

## 距離規制の妥当性について検証するための事例

ここでは、過去に枯渇現象が生じた3つの温泉地を取り上げ、どのような源泉間の距離でなら枯渇現象が生じないかを探ることとする。

なお、ここで考える源泉分布域とは、温泉を集水する地域としての性格を考慮していることから、主要な源泉を真円で包含させることができる面積として考えた。また、源泉の温泉ゆう出能力は地域毎、源泉毎で変化に富むことから、その温泉地内にある源泉数から適正な源泉距離を考察するのではなく、その温泉地からどれほどの温泉を採取していたのかを検証し、これを1源泉当たりゆう出量の全国平均である100L/分で除すことでその地域内の源泉数に換算。その数値から1源泉が必要とする面積を算出し、また、その数値から源泉間距離を逆算した。

その検討結果を以下に示す。

### (1) A温泉

<p>枯渇現象の状況</p>	<p>A温泉は、当初は自噴利用が中心であったのが、昭和31年以降、動力揚湯が行われ始め、昭和33年2月には自噴利用から揚湯利用への変更を迫認し、昭和36年10月の審議内規の改正では動力揚湯を正式に認めるに至った。これに伴い、ゆう出量が増加し、枯渇現象が出現し始めた。具体的な状況は以下の通りである。</p> <p>昭和29年当時のA温泉は利用源泉数が63で、自然水位は0～-1.0m、揚湯水位は-0.10～-3.0m、1井当りの平均ゆう出量は14.91L/分、全ゆう出量は約940L/分（日量1353m<sup>3</sup>）であって、自然ゆう出量の範囲内で需要に答えてきた。</p> <p>ところが、昭和33年4月の役場の調査によると、総ゆう出量（1556m<sup>3</sup>/日）は昭和31（1956）年4月以降、18%の増加を示した。</p> <p>昭和34年には利用源泉数が68と微増し、総ゆう出量は昭和29年時の940L/分から1,345L/分へと43%増加した。</p> <p>さらに昭和39年の調査時に、利用源泉数が63に減ったものの、総ゆう出量は1,424L/分（51.5%増加）に増加している。その結果、揚湯水位は-0.1～-3.0mから-4.7～-9.02mへと低下し、周辺あるいは上部から地下水の浸入を招来し、孔底温度と泉温の低下、溶存成分量の減少となって現れてきた。</p> <p>以上のような経緯から、A温泉が洪積層の温泉層（第2次温泉源）から採湯している限り、昭和29年時のゆう出量（約940L/分）にもどらなければ、過剰揚湯といわざるを得ない状況であることが指摘された。</p>
<p>現在の状況</p>	<p>平成17年当時のA温泉の利用源泉数は44に減り、総ゆう出量は1,100L/分台に減じ、平均泉温は37.3℃から40.5℃へと回復している。温泉水位は昭和</p>

	39年当時より若干低下している傾向があるものの、目立った低下ではなく、昭和39年当時よりも健全化（回復）しているといえる。しかし、昭和29年時に比較すれば、平均泉温は未だ低く、温泉水位も最大10m近く低下しているので、A温泉の適正ゆう出量は昭和29年時の940L/分程度として、大きな間違いはないものと思われる。
源泉分布面積	1.400km <sup>2</sup>
源泉密度と源泉間距離	A温泉における昭和29年当時の温泉ゆう出量100L/分当たりの面積は0.149km <sup>2</sup> となり、その状態での源泉間距離は413mとなる（別表参照）。

## (2) B温泉

枯渇現象の状況	B温泉は、大正末期頃までは自然ゆう出あるいは掘削自噴の状態が続いていた。 戦後の高度成長期に入ると、多数の人が競うように新規の掘削を行い、揚湯を行うようになった。昭和52年当時で合計137もの源泉が所在した。その結果、温泉水位は急激に低下し、昭和26年当時には地表面下20m位であったものが、35年頃には100m（利用源泉数は65、総ゆう出量は約2,600L/分）になり、50年頃には200m（利用源泉数は95、総ゆう出量は約3,300L/分）にまで低下した。これにより、昭和35年には1井当たり7.94馬力で足りていた動力が、昭和50年には15.78馬力もの動力が必要となり、1馬力当たりで揚湯できる量は逆に減少する事態となった。なお、昭和38年以降、平均温度の低下はほとんどない（おおむね58℃程度）。
現在の状況	昭和53年から集中管理による給湯が行われている。これにより、稼働源泉数は55～53に減じ、総ゆう出量も約2500L/分程度まで減少させた。その結果、昭和56年には温泉水位は地表面下140m台にまで回復している。
源泉分布面積	4.400km <sup>2</sup>
源泉密度と源泉間距離	昭和53年の集中管理以後のゆう出量100L/分当たりの面積は0.176km <sup>2</sup> で、その状態での源泉間距離は449mとなる（別表参照）。

## (3) C温泉

枯渇現象の状況	C温泉は、明治31年の記録では源泉数は20、昭和10年代までは自然ゆう出泉や掘削自噴泉が存在し、昭和21年までは自然ゆう出泉と小規模揚湯泉とが共存した。しかし、昭和22年以降乱掘・増掘競争が始まり、昭和25年には自噴泉が姿を消した。 これまでの温泉ゆう出量や温度、温泉水位の変化状況は以下の通りである。																				
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>年</th> <th>源泉数</th> <th>平均温度</th> <th>温泉採取量</th> <th>温泉水位（標高）</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>昭和15年</td> <td>16</td> <td>66.0℃</td> <td>約540L/分</td> <td>約90m</td> </tr> <tr> <td>昭和30年</td> <td>30</td> <td>60.9℃</td> <td>約1,280L/分</td> <td>約70m</td> </tr> <tr> <td>昭和35年</td> <td>45</td> <td>58.2℃</td> <td>約2,260L/分</td> <td>約30m</td> </tr> </tbody> </table>	年	源泉数	平均温度	温泉採取量	温泉水位（標高）	昭和15年	16	66.0℃	約540L/分	約90m	昭和30年	30	60.9℃	約1,280L/分	約70m	昭和35年	45	58.2℃	約2,260L/分	約30m
年	源泉数	平均温度	温泉採取量	温泉水位（標高）																	
昭和15年	16	66.0℃	約540L/分	約90m																	
昭和30年	30	60.9℃	約1,280L/分	約70m																	
昭和35年	45	58.2℃	約2,260L/分	約30m																	

	昭和 44 年	58	53.7℃	約 2,000L/分	約 14m
	昭和 50 年	54	54.0℃	約 1,700L/分	約 18m
現在の状況	昭和 56 年から集中管理による給湯が行われ、それまでと比較して総ゆう出量は約 1,800L/分であり変わらないものの、稼働源泉数は 34 に減じた。その結果、昭和 57 年には温度は 60.8℃に、温泉水位は海拔 80m 程度に回復した。稼働源泉数の減少にはその後も努力し、平成年代に入ると 22~24 井となっている。この間の総ゆう出量は 1,700~1,900L/分の範囲で推移し、温泉水位も海拔 70m 程度で安定している。				
源泉分布面積	2.030km <sup>2</sup>				
枯渇現象発生時の源泉の密度	枯渇化の進行を止めることができた集中管理以後のゆう出量 100L/分当たりの面積は 0.119km <sup>2</sup> で、その状態での源泉間距離は 369m となる（別表参照）。				

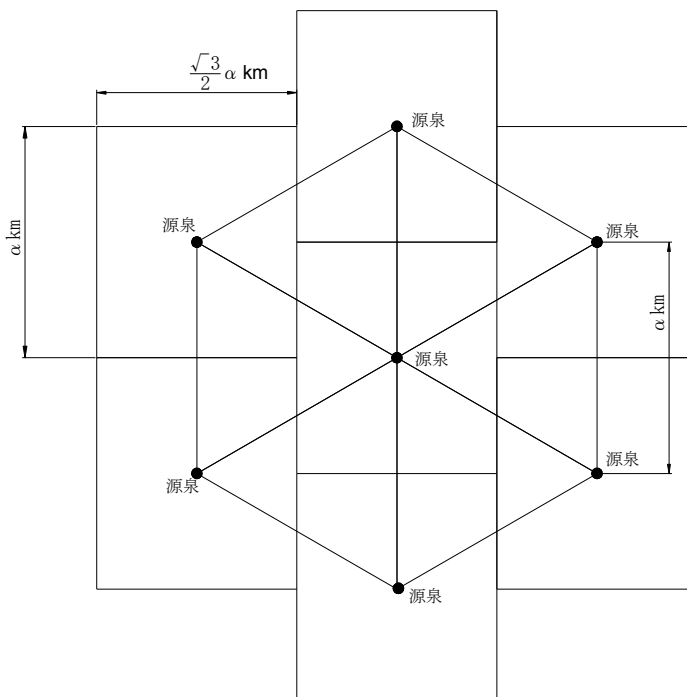
以上のとおり、現状（資源保護のための対策実施後）又は枯渇現象発生前の温泉採取量から、1 源泉当たりの所要面積を計算すると 0.119~0.176 k m<sup>2</sup> となる。これが温泉資源の枯渇現象を抑えるために必要な源泉密度となり、この密度の源泉を均等に配置するために必要な源泉間の距離は 369~449m となる。

（参考）

最も高い密度で源泉を配置した場合の 1 源泉あたりの所要面積

( $0.866 \alpha^2 \text{ k m}^2$  ( $=\sqrt{3}/2 \alpha^2 \text{ k m}^2$ )) の考え方

距離規制の距離を  $\alpha \text{ km}$  とした場合、最も高い密度で源泉を配置する方法は、一辺  $\alpha \text{ km}$  の正三角形の各頂点に源泉がある形である。それら正三角形の集合体からなる平面を源泉を中心とする四角形でモザイク状に剥ぎ取ると仮定すると、四角形は ( $\alpha$ ) と ( $\sqrt{3}/2 \alpha$ ) を 2 辺とする長方形となる。ただし、長方形を用いたのは、区域内の空間を隙間なく均等に見積もるためであり、水文学的な考えを反映したものではない。



