

地熱井の仕上げ技術とトラブル例

平成30年3月15日

帝石削井工業株式会社
島田邦明

説明内容

- はじめに
- 1. 地熱掘削技術概要
- 2. 坑井計画立案に必要な地下状況
- 3. ケーシングプログラムの策定
- 4. ケーシングの仕様と選択
- 5. セメンチング
- 6. 坑口装置の仕様と選択
- 7. 「仕上げ」関係するトラブル
- 8. 廃坑
- まとめ

はじめに

- 地熱開発は、地下資源であるため資源の調査、生産、地下還元等の各段階で地熱井を掘削
- 生産井は地熱流体、還元井は還元流体の管路として、長期間使用
- 地熱井は、試験や生産、還元等により、大きな温度変化や腐食性の地下流体にさらされる
- 地熱井のケーシングパイプや坑口装置にトラブルが発生すると、坑井の寿命を短くするだけでなく、周辺的环境への影響や人的事故が発生
- トラブルには、ケーシングパイプの切断・圧潰・腐食・スケールの付着、坑口装置のリーク・破損、暴噴等
- これらトラブルの防止は、ケーシングパイプの仕様や設置深度、セメンチング等を地下状況に合わせて、設計し施工することが重要
- この技術を坑井用語では「仕上げ計画」や「仕上げ作業」という

1. 地熱掘削技術概要①

ロータリー掘削

- ロータリー式掘削は、石油掘削に用いられている工法
- ドローワークスのドラムでドリルストリングを吊下げ、ケリーをロータリーテーブルで回転させ掘削
- ドリルストリングは、上部からドリルパイプ・ドリルカラー・スタビライザー・ビットと接続し、全断面を掘削
- 一定深度まで掘削後に、ケーシングパイプを降下し、その深部から掘削
- ロータリー式掘削法は大口径の全断面掘削に適合
- ドリルストリングの強度は大きく、深部掘削、高傾斜コントロール掘削、高温部掘削も可能
- 掘削流体は泥水、清水、空気、空気混合泥水を選択可能
- 掘削機は大型で広い敷地と、作業には多くの技術者が必要

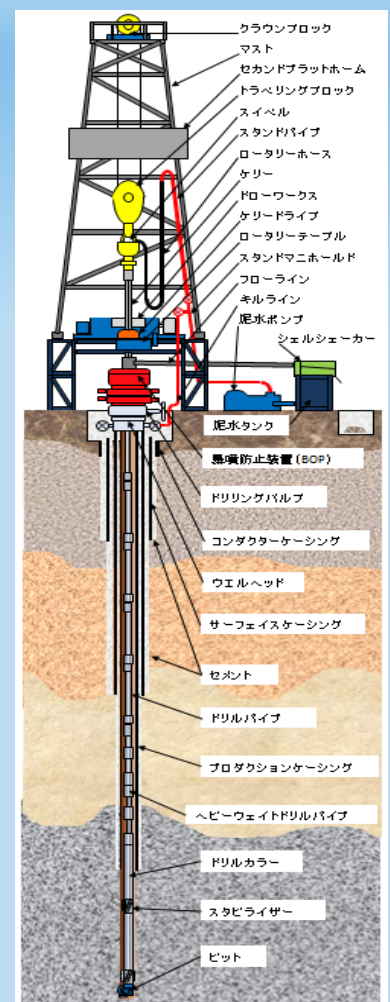


図1 ロータリー掘削⁴

1. 地熱掘削技術概要②

- 地熱井と石油井の違い(温度と圧力)
 - ・地熱井は高温地層を冷却しながら掘削
 - ・石油井は高压の石油やガスを抑圧コントロールしながら掘削
- 地熱井と石油井の違い(生産方法)
 - ・地熱井は、ケーシングパイプを通して地熱流体を採取
 - ・石油井はケーシングパイプ内に設置したチュービングパイプを通して採取
- 地熱井のケーシングパイプの機能

坑壁の崩壊防止、坑口装置の支持、生産または還元流体の通路、逸泥層・出水層・崩壊層等との遮断、地下水層、温泉層に対する汚染防止、腐食、浸食に対する坑井の保全、ドリルstringの摩擦抵抗軽減、キーシートの防止など

- ケーシング計画の変更

ケーシングパイプの納期や準備数、上部設置ケーシングの内径等による制約から、掘削作業開始後に変更することは困難

※「仕上げ技術や作業」は、重要な技術や作業



図2 地熱井と石油井

2. 計画立案に必要な地下状況

- 坑内温度
 - ・国内の生産井の坑内温度は200～350℃
 - ・300℃を超えるとケーシングトラブルが増加
- 地質層序
 - ・ケーシングの下端(シュー位置)は、比較的硬質な地層を選択
- 逸泥
 - ・シュー位置付近には、逸泥層が無い深度
- ガスの噴出
 - ・シュー位置付近には、ガスの噴出する層が無い深度を選択
 - ・ガス噴出層の下部に逸泥層がると、ガスの噴出を防止することができない
- 傾斜掘削計画
 - ・キックオフポイント、増角や方位偏角区間

