

地熱開発, 最近の諸問題

馬場 健 三*

1. 地熱資源

地熱資源と呼ばれるものは地熱流体をエネルギー資源とみて用いられる言葉と考えてよいだろう。地下水が地下において異常な高温を獲得して地表上に自然に湧出する現象は、温泉や〇〇地獄の名前などでわれわれになじみ深い。地熱流体はこれらの現象をになう熱水蒸気にあてられた言葉であるが、上記のような自然湧出に至るまでには途中で冷い地下水と混ったり、冷却されて低エンタルピーのものになっていると一般には考えることができる。そこで地下にボーリングをして直接地熱流体を取り出し、高エンタルピーのものを発電に利用するのが地熱発電の原理である。日本では岩手県の松尾村の松川地熱発電所(2.2万kW)および、大分県の玖珠町の大岳地熱発電所(1.3万kW)の計3.5万kWの設備がある。最近のエネルギー危機によって地熱発電の重要性が内外で改めて強調されている。わが国では水力を除いては当面有力な国産エネルギー資源が地熱以外に見当たらない現状である。地熱発電のもう一つの魅力的な点は、公害対策が比較的容易のようだという見通しがあることである。しかし、エネルギー資源の開発消費に際して、環境への影響は本質的にさげられないことであり、この点については、後に項を改めて述べることにしよう。

表一 世界における地熱発電の現況

国名	発電所	設備容量合計(kW)
アメリカ合州国	ガイザー	396 000
イタリア	ラルデレロその他	390 600
ニュージーランド	ワイラケイ	192 000
メキシコ	セロプリエト	37 500
日本	松川、大岳	35 000

ところで、日本では地熱はどれほど期待できる資源なのであろうか。この問に対する答には残念ながらそれほど精緻なものはない。流体そのものの起源はそのほとんどが天水と解釈されており、それが地下の高温を獲得したものが地熱流体である。ところが、どれほどの時間をかけて熱エネルギーを獲得するかという生成の時間についての知識は、まだ未解明である。いわば地熱流体資源を化石資源と見るべきか否かがまだよくわからない。こ

の点からも、地熱資源の開発可能量を調査しようとするのに基本的困難があるといえる。

筆者は、地熱地域における自然放熱量が開発可能量を推定する上に有力な手がかりを与えるものと考ええる。いわゆる地熱地域では、先に述べたように温泉とか地獄という現象によって地中から地表上に定期的な熱の輸送すなわち放熱が行われている。地中の熱的ポテンシャルが大きいほど、その放熱量が大きいことは第一近似的にいえることである。

地熱地域からの自然放熱のメカニズムは、温泉湧出や噴気に伴うもののほか、大地の熱伝導によるものも無視できない。

日本全国でどの程度の自然放熱があるのであろうか。地下に異常高温のない普通のところでも、一般には地中から地表方向に熱伝導によって熱の流れがあると考えられる。その熱流量は約 1.5×10^{-6} cal/cm²·sec 程度である。地熱温泉地域では、これをはるかに上回る熱の流れがある。その全量を見つめる上には、温泉湧出と熱伝導によるものを考えれば、ほぼその大勢をとらえることができる。北海道大学の福富教授は、北海道における主な温泉について温泉湧出および熱伝導による自然放熱量を測定し、その数字をもとにして北海道全体および日本全体の温泉地からの自然放熱量を推算した。その結果は、日本全体で約 1.1×10^{10} cal/sec とのことである。この数値を“キロワット”に単純に換算すると460万kWとなる。これを発電にすべて利用できるとしても、発電の際の変換効率を考慮すれば、さらに小さい数字となる。日本の現在の総発電設備約7600万kWと比べれば大きな数字ではない。

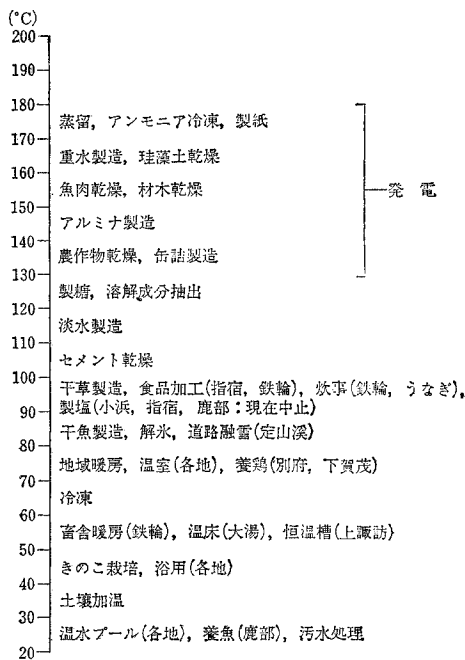
しかし、地熱地域でボーリングして地下の流体を直接的に地表上に取り出すならば、結局は自然湧出による熱量以上のものが取り出せるであろうことは原理的にいえる。場合によっては、自然状態時の数倍以上を期待してよかろう。発電の際の変換効率をも考慮しなくてはならないが、この考えからいけば、わが国の地熱発電可能量として数百万kWあるいは多少楽観的立場に立てば、1000万kW以上を考えてもそれほど荒唐無稽いではなからう。地熱地域に多くのボーリングをして、熱水蒸気を取り出すことは、比較的長い地質学的時間をかけて

