報告書

地熱発電と温泉利用との共生を目指して

2010年5月

日本地熱学会

地熱発電と温泉との共生
を検討する委員会

〒166-8532　東京都杉並区和田3-30-22
大学生協学会支援センター内
office@grsj.gr.jp
http://www.grsj.gr.jp

報告書

『地熱発電と温泉利用との共生を目指して』

2010 年 5 月

日本地熱学会

地熱発電と温泉との共生を検討する委員会

序　文

我が国は米国，インドネシアに続く世界第 3 位の地熱資源保有大国であり，従来型の地熱資源開発量だけでも電力換算で 2,347 万ｋＷと評価されている。しかしながら，それらを有効に利用するに当たって，幾つかの阻害要因があり，2010 年 5 月現在，認可設備容量は約 53 万ｋＷで，推定資源量の 2.3％が利用されているにすぎず，2000 年時点で世界 5 位の地熱発電設備容量であったものが，現在，世界 8 位に後退した。

地球温暖化問題，そしてエネルギー問題がますます深刻化する中で，各国とも地熱エネルギーを含む再生可能エネルギー利用に積極的に乗り出している。しかしながら，我が国では，上述のように，豊富な資源量が推定されているにもかかわらず，その利用は極めてわずかなものに限られている。その阻害要因として幾つか挙げられるが，その重要なものの一つに「地熱発電と温泉」との関係がある。

地熱発電の温泉への影響に対する懸念から，地熱開発有望地域周辺の温泉関係者による反対があり，調査・開発が行えない地域が多く存在している。地熱貯留層の管理技術が発達し，温泉との共生的利用が可能になってきていることを考えると，地熱発電利用と温泉利用の科学的理解に基づいて，双方向のコミュニケーションが図られ，地球の恵みの有効利用につながることを心から期待している。

日本地熱学会では，このような期待を現実のものとしていくため，2009 年 1 月，特別委員会「地熱発電と温泉との共生を検討する委員会（野田徹郎委員長）」を立ち上げ，検討を重ねるとともに，2009 年 12 月の学術講演会において，地熱発電と温泉との共生をテーマとするシンポジウムを開催し，温泉関係学会のリーダーの方々のご意見も伺いながら，この問題の理解を深めてきた。そして，この度，それらの成果を本書「地熱発電利用と温泉利用との共生を目指して」として発刊する運びとなった。

本書では，地下における熱システムの科学的理解，地熱発電利用と温泉利用との関係，温泉に影響しない地熱発電を実現するための科学的技術的対応方法，「地熱発電と温泉」が共生していくための技術的・社会的システム作り，新しい温泉利用の方向－温泉発電の展開－，さらに，各地における地熱発電と温泉の共生の実例が示されている。そして，最後に，共生のための具体的な方策が提案されている。そこでは，1) 科学的分析結果の適切な説明に基づく，相互の信頼関係の維持，2) 地熱発電・温泉関係者の定期的な対話と地熱発電に関する広報活動，そして，3) 学識経験者，地熱発電事業者，温泉事業者を含む地元関係者の意見を踏まえた共生のための事業化プログラムの作成が提案されている。

これらの提案が具体的に生かされ，地熱発電関係者と温泉関係者が科学的理解に基づいて，信頼関係を確立し，我が国に恵まれた地球の恵み「地球の熱」を地熱発電利用にも温泉利用にも生かしていきたいものである。そのために，本書が多方面で活用されることを期待したい。「地球の熱」の共生的利用が実現すれば，「地球温暖化問題」及び「エネルギー問題」に大きな貢献をすることができると確信している。共生的利用は，鳩山首相が国際的に公約した我が国の目標「温室効果ガスの排出を，2020 年において，1990 年比 25％削減」の実現に大いに貢献することができると考えられる。日本地熱学会としても，共生的利用実現のため，一層の努力をしたいと考えている。

2010 年 5 月

日本地熱学会会長
江原幸雄

『地熱発電と温泉利用との共生を目指して』

目次

第１章　基本的考え方 …… 1
第２章　地熱発電と温泉との関係 …… 3
2-(1)　地質的・地形的に見た地熱系と温泉との関係及び地熱徴候の特徴 …… 3
2-(1)-1)　はじめに
2-(1)-2)　熱水卓越型地熱系の地熱徴候の特徴
2-(1)-3)　高起伏地形型地熱系
2-(1)-4)　地熱開発による地表徴候の変化
2-(1)-5)　地熱系の特性と日本における開発の地熱徴候への影響予測
2-(1)-6)　上記以外の特性による開発の地熱徴候への影響予測
2-(2)　温泉に影響しない地熱発電のあり方 …… １１
2-(2)-1)　事前モデリング
2-(2)-2)　モデリング
2-(2)-3)　温泉影響予測
2-(2)-4)　事後モニタリング，影響判定
2-(2)-5)　影響が予想される場合の対策
2-(2)-6)　適切な貯留層管理に基づく温泉に影響を与えない開発
第３章　温泉との共生のしかた …… ２４
3-(1)　温泉との身近な共生の可能性　－カスケード利用を中心として－ …… ２４
3-(1)-1)　地熱カスケード利用の基本的考え方
3-(1)-2)　各国での事例
3-(2)　温泉を利用した発電 …… ２６
3-(2)-1)　温泉発電
3-(2)-2)　やや大きめの温泉発電
3-(3)　温泉との共生事例 …… ３７
3-(3)-1)　八丈島における共生事例
3-(3)-2)　松川における共生事例
3-(3)-3)　森における共生事例
3-(3)-4)　鬼首における共生事例
3-(3)-5)　滝上における共生事例
3-(4)　温泉との共生のための「システム」 …… ４７
3-(4)-1)　はじめに
3-(4)-2)　温泉との積極的な共生のための「システム」の概念
3-(4)-3)　システム構成のための要素技術
3-(4)-4)　まとめ
第４章　共生のためにどうしたら良いか …… ５５
4-(1)　地熱と温泉との関係のとらえ方 …… ５５
4-(2)　冷静な考え方 …… ５８
4-(3)　具体的共存策 …… ５９

日本地熱学会　地熱発電と温泉との共生を検討する委員会
野田徹郎（委員長），大里和巳，梶原竜哉，相馬宣和，田口幸洋，當舎利行，鴇田洋行，中西繁隆，新妻弘明，松山一夫，村岡洋文，森山清治，安川香澄，矢野雄策，山田茂登，江原幸雄（常任アドバイザ）
執筆協力者　下田昌宏，高村光一，佐々木英代

『地熱発電と温泉利用との共生を目指して』

第１章　基本的考え方

地熱発電と温泉との共生について述べた本報告は，次を基本認識として稿をまとめている。

①地熱（深部）と温泉（浅部）は共に地球の熱システムであり，保護し適正に利用すべき貴重な資源である。

②両者の関係はシームレスであり，地熱発電の温泉への影響についても，この関係の中でとらえるべきである。

③両者の関係は多様であるが，両者が適切な利用を行うことにより，影響なく十分共生することが可能である。

Fig.1-1（阪口・高橋，2002）は地熱資源の賦存形態を示すものとしてしばしば見かける模式図の一例である。この図には，地熱資源だけではなく温泉も併せて表現されている。これは偶然の所産ではなく，地熱資源と温泉とは切り離せない関係にあることを意味している。深層熱水のような非火山性の温泉を除けば，地熱資源と温泉は共に火山をもたらす地下のマグマの活動に熱を得ているという共通点がある。地球上の自然現象という観点からは，地熱資源と温泉とは区別する積極的な理由はなく，いずれも地球の熱エネルギーが，我々の利用できる熱流体（熱水や温泉）として存在するものである。我が国では地熱資源と温泉資源を区別することが多いが，グローバルにはその区別はない。英語圏では Geothermal は地熱と温泉を包含した呼称として使われる。我が国ではこれを利用面で区別し，地熱資源は地熱発電に使えるような高温の資源，温泉資源は浴用を中心とした温水を指しているのが一般的であるが，その境がはっきりしているわけではない。ここでは，話の展開上，このあいまいな定義に従って論を進めるが，背景となる事実としては上記を踏まえている。

温泉は，数千年来地域の人々の生活や福祉のための大切な熱エネルギーであり資源であった。その地域にあって，温泉宿は幾多の戦乱，経済的混乱，国や社会の変遷を乗り越えて存続し，地域の経済に貢献してきた。例えその資源量は僅かであっても，その地域にとっては大切な宝であった。温泉の枯渇は，その地域の生活基盤が失われることを意味し，地域の人々は持続的にその恩恵に浴することに最大限注意を払ってきた。

それにもかかわらず，温泉の枯渇は，これまで，自

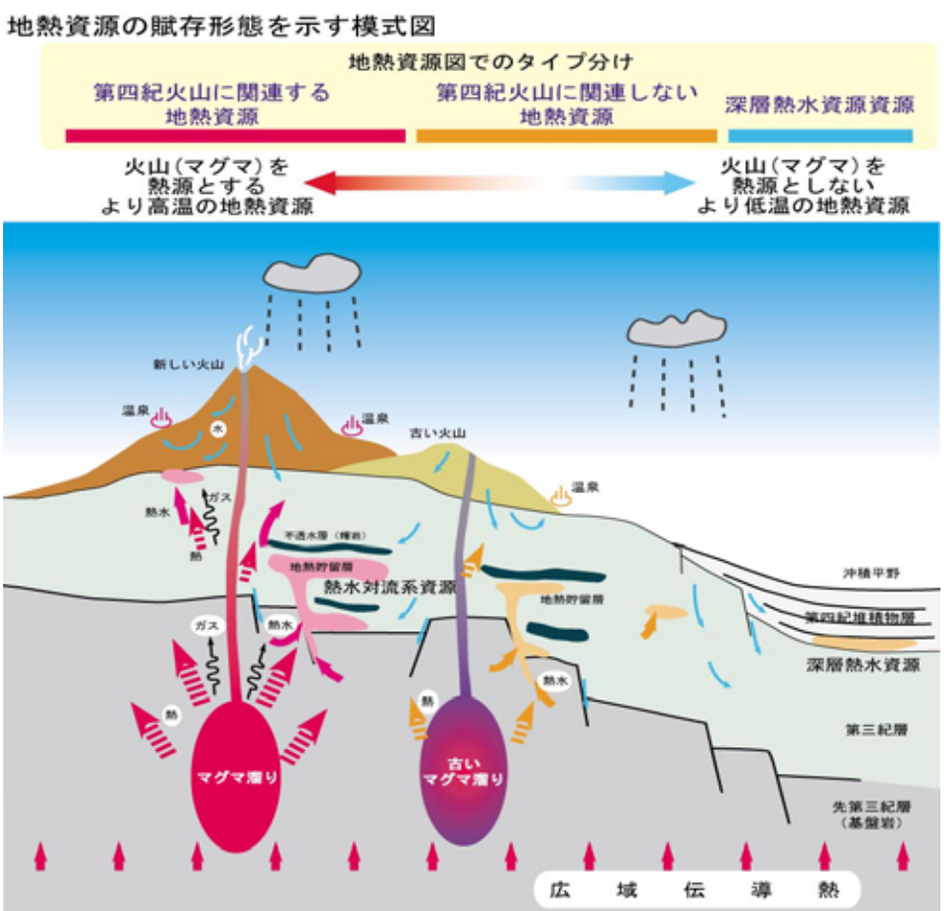


Fig.1-1　地熱資源の賦存形態を示す模式図

然現象や乱開発などによってしばしば引き起こされてきた。このような地域資源の枯渇の問題は漁業や農林業にあっても同様であった。人類は資源枯渇の苦い経験を乗り越え，天然自然に頼るだけでなく，その生産方法を工夫したり，里山や水田に代表されるような，自然と人間との相互作用によるいわゆる二次自然をつくり上げたりして，持続的に自然の恩恵を得る手法をつくり上げてきた。

他方，現代文明社会は 21 世紀に至り，地球温暖化と生物多様性崩壊の危機に直面し，環境共生型の文明社会の早急な構築が求められている。そこでは，2050 年において世界の CO_2 排出量の半減が求められており，工業先進国にあっては 80 ～ 90% の大幅な削減が必要とされている。このためには化石燃料に代わる再生可能エネルギーのあらゆる選択肢について，条件の許す限り最大限利活用することが必要である。火山国である我が国では，地熱エネルギーはその有力な選択肢の一つである。

温泉と地熱開発の間の問題は，地域住民の思いと国家的要請との衝突の問題である。国家的要請は，かつてはオイルショックを受けた石油代替エネルギー開発であり，現在では地球温暖化問題を受けた再生可能エネルギー開発である。国家的視野に立てば，国内の有望地域からできるだけ多くのエネルギーを取り出すことがその使命である。その量は，地域住民が温泉から得てきた量に比べ格段に大きく，数 100 年の実績を持つ温泉という生活基盤に支えられてきた地域住民にとって，数 10 年の歴史を持つ現代技術がその開発を行うことに対する不安は当然である。もし地熱開発にたずさわる人が，国家的視野のみで開発を遂行しようとすれば，地域住民との意識のギャップは埋まらないであろう。長い歴史を持つ地域社会の理解と地域的視野，そしてその意識のギャップを埋める努力が不可欠である。

しかし，現在の環境共生社会構築へ向けた地熱開発は，従来の資源開発とは異なり，開発したエネルギーシステムが持続可能であることが特に重要であり，資源の枯渇が許されないことは温泉と同じである。そこでは，農林水産業の資源管理と同様に，人為作用に対する自然の応答をモニタリングしながら順応的に開発・管理を行うことが不可欠である。このためには，これまでの経験や実績を科学的に整理することが必要である。さりとて地下は複雑系であり個々の現象の不確定性を免れることはできない。このため，“無知の知” を基本とした，人為作用に対する地下の応答に対する対処法，方法論を，地域目線に照らしながら科学的に考究していくことが必要である。

国家の CO_2 削減は，一地域にとって直接的には何のメリットもない。特に，地熱エネルギーの多くが賦存する我が国の中山間地は，現在過疎・高齢化にあえいでおり，それどころではないのが実情である。地熱開発が地域の生活基盤や地域社会を破壊しないことはもちろん，それが新たな地域メリットを生む技術・社会システムの構築が必要である。

本書を手に取られる方には，多くの層の方がおられるであろう。日頃から地熱や温泉を技術的に取り扱っている方（言わば内部の方）だけではなく，地熱に興味を持つ一般の方，温泉業者，行政担当者，地熱を学ぼうとする方など（言わば外部の方）があろうが，特に本書は外部の読者を意識してまとめた。そのために，できるだけ分かりやすい表現を心掛けたつもりである。一方，地熱・温泉に精通する内部の方にも，この際ぜひ心得ておいていただきたい部分もある。「第 2 章 2-(2) 温泉に影響しない地熱発電のあり方」がそれである。この部分は，マニュアル的であり，技術的な表現が避けられなかったので，外部の方には理解が難しいかもしれない。

このような難解さを補い，また，全体が大部に及ぶため，特に外部の方に大事な部分を理解していただきたい思いで，「第 4 章　共生のためにどうしたら良いか」をまとめた。この章には，まず，誤解の発端となっている「地熱と温泉の関係のとらえ方」について，第 2 章で述べた部分のエッセンスに，分かりやすさを旨とした解説を加えた。次に，この問題を考える時に，関係者が熱くならず，双方が得になるように相手のことも考えながら「冷静な考え方」が大事なことを述べた。最後に，関心が高く，また本書の成果として役立てていただきたい「共生のための具体的方策」を併せて記している。第 4 章は，前章までとの重複もあるが，この章だけで完結するまとめの内容としており，特に理解しやすい表現としているので，そのつもりで読んでいただきたい。

（新妻弘明・野田徹郎）

引用文献

阪口圭一・高橋正明 (2002)　東北・九州地熱資源図（CD-ROM. 版）. 数値地質図 GT-1, 産業技術総合研究所地質調査総合センター .

第２章　地熱発電と温泉との関係

2-(1)　地質的・地形的に見た地熱系と温泉との関係及び地熱徴候の特徴

2-(1)-1)　はじめに

地熱系は，貯留層の状態により熱水卓越型地熱系と蒸気卓越型地熱系に大きく分類される。このうち地熱系のほとんどを占める熱水卓越型地熱系は，火山活動の様式により出来上がる火山地形が異なるため，さらに二つのタイプに分類される。島弧の安山岩卓越地域の地熱系あるいは High topographic relief タイプ（以下高起伏地形型地熱系と呼ぶ）と呼ばれるものと，珪長質火山岩卓越地域の地熱系あるいは Low topographic relief タイプ（以下低起伏地形型地熱系と呼ぶ）である（Henley and Ellis, 1983;　Henley, 1984）。

熱水卓越型地熱系の開発のパイオニアであるニュージーランドでは地溝帯の中に流紋岩質の火山活動が卓越し，そのため低起伏地形型の地熱系が発達する。これに対し，日本では安山岩質の火山活動が卓越するため，地形が急峻となり高起伏地形型の地熱系が発達している。この二つのタイプは，マグマからの熱や物質の供給，地下水の循環などによって形成される地熱系形成機構に大きな差はないが，地質や地形による水理系の違いが地熱徴候に顕著な差として現れる。これらのタイプ間の地熱徴候の現れ方の違いの理解は，地熱開発による影響を考える際にも重要である。

ここでは両地熱系の特徴を明らかにするとともに，今まで報告されてきた地熱開発による影響についても報告する。なお，蒸気卓越型地熱系は，熱水卓越型地熱系に比べて形成される条件が極めて物理的に制限されており，出現する頻度が小さい。また，温泉や地獄などの地熱徴候の特徴や形成機構は，高起伏地形型地熱系の水位面より浅所でのそれに類似しているので，ここでは熱水卓越型地熱系の二つのタイプについてのみ述べる。

2-(1)-2)　熱水卓越型地熱系の地熱徴候の特徴

2-(1)-2)-a　低起伏地形型地熱系の構造と地熱徴候

低起伏地形型地熱系（Fig.2-1-1）は，ニュージーランド北島の中央部のタウポ火山帯に発達している。この火山帯は北東－南西に伸びるタウポ－ロトルア陥没帯内に，この伸びと同方向に並んでおり，タウポ湖より北東側には主に流紋岩質火山が，タウポ湖の南側には安山岩質火山が分布している（Cole, 1986）。低起伏地形型地熱系はこのうち陥没体内の流紋岩卓越地域に分布している。

Fig.2-1-1 に示すように，この地熱系モデルによると，周辺部より天水が浸透し，地下深部でマグマからの熱や物質が供給され，系の上部に向かって中性で NaCl に富む熱水が上昇していると考えられている（Henley and Ellis, 1983）。この地熱系を含む地域は一般的に地形的な凹凸差が小さく，そのため地熱開発地域の地下水位面の深度は，周囲の河川や湖などの水位面に近く，そして浅い。その結果，NaCl に富む深部熱水がしばしば地表にまで達し，熱水プール，シンターや間欠泉を形成している。例えば，Waiotapu 地熱帯の Champagne Pool

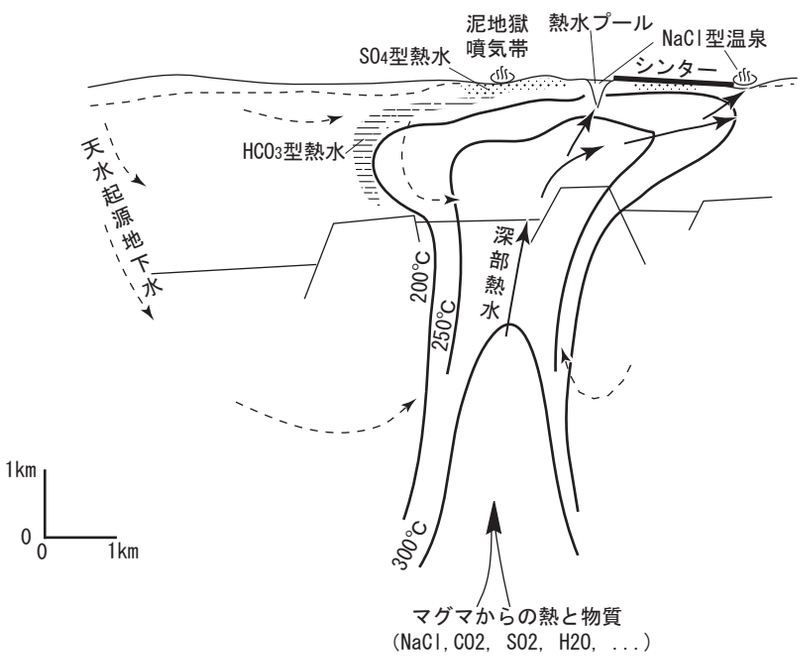


Fig.2-1-1　低起伏地形地域に発達する地熱系のモデル。 Henley and Ellis (1983）を簡略化し，一部加筆。

とシンターテラスはその代表的なものである。また，上昇する深部熱水は沸騰を起こし気液分離を行うため，分離された水蒸気，CO_2，H_2S などは地表に向かって上昇し，地下浅所～地表で地下水を加熱し，いわゆる蒸気加熱水が形成される。地表により近い付近では H_2S は空気を含む地下水で酸化され，Cl をほとんど含まない SO_4 に富んだ酸性の温泉が形成される（蒸気加熱水と呼び習わされている）。そのような場はしばしば，噴気地 (Steaming ground) や地獄 (Mud pool) として見ることができる。このような地獄付近ではクリストバル石，明礬石，カオリンなどからなる高度粘土化帯（Advanced argillic alteration ）と呼ばれる変質帯が発達している。また，このような SO_4 に富んだ温泉の下位には，HCO_3 に富んだ弱酸性～中性の温泉（CO_2 に富む蒸気加熱水）が分布している。

低起伏地形型地熱系が発達する地域の地質は，火山性地溝やカルデラ内などに堆積した軽石を含む火山砕屑岩や，湖成堆積物などをしばしば伴っている。軽石に富む部分は透水性が高く，泥岩に富む層は不透水性が高い。このような地質を背景とし，深部から断裂を通じて上昇してきた熱水は，地下浅所で不透水性の高い地層に遭遇すると水平に広がり，貯留層はマッシュルーム型の温度構造を示す。

このような地熱構造の具体例として，熱水卓越型の地熱開発が世界で最初に行われた Wairakei について概観する。Wairakei における深部熱水は，坑井掘削地域の北，Wairakei Stream 沿いの Geyser Valley において，間欠泉や温泉として湧出していた（Glover, 1977）。温泉の pH は中性で，Cl を 1,600-1,700mg/l 程度含んでおり，これは深部熱水の含有量（1,500-1,600mg/l）より若干高い値である。なお，坑井の噴出熱水の Cl 濃度は，2,100-2,200mg/l である。この深部熱水の地表到達地点である Geyser Valley は，本地熱地域を北東 - 南西方向に走る Kaiapo 断層沿いに位置し，本断層は坑井掘削地域も横断している（Fig.2-1-2）。Geyser Valley の熱水は，この Kaiapo 断層に沿って上昇してきたものと考えられる。一方，坑井掘削地域の南約 3km の Karapiti では，1950 年には小さい範囲に噴気地や地獄，そして Karapiti Blowhole と呼ばれる大きな噴気孔が一つあった。放熱量は Browhole の 12MW を含み，全体で 40MW 程度であった。

この地域の地質は下位より，Wairakei 溶結凝灰岩類，Waiora 層，Huka Falls 層，Wairakei 角礫岩類，そして最近の軽石層が最上位に載っている（Fig.2-1-3）。このうち基本的な貯留層は厚い軽石角礫岩と間に挟まれている湖成堆積物から成る Waiora 層内に発達している。なお，この上位の Huka Falls 層には透水性の低い湖成堆積物も含まれている。

深部から断層に沿って上昇してきた熱水は，透水性の良い Waiora 層で水平方向に広がり，200℃の広がりが直径約 4km にも達するマッシュルーム型の貯留層を形成している（Fig.2-1-4；Elder, 1981）。上位に載る Huka Falls 層はこれより浅い地下水と深部の貯留層を隔てている。

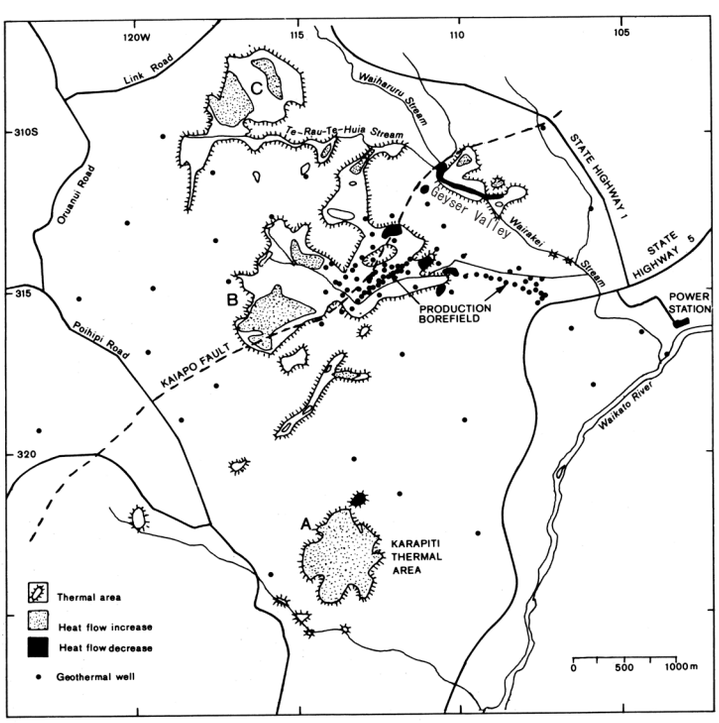


Fig.2-1-2　Wairakei の地熱徴候と坑井位置，及び地熱徴候の変化 (Allis,1981)。黒塗り部は放熱量が減少，打点部は放熱量が増加した範囲を示している。

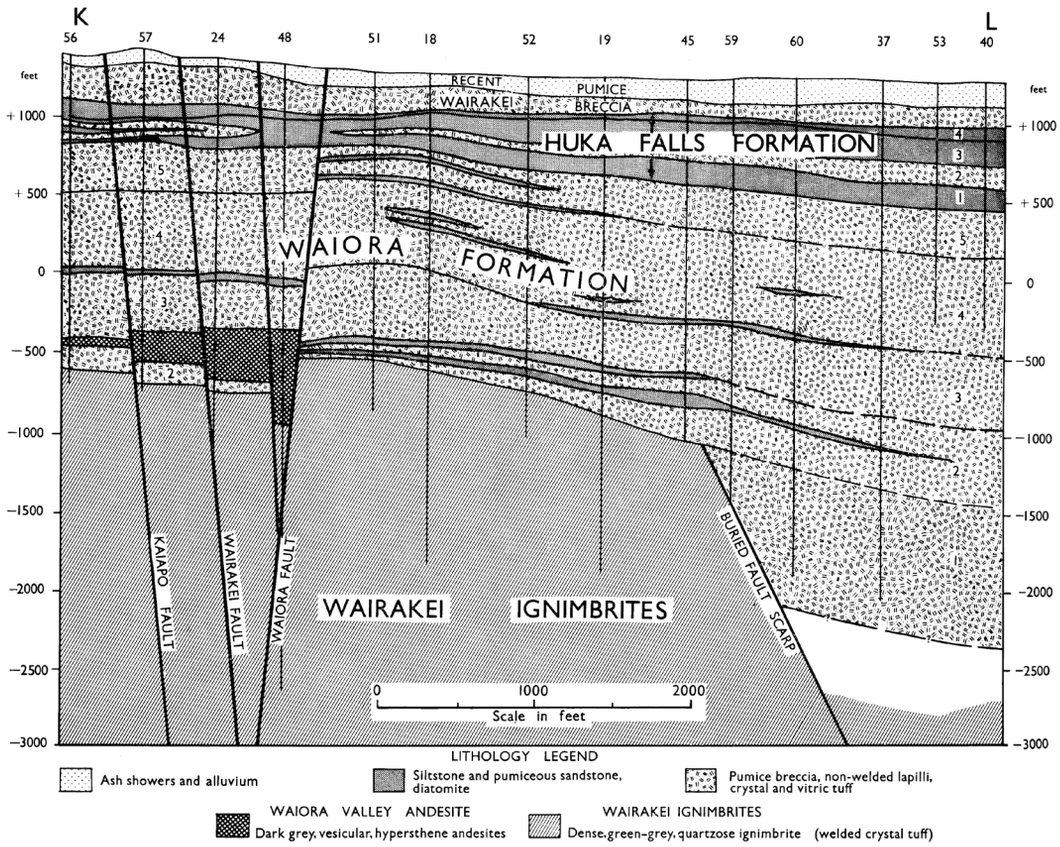


Fig.2-1-3　Wairakei の地質断面（Grindley, 1965）

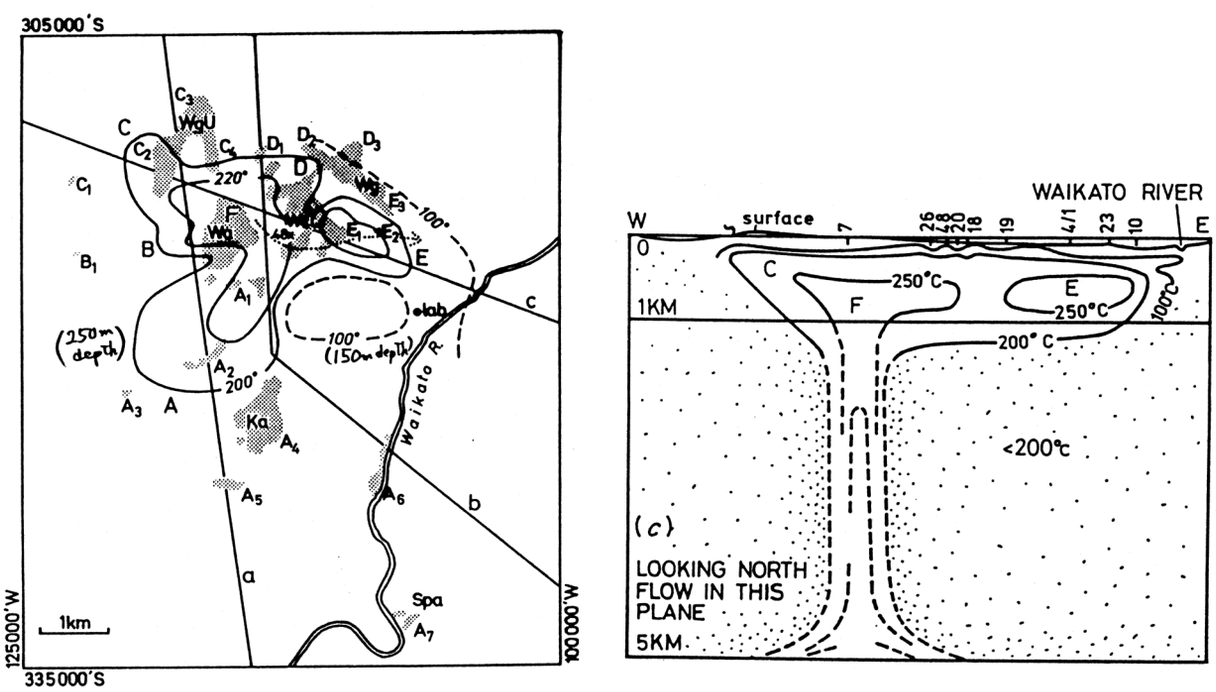


Fig.2-1-4　Wairakei の地下温度プロファイル（Elder, 1981）。左：200℃，220℃のコンターは標高 150 m（深度約 250 m），右：Wairakei を東西に切る断面上の温度分布。

2-(1)-3)　高起伏地形型地熱系

安山岩質火山活動が卓越する地域の地熱系（Fig.2-1-5；Henley, 1984)）では，有望な地熱開発地点は，火山体の中腹に位置する。このような地熱系の火山体中央部ではしばしば高温噴気活動を伴う場合があり，噴気温度が500℃を超える場合もある。このような高温の噴気は酸性の火山ガス（SO_2, HCl, HF など）を含んでいるので，その周辺ではこれらが地下水に溶け，強酸性の Cl-SO_4 型の温泉が形成される。箱根温泉ではよりマグマに近い臨界点を超える系では，酸性ガスに NaCl を伴う例もあるとされているが（大木・平野，1970)，箱根温泉の一部のものはこの Cl-SO_4 型のものと考えられ，いわゆる蒸気加熱水ではない。一方，地熱発電に利用される中性の NaCl 型の熱水は深部熱水と呼ばれ，深部熱水はこのような火山体中心部の直下には存在せず，中心部から数 km 離れた地下に分布している。深部熱水の流動は，通常断層に沿っている場合が多く，そのため貯留層は低起伏地形型地熱系のようなマッシュルーム型を示さず，鉱脈型を呈し，断裂型貯留層とも呼ばれている。なお，「断裂」は「断層」より広い概念を含む。「断層」は地層間に相対的な変位がある場合を指し，「断裂」は地層間に変位がなく裂罅（れっか）が存在する場合も含んでいる。

高起伏地形型地熱系の場合，地形が起伏に富むため，地下水位は一般的に深い。このため，断層に沿って上昇してきた深部熱水は，上昇中心部付近では地表に到達することができない場合が多い。従って，このタイプの地熱系では，ニュージーランドの地熱帯でよく見られる中性の熱水プールやシンターなどが認められないのが一般的である。上昇してきた深部熱水は地下浅所で側方流動を開始する。そのような場の地表部では，沸騰により分離された水蒸気，CO_2，H_2S により噴気帯が形成される。このような噴気帯では，周辺の酸素に富む地下水と噴気中のガス成分（H_2S）との反応によって，酸性の SO_4 型の温泉（蒸気加熱水）が形成される。このような場はしばしば地獄と呼ばれている。活発な地熱徴候地に中性の熱水プールやシンターが認められず，地獄（あるいは噴気地や噴気孔）が発達し，酸性の SO_4 型の温泉が存在するのが高起伏地形型の地熱系の特徴である。

日本の地熱帯は活火山ないしは第四紀の火山の近くに分布している。日本の火山は安山岩質火山活動が特徴的で，しばしば奇麗な成層火山を呈している。そのため，ニュージーランドなどの地熱地域と比べると，地形は起伏に富み，地熱帯は火山体の斜面上に位置しており，坑井内の静水位は地表に達していない（Fig.2-1-6)。

Fig.2-1-7 は八丁原地熱帯と柳津西山地熱帯の地下温度分布を示している。これらは掘削により得られる鉱物中の流体包有物の均質化温度や掘削後の坑井の検層温度から推定される。両地熱系とも，地下の等温線はそれぞれ断層に沿って高温部が伸びていることが分かる。すなわち，八丁原地熱帯の海抜 0 m付近では小松池副断層に