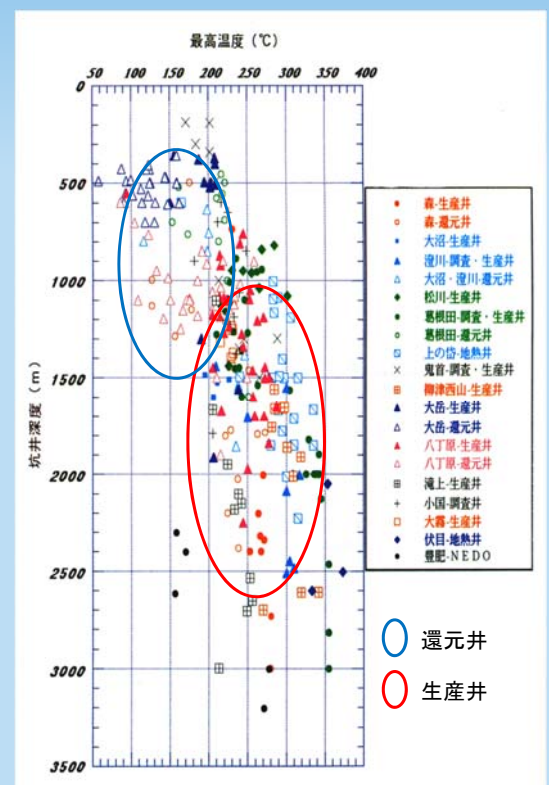


図3 地熱井の深度と温度[日本地熱調査会,1993]

3. ケーシングプログラムの策定

- ・ 蒸気生産への影響による選択
 - ・ プロダクションケーシングを坑口まで立ち上げるとサーフェスケージング深度が浅くは二重管となり安全性が向上
 - ・ ライナー仕上げは、ライナーハンガー以下浅の坑径が大きくなり、生産時の圧力損失が減少
- ・ 各段の深度設計
 - ・ コンダクターパイプは、シュウ深度を表土や風化帯下部の比較的硬い地質とし、浅部の地下水層を遮断
 - ・ サーフェスケージングは、シュウ深度は比較的硬く低浸透性の地層とし、シュウ付近に逸水層がなく、次段のガスや蒸気の圧力にシュウ位置の地層が耐えられる
 - ・ プロダクションケーシングは、シュウ深度は比較的硬く低浸透性の地層とし、シュウ付近に逸水層がなく、生産する蒸気の圧力にシュウ位置の地層が耐えられる

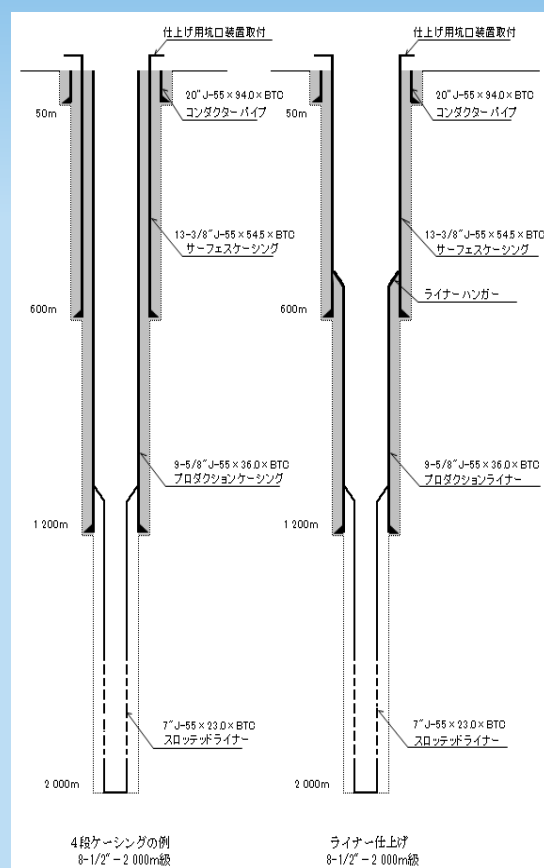


図4 ケーシングプログラム例

4. ケーシングの仕様と選択①

- ・ ケーシングの選択
 - ・ ケーシングは、API 規格から選定するが、コンダクターパイプについてはJIS規格による配管用炭素鋼鋼管等も選択対象
 - ・ 管体強度、ジョイント強度、圧潰圧力、内圧力等が、使用時の外力に耐えられる性能が必要
- ・ 熱による強度変化
 - ・ ケーシング材料は、熱により強度が変化
- ・ 坑井のケーシングに掛かる荷重
 - ・ 坑内に吊り下げたケーシングには重量による引張荷重(泥水中等)
 - ・ 坑井傾斜による引張と圧縮荷重
 - ・ 坑内温度低下による引張荷重(冷却循環、注水試験等)
 - ・ 坑内温度上昇による圧縮荷重(温度回復、噴気試験、蒸気生産)
- ・ 坑井のケーシングに掛かる圧力
 - ・ ケーシング内の泥水と間隙のセメントスラリーとの比重差(圧潰圧)
 - ・ 密閉されたケーシング内の泥水の温度膨張圧(バースト圧)

表1 熱による強度変化 [新エネルギー財団,2003]

グレード	温度 (°C)			
	20	100	200	300
降伏強さ (係数) J-55, K-55	1.00	0.95	0.95	0.95
引張強さ (係数) J-55, K-55	1.00	0.97	1.02	1.07
弾性係数(10 ³ MPa) J-55 K-55	178 208	172 208	168 200	160 192

