

人工トレーサーを利用した熱水系の 化学的調査・評価手法(1)

茂野 博 (地殻熱部)
Hiroshi SIGENO

1. はじめに

それぞれの地熱地域において合理的な地熱開発を行うためには、まず対象地域の地下における地熱資源の質的・量的な分布状況を明らかにすることが基本的に必要である。また、その地熱資源の生成機構を把握することがいろいろな意味で望ましい。地熱開発が進んだ段階では、地熱流体の生産・還元に伴う地下状況の変化の実態とその原因を明らかにすることが開発の長期的な安定化や拡大化を図る上で重要となる。このような地熱資源の調査・探査・モニタリング・解析・評価・変化予測等の方法については、いろいろな手法が試みられ、実用化されてきた(例えば、湯原 1982)。

熱水系地熱資源に対する人工的な化学トレーサー手法の利用は、地熱発電用の蒸気の採取に伴われて生産される熱水を環境保全のために地下に還元しなければならない場合に、相対的に低温・高圧の還元熱水が地熱貯留層に及ぼす影響を明らかにすることを主要目的として開始された。不用な地熱熱水の地下還元処理が世界に先駆けて始められた日本では、1975年頃から人工トレーサーテストが試みられ、後述するように基本的な手法を用いて多くの新知見がもたらされた。その後アメリカ合衆国やニュージーランドなどでは、地熱貯留層における地熱流体の動きを直接的に把握するための手法として、また地熱貯留層の規模・特性を明らかにするためのデータを提供する有力な手法として、より積極的な人工トレーサーテストが放射性核種の利用、各種のデータ解析法の適用、高温岩体人工熱水系開発への応用、熱反応性のある物質のトレーサーへの利用などを含めて行われて来ている。

本説では熱水系の化学的探査・評価等の手法の1分野として人工トレーサー手法を取り上げ、その利用の現状について体系的な紹介を試みた。取りまとめにあたっては、HORNE (1986)、藤井 (1982)、千田・新堀 (1986) 等の熱水系における人工トレーサー手法についての総説を参考とした。

重点を置いた人工トレーサーデータの解析法については、解析の具体的な目標、解析過程の概要、式・パラメーターの概念的な意味等の理解が容易となるような取り

まとめに努力した。しかし、筆者の力不足により結果は必ずしも十分なものにならなかったかもしれない。解析法に関して使用した順解析 (Forward Problem) 逆解析 (Inverse Problem) という言葉は物理探査でよく用いられるが、次のことを意味している。

順解析：モデルから導かれる式について適当にパラメーター値を変えて計算した理論値とこれに対応する観測値とを比較し、前者を後者に近づけていくことによりパラメーター値の推定とともにモデルの妥当性の検討等を行う方法。

逆解析：モデルから導かれる式に観測値を直接入れ、最小2乗法のような方法で式を解いてパラメーター値を算出するとともにモデルの妥当性の検討等を行う方法。

順解析、逆解析ともに、良質で十分な量のデータがあるにもかかわらず満足な解が得られない場合には、さらにモデルを修正することにより解析を進めていくこととなる。

本説では、基本的に複数の孔井を用いて孔井間の人工トレーサーの移動を観測・解析する手法について取りまとめた。各単独の孔井について人工トレーサーを用いてその孔井周辺における地熱流体の流れの速さ・方向、地層・岩石の孔隙率などを明らかにする方法については、地下水帯水層についての人工放射性核種トレーサー手法を取り扱った DROST and KLOTZ (1983)、IAEA (1983)、GASPAR and ONCESCU (1972) などが参考になると思われる。

本説は、国際協力事業団 (JICA) の研修制度により筆者が1985年10月から1987年9月の間、米国地質調査所 (USGS, Menlo Park) に滞在中に、今後の発展が期待される深部地熱貯留層の化学的探査・評価手法について模索する過程でまとめられたものである。天然放射性核種トレーサーを利用した熱水系の化学的調査・評価手法については、今後別の機会に総括的に紹介したい。

取りまとめにあたっては、地殻熱部の金原啓司、野田徹郎、および石戸恒雄の各氏から貴重な御意見をいただいた。1986年6月の米国ニューメキシコ州の Fenton Hill 地域における高温岩体人工熱水系の放射性核種を用いる人工トレーサーテスト施設の現地見学では、当時 Los Alamos 国立研究所に滞在していた電力中央研究所

(現在岐阜大学)の金折裕司および公害資源研究所の松永烈の両氏に便宜を計っていただくとともに 有益な御意見をいただいた。米國地質調査所の Alfred H. Truesdell および Steve E. Ingebritsen の両氏からは各種の文献を紹介していただいた。以上の方々に記して感謝します。

最後に 本説では方程式の表示方法 物理パラメーターの記号等については統一せず 基本的に原典に従ったことをお断りする。

2. 熱水系における人工トレーサー手法の概要

2.1. 地下水文学的トレーサー手法

一般にトレーサーとはある環境下のある過程におけるある物質の挙動を知るために添加され 観測される物質のことである。基本的な条件として トレーサー物質は研究の対象となる過程において問題の物質と同一の挙動を示さなければならないと同時に 問題の物質から区別して測定されるものでなければならない。

トレーサー手法は 地下水文学的な調査・研究において様々な目的で使用されているが 大きく天然トレーサー手法と人工トレーサー手法とに区別することができる。

天然トレーサー手法は 意図的に対象となる地下水系にトレーサー物質を添加するのではなく 何らかの自然の原因により(非意図的・非直接的な人工的作用も含める)地下水系に対して時間的・空間的な供給量の変化のある物質 あるいは逆に供給量は安定しているけれども放射線変化によって規則的に減少する物質等をトレーサーとして利用するものである。天然トレーサー手法の長所は過去の自然現象をトレーサーの系への添加と見なして長期的・広域的な地下水の流動状況を把握できる点にある。一方 その短所としては トレーサー物質の添加条件の制御が不可能なために利用できるトレーサーの種類が限定されるとともに 一般に狭い地域における短期的な過程は把握し難いことがあげられる。

これに対して 人工トレーサー手法は意図的に対象となる地下水系にトレーサー物質を添加するもので その長所としてはトレーサー物質の選択を始めて十分に設計された繰り返しての実験が対象となる系で可能なことがあげられるが 一般に長期的・広域的な過程の把握は困難である。

人工トレーサーとして用いられる物質は 地下における水の移動・貯留状況を明らかにし またこれを通じて帯水層・貯留層の状態・特性を明らかにするために 基本的に下記の条件を満たす必要がある。

- (1) トレーサー物質は 調査の対象となる過程において水と同一の挙動を示すこと。もしトレーサー物質が地層・岩石との化学反応等により選択的に除去・添加されたり その流動が遅延したりする場合にはその影響の補正が可能でなければならない。
- (2) トレーサー物質が放射性物質である場合には その半減期は調査の対象となる過程に要する時間と同じオーダーかまたは十分に長いこと。
- (3) トレーサー物質の水系への添加及び必要な精度での測定が容易かつ経済的に行えること。
- (4) 調査の対象となる水系におけるトレーサー物質のバックグラウンド値が十分低いこと。もし高い場合には十分安定していること。
- (5) 水系へのトレーサー物質の添加によって調査の対象となる過程が受ける影響が無視できるほど小さいこと。
- (6) トレーサー物質が実験上安全に取り扱えるとともに環境上悪い影響を生じないこと。

人工トレーサー手法では データ解析を容易にするために 一般に調査の対象となる地下水系への各トレーサー物質の投入は水溶液の形で空間的には点状に 時間的にはパルス状あるいは一定濃度連続状(十分長い時間)のどちらかで行われ 観測は多数の点で時間的には連続的にあるいは不連続多数回行われる。