(別表) 源泉分布面積と 100L/分当たり所要面積、源泉間距離

	A 温泉	B 温泉	C 温泉
①源泉分布面積 (km <sup>2</sup> )	1.400	4.400	2.030
②合計温泉ゆう出量 (L/分)	940	2500	1700
③1 源泉 (100L/分) 当たりの所要面積 (km <sup>2</sup> )	0.149	0.176	0.119
④上記に必要な源泉間距離 (=1.07√③, m)	413	449	369

距離規制の距離を  $\alpha$  k mとした場合、最も高い密度で源泉を配置する方法は、一辺  $\alpha$  k mの正三角形の各頂点に源泉がある形である。その場合の1 源泉当たりの面積は、 $0.866 \alpha^2 \text{ k m}^2 (= \sqrt{3}/2 \alpha^2 \text{ k m}^2)$  となる。逆に、1 源泉当たりの面積として  $\beta \text{ k m}^2$  を確保するためには、各源泉の間に  $1.07\sqrt{\beta} \text{ k m}$ 以上の距離を取れば十分となる。

## 熱収支について

熱収支の考えは、温泉を採取することで地下から奪われる熱量と、地球内部からの熱伝導で獲得できる熱量とを比較し、両者が釣り合うことで熱量的な均衡を取ることができる面積を検討したものである。

計算条件として、温泉の温度は 45℃、当該地域の気温は 15℃とし、1 源泉当たりのゆう出量の全国平均である 100L/分 (≒100,000g/min) を採取したとすると、地下から採取する熱量 (Qs とする) は以下の通りとなる。

$$Q_s = ((45 [^{\circ}\text{C}] - 15 [^{\circ}\text{C}]) \times 100000 [\text{g}/\text{min}]) / 60$$

$$= 50,000 \text{cal}/\text{sec}$$

一方、地球内部から熱伝導によって運ばれる熱量は、地殻熱流量 (※) と呼ばれる。日本における地殻熱流量は様々な文献等で公表・紹介されているが、ここでは地質調査所 (1980) による「日本温泉放熱量分布図」にコンターマップとして表現されているので、参照とされたい。

※地殻熱流量 (Q: cal/cm<sup>2</sup>・sec) とは、地球内部から地表に向かう熱の流れの量を意味する。地表付近ではほとんどの熱伝導で運ばれていると考えられるので、ある場所で地温勾配 (dT/dZ、T: 温度、Z: 深さ) と熱伝導率 K を測定することで、熱流量は次式により求められる。

$$Q = K \cdot (dT/dZ)$$

(新版地学事典: 1996 による)

なお、1cal は常用的には 1g (≒1mL) の水の温度を 1℃上げるのに必要な熱量を指す。

これによると、我が国の非火山地域における地殻熱流量は 0.5~1.5HFU (1 HFU は 1 × 10<sup>-6</sup>cal/cm<sup>2</sup>・sec) の範囲にある。仮に、上記の温泉採取地点の地殻熱流量が 1.0HFU の地域であるとする、そこで獲得できる熱量 (Qe とする) は 1 × 10<sup>-6</sup>cal/cm<sup>2</sup>・sec であり、1km<sup>2</sup> 当たりに換算すると 10,000cal/km<sup>2</sup>・sec となる。したがって、上記の温泉採取によって奪われる熱量 (Qs) を、熱伝導によって運ばれる熱量 (Qe) で補填するには、Qs/Qe=5km<sup>2</sup> の面積が必要となる。これは半径 1.26km の円に相当する。

同様の計算を、いくつかの HFU 値に対応して試算した結果を下表に示しておく。

### 熱収支による集水必要面積試算例

地殻熱流量	HFU	0.5	1	1.5	2
同上（単位換算）	cal/cm <sup>2</sup> ・sec	0.0000005	0.000001	0.0000015	0.000002
同上（1km <sup>2</sup> 当たり）	cal/km <sup>2</sup> ・sec	5,000	10,000	15,000	20,000
必要面積	km <sup>2</sup>	10	5	3.33	2.50
半径	km	1.78	1.26	1.03	0.89

注：温泉の温度は 45℃、当該地域の気温は 15℃とし、ゆう出量は 100L/分（＝100,000g/min）としたので、温泉の熱量は 50,000cal/sec となる。

## 経年的な水位低下について

以下の報告から、箱根カルデラと湯河原カルデラでは、1950年代後半から70年台にかけて著しい水位・温度・成分の低下が生じていたと考えられる。大山(1984(\*1)、1985(\*2))は、両カルデラにおける水がそれぞれ閉じた循環系を形成しているとみなし、当時の温泉総採取量と降水量の比を、箱根で2.3%、湯河原で5.5%と見積もっている。同報告によれば、カルデラへの平均降水量は箱根で2,830mm(108km<sup>2</sup>)、湯河原で2,200mm(30km<sup>2</sup>)である。一方、1979年度の温泉総ゆう出量は箱根で約27,000L/分、湯河原で約7,000L/分(いずれも神奈川県統計資料による)であり、温泉ゆう出量が降水量に占める割合は、箱根で4.6%、湯河原で5.5%となる。

\*1: 大山正雄・広田 茂・迫 茂樹・栗屋 徹、1984: 湯河原の水位 (1982年)、神奈川県温泉地学研究所報告、第15巻、第5号、183-191

\*2: 大山正雄・平野富雄・大木靖衛、1985: 箱根の地下水とその利用、神奈川県衛生部

### 1. 湯河原温泉

- ① 大山・大木(1974) 湯河原温泉の水位の変遷、神奈川県温泉研究所報告、第6巻、第1号、31-46.

湯河原温泉の沿革を整理するとともに、1900年代初頭から1970年代までの、源泉総数、総ゆう出量の推移と、静水位の低下についてまとめている。湯河原温泉の開発が顕著だったのは1935~40年頃と、1950年以降の2時期であった。1935年頃の開発により、それまで自噴していた掘抜井戸が動力揚湯への切替えを余儀なくされる事態が発生したが、特に急激な水位低下が始まったのは1950年以降であり、総ゆう出量は1958年の5,400L/分(利用源泉数67)から、1978年の7,000L/分(利用源泉数103)まで増加している。これに伴う温泉井の水位低下は、1960年までは、温泉の揚湯が集中している地域を中心に水位低下が顕著であったが、その後も続いた温泉の掘削・利用の増加により、水位の低下範囲は湯河原温泉全体に拡大していった。1957年と1972年とで比較すると、水位低下の最大量は中心部で70m以上、周辺部でも40m程度であった。以上の結果から、湯河原温泉の総ゆう出量は、著しい水位低下が起きる前の毎分4,500~5,000L/分程度が適当であるとしている。

- ② 平野・栗屋・大山・大木(1976) 湯河原温泉の地下水位低下と温泉の冷地下水化 — こそめ橋周辺の古い源泉の場合 —、神奈川県温泉研究所報告、第7巻、第2号、53-68.

湯河原温泉の中心部(こそめ橋周辺)で古くから利用されている源泉について、井戸の深さ、温泉温度とゆう出量、化学組成の推移や揚湯装置の変遷について検

討した。各源泉とも、水位の低下にともない、揚湯装置の設置、増くつ、揚湯能力の強化といった経過をたどることで源泉の維持に努めてきているが、1960年以降は、水位・温度の低下だけでなく、溶存成分の減少、成分比率(Cl/SO<sub>4</sub>比)の変化が観測されるなど、温泉の冷地下水化(浅層地下水の混入割合増加)が進行していることが明らかになった。

## 2. 箱根温泉

③大山・伊東・大木(1985) 箱根温泉の温度と湧出量の観測 昭和57-58年、神奈川県温泉地学研究所報告、第16巻、第5号、41-52.

箱根を代表する湯本・塔ノ沢、蛇骨、姥子、芦ノ湯の各温泉地で、温度・ゆう出量の連続観測を行った結果について検討した。このうち、湯本・塔ノ沢地域では、地域の総温泉ゆう出量の約8%をゆう出する竪穴湧泉において、1958年から1970年にかけて泉温の低下が著しかった。また、蛇骨湧泉では、箱根の火山活動活発化の影響による温度上昇が観測されたものの、1968年以降、ゆう出量の減少傾向が続いていた。

④大山・久保寺・小鷹・伊東・迫(1985) 箱根火山中央火口丘東麓の温泉水位、神奈川県温泉地学研究所報告、第16巻、第5号、53-62.

箱根中央地区で1978(昭和53)年から行っている観測井の水位観測結果と、過去の水位の記録のある温泉井のデータについて検討し、1960年から1980年にかけての温泉水位の低下速度を、箱根中央部で0.3~0.5m/年、山麓周辺で0.8~1.0m/年、基盤岩中で0.7~0.8m/年と見積もった。

⑤平野・広田・小鷹・栗屋・大木(1976) 箱根塔ノ沢温泉の温度と化学成分、神奈川県温泉研究所報告、第7巻、第2号、85-92.

⑥平野・広田・大木(1977) 箱根湯本、下茶屋地区の温泉のゆう出量と溶存成分の減少について、神奈川県温泉研究所報告、第8巻、第2号、51-66.

