

討 論

地熱発電と温泉利用の共生に関連する議論

江原幸雄¹⁾, 野田徹郎^{1)*}

(平成 26 年 9 月 25 日受付, 平成 26 年 12 月 2 日受理)

Discussions on the Coexistence of Geothermal Power Generation with Hot Spring Utilization

Sachio EHARA¹⁾ and Tetsuro NODA^{1)*}

Abstract

We believe that it is very important to discuss from both social and scientific viewpoints in order to realize the coexistence of geothermal power generation and hot springs. However, we had so far very few discussions, especially from the scientific viewpoint. Recently, Dr. Masao OHYAMA published a paper about the impacts on hot springs by geothermal power generation in this journal (63, 341-352). We agree with some of his discussions but there still remain disagreements with his ideas from the scientific viewpoint. In this paper, we show our ideas about the issue concerned. We welcome the discussions in order to facilitate communications on the coexistence of geothermal power generation and hot spring utilization.

Key words : geothermal power generation, hot springs, sustainability, coexistence

要 旨

地熱発電利用と温泉利用との共生を図っていくためには、社会的および科学的な議論が重要である。しかしながら、従来、温泉の利用側から、科学的な議論が提示されたことはほとんどなかった。このような中、地熱発電の温泉への影響に関する解説(大山, 2014)が投稿された。大山(2014)は温泉利用側からの科学的な意見を代表するものの一つととらえられ、同意できる部分もあるが、著者らと意見を異にする点も少なくない。本論では、これを、議論を行う良い機会ととらえ、地熱発電の温泉への影響、ひいては地熱発電と温泉利用の共生について著者らの見解を示した。その基本は、地熱発電は温泉利用と共生できるというものである。読者各位におかれては、温泉科学誌上でこの問題を、科学的に議論いただくきっかけになればと考えている。

¹⁾地熱情報研究所 〒350-1319 埼玉県狭山市広瀬1-3-12 および 〒305-0035 茨城県つくば市松代1-33-12. ¹⁾Institute for Geothermal Information, 1-3-12, Hirose, Sayama City, Saitama Prefecture, 350-1319 and 1-33-12, Matsushiro, Tsukuba City, Ibaraki Prefecture, 305-0035. E-mail eharakuju@kind.ocn.ne.jp and *noda-fam@mail2.accsnet.ne.jp, FAX 04-2935-4070 and 029-861-2046.

キーワード：地熱発電，温泉，持続可能性，共生

1. はじめに

本誌第 63 巻第 4 号 (平成 26 年 3 月発行) に、特集：温泉と地熱開発 が掲載された。著者らは、この特集に「地熱開発に伴う周辺環境への影響問題 (温泉への影響を中心に)」という題名の解説記事を寄稿するよう編集委員会より依頼された。しかしながら、この問題に関しては、例えば日本地熱学会 地熱発電と温泉との共生を検討する委員会 (2010) から、総括的な科学的議論がなされているが、温泉利用側からの温泉影響に関する科学的な論説は公表されておらず、どのように具体的に実りある議論をするべきか検討を重ねていた。このようなことから、この問題に関しては、温泉研究者からの貢献を期待してきたところである (江原, 2013)。

本論は、この度、解説 (大山, 2014) が本誌 63 巻 4 号 p. 341-352 に掲載されたのを受けて、改めて投稿したものである。大山 (2014) では個別の温泉地域における具体的で定量的な議論を示しているわけではないが、これまでの多くの研究を参照しながら、できるだけ量的な議論を試みている。大山 (2014) の解説は、全国旅館ホテル生活衛生同業組合連合会が発表した「地熱発電と温泉地との共生に関する調査報告書——地熱発電の現状と考察」に、「水文学見地から」(大山, 2013) としてより詳細に記述されているので、本論ではこれも参考にして議論した。

本論は、科学的見地からの意見を述べることを旨としている。大山 (2013, 2014) の述べた論評の各項目についての様々な議論を取り上げ、正しいと考えられるものや同意できるものは評価した上で、誤りや誤解に基づくと考えられるものについてはそのことを指摘している。また、意見を異にする点や、もっと議論を深める必要がある点については、更なる議論を促している。その意図は、学術誌としての温泉科学誌上での科学的な議論を、これを機会に活発化しようとするものであり、それ以外の何の作為もないことを理解願いたい。

なお、著者らの温泉利用と地熱発電利用との共生の考え方あるいは地熱発電利用の温泉への影響に関する考え方は、すでに本誌で発表しているので (江原, 2013; 野田, 2013)、併せてお読みいただければ幸いである。江原 (2013) では、「地熱発電—温泉利用と地熱発電利用の共生を実現するために—」と題して、地熱発電の実際、地下における熱と水の流れ、そして、持続可能な地熱発電技術を八丁原地熱発電所の例について具体的に紹介し、最後に温泉利用と地熱発電利用の共生を実現するための提案を行っている。そして、温泉影響問題を議論するときに、すでに実例の多い温泉相互の影響についての検討が大いに参考になるであろうことを指摘している。一方、野田 (2013) では、「地熱発電の温泉への影響を科学的に考える」と題して、温泉影響事例の検証として、観測データの蓄積のある箱根温泉の事例 (地熱発電の影響がない地域の例) と筋湯温泉 (近くに地熱発電所のある例) の事例を紹介するとともに、モデルに基づいて温泉影響の定量的見積りを試みている。また、最後に、温泉に影響を与える因子について総括し、適切なモデリングとモニタリングが重要であることを指摘している。

なお、地熱発電の温泉利用への影響を議論する場合、平均的・一般的な議論ではなく、個別の地域に関する具体的な議論が本質的に必要であることを述べておきたい。

温泉科学第 63 巻第 4 号特集「温泉と地熱開発」において、浜田 (2014) あるいは秋田 (2014) がこれについて述べている。浜田 (2014) は、解説の 1. はじめに の中で、「地熱発電の温泉への影響の懸念を払しょくするためには、これまで影響と見られてきた事例を検証する以外にない」としている。また、秋田 (2014) は解説の 5. 今後の課題 の中で、「この問題に関しては、科学的なモニタリングデータを関係者間で情報共有しながら議論を進めることが重要である。地熱・温

泉現象は判らないことが多いということを前提に、常にモニタリングしながら調査開発を進めるべきである。また、地熱・温泉現象が地域性の非常に強いものであり、画一的な一般論で解決できないことが多いことも理解する必要がある。」と指摘している。

著者らも同感であり、温泉影響問題を科学的に論じるためには、個別地域ごとに、科学的なデータに基づいて議論すべきである。今後、本誌読者各位には、本論で述べた内容についてどう考えられるかを公表されることを期待したい。それに応じて、著者らも、科学的に実りある議論を深め、温泉利用と地熱発電利用の共生に活かしたいと考えている。

