

講 演

安全かつ経済的で耐久性を持った坑井に仕上げるための  
 セメントデザインプロセス\*

橋本 博之\*\*・Kris Ravi\*\*\*・Jason Jeow\*\*\*

(Received July 28, 2005 ; accepted September 2, 2005)

Design Cement Slurry for Safe and Economic Well Operation

Hiroyuki Hashimoto, Kris Ravi and Jason Jeow

**Abstract :** The purpose of primary cementing is to provide zonal isolation during the life of the well so that the hydrocarbons can be produced safely and economically. Recently, the industry has taken the exploration and production of oil and gas to challenging environment such as high pressure, high temperature (HPHT), Steam Injection and Deepwater. Recent experience has shown that conventional cementing procedures could be inadequate under these conditions to provide zonal isolation. From all accounts, the experience in Japan in this regard has been very similar to the global experience.

**Key words :** Life, Finite element Analysis, Zone Isolation

1. はじめに

プライマリーセメンチングの目的は坑井の寿命の間、地層間の隔離を維持し、炭化水素を安全かつ経済的に生産できるようにすることである。

近年、石油・ガス開発業界は高圧、高温度 (HPHT)、蒸気圧入および大水深のような厳しい条件に挑戦することで石油およびガスの探鉱や生産を行ってきている。ここ数年の経験で、従来の一般的な手順ではこれらの条件下で地層間の隔離を得るためには不十分であることが分かってきた。日本における経験もこの点に関して世界的な経験と非常に類似してきた。

坑井作業の間、セメント被覆の健全性を保つための 3

ステップ設計手順について説明する。

ここでいう坑井作業の例とは圧力試験、水圧破碎および炭化水素生産を示す。

これらの作業での応力に耐えうる、セメント被覆に必要とされる特性は、地下条件下で開発され、テストされた技術解析手法とセメントシステムから決定されるべきである。さらにセメントシステムは泥水と効果的に置換し、環状部全体に充填される必要がある。効果的なセメントスラリー配置やセメント被覆の長期の健全性を得るための技術的パラメータや設計手順についても説明する。

2. 背景

海外の石油およびガス開発産業と同じように、日本においても環状部の圧力上昇や流体のフローなどが陸上や海上の坑井で観測されている。

セメントボンドログ結果で良いセメント作業である見込みがあったにもかかわらず、時折セメント被覆の健全性の損傷と関係があるような問題が起こっている。

環状部の圧力上昇が起こったときの、現在の対応は繰り返しで時間消費であるが坑口装置の耐圧上限に達する前に脱圧することであった。管理できる範囲で不必要な

\* 平成 17 年 6 月 1 日、平成 17 年度石油技術協会春季講演会 作井部門シンポジウム「改修と仕上げ技術～坑井の健全性確立への取り組み～」で講演 This paper was presented at the 2005 JAPT Drilling Symposium entitled "Workover and well completion technologies ~ The current and historical approach for trouble free well completion. ~" held in Tokyo Japan, June 1, 2005.

\*\* ハリバートン・オーバーシーズ・リミテッド Halliburton Overseas Limited

\*\*\* ハリバートン Halliburton

流体のフローを悪化させないように、成功率は低いがセメントスクイズ、樹脂スクイズ、機械的な装置の取り付けのようなさまざまな方法が用いられてきた。

不幸にも、状況が悪化し廃坑にしなければならなくなったり、炭化水素の生産量を維持するために新たに坑井を掘削しなければならないこともある。ここに述べたような問題は、不十分なセメント置換や坑井作業の間のセメント被覆の損傷が原因であると考えられる。

セメント置換に影響を及ぼすとして良く知られている要素は：

- ・ 坑径およびケーシングサイズ
- ・ 泥水特性
- ・ スペースおよびフラッシュの特性および流量
- ・ ケーシングの芯だし
- ・ セメントスラリーの特性および流量
- ・ 後押し泥水の流量
- ・ パイプの管動
- ・ 逸泥の防止

