

最新の坑井掘削技術（その10）

東京大学 大学院工学系研究科
エネルギー・資源フロンティアセンター 助教
長 縄 成 実

新年度を迎えて、筆者の所属先は「エネルギー・資源フロンティアセンター」に変わりました。これまで所属していた地球システム工学専攻は、環境海洋工学専攻（旧船舶工学）およびシステム量子工学専攻（旧原子力工学）と一緒に、新たにシステム創成学専攻となりました。この3専攻の合併に伴い、地球システム工学専攻のなかの石油開発と金属鉱物資源開発に関わる研究を行っているメンバーは、システム創成学専攻ではなく、「センター」を新設し、そこに移ることとなりました。

地球システム工学専攻の前身である鉱山学科は、東京大学のなかでも最も古い歴史を持つ学科のひとつで、昭和39年に資源開発工学科へ、平成6年には地球システム工学科へと時代とともに名称を変更してきました。大学はもともと4年制の学部・学科に大学院が併設される形をとっていましたが、平成7年からは大学院の研究科・専攻が教職員の本務組織となり、別途学部・学科の教育を担当するという形になりました。これに伴って我われも工学部地球システム工学科から大学院工学系研究科地球システム工学専攻へ所属換えになりました。平成12年には学科の再編に伴って地球システム、環境海洋、システム量子の3学科（このとき精密工学科も合併したが後に独立）が合併し、一足先にシステム創成学科が誕生しました。その後は大学4年まではシステム創成学科、大学院は地球システム工学、環境海洋工学、システム量子工学の3つの専攻という具合に学科と専攻が一对一に対応しない状態にありました。

今回の専攻の合併は、学科と専攻が一致した（厳密には完全に一对一ではありませんが）こと

も大きなメリットの一つではありますが、なにより、旧来の枠組みに囚われずそれぞれの専門領域で培われた知識や技術を統合することによって、現代社会が直面するさまざまな課題に対する具体的なソリューションを提供し、新しい価値の創出や革新的なシステムを創成することを目指したものです。同時に、この新専攻と連携して、環境との調和を軸に将来にわたるエネルギー・資源の安定的かつ持続的供給のための先進的研究を行う組織として誕生したのが「エネルギー・資源フロンティアセンター」です。鉱山学科から続いた学科・専攻単位での資源開発系の組織が消えたことは寂しいですが、石油開発を始めとして資源開発に関する大学での研究開発は、学内外の他組織との連携のもとにますます活発になっていくものと考えています。

さて前置きが長くなりましたが、今回はコイルドチュービング技術の解説をします。

1. コイルドチュービング技術とは^{1,2)}

リールに巻き取られた状態の鋼管をコイルドチュービング (coiled tubing, CT) と呼び、コイルドチュービングを作業ストリングとして用いて様々な坑内作業を行う技術をコイルドチュービング技術といいます。コイルドチュービングは最初から1本に繋がっていて、ドリルパイプ（掘管）のツールジョイントのような径の太い継ぎ手部分がありません。地上でリールから繰り出されたコイルドチュービングは、まっすぐに伸ばしながら坑井内に降下され、坑内作業を終えた後には再びリールに巻き取りながら引き揚げられます。現在用いられている標準的なコイ

ルドチュービングの外径は3/4 ~ 4 in(19.05 ~ 101.6 mm)で、ひとつのロールに巻かれるコイルドチュービングの長さは30,000 ft (9,144 m)を超えます^{注1}。

ドリルパイプ、ケーシングパイプ、チュービングといったいわゆる油井用鋼管は、その製造方法によって溶接鋼管と継目無鋼管（シームレス鋼管）に大別できます（図1）。溶接鋼管は、帯状の鋼板（鋼帯）を連続圧延によって筒状に丸めながら管の長手方向にできる継ぎ目を溶接して製造します。多くの油井用鋼管のように電気抵抗溶接によるものは電縫鋼管とも呼ばれます。一方の継目無鋼管は、文字通り溶接鋼管のような長手方向の継目の無い鋼管で、丸棒状の鋼材に穿孔して中空丸棒とした後に圧延して所定の肉厚や管径に成形します。ドリルパイプは継目無鋼管、ケーシングパイプやチュービングは継目無鋼管または溶接鋼管として製造されます。