4. ケーシングの仕様と選択②

- 腐食環境
 - ・地熱流体には、二酸化炭素(CO_2)、硫化水素(H_2S)含まれていることがあり、強酸性の腐食環境であることがある
 - ・腐食環境のケーシング材料の選定には、明確な基準や規格は無いが、パイプメーカーが社内基準を作成
- 硫化水素腐食環境
 - ・ H_2S があると H_2S と応力の共存による硫化物応力腐食割れ(SSC)が発生
 - ・鋼材のSSC感受性は、強度の高いほど高く、温度が高いほど低い
- 炭酸ガス腐食環境
 - ・ CO_2 を含む環境にある鋼材には、湿潤下における炭酸ガス腐食が発生
 - ・ CO_2 は水に溶解すると炭酸となり流体のpHを下げ、腐食反応を加速
- 硫化水素と炭酸ガスの混合腐食環境
 - ・硫化水素と炭酸ガス塩化物とが混合した環境は、鋼材にとって最も厳しい環境
- 腐食環境での材料の選択
 - ・耐腐食材料の選択は、温度環境、塩素濃度、 CO_2 濃度、 H_2S 濃度、pH値等を元に行う

4. ケーシングの仕様と選択③

- ケーシングの接続
 - ・接続ネジには、API規格の他、プレミアムジョイント、溶接等
 - ・主弁を取付けるケーシングには、APIバットレスネジまたはプレミアムジョイントを使用
- APIバットレスネジ
 - ・バットレスネジは、ネジ自体がシール機構を有し、規定のメイクアップトルクでピン谷底とボックス山頂が密着
 - ・適切なスレッドコンパウンドが不可欠
 - ・バットレスネジは、カップリング接続のため、ネジの締付けトルクにより周方向にフープストレス(hoop stress)という応力が発生
 - ・高温の地熱井では、熱膨張や収縮、腐食、フープストレス割れ等のトラブルが発生



図6 フープストレスによる割れ

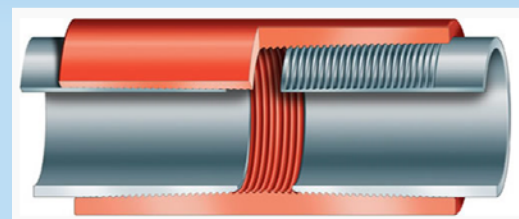


図5 バットレスネジ断面図

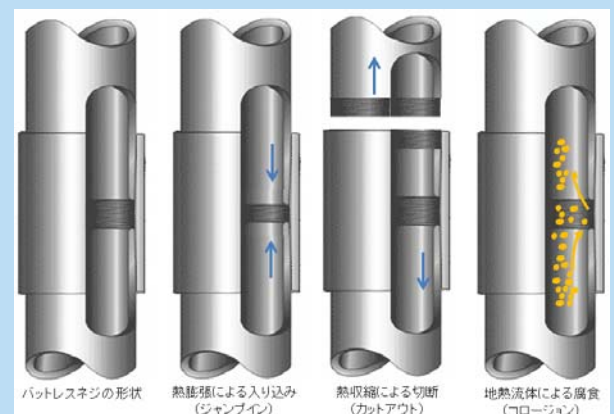


図7 バットレスネジのトラブル例

4. ケーシングの仕様と選択④

- ・プレミアムジョイント
 - ・プレミアムジョイントはAPI規格以上の機能を持つ、各メーカーが開発したジョイント
 - ・特徴: 高いガスシール性(気密性)、高い継手強度、硫化物応力腐食割れの防止
 - ・圧力シールは、メタルタッチ部で行うため、同所を損傷すると圧カリークが発生
 - ・損傷したメタルタッチ部の補修は、専門の技術者と道具が必要
- ・プレミアムジョイント例
 - ・テナリスハイドリルブルーネジ
 - 1: ネジは、粗いピッチと大きなテーパーを持ち、接続しやすい形状
 - 2: 優れた圧縮強度のトルクショルダーを持つ
 - 3: 金属製シール

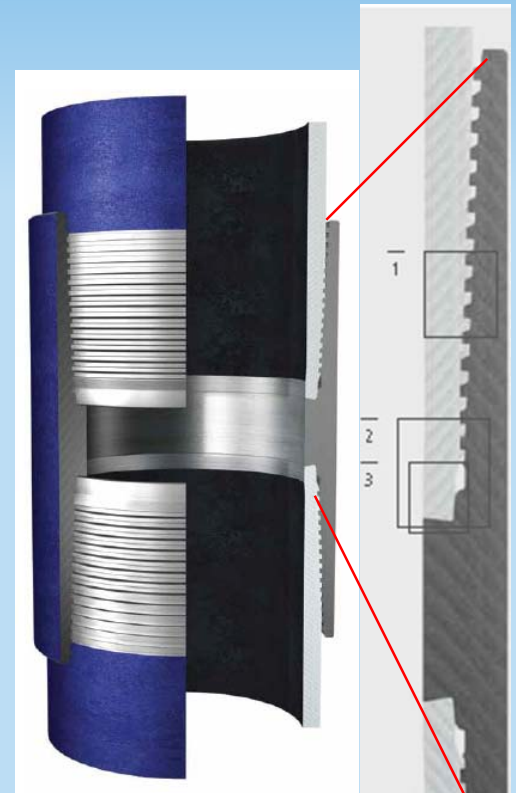


図8 Tenaris Hydril Blueジョイント
(エヌケーケーシームレス鋼管(株)カタログ)

