

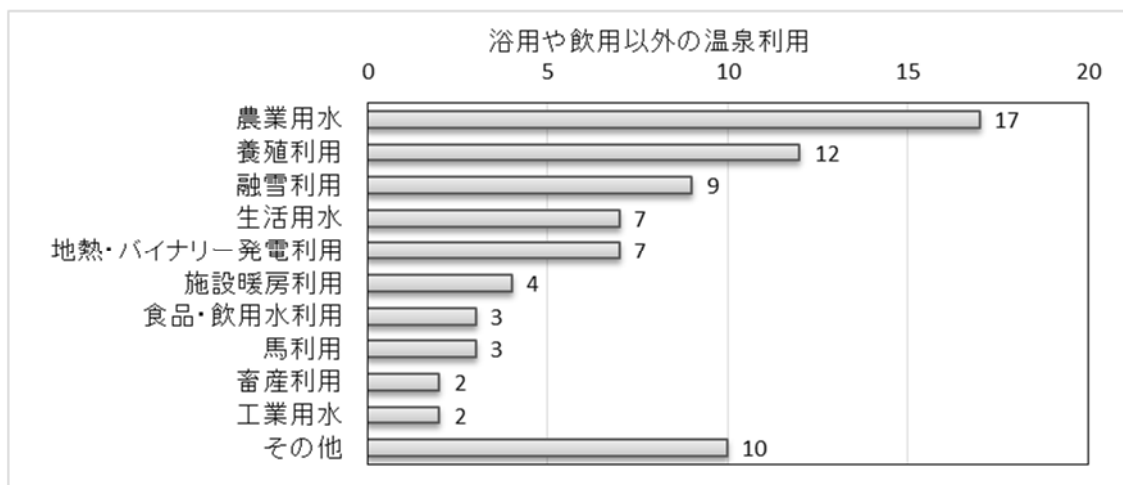


図 3 浴用や飲用以外の温泉利用

(2) 温泉発電

環境省では温泉資源の保護を図りながら再生可能エネルギーの導入が促進されるよう、地熱発電の開発のための温泉の掘削等を対象とした「温泉資源の保護に関するガイドライン（地熱発電関係）」を平成 24 年 3 月に策定した。これは現在稼働している地熱発電所に相当する規模の地熱発電の一般的な開発段階における考え方を示したものであるが、本項目ではそれよりも小規模な温泉を用いた発電（以下「小規模温泉発電」という）について記載する。

小規模温泉発電は既に湧出している温泉を浴用可能な温度（50℃程度）まで冷ます温度差のエネルギーを用いて発電を行う場合もあり、このような場合では既存の温泉を活用し、二酸化炭素排出量の少ない発電を天候等に左右されずに行うことが可能となる。

小規模温泉発電には主に以下の方式がある。

- ・ 蒸気タービン発電（復水式）[図 4(A)]
- ・ バイナリー発電 [図 4(B)]

現在、全国で運転されている小規模温泉発電の多くは、バイナリー発電である。バイナリー発電は、温泉井戸から蒸気が湧出しない、あるいは弱い勢いの蒸気のみが湧出するといった蒸気タービン発電ができない場合に用いられる発電方式である。再生可能エネルギーの導入検討は、政府が掲げる 2050 年ネット・ゼロ^(※1)の実現に向けた重要な取り組みのひとつであり、温泉発電も再生可能エネルギー源の一つとして導入検討が行われ、様々な知見が蓄積されていくと考えられる。

(※1) ネット・ゼロとは、温室効果ガスが排出される量と吸収・固定される量の差し引きがゼロになること。

なお、「平成 25 年度小規模地熱発電のうち温泉発電導入促進のための手引書」(独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC)) によると、バイナリー発電により高い事業性を確保する観点から経済性のある温泉発電事業を始めようとする場合、温泉井や立地場所として以下の条件が挙げられている。

- ① 高温で十分な量の熱水が得られること (80℃以上、300L/分以上^(※2))
- ② 十分な量の冷却水があること
- ③ 送電線が近くにあること

(※2) 大分ベンチャーキャピタル株式会社の目安。大分ベンチャーキャピタル株式会社とは、1997 年 10 月、大分銀行の関連会社として設立された。その中で、おおいた自然エネルギーファンドは、25 億円の融資枠を持ち、主として大分県内の温泉事業者が保有する泉源を活用した再生エネルギーの発電事業を対象とし、設備投資への融資、SPC への株式出資、調査費の支払い等に投資している。

