

氏 名	しほ や よつぎ 洪 谷 嗣
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和63年5月11日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第2項
最 終 学 歴	昭和57年3月 東北大学大学院工学研究科機械工学専攻前期2年の課程修了
学位論文題目	高温岩体からの熱エネルギー抽出と地下き裂の挙動に 関する研究
論文審査委員	東北大学教授 阿部 博之 東北大学教授 太田 照和 東北大学教授 関根 英樹 東北大学教授 前川 一郎 東北大学教授 高橋 秀明

論 文 内 容 要 旨

第1章 緒 論

地球の表面をおおっている地殻には地球内部からの熱伝導や放射性物質の崩壊、また、マグマの上昇などにより莫大な熱エネルギーが蓄積されている。この地殻内の浅所の恵まれたごく一部では地下に天然の熱水が存在し、熱水対流系（貯留層）が形成されている。現在までの地熱開発の対象は、このような天然の熱水対流系を探査し、その熱エネルギーを利用することに限られてきた。しかし、このような地熱資源は地殻の持つ熱エネルギーのごく一部にすぎない。地殻のより深部の高温岩体内に蓄えられた熱エネルギーに対しては、これまで開発の手が及んでおらず、各国で開発研究が精力的に行われている段階である。

高温岩体から熱エネルギー抽出を行うために人工的に地下き裂を作成し、地上から積極的に流体を注入しき裂面（伝熱面）で熱交換して蒸気や熱水を利用する新しい熱エネルギー抽出方式が提案されている。その原理は2本の地熱井（生産井と注水井）を掘り、それらの地熱井間に人工的に破碎された地下き裂を熱交換部分とする熱水循環系を造成し、地上から供給した流体を熱交換して蒸気や熱水として回収し利用するものである。このような地下人工き裂の作成には、石油や天然ガス井などで貯留層の刺激技術として発達してきた水圧破碎法が現在最も有望である。

高温岩体からの熱エネルギー抽出を実現するためには、工学的に地下人工き裂を設計、作成し、

必要な年限にわたって安定に制御保持するための技術の確立が必要となる。高温岩体中の地下き裂に流体を循環させて熱エネルギーの抽出を始めると、き裂面を通して岩体は冷却され、岩体の熱収縮によってき裂まわりに大きな熱応力が生ずる。したがって、高温岩体からの熱エネルギー抽出時の地下き裂の挙動に関しては、熱弾性効果も含めた破壊力学的研究が不可欠である。

また、従来型の地熱開発においても、熱水卓越型地熱地域では熱水の還元が行われる場合がほとんどであり、高温岩体型と同様に貯留層内に流体が注入されている。多くの熱水卓越型の地熱地域は断層や地下き裂がかなり発達した火山岩中に形成されており、地下き裂の存在を考慮した貯留層の評価が必要となる。

本論文においては、熱エネルギー抽出システムの稼動時における地下き裂の安定保持の必要性から、熱エネルギー抽出時における岩体の熱伝導と地下き裂の固体力学的挙動を連成して考え、地下人工単一き裂および多重き裂を対象として、熱エネルギー抽出量や熱エネルギー抽出時における地下き裂の挙動を明らかにし、地下き裂の安定保持について検討を行った。また、断層面の地熱貯留層から熱エネルギーを抽出する場合の貯留層の挙動についても検討した。さらに、熱水卓越型の貯留層に対して透水性の大きな地下き裂が存在するモデルを用いて貯留層の評価を行った。

第2章 熱エネルギー抽出モデルと熱弾性方程式

高温岩体からの熱エネルギー抽出モデルを構成し、非定常熱伝導、準静的熱弾性理論に基づいて地下き裂の熱エネルギー抽出時の挙動を解明するための基礎方程式と基本的な解析方法を述べた。地下き裂の挙動を解析するためにはき裂内部を流れる流体のエネルギー方程式、岩体の非定常熱伝導方程式および熱弾性方程式を連立して解く必要がある。解析方法の基本的な考え方は、熱エネルギー抽出によって生ずるき裂面上の熱流束を瞬間集中熱源の連続分布で置換し、熱流束に関する特異積分方程式を誘導し、き裂面上の熱流束を数値的に決定するものである。また、き裂の挙動に関する解析は、得られた熱流束がき裂面上に存在する場合の準静的熱弾性のき裂問題を解くことに帰着できることを示した。

