注水に依る温泉の若返りと赤湯温泉 の実例に就いて

室 井 渡* 安 斉 徹**

Water Pouring Method of Hot Spring, and its Practical Test at Akayu-machi, Yamagata Prefecture

BY

Wataru MUROI & Toru ANZAI

(Abstract)

Because of the continuous pumping, the declining phenomena of the water-level of hot springs had been occurred in several places. So the writers had, for long years tried how to prevent the springs from the exhaustion.

But it had much difficulty to resolve this problem completely on geological, hydrological point of an underground thermal water.

In this paper, they describe chiefly the method and theory of pouring water to the underground thermal zone by deep bore-hole. At first, they show the method how to resolve geologically and hydrologically the circle of influence on boreholes drilled at many places of the hot spring region. And at second, they describe mainly the practical test of the method which pour water into the underground thermal zone by two wells at Akayu-machi.

緒 言

温泉地帯において地下に包蔵される地下エネルギーの量は極めて大きく 普通の温泉地帯でもこれを電力に換算すると数万～十数万kWに達する事は容易に算出することができる。このように莫大なエネルギーを有する温泉地帯でも湯量を過剰に汲上げを行えば水位は次第に降下して行き、あるいは海水地下水等を混入させて温度を低下し泉質を変化させる現象は最近温泉地帯の濫掘と共に各地に見られる事柄であるが(第1図参照)これと全く逆に溪谷や河川に沿って湧出している温泉が降雨によつて河水位が増すと湧湯量ならびに温度を増して行き、あるいは温泉地の近くの河川に堰堤を設けて水位を高め泉源を保護している実例もまたしばしば見られる実例である(第2図参照)。

第1図 鬼怒川に於ける過剰汲上と水位降下の例

* 東京地質研究所長

** 厚生省温泉協議会委員

A'B'C' 元の湧出面積
A, B, C ダムに依る新湧出面積

第2図 ダム設置により温泉の増量

また温泉を成因的に考えると地下深部より上昇する初生水と、地表よりの滲透水が地熱に温められ乍ら地下深部に滲流したものとが相混和して温泉となり、地層の空隙や裂隙線に沿つて再び上昇するものもあるから、温泉の管理とは地熱と地下水の管理と言つても過言では無いと信じる。筆者等はこれ等の点から考え適当な方法によつて温泉地の地下に注水すれば減衰しつつある温泉の量を増加し得るものと考へ年来研究を行つて来たがここに述べるような温泉若返りの理論を確立するに至つたのでその大要と、山形県赤湯温泉の注水の実施の概況を紹介し大方の叱正を仰ぐ所存である。

1. 温泉と地下水の交渉

今第3図のごとく温泉地帯で河川または入江の幅員を B 、水深を H とし基部の岩石は相當に透水性で

第3図 温泉へ河水の混合

あるとすると、この河川または入河から地下に滲透する水量を q_f とすると、これの水量は田中治雄等の研究によれば次式で表される。

$$q_f = K (B \pm 2H) \times L \dots \dots \dots (1)$$

ただし K = 滲透係数 (m/s)

L = 滲透する川の長さ (m)

このように地下に侵入する河川の滲透水は次第に地下深部に流下していわゆる楕状地下滲透区域 ($ABEC$) を作るが、これは河川の幅、水深はもちろん地盤の透水性あるいは破碎程度等によりその形を变化する。また穿井 (W) が水位を h_w だけ下げて水量 q を汲上げて居るとすると P. Brinkhaus にしたがえば汲上量、水位降下、透水性等の中には次の関係がある。

$$h_w = \left(\frac{q}{2\pi K L} \right)^m \frac{1}{m-1} \cdot \frac{1}{\gamma^{m-1}} \dots \dots \dots (2)$$

ただし K = 帯湯層の滲透係数 (m/s)

γ = 穿井の半径 (m)

l = ストレーナーの長さ (m)

m = 地下滲透に関する常数で $1 \sim 2$

$v = K(I)^n$ とすると $m = 1/n$

q = 汲上量 (m^3/s)

h_w = 水位降下 (m)

すなわち半径 γ は施設により決り、 K, l および m は地層によつて決るものであるから式 (2) は簡単にし、次のごとく書き換えても良い。

$$q = Ch^n \dots \dots \dots (2)$$

$$\text{ただし } C = (2\pi Kl) \frac{1}{m-1} \gamma^{\frac{m-1}{m}}$$

若しも穿井から汲上られる量が、その温泉地帯の補給力の限界内にあるならばさらに水位の降下は起らないが、汲上時間が無限に続くかあるいは汲上量が地層の補給力以上である時は、水位 (h_w) は次第に低下して行くと共に影響半径もまたこれにしたがつて拡大して行き、汲上量 (q) は地下帯湯層の温泉だけでなく上部の地表から流下しつつある地下水 (または海水) も同時に汲上ようになるから温泉と地下水 (または海水) が混合して来、この実例は全国に甚だ多い。今穿井よりの汲上量を q とするときその中帯湯層よりの汲上量を q_1 、流下地下水よりの汲上量を q_2 とし、それ等の温度をそれぞれ T_1, T_2 とすると第 4 図において次の式が成立する。

第 4 図 温泉及び地表水々位

$$q = q_1 + q_2 \dots \dots \dots (4)$$

$$q = Ch_3^n \dots \dots \dots \text{温泉, 地下水共同の水位からの水位降下 } (m)$$

$$q_1 = C_1 h_1^{n_1} \dots \dots \dots \text{温泉の点の水位降下 } (m)$$

$$q_2 = C_2 h_2^{n_2} \dots \dots \dots \text{地下水の水位降下 } (m)$$

$$\text{又 } qT = q_1 T_1 + q_2 T_2 \dots \dots \dots (4)'$$

$$\therefore T = \frac{C_1 h_1^{n_1} T_1 + C_2 h_2^{n_2} T_2}{q_1 + q_2} \dots \dots \dots (4)''$$

