

| | | | |
|-----------|------------------------------|-------|---------------|
| 氏名 | ひらののぶお | | |
| 授与学位 | 平野 伸夫 博士(工学) | | |
| 学位授与年月日 | 平成10年3月25日 | | |
| 学位授与の根拠法規 | 学位規則第4条第1項 | | |
| 研究科、専攻の名称 | 東北大学大学院工学研究科(博士課程)資源工学専攻 | | |
| 学位論文題目 | HWR型人工地熱貯留層内のき裂閉塞制御に関する基礎的研究 | | |
| 指導教官 | 東北大学教授 中塚 勝人 | | |
| 論文審査委員 | 主査 東北大学教授 | 中塚 勝人 | 東北大学教授 松木 浩二 |
| | 東北大学教授 | 林 一夫 | 東北大学助教授 橋田 俊之 |

論文内容要旨

第1章 緒論

現在、次世代の地熱発電方法とされる高温岩体発電の研究がなされている。しかし、高い確度で熱エネルギー抽出をおこなう上ではまだ問題点も多い。たとえば、熱交換にもちいる高温地下き裂中を熱水が通過することによるき裂の拡大や閉塞、岩体温度の低下に伴う不要流路の発生、一部き裂からの熱水の散逸、き裂の管理や拡張方法などが挙げられる。これらの問題に対し、拡大あるいは不要き裂に関しては、永久的な閉塞あるいは流量を低下させるような技術の開発が望まれる。また、き裂の管理や拡張として、使用中のき裂の周囲に新たなき裂を作成する場合などには、使用中のき裂を閉塞させたあとに目的のき裂を生成し、さらに閉塞させたき裂を再び流動状態にするような一時的な閉塞技術の開発が望まれる。

本研究においては、以上に述べたような地熱貯留層内き裂の閉塞制御をおこなう手段として、高温セメントあるいは高分子ポリマーなどを用いる従来の手法とは異なる、粘土鉱物の合成とこれに伴うゲル化、あるいは他鉱物への変質や特性変化を利用する手法を提案する。粘土鉱物の合成・変質にはオートクレーブによる水熱条件下での反応が一般的であるが、これは、地熱貯留層内の温度・圧力にはほぼ近似しており、粘土原料を坑井より圧入すれば高温地下き裂内に粘土を生成あるいは変質させることが可能であると考えられる。その際のゲル化による閉塞あるいはその後の変質など、粘土鉱物の機能性を利用することにより高温地下き裂の流動性制御技術を開発することが可能と考えられる。

したがって、本研究はこれらの地下き裂の制御技術の基礎研究として、原料となる粘土鉱物の提案と合成条件、水熱条件下における特性を明らかにするとともに、高温地下貯留層を模擬した装置を使用した閉塞材の流動実験を行い、高温地下き裂の閉塞制御技術の可能性について検討した。

本論文は以上から得られた成果をまとめたもので、要旨を各章ごとに大別して列挙すると以下のようになる。

第2章 スメクタイト類粘土の水熱合成

スメクタイト類粘土は粒子径が非常に小さいために分散によるゾルあるいはゲル特性を示す。また、ケイ酸塩層の同形置換量が少ないために層電荷も小さく、層間陽イオンとの結合が弱い。このために水その他の溶媒で膨潤し、コロイド溶液あるいはチクソトロピー性を持つゲルを形成する。本章で扱うスメクタイトは、

ヘクトライト、サポナイトおよびモンモリロナイトである。また、トスダイトについては緑泥石／バイデライト（スメクタイト）の混合層粘土である。

まず、各種スメクタイト類の合成については試薬を用いて湿式法により各粘土鉱物の理想組成に調整した出発物質を用い、ヘクトライトの場合は反応温度150℃以上、反応時間1時間程度で合成できることを示した。また、サポナイト、モンモリロナイトについては12時間から24時間程度の反応時間を要し、ヘクトライトと比較して結晶度が低いものの、反応温度200℃以上で合成できた。また、トスダイトのアルカリ水熱条件下における変質については、アルカリ濃度の高い場合や反応温度の高い場合において、粘土鉱物から沸石への変質が観察され、この変質過程において、膨潤状態を示す膨潤性トスダイトが生成した。この膨潤性は0.05mol/dm³-NaOH水溶液を用い、反応温度200℃の場合が最も顕著であった。また、NaCl、Al(OH)₃、MgCl₂溶液などの中性及び酸性溶液を使用した場合は、トスダイトの変質が生じないか、あるいは緑泥石等への変質が観察された。以上の結果をまとめると、各種粘土鉱物の合成あるいは変質を用いて高温き裂閉塞を生じさせる場合には、ヘクトライトでは150℃以上、モンモリロナイト、サポナイトの場合では200℃以上、トスダイトの場合では200℃付近が有望であることを示した。また、粘土鉱物の生成後にMgイオンやAlイオンが供給された場合、粘土鉱物は緑泥石などの他鉱物へと変質する可能性があることを明らかにした。

