
解 説

地熱発電と温泉との共存の問題大 山 正 雄¹⁾

(平成 26 年 2 月 3 日受付, 平成 26 年 2 月 19 日受理)

**Problems on the Coexistence of Geothermal Power
Generation with Hot Spring Resources**Masao OHYAMA¹⁾**要 旨**

地熱発電所は主要温泉地の分布する第四紀の火山帯に位置し、温泉の源でもある深部の火山性熱水を生産井で多量に噴出させて発電している。地熱発電所 17 カ所の利用熱量は主要温泉地 189 カ所の総温泉熱量に匹敵している。地熱発電所はいずれも稼働してからしばらくすると発電電力量が最大値に達した後年々減少している。その原因は生産井を補充しても蒸気量の減少と熱水量の相対的増加、温度の低下が起きていることから深部熱水系の枯渇化と推定される。このことから熱水の埋蔵量が豊富でも生産井からの噴出量は自然供給量に制約され、供給量に見合った持続可能な熱水利用が求められる。それにもかかわらず地熱発電はさらに 2 から 4 倍に増やす計画があり、温泉への影響が危惧される。また、地熱発電所の熱水はヒ素などの有害成分を高濃度に含んでいることと噴出による熱水系の圧力を維持するために還元井で地下に戻されている。この還元水には孔内や地層に目詰まりを起こす沈殿物付着を抑制するために硫酸が注入されている。この汚染された還元水は温泉として再び地表に湧出する可能性がある。こうしたことから地熱発電所と温泉地との共存は困難と考えられる。

キーワード：地熱発電、温泉、深部熱水、持続可能な熱水利用、還元水、温泉源の汚染

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）は東京電力福島第一原子力発電所の事故を契機に全国の原子力発電所が全面的に停止したこともあり、電力の将来的不足の懸念から地熱発電の地熱開発が急にクローズアップされた。地熱発電所の使用するエネルギー源は発電機のタービンを駆動させるために地下に貯留する 150℃以上の高温高圧の熱水を対象としている。しかし、その熱水は温泉の源でもある。

温泉は古来から日本人に好まれ、今日では年間 1 億 2 千万人が温泉地に宿泊している。温泉は日本人のみならず、訪日外国人観光客にとっても最も好まれている。21 世紀は観光の世紀ともいわ

¹⁾昭和女子大学 〒154-8533 東京都世田谷区太子堂 1-7. ¹⁾Showa Women's University, 1-7 Taishido, Setagayaku, Tokyo, 154-8533, Japan. *Corresponding author : E-mail msooyama@ric.hi-ho.ne.jp.

れている。温泉はその要をなしている。したがって温泉と地熱発電は共存し得るのかは重要な課題である。本稿では地熱発電の採取している熱水の特性と収支、および温泉にどのような影響を及ぼすのかの検討を試みた。

2. 温泉地の地熱資源

2.1 温泉地の熱階級

今日、わが国にはおよそ 3,100 カ所の温泉地があるが、角（1975）によれば、60℃以上の温泉水を湧出するのが 300 余の温泉地、90℃以上が 110 温泉地である。福富（1965）は各温泉地に湧出する温泉の熱的規模を表 1 のように 0 からⅦまでの熱階級区分をした。福富の計算によると、熱階級Ⅲ以下の温泉地の熱量は地下の熱源からの岩石の熱伝導による地殻熱流量だけで地下水が温められたものとして説明できるが、熱階級Ⅴ以上の温泉地になると熱伝導の 10 倍以上の熱量を運べるマグマ起源の蒸気や熱水などの高温流体が岩石の割れ目を通して上昇してこなければまかなえないとしている。

すなわち、熱階級Ⅲ以下の温泉は地球上のどこでも得られる可能性がある。実際、1980 年頃からの温泉ブームからは非火山地域の平野や都市部などでも温泉開発が盛んに行われている。しかし、非火山地域の地下温度は 100m で 2~3℃の上昇率なので 1,000~2,000m の地下まで掘削しても熱流量と浸透水量も少ないので泉温 45℃、湧出量 200 L/min 以上を得ることは困難である（大山, 2004）。一方、火山地域は地温勾配が大きく、地熱地帯の地表付近で (10~80)℃/100m に達し (図 1)、90℃以上の温泉を湧出している。これはマグマ起源の蒸気や熱水などの高温流体が上昇していることを示している。

日本の地熱調査委員会（1982）が示した熱階級Ⅲ以上の日本の主要温泉地 189 カ所は主に第四紀の火山帯に分布している (図 2)。この中で最大熱階級はⅥで、登別、万座、箱根などの 6 カ所である。非火山地域にも道後や白浜のように熱階級Ⅲ以上の温泉地もあるが、それらは深部熱水の通路となりえる大きな断層の付近や新第三系などの古い火山の地層から湧出している。

こうした地下の熱水系の違いは温泉の孔井深度にも現れている。地下に有力な熱水系のある火山地域に湧出する温泉は自然湧泉や深度 10~500m 程度の掘削井によるものである。一方、非火山地域ではより高い温度を求めて深度 300~1,000m 前後となっている。