ほとんどの日本のオペレーターはセメント置換に影響を及ぼす上記項目を理解していて、作業を最適化しようと試みているが、しかし置換不良とセメント被覆の損傷などに起因する不必要な流体の生産や環状部圧力の上昇などが起こっている。

セメント被覆の健全性は、ライフサイクル<sup>1), 2)</sup>の間の環状部の圧力上昇と流体のフローを妨ぐためのセメントスラリーの効果的な置換と同様に重要である。

セメント被覆の機械的性質は、ライフサイクルの間の坑井作業に耐えるように最適化されるべきである。

セメント被覆に応力を及ぼすであろう坑井作業の例を以下に示す。

- ・ セメントの水和
- ・ 掘削流体から仕上げ流体への置換
- ・ 水圧破碎
- ・ 圧力試験
- ・ 炭化水素生産
- ・ 流体圧入
- ・ ガスリフト

これらのタイプの作業はスラリーが環状部に置かれた後で、セメント被覆の圧力および温度を変化させる。

圧力または温度変化が大きく、セメント被覆に限界を超えた応力が加わった場合、セメント被覆は損傷する。

限界値は測定された値であり、それはセメントスラリー組成<sup>3), 4)</sup>に応じて変化する。

環状部の圧力上昇やケーシング損傷のようなセメント被覆の損傷による主な影響は、坑井の閉鎖もしくは高額な改修作業をよぎなくされる。

セメント被覆の損傷は炭化水素生産の損失、不必要な流体の生産および坑口装置の伸びのような石油およびガス資産の安全および経済的生産に悪影響を及ぼす。

したがって、セメント被覆の健全性は坑井計画の最初に考慮され、そして炭化水素の長期の安全で経済的な生産のために設計されるべきである。

### 3. セメント被覆の機械的性質

環状部に送入されたセメントスラリーは水和作用を受け、そして固体になる。

石油・ガス開発業界はセメントシステムを選択するための指標として今まで圧縮強度を使ってきた。

圧縮強度のみでは、そのセメントが圧力試験、仕上げ、水圧破碎および炭化水素生産のような作業時の地下での挙動に耐えることができるかどうかを決定するのに十分ではない。

図1はセメント被覆の3軸テストで、応力-歪関係測定し、応力が加わったときにセメント被覆が変形する<sup>5)</sup>典型的なプロットを示す。

図1に示すように、セメントシステムAは、高い強度を持っている、しかし低い弾性ひずみ許容で、それが損傷するときは、突然で壊滅的に損傷し脆い材料であることを表している。

ところが、セメントBは強度は低いが、はるかに高い弾性変形を受容でき、突然損傷することはない。セメントシステムBは最終的に、弾性変形から塑性変形に移行し、損傷をするが、損傷する前も塑性変形に耐える。

セメント被覆の応力-歪関係の作用を理解することで坑井のライフサイクルの間の作業による地下での挙動に耐えるようにセメントシステムを設計することができる。

セメント被覆の弾性は、さまざまな添加剤を用いて修

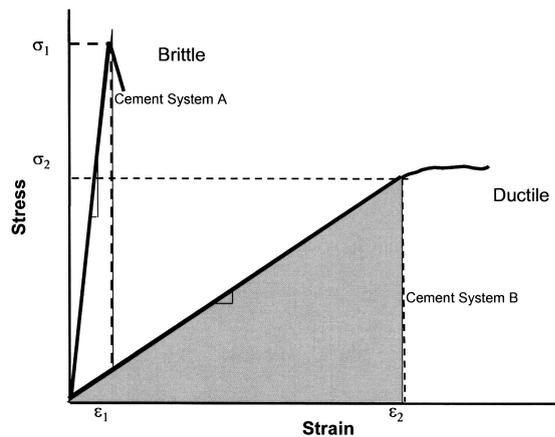


図1 応力-ひずみ 特性

正することができる。気泡、弾力のある粒子およびファイバーのような材料は、セメント被覆の堅さをやわらげるために、セメントスラリーに添加される。

CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S のような地下での化学反応の影響は、セメント被覆の長期の健全性のために考慮されるべきである。そのような地下での化学反応は潜在的なセメント被覆損傷から引き起こされた亀裂およびマイクロアニュラスに地層流体やガスが流入し、そしてセメント被覆の損傷を加速する<sup>6), 7)</sup>。

