「令和６年度 地熱井掘削監督者養成講座」
地熱井掘削における泥水管理

株式会社テルナイト
泥水技術部 技術営業課
石川 佳孝

令和7年（西暦2025年）

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

OUTLINE

- ◆ 泥水の機能（おさらい）
- ◆ 地熱井掘削で使用する泥水について
- ◆ 地熱掘削で特に留意すべき点
  - 高温度対策
  - ﾎｰﾙｸﾘｰﾆﾝｸﾞ
  - 泥水･泥壁の潤滑性
  - 蛇紋岩対策について
- ◆ まとめ

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

OUTLINE

- ◆ 泥水の機能（おさらい）
- ◆ 地熱井掘削で使用する泥水について
- ◆ 地熱掘削で特に留意すべき点
  - 高温度対策
  - ﾎｰﾙｸﾘｰﾆﾝｸﾞ
  - 泥水･泥壁の潤滑性
  - 蛇紋岩対策について
- ◆ まとめ

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

泥水の機能（おさらい）

DRILLING FLUIDS（泥水）の定義

Drilling Fluid（掘削流体）またはMud（泥水）と呼ばれる、多くの異なる種類の化学物質で構成された、石油・天然ガス井、地熱井、温泉井や水井戸、地質調査井などの掘削作業の要求を満たす流体。

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

APIの定義

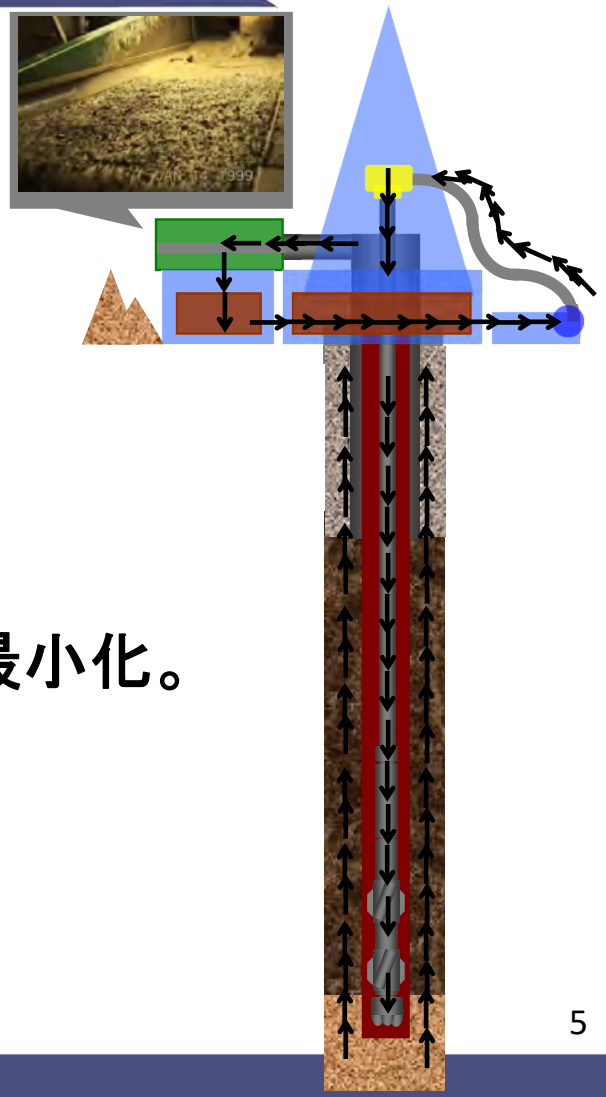
“A Circulating fluids used in Rotary drilling to perform any or all of the various functions required during the Drilling operations”

API : American Petroleum Institute

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

泥水の機能（おさらい）

泥水には、坑井開発を早く、安全に、そして安価に達成するために様々な要件・機能が求められる。



- ◆ 掘削効率、掘進率の最適化。
- ◆ 坑内情報の地上への伝達。
- ◆ 人の健康、環境、掘削設備および坑内ﾄﾗﾌﾞﾙﾘｽｸの最小化。
- ◆ 貯留層の生産性の最大化。

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

泥水の機能（おさらい）

良好な泥水が具備すべき機能・性質（1）

- ◆ 泥水比重は、地層圧力とﾊﾞﾗﾝｽした適正値であること。
- ◆ 流動特性は、ﾎｰﾙｸﾘｰﾆﾝｸﾞ性に優れ且つ圧力損失やECD（Equivalent Circulation Density）への影響が少ないこと。
- ◆ 坑内状況に適した脱水特性、泥壁形成性を有すること。
- ◆ 水和膨潤・分散傾向が強い頁岩の場合は、それらを良好に抑制することで坑壁を安定化すると共に、泥化および張り付きを防止すること。
- ◆ 粘土およびｿﾘｯﾄﾞ濃度が適正範囲内であること。

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

泥水の機能（おさらい）

良好な泥水が具備すべき機能・性質（2）

- ◆ 潤滑性に優れること。
- ◆ 各種ｲｵﾝ、ｿﾘｯﾄﾞ、温度他の汚染源に対する耐性が高いこと。
- ◆ 多種多様な泥水材料、泥水ｼｽﾃﾑとの適合性が高いこと。
- ◆ 高温高圧、大水深および高傾斜井など、複数の要件に対して多様性を有すること。
- ◆ 地上において泥水とｿﾘｯﾄﾞ分の分離が容易であること。
- ◆ 貯留層の生産性に影響しないこと。
- ◆ 坑内ﾄﾗﾌﾞﾙﾘｽｸを最小限に抑えること。

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

泥水の機能（おさらい）

良好な泥水が具備すべき機能・性質（3）

- ◆ ﾊﾝﾄﾞﾘﾝｸﾞ性に優れていること。
- ◆ ｺｱや検層の解析に影響を与えないこと。
- ◆ 調達性に優れ且つ経済的であること。
- ◆ 人の健康や環境に対する影響が少ないこと。
- ◆ 鋼管や掘削設備に悪影響がないこと。
- ◆ 関係法令や産廃への特別な配慮が不要であること。

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

OUTLINE

- ◆ 泥水の機能（おさらい）
- ◆ 地熱井掘削で使用する泥水について
- ◆ 地熱掘削で特に留意すべき点
  - 高温度対策
  - ﾎｰﾙｸﾘｰﾆﾝｸﾞ
  - 泥水･泥壁の潤滑性
  - 蛇紋岩対策について
- ◆ まとめ

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

地熱井掘削で使用する泥水について

地熱井掘削で使用する泥水の要件

◆ 地熱井と石油・天然ガス井は、泥水循環を伴うロータリー掘削という点で共通しており、そこで使用される泥水技術や泥水システムは石油・天然ｶﾞｽ井の応用であることから、泥水に求められる機能や性質などの要件は、両者に大きな違いはない。

◆ 地熱井で掘削する火成岩および深成岩は、石油・天然ｶﾞｽ井で掘削する堆積岩とは物理化学的性質や特徴が大きく異なり、特にに地熱井掘削に適した泥水システムを思慮する上では次の事柄への配慮が必要とされる。

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

地熱井掘削で使用する泥水について

地熱井掘削特有の要素

- ◆ 地層圧力が低く、泥水比重を必要としない。
- ◆ 地層温度が高い（石油井170℃ @5,000 m⇒地熱井：200～300℃ @2,000 m）。
- ◆ 硬質でほとんど水和膨潤しないため、頁岩抑制力を必要としない。
- ◆ 地層に亀裂が多く、重篤な逸泥が生じる。
- ◆ 地熱貯留層の地層圧力は静水圧力よりも大幅に低く、重篤な逸泥が例外なく生じる。

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

地熱井掘削で使用する泥水について

地熱井掘削で使用される泥水の要件

地熱井掘削で使用する泥水を選択あるいはﾃﾞｻﾞｲﾝする場合には、上述の事柄を前提として、より地熱井掘削にﾌｨｯﾄするよう泥水を最適化しなければならない。

1.堆積岩の掘削

- ◆ 大坑径下でのｻﾞｸ揚げ能力に優れること。
- ◆ 砂岩や礫岩などの粗粒未固結層を厚い泥壁で保護すること。
- ◆ 浸透性地層を粘土粒子で閉塞し、Seepage lossを緩和すること。
- ◆ 安価で作液が容易であり且つ環境影響が小さいこと。
- ◆ 分散剤、張り付き防止剤などの追加が可能であること。

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

地熱井掘削で使用する泥水について

地熱井掘削で使用される泥水の要件

2. 火成岩、深成岩の掘削

- ◆ 高温度環境下でも安定した流動特性、脱水特性が得られること。
- ◆ ﾎｰﾙｸﾘｰﾆﾝｸﾞに適した流動性ﾌﾟﾛﾌｧｲﾙを有していること。
- ◆ ｿﾘｯﾄﾞ、塩分、ｾﾒﾝﾄなどのｲｵﾝ耐性が大きいこと。
- ◆ 脱水量が少なく、泥壁の圧密性に優れること。
- ◆ 潤滑性に優れること（傾斜井）。
- ◆ 安価で作液が容易であること

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

OUTLINE

- ◆ 泥水の機能（おさらい）
- ◆ 地熱井掘削で使用する泥水について
- ◆ 地熱掘削で特に留意すべき点
  - 高温度対策
  - ﾎｰﾙｸﾘｰﾆﾝｸﾞ
  - 泥水･泥壁の潤滑性
  - 蛇紋岩対策について
- ◆ まとめ