表 1 温泉地と地熱発電所の熱階級 (熱量×10⁷ cal/min)。

| 熱階級 | 熱量範囲 (1) | 主要温泉地 (2) | 189 | 地熱発電所 (3) | 17 |
|-----|-------------|-----------|-----|-------------|----|
| 0 | 0.32 以下 | | | | |
| I | 0.32~ 1.0 | | | | |
| II | 1.0 ~ 3.2 | | | | |
| III | 3.2 ~ 10.0 | 浅虫・野沢・道後等 | 116 | 霧島国際 H | 1 |
| IV | 10.0 ~ 31.6 | 乳頭・皆生・嬉野等 | 40 | | |
| V | 31.6 ~ 100 | 蔵王・那須・雲仙等 | 27 | 八丈島・大沼・杉乃井等 | 4 |
| VI | 100 ~ 316 | 登別・草津・箱根等 | 6 | 森・松川・鬼首・大霧等 | 8 |
| Ⅶ | 316 ~1,000 | | 0 | 八丁原・澄川・葛根田等 | 4 |

(1) 福富 (1965), (2) 日本の地熱調査委員会 (1982), (3) 日本地熱調査会 (2000)。

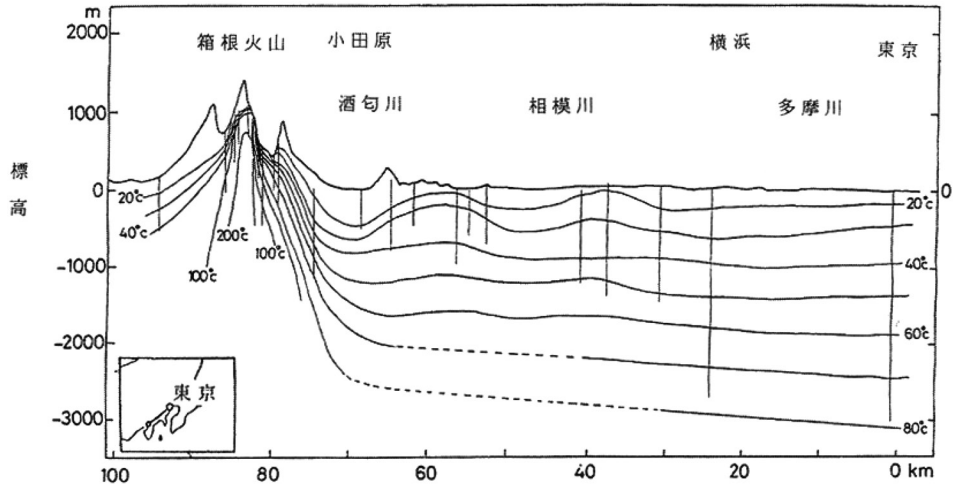


図 1 関東南西部の地下の温度断面図 (Oyama, 1997).

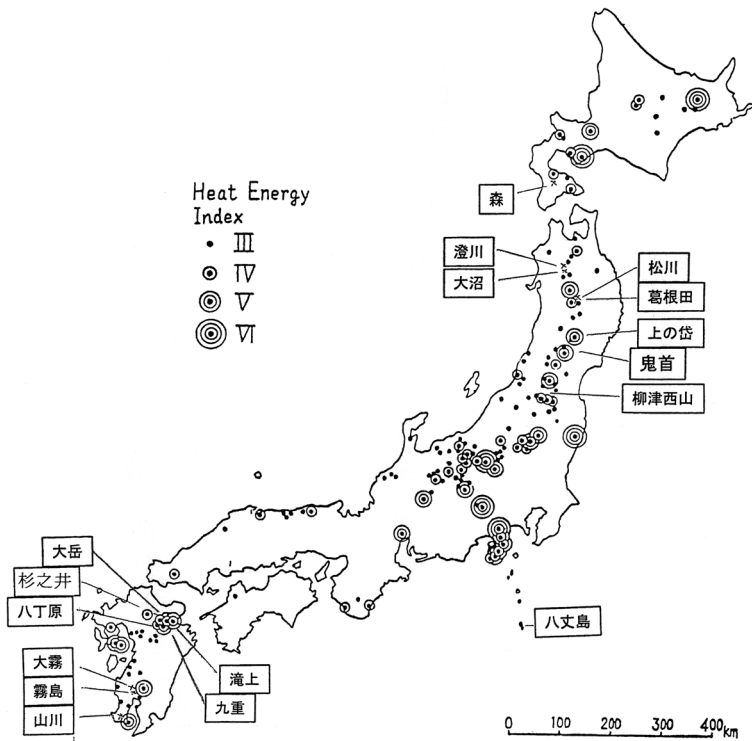


図 2 熱階級Ⅲ以上の主要温泉地 (湯原, 1973) と地熱発電所の分布.

2.2 温泉の熱量 (放熱量)

環境省 (2012a) によると、2010 年の日本の温泉の源泉数は 27,671、総湧出量は 2,686,559 L/min である。源泉の温度は、25℃未満が 16.3%、25~42℃未満が 27.5%、42℃以上が 51.9%、100℃以上 (水蒸気ガス) が 4.3% である。1980 年度の源泉数は 19,506、総湧出量は 1,690,127 L/min である。

この30年間における温泉開発による増加は源泉数1.4倍、湧出量1.6倍である。しかし、主要温泉地は新たな開発を規制している所が多いことや都市部での温泉利用が好まれていることなどから新規源泉井の多くが非火山地域の平野部で行われている。

