

最新の坑井掘削技術（その7）

東京大学 大学院工学系研究科
地球システム工学専攻 助教
長 縄 成 実

先日、東京渋谷の温泉施設で地下水とともに汲み上げられた天然ガスが原因となる爆発事故がありました。2年ほど前には、東京の北区や大分県で温泉掘削中に坑井から天然ガスが噴出して火災になる事故がありました。これらの事故を受けて、例えば東京都では温泉掘削等に係る可燃性ガス安全対策指導要綱を定めました。また、掘削後も含めた天然ガスの安全管理についても関係省庁で現在議論がなされているようです。

我々が携わっている石油・天然ガス開発の現場では、開発計画から坑井の掘削、生産、そして廃坑に至るまで、常に坑井の圧力を管理することが要求されます。今回は、坑井からの油ガスなどの噴出事故を未然に防ぐためのウェルコントロール（抑圧作業）とそのための機器、そしてこれに関連する事項を紹介します。

1. 暴噴

近代石油産業の始まりともいえるドレークの井戸が掘削されて間もない19世紀末の初期の石油掘削は大変危険なものでした。この頃は、石油を掘り当てると、油層が持っている圧力に任せてまず坑井から油やガスを噴出させ、圧力が低下して噴出の勢いが落ち着くのを待ってから、手作業で生産用のパイプを地面に挿入するというやり方をとっていました。ジェームス・ディーンの映画「ジャイアント」のなかにも、轟音を上げて石油が噴出するシーンが登場します。そのため、1861年の4月には既に、ウエストペンシルベニアの坑井掘削において、噴出した油に引火した火災によって19人が命を落としたという事故の記録が残っています。

もう一つ、以前紹介した1901年のテキサス州スピンドルトップの大噴出井（ルーカス井と呼ばれている）における噴出の状況をもう少し詳しく文献から引用しましょう¹⁾。深度880 ftに6インチ径のケーシングパイプを設置した後、さらに1,020 ftまで掘削したところで、掘れなくなったビットを交換するために揚管作業に入りました。するとその途中で何度か油やガスなどの地層流体が坑井内に流れ込むキックと呼ばれる現象が観察され、最後に坑井内から4インチ径のドリルパイプを吹き飛ばして大噴出が起きました。その勢いは凄まじく、坑井から噴き上がった油の柱は高さ100 ft以上にも達したといわれています。

この当時の坑井掘削では、噴出を防いだり制御するための特別の装置は何もありませんでした。ルーカス井は、9日間噴出を続けた後、ようやく遮断バルブを備えたパイプを坑口のケーシング上端に接続し、噴出をコントロールすることに成功しました。この間に噴出した油は、坑井の周りに急造された土の堤防によるビットに溜められ、その量は50万バレルにも及びました。しかし、これらの油はその数日後に発生した火災によってすべて失われてしまいました。

2. 噴出防止装置（BOP）

掘削深度の増加に伴い、地層の圧力も高くなり、噴出の発生頻度も増していきました。噴出あるいは暴噴は、莫大な経済的損失を被るのみならず尊い人命をも失いかねない危険を伴うため、坑井内の圧力を制御し暴噴を防止するための装置と手法の開発が必要となりました。

石油・天然ガスの坑井掘削装置には、図1～

4に示すような噴出防止装置 (blowout preventer, BOP, 暴噴防止装置または防噴装置ともいう) が坑口に備えられています。これは坑井を密閉する一種の安全弁のような役割をする装置です。現在使われている BOP は

- アニュラー型 BOP
- ラム型 BOP

の2種類に分けられます。ラム型 BOP の原型となった最初の BOP は 1922 年に作られ、油圧で作動するタイプが 1928 年に登場しました²⁾。また油圧作動式のアニュラー型 BOP が登場したのは 1936 年です。

アニュラー型 BOP はドリルパイプの周囲をぐるりと囲んだリング状の弾性体 (強化合成ゴ

ム) を、油圧によって締め付けるようにしてアニュラス部分を密閉します。ドリルパイプの直径によらずアニュラスを密閉でき、油圧の加減によっては、締め付けた状態でドリルパイプを動かすことも可能です。

