

温泉資源の保護に関するガイドライン（地熱発電関係）

（案）

2012 年 2 月

目次

第一 基本的考え方	1
1. 背景.....	1
2. 本ガイドラインのねらい.....	2
第二 地熱資源の一般的概念等.....	4
1. 地熱貯留層の構造と地熱資源の分類	4
2. 地熱発電の仕組み	5
3. 関連用語について	6
4. 我が国の地熱資源の状況.....	9
第三 地熱開発のための掘削許可に係る判断基準の考え方	11
1. 掘削許可に係る判断基準の考え方	11
2. 地熱開発のための調査について	12
3. 温泉の生成機構分類と地熱開発による温泉影響の可能性	13
4. 各段階における掘削許可の判断に係る情報及び方法等	16
4-1. 広域調査段階	16
4-2. 概査段階	18
4-3. 精査段階	20
4-4. 発電所建設段階	22
4-5. 発電所運転開始後段階.....	24
第四 関係者に求められる取り組み等	27
備考	30
別紙	31

第一 基本的考え方

1. 背景

平成 19 年 2 月、環境省の諮問に基づき温泉資源の保護対策及び温泉の成分に係る情報提供の在り方等について検討を行っていた「中央環境審議会（自然環境部会温泉小委員会）」は、環境省に対し「都道府県が温泉資源保護のための条例・要綱等を定めるに当たっての参考となり、対策を円滑に進めることができるよう、新規事業者による掘削や動力装置の許可等の基準の内容や都道府県における温泉資源保護のための望ましい仕組みについて、国は、温泉は国民共有の資源であるという観点に立って、できるだけ具体的・科学的なガイドラインを作成すべきである」との答申を行った。

この答申を受け、平成 20 年 12 月から平成 21 年 3 月にかけて行われた中央環境審議会温泉小委員会における審議等を経て、環境省は、平成 21 年 3 月 31 日に温泉資源の保護に関するガイドライン（以下「ガイドライン（平成 21 年版）」という。）を策定し、各都道府県あてに通知した。

ガイドライン（平成 21 年版）のねらいは、温泉の掘削、増掘及び動力の装置（以下「掘削等」という。）の不許可事由の判断基準について、一定の考え方を示すことであり、その具体的な項目は、地域等による一律規制（制限地域の設定、既存源泉からの距離規制）の在り方、個別判断のための影響調査の手法、公益侵害への該当性の判断等である。

ただし、ガイドライン（平成 21 年版）では、地域等による一律規制の項目において、その考え方については、浴用・飲用への利用を目的とした温泉の掘削等の他、地熱発電の開発のための温泉の掘削等も対象として捉えているが、具体的な対応については、当時得られていた知見では、地熱発電の開発のための温泉の掘削等に言及することが困難であったため、これを除いた温泉の掘削等（主として浴用・飲用への利用を目的とした温泉の掘削等であるが、暖房への利用を目的とした温泉の掘削等も含まれる）を対象とした。

ガイドライン（平成 21 年版）の策定後、平成 22(2010)年 1 月に、我が国は、気候変動枠組条約の目的である温室効果ガス濃度の安定化を実現するため、平成 21(2009)年 12 月の気候変動枠組条約第 15 回締約国会議（COP15）でまとめられたコペンハーゲン合意に基づき、すべての主要国による公平かつ実効性のある国際枠組みの構築及び意欲的な目標の合意を前提として、平成 32(2020)年の温室効果ガスを平成 2(1990)年比で 25%削減するという排出削減目標を国連気候変動枠組条約事務局に提出した。また、同年 3 月には、平成 32(2020)年に温室効果ガスの 25%削減を実現するための対策・施策の道筋を示した中長期ロードマップ（環境大臣試案）が公表され、その後中央環境審議会地球環境部会中長期ロードマップ小委員会において、対策・施策の具体的な姿について検討し、その内容を同年 12 月に中長期ロードマップ（中間整理）としてまとめた。この中で、平成 32(2020)年の絵姿として、エネルギー供給分野においては、発電量として、平成 17(2005)年比で住宅以外の太陽光は約 85 倍、風力発電は約 10 倍、地熱発電は約 3 倍（53 万 kW→171 万 kW）に増加させるという目標を示している。

一方、規制・制度改革に関する調査を行うため、平成 22 年 3 月 11 日に、政府の行政刷新会議に規制・制度改革に関する分科会が、また、同分科会にはグリーンイノベーションワーキンググループ等三つのワーキンググループが設置され、各種の検討が行われた結果、同分科会は同年 6 月 15 日に第一次報告書を取りまとめ、これに基づき、同年 6 月 18 日に「規制・制度改革に係る対処方針」が閣議決定された。

この閣議決定では、「再生可能エネルギーの導入促進に向けた規制の見直し（自然公園・温泉地域等における風力・地熱発電の設置許可の早期化・柔軟化等）」が規制・制度改革事項とされ、その対処方針の一つとして、地熱発電の開発のための温泉の掘削等に関し、「温泉法における掘削許可の判断基準の考え方を策定し、ガイドラインとして運用するよう通知する。＜平成 22 年度中検討開始、結論を得次第措置＞」こととされた。

さらに、同年9月10日には、財源を使わない景気対策として、既定の改革の実施時期を前倒しすることを含め、需要・雇用創出効果の高い規制・制度改革を推進することを目的として、「新成長戦略実現に向けた3段階の経済対策」が閣議決定された。

この閣議決定では、同年6月に閣議決定された「規制・制度改革に係る対処方針について」における前述の規制改革事項が実施時期を前倒しする事項とされ、その内容として、「地熱発電を推進するため、温泉法における掘削許可の判断基準の考え方を策定し、ガイドラインとして運用するよう平成23年度中を目途に通知する。」こととされた。

以上のような再生可能エネルギーの導入促進に向けた二つの閣議決定を受け、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を策定することとしたものである^(※)。

なお、本ガイドラインは、ガイドライン（平成21年版）の一部を構成するものであるが、これら二つを別に整理した方が利便性が高いと考えられるため、ガイドライン（平成21年版）の分冊として取りまとめることとした。

(※) 平成23年3月の東日本大震災を契機として、また、同年8月には電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法が国会で成立する等、再生可能エネルギーの普及に関する機運は一層高まりをみせている。そのため、温泉資源の保護を図りながら再生可能エネルギーの普及を促進する観点から、温泉法における掘削許可の判断基準の考え方を示すこのガイドラインは、一層重要なものとなっている。

2. 本ガイドラインのねらい

本ガイドラインのねらいは、前述の二つの閣議決定を受け、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、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開発の各段階における掘削等（調査段階における調査井の掘削等、地熱発電の開始に当たっての生産井の掘削等、生産井の追加掘削や還元井の掘削等）について、温泉法における許可又は不許可の判断基準の考え方を示すことである。

具体的には、地熱発電の開発前中後の各段階に実施される、掘削行為等による温泉資

源への影響を判断するために必要な資料とそれに基づく判断の方法等を示すことである。さらに、実際の判断に当たっては、既存の地熱発電開発に係る調査研究成果を踏まえた地熱・温泉資源に関する地熱系概念モデルの構築と、それに基づくシミュレーション等が有効である場合が考えられることから、現在稼働している地熱発電所一帯を対象として行ったシミュレーション等を試行し、それらの結果等についても記述している。

地熱発電の開発のための温泉の掘削等について、今後、各都道府県において、本ガイドラインを参考に、温泉法における許可の運用に当たることを期待しているが、参考にするに当たっての留意点を次に示す。

留意点の一つ目は、地域の温泉資源等の状況を考慮することが必要であるという点である。本ガイドラインは、地熱発電の開発のための温泉の掘削等による温泉資源への影響を判断するために必要な資料とそれに基づく判断の方法を記述しているが、温泉資源への影響を判断するために必要な資料は、当該掘削等を行う地域における地質の構造、泉脈の状態又は温泉の開発状況等に応じて、異なることが想定される。また、地域の温泉資源等の状況に応じて、本ガイドラインで示す資料に加えて更に資料を収集する、あるいは本ガイドラインで示す資料の一部を省略するといった対応が求められるケースが考えられる。

二つ目は、本ガイドラインは、現時点での知見に基づき作成したものであるという点である。環境省では、引き続き、温泉資源に関する各種調査を実施し、また、都道府県の温泉行政担当者等の意見を伺いながら、ガイドライン（平成21年版）とともに、少なくとも5年度ごとに総点検を実施するとともに、随時、その更新を行っていく予定である。

本ガイドラインの取りまとめを契機に、地熱発電と温泉資源の関係について、関係者間での理解の共有が進められ、また、今後の科学的な議論が一層展開されることを期待したい。

第二 地熱資源の一般的概念等

ここでは、地熱資源の賦存形態を温泉も併せて図1として模式化し、地熱貯留層の生成機構と温泉との関係を示すとともに、一般的な地熱発電所における地熱利用形態についても示すこととする。

1. 地熱貯留層の構造と地熱資源の分類

地球内部の温度は一般に深部ほど高い。特に地熱地帯といわれるのは、地表面付近に高温域のあるところであり、全体として火山地域に多い。そこには地下にマグマ溜まりやその痕跡があって地熱貯留層の熱源になっている。

多くの場合、高温域を形成する原因は、断層・裂かに沿って地熱流体が地下深部から上昇することによっている。一方で、上昇する地熱流体の起源はそのほとんどが天水であることが分かっている。一般的な地熱貯留層の形成に当たっては、地熱流体が流動する断層・裂か構造の形成と、天水が地下深部へ浸透する下降流域、地熱流体と浅部の温泉・地下水とを隔てる帽岩等の地質構造が重要となる。

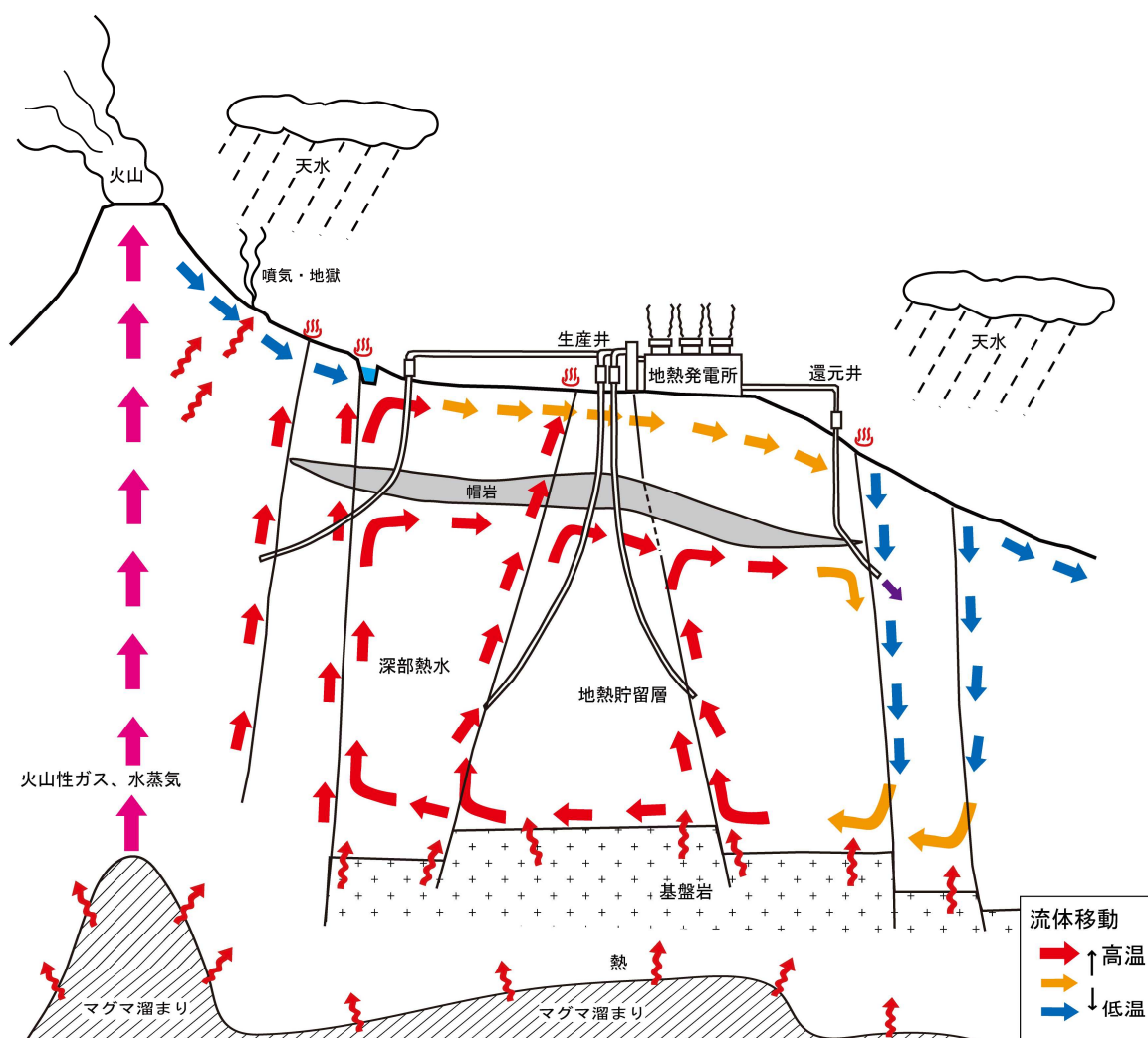


図1 地熱貯留層概念図

帽岩は、浅部にある低温の温泉・地下水帯水層と、深部の地熱貯留層における地熱流体の循環系を隔てている。多くの地熱流体の循環系において帽岩となっているのは、透水性が極めて低い地層である。そうした地層には、地層生成時からあるものと、熱水の作用によって水を通しにくく変質した二次的なものと考えられ、その性質、厚さ及び範囲によって、深部の地熱貯留層と浅部の温泉・地下水との水理的な関連性を示す一つの要素となっている。

なお、温泉・地下水の賦存状態にも上下を不透水層によって挟まれた帯水層がある。帯水層は透水性の高い地層、不透水層は透水性の低い地層からなり、これらが重なっている事により帯水層中の地下水に静水圧よりも高い圧力がかかり、これを掘削した場合には大量の温泉・地下水が湧出することになる。

我が国では伝統的に温泉として地熱エネルギーを活用してきたが、その中でも古来の高温泉は、地熱地帯にあることが多い。このことから、地熱貯留層とその深度に違いがあるものの、一部を除けば、温泉は地下にあるマグマ溜まりを直接・間接的に熱源としていることは共通している。

地熱資源の分類として、熱水卓越型地熱系と蒸気卓越型地熱系、高温岩体等がある。これらを簡単に説明すれば、熱水が多い熱水卓越型地熱系と蒸気が多い蒸気卓越型地熱系、そして熱水、蒸気ともに少ない高温岩体である。国内では熱水卓越型地熱系がより多く存在する。なお、地熱発電で利用するのは、多くの場合、蒸気であることから、熱水卓越型よりも、不用な熱水を地下に還元する必要のない蒸気卓越型の方が地熱発電に有利と考えられるが、蒸気卓越型は供給される熱量に比較して相対的に天水の補給が少なく、持続可能な発電を行う上で注意を要する。

2. 地熱発電の仕組み

一般的な地熱発電の仕組みは、概ね図2に示したとおりである。

地上に取り出した地熱流体のうち、発電に用いるのは蒸気であるため、地熱流体から蒸気と熱水を分離し、蒸気のみをタービンに送り発電に用いる。

熱水は、ひ素等の有害成分を多く含有している場合があり、温度も高いので、そのまま河川等に放流すると環境汚染を引き起こすことが懸念されるため、地下還元が行われる。この地下還元は、当初の主たる目的は環境汚染防止にあったが、地下還元することにより地熱貯留層の圧力維持や流体涵養にも寄与することが明らかとなっており、その意義も大きい。

還元熱水は地熱貯留層の温度低下を招かないように、一般には地熱流体の採取域から離れた場所に還元されるが、その一部は、地熱貯留層に戻り地熱流体の循環系に組み込まれることになる。

