

# 北海道濁川温泉の湧出機構

日本重化学工業(株) 吉田 裕  
地熱事業本部 探査部

(昭和57年 3月14日受付, 昭和57年 5月22日受理)

## Study on the Hydrothermal System in the Nigorikawa Basin, Hokkaido

Yutaka YOSHIDA

Geothermal Development Division  
Japan Metals and Chemicals Co., Ltd.

### Abstract

Thermal waters discharged from the Nigorikawa Basin are characterized by various contents of  $\text{Cl}^-$ , high contents of  $\text{CO}_2$  and  $\text{HCO}_3^-$  and by the constant water temperature. These are considered to be due to the characteristic hydrothermal system in this area. According to the results of chemical analyses, it is suggested that the origin of the thermal water is related to the deep hot water ascending through the fractured zone along the caldera wall. The underground water which is heated by conductive heat is reserved in the two types of the reservoirs after being mixed with the steam and/or deep hot water. Because of incomplete mixing of such waters,  $\text{Cl}^-$  concentrations of thermal waters are varied in a wide range. On the other hand, as the movement of  $\text{CO}_2$  gas is independent of water, thermal waters become uniform both in the total dissolved carbonate concentration and enthalpy. These two kinds of waters come up to the surface, without mixing with the cold underground water near the surface.

### 1. ま え が き

濁川盆地は北海道南西部の渡島半島に位置し、その平坦部は標高100~140m、面積約5km<sup>2</sup>でほぼ五角形の形状を示し、周囲は標高400m程度の山で囲まれている。濁川温泉はこの盆地内に湧出し、その分布はFig. 1に示すように盆地の北側に偏っている。また濁川盆地の西部には上の湯温泉、銀婚湯温泉、桜野温泉等が分布している。濁川温泉に関しては、太秦他(1959)の地球化学的研究、福富他(1963)および浦上、西田(1977)の地球物理学的立場からの調査研究が行われている。これらの調査研究によると温泉の生成はNa-Cl型熱水とHCO<sub>3</sub>型熱水の混合からなり、その特徴として温泉水のCl<sup>-</sup>濃度が大きな変動幅を持つにもかかわらずHCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、CO<sub>2</sub>濃度は高濃度で一定しているという点があげられている。

一方、1972年以来濁川盆地内で50MWの地熱発電を目的とする開発工事が日本重化学工業(株)、道南地熱エネルギー(株)によって進められ、1981年までに調査井9本、地熱井17本(深度700~2,400m)が掘削され、これらの坑井から直接地下深部の熱水を採取することが可能となった。

本報文は温泉水および坑井熱水の分析結果にもとづき、温泉水の成因と深部熱水との関係、さらに地質構造との関連の上で濁川温泉の湧出機構のモデルについて考察したものである。

2. 地質・構造

道南地熱エネルギー(株)(1980)の調査結果によると濁川盆地は12,000-20,000年前の火山活動によって生じたクラカトア型のカルデラであり、盆地内部は活動時に堆積した凝灰岩、凝灰角礫岩から成るフォールバックと、その後に堆積したシルト岩、礫岩および砂岩等の堆積物によって満たされている。一方、盆地周辺は砂岩、礫岩、安山岩および凝灰岩等から成る新第三紀層(中新世-鮮新世)とこれを不整合に覆う軽石質凝灰岩、砂質シルト等の第四紀層で構成されている。さらに坑井の掘削によって新第三紀層の下部に石灰岩、粘板岩、チャート等から成る先第三紀層が存在することが知られ、その中の断層構造も確認されている。盆地を含むこの地域一帯の地質構造上の特徴としては上記のカルデラ構造の他に、北西-南東方向に軸を持つ褶曲構造とこれに交わる北東-南西方向の断層構造があげられる。濁川盆地の地質構造模式断面を Fig. 2 に示す。

