地熱貯留層探査・評価技術の進展

小 川 克 郎*

Recent Advance in Exploration and Evaluation of Geothermal Reservoir

Katsuro OGAWA

I. はじめに

昭和41年に日本重化学工業松川地熱発電所が運開して以来、はや20年の年月が過ぎた。この間、特に昭和40年代末の石油危機を経て、石油代替エネルギーの有力な旗頭として、国や企業による地熱資源開発に係る活動は著しい進展をみた。この結果、1) 多数の地熱地域についての著しい量のデータが集積されるにつれて、2) 地熱貯留層の概念が少しずつ明瞭になってきた。また、3) 幾つかの新しい地熱探査評価の方法が開発された。

しかし、こうした多くの果実の収穫はあったものの、依然として、地熱システムの実体（ネーチャー）はかなり曖昧であり、また、地熱探査・評価のシステムもまだまだ確立に至るにはほど遠いと言わねばならない。“石油鉱床学”、“金属鉱床学”はあつても、末だ“地熱鉱床学”は極く未熟な段階にあるにすぎない。歴史の浅い“地熱学”が成人となるには、今しばし時間の中で熟成をまつ必要があるだろう。“地熱鉱床学”に至る最初の重要な過程は、できるだけ精密な事実（ファクト）の集積であろう。生きている地熱鉱床は、鉱物鉱床とは異なり、直接の露頭観察ができない。従って、地熱鉱床へのアプローチは様々の道具を駆使した間接的な方法によるしかない。事実の集積は、こうした道具の高度化によって促進されるはずである。このような理由により、地熱探査評価技術といった工学的アプローチの精度化が重要な課題として位置づけられる。

II. 地熱貯留層モデルの最近の考え方

日本地熱学会創立5周年行事の一環として「日本の地熱系モデルに対する新しい見方」というテーマのシンポジウムが開催され、後に論文集として出版された**。ここでは、我が国の多くの地熱地域についての地熱貯留層モデルの変遷が論じられているが、その結論は、“多孔質型貯留層から断裂型貯留層へ”のモデル認識の変化としてとらえる事ができる（第1図）。この二つのモデルでは、探査・評価はむしろのこと、掘削にも著しく異った概念を必要とする。一般には、多孔質型貯留層に較べて、断裂型貯留層の探査・評価にはより高度の技術が要求される。残念ながら、こうした技術は、末だ、暗中模索の段階にあり、今後の重要な課題となっている。

III. 断裂型地熱貯留層の探査・評価

地熱資源の開発の手順は、まず有望地域抽出のための新規地点の地表調査に始まり、次いで有望地域に構造井や調査井の掘削を行う（新規地点調査）。もし、熱水や蒸気の噴出を見れば、引き続き貯留層の輪郭や

*工業技術院地質調査所 Geological Survey of Japan, Tsukuba

**日本地熱学会創立5周年記念誌、1987あるいは日本地熱学会誌第7巻第3号、1985.

第1図 多孔質型貯留層と断裂型貯留層

熱水が流動している場合には、その部分に生ずる圧力集中により破砕が発生し、微小な地震波動が放射される。この地震波動を地表で観測し、震源を定めることにより断層分布を検出できる可能性がある。また、地下の速度や減衰のイメージングが可能である。地熱生産井の噴気試験の時に観測を行えば、震源

第2図 地熱開発の流れ

性状をより詳細に知るための探査とその生産性を知るための調査井掘削と噴気試験とが行われる(貯留層探査・評価)。この段階で発電に十分な熱水・蒸気を得る見通しを得ることができれば、多数の生産井掘削ののち発電所の建設へと進むことになる(第2図)。地熱探査はこのいずれの段階においても重要な役割を持つが、「新規地点探査」段階では、広い地域の概要を知り、地熱資源賦存の有望な地域を絞り込むことが主な目的であり、一方、「貯留層探査・評価」段階では熱水・蒸気の賦存の具体的な場所やその性質を詳細に知ることを目的とする。

