

秋田県八幡平地熱地域における熱水注入井に関する調査結果

馬場 健三* 高木慎一郎* 田中 信一*

Measurement on Injecting Well for Wasting Hot Water in the Hachimantai Geothermal Area, Northeast of Honshu

By

Kenzo BABA, Shin'ichirō TAKAKI and Shin'ichi TANAKA

Abstract

In the Hachimantai geothermal area, Northeast of Honshu, the production wells (03RA and 03RB) of geothermal steam are discharging the mixture of steam and water. The separated hot water of 140 tons per hour is wasted into the underground of the area through a well (01R). The writers studied on the injecting well to know, 1) where the wasted water is flowing into strata in the well, 2) when the disposal by present constant flow-rate becomes impossible without pressurizing at the well-head being done at the present time, and 3) how much more injection-rate can be increased to continue disposal for a fairly long period after the present time.

The disposal of hot water by injecting into a well had been already started on last July and the well measurement by the writers was carried out on last October. The temperature and pressure distribution at the steady flow-rate were measured, and the bottom-hole pressure changing phenomena by interrupting injection were observed to study the problems mentioned above. EVERDINGEN's theory (1968) for the well disposal was applied to interpret the observed data.

It is concluded that wasting hot water is flowing into strata at the depth of about 830 m in the well. When the present flow-rate is kept constantly, the water will overflow from the well-head after elapsing about 8,500 days since the time of beginning injection. But if the flow-rate is increased to 140~150% of the present rate, the time when the overflow happens, will become in very near future since the beginning. In such case, pressurizing at the well-head to continue disposal through the well will be necessary within about 8~70 days.

要 約

標題地域の天然蒸気井からえられる廃熱水の同地域における地下還元が注入用の坑井により行なわれている。

注入された熱水が地下で一定の厚さで無限にひろがる流体貯留層中には行って行くものと仮定し坑井の注入能力を調べる試みがなされた。注入を続けるに従い貯留層の圧力の増加が起こると考えられる。従って注入能力を知るにはこの圧力の増加（貯留層が坑井に出合っている所での）のようすが予測できればよい。

注水中の坑井内の温度分布の測定、一定量の注水が続けられているこの坑井への注水をとめることによって起

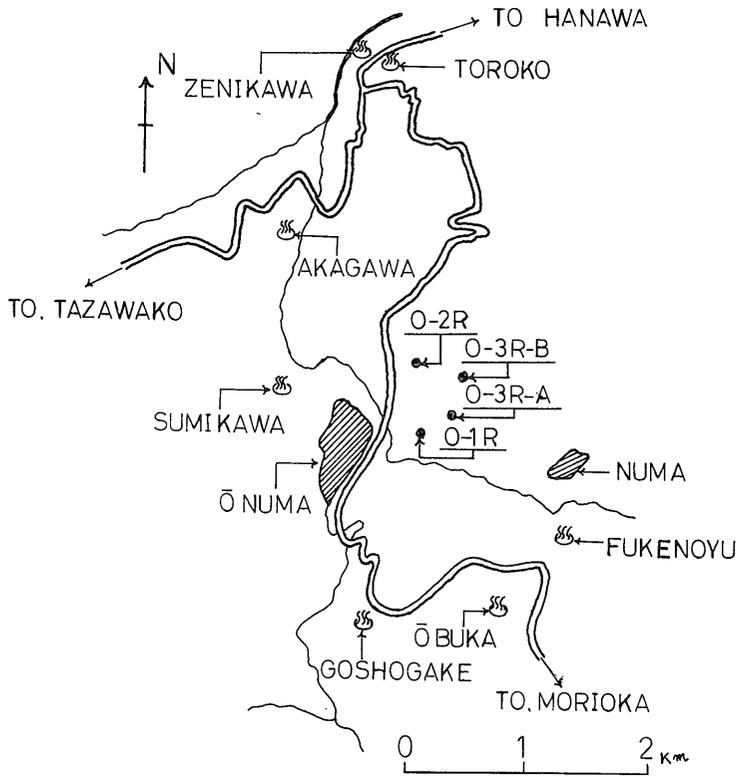
こる坑底圧の変化の観測などが上記目的のためなされた。

注水されている熱水の温度は坑井中の地層の温度を下まわるものであるので、注水中の温度分布から熱水がはいっている貯留層の位置を推定することができる。その結果坑底近くの830 m深度付近にその貯留層の位置の推定がなされた。