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

地熱掘削で特に留意すべき点

◆ 高温度対策

- 温度勾配が高く、比較的浅部でも地層温度が高い。
- 揚降管後や電気検層後に坑底付近の泥水性状が悪化。
- 貯留層掘削時に逸泥が伴わない場合には特に顕著。

◆ ﾎｰﾙｸﾘｰﾆﾝｸﾞ

- 搬入路や敷地の制限により不十分なｽﾍﾟｯｸのﾏｯﾄﾞﾎﾟﾝﾌﾟやｿﾘｯﾄﾞｺﾝﾄﾛｰﾙ装置を使用(ﾎﾟﾝﾌﾟ繰り出し量や泥水の粘性が制限を受ける)。

◆ 泥水・泥壁の潤滑性

- 高傾斜井・大偏巨井での潤滑剤の不使用によるﾄﾙｸ･ﾄﾞﾗｸﾞの増大。

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

OUTLINE

- ◆ 泥水の機能（おさらい）
- ◆ 地熱井掘削で使用する泥水について
- ◆ 地熱掘削で特に留意すべき点
  - 高温度対策
  - ﾎｰﾙｸﾘｰﾆﾝｸﾞ
  - 泥水･泥壁の潤滑性
  - 蛇紋岩対策について
- ◆ まとめ

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

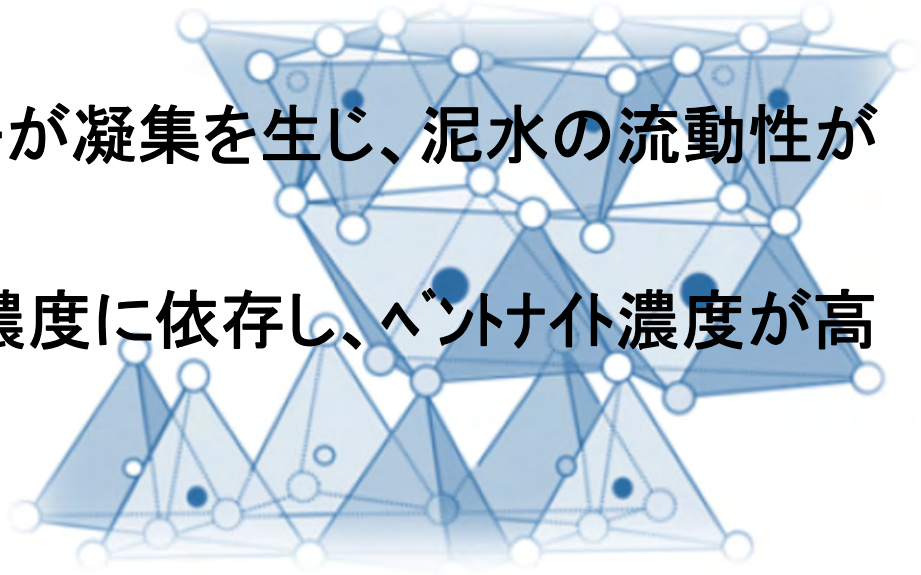
高温度対策

ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ濃度と温度との関係

◆ ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄは熱に対して非常に敏感であるため、高温度環境となる地熱井で安定した泥水性質を得るためには、このﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄの熱汚染対策が重要な鍵となる。

◆ 熱汚染を受けたﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄは、粘土粒子が凝集を生じ、泥水の流動性が悪化する（失う）。

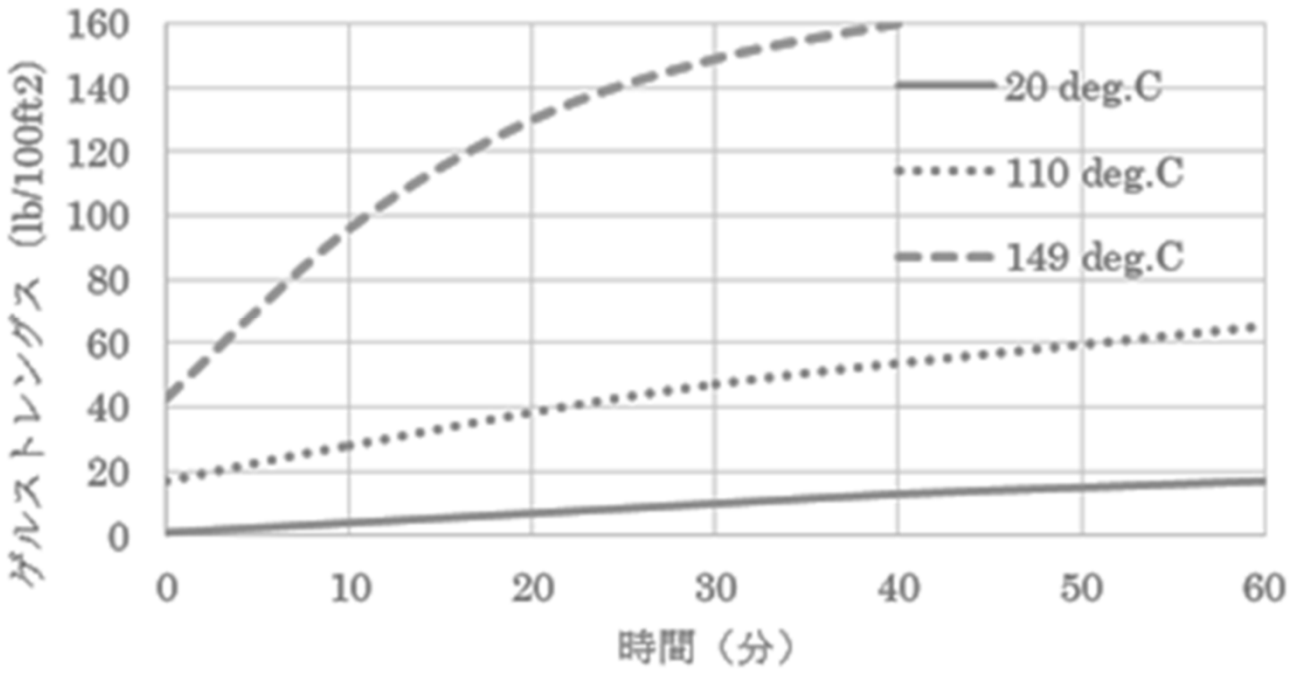
◆ それらの重篤度は泥水中のﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ濃度に依存し、ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ濃度が高いほど熱汚染の影響は大きくなる。



Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

高温度対策

ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ濃度と温度との関係(1)

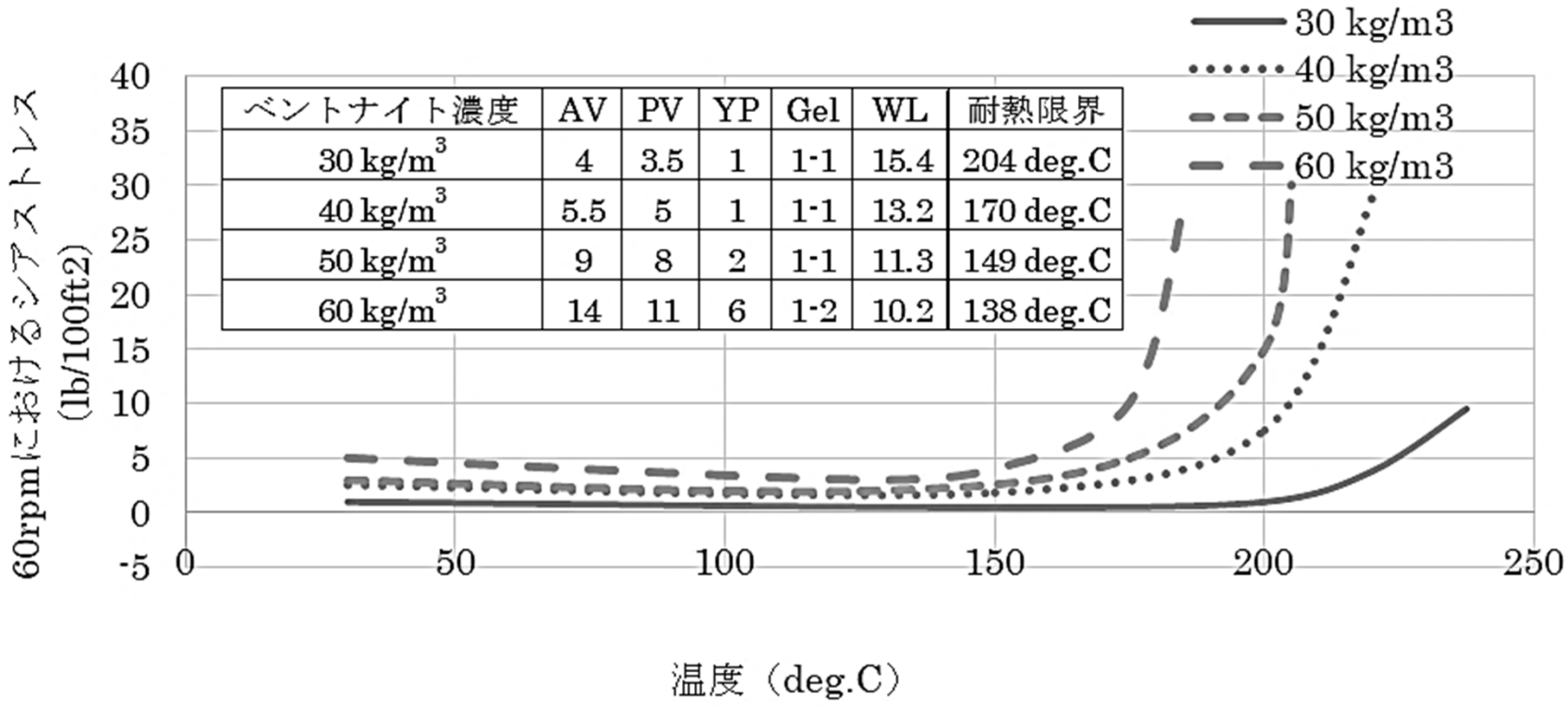


- 左図に50 kg/m³ ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ懸濁液の各温度下におけるｹﾞﾙｽﾄﾚﾝｸﾞｽに及ぼす時間の影響を示す。
- 温度が高くなるに従ってｹﾞﾙｽﾄﾚﾝｸﾞｽの増加率は著しく大きくなり、経時により更にｹﾞﾙｽﾄﾚﾝｸﾞｽは成長する。

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

高温度対策

ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ濃度と温度との関係(2)