5. セメンチング①

- ・ケーシングセメンチング
 - ・ケーシングと地層または外側のケーシングの間隙にセメントを充填し、ケーシングを固定
 - ・地熱井は、ケーシングパイプを通して蒸気を採取するため、セメンチング不良は坑井の致命傷にもなる
- ・インナーstring式セメンチング
 - ・ドリルパイプの先端にシーリングアダプターを取り付け、ケーシングのシューに接続し、ドリルパイプを通してセメンチングする工法
 - ・スラリーの上昇流を早くはできないが、セメント材料があればスラリーがリターンするまで送り続けることが可能
- ・二栓式セメンチング
 - ・ケーシング内に投入した第1栓と第2栓(の間にセメントスラリーを送入し、セメントスラリーが泥水と混ざらないようにする工法
 - ・最も一般的に行われる工法で、スラリー送入レートをコントロールすることが可能

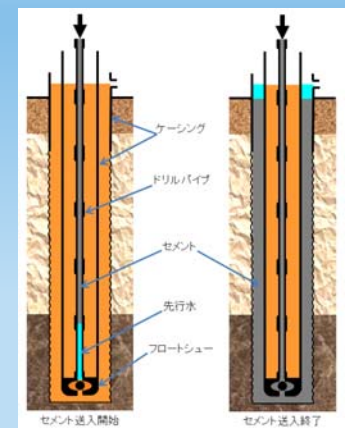


図9 インナーstring式模式図

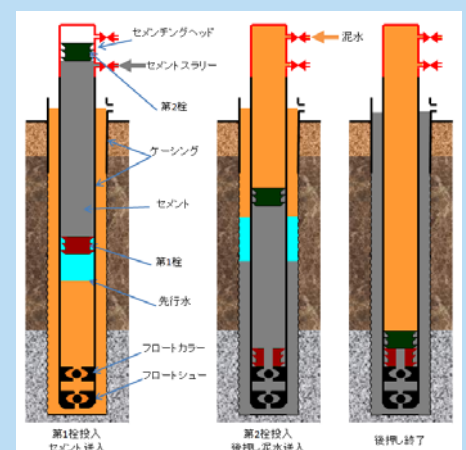


図10 二栓式模式図

5. セメンチング②

- マルチプルステージ式セメンチング
 - ・ケーシングパイプの間にMSCを設置、1段目のセメンチング後にフリーホールプラグによりポートを開放して2段目のセメンチングを実施、クロージングプラグを用いてポートを密閉する工法
 - ・セメンチング区間を多段(2段が多い)に区切ってセメントを送入可能
- ライナー式セメンチング
 - ・ライナーハンガーで下部のケーシングを吊下げた状態でセメンチングする工法
 - ・ケーシングセメンチング区間をハンガー下部に限定
- タイバック式セメンチング
 - ・ライナーハンガー上部にケーシングを接続し、その間隙にセメンチングする工法
 - ・セメンチング区間をケーシングとケーシングの間隙内のみとできスラリー比重の高いセメントを打設可能

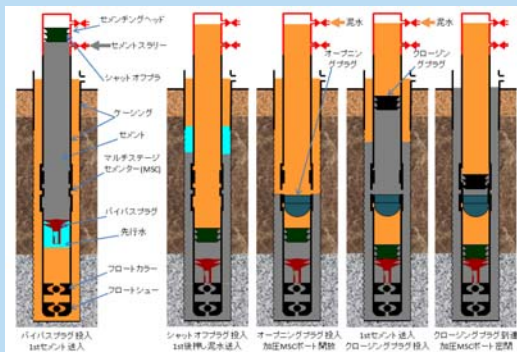


図11 マルチプルステージ式

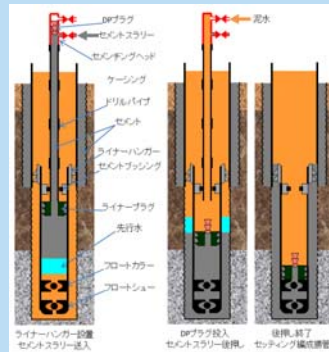


図12 ライナー式

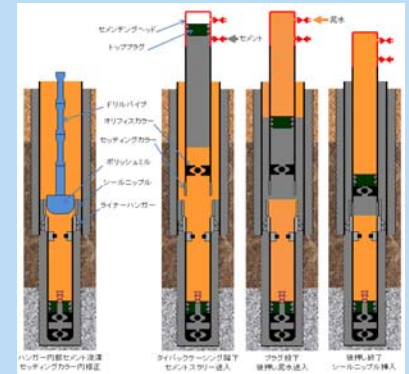


図13 タイバック式

5. セメンチング③

- セメント
 - ・地熱井のセメンチングは、普通ポルトランドセメントと、地熱井セメントを使用
 - ・地熱井セメントは、油井用のクラスGセメントにシリカフラワーを混合して耐熱性を高めたもので、高温高压環境下での強度特性・硫酸塩に対する化学抵抗性を持つ
- セメント添加剤
 - ・セメントスラリーの物理的特性を、坑内温度、地層圧力等の坑内状況に適合させるためにセメントに加える薬剤
 - ・速効剤、遅硬剤、分散剤、脱水減少剤、低比重化剤、高比重化剤、高温安定剤など
 - ・速効剤はセメントの硬化を速め、遅硬剤は硬化を遅くし、分散剤は粘性を低下させ流動性を高め、脱水減少剤は遊離水を防止、低比重剤はスラリー比重を低下、高比重剤はスラリー比重を高く、高温安定剤は高温下でのセメント強度を安定化
 - ・高温井でのセメンチングの際は、事前に専門会社にセメント試験を依頼してシックニングタイム等のデータを得ることが必要

