

松川地熱地帯における物理探査*

早 川 正 巳**

Geophysical Study at Matsukawa Geothermal Area

by

Masami HAYAKAWA

Geological Survey of Japan

Abstract Before explaining on Geophysical Study at Matsukawa Geothermal area, the writer tried to summarize the role of geophysical prospecting to make clear the underground structure of geothermal field.

At the present stage, it is difficult to know the true picture of geothermal structure including the hydrothermal system and the behavior of magma by only one geophysical method, that means the synthesized method of various kinds of geophysical prospecting and also geological and geochemical studies will be most effective for our present purpose.

Besides this, new techniques are very necessary to establish the Reservoir engineering as in the case of oil prospecting.

The writer will explain on the geophysical study at Matsukawa a little in detail in the following. For this study, many of my friend have joined. They are Messrs. K. Baba, S. Takaki, S. Tanaka, K. Mori, Y. Ono (Geological Survey of Japan), Members of Azumakako Co., Members of Teikoku Oil Co.. And also Prof. H. Takeuchi of the University of Tokyo helped me in considering the heat problem. The writer wishes to express his cordial thanks to them.

During last eight yeays since 1958, the writers have conducted seismic and electrical prospectings and geophysical logging by using some test wells. Besides these, Hayakawa has also calculated the underground temperature distribution under the assumption of some geophysical states. Paralleling to the geological studies described in the previous paper, they started with laboratory experiments including density, porosity, and ultrasonic wave velocity measurements by using the specimens of outcrops at and adjacent area of this geothermal field

From these results tentatively they presumed as follows by combining geological data. Matsukawa andesite might correspond to the first cover-rock because of the high velocity and low porosity while the subsequent dacite tuff formation probably might be the first reservoir of hot water because of low velocity and high porosity. Likewise the dacite lava beneath the dacite tuff might correspond to the second cover-rock and the underlaid marine sediments correspond to the second reservoir.

Consequently they rather preferred the reflection seismic method instead of refraction method because the

* 去る2月16日の地熱調査会における講演を元にしこれに關係のある過去10年にわたる地熱に関する地球物理学的研究の主だったところだけを一しよに加えた

** 地質調査所物探部長

地熱 No. 10 (5月特集号), 1967

seismic velocity might not increase with depth. For the seismic prospecting we utilized the magnetic tape recording system and after the several trials of playback, some nice reflection records were obtained. (Fig. 8) The vertical axis shows the depth from the surface in meter and the horizontal axis shows the lateral distances between shot to detectors.

As the result of seismic records, depths of reflection interfaces from the surface were obtained, and they are 160, 550, 980, 1300, and 2000 meters. By taking the geological events into consideration these reflection faces should correspond to the boundaries between different formations. As explained before, the first layer consisting of hard andesite may be the cover-rock. Below this from 160 meters to 550 in depth, there are possible reservoir for hot water. The layer between 550 and 980 meters corresponds to the dacite formation and as already explained before this formation was named the second cover-rock. But this is not so complete cover-rock as the first one, as it includes some cracks according to the seismograms. Below this layer to 1300 meters, there will be sedimentary formation. Below this to 2000 meters, there will be so-called Green-tuff formation. From seismic records it is easy to predict vertical fissures in it, which will provide steam and gas paths. Deeper than 2000 meters the material must correspond to chert or slate of Palaeozoic formation.

Some test bore-holes were drilled from which we could obtain the temperature distribution in the shallow part in this area. It was very effective for us to know the temperature distribution in the shallow part of this field. This result did not contradict with the presumed fault structure in seismic profile.

Also the result of the temperature calculation did not contradict with the present shallow temperature curves.

Paralleling with seismic prospecting, electrical prospecting was also conducted. In the case of seismic survey, the traverse line was set along Matsukawa river. In the electrical prospecting the traverse lines were set not only in the same direction of seismic one but also in the perpendicular direction of it. They applied vertical electric sounding of Schlumberger method. The maximum distance between two current electrodes was 4 kilo-meters and many resistivity data were obtained, (Fig. 9). Generally speaking all of such curve show more or less the same character. In the abscissa you will see the half of electrode distance that is $AB/2$ in meter. In the ordinate you will see the apparent resistivity in ohm-meter. Both of them are expressed in logarithmic scale.

As you see here, the electric apparent resistivity shows higher in the shallow part and it shows low resistivity in the intermediate. Again there is resistivity high. By the calculation the first high is thought to correspond to the surface debris or the first cover as in the seismic prospecting, first low to the first reservoir and the second high may correspond to the second cover. In some of the curves we can see the second low resistivity at deeper part. Probably this may indicate the existence of the marine sediments.

Here is a resistivity profile with some of resistivity logging data which correspond to the perpendicular direction to the seismic traverse. (Fig. 10) As is in the case of seismic profile the vertical line shows the depth from the surface, and the scale of both horizontal and vertical direction is the same each other. As will be seen easily from this profile, near the surface there are debris or the first cover, below this the first reservoir and finally the second cover. This, the second cover part has comparatively high resistivity as shown here, $100\sim 2000\Omega m$. It means that this formation does not contain clayey material and is more compact formation than overlain formation. As the writer will write later, however, we have found that this part can feed a lot of steam and hot water through the wells at present productive area.

Although soon later the writer will explain about electrical logging, tentatively you will see the resistivity logs here in this profile. As you will see easily here the high resistivity part in this profile just corresponds to the high resistivity logging data. If we look carefully at this high resistive part of log, we can see the minute low resistivity values among the high resistivity domain in the log which may indicate the existence

of fissures in the compact lava.

You will see the electric logs in Fig. 11. The vertical line indicates the depth from the surface in meter. On the right side of the axis the resistivity values are shown in ohm-meter while on the left side self-potentials are shown in milli-volt. These dotted lines are the boundaries between Matsukawa andesite and dacite tuff, and dacite lava and marine sediments respectively obtained by geological core analysis. In between these two dotted lines you will see the break-lines which connect each other the similar characteristic part of each curves.

Now let's here remember some experiments in test wells. By using the data obtained from these test wells we can say the surface cold water might flow seasonally into the so-called first reservoir. On the other hand, the resistivity logs show small value in shallow part, say about until 550 meters while at deeper part than that depth resistivity value shows high especially in well No. 1. So synthesizing the above phenomena, we decided to set the casing pipe until the depth of 550 meters to avoid the surface cold water flow into the well. Later this arrangement was proved to be good. Anyway, in the deeper part than this depth we set slotted pipes.

Now you will see the temperature recovery curves by taking example of well No. 1. in Fig. 13. In vertical line the depth from the surface is shown in meter as in the former case and in the horizontal line, temperature is shown in degree-centigrade. Immediately after the completion of the well, the mud water which was used for drilling was replaced by the pure cold water. One day after this arrangement the temperature curve became like the figure. The second day, the temperature increased a little. Likewise finally one week later the temperature became higher as in the figure.

From Hayakawa's calculation of underground temperature distribution we expected the temperature of 300°C at the depth of 1000 meters, so we expected as if the temperature might increase a little more than the final curves in this graph, however, we could not help stopping measurement at this stage because of some financial reason. Consequently some amount of water were taken out from the well and suddenly a lot of steam were gushing out from the outlet of this well with the amount of 60 tons per hour under about 6 kg/cm² pressure which might correspond to 6,000 kW from this only one well.

Likewise another three wells began to discharge steam and water also immediately after excluding some amount of water from the well head. Fig. 12. shows the results of the final temperature measurement conducted just before making them to discharge steam and hot water.

Now let's go back to the temperature recovery curves of No. 1 well showed before in Fig. 13, and pay our notice to these comparatively high temperature parts which showed the rapid temperature increase in the later stage of this one week. By comparing these parts with the resistivity logs we can say that hot water or steam were penetrating from the country formation into the well through fissures.

Finally by taking these facts we have arrived at the following conclusion regarding the existing state of hot water or steam.

At the beginning stage of the study we thought that the second cover rock formation could not supply a lot of steam and hot water for the well which penetrated it. But finally it became clear from many evidences just the writer told that hot water or consequently steam might come from the deep heat source through the faults, fissures or cracks into the narrow pockets in the lava of so-called second cover. The rocks which form the first reservoir are more porous than the second cover-rock, of course, but that reservoir does not contain hot water and steam enough to supply for the productive wells because it does not possess many cracks and fissures, and furthermore the surface cold water may flow into it as I told before. Consequently we are now tapping the hot water and steam from the hard formation named firstly as the second cover and from the second reservoir, because the hard formation has plenty of cracks and or fissures, and it also acts as the cover-rock against the surface cold water.

