

# 蒸気卓越型地熱資源の理解進展のきっかけ

花野峰行<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

地熱蒸気の産業への利用は、ホウ酸の抽出という形で19世紀のイタリアで始まった。地下に存在する地熱資源の実態について、その当時どのように考えられていたのか、今となっては知る由もない。しかし、イタリア トスカーナ地方のラルデレロにおいて、1904年に地熱蒸気による試験発電が成功し、世界最初の地熱発電所が1913年にラルデレロに建設されて運転を開始して以来、考えられ続けてきたことは確かである。地熱資源の開発・利用を行うにあたり、その地域の地熱資源の実態を的確に理解することは不可欠のことであると認識され、その努力が続けられてきた。

ここでは、商業的な開発と利用が最も古くから行われている蒸気卓越型地熱資源について、その理解の変遷を振り返り、どのようなことがきっかけとなってその理解が進展してきたのかを見てみたい。併せて、蒸気卓越型に関してまだ残された疑問点と今後の課題について触れてみたい。

## 2. 蒸気卓越型地熱資源とは

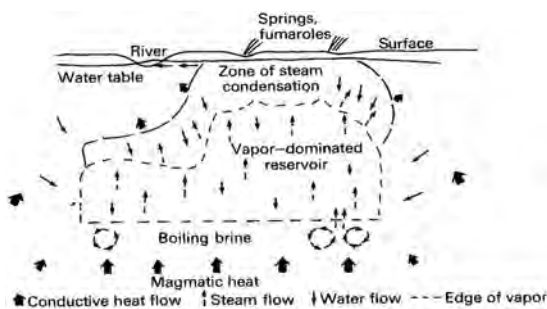
最初に、蒸気卓越型地熱資源について簡単にまとめておきたい。なお、その地学的全体構造が蒸気卓越型地熱系 (Vapor-dominated geothermal system) であり、その中で地熱蒸気が生産可能な場所が蒸気卓越型地熱貯留層 (Vapor-dominated geothermal reservoir) である。蒸気生産可能な地熱貯留層を持つ蒸気卓越型地熱系が蒸気卓越型地熱資源 (Vapor-dominated geothermal resource) であるが、地熱系全体を指す場合もあれば、地熱貯留層のみを指す場合もあり、ケースバイケースである<sup>(注1)</sup>。

蒸気卓越型地熱系の自然状態 (開発前の自然のま

まの状態)を表すモデルとして現在最も広く支持されているのはWhite *et al.* (1971)によるものである(第1図)(以下、Whiteほかのモデルと呼ぶ)。また、このモデルは蒸気卓越型地熱系の全体構造の概念モデルとしては最も古典的なものでもある。このモデルのポイントは以下の3点である。

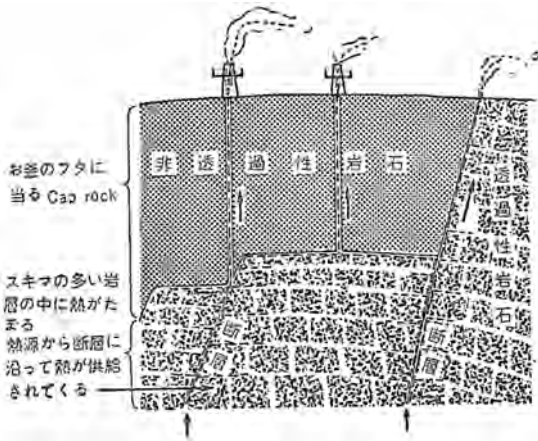
①蒸気卓越ゾーン (Vapor-dominated zone)の上方と側方に低透水性の遮蔽が存在し、外部からの熱水や地下水の流入、外部への蒸気の流出が制限されている(上方のそれはキャップロックと呼ばれる)。

②蒸気卓越ゾーンでは、岩盤のき裂内を蒸気が上昇する一方、キャップロック下面 (=蒸気卓越ゾーン上面)でこの蒸気は凝縮して凝縮水(熱水)となり、き裂中(き裂表面)を下降し、さらに下位の熱水ゾーンに戻る。このため、熱は蒸気の持つ潜熱として運ばれ、キャップロック下面での凝縮によって上方に移動してい

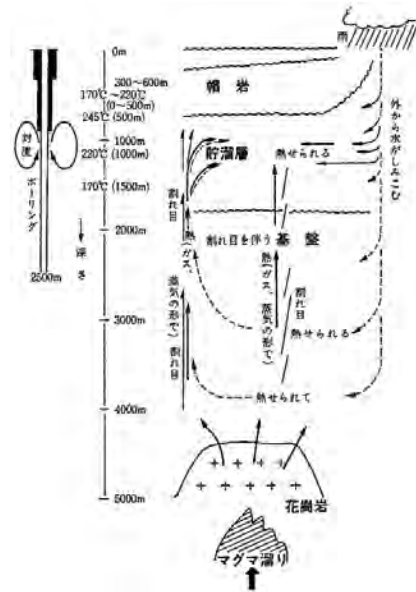


第1図 White *et al.* (1971)による蒸気卓越型地熱系の概念モデル。Vapor-dominated reservoir: 蒸気卓越型地熱貯留層 (蒸気卓越ゾーン)。Zone of steam condensation: 凝縮水ゾーン。Boiling brine: 沸騰する高塩濃度熱水 (ブライン)のゾーン。Magmatic heat: マグマからの熱供給。Springs, fumaroles: 温泉と自然噴気。本モデルの日本語によるコンパクトな解説が森・陶山 (1980)にある。

1) 日本重化学工業株式会社



第2図 1960年代初期のラルデレロの地熱資源賦存形態モデル(中村, 1964)。「透過性岩石」は透水性の地層。「非透過性岩石」は不透水性の地層(キャップロック)。