湯本・塔ノ沢温泉では、温泉総ゆう出量が、1953年の毎分2,810Lから、1983年には、その2倍以上にあたる6,023L/分に増加したのにもない、自然湧泉の枯渇、温泉の水位、温度、ゆう出量、溶存成分の低下が進行していることを報告している。



## 動力装置の際の影響調査等実施手法

### I 影響調査

#### 1. 観測源泉の選定

動力の装置が「温泉のゆう出量、温度又は成分に影響を及ぼす」か否かを判断するため、動力を装置しようとする源泉（以下「対象源泉」）の周辺の既存源泉を「観測源泉」として捉え、当該観測源泉における影響の程度を調査する。

観測源泉の選定に当たっては、対象源泉からの距離、温泉採取深度、泉質の類似性等を考慮した上での位置関係、予測される影響範囲、観測の難易度等を考慮して、抽出することが適当である。

#### 2. 観測項目

##### 2-1 観測源泉（既存源泉）

源泉間の影響関係でもっとも鋭敏に反応するのは水位であり、自噴の場合にはゆう出量と孔口圧力である水位水位。また、温泉の温度や泉質への影響は、一般的に上記の項目に次いで変化が現れる項目である。

このため、影響調査で必須の観測項目は、水位（自噴では孔口圧力）、ゆう出量の観測が最も重要であり、次いで湧出温度である。成分濃度は状況に応じて適宜測定すべき項目となるが、観測源泉の湧出温度や成分濃度に変化が及ぶと利用や温泉に適合しなくなるなど大きな問題となることが予測される場合は、測定することが必要となる。簡易的に判断するには電気伝導率を測定することで濃淡の目安となる。

##### 2-2 対象源泉（申請源泉）

対象源泉においても、観測源泉との影響関係を検討するために、原則として観測源泉と同一の項目を観測する必要がある。

#### 3. 観測に使用する機器

観測に使用する機器は以下の内容を参考とし、現場の状況に応じて、自動記録方式、機器の指示値の読み取り、現地測定を組み合わせた観測態勢を取ることになる。温泉成分の分析も必要とされる場合には、時間と費用を要するので重要な成分項目のみを

測定したり、携帯型測定器を用い電気伝導率を計測することで総濃度濃淡の変動目安として判断することができる。

なお、観測源泉において、これらの機器のいくつかが設置できない場合、あるいはいくつかの項目が測定困難な場合は、測定可能な項目をもって影響の有無を判断するほかはない。しかし、水位、ゆう出量ともに測定できない場合は、観測源泉としては不向きであるので別の周辺源泉を観測対象とする等の処置もある。さらに他に観測できる源泉がない場合は、単一井（対象源泉のみ）による影響予測を行うことが考えられる。

### 3-1 機器による観測

観測項目	代表的機種	規格
水位	圧力式等	±0.1% FS（フルスケール）程度
ゆう出量	電磁式等	±2%指示値
孔口圧力	圧力発信器等	測定精度±1% FS
温度	測温抵抗体等	分解能 0.1℃
記録方式	アナログ記録、自動記録計、表示値の読み取り等	連続記録、定時での記録

### 3-2 観測員による定時観測

観測項目	代表的機種	測定
水位	触針式等	1cm 単位以下で読み取り
ゆう出量	容積法、ノッチ法等	L/min 単位で有効数字三桁以内
孔口圧力	ブルドン管式等（測定精度±1.6% FS 程度）	機器の指示値
温度	デジタル温度計等（分解能 0.1℃）と標準温度計の併用	0.1℃単位で現地測定
記録方式		現地測定・記録

※ ゆう出量と温度を測定するために、源泉近くに採取した温泉の全量を吐き出すことができるバイパス管を設置する必要がある。

※ ゆう出量の実測が困難な場合は、現地の状況に応じて工夫する（例：タンクからの流出を止め、タンク内の水位上昇速度を測定して量に換算する等）

## 4. 影響調査の実施期間

影響調査に当たっては、対象源泉を揚湯しない状態での測定（事前調査）、対象源泉を揚湯した状態での測定（本調査）、対象源泉の揚湯を停止した状態での測定（事後調査）の3つの期間を設定する。以下に実施期間の目処を記すが、温泉の採取層の関係（距離や深度、地質条件、採取状況）により、必要とされる日数は、大きく変わ

ることに注意されたい。影響関係の判断が難しい場合は、期間を延長する等の対応が必要とされる。

#### 4-1 事前調査

観測源泉の通常期（対象源泉の影響がない状態）のゆう出状況を把握するためのものである。観測に必要なとする期間は源泉の特性によるが。変動が少なく安定している温泉であれば3日間程度を目処とする。季節や降雨による変動が大きい場合は、バックグラウンドを把握するためにより長い期間を要することに注意する。この期間の観測内容は以下の通りとする（重要な項目から順に記す）。

a) 対象源泉での測定

水位（静水位）

b) 観測源泉での測定

揚湯の場合：水位（静水位、動水位）、ゆう出量、温度、  
その他（電気伝導率、成分濃度等）

自噴の場合：孔口圧力、ゆう出量、温度、  
その他（電気伝導率、成分濃度等）

#### 4-2 本調査（1段階で1日程度、5段階を目処）

観測源泉において、対象源泉の揚湯量に応じた影響の有無と程度を確認するため、対象源泉のゆう出量を段階的に増加する方式を推奨する。ゆう出量の設定は、下限は使用ポンプでの最小ゆう出量、上限は許可制限量、もしくは対象源泉の適正採取量又は計画採取量とし、5段階程度に区分する。1段階の揚湯期間は1日程度とするが、最終的な影響量の確認が重要となる。この間での揚湯時間（例えば、終日運転か昼間のみの運転か等）については、源泉の利用状況等を勘案して決定する。

対象源泉のゆう出可能量が少なく、5段階以上のゆう出量の設定が困難な場合は、状況に応じて段階を設定することとし、調査期間はその段階設定に対応することになる。

なお、この期間の観測内容は以下の通りとする（対象源泉・観測源泉とも共通、重要なものから順に記す）。

- ・水位（自噴の場合は源泉孔口圧力）
- ・ゆう出量
- ・温度
- ・その他（電気伝導率、成分濃度等）

### 4-3 事後調査

影響調査時に出現した変化が対象源泉によるものか否か（影響か否か）を再確認するものであり、対象源泉揚湯停止後の変動を観測する。観測に必要とする期間は源泉の特性により、回復速度が異なるが、本調査の結果を目処に回復状況から判断する（3日を目処）。本調査時に明確な変動がなければ、事後調査の実施は省略することもできる。この期間の観測内容は以下の通りとする。

a) 対象源泉での測定

水位（静水位）

b) 観測源泉での測定

揚湯の場合：水位（静水位、動水位）、ゆう出量、温度、その他（成分濃度、電気伝導率等）

自噴の場合：ゆう出量(孔口圧力)、温度、その他（電気伝導率、成分濃度等）

## 5. 観測方法

### 5-1 自動記録

アナログ記録計（ペン式、打点式）では連続記録、自動記録計による場合のデータサンプリング間隔は10分程度を目安とし、前者の場合は連続記録をそのまま図化するか、10分間隔でデータを読み取る。

### 5-2 観測員による定時観測

a) 水位・孔口圧力（対象源泉・観測源泉共通）

対象源泉の揚湯開始又は停止を起点として、最初は短い間隔で測定し、変動が小さくなるに従い徐々に測定間隔を長くすることが考えられる。測定例を以下に示すが、源泉状況や水位の変化状況に応じて適切な間隔を選択すべきである。

《測定例》

0 ～30分 : 1～5分

30 ～60分 : 5～10分

60 ～120分 : 10～30分

120分～ : 30～60分（より長期の場合も60分を目処とする）

## b) ゆう出量・温度（対象源泉・観測源泉共通）

原則 60 分間隔を目安とする。

## c) 上記の実施が困難な場合

観測源泉が利用しているなどのため、上記したような定期的観測が困難な場合は、温泉利用に支障が生じない範囲で観測する。特に、旅館等の繁忙時や夜間には観測困難となることもあるので、観測間隔は柔軟に対処し、これに応じて観測の実施期間も変更すべきである。

### 5-3 影響調査時の観測源泉の状態

影響調査時の観測源泉は、休止状態で水位（静水位）や自噴締め切り圧力（静止水頭）を測定するのが理想であるが、実際は利用しているために測定が困難なケースが多い。利用している源泉では、長期にわたり揚湯（自噴）を休止することは困難であるので、影響調査期間中は観測源泉の揚湯（自噴）状態をできる限り一定とすることが望ましい。

間欠的な揚湯を行っている源泉の場合は、対象源泉の影響を誤認させないためにも、調査期間中はできれば一定の揚湯状態を維持したい。これが実現困難な場合は、通常状態における運転状態を監視・記録し影響の有無を判断することが考えられる。

## 6. その他特記事項

### 6-1 関連データの収集

浅深度で湧出する温泉は、降雨等、周辺環境の影響を受け常に変動している。影響観測時には、直近の気象観測点の気象データ（降水量、気温、気圧等）を収集・整理するとともに、付近の河川水位や潮位も測定しておくべきである（気象庁、国土交通省等の公表データがあれば、そのデータを収集・整理する）。

また、温泉の自噴量や水位は、地下水位の影響も受けていることがある。源泉分布域の中に地下水井が存在していれば、その揚水量や揚水時間、水位等を測定して参考資料とすることも考えられる。

また、温泉への影響のみならず、周辺環境への影響についても考慮が必要である。

### 6-2 観測間隔や揚湯期間の変更

対象源泉の水位は、揚湯後速やかに安定する場合と、安定しない場合とがある。影響調査での揚湯期間は 1 段階につき 1 日程度としたが、早期に水位が安定する場

合は、これよりも短い揚湯期間で影響判断が可能なこともある。反面、水位が低下を続け安定しない場合は、揚湯期間を延長する必要もあり得る。

要は、状況に応じた適切な方法を採用し、影響量を確認することが重要であり、観測間隔をより短くしたり、観測期間を長くしたりすることは差し支えない。

### **6-3 調査の協力が得られない場合について**

調査協力が得られない場合には、調査の必要性和理解を求め、地域共有資源を保全することの認識ができるよう努める。影響問題が発生した際には、既存源泉所有者自身で影響関係の程度を科学的に証明する必要があることを説明し、どうしても協力が得られなかった場合には、その他の手段によって得られた情報から判断することとなる。

## II 揚湯試験（集湯能力調査）

### 1. 揚湯試験の種類と目的

段階揚湯試験による限界揚湯量とその結果から判断する適正揚湯量の検討は、その後の連続試験設定揚湯量を調べるための調査であり、最終的に過度な水位低下を招くことなく水位の安定を確認し、周辺へ影響することなく安定して採取できる温泉の量を調べるのが揚湯試験における主目的である。

#### a) 予備揚湯試験

孔内洗浄の後、実際にポンプ揚湯を行ってゆう出量と水位との関係を確認し、以降の揚湯試験の計画を立てるための資料を得るのが予備揚湯試験である。所要日数は1日程度を目処とする。

#### b) 段階揚湯試験

この試験は、ゆう出量を段階的に変えて、その段階ごとのゆう出量と水位（水位降下量）との関係調べるものである。5段階以上で実施することを基本とする。設定する最大ゆう出量は、ゆう出量に関する規制量があればその量を、規制量がなければ、使用するポンプの能力又はその源泉から採取可能な量とし、最小量は使用するポンプで制限可能な量とする。

