



総 説

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—

江 原 幸 雄¹⁾

(平成 25 年 3 月 17 日受付, 平成 25 年 4 月 21 日受理)

Geothermal Power Generation
—Towards the Coexistence of Hot Springs and
Geothermal Power Generation—

Sachio EHARA¹⁾

Abstract

The operation system of geothermal power generation is summarized in order to understand the underground geothermal fluid flow. Generally, the deeper geothermal reservoir is separated hydrologically from the shallower hot spring water aquifer. Even though the deeper geothermal reservoir is connected to the shallower hot spring water aquifer through permeable zones such as fractures, sustainable production of geothermal fluids minimizes the effect to the hot spring water aquifer, that is, the sustainable production of geothermal fluids from the geothermal reservoir is the key technology to realize the coexistence with hot springs and geothermal power generation. Monitoring of geothermal systems before and after the exploitation of geothermal energy is extremely important to understand the effect to the hot spring water aquifer.

Key words : Geothermal power generation, Geothermal reservoir, Hot spring water aquifer, Step geothermal development, Sustainability, Coexistence

要 旨

地下における地熱流体の流動を理解するために、地熱発電システムの原理が紹介された。従来多くの経験から、一般に、深部の地熱貯留層と浅部の温泉帯水層は水理的に隔離されていることが多いと言われている。しかしながら、もし、深部の地熱貯留層と浅部の温泉帯水層が断層などを通じて水理的に連結している場合でも、地熱貯留層からの持続可能な地熱流体の生産は温泉帯水層への影響を最小化する。すなわち、持続可能な地熱流体の生産は、温泉利用

¹⁾地熱情報研究所 〒350-1319 埼玉県狭山市広瀬 1-3-12. ¹⁾Institute for Geothermal Information, 1-3-12, Hirose, Sayama City, Saitama Prefecture 350-1319, Japan. E-mail charakuju@kind.ocn.ne.jp, TEL 04-2935-4070, FAX 04-2935-4070.

と地熱発電利用の共生を実現するためのキーテクノロジーである。地熱エネルギー利用開始前後にわたる地熱系のモニタリングは温泉帯水層への影響を理解するためには極めて重要である。

キーワード：地熱発電，地熱貯留層，温泉帯水層，段階的地熱開発，持続可能性，共生

1. はじめに

筆者は、火山物理学から出発し、その中でも特に熱学に興味を持ち、やがて、地下における構造とそこにおける熱と水の流れの解明という理学的な課題を研究の中心に据えるようになり、さらに「持続可能な地熱発電」というような工学的な課題にも興味を持ってきた。このような中で、「温泉利用と地熱発電利用の共生」という問題にも関心を持ち、研究を続けてきた。ご存知のように、既設地熱発電所とその周囲の温泉地とは共生が成り立ってきているが、新規開発予定地点では、いろいろな軋轢が生じてきている場合があり、非常に残念に思っている。いわゆる、「地熱発電の温泉への影響問題」は本来、極めて科学的・技術的課題であり、信頼できるデータに基づいて、合理的な推論を行い、一定の判断を下していくものと理解しているが、従来の種々の議論ではこれらが十分ではない場合が少なくなく、非常に残念に思っている。本小文では、信頼できるデータに基づいて、合理的に推論するという科学の原点に立って、いろいろな議論を進めたい。

なお、小生は、日本温泉科学会 70 周年記念大会（平成 22 年 12 月、東京都全国町村会館）のパネルディスカッションⅡ「温泉科学の進め方」において、「地下における熱と水の流れの定量的解明を目指して—温泉科学の進め方の一試論—」という報告をさせていただき、それに先立ち、その概要を、温泉科学誌第 60 巻特別号（平成 22 年 11 月）に掲載させていただいた（江原，2010）。この小文は、地下における熱と水の流れを定量的に扱うことの重要性を指摘したもので、そのような考え方が「温泉利用と地熱発電利用の共生」に益するという立場から記述されている。そのような観点から、2013 年に岳温泉で開催される日本温泉科学会パネルディスカッションの材料として、本小文と江原（2010）の小文とを合わせて 1 つの材料と考えていただければ幸いである。

2. 地熱発電システム—原理と進展の歴史—

すでに日本温泉科学会の方々には、地熱発電システムに関しては大方の理解を頂いていると思われるが、ここでは以後の議論を明確にする上でも、改めて、地熱発電システムの概要について触れておきたい。Figure 1 に地熱発電のしくみ（日本地熱開発企業協議会，2011）を示した。

火山の下、地下数 km の深さにはマグマ溜りがあり、これが直接出れば噴火となるが、それは稀な現象であり、その寿命のほとんどにおいては、マグマは熱源として、熱を周囲、特に上方に放出している。熱源としてのマグマは、溶融している必要はなく、固化していても、一定以上の温度（たとえば 300℃程度）があれば、十分熱源としての役割を果たすことができる。実際、地熱発電を実現するような高温の熱水あるいは蒸気が存在する火山は、その最も新しい噴火活動が 100 万年より新しければ可能との指摘がある（玉生，1994）。また、余り若い活火山では、火山体内が十分温められず、地熱発電を実現するような高温の熱水・蒸気の領域、すなわち地熱貯留層が地下浅部に十分形成されない。桜島火山などがそれに該当する可能性がある（湯原・江原，1981）。このようにマグマの熱によって、地殻浅部に地熱発電が可能なような蒸気・熱水の存在する領域を形成するためには地質学的に見て一定の時間が必要で、熱水系発達の数値計算からは、 10^4 年以上のオーダーの時間が必要との指摘がある（Gargs and Kassoy, 1981）。

マグマからは主として伝導的な熱が上昇する。もちろん、若い火山からはマグマ性流体の寄与も

地熱発電とは

地熱発電とは、地中深くから得られた蒸気で直接タービンを回して発電するものです。一緒に出る熱水は還元井を使って再び地下に戻して再利用に役立てます。

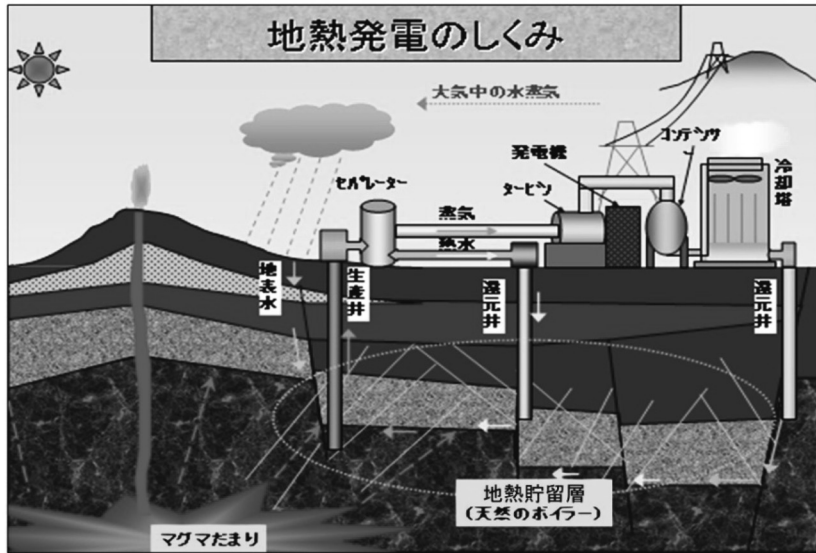


Fig. 1 A generalized system of geothermal power generation (JGDCA, 2011).

