(Received July 10, 2017 ; accepted August 10, 2017)

Trend review on drilling technology and R&D

Ryuta Kitamura, Norihito Inada and Ryosuke Sato

Abstract : Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC, formerly Japan National Oil Corporation) has been conducting surveys on trends of latest technology related to oil & gas development for more than 40 years, based on requests from Japanese oil companies and service companies. These surveys include “Offshore drilling” in the 1970s, “Deep drilling” and “Deep-water drilling” in the 1980s, “Horizontal drilling” and “Slim hole drilling” in the 1990s, and “Extended reach drilling”, “Casing drilling”, “Managed pressure drilling” in the 2000s.

This paper introduces the outline of the related surveys, and we will also present the trends of research and development for oil and gas drilling implemented at Technology Research Center (TRC).

Keywords : Drilling technology, R&D, Latest trend

1. はじめに

石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) の主要なファンクションである技術開発においてもプロジェクト技術評価においても最新技術開発動向を把握することは重要な責務であり、そこで得られた最新情報を本邦石油開発業界へ発信することもまた大切なファンクションの 1 つである。

今回のシンポジウムのテーマ「時代の流れと作井技術の変遷 - 作井技術の過去, 現在, そして将来の見通し」に合わせ、本稿では JOGMEC が石油公団時代から進めてきた最新技術動向調査の変遷と、これらの情報に基づいて培ってきた技術開発の動向についてまとめる。

2. JOGMEC 技術動向調査概要

JOGMEC では石油公団時代より本邦石油開発企業、サービス企業などからの要望を元に、石油開発に関連する最新技術についての動向調査を 40 年以上に渡り実施してきており、企業に対して広く情報発信してきている。調査テ

マについては各社が抱える技術課題などの聴取を目的として実施している技術協議会の開催に際して、事前を送付しておいたアンケートへの回答という形で提案をいただいております。各社のプロジェクトに直結した技術課題に加え、業界において注目度が高まっている最新技術の概要把握など、広範囲に渡った要望が寄せられている。

掘削技術に関しては、物理探鉱技術、海洋開発技術などと並び、各社からの要望が多く寄せられる分野であり、同調査を始めた 1973 年以降約 40 件の調査を実施している。以下に各年代の傾向をまとめる。

・ 1970 年代

掘削技術に関連する動向調査として表 1 に示すように、1976 年に行われた「深海用掘削装置に関する調査」を皮切りに「深海用ライザーシステムの挙動解析法に関する調査」や「係留解析並びに臨界使用条件の評価」など、海洋掘削に関するテーマを中心に 6 件が実施された。

この中の「深海用掘削装置に関する調査」(1976 年)を紹介すると、当時は世界的に深海域(水深 3,000 ~ 6,000 ft 程度)における海洋油田開発が活発になり始めた時代であり、DPS (Dynamic Positioning System) を搭載したセミサブマリーナブルリグやドリルシップが続々と建造され始めていた状況下で、世界各地の深海地域の地理的条件や海象条件に適したリグ選定を行うことを目的に、各リグの性能に関する調査が実施された。また他にも海洋掘削の深海化の流れに合わせ、ライザー挙動解析に関する調査が複数年にわたって実施された。

* 平成 29 年 6 月 14 日、平成 29 年度石油技術協会春季講演会作井部門シンポジウム「時代の流れと作井技術の変遷 - 作井技術の過去, 現在, そして将来の見通し」にて講演 This paper was presented at the 2017 JAPT Drilling Symposium entitled “Evolution of drilling technologies over time - Drilling technologies in the past, present and future vision” held in Tokyo, Japan, June 14, 2017.

