解 説

高傾斜・水平坑井におけるセメンチング
—泥水置換効率およびセメントスラリーデザイン—*

橋 本 博 之**

(Received June 7, 1994; accepted July 18, 1994)

High deviated and horizontal well cementing: Displacement
mechanics and cement slurry design

Hiroyuki Hashimoto

はじめに

掘削技術の向上にともない、近年、高傾斜井はいうまでもなく、生産層を水平坑井で仕上げるという方法もかなり頻度を増してきている。従来の垂直井、傾斜井と異なり、掘削中の泥水性状（加重剤やカッチングスの運搬能力）やセメントスラリーデザインに特に注意を払う必要が生じてきている。ここでは大規模な実験モデルによる高傾斜・水平坑井坑内での泥水置換問題の研究報告をもとに、セメンチング前またはセメンチング中の泥水置換効率の向上およびセメントスラリーデザインなどについて説明する。研究に用いた大規模実験モ

デルを図 1 に示す。

1. 泥水置換の問題

高傾斜や水平坑井坑内からの泥水置換の問題点として以下のものが挙げられる。

- 1) 泥水循環中（ラミナーフロー）にカッチングスや泥水加重剤の沈殿により、ローサイドソリッドチャンネルが形成されやすくなる。
- 2) 重力によりケーシングの坑内における偏芯が生じ、坑壁との間隙をさらに狭くする可能性が増大する。また、この状況は、坑内での流速分布にも悪影響をもたらす。

図 1 Schematic diagram of simulated well and heating jacket

* 平成 6 年 6 月 9 日、平成 6 年度石油技術協会春季講演会井部門シンポジウム「高傾斜・水平坑井開発技術」にて講演

** ハリバートン・オーバーシーズ・リミテッド

$$\text{STANDOFF} = \frac{C}{A - B}$$

図2 DISPLACEMENT EFFICIENCY

$$= \frac{\text{CEMENTED AREA}}{\text{ANNULAR AREA}}$$

図3 Parameters that affect cementing of horizontal wellbores

- 3) 泥水、スぺーサー、セメント間での比重差は、泥水調整が十分でなければ坑内で泥水置換の問題を引き起こす。

泥水置換効率の定義と水平坑井セメンチングに影響を及ぼすパラメータを図2、図3に示す。

2. 泥水置換の向上

ここでは、掘削中のローサイドソリッドチャンネル形成を防ぎ、泥水置換効率を向上させ、セメントでの良好なシールを得るために推奨される泥水性状、スぺーサー、セントラライゼーション、管動、ケーシング／ホールサイズなどについて述べる。

2.1 掘削泥水性状

泥水は、セメンチング前やセメンチング中に可能な限り完全に循環されるよう計画する必要がある。大規模実験によりラミナーフローでポンプしている時にソリッドの沈殿を制御する泥水性状を調査した結果、傾斜が大き

表1 イールドポイントの変化－角度

角 度 Angle(°)	Yield point 22.2°C(72°F)
45	15
60	20
85	28
90	30

くなるほど、ソリッド分の運搬に高いイールドポイントの泥水が必要であることが分かった。ターバレントフローにすることにより、さらに効果的なチャンネル除去が可能となることも判明した。表1に傾斜角度を変えた場合に95%以上の置換効率を得るために必要とされた泥水イールドポイントを示す。

セメンチング前の調泥および坑内調整は、最低3循環か、泥水性状が井戸の入口と出口の両方でほぼ同様になるまでを最大とする。シェーカー上にソリッド分が少しでもあれば坑内調整はまだ必要ということになる。坑内調整中に環状部の流動している泥水の割合を測定する目的で、フルイドキャリバーを用いた場合、少なくとも計画裸坑量またはキャリバーログによる裸坑量の90～95%の量を流動可能とすべきである。ゲルした区間のゲル破壊だけでなく、ソリッドチャンネルを除去するために、できれば泥水をターバレントフローにする。一度この循環を開始したら、流動している泥水域を減少させないために、その後静止状態にはしない方がよい。静止状態になると泥水にゲルストレングスを発現させてしまい、ゲル破壊に十分なせん断力を与えないと泥水循環のみでは排出することは困難になる。

2.2 フラッシュおよびスぺーサー

適切なスぺーサーやフラッシュの使用は坑内洗浄やセメントスラリーの置換効率を向上させる。表2は5"と6.5"の環状部を持つ、長さ4.6mの実験装置を用いて得られたものである。