若し混入する水が海水のようにクロールの多い水の場合で、その混入クロールの量を求めるならば (4)' 式の T_i の代りに Ch_i を入れて求めると知ることができる。

2. 穿井からの注水による帯湯層補給力の強化

前項において述べたように温泉地において温泉の低下ならびに湧湯力減少を防止する為には、地下水の侵入を防止すると共に帯湯層の増湯能力の増加を計ることが大切でその為には帯湯層自身に注水し、その注水量が再び汲上げられる迄に十分に加熱されて温泉化するようにすればよいのである。

今第5図において地下温度の分布が地表に平行して存在し、温泉の水平移動は殆んど行われないと仮定

第5図 注水による等圧曲面

し、穿井0よりは常に温度 T_0 の水を q_0 だけ帯湯層中に注水するものとし、穿井0'は0井より γ の距離にある汲上井とする。穿井0の近傍においては q_0 の注水により生じる水位_透地下水面は ACE のような放物線または減衰曲線となり、穿井0にケーシング、パイプが挿入してなければ地下ではこの注水による_透透曲線に直角な方向に CBD , $C'B'D'$, $C''B'D''$...のごとき等圧曲線が生じて、注入水はこの等圧曲線と直角な方向に_透透逸散するがこのさい生ずる_透透曲線 ACD は穿井0より q_0 を汲上げる時生ずる汲上曲線と全く同じで共に減衰曲線若しくは放物線をなすから近似的に次式で表すことができ

る(第5図参照)と考えてよい。

$$y = hx^n \dots \dots \dots (5)$$

ここに n = 常数

また第5図において曲線 CBD , $C'B'D'$...は式(5)に直角な曲線であるから次のようにして求められる。

$$\text{式(5)を微分すると } y' = -nhx^{n-1} \dots \dots \dots (6)$$

式(5)に直交する曲線 CBD の方向余弦は次の通りである。

$$\frac{dy}{dx} = \frac{1}{nh} x^{n+1} \dots \dots \dots (6)$$

$$\text{また式(5)を書き直すと } \log \frac{h}{y} = n \log x \dots \dots \dots (5)'$$

(7)の方向余弦をもつ曲線と式(5)の曲線はその交点において交るから、この点での x, y の値は等しいのである。故に(5)'と(7)から n を消去すると

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\log x}{h \log \frac{h}{y}} \cdot \frac{h}{y} x$$

$$\therefore x \log x \cdot dx + y \log \frac{y}{h} = 0$$

$$\frac{x^2}{2} \log x - \frac{x^2}{4} + \frac{y^2}{2} \log \frac{y}{h} - \frac{y^2}{4} = C$$

第6図 等圧曲面と温度勾配

$$2x^2 \log x - x^2 + 2y^2 \log \frac{y}{h} - y^2 = 4C \cdots \cdots (7)$$

ここに C = 常数

次に第6図において曲線 AB を穿井0における注水前の温度分布を示すものとし、これに注水を行つた一定時間後の温度分布が CD に変化したとすると、任意の深度 $B', B'', B''' \cdots$ の諸点の温度はそれぞれ T_1 は T_1' , T_2 は T_2' , T_3 は T_3' ... に低下してこれ以下に温度は降らない場合は注水量 q_0 と地熱による加熱とが平衡状態を保っているものと考えられるから、第5図の曲線 CBD , $C'B'D'$... は何れも平衡曲線と考えて良いし現実これ等は等温曲線を表している。若し穿井0の近くに神助井を2井以上設けて水位の変化ならびに水温の分布等を測定するならば注水によつて生ずる減衰曲線式(5)は実験的に測れるからこれに穿井0内並に補助井内の温度分布等から等温曲線 CBD , $C'B'D'$... は近似的に算出することができるわけである。

若しも滲透水位曲線 ACD が対数指数曲線で示されるならばこれは次式で表すことができる。

$$y = hn^{-x} \cdots \cdots (7)$$

$$\text{または } y = he^{-x \log n} \cdots \cdots (9)'$$

この場合等圧曲線 CBD , $C'B'D'$... は次のようにして求められる。

$$y' = -h \log ne^{-x \log n}$$

(9)式に直交する曲線の方向余弦は

$$\frac{dy}{dx} = \frac{1}{h \log n} e^{x \log n} \cdots \cdots (10)$$

$$\text{また } \log \frac{h}{y} = x \log n \cdots \cdots (9)'''$$

前2式から n を消去すると

$$\frac{dy}{dx} = \frac{x}{h \log \frac{h}{y}} \cdot \frac{h}{y} = \frac{x}{y \log \frac{h}{y}} \cdots \cdots (11)$$

$$\therefore x dx + y \log \frac{y}{h} dy = 0$$

第7図 計算による等圧面

$$\frac{x^2}{2} + \frac{y^2}{2} \cdot \log \frac{y}{h} - \frac{y^2}{4} = C$$

$$2x^2 + 2y^2 \log \frac{y}{h} - y^2 = 4C \dots\dots\dots (12)$$

第7図は式(12)から計算した等温曲線であり、第8図は山形県赤湯温泉とわの湯における地下等圧曲線であるが、このように等温曲線が測定できるならば次に述べるような理論から注水井ならびに汲上井を適当に配列することにより温泉の増量および増温も実際に行うことができるわけである。

