

二層貯留層による高温岩体抽熱システムに関する研究

学位論文内容の要旨

地球環境問題に対応したエネルギー開発として、自然エネルギーの開発が重要な課題となってきた。この自然エネルギーの一つである地熱エネルギーの開発では、地下に貯留している高温の地熱流体(蒸気・熱水)を抽出する従来型の受動的な地熱利用から、地下に人工的なき裂を造って、地上から水を循環させ、このき裂を熱交換面として抽熱を行う高温岩体の能動的な熱利用への展開が試みられているが、この実用化のためには抽出エネルギー量の増大が不可欠である。このために、複数の貯留層を利用するマルチ貯留層システムが提案されているが、その生産・抽熱特性に関しては未解明な点が多いのが現状である。

本研究は、山形県大蔵村肘折カルデラ内の NEDO 肘折高温岩体実験場で進められてきた高温岩体発電技術に関する現場試験に基づいて、二層貯留層による循環システムの生産・抽熱特性を明らかにすることを目的としている。特に、肘折で実施された長期循環試験を対象として、貯留層評価のための数値モデルを提案し、数値シミュレーションによって各貯留層の生産・抽熱特性を明らかにするとともに、その長期挙動を予測している。以下、本論文各章の概要を示す。

第 1 章は序論であり、研究の背景と目的を示すとともに、地熱エネルギー抽出に関する既往の研究を展望している。

第 2 章では、肘折高温岩体実験場で実施された高温岩体技術開発の経緯や同サイトの深度約 1.8km 及び約 2.2km に造成された二層の貯留層（以下、浅部貯留層と深部貯留層と呼ぶ）の概要を紹介するとともに、浅部及び深部貯留層を対象に実施された短期循環試験や長期循環試験の概要について述べている。特に、これまでに実施された代表的な短期循環試験の結果に基づいて、浅部及び深部貯留層の特性を分析し、浅部貯留層と深部貯留層との生産性の相違やこれら貯留層を構成する主要なき裂群の形態などを明らかにしている。

第 3 章では、二層貯留層システムの生産・抽熱特性を評価・予測するための貯留層の数値モデル化手法について論じている。具体的には、まず、二重空隙構造を考慮した 2 相流体の流動と周囲岩盤を含めた熱伝導の有限要素解析手法について述べている。次に、貯留層は複数枚のき裂から構成され、これらのき裂が主要な流体流路・熱交換面となることから、個々の亀裂の開閉合と流体流動挙動の数値モデル化手法について考察を加え、Bed-of Nails モデルの適用法とそのモデル定数の同定法を明らかにしている。

第4章及び第5章では、2000年11月27日から2002年8月31日までの約1.5年にわたって実施された長期循環試験を対象として、第3章で提案した貯留層モデルを用いて解析を行い、提案モデルの妥当性を検証するとともに二層貯留層の特徴について考察している。なお、長期循環試験は注水条件等の違いから第1期～第3期の期間に分けられる。そこで、第4章では、深部貯留層に注水した第1期の循環試験を対象として数値シミュレーションを行い、循環試験における種々の計測結果をよく再現できる貯留層モデルを開発している。さらに、計測結果と解析結果に基づいて、深部貯留層へ注水した場合の浅部・深部貯留層の生産特性や抽熱特性を評価し、初期の段階では生産井 HDR-2a に浅部貯留層からの生産寄与があったが、その後寄与が無くなったこと、生産井 HDR-3 では浅部貯留層からの寄与が優勢であったこと、試験期間中に深部貯留層の一部でその透水性が変化したこと、などを明らかにしている。

第5章では、浅部及び深部貯留層への同量注水が実施された第2期及び第3期を対象としている。特に、第1期の計算結果から初期条件を与えて第2期以降の数値シミュレーションを行い、提案した貯留層モデルが循環試験の結果によく合うことを確認している。さらに、浅部・深部貯留層に対して同時注水した場合の両貯留層の生産・抽熱特性や貯留層相互の干渉効果について分析している。そして、浅部貯留層からの生産寄与により生産井 HDR-2a の坑口温度が回復すること、浅部貯留層と深部貯留層への注入流量の変化に伴って各貯留層からの生産流量が変化し、その結果、生産井 HDR-2a からの生産流量が減少することなど、二層貯留層の複雑な流動挙動を具体的に明らかにしている。

第6章では、肘折貯留層から長期間にわたって効率の良い抽熱を行うための注水条件について論じている。まず、肘折貯留層に対する最適な総注水流量を求め、次に、種々の注水条件、すなわち、最適総注水流量を浅部及び深部貯留層へ個別注水した場合と同時注水した場合など、に対して10年間の予測計算を行っている。そして、長期間の生産・抽熱特性を考えた場合には、深部貯留層から浅部貯留層への流入を生じさせない注水条件が回収率・抽熱量の上で最良であることを明らかにしている。さらに、モデル定数を変化させた解析から、貯留層の透水性を変化させることでより効率的な抽熱が可能になることを指摘している。

第7章では、長期循環試験の最終段階で実施された発電試験の結果を示すとともに、高温岩体の商業発電の可能性について考察している。特に、30MW 程度の発電を目標とした場合の多層貯留層システムの要件について論じている。

第8章は結論であり、本研究で得られた成果をまとめている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 金 子 勝比古