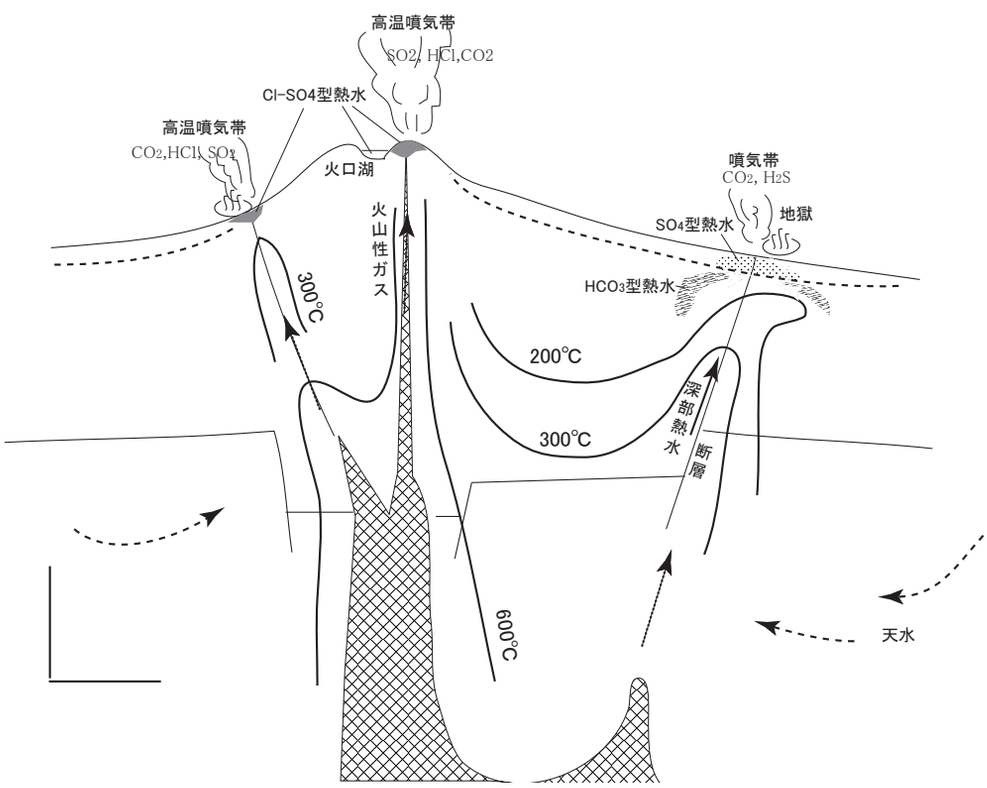


Fig.2-1-5　高起伏地形地域に発達する地熱系のモデル。Henley（1984）及び Hedenquist et al.(1996) を基に作成。

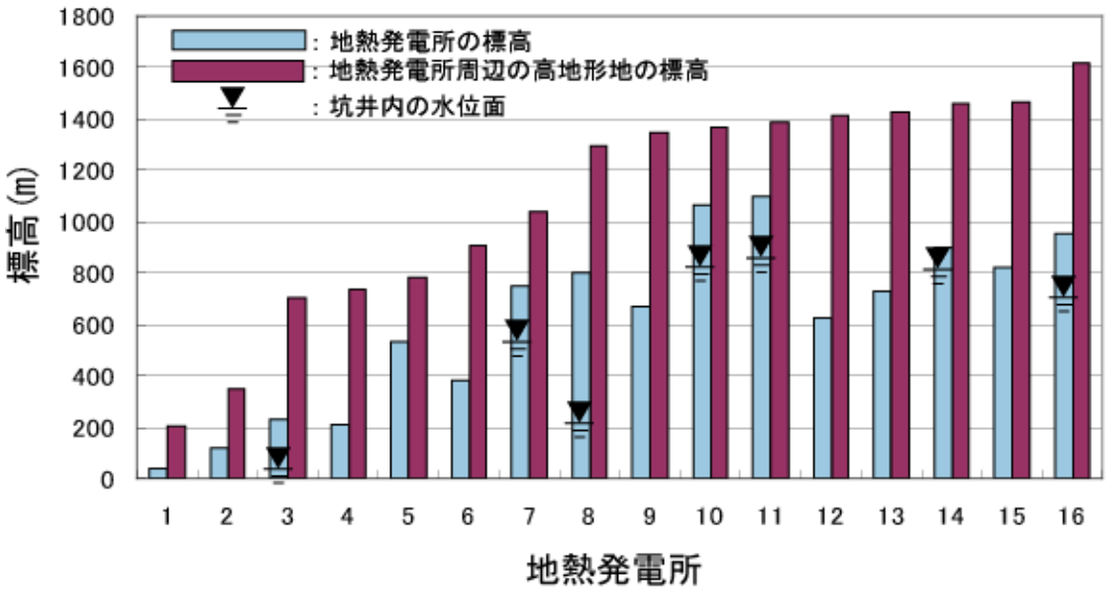


Fig.2-1-6　地熱発電所，周辺の高地形地及び坑井内水位の標高 (m)
１：山川，２：森，３：八丈島，４：杉乃井，５：鬼首，６：柳津西山，７：滝上，８：大霧，９：上の岱，１０：澄川，１１：八丁原，１２：霧島国際，１３：葛根田，１４：大岳，１５：松川，１６：大沼の各地熱発電所。
発電所の標高は日本地熱調査会（2000）による。周辺の高標高地は地形図より推定。水位面は坂井ほか（1986），Hayashida & Ejima(1970),, 林（1972），Furuya et al.,(2000), Matsuyama et al.,(2000), 児玉・中島（1988）による。

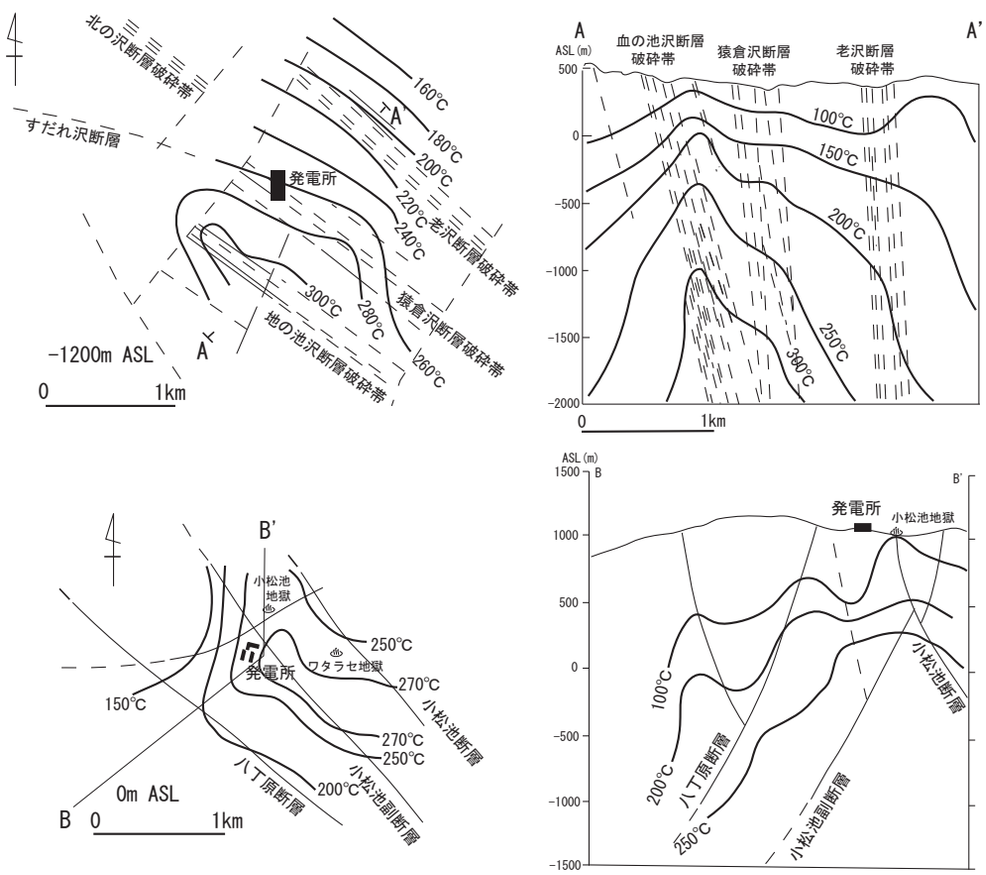


Fig.2-1-7　大岳 - 八丁原（左）及び柳津西山（右）地熱帯の地下温度分布と断層の関係
大岳－八丁原地熱帯は馬場ほか（1991），また柳津西山は Seki(1991) を簡略化し一部加筆。縮尺は同一サイズ。

沿って 270℃の等温線が南東から伸び，その幅は数百m，長さは 1 km ほどに達している。すなわち，断層に沿って深部熱水が分布していることが明らかである。東北の柳津西山地熱帯でも断裂規制は明らかで，ここでは海水準以下 1200 mで，血の池沢断層破砕帯に沿って 300℃以上の等温線が伸びている。そして断面図から明らかなように，熱水は断裂に沿って地表に向かって移動している温度分布が得られている。このような断裂に沿った断裂型貯留層の分布は，日本のほとんどの地熱帯において確認されており，ニュージーランドの低起伏地形型地熱系において認められるような地下浅部におけるマッシュルーム型の貯留層構造は発達しない。

2-(1)-4)　地熱開発による地熱徴候の変化

地熱発電が温泉に影響した事例は，野田 (2009) によりまとめられている（Table 2-1-1)。また , 同表には日本の地熱開発の状況も比較のため示されている。ここでは，日本での開発によるはっきりした影響は認められていないので，以下に今までに報告されたニュージーランドとフィリピンの事例について述べる。

2-(1)-4)-a 低起伏地形型地熱系の地熱徴候の変化

低起伏地形型地熱系における地熱開発では，地熱徴候に大きな影響が現れやすい（例えば Allis, 1980, 2000, 2001; Allis et al., 2009；Glover, 1977 など)。Fig.2-1-2 には，開発後に地熱活動が低下した地域（Geyser Valley など）と，上昇した地域が示されている。活動が上昇した地域が周辺にかなり広い範囲にわたって分布していることが分かる。

放熱量の低下は，主に深部熱水の地表到達部であった Geyser Valley で, 1953 年より間欠泉や温泉活動の低下・停止として確認された（Allis, 1981)。放熱量は 52MW（1953 年）から 6MW（1966 年）に減少した。温泉の流量低下と Cl 濃度の低下は Geyser Valley 内でもより地形的に高い場所や周辺にある温泉から始まり，Cl 濃度は初期の 1700mg/l から 400-20mg/l 程度まで低下した（Glover, 1977)。 1968 年には 2 カ所の温泉が残り，化学組成は SO_4 型の蒸気加熱水の様相を呈するものもあった。同様な深部熱水の地表到達部における顕著な熱水活動の低下は，Ohaaki-Broadlands 地熱帯の Ohaaki Pool においても認められている（Glover et al., 2000)。地熱活動の低下に呼応し，Wairakei の貯留層の熱水組成にも影響が認められた。Geyser Valley に近い Well 21, Well 8A の噴出熱水の Cl 濃度は, それぞれ 2,038mg/l（1953 年）から 879mg/l（1968 年）, 1,589mg/l（1959 年）から 1092mg/l（1960 年）へと低下した。これは，この付近を通る断層を通じ地下浅所の地下水の流入が起きたためと考えられている。

一方，放熱量の増加は，深部熱水の地表到達部の中心部より離れた地域で起きていることが分かる (Fig.2-1-2)。その代表的な場所は Karapiti で，そこでは噴気活動が活発になった。 1954 年にまず熱い地温の地域（噴気地）の広がりが確認され，1958 年までには既存噴気活動はより強くなり，水蒸気爆発が起こり多くの爆裂クレーターができた。これらの活動のため，1950 年には，この地域で 40MW 程度あった放熱量が最大 420MW（1964 年頃）まで増大し，その後 ,220MW（1978 年）まで低下した。

Table 2-1-1　地熱発電が温泉に影響した事例と日本の開発状況の比較。 野田 (2009) より熱水卓越型地熱系のみを抜粋及び一部加筆。

地熱発電が既存温泉に影響した事例			日本の状況（≧10MW）
国　名	New Zealand	Philippines	日本
地 域 名	Wairakei	Tiwi	森, 松川, 葛根田, 大沼, 鬼首, 大岳, 八丁原
運 転 開 始	1950	1970	1966－1982
発 電 規 模	152.2MW(1990)	330MW(1990)	10-110MW
開 発 エリア	15km^2	10km^2	数km^2
坑 井 本 数	154(～1990)	90(1983)	6～32(1992)
地 下 還 元	還元せず	還元せず	還元
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	はっきりした影響 認められず
その他の影響	陥没広範囲	特になし	特になし
学会誌への影響記事	あり	あり	なし
地熱系のタイプ	低起伏地形型	高起伏地形型	高起伏地形型

一方，Geyser Valley の南東約 1km の東部掘削地域の北東部に当たる Wairakei Stream 沿いでは，顕著な陥没が起きた。その陥没量は，開発以来 50 年間で計 15 mに達する。陥没中心部の陥没速度は 1970 年代で最大 450mm/ 年であったが，2000-2007 年には 80-90mm/ 年まで下がってきている（Allis et al., 2009）。このような陥没は，開発による地下浅所の蒸気ゾーンの圧力減少に伴う，湖成堆積物である Huka Falls 層の部分的な高圧密性によると考えられている。最も圧密を受けている深度は Wairakei では 150-200m の深さで，地下での強い熱水変質作用による粘土化が，高圧密性に関連していると考えられている。

このように中心部での放熱量の減少（シンターや間欠泉活動の低下，陥没などによる減少），周辺部での放熱量の増大（地下水位低下による沸騰温度の上昇による噴気活動の増加）などのメカニズムは，開発による地下浅所の圧力減少による一連のものとして捕らえることができる（Grant et al., 1982）。 また，このような顕著な地熱徴候の変化は，低起伏地形地域の地質，水理学的要素が大きな要素と考えられるが，Wairakei では蒸気分離後の熱水の還元が行われていないことも関係していると思われる。

2-(1)-4)-b 高起伏地形型地熱系の地熱徴候の変化

日本においては，地熱開発に伴う顕著な地熱徴候の変化は報告されていないので，フィリピンの例を示す。Tiwi 地熱帯はルソン島のビコール半島の第四紀の安山岩質の Malinao 火山，（0.5-0.06Ma，標高 1548 m）の北西斜面上に位置している（Fig.2-1-8，Gambill and Beraquit, 1993）。

Tiwi の深部熱水は Malinao 山側から，Tiwi, Kagumihan, Nagaagbong の各断層に沿って北東方向に向かって上昇流動していると考えられている（Sugiaman et al., 2004）。そして北東部の低地でこれらの断層が交差する付近には多くの温泉や地獄，シンターが分布していた。なかでも Naglagbong Park（標高 50 m前後）の Aqua Pool の温泉水は NaCl タイプで，Cl 濃度が 4100mg/l ほどあり，地化学温度計は地熱貯留層の温度（277℃）を示していた。

ここでは地熱井の掘削は 1971 年から本格的に行われ，断層に沿う地熱流体上昇域側に多くの坑井が掘削された。1975 年頃から温泉の枯渇，水蒸気爆発などが起きるようになった。 これは，熱水の上昇している側で地下から大量の深部熱水を採ったことで，貯留層圧が低下して水位面が下がり，深部熱水が地表に到達できなくなって，更に湧出口付近の熱水の通路の崩落や閉塞が起き，より深部に下がった沸騰面からの蒸気やガスがたまり水蒸気爆発を引き起こしたと考えられる。また，この付近を通る Tiwi 断層や Naglagbong 断層を通して浅所の冷たい地下水が貯留層へ流入・混合し，Naglagbon 公園の温泉・噴気の枯渇が進行した（Gambill and Beraquit, 1993）。

2-(1)-5) 地熱系の特性と日本における開発の地熱徴候への影響予測

日本では今まで地熱開発による地熱徴候の顕著な変化は報告されていない。これは，上述したように，安山岩地域の地熱開発では，深部熱水が地表に達していない場合がほとんどであることに，大きく起因していると考えられる。深部熱水の上昇中心部の噴気帯近くでは，開発に伴い地下水位の低下があっても，そこから深部熱水の沸騰が継続しているかぎり，地下浅所での蒸気加熱水の温泉（SO_4 型）の生成は継続されるためと考えられる。もちろん，この蒸気加熱型の温泉は地下浅所にあり，降水や流入地下水による変化は避けられないが，地獄が消滅してしまったというような報告はなされていない。

日本の高起伏地形型地熱系には，シンター形成を伴うような深部熱水の湧出はほとんど認められない。フィリピンの例は，安山岩質火山活動に伴う地熱系であるが，深部熱水は海岸近くの平坦な地域に湧出する場合であり，高起伏地形型地熱系であっても水理系が低起伏地形型地熱系のそれに似る様な場合には，深部熱水が湧出する地熱徴候に影響が起きることを示している。しかしながら，貯留層は断層に支配されている場合が多いので，変化が起きても，ある特定の方向性をもった限られた範囲内であると考えられ，低起伏地形型地熱系で認められるように広範囲には起きないと考えられる。更に , 安山岩地域の地熱系では，安山岩溶岩を主体とした地層から成るので，流紋岩地域の地熱系に認められるような顕著な陥没はほとんど起こらないと思われる。

2-(1)-6) 上記以外の特性による開発の地熱徴候への影響予測

日本の地熱開発に伴って地熱徴候への顕著な影響が認められないことは，本章で述べた地質的・地形的特徴の他に，Table 2-1-1 にあるように日本の地熱系の開発のサイズが小さいこと，さらに熱水の還元が行われていることなどが，開発による影響をさらに起きにくいものにしているものと考えられる。

すなわち, 開発に伴う地熱徴候への影響を考える場合，本章で述べたように，地熱系に関する科学的理解がその根底にあることが重要であるとともに，同時に地熱系と開発との関連に関する科学的および技術的な考察が必要である。そのためには，地熱系の深部と浅部の水理学的連結に関する考察や地熱発電における地熱流体の生産還元に伴う新たな流体流動の発生とそれに関する科学的技術的対応等の考察を欠かすことができない。この生産還元に関する問題は，次節で詳細に検討するとともに，地

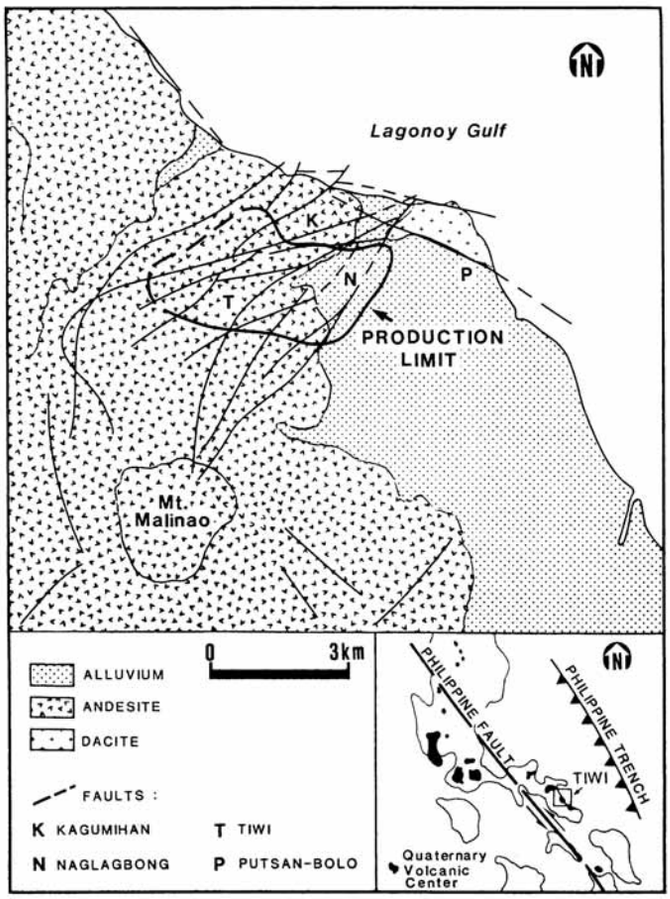


Fig.2-1-8　Tiwi 地熱帯の位置と地質　（Gambill and Beraquit, 1993）

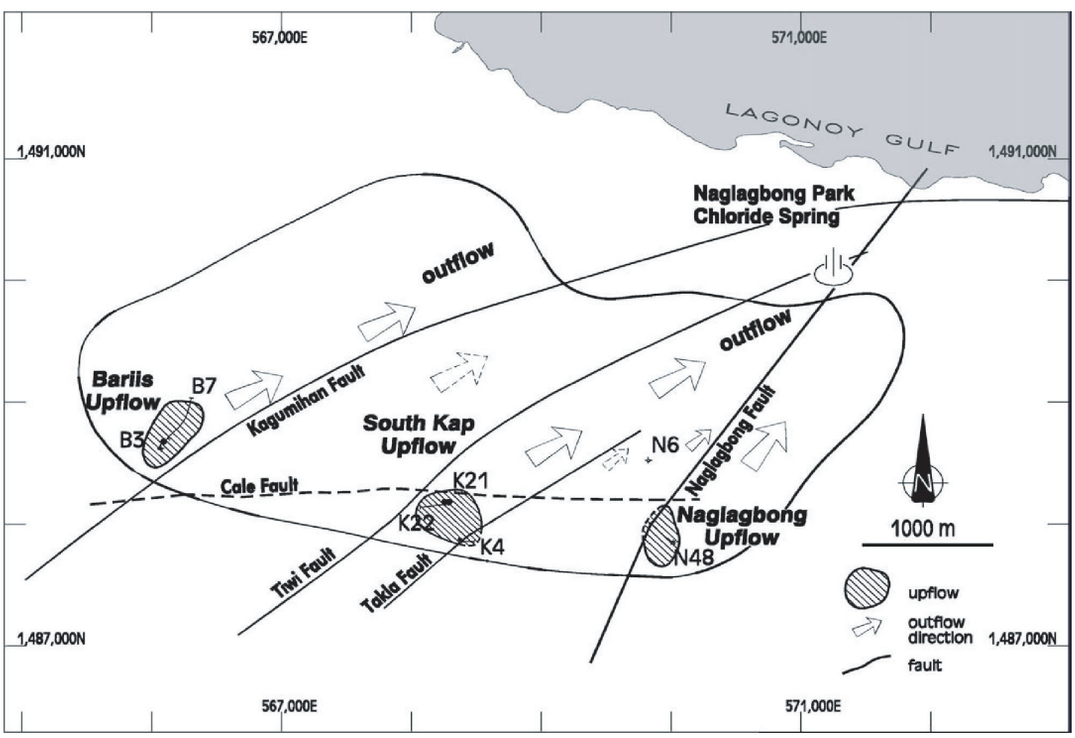


Fig.2-1-9　Tiwi 地熱帯の地熱流体流動と断層，温泉の位置関係（Sugiaman et al., 2004）

熱系の浅部と深部の水理学的連結に関しては，4 章において，地熱と温泉の関係のとらえ方という観点から総括的に議論されるので参照されたい。

（田口幸洋）

2-(2)　温泉に影響しない地熱発電のあり方

本節では，これまでに（財）新エネルギー財団（NEF）が実施した地熱発電所環境保全技術調査 (NEF, 1989-1993, NEF, 1994-1999) の成果として構築された温泉影響予測手法マニュアルを新たに整理し，温泉への影響を予測するための手法の概要を紹介するとともに，温泉に影響しない地熱発電のあり方について考察する。

本節の構成は，まず 2-(2)-1) 項で，温泉への影響の有無を判断するために必要となる事前モニタリング，次に 2-(2)-2) 項と 2-(2)-3) 項でそれぞれ温泉への影響の有無を予測するためのモデリング手法と予測手法について述べ，続いて 2-(2)-4) 項で温泉影響の有無を判定するための事後モニタリングと影響判定について述べる。そして，2-(2)-5) 項で温泉に影響が予想される場合の対策について整理し，最後に 2-(2)-6) 項で適切な貯留層管理に基づく温泉に影響を与えない開発について考察する。以上，2-(2)-1) 項から 2-(2)-4) 項は，温泉影響予測手法マニュアルを新たに整理し，2-(2)-5) 項と 2-(2)-6) 項は，本節のために新たに書き加えたものである。

2-(2)-1)　事前モニタリング

2-(2)-1)-a モニタリングの目的と影響の定義

モニタリングの目的は，温泉や地下水の変動を把握することによって，その異常をいち早く検知することである。そして，それが何の影響によるものかを抽出し，温泉・地下水系の保全に役立てることである。モニタリングは温泉・地下水系の季節的な自然変動を理解することから始まり，得られたデータをバックグラウンド値として位置付ける。このバックグラウンド値を得るために実施するのが「事前モニタリング」である。そして，地熱開発後のモニタリングデータと比較することにより地熱開発の影響が現れているかどうかを判別することができる。

温泉に対する影響については，「影響を及ぼす」の意味についての問い合わせに対し，当時の厚生省（1951; 温泉必携 , 2004）が次のように回答している。

①影響により使用に耐えなくなった場合：該当する
②影響があってもどうにか使用に耐える場合
　：概ね該当する
③影響があってもさして困難を感じない場合
　：概ね該当しない
④影響が極微量である場合：該当しない

以上は利用面から見た，影響判断の尺度を示したものであり感覚的に納得できる区分である。しかし，だれもが納得する判断指標とするには定量性の導入が必要である。

温泉への影響について，ここでは「温泉に対して，その自然変動を逸脱するような変化（降水量変化等の影響を考慮しても，説明できないような変化）をもたらすこと」を「影響」と定義する。従って，温泉への影響を判断するためには，温泉の自然変動（季節変動や降水量による変動，泉源固有の変動等）を把握しておくことが前提となる。このため，できるだけ長期の温泉変動データが必要である。温泉の自然変動を把握しておくことは，温泉保全対策にも有用である。

2-(2)-1)-b モニタリング項目の選定と実施計画の策定

モニタリング項目を選定する場合，地下の変化を反映したデータが適切に得られる環境にあるかどうか，また長期観測を行う上で支障がないか等を考慮した上で，実施可能な項目を選定する。項目を列記すると，概略以下のとおりである。

a. 気象（気温，降水量等）
b. 河川水位
c. 坑井内水位
d. 湧水量，温泉湧出量，揚湯量
e. 湧出温度
f. 噴気量
g. 噴気温度
h. 湧水，温泉水の化学成分
　・陽イオン成分：Na,K,Ca,Mg（主要 1 ～ 2 成分）
　・陰イオン成分：Cl,SO_4,HCO_3（主要 1 ～ 2 成分）
　・As（砒素）
　・TDS（全蒸発残留物）
　・EC（導電率）
　・その他
i. 温泉の運用状況（ポンプやコンプレッサーの起動記録など）
j. その他（周辺泉源の運用状況や井戸のスケール浚い等の改修工事状況等）

温泉は降水等の気象条件や周辺河川の水位変化等によっても変動するため，気象（降水量，気温），河川水位，周辺での土木工事や地震等についても同時に観測することが必要である。地熱開発の影響が周辺温泉に及ぶ場合，水位の変化が時間的に最も早く現れることが予想されることから，水位変化を連続して計測することが影響を調査する上で有効と考えられる。バックグラウンド値として事前モニタリングのデータが 1 年以上取得できれば，温泉・地下水系の季節変動が把握できる。更には降水量の変動記録等と照合することで，季節変動がどのような

メカニズムで生じているかをある程度推定できる。

2-(2)-2)　モデリング

2-(2)-2)-a 地熱構造モデル

ここでいう地熱構造モデルは，温泉と地熱貯留層の関係を地質及び地熱構造の観点から理解できるように表現したものである。地熱貯留層を主眼とした地熱構造モデルの作成手法については,既に多くの専門書や論文等(例えば,水垣 , 1996;玉生 , 1995a, 1995b;由佐 , 1995 など)で紹介されているので，ここでは地熱貯留層と温泉の関係に焦点を置いたモデルの作成手法について述べる。

地熱構造モデルは以下の内容を説明できるように作成する。

① 地質構造（地熱貯留構造）
- 基盤構造
- 断層分布
- 地層・岩相特性
- 高透水性層分布

② 地熱構造（熱構造，水理）
- 熱源
- 地熱流体・温泉水の生成機構と特性
- 地熱貯留層と温泉帯水層の分布
- 帽岩（キャップロック，難透水性層）の分布
- 地下温度分布
- 流体の起源と流体循環

地熱構造には，熱構造，水理，熱源，地熱流体・温泉水の生成機構と特性・分布，温度や流体の起源と流体循環などが含まれる。地熱構造のうち熱源は地熱系を形成する要素であり，地熱貯留層，温泉帯水層のそれぞれについて熱源が明らかにできれば，両者の関係を把握するのに重要な役割を果たすものと思われる。

帽岩（キャップロック，難透水性層）の分布は，地熱構造モデルにおいて地熱貯留層と温泉帯水層の関係を理解するために重要である。キャップロックは，温泉影響予測においては，地熱貯留層と温泉帯水層を分離する役目を果たす層として評価される。地熱系におけるキャップロックは，一般には緻密な地層や熱水変質帯がその役割を果たしており，キャップロックとなっている変質帯や地層は通常 100 ～数 100 m程度の厚さを持つと考えられている。キャップロックが存在しても，それを分断するように断層に沿う高透水性層が存在する場合もあるので注意が必要である。

2-(2)-2)-b 地熱流体流動モデルの構築

温泉水が生成されるには，水（溶存成分を含む）と熱が必要であるが，それらの起源には様々なものがあり，詳しい報告もなされている（例えば，茂野，1992; 鶴見 ,1981 など)。

開発される地熱貯留層の流体（熱水，蒸気）が，水や熱の供給源となっている温泉では，地熱開発による温泉への影響を検討する必要がある。地熱開発の対象となっている地熱貯留層の流体が温泉に混入しているか否かを明らかにすることにより，地熱開発の温泉への影響の有無やその現われ方を予測することができる。予想される影響を Table 2-2-1 にまとめた。

伝導熱により加熱され生成している温泉の場合，一般的に地熱開発で熱水や蒸気を採取しても，熱源から供給される熱量には変化がないことから，開発による影響はないと判断される。ただし，伝導加熱型であっても，地熱開発地域内の還元エリア近傍に難透水性層を介して貯留されている温泉帯水層から揚湯されている場合には，長期的な還元により泉温が変化する可能性がある。

温泉は生成機構に応じて化学的特徴や同位体的特徴が異なることから，これらの特徴を明らかにし，Fig.2-2-1 に示す地化学解析を実施することにより，開発される地熱貯留層との関係を推定する。地化学解析手法に

Table 2-2-1 地熱開発が温泉に影響した場合に予想される温泉の変化

開発対象の地熱貯留層と周辺温泉との関係	温泉に供給されるもの	予想される変化
地熱貯留層の熱水が温泉に混入している場合	熱，化学成分，水	泉温の変化，化学組成の変化，水位低下・湧出量の減少
地熱貯留層の蒸気が温泉に混入している場合	熱，化学成分，蒸気	泉温の変化，化学組成の変化，（蒸気混入量の変化が大きい場合は水位低下・湧出量の減少）
地熱貯留層の伝導熱により温泉が加熱されている場合	熱	検知できるほどの泉温の変化はない
地熱貯留層と温泉の間につながりがない場合	なし	変化なし

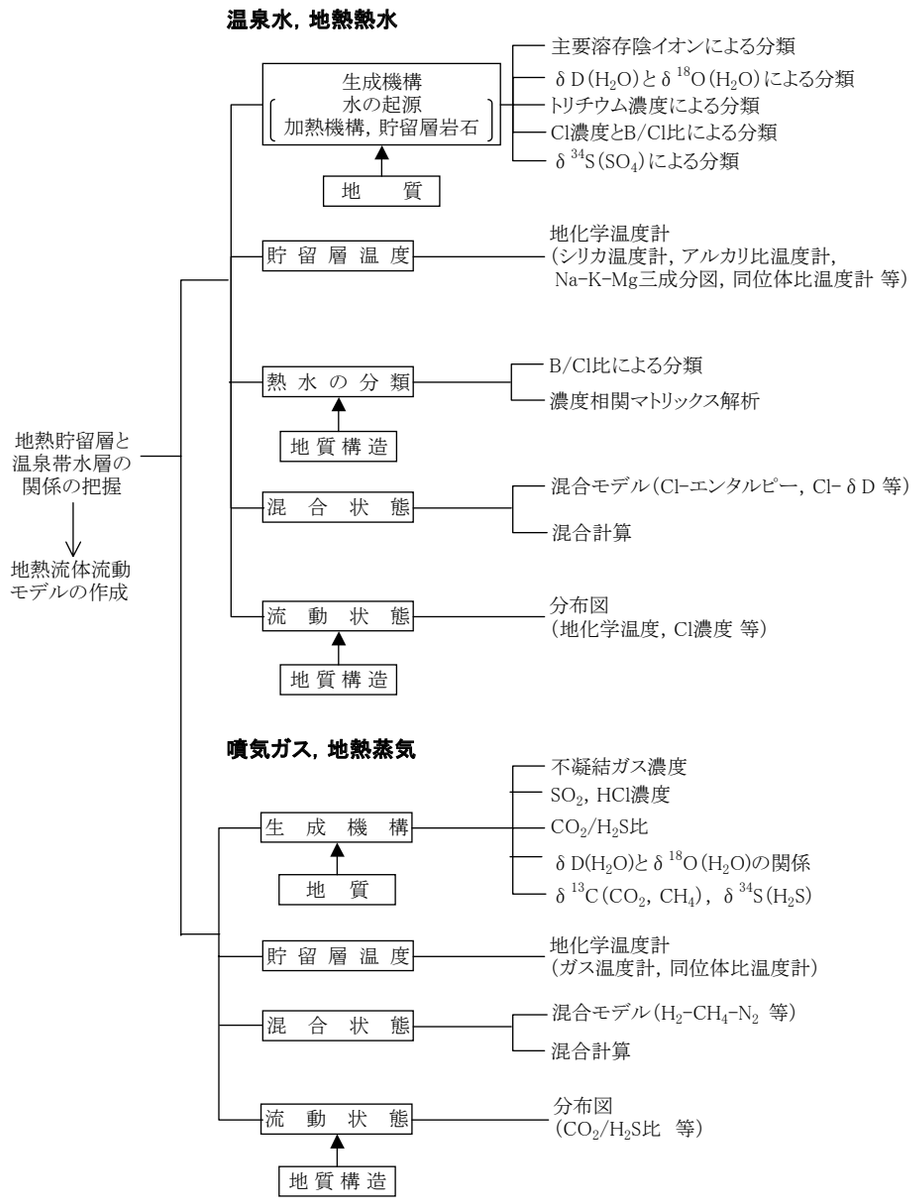


Fig.2-2-1　地化学解析手法の一覧

ついても多くの専門書や論文が出されており，例えばFournier(1991)，Giggenbach(1988)，野田(2003)や野田・島田(1989)などがある。

また，この解析により明らかになった温泉や地熱貯留層の流体の化学的特徴とそれら相互の関係，及び地熱構造モデルを考慮して，地化学情報を基に温泉帯水層と地熱貯留層との関係が理解しやすいような地熱流体流動モデル図を作成する。地熱流体流動モデルでは，収集したデータに基づき，温泉および地熱流体それぞれについて，①生成機構，②貯留層温度，③熱水系の分類，④混合状態，⑤流動状態を明らかにし，温泉水の起源となった流体と地熱貯留層流体の関係について検討する。

2-(2)-2)-c 数値モデルの構築

数値シミュレーションによる定量的な影響予測を行う目的で，地熱構造モデル及び地熱流体流動モデルを反映した数値モデルを構築する。数値モデルには，地下の特性を定量化するための坑井データが必要不可欠である。なお，日本の地熱調査における坑井データについては，例えば須田・矢野(1991)や矢野ほか(1989)によって整理されている。

温泉・地下水系を対象に数値モデル化を行う場合，基本的には，地熱貯留層を評価するための貯留層シミュレーションと同じ要領（例えば，石戸,2002；NEDO,

1993 など）で温泉・地下水系を含めた数値モデルを構築すれば良い。温泉帯水層を含めて地熱流体の挙動が計算できる数値シミュレータには，NIGHTS (Pritchett, 1995a)，STAR (Pritchett, 1995b) や TOUGH2 (Pruess, 1983, 1987, 1988, 1991；Pruess et al., 1997) などがある。通常の貯留層シミュレーションと比較して留意点を挙げると以下のとおりである。

①地形・地表部分（大気を含む）のモデル化（不飽和層のモデル化）が必要。
②地熱貯留層と温泉や地下水の湧出地点などを含む広域的なモデルが必要。
③降水の地下浸透や河川のモデル化が必要。
④温泉・地下水の湧出機構に基づくモデル化が必要。

Fig.2-2-2 に数値モデルの範囲と平面分割の概念を示す。モデルの範囲は，地熱構造モデルや地熱流体流動モデルから推定された地熱系の範囲を考慮して，地熱開発エリアとその周辺に位置する温泉や地下水の湧出地点を含む広域エリアが対象となる。基本的には構造的に開発エリアとつながっている可能性があると判断される温泉や地下水の湧出地点はすべて包含しなければならない。

深度方向には基本的に地表部から基盤岩までを対象とし，地表の起伏をできるだけ忠実に再現する。自然水位よりも上部に位置するブロック，すなわち大気中に位置するブロックに対して，地下水の自由変動が計算で再現できる（不飽和層を取り扱うことができる）シミュレータを導入することが望ましい。

Fig.2-2-3 に温泉のタイプによる数値モデル化の概念を示す。温泉の生成機構に基づいて分類すると，① Cl 型温泉，② SO_4 型温泉，③ HCO_3 型温泉の 3 種類に大別できる。数値モデルにも，こうした温泉のタイプによる生成機構を反映させる。3 つのタイプの中間的な特徴を示す温泉を表現する場合には，それぞれの特徴に応じたモデル化が要求される。