第 8 図 地下等圧曲面

3. 注水による温度の上昇

今第9図において、その地下等温線が水平的にある場合とし、穿井0、0'の距離 γ_0 だけ放れて掘穿して0井から温度 T_0 の水を q_0 ずつ連続的に注水し、その為0'井の水位が h だけ上昇したとすると、このさい0'井から汲上げられる湯量が増しかつ増温する為には次の3つが考えられる。

1. 穿井0中を流下する間の加熱、2. 帯湯層 MN の距離 γ_0 の滲流する時加熱、3. 地下等温線の変化による温度の上昇

直接加熱に関係のあるファクターとしては注水圧 (h_0)、岩石の熱伝導率および比熱、北下温度の熱さ、等が挙げられるが滲透時間の長い事も加熱の大切な要因でありまた増量の条件としては両穿井間の距離 γ_0 が影響半径内でできるだけ近距離内にあることも必要な事である。

すなわち井戸0、0'間の距離(γ_0)は注入水が加熱されるに大切な場所であり、若し $\gamma_0 > R$ ならば汲上井

第 9 図 漏斗状浸透曲面と水温変化

O' に水位上昇 (h) が起らないから注水による効果が薄いことになるし、逆に γ_0 が余り極端に短い時は汲上げが桶状地下浸透区域の中心近くに成るから注入水に近い温度の低温水を汲上げる恐れがあるから地下等温線の分布の研究の上可能な範囲迄 γ_0 を縮める必要がある。

次に注入水が汲上げられる迄に加熱されるプロセスを考えて見る。

1. 注入井管内での加熱

穿井のケーシング・パイプ内を注入水が水頭 (h_0) で流下する平均流速 $V = C\sqrt{2gh_0}$ であるからその所要時間は割合に短時間でしかも熱を与えるものは挿入鉄管の総断面積、管の周囲の温度と注入水の温度の差鉄管の熱伝導率流下に要する時間等であるが、余り高温でない個所を流下するからこの過程で加熱される割合は少いものと見てよい。例えば赤湯温泉の注水の場合流下速度は割合に早く、地下

第 10 図 注水と汲上げ井

125 m の井底で注水開始後の温度は 32°C (注水前 65°C) となつている。しかし乍ら注水井 O_1 が O_1B 迄で帯湯層 AA' に達しないで地下の注水は自由に地下に浸透または拡散し乍ら岩石の亀裂間を伝つて流下する場合の自由流下時間を t_1 とすると、(第 10 図参照)、これは次式で表すことができかなり加熱を受けることができるわけである。

$$t_1 = \left(l + h_2 \log \frac{h_2}{h_2 + l} \right) \div K \dots \dots \dots (13)$$

ただし l = 流下する岩石の長さ (m)

h_2 = 注水々圧 (m)

帯湯層間 γ_0 を浸流したものが汲上げ井 O' 井底から上昇する場合は逆に熱の一部を失うのが一般でかかるからこの区間での加熱作用は考えられない。

2. 地層の空隙または裂隙間を浸流する間の加熱

また O_1 から注水された水が帯湯層 AA' に達し穿井 O, O' 間の岩石の距離 γ_0 を滲流する温泉の流速 (v) とし O_1 に流水した水が A_1 に達する迄水頭の損失が無いと仮定すれば v では次式を以て表すことができる。

$$v = K \left(\frac{h}{\gamma_0} \right)^n \dots \dots \dots (14)$$

ただし $h = h_1 + h_2$

よつて距離 γ_0 を滲流するに要する時間を t_2 とすると

$$t_2 = \frac{\gamma_0}{K \left(\frac{h}{\gamma_0} \right)^n} = \frac{1}{K} \cdot \frac{\gamma_0^{n+1}}{h^n} \dots \dots \dots (15)$$

注入水が管中を流下のさいは赤湯の例を見ても若干は加熱されるが、さらにこの注入水が温泉化することに大切なことは高温の地層粒子間を毛細管状に滲流する時間 (t_2) でこの間に地下滲流水は完全に温泉化するだけのエネルギーを付与される余有がなくてはならない。この温泉化には地下温度が相当に高いこと、滲透時間がある程長いこと、滲透水量が熱地状況に較べて余り多量でないこと等が必要な条件である。今加熱に最も重要なファクターである滲透時間について 1~2 の例を示すことにする。

例 1

$$K = 0.0004 \text{ m/s}$$

$$\gamma_0 = 180 \text{ m}$$

$$h = 20 \text{ m}$$

$$n = 0.85$$

$$\text{式 (14) より } v = 0.0004 \left(\frac{20}{180} \right)^{0.85} \approx 5 \text{ m/d}$$

$$\text{式 (15) より } t_2 = 180 \div 5 = 36 \text{ 日}$$

例 2

$$K = 0.00025 \text{ m/s}$$

$$\gamma_0 = 150 \text{ m}$$

$$h = 10 \text{ m}$$

$$n = 0.85$$

$$v = 0.00025 \left(\frac{10}{150} \right)^{0.85} \approx 7.59 \text{ m/d}$$

$$t_2 = 150 \text{ m} \div 7.59 \text{ m/d} \approx 20 \text{ 日}$$

すなわち $K = 2.5 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4}$ の地質状況において注水および汲上を行う場合、 $\gamma_0 = 150 \sim 180 \text{ m}$ ならば $t_2 = 20 \sim 36$ 日となるから注入水は加熱を受ける時間は十分に あるが裂隙性温泉においては亀裂間を流れる速度は比較的早いことがあるから γ_0 のとり方にはさらに吟味しなければならない。