2. 大山 (2014) に代表される論点に関する議論

2.1 「3.1 地熱発電の地熱水の特性」に関する議論

地熱エネルギーは持続可能なエネルギーである。示された「キャップロックから通って絶えず地表に向かってくる熱水量がいわば持続可能な資源といえる。」の意味は、キャップロックから漏れ出してくる熱水量は固定的であり、その量が持続可能なエネルギーとするものである。

自然界（ここではキャップロック以深の地層と言ってもよい）では、熱水の対流現象が発生しており、対流によって運ばれる熱エネルギーの一部が「キャップロックの割れ目等の透水性の部分から」漏れ出している。このとき、新たな人工的な生産があるとそれに伴って（温泉井の場合も地熱井の場合も同じである）圧力降下や温度降下が生じるが、それが新たな熱および流体流動の原動力となり、自然状態に比べ熱や流体の供給の増加が生じる。このことは周辺の一定範囲の領域の圧力や温度を低下させるが、この影響範囲がある領域に留まる限り（たとえば、周辺の井戸に実際的な影響を与えない限り）、その利用は許されると考えるべきである（これは、温泉井でも地熱井でも同じである）。

以上述べたように、「持続可能なエネルギー」とは、本来、固定的なものでもなく、キャップロックから漏れ出すものだけでもない。また、新たに人工的な生産が生じたときには、増加して新たな「持続可能エネルギー」になる（持続可能エネルギーとは、本来、安定して長期間生産することのできるエネルギーという意味であり、著者らはこの意味で使っている）。そして、その場合、周辺から新たに熱および流体を奪うことになるのであるが、その影響が時間的にも空間的にも無限に続くようなものではなく、新たな人工的な生産が生じたとき、その影響が実質的に時間的にも空間的にも一定の領域に収まり、その人工的な生産が長期間安定して行うことができる。このようなことは良く管理された温泉地域でも、そして良く管理された地熱発電地域でも実現されていることである。これに対し、多くの温泉地域や一部の地熱発電地域において、これが実現されていないとみられることが問題である。

温泉影響の実例として示された箱根や湯河原の温泉地は、固定的な持続可能エネルギーよりも過剰に採取しているのではなく、掘削によって新たに増加したエネルギーがあるにもかかわらず、それを超えて過剰な生産が行われたと考えるべきである。新たに人工的な生産が行われても、持続可能な生産は可能である。それは、生産ゾーン周囲の透水性や熱伝導率等の熱的・水理的特性に規定される。

2.2 「3.2 地熱発電の熱水の成分」に関する議論

地熱流体（熱水、水蒸気）の成分が様々な視点で問題にされることがある。そのひとつに水蒸気の凝縮水の成分が少ないことがとりあげられ、これに比べると「一般家庭の水道の風呂水の方が水質的には温泉に近い。」と指摘がある。蒸気の凝縮水の成分が少ないのは当たり前のことであるが、

それを、水道水を湧かした風呂水と比較することにどれほどの意味があるのだろうか。蒸気が得られるのは地熱井だけではなく、高温の温泉地帯の蒸気井からも得られており、同じく成分は少ない。しかし、温泉地帯の蒸気井から出る水蒸気も温泉法上の温泉であり、その蒸気で温泉を造成し、園芸や調理するなど多目的に利用され、大きい益を受けていることも事実であり、見過ごしにすることはできないと思われる。

「日本の水道のヒ素濃度基準は 0.01 mg/kg (ppm) 以下である。地熱発電所の熱水のヒ素濃度は 0.1 ~ 48.9 mg/kg (大山, 2014 の表 2) であるから水道基準の 10 ~ 4,890 倍となる。」との指摘は、地熱水中のヒ素濃度はそのとおりであるが、しかし、温泉水で飲用されているものにも、ヒ素濃度が 0.36 ppm (上諏訪温泉) に達するものがあり、また温泉水のうちには 130 ppm (島根県豊川温泉, 現在の大谷温泉) に達するものもあり、地熱水と大きな違いはないのが現実である (島田, 1998)。ヒ素が健康上問題になるのは、それを長期間飲用した場合であるが、地熱発電の熱水は地下にすべて還元されており、健康問題は生じない。一方、ヒ素を含む温泉は、処理されることなく公共水域に放流されることがあり問題視されている。温泉の場合も、誤って口から取り込まれることはあっても、通常長期間飲用することはなく、問題はほとんど生じないと思われる。ヒ素濃度について議論するには、濃度を示すだけではなく、地熱水と温泉水の状況を比較しながら示すことと、その科学的・医学的意味も示しておかないと無用の誤解を生じることになる。

さらに、大山 (2014) では、「自然循環の熱水の速度は後述する年 3 cm 程度とすると深度 1,000 ~ 3,000 m 上昇するのに数万年を必要とする。ゆっくりと上昇する熱水は圧力と温度低下によって溶存能力が低下し、次第に溶存成分が少なくなっている。」と述べられている。自然循環の熱水とは、察するに深部の熱水を起源とする水がゆっくり上昇してできた温泉と思われ、そのような温泉は、元々成分濃度は高いが、圧力と温度低下により溶存能力が低下するため低濃度になっているという主張である。深部熱水の成分で圧力により溶存濃度が低下するものはなく、温度低下に伴う溶解度低下により濃度が下がるのはシリカだけであり、熱水を起源とする温泉水の成分濃度が低くなるのは、浅層水による希釈の効果が大きいと考えるのが一般的であろう。

一方で、大山 (2014) では、6. 地熱資源の利用に関する温泉と地熱発電の共生について で、「温泉水は地下をゆっくり循環をしながら高温化し、そして岩石中の成分を獲得している。」と、前記の内容とは異なる記述があり、趣旨に混乱があるようである。

2.3 「3.3 地熱発電の水蒸気と熱水の熱量」に関する議論

地熱発電の熱量に関し、日本の火山体の自然放熱量の平均値より地熱発電所からの放熱量が大きい場合は、近くに噴気地熱地帯があれば噴気地熱活動の衰退・消滅もあり得ると述べられている。しかし、地熱発電所からの放熱量は発電所ごとに大きく異なり、また、火山体には小規模な単成火山からカルデラを有するような大規模な複式火山までその大きさは様々であり、平均値との比較は意味がない。この議論を行うためには、実際に影響が生じているかどうかの検証が重要と考える。

2.4 「3.4 地熱発電所の発電電力量の経年変化」に関する議論

地熱発電所の蒸気量の減衰について 3 つの原因 (1. 初期減衰, 2. 空隙の閉塞, 3. 貯留層中の熱水量の減少と温度低下) が挙げられ、1, 2 は問題ないが、3 が問題と指摘されている (大山, 2014)。3 については、その原因として、キャップロックを通しての冷水の流入、還元熱水の関与を挙げられており、その可能性はあると考えられる。しかし、地熱水の採取による圧力降下に伴い、深部からの自然な熱水補給量の増加があるという重大なことが見逃されている。

