

最新の坑井掘削技術（その1）

東京大学 大学院工学系研究科
地球システム工学専攻 助手
長 縄 成 実

はじめに

本誌には、田中彰一先生が「事務屋のための石油技術講座」と題した石油開発技術の解説記事を1981年から1994年にわたって連載されました（これは全56回を数え、その後、藤田和男先生が引き継がれて63回まで続きました）。この講座のなかでは、坑井掘削技術についての解説にも多くの紙面が割かれ、「作井技術」、「海洋掘削技術」、「水平掘」の3つがシリーズとして取り上げられています。掘削技術に関するその時々最新の技術動向が解説されていますので、機会があればこれらの記事をご一読されることをお勧めします。

さてこのたび、「最新の掘削技術（仮）」というテーマでの原稿執筆のお話を頂きました。しかし、最新の技術や装置はやはりまず現場に導入されますから、大学勤めの筆者に最新の話題がうまく提供できるだろうか、そもそも何時からが「最新の」なのか、などと考え始めるとなかなか構想がまとまりませんでした。まずは、「事務屋のための～」が書かれてから十数年が経つことから、その間に話題になった新しい坑井掘削技術のなかからいくつか拾い上げて、解説していこうと考えています。また、筆者の力の足りない部分では、石油技術協会作井技術委員会の運営幹事会メンバーの方々のご協力を適宜頂きながら連載を進めることになると思います。読者の皆さんにあらかじめお断りしておくと同時に、ご協力に感謝致します。

今回はまず導入として、現状の坑井掘削技術とはどのようなもので、どの程度の水準にあるのかといった大きなところのお話をします。

1. 石油掘削の歴史¹

地下に眠る石油を見つけて地上に取り出すためには、石油が埋蔵しているであろう地層まで地表から井戸を掘る必要があります。石油の井戸（石油坑井、油井）の掘削には、ビットを回転させて岩石を破碎し、掘削流体の循環によって岩石の掘屑（ほりくず）を取り除きながら地層を掘り進むロータリー掘削（rotary drilling）が用いられます。最初に石油掘削の歴史を簡単に振り返っておきましょう。

初めて石油が掘削されたのは、1745年フランスのアルザス地方においてだといわれています。1800年代に入ると米国でも石油が生産されるようになりますが、当初は塩水採取のための井戸からの副産物として石油を産出していました。商業生産を目的として最初に石油の井戸が掘削されたのは1859年になってからです。この最初の井戸はドレークが米国ペンシルベニア州タイタスビルで掘削したもので、近代石油産業の始まりとされる象徴的な井戸です。

ドレークの井戸は、ロータリー掘削ではなく、当時塩水採取井の掘削に用いられていた綱掘り

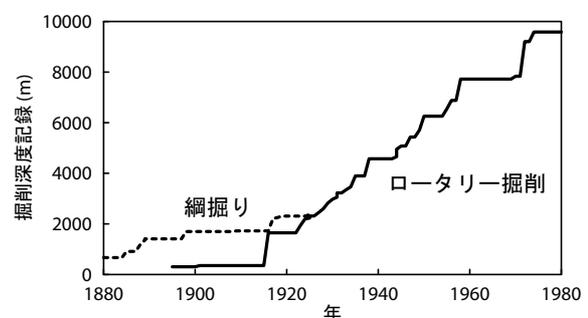


図1 坑井掘削深度記録の推移（文献1をもとに作成）

(cable tool drilling) とよばれる方法で掘削されました。綱掘りは、ケーブルに吊るしたビットを繰返し上下させて井戸の底に打ちつけ、岩石を破碎する衝撃掘削法です。一方の掘削流体を使用するロータリー掘削は、1844年の英国での特許が起源であるといわれ、石油の掘削に初めて用いられたのは、1895年ごろ米国テキサス州コーシカナにおいてでした。コーシカナで用いられたロータリー掘削は、テキサス地方の深度100 m 付近に存在する崩れやすく軟弱な砂層を掘り抜くのに威力を発揮し、1901年にはテキサス州スピンドルトップにおいて、かつてない大量の石油を産出する井戸の掘削に成功しました。ルーカスの大噴出井とよばれる井戸です。

ロータリー掘削がスピンドルトップで成功を収めた後も、綱掘りは1920年頃までは主要な掘削法として米国内で広く用いられ、1925年には2,365 m (7,759 ft) の掘削深度記録を作るまでになりました(図1)。しかし、ロータリー掘削による掘削深度も技術の進歩とともに飛躍的に増加し、綱掘りの掘削深度記録を抜いた1930年頃には、ロータリー掘削が主流となりました。以来、現在に至るまでロータリー掘削は石油坑井掘削法の主流となっています。