副 査 教 授 石 島 洋 二

副 査 教 授 米 田 哲 朗

学 位 論 文 題 名

二層貯留層による高温岩体抽熱システムに関する研究

地球環境問題に対応したエネルギー開発として、自然エネルギーの開発が重要な課題となってきた。この自然エネルギーの一つである地熱エネルギーの開発では、地下に貯留している高温の地熱流体(蒸気・熱水)を抽出する従来型の受動的地熱利用から、地下に人工的なき裂を造って、地上から水を循環させ、このき裂を熱交換面として抽熱を行う高温岩体の能動的熱利用への展開が試みられているが、この実用化のためには抽出エネルギー量の増大が不可欠である。このために、複数の貯留層を利用するマルチ貯留層システムが提案されているが、その生産・抽熱特性に関しては未解明な点が多いのが現状である。

本研究は、山形県大蔵村肘折カルデラ内の NEDO 肘折高温岩体実験場で進められてきた高温岩体発電技術に関する現場試験に基づいて、二層貯留層による循環システムの生産・抽熱特性を明らかにすることを目的としている。特に、肘折で実施された長期循環試験を対象として、貯留層評価のための数値モデルを提案し、数値シミュレーションによって各貯留層の生産・抽熱特性を明らかにするとともに、その長期挙動を予測している。以下、本論文各章の概要を示す。

第 1 章は序論であり、研究の背景と目的を示すとともに、地熱エネルギー抽出に関する既往の研究を展望している。

第 2 章では、肘折高温岩体実験場で実施された高温岩体技術開発の経緯や同サイトの深度約 1.8km 及び約 2.2km に造成された二層の貯留層（以下、浅部貯留層と深部貯留層と呼ぶ）の概要を紹介するとともに、浅部及び深部貯留層を対象に実施された短期循環試験や長期循環試験の概要について述べている。特に、これまでに実施された代表的な短期循環試験の結果に基づいて、浅部及び深部貯留層の特性を分析し、浅部貯留層と深部貯留層との生産性の相違やこれら貯留層を構成する主要なき裂群の形態などを明らかにしている。

第 3 章では、二層貯留層システムの生産・抽熱特性を評価・予測するための貯留層の数値モデル化手法について論じている。具体的には、まず、二重空隙構造を考慮した 2 相流体の流動と周囲岩盤を含めた熱伝導の有限要素解析手法について述べている。次に、貯留層は複数枚のき裂から構成され、これらのき裂が主要な流体流路・熱交換面となることから、個々の亀裂の開閉合と流体流動挙動の数値モデル化手法について考察を加え、Bed-of-Nails モデルの適用法とそのモデ

ル定数の同定法を明らかにしている。

第4章及び第5章では、2000年11月から2002年8月までの約1.5年にわたって実施された長期循環試験を対象として、第3章で提案した貯留層モデルを用いて解析を行い、提案モデルの妥当性を検証するとともに二層貯留層の特徴について考察している。なお、長期循環試験は注水条件等の違いから第1期～第3期の期間に分けられる。そこで、第4章では、深部貯留層に注水した第1期の循環試験を対象として数値シミュレーションを行い、提案した貯留層モデルを用いると循環試験における種々の計測結果がよく再現されることを確認している。さらに、計測結果と解析結果に基づいて、深部貯留層へ注水した場合の浅部・深部貯留層の生産特性や抽熱特性を評価し、初期の段階では生産井 HDR-2a に浅部貯留層からの生産寄与があったが、その後寄与が無くなったこと、生産井 HDR-3 では浅部貯留層からの寄与が優勢であったこと、試験期間中に深部貯留層の一部でその透水性が変化したこと、などを明らかにしている。

第5章では、浅部及び深部貯留層への同量注水が実施された第2期及び第3期を対象としている。特に、第1期の計算結果から初期条件を与えて第2期以降の数値シミュレーションを行い、浅部・深部貯留層に対して同時注水した場合の両貯留層の生産・抽熱特性を評価するとともに、貯留層相互の干渉効果について分析している。そして、浅部貯留層からの生産寄与により生産井 HDR-2a の坑口温度が回復すること、浅部貯留層と深部貯留層への注入流量の変化に伴って各貯留層からの生産流量が変化し、その結果、生産井 HDR-2a からの生産流量が減少することなど、二層貯留層の複雑な流動挙動を具体的に明らかにしている。

第6章では、肘折貯留層から長期間にわたって効率の良い抽熱を行うための注水条件について論じている。まず、肘折貯留層に対する最適な総注水流量を求め、次に、種々の注水条件、すなわち、最適総注水流量を浅部及び深部貯留層へ個別注水した場合と同時注水した場合など、に対して10年間の予測計算を行っている。そして、長期間の生産・抽熱特性を考えた場合には、深部貯留層から浅部貯留層への流入を生じさせない注水条件が回収率・抽熱量の上で最良であることを明らかにしている。さらに、モデル定数を変化させた解析から、貯留層の透水性を変化させることでより効率的な抽熱が可能になることを指摘している。

第7章では、長期循環試験の最終段階で実施された発電試験の結果を示すとともに、高温岩体の商業発電の可能性について考察している。特に、30MW 程度の発電を目標とした場合の多層貯留層システムの要件について論じている。

第8章は結論であり、本研究で得られた成果をまとめている。

これを要するに、著者は、多層貯留層評価のための数値モデルを提案するとともに、これを用いて2層貯留層における熱水循環と生産・抽熱特性を解明しており、地熱工学ならびに地圏工学の発展に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。