世界における地熱開発の趨勢

陶 山 淳 治*

On the Situation of the Development of the Geothermal Resources

Junji SUYAMA

Abstract

Geothermal energy has becoming rapidly perceived as a viable alternative energy source available with the current technology as well as solar energy. For a long time, geothermal energy has been utilized in various forms. High temperature steam and hot water have been mostly used for an electric power generation. World-wide today, total power of geothermally fired electric generating plant amounts to approximately 1,100 MW. On the other hand, intermediate and low temperature geothermal fluids also have been consumed for space-heating and industrial processes in certain locations of the world.

However, the full potential of electric and non-electric application of geothermal resources has not yet been realized, and only a small part of geothermal energy stored within the earth's crust has been tapped. Remaining enormous amounts of natural heat will be made available with the further exploration and technological research and development.

Under present technology, use of geothermal energy for electric power generation is limited to the hydrothermal convection system having the temperature above 180°C. Among this, energy of natural steam has best quality, but the existence of this type of energy may be expected within only a part of whole high temperature convection system. Other hydrothermal convection systems are much more abundant geothermal resources.

Research and development of technology for the efficient utilization of hydrothermal system having temperature below 180°C as well as hot water system (above 180°C) are needed. Especially, development of technology of electric power generation from intermediate temperature (90°C-180°C) geothermal fluid and multiple use of this type of geothermal resource must be enforced.

Geothermal deposits in sedimentary basin are also potentially valuable geothermal resources which contain enormous amounts heat. In a high heat-flow area, deep-seated layered strata produce hot-water having intermediate temperature above 90°C, but, in a normal heat-flow area, water-bearing strata at depths of more than 2 km show temperature above 60°C, which is hot enough for space-heating and other non-electric use. In

* 地質調査所地殻熱部 Geothermal Research Department, Geological Survey of Japan

former case, reservoirs in subsiding sedimentary basin sometimes show abnormally high fluid pressure, and said to be geopressured.

Hot dry rock deposit without associated hydrothermal system is expected as other potential geothermal deposit and may become an attractive geothermal resource if technology extracting the stored heat is developed. Research and development of exploitation technology for this type of deposit are now world widely under way.

緒 言

エネルギー需要は世界的に年とともに増加の一途をたどっており、今後とも、こうした傾向が変わることはない。このようなエネルギー需要の増大に対処するためには、水力、火力および原子力以外の新しいエネルギー源の開発利用が必要とされている。ところで、地熱エネルギーは太陽エネルギーとともに天然に存在する未開発の貴重なエネルギー源といえる。これらはいずれも、古くから人類が何らかの形で利用して来たエネルギー源であり、かつ、現在の技術によつて、さらに一段と、積極的な利用を計りうるものである。事実、高温地熱流体（天然蒸気および天然高温熱水）は、すでに、発電用のエネルギー源として利用され、現在、全世界で1,100MW 容量の発電設備がか働している。一方、中低温地熱流体は、アイスランドをはじめとする各国で、地域暖房用熱源として積極的な利用が進んでいる。ところで、地球内部には莫大な量の熱が包蔵されており、現在利用されているものはそのごく一部にすぎず、また、利用されている地熱資源の種類も限られ、利用方法も限られている。今後、地熱エネルギー資源のふ存状態の解明が進み、かつ、その利用技術が発展するとともに、地熱エネルギーの開発利用は一段と活発化し、地熱エネルギーがエネルギー供給源の一翼を荷うことが期待されている。このような観点に立って、現在、世界的に地熱エネルギーの開発研究が進められているので、ここに、その概要を紹介することにする。

地 熱 資 源

1. 高温地熱流体資源

地熱エネルギーを利用する立場からすれば、地下深所の熱源によつて加熱された天然の地熱流体は利用のし易さという点で、資源としての価値は高い。一方、地下深部ほど熱源に近く温度も高くなることを考えると、地熱流体が存在する場合には、伝導のほかに対流によつて深部から熱が運ばれうるので、浅い所で高い熱エネルギーをもつものがえられ易くなる。現在までに開発の対象とされてきたものは、このような比較的浅所にふ存する地熱流体資源であり、おおむね1.5km 以浅のものである(第1表)。

