

# 大岳地熱発電井の湧出機構について

京都大学理学部 山下 幸三郎

(昭和44年11月30日受理)

## Flowing Mechanism of Bored Wells for Geothermal Power Generation in Otake Hydrothermal Field, Oita Prefecture

Kosaburo YAMASHITA

Geophysical Research Station, Kyoto University

A large quantity of hot water accompanied with steam is gushing out from the orifice of the bored wells made at Otake by Kyushu Electric Power Co. for geothermal power generation. This phenomenon seems to be that of the boiling spring of which the hot water and steam are fed from underground water at a high temperature. But, regarding the data obtained by Kyushu Electric Power Co., the mean value of enthalpy of the discharging fluid is remarkably high compared with the temperature at the bottom of the well and varies extremely by the change of the orifice pressure. Accordingly, from those facts, it is inferred that the steam gushing out from the orifice is fed from both an underground water and a vapour bearing stratum. By this treatment, the writer gave a theoretical consideration of the relationship between discharge and orifice pressure.

### 1. 緒 言

九州電力株式会社が九重火山地域に建設した大岳地熱発電所の発電井からは発電に利用する蒸気と共に多量の熱水が流出している。<sup>1)</sup> 発電に利用する蒸気は噴出する蒸気と熱水の混合物から気水分離装置によって  $3.35 \sim 2.15$  (kg/cm<sup>2</sup>G) の分離圧の下で熱水を分離したものである。

地熱発電研究の初期においては過熱蒸気の採取を目標にテストボーリングを行なったが、蒸気と共に多量の熱水を噴出する井戸しか得られなかった。したがって両者の混合噴出から得られる蒸気を利用して発電する方法を考え、その予備調査として、九州電力総合研究所は両者の混合から発電に利用する蒸気を取り出すには如何なる分離圧の下で分離すれば最も有効利用が出来るかを知るため、噴出孔口圧を変化させ、その時の蒸気及び熱水の量、熱量等噴出流量の特性を各井戸について測定し、多くの興味ある現象を示す資料が得られている。今回これらの資料を戴いたので資料に示された特異な現象は井戸構造や流出する熱水、蒸気の地下における賦存状態に関係があると考え、各井戸について得られた資料を解析し、湧出機構について考察した。

### 2. 井戸構造の概況

各井戸の分布を図1に、又それらの掘さく記録を表1に示す。<sup>2)</sup>

現在発電に利用されている井戸は7~10号井の4個で出力は1万kwである。5.6号井

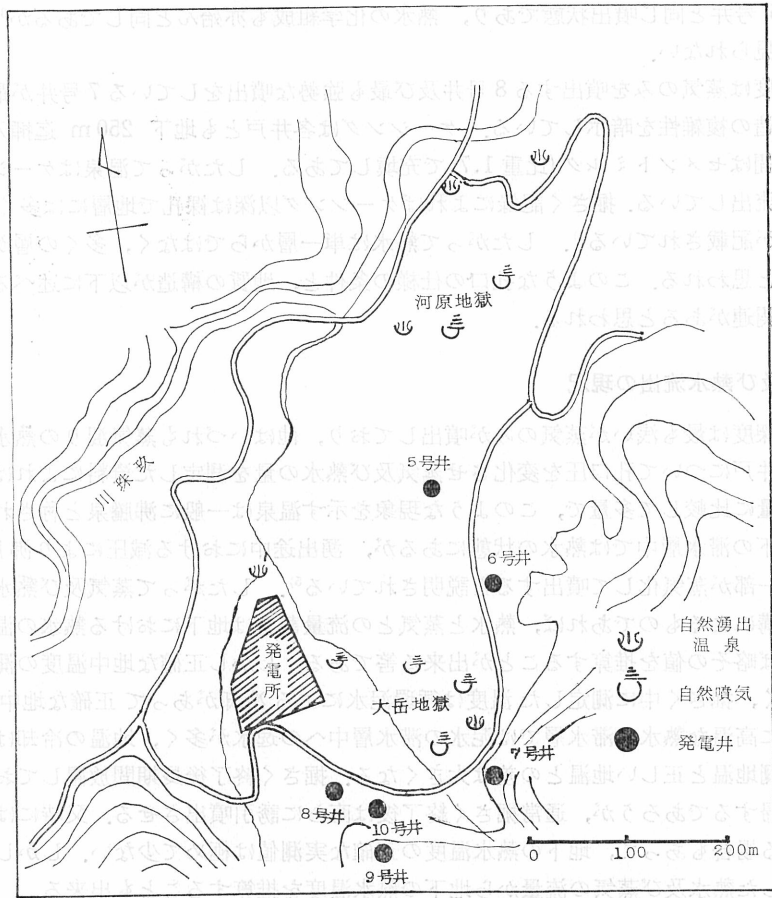


図 1. 大分県九重町，九州電力大岳地熱発電所付近温泉分布図

表 1. 各井戸の概況 (九電総合研究所調査による)