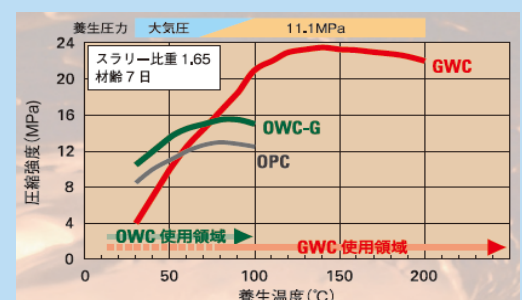


図14 セメントの養生温度と圧縮強度
宇部三菱セメント株

5. セメンチング④

- セメント置換効率
 - 泥水との置換が悪いとトラブルの原因
 - 原因: 坑芯ずれ、坑径拡大、残留カッティングス、厚い泥壁、泥水ゲル化、等
- セメンチング前の対策
 - 循環調泥
 - 先行水の使用
 - セントライザーによりケーシングの芯出し
 - スタンドオフ比70%以上
 - ※坑壁とケーシングパイプの最小距離とケーシングパイプが坑内の中心に位置した際の距離との比
- セメンチング作業中の対策
 - ケーシングの上下動、回転
 - セメンチング作業の連続化

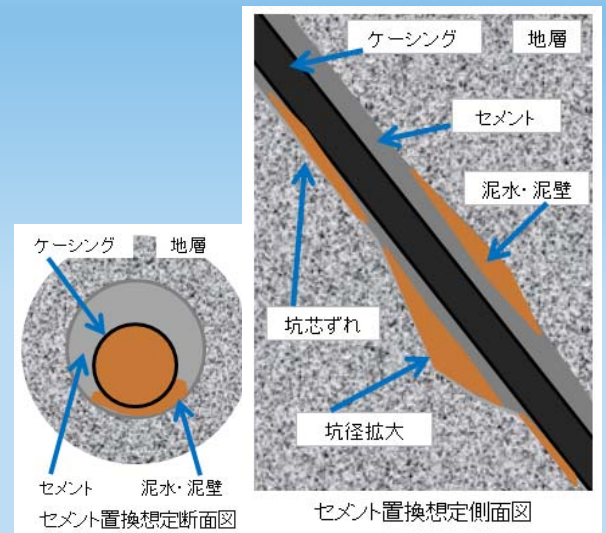


図15 セメント置換状況予測図

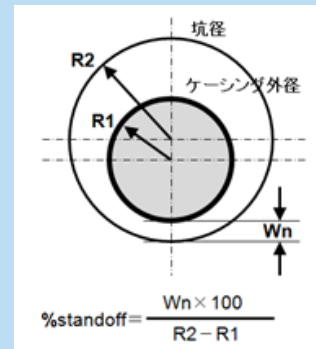


図16 スタンドオフ比の計算

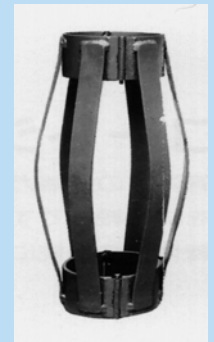


図17 セントライザー

5. セメンチング⑥

- セメントの未回帰・回帰後の降下の処置
 - セメンチング時の逸泥によりスラリーが回帰しない、または一度回帰したスラリーが降下した場合の処置方法としてトップフィル式とトップスクイズ式がある
 - この施工によりケーシングの間隙にウォーターポケットを作ると、噴気時にケーシングが圧潰する可能性が高い
- トップフィル式
 - プライマリーセメンチング時に良好なセメントスラリーの地表へのリターンがあがが、フォールバックした場合の処置
 - 降下したセメントの頭部がケーシングとケーシングの間にあり、頭部位置や間隙部に水や泥水が混入していない
 - セメント硬化後に、坑口のサイドバルブからセメントスラリーを送入
- トップスクイズ式
 - セメンチング中に逸泥が発生し、地表への回帰が無かった時の対処
 - 降下したセメントの頭部には泥水などの水や異物が存在
 - 坑口より清水を送入し、逸泥層までプライマリーセメントを洗浄
 - セメントが硬化後に、坑口のサイドバルブからセメントスラリーを連続または断続的に送入

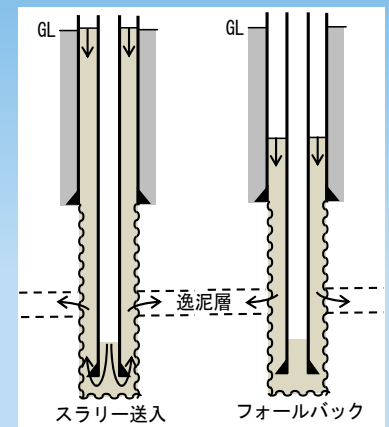


図18 フォールバック状況図

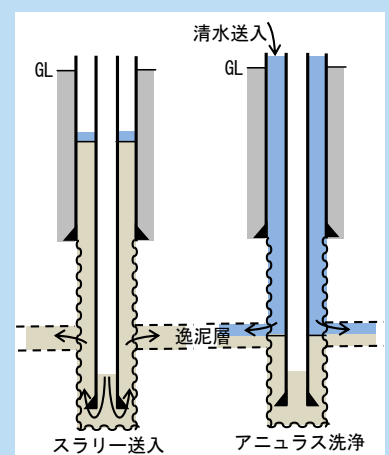


図19 清水洗浄状況図

6. 坑口装置の仕様と選択

- 仕上げ用坑口装置
 - ・主弁は、掘削作業中にストリングス等により損傷する危険があるので、ガスの噴出等により掘削後に交換ができない場合を除き、掘削作業後に取り付け
 - ・規格は、APIまたはANSI規格
- 坑口装置の耐圧力
 - ・周囲の坑井の実績等から最大坑口密閉圧力が推定できる場合は、その圧力の2倍以上の耐圧力を有するように設計
 - ・不明な場合はAPI3 000またはANSI900以上
 - ・耐圧性能は、坑内温度により変化
- 坑口装置の性能
 - ・坑内流体の腐食環境に耐えられる材料を使用
 - ・坑井の改修時に使用するビット等が通過可能な内径を有する