第3章 水熱条件下における粘土鉱物の粘性測定

本章では水熱条件下において粘性測定を簡便に行うことのできる装置を試作し、各種溶液、粘土鉱物原料、地熱井ボーリング用泥水の粘性挙動を測定し、その結果について記述した。

まず、各種溶液を用いて、常温における粘性測定を試みた。その結果、装置自体の特性によると考えられる回転トルクの増減が観察されるが、同一溶液における剪断速度と回転トルクの関係および粘性の実測値から、ほぼ粘性が測定できたと考えられる。しかしながら、低剪断速度や低粘性溶液の場合には、粘性が測定できているとはいいがたく、本装置における粘性測定の限界値は5cP程度であると考えられる。次に水熱条件下における粘性の追跡であるが、グリセリンを使用した場合には実測値と文献値は20℃の場合を除いてほぼ一致した。ボーリング用粘土を使用した場合の結果からは200℃近辺までは良好な粘性傾向を示すが、220℃以上では、泥水自体の変質によって固形物が生成・沈殿を生じ、2相分離を起こしているために見かけ上の粘性が低下していると考えられる。ヘクトライト原料スラリーおよびLi-トスダイトスラリーの場合には、高い粘性の発現がほぼヘクトライトの結晶化およびLi-トスダイトの変質と対応した。しかし、4%および8%濃度ヘクトライト原料スラリーの場合には、160℃から180℃付近までは粘性が増加するが、より温度が上昇すると結晶化が進むにもかかわらず粘性は低下した。これは150℃から180℃付近では粘性が高くなかつ流動性を持つ状態であるが、さらに結晶化が進むと生成したヘクトライトがゲル状状態になり、2相分離を起こすために見かけ上の粘性が低下したと考えられる。以上の結果によると、地下高温き裂を粘土鉱物の生成および変質を利用して閉塞させようとする場合、ヘクトライトを用いる場合には、反応温度が150℃から180℃以上の領域で2相分離を起こす、つまり十分なゲル化をおこす温度領域での閉塞が可能であると考えられる。これは他の粘土鉱物にも適用できると考えられ、今回測定が行えなかったサポナイト、モンモリロナイトについては結晶化の進む200℃以上での閉塞が期待できる。トスダイトを用いる場合には0.05mol/dm³-NaOH水溶液を用いて200℃付近での閉塞が有望ではないかと考えられる。

以上のことは粘土鉱物の結晶化や変質に伴って粘性の発現、ゲル化が生じることを示しており、結晶化の速度、つまり反応温度、反応時間を制御することにより閉塞の制御をおこなえる可能性を示唆している。ま

た、原料スラリーの濃度変化によっても粘性の高い領域が変化することから、閉塞の制御を原料スラリー濃度によって行える可能性を示唆している。

第4章 流通式オートクレーブを用いた粘土鉱物による高温地下き裂閉塞の模擬実験

本章では高温地下き裂を模擬できる装置を用い、各種粘土鉱物による閉塞実験をおこなった。その結果、4wt%および8wt%ヘクトライト原料スラリーを用いた場合には200℃以上、3wt%サポナイトおよびモンモリロナイト原料スラリーを用いた場合には250℃以上、0.5mol/dm³-NaOH溶液に分散した4wt%トスダイトスラリーを用いた場合には300℃以上の温度領域において閉塞が可能であったことを示した。また、スラリーの流入速度や濃度によっても閉塞挙動は変化し、流速の増加あるいはスラリー濃度の低下にともなって、閉塞可能な温度は上昇した。これらの結果は粘土鉱物の種類や濃度、原料スラリーを高温地下き裂内に圧入する際の流速によって閉塞挙動、特に閉塞可能な温度領域がコントロールできること示している。