安定した地熱流体の生産を行うためには、「生産による流体の流出」と、「冷地下水の流入・還元

水の流入・深部熱水の流入」のバランスをいかに保つかということになる。地熱発電所によっては、発電量（蒸気生産量）が経時的に減少を続けているものがあり、また貯留層の温度が継続的に低下しているものがあるのは確かである。こうした発電所は、持続可能な発電（長期間安定した発電）を行うには設備容量が過大であり、設備容量を維持することが困難であると考えられる。貯留層の圧力低下に伴って、周囲からの補給量が増大するが、貯留層周囲の透水性によっては、周囲からの熱水の十分な補給が困難で、設備容量に相当する蒸気の生産が困難になることがあり得る。現在、設備容量に比べ、発電量が少ない地熱発電所ではこのようなことが発生している可能性がある。このような発電所においては、持続可能な生産量をより早期に見出し、資源量（周囲からの補給量）に応じた発電を行っていく必要がある。このような意味から、「熱水の枯渇化と温度低下」が発生している地熱発電所が存在する可能性があり、発電量の減衰が続く地熱発電所においては、適正な地熱流体生産量のもとで、安定した発電を実現する努力をする必要があると考えられる。

地熱発電所における熱水の枯渇と温度低下を、地熱発電所（の地熱貯留層）すべてに発生する共通の現象のように考えるのは正しくない。消費される流体量と供給される流体量とのバランスがとれるような発電を行えば、「熱水の枯渇化と温度低下」は必然的な現象ではない。これについては、八丁原地熱発電所や滝上地熱発電所の例を見れば納得されると思う。また、資源量に比べて過剰な設備容量を持っている地熱発電所においては、より早期に持続可能な発電量を見極めるべきであろう。この点に関して言えば、北海道の森地熱発電所（1982年11月運転開始）においては、当初の設備容量の5万kWを維持することができず、2012年9月認可出力を半分の2万5,000kWとした。認可出力の低下そのものはできれば避けたいところであるが、持続可能な発電を行うためには適切な判断と考えることができる。森地熱発電所においては、今後長期間にわたって、2万5,000kWが維持されていくことを期待したい。それには不断のモニタリングとモデリングを通じた適切な地熱貯留層管理が必要とされるであろう。

複雑な地下構造における地下資源開発というリスクのある地熱発電事業においては、持続可能な設備容量の決定を発電所運転開始前に100%正確に行うことには困難がある。このようなリスクを避けるためには、当初は控え目な規模で発電を開始し、地熱貯留層の反応を見ながら、可能であれば段階的に規模を拡大していくという「段階的地熱開発」が推奨される。「段階的地熱開発」を進めることにより、大山（2014）の指摘に添えていくことが地熱事業者にとっても意義あることと考えられる。

一方、温泉地における「温泉貯留層の枯渇化と温度低下」はどうだろうか。データが比較的充実している箱根温泉（野田，2013）に見られるように、源泉数の増加に伴い、温度が低下したり、温泉湧出量が減少したり（源泉数の増加に比較して総湧出量の増加が頭打ちとなる、もしくは1源泉当たりの湧出量が減少するなど）している温泉地が多いのが実態ではなかろうか。現に、それへの対応として温泉の集中管理が行われている温泉地も少なくない。温泉地でより問題なのは、十分な観測データがないために、温泉湧出量等が減少していることに気付くのが遅れ、十分な予防措置を施せないことである。

過剰な熱水の利用とは、一部の地熱発電利用だけでなく、温泉利用でも多発しているのが現状であると思われる。地球の熱エネルギーは国民共通のものである。これが現世代だけでなく、将来の世代も利用できるようにしていく、すなわち持続可能な利用を追求する姿勢が必要であろう。これは温泉利用・地熱発電利用にかかわらず、追求すべき課題である。

ところで、大山（2014）は、表4地熱発電所の熱水温度と発電電力量に、我が国の地熱発電所の1997年頃と2010年の熱水温度と発電電力量、及び兩年の温度差と発電電力量の比を示している。この表は、地熱発電所の温度低下を論じている基礎となる重要な表である。このように数値を用い

た議論は科学的考察にふさわしいものである。表 4 の数値については、大岳発電所では 1997 年頃 183℃、2010 年 127℃とされている。引用された文献（日本地熱調査会、2000；火力原子力発電技術協会、2012）では、1997 年頃については気水分離温度 183℃、タービン一次蒸気条件（入口温度）127.0℃、2010 年についてはタービン入口温度 127℃となっている。1997 年頃には気水分離温度を採用し、2010 年にはタービン入口温度を採用しているようである。発電に用いる蒸気は、気水分離後に幾つかの装置を経てタービンに入るため、場所によって温度は異なる。温度を比較するには発電プラントの同じ装置での値を採用するべきである。他の事例をあげると、鬼首発電所では、1997 年頃のデータは気水分離温度の幅をもった値 145～160℃の高い方の値 160℃が表に記入されており、2010 年には引用文献では数値が欠けているのに、1997 年頃に比べ温度が非常に低下しているデータ 135℃（出典不明）が記入されている。これは一例であり他にも同様に修正すべきデータが数多く存在することから、学術誌に掲載されたこの表は、少なくとも、差し換え等の適切な処置が必要ではなかろうか。

2.5 「3.4 地熱発電所の発電電力量の経年変化」の後半の熱水系に関する議論

熱水系の年齢については、熱水系の熱水は数万年から数十万年にわたり蓄積・貯留された化石熱エネルギー（日本の地熱調査委員会、1982）との意見がある。この場合、キャップロックの下の熱水は生産井の掘削によって初めて流動する地下水（山本、1985）であるとされる。地下に存在する熱水系への熱の供給は、熱水系が形成された以降、供給が立たれる化石的なものではなく、量的な変動があるにせよ継続されるものであり、化石熱エネルギーという表現は正しくない。また、キャップロックの下の熱水は生産井の掘削によって初めて流動する地下水ではなく、常に対流現象を起こしている。そして、坑井周辺の流動状況は、坑井掘削前に比べ大きく変動するが、坑井から離れた地点では大きな変化は少ないことが知られている（例えば、Elder, 1964）。熱水系とは、このように本来極めてダイナミックなものなのである。