このような人工トレーサーテストに用いるトレーサー物質の種類・量 トレーサーの投入・観測法 データの解析方法等の選択は トレーサーテストの目的 技術的制約 環境的条件 予算等によって大きく異なってくる。しかし いずれにしてもトレーサーテスト開始前の既存のデータに基づく地下の水文学的な状況の予測とこれを基にした周到なテスト計画の作成が重要である。

人工トレーサーテストによって得られるデータは 一般に各観測点について横軸にトレーサーの投入後経過した時間あるいは累積流体通過量 縦軸にトレーサー濃度あるいは累積トレーサー観測量を取った時系列データとして表示される。

2.2. 熱水系における人工トレーサーテストの目的

熱水系の化学的調査・評価手法として人工トレーサー手法を用いる目的は 以下の6点にまとめられる。

- (1) 地熱貯留層における地熱流体の流動の速さ・方向流路を明らかにする。
- (2) 開発された地熱貯留層において生産一還元される地熱流体の中で還元一生産の速い循環を行っているものの割合を推測する。
- (3) 地熱貯留層の内部に存在する地熱流体の総量を推測

する。

- (4) 地熱貯留層における地熱流体の流動様式を明らかにする。
- (5) 地熱貯留層の物理パラメーター値を推測する。
- (6) 地熱開発によって生じる貯留層内部およびその周辺の地熱流体の移動・貯留状況の変化を推測する。

究極的には 人工トレーサーテストデータを他の様々な調査・探査・モニタリングデータと組合せて総合的な解析を行うことにより 自然状態での熱水系の実態を明らかにし 開発による地熱貯留層の変化を解明・予測することを通じて 各々の熱水系地熱資源についてより合理的な開発システムの設計・構築（生産井—還元井の配置採取—還元圧力・速度の設定等）を行うことが可能になるとと思われる。

2.3. 熱水系で使用される人工トレーサー物質の種類と量

熱水相が卓越する熱水系では 前述した条件を満たす人工トレーサー物質として 主に有機化合物 ハロゲン元素および放射性核種が用いられている。

(1) 有機化合物としては 主にフルオレセインやローダミンWTなどの染料が利用されている。染料トレーサーは 取り扱いが非常に簡単で蛍光光度法などにより現地での測定も容易であり バックグラウンド値が低く $0.1\mu\text{g/l}$ 程度の低濃度でも検出することが可能である。特に大きな長所として低価である。染料トレーサーの大きな短所としては 熱によって分解するために高温の熱水系では長期間あるいは精密なトレーサーテストに使用するのが困難であることがあげられる。しかしこの熱分解性により染料トレーサーは地熱貯留層において短時間で消滅するために 同一トレーサー物質を用いた繰り返しのテストを行うことが可能となる。後述するように これらの染料以外の耐熱性が高い有機化合物のトレーサーとしての使用の可能性も検討されている。一方 各種の比較的熱分解性の高い有機化合物を熱分解性のない物質とともにトレーサーとして併用することにより 地熱貯留層中の温度分布の変化を感度よく定量的に明らかにする試みも行われている。

(2) ハロゲン元素としては 主に熱水中の溶存量が少ないヨウ素 (I) が KI の水溶液の形で投入されているが 臭素 (Br) も同様に用いられている。ハロゲン元素トレーサーは 取り扱いが比較的簡単で吸光光度法やイオンクロマト法などにより測定も比較的容易であり 0.01mg/l 程度の低濃度でも安定した測定を行うことが可能である。また ハロゲンイオンは採取された熱水試料中でも非常に安定しているために 長期の保存に耐

え再分析を行うことが可能である。ハロゲン元素トレーサーの欠点としては 一般にバックグラウンド値が高いために多量のトレーサー量を必要とし高価であること 投入時にトレーサー濃度が極端に高い場合は貯留層を構成する地層・岩石との反応を生じるためにデータの解析が難しくなること (HORNE *et al.*, 1982) などがあげられる。また ハロゲン元素トレーサーは長期的に熱水中に残留するため 繰り返しのトレーサーテストの実施に問題が生じる。一方 この残留性を利用して後述するように地熱貯留層中に存在する熱水の総量を推定する試みも行われている。(ただし 開発された地熱貯留層においては蒸気の生産や地下水の浸入により熱水中のハロゲンイオン濃度は長期的には大きく変動している可能性が高いため この方法の適用については十分な注意が必要であると思われる。) この他の元素・無機化合物トレーサーとして リチウム (Li) や硝酸イオン (NO_3) の利用も試みられているが 地層・岩石との反応性等が存在するために精密なトレーサーとしての使用には問題があると考えられる。意図的に注入される人工トレーサーではないが 地下還元される熱水中に蒸気 の分離によって濃縮する塩素 (Cl) や大気から溶解する窒素ガス (N_2) 等もトレーサーとして利用することが可能である。また 地下還元される熱水中にヘリウム (He) 等の非反応性のガスを溶解させて人工トレーサーとして利用することも可能かもしれない。

(3) 放射性核種としては 主にハロゲン元素の放射性核種である ^{131}I と ^{82}Br に加えて水素の放射性同位体である ^3H (トリチウム) が利用されている。 ^{131}I ^{82}Br ^3H はそれぞれ 8.05d 35.3h 12.3y の半減期を持ち 前2者は β 壊変の他にエネルギーレベルの高い γ 壊変を行うためにシンチレーションカウンターなどにより野外での高精度の連続測定が可能である。一方 ^3H は低エネルギーレベルの β 壊変のみを行うために野外での測定は困難であるが その半減期が長いのでシンチレーションカウンターなどにより実験室において高精度の安定した測定が可能である。放射性核種トレーサーは ^3H を除いて使用量が極く少量で済むこと 高精度の連続測定が可能であること バックグラウンド値が低いこと データの解析が容易であること 短い休止期を置いての繰返しのテストの実施が可能であることなどを大きな長所としている。一方 短所としては実験の安全性の確保のために特別なトレーサーの投入装置・技術が必要であること 半減期が短い場合には迅速な放射性核種トレーサーの運搬・投入・測定作業が必要であること 測定機器がかなり高価であることなどがあげられる。最も大きな問題は 放射性核種の地下水学的なトレーサー

第1表 熱水系における人工トレーサーテストで使用されている放射性核種の種類とその量 (HORNE, 1986)

Field	Tracer	Quantity(GBq)
Wairakei, N. Z.	I ¹³¹	150
	Br ⁸²	3.1
Broadlands, N. Z.	I ¹³¹	150
Tongonan, Philippines	I ¹³¹	25
Ahuachapan, El Salvador	Tritium	n. a.
The Geysers, U. S. A.	Tritium	740

テストへの使用は環境上の問題から一般に行政上の手続きが必要であり その使用が許可されない場合もあることである。半減期の長い³Hについては 広域的な地下水-熱水系における水の移動・貯留を明らかにする目的で天然放射性核種トレーサーとしての利用が重要であること また繰返してのテストが困難であることなどから人工トレーサーテストに使用された例は少ない。この他に 放射性核種トレーサーとしては ³⁶Cl ¹²⁵I ³⁵S (半減期はそれぞれ約 3×10⁶ y 60 d 88 d) などの利用の可能性も検討されており (McCABE *et al.*, 1983) 重金属元素の放射性核種のキレート化合物なども利用できるかもしれない。FLORES *et al.* (1982) は ¹⁹²Ir (半減期74d) の使用を試みている。一方 重金属元素 (例えば Dy In Eu) のキレート化合物を人工トレーサーとして投入-採取し 後で放射化分析等により検出する方法 (アクチバブル・トレーサー) もある (例えば CHRYSIKOPOULOS and KRUGER, 1986)。