ところで、地熱流体資源は高エンタルピーのものほど熱対率がよく、とくに発電への利用を考える場合、高エンタルピーの地熱流体資源の経済性は一段と重きをなしている。イタリアの Larderello での天然蒸気による発電は地熱発電の端緒をなすものであつたが、この場合の天然蒸気は乾き飽和蒸気ないし過熱蒸気であつた。乾き飽和蒸気ないし過熱蒸気は天然蒸気のなかでもつともエンタルピーが高く、熱対率がよく、かつ、不安な成分に欠けた良質の地熱流体である。したがって、地熱開発の初期の段階では、開発対象はもっぱらこの種の高エンタルピーの地熱流体資源にしばられた。その結果、1960年アメリカの The Geysers で、1966年に日本の松川で発電が行われるようになった。第2表に示すように、乾き飽和蒸気ないし過熱蒸気からなる高温地熱流体資源（乾き蒸気型ないし蒸気卓越型地熱資源）による発電設備は全世界で827.6MW か働しており、全世界の地熱発電設備容量の約75%を占めている。しかしながら、この種の良質の高温地熱流体資源は貯溜層温度は240°C、初期孔口圧は34bar という恵まれた条件下¹⁾にのみ存在するもので、高温地熱流体資源全体の5%程度の資源量²⁾しか期待出来そうにないと考えられている。今後大量に開発が期待されている地熱流体資源は、現在ある技術で発電に利用出来るものに限るならば、むしろ、次に述べる高温熱水型地熱資源である。

第 1 表

Field	Reservoir temperature (°C)	Reservoir fluid	Average well depth (m)	Fluid salinity (ppm)	Mass flow per well (kg/hr)
Larderello	245	Steam	1,000	<1,000	23,000
The Geysers	245	Steam	2,500	<1,000	70,000
Matsukawa	230	Mostly steam	1,100	<1,000	50,000
Otake	200+	Water	500	~4,000	100,000
Wairakei	270	Water	1,000	12,000	—
Pauzhetsk	200	Water	600	3,000	60,000
Cerro Prieto	300+	Water	1,500	~15,000	230,000
Niland	300+	Brine	1,300	260,000	~200,000
Ahuachapán	230	Water	1,000	10,000	325,000
Hveragerdi	260	Water	800	~1,000	250,000
Reykjanes	280	Brine	1,750	~40,000	~400,000
Namafjall	280	Water	950	~4,000	400,000

(J. B. KOENING の表より抜萃)

1958年にニュージーランドの Wairakei で熱水を含む湿り蒸気による発電に成功して以来、高温熱水型資源も発電用のエネルギー資源として考えられるようになった。高温熱水型の場合には、現在、高温熱水を定められた圧力状態でフラッシングによって生成する蒸気量ともの高温熱水の温度との関係は発電用タービンの入口圧如何によつて変化する。蒸気条件が一定であれば、タービン入口圧の大きいほど、タービンの出力が大きく、熱効率もよくなるが、一方、生産井の孔口圧によつて噴出熱水量は変わり、しかも、その関係は貯溜層の深度・性質および孔井の孔径によつて左右される。この種の高温熱水の貯溜層の性質に

もとづいて、適正熱水産出量をうるための圧力と、タービンの対率とを考慮して、タービン入口圧が設定されているが、現在発電の行われている地域の例では、タービン入口圧は、一部の地域では10bars をこえるものも使われているが、おおむね3~5 bars 程度のものが多く使われている。このような圧力条件のもとで、生産井より噴出する熱水からフラッシングによつて蒸気をえようとするためには、熱水温度は少くとも150°C 以上であることが必要⁹⁾となる。(150°C のときの飽和蒸気圧は4.75bars である)