コイルドチュービングは溶接鋼管で、幅が48 in 程度のロールに巻かれて供給される炭素鋼の鋼板から、製造予定の鋼管の直径に合わせた周囲長の幅に裁断した鋼帯を作り、これを連続圧延によって丸めながら溶接し円管に成形します。ロール鋼板の長さは最大で3,500 ft にもなり、したがってこれを用いれば一度に3,500 ft の長さのコイルドチュービングを製造すること

ができます。それ以上の長さが必要な場合には、溶接によって継ぎ足すこととなります。この継ぎ足し部分の溶接は強度的に弱いので、単に端部を突き合わせて溶接するのではなく、現在では図2に示すように鋼帯の端辺を斜めに裁断して溶接するバイアス溶接と呼ばれる方法が用いられます。

さて、コイルドチュービング技術に関する業界団体に、1994年に設立された Intervention and Coiled Tubing Association (ICoTA) があり、SPE との共催でコイルドチュービング技術に関する国際会議の開催なども行っています。筆者の記憶では、以前は International Coiled Tubing Association というのが ICoTA の正式名称であったと思うのですが、この原稿を執筆するに当たって改めて Web ページを訪れてみると、International ではなく上記のように Intervention and となっていました。Well Intervention には、ぴったり当てはまる日本語の専門用語がなく、そのままウエルインターベンションと言ったり、坑井介入作業などと表現したりします。地上から坑井内に機器を降下して行うあらゆる種類の坑内作業の総称として用いられます。コイルドチュービング技術は、後述するように、まさにウエルインターベンション作業に最適のツ

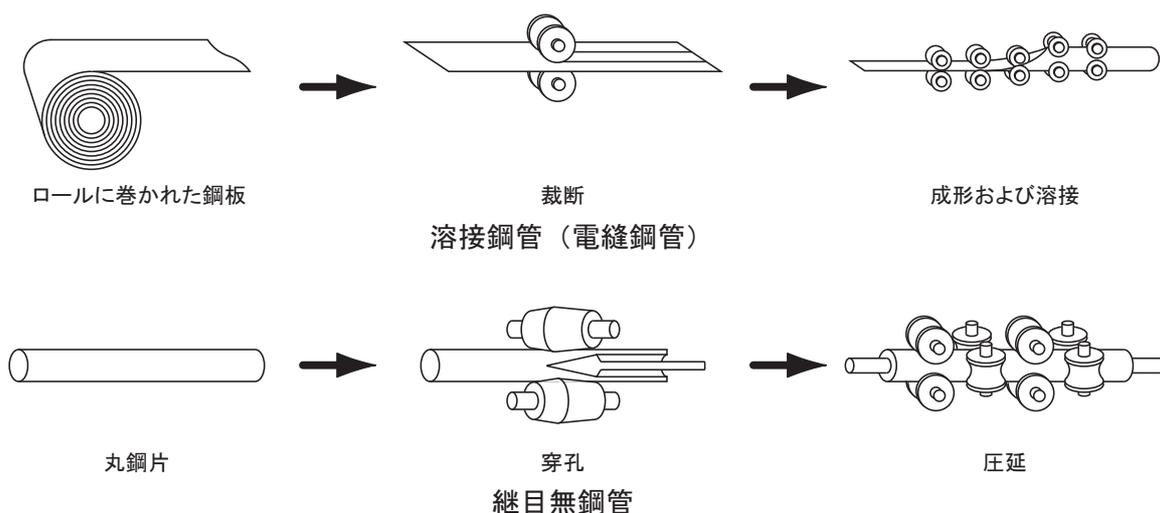
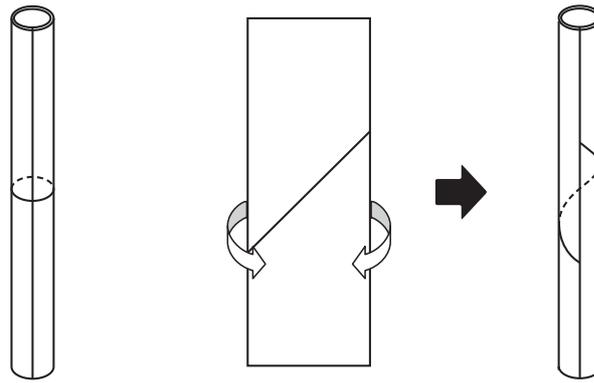