ラム型 BOP は、スライド弁のような機構によって2つのラムで両横から挟むようにして坑井を密閉します。ラムのタイプには

- パイプラム (pipe ram)
- ブラインドラム (blind ram)
- シアラム (shear ram)
- ブラインドシアラム (blind-shear ram)
- バリアブルボアラム (variable bore ram)

があります。標準的なラムであるパイプラムは使用するドリルパイプの直径にあわせた半円形の切り欠きがあり、ドリルパイプを挟んでアニュラス部分のみを密閉します。したがって、使用するドリルパイプの直径に合ったラムを選択す

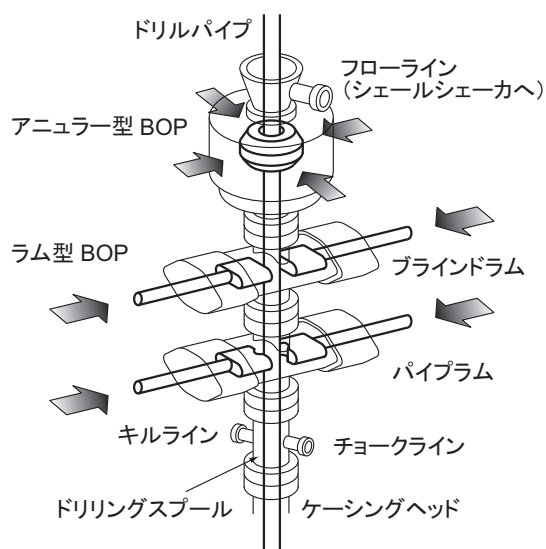


図1 BOP スタックと各 BOP の作動原理



図2 アニュラー型 BOP

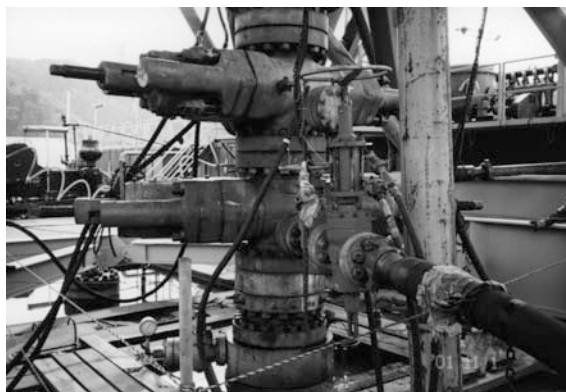


図3 ラム型 BOP

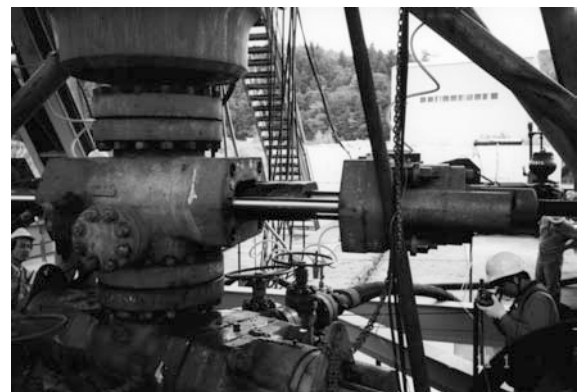


図4 ラム型 BOP のラムを引き出した様子

る必要があります。複数のパイプ径に対応したラムもあり、これはバリアブルポアラムといえます。ブラインドラムはラムの先端に切り欠きがなく、ドリルパイプが無い状態でも坑井を完全に密閉できるものです。シアラムはラムの先端部が刃のように鋭くなっていてドリルパイプなどを切断できるものです。パイプを切断して完全に坑井を密閉できるタイプはブラインドシアラムといえます。