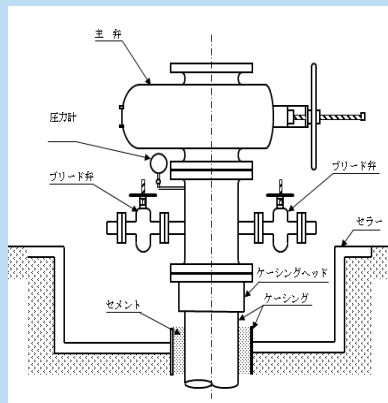


図20 標準的な坑口装置

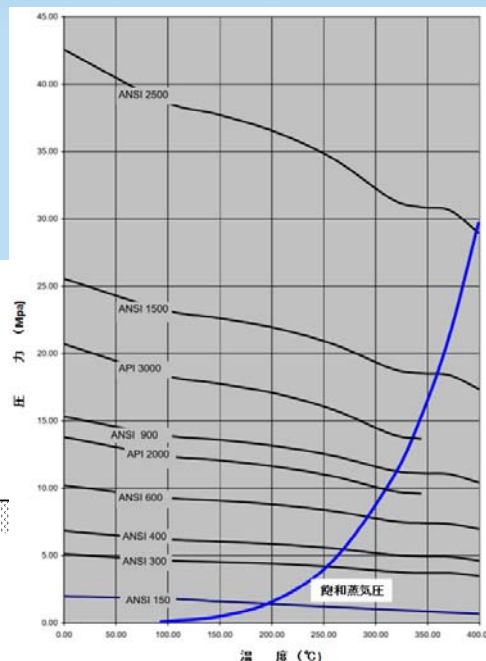


図21 温度と使用圧力
[Hagen Hole, 2008]

7. 「仕上げ」に関するトラブル(早期硬化)

1. 18-5/8"ケーシングセメンチング後押し送水直後のセメント硬化

- 発生状況
 - ・18-5/8"ケーシングを深度635mまで降下し、二栓式セメンチングを実施
 - ・スラリー送入後、トッププラグを投入、後押し泥水送入直後、ポンプ不能
- 対策作業
 - ・セメントボンド検層により間隙のセメント頭部480mを確認
 - ・エアー抜き管(3/4"SGP)を18-5/8"ケーシングの外側に深度249mまで挿入
 - ・深度82mまで砕石を投入して充填、同深度まで3/4"SGPを挿入し、トップジョブセメンチングを施工
- 原因の推定
 - ・セメント硬化時間を短縮するため、セメント速効剤(塩化カルシウム)を添加したが、想定より坑内温度が高かったことから、セメントが早期に硬化したと推測
 - ・セメントスラリーミキシング時に、比重調整が良好に行えず高比重スラリーを送入してしまったことにより、セメントが早期に硬化したと推測

7. 「仕上げ」に関するトラブル(圧潰)

2. 13-3/8" CSG の深度368.96mの圧潰

- 発生状況
 - 13-3/8" CSGをシュー深度1 406.19mに設置し、2栓式セメンチングを施工したが、セメントスラリー回帰せず
 - 加圧注水後にトップジョブセメンチング
 - 噴気テスト後にケーシングが圧潰
- 対策作業
 - ドリルカラーによる圧潰調査
 - 7"スエッジで矯正後、7-3/16"、8-1/8"、9"、10-1/2"、12-5/16"スエッジにより矯正
- 原因の推定
 - 13-3/8" CSGセメント頭部が、CSGとCSGの間隙にあり、この付近にウォーターポケットを作り、噴気テストによる温度上昇でケーシングが圧潰したと推測
 - セメンチング時にケーシングとケーシングの間隙にウォーターポケットが発生し、噴気試験時を実施すると水の温度膨張により、数百kg/cm²の圧力が発生