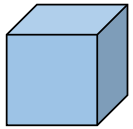


ベントナイト濃度	AV	PV	YP	Gel	WL	耐熱限界
30 kg/m^3	4	3.5	1	1-1	15.4	204 deg.C
40 kg/m^3	5.5	5	1	1-1	13.2	170 deg.C
50 kg/m^3	9	8	2	1-1	11.3	149 deg.C
60 kg/m^3	14	11	6	1-2	10.2	138 deg.C

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ濃度と温度との関係(3)

ソリッドの微細化とその比表面積



立方体1辺の長さ	立方体の個数	比表面積	表面積の倍率
1cm	1	6cm2	1
1/2cm	8	12cm2	2
1/4cm	64	24cm2	4
1/8cm	512	48cm2	8
1/16cm	4,096	96cm2	16
1/32cm	32,768	192cm2	32

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

高温度対策

ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ濃度と温度との関係（まとめ）

- ◆ 耐熱性を向上させたい場合には、泥水中のﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ濃度とｿﾘｯﾄﾞ分濃度を低く維持･管理することが原則(必要最低限)。
- ◆ 新泥水作液時のﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ濃度は30kg/m^{3}以下、MBC値では2.00ml/ml.mud前後を目安とする。
- ◆ 高性能（低添加量で高粘性を発現）なﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄを使用するか、より耐熱性の高いｾﾋﾟｵﾗｲﾄを使用する。
- ◆ 長時間、循環を停止する場合には、新規に作泥した耐熱泥水を坑底にｽﾎﾟｯﾄする。
- ◆ ソリッドの微細化にも注意を払う（弊社技研で粒度分布を測定可能）。
- ◆ 泥水の蒸発分を常時割水で補給する（500L-2,000L/時間程度）。

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

OUTLINE

- ◆ 泥水の機能（おさらい）
- ◆ 地熱井掘削で使用する泥水について
- ◆ 地熱掘削で特に留意すべき点
  - 高温度対策
  - ホールクリーニング
  - 泥水・泥壁の潤滑性
  - 蛇紋岩対策について
- ◆ まとめ

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

ﾎｰﾙｸﾘｰﾆﾝｸﾞ

ﾎｰﾙｸﾘｰﾆﾝｸﾞ：坑内において掘削されたｶｯﾃｨﾝｸﾞｽを地表まで運搬すること。

◆ｶｯﾃｨﾝｸﾞｽは、基本的には泥水のｱﾆｭﾗｰﾍﾞﾛｼﾃｨとｶｯﾃｨﾝｸﾞｽのｽﾘｯﾌﾟﾍﾞﾛｼﾃｨとの差によってｶｯﾃｨﾝｸﾞｽがは地上へ上昇する。

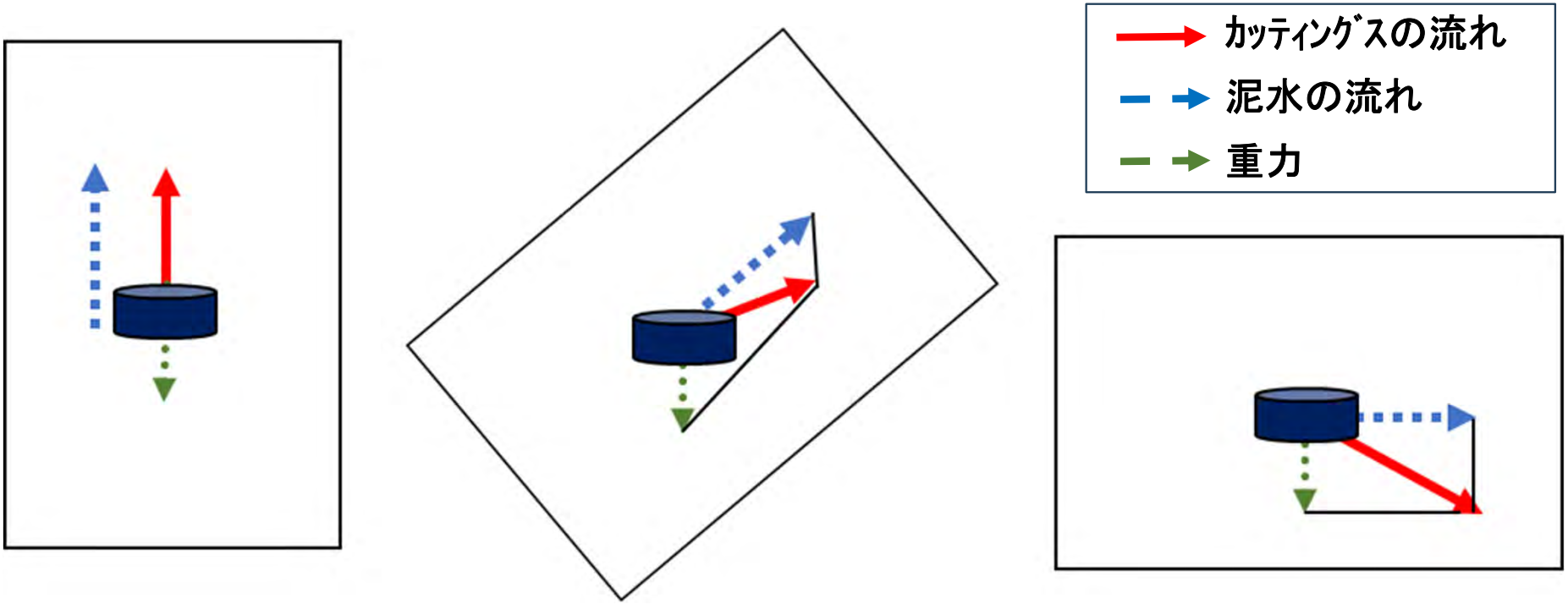
◆ｶｯﾃｨﾝｸﾞｽのｽﾘｯﾌﾟﾍﾞﾛｼﾃｨより大きなｱﾆｭﾗｰﾍﾞﾛｼﾃｨであれば、理論上ｶｯﾃｨﾝｸﾞｽは全て地上に揚がる。

◆しかし、高傾斜・水平坑井の場合には、この理論は直接適用できない。

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

高傾斜・水平坑井におけるカッティングスの挙動

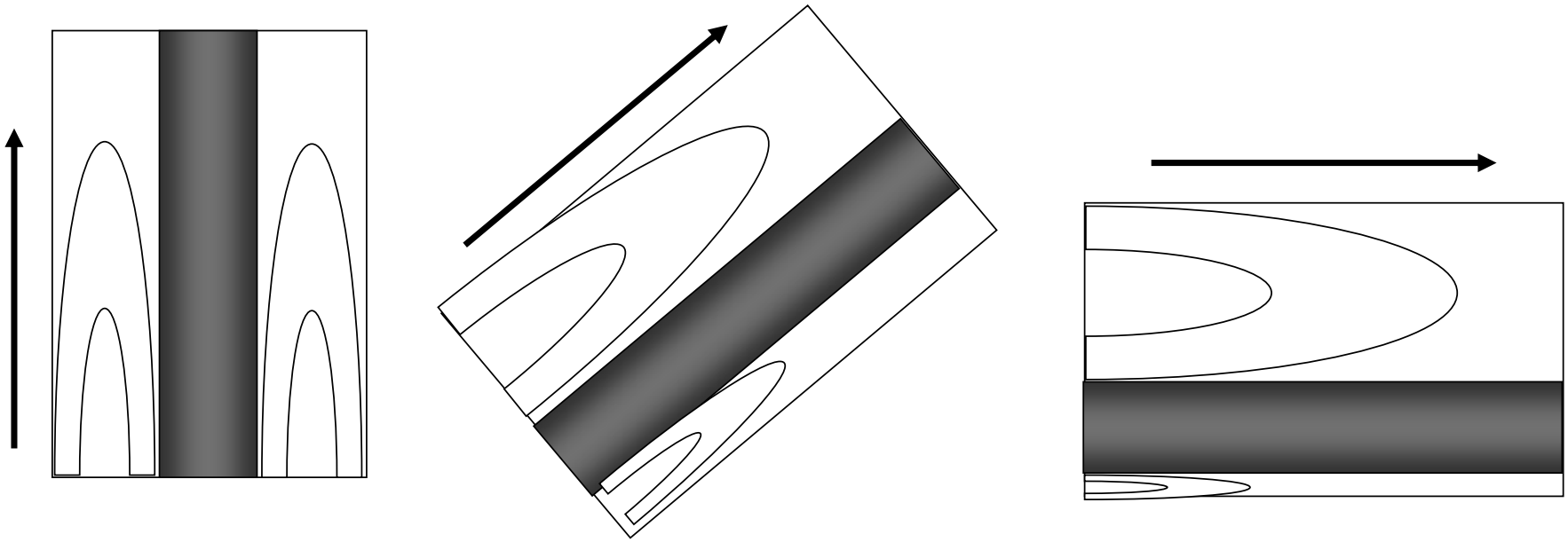
◆傾斜が増加するにつれて、ｶｯﾃｨﾝｸﾞｽは坑壁のﾛｰｻｲﾄﾞへ沈降しようとする。



Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

ﾄﾞﾘﾙｽﾄﾘﾝｸﾞｽの偏心とｱﾆｭﾗｰﾌﾟﾛﾌｧｲﾙ

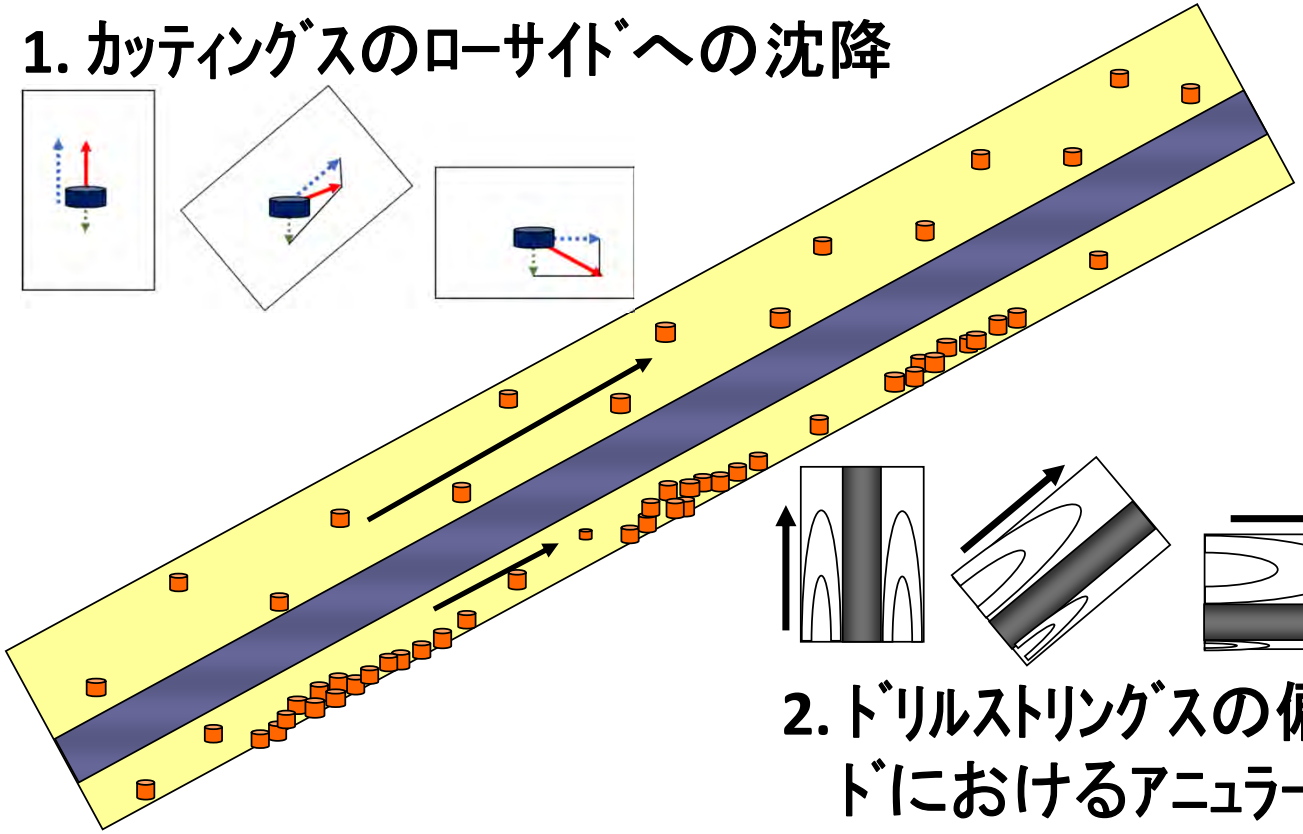
◆傾斜の増加に伴い、ﾄﾞﾘﾙｽﾄﾘﾝｸﾞｽはﾛｰｻｲﾄﾞの坑壁に横たわる傾向となり、ｱﾆｭﾗｽのｸﾘｱﾗﾝｽは、ｱｯﾊﾟｰｻｲﾄﾞでは広く、ﾛｰｻｲﾄﾞでは逆に狭くなる。



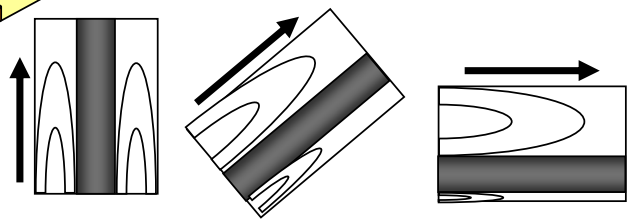
Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

高傾斜・水平坑井の場合のｶｯﾃｨﾝｸﾞｽの流れ

1. ｶｯﾃｨﾝｸﾞｽのローサイﾄﾞへの沈降



◆高傾斜・水平坑井の場合のｶｯﾃｨﾝｸﾞｽの挙動は、2つの悪条件により、坑壁のローサイﾄﾞにｶｯﾃｨﾝｸﾞｽﾍﾞｯﾄﾞの形成を許容してしまう。



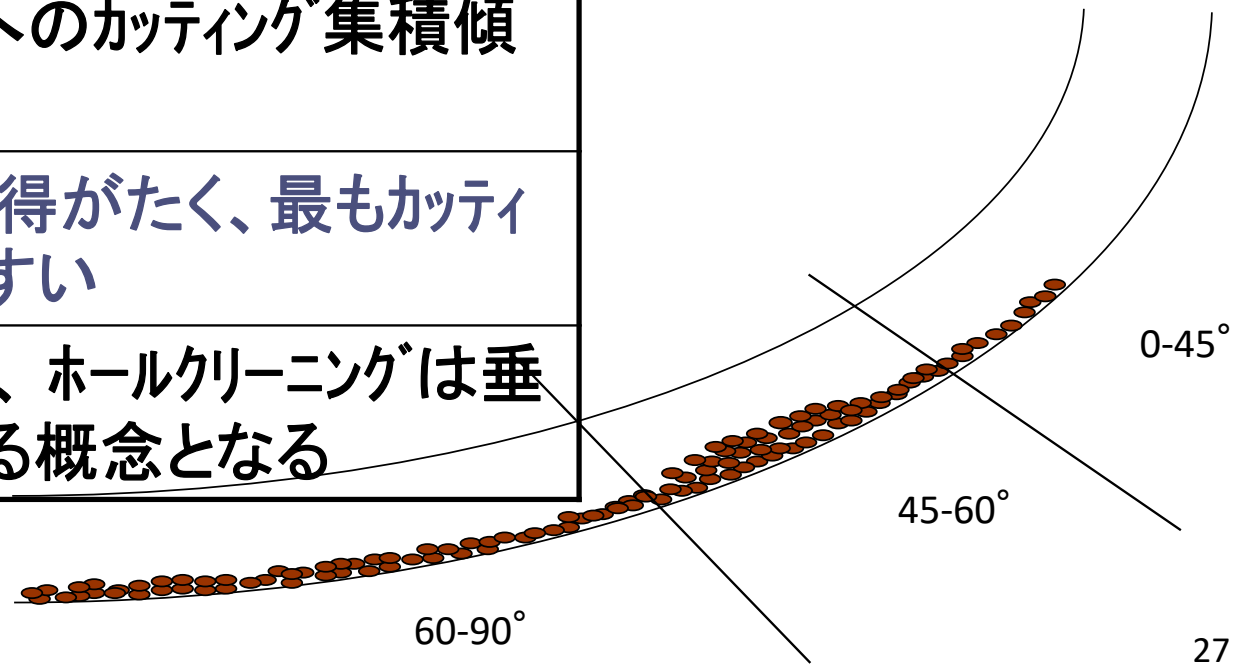
2. ﾄﾞﾘﾙｽﾄﾘﾝｸﾞｽの偏心によるローサイﾄﾞにおけるｱﾆｭﾗｰﾌﾛｰの流れ難さ

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

坑井の傾斜角度とカッティングスベッドの形成

➢ホールクリーニングの難易度は傾斜に依存し、主に3つのカテゴリーに区分される。

0-30°	10° 以上よりローサイドへのカッティング集積傾向が現れ始める
30-60°	良好なホールクリーニングは得がたく、最もカッティングベッドが形成されやすい
60-90°	高傾斜・水平領域では、ホールクリーニングは垂直井の場合と全く異なる概念となる



Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

ホールクリーニング不足による問題点と対策

- ◆ 傾斜30°- 60° の範囲では、坑内に沈積したカッティングは泥水の流れに逆らう形で下方に向かってスライドする。
- ◆ ポンプ停止時にカッティングは運搬力を失い、坑内に沈降し、裸坑斜面に沿って滑りながら下方に移動する。
- ◆ コントロールドリリング⇒方位・傾斜調整のためビット荷重のむやみな変更は限界がある。
- ◆ ショートトリップ⇒最も効果的であるがリグタイムが増加。
- ◆ アニュラス速度⇒モーター編成においては圧力損失が増加。

限られた条件で良好なホールクリーニング性を発揮するよう坑内状況に応じた泥水性状（流動特性）に調整する必要がある。

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

流動特性(レオロジー)の最適化

◆泥水のレオロジーは特に低せん断速度域で評価する。

・Fann Viscometer の3rpm値 、6rpm値、100rpm値、イニシャルゲル値で評価。

・指針：6rpm値 = ホールサイズ(inch)に近いほど望ましい。

	※1Flow Rate (L/min)	※2Shear Rate (Sec^{-1})	Annular Viscosity (CP)
17-1/2” Section	3,300	15	258
12-1/4” Section	3,200	55	122
8-1/2” Section	2,100	196	100

※1：ある坑井での実績

※2：VGメーターの回転数×1.7 = Shear Rate

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

Cuttings Transport Ratio (CTR)の最適化

◆ **Cuttings Transport Ratio (CTR)**

- Cuttings Transport : Slip Velocity / Annular Velocity x 100,
  最低でも25%以上、垂直井50%以上、高傾斜井・水平井55%以上
- 実績；
  17-1/2”坑：47%、12-1/4”坑：73%、8-1/2”坑：75%
- ホールクリーニング不足の問題は生じていない

- 推奨；
  12-1/4”坑：YP 20-30lb/100ft^2, A/Vel >30-40m/min, CTR 65-75%
  8-1/2”坑：YP 10-20lb/100ft^2, A/Vel >80m/min, CTR 70-80%
  垂直井と比較してザク揚げ循環時間は2倍以上

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

CTR（参考）

◆ 清水 V.S. 泥水（8-1/2”坑掘削）

種別	A/Velocity (m/min)	S/Velocity (m/min)	最大上昇可能粒径 (inch)	CTR （%）
清水	91	58.4	0.7	35.8
泥水1		22.4	1.9	75.4
泥水2		18.6	2.3	79.6

- Flow Rate : 2,100L/min
- 泥水1 : PV 21cp, YP 20 lb/100ft^2, Gel 8-12 lb/100ft^2
- 泥水2 : PV 15cp, YP 8 lb/100ft^2, Gel 3-16 lb/100ft^2