井戸番号	掘さく年月	深度 (m)	ケーシング深度 (m)	同口径 (mm)	地質	噴出状況
5	昭 30.12	450	251	200	安山岩及びその変質帯	蒸気混り熱水
6	" 39.3	500	250	215	"	"
7	" 39.4	350	235	215	"	"
8	" 39.12	346	250	215	"	蒸気
9	" 40.3	550	250	215	"	蒸気混り熱水
10	" 41.4	600	250	215	"	"

は現在炭酸カルシウムのスケールによって井孔が閉塞され、殆んど流出していない。7, 9, 10号井は5, 6号井と同じ噴出状態であり、熱水の化学組成も亦殆んど同じであるが<sup>3)</sup>、スケールの付着は見られない。

掘さく深度は蒸気のみを噴出する8号井及び最も強勢な噴出をしている7号井が最も浅く、地下の熱構造の複雑性を暗示している。ケーシングは各井戸とも地下250m迄挿入され、裸孔と管との間はセメントミルク(比重1.7)で充填してある。したがって温泉はケーシング以深の地層から流出している。掘さく記録によればケーシング以深は裸孔で地層には多くのCrackのあることが記載されている<sup>4)</sup>。したがって熱水は単一層からではなく、多くの層からの混合流出であると思われる。このような孔口の仕様の条件と、地質の構造が以下に述べる流量の特性と密接な関連があると思われる。

### 3. 蒸気及び熱水流出の現況

8号井の深度は最も浅いが蒸気のみが噴出しており、他はいづれも蒸気混りの熱水が噴出している。各井戸について孔口圧を変化させ蒸気及び熱水の量を測定した資料によれば(表2)熱水量は蒸気量に比較して多量で、このような現象を示す温泉は一般に沸騰泉と称され、その噴騰機構は地下の滞水層中では熱水の状態にあるが、湧出途中における減圧により沸騰を起し、熱水の一部が蒸気化して噴出すると説明されている<sup>5)</sup>。したがって蒸気及び熱水の噴出が沸騰泉の機構によるものであれば、熱水と蒸気との流量割合は地下における熱水の温度が実測されていれば略その値を推算することが出来る筈である。しかし正確な地中温度の測定は非常にむづかしく、掘さく中に測定した温度は循環泥水による冷却があって正確な地中温度を示さない。特に高温な熱水の滞水層では泥水の滞水層中への逸水が多く、地温の冷却は一層大きくなって実測地温と正しい地温との差は大きくなる。掘さく終了後長期間放置しておけば地温は正常に復帰するであろうが、通常掘さく終了後は直ちに誘引噴出させる。又時には掘さく途中で自噴する場合もあって、地下の熱水温度の正確な実測値は極めて少ない。しかし沸騰泉であれば噴出した熱水及び蒸気の流量から地下の熱水温度を推算することも出来る。

地下の高温熱水が噴出の途中減圧によって沸騰を起し、蒸気と熱水を大気中に噴出し、定常状態が継続されているとき、熱水の湧出量が多く、且つ井戸孔中での外部への熱の逸散が少ない場合は近時的に次式が成立する。

$$Q_u = Q_a + Q_s \quad (1)$$

$$i_0' Q_u = i_1' Q_a + i_1'' Q_s \quad (2)$$

ここに  $Q_u$  は地下における熱水の流出量 (ton/hour),  $Q_a, Q_s$  は大気中に噴出したときの熱水及び蒸気量 (ton/hour),  $i_0'$  は地下における熱水のエンタルピ,  $i_1', i_1''$  は熱水, 蒸気の大気圧におけるエンタルピである。

(1), (2) 式から

$$\frac{Q_a}{Q_u} = \frac{i_1'' - i_0'}{i_1'' - i_1'} \quad (3)$$

大気圧下における熱水, 蒸気のエンタルピは既知であるから、地下における流出熱水量と大気中に流出したときの熱水量との比は地下における熱水のエンタルピによって定まる。したが