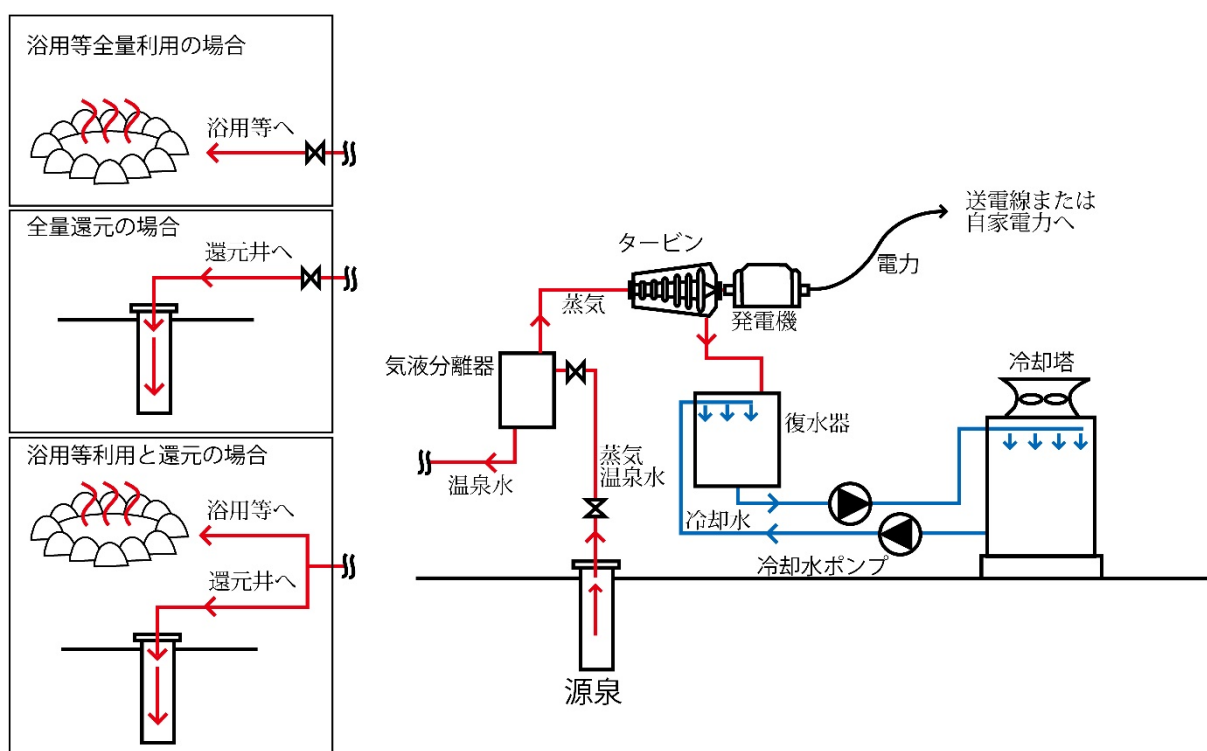


図 4(A) 蒸気タービン発電(復水式)の仕組み (概要)