#### 4. 水和体積変化

セメントスラリーは、水和の間に体積変化が起こる。これはセメント水和作用での生成物が反応物より少ない体積だからである。したがって、セメント水和によって体積減少が起こる。もし外部からの流体の供給がなければ、セメントスラリーは、合計 3-4% の体積減少が生じる。すべての体積減少は 2 つの部分からなり、それは外部および内部の体積減少である。セメントスラリーが反応し脱水を起こさなくなるまで、外部の体積減少は起こり、そして、その後は取るに足らなくなる<sup>8), 9)</sup>。

内部の体積減少は、セメントのマトリックス内部での反応の兆候である。

内部および外部の体積減少は地下の条件下でセメント被覆の様子を示すために定量化される必要がある。

セメント水和位相の間、水のような流体が、反応しているセメントに外部のソース（地層）から補充することができれば、この流体は内部の体積減少を部分的にあるいは完全に補うであろう。しかし水の供給が可能でない場合、実効体積減少が発生し、セメント被覆は養生している間に損傷するかもしれない。

セメントスラリーの内部の体積減少は、セメントスラリー中に良く分散された膨張する気泡のような内部ガスによっても補われる。

#### 5. 設計手順

図 2 に示す 3 ステップ設計手順は安全に、そして、経済的に炭化水素を生産することができる坑井を建設するのに役立つ。

ステップ 1 は技術解析であり、その結果は坑井作業に耐える最適のセメント被覆特性を提供する。

これらは Bosma *et al.*, Ravi *et al.*<sup>3), 12)</sup> によって提唱されている。

ステップ 1 はいかに異なる坑井作業がセメント被覆の健全性に影響を及ぼすかを評価するための詳細な技術解析である。

例えば、建設産業において、技術解析を適用する架橋工事は、材質特性を最適化する一般的な方法である。

石油・ガス開発業界は、これらの技術を徐々に採用してきている。

極端な作業環境での高価な坑井の作業によるセメント被覆の健全性に対する危険性の増大と安全面の強化の両方の必要性によりこの技術解析が採用された<sup>1)~7), 12)</sup>。