表 2. 孔口圧力と流量との関係 (九電総合研究所測定)

Well No. 7. $i' = 195.1 \text{ kcal/kg}$							
測定年月日	孔口圧力 kg/cm <sup>2</sup>	熱水量 ton/hour	蒸気量 ton/hour	熱水からの蒸気量 ton/hour	噴気量 ton/hour	噴気量 熱水量	Mean Enthalpy kcal/kg
1964							
9. 21	11.2	0	0	—	—	—	—
	10.7	108	19.5	2.51	17.0	0.154	257.5
	9.8	154	27.0	4.91	22.1	0.138	252.2
	7.9	224	39.5	11.74	27.8	0.118	244.2
	7.25	236	43.5	14.27	29.2	0.116	243.7
	6.3	248	49.5	18.14	31.4	0.118	244.0
1965							
6. 15	9.60	122	20.7	4.12	16.6	0.133	249.4
	8.20	171	30.9	8.37	22.5	0.126	247.1
	6.95	189	37.2	12.04	25.2	0.126	246.8
	5.85	195	42.4	15.55	26.9	0.128	247.4
	5.20	200	44.0	18.02	26.0	0.118	244.2
	4.95	200	45.3	18.69	26.6	0.122	245.1
	4.85	199	45.4	19.13	26.3	0.121	244.6
1965							
9. 29	11.90	0	0	—	—	—	—
	9.57	90	19.5	3.08	16.4	0.176	265.2
	7.60	165	31.5	9.31	22.2	0.127	247.8
	5.90	185	39.0	14.67	24.3	0.122	245.5
	4.80	192	42.3	18.43	23.9	0.114	241.7
	4.65	192	42.8	19.36	23.4	0.111	241.0
1965							
12. 7	11.70	0	0	—	—	—	—
	9.10	114	20.5	4.44	16.1	0.136	250.9
	7.35	184	32.5	10.88	21.6	0.111	241.5
	5.85	204	38.5	16.27	22.2	0.101	237.5
	4.60	210	41.6	20.17	21.4	0.093	232.5
	4.40	199	42.4	20.92	21.5	0.098	236.2
1966							
3. 16	7.20	138	29.9	8.43	21.5	0.147	254.5
	6.25	140	34.5	10.33	24.2	0.161	259.3
	5.50	152	39.4	12.96	26.4	0.160	258.9
	4.50	160	42.2	16.42	25.8	0.146	253.8
	4.25	166	43.0	17.85	25.2	0.137	250.4

Well No. 9.  $i'_{0}=183.3$  Kcal/kg

測定年月日	孔口圧力 kg/cm <sup>2</sup>	熱水量 ton/hour	蒸気量 ton/hour	熱水からの蒸気量 ton/hour	噴気量 ton/hour	噴気量 熱水量	Mean Enthalpy kcal/kg
1965							
5. 28	8.5	0	0	—	—	—	—
	7.1	28	14.0	1.01	13.0	0.448	330.7
	6.1	36	19.0	1.77	17.2	0.455	332.1
	4.7	38	24.7	2.71	22.0	0.540	348.9
1965							
7. 5	7.8	51	12.6	1.37	11.2	0.214	268.3
	6.9	59	18.7	2.27	16.4	0.268	283.2
	5.8	57	23.5	3.06	20.4	0.339	303.7
	4.9	61	27.0	4.14	22.1	0.340	306.1
	3.8	65	29.0	5.78	23.2	0.328	299.2
1965							
10. 4	6.75	70	19.2	2.84	16.5	0.227	271.0
	5.85	75	24.5	3.97	20.5	0.260	281.2
	4.90	78	28.0	5.30	22.7	0.272	284.6
	3.60	97	32.0	7.40	24.6	0.285	287.7
1965							
12. 10	8.40	0	0	—	—	—	—
	6.65	67	19.0	2.80	16.2	0.233	272.9
	6.00	78	24.0	3.94	20.3	0.248	277.4
	5.00	83	28.2	5.40	22.9	0.262	281.5
	3.85	82	32.2	7.17	25.1	0.288	286.7
	3.60	83	32.7	7.78	24.9	0.276	284.4
1966							
3. 13	9.40	0	0	—	—	—	—
	6.0	95	28.2	4.80	23.4	0.235	273.5
	5.0	96	31.8	6.33	25.5	0.249	277.6
	4.4	96	34.0	7.59	26.4	0.253	279.8
	3.7	95	36.2	8.66	27.5	0.265	281.9

Well No. 8.