数値モデル化は，地熱開発を開始する以前のきわめて安定した状態である自然状態を再現することから着手するが (Yang et al., 1991), 温泉の生成についても自然状態において再現しなければならない。

2-(2)-3)　温泉影響予測

2-(2)-3)-a 影響予測手法の構成

温泉影響予測手法は，基本的に以下の三つの手法により構成される。

①地熱構造モデルによる影響予測（地質学的手法）
②地熱流体流動モデルによる影響予測（地化学的手法）
③流体流動解析（シミュレーション）による影響予測（貯留層工学的手法）

Fig.2-2-4 に影響予測のフローを示す。影響予測の手順は，まず上記①地熱構造モデルと②地熱流体流動モデルによる影響予測を行い，その時点で各手法に基づく判定を行う。次に，影響が懸念される場合は，開発規模等を考慮した③流体流動解析（シミュレーション）による影響予測を行い，それらを総合的に判断して最終判定を

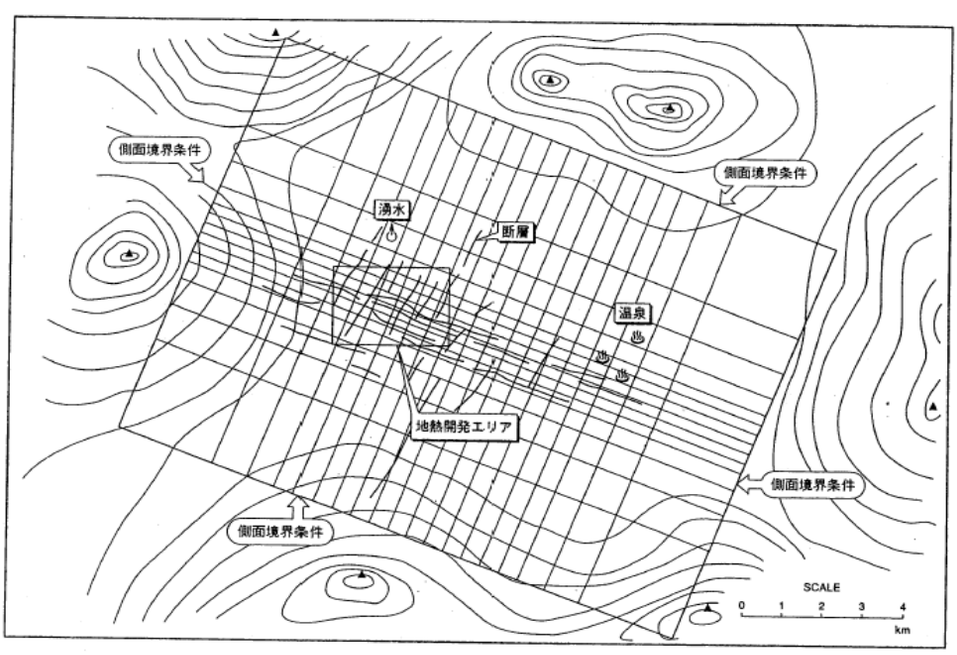


Fig.2-2-2　数値モデルの範囲と平面分割の概念

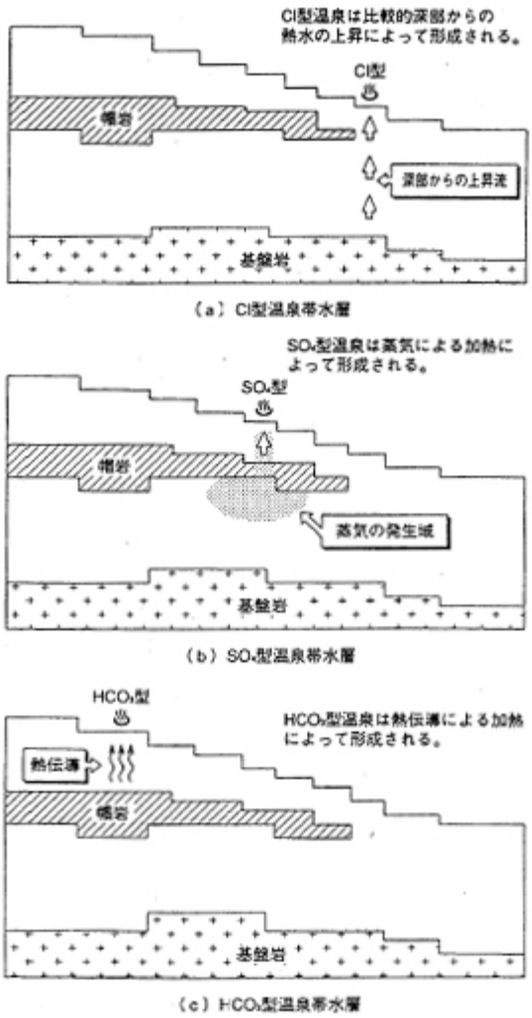


Fig.2-2-3　温泉のタイプによる数値モデル化の概念

下す。

地熱構造モデルでは，地熱貯留層と温泉・地下水系との間に構造的なつながりがあると判断された場合，影響の可能性があると予想する。地熱流体流動モデルでも流体の生成機構や流動の観点から，地熱貯留層と温泉帯水層のつながりが把握でき，地熱流体と温泉水が同一の起源と判断された場合，影響の可能性が高いと予想する。しかしながら，透水性の大きさや開発規模（生産・還元量の大きさ）の条件によっては，ほとんど影響が現れないケースも想定されることから，三つの手法による総合的な評価を行う。総合判定の基本的な方針は，地熱構造モデルと地熱流体流動モデルで共に影響がないと予測された場合には，流体流動解析を行わずに「影響なし」の判定を下し，それ以外については開発規模との関係を定量的に予測する必要があることから，流体流動解析（シミュレーション）までを行い，すべての影響予測結果を総合して判定を下す。予測結果の妥当性を判定するためには，各手法において用いられる個々の解析の妥当性評価がまず必要であり，それらを総合して影響予測結果全体の妥当性が判定できる。判定の手順は，まず地熱構造モデルと地熱流体流動モデルに基づく影響予測結果を，それぞれ以下のように３段階に分類して判定する。

判定Ａ：影響はない，あるいは影響のある可能性は極めて小さい。
判定Ｂ：影響のある可能性がある。または現状の調査では判断できない。
判定Ｃ：影響がある，あるいは影響のある可能性は極めて大きい。

地熱構造モデルと地熱流体流動モデルによる判定が共に判定Ａであれば，総合判定は以下に示すように，「ランク１：影響がないと判断できる。」または「ランク２：影響はほとんどない，あるいは影響のある可能性は極めて小さい。」と判断する。判定が共にＡでなかった場合，すなわち，いずれか一方の判定がＢあるいはＣであった場合には，流体流動解析の結果を考慮して最終的に判断する。流体流動解析の結果についても同様に３段階で評価するが，総合的な判断は地熱構造モデルと地熱流体流動モデルによる判定結果も考慮して，以下の５段階に分類する。

ランク１：影響がないと判断できる。
ランク２：影響はほとんどない，あるいは影響する可能性は極めて小さい。
ランク３：影響する可能性がある。補足調査による再評価が必要。
ランク４：影響する可能性が大きい。補足調査による再評価が必要。
ランク５：影響すると判断できる，あるいはその可能性が極めて大きい。

2-(2)-3)-b 地熱構造モデルに基づく影響予測

地熱開発が周辺の地下水系や温泉に影響を及ぼす場合は，地熱開発の対象である深部の地熱貯留層が浅部の地下水系や温泉帯水層と水理的なつながりがある時である。水理的なつながりは地熱構造によって規制されることから，まず地熱構造モデルに基づく構造的な関係を判定する。この時，特に着目すべき要素は概略以下のとおりである。

①断層等の地質構造上のつながりがあるか？
②帽岩（キャップロック）によって隔絶されているか？
③隔離距離（水平距離）はどのくらいか？
④温度の違いはどのくらいか？

①，②は地熱構造モデル構築のために収集された情報

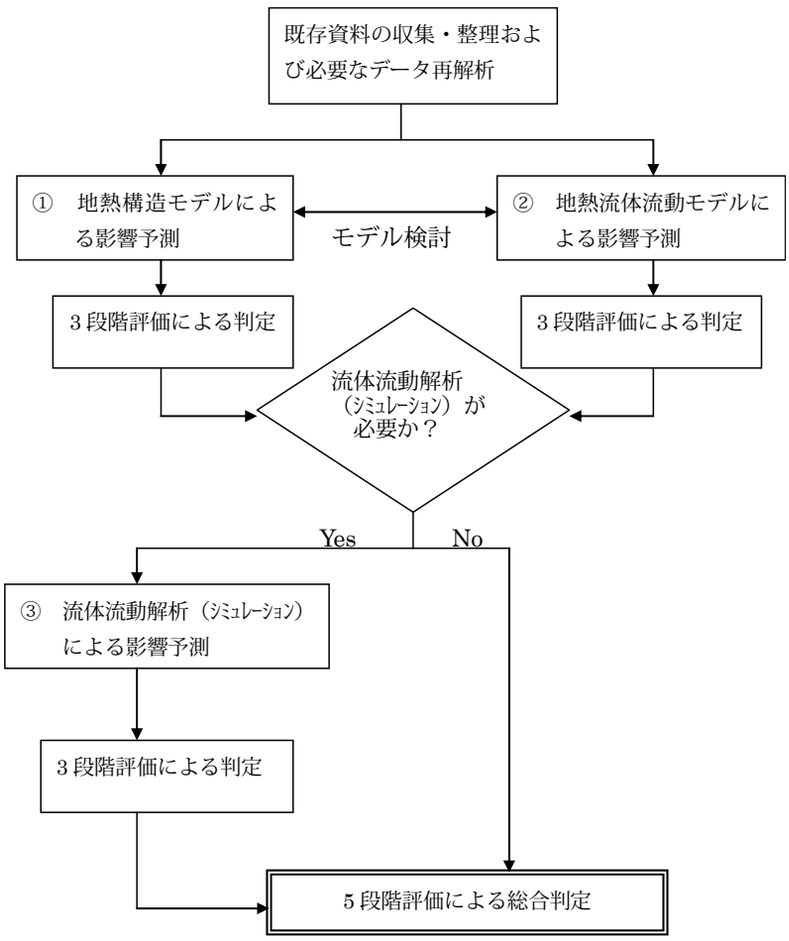


Fig.2-2-4　影響予測フロー

やデータに基づいて明らかにされるものであり，情報やデータの精度により，影響についての判断も影響を受けることになる。このような地質・地熱構造に関するデータが必ずしも十分に収集できるとは考えられないことから，③，④に示す経験的な距離や深度に関する指標も併せて影響評価に用いる。

2-(2)-3)-c 地熱流体流動モデルに基づく影響予測

地熱開発による影響の有無や程度は，地熱貯留層が温泉の生成機構（水の起源や加熱機構）にどの程度関与しているか，あるいは地熱開発により地熱貯留層周辺の流体の流動がどの程度変化するかによって異なる。地化学的な解析では，開発の規模やそれに応じた地熱流体の流動状態の変化を予測することはできないため，開発対象の地熱貯留層の流体（熱水，蒸気）が混入しているものすべてを，地熱開発の影響が現われる可能性のある温泉として抽出する。温泉の分類方法には，温泉の貯留構造による分類，主要な溶存化学成分による分類，生成機構による分類等，様々なものがある。一般的に使われている鉱泉分析法指針に基づいた分類では，温泉の効能を明らかにするため，主要な溶存化学成分によって温泉を分類している。しかし，地熱開発の温泉への影響を予測するためには，温泉と地熱貯留層とのかかわりに注目して温泉を分類する必要がある。

温泉の生成機構は，Fig.2-2-5 に示すように，水の起源や加熱機構に応じて，主に，①深部熱水混入型，②蒸気加熱型，③伝導加熱型，④高温（マグマ）蒸気加熱型，⑤海水混入型の 5 種に分類できる。一般的に，地熱開発は深部熱水もしくは深部熱水から分離した蒸気を採取するものであるから，温泉に対する地熱開発の影響の可能性について，温泉の生成機構の観点から整理することができる。各タイプの温泉の内，地熱開発による影響を受ける可能性のある温泉は，深部熱水を起源としている①深部熱水混入型や，熱水から分離した蒸気を起源として

いる②蒸気加熱型の温泉である。ただし，これらの温泉に混入している深部熱水や蒸気が開発対象の地熱貯留層とは異なるものである場合には影響はない。

一方，③伝導加熱型，④高温（マグマ）蒸気加熱型，⑤海水混入型の各温泉については，生成機構の面で地熱貯留層の深部熱水や深部熱水から分離した蒸気とは関係のない場合には，理論的には地熱開発の影響を受ける要素はないという考え方ができる。地熱流体流動モデルでは，深部から上昇してきた地熱流体により生成されている温泉を抽出し，温泉に混入している地熱流体の起源が開発対象となっている地熱貯留層の流体であるかどうかを，流体地化学的手法で解明，推定する。温泉帯水層への流体の流動が阻害されるような地熱開発が行われれば，影響する可能性が高いと判断される。

調査の最初のステップとして，Fig.2-2-6 に示すように，対象地域内の温泉の生成機構を温泉水の化学特性や同位体特性から把握し，温泉水に深部からの地熱流体が混入しているかどうか判断する。温泉の生成機構の把握に用いている調査技術は比較的平易なものであり，その調査結果の精度は原理的に見ても経験的に見ても非常に高いと考えられる。まずこの解析を行い深部熱水混入型及び蒸気加熱型の温泉を抽出する。他の型の温泉は，地熱開発の対象となる地熱貯留層とつながりがないため，地熱開発による影響はないと判断する。但し，伝導加熱型の温泉であっても，地熱開発地域内において，還元層として利用される貯留層と，難透水性層と接して貯留されている帯水層から揚湯されている場合には，長期的な還元により泉温の低下が生じる可能性があるが，それ以外では，深部熱水混入型あるいは蒸気加熱型に分類されなければ高い精度で影響はないと判断できる。

次のステップとして，深部から地熱流体が混入している温泉について，温泉に混入している地熱流体の起源が開発対象となっている地熱貯留層の流体であるかどうかの検討を行う。この検討においては不確定な要素も含まれることから，温泉帯水層と地熱貯留層とのつながりを評価するが，評価する項目は以下の 4 項目（蒸気加熱型の温泉の場合は②を除く 3 項目）とする。

①温泉水データから推定される地下温度と地熱貯留層温度の類似性
②温泉水，地熱熱水の化学成分比，同位体比等による熱水系の分類
③地熱流体の混合状態
④地熱流体の流動状態

これらの手法を深部熱水混入型の温泉に適用した場合，すべての項目について解析が実施され，総合的な判断の下に個々の要素が判断されれば，高い確率で妥当な影響予測が可能である。しかしながら，蒸気加熱型の温泉の場合には，すべての項目について解析が実施され，総合的な判断の下に個々の要素が判断されたとしても，現状のレベルでは流体地化学的技術の適用だけでは，高い確率で適切な影響予測を行うことは難しく，地熱構造モデルや後述する流体流動解析技術等を加えたより総合的な解析・判断が必要である。

2-(2)-3)-d 流体流動解析に基づく影響予測

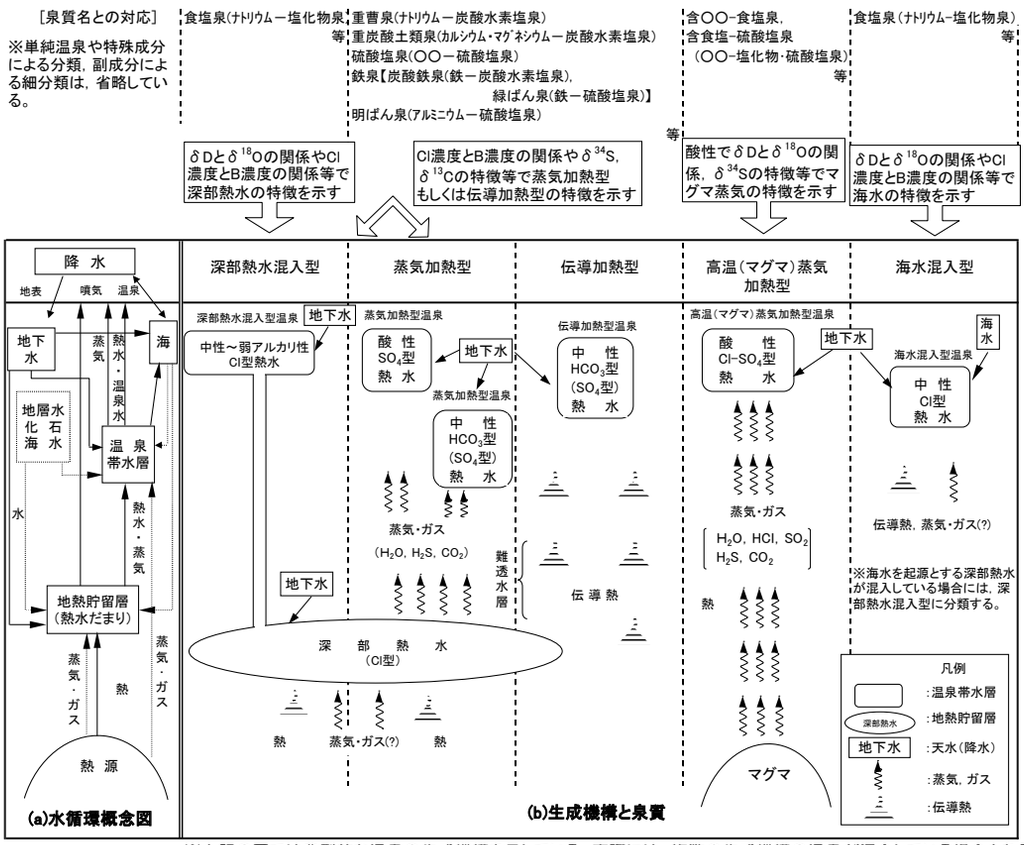
地熱構造モデルと地熱流体流動モデルが作成できれば，これらに基づいて数値モデルを作成し，流体流動解析（シミュレーション）を実施する。これにより，地熱開発の規模（生産・還元量）を想定して温泉帯水層への影響を定量的に予測することができる。影響の大きさは地熱開発の規模で異なるため，例えば，地熱構造モデルと地熱流体流動モデルによる評価から，地熱貯留層と温泉帯水層との間に水理的なつながりがあると判定されても，開発規模が小さい場合には，明瞭な影響は出ない可能性も考えられる。したがって，特に地熱構造モデルと地熱流体流動モデルによる評価だけでは確定が困難な場合，流体流動解析による定量的な影響予測が必要となる。流体流動解析による影響予測を行う上で，重要な点は以下のとおりである。

①地熱構造モデル及び地熱流体流動モデルに忠実に数値モデルを構築する。
②温泉帯水層と地熱貯留層の両方のデータと照合し，数値モデルの妥当性を評価する。
③数値モデルの不確定部分について感度解析（センシティビティ・スタデイ）を行い，影響予測結果の信頼性を評価する。

自然状態が再現できる数値モデルが得られると，次には開発の条件を入力して将来の予測計算を行うことで，地熱貯留層の変化及びその周辺の温泉・地下水系の変化の有無を予測することができる。例えば将来 30 年間の予測計算を行い，地表近くに設定されている地下水層や温泉帯水層のブロックに注目して，それぞれのブロックで開発前と開発後で圧力，温度，蒸気割合，自然湧出量，放熱量等に関して何らかの変化が現れているかどうかを確認し，影響の有無を判断する。

この場合，自然変動幅を判断基準とし，それを逸脱するような変化が計算で予測された場合に，影響があると判断する。感度解析（以下，センシティビティ・スタディ）は，数値モデルの不確定部分の入力値を変更した場合に，予測結果にどの程度の違いが現れるかを調査する重要な作業であり，これによって数値モデルの一義性と予測結果の有効性が確認できる。温泉影響予測のための数値モデルには，それが広域になるためデータを取得していない領域（データ空白域）が多くなりやすいという問題点

一般的に，溶存物質量が1,000mg/kg以上の温泉は，主成分により主に以下の泉質に分類されている。また，溶存成分が1,000mg/kg未満の温泉は単純温泉と呼ばれている。一方，本手法では，単純温泉も含めて主要陰イオンにより分類している。一般的な温泉の分類とは基準が異なるため1対1では対応していないが，概ね以下のように対応している。



※上記の図では典型的な温泉の生成機構を示している。実際には，複数の生成機構の温泉が混合している場合もある。

Fig.2-2-5　温泉の泉質と生成機構

がある。データ空白域に対しては，周辺のデータと比較照合して推定値を採用することになるが，その推定値にはある程度許容される幅が生まれる。

このため，許容される範囲で入力値を変更した場合に，予測結果が変わるかどうかを確認することが必要である。許容される範囲で入力値を変更しても予測結果が変わらないのであれば，その予測結果は極めて確度が高いと判断される。一方，極端なケースとしては入力値を変更することで予測結果が全く異なる場合が想定される。この場合には，変更した入力値が予測結果を左右することになるから，その入力値に該当するデータを取得して確定しなければ，有効な予測ができない。また，入力値の幅に程度の差はあっても，予測結果が同じ傾向である場合には，それらの予測結果は有効であり，その信頼性は高いと判断される。センシティビティ・スタディは流体流動解析における予測結果の最終的な判断に必要な作業であり，予測結果の信頼性を高めるためにも極めて重要である。Fig.2-2-7 に影響予測の判定例を示す。流体流動解析による影響予測結果を判定する場合，センシティビティ・スタディ結果のすべてを有効な予測結果であると考え，図に示すようにセンシティビティ・スタディ結果のうち最も影響が小さく予測されたケースと，最も影響が大きく予測されたケースの範囲内を有意な予測結果と判断する。

この場合，センシティビティ・スタディ結果が「すべてのケースで影響がない」または「程度の差はあるが，すべてのケースで影響がある」という内容であれば，影響の有無についての判断は容易であるが，一方では「影響がない」と予測される結果と「影響がある」と予測される結果が混在する場合が想定される。このような場合には，その時点においては「影響のある可能性がある」と判断し，予測結果の違いが数値モデルのどの領域のどのような入力値の違いで現れているかを抽出し，可能な限りその入力値に関する実測値を得るように努めることが重要である。その実測値が得られれば，再度流体流動解析による影響予測を行い，判定を見直すことが必要である。

なお，調査・開発が進展するにつれて各種のデータが

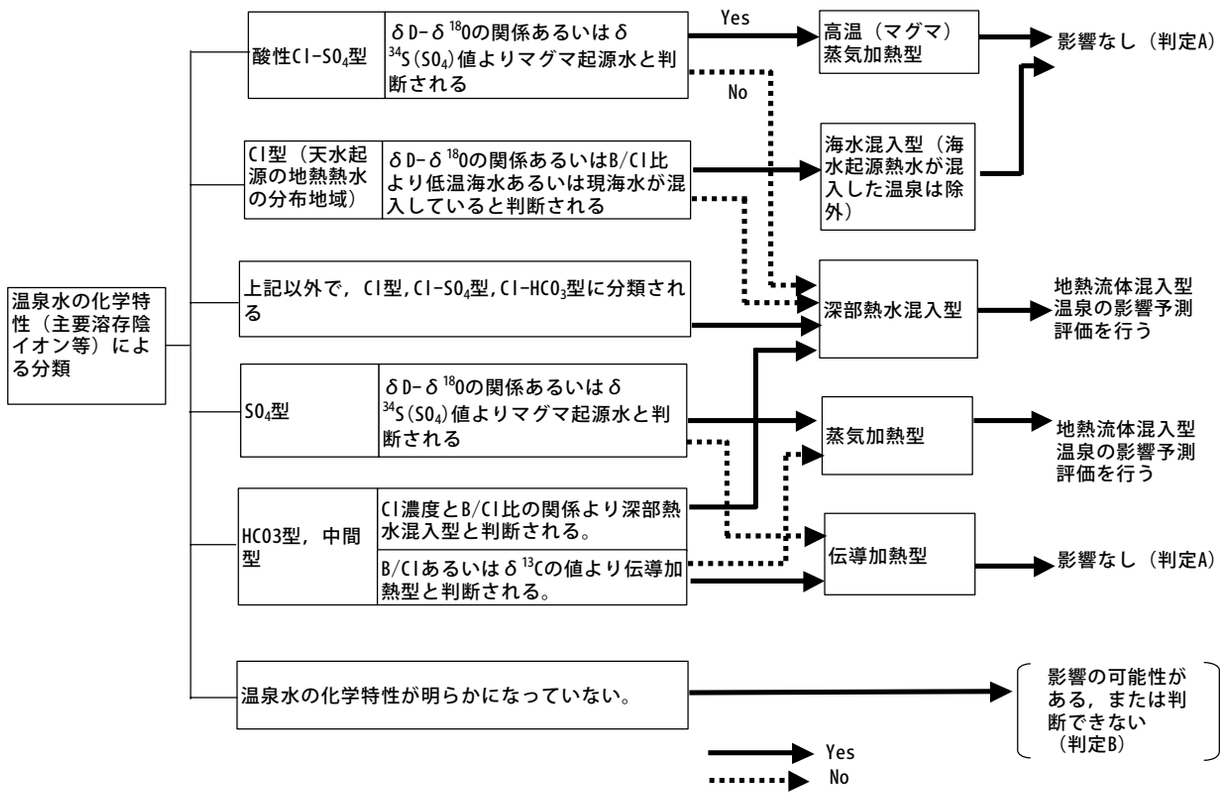


Fig.2-2-6　流体流動モデルによる温泉影響予測

蓄積されていくので，温泉を含めた地下モデルの更新を適宜行い，温泉影響予測についても更新していくことが重要である。

2-(2)-4)　事後モニタリング，影響判定

温泉への影響は，温泉の水位（または湧出量），泉温，泉質について，自然変動の範囲を逸脱するような変化が観測された場合,影響が出た可能性があると判断される。温泉の変動は降水量や河川水位の変化にも大きく左右されることから，事前モニタリング結果（バックグラウンド値）と照合し，通常の自然変動を逸脱するような変化が認められた場合，その変化の原因が何であるかを特定する。温泉の水位（または湧出量）は，地震等によっても変化することが知られており，さらには温泉井同士の干渉や近くの河川工事等によっても温泉に変化が現れることがある。

2-(2)-4)-a 地熱開発後の状態変化の判定

1) 定性的な分析による判定

地熱開発後の温泉・地下水系に変化が現れたかどうかの判定は，基本的には各モニタリング項目の経時変化のグラフを作成し，地熱開発前の傾向と比較して開発後に傾向の変化が見られるかどうかで行う。地熱貯留層と構造上及び流体流動上のつながりがあって地熱開発の影響が現れている場合に，温泉・浅層地下水層に予想される現象は，定性的には以下のとおりである。

（生産の影響）温泉・地下水の水位が低下傾向を示す。このため，地下水の湧水量や温泉の自然湧出量が減少する。水位の低下によって周辺からの浅層地下水の混入量が増加すると，泉温が低下するとともに希釈によってCl濃度等の化学成分の濃度が低下する。

（還元の影響）温泉・地下水の水位が上昇傾向を示す。この場合，地下水の湧水量や温泉の自然湧出量が増加する。還元熱水が温泉・浅層地下水層へ混入すると，その温度が温泉水の温度よりも高い場合には泉温が上昇し，低い場合には泉温が低下する。また，Cl濃度が上昇傾向を示すとともに，還元熱水の混入割合によって温泉の化学性状が変化する。

2) 統計的手法による判定

地熱開発後の温泉・地下水系に変化が現れたかどうかが微妙な状況にあり，経時変化のグラフからだけでは判

断が困難な場合，統計的手法を用いることにより判定を下すことができる。地熱開発後に得られたモニタリングデータが開発前と比較して同じ範囲に含まれるかどうかについて，統計的な許容範囲（例えば 95% 信頼区間等）を逸脱しているかどうかで状態変化の有無を判定する。その手法の例として，開発前後のデータが十分にそろった段階では二標本 t 検定等が挙げられる。

2-(2)-4)-b 要因分析による地熱開発の影響判定

1) 状態変化の要因

地熱開発の時期を挟んで温泉・地下水系の状態が変化したと判断された場合でも，それがすぐに地熱開発の影響であるとは断定できない。温泉・地下水系の状態変化は，地熱開発の影響だけでなく，他にもさまざまな要因で起こり得るからである。このため，状態変化の要因が何であるかを検討しなければならない。温泉・地下水系では地熱開発の影響がない場合でも既に種々の要因で自然変動が生じているが，その変動を変化させる要因としては，一般に Table 2-2-2 に示す項目が挙げられる。

2) 要因の決定

上記 1 ）で抽出した要因のうち，異常気象（雨・雪）に属するものについては降水量等との関係が適切に説明できるタンクモデルが作成できれば，それによって判断することができる。地震・火山活動については，地震・火山活動が発生した時期と温泉・地下水の状態が変化した時期との相関によって特定が可能である。特に地震による状態変化のうち，水位変化は，ほぼ地震と同時に発生することが多いので，要因特定の目安になるであろう。

土木工事に属するものや泉源のスケール浚渫，改修工事についても，工事時期との相関で判断できる。特に水位は工事と同時に変化することが多いので要因特定の目安となる。

温泉間の干渉と地熱開発による影響については，影響の現れ方がよく似ているため慎重に判断しなければならない。例えば，今まで運転していなかった動力泉のポンプを起動させた場合と地熱開発によって生産井の噴出を開始した場合に，近くの温泉に現れる影響はどちらも水位低下であったり，自然湧出量の減少であったりする。

以上のように，地熱開発後に温泉・地下水系の状態が変化した場合でも，想定される要因は地熱開発の他にも種々考えられるため，それらについて十分可能性を検討した上で要因を決定することが重要である。

2-(2)-5) 影響が予想される場合の対策

調査段階において，現行の開発計画で影響が予想される場合には，影響の要因を特定した上で以下の計画の見直しを行い，それによって影響が回避できるかどうか再検討する。

①生産井・還元井の配置・深度の変更
②開発規模（生産・還元量）の縮小

生産井あるいは還元井の掘削予定位置や深度と周辺温泉との水理的なつながりによって，将来的に生産・還元を開始すると周辺温泉に影響が出ることが予想される場合，それが回避できるような掘削位置・深度を模索する。適切な位置・深度が見出せた場合には，その新たな場所に調査井が掘削され，開発可能な地熱資源量が再評価される。その一環として噴出試験と周辺温泉へのモニタリングを実施し，温泉へ影響が出ないことを検証する。

適切な位置・深度が見出せない場合には，開発規模（生

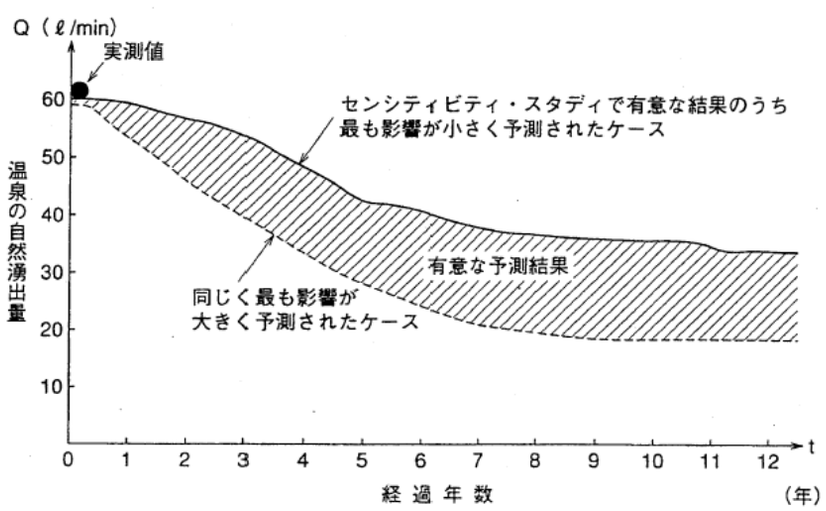


Fig.2-2-7 センシティビティ・スタディによる温泉影響予測の判定例

産・還元量）を縮小することで回避できるかどうかを検討する。この場合の予測手法には，数値シミュレーションが適用され，影響の有無に関して定量的な予測が試みられる。当初の開発計画を見直し，規模を縮小することで温泉への影響が回避でき，なおかつ経済的にも採算が取れると判断されれば，その計画に沿って開発は継続可能となる。ここでも噴出試験やモニタリングを実施し，規模を縮小した開発計画に沿って周辺温泉に影響が出ないことを検証する。また，データが蓄積されるにしたがい，温泉への影響が回避できる適切な位置・深度が次第に明らかになれば，その地点を開発の対象としていくことで段階的に規模を拡大していく方針も選択肢の一つになる。

以上のような開発計画の見直しを行っても，温泉への影響が回避できないと判断される場合には，開発規模のさらなる縮小あるいは開発の中止や延期の決断が下されるであろう。

2-(2)-6)　適切な貯留層管理に基づく温泉に影響を与えない開発

地熱開発計画を策定するうえで，温泉影響予測手法を用いることで，温泉に影響を与えない開発が可能と考えられる。持続可能となるように開発規模を決定し，それを実現できるように貯留層を適切に管理していくことで，温泉に影響を与えない開発が可能である。持続可能な開発は，発電所稼動中の地熱貯留層を常に安定した状態に保ち，それは周辺温泉も含めた安定した状態の維持につながる。

適正な発電規模とは，長期間にわたって安定した発電が維持できる範囲，すなわち持続可能な発電規模であり，なおかつ温泉に影響の出ない発電規模のことである。生産・還元を開始すると，地熱貯留層では圧力，温度や蒸気割合などが時間とともに変化するが，持続可能な開発を行うことにより，生産する地熱流体と地下で循環・供給される地熱流体の収支バランスが取れれば，生産・還元中における平衡状態に達する。それは，周辺温泉を含めて地下が安定な状態にあることを意味している。持続可能な開発を行うためには，地下の状態を把握し，適切に管理することが必要である。そのためには，地熱貯留層と温泉に対してモニタリングを継続することが不可欠である。

温泉に対しては，事後モニタリングを行い，地熱貯留層の収支バランスに関しては①生産井・還元井の流量，②観測井の坑井内圧力・温度 , ③重力変化等を対象としたモニタリングが有効である。生産井と還元井の流量は基礎データとなる。観測井を利用した地下の圧力温度モニタリングでは，生産・還元による局所的な圧力変化と温度変化を観測し，重力モニタリングでは，比較的広範囲に地下の質量や密度変化を観測する。こうして地下の質量とエネルギーの収支バランスに関するデータが得られる。

国内の地熱発電所では，実際に上記モニタリングが継続して実施され，地下の収支バランスが取れるように貯留層管理が行われている。例えば，八丁原発電所では，上記モニタリング結果や貯留層シミュレーションによって，約 120 MW が持続可能な発電規模であると評価されており，その範囲内である定格出力 110 MW の運転が行われている。貯留層シミュレーション結果からは，生産する質量の約 94% が地下からの熱水供給や還元によって補充されており，貯留層はほぼ安定した状態にあることが示唆されている（Tokita et al., 2000, 2006）。そして，このレベルの補充が実現されている場合，実用上ほぼ持続可能であると国際的にも判断されている（Rybach and Mongillo, 2006）。また，重力モニタリング結果からも，地下の水収支バランスについて十分な質量が貯留層に供給されていることが示唆されており（江原・西島，2004），生産エリアにおける重力がほぼ安定していることから，生産エリアはほぼ安定した状態に

Table 2-2-2 温泉・地下水系の状態変化をもたらす要因

自然要因	人為的要因
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	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

あると考えられる（斉藤ほか ,2006）。大霧発電所においては，運転開始前の全量噴出実証試験において蒸気量 360 t/h の安定した噴出を確認し 30,000 kW 以上の発電も可能であったが，出力 30,000 kW にとどめた経緯がある。開発前は，地質構造や地熱系について解明された段階で，貯留層の特徴や適正な開発規模が十分には把握されているとは言えないため，初めは控えめな規模で発電し，貯留層の状態や生産能力を踏まえながら順次規模を拡大し，適正な発電出力規模としていくことがより現実的であると指摘されている（御幸 ,2004）。

以上のように，持続可能な地熱発電（開発）を実現させることが，ひいては温泉に影響の出ない開発につながると考えられる。

（鴇田洋行）

引用文献

Allis, R. G. (1981) Changes in heat flow associated with exploitation of Wairakei Geothermal Field, New Zealand. New Zealand Jour. Geology Geophys., 24, 1-19.