地熱流体が断層を介して流動し、かつ貯留するのであれば、「新規地点探査」段階では断層の集合体である熱水賦存領域の輪郭を知ることがまず目標とする。また、「貯留層探査・評価」段階では、断層集合体の輪郭をより精密に同定するとともに、個々の断層の分布をも同定することを目指しなければならない。この二つの目標は、“森”の探査と“木”の探査に比喻すると解り易いだろう(第3図)。

次章から、最近著しい技術的展開があったと思われる断層型貯留層の探査・評価技術について紹介する。

IV. 微小地表探査

地下の断層系が活動的な場合や断層中を地熱

の空間分布の時間的変動から、地下の熱水の流動経路・速度や地層透水性などの解析の行える可能性もある。

地質調査所ではかねてよりこうした可能性について研究を進めている。伊藤・杉原 (1985 a), 杉原・伊藤 (1987) によってその概要を紹介したい。

第4図-1はある地熱地域の生産井・還元井周辺に配置された地震計ネットワーク (7点) で得られた微小地震の震源分布を示している。震源は坑井を取り巻くある一定の領域に集中して

おり、坑井資料から判断すると、本域の地熱熱水の流動地域に対応するものと想定される。すなわち、ここでは微小地震は地下における熱水の流動に伴う微小破碎によるものと考えられる。このネットワークで決定された震源の深度分布が第4図-3(a)に示されている。震源決定は単純な成層速度モデルを用いて行なわれており、その分布の規則性は現われていない。そこで、より精度のよい速度モデルを得るために、短期間8点の追加による合計15点による観測を実施した。このデータにより波線 (レイパス) によるインバージョンを行い更に精度の良い速度モデルを得た (第4図-2)。この速度モデルを用いて得られた新たな震源の深度分布が第4図-3 (b) である。この震源分布は明らかに規則性が認められる。既に坑井により知られている断層と照合してみると、両者が良い一致を示すことがわかった。第4図-1が地熱貯留層の賦存領域の輪郭、すなわち、“森”をあらわしているとすれば、第4図-3 (b) はおぼろげではあるが地熱流体を貯留する個々の断層、すなわち、“木”をあらわすものといえよう。

また、伊藤・杉原 (1985b) は噴気試験 (ビルドアップテスト) 時における微小地震の時空分布を解析し、坑井周辺の浸透率を求めるのに成功している。この場合、噴気試験により坑井から外方に圧力変化が伝達するものと仮定している。

第4図-1 ある地熱地域の微小地震震源分布 (伊藤・杉原 1985 b)

第4図-2 多点観測によるインバージョンにより求めた速度構造の断面図(上)と波線分布図(下)(杉原・伊藤 1987)

第4図-3 1次元速度構造モデルの場合(a)と3次元速度構造モデルの場合(b)の震源決定結果の比較。(伊藤・杉原 1987) 上図は震央位置を, 下図は上図の微小地震の深度分布を示す。右図には断層位置も重ねて示す。

抵抗が $30\Omega\text{m}$ 以下の領域を特に示している。こうした低比抵抗域の拡がりはいしばしば観測されるが、これが地下における地熱流体の流動領域を示すものと直ちに考える訳にはゆかない。なぜなら、低比抵抗領域は、1) 堆積物(特に海成)、2) 変質帯(特に粘土化変質)、3) 地熱水等の複数の原因で生じるからである。1) や 2) の原因を良く調べ、その可能性を否定して始めて地熱熱水に原因を絞ることができる。本域

地熱現象により発生する地震はエネルギーの極めて低いレベルにあり、観測システムは極めて高い SN 比を必要とする。また、一般の地震に比べて波動周波数が高く、このことが更に強調される。また、震源位置をより正確に求め、“木”の姿を明瞭なものにするためには、数多くの点での同時観測をする必要がある。これらは今後の重要な技術開発課題となっている。