測定年月日	孔口圧力 kg/cm <sup>2</sup>	蒸気量 ton/hour	測定年月日	孔口圧力 kg/cm <sup>2</sup>	蒸気量 ton/hour
1965			1965		
7. 7	5.60	0	12. 12	4.90	0
	5.20	10.1		4.60	6.2
	4.72	11.8		3.80	10.6
	3.82	15.0		2.50	15.4
	2.60	18.4		1.13	18.4
	1.35	21.5			
1965			1966		
9. 27	5.40	—	3. 11	4.95	0
	5.17	5.3		4.63	4.5
	3.75	13.4		3.85	9.5
	2.52	17.4		3.15	11.8
	1.18	19.4		2.55	13.1
				1.10	16.2

って地表に噴出したときの蒸気及び熱水の量を測定すれば地下における熱水の温度が推測される。又 (3) 式によれば  $Q_a/Q_u$  は  $i_0'$  即ち地下における熱水の温度にのみ関係するので熱水温度が変わらない限り流出量に変化しても変わらない。

九州電力総研究所で測定した各井戸の孔口圧力の変化に伴う流量変化の資料から (3) 式に示される比を求めると、図 2 の如くなる。

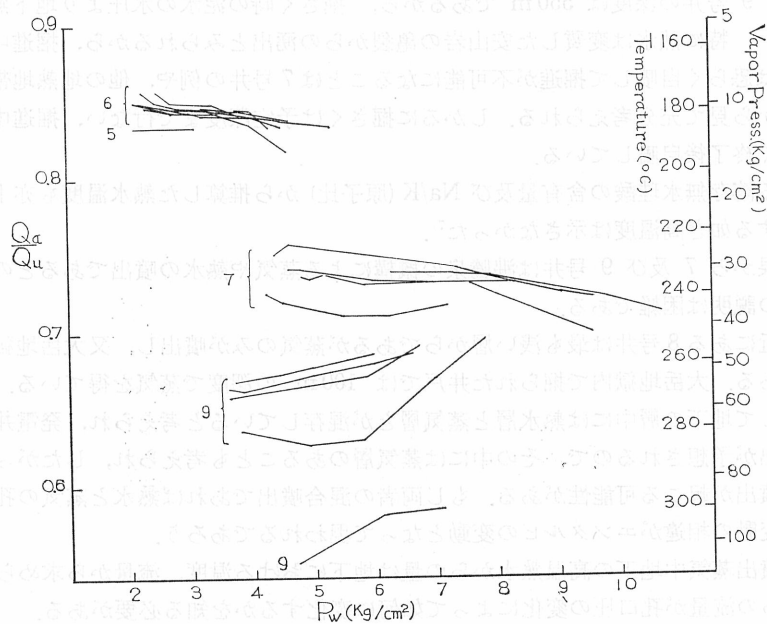


図 2. 孔口圧と熱水量との関係

5, 6 号井の  $Q_a/Q_u$  は孔口圧力の変化により流量が大きく変化したにも拘らず大きい変化は見られない。6 号井では地下熱水の平均エンタルピは 190 kcal/kg 程度で、これに対応する温度は約 187°C である。この温度は実測地温 180~202°C に近い<sup>6)</sup>。5 号井は掘さく後一時噴出を停止させてあったが、昭和 36 年地熱発電の具体化により浚渫を行ない噴出させた。しかし発電に利用する計画がなかったので測定は充分に実施されていない。実測された孔底温度の最高は 170°C で熱水及び蒸気の流量から求めた値より幾分低い。この井戸は 6 号井の近くであり、地熱地帯としては末端に近いところにあることから、略 6 号井と同じ地下状態であろうと思われる。以上の結果から 5, 6 号井は (3) 式で示される関係を略満足しているとみてよい。

しかるに 7 及び 9 号井においては孔口圧の変化によって  $Q_a/Q_u$  は大きく変化し、7 号井では孔口圧の上昇により  $Q_a/Q_u$  の値は大きくなり、9 号井はこれと反対に小さくなる。地下において熱水の状態にあるとすれば、圧力の変化によってその温度が大きく変化するとは考えられない。

前述の地下構造において多くの crack のあることから多くの熱水層から混合流出し、それぞれの熱水層の透水係数、温度、水圧などが異なる場合、孔口圧の変化によって混合割合が変化し、したがって  $Q_a/Q_u$  の変化が起こる可能性があるが、一方地下において熱水であるとすれ