図 1 地熱発電のしくみ (日本地熱開発企業協議会, 2011).

大きいと考えられる (たとえば, 江原 (2010) における九重火山・九重硫黄山の例). 一方, 地表からは降水が地下に浸透してくるが, この地下水はマグマからの熱によって温められて軽くなり上昇に転じる. そして, 透水性のよい地層があればそこに流入することになる. その透水性のよい地層が地表にまで到達していれば, 地表で天然の温泉や噴気が見られることもある. 透水性のよい地層の上部に難透水性の地層 (帽岩とも呼ぶ) があらかじめあったり, 上昇し冷却した熱水から沈殿物が生じ, 透水性のよい地層の隙間を埋めたりすることもあるだろう. あるいは, 熱水と周辺地層が反応し, 熱水変質が生じ, さらに粘土化することによって難透水性の地層 (帽岩) が形成されることもあるだろう. いずれにしても, このように透水性の地層の上部に難透水性の地層 (帽岩) が発達することにより, 周囲より圧力と温度の高い透水性のよい地層が存在することになる. これを地熱貯留層と呼んでいる. 多くの場合, 地熱貯留層は高角の断層の場合が多いが, 断層ではなく, 開口割れ目のようなものでもよく, このことからこれを断裂型地熱貯留層と呼んでいる. 多くは断層や開口割れ目のような 2 次元的な構造をしているが, 例は少ないが, 多孔質的な地熱貯留層も存在する. そのほか, 地層境界に水平的な地熱貯留層が発達することもある.

地熱発電においては, 各種の地熱探査法を駆使して地熱貯留層を発見し, それを目掛けてボーリングを行う. 多くの場合は, 地熱貯留層内にあるのは圧縮された高温水 (液相) であり, ボーリング坑中を自然に上昇するに従って減圧し, 沸騰を開始, 気液 2 相となって, 高速で地上に到達する. この気液 2 相流体はセパレーターによって気液分離させられ, 蒸気はタービンに送られ, 発電機を回し, 電気を起こし, 送配電線を介して, 最終的に我々の家までやってくることになる. なお, 地熱流体が地熱貯留層中では液相で, 地上では気液 2 相になるこのような地熱系を熱水卓越型地熱系と呼ぶ. 一方, 地熱貯留層中ですでに気液 2 相となっており, 地上では水蒸気のみになる場合があるがこのような地熱系を蒸気卓越型地熱系と呼ぶ. この蒸気卓越型地熱系は稀な存在で, 多くの火山

性地熱系は熱水卓越型である。ただし、蒸気卓越型の場合は、発電に不要な熱水がないため、セパレータや還元井が必要なく、発電システムとしては簡単であり、経済性も高い。地熱発電が始められた当初は、気液分離するという考え方がなく、気液 2 相では発電が行えないと考えられていた。そのため、日本を含め、世界各国で最初に地熱発電が始められたのはいずれもこの蒸気卓越型である。セパレータによって気液分離するという考え方はニュージーランド・ワイラケイ地熱発電所 (1958 年運転開始) で実現された。我が国で最初の熱水卓越型地熱発電所 (地熱発電所としては、松川地熱発電所に次いで我が国 2 番目の地熱発電所) である大分県大岳地熱発電所は、調査によって得られた地熱流体が気液 2 相であったため開発が滞っていたが、ワイラケイでの成功が力となり、1967 年我が国最初の熱水卓越型地熱発電所となったのである。

タービン以降の発電システムは火力発電と本質的に同じである。ただし、扱われる蒸気の温度・圧力は地熱発電の方が圧倒的に小さい。地熱発電の場合は、数気圧から 10 数気圧、温度は 150~200℃程度、一方、火力発電の場合は、150~250 気圧、温度は 500℃を超える。無人で遠隔操作されている地熱発電所が多いゆえんでもある。分離された熱水は還元井によって地下に還元される。還元においては、特に圧力を加えることはなく、自然流下である。人工的に高い水圧をかける高温岩体発電 (近年では、高温岩体を含めたより広い概念である Enhanced Geothermal System 発電 (EGS 発電)) の場合とは異なることを留意する必要がある。なお、EGS 発電とは、乾燥高温岩体だけでなく、低透水性の岩体を水圧破碎によって透水性を改善し、人工的に水を注入後回収した熱水・蒸気を使って発電する発電方式も含めている。

還元を行うのは、地熱貯留層へ熱水を補給し、圧力維持に寄与するためと、熱水中に含まれるヒ素などの有害物質を環境中に放出させないためである。多くの地熱発電所では分離された熱水はそのまま地下に還元されるが、圧力が高い場合は、フラッシュという減圧容器で減圧され、2 次的に蒸気が生産され、タービンの後段に入れられ、発電に寄与する。このような発電方式はダブルフラッシュ方式と呼ばれ、フラッシュを介さない場合 (シングルフラッシュ方式と呼ばれる) に比べ、20%程度発電量が増加すると言われている。最近では、さらにもう一段フラッシュさせる、トリプルフラッシュ方式も導入され、シングルフラッシュ方式に比べ、発電量が 27%も増加している例が報告されている (牧元, 2012)。

地熱発電は、我が国では、1966 年に岩手県松川地熱発電所が運転開始して以来、2013 年 3 月現在、17 カ所、合計認可出力は約 52 万 kW となっているが、2000 年以降新設の地熱発電所がなかった。しかしながら、固定価格買取制度が 2012 年 7 月に導入され、経済性が増したことから、新たな地熱発電所建設の機運が出てきている。2013 年 1 月には、48 kW の小規模なバイナリー発電方式の地熱発電所が別府温泉で運転開始したことが報道されている。なお、これは、むしろ、温泉発電と言った方がよいかも知れない。

一方、世界では、1904 年イタリアで世界最初の地熱発電が開始され、1940 年代には出力 12 万 kW を超えていたが、第 2 次大戦で爆撃され壊滅、戦後徐々に復興、アメリカやニュージーランドでも着手された。オイルショック後の 1980 年代、増加のスピードが上がり、さらに、1990 年代の地球温暖化の顕在化により、一層増加のスピードが上昇している。1990 年以降、地球温暖化対策の視点から、地熱発電の導入が非火山国を含め世界各国で計られ、2010 年には世界全体で 1,070 万 kW を超え、2015 年には 1,850 万 kW に達するであろうと予測されている (Bertani, 2010)。2000 年以降、残念ながら我が国の地熱発電は停滞しているが、世界の地熱発電は急速に進展している。地熱資源量はアメリカ、インドネシアについて世界第 3 位の我が国であるが (村岡ら, 2008)、発電設備容量では、2000 年には世界第 5 位であったが、現在、インドネシア、ニュージーランド、アイスランドに抜かれ、世界第 8 位に下がってしまった (火力原子力発電技術協会, 2012)。一方、増加する