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

パイプローテーション

◆ パイプの回転及び昇降

・ドリルストリングスによる機械的動作がホールクリーニングを改善する。

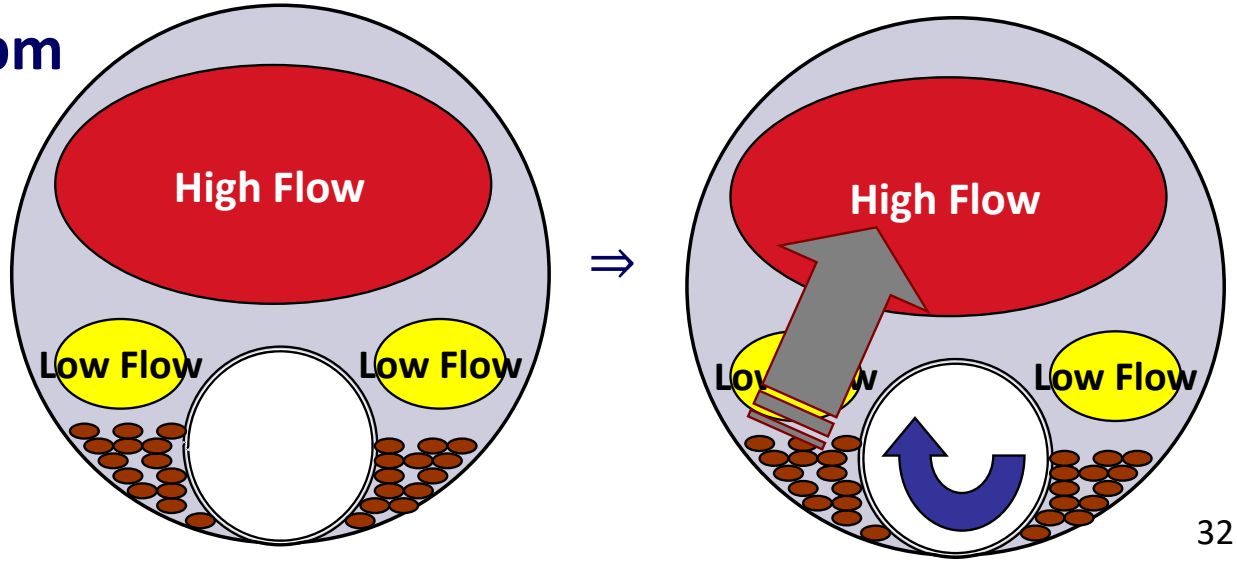
・パイプの回転を続ける限り、ポンプ停止後も、カッティングはベッドに沈降せず、パイプの周囲に保持される。

・12-1/4” & 17-1/2” Hole 120rpm

・8-1/2” Hole 60rpm

◆ ショートトリップの実施

・カッティングスベッド形成後はカッティングスベッドを機械的に破壊し、ホールクリーニングを補助する。



Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

その他

◆ ｽｳｨｰﾌﾟﾏｯﾄﾞ

・高粘性泥水、50m – 150mｱﾆｭﾗｰｺﾗﾑ、F/Vis:100-200sec/qt。
・Xanthan gumを使用して、低PV、高YP、特に低速部の粘性を持ち上げる。
・乱流はｶｯﾃｨﾝｸﾞﾍﾞｯﾄﾞの除去に効果的、十分な送入量が必須。
・Turbulent Sweep(低粘性)とLaminar Sweep(高粘性)の併用(ﾀﾝﾃﾞﾑ)。
・Sweep送入中はﾊﾟｲﾌﾟ回転と昇降を行う。
・高比重/低粘性 ：循環泥水比重+0.03-0.05sg。

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

ﾎｰﾙｸﾘｰﾆﾝｸﾞ（まとめ）

- ◆ ｱﾆｭﾗｰﾍﾞﾛｼﾃｨは、ｶｯﾃｨﾝｸﾞｽﾍﾞｯﾄﾞが形成しないようできる限り高くする。ﾌﾛｰﾊﾟﾀｰﾝは乱流が望ましい。但し、未固結層やﾌﾗｸﾁｬｰﾀｲﾌﾟの地層においてｳｫｯｼｭｱｳﾄが懸念される場合を除く。
- ◆ 掘削中は可能な限りﾊﾟｲﾌﾟﾛｰﾃｰｼｮﾝを行い、ﾎｰﾙｸﾘｰﾆﾝｸﾞを補助する。また定期的なｼｮｰﾄﾄﾘｯﾌﾟを行い、機械的にｶｯﾃｨﾝｸﾞｽﾍﾞｯﾄﾞを破壊する。
- ◆ 流動特性（ﾚｵﾛｼﾞｰ特性）については、基本的に垂直坑井の場合と同様。管理上の目安はVGﾒｰﾀｰの6rpm値=坑径(inch)、CTR : 50%以上(水平坑55%以上)とする。
- ◆ ｶｯﾃｨﾝｸﾞｽﾍﾞｯﾄﾞの除去には低粘性/高比重のｽｳｨｰﾌﾟﾏｯﾄﾞが効果的(坑内状況による)。低粘性ｽｳｨｰﾌﾟﾏｯﾄﾞ送入後は、直ちに高粘性のｽｳｨｰﾌﾟﾏｯﾄﾞをﾌﾗｯｼｭする（ﾀﾝﾃﾞﾑｽｳｨｰﾌﾟ）。

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

OUTLINE

- ◆ 泥水の機能（おさらい）
- ◆ 地熱井掘削で使用する泥水について
- ◆ 地熱掘削で特に留意すべき点
  - 高温度対策
  - ﾎｰﾙｸﾘｰﾆﾝｸﾞ
  - 泥水･泥壁の潤滑性
  - 蛇紋岩対策について
- ◆ まとめ

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

潤滑性の必要性

- ◆ 高傾斜・水平掘削ではﾄﾞﾘﾙｽﾄﾘﾝｸﾞｽはCSGや裸坑部に押し付けられ大きな負荷が生じる。
- ◆ ﾄﾞﾘﾙｽﾄﾘﾝｸﾞｽはﾛｰｻｲﾄﾞに横たわる状態となり接触面積が増加する。
- ◆ より高い摩擦力が生じ、高ﾄﾙｸ・ﾄﾞﾗｸﾞの原因となる。抑留事故を防止するために、良好な潤滑性が重要。
- ◆ 泥水の潤滑性：泥水中における金属間で生じる摩擦に対する泥水の摩擦係数（ﾄﾞﾘﾙｽﾄﾘﾝｸﾞｽ V.S CSG）。
- ◆ 泥壁の潤滑性：一定の差圧条件下で泥壁上に抑留させた金属ﾌﾟﾚｰﾄが離脱する時の泥壁の抑留係数（ﾄﾞﾘﾙｽﾄﾘﾝｸﾞｽ V.S 裸坑）。

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

泥水・泥壁の潤滑性

泥水・泥壁の潤滑性は次式で示される。

F = f *W　　：泥水の潤滑性

F = μ*A*⊿P ：泥壁の潤滑性

F　：摩擦力
f　：摩擦係数
W　：負荷
μ　：抑留係数
A　：接触面積
⊿P ：差圧（泥水柱圧力 - 地層圧）

- ◆ ﾄﾞﾘﾙｽﾄﾘﾝｸﾞｽはｹｰｼﾝｸﾞや裸坑に押し付けられ大きな負荷が生じる。
  ⇒異常ﾄﾙｸ＆ﾄﾞﾗｸﾞ
- ◆ 掘管はﾛｰｻｲﾄﾞに横たわる状態となり、全体の接触面積が増大する。
  ⇒差圧抑留
- ◆ OBMやSBMの使用、WBM + 潤滑剤。

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

泥水・泥壁の潤滑性

測定方法

◆ 摩擦係数のイメージ (F0 = μ・N)

API脱水試験器で生成した泥壁上に、100gr（垂直抗力N）の鉄製の物体を静置させ、水平方向にバネ計りを付けて引っ張る。
鉄球が動きはじめる力（重さF0）が40grであった場合40/100=0.4となり、静止（最大）摩擦係数 μ(ミュー)は0.4で評価される。