1段階の揚湯時間は、最低1時間とするが、調査時間を延長しても水位が安定しない場合は、おおよその安定をもって次の段階に移行せざるを得ないケースもある。

なお、採取可能量が少ないときは、その採取量の範囲内で可能な段階を設定するものとし、さらに少なければ、c)の連続揚湯試験のみを実施することになる。

#### c) 連続揚湯試験

段階揚湯試験で得られたデータを基に、ゆう出量を規制量の範囲内で、その源泉で適正と思われる量又は将来的に採取することになるゆう出量に設定して、一定ゆう出量で長期間の揚湯を行う試験である。この試験の所要日数は、水位が安定化するまでを基本とし、3～7日間程度を目処に安定を確認する。おおよその安定の目安は1時間当たりの水位変化量が、全体水位変化量のおおむね0.5%以内となるまでとするが、0.5%以内でも継続的に水位が低下しているような場合は、完全に安定しているとはいえないので判断には注意が必要である。

#### d) 回復試験

連続揚湯試験から引き続く試験であり、揚湯を停止した後の水位回復状況を観測するものである。観測期間は1日以上とする。

## 2. 揚湯試験の観測項目と観測方法

揚湯試験で観測すべき項目と測定間隔は、「I 影響調査 5. 観測方法 5-2 機観測員による定時観測」と同様に実施すること。

## 3. 揚湯試験の観測機器

揚湯試験に使用する観測機器は、「I 影響調査」の項で記した観測機器を援用すること。

## 4. 揚湯試験の観測期間

対象源泉の水位は、揚湯後速やかに安定する場合と、安定しない場合とがある。速やかに水位が安定する場合は、これよりも短い揚湯期間で影響判断が可能なこともある。反面、水位が安定しない場合は、揚湯期間を延長する必要もあり得る。

## 5. 特殊な条件における対応事例

○揚湯量をポンプに負荷がかかる限界値まで制限しても安定水位が得られなかったケースにおける対応事例

- ・水位の回復速度から採取可能量を求め、適正揚湯量を検討した。
- ・長時間の連続揚湯が出来ないため間欠運転で試験を行い積算揚湯量から適正揚湯量を求めた。
- ・ポンプの負荷が大きくなり絞れきれないため、採取した温泉の一部を源泉に戻して減量調整を行い適正揚湯量を求めた。

○その他

- ・揚湯量を増加させると共に温泉付随ガスの量が増加し、水位が上昇した。圧力計を用いると整合的な値となることからガス発泡によるものと判断した。



## 温泉モニタリング実施手法

## I 自動観測

## 1. 観測機器

自動観測における観測機器の具体例は、次のとおりである（別紙4の「I 影響調査 3. 観測に使用する機器 3-1 自動記録方式」に記した機器と基本的に同一である）。

観測項目	代表的機種	規格
温泉水位	圧力式など	±0.1% FS（フルスケール）程度
ゆう出量	電磁式など	±2%指示値
孔口圧力	圧力発信器など	測定精度±1% FS
温度	測温抵抗体など	分解能 0.1℃
記録方式	自動記録計（アナログ・デジタル）など	連続記録、定時での記録

これら表示器・記録計の配置例を別図1に示すので参考とされたい。なお、配置例において、流量計・温度計の前後にバイパス管を配置したのは、機材のメンテナンスや交換が容易に行えるように留意したものであり（別図2）、また、バイパス管にドレーンを設けたのは、この形式であれば通常状態時にはバイパス管に水が滞留するので、排除するためである。排除する必要性がなかったり、小さかったりする場合は、バイパス管やバイパス管ドレーンの設置は必要ない。

流量計の下流側（図の右側）には湯量測定・温泉採取用の吐き出し管を設けており、これは、できるだけ源泉に近い所で温泉を採取できるようにすることと、流量計の指示値を確認できるようにする二つの目的がある（別図3）。

自動記録方式には、大きく分けるとアナログ記録（いわゆるペン式又は打点式レコーダーによる）とデジタル記録（自動記録計又はパソコン管理）があり、両者の特徴を併せ持つハイブリッド式の記録計もある。

アナログ記録は連続的な波形記録が行われ、あるイベントに対する変化が忠

実に再現される点がメリットだが、データ（記録紙－チャート－）の読み取りが必要な場合があることと、その管理が悪いと後からの資料整理に支障を来す点がデメリットである。ペン式又は打点式レコーダーによる記録の時間的な粗密の程度は、記録紙の送り速度（チャートスピード）によって決められる。

デジタル記録はサンプリング間隔が任意に決められ、データをパソコンに直接取り込むこともでき、データの管理も容易である。しかし、データのサンプリング間隔よりも短い時間単位での変化は記録されないのがデメリットとなる。

記録間隔は、目的とする観測内容によって異なるが、標準的には1時間に1データの取得で充分であり、ある限られた期間において、細かい時間間隔で変化を把握したければ、さらに短い時間間隔でのデータ取得が可能であり、自動記録計やパソコンの記録容量、データ通信量などに余裕があれば、1分間隔での測定も十分に可能であるが、通常の観測であればその必要性は小さい。

## 2. 観測項目

### a) ゆう出量

ゆう出量の自動計測は、自動観測に対応した配管用の流量計（電磁流量計や超音波流量計など）による。

エアリフトによる源泉では、揚湯管内はエアと温泉との混合体となって、正確な流量が測定できない。そうした源泉では、温泉をタンク（気液分離槽）などに貯留していったんエアを抜き、そこからの配管（タンクからの送湯管）に流量計を設置するか、気液分離槽にノッチ箱の機能を持たせ、その溢流水深を自記水位計（圧力式、静電容量式その他、超音波式でも対応可能）で記録することになる。ただし、後者の場合には、水位測定値を流量に換算する演算機能が必要である。

可燃性ガスを含む温泉も、基本的にはエアリフト源泉と同様の処置が必要だが、可燃性ガスに対する所定の対策を施すことが求められる。

なお、スケールが生成しやすい温泉、腐食の激しい温泉などでは、このような観測機器は耐久性に乏しく、実用的ではないこともあるので注意が必要である。

## b) 温度

温度の自動記録は、配管に温度センサー（測温抵抗体など）を設置して行う。後述する水位計には、測温機能が付帯されているものもあり、そうした水位計を用いていれば、地上部に温度センサーを配置する必要性はあえてない。ただし、測温機能付き水位計は、設置場所によっては湧出温度とは異なる温度を測定してしまう場合があるので、注意が必要である。

## c) 水位・孔口圧力

水位の測定機器には、センサーを水中に浸すことなく測定する機器（上記した超音波式などの隔測式水位計）がある。ノッチ箱で水位測定する場合や、自然ゆう出泉などで広い水面を持ち、地表から水面までの深さが浅い場合には、このような隔測式水位計も適用可能である。

しかし、一般の源泉は口径が細く、温泉水位も深いために、隔測式水位計は使用できないことが多い。一般的な源泉では、圧力式などのセンサーを水没させる機器を用いる。設置深度が深い場合、センサーを後から挿入することは容易ではなく、通常はポンプ挿入時に水位センサーを揚湯管に拘束し、ポンプと同時に設置することになる。このため、センサーが故障した場合でも、それを交換するにはポンプの引き上げが必要になる。また、温泉であるが故に、高温、ガスを含む、スケールが生成するといった特徴があり、これらが水位計の耐用を短くする。こうした温泉では、温泉水中に高価な機器が浸らないエアパージ式水位計を用いるのも一法である。

なお、可燃性天然ガスを含む温泉では、例えばポンプ地上部で水位計のケーブルが通る部分に隙間ができると、そこからガスが地表に漏出する可能性があるため、所定のガス対策を施すことが求められる。

自噴源泉の場合の孔口圧力は、源泉頭部に圧力センサーを設置して自動観測化する。圧力計の選定に当たっては、当該源泉の最大圧力又は通常状態における圧力を考慮すべきである。

## Ⅱ 現地観測

### 1. 観測機器

現地観測における観測機器の具体例は、次のとおりである。これは別紙 4 の「Ⅰ 影響調査 3. 観測に使用する機器 3-2 定期観測又は随時観測」 b) に記した機器と基本的に同一であり、同 a) の自動観測機器（本紙に記した自動観測機器と同じ）の指示値の読み取りであっても構わない。

観測項目	代表的機種	測定
温泉水位	触針式など	0.5cm 単位以下で読み取り
ゆう出量	容積法、ノッチ法など	L/min 単位で有効数字三桁以内
孔口圧力	ブルドン管式など（測定精度±1.6% FS 程度）	機器の指示値
温度	デジタル温度計など（分解能 0.1℃）	0.1℃単位で現地測定
記録方式		現地測定・記録

※ ゆう出量と温度を測定するために、源泉近くに採取した温泉の全量を吐き出すことができるバイパス管を設置する必要がある。

※ ゆう出量の測定は、現地の状況に応じて工夫する（例：タンクからの流出を止め、タンク内の水位上昇速度を測定して量に換算するなど）

測定記録の間隔は、目的とする観測内容によって異なる。現地観測では自動観測よりも頻繁な測定はできないが、1回/日～1回/週程度の測定を標準としたい。これが困難な場合であっても、1回/月の測定頻度は確保すべきである。なお、測定は定時観測（毎回、ほぼ同一時刻で測定すること）、同一条件下（例えば、ポンプを自動運転している場合などでは、ポンプの運転中か休止中かのいずれかに統一する）での測定を基本とする。

### 2. 観測項目

#### a) ゆう出量

現地でのゆう出量の観測方法は、容積法を主体とする。これは、吐出口を計測しやすい場所に設け容量既知の容器が満杯になるまで（あるいはある一定の容量に達するまで）の時間を計測し、【容量 (L) / 時間 (秒) × 60 (毎分への換算)】でゆう出量を計算するものである。なお、測定ミスや湯量の脈動などに対処するため、測定は複数回行い、その平均値を採用すべきである。容積法による測定を行うためには、別図 1～3 に示した吐き出し管が必要であ

る。

こうした吐き出し管がない場合には、タンク流入部で測定したり、水道水等が混じらないようにして浴槽への流入口で測定したりするほかない。タンクからの流出を止め、タンク内の温泉の上昇速度からゆう出量を求めることも可能だが、タンク容量（断面積）が正確に把握できていないと精度が落ちるので、注意が必要である。