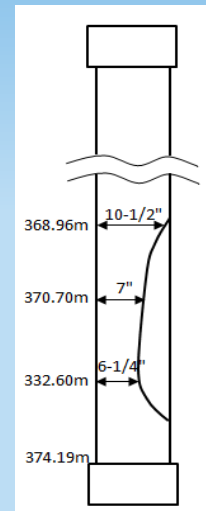


図22 圧潰予想図



図23 スエッジ

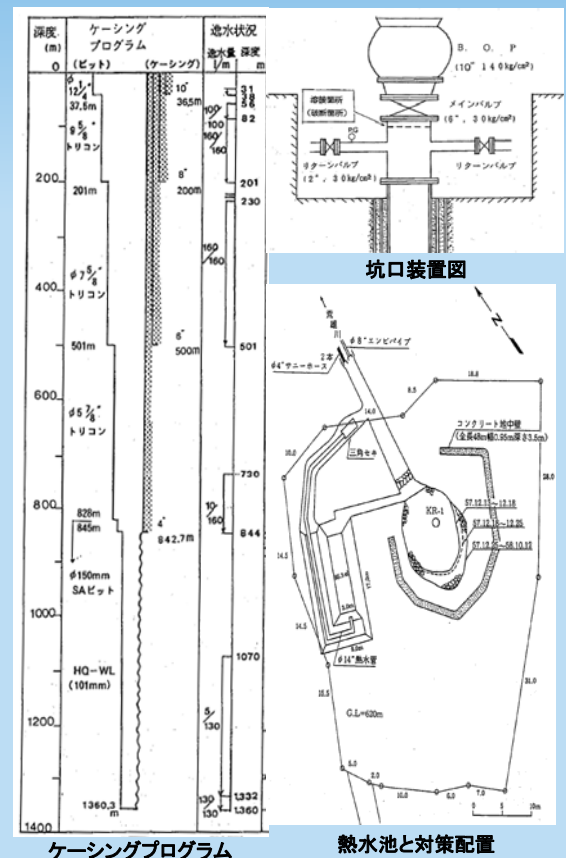


図24 ケーシングの圧潰状況
[Gunnar,2013] 19

7. 「仕上げ」に関するトラブル(暴噴)

3. 調査井の暴噴による坑口装置の損傷

- 発生状況
 - 深度1332mで全量逸泥し、深度1360.3m掘削中に硫化水素を含む熱水が暴噴、HQロッドが抑留
 - メインバルブの下部の溶接部が破損
 - 坑口装置が破損し、周辺部からも噴出、クレータ型の熱水池を形成
- 対策作業
 - 熱水の流出対策
 - リリース井の掘削
 - リリース井からのセメンチング
- 原因の推定
 - 坑口装置の耐圧不足および溶接不良
 - ケーシングセメンチング不良
 - ケーシングの耐圧不足
 - 掘削設備および能力不足
- 環境への影響
 - 噴気により周辺の植生に影響
 - 多量の熱水が河川に流入



ケーシングプログラム

熱水池と対策配置

図25 トラブル状況関係図 [高木、他,1990]

7. 「仕上げ」に関するトラブル リリーフ井①

4. 水蒸気爆発による生産井の損傷

- 発生状況
 - 水蒸気爆発により生産井が損傷し、坑口付近に噴気口が形成
 - 高さ5～15mの蒸気熱水が間欠的に噴出
 - 噴出流体のサンプルを化学的に分析し生産井からの噴出と仮決定
 - 災害発生後、立ち入りの「制限区域」および「禁止区域」を設定
- リリーフ井の計画
 - ターゲット坑井から約200m離れた所に掘削リグを設置
 - MWDを用いて、ターゲット坑井近傍まで傾斜コントロール掘削を実施
 - レンジング技術によりターゲット井を確認して掘削



図26 噴出初期の坑井付近
[Takizawa,2013]

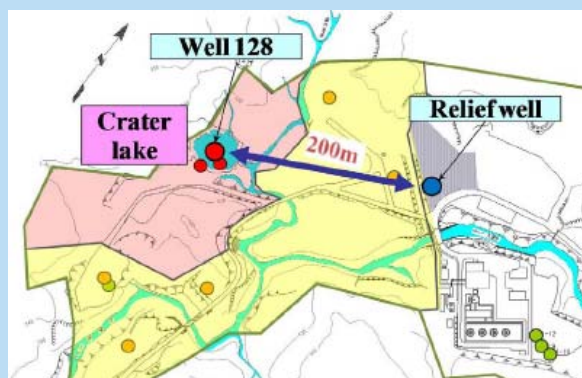


図27 噴出井とリリーフ井の位置
[Takizawa,2013]

7. 「仕上げ」に関するトラブル リリーフ井②

※レンジング技術

ケーシングなどの磁極より発生する磁場を異なる深度で、MWDの三軸磁場センサにより計測し、成分ごとにモデル計算値を実測値とマッチングさせることにより、センサ位置からケーシングの磁極までの距離と方向を求める技術

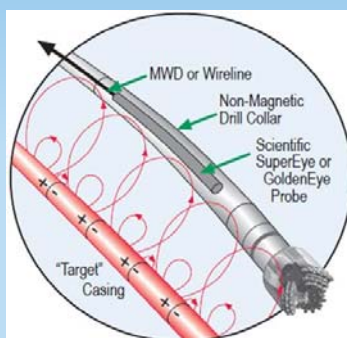


図28 レンジング技術
Scientific Drilling社

- リリーフ井の掘削
 - 9-5/8"ケーシングを設置後、レンジング技術を用いて噴気井を探索し、数度にわたるサイドトラック掘削を施工
 - リリーフ井は噴出井の0.5m以内を通過し、逸泥が発生したことにより、導通を確認
 - リリーフ井よりセメンチングを施工

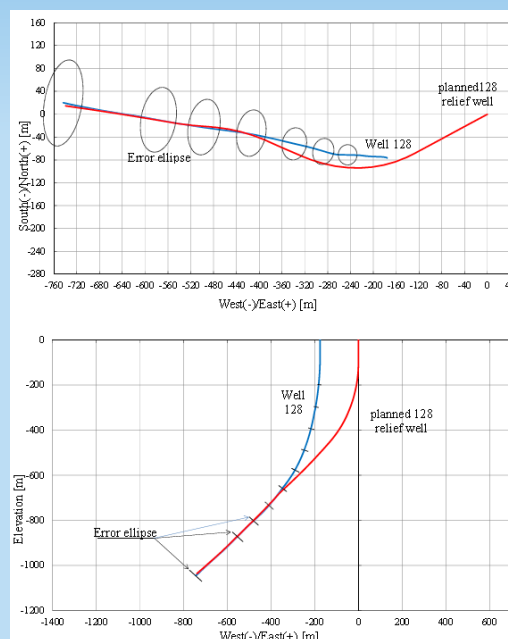


図29 リリーフ井坑跡 [Takizawa,2013]

