

温泉と共存共栄する地熱開発について

やすかわ かすみ
安川 香澄

独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 特命参与

1. はじめに

現在、日本で地熱開発にまつわる社会的問題として筆頭に上がるのが、周辺温泉地との関係であろう。温泉も地熱も地下の熱水資源を活用するので、地熱開発に適した地域は、必ずと言ってよいほど温泉地の近くにある。そして大規模な地熱発電に必要な蒸気・熱水の生産量は、通常の温泉での湧出・汲み上げ量より多いため、地熱開発をしたら温泉への悪影響が起きるのではないかという不安が生じるのは、当然のことである。

そこで、まず地球科学的な側面から、大規模な地熱開発による温泉への影響は案外起きにくいということと、それでも影響可能性がゼロとは言えないので、影響を出さないためにはどう開発すればよいかについて述べる。次に、悪影響を与えないだけでは共存共栄とは言えないので、実際に温泉と共存共栄している

事例を挙げる。

なお本稿での“温泉”は、地表湧出または深くても300m程度掘ると温湯が得られるものを指す。日本には1～2kmも掘って40℃程度のお湯を得ている温泉や、冷たい鉱泉を沸かした温泉も存在するが、そのような地域では地下の温度が低すぎて地熱発電ができないので、本稿の対象外とする。

2. 浅い流動と深い流動：量的な違い

図1に、地形によって生じる地下水流動の模式断面図を示す¹⁾。これは、地下を均

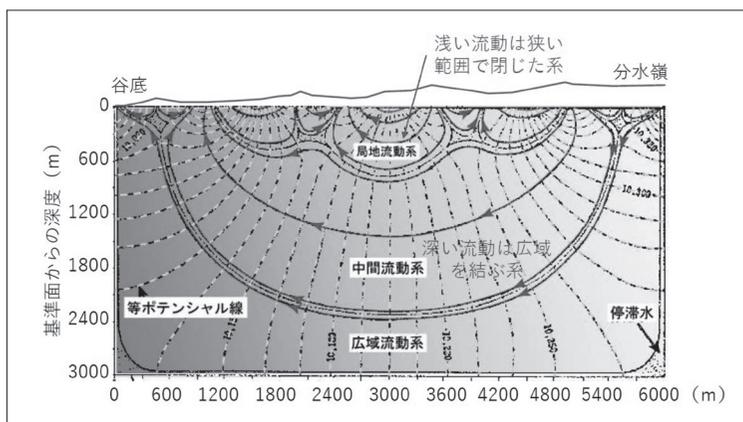


図1 地下水流動の模式断面図¹⁾

質と仮定して地形の影響だけをシミュレーションした結果である。分水嶺と谷底を結ぶ曲線は、おおよその地形を示しており、標高のスケールは地下部分の深度とは一致しない。

さて、図から明らかなように、浅部と深部の流動系は別々の閉じた系となる。そして、浅部の流動系はいずれも局所的だが、深部の流動系は広域にわたっており、関与する水の量が圧倒的に多い。しかもこの図は2次元だが、実際には3次元的に広がっているため、1つの流動系に関与する水の量は、深部のほうが数桁以上大きくなる。

これを地熱と温泉に当てはめてみよう。地熱地帯では、鉛直断層によって浅部と深部が繋がっている場合や、熱水対流による上昇流もあるので、浅部の温泉帯水層と深部の地熱貯留層は必ずしも別の流動系とは言えない場合がある。しかし、深部のほうが広域の水が集まり、関与する水の量が多いことは、図1と同様である。そのため、温泉での汲み上げ量よりはるかに多い地熱流体を生産したからといって、すぐに周辺の流動系に影響を与えるわけではない。

ただし、温泉にしても地熱にしても、天然の流動系によって供給可能な量を超えた生産を行えばいずれは減衰が起き、周囲にも悪影響を及ぼしかねないので、持続可能な生産量を把握しておくことが重要である。

3. 温泉帯水層と地熱貯留層とのつながり

前節では、たとえ地熱貯留層と温泉帯水層が繋がっているとしても、という仮定で量的な側面に触れた。それでは、両者が実際に繋がっているのか否か、どうやって調べればよいのだろうか。ここでは、両者の水理的繋がりを簡易的に調べる方法と、繋がっている可能性がある判断された場合に必要モニタリング方法を紹介する。

