

最新の坑井掘削技術（その9）

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

まずは1年ぐらいということスタートしたために、かなり駆け足で総論的に掘削技術の解説をしてきた感じではありますが、8回の連載を終えて掘削技術のかなりの部分をカバーしたのではないかと思います。とはいえ、まだ取り上げていない話題や取りこぼしも多々あると思います。これからもうしばらく、そういった話題を拾いながら少し掘り下げた解説も試みていきたいと思っています。ただし、石油掘削技術を構成する要素は非常に多岐にわたり、筆者にも得意・不得意な分野があります。どうしても取り上げる話題や内容の詳しさに偏りが出てしまいますが、どうかそこはご勘弁ください。

さて、今回はこれまでもその役割について触れてきた掘削泥水について詳しく取り上げます。

1. 掘削泥水の機能

ロータリー掘削に使用される泥水は、地上の泥水ポンプから送出され、スイ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。ビットのノズルから坑底に向かって噴出された泥水は、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、水系泥水（water base mud）と油系泥水（oil base mud）に分けられます。名前のとおり、水系泥水は水に粘土などの添加物

を混合して懸濁液（液体中に粘土の粒子が浮遊している状態の溶液）とした泥水、油系泥水は水の代わりに軽油などの油をベースとして作った泥水です。そして、掘削泥水は次のような重要な役割を持っています。

- 掘屑を坑底から除去し地上へ運搬する
- 坑井内の圧力を制御し地層流体の坑井内への流入や地上への噴出を防止する
- 坑壁を保護し地層の崩壊を防ぐ
- ドリルストリングと坑壁との摩擦を減らす
- 坑井内機器を冷却する
- 地下の情報を得る

水や油は一定温度の下では流動の状態によらず粘度が一定で、このような性質の流体をニュートン流体といいます。ところが、ベースとなる水や油に粘土を混ぜて懸濁させた掘削泥水は、一般に、流動の速度が大きくなるに従って粘度が低下する少々複雑な性質を持っています。流動の状態によって粘度が一定でない流体を非ニュートン流体といいます。さらに、泥水は攪拌したり流路の中を流動したりして流体を変形させる力が加えられている間は流動性が高い半面、静置すると高粘度のゲル状になってしまうチキソトロピー（thixotropy）と呼ばれる性質を持っています。この性質のために、掘削中に泥水ポンプを一時停止しても、直ちに掘屑が坑井内を沈降してしまうことがなく、掘屑を地上へ運搬するのに好都合なのです。

また、通常は地層圧よりも坑井内の泥水の圧力の方が大きくなるようにして掘削することはこれまでも触れましたが、このために掘削中は、坑井から地層の孔隙の中へと泥水が侵入していきます。このとき、泥水の成分である粘土

鉱物は孔隙を目詰まりさせながら侵入することで、坑壁の表面に泥壁 (mud cake) と呼ばれる一種のろ過膜を形成します。泥壁を通して地層内にろ過水が浸透していく現象を脱水と表現し、ろ過水の量を脱水量といいます。

この泥壁は、坑壁を安定に保って崩壊を防いだり、ドリルストリングとの摩擦を小さくするなどの重要な役割を果たす一方で、油層部分の掘削では、坑井近傍の地層の孔隙を目詰まりさせて油やガスの生産能力を低下させる生産性障害 (または油層障害) を起こすという副作用も併せ持ちます。また、あまり厚い泥壁が形成されるとドリルストリングとのクリアランスが小さくなって抑留などの掘削障害の危険が生じます。したがって、一般に、薄くて強固な泥壁を形成し、なおかつ脱水量の少ない泥水が良い泥水であるとされています。

2. 代表的な泥水の種類

2.1 ベントナイトとベントナイト泥水¹⁾

最もシンプルな水系泥水はベントナイト (bentonite) という粘土を水に混ぜて懸濁させたベ

ントナイト泥水です。ベントナイトは、モンモリロナイト (montmorillonite) と呼ばれる粘土鉱物を主成分とし、その他に石英や長石などの鉱物が混ざりものとして含まれています。石油掘削では、アメリカのワイオミング産のベントナイトが良質なベントナイトとして広く用いられています。国内産では山形産のベントナイトが代表的です。泥水材料としてのベントナイトは、図1のような粉末の状態を提供されます。