V. MT (地磁気地電流) 法

岩石はそれ自身は電気的に絶縁体に近いが、地熱熱水のような溶存成分に富む水を含む場合には著しく導電性を増す。この理由により、電気探査は地熱流体の有力な探査法としてよく利用されてきた。人工的に地下に電流を送る電気探査は可探深度に限界があり、次第に深部探査に進んできた地熱探査では、可探深度の大きい MT 法(地磁気地電流法)による地下比抵抗探査が主流となりつつある。

フランスのカニヤールは地電流(電場)と地磁気(磁場)の両方の同時測定を行い、その比として定義されるインピーダンスを用いれば、信号源の強度を知ることができなくとも地下の比抵抗値を求めることが可能であることを示した。信号源としては、太陽風と地球磁場の相互作用や雷が生み出す自然の電磁場を用いる。カニヤールの原理はその後30年の年月を経て、エレクトロニクスやコンピュータの著しい発展により、ようやく最近実用化が実現した。

第5図は九州の豊肥地域における MT 法探査結果(通産省, 1987)である。図では海拔 -2000m (地表下約 2500m)において比

においては、既存の坑井により、1) はほぼ否定可能である。また、2) については本域に粘土化変質の存在があり得ることから完全に否定し切れないが、第5図のような広域な分布は考えにくく、たとえ寄与があるにしても極く部分的であろうと考えられる。以上の理由により、本域の低比抵抗域は地熱熱水の存在による可能性が大きいと判断されている。MT 調査後に低比抵抗域で掘削された深部坑井の結果により深部（地表下2500m 以深）の断裂中にかなりの規模の高温熱水の賦存が確認されている。

現在のところ、この低比抵抗域の全体像は明らかではないが、断裂集合体としての地熱貯留層の輪郭を示している可能性がある。

MT 法による地下比抵抗分布の検出精度には未だ多くの問題があり、個々の断裂を検出できる精度はなく、従って、“森”の探査に分類してよいであろう。

極く最近、MT 法の一つの発展形態と言ってよいアレイ式 MT 法が米国で提唱された (BOSTIC 1986)。この方式では、反射法地震探査と類似の概念が取り入れられており、従来より密に、かつ直線状に配列 (アレイ) した測点により、また、空間フィルターの導入によりそれらを相互に関連させることができ、より高い精度で地下比抵抗分布を解析するものである。この方法により、従来 MT 法の弱点とされていた、地形や浅部低比抵抗層の存在により著しく深部比抵抗分布の解析信頼性を低めていた、スタティック効果の除去が可能となった。従って、深部に至る地熱貯留層領域のより信頼性の高い輪郭を得る可能性が指摘されよう。

第5図 MT 法による低比抵抗域の例
数字：重力基盤深度(海拔下km)
網：低比抵抗域 (30 $\Omega \cdot m$ 以下)
(通産省 1987よりアレンジ)

VI. 貯留層評価 (シミュレーション)

自然状態や生産還元時における地下熱水流動の挙動を知ることは貯留層生産性の評価の基本となる重要な役割を果たす。この方法は主として、流動の物理方程式に則る数値シミュレーションの手法を利用する。手法は古くから石油貯留層評価に用いられてきたものに基づいているが、地熱貯留層の場合には非等温の条件が加わり若干複雑なものとなっている。数値シミュレーションを行うには、地下構造を簡略化したモデルを用いる。数値解法とコンピュータ能力の進歩によりモデルは次第により地質構造の実体に近い複雑なものに進化しつつある。最初のモデルは多孔質型貯留層 (第1図) を想定したものである。すなわち、横に広がる一定の浸透率中を流体が移動する。このモデルにおける浸透率を縦横可変にしたものが長い間用いられてきた。その後、断裂型貯留層を想定したダブルポロシティモデルが提唱された。このモデルでは、地下構造を立方体状の母岩 (マトリクス) とその間の流体が主に流動する空間 (断裂) の組み合わせモデルで表現する。このモデルでは、マトリクスは孔隙率は大きい浸透性は極めて小さく、一方、断裂はその逆であると考えられる。流体全体の流れは主として断裂を通じて行われ、マトリクスは断裂との間で熱と流体の変換を行なう。しかし、両者の間の流れは疑似安定であり、流れはそれらの平均的圧力の差に比例するものであり、現実の非等温・二相の速い流れには対応し切れないと考えられる。実際、このモデルは LBL によりガイザー地熱貯留層の解析に適用されたが現実の生産量を説明するのに困難があった。そこで、マトリクスが断裂に対して、生産・還元のような速い流れの変化にも対応することのできる修正モデルが提案された。このモデルで用いる方法は Multiple Interacting Continua Method (MINC) と呼ばれている (第6図, PRUESS *et al* 1982)。MINC モデルではマトリクスを更に幾つかのゾーン