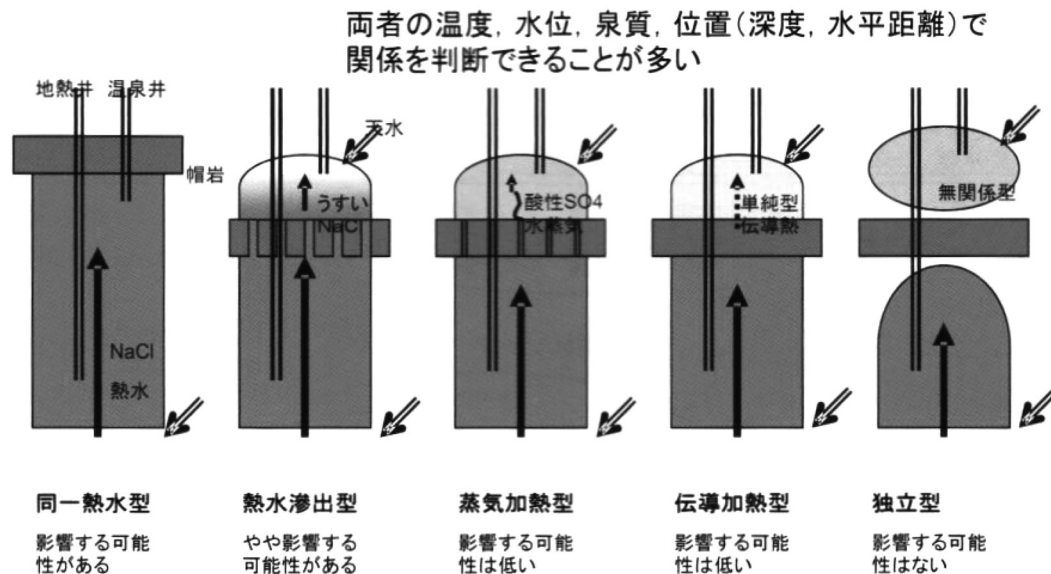
世界の地熱発電設備の心臓部の地熱タービンの技術では我が国は世界で圧倒的に優れており、世界の地熱発電設備容量の7割は我が国のメーカーが供給している（日本地熱開発企業協議会，2011）。

3. 地下における熱と水の流れ

さて、前章で、降水がマグマからの熱によって、加熱され上昇し、地熱貯留層に貯えられることを述べたが、浅部の温泉との関係を述べておきたい。地下1,000~3,000 m程度の深さに形成された地熱貯留層の周辺は当然高温で、その上部の地殻上層も高温となっている。したがって、浅部に浸透した降水は、地熱貯留層の上部にある浅部地層内で温められ、それらは上昇して、地層中に貯えられる。この場合、水は単なるH₂Oではなく、岩石から種々の化学成分を溶かし込んでいる。この貯えられた温度の高い水の地層を温泉帯水層と呼ぶことがある。地熱貯留層よりも一般に浅く、深さ数100 mから地表（自然湧出温泉）までにある。この温泉帯水層の上部に難透水性地層（帽岩）がある場合もあろう。このような場合は被圧しており、掘削した場合、自噴する場合がある。自噴しない場合は、動力揚湯が必要となる。以上の場合、温泉帯水層へはそれより深部からは、熱だけが供給されると考えたが、地熱貯留層と温泉帯水層が断層等で水理的連結がなされる場合も十分考えられる。すなわち、この場合は、熱も水（の一部および当然化学成分も）も地熱貯留層から供給される場合である。

以上では、地熱貯留層と温泉帯水層との関係を、極めて単純化して説明したが、実際には、それぞれの地下構造等に応じて、地熱貯留層、温泉帯水層および難透水性地層（帽岩）との間には多様な関係が生じるであろう。そのような多様な関係をモデル化し5つに分類したものが提案されている（Fig. 2, 野田, 2010）。このようなモデルに基づけば、地熱発電の温泉への影響をより概念的にかつ客観的に議論することが可能である。ただ、注意しておかなければならないことは、自然現象は連続的であり、実際には、Fig. 2における、同一熱水型と独立型の間には、3タイプだけではなく、それぞれ、無数とも言える実際の状態が出現するのであり、地域ごとに異なり、1つとして同じものはないことをよく理解しておく必要がある。しかしながら、Fig. 2のような概念的な分類は、われわれの思考および議論において大いに貢献してくれるのも確かである。

Figure 2に示したのは、実際の現象を類型化してモデル化したものであるが、われわれが個々の地熱地域の地下における熱と水の流れを解明するにあたっては、やはり、初めに、このようなモデル化（概念モデルの作成）を行う。この場合、当該地域の、地質学的、地球化学的、地球物理学的、あるいは水理学的データに基づいて、特定の地下の構造の中で、どのような熱と水の流れが生じているかを概念的に表現する。言ってみれば、地下における熱と水の流れのイメージを作るのである。そして、この概念的なモデルに基づいて、3次元的な数値モデルを作成する。その際、温度や圧力等の経時データを説明するような、ヒストリーマッチングのプロセスを経ることによって、より信頼性の高い定量的なモデルを作っていく。そうして作られた数値モデルを用いて、当該地域において、どの程度の発電規模であれば（地熱流体の生産量であれば）、長期間安定な発電ができるかを見極め、発電規模を決定するのである。もちろん、この段階では多くの坑井が掘削され、長期間の噴出試験が行われ、生産流体の経時変化、あるいは周辺の坑井の温度・圧力変化に関するデータも入手されているので、そのようなデータも説明できるようなモデルとなっている。数値モデル作成においては、様々なパラメータが関与するが、各々のパラメータの生産量等への影響がどの程度であるかというような感度試験も行われる。たとえば、観測値には幅があるので、ある範囲にあるパラメータであれば観測値を説明できるような場合があるが、そのような場合、資源量予測の前提として、控えめな数値を選択することになる。これらの一連の手続きはFig. 3に示している



熱水の取り過ぎにより地熱貯留層の圧力が低下する場合に影響が生じる。地熱貯留層の収支バランスがとれていれば影響は生じない。また、温泉相互の関係と、他の人為的、自然的影響があり得るので判断には注意を要する。

Fig. 2 Relation among the geothermal reservoir, the hot spring water aquifer and the cap rock (Noda, 2010).

図 2 地熱貯留層, 温泉帯水層と帽岩の関係 (野田, 2010).