2. ロータリー掘削法

ロータリー掘削とはどのような方法なのか、ここでいま一度おさらいをしておきます。図2にロータリー掘削装置の模式図を示します。先端に岩石を破碎するためのビットを取り付けたドリルストリングとよばれる一連のパイプをやぐらから坑井の中に吊り降ろします。ドリルストリングは、上から順にそれぞれ、ケリー、ドリルパイプ(掘管)、ドリルカラーとよばれる中空の鋼管をつなぎ合わせたものです。そして、次の3つの機構によって坑井を掘削します。

(1) ビットを回転させる

ドリルストリングの最上部はスイベルとよばれる一種の回転継ぎ手に接続されています。この継ぎ手は、スイベル本体が回転することなく、ケリー以下のドリルストリングが自由に回転できる仕組みになっています。ケリーを駆動軸とし

てドリルストリングごと回転させることでビットを回転させます。断面の外形が六角または四角形をしたケリーは、ロータリーテーブルの中央の穴を貫通しており、回転テーブル部とともに回転するプッシングがケリーを掴んで回転させます(図3)。

(2) ビットに荷重を与える

やぐら下のトラベリングブロック(動滑車)のフックにスイベルが掛けられ、ドローワークス

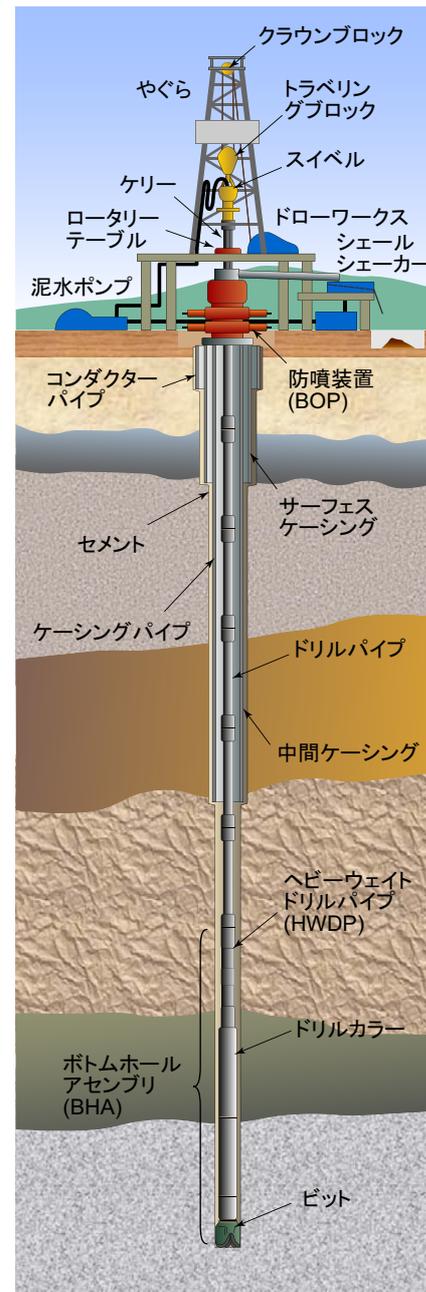


図2 ロータリー掘削装置の模式図



図3 ロータリーテーブル

とよばれるドラム式の大型巻き上げ装置によってドリルストリングを昇降することができます。ドロワークスからワイヤーを繰り出しながらドリルストリングを坑井内に降ろしていく途中では、ドリルストリングの自重に相当する吊り荷重がドロワークスのワイヤーに掛かっています。坑底にビットが接触すると、この吊り荷重は減少し、その減少分だけビットに荷重がかかります。ロータリー掘削においてビットに荷重をかける基本的な機構は、地上でドリルストリングを押し下げているわけではなく、ドリルストリングの自重を利用し、吊り荷重を調整することによって行われます。

比較的浅い井戸を掘る温泉や地下水の掘削装置には、地上で掘管上部にスラスト（推力）荷重を与えるスピンドル式とよばれる機構のものもあります。しかし、石油坑井のような非常に細くて深い（長い）井戸の場合には、軸方向に大きな圧縮応力が作用するとドリルストリングが容易に座屈して（曲がって）しまい、スラスト荷重を掛ける方式では到底掘削できません。