なお、3.4 節の最後の部分に「エルサルバドルでは 1975～1982 年の還元期間に生産井の熱水温度が約 30℃の低下が記録され、八丁原では還元に関するシミュレーション（原文はシミュレーション）により、生産流体の温度が 11℃も下がることが予想されていた（秋林・藤井、2001）。」と引用されているが、秋林・藤井（2001）では、それらの記述のすぐ後に、還元に関するまとめがあり、「以上より、トレーサーが還元井に早く到達し、熱的ブレイクスルーが早く起こり易い地熱地域の還元計画には、還元流量の調節等の柔軟性が必要である。また、熱的ブレイクスルーは、フラクチュアで導通しているような特定の還元井と生産井では重要であるが、貯留層全体に及ぼす熱的影響の小さいことを示唆している。」としている。すなわち、還元井と生産井がフラクチュアで連結されているような場合を除けば、還元の生産井への熱的影響が小さいことを示している。そして、さらに、八丁原の場合は、Tokita *et al.* (1995) によれば、八丁原地熱発電所 2 号機運転開始に伴って、出力が 11 万 kW から 9 万 kW に下がったが、数値シミュレーションの結果、これが還元水の影響と判断され、その結果に基づいて、還元井の位置が変更され、出力低下が大きく減じた（出力が回復した）と報告されている。還元井と生産井との連結状態によっては、生産井が大きく影響を受けることがあるが、Tokita *et al.* (1995) は、十分な調査研究により必要な改善がなされたことを示したものであり、論文の意図を正しく理解する必要がある。

2.6 「4. 熱水貯留層の水量と熱量の収支」に関する議論

この節では数値的な検討が行われているものの、用いた数値は平均的かつオーダーレベルのものであり、また、対象領域の境界には触れていない。このような曖昧な根拠や条件に基づいて「地熱

発電所が温泉地に影響を与えないための面積（あるいは距離）」を算出することは不適切であり、誤解を生む原因となる。地熱発電所からの平均的蒸気量あるいは平均的熱量を基に、平均的な集水面積を80~170km²（なお、該当面積を円形とした場合、およその半径は5.0~7.4km程度と算出される）と推定し、大温泉地のそれぞれの市町村全体の面積（草津町50km²、箱根町93km²、別府市125km²）と比較し、これらの面積が同程度であることから、既存温泉における温泉利用と地熱発電とが共存した場合、熱源からの熱量採取の競合となるであろうと推論されているが、地熱発電所における平均的蒸気量あるいは熱量と、熱水系の面積には関係しない行政区界面積が用いられており、科学的ではない。

また、集水面積を求めるのに、熱水の涵養速度として3cm/年を使用しているが、この数値の引用文献は示されていない。湯原・江原（1981）の中の熱水上昇速度3cm/年が使われた可能性があるが、地表水の涵養速度と熱水の上昇速度は本来全く異なるものであり、3cm/年を涵養速度として使うことは不適切であることを指摘しておく。収支に関する定量的な取扱いについては様々な考え方があり得る。どのように考えるのが適切かは、深い考察が必要であり、ぜひ共に議論していきたい課題である。

地熱流体が地下から長期間にわたり取り出された場合（水蒸気爆発に伴い大量の水蒸気流出が長期間にわたるような場合も含む）、周辺水系に与える影響を、観測的立場から評価する手法としては、現在では重力変化を利用するのは非常に有効と考えられる。ここでは地熱発電に伴うものとして、わが国最大の地熱発電所である八丁原地熱発電所の例（江原・西島，2004）を、水蒸気爆発に伴うものとして、1995年九重火山噴火の例（Ehara *et al.*, 2005）を挙げる。

八丁原地熱発電所においては1990年2号機運転開始直後（1号機の運転開始は1977年）、生産ゾーンで急激な重力減少が生じたが（この重力減少領域が地熱発電の影響があった周辺水系すなわち集

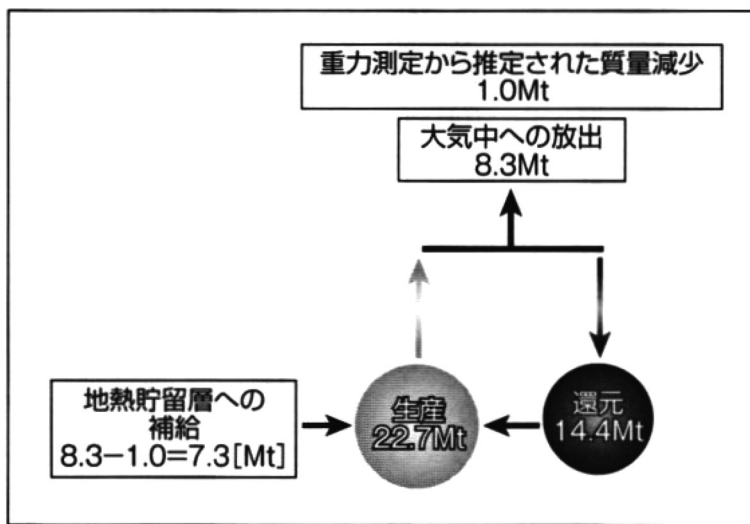


図1 八丁原地熱発電所地域における地熱貯留層周辺における流体収支（江原，2012）。2号機運転開始（1990年）後10年経過した時点（2000年）での1年間における流体収支を示す。この1年間で、22.7メガトンの地熱流体が生産され、14.4メガトンの熱水が地下還元されている。その結果、 $22.7 - 14.4 = 8.3$ メガトンが地熱貯留層から地熱流体が失われたことになる。しかしながら、重力変化から推定される地下流体の質量減少はわずか1.0メガトンであった。この差、 $8.3 - 1.0 = 7.3$ メガトンが地熱貯留層周囲から補給があったことを示している。

水域と考えることができる), 約7年後にはほぼ重力変化が安定し, 失われる蒸気量に見合った補給(還元熱水も含めたもの)が行われつつあり, 運転開始後10年の時点で失われる流体質量の約90%が補給されており, 発電量も安定してきている. 今後持続可能な発電が継続すれば100%に近づいていくであろう(図1). ただし, 漸近的に近づくので完全に回復するまでには長期間が必要である. このようなことから, 国際的には90%程度の補給が満たされた場合, 実質的に持続可能な状態に入ったと判断されている(Rybach and Mongillo, 2006).