まず、地熱貯留層の構造について、簡単に説明しよう。地熱貯留層とは、深部からの熱によって地下水が熱水対流を起こしている部分である。熱せられて上昇する熱水は、周囲の岩石と反応してさまざまな化学成分を溶かし込むが、上昇するほど温度が下がるため、ある深度で化学成分が析出して粘土層を形成する。これは地熱貯留層を覆う“帽岩”と呼ばれ、粘土層は水を通しにくいいため、熱水や蒸気を逃がさない蓋の役割を果たしている。

数MW（メガワット、1,000kWに相当）以上の大規模な地熱開発を行うためには、帽岩が発達して地熱貯留層が高温高压に保たれている必要があるため、その上方にある温泉帯水層とダダ洩れ状態で繋がっている状況は考えにくい。ただし、帽岩を貫く断層が生じる場合もあれば、帽岩の末端部

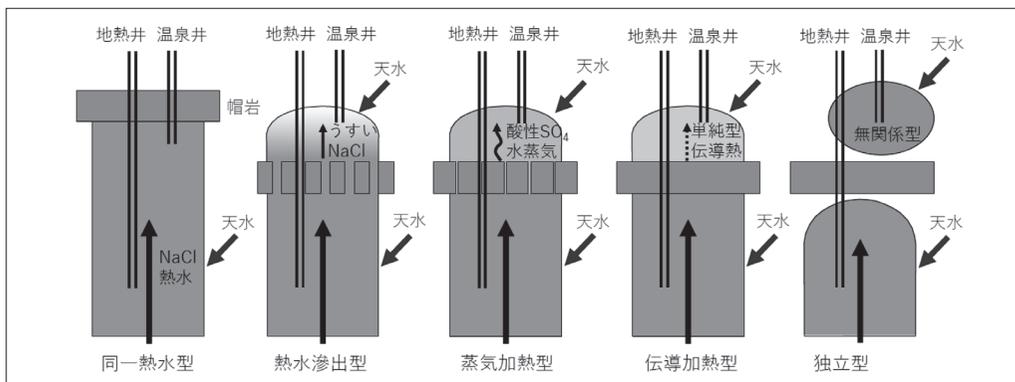


図2 温泉帯水層と地熱貯留層との水理的関係²⁾

では遮水効果が薄れるであろう。そこで、個々の温泉が地熱貯留層とどのような関係にあるのか、帽岩の遮水能力で分類したものが図2である。ここで天水とは、降雨や降雪を起源とする水のこと、温泉や地熱流体の源となっている。

図2の5つの図はいずれも、上部が温泉帯水層、下部が地熱貯留層となっており、左側ほど両者の繋がりが強い。同一熱水型は、地熱貯留層と同一の温泉である。熱水滲出型は、帽岩が存在するが発達が不十分なため、地熱貯留層から流入した熱水が天水と混合してできた温泉である。蒸気加熱型では帽岩が熱水を遮断するが、水蒸気とガスが地熱貯留層から流入し、それが天水に混入している。伝導加熱型は、帽岩の遮水性が極めて高く、地熱貯留層とは水理的な繋がりが無いが、地熱貯留層からの熱伝導で加温されている。独立型は、地熱貯留層とは距離的にも数km以上離れており、水理的にも熱的にも無関係な温泉である。

地熱貯留層の熱水の陰イオン成分はCl⁻タイプだが、ガス成分はSO₄²⁻タイプなので、温泉の化学成分から、同一熱水型・熱水滲出型と、蒸気加熱型を識別することが

できる。また伝導加熱型と独立型の温泉水は、概して溶存成分の濃度が低い。そのため、温泉の泉質から地熱貯留層との関係を調べることができる。その方法を示したのが、図3である。

ただし、図3で火山ガス吹込型やCO₂付加型と分類された場合は、泉質だけでは地熱貯留層との関係が不明である。また海に近い温泉では、地熱貯留層との繋がりがなくても、海水の浸入によりCl⁻タイプと分類される場合がある。さらに同一熱水型等と判断された温泉であっても、それが現在開発しようとしている地熱貯留層と同一か否かを検討する必要がある、位置関係も重要である。このように図3は万能ではないが、温泉の泉質だけである程度のことが判るとい意味で、有用性が高い。