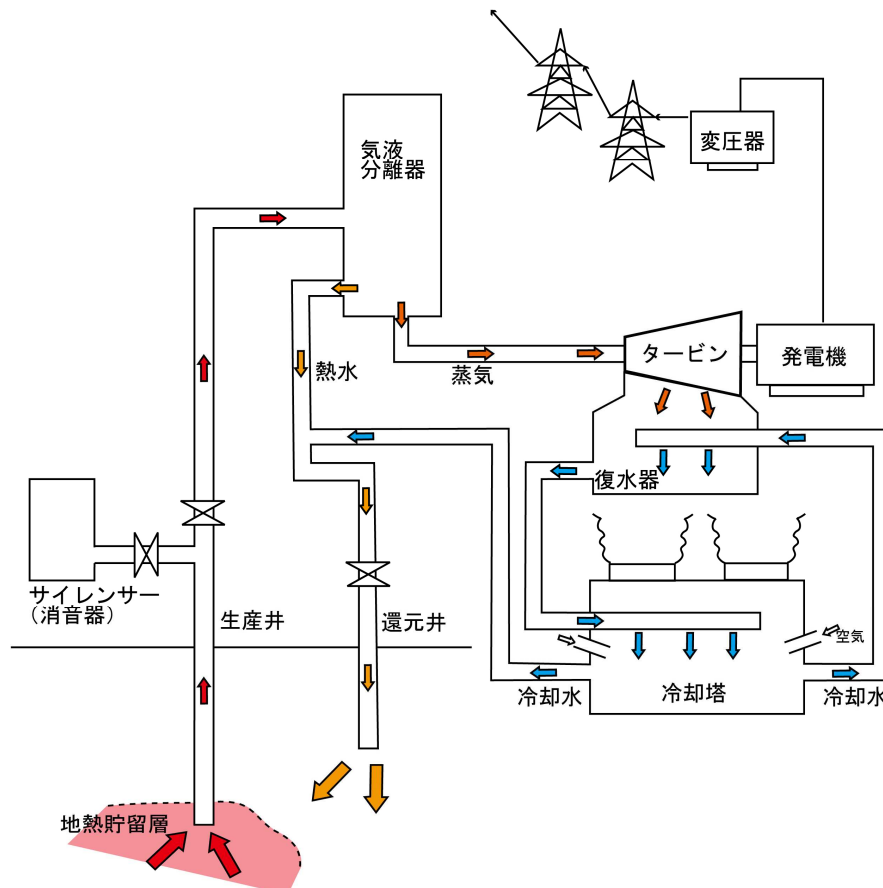


図 2 地熱発電の仕組み

3. 関連用語について

本ガイドラインにおいて使用する地熱関係の用語の内容は以下に記すとおりである。

○温泉帯水層（おんせんたいすいそう）

透水性と貯留性がよく、温泉水が流動・貯留している地層。

○噴気（ふんき）

地表に噴出している水蒸気やマグマ中の揮発性成分からなるガス。

○地熱流体（ちねつりゅうたい）

地熱開発が対象とする比較的深部の熱水及び蒸気・ガス。

・熱水（ねっすい）

地熱井より噴出する高温の地下水。この熱水は、温泉法で定義される温泉に含まれるが、本ガイドラインでは、温泉用として利用しない、温泉より高温のものを便宜的に定義している。また、温泉も熱水も地下水の一種であるが、本ガイドラインにおける地下水とは、温泉法の定義に該当しないものを指す。

○地熱貯留層（ちねつちよりゅうそう）

地熱流体を貯留する地層のこと。地熱貯留層は熱水対流系の部分系であり、割れ目に富んだ岩体からなることが多い。

○帽岩（ぼうがん）

高温の熱水及び蒸気を貯留する透水性の高い地熱貯留層から地熱流体の上方または側方への流出・移動を防ぐとともに、浅部から低温の温泉・地下水が浸透するのを防ぐ不透水層。一般には泥岩や粘土質変質岩がその役割を果たすことが多い。キャップロックとも呼ばれる。

・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する非透水層を含む。

○地熱井（ちねつせい）

地熱貯留層及びその周辺部や高温岩体中に掘削される坑井。以下のようなものがある。

・構造試験井（こうぞうしすいせい）

地熱開発のために行われる地質・地熱構造解明を目的として掘削される坑井。地質サンプルの採取や地温勾配の確認を目的とした掘削が該当する。一般に地下水や地熱流体の採取や湧出は意図せず、調査終了後埋め戻される。

・観測井（かんそくせい）

地熱貯留層の状況、周辺の温泉や地下水位等を監視することを目的として掘削される坑井。他の坑井から転用されることもある。

・試験井（しけんせい）

地熱貯留層の資源量評価を確認することを目的として掘削される坑井。ここでは、構造試験井で行われる調査内容に加えて、噴出試験を行う坑井とする。実際に地熱流体を噴出させ、水位や圧力のほか、温度、成分組成の測定を行う。

・生産井（せいさんせい）

地熱貯留層から地熱流体を採取するための坑井。蒸気井ともいう。採取された地熱流体は地熱発電所で発電に使用される。

・還元井（かんげんせい）

地熱発電所において、生産井から採取された地熱流体を使用後地下に返送するための坑井。地熱流体による熱汚染防止、ひ素等の有害成分流出による環境汚染防止、地盤沈下防止、貯留層の圧力維持・涵養等を目的とする。

・補充井（ほじゅうせい）

本来の目的が達成できなくなった坑井に替わって、同じ目的で掘削される坑井。

○注水試験（ちゅうすいしけん）

坑井内に設置した圧力計によって注水量と坑井内圧力との関係や注水停止後の圧力変化を測定して、坑井周辺の透水性を解析する試験。

○噴出試験（ふんしゅつしけん）

地熱井の噴出量と孔口圧力を測定する試験。噴気試験と呼ばれることもある。バルブ操作等で孔口圧力を変化させ噴出量を測定することで坑井の噴出特性を調査する短期噴出試験と周辺の坑井に対しての圧力干渉等を調査する長期噴出試験がある。複数の生産井や試験井を同時に噴出させて状況を確認する試験は一斉噴出試験と呼ばれる。

○トレーサー試験（とれーさーしけん）

トレーサーとなる物質を坑井に注入し、坑井間、温泉とのつながり、熱水の流動状況を明らかにするため、生産井の熱水や温泉水を採取して、その物質が検出されるかどうかを測定する試験。

○地熱系概念モデル（ちねつけいかいねんもでる）

地下の地層や断層等の分布、地下温度分布、地熱貯留層と温泉帯水層の分布、温泉水や地熱流体の生成機構、熱水系の分類、混合状態、流動状態を概念的に説明したモデル。本ガイドラインでは、主に地質構造に基づいて作成したモデルを地熱構造モデルと呼び、地下の温度や圧力、地化学情報、地熱流体の流動に関する情報も加えて作成したモデルを地熱流体流動モデルと呼ぶこととする。

・地熱構造モデル（ちねつこうぞうもでる）

温泉と地熱貯留層の関係について地質構造の観点から、地層や断層等の分布、地熱貯留層と温泉帯水層の分布、熱源等の概要を説明したモデル。地熱調査ステージの概査段階において作成される。

・地熱流体流動モデル（ちねつりゅうたいりゅうどうもでる）

地熱構造モデルを発展させ、温泉水や地熱流体の温度や圧力、地化学情報を基に、温泉及び地熱流体の生成機構、地熱貯留層温度、熱水系の分類、混合状態、流動状態を説明したモデル。地熱調査ステージの精査段階以降において作成される。

○数値シミュレーションモデル（すうちしみゅれーしょんもでる）

地熱流体採取による貯留層の圧力変化や温泉への影響予測といったことを定量的に検討するために、地熱構造モデルや地熱流体流動モデルを反映し、コンピューター（数値シミュレータ）等を使用して構築されるモデル。地下の特性を定量化するために、坑井から得られるデータ（地層の間隙率や透水性、温度分布等）が最低限必要である。また、モデルの精度を検証するには、数値シミュレーションにより予測された結果（地熱貯留層や温泉帯水層の圧力や温度）について、より多くのモニタリングによる実測データを取得し、計算値と実測値との照合を行う必要がある。現在、このモデルは地熱資源量の評価に用いられているが、将来的には既存温泉への影響予測にも適用されることが期待される。

4. 我が国の地熱資源の状況

地熱発電に用いる地熱資源（地熱エネルギー）は、以下の特徴を有する。

- ① 温室効果ガスの排出が少なく、地球温暖化防止に有効であること。
- ② 再生可能な自然エネルギーであること。
- ③ 火山国である我が国にあっては、数少ない国産のエネルギー源のひとつであること。
- ④ 我が国の地熱資源量は世界的にみて豊富であること（表1）。

表1 各国の地熱資源量

国名	活火山数（個）	地熱資源量（万 kW）
アメリカ合衆国	160	3000
インドネシア	146	2779
日本	119	2347
フィリピン	47	600
メキシコ	39	600
アイスランド	33	580
ニュージーランド	20	365
イタリア	13	327

村岡（2009）世界の地熱資源より引用

平成 22 年度環境省委託業務である「平成 22 年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書（平成 23 年 3 月）」によると、国立・国定公園等の外縁部から 1.5km までの範囲（コントロール掘削による偏距の大きさ）を開発可能とした場合の温度別熱水資源の賦存量（理論的に算出することができるエネルギー資源量であり、現在の技術水準では利用することが困難なものを除き、種々の制約要因（法規制、土地利用、居住地からの距離等）を考慮しないもの）と導入ポテンシャル（エネルギーの採取・利用に関する種々の制約要因による設置の可否を考慮したエネルギー資源量）、開発可能割合（賦存量に対する導入ポテンシャルの割合）は表 2 のようにまとめられている。

なお、この中で 53～120℃の温度区分における地熱資源開発にはいわゆる温泉を活用するものも含まれており、温泉の熱エネルギーを内包した数値となっている。

表 2 温度区分別の導入ポテンシャル（全国）

温度区分	賦存量（万 kW） A	導入ポテンシャル（万 kW） B	割合（%） B/A
150℃以上	2357	636	27.0
120～150℃	108	33	30.6
53～120℃	849	751	88.5
計	3314	1420	41.8

環境省（2011）平成 22 年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書より作成

一方、社団法人火力原子力発電技術協会の「地熱発電の現状と動向（2009年版）」によると、我が国における地熱発電の認可出力、発電電力量の推移は図3のようになり、平成11年の八丈島の地熱発電所立地以来、新規の立地はない。現状の認可出力は53.5万kWであるので、上記の導入ポテンシャル（636万kW）に対して1割未満、賦存量に対して2%程度の利用に止まっている。地熱発電の特徴は、発電所の稼働率や利用率は高く、他の自然エネルギー（風力、太陽光）に比較して安定した発電が期待出来ることである。また、我が国における地熱発電の発電設備構成比は、図4に示したとおり、全発電施設の0.2%となっている。

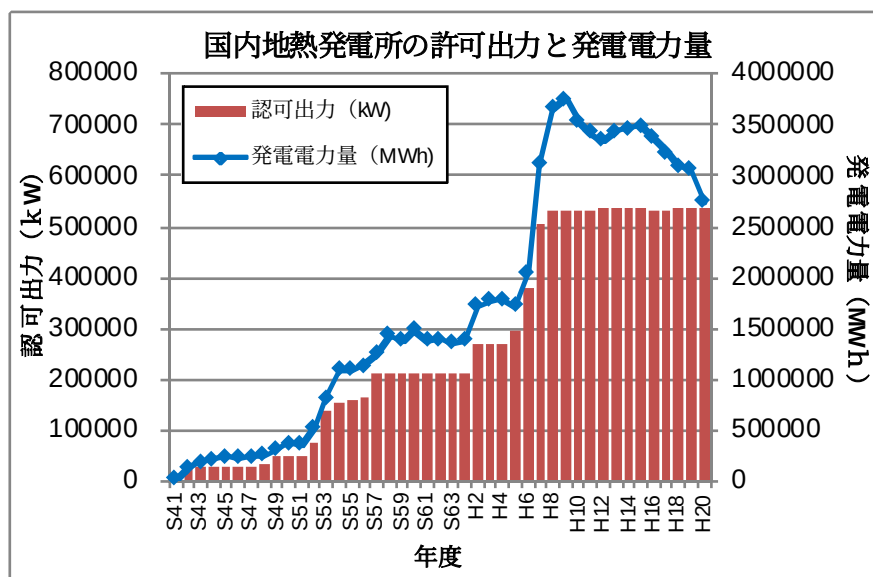


図3 国内地熱発電所許可出力の推移

火力原子力発電技術協会（2009）地熱発電の現状と動向より引用

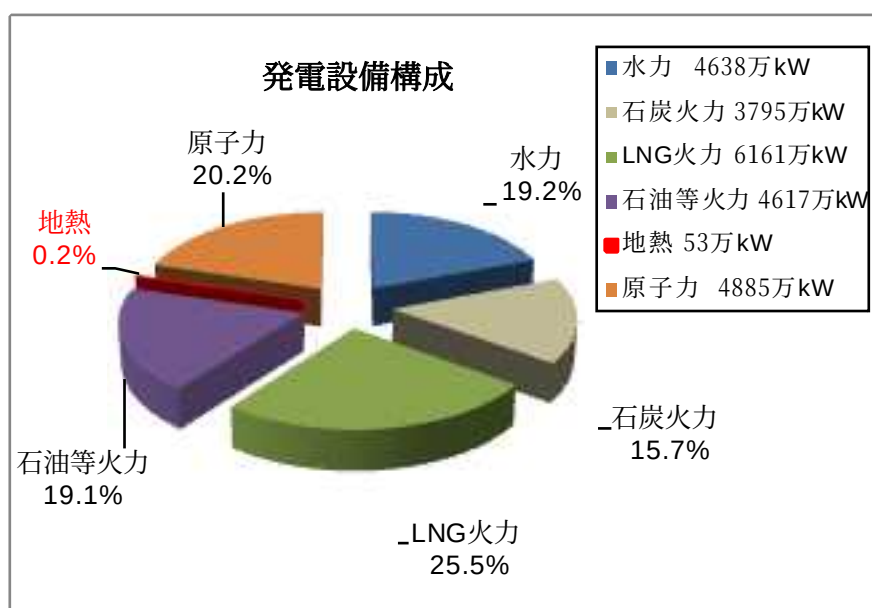


図4 発電設備構成（平成21年度末推定実績）

自家発電設備は除き、水力発電は一般水力発電と揚水水力発電を合計している。
資源エネルギー庁（2010）平成22年度電力供給計画の概要より引用

第三 地熱開発のための掘削許可に係る判断基準の考え方

1. 掘削許可に係る判断基準の考え方

温泉法では、温泉を湧出させる目的で土地を掘削しようとする者は、都道府県知事に申請してその許可を受けなければならないとしており、地熱発電に利用するための熱水・蒸気の生産井の掘削はもちろん、地熱開発のための探査時に地下の熱水貯留状況を確認し、資源量を検討するための試験井の掘削であっても、温泉の湧出が見込まれる場合には温泉法に基づく掘削許可申請が必要となる。

また、温泉法では個々の掘削申請の度に、温泉法第4条の許可の基準に基づき許可の判断を行うこととなる。当該掘削が既存温泉へ与える影響を判断するためには各種のデータ、資料等が不可欠であるが、入手することが可能なデータ、資料等は、地熱開発調査の段階により大きく異なる。当初の広域調査の段階では、その判断基準となる各種のデータ、資料は限られたものとなるが、調査が進展するにつれて地熱開発の予定地域の地質構造及び地熱構造、既存温泉の湧出機構や温泉湧出の変動状況、過去の源泉間の影響発生事例等に関する理解が深まり、より正確に当該地熱開発による既存温泉への影響の予測が可能となる。さらに坑井からの噴出試験が始まれば、それによる既存温泉への影響の有無と程度等が具体的に明らかになり、当該地熱開発による既存温泉への影響について、定性的な情報に基づく予測からモニタリング結果や各種坑井調査に基づいた定量的な評価が行えるようになる。その後もデータ集積が進むことによって、地熱構造のモデル化や地熱流体流動のモデル化に基づくより正確な影響判断が可能となる。また、現在、地熱分野においては数値シミュレーションを用いた地熱資源量評価予測手法があるが、将来的に数値シミュレーションによる温泉影響評価予測手法が確立されれば、温泉影響評価のためのモニタリング結果と合わせた影響予測へと高度化することが可能となる。

なお、既存温泉への影響としては湧出量の減少、温度の低下もしくは成分の変化等が考えられるが、これらは公益を害するおそれがある場合の例示であり、公益を害するおそれがある場合とは、温泉源を保護し、その利用の適正化を図るという見地から特に掘削を制限する必要があると認められる場合を指すとの考え方は従来と同じである。したがって、地熱開発の掘削許可申請であっても、当該掘削が公益を害するか否かについて判断を行うこととなる。

温泉法においては、都道府県知事が温泉の保護に関連のある一定の処分¹⁾を行うに当たって、審議会その他の合議制の機関（以下「審議会等」という。）の意見を聴かなければならないこととしている。これは、これらの処分がいずれも専門的科学的判断を要するものであり、かつ、申請者及び関係者の利害に関与するところが大であるため、処分の適正を期するためである。そのため審議会等においては、従前から地学、医学、薬学、法律学等の学識経験者を含む適切な委員構成を確保する必要があるとされてきたところである。今般、地熱開発に係る処分の適正を期すために、既存温泉への影響等を技術的・科学的見地から判断できる専門家の参画を検討することが望ましいと考