なお、経済性を考慮に入れるならば、180~200°C 以上であることが望ましい。現在、この種の150°C 以上の高温熱水型の地熱流体資源による発電は、第1表に示したように、日本の大岳、大沼、鬼首、ニュージーランドの Wairakei および Kawerau、メキシコの Cerro Prieto および Pathé、アイスランドの Namafjall、ソ連の Pauzhetsk で行われており、エル・サルバドルの Ahuachapán (30MW) およびフィリピン¹⁰⁾の Tiwi (10.5MW) で発電所が建設されつつある。

第 2 表 世界の地熱発電所の設備容量と型式

地 域	国 名	設備容量 (MW)	型式
松 川	日 本	22.0	蒸気
大 岳	日 本	13.0	熱水
大 沼	日 本	10.0	熱水
Larderello	イ タ リ ア	358.6	蒸気
Monte Amiata	イ タ リ ア	25.5	蒸気
Wairakei	ニュージーランド	160.0	熱水
Kawerau	ニュージーランド	10.0	熱水
The Geysers	ア メ リ カ	412.0	蒸気
Cerro Prieto	メ キ シ コ	75.0	熱水
Pathé	メ キ シ コ	3.5	熱水
Namafjall	アイスランド	2.5	熱水
Pauzhetsk	ソ 連	5.0	熱水

高温熱水型資源が蒸気卓越型資源と比べて資源の質が劣るのは、高温熱水のもつ熱エネルギーの一部が蒸気の形で利用されているにすぎない点と、第2表に示したように高温熱水中には塩分が多量に含有されることが多い点とにある。熱水中に含まれる塩分の量と質の問題は、高温熱水型資源を発電に利用する場合に重要な要素となる。第2表の Niland は、アメリカの Salton Trough の地熱地域 (Imperial Valley 地域) の1つの地熱区域であるが、Salton Trough 内にはこのような高濃度の塩分を含む高温熱水型資源が多量にふ存することが知られているが⁴⁵⁾、多量の塩分を熱水が含むために、従来の発電方式ではそこに含まれる地熱エネルギーを発電に利用することは難しく、かつ排熱水の有効利用をも含めた新しい方式の開発が進められている⁵⁾、このような高塩分濃度の例は例外的であるが、一般に熱水中には可成りの濃度の塩分が含まれるので、排熱水の有効利用および処理のための技術開発は、後に述べるように、欠かすことは出来ない。

2. 中低温地熱流体資源

現在発電に利用されている地熱資源は、主として、上記の蒸気卓越型および高温熱水型の高温地熱流体資源であるが、150°C 以下90°C 内外の中温 (intermediate temperature) 地熱流体資源は各地に広く分布しており、古くから種々の形で利用されている。その代表的なものは地域暖房への利用であり、アイスランドの Reykjavik では、1925年よりこのような中温熱水による地域暖房が進められており、現在すでに、市 (人口約8万) の99.5%に対して地域暖房⁶⁷⁾が完成している。ニュージーランドの Rotorua においても1940年頃から地域暖房への天然熱水の利用が進められ、現在、市民の20%が100~160°C の熱水を熱交換後暖房に利用⁸⁾している。一方、発電への利用は、1967年にソ連の Paratunka で行われている。この場合の発電方式はバイナリー・サイクルであり、低沸点の2次作働流体にはフロンが使われている。発電設備容量は750kW と小型であるが、地熱発電にバイナリー・サイクル方式が使われた最初のものである⁹⁾。中温熱水は、地域暖房、バイナリー・サイクルによる発電のほか、古くから農業用設備の加温および穀物、諸材料の乾燥用のエネルギー源として使われているが、いずれの場合も、その使用規模は未だ大きくない。本格的なエネルギー源としての利用は今後の問題として残されている地熱流体資源である。