蒸気相が卓越する熱水系では 上述した人工トレーサー物質の多くは 350°-400°C 以下では揮発性が低く蒸気中にはほとんど存在できないため使用できない。この結果蒸気卓越系での人工トレーサーテストの実施例は限られている。しかし 蒸気卓越系においても水の構成核種である³Hは人工トレーサーとして利用可能であり 前述した He等の非反応性ガスのほか NH₃ Bなども人工トレーサーとして利用できる可能性がある (野田 私信)。

熱水系において人工トレーサーテストに使用されるトレーサーの量は テストの目的 貯留層の規模・特性 注入井-観測井間の距離 トレーサーのバックグラウンド値・分析精度等に応じて大きく異なる。テストに必要なトレーサー量の見積り方法については HORNE (1986) 藤井 (1982) などに概要が述べられている。

現在までに実施・報告された地熱地域における代表的な人工トレーサーテストで用いられたトレーサー物質の種類とその量を 放射性核種とそれ以外に分けて第1表および第2表 (HORNE, 1986) に示す。

第2表 熱水系における人工トレーサーテストで使用されている非放射性トレーサーの種類とその量 (HORNE, 1986)

Field	Tracer	Quantity (kg)
Kakkonda, Japan	KI	1000
	KBr	2000
Onuma, Japan	KI	500 or 250
Otake, Japan	KI	800
Hatchobaru, Japan	KI	800
	fluorescein	10
Los Azufres, Mexico	KI	900
Klamath Falls, Oregon	KI	250

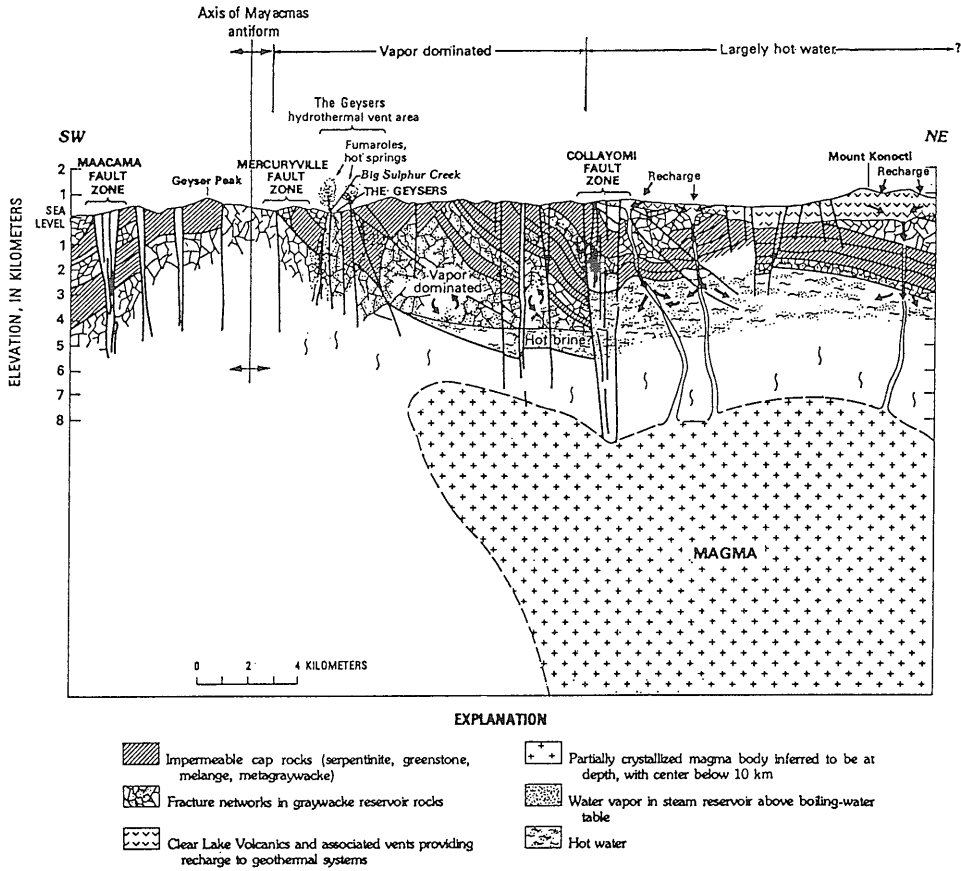
2.4. 熱水系で用いられる人工トレーサーテストの方法

人工トレーサー手法は 熱水系においては地熱貯留層に掘削され定期的に稼働中の還元井および生産井を用いて 前者をトレーサーの投入井 後者をその観測井として数10日-数100日の期間に渡って実施されている場合が多い。地熱貯留層の総合的な理解のためには 多数の観測井が利用できることが必要であるとともに 異なる投入井を用いたトレーサーテストが実施されることが望ましい。

熱水系における人工トレーサーテストでは 一般にパルス状-スラッグ状のトレーサーの投入様式がとられている。この方法は 一定濃度連続状のトレーサーの投入に比較して使用するトレーサーの量が少なく済むために経済的であることおよび人工トレーサーテストが引き起こす熱水系の化学的変化が小さいことを長所としている。ハロゲン元素トレーサーのように量が多い場合パルス状-スラッグ状のトレーサーの投入時にトレーサー濃度の鋭いピークを形成するためには 投入方法に工夫が必要である (HORNE, 1987)。

パルス状のトレーサーの投入様式が取られた場合 トレーサーの観測にあたってはトレーサーの出現 ピークの通過等を見落さないように十分高い頻度で測定試料を採取するとともに 高い精度で測定を行う必要がある。しかし 後述するように時間の経過とともにトレーサーは地熱貯留層中で分散するため 観測井における試料採取の時間間隔は広げていくことができる。なお ハロゲン元素等を人工トレーサーとして使用する場合には 熱水中のバックグラウンド値の変動を明らかにするために熱水試料の採取・分析はトレーサーの投入のかなり以前から行わなければならない。

放射性核種トレーサーの投入・観測方法については MCCABE *et al.* (1983) TESTER *et al.* (1982) などが非放射性トレーサーの投入・観測方法については 伊東ほか (1978) GUDMUNDSSON *et al.* (1983) などが具体的な例として参考になると思われる。



第1図 The Geysers 地域における地質構造に重点を置いた熱水系の概念モデル (MCLAUGHLIN, 1981)

3. 地熱貯留層モデル

3.1. 地熱貯留層モデルの概要

ここでは本題の人工トレーサー手法からはやや離れるが 5.に述べるトレーサーテストデータの解析法の説明を分かり易くするために 基礎として地熱貯留層における水と熱の移動と貯留に関するモデルについて概説する。

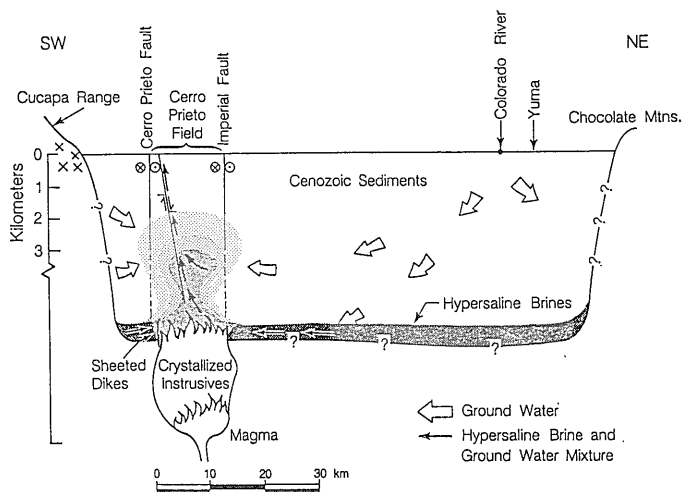
地熱地域の地下では マグマから放出される高温熱流体の流入 マグマからの熱伝導あるいは広域的な地下深部からの熱伝導等により 降水 海水等を起源とした地下水から熱水・蒸気が生成し 地質構成・構造分布に規制されて特定の場所で地層・岩石中の孔隙や断裂中に保持されている。このような地熱流体の生成・分布の場は総括的に熱水系 特に連続した生産が可能な程度に熱水・蒸気が濃集して貯留されている場合は地熱貯留層あるいはリザーバーと呼ばれている。