また、自動計測ではないが、現地指示又は遠隔指示による流量計を用いることも有用である。特に、温泉の利用が断続的である場合、上記の容積法では測定時間内の瞬間的な量しか把握できないことから、現地指示型であっても、積算機能がある流量計であれば、より実態に即したゆう出量が把握できる。

ただし、スケールが生成しやすい温泉、腐食の激しい温泉などでは、このような観測機器は耐久性に乏しく、実用的ではないこともある。実態に即した観測態勢を整えることが重要である。

## **b) 温度**

温度の測定は、上記の吐き出し管があれば、デジタル型温度計や水銀温度計によって容易に測定できる。

## **c) 温泉水位・孔口圧力**

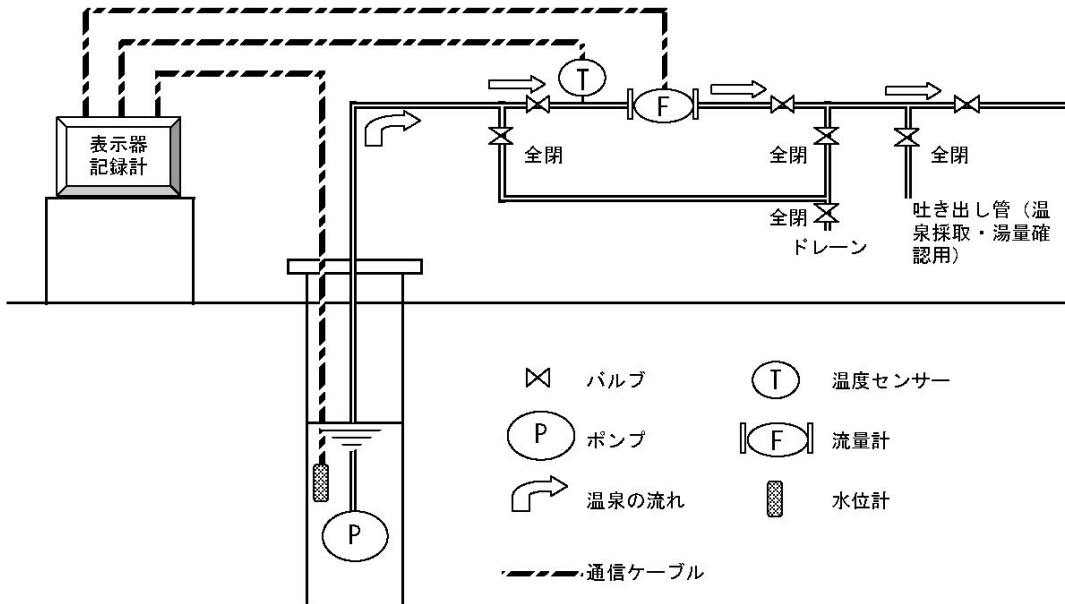
高温、ガスを含む、スケールが生成するといった源泉で、水位計の耐用が難しい温泉では、触針式水位計によって、地上部から温泉水位を測定する。源泉孔内には動力ケーブルなどがあり、水位計のスムーズな挿入を困難とするので、水位測定用の小口径のパイプを、水中ポンプ挿入時に同時設置することが必要である。源泉孔内にスペースが無ければ、あらかじめエアチューブを源泉に設置しておき、チューブから空気を送りその圧力から水位に換算する方法もある。

なお、可燃性天然ガスを含む温泉では、ポンプ地上部で水位測定管を通してガスが地表に漏出する可能性があるため、所定のガス対策を施すことが求められる。

自噴源泉の場合の孔口圧力は、源泉頭部に圧力計（ブルドン管式など）を設置して、その指示値を記録することとする。圧力計の選定に当たっては、当該源泉の最大圧力もしくは通常状態における圧力を考慮すべきである。

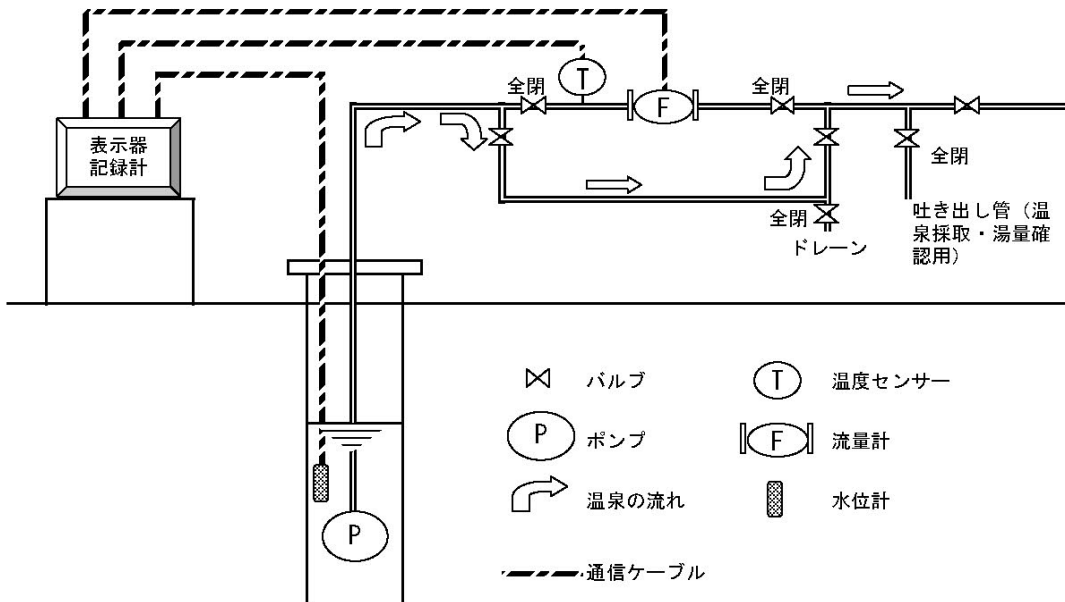
別図 1

通常状態



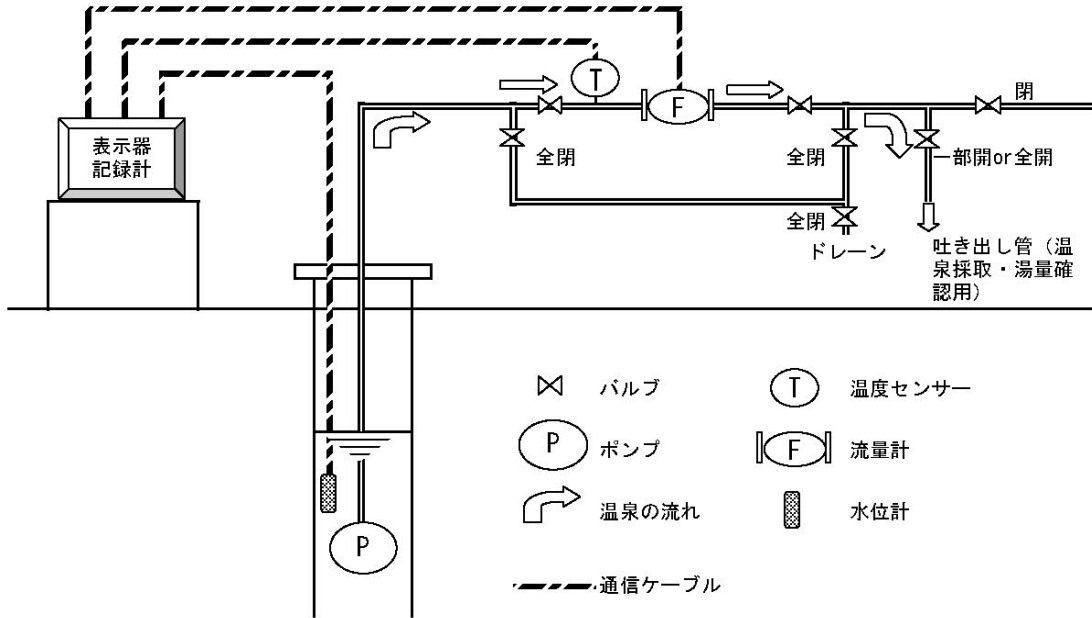
別図 2

流量計などメンテナンス時



別図 3

温泉採取・湯量確認時





## 1. 水質基準に関する省令

(昭和46年12月28日 環境庁告示第59号より抜粋)

項目	基準値
カドミウム	0.01mg/L 以下
全シアン	検出されないこと。
鉛	0.01mg/L 以下
六価クロム	0.05mg/L 以下
砒素	0.01mg/L 以下
総水銀	0.0005mg/L 以下であること。
アルキル水銀	検出されないこと。
PCB	検出されないこと。
ジクロロメタン	0.002mg/L 以下
四塩化炭素	0.002mg/L 以下
1,2-ジクロロエタン	0.004mg/L 以下
1,1-ジクロロエチレン	0.02mg/L 以下
シス-1,2-ジクロロエチレン	0.04mg/L 以下
1,1,1-トリクロロエタン	1mg/L 以下
1,1,2-トリクロロエタン	0.006mg/L 以下
トリクロロエチレン	0.03mg/L 以下
テトラクロロエチレン	0.01mg/L 以下
1,3-ジクロロプロペン	0.002mg/L 以下
チウラム	0.006mg/L 以下
シマジン	0.003mg/L 以下
チオベンカルブ	0.02mg/L 以下
ベンゼン	0.01mg/L 以下
セレン	0.01mg/L 以下
硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素	10mg/L 以下
ふっ素	0.08mg/L 以下
ほう素	1mg/L 以下

\*1: この告示は、公共用水域の水質汚濁に係る環境基準を定めたものであり、別表2として「生活環境の保全に関する環境基準」が定められている。

\*2: 別途、「地下水の水質汚濁に係る環境基準について」が告知されている（平成9年3月31日 環境庁告示第10号）。

## 2. 水質基準に関する省令

(平成 15 年 5 月 30 日厚生労働省令第 101 号より抜粋)