(Elders, 1991).

すなわち、生産量の予測は基本的に安全側になされるのであるが、しかし、このようなプロセスを経ても、事前に完全に正確に予測することは困難で、計画通りの蒸気生産量が得られない場合もある。新しい地熱貯留層を発見して、それを補うことができる場合もあるが、それが難しい場合もあり、その場合は、設備容量に応じた蒸気を安定して生産することができず、経済性に問題が生じることになる。このようなリスクを避けるために、控え目な設備容量から出発し、地熱貯留層の反応を見ながら、可能であれば設備を増強していくという、「段階的地熱開発」という考え方が提案されている。これは持続可能な地熱発電と言うこととも関係しており、次章で触れることにしたい。

なお、以上の、概念モデルの作成から数値モデルの作成にわたるプロセスに関しては、すでに江原 (2010) に詳しく記述されているので、合わせて読んでいただければ幸いである。

4. 持続可能な地熱発電

前章で、控え目な資源量評価により発電規模を決定すると記述したが、当初はそれを維持できても、数年後にはそれを維持できなくなる場合がある。わが国 17 地熱発電所について、このことを調査した結果を Fig. 4 に示した (火力原子力発電技術協会, 2007)。

Figure 4 を見ると、過半の地熱発電所では設備出力と最大電力はほぼ 1 対 1 の対応を示しているが、3 か所では最大電力が設備出力の 75% 程度、4 か所は 50% 程度となっている。これは、設備に見合った出力が出ていないことを示している。地熱発電の設備利用率は平均としては 70% 以上

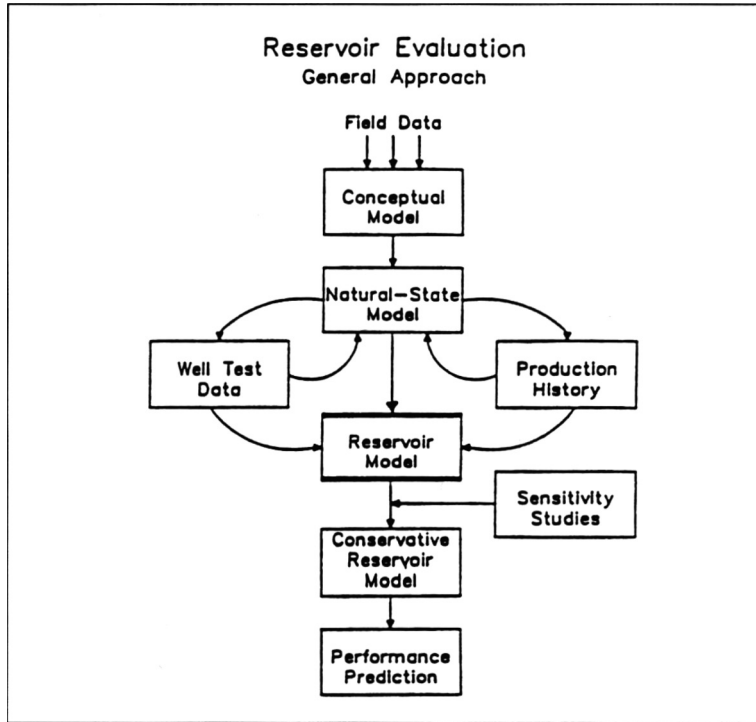


Fig. 3 A generalized approach to reservoir evaluation (Elders, 1991).
 図 3 地熱貯留層モデリングの一般的な手続き (Elders, 1991).

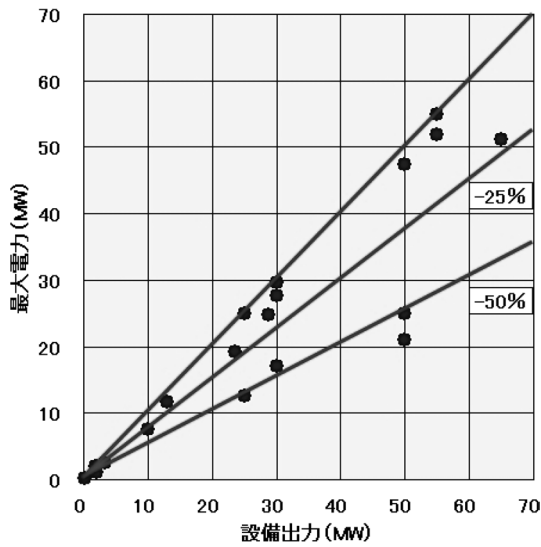


Fig. 4 Relation between the installed capacity and the maximum power generation.

図 4 日本の地熱発電所の設備出力と年間当りの最大電力 (2006 年度) との関係。

を維持しているが、それ以下の地熱発電所もあるということである。このようなことが生じると、当初計画した収入が得られなくなり、したがって、新たな発電所を建設する方向にも進まなくなるわけである。ここにも近年、新規地熱発電所が建設されてこなかった要因の1つが隠されている。このようなことを起こさず、設備容量に応じた地熱発電を継続する（持続可能な発電と言ってもよい）ためにはどうしたらよいだろうか。そのためには、持続可能な発電とはどういうことかを改めて考える必要がある。それを検討するための格好な材料が、Axellson *et al.* (2003) に示されている (Fig. 5)。

地熱地域には大きなものも小さなものもある。したがって、それぞれに応じて、その地域から、長期間安定して生産される発電量（あるいは蒸気量）を想定することができる。これを E_0 とし、持続可能な生産のレベルと呼ぶ。もし、たとえば、短期間にたくさんの生産井を掘れば、一時的には E_0 を超える生産は可能であろう。しかし、それを長期間維持することはできず、やがて、 E_0 より低いレベルに生産量は下がってしまうであろう（図中 $E > E_0$ の場合）。一方、 E_0 より低いレベルで生産を続ければ、長期間安定した生産を実現できるが、資源量の一部を利用するだけであり、一般には経済性も低いであろう ($E < E_0$ の場合)。そこで、できるだけ経済性も上げ、かつ、長期間安定して生産するためには、開発のできるだけ早い段階に E_0 を見出し、それを長期間維持することになる（図中の破線）。これを「段階的地熱開発」と呼ぶことにする。地熱発電所の建設プロセスにおいて、このような選択ができれば、過剰設備の建設ということがなくなり、地熱発電は極めてリスクの低い事業ということができよう。このような「段階的地熱開発」というプロセスこそが、今後採用されるべき開発プロセスと考えられる。

開発に伴う地熱貯留層の反応を見るためには、貯留層圧力は最も有効な指標と言えるが、そのための十分な数の観測井を掘削することは経済的には困難である。それに代わる手法として最も有効な手法が、繰り返し重力測定による地熱貯留層の重力モニタリングという手法である。地熱貯留層