次に坑底圧変化の観測より貯留層の透水性を決め、現在の注入割合(140 T/H)がつけられた場合およびその注入割合が多い場合(50%増まで)の坑底圧の変化の予測をした。その結果は第7図に示されてある。

また本測定時にはすでに113日にわたって一定量の注水がつけられていたのであるが、その後注入の割合を

* 物理探査部



第1図 調査位置説明図

増加させたら貯留層の坑底圧がどのように増すかの予測がなされた。

1. はじめに

秋田県八幡平の北側に多くの地熱地域が分布する。その概略の位置は東経140°45′、北緯40°である。蒸の湯・後生掛・赤川などの温泉がある(第1図)。大沼の東側において、地下に地熱流体貯留層の存在を期待し坑井掘さくがなされ、すでに2本の天然蒸気の生産井がえられている注1)。坑井からは蒸気・熱水の混合物がえられている。当地域における開発目的は地熱発電である。坑井から蒸気・熱水の混合物がえられる場合、熱水を分離し蒸気のみが発電に利用される。分離熱水が多くえられる地熱発電所ではそれぞれにおいてその処理方法が工夫されている。考えられる処理方法としてその地域の地下に坑井により注入還元する方法がある。この方法は地表環境の変化を最小限にとどめる点で望ましい方法といえよう。

廃熱水の注入を続けて行くためには坑井への注入能力に関する知識をえておくことが重要である。廃熱水のこ

のような処理方法は今後各地で行なわれるうすせいにあるが、一方地熱地域におけるこのような注入井の能力に関する調査はあまり行なわれた例がない。そこで筆者らはすでに注入廃棄が行なわれつつあるこの地域の坑井に着目し一つの試みとして報告するような調査を行なった。

第1図中のO-3RAおよびO-3RBと名づけられた坑井から現在(1971~72年)合計140 T/H注2)の一定の割合で分離熱水がえられる。これがO-1Rに注入されている。ここでわれわれの設定した問題は次の通りである。現在140 T/Hの割合で口元より圧入することなく注入が行なわれている。そして現在のところあふれることなく注入が進んでいる。

(1)熱水はO-1Rのどの深度から地層中はいって行くか。

(2)注入を開始してからどれ位時間を経過したら口元であふれるか、換言すれば圧入が必要な状態となるか。

(3)現在の注入割合140 T/Hを増加したらどうか。などである。

注1) 三菱金属鉱業KKによる。

注2) トン/時間。

O-1R への注水は本坑井の所有者（三菱金属鉱業KK）により、われわれの現地調査時においてすでに 100 日余続けられており、今回のわれわれのテストは同社の協力をえてはじめて可能となったものである。ことに同社与良三男地熱開発室長をはじめとする関係各位の御好意に厚く御礼申し上げる。またわれわれの仕事に対し議論して下さい元当所主任研究官中村久由氏^{注3)} および草稿に目を通し不十分な点を指摘下さった当所陶山淳治氏に厚く御礼申し上げる。

