

## 解 説

## 地熱生産管理のための地熱レザヴァーの概念

安達正畝<sup>1)\*</sup>, 有木和春<sup>2)</sup>, 後藤弘樹<sup>3)</sup>, 佐伯和宏<sup>4)</sup>, 森田誠也<sup>5)</sup>

(平成 26 年 1 月 28 日受付, 平成 26 年 2 月 26 日受理)

## A Conceptual Model for Controls of Geothermal Reservoirs

Masaho ADACHI<sup>1)\*</sup>, Kazuharu ARIKI<sup>2)</sup>, Hiroki GOTO<sup>3)</sup>,  
Kazuhiro SAEKI<sup>4)</sup> and Seiya MORITA<sup>5)</sup>

## 要 旨

温泉帯水層と地熱レザヴァー（地熱貯留層）の大きな相違点は次の様に考えられる。温泉は百数十℃以下の熱水を対象とするため、温泉帯水層は相対的に浅い所にあり、空隙率の高い地層中および断裂中の主として天水循環系を対象とし、天水の影響を大きく受ける。地熱熱水は二百数十℃～三百数十℃の熱水を対象とし、地熱レザヴァーは高温を保持するための地質構造が形成されている相対的に深い所にあり、天水の影響を短時間で受け難い。このような地質構造とは如何なるものなのか、地熱の三要素である熱源・水・構造の特徴を理解するための静的な調査だけでなく、動的な調査としてのモニタリングが地熱開発の前後にわたって行われてきた。本稿では、こうした調査・研究の積み重ねによって地熱開発事業者が現在抱いている地熱レザヴァーの概念について整理することを試みる。また、最適な蒸気生産を目指す目的で我が国の地熱発電所において行われている地熱生産管理の実態の一部について記述する。更に、参考までに温泉モニタリングと温泉の状態が変動する要因について紹介する。

キーワード：地熱レザヴァー概念モデル、地熱レザヴァーモニタリング、還元、涵養、生産管理

## 1. はじめに

我が国の地熱生産管理は 1966 年の松川地熱発電所運開（運転開始）に始まる 47 年の歴史を有す

<sup>1)</sup>国際石油開発帝石(株) 〒107-6332 東京都港区赤坂5-3-1 赤坂Bizタワー。 <sup>1)</sup>INPEX CORPORATION, Akasaka Biz Tower, 5-3-1 Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107-6332, Japan. \*Corresponding author : E-mail masaho.adachi@inpeco.jp, TEL +81-3-5572-0232, FAX +81-3-5572-0235.

<sup>2)</sup>三菱マテリアル(株) 〒100-8117 東京都千代田区大手町1-3-2 経団連会館。 <sup>2)</sup>MITSUBISHI MATERIALS CORPORATION, KeidanrenKaikan, 1-3-2 Ohtemachi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8117, Japan.

<sup>3)</sup>出光興産(株) 〒100-8321 東京都千代田区丸の内3-1-1。 <sup>3)</sup>IDEMITSU KOSAN CO., LTD., 3-1-1 Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8321, Japan.

<sup>4)</sup>奥会津地熱(株) 〒969-7321 福島県河沼郡柳津町砂子原上ノ平1034-1。 <sup>4)</sup>OKUAIZU CO., LTD., 1034-1 SunakoharaKaminotaira, Yanaizu-cho, Kawanuma-gun, Fukushima-ken 969-7321, Japan.

<sup>5)</sup>日鉄鉱業(株) 〒100-8377 東京都千代田区丸の内2-3-2 郵船ビル。 <sup>5)</sup>NITTETSU MINING CO., LTD., Yusen Building, 2-3-2 Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8377, Japan.

る。初期の地熱開発の技術は石油開発や地下水開発の技術を転用したものであったが、石油ショック後の地熱開発が促進された時期に、新エネルギー総合開発機構（現：新エネルギー・産業技術総合開発機構、以下「NEDO」）を中心に地熱独自の技術開発が行われた。特に、1995年前後の地熱発電所運開ラッシュ以降、地域特性に応じた地熱生産管理が各地熱発電所で実践され、技術の蓄積がなされた。

海外では熱水を地下に還元せずに河川や海に放流していた地熱発電所もあったが、我が国では、当初から熱水の地下還元が行われた。熱水還元は地熱流体の涵養に寄与するが、還元熱水の生産領域への回帰が早過ぎると、地熱レザヴァー内の流体の低温化を招くこともあり、持続的生産のためのバランスを取る必要がある。このため、モニタリングとシミュレーションの技術が蓄積され、地熱レザヴァーの概念が改良されてきた。本稿では、これまでに蓄積されてきた地熱に関する各種の知見の中から、地熱発電の温泉影響を議論するにあたって重要な、地熱レザヴァーの概念モデルとモニタリングおよび温泉モニタリングの概要を紹介する。

## 2. 地熱レザヴァーのモニタリング

### 2.1 大霧，澄川，滝上，柳津西山地熱地域

地熱流体の生産開始によって地熱レザヴァーの状態が変化するので、生産開始前後の温度・圧力・流量・化学成分の変化をモニタリングする必要がある。モニタリングの手法は地域特性に応じて様々な手法が採用されている。筆者らの関係する大霧，澄川，滝上，柳津西山の各地熱地域の地熱レザヴァーのモニタリングも各所各様である。これら4地域および本稿に記述される葛根田，八丈島，八丁原の坑井設備配置図を本稿末の別添図（付図1～7）に示す。

大霧では、生産井掘削に伴う土地改変面積を最小限にするため、三つの基地に生産井が集約され、各基地から3～8本の生産井が掘削されている。圧力は生産井ごとに連続測定されているが、流量は基地ごとに連続測定されている。また、過熱蒸気が噴出する生産井では連続した温度測定が行われているが、その他の生産井の地熱流体は飽和状態（沸点）であるため、温度は圧力から換算される。地化学モニタリングに関しては、分析項目が生産井ごとに異なり、分析項目により月1回から半年に1回、蒸気・熱水・非凝縮性ガスが採取・分析されている。坑井内の温度・圧力・流量検層（PTS検層）は、代表的な生産井について年1回程度実施されている。地熱レザヴァーについては、観測井によって連続的に温度・圧力が計測されている。還元井からの還元熱水は、化学モニタリングの解析およびトレーサー試験によりその一部が生産井へ回帰していることが確認されており、地熱レザヴァーの圧力維持に寄与している。

澄川では、大霧と同様に生産井が二つの基地に集約され、基地ごとの蒸気流量と熱水流量が、複数の生産井からの噴出流体を気水分離する気水分離器の下流で測定されている。生産井ごとの流量については、トレーサー希釈法による二相流流量測定が2回/年程度行われ、更に、原則1回/4年の発電所法定点検による発電停止時などに差圧式流量計で測定されて、経時変化が把握されている。生産井ごとの噴出エンタルピーは流量データから求められる。還元井ごとの還元流量はそれぞれ差圧式流量計で測定されている。坑口圧力は生産井と還元井それぞれ坑井ごとに連続測定されている。地化学モニタリングに関しては、定期的（4回/年）に蒸気・熱水・非凝縮性ガスが採取・分析され、地熱流体の性状の把握、地熱レザヴァーおよび坑井の挙動把握に活かされている。坑井の挙動に変化が認められた場合、あるいは坑井工事計画を検討する場合など必要に応じて、温度・圧力・流量検層（PTS検層）、キャリバー検層（坑径検層）やトレーサーテスト（干渉試験）などの坑井調査が実施されている。

滝上では、蒸気と熱水を分離する気水分離器が生産井ごとに設置されており、気水分離器出口配管に取り付けられた渦流量計により生産井ごとの蒸気流量が測定されている。還元井においても還元井ごとに設置された差圧式流量計により還元熱水量が測定されている。生産井では坑口圧力、気水分離器出口圧力、蒸気流量および熱水流量、そして還元井では還元基地入口圧力と還元熱水流量がモニタリングされている。坑井ごとの流量の把握は経年的な流量変化のみならず、生産設備制御システムの不具合の早期発見にもつながり、地熱レザヴァー管理上はもちろん、保守・保安上も有効である。地化学モニタリングに関しては、年2回の頻度で蒸気・熱水・非凝縮性ガスが採取・分析されている。また、2年ごとの発電所定期点検工事に伴う生産井の噴出停止に合わせ、噴出停止直前に生産井内の噴出中温度検層および、観測井の温度・水位検層が実施され、貯留層内の温度・圧力変化がモニタリングされている。このような地熱レザヴァーモニタリング結果を基に、補充掘削する生産・還元井の最適な配置が検討されている。