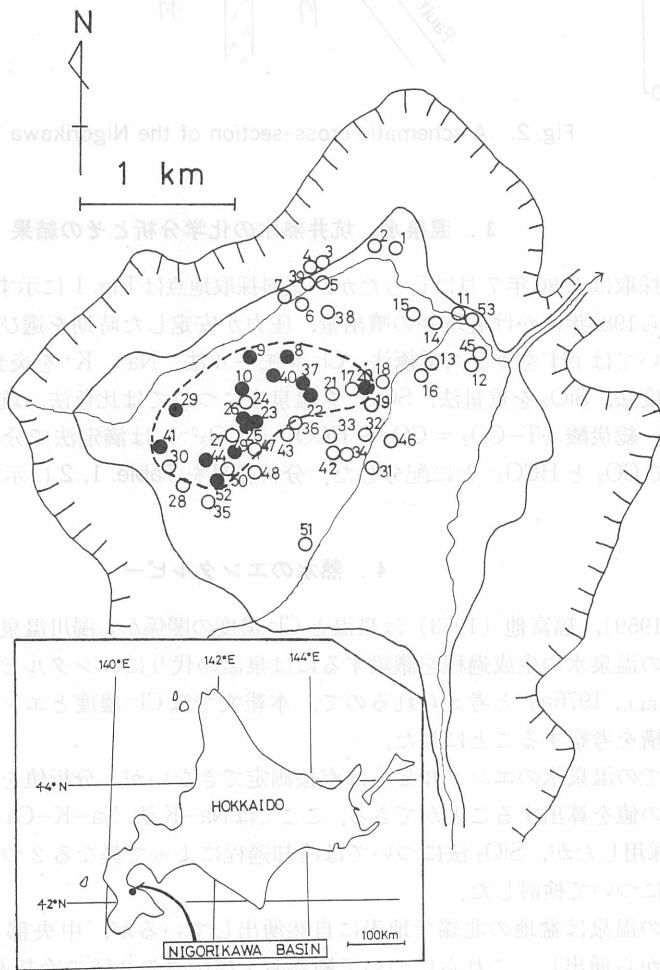


Fig. 1. Locality map of hot springs examined in this study.

Symbols; ●, low salinity high temperature ( $Cl^- < 100mg/l$ ,  $T > 40^\circ C$ ) hot springs; ○, other hot springs.

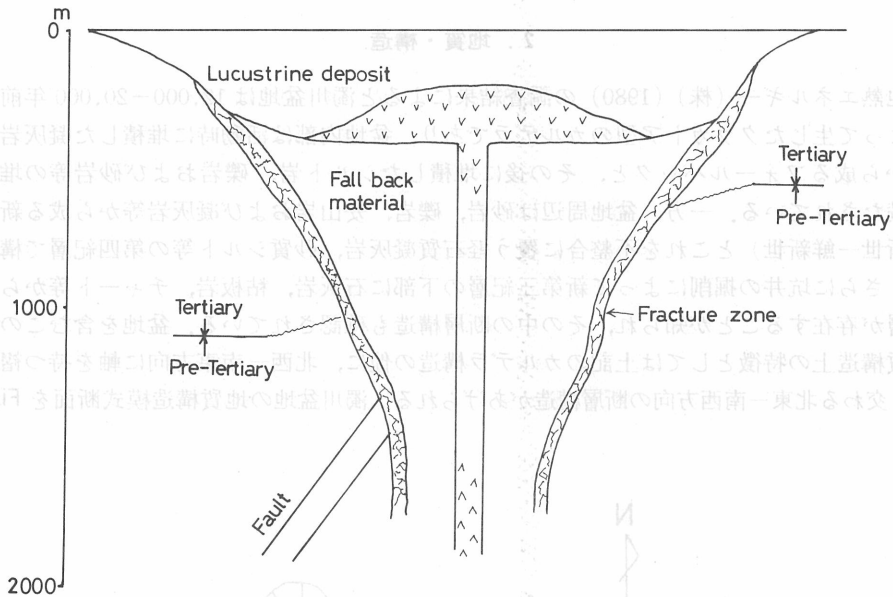


Fig. 2. A schematic cross-section of the Nigorikawa Basin.

### 3. 温泉水, 坑井熱水の化学分析とその結果

温泉水の採取は1980年7月に行ったが, 試料採取地点は Fig. 1 に示すとうりである. 坑井熱水は1977年から1980年にかけて各坑井の噴出量, 圧力が安定した時期を選び大気圧下で採取した. 化学成分については pH をガラス電極法,  $\text{Cl}^-$  をモール法,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  を炎光光度法,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  を原子吸光光度法,  $\text{SiO}_2$  を重量法,  $\text{SO}_4^{2-}$  を温泉水については比色法, 坑井熱水については重量法で分析した. 総炭酸 ( $\text{T-CO}_2 = \text{CO}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ ) は滴定法で分析し, 温泉水については pH によって  $\text{CO}_2$  と  $\text{HCO}_3^-$  とに配分した. 分析結果を Table. 1, 2 に示す.