項目名		基準値
1	一般細菌	1mL の検水で形成される集落数が 100 以下であること。
2	大腸菌	検出されないこと。
3	カドミウム及びその化合物	カドミウムの量に関して、0.01mg/L 以下であること。
4	水銀及びその化合物	水銀の量に関して、0.0005mg/L 以下であること。
5	セレン及びその化合物	セレンの量に関して、0.01mg/L 以下であること。
6	鉛及びその化合物	鉛の量に関して、0.01mg/L 以下であること。
7	ヒ素及びその化合物	ヒ素の量に関して、0.01mg/L 以下であること。
8	六価クロム化合物	六価クロムの量に関して、0.05mg/L 以下であること。
9	シアン化物イオン及び塩化シアン	シアンの量に関して、0.01mg/L 以下であること。
10	硝酸態窒素及び亜硝酸態窒素	10mg/L 以下であること。
11	フッ素及びその化合物	フッ素の量に関して、0.8mg/L 以下であること。
12	ホウ素及びその化合物	ホウ素の量に関して、1.0mg/L 以下であること。
13	四塩化炭素	0.002mg/L 以下であること。
14	1,4-ジオキサン	0.05mg/L 以下であること。
15	シス-1,2-ジクロロエチレン及び 1,2-ジクロロエチレン	0.04mg/L 以下であること。
16	ジクロロメタン	0.02mg/L 以下であること。
17	テトラクロロエチレン	0.01mg/L 以下であること。
18	トリクロロエチレン	0.03mg/L 以下であること。
19	ベンゼン	0.01mg/L 以下であること。
20	塩素酸	0.6mg/L 以下であること。
21	クロロ酢酸	0.02mg/L 以下であること。
22	クロロホルム	0.06mg/L 以下であること。
23	ジクロロ酢酸	0.04mg/L 以下であること。
24	ジブロモクロロメタン	0.1mg/L 以下であること。
25	臭素酸	0.01mg/L 以下であること。
26	総トリハロメタン(クロロホルム、ジブロモクロロメタン、ブロモジクロロメタン及びブロモホルムのそれぞれの濃度の総和)	0.1mg/L 以下であること。
27	トリクロロ酢酸	0.2mg/L 以下であること。
28	ブロモジクロロメタン	0.03mg/L 以下であること。
29	ブロモホルム	0.09mg/L 以下であること。
30	ホルムアルデヒド	0.08mg/L 以下であること。

31 以降、次項

項目名		基準値
31	亜鉛及びその化合物	亜鉛の量に関して、1.0mg/L 以下であること。
32	アルミニウム及びその化合物	アルミニウムの量に関して、0.2mg/L 以下であること。
33	鉄及びその化合物	鉄の量に関して、0.3mg/L 以下であること。
34	銅及びその化合物	銅の量に関して、1.0mg/L 以下であること。
35	ナトリウム及びその化合物	ナトリウムの量に関して、200mg/L 以下であること。
36	マンガン及びその化合物	マンガンの量に関して、0.05mg/L 以下であること。
37	塩化物イオン	200mg/L 以下であること。
38	カルシウム、マグネシウム等(硬度)	300mg/L 以下であること。
39	蒸発残留物	500mg/L 以下であること。
40	陰イオン界面活性剤	0.2mg/L 以下であること。
41	(4S,4aS,8aR)-オクタヒドロ-4,8a-ジメチルナフタレン-4a(2H)-オール (別名ジェオスミン)	0.00001mg/L 以下であること。
42	1,2,7,7,-テトラメチルビシクロ[2.2.1]ヘプタン-2-オール (別名 2-メチルイソボルネオール)	0.00001mg/L 以下であること。
43	非イオン界面活性剤	0.02mg/L 以下であること。
44	フェノール類	フェノールの量に換算して、0.005mg/L 以下であること。
45	有機物等(全有機炭素(TOC)の量)	3mg/L 以下であること。
46	pH 値	5.8 以上 8.6 以下であること。
47	味	異常でないこと。
48	臭気	異常でないこと。
49	色度	5 度以下であること。
50	濁度	2 度以下であること。

### 3. 農業用水基準

(昭和 45 年農林省公害研究会作成：農業農村整備事業計画研究会編、農業農村整備事業計画作成便覧より表：「農業（水稲）用水基準」及び文章：「本基準の取扱い」を抜粋、表については加筆を行った。)

#### 「本基準の取扱い」

農業（水稲）用水基準は、公害対策基本法第 9 条の環境基準策定時に、基礎資料とするため当時の各種調査成績に基づく科学的判断から、昭和 45 年 5 月農林省公害研究会（会長技術審議官（現技術総括審議官））が学識経験者、研究者等の協力を得て作成したものである。

したがって、法令に基づく環境基準と同列には位置づけられないものの、本基準の内容、作成時の検討経過等は環境基準に反映されており、農政の展開の場においては環境基準とともに準拠すべき基本的要件の 1 つとなっている。

#### 農業（水稲）用水基準

項目	基準値
pH(水素イオン濃度)	6.0～7.5
COD(化学的酸素要求量)	6mg/L 以下
SS(無機浮遊物質)	100mg/L 以下
DO(溶存酸素)	5mg/L 以下
T-N(全窒素濃度)	1mg/L 以下
EC(電気伝導度)*	0.3mS/cm 以下
As(砒素)	0.05mg/L 以下
Zn(亜鉛)	0.5mg/L 以下
Cu(銅)	0.02mg/L 以下

\*：現在 EC については「電気伝導率」という呼び方が一般的で、単位についても [S/m] が使われることが一般的である。0.3mS/cm は、30mS/m に相当する。

## 沖縄県宮古島市における塩化物イオン濃度の上昇に係る原因究明調査事例 (平成19年度宮古島市地下水保全対策学術委員会報告書より抜粋)

### 1.2 調査・研究の目的および方針

#### 1.2.1 目的

宮古島最大の水道水源となっている白川田流域において、2004年8月より認められている地下水中の塩化物イオン濃度上昇の原因解明とその対策方針について調査・検討を行うことを目的とする。

#### 1.2.2 原因究明の方針

上記目的、および既存資料整理の結果を受けて、当地の水理地質的特徴及び地下水質から原因究明の方針を3つに定め、それぞれの方針に対する調査・解析を以下のように設定した。

【第1】 更竹地区に負荷された塩化物イオンが、白川田水源等の水源地に、最終的に到達するか否か。

- ① 地下水流動に関する調査  
既存資料整理調査  
井戸台帳作成調査  
地表地質踏査調査、水露頭調査  
土壌塩化物イオン含有量調査  
ポーリング調査 (現場透水試験、伝導率測定、自記計設置)  
定期地下水位観測調査

【第2】 塩化物イオン濃度が上昇した2003年8月以降に白川田流域の地下水質がどのように変化したかを解析すること。

- ② 地下水イオン組成・濃度に関する調査
- ③ 地下水同位体に関する調査

【第3】 白川田流域に負荷される塩化物イオンの起源と各起源の寄与度をできるだけ精度よく推定すること。

- ④ 大気・降水由来の塩化物イオン濃度に関する調査  
大気中塩化物イオン量調査  
降水量調査
- ⑤ 原単位に関する調査  
既存資料による肥料等使用量調査  
土地利用実態調査及び原単位塩素負荷量調査
- ⑥ 温泉水に関する調査  
井戸構造、排水箇所および揚水量等に関する資料収集調査  
温泉水の水質・同位体調査
- ⑦ 地下水イオン混合による影響度解析
- ⑧ マグネシウム・塩化物イオン相関による影響度・寄与率解析
- ⑨ 塩素安定同位体比による寄与率解析

- ⑩ 原単位による起源別負荷および寄与率解析
- ⑪ 統計解析による寄与率解析

表 1.2.1 に、本検討で実施した調査項目および数量一覧を示す。

表 1.2.1 調査項目一覧

項目	数量
① 地下水流動に関する調査	
既存資料整理調査	1式
井戸台帳作成調査 (水準測量含む)	85箇所
地表地質踏査調査、水露頭調査	1.5km <sup>2</sup> (更竹付近)
土壌塩化物イオン含有量調査	8試料
ポーリング調査	3箇所
現場透水試験、電気伝導率測定	5深度
自記計 (水位、EC) 設置	3箇所
定期地下水位観測	37~38箇所/月1回、計12回
② 地下水イオン組成・濃度に関する調査	
モニタリング (井戸等)	30~31箇所/月1回、計12回
モニタリング (海水)	1箇所
③ 地下水同位体に関する調査	
地下水中の塩素安定同位体比・放射性トリチウム	23検体
化学肥料の塩素安定同位体比	1検体
④ 大気・降水由来の塩化物イオン濃度に関する調査	
大気中塩化物イオン量調査	6箇所
降水量調査	1箇所
⑤ 原単位に関する調査	
既存資料による肥料等使用量調査	1式
土地利用実態調査及び原単位塩素負荷量調査	白川田流域
⑥ 温泉水に関する調査	
井戸構造、揚水量等資料収集	1式
温泉水の水質、同位体調査	1式
⑦ 地下水イオン混合による影響度解析	1式
⑧ マグネシウム・塩化物イオン相関による影響度・寄与率解析	1式
⑨ 塩素安定同位体比による寄与率解析	1式
⑩ 原単位による起源別負荷および寄与率解析	1式
⑪ 統計解析による寄与率解析	1式