柳津西山では、生産井毎の気水分離は行われず、二つの基地に設置された気水分離器による集合気水分離が行われている。気水分離器毎に渦流量計によって蒸気流量が測定され、差圧式流量計によって熱水流量が測定されているが、同時に、生産井毎にも差圧式二相流計測法によって圧力が連続測定され、気水比を仮定して流量が計算されている。仮定した気水比の校正はトレーサー希釈法による二相流流量測定により年1回行われる。生産井毎の流体温度は飽和蒸気・熱水については圧力から換算されるが、坑口の袖管から温度計を挿入して直接的に温度を測定することにより、過熱度が測定されている。柳津西山は蒸気卓越型の噴出であるため、過熱度の測定の重要性が当初から認識されており、測定は月1回の高頻度で行われている。地化学モニタリングに関しては、分析項目により年1~4回の頻度で蒸気・熱水・非凝縮性ガスが採取・分析されている。坑井内の温度・圧力・流量検層(PTS検層)については生産井ごとに数年に1回程度の頻度で行われている。また、生産開始前後の地熱レザヴァーの質量欠損の変化をモニタリングする目的で重力測定が1994年から2000年まで毎年行われた。その結果、判明していることは、①還元井から生産井への還元熱水の回帰が認められない(安達, 2007)。②2010年に実施された地磁気地電流法比抵抗探査(MT法)三次元解析の結果、生産領域の高温部を取り囲むように低比抵抗帯が認められ、これは難透水性の粘土化変質岩からなる帽岩と考えられる(Uchida, *et al.*, 2011)。③このため、浅所の冷水侵入は認められず、周囲および深部からの熱水の供給が不足しているため過熱化が生じている。④試験的に深部への注水を行っている涵養井からの生産領域へのコールドスweepによる弊害は認められず、注水涵養は地熱レザヴァーの圧力維持と過熱化緩和に有効な対策となり得る可能性がある、ことなどである。

## 2.2 葛根田地熱地域

坑井内の温度・圧力変化をモニタリングした例として公開されている論文としては、小原(1988)と笠井ら(1990)があり、教科書的な一例として紹介する。小原(1988)は葛根田において、開発地域から3km離れた所に掘削された観測井では発電開始後も水位変化がほとんどなかったが、開発地域に近くなるにつれて水位変化が大きくなるのが観測された、と記述している。一方、開発地域内で起こる現象は、生産井で毎年測定される坑井追跡調査の測定結果の解析から把握できるとしている(図1)。この図には、1978年5月26日の運開前と運開後1982年までの5回分の坑井内温度・圧力検層結果が示されている。図2には引き続き1983年から1987年までの5年間の坑井内温度・圧力検層結果が示されている(笠井ら, 1990)。小原(1988)および笠井ら(1990)はこれらの温度・圧力プロファイルの詳細な解説をしていないが、これらの図からは次のことが読み取れる。

- ① 垂直深度200mから坑底1,265mまでの圧力は10年間にわたって熱水単相の直線を示す。

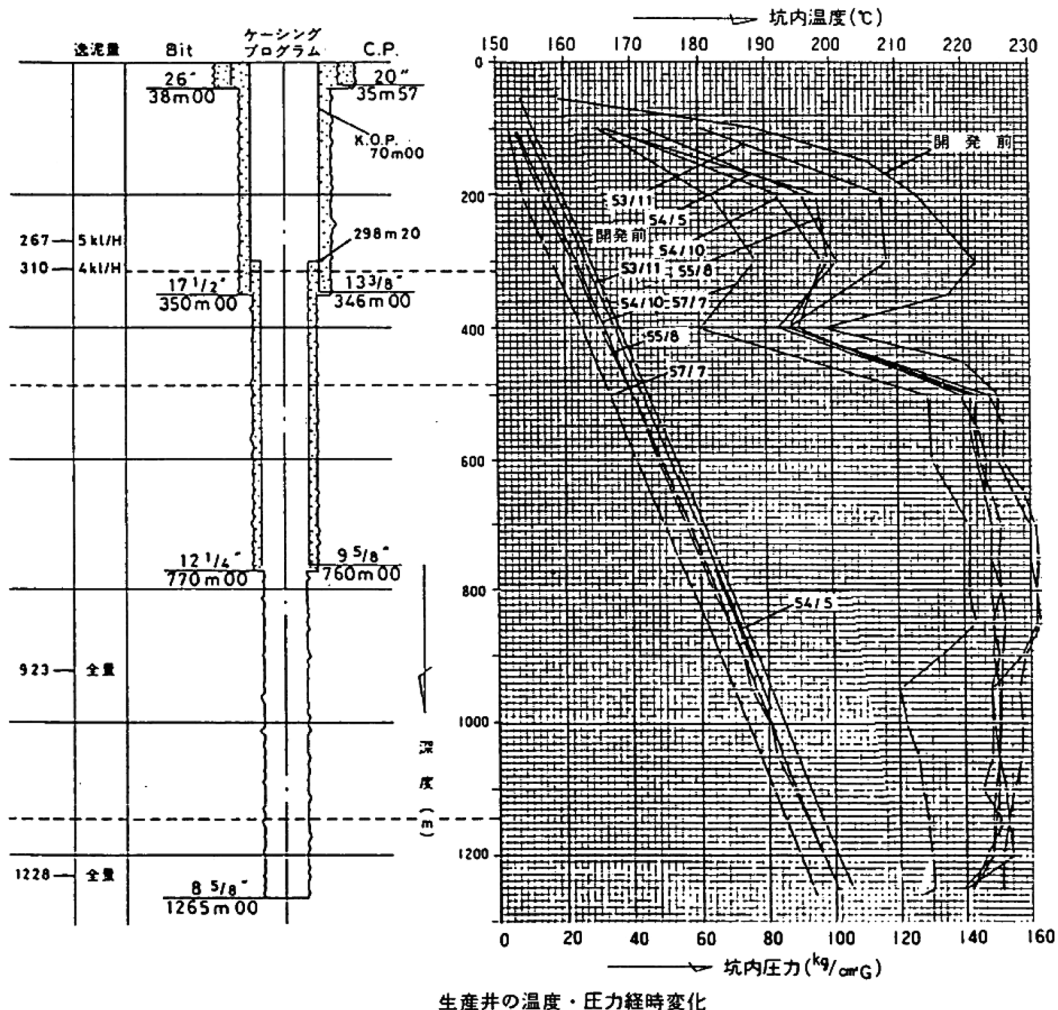


図 1 葛根田の坑井内検層モニタリング (1978-1982 年; 小原, 1988).