第6図-1 断裂媒体中の流体移動 (LBL 1985)

第6図-2 ダブルポロシティ
ーモデル

第6図-3 MINC モデル

第6図-4 MINC における断裂のモデル化

第6図-5 多孔質型貯留層モデルと断裂型貯留層モデルの比較
(矢野他 1987)

(第6図-3では5つ)に分け、各ゾーンは隣接するゾーンとの圧力差・温度差を関数とする流れが発生する。断裂に接するゾーンもこれと同じで、この境界を介してマトリクスと断裂の間に流れの交換が行なわれる。このようにして、マトリクス中に含まれる流体は迅速に生産に参加できることになる。MINC モデルによるとガイザーズ貯留層の蒸気生産量は説明できるという。

第6図-5 は多孔質型貯留層と断裂型貯留層 (MINC モデル) とを、注水時の温度経時変化を例として比較して示したものである (矢野他 1987)。

現状では、断裂型貯留層の評価には MINC は最も優れたモデルであると言えよう。

VII. おわりに

資源の実体 (ネイチャー) が明確にならない限り資源を発見できないという訳ではない。資源の発見には“運”がつきものであることも否定できない。しかしながら、実体のより優れた理解が資源発見の確率を上げることも自明である。

すでに述べてきたように、断裂型地熱貯留層の実体は未だ明瞭にはなっていない。しかしながら、数多くの地熱地域で熱水や蒸気の発見がなされていることも事実である。実は、地熱貯留層の場合には実体の理解を最も必要とするのは、熱水・蒸気発見以後の生産性評価の段階にあると言ってよい。なぜなら、巨大な金額を要する発電所の建設には、少くとも 20 年以上の長期にわたる熱水・蒸気供給の保証が必要だからである。このような長期予測の必要性は地熱固有の特徴であるが、この為

には、地下の実体はかなり明瞭に理解されていなければならない。

この意味で、地熱貯留層の探査・評価に果たされた今後の努めは、実体の理解という理学的アプローチと探査技術・評価技術という工学的アプローチの両面をうまくかみ合わせて、相互にフィードバックさせつつ展開することであると考えられる。

文 献

- BOSTIC, F. X. (1986): EMAP (Electromagnetic Array Profiling), SEG 1986 Abstract, 60-61.
- 伊藤久男・杉原光彦 (1985a): 微小地震からみた地熱貯留層. 日本地熱学会昭和60年度学術講演会講演要旨集, 104.
- 伊藤久男・杉原光彦 (1985b): 滝の上地域における断裂系と微小地震, 日本地熱学会昭和60年度学術講演会講演要旨集, 45.
- LBL (1985): Transport in fractured media, a symposium at Lawrence Berkeley Laboratory.
- PRUESS, K. and NARASHIMAN, T. N. (1982): On fluid reserves and production of superheated steam from fractured, vapor-dominated geothermal reservoirs, *JGR*, **87**, 9329-9339.
- 杉原光彦・伊藤久男 (1987): 微小地震データによる3次元速度構造インバージョン, 物理探査学会第76回学術講演会論文集, 42-45.
- 通商産業省 (1987): 大規模深部地熱発電所環境保全実証調査総合評価報告書, pp. 117.
- 矢野雄策・中尾信典・石戸経士 (1987): フラクチャー型貯留層の数値シミュレーションについて. 日本地熱学会昭和62年度学術講演会講演要旨集, 61.