第3図 ピサ大学マリネリ教授によるラルデレロ地熱系概念モデル(早川, 1988)。天水が地下深部で沸騰して蒸気として上昇してくるとの考え。早川先生が1967年に現地を見学された際に、マリネリ教授が紙に書いてくださった説明とのこと。

る。(注2)

③蒸気卓越ゾーンの下に熱水ゾーンがあり、沸騰によって蒸気が作り出されている。この際、沸騰に伴う濃縮によって、熱水は、あたかも蒸気ボイラー内の水のように高塩濃度となっていると考えられている。この高塩濃度熱水はブラインと呼ばれている(注3)。

さて、蒸気卓越型地熱資源とはどのようなものをそう呼ぶのだろうか。これにはいくつかあって、例えば、①第1図のWhiteほかの蒸気卓越型モデルが適用される地熱貯留層である場合、あるいは、②乾き蒸気のみを坑井が生産する場合、である。

①のWhiteほかのモデルが成立する場所では、蒸気卓越ゾーンの岩盤き裂内は飽和蒸気でほぼ満たされているため、必ず乾き蒸気が生産される。ところが、Whiteほかのモデルが必ずしも成立していないような場所、すなわち熱水で満たされているゾーンに掘削された坑井からも乾き蒸気が生産される場合がある。このため、地熱資源開発の現場においては、坑井から生産される流体が乾き蒸気か否かという点を重視した②が考えられている場合が多い。

### 3. 現場データの充実による理解の進展

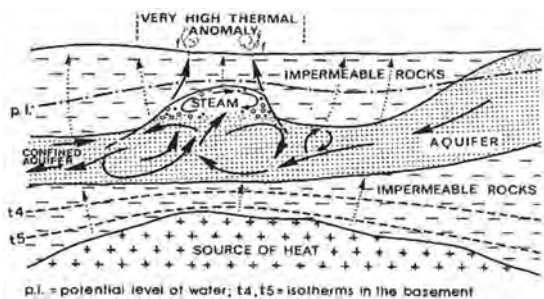
#### (1) イタリアでの事例

蒸気卓越型地熱資源の理解がどのように進んできたかを事例で見てみよう。先ほどのWhiteほかの

モデルが提唱される以前はどうだったのだろうか。

第2図は、1960年代初期にイタリアで考えられていた、蒸気卓越型地熱資源の賦存形態である。この図では、地熱蒸気は地下深部から上昇してきており、坑井掘削による蒸気生産が断層や地層境界に伴う断裂構造から行われていることが示されている。坑井の掘削は種々の情報をもたらした。この時点では、過去の掘削経験から、蒸気生産が行われる場所(地熱貯留層と呼ぶ)に関する理解がどの程度に進んでいて、坑井掘削の指針となっていくかが分かる。しかし、この図では蒸気卓越型地熱系の全体構造がどのように考えられていたのかかがい知ることにはできない。

しかしながら、貯留層内のき裂空隙体積を考えた場合、き裂中に存在するのが蒸気のみでは、過去に生産された蒸気量をまかないきれないことは既に知られており、蒸気より体積の遙かに小さい熱水が貯留層内のどこかに存在し、それが沸騰することにより生じた蒸気が生産されていると理解されるようになっていた(注4)。その後、化学的な調査の進展により1970年代までには、蒸気は天水起源の熱水が地下で沸騰して生じたと考えられるようになった。



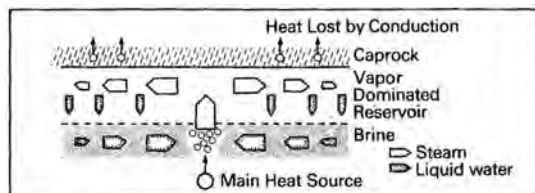
第4図 ラルデレロの広域モデル (Cataldi and Sommaruga, 1986). 貯留層を形成する地層は遠方において地表に露出している。そこから浸透した天水がリチャージ(補給)となっている。Aquifer: 地熱貯留層。 Confined Aquifer: 上下(または上部のみ)を不透水性地層で遮蔽された地熱貯留層。 Impermeable Rocks: 不透水性地層(キャップロック)。 Source of Heat: 熱源岩。 Very High Thermal Anomaly: 高熱流量地帯。

第3図はその例であり、地下深部に浸透した天水が花崗岩体等の熱源によって加熱されて蒸気となって断層等の割れ目を上昇して地熱貯留層に達すると考えられていた様子が表されている。従来より深い井戸が掘削され、深部のデータが得られるようになったことも、地熱系全体構造を広く考えるきっかけとなったようである。

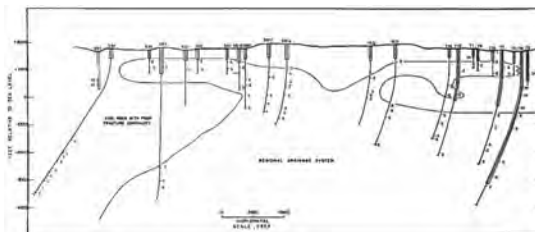
ラルデレロの貯留層を形成する地層は遠方において地表に露出している。1970年代には、分析技術等の発展による化学的なデータの蓄積と解釈の進展により、そこから浸透した天水が沸騰して生じた蒸気のリチャージ(補給)があることが分かった(第4図)。

化学的な分析技術の発展とデータの充実はさらに詳細な解釈を可能にした。ラルデレロやザ・ガイザース(後述)の浅部貯留層においては、蒸気中のガス濃度に同心円状の分布があることが分かったが、この現象は、第5図のように説明された。すなわち、深部から浅部貯留層の中心部に上昇してきた蒸気が、浅部貯留層中を水平方向に流動する過程で、キャップロックを通した熱ロスによって少しずつ凝縮していくが、蒸気中のガスは凝縮しないため、浅部貯留層の中心から離れるに従って、ガス濃度が見かけ上高くなることを示しているのである。

