

最新の坑井掘削技術（その12）

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

前回のセメンチングの話では、その手法の説明に大幅に紙面を取られてしまい、新しい技術についてほとんど触れることができませんでした。まずは、それを補足する意味から新しいセメントシステムについていくつか紹介します。

1. 新しいセメント技術

プライマリセメンチング（すなわちケーシングセメンチング）の主な目的あるいは機能といってもよいかも知れませんが、それには次のようなものがあります。

- ケーシングを支持する
- 圧力や含有する流体が異なる地層の間で圧力を遮断する
- 逸泥層を密閉する
- ケーシングの腐食を防ぐ
- ケーシングの圧潰を引き起こすような衝撃荷重から守る

そして、坑井が掘削され、仕上げが行われてから、石油・天然ガスが生産され、さらに生産を

終えて廃坑されたその後までの長い長い坑井のライフサイクルの間、セメントは以上のような機能を十分に果たさなければならないのです。

しかし、この間にケーシングやセメントに対して力（応力）や熱の変化が様々な形や大きさで繰り返し作用し、ケーシングやセメントはダメージを受けます。図1のようにセメントに亀裂が生じたり、セメントとケーシングあるいはセメントと地層との間が剥離して隙間が生じたりといった劣化が生じます（セメントとケーシングあるいは地層のあいだの隙間は環状の空間になっているためこのような形の隙間をマイクロアニュラスと呼びます）。そして、これらのセメントに生じた隙間は油やガスの流路となり、アンダーグラウンドブローアウトや地表へのガスの漏洩につながります。

以上のような熱や応力の繰り返し変化によるセメントの亀裂やマイクロアニュラスの発生を極力防ぐために、前回説明したようなセメンチング手法における技術の他に、セメントスラリーそのものにも様々な工夫がこらされて設計がなされています。

1.1 泥水をセメントに変換する技術¹⁻³⁾

セメンチングにおいて、セメントスラリーをケーシング外側アニュラスに送入する際には、それまでアニュラスを満たしていた掘削泥水を完全に取り除く必要があります。セメントスラリーと掘削泥水は親和性が悪く、混ざり合うとゲル状の塊を生成するとされ、セメントによる泥水の置換が不十分になります。このため、前回説明したようにセメントスラリーを送入する前にスパーサー溶液を送ってアニュラス内の泥

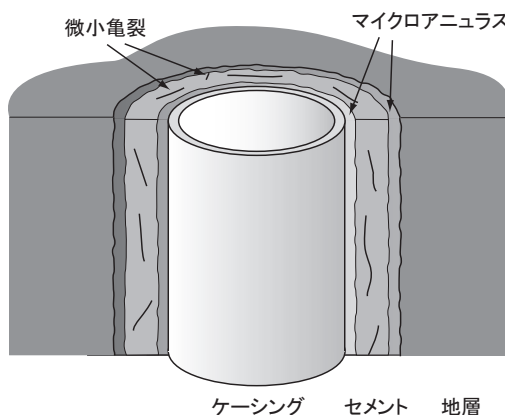


図1 セメントの劣化

水を完全に排除し、セメントが泥水に汚染されないようにします。

このようなセメントと掘削泥水の親和性の問題を解決する方法として、ポルトランドセメントをベースとしたセメントシステムに代わり、掘削泥水をセメント質の材料に変換してセメンチングに使おうという研究が行われてきました。MTC (mud to cement) 技術などと呼ばれ、これには次のような利点があります。

- MTC によって作られたセメント質の材料は比較的掘削泥水とのあいだに親和性があるので、通常のセメントのような泥水による汚染の影響が少ない
- ケーシング外側アニユラスに残った泥水や泥壁をもうまく固化できる
- 廃棄しなければならない泥水の量を減らせる

掘削泥水をセメントに変換する主な方法には2つあります。ひとつは、泥水を特殊な共重合体分散剤と速硬剤によって処理した後にポルトランドセメントを加えるものです。もうひとつは、ポルトランドセメントを用いないで、高炉スラグ (blast furnace slag, BFS) を水系泥水に混ぜ合わせて希釈し、さらに BFS に対する活性剤を加える処理を行うというものです。ここで、高炉スラグとは、高炉で銑鉄を製造するときに発生するスラグ (非金属製の不純物、鉍滓) のことで、主な成分は鉄鉍石に含まれていた二酸化ケイ素です。スラグはレンガや舗装材などにも用いられたりしています。