Fann社製EP & Lubricity Tester

Fann社製Differential Sticking Tester

泥水の潤滑性 : F = f - W

泥壁の潤滑性 : F =μ・A・⊿P

F = 摩擦力、f = 摩擦係数

W = 負荷、μ= 抑留係数

A = 接触面積、

⊿P = 差圧（泥水柱圧-地層圧）

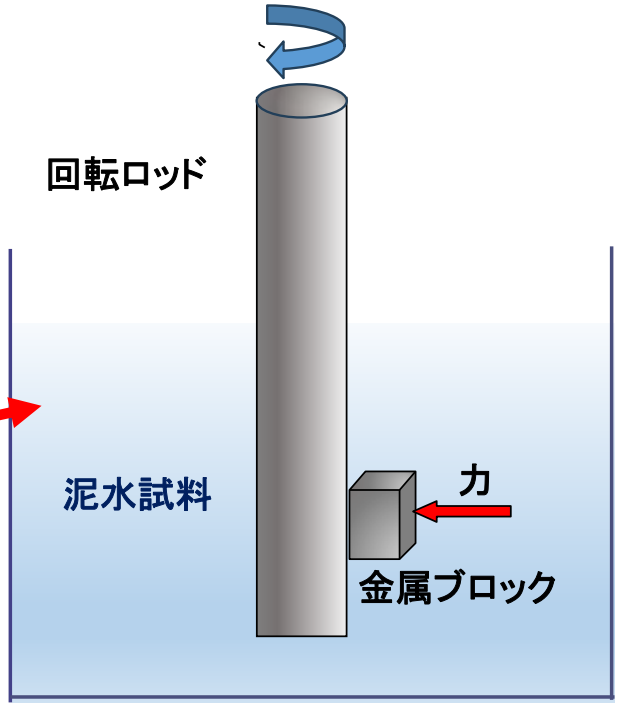
Reference : Fann instrument web site

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

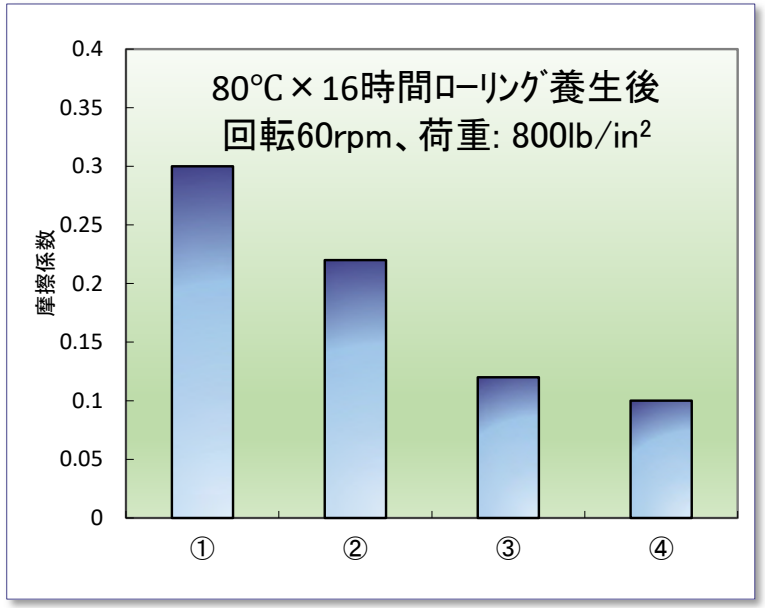
泥水の摩擦係数

◆ｹｰｼﾝｸﾞﾊﾟｲﾌﾟとﾄﾞﾘﾙｽﾄﾘﾝｸﾞｽとの摩擦に対する泥水の潤滑性を示す。

Fann社製EP & Lubricity Tester



試験装置概念図



①KCl/ﾘｸﾞﾈｰﾄ泥水 (ﾍﾞｰｽ)
②ﾍﾞｰｽ+重油(40kg/m³)+ｽﾋﾟｰﾀﾞｰP(10kg/m³)
③ﾍﾞｰｽ+ｸﾘｰﾝﾘｭｰﾌﾞ(40kg/m³)+ﾃﾙｸﾘｰﾝ(10kg/m³)
④ｵｲﾙﾍﾞｰｽ泥水

Reference : Fann instrument web site

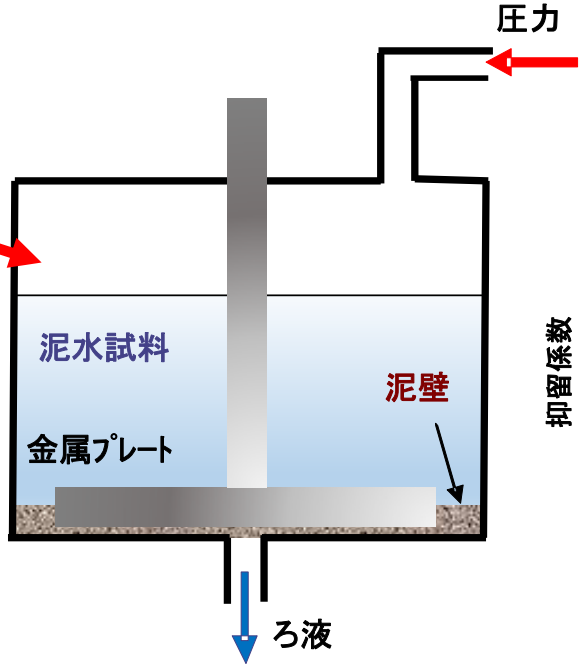
Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

泥壁の摩擦係数

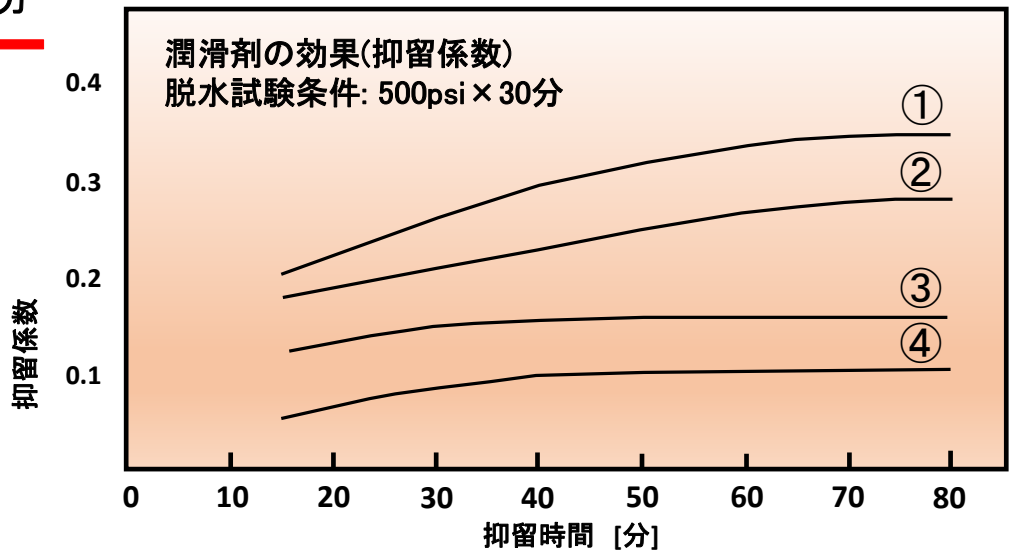
◆泥壁を形成させた後、ﾌﾟﾚｰﾄを押し付けて抑留状態として離脱に必要な力(トルク)から抑留係数を算出する。

Fann社製 Differential Sticking Tester

Reference：Fann instrument web site



試験装置概念図

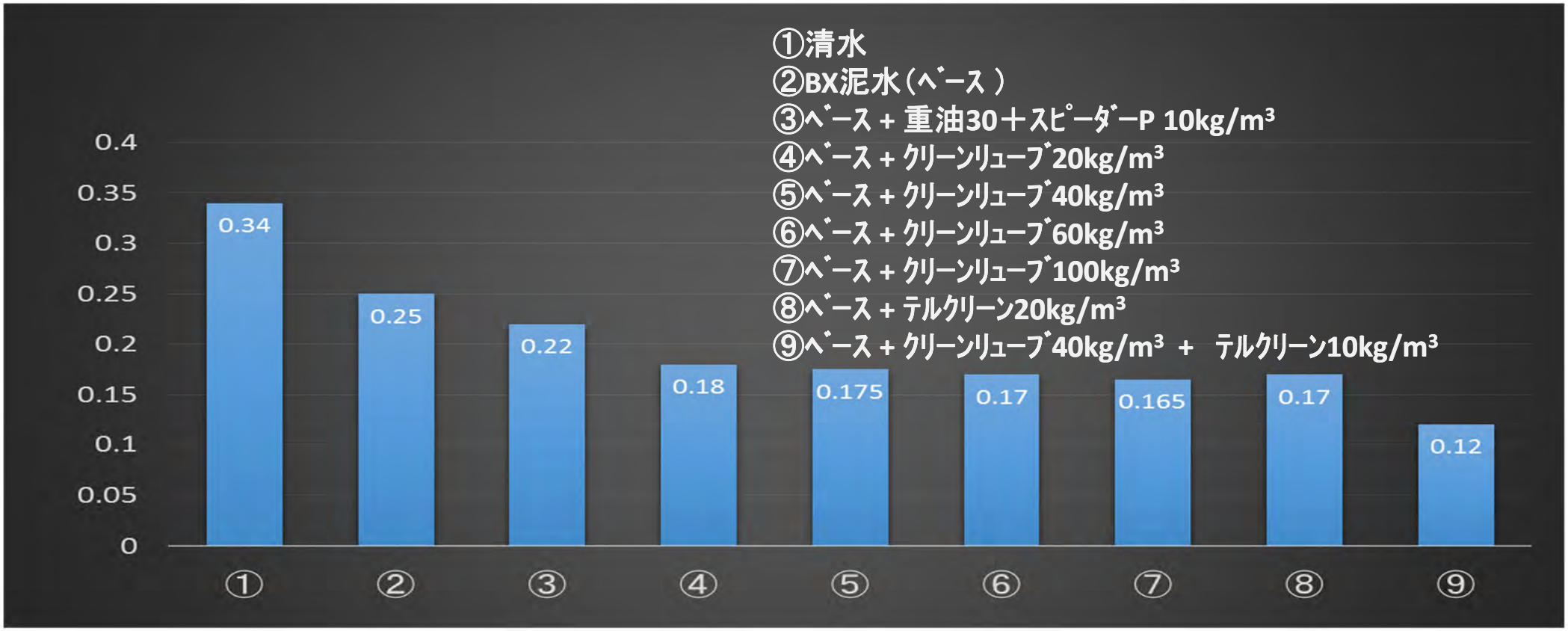


①KCl/ﾘｸﾞﾈｰﾄ泥水 (ﾍﾞｰｽ)
②ﾍﾞｰｽ+重油(40kg/m³)+ｽﾋﾟｰﾀﾞｰP(10kg/m³)
③ﾍﾞｰｽ+ｸﾘｰﾝﾘｭｰﾌﾞ(40kg/m³)+ﾃﾙｸﾘｰﾝ(10kg/m³)
④ｵｲﾙﾍﾞｰｽ泥水