このように、種々のデータの充実が地熱資源や地熱系の理解進展に大きく貢献してきたのである。



第5図 浅部蒸気貯留層内での蒸気の水平流動に伴う化学成分(ガス濃度)の変化を表すモデル (D'Amore and Truesdell, 1979)。熱ロスに伴う蒸気の凝縮がガス濃度分布に反映されていることを明らかにした。Main Heat Source: 深部から地熱蒸気が上昇するゾーン。Heat Lost by Conduction: 熱伝導による熱ロス。



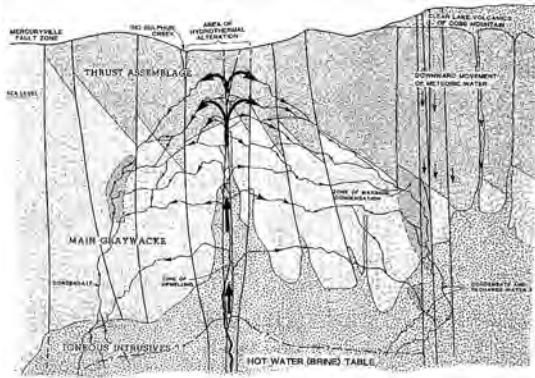
第6図 ザ・ガイザースの蒸気貯留層分布 (Lipman et al., 1978)。蒸気層に遭遇した地点 (Steam Entry) はSで示されており、それらを結んだ形で蒸気採取可能な蒸気貯留層の輪郭が描かれている。

## (2) アメリカでの事例

カリフォルニア州のザ・ガイザース地熱地帯は世界最大の地熱地帯であり、現在140万kWを超える地熱発電が行われている。ここも、蒸気卓越型地熱地帯の典型の一つと考えられているが、その利用を目的とした調査は1920年代から行われていた。その後、1950年代になって本格的な資源開発が再開され、1960年に最初の発電所が運転を開始している。当地域での地熱開発の経過と問題についてはBarker et al. (1992)やBarker (2000)に詳しい。

ザ・ガイザースでは1970年代に地熱開発が一気に拡大したが、その当時地熱開発業者によって作られた地熱貯留層のモデル図が第6図である。この図では坑井と蒸気層に遭遇した地点 (Steam entry) の関係に基づき、蒸気採取可能ゾーンが示されているが、地熱系の全体構造については必ずしも意識されていないように見える。

この当時から、ザ・ガイザースではエア掘<sup>(注5)</sup>による

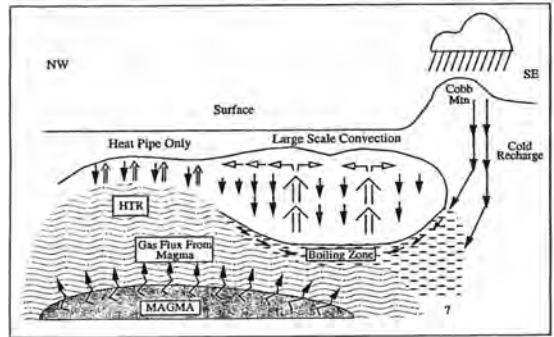


第7図 ザ・ガイザースの蒸気卓越型地熱系全体構造のモデル(カリフォルニア州政府による)(Stockton *et al.*, 1984). Graywacke: 硬質砂岩(ザ・ガイザース地域の貯留層を構成する岩石). Area of Hydrothermal Alteration: 過去の熱水活動による変質帯(粘土化帯, 珪化帯など). Igneous Intrusives: 花崗岩類等の貫入岩体(地熱系の熱源としては通常これが想定されている). Meteoric Water: 天水(雨や雪解け水など)(これが長時間かけて地下深部に浸透し, 熱源岩によって加熱され, 地熱流体となって上昇する). Big Sulphur Creek: 当地域を流れる河川の名称. Brine: 高塩濃度熱水(ただし, その存在は未確認).

坑井掘削が主であったため, 地質判定が困難であり, コア採取箇所以外の地質情報はよく分かっていなかったようだ. このため, Steam entryと地質の対比は必ずしも十分行われていなかったようだ. ただし, 当時の開発業者であるUNOCAL社が秘密主義で単に公表されなかっただけなのかもしれない.

1980年代になってから, 複数の開発業者がザ・ガイザース地域に参入してきた. 発電設備の合計出力は一時200万kWを超えた. このこともあってか, 1980年代にはザ・ガイザースの蒸気卓越型地熱系の全体構造が考えられるようになった(第7図). この図で分かるように, 深部に伏在するであろうブライン(高塩濃度熱水)が沸騰して生じた蒸気が中心部を上昇してキャップロック下部で凝縮し, 凝縮水が縁辺部を下降してブラインゾーンに戻るといったモデルである. これは基本的にWhiteほかのモデルと同じだが, この時点でも(現在においても)高塩濃度のブラインは確認されていない.

多数の開発業者の参入はザ・ガイザースに悲惨な



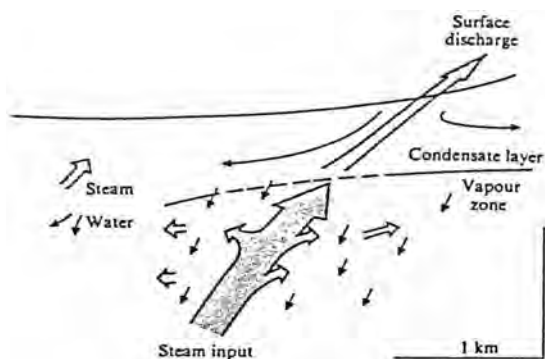
第8図 ザ・ガイザースの地熱系全体構造のモデル(Truesdell *et al.*, 1993). ザ・ガイザースの地熱系の全体構造は, 90年代になって初めて総合的な検討が行われた. HTR: 300°C超の高温貯留層.