¹⁾ 処分とは、許可処分・不許可処分・採取制限命令を含む。

えられる。

例えば、審議会等の委員の任命制度として、常任の委員、もしくは、審議内容によって審議に加わることができる臨時委員や専門委員を設ける規定がある場合には、地熱と温泉の関係等に専門的な知見のある有識者を必要に応じて任命することも考えられる。

また、判断基準の資料として専門技術的な資料を審査する必要がある場合には、掘削許可の審議に当たり、必要に応じて有識者からの意見を聴取するといった取り組みも考えられる。なお、地熱発電の開発のための掘削にあたるかどうかにかかわらず、行政手続法（平成5年法律第88号）の趣旨に鑑み、審議会等については、適切な時期にこれを開催することが期待される。

一方で、掘削中に既存温泉への影響等が見られた場合への対処としては、掘削許可に当たり必要に応じて温泉法第4条第3項の規定に基づく条件（影響が見られた場合における調査の実施等）を付し、個別の状況によっては当該条件の変更を行うことにより既存温泉への影響等を回避することが考えられる。

2. 地熱開発のための調査について

地熱開発のための調査は、一般的には表3に示すように段階的に調査範囲を絞りながら進行される。地熱開発のための調査は主に、既存資料調査、地表調査、坑井掘削による調査等がある。

既存資料調査は、既存の学術文献や温泉の水質分析結果、温泉調査の結果等を収集し、該当する地域に関する地熱資源状況を整理するものである。

地表調査には、地質調査や物理探査、地化学探査、温泉や地熱流体を対象にした各種化学分析等がある。

坑井掘削による調査には、①構造試錐井による地下の地質分布状況、地質構造及び地温分布の状況等を知るための調査、②試験井による地熱貯留層の資源量評価や周辺の温泉や地熱井との影響関係を確認するための噴出試験を行うことを主な目的とする調査（試験井は後に生産井、還元井、観測井へ転用される場合も考えられる。）、③観測井による地熱貯留層の状態や既存温泉や地下水位等を監視することが目的の調査等がある。

なお、表3に示す地熱開発における各段階での調査目的や調査内容等については、一般的と思われる事例を記載したものであり、ここに記載された調査等がこの順番ですべて実施されるということではなく、調査データ等についてもそのすべてが当該段階でそろえるということではないことに十分に留意する必要がある。

各調査の中で、坑井掘削による調査は重要であり、それによって得られる情報は多岐にわたる。さらに、複数行われる坑井掘削による調査の結果を相互につなげるとともに、資料調査や地表調査結果を集約していくことで、より正確な情報となる。

3. 温泉の生成機構分類と地熱開発による温泉影響の可能性

温泉の生成には、貯留構造と起源となる水、熱源、それに加え成分の供給源となるガスや岩石が必要である。温泉の起源や熱源が深部の地熱貯留層と関係している場合には、地熱開発の規模により、温泉に影響が現れる可能性があるので、まずは温泉の生成機構や開発対象とされる地熱貯留層との関係の解明が必要とされる。

表4には温泉帯水層と地熱貯留層の関係を5つのパターンに分け、それぞれの影響の可能性について記した。大きくは、表の①深部熱水混入型温泉、②蒸気加熱型温泉、③伝導加熱型温泉に分類されるが、②蒸気加熱型温泉の特殊ケースで、地熱貯留層とは関係せず火山性高温ガスを直接起源とする場合を④高温(マグマ)蒸気型温泉とし、①深部熱水混入型温泉、②蒸気加熱型温泉、③伝導加熱型温泉、それぞれの型に海水が混入している特殊ケースを⑤海水混入型温泉とした。

これら温泉と地熱貯留層の関係を把握するには、各種の探査情報やモニタリング調査結果を加味して総合的に考える必要がある。温泉の生成機構と温泉と地熱貯留層の関係については、表3におけるⅡ.概査までの調査により、おおよその推定が行われ、Ⅲ.精査以降の試験井、生産井掘削時の噴出試験やトレーサー試験、モニタリング調査により実際的な確認が行われる。さらに、その後の調査の進展に伴い、地熱開発の規模が決定されることで、より正確な影響の有無が判断されることとなる。なお、実際にはこの5つに明確に分類されるわけではなく、これらが複合した形態が多々存在する。

①深部熱水混入型温泉、②蒸気加熱型温泉、⑤海水混入型温泉の一部においては、温泉帯水層と地熱貯留層が関連性を有し、その地熱貯留層が開発対象となっている場合には特に注意が必要である。

表 3 地熱調査の一般的段階と掘削内容の関係(例)

	I . 広域調査段階	⇒ II . 概査段階	⇒ III . 精査段階	⇒ IV . 発電所建設段階	⇒ V . 発電所運転開始後段階
主な掘削調査	構造試錐井の掘削	観測井の掘削 構造試錐井の掘削	試験井の掘削 観測井の掘削 構造試錐井の掘削	生産井の掘削 試験井の掘削 還元井の掘削 観測井の掘削 構造試錐井の掘削	生産井の掘削 試験井の掘削 還元井の掘削 観測井の掘削 構造試錐井の掘削
掘削で取得し得る情報	地質（断層含む）、地下温度・圧力等	地質（断層含む）、地下温度・圧力、透水性等	地質（断層含む）、地下温度・圧力、透水性、地熱流体性状等	地質（断層含む）、地下温度・圧力、透水性、地熱流体性状等	地質（断層含む）、地下温度・圧力、透水性、地熱流体性状等
地熱資源調査内容とそれにより得られる情報	<調査内容> 地熱地帯の広域調査から、概査対象地域を選定する。 ○資料調査 ・地質、地熱、温泉に関する資料 ○地表調査 ・地質・変質帯調査結果 ○物理探査 ・重力探査、電磁探査、電気探査、弾性波探査結果等 ○地化学探査 ・水質、ガス、地温探査等の結果 ・温泉の水質や起源に関する情報 ○モニタリング調査 ・周辺温泉・噴気の状況調査結果等	<調査内容> 地下温度や地質の詳細情報 ○地表調査 ・地質・変質帯調査結果 ○物理探査 ・重力探査、電磁探査、電気探査、弾性波探査等の結果 ○モニタリング調査 ・周辺温泉・噴気の状況調査結果等 ⇒地熱構造モデルが構築される。	<調査内容> 試験井掘削により、深部地熱流体に関する情報が得られ、地熱流体流動予測、および地熱資源量の予測が行われる。 ○噴出試験 ・圧力干渉試験結果 ・トレーサー試験結果 ○精密地表調査 ・地質・変質帯調査結果 ○高密度物理探査 ・重力探査、電磁探査、電気探査、弾性波探査の結果等 ○モニタリング調査 ・地熱貯留層の情報 ・温泉・噴気の状況調査結果等 ⇒試験井掘削により多くの深部地下情報が得られ、地熱流動流体モデルが構築される。	<調査内容> 地熱貯留層解析、地熱貯留層の資源量評価、モニタリングによる資源動向の推定・影響調査が行われる。 ○噴出試験 ・一斉噴出試験結果 ・圧力干渉試験結果 ・トレーサー試験結果 ○モニタリング調査 ・地熱貯留層の情報 ・温泉・噴気の状況調査結果等 ⇒地熱系概念モデル（地熱構造モデルや地熱流体流動モデル）が更新される。地熱資源評価のための数値シミュレーションモデル¹⁾により想定した発電事業に対する将来予測が行われる。	<調査内容> ヒストリーマッチングによるモデルの更新が行われ、地熱貯留層資源量が再検証される。モニタリングによる影響評価が行われる。 ○噴出試験 ・地熱貯留層の規模や能力情報 ・周辺温泉や噴気、地下水等への環境影響についての情報 ・圧力干渉試験結果 ・トレーサー試験結果 ○モニタリング調査 ・地熱貯留層の情報 ・温泉・噴気の状況調査結果等 ○生産・還元履歴 ・生産量や還元量の状況調査結果 ⇒建設時の予測と実際の発電所運転によるモニタリング結果との比較を行い、修正した数値シミュレーションモデル¹⁾による将来予測の更新が行われる。
温泉影響検討資料として利用できるもの	・温泉の位置関係 ・温泉の掘削深度、採取深度 ・温泉の湧出形態・湧出状況 ・温泉の水質、起源について ・地質、地質構造 ・温泉の検層記録 等	・観測井、温泉モニタリング結果 ・各種物理探査結果等による地質構造の推定 ・温泉帯水層と地熱貯留層の関係をとりまとめた地熱構造モデル 等	・噴出試験期間中の温泉影響モニタリングデータ ・地熱系概念モデル（地熱構造モデルや地熱流体流動モデル） 等	・噴出試験期間温泉モニタリングデータ ・予測結果と各種モニタリング結果の比較 ・更新された地熱系概念モデル（地熱構造モデルや地熱流体流動モデル） 等 ・地熱資源の将来予測	・発電所稼働後の温泉モニタリングデータ ・予測結果と各種モニタリング結果の比較 ・更新された地熱系概念モデル（地熱構造モデルや地熱流体流動モデル）や数値シミュレーションモデル¹⁾による評価 等

1) 地熱調査で行われる数値シミュレーションについては、離れた地域にある温泉地は対象外となり、十分に取込まれていない場合があるので留意する必要がある。また、数値シミュレーションモデルは、現時点では地熱資源量評価を目的とした手法で作成される。将来的に同様な技術による温泉影響評価のための手法が構築される事で、温泉変動予測に利用する事が期待される。

表 4 温泉の成因と深部地熱流体の関係

分類	①深部熱水混入型温泉	②蒸気加熱型温泉	③伝導加熱型温泉	④高温（マグマ）蒸気型温泉	⑤海水混入型温泉
温泉と地熱貯留層の関係	地熱貯留層の深部熱水を起源とし、直接つながっている場合	地熱貯留層から蒸気のみ供給を受けている場合	温泉と地熱貯留層につながりはなく、地熱貯留層から熱伝導により過熱されている場合	温泉と地熱貯留層に関係はなく、マグマから派生した高温蒸気の供給を受けている場合	温泉に地下水、深部熱水だけでなく、海水も関係しているケース
概念図					
温泉生成機構とその特徴	【生成機構】 地下水と深部から混入する熱水によって形成された温泉帯水層を指す。温泉帯水層と地熱貯留層を隔てる不透水層等の地質構造が十分に発達していない、もしくは、断層等による構造を熱水が流動し直接つながっているケース等が考えられる。 【特徴】 温泉水は深部熱水に類似した水質を示すことが多い。温泉の温度は、深部熱水の温度や地下水との混合割合でかなり幅がある。深部熱水の割合が多い場合は、高温を示す。	【生成機構】 地熱貯留層からの蒸気混入によって加熱されて形成された温泉帯水層を指す。 【特徴】 温泉水の形成に関与する蒸気量や地下水との混合割合によって温度にはかなりの幅がある。地熱貯留層からの蒸気混入量の割合が多い場合は、高温を示す。	【生成機構】 温泉帯水層と地熱貯留層は、不透水層により隔てられているが、地熱によって加熱（伝導加熱）されて形成された温泉帯水層を指す。 【特徴】 日本の地熱開発地域にはこのタイプに属するものが多い。地下水が伝導熱で加熱された温泉のため泉温は一般に高くはないことが多い。	【生成機構】 マグマから、高温蒸気により直接加熱されているタイプである。マグマから派生した高温の蒸気やガスによって地下水が加熱されて形成された温泉帯水層を指す。火山性高温ガスには、SO ₂ やHCl等を含むため、酸性のCl-SO ₄ 型の水質の温泉が多い。 【特徴】 高温を示す特徴があるが、地下水の混合割合によってかなり幅がある。	【生成機構】 前述の温泉分類①、②、③のケースにおいて地下水に加えて、海水も混入しているケースを指す。温泉の水質における影響の現れ方が異なる。 【特徴】 海水が混入していることから元々溶存成分濃度が高い。
温泉影響の可能性	温泉へ影響する可能性が他に比べ高く、地熱貯留層の圧力低下に伴い深部熱水の供給量が減少し影響が現れることが考えられる。温泉帯水層に混入する熱水の量が減少し、水位低下や湧出量減少、泉温や溶存成分濃度の低下などが起こる可能性がある。	地熱開発域が非常に近い場合、開発域で生じた圧力低下の影響によって加熱源である深部からの蒸気の量や体積に変化が現れる可能性がある。一般的に②蒸気加熱型温泉では①深部熱水混入型温泉に比べれば変化は起こりにくい。	地熱流体混入による温泉との直接的なつながりはないため、①、②のケースに比較して原理的には地熱開発の影響は及びにくいと考えられる。ただし、温泉帯水層と地熱開発域が接近し、かつ開発規模が大きい場合には、間接的に影響が現れる可能性もある。	温泉帯水層の加熱源である蒸気がマグマから直接派生したものであるため、地熱貯留層とつながりはなく地熱開発による影響は発生しないと考えられる。しかし、地熱開発域が近くて開発規模が大きい場合には間接的に影響が現れる可能性がある。	①、②、③のケースと同様に地熱開発地域が近く、開発規模が大きい場合には、間接的に影響が現れる可能性がある。
想定される温泉への影響の現れ方	【温泉帯水層に供給される深部熱水の一部が地熱発電に利用される場合】 1) 温泉水位・自噴圧力が低下する。 2) 温泉水位が低下することで、周辺から地下水の流入割合が増加した場合、温泉水が希釈されて温泉水の温度や成分濃度が低下する。 3) 100℃前後の高温の温泉帯水層であり、水位（圧力）の低下によって温泉水の一部が蒸気化した場合、温泉帯水層の蒸気割合が増加する。 【還元熱水が温泉帯水層に及んだ場合】 1) 温泉水位・圧力が上昇する。 2) 温度や成分濃度が上昇する。	【温泉帯水層の加熱源である蒸気層が、生産によって縮小した場合】 1) 温泉帯水層の温度が低下する。 2) 温泉帯水層へ流入する蒸気量が減少した場合、温泉水位が低下する。 3) 温泉水位が低下することで、周辺からの地下水の流入割合が増加した場合、温泉水が希釈されて温度や成分濃度が低下する。 【地熱貯留層の圧力が低下して、その一部で蒸気化が起り、温泉帯水層周辺の蒸気層が拡大した場合】 1) 温泉の温度が上昇したり、蒸気割合が増加する。	【地熱貯留層の圧力・温度を大きく低下させてしまった場合】 1) 温泉帯水層の温度が低下する。 2) 周辺への圧力伝播によって間接的に温泉の水位低下に連鎖する。 3) 温泉水位が低下することで、周辺からの地下水の流入割合が増加した場合、温泉水が希釈されて温度や成分濃度が低下する。	【地熱貯留層の圧力・温度を大きく低下させてしまった場合】 圧力伝播が及んだ場合、③と同様の影響が考えられるが、より小さな変化と考えられる。	【地熱貯留層の圧力・温度を大きく低下させてしまった場合】 ①、②、③の生成機構での温泉における影響において地下水で希釈されるのではなく、海水混入により高濃度化する可能性が考えられる。
影響防止における注意点	開発対象とする地熱貯留層、もしくは、温泉帯水層、それらの周辺に観測井を設置し、地熱開発による、影響の早期発見、拡大防止に努めること等が考えられる。	開発対象とする地熱貯留層、もしくは、温泉帯水層、それらの周辺に観測井を設置し、地熱開発による影響の早期発見、拡大防止に努めること等が考えられる。	地熱貯留層からの熱水採取量が多く、圧力に大きく低下が予想される場合には、影響が発生する可能性があるため、観測井を設置し、開発による影響の早期発見、拡大防止に努めること等が考えられる。	温泉は火山活動との関連性も大きいと考えられる。火山観測記録等も合わせて影響評価を行う必要がある。	海水混入による成分濃度や温度変化に考慮した検討も重要である。

新エネルギー・産業技術総合開発機構（2002）平成13年度温泉影響予測手法導入調査（第3次）報告書，p16，第Ⅰ-2-1表を加筆修正

4. 各段階における掘削許可の判断に係る情報及び方法等

地熱開発を目的として実施された各段階の調査結果から掘削許可の判断に係る情報が得られる。それらの情報を基に温泉と地熱貯留層、両者の地質構造・地熱流体流動上の関係を論じ、温泉掘削許可の判断を行うこととなる。判断に当たっては申請に係る地熱井と温泉帯水層のつながりが、温泉帯水層への影響を左右する大きな因子であることからその影響の程度を当該地熱井と温泉帯水層の関係を示すモデルによって、もしくは当該地熱井と温泉帯水層に関するデータを収集し、それを基に検討する。これらのモデルやデータは、地熱開発のステージが進むにつれて、より精度の高いモデルやデータが得られる可能性が高くなることから、新しい地熱井掘削の申請が行われる場合には、都道府県はそれらの資料収集に努力しなければならない。