(3) 掘削流体を循環させる

ロータリー掘削に使用される掘削流体は泥水（でいすい）とよばれ、次のような経路で循環されます。地上の泥水ポンプから送出された泥水は、スィベルを通過してドリルストリング内部へ送られて坑底に達します。泥水はドリルストリング先端のビットのノズルから坑底に向かって噴出され、ビットで破碎された掘屑とともに、今度はドリルストリング外側の坑井との間の環状の隙間（アニュラス）を通過して地上まで戻ってき

ます。地上では大型のふるい装置であるシェールシェーカーによって掘屑が分離され、ふるいを通った泥水はポンプのサクシオンタンクに戻り、成分の調整（調泥）をした後、再びドリルストリング内へポンプされます。

掘削泥水は、適切なレオロジー特性と比重をもち、掘屑の地上への運搬以外にも次のような重要な役割を果たします。

- 坑井内の圧力を制御し、地層流体の流入を防止する
- 坑壁を保護し、地層の崩壊を防ぐ
- 坑井内機器を冷却する
- ドリルストリングと坑壁との摩擦を減らす
- 地下の情報を得る

実際の掘削では、ドリルパイプ1本分の長さ（約9 m）だけ掘り進むごとに、ケリーの直下にドリルパイプを1本継ぎ足しながら地層を掘進していきます。途中でビットが摩耗したら、一旦ドリルストリングをすべて地上に引き揚げ、ビットを交換し、再びドリルストリングを繋いで坑井内に降ろします。このパイプを揚げ降ろする作業を揚降管といいます。揚降管時には、接続されていたドリルパイプを1本ずつすべて分解するのは効率が悪いので、通常は3本単位（これをスタンドという）でねじを外して切り離し、やぐらの内側の格納場所（フィンガーボード）に立てかけておきます。また、掘削した坑井を保護するために、必要な深度まで掘削を終えたごとに、いったんドリルストリングを揚管して、ケーシングとよばれるパイプを坑井内に挿入し、パイプと坑井との間の隙間にセメントを送入して固定します。

石油坑井の掘削は、石油や天然ガスなどの高圧流体が地下に存在することを前提としています。そのため、掘削装置には防噴装置（blowout preventer, BOP）とよばれる掘削中に坑井の入口を密閉できる安全弁のような役割をする装置を必ず備えています。防噴装置は高圧の地層から坑井内に流体が流入した場合に、それが地上に噴出してこないように坑井内の圧力を抑制・制御する作業（抑圧作業、ウエルコントロールなどという）を行うときに用います。温泉や地下

水をくみ上げる井戸の掘削にも、とくに深度が数百から千 m を越えるような場合には、ロータリー掘削が用いられることが最近では多いようです。しかし、防噴装置がこれらの水井戸掘削用の装置に備えられることはほとんど無く、この点は石油のロータリー掘削装置との決定的な違いであるといえます。

3. 現在の技術でどれぐらいの深さの坑井を掘ることができるのか？^{2,3}

「大深度」という言葉は日常生活のなかでもたびたび耳にする言葉で、例えば都市の地下開発では 40 m 以深を指して大深度地下などと言ったりします。石油掘削の分野では、統一された定義はありませんが、一般的に 15,000 ft (約 4,500 m) より深い坑井を大深度坑井、20,000 ft (約 6,000 m) より深い坑井の掘削を超深度坑井と分類することが多いようです。

図 1 に示したように、ロータリー掘削が用いられるようになって以降、掘削深度の記録は 1938 年に 15,000 ft を、1950 年に 20,000 ft の壁を越えました。そして、1974 年に米国オクラホマ州で掘削された Bertha Rogers 1 という名前の天然ガス試掘井の深度 9,583 m (31,441 ft) が陸上掘削での世界記録になっています。日本国内では、1968 年に深度 5,000 m を超え、1990 年には 6,000 m の壁を突破しました。現在では 1993 年の基礎試錐「新竹野町」での 6,310 m が国内の掘削深度記録になっています。

ところで、以上に挙げたのはいずれもいわゆ

る垂直坑井ですが、坑井は必ずしも鉛直下向きに真っ直ぐに掘られるわけではありません。意図的に坑井の軌跡(坑跡)を曲げて、つまりコントロールしながら傾斜させて掘削した坑井を傾斜坑井といいます。このような傾斜坑井には、目的や形状によって、例えば図 4 に示すようなものがあります。水平坑井(horizontal well)は、石油の埋蔵している地層(油層)のより広い範囲をカバーすることによって石油の生産効率を向上させることを目的として、油層内の長い区間を水平に掘削する坑井です。1本の坑井から横方向に延びる坑井を複数掘削し、1本の坑井から複数の油層にアクセスすることで生産効率の向上を図ろうという坑井もあり、これはマルチラテラル坑井(multilateral well)といいます。また、経済性や環境保全などの問題から、目的の地層の直上から掘削を行うことが困難な場合に、ターゲットの油層までの偏距が非常に大きくなるように掘削された坑井を大偏距坑井(extended reach well)といいます。