Allis, R. G. (2000) Review of subsidence at Wairakei field, New Zealand. Geothermics, Vol.29, 455-478.

Allis, R. G. (2001) Changes in heat flow associated with exploration of Wairakei Geothermal Field, New Zealand. New Zealand Jour. Geology Geophys., 24, 1-19.

Allis, R. G., Bromley, C. and Currie, S. (2009) Update on subsidence at Wairakei-Tauhara geothermal system, New Zealand. Geothermics, 38, 169-180.

馬場敬之・川副聖規・末吉喜和（1991）大岳・八丁原地域における坑井掘削について．地熱，28，74-296.

Cole, J. W. (1986) 2.Volcanism in the Taupo Volcanic Zone. Monog. Ser. Mineral Depos., 26, 23-35.

江原幸雄・西島 潤 (2004) 地熱熱源の持続可能性に対する観測的立場からの検討－重力変動観測から見た持続可能性－ . 日本地熱学会誌 , 26, 181-193.

Elder, J. (1981) Geothermal Systems, Academic Press, 508p.

Fournier, R. O.(1991) Water geothermometers applied to geothermal energy. Appli. Geochem. Geotherm. Reservoir Development, 37-69, issued by UNITAR, Rome.

Furuya S., Aoki, M., Gotoh, H. and Takenaka, T. (2000) Takigami geothermal system, northeastern Kyushu, Japan. Geothermics, 29, 191-211.

Gambill, D. and Beraquit, D. B. (1993) Development history of the Tiwi geothermal field, Philippines. Geothermics, 22, 403-416.

Giggenbach W. F.(1988) Geothermal solute equilibria: Derivation of Na-K-Mg-Cageoindicators., Geochem. Cosmochem. Acta, 52, 2749-2765.

Glover, R. B. (1977) Chemical and physical changes at Geyser Valley, Wairakei, and their relationship to changes in borefield performance. In A.P.W. Hodder (ed.), Geochemistry 1977, DSIR Bulletin, 19-26.

Glover, R. B., Hunt, T. M. and Severne, C. M. (2000) Impacts of development on a natural thermal feature and their mitigation, Ohaaki Pool, New Zealand. Geothermics, 29, 509-523.

Grant, M., Donaldson, L. G., and Bixley, P. F. (1982) Geothermal reservoir engineering, Academic Press, 369p.

Grindley, G. W. (1965) The geology, structure, and exploration of the Wairakei Geothermal Field, Taupo, New Zealand. Bull. Geol. Survey New Zealand, 75,131p.

御幸和則 (2004) 持続可能な蒸気生産に向けて－大霧地熱発電所の場合 . 日本地熱学会誌 , 26, 151-164.

林 正雄（1972）大岳地熱帯開発の歴史と熱水変質について．地質ニュース , 218, 30-42.

Hayashida, I. and Ejima, Y. (1970) Development of Otake geothermal field. Geothermics, Sprcial Issue 2, Vol.2, Part 2, 1448-1457.

Hedenquist, J. W., Izawa, E., Arribas, A. and White, N. C. (1996) Epithermal gold deposits: Styles, characteristics, and exploration.Resource Geology Special Pub. Num. 1., Soc. Res. Geology.

Henley, R. W. and Ellis, A. J. (1983) Geothermal Systems Ancient and Modern, a geochemical review. Earth Sci. Rev., 19, 1-50.

Henley, R. W. (1984) Chemical structure of geothermal systems. In R. W. Henley, A. H. Truesdell, and P. B. Barton, Jr. (eds.), Fluid Mineral Equilibria: Society of Economic Geology, Reviews in Economic Geology, 1, 9-28.

石戸経士 (2002) 地熱貯留層工学 . 日本地熱調査会 , 176p.

厚生省（1951）国管収第七二号　国立公園部長回答

児玉牧夫・中島 完 (1988) 霧島地域の地熱開発調査. 地熱 , 25, 201-230.

Matsuyama, K., Narita, N., Tomita, K. and Majima, T. (2000) Geothermal resources of Hachijojima. Geothermics, 29, 213-232.

水垣桂子 (1996) 貯留層断裂系とは何か . 地熱エネルギー , 75, 57-67.

日本地熱調査会（2000）新版　わが国の地熱発電所設備

総覧 2000 年 . 日本地熱調査会 , 254p.
野田徹郎（2009）経済産業省ホームページ（www.meti.go.jp/committee/summary/0004561/g90609a01j.pdf ）
野田徹郎　監修 (2003) 地熱地化学講座 . 産業技術総合研究所 , 210p
野田徹郎・島田寛一 (1989) 深部地熱熱水の特性把握のための熱水混合モデル計算 . 地熱 , 26, 21-29.
温泉研究会　編 (2004)　温泉必携（改訂 9 版）. 日本温泉協会 , 406p.
大木靖衛・平野富雄（1970）箱根火山の温泉 . 箱根町集団施設地区計画調査報告書 , 箱根町 , 140-168.
Pritchett, J. W.(1995a) NIGHTS: A Single-Phase Geothermal Reservoir Simulator. Proc.World Geotherm. Cong. 1995, 3, 2955-2958.
Pritchett, J.W.(1995b) STAR: A Geothermal Reservoir Simulation System. Proc. World Geotherm. Cong. 1995, 3, 2959-2963.
Pruess, K.(1983) Development of the general purpose simulator MULKOM. Anual Report 1982, Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley Labolatory, Report No.LBL-15500
Pruess, K.(1987) TOUGH User's Guide. Lawrence Berkeley Laboratory, Report LBL-20700.
Pruess, K.(1988) Modelling of geothermal reservoirs: fundamental processes, computer simulation, and field applications. Proc.10th New Zealand Geotherm. Workshop 1988, 15-21
Pruess, K.(1991) TOUGH2 - A General Purpose Numerical Simulator for Multiphase Fluid and Heat Flow -. Lawrence Barkeley National Laboratory, Report No.LBL-29400, May 1991.
Pruess, K., Finsterle, S., Moridis, G., Oldenburg, C. and Wu, Y.(1997) General-Purpose Reservoir Simulators: the TOUGH2 Family. GRC BULLETIN February 1997, 53-57
Rybach, L. and Mongillo, M.(2006) Geothermal Sustainability- A Review with Identified Research Needs, GRC Trans., 30, 1083-1090.
斉藤博樹・田篭功一・本田 満・笠木順一・藤瀬 豊・江原幸雄 (2006) 八丁原地熱地帯における重力モニタリング結果と準 3 次元モデル解析から推定される地熱貯留層の挙動 . 日本地熱学会誌 , 28, 181-197.
坂井定倫・窪田康宏・畠山和義（1986）秋田県八幡平・澄川地区の地熱資源探査 . 地熱 , 23, 281-302.
Seki, Y. (1991) The physical and chemical structure of the Oku-aizu geothermal system, Japan. Geochem. Jour., 25, 245-265.
茂野 博 (1992) 熱水系の深部環境を地球化学データから予測する . 地質ニュース , 457, 16-33.
新エネルギー・産業技術総合開発機構（1993）地熱貯留層評価マニュアル .
新エネルギー財団 (1989 ～ 1993) 昭和 63 年度～平成 4 年度地熱発電所環境保全技術調査報告書（中小地熱発電所環境保全技術調査）
新エネルギー財団 (1994 ～ 1999) 平成 5 年度～平成 10 年度地熱発電所環境保全実証調査報告書（温泉・地下水系影響予測手法証調査）
須田芳郎・矢野雄策 (1991) 日本の地熱調査における坑井データ　その２　検層データおよび地質柱状図データ . 地質調査所報告 , 273p.
Sugiaman, F., Sunio, E., Molling, P., and Stimac, J. (2004) Geochemical response to production of Tiwi eochemical field, Philippines. Geothermics, 33, 57-86.
玉生志郎 (1995a) 地熱構造と貯留層モデル作成の条件・留意点 (その 1). 地熱エネルギー , 69, 26-42.
玉生志郎 (1995b) 地熱構造と貯留層モデル作成の条件・留意点 (その 2). 地熱エネルギー , 70, 16-34.
Tokita, H., Haruguchi, K. and Kamenosono, H. (2000) Maintaining the rated power output of the Hatchobaru Geothermal Field through an integrated reservoir management. Proceed. World Geotherm. Cong. 2000, 2263-2268.
Tokita, H., Lima, E., Itoi, R., Akiyoshi, M. and Senjyu, T. (2006) Application of coupled numerical reservoir simulation to design a sustainable exploitation of the Hatchobaru Geothermal Field. Proceed. Renewable Energy 2006. CD-ROM
鶴見 実 (1981) 有珠山周辺の温泉水の起源 . 温泉工学会誌 , 16, 1-6.
Yang, Z., Bullivant, D. P., Zyvoloski, G. A. and O'sullivan, M. J. (1991) Numerical experiments with the simulation of natural states of geothermal reservoirs. Proceed.13th New Zealand Geotherm. Workshop 1991, 167-173
矢野雄策・須田芳郎・玉生志郎 (1989) 日本の地熱調査における坑井データ　その 1 －物性，地質層序，年代，化学組成－ . 地質調査所報告，271p.
由佐悠紀 (1995) 熱水・水理構造と貯留層モデル作成の条件・留意点 . 地熱エネルギー , 71, 213-224.

第３章　温泉との共生のしかた

3-(1)　温泉との身近な共生の可能性
—カスケード利用を中心として—

3-(1)-1)　地熱カスケード利用の基本的考え方

3-(1)-1)-a 温泉と直接利用

日本の温泉は，現状では浴用以外には殆ど利用されていない。天然湧出の温度が高すぎる場合は，冷ましてから浴用に利用し，浴用利用後はそのまま捨てている。これは熱利用の面から言うと，非常にもったいない使い方である。江原ほか（2008）は，現存する温泉の熱を，浴用と競合しない形で 100％カスケード利用した場合の熱量ポテンシャルを計算した。この論文では，以下のような考え方で，利用の下限温度 45℃と 20℃の場合を示している。

(i) 下限温度 45℃の場合

浴用には，42 ～ 43℃が最適と考えられるので，温度の高い温泉水を熱交換して熱だけを利用した後，45℃に下がったところで，浴用に供給すると仮定する。Fig.3-1-1 に示される通り，45℃以上の湯はいろいろな産業に用いることができ，高温から 45℃に至るまで，何段階にもカスケード利用して無駄なく熱を利用すると考える。全国の 50℃以上の温泉のわずか 5％の熱を 45℃まで利用する場合の熱量は，2005 年時点で約 80,000 TJ/ 年である。

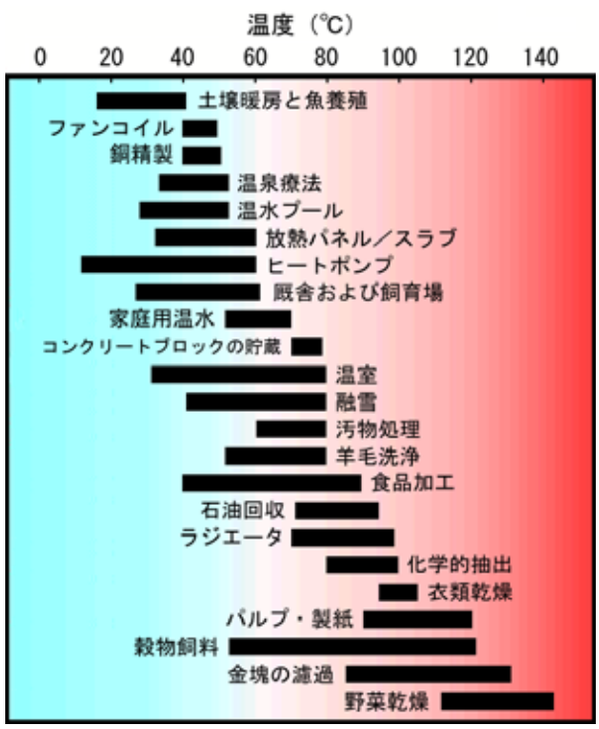


Fig.3-1-1　地熱流体の温度別利用法 (Lindal, 1973 より)

(ii) 下限温度 20℃の場合

床暖房，融雪などには，常温に近い温水でも利用価値があるので，常温の 15℃程度までの熱が利用可能である。経済性を考慮して利用の下限温度を 20℃とした場合に利用できる熱量には，(1) に加えて以下のものが加わる。

a) 浴用に利用した後の温泉水の熱量
b) 35℃未満で浴用には適さないが，直接利用に使える温泉水の熱量

浴用利用後の温泉水の温度は一律に 35℃と仮定すると，35℃以上の全ての温泉は a) に，25℃～ 35℃の温泉は b) に含まれる（Fig.3-1-2）。a) と b) の合計は (1) の約半分もあり，総計は (1) だけの場合の 1.5 倍となる。

このように，既存の温泉の熱を使って，浴用温泉と競合しない形で，地熱の直接利用ができる。暖房・融雪や作物の乾燥などに有効利用できる場合には，競合ではなく温泉地域との共生という新しいスタイルのカスケード利用が可能である。

3-(1)-1)-b 地熱発電所に絡んだカスケード利用

江原ほか(2008)が示す地熱利用将来予測の“ドリームシナリオ”では，温泉の熱利用のほかに，発電所の廃熱を直接利用に使うアイディアが示されている。この論文では熱利用ポテンシャルのみを計算しているので，本文では具体例や技術的問題等について考察する。

どのようなカスケード利用が可能かを考えてみると，まず，従来の蒸気発電後に得られた熱水（1 気圧で 120 ～ 150℃程度？）をバイナリー発電に使うという，発電方式自体のカスケード利用がある。さらにバイナリー発電後に，温度の下がった熱水（80℃前後）の熱を直接利用してから，地下に還元することが可能である。この場合は，従来の還元熱水より温度が下がっているので，貯留層を冷やさないための貯留層管理が必要だが，数値シミュレーションなどで還元の位置を十分に検討すれば，技術的には可能と考えられる。

直接利用の内容としては，Fig.3-1-1 に示されるように 80℃もの温度があれば様々な利用法がある。例えば農作地や酪農地が近くにあれば，食品加工，厩舎利用，温室などにも利用できる。また観光地や温泉旅館での給湯利用も可能である。例えば温泉地では，浴槽内の湯は天然湯であっても，シャワーや水道の湯はボイラーの沸かし湯である場合が殆どで（池上ほか , 2008），その熱供給に使うことができる。最大限のカスケード利用を行う上で，ヒートポンプの利用もキーとなる技術と考えられる（池上ほか , 2008, 及び次章の中国の例を参照）。

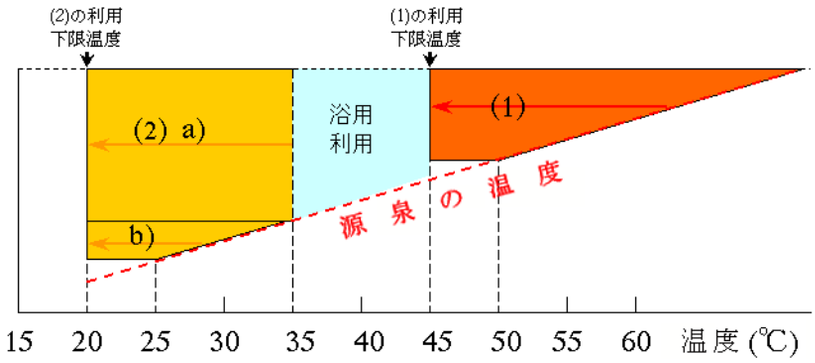


Fig.3-1-2　仮定した温泉水直接利用の温度範囲の模式図

3-(1)-2)　各国での事例

次に，温泉との共生を考える上で役立つと思われる各国の事例を紹介し，日本への応用について考察する。

3-(1)-2)-a 中国の地熱直接利用（カスケード利用）

中国での地熱直接利用は，1970 年代の政府主導の地熱開発から，1990 年代からの私企業中心の開発に移行していった。その結果，あらゆる利用法を取り入れて経済性を高め，資源の利用率・回収率を高めるといった意味ではプラスの方向に進んだ一方，資源量調査や貯留層評価といった科学的裏づけなしに温泉資源の乱獲が進み，貯留層圧力・水位の低下による枯渇の危険性というマイナス面も目立った。そのため，地熱開発についての規制が進められた他，圧力低下を防ぐための還元に注目が集まってきた (Zheng et al., 2005)。

地熱資源の利用率・回収率を高めるための方法として，多目的利用，とくにカスケード利用が盛んに行われており，その一環として，ヒートポンプも多く利用されている。ヒートポンプに電力を消費しても，昇温することで更に多段にしたほうが，経済性が良いとされる。宮崎（2006）には，72℃の熱水をホテル・住宅暖房，公共施設暖房，床暖房，魚養殖，温室，と 5 段階にもわたって地熱が直接利用されている例が紹介されている。このような多目的利用は，プール，温泉，宿泊施設などを備えたレジャー施設で行われている場合が多く，市民に地熱の利用法を展示するショーケース的な意味合いが強いようであり，その意味では，実際の利用量はまだこれから伸びる可能性がある。新たな温泉プラスアルファの開発には，参考になると思われる。

3-(1)-2)-b ニュージーランド（温泉関係者への技術支援の可能性 1 ）

Ngawha 地熱地帯は，タウポ地域以外ではニュージーランドで唯一の地熱貯留層温度が 200℃を超す地熱地帯である。1998 年より，10,000ton/day の流体抽出で 10MWe の発電が行われている。生産を拡大することは物理的に可能だが，たとえ熱水の全量を還元したとしても，地表の温泉水に影響を及ぼす懸念がある。そこで，1,000ton/day の冷水を補助的に注入すれば，貯留層圧力を維持するのに充分という予測に基き，補助還元実験を 3 ケ月間行った。その結果，貯留層圧力を回復させるのに成功し，貯留層温度には影響がなかった。数値モデリングの結果では，25MWe に相当する 25,000ton/day の生産を行う場合，わずか 5%の補助還元を行うことで，25 年間の発電を維持できることが予測され，生産流体の温度・化学性状や地表の温泉への影響は見られなかった。こうして生産量拡大の申請に対する許可が得られた (Lawless, 2006)。

100%還元した場合でも生じる貯留層圧力減衰を，わずか 5%の補助的な冷水（生活排水等）注入で回復可能という知見は，温泉の減衰対策という形で，温泉関係者に対し技術的援助が可能なことを示している。地表湧出減少の懸念については，実験結果に基づくシミュレーションで，正しく評価するべきであろう。

3-(1)-2)-c イタリア（温泉関係者への技術支援の可能性 2 ）

ヴェニスの西，大学街パドヴァから西南に 7 km 程の場所に，エウガネイ丘陵地熱地帯と呼ばれる非火山性の温泉地帯があり，そのうち最も高温のアバノ温泉は 87℃である。アバノにはもともと自然湧出の温泉があったが，1950 年ごろから温泉水を使ったセラピーを売り物に温泉開発が始まり，温泉井の掘削が盛んに行われた。次々と保養ホテルが建てられ，1965 年に温泉井掘削数はピークに達した。しかしその結果水位が下がり，自然湧出は消滅し，揚水をしなければ温泉水が出なくなった。そこで，各ホテルは共同で温泉揚水量管理組合を作り，地下水の流動系と揚水量に関する解析をパドヴァ大学に依頼した（Antonelli and Fabbri, 1988）。大学からのアドバイスに従い，1992 年から揚水量を管理するよ

うになってからは，水位が安定した（安川 , 1998）。一方，水位は安定したものの，地下水の採取過多による地盤沈下が深刻な問題となり，ひどい所では 2m にも達し（Antonelli et. al., 1995），やはりパドヴァ大学がコンサルタントを行っている。これは，大学や学協会等が温泉関係者や地元住民に貢献できることを示す好例であろう。

3-(1)-2)-d トルコ（直接利用の拡大）

トルコの地熱利用は，熱の直接利用が主であり，資源ポテンシャルは，下限温度を 35℃とすると 3524MWt である（MTA, 2005）。2000 ～ 2005 年に直接利用は 50％増加し，1,229MWt にのぼる（地域暖房 392→635MWt, 温室 101→192MWt, 温泉観光 327→402MWt）。地域暖房は全国に 16 箇所あり，いずれも自治体が運営主体となっている。古くは褐炭で行われていた地域暖房が，地熱に置き換わっていった。地熱による暖房の家は持家も借家も人気が高く，通常の３～４倍の高値で取引きされている。この地域暖房を中心に，発電，温室，温泉利用など多目的カスケード利用することで経済性も上がり，新たな研究・技術開発が行われている。またビーチや日光浴と組合せた温泉観光も盛んで，経済的に重要である。

日本の場合を考えると，石油価格高騰が予想される中，都道府県のエネルギービジョンに取り入れるなど，地熱による地域暖房を寒冷地の自治体に呼びかける方法が考えられる。既存の発電所の廃熱利用という方法もある。技術者は，カスケード利用の方法と経済性まで踏み込んで自治体に提示することが有効であろう。また，地熱ハウスに高い付加価値をもたせる戦略を考えることも有効と思われ，地熱と地中熱をうまく組み合わせることも役立つであろう。こうした自治体への働きかけで，温泉関係者との関係が別な方面から改善されることが期待される。

以上の議論から導かれる今後の発電所と温泉との関係で重要なことは，正確な地下の熱水系モデルを共同で作り上げるということであろう。温泉源は地熱貯留層と同一ではないとしても，地下全体を考えれば，どこかで繋がっている可能性があり，温泉業者が地熱開発を懸念するのは当然とも言える。ただし，これまで国内の地熱開発が温泉の枯渇を招いた例はなく，今後も適切な事前調査とエンジニアリングによって，そういう被害を避けることができると考えられる。それをより確かなものとするため，貯留層と温泉源とはどこでどのようにつながっている可能性があるのか，調べることが，双方の理解を深めるだけでなく，双方の利害にとっても有効である。適切な調査なしに温泉を乱掘したために湯量の減衰が生じている例もあり，そういった温泉内での問題をエンジニアリング的に解決することも地熱業界の役割であり，地熱と温泉の共生に役立つと思われる。

（安川香澄）

3-(2)　温泉を利用した発電

3-(2)-1)　温泉発電

3-(2)-1)-a はじめに

温泉は我が国の文化であり，我が国は 2006 年 3 月現在，27,866 個の温泉泉源を有する（環境省，2007；Fig.3-2-1 はより新しい，環境省，2009）世界最大の温泉開発利用国である。そのため，地熱発電開発は既存の大型の温泉地域では立地の余地がほとんどなく，温泉枯渇への危惧から歓迎されないことが多い。これが我が国特有の地熱発電開発の障壁を形成してきた。しかも，我が国の温泉開発市場はダイナミックであり，1962 ～ 2007 年度の間に，温泉泉源が毎年平均 334 個ずつ増えている（Fig.3-2-1，環境省，2009）。温泉を地熱発電開発の障壁としてみた場合，この障壁はますます高くなっていく。

我が国の温泉泉源には，沸騰泉を始め，高温温泉が少なくない。しかし，その用途がほとんど浴用利用に限定されていることから，むしろ，その浴用適温化に苦慮している。高温温泉は優位な熱エネルギーを生かすどころか，捨てることに苦慮しているのである。例えば，2009 年 2 月 8 日の朝日新聞によれば，泉源温度が 101℃の別府のひょうたん温泉では，薬用成分を薄める加水適温化を避け，自然冷却によって適温化している。これは夜 21 時から朝 8 時まで営業を停止し，浴槽で自然冷却を行う方法であった。しかし，この方法では営業時間が短縮される上に，冷却し切れない大量の熱水を廃棄せざるを得なかった。この克服のために，竹製の高温温泉用冷却器を開発したことが記事として報じられた（朝日新聞，2009）。

近年，バイナリーサイクル発電の最低発電温度は次第に中低温側に拡大しつつあり，発電可能な熱源熱水温度は既に，100℃未満の領域に拡大している（大里，2009；山田，2009）。これが，地熱発電開発の障壁を地熱発電開発に転化する逆転の発想，温泉発電ビジネスモデルの所以である（村岡，2007；大里・村岡，2008；大里，2009）。例えば，ひょうたん温泉においてエネルギーを効率的に捨てるための冷却器の代わりに，小型バイナリーサイクル発電システムを導入すれば，発電と適温化とを同時に具現できる。これは一挙両得であり，高温温泉の本来の優位性を生かすことになる。これが温泉発電ビジネスモデルである。

もし，この温泉発電ビジネスモデルが普及すれば，温泉は実態として地熱資源の一部となり，温泉オーナーが地熱発電事業者となる。こうなれば，最早，地熱発電開

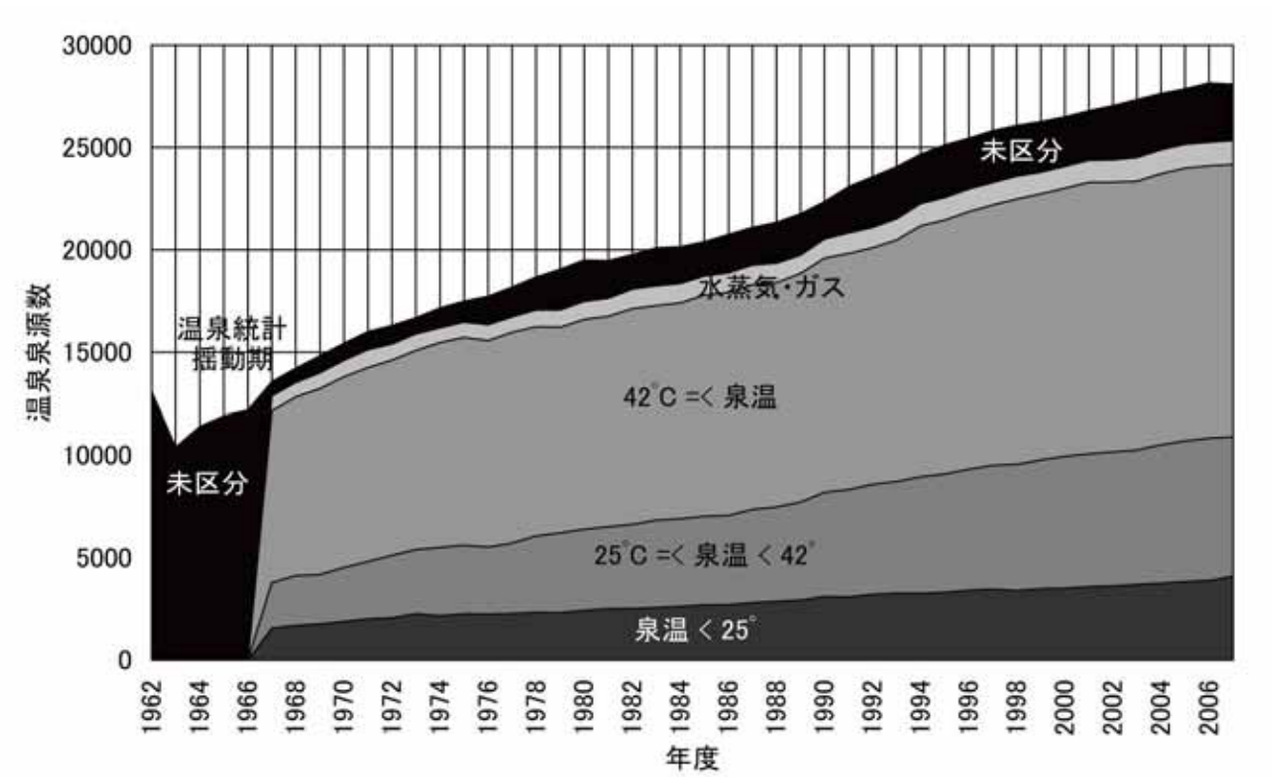


Fig.3-2-1　我が国の温泉泉源数の年次変化（環境省，2009）

発と温泉開発との間の垣根はなくなり，対立の意味を失う。温泉発電ビジネスモデルには上述の一挙両得の効果に加えて，地熱発電開発と温泉開発の間の垣根の解消という，もう一つの市場開放効果が期待される。

3-(2)-1)-b 温泉発電の市場規模

我が国には 2006 年 3 月現在，温泉泉源が 27,866 個存在する（環境省，2007）。温泉発電の利点は，この温泉の，現在，捨てられている浴用以上の温度差エネルギーを利用する点にある。従って，狭い意味の市場規模（資源量）は，既存の温泉データから求められる（村岡ほか，2008）。基礎データとしては金原（2005）の収集した 4,536 個の温泉データのうち，泉温と湧出量が共にそろっている 3,686 個の温泉データが利用できる。熱エネルギーから発電電力への換算には，カリーナサイクル発電の熱効率の概算値である Fig.3-2-2 の関係が利用できる（村岡，2007）。その結果から 3,686 個中 657 個の温泉で発電可能と評価される。その地域的分布を Fig.3-2-3 に示す。

657 個の発電可能な温泉のうち，所内電力消費やコストの点から見て，あまりにも小規模な温泉の開発は現実的でない。このため，後述の 50kW 級の温泉発電装置を想定しつつ，その出力規模を 30kWe 以上に限定すると，温泉数は 210 個となる。その結果，総発電電力規模として 95.5MWe が得られる。ここで，我が国には 2006 年 3 月現在，27,866 個の温泉泉源が分布するため，3,686 個の温泉データはこの 13.2％にすぎない。この 210 個の温泉の発電規模 95.5MWe が全国のすべての温泉の 13.2％を表していると仮定して，全国の温泉発電規模を見積もった。その結果，対象温泉数は 1,591 個，総電力規模は 723MWe（72.3 万 kWe）と見積もられた。これが既存の温泉から，現在，廃棄されている浴用以上の温度差エネルギーで発電した場合の狭義の市場規模である。

他方，前述のように，我が国では 1962 ～ 2007 年度の間に，温泉泉源が毎年平均 334 個ずつ増えている。これら新たに開発されている温泉はすべて掘削によるものである。新たな掘削による温泉も温泉発電用資源になり得る。これを含む広義の市場規模については，村岡ほか（2008）が，最近行った 1km グリッドの地熱資源量評価の際に，53 ～ 120℃の熱水系資源量に含めて見積もっている。Fig.3-2-4 に，その結果を示す。この図で，グレー階調区分の MW とは，1 km×1 km の単位面積当たりの発電規模である。また，この図でグレー階調区分された抽出地域は，地表から重力基盤深度までの深度範囲において，規格化された深度温度曲線「活動度指数曲線」が 53℃～ 120℃の範囲に相当する地域を示している（村岡ほか，2007）。53℃～ 120℃という温度範囲の

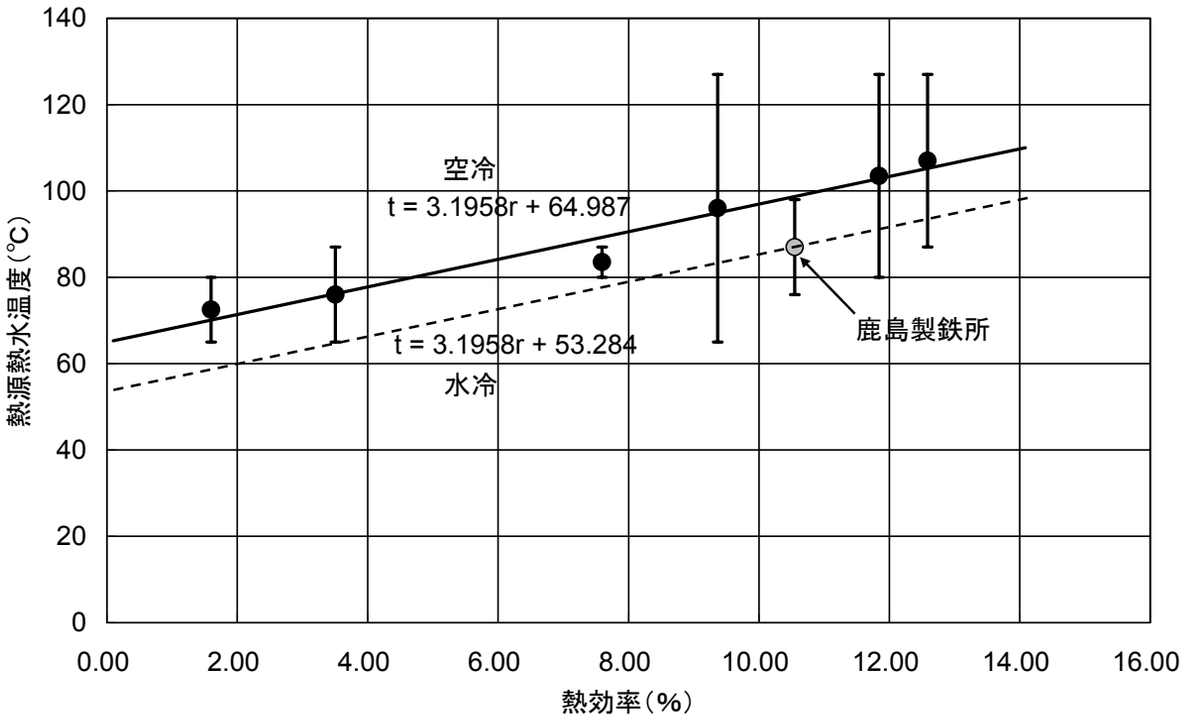


Fig.3-2-2　カリーナサイクルの熱効率概算値（村岡，2007）

設定は，小型温泉発電装置の目標とする開発仕様に基づいている。この評価は基本的には米国地質調査所の容積法に基づいているが，大きな相違は基準温度，すなわち，熱水から熱エネルギーを抽出する際の下限温度を 15℃ではなく，Fig.3-2-2 に基づき 53℃としている点にある。そのため，より現実的かつ控えめの見積もりとなっている。もう一つの大きな相違は発電効率であり，米国地質調査所の容積法が，蒸気フラッシュ発電を想定して 0.4 としているのに対して，この評価では Fig.3-2-2 のカリーナサイクルの水冷発電のうち，53℃～ 100℃の範囲の平均的発電効率 0.0731 を用いて見積もっている。この点でも，より現実的かつ控えめの見積もりとなっている。

その結果，Fig.3-2-4 の小型温発電装置による広義の市場規模は，全国を合計して 8,330 MWe（833 万 kWe）×30 年と見積もられる（村岡他ほか，2008）。これら熱水系資源の分布面積は 84,039 km^2 であり，国土の面積 377,923km^2 の 22.2％に達している。つまり，温泉発電システムは，従来の地熱発電の適用範囲を地域的にも飛躍的に拡大させ，立地の制約を打破する画期的な発電手法と言える。また，この広義の市場規模（資源量）の見積もりは，在来型の蒸気フラッシュ発電やランキンサイクルバイナリー発電とのすみ分けを考慮して，120℃以上の熱水系資源を除外している。そのため，Fig.3-2-4 では，しばしば地熱地域の高温部周囲で資源量が大きくなるドーナツ状分布を示しており，温泉発電が余すことなく資源を使うのに有効であることを表わしている。

3-(2)-1)-c 小型温泉発電装置の開発

現状において，温泉への適用範囲の広いカリーナサイクルを多数の温泉に普及させるためには，発電効率が高く，低コストの 50kWe 程度の普及型の小型発電システムが必要である。これを実現すれば，施設への電力供給と同時に，熱源温泉水の浴用適温化，及び冷却に用いる水（清水）から得られる温水を給湯・暖房熱等に用いていることで，従来のボイラーの重油・灯油類の焚減らし効果が得られる（Fig.3-2-5）。これによって，熱くて利用できなかった温泉を水で薄めることなく利用することができる上に，温泉旅館やホテルで排出する二酸化炭素の削減や，油価の高騰による燃料費の節約に寄与できる。

小型温泉発電を実現するための技術開発課題は，温泉沈殿物耐性・酸性熱水耐性の熱交換器の開発と小型タービンの開発である。これらを実現して，温泉事業者向けの新しい熱電併給システムを実用化し，広範な温泉熱電併給市場を形成することを目指して，地熱技術開発 (株) と産業技術総合研究所は共同で，2007 年度に研究開発を開始した。このプロジェクトの概要と，2007 年度に実施したフィージビリティスタディでの成果について，大里（2009）に基づき記載する。