次に注水時において注意しなければならないことは前述のごとき注入水の滲流と注入水による水圧の伝播との錯誤である。すなわち O_1 井に注水を行うとその附近に生ずる水圧による水柱は地下水の表面を伝つて速かに O 井に伝達されから恰も滲透水がその時間内に流達したかのごとき錯誤に陥ることがある。これは地下水汲上の場合漏斗状の水位下降面が瞬間的に生じる場合距つた所にある井水が低下する為その地下水自身が汲み取られたかのごとき錯覚になるのと同様であるが、実際滲透水の流達には上記のごとく相当の時間を要するのである。

3. 地下等温線の変化による温度の上昇

第 10 図において帯湯層 MN 面を考えると、注水によつて侵入して来た地下水により、固有の温泉は排除されてその傍に押上げられるがその量は曲面 BPB' が O 軸の周囲に回転して生じる容積に空隙率を乗じた量で、第 10 図では曲面 BPB' である。依つて面積 BPB' の為 PF 直線が DF' 迄押上げられたと

すると 面積 $BPB' = \text{面積 } D'PF'$

すなわち地下等温線 PF' が PD' 迄上昇するから穿井のストレーナーは注水によつて深さ PD' だけ深部の湯層を汲上げることになる。所が曲線 $D'F'$ は滲透曲線 DGF と相似であり PB は AF に直交する等圧曲線であるから、若し地下温度を実測してあればこれは、 P および B 点の座標が解つたのと同じであるから次のごとくにして H を知ることが出来る、今曲線 $D'F'$ を $y=f(x)$ 、曲線 DB を $y=\phi(x)$ で表せば $dy'=f'(x)dx$, $dy=\phi'(x)dx$ ばであるから

$$\text{面積 } B'PB = \int_B^{B'} x dy = \int_0^P x \phi'(x) dx \dots \dots \dots (16)$$

また 面積 $D'PF' = B'B'F'D' - B'B'PD'$

$$\begin{aligned} &= \int_R^a f(x) dx - \int_P^a x \phi'(x) dx \\ \therefore \int_0^P x \phi'(x) dx &= \int_R^a f(x) dx - \int_P^a x \phi'(x) dx \dots \dots \dots (16)' \end{aligned}$$

今 D' の座標を (a, b) とすると左辺および右辺の第2項は既知であるから上式を満足させる a は求められるから等温泉の上昇(H)は知ることが出来るわけである。

4. 注水による影響圏が平衡を保つ条件

既述のごとく注入を行つて地下温泉脈の保護を計ることは温泉資源の減衰防止の要旨であるが汲上量(q)に対し、最少限度どれだけの注水量が必要であるかについてさらに考えて見る。

今迄考えた所は汲上げを行つている所で、地表より雨水河川等よりの滲透量が全く無く、また地下帯湯

層の間では全然温泉の流動が行われて居ない理想の場合を考えて居たのであるが実際にはこのような場合は少く地表よりの滲透もあり、また地下帯湯層は地形地質に従ひ僅々流動は行われて居ることは多くの温泉に循環性の成分が含まれて居りまた自噴温泉に至る所に見られることよりも相当量の補給の行われていることは首肯される筈で、例えば赤湯温泉においても循環水の性質を表す HCO_3^- が相当量の % で含有されて居るがごときである。

第11図において絶えず一定量 q が汲上げられその水位降下が H で影響半径を R 、地層の有効空

第 11 図 漏斗状体積

隙率を β とすると、汲上げによつて生ずる漏斗状の容積(V)は次の式で表せる、

$$V = \int_0^H \pi x^2 dy \frac{1}{\beta} \dots \dots \dots (19)$$

ただし水位曲線を近似的に $y = He^{-\lambda x}$ で表せるとする

$$dy = -H\lambda e^{-\lambda x} dx$$

$$\therefore V = \frac{-\pi H \lambda}{\beta} \int_R^0 x^2 \cdot e^{-\lambda x} dx$$

$$V = \frac{\pi H}{3\beta} R^2 e^{-\lambda R} (R\lambda - 3) \dots \dots \dots (17)$$

ただし $R\lambda > 3$ とする。

この場合影響半径 R 中に平均 ω だけ滲透水が絶えず補給を行つておるとしこれを V_1 とすると

$$V_1 = \pi R^2 \omega \dots \dots \dots (18)$$

また帯湯層の周囲から単位時間に滲流する量を S としその量を V_2 とすると

$$V_2 = 2\pi R S \dots \dots \dots (19)$$

第 12 図 汲上井と注水井の関係

穿井 $0'$ からの注水量中汲上井 0 に汲取られる量 (V_3) は第 12 図において円 0 と円 $0'$ が交錯して生ずる容積で、これは容易に算出することができるが、汲上を今連続的に行つて水位が全く低下しない為には次の関係が成立しなくてはならぬ。

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

$$\therefore V = \pi R^2 \omega + 2\pi R S + V_3$$

$$\therefore V - V_3 = \pi R^2 \omega + 2\pi R S$$

地下の構造が簡単で地形が平垣ならば V および V_3 を理論的に算出することは容易であるが地表における補給量 ω および地下帯湯層への周囲からの補給量 S を正確算出することは困難であるから、実際の場合汲上

げに対して水位を一定になるよう汲上量を調節するか、若しそれが實際上困難であれば、地下地温は相当にありさらに注水しても温度を維持し得る状態なれば第 14 図のように注水井 $0'$ および $0'' \dots$ を設けそれによつて補給量を増加して行けば

$$V - (V_3 + V_4 \dots) = \pi R^2 \omega + 2\pi R S$$

の条件を満足させられる筈である。換言すれば或る程度地温があれば相当量の汲上量に対する補給も注水に依つては可能であると推定される。(第 13 図参照)