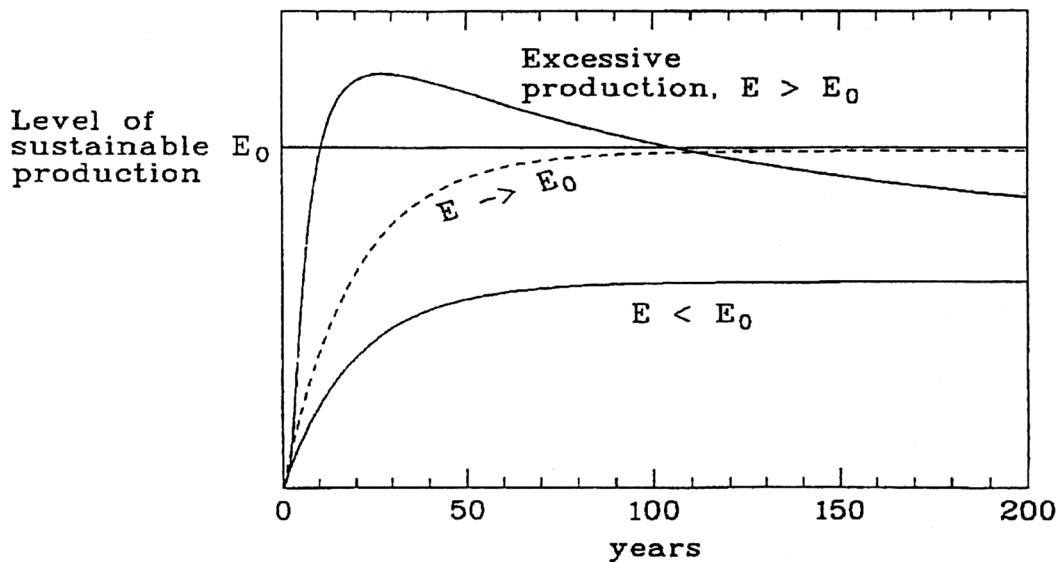


Fig. 5 Sustainable production of geothermal energy from an individual geothermal system (Axellson *et al.*, 2003).

図 5 持続可能な地熱発電の考え方 (Axellson *et al.*, 2003)。

内の圧力変化は地熱貯留層内の地熱流体の質量変化に反映され、その質量変化は、高精度の重力観測によって検出可能であることがいくつかの地域で明らかにされており、ここでは筆者らが大分県八丁原地熱発電所で行ってきた結果を示したい（江原・西島, 2004）。

八丁原地熱発電所は熱水卓越型の地熱地域であり、貯留層は断裂型地熱貯留層である。八丁原地熱地域地下の地下構造と流体流動の様子を示したのが Fig. 6 である（Momita *et al.*, 2000 を一部改変）。地表からおおよそ 2km 程度（図中白色部分）までは第三紀以降の各種火山岩類が存在しており、それ以下には白亜紀の花崗岩が存在している。花崗岩の中に冷却中のマグマ溜り（深さ 5 km 程度）があり、マグマ溜りからは熱が上方に供給されている。地表から浸透した降水は、温められ、再び上昇し、断裂（主として高角の断層。図中斜めの実線）中に貯えられる。これが地熱貯留層となる。図中では貯留層に沿って黒色で塗りつぶされている。これらの地熱貯留層の上部には変質帯が発達しており、帽岩の役割を果たしている（図中、水平方向に網掛けがなされている地層）。本地域では、図中央およびやや左側が主な生産ゾーンになっており、地熱流体輸送管によって図の右側へ地熱流体は運ばれ、気液分離後、蒸気はタービンに送られ、最終的には大気中に放出される。一方、熱水は図中右側の還元ゾーンから地下に還元されている。すなわち、図の中央および左側の深さ 1,700~2,200 m から地熱流体（液相）が生産され、図右側の深さ 1,000~1,500 m の深さに熱水が還元されており、大量の地熱流体の質量移動が生じることになる。重力観測はこのような質量移動を重力変化から捉えようとするものである。なお、筋湯温泉は Fig. 6 のさらに右側に位置している。Figure 7 に本地域の生産ゾーンおよび還元ゾーンの位置を示すとともに、重力観測点の位置を示した。

八丁原地熱発電所は、1977 年 7 月、1 号機が運転開始し（設備出力 5 万 5,000 kW）順調に発電を続けていたが、1990 年 7 月から 2 号機が増設され、設備出力が倍の 11 万 kW となった（なお、その後の 2006 年、2,000 kW のバイナリー発電設備が設置され、現在、認可出力は 11 万 2,000 kW と

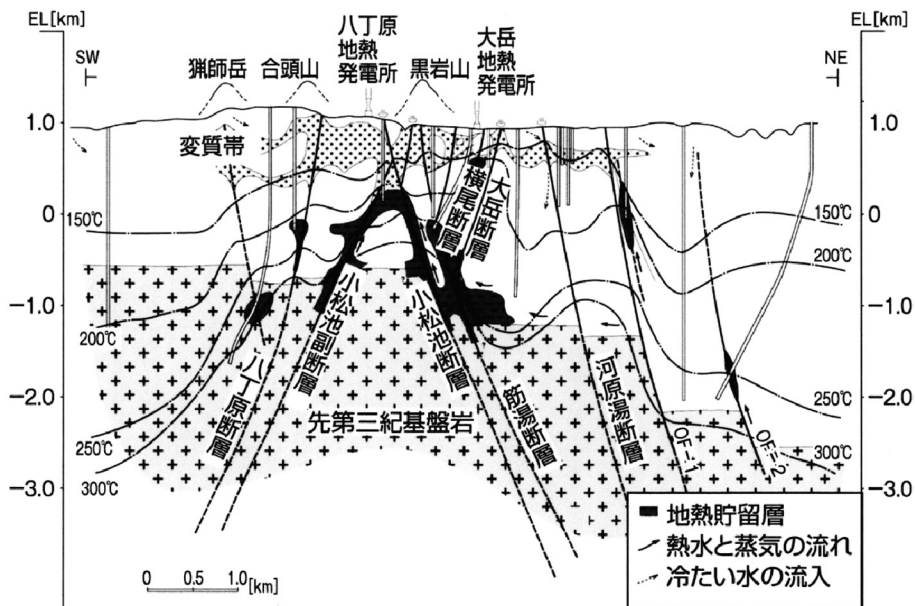


Fig. 6 A conceptual model of Hatchobaru geothermal system (modified from Momita *et al.*, 2000).