ばそのエンタルピ、温度の絶対値を求めると、最高は7号井では 265 kcal/kg, 255°C, 9号井は更に大きく 349 kcal/kg, 319°C と非常に大きい値である。更にこの温度における飽和蒸気圧を求めると 43 kg/cm<sup>2</sup>, 115 kg/cm<sup>2</sup> とこの値も亦温度に対応して大きい値をもつ。しかるに孔口密閉圧の実測では6号井は最大約 11 kg/cm<sup>2</sup> を示し、地下温度における飽和蒸気圧に略近い。これに反し7号井では 11.9 kg/cm<sup>2</sup>, 9号井では 8.5 kg/cm<sup>2</sup> と上記温度から求めた値と比較して非常に低い値である。尚最大圧でも7号井約 19 kg/cm<sup>2</sup>, 9号井約 11 kg/cm<sup>2</sup> 程度にすぎない。9号井の深度は 550 m であるから、掘さく時の泥水の水圧より地下熱水の蒸気圧の方が高い。特に熱水は変質した安山岩の亀裂からの湧出とみられるから、掘進中割れ目に出合った時は恐らく自噴して掘進が不可能になることは7号井の例や、他の地熱地帯における掘さくの例から見て充分考えられる。しかるに掘さくは予定深度まで行ない、掘進中の自噴はなく、掘さく終了後自噴している。

古賀による溶存無水珪酸の含有量及び Na/K (原子比) から推算した熱水温度も亦上記エンタルピに相当する如き高温度は示さなかった<sup>7)</sup>。

以上の結果から7及び9号井は沸騰泉の機構による蒸気や熱水の噴出であるとの考えからは実測結果の説明は困難である。

両井の付近にある8号井は最も浅い層からであるが蒸気のみが噴出し、又大岳地獄には今だ自然噴気がある。大岳地獄内で掘られた井戸では 100 m の深度で蒸気を得ている。このような事実からして地下の層中には熱水層と蒸気層とが混存していると考えられ、発電井も多くの層からの流出が予想されるので、その中には蒸気層のあることも考えられ、したがって熱水と蒸気の混合噴出が起こる可能性がある。もし両者の混合噴出であれば熱水と蒸気の孔口圧の変による流量変動の相違がエンタルピの変動となって現われるであろう。

この場合噴出蒸気中地下の高温熱水からの量は地下における温度、流量から求められるが、蒸気層からの流量が孔口圧の変化によって如何に変化するかを知る必要がある。

#### 4. 噴気井における孔口圧と噴気量との関係

地下にガスの滞留する層があって、この層中におけるガスの流動が Darcy の方則に支配される場合、この層に噴出量に対して充分な口径の井戸を掘ってガスを噴出させ、その流動が定常状態になった時、噴出量は理論的に次式によって表わされる<sup>8)</sup>。

$$Q = \frac{2\pi k r_0 h}{(1+m)\mu \log r_e/r_w} (P_e^{1+m} - P_w^{1+m}) \quad (4)$$

ここに  $Q$  は噴出ガスの質量流量、 $k$  は比浸透係数、 $r_0$  は  $P=1$  の時のガスの密度、 $h$  はガス層の厚さ、 $\mu$  はガスの粘性係数、 $m$  はガスの定積比熱 ( $C_v$ ) と定圧比熱 ( $C_p$ ) との比即ち  $m=C_v/C_p$ 、 $P_e$  は井戸から  $r_e$  の距離におけるガスの圧力、 $P_w$  は井戸の孔口における圧力、 $r_w$  は井戸半径である。

ガスの流れが等温変化であれば  $m=1$  であるが、断熱変化のときは  $m=C_v/C_p$  で噴気の場合は殆んどが水蒸気で  $m=0.75$  とみてよい。

前述の如く8号井は蒸気のみが噴出していて、その孔口圧の変化による噴出量が測定されているので、噴気の地下における流動状態及び孔口圧と噴気量との関係について考察することが出来た。