テストは以下に示す手順で行われた。

- 1) 泥水循環 82°C, 1時間
- 2) 循環停止 93°C, 24時間

表2 Preflush testing

Settling mud—80° deviation		
Spacer		Bottom half displacement efficiency(%)
Type	Volume (bbl)	
Water	10	69
Water	40	94
高粘性スぺーサー	10	34
高粘性スぺーサー	40	66

- 3) 泥水循環 82°C, 1 時間
- 4) スペーサー送入 82°C (1.6~6.4 kL)
- 5) スラリー送入 82°C (3.18 kL)
- 6) 後押し (泥水) 82°C
- 7) セメント養生 93°C, 24時間

セメント養生後、テストサンプルは輪切りにし、置換効率の測定を行った。

* 泥水比重: SG 1.44 スラリー比重: SG 2.0

ポンプレート: 636 L/min

最も効果があったのは、多量の低粘性流体 (清水) をセメントスラリーの前にポンプしたときである。表 2 に示すように 40 bbl (6.36 kL) の高粘性スペーサーを使用したときが 66% の置換効率であったのに対し、同じ 40 bbl (6.3 kL) の清水のときは 94% の置換効率という結果を示した。同等のレートで得られるフローエネルギーでも、粘性の低い方がターバレントフローになり、より効果を高めることが実証された。

2.3 セントラライゼーション

水平坑井でのケーシングの芯だしは垂直井に比べより条件が厳しく、比重差による置換促進は水平区間では作用しないため、ゲル化した泥水やソリッドなどの置換はさ

らに困難である。セントラライザーを取り付けることで坑内の中央にケーシングを維持し、泥水置換の過程でチャンネルリングを防ぎ、高浸透性の地層への張り付き防止やケーシング固定などに有効となる。セントラライザー間の割り付け計画は、効果的にスタンドオフを確保し、ドラッグを最小限にするために、コンピューター計算するとよい。

ケーシングの偏芯による置換への影響を調べるために 5" と 8.5", 7" と 8.5" の 2 種類の環状部を用い、テストが行われた。手順を以下に示す。

- 1) 泥水循環 60°C, 1 時間
- 2) 循環停止 71°C, 24時間
- 3) 泥水循環 60°C, 1 時間
- 4) スペーサー送入 60°C
- 5) スラリー送入 60°C (4.8 kL)
- 6) 後押し (泥水) 60°C
- 7) セメント養生 71°C, 24時間

セメント養生後、テストサンプルは輪切りにし、置換効率、スタンドオフの測定を行った。

* 泥水比重: SG 1.56 スラリー比重: SG 2.0

ポンプレート: 泥水循環中 636 L/min

表 3 に示すように 60% 以下のスタンドオフの 8 つの

表 3 Horizontal displacement test result

Test	Pump rate (bbl/min)	Casing size (in)	Standoff	Displacement efficiency	Remarks
1	2	5	100	100	None
2	2	7	100	98	None
3	2	5	57	98	Severe cement contamination, moderate mud channelling
4	2	7	32	93	Severe cement contamination, severe mud channelling
5	2	5	49	98	Slight cement contamination, slight mud channelling
6	7	7	84	98	Moderate cement contamination
7	7	7	37	98	Slight cement contamination, moderate mud channelling
8	2	5	37	95	Severe cement contamination, severe mud channelling
9	2	5	100	99	Moderate cement contamination, slight mud channelling
10	7	7	40	95	Slight cement contamination, severe mud channelling
11	2	5	100	99	Moderate mud channelling
12	2	5	46	97	Severe cement contamination, severe mud channelling
13	7	7	39	97	None

図4 Turbulator rigid centralizer

テスト (No. 3, 4, 5, 7, 8, 10, 12, 13) においてローサイドマッドコミュニケーションが生じた。これは、ハイフローレートでさえも環状部の狭い隙間のマッドチャンネル問題を解決できないことを示している。

しかし、スプリングセントラライザーはそれを取り付けた位置の数ft下流でソリッドチャンネルの除去を助けていることが分かっている。すなわち、スプリングボディーは流れの方向を拡散する働きをするので、セントラライザーに近い部分にソリッドが沈殿することがない。もし泥水がソリッドを運搬するのに適切にデザインされていなかった場合、ソリッドはこの拡散された流れの影響がなくなったところの下流側で再び沈殿してしまうだろう。しかし、これは少なくともセントラライザー付近では泥水置換効率が高いことを示している。