このような傾斜坑井では図 5 に示すように深度を表します。掘削深度(measured depth, MD)は坑跡に沿って測定した坑井の深度(長さ)で、通常は単に深度といったときにはこの掘削深度のことを指します。一方、坑跡に依存しない鉛直方向の深度を垂直深度(true vertical depth, TVD)といいます。また、坑井の傾斜角は垂直からの角度で表します。したがって、垂直な坑井の傾斜角は 0 度、水平な坑井の傾斜角は 90 度になります。

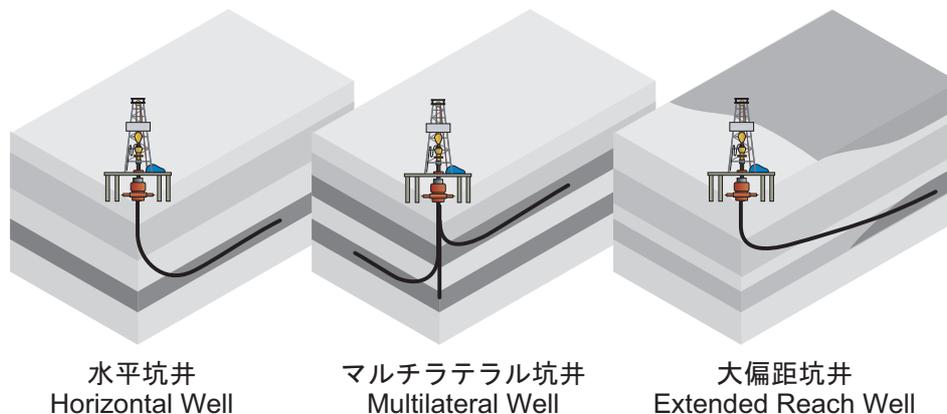


図 4 さまざまなタイプの傾斜坑井

傾斜坑井の掘削には、垂直坑井とはまた違った技術が必要となるわけですが、近年、傾斜坑井、とくに大偏距坑井の掘削数が増えています。英国の Wytch Farm 油田では偏距が 10 km を超える大偏距坑井が既に何本か掘削されています。1999 年には偏距 10,728 m、垂直深度 1,637 m、掘削深度 11,278 m の坑井が掘削され、掘削深度と偏距の世界記録になっています。日本国内では、1994 年に掘削された磐城沖ガス田での偏距 3,881 m が最大偏距記録です。これまでに掘削された主要な坑井の深度(垂直深度と偏距)をグ

ラフにプロットすると図6のようになります。このグラフを見ると、現在の坑井掘削技術によってどの程度の深度の坑井が掘削可能かが分かります。もちろん地域によって掘削の困難さが異なり一概にはいえませんが、実線で示した包絡線の左側の領域内にあるターゲットに到達する坑井の掘削が可能といえます。

これ以外にも科学掘削の分野では、ロシアのコラ半島で掘削された SG-3 という坑井が 1992 年に垂直深度 12,261 m (40,226 ft) を記録しました。また、ドイツの超深部学術ボーリング計画 KTB では、1994 年に垂直深度 9,101 m を達成しています。しかし、石油や天然ガスの開発では、垂直深度が 6,000 m を超えるような超深度坑井では、探鉱リスクの増加や技術課題がなお多いといわれ、鉛直方向の大深度化の傾向はここ数十年ほど停滞しているといえます。実際のところ、石油を生産した坑井としては 1956 年の米国ルイジアナ州の 6,542 m (21,465 ft)、天然ガスでは 1977 年のテキサス州の 8,088 m (26,536 ft) が最も垂直深度の深い坑井です。近年の傾向として、坑井の大深度化は、鉛直方向ではなく、大偏距化や坑跡の複雑化に向かって進んでいるといえます。