噴気井について観測実施中に周辺の噴気井で観測井に影響を及ぼす井戸の流量に変化がなければ、(4) 式の右辺は孔口圧  $P_w$  以外は変化しないから

$$Q = K(A - P_w^{1+m}) \tag{5}$$

$$K = \frac{2\pi k r_0 h}{(1+m)\mu \log r_e/r_w}, \quad A = P_0^{1+m} \tag{6}$$

したがって  $Q$  と  $P_w^{1+m}$  との間には一次関係が成立する。

地下の蒸気層中での蒸気の流動についての熱力学的取扱はその賦存状態の様相によって取扱を変える必要があると思われるが、本質的には断熱変化の流れを考える方が適切であると思われる。地下の温度分布の実測から深部に行くにしたがって地温は上昇しているの、深部から熱伝導による蒸気層への熱の供給があると考えられ、したがって蒸気が水平な層を流動する場合は断熱変化による温度降下は深部からの熱の供給によって補償される場合もある。しかし一方浅部への熱の逸散もある。又深部蒸気層からの蒸気の供給や浅部蒸気層中への流出などもある。これらの熱収支の如何が流れの様相を決定するであろう。したがって8号井の実測資料を用い、孔口圧と噴気量との関係を求めると図3の如く、断熱変化とした場合  $Q$  と  $P_w^{1+m}$  とは略一次関係が成立し、(5) 式に示される関係の成立つことが確かめられた。

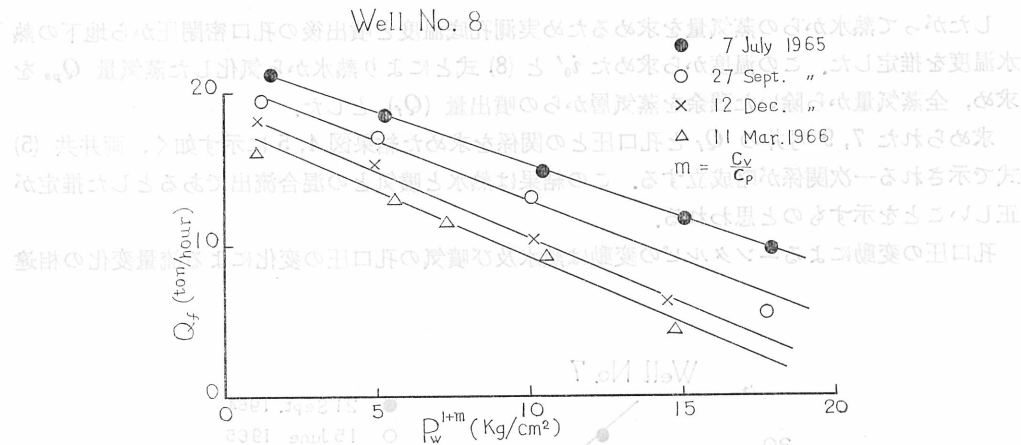


図3. 九電8号井の孔口圧と蒸気量との関係

7号井、9号井においても蒸気層からの噴出があるとすれば孔口圧と蒸気噴出量との間に(5)式で示される関係が成立すると思われる。しかし測定された蒸気量の中には熱水から気化した蒸気も含まれているから、これを除去しなければならない。

各孔口圧における噴出熱水量を  $Q_p$ 、地下の熱水から気化した蒸気量を  $Q_{ps}$ 、地下の熱水の流出量を  $Q_u$ 、地下熱水のエンタルピを  $i_0'$ 、孔口圧における熱水及び蒸気のエンタルピをそれぞれ  $i_p'$ 、 $i_p''$  とすれば近似的に次式が成立する。

$$Q_u = Q_p + Q_{ps} \tag{6}$$

$$Q_u i_0' = Q_p i_p' + Q_{ps} i_p'' \tag{7}$$



(6), (7) 式から

$$Q_{ps} = \frac{i_0' - i_p'}{i_p'' - i_0'} Q_p \quad (8)$$

(8) 式において  $i_0'$  以外は実測値から求められるが、 $i_0'$  の決定については前述の如く地下熱水の正確な温度の直接測定は困難である。実測された 5~10 号井の実測孔底温度と噴出後の孔口密閉圧及び平均エンタルピ等を比較すると、最も強勢である 7, 9 号の孔底温度が最も低い。

表 3. 九電総合研究所調査による

井戸番号	5	6	7	8	9	10
孔底温度 (°C)	170	202	155	195	150	183
孔口密閉圧 (kg/cm <sup>2</sup> )	4	7	12.3	4.6	9	7.7
最高密閉圧 (kg/cm <sup>2</sup> )	—	11 以上	18.8	8 以上	16 以上	8 以上
平均エンタルピ (kcal/kg)	178	181	245	651	299	245