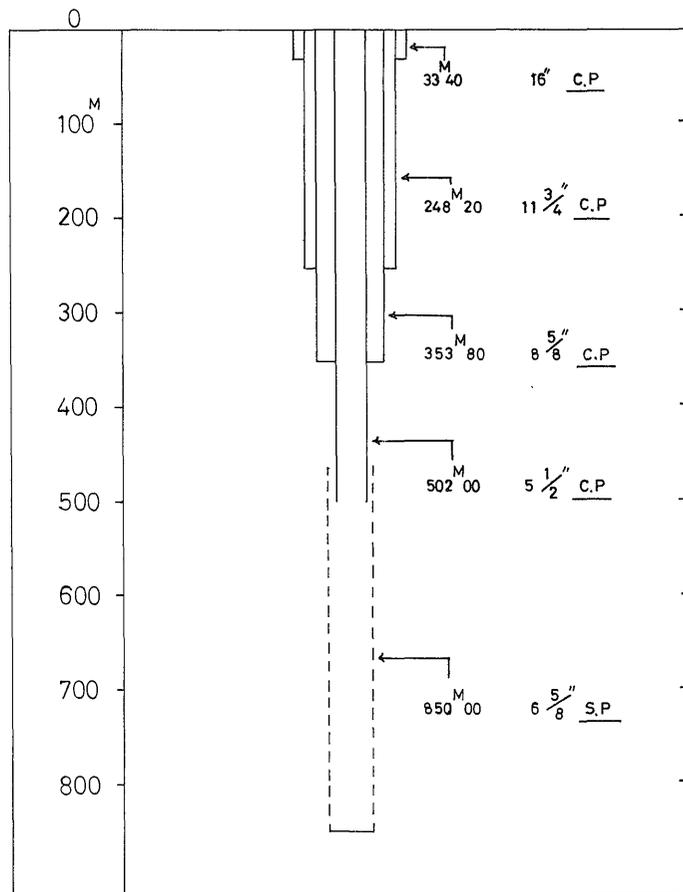
なお本調査は昭和46年度当所経常研究（地熱の研究）の一環として行なわれたものである。

2. 坑井の概要

注3) 現日本重化学工業 KK.

合計 140 T/H の割合の熱水を蒸気を伴って噴出する 2 つの坑井 O-3RA および O-3RB の深度はそれぞれ 1,484 m および 1,245 m である。一方注入井とされた O-1R のそれは 846 m である。坑井内のケーシングによる水止め深度は前 2 者は約 550 m 深度までであり、O-1R については 502 m である。O-1R の坑井内仕上げ概要を第 2 図に示す。

この地域の各坑井から噴出される熱水・蒸気の坑井内噴出箇所については直接たしかめられてはいないが、掘さく時のけん著な逸泥箇所がおそらくそれらを示しているものと考えられている。そして熱水の注入の場合もそのような箇所が地層中への流入箇所と推定される。注入井とした O-1R 井の掘さく時のけん著な逸泥箇所は深度



第 2 図 調査井 (O-1R) の坑井内仕上げ図

684m^{注4)}と830m付近の2箇所である。従ってあらかじめ予想される注入時の坑井内の熱水流入箇所は上記2箇所かあるいはそのうちの1箇所である。

注入は1971年7月7日より平均140 T/Hの割合で定常的に行なわれてきている^{注5)}。本調査の行なわれた同年10月末現在まで水は口元での圧入の必要はなかった。

3. 注入井に関する理論と調査方法

わずかに縮む流体が等温で均質等方多孔質媒質中を流動する場合、その層状媒質を貫く坑井の坑底圧と流量などの関係については、EVERDINGEN and HURST (1949) によって取扱われその理論は今日まで有用に利用されている。EVERDINGEN (1968) はまた先の結果を廃水の坑

井中への注入問題に応用し、地層中の流体および注入する流体などの物理的性質について十分な知識があれば地層中の流体の圧力とその変化について正確な予測ができることを示した。今回の調査結果の解釈は以上の理論に基づいて行なった。