松川における物理探査について述べる前に、地熱地帯の地下構造の解明に物理探査、広くいえば地球物理がどのような役割を演じているか、あるいは今後それがいかに利用されるのか、そのような問題についてふれておきたい。

今さらいうまでもないが、地熱蒸気による発電そのものは、原理的にはいたって簡単なことである。手近かな例でいえば、お釜の中にある水が下から熱せられて、口元から熱気として噴き出すのに似ている。しかし現実には、そのいれ物となる地層の性質1つをとってみても簡単なものではない。特に日本のような地下構造の複雑なところにおいてはである。従ってそこには入ってくる水についても、また下からの熱の問題

についてもわからないことが一ぱいである。

しかし、ごくおおよそのことは次のように考えることができる。まず熱についてのべよう。地殻のすぐ下マントルの上部に、ある理由で岩石の融点以上のところ（これは本源マグマといわれている）ができ、次に地殻変動を起すと同様な力の作用で、圧力が減少することによりマグマの一部は上昇し、地殻内部の浅いところ（地表から数 km のところ）に、いわゆるマグマ溜りをつくる。

これは Al、Fe、Mg、Ca、Na 等の珪酸塩から成り立っているが、少し温度が下がってくると、olivine, pyroxene, amphibolite, biotite, potassium, feldspar, quartz などの結晶を生ずる。一方マグマ溜りの

○……自然の場（放出物を含む）を利用するもの 放射能は省いた
■……人工的にエネルギーを与えて測定するもの

方 法 要 素	重 力	地 震	電 気	磁 気	温 度	検 層	空中写真	地球化学
	密 度	波動伝播速度	比 抵 抗	帯 磁 率	熱	S. P. 比抵抗温度 (圧力)	赤 外 線	
外部からの水								
地下の様子		屈折 反射 法			作井による断熱膨脹	(時間的変化も測定する)		
—地表— ちみつな岩石	大	大きな構造をみる場合には利用される。	大	母岩の性質により帯磁率がことなる。	伝導対流	大	しめりけ割れ日のトレス熱の異常	Cl Si SO ₄
すきまの多い岩石	小		小	(残留磁性に注意すること)	蒸気又は熱水 (p. t により)	小		Na/K
同 上 のくり返し	大		大					CH ₄ と CO ₂ における C ¹² と C ¹³ のアイソトープ平衡を用い温度の推定
	小		小					O ¹⁸ と 重水素
割れ目 断層等		記録上の位相のくいちがいから断層等を推定	断面上で層のくいちがいから断層等を推定		割れ目の役割	大の中における小が割れ目を示すことあり (熔岩などの中の)	目下技術確立中	
地下深部 (マグマ溜り) よりの熱		小 (流体は S 波を通さない)	小	小 (キュリー点以上) (熱変質によっても)	過熱蒸気 (臨界温度以上)	formation pressure の測定技術確立中		

中には非圧縮性で揮発性の成分、たとえば H_2O (volume で80%以上)、次に CO 、 H_2S 、 SO_2 、 HCl と NH_4Cl など、それに微量成分として HF 、 N_2 、 H_2 、 CH_4 、 B_2O_3 や CO が含まれている。

ところで結晶がはじまると、これらの液相の部分はなかなか結晶には入り切れなくて残るのである。実験によれば圧力がある程度高く (たとえば 2kbar 以上)、温度がある程度低くなった状態 ($7\sim 800^\circ C$ 以下) にあれば、その中に含まれる H_2O の量 (蒸気圧) はかなりのものになる (9% 程度)。しかし圧力が低く温度が高い状態では、その中に含まれる蒸気圧は小さい。したがって、深いところで、できたマグマ溜りの中の蒸気圧は、浅いところのものより高いといえる。

すなわち、マグマ溜りが冷却して結晶をはじめると、結晶中には入る H_2O の量は限られるので、残っている部分すなわち残漿 (residual magma) 中の蒸気圧は次第に増加してくる。この蒸気圧が周囲の rock formation の圧力より小さい場合は、冷却、団結して深成岩になるであろう。また周囲の圧力より大きくなれば、まわりの弱い部分にはけ口を見つけたら、あるいはすでにできている割れ目を通して蒸気が地表面に向って滲透してゆく。この場合 H_2O の臨界温度 $374^\circ C$ (対応圧力は 220 気圧) 以上であれば、液体としては存在し得ず、常に過熱蒸気の状態にある。

さてこのようなマグマ中の H_2O の他に、地表からの外部の水がマグマ溜りの上部に滲入してくることが充分考えられる。この場合、温度・圧力に応じて、蒸気または熱水の形で地下の割れ目あるいは formation の中を満たし、貯溜層を形成することが考えられる。この時も地表面に外部からの水の滲入を防ぎ、貯溜層の熱水または蒸気の圧力 (および温度) を保つ役目をする石油における帽岩 (cap または cover rock) が存在すれば非常に都合である。これらは必ずしも 1 対のものでなくて、さらに地下に第 1 の貯溜層の下に第 2 の帽岩、第 2 の貯溜層のある場合もある。

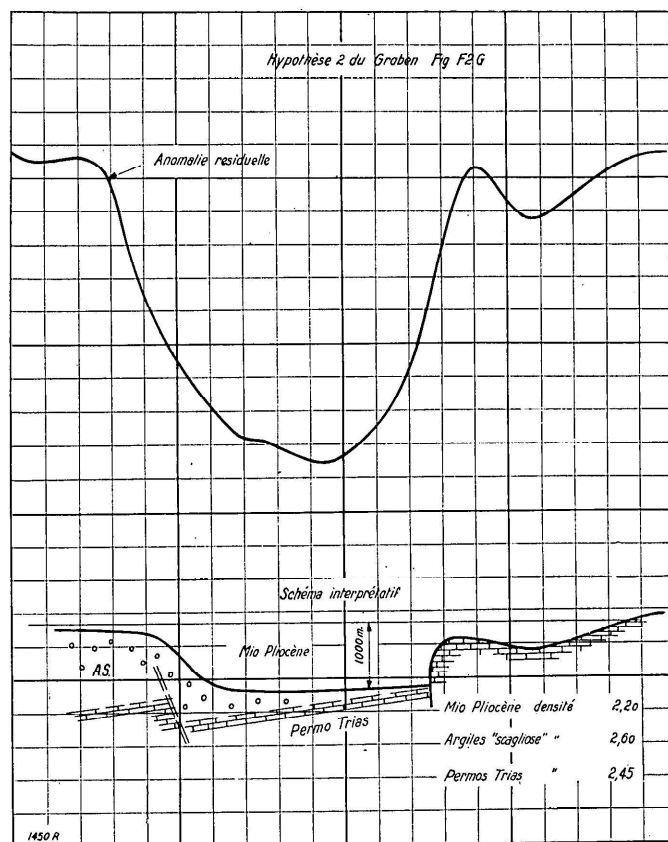
このような場合、地下の様子をさぐるのに物理探査の果たす役割を表にして書いてみた。この表の一番左側に上下

に上記の要素をしるした。そして右側へ各方法による特性を示した。これらそれぞれについて、以下に簡単な説明を試みよう。

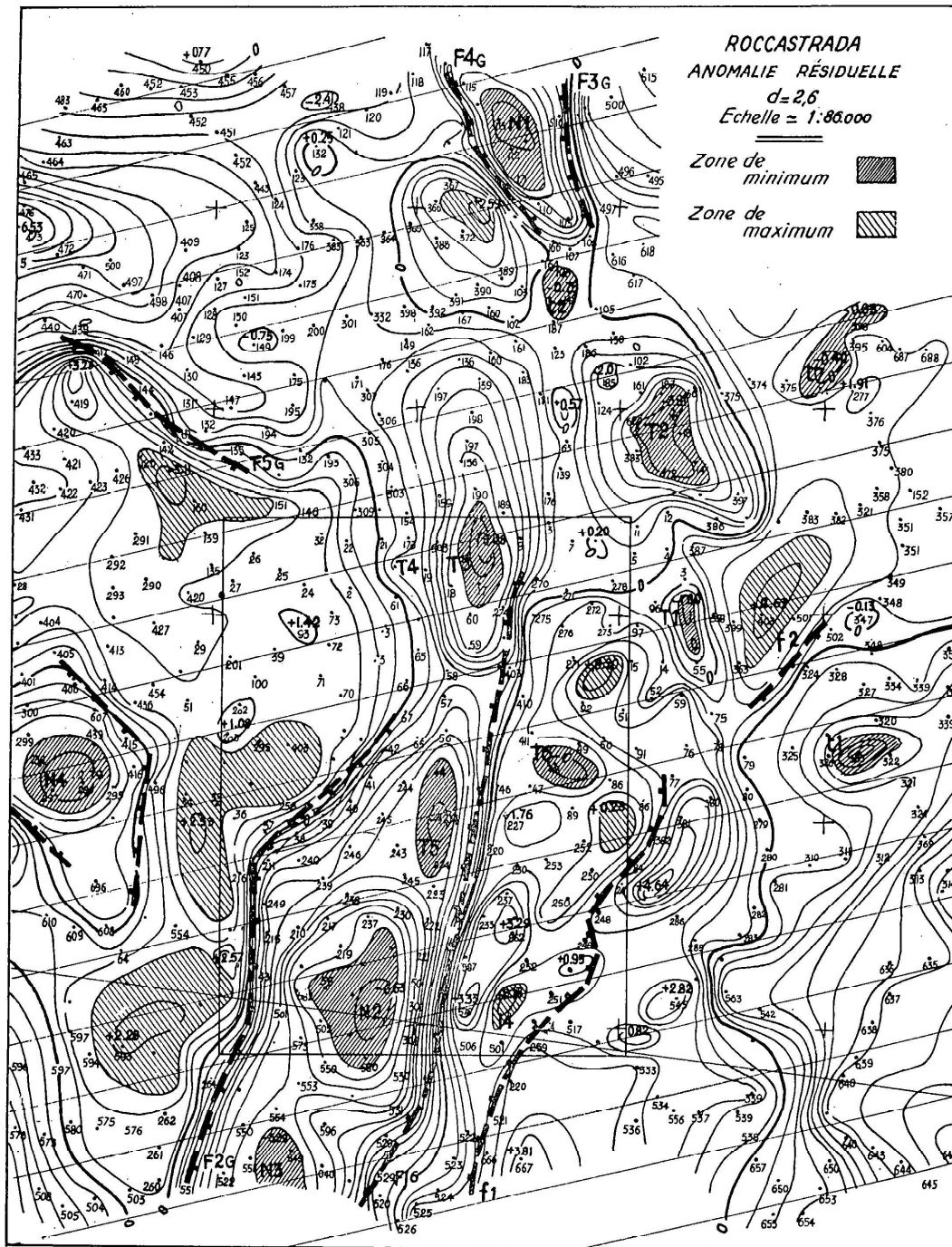
まず重力については、ちみつな岩石では密度が大、すきまの多い岩石では密度が小、そして断層などのあるところでは等重力線がそこでは密になる。現在のところ重力は reconnaissance survey としては有益であるが、ただ重力が大小というだけでは、地熱地帯の地下を論ずるわけにゆかない。しかしマグマの状態によっては密度に反映するものもある。ここにはイタリアの地熱地帯での地下構造と重力の関係を図示した (第 1 図)。また第 2 図では断層と重力の等重力線の関係をみる事ができるであろう。