モンモリロナイトは、結晶構造として3層の膨張性格子をもったスメクタイト類と呼ばれる粘土鉱物の一つです。図2に示すように、八面体の結晶構造をもった Al-O-OH (アルミニウムと酸素と水酸基) の層とそれを挟む2つの四面体結晶構造をもった Si-O (ケイ素と酸素) の層から成る3層をひとつの単位層とし、これが積み重なった薄い不定形の板状結晶構造をしています。3層構造の真ん中の層の Al³⁺ イオンの一部が電荷の低い Mg²⁺ イオンに置き換わっているために陽電荷が不足し、ベントナイト粒子全体としては負電荷を持っています。この負電荷



図1 掘削泥水用に市販されているベントナイト (左: 粉末の状態, 右: 約6%濃度の懸濁液)

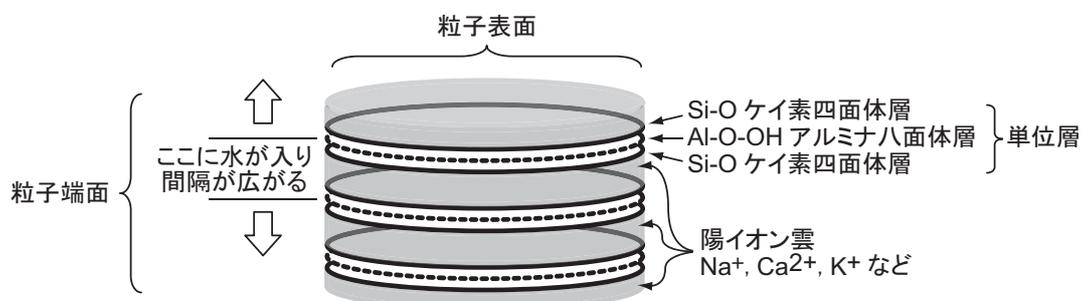


図2 ベントナイトの結晶構造と膨潤の仕組みの模式図

に対応する Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} などの陽イオンが単位層の表面に吸着されて電氣的に中性を保っています。pH の値が小さい酸性の条件下では、これらの陽イオンに代わって H^+ が吸着します。このように、吸着されている陽イオンの種類によって、Na モンモリロナイトや Ca モンモリロナイトなどの種類に分けられます。

モンモリロナイトは、清水中に入れられると、隣接した単位層の間に水が入り、単位層の間隔が著しく広げられる特性があります。この現象を膨潤 (swelling) といいます。モンモリロナイトの膨潤能は、吸着している陽イオンの種類によって大きく異なり、例えば Na モンモリロナイトは単位層間の結合が弱いために多量の水が入り、したがって膨潤量が大きく高い粘性を示します。Na モンモリロナイトの単位層の間隔は、乾燥空気中では 9.8\AA であるのに対して、水中では 40\AA にもなるといわれています。一方、Ca モンモリロナイトは単位層間の結合が比較的強いので少量の水しか入り得ず、膨潤量は小さく低い粘性しか示しません。また、これらのアルカリ性のモンモリロナイトに比べて、酸性モンモリロナイトである H モンモリロナイトの膨潤量は最も少なくなります。一般的に坑井掘削用の泥水材料には、膨潤能力の大きい Na モンモリロナイトを主成分とした Na ベントナイトが用いられます。

さて、泥水比重を大きくするためには、バライトとよばれる高比重 (ケイ素を主成分とした普通の岩石の比重が 2.6 前後であるのに対してバライトの比重は 4.2 以上) の鉱物の微粉末を加重剤として添加します。ところが、泥水中に微細な固形分が多くなると、掘削をしているうちに泥水の粘性が大きくなったりゲル化しやすくなります。このようにベントナイト泥水は、より深く高圧の地層を掘削するために高比重の泥水を使用する必要がある場合に、泥水の性質のコントロールが非常に難しくなります。