日本の地熱調査研究委員会(1982)による1980年の主要温泉地の温泉量は763,700L/min、単純平均温度は59℃である。各地の平均気温を基準とすると総熱量は 3.7×10^7 kcal/min (1.95×10^{13} kcal/年)である。そこで、2010年の温泉の平均温度は泉温25℃未満を20℃、25~42℃未満を33℃、42℃以上を59℃とすると45.5℃と概算される。日本の地下水の平均温度は14℃とすると、温泉が地下の熱源から得ている総熱量はおよそ 8.46×10^7 kcal/min (4.44×10^{13} kcal/年)となる。この値は福富(1978)の試算値 3.47×10^{13} kcal/年と同程度である。

2010年度の温泉熱量は石由の燃焼熱を10,000 kcal/kg、ボイラーの熱効率を50%とすると1年間に888万トン、日本の2009年の原油輸入量1.69億トン(二宮, 2013)のおよそ5%に相当する。原油を100円/kgとするなら、年間9,000億円である。このことから日本人は温泉として地熱資源をよく利用している。

3. 地熱発電の地熱資源

3.1 地熱発電の地熱水の特性

現在、日本で稼働している地熱発電所は17カ所19基で、いずれも主要温泉地の分布する第四紀の火山帯に位置(図2)し、高温高压の火山性水蒸気を利用している。

日本地熱調査会(2000)によると、事業用地熱発電所の調査井や生産井は深度1,000~3,000m、孔底温度190~360℃である。温度360℃は水の臨界点温度(374℃)に近い。臨界点圧力は225 kg/cm²なので、静水圧で約2,250mの深さに相当する。その深さは地熱発電の生産井等の孔底深度と調和している。

地下に有力な熱水系が形成されるためには低温地下水の自由な侵入を防がなければならない。地熱発電の地下の有力な熱水系は浅部の低温地下水の侵入が困難なキャップロック(帽岩)と呼ばれている難透水層に覆われて、高温高压の状態をなしている。粘土層や割れ目の乏しい岩層がキャップロックの役割を果たしている。また、キャップロックは熱による地層の変質や熱水の上昇にともなう温度と圧力の低下によって溶存している成分を析出し、地層の空隙を埋めることによって形成される場合もある。この現象は自己閉塞作用と呼ばれている。

では、キャップロックは完全に水を通さないかというそうではない。深部から絶えず供給(循環)される熱水の相当量はその供給圧力によってキャップロックのわずかな割れ目や空隙を通過してキャップロックの上部に押し出され、浅層地下水と混合しながら地表に湧出している。火山性温泉が熱伝導では熱量が足りず、また塩化物を多く溶存していることがそれを示している。すなわち、キャップロックを通過して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。古来からの自然湧出の温泉はこの持続可能な資源の湧出である。

ところで、キャップロック下の熱水系が高温を保っているのはキャップロックの通路が小さいので高压になっていて浅層の低温地下水の侵入を防いでいることも作用している。従って、熱水系の圧力が低下すれば浅層地下水がキャップロックの通路を通過して流下することにもなる。

3.2 地熱発電の熱水の成分

孔井がキャップロックの下端まで掘削されると、高温高压の状態にある熱水は大量に孔井を通過して上昇する。熱水は上昇による圧力低下によって一部が気化・沸騰し、気液2相流となって勢いよ

表 2 日本の雨水・河川水・地熱発電所熱水の水質.

| 項目 | 雨水 A | 河川 A | 蒸気凝縮水 B | 熱水 B |
|-----------------------|--------|---------|----------|------------|
| pH | 4~6 | 5.6~7.5 | 4.5~5.7 | 2.8~9.4 |
| Cl mg/l | 1.1 | 5.8 | 0.01~2.3 | 66~59,500 |
| Na mg/l | 1.1 | 6.7 | 0.03 | 10.4~5,290 |
| SiO ₂ mg/l | | 19.0 | 0.02~0.4 | 2.6~1,370 |
| As mg/l | 0.0016 | 0.0017 | 0.04 | 0.1~48.9 |

A: 菅原・半谷 (1970), B: 日本地熱調査会 (2000).

く噴出する。地熱発電所の孔井は生産井と呼んでいる。地熱発電所が利用する熱エネルギーは発電機のタービンを回す水蒸気のみである。水蒸気は気液 2 相流から熱水とセパレーターで分離されてタービンに送られている。

水蒸気の凝縮水の成分(松川, 八丁原, 大霧)は雨水や河川よりもはるかに少ない(表 2)。すなわち, 一般家庭の水道の風呂水の方が水質的には温泉に近い。

熱水の水質は, pH が 3~9 で単純平均 7 前後, Cl が 66~59,500 mg/kg, Na が 10.4~5,290 mg/kg, As は 0.1~48.9 mg/kg である(表 2)。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水道基準の 10~4,890 倍である。

地熱発電所の熱水の成分が多量なのは一部蒸気化による濃縮と高温高压下の熱水が深度 1,000~3,000 m から生産井の管内を秒速 100 m 前後で 10 数秒から 1 分程度で噴出しているからである。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。

水蒸気はタービンを駆動した後, 大気中に放出されるが, 熱水はヒ素などの有害成分を高濃度に含んでいることと採取によるキャップロック下の熱水系の圧力を維持するため全量が還元井で地下に戻されている。この還元熱水は温度低下をしているので, 生産井の熱水系温度を低下させないために還元井の深度を生産井より浅くし, キャップロックの上部付近に流出させている。