さて、水理的繋がりの違いは、温泉への影響可能性の違いを示すだけでなく、影響の仕方も異なることに注目したい。同一熱水型では、地熱発電のために流体を取りすぎると、温泉の流量や水位が下がる可能性がある。熱水滲出型も同様だが、深部からの流入量が減ると相対的に天水の混合割合が増すため、希釈により温度や溶存成分

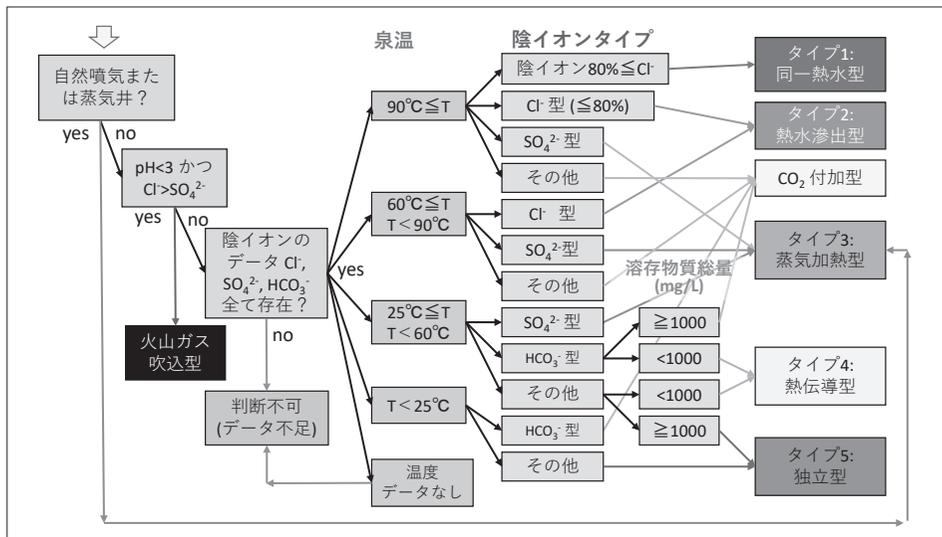


図3 泉質・温度による温泉分類のフローチャート²⁾

濃度も下がるであろう。蒸気加熱型では、ガス流入量が変化すると温泉の溶存成分が変化する。このように、温泉型ごとに影響の仕方が異なるので、必要なモニタリング項目も異なってくる。それを表1に示す。

温泉に悪影響を及ぼさないためには、表1右欄の項目をモニタリングして、異常が無いことを常時確認する必要がある。この際、源泉ごとのモニタリングが肝要であり、地熱井の生産位置から近い源泉から順に、いくつか選ぶことが望ましい。また、自然影響や他の人為的影響を識別するために、自動式の連続観測が望ましい。万一、温泉に異常が発生した場合は、営業に支障をきたすほどの変化が出る前に、通常の年変化の範囲を逸脱する変化が観測されるはずなので、その原因を調べて対応を行えばよい。

こういった場合の原因調査費用、また地熱開発の影響と判断された場合の補償費用を補填する保険商品も販売されている。

なお、イタリアのラルデレロ、ニュージーランドのワイラケイ、米国のガイザーズ、フィリピンのティウイでは、初期の地熱開発が付近の天然湧出に影響を与えた例が報告されている(表2)。これらは地熱井の深さが数十~数百mと浅かった時代に起きており、同一熱水型であったと推定される。現在では千m以上の深い地熱井から生産を行うのが普通であり、30カ国、300を超える地域で地熱発電が行われているが、温泉への影響は報告されていない。

4. 地域との共存共栄

さて、本節では、地熱開発が地域に利益をもたらし、共存共栄の関係を築いている地域をいくつか紹介する。

1967年に日本初の松川地熱発電所が開発された岩手県八幡平市では、地熱を活かしたまちづくりが行われている。同市では、「沸騰地熱塾」で持続可能な観光や農業の在り方について考え、「地熱探検隊」で子どもと大人が楽しみながら地域の地熱資源について学び、地熱料理コンテストと行うなど、さまざまな取り組みが行われている。