ステップ 2 は、セメントスラリー設計とステップ 1 において評価されたセメント被覆特性に適合するセメントシステムを供給するためのテストである。

セメントスラリー特性のテスト例を下記に示す。

- ・ シックニングタイム
- ・ 流動特性
- ・ 静止ゲルストレングス
- ・ 脱水

重要なセメント被覆の機械的性質の例を下記に示す。

- ・ 引っ張り強さ
- ・ ヤング率
- ・ ポアソン比
- ・ 可塑性のパラメータ
- ・ 収縮 / 膨張

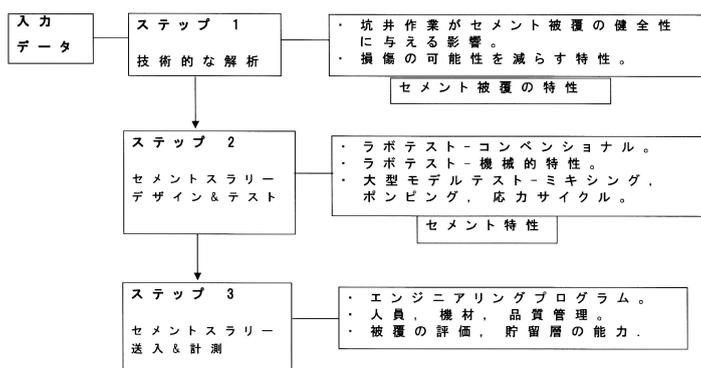


図 2 坑井ライフの設計手順

研究室での測定値は、セメント被覆の健全性を評価する技術解析（ステップ1）のための入力値となる。

さらに、坑井のライフサイクルの間に経験上の繰り返し応力に耐えるためのセメント被覆の能力は技術解析および実験室試験によって決定される

より良い地層の隔離を得るために、ステップ1および2に続き、ステップ3を行うべきである。

ステップ3はRavi *et al.*, Biezen *et al.*, によって論じられている<sup>10), 11)</sup>。

## 6. 耐久限度

繰り返しサイクルが物質的健全性に及ぼす影響を扱う産業がほかにもある。

すべてにおいて材料が耐え得るサイクルの回数を増やすためにはそれに及ぼされた応力がある値を下回っているべきであることはこの産業において有名である。

この値は通常耐久限度といわれる。

すなわち、耐久限度は材料が多数の繰り返しサイクルに耐え得る応力である。図3にこれを示す。

鉄に作用する応力をその極限強さの50%以下に保つことが耐え得る繰り返しサイクル数を増加させるために推奨されている。

## 7. 残存容量

ここで定義されている残存容量は容量がオリジナルの容量のうちで材料において損傷に抵抗するためにどのくらいの状態が残っているかを示す値である。例えば、材料の引っ張り強さが500 psi (3.447 MPa) とすると、もし250 psi (1.724 MPa) の引っ張りを材料に加えた場合、材料における残存容量の引張破壊への抵抗能力は50%である。

先に説明した設計プロセスのステップ1でセメント被

覆における初期応力状態および坑井作業による応力変化が計算される。損傷に抵抗するためのセメント被覆の残存容量は、セメント被覆における応力の最新の値と実験で測定した機械的性質に基づいて計算される。分析において定義された損傷モードは亀裂、剥離およびせん断破壊である。

先に説明したように、材料の技術設計において、その材料が多数の繰り返しサイクルに耐え得るように、材料における応力レベルが耐久限度より少ない状態に保たれることが推奨されている。同じ設計論理を適用して、各坑井作業の間十分な残存容量を保持するように設計することで、セメント被覆はさらに大きい繰り返し負荷に耐えることができる。

鉄鋼産業では疲労を減らし、繰り返しサイクルの回数を増やす残存容量は50%が適切であるとしている。実験室での試験はセメント被覆の応力レベルと繰り返し負荷の間の関係を決定するために行われた。

## 8. 結果および検討

坑井作業がセメント被覆に及ぼす影響は応力レベルの変化である。坑井作業の例は、圧力試験、水圧破碎、炭水素生産および圧入などがある。

セメント被覆における応力変化の大きさは、以下によって変わる。

- ・ ケーシング、セメントおよび地層の機械的、熱的特性。
- ・ 坑井作業による圧力および温度変化の大きさ。
- ・ セメント被覆厚さおよびケーシング偏心を含む坑井の特徴

セメント被覆における初期応力および応力レベルの変化を知ることにより、新しい応力レベルが計算される。

セメント被覆における新しい応力レベルがその能力許容曲線の外にある時は、セメント被覆は損傷を起こす可能性が高い。

セメント被覆の損傷限界は試験により測定したその機械的性質の特性により計算される。

セメント被覆における初期応力は、収縮/膨張特性、比重および深さによって変わる。

### ケース I

坑径が8.5" (0.2159 m) およびケーシング外径が7" (0.1778 m) のケースを検討する。

この場合ケーシングが坑井の中心にあった場合で0.75" (0.019 m) のセメント被覆厚さとなる。

セメント被覆に収縮または膨張がなく、ケーシングの内圧が5,000 psi (34.5 MPa) 増大すると仮定した場合のヤング率の違う3つの異なるセメントシステムによるセメント被覆における応力の変化を図4に示す。