### 4. 熱水のエンタルピー

太秦他 (1959), 福富他 (1963) は泉温と  $\text{Cl}^-$  濃度の関係から濁川温泉の湧出機構を論じているが, 地下での温泉水の生成過程を議論するには泉温の代りにエンタルピーを用いるのが有効である (TRUESDELL, 1976a) と考えられるので, 本報文では  $\text{Cl}^-$  濃度とエンタルピーによって濁川温泉の湧出機構を考察することにした.

貯留層内での温泉水のエンタルピーは直接測定できないが, 分析値を各種の化学温度計として用いればその値を算出することができる. ここでは Na-K 法, Na-K-Ca 法,  $\text{SiO}_2$  法 (TRUESDELL, 1976b) を採用したが,  $\text{SiO}_2$  法については冷却過程によって異なる2つの算出式があるので, 先ず冷却過程について検討した.

濁川盆地の温泉は盆地の北端で地表に自然湧出しているが, 中央部では深さ100m程度のボーリング井から湧出し, これらについて断熱および伝導の2種の冷却過程を想定して  $\text{SiO}_2$  濃度により温度を求めると160~170℃に集中する. しかし地表での泉温は90℃を越えるものはない. 一方, 濁川温泉における鉛直地温分布 (浦上他, 1977) によると盆地西端で深度50mで90℃を示すものが1箇所存在するのみで, 他の5点はいずれも深度60~100mで40~70℃である. こ

Table 1. Results of chemical analyses of thermal waters in the Nigorikawa Basin.  
( Collected on July 20 - 23, 1980 )

Sample No.	Temp. (°C)	Flow rate (l/min)	PH	HCO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	Na	K	Ca	Mg	SiO <sub>2</sub> (mg/l)
1	30.7	136	5.82	428	1086	30	21	64	8.8	87	45	127
2	34.5	11.5	5.74	333	1017	9	10	47	9.2	63	17	129
3	67.5	2.3	6.64	637	245	2325	25	1478	34.2	120	50	181
4	72.7	4.3	6.51	460	238	2696	31	1668	34.2	96	61	178
5	56.6	1.4	6.51	460	238	2596	26	1634	34.9	85	42	184
6	64.0	34.1	6.86	574	133	1083	14	568	127	131	98	189
7	88.5	52.1	6.88	927	205	1750	21	1113	21.1	109	87	207
8	57.3	49.1	6.38	583	408	19	19	89	47.1	73	42	153
9	54.3	19.0	6.81	290	75	13	10	61	35.1	13	6	161
10	53.7	62.5	7.52	224	11	11	7	41	26.5	8	4	147
11	42.1	27.2	6.14	696	845	521	70	448	10.5	109	52	162
12	28.6	2.1	6.06	632	944	96	10	134	11.0	82	45	114
13	47.0	7.5	7.45	856	51	667	14	517	39.1	88	55	151
14	56.0	85.7	6.42	667	426	638	10	524	32.8	92	42	184
15	51.1	50.8	6.27	986	888	345	12	387	30.9	93	45	142
16	50.3	7.5	6.26	633	584	163	12	187	25.8	108	73	147
17	76.2	96.0	6.57	801	362	645	10	583	28.1	117	19	188
18	62.9	107	6.31	636	522	421	15	314	4.4	129	36	130
19	56.4	61.2	6.89	552	119	945	11	624	26.1	91	50	172
20	57.4	6.1	6.53	1049	519	43	33	183	31.1	169	36	115
21	61.4	72.0	6.22	444	449	860	7	555	30.2	94	60	205
22	51.6	42.8	6.10	494	659	15	13	74	19.4	80	24	152
23	56.4	24.0	6.18	477	529	15	14	96	50.2	34	19	169
24	72.2	81.1	7.25	650	61	519	17	403	66.3	64	56	204
25	58.5	16.1	7.90	311	7	23	10	61	31.7	13	6	177
26	40.3	30.0	7.49	144	8	9	5	21	17.2	14	8	101
27	76.6	35.3	7.11	847	110	2103	23	1175	62.7	229	162	255
28	54.8	12.0	6.95	1008	189	635	15	494	22.3	150	83	176
29	63.2	42.9	6.40	785	524	77	7	115	55.1	172	39	193
30	75.6	125	6.45	668	397	1870	26	1218	57.4	137	47	133
31	48.8	35.3	6.91	524	108	625	8	418	27.9	86	55	185
32	46.9	63.8	6.51	475	246	532	6	378	25.9	88	59	185
33	50.2	115	6.37	504	361	512	6	378	28.7	93	61	188
34	47.2	143	6.31	557	457	534	6	383	30.0	94	61	168
35	51.7	17.1	6.29	1176	237	540	11	470	31.7	170	91	201
36	57.3	100	6.53	621	307	693	9	489	40.6	103	65	190
37	63.1	66.6	6.45	761	453	62	10	195	45.1	141	35	182
38	65.8	30.0	6.48	883	490	240	13	248	102	127	60	207
39	35.8	14.3	5.88	373	824	250	8	148	13.6	115	37	116
40	51.2	81.1	6.28	351	309	12	8	53	33.5	34	36	149
41	60.7	111	6.31	452	371	78	8	87	18.9	110	28	175
42	47.0	83.3	6.44	524	319	538	7	384	29.0	88	69	173
43	48.6	90.9	6.39	575	394	552	8	405	34.7	99	72	168
44	59.3	73.1	7.98	205	4	9	6	32	18.2	26	9	120
45	73.5	22.0	6.61	760	313	909	73	801	8.7	74	44	128
46	46.9	115	6.40	460	307	574	8	398	27.8	76	51	164
47	54.9	300	6.44	604	368	610	8	430	32.1	111	84	192
48	47.0	93.8	6.61	625	257	528	7	389	30.0	97	75	166
49	67.0	34.5	6.48	773	429	46	22	153	72.3	64	37	219
50	42.7	46.9	6.79	575	156	528	12	365	29.6	98	75	147
51	55.6	66.7	6.75	1122	335	3691	76	2255	102	104	184	221
52	54.8	100	7.85	257	6	11	7	41	19.5	44	5	136
53	46.8	13.0	6.15	621	738	476	57	420	22.7	14	54	175