ところで, 初期に重力減少が生じた領域は, 半径1kmから1.5km程度である(図2. 対象地域は山岳地域であり観測点が山道に限られ, 重力変化の一部の領域しか捉えられていないが, 得られた重力変化等値線を円弧の一部であると仮定して影響半径を推定した). 一方, 1995年九重火山水蒸気爆発の例を見てみよう. この水蒸気爆発に伴い, 火山体中心部の帯水層(地熱貯留層およびその周辺域を含めたもの)の圧力が減少し, 周囲から多量の冷地下水が補給されたと考えられ, この

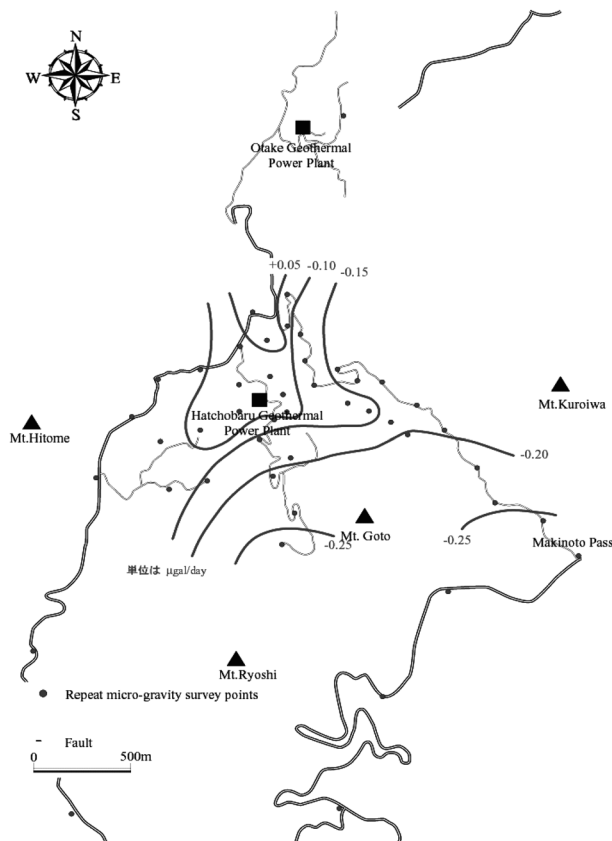


図2 八丁原地熱発電所(図中央の■)周辺における, 2号機運転開始後の重力変化の広がり(江原・西島, 2004). 発電所の南および南東側に広範囲に重力減少ゾーンが広がっている. さらに南東方向に重力減少域が広がっており, 重力減少域は閉じていないが(山岳地域のため測定が困難である), 重力コンターの形状からおおよその影響範囲が推定される. 一方, 発電所の北~北西側で重力が増大しているのは還元の影響である. 2号機運転開始10年後には, このような生産域での広域の重力減少, 還元域での広域の重力増加は解消されている. 単位はマイクロガル/日.

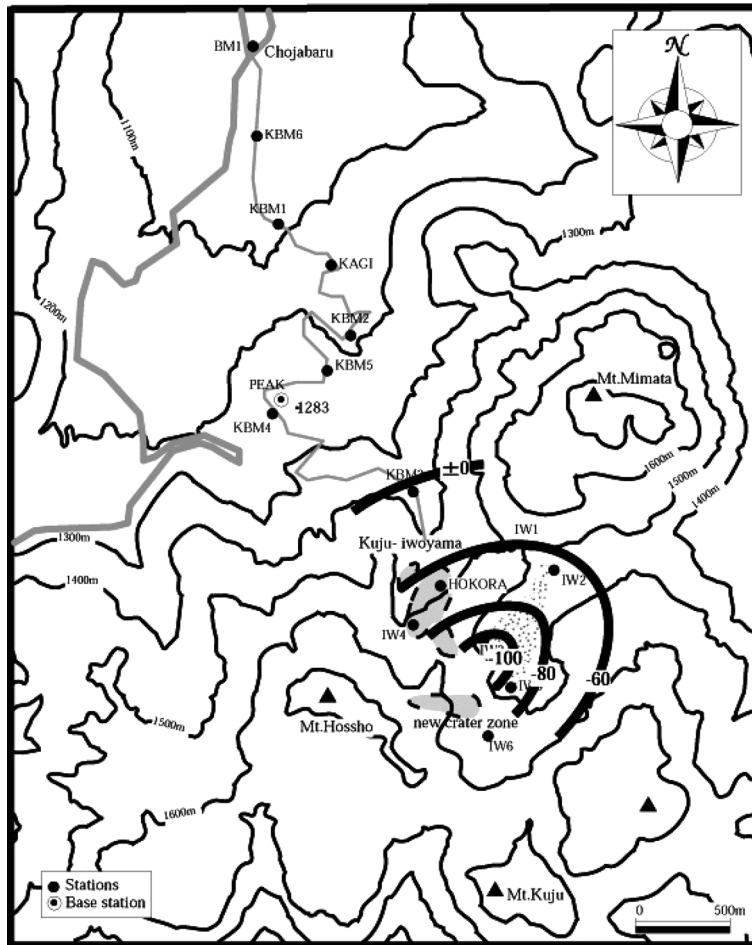


図 3 九重火山 1995 年水蒸気爆発から 1 年後の重力減少を示す範囲 (Ehara *et al.*, 2005). 中心部で約 100 マイクロガルの減少となっている. 主要な重力変化は噴火後 1 年以内に生じており, 噴火 2 年後までゆっくりとした重力減少が続き, その後の回復 (重力増加) に転じた.

場合は, 言ってみれば, 地熱発電所において, 還元をしない生産が長期間行われたような場合に相当しているとも言える. また, 大量の水蒸気放出に伴って, 数 100 MW~1,000 MW の熱が 10 年程度にわたって放出された. これは地熱発電所の規模に相当させれば, 八丁原地熱発電所と同等かそれ以上となる. この場合重力減少が生じた領域は, 半径 1 km から 2 km 程度である (図 3, この場合は, 楕円形の重力減少地域の半分が観測から求められているので, 短径と長径の長さを採用した).

わが国のような複雑な地質構造の地域では「半径 4~6 km の広大な貯留層は考えにくい」としている一方で, 「地熱発電所が温泉地に影響を与えないためには生産井と還元井の先端は 10 km くらい離れる必要がある。」とも述べられており, 両者は整合性に欠けている. 日本最大の地熱発電所およびそれに匹敵する熱放出のあった火山の水蒸気爆発における数値からは, 実際の影響範囲はかなり小さいことが分かる.

