

平成 30 年 6 月 10 日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420842

研究課題名(和文) 逸泥とガスキックを伴う超高温人工地熱系掘削における最適泥水循環技術の開発

研究課題名(英文) Optimization of Drilling Fluid Circulation System in Superhot Enhanced Geothermal Drilling with Fluid Loss and Gas Kick

研究代表者

長縄 成実 (Naganawa, Shigemi)

秋田大学・国際資源学研究科・教授

研究者番号：10237539

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：逸泥を伴う超高温地熱井の掘削中に発生した地層流体の坑内流入(キック)を適切にコントロールする新しいコンセプトの泥水循環技術を開発・提案することを目的とした。逸泥層に存在する天然き裂(逸泥層)への逸泥流量推定モデルを代表的なき裂進展モデルを用いて構築し、非定常坑内流動モデルとの連成を図った数値シミュレータを開発した。逸泥とキックを伴う超高温地熱モデル坑井を設定したシミュレーションを行い、新しいコンセプトのマネージドプレッシャー掘削手法の有効性を評価した。また、超高温掘削時のベントナイト系泥水の熱劣化を防ぐために必要な高温泥水用分散剤の開発可能性に関する予備検討も行った。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop and propose a new concept of drilling fluid circulation system that enables to adequately control both lost circulation and gas kick simultaneously occurring for safe superhot geothermal drilling on the basis of the managed pressure drilling technology. A model to estimate the loss rate was developed by use of a traditional fracture model and it was combined with a transient wellbore flow simulator. Drilling a model well that represented a simultaneous lost circulation and gas kick situation was simulated to evaluate the proposed new concept managed pressure drilling method. Also, fundamental study on development of a new deflocculant for drilling fluid in high temperature conditions.

研究分野：石油・天然ガスおよび地熱開発における掘削工学

キーワード：地熱開発 EGS 掘削 逸泥 ガスキック 泥水循環 超臨界地熱開発

1. 研究開始当初の背景

(1) 2012年に、東北大学や産業技術総合研究所(地質調査所)などの国内外の研究者らによって、革新的地熱発電技術開発に関連した科学掘削プロジェクト Japan Beyond-Brittle Project (JBBP) が国際陸上科学掘削計画(International Continental Scientific Drilling Program, ICDP) にワークショップ提案された。本研究開始当初には、2016年ごろのICDPへの正式提案を目指して、技術課題の検討が行われていた。JBBPプロジェクトは、地下の脆性-延性遷移領域あるいはそれ以深の延性帯における人工地熱系(Enhanced Geothermal System, EGS)での発電の実証を目的とした掘削を計画するものであった。延性帯地層まで掘削された坑井近傍に人工的にき裂(フラクチャー)を形成できれば、もともと天然き裂がほとんど存在しない延性帯地層に囲まれた完全に閉鎖系の人工貯留層を造成することができると考えられ、天然き裂が豊富な脆性帯に作られる従来のEGS・高温岩体発電開発において問題となっていた圧入水の回収率が低く循環系の維持・管理が難しいという課題の克服が期待できる。

(2) JBBPプロジェクトにおける掘削地点は岩手県の松川や葛根田のような東北地方の高地熱ポテンシャル地域が想定されていた。これらの地域では、地下3~4km程度の比較的浅い深度で延性帯に達することが葛根田地域で過去に行われた深部地熱調査井WD-1aの掘削結果から分かっており、それにより掘削コストや掘削トラブルのリスクを低減できることが期待できる。想定された具体的なターゲットは、垂直深度3,000~5,000m、予想地層温度350~500°C、予想地層圧力30~100MPaという地層水が超臨界状態になる厳しいものであった。葛根田WD-1a坑井の掘削では、地熱地帯の掘削で避けて通ることのできない逸泥対策に掘削延べ日数340日中97日と大変な日数を費やした。さらに、逸泥中に毒性の高いH₂Sガスの地層から坑内への流入(ガスキック)に遭遇した。地熱地帯特有の低地層圧下で高比重泥水が使えない状況のなかでの坑井抑圧作業に苦慮し、最終的には安全性に配慮して計画深度に達する前にこの坑井は掘り止められたという経緯がある。逸泥が多発するような状況下でH₂Sガスの発生を抑えることは現在でも至難の業であり、そのコントロールに失敗すると、最悪の場合にはいわゆる地下暴噴状態となり、坑井を放棄せざるを得ない(図1)。