閉塞後における閉塞維持時間については、6wt%ヘクトライト原料スラリーを用いた結果では250℃において1ヶ月以上、3wt%サポナイト原料スラリーを用いた結果では300℃において10日以上、3wt%モンモリロナイト原料スラリーを用いた結果では300℃において1週間程度の期間、閉塞状態を維持できる結果が得られた。また、この閉塞状態の維持は粘土鉱物の種類や原料スラリー濃度によって変化し、結晶化速度の遅い粘土鉱物やスラリー濃度が低い場合には閉塞維持時間が短くなり、一時的な閉塞状態にすることが可能であった。また、閉塞後の閉塞部付近の圧力状態によって閉塞維持時間に影響が生じることも示唆された。しかし、高温地下き裂内の状態、特に流路の状態によっては閉塞が生じないか、あるいは維持できない場合もあることがわかった。これは、主にき裂内でフラッシュが起こった場合と流路空隙の状態によると考えられるが、特に前者の場合には閉塞部分近傍の圧力を下げることににより、強制的に閉塞部分の再流動を生じさせることが可能であることを示唆している。これらの結果をまとめると、地熱貯留層内での粘土鉱物の合成あるいは変質を用いた高温地下き裂の閉塞制御について、粘土鉱物の種類、原料スラリー濃度、流入速度を制御することによる、一定の温度領域にあるき裂の選択的な閉塞や一時的あるいは永久的な閉塞制御実現の可能性が示された。

第5章 結論

本章では本研究で得られた主要な成果を総括的に述べた。本研究では、各種粘土鉱物の合成条件、水熱条件下における粘性挙動を検討し、これらの内容に基づいて、実験室内における高温地下き裂の閉塞模擬実験をおこなった。その結果、従来とは全く異なった方法である、粘土鉱物の合成や変質反応を利用することによる高温地下き裂の一時的あるいは永久的な閉塞制御技術の可能性を提示できた、さらに応用展開することにより実用化技術の重要な要素になることを示した。

審査結果の要旨

高温岩体からの地殻熱エネルギー抽出は、世界各国で研究が進められているが、抽熱効率が充分でないのが最大の問題点となっている。このため、抽熱に有効なき裂面積を確保するとともに、地下の不用き裂は閉塞させ、循環水の移動範囲を限定させるなど、地下き裂を制御する技術の開発が望まれている。本論文は、高温岩体中で粘土鉱物を生成させることにより閉塞材としての性能を発現させ、地下き裂を制御する技術について基礎的研究をしたもので、全編5章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、水ガラスをベースとして化学組成を調整した出発スラリーを用いて、ヘクトライト、サポナイトおよびモンモリロナイトのスメクタイト類粘土鉱物を100~300℃の水熱条件下で合成する実験を行っている。この結果、ヘクトライトは反応温度150℃以上、サポナイトおよびモンモリロナイトは200℃以上の条件で合成でき、また天然産トスダイトはアルカリ水熱反応により膨潤性トスダイトに変化し、かつ反応条件により沸石類への転換が可能であることを示している。これらの結果から閉塞材として機能する粘土鉱物を選定するとともに、それらの生成条件を明かにしている。これらは有用な知見である。

第3章では、水熱条件下における粘性測定装置を新たに製作し、粘土原料スラリーの結晶化過程における粘性変化を測定することに成功している。ヘクトライトスラリーは粘土の生成温度にほぼ対応する150℃から180℃付近で最も粘性が高くなり、さらに高温域では結晶化のために2相分離が生じ逆に粘性が低下することを明らかにしている。また原料スラリーの濃度変化によって粘性の高い温度領域が変化することから、地下き裂の閉塞制御を原料スラリーの濃度調整によって行える可能性を見いだしている。

第4章では、地熱貯留層を模擬した流通式オートクレーブを製作し、花崗岩粒子充填部での粘土の生成と管路の閉塞および再流動実験を行っている。この結果、ヘクトライトを用いた場合には200℃以上、サポナイトおよびモンモリロナイトでは250℃以上、さらにトスダイトを用いた場合には300℃以上の温度において閉塞が確認された。また、閉塞維持期間について検討を行い、用いる原料スラリーの種類と濃度により閉塞の温度およびその維持期間を制御することが可能であること、さらに閉塞部位下流側の圧力を低下させることにより再流動化が可能であることを示し、実用上有益な成果を得ている。

第5章は総括であり、本研究で得られた成果を要約している。

以上、要するに本論文は、粘土および粘土原料スラリーの水熱条件下での反応とその過程での粘性変化を検討し、150℃から300℃の地熱環境下でき裂閉塞材として機能する特性をもつことを明らかにしたもので、地球工学および地殻熱抽出工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。