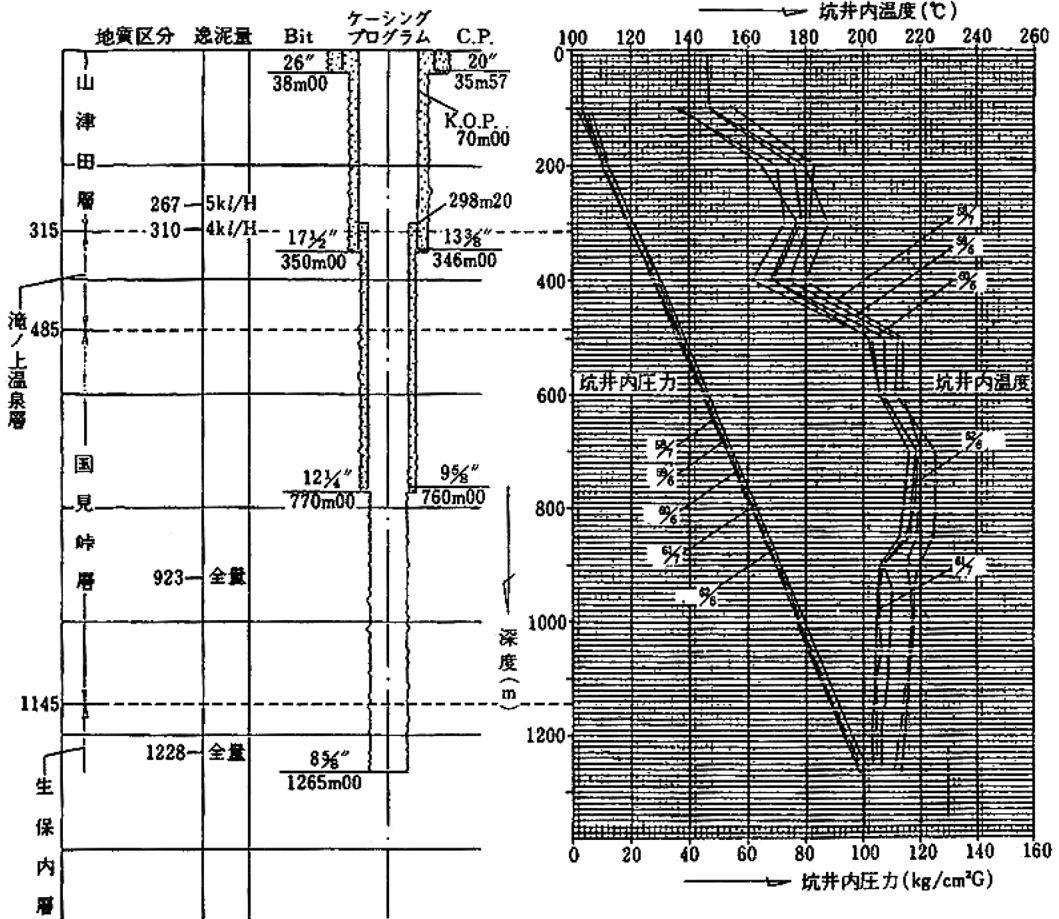
② 初めの 5 年間で約  $12 \text{ kg/cm}^2\text{G}$  の圧力低下が認められるが、次の 5 年間は約  $3 \text{ kg/cm}^2\text{G}$  の低下に留まっている。

③ 坑内水位から逸水深度 310m まで温度が上昇した後、深度 400m までは逆に温度が低下するので、310m 付近の地層中にその上下より高温の流体が賦存する。

④ 深度約 500m まで急激に温度が上昇した後、深度約 600m までほぼ同じ温度が続き、再び、深度約 700m まで温度が上昇し、深度約 850m までほぼ同じ温度が続き、開発前の後者の温度は約  $230^\circ\text{C}$  の最高温度を示す。それ以深は温度が低下し、約  $225^\circ\text{C}$  になる。この二つの高温・等温区間には地層中に地熱流体の対流ゾーンが存在する。

⑤ 温度・圧力プロファイルの形状は 10 年間相似形を示す。

⑥ 以上のモニタリング結果から、熱水卓越型の地熱レザヴァー内で、圧力の低下と対応する温度低下が初期に大きく、やがて収斂する様子が認められる。



生産井の温度・圧力経時変化 (小原, 1988に追加)

図 2 葛根田の坑井内検層モニタリング (1983-1988年; 笠井ら, 1990).

### 3. 地熱レザヴァーの概念

#### 3.1 熱源

大半のマグマは地下数 km の深度に定置してその一部を溶岩や火山灰として地上に噴出させるが、定置したマグマはやがて冷却して固結し、深成岩や半深成岩を形成する。この熱源は熱伝導によって周囲の地層・岩体を温めて自身を含む高温岩体を形成するが、この異常高温部に生成される割れ目系に天水や、地層中の化石海水、マグマから発散する熱水などが供給されると対流が生じて、より浅所まで異常高温部ができるようになる。地熱発電に利用する熱源はマグマの浅所貫入に由来する高温岩体が持つ熱を対象とするのが経済的であるので、第四紀火山岩分布地域で古くても数 10 万年前からの火山活動履歴を持つマグマの後火山活動による熱がターゲットとされている。

熱源の一例として、真鍋ら (1984) は、「八丁原地区の地熱活動は、約 30 万年前に始った九重火山の活動の後火山作用によるものと推定される」、「噴出流体中にマグマ発散物の強い影響が認められないことから、現在は直接の熱源ではないと解釈される」と記述し、マグマ自体というよりマグ

マからの熱伝導で温められた高温岩体を直接的な熱源と考えている。

一方、火山島なので熱源が分かりやすい八丈島の場合、島の基盤には新第三紀層があり、第四紀火山岩は 200 万年前のものから 4 千年前に降現在に至るものまで 6 ステージの火山活動に分類されており、最も若い西山火山体 (八丈富士) よりも古い 40 万年前から 4 千年前まで活動した東山火山の山麓にむしろ高温の中心がある (NEDO, 1993)。

## 3.2 水

### 3.2.1 起源

湯原 (1980) は、「現在もっとも多くの人に支持されている考えは、熱水や水蒸気の中に、数%程度のわずかの岩しょう起源の水の存在を否定することはできないが、ほとんどは地下水が加熱されたもの、すなわち、天水起源であるとする考えである」と記述している。

真鍋ら (1984) は、「八丁原地区の貯留層中の熱水はほとんど全てが地表水起源である。この一部は基盤岩中にまで浸透し、290~300℃まで加熱され、同時に、周辺の岩石と反応して Cl 型熱水を作るものと推定される」と記述し、八丁原の事例ではマグマ水の寄与が認められないとしている。

NEDO (1993) は、八丈島では、新第三紀層中に確認された浅部地熱流体は、流体包有物の塩濃度から推定される海水約 1 : 天水約 2 の混合による深部地熱流体が地層内フラッシュして生成されたものであると推定している。また、海岸付近の浅所の温泉帯水層は天水と海水の混合した地下水が熱伝導によって温められたものであるが、二酸化炭素の寄与を受けている可能性がある、とし、さらに、温泉帯水層は「相互の相関は低く、それぞれ独立した生成機構を持っていると考えられる」としている。

近年、非火山性高温温泉として知られる有馬型温泉の起源として、マグマを経ずにマントルから直接上昇するスラブ水に求める議論が幾つか発表されているが (例えば、Kazahaya, 2006)、地熱熱水へのスラブ水の直接的な寄与を認めた例はまだなく、地熱熱水は天水と海水、化石海水、マグマ水が、地域によって異なる割合で混合して生じた塩水からなると考えられている。

### 3.2.2 還元熱水の生産井への還流

還元熱水の還流には二つの意味がある。それが短期間で還流すると地熱流体を冷やすので蒸気流量の減少につながるコールドスイープ現象のような弊害をもたらす場合と、十分熱せられて還流すると地熱レザヴァーの圧力低下を防ぎ、安定生産に寄与する場合の二つである。従って、還元井の位置を適切に配置することが肝要であり、平面的に十分離す方法、生産深度より深い位置に還元位置を設ける方法など地熱レザヴァーの特性に応じた工夫が積み重ねられている。

窪田・松葉谷 (1998) は大沼地熱発電所について、「レザーバー (筆者注: 原文用語のまま) 中の流体質量は年間の噴出量の約 1.0 倍 (1984 年以降は 1.2 倍) で、還元した熱水の約 75% はレザーバーに戻り、その流体と混合して再び噴出している」と記述し、「熱収支、物質収支が保たれ、その結果として安定した発電が継続されてきたものと考えられる」と報告している。

## 3.3 構造

### 3.3.1 割れ目系

伊東ら (1977) は、「還元熱水は、溶岩と火山性碎屑物の層中を約 100 m の厚さをもつ層状の流れとなって流動している」、「還元熱水の流れている部分は特に孔隙性 (筆者注: 原文用語のまま) が良いわけではないので、熱水は割れ目系に支配されて流動していると解さざるを得ない」と記述しており、割れ目系が層状に分布する一面を記載している。これに対して、角 (1980) は、「第四紀火山は貯留槽 (筆者注: 原文用語のまま) としてより、むしろ割れ目 (熱水の上昇通路) の成因