2. 研究の目的

(1) JBBPプロジェクトの掘削を実現するためには、葛根田WD-1a坑井の掘削でも致命的となった逸泥とキックが同時に発生するような状況下で、動的な坑内圧力分布挙動の正確な予測を行い、逸泥とキックを抑制できるように、既存技術であるマネージドプレッシャー

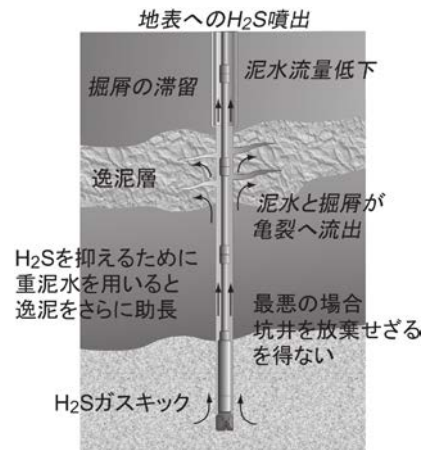


図1 逸泥とガスキックによる地下暴噴

掘削(Managed Pressure Drilling, MPD)をさらに発展させた新しい概念に基づく坑井内の圧力コントロールを行う泥水循環技術を開発することが不可欠である。本研究は、JBBPプロジェクト実現のための研究開発の一環として、非定常の坑内流動及び逸泥層シミュレータを構築し、逸泥を伴う坑井でH₂Sガスのキックをコントロールする新しいコンセプトのMPD手法を採用した泥水循環技術を開発することを目的とした。

(2) JBBPプロジェクトの構想は、2015年から始まった(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の事業「超臨界地熱発電技術開発」に移行し、2050年ごろの発電実証試験および普及を目指して、2017年度から本格的な技術開発が始まった。このNEDOの開発ロードマップには、2025年ごろの調査井試掘が想定されており、それに必要な予備スタディとして、超高温地層掘削のための掘削泥水システムの現状調査および新規泥水材料開発の可能性評価を行うことを本研究の目的に3年度目から追加した。

3. 研究の方法

(1) 掘削中に逸泥が発生すると、坑井アニュラス内を地上へ戻ってくる泥水の流量が減少し、逸泥層以浅でのアニュラス部を流動する泥水の摩擦圧力損失の低下が生じる。また全量逸泥になると泥水が地上に全く戻らず坑内の水頭圧の低下が生じ、これらに掘削の坑内の圧力バランスが一旦に崩れる。既往研究には、逸泥を伴う坑内の掘削輸送現象をモデル化したもの(高橋ほか1999)が存在するが、このような状況下での坑内の複雑な圧力挙動を予測できるツールはこれまでに作られていない。泥水比重や循環流量の調整あるいは逸泥防止剤の添加、セメントプラグの設置などといった対処療法的な対応をすることしかできていないのが現状であり、先に挙げた葛根田WD-1a坑井のように、計画深度まで完掘できないこともしばしば起こり得る。

(2) まず、これまでの研究で開発した二流体モデル (Two-Fluid Model) による坑内掘屑運搬シミュレータを参考にし、逸泥層での流出を簡易な境界条件で表現した非定常の坑内流動シミュレータを構築した。次に、地熱井掘削用泥水について粘度や脱水特性といった逸泥量の推定に必要な基礎データをもとに、これらに、逸泥層に存在する天然き裂の開口幅や長さ、地層の浸透率などの物理パラメータを組み合わせ逸泥層詳細モデルの構築を行った。最後に、葛根田 WD-1a 坑井の掘削データに基づいて掘削中の坑底から H_2S ガスの流入 (ガスキック) がある状況を再現したシミュレーションスタディを実施し、逸泥を抑制しつつガスキックを防ぐような、従来 MPD 手法をさらに発展させた新しいコンセプトの泥水循環技術を提案した。