ところで、さきに述べた Reykjavik および Rotroua はともに、近傍に高温地熱流体資源のふ存が知られている。Reykjavik は、市の地下500~2000m 付近より94~135°C の熱水が多量に産出するが、その東方約20km にあたる Hengill では、最近の試掘によつて、深度1830m で285~295°C の高温熱水が確認されている。Hengill は新しい火山活動帯 (neo-volcanic zone) 内に位置するが、Reykjavik はその西翼にあるやや古い第3紀の火山活動帯内にある。Rotorua では、30~300m の深度より100~160°C の熱水を産出しているが、その東に隣接して Taupo 火山帯がほぼ南北に走っており、この火山帯には高温地熱流体のふ存が確認されている Wairakei, Broadland および Waiotapu などの地熱地域が分布する¹⁰⁾。このような中温熱水型地熱流体資源と高温地熱流体資源とは互に密接な関連があり、熱源の年齢、規模、熱源と貯溜層との相対位置 (距離) および水理地質学的条件などの違いがあるとしても、いずれも新生代の火山活動と関連の深い地熱流体資源である。Paratunka の場合は、第4紀の火山活動に関連ある熱源によつて加熱された地熱流体資源であるが、地表からの浸透水の混入によつて温度が低下した⁹⁾と考えられており、水理地質学的条件によつて、高温地熱流体資源が中温熱水型地熱流体資源となつたものである。

このように新生代の火山活動に関連するもののほかに、第4紀の火山活動とは関連がなく、むしろ新生代の造山運動に伴う褶曲山脈の周縁の堆積盆の貯溜層から産出するものがある。その代表的なものとしてハンガリー盆地があげられる。ここでは、深度約2000m の鮮新世の砂岩より約90°C の熱水が多量に産出し、現在、地域暖房、給湯用ならびに農業用熱源として利用されている¹¹⁾¹²⁾¹³⁾。ハンガリー盆地では地温勾配は50~70°C/km と高く、地殻の厚さはヨーロッパ大陸の平均の値より8~10km も薄く、平均で24~26km¹⁴⁾しかない。その熱源は、さきに述べた地熱資源の場合のようなマグマ溜りという局所的な異常熱

源でなく、地域的なマントルの高まりにあると考えられている。ソ連の Georgia 山間盆地にも105°C の熱水が下部白亜紀の石灰質岩石より多量に産出¹⁵⁾するが、これも同種の中温地熱流体資源と考えられている。

ところで、大ハンガリー盆地の南部では堆積物の厚さは6 km 以上に達するが、この部分では、深度3.9~4.8km 付近の異常高圧層中に212~249°C の熱水が多量に存在¹⁶⁾することが知られている。一方、アメリカのメキシコ湾盆地の現在の地向斜中にも、深度3.0~4.8km 付近にある異常高圧層に150~160°C の熱水が多量に存在¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾することが知られている。これらはいずれも石油、天然ガス鉱床の探査の際発見されたもので、貯溜層内には天然ガスが含まれており、高圧のあまり高温でない熱水が天然ガスとともに産出するもので、熱エネルギーとともに力学的エネルギーをもっている地熱流体資源である。アメリカでは、この種の地熱流体資源を Geopressure 型資源とよび、それに含まれる熱エネルギーと力学的エネルギーの双方を利用して発電を行うための研究が進められている。

高温および中温地熱流体資源は、ともに異常に高い熱流量のために加熱されたものであるが、正常な熱流量の分布する地域においても、深度が2 km 以上の地層では60~90°C の熱水が多量に貯溜されうることがある。この種の低温地熱流体資源は発電以外のエネルギー源として充分役立つものである。パリ盆地の例はその1つといえる。パリ盆地の南部に位置する Melun では、1969年より、深度1.8km 付近の中部ジュラ紀の緑色砂岩から70°C 内外の熱水を採取し²⁰⁾、熱交換器によつて真水を加熱し、これを暖房、給湯用に供給している。ソ連の表 Caucasus にある前陸盆地には47~86°C の熱水が産出し、現在までに農業用に多く使われているが、Makhachkala とその周辺地域では、深度1200~1500m 付近の貯溜層から60~70°C の熱水が多量えられるので、これを地域暖房に利用²¹⁾している。また、西シベリア低地には深度2 km 付近に60~80°C の熱水が、カスピ海東岸の Turana 低地には深度2 km 付近に65~95°C の熱水が知られている。これらはともに古生界基盤卓状地の地熱流体資源といえるが、その熱源は高い熱流量に関連があり、ここでは地殻の厚さが薄くなっているとも云われている²²⁾。