としての構造的意味をもつものである・・・」と記述し、縦型の割れ目系を重視している。中村(1982)は、「地熱流体が存在する地域は、一般に石油や地下水を胚胎する地層よりかなり堅い岩石、地層で構成される場所が多いため、岩石、地層のもつ本来の孔隙率だけに期待してこれらの岩石、地層中に坑井を掘削してもほとんど使用できるほどの流量が得られず、いわゆる空井戸になることが多い。言い換えると、このような堅い岩石、地層中で流体が流動できるのは、これらの岩石、地層中に発達する割れ目を通してでしかないということである」と記述しており、ここでは割れ目系の縦型、横型といった空間的な形状には言及していない。

中野ら(1983)は、「地熱リザーバーの裂か系は、陥没構造形成およびその発展過程で形成される裂か系が第四紀火成-地塊運動によりリオープニング・再活動した裂か系と、第四紀マグマの上昇による突き上げ裂か系とが合成された第四紀の造構運動を重要な契機とする歴史的産物であると考えられる。」とする「試論」を展開している。

真鍋ら(1984)は、「大岳・八丁原の地熱系は深部に流入した地表水が先第三紀基盤岩中で加熱されて、新第三紀から第四紀の火山岩中に貯留されたものと推定される。」「大岳・八丁原地熱地帯では、高温岩体である先第三紀基盤岩が作る凸構造は、地熱流体がしばしばその上部で裂かを通路とした熱対流の一つの原因となっている」と記述し、縦型の割れ目系を重視している。

このように、地熱流体は岩石・地層が本来持つ空隙でなく、割れ目系を流動するという考え方が支配的であるが、その流動方向と空間的形状については単純でない。Liotta *et al.* (2010) はイタリアのラルデレロ地熱系について、割れ目系を通じて深部から上昇した地熱流体が浅所で高い孔隙率を持った等方性の地層中を対流する概念モデルを示している(図3)。日本では多くの場合、急傾斜の割れ目が主要な上昇流の通路と考えられており、上昇流が同一の割れ目内で下降する対流を形成する場合もあるが、側方流動して別な断裂を下降する場合もあると考えられ、後者では平面的に拡がった地熱レザヴァーが形成される。側方流動が浅所の高い孔隙率を持つ地層に支配される場合と、何らかの原因で割れ目系が平面的に発達した場合(伊東ら, 1977)のいずれも存在するものと考えられる。

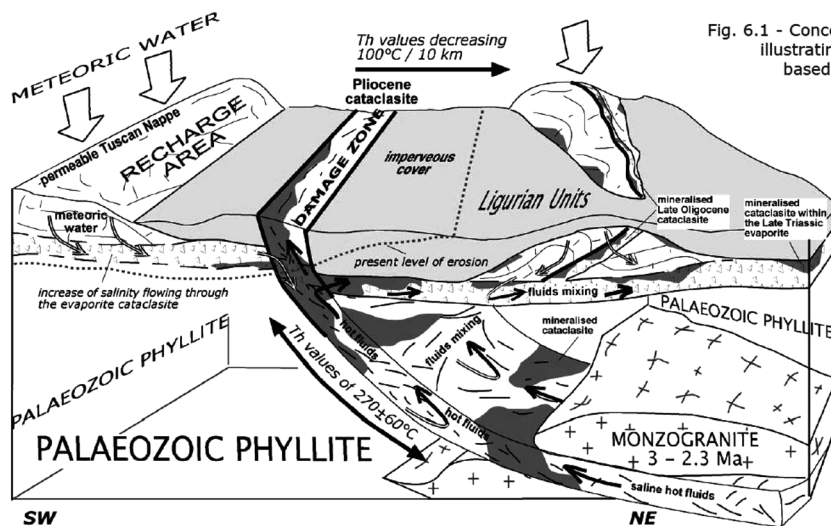


Fig. 6.1 - Conceptual cartoon, not to scale, illustrating the path of the fluid flow, based on the results of our study. Meteoric water infiltrated to depth through the damage zone of the Boccheggiano fault and through the permeable Tuscan Nappe fractured and porous rocks. At depth, down to the monzogranite, heating and mixing with deep fluids originated hydrothermal mineralizing fluids, upflowing toward the surface and pervading the existing cataclasites and locally mixing with meteoric water (From Liotta *et al.*, 2010).

図3 イタリア ラルデレロの地熱レザヴァー概念モデル (Liotta *et al.*, 2010).

### 3.3.2 帽岩 (キャップロック)

地熱レザヴァーが形成されて温存されるためには、地上への流出と低温地下水の混入による温度低下を防ぐ機構が必要であり、この機構は地熱レザヴァー形成前から存在していた難透水性の地層と、地熱流体による粘土化変質 (自己閉塞) で新たに生成されたものの双方が考えられている。

柳津西山では新第三紀の泥岩層が帽岩の役割を担っていると開発前に考えられたが、データが集積するにつれて粘土化変質による自己閉塞の重要性が強調されている (関・安達, 1997)。

真鍋ら (1984) は、「Cl 型の深部熱水貯留層の帽岩は断層の主として上部に発達するカオリンパイロフィライト帯であるが、その他硬石膏、方解石、石英などの鉱物が裂か中に沈積した部分もその役割を果たしている」と記述している。

### 3.4 概念モデルの例

地熱開発では熱・水・構造の地熱三要素によって生じる地熱現象・地熱微候を整合的に説明可能な概念モデルを作ることが重要である。

断裂支配型の典型的な例として、八丁原の地熱レザヴァー概念モデルが真鍋ら (1984) に示されている (図 4)。このモデルによると、集水盆から地下深部の基盤岩まで浸透した地下水が基盤岩の凸部の高温岩体中で加熱されて、基盤岩凸部の上部に生じている断層 (小松池副断層) の主として下面に沿って上昇する。上昇した熱水は断層の上部でカオリンなどの粘土鉱物を生成して難透水層の帽岩 (キャップロック) を形成し、更に側方流動して帽岩の範囲を平面的に広げる。帽岩は地表から浸透する冷たい地下水の浸入と地熱熱水の地表への逸出から地熱レザヴァーを守るが、難透

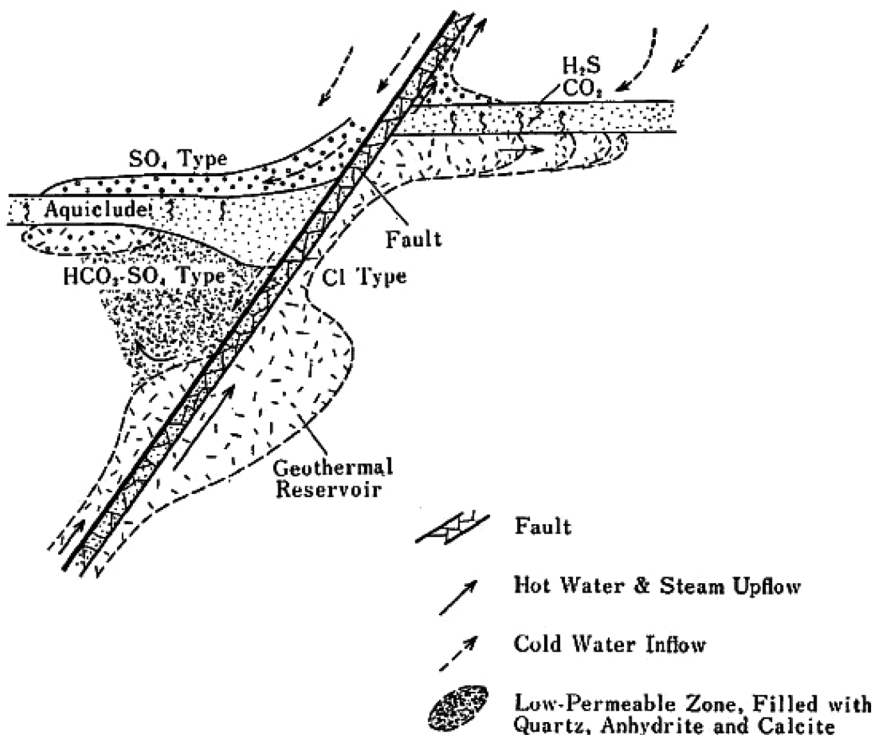


図 4 八丁原の地熱レザヴァー概念モデル (真鍋・江島, 1984)。



水層でも通過できる硫化水素や炭酸ガスなどの気体は帽岩を通過して上昇し, 地下水に溶け込んで  $\text{SO}_4$  型の熱水などを生じる。

#### 4. 温泉資源と地熱レザヴァー

ここまで, 地熱生産管理のための地熱レザヴァーの概念とそのモニタリングについて述べた。以下に温泉モニタリングと温泉の状態が変動する要因について紹介する。

温泉モニタリングとして, 発電所操業開始前の温泉の状態を把握するため, 地熱探査の初期段階から, 温泉の泉温, 湧出量 (自然湧出でない温泉の場合は水位), 泉質 (流体性状) のモニタリングを実施する必要がある。かつ, 温泉事業者と地熱開発事業者の情報共有に留意することが重要である。