したがって熱水からの蒸気量を求めるため実測孔底温度と噴出後の孔口密閉圧から地下の熱水温度を推定した。この温度から求めた  $i_0'$  と (8) 式とにより熱水から気化した蒸気量  $Q_{ps}$  を求め、全蒸気量から除いた残余を蒸気層からの噴出量 ( $Q_f$ ) とした。

求められた 7, 9 号井の  $Q_f$  と孔口圧との関係を求めた結果図 4, 5 に示す如く、両井共 (5) 式で示される一次関係が略成立する。この結果は熱水と噴気との混合流出であるとした推定が正しいことを示すものと思われる。

孔口圧の変動によるエンタルピの変動は熱水及び噴気の孔口圧の変化による流量変化の相違

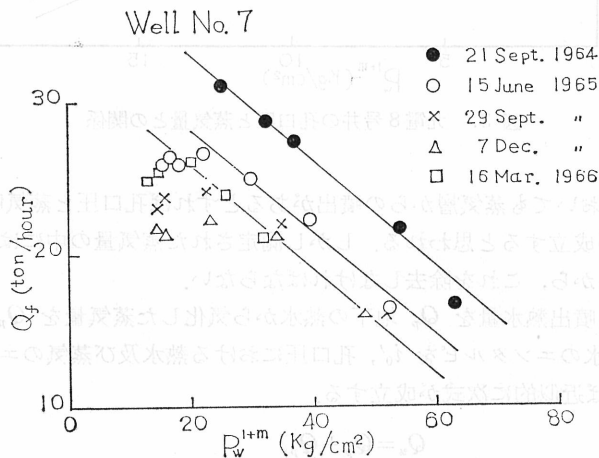


図 4. 九電7号井の孔口圧と蒸気量との関係

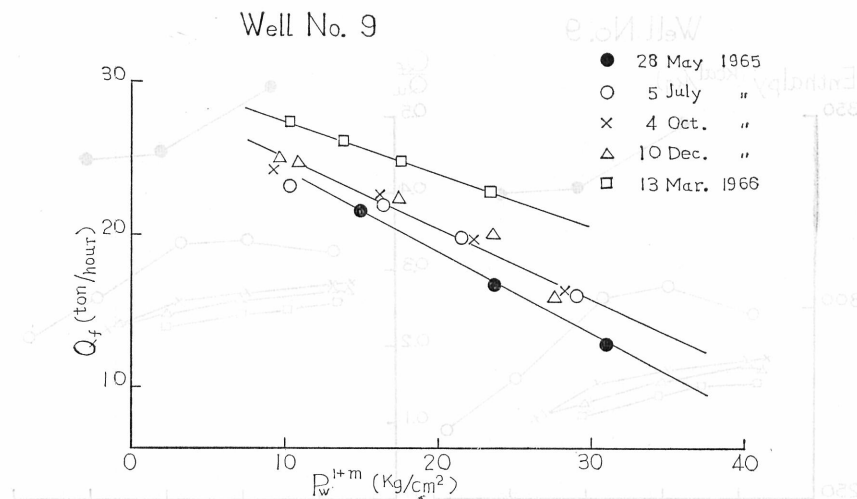


図 5. 九電 9 号井の孔口圧と蒸気量との関係

が主要原因であると考えられ、孔口圧の変化による地下における流出熱水量と蒸気層からの噴気量との比を取って平均エンタルピと比較すると、図 6 の A・B 及び図 7 の A・B に示す如く両者の変化は全く一致する。この結果は熱水、噴気の混合流出であれば当然であるが、又推定の正しいことを示す結果でもある。

7 号井において孔口圧の低い値では蒸気層からの噴出量が直線関係から離れ小さい値を示している。孔口圧を低くすれば熱水流量が多くなり、特に 7 号井は多量の熱水 (200 ton/hour) が