通常は、さまざまな状況に対応できるように複数段のBOPを積み上げて構成したBOPスタックの形で用います。例えば、図1に示したのは中程度の圧力用(耐圧5,000 psi = 約35 MPa)の典型的なBOPスタックで、アニューラ型を1つとパイプラムとブラインドラムの異なるタイプのラム型を2つ組み合わせてあります。このほかにも、10,000 psi(約69 MPa)や15,000 psi(約103 MPa)といった高圧の坑井を密閉可能なBOPスタックの構成などが、アメリカ石油学会API(American Petroleum Institute)の規格のなかのガイドライン「RP 59-Recommended Practice for Well Control Operation」に示されています。高圧用のBOPスタックでは、各々のBOPの耐圧が大きいだけでなく、組み合わせるBOPの段数も多くなります。現在は耐圧20,000 psiのBOPも製造されていて、近年の大水深掘削ではアニューラ型を2段とラム型を6段という巨大なBOPスタックが用いられることもあります。図5は水深2,500 m、掘削深度10,000 mの能力を持つ地球深部探査船「ちきゅう」に搭載されている耐圧15,000 psiの海底BOPスタックです。

3. ウェルコントロール

掘削中に油やガスあるいは地層水などの地層内の流体が坑井の中に流入してくる現象を「キック(kick)」といいます。流体の流入を制御できなくなって地層流体が坑口にまで達し、地上に噴き上げてくる状態を噴出あるいは暴噴(blowout)と呼びます。もし坑井内に流入する流体がガスならば、ガスが膨張しながらアニューラス内を上昇することによって泥水柱圧(静水圧)がどん

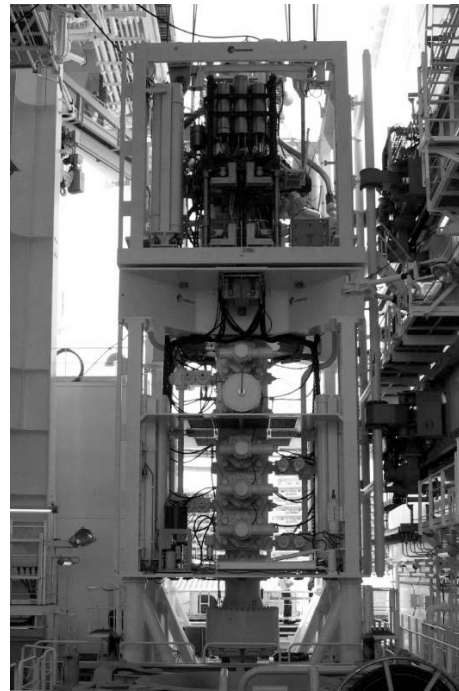


図5 地球深部探査船「ちきゅう」のサブシーBOP

どん小さくなるという悪循環に陥り、加速的にキックから暴噴へと進行し得ます。キックは噴出の兆候といえる状態で、キックを早期に検知して、適切に坑井内の圧力をコントロールし、噴出を防止するとともに掘削作業を再開できるように坑井内を安定させる必要があります。このような作業をウェルコントロール(well control)といえます。

キックなどの噴出の兆候が観察されたときには、BOPを閉めて坑井内の圧力を抑えるウェルコントロール作業すなわち抑圧作業に入ります。BOPを閉めた後には、図1に示したチョークラインおよびキルラインと呼ばれる2つの配管を用いて泥水の循環を行います。ドリルストリングが使える状態のときには、ドリルストリングから泥水を送入して、チョークラインから排出します。チョークラインの先は、油圧によって絞り具合を遠隔操作できるハイドロリックチョークなどを複数組み合わせたバルブおよび配管群であるチョークマニフォールドにつながっており、坑井アニューラスに背圧をかけながら泥水循環できます。ドリルストリングが坑井内にはない

ような状態のときには、泥水ポンプから分岐される配管につながっているキルラインから泥水を坑井内に送入します。

ウェルコントロールの代表的な手法には

- ドリラーズ法 (Driller's Method)
- ウェイトアンドウェイト法
(Wait-and-Weight Method)
- コンカレント法 (Concurrent Method),
サーキュレートアンドウェイト法
(Circulate-and-Weight Method)