図 6 八丁原地熱地域の地熱系モデル (Momita *et al.*, 2000 を一部改変)。

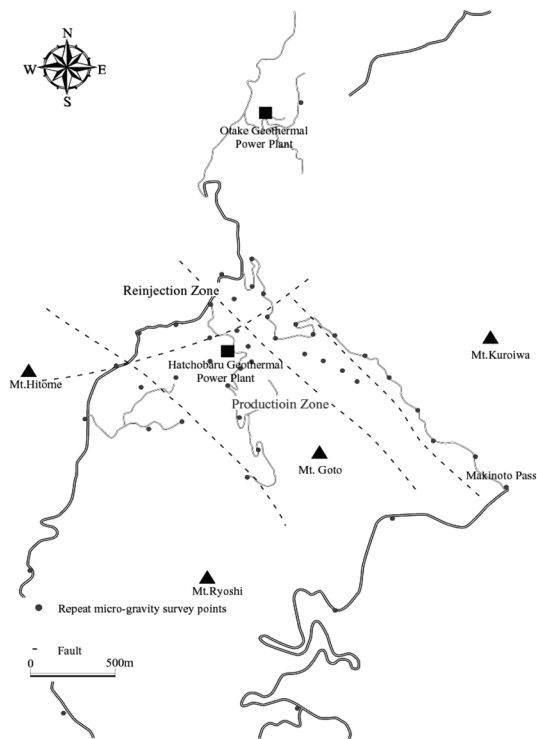


Fig. 7 Location of the production zone, the reinjection zone and the gravity stations (solid circles).
The solid square shows the power house and the solid triangles show the volcanic peaks.

図 7 八丁原地熱発電所における生産ゾーン (Production zone), 還元ゾーン (Reinjection zone), と重力観測点 (黒丸).
■は地熱発電所建屋の位置. ▲は火山体のピーク.

なっている). 重力変化観測は 2 号機運転開始の直前 1990 年 6 月から開始され, 年 4 回以上の繰り返し観測を行った. 観測は地熱貯留層領域外に基準点を設置し, 基準点との重力差を追跡する相対重力観測であった. はじめに, 還元ゾーン (Fig. 8 : Upper) および生産ゾーン (Fig. 8 : Lower) における典型的な重力変化を示す. 還元ゾーンでは, 還元開始後重力は 80 マイクロガル程度増加, その後低下したが, 増減を繰り返すも, ある一定の値を保っている. これは以下のように解釈される. 還元井から還元された熱水は一定時間還元井周辺に滞留しているが, ある程度以上滞留すると周辺に拡散していき, これを繰り返しているの, 還元された熱水は長期間還元井周辺には留まらないと理解される. 一方, 生産ゾーンでの重力変化はかなり異なっている. 生産開始後, 重力は 150 マイクロガル以上急激に低下している. 生産により地下の地熱流体は失われるが周囲からの補給が追いついておらず, 重力は低下を続けている. もし, 透水性が悪く, 周囲からの補給量が足りない場合は, 重力は低下を続けるであろう. しかし, 実際には, 重力低下の割合は次第に下がり, 生産開始後 8 年後以降, ほぼ一定に近くなっている. このことは, 生産によって失われる質量に応じた補給が周囲から行われ, 生産ゾーンでは次第に質量バランスが取れつつあることを示している. これは, 重力変化の空間分布を見てもよくわかる (江原・西島, 2004). それによれば, 生産・還元開始後 1~2 年程度は, 還元ゾーンではやや広域の重力増加ゾーンが存在し, 生産ゾーンでは

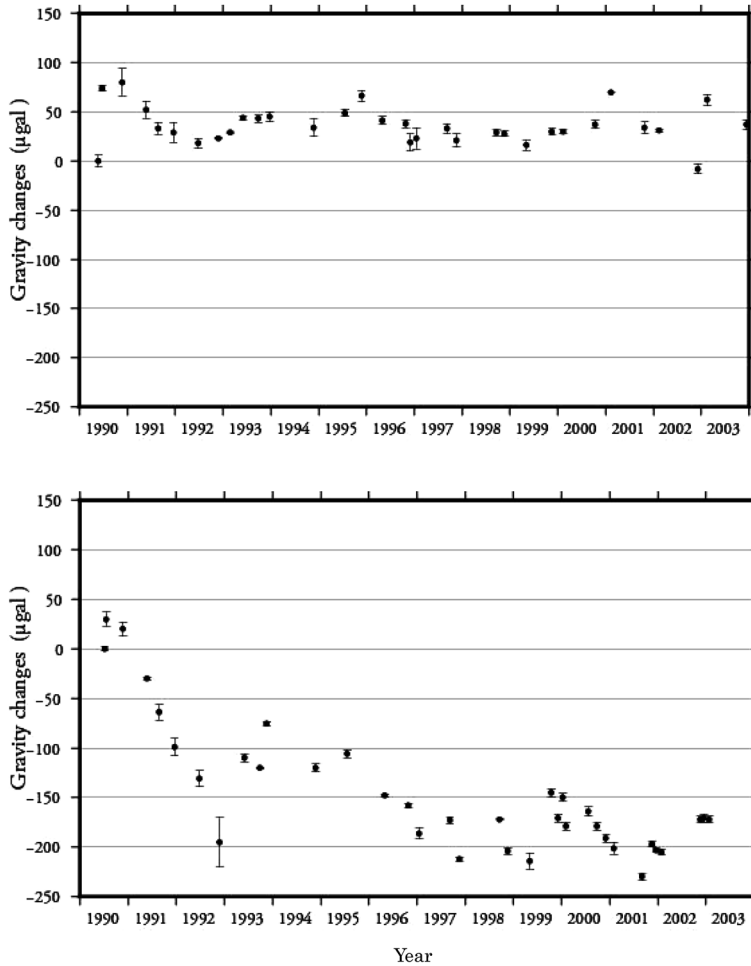


Fig. 8 Upper : Gravity changes at a gravity station in the reinjection zone.
Lower : Gravity changes at a gravity station in the production zones.

図 8 上：還元ゾーンでの重力変化 下：生産ゾーンでの重力変化。

広域に重力減少ゾーンが広がっていたが、やがて、それらの広域の重力の増加・減少ゾーンはなくなっていたことが重力変化図から確認された。

なお、このような重力変化が貯留層内の圧力変化をよく反映していることを貯留層内の圧力変化とその直上での重力変化との対比からもわかる (Fig. 9. 田籠ら, 1996 を一部改変)。

Figure 9 を見ると、重力値と圧力値の変化が相関しているのがよくわかる (相関係数, 0.93)。圧力が上昇するときには重力も上がり、圧力が低下する時は重力が下がっており、合理的な結果である。すなわち、地表における重力変化は地熱貯留層内の圧力変化、すなわち質量変化をよく反映していると理解される。

Figure 10 に、重力変化がほぼ安定した 1999 年 10 月から 2000 年 10 月までの 1 年間の地熱貯留層における質量収支を見積もった結果を示した。これによると、この 1 年間に生産された地熱流体量は 22.7 メガトン、還元された熱水量は 14.4 メガトンであったことが実測されている。したがって、両者の差 = $22.7 - 14.4 = 8.3$ メガトンが生産還元に伴って、地熱貯留層から失われた流体質量と