(3) 研究の初期のフェーズで行った超高温掘削技術全般に関する調査 (発表論文 [雑誌論文] ①③, [学会発表] ⑥⑧⑩⑪) のなかで、地層温度が $200^\circ C$ を超えるような掘削では、通常用いられるベントナイト系泥水中の固形分が凝集し著しく流動特性が悪くなって坑井掘削に障害となることが分かってきた。そこで、東南アジアで廃材料として容易かつ多量に入手可能なマングローブ起源のタンニン をリグノスルホン酸と架橋合成した新しい分散剤の予備的な開発を行い、 $200^\circ C$ 以上の温度で使用可能な泥水用分散剤の可能性評価のための泥水試験を行った。

4. 研究成果

(1) まず、逸泥層での泥水および掘屑の流出を伴う非定常の坑内流動シミュレータを構築し、逸泥が発生したときの逸泥量や逸泥層以深での流量の低下および水頭の低下、掘屑の坑内での滞留などの状況、さらにはそれに伴い変化する坑内の動的な圧力分布挙動をシミュレーションで予測できるようにした。これまでに (独) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) と共同開発を行ってきた石油・天然ガスの大偏距坑井掘削における掘屑運搬坑内流動シミュレータと同様の二流体モデルを採用した非定常の流動シミュレータの構築 (発表論文 [雑誌論文] ②, [学会発表] ⑦⑨) を基盤とし、これに逸泥層モデルを組み込んだシミュレータの開発を行った。

(2) 第一段階として、坑内流動に関するモデル化に重点を置き、逸泥層への泥水と掘屑の流出については簡易逸泥層モデルとし、ある一定のレートでの流出を仮定した境界条件を設定する手法をとった。既往研究でのシミュレータ開発の経験から、このような坑内流動計算では、適切な空間グリッド幅の設定のもと 1 本の坑井の全坑跡にわたるシミュレーションを行うのに非常に多くの計算時間を要することが分かっている。そのため、このシミュレータには、数値解法に混相流数値計算で

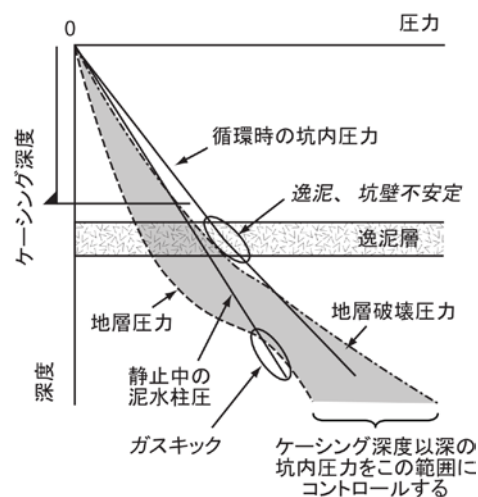


図2 逸泥+ガスキック発生時の坑内圧力状態

実績のある多段階陰解法 Stability-Enhancing Two-Step Method (SETS 法) を採用した。

(3) 次に、逸泥層に存在する天然き裂の開口幅や長さ、地層の浸透率などの物理パラメータを考慮した逸泥層詳細モデルを構築した (Lavrov 2016)。き裂の形状や流動に関する物理パラメータを加味することで、き裂内への逸泥流量を推定し、掘屑と泥水のき裂内への流出現象をシミュレーションできる逸泥層詳細モデルの構築を行った。掘削パラメータと地層条件を設定すれば逸泥量が求められる仕様とし、このモデル化により、より正確な逸泥規模および坑内の圧力挙動の予測が可能となった。