次は地震である。ちみつな cap rock が一番上にあると速度が大で、下にすきまの多い地層のように速度の小さいものがくると屈折法は無理となる。しかし反射法ならよい。そしてもしこれらのくり返しがあっても大丈夫である。断層やわれ目は位相のくいちがいとあらわれる。なお地震波の伝播速度は温度が高く

第 1 図



第 2 図



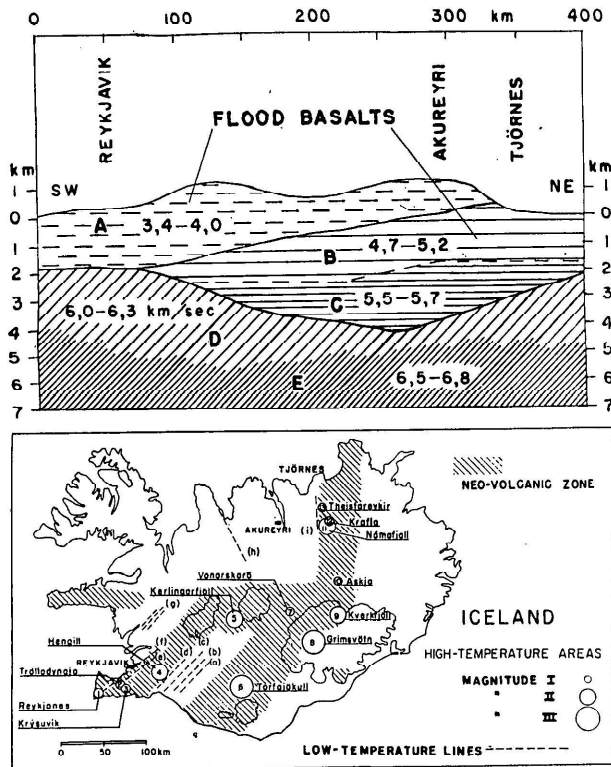
なると一般におそくなる性質があり（昭和新山の場合のような例外はあるが）、またマグマのような流体の中では振れ波（S波）はなくなる性質があり、今後このような性質が地熱開発の基礎に利用される可能性が

ある。非常に大きな構造をしらべる場合には屈折法も役に立つ。その例としてアイスランドの地熱地帯、つまり東北から西南方向への切り口を第3図に示した。また屈折・反射両方法による地下断面の1例として、

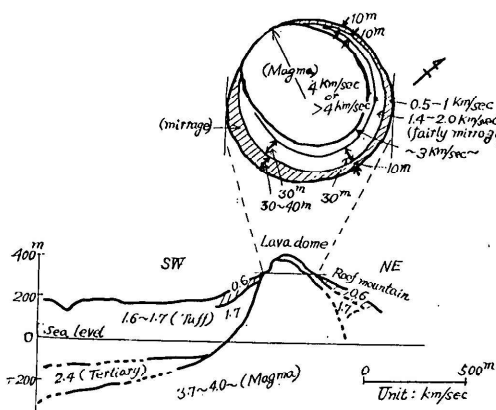
昭和新山の場合を第4図に示した。この場合には石英安山岩熔岩の地表下の様子を見ることができる。

次に電気探査について考えてみよう。この場合、比抵抗に着目すると、ちみつな岩石では一般には大、す

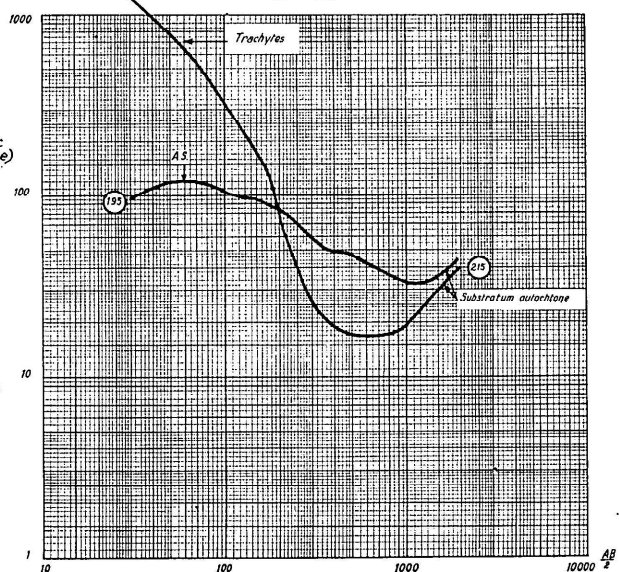
第3図



第4図



第5図

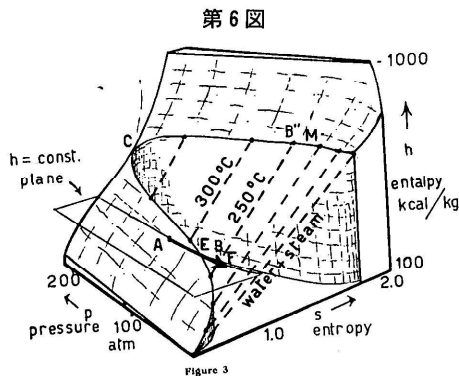


きまの多い岩石（特に CI などの含まれた水が入っていると）では小となる。電気探査によって推算した地下断面から層のくいちがいがあれば、一応断層の可能性はある。なお高温では比抵抗は小となるので、地震同様地熱地帯地下構造の解明に役立つ要素となっている。第5図にイタリアの地熱地帯での比抵抗曲線の1例を示した。

次に磁気であるが、帯磁率は一般に母岩の性質によってことなる。たとえば magnetite のようなものを多く含んでいる火成岩は一般に堆積岩に比べて大きい。なお磁気の場合に注意しなければならないのは残留磁性である（遠い過去につくられた磁性のことである）。磁気は断層のあるようなところでは、等磁力線が密になることがある。またキュリー点以上の温度になると、帯磁率が減ずる性質がある。昭和新山のドームの上では磁気異常が高温の為小さくなっているが、この結果は地震探査の方から得た地下の高温状態の結果と一致している。熱変質によって磁気異常の値が減ることも、地熱地帯の探査には有利である。最近は空中磁気探査の技術も次第に確立されてきた。これによると地上の影響が消え、しかも短時間に広い範囲の磁気異常を知ることができる。さらに高度を変えた飛行によって、地下のマグマに関する情報をつかみうる可能性もある。