以上述べたように、新生代の火山活動がみられない地域の地下深部に多量の中低温地熱流体が存在することは注目すべき現象であり、これらを地熱資源として有効に活用することは地熱エネルギー開発上の重要な課題である。

3. その他の地熱資源

地熱流体という形で熱エネルギーが埋蔵されているもののほかに、熱源そのものがある。たとえば、マグマが地下深所に貫入し、周縁の不透性地層に激しく割れ目を生ずることもなく、現在冷却をつづけているものがある。このような場合には、熔融貫入岩体の周縁の浸透率が極めて悪いために、循環水の浸入とそれによる冷却効率が妨げられ、長期間にわたつて熱エネルギーが貫入岩体およびその周辺の岩石内に蓄えられたままとなつている。すなわち、地層が浸透性に欠けているために、地熱流体による熱水系が充分発達することなく、対流による熱の輸送が行われぬままに、現在も高温岩体として熱源¹⁹⁾のみが埋蔵されている。このような流体を含まない乾燥した高温岩体のもつ熱エネルギーは莫大であり、そこに内蔵されている熱エネルギーを採取する技術が出来れば、乾燥高温岩体 (hot dry rock)、は地熱資源として利用出来る。乾燥高温岩体のもつ熱エネルギーを利用するための研究は、アメリカで最初に取り上げられた。現在、New Mexico 州の Valles Caldera の西外壁にあたる Jemez Plateau で、水力破砕 (hydraulic fracturing) と熱破砕 (thermal stress cracking) を組み合わせることによつて、人工的に割れ目をつくり、地表水をこのようにして作られた人工的貯溜層に注入して、熱エネルギーの回収を計るための実験が行われている²¹⁾²²⁾。乾燥高温岩体のもつ熱エネルギーは非常に大きい。たとえば、厚さ2 km、幅4 km、長さ5 km の350°C の高温岩体を150°C まで冷却するとき、 4.2×10^{15} kcal の熱量が回収される。この熱エネルギーは50年間10,000MW の熱出力に相当する。そこで、アメリカ以外にも、日本、イタリア、ソ連で、この型の資源の探査および採取技術の研究が行われつつあり、将来資源として期待されている。

第1図. 活火山・地熱開発地域と地熱域 (geothermal regions) との関係 (MEIDAY による)

乾燥高温岩体はマグマが活動を停止したのち、それが内蔵していたエネルギーを利用しようとするものであるが、現在、活動が停止していないマグマの熱エネルギーを利用も考えられる。その第1歩として、現在活動中の火山地域で、火山活動地域の地熱エネルギーとその利用のための基礎データの収集が行われており、日本では薩摩硫黄島が、アメリカではハワイ島がモデル地域として取り上げられている。

4. 地熱資源とその分布

地熱エネルギー資源としては、地熱流体の形でふ存する地熱流体資源と地熱流体とは無関係に熱エネルギーの形でふ存する乾燥高温岩体および火山活動に伴うエネルギーとが考えられる。このうちで、現在技術で利用可能なものは地熱流体資源であり、乾燥高温岩体は熱エネルギーの採取技術が出来れば、直ちに資源として利用出来るものである。しかしながら、火山活動に伴うエネルギーは熱エネルギーそのものの存在は確認出来るが、資源としての実体が明確さを欠いているので、現段階でこれを資源と考えるには異論も考えられるが、将来のエネルギー資源に組み入れる努力は必要である。という意味から地熱資源の1つとして取り上げたものである。

浅所に高温地熱流体資源のふ存が期待され地域が当面の開発対象となつているが、これらは、環太平洋火山帯、地中海ヒマラヤ造山帯、東アフリカ地溝帯および大西洋中央海嶺系のいずれかに属している。このような地域は新生代の火山活動および造山運動の活発な地域で地熱域²³⁾ (geothermal region) と呼ばれているが、現在開発が行われている地点と地熱地域との関係は第1図のようになる。