といったものがあります。いずれも、適切な比重の泥水を坑井内に送り込んで、油やガスなどの地層から流入してきた流体を坑井から排出するとともに、坑底における坑井内の圧力を地層の圧力より高くなるようにコントロールして地層流体の流入を抑えます。各方法の違いをごく簡単に説明すると、ドリラーズ法はまず地層流体を坑井から排出する作業を優先させてから、次の段階で高比重の泥水を送って抑圧する方法で、ウェイトアンドウェイト法は十分な準備のうえで地層流体の排出と抑圧を同時に行う方法です。どちらも一長一短あるために、両者の長所を組み合わせた方法がコンカレント法やサーキュレート アンド ウェイト法であるといえます。

ウェルコントロールに関する技術や装置の開発の一方で、実際の掘削の現場において噴出が推定される状況下で適切な決断と対処を迅速かつ的確に行い事故を未然に防ぐには、作業従事者に対する十分な教育と訓練が必要となります。そこで、1990年代にウェルコントロールに関する資格認定制度が整備され、現在、国際掘削請負業者協会 IADC (International Association of Drilling Contractors) による Well-CAP (Well Control Accreditation Program) と IWCF (International Well Control Forum) の2つの資格認定制度が存在します^{3,4)}。これらの間には講習のカリキュラムなどに幾分違いがあり、操業する地域によってどちらの資格が要求されるかが異なるようです。日本では、石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) が

WellCAP による資格認定団体として正式に認可されていて、国内で年間数回のスクールを開催しています。

4. 噴出のさまざまな形態

暴噴すなわちブローアウトは、サーフェスブローアウト (地上暴噴) とアンダーグラウンドブローアウト (地下暴噴) に分けることができます。ここまではサーフェスブローアウトを防止する機器や方法について解説してきましたが、通常は単に噴出や暴噴といった場合は坑井から地上に油やガスが噴き上げてくるサーフェスブローアウトを指します。ところが、実際に起こった噴出事故のうちの約 65% はアンダーグラウンドブローアウトであるという統計があります⁵⁾。アンダーグラウンドブローアウトは、地上に噴き上げてこないがために、地下で起こっている現象を正確に把握することが難しく、加えて BOP などの地上装置を用いた制御ができないために、サーフェスブローアウト以上にその抑圧作業に手間とコストがかかるといわれています。

アンダーグラウンドブローアウトの典型的なメカニズムは図 6 のようになります^{6,7)}。掘削中の坑井内にキック層 (高圧層) と逸泥層の両方が存在し、坑井の中で地層流体が噴出しているものの逸泥層に逃げていってしまうために、地上まで噴出してこない状態にあります。その原因の一つは、図 6 左に示したように、キックをコントロールするために高比重の泥水を使用したことによって、それより浅部のケーシング下端 (シュー) 付近のような比較的地層破壊圧の小さい部分に想定以上の圧力がかかり、地層を破壊し逸泥が発生してしまったというものです。もう一つの典型的な原因は、図 6 右のように高圧層の下に低圧層が存在し、高圧層とバランスする高い比重の泥水のまま低圧層へ掘り込んだために逸泥が発生し、坑井アニュラス内の静水圧の一時的な低下が起きて高圧層からのキックを誘発するというものです。