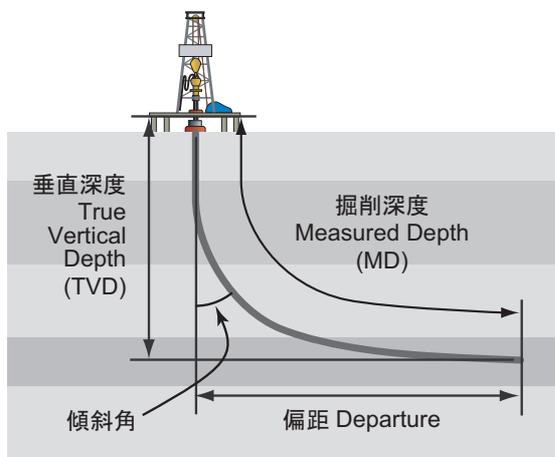


図5 坑井の深度の表し方

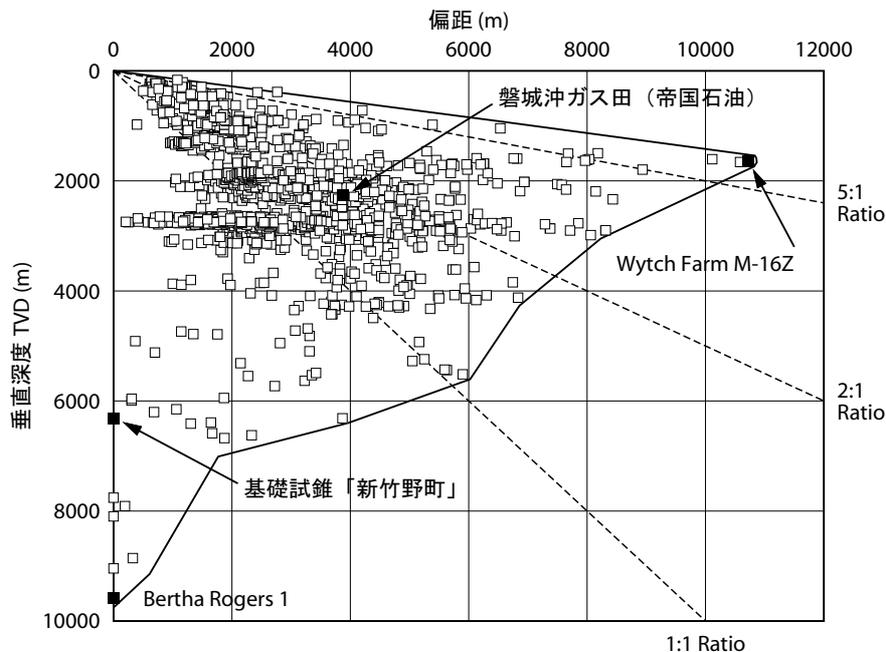


図6 石油の開発探鉱における大深度・大偏距掘削の実績

4. 掘削作業の自動化^{2,4-6}

前述のように今日では、新たな石油・天然ガス資源を求めて、より深い地層や大水深海域での坑井掘削や、水平坑井やマルチラテラル坑井、大偏距坑井といった複雑な軌跡の傾斜坑井が掘られることが増えてきました。しかしながら、石油の坑井掘削は100年以上にわたってロータリー掘削法によって行われ、基本的な部分は変わっていません。坑井掘削法の概念を根本から覆すほどの画期的な技術革新というのは今のところなく、ロータリー掘削の枠の中で技術開発が進められているといえます。

そのなかで、従来人間の手で行ってきた作業を機械化する試みは比較的早くから行われてきました。石油の掘削作業、特にやぐら下での作業は、重量のある鋼管や器具の取り回しといった危険で重労働を伴う作業です。人間に代わってこうしたやぐら下での作業を機械化し、掘削作業の効率と安全性の向上を図るための技術や装置をいくつか紹介します。

第2節に述べたとおり、ロータリー掘削においてビットを回転させる基本的な方式は、ロータリーテーブルによってケリーを回転させる方式でした。現在ではこの方式の他に、1970年代以降米国のボーエン社やバルコ社などによって開発・商品化されたトップドライブシステム (top

drive system, TDS) とよばれる方式が用いられています。トップドライブシステム (あるいはパワースイベル) は、スイベル部分にドリルストリングの回転駆動装置 (モーター) を内蔵しており、ケリーを用いないで直接ドリルパイプを接続してドリルストリングを回転させます。また、装置自体が滑車に吊られた状態にあるため、回転によるトルクやそれに伴う振れを抑えるために、トップドライブシステムはやぐら内に設置されたガイドレールに沿って昇降します (図7)。