以上のほかにも油系泥水を変換するものなどいくつかの方法について特許がとられています。MTC はいずれもセメント質の材料を加える際に複雑で時間のかかる前処理を行う必要があるのが欠点です。最近では、BFS を用いる方法が主に使われているようですが、MTC は従来のポルトランドセメントに比べても良好な膠着が得られ、ガスの移動や逸泥などの防止にも有効であるという報告があります。その一方で、硬化した後の MTC には微小な亀裂が発生しやすいとか、セメントシステムの設計が複雑であるなどの問題も指摘されていて、ポルトランド

セメントに比べると一般にはあまり普及していないのが現状です。

1.2 CemCRETE 技術⁴⁾

従来のセメントは、その性質は、スラリーを作るときに混ぜる水の量すなわち水セメント比に大きく依存していました。例えば、クラス G セメントから低粘性で安定なスラリーを作るのに最適な水セメント比は約 44% とされていて、このときのスラリーの比重は 1900 kg/m³ 程度です。これより高い比重のスラリーにするには水の割合を減らすか、同じ量でも密度の大きな骨材 (セメント以外に混ぜる材料) を混ぜることになります。最も手軽な方法は水セメント比を調整することですが、水セメント比を小さくすると、ポンプでの送出や混合が困難になってしまいます。一方、低比重のスラリーを作るには、この逆で、水の割合を多くするか低比重の骨材を加えることになります。また、フォームセメントといって、窒素や空気などの気体を混入してフォーム (泡) にすることも行われます。しかしこれらの場合も、水セメント比を大きくするとスラリーの安定性が失われ、硬化した後の強度の低下が起きたり、孔隙率や浸透率が大きくなったりといった、セメントとして好ましくない性状が現れます。

シュルンベルジェ社の CemCRETE 技術 (同社の製品群に対する固有名詞で、一般名詞では無いので注意) と呼ばれるセメントシステムは、セメントスラリー中に含まれる固体粒子の粒度分布を調整することによって、これらの水セメント比の調整に関わる問題を解決したセメントです。

固体粒子の粒度分布について何ら考慮していない通常のスラリーでは、その中の固体粒子はほぼ単一の粒子径を持っていると考えられます。単一径の球形の粒子の集まりと考えると分かりやすくモデル化すると、この場合は粒子が最も密に充填された最密充填の形をとったとしても、その充填率は 74% です。実際にはそこまで密に充填することは容易ではなく、ランダムに粒子を充填すると通常は充填率は 64% ぐ

らいにしかありません。つまり残りの約 36%は空間で、スラリー中ではこの空間を水が占めることとなります。これに対して、図 2 のように 3 種類（あるいはそれ以上）の異なる粒子径の固体粒子をその粒度分布をうまく調節して混合することによって、ランダム充填であっても粒子の充填率を 80%以上にすることが可能になります。

CemCRETE 技術によって作られたセメントは、水セメント比とは独立にスラリーの比重を調整することが可能で、高い圧縮強度や低い孔隙率と浸透率を実現することができます。また、最も小さい粒子がボールベアリングのように働いて粒子間に潤滑性を持たせ、ポンプによる送出や混合がし易くなるという特長もあります。これらの特長を生かして、CemCRETE 技術をベースとした次のようないくつかのセメントシステムが開発されています。

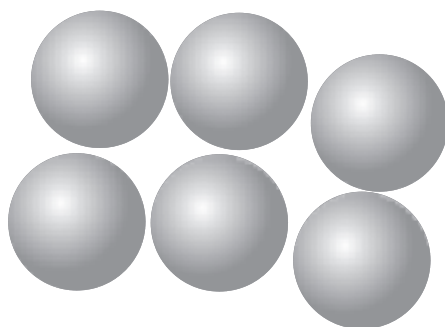
ひとつは、低密度（低比重）の LiteCRETE セメントで、逸泥層あるいは低圧層が存在するときのセメンチングに有効なものです。このセメントスラリーは水セメント比を大きくすることなく 1500 kg/m³ 以下の低比重を実現しているため、通常のセメントスラリーと同等の性能を発揮し、通常のポルトランドセメントを用いた低比重セメントに比べても硬化時間が短く安定したスラリーになります。従来ならば低圧層での逸泥の危険を回避するためにステージセメンチングが選択されたような場合にも、LiteCRETE