発電所運転開始以降には、地熱貯留層と温泉帯水層の関係を含むシミュレーション結果が得られる可能性もあることから、その場合は、申請に係る地熱井と温泉帯水層のつながりの検討に資することができることに留意する。なお、地熱開発における各段階で得られる情報は大きく異なるため、表5-1～表5-5まで5段階に分けて記載した。なお、温泉資源への影響を判断する方法についても各段階に示しているが、モデルやデータの入手可能性は様々であるため、共通する判断の進め方を図5に参考として示す。さらに、各段階においては複数の坑井掘削が行われると考えられ、開発段階内の最初の掘削とその後の掘削とでは、その掘削許可の判断に係る情報量に大きな差があることに注意が必要である。また、下記の温泉・地熱徴候には噴気帯等も含まれている。

4-1. 広域調査段階

対象地域における地熱資源開発の可能性を検討し、広域の範囲から、より地熱資源開発の可能性が高い地域が抽出される。その抽出された地域において、坑井掘削から判明した地温分布状況に基づいて予想される地熱資源の存在状態を踏まえた有効な調査計画（調査内容や規模）が立てられる。この段階では、広域の地質分布及び地質構造の概要、地熱貯留層の平面的な賦存状況、温泉の水質や起源等の特性に関する情報が得られる。

表 5-1 広域調査段階における掘削の場合（例）

調査段階	I .広域調査段階
想定される坑井掘削の内容	構造試錐井（温泉の湧出が見込まれる場合）
掘削目的	地熱開発可能性に関する地質構造の確認、地下温度（主に浅部）の確認
地熱資源調査の内容	・ 資料調査 ・ 地表調査 ・ 地化学探査 ・ 坑井掘削による調査 ・ 温泉・噴気・地下水等の実態調査 等

掘削許可の判断に係る情報	① 掘削概要 ・ 掘削位置 ・ 掘削口径 ・ 掘削深度 ・ 流体・ガス採取深度 ・ 既存温泉からの距離 ・ 可燃性天然ガスの賦存状況 等 ② 掘削目的 ・ 流体・ガス採取見込量 ③ 掘削計画 ・ 掘削・調査スケジュール ・ 施行方法 等 その他、申請時点で得られる掘削許可の判断に役立つと思われる以下の資料があれば参考にする。 ④ 地質情報 ・ 地質平面図 ・ 地質断面図 ⑤ 既存調査資料 等 ・ 学術論文等
温泉資源への影響を判断する方法	従来の温泉資料に加え、上記の探査資料等を基に水平距離、垂直距離、掘削深度、採取深度等の位置関係を指標として、温泉帯水層と掘削井、温泉と地熱貯留層間の地質及び地質構造における関係等を判断することが考えられる。 申請に係る地熱井と温泉帯水層の関係について検討した上で、両者間に影響する可能性を示すデータがある場合には、モニタリングデータのある周辺の既存掘削井と当該地熱井との類似性を予想される水位、温度、化学成分、地質条件の各要素と三次元的距離によって参考にした上で、例えば、既存掘削井において行われているモニタリングによって自然変動から逸脱する変化が生じていないか等の結果をもとに温泉帯水層への影響の有無について判断することが考えられる。そのため、あらかじめ既存掘削井におけるモニタリングデータを収集することが重要である。

4-2. 概査段階

地熱貯留層の概略的な資源量を把握し、地熱開発の可能性が高い精査対象地域を絞り込むことを目的とした調査が行われる。各種調査結果から、温泉の湧出機構や地熱徴候の生成機構を検討し、地熱構造モデルが作成される。モデルがあれば、その精度に応じた開発対象となる地熱貯留層と温泉・地熱徴候との関連性についての予測が可能となることがある。

表 5-2 概査段階における掘削の場合（例）

調査段階	Ⅱ.概査段階
想定される坑井掘削の内容	構造試錐井（温泉の湧出が見込まれる場合） 観測井（温泉の湧出が見込まれる場合）
掘削目的	構造試錐井、観測井掘削による地下温度（主に浅部）、地質情報の取得 観測井による地域の温泉、地下水特性把握
地熱資源調査の内容	・ 地表調査 ・ 坑井掘削による調査 ・ 周辺温泉・噴気の状態調査やモニタリング調査 等
掘削許可の判断に係る情報	① 掘削概要 ・ 掘削位置 ・ 掘削口径 ・ 掘削深度 ・ 流体採取深度 ・ 既存温泉からの距離 ・ 可燃性天然ガスの賦存状況 等 ② 掘削目的 ・ 流体・ガス採取見込量 ③ 掘削計画 ・ 掘削、調査スケジュール ・ 施行方法 等 その他、申請時点で得られる掘削判断の役立つと思われる以下の資料があれば参考にする。 ④ 温泉や地熱徴候を対象としたモニタリング結果 ⑤ 温泉や地熱徴候に対する地質学・地球物理学・地球化学的考察 ⑥ 地熱構造モデル 等 ・ 熱貯留層と温泉や地熱徴候との地質構造的な関係 等
温泉資源への影響を判断する方法	これまでの判断情報に加えて、温泉の生成機構等による地熱貯留層と温泉帯水層との関係を参考に温泉資源への影響を判断することが考えられる。

	申請に係る地熱井と温泉帯水層の関係について検討した上で、両者間に影響する可能性を示すデータがある場合には、モニタリングデータのある周辺の既存掘削井と当該地熱井との類似性を予想される水位、温度、化学成分、地質条件の各要素と三次元的距離によって参考にした上で、例えば、既存掘削井において行われているモニタリングによって自然変動から逸脱する変化が生じていないか等の結果をもとに温泉帯水層への影響の有無について判断することが考えられる。そのため、あらかじめ既存掘削井におけるモニタリングデータを収集することが重要である。 さらに、地熱構造モデルが構築されている場合には、地熱貯留層と温泉帯水層との関係を参考に温泉資源への影響を判断することが考えられる。
--	--

4-3. 精査段階

地熱発電所の事業化に向けた調査段階に相当し、試験井掘削による噴出試験によって、実際に深部地熱貯留層から地熱流体の採取が行われる。各種調査から得られた情報により地熱資源量の評価が行われる。試験井掘削による調査と噴出試験から地熱貯留層の規模と特徴、地熱流体流動モデルによる影響予測が可能となることがある。

表 5-3 精査段階における掘削の場合（例）

調査段階	III. 精査段階
想定される坑井掘削の内容	試験井の掘削 観測井の掘削（温泉の湧出が見込まれる場合） 構造試錐井の掘削（温泉の湧出が見込まれる場合）
掘削目的	地熱発電の事業化に向けた地熱資源量の把握と温泉への影響評価
地熱資源調査の内容	・ 精密地表調査 ・ 坑井掘削による調査 ・ 噴出試験による調査 ・ 温泉や地熱徴候のモニタリング調査 等
掘削許可の判断に係る情報	① 掘削概要 ・ 掘削位置 ・ 掘削口径 ・ 掘削深度 ・ 流体採取深度 ・ 既存温泉からの距離 ・ 可燃性天然ガスの賦存状況 等 ② 掘削目的 ・ 流体・ガス採取見込量 ③ 掘削計画 ・ 掘削、調査スケジュール ・ 施行方法 等 その他、申請時点で得られる掘削判断の役立つと思われる以下の資料があれば参考にする。 ④ 温泉や深部熱水の地質学・地球物理学・地球化学的考察 ⑤ 温泉モニタリングによる影響監視結果 ⑥ 掘削計画時までに得られた地熱流体流動モデル ⑦ 既存温泉地への影響予測に関する考察 等
温泉資源への影響を判断する方法	これまでの判断情報に加えて、調査が進展することによって温泉帯水層と地熱貯留層との関係を参考により高度な影響判断を行うことが考えられる。

	申請に係る地熱井と温泉帯水層の関係について検討した上で、両者間に影響する可能性を示すデータがある場合には、モニタリングデータのある周辺の既存掘削井と当該地熱井との類似性を予想される水位、温度、化学成分、地質条件の各要素と三次元的距離によって参考にした上で、例えば、既存掘削井において行われているモニタリングによって自然変動から逸脱する変化が生じていないか等の結果をもとに温泉帯水層への影響の有無について判断することが考えられる。そのため、あらかじめ既存掘削井におけるモニタリングデータを収集することが重要である。 さらに、地熱概念モデル（地熱構造モデルや地熱流体流動モデル）が構築されている場合には、温泉帯水層と地熱貯留層との関係を参考に温泉資源への影響を判断することが考えられる。
--	---

4-4. 発電所建設段階

開発調査の進展に伴い地熱系概念モデル（地熱構造モデル及び地熱流体流動モデル）の更新が行われ、地熱資源量評価のための数値シミュレーションが実施される。地熱資源の持続可能な資源量の把握と同時にモニタリングによる発電所運転時の既存温泉への影響評価が行われる。

表 5-4 発電所建設段階における掘削の場合（例）

調査段階	IV. 発電所建設段階
想定される坑井掘削の内容	生産井の掘削 試験井の掘削 還元井の掘削（温泉の湧出が見込まれる場合） 観測井の掘削（温泉の湧出が見込まれる場合） 構造試験井の掘削（温泉の湧出が見込まれる場合）
掘削目的	地熱流体の生産・還元と地熱資源量の把握
地熱資源調査の内容	・ 坑井掘削による調査 ・ 噴出試験による調査 ・ 生産井や還元井、観測井モニタリング調査 ・ 温泉や地熱徴候のモニタリング調査 等
掘削許可の判断に係る情報	① 掘削概要 ・ 掘削位置 ・ 掘削口径 ・ 掘削深度 ・ 流体採取深度 ・ 既存温泉からの距離 ・ 可燃性天然ガスの賦存状況 等 ② 掘削目的 ・ 流体・ガス採取見込量 ③ 掘削計画 ・ 掘削、調査スケジュール ・ 施行方法 等 その他、申請時点で得られる掘削判断の許可に役立つと思われる以下の資料があれば参考にする。 ④ 掘削計画時までに更新された地熱系概念モデル（地熱構造モデルや地熱流体流動モデル） ⑤ 既存温泉や地熱徴候を対象とした地質学・地球物理学・地球化学的考察 ⑥ 既存温泉や地熱徴候を対象とするモニタリング結果

	⑦ 既存温泉への影響予測に関する考察 ⑧ 地熱貯留層の動態に関する数値シミュレーション結果 等
温泉資源への影響を判断する方法	これまでの判断情報に加えて、新たなモニタリング結果を含む各種の情報を基に更新された地熱系概念モデル（地熱構造モデルや地熱流体流動モデル）による地熱貯留層と温泉帯水層の関係を参考に温泉資源への影響を判断することが考えられる。 申請に係る地熱井と温泉帯水層の関係について検討した上で、両者間に影響する可能性を示すデータがある場合には、モニタリングデータのある周辺の既存掘削井と当該地熱井との類似性を予想される水位、温度、化学成分、地質条件の各要素と三次元的距離によって参考にした上で、例えば、既存掘削井において行われているモニタリングによって自然変動から逸脱する変化が生じていないか等の結果をもとに温泉帯水層への影響の有無について判断することが考えられる。そのため、あらかじめ既存掘削井におけるモニタリングデータを収集することが重要である。 また、本段階では、試験井、生産井掘削による地熱流体の採取量増加、還元井による熱水の地下還元・注水により温泉資源に影響を与えないかを注視する必要がある。特に一斉噴出試験が行われる最終期間は、地熱流体採取量がピークに達するので、同期間におけるモニタリング結果は、今後の発電所運転開始後における影響判断の重要な参考資料となる。

4-5. 発電所運転開始後段階

発電所の出力維持や出力増強のための生産井や還元井の掘削が行われる。生産井や還元井以外にも追加調査のための試験井、観測井、構造試錐井が掘削される場合がある。運転開始後の生産・還元履歴や補充掘削により地熱貯留層に関する情報がさらに蓄積され、地熱資源量評価のため数値シミュレーションが行われ、モデルが精緻化される。長期間のモニタリングデータを基にした温泉や地熱徴候への影響確認が行われ、運転開始後のモニタリング結果に基づいた上記数値シミュレーションモデルを温泉帯水層も含めて行い、温泉影響評価への適用が可能となることもある。

表 5-5 発電所運転開始後における掘削の場合（例）

調査段階	V. 発電所運転開始後段階
想定される坑井掘削の内容	各種坑井の補充井掘削 生産井の掘削 試験井の掘削 還元井の掘削（温泉の湧出が見込まれる場合） 観測井の掘削（温泉の湧出が見込まれる場合） 構造試錐井の掘削（温泉の湧出が見込まれる場合）
掘削の目的	発電所の出力維持や出力増のため
地熱資源調査の内容	・ 坑井掘削による調査 ・ 噴出試験による調査 ・ 生産井、還元井モニタリング調査 ・ 温泉や地熱徴候のモニタリングの結果 等
掘削許可の判断に係る情報	① 掘削概要 ・ 掘削位置 ・ 掘削口径 ・ 掘削深度 ・ 流体採取深度 ・ 既存温泉からの距離 ・ 可燃性天然ガスの賦存状況 等 ② 掘削目的 ・ 流体・ガス採取見込量 ③ 掘削計画 ・ 掘削、調査スケジュール ・ 施行方法 等 その他、申請時点で得られる掘削判断の許可に役立つと思われる以下の資料があれば参考にする。 ④ 掘削計画時までに更新された地熱構造モデルや地熱流体流動モデル

	ル ⑤ 既存温泉や地熱徴候を対象とするモニタリング結果 ⑥ 既存温泉や地熱徴候を対象とする地質学・物理学・化学的考察 ⑦ 地熱開発による既存温泉地への影響発生に関する考察 ⑧ 地熱貯留層の動態に関する数値シミュレーション結果 ⑨ 温泉や地熱徴候を含めた数値シミュレーション結果 等
温泉資源への影響を判断する方法	これまでの判断情報に加えて、モニタリング結果を含む各種の情報を基に更新された地熱系概念モデル（地熱構造モデルや地熱流体流動モデル）もしくは数値シミュレーションを参考に温泉資源への影響を判断することが考えられる。 申請に係る地熱井と温泉帯水層の関係について検討した上で、両者間に影響する可能性を示すデータがある場合には、モニタリングデータのある周辺の既存掘削井と当該地熱井との類似性を予想される水位、温度、化学成分、地質条件の各要素と三次元的距離によって参考にした上で、例えば、既存掘削井において行われているモニタリングによって自然変動から逸脱する変化が生じていないか等の結果をもとに温泉帯水層への影響の有無について判断することが考えられる。そのため、あらかじめ既存掘削井におけるモニタリングデータを収集することが重要である。 さらに、地熱資源量評価のための数値シミュレーションが行われている場合は、その採取量が適正であるのか、予測された結果から周辺への圧力伝播の範囲と程度等を検討することも考えられる。また、これまでの各種モニタリング結果から地熱流体の生産・還元が温泉に与える影響を予測する。 温泉や地熱徴候を含めた数値シミュレーションが行われている場合には、地熱貯留層と温泉帯水層の関係を含むシミュレーション結果が得られる可能性もあることから、その場合は、申請に係る地熱井と温泉帯水層のつながりの検討に資することができることに留意する。