図1 油井用鋼管の製造方法の違い³⁾

^{注1} 1 in = 25.4 mm, 1 ft = 0.3048 m.



通常の突合せ溶接

バイアス溶接

図2 バイアス溶接によるコイルドチューブの継ぎ足し接合

ルといえます。

本稿でも参考にしますが、ICoTAのWebページから「An Introduction to Coiled Tubing」という資料を入手することができます¹⁾。英語で書かれていて専門用語もちらほら見られますが、コイルドチューブ技術について大変簡潔にまとめられていますので一読をお薦めします。

2. コイルドチューブの歴史^{1,2,4)}

既にいろいろなところで紹介されているように、コイルドチューブ技術の起源は第二次世界大戦中の連合軍のPLUTO (Pipe-Lines Under The Ocean) 作戦にあります。1944年6月6日にフランス北西部ノルマンディーへの上陸を果たした連合軍のその後の侵攻に合わせて、必要となる燃料油をイギリスからフランスへ供給するためのパイプラインをイギリス海峡の海底に敷設しようと計画された作戦です。敷設されたパイプラインの本数は文献によって多少異なる記述がされていますが、まず最初にイギリス南部のワイト島からノルマンディー上陸作戦が展開されたコタンタン半島へ4本(距離約113 km)、つづいてイギリス海峡北東部のドーバー海峡(フランスではカレー海峡という)付近に17本(距離約48 km)が敷設されたという数字がもっともらしいようです。

このとき用いられたパイプには「HAIS」および「HAMEL」と呼ばれる2種類のものがありま

した。いずれも開発者たちの名前の頭文字を繋げたもので、この単語自体に意味はありません。HAISパイプは直径3 inの鉛管を芯としてその外側に何層にも被覆が施されたフレキシブルパイプで、当時既に電信用海底ケーブルに用いられていたものです。一方のHAMELパイプがコイルドチューブの原点といえる鉄製の鋼管で、内径3 in、長さ40 ftの鋼管を溶接によって繋ぎ合わせて4,000 ftもの長さに作られました。HAMELパイプは、巻き芯の直径が40 ftという巨大なドラムに巻かれ、海上に浮かべたこのドラムを船で曳航しながら海底に敷設されました。最初の4本のうちの2本と後の17本のうちの6本がHAMELパイプでした。

コイルドチューブの石油開発での利用は、1962年にBowen社が「連続ストリング式軽量ワークオーバー装置」の試作機を製作し、実際にメキシコ湾で油・ガスの生産井内に堆積した砂の除去作業に用いたのが最初です。外径1.315 in、全長15,000 ftのコイルドチューブが、巻き芯の直径が9 ftのリールに巻かれて用いられました。このときのコイルドチューブは50 ftの長さに製造された鋼管を突合せ溶接と呼ばれる溶接法で繋いで作られていました。

溶接によって継ぎ足して作られるコイルドチューブは、繰り返し加えられる曲げや坑井内での引張りの力に弱く、地上機器の信頼性も十分とは言えなかったため、しばらくの間は本