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

泥水・泥壁の潤滑性

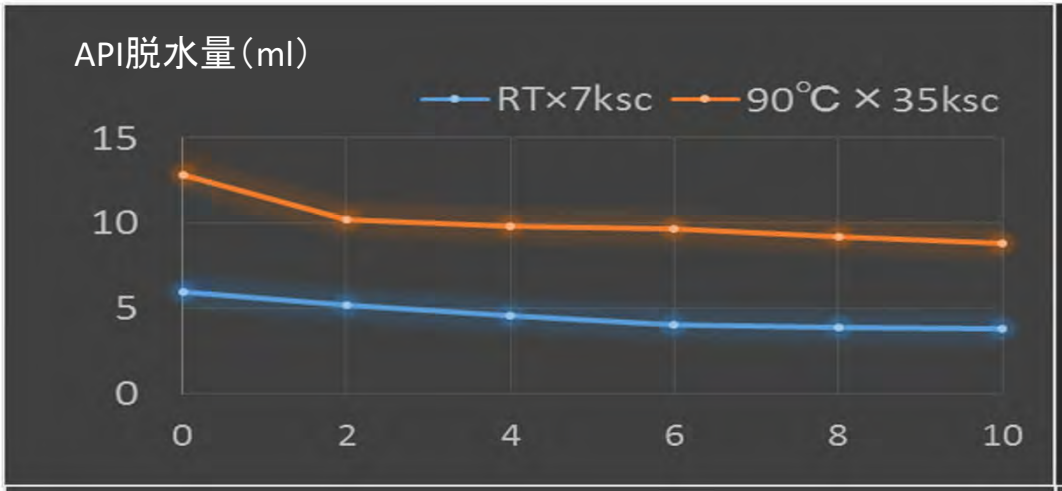
潤滑性

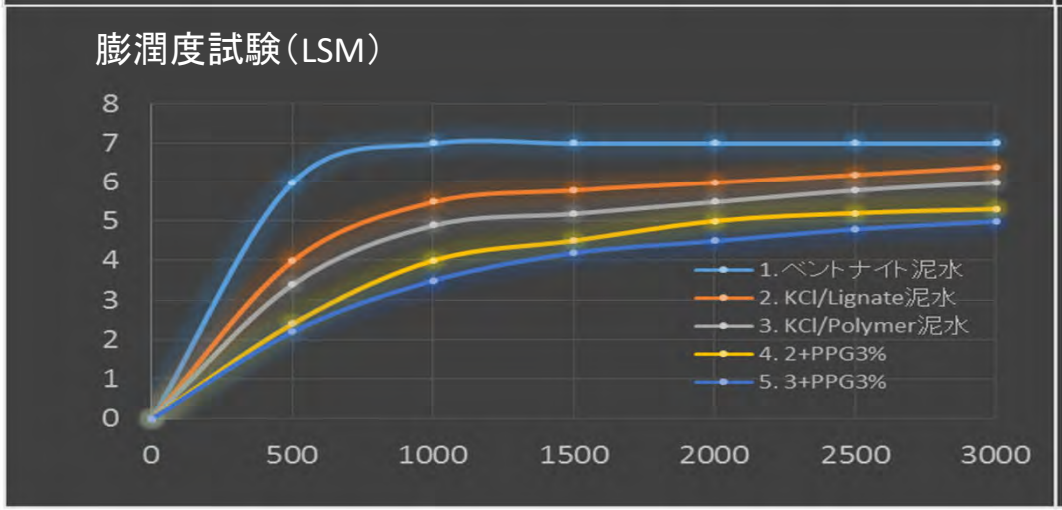


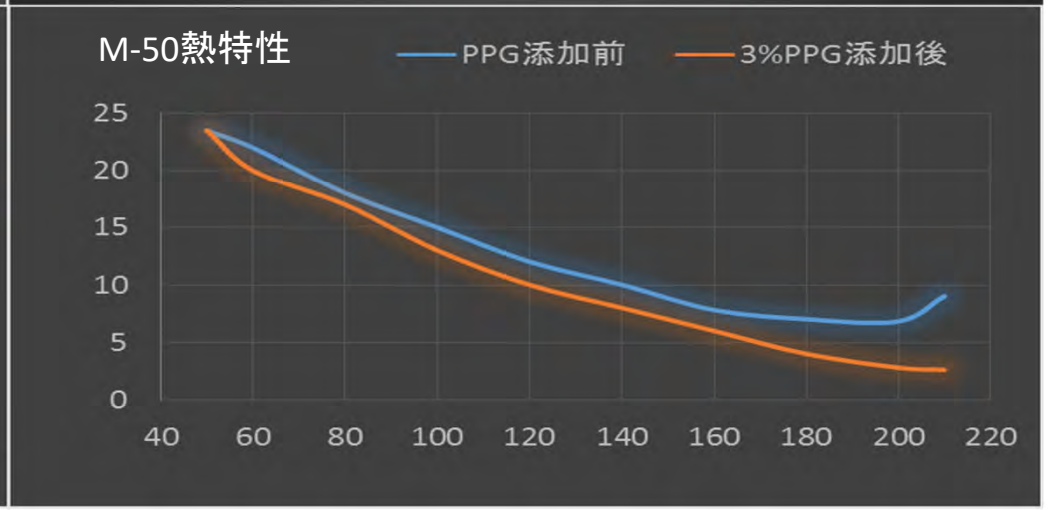
グラフ．BX泥水に対する潤滑剤添加試験

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

泥水・泥壁の潤滑性







Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

泥水・泥壁の潤滑性

潤滑性

クリーンリューブの推奨濃度

(1) 最大傾斜角 0～45°
- クリーンリューブ: 30kg/m³

(2) 最大傾斜角 45° 以上
- クリーンリューブ: 50kg/m³前後
- テルクリーン: 10kg/m³

- 坑跡、増角率、泥水比重によって増減。
- 実坑井では適宜潤滑性を測定し、有効濃度を考慮の上コントロール。
- 極圧潤滑にはスピーダーPとの併用も考慮。

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

OUTLINE

- ◆ 泥水の機能（おさらい）
- ◆ 地熱井掘削で使用する泥水について
- ◆ 地熱掘削で特に留意すべき点
  - 高温度対策
  - ﾎｰﾙｸﾘｰﾆﾝｸﾞ
  - 泥水･泥壁の潤滑性
  - 蛇紋岩対策について
- ◆ まとめ

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

蛇紋岩とは

- 表面の蛇皮に似た紋様がその名称に由来。
- かんらん岩が水の影響により変質してできた変成岩の一種。
- 地層の褶曲や断層など構造的変位の影響により亀裂が発達あるいは破砕していることが多い。
- 水分活性が低く硬質で脆い蛇紋石を主成分として、クリソタイル、タルク、クロライトなどの鉱物の他、モンモリロナイトやスメクタイといった水分活性が大きく軟質な膨潤性粘土鉱物（などと混在している場合が多い。

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

蛇紋岩の崩壊の原因

① 脆弱な地層（破砕状態の地層）と掘削編成との干渉（衝撃）。

② 隣接する膨潤性・分散性粘土鉱物の水和・欠損による硬質鉱物の剥落。

③ 亀裂や滑り面（層理面）などに泥水・濾水が侵入することによる滑り摩擦の減少。

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

蛇紋岩の泥水による直接的な崩壊対策

① 膨潤性粘土鉱物の物理化学的水和膨潤・分散の抑制
② 脆弱な地層の物理的保護。
③ 不水溶性粒子による亀裂・孔隙の物理的閉塞（泥水、濾水の浸入遮断）

- ✓ 粘土鉱物の層間陽イオンをKイオンで置換し、水分子の侵入による粘土の水和膨潤を化学的に抑制するKCl泥水
- ✓ 粘土鉱物層間へのintercalationおよび粘土粒子の被覆により水分子の侵入による粘土の水和膨潤や地層の分散を化学的、物理的に抑制するアミン系泥水
- ✓ 坑壁近傍の孔隙内部で凝固・沈殿するシリケート膜により水分子の侵入を遮断することで、粘土の水和膨潤や地層の分散を化学的、物理的に抑制するシリケート泥水

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

蛇紋岩の泥水による直接的な崩壊対策

- ✓ 不水溶性の粒子によって地層の亀裂・孔隙を閉塞するアステックスS、グラファイトなどの坑壁強化剤（Wellbore strengthening material：WSM）の併用
- ✓ グライコール類（クリーンリューブ）やPHPA（イージードリル）の併用による粘土の水和分散抑制力の強化
- ✓ 傾斜井における摩擦低減の必要性にもよるが、油類は地層層理面の滑りを助長する（崩壊が悪化する）恐れがあるため使用を控えた方が良い場合がある

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

蛇紋岩の泥水による間接的な崩壊対策

① 掘削面での対策

- ✓ 高ROPの維持、ビットトリップ回数の最小化
- ✓ パックオフの防止：最低限のスタビライザー、アニュラスウォーターウェイの確保
- ✓ ポンプON/OFF時のPressure spikeの防止
- ✓ 揚降管スピードの調整、定期的・計画的なトリップによる坑内状況の確認
- ✓ セメントによる保坑は極力控える

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

蛇紋岩の泥水による間接的な崩壊対策

② 泥水面での対策

- ✓ 圧力による坑壁の支持（安定）力の増強と、泥水の浮力増加によるCTR: Cuttings transport ratioの向上（後述の流動性調整も含めCTRは最低50%以上を確保する）を目的として、必要により泥水比重を0.1～0.2sg程度上げて様子を見る。
- ✓ ベントナイトやポリマー類によって粘性（YPとGel）を高くする。
- ✓ 坑壁にベントナイトの厚い泥壁を形成する事で地層を保護し、掘削編成の干渉による衝撃を軽減する。
- ✓ 編成へ干渉する前に崩壊ザクを編成部および坑底から迅速に移動させる。

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

蛇紋岩の崩壊対策を講じるタイミング

- ✓ 崩壊が進行してからでは以下のような状態となり、先に述べた掘削面、泥水面での対策による効果が得られ難くなることから、計画段階において蛇紋岩との遭遇が既知である場合や掘削中不意に蛇紋岩に遭遇した場合は、崩壊が進行する前に予めまたは速やかに対策を講ずることが重要となる。
- ✓ 坑径拡大箇所以浅の岩石重量を支えていた支持部の欠損により、掘削編成の僅かな衝撃で崩壊が更に進行する。
- ✓ 坑径拡大箇所におけるアニュラーベロシティーの低下によりホールクリーニング不全が生じる。
- ✓ 坑径拡大箇所に蓄積したカッティングスの、ポンプ停止時における落ちこみに起因する重篤な埋没形成やパックオフトラブル（泥水のインジェクションによる逸泥などの二次被害への発展）の発生