地熱資源の開発・利用

現在の地熱開発は、高温地熱流体資源を探索し、発電用エネルギー源として利用するための探索活動と地熱エネルギーの採取・利用技術の開発とを中心に進められている。

探索活動²⁴⁾は日本、イタリア・アメリカ・アイスランドおよびソ連でとくに活発であり、その際、国全体および地域毎の地熱資源の評価を念頭におきながら進められている。このほか、メキシコ・ガテマラ・エル・サルバドル、ニカラグア、コスタリカ、カリブ諸島の仏領 La Guadeloupe 島、チリ、ペルー

などのラテン・アメリカでもいくつかの地点で探査・開発が進められている。アフリカでは、東アフリカ地溝帯に属するケニア、エチオピアおよび旧仏領ソマリーランドのいくつかの地点と、大西洋中央海嶺系に属するスペイン領カナリヤ諸島で探査が行われている。また、トルコ、ギリシヤおよびインドネシア、フィリピン、台湾でもかなり以前から調査が進められており、フィリピンの Tiwi ではすでに10.5MWの地熱発電所が建設されつつあり、トルコの Kizildere²⁵⁾では10MW の発電計画が進んでいる。

地熱エネルギーの有効利用の問題のうちで、第1に考えねばならぬ問題は中温地熱流体のもつ熱エネルギーによる発電の問題である。中温地熱流体資源は、熱源の年齢・規模およびそれと貯溜層との相対位置などの加熱条件および水理地質学的条件によつて、高温地熱流体資源となりえなかつたもので、高温地熱流体資源と比べて質の劣る、すなわち、品位の低い資源であるが、その資源量は高温地熱流体資源を大幅に上回るものと考えられている。一方、高温地熱流体資源のうち、高温熱水型資源は蒸気卓越型資源の約20倍の資源量があるが、それがもつ熱エネルギーの $\frac{1}{2}$ 程度が蒸気として発電に利用されているのみで、残りの熱エネルギーは中温の排熱水として処分されている。たとえば、蒸気タービンの入口圧力を50psi (4.46絶対圧) とし260°C の熱水をこの圧力でフラッシングしてえられる蒸気量は重量比で24%にすぎず、その蒸気のもの熱量は260°C の熱水のもつ熱量の59%にすぎない²⁶⁾。排熱水は重量比76%もあり、フラッシングによつて3割方温度が低下して排熱水温度は200°C 以下となる。

中温地熱流体は、このように、品位の低い天然の中温地熱流体資源および高温地熱流体資源の使用後の排熱水という形で、莫大な量が未利用のまま残されている。中温地熱流体を利用する発電方式としては、2段ないし多段フラッシュ方式とバイナリー・サイクル方式などがある。前者は低圧タービンを用いて、中温熱水のフラッシング圧力を下げてえられる蒸気で発電する方式であるが、熱水温度の低下とともに急激に熱効率が悪くなる。後者は、低沸点の2次流体（フロン、イソブタン、プロパン、アンモニア、炭酸ガスなど）を作働流体に用い、熱交換器によつて2次流体を気化させ、その蒸気によつてガス・タービンを駆動し発電する方式で、小容量のものはわが国でも工場排熱水用にか働しているが、10~50MW 級の容量の設備の経済性に問題がある。多段フラッシュ方式はニュージーランドで実用化しており、日本でも近く実用化される段階にある。バイナリー方式は日本およびアメリカがその実用化の研究に力を入れている。いずれの場合も、中温地熱流体による発電は、経済性の高いトータル・システムをどう考えるかという点にしばられて関連する技術の開発が進められている。このような考えで進められている研究は将来低温地熱流体の発電技術へと発達することになる。その1例としてあげるならば、まだ基礎研究の段階ではあるが、アメリカでの Geopressure 型資源の熱水の噴出圧と温度との並用利用方式の研究があり、また、ソ連での熱水温度と外気温度との間にある熱落差を直接力学的エネルギー（廻転エネルギー）に変換するための研究がある。地熱エネルギーを動力用エネルギー源として利用するためには力学的エネルギーへの変換効率を高めるための広汎な研究が必要である。