第3章 地下人工単一き裂からの熱エネルギー抽出

地下人工き裂のモデルとして地表面に垂直な二次元の単一き裂を想定し、第2章で示した解析方法に基づいて抽出される流体温度および地下人工単一き裂の熱エネルギー抽出時の進展挙動を示したものである。さらに、熱エネルギー抽出時における二次き裂発生を議論するのに必要な地下人工き裂まわりの擾乱応力を検討した。熱エネルギー抽出開始後、地下人工単一き裂の進展が安定なき裂端の位置が存在し、き裂の長さ、開口変位および体積は時間の経過とともに増大する。また、き裂表面には二次き裂が発生するほどの引張の擾乱応力が発生することが明らかとなった。

第4章 地下人工多重き裂からの熱エネルギー抽出

第3章で示した地下人工単一き裂の場合には伝熱面積の大きさに限界があることから、大規模地熱開発のために地下に複数個の人工き裂を作成し、それらを連結して熱エネルギー抽出を行う場合

の地下人工多重き裂の挙動について検討を行った。多重き裂を用いると、長年月にわたって高い温度の熱水が得られることを定量的に示した。さらに、地下人工多重き裂はき裂進展量にき裂間隔によって極小値が存在し、単一き裂と比較してき裂進展量、き裂1個あたりの体積は小さいが、熱エネルギー抽出時に地下人工多重き裂を安定に保持することができることを示した。

第5章 地下人工き裂群の分岐成長過程

第4章で示した地下人工多重き裂の分岐成長過程を論じた。熱エネルギー抽出開始後、き裂まわりの岩体温度の低い領域がき裂近傍に限られる相互干渉の小さい場合は、等長であった地下人工き裂群は互いに等長の状態を保ち成長するが、温度の低い領域が広がり相互干渉が大きくなると必ずしも等長で成長するとは限らなくなる。熱エネルギー抽出時の地下人工き裂群についてき裂群の分岐成長過程が生じることを示し、また、分岐成長の発生する条件についてき裂端応力拡大係数を基に検討した。さらに、分岐成長の発生する条件が満足された後の等長き裂成長過程と不等長の成長過程の安定性をき裂が成長するときに解放されるエネルギーに基づいて検討し、不等長の成長過程がより安定であることを明らかにした。

第6章 断層面からの熱エネルギー抽出

高温岩体内に存在する天然の断層面を伝熱面として利用した場合の熱エネルギー抽出時の挙動について検討した。断層面を地殻応力による圧縮荷重下の二つの均質等方弾性体のクーロンの摩擦抵抗が働く接触界面と考え解析を行った。これまで、断層面のような既破断面には特殊な応力場が存在するときに除いて流体を安定に保持することができないとされてきたが、熱エネルギー抽出時に生ずる岩体の熱変形により、破壊抵抗の存在しない断層面のような既破断面にも流体を安定に保持することが可能であり、貯留層（伝熱面）として利用できることを明らかにした。

第7章 地下き裂モデルの地熱貯留層評価への適用

これまで示してきた地下き裂モデルが現在稼働中の地熱地域の貯留層評価にも適用することができることを明らかにした。従来、熱水卓越型の貯留層内の岩体は均質な多孔質体としてダルシーの法則に基づく流体の浸透の問題として扱われてきた。しかし、地熱地域では流体が岩体内を急速に移動する場合もあり、この点から貯留層内に透水性の大きな地下き裂が存在するモデルを提案し、岩手県滝の上（葛根田）地熱地域の貯留層について貯留層の大きさを抽出される熱水の温度変化について検討を行った。

第8章 結論

地下き裂の安定保持の必要性から、熱エネルギー抽出時における地下き裂の進展挙動について検討を行った。さらに、従来から開発が行われている熱水卓越型地熱貯留層について地下き裂モデルを提案し貯留層の評価を行った。得られた主要な知見を以下に述べる。

- 1) 熱エネルギー抽出開始後、地下き裂の出水口から得られる熱水温度を厳密に計算し、定量的

に示した。地下き裂の出水口から得られる熱水温度は時間の経過とともに低下し、き裂内を流れる流体の流量が大きくなるほどその傾向は大きくなる。多重き裂を用いると長年月にわたって高い温度の熱水を得ることができ、き裂間隔を大きくするほど熱水の温度低下が緩やかとなる。