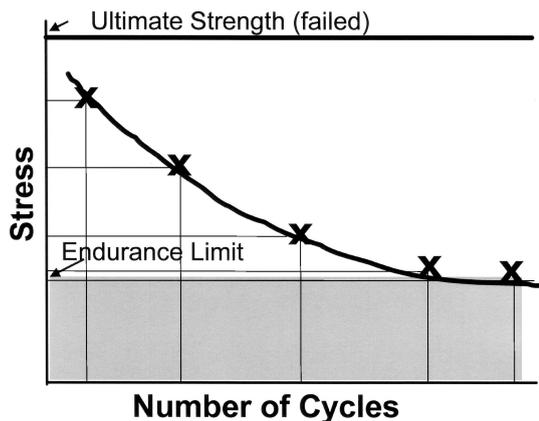


図3 応力レベルとサイクル数のプロット

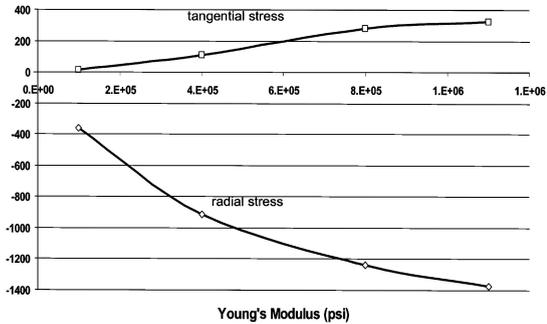


図4 5000 psi ケーシング内圧力が増加したときのセメント被覆内の応力変化

この図は低いヤング率を持つセメント被覆の応力変化が最も少ないことを示している。グラフ中の負の値はそれらの応力が圧縮力であることを意味し、正の値はそれらの応力が引張力であることを意味する。

低いヤング率を持つセメントは円周の応力が圧縮力であることより割れにくい傾向がある。

#### ケース II

坑井の入力データを表1に示す。

1.0 psi/ft (22.6 kPa/m) の勾配の岩圧を持つ垂直井を16,500 ft (5,029 m)まで掘削したものを例として検討する。16,500 ft (5,029 m)における垂直応力は、16,500 psi (113.8 MPa)である。

地層圧力は12.0 lb/gal (1,438 kg/m<sup>3</sup>)に相当する。

最小と最大の水平応力対垂直応力の比率は0.78である。これらの比率は、岩石の坑井から離れた場所の応力状況を定義する。

坑径は9.5" (0.2413 m)、ケーシング外径は、7.625" (0.1936 m)、ケーシング内径は6.765" (0.1718 m)である。掘削泥水の比重は13 lb/gal (1,557 kg/m<sup>3</sup>)、セメントの比重は16.4 lb/gal (1,965 kg/m<sup>3</sup>)である。

セメントのトップは13,500 ft (4,115 m)である。

表1 坑井のインプットデータ

入力データ	坑井 1
垂直深度	16,500 ft (5,029 m)
岩圧	1.0 psi/ft (22.6 kPa/m)
地層圧力	12.0 lb/gal (1,438 kg/m <sup>3</sup> )
坑径	9.5" (0.2413 m)
ケーシング外径	7.625" (0.1936 m)
ケーシング内径	6.765" (0.1718 m)
掘削泥水比重	13 lbs/gal (1,557 kg/m <sup>3</sup> )
セメントスラリー比重	16.4 lb/gal (1,965 kg/m <sup>3</sup> )
仕上げ流体比重	8.6 lb/gal (1,030 kg/m <sup>3</sup> )
セメントトップ	13,500 ft (4,115 m)

表2 セメントシステム

セメントシステム	ヤング率	実際の水和による体積変化
1	1.2e + 6 psi (8.27 GPa)	- 4 %
2	1.2e + 6 psi (8.27 GPa)	0 %
3	1.35e + 5 psi (0.93 GPa)	0 %

次の2つの条件下でセメント健全性の評価が必要である。

- ・ 13 lb/gal (1,557 kg/m<sup>3</sup>) の泥水を8.6 lb/gal (1,030 kg/m<sup>3</sup>)の仕上げ流体に入れ替える時。
- ・ 次に行うケーシング内に加えられる圧力が10,000 psi (68.97 MPa)まで増加するであろう水圧破碎作業の間。セメントシステム