温泉の状態変化をもたらす要因として, 下記がある (日本地熱学会地熱発電と温泉の共生を検討する委員会, 2010)。

##### 【自然要因】

- ・降雨, 降雪, 積雪
- ・河川, 湖沼水位
- ・潮汐
- ・地震
- ・火山活動
- ・気圧変化
- ・泉源のスケール付着
- ・その他

##### 【人為的要因】

- ・ダム・貯水池工事
- ・河川・護岸工事 (地滑り防止対策の水抜き孔掘削含む)
- ・トンネル・隧道工事
- ・道路・広域駐車場工事
- ・温泉井戸同士の干渉, 乱開発
- ・泉源のスケール浚渫, 改修工事
- ・森林伐採
- ・土地改良工事
- ・その他

地熱発電のための坑井が温泉資源に影響を及ぼす場合の要因は, “人為的要因である温泉井戸同士の干渉, 乱開発” に該当する。仮に, 温泉の状態に変動が生じた場合, 地熱開発の温泉への影響有無の判定は, 前述の温泉の状態変化をもたらす要因を検討するとともに, 野田 (1994) が示した下記の手順で進めることが望ましいと考えている。

- ① 温泉と地熱貯留層の泉質 (流体性状) は類似しているか?
- ② 同一水位か (水理的なつながりの有無を検討)?
- ③ データに基づいた科学的な総合解析 (必要に応じて地熱系概念モデルや温泉変動のモデルを作成)。

地熱発電の温泉への影響に対する懸念があることから, 温泉と地熱発電の共生は重要なテーマである。地熱発電を永続的に行うためには, 地熱レザヴァーのモニタリングと温泉を含めた環境モニタリングが重要であると筆者らは認識している。

## 5. ま と め

① 我が国の地熱生産管理は 1966 年の松川地熱発電所運開に始まる 47 年の歴史を有し、各地熱地域の資源特性に応じた地熱レザヴァーの管理技術が蓄積している。

② 自然状態から生産状態に移行する変化をモニタリングすることの重要性が早くから認識されて、各地熱地域の各種データが高い頻度で取得されている。

③ 熱源はマグマの浅所貫入に由来する高温岩体が持つ熱を対象とするのが経済的であるので、第四紀火山岩分布地域で古くとも数 10 万年前からの火山活動履歴を持つマグマの後火山活動による熱がターゲットとされている。

④ 地熱熱水の起源は、数%程度のわずかなマグマ起源の水とガスを含むことがあるものの、ほとんどは地下水が加熱されたもの、すなわち、天水起源であるとする考えが支配的である。

⑤ 還元熱水が短期間で生産井に還流すると、地熱流体を冷やすことにより蒸気流量の減少に繋がるコールドスweep現象のような弊害をもたらす場合と、十分熱せられて還流することにより地熱レザヴァーの圧力低下を防ぎ、安定生産に寄与する場合のプラス・マイナス両方の側面を理解してバランス取った生産を行う必要がある。

⑥ 地熱レザヴァーでは、高傾斜の割れ目を通路とする上昇流の存在が一般的であるが、地層本来の高い孔隙率に支配された流動もあり、特に、水平方向に高い浸透率を持つ地層は熱水の側方流動に寄与する。

⑦ 帽岩は地上への地熱流体の流出と低温地下水の混入による温度低下を防ぐ機構として重要であり、この機構は地熱レザヴァー形成前から存在していた難透水性の地層と、地熱流体による粘土化変質（自己閉塞）で新たに生成されたものの双方が考えられる。

⑧ 地熱開発では、熱・水・構造の地熱三要素によって生じる地熱現象・地熱徴候を統合的に説明可能な概念モデルを作ることが重要である。

⑨ 温泉モニタリングとして、地熱発電所操業開始前の温泉の状態を把握するため、地熱探査の初期段階から、温泉の泉温、湧出量（自然湧出でない温泉の場合は水位）、泉質（流体性状）のモニタリングを実施する必要がある、かつ、温泉事業者と地熱開発事業者の情報共有に留意することが重要である。

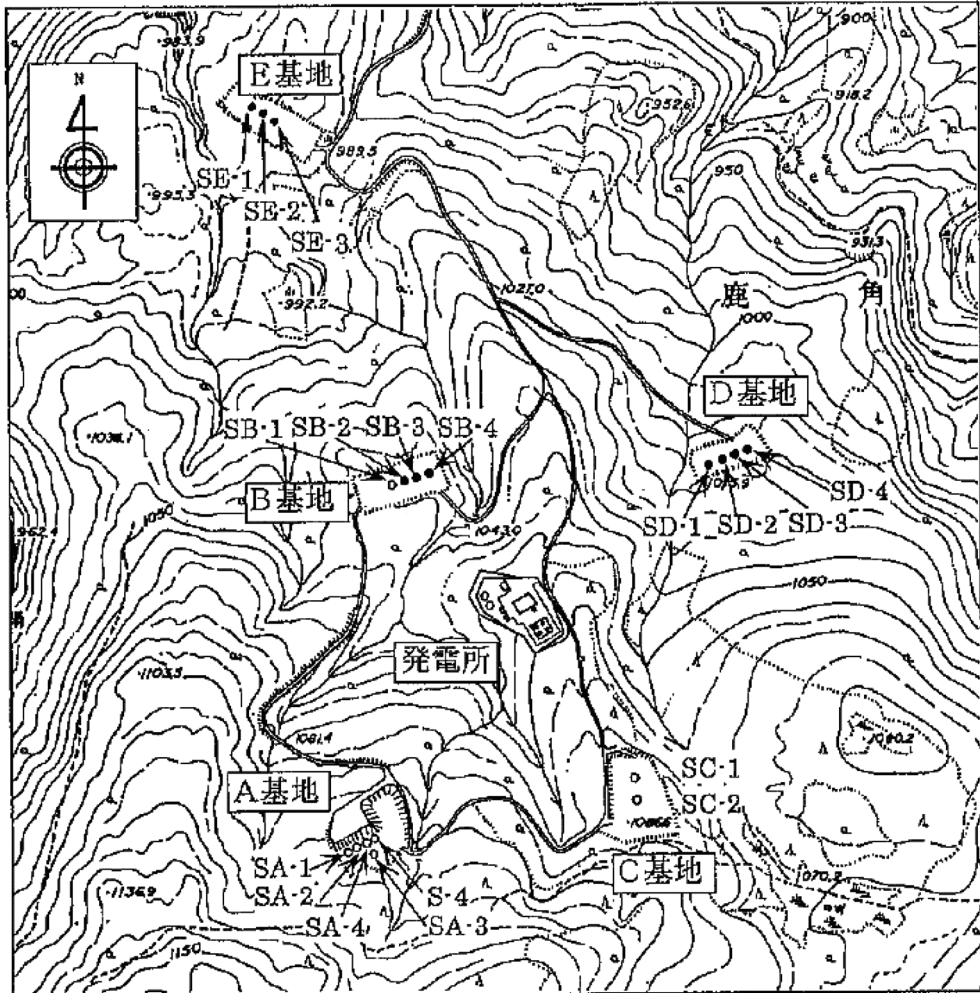
### 引用文献

- 安達正敏 (2007) : 奥会津地熱レザヴァーの持続的再生性の考察. 地熱学会講演要旨集, A12.
- 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, 14 (3), 15-27.
- 笠井加一郎, 小田中浩一, 千葉文彦 (1990) : 葛根田地熱発電所の蒸気生産と貯留層管理, 地熱, 27 (1), 1-22.
- Kazahaya, K. (2006) : Upwelling of volatiles from the mantle and the subsiding slab through faults and tectonic lines at Kinki district, Japan. 第 5 回水文学的・地球化学的手法による地震予知研究についての日台国際ワークショップ予稿集 PDF, 33 p.
- 窪田康宏, 松葉谷治 (1998) : ランプトパラメーターモデルによる流体化学量の変化から解析した大沼地熱レザヴァーの物理量. 地熱学会誌, 20 (2), 107-124.
- Liotta, D., Ruggieri, G., Brogi, A., Fulignati, P., Dini, A. and Nardini, I. (2010) : Migration of geothermal fluids in extensional terrains: the ore deposits of the Boccheggiano-Montieri area (southern Tuscany, Italy). Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsh.), 99, 623-644.