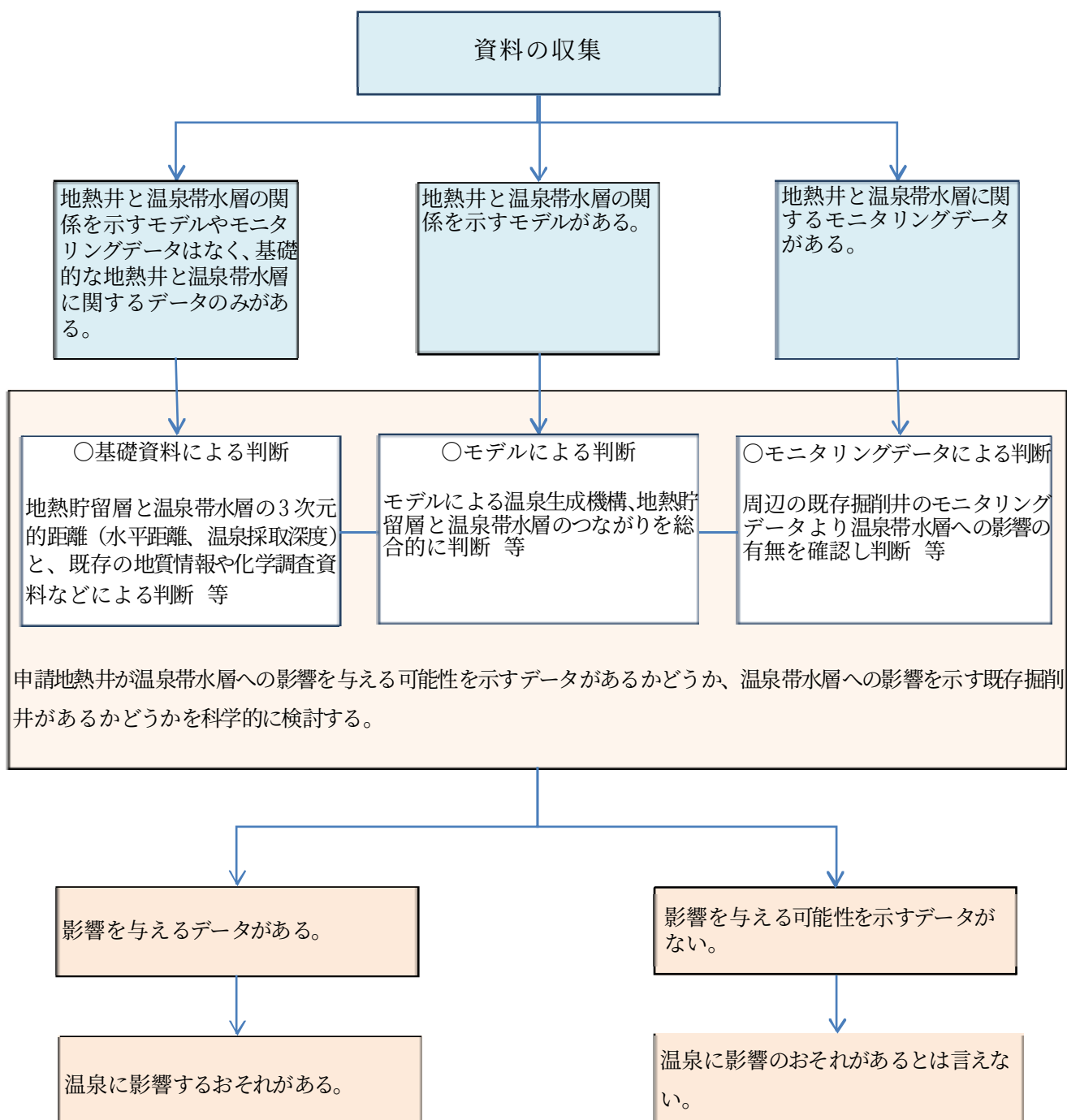


図5 掘削許可の判断に係る判断の進め方（例）

第四 関係者に求められる取り組み等

本ガイドラインは、地熱開発のための温泉の掘削等について、今後、都道府県が本ガイドラインを参考に温泉法における許可制度の運用に当たることを期待しているが、温泉資源の保護と地熱開発の共存は都道府県による温泉法の運用のみで実現されるものではなく、当事者である温泉事業者及び地熱発電事業者等の関係者による各種の取り組みが不可欠である。

実際にはどのような取り組みが有効であるかについては、温泉地の状況や地熱開発の状況等により異なってくることが予想されるが、ここでは一般的に有効と考えられる各種の取り組みについて記載することにより、関係者間の参考となることを期待する。

1. 温泉事業者、地熱発電事業者等によるモニタリングの重要性

地熱開発による温泉への影響を判断するには、温泉や噴気のモニタリングデータのみならず、地熱貯留層の動態、観測井等から得られる温泉・地下水位、河川水位、降水量等に関するモニタリングデータ、周辺での土木工事による地形改変状況等、様々な情報を総合して判断する必要がある。

また、これらのモニタリングデータは、事後の予測を行うためのモデルや数値シミュレーション構築の基礎データとしても活用される。地熱貯留層や温泉、双方の周辺域におけるモニタリングは、地熱貯留層からの圧力伝播の有無や範囲の拡大を早期に発見し、温泉や噴気に影響が及ぶ可能性について判断する上で重要なデータとなりうる。さらにモニタリング結果より温泉に影響が確認された場合や影響が及ぶ可能性が高い場合には、その原因を究明するとともに、地熱発電のための生産量や還元量を減量することや掘削位置を変更するなどの対策が考えられる。

具体的な温泉のモニタリング手法については、ガイドライン（平成 21 年版）の別紙として記載している。温泉についてのモニタリングの項目としては温泉の湧出量、温度及び水位（自噴の場合は孔口圧力）があげられる。地熱貯留層の適正管理にとって、重要な指標は地熱貯留層の圧力であり、温泉においても水位（自噴の場合は孔口圧力）が最も重要な監視項目となる。

さらに温泉資源の状況を的確に把握するためには、都道府県や市町村等の自治体及び温泉事業者等が協力し合いながら地域の温泉資源保護対策及び有効利用を推進するためのデータ収集を行うことが重要である。これらのモニタリング結果を集積することで、都道府県による掘削等の許否の判断、掘削等の原則禁止区域の範囲や規制距離の設定の見直しに活用することも可能となる。なお、掘削等の制限に当たっては審議会等の意見を聴いた上で実施することが望ましい。

2. 情報の共有・公開

モニタリング結果および各種調査情報は、温泉事業者、地熱発電事業者等にとって、資源を適正に維持・管理することを可能とする上で不可欠な情報となる。温泉地におけるモニタリングは平時から行い、モニタリング結果の整理と各種調査情報の共有化と公開に努めるべきである。また、必要に応じて、信頼性向上のため、第三者機関等

による検証を行うことも考えられる。

こうした情報の共有等を行うために地熱発電事業者、温泉事業者及び関係する市町村等の第三者を加えた場（以下、本ガイドラインでは「協議会等」という。）を設置し、定期的に開催することが考えられる。

3. 関係者間の合意形成（協議会等の設置）

地熱開発と温泉事業が共存・共栄するためには、協議会等において地熱開発に伴う温泉や噴気への影響に関する検証結果、地熱発電の現状報告と将来計画等の説明・報告等を通じて、関係者間の合意形成を図っていくことが重要である。

例えば、掘削を伴わない広域調査の段階であっても、調査目的と調査内容、今後の坑井掘削等の調査スケジュール等の情報を事前に関係者と共有し、調査結果に基づく地熱開発の継続・中止等の対処方針を明らかにすることで、その後の関係者間相互の信頼醸成に役立つことが考えられる。

また、関係者間で親密なパートナーシップを構築することで、地熱開発に関する協議がスムーズに進展することが期待される。具体的には、地域の地熱資源のカスケード利用をはじめとする有効活用や保護対策（観測井設置等）、温泉資源への影響が生じた場合の対応についての事前の合意形成等に係る協議を行うこと等が考えられる。また、相互理解を進めるため、温泉と地熱開発の科学的関係を内容とするセミナーの開催等を行うことも考えられる。

協議会等は、地熱資源開発の過程のなるべく早い段階から設置することが望ましく、その設置に当たっては、地元自治体の果たす役割が大きいと考えられる。

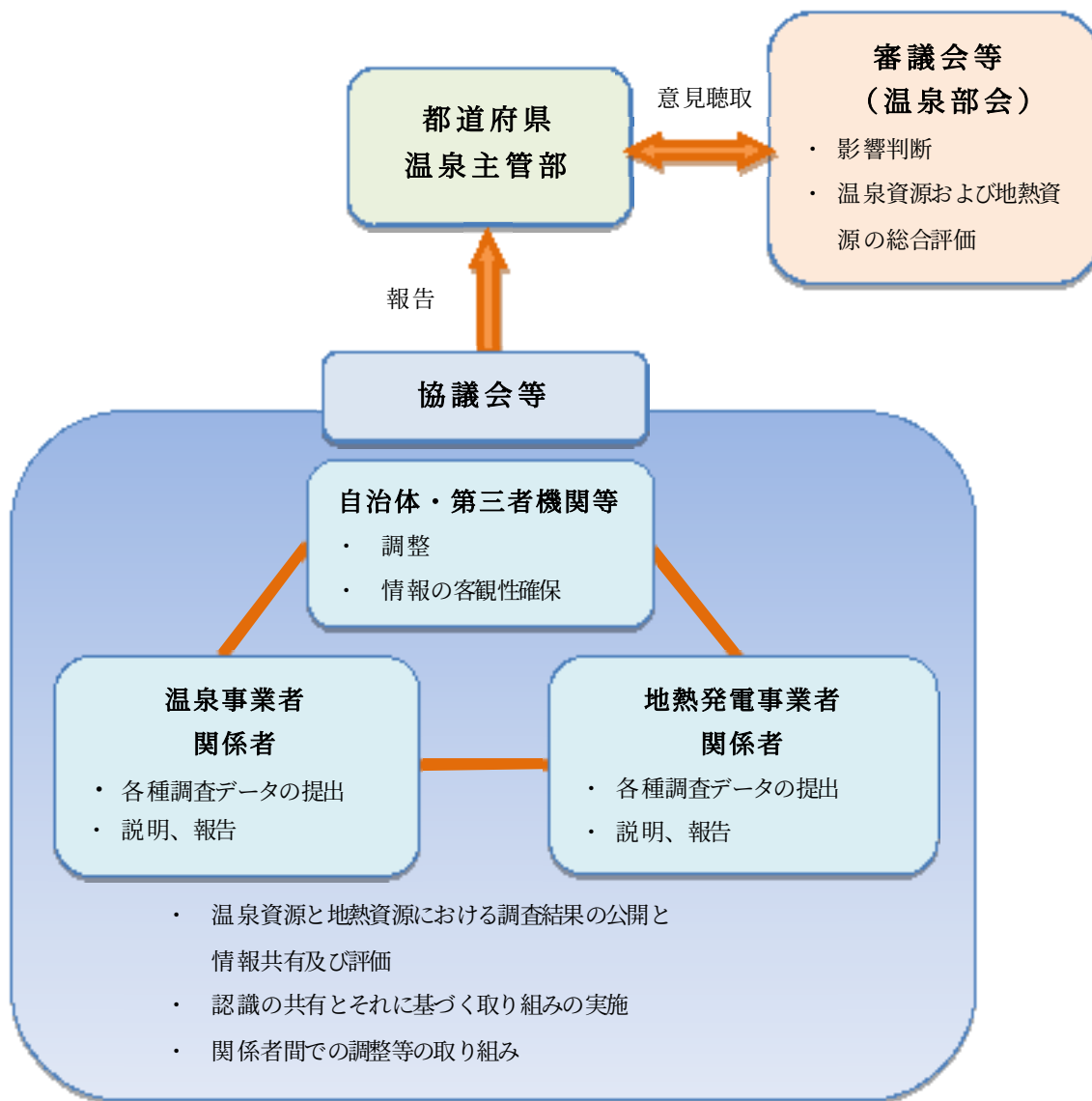


図6 協議会体制の構築例

備考

- 平成 23 年度地熱発電施設における自然公園の風致景観上の支障並びに温泉資源・地下水に及ぼす影響の検討事業委託業務請負：株式会社プレック研究所
地熱資源開発に係る温泉・地下水への影響検討業務：財団法人中央温泉研究所
(共同事業実施)
地熱技術開発株式会社
(協力会社)
- 同請負業務における検討会（地熱資源開発に係る温泉・地下水への影響検討会）委員
〈座長代理〉秋田藤夫 地方独立行政法人北海道立総合研究機構地質研究所資源環境部部長
板寺一洋 神奈川県温泉地学研究所 主任研究員
江原幸雄 国立大学法人九州大学大学院工学研究院 教授
交告尚史 国立大学法人東京大学大学院公共政策学連携研究部 教授
小林哲夫 国立大学法人鹿児島大学大学院理工学研究科 教授
〈座長〉田中 正 国立大学法人筑波大学 名誉教授
野田徹郎 独立行政法人産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門 顧問
(五十音順、敬称略、役職は平成 23 年度当時のもの)
- 参考文献
犬山文孝・島田寛一・鵜田洋行・横井浩一 (1999)：温泉・地下水系影響予測マニュアル (1), 地熱エネルギー, vol.24, No.3, 25～61.
環境省 (2011)：平成 22 年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書, 287p.
経済産業省 資源エネルギー庁 (2010)：平成 22 年度電力供給計画の概要, 38p.
公益社団法人日本地下水学会編 (2011)：地下水用語集, 理工図書, 143p.
社団法人火力原子力発電技術協会 (2009)：地熱発電の現状と動向, 99p.
新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) (2002)：平成 13 年度温泉影響予測手法導入調査 (第 3 次) 報告書, 94p.
地学団体研究会編 (1996)：新版地学事典, 平凡社, 1443p.
地熱発電と温泉利用との共生を検討する委員会 (2010)：報告書 地熱発電と温泉利用との共生を目指して, 日本地熱学会, 62p.
日本地熱学会ホームページ, 地熱発電用語集.
(http://www.soc.nii.ac.jp/grsj/jgea/index1_6.html)
村岡洋文 (2009)：世界の地熱資源, 地熱発電, 社団法人火力原子力発電技術協会, 61～69.

地熱資源の開発に係る地下の流体モデル・指標の構築と再現性の検証結果

1. はじめに

本資料は、「地熱資源の開発に係る地下の流体モデル・指標の構築と再現性の検証」の概要をまとめたものである。

この検証では、国内の既存発電所 3 ヶ所を選定し、各地域において行われた地熱開発の各ステージの調査結果と構築された地熱系概念モデルの状況及び地熱開発が温泉に与える影響を調べるための温泉モニタリングの概要についてまとめた。

調査対象地域の内の 1 地域については、数値シミュレーションモデルを構築し、地熱発電に伴う地熱流体の生産・還元が温泉に影響を与える場合は、どのような現象としてとらえ得るかを検討した。

2. 流体モデルとモデル構築のステージについて

一般的に流体モデルの種類については様々あるが、ここでは地熱系概念モデル（地熱構造モデルと地熱流体流動モデルとに分けられる）と数値シミュレーションモデルを指すものとした。各モデルの概要を以下に示す。

1) 地熱構造モデル

温泉と地熱貯留層の関係について地質構造の観点から、地層や断層等の分布、地熱貯留層と温泉帯水層の分布、熱源等の概要を説明したモデル。地熱調査ステージの概査段階以降において作成される。

2) 地熱流体流動モデル

地熱構造モデルを発展させ、温泉水や地熱流体の温度や圧力、地化学情報を基に、温泉及び地熱流体の生成機構、地熱貯留層温度、熱水系の分類、混合状態、流動状態を説明したモデル。地熱調査ステージの精査段階以降において作成される。

3) 数値シミュレーションモデル（地熱資源量評価）

地熱流体採取による貯留層の圧力変化や温泉への影響予測といったことを定量的に検討するために、地熱構造モデルや地熱流体流動モデルを反映し、コンピューター（数値シミュレータ）等を使用して構築されるモデル。地下の特性を定量化するために、坑井から得られるデータ（地層の間隙率や透水性、温度分布等）が最低限必要である。また、モデルの精度を検証するには、数値シミュレーションにより予測された結果（地熱貯留層や温泉帯水層の圧力や温度）について、より多くのモニタリングによる実測データを取得し、計算値と実測値との照合を行う必要がある。現在、このモデルは地熱資源量の評価に用いられているが、将来的には既存温泉への影響予測にも適用されることが期待される。

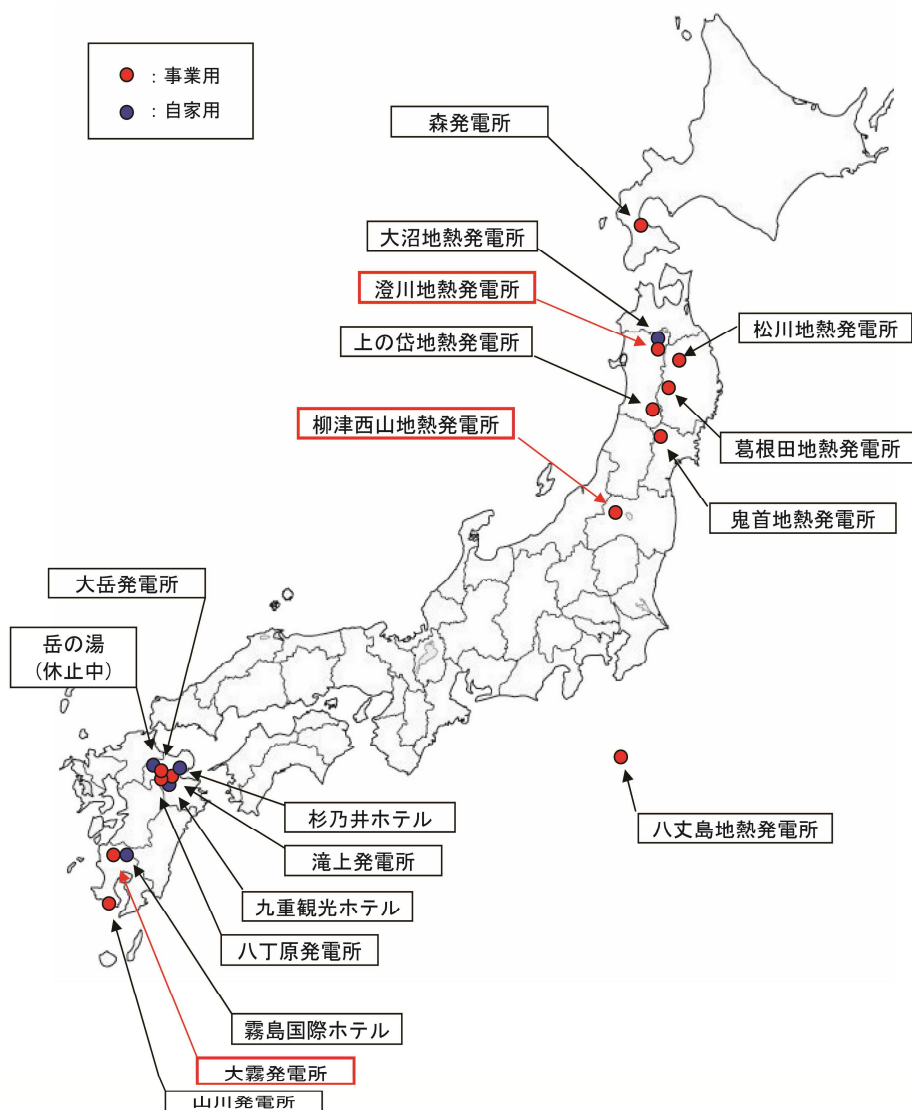
温泉と地熱貯留層との関係を検討する際の指標としては、地熱構造モデルや地熱流体流動