松川地熱発電所では、生産された地熱蒸気の一部を、地元の温泉旅館に無償で供給しているほか、温水を八幡平の別荘・

表1 温泉の泉質、地熱貯留層との水理的關係、地熱開発の影響可能性²⁾

地熱貯留層との関係	温泉水の泉質と温度	地熱開発の影響可能性	主な影響(やや可能性のある影響)
同一熱水型	Cl ⁻ /総濃度 >80% 温度 >90°C	ある	流量(温度)
熱水滲出型	Cl ⁻ タイプ 温度 >60°C	ややある	流量・温度・溶存成分濃度
蒸気加熱型	SO ₄ ²⁻ タイプ	低い	溶存成分濃度(温度)
伝導過熱型	総濃度 < 1000 mg/L 温度 >25°C	非常に低い	(温度)
独立型	特徴無し	なし	なし

表2 地熱開発が温泉湧出に影響を与えた海外事例³⁾

地域名	ワイラケイ	ティウイ	ラルデレロ	ガイザーズ
国名	ニュージーランド	フィリピン	イタリア	米国
運転開始	1950	1979*	1904	1960
発電規模	152.2 MW (1990)	330 MW (1982~)	228.5 MW (1990)	最大時2,545 MW 1,517 MW(2008)
開発エリア	15 km ²	12 km ²	200 km ²	78 km ²
当初生産深度*	≦660m	≦938m	約300m	≦427m
地下還元	当初なし	なし	復水を還元	なし
温泉への影響	温泉湧出量減少 成分濃度低下 温泉の蒸気化	水蒸気爆発 地獄化 温泉停止	天然蒸気・温泉消滅	天然湧出消滅

*は本稿著者による加筆

ホテル・観光施設等へ有償提供している。その内訳は、宿泊施設：38軒、保養所：26軒、別荘：613軒、商店：15軒、貸別荘・病院・老人施設・日帰り温泉施設：各1軒、農業用ハウス：95軒である⁴⁾。この地域にはスキー客も多く、温水供給が宿泊施設での集客に貢献している。このため、長年にわたり、地元の温泉・宿泊施設事業者と松川地熱発電所は良好な共存関係にある。

東京都で唯一の地熱発電所である八丈島地熱発電所では、利用後の蒸気を復水器で凝縮し、約40℃となった熱水で農業用水を加熱していた⁴⁾。加熱された用水は八丈町が整備した温室団地に供給され、熱帯性観葉植物の栽培により、八丈島の農業の基盤である花卉園芸に新たな展望が開けた。ただし2014年4月から温水の供給が休止され⁵⁾、現在、八丈島地熱発電所はリニューアル工事が行われている。

大分県の滝上発電所では、地熱発電所の凝縮水排出に伴って発生する蒸気に河川水や湧水を混ぜてお湯を造成し、地域の施設に供給している。滝上地区で毎時10.2tのお湯(80℃)を貯湯タンク3カ所へ、寺床地区で毎時1.2tのお湯(70℃)を共同浴場1カ所に供給している⁴⁾。

宮城県の鬼首地熱発電所から4kmの範囲には、宮沢温泉、轟温泉、神滝温泉があり、地熱発電所と源泉所有者、地元自治体は、定期的な懇談会にて、発電所の運転状況の情報提供と意見交換を行っている。発電事業者は、地熱発電所の運開前から自然湧出する源泉のモニタリングを継続しており、50年近いデータを蓄積している。鬼首地熱発電所のPR館には年8,000人程度の観光客が訪れ、近傍の温泉への宿泊など地元への経済効果があると見られている⁴⁾。鬼首温泉の観光マップでは、鬼首地熱発電所が観光地として案内されている。

北海道森町にある森地熱発電所では、還元熱水の一部を、野菜生産温室団地の熱交

換施設に無償提供している。熱交換施設は熱水利用組合が管理しており、全69頭のハウスに温水を供給することで、冬にかかる11月から翌年6月にかけて春トマトとキュウリ、6月から11月ごろにかけては秋トマトを生産している。時期をずらした農産物の付加価値は高く、このハウスで生産されるトマトは、森町の作物別販売額1位の基幹作物となっている。さらに森町は、地熱開発事業連絡協議会を設置し、温泉関係者と地熱発電事業者との情報交換を行っている⁴⁾。