ベントナイト泥水は、安価で取り扱いが容易であるものの、その他にも崩壊防止能力が小さい、塩分やセメントに弱くゲル化しやすい、高温に対して不安定であるなどの欠点があります。

泥壁形成性の改善や脱水量の減少の効果のある CMC (carboxymethylcellulose, カルボキシメチルセルロース) とよばれるポリマーやその他の添加剤を用いてこれらの弱点を補うことも行われますが、ベントナイト泥水は、現在は主に浅層の掘削に使用されます。

2.2 リグノスルホネート泥水

板状のベントナイト粒子は先に述べたような結晶構造のために、その粒子表面は負電荷を、端面は正電荷を帯びています。そして、水中に懸濁されたベントナイト粒子は、これらの電荷の状態変化によって図 3 に示すような 4 つの状態をとります。

分散 (dispersion) 粒子表面の負電荷が大きいために、粒子が互いに反発しあって個々の粒子がよく分離している状態

集合 (aggregation) 粒子表面の負電荷が小さいために、粒子の表面同士が接触して大きな粒子となっている状態

凝集 (flocculation) 負電荷を帯びた粒子表面と正電荷を帯びた端面とが、または端面同士が接触してくっついている状態

解膠 (deflocculation) 粒子端面の正電荷が中和されたり負電荷を帯びたりして表面と端面または端面同士の接触が減少し分離した状態

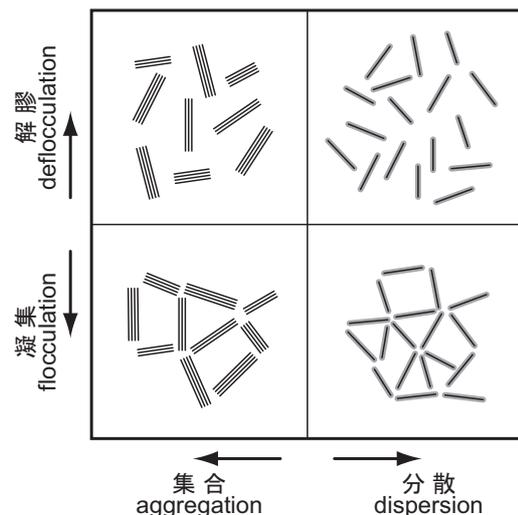


図 3 ベントナイト粒子の集合・分散および凝集・解膠の関係のイメージ

これらの分散と集合や解膠（かいこう）と凝集の状態は、泥水の粘性、脱水特性、泥壁形成性に密接に関係します。例えば大雑把に言って、前述のような高比重泥水における粘度の増加をうまくコントロールするためには、ベントナイト粒子が適度に分散あるいは解膠していることが望ましいといえます。ただし、実際には分散と解膠、集合と凝集はそれぞれ似ていますが、その仕組みが異なるため、例えば凝集はゲルストレングスを増加させるのに対して集合は減少さるといったように、泥水の性質を違った形で変化させます。

ベントナイト粒子の分散や解膠を助けるはたらきをもった添加剤を分散剤あるいは分散解膠剤といい、分散剤を使用した泥水を分散系泥水、分散剤を一切使用しないベントナイト主体の泥水を非分散系泥水と呼びます。リグノスルホネート（lignosulfonate、リグノスルホン酸あるいはリグニンスルホン酸）泥水^注は、リグノスルホン酸の誘導体（元の化合物の一部を他の原子や原子群に置換したもの）を分散剤として使用した泥水で、ベントナイト泥水の欠点を補うべく1960年代の初めに開発されました。この泥水は、一般的には水をベースにして次のような添加物を加えて作液します。

- ベントナイト
- リグノスルホン酸誘導体
- リグナイト（フミン酸誘導体）
- 苛性ソーダ（＝水酸化ナトリウム、pH調整剤）
- バライト（加重剤）

リグノスルホネート泥水は、泥岩の保護機能が比較的優れている、粘性や比重のコントロールが容易、温度に対する安定性が大きい、塩水やセメントなどの汚染物質に対する耐力が大きい、さらには作液や調泥が容易などの長所があり、安定した泥水として現在にわたって広く用いられています。国内では、リグノスルホン酸誘導体とフミン酸誘導体の複合物を主成分とし