地熱貯留層においては 自然状態においても熱伝導熱流体の対流 熱水-蒸気間の相変化 気液分離 水塊

間の混合 鉱物の生成・溶解等の様々な現象が生じており 長い時間スケールでは熱源 水の供給源 貯留構造等の変化に応じて地熱貯留層内の状態は大きく変化している。特に開発により地熱流体が孔井を通じて大規模に採取・還元されると 地熱貯留層内の状態の変化は大きく加速されることとなる。

このような自然状態あるいは人工的な影響下における個々の熱水系あるいは地熱貯留層の複雑な実態を解明しその将来の変化を予想することを通じて開発の可能性・経済性・問題点等を明らかにするために 地表からあるいは孔井を通じた調査・探査・モニタリング等で得られた各種のデータを用いて これらのデータおよびデータ間の関係を合理的に説明する総合的な熱水系モデルあるいは地熱貯留層モデルが構築される。

個々の熱水系あるいは地熱貯留層において最も基本的でまた重要な水と熱の移動と貯留についての総合的なモデルは その性格に応じて概念モデル ランプドパラメーターモデル (タンクモデル) 分布パラメーターモデル



第2図 Cerro Prieto 地域における水の流動に重点を置いた熱水系の概念モデル (HALFMAN *et al.*, 1986)

の3種類に分類される。

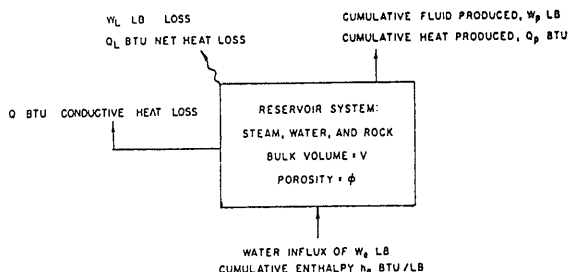
このような各種の地熱貯留層モデルの概要については 在原 (1982) MERCER and FAUST (1980) GARG and KASSOY (1981) GRANT *et al.* (1982) GRANT (1983) などによってもまとめられているが 以下にそれぞれの内容を簡単に紹介する。

3.2. 概念モデル

概念モデルは 一般に広く熱源の位置と熱水系の加熱機構 水の起源と広域的な流動の方向等を含めて 貯留層の分布と構成 貯留層内の地熱流体の相・温度・圧力分布 流動方向・様式などを概念的・定性的に示すもので 以後のより定量的なモデル化の基礎となるものである。第1図および第2図には このような概念モデルとして The Geysers (McLAUGHLIN, 1981) と Cerro Prieto (HALFMAN *et al.*, 1986) の例を示す。

3.3. ランプドパラメーターモデル

ランプドパラメーターモデルは 地熱貯留層を1つの均一な領域あるいは少数の均一な領域の集合体と見なして貯留層内部の流体存在量 温度 圧力 蒸気-熱水比 有効孔隙率 外部に対する流体質量とエネルギーの収支等を示すものである。開発された地熱貯留層が均一と見なせ 貯留層内部の温度 圧力 蒸気-熱水比 孔井を通じた流体生産-還元量 エネルギー生産-還元量等の経年変化データが利用できる場合には ランプドパラメーターモデルに基づく質量保存式 エネルギー保存式 貯留層容積の保存式 貯留層の圧力と生産される地熱流体量の関係式 貯留層の圧力と外部から地熱貯留層に供



第3図 Wairakei 地域における地熱貯留層のランプドパラメーターモデル (WHITING and RAMEY, 1969)

給される地熱流体量の関係式等を用いて逆解析あるいは順解析を行うことにより 上述した物理量 パラメーターのうち未知のものを求めることができる。また この結果を利用して 仮定された今後の生産スケジュールに基づき将来の貯留層内部の温度 圧力等の変化を予想することが可能となる。

このようなランプドパラメーターモデルの1つとして不完全ながら WHITING and RAMEY (1969) によって試みられた Wairakei 地域の例を第3図に示す。

3.4. 分布パラメーターモデル

分布パラメーターモデルは 地熱貯留層の内部およびその周辺部についてこれらを領域として代表する多数の点における透水性 熱伝導率等のパラメーター値と温度 圧力 蒸気-熱水比等の状態量の空間的な分布とその時間的な変化 および地熱流体の質量・エネルギーの移動速度とその時間変化等を示すものである。このモデルは 基本的に各代表点における質量保存式 エネルギー

保存式 運動量保存式を連立方程式として解くことにより実体化されるが このためには以下のような多数の項目について測定データあるいは合理的な仮定が必要となる。

- (1) 貯留層の空間的な分布
- (2) 貯留層における地熱流体の流動・貯留様式：孔隙媒体 断裂媒体 孔隙—断裂媒体など
- (3) 貯留層における固定相の物理パラメーター値の分布：密度 孔隙率 透水率 比熱 熱伝導率など
- (4) 貯留層における流動相の物理パラメーター値の分布：密度 粘性率 比熱など
- (5) 一定時における貯留層内部の状態量の分布（初期条件）：圧力 温度 単位容積あたりのエンタルピー 蒸気—熱水比など
- (6) 貯留層の内部と外部との間の流体質量とエネルギーの収支（境界条件）
- (7) 孔井の分布および仕様：位置 深度 ケーシング仕様など
- (8) 孔井の生産・還元ヒストリー：生産・還元流体の温度・圧力 質量・エンタルピーの生産・還元量の時間変化など

(3)および(4)に示した物理パラメーター値の多くは 温度・圧力などへの依存性を顕著に示すため その補正を解析に組み込む必要がある。

上述の連立した方程式は 通常3次元の非線形偏微分方程式であり解析的にこれを解くことは不可能であるため 電子計算機を使用して差分法や有限要素法などを用いた数値シミュレーションが行われ 順解析的に分布パラメーターモデルが実体化される。数値シミュレーションにあたっては大規模な電算機プログラム（数値シミュレーター）が必要となるが その作成およびこれを用いた計算処理を現実的で容易なものとするために様々な仮定や近似を行う必要がある。

地熱貯留層についての分布パラメーターモデルを解くために FAUST and MERCER (1979a 1979b) が差分法を用いて作成した汎用シミュレーターの例を以下に示す。

基礎となる方程式は (1) (2) (3)および(4)に示す質量保存式 エネルギー保存式および運動量保存式である。

$$\frac{\partial(\phi\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_s \vec{V}_s) + \nabla \cdot (\rho_w \vec{V}_w) - q_s' - q_w' = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \{ \phi \rho h + (1-\phi) \rho_r h_r \} + \nabla \cdot (\rho_s h_s \vec{V}_s) + \nabla \cdot (\rho_w h_w \vec{V}_w) - \nabla \cdot (K_m \nabla T) - q_s' h_s - q_w' h_w = 0 \quad (2)$$

$$\vec{V}_s = -\frac{\vec{K} k_{rs}}{\mu_s} \cdot (\nabla P_s - \rho_s g \nabla D) \quad (3)$$

$$\vec{V}_w = -\frac{\vec{K} k_{rw}}{\mu_w} \cdot (\nabla P_w - \rho_w g \nabla D) \quad (4)$$