開発中の 50kWe 級小型温泉発電装置の基本開発目標および普及を目指す開発要素を，それぞれ Table3-2-1

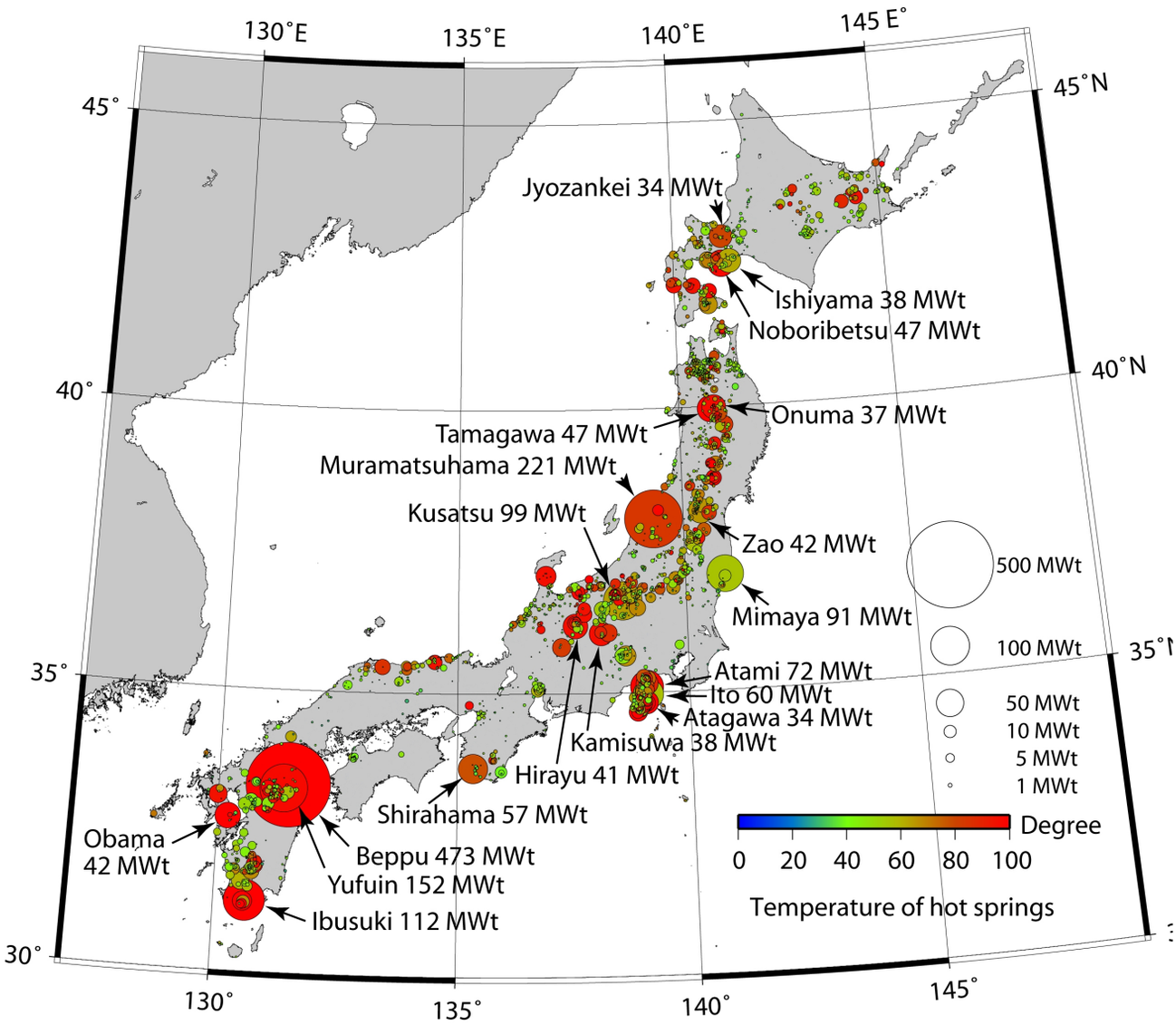


Fig.3-2-3　3,686 個の温泉データから見た主要な温泉発電市場（村岡，2007）

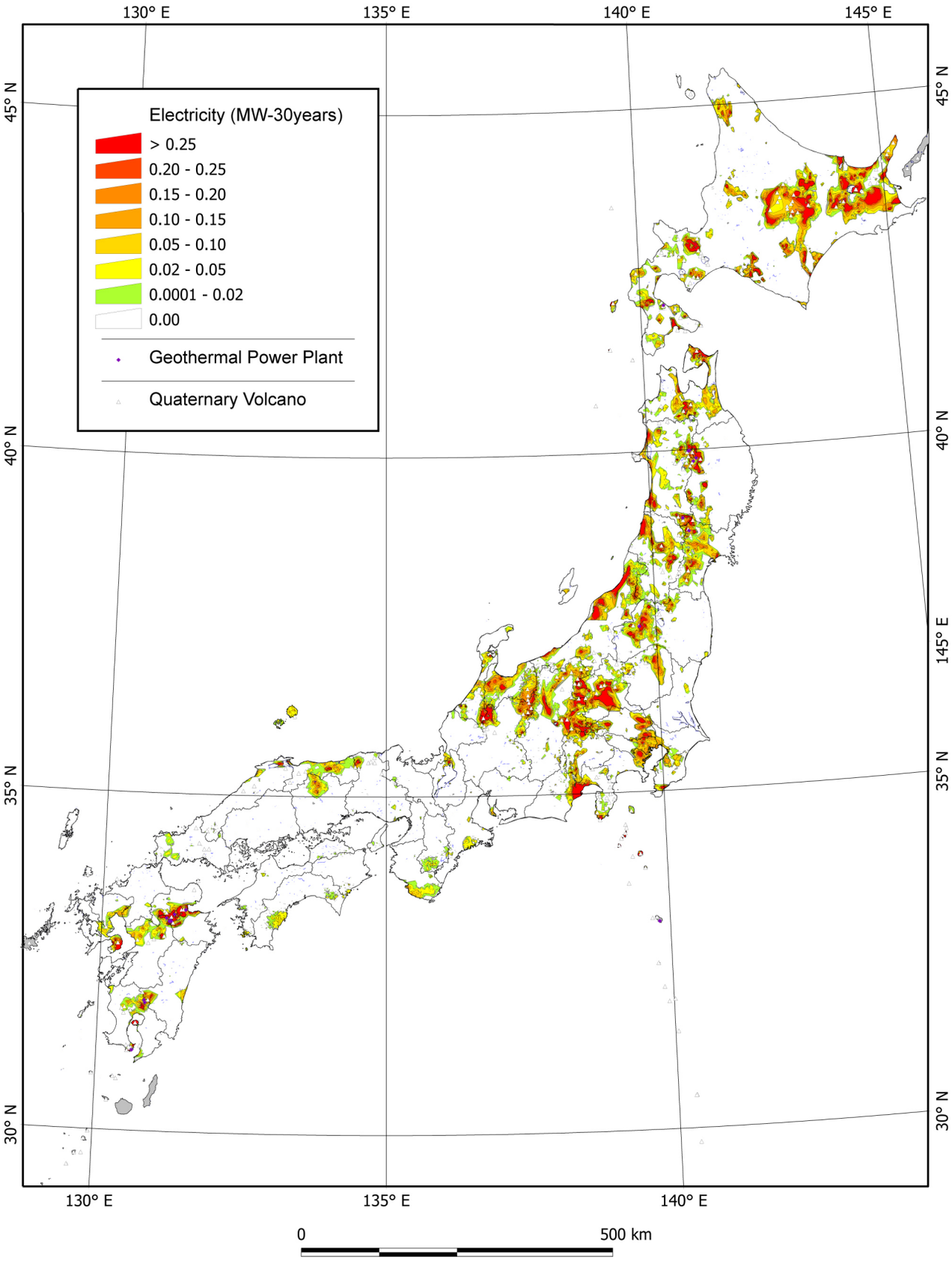


Fig.3-2-4　先第三紀基盤上部における 53℃～ 120℃の熱水系資源分布図（村岡ほか，2008）

および Table3-2-2 に示す。

2007 年度はシステム設計として，機器の概念設計及び実証機の設計を実施した。そこでは，概念設計で実施したサイクルのヒートバランス計算より求めたカリーナサイクルに必要な熱交換器・タービン発電機・ポンプ等の設計値に基づき，市場部品の性能等について調査を行い，実証機設計を行った。

Table 3-2-1　50kWe 級小型温泉発電装置の基本開発目標

①熱交換器入口：運転範囲　泉温 70 ～ 120℃ 湯量 8.1kg/sec(85℃)
②熱交換器出口：泉温 50℃
③冷却方式：空冷 (年間平均 12℃）または 水冷 (年間平均 12℃)
④送電端：50kW

Table 3-2-2　50kWe 級小型温泉発電装置の普及を目指す開発要素

(1)50kWe 超小型タービン発電機（高効率・低コスト）
(2) 温泉水の沈殿の起こりにくい熱交換器 (耐腐食を含む)
(3) 密閉式筐体 (安全性・防音性の向上：アンモニアの漏洩防止と騒音低減)
(4) 遠隔制御 (取り扱いやすさ)

Fig.3-2-6 にシステムフローの概念図を示す。図の沸騰器の 1 の部分が熱源熱水サイクルの部分であり，2 が低沸点媒体（アンモニア水）への熱交換器である。1 の部分は我が国で普及が見込まれる高温温泉を想定している。熱源熱水サイクル側が強酸性熱水の場合には，耐久年数の長い熱交換システムの材料の試験・選定を行っている。また，1 の部分では，熱源熱水の温度が 80℃以上の高温から 50℃程度まで低下するため，若干の温泉沈殿物の集積が予想される。これらの対策として，運転条件の適正化・沈殿物の事前回収装置・自動水圧洗浄装置等の適用，及びその適正な組み合わせ方法を検討している。また，これらの方法を検討する上で，実際の温泉条件に応じた温泉沈殿物を抑制する材料・形状・運転条件の試験・設定等の検討が不可欠であるため，試験結果の温泉水・温泉沈殿物の性状分析・腐食や沈殿の抑制条件の検討を行った。

本システムは，2008 年度より実証機の製作に取り掛かっており，2009 年度に完成する予定である。なお，開発中の温泉発電装置はすでに，多数の温泉地域から誘致を受けており，温泉発電ビジネスモデルに関して明るい見通しを得ている。

3-(2)-1)-d 温泉発電システムの技術的・制度的課題

まず，温泉発電システムの小型化に関する技術的課題について述べる。温泉エコジェネシステムの小型化を更に進めて，20kWe や 10kWe と発展させていく可能性もなくはない。しかし，幾らタービンを小型化しても，熱交換器などの周辺設備の小型化には限度がある。加えて，フィードポンプなど，設備の内部で使う所内電力の省力化にも限度があり，採算性には小型化するほど厳しくなるだろう。そのため，バイナリーサイクル発電設備を小型化させるには，おのずから限界がある。これ以上の地熱発電の小型化については，回転駆動部がなく，構造が簡単な熱電変換素子に期待する他ないように思われる。

p 型半導体と n 型半導体を組み合わせて，温度差の大きい高温側と低温側の間に配置すると，熱起電力が生じて電流が流れる（ゼーベック効果）。150℃以下の低温領域では，従来から Bi-Te 系の熱電変換材料が最も変換効率が高いことが知られている。知るかぎり，150℃以下の低温領域で，最も高い変換効率を得た点でも，草津温泉で実験した点でも，温泉発電に肉薄しているのは㈱東芝の研究グループである（新藤ほか，2008）。これによれば，高温端 130℃，低温端 30℃という 100℃の温度差条件において，すでに 3.6％の変換効率を得ている。これはバイナリーサイクル発電の熱効率に相当近付いていると言えよう。また，草津温泉における発電実験では，約 20,000 時間の連続発電に成功している。これが実用化していけば，将来は超小型噴気帯発電や超小型温泉発電などが実現可能となるだろう。

ただし，草津温泉における発電実験の発電量累積図を定性的に読み取ると（新藤ほか，2008），素子の単位面積当たりの発電出力規模は約 80We/m^2 であることが分かる。つまり，この熱電変換素子で 50kWe の規模の発電を行うためには，625m^2 もの面積の素子と耐腐食金属材料製の熱交換面が必要であることになる。これが現時点では大きなコストを意味することは想像に難くない。熱電変換素子についてはこの問題を含めて，今後，より一層の技術開発が期待される。

次に，バイナリーサイクルを利用する温泉発電において利用可能な二次媒体の課題について述べる。現在，温泉発電に利用可能な二次媒体には，炭化水素系（ブタン・ペンタン・イソブタン・イソペンタン等），アンモニア水，ハイドロフルオロカーボン（HFC）等が考えられる。このうち，炭化水素系媒体は燃焼性が強く，アンモニア水は毒性があるため，特に貯蔵や漏洩に対する厳重な安全対策を施す必要があるが，それらの漏洩・貯蔵対策については，一般に普及しているノンフロンガス冷凍機等ですでに確立された手法を用いており，大きな課題とはなっていない。ただし，温泉発電の場合は，温泉地での利用という点で安全対策についてはより一層の配慮が必

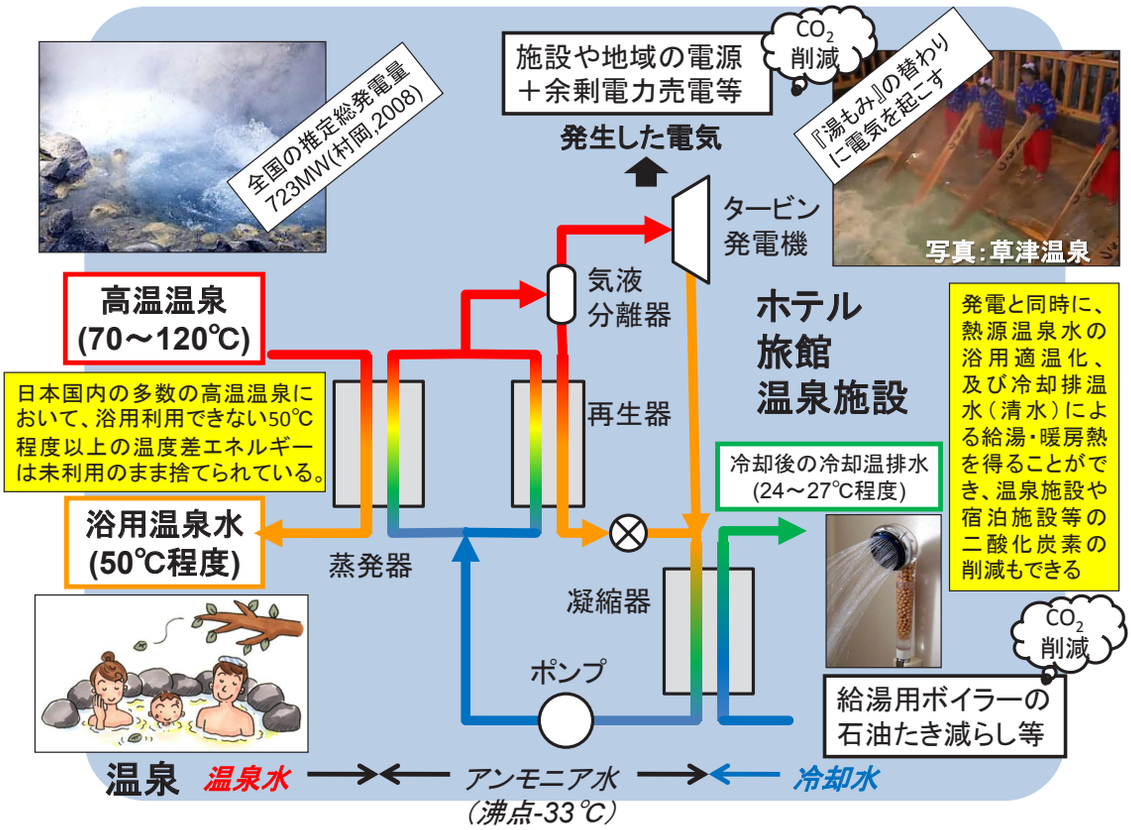


Fig.3-2-5 カリーナサイクルによる温泉発電の概念（大里，2009）

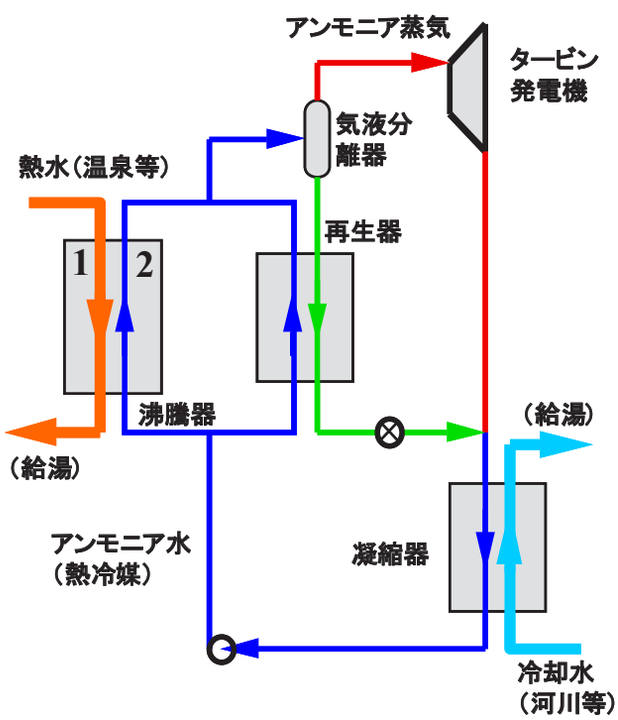


Fig.3-2-6　小型温泉発電用カリーナサイクル（大里，2009）

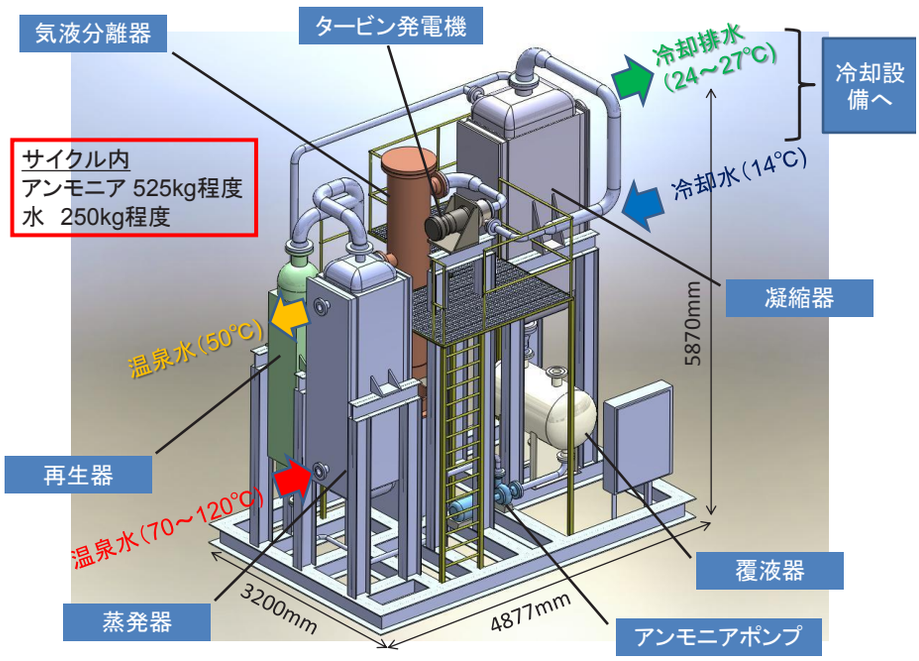


Fig.3-2-7　50kWe 級カリーナサイクルの発電装置部 (長さ 4.9m ×幅 3.2m ×高さ 5.9m)

要である。一方，HFC(R134a など) は，燃焼性・毒性もなく理想的な媒体であるが，地球温暖化係数が CO_2 の 1000 倍前後（アンモニアはゼロ，炭化水素系は 23）であり，その漏洩は少量でも深刻な温室効果をもたらす恐れがあるため（NOAA,2009），地球温暖化防止京都会議（COP3）での規制対象となっている。このため，日本国内では使用規制はないものの，ビル空調・冷凍機等において，大気への放出の禁止，廃棄時の完全な回収と破壊処分が義務付けられており，空調・冷凍機についてはノンフロンガス化が推進されている。従って，将来的には日本国内でも使用についても制限される可能性は否定できず，法定耐用年数が長い発電装置での利用には慎重な検討が必要であると思われる。

また，現在の電気事業法によれば，どんなに小型の発電設備であっても，ガスの最高使用圧力が 1MPa 以上の気化器については，その外面から発電所の境界線まで 20m 以上，1MPa 未満のものは 10m 以上の離隔距離を確保することが義務付けられている。これは小型発電システムの普及を根本的に困難にしている。これについては，規制緩和が期待される。さらに，現在の電気事業法によれば，どんなに小型のバイナリーサイクル発電設備であっても，ボイラー・タービン主任技術者（一般にはボイラー・タービン主任技術者の免状の交付を受けた者を選任する，ただし自家用電気工作物のうち一定の条件を満たす者については，経済産業大臣の許可を受けて免状の交付を受けていない者を選任することができる）を選任しなければならない。その人件費負担は温泉発電ビジネスモデルの採算性を根本的に困難にしている。これについても，300kWe 未満のマイクロガスタービンと同様に，周辺を一つの筐体で取り囲む等で，破裂時の破片の飛散を防止する対策を施す等によって，ボイラー・タービン主任技術者選任の免除等の規制緩和が期待される。

（村岡洋文・大里和己）

3-(2)-2)　やや大きめの温泉発電

温泉地によっては大きな観光ホテルがあり，大きな電力の重要がある場合がある。すでに所有する温泉井からの高温の蒸気や熱水の利用に余裕があったり，新たに坑井を掘って十分な蒸気や熱水を得られたりする場合には，3-(2)-1) で述べた規模より更に大きな規模の温泉発電を行うことができる。この時は，地熱発電で用いた既存の蒸気発電やバイナリー発電の技術を基本として，ケースに応じた規模と形式の発電システムを適用して電力需要に応じることができる。つまり，ここでの発電は，いわゆる地熱発電と，温泉を利用した発電に継ぎ目がないことの証でもある。

このような温泉地におけるやや大き目の温泉発電は 3 件の建設例が九州に存在する。大分県別府市の杉乃井ホテル（1981 年完成，3,000kW），鹿児島県霧島市の霧島国際ホテル（1984 年完成，100kW）及び大分県九重町の九重観光ホテル（1998 年完成, 2,000kW）である。いずれも発電専用の井戸を準備しているものではなく，温泉やその他熱利用との併用で発電を行っている。以下に，その概要を紹介する。更に，各ホテルの関係者から聴取した，発電を行ったことでの利害得失や率直な感想を，

Photo 3-2-1　杉乃井ホテル発電所冷却池 . 噴水の背後が発電所である。

それぞれ付記することにする。

3-(2)-2)-a 杉乃井ホテル

杉乃井ホテルは , 日本でも有数の温泉地である別府に位置した 2,390 人が宿泊可能なリゾートホテルである。温泉井から得られる蒸気と熱水は，地熱蒸気を利用する発電，熱水の直接利用による冷暖房，熱交換による食品加工やクリーニング等での温水利用，温室利用及び浴用と，非常に多岐にわたり利用されている (Photo 3-2-1)。

地熱発電所は 1981 年に完成した。完成当初の発電設備は 3 bar の地熱蒸気を 40t/h 利用して，復水式の地熱タービンにより 3,000kW を発電するものである。復水式では大量の冷却水を要するため一般的には冷却塔が利用されるが，杉乃井ホテルでは冷却池方式を採用している。タービンからの蒸気を復水し温められた冷却水はホテルの庭園に調和するよう設置された噴水により大気で冷却し，小川を通して冷却池に流しポンプで復水器へ冷却水として供給するように設計されている。

発電設備の老朽化の対応に加え，経年変化した蒸気の生産量に合わせるべく 1996 年に 1,900kW の地熱タービン，発電機への更新工事が行われた（田中 , 1983）。

（杉乃井ホテル関係者談）

発電をやってすごく良かったと思っている。現在はホテルの電気はすべてまかなっており，電力会社からほとんど買うことはない。計算してみると，今の発電設備については，6 年で元をとれることになる。余剰の電力は電力会社に売っているが，数円 /kWh と安いので，もう少し何とかならないかと思っている。ホテルの地熱発電はグリーン電力としての価値があり，その証書代が入ってくるのも馬鹿にならない。発電を行うことで周辺の温泉への実質的な影響はないが，周囲では気にする向きもあるので，地熱発電（温泉発電）をやっていることを積極的にはＰＲしていない。この点は，エコツーリズムの風潮次第で，もっと宣伝しなければいけないかもしれない。この地域の特徴として，硫化水素系のガスが含まれるので，普通より金属の傷みが早いので，いい対応策がないか探索中である。

3-(2)-2)-b 霧島国際ホテル

霧島国際ホテルは霧島屋久国立公園の霧島連山の山麓に位置し，豊富な温泉に恵まれた観光保養地として内外の多くの宿泊客を迎えている。霧島国際ホテルでも開業当初より温度の高い蒸気と熱水を暖房に利用し，暖房により温度の下がった温泉水を浴用として利用していた。1983 年から吸収式冷凍機を使用した夏季冷房を開始し，

1984 年 2 月に 142℃の蒸気を利用して 100kW の地熱発電所を完成してホテルのベース電源として利用を開始した。これは世界初のミニ発電所である（大窪 , 1984; Photo 3-2-2)。

1989 年から 1992 年にかけて NEDO による 200kW 蒸気復水型及び 300kW 蒸気背圧型のタービン発電機長期実証運転を行い，2006 年から 2009 年には富士電機システムズ（株）による 220kW バイナリー発電の実証運転を行うなど，日本の中小地熱（温泉）発電設備の開発にも協力している。

（霧島国際ホテル関係者談）

地熱発電導入を思い立ったきっかけは，浴用温泉の予備井の蒸気が余っている状態だったので，それを有効利用しようと思った。最初に熱交換による熱利用，次に蒸気による冷房システム，最終的に地熱発電を計画した。地熱発電を導入したことによって，電力使用コストを抑えることができた。建設費用は当時 5,000 万円であったが, 3.5 年で償却することができた。見学者が年間 1,000 名程度あり，うち 750 名が，宿泊もしくは食事をする客であった。関係者の他，大学生，小学生が多かった。ホテルのホームページ, パンフレットでも紹介している。その他テレビ･新聞でも紹介されている。昔の電気室（コントロールルーム）を展示室とし，発電試験設備は展示物として保存して，霧島地域の温泉や地熱の展示を行う計画がある。エネルギーの有効利用と二酸化炭素排出抑制をモチーフに，地熱の学習の場として活用する。発電を行ったことによる周囲（地域，温泉等）の問題は全くない。坑井については，この地域特有の熱水のスケール付着による蒸気量の減衰があり，対策が必要である。発電システムについてもタービンへのスケール付着が問題であった。当初，年 6 回程度スケールの除去を実施していたが，対策を検討した結果，2 年に 1 回のタービン清掃で済むようになった。バイナリー発電の方は，二次媒体使用のため，タービンにスケールが付着することは全くない。地熱発電（温泉発電）について要望したいことはたくさんある。補助率のアップ，電気事業法適用の緩和（ボイラータービン技術者制度，電気技術基準，電気工作物認定），導入しやすい環境づくり，電力会社との系統連携調整，出力 50kW 程度のパッケージ発電機の技術開発などである。

3-(2)-2)-c 九重観光ホテル

九重観光ホテルは大分県玖珠郡九重町の九重連山，黒岩山の麓に位置する客室数 51 室の温泉宿泊施設であり，環境省より阿蘇くじゅう国立公園内での国立公園事業の執行認可を受け，1956 年に開設された（Photo 3-2-3)。

1995 年にホテル敷地内で掘削された井戸は坑底温度 180℃で 26t/h の蒸気量があった。この量はホテル施設内の冷暖房，給湯，浴用，調理等に使用しても , 大量の蒸気が余るほどのものであった。そこで，蒸気は発電に利用し，熱水は浴用と暖房に利用する，さらに発電後の復水は温水として施設内で利用する計画を立て，2,000kW の蒸気フラッシュ型（ほとんどが蒸気）の地熱発電所が建設され 1998 年に完成し，同年から発電を開始した。

ホテルは阿蘇くじゅう国立公園内に位置するため，電気事業法に加え自然公園法の適用も受け，ホテルの自家発電設備として認可されたものとして当面 990kW 以下で運転することが協議により決定された（小池 , 2003)。

（九重観光ホテル関係者談）

掘削した井戸が噴出蒸気の多い井戸であったことと，キャンプ場が急速に衰退する時期であり，有効利用として地熱発電を考えた。ホテルでは，来客がなくても電気が必要であり経営上の貢献や, 国立公園内での CO_2 削減に取り組んでいるということでアピールにも貢献している。エコロジーに貢献しているということでホテルと訪れる人もいるし，もっと積極的にＰＲしたらという人もいる。12 年目になるが, 余剰電力（990kW の半分ほど）も買い取ってもらい，グリーン証書も売れているので資金的にも余裕が出ているが，固定買い取り制になると，もっと楽になる。周囲には，温泉への影響という懸念を感じている人もいた。地方行政は，温泉にはタッチしないので，こちらで気を遣わねばならない。法的にはクリアしているが，一軒一軒回って説明をしてほしいと要望が出されたので, そのようにした。浅い坑井（300m）を使っているので，その意味では温泉と競合する可能性はあったが，影響は出ておらず，それが分かってってきたことから，今は何も聞こえてこない。建設には通産産業省（現，経済産業省）の補助金を申請したが，持ち出しも多かった。行政についても，根回しが大切であることを認識した。一人で全てのことをやるのは大変である。自家発電としてスタートしたが，認定を受けるときに苦労をした。

（山田茂登・野田徹郎）

Photo 3-2-2　霧島国際ホテル 100kW 発電所 . この奥で 220kW バイナリー発電実証試験が行われた。

Photo 3-2-3　九重観光ホテル 990kW 発電所

3-(3)　温泉との共生事例

既存の地熱発電地域では，Table 3-3-1 に示すように様々な形での温泉との共生事例がある。これらの事例は，積極的に共存共栄の道を拓く参考となる。以下では，これらの事例のうち代表的な地域を採り上げ，詳しく共生の内容を説明することにする。

Table 3-3-1　既存地熱発電地域での温泉共生事例のまとめ
（出典：地熱発電に関する研究会，2009）

事業者	内容
A	町主催の連絡協議会に参加し、温泉業者と情報交換。
	還元熱水を利用した町 (トマトなどの栽培用ハウス) への温水供給 (無償)。
B	定期点検修繕工事作業員の地元温泉宿泊施設の活用。
	温泉組合主催の各種行事への参加。
	発電所 PR 館来訪者への温泉宿の紹介 (パンフレット、地図の配布)。
C	毎時 260 トン、70℃の温水供給 (有償)。
D	協定に基づく、温泉モニタリングや発電所操業状況についての定期的な報告。
	造成熱水の給湯、観測井による給湯。
	地元温泉業者の温泉井スケール付着対策等の技術支援。
	学識経験者を含む第三者機関 (委員会) による温泉モニタリング結果の評価。
E	源泉所有者説明会を定期的に実施し、発電所の運転状況等について意見交換。
	泉温・湧出量等の定期的な温泉モニタリングの継続と報告。
F	地元温泉組合への技術支援。
G	温泉の湯量確保のための技術支援 (温泉井の掘削位置の選定等)。
	発電に使用した蒸気凝縮水を熱交換に利用し、温水を温室に供給。
H	周辺地区の町有泉源確保のため、地表調査やスケール対策等の技術協力。
	発電設備および蒸気供給設備の設置地区に対し、民生利用に限定した給湯。 A 地区 : 毎時 10.2 トン、80℃、 B 地区 : 毎時 1.2 トン、70℃ (いずれも造湯槽出口)。
J	熱水有効利用装置等を利用した給湯。
	定期的に委員会を実施し、水質測定の結果等について報告。

（野田徹郎）

3-(3)-1)　八丈島における共生事例

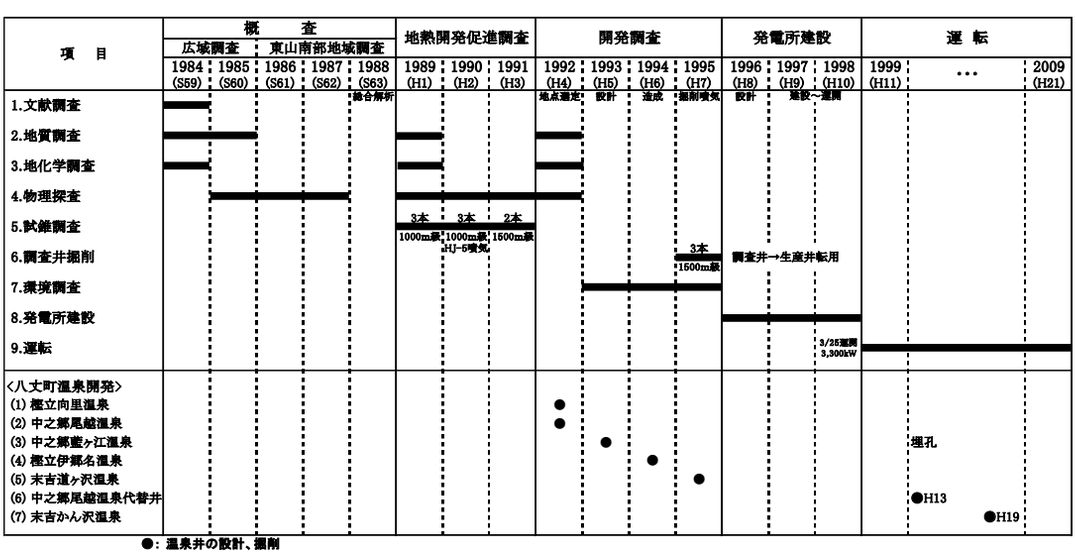
3-(3)-1)-a　地熱開発の経緯

八丈島は，東京の南 290km の太平洋上に位置し，人口約 8,500 人，面積約 70km^2 の島で，東山と西山の二つの火山体から成る。八丈島の東山南部地域には優勢な地熱資源が存在しており，八丈町による温泉開発，東京電力 (株) による地熱発電所開発，温泉熱及び地熱発電所余熱を利用した農業利用など多目的に利用されている。

八丈島における地熱開発調査は，1984 年度から開始され，1988 年度までに地質調査，地化学調査，重力探査・地磁気地電流法探査・空中磁気探査等の物理探査を実施した結果，東山南部地域を有望地域として抽出した。1989 年度からは，新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) による地熱開発促進調査が行われ，1989 年度までに 8 本の調査井が掘削され，東山南部地域に 300℃以上の高温地熱資源が存在することが確認された (Table 3-3-2)。

この地熱開発促進調査の結果を受けて，東京電力 (株) は 1992 年度から地熱発電所立地地点の選定調査を進め，既往地熱調査のレビューを行うとともに，アクセス道路の状況，自然環境の現況等を総合的に検討し，中之郷北部の富士箱根国立公園普通地域内を開発地点として選定した。その後，調査井の掘削を行うための整地工事を行い，1995 年度に 3 本の調査井を掘削し，噴気試験により蒸気卓越型地熱資源の存在を確認した。この結果に基づき，八丈島での電力需要を勘案して発電出力を 3,300kW とした地熱発電所の建設を行い，1999 年 3 月 25 日に営業運転を開始した。地熱発電はベース電源として利用しており，内燃力発電とのベストミックスによる電力供給を行っている。地熱発電所の運転により，エネルギー・セキュリティが確保されるとともに，二酸化

Table 3-3-2　地熱開発工程表



炭素の排出量が約４割削減できている。

八丈島の温泉は，1992 年以前には２箇所の温泉ホテルと１箇所の自治会による温泉（洞輪沢温泉）が存在していたが，町民にはほとんど利用されていなかった（Fig.3-3-1）。八丈町は，地熱開発促進調査の結果を受けて，町民の健康増進並びに観光客の娯楽施設として温泉を提供するために温泉開発を進めることになった。

東京電力（株）グループは，八丈町の要請を受けて，温泉開発に積極的に協力することとし，1992 ～ 1995 年度までに５本の温泉井の掘削位置選定及び温泉井設計を行った。これに基づき，八丈町は温泉井の掘削を行い，順次，温泉浴用施設を建設した。温泉施設の建設後も引き続き，同グループは八丈町の温泉井浚渫工事や水中ポンプの維持管理，代替井の温泉井設計及び工事監理等について，技術協力を継続している。