た「リグネート」という商品名の泥水材料が広く用いられるため、「リグネート泥水」の名前で知られています。

2.3 KCl ポリマー泥水

砂よりも細かい粒子が堆積してできた泥岩、あるいは泥岩の中でも堆積した層面に沿って層状に剥離しやすい性質を持った頁岩（けつがん、shale）にはモンモリロナイトのような粘土鉱物が含まれています。掘削する地層の中にこのような粘土鉱物が含まれていたらどのようなことが起こるでしょうか。当然のことながら泥岩中のモンモリロナイトも掘削泥水中の水に反応して膨潤を起こしますから、坑井内へ迫り出てきたり崩れてきたりといったトラブルが発生することが予想されます。

このため、泥岩層の水和膨潤を抑制して崩壊を防ぐ機能を持った泥水をの開発が行われてきました。このような泥水を「抑制する」の部分をとってインヒビテッド（inhibited）泥水と総称します。リグノスルホネート泥水の項でその特長の一つに挙げた「泥岩の保護機能」とはこのことで、リグノスルホネート泥水もインヒビテッド泥水の一つです。しかし、リグノスルホネート泥水の水和膨潤抑制作用や崩壊防止能力は十分ではなく、泥岩層（頁岩層）の掘削でしばしば深刻な掘削障害に陥ることがありました。

そこで1980年頃に開発されたのが、Kポリマー泥水（カリウム - ポリマー泥水）とも呼ばれるKClポリマー泥水です。Kイオンが粘土類の膨潤や分散を抑制する作用に非常に優れていることから、KCl（塩化カリウム）を添加剤とした泥水です。それ以前から、モンモリロナイトに電気的に吸着され得る陽イオンのうちでKイオンの膨潤抑制力が最も優れていることが知られていましたが、凝集力が強すぎるために、従来の泥水添加物では流動性のコントロールが難しいという問題がありました。Kイオンを多量

^注「スルフォネート」、「スルフォン」と表記するほうが英語の発音に近いと考えられますが、一般には「スルホネート」、「スルホン」と表記されることが多いので、ここでもそれに統一します。



図4 掘削泥水用に市販されている PHPA ポリマー
(左：粉末の状態，右：水溶液が糸を引いている様子)

に含んだ水中でも優れた増粘性や保護コロイド性(ベントナイト粒子を被膜して安定したコロイド状態を維持し泥壁形成性を改善する特性)を発揮するキサンタンガム(xanthan gum)のようなバイオポリマーや PHPA(partially-hydrolyzed polyacrylamide, 部分加水分解ポリアクリルアミド)ポリマー(図4)が開発されたことにより、優れたインヒビテッド泥水として実用化されました。

また、一般に KCl ポリマー泥水は高比重になると粘性のコントロールが難しくなるため、KCl ポリマー泥水に分散剤であるリグネートを添加することもあります。リグネートを添加した泥水を K リグネート泥水または KCl リグネート泥水といいます。昔からの一般的なリグノスルホン酸化合物では分散機能が悪く、リグネートのような優れた分散剤の開発も KCl ポリマー泥水の実用化に重要な役割を果たしました。KCl ポリマー泥水あるいは KCl リグネート泥水は、現在も広く用いられている優れた泥水です。

2.4 油系泥水

狭義には、油が 95%以上の泥水をオイルマッド、15 ~ 35%程度の水を加えて乳化剤の添加により油中水滴型のエマルジョンにしたものをインバートエマルジョンオイルマッド(invert-emulsion oil base mud)といいます。水中に油滴が分散する水中油滴型に対して水相と油相の関係が逆であるという意味からインバートエマ

ルジョンと呼ばれます。一般的に、経済性や粘性の調整、取り扱いなどの点から主にインバートエマルジョンオイルマッドが使われていて、これを単にオイルマッドあるいはオイルベースマッドということが多いようです。