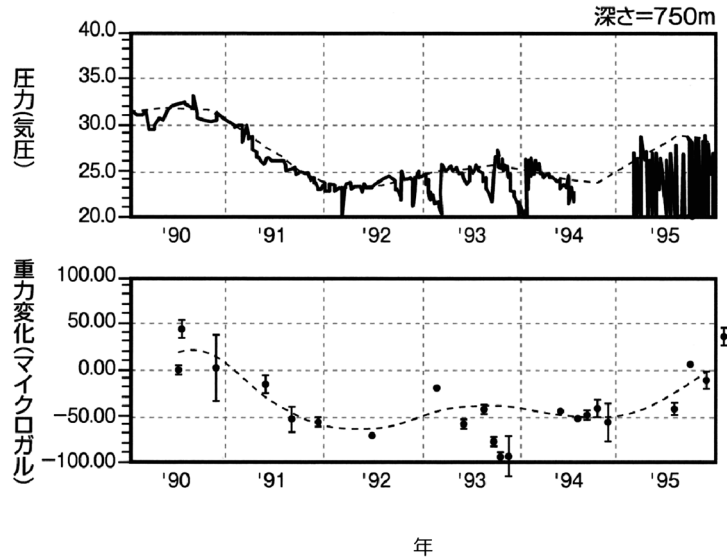


Fig. 9 Relation between the pressure changes in the reservoir and gravity changes at a gravity station right above the reservoir (modified from Tagomori et al.,1996).

図 9 地熱貯留層中の圧力変化と地熱貯留層直上の観測点における重力変化 (田籠ら, 1996 を一部改変)。

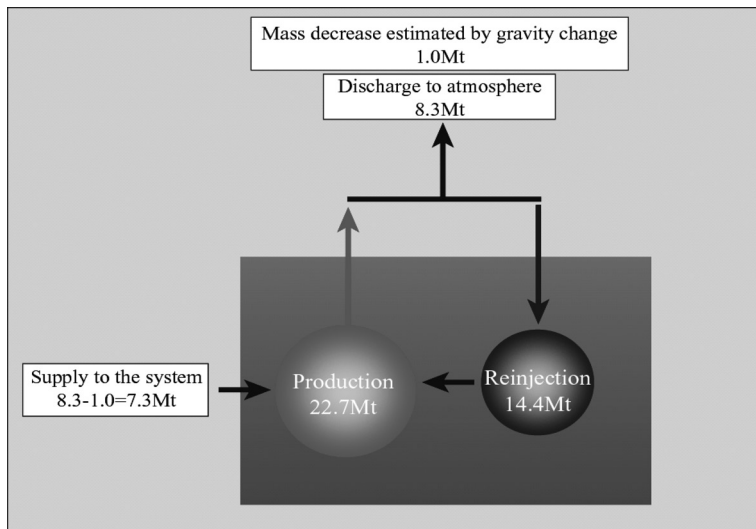


Fig. 10 Mass balance in the geothermal reservoir at Hatchobaru geothermal field.

図 10 八丁原地熱発電所における地熱流体質量バランス。

ということになる。一方、重力変化図にガウスの定理 (Allis and Hunt, 1986) を適用することによって、当該期間に失われた質量を計算することができる。計算の結果、失われた質量は 1.0 メガトンと推定された。生産および還元によって失われた質量が 8.3 メガトンであるのに、重力変化から推定された実際の質量変化がたったの 1 メガトンということになる。これは実は、この差 = 8.3 - 1.0 =

7.3 メガトンの流体が周囲から地熱貯留層へ補給されたことによる。すなわち、2000年の時点で、失われた質量の約90%が補給されていることになる。なお、この補給には還元によるものも含まれている。なお、適正な生産還元が行われる限り、補給量は次第に100%に近づいていくことであろう。しかし、理論的にはそうなるためには無限大の時間がかかることになるが、実用的には90%程度の補給達成されれば十分適正な生産還元が行われていると判断してもよいのではとの研究結果が示されている (Rybach and Mongillo, 2006)。

八丁原地熱発電所においては、1977年7月に出力5万5,000kWの1号機が設置され(当初の認可出力は2万3,000kWで、その後増加し、約3年後には認可出力は設備出力に達した)、1990年に同規模の2号機が設置され、当初から数えると、現在36年目に入っており、ほぼ安定して認可出力を維持している。一方、数値シミュレーションの結果から、長期間安定して維持できる発電規模は12万kWと推定されている (Tokita *et al.*, 2006)。これらのことは、八丁原地熱発電所においては、現在、設備出力に見合った安定な発電が維持されており、今後も維持できる可能性が極めて高いことを示している。すなわち、持続可能な発電が実現されつつあると判断することができる。これは結果的にはあるが、初めに持続可能な生産量の半分程度でスタートし、地熱貯留層の反応を見ながら、2倍に増設した結果、ほぼ持続可能な生産量を実現したものと考えられる。この八丁原地熱発電所の例は、「段階的地熱開発」による持続可能な地熱発電を実現している良い例と考えられる。

5. 温泉利用と地熱発電利用の共生

地熱発電が温泉に悪影響を与えた事例に関しては、外国の例(ニュージーランド・ワイラケイ地熱発電所、フィリッピン・ティウィ地熱発電所)では明確に科学的論文として発表されており、その原因も科学的に明確にされている(田口, 2010)。全く還元を行わず、発電に使用されなかった熱水を全量河川や海に放出したこと、設備出力が資源量に比較して過大であったこと、地熱貯留層と温泉帯水層との水理学的連結が強かったこと等がその理由として挙げられている。この点、発電に使われない熱水の全量が還元されている我が国の事情と多くが異なっており、ワイラケイやティウィのようなやり方をすれば温泉に影響することは十分想定される。

我が国における地熱発電所の建設においては、もともと温泉影響に対しては、細心の注意を払っており、地下構造の調査、事前の温泉調査を含め、丁寧な手続きを踏んでいる。そして、発電開始前から、地熱貯留層に関する諸語だけでなく、周辺の温泉の温度、湧出量、化学成分などのモニタリングを、地熱事業者の負担で行ってきている。そして、それらの結果を定期的に協議会等で説明してきており、地元温泉関係者には納得をもらいながら事業を継続している。また、発電に使用しない熱水を使って、清水との熱交換により温水を造成、地元に配湯したり、温泉維持に技術的な支援を行ったりしており、このような努力の積み重ねが、地熱発電事業者と温泉関係者との共生が成立している基礎になっていると考えられる。このような望ましい関係は、当然、同じように新規発電所でも実現されると考えられる。

次に、温泉影響の科学的・技術的側面に触れてみたい。一部の温泉関係者から、温泉影響が出たと指摘された事象には誤解も多く、また、信頼のおけるデータに基づいていないなど、推論も含めて合理的と言えないものが多々あり、科学的な議論が極めて困難である。この点に関しては、温泉関係の研究者が前面に出て、共にきちんと議論する方向が望ましく、そうすれば、実りある議論が展開されると考えられる。