Dickson and Fanelli 著 日本地熱学会 I G A 専門部会 訳・編 「地熱エネルギー入門」を参考に作成

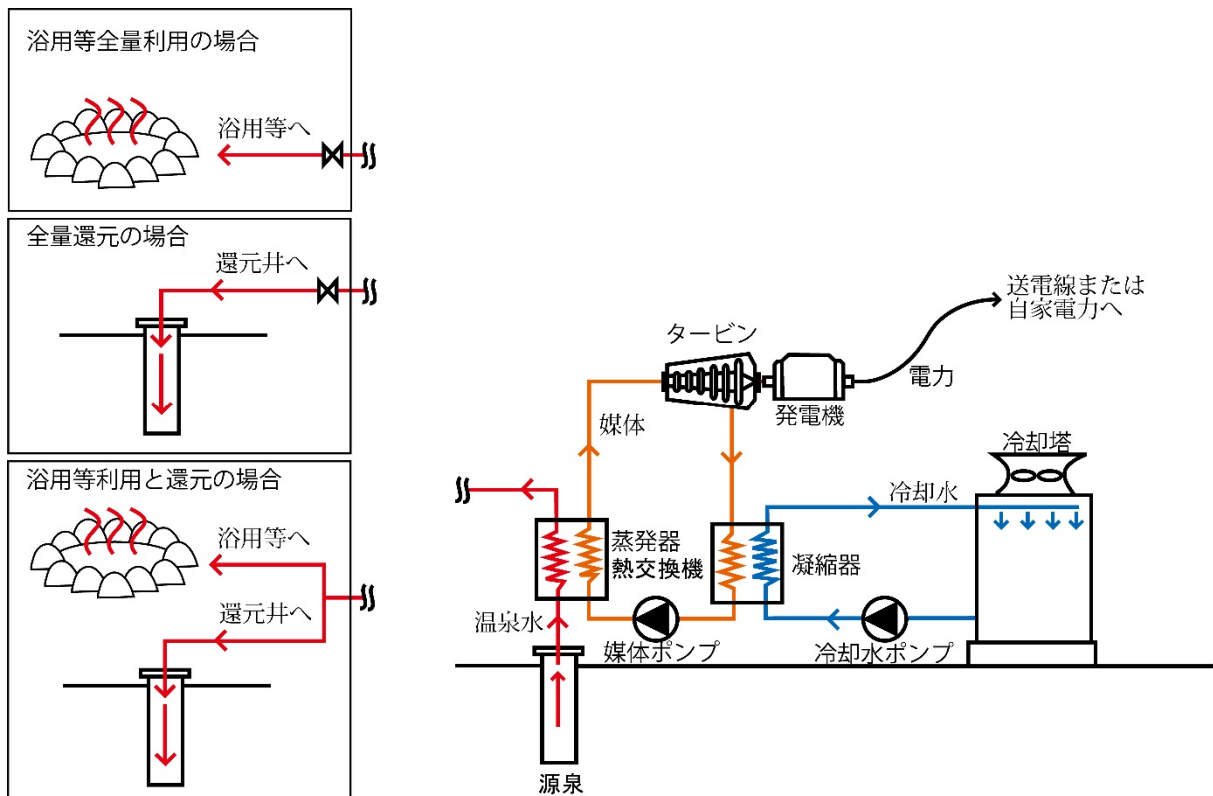


図 4(B) バイナリー発電の仕組み（概要）

Dickson and Fanelli 著 日本地熱学会 IGA 専門部会 訳・編 「地熱エネルギー入門」を参考に作成

「平成 25 年度小規模地熱発電及び地熱水の多段階利用事業の導入課題調査手引書」（独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC））によると、バイナリー発電機の導入、選定に当たっては、熱源温度・流量や冷却温度、設置地点の環境条件、システム配置等様々な要因を検討する必要があるとされている。図 5 に小規模発電での利用が多い出力 200kW 以下の発電出力毎に熱源（温泉）の温度（℃）と湧出量（L/分）の関係を示す。温泉発電で中心となる出力 50kW でみると、ランキンサイクルでは 80℃以下の温度域では必要湧出量が 1,000 L/分を超え、これに対してカーナサイクルは、70℃においても 600 L/分の湧出量があれば 50kW の出力を得ることができるとされている。

また、「平成 25 年度小規模地熱発電のうち温泉発電導入促進のための手引書」（独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC））によると、バイナリー発電では、熱源（温泉の温度）と冷却水の温度差が 65℃以上で経済的な発電が可能とされている。70℃の温泉で経済的な発電をするためには 5℃以下の冷却水が必要となる。