- 真鍋 孝, 江島康彦 (1984): 八丁原地熱地帯における裂か型貯留層の地質構造特性および熱水系, 地熱, 21 (2), 37-54.
- 中村久由 (1982): 発電計画, 地熱開発総合ハンドブック, (株)フジ・テクノシステム, 769-784.
- 中野啓二, 松山一夫, 泉浩一 (1983): 地熱地域の地質構造論試論 (下) —地熱レザバーの裂か系解析・評価へのアプローチ—, 地熱, 20 (5), 23-42.
- NEDO (1993): 地熱開発促進調査報告書 No. 32 八丈島地域, 1202 p.
- 日本地熱調査会 (2000): 新版わが国の地熱発電所設備要覧, 日本地熱調査会, 254 p.
- 日本地熱学会地熱発電と温泉の共生を検討する委員会 (2010): 報告書, 地熱発電と温泉の利用との共生を目指して, 62 p.
- 野田徹郎 (1994): 冷戦から土俵上の熱戦へ—地熱発電と温泉の共存のために—, 地熱エネルギー, 19 (1), 13-29.
- 小原幸正 (1988): ケーススタディ (1), 地熱貯留層工学技術. 地熱, 24 (5), 87-91.
- 関 陽児, 安達正畝 (1997): 奥会津地熱地域の層序と熱水変質, 地質調査所月報, 48 (7), 365-412.
- 角 清愛 (1980): 地質構造上の特色, 地熱活動の場としての日本の地質構造, 日本の地熱資源, 日本地熱調査会, 5-16.
- Uchida, T., Takakura, S., Adachi, M., Ozeki, H., Kamada, K. and Sato, T. (2011): 3D magnetotelluric survey at the Yanaizu-Nishiyama geothermal field, northern Japan. Proceedings of the 9<sup>th</sup> Asian Geothermal Symposium, 1-6.
- 湯原浩三 (1980): 地熱資源としての降雨量と地下水, 地熱活動の場としての日本の地質構造, 日本の地熱資源, 日本地熱調査会, 20-25.

### 3. 澄川地熱発電所

出典：地熱調査会(2000)わが国の地熱発電所設備要覧

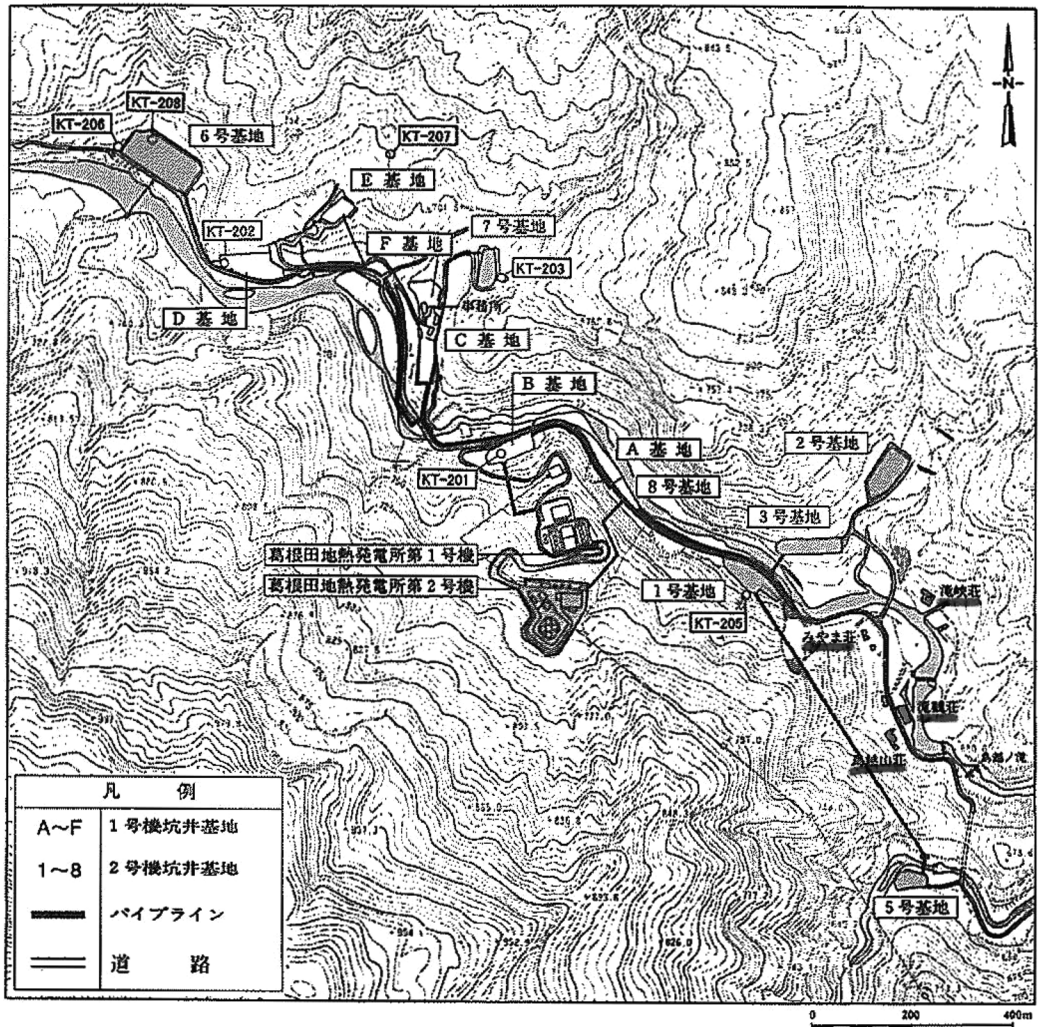


凡例  
○ 生産井  
● 還元井  
配置図

付図 1 澄川地熱発電所 (日本地熱調査会, 2000).