これらのことは濁川盆地の地表近くでは水頭圧以上の飽和圧力を持つ高温熱水は存在しないことを示す。GRANT (1977) はブロードランドにおいて大量のCO<sub>2</sub>ガスを含む地熱水は純水の飽和圧力より高い圧力領域でも蒸気相を生成することを示しているが、濁川の温泉水のCO<sub>2</sub>含有量(約0.1%)程度ではその効果はほとんど無い。さらに今まで温泉井から大量の蒸気が噴出した記録がないことから考えても結局、石英と溶解平衡状態にある温泉水が貯留層から地表に上昇し湧出する間の冷却過程は断熱過程でなく熱伝導過程であるとみなされる。従って温泉水のSiO<sub>2</sub>温

Table 2. Chemical composition of hot waters discharged from geothermal wells in Nigorikawa.

Well	Date	PH	T-CO <sub>2</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	Na	K	Ca	Mg	SiO <sub>2</sub>
301	770411	8.81	450	5477	388	3750	385	5.0	2.1	407
302	781119	8.67	137	5863	126	3600	548	21.5	3.1	574
306	781008	7.98	277	5587	258	3448	474	13.6	4.7	490
B-2	790331	8.28	246	5260	258	3420	456	12.9	1.2	491
C-1	790531	8.53	358	5640	407	4063	504	8.6	2.7	440
D-1	800229	8.45	281	6371	432	4238	642	5.9	0.2	681
D-3	800717	9.01	288	6780	317	4370	656	5.0	0.6	726
D-5	790429	8.29	187	6428	182	4151	722	16.1	1.5	589
D-6	800229	8.22	281	7168	333	4627	709	6.0	0.1	747
F-2	790920	8.00	132	6104	132	3845	659	25.5	2.8	564
F-2a	800305	8.80	180	4683	205	3088	544	9.8	0.8	555
F-7	790730	8.50	99	7490	90	4660	881	21.8	0.8	726
F-9	800717	9.28	331	5910	593	4150	373	3.4	0.2	643

( waters were collected at the atmospheric pressure )

度計については熱伝導冷却式を用い、他の化学温度計の値と比較検討した。

Na-K 法, Na-K-Ca 法, SiO<sub>2</sub> 法の 3 種の化学温度計によって推定した温泉水の地下温度を Cl<sup>-</sup> 濃度によって 3 つに区分し, Table. 3 に示したが, 500 > Cl ≥ 0 (mg/kg) の温泉水については Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> 濃度が低いいため SiO<sub>2</sub> 温度のみ求めた. 試料 No. 6, 11, 24, 45 の Na-K 温度, Na-K-Ca 温度は平均値から 60~200°C もかけ離れているので, これらの値は平均値, 標準偏差の計算から除いた.