第 13 図 2 井以上の補給井と汲上井

5. 影響圏について

1. 地質学的に見た影響圏

従来温泉または地下水利用の場合しばしば問題を起して居るのは例外なしに影響圏に関することであるが、殆ど大部分の場合は影響圏を簡単な円と考えその半径も推定の儘で論議して居るが、その理由は影響圏が地質構造、地層の透水性、亀裂の発達程度、流体の動水勾配等によつて異なる汲上時間の長短にも左右され降雨量その他の補給力にも関係し理論的には簡単に決らないからである。しかし乍ら注水法利用の為にはどうしてもこの影響圏の拡大状況を解明することが必要であるから、これに最も関係の深い地質構造から影響圏を考えて見ることにする。

今 14 図 A において S を透水性の地層または空隙に富んだ亀裂帯とすると、 S 帯は温泉または地下水を自由に滲流することができるがその上下盤は完全なる不透水性であり、その地表面は水平であるとすればこの S 層中に存在する液体は静止の状態にあるものと考えられ、周囲からの補給は全く無いと考えることができる。今穿井 0 より一定量 q を汲上げていて、その為に生ずる漏斗状の水位降下面を考えるとことは時間と共に次第に拡り、しかも S 層に従つて長方形楕円形となつて拡大されて行く。このような狭長影響圏は直立した堆積層や急傾斜を呈する断層破碎帯や甚だしくもめた亀裂地帯から汲上げられる場合に見られ、影響半径は 400~500 m から時に 2000 m 以上に及ぶことが稀ではない。また B 図のごとく A の直立層の一方側が傾いて上流から下流に勾配 θ で液体が流動する場合を考えると液体の流動は第 15 および 16 図のごとくになり上流の影響圏 (R_1) は下流の R_2 に比して遙かに長く勾配に直角な方向の R が

第 14 図 地 質 構 造 と 影 響 圏 の 関 係

水平の場合の影響圏に等しく、このような実例は氾濫原や扇状地に覆われた断層帯からの源泉や勾配のある溪谷に生じた温泉の場合はこれである。

また A 図の立樋層が角度 i だけ傾いた場合が C の場合で、穿井は S 層の上盤側より掘穿して行くのが常道であるがこのさい生じる影響圏は細長い楕円形をなすが角度 i が小さくなるに従つて影響圏の形は

円形に近い楕円形をなすが、これは地形に勾配のある水平層からの汲上の場合や多少傾斜している一般堆積層からの地下水汲上の影響圏の場合である。 D の場合は A を 90° 回転させた水平層で周囲から全く滲流がなく地形も水平の場合で影響圏は円形となる。

以上述べたものは帯湯層または温泉脈が単純に傾斜し或は水平に近い場合の例であるが、実際には影響圏が複雑な因子の重り合っている場合がある、例えば E の場合のごとく地表面は水平か或は多少勾配のある沖積層でその下部に温泉を湧出させる亀裂線が傾斜または垂直に賦存している場合で、影響圏は下部では楕円形となるが沖積層では円形を呈すから実際地表に現われるものは不規則なものとなる。

また F のごとく相交る断層、亀裂線または節理等から裂隙性温泉が湧出しておる場合は亀裂線の交錯の状況および湧湯力の優劣に従つて不規則な形状を呈するごとく、

2. 水文学的に見た影響圏

前項に述べたごとく影響圏の形状は第一には地質的ないし地形的条件に制約され円、楕円或は長方楕円形と色々な複雑な形をとるがさらにこれ水文学的に考えて見る。第12図において穿井0から一定量 q を絶えず汲上げて生じる漏斗状の容積を V とすると影響半径 R とは3で述べたように次の関係がある

$$V = \frac{\pi H}{3\beta} R^2 e^{-\lambda R} (R\lambda - 3) \dots\dots\dots (17)$$

今(17)式の H および λ が決つておるとすると、ある地層に於いて連続汲上げに依つて生じる漏斗状 V が一定である為には β の値が割合に大きいすなわち空隙に富んだ地層であれば生じる影響圏の広さ R が小さい値でなくてはならないし逆に β が小さければ R は大きくなる筈である、すなわち多孔質透水性の地帯または豊富に湧湯力のある所から或る湯量を汲上げても大きな影響圏は生じないが亀裂や空隙の少い帯湯層言い換えると湧湯力の少い所である量を汲湯すると影響圏は直ちに拡大して行く。

また第17図のごとく影響圏

第15図 流れのある井よりの汲上の流線

第16図 滲流のある井の汲上曲線

第17図 汲上量により変化する影響圏

R_1, R_2 を表す滲透曲線の式は次式で表せるから

$$y = He^{-\lambda x} \dots \dots \dots (9)'''$$

水位の降下(H)が大きくなれば任意の距離(x)での降下量(y)も大となり影響圏は拡大する。若し降雨または外部から補給が無ければ(17)式に示されるように x は汲上量(V)と共に無限に拡つて行く筈で最近千葉市の地下水汲上においてはその影響が約 5 km におよび東京都江東砂層は汲上によつて水位降下 45 m の為に生じる R は 7.2 km に達することが知られるに至つた。

また同じ汲上量であつても完全にキャップ、ベッドに覆われている場合と自由面になつてゐる場合では同一汲上量に対して水位の降下が違うことは幾多の汲上に関する公式からも知ることができる。例えば、P. Brinkhaus によれば次のごとくである

$$\text{被圧面} : h = \left(\frac{Q}{2\pi Kl} \right)^m \frac{1}{m-1} \frac{1}{\gamma^{m-1}} \dots \dots \dots (12)$$

$$\text{自由面} : H^{m+1} - h^{m+1} = \left(\frac{Q}{\pi k} \right)^m \frac{m+1}{m-1} \frac{1}{\gamma^{m-1}} \dots \dots \dots (12)'$$