5. 葛根田地熱発電所

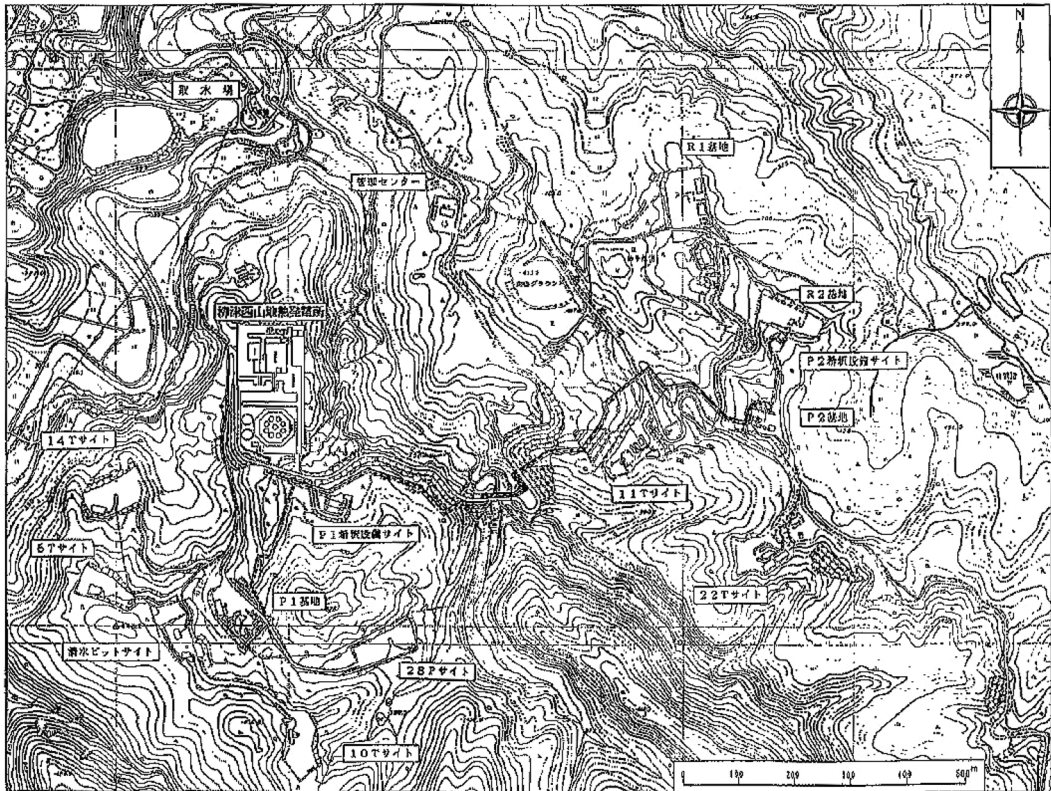
出典: 地熱調査会(2000)わが国の地熱発電所設備要覧



付図 2 葛根田地熱発電所 (日本地熱調査会, 2000).

8. 柳津西山地熱発電所

出典: 地熱調査会(2000)わが国の地熱発電所設備要覧

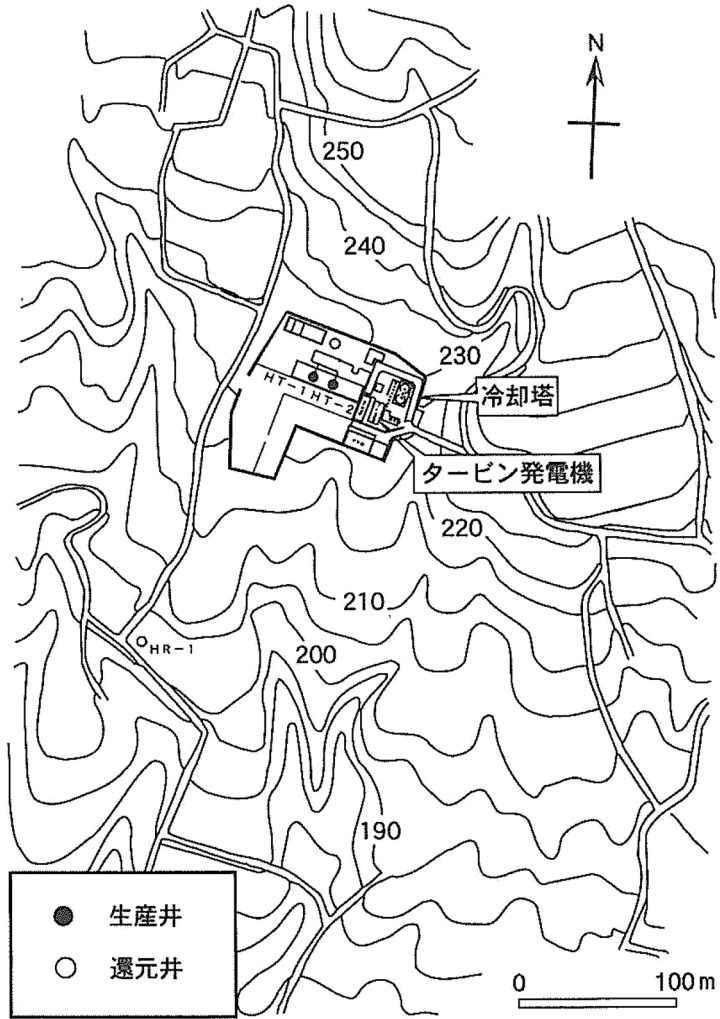


(備考) 生産井, 還元井の基地別・サイト別区分は表「坑井掘削状況」を参照

配 置 図

付図 3 柳津西山地熱発電所 (日本地熱調査会, 2000).

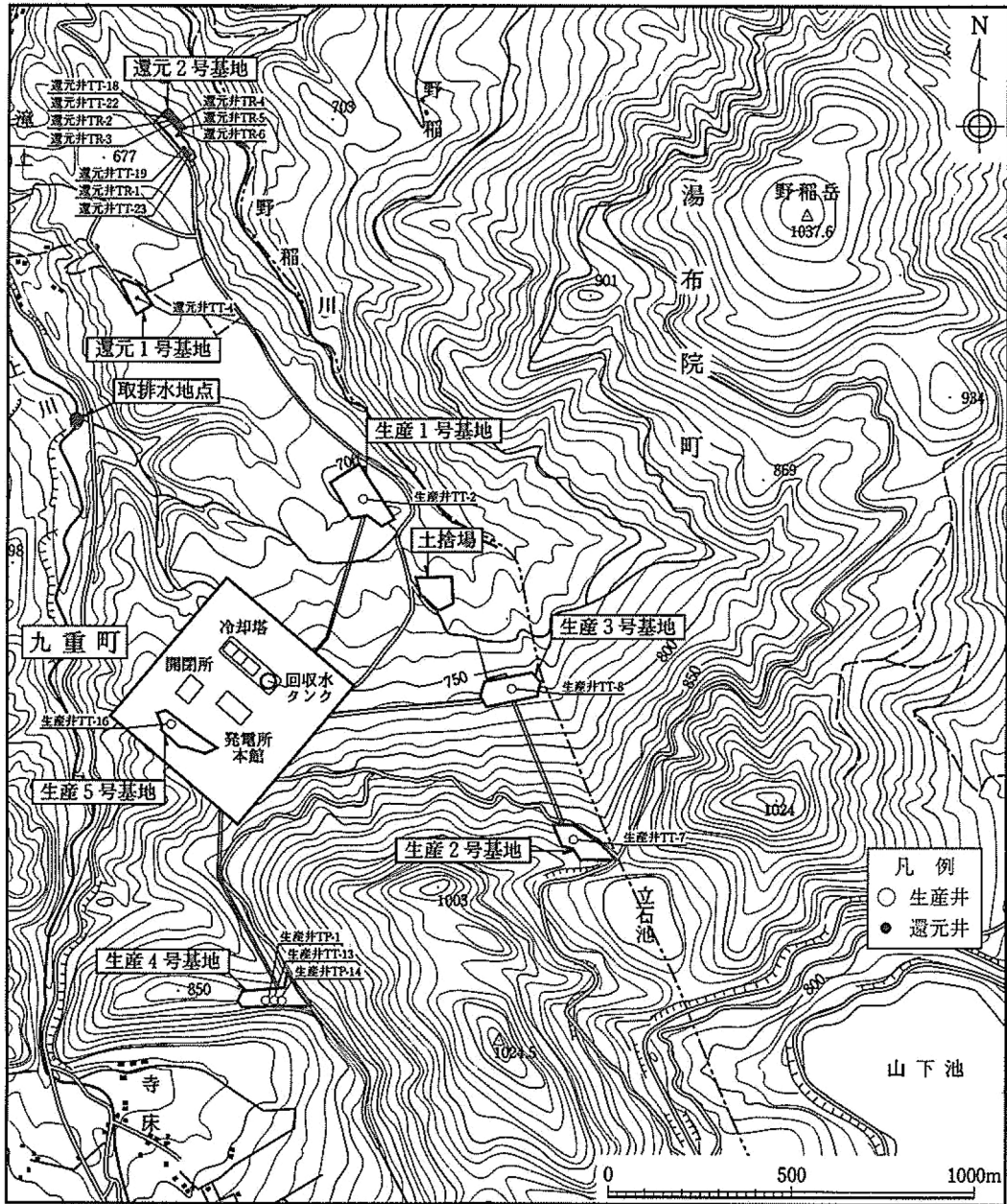
9. 八丈島地熱発電所 出典:地熱調査会(2000)わが国の地熱発電所設備要覧



付図 4 八丈島地熱発電所 (日本地熱調査会, 2000).