したがって、事業性が高い温泉バイナリー発電を導入するためには、必要な温泉の温度と湧出量に加え、冷却水の温度と必要量、立地条件の項目を十分検討することが望ましい。

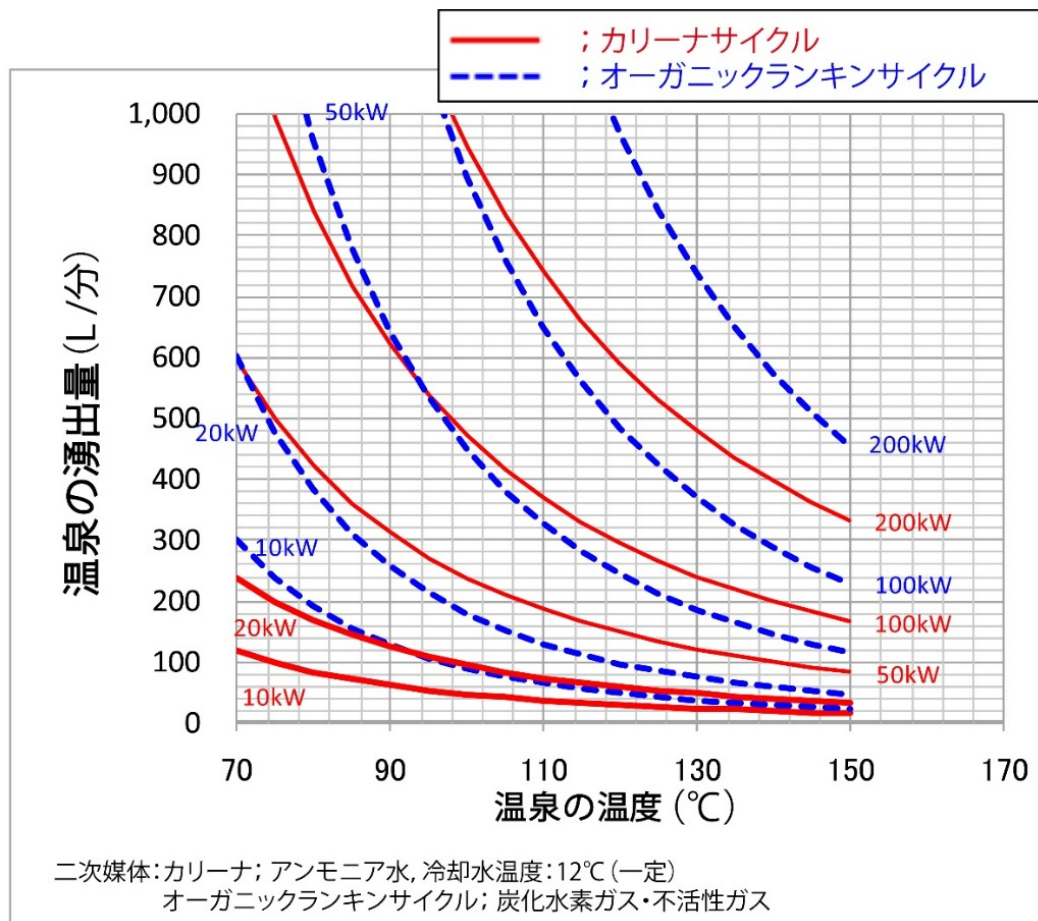


図 5 発電出力毎の温泉温度と湧出量の関係

図中の発電量は送電端出力（データ提供：地熱技術開発株式会社）

独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（2013）平成 24 年度 小規模地熱発電及び地熱水の多段階利用事業の導入課題調査手引書より

温泉発電は、浴用利用等と比較して高温かつ多量の温泉を必要とするため、新規掘削による発電の場合や採取量を増加させる等の場合には事前の賦存量の把握等の調査及び発電開始前後のモニタリング等が持続的に利用するために重要となる。

地域の特性や実情に沿った温泉資源の保護の観点からも、必要に応じて都道府県は小規模温泉発電に関する知見を収集することが重要である。

温泉の基礎知識

温泉湧出機構イメージ

温泉はその多くが天水（降水）を起源とするが、一部には海水や化石水等を起源とするものがある。地球規模の大きな水循環の中にあり、気象、河川、海洋、火山等の影響を受け、その湧出状況は変動する。

温泉湧出機構のイメージを図 1 に示す。温泉湧出機構は、大きく「火山性温泉」と「非火山性温泉」にわけることができ、非火山性温泉は、更に深層地下水型と化石水型等に分類できる。

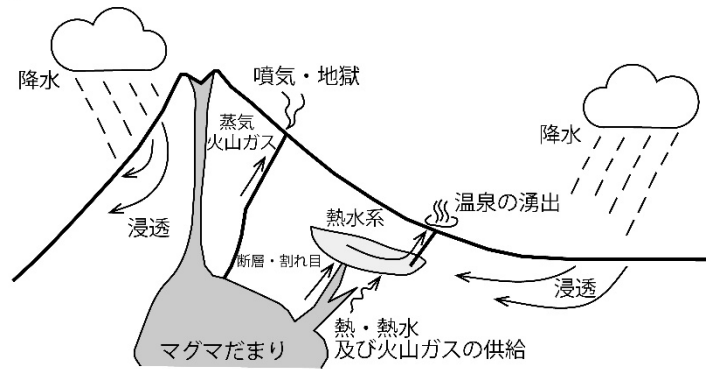
火山性温泉は、火山地域に位置し、降水が浸透した地下水がマグマだまりの熱であたためられて湧き出した温泉のことである。大規模な温泉地のほとんどは比較的新しい地質時代の火山地域に分布しているが、火山活動との関係が強く、その影響が湧出状況に及ぶことがある。また、高温であることや、火山ガスに由来する温泉ガスに注意が必要である。

非火山性温泉は、火山活動とは関係なく形成された温泉のことである。地温（地温勾配）によってあたためられたものは深層地下水型と呼ばれ、地殻変動によって古い海水が地層中に閉じ込められ地温にあたためられたものは化石水型と呼ばれる。

地下水の基本概念（図 2）によると、比較的浅層で地表に最も近い透水性の低い地層（難透水層）の上に存在する温泉は不圧水と呼ばれる。これらは、降水量浸透により敏感に変化する。一方、非火山性の温泉は地下深部より温泉を汲み上げるものが多く、それらは難透水層よりも深い位置にあったり、そのような地層に挟まれて存在することがある。それらは被圧水と呼ばれ加圧されているが、降水が浸透してくるまでには時間がかかる（涵養量が少ない）。化石水型に至っては、ほぼ涵養されていない。つまり、地下深部より温泉を汲み上げている源泉では、温泉を過剰に汲み上げると温泉資源の枯渇化のおそれがあることに注意が必要である。

温泉には、三つの要素があり、それは「温度」と「成分」と「水」である。また、それらを混ぜ込み蓄える器（うつわ）や流路として地層、岩石、断層、割れ目等が温泉の湧出にかかわる（図 3）。