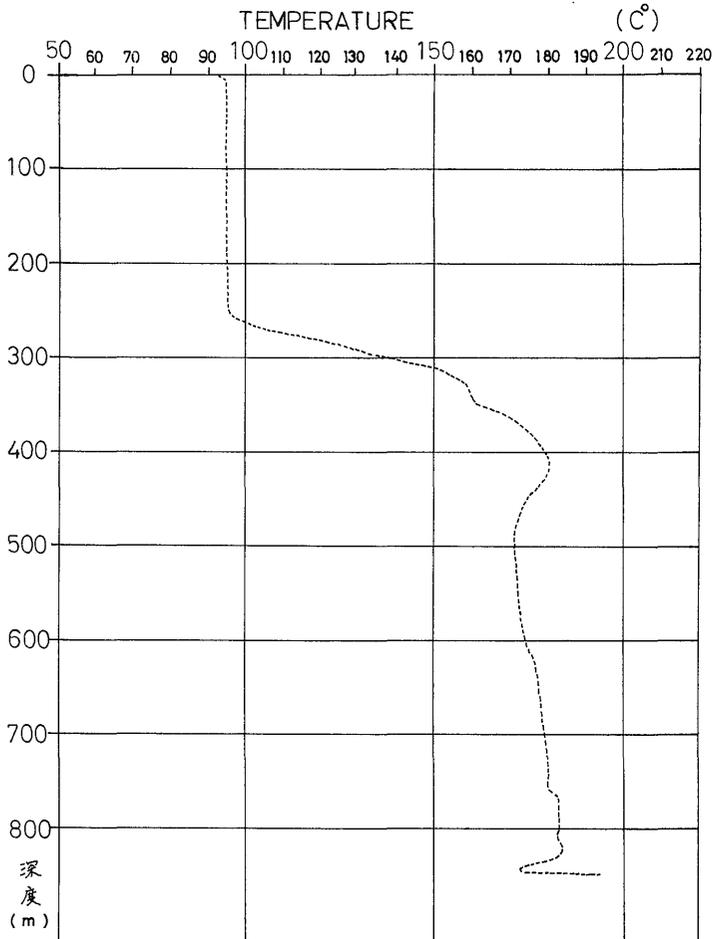
上記理論によれば、一定の厚さ h の無限にひろがる等方均質の多孔質媒質によってなる流体貯留層の滲透率を k 、孔隙率を ϕ とし、その層を垂直に貫く坑井を考え、それより層中に一定の割合 Q で流体を注入した場合の坑井中の圧力 P と注入経過時間 t との関係は次の (3-1) 式で表わされる。ただしここでは問題が2次元の放射状流のみが考えられている。

$$P \doteq P_s - \frac{\mu Q}{4\pi kh} \left[\ln \frac{\phi C \mu r_0^2}{4kt} + \gamma \right] \quad (3-1) \quad \text{注6)}$$

注4) ただしこの深度の逸泥量はそれほどけん著ではなかった。

注5) 注水開始時の坑井内水位などの記録はない。

注6) 他坑井の噴出の影響は考慮しないとする。



第3図 調査井の掘さく後の温度測定結果の一例
(掘さく完了後泥水循環停止259時間後の測定)

この近似式は $\frac{\phi C_{\mu} r_w^2}{4kt} < 0.01$ を満たす t について実用上有用のものである。(3-1)式中 P_0 は初期に地層中に一様に分布した流体の圧力であり、 μ は流体の粘性係数、 r_w は坑井の半径、 γ は Euler の常数 (=0.577...), C は流体の圧縮率をそれぞれ表わす。

この式からわかるように、注入を続ければ貯留層の圧力は時間とともに増大する。坑口から注水しているのであるから、貯留層の深度位置では熱水は坑井内の水柱の重さだけ加圧された状態で地層中にはいって行くことになる。そして貯留層の圧力が坑井内で上昇を続け、ついに坑井内の水柱でえられる圧力をこえるようになると、口元で加圧しないと注入を続けることができなくなる。本坑井について(3-1)式の P を t の関数としてえられれば先に設定したわれわれの問題の解がえられる。結局われわれの問題 2), 3) は本坑井に関する(3-1)式を得ることである。

$t=0$ より T まで Q なる割合で注入が行なわれ、その後

注入が一たん停止されたとする。注入停止後の経過時間 θ と坑底圧 P との関係は次の(3-2)式で与えられる。

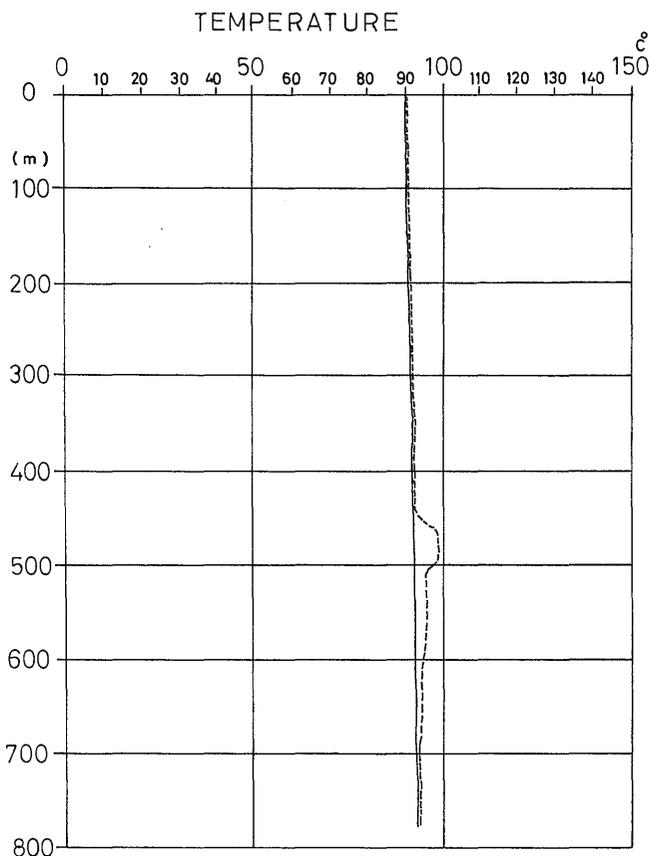
$$P \doteq P_0 + \frac{\mu Q}{4\pi kh} \ln \frac{T + \theta}{\theta} \quad (3-2)$$