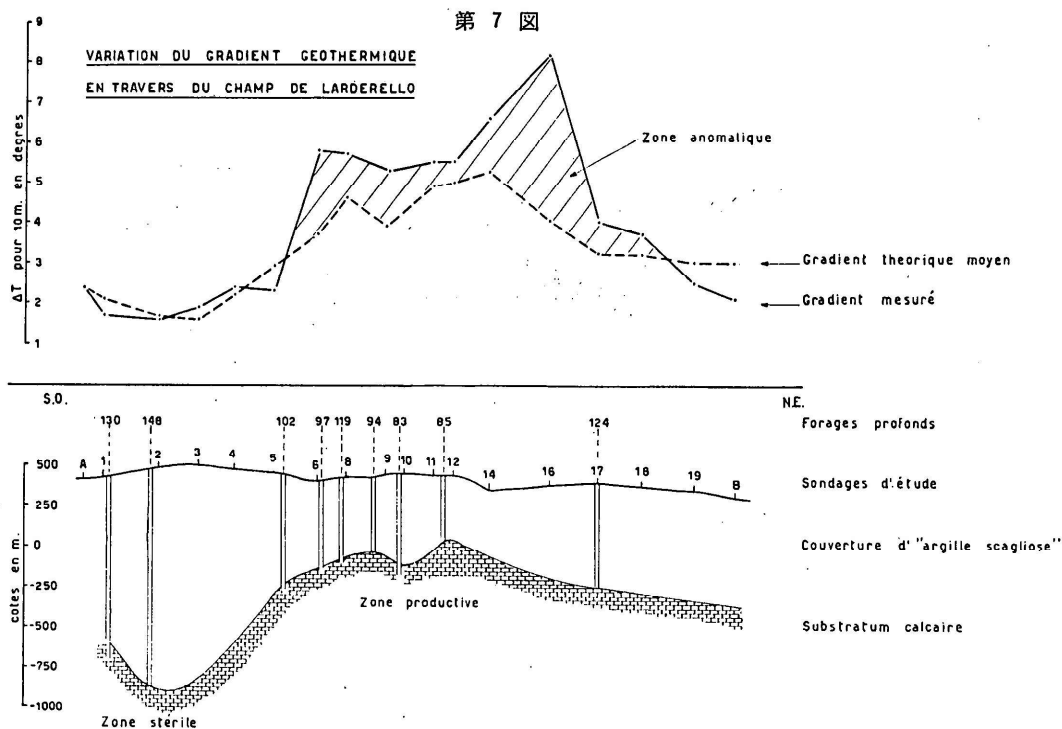
以上のうち、重力と磁気は自然の場の性質をしらべることであり、学問的にはポテンシャル論に起因している。それに比べ地震と電気（比抵抗）は人工的にエネルギーを与えるもので、地下構造の解析は前者等比べより直接的である。

次に温度について。地下1 mの等温度分布などのしらのほか、各点での深さに対する温度変化の分布を一しにみる方法もある。温度・圧力の関係により蒸気になったり熱水になったりする。もちろん元来は熱水であったものが作井による結果、断熱膨脹により蒸気となり地上にみちびかれ多くの場合利用されている。臨界温度以上では過熱蒸気である。この関係を第6図



に示した。また地層が非常に透水性で地下温度勾配が急である時には対流が起ることがある。割れ目は熱をもち運ぶ重要な役割を演ずる。第7図にイタリアの地熱地熱における理論計算と観測結果とのくいちがいを示す。

物理検層は一般に坑井内での比抵抗・自然電位・温度さらに圧力等を連続的に測定するのであるが、圧力については目下技術を確立中である。たとえば比抵抗からいえることは、一般に先にのべた電気探査と同様のことがいえるが、ある場合には、ちみつな熔岩などのため高比抵抗になっている中で、割れ目などのため部分的に低比抵抗になるところがある。このようなところは、坑井掘さく中に逸泥するところと一致する。またそのような処では、はじめ坑井完成直後は低温を示すが、時間の経過とともに逆に他の場処よりも高温となる。一般に温度を高める熱については、熱伝導よりは地熱地帯では下からの割れ目にそって、熱水ガスまたは蒸気に伴ってもたらされることがずっと多い。温度は374°Cより高ければH₂Oは液体としては存在し得ず、過熱蒸気というべきものであるが、その温度以下では圧力に対応する温度次第で蒸気または熱水となること、先ほどのべた通りである。物理検層は坑井掘さく中に、どこまで水どめのめくら管を入れるべき



かというような場合にも利用される。一般にこれからは reservoir engineering の技術確立に大きな役割を演ずることになる。なお放射能検層も今後は利用、発展する可能性はあるが、地熱開発に対する放射能の役割については今後の問題として残し、今ここには詳しくふれないでおく。

さて最近急速に進んでいく技術としては、空中写真（主として赤外線）をあげることができる。これはしめりけ、断層のトレース、さらに熱地帯での異常を写真の上にみることができる。固体が熱せられると連続スペクトルを持った放射を発生する。一般に固体が熱によって光を出す場合、温度によって光の色を異にする。種々の物体の放射と吸収との関係はすでに理論的に研究されている。キルヒホッフは、すべての放射を全く吸収するような物体を完全な黒体と名付けた。温度が高くなると放射能を増してゆくのであって、完全な黒体では、これが絶対温度の4乗に比例することがステファンとボルツマンによって見出された。また温度の高いほど光が白く光るのは、放射スペクトルの種々の波長に対するエネルギー分布が、温度によって変わることを示すものである。ルummerやプリングスハインの測定結果などをみると、各温度についてエネルギーの最大になる波長が一定し、かつこれが温度の高いほど短い波長の方に移ってゆくことがわかる。この最大波長と絶対温度とが逆比例する関係は、ウィーンがやはり熱力学的にみちびき出したもので、これをウィーンの移動法則と名付けている。

以上のような関係をくみ合わせて考えてみる時、近い将来には光線の波長と吸収などのことも考えに入れ、地下どれ位の深さからどの位の熱が来ているかを知ることができる可能性がある。また間接には割れ目の存在も推定できるかも知れない。現実にはこの技術を目下確立中であるが、他の方法では知り得ない要素をみるところに強味がある。

最後に地球物理とは別の分野の地球化学についていくらか考察の筆をのばしておこう。地熱地帯の問題としては、一般に Cl、Si、 SO_4 などの要素がいつも問題になるほか、Na/K の比の小さい処は地熱の中心から近いというようなことがいえる。それは地下深部で熱変質が行なわれる場合、岩石中の Na と熱水中の K が置換されるため、熱の中心より地表までのみちのり、すなわち熱源に近いほど Na/K の値が小さくなるためである。

最近興味ある研究として、 CH_4 と CO_2 における C^{12} と C^{13} のアイソトープ平衡から、地下の熱つまりは温度

を推定することが行なわれている。 $\text{C}^{12}\text{H}_4 + \text{C}^{13}\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{C}^{13}\text{H}_4 + \text{C}^{12}\text{O}_2$ の平衡を用いて供給点の温度を算出するわけである。松川においては、名大の中井は 319°C という結果を出した。これらの他 USGS のホワイトは、 O^{18} と重水素の関係を用いて熱水の地下での動きをしらべている。以上かんたんに地熱地帯の物理探査について考えてみた。このような予備知識のもとに、松川の物理探査について述べてみよう（ここまでにした図面は国連のローマ会議の資料にもとづくものが多い）。

松川における物理探査としては地震および電気を主体とした。重力を用いるにはあまりにも地形が急峻であり、あとの補正について心配をしたので今回は用いなかった。磁気は上記両方法を用いた後、最近開発と平行して主として東化工 K. K. でこれを実施中である。なかなか興味ある結果が出つつあるが、今回は説明を割愛する。なお調査の段階で試錐が行なわれ、それに伴う物理検層を実施した。この方法は開発井さく井中にも行なった。また地下の温度計算や熱水系の研究も行なった。なお今後も地震や電気の方法が将来の開発のために行なわれることが考えられる。

以上の実施には地質調査所の馬場健三・高木慎一郎・田中信一・森喜義・小野吉彦をはじめその関係者、さらに東化工 K. K. の森所長・片桐課長をはじめその関係者、帝石鑿井工業 K. K.、東京大学の竹内均教授などの方々の非常な協力を得た。ここに深く御礼を申上げる次第である。

地質・岩石学的な説明はすでになされているので全部省略し、まず地震探査から始めよう。

まずこの方法については、堆積岩の地域では地震探査はすでに数多くの経験をもっているが、火山地帯では本式になされたのは北海道の昭和新山ぐらゐのものであろう。

それで地震探査の可能性をしらべるために、あらかじめこの付近の岩石露頭や、テスト井のコアサンプルを用いて、室内で岩石中の地震波速度（超音波）・密度・孔隙率等の測定を行なった。

その結果、地質の方から推定される地下各層相互間に地震波速度の差異のあることがわかったので、地震探査を実施することにした。

実験結果からみて、速度が深さとともに連続的に増すことが考えられないので、屈折法は適当でない。それでここでは反射法を主として行なった。またこの地熱地帯ではノイズが多いので、磁気録音テープ式の地震計を用いた。現地における地震探査実施後、室内に

おける数多くの再生実験の結果、このような火山地帯としては、かなりきれいな反射層の記録がとれた。それらを数枚つなぎ合わせてみると第8図のようになる。

もちろんそれら反射層がそれぞれの地層の境になっているかどうかを、記録の上からだけではいえない。しかしながら地層の境界面での反射インピーダンスのちがいは、それぞれおおよそは始めに実験的にわかっているし、また地質調査の方の結果をも考えに入れて、こういうことはあり得ないというような部分は除くという考え方をすると、大体の推定がついてくるのである。