さて、これまでの多くの経験から、温泉帯水層と地熱貯留層とは深さが一般に異なり、また、多

くの場合、地熱貯留層の上部には難透水層があり、深部の地熱貯留層からの流体採取の影響は直接的には温泉帯水層に出にくいと考えられる。しかし、両者が断層等で連結されている場合も十分想定される。したがって、そのようなことが予測される場合は細心の検討が必要である。この点に関しては、前章で示した持続可能な地熱貯留層からの生産が重要な指摘を示している。持続可能な地熱発電が行われれば、深部の地熱貯留層内では質量バランスが取れることになり、仮に地熱貯留層と温泉帯水層との間に水理的連結があったとしても、温泉帯水層への影響は限りなく少なくすることが可能となる。しかし、一方、それは、絶対に影響が現れないことを意味しない。なぜなら、われわれは 100% 完全に地下を理解しているわけではないからである。そして、このような不確かさを補うものがモニタリングである。このモニタリングを適切に行うことによって、想定される問題に適切に対応することが可能であると考えられる。科学的検討の結果、地熱発電が温泉に悪影響を与えたことが明確になれば、それに適切に対応するのは当然のことである。

我が国では、これまでの地熱発電所運転結果では、深部の地熱貯留層からの地熱流体の生産が、浅部の温泉帯水層に悪影響を与えたとの結果は出ていない。一方、浅部の温泉帯水層からの生産が、他の温泉井に悪影響を与えたとの事例は多く知られており、科学的検討の結果に基づいて報告されている（たとえば、野田，2012）。一般に、地熱貯留層と温泉帯水層との影響関係よりも、温泉帯水層内相互の影響の方がより直接的に表れることが知られている。したがって、地熱発電の温泉への影響問題を実証的に議論する場合、温泉関係者がまず、自ら、温泉－温泉の影響問題をどのように認識し、それにどのように対処し、現在どのような到達点に来ているかを明確にすることが、地熱発電の温泉影響を議論するためにも極めて有用であり、そのような検討結果が公表されることを期待したい。

地下構造を理解し、その中での熱と水の流れを解明し、その恵まれた熱および水をどのように利用していくのが望ましいかを考えることが本質的な課題である。すなわち、温泉利用しかできない、あるいは、地熱発電利用しかできないということではないはずである。温泉利用、地熱発電利用ともに固有の価値を持つものであり、一般に、存在領域、温度領域とも大きく異なっており、温泉利用、地熱発電利用共生の道は必ず見出されるはずと信じている。それは、単なる思いではなく、本小論で示したように、科学的・技術的にも十分実現できる根拠がある。

6. おわりに

本小文で展開したように、地球の熱エネルギーの温泉利用と地熱発電利用は科学的にも技術的にも十分可能と考えられる。温泉影響問題は優れて科学的・技術的問題である。この基本的立場を忘れずに対応するならば、温泉利用と地熱発電利用の共生は当然の帰結として実現されると考える。

謝 辞

本論文を書くにあたって、執筆をお勧めいただいた日本温泉科学会編集委員会委員長井上源喜先生に深く感謝の意を表するものである。また、産業技術総合研究所顧問野田徹郎博士には、丁寧に原稿をお読みいただき、種々のご指摘をいただいた。その結果、本論文の改善に大いに役立てることができた。ここに記して深く感謝するものである。本論文が、温泉利用と地熱発電利用との共生の議論に貢献することを心より期待したい。

引用文献

Allis, R.G. and Hunt, T.M. (1986) : Analysis of exploitation induced gravity changes at Wairakei

- geothermal field. *Geophysics*, **51**, 1647-1660.
- Axellsson, G., Armannsson, H., Bjornsson, S., Floventz, O.G., Gudmundsson, A., Palmason, G., Stefanson, V., Steingrimsdottir, B. and Tulinus, H. (2003) : Sustainable production of geothermal energy-, Suggested definition, 1.
- Bertani, R. (2010) : Geothermal power generation in the world 2005-2010, Update report. Proc. World Geothermal Congress 2010, CD-ROM.
- 江原幸雄 (2010) : 地下における熱と水の流れの定量的解明を目指して—温泉科学の進め方の一試論—. *温泉科学*, **60**, 261-271.
- 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—重力変動観測から見た持続可能性—. *日本地熱学会誌*, **26** (2), 181-193.
- Elders, W.A. (1991) : Geologic models of geothermal reservoirs. *Bull. GRC*, **20** (7), 194-203.
- Garg, S. and Kassoy, D.R. (1981) : Convective heat transfer in hydrothermal systems. *Geothermal Systems* (Edited by Rybach, L. and Muffler, L.J.P.), 37-76. John Wiley & Sons Ltd.
- 火力原子力発電技術協会 (2007) : 地熱発電の現状と動向 2006年, 1-99.
- 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, 1-99.
- 牧元静香 (2012) : ナ・ア・ブルア地熱発電所に納入した蒸気性状自動分析装置. *火力原子力発電*, **63** (8), 8-14.
- Momita, M., Tokita, H., Matsuda, K., Takagi, H., Soeda, T. and Koide, K. (2000) : Deep geothermal structure and the hydrothermal system in the Otake-Hatchobaru geothermal field, Japan. Proc. 22nd New Zealand Geothermal Workshop, 257-262.
- 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.
- 日本地熱開発企業協議会 (2011) : 地熱発電—日本と世界の動向—. 1-2.
- 野田徹郎 (2010) : 第4章 共生のためにどうしたら良いか. 報告書「地熱発電と温泉利用との共生を目指して」, 55-61, *日本地熱学会*.
- 野田徹郎 (2012) : 地熱発電は温泉に影響を与えるか—時系列データから見た温泉への影響因子—. *日本地熱学会平成24年学術講演会講演予稿集*, B21.
- Rybach, L. and Mongillo, M. (2006) : Geothermal sustainability—A review with identified research needs—. *GRC Transactions*, **30**, 1083-1090.
- 田口幸洋 (2010) : 第2章 地熱発電と温泉との関係. 報告書「地熱発電と温泉利用との共生を目指して」, 3-11, *日本地熱学会*.
- 田籠功一, 江原幸雄, 長野洋士, 大石公平 (1996) : 八丁原地熱地帯における重力モニタリング結果からの地熱貯留層の挙動に関する一考察. *日本地熱学会誌*, **18**, 91-105.
- 玉生志郎 (1994) : 地熱系モデリングから見たマグマ溜り—豊肥・仙岩・栗駒地域を例にして—. *地質学論集*, **43**, 141-155.
- Tokita, H., Lima, Enrique, M., Itoi, R., Akiyoshi, M. and Senju, T. (2006) : Application of coupled numerical reservoir simulation to design a sustainable exploitation of the Hatchobaru geothermal field. *Renewable Energy Conference*, Chiba, Japan, 1549-1552.
- 湯原浩三, 江原幸雄 (1981) : 日本列島の地熱場について. *火山*, **26** (3), 185-203.