ただし $S_s + S_w = 1$

$$\rho = S_s \rho_s + S_w \rho_w$$

$$h = (S_s \rho_s h_s + S_w \rho_w h_w) / \rho$$

S : 流体の体積存在率

T : 絶対温度

P : 流体圧力

h : 単位容積あたりのエンタルピー

\vec{V} : 流体速度

q' : 単位時間あたりの系への流体の流入量

g : 重力定数

D : 深度

ρ : 流体・岩石の密度

ϕ : 孔隙率

\vec{K} : 固有透水率テンソル

k_r : 流体の相対的透水率

μ : 流体の動的粘性率

K_m : 熱伝導—分散係数

s : 水蒸気の

w : 熱水の

r : 岩石の

この例では 以下の3つの重要な仮定が行われている。

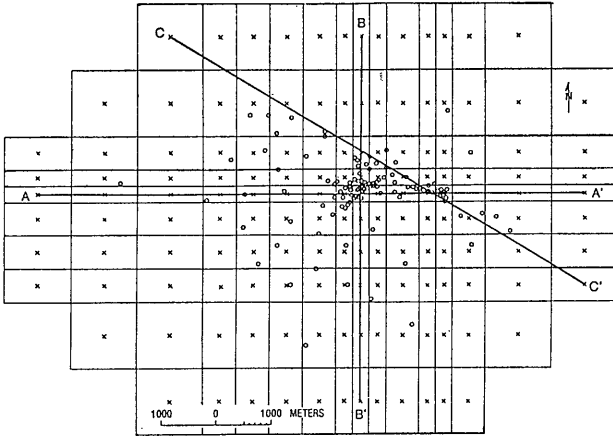
- (1) 毛細管圧力効果は無視できる。
- (2) 個々の点が代表する領域では水蒸気 熱水 岩石間に熱平衡が成立する。
- (3) 熱水・蒸気を構成する水は純水で 溶存物質 ガス等の存在とその影響は無視できる。水—岩石間の化学反応は存在しない。

MERCER and FAUST (1979) がこの数値シミュレーターを用いて Wairakei 地域の開発された地熱貯留層について水平2次元に圧縮した分布パラメーターモデルを作成し これに基づいて地熱貯留層の将来予想を行った例を第4図～第6図に示す。

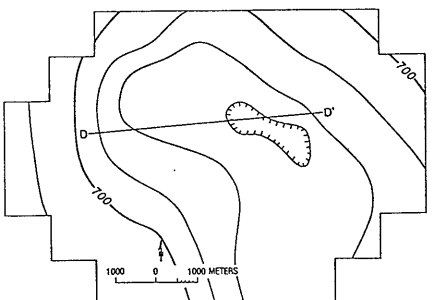
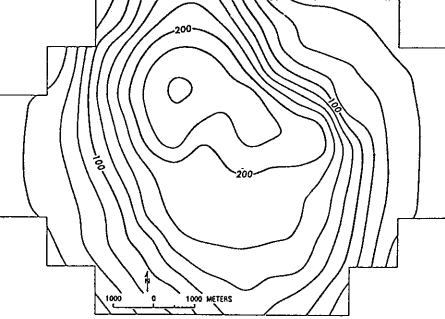
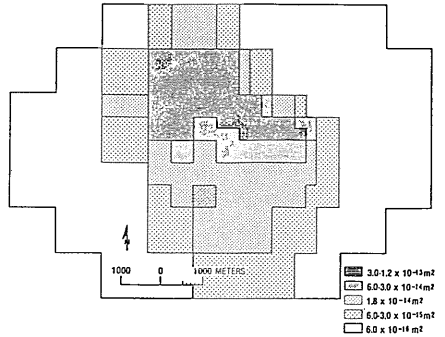
4. 熱水系におけるトレーサーの動き

4.1. トレーサーの質量保存式

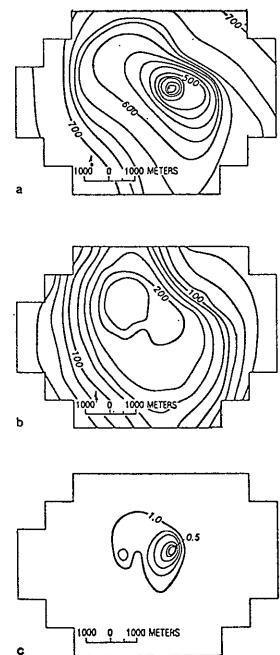
ここでは JAVANDELL *et al.* (1984) によって 分布パラメーターモデルに基づく地熱貯留層における人工トレーサーテストデータの解析の基礎となる流体中の化学物質の質量保存式を説明する。ランプドパラメーターモデルに基づく地熱貯留層における人工トレーサーテストデータの解析に関係が深い畳み込み式 インパルス応答式等については例えば YURTSEVER (1983) 岩井ほか



第4図 Wairakei 地域の地熱貯留層の分布パラメーターモデルに基づく数値シミュレーション(差分法)に用いられた格子(MERCER and FAUST, 1979)
○印は孔井位置 ×印は格子ブロックの中心を示す。



第5図 Wairakei 地域における (a)Waiora 貯留層の水平方向の透水性の分布 (b)Waiora 貯留層中の垂直方向に平均化された定常温度の観測値分布(°C コンター間隔 25 °C) (c)平均海面レベル下-274mにおける定常圧力の数値シミュレーションによる計算値分布(N/m²×10⁴ 絶対値 コンター間隔 25×10⁴ N/m²) (MERCER and FAUST, 1979)



第6図 Wairakei 地域において分布パラメーターモデルに基づいて数値シミュレーションにより予測された西暦 2000 年における(a)海面レベル下-274mの圧力(N/m²×10⁴)の分布 (b)Waiora 貯留層の垂直方向の平均温度(°C)の分布 (c)同じく熱水存在率の分布(MERCER and FAUST, 1979)

(1980) 土木学会 (1985) が参考になる。
 前述した質量保存式(1) エネルギー保存式(2)とは表示方法が異なるけれども 地熱貯留層の各代表的における人工トレーサー物質の質量保存式は(5)で表現することができる。ただし この場合には地熱貯留層内の流体相としては一定温度の熱水のみが存在することを仮定している。また 前述した流体の運動量保存式は(6)で表示した。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (C V_i) - \frac{C' W^*}{n} + \sum_{k=1}^N R_k \quad (5)$$

$$V_i = \frac{-K_{ij}}{n} \frac{\partial h}{\partial x_j} \quad (6)$$

ただし C : 流体中のトレーサー濃度
 D_{ij} : トレーサーの分散係数テンソル
 V_i : x_i 方向への流体流動の移流速度
 C' : 系から流出する流体中のトレーサー濃度
 W^* : 単位時間・単位体積あたりの系からの流体の流出量
 n : 有効孔隙率
 R_k : k 番目の反応による単位時間・単位体積あたりの流体中のトレーサー物質の増加量
 K_{ij} : 透水率テンソル
 h : 全水頭
 x_i : デカルト座標

流体中のトレーサーが貯留層において固相と平衡的なイオン交換反応のみを行う場合には (7)が成立すると見なせる。

$$\sum_{k=1}^N R_k = -K_d \frac{\rho_b}{n} \frac{\partial C}{\partial t} \quad (7)$$