この近似式の有用な範囲は先の不等式の t を θ と置き換えたものである。

(3-2)式は坑底圧の下降現象を示し、比較的短時間内の $P-\theta$ 関係を観測することにより、 P_0 および $\frac{\mu Q}{4\pi kh}$ の値を実験的にきめることができる。(3-1)式に以上できめられる値を用いれば注水による圧力変化を知ることができ、先にのべたわれわれの目的 2), 3) に役立つ。

実際には約 113 日間の注入がなされた後それを停止し、坑底圧の下降現象を測り有用な結果をうることができた。

次に先の目的の(1)である注入水の地層中への浸入箇所を検出については今回は注入中の温度分布を測定することによって間接的方法ではあるがその目的を果すことができた。筆者の一人(馬場・松尾, 1970) は先に松川 4



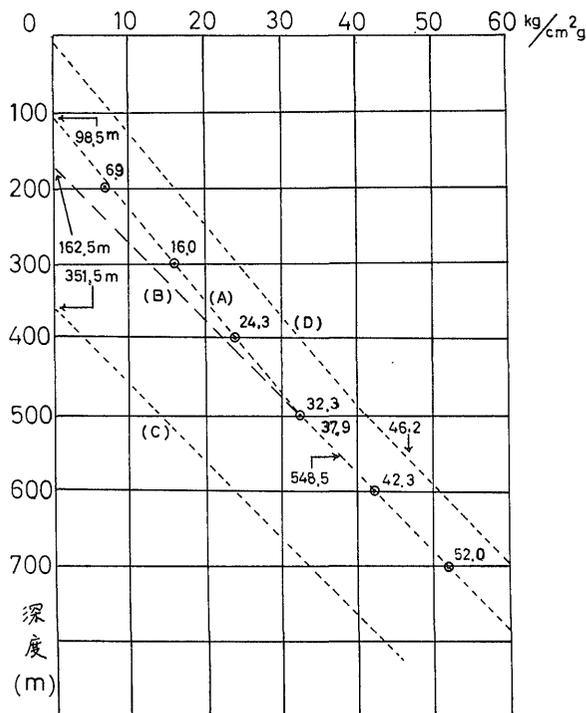
第4図 注水中の温度測定結果

号井につき注水中の温度分布を測定することにより逸水箇所が検知できる例を示したが今回も同じ考え方によった。本坑井においては少なくとも400 m以深であれば170～190℃程度の高温であることは掘削後の温度検層結果よりあきらかである(第3図参照)。そして注入する熱水の温度は口元で92℃であるので、もし673 m付近から逸水していればそれ以深では急げきに高温となっているものと予想される。

4. 調査結果とその解釈

第4図に注水中の温度分布の測定結果を示した。測定深度は780 mまでであった。この深度で障害物があったので、これ以深の測定を残念ながら断念したものである。測定は計器降下中と上昇中両方とも行なわれた。上昇に転じた後注水を若干少なくしさらには一たん停止し、計器を上昇させながら測定を行なった。注水停止により温度が上昇するさまが認められる。455 mまで計器を上げた時ふたたび注水を開始した。その結果それより上では下降時と同じ温度分布が再現された。