3つのタイプのセメントがセメント被覆の健全性を決定するために検討された。

それらの特性を表2に示す。

- ・ セメント1-従来のオイルウェルセメント、ヤング率1.2e + 6 psi (8.27 GPa) 体積減少4%。
- ・ セメント2-体積減少相殺、体積変化は0% (他の特性は従来のセメントと非常に類似している)。
- ・ セメント3-体積減少相殺そして従来のセメントに比較してさらに低い剛性、体積変化は0%そして、ヤング率は、1.35e + 5 psi (0.93 GPa)。

#### 分析

表3でまとめているセメント1、2および3の分析結果の要約について下記に述べる。

セメントの水和段階-セメント水和の間セメントシステム1 (約4% 体積減少) はセメント-岩石境界面から剥離した。剥離は約115 μmであった。

したがって、地層の隔離はこのタイプのセメントシステムではリスクがある。

しかし、セメントシステム2および3 (水和中体積変化は0%) はセメント水和位相の間に損傷の問題はない。

坑井の仕上げ段階-13 lb/gal (1,557 kg/m<sup>3</sup>) 泥水を8.6 lb/gal (1,030 kg/m<sup>3</sup>)の仕上げ流体に入れ替えたときに圧力が減少する。

16,500 ft (5,029 m)の深さで、ケーシング内の圧力が3,775 psi (26.0 MPa)減少することになる。

坑井の仕上げの間、セメントシステム1は、セメント-岩石境界面の剥離が助長され、190 μmに増加した。

しかしながら、仕上げの間、セメントシステム2および3はケーシング内の圧力が3,775 psi (26.0 MPa)減少したときでも健全であった。

セメントシステム2か3を使うという決定は、臨界の入力パラメーターで詳細分析や固有の安全性の要因評価

表3 セメント被覆への坑井作業の影響

坑井作業	変化	セメントシステムへの影響		
		セメントシステム1	セメントシステム2	セメントシステム3
セメントの水和	体積変化-表2に示す	損傷, 剥離	健全	健全
仕上げ(流体入れ替え)	3,775-psi 内圧減少	損傷, 剥離	健全	健全
水圧破砕	10,000-psi 内圧増加	損傷, 塑性変形	健全	健全

を行った後に決定するべきである。

さらに、繰り返し負荷の影響はセメントシステムの残存容量を評価することによって考慮されるべきである。

水圧破砕作業段階-水圧破砕の間、ケーシング内に加えられる圧力は10,000 psi (68.97 MPa) まで増加する。

セメントシステム1はケーシング内の圧力の増加に従い、永久変形または塑性変形を生じる。

しかしながら、セメントシステム2および3は健全な状態を維持した。

したがって、これらはこの坑井のすべての作業の間、地層の隔離を維持する能力がある。

ここでも、セメントシステム2か3を使うという決定は臨界の入力パラメーターで詳細分析や固有の安全性の要因評価を行った後に決定するべきである。

セメントシステム1は、この井戸に十分な地層の隔離を提供しない。

セメントシステム2および3は、研究での負荷条件下で損傷しなかった。

技術的、経済的、そして作業上の考察事項はこれらの2つのセメントシステムのうちの1つを使うことを決定する前に考慮するべきである。

この時点で、残存容量は2つのシステムを選択するときに考慮されるべきである。

セメント被覆は、繰り返し負荷によく耐え得るように、高い残存容量を持っているべきである。

残存容量プロットを図5に示す。

これはセメントシステム1が収縮のためにセメント水和の間に損傷したので、あらゆる坑井作業に耐えられない残存容量がゼロであることを示す。

セメントシステム2および3は健全で、そして、水和の間や仕上げの間、50%を超える残存容量を持つ。

セメントシステム2は水圧破砕の間わずか40%の残存容量となり、繰り返し負荷についての懸念がある。

セメントシステム3は3種類の坑井作業の間80%残存容量を持っており、繰り返し負荷に耐えるのに適している。

### 9. まとめ

- これらの3つのステップ設計手順、技術的解析、ラボテスト、および、フィールドでの開発と監視は、坑井作業の間および寿命の間、地層間隔離を保つために適用されるべきである。
  - 最適のセメントシステムは、繰り返し負荷に耐えるその能力に基づいて選択されるべきである。
  - 残存容量の概念は、セメントシステムを決定する際に使われるべきである。
  - ラボテストは、機械的性質、および、繰り返し負荷の効果を決定するために、セメント被覆を用いて行われるべきである。
  - セメント被覆の水和体積減少、または収縮は、セメント被覆損傷の危険を減少させるために、補正されるべきである。
- これは、養生後で発生する膨張とは異なるものである。