最近では、リジットセントラライザーの支持部に工夫を凝らしたものが製品化されている。図4に示すタービュレーターリジットセントラライザーは支持部がらせん形状となっていてスパーサーやセメントスラリーに渦巻状の流れを与え、泥水除去を促進させ、結果的にボンドを良くする。また、ケーシングの回転や上下動の間、タービュレーターはベアリングのような働きをし、トルクやドラッグを減らす役目をする。

2.4 管 動

上下動や回転のどちらでもパイプを動かす機械的な引き回しは坑内に蓄積されたゲル化した泥水や、カッティングスの除去に非常に効果がある。管動は、一度形成されたローサイドソリッドチャンネルを除去する唯一の絶対的効果のある方法である。

2つの実験結果がそれを裏づけている。

表4は浸透性のない地層条件下で、セトリングを起こす泥水によって形成されるソリッドチャンネル除去に管動が非常に効果的であり、実験では、ほぼ100%の置換効率を得られることを実証した。表5は、浸透性のある地層条件下で、坑壁にビルドアップしたフィルターケーキ

表4 Pipe movement

Settling mud-80° deviation	
Type movement	Bottom half displacement efficiency (%)
None	50
Rotation	100
Reciprocation	99
Rotation and reciprocation	100

表5 Pipe movement/Cable wall cleaner testing

Non-settling mud-80° deviation		
Type movement	Displacement efficiency (%)	
	Without cleaner	With cleaner
Rotation	69	86
Reciprocation	67	98
Rotation and reciprocation	92	99

の除去には管動のみよりも、ウォールクリーナーの使用が効果的であり、上下動の場合、置換効率が67%からウォールクリーナーの使用により98%にまで向上したことを示している。

ただし、水平坑井での管動は適切な芯だしが重要であり、偏芯したケーシングは差圧抑留やドラッグの増加、坑壁に接着面積が増えるため、過剰なトルクがかかったりするなどの原因となる。

2.5 フローレート

研究により、フロー形態には関わりなく全般的に速いアニュラー流速は、より良い置換効率を得られることが判明した。表6に流速と置換効率の変化を示す。すべてのケースがこのように劇的な置換効率の向上が得られるわけではないが、フローレート以外の条件が同じであれば、フローレートを上昇させれば置換効率は上昇する。ただし、たとえ高いアニュラー流速が必要だとしても、過剰な循環圧力による地層破壊を起こすことがないようにしなければならない。坑内ブレイクダウンを避けるために、コンピューターシミュレーションを作業前に行うことが薦められる。

表6 Velocity

BPM	Displacement efficiency (%)
1	48
4	75
7	98

2.6 ケーシング／ホールサイズ

坑径とケーシングサイズは、置換効率に影響を及ぼす。垂直井において、最適条件の環状部のクリアランスは、0.75" が提案されてきた（例：5 1/2" ライナーと7" ホール）。水平坑井においては、ケーシング自重により坑内で偏芯が生じ、下側が狭くなるため、効果的にクリーニングするには、この隙間をより大きくする必要がある。テスト結果では、少なくとも1.5" の環状部のクリアランスは維持すべきであるとしている（5" ライナーと8.5" ホール）。こうして置換に十分なクリアランス（70% スタンドオフ相当）を与え、圧力損失を最低限度に抑えることができる。

3. セメントスラリーデザイン

高傾斜、水平坑井のセメントスラリーデザイン上、ハイスайдコミュニケーションチャンネルが、置換後アニュラスに形成されないようにすることが重要である。デザインの要点として、以下が挙げられる。

3.1 遊離水

水平区間のスラリーを考える上で最も重要なスラリー特性である。セメントスラリーの遊離水はホールの上部に移動し、連続的なチャンネルを生じさせ、水平部での地層隔離に悪影響を及ぼす。遊離水のテストはスラリーを高温高圧コンシステーターに入れて、予想するセメント作業時間で坑井の深度、温度、圧力条件に調整し、次に250ccのメスシリンダーに入れて、45°の傾きで2時間静置後の表面に遊離した水の量を測定する。45°の傾きでテストを行い遊離水を0%にデザインしたスラリーは、大規模実験モデルの水平条件下でも、遊離水の分離が無いことがテスト結果でも示された。遊離水の分離に傾斜が影響する例を表7に示す。通常条件（API）のテストでは、許容範囲の遊離水が得られても、45°の傾斜では過度の遊離水が計測された。