** 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 Japan Oil, Gas and Metal National Corporation (JOGMEC)

† Corresponding author : E-Mail : kitamura-ryuta@jogmec.co.jp

表 1 1970 年代の掘削関連動向調査一覧

西暦年度	調査名	委託先
1976	深海用掘削装置に関する調査	ETA
1976	高圧頁岩層掘削に関する調査	Geoman
1977	掘削トラブル予測技術の調査	Geoquest
1977	深海用ライザーシステムの挙動解析法の研究	日本海洋掘削
1978	ライザー挙動解析ならびに臨界使用条件の評価	日本海洋掘削
1979	ライザー挙動解析ならびに臨界使用条件の評価	日本海洋掘削

・1980 年代

1980 年代前半（1980～1985 年）は、表 2 に示すように 1970 年代に引き続いて海洋掘削に関する調査が数多く実施されていたが、DPS や係留に関するテーマだけではなく、1985 年には掘削作業の自動化に関する調査も実施された。

掘削作業の自動化に関しては、当時のアメリカやフランスなどで研究開発が行われており、いくつかはすでに実用化されていた。日本においても工業技術院（現、産業技術総合研究所）などを中心に研究調査が行われていたが、従来の方式とは異なる新しい掘削装置の概念設計を行うものであったため、1985 年の動向調査は、工業技術院のプロジェクトで取り上げられなかった、既存リグの掘削装置の改修による段階的な自動化を検討することを目的とした。本調査により既存リグを完全自動化するための改造点や、図 1 に示すような方向性について把握することができたが、実現には依然として多くの検討事項や詳細分析、新しいアイデアの盛り込みが必要であると結論付けられた。なお、調査当時はトップドライブ

やパイプハンドリングシステムなどの機器が実用化され始めた時期であり、掘進作業や揚降管作業の準自動化が進められていたが、人間が意識下・無意識下で行っている判断作業の自動化が今後の検討課題として挙げられた。現在ではシーケンス制御などによって部分的な作業の自動化は実現しているものの、人間の経験や五感に頼ってきた判断作業の自動化という面においては本調査当時からあまり進展はないと言えよう。

1980 年代後半（1986～1989 年）も表 2 に示すように、引き続き海洋掘削に関する複数の調査が行われたが、浮体式リグに関する調査のみならず、「ジャッキアップリグのレグのペネトレーションに関する研究調査」や「着底式リグ選定の技術的評価方法」といった浅海掘削に関連する調査も行われている。また、国内基礎試験などで注目度が高まっていた大深度掘削に関連して「大深度掘削用泥水に関する調査」が行われている他、「セメンチング技術の総合評価に関する調査」や「スクイズセメンチングの総合評価」といったセメンチングに関連する調査が行われている。セメンチングに関する調査は「我

図 1 全自動化リグへの段階的相関図

表 2 1980 年代の掘削関連動向調査一覧

西暦年度	調査名	委託先
1980	係留解析ならびに臨界使用条件の評価	日本海洋掘削
1981	係留とライザー挙動総合解析	日本海洋掘削
1982	係留, ライザー挙動及び船体動揺の総合解析	日本海洋掘削
1983	海洋掘削リグの大水深における位置保持に関する基礎研究他	日本海洋掘削
1983	掘削作業自動化の基礎調査	日本海洋掘削
1984	海洋リグのダイナミックポジショニングシステムに関する調査	日本海洋掘削
1984	掘削作業の自動化に関する調査	日本海洋掘削
1985	掘削作業の自動制御技術に関する調査	日本海洋掘削
1986	大深度掘削用泥水に関する調査	石油資源開発
1987	ジャッキアップリグのペネトレーションに関する調査研究および評価方法の確立	日本海洋掘削
1987	セメンチング技術の総合評価に関する調査	石油資源開発
1988	海洋掘削リグ選定の技術的評価方法	日本海洋掘削
1988	スクイズセメンチングの総合評価	石油資源開発
1989	着底式リグ選定の技術的評価方法	日本海洋掘削
1989	暴噴事故と抑圧に係わる調査 Phase 1	日本海洋掘削

が国におけるセメンチング技術向上の指針となるべきガイドラインの策定」, 「我が国におけるスクイズセメンチング技術向上の指針となるべきガイドラインの策定」を目的に, 委託先である石油資源開発株式会社が国内で実施したプライマリーセメンチング (36 ジョブ), スクイズセメンチング (43 ジョブ) のデータを米国のコンサルティング会社である CTC 社 (Completion Technology Company) に提供し, データ解析および各ジョブの評価が行われ, セメンチング作業ならびにスクイズセメンチング作業に対するレコメンデーションが得られた。CTC 社のレコメンデーションの中にはセメンチング中のケーシングの回転など, 作業の困難さから実際には行われていないものも含まれていたが, 個々のセメンチングの結果が満足できないものである限り, 作業がいかに困難であっても改善のための努力を惜しまず, 新旧の方策を一つ一つ積極的に実行してみるべきと締めくくられている。