結果をもたらした. 乱開発に伴う大幅な減衰である(注6). その詳細はBarker *et al.* (1992)やBarker (2000)を参照いただくとして, ここで得られた最も大きな教訓の一つは, 「一つの地熱貯留層は, 一つの開発事業者によって系統的に開発されるべきである」ということである. それがかきかけとなって, ザ・ガイザース地熱系の全体構造をきちんと考え直すための総合的な検討が政府主導で行われた. その結果の一つが第8図である. データの充実以外にも, このようなことが総合解析のきっかけになることもあるのである.

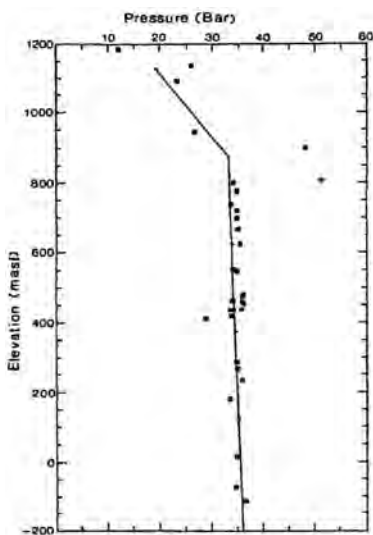
### (3) インドネシアの事例



写真1 カモジャン地熱地帯(インドネシア)で1928年に掘削された調査井からの蒸気噴出. オランダ統治時代に掘削されたが, 今日まで暴噴が続いている(西日本技術開発(株)殿より借用).



(a)



(b)

第9図 (a) カモジャンの初期状態概念モデル (Grant, 1979)と(b) 初期状態における貯留層圧力(と考えられていたもの) (O'Sullivan et al, 1990). Elevation: 標高(坑井内測定データの深度に対応)

インドネシア ジャワ島のカモジャン地熱地帯も蒸気卓越型の代表的地域の一つと考えられている。ここでの地熱調査はオランダ統治時代の1920年代に初めて行われた。1928年には深度66mから128mの調査井が3本掘削されたが、そのうちの1本は蒸気層に遭遇して暴噴し、現在もなお暴噴し続けている (Zen and Radja, 1970) (写真1)。

1970年代になりニュージーランドの技術協力により調査が再開され、1982年に最初の地熱発電所が運転を開始した。第9図は、この時点で考えられていたカモジャン地熱貯留層の初期状態である。この図では、

初期状態における蒸気卓越ゾーンの厚さは1kmを超えと考えられていたことが分かる。

このように、カモジャンの貯留層は、1970年代に調査が再開された時点で初期状態が確認されたと言われているが、一方、1928年からの蒸気噴出により、1970年代にはもはや「初期状態」ではなくなっていたのではないかとの疑問がある。この点については後で述べる。

#### (4) 蒸気卓越型地熱地域の初期状態検討上の問題点

ここで、上に述べてきた蒸気卓越型の各地域の初期状態モデルを、現在の視点で見た場合の問題点を列記すると以下ようになる。

① 系統的な調査や開発以前から、浅部井や小規模井による蒸気利用または蒸気放出が相当長期間行われていた。例えば、ラルデレロでは19世紀から、ザ・ガイザースでは1921年から、カモジャンでは1928年から。

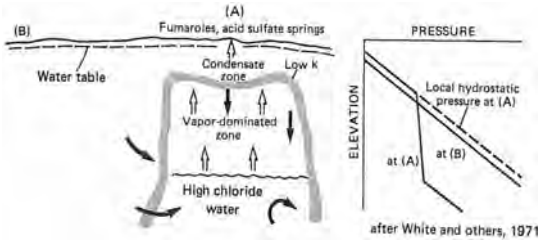
② このため、現代の地熱開発調査開始時点では、各地熱貯留層は、全く手つかずの自然状態ではなくなっていた。具体的には、キャップロック下の蒸気卓越ゾーンの厚さは、手つかずの初期状態より遙かに厚くなっていたのではないかと考えられる。

このように考えられるのは、後年、数値シミュレーション技術の発達によって、ごく僅かの生産をある期間継続するだけで、蒸気卓越ゾーンは広く拡大することが分かったからである (例えば、Pruess, 1985)。このため、本当の初期状態が確認された蒸気卓越型地熱貯留層は岩手県の松川地熱地域だけなのではないかと考えられる (例えば、花野, 1994)。

### 4. 定量化による理解の進展

#### (1) 定量的検討の始まり

第1図に見られるように、概念モデルには長さのスケールや具体的な温度・圧力値が示されていない。最初はあくまで定性的だったのである。その後、第9図に見られるように、データの充実により、開発前の自然状態における蒸気卓越ゾーンは1kmを超える厚さであると考えられるようになった。第1図では、その間の情報に基づいたのか、蒸気卓越ゾーンはかなりの厚さであるような印象を持って描かれている。



第10図 Ingebritsenらが描き直したWhiteほかのモデル (Ingebritsen and Sorey, 1988). 数値シミュレーション解析用のモデルをイメージした形に描き直したもののだが、蒸気卓越ゾーンはかなりの厚さ (厚さ1kmを超えるイメージ?) で描かれている。High chloride water: 高塩濃度のブライン。Low k: kは浸透率 (遮蔽となる低浸透率の岩石を意味している)。Hydrostatic pressure: 静水柱圧力 (流動のない状態での圧力分布)。