以上のように, 実績に基づいた, 影響の生じた集水面積の評価は, わが国で想定される大規模な

地熱発電所に相当するものを想定し、集水面積を円形と考えた場合、半径 1~2 km 程度と云えそうである。八丁原地熱発電所あるいは九重火山水蒸気爆発の場合、放出される熱量は同程度で数 100 MW から 1,000 MW の程度である。これはわが国の地熱地域等から放出される熱量の最大規模に相当するものであり、わが国の場合、影響範囲はせいぜい半径 1~2 km の程度であり、一方、10 km と 1 ケタ過大な推定があるが、規制の議論に資するような数値を算出する目的ならば、個別の地域に関してより具体的な議論に基づく必要がある。

2.7 「5. 日本の熱資源の評価と地熱発電の開発可能量」に関する議論

日本の熱資源の評価と地熱発電の開発可能量に関し、次の意見が示されている。「地熱資源は地表に兆候を示すはずである。日本列島からの放熱量がこれまでの推定値より 3 倍以上もある自然供給熱量、いわゆる持続可能な資源とするなら地熱地帯や温泉湧出がもっとあってよい。それに現在の地熱発電の稼働によって熱資源量が衰退傾向を示していることから、地熱資源のポテンシャル 2,347 万 kW については改めて再評価する必要がある。」

一方これに対し、地表地熱徴候が見るべき程ではないが、地下に大規模な熱水系が存在している例は少なくなく、例えば、大分県の滝上地熱発電所の地下熱構造を見れば明らかであり、単純に「地熱地帯や温泉湧出がもっとあってよい」とは言えない。むしろ、温泉の分布から見ると、わが国国土の広範な面積に十分に温泉が生じていると言えるのではないか（たとえば、村岡ら（2007）の 26 ページに示されている日本の温泉分布図によれば、日本列島には限なく温泉が分布していると言っても良い。さらに、やや古いが、湯原・瀬野（1969）「温泉学」20 ページ第 3 図に示されている日本の温泉分布図でも、日本列島に限なく温泉が示されている（なお、同図は、地質調査所（1957）本邦温泉分布図によるとされている）。

さらに、「村岡によって推定されている地熱発電量 2,347 万 kW を取り出される熱に換算すると、日本列島から放出される総エネルギーの 3.6 倍になり、したがって、地下 1~3 km にこれほど莫大な熱量の存在と採取しても絶えず供給されるような地下構造は地学的に大いに問題であって、地熱発電や温泉の関係者のみならず、地球物理、火山、地震の研究者も大いに論じられ、それらからの引用もあってよいはずである。しかるにそれが見当たらないのは不思議である。」との指摘があるが、このことは以下のように考えられる。

まず上の指摘の問題点は、村岡ら（2008）の評価した 2,347 万 kW を今にもすべてが利用されるような指摘であるが、仮にそのようなポテンシャルがあったとしても、それらを開発するに要する時間は少なくとも数 10 年以上というかなりの長期間であり、また、地熱発電所の運転開始に伴って広範囲なモニタリングが行われるので、その結果、地下の状態に大きな変化を与えることが明確になるようなことがあれば、新しい発電所を造り続けるということはある程度あり得ないと言える。

また、2,347 万 kW という数字に誤解があるようである。この数値は、現在の地殻上層（おおよそ 3 km 深程度）に貯えられた熱量のある割合（0.25 という回収率が設定されている）を 30 年間で取り出すと仮定し、地上に取り出した後、蒸気の温度等に応じて熱効率等を設定し、発電した場合にどの程度の発電容量になるかを推算したものである。あくまでもすでに貯まっているストックについて計算したもので、フローについて議論したものではない。したがって、このように熱を取り出したから、他に配分される熱がなくなってしまうというものとは本質的に違うのである。なお、貯えられた熱を取り出せば、より深部との温度差は増加し、深部から供給される伝導熱流量は増加する。

このような容積法による資源量評価は、貯まっているものをある年限で採取するという考えであり、再生可能エネルギーというより、枯渇性エネルギーの考え方である。しかし、実際には、取り

出されることによって、より深部からの熱の供給量は増加するので、計算上では補給を考えていないが、実質上補給があることを背後には想定としていることになる。そこで問題となるのは、実質的な補給を考えると、何年間で取り出すペースだと持続的な収支バランスが保たれるかということである。何年間程度で取り出すと考えれば実質的に補給を考えたことに相当するのかということである。多くの場合30年間という数値が想定されている。そして、この30年間という値は経験的には大きく間違っている数値ではなさそうである。例えば、安定した発電が行われている地熱発電所において、発電開始前に、村岡と同様の容積法で資源量を見積もって得られた発電規模と実際に安定して発電できる規模があまり変わらない例を示すことができるのである(江原, 2007)。ただ、このような検討は多くの例についてなされたわけではなく、今後の調査研究が必要と考えられる。

なお、大山(2014)は、日本の地熱資源量の再評価を提言されているがもっともなことと考えられる。村岡氏ら(2008)により評価された値は、ある前提のもとで評価されたものであり、新しいデータおよび新しい考え方にに基づき、常に、より精度の高い資源量評価を行っていく必要がある。事実、そのような試みが現在も行われつつある。

2.8 「6. 地熱資源の利用に関する温泉と地熱発電の共生について」の議論

大山(2014)はDickson and Fanelli(2004)の邦訳(日本地熱学会 IGA 専門部会訳・編, 2008)には、「地熱資源での持続可能エネルギーとは、“たとえある特定の資源が枯渇しても代替え資源が見つければよい”ということである。」としている。

この引用文献は、「“持続的開発”が意味するのは、“どのようなエネルギー資源についても、完全に持続可能な形で使う必要がある”のではなく、単に“たとえある特定の資源が枯渇しても、未来の世代がやっていけるための代替え資源が見つければよい”」という持続的開発の意味を説明したものである。この内容を地熱資源にそのまま当てはめ、地熱開発は資源が枯渇しても代替え資源が見つければよい、という無責任な行為であるとするのは曲解である。引用文献の前段には、「自然の地熱系の開発において熱流体の移流によるエネルギー涵養は、貯留層からの生産と同じ時間スケールで行われます。このことから、地熱エネルギーを再生可能エネルギー源と分類することは正当と言えます。ところが、高温岩体や一部の堆積盆中の高温地下水については、エネルギー涵養が熱伝導だけによって行われますが、その速度が遅いため、高温岩体や堆積盆中の貯留層は、有限のエネルギー資源と考えるべきです(Steffansson, 2000)」があり、それとの脈絡で、“枯渇しても代替え資源が見つければよい”との記述があるのである。つまり、引用文献の主張は、本来、地熱資源は熱水系に代表される再生可能エネルギーであるが、特殊な資源の形として、再生性に乏しい高温岩体などのエネルギーがあり、これらについては持続可能な形で開発する必要はない(エネルギーの種類によっては持続可能でない形で開発せねばならないこともある)との趣旨である。因みに引用文献の元となったWright(1998)には、再生可能な熱水型と並んで、再生性に乏しい資源を含むマグマ系、地殻熱、岩圧系といった非在来型の地熱資源がリストアップされ、その重要性を述べていることが確認できる。

さらに同じ引用文献のものとして、大山(2014)は「地熱発電の地熱エネルギーは地下、1,000～3,000 m 付近の熱水系貯留層の開発によって取り出すものであるから可採資源量とも呼ばれ、将来のある期間(100年以内)まで採取できればよい(Dickson and Fanelli, 2004; 日本地熱学会 IGA 専門部会訳・編(2008))」と記述しているが、これに一致する表現は引用文献にはない。大山氏の記述を引用文献から解説すると、引用文献には「可採総資源量には、利用可能な可採資源量(=資源量)が含まれ、それは将来のある特定期間(100年以内)までに経済的に法律に則って採取できるものを指します」とあり、これに同じページの大山(2014)の図9では、地熱資源のカテゴリー