2) 地下人工き裂を通して熱エネルギー抽出を始めると岩体の熱変形によって安定で大きな貯留部を保持することができる。このとき地下人工き裂はき裂端の上端および下端の両方から時間の経過とともに進展するが、き裂の進展に対する寄与はき裂内部の流体の圧力の影響が最も大きい。また、多重き裂の場合には単一き裂と比較して、き裂進展量、き裂1個あたりの貯水量は小さいが、やはり安定に保持することが可能である。

3) 熱エネルギー抽出を始めると地下き裂のき裂面には二次き裂が発生するほどの大きな引張の擾乱応力が発生する。引張の擾乱応力はき裂面から離れると急激に小さくなるので二次き裂はそれほど進展しないと考えられる。

4) 地下人工き裂群は相互干渉が大きくなると等長と不等長の二つのき裂成長過程が存在するようになる。不等長のき裂成長過程が存在する条件が示され、この条件を満足すると等長のき裂成長過程より不等長のき裂成長過程の方が安定であり、等長き裂群は一方のき裂群の成長が停止するという過程を経て不等長の成長過程に移る。

5) 断層面を通して熱エネルギー抽出を行うと断層面には流体を保持する開口領域と断層面の相対すべりの生じている領域が存在する。開口領域およびすべり領域は時間の経過とともに増大するが、岩体の熱変形の効果により断層面の開口領域に流体を安定に保持することができる。

6) 本論文で提案した地下き裂を含んだ地熱貯留層モデルを用いると、稼動条件やトレーサー試験の結果から生産井の熱水温度、地熱貯留層の大きさの評価ができ、熱水還元の影響についてほぼ妥当な推定が可能である。

審査結果の要旨

高温岩体からの熱エネルギー抽出システムを実現するためには、地下人工き裂を設計、作成し、必要な年限にわたって安定に保持するための技術の確立が必要である。流体を循環させてき裂面で熱交換を開始すると、岩体の熱収縮によってき裂まわりに大きい熱応力が生じる。したがって地下き裂の挙動の解明には、熱弾性効果を含めた破壊力学的研究が不可欠である。

本論文は、熱エネルギー抽出時における岩体内の熱伝導と地下き裂の固体力学的挙動を連成して捉え、地下人工単一き裂、多重き裂および断層面を対象にして、それらの挙動や安定保持条件、熱エネルギー抽出量を明らかにしたもので、全編8章からなる。

第1章は緒論である。

第2章では、非定常熱伝導、熱弾性理論に基づいて、熱エネルギー抽出時の地下き裂の挙動を表現する基礎方程式と解析方法の基本について述べている。とくにき裂面上の熱流束を瞬間集中熱源の連続分布で置換し、それに関する特異積分方程式に帰着させる著者の解法は、熱弾性き裂問題の対象を大きく広げた有用な考案である。

第3章および第4章では、それぞれ単一および多重き裂をとりあげ、第2章の解析方法に基づいて、熱エネルギー抽出時のき裂の進展挙動を詳細に明らかにしている。

第5章では、多重き裂の分岐成長問題をとりあげ、熱エネルギー抽出とともにき裂群がどのような過程で安定に成長するかを論じている。

第6章では、断層面を伝熱面として利用する場合の検討を行っている。断層面間で流体を安定に保持させるためには、特殊な応力場の存在が必要とされていたが、岩体の熱変形を考慮すると、安定な貯留層として利用できることを明らかにしている。これは有用な知見である。

第7章では、本論文の地下き裂モデルが現在稼働中の地熱地域の貯留層にも適用できることを示している。従来の多孔質モデルと異なり、貯留層内には透水性の大きい地下き裂が共に存在することを考慮し、岩手県滝の土地域を例にとり、地熱貯留層の大きさや熱水の温度変化についての有効な推定方法を提案している。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は、地下き裂の安定保持の必要性から、熱エネルギー抽出時における地下き裂の進展挙動について詳細な理論的考察を行うとともに、この結果を熱水卓越型地熱貯留層に応用して、貯留層の妥当な評価が可能であることを示したもので、地熱工学ならびに機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。