3.2 セトリングテスト（沈殿、分離テスト）

スラリーのソリッドセトリングは、たとえ遊離水が無くても問題となる。セトリングテストは、坑底条件でスラリーの安定性を測定する。セトリングテストは、BP

表7 フリーウォーターの分離と傾斜

テストシリンダー 傾斜角(°)	Free water %
0	1
45	7

セトリングテスト手順に従って行われる。スラリーはフリーウォーターテストと同様に調整し、特製のセトリングモールドに注ぎ入れ、オートクレーブで3,000psiの圧力を加え養生する。養生後、モールドからスラリーピースを取り出し、乾燥しないようにただちにトップ、ミドル、ボトムの3ピースに切断し、アルキメデスの原理を用い測定する。0.5 PPG (SG 0.06) 以上の比重の誤差は、セトリングの兆候である。

3.3 脱水

セメンチング中やセメンチング後の脱水を防止するため、API脱水値は坑底温度条件下で100cc/30min以下とすべきである。

3.4 レオロジー（流動特性）

スラリーは、遊離水とセトリングに影響を与えない範囲で、極力低粘性とすべきである。低粘性のスラリーは、妥当なポイントでターバレントフローにすることができ、余分な圧力損失を抑え、置換効率の向上やボンドをより良くすることができる。

4. コロイダルシリカセメント

ここでは先に述べたスラリー特性を満足させる添加剤として、北海地域で注目を集めている、コロイダルシリカセメント（colloidal silica cement）を紹介する。

北海では、従来マイクロシリカが使用されてきたが、オフショアでのバルクハンドリングの手間やその保管量の多さ、製品ドラム内での添加剤の沈殿などいくつかの問題があり、それを解決し、なおかつ特性の優れているコロイダルシリカが開発された。コロイダルシリカセメントスラリーは、北海で100回以上使用され、アニュラーガスマイグレーション防止、スラリー特性の向上、スラリーの安定性、圧縮強度発現や脱水防止効果

表8 Approximate particle sizes of silicas

Type	Average (microns)	Maximum (microns)	Specific surface area (m ² /gm)
Colloidal silica	0.05	0.05	500
Microsilica	0.20	0.50	15-25
Amorphous silica	5.00	80.00	10-15
Fine crystalline	5.00	10.00	10-15
Crystalline silica	15.00	90.00	0.4

の向上, また低比重添加剤としても使用でき, 成功を収めている。

コロイダルシリカは SiO_2 のみを含んだ非結晶のシリカの純粋な組織からなり, 若干の NaOH を含む。 SiO_2 粒子は, ウォーターベース内に浮遊させられる。成分に毒性はない。従来使用されてきたマイクロシリカとコロイダルシリカ粒子は同じように球状であるが, 表8に示すように, コロイダルシリカ球状はマイクロシリカより小さいため (0.05μ 対 0.5μ), 単位重量当たりの表面積は劇的に増加する ($500\text{m}^2/\text{g}$ 対 $15\text{--}25\text{m}^2/\text{g}$)。ゆえに大きな表面積を持つコロイダルシリカは増大した表面積により製品のドラム内での沈殿を避けることができ, 少ない量で同じ効果を得られる。