* 工業技術院地質調査所 物理探査部探査課長

地下に蓄積された流体のもつ熱エネルギーを取り出すとともに地下深部の熱源の放熱をさらに促すことになり、それはまた、地熱流体の地下における新たな生成を促すこととなろう。そして、自然状態を上回る熱量を長い期間安定に取り出すことが可能であろうと筆者は予想する。熱源の枯渇にはいずれ至るであろうが、地質学的現象の規模を考えれば、例えば自然状態では数万年かかって枯渇するものが開発によってそれが数千年と短くなるといった関係になると考えられる。われわれの経済活動で考えるタイムスケールからいえば両方の数字は、ともに無限を意味し、両者に差はない。ある量を安定して無限に長い期間取り出すことができるというのが、この資源のもつ一つの特質と考えることができる。

2. 利用上の問題

地熱の第一次産業には、農業および水産業への利用として次のものがある。農業への利用では園芸作物の栽培がまず考えられる。しかし、日本では現在ほとんど行われていないといってよい。もちろん、農産物の加温乾燥、醸造、養鶏などにも応用が可能である。これらも、今のところあまり多くの例はない。水産業への利用はいわゆる栽培漁業について考えられる。飼料生物の培養、生物飼育、水産物の養殖などがそれである。近時温泉以外でも、工場廃水として得られる温水をこれに利用することが試みられている例がある。しかし、これらについ



注：通産省・産業技術審議会エネルギー分科会報告，から引用。

(()) 内は日本の実例)

図一 地熱の温度別利用法

ても今のところ実用されている例は少ない。最近のエネルギー資源の価格の上昇につれて、これらの利用は今後積極的に取り組まれるべきものである。

地熱の第二次産業への利用としては、現在地熱利用の中心と考えられている発電利用があげられる。地熱資源の発電利用は、国策的にも必要であるとの観点から、促進のための立法が検討されており、近々のうちにはその制定がなされよう。これは、発電利用のための地熱資源の開発に国が助成措置を行うことを内容とするものになる。

第三次産業への利用としては、レジャー対象の観光業へのそれがある。温泉の浴用利用の日本における歴史は古く、江戸時代にはすでに広く普及していたものといわれている。湯治として保健上の目的が昔には強調されていたが、近時は付帯する豪華な宿泊施設とあわせて娯楽的性格が強くなっている。

そのほか、地熱による地域開発への利用として、地域冷暖房、道路融雪、家庭への給湯などがあげられる。

さて、わが国において地熱の利用上問題となるのは、上に述べた観光業の一環として開発された温泉地との調和の可否が第一であろう。温泉事業は古くより広く発展しており、国民の多数と深くかかわり合っているといつて過言でない。したがって、それに伴う権益も無視できない。地熱発電を行うことによって、それと衝突することがあってはならない。原理的には、発電用には高エンタルピーの熱水・蒸気が利用され、そのいわば廃水となる低エンタルピー流体が浴用に適するので発電と浴用利用の両者はうまく共存できると考えられる。しかし、現実問題としては、観光地として著しい発展をとげた所では、当面発電は考えられないであろう。しかし、発電が行われることによって、かえって低エンタルピー流体の安定な供給源が得られることにもなるので、未発展の地熱地域では両面の調和が、うまくなされると考えられる。発電と浴用以外の地熱利用の形態は日本では今のところあまり重要視されていないが、地球上の化石燃料の節約という面からも今後は真剣にその実用を検討することが必要である。この傾向は国際的にも見られる。最近、地熱の発電以外の利用についての調査団がアメリカ合州国政府を中心として国際的に結成されわが国にも訪れたが、その動きの一つである。

3. 探査上の問題

付近の地表に温泉や噴気の徴候の全くないところで掘削が行われ地熱流体の開発がなされている例は世界にあまりない。地熱流体を得るためのボーリングの成功率はかなりよい。石油のそれと比べれば、地熱の場合が成功