また Weber や Schultz 等の研究に従えば影響圏はその汲上量に従つて変化し若し単位時間の汲上量が一定で長時間にわたつて、汲上げる時生ずる R は次式に示すようにその汲上時間の平方根に比例すると云つてゐる。

$$\text{被圧面} : R = C' \sqrt{\frac{KT}{\beta}} \dots \dots \dots (18)$$

$$\text{自由面} : R = C \sqrt{\frac{HKT}{\beta}} \dots \dots \dots (19)$$

$$\text{ここに } K = m/h$$

$$C \doteq 3 \quad C' = 67,000$$

6. 注水井の位置決定

1. 影響圏半径の算定

注水を行う前には先ず影響圏半径を算出することが如何に必要であるか或いは成功失敗の鍵おにぎつておると言つても過言でないことは既に述べた通りであるが、その為には地質的地形的状況を調査しておくことが大切であるが、次に現地において水理学的なデーターを確実に掴み、実験的に汲上試験を行つた上 R を解析する必要があるその為には次のような方法に従うとよい。

(a) 1 列の穿井で汲上試験

地質状況ならびに地形が簡単な時は汲上井の近くに 2 個の補助井のあることが望ましく、これを用いて汲上試験、水位観測および水温変化の調査等を行う。すなわち汲上井から q を汲上げ乍ら補助井の水位降下 y_1 および y_2 を測り、また汲上量 q を若干変えたら、その汲上量に対する各井の水位降下、 y_1, y_1 , および $y_2, y_2' \dots$ を測定しておけば x_1, x_2 は測定できるから y_i と q_i に関する計算を行えるから q と y の関係を求めることができる。

第 18 図 水位曲線

i) $q = ah$ の場合

第 18 図で汲上井(0)において一定の汲上量(q)に対して補助井 0', 0'' y_1 および y_2 を測定して q と y との関係を求めて若しこれが直線的に変化する時は次式によつて K を求める。(第 7 図参照)

$$q = \frac{2\pi h Kl}{\log \frac{R}{r}} \dots \dots \dots (20)$$

$$\therefore K = \frac{2.8Q}{2\pi(h_1 - h_2)l} \cdot \log \frac{x_1}{x_2} \dots\dots\dots (20)'$$

すなわち汲上井より x_1 の距離, x_2 の距離にある補助井 $0'$, $0''$ 井の水位降下を y_1 および y_2 とすればこの実測値を (20)' 式に代入して K および R を求めても良いがまた滲透水位曲線式を用いてもよい。

$$\text{すなわち } y = he^{-\lambda x} \dots\dots\dots (9)''$$

に補助井 $0'$, $0''$ の (x_1, y_1) (x_2, y_2) を代入して λ を算出すれば任意の水位降下 h に対する x の点の水位降下 y は近似的に算出することはできる。

$$\text{ii) } q = \alpha h^n \quad n < 1$$

第19図 汲上井と補助井

く補助井を幾つか設けるか既存の井を利用して汲上量 $q_1, q_2, \dots$ に対する各補助井の $h_1, h_2, \dots$ を測定して K および R, R_1, R_2 を算出しなければならない。

また今迄述べた 影響圏の半径 R の測定には汲上試験に必ずしもよる必要なく注入試験によつて測定しても良いが注水前に深度別温度測定は必ず行つておかなければならない。

2. 等温曲線の作成

今第20図において注水井0井で種々と水量を変えて注水するとこれによつて生じる滲透水圧曲線 ACD は注水量により変化することはすでに述べた通りである。また第18図のごとき注水試験で注水井0および補助井 $0'$, $0''$ 等における水温の変化を $T_0, T_0', T_0'', \dots, T_1, T_1', T_1'', \dots$ 及び $T_2, T_2', T_2'', \dots$ がそれぞれ知れば式 (8)' および (11) によつて等温曲線は求めることもできる (第20図)。また地下深部で補助井で測定することの

汲上井(0)からの汲上量 $q_1, q_2, q_3, \dots$ に対する各補助井の水位の降下 y_1, y_2 および $y_3, \dots$ を測定し q と y との関係が曲線で表される時は公式 (2) を用いて m, n, K を測定し q と h の関係を求める。また影響圏の半径は公式 (9)'' によつて前項と同様の方法で求めれば良い。

2 多数の補助井を必要とする汲上試験

地質状況が簡単でなく、かつ地形に勾配のある場合影響圏半径は色々の因子に関係し汲上井の四周の水位降が一定でない場合がある。

かのかうなで正確さを求めらる場合には止むを得ないから第19図のごと

第20図 等圧曲面の作成

できなかつた個所には公式(8)'または(11)によりも浅部の実測値とを考え合せてその地下等温曲線を作図することができる。

また汲上量(q_1)に対し注水量(q)の何%が補給力となつているかは實際上極めて大切なことであるが、これは注水井0と汲上井0'との距離(γ_0)と楕状地下滲透区域とを算出すれば第12図のごとくにして大要を知ることができる。赤湯における実例や公式(8)または(12)からも解のごとく等温曲線の形状は浅部の注水口近くでは x 軸(水平軸)に長い楕円形をなしているが深さを増すに従い曲率を変じて円形になり、さらに深度を増すと逆に y 軸(垂直)に細長い楕円形となつて行くがこのことは滲透水位曲線の式(8)および(12)の性質からも想像し得る所である。例えば赤湯温泉の例によれば地下60m 迄は x 軸に長くのびた楕円であるが次第に深度と共に曲率を変え80~90m 附近で等水温曲線は殆んど円に近くなり、これより深くなると垂直に細長い楕円となつて