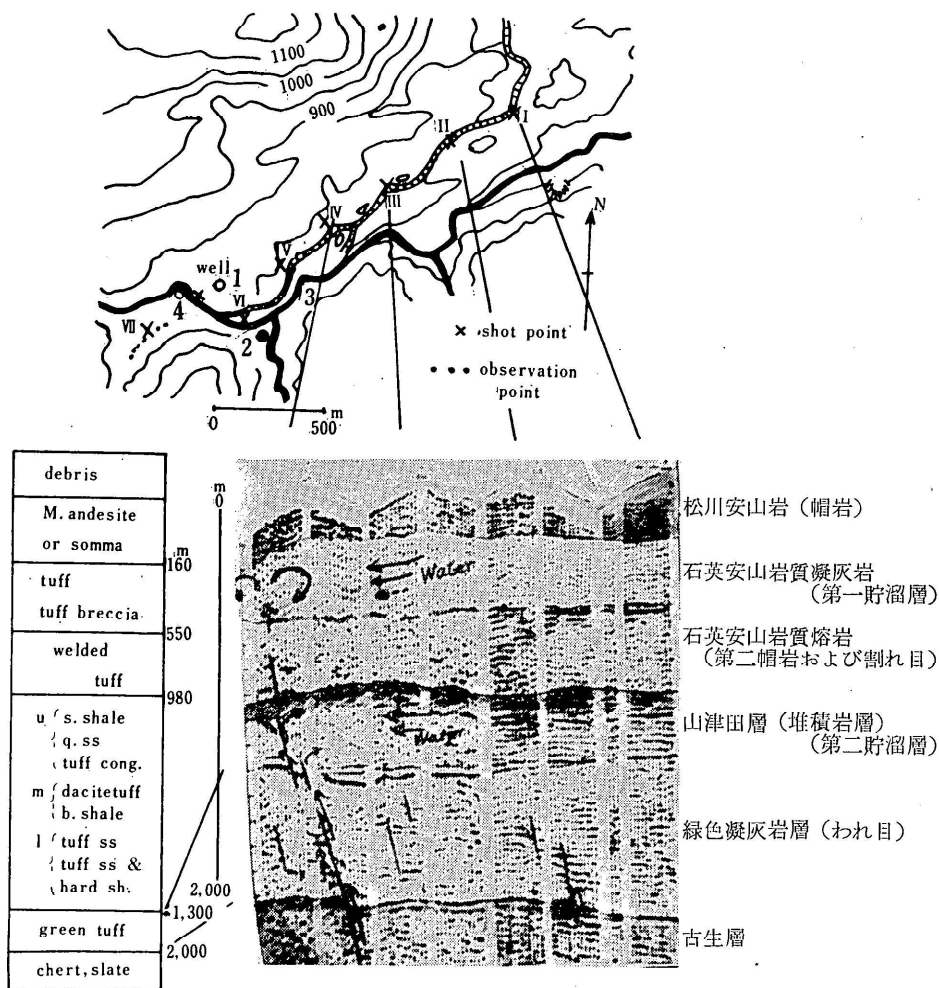
それによると、平均して地表から160m位までが松川安山岩、その下550m位までが主として石英安山岩質凝灰岩、さらにその下980m位までが石英安山岩質熔岩（または熔結凝灰岩）、そしてその下にくる堆積岩の山津田層（秋田油田の女川層に当る）と緑色凝

灰岩層（Green tuff formation）との境界までは地表から1,300m、おしまいにこの green tuff formation とその下の 占生層との境は、地表から約 2km の深さにあるだろうと見当がついた。

なお、この地震探査の解析には、はじめ地下の温度・圧力についての影響を考慮していなかったで、その実験も行なってみた。

まず温度によって速度がどのように変わるか——いくつか行なった実験結果は100℃のところでは一寸変わった様相を示すが、いずれも全体の傾向としては速度が減少している。この温度による実験には恒温槽を用いたが、水を含んだ岩石としては余り実験結果が多くないので興味あるものと思う。一方圧力によってはどうか。この結果は、圧力増加に伴い超音波は温度の場合とは反対に増加している。したがって、これら相互に

第8図

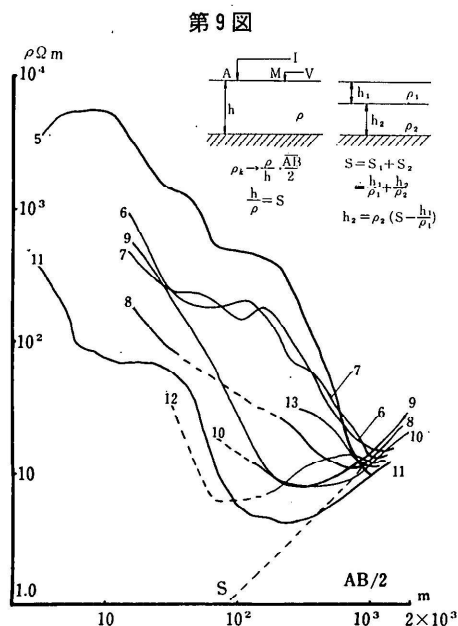


速度に対しては反対に作用するが、おおよそ地表面から1kmのあたりでは温度圧力による影響は相殺している、解析には影響していなかったようである。

ところで一方、電気探査の方はどうかという、ちょうど地震の方でテープを用いたように新しい技術として直流法を用い、電位を測る観測点をまん中にして両方に電気を流す電極の手をひろげ、端から端まで2kmという長さにして実験をしたのである。

昭和33、34年に行なった時は地震探査と同じ場処（ほぼ東西方向）であったが、40、41年にはこれとはほぼ直角方向に（この際は端から端まで約4km）実施した。両方の交わる点は開発第1号井の近くである。

さてその結果を第9図に示したが、それから色々大切なことがわかってきた。図からみられるように、縦軸に比抵抗、横軸にその測線の長さをとると（この測線の長さというのはつまり深さに対応するわけであるから）、結果として深さに対する比抵抗のちがいを図からみることができる。



それからみると、非常に長い測線（ab/2が1km）つまり両端まで2kmになる測線からわかることは、一番上のところに非常に高い抵抗のものがあ（松川安山岩に当る）、それから今度は抵抗の低いものがある（石英安山岩山岩質の凝灰岩）。そして一度高いところができた（これを最初熔結凝灰岩層としてみた）。そしてある記録の中には再び比抵抗が小さくなりそうな気配のみえるものもある。これを山津田層上部

と考えてみた。

ここで地震探査と電気探査の結果を比較してみると、大切なことがわかってくる。すなわち、まず松川安山岩であるが、このところは地震波速度の大きいこと、孔隙率の小さいこと、見かけと真の密度との差のないこと、それに比抵抗の高いことなどから、帽岩として適している。これは地質（岩石）の方から変質のすくないことや、くつ進中の温度の余り高くないことと矛盾しない。

次の石英安山岩質凝灰岩層は地震波速度の小さいこと、孔隙率の大きいこと、見かけと真の密度差の大きいこと、それに比抵抗の低いことなどから、物理検層や地質の方からも考えられているように、凝灰岩を主とする地層で、中に挟まれている熔岩の中の割れ目には熱水が溜っているような、いわゆる貯溜岩層ということができる。

本来このような問題を扱う場合には、孔隙率ばかりでなく、浸透率を用いるべきであるが、当地域の岩石では一般に孔隙率の大きいものは浸透率も大きいので、ここでは孔隙率で説明した。また上に熱水の貯溜層という言葉を用いたが、これは次のような理由による。貯溜層になり得るという可能性については、上に述べたような岩相の説明で了解されると思うが、でなぜその中に熱水が溜つていると考えられるのか。理由の1つは電気抵抗の低いことにある。

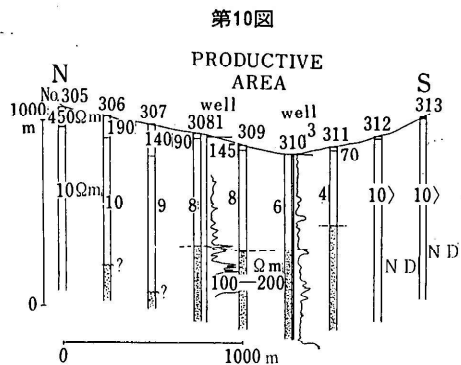
岩石だけでこれ位の低い比抵抗は一寸説明しきれない。電気抵抗が低いということは、地層が液体を含んでいること、その温度が高いこと、さらにその塩分濃度が高いこと、など種々の原因によって説明されるが、そのいずれであるかをいい切ることはそれだけではむずかしい。しかし井戸の中の物理検層から、抵抗の高い自然電位の負の値の大きい部分、つまり熔岩のある部分の中の割れ目のところで温度の高い水が湧出しており、しかもこれは沸とう曲線のすぐ内側にあることがわかったので、熱水貯溜層とした。地震探査の記録をよく調べてみると、同じ地層内でも熱水や蒸気のある処は、その変質作用のため反射記録がはっきりしていない。

次に熔結凝灰岩層であるが、ここでも上に用いたと同じく地震波速度・孔隙率・密度・比抵抗等から、第2の cover (cap) rock つまり帽岩層と考えることができる。ただしこの帽岩は一番上の松川安山岩層より割れ目の多い、したがって割れ目の中に少なくとも熱水の存在が期待されるような帽岩である。