3-(3)-1)-b 八丈町温泉井掘削状況

八丈町の温泉開発に当たっては，各種地熱調査の結果から作成した八丈島東山南部地域の地熱系モデルに基づき，キャップロック内の高温高圧地熱資源は発電に利用し，キャップロック上部の低温地熱資源を温泉利用することとし，地熱資源の発電利用と温泉利用の棲み分けを行った（Fig.3-3-2）。また，温泉井の掘削地点選定に当たっては，利用地から近いこと，泉温が適温であること，掘削深度が比較的浅いこと等を考慮して決定した。

八丈町は，1992 ～ 1995 年度までに東山の樫立，中之郷，末吉に５本の温泉井の掘削を行った。それぞれの温泉井の深度，泉温及び揚湯量は Table 3-3-3 に示すとおりである。温泉井の成功に伴って，順次，町営の浴用施設として，「裏見ヶ滝温泉」，「ふれあいの湯」，「やすらぎの湯」，「ザ・BOON」，「ふれあいの湯だんらん（体の不自由な方の利用施設）」及び「みはらしの湯」等が建設され，町民や観光客に広く利用されている（Table 3-3-4，Fig.3-3-3，Fig.3-3-4）。

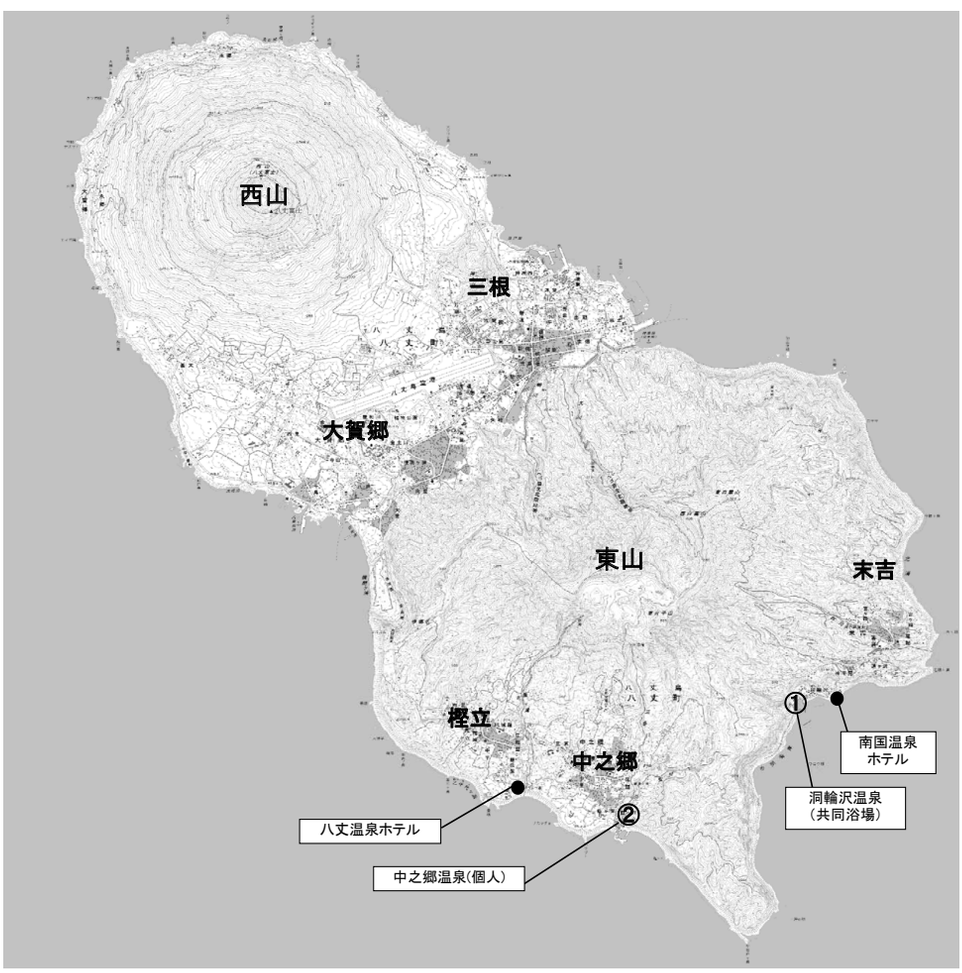


Fig.3-3-1　平成４年以前の温泉分布
（南国温泉ホテルは①南部の汐間海岸から引揚）

樫立伊郷名温泉は，将来の地熱発電所からの熱供給による農業利用を見据えて，温泉利用先進農業展示ハウスを建設し，地熱の農業利用について研究が行われた施設で，現在も研究が継続されている。また，「やすらぎの湯」及び「足湯きらめき」の源泉は，1986 年に個人が掘削した温泉井を町が買い取ったものである。中之郷藍ヶ江温泉については，泉温が低いこと，近傍に中之郷尾越温泉が存在していることから埋孔処理した。

また，温泉井についてはトラブルも発生している。中之郷尾越温泉については，孔内の錆などにより水中ポンプが引き揚げられなくなったことから，近傍に代替井を掘削することとし，ステンレス管を使用するなどの改善を行った。末吉道ヶ沢温泉については，孔内に異状が発生し泉温が低下したため，代替井を温泉施設近傍に掘削することとし，同じくステンレス管を使用するなどの改善を行った。現在，樫立向里温泉については代替井の掘削を進めており，水中ポンプの設置位置に当たるケーシングパイプ径を大きくすることやステンレス管を使用するなどの改善を行っている。

3-(3)-1)-c 八丈町温泉施設の利用状況

八丈町の温泉施設のうち，「ふれあいの湯」，「やすらぎの湯」，「ザ・BOON」及び「みはらしの湯」の 4 施設の利用者数は，Table 3-3-4 に示すとおり，年間で約 17 ～ 18 万人（約 500 人 / 日），1994 年 10 月の「ふれあいの湯」の利用開始以降，2009 年 3 月 31 日までの利用者数の累計は約 250 万人となっている。

また，「ふれあいの湯」などでは温泉スタンドを設置し，

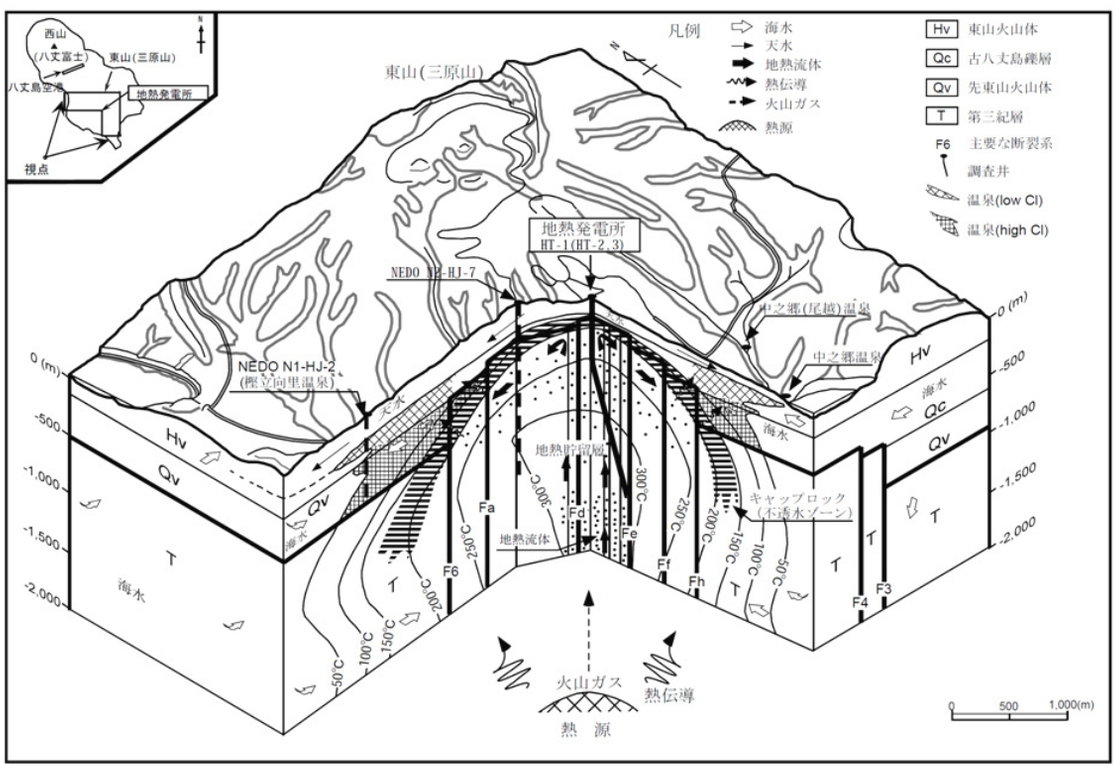


Fig.3-3-2　八丈島東山南部地域の地熱系モデル

Table 3-3-3　温泉井の掘削状況

掘削年度	源泉名	掘削深度	泉温	揚湯量	利用施設	利用開始年月
S53	① 洞輪沢温泉	60 m	41.0 ℃	98 L/m	共同浴場洞輪沢温泉	S54/1
S61	② 中之郷温泉	60 m	53.4 ℃	84 L/m	やすらぎの湯	H7/4
					足湯きらめき	H18/3
H4	③ 樫立向里温泉	450 m	53.4 ℃	370 L/m	ふれあいの湯	H6/10
					ふれあいの湯だんらん	H8/4
H4	④ 中之郷尾越温泉	300 m	64.2 ℃	440 L/m	ザ・BOON	H8/4
					裏見ヶ滝温泉	H6/9
H5	⑤ 中之郷藍ヶ江温泉	300 m	32.4 ℃	423 L/m	ザ・BOON に利用，その後埋孔	－
H6	⑥ 樫立伊郷名温泉	700 m	57.7 ℃	208 L/m	温泉利用先進農業展示ハウス	H9/3
H7	⑦ 末吉道ヶ沢温泉	1000 m	49.9 ℃	370 L/m	みはらしの湯	H10/8
H13	⑧ 中之郷尾越温泉(④の代替井)	270 m	53.1 ℃	500 L/m	④と同じ	－
H19	⑨ 末吉かん沢温泉(⑦の代替井)	1300 m	49.8 ℃	500 L/m	⑦と同じ	－

注)H4 以降の③～⑨の温泉井掘削地点選定及び設計，申請図書作成，掘削工事監理等について八丈町から東電設計(株)が受託

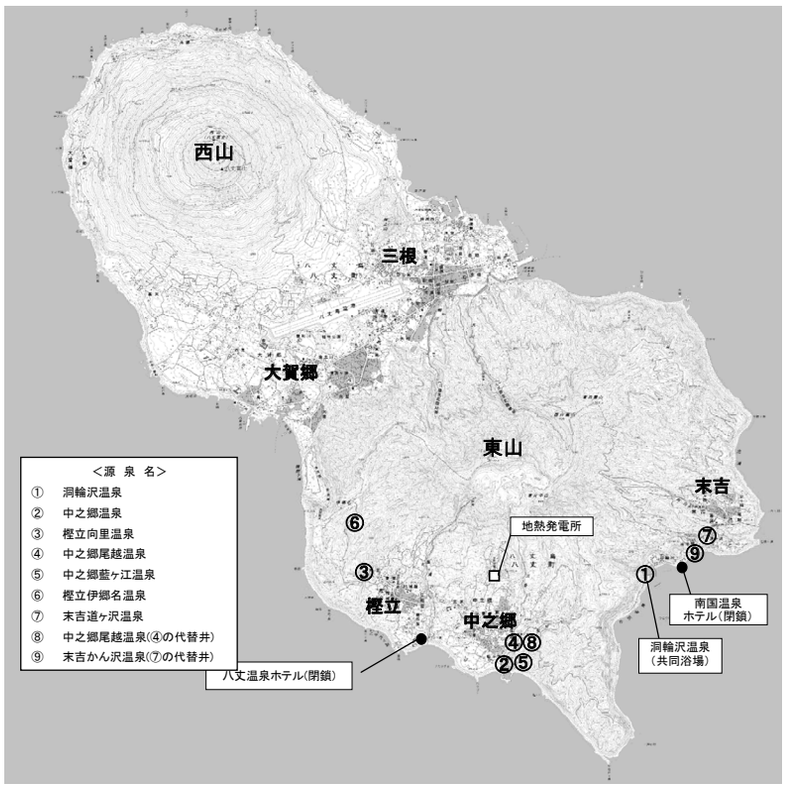


Fig.3-3-3　平成 4 年度以降の町営温泉井掘削地点（③～⑨）

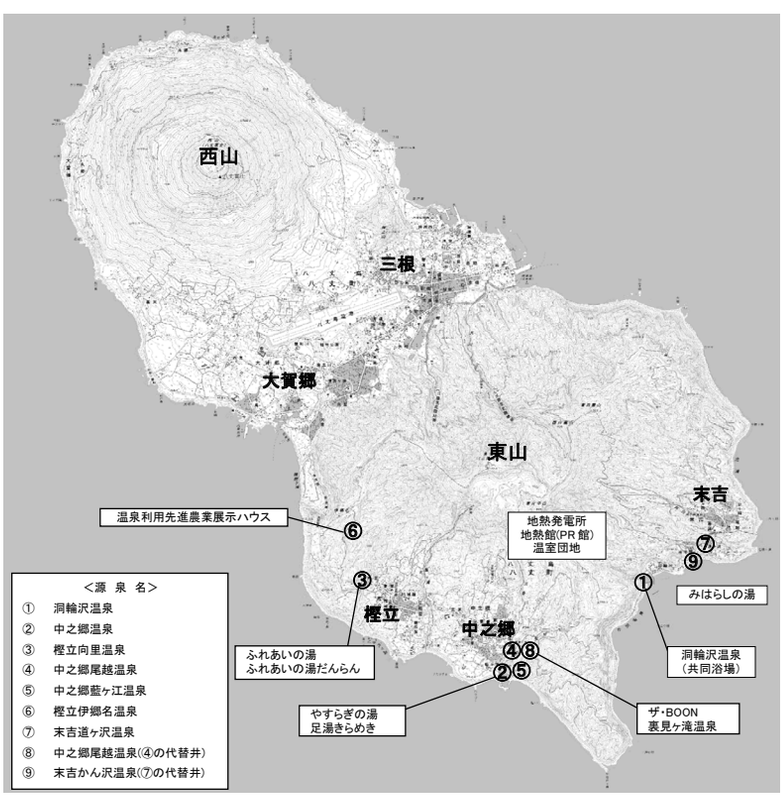


Fig.3-3-4　平成 21 年 7 月現在の温泉井位置と利用施設

無料で温泉水を持ち帰ることができる。

3-(3)-1)-d 地熱発電所から温室団地への熱供給，地熱館

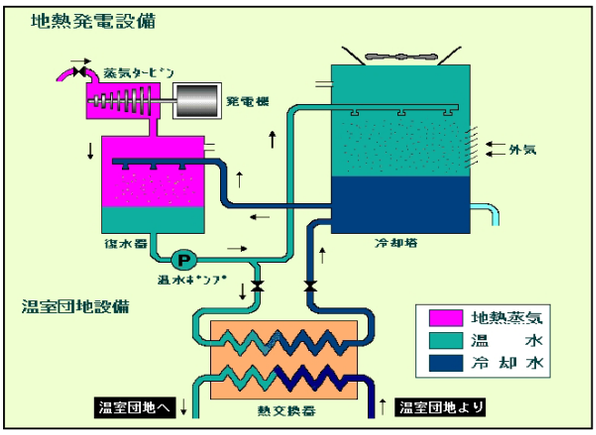
地熱発電所から周辺の温室団地へ 12 月～ 3 月の間，温水を供給し，温室内を約 15℃に暖房している。熱源はタービンを回した蒸気を復水器により凝縮した約 40℃の温水を用いており，熱交換器により農業用水を温め，温められた農業用水は温水造成所から各温室へ供給している（Fig.3-3-5）。地熱蒸気の熱は，最初は発電に使用し，その後は温室団地の暖房に使用し，無駄なく利用している（熱のカスケード利用）。

また，地熱発電所には地熱館（PR 館）を併設しており，地熱発電の仕組み（体験コーナー），八丈島誕生の様子（コンピュータグラフィックス）及びシアターの他，八丈島における電気の歴史などを紹介している。地熱館は，いつでも無料で見学でき，定期観光バスのルートにもなっており，町民及び観光客に広く利用されている。

3-(3)-1)-e まとめ

八丈島の東山南部地域に存在する地熱資源は，キャップロックを境として高温帯と低温帯に区分される。キャップロック内の高温帯は発電に，キャップロック上部の低温帯は温泉に利用され，地熱資源のすみ分けを行っている。発電に利用している熱水の塩素濃度は約 2,500mg/L に対し，温泉水の塩素濃度は 4,000 ～ 22,000mg/L と海水の混合率が高く，成因の異なる地熱資源である。

八丈島における地熱資源は，発電，温泉（浴用），農業など多目的に利用されており，温泉や地熱館（PR 館）は観光資源となっている。地熱発電は島のベース電源として利用され，温泉施設については年間利用者数が 17 ～ 18 万人に上っており，温室団地では果物や観葉植物等の栽培が行われている。八丈島の地熱資源は地産地消のローカルエネルギーとして，地域の活性化のみならずエネルギー・セキュリティの向上に寄与している。



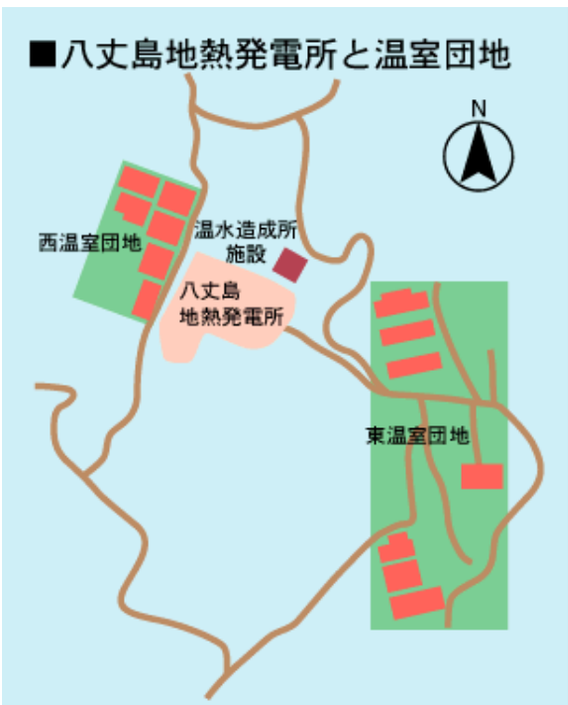


Fig.3-3-5　地熱発電所から温室団地への熱供給

Table 3-3-4　温泉施設の利用者数

温泉施設	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20
ふれあいの湯	66,388	72,198	72,753	78,222	75,412	75,815	72,621	81,829	83,051	73,058
やすらぎの湯	40,910	38,283	47,858	38,481	42,535	42,009	39,231	43,110	41,837	44,922
ザ･BOON	22,488	19,764	5,562	20,285	18,365	17,699	21,010	17,556	15,990	16,601
みはらしの湯	45,572	44,687	52,163	46,028	46,143	44,699	45,721	34,244	26,271	11,791
計	175,358	174,932	178,336	183,016	182,455	180,222	178,583	176,739	167,149	146,372
累計	922,527	1,097,459	1,275,795	1,458,811	1,641,266	1,821,488	2,000,071	2,176,810	2,343,959	2,490,331

注)累計は平成 6 年 10 月のふれあいの湯利用開始時からのものである。

（松山一夫・下田昌宏・高村光一・佐々木英代）

3-(3)-2)　松川における共生事例

3-(3)-2)-a 地熱開発の経緯

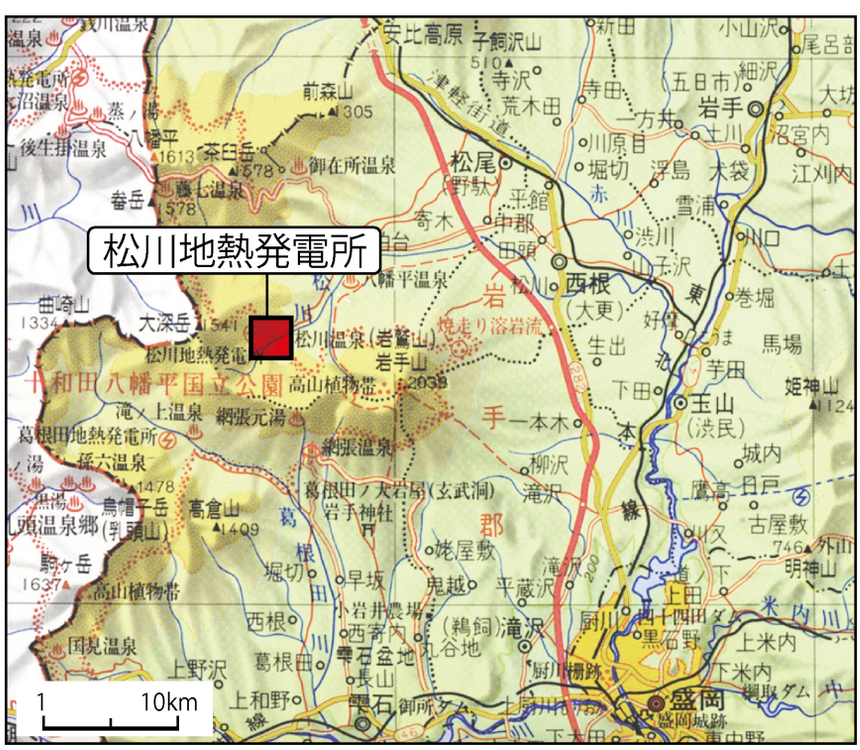
松川地熱発電所は，盛岡市から北西約 27km の十和田八幡平国立公園内の南東部に位置し，第四紀火山である秋田駒ヶ岳や岩手山などに取り囲まれた地域にある(Fig.3-3-6)。開発の発端は，日本重化学工業（株）のフェロアロイ製造に利用する低廉かつ常時の自家用電力源確保という課題があったことである。同社は水力発電も手掛けていたが，火山国である日本の特徴に沿った経済的な地熱発電を開発することが最適と考え，地域の選定を行った。松川地域に着目した経緯は，1952 年に地元の松尾村（現八幡平市）が温泉開発のためのボーリングを実施したところ，7 本の温泉井の内 6 本が蒸気を噴出したことに始まる（中村 ,1966a,1966b; 森 ,1967)。その情報を入手した日本重化学工業（株）は，1956 年 11 月より調査を始めた。通商産業省工業技術院地質調査所（現産業技術総合研究所）との共同での地表調査や 3 本の調査井掘削結果を基に，1963 年には生産井 M-1 と M-2 の掘削を行った。両坑井の成功を受けて 20MW の発電所建設を決定した。その後，発電所建設と追加生産井掘削を同時に進め，1966 年 10 月 8 日に 9.5MW の出力で発電を開始した。その後，追加生産井の合流により，1967 年には 12.5MW，1968 年には 20MW に認可出力をアップさせた。さらに，1973 年には 22MW に出力を変更し（七沢 ,1987), 1993 年はタービン更新により 23.5MW へと認可出力を変更した。

なお，松川地熱発電所は，2003 年 10 月 1 日より日本重化学工業（株）から東北電力（株）グループ企業である東北水力地熱（株）へ事業承継されている。

3-(3)-2)-b 温水利用について

温水利用については，七沢 (1987) に記載されている。それによると，松川地熱発電所の発電開始 (1966 年) 以来，地元温泉旅館に暖房用として地熱蒸気の一部を供給している。その後，1971 年には蒸気凝縮水を加温して，八幡平温泉開発（株）（現，八幡平市産業振興（株））に 70℃，60t/h の温水を有償で供給し，同社は東八幡平温泉郷の別荘・ホテル及び観光施設に分湯している。その後，温泉郷その他における温水需要が大幅に増加する見込みがあるとして，1981 年に，更に 200t/h の増湯の申し出が日本重化学工業（株）にあり，応諾することになった。このような経緯を経て，現在は東北水力地熱(株)が 70℃，最大 260t/h の温水を有償で供給している。

温水の供給先は，Table 3-3-5 のとおりである (Fig.3-3-7 参照)。



地形図は日本列島大地図館（小学館）より引用

Fig.3-3-6　松川発電所の位置図

Table 3-3-5 東八幡平温泉郷での熱水供給先

・ホテル・旅館・民宿・ペンション：38 軒
・保養所：25 軒
・別荘：613 軒
・商店 :15 軒
・貸別荘施設，病院，老人ホーム，日帰り温泉施設：各 1
・農業用ハウス：95 棟 (冬季のみ)

3-(3)-2)-c 観光への効果

松川地熱発電所は，十和田八幡平国立公園内に位置し，東八幡平温泉郷から観光道路である八幡平樹海ラインを通じて，八幡平山頂へと通じる観光ルート上に位置している。また，高さ 45m の自然通風型の冷却塔は，松川地域の景観上の象徴となり，各種観光パンフレットに写真が掲載されるなど，観光スポットとなっている。松川周辺地域の観光客数の推移を Fig.3-3-8 に示す。

松川地区への観光客は八幡平・藤七地区に含まれる。地元松川荘の声として「地熱発電所の成功に伴って，旅館の経営も順調に伸び，松川荘の現在の発展を招いたものと思っております。」(日本重化学工業株式会社社内誌「敬愛」1986 年 9 月 [地熱発電 20 周年記念特集] より引用) とある。東八幡平地区のホテルや民宿・ペンション・スキー場への観光客は，松川地熱発電所から温水が供給されている効果により集客につながっていると言え，松川周辺地域の活性化につながっていると考えられる。

（梶原竜哉）

3-(3)-3) 森における事例

3-(3)-3)-a 地熱開発の経緯

森地熱発電所は，道南の渡島半島中部に位置し，函館市の北方約 60km の茅部郡森町濁川地区に位置する (Fig.3-3-9)。森地域の開発経緯は，内山 (1983a,b)，北村 (1983)，好田 (1998)，鷹觜 (2002) 等で述べられており，それらを引用して，その経緯をまとめる。

森地域では 1967 年から 1968 年にかけて通商産業省工業技術院地質調査所 (現，産業技術総合研究所) が基礎的な地熱調査を実施されていた。その後，日本重化学工業（株）が 1972 年，森町に地熱開発を申し入れ，濁川盆地を中心に地熱発電の可能性調査を実施した。1973 年には工業技術院による全国地熱基礎調査「駒ヶ岳北部」が実施された。これらの成果に基づき，1973 年に北海道電力（株）に対して，共同開発方式による地熱発電開発の申し入れを行い，1974 年に 50MW 規模の地熱発電所の開発を目標とする共同開発基本協定が締結された。その後，1974 年には資源エネルギー庁による地質精密構造試錐調査が実施され，更に，日本重化学工業（株）により 1975 年～ 1977 年にかけて小口径調査井 9 本が掘削された。1976 年 12 月には，道南地熱エネルギー（株）が設立され，日重化の事業を継承し，

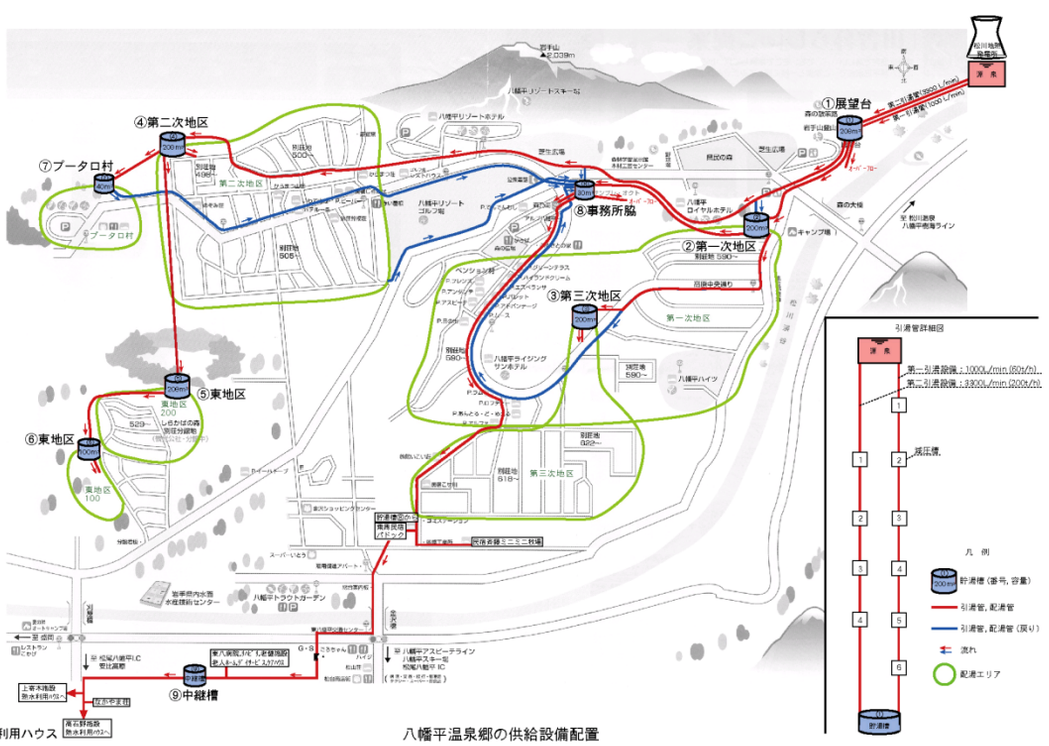


Fig.3-3-7 八幡平温泉郷の供給設備配置（八幡平市産業振興株式会社提供）

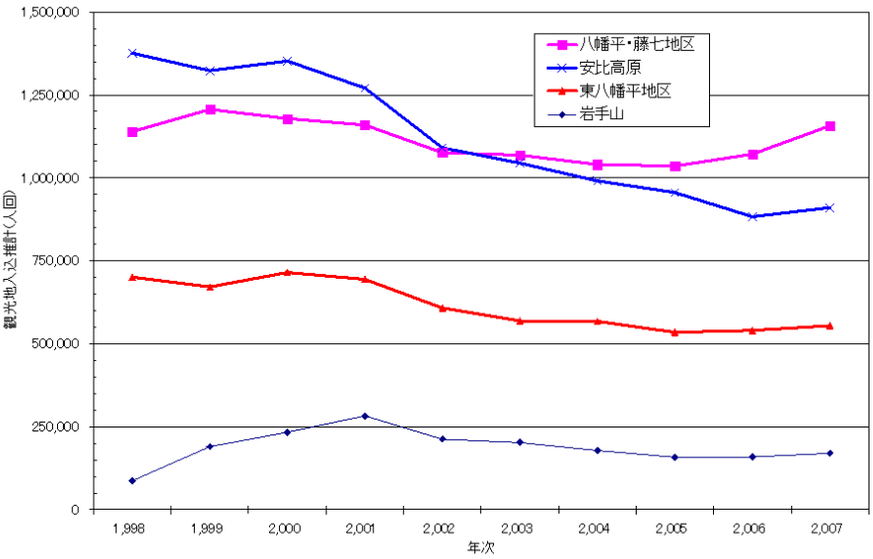


Fig.3-3-8　松川周辺地域への観光客数の推移
（岩手県観光協会資料に基づきグラフ化）

地形図は日本列島大地図館（小学館）より引用

Fig.3-3-9　森発電所の位置図

1977 年 3 月に道南地熱と北海道電力（株）間で共同開発基本協定が締結された。

生産井と還元井の掘削は 1977 年 8 月から開始した。その際，地元住民のより一層の理解と協力を得るため，1977 年 4 月に森町と道南地熱の間で「濁川周辺地域の地熱開発に関する契約書」を締結し，地熱開発についての事業活動，熱水の多目的利用・供給の基本的な進め方，自然環境の保全，公害・災害等の未然の防止に関する取り決めを行っている。

地熱発電所の建設は，1980 年 12 月の国の電源開発調整審議会に上程，了承され，国の電源開発基本計画に組み入れられた。その翌年の 1981 年 4 月に建設着工となり，1982 年 11 月に認可出力 50MW で運転を開始した。

なお，2004 年 2 月に，道南地熱エネルギー（株）から北海道電力（株）に蒸気生産設備が譲渡されている。

3-(3)-3)-b 温水利用について

温水利用については，内山 (1983a) に記載され，その詳細が長谷川 (1986) に示されている。それらによると，開発当初から地熱発電事業に伴う地熱熱水利用が計画されていた。1973 ～ 1975 年には北海道開発庁と北海道による熱水利用調査が，1977 ～ 1979 年には北海道開発庁による農村開発基盤整備事業推進調査が実験温室において実施されている。それらの結果を基にして，1982 ～ 1984 年には，新農業構造改善事業を通じた本格的な地熱水利用野菜生産温室団地が発足した。地熱発電所側としては，還元熱水の一部を熱交換施設 (約 120℃，最大 150m^3/h) に無償で供給している。熱交換施設は熱水利用組合が管理し，二つの地区に対して，69 棟のハウス(トマト・キュウリなどを栽培)に温水を供給・利用している。熱水利用システム概略図は Fig.3-3-10 に示す。

3-(3)-3)-c その他の取り組み

森町が主催する地熱開発事業連絡協議会が濁川地区にあり，これにオブザーバとして参加し，温泉業者との情報交換を行っている。

（梶原竜哉）

3-(3)-4) 鬼首における共生事例

3-(3)-4)-a 鬼首温泉の源泉所有者との懇談会

鬼首地熱発電所（出力 12.5MW）は 1975 年 3 月に運開した。発電所周辺の温泉としては，鬼首温泉が地熱発電所の西方 3 ～ 4km に位置しており，宮沢温泉，轟温泉，吹上温泉（間欠泉）といった自然湧出の複数の温泉が点在している。また発電所南西方約 2.5km には神滝温泉がある。これらの源泉所有者とは，地元自治体（市町村合併前は鳴子町，合併後は大崎市鳴子総合支所）の関連部署の職員も含めて，毎年定期的に懇談会を開催しており，電源開発（株）から発電所の運転状況を説明すると共に，生産補充井や還元井等新たな坑井を掘削する際には，温泉掘削申請の前の計画段階から，掘削理由・仕様詳細等を説明し，発電所運転について関係者の理解と協力を得ている。このような定期的な懇談会で意見交換することにより，地元の源泉所有者と良好な関係を構築している。

また，これらの自然湧出の源泉のモニタリングを地熱発電所運開前から継続して実施している。モニタリング項目は，pH，泉温，湧出量であり，これらの項目が測定不可能な吹上温泉（間欠泉）は，間欠泉の停止時間と噴出継続時間をモニタリングしている。これらの結果は毎年，第三者機関として位置づけられる自治体関連組織の鳴子町温泉事業所（市町村合併後は第三セクターとなった）に報告している。鬼首地熱発電所運開以来 35 年弱の源泉モニタリングデータが蓄積されており，地熱発電所が源泉に影響を及ぼしていないという事実を客観的に示しているものと考えている（なお，各源泉のモニタリングデータについては，各源泉所有者の事業運営に係る情報であり，公表はしていない)。

3-(3)-4)-b 地熱発電所の地元への経済効果

・発電所定期点検（毎年）時の宿泊：鬼首地熱発電所では年によって期間は変わるものの毎年定期点検を実施しており，短い定検時で約 700 人泊，長い時で約 1,000 人泊の宿泊利用がある。

・ＰＲ館（4 月～ 11 月末の 8 ヶ月開館）の利用者は年間約 7,000 人～ 10,000 人で，年平均約 8,000 人が訪問している状況である。それに関連した地元への経済効果もあると考えられる。

・冬季間の除雪費用：冬季間でも発電所へのアクセス道路は除雪して確保する必要があり，除雪作業は毎年地元の業者に委託実施している。

・その他，出来るかぎり地元の業者から資材・サービスの購入に努めている。

（中西繁隆）

3-(3)-5) 滝上における共生事例

3-(3)-5)-a 地熱開発の経緯

滝上における地熱開発調査は，出光興産（株）が 1977 年度から全国規模で行った地熱資源調査の結果を受けて，1979 年に設立された出光地熱開発（株）により本格的に開始された。