分類にある資源の深度方向の経済的と準経済的を仕切る境界が約 3km とあることから、この文章と図の意味をつなげて自ら記載したものと類推する。特に気になったのは「将来のある期間 (100 年以内) まで採取できればよい」(下線、著者) と原文にはない記載がされている点である。引用文献が引用している Muffler and Cataldi (1978) は、地熱資源の評価法を述べた有名な論文であるが、そこで述べられているある期間 (100 年) とは、対象とする貯留層の熱量を 100 年かけて利用すれば、その一方で、熱の涵養があるため持続的に地熱貯留層を保持できることを意味している。そこには、地熱開発は後のことは考えないという無責任さは毛頭なく、むしろ逆に持続可能な開発が述べられている。

一方、大山 (2013, 2014) は「温泉は古代から、そして孫の時代に至っても永続的利用ができるように努力が払われている。その実例が温泉法と都道府県に設けられている温泉審議会の存在である。」と述べている。しかし、温泉審議会が永続的な温泉利用にどれほど機能してきたのか、箱根温泉の湧出量が最近 30 年で大きく減衰している現象 (野田, 2013) を見ると、心許ない。逆に、都道府県によっては、科学的な検討を行うのにふさわしくない委員構成も見られ、地熱発電の可能性のある都道府県でありながら、地熱の学識のある委員が不足しているケースもある。今後の温泉審議会においては適切な委員構成のもとで、適切な審議が行われることを期待したい。

また、シリカの沈殿を抑えるための還元水への硫酸の注入を問題とされており、これを還元水の汚染としている。硫酸の注入は、無処理だと地層の目詰まりを起こし、それぞれ地下の環境変化を起こすことへの対策であり、エネルギー開発と環境保持を調和させるために技術者が創案した知恵である。汚染とは、有害な物質が害毒を生じる程度に混入させている状態を指す。硫酸を注入する行為がそれに相当するのであれば、中止しなければならない。しかし、汚染に相当するかどうかは、それによる害毒の発生の実態があるかどうか、または、そのことが害毒をもたらすことを理論的に証明することによって判断されなければならない。硫酸自体は強酸性の劇物であるが、還元水の注入においては瞬時に pH が 5~6 の微弱な酸性となり、温泉が本来持っている硫酸イオンの濃度がいくらか増すだけである。熱水を還元することで、地下の熱水の化学成分が意味のある程度変わるかどうかは検討に値することである。しかし、それは主として地熱貯留層に係ることであって、還元熱水を温泉帯水層の近傍に還元するようなことを避ける限り、温泉水に直接的な影響を及ぼすわけではない。このことについては、わが国の地熱発電所周辺で、発電に伴って温泉水の化学成分がどのように変わったかのデータを提示していただき、科学的に議論することを願っている。

還元に関連して、(大山, 2014) は引用文献を示して、「地熱発電所の地下環境は広域にわたって開発前に比べると著しく変化している懸念もある (秋林・藤井, 2001)」と記している。しかし、秋林・藤井 (2001) の文献に直接当たってみると、この件に関しては、論文最後のまとめの中で、以下のように記している。「(5) 分離熱水は原貯留層流体の化学組成とは異なるため、地熱貯留層の管理およびフラクチュアの検知には、還元後における貯留層流体の化学組成の分析データが利用される。また、放射性同位体の組成変化と非凝縮性ガスの混入量から還元流体の戻り流れの流量と化学的ブレイクスルー時間から流路容積を求めることも可能である。この流路容積とシリカ沈殿レートから流路が目詰まりを起こすのに要する年数を推定することが可能である。(6) 還元の戻り流量から、還元流体の回収率、熱エネルギー回収の効果や還元指数の減退が推測される。したがって、最適な貯留層管理には還元戻り流れの正確な把握が必要である。」と、地下環境を保持するための方策があることが示されている。

さらに、「温泉成分は温泉療養のもっとも重要な要因である」と述べられているが、温泉地に逗留し、リラックスすることにより免疫力あるいは自然治癒力が高まり、良好な健康維持に貢献することは十分あり得ると思われる。また、温泉研究者あるいは旅行 (温泉) ジャーナリストによるそ

のような指摘は少なくない(例えば, 最近の著作, 佐々木, 2013; 小野寺, 2012)。これらについて議論を深めるには, 個々の化学成分が短期間の入浴でどれほど効果があるかについて明確なエビデンスを示すと同時に, 地熱発電の発電熱水を温泉として利用した場合の効果についても言及すべきである。また, 温泉入浴客が, どれくらい温泉の療養効果への嗜好や理解を有しているかの本質も把握しておくことが必要であろう。加えて, 「地熱発電に必要なのは熱量のみで, 機器や湧出に支障を来さなければ地下の熱水系がいかなる水質になろうともいわず, 地熱発電所の還元水は温泉地なら大問題になり, 多分, 浴客は来なくなるだろう」と述べられている。地熱発電は長いところでは45年以上継続しているが, 地熱発電所周辺の温泉地で, それによって浴客が来なくなったところは本当にあるのであろうか。

そして, 「これらのことから温泉地と地熱発電所の共生は困難と考えられる。」と結論されているが, わが国最大の八丁原地熱発電所においては, 安定した発電と筋湯温泉との共生が図られている(野田, 2013)。さらに述べられている, 地熱発電には自然湧出に相当する熱量を利用するものだけに限定する一方, 動力揚湯の温泉利用は認めるというのは, 公平性に欠けるといえるべきである。大山(2014)では, 補給と消費をバランスせよとの提言は全く同意するものであり, わが国の地熱発電所の中にはそれを満たしていないものがある可能性がある。既設地熱発電所においては, 持続可能な発電レベルをできる限り早く見出し, 持続可能な発電を行うことによって答えるべきであり, 答えることができると考えられる。新規地熱発電所においては, 段階的開発に基づき持続可能な発電を目指すべきであろう。この持続可能な利用は温泉でも本来実現されるべきものである。しかし, 還元を行わないかぎり, それは極めて困難なことになると思われる。

3. おわりに代えて

大山(2013, 2014)の指摘には傾聴すべき点もあるが, 一面的な議論が多いと感じられる。一面的なものの見方は, 偏った結論に陥りがちである。科学とは, 本来, 物事を多面的に見ることから始まると言えよう。断片的な引用やその拡大解釈は, 一方的な持論を正当化や誇張につながりがちなので注意を要する。