セメントを用いれば一度にセメンチングを行うことができます。

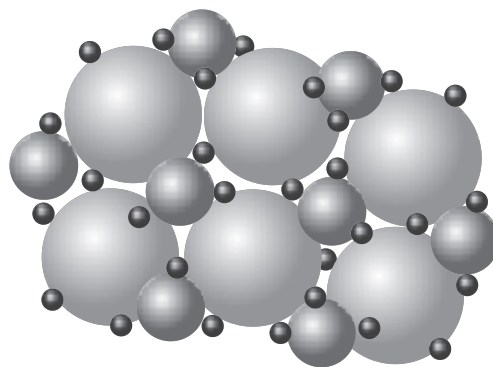
これとは逆に CemCRETE 技術を用いて高密度を実現したものに DensCRETE セメントがあります。このセメントスラリーは高比重でありながら高い流動性を示し、したがって流動時の摩擦圧力損失が小さいために、地層圧と地層破壊圧とのマージンが小さいような高圧層の区間をセメンチングする場合にも、逸泥を起すことなくセメンチングを行えます。また、傾斜井のセメンチングなどでも、スラリー中の固体分が分離して沈殿するようなことも無く安定した性状を示します。

スクイズセメンチング用に最適化されたセメントスラリーもあり、これは SqueezeCRETE と呼ばれます。CemCRETE 技術を用いることによって高い流動性が得られ小さな粒度の粒子を含むため、従来のセメントよりも小さな間隙に効率よくセメントスラリーを侵入させることができます。

以上のような CemCRETE 技術によるセメントスラリーを使用するときには、セメンチング作業に用いるポンプやミキサーなどの機材は通常のセメントの場合と同じで、特殊な機材を必要としない点も大きな利点です。例えば、フォームセメントを使う場合には、混入する窒素を扱うための装置やガスを混入するための特殊な機材が必要になります。



単一径の粒子からなるスラリー



粒度分布がデザインされたスラリー

図 2 セメントの粒度分布の最適化

1.3 自己修復セメント⁵⁾

次に、もしかしたら究極のセメントといえるかもしれないセメントを紹介しましょう。自己修復セメント (Self-Healing Cement) と呼ばれるセメントです。その名のとおり、セメンチングを終えて硬化した後に生じた亀裂などを自ら塞いで修復してくれるセメントです。

セメントは、粘土のように乾燥して固化するわけではなく、セメントと水が化学反応（水和反応）を起こして硬化します。水和反応によってセメントは体積が数%収縮することが知られていますが、その結果、硬化したセメントには微小亀裂が発生することがあります。また、冒頭に述べたように、坑井のライフサイクルを通して加えられる様々なストレスが原因となって微小亀裂やマイクロアニュラスが発生し得ます。このような隙間を自己修復する機能を持ったセメントが自己修復セメントです。しかも、このセメントは油やガスなどの炭化水素がその隙間に侵入してきたときに活性化して能動的に隙間を埋めるというものです（図3）。文献⁵⁾からはどのような添加剤を混入したのかや、隙間を埋めて修復が進んでいくときの詳細な機構などは不明ですが、夢のようなセメントです。

調べてみると、土木・建築の分野でも自己修復機能を持ったコンクリートの開発が近年注目を集めているようです。通常のポルトランドセメントに膨張剤と呼ばれる種類の添加剤を混入することによって、発生した亀裂部分にセメント様の物質が溶出し、次第に硬化していくことが実験などで確認されているようです⁶⁾。

石油坑井のセメンチング用の自己修復セメントはシュルンベルジェ社による商品化の段階に入ったようですが、今後の動向に注目したいところです。

2. 坑井掘削の大深度化，大偏距化^{7,8)}

セメンチングの話はここまでにして、最後に、今後の坑井掘削技術がどのような方向に向かっていくのか少し考えてみたいと思います。

このシリーズの第1回でお話したとおり、石油・天然ガスの開発・探鉱において掘削深度（垂直）が9,500 mを超えたのはもう30年以上も前のことです。それから今日まで掘削深度記録はほとんど伸びていません。日本国内でも大深度掘削技術が盛んに研究され深度6,000 mを超える坑井が掘削されたのは1990年のことで、1993年に到達した6,310 mが今でも大深度掘削