3.3 地熱発電の水蒸気と熱水の熱量

生産井の噴出口付近の気液 2 相流の温度は 120~190℃ (表 3) で, 単純平均で 158℃ となる。松川発電所は蒸気 100% の蒸気卓越型(乾いた水蒸気)であるが, 他は熱水量が全噴出量の 3~81%, 平均 70% を占める熱水卓越型(湿った水蒸気)である。

総蒸気量は 3,744 ton/時 (62.4 ton/min), 蒸気の総放熱量は噴出温度から各地の平均気温(東京天文台編, 2011)を引くと 245.1×10^7 kcal/時 (4.08×10^7 kcal/min) となる。総蒸気量は主要温泉地の総温泉量の 8% に過ぎないが, 総熱量は主要温泉地の約 1.1 倍に相当する。熱水量を加えると熱量は 6.43×10^7 kcal/min となり, 主要温泉地の 1.7 倍に達する。

ホテルなどの自家用と八丈島を除けば, 事業用地熱発電所 12 カ所の蒸気熱量はいずれも熱階級 VI 以上で, 平均 328×10^7 cal/min ある。この内, 八丁原, 葛根田, 澄川, 柳津西山の 4 カ所は熱階級 VII で, 日本最大の温泉地の利用熱量を陵駕している。また, 1 火山体の自然放熱量はおよそ平均 20×10^7 cal/min (大木・渡部, 1979) である。1 事業用地熱発電所はその 16 倍相当である。近くに噴気地熱地帯があれば噴気地熱活動の衰退・消滅もありえる。

表 3 地熱発電所の熱量（日本地熱調査会，2000）.

| 発電所名 | 認可出力 | 気温 | 温度 | 蒸気量 | 蒸気熱量 | 熱水量 | 熱水熱量 | 合計量 | |
|------|---------|--------|-------|---------|------------------------|---------|------------------------|--------|-------|
| | kW | ℃ | ℃ | ton/時 | 10 ⁷ kcal/時 | ton/時 | 10 ⁷ kcal/時 | ton/時 | |
| 森 | 50,000 | 9 | 166 | 245 | 16.13 | 1450 | 22.96 | 1,695 | |
| 澄川 | 50,000 | 10 | 158 | 420 | 27.5 | 750 | 11.18 | 1,170 | |
| 松川 | 23,500 | 10 | 142 | 183 | 11.91 | 0 | 0 | 183 | |
| 葛根田 | 1 | 50,000 | 10 | 144 | 250 | 16.28 | 1061 | 14.29 | 1,311 |
| | 2 | 30,000 | 10 | 152 | 257 | 16.80 | 797 | 11.39 | 1,054 |
| 上の岱 | 28,800 | 11 | 173 | 243 | 16.03 | 62 | 1.01 | 305 | |
| 鬼首 | 12,500 | 11 | 160 | 135 | 8.85 | 592 | 8.88 | 727 | |
| 柳津西山 | 65,000 | 11 | 167 | 494 | 32.50 | 39 | 0.61 | 533 | |
| 八丈島 | 3,300 | 18 | 188 | 35 | 2.31 | 1 | 0.017 | 36 | |
| 滝上 | 25,000 | 16 | 130 | 252 | 16.24 | 1070 | 15.14 | 1,322 | |
| 大岳 | 12,500 | 16 | 183 | 123 | 8.13 | 445 | 7.51 | 568 | |
| 八丁原 | 1 | 55,000 | 16 | 166 | 319 | 20.93 | 596 | 9.00 | 915 |
| | 2 | 55,000 | 16 | 166 | 302 | 19.82 | 626 | 9.46 | 928 |
| 大霧 | 30,000 | 18 | 137 | 269 | 17.39 | 836 | 9.98 | 1,105 | |
| 山川 | 30,000 | 18 | 191 | 118 | 7.81 | 463 | 8.10 | 581 | |
| 自家用 | 大沼 | 9,500 | 10 | 122 | 61 | 3.93 | 252 | 2.83 | 313 |
| | 杉乃井H | 3,000 | 16 | 157 | 30 | 1.96 | 1 | 0.014 | 31 |
| | 霧島H | 100 | 18 | 142 | 8.8 | 0.57 | 2.2 | 0.027 | 11 |
| 総計 | 533,200 | | (158) | 3,744.8 | 245.09 | 9,043.2 | 132.398 | 12,788 | |

3.4 地熱発電所の発電電力量の経年変化

日本最初の事業用地熱発電所は1966（昭和41）年に岩手県松川で、次いで翌1967年に九州大分県大岳で稼働した。地熱発電所数は次第に増大し、2000年に17カ所19基となった。その後の増加はない。地熱発電所は稼働を始めてからしばらくするといずれも発電電力量が最大値に達した後に年々減少している。例えば、1997年に対する2010年の年間発電電力量（表4）を見ると、滝上と大霧の2発電所は大きな変化を示していないが、上の岱は20.4%、他の11発電所13基は50~80%に減少している。この結果、総認可出力は1997年のよりも増加しているにもかかわらず、年間総発電電力量が1997年に375万MWhに達した後（図3）、2010年に265万MWhと13年間で約30%もの減少である（表4）。

表5は事業用と大沼の地熱発電所の蒸気量と熱水量の経年的状況で、2001年から2010年の9年間に蒸気量が24%、熱水量が8%、総湧出量で13%の減少を示している。