著者らは, 地熱発電と温泉とを同じ視点で考え, さらに進んだ議論をしたいものと考えている。また, 議論を一般的・平均的にするだけでなく, 個々の地熱地域に関して, 個々の地熱構造に基づいて, できるだけ定量的に議論を進めなければ, 各自の議論を主張・展開するだけで, 議論が深まることはないであろう。7. おわりにには「現在の地熱発電の認可出力54万kWは全国発電量(著者注: kWは発電量ではなく電力なので誤用か?)の0.2%に過ぎない。この値を0.4から1%にすることにより1億2万人(原文のまま)が享受し, 数十万人の雇用の場となっている温泉を危機的状況にするだけの価値があるとは思えない。」と述べられている。電力の1%は単純な比率で国民の120万人, 発電量では1.25%に当たるため(地熱発電は他の再生可能エネルギーより設備利用率が格段に高い), 150万人の毎日の電力消費に相当する。決して「過ぎない」というレベルではない。温泉の観光上の価値について, 著者らは否定するものではない。地熱発電が本当に観光の危機的状況をもたらすのであれば, 地熱開発は控えなければならない。しかし, 1%分の電力が全国の温泉観光に危機をもたらすとする警告には論理的飛躍がある。地熱発電の実施に当たっては, 地域の合意を得るための協議会の設置や, 環境アセスメントの実施などの配慮が必要となっているし, 何よりもこれまで目立った温泉への影響がなく共生ができていたとの実績がある。わが国にとって観光が非常に大事なことは論を待たないが, 我々が将来にわたって持続的発展を続けるには, エネルギー問題や地球環境問題への対応も併せて考えなければならない時代となっている。温

泉利用と地熱発電利用とがどうしたらうまく調和して共生し、地球環境問題、エネルギー問題、さらには地域振興に貢献できるか、温泉事業者、地熱事業者の垣根を越えて、一緒に考えられるようになることを願っている。本論が今後の有益な議論につながることを期待したい。

謝 辞

本稿の査読に当たっては二名の査読者のほかに特に編集委員会としての査読もしていただきました。地熱利用と温泉利用の共生の問題を非常に大事な問題ととらえての十分な措置であり、細部にわたり精密な検討を加えていただいたおかげで、内容を適切なものとする事ができたことに深く感謝いたします。

引用文献

- 秋田藤夫 (2014) : 北海道における地熱開発の現状と課題 (解説). 温泉科学, **63**, 353-363.
- 秋林 智, 藤井 光 (2001) : 地熱開発地域における熱水還元之功罪について. 地熱エネルギー, 通巻 95 号 (26 巻 3 号), 228-238.
- 地質調査所 (1957) : 本邦温泉分布図.
- Dickson, M.H. and Fanelli M. (2004) : What is Geothermal Energy? http://www.geothermal-energy.org/geothermal_energy/what_is_geothermal_energy.html
- 江原幸雄 (2007) : 持続可能な開発に適合した地熱資源量評価について. 日本地熱学会平成 19 年学術講演会講演要旨集, A13.
- 江原幸雄 (2012) : 地熱エネルギー—地球からの贈りもの一. 179 p, オーム社, 東京.
- 江原幸雄 (2013) : 地熱発電—温泉利用と地熱発電利用の共生を実現するために—. 温泉科学, **63**, 44-58.
- Ehara, S., Fujimitsu, Y., Nishijima, J., Fukuoka, K. and Ozawa, M. (2005) : Changes in the thermal state in a volcanic geothermal reservoir beneath an active fumarolic field after 1995 phreatic eruption of Kuju volcano, Japan. Proc. World Geothermal Congress 2005, CD-ROM.
- 江原幸雄, 西島 潤 (2004) : 地熱資源の持続可能性に対する観測的立場からの検討—重力変動から見た持続可能性—. 日本地熱学会誌, **26** (2), 181-193.
- Elder, J.W. (1964) : Physical processes in geothermal areas, in Terrestrial heat flow, Geophysical Monograph 8. W.H.K. Lee (ed.), 211-239, AGU.
- 浜田眞之 (2014) : 温泉と地熱の共生の可能性についての考察 (解説). 温泉科学, **63**, 329-340.
- 火力原子力発電技術協会 (2012) : 地熱発電の現状と動向 2010-2011 年. 99 p.
- Muffler, P. and Cataldi, R. (1978) : Methods for regional assessment of geothermal resources, Geothermics, **7**, 53-89.
- 村岡洋文, 阪口圭一, 駒沢正夫, 佐々木進 (2008) : 日本の熱水系資源量評価 2008. 日本地熱学会平成 20 年学術講演会講演要旨集, B01.
- 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. 110 p. 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 日本地熱調査会 (2000) : 新版 わが国の地熱発電所設備要覧. 254 p. 日本地熱調査会.
- 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 (2010) : 報告書 地熱発電と温泉との共生を目指して. 62 p.
- 日本地熱学会 IGA 専門部会訳・編 (2008) : 地熱エネルギー入門, 第 2 編. 45 p.
- 日本の地熱調査委員会 (1982) : 日本の地熱資源に関する火山学的研究. 55 p.

- 野田徹郎 (2013) : 地熱発電の温泉への影響を科学的に考える. 温泉科学, **63**, 224-237.
- 大山正雄 (2013) : 7-2 水文学的見地から. 地熱発電と温泉地との共生に関する調査報告書, 100-132. 全旅連.
- 大山正雄 (2014) : 地熱発電と温泉との共存の問題 (解説). 温泉科学, **63**, 341-352.
- 小野寺淳子 (2012) : 北海道温泉大図鑑, 367 p. 北海道新聞社.
- Rybach, L. and Mongillo, M. (2006) : Geothermal sustainability—A review with identified research needs—. GRC Transactions, **30**, 1083-1090.
- 佐々木信行 (2013) : 温泉の科学. 218 p. サイエンス・アイ新書, SBクリエイティブ株式会社, 東京.
- 島田充克 (1998) : 砒素含有地下水の地質環境. ヒ素をめぐる環境問題, 湊 秀雄監修, 日本地質学会環境地質研究会編, 95-116. 東海大学出版会, 秦野.
- Stefansson, V. (2000) : The renewability of geothermal energy. Proc. World Geothermal Congress 2000, CD-ROM.
- Tokita, H., Yahara, T. and Kitakoga, I. (1995) : Cooling effect and fluid flow behavior due to reinjected hot water in the Hatchobaru geothermal field. Japan. Proc. World Geothermal Congress 1995, 1869-1874.
- Wright, P.M. (1998) : The sustainability of production from geothermal resources. Bull. Geo-Heat Center, Vol. 19, No. 2, 9-12.
- 山本莊毅 (1985) : 新版 地下水調査法. 490 p. 古今書院, 東京.
- 湯原浩三, 江原幸雄 (1981) : 日本列島弧の地熱場について. 火山, **26**, 185-203.
- 湯原浩三, 瀬野錦蔵 (1969) : 温泉学. 293 p. 地人書館, 東京. .