モデルを参照するのが適切である。

ガイドライン本編の表 3 に示されているが、一般に地熱調査のステージは「Ⅰ．広域調査段階」、「Ⅱ．概査段階」、「Ⅲ．精査段階」、「Ⅳ．発電所建設段階」、「Ⅴ．発電所運転開始段階」に分類される。このうち、地熱構造モデルは「Ⅱ．概査段階」以降、地熱流体流動モデルは「Ⅲ．精査段階」以降に構築され、数値シミュレーションモデルは「Ⅳ．発電所建設段階」以降で実施される。なお、ここでのステージと構築される流体モデルの関係は一般的なものとして整理したもので、実際には個々の場合で異なる。

3. 国内3地域の地熱発電所における流体モデル概要と温泉モニタリング

国内の既設地熱発電所の内、柳津西山地域（福島県）、澄川地域（秋田県）、大霧地域（鹿児島県）の3地域を選定し、各地域の蒸気供給会社より概念モデルの概要と温泉モニタリングに関する情報を提供していただいた。



付図-1 既存地熱発電所の位置図

環境省（2011）平成 22 年度地熱発電に係る環境影響審査報告書より引用編図

3.1 各地域の開発経緯

3.1.1 柳津西山地域

1) 所在地

福島県河沼郡柳津町大字黒沢

2) 事業者

東北電力株式会社（発電部門）

奥会津地熱株式会社（蒸気生産部門）

3) 出力

設備容量：65,000kW

認可出力：65,000kW

4) 位置案内

発電所は、福島県会津若松市の西南約 20km、河沼郡柳津町西山地区の只見川沿いの標高 380m に位置し、国土利用計画法に基づく森林地域及び農業地域となっている。また、発電所蒸気生産設備の一部は、自然公園法に基づく只見柳津県立自然公園の普通地域に指定されている。最寄りの温泉地としては、柳津温泉と西山温泉がある。

5) 開発経緯（付表-1）

① 概査期Ⅰ：1974 年

三井金属鉱業（株）は奥会津地域の地熱資源量探査を目的とする予察調査を開始し、地質構造と地熱構造井の調査を行った。

② 概査期Ⅱ：1976-1977 年

通産省工業技術院地質調査所と日本地熱開発促進センター（現（財）新エネルギー財団）による「地熱開発基礎調査：西山地域」が実施され、変質帯調査、放熱量調査、電気探査、温泉調査及び構造試錐掘削が行われた。この後、1978-1980 年に調査中断期がある。

③ 概査期Ⅲ：1981-1983 年

柳津町及び町議会から地熱調査再開の要請を受け、三井金属鉱業（株）は 1m 深地温調査、地化学調査、温泉調査を実施した。これらのデータを基に、新エネルギー総合開発機構（現（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構）による「地熱開発促進調査：奥会津地域」が 1982 年度から 2 年間実施された。また、1983 年 11 月 12 日に、三井金属鉱業（株）、三井建設（株）、（株）東芝の出資によって奥会津地熱（株）が設立された。

④ 精査期：1984-1989 年

奥会津地熱（株）は企業化・開発調査を実施し、22 本の坑井掘削を行った。1989 年に 9 坑井の同時噴出試験を行い、蒸気量 509t/h を確認し、同年、東北電力（株）と推進協定を締結した。

⑤ 建設期：1990-1994 年

1990 年に東北電力（株）と奥会津地熱（株）は基本協定を締結し、環境アセスメント（1990-1992 年）を経て、第 122 回電調審（1992 年）にて建設計画が了承され、

1993年に発電所の建設工事を着工した。この期間に新たに7本の坑井掘削を行った。また、柳津町・東北電力（株）・奥会津地熱（株）の三者で環境保全協定が締結され、運開準備が整った。

⑥ 運転期：1995年以降

1995年5月25日、出力65,000kwの柳津西山地熱発電所が運開した。1998年7月、東北電力（株）は硫化水素除去装置を設置し、環境対策にも万全を期している。

付表-1 柳津西山地域の開発経緯

		概査(1974-1983)	精査(1984-1989)	建設(1990-1994)	運転(1995以降)
企業調査	地表調査	地質、変質帯調査 温泉、地化学調査 1m深地温調査			
	坑井掘削		調査井/試験井掘削22本 ・生産井転用9本 ・還元井転用2本	生産井掘削6本 還元井掘削1本	補充井掘削
	資源量評価		噴出試験 確認蒸気量509t/h	噴出試験 確認蒸気量376t/h	地熱貯留層シミュレーション
	環境影響調査			環境アセスメント	
国の調査	地熱開発基礎調査	変質帯調査 地上物理探査 温泉調査 構造試験1本			
	地熱開発促進調査	地化学調査 1m深地温調査 小口径調査井・試験井13本 経済性評価			

日本地熱調査会(2000)わが国の地熱発電所設備要覧を引用加筆

3.1.2 澄川地域

1) 所在地

秋田県鹿角市八幡平字熊沢

2) 事業者

東北電力株式会社（発電部門）

八幡平地熱株式会社（蒸気生産部門）

3) 出力

設備容量 50,000kW

認可出力 50,000kW

4) 位置案内

発電所は秋田県鹿角市南端の八幡平地区の標高 1,062m に位置し、周辺には南東約 6km に秋田・岩手両県にまたがる標高 1,613m の八幡平がある。十和田八幡平国立公園に指定されていないが、国土利用計画法に基づく森林地域となっている。最寄りの温泉地としては、八幡平温泉郷がある。

5) 開発経緯（付表-2）

① 概査期Ⅰ：1965～1973 年

三菱金属（株）（現三菱マテリアル（株））は、広域調査を実施して、有望地区として大沼地区と併せて澄川地区を抽出した。

② 概査期Ⅱ：1974～1980 年

三菱マテリアル（株）は澄川地区に対し、追加地表調査と調査井の掘削を実施した。また、国の調査（地熱開発精密調査、全国地熱基盤調査、広域熱構造調査、発電用地熱開発環境調査）も導入された。試験井 N52-SM-2 で蒸気噴出を確認し、本格的調査の開始へと移行した。

③ 精査期Ⅰ：1981～1985 年

三菱マテリアル（株）と三菱ガス化学（株）の共同開発が開始した。試験井を 4 本掘削し、そのうち S-4 坑井で優勢な蒸気を確認した。また、東北電力（株）との共同調査委員会が設置され、50MW（50,000kW）発電所建設の可能性について調査した。

④ 精査期Ⅱ：1986～1990 年

三菱マテリアル（株）と三菱ガス化学（株）は 50MW 発電所建設を前提とした調査井（試験井）掘削計画を策定した。また、地熱探査技術等検証調査（仙岩地域）と地熱開発促進調査（地熱貯留層評価手法開発）が導入され、1990 年に 3 ヶ月の一斉噴出試験を実施し、50MW 相当の蒸気量が確認され、東北電力（株）と三菱マテリアル（株）とで開発基本協定が締結された。

⑤ 建設・運転期：1991 年以降

環境アセスメント（1990～1991 年）を経て建設計画が了承され（1992 年 3 月）、建設を開始し、1995 年 3 月営業運転に入った。

付表-2 澄川地域の開発経緯

	概査期Ⅰ (1965-1973)	概査期Ⅱ (1974-1980)	精査期Ⅰ (1981-1985)	精査期Ⅱ (1986-1990)	建設・運転期 (1991以降)
地表調査	65. 66 地質調査 67 重力調査	73 比抵抗探査 74 弾性波探査	81 82 83 84	85	91 92 93 94 95 96 97 98 99
企業による調査			OS-1 OS-2 OS-3 OS-4	SA-1 SA-2 SB-1 SA-4 SB-2 SB-3 SD-2 SD-3 SD-4	SC-2 SB-4 SE-2 SE-1 SD-3 SE-3 SD-4 SA-3
資源量評価					
環境影響評価					環境影響評価 建設工事開始 営業運転開始
地熱開発精密調査		OS-5T			
発電用地熱開発環境調査					
地熱開発促進調査					
地熱探査技術等検証調査					
国による調査					
凡例:					
○小口径井(構造試験、調査井、試験井、観測井)					
◎大口径井(調査井、試験井、生産井、還元井、観測井:掘削深度2,000m未満)					
●大口径井(調査井、試験井、生産井、還元井、観測井:掘削深度2,000m以上)					

日本地熱調査会(2000)わが国の地熱発電所設備要覧を引用加筆

3.1.3 大霧地域

1) 所在地

鹿児島県始良郡牧園町大字万膳及び栗野町大字木場

2) 事業者

九州電力株式会社（発電部門）

日鉄鹿児島地熱株式会社（蒸気部門）

3) 出力

設備容量：30,000kW

認可出力：30,000kW

4) 位置案内

発電所は、霧島連山の西部に位置し、万膳川と鏑河川に挟まれた標高 700～900m の丘陵地であり、その周辺には北約 2km に標高 1,094m の栗野岳、東約 6km に標高 1,700m の韓国岳、東南東約 5km に大浪池、南西約 2km に佐賀利山がある。霧島屋久国立公園の普通地域内に位置する。

5) 開発経緯（付表-3）

霧島地域の地熱調査・開発は、1973 年に日鉄鉱業（株）により地下資源の探査開発の一環として開始され、地表地質調査、物理探査が実施された。また、国の地熱開発基礎調査（1974 年）、地熱開発精密調査（1975 年）が行われ、これらの結果から有望地域と認識された。

1979 年から新日本製鐵（株）と日鉄鉱業（株）の共同調査体制で本格的調査に入った。1979 年以降の調査・開発は以下のステップに分けられる。

① 1979～1981 年

銀湯、白水越地域に小口径試験井 3 本を掘削し、蒸気熱水の噴出を確認した。特に、KEI-2 号井は浅部で銀湯断層を貫通し、極めて優勢な地熱流体を噴出したことが大霧の銀湯貯留層開発のスタートとなった。企業調査井掘削に伴い、国は環境調査井 2 本を掘削し、「発電用地熱開発環境調査」を実施した。

② 1982～1984 年

銀湯、白水越地区に小口径 4 本、大口径 7 本の調査井・試験井を掘削し、坑井利用電気探査も実施した。これに先立つ 1980～1982 年には、NEDO による「栗野・手洗地域地熱開発促進調査」の調査井・試験井 8 本が掘削された。

白水地区の 3 坑井では、300℃に近い坑底温度を記録し、同地区の有望性を確認した。銀湯地区の 2 坑井からも優勢な流体噴出が認められ、銀湯断層の南東への広がり及び銀湯断層深部の活発な地熱流体の存在が確実視された。

③ 1985～1987 年

銀湯地区の開発可能量実証のため、大口径試験井 5 本を掘削した。銀湯断層の深部を狙った 3 本全てから優勢な流体噴出が見られ、調査解析の結果、銀湯断層は走向延長 1,200m の透水性の高い地熱貯留層であることが確認された。

続いて、3 ヶ月間、生産井 4 本、還元井 2 本を使用し、一斉噴出還元試験を実施し、

出力 14,000kW 相当の安定した蒸気量 125t/h（口元 5 気圧換算）を確認した。

その後、九州電力（株）の「大霧地区地熱プロジェクト評価委員会」の総合解析評価の結果、30,000kW 規模の地熱資源が長期安定して確保できると評価され、九州電力（株）及び地元自治体との開発基本協定締結へと進展した。

なお、1984 年、1985 年には NEDO により「地熱貯留層評価手法開発」の観測井 2 本が掘削された。

④ 1990～1991 年

1990 年日鉄鹿児島地熱（株）が設立され、大霧開発地区に生産井 7 本、還元井 7 本を掘削した。その後、転用井を含めた生産井 10 本の全量噴出実証試験を行い、蒸気量 360t/h（口元 5 気圧換算）と、出力 30,000kW に十分な蒸気が安定して得られることが確認された。

⑤ 1992～1996 年

1992 年から九州電力（株）とともに環境影響調査を実施し、第 125 回電源開発調整審議会を通過した。1994 年から九州電力（株）が発電設備を、日鉄鹿児島地熱（株）が蒸気生産設備をそれぞれ建設し、試運転、使用前検査を経て、1996 年 3 月に営業運転を開始した。

付表-3 大霧地域の開発経緯

[illegible]

日鉄鹿兒島地熱株式会社内部資料より引用

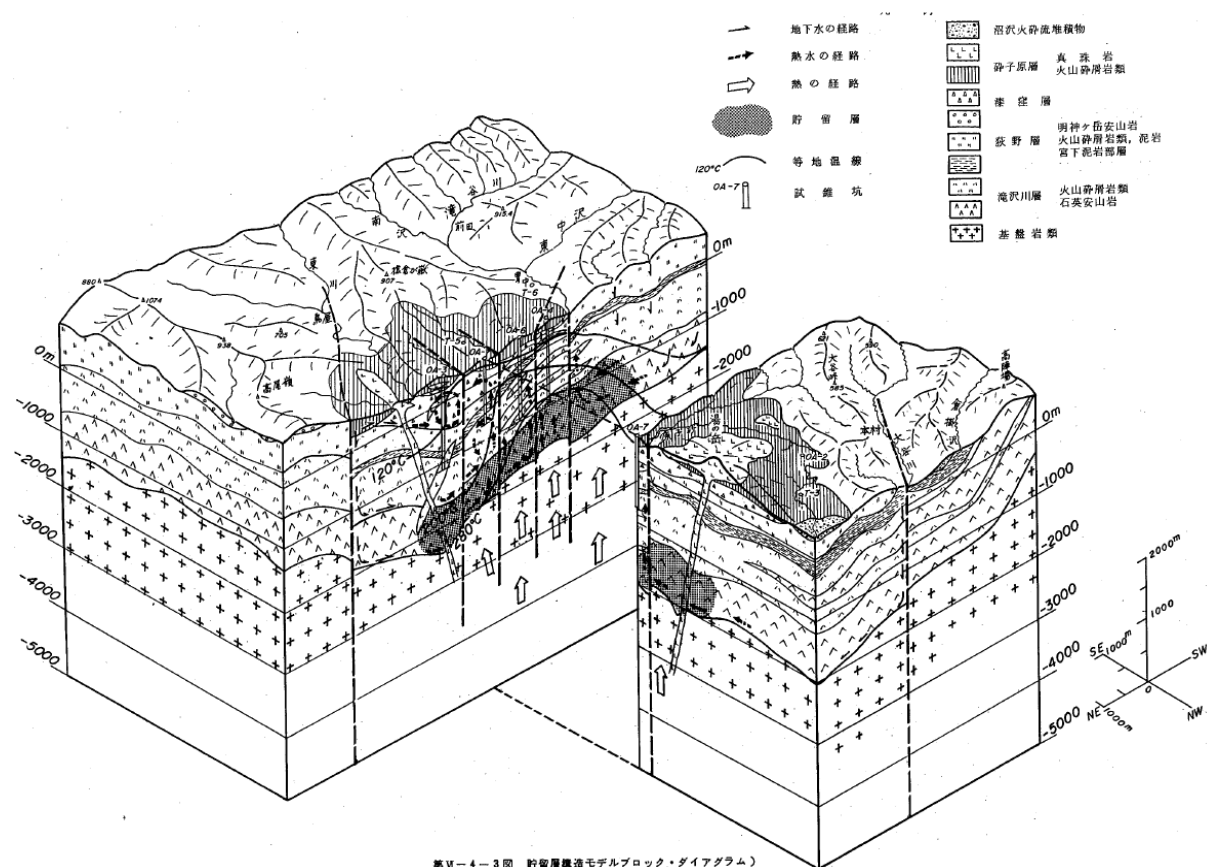
3.2 流体モデル

柳津西山地域、澄川地域、大霧地域においては、それぞれの地熱調査ステージの進展に伴い、地熱構造モデル、地熱流体流動モデル、数値シミュレーションモデルがそれぞれ構築されている。ここでは、代表例として柳津西山地域の各モデルを付図-2～4に示した。