澄川の場合（図4）だと、蒸気量が減少し、相対的に熱水量が増加している。噴出温度は1997年の158℃から2010年の151℃と7℃の低下（表4）をしている。同期間の他の地熱発電所を見ると、噴出温度は松川で+49℃の上昇と大岳で-56℃の低下を最大値とし、増温が3カ所、減温が15カ所である。地熱発電所の温度変化の単純平均は-5℃の低下である。

表 4 地熱発電所の熱水温度と発電電力量.

| 発電所名 | 1997 年頃 | 2010 年 | 温度差 | 発電電力量 (MWh) | | B/A | | |
|--------|---------|--------|-------|-------------|-----------|---------|---------|------|
| | ℃ | ℃ | ℃ | 1997 年 A | 2010 年 B | % | | |
| 事業用 | 森 | 166 | 162.4 | - 3.6 | 169,049 | 100,747 | 59.6 | |
| | 澄川 | 158 | 151 | - 7 | 394,072 | 304,164 | 77.2 | |
| | 松川 | 142 | 191 | + 49 | 170,902 | 98,473 | 57.6 | |
| | 葛根田 | 1 | 144 | 147.4 | + 3.4 | 289,951 | 144,286 | 49.7 |
| | | 2 | 152 | 147.5 | - 4.5 | 221,950 | 132,248 | 59.6 |
| | 上の岱 | 173 | 161.3 | - 11.7 | 231,176 | 47,080 | 20.4 | |
| | 鬼首 | 160 | 135 | - 25 | 104,669 | 81,289 | 77.7 | |
| | 柳津西山 | 167 | 165.9 | - 1.1 | 457,755 | 222,712 | 48.7 | |
| | 八丈島 | 188 | 187 | - 1 | — | 11,791 | — | |
| | 滝上 | 130 | 126.8 | - 3.2 | 204,284 | 213,996 | 100.5 | |
| | 大岳 | 183 | 127 | - 56 | 93,804 | 76,908 | 82.0 | |
| | 八丁原 | 1 | 166 | 158 | - 8 | 423,157 | 338,207 | 79.9 |
| | | 2 | 166 | 164 | - 2 | 452,052 | 413,497 | 91.5 |
| | 大霧 | 137 | 132.9 | - 4.1 | 239,815 | 239,692 | 99.9 | |
| | 山川 | 191 | 183.2 | - 7.8 | 228,958 | 143,032 | 62.5 | |
| | 自家用 | 大沼 | 122 | 127 | + 5 | 63,673 | 56,253 | 88.3 |
| 杉乃井H | | 157 | 142.9 | - 14.1 | 10,676 | 7,963 | 74.6 | |
| 霧島H | | 142 | 143 | - 1 | 684 | (107) | (15.6) | |
| 九重 | | | 133 | | — | 7,686 | — | |
| 総発電電力量 | | | | 3,756,627 | 2,652,214 | 70.6 | | |

日本地熱調査会 (2000), 火力原子力発電技術協会 (2012).

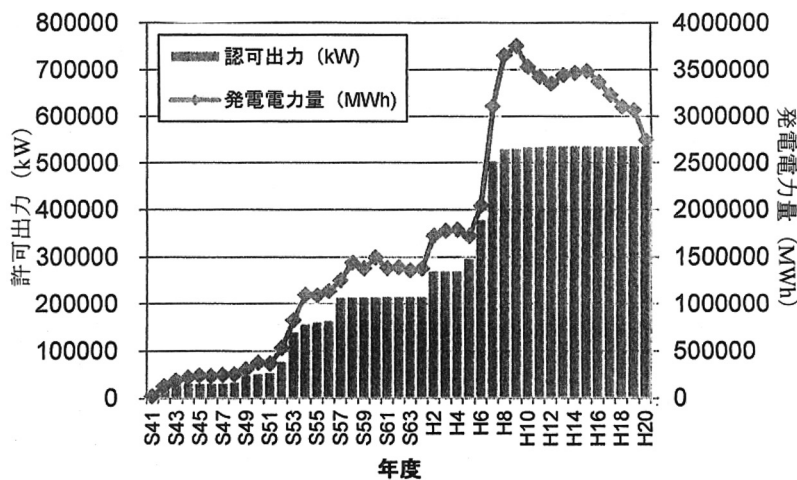


図 3 地熱発電電力量の経年変化 (火力原子力発電技術協会, 2009).

表 5 地熱発電所（事業用+大沼）の蒸気量と熱水量.

| 噴出量 (ton/時) | 1997 年頃 | 2001 年 C | 2010 年 D | C/D% |
|-------------|---------|----------|----------|------|
| 蒸気量 A | 3,706 | 3,633 | 2,753 | 75.8 |
| 熱水量 | 9,040 | 9,682 | 8,878 | 91.7 |
| 総湧出量 B | 12,746 | 13,315 | 11,631 | 87.3 |
| 蒸気比量 (A/B) | 29.1% | 27.3% | 23.7% | |

日本地熱調査会（2000）、環境省（2011）、火力原子力発電技術協会（2012）.