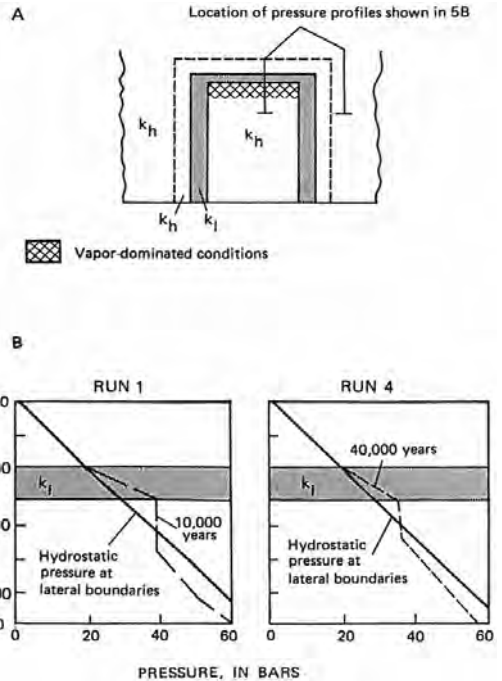
地熱開発が進んでデータが蓄積されると、さらに深い理解が要求されるようになってきた。また、実際の開発現場では、より定量的な表現が必要とされるようになってきた。このような時代背景の下で種々の定量化が試みられるようになった。

最初は、蒸気の賦存形態に関するものである。ラルデレロのところで既に述べたように、地熱流体が地下に蒸気の形で賦存していたのでは、開発ゾーンとその周辺のき裂空隙の体積では、その時点までに生産された積算蒸気量に対して大幅に不足であるので、地下ではより体積の小さな熱水の形で賦存していて、それが沸騰して蒸気となって生産されているに違いないと考えられた。この検討は1960年代初めまでに行われていたようである。

(2) Ingebritsenらの研究: 蒸気卓越型研究の金字塔

1980年代になり、数値シミュレーション技術の発展により、多孔質体内 (ポラスメディア) の気液二相状態での熱・流体挙動シミュレーション解析が可能になった。その技術を活用して第1図の自然状態モデルの定量化に挑んだのがIngebritsen and Sorey (1988) である。彼らは、第1図を第10図のように描き換え、これに基づき、蒸気卓越型地熱系の自然状態形成のシミュレーション解析を行った。

その結果が第11図である。キャップロック下に見事に蒸気卓越ゾーンが形成され、Whiteほかのモデルが

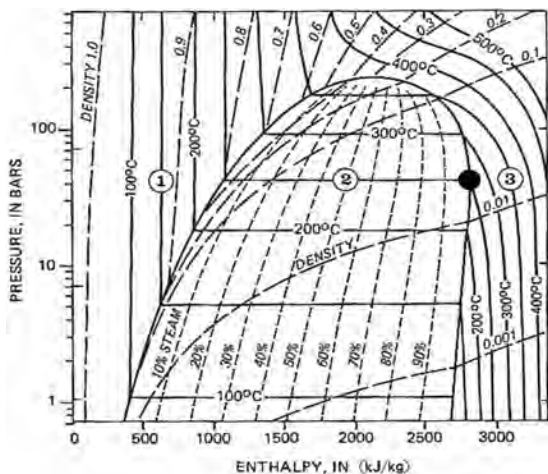


第11図 蒸気卓越型地熱系の自然状態シミュレーション結果 (Ingebritsen and Sorey, 1988). キャップロック下に蒸気卓越ゾーンが形成され、第10図のモデルが成り立つことが示されたが、その厚さは200m程度であり、第10図に描かれたよりも遙かに薄い。図中の40barは4MPaと同じである。kl: キャップロック (上方の場合) または側方の遮蔽。

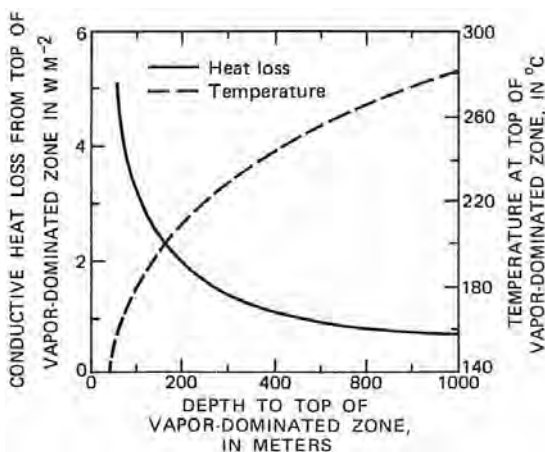
成立することが確認された。ところが、得られた蒸気卓越ゾーンの厚さは200m程度であり、第1図や第9図でイメージされていた1kmを超える厚さではなかった。開発前の自然状態における蒸気卓越ゾーンの厚さは、従来考えられていたよりも遙かに薄いと考えられることが分かったのである。このため、カモジャンで1970年代の調査によって自然状態 (初期状態) と考えられた状態は、1928年からの蒸気噴出によって変わってしまった「現在状態」であったことが分かった。

また、キャップロックや側方の遮蔽の浸透率についても、 $5 \times 10^{-17} \text{m}^2$  が適当であり、それよりも大きくても小さくても蒸気卓越型地熱系は形成されないことを示した。これは、一般の地熱貯留層の値 ( $10^{-15} \sim 10^{-14} \text{m}^2$ ) に比べて非常に小さな値である。

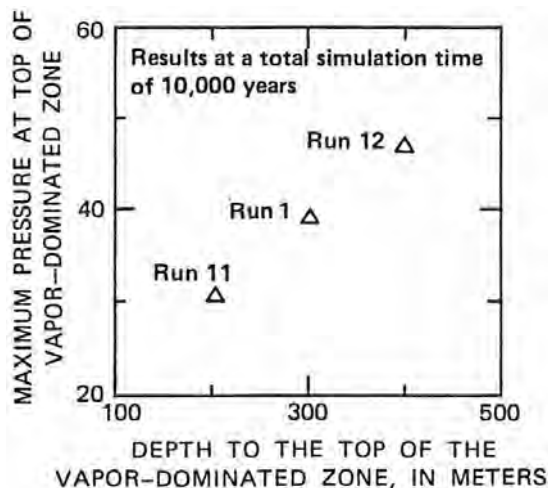
さて、蒸気卓越型地熱資源に関しては、今になってみると必ずしも根拠があるとは思えない、いわば迷信



第12図 水のp-h線図(圧力と比エンタルピの関係図)(例えば, 日本機械学会, 1980). 飽和蒸気の最大エンタルピ点を●で示した(圧力3.0~3.3MPaは30~33barに対応する).