### 1.2.3 調査方法と検討フロー

前述の方針に従い、検討フローは以下のとおりとした。

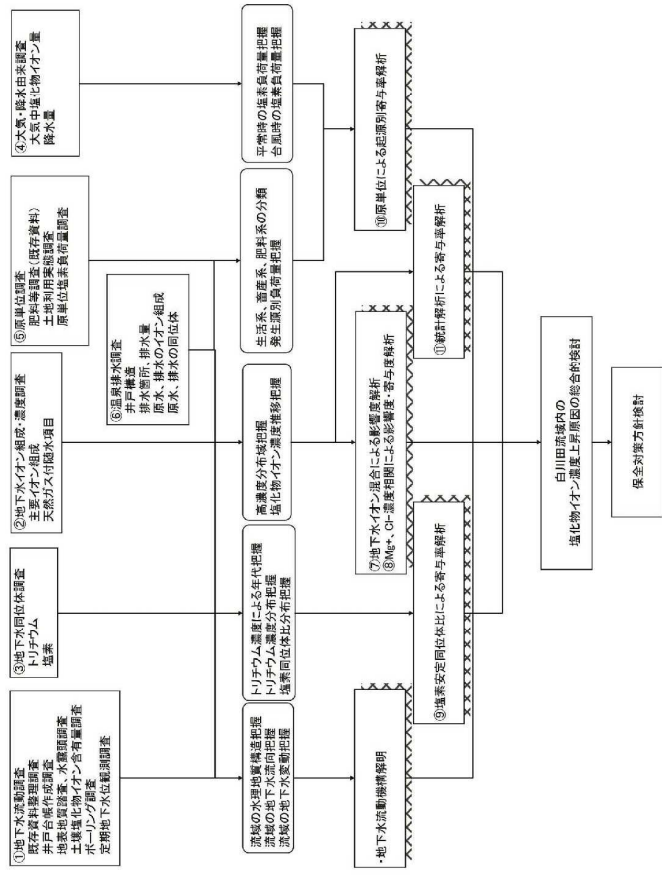


図 1.2.1 検討フロー

## 6.3 結論

宮古島において大半の水道原水が採取される最も重要な地下水流域である白川田流域では、2003年10月以降、地下水の塩化物イオン濃度が顕著に上昇してきていることが認められている。本報告は、その原因を究明することを目的とした平成18および19年度の調査・研究成果をまとめたものである。ここでは、本成果の集約として、総合的な結論を示す。なお、結論を導き出す視点として、白川田流域における地下水流動方向とイオン組成の特徴および塩化物イオンの起源別寄与率推定に関する調査・研究結果に焦点を当てた。

### 6.3.1 白川田流域の地下水流動

白川田流域内の地下水は、同流域における定期的な地下水位測定結果および水理地質構造から判断すると、最終的に流域北東部の湧水口、すなわち白川田水源およびその近辺に収束され流出していることが確認された。従って、更竹地区において浸透した水も、南東―北西方向に形成された不透水性基盤の凹状の溝に沿い、地下水としてI-64(C井戸)、高野水源、大野水源を経て白川田水源方向に向かうことが確認された。【6.1 白川田流域における地下水流動 参照】(図6.3.1)。

### 6.3.2 白川田流域の地下水イオン組成

白川田流域内の地下水観測孔および東添道水道水源における地下水のイオン組成、ならびに温泉原水とその排水のイオン組成を調べた。その結果、地下水塩化物イオンが高濃度を示す更竹地区のI-64(C井戸)等の地下水は、温泉原水とその排水に特徴的に含まれるホウ酸イオンと臭化物イオンを含有しているなど、流域外の地点の地下水イオン組成と比べて明らかに異なった。【5.1.3 イオン組成解析、5.1.4 天然ガス付随水のイオン組成 参照】  
温泉排水前(2002年10月)の白川田水源の地下水に、温泉排水を混合した場合に構成される水質に関するシミュレーションを行った。その結果、温泉排水を温泉排水前の白川田水源地下水で10倍希釈すると2004年12月時点のI-64(C井戸)の地下水イオン組成に酷似した。同様に20倍希釈すると2006年11月時点のI-64(C井戸)の地下水イオン組成に、50倍希釈すると2004年12月時点のI井戸と2006年11月時点のI-60の地下水イオン組成に酷似した。【5.1.5 地下水イオン混合解析 参照】

白川田流域地下水の塩化物イオン濃度上昇における海水由来と温泉排水由来の塩化物イオンの寄与度を検討するため、マグネシウムイオン(海水の濃度が温泉排水よりも10倍以上高い)に着目し、地下水の塩化物イオン濃度とマグネシウムイオン濃度との関係( $Mg^{2+}/Cl^{-}$ 濃度比)と、その経時的変化を調べた。その結果、I-64(C井戸)、I-38(I井戸)、高野水源、大野水源の地下水における $Mg^{2+}/Cl^{-}$ 濃度比は、塩化物イオン濃度が高い時期ほど、温泉排水時期以前における白川田水源地下水の原型的な水質と温泉排水とが混合した場合に形成される $Mg^{2+}/Cl^{-}$ 濃度比に相似した。【5.1.6 マグネシウムイオン・塩化物イオン濃度相関法 参照】

また、地下水塩化物イオン濃度を上昇させる原因として、台風が陸上にもたらす海水起

源の塩化物イオンが考えられるため、白川田流域内の高野水源と大野水源を対象に、流域外の海岸沿い湧水の塩化物イオン濃度を比較した。その結果、2003年9月の台風14号が直撃した以降、高野水源・大野水源の塩化物イオン濃度最高値は、より海岸に近い山川湧水(ウブカー)、新城湧水および保良ガラの最高値より高かった。

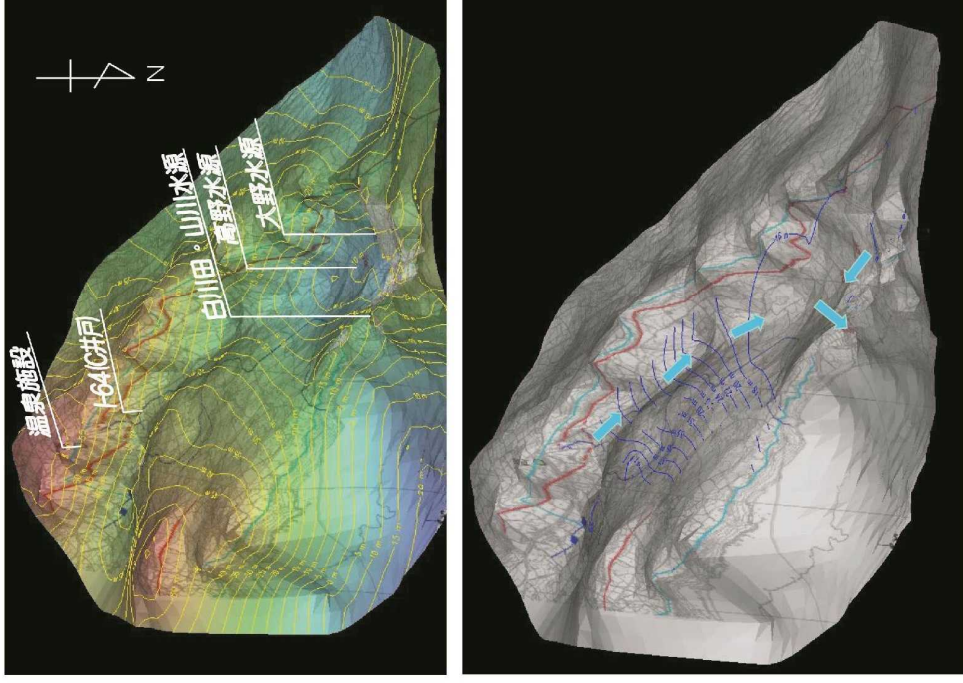


図 6.3.1 白川田流域の不透水性基盤上面コンター(上図)と平常時(2006年2月)における地下水コンター(下図)

注：標高方向は20倍に強調して示した。また、青矢印は地下水の流動方向を示す。

### 6.3.3 白川田流域地下水の塩化物イオンの起源別寄与率

塩素安定同位体比法および  $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$  濃度相関法を用い、I-64(C 井戸)における地下水の塩化物イオン起源別寄与率を推定した。その結果、2006 年を対象とすると、温泉排水の寄与率は前者で 97.3%、後者で 92.1%以上（一部は台風等で負荷された分も含む）と、同地点の地下水中塩化物イオンの大半が温泉排水に由来すると推定された。

原単位法を用い、白川田流域全域を対象とした 2005 年当時における地下水塩化物イオンの起源別寄与率を推定した。その結果、1 日に  $92.85\text{m}^3$ 、304 日間(2004 年 7 月～2005 年 4 月)、温泉施設から更竹地区に排水されたとした場合、白川田流域に負荷された塩化物イオン年間量の寄与率は、温泉排水由来が 39.9%、大気・降水由来が 47.4%、その他(肥料・生活排水・家畜ふん尿)由来が 12.8%と推定された。また同様に、温泉施設からの排水量が  $30\text{m}^3/\text{日}$  (排水期間は同じく 304 日間)であった場合の推定結果は、それぞれ 17.6%、64.9%および 17.5%であった【5.3 原単位法による塩化物イオンの起源別負荷量 参照】。

統計解析手法を用い、白川田水源地下水を対象とした 2005 年当時の地下水塩化物イオンの起源別寄与率を算出した。その結果、温泉排水由来が 17%、大気・降水由来のうち台風影響による上昇分が 30%、その他(平常降雨・肥料・生活排水・家畜ふん尿)由来が 53%となった。この結果を用い、白川田水源における地下水塩化物イオン濃度の年平均値(2005 年、 $67.8\text{mg/L}$ )の内訳を求めると、温泉排水由来が  $11.5\text{mg/L}$ 、大気・降水由来のうち台風影響による上昇分が  $20.3\text{mg/L}$ 、その他(平常降雨・肥料・生活排水・家畜ふん尿)由来が  $36.0\text{mg/L}$  となった。同様に、2006 年(年平均値  $88.2\text{mg/L}$ )を対象とした推定結果は、それぞれ 40% ( $35.8\text{mg/L}$ )、21% ( $17.6\text{mg/L}$ ) および 39% ( $34.8\text{mg/L}$ ) で、2005 年に比べ 2006 年における温泉排水の寄与率が高かった【5.4 統計解析法 参照】。

### 6.3.4 白川田流域における地下水塩化物イオン濃度の上昇原因に関する総合的考察

台風の常襲する小さな島嶼で、沿岸に位置する白川田流域のような地域の地下水に含まれる塩化物イオン濃度が異常に上昇した場合、その原因は通常、台風により陸域へもたらされた海水に帰されるであろうことは容易に推測できる。事実、近年稀な勢力を有し、2003 年 9 月 11 日に宮古島を直撃した台風 14 号は、その後、宮古島の各地の地下水塩化物イオン濃度を上昇させた(第 1 の事実)。しかしながら一方で、本台風による影響が宮古島に生じたであろうと考えられる時期に重なり、白川田流域地下水の塩化物イオン濃度を上昇させる可能性を有する人為行為があったことも事実である。すなわち、海水の半分程の塩化物イオン濃度を含む温泉が掘削され、その排水が少なくとも 2003 年 10 月から 2005 年 4 月まで、白川田流域の南西端に位置する更竹地区に行われた(第 2 の事実)。そして第 3 の事実として、白川田流域地下水の塩化物イオン濃度は、2003 年 10 月以降、顕著な上昇を示してきた。