《火山性温泉》



《非火山性温泉》

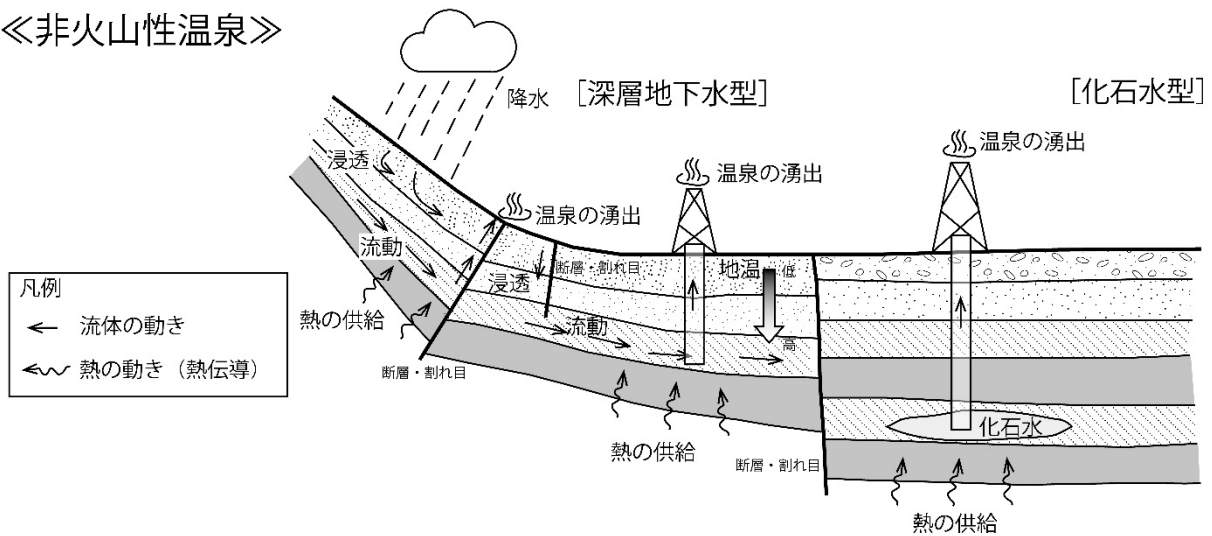


図1 温泉湧出機構のイメージ

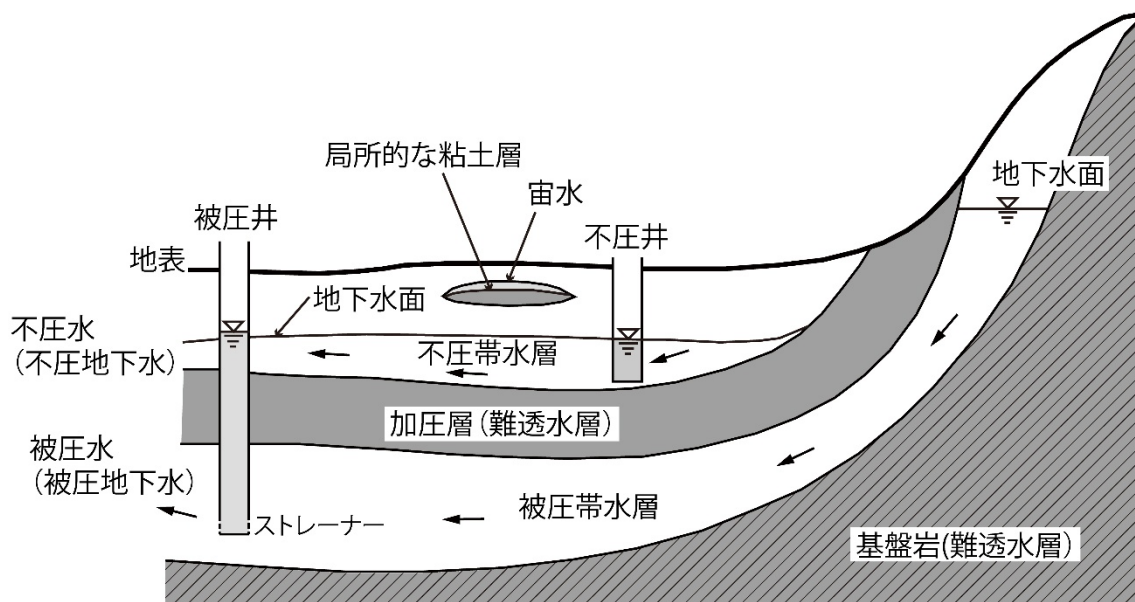


図2 地下水の基本概念図 (不圧水・被圧水の概略)