滝上地区は広域的な地質構造から見れば数多くの火山，噴気，温泉等が認められる別府湾から雲仙に至る「別府 ― 島原地溝帯」に位置している。しかし，滝上の周辺には温泉等の地熱徴候がほとんど認められず，調査初期は，重力探査，MT 探査などの物理探査を主とした調査

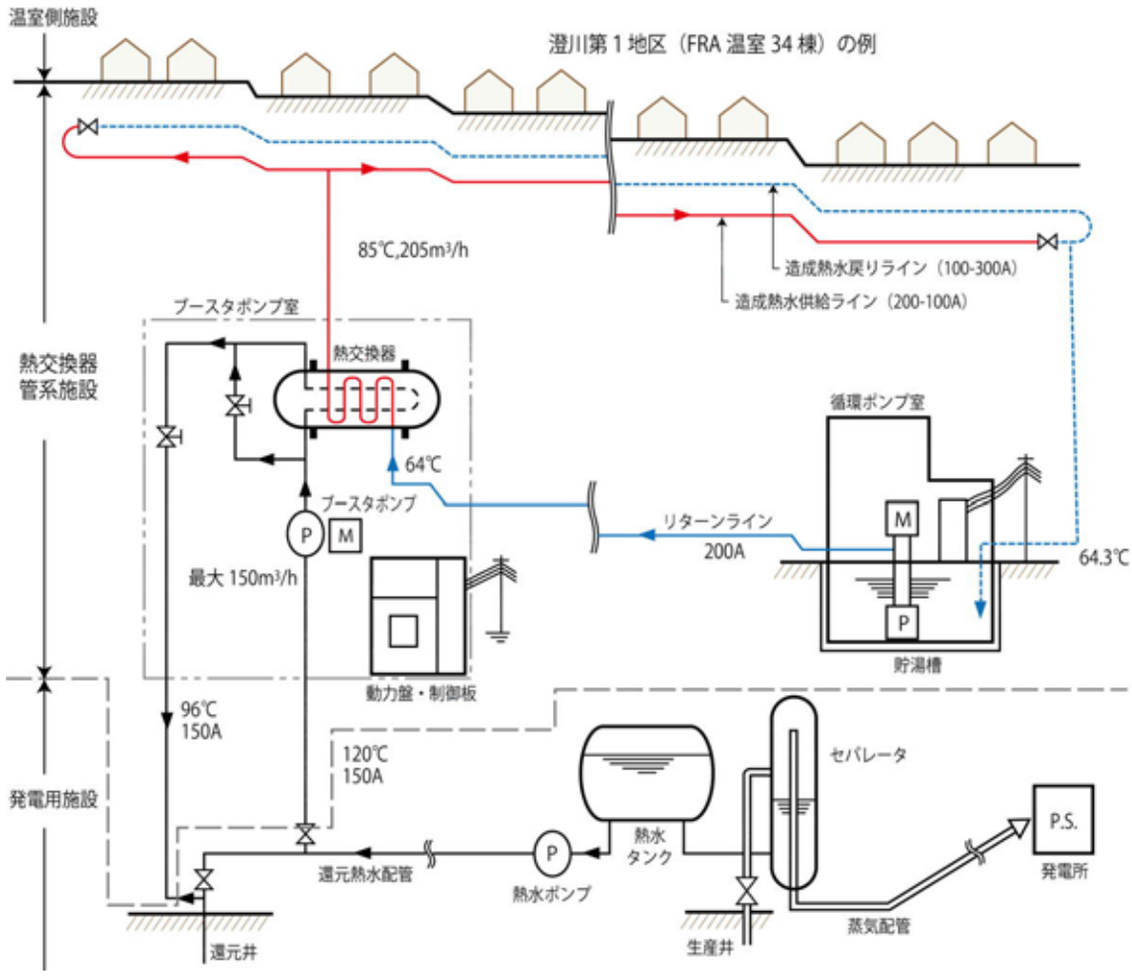


Fig.3-3-10　熱水利用システム概略図

を実施し，1981 年に小口径井の掘削によって，地下に発達する低比抵抗帯の中心部で約 200℃の地熱流体を確認した。その後調査域を拡大して南部及び西部で 250℃程度の高温部の広がりを確認，1986 年より本格的に大口径調査井掘削を開始した。

1989 年，20 ～ 30MW の発電に相当する蒸気量を確保したので，九州電力（株）に発電所建設を申し入れ，1991 年，出光地熱開発（株）が蒸気部門を，九州電力（株）が発電部門を分担して，25MW の発電所を共同開発することで合意に至った。

1993 年，出光地熱開発（株）より事業を継承した出光大分地熱（株）は，環境アセスメントを経て，1994 年第 127 回電源調整審議会の計画承認を受け，1995 年 4 月より建設工事に入り，1996 年 11 月 1 日営業運転を開始した。

運転開始後は安定的な生産・還元が維持され，かつ発電設備の順調な稼動により，運転開始後 13 年間の平均暦日設備利用率は 95％と安定した運転を継続している。

3-(3)-5)-b 滝上地区の温泉井

滝上地区は周囲を崩平山（標高 1288m），鹿伏岳（標高 1,024m），野稲岳（標高 1,038m）等に囲まれた標高 700 mの丘陵地である。東方に約 5km には由布院温泉，湯平温泉が位置しているが，開発エリア（東西 3km×南北 4km）内には温泉は無く，変質等の地熱徴候もほとんど見られない。

北側で隣接している野矢地区は小規模な温泉，変質帯などが認められ，かつて大分県企業局によって地熱調査が実施された場所である。現在この地区には自家使用の温泉井が 3 本（内 1 本は共同湯として提供：野矢温泉）と水分峠温泉（民宿経営）の 1 本がある。

3-(3)-5)-c 開発エリア内の熱利用

発電設備及び蒸気生産設備を設置している開発エリア内には主として農業，林業に従事されている滝上・寺床の 2 地区，合わせて約 40 戸の民家がある。

運転開始後の 1997 年及び 1998 年から，九重町と共に，滝上･寺床両地区への地域協力事業の一つとして熱

水供給設備を建設し，給湯を行っている。

熱水は蒸気配管の凝縮水排出に随伴する蒸気と河川水や湧水を混合させて造湯し，共同浴場及び地区の貯湯タンクに供給している（Table 3-3-6)。

Table 3-3-6 滝上・寺床地区への給湯内容

・滝上地区　毎時 10.2 トン　80℃ （造湯槽出口） 3 箇所の貯湯タンクまで ・寺床地区　毎時 1.2 トン　70℃ （造湯槽出口） 1 箇所の共同浴場 注 1　熱水利用に当っては民生利用に限定している。 注 2　給湯設備（造湯設備，熱水･清水輸送管，タンク等）は両地区民と出光で分担管理及び定期的に共同清掃作業を実施している。

3-(3)-5)-d その他の地元への経済効果（項目のみ）

①電源三法交付金

②固定資産税

出光大分地熱（株）分として平成 19 年の実績で 16 百万円。

③地域住民 (九重町民) の雇用

出光大分地熱（株）の雇用は，九重町から女子事務員 1 名採用。

山九（株）（運転請負会社) は，九重町内から 3 名採用。計 4 名

④ 地元 (九重町内) での消費効果

地元旅館・ホテルへの宿泊者数

(施工会社人員の宿泊)

・定検時 (2 年ごと) 約 600 人・泊

（2008: 定検時実績より）

・還元井掘削時 (不定期) 約 1,900 人・泊

（2005:TR-8 掘削時実績より）

・生産井掘削時 (不定期) 約 3,000 人・泊

（2006:TP-2 掘削時実績より）

地元会社への工事発注・工事用資材購入

・通常時 (年平均)10 百万円／年

・還元井掘削時の地元発注分 (土木・燃料)

25 百万円（2005:TR-8 掘削時実績より）

・生産井掘削時の地元発注分 (土木・燃料)

26 百万円（2006:TP-2 掘削時実績より）

地元商店からの購入

・通常時 (年平均)　燃料代，事務用品，昼食，他　約 900 千円／年

⑤温泉業者との共存共栄

滝上周辺市町村の町有泉源確保のために地表調査やスケール対策等の技術協力

⑥その他

材搬入や通勤も兼ねる滝上地区の砂利道 (約 2km) を拡幅・アスファルト舗装

（森山清治）

3-(4)　温泉との共生のための「システム」

3-(4)-1)　はじめに

温泉と地熱発電の共生を積極的に考える上で，発電利用後に残る余剰熱エネルギーの利用や温泉で利用されていない温度範囲での余剰熱エネルギー利用を考慮した共生システムは，地熱発電と地域社会が調和していく上で非常に重要な役割を持つ。地域の温泉と地熱発電の共生のあり方についての概念を以下の Fig.3-4-1 に整理した。

この図において，自然界においては，自然界の水の供給や生産・還元に伴う水の循環による質量バランス及び地下深部の熱源（マグマ）からの自然界の熱の供給による熱バランスに基づき，温泉帯水層と地熱貯留層を均衡させることを想定している。この時，地熱発電が隣接する温泉地において，地熱発電所余剰熱エネルギーや温泉の余剰熱エネルギーを地域全体として多段階（カスケード）に有効利用していく。そして，これと同時に，温泉の抱える様々な技術的問題（温泉の減衰や温泉スケールへの対策等）を地熱発電所の知見・ノウハウ・データ等を利用しながら解決していく。このことを通じて，地域の温泉と地熱発電所の両者で地域の地熱エネルギーがもたらす大きな恵みを共有し，積極的な共生を図っていくことがこの共生システムの本質である。

本章では，まず，地熱発電と温泉との共生のための「システム」に関して概念的な整理を行う。また，具体的な余剰熱エネルギーの段階的（カスケード）利用について事例を含めて整理する。さらに，高温温泉の給湯温度までの温度差を活用した比較的小規模の温泉発電と，やや大きめの電力供給に主眼を置いた温泉発電についても紹介し，温泉と地熱発電の積極的な共生システムのあり方について提示する。

温泉と地熱発電の共生を積極的に考える場合，地熱エネルギーがもたらす大きな恵みを活用して地域特性や営みに合わせた直接的なメリットを地域にもたらすよう，発電利用後に残る余剰熱エネルギーを多面的に活用する発想がある。このためには，地熱エネルギーよる発電システム等に加えて，それ以外の熱エネルギーを回収して有効に活用する何らかの「システム」を設けることが不可欠である。既に我が国や諸外国においては，地熱発電と地域社会が調和して，総合的な地熱エネルギー活用が地域にとって不可欠なものになっている事例は少なくないが（第 3 章，3-(3) 参照)，それらを温泉や地域社会との共生に有用な「システム」として捕らえてまとめた例は少ない。

本節では，前章までに示された「地熱」と「温泉」との関係性の科学的な分析や，前節までに示されたこれまでの共生事例を踏まえながら，地熱発電に付加される部

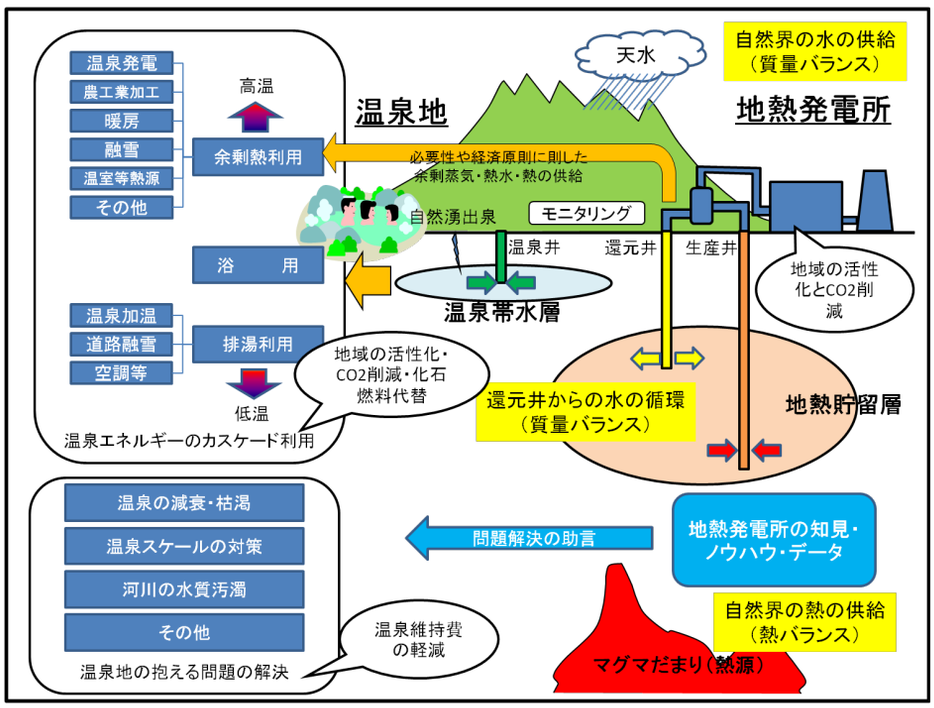


Fig.3-4-1　温泉と地熱発電の積極的な共生システムの概念

分を含めて，「システム」として基本的な概念を取りまとめるとともに，構成する要素技術についても整理を行う。基本的概念には法的・制度的な面での制約をここでは設けず，出来るだけ客観的に，全利害関係者（ステークホルダー）が共生方法の可能性として検討できるための概念整理と情報の提供を試みる。

3-(4)-2)　温泉との積極的な共生のための「システム」の概念

3-(4)-2)-a「システム」の定義

「システム」という言葉の一般的な意味は，「相互に関係し合う要素から構成される，仕組みやまとまり全体(系)」を指し，地熱エネルギー利用においては「地球システム」ならびに「社会システム」も極めて重要な考慮すべき要素である。しかし，これらは複雑で膨大な内容であり，本報告書全体がこれらとの調和を意図していることから，本節で扱う「システム」についてはハードウェア面を主に対象とし，「地下の熱からエネルギーを採取して電力への変換をする装置を前段に含むことを基本にし，それ以外の熱エネルギーを何らかの形態に変換し，供給し，何らかの目的で利用するための“系”」を意味することにする。また，便宜的に「システムが地域にもたらす便益の増大＝共生実現可能性の増大」と単純化して考えることとする。

「地球システム」に関しては，例えば「地熱」と「温泉」が同じ地球システム内にあると理解して影響の可否を判断したり（第 2 章），あるいは積極的に水資源を涵養したり地熱同様の貯留層管理を試みることで温泉資源の長期保全が可能ではないかという発想（第 3 章）などが含まれる。また，地球から授かる便益をどのように処理し共生を実現するかは「社会システム」における大きな課題でもある。

3-(4)-2)-b「システム」の目的

地熱発電に付随して「システム」を構成し設置する目的は，「地熱発電後の余剰熱（場合によっては余剰電力を含む）を，それぞれの地域（しばしば温泉地域）において，それぞれの地域特性に応じてメリットになるように有効に活用できるようにする」ことである（Fig. 3-4-2)。

ここで「システム」の技術的な役割は，熱エネルギーの「採取」，「運搬」，「変換」，「利用」である。「変換」としては，主に熱交換器やヒートポンプ技術等によって温度レベルの違う熱エネルギーに変換することが考えられるが，余剰熱エネルギーが十分な場合に小規模発電を付加することや，動力源としての利用なども可能性に含まれる。「システム」がもたらす地域メリットとしては，広く光熱水費の節約（給湯，冷暖房，冷凍冷蔵，乾燥等への活用），地域産業の振興（農林水産業や工業への熱供給等），安全･安心（融雪，非常時ライフライン）など

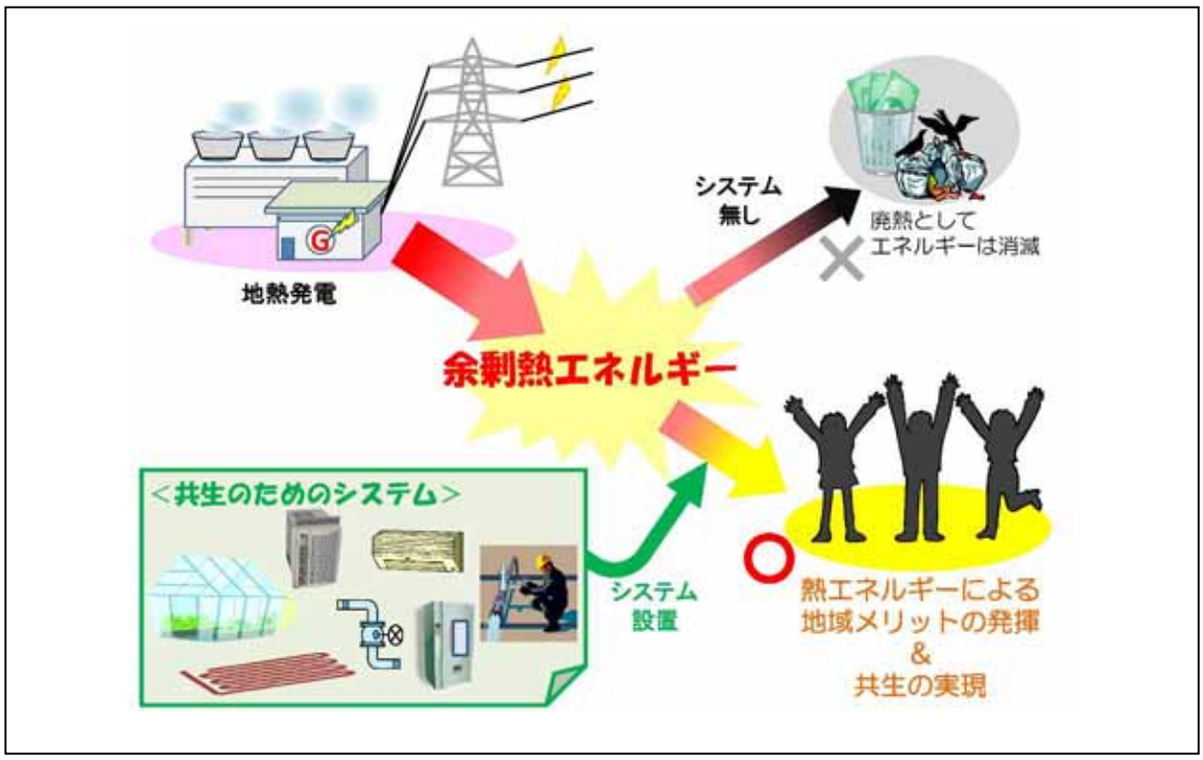


Fig.3-4-2　システムの目的と役割の概念

が考えられる。

3-(4)-2)-c「システム」にかかわる地熱発電の主体と優先度

前述のように，本節における「システム」は地熱発電の存在を前提にしているが，その事業主体が誰であるのか，発電事業にどのような態度で取り組むのかによって，地域が受ける便益の範囲や「システム」構築における設定条件等が異なってくる。これまでの地熱発電の導入では，地域から見れば「地域外からの第三者の参入」がほとんどであったが，再生可能エネルギーを積極活用していく未来においては，地域自体が主体的に「地熱」を検討するようになることは想像に難くない。よって，共生のための「システム」構築やこれを含めた地熱エネルギー利用の構想に当たっては，これらの要素を整理しておくことが不可欠である。

地熱発電の事業主体の考え方を，大きく以下の二つに分類する。

①地域外から参入する主体（発電事業者等）が，基本的に全量を売電（グリッド送電）することを目的にして，比較的規模の大きな地熱発電を目指すケース。

②地域を代表する主体（温泉事業者，地域の事業団体，自治体等）が，基本的に地域内で利用することを目的に，主に中小規模の地熱発電を行い，生産量に応じて，売電や熱事業へ発展するケース。

また，地熱発電に対する基本的な態度としては，

(A) 地熱発電の効率を最優先に考えられる場合。

(B) 地下の水や熱資源の利活用に基づく社会システムや文化が既にあり，その許容する範囲内で地熱発電を含む開発利用やその拡大，高度化を考える場合。

が考えられる（Fig. 3-4-3)。

これらの①－②，(A) － (B) のバランスや組み合わせは地域状況に応じて定まり，共生に有用なシステムも異なってくる。例えば (B) 側の地域の既存の熱・水資源利用を重要視する態度で出発しても，地域が主体（②）であり地球システムが許す範囲内での可採エネルギー規模が十分大きいことが明らかになった場合には，比較的規模の大きな地熱発電を目指す方が地域に大きなメリットを生むことも考えられる。一方，地域外の事業主体（①）が地熱発電最優先（(A)）で構想しても，社会的・経済的条件によっては，地域主体の②-(B) に転換することが，地域メリットを生み再生可能エネルギーとしての地熱の役割を高めることに繋がることも考えられ得る。このように，ケース・バイ・ケースの柔軟な態度でシステムを構想することが大切である。

3-(4)-2)-d「システム」の空間的な分類

「システム」の空間的な構成は，その主たるエネルギー源が地熱発電の施設付近となるため，当該地域の社会経

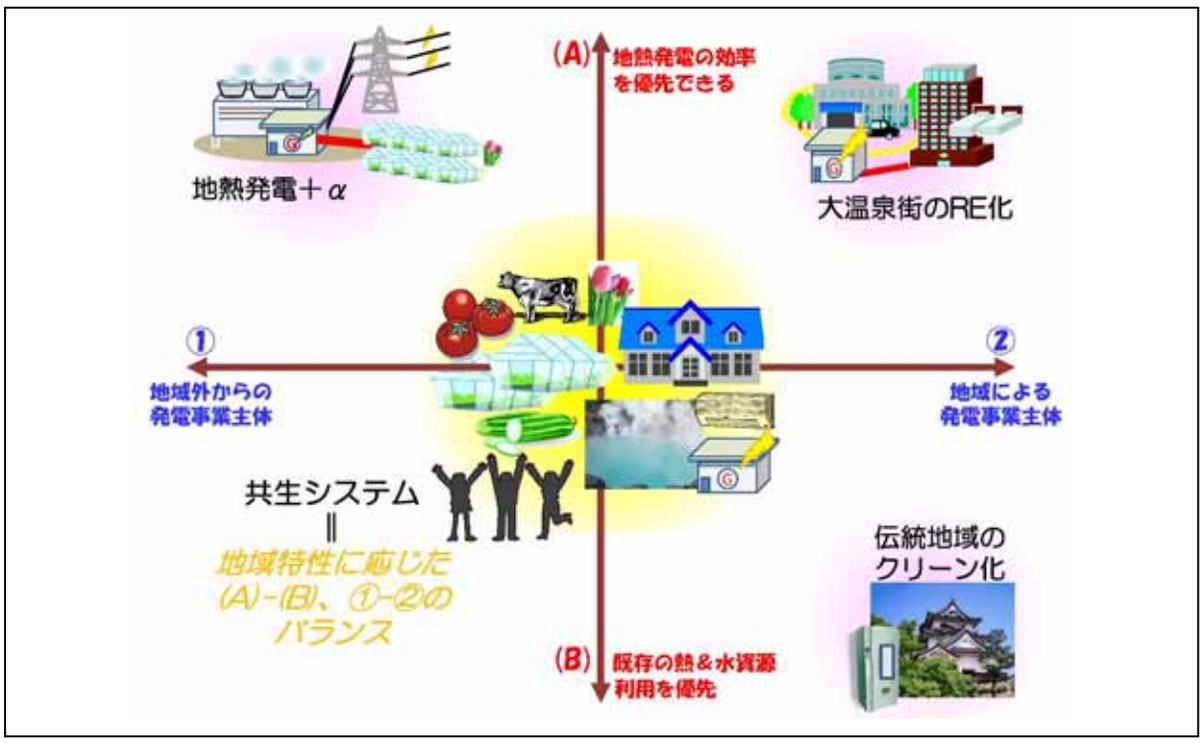


Fig.3-4-3　システム設置の際の発電の主体と優先度との関係の概略図
現実には，両者のバランスが事業ごとに図られる。図中の３例は極端なケースのイメージである。

済活動領域との空間的関係に対応して異なってくる。ここでは，以下の三種に大きく分類する。

- 集中型：地熱発電プラントと多目的熱利用設備等が比較的近接する一つの地区に集まっているシステム形態。
- 分離型：地熱発電プラントからパイプラインで熱エネルギーは運搬され，多目的熱利用設備等は地熱発電からは分離した当該地域の別地区に位置するシステム形態。
- 分散型：多目的熱利用設備等が，地熱発電施設付近，当該地域の別地区，及び両者を結ぶパイプライン途中などに分散して存在するシステム形態。

「システム」の具体的なデザインに当たっては，関与する全てのステークホルダー（当事者：発電事業者，熱エネルギー利用者，温泉事業者，行政，銀行，自然・環境問題関係者，一般地域住民など）による協議によって最適化が図られ，その結果としておおよそ上記三類型のいずれかの形の「システム」が選択されるものと考えられる。ここで重要な点は，共生のための「システム」形態は固定的なものではなく，その配置や規模，利用方法などは，当事者により柔軟に定められることである。また，必ずしも地熱発電が主ではなく，既存温泉地に後から小規模な発電設備を設置する場合にも，これらの類型は基本概念として同様に構想されるものである。

3-(4)-2)-e 共生のための「システム」構築までの流れ

これまで述べてきたように，共生のための「システム」は規模や形態が多様であり，また基本構想や設計の“最適性”を判断する基準も，地域毎の発電事業主体やステークホルダーの構成で変わってくる。従って，その設計・構築の詳細を一般化して示すことは困難である。ここでは，おおよそ一般的と考えられる範囲での大まかな流れ

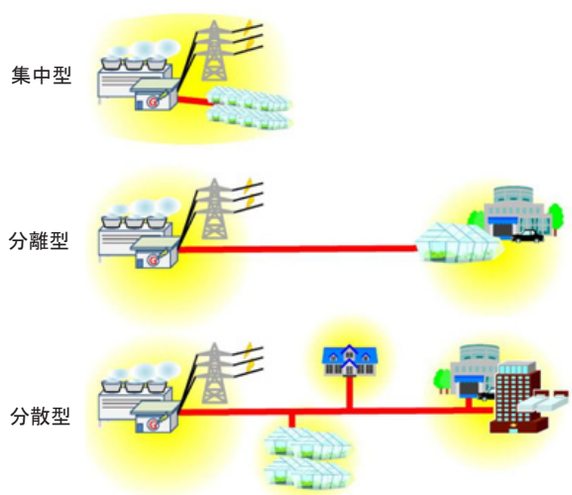


Fig.3-4-4　システムの空間的な分類イメージ

を Fig.3-4-5 に示す。

システム構築に当たっては，地下状況の把握は常に不確実なものであることから，必ずしも一方向的な流れになるわけではなく，試行錯誤的に評価と修正が必要である。また，最適化には全ステークホルダーの合意形成が不可欠であることから，システム構築の初期の段階から，想定される利害関係者の全てに基本情報や問題点が共有されることが望ましい。

3-(4)-2)-f　システム構成の概念例

これまで述べてきたように，地熱発電と地域社会との共生に有効な「システム」の構築では，事前に固定的なシステムを考えることは困難であるが，ここでは 3-(4)-2)-c および 3-(4)-2)-d の分類に従って概念的な例示を Fig3-4-6 に示す。

ここでは、二つのシステムの構成イメージを示したが，必ずしも“地域外事業者＝大規模”,“地域主体＝小規模”と限定されるわけではなく，これからの社会情勢の変化によっては地域が戦略的に再生可能エネルギーの生産に取り組むことも十分考えられる。システム構成については，多様なステークホルダーの参画の下に，段階を追って構築していくことが共生のための「システム」を真に実現するためには不可欠である。

3-(4)-3)　システム構成のための要素技術

地熱発電と地域（温泉）が共生するための「システム」を実現するのには，基本的には全て既存要素技術の組み合わせで可能である。

・発電技術

天然の地熱蒸気を用いてタービンを駆動する他，バイナリー発電では熱交換によって低沸点媒体の蒸気でタービンを回すことにより 80℃程度の温泉水によっても発電が可能である。また，熱電変換素子によって温泉水から極小規模の電気を起こすことも可能である。

フラッシュ発電（水・ランキン・サイクル）

バイナリー発電（オーガニック・ランキン・サイクル，水－アンモニア・ランキン・サイクル，カリーナ・サイクル，ウエハラ・サイクル）

熱電変換発電（Bi-Te 系熱電変換素子）

・給湯管・パイプライン

地熱発電関連分野の他に都市熱供給や熱水供給事業などでも多くの実績がある。断熱性のよいパイプラインを用いた場合，理想的な状態では 60km 程度まで熱水の輸送が可能と言われている。地熱水の輸送時にはスケール沈積が問題になることがあるが，薬品注入技術の他にもいくつかの新材料が検討されている（ただしパイプラインとしての実績は不明である）。

金属管，コンクリート管，FRP 管，真空断熱パイプライン

ファイバーグラス断熱材

改質硫黄固化体，有機フィルム材料

・熱交換器

本「システム」においては，「液体 - 液体」での熱交換によって熱エネルギーの採取時に用いられる。規模の大きな地熱発電との共生においては，クーリングタワーからの熱利用も考えられる。

プレート式熱交換器（分解清掃可。能力の変更が容易）

スパイラル式熱交換器（汚れにくい，コンパクト，低温度差対応など，高性能）

①地域が賦存する地熱エネルギーの全体量の把握
↓
②地域需要（形態，量）や地熱以外の制約条件（地形，交通，自然条件，水資源等）の把握
↓↑
③地熱発電所の条件設定（②～④についてはフィードバックしながら最適化）
↓↑
④地域に供給するエネルギーの形態，規模の設定
↓
⑤熱交換器，パイプライン，利用施設等の具体的なシステムの構築
↓
⑥地熱発電所の操業及び「システム」の地域活用の開始

Fig.3-4-5　システム構築までの流れ

Ⅰ：”① - (A) **分離型”のケース**

※この場合，地域外から事業主体（①）が比較的大規模の発電事業を構想して参入し，地熱発電の効率を優先しながら（(A)），**地域の社会経済や文化歴史などと協調した合意形成の上で，**地熱発電と共に地域にメリットを生む「システム」の構築が図れる。地熱発電を優先できるのは，近傍に温泉地が存在しないか，影響が十分小さいと考えられることが前提である。また共生のための「システム」は，多くの場合に分離型になる（地熱発電所と地域社会活動の場が離れている）。地熱系からの総エネルギー採取量，地熱発電の規模，地域への供給エネルギー量や規模などについては，科学的・客観的知見に基づきながら，利害関係者が総参画した「ガバナンス」によって定められることが，共生のための「システム」を成功裏に実現する前提として重要である。

地熱井・商用発電 ————→ グリッド売電**【地域外事業者の便益】**
↓
↓（地域電力供給）　　**【以下，新たに地域が得られる便益】**

（地域向け発電［バイナリー発電］）
熱エネルギー採取［熱交換器］←————— 冷水供給［河川，井戸水，水道水等］
↓
熱水の地域への運搬［ポンプ，パイプライン］
↓
多目的利用設備へ
［給湯，冷暖房，冷蔵冷凍庫，ハウス農業，養殖漁業，乾燥工程，発酵工程，
洗浄工程，殺菌・滅菌，融雪，等々］
↓
温泉地域へ，より深部の地層からの温泉水の供給

Ⅱ：”② - (B) **集中型”のケース**

※この場合，各地域の事業主体が，自ら（あるいは地域）が有する既存の温泉等熱エネルギー利用設備の余剰エネルギーを利用し，地域にメリットを生む「システム」を構築する。ここで地域に供給されるエネルギー量の上限は，温泉事業者等の既得権益保持者との対話により定められると予想できる。地域主体の場合には，比較的規模が小さくなり熱利用需要が大きくなると想定されることから，集中型構成になることが考えられる。

温泉井・熱水利用＝＝＝＝＝温泉ビジネス**【既存の地域産業としての便益】**
↓
地域発電［バイナリー発電］　　**【以下，新たに地域が得られる便益】**
↓
熱エネルギー採取［熱交換器］←————— 冷水供給［河川，井戸水，水道水等］
↓
熱水の地域内での配湯［ポンプ，パイプライン］
↓
多目的利用
［給湯，冷暖房，冷蔵冷凍庫，ハウス農業，養殖漁業，乾燥工程，発酵工程，
洗浄工程，殺菌・滅菌，融雪，等々］

Fig.3-4-6　システム構成の概念的な例示

プレート＆シェル式熱交換器，二重管式熱交換器，多管式熱交換器
タンクコイル式熱交換器，直接接触液式熱交換器

・ヒートポンプ技術（給湯，冷暖房，冷蔵冷凍）

現在，我が国では空気熱源の給湯装置が普及しており，地中熱分野でも室内空調向けの利用が多く考えられている。しかし，類似技術のものとして冷蔵冷凍機器があるなど，原理的には多様な活用が可能である。地熱を用いた冷蔵冷凍機器は，地熱をいったん電気に変換してから冷蔵庫を駆動するよりも効率が良いことなどから，海外では近年注目されている。

蒸気圧縮ヒートポンプ（気体液化ヒートポンプ：現在，地中熱に利用されている）

吸収式冷凍機（吸収力の高い液体に冷媒を吸収させ，低圧で気化させて低温を得る冷凍機。熱駆動ヒートポンプとしての利用も可能である。冷媒 - 吸収液として，空調用の水 - 臭化リチウム・冷凍用のアンモニア - 水を使用したものが実用化。
→ アラスカ氷の博物館：2005, GRC the best new direct use geothermal project in the United States を受賞 (Holdmann and Erickson 2006, Chena Hot Spring Resort HP など)。）

吸着式冷凍機（冷媒を蒸発器で低温蒸発させるため，シリカゲルなどの固体吸着材を冷却しながら冷媒蒸気を吸着させることによって低い圧力を得るもの。冷媒は，凝縮器で冷却・液化され再び使用される。冷媒として，水が一般的に使用される。太陽熱，コジェネレーション・工場プロセスの低温排熱を利用した冷水製造に使用されている）

・温熱ハウス関係

温泉水等のハウス農業等への活用事例は，国内においても歴史が古く事例も多い。機器等については，比較的扱いやすい温度で利用されることから，各地域の工務店等の制作など簡便なものでも十分な効果が得られることが報告されている。

温水利用空調装置（温風機による加温など）
土壌温度調整（塩ビ管等比較的簡便な装置による事例多数）

・その他

乾燥装置（木材乾燥設備：小国，高温地熱蒸気利用乾燥設備：ニュージーランド，
温泉熱による製塩：現在では廃れている，乾燥野菜工場：米国ネバダ州 Empire，衣類乾燥室：兵庫県湯村温泉，現在では廃れている）
発酵装置（装置不明：津軽味噌醤油（株），温泉熱静置発酵槽（アロニア果汁）：北海道）
消毒装置（装置不明：温泉熱低温殺菌牛乳（栗駒高原），ドラム缶等による温水層：種籾温熱消毒（福島県会津若松））

3-(4)-4)　まとめ

前節までの科学的な分析や事例に基づいて，「地熱」と「地域（温泉）」が共生出来るために役立つであろう「システム」を出来るだけ一般化して客観的に捉え，定義，目的，構成，実現までの流れ等についての概念を整理した。また，具体的なシステム構築の段階で有益な要素技術についても列挙した。ここで挙げた要素技術事例はインターネットで容易に見いだせる範囲のものであり，今後より具体的に「システム」を構築する場合には，実際の適用現場の詳細な調査等を行って各要素技術の特性と各地域の地熱資源や需要とのマッチングを図り，構想する「システム」の現実性を高めていくことが必要である。

本節では主に機械的な意味でのシステムの取りまとめに注力したが，一部，合意形成に関わる記述を含んでいる。これは，不透明かつ不確実で扱いが困難な地下を対象とする地熱においては，いかに詳細な「システム」の事前検討であっても，開発～利用までの全過程において必ずしも 100% の有効性を発揮することは期待できないと考えるからである。つまり，日本の地熱エネルギー資源を有用な再生可能エネルギーとして活用を広めていく上では，他に規定される環境問題の処理よりも，さらに慎重な全利害関係者（ステークホルダー）による合意形成プロセスが各地域において必要であり，その場面で本節での「システム」の概念整理がより強く意味を持つものと期待している。

（相馬宣和）

引用文献

Antonelli, R. and Fabbri, P. (1988) Analysis and comparison of some values of transmissivity, permeability and storage from the Euganean Thermal Basin. Trans., IAH 21st congress, Karst hydrogeology and karst environment protection, Guilin, China., 707-718.