ただし K_d : 固相と液相間のトレーサー物質の分配係数
 ρ_b : 固相の密度

トレーサーが非反応性の放射性物質である場合には(8)が成立する。

$$\sum_{k=1}^N R_k = -\lambda C \quad (8)$$

ただし λ : トレーサー物質の壊変定数

トレーサーが放射性物質で 固相と平衡的なイオン交換反応のみを行う場合には (5)は(9)となる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (C V_i) - \frac{C' W^*}{n} - \lambda C R \\ = R \frac{\partial C}{\partial t} \end{aligned} \quad (9)$$

ただし $R = (1 + \rho_b K_d / n)$

簡単な場合として 2次元の媒体中で放射性・反応性のあるトレーサーが系の外部に対して流出・流入がない条件下で流動している時には 流れの方向に x 軸を取ることにより(10)が成立する。

$$D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_T \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - V \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda C R = R \frac{\partial C}{\partial t} \quad (10)$$

ただし D_L : 流れに沿った方向のトレーサーの分散係数
 D_T : 流れに垂直な方向のトレーサーの分散係数
 さらに 1次元の媒体中で トレーサーが非放射性・非反応性物質の場合には より単純化した(11)が成立する。

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (11)$$

第7図は 1次元の均質媒体中において定常流が存在

する時に 非反応性トレーサーがパルス状に投入された場合と一定濃度連続状に投入された場合におけるトレーサー濃度の 時間的・空間的な変化の様子を模式的に示す。同様に第8図は 2次元の均質媒体中において x 軸に沿った方向の定常流が存在する時に トレーサーがパルス状に投入された場合と一定濃度連続状に投入された場合におけるトレーサー濃度の分布の様子を模式的に示す (KINZELBACH, 1986).

4.2. トレーサーの分散

流体が流動する場合に生じるトレーサーの分散は 一般にトレーサーの分子拡散と流れの乱れに伴う機械的混合の結果と見ることができる。

トレーサーの分子拡散については トレーサーの濃度勾配に垂直な方向に(12)が成立する。

$$F = -D^* \frac{\partial C}{\partial x} \quad (12)$$

ただし F : 単位時間あたりのトレーサーの拡散量
 D^* : トレーサーの拡散係数

流体の流動の媒体が均質等方的な多孔質物質である場合には 単純化して(13)および(14)が成立すると見なせる場合が多い。

$$D_L = \bar{D} + \alpha_L V \quad (13)$$

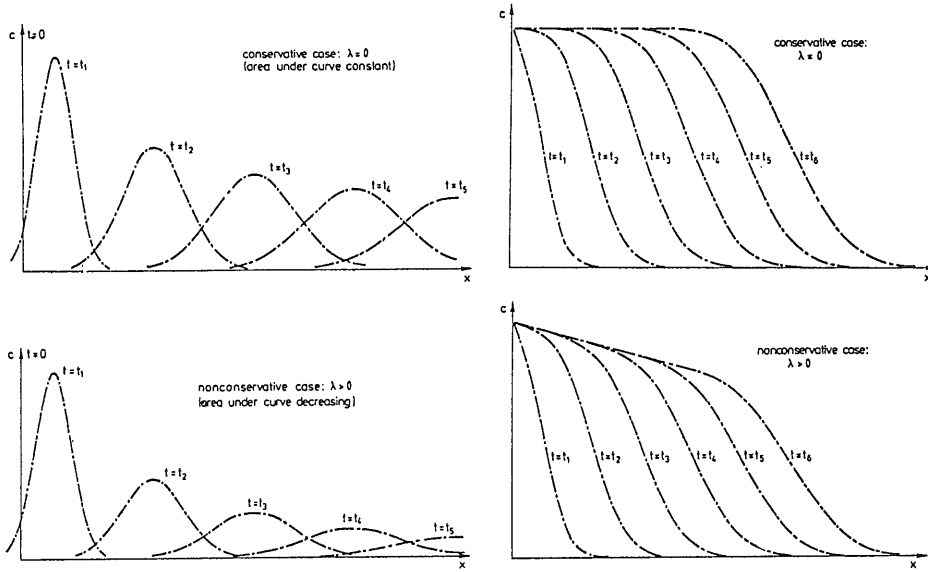
$$D_T = \bar{D} + \alpha_T V \quad (14)$$

ただし D_L : 流れに沿った方向のトレーサーの分散係数
 D_T : 流れに垂直な方向のトレーサーの分散係数
 \bar{D} : 多孔質媒体中のトレーサーの分子拡散係数
 α_L : 流れに沿った方向のトレーサーの機械的混合による分散の流速への依存係数
 α_T : 流れに垂直な方向のトレーサーの機械的混合による分散の流速への依存係数
 なお 一般に α_L は α_T より一桁程度大きく また $\bar{D} = 0.7 D^*$ 程度である。

実際の地熱貯留層では 断裂系の発達等により媒体は均質等方的とは見なせない場合が多い。

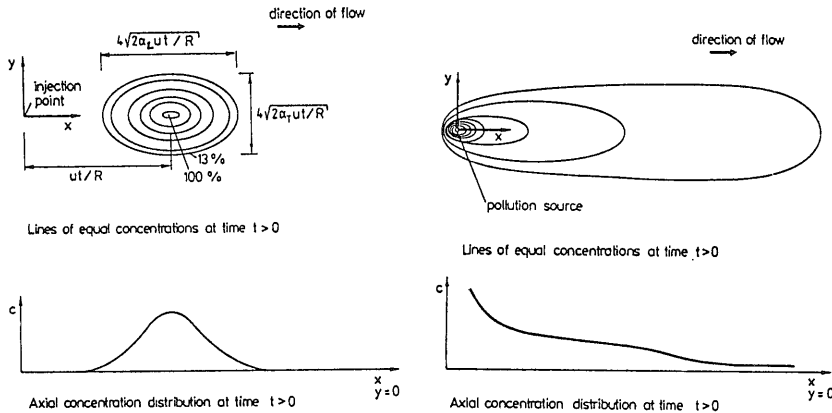
断裂中を地熱流体が速く流れる場合には 流動速度が断裂の中心部では大きく縁辺部では小さいために断裂壁に垂直な方向のトレーサー濃度の勾配が生じるが このトレーサー濃度の不均一性は断裂壁に垂直な方向の分子拡散によって解消されていく。この結果は地熱流体の流れに沿った方向のトレーサーの分散として表れ テーラー分散と呼ばれている。テーラー分散の分散係数は(15)で表せる (HORNE and RODRIGUEZ, 1983; HORNE et al., 1985).

$$\eta = \frac{2}{105} \frac{b^2 V^2}{D^*} \quad (15)$$



第7図 一次元の均質媒体において定常流が存在する場合に投入された非反応性トレーサーの濃度の時間的・空間的な変化 (KINZELBACH, 1986)

左の2図はトレーサーがパルス状に投入された場合を 右の2図は一定濃度連続状に投入された場合を示す。また上の2図はトレーサーが非放射性の場合を 下の2図は放射性の場合を示す。



第8図 2次元の均質媒体中においてx軸に沿った方向の定常流が存在する場合に投入された非反応性トレーサーの濃度分布 (KINZELBACH, 1986)