率がよいというのが現状であろう。それは、地熱開発が最初に述べたような所のみを対象として開発されていることにもよるであろう。ここで用いる探査という言葉は地表探査という意味に限るとする。地表に地熱微候の全くない所でも地熱流体が得られるということがあるかどうか今のところわからないが、もし存在するとすればその探査は難しいこととなろう。現在開発対象となっている所での探査も、探査技術という観点からみると、きわめて不満足な技術レベルにある。結局、地下の高温を地表上において検出する技術が今のところ不十分である。現状ではある程度の深さの試錐をして測温を行うことによる以外に深部の熱的構造を明確にする方法がない。高温の熱水は化学成分に富むので、その地下における存在は地層のその部分の電気的比抵抗を小さくしているという考えに立って電気探査を行い低比抵抗部分を探しあてるといこともなされている。あるいは、温泉の流出通路には微小地震発生頻度が多いので、その観測を行い震源集中部分を探しあてるといことも有効な探査技術の一つと考えられているが、これらの理論的基礎は、まだそれほど明確ではない。地熱流体の地下における存在が地質構造上規制を受けているとすれば、どのような構造かという点についてもあまり明確にされていない。幸い地熱探査技術が低レベルにあるという現状は、現在の地熱開発の本質的障害にはなっていない。しかし、地熱開発が将来さらに発展をとげるためには、改善が大いに望まれる分野である。

4. 環境の問題

地熱開発が環境にどのような効果を及ぼすかは、地熱開発の促進がうたわれている現在、論議のはげしい問題である。環境問題は、いうまでもなく今日世界的な問題である。したがって、地熱開発についてのこの問題は諸外国でも取り上げられているが、一般的には次の結論がいえとえられる。すなわち、地熱は本質的には公害のない資源とはいえないが、公害対策が十分可能な資源であるということである。

地熱開発によって考えられる影響を列記すれば、次のとおりとなろう。まず、景観の変化がある。一般に地熱地域は特別なところ（例えば熱海や別府）を除けば、産業化ないしは都市化が行われていないところである。そして、自然景観の優れたところも多い。このようなところに発電所を作ったり、それに付帯する諸土木工事が行われることにより、景観の変化が著しいことが予想される。したがって、自然と調和した工事が望まれるが、これは必ずしも不可能ではなからう。

地熱開発によって大量の温廃水が出る。これも環境に

影響を与えよう。ことに、有害成分をもった廃水の場合問題となる。究極的には地下還元を行うことが対策となろう。これによって地下深部より地表上に熱を運び出す際の熱のにない手である水を、元のところにもどすことになるので、その地域の地熱の採集能力を保持する上に有効であるとも考えられる。地下還元はボーリング孔を通じて行われるが、これについての技術上の難点はあまりない。

大量の熱水蒸気を地下から取り出すことによって、その地域の地盤沈下が懸念される。地下水の大量汲上げによる地盤沈下の恐れはわが国では現実のものであるが、その地盤沈下は若い堆積層からの地下水の大量の汲上げによるものであるのに対し、日本の地熱地域は堅固な火山岩の広く分布するところが多く、その恐れは少ない。またその恐れがあるとしても先に述べた廃水の地下還元がその有効な対応策となる。

温廃水の地下還元が微小地震をもたらす恐れのあることはしばしば指摘される。これは、アメリカ合州国のデンプーにおける有名な実例からの予想である。ここでは、地熱開発と無関係であるが、大量の廃水を注入井によって地中に投棄をはじめた結果、明らかにそれによって微小地震が誘発された。注入を中止すればそれが止まった事実からもこれは確認された。地下深部の断層中に水が新しく入り込むことによって、地下の変動がうながされ地震活動をもたらしたと解釈されている。このような影響を避けるためには、地下注水を中止する以外に対応策はない。しかし、このような恐れがあらゆる所にあるとはいえない。現在、地熱開発に際して考えられているように、取り出した所は結局はほぼ同じ所に還元する方式をとれば、その心配もそれほどではないと考えられる。この問題は、地熱開発促進と並行して今後研究を進めるべき課題の一つではある。

地熱流体の地表上への流出に伴って硫化水素ガスを主体とする有毒ガスが空気を汚染する問題についても検討すべきである。一般に地熱温泉地域では硫化水素ガスが自然に噴出し、まれには災害をもたらす例もある。人工的に多量の熱水蒸気を取り出すことにより、その量は自然状態を上回ると考えられる。アメリカ合州国のガイザー地熱発電所においては、この地熱発電所から放出される硫黄は同規模の低硫黄石油燃焼の火力発電所のそれと同程度なので 100 万 kW 程度まで拡大されれば、なんらかの対応策が必要だろうという予想をいう人もある。このことは、地熱発電の利点を損うものではあるが、その回収には技術的困難はないと考えられる。まさに、経済性の問題であるといえる。

そのほかには、熱放出の問題がある。地中にとじ込められている熱を新たに地表上に持ち出すことであるから

環境への影響はこの点にもある。これについては、化石燃料の利用と本質的に差違はない。それが局地的な気象に影響をもたらすかどうかは、地熱開発のみの問題ではない。いわば、エネルギー技術に共通した重要課題の一つといえる。