(4) 以上のモデルを用いて、葛根田 WD-1a 坑井の掘削データに基づいて上部に逸泥層があり、なおかつ掘削中の坑底から H_2S ガスの流入 (ガスキック) がある状況 (図 2) を再現したシミュレーションを実施した。感度解析およびパラメータスタディの結果、逸泥を抑制しつつガスキックを防げるように、従来 MPD 技術をさらに発展させた形で坑口での圧力コントロールや泥水循環パラメータの最適化を図った。従来の MPD 技術にはいくつかのバリエーションがあり、本研究の目的において応用可能なものは、坑底圧一定法や加圧マッドキャップ掘削 (Mud Cap Drilling) などの坑口に Rotating Control Device (RCD) という装置を用いて掘削中の坑井アニュラス内の泥水に背圧をかけることにより泥水循環中の摩擦圧力損失分の圧力を循環停止中に付加し、坑底の圧力を常時一定に保つ方法である。通常のマッドキャップ掘削法を用いて坑底のガスキックをコントロールしようとする、それ以外での逸泥を抑えることができない状況が想定できる。そこで、坑口で背圧をかける従来法とは異なり、坑口で負圧を付加する手法についてもシミュレーションスタディを行い、その評価を行った (詳細は、発表論文 [学会発表] ①にて発表予定)。

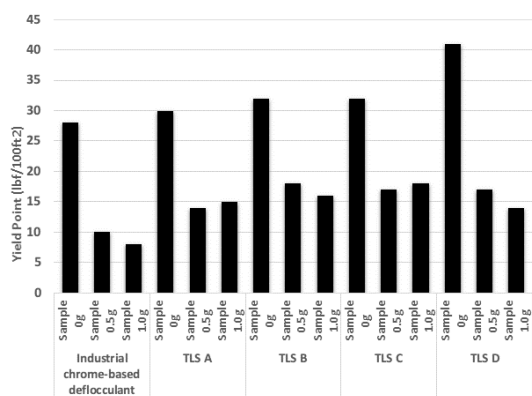


図3 タンニン-リグニンスルホン酸分散剤の分散効果測定結果（学会発表②より引用）

(5) 地層温度が 200°C を超えるような掘削で使用可能な泥水用分散剤の候補として、東南アジアで廃材料として容易かつ多量に入手可能なマングローブ起源のタンニンをリグノスルホン酸と架橋反応させた分散剤の合成を新たに試みた。合成した分散剤の構造および熱分解特性を FT-IR（フーリエ変換赤外分光光度測定）および TGA（熱重量測定）によってそれぞれ分析し、200°C 以上の温度でも熱劣化が抑制されていることを確認した。さらに、ベントナイト泥水に合成した分散剤を添加し、API 規格に沿って泥水の粘度測定を行い、その分散効果を調べた。結果の一例が図 3 で、この測定結果では、新規合成した分散剤を少量添加することで泥水の降伏値（Yield Point）が低下しており、分散剤としての有効性が示された（発表論文〔学会発表〕②③⑤）。

(6) 本格的な研究開発が始まった超臨界地熱開発プロジェクトの実現に向けて、掘削泥水に関連する坑井掘削技術の研究は、工学的に大変大きな意味を持つと考える。逸泥下で H₂S ガスの発生を適切にコントロールできるか否かは、その坑井の掘削の成否を決める大きな鍵であり、現場での対処療法的な対応や掘削技術者の経験的技術に頼るこれまでの手法に対して、本研究結果は理論的な裏打ちのあるツールを提供できるものである。本研究を提案した当初の背景は超高温地熱井の掘削であったが、石油・天然ガス開発においても、例えば中東に多い炭酸塩岩貯留層や東南アジアの断層系基盤岩貯留層の掘削では逸泥とガスキックが同時に発生する同様の坑内状況にしばしば遭遇する。本研究の成果は様々な地下流体資源開発の掘削において応用可能なものであると考える。

<引用文献>

高橋 弘・齋藤清次・益山 忠 1999. 逸泥を伴う水平および傾斜ドリリングにおける掘削井内練粉濃度変化に関する数値シミュレーション. 資源と素材 **115** 219-225.

