

氏名（本籍）	オンガウ トーマス ミヨラ（ケニア共和国）
専攻分野の名称	博士（工学）
学位記番号	国博甲第19号
学位授与の日付	令和6年3月22日
学位授与の要件	学位規則第4条第1・2項該当
研究科・専攻	国際資源学研究科・資源学専攻
学位論文題目（英文）	地熱井掘削時の掘屑運搬のモデル化：ケニア共和国パカ地熱フィールド PW-03B 坑井におけるケーススタディ (Modelling of Geothermal Well Cuttings Transportation during Drilling: A Case Study of Well PW-03B in Paka Geothermal Field, Kenya)
論文審査委員	(主査) 教授 長縄 成実 (副査) 教授 藤井 光 (副査) 教授 今井 忠男 (副査) 教授 古井 健二

論文内容の要旨

地熱井の掘削コストは掘削時間に大きく依存するため、掘削工程中の非生産時間を最小限に抑えることが重要である。ケニア共和国の大地溝帯北部で掘削される地熱井では、従来のローラーコーンビットの代わりにPDC（多結晶ダイヤモンド焼結体）ビットを使用することで、より高い掘進率（掘削速度）を達成できることが経験から示されてきた。しかし、高掘進率での掘削はドリルパイプの抑留など重大な坑内トラブルの発生の増加につながると考えられ、ケニアの地熱開発業者はこれまで高掘進率で掘削することに慎重であった。PDCビットの使用により達成可能であることが示されている高掘進率での安全な掘削を可能にするためには、高掘進率でも坑内トラブルを最小限に抑制できる最適な掘削パラメータ設定を確立することが必要である。

本学位請求論文は、ケニア共和国の大地溝帯内に位置するパカ地熱フィールドで新規に進められている地熱開発において、以上のような問題に対して坑内の掘屑運搬効率の改善に着目し地熱井掘削効率の向上を図ることを試みたものである。

第1章は序論であり、地熱井掘削に伴う技術的課題を明確にし、本研究の目的について述べている。地熱井掘削の時間解析によれば総掘削時間の20%以上が非生産時間であり、そのうちの50%以上を占める高トルク・ドラッグや抑留、坑壁不安定、逸泥といった坑内トラブルの多くはホールクリーニングすなわち掘屑運搬の不良に起因している。掘削時の坑内掘屑運搬挙動のモデル化および数値シミュレーションを行い、掘屑運搬効率を改善することで坑内トラブルを回避できる最適な地熱井掘削操業条件を見出すことが本論文の目的である。

第2章では、先行研究の文献調査をまとめており、掘屑運搬効率を改善するためには、単に泥水循環流量を増加するだけでなく流動圧力損失や掘進率についても同時に考慮する必要があることを指摘している。また、ケニア共和国でこれまでに開発が進められてきたオルカリアおよびメネンガイの両地熱フィールドでの地熱井掘削実績との比較に基づいて、本論文が対象とするパカ地熱フィールド固有の課題の特定を行っている。

第3章では、本論文の研究手法について述べている。まず空気混合泥水を使用した掘削を仮定した気固液3相の1次元非定常坑内流動モデルの構築および数値シミュレーション手法について解説している。本研究では、植松（2003）および長縄・野村（2006）が開発した非定常掘屑運搬（TCT; Transient-Cuttings-Transport）シミュレータに対して、逸泥層での掘屑の地層中への逸失および空気混合泥水の使用を考慮した改良を行った。次にパカ地熱フィールドで掘削されたPW-03B坑井の詳細諸元、掘削操業条件および現場にて実際の掘削中に収集した回帰掘屑量などのデータの計測手法についてまとめている。

第4章では、PW-03B坑井の12-1/4インチ坑径の約300~1100mの深度区間を掘削したときの掘屑運搬挙動シミュレーションの結果をまとめている。このフィールドでは、掘屑運搬効率の低下による坑井アニュラス部での掘屑の堆積および等価循環泥水比重（ECD; Equivalent Circulating Density）の上昇による坑壁不安定が原因となってドリルストリングの埋没・抑留が引き起こされることが最も懸念される。そこで、空気混合泥水を用いた掘削時の掘屑運搬挙動が適切にモデル化できていることを確認したうえで、単相の水系泥水を使用した場合よりも空気混合泥水を用いた場合のほうが坑内の掘屑堆積量がおおよそ1/10に低減され、ECDも坑壁不安定を起ささない程度に十分に小さく維持できることをシミュレーションにより示した。また、逸泥に伴う掘屑の地層中への逸失や坑径拡大を考慮した地上への回帰掘屑量の実測データとのマッチングによるモデルパラメータの調整を行っている。

第5章では、パラメータ調整を行ったモデルを用いて、掘削泥水の循環流量と空気混合量を変数とした感度解析ケーススタディを行っている。先行研究から導かれた掘屑運搬効率の評価基準に基づき、掘削泥水の循環流量と空気混合量の最適化を図るとともに掘進率や必要な泥水ポンプ能力についても考察している。