さらにその下の山津田層、これにも同じような材料

から第2の熱水あるいは蒸気の貯溜層を考えたのである。上記の物理検層で、地表面から500mまでの温度の上昇曲線からみるとさらにある程度の深さでは急に温度が下るとは考えられないばかりでなく、かなりの温度上昇率が推定されたので、ここに示したような熱水、または蒸気の貯溜層としたのである。地熱蒸気を現実に発電に開発、利用するという点から考えれば、これより深い green tuff formation や古生層はボーリングの対象にはならない。しかし後に述べるように、熱の通りみちとしての意味あいでは非常に大切である。

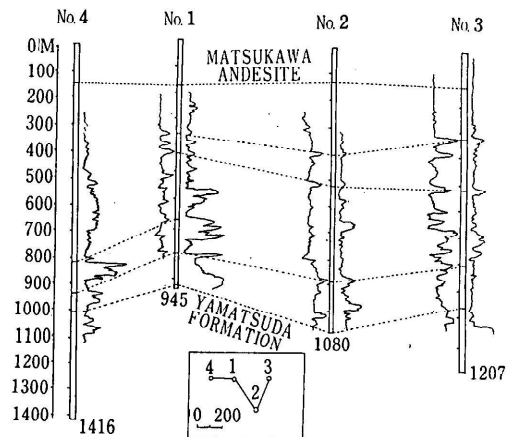
ここで南北測線に電気検層結果の一部をそえがきしたものをしらべてよう。なおこのように、高温の化学物質のある井戸での検層測定器の作成には非常な努力が払われた。この第10図からよくわかるように、表面には debris や第1の帽岩があり、すぐその下に第1の貯溜層、そしてその下に第2の cover がく。この第2の cover は 100~200Ωm の比較的高い抵抗を示している。しかし、この部分には割れ目があり、熱水や蒸気の通りみちとなっている。この cover の高い抵抗の処は電気検層の方でも高い抵抗を示す。そしてその電気検層の高い抵抗のところをよくみると、その中に抵抗の低い部分がところどころにある。ちょうどそれが堅い熔岩の中の割れ目に相当している。



ここに各井戸で行なった電気検層の比較図を示した(第11図)。縦軸は表面からの深さ、そして各検層図は右側に比抵抗、左側に自然電位を示している。点線は岩石のしらべからそれぞれ松川安山岩と石英安山岩凝灰岩、それから石英安山質熔岩(熔結凝灰岩)、そして海成堆積層(山津田層)、の境の面を示す。さらにこれらの間に引いた破線は、それぞれ各井戸の同じような特徴のあるところを連ねたものである。

これらは、地下の構造(ある意味では状態を加味した)のつながりをあらわしていることがよくわかる。

第11図



この附近にはほぼ東東北—西西南の方向と、それに直角な北北西—南南東方向の構造のあることが地質学的にも表面地形からも、また空中赤外線写真の方からも考えられていたが、地球物理学的にもこの考えは矛盾しない。しかもその上この図からわかることは、たとえば第2の cover と山津田層との境界に着目すれば、現在の開発第1号井のあたりが一番盛上っているのである。これは先程のべた2つの構造線にそって考えれば、東西・南北方向ともいくつかの断層によって、このように中央部が地壺のような形で隆起しているのかもしれない。このことは開発孔作井後の各井戸の柱状図を比較すると、このことの確かなことがわかるであろう。

さてここで地震探査の断面図をよく見ると、古生層から green tuff formation を通って浅い部分に通ずる割れ目が、記録の各相のくいちがいていくつも見られる。とくに図の左側(東西地震測線の西側付近)すなわちカルデラ壁に近い処にこの割れ目が多い。このことは、先程のべた断層構造の1つに相当するものかもしれないし、また地質学的な解釈とも矛盾しない。

そうすると地下数 km の処にある 残漿 (residual magma) から、この割れ目を通して熱をもったガスまたは蒸気、あるいは熱水が地表に向かって昇ってくることが考えられる。この際、当然のことであるが、もしその温度が374℃以上であれば、そのものは液体としては存在し得ない。しかしこの温度以下であれば、その部分の圧力 (formation pressure) に応じて液相あるいは気相のいずれかの形で存在する。

さてこの場合、岩漿からだけのガス・蒸気または熱水だけでは、とても大量の地熱発電用の蒸気を得るこ

とはむずかしい。しかし、外からの雨や河水、雪どけ水が長い時間かかって僅かのすき間を通して、先に述べた第1、第2の貯溜層内に浸透していることが考えられる。それは第1、第2の帽岩があるので、直接ま上から浸み込んだとは考えられない。むしろ遠い北の川、あるいは滝の上、あるいはもう少し近い処の河川などから浸み込んで地下で横向きに水がひろがったと考えられる。このことはテストボーリングをやった際に確められた。

すなわちテスト井の1本が掘られ、一旦勢よく噴気してから数カ月たって、噴気が年末にとまった。その後2〜3カ月の後再び噴気を得ることに成功した。このことは他のテスト井においても同じく経験された。これらの場合、表面からのめくら管の深さはそれぞれ200m、250mであった。そこでこの原因をしらべたところ、次のようなことがわかった。

それはある時期が来て（これは外部の雨季等よりある時間ずれて）、formationの中に冷たい水が次第には入ってくる。このさい、もしメクラ管が浅く、またグラウトが完全でなければ、孔（井戸）の中にどんどん水が入ってきて水位を満す。こうなると温度が低下して、表面では1気圧における沸とう点以下になり、ここで蒸気でなくなってう。それからさらにある時間がたち、水はまた増してくるが、温度の方もheat supplyがあるから、上昇してある時期に達すると、ここで再びboiling pointをこえるということになる。テストボーリングでの観測結果は全くこのようないことがらを反映していた。それで3本目のテストボーリングの際は、めくら管の深さを300mにした。その結果遂に半永久的な優勢な噴気を得たのである。一方、検層から比抵抗は浅い処では低い値を示し、550mより深い処では高抵抗を示した。これらのことを考慮に入れて、500〜550mの深さまでめくら管を入れることにした（後に述べるように、このことは非常な成功であった）。

以上からわかったように、第1貯溜層内の上半部においては、時間的に熱水の量および温度が変化している。しかもそれは年間の降雨期から数カ月おくれで必ず起こる現象である。そして深いところの割れ目からくるガス・蒸気および熱水は、帽岩になるような岩相のところでは余り浸透しないけれども、孔隙率の大きい浸透性の地層のところでは徐々に広がってゆき、そしてそれが1つの貯溜層をつくる。このことは、第1の貯溜層は熱水を考えてよいが、第2貯溜層の場合は熱水または蒸気と考えられる。この理由の説明の前に

地下の温度分布のことを考えてみよう。

一般に地下の温度分布は、その場処々々の岩石の溶ゆう点と断熱圧縮から考えられる温度との間にあるものとされている。しかし、これには非常に幅がある。また地震波速度分布の方からも、物性論的にこれを推算することはできる。このような考えはかなりの深さの問題に利用されているのが普通で、浅い処の地下温度分布の推定には、熱伝導という立場からはテストボーリングなどを利用して、その地下増温率とコアサンプルによる熱伝導による測定結果を使って、ボーリング抗底よりさらに深くの温度を推算している。

これは熱伝導だけによるわけであるが、今のようない地熱地帯においては、伝導よりもはるかに、割れ目を通じての物質による熱の移動と、それによって外部から浸透してきた水をあたためる方が大きな影響を持つものと思われる。

松川地熱地域においては、これらのことを考慮に入れて、テストボーリング（深さ500mまでの）の温度分布と、以前に松尾村でやった7本の浅い井戸の温度分布を利用して、この地域の地下の温度分布を計算してみた。その計算のやり方は次のようである。

地下の割れ目を通して地下深所から熱水または蒸気が上昇し、ある処でpermeableなformationに出合った処で、その中に滲透する場合のまず圧力分布を考えたと、それには次式が得られる。

$$r^2 \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{f \mu c}{\kappa} \frac{\partial p}{\partial t}$$

ここに p …時間 t における reservoir 内の一点の圧力

f …porosity

μ …viscosity

c …compressibility

κ …permeability

である。この式は熱伝導の式と同じ形であるから、その要領で解くことができる。

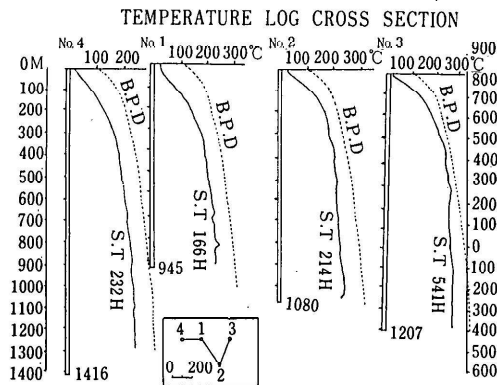
ここで圧力分布が得られた後で、formation内で熱水の温度がboiling pointにあるという仮定を設けると、一義的に地下の温度分布が得られるのである。