格的な普及を見ることはありませんでした。それでもコイルドチュービング技術の開発と性能の向上は継続して進められ、1970年代後半には1,500 ftの長さのコイルドチュービングを一度に製造できるまでになっていました。そして、その後のコイルドチュービング技術の飛躍的な発展の契機となったのは、1983年にコイルドチュービング製造会社のひとつである Quality Tubing 社に対して、日本の鉄鋼メーカーが長さ3,000 ftのロール鋼板の供給を始めたことです。この原料鋼板を用いることによって長さ3,000 ftを1本の鋼管として作れるようになり、コイルドチュービングの弱点である溶接箇所を一気に半減することができました。さらに1980年代後半には、前述のバイアス溶接法が開発され、コイルドチュービングの疲労破壊に関する研究も進んで、強度と信頼性を高めることに成功しました。1990年代に入ると、初めて2 inという大口径のコイルドチュービングが製造され、その後4-1/2 in径までの様々な直径のコイルドチュービングが製造されるようになりました。こうしてコイルドチュービング技術は、1990年代に入ってウェルインターベンションのための有効なツールとしての地位を確立しました。

2005年8月現在、全世界で1060台のコイルドチュービング装置が利用可能で、その約半数が北米大陸にあり、東アジアにも63台の装置があります。文献⁵⁾には1992年時点での全世界のコイルドチュービング装置の総数は500超との記述が見られます。試作機が誕生してから約30年かけてようやく500台に達したコイルドチュービング装置は、その後の13年ほどの間に倍増したことになります。

3. コイルドチュービングで用いられる機器^{1,2)}

コイルドチュービング装置(コイルドチュービングユニット)は、図3に示す機器を中心として、以下の5つの主要機器から構成されます。

- リール
- インジェクターヘッド
- 制御室
- 動力源

● ウェルコントロール機器

リールには回転駆動装置(油圧モーター)および制動装置(ブレーキ)が付いていて、コイルドチュービングを繰り出したり巻き戻したりします。コイルドチュービングのリールへの巻き始めの末端は、リール軸に内蔵されたスイベル(回転継ぎ手)機構の付いた高圧配管に接続されます。このスイベル機構によって、リールが回転していても、連続的にポンプからコイルドチュービング内に流体を送り込むことができます。リールへの巻き取り口の部分にはレベルワインドと呼ばれる巻き取り補助装置が備えられ、コイルドチュービングのリールへの巻き取りやリールからの繰り出しが整列して正しく行われるようにガイドする仕組みになっています。また、この部分にはチュービングカウンターと呼ばれる、コイルドチュービングの繰り出し長を計測する装置も取り付けられています。リール径は、一般に最低でもコイルドチュービングの外径の20倍以上が必要とされ、標準的にはコイルドチュービング径に合わせて5~8 ftのものが用いられます。

インジェクターヘッドは、リールから繰り出されたコイルドチュービングを坑井内に降下したり揚管したり、場合によっては坑井内に押し込んだりするための装置です。チェーン駆動されるグリッパーで、コイルドチュービングを左右両側から挟んでパイプを上下に動かします。上述のリールに付いている回転・制動機構はリールでのコイルドチュービングの繰り出し・巻き取りを補助するもので、実際の坑内への揚降管は、このインジェクターヘッドによって行われます。インジェクターヘッドの上部には、リールから伸びるコイルドチュービングを垂直にインジェクター部および坑口へ導くためのガイドアーチ(グーズネックとも呼ばれる)が設置されています。多くのコイルドチュービング装置では、インジェクターヘッドには支持脚が付いていて、クレーンやポータブルマストのウインチから吊り下げられた状態で用いられます。