Table. 3 をみると Na-K 温度, Na-K-Ca 温度は Cl<sup>-</sup> 濃度の高い温泉水の方が低濃度のものより低温を示し, しかもバラツキが大きいことが分かる. これに対し, SiO<sub>2</sub> 温度は Cl<sup>-</sup> 濃度が低くなるにしたがって計算温度が低くなり, しかもバラツキが小さい. これらのことから貯留層内における Na, K, Ca を含む岩石と熱水との化学反応は Cl<sup>-</sup> 濃度の低下 (これは Cl > 500mg/kg の範囲に限って言えば混合の進行, すなわち時間の進行を意味する) とともに平衡に近づくがまだ完全な平衡状態に達していないことを示唆している. 従って, 計算温度のバラツキや Cl<sup>-</sup> 濃度との関係から温泉水の地下温度を求める方法としては SiO<sub>2</sub> 温度計の値が信頼できると考えられるので Cl > 500mg/kg のものについては SiO<sub>2</sub> の値からエンタルピーを求めた.

坑井熱水については, 深部熱水が極めて短時間のうちに減圧蒸発を行って断熱的に冷却しながら噴出するので, この SiO<sub>2</sub> 温度は断熱冷却式を用いて算出した. 各坑井の化学温度は Table. 4 に示すように F-9 号井の Na-K 温度のみ異常に低い値を示したが, SiO<sub>2</sub> 温度は 301 号井を除く全ての坑井熱水について実測温度の最高値と良い一致を示した. 301 号井の実測温度は温度計が坑井深度の 70% までしか到達しなかったために実際の坑内最高温度を示さなかったと考えられる. そこで坑井熱水のエンタルピーは SiO<sub>2</sub> 温度 (断熱冷却式) から求めることにした. エンタルピ

Table 3. Underground temperatures estimated by chemical thermometer methods.

Cl concentration (mg/kg)	T~Na-K			T~Na-K-Ca			T~SiO <sub>2</sub>			(°C)
	av.	σ	n	av.	σ	n	av.	σ	n	
Cl ≥ 1,000	* 89	31	7	* 143	19	7	177	13	8	
1,000 > Cl ≥ 500	**149	19	18	**161	17	18	171	7	21	
500 > Cl ≥ 0	-	-	-	-	-	-	161	13	24	

\* except No. 6

av.: average temperature

\*\* except No. 11, 24 and 45

σ : standard deviation

n : number of samples

Table 4. Underground temperatures estimated by chemical thermometer methods.

Well	Measured	T~SiO <sub>2</sub>	T~Na-K	(°C)
301	192	213	191	
302	236	239	239	
306	208	225	225	
B-2	241	225	221	
C-1	229	218	212	
D-1	263	250	237	
D-3	242	255	236	
D-5	236	239	256	
D-6	264	257	239	
F-2	237	235	254	
F-2a	---	234	258	
F-7	272	255	268	
F-9	239	245	176	

一と Cl-濃度との関係は後に述べる。

### 5. 坑井熱水の化学的特徴

温泉水と深部熱水との関係を検討するに先立ち、坑井熱水の化学的特徴を先ず次に述べる。大気圧下で採取した坑井熱水の分析値は Table. 2 に示したが、これらのうち 301, 306, B-2, C-1 の 4 坑井は他坑井に比較してエンタルピーが低く噴気特性も良好でない。従ってこれらの坑井を除き残りの坑井を熱水供給源に関連づけて分類すると次のとおりである。

- (1). カルデラ壁に沿う破碎帯に掘削されたもの。すなわち302, D-5, F-2, F-7。
- (2). 先第三紀層中の断層に掘削されたもの。すなわちD-1, D-3, D-6, F-2a, F-9。

これら2群の坑井熱水の間には明らかに化学性状の差がある。すなわちカルデラ壁破碎帯の熱水はCa<sup>2+</sup>が多く、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>が少なくCl/SO<sub>4</sub>重量比は30以上を示す。一方、先第三紀層内断層の熱水はこれと逆の傾向を持つ。また熱水のCl<sup>-</sup>濃度とエンタルピーの関係についても明らかな相違がある。