アンダーグラウンドブローアウトは、地下での坑井を通した地層間の流体のフロー現象であるため、通常のサーフェスブローアウトのよう

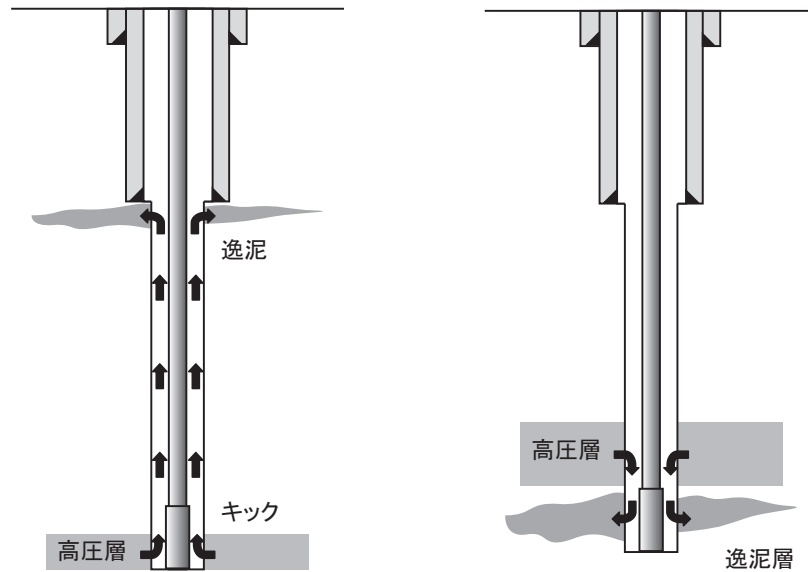


図6 アンダーグラウンドブローアウト

にBOPなどを用いた抑圧方法をとることができません。一般的に、ガンクプラグ（水和膨潤性をもった粘土であるベントナイトと軽油の混合スラリーによるプラグ）やセメントプラグといった方法で逸泥層の孔隙やフラクチャーを閉塞して、まず逸泥を止めることを優先させるのが効果的であるといわれています。しかしながら、流入する地層流体に妨げられて上記のようなプラグによる逸泥対策が困難であることも多く、比重の重い泥水を用いてキックを抑えることに主眼をおいて抑圧に成功した事例も報告されています⁸⁾。このように、アンダーグラウンドブローアウトに対する抑圧方法は状況に応じてさまざま、決め手となる普遍的な手法は確立されていないといえます。

以上は主に裸坑を掘削中に遭遇する噴出でしたが、ケーシングを設置した坑井部分でも噴出は起こり得ます。これには、アニュラーガスフローといって図7に示すようなものがあります。セメンチングを行ってケーシングを設置した後に、ケーシングパイプの外側の裸坑との間の、セメントが充填されているアニュラス部に地層から流体が流入する状態をいいます。セメンチング作業においてセメントスラリーが送入された時点では、ケーシング外側のアニュラス部のセメ

ントスラリーとその上方にある泥水の静水圧で地層流体は抑圧されています。ところが、浸透性が高く地層圧の小さい地層が存在した場合に、セメントスラリー中の水がその層に流出（脱水）して、いわゆるブリッジを形成し、その上下との間の静水圧の伝達が遮断されてしまい、地層圧とのバランスが崩れてケーシングアニュラスに地層流体が流入すると考えられています。その他に、セメントが固化するのに伴って体積が減少し、セメントと地層あるいはケーシングパイプとの間の接着（bonding）が不完全になることも原因の一つと考えられています。アニュラーガスフローを防止するためには、セメントスラリーの性状をコントロールしたり特殊なセメントを用いたりします⁹⁾。

最後に、掘削作業中以外の噴出の例を一つ挙げます。油層内に残り残された油を人工的に回収するEOR(enhanced oil recovery)あるいはIOR(improved oil recovery)と呼ばれる増進回収法の一つとして二酸化炭素(CO₂)を油層に圧入する方法があります。こうした作業に用いられるCO₂の圧入井においてCO₂ブローアウトの発生事例が報告されています¹⁰⁾。CO₂によるセメントの劣化、ケーシングやチューブパイプの腐食が原因でCO₂の坑井内への漏