11. 滝上発電所

出典:地熱調査会(2000)わが国の地熱発電所設備要覧

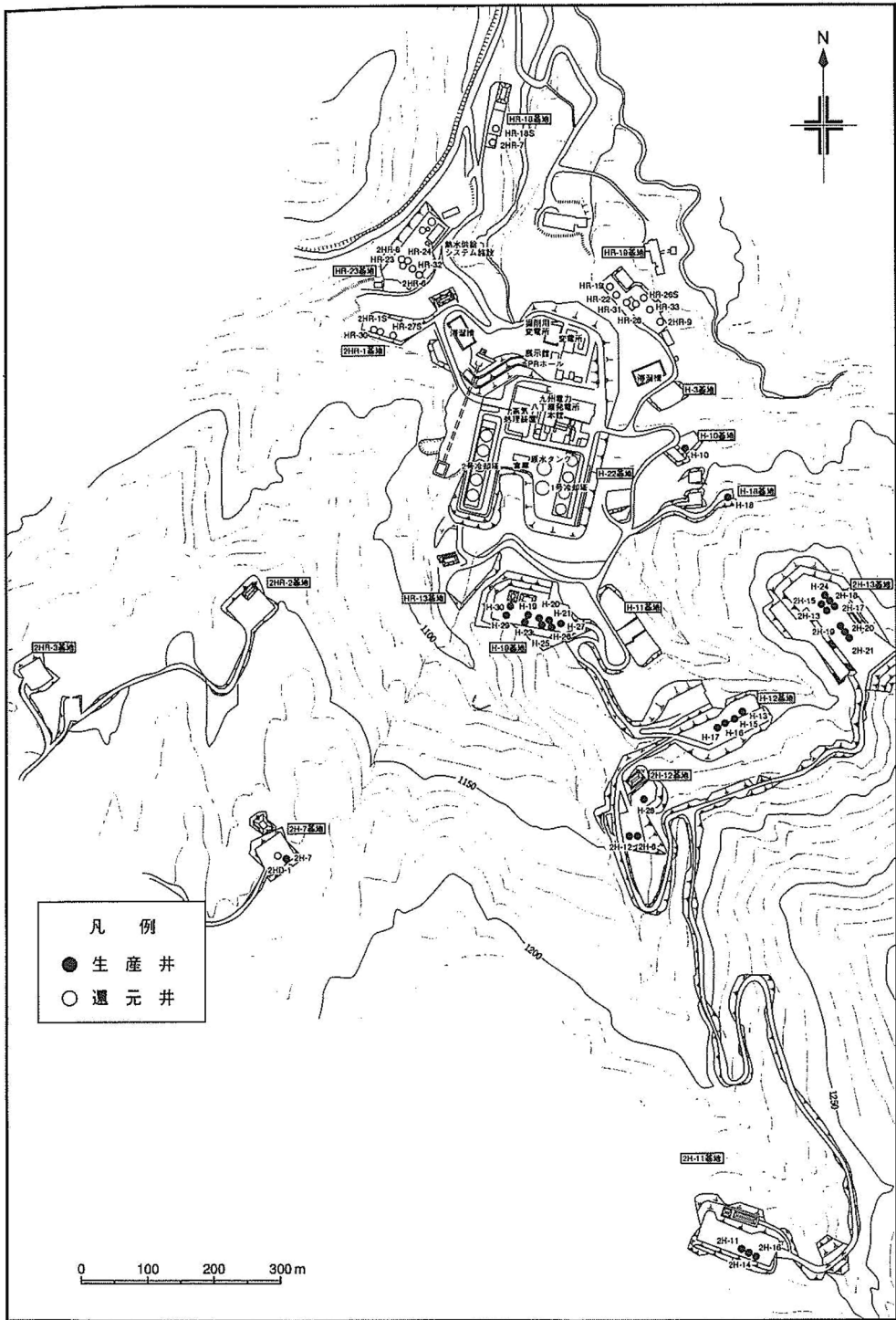


付図 5 滝上地熱発電所 (日本地熱調査会, 2000).



13. 八丁原発電所

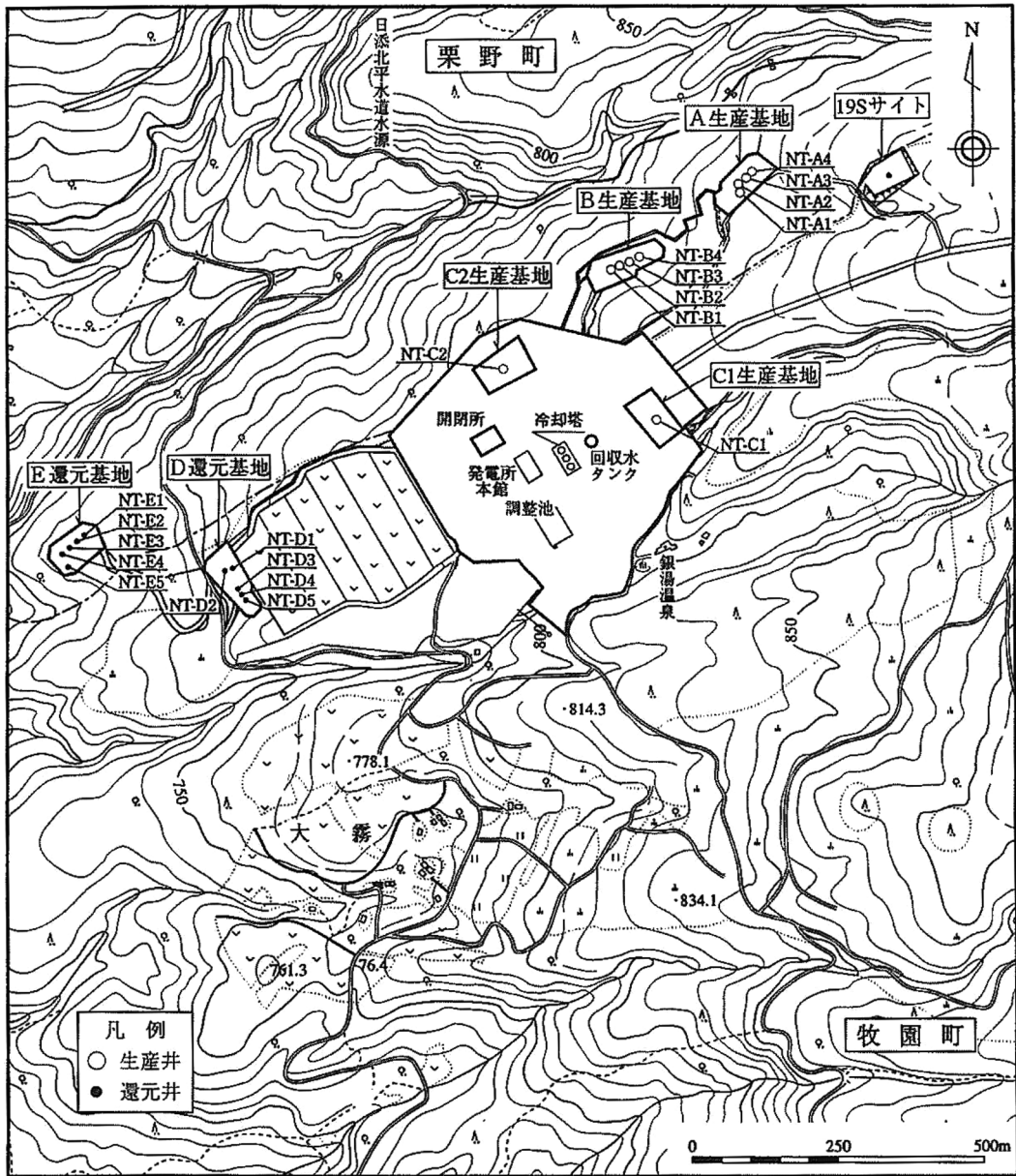
出典: 地熱調査会(2000)わが国の地熱発電所設備要覧



付図 6 八丁原発電所 (日本地熱調査会, 2000).

14. 大霧発電所

出典:地熱調査会(2000)わが国の地熱発電所設備要覧



付図 7 大霧発電所 (日本地熱調査会, 2000)。