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

海外での事例（トルコ地熱井）

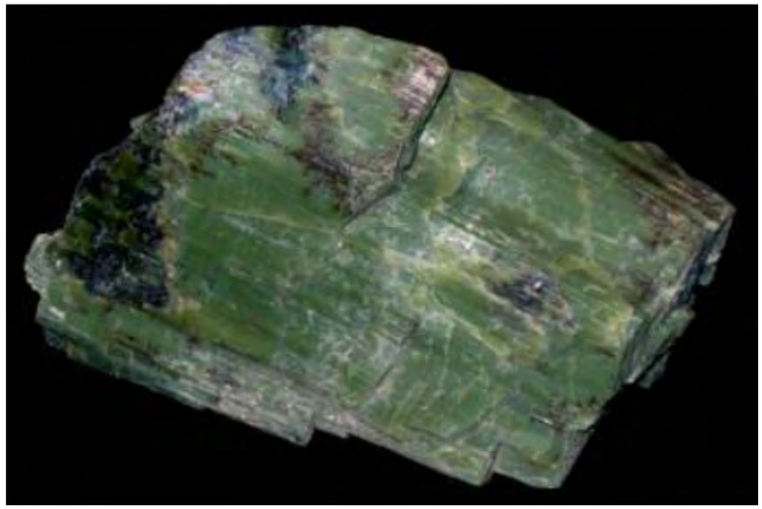
坑井条件；

堀止深度：2,545m

蛇紋岩区間：434m with 12-1/4”ビット、726m with 8-1/2”ビット

使用泥水：WSM併用ポリマー系泥水

問題：蛇紋岩による崩壊、掘進不渉、工期遅延



Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

海外での事例（トルコ地熱井）

◆蛇紋岩を安定させるには、裸坑への圧力と応力の解放を最小限に抑える必要があった。

◆高い掘進率を実現するためにトルクの低減が不可欠であった。それらを達成するための添加剤は以下の通りであった。

✓ 水分散性ギルトナイト
✓ スルホン化アスファルト誘導体：ソルテックス
✓ グラファイト）
✓ Formation Strengthening Pill(FSP)をトリップ時に適宜使用（6ppb　水分散性ギルソナイト、6ppb スルホン化アスファルト誘導体、10ppb グラファイト、5ppb セルロースファイバー）
✓ バライトで泥水比重を1.69に調整
✓ 粘性は高めに維持（YP40-50lb/100ft^2）
✓ 脱水量は5cc以下を維持

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

海外での事例（トルコ地熱井）

泥水システムの配合

主成分	機能	濃度 (PPB)
ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ	基本材、増粘材	10-20
ﾎﾟﾘｱﾆｵﾆｯｸｾﾙﾛｰｽ	脱水減少剤	2.0-6.0
ｽﾙﾎﾝ化ｱｽﾌｧﾙﾄ誘導体	WSM、潤滑剤	2.0-6.0
ｸﾞﾗﾌｧｲﾄ	WSM、潤滑剤	2.0-6.0
水分散性ｷﾞﾙｿﾅｲﾄ	WSM、潤滑剤	2.0-6.0
ｷｻﾝﾀﾝｶﾞﾑ	増粘剤(YP)	0.25-1.0
液体ｱﾆｵﾝ性ｱｸﾘﾙ酸	分残剤	0.5-1.5
ﾎﾟﾘｱｸﾘｽ酸ﾅﾄﾘｳﾑ	脱水減少剤	0.5-1.5
炭酸ｶﾙｼｳﾑ	WSM	10.0-20.0
ﾊﾞﾗｲﾄ	加重材	147-245
苛性ｿｰﾀﾞ	アルカリ調整	0.5
ｿｰﾀﾞ灰	アルカリ調整	0.25

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

OUTLINE

- ◆ 泥水の機能（おさらい）
- ◆ 地熱井掘削で使用する泥水について
- ◆ 地熱掘削で特に留意すべき点
  - 高温度対策
  - ﾎｰﾙｸﾘｰﾆﾝｸﾞ
  - 泥水･泥壁の潤滑性
  - 蛇紋岩対策について
- ◆ まとめ

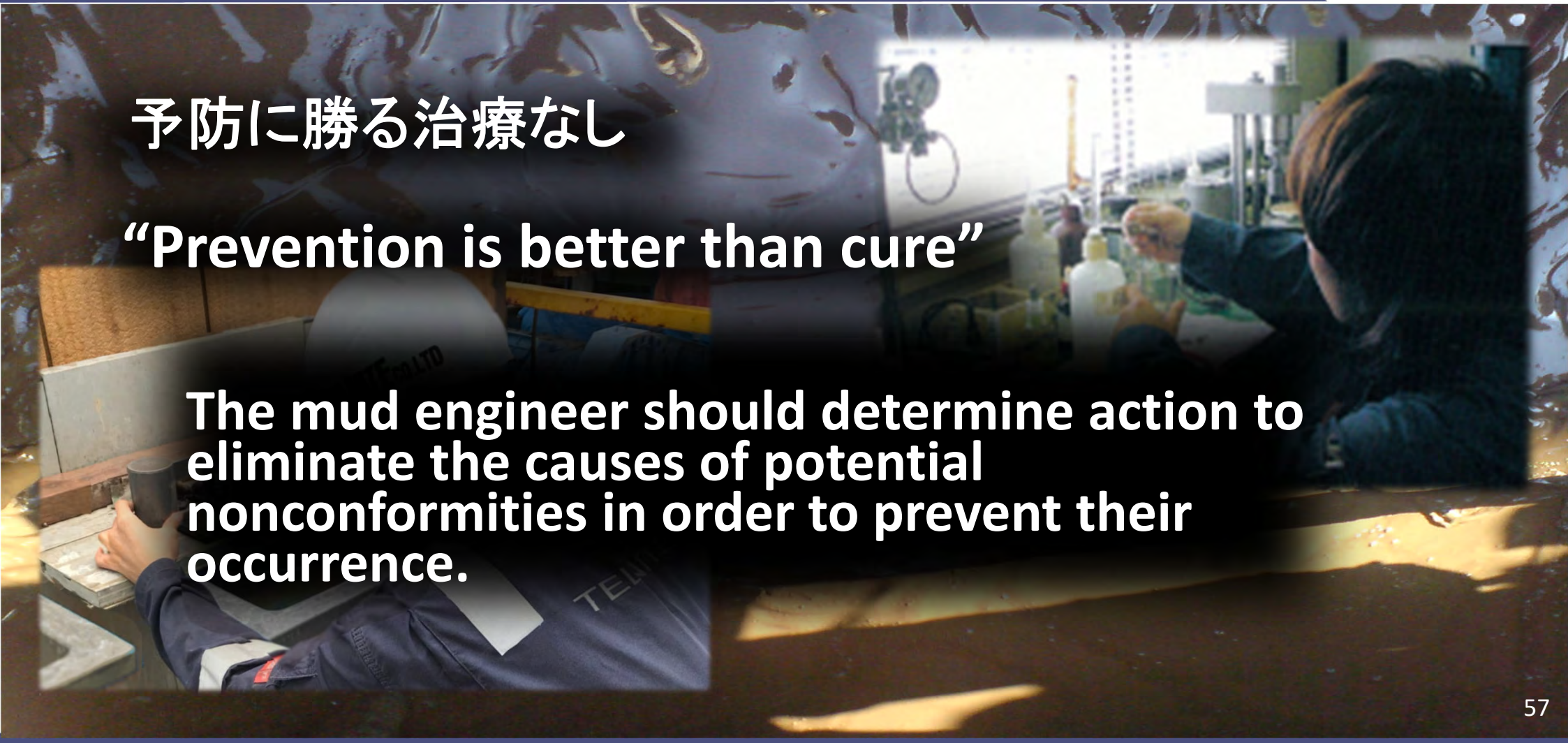
Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

まとめ

- ◆ 全ての坑井において泥水に求められる基本的な要件は同じ。
- ◆ 但し、地熱井は特に高温度環境であることを念頭に泥水をﾃﾞｻﾞｲﾝする。
- ◆ 高温度対策には、粘土(ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ、ｾﾋﾟｵﾗｲﾄ)の選択とそれらの適切な濃度管理が重要であり、またｿﾘｯﾄﾞの微細化にも注意を払う。
- ◆ 割水は最も安価で容易な調泥だが、とても重要。
- ◆ ﾎｰﾙｸﾘｰﾆﾝｸﾞの指標には、VGﾒｰﾀｰの6rpm値とCTRを用い、坑内状況が許す限り高ｱﾆｭﾗｰｽﾋﾟｰﾄﾞを目指す。
- ◆ 定期的なﾜｲﾊﾟｰﾄﾘｯﾌﾟと掘削中、ｻﾞｸ揚げ循環中のｽﾄﾘﾝｸﾞｽの回転は、ｶｯﾃｨﾝｸﾞｽﾍﾞｯﾄﾞの破壊、除去に非常に有効。
- ◆ 泥水・泥壁潤滑性の向上には潤滑剤の使用が必須であり、掘削仕様、地質、坑内状況に応じた潤滑剤の選択と適切な濃度管理が重要。
- ◆ 蛇紋岩対策は蛇紋岩に掘り込む前に実施する。

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

さいごに



予防に勝る治療なし

“Prevention is better than cure”

The mud engineer should determine action to eliminate the causes of potential nonconformities in order to prevent their occurrence.

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.

さいごに

ご清聴ありがとうございました。

引用文献:
沖野文吉, 1981 : 新版ﾎﾞｰﾘﾝｸﾞ用泥水, 1-4, 技報堂出版.
佐藤 敬, 1994 : 高傾斜・水平坑井における掘削泥水技術, 石技誌, 59(5).
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, 石技誌, 63(5).
今野 淳, 2000 : ﾎﾟﾘﾌﾟﾛﾋﾟﾚﾝｸﾞﾘｺｰﾙを用いた高潤滑性泥水の開発, 石技誌, 65(2).
GEOS Energy, STIFF DRILLL D Drilling Fluid Systems Case History : Kutahya Turkey, 2015

Copyright © 2024 TELNITE CO.,LTD. All rights reserved.