標準的なコイルドチュービング装置の動力源はディーゼルエンジンで、各種油圧装置や油圧

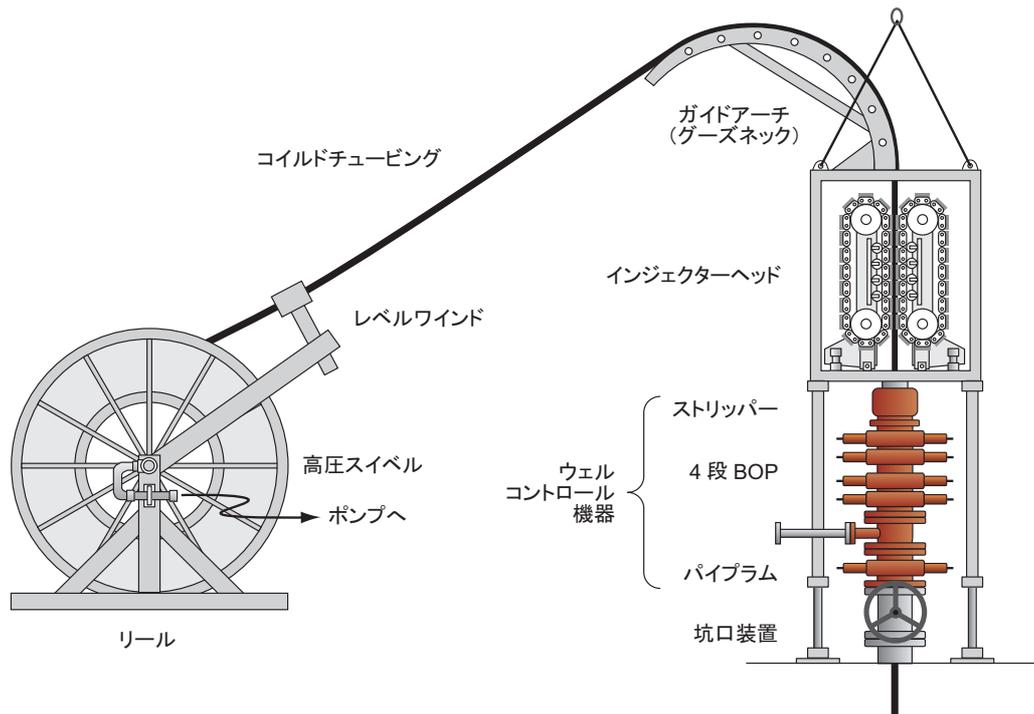


図3 標準的なコイルドチュービング装置

モーターの駆動，発電による電力供給を行います。また，機器の操作，作動状況や計測データのモニターはすべて制御室で一元的に管理されます。

コイルドチュービング用の標準的なウェルコントロール機器は，インジェクターヘッドの下部の坑口装置との間に設置され，上から順にストリッパー，BOP，さらにはBOPを締めた後の制御を可能にするためのフローラインとパイプラムで構成されます。コイルドチュービング技術は，坑井を生かしたままで，つまり坑井のアニュラス部分に圧力がかかったままの状態で行えることが特長です。それを可能にするのがストリッパーで，アニュラー型のBOPに類似した機構によりコイルドチュービングの周囲を弾性体で締め付けて圧力を遮断し，その状態でコイルドチュービングを上下動かすことができます。アンダーバランス掘削に用いられるローターティングヘッドと同様の働きをします。

コイルドチュービング用のBOPには，2段や3段のものもありますが，標準的には4段の

BOPが用いられます。下からパイプラム，スリッパラム，シアラム，ブラインドラムの順に構成されます。パイプラムはコイルドチュービングの外側を挟んでアニュラス部分の圧力を遮断するラム型BOPです。スリッパラムは，ラムの内面にギザギザの歯が付いていて，コイルドチュービングの重量を支えたり，あるいは噴出があったときのように上向きに動こうとするコイルドチュービングを掴んで抑える役目をします。ちなみに，ローターテーブルの穴とドリルパイプの周りの隙間に楔のように咬ませて，ドリルパイプが滑り落ちないように保持する器具をスリップといい，名前の由来はこれと同じです。シアラムは緊急の場合にコイルドチュービングを切断できるもので，切断された上部のコイルドチュービングを取り除いた後に坑井を完全に密閉することができるように，さらにその上部にブラインドラムが設置されます。