これまで見てきた水系泥水に比べて、油系泥水は次のような利点を備えています。

- 泥岩層(あるいは頁岩層)の水和、膨潤を抑制する作用が大きい
- 高温安定性が非常に優れている
- 潤滑性が優れている(水平掘削、大偏距掘削に有効)
- 油層への水の侵入が無いので生産性障害を起こし難い
- 硫化水素や炭酸ガスなどによるケーシングなどの金属腐食を起こし難い
- 腐敗による泥水の劣化が少ない

油系泥水は KCl ポリマー泥水よりもさらに泥岩層の水和、膨潤抑制力が大きく、こうしてみると理想の掘削泥水であるように見えます。

日本国内でも 20 年ほど前に、予定掘削深度 6,000 m、推定地層温度 243°C という国内初の大深度掘削の実現に向けた計画が進められるなか、油系泥水の使用が検討されました^{2,3)}。前述のリグノスルホネート泥水も比較的高温で安定で、使用温度は約 175°C といわれています。また、さらに高温で安定なフミン酸誘導体(リグナイト)を主体とした泥水をリグナイト泥水といい、その使用温度は約 190°C といわれていま

す。これに対して、油系泥水は 300°C 程度まで使用可能とされていますが、環境問題や法規制、物理検層の制約などの問題のために、当時は国内での油系泥水の使用を断念した経緯があります。その後、国内では 240°C の高温条件下でも安定した特性を維持できる水系の超高温泥水が開発され、深度 6,000 m 級の掘削で実績を上げました。

2.5 SBM (Synthetic Base Mud)

以上に見たように利点の多い油系泥水ですが、1980 年頃から環境に対する規制が厳しくなり、世界的にも使用に制限がかけられてきました。例えば、アメリカのメキシコ湾での石油開発では、環境保護庁 (EPA, Environmental Protection Agency) が定めた試験法を基に、1986 年に掘削泥水の毒性評価の基準が設けられました⁴⁾。小さなエビに似た甲殻類であるアミ (英語では mysidopsis bahia または mysid shrimp) に対する半数致死濃度 (LC50, 50% lethal concentration) という指標を用いたもので、その生物の半数が死に至るかどうかの基準値を、毒性の疑われる物質の水中での濃度で表します。LC50 の値が小さいほど毒性の大きい物質ということになり、メキシコ湾では LC50 値が 30,000 ppm 以下の掘削泥水は海洋への投棄が禁止されました。現在使用される水系泥水のほとんどは LC50 が基準値の 30,000 ppm より少なくとも 3 倍以上大きく、安全基準を満たしています。

一方、油系泥水に用いられる軽油 (diesel oil) は、LC50 が 1,000 ppm 程度と非常に毒性が高く⁵⁾、メキシコ湾の規制よりも前に、北海では既に軽油ベースの泥水を海洋に投棄することは禁止されていました。軽油の毒性は、軽油に 20% 以上含まれる芳香族炭化水素に由来するとされます。芳香族成分を含まない飽和炭化水素からなる油のうち石油から作られるものは鉱物油 (mineral oil) と呼ばれ、比較的低毒性 (low toxicity) であるとされますが、わずかに芳香族炭化水素が含まれます。

そこで、油系泥水の利点を損なわず、芳香族炭化水素を全く含まない、より毒性の低い合成

油 (synthetic oil) をベースとした泥水 SBM の開発が進められ、現在では数種類の SBM が利用できるようになっています⁶⁾。海外では、既に油系泥水に代わる低毒性の高機能掘削泥水として SBM が用いられてきましたが、日本国内で初めて導入されたのは 2006 年のことです⁷⁾。

3. 泥水に関わるいくつかの話

3.1 泥水検層

掘削の現場では、泥水エンジニアによって、常に泥水の粘度や比重などの測定が行われ、最適な泥水性状を保つように調泥されます。この他に、掘削中に泥水そのものあるいは泥水循環システムを利用して地下の情報を得る泥水検層 (mud logging) と呼ばれる計測作業が行われます。冒頭に書いたとおり、これも泥水の重要な役割の一つですので、簡単に解説しておきます。