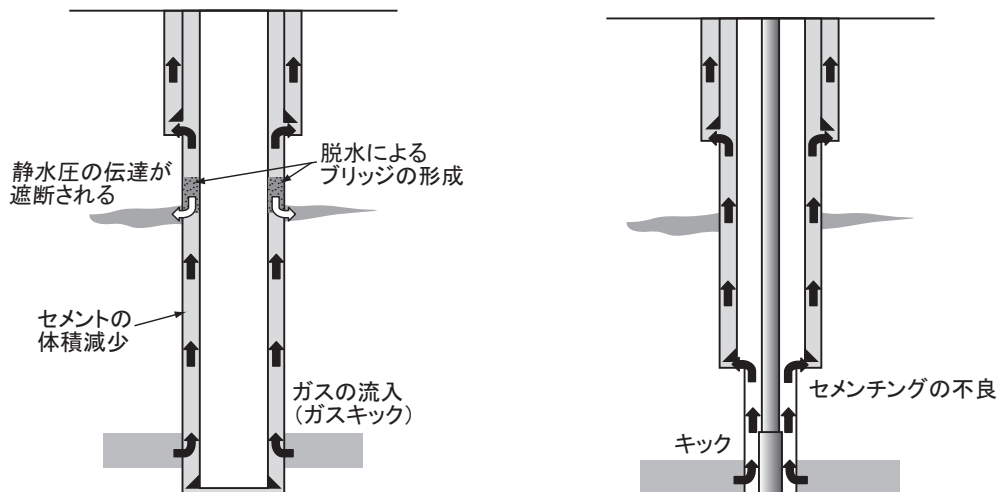


図7 アニュラーガスフロー

洩による噴出を引き起こします。また、CO₂ が圧入されるような地層条件下ではCO₂ は超臨界状態にあるため、坑井内に流入したときの体積膨張が通常のガス以上に非常に大きくなるのがCO₂ ブローアウトの特徴です。CO₂ による腐食対策には、耐CO₂ セメントや13Cr鋼(クロムの配合割合を13%にしたステンレス鋼。よく用いられるものはSUS304といったクロム18%のステンレス鋼である)や22Cr鋼と呼ばれる耐腐食性材料を用いた鋼管が使用されます。

近年、地球温暖化対策の一つとしてCO₂ を地層中に圧入して貯留するプロジェクトが各地で進められています。圧入作業に用いる装置は、一般に掘削時に用いるリグに比べると簡素で小型であることが多いようですが、噴出事故を未然に防ぐために、掘削作業時と同様に十分な耐圧のBOPなどの装置やウェルコントロール作業の準備を行うことが重要であるといえます。

文献

- 1) Petroleum Extension Service, 1980: *Blowout Prevention, Rotary Drilling Series Unit III-Lesson 3*, Third edition, Petroleum Extension Service, The University of Texas at Austin.
- 2) ASME International, 2003: *Cameron First Ram-Type BOP*, An ASME Historic Mechanical Engineering Landmark, July
- 3) 小山輝之, 2004: IADC WellCAP と IWCF の相違点. 石油技術協会誌, 第69巻, 第5号, pp. 546-552.
- 4) Kropla, S., 2007: IADC's WellCAP Program Provides Latest in Well Control Training. *World Oil*, Vol. 228, No. 1, pp. 31-39.
- 5) Adams, N. and Young, R., 2004: Underground Blowouts: What You Need To Know. *World Oil*, Vol. 225, No. 1, pp. 21-24.
- 6) Adams, N., 2005: Underground Blowout Causes and Symptoms. *World Oil*, Vol. 226, No. 1, pp. 43-46.
- 7) Adams, N., 2006: Causes of Underground Blowouts. *World Oil*, Vol. 227, No. 1, pp. 37-43.
- 8) 後藤三郎・田邊一夫, 1992: マレーシアSK-10 鉱区におけるアンダーグラウンドブローアウト(地下暴噴)とその抑圧技術. 石油技術協会誌, 第57巻, 第5号, pp. 450-459.
- 9) 三家 茂, 1986: アニュラーガスフロー対策技術について. 石油技術協会誌, 第51巻, 第5号, pp. 421-428.
- 10) Skinner, L., 2003: CO₂ Blowouts: An Emerging Problem. *World Oil*, Vol. 224, No. 1, pp. 38-42.