4. コイルドチュービングの特徴^{1,2,4,5)}

以上で見たように，コイルドチュービング技術の最も大きな特長は，坑井を生かしたままで

ウェルインターベンション作業を行えることで、揚降管などの作業中に連続的に流体を循環することもできます。また、コイルドチュービングが小径であるため、既存の生産用のチュービングの中に作業ストリングとして降下するスルーチュービング方式によるインターベンション作業が行えます。このため、コイルドチュービング技術は以下のような仕上げ作業や改修作業によく利用されます。

- 酸処理などの坑井刺激（坑井近傍の地層の孔隙内を処理して浸透率の向上を図る）
- 自噴誘導（坑井内の圧力を低下させて貯留層内の油ガスを坑井内に導き、自噴可能な状態にする）
- 坑内洗浄（砂などの沈殿物を坑井内から除去する）
- 採揚作業（坑井内の遺留物の回収作業）

また、インジェクターによってコイルドチュービングを坑井内に押し込むことが可能であるため、重力だけに頼ったワイヤーラインでの降下が難しい高傾斜・水平坑井における検層ツールや各種坑内ツールの搬送にも用いられます。その他に、廃坑のためのセメンティングなどの坑内作業への利用もなされています。

コイルドチュービング装置は、多くの場合、図4に示すようにトレーラーやトラックに積載さ

れ、非常に可搬性が高く、設置面積が小さく、装置の組み立てに要する時間も短くて済みます。装置がコンパクトであるため、作業人員も少なく済みます。また実際の作業においても、ドリルパイプや通常のチュービングのようにパイプを接続あるいは切り離しながら揚降管する必要がないため、作業時間を大幅に短縮することができる利点があります。このため、掘削リグを動員して坑内作業を行うことに比べると、大幅なコストの削減が望めます。

一方でコイルドチュービング技術にも欠点があります。装置や方式に起因する欠点は次の掘削の項で触れることにして、ここでは国内で発生したトラブルの事例を文献⁶⁾から紹介します。

掘削を終えてドリルステムテスト（ドリルストリングを使用して行われる産出試験）によって十分な生産能力を確認した後に休止井となっていた坑井に対して、生産を開始するために坑内洗浄を中心としたコイルドチュービングを用いた改修作業を実施しました。ところが、コイルドチュービングを巻き上げる作業の最中に抑留および破断が発生し、3,500 m 以上のコイルドチュービングを坑井内に遺留してしまいました。採揚作業によって結果的にほとんどのコイルドチュービングを回収することができましたが、その作業は非常に困難なものでした。この