このような状況において、本委員会は、白川田流域地下水の塩化物イオン濃度上昇の原因を究明することを目的とした調査・研究を行ってきた。その主な命題は次の 3 点である。

第 1 は、更竹地区に負荷された塩化物イオンが宮古島の大半の水道原水を採水する白川田水源等の水源地に、最終的に到達するか否かである。第 2 は、ここで問題とする時期、すなわち 2003 年 10 月以降において、白川田流域地下水の水質組成はどのように変化したかを解析することである。第 3 は、白川田流域に負荷される塩化物イオンの起源と各起源の寄与率をできるだけ精度良く推定することであり、簡潔には、台風影響と温泉排水影響の寄与率を求めることである。

その結果、第 1 の命題に関しては、上述の 6.3.1 でまとめたように、更竹地区において浸透した水は、最終的に白川田流域の水源地に到達することが確認された。したがって水溶された塩化物イオンも同様に、更竹地区から水源地に移動することは自明である。第 2 の命題に関しては、上述の 6.3.2 に示したように、温泉原水とその排水は硫酸イオンをほとんど含まず、また海水に比べマグネシウムイオン濃度がきわめて低いという特性を利用した解析の結果、温泉排水が行われた後の I-64 (C 井戸)の水質組成は、温泉排水を混合した場合に形成される水質組成に類似することが判明した。この解析結果から、温泉排水に含まれる塩化物イオンが、I-64 (C 井戸)に混入し、その濃度を上昇させる一因になったと結論できる。

第 3 の命題に関しては、上述の 6.3.3 に示したように、4 つの手法を用い、起源別の塩化物イオン寄与率を推定した。その結果、温泉排水地点に近い C 井戸(地下水)への温泉排水の寄与率は 2004～2006 年において 90%を超えると考えられ、また同様に、白川田水源地の地下水への寄与率は、2006 年のおおよそ 20～40% (この数値の幅は、温泉排水量が正確に把握できないことに起因する)と推定された。

以上の結果から、近年における白川田流域地下水の塩化物イオン濃度の顕著な上昇に関し、温泉排水の影響は排水地点近傍の地下水に直接的に強い影響を受けたと判断された。白川田水源地における地下水塩化物イオン濃度への温泉排水の寄与率は、上述のように約 2～4 割であると推定され、排水地点近傍より温泉排水の寄与率が低いと推定された。このことは、温泉排水地点が白川田流域の南西端上流域に位置するため、下流の水源地に至る過程で、流域の他地域から集まる地下水により希釈されるためと考えられる。

また、台風による塩化物イオンの負荷はいわゆる面源であるのに対し、温泉排水は点源である。このため、温泉排水地点における塩化物イオンの負荷は、水源地に至るまで、その距離に応じた時間差が生じることになる。事実、6.3.3 で示したように、統計解析法によると、白川田水源地下水に対する温泉排水由来塩化物イオンの寄与率は、温泉排水が行われた直後の 2005 年よりも 2006 年の方が高いと推定された。このことは、今回のような点源での地下水負荷の影響が、その直後に水源地で顕在化するには限らないことを示している。したがって、水道水資源流域における地域網羅的な水質監視体制が必要であることもさることながら、地域公共財産である水道原水を保全するため、人為的な負荷を極力生じさせないといったセオリアルを、全ての住民が堅持することの重要性を示したと考える。



## 温泉動力の装置の許可に係る審査基準

平成10年 7月 1日 (東京都告示第 724号)

最終改正 平成20年10月24日 (東京都告示第1339号)

地盤沈下防止の観点から、温泉法(昭和23年法律第125号)第11条第3項により準用する同法第4条第1項の規定に基づく動力の装置の許可に係る審査基準を次のように定める。

	指定地域	吐出口断面積	一日の揚湯量
1	墨田区 江東区 北区 荒川区 板橋区 足立区 葛飾区 江戸川区	6平方センチメートル 以下	50立方メートル 以下
2	東京都の区域のうち、1に掲げる区域、八王子市の一部(一般国道411号線との交点以北の都道榑原あきる野線、その交点から一般国道20号線との交点(八王子市高尾町)までの都道八王子あきる野線、その交点から都道八王子町田線との交点までの一般国道20号線及びその交点以南の都道八王子町田線以西の区域)、青梅市、あきる野市、西多摩郡日の出町、同郡檜原村、同郡奥多摩町及び島しょ地区を除く区域	21平方センチメートル 以下	150立方メートル 以下

備考 揚湯の状況について、水量測定器及び水位計により確認できること。

### 〈 参考 〉

#### 温泉法第4条第1項

都道府県知事は、前条第1項の許可の申請があつたときは、当該申請が次の各号のいずれかに該当する場合を除き、同項の許可をしなければならない。

第1号 当該申請に係る掘削が温泉の湧出量、温度又は成分に影響を及ぼすと認めるとき。

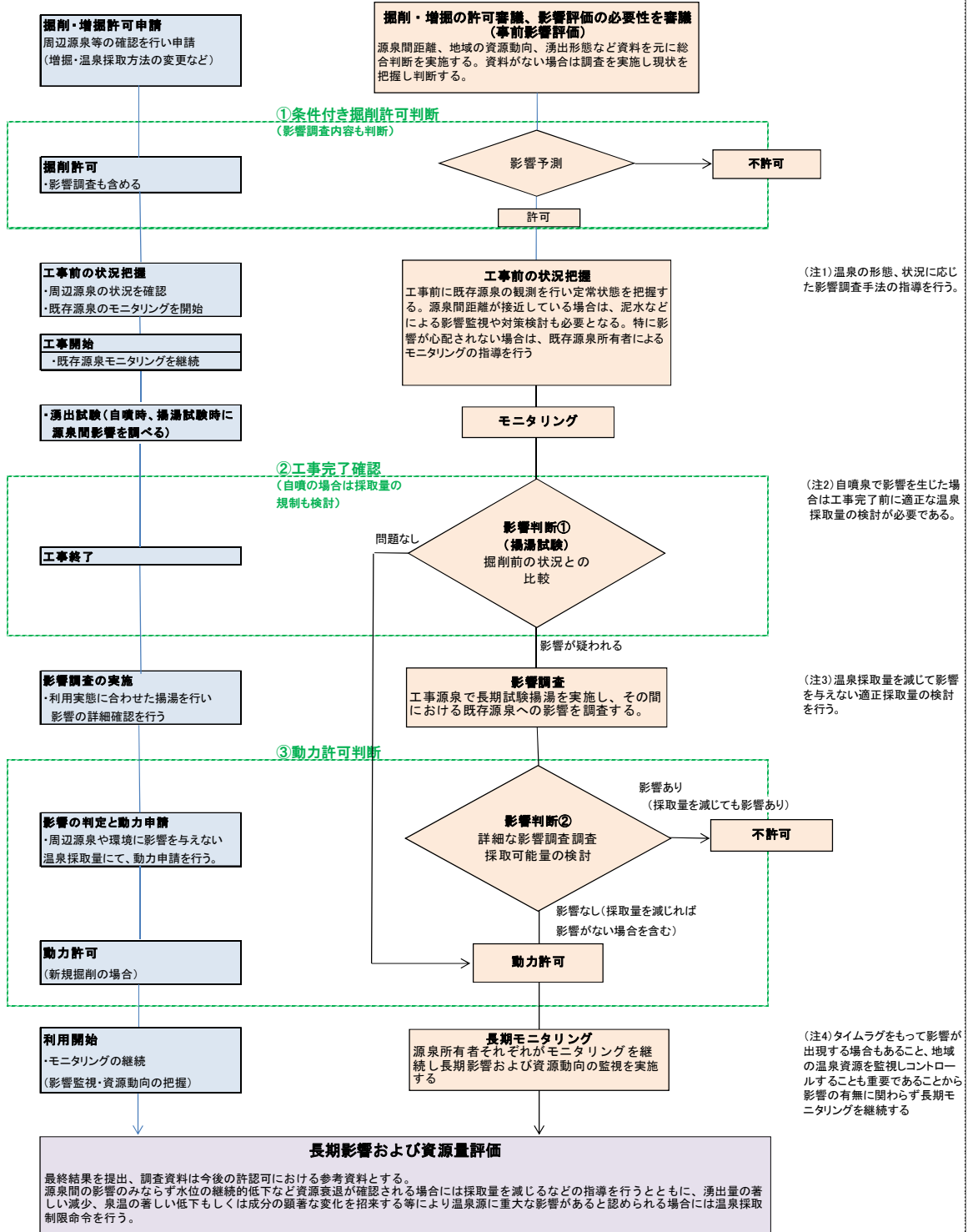
第2号 前号に掲げるもののほか、当該申請に係る掘削が公益を害するおそれがあると認めるとき。

(第3号、第4号、第5号、省略)

## 源泉間における影響調査のイメージ

### ○申請源泉での工事進行

### ○都道府県温泉主管部での対応



## 近年の温泉利用形態について

温泉の利用については、従来からの浴用、飲用又への利用等を行ってきた。これらに加え、近年は温泉を用いての熱利用が注目されている。

### (1) 温泉を用いた発電

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異常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、ここではそれよりも小規模の温泉を利用する発電について記載する。温泉を利用する発電には大里和巳(2012)によると以下の形態がある。

- ① 蒸気タービン発電
- ② バイナリー発電
- ③ 温度差を直接電流に変換する熱電変換素子を用いた発電

これに加えて、現在、温泉への適用可能温度、発電効率やコストの面で、注目されているのがバイナリー（サイクル）発電である。

今後、温泉によるバイナリー発電は増加することが予測され知見は蓄積していくと考えられる。発電には高温かつ多量の温泉を必要とするため、事前の資源量の把握および利用後のモニタリングが重要となる。都道府県においても、温泉資源の保護の観点からも、こういった知見の蓄積がなされるようにしていくことが重要である。