5. 地熱開発の将来

通産省工業技術院では、今年度からサンシャイン計画と名づけた新エネルギー開発技術の研究をナショナルプロジェクトとして取り上げることとなった。これは、西暦2000年までという長期間を通じて新エネルギー開発の技術を確立し、エネルギー資源に悩むわが国の体質改善を旨とするものである。そこでは、太陽、地熱、水素、および石炭のガス化などが取り上げられる。このうち、地熱は当面最も実現化が早いものとして期待される。

ところで地熱エネルギー開発についての課題はどんな点にあるのであろうか。

諸外国の例と比べると、わが国の地熱発電の現況は小規模にすぎるといえる。その原因は、わが国の地熱の発電利用という面での立遅れにあるといえる。技術的側面では差違はそれほどないと考えられる。むしろ、社会的政治的要因によるものと判断すべきであろう。その意味では今後の積極的開発が期待される。わが国の地熱流体の採集深度は最深1500m程度であるが、アメリカ合州国やニュージーランドの例では、開発はより深くに行く傾向が見られる。その限界はまだ明らかではないが、より深部の開発については技術的解決を要する問題がある。探査および掘削技術の改善がさしあたって必要となろう。しかし地熱開発技術についての現在の大問題は、高温岩体の熱抽出方法にあると考えられる。現在の地熱開発は、地層中の高温流体の熱エネルギーの開発である。しかし、岩石そのものが高温であり、そしてその熱エネルギーが抽出

できれば地熱エネルギーの開発可能量は飛躍的に増大する。高温の地層中に開発可能な流体が存在することはむしろ特殊な自然条件といってもよく、流体を十分含まぬ高温な岩体の存在の方がより一般的であろう。事実、井戸を掘っても地下の高温は確認できたが満足すべき高温流体の存在はなかったというケースがある。高温の岩体の熱を抽出利用できるとすれば、地熱開発の将来性はきわめて大きいものとなる。岩石の比熱は0.2 cal/g程度と考えてよい。密度は2.6 g/cm³程度であるので、1 cm³の岩石が300°Cから200°Cまで冷却されたとすると0.2×2.6×100 cal、すなわち、52 calの熱が利用できる。岩体の大きさを1 km³とすると、52×10¹⁵ calという莫大な量となる。最初の項で述べたように、日本の地熱温泉地域の自然放熱量は1 secについて1.1×10⁹ cal程度であるので、大略4.7×10⁶倍、すなわち、その自然放熱量を4.7×10⁶ sec（≒50日）維持するに足る熱量となる。

このような高温岩体中になんらかの方法で（井戸を掘って水圧により地層中に割れ目を造ることがまず考えられる）、透水性をもたせるように割れ目をつくり、地表から坑井を通じ水を送り込み、その水に熱を獲得させそれを別の坑井を掘ることによって地表上に取り出し、いわば人工的地熱流体を造ることによって高温岩体の熱を取り出すことが考えられる。この方法は近年、合州国の科学者により提案され、理論的および小規模な実験的研究が行われている。そして、その結果かなり有望性があるといわれている。わが国においてもこの課題が数年内には本格的に取り上げられ研究が開始されることが、先の工業技術院の計画に盛り込まれている。技術的に解決を要する問題は多くあるが、地熱エネルギーの積極的開発の一つの方法として今後大いにその研究の発展が期待されている。このような方法で、一般に地下に存在する高温部分の熱そのものを取り出す技術が確立すれば、地熱の開発可能量は飛躍的に拡大するであろう。

土木学会編 **基礎と地盤** 48年夏期講習会テキスト

2200円 会員特価 2000円（〒170）

●基礎地盤の調査——目的、手段と適応性など／大矢 暁 ●土質の解析——土のせん断強度と体積変化、弾性体としての土の圧力分布、すべり抵抗による基礎の支持力など／後藤正司 ●杭基礎の設計——目的、分類、各種の杭の一般的性質、軸方向支持力、載荷試験、支持力公式、杭打ち公式、周面摩擦など／沢口正俊 ●杭基礎の施工——原地盤の土性の変化、打込み・場所打ち・埋設杭の施工、施工設備と仮設工事など／藤田圭一 ●ケーソン基礎の設計——計画、基本事項、安定計算、躯体の設計など／吉田 巖 ●盛土の基礎——軟弱地盤上の盛土、傾斜地盤上の盛土など／中沢 裕 ●岩盤基礎——力学的特性、分類、試験、評価、解析方法など／飯田隆一 ●軟弱地盤対策——特徴と分類、目的と問題点、選択および組合せ、各種の工法など／室町忠彦 ●地中構造物と地盤——地中構造物、開削トンネル、シールドトンネルなど／渡辺 健 ●基礎の耐震設計——震害の例、設計基準、地震動など／田村重四郎 ●