いる。(第8図参照)

7. 赤湯温泉に於ける注水

赤湯温泉は現在森の山源泉から汲上げ共同配湯を行つており、この源泉深度は388mでその地温分布は第21図のごとく孔底72.5°Cで汲上温度が68°Cで注水目的はこの高温を地下において幾分温度を下げ、かつ湯量を増加させることであつたが実際の結果は湯量増加の目的は達し得たが温度低下は逆に増温となつたのである。第22図は赤湯における森の山源泉(汲上井)とわの湯および局跡の湯(汲水井)の位置を示したものである。次にその地質および泉質等の概要を参考迄に記すことにする。

1. 地質

赤湯附近で温泉を賦存するのは第三紀中新統に属する所謂緑色凝灰岩で、ここより北方に当る上の山温泉との地質関係を追跡すると第23図のごとくになり、上の山では温泉は緑色凝灰岩の一部およびその下位にある花崗岩より湧出するのに対し、赤湯では広義の緑色凝灰岩層に属する石英粗面岩凝灰岩であつて、温泉は凝灰岩の裂隙に沿つて湧出して居る。

2. 泉質

この温泉地帯の泉質は弱食塩泉で代表的な森の山源泉の主要成分を示すと第1表の通りである。

またこの地に見られる多くの温泉分析データを総括整理すると Cl' と SO_4'' のイオン間には正の相関々係があるが Cl' と HCO_3' との間に負の相関々係にあり、このことは Cl' と SO_4''

第21図 森の山地下増温率表

第22図 赤湯温泉汲上注水井位置図

第23図 赤湯上の山地質比較表

第1表 森の山湯泉主要化学成分

Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁼⁼	HCO ₃	pH
872.5	358	329.2	1,744	251.2	725	8.1

は共に高温度の温泉中に多く含まれておるから初生水として地下深部から湧出したものと考えられるに対し、 HCO_3' は低温度のもの程多く含有されて居り、循環性地下水を多量に含む温泉中には HCO_3' が多く含まれているものと考えられる。すなわち今 $\text{Cl}'=1,800 \text{ mg/l}$ 近傍の温泉を地下 400 m 前後の初生水に近

第 24 図 湯治温泉の温度深度変化表

いものと考えらるならば Cl^- 含有量 $1,500 \sim 1,200 \text{ mg/l}$ のものは $33\% \sim 15\%$ の循環水を混合しておると考えてよいわけである。

3. 注水試験

既述のように低温、増量の目的から赤湯温泉では昭和25年4月22日より5月21日迄注水試験を行つた所とわの湯および局跡の湯の温度の変化は第24および25図のごとくで、注水開始後約14日後森の山温泉が水位 0.60 m 上昇し、汲上試験をした所第2表のごとく温度が 68.5° より 69.5°C に上昇した。

A. 汲上井

名称=森の山源泉

口径= 200 m/m

深度= 72.5°C

注水開始=4月2日午後6時

第2表 森の山湯泉成績表

朝 日	自然水位 (m)	汲上水位 (m)	水位降下 (m)	汲上量 (m^3/m)	温度 ($^\circ\text{C}$)	備 考
4/1	-2.17	-10.42	8.23	0.463	68.5°	注水前日
4/16 午後8時	-1.56	-10.36	8.80	0.510	69.5°	注水後14日水位はゲージ読み
5/21	-1.92	-11.12	9.20	0.545	69.5°	注水後50日 //

B. 注水井

とわの湯

口径= 150 m/m

深度= 174 m

温度= 63.5°C

注水量= $0.09 \text{ m}^3/\text{m}$

第3表 とわの湯注水成績表

期 日	自然水位 (m)	水 温 ($^\circ\text{C}$)						備 考
		0 m	18.3 m	36.6 m	54.4 m	$91. \text{ m}$	$127. \text{ m}$	
9/1	-5.25	24.8°	40.0°	61°	63°	65.0°	65.3°	
4/10	—	—	18.0°	18°	29°	31.0°	36.0°	
5/23	-5.31	22.8°	26.0°	54.9°	56.7°	57.0°	57.5°	注水中止後 2日
5/28	-5.33	23.0°	30.0°	56.0°	57.0°	57.5°	58.5°	// 7日
6/4	-5.36	28.0°	35.0°	57.0°	57.0°	57.0°	58.8°	// 14日

局跡の湯

口径= 150 m/m

深度= 102 m (以下崩壊)

注水量= $0.047 \text{ m}^3/\text{m}$

4. 影響圏の水位曲線の算定

森の山源泉、とわの湯および局跡の湯等において独自に透水係数 (K)、動水勾配指数 (n) 等を算出でき

第4表 局 跡 の 湯 注 水 成 績 表

期日	自然水位 (<i>m</i>)	水 温 (C)				備 考
		18.3 <i>m</i>	36.4	54.4	91	
5/23	-4.30	19.0°	24.0°	25.5°	26.5°	注水中止後 2日
5/28	—	24.9°	28.0°	30.0°	30.5°	" 7日
6/4	-4.24	24.0°	31.0°	34.1°	37.7°	" 14日

るだけの実験データが無いからここでは森の山源泉から算出したものが他の2井にも適用できるものとして推論した。

A. 森の山源泉の透水係数動水勾配指数と注水井の注水水位

第2表のデーターより森の山源泉の石英粗面岩質安山岩の裂隙中を滲流する透水係数および動水勾配指数を算出すると次のごとき値である。

$$K=0.000116 \text{ m/s}$$

$$n=0.5$$

次に上記値を公式(2)に適用し上昇水位(*h*)を算出した所次のごとき値となつた。

第5表 注水時に於ける注水量と
推定上昇水位(*m*)