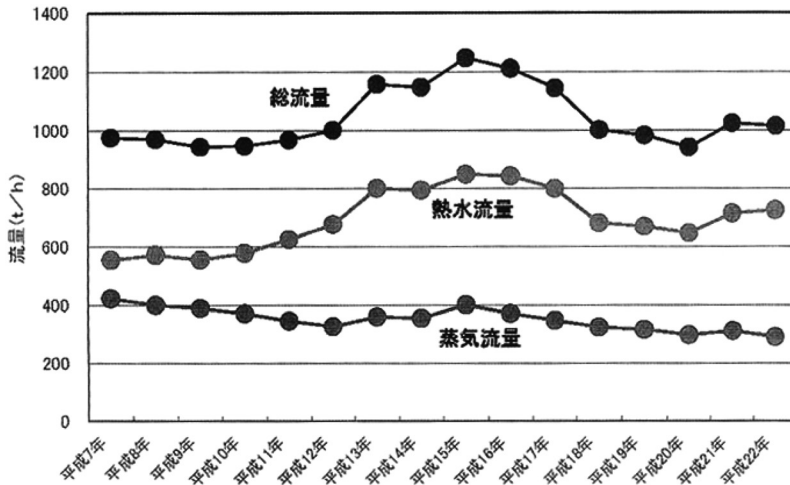


図 4 澄川地熱発電所の生産井の噴出量の推移 (佐藤, 2012).

各地熱発電所は平均すると3年に1本の頻度で補充生産井を掘削している（環境省, 2011）。それにもかかわらず、噴出量の減少と温度低下を止める事が出来ていない。蒸気量の減少に対応しての熱水量の増加、総噴出量の減少および噴出温度の低下はキャップロック下の熱水系の温度と圧力の低下と考えられる。

熱水貯留層の形成は一般に1万年程度以上の時間が必要（江原, 2007）と推定され、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）と考えられている。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）とも言える。

熱水系の熱水が豊富にあったとしても、掘削井によって熱水系へ循環する供給量（収入）以上に地上に湧出（支出）されるならば、熱水系の圧力低下によって湧出量が減少する。そして、キャップロック上部の低温水が圧力低下した熱水系に流入して低温下をもたらすであろう。キャップロックを貫いた生産井と地層との境界は水の通り易い通路となりうる。こうした事例は温泉の過剰採取で水位低下の起きた箱根や湯河原の温泉地でも経験している（平野ら, 1974, 1976）。温度低下は還元井から地下に戻されている還元水が関与していることも考えられる。還元水は噴出時の熱水よりも温度低下をしているからである。還元水に注入したトレーサの試験によると、八丁原地域では生産井からの噴出流体の半分が還元水からもたらされていると推定されている（江原, 2012）。このことは熱水系の圧力低下によってキャップロック上部の地下水が下部の熱水系に流下混入していることも意味している。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により、生産流体の温度が11℃も下がる事が予想されていた(秋林・藤井, 2001)。

地熱発電は熱水の自噴が必要なので、熱水系への供給量に見合った持続可能な熱水利用が求められる。

4. 熱水貯留層の水量と熱量の収支

ここでは地熱発電所の生産井から噴出する水量と熱量の集水と集熱の地形的面積の算出を試みる。まずは水収支を試算する。火山地域の高温度流体はマグマ水、沈み込むプレートからの脱水(Ito *et al.*, 1983; 由佐, 1996)やマントル水(松葉谷, 1991)などもあるが、水素と酸素の安定同位体の研究からほとんどが天水(降水)による循環水である(Craig, 1963; 田中, 2008)。

湯原・江原(1981)は、地下約3km深まで浸透した水は約250℃に加熱されて約 1×10^{-7} cm/sec (3cm/年)で上昇していると試算している。この上昇速度は地殻深部の流動モデルによる推定値の0.003~3cm/年(中島・鳥海, 1996)の最大値に相当する。これは火山活動と地殻変動が活発で破碎の発達している地下環境によるもの(湯原・江原, 1981)と考えられている。

1事業用地熱発電所(表3)が大気中に放出する水蒸気の水量は最大494 ton/時、平均280 ton/時(約 2.45×10^6 m³/年)である。熱水の涵養速度を3cm/年とすると、発電所の平均水蒸気の地形的な集水面積は、 $(2.45 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}) / (3 \text{ cm}/\text{年}) = 81.7 \text{ km}^2$ となる。

次は熱収支を試算する。熱水系の熱量の主な源は地下深部からの熱水によって運ばれたものである。その熱量は、湯原・江原(1981)によれば平均 30×10^{-6} cal/cm²·sec (1.08×10^6 kcal/km²·時)で、地球の平均地殻熱流量 2×10^{-6} cal/cm²·sec(田近, 1996)の15倍である。

1事業用地熱発電所が大気中に放出する水蒸気の熱量は最大 32×10^7 kcal/時、平均 18.3×10^7 kcal/時である。失われる平均熱量を補給するのに必要とする集熱面積は熱水による供給熱量を 1.08×10^6 kcal/km²·時とするならば、約170 km²となる。

以上から、地熱発電所の水と熱の集水と集熱の面積は80~170 km²で、大温泉地の草津町の約50 km²、箱根町の93 km²、別府市の125 km²に相当している。この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。

5. 日本の熱資源の評価と地熱発電の開発可能性

日本の熱資源の熱量評価は地熱利用のみならず火山、地震、造山運動などの地球の活動の研究にとっても必要なので、これまで多くの温泉・地熱の研究者(湯原, 1973; 早川, 1988)とともに地球物理(上田・力武, 1961; 島津, 1966)や地震(宇津, 1980)の研究者らによっても行われてきた。その成果によると、日本列島の地下内部からの放熱量はおよそ表6の値となる。