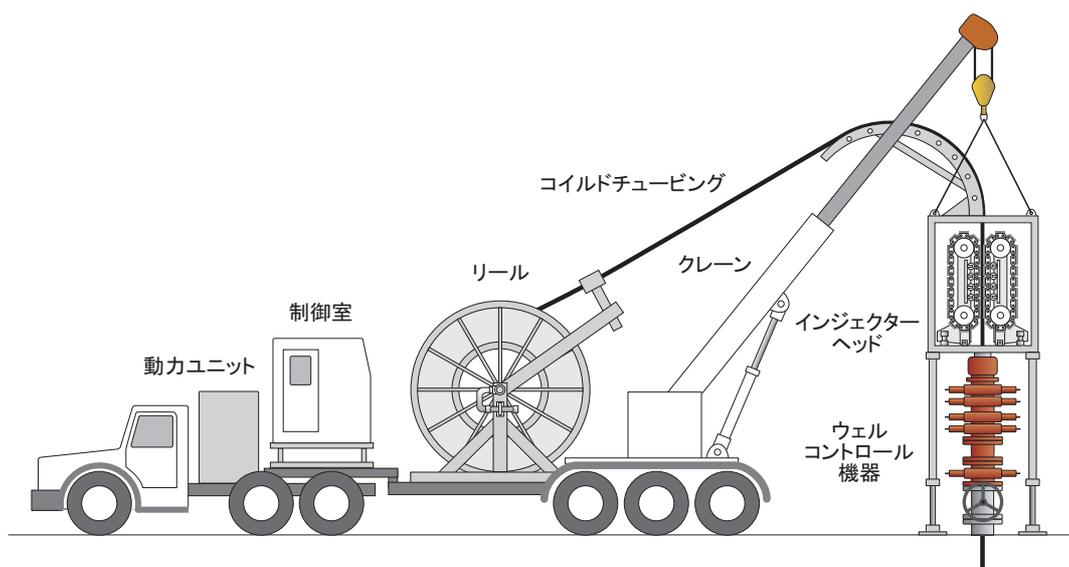


図4 トレーラーマウント型のコイルドチュービング装置

報告のまとめでは、「コイルドチュービング技術は大変便利であるが、万一トラブルが発生したときには、その小径さゆえに物理的、技術的に非常に難しい改修作業を強いられるため、事前に作業手順やリスクを十分に検討することが重要である」ことが指摘されています。

5. コイルドチュービング掘削^{1,2)}

コイルドチュービングを用いた掘削をコイルドチュービング掘削 (coiled tubing drilling, CTD) といいます。コイルドチュービング技術は、その特徴から仕上げや改修作業において威力を発揮することを紹介してきましたが、当然ながらそのメリットを掘削作業へ応用する試みもなされてきました。これまでに見てきたように、石油・天然ガス坑井の掘削に用いられるロータリー掘削では、長さ約9 mのドリルパイプを

延々と継ぎ足しながら何千メートルという深さの坑井を掘削していきます。コイルドチュービングを用いて掘削作業を行えば、揚降管の時間を大幅に短縮でき、結果的に大きなコスト削減につながることを期待できます。

ところが実際には、標準のコイルドチュービング装置だけでは口元の大坑径の掘削やケーシング設置作業などの鋼管のハンドリングができないために、コイルドチュービング掘削には、やぐらを備えた専用のコイルドチュービング掘削装置が用いられ、通常の掘削リグと組み合わせた装置が用いられます。国内で初めて行われた1999年の石油公団柏崎テストフィールドでのコイルドチュービング掘削試験では、図5のようにコイルドチュービング装置が掘削リグと組み合わせて用いられました。こうなると、コイルドチュービング技術の大きな特長の