・ 1990 年代

1990 年代前半は, 表 3 に示すとおり, これまでの海洋掘削技術を主とした流れから, スリムホール掘削技術や水平坑井掘削技術に関する調査が入ってきて, 当時の

石油業界の興味が広がっていった時期と考えられる。特にスリムホール掘削技術の調査からは, その関連技術として, コイルドチュービング技術やアンダーバランス掘削技術, 水平坑井掘削技術や坑壁安定性 (Wellbore Stability) 評価技術の調査へ発展し, 石油公団の研究開発にもつながっていった。

スリムホール掘削技術については, コスト削減を目標として 1950 年代に盛んに研究開発されたものであるが, 当時の技術では坑内機器のサイズを小さくできずに, 使えないものが多かったり, ドリルストリングスの強度の問題で深く掘れなかったりと, 広範には適用できるものではなかった。その後, 技術開発による坑内機器の小型化およびドリルパイプ強度の向上によって技術的な制約がとり払われつつあり, 最新技術動向調査の契機となった。調査の結果, ウェルコントロールとコイルドチュービング技術がスリムホール掘削技術の活用のカギとなると締めくくられ, 研究開発テーマとしてスリムホールウェルコントロール技術, ストリングス挙動とハイドロリクス, ビット挙動と地層適正, ノンソリッド高比重泥水が提言された。その後石油公団では, スリムホールウェルコントロールに関する研究が実施されて同マニュアル

表 3 1990 年代前半の掘削関連動向調査一覧

西暦年度	調査名	委託先
1990	暴噴事故と抑圧に係わる調査 Phase 2	日本海洋掘削
1991	スリムホールドリリングに関する調査	日本海洋掘削
1992	掘削泥水の現状と動向に関する調査	OGS
1992	CIS 諸国の資機材供給に関する共同調査	MAI
1993	掘削作業で生じる廃棄物の処理技術に関する動向調査	石油開発環境安全センター
1994	水平坑井作業の諸問題及び解決策	日本海洋掘削
1994	CIS 諸国の資機材供給に関する共同調査	MAI
1994	CIS 諸国におけるインフラ等に関する調査	MAI
1994	コイルドチュービング技術の応用に関する動向調査	日本海洋掘削

表 4 1990 年代後半の掘削関連動向調査一覧

西暦年度	調査名	委託先
1995	旧ソ連諸国の油・ガス田開発の経済性とコストの評価に関する調査	MAI
1995	水平坑井の諸問題及び解決策 2	日本海洋掘削
1995	異常高圧層の余地及び早期検知に関する最新技術の理論及び地域性を加味した有効性	石油資源開発
1996	アンダーバランス掘削及び仕上げ技術に関する調査	Philip C. Crouse
1996	既存半潜水式リグのアップグレードに関する調査	日本海洋掘削
1997	異常応力場における Wellbore Stability に関する調査	帝国石油
1997	Integrated Service 他の具体的な有効性調査	出光 O&G 開発
1998	世界の陸上掘削リグに関する市場調査	Spears and Association
1998	水系高温度泥水に関する市場調査	テルナイト・帝国石油
1998	マルチラテラル仕上げ技術に関する情報収集	Philip C. Crouse
1999	サイトサーベイについての調査	オフショア・オペレーション
1999	Drill-In Fluid の現状に関する調査	テルナイト
1999	基盤岩貯留層水平坑井掘削について	PCM Technical Inc