以上の結果注水中の温度分布は780 mまでほぼ一定で



この図の深度は坑口より6.5 m上を基準としてある。従って坑口からの深度は表示より6.5 m差引きが必要。図中の各深度の数字はその補正がなされた坑口からの深度となっている。

第5図 注水中の静圧測定結果

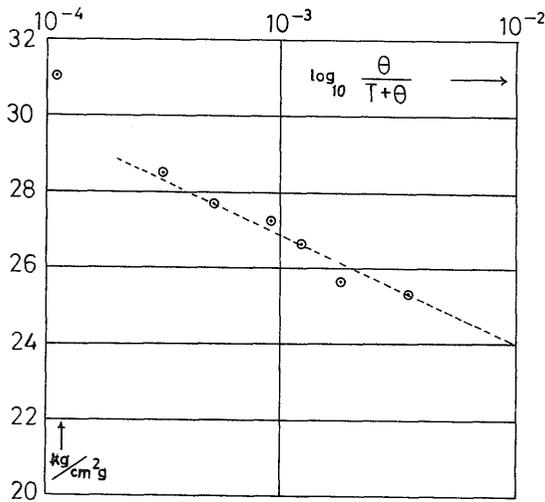
あり、注水をとめるとただちにその温度が上昇することが確かめられた。結局注入されている水は780 m以深にすべてはいり期待された684 m付近での逸水は起こってなく、おそらく830 m付近の逸泥のおきたところで逸水しているものと判断できる。

第5図は注水中の圧力分布の測定結果を示した。図の(A)がその測定結果である。200 mから各100 mごとの流水中の静圧が測定されたものである。この結果からえられる200～500 mにおける各100 mごとの圧力差より、水柱の密度は0.80～0.91 g/cm³となり、500～700 mにおいては0.97～1.00 g/cm³となる。一方純粋の水の90℃の飽和状態の密度は0.965 g/cm³であり、一般に温泉水の密度は純粋の水のそれより概して大きいと考えられる(湯原・瀬野, 1969)ので、500 m以深の上記値は妥当なところであろう。500 m以浅ではおそらく注入している水が乱流状態にあることからこのような値がえられるのであろうと判断される。(A)線の圧力がゼロになる深度98.5 m注⁷⁾が測定時の水位面と考えることができる。乱流状態がなければ(A)の深いところの勾配をのばした(B)のような分布となり、162.5 mが水位面となる。後に説明する理由によって、注入開始時の坑井内圧力分布は、温度分布を測定時の90～92℃と同一とすれば、(C)で示されるようなところにあったと考えられる。注水開始(1971年7月7日)とともに水位面上昇のはじまり(A)の測定時(1971年10月27日)にはこのように上昇した訳である。注水中の圧力分布の勾配が図示のように500 mにて変わるような分布が今後も存在するとすると、(D)のような状態になった時、注入をさらに続けるためには口元での圧入が必要になる。坑井内圧力で示せば、例えば図中の矢印の548.5 m深度にて、今回の測定時点にて37.9 kg/cm²であったものが46.2 kg/cm²に増加した時圧入が必要な状態になる。

先の(3-2)式に従って、注水を一たん止めた後の坑底圧の回復現象を測定した結果が第6図に示されてある。これは注水を開始して113日経過後(T=113日)これを止め、548.5 m深度注⁸⁾の坑底圧変化を測ったものである。縦軸は圧力、横軸は $\frac{\theta}{T+\theta}$ の対数スケールを示す。(3-2)式によればこれが直線を表わすことが期待される。そしてこの図の直線をさらに右にのばし $\theta = \infty$, すなわち $\log \frac{\theta}{T+\theta} = 1.0$ におけるこの直線の交点の圧

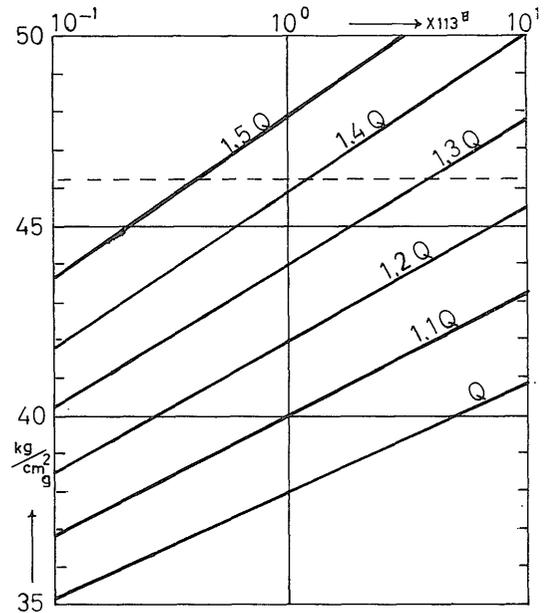
注7) 第5図の深度は地表より+6.5 mを0 mと表示してあるので地表面からの実際深度は表示値より6.5 mさし引く。