各坑井の噴気試験は1回だけでなく、数ヵ月の間隔をおいて2週間程度の期間で数回行われ、その場合熱水の化学組成は常に同じではない。これは貯留層内の熱水が完全には均一でなく、坑井熱水といえども本質的な深部熱水と地表水の混合物であり、噴気条件によって異なった混合割合の熱水が噴出するためと考えられる。しかし熱水組成が異なるとはいふものの貯留層が同じであればCl<sup>-</sup>濃度とエンタルピーとの間には密接な関係がある。各坑井毎で繰り返し行われた噴気試験時の結果を総合すると、カルデラ壁の破碎帯に伴う熱水については $h = 0.0212Cl + 151$ 、先第三紀層内断層熱水については $h = 0.0129Cl + 202$  ( $h$  = エンタルピー cal/g,  $Cl$  = 深部熱水Cl<sup>-</sup>濃度 mg/kg) の関係があり、夫々の分析数および相関係数を示すと44個、 $r = 0.836$ および85個、 $r = 0.553$ となる。なお深部熱水のCl<sup>-</sup>濃度については地表で大気圧下で得られた熱水の密度を1g/cm<sup>3</sup>とし、次式から求めた。

$$Cl = Cl_s \times \left( 1 - \frac{h_T - h_s}{r_s} \right)$$

ここでCl<sub>s</sub>は大気圧下でのCl<sup>-</sup>濃度、 $h_T$ 、 $h_s$ は夫々深部熱水と大気圧下飽和熱水のエンタルピー、 $r_s$ は大気圧での熱水の蒸発潜熱である。 $h_T$ はSiO<sub>2</sub>温度から求めた値である。

Fig. 3は繰り返し行われた噴気試験から得られた深部熱水のCl<sup>-</sup>濃度とエンタルピーの関係を示す。また深部熱水と地下における温泉水のCl<sup>-</sup>濃度とエンタルピーの関係を総合して示すとFig. 4のようになる。この図において温泉水のエンタルピーはCl<sup>-</sup>濃度に関係なく170cal/g付近に集中するが、○印で表わした温泉水の平均値(Cl<sup>-</sup> = 585mg/kg,  $h$  = 169.5cal/g)がカルデラ壁の破碎帯に伴う熱水の回帰直線に近く、個々の値も直線の付近に分布することから、この熱水が濁川温泉の源熱水であることが示唆される。

## 6. 濁川温泉の湧出機構

太秦他(1959)はCl型熱水とHCO<sub>3</sub>型冷地下水とが種々の割合で混合して湧出し、濁川温泉が形成されたと考えた。また福富他(1963)は温泉水のCl<sup>-</sup>濃度と泉温の関係(Fig. 5)から濁川温泉の源熱水としてCl型(A系)、Cl-HCO<sub>3</sub>型(F系)の2つを考え、F系熱水から水蒸気の供給を受けて生成したE系熱水と、上記A、F系熱水が冷地下水(C系)と混合することによって濁川温泉水が形成され、温泉水として供給される熱量の8割がFC系温泉によるものとしている。また放熱量調査の結果から濁川温泉地域での温泉水からの放出熱量は10℃基準で $4.6 \times 10^7$  cal/分であると報告している。

今回行った1980年7月の温泉調査によると温泉湧出量は3,120kg/分(温泉水の密度を1g/cm<sup>3</sup>とみなして)、放出熱量は10℃基準で $14.3 \times 10^7$  cal/分、放出Cl<sup>-</sup>量は1,826g/分である。これらの値から温泉水の地表でのエンタルピー、濃度の平均値を求めると、夫々55.8cal/g, 585mg/kgとなる。温泉水による放出熱量は福富他(1963)の値 $4.6 \times 10^7$  cal/分の約3倍に達するが、浦上他

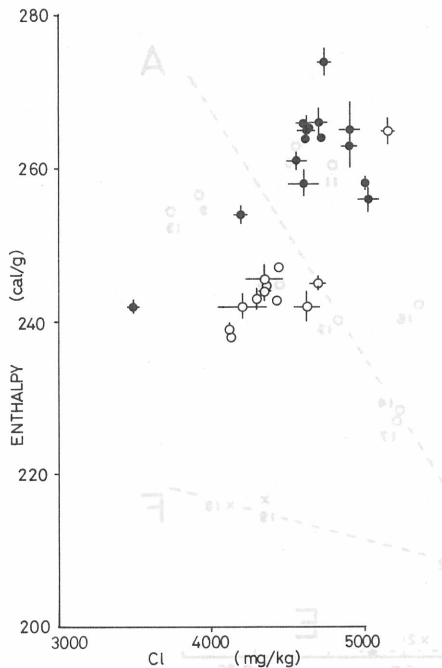


Fig. 3. Relation of enthalpy and Cl<sup>-</sup> concentration of deep hot waters at Nigorikawa.