Lavrov, A. 2016. *Lost Circulation: Mechanisms and Solution*. Gulf Professional Publishing,

Elsevier. 252pp.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 長縄成実 2017. 超深度・超高温掘削プロジェクトとそれに伴う技術開発の変遷. 石油技術協会誌, 査読有, **82** (5) 324-331. DOI: 10.3720/japt.82.324
- ② Naganawa, S., Sato, R. and Ishikawa, M. 2017. Cuttings Transport Simulation Combined With Large-Scale Flow Loop Experimental Results and LWD Data for Hole Cleaning Evaluation in Extended- Reach Drilling. *SPE Drilling & Completion*, 査読有, **32** (3) 194-207. DOI: 10.2118/171740-PA
- ③ 長縄成実 2015. 掘削作業におけるリスク評価とリスク管理. 石油技術協会誌, 査読有, **80** (5) 324-329. DOI: 10.3720/japt.80.324

[学会発表] (計 11 件)

- ① Naganawa, S. and Ishikawa, M. 2018. Hole Cleaning Study in Mud Cap Drilling Operation Under Loss and Influx Situation Coincident With Borehole Enlargement. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference (ADIPEC), November 12-15, Abu Dhabi, UAE. 採択済発表予定 DOI: 10.2118/192607-MS
- ② Ghazali, N. A., Naganawa, S. and Masuda, Y. 2018. Development of Modified *Rhizophora spp.* Tannin Biopolymer Additive in Drilling Fluid System for High Temperature Well Applications. IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference, August 27-29, Bangkok, Thailand. 採択済発表予定 DOI: 10.2118/191080-MS
- ③ Ghazali, N. A., Naganawa, S., Masuda, Y., Ibrahim, W. A. and Bakar, N. F. A. 2018. Eco-Friendly Drilling Fluid Deflocculant for Drilling High Temperature Well: A Review. ASME International Conference on Ocean, Offshore & Arctic Engineering (OMAE 2018), June 18-21, Madrid, Spain.
- ④ Asanuma, H., Mogi, T., Tsuchiya, N., Watanabe, N., Naganawa, S. et al. 2018. Current Status of Research and Development on Supercritical Geothermal Resources in Japan. Grand Renewable Energy 2018 International Conference and Exhibition, June 18-22, Yokohama.
- ⑤ Ghazali, N. A., Naganawa, S. and Masuda, Y. 2018. Feasibility Study of Tannin-Lignosulfonate Drilling Fluid System for Drilling Geothermal Prospect. Stanford Geothermal Workshop, February 12-14, Stanford California.
- ⑥ Naganawa, S., Tsuchiya, N., Okabe, T. et al.

2017. Innovative Drilling Technology for Supercritical Geothermal Resources Development. Stanford Geothermal Workshop, February 13–15, Stanford, California.

- ⑦ Naganawa, S., Kudo, H. and Matsubuchi, H. 2016. Simulation Study on Influences of Wellbore Tortuosity on Hole Cleaning in Extended-Reach Drilling. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference (ADIPEC), November 7–10, Abu Dhabi, UAE.
DOI: 10.2118/183409-MS
- ⑧ Naganawa, S. 2016. Drilling Technology Development for Supercritical Geothermal Resources in Japan. IEA Central and South American Workshop on Geothermal Energy, April 18–19, Cuernavaca, Mexico.
- ⑨ Naganawa, S. 2015. Optimum Hydraulics Design and Operation for Extended-Reach and Horizontal Geothermal Drilling. World Geothermal Congress 2015, April 19–24, Melbourne, Australia.
- ⑩ Naganawa, S. 2015. Survey on Effective and Feasible Emerging Technology for EGS Well Drilling. Stanford Geothermal Workshop, January 26–28, Stanford, California.
- ⑪ 長縄成実 2014. 地熱井の掘削技術の現状と最新動向. 日本地熱学会学術講演会, 10月29～31日, 弘前.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長縄 成実 (NAGANAWA, Shigemi)
秋田大学・大学院国際資源学研究科・教授
研究者番号：10237539

(2) 研究協力者

Nurul Aimi Ghazali
東京大学・大学院工学系研究科・博士課程