杉田・田中・筑波大学水文科学研究室 (2009) をもとに作成

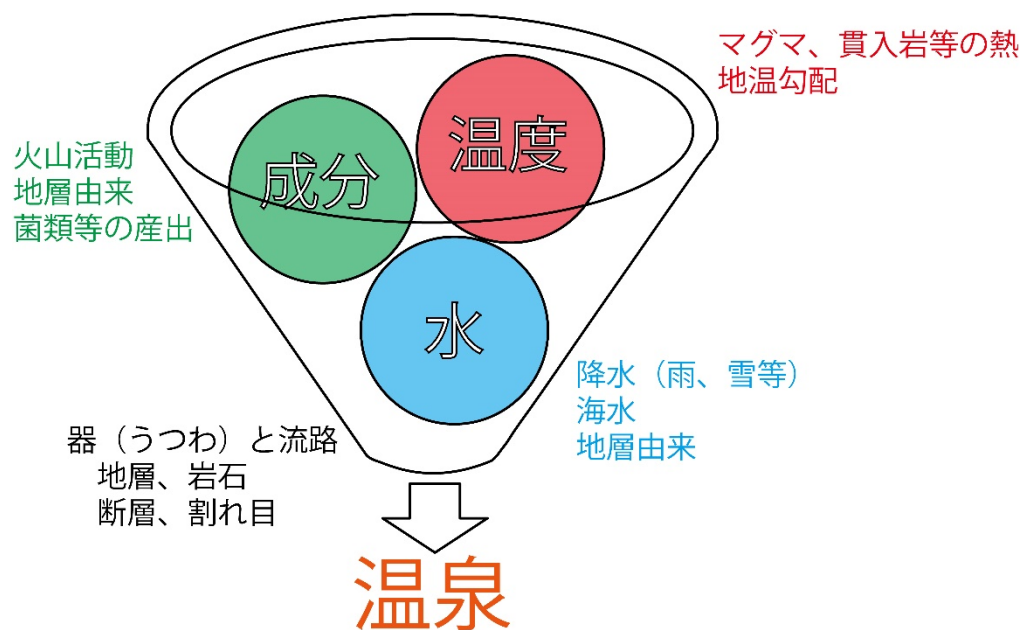


図 3 温泉の三要素

ガイドライン更新案 現ガ p.98～

温泉用語集

影響【えいきょう】

温泉においては、温度、湧出量、水位、化学組成等が外的要因により変動を受けること。原因の例としては、近隣での温泉掘削や温泉採取量の増加のほか土木工事や自然災害等の様々な要因がある。

温泉【おんせん】

温泉とは地中から湧出する 25℃以上の温水若しくは温泉法に規定する特定成分を基準値以上含むもの。なお、水蒸気やその他のガス（炭化水素を主成分とする天然ガスを除く）も温泉に定義される。

温泉スケール【おんせんすけーる】

温泉中の成分が過飽和となり析出した沈殿物で、湯の華とも呼ばれている。スケールの析出は源泉孔内や揚湯管等を詰まらせたり、測定器の誤差原因となることがあり、定期的に除去する必要がある。

温泉成分分析【おんせんせいぶんぶんせき】

温泉に含まれる成分と含有量を調べること。分析は鉱泉分析法指針に基づいて実施する。温泉成分は、溶存成分と非解離成分、ガス成分に分けられる。公共の利用に供する者は、登録分析機関による温泉成分分析（10 年に一度の定期的な分析）を行う必要がある。

温泉帯水層【おんせんたいすいそう】

空隙のある堆積層のほか亀裂に富む岩盤など温泉水が貯留されている地層。温泉帯水層から持続的に採取可能な温泉水の量は、地層の透水性や貯留性、涵養源の安定性などにより変わる。

温泉探査【おんせんたんさ】

温泉湧出の可能性を高めるため、掘削地点の選定のために実施される調査。主な内容は、既存資料調査、地表地質調査、物理探査（電気探査、電磁探査、自然放射能探査）等がある。数種類の調査を行って結果を総合的に解析することで、より多くの地下情報が得られ、掘削地点、掘削深度及び温泉採取深度の決定根拠を示すことができる。

・既存資料調査【きぞんしりょうちょうさ】

調査対象地周辺の地質、温泉等に関する資料を調査し、周辺の地質や断層を確認し、周辺源泉の湧出状況から温泉帯水層について検討する。

・地表地質調査【ちひょうちしつちょうさ】

地表にある露頭（道路等の法面、崖部、河川沿や沢沿いで岩盤や地層が露出した箇所）を観察し記載する。地質やその分布、割れ目の方向性から断層とそれに付随する割れ目に注目して調査を行う。また、湧水や温泉兆候の有無もあわせて確認する。

・電気探査【でんきたんさ】

地中に電気を流し、電気の流れにくさ（比抵抗）を測定し、比抵抗の分布から、地質、断層や割れ目の発達状況を推定する。電気探査には、垂直探査、比抵抗二次元探査、比抵抗三次元探査等がある。温泉探査では、比較的掘削深度の浅い温泉開発が目的の場合に用いられる。探査深度は、電気を流す電極をつないだ測線の長さによるが、おおよそ 300m 程度までである。