付図-2に示した地熱構造モデルは、国が行った地熱開発促進調査で構築されているが、同調査ステージは概査段階に相当するものである。同モデルは、地表調査（地質・物理探査・地下学探査他）、坑井調査（構造試錐井、観測井、試験井）などの結果を総合的にまとめたもので、広域的な地下温度分布や主要な断裂系によって地熱構造が規制されている様子を示している。

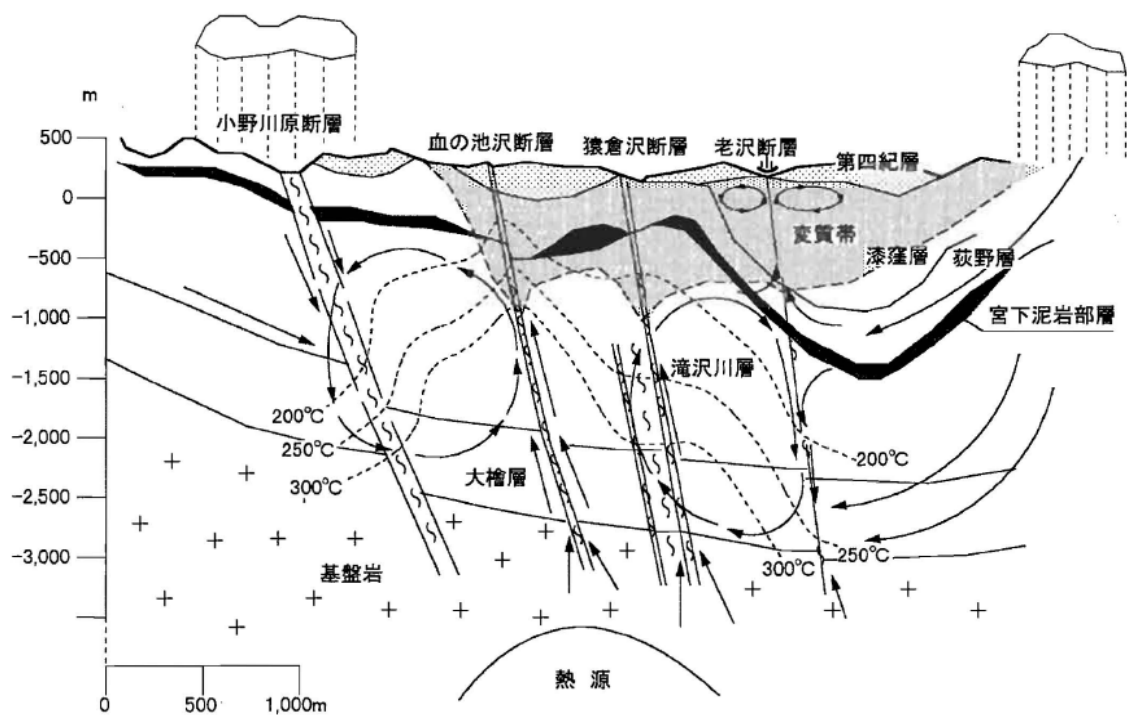
付図-3に示した地熱流体流動モデルは、精査の段階で構築されている。同モデルは精密な地表調査（地質、物理探査、地化学調査）や坑井調査（試験井）など、更に対象を絞った詳細調査の結果をまとめたものがある。モデルには地熱構造と共に地熱流体の流動の様子が表現されており、また、温泉帯水層との関係が示されている。

付図-4に示した数値シミュレーションモデルは、精査～地熱発電所建設の段階で構築されている。同モデルは地熱流体流動モデルを基に、地熱流体の地下での動きを定量的に再現している。なお、同モデルは地熱貯留層をモデル化しており、温泉帯水層はこれに含まれていない。



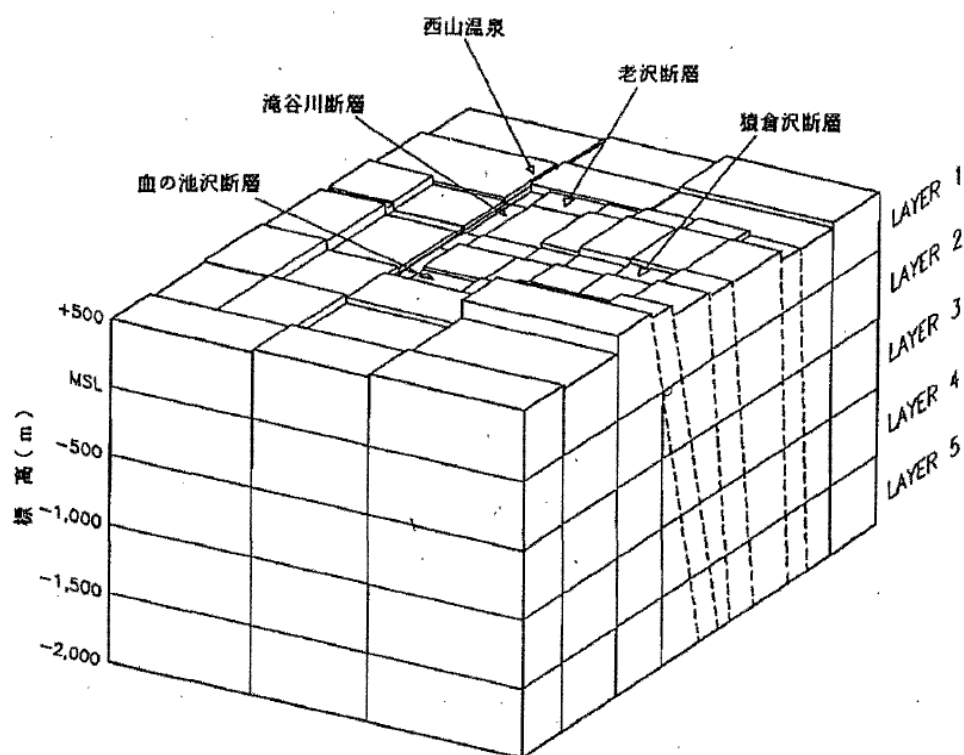
付図-2 地熱構造モデル（柳津西山地域）

新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）（1983）地熱開発促進調査報告書より引用



付図-3 地熱流体流動モデル（柳津西山地域）

日本地熱調査会（2000）新版わが国の地熱発電所設備要覧より引用



付図-4 数値シミュレーションモデル

佐伯（1993）地熱エネルギーの評価（3）-柳津西山地点-より引用

地熱貯留層のみが対象とされており、温泉帯水層はモデルに含まれていない。

3.3 温泉モニタリング

一般に、温泉・地下水系の状態変化をもたらす要因として以下のことがあげられる

【自然要因】

- a. 降雨, 降雪, 積雪
- b. 河川, 湖沼水位
- c. 潮汐
- d. 地震
- e. 火山活動
- f. 気圧変化
- g. 泉源のスケール付着
- h. その他

【人為的要因】

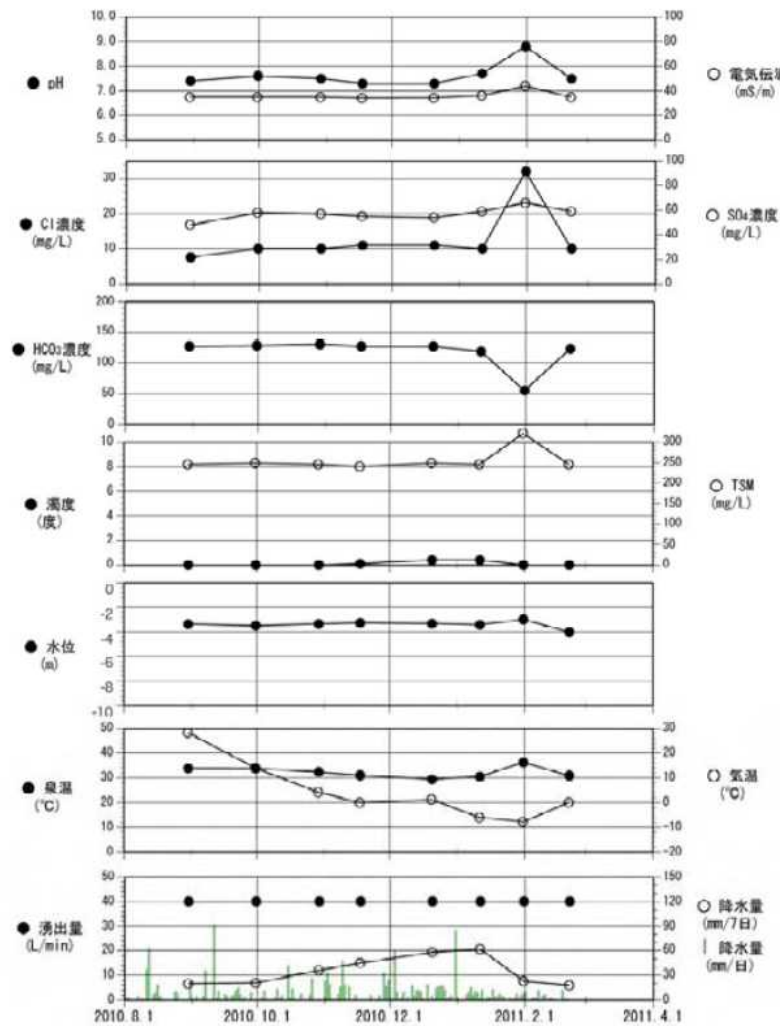
- a. ダム・貯水池工事
- b. 河川・護岸工事
- c. トンネル・隧道工事
- d. 道路・広域駐車場工事
- e. 温泉・井戸同士の干渉, 乱開発
- f. 泉源のスケール浚渫, 改修工事
- g. 森林伐採
- h. 土地改良工事
- i. その他 (たとえば, 地すべり対策のための水抜き孔掘削)

地熱発電と温泉利用との共生を検討する委員会 (2010) 報告書 地熱発電と温泉利用との共生を目指してより引用加筆

このため、温泉モニタリングを適切に行い、これら要因による変動に対して地熱開発に伴う有意な変化を観測する必要がある。

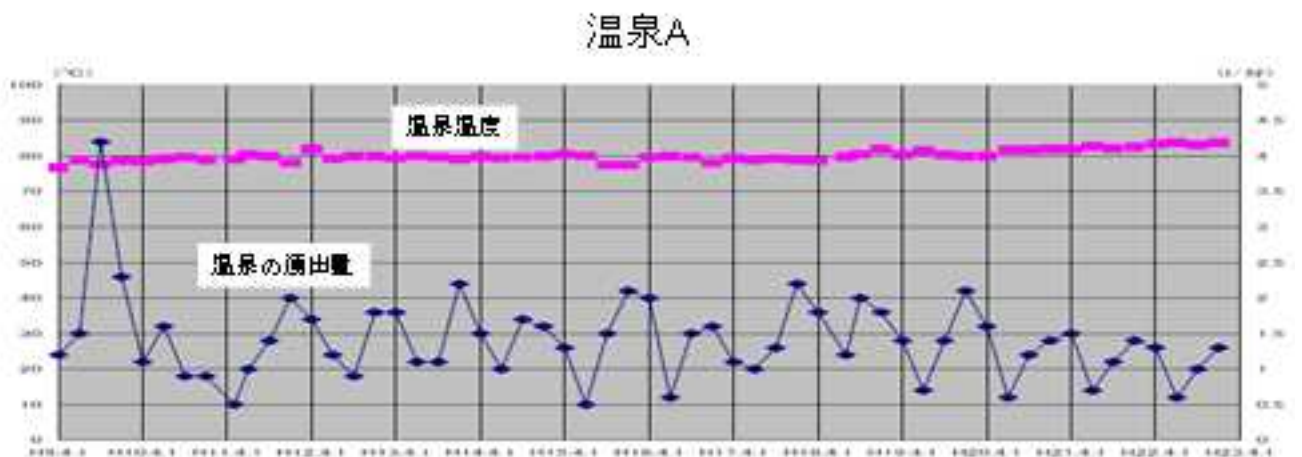
柳津西山地域、澄川地域、大霧地域では、発電所運転開始以前の段階より温泉モニタリングが実施されている。各地域とも、付近の温泉の湧出量や成分が定期的に計測され、自治体等に報告されている。付図-5 及び 6 に澄川地域と大霧地域のモニタリング例を示す。

各地域とも地熱開発に伴う温泉湧出量減衰は認められていない。これは、発電所の運転開始前の地熱構造モデルや地熱流体流動モデルを含む各種調査・検討結果と整合している。



付図-5 温泉モニタリングの例（澄川地域付近の温泉）

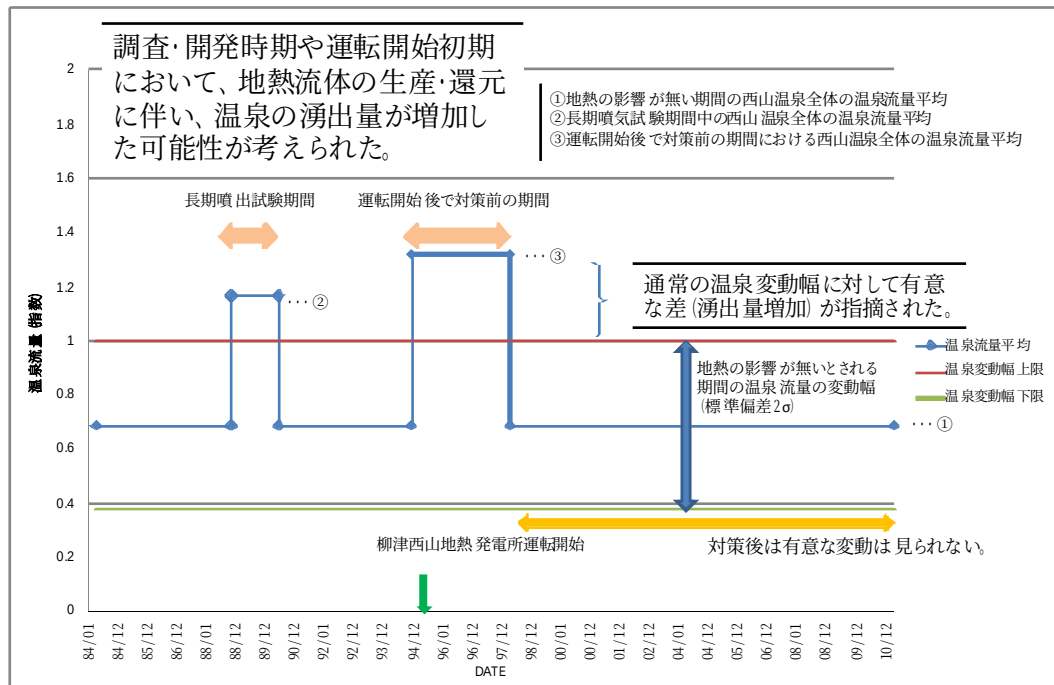
新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）（2011）地熱開発促進調査報告書より引用