注8) 830 mにおいて測定するのが最も望ましいが障害物があったのでこの深度における測定を行なった。



第6図 注水を停止した時の548.5m深度の坑底圧変化力の値は $18.3 \text{ kg/cm}^2\text{g}$ となる。これが貯留層中の流体が一樣にもととの圧力にもどった時の548.5m深度における圧力を意味する。第5図の(C)はこの結果にもとづきえがたいものである。今回の調査で注水が780m以深には行って行きおそらく830m付近が貯留層の位置であるのでこの貯留層中の流体圧力は 18.3 kg/cm^2 に548.5mと823m区間の水柱の重さを加えたものであることを意味する。そしてこの直線の勾配は830m付近に予想する単一の貯留層の透水についての性質を表わす。すなわち(3-2)式の右辺第2項の係数を表わす。(3-1)式を参照すれば以上できめられる P_0 と係数および $t = 113$ 日の P の値がわかったのであるから $P-t$ の関係が明らかになる。ただしここでは噴出している他の2井の影響はないものとする。実際これら2井は深度が深く噴出物は注入井坑底より深い層からのものが卓越していると考えられているのでこの仮定はまずさしつかえない。

以上により、注水による坑底圧の上昇がおこるもようを548.5mの深度における圧力にて表わし、それがどのように推移するかを(3-1)式により予測した結果が第7図の通りで、注入量の割合をパラメータとして示してある。縦軸に圧力値、横軸に113日を単位とした時間を対数スケールで示し、パラメータの単位として $Q=140 \text{ T/H}$ をえらびこれが $1.0 Q \sim 1.5 Q$ の場合を示した。なお点線は $46.2 \text{ kg/cm}^2\text{g}$ の線で圧力値がこれを越すと注入をさらに続けるためには口元圧入が必要となる。図の $1.0 Q$ の場合は 113×10^1 日を経過しても点線よりまだ下にあり注入可能を示す。点線との交点はこの場合約 $7.5 \times 10^1 \times 113$ 日である。そして例えば当初から $1.3 Q$ の割合で注入を行なったとすると、先とくらべればきわめて



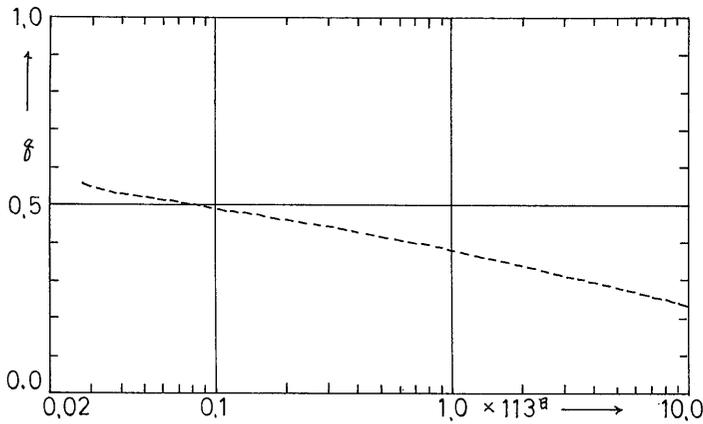
第7図 同深度の坑底圧の変化の予測を示す図

速く約 4.0×113 日にて口元圧入が必要となる。第7図はこの坑井の注入井としての能力を見るに好都合のものである。第7図から明らかなように現在の注入割合はこの坑井のいわば注入能力をギリギリに使っているといえよう。割合を増加させると口元にあふれるまでの時間が急速に短縮されることは先の $1.3 Q$ にした場合の例にもあきらかである。