・電磁探査【でんじたんさ】

地中の地層や岩石の電磁波（電波）に対する反応の違いから比抵抗を測定し、比抵抗の分布から、地質、断層や割れ目の発達状況を推定する。電磁探査には、MT 法（Magneto-Telluric）、AMT 法（Audio-frequency Magneto-Telluric）、CSAMT 法（Controlled Source Audio-frequency Magneto-Telluric）がある。AMT 法と MT 法は自然の地磁気と地電流を用いて観測を行うが、CSAMT 法は人工的な電磁波を利用する。温泉探査では、比較的掘削深度の深い温泉開発が目的の場合に用いられる。探査深度は、電磁波の周波数帯や電磁ノイズの影響によるが、おおよそ 2000m 程度までである。

・自然放射能探査【しぜんほうしゃのうたんさ】

地中の地層や岩石に含まれる放射性同位元素から放出されるガンマー線を検出し、その強度（単位時間あたりの放射線の数）やエネルギーを測定し、断層や割れ目で放射能強度が上昇することを利用して、断層や割れ目の発達状況を推定する。

温泉付随ガス【おんせんふずいがす】

温泉採取に伴い発生するガス。可燃性天然ガス（メタン等）の他に硫化水素、二酸化炭素（炭酸ガス）等がある。酸素が含まれていないので、酸欠事故に注意が必要である。

温度【おんど】

温泉の場合、地上での湧出温度を測定する。この地上での湧出温度は、泉温とも称される。

火山性温泉【かざんせいおんせん】

火山地域から湧出する温泉。マグマによる熱源の影響を受け、高温泉が大規模に湧出しているものがある。

化石水【かせきすい】

地層の堆積時に地層中に包み込まれ、そのまま閉じこめられた水。海成層は海底で形成されるため、地層中に海底付近の海水が残留する。それら海水起源のものを化石海水と呼ぶことがある。その後の続成作用により化学組成は変化する。

源泉【げんせん】

温泉の湧出口。自然に温泉が湧出する源泉もあれば、掘削し、動力（ポンプ等）により温泉を採取している源泉もある（＝温泉井戸）。

源泉構造物【げんせんこうぞうぶつ】

ケーシング管等の温泉井戸を維持構成する人工物のこと。

検層【けんそう】

温泉の掘削孔に測定器を降下させ、地下の状態を測定する調査。温度や電気伝導率、口径等、様々な測定項目がある。目的に応じて項目を選択し源泉の診断を行う。

水位【すいゐ】

地表面若しくは源泉孔口から水面までの距離で表すことが多い。

・ 静水位【せいすゐゐ】

温泉を採取しない状態での自然状態での水面の高さ。揚湯泉の場合は地表からの深さとなり、自噴泉の場合は地表より上に位置する水面の高さとなる。

・ 動水位【どうすゐゐ】

ポンプ等を運転して、温泉を汲み上げているときの水位。揚湯量に応じて変化する、一般には揚湯量を増やすと低下する。

・ 水位測定管【すゐゐそくていかん】

水位測定のため、源泉孔内にセンサーを水面まで安全に降下させるため揚湯管等に併設したガイド管のこと。

・水位計【すいいけい】

水位を測るための測定器。ロープ式、圧力式など様々な種類がある。

断層【だんそう】

地層の不連続面。付随する割れ目に温泉が流動したり、断層面は粘土化することがあり、そこが遮水の役割を果たす。地下深部から地表への温泉の流路として機能することがある。

地温勾配【ちおんこうばい】

地下深度に対する温度の上昇率。国内の非火山性地域の一般的な地温勾配は2.5～3℃/100m程度である。

適正採取量【てきせいさいしゅりょう】

自噴、揚湯に関わらず持続的に安定して採取可能な温泉の量。温泉を過剰に採取すると源泉の水位や圧力の低下から周辺の他水系（地下水、河川水、海水等）が混入し、温度の低下や温泉成分濃度が低下することもある。揚湯源泉の場合は、適正揚湯量と呼ばれる。

電気伝導率【でんきでんどうりつ】

電気伝導率は、検水の電気の通りやすさを示す指標で、溶存物質量の多少により増減する。現地で温泉中の溶存成分変化について、おおよその推定ができる。

登録分析機関【とうろくぶんせききかん】

温泉法第19条第1項の登録を受けた機関。温泉の成分等の揭示を行うための水質分析を行える機関。

バイナリー発電【ばいなりーはつでん】

温泉水と水より低い沸点をもつ媒体（二次媒体）との間で熱交換器（蒸発器）により熱交換を行って、二次媒体を沸騰させて作った蒸気でタービンを回転させて発電する発電方式。