左図はトレーサーがパルス状に投入された場合を 右図は一定濃度連続状に投入された場合を示す。トレーサーの投入場所はそれぞれ $x=0, y=0$ である。

ただし η : トレーサー分散による流れに沿った方向のトレーサーの分散係数

b : 断層の幅の半分

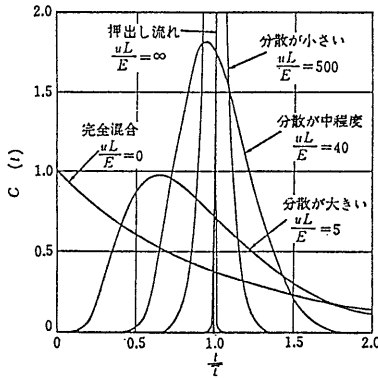
この場合において 地層・岩石の透水性が高い場合にはトレーサーはさらに断層壁を通じて地層・岩石の孔隙中に浸透していくが 断層中をトレーサーを含む速い水塊(スラッグ状)が通過した後は逆に孔隙中から断層中への分子拡散が生じるため より大きなトレーサーの分散が生じることとなる。

複雑な断層系分布に規制されて複数の断層中を地熱流体が流動する場合には 様々な機械的混合によりトレーサーの分散は非常に大きくなる。

トレーサーの流動について 移流速度と分散速度の比較の指標となる無次元のペクレ数 (Pe) は(16)で定義される。

$$Pe = \frac{VL}{D} \tag{16}$$

ただし V : 移流の代表的な速度



第9図 投入井からパルス状に投入された人工トレーサーの観測井における観測濃度の時間変化とペクレ数との関係 (土木学会 1985)

貯留層は1次元で 観測時間は平均トレーサー 通過時間によって無次元化されている。

L : 流動の代表的な距離

D : 流動における代表的な分散—拡散係数

ペクレ数が非常に大きい場合 トレーサーは主に移流によって移動すると見なされ 1次元の媒体中ではピストン流(押し流れ 栓流)モデルを適用することができる。一方 ペクレ数が非常に小さい場合 トレーサーは主に分散—拡散によって移動すると見なされ 完全混合貯留層(完全混合)モデルを適用することができる。ペクレ数が中間的な大きさの場合には完全混合貯留層列(コンパートメント)モデルが適用される 場合がある。

なお (5) (9) (10) (11)はトレーサーの分散モデルに基づいていると言える。これらの各モデルの数学的表現と取り扱いについては 例えば YURTSEVER (1983) 岩井ほか (1980) 土木学会 (1985) などが参考になる。

トレーサーを1本の投入井より地熱貯留層にパルス状に投入し1本の観測井で観測する場合 トレーサーの平均通過時間で規格化したトレーサーの観測時間とトレーサーの観測濃度との関係は (11)の1次元の場合を第9図で示すようにペクレ数に応じて変化する。

本説の5.熱水系における人工トレーサーテストのデータ解析法, 6,熱水系における人工トレーサーテストの実施例および7.おわりには「人工トレーサーを利用した熱水系の化学的調査・評価手法」の(2), (3)として引続き地質ニュース412号, 413号に掲載する予定です。本説の参考文献を以下にまとめて示します。

文 献

ADAMS, M. C. (1985) Tracer stability and chemical changes in an injected geothermal fluid during injection

-backflow testing at the East Mesa geothermal field. *Proceedings of 10th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford Univ.*, p.247-252.

ADAMS, M. C., AHN, J. H., BENTLEY, H., MOORE, J. N. and VEGGEBERG, S. (1986) Tracer developments: Results of experimental studies. *Proceedings of 11th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford Univ.*, p.97-102.

秋林 智 (1982) 還元水の挙動調査. 湯原浩三監修 地熱開発総合ハンドブック p.623-637, フジ・テクノシステム 東京.

在原典男 (1982) 貯留層モデル・スタディ. 湯原浩三監修 地熱開発総合ハンドブック p.638-657, フジ・テクノシステム 東京.

BATCHELOR, A. S. (1986) Reservoir behaviour in stimulated hot dry rock system. *Proceedings of 11th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford Univ.*, p.35-41.

千田 信・新堀雄一 (1986) 地熱貯留層におけるトレーサー応答解析. 地熱エネルギー vol. 11, p.146-157.

CHRYSIKOPOULOS, C. and KRUGER, P. (1986) Thermal stability of chelated indium activable tracers. *Proceedings of 11th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford Univ.*, p.103-107.

土木学会 (1985) 水理公式集 昭和60年版. 625p.

DROST, W. and KLOTZ, D. (1983) Aquifer characteristics. in *Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology*, 1983 ed. 439p., IAEA, Vienna, p.223-256.

EINARSSON, S. S., VIDES, A. and CUELLAR, G. (1975) Disposal of geothermal waste water by reinjection. *Proceedings of 2nd U.N. Symp. on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco 1975*, p.1349-1363.

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (1984a, 1984b, 1986) *Geohydrochemical Models for Solute Migration*, vol. 1, 2, 3. EPRI, Palo Alto, California.

FAUST, C. R. and MERCER, J. W. (1979a, 1979b) Geothermal reservoir simulation, 1., 2. Mathematical models for liquid- and vapor-dominated hydrothermal systems. *Water Resources Res.*, vol. 15, p.23-30, p.31-46.

FETTER, C. W. JR. (1980) *Applied Hydrogeology*. 488 p., Merrill, Columbus, Ohio.

FOSSUM, M. P. and HORNE, R. N. (1982) Interpretation of tracer return profiles at Wairakei geothermal field using fracture analysis. *Geothermal Resources Council Transactions*, vol. 6, p.261-264.

FLORES, R. M., SANCHEZ, J. R., TERRAZAS, B. and ALBARRAN (1982) Aplicacion de tecnicas radioisotopicas en el campo geotermico de Cerro Prieto. *Actas de Cuarto Simposio sobre el Campo Geotermico de Cerro Prieto, Baja California, Mexico, Guadalajara 1982*, p.439-453.

藤井幸夫 (1982) 孔井相互影響調査. 湯原浩三監修 地熱開発総合ハンドブック p.680-685, フジ・テクノシステム

東京.