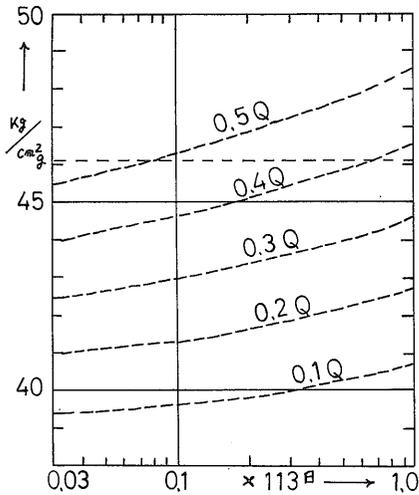
次に113日間 140 T/H の割合で注水を続けたこの坑井について、今後注水割合を増加した場合どのような予測を以上の結果から行なってみる。注水開始よりある時間経過した後、従来の注水割合 Q に対し q だけ増加して注水を続けた場合の P の経過時間 t についての P の近似式は(3-1)式を重ね合わせ次の(4-1)式のようにえられる。

$$P \approx P_0 - \frac{\mu Q}{4\pi kh} \left[\ln \frac{\phi C \mu r_w^2}{4kt} + \gamma \right] - \frac{\mu q}{4\pi kh} \left[\ln \frac{\phi C \mu r_w^2}{4k\theta} + \gamma \right] \quad (4-1)$$

近似式の成立する範囲は t, θ について先の例のように充分大きなところである。ただし $t > \theta$ であり、 t は注入開始後の時間、 θ は当初注入割合 Q であったものを、 $(Q+q)$ すなわち q だけ注入割合を増加してからの経過時間である。上式に基づいて作った図が第8図と第9図である。第8図は113日間 140 T/H の割合で注水されたこの坑井が、もし今後注入割合を増加させて注水続けたらいつ口元にあふれるだろうかを示したもので、縦



第8図 調査井の今度調査後の口元圧入が必要となる時期と注入増量の関係



第9図 調査井の548.5m深度の坑底圧の今後の変化と注入増量との関係を示す図

軸にその増加分を Q を単位として示し、横軸には113日後どれだけ経過したら口元であふれるかの時間を113日を単位とし対数スケールで示した。例えば、 $q = 0.5$ すなわち70 T/H だけ今後増加して注入すれば、 0.07×113 日 = 8日後に口元であふれてくるという関係になる。

同様な関係が第9図にある。これは測定を行なった深度548.5mの圧力でその関係が表示しており、横軸に θ をとり各曲線のパラメータを q の値にとり、そして縦軸にその深度の圧力値をとってある。点線すなわち46.2 kg/cm²より上側に曲線がくると先述の口元であふれることがおきるわけである。例えば増し分を40%とすると 0.62×113 日 = 70日後にそれが起こる。第8図からわかるように曲線の勾配はきわめてなだらかで増し分の多少は時間に大きく効いてくる。

5. まとめ

先に序にのべた各問題につき次のような結論がえられた。

- (1) 注入している熱水は830 m深度付近より地層中にはいっている。
- (2) 本文でのべた仮定をとれば、現在の注水割合を続けて行けば約 75×113 日 = 8475日経過して口元にあふれるということになる。この時間は注水量を増加させると急速に短縮され、もし30%増しの量が注入されていたとすると約450日となる。その詳細は第7図の通りである。
- (3) 注水割合を現在より増加させると口元にあふれるまでの時間がきわめて早くくることは上の結果より容易に予想される。113日間注水されたこの坑井にその後40~50%増の注水を行なったとすると、8~70日で口元にあふれるようになると予想される。その詳細は第8, 9図の通りである。

文 献

- A. F. V. EVERDINGEN and W. HURST (1949): The application of the Laplace transformation to flow problems in reservoirs. *AIME Engineers Petroleum Trans.*, v. 186, p. 305.
- A. F. V. EVERDINGEN (1968): *Fluid mechanics of deep-well disposals*. AAPG. Memoir 10, Subsurface disposal in geologic basins-A study of reservoir strata, p. 32~42.
- 馬場・松尾 (1970): 松川4号井の坑井内調査. 地熱, no. 24, p. 29.
- 湯原・瀬野 (1969): 温泉学. 地人書館, 151 p.