ドリルパイプがトップドライブシステム、すなわちスイベルに直接接続されるため、揚降管作業時に泥水の循環とドリルストリングの回転を行いながらドリルストリングを引き上げることができ、さまざまなトラブルに対処できるようになりました。また、ケリーを用いないことにより、ドリルパイプを3本単位のスタンド (長さ約27 m) で継ぎ足しながら掘削でき、作業効率が大幅に上がるという利点もあります。通常は、継ぎ足し無しで一度に掘進できる長さはケリーの長さに依存し、これはドリルパイプ1本分です。トップドライブシステムは国内でも1990年代に導入が進み、各社の主要掘削リグに装備されています。今ではトップドライブシステムは決して特殊な装置ではなく、ロータリー



図7 トップドライブシステム
(左: Varco 社製 TDS-3, 右: National Oilwell 社製 PS500/500)

テーブルと同様に標準的に用いられています。

トップドライブシステムと組合わせて使用することによって、やぐら下の作業の多くを機械化できる装置に、同じくバルコ社によって1975年ごろ開発されたアイアンラフネックがあります。ドリルストリングを構成するパイプ類はすべてねじによって接続されていて、揚降管時のねじの締め付けおよび戻し作業は、通常はトンクとよばれる大型のパイプレンチをかけて人力で行います(図8)。アイアンラフネックは、レール上を自走可能な台車フレーム上に油圧で作動するレンチを搭載した装置で、パイプ類のねじの締め戻し作業を半自動で行えます(図9)。

さらに、パイプラックとの間や、やぐら下(やぐらの内側)でのパイプ類の移動などのハンドリングを自動で行う装置の開発も進められています。現在使われているパイプハンドリングシステムの多くは、海洋掘削リグに装備されています。海洋掘削では船体の動揺や厳しい海象条件のために、人力によるパイプハンドリング作業がより困難かつ危険であることが多いため、海洋掘削リグでの導入が比較的早くに進みました。統合国際深海掘削計画(IODP)の主力掘削船として2007年から運用開始予定である、(独)海洋研究開発機構(JAMSTEC)の地球深部探査船「ちきゅう」にも最先端のパイプハンドリングシステムが導入されています(図10)。「ちきゅう」は、石油掘削と同様のマリンライザー

を用いた掘削方式による水深2,500 m、海底下7,000 mの掘削を目指して設計された掘削船です。掘削装置には、トップドライブシステムやアイアンラフネックの他に、トップドライブ装置の下とフィンガーボードとの間のパイプの移動を行うパイプラッカーや、パイプラックエリアとパイプラッカーとの間のパイプの移動を行うパイプトランスファーシステムといったフル装備に近いパイプハンドリングシステムが搭載されています。

最後に、陸上掘削リグでこのようなパイプハンドリングシステムを装備した近代的な掘削装置を1つ紹介しておきます。図11は、帝国石油株式会社が1997年に導入した深度2,000～3,000 mの掘削能力を持つセミオートマチック小型掘削リグです。トップドライブシステムに加えて、パイプラックからやぐら下までパイプ類を移動することのできるパイプハンドリングシステムを備えています。このパイプハンドリングシステムは、陸上リグとしては当時世界で初めて実用化されたものです。



図8 トンクを使ったツールジョイントのねじの締め戻し作業



図9 Varco社製アイアンラフネック



図 10 地球深部探査船「ちきゅう」(左：掘削船全景，右：パイプハンドリングシステムを備えたやぐら下の様子)



図 11 セミオートマチック小型電気リグ 610-E (左：掘削リグ全景，右：パイプラックからやぐら下へドリルパイプを移動しているところ)

文献

- 1) Brantly, J. E., 1971: *History of Oil Well Drilling*, Gulf Publishing, pp. 1473-1474.
- 2) 石油技術協会, 1993: 最近の我が国の石油開発, 「第2章 さく井技術の進歩」, pp. 243-334.
- 3) 石油技術協会, 2004: 石油・天然ガス資源の未来を拓く - 最前線からのメッセージ -, 「第2部 第2章 新分野を開拓した掘削技術」, pp. 184-209.
- 4) Aldred, W. *et al.*, 2005: Changing the way we drill. *Oilfield Review*, Vol. 17, No. 1, pp. 42-49.
- 5) 独立行政法人海洋研究開発機構, 2005: 海と地球の情報誌「Blue Earth」, 2005年7-8月号 (通巻78号).
- 6) 平川良輝, 1998: セミオートマチック小型電気リグ 610-E の概要, 石油技術協会誌, 第63巻, 第5号, pp. 388-392.