第14図 キャップロック下面深度(=蒸気卓越ゾーン最上部の深度)と蒸気卓越型を維持するために最低限必要な熱入力の関係(Ingebritsen and Sorey, 1988). キャップロック下面深度が深いと, より少ない熱入力で蒸気卓越型を維持できることが分かる.



第13図 種々のキャップロック下面深度(=蒸気卓越ゾーン最上部の深度)と蒸気卓越ゾーンの圧力との関係(圧力の単位はbar)(Ingebritsen and Sorey, 1988). キャップロック下面深度が深い場合, 蒸気卓越ゾーンの厚さは3MPa(30bar)を超える値になりうる事が示された. Run1等は数値実験の番号.

とも言えるような思い込みがいくつかあった. Ingebritsenらはこれらの検証にもチャレンジした.

最初は, 「蒸気卓越型地熱貯留層のキャップロック直下の圧力は, 飽和蒸気の最大エンタルピ点に拘束される」という点である(第12図). Ingebritsenらはキ

ャップロック下面の深度を種々変えてシミュレーションを行い, 第13図の結果を得た. この結果によれば, キャップロック直下の圧力はキャップロック下面深度に完全に依存しており, キャップロック下面深度が深い場合, キャップロック直下の圧力は, 飽和蒸気の最大エンタルピ点(3.0~3.3MPa)を超える4MPaや5MPaにもなることが分かった. すなわち, 蒸気卓越型地熱貯留層のキャップロック直下の圧力は, 飽和蒸気の最大エンタルピ点とは無関係だったのである.

なぜこのような迷信とも言えるようなことが信じられるようになったのかを現在の視点で考えてみると, 1960年代までに開発されていた蒸気卓越型地熱貯留層(ラルデレロやザ・ガイザース)の深度が300m級であり, キャップロック下面深度がたまたま200m程度であったためではないかと思われる. 単なる偶然が思い込みを生んでしまったのかもしれない.

もう一つは, 「蒸気卓越型地熱資源は, 熱水型地熱資源を上回る強力な熱源があって初めて形成される」という点である. これは, 蒸気卓越型では高比エンタルピの乾き蒸気のみが生産井から噴出することから, 蒸気に比べて低比エンタルピである, 熱水混じりの蒸気が噴出する熱水型地域と比べてそのように思われていたのである. Ingebritsenらは, 蒸気卓越型状態を維持するために最低限必要な熱入力とキャ

ブロック下面深度との関係を求めた。それが、第14図である。Ingebritsenらが第11図のケースで用いた熱入力は約 $1.5 \text{ W/m}^2$ であったが、この図から、キャップブロック下面深度が深くなるほど、蒸気卓越型を維持するために必要な熱入力は小さな値で済むようになることが分かる。

さて、温度が $230 \sim 250^\circ\text{C}$ 程度の熱水型地熱貯留層内を自然対流で上昇する熱水が運ぶ熱流束は約 $4 \text{ W/m}^2$ である(例えば、Hanano and Kajiwara, 1999)。従って、第14図の結果から、蒸気卓越型はむしろそれより少ない熱入力で維持しうることが分かった。地下深部から上昇する熱水が基本的に全て地表に湧出する熱水型地熱系に比べて、蒸気卓越型地熱系は低浸透率のキャップブロックと側方の遮蔽が熱的バリアとなることから、結果的に、少ない熱入力でその状態を維持できるということなのである。

このように、Ingebritsenらの研究は蒸気卓越型地熱系の理解進展に大きく貢献した。蒸気卓越型に関する研究の金字塔の一つである。これから蒸気卓越型について学ぼうとする場合は、最初に読むべき論文の一つであると言える。

余談だが、蒸気卓越型研究の金字塔の一つであるWhiteほかのモデルの著者らはUSGS(アメリカ合衆国地質調査所)に所属する研究者であったが、IngebritsenとSoreyも同じUSGSの研究者である。このような独創的な研究が続出する組織には敬服するほかない。

### (3) 1970年代の解析的研究

現代の研究は、ただ一人の天才が全てをやり通せるわけではない。色々なグループによる色々な方面からの複数の研究成果が重層的に組み合わさって、螺旋階段を1段ずつ上っていくように進んでいく。地熱研究も例外ではない。Ingebritsenらの研究が可能になった背景には、1970年代に行われた一連の解析的な研究の成果があった。

UCLA(カリフォルニア大学ロサンゼルス校)のSchubertらは、蒸気卓越型地熱資源の基本的な現象に関する定量的評価を解析的手法によって試みた。この結果、①多孔質体内におけるヒートパイプ現象に関する、浸透率と熱輸送能力との関係、②蒸気卓越ゾーンの上に位置するキャップブロックに求められる浸透率の値、③キャップブロックとその下位の貯留層の浸

透率に求められるコントラスト、などが明らかにされた(例えば、Schubert and Straus, 1979; 1980; Straus and Schubert, 1981)。これらの成果は、Ingebritsenらの研究において、数値シミュレーションを行う際の重要な基礎データとなった。

## 5. 現時点での蒸気卓越型地熱資源に関する理解と今後の課題

以上のような経緯により、現時点での蒸気卓越型地熱資源に関する理解は以下のようになっている。

1) Whiteほかのモデルは適切である。

Whiteほかのモデルは蒸気卓越型地熱系を適切に表している。ただし、蒸気卓越ゾーンの厚さはモデル図でイメージされたものよりもかなり薄く、その存在が容易に認識できない場合もある可能性がある。