ここで先ほど述べた既知（テストボーリングの500m深さまでの）温度分布に合わせるように（平均的なpermeabilityを仮定して）して地下に374℃の臨界温度の出口（溜り）があって、そこから熱水蒸気またはガスが放出され、まわりの地層中に浸透させていると仮定すると、その深さは地上から約3kmの処になる。また、途中の温度分布から1,000m深さで300℃程度

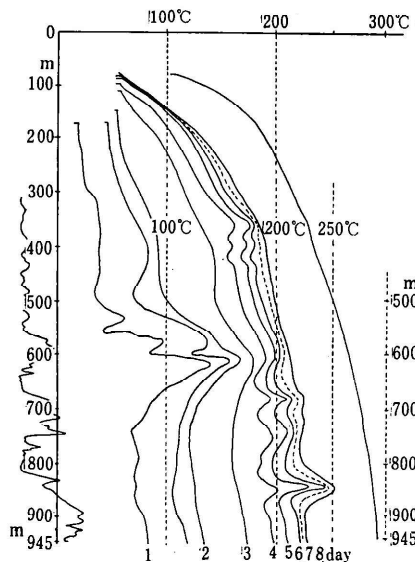
のものが考えられる。実際経済的に考えられる地熱発電の場合には、200数10度以上のものでなければならぬことや、上記地質・地球物理学的構造を考慮に入れて、1,300m程度の井戸を掘ることになった。またこのような値から、第2の貯溜層では熱水または蒸気と考えられる。

現在4本の井戸が掘られ、それぞれ優勢な蒸気を得られている。それらの温度分布を第12図に示した。これら4本の井戸で、井戸竣工直後（掘さく中の泥水をふつうの冷水におきかえる。従って最初は一旦低温度となる）から、日とともにいかに温度がその場処の本来の温度に近づいてくるかという様子を見ることが出来る（第13図）。

第12図



第13図



まず、計算結果から得られた温度とは非常に近く、

前者がごく僅か計算結果より低いようにみえる。しかしこれは、もしもっと日時をかければ、さらに僅かではあるが、温度が上昇し理論結果に近づくことが予想される。これからみても、ほとんどが熱は伝導ではなく、物質の移動によることがわかるであろう。

さらに具体的には、水をくみとり水位をその点における沸とう点に相当するまで低下させ、噴気させた後の温度関係についてしるしておく。それは実際噴気させて、たとえば第1号井のすぐ10mそばにテストボーリングBR-2があるが、その井戸で500mのところの温度が、開発第1号井噴気後もずっとはじめと同じく240°Cにあり、水位も40mのところにあることは大切な事実である。一方1号井の噴気蒸気の温度は坑口で約150°Cである。このことは孔井内のたとえば（1号井では940mの）割れ目から、井戸内へ熱水が蒸気となってフラッシュする際と、坑口で再度膨脹する際と、以上2段の断熱膨脹を考えることによって解決するのである。

すなわちこの場合、状態方程式は

$$PV^{\gamma} = \text{const}$$

$$TV^{\gamma-1} = \text{const}$$

$$T = 273^{\circ} + t \quad r = C_p / C_v \quad \text{であらわされる。}$$

ここに P は圧力、 V は体積、 C_p は等圧比熱、 C_v は等容比熱、 t は温度（摂氏）

今、いろいろと今回の情勢から $r = 1.3$ 、

圧力低下を第1段、第2段とも2割ずつと考えると、その度にそれぞれ約3割ずつの温度低下がある。

$$\text{従って } 300^{\circ} \times 0.7 \times 0.7 = 150^{\circ}$$

となり、上に述べた事柄は、2段の断熱膨脹によって解決がつくことになる。

ところで、最初は第2の帽岩は第1の場合ほど完全でないことはすでに述べた。そしていくらか permeable であることも述べた。しかしこれが大きな蒸気の通りみちになるほどとは考えなかった。

処が現実の結果は、この熔結凝灰岩中に小さなポケットのようなものがあり、下からの断層につながっていて、1つの強力な蒸気の供給口となっていることがわかった。

そしてむしろ第2の貯溜層と考えた山津田層の厚さは、はじめ考えたよりも少しくすくなっていることもわかった。

先ほど、断熱膨脹の場合の圧力低下を仮定したが、本当の formation pressure はまだ測られていない。現在ブルドン管を利用したクースターで、これが測定技術を確立すべく努力している現状である。

また、いくつかの割れ目のあった場合、石油の場合には生産の場合多層採油として簡単ではないが、地熱蒸気の場合、結果からみればおそらくそのような心配はなさそうである。しかしこれも今後の問題であり、また井戸間相互の干渉の問題や capacity 寿命の問題で、Reservoir Engineering の技術が確立されなければならない。

ここで現在、それでは一体どの位の熱量が、松川では地下から外へボーリングの井戸を通じて運び出されているのか当ててみよう。

それには各井戸から噴出している蒸気の量を用いるのがよい。

それは蒸気を水に換算して、時間当たり平均50ton($50 \times 10^6 \text{cm}^3$)とみることができる。運び出される熱量 Q は、今の場合次の式であらわされる。すなわち、

$$Q = C\rho V(T - T_0)$$

ここに C は比熱、 ρ は密度、 V は体積、 T_0 は外から雨または地下水としては入ってきた水の最初の温度、 T は噴出時の熱水の温度である。この温度を平均 150°C としてみると (井戸の半径を 15cm とみて)

$$\begin{aligned} Q &= 1 \times 1 \times \frac{50 \times 10^6}{3600} \times \frac{150}{\pi \times 15^2} \\ &= \frac{7.5 \times 10^9}{2.3 \times 10^6} = 3 \times 10^3 \text{cal/cm}^2/\text{sec} \text{ となる。} \end{aligned}$$

ふつうの場合では、熱伝導で地下から外へ逃げる熱流量は $1.5 \times 10^{-6} \text{cal/cm}^2/\text{sec}$ であるから、その 2×10^9 倍の熱量が流れていることになる。これは大へんな量である。ところで、他にこれを見積る方法はないものか。幸い松川の場合には井戸の仕上げ直後、泥水を清水に切りかえてから、井戸の中の温度がどのように回復してきたかを、先ほども述べたように、各井戸について度々温度測定をくり返して、回復の様子を知ることができる。

それぞれの井戸について変化があり、このこと自体は地下の構造状態を反映していて大切なことであるが、全体としてみる時、共通の重要な事柄がある。それはこの回復時間である。どの井戸も井戸完成後、たかだか2週間位のうちにかなりの温度になる。このことから、どの位の熱量が地下から外へ運ばれているかを推算できる。すなわち一般に地下から外へ運び出される熱流量を計算するのに、熱伝導の場合には $Q = k \frac{dT}{dz}$ なる関係を用いることは、よく知られているところである。ここに Q は熱流量、 $\frac{dT}{dz}$ は地下の増温率、そして k は熱伝導率をあらわしている。

今これと同じような考え方で、伝導の代りに外部へ

向って流体に乗って運ばれる熱束 (heat flux) を考える。すなわち伝導率の代りに effective conductivity を考えてみるのである。このことは考え方としては一向さしつかえない。つまり $Q = k' \frac{dT}{dz}$ と書くことができる。

さてこのような見方からすると、まずふつうの熱伝導だけであれば、 1km 位の距離をゆくのにおそらくオーダー的に見て10乃至100万年 (10^6 年) 以上はかかるであろう。

それを今の場合には、たかだか1年の25分の1位 (4×10^{-2} 年) で事柄をすませられるのであるから、その比つまりは effective conductivity は、ふつうの場合の 10^8 倍となる。一方地下の増温率は今の場合、各井戸の平均として、ふつうの10倍位に考えることができる (ふつうは 100m で 3°C 、今の場合には $1,000\text{m}$ で 300°C ゆえ)。

したがって結局、 $Q = k' \frac{dT}{dz}$ はふつうの熱伝導で地表から外へ持運ばれる熱量の $10^8 \times 10 = 10^9$ 倍となる。このことはオーダー的に前の値とよく合う。

さてこうやつてみると、全然異なる2つの方法で、松川ではふつうの場合の10億倍もの熱が、地表から外部へ運び出されていることになる。これは全く驚くべきことであるが、よく考えてみると、これは井戸という出口に非常にシャープに集中して、エネルギーを放出したからに他ならない。

ところで、こんな物すごい熱量を放出して蒸気が永つづきするであろうか。

それにはまず、地下の岩漿 (マグマ) 溜りの持つている熱量を考えてみよう。それは C 、 ρ 、 ΔT 、 v であらわすことができる。ここに C は比熱、 ρ は密度、 ΔT は岩漿溜りとその周辺との温度差、 v は体積である。今その温度差を小さくみて 100°C 、半径を 2km とすると、それは $1 \times 1 \times 100 \times \frac{4}{3} \pi \times (2 \times 10^5)^3 = 1.6 \times 10^{18}$ となる。一方、1本の井戸から毎時50tonの蒸気を噴出させているのであるから、毎秒1本の井戸から

$$\frac{7.5 \times 10^9}{3.6 \times 10^4} = 2 \times 10^5 \text{cal/sec}$$

の熱量を持ち出している。

従って4本では

$$\frac{1.6 \times 10^{18}}{8 \times 10^6} = 2 \times 10^{11} \text{sec}$$

1年は $86,400 \times 365 = 3 \times 10^7 \text{sec}$ であるから、 10^4 年つまり1万年はもつことになる。

ところでもしこれだけの熱量を持ち運ばなかったら、どうなるであろうか。

その際には、おそらくほとんどが伝導で、部分的には割れ目や岩石のすき間を通して、まわりの地層の温度をごく僅か高めることであろう。そしてマグマの寿命は、もちろん上にしるしたよりはずっと永い年月づくことであろう。