日本列島のからの総放熱量はおよそ 26×10^{13} kcal/年(260兆 kcal/年)である。この内、地殻熱流量が最も多く、67%を占めている。しかし、温泉、地熱発電、火山の地熱量は30%に達しており、世界の2.5%(田近, 1996)に比べると12倍である。日本がいかに地熱資源に富み、温泉大国、火山大国と言われる所以である。

最近、日本全体の地熱資源のポテンシャル量は世界第3位で、地熱発電で2,347万kW(村岡, 2008)に相当するとマスコミも含めて盛んに言われている(毎日新聞, 2012; 環境省, 2012b; 田中, 2013)。この地熱資源量は稼働している現在の地熱発電所の認可総出力の54万kWの43倍にあたる。すなわち現在の地熱発電は潜在能力の2.3%にすぎないと指摘している。地熱発電のベストナリ

表 6 日本列島の熱流量 (×10¹³ kcal/年).

| 熱源 | 熱量 | % |
|------------------|----------------|---------------|
| 温泉 (主要温泉) (1) | 4.44 (1.95) | 17.1 (7.5) |
| 地熱発電用水蒸気 | 2.14 | 8.2 |
| 火山 (1) | 1.43 | 5.5 |
| 地震 (2) | 0.57 | 2.2 |
| 地殻熱流量 (3) | 17.44 | 67.0 |
| 総計 | 26.02 | 100.0 |

(1) 日本の地熱調査委員会(1982), (2) 宇津(1980), (3) 湯原・江原(1981).

オとして 2020 年には現在の 1.7 倍の 91 万 kW, 2050 年に 4.5 倍の 243 万 kW が目標 (江原, 2008) とされている。

ところで, 地熱発電所の認可総出力 54 万 kW の使用熱量は 2.14×10^{13} kcal/年 (245.1×10^7 kcal/時) となる。これを基準にすると, 2,347 万 kW の熱量は 93×10^{13} kcal/年となる。この値はこれまで試算されている日本列島から放出されている総放熱量の約 3.6 倍に相当する。しかし, 熱は温度差があれば必ず流れる。地表は地中よりも温度が低いから, 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も 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のではないかと考えさせられる。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量 2,347 万 kW については改めて再評価する必要があると考える。

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

地熱は太陽や風と同様に持続可能なエネルギー源と言われている。しかし, 地熱発電での持続可能なエネルギーの定義は太陽や風のそれと異なっている。太陽と風は来るエネルギーだけを使用するので永続性があり, まさに自然の持続可能なエネルギーである。しかし, 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, 将来のある特定期間 (100 年以内) まで採取できればよい (Dickson and Fanelli, 2008) とされている。そして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。温泉は古代から, そして孫の時代に至っても永続的利用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。

日本列島の地下に定期的に供給される熱エネルギーを利用するならば重大な問題とならないであろうが, その数倍に相当する熱エネルギーを取り出すとなれば温泉のみならず自然環境に影響を及ぼすことは容易にありうる。

また, 地熱発電には生産井から噴出した熱水を還元井で地下に戻している還元水の問題もある。還元水の成分は失われた水蒸気のみ (約 30%) だけ溶存成分が増加している。そして孔内や地層に目詰まりを起こさないため還元水に沈殿物の付着を抑制する硫酸が注入されている。自然の状態での降水の浸透なら深度 1,000 m まで少なくとも数 1,000 年以上を必要とするが, 還元井だと数分である。還元水に注入された硫酸は地下の岩石と反応して中和されるため, 地下水系への影響はないと報告 (環境省, 2012c) されているが, こうなると何でもありとなりかねない。しかし, 同報

告において、還元水の地中内部での詳細な動向や、還元水に注入された硫酸の影響など、地下環境に与える影響は必ずしも詳細に解明されていないと指摘している。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)。そして、生産井からの噴出流体の半分が還元水からもたらされている(前記)となると、付近の温泉場に自然水と異なった還元水が湧出し、それを利用する可能性もある。

温泉水は地下をゆっくりと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。この成分と熱は保養や療養となる温泉の最も重要な要因である。一方、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の熱水がいかなる水質になろうともいとわない。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。

7. おわりに

わが国の有力な地熱地帯の多くは温泉観光地となっている。第二次世界大戦後の観光の大衆化によって至る所で温泉の大規模開発が行われたが、いずれも温泉の枯渇を起こしている。こうした経験から温泉開発には厳しい規制がかけられている。地熱発電は地熱の大規模開発である。現在の地熱発電の利用熱量は主要温泉地の放熱量にほぼ等しいことから、地熱発電の地熱開発がさらに2倍以上に実施されたら温泉の将来が危惧される。それにしても、現在の地熱発電の認可出力54万kWは全国発電量の0.2%(火力原子力発電技術協会, 2012)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。なお、本稿は多くの事例を単純化しているが、地熱発電と温泉との関係の問題点について参考になれば幸いである。