8. 廃坑

- ・廃坑作業の必要性
- ・将来にわたって坑井跡から地熱流体や火山性ガスが噴出させない
- ・長期間生産や還元を使用した坑井は、ケーシングの健全性が懸念されることがあり、坑井内の状況を予測して計画を立案して施工
- ・ガス噴出の危険性のある坑井
 - ・プロダクションケーシングのシューの近くにブリッジプラグ等をセットし、その上部にセメントプラグおよび濃泥を2～3段施工
- ・坑口の処理
 - ・将来にわたって坑井跡から地熱流体や火山性ガスが噴出しないように廃坑
 - ・長期間生産や還元を使用した坑井は、ケーシングの健全性が懸念されることがあり、坑井内の状況を予測して計画を立案して施工
- ・記録の保存
 - ・坑井位置、坑井の掘削および生産概要、廃坑作業概要を記録

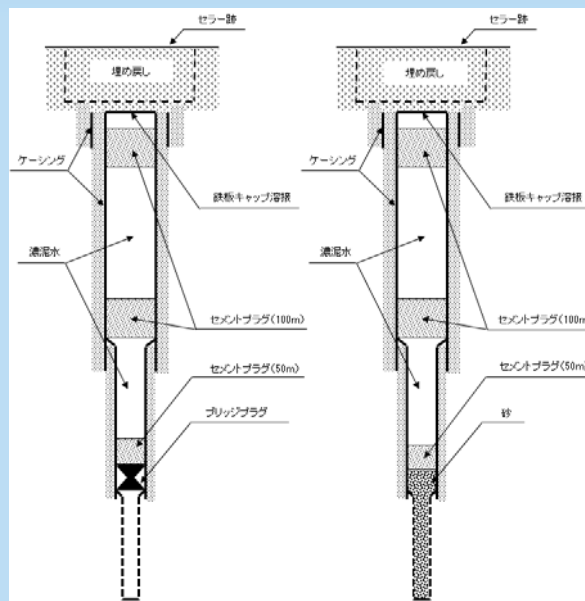


図30 ガスが湧出する地熱井の廃坑例

まとめ

- ・地熱井は石油井と異なり、ケーシングパイプを通して地熱流体を採取
- ・ケーシングプログラムは、地層温度、地質、逸泥やガスの賦存、生産流体の産出量や性状を考慮して決定
- ・ケーシングセメンチングは、良好なセメントでフルホールセメンチングが可能な方式を選択
- ・フルホールセメンチングができない場合の処置についても事前に計画
- ・セメンチング作業は、セメントの置換効率を高める対応や装置を用いて実施
- ・「仕上げ」に関するトラブルは、坑井の寿命、周辺環境破壊や人的災害発生につながる
- ・坑口装置とケーシングパイプ、セメンチング工法の選択、ケーシングの降下とセメンチング作業は、掘削技術の中でも重要な技術

参考文献

- [日本地熱調査会,1993] 21世紀の地熱エネルギー
- [日本地熱学会,2014] 日本地熱学会地熱エネルギーハンドブック刊行委員会、地熱エネルギーハンドブック
- [石油技術協会,1992] 石油技術協会、油井・パイプライン用鋼管ハンドブック
- [新エネルギー財団,1999] (財)新エネルギー財団、地熱井掘削自主保安基準(改訂版)
- [新エネルギー財団,2003] (財)新エネルギー財団、地熱調査井の掘削標準・指針(改訂版)
- [新エネルギー財団,2014] (財)新エネルギー財団、平成26年度地熱開発技術者研研修テキスト
- [高木、他,1990]高木慎一郎、一杉武治、地熱井掘削のトラブルマネジメント事例、地熱エネルギーVol.15.No.4
- [赤坂千寿,2015]赤坂千寿,戸高法文,滝沢顕吾、鬼首地熱発電所における地熱リリーフウェル掘削工事、日本地熱学会、平成27年度額実講演会講演要旨集
- [Gunnar,2013] Gunnar Skúlason Kaldal、COLLAPSE ANALYSIS OF THE CASING IN HIGH TEMPERATURE GEOTHERMAL WELLS、PROCEEDINGS, Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering
- [Hagen,2008] Hagen Hole、GEOTHERMAL WELL DESIGN – CASING AND WELLHEAD、Petroleum Engineering Summer School, Dubrovnik, Croatia. Workshop
- [Rafael,2012] Rafael Hernández、Unconventional Cementing Method Enables Drilling in Lost-Circulation Zones: Case History、SPE 154564、October 2012
- [William,2013] William M. Rickard, Jonathan Hernandez and Alan Bailey、TOP SQUEEZE OR TOP FILL : IMPROVED SECONDARY CEMENTING FOR GEOTHERMAL WELLS、PROCEEDINGS, Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, February 11-13, 2013
- [Takizawa,2013] Kengo Takizawa, Osamu Iwasaki, Norifumi Todaka, Isao Shimizu, Shigeo Tezuka, and Shigetaka Nakanishi、Geothermal Relief Well at the Onikobe Geothermal Power Station、GRC *Transactions*, Vol. 37, 2013