個所	注水量 (<i>m</i> ³ / <i>m</i>)	上昇水位 (<i>m</i>)
とわの湯	0.09	2.65
局跡の湯	0.047	1.70

B. 滲透水位曲線の算定

とわの湯、局跡の湯の両注水井より注水開始後14日後、森の山源泉で0.60*m*水位が上昇したからとわの湯および局跡の湯の源泉におよぼした水位を y_1 および y_2 とすると次の式が成立つ

$$y=y_1+y_2 \dots \dots \dots (22)$$

$$y_1=2.65 e^{-\lambda \times 200m} \dots \dots \dots (23)$$

$$y_2=1070 e^{-\lambda \times 100m} \dots \dots \dots (24)$$

これ等の3式を解くと

$$\lambda=0.0182$$

$$y_1=0.136 \text{ m}$$

$$y_2=0.464 \text{ m}$$

すなわちとわの湯で注水水位2.65*m*で0.09*m*³/*m*の水量を注水しておる時汲上井にはその5.1%に当る0.136*m*が影響を与え、局跡の湯では注水水位1.70*m*で0.047*m*³/*m*注水している時汲上には100*m*距ててその27.2%の0.0464*m*の水位が影響をおよぼしていることを示している。

C. 地下等圧曲線の作成

前項の算出から注水井とわの湯で水位 $h(m)$ 降下させて汲上げるとその水圧の x 軸上における降下%は

$$y=he^{-0.0182x} \dots \dots \dots (28)$$

から求めることができる。また同じくとわの湯における注水時における y 軸に沿つての温度の減少率は第8図によつて求めることができるから、今とわの湯の深さを Y 軸、水平線を X 軸にとり、 X 、 Y 軸上における水圧、水温の降下率の同位点を結べば第22図のごとき地下等温曲線を近似的式として求める

第25図 局跡の湯温度深度変化表

ことができる。

これに依ると地下 60 m 迤は x 軸を長軸とした楕円形に近く 80~90 m 附近では殆ど円い近く成つており、これより深部は y 軸が長軸の楕円形に近い形をとるようである。また公式 (11)' より等圧曲線を求めて見たら第 23 図のごとくなり、第 22 図の 60 m 近傍に酷似のものとなつた。

5. 帯湯層を滲流するに要する時間
今水頭 h で管中な流れる速度は

$$V = C\sqrt{2gh} \dots\dots\dots (26)$$

で求めることができるから注水井に注入される水が井底に達する速度は簡単に求められ、この間に加熱される熱量は大したものではない。しかし乍ら注水井底に達して汲上井底に達する時間は加熱および化学成分付与に最も大切なファクターであるからとわの湯、局跡の湯から源泉迄滲流するに要する時間を算出して見ると次の通りである。

1. とわの湯

$$K = 0.000116 \text{ m/s} \Rightarrow 9.6 \text{ m/d}$$

$$h = h_1 + h_2 = 8.80 + 2.65 = 11.45 \text{ m}$$

$$n = 0.5$$

$$\gamma = 200 \text{ m}$$

$$\therefore t_2 = 200 \text{ m} \div 9.6 \times \left(\frac{11.45}{200} \right)^{0.5} \Rightarrow 82 \text{ 日}$$

2. 局跡の湯

$$h = h_1 + h_2 = 8.80 + 1.70 = 10.50$$

$$\gamma = 100$$

$$\therefore t_2 = 100 \div 9.6 \times \left(\frac{10.5}{100} \right)^{0.5} \Rightarrow 31 \text{ 日}$$

すなわちとわの湯および局跡の湯からの注水は加熱されるに十分の時日を経て汲上井に至るから温度の低下は起らない訳である。

結 語

1. 以上で温泉の減衰回復を目的とした地下水注入の理論の概要および赤湯温泉における注水の実例について概説した。

2. 注水理論の根本をなすものは影響圏の解明と地下水滲透による楕状地下滲透区

域の解析にあり、これ等は各温泉地域の地質構造ならびに地下水理により多少状況を異にする。

3. 注水によつて生ずる楕状地下滲透区域の生成ならびにその効果的利用範囲については今後さらに研究すべき点がある。それは實際上の地下温度分布は色々断層、その他の地質的条件で複雑な形をとつて居るから楕状区域もまたこれ等地温の変化にしたがつて色々な形を取るからである。

4. 本理論の利用によつて温泉地における影響圏の解析ならびに水位減衰防止は役立つものと考えられるが実施にさいしては既述の各項について充分注意の上行わなければならない。

5. 注水に依り若干温度の上昇することは地下等温線の上昇異動によるものとも考えられるが、一半の原因は汲上鉄管上昇中の流速増加による熱損失の少くなつたことにもよるものと考えられるがこれの点についても今後さらに検討の余地である。

6. 赤湯の実験により凝灰岩のごとき岩石の亀裂性破碎帯中を流れる地下水の運動には風化岩に対する田中治雄の研究と同様に Darcy の方則を適用し得ることが確められた。

7. 注水法の適当な利用は量的な意味で目的達成させること、或は相互影響防止を成功せることは可能であろうが注水による泉質の変化は予想される所であるがこれに関してはさらに研究の余地があるものとする。

引用文献

1) 福富孝治：温泉の物理	5) 田中治雄，矢作文彌：電力技術研究所報告，
2) M. Muskat：The Flow of Homogeneous	Vol. 1.7 No. 2
Fluids through Porous Media (1937) 9-8	6) 沼倉三郎：測定値計算法
3) 最上房義：土質計算法 1958	7) 山本明：工業数学計算演習
4) 物部長穂：水理学	8) 室井渡：温泉研究，No. 13, No. 14, 1958