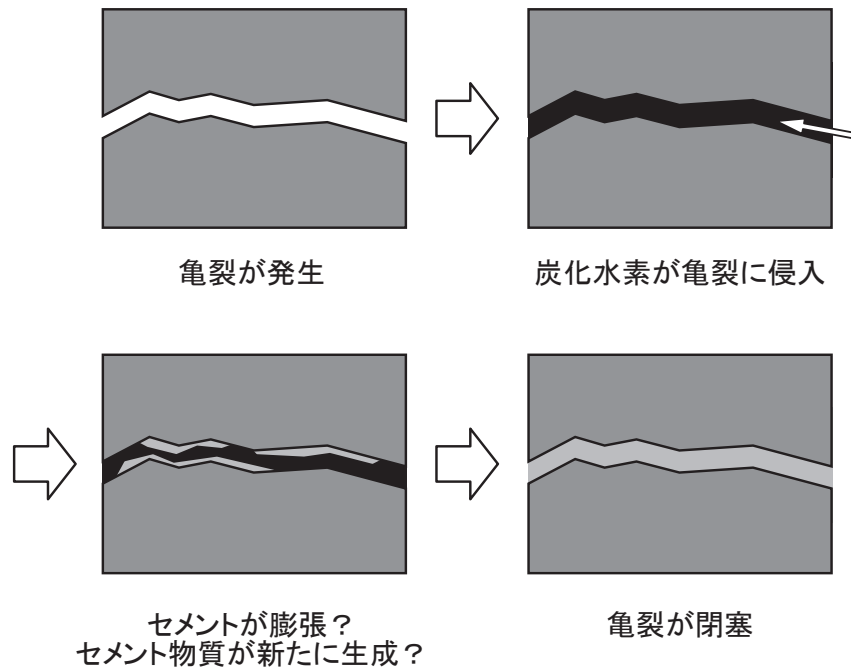


図3 自己修復セメントの概念

記録となっています。その後 15 年以上記録の更新はありません。

このような坑井掘削の大深度化傾向の停滞は、大深度になるに従って探鉱の困難さやリスクが大きくなることも関係しているため、必ずしも技術的な問題が障壁になっているとはいえません。しかしながら、坑井が垂直方向へより深くなる大深度化には、次のような様々な解決すべき課題が依然として存在していることには違いありません。

- ドローワークスおよび泥水ポンプ、BOP などのリグ関係機器の大容量化
- ドリルパイプの高強度化あるいは軽量化の必要性
- 高温高圧（HPHT, high pressure high temperature）による泥水性状の悪化およびそれによる CO₂ や H₂S 濃度の増加による鋼管類の腐食
- HPHT による坑内機器の使用限界
- 地層圧と地層破壊圧との差の減少による逸泥や差圧抑留の危険性の増加、坑壁の不安定、ウェルコントロールの困難さの増大
- 掘進率の低下

一方、大深度化傾向の停滞を見た 1990 年代後半以降は、世界的にも傾斜掘削技術を駆使した大偏距坑井のような水平方向へ遠く離れた地点へと掘削深度を伸ばしたり、より複雑な坑跡の坑井を掘削する方向へと掘削技術の発展が向かいました。現在では 10 km を超える水平偏距の大偏距坑井の掘削が技術的には可能になっています。このような大偏距化、坑跡の複雑化の傾向に向かった背景として、単に技術の発展のみではなく、遠隔地からの掘削や開発設備の集約が可能などの大偏距坑井やマルチラテラル坑井の利点が、開発コストの削減あるいは環境への配慮の高まりといった時代の要請に合致したことも理由に挙げられます。

大偏距掘削でより遠くのターゲットに到達するには、単なる掘削深度の増加に加えて、長い高傾斜区間の掘削が必要になります。そのため、次のような大偏距掘削特有の技術課題が発生します。

- トルク・ドラッグの増大
- ビットへの荷重伝達の困難さ
- カuttingストランスポート、ホールクリーニングの問題
- 坑井の傾斜に起因する坑壁不安定
- 上記課題に付随して坑跡の最適化の必要性

以上のような大深度化、大偏距化の課題に取り組みながら数々の研究開発が行われてきたのは、これまでのこの連載でお話してきたとおりです。そして、より深くより遠くの石油や天然ガスを求めて、今後もこれらの課題を克服するための研究開発が続いていくことでしょう。