秋田県湯沢市には、上の岱地熱発電所、山葵沢地熱発電所があるほか、調査・開発中の地域が複数ある。湯沢市は、「地熱のまち“ゆざわ”」として、川原毛地獄、小安峡大噴湯などの地熱景勝地を含むジオパークを、観光の目玉としている。この地域には、地熱水を使った農業ハウスでのミツバやパクチーの栽培、地熱蒸気を利用した乳製品の低温殺菌、果物や野菜の乾燥など、地熱を利用した産業が根付いている。湯沢翔北高校の生徒が地元のサクランボを地熱蒸気で乾燥させて開発したドライフルーツ『ミツチェリー』は、人気のおみやげとなっている。

(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)では2019年、地熱資源を有効活用し、農林水産業や観光などの産業振興に積極的に取り組む自治体を「地熱モデル地区」に指定した(図4)。上記の岩手県八幡平市、秋田県湯沢市、北海道森町の3地域が地熱モデル地区に選ばれ、各地域の取り組みや情報がJOGMECのホームページで紹介されている⁶⁾。

近年の地熱開発では、地熱開発事業者が地元住民と話し合い、地域環境を良くするための取り組みを積極的に行う例もあるようである。一方で、福島県の土湯温泉のように、地域の人々が自ら地熱発電を行い、売電収入で得た利益を地域の福利厚生に役

立て地域の活性化に役立っている例もある。土湯温泉では、余剰熱を使ったエビの養殖とエビ釣りなどのアトラクション、さらには国際的な環境教育プログラムを構築して滞在客の増加につなげるなど、地熱資源を多面的に役立っている⁷⁾。

5. おわりに

地熱開発に限ったことではないが、何かの開発を行うべきか否かという議論で地域が分断してしまうことがある。また、自らリーダーを自負する人が群居して、かえって話し合いが難しい地域もあるようだ。民主主義とは、ややこしいものである。

最近、とある地熱開発予定地域を訪ねた時、宿泊した温泉の経営者から、周辺の土地が軒並み外資系リゾート開発事業者に買収されているという話を聞いた。海外の保養地に比べ圧倒的に地価が安いためだという。宿の近くでも大規模なリゾート建設が始まっており、アクセス道路が狭いうえ、川沿いで足場の悪い敷地が既に広々と造成されていて驚いた。こんな巨大資本が入ってきては、伝統的な温泉旅館はひとたまりもないのではないか。資本がどこであれ、滞在客が増えて地域が活気づけば良いのだが、巨大リゾートはそだけで完結し、周辺はむしろ寂れてしまう恐れがある。

そうならないためにも、地域住民が地域の将来について真剣に議論し合い、どんな地域としていきたいのか、総意を固めておくことは重要と思われる。そういった議論のなかで、地熱開発が地域に役立つ選択肢の一つとなつてこそ、真の共存共栄が実現するのではないだろうか。



図4 JOGMECホームページから、地熱モデル地区の紹介

参考文献

- 1) Toth, J. (1963) A Theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. J. Geophys. Res.,68, pp.4795-4812.
- 2) 安川香澄・野田徹郎 (2017) 温泉帯水層と地熱貯留層との水理・熱的關係についての温泉地化学的手法による分類、日本地熱学会誌、第39巻 第4号、pp.203 - 215
- 3) 野田徹郎 (2014) 地熱エネルギーハンドブック (オーム社) 表6・3・1
- 4) 佐藤真丈 (2014) 地熱エネルギーハンドブック (オーム社) 6.3.4節
- 5) 八丈町ホームページ (2022)
https://www.town.hachijo.tokyo.jp/kakuka/kikaku_zaisei/re/greenhouse.html [2022年7月閲覧]
- 6) JOGMEC (2022) 地熱モデル地区PROJECT.
<https://geothermal-model.jogmec.go.jp/index.html> [2022年7月閲覧]
- 7) 元気アップつちゆ (2022)
<https://genkiuptcy.com> [2022年7月閲覧]