を発行した他、コイルドチュービング技術の動向調査や大型研究「スリムホール掘削技術」が立ち上がっている。

さらに 1990 年代後半になると、表 4 に示すとおり、異常高圧・異常応力場の調査が実施され、坑壁安定性検討が課題として登場、継続して同課題に対する研究が始まった。異常応力場における Wellbore Stability に関する調査では、裸坑の安定性に影響を及ぼす化学的作用と機械的作用の内、機械的作用に注目して、スラストベルトに代表される構造運動が激しい異常応力場における検討手法について調査された。調査の結果、砂岩ではほとんど坑径拡大は発生していないが泥岩では崩壊などにより坑径拡大が起こり、その互層が棚となってバックオフなどのトラブルが起こっていることが示された。この対策として、1) 適正泥水比重、2) 泥岩のマイクロフラクチャーを機械的に目詰まりさせる目的での CaCO_3 やアスファルトの使用、3) 低脱水量、4) 極力スタビライザーを使わないシンプルな編成、5) 坑跡の指向性をあらかじめ予測した掘削地点の決定が効果的であることが判明した。

引き続いて、高温度泥水やマルチラテラル仕上げ技術など、その後の汎用性の高いテーマが選定されていく。

一方で、その時々操業現場の技術課題に対する調査として、基盤岩貯留層への掘削技術、カスピ海諸国のロジスティック、海外陸上リグの市場調査なども実施されている。

・2000 年以降

2000 年代は、表 5 に示すとおり、特定地域（サハリンやカスピ海）の調査という操業現場の課題に対応するようなテーマも選定されているが、汎用性の高い技術への注目が続いており、テクニカルリミット（TL）やケーシング掘削（CSG Drilling）、Expandable Tubular 技術、大偏距・マルチラテラル坑井の掘削・仕上げ技術、Managed Pressure Drilling（MPD）、ビットおよび拡張掘削器などを調査課題として選定し、当時の最新技術を紹介している。

テクニカルリミットは、統計的・技術的なパフォーマンスを分析してその限界を探るものである。「Technical Limit 手法による掘削費削減について（SSX）」、「Technical Limit 手法による掘削費削減プロセスに関する調査」、「Technical Limit 手法による掘削費削減「Organization Learning System 導入」」という動向調査を 3 年連続して

表 5 2000 年代の掘削関連動向調査一覧

西暦年度	調査名	委託先
2000	Technical Limit 手法による掘削費削減について（SSX）	日本海洋掘削
2000	Technical Limit 手法による掘削費削減プロセスに関する調査	Frontline Group
2000	Technical Limit 手法による掘削費削減「Organizational Learning System」導入	Frontline Group Orga
2001	SODECO 開発計画における ERD コンサルテーション	CRC ソリューションズ
JOGMEC 発足		
2004	カスピ海における掘削課題の調査	HIS Energy Service
2005	CSG Drilling 及び Expandable Tubular 技術の最新動向調査	日本海洋掘削
2006	OBM・SBM の最新動向調査	TRACS International
2007	大偏距・マルチラテラル坑井の掘削・仕上げ技術の最新動向調査	OTM Consulting
2008	Managed Pressure Drilling の最新動向調査	OTM Consulting
2009	Sand Management に関する動向調査	Advanced Well Technologies
2010	高温高圧（HPHT）フィールドの開発に関する最新技術動向調査	OTM Consulting
2011	Deepwater Horizon 事故を受けた法規制強化・安全対策技術に関する動向調査	OTM Consulting
2012	ビットおよび拡張掘削器に関する動向調査	JMCC

実施した。引き続いてTL手法のコンセプトに関するスタディを実施しており、初年はセミナーにとどまったが、2年目は基礎試錐チカップや基礎試錐新津に取り入れ、掘削効率の最適化に貢献している。

Managed Pressure Drillingの最新動向調査については、大水深フィールドの開発や大偏距井の適用が進む中で、ドリリングウインドウが狭くなる状況において、ケーシング枚数や泥水比重のコントロールに余裕を持たせるために開発された、MPD技術の開発動向を把握することを目的として実施した。調査項目は、MPD技術の概要、適用基準とフィールド条件、リスク管理などの課題、Under Balanced DrillingやDual Density Drillingといった類似技術との比較、適用実績と従来技術とのコスト比較など、多岐にわたる内容を調査している。

3. 技術センター（TRC）における掘削・仕上げ関連の技術開発の推移

TRCにおいては前述の技術動向調査と連動して、当時注目されていた要素技術について適宜技術開発を行っている。ここでは記録が確認できる石油公団後期（1980年代後半）以降について概要を紹介する。