第6章は結論であり、本研究で得られた知見を総括し、推奨される地熱井掘削の操業条件を提示している。具体的には、パカ地熱フィールドでは、空気混合量を700scfmとして泥水循環流量を従来の1500l/minから1800l/minに増加させることで、従来の掘削実績値の2.5倍の掘進速度での掘削が可能であり、掘管の付け替え時のザク上げ循環時間も45分から30分に短縮できることを示している。

以上のように、本論文では、ケニア共和国パカ地熱フィールドをモデルとして、最適な掘進率を達成するための効果的なホールクリーニングを行える空気混合泥水の水と空気の流量の最適な組み合わせをシミュレーションにより推定した。同時に、掘削現場においてデータ計測・モニタリングを行い、掘削時の掘屑運搬挙動をシミュレーションすることによって地熱井掘削操業条件の最適化を図ることが重要かつ有効であることを実証したものである。ここで得られた知見は、有望な地熱地帯の開発が続いているケニア共和国大地溝帯での空気混合泥水を使用した地熱井掘削の効率向上に資するだけでなく、当該地熱フィールド以外での地熱開発の促進にも大いに貢献するものである。

論文審査結果の要旨

本学位請求論文は、ケニア共和国の大地溝帯内に位置するパカ地熱フィールドで新規に進められている地熱開発において、坑内の掘屑運搬効率の改善により地熱井掘削効率の向上を図ることを試みたものである。

第1章は序論であり、地熱井掘削に伴う技術的課題を明確にし、本研究の目的について述べている。地熱井掘削の時間解析によれば総掘削時間の20%以上が非生産時間であり、そのうちの50%以上を占める高トルク・ドラッグや抑留、坑壁不安定、逸泥といった坑内トラブルの多くはホールクリーニングすなわち掘屑運搬の不良に起因している。掘削時の坑内掘屑運搬挙動のモデル化および数値シミュレーションを行い、掘屑運搬効率を改善することで坑内トラブルを回避できる最適な地熱井掘削操業条件を見出すことが本論文の目的である。

第2章では、先行研究の文献調査をまとめており、掘屑運搬効率を改善するためには、単に泥水循環流量を増加するだけでなく流動圧力損失や掘進率についても同時に考慮する必要があることを指摘している。また、ケニア共和国でこれまでに開発が進められてきたオルカリアおよびメネンガイの両地熱フィールドでの地熱井掘削実績との比較に基づいて、本論文が対象とするパカ地熱フィールド固有の課題の特定を行っている。

第3章では、本論文の研究手法について述べている。まず空気混合泥水を使用した掘削を仮定した気固液3相の1次元非定常坑内流動モデルの構築および数値シミュレーション手法について解説している。次にパカ地熱フィールドで掘削されたPW-03B坑井の詳細諸元、掘削操業条件および現場にて実際の掘削中に収集した回帰掘屑量などのデータの計測手法についてまとめている。

第4章では、PW-03B坑井の12-1/4インチ坑径の約300~1100mの深度区間を掘削したときの掘屑運搬挙動シミュレーションの結果をまとめている。空気混合泥水を用いた掘削時の掘屑運搬挙動が適切にモデル化できていることを確認するとともに、単相の水系泥水を使用した場合よりも空気混合泥水を用いた場合のほうが坑内の掘屑堆積量がおよそ1/10に低減されることが示されている。また、逸泥に伴う掘屑の地層中への逸失や坑径拡大を考慮した地上への回帰掘屑量の実測データとのマッチングによるモデルパラメータの調整を行っている。

第5章では、パラメータ調整を行ったモデルを用いて、掘削泥水の循環流量と空気混合量を変数とした感度解析ケーススタディを行っている。先行研究から導かれた掘屑運搬効率の評価基準に基づき、掘削泥水の循環流量と空気混合量の最適化を図るとともに掘進率や必要な泥水ポンプ能力についても考察している。

第6章は結論であり、本研究で得られた知見を総括し、推奨される地熱井掘削の操業条件を提示している。具体的には、パカ地熱フィールドでは、空気混合量を700 scfmとして泥水循環流量を従来の1500 l/minから1800 l/minに増加させることで、従来の掘削実績値の2.5倍の掘進速度での掘削が可能であり、掘管の付け替え時のザク上げ循環時間も45分から30分に短縮できることを示している。

以上のように、本論文は、掘削現場においてデータ計測・モニタリングを行い、掘削時の掘屑運搬挙動をシミュレーションすることによって地熱井掘削操業条件の最適化を図ることが重要か

つ有効であることを実証したものである。ここで得られた知見はケニア共和国大地溝帯での空気混合泥水を使用した地熱井掘削の効率向上に資するだけでなく、当該地熱フィールド以外での地熱開発の促進にも大いに貢献するものである。

よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。