次に、地熱資源の有効利用という点で重要な問題は、中低温地熱流体のもつ熱利用である。石油・天然ガスなどの化石燃料の消費節減に寄与するため、地熱資源を地域暖房・給湯用熱源として利用するには、熱水温度もさることながら、資源ふ存地域と消費地との距離が最大の問題である。アイスランドの Reykjavik、ハンガリーの Budapest, Szeged および Szentes、ニュージーランドの Rotorua、アメリカの Klamath Falls²⁶⁾²⁷⁾などは、この点で好条件下にある。これらのうち、ハンガリーの場合は火山活動と関連がなく、高い熱流量を示す堆積盆の熱水である。この種のものは熱水温度が余り高くなかつたり、貯溜層の深度が深くなることがあるが、資源ふ存地域と消費地との地理的条件に恵まれていたものが多い。地域暖房用には少くとも70°C 以上の熱水が必要であり、生産井の口元温度は90°C 程度が望ましいが、低温のものでも利用システムを考えれば実用になる。フランスのパリ盆地の Melun、ソ連の Caucasus の Mak-hachkala での熱水利用は熱水温度は70°C 内外である。冷房・冷蔵用への利用は少くとも75~85°C の熱水が必要であるが、暖房・冷房および冷蔵用に効率よく役立てるには、熱交換システムの研究が必要であ

る。現在、各国で中低温地熱流体のもつ熱エネルギーを効果的に取り出し、空調・冷房用のエネルギー源として活用するための研究が進められている。中低温地熱流体の有効利用を計る場合に、その経済性は、上に述べた熱交換システムの選択のほかに、熱水の温度・生産量が影響するが、また熱水の化学組成が重要な要因となる。熱水の化学組成如何によつては、排熱水の地下還元が必要となるが、排熱水の地下還元はまた熱水の枯渇と地盤沈下の防止の両面で必要なものでもある。ところで、多量の熱水を効果的に地下に還元するためには、還元能力の向上を計る必要があるが、このことは貯溜層の冷却を引き起す恐れがあり、貯溜層の冷却を防止しつつ、排熱水を地下へ還元する研究が行われている。

このようなクローズド・システムの開発は地熱資源の効果的な活用という点で極めて重要な課題であり、そのためには、地熱流体の貯溜層の実態の把握と貯溜層内での地熱流体の挙動についての貯溜層工学的アプローチとが必要である。この種の研究はアメリカ・ニュージーランド、フランスなどでとくに活発に行われている。

以上述べたように、各国で地熱資源の開発・利用のための研究開発が行われており、とくに、資源の実態の把握とその有効利用のための研究が重点的に進められている。

結 び

地熱エネルギーの包蔵量は莫大なものであり、これを人類の利用するエネルギー源として活用することを、いまや真剣に考えるべきである。ところで、地熱エネルギーは種々の形態で資源として地下に埋蔵されており、まづ、それぞれについて資源量の評価を行うことが必要である。現在のところ、資源量の評価は一応なされているが、その精度の向上のためには、評価方法の適切化のための研究の努力を必要とする。一方、エネルギー資源としての利用は、現在、 150°C 以上の高温地熱流体資源が発電用に利用され、 $90^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{C}$ の中温地熱流体資源が1部で地域暖・冷房および農業用熱源として利用されているにすぎない。今後、本格的なエネルギー資源として地熱流体資源を利用するためには、有効利用のための技術の開発を一段と促進する必要がある。その他の地熱資源については、その実体の把握と熱の抽出のための基礎的研究に重点を置いて研究を進めるべきであろう。

地熱資源の評価・探査・採取および利用に関する研究開発が着実に進行することによつて、地熱エネルギーは確実に将来のエネルギーの供給源となるであろうし、また、そうなるための努力を怠つてはならない。