ここでは, 水平坑井セメントとしての実施例を紹介する。

4.1 フィールドでの適用

坑井条件を図5に示す。コロイダルシリカセメントスラリーは, プロダクションライナーのセメンチングに使用された。水平部セメンチングの目的は, 将来の坑井刺

激法を適切に行うためゾーンの隔離を確実にすることである。掘削総延長は, 12,700 ft (3,871m) で 4,900 ft (1,494m) の水平部を含んでいる。坑井およびセメンチング諸条件を表9に示す。スパーサーは以下のように送入された。フラッシュであるスパーサー No. 1 を 34 bbl, 続いて粘性のあるスパーサー No. 2 を 24 bbl, そして再度スパーサー No. 1 を 34 bbl, 続いてスパーサー No. 2 を 24 bbl, これを繰り返してスパーサー No. 1 は 170 bbl, スパーサー No. 2 は 120 bbl がすべて送入された。水平坑の坑底からソリッドやカッティングスを取り除くのにターブレントスパーサーを用い, それに続いて, 粘性のあるスパーサーは坑内からソリッドを運搬するのに用いられた。コロイダルシリカセメントスラリーは, 連続して混合され, 6bbl/min (950l/min) で送入された。泥水は, 8bbl/min (1,270l/min) でセメントの後押しに用いられ, 後押し中 25 bbl の逸泥が確認された。48時間後, ソニック, ウルトラソニックロギングツールがセメントボンドの評価に用いられた。報告書によると, ほとんどの区間で良い結果を示したが,

図5 Case Well No. 1—Intermediate and production liner cementing of horizontal well—Configuration after cementing

表9 Well data and cementing data

<u>Well date</u>		
Casing/Hole	: 7"/9.1" (average)	
Deviation	: 89° (avarage)	
Depth	: 12,700 ft MD (3,871m)	
	: 6,730 ft TVD (2,051m)	
BHST/BHCT	: 164°F (73°C) 148°F (64°C)	
Mud type	: KCL/Polymer	
Mud density	: 10.8 lb/gal (SG 1.58)	
Mud PV/YP	: 20cp/12 lb/100 ft ²	
Previou casing	: 9 5/8" at 7,500 ft MD (2,286m)	
<u>Cementing Data</u>		
Spacer design	Spacer No. 1	Spacer No. 2
	Drill water	Drill water
	0.45 gal/bbl mud surfactant	42.2 lb/bbl polymer/solids
	8.4 lb/bbl mud thinner	0.2 gal/bbl surface viscosifier
		225.0 lb/bbl barite
Spacer density	8.4 lb/gal (SG 1.01)	13.5 lb/gal (SG 1.62)
Spacer volume	170 bbl	120 bbl
Cement design	Class G cement	
	0.4 gal/sk colloidal silica	
	0.5 gal/sk fluid loss additive	
	0.15 ga/sk synthetic retarder	
	4.1 gal/sk fresh water	
Slurry density	: 15.8 lb/gal (SG 1.89)	
Thickening time		
@148°F (64°C)	: 5 hr, 08 min	
API operating free water		
@45° angle	: 0%	
Fann readings		
(300/200/100/30)		
@140°F (60°C)	: 34/24/13/6	
24hr compressive strength		
@164°F (73°C)	: 2,800 psi	
Slurry volume	: 277 bbl	

例外はライナーラップとケーシングシュー直下 7,496～7,695 ft と 10,284～10,386 ft と 10,452～10,624 ft である。ケーシングシュー直下のインターバルにおいては、ウルトラソニック評価はケーシングとセメントボンドが非常に悪いのに対して、CBL は良いボンドを示した。下の 2 つのインターバルは CBL とウルトラソニックの両方とも中間から悪いというボンドを示した。しかし、パーフォレーション後、薬品による坑井刺激を行ったが、ゾーン間のコミュニケーションは認められなかった。

5. ま と め

大規模実験モデルを使用した模擬作業によって、現実が高傾斜や水平坑井坑内で起こる問題が明らかにされ、その報告を基に解決策を簡単に説明した。泥水置換効率を向上させる手法は本文中に述べた掘削泥水性状やセメントスラリーデザインを除いて、基本的には垂直井に対していままで奨励されてきたものと大きな差異はないと言える。しかし、高傾斜、水平坑井の場合、ケーシングの芯だし 1 つをとってみても不十分なセントラライゼーションは置換に悪影響を与え、さらに計画していた管動

がドラッグの増加で不可能になるなど連鎖的に作用し、結局、満足のいくセメント充填ができなくなる可能性が非常に高くなる。泥水置換を向上させるための個々の手法すべてを機能させることで、はじめて期待した結果を得ることができる。セメンチングの失敗はその改修作業にも膨大な費用と日数を要するため、入念な計画とその確実な実行が不可欠である。

文 献

- Audun Bjoradai, K.L. Harris and S.R. Olaussen, 1993: Colloidal silica cement: Description and use in North Sea operations. *SPE 26725 Haliburton Services: Summary of horizontal well completion technology. Section 4. Haliburton Services Research Support: Displacement mechanics.*