・1980年代後半～1990年代中盤

1989年（平成元年）に石油公団（当時）は、それまで西多摩郡羽村町（現、羽村市）にあった石油開発技術センターを千葉市浜田（現、美浜区浜田）に移転し、現在の技術センター（TRC）が発足している。当時は研究室制を採用しており、開発技術研究室、その後掘削技術研究室、石油工学研究室と名称を変えながら継続して技術開発を行ってきた。

1990年代初頭は開発技術研究室として、いろいろな科学・工学の知識・手法を必要とすること（学際的基盤）と、国内の種々の産業ノウハウ・技術を必要とすること（業際的展開）を意識しながら技術開発を行っている。その中で掘削・仕上げ技術としてはリアルタイム掘削制御技術、水平坑井開発技術に注目し、多くの技術開発が行われている。

平成元年より開始された水平坑井開発技術の研究においては、坑井掘削時に坑跡をリアルタイムに制御するシステムとしてRC-DOS（Remote-Controlled Dynamic Orientating System）の開発に成功し、後にSperry Sun（現Halliburton）とともにGeo-Pilotとして製品化に至っている。Geo-Pilotは、それまで広く傾斜掘削に使用されていたPDM（Positive Displacement Motor）と比較して、より滑らかな坑跡による掘削が可能と言われるRSS（Rotary Steerable System）の一種である。当時Schlumberger、BHI（Baker Hughes INTEQ）などの競合他社もRSSの開発を行っていた中Geo-Pilotで唯一採用されたシステム（Point-the-Bitシステム）は、現在では他社においても採用されてきており、その技術的優位性が認められたものと言える。

また同じく水平坑井開発技術に関連して実施されてい

（撮影者：JOGMEC）

図2 Geo-Pilot 模型

た地層検層システムの開発においては、孔隙率評価、油層識別、岩相識別、水飽和率評価などの検層機能を持った新規検層システムとして、パルス中性子を用いた検層システムの開発に成功し、後にSchlumbergerと共同でEcoScopeとして製品化された。

他には、1980年代後半よりリアルタイム掘削制御に関する技術開発として実施されてきた、泥水中を通る圧力波（マッドパルス）に代わる新規MWD伝送システムの開発において、電磁波を用いたシステムの開発に成功している。残念ながら製品化までは到達できなかったが、BHIと製品化に向けた協議まで進んだものであった。

当時の時代背景においては、大規模な技術開発を複数実施することにより、一部に関しては製品化という目に見える成果を得ることができていた。

・1990年代後半～2000年代前半

1990年代中盤に開発技術研究室から掘削技術研究室が独立、「コスト削減」「フロンティアへの挑戦」「環境への順応」の3つの課題を念頭に技術開発に取り組み、引き続き水平坑井開発に関する技術開発に加え、スリムホール掘削に関する技術開発が開始された。

上述のとおり1991年に技術動向調査として「スリムホールドリリングに関する調査」が実施されており、調査結果においてスリムホールウェルコントロール技術、ストリングス挙動とハイドロリクス、ビット挙動と地層適正、ノンソリッド高比重泥水などの研究の必要性に関する提言がまとめられている。

それを受け、開発技術研究室では「ビット」「ドリルストリング」「コイルドチュービング」「坑井抑圧手法」の4つの要素技術に注目してスリムホール掘削に関する技術開発を実施している。その中では、コイルドチュービング掘削マニュアルの策定、掘削エンジニアリングソフトウェアであるJ-Drillの開発などのソフト面での成果が得られている。また高性能コイルドチュービングの開発として、ADB（Amorphous Diffusion Bonding）接合

非定常カッティングストランスポートシミュレータ演算例：

図3 TCT シミュレータ概念図

図4 坑壁不安定性改善スタディ概念図

による周溶接技術をコイルドチュービングに適用し、当時の従来技術の2倍の疲労寿命を有するプロトタイプの開発検証に成功している。時代背景の変化に伴い、それ以前の要素技術の製品化というハードウェアの開発に代わり、ソフト面での技術開発にシフトしてきたことが分かる。

また国産資源の有効活用の観点より、掘削技術のみならず包括的な開発技術に関する技術開発として、メタンハイドレート開発技術に関する民間10社（石油資源開発、帝国石油、東京ガス、大阪ガス、日本海洋掘削、テ