被圧水【ひあつすい】

上部と下部に難透水層を有した加圧層によって被圧されている地下水。**被圧地下水とも呼ばれる。**大気圧より高い圧力を有する。

BOP【ビーおーピー】

噴出防止装置（Blow Out Preventer）の略で暴噴防止装置や防噴装置ともいわれる。掘削中または仕上げ作業中に、暴噴の徴候があった場合、井戸を密閉し噴出防止作業を行うために孔口の上に取り付ける装置をいう。アニューラー型 BOP とラム型 BOP があり、組み合わせて使用することもある。

不圧水【ふあつすい】

水圧が大気圧と等しい状態にある地下水。不圧地下水とも呼ばれる。一般に水位は、地表からの降水浸透により敏感に変化する。

非火山性温泉【ひかざんせいおんせん】

火山地域に該当しない平野部等から湧出する温泉。ボーリング技術の進歩によって、非火山性温泉の割合は増加傾向にある。

賦存【ふぞん】

鉱物や温泉等、資源的価値を有するものが地下に存在すること。

不透水層【ふとうすいそう】

地層を構成する粒子間の間隙が小さく透水性の低い地層。粘土層やシルト層を主体とする難透水層と岩盤を主体とし水をほとんど通さない非透水層を含む。

・難透水層【なんとうすいそう】

透水性が低く、地下水流動を阻害したり、帯水層の境界となると考えられる地層。泥層（粘土層やシルト層）、極細粒の砂層等がある。

・非透水層【ひとうすいそう】

透水性が非常に低く、地下水がほとんど流れないとみなされる地層。連続性があり固結度の高い泥質地層や間隙率が非常に小さく割れ目も少ない火成岩体等がある。

保護地区【ほごちく】

温泉の密集地域や温泉の枯渇リスクが高い地域、温泉資源保護が必要とされる地域など行政によって指定された地域をいう。特別温泉保護地域、温泉保護地域、温泉準保護地域等の名称で設定されることがある。

湧出量【ゆうしゅつりょう】

定常的に採取している温泉の量。自噴源泉では、日常安定して長期間、溢流している水量である。動力源泉では、日常安定した動水位で汲み上げている水量である。断続的な自噴又は動力源泉ではその平均水量である。温泉では1分あたりに湧き出る量（リットル）に換算し比較をすることが多い。自然に地中より湧き出る量を自噴量、ポンプ等の動力を用いて人為的に汲み上げる量を揚湯量と記すことがある。

・容積法【ようせきほう】

定量容器で温泉を受けて、満水になる時間を測定することで単位時間あたりの量を求める測定方法。

- ・ **三角堰法【さんかくせきほう】**

流出口に三角堰を設け、越流水深を測定し流量を求める方法。ノッチ箱等で利用される。

- ・ **流量計法【りゅうりょうけいほう】**

流量を測定する計器を用いる方法。送湯配管に計器を設置して測定を行う。温泉で使用する場合は、温泉スケールやガスが精度低下の原因となる。温泉の水質や特性に応じて適したものを選び定期的にメンテナンスを行う必要がある。

揚湯試験【ようとうしけん】

源泉の温泉湧出能力の評価のための試験。揚湯量を段階的に変えて、その水位変化を測定し限界揚湯量を検証する段階揚湯試験と段階揚湯試験結果から求めた限界揚湯量に安全係数を乗じて適正揚湯量を推定し、連続的に揚湯する連続揚湯試験がある。

- ・ **段階揚湯試験【だんかいようとうしけん】**

動力装置にて段階的に揚湯量を変えて、動水位の変化を観測することで、温泉井戸の限界揚湯量を求める試験。

- ・ **限界揚湯量【げんかいようとうりょう】**

温泉井戸を枯渇せずに揚湯可能な最大量。限界揚湯量以上に揚湯を続けると、動水位が継続的に低下する。段階揚湯試験で求めることができる。

- ・ **揚湯量-水位降下量関係図【ようとうりょう-すいはいこうかりょうかんけいず】**

横軸を揚湯量（Q）、縦軸を水位降下量（S）とそれぞれ対数表示としたプロット図。Q-S 関係図とも呼ばれる。段階揚湯試験の結果を基に作成し、限界揚湯量の推定、適正揚湯量の算出に用いる。

- ・ **適正揚湯量【てきせいようとうりょう】**

限界揚湯量に安全係数を乗じた揚湯量。動力許可申請では、適正揚湯量が許可揚湯量とされることが多い。一般に安全係数は 0.8 が多く用いられているが、温泉密集地域等、温泉枯渇リスクの高い場合には安全側に係数を定めていることがある。

- ・ **連続揚湯試験【れんぞくようとうしけん】**

段階揚湯試験の結果から推定された適正揚湯量が、実際の連続揚湯に耐え得るか確認するための試験。

- ・ **回復試験【かいふくしけん】**

連続揚湯により低下した動水位から、揚湯停止により揚湯試験前の水位まで回復するか否かを確認する試験。