2) 蒸気卓越型地熱系の形成には低浸透率の遮蔽構造が不可欠である。

蒸気卓越型地熱系の形成と乾き蒸気生産のための最大のポイントは、貯留層の上部と側面に低浸透率の遮蔽が存在することである。上部のそれはキャップブロックと呼ばれる。これにより、熱水の流入が制限され、その結果、蒸気卓越ゾーンが形成されたり、蒸気卓越ゾーン以深の熱水ゾーンに掘削された坑井から生産される流体が乾き蒸気となるほどの大きな圧力低下が可能になる(注7)。その浸透率は $5 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ 程度であって、それより大きくても小さくても適当ではない。

3) 熱入力は熱水型地熱系に比べて少なくともよい。

キャップブロック下面深度が $300 \text{ m}$ 程度であれば、 $1.5 \text{ W/m}^2$ 程度の熱入力で蒸気卓越型地熱系は安定に存在しうる。これは、熱水型地熱系の $1/2$ から $1/3$ 程度の値である。

蒸気卓越型地熱系に関して、いまだ未解決の、今後の課題は以下の通りである。

1) ブライン(高塩濃度熱水)は存在するのか?

Whiteほかのモデルの特徴の一つにブラインがある。しかし、このブラインは未だどの蒸気卓越型地熱地帯においても確認されていない。果たして本当にブラインは存在するのか。その必然性はどうなのか。ブラインに関しては、必ずしもその存在は不可欠ではないのではないか、との意見もあり、興味深い課題で



ある。

## 2) 発生確率は熱水型に比べて低いか？

現在、商業規模の地熱発電の開発が行われている地熱地帯は、そのほとんどが熱水型であり、蒸気卓越型の地域はきわめて少ない。蒸気卓越型地熱系は、熱水型地熱系と比べると、低浸透率の遮蔽が必要という点で発生条件が厳しくなる。このため、一般には、蒸気卓越型地熱系は熱水型地熱系に比べて発生確率が低いと考えられている。しかし、少ない熱入力でも維持されうることから、熱源に対する要求は少し緩やかである。これらの点がどのように相殺されるのか、その結果、発生確率はどのように違うのか、興味深い課題である。

なお、温泉が活発に自然湧出する熱水型地熱系に比べて、蒸気卓越型地熱系では地表地熱活動（温泉湧出や自然噴気）は遙かに少ない。このため、発見しにくいという問題があるが、それは別の問題である。

## 3) 対流の振動は起きていたのか？ その痕跡を地学的に確認できるか？

ここでは触れなかったが、蒸気卓越型地熱系は、熱的に十分発達した後で、対流パターンが振動する可能性がある（例えば、花野、1994）。これに関する研究はまだ十分行われていないが、この痕跡を地学的に、例えば鉱物学的手法などによって確認できるかどうかは非常に興味を持たれる課題である。

## 6. 蒸気卓越型地熱系の理解進展の要因

終わりに、以上述べてきた蒸気卓越型地熱系の理解進展過程をまとめてみると以下のように思われる。

### 1) データの充実（質・量）が新たな解釈を促した。

具体的には、掘削本数や深度の増加、地域数の増加（色々な個性を持つ地域の事例の増加）、コア採取や検層、化学分析、物理探査等の技術の発達による新たな種類のデータの出現とその質・量の増加である<sup>(注8)</sup>。

### 2) 数値解析技術の発達で新たな解釈を可能にした。

具体的には、地熱現象に関する種々の定量化が可能になったことから、過去のデータに基づく再解析、再検討が進んだ。同時に、概念モデルの成否を問う定量的テストが可能になった。これにより、現実起こりうる可能性のあるモデルを取捨選択できるように

なった。

### 3) 「さらに深く知りたい意欲」が「正当な思い違い」

を恐れぬチャレンジングな努力を続けさせた。

新たな材料（データ）や新たな武器（数値解析技術）が出現しただけでは理解は進まない。「より深く理解したい」という人間的な欲求がチャレンジングな努力を行わせた、という人間的な側面も忘れることはできないだろう。地学現象の理解では、簡単に正解にはたどり着けない。蒸気卓越型地熱資源に関しても、まだ正解にたどり着いているのかどうか分からないのである。「正当な思い違い」<sup>(注9)</sup>はこのような努力の過程で避けることのできないことなのだどと割り切って、その時その時で行いうる最大限の努力をこれからも行っていくのであろう。

注1 現在商業規模の地熱発電が行われている地熱資源には、熱水型地熱資源と蒸気卓越型地熱資源がある。これらの概要は、日本地熱学会のホームページの「地熱について」にやさしく説明されているので参照されたい(<http://www.soc.nii.ac.jp/grsj/>)。

注2 イメージ的には、多孔質媒体の一端（例えば下端）が加熱されて水が沸騰して蒸気が生じて他方（例えば上端）に移動し、そこで外部からの冷却によってそれが凝縮して水となって元の場所へ戻るといった循環系が形成されている。これは、ヒートパイプと呼ばれる現象であり、沸騰と凝縮により非常に高効率で熱が輸送される。

注3 蒸気ボイラー内の水（ボイラー水）は蒸気供給に伴う沸騰により、給水中の不純物（カルシウム、マグネシウム等の硬度成分や溶解固形分）が濃縮する。Whiteほかのモデルが考えられた時、このことがイメージされていた可能性が高い。実際、第1図を描き直したとされる第10図は、立てボイラーのイメージに似ている部分がある。

注4 熱水の体積は、250℃の状態では、蒸気の約40分の1である。

注5 通常の掘削では掘削ザク（岩石片）の地上への回収に高粘性の泥水を用いるが、泥水の代わりに高速の空気によって掘削ザクの回収を図るのがエア掘である。掘進率が早く、蒸気層に遭遇した場合には蒸気噴出によってそれがすぐに確認できる上、坑井を冷却しないことから掘削終了後直ちに蒸気生産を行えるという利点があるが、掘削用具の損耗が