文 献

- 1) WHITE, D. E., MUFFLER, L. J. P., TRUESDELL, A. H. (1971) : Vapordominated hydrothermal systems compared with hot water systems. *Econ. Geol.*, v. 66, no. 1, p. 75-97.
- 2) WHITE, D. E. (1965) : Geothermal energy. *U. S. Geol. Surv. Cir.*, 519.
- 3) MUFFLER, L. J. P. (1973) : Geythermal resources in United State mineral resources. *U. S. Geol. Surv. Prof. Paper*, 820, p. 251-261.
- 4) 陶山淳治(1975) : 地熱開発の現状と将来, 石誌, v. 40, no. 2, p. 11-23.
- 5) AUSTIN, A. L., HIGGINS, G. H., HOWARD, J. H. (1973) : The total flow concept for recovery of energy from geothermal hot brine deposits. UCRL-51366.
- 6) 松野久也・平林健夫・松尾圭二(1975) : アイスランド, イタリアにおける地熱エネルギー, その開発と利用状況. 地質ニュース247号, p. 44-59.
- 7) 金子美道(1975) : 欧州における地熱多目的利用の状況. 地熱, v. 12, no. 4, p. 3-12.
- 8) HOWARD, J. H. (1975) : Present status and future prospects for nonelectrical used of geothermal resources. UCRL-51926.
- 9) STEVOVICH, V. A. (1972) : Soviet geothermal electric power engineering.
- 10) HEALY, J. (1964) : Volcanic mechanisms in the Taupo volcanic zone, New Zealand. *N. Z. Jour. Geol. Geophy.* v. 7, no. 1, p. 6-23.
- 11) KORIM, K. (1972) : Geological aspects of thermal water occurrences in Hungary. *Geother-*

- mics, v. 1, no. 3, p. 96-102.
- 12) BELTIKY, L. (1972) : Development and utilization of thermal water in Hungary. *Geothermics* v. 1, no. 3, p. 103-112.
- 13) BOLDIZSAR, T. (1970) : Geothermal energy production from porous sediments in Hungary. *Geothermics* sp. issu. v. 2, p. 99-110.
- 14) BOLDIZSAR, T. (1973) : Positive heat flow anomaly in the Carpathian basin. *Geothermics*, v. 2, no. 2, p. 61-67.
- 15) BUACHIDSE, I. M., BUACHIDSE, G. I., SHAORSHADSE, M. P. (1970) : Thermal water of Georgia. *U. N. Symp. Dev. Util. Geoth. Resources*.
- 16) ALLIQUANDER, O. (1973) : High pressures, temperatures plaque deep drilling in Hungary. *Oil & Gas Jour.* May 21, p. 97-100.
- 17) JONES, P. H. (1969) : Hydrodynamics of geopressure in the northern gulf of Mexico basin. *Jour. Petr. Tech.* v. 21, no. 7, p. 803-810.
- 18) JONES, P. H. (1970) : Geothermal resources of the northern gulf of Mexico basin. *U. N. Symp. Dev. Util. Geoth. Resources*.
- 19) DORFMAN, M. and KEHLE, R. O. (1974) : Potential geothermal resources of Texas. *Geol. Cir.*, 84-4, Bureau of Econ. Geol. Univ. of Texas, Austin.
- 20) La geothermie en France. *Bull du B.R.G.M.* 2e serie, section 2. supplement au no. 1, 1975.
- 21) Smith, M. C. (1973) : Geothermal energy. LA-5289-MS.
- 22) SMITH, M. C., POTTER, R., BROWN, D. W., AAMODT, R. L. (1973) : Induction and growth of fractures in hot rock. *Geothermal Energy*, Stanford Univ. Press. p. 251-268.
- 23) MEIDAV, T. (1974) : Geothermal opportunities bear closer look. *Oil & Gas Jour.* May 13, p. 102-106.
- 24) WHITE, D. E. (1973) : Characteristics of geothermal resources. *Geothermal Energy*, Stanford Univ. Press, p. 70-94.
- 25) 河田清雄・太田良平(1975) : トルコの地熱開発. *地質ニュース*, 247, p. 39-43.
- 26) 関岡 満(1975) : 米国オレゴン州クラマスフォールスにおける地熱多目的利用. *地熱*, v. 12, no. 4, p. 13-19.
- 27) CULVER, G. G., LUND, J. W., SVANERICK, L. S., (1974) : Klamath falls hot water well study. UCRL-13614.

(1976年3月22日受理)