泥水検層は、1950 年頃に商用化され、もともとは掘進中の油・ガス層の検知を目的に泥水中の炭化水素ガスの検出を行ったのが始まりです。現在では、図 5 に示すように、掘削パラメータ、泥水循環パラメータ、泥水中のガスの分析、掘削の調査と多岐にわたる多数のデータ測定が行われます。坑井から戻ってくる泥水中に混入した炭化水素ガスや硫化水素ガスの測定と分析、掘進率や荷重、泥水圧力などの掘削パラメータの測定と記録を坑井元で連続的に行い、物理検層データの柱状図のようにならば深度 (あるいは時間) 軸に沿ったプロットとしてデータが記録されます。

計測データは、坑井元の計測ハウス内 (図 6) だけでなく、インターネットなどのコンピュータネットワークを介して、掘削現場の各所に配置された端末や遠隔地の事務所、石油会社の本社などでリアルタイムにモニターすることが可能です。

3.2 エタノールベントナイト

最後に、ベントナイトを利用した、環境問題に関する研究への取り組みを簡単に紹介します。

現在、地球温暖化対策として、発電所などの発

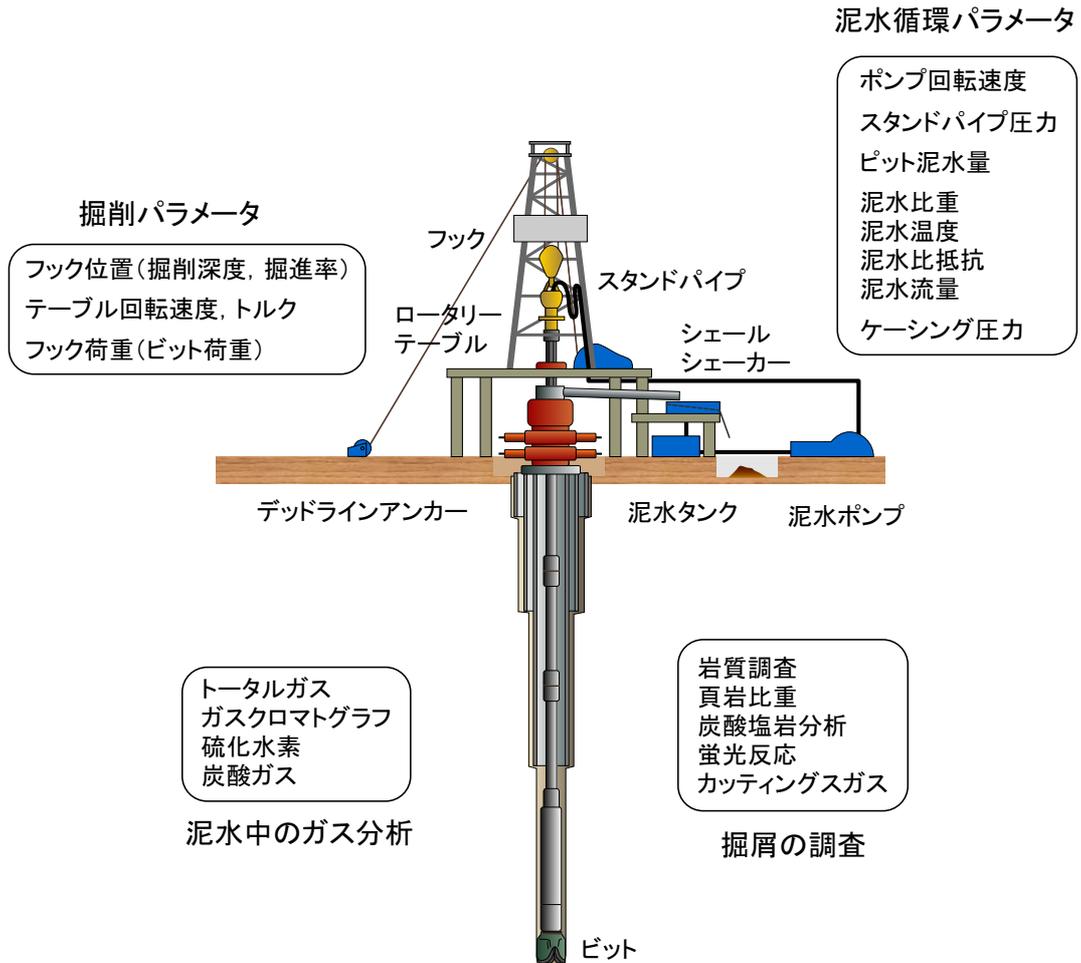


図5 主な泥水検層項目



図6 泥水検層ハウス内の様子

生源から分離された二酸化炭素 CO₂ を貯留・固定する技術の開発が行われています。なかでも石油・天然ガスを地下深くの地層から採取すること仕事としている我われ石油開発業界は、地

層の中での流体の挙動についての知識や経験を活かして、地層に CO₂ を圧入する地中貯留に関する研究に取り組んでいます。

そこでは、地下に圧入された CO₂ がどのよ

うな挙動をとり、長期間にわたっていかに安全性を確保できるかが研究の主題になりますが、その他にも様々な要素技術の研究開発が進められています。例えば、以前の暴噴とウェルコントロールの話の中でも少し触れましたが、長期間にわたる安全性の確保のためには、圧入に使用した坑井を通して、後々 CO₂ が漏洩してこないように、坑井を確実に封鎖・廃坑する技術が必要となります。

そこで行われているのが、従来の廃坑に用いられる坑井用セメントの弱点を補い、エタノールにベントナイトを混合したエタノールベントナイトと呼ばれる懸濁液を用いて坑井周辺の地層の孔隙を閉塞する技術の開発です。今回見てきたように、掘削泥水は良好な泥壁を形成して地層深くまで侵入しないほうが望ましいのですが、この CO₂ の漏洩防止に関する研究では、ベントナイトの懸濁液を掘削泥水では想定しない地層深くにまで圧入して、孔隙を閉塞しようというわけです。