Antonelli, R., Fabbri, P., Iliceto, V., Majorana, C., Previatello, P., Schrefler B. and Sedea, R (1995) The geothermal Euganean Field. A subsidence modeling approach. Trans. World Geotherm. Cong. 1995, 1263-1268.

朝日新聞（2009）技あり：竹製温泉冷却装置．2 月 8 日朝日新聞朝刊 Be 紙面.

Chena Hot Springs Resort ホームページ，(http://www.chenahotsprings.com/ice-museum

-renewables/).
江原幸雄・安達正畝・村岡洋文・安川香澄・松永 烈・野田徹郎 (2008) 2050 年自然エネルギービジョンにおける地熱エネルギーの貢献．日本地熱学会誌 , 30, 165-180.
Holdmann, G. and Erickson, D. C. (2006) Absorption chiller for the Chena Hot Springs Aurora Ice Museum. Geo-Heat Center Quarterly Bull., 27, 3, 5-6.
長谷川茂道 (1986) 北海道・森町の熱水利用施設とその利用状況，地熱，23, 117-132.
池上真紀・増田純也・駒庭義人・浅沼 宏・新妻弘明（2008）経済性ならびに環境効果向上のための温泉排湯熱有効利用法の検討 . 日本地熱学会誌 , 31, 39-50.
環境省（2007）平成 17 年度温泉利用状況 (pdf). http://www.env.go.jp/nature/onsen/data/index.html.
環境省（2009）平成 19 年度温泉利用状況 (pdf). http://www.env.go.jp/nature/onsen/data/index.html.
金原啓司 (2005) 日本温泉・鉱泉分布図及び一覧 (第 2 版, CD-ROM 版)．数値地質図 GT-2, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
北村靖彦 (1983) 森地熱発電所の建設・運転状況について，地熱，20, 200-211.
小池由明 (2003) 九重地熱発電所 . 地熱エネルギー , No. 104, pp. 47-50
Lawless, J. (2006) Supplementary injection to mitigate environmental effects: Can it be applied in Japan? Special Seminar RE2006, GRSJ，Tokyo.
Lindal, B., (1973) Industrial and other applications of geothermal energy. In: Armstead, H. C. H., ed., Geothermal Energy, UNESCO, Paris, 135-148.
森芳太郎 (1967) 松川地熱地域開発上の問題点，地熱，Ser.No.10, 52-64.
村岡洋文（2007）日本の地熱エネルギー開発凋落と将来復活の可能性．日本エネルギー学会誌，86，153-160.
村岡洋文・阪口圭一・玉生志郎・佐々木宗建・茂野 博・水垣桂子（2007）日本の熱水系アトラス．産総研地質調査総合センター , 110p.
村岡洋文・佐々木宗建・柳澤教雄・大里和己 (2008) カリーナサイクルによる温泉発電の市場規模評価．日本地熱学会平成 20 年度学術講演会講演要旨集 , B15.
宮崎眞一（2006）中国における地熱・深層熱水開発 . 平成 17 年度第 3 回地熱研究会（2006. 4. 21 東京）講演資料 .
MTA (2005) Inventory of geothermal resources of Turkey (in Turkish), MTA, Ankara.
中村進 (1966a) 松川地熱発電所の現状，地熱，Ser.No.6, 38-40.
中村進 (1966b) 松川地熱発電所完成，営業運転に入る，地熱，Ser.No.8, 9-11.
七沢正敏 (1987) 松川地熱発電所創業 20 周年を迎えて，地熱，24, 21-29.
日本重化学工業株式会社社内誌「敬愛」1986 年 9 月号 [地熱発電 20 周年記念特集]
NOAA (2009) Beyond CO_2: Study reveals growing importance of HFCs in climate warming. http://www.noaanews.noaa.gov/stories2009/20090622_hfc.html
大窪三郎 (1984) 霧島国際ホテルにおける地熱エネルギーの利用について . 地熱エネルギー , 27, 59-65.
大里和己・村岡洋文（2008）温泉バイナリー発電．日本エネルギー学会誌 , 87, 812-818.
大里和己 (2009) V．地熱技術の展望, 2.4 温泉発電技術．地熱発電，(社) 火力原子力発電技術協会，127-134.
新藤尊彦・中谷佑二郎・大石高志（2008）未利用エネルギーを有効に活用する熱電発電システム．東芝レビュー , 63, 2, 7-10.
Simsek, S. (2006) Present status and future plan of geothermal development in Turkey. Special Seminar RE2006, GRSJ, Tokyo.
鷹觜守彦 (2002) 運転開始 20 年を振り返って，地熱，39, 373-396.
田中大生 (1983) 杉乃井ホテルにおける熱水の多目的利用について . 地熱 , 20, 5, 49-51.
内山実 (1983a) 森地熱発電所の蒸気設備について, 地熱, 20, 345-350.
内山実 (1983b) 森地熱発電所の運転開始にあたり，地熱技術，8, 56-63.
山田茂登（2009）V．地熱技術の展望，2.5 バイナリー発電技術．地熱発電，(社) 火力原子力発電技術協会，135-139.
安川香澄（1998）イタリアにおける熱水卓越型及び低温地熱資源の研究と利用状況 . 地熱 , 35, 2, 111-127.
好田晉 (1998) 森発電所運開 15 年を振り返って，地熱，35, 308-313.
Zheng, K., Zhang. Z., Zhu, H and Liu, S. (2005) Process and prospects of industrialized development of geothermal resources in China - Country Update Report for 2000-2004. Proceed. World Geotherm. Cong. 2005.

第４章　共生のためにどうしたら良いか

4-(1)　地熱と温泉との関係のとらえ方

地熱発電が温泉に影響を与えるとすると，それはどのような時であろうか。地下の熱水系（地熱発電に使う高温の熱水と温泉を区別なく扱う総称）は，そのほとんどの水の起源は天水(雨水)である。天水は河川を流れ下って海に入り，それが蒸発して雲となり雨として地上に降るという大循環を行っているが，天水の一部は地下に浸透してゆう出する循環系を形成している。浸透水が，地球内部から地表に向かって放出されている熱に遭遇し十分温められ，貯留する条件が整うと地熱貯留層が形成される。このための条件としては，水とそれを貯めておく地下の構造及び火山の元となるマグマからの熱が必要である。Fig.4-1 はこの様子を示したものである。

この時，地下には様々な形態と性状の熱水系が形成される。大別すると，地下の比較的深いところに形成される地熱貯留層と，比較的浅いところに形成される温泉帯水層がある。　地熱資源が高温であるのは，より深部にあってマグマ（溜り）からの熱の供給を得やすく，地上からの冷たい水の侵入を避けて貯留できる構造にあるからである。温泉は同じ火山地域にあっても，地熱資源とは遮断されたもっと地下の浅い部分で熱を得ているのが普通であり，地熱資源とは無関係だという説明がなされることがある。実際にはこう説明しても差し支えない場合も多いが，両者の関係が無視できない場合もある。正しい理解は，両者のつながり具合により関係の有無が左右されるとするもので，そのつながり具合を確認しておくことが非常に重要になる。ある程度のつながりがあると想定される時には，地熱資源の採取ペースをどうコントロールするかが，影響を生じさせないための技術的処置となる。

この両者の関係は単純に考えると，Fig.4-2（江原，2010）に示すような二つの関係が考えられる。一つはケース１の兄弟型で，共通のマグマからの熱を受けるが水の循環系が異なり，地熱貯留層と温泉帯水層が別々に出来る場合で，この時両者の間に影響はほとんど無い。もう一つは親子型で，マグマからの熱を受けて出来た熱水貯留層が元となって，更に浅いところに温泉帯水層が出来る場合で，この時は影響の可能性があり，熱水貯留層から温泉帯水層に十分熱水（温泉水）が行かないくらい多くの熱水を採取すると影響が現れる。この他のケースとしては，全く両者に関係がない場合がある。

ここに述べた関係は単純化したものであり，実際のケースでは地熱貯留層と温泉帯水層のつながり具合がどれくらいかを見極めることが非常に重要である。以前には，地熱貯留層と温泉帯水層は不透水層が間に存在するため，全く関係ないという説明がされたことがあるが，ここではその説は採らない。

地熱発電の温泉への影響を心配するあまり，事実の確認が不十分のまま影響を懸念する声を聞くことがある。そのような時，両者の空間的配置のイメージを描いて考

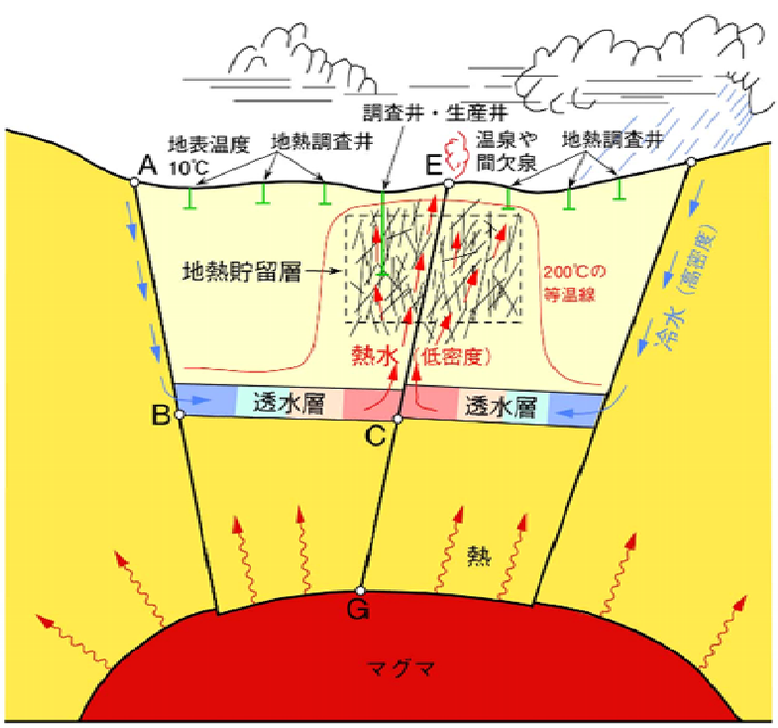


Fig.4-1　地熱系の出来方（花野，2008）

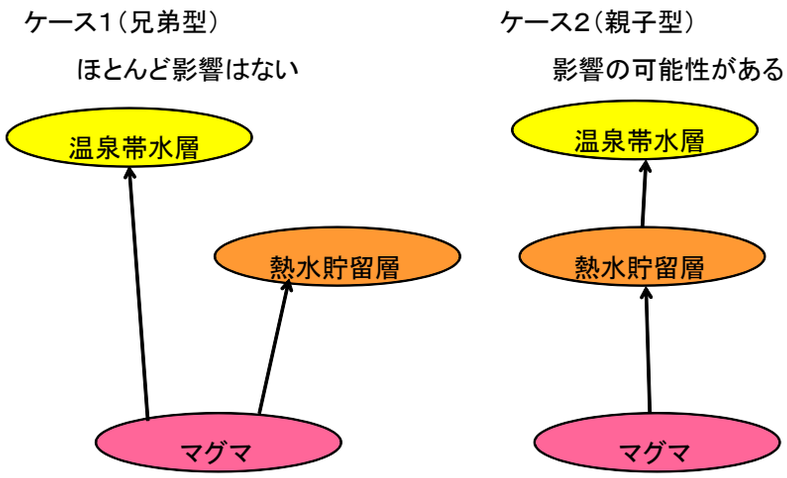


Fig.4-2　温泉の元（温泉帯水層）と地熱発電の元（地熱貯留層）の関係

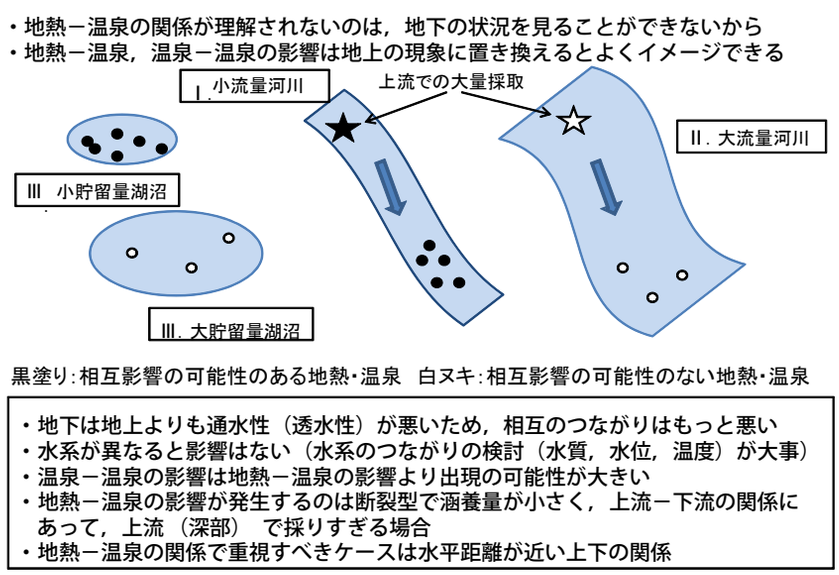


Fig.4-3　分かりやすい地熱と温泉の関係（地上の水系に例えて）

えてみることが薦められる。両者の関係が理解されない大きな原因は，地下の状況を直接見ることができないことによる。これを地上で見ることのできる水の有り様と置き換えるとよくイメージできる。Fig.4-3 には河川と湖沼を採り上げ，そこに地熱熱水（河川の上流側）と温泉（河川の下流側）を位置づけて両者の関係を考えてみた。

河川や湖沼でも水利権をめぐって取水が競合するのは大きい問題である。その時，違う河川や湖沼内だと影響問題は全く度外視される。違うか同じかは，実際に水をたどらなくても，お互いがどれくらい離れているかでイメージできることが多い。河川の上流と下流の関係（これについては後述）を除けば，両者が 1km 以上も離れていれば問題にされることはないであろう。地下では地上と違って透水性は著しく乏しいため，影響範囲はもっと狭いと考えられる。同じ河川の場合は影響を検討しなければならないが，この時は，上流での取水が下流にどれくらい影響するかが問題である。影響は，河川流量の多寡に対し，上流での採取量と下流での必要量によって決まる。湖沼での水利権問題は，湖沼が小さく，涵養する水量が限られる場合に問題が発生する。

地熱熱水の代表的な貯留形態は地下の断裂系が支配する裂罅型である。この地熱貯留層から温泉帯水層へ縦方向に断裂を通じて熱水が流動しているのが，温泉との関係である。従って河川で例えた地熱熱水が上流，温泉が下流という関係は実際には水平方向ではなく，比較的狭い範囲の垂直の関係である。湖沼に相当する貯留形態は，堆積平野などに見られる層状帯水層で，これは温泉に限られ，地熱貯留層は関係ない。

温泉への影響で考えておかねばならないのが，温泉相互の関係である。河川や湖沼において，近くに採取点があり汲み上げを競うと影響し合うように，温泉においてつながりのある近い位置での汲み上げは温泉相互の影響を生じ，温泉枯渇の大きな原因となっている。

地熱貯留層と温泉帯水層がつながっているかどうかは，後述のように様々な面から総合的に判断されるが，ここでは特に有力だと考えられる直接的な手法を紹介しておく。温泉の３要素は，温度，湯量（水位），泉質だとされる。これに両者の位置関係（深度，水平距離）を加えてつながり具合を判断することが多い。温泉帯水層と地熱貯留層がつながっていれば，それぞれに含まれるこれらの特性は同じはずである。すなわち，同じくらいの温度と湯量（または水位）で，化学成分は同じはずである。中でも化学成分は，温度のように冷めたり，採湯環境に左右されたりする湯量や測定設備が必要な水位に比べ，簡単に採取分析できることから良い手段である。Fig.4-4 には，地熱貯留層と温泉帯水層がその間を遮蔽する不透水層のありように従って，どのような化学成分

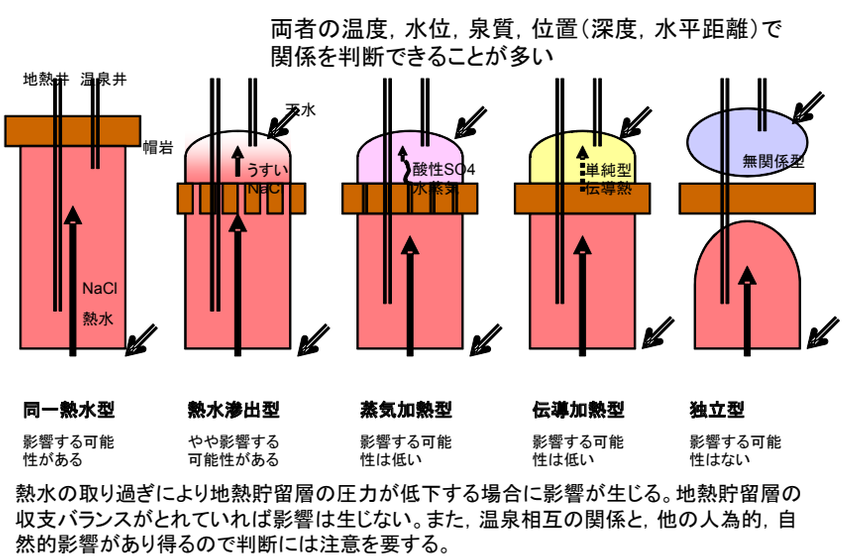


Fig.4-4　地熱貯留層と温泉帯水層と帽岩の関係

の関係にあるかの基本的な五つのパターンを示した。地熱貯留層の熱水は常に NaCl 型で，これに対し温泉は様々な泉質を形成している。独立型では全く影響は無く，伝導加熱型と蒸気加熱型は影響する可能性は低い。熱水滲出型はやや影響する可能性があり，同一熱水型は影響する可能性がある。ここでやや影響する可能性がある，あるいは影響する可能性があるとした組み合わせにおいても，後述するように，地熱貯留層からの流体の採取が，地熱貯留層への熱と流体の供給とバランスしていれば，影響を回避することができる。

地熱発電は，地下から火山性の熱を収受した流体（熱水と水蒸気）を地上に導いて，その熱エネルギーを電力に変えるシステムである（Fig.4-5）。マグマ溜りは火山の活動が若くて規模が大きいほど供給熱量が大きく，その持続性については心配が無い。しかし，地下に浸透して熱を運び上げる水の量が多いと，温度が下がってくる心配がある。熱水は基本的には雨水を起源とする循環水なので，すぐに枯れてしまうことはないが，地上に取り出す量が多すぎると流量が減っていく心配がある。持続的な発電を行うには，この熱と水の供給と取り出しのバランスが取れていることが極めて重要である。バランスが取れているかどうかは，系の大きさだけでは判断できない。大きい発電所や大温泉地のように見掛けの採取量が大きくても，それを補給する供給があれば影響は出ず，一方，採取量が小さくても補給が追い付かなければ影響は出る。発電を行うための設備投資には非常に巨額を要するので，発電量が一過性であったり，次第に減ったりすることがあれば，事業の継続に対し致命的である。そこで，発電所の建設前に発電量の減らない，すなわち，熱と水に関してバランスのとれた設計を，入念な事前調査の下に行う。

このことは，結果として温泉への影響についても良い効果をもたらす。温泉帯水層と地熱貯留層がつながっていたとしても，地熱貯留層を変わらずに維持することができていれば，温泉への供給は保証されるからである。実際には，事前の設計段階だけでなく，発電開始後も一定量の発電を行えているかどうかの出力や流体流量の監視を行い，もし減退傾向が生じるようならば，生産量の回復措置を行ったり，適切な発電量に変更したりする。このことはひいては，温泉への影響を起こさないことにつながる。

4-(2)　冷静な考え方

地熱発電の温泉に対する影響を懸念する立場からの代表的な意見は，地熱発電は温泉に影響する可能性が大であるとし，地熱発電を行う側に影響がないことの証明を求めるものである。しかし，この懸念の論拠には評価に耐え得るデータが示されないことが多く，しばしば情緒的

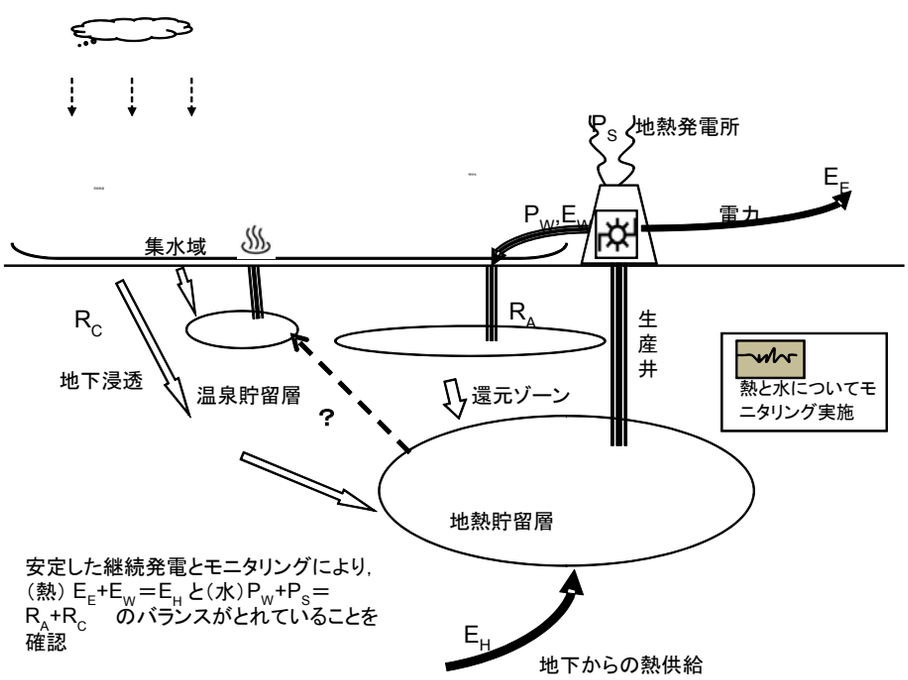


Fig.4-5　水と熱の収支バランスを考慮した流体採取

であったり，風聞であったりする。これに対し，地熱発電の実行側の基本的な意見は，バランスを崩すような過剰採取をしなければ温泉への影響をなくすことができるとするものである。この対立関係が解けないのは，地熱発電側の往時の説明として，地熱貯留層と温泉帯水層は深度が違い，間に不透水層があるから関係はないとする問答無用の説明が不信を招いたことが尾を引いている面もある。また，温泉への影響を問題視する側も，科学的な関係を理解することなく，反対の声だけを上げる傾向がある。

影響がないことの証明は，我が国の訴訟法上は告発側に説明責任があるため，そこまで踏み込んだ係争となっている例はない。ここに見られるような影響のあるなしだけの議論は，両者にとって不毛の水掛け論であり，打開が望まれるところである。

温泉の所有者からは，温泉の大事さをよく耳にするが，その一方，しばしば自らの温泉のことをよく知らないことがある。温泉井戸の構造や揚湯設備について把握しておくことの他，日常から“大事”とする温泉の温度，ゆう出量（水位）のデータをとっておくことは非常に重要である。これらのデータは，だれでも簡単に測ることができる。これらのデータをとっておくことにより，自分の温泉の季節的変動，降雨との関係，長期的な変化の傾向を知ることができ，地熱発電との関係だけでなく，温泉相互の影響についての判断にも役立ち，いざというときの重要な証拠となる。

地熱発電の開発を行う側は，平易にその地域の地熱貯留層と温泉帯水層の関係を説明し，理解してもらう努力が必要である。温泉所有者からのデータに基づく影響の指摘に対しては，その判断や原因を共に考える協力的な態度が望まれる。

双方とも，いたずらに対立感情を抱くのではなく，問題を解決して両方の利益になるような方向を目指すべきである。

次の三つは，地域に安心してもらうポイントであることから，特によく地域に理解してもらう努力が必要である。

1　地熱発電のための坑井掘削は温泉法による許可が必要であることから，温泉への影響のおそれがある場合は，許可が得られない。
2　温泉に影響するような地熱流体採取は，地熱貯留層の水と熱の収支バランスの乱れを生じ，地熱発電の持続的運転に支障を来たすので，基本的に回避するように計画される。
3　科学的に見て，我が国で地熱発電が温泉に影響を及ぼしたと言える例はない。

4-(3)　具体的共存策

発電用施設の立地の促進及び運転の円滑化を図り，安定的かつ低廉な電気の供給を確保することは，地球温暖化問題・エネルギー問題を含めた国民生活及び経済活動にとって極めて重要である。一方，発電された電気の受益者は，立地地域に限られるものではないため，発電用施設の設置にかかる地元の理解促進等を図ることが必要となる。特に地熱発電の場合には，有望な地熱開発地域のほとんどが温泉地域に近接している。そのため，地熱発電の開発に際して，温泉の枯渇等に対する懸念を抱く温泉事業者等からの反対があると，実際には温泉に対する悪影響のない事業であっても坑井の掘削が事実上不可能となったり，温泉事業者等との調整に時間を要し開発期間が長期化したりする。こうしたことから，地熱発電の開発に当たっては，調査段階から，地域の信頼と協力を得ることが不可欠である。

そのためには，地熱発電事業が資源収奪のみの形態であってはならない。温泉と地熱は一体の地下熱資源であり，地域の重要な資源であるという認識に立たねばならない。地域の熱資源は，資源の保護を図りつつ適正に利用していかねばならない。地熱発電により地域が不利益を被ってはならず（むしろ利益がなければならず），一方，地域は，地熱発電は我が国のエネルギーセキュリティと二酸化炭素削減を図る有効な手段であることを理解して，協力の姿勢を示すことが，win-win の関係の第一歩である。

地熱開発促進調査では，調査を目的とする坑井掘削を行う際に，周辺の温泉地の温泉資源に影響を及ぼしていないかどうかを確認するために，温泉事業者の協力を得て温泉源泉のゆう出量，温度等のモニタリングを実施するとともに，簡易な環境影響評価も実施している。これを更に一歩進めて，調査が発電だけでなく，地域の熱利用も視野に入れた開発につながるようにすることも考慮に値する。これらのデータを積極的に公開することにより，調査段階から，地域の信頼と協力を得ることは，地熱発電の開発を円滑に進める上で重要である。

ここで，地熱発電と熱利用が形態的に不可分な関係にあり，両者が協力しながら開発できるアイデアを紹介する。現在，日本の大半の地熱発電所に見られる熱水卓越型の資源に対しては，発電に用いる以外の熱水は地下に還元を行っている。これらは沸騰点に近い温度を有し，利用可能な熱エネルギーが豊富である。これを更に高温部分をバイナリー発電により電気に変換し，それでもまだ十分熱い温水を民生用に使えるようにすれば，発電としても地域にとってもメリットは大きい。Fig.4-6 に永続地帯研究会（2008）のデータを元に集計した我が国の地球熱（地熱と温泉熱）エネルギーの利用状況を示す。この集計によると，地熱発電は 3,162GWh，温泉は 22.81PJ（温泉浴用利用 20.37PJ，温泉直接熱利用

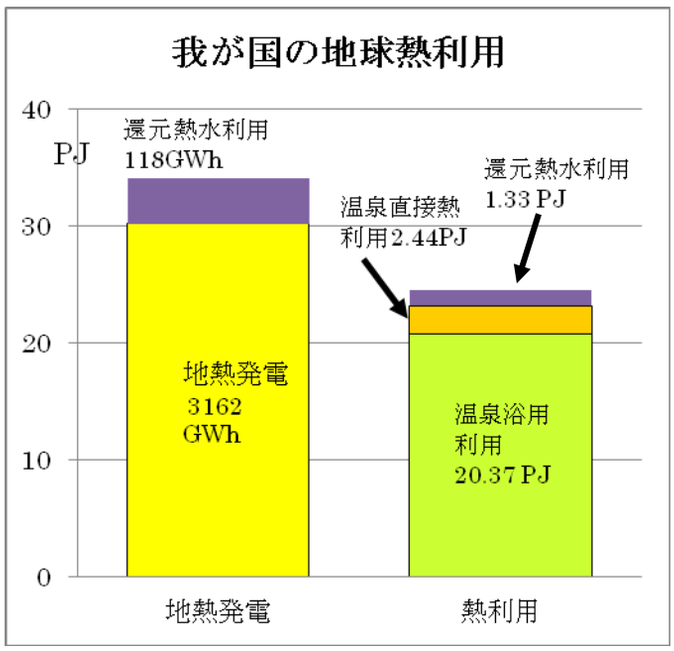


Fig.4-6　我が国の地球熱利用

2.44PJ）を利用し得ているが，これに還元熱水の有効利用が加わると，118GWh の電力（現在の 3.7% 増）と 1.33PJ（現在の 5.8% 増，温泉 1,600 本に相当）の温泉が利用し得ることになる。ただし，還元熱水の温泉としての利用のためには，制度の改善が必要である。

また，地熱発電所が立地地域と共生するためには，電源立地地域対策交付金等の制度を積極的に活用することも有効である。一方，地熱発電事業者自ら地域との共生を図っていくことも必要である。

その際，地域活性化のためのニーズ把握，国・地元・事業者がともに参加する議論の場として，国の「電源地域振興指導事業」による地域振興プランの作成等の事業を活用することも一案となる。そうしたプランに即して，国による支援措置や事業者による共生のための取り組みが有機的に組み合わさり，効果的に地域の振興が図られるよう関係者は努めるべきである。特に，地元温泉事業者が抱く地熱発電所の建設・運転による温泉の枯渇等に対する懸念を緩和・払拭し，開発に対する理解を得るとともに，地元自治体の理解と協力を促進していくためには，以下のような対策を講じていくことが重要である。

① 事業者は，開発に際して，地熱開発の温泉に対する影響に関する調査データの提供等を通じた科学的分析に基づく説明を行い，理解の促進に努める。開発着手後においても継続的な温泉のモニタリングを温泉事業者と共同で実施し，相互の信頼関係の維持に努める。

② 温泉事業者と地熱開発事業者等との間での定期的な対話や，地熱発電に関する広報活動を推進する。

③ 学識経験者，地熱開発事業者，温泉事業者を含む地元関係者等の意見を踏まえた共生のための事業化プログラムを作成する。

具体的な共生のための貢献策は，地域の資源と開発の状況や社会的背景によっても異なる。先に Table 3-3-1 に挙げた様々な貢献は次のような項目に整理することができる。

1　電源三法交付金制度
2　固定資産税
3　地域住民の雇用
　発電所・蒸気生産設備の管理業務，ＰＲ館スタッフ等
4　地元での消費効果
　旅館宿泊，地元企業の活用，燃料油・消耗品等の購入
5　温泉業者との共存共栄
　湯量確保のための技術支援，給湯
6　その他
　発電所ＰＲ館，地元主催行事への協賛

これらを参考にしながら，地域に合った共生の方策を地域と一体になって探っていくことが望まれる。

（野田　徹郎）

引用文献

永続地帯研究会（2008）エネルギー永続地帯指標
2008 年版の市区町村別総合集計表
http://sustainable-zone.org/index.php

地熱発電に関する研究会（2009）地熱発電に関する研究会中間報告　中間報告．41p.

江原幸雄（2010）日本列島は地熱エネルギーの宝庫
－あなたも今日から地熱博士－．182p.

花野峰行 (2008) 地熱エネルギーの開発　－純国産自然エネルギー地熱発電を中心として－．第 3 回新エネルギー世界展示会再生可能エネルギー協議会（JCRE）地熱フォーラム資料.

あとがき

1年余をかけて『地熱発電と温泉利用との共生を目指して』の編集を終わることができた。この間，本書を作成するのに力を尽くしていただいた日本地熱学会「地熱発電と温泉との共生を検討する委員会」の皆さんには，心から感謝の意を捧げたい。特に，出版までの全般にわたる多端な調整は當舎利行委員にやっていただいた。また，佐藤久代さんには面倒な原稿の全体レイアウトと調和を図っていただき，西澤修氏には表表紙と裏表紙のデザインを作っていたことを特記したい。

2010年3月，一服したかに見えた身近な灯油やガソリンの価格は，世界の石油産出がピークを過ぎたと言われる中，今後の値上がりの予断を許さない状況にある。一方で，大気中のCO_2を主とする温室効果ガスの増加は，世界中の気候の変調を実感させ，温暖化に拍車をかけようとしている。そんな中，この二つの問題に対処することのできる地下の熱エネルギーの利用は，火山国日本の特権であり，当然進むべき道だと考えられる。しかし，その考えどおりに進んでいないのが現実であり，その隘路の一つが地熱発電と温泉利用の二つの立場の軋轢である。

地下の熱エネルギーの利用は地熱発電だけではない。温泉は古くからの伝統ある地下の熱エネルギーの賢い利用法であり，その分だけ燃料を消費せずに湯浴みができている。ところが，同じ熱利用をしていながら，温泉利用の立場からは，地熱発電の温泉への影響の懸念や不信感から，両者の考え方には垣根が存在する。私自身は，日本地熱学会の会員であると同時に，温泉関連学会の会員でもある。地熱発電を盛んにしたい気持ちを持ちながら，温泉を心から愛する一人でもある。四十年来のこの問題に対して，何とか垣根を取り払いたいと思いながらも，果たせなかったという思いも人一倍強い。

地熱発電の初期には，地熱系についての情報や理解が十分ではなかった。そのこともあって，採取深度の違いがあるから影響はないとの説明がしばしばなされ，納得できない感覚を残したまま発電所を造ってきたことが禍根を残すこととなった一因ではなかろうか。それでは温泉利用の側に問題がなかったかというとそうではない。長年の内在する問題である「温泉を保護しながら利用すること」への対応を疎かにしてきたことがあるのではないか（地熱発電への攻撃は，自己の問題を見えなくする効果があった。）

私は，地熱発電は温泉利用に全く影響しないという立場は取らない。地熱貯留層と温泉帯水層（貯留層）のつながり方次第では，地熱発電用の流体採取が過剰だと影響が発生する。逆にどのような場合も，適度な採取であれば，影響を与えずに発電ができるというのも事実である。

温泉に最も影響を与えているのは実は温泉相互である。各地の温泉が，乱掘，動力設置競争による過剰採取のために，温泉水位が下がっていった歴史は多く見られるところである。環境省が2009年3月に発表した「温泉保護に関するガイドライン」では，掘削の距離規制に関する論理構成には問題が多いが，モニタリングの重要性を指摘している点は非常に評価できる。生命に次いで大事とされる温泉の成り立ちの理解や変わりぶりを知らないまま放置するのは片手落ちとも言えるのではないか。近くの地熱発電所についても，どのような関係にあるかの真実を理解することは重要であるし，地熱発電側もその説明には手を抜いてはならない。

私が地熱発電と温泉利用とは共生できると考えるのは，恵まれた地下の熱エネルギーをうまく使うということが共通の目標になり得るからである。地域の地熱・温泉エネルギーをどううまく使うかは，地下の資源のあり方や地域の社会的要求に左右される。そのテーマを考える時に，地熱発電側は温泉に影響を与えないように発電するにはどうしたらよいかを考え，温泉利用側は温泉を長く利用し，更に地下の熱をより有効に利用していくにはどうしたらよいかを考えることが望まれる。その答えを持ち寄って，地熱と温泉の関係を境目なく考えてほしいのである。そこに共生の答えがある。

本書には，ここに述べた考えが底辺を流れている。温泉を利用する方にもぜひ読んでもらいたいし，地熱発電関係者にも初心に返って考えてみてほしい。一挙に問題は決着しないかもしれない。しかし，諦めてはいけないし，諦めはしない。私の残りの人生はこの問題解決に捧げたいと思っている。21世紀以降のエネルギー・環境問題に対処する重要な部分だからである。日本のために，そして何よりも愛する我々の子孫のために。

2010年5月
地熱発電と温泉との共生を検討する委員会
委員長　野田徹郎

・本報告書についてのご質問は日本地熱学会へご連絡下さい。

不　許
複　製

報告書　「地熱発電と温泉利用との共生を目指して」
2010 年 5 月　発行　　非売品

編集者　地熱発電と温泉との共生を検討する委員会
発行者　日本地熱学会
〒 108-0671　東京都港区白金台 3-18-6-103
電話 / Fax　:　03-3473-7290
電子メール :　grsj-of@m.aist.go.jp
URL :　http://wwwsoc.nii.ac.jp/grsj/

印刷所　アイコー企画印刷 (株)
〒 162-0814　東京都新宿区新小川町 4-8
電話　:　03-3267-1605

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

〒166-8532　東京都杉並区和田3-30-22
大学生協学会支援センター内

office@grsj.gr.jp
http://www.grsj.gr.jp