- GARG, S. K. and KASSOY, D. R. (1981) Convective heat and mass transfer in hydrothermal systems. in RYBACH, L. and MUFFLER, L. J. P. ed., *Geothermal Systems: Principles and Case Histories*, 359p., John Wiley and Sons, Chichester, p. 37-79.
- GASPAR, E. and ONCESCU, M. (1972) *Radio-active Tracers in Hydrology*. 342p., Elsevier, Amsterdam.
- GRANT, M. A. (1983) Geothermal reservoir modeling. *Geothermics*, vol. 4, p. 251-263.
- GRANT, M. A., DONALDSON, I. G. and BIXLEY, P. F. (1982) *Geothermal Reservoir Engineering*. 369 p., Academic Press, New York.
- GUDMUNDSSON, J. S., HAUSSON, T., THORHALLSON, S., ALBERTSSON, A. and THOROLFSSON, G. (1984) Injection and tracer testing in Svartsengi field, Iceland. *Proceedings of 6th New Zealand Geothermal Workshop*, p. 175-180.
- GUDMUNDSSON, J. S., JOHNSON, S. E., HORNE, R. N., JACKSON, P. B. and CULVER, G. G. (1983) Doublet tracer testing in Klamath Falls, Oregon. *Proceedings of 9th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford Univ.*, p. 331-337.
- GULATI, M. S., LIPMAN, S. C. and STROBEL, C. J. (1978) Tritium tracer survey at the Geysers. *Geothermal Resources Council Transactions*, vol. 2, p. 237-239.
- HALFMAN, S. E., MANON, A. and LIPPMAN, M. J. (1986) Update of the hydrogeologic model of the Cerro Prieto field based on recent well data. *Geothermal Resources Council Transactions*, vol. 10, p. 369-375.
- HAYASHI, M., MIMURA, T. and YAMASAKI, T. (1978) Geological setting of reinjection wells in the Otake and the Hatchobaru geothermal field, Japan. *Geothermal Resources Council Transactions*, vol. 2, p. 263-266.
- HORNE, R. N. (1982) Geothermal reinjection experience in Japan. *Jour. Petrol. Technology*, vol. 34, p. 495-503.
- HORNE, R. N. (1985) Reservoir engineering aspects of reinjection. *Geothermics*, vol. 14, p. 449-457.
- HORNE, R. N. (1986) Tracer tests. 20p., *Text of Geothermal Resources Council Course on Testing of Geothermal Wells, Palm Springs* 1986.
- HORNE, R. N., BREITENBACH, K. A. and FOSSUM, M. P. (1982) Retention of chemical tracers in geothermal reservoirs. *Proceedings of 8th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford Univ.*, p. 289-294.
- HORNE, R. N., GILARDI, J. and BOUETT, L. (1985) Dispersion of tracers in fractures - Experiments at Stanford University. *Proceedings of 7th New Zealand Geothermal Workshop*, p. 61-64.
- HORNE, R. N. and RODRIGUEZ, F. (1983) Dispersion in tracer flow in fractured geothermal systems. *Geophy. Res. Lett.*, vol. 10, p. 289-292.
- INOUE, K. and SHIMADA, K. (1985) Reinjection experiences in the Otake and Hatchobaru geothermal fields. *Proceedings of 7th New Zealand Geothermal Workshop*, p. 69-74.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (1983) *Isotope Techniques in the Hydrogeological Assessment of Potential Sites for the Disposals of High-level Radioactive Wastes*. 151 p., IAEA, Vienna.
- 伊東潤二・窪田康宏・黒沢昌志 (1977) 大沼地熱貯留層における地熱熱水の流れ. *地熱* vol. 14, p. 139-151.
- 伊東潤二・窪田康宏・黒沢昌志 (1978) 大沼地熱発電所における地熱熱水のトレーサーテストと地熱貯留層および坑井仕上等の諸考察. *地熱* vol. 15, p. 87-95.
- 岩井重久・住友 恒・松岡 譲 (1980) 水質データの統計的解析. 240 p., 森北出版 東京.
- JAVANDEL, I., DOUGHTY, C. and TSANG, C. (1984) *Groundwater Transport: Handbook of Mathematical Models*. 228p., American Geophysical Union, Washington, D. C.
- JENSEN, C. L. and HORNE, R. N. (1983) Matrix diffusion and its effect on the modeling of tracer returns from the fractured geothermal reservoir at Wairakei, New Zealand. *Proceedings of 9th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford Univ.*, p. 323-329.
- 笠井加一郎・猿舘正大 (1986) トレーサーテストによる貯留層内の熱水流動解析. 日本地熱学会昭和61年度学術講演会講演要旨集 p. 16.
- KINZELBACH, W. (1986) *Groundwater Modelling, An Introduction with Sample Programs in Basic*. 333 p., Elsevier, Amsterdam.
- KOCABAS, I. and HORNE, R. N. (1987) Analysis of injection-backflow tracer tests in fractured geothermal reservoirs. *Abstract of 12th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford Univ.*
- MCCABE, W. J., BARRY, B. J. and MANNING, M. R. (1983) Radioactive tracers in geothermal underground flow studies. *Geothermics*, vol. 12, p. 83-110.
- MCLAUGHLIN, B. J. (1981) Tectonic setting of pre-Tertiary rocks and its relation to geothermal resources in The Geysers-Clear Lake area. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper*, no. 1141, p. 3-23.
- MERCER, J. W. and FAUST, C. R. (1979) Geothermal reservoir simulation, 3. Application of liquid- and vapor-dominated hydrothermal modeling techniques to Wairakei, New Zealand. *Water Resources Res.*, vol. 15, p. 653-671.
- MERCER, J. W. and FAUST, C. R. (1980) The physics of fluid flow and heat transport in geothermal systems. in KESTIN, J. ed., *Sourcebook on the Production of Electricity from Geothermal Energy*, 997 p., U.S. Dept. Energy. p. 121-135.
- OGATA, A. and BANKS, R. B. (1961) A solution of the differential equation of longitudinal dispersion in porous media. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper*, no. 411-A. 7 p.
- ROBINSON, B. A. (1986) A field study of tracer and

- geochemistry behavior during hydraulic fracturing of a hot dry rock geothermal reservoir. *Proceedings of 11th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford Univ.*, p.189-196.
- ROBINSON, B.A., AGUILAR, P.G., KANAORI, Y., TRUJILLO, P., COUNCE, D., BIRDSELL, S. A. and MATSUNAGA, I. (1987) Geochemistry and tracer behavior during a thirty day flow test of the Fenton Hill HDR Reservoir. *Abstract of 12th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford Univ.*
- ROBINSON, B. A. and TESTER, J. W. (1984) Dispersed fluid flow in fractured reservoirs: An analysis of tracer-determined residence time distributions. *Jour. Geophys. Res.*, vol. 89, p.10374-10384.
- TESTER, J. W., BIVINS, R. L. and POTTER, R. M. (1982) Interwell tracer analyses of a hydraulically fractured granitic geothermal reservoir. *Soc. Pet. Eng. Jour.*, vol. 22, p.537-554.
- TESTER, J. W., ROBINSON, B. A. and FERGUSON J. H. (1986) Inert and reacting tracers for reservoir sizing in fractured hot dry rock systems. *Proceedings of 11th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford Univ.*, p.149-159.
- VAN DEL HEIJDE, P., BACHMAT, Y., BREDEHOEFT, J., ANDREWS, B., HOLTZ, D. and SEBASTIAN, S. (1985) *Groundwater Management: The Use of Numerical Models, 2nd ed.* 180p., American Geophysical Union, Washington, D. C.
- VAN GENUCHTEN, M. TH. and ALVES, W. J. (1982) Analytical solutions of one dimensional convective-dispersive solute transport equation. *U. S. Dept. of Agric. Tech. Bull.*, no. 1661, 149 p.
- 和田三郎・大牟田秀文 (1984) 地熱貯留層開発評価手法のシミュレーションによるアプローチ. 地熱エネルギー vol. 9, p.634-650.
- WANG, H. F. and ANDERSON, M. P. (1982) *Introduction to Groundwater Modeling, Finite Difference and Finite Element Methods.* 237 p. Freeman and Company, San Francisco.
- WANG, J. S. Y., TSANG, C. F. and STERBENTZ, R. A. (1982) *The state of the art of numerical modeling of thermo-hydrologic flow in fractured rock masses.* Lawrence Berkeley Laboratory, Report LBL-10524, 243 p.
- WHITING, R. L. and RAMEY, H. J. JR. (1969) Application of material and energy balances to geothermal steam production. *Jour. Petroleum Technol.*, vol. 21, p.893-900.
- 湯原浩三監修 (1982) 地熱開発総合ハンドブック. 1109 p., フジ・テクノシステム 東京.
- 湯原浩三・秋林 智 (1978) 大岳地熱地域における還元熱水の挙動. 日本鉱業会誌 vol. 94, no. 1086, p.1-6.
- YUHARA, K. and AKIBAYASHI, S. (1983) Flow of reinjected water and transmissibility distribution estimated by a tracer test in Otake geothermal reservoir, *Japan. Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 16, p.205-219.
- YURTSEVER, Y. (1983) Models for tracer data analysis. in *Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology, 1983 ed.*, 439 p., IAEA, Vienna, p.381-402.
- ZUBER, A. (1986) Mathematical models for the interpretation of environmental radioisotopes in groundwater systems. in FRITZ, P. and FONTES, J. CH. ed., *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*, vol. 2, 557 p., Elsevier, Amsterdam, p.1-59.