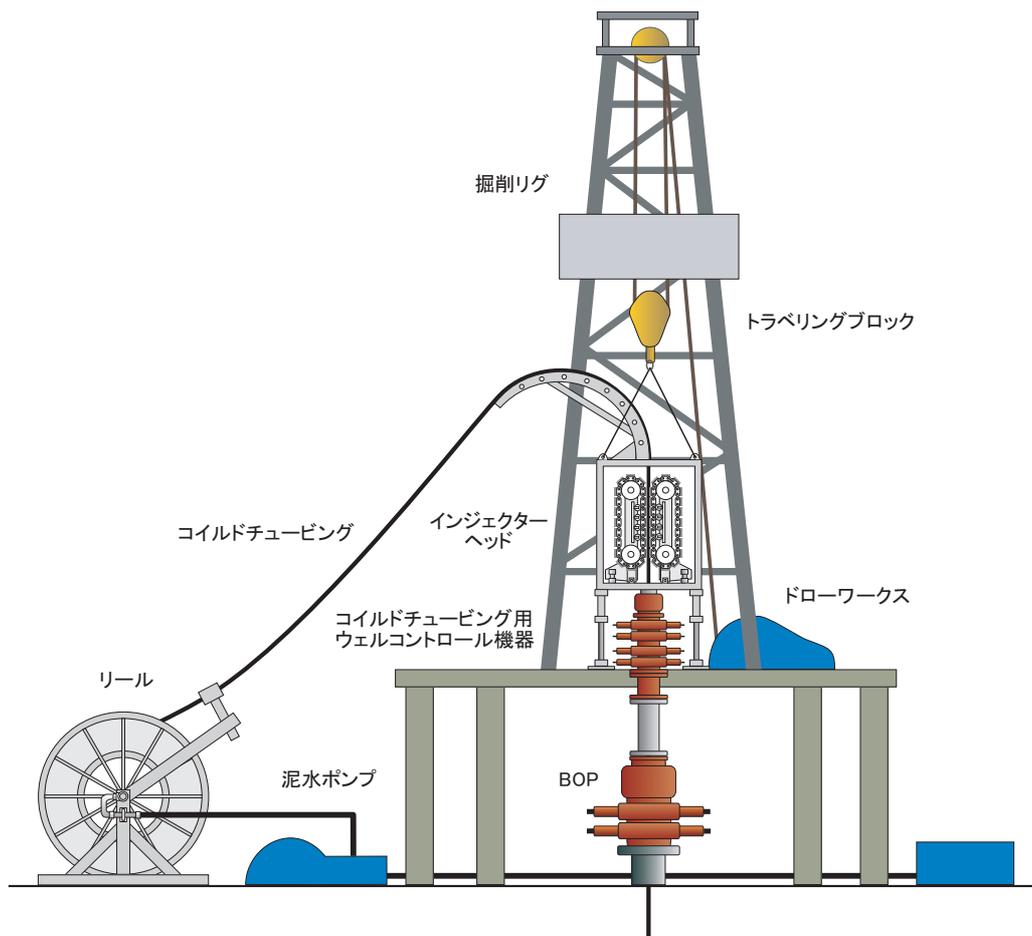


図5 コイルドチュービング装置と通常の掘削リグの組み合わせ

ひとつであった装置の可搬性や作業に必要な面積や装置組み立ての時間が少ないなどといったメリットがほとんど無くなってしまいう場合も生じます。

この他にもコイルドチュービングを掘削作業に利用しようとしたときには次のような点が問題となります。

- パイプの回転ができない（傾斜坑井での掘削運搬不良，坑井の屈曲）
- パイプが小径である（坑径，泥水循環レート，トルク，ビット荷重などの制約）
- パイプの強度が小さい，寿命が短い（コスト増，トラブルの危険）

こうした欠点も考慮して総合的に判断すると，普通の坑井掘削では，従来のドリルパイプを継ぎ足して掘削する方式のほうが間違いなく有利であるため，コイルドチュービング掘削は現状では残念ながら世界的に広く普及した技術とはなり得ていません。

それでも，コイルドチュービング技術の利用が不可欠である掘削作業があります。ドリルパイプの接続および切り離しのための中断をすることなく，常に坑井内の圧力を制御しながら掘削作業を行うことが可能であるため，コイルドチュービング技術はアンダーバランス掘削（UBD）への利用で大きな威力を発揮します。現在，コイルドチュービングによる掘削で最も成果を挙げていると思われるのは，既存の坑井からサイドトラックによって傾斜坑井を掘削し，アンダーバランスで仕上げる方法です。アラブ首長国連邦（UAE）などの中東地域やカナダでは，アン

ダーバランス掘削やサイドトラックによるマルチラテラル坑井による開発へのコイルドチュービング掘削の適用の実績があり，これらの地域ではコスト的にも採算の取れる状況にあるといわれています。

文献

- 1) International Coiled Tubing Association, 2005: *An Introduction to Coiled Tubing*, <http://www.icota.com/> (cited 2008/4/25).
- 2) Sas-Jaworsky, A., II, Blount, C. and Tip-ton, S. M., 2006: *Petroleum Engineering Handbook, Volume II—Drilling Engineering*, Chapter 16—Coiled-Tubing Well Intervention and Drilling Operations, pp. II-687–II-742, Society of Petroleum Engineers.
- 3) JFE スチール, 2008: 製品カタログ「鋼管」, Cat.No.E1J-027-03, 08.03 改訂版.
- 4) Afghoul, A. C., *et al.*, 2004: Coiled Tubing: The Next Generation. *Oilfield Review*, Vol. 16, No. 1, pp. 38–57.
- 5) 岡田 徹, 1995: コイルドチュービングの応用技術について. 石油の開発と備蓄, '95・8, pp. 84–92.
- 6) 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. 石油技術協会誌, 第 70 巻, 第 5 号, pp. 417–425.