早い。回収される掘削ザクがパウダー状で熱による影響を受けているため、正確な地質判定が困難という難点もある。

- 注6 「入会地の悲劇(コモングの悲劇)」である。新規参入業者は、投資を回収して利益を確保するために我先に蒸気を多量に生産したところ、地域全体では過剰生産の状態に陥ってしまい、結果的に全ての業者の蒸気生産量が大幅に減衰した。このため、縁辺部に位置する条件の劣る貯留層を開発していた新規業者から撤退が始まったが、中心部の最優良地域を以前から開発していたUNOCAL社も大打撃を被った。
- 注7 蒸気卓越ゾーン以深の熱水ゾーンに掘削された坑井から乾き蒸気が生産される事例については、例えば、花野(1994)を参照されたい。
- 注8 技術開発が寄与した一例：1960年代の岩手県松川地域の開発時に、200℃を超える坑内の温度検層技術が実用化されたことが有益なデータの取得につながり、1980年代の再検討による初期状態の理解進展に大きく役立った(例えば、花野, 1994)。
- 注9 地学現象の解釈を行う際、必要かつ十分なデータが得られていることはまずない。そういった状況の中でもなんとか理解の進展を図りたいとの思いでベストを尽くして得られたモデルや定式化が、後年、新たなデータや解析手段の出現による再検討によって否定されたことは過去に何度もあった。これらは結果的には思い違いではあっても、次の時代の検討の礎やヒント、引き金になったはずである。これがここで言う「正当な思い違い」である。後々、花を咲かせるための培養土とするつもりで、考えたことを、論拠も含めてきちんと書き残すことが我々の使命なのだろう。

#### 引用文献

- Barker, B. (2000) : The Geysers: Past and Future. Geothermal Resources Council Bulletin, 29 (5), 163-171. (邦訳：ベンジャミン・バーカー(著)安川香澄(訳) (2001) ガイザース地熱地帯：その過去と将来. 地熱, 38, 292-304.)
- Barker, B.J., Gulati, M.S., Bryan, M.A. and Riedel, K.L. (1992) : Geysers reservoir performances. Monograph on The Geysers Geothermal Field. Geothermal Resources Council, Special Report No.17, 167-177.
- Cataldi, R. and Sommaruga, C. (1986) : Background, present state and future prospects of geothermal development. Geothermics, 15, 359-383.
- D'Amore, F. and Truesdell, A.H. (1979) : Models for steam chemistry at Larderello and The Geysers. Proceedings of the 5th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, 283-297.
- Grant, M.A. (1979) : Mapping Kamojang reservoir. Geothermal Resources Council Transactions, 3, 271-274.
- 花野峰行 (1994) : 松川地熱地域における貯留層学的調査. 日本地熱学会誌, 16, 255-284.
- Hanano, M. and Kajiwara, T. (1999) : Permeability associated with natural convection in the Kakkonda geothermal reservoir. Geothermal Resources Council Transactions, 23, 351-360.
- 早川正巳 (1988) : 地球熱学. 東海大学出版会, 324p.
- Ingebritsen, S.E. and Sorey, M.L. (1988) : Vapor-dominated zones within hydrothermal systems: evolution and natural state. Journal of Geophysical Research, 93, 13635-13655.
- Lipman, S.C., Strobel, C.J. and Gulati, M.S. (1978) : Reservoir performance of The Geysers field. Geothermics, 7, 209-219.
- 森 康夫・陶山淳治 (1980) : 地熱エネルギー読本. オーム社, 233p.
- 中村久由 (1964) : 地熱の開発と利用. 地学出版社, 153p.
- 日本機械学会 (1980) : 蒸気表. 日本機械学会, 124p.
- O'Sullivan, M.J., Barnett, B.G. and Razali, M.Y. (1990) : Numerical simulation of the Kamojang geothermal field, Indonesia. Geothermal Resources Council Transactions, 14, 1317-1324.
- Pruess, K. (1985) : A quantitative model of vapor dominated geothermal reservoirs as heat pipes in fractured porous rock. Geothermal Resources Council Transactions, 9, Part 2, 353-362.
- Schubert, G. and Straus, J.M. (1979) : Steam-water counterflow in porous media. Journal of Geophysical Research, 84, 1621-1628.
- Schubert, G. and Straus, J.M. (1980) : Gravitational stability of water over steam in vapor-dominated geothermal systems. Journal of Geophysical Research, 85, 6505-6512.
- Stockton, A.D., Thomas, R.P., Chapman, R.H. and Dykstra, H. (1984) : A reservoir assessment of The Geysers geothermal field. Journal of Petroleum Technology, December 1984, 2137-2159.
- Straus, J.M. and Schubert, G. (1981) : One-dimensional model of vapor-dominated geothermal systems. Journal of Geophysical Research, 86, 9433-9438.
- Truesdell, A., Walters, M., Kennedy, M. and Lippmann, M. (1993) : An integrated model for the origin of The Geysers geothermal field. Geothermal Resources Council Transactions, 17, 273-280.
- White, D. E., Muffler, L.J.P. and Truesdell, G. (1971) : Vapor-dominated hydrothermal systems compared with hot-water systems. Economic Geology, 66, 75-97.
- Zen, M. T. and Radja, V. T. (1970) : Result of the preliminary geological investigation of natural steam fields in Indonesia. Geothermics, Special Issue, U. N. Symposium on the Development and Utilization of Geothermal Resources, Pisa 1970, Vol.2 Part I, 130-135.

HANANO Mineyuki (2010) : Clues to improvement of understanding of vapor-dominated geothermal resources.

< 受付 : 2009年11月10日 >