ルナイト、電源開発、AOCエネルギー開発、インドネシア石油、東邦ガス：社名は全て当時）との共同研究も1990年代中盤より開始されており、現在のMH21（メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム）へ続いている。

・2000年以降

2000年代に入ると掘削技術研究室は石油工学研究室となり、スリムホール掘削に関する技術開発などを継続して実施している。またメタンハイドレート開発技術については研究プロジェクトチームが発足して国からの受

託事業となり、その中でメタンハイドレートに特化した掘削・仕上げに関する技術検討が行われてきている。

スリムホール掘削に関する技術開発において、ベネズエラ国営 PDVSA/INTEVEP との共同研究として開始されたアンダーバランス掘削に関する共同研究においては、定常状態における多相流体挙動シミュレータの開発を行っている。これはその後、非定常状態多相流体挙動シミュレータの開発へと続き、現在も改良を続けている非定常カッティングトランスポート (TCT: Transient Cuttings Transport) シミュレータの開発へとつながることとなる。

1997 年に動向調査として実施された「異常応力場における Wellbore Stability」においては、コロンビアにおける事例が取り上げられ、適正泥水比重に関する提言などがまとめられている。これにも関連して、1999 年より掘削効率改善技術として坑井掘削時の坑壁不安定性改善の力学的検討が開始されている。この検討においては特に頁岩掘削時の坑壁不安定性に着目し、数値解析などを用いて国内、海外の実フィールドにおける技術的提言を行っている。この岩石力学を用いた、いわゆるジオメカスタディは TRC ラボの存在もあり、現在は JOGMEC が所有するコア技術の 1 つとなっている。

2001 年には「SODECO 開発計画における ERD コンサルテーション」が動向調査として実施されている。同時期には ERD (大偏距掘削) に対する関心が世界的にも高まっており、その後しばらく TRC において実施された ERD 関連の各種スタディの礎となっていた。

2004 年の JOGMEC 発足後は上述のとおり、汎用性の高い最新技術に対する動向調査が実施されている。それらはすでに製品化された要素技術であるため、その中から後に JOGMEC における技術開発に発展した例はない。

記憶に新しいところでは、研究テーマを公募にて広く集める提案公募研究のスキームを経て、2006 年よりレーザ掘削システムの開発を手がけている。掘削スピードの低さなど当時注目したシステムでは克服が困難であった課題が複数見いだされ、2011 年に半ばにして中止に至っているが、このような革新的な技術への取り組みは

民間企業のみでは難しい側面もあり、今後も状況に応じて可能性を追求していくべきと考えている。

4. JOGMEC 技術開発の展望

大規模油田の発見が少なくなり、小規模・大水深・HPHT・非在来といった難開発フィールドを対象とした探鉱・開発が進む中、掘削技術の開発も高度に複雑に発展してきている。そのような中、どのようなフィールドにも適用できる技術開発テーマは多くない一方で、特定の技術課題を抱える特定のフィールドに対して専門的なスタディを実施することで、当該フィールドの価値を高める傾向が見えてきた。

今後は、例えばジオメカ的な見地からの坑壁安定性スタディといった、専門性の高いコンサルテーションの形での技術貢献が求められると考えられる。

他方、油価の低迷が続く中、新規に掘削される坑井よりも廃坑される坑井の数が増えてきているという情報もある。坑井健全性も注目されるようになっており、コストのかからない安全な廃坑技術の開発にも期待がかかる。

5. ま と め

本シンポジウムは、JOGMEC が石油公団時代から行ってきた最新技術動向調査と技術開発の変遷を振り返り、今後の展望を考える良い機会となった。企業が抱える技術課題を解決するには、まずは調査にて課題の本質、対処方針などを見極め、必要に応じて技術開発を行うといった一連の流れが確認できた。

技術開発と最新情報の発信は JOGMEC の重要なファンクションの 1 つであり、今後も継続していきたい。

謝 辞

本稿の公表を許可された石油天然ガス・金属鉱物資源機構に謝意を表します。また、シンポジウム講演および本稿作成にあたっては、石油技術協会シンポジウム世話人ならびに査読者の方々にご協力を賜りました。心より感謝致します。