Symbols; ●, deep hot waters derived from fractured zones in the pre-Tertiary formations; ○, deep hot waters derived from fractured zones along the caldera wall. Each point and bar show the average value and standard deviation within several production test period.

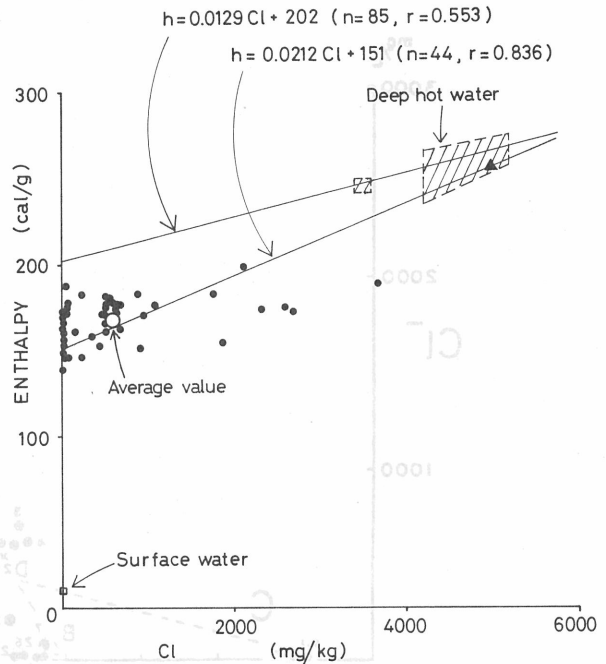


Fig. 4. Relation of enthalpy and Cl<sup>-</sup> concentration of thermal waters and deep hot waters at Nigorikawa.

Symbols; ●, value of individual hot spring; ○, average value of the whole hot springs; ▲, model value of the deep hot water derived from the caldera wall (h = 257 cal/g, Cl<sup>-</sup> = 5,000mg/kg). Upper and lower lines show those of obtained from the data of deep hot waters derived from fractured zones in the pre-Tertiary formations and along the caldera wall. All values of deep hot waters appear within a hatched area.

(1977) の値  $13.6 \times 10^7$  cal/分 にほぼ等しい。これは農業用に利用される温泉水の量が多くなったためである。

温泉水の源熱水については先に述べたように、カルデラ壁破砕帯熱水と考えられるので  $h = 0.0212Cl + 151$  の Cl—エンタルピー回帰直線上でかつ深部状態での坑井熱水の範囲内 (Fig. 4 斜線部分) の 1 つの値をもって源熱水の値としてモデルを想定した。仮定した源熱水は  $h = 257$  cal/g,  $Cl^- = 5,000$  mg/kg の値を持ち (Fig. 4 ▲印), これはカルデラ壁破砕帯熱水の中でもより本質的な熱水に近いと思われる F-7 号井の値にほぼ等しい。この源熱水の Cl<sup>-</sup> 濃度と地表放出 Cl<sup>-</sup> 量から源熱水の流量が 365 kg/分と求まり、さらにエンタルピーと流量から熱移動量が  $9.0 \times 10^7$  cal/分 (10℃基準) と計算される。一方、温泉水の貯留層内平均エンタルピーは次式によって求められる。

$$h = \frac{\sum (h_i \cdot G_{wi})}{\sum G_{wi}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで  $h_i$ ,  $G_{wi}$  は個々の温泉について求めた値であり、夫々地下でのエンタルピーおよび地表湧出量である。