謝 辞

この発表の場を与えてくれた本学会編集委員会と適切な指摘をされた査読者にお礼を申し上げます。

引用文献

- 秋林 智, 藤井 光 (2001): 地熱開発地域における熱水還元の功罪について. 地熱エネルギー, 26, 228-238.
- Craig Harmon (1963): The Isotopic Geochemistry of Water and Carbon in Geothermal Areas. Nuclear Geology on Geothermal Areas, Laboratorio di Geologia Nucleare-Pisa, 17-53.
- Dickson, M.H. and Fanelli, M. 著, 日本地熱学会 IGA 専門部会訳・編 (2008): 地熱エネルギー入門, 50 頁, 日本地熱学会.
- 江原幸雄 (2007): 火山の熱システム. 193 頁, 樺歌書房, 福岡.
- 江原幸雄 (2008): 2050 年自然エネルギービジョン作成における地熱ポテンシャル評価の概要. 日本地熱学会誌, 30, 166-168.
- 江原幸雄 (2012): 地熱エネルギー. 179 頁, オーム社, 東京.
- 福富孝治 (1965): 地下水起源の温泉の温度. 北海道大学地球物理学研究報告, 13, 53-70.
- 福富孝治 (1978): 温泉の熱エネルギーとその起源. 温泉科学, 29, 88-102.
- 早川正巳 (1988): 地球熱学. 324 頁, 東海大学出版会, 東京.
- 平野富雄, 広田 茂, 大山正雄, 大木靖衛 (1974): 箱根湯本温泉の自然湧出泉について(その2). きよ水源泉の枯渇, 神奈川県温泉研究所報告, 6, 1-10.

- 平野富雄, 粟屋 徹, 大山正雄, 大木靖衛 (1976): 湯河原温泉の地下水低下と温泉の冷地下水化. 神奈川県温泉研究所報告, 7, 53-68.
- Ito, E., Haris, D.M. and Anderson, A.T. (1983): Alteration of oceanic crust and geologic cycling of chlorine and water. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 47, 1613-1624.
- 環境省 (2011): 地熱資源開発に係る温泉・地下水への影響検討会 第2回検討会ヒアリング回答. 11頁, 日本地熱開発企業協議会, 東京.
- 環境省 (2012a): 都道府県別温泉利用状況 (平成22年度). 温泉, 848, 32-33.
- 環境省 (2012b): 温泉資源の保護に関するガイドライン (地熱発電関係). 50頁, 中央環境審議会自然環境部会第13回温泉小委員会, 東京.
- 環境省 (2012c): 国立・国定公園内における地熱開発に係わる通知見直しに向けた基本的考え方. 地熱開発に係わる自然環境影響検討会報告, 10頁, 環境省自然環境局, 東京.
- 火力原子力発電技術協会 (2009): 地熱発電の現状と動向2009年. 99頁, 火力原子力発電技術協会, 東京.
- 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頁, 火力原子力発電技術協会, 東京.
- 毎日新聞 (2012): 地熱発電 成功モデルをつくろう. 社説, 2012年4月13日, 毎日新聞, 東京.
- 松葉谷治 (1991): 熱水の地球化学. 139頁, 裳華房, 東京.
- 村岡洋文 (2009): 地熱発電の開発可能性. 1-16, 地熱発電に関する研究会, 経済産業省, 東京.
- 中島義人, 鳥海光弘 (1996): 地殻深部を水はどう流れるか, 科学, 66, 873-879.
- 日本地熱調査会 (2000): 新版 わが国の地熱発電所設備要覧. 254頁, 日本地熱調査会, 東京.
- 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頁, 日本機械工業連合会・日本火山学会, 東京.
- 二宮健二 (2013): 2013 データブック・オブ・ザ・ワールド. 483頁, 二宮書店, 東京.
- 大木靖衛, 渡部暉彦 (1979): 地熱と温泉. 岩波講座・地球科学7, 215-246, 岩波書店, 東京.
- 大山正雄 (2004): 大深度温泉井の開発について. 温泉科学の最前線, 69-93, ナカニシヤ書店, 京都.
- Oyama, M. (1997): Deep geothermal water in Kanagawa Prefecture, Central Japan. *Proceedings of the 33rd Conference of SITH in Hakone, Association Japonaise des Techniques Hydrothermals*, 97-100.
- 佐藤好億 (2012): 地熱発電の隠された真実. 474頁, 日本秘湯を守る宿, 福島.
- 島津康男 (1966): 地球内部物理学. 394頁, 裳華房, 東京.
- 菅原 健, 半谷高久 (1970): 地球化学入門. 280頁, 丸善, 東京.
- 角 清愛 (1975): 全国地熱基礎調査について. 地質ニュース, 247, 12-27.
- 田近英一 (1996): 地球の構成. 岩波講座・地球惑星科学1, 47-100, 岩波書店, 東京.
- 田中 正 (2008): 温泉と地下水の接点. 温泉科学, 58, 148-156.
- 田中 正 (2013): 地熱発電と温泉資源の共生を図るために. 温泉科学, 63, 241-248.
- 東京天文台編 (2011): 平成24年 理科年表. 1108頁, 丸善, 東京.
- 上田誠也, 力武常次 (1961): 地球の熱学. 地球の構成, 143-162, 岩波書店, 東京.
- 宇津徳治 (1980): いくつかの地震カタログに基づく最近100年間の日本付近の大地震の起こり方. 地震, 3-15, 東海大学出版会, 東京.
- 山本荘毅 (1985): 新版 地下水調査法. 490頁, 古今書院, 東京.
- 湯原浩三 (1973): 地殻熱流量におよぼす熱水系の影響. 火山, 18, 129-141.
- 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.
- 由佐悠紀 (1996): 温泉の起源 (塩素の起源に関して). 温泉科学, 46, 105-108.