### SI 単位換算係数

psi × 6.894757	E + 03 = Pa
lbm / gal × 1.198264	E + 02 = kg / m <sup>3</sup>
Inch × 2.54	E - 02 = m
ft × 3.048	E - 01 = m

### 引用文献

1) Goodwin, K. J. and Crook, R. J. : "Cement Sheath Stress Failure," paper SPE 20453 presented at the 1990

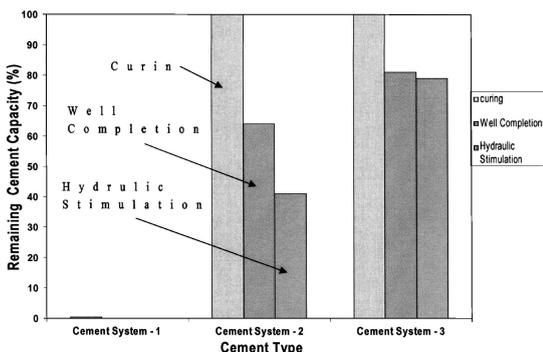


図5 セメントシステムの残存容量 ケースII

- Technical Conference and Exhibition, New Orleans, LA, USA, 23–26 September.
- 2) Bengé, O.G., *et al.* : “Foamed Cement Job Successful in Deep HTHP Offshore Well”, *Oil & Gas J* (March 1996) 58.
  - 3) Bosma, M., *et al.* : “Design Approach to Sealant Selection for the Life of the Well”, paper SPE 56536 presented at the 1999 Fall Technical Conference and Exhibition, Houston, TX, USA, 3–6 October.
  - 4) Thiercelin, M. J., *et al.* : “Cement Design Based on Cement Mechanical Response”, *SPE Drilling & Completion*, December 1998 266–273.
  - 5) Fjær E., *et al.* : *Petroleum-Related Rock Mechanics*, Elsevier Science BV, Amsterdam, The Netherlands (1996), ISBN-0-444-88913-2.
  - 6) Bruckdofer : “Carbon Dioxide Corrosion in Oilwell Cements”, SPE 15176, SPE Rocky Mountain Regional meeting, May 19–21, 1986.
  - 7) Shen, J.C., *et al.* : “Effects of CO<sub>2</sub> Attack on Cement in High-Temperature Applications”, SPE/IADC Drilling Conference, New Orleans, LA, 28 February–3 March, 1989.
  - 8) Harald Justnes, *et al.* : “Chemical Shrinkage of Cement Pastes with Plasticizing Admixtures”, *Nordic Concrete Research*. No. 24, (2000) 39–44.
  - 9) Harald Justnes, *et al.* : “Chemical Shrinkage of Oil Well Cement Slurries”, *Advances in cement Research*. 1995, 7, No.26, Apr., 85–90.
  - 10) Al Khayyat, B., *et al.* : “Successes in Production-Liner Cementing in Oil-Based Mud : A Case Study”, paper SPE/IADC 57560 presented at the 1999 SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference, Abu Dhabi, UAE.
  - 11) Biezen, E., van der Werff, N. and Ravi, K. : “Experimental and Numerical Study of Drilling Fluid from a Horizontal Wellbore”, paper SPE 62887 presented at the 2000 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas.
  - 12) Ravi, K., Bosma, M. and Gastebled, O. : “Safe and Economic Gas Wells through Cement Design for Life of the Well”, paper SPE 75700 presented at the 2002 Gas Technology Symposium, Calgary, Alberta, Canada, 30 April–2 May.