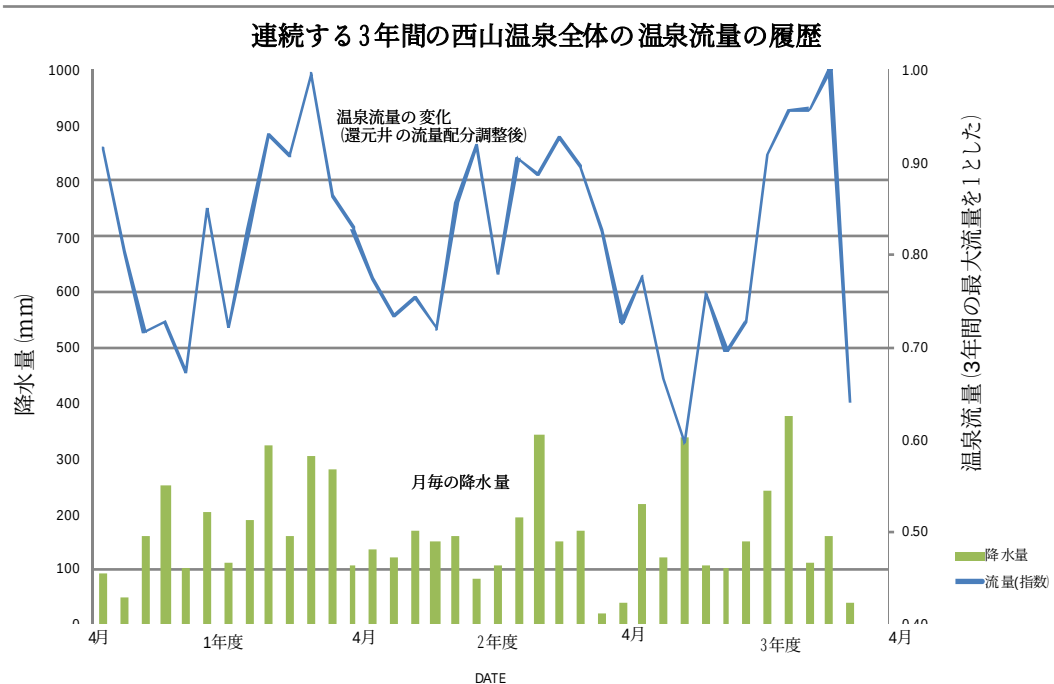
付図-6 温泉モニタリングの例（大霧地熱地域付近の温泉）

日鉄鹿兒島地熱株式会社内部資料より引用

一方、柳津西山地域では、温泉モニタリング結果により開発段階から発電所運転開始初期において温泉湧出量が増加する現象が指摘された（付図-7）。この温泉湧出量の増加が指摘された期間は、通常の温泉変動幅よりも有意な差が観測されている。これについては、温泉モニタリングデータの検討や解析等から地熱流体の還元による影響と推定され、各還元井への還元流量配分の調整等を行った結果、上記現象が解消されている。



付図-7 柳津西山地域の温泉モニタリング結果の解釈について



付図-8 柳津西山地域の温泉モニタリング例

対策後は地熱流体生産・還元に伴うと考えられる有意な差は見られない。

4. 柳津西山地域対象とした数値シミュレーションモデルを用いた検証

4.1 数値シミュレーションモデルについて

柳津西山地域を対象とした数値シミュレーションモデルを構築し、同モデルを用いて地熱発電に伴う地熱流体の生産・還元が温泉帯水層に与え得る応答の特徴について検討した。

一般的に、地熱資源量評価では以下の手順で数値シミュレーションモデルが構築される。

① 数値ブロックモデルの作成

地熱流体流動モデルを参考に、地熱流体流動を規制する構造（地質分布や断層）をブロックモデルで表現する。この際、個々のブロックに水理パラメータ（透水性、空隙率、熱伝導率、比熱、密度等）を入力する。

② 自然状態シミュレーション

①で作成したモデルに熱源を与えて、対流系を再現する。この際、構造試験井や試験井、観測井などの各種坑井で観測された温度・圧力分布が計算結果と合うように、個々の数値ブロックの水理パラメータを調整する。

③ ヒストリーマッチングシミュレーション

②の自然状態シミュレーションで構築したモデルを使い、試験井や生産・還元井の地熱流体生産・還元履歴をモデル上に再現し、観測結果（生産流体のエンタルピー変化や、圧力・温度観測井などの観測データ）と計算結果が整合するように、特に坑井が分布している領域の個々の数値ブロックの水理パラメータを調整する。

④ 生産還元挙動予測シミュレーション

③のヒストリーマッチングシミュレーションによって最適化されたモデルが、地下の地熱流動を定量的に再現していると仮定し、同モデルに目標とする事業を想定した生産・還元シナリオを再現する。想定した事業期間で想定した発電量が維持できるかを計算によって評価する。

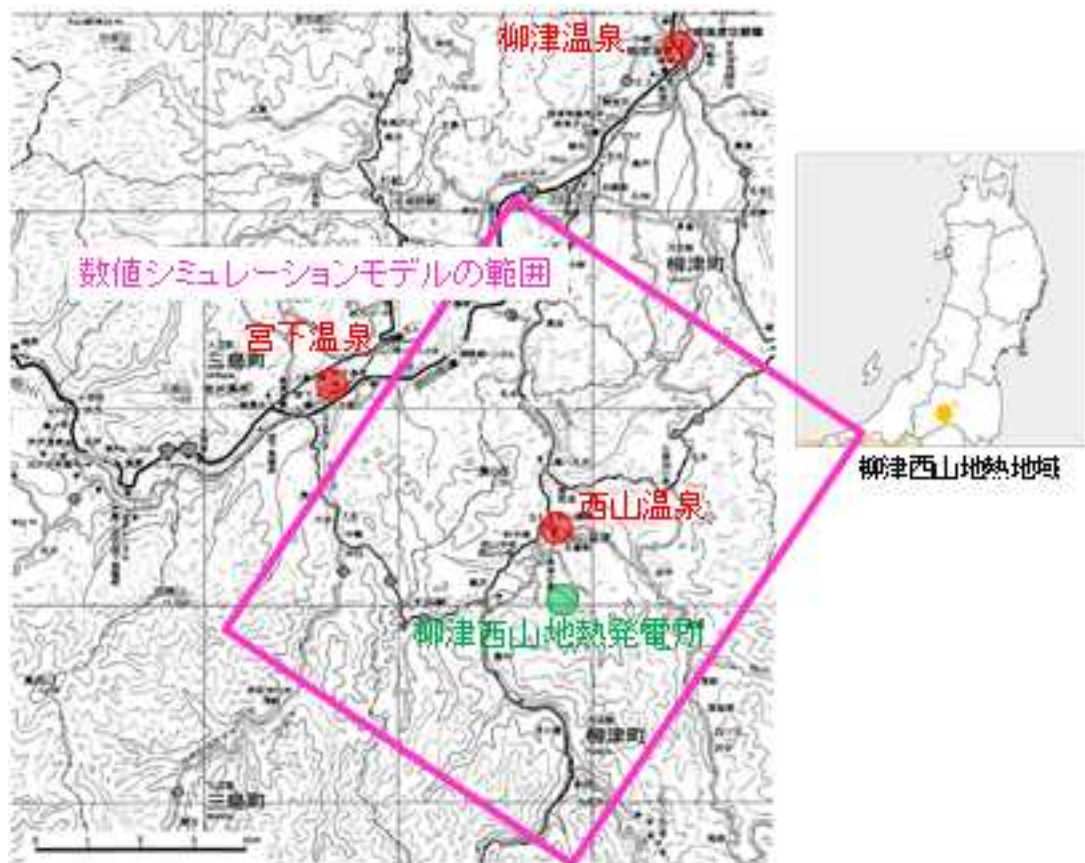
地熱分野で行う数値シミュレーションは、以上のように資源量評価を目的として体系化された手法に基づいて行われる。このため、温泉影響を対象とした数値シミュレーションを行う場合は、温泉変動観測手法やそのデータ解釈方法、数値シミュレーション手法などの構築が必要とされ、将来的にこれら手法が提案されることが期待される。

ここでは上記に示した通常の資源量評価を目的とした数値シミュレーションモデルの構築手法を用いて温泉帯水層を含むモデルを作成し、地熱流体の生産・還元が温泉帯水層に相当するブロックに対し、どのような応答を与えるかを検討した。これにより、地熱貯留層や温泉帯水層内のどのような変化が温泉変動の原因となり得るかを検証し、温泉影響を判断するための指標となり得るパラメータについても考察した。

4.2 数値シミュレーション結果について

付図-9 に柳津西山地域で作成した数値シミュレーションモデルの範囲を示す。柳津西山地域付近では西山温泉と柳津温泉、宮下温泉がある。宮下温泉や柳津温泉は発電所から 5~10km 程度以上離れているが、西山温泉は比較的近傍に位置する。3.3 温泉モニタリングで述べたように、運転開始以降、1998 年前期頃までの期間で、西山温泉の湧出量が増加したと考えられ

たため、還元井の還元流量の配分が調整された結果、この問題は解消された。



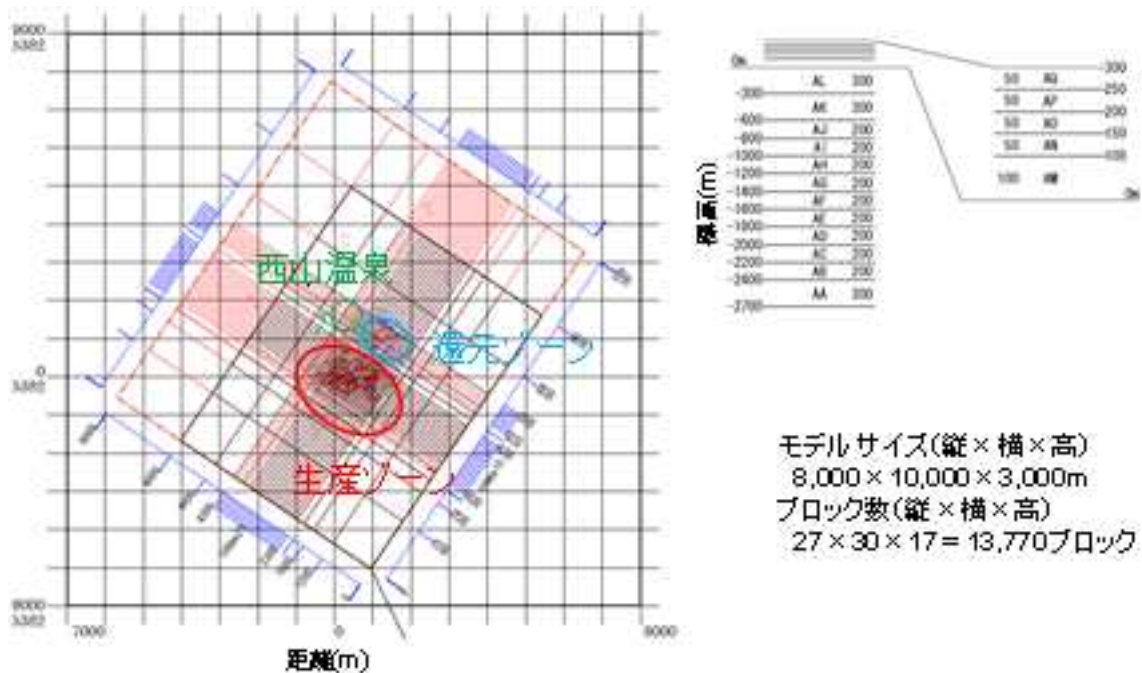
付図-9 柳津西山地域の数値シミュレーションモデル範囲

ここでは、同現象を数値シミュレーションモデルで再現し、この現象が温泉帯水層にどのような変化として出現するかを検討した。

付図-10 に数値シミュレーションモデルを示す。モデルは縦×横×高さが $8\text{km} \times 10\text{km} \times 3\text{km}$ で西山温泉がほぼ中央付近にくるようにブロックを配置し、モデルのブロック数は 13770 ブロックである。同モデルは地熱流体流動モデル（付図-3）を基に作成し、自然状態シミュレーション及びヒストリーマッチングシミュレーションを行うことで最適化した。

温泉変動の計算では、発電所運転開始以降の地熱流体の生産・還元を与え、西山温泉相当ブロックの変化を観察した。以下に手順を示す。

- 最適化されたヒストリーマッチングモデルを用い、西山温泉相当ブロックの圧力の履歴を計算。
- 運転開始以降、1998 年前期頃までの期間に影響があるとされた還元井（A）に対して、還元したケースと還元しないケースでシミュレーションを行い、各ケースの西山温泉相当ブロックの圧力差を計算。
- この差が湧出量増加した時期に大きく変化するようにモデルを修正（地熱貯留層と温泉帯水層の間のブロックの透水性等を修正）



付図-10 数値シミュレーションモデル

一般に、温泉の流量は以下のような関係があるとされる。

温泉の湧出量 = (温泉帯水層の圧力 - 湧出時の温泉井戸の圧力) × 生産効率

ここで、「湧出時の温泉井戸の圧力」と「生産効率」は温泉井戸や地層に依存する一定値と考えることができるので、湧出量は温泉帯水層の圧力に依存する。そこで、西山温泉相当ブロックの圧力変化が温泉モニタリングで得られた知見と整合するようにモデルを最適化した。

付図-11 に結果を示す。図では、西山温泉で有意な差が観測された運転開始直後から 1998 年前半までは、西山温泉相当ブロックの圧力が上昇している様子が示されている。この差は、影響があると考えられた還元井 A 相当ブロックへの還元を行った場合と、行わなかった場合の差である。

温泉モニタリング結果が適切に説明できるようにモデルを修正することができれば、地熱流体生産・還元がどのように温泉帯水層に影響を与えるかを計算できる可能性が示された。このことから、将来的には適切な温泉変動観測手法や解釈手法、数値シミュレーションモデル構築手法の体系化が可能であると考えられる。

また、温泉湧出量の変化は温泉帯水層の圧力変化により起きる様子が示されたが、温泉モニタリングを行う上で同パラメータ（温泉帯水層の圧力）は重要な指標になると考えられる。



付図-11 数値シミュレーション結果例

ピンクの枠で囲った期間について、還元井(A)に還元していた時期に西山温泉相当ブロックの圧力上昇が計算されている。この傾向は温泉モニタリングデータと整合的で、この計算結果では水位変化の指数が0.5を超え良く一致している。

5. まとめ（指標の検討）

1) 指標について

- 地熱構造モデル、地熱流体流動モデルは開発ステージの進展によって構築され、各種調査データを基に地熱貯留層と温泉帯水層の関係を含む流動構造などを説明するモデルである。
- 今回、検討対象とした3地域でも開発の段階でこれらモデルが構築され、資源量評価のために利用されている。
- 地熱貯留層と温泉帯水層の関係を議論する同モデルによって、地熱開発のための各種掘削が温泉帯水層に影響を与える可能性を必要に応じて説明することは、許可を判断するための指標の一つとして適切であると考えられる。

2) 温泉モニタリングについて

- 今回検討の対象とした地熱発電地域（3地域）では、各地域とも開発段階より温泉モニタリングが実施されている。
- 今回の事例では、これまで観測された温泉モニタリングの傾向から、温泉の減衰等の影響は報告されておらず、これは各地域とも運転開始の段階で地熱流体流動モデル等により予測したものと整合的であると考えられる。
- 一部地域では地熱開発によって温泉湧出量が増えた可能性が指摘された例があるが、温泉モニタリングデータを基にした対策によって、現在その問題は解消されている。長期の温泉モニタリングによる対策は、問題が指摘された場合にも有効であることが示されている。
- 今回の数値シミュレーションモデルを用いた検討では、温泉の湧出量変化は地熱流体の生産・還元に伴い、引き起こされる温泉帯水層の圧力変化などと関係があることが示された。また、これら変化を適切に捉え、季節変化や地表の人為的・自然環境的な構造の変化などと区別する手法が、温泉モニタリングとして重要であると考えられる。

3) 数値シミュレーションモデルについて

- 現在の数値シミュレーションモデルは、地熱資源量評価のために開発された手法を基にしているため、これを温泉影響予測等に使う場合は、同評価のためのデータ解釈方法や適用方法、数値シミュレーションモデル化手法などの構築が必要であると考えられる。
- 一般に、資源量評価のための数値シミュレーションは、相当な数の坑井情報や生産・還元履歴データに基づいて構築されるが、想定した事業に対してどの程度の資源量を期待できるか、事業性を見誤らないように（過大な評価にならないように）評価するものであるため、計算で与える生産・還元に対し減衰しやすい地熱貯留層となるような数値シミュレーションモデルを構築することが一般的である。このため、資源量評価を目的とした手法で構築した数値シミュレーションモデルをそのまま温泉影響予測に使用する事は、適切ではない。
- 今回の数値シミュレーションモデルでは解析対象とする現象を絞り込み、これに観測データを適切に反映させる事で、地熱貯留層の生産・還元が温泉帯水層に与える応答を計算できる可能性が示されたと考えられる。よって、将来的には温泉変動を適切に捉えるモニタリング手法が提案され、同手法で観測された“有意な影響”を、温泉変動予測を目的に提案された手法で構築された数値モデルで再現する事で地熱貯留層と温泉帯水層とのつながりを評価し、これを予測（あるいは対策）に活用できる可能性が考えられる。

6. 参考引用文献

環境省（2010）平成 22 年度 地熱発電に係る環境影響審査手法調査業務，委託先：株式会社ブレック研究所.

佐伯和宏（1993）地熱エネルギーの評価（3）-柳津西山地点-，地熱エネルギー，Vol.18, No.2, pp159-175.

新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）（1983）地熱開発促進調査報告書 No.8 奥会津地域.

新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）（2011）平成 22 年度成果報告書 地熱開発促進調査（開発可能量調査 菰ノ森地域），委託先：三菱マテリアル株式会社 三菱マテリアルテクノ株式会社.

地熱発電と温泉利用との共生を検討する委員会（2010）報告書 地熱発電と温泉利用との共生を目指して，日本地熱学会.

日本地熱調査会（2000）新版わが国の地熱発電所設備要覧.