筆者ら東京大学でも帝石削井工業(株)や地熱技術開発(株)のグループとともに、(財)地球環境産業技術研究機構(RITE)の「二酸化炭素地中貯留技術研究開発」の一部として、このエタノールベントナイトを利用した廃坑技術の研究を実施しています⁸⁾。このような形でのベントナイトの利用に関する本格的な研究はまだ始まったばかりで、いずれ別の機会にまとまった

形で研究成果を報告できればと思います。

文献

- 1) 沖野文吉, 1981: ボーリング用泥水 新版, 技報堂出版.
- 2) 中村 元, 1990: 我が国におけるオイルマッド導入に係る問題点. 石油技術協会誌, 第 55 巻, 第 5 号, pp. 358-365.
- 3) 今野 淳, 1998: 日本におけるここ 10 年間の掘削泥水の技術革新と今後の課題. 石油技術協会誌, 第 63 巻, 第 5 号, pp. 400-409.
- 4) Bleier, R., Leutermaun, A. J. J. and Stark, C., 1993: Drilling Fluids: Making Peace With the Environment. *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 45, No. 1, pp. 6-10.
- 5) 栃川哲朗, 2000: Downhole Talk. 石油 / 天然ガスレビュー, Vol. 34, No. 4, pp. 72-77.
- 6) 今里昌幸, 2006: JAPEX における新技術採用 - SBM 導入について -. 石油技術協会誌, 第 71 巻, 第 5 号, pp. 476-483.
- 7) 今里昌幸, 2007: 国内初 SBM の導入と使用実績. 石油技術協会誌, 第 72 巻, 第 5 号, pp. 445-458.
- 8) (財)地球環境産業技術研究機構, 2007: 平成 18 年度 二酸化炭素地中貯留技術研究開発 成果報告書, 第 2 編「1.7 ベントナイトによる坑井封鎖技術の室内実験」.