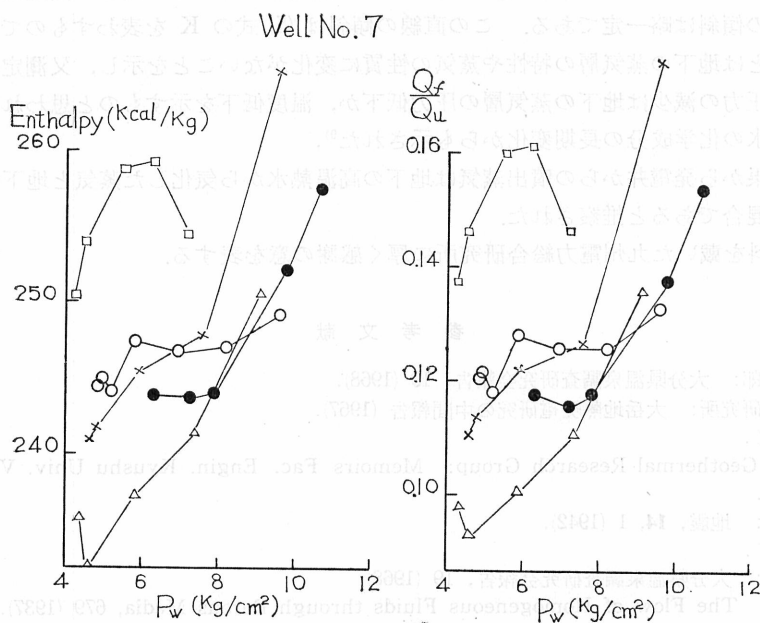


図 6-A. 九電 7 号井の孔口圧と Enthalpy との関係

図 6-B. 九電 7 号井の孔口圧と噴気量/熱水量との関係

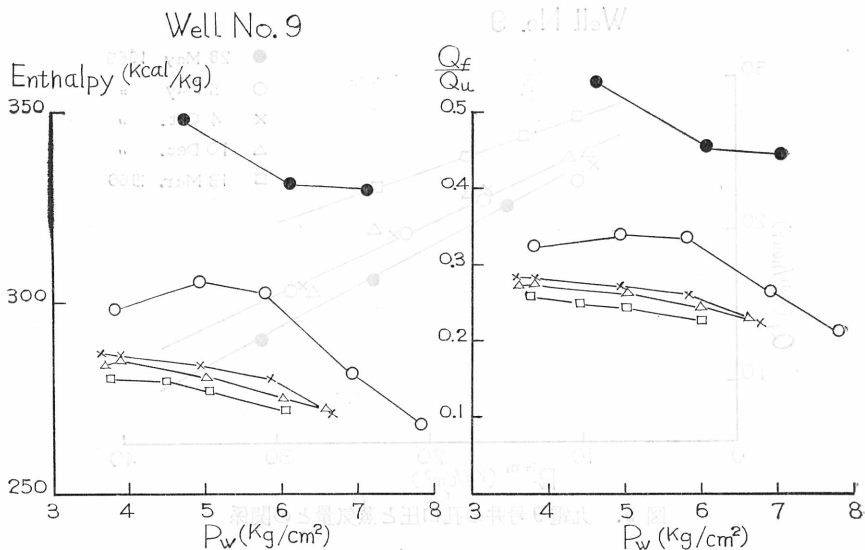


図 7-A. 九電 9 号井の孔口圧と Enthalpy との関係

図 7-B. 九電 9 号井の孔口圧と噴気量/熱水量との関係

流出するのでこのため蒸気層からの噴出が妨害され、したがって孔口圧は地下の蒸気層から井戸への流入圧力の変動を正しく示さないからであろう。熱水量の少ない 9 号井においてはこのような状態は見られない。

7, 9 号井の孔口圧と蒸気量との関係直線において測定期日によって両者の測定値が変わっているが、直線の傾斜は略一定である。この直線の傾斜は (5) 式の  $K$  を表わすもので、これが一定であることは地下の蒸気層の特性や蒸気の性質に変化がないことを示し、又測定時の経過と共に流量や圧力の減少は地下の蒸気層の圧力低下か、温度低下を示すものと思われる。これについては熱水の化学成分の長期変化からも示された<sup>9)</sup>。

以上の結果から発電井からの噴出蒸気は地下の高温熱水から気化した蒸気と地下の蒸気層からの蒸気の混合であると推察された。

終りに資料を戴いた九州電力総合研究所に厚く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 山下幸三郎: 大分県温泉調査研究会報告, 19 (1968).
- 2) 九電総合研究所: 大岳地熱発電研究の中間報告 (1967).
- 3) 1) に同じ.
- 4) Kyushu Geothermal Research Group: Memoirs Fac. Engin. Kyushu Univ. Vol. XXVII, 1, (1967).
- 5) 福富孝治: 地震, 14, 1 (1942).
- 6) 2) に同じ.
- 7) 古賀昭人: 大分県温泉調査研究会報告, 19 (1968).
- 8) Muskat: The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media, 679 (1937).
- 9) 未発表.