しかしながら、ロータリー掘削が初めて石油の掘削に用いられてから既に 100 年以上が経ちますが、坑井掘削は依然としてロータリー掘削法の枠の中にあり、掘削方法の基本的な部分にはほとんど変化がありません。以上に挙げた技術課題もその多くはロータリー掘削を前提としたものです。今後近い将来に、10 km、15 km といった垂直深度をもった大深度坑井や、15 km、20 km といった水平偏距をもった大偏距坑井の掘削が可能になる日がきっと来るに違いありません。それはロータリー掘削の更なる成熟のもとに達成されるのかも知れませんが、あるいはどこかにロータリー掘削法の限界が存在し、それに代わる新しい掘削法が生み出されて初めて可能になるのかも知れませんが、地道な研究開発と同時に、従来の枠にとらわれない新しい発想を大事にすることが今後ますます必要になっていくのだと思います。

最後に、先ほど記した掘削深度記録について一言補足しておきます。掘削深度記録の数字だけを見れば、日本国内での大深度掘削技術は世界にずいぶん遅れをとっているように見えますが、これは決してそうではありません。上に挙げた大深度掘削の課題のうちのひとつである高温の問題に注目すると、基礎試錐「東頸城」は深度 6,004 m で坑底温度が 212°C、基礎試錐「三島」では深度 6,300 m で 225°C を記録しています。国内の大深度坑井の 200°C を超えるこれらの坑底温度は、学術掘削の掘削深度記録である旧ソ連コラ半島の SG-3 坑井における深度 12,000 m

での坑底温度や米国ルイジアナ州の平均的な地域での深度 9,000 m を超える坑井の坑底温度に匹敵するものです。温度の観点からみても、日本国内の坑井掘削技術は世界でも極めて高いレベルにあることが分かります⁹⁾。

おわりに

「最新の坑井掘削技術」は今回で終わりです。3年間にわたってお付き合い頂いた読者の皆さんにまずはお礼を申し上げます。坑井掘削技術に関する日本語で書かれた入門的な書物はなかなかありませんが、この連載が少しでも多くの方のお役に立てたとすれば幸いに思います。

本連載では、新しい技術を紹介する際に、どこがどのように新しいのかが分かるように、従来の技術や発展の歴史も解説するように努めました。しかし、坑井掘削と一言でいっても非常にたくさんの分野がありますし、坑井掘削技術を構成している学問分野も大変幅広いものがありますから、残念ながらすべてを網羅することはできませんでした。また、内容やその詳しさなどでバランスに欠けるところがあったかもしれません。その点はどうかご容赦下さい。

この連載の執筆を通して私自身も大変多くのことを勉強させていただきました。このような機会を与えてくださった石油鉱業連盟事務局、ならびに原稿の誤りの指摘や適切な助言を毎回いただきました石油技術協会作井技術委員会運営幹事会の皆さんに、この場をお借りして改めて感謝申し上げます。

文献

- 1) Nelson, E. B. and Guillot, D., eds., 2006: *Well Cementing*, second edition, Schlumberger.
- 2) Wilson, W. N., Carpenter, R. B. and Bradshaw, R. D., 1990: Conversion of Mud to Cement. paper SPE 20452 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 23–26 September, New Orleans, Louisiana.
- 3) Cowan, K. M., Hale, A. H. and Nahm, J. J., 1992: Conversion of Drilling Fluids to Cements With Blast Furnace Slag: Performance Properties and Applications for Well Cementing. paper SPE 24575 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 4–7 October, Washington, D.C.
- 4) Boissault, J. M., *et al.*, 1999: Concrete Development in Cementing Technology. *Oilfield Review*, Vol. 11, No. 1, pp. 16–29.
- 5) Cavanagh, P., Johnson, C. R., LeRoy-Delage, S., DeBruijn, G., Cooper, I., Guillot, D., Bulte, H. and Dargaud, B., 2007: Self-Healing Cement—Novel Technology To Achieve Leak-Free Wells. paper SPE 105781 presented at the SPE/IADC Drilling Conference, 20–22 February, Amsterdam, The Netherlands.
- 6) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2008: コンクリート建造物の維持管理費用を大幅に低減、防水工事を不要にする技術を開発, プレス発表平成 20 年 9 月 8 日, http://www.nedo.go.jp/informations/press/200908_1/200908_1.html (cited 2008/10/23).
- 7) 石油技術協会編, 1993: 最近の我が国の石油開発, 石油技術協会.
- 8) 石油技術協会編, 2004: 石油・天然ガス資源の未来を開く - 最前線からのメッセージ -, 石油技術協会.
- 9) 藤井邦夫・石田信一・伊藤寛・佐野守宏, 1990: 大深度掘削技術の現状. 石油技術協会誌, 第 55 巻, 第 2 号, pp. 142–152.

(完)