さて、ここで4号井のことについて少しふれておこう。

4号井は昭和40年11月、50ton/時程度の物すごい蒸気を噴出してスタートしたが、井戸のケーシング修理のため長時間かけて改修した。この修理の過程で、作業中に井戸の中から高熱の蒸気を噴出させないため、多量の冷水を圧入させた(10数万tonの程度)。この結果、井戸の中の状態に変化を生じ、回復には長時間を要したのであった。

松川の場合には、この程度で済んだからよかったようなものの、一般に今後のために多量の水を井戸に圧入することは、よくないことをししておく。

1つの最近の例をあげておこう。これはアメリカのデンバーにおこつた思いがけない事柄である。

1962年のことである。デンバー東北のロッキー山ふもとでは、地上で使った水のやり場に困って、地下にこれを捨てようということになり、3,700mばかりの深い井戸を掘った。そして同年3月、地下への圧入を開始したのである。同月中に注入した水の量はおよそ1万6,000tonであった。

ところが大へんなことが起った。それは水を入れはじめた翌月の4月になって、この井戸の周辺で地震が起りはじめたのである。はじめは大した地震ではなかったもので、翌月も引きつづき少し大量の水を、さらにその後も平均月2万ton程度の水を入れた。その量に応じて地震は続発したのである。ついに、たまりかねて翌1963年9月末で水の注入を一応打切った。果せるかな、翌月から地震の量は目立って減った。しかし、廃水の処置に困り翌年1964年9月半ばから再び注水を開始したところ、待っていたかのようにまたまた地震が始まった。廃水処理は一廃翌1965年の9月末で終わった。申し合せたかの如く、地震は翌月の11月はじめからピタッと止ったのである。

この地域では、1882年以来80年間も地震のなかったところだけに、驚きも大きかった。この間に注入した水の総量も60万ton近くに及ぶが、地震の総数も700回にもなり、有感地震は75回に及んだ。そして大きさの方は被害を起す程度のものではなかったが、よく使われるリヒターのスケールでマグニチュードは最大4.3であった。アメリカの地質調査所はコロラド鉱山

専門学校、コロラド大学と協力してこの研究に当たった。

大まかな震源分布は井戸から半径10kmの距離にまでひろがっている。また深さの方は10kmから20kmにも及ぶものもあるが、いくつかの地震計からの計算では、井戸の下10kmのところに断層らしいものが考えられ、この度の地震の主なものはこの断層面を活動させたことに起因しているであろうと説いている。すなわち、従来重力と弾性とがつり合っていたこの地域で、水を入れたために断層面の圧力を解散したというのである。

話は以上の如くであるが、坑井内に多くの水を圧入することによって、予期せざる地層内の状態の変化をひきおこす可能性があることは、よく心がけておかなければならないことである。われわれの場合には、一般にいつて蒸気の通路やひいては場合によっては貯溜層自身の構造・状態等にも、影響のおこることは考えておかなければならない。

松川地熱地帯の物理探査としては、以上の他、主として東化工で磁気探査を実施した。これの結果は興味あるものであり、別の機会に述べられることと思う。また将来の開発のため、さらに電気探査・地震探査も必要であろう。

なお、この松川地熱開発の成功の裏には、実に関係者の並々ならぬ努力・協力のあったことを特記しておきたい。

なお、松川の成功を機会に、先般おそれ多くも皇太子殿下に御進講の榮に接した。その模様をここにしるすこととした。

皇太子殿下には、最近次第に大きく取上げられるようになってきた地熱発電に強い関心を示され、それについて浜尾東宮侍従と科学技術庁・新技術開発事業団代表者等の間で打合せがなされ、この問題について御進講申上げることが決った。

筆者等は、選ばれてこの光榮に浴することになった。

時は2月3日の午前、処は東宮御所においてであった。当日は午前10時すこし前に御所に参上し、御進講のお部屋に案内された。

間もなく殿下がお出でになり、まず井上科学技術庁事務次官から殿下に筆者等を紹介された。少し長細いテーブルを囲んで、殿下の両側には鈴木東宮大夫・戸田東宮侍従長・浜尾東宮侍従、そして側面に井上科学技術庁事務次官・梶井科学技術庁長官官房秘書課長、

殿下に面する側に、鈴江新技術開発事業団理事長をばさんで、富岡東化工KK社長と筆者が両側に着席した。

はじめに鈴江理事長が事業団の内容を簡単に御説明申上げ、つづいて筆者から地熱に関し次のように御進講申上げた。

まずはじめに、地殻の下のマントル上部では、岩石がその熔点以上の温度になるところがあり、それがいわゆる本源マグマで、この生成後、いろいろの理由で、それは弱線にそつて上昇し、なある条件のもとで地表近くに溜るところができる。これをマグマ溜りといい、これが地上に噴出すれば火山爆発となる。そしてある程度温度が下つたところで、この龍大な熱容量をもつマグマ溜りからガスまたは蒸気が、外部から地下に浸透した水を熱し、蒸気または熱水をつくる。この場合臨界温度 374℃ 以上では H_2O は液体ではあり得ず、ガスまたは過熱蒸気のようなものであるが、この温度以下では圧力次第で蒸気あるいは熱水となり得、このような地域にボーリングすることによって減圧されて蒸気ができ、その蒸気によってタービンを回転し発電する。このような地熱地帯の地下構造をしらべるために、地質学・地球物理学・地球化学の方法が用いられる。地下に蒸気あるいは熱水をためるには帽岩が大きな役割をする。また地下からつづいた割れ目が通路として大切である。イタリー・ニュージーランド・アイスランド・アメリカ・ソ連や中南米の地熱発電とその研究のありさま、さらに日本の北海道・松川・八幡平・鬼首・那須・大岳等の現状。そして現在、日本では温泉地帯は地熱発電には使えない。さらに地熱の研究については工技院時代から、そして現在やっている研究機関としては工技院地質調査所・大学・九州電力等の発電会社や電源開発あるいは発電を利用する会社がある。地熱に関する国際連合の活動や、国内ではこの地熱調査会があり、多数の会員がいて活躍していること。おしまいに今回成功を見た松川の地熱開発についての東化工KKと地質調査所との共同研究の内容、とくに地下構造と状態について地質および地震探査・電気探査による地下断面図を、岩石のサンプルとともに御覧いただいた。またそれとの関連でニュージー

ランドワイラケイの地下構造をサンプルとともに御説明申上げた。

筆者のあと、富岡社長から今回の作業についてはじめの頃からの苦心談を逐一申上げた。

引きつづきボーリング作業から発電機、送電、等の地上設備に至る事情がこまかく撮影された有名な16ミリ映画「地熱発電」（企画東化工KK中村進部長、撮影東映の齊藤監督）を上映し、御覧いただいたのである（この前半は筆者が一昨年暮の国際火山学会の際ニュージーランドで、またその前ニューヨークの国連本部でも上映したむね申上げた）。

殿下には終始非常に御熱心にお見受けした。

以上のあと、お茶をいただきながら殿下からいろいろの御下問があり、それにおこたえした。たとえばまず、松川の工事で事故はなかったか、日本の温泉を地熱のエネルギーに換算するとどの位か、1つの地熱地帯の規模と寿命（自然の場合と発電の場合）、日本および世界でのこれから後何年かの地熱発電の発展の予想（見越し）と発電キロワット数、臨界温度前後のマグマの中の状態、スケールやふしよくの対策、それによる坑井の寿命、地熱発電の単価、地熱発電の場合の発電機は水力や火力発電あるいは原子力発電に比べて難しいのか、日本とニュージーランドの地熱地帯の構造のちがい、蒸気と熱水の分離、そして最後に事業団での成否の判別方法と基準、それに関しての松川の場合のこと、活火山で地熱発電ができるかどうか、などである。

当日は非公式のスケジュールでもあり、殿下には御機嫌うるわしく拝され、ここにしるしたように御活発に数々のことをおたづねになられ、それに筆者等はおこたえ申上げたが、非常に御熱心に科学を愛されている御姿をまのあたりに拝して感激した。

御予定の時間を30分も超過して12時半にこの御進講を終り、東宮御所を退出した。

（御進講には資料として「(1)地熱発電の趨勢 (2)岩手県松川の地熱発電」を献上した。これらの作成について、また打合せについて、科学技術庁、新技術開発事業団、東化工株式会社および地質調査所の関係者に御礼申上げたい）。