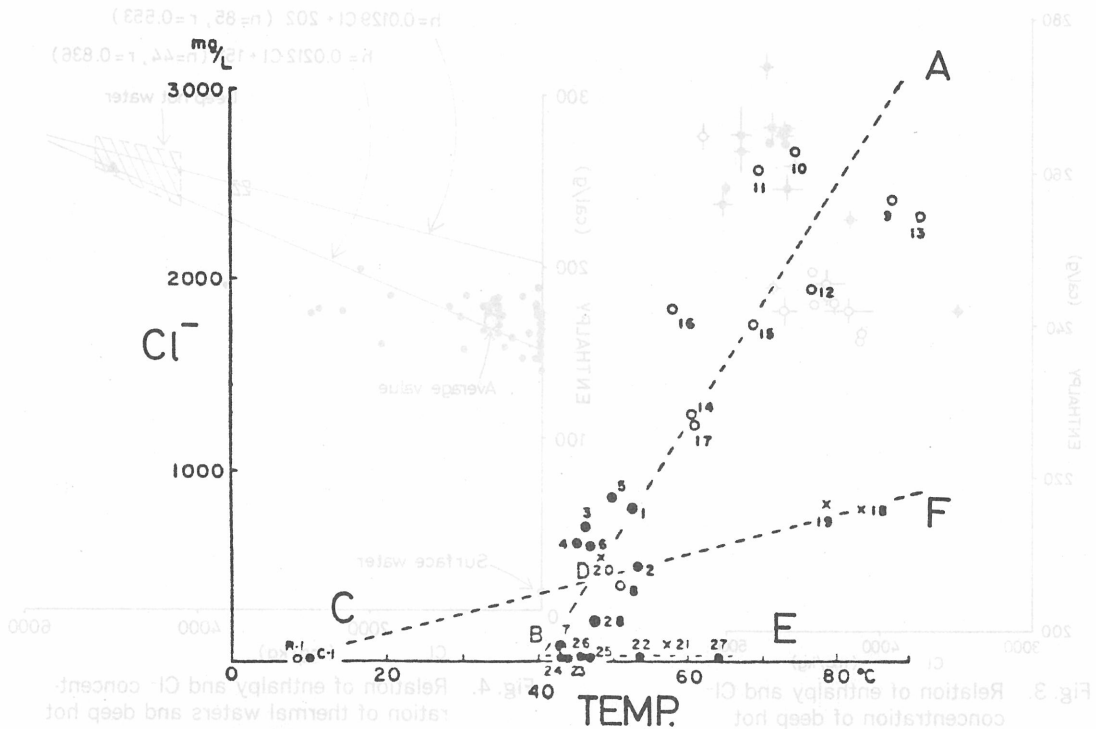


Fig. 5. Relation of  $\text{Cl}^-$  content and the orifice temperature of hot springs in the Nigorikawa Basin (after FUKUTOMI et al., 1963).

(1)式によって得られた温泉水貯留層内の平均エンタルピーは  $169.5 \text{ cal/g}$  であり、この熱水が上昇し熱伝導によって冷却された後地表に温泉水として湧出する。また濁川地域において熱伝導による地表への放熱量として  $13.6 \times 10^7 \text{ cal/分}$  (福富他, 1963),  $7.8 \times 10^7 \text{ cal/分}$  (浦上他, 1977) が報告されているが、今回は両者の平均値,  $10.7 \times 10^7 \text{ cal/分}$  を採用した。

これらの値をもとに濁川温泉における平均的な流体、熱の動きを計算し、その結果を Fig. 6 に示した。この図で明らかなように濁川温泉の水の供給源は深部熱水と地表水であり、熱は深部熱水と熱伝導によって供給される。

Fig. 6 では深部から供給される熱量の大部分は熱伝導によるものであり、深部では蒸気相による熱の供給はないと表現した。その理由を明らかにするために次に  $\text{T-CO}_2$  の収支について触れてみる。

濁川地域の深部熱水中の  $\text{T-CO}_2$  は  $10 \sim 20 \text{ g/kg}$  であり (YOSHIDA, 1981), Fig. 6 に示した深部熱水の  $\text{T-CO}_2$  含有量を  $10 \text{ g/kg}$  と低く見積っても  $365 \text{ kg}$  の熱水から供給される  $\text{T-CO}_2$  量は  $3.7 \text{ kg}$  であり、すでに温泉水として放出される量  $3.0 \text{ kg}$  を越えている。その差に相当する量の  $\text{T-CO}_2$  は盆地北東部に見られる冷噴気帯から遊離  $\text{CO}_2$  ガス、あるいは冷水に溶解して放出されていると考えられる。実際にこの量を見積ることは困難であるが、冷噴気活動が小さいことから余り大きくはないと考えられる。すなわち深部熱水  $365 \text{ kg}$  に溶解している  $\text{T-CO}_2$  量だけで十分地表に放出される  $\text{T-CO}_2$  量を供給することができると考えられる。一方、流体、熱の収支から計算で求めた深部からの熱供給総量は  $25.0 \times 10^7 \text{ cal}$  であるが、ここから深部熱水によってもたらされる  $9.0 \times 10^7 \text{ cal}$  を差し引いた残りの  $16.0 \times 10^7 \text{ cal}$  を熱伝導によるものとせず、仮に蒸気によって供給されたと想定すると、蒸気のエンタルピーを  $660 \text{ cal/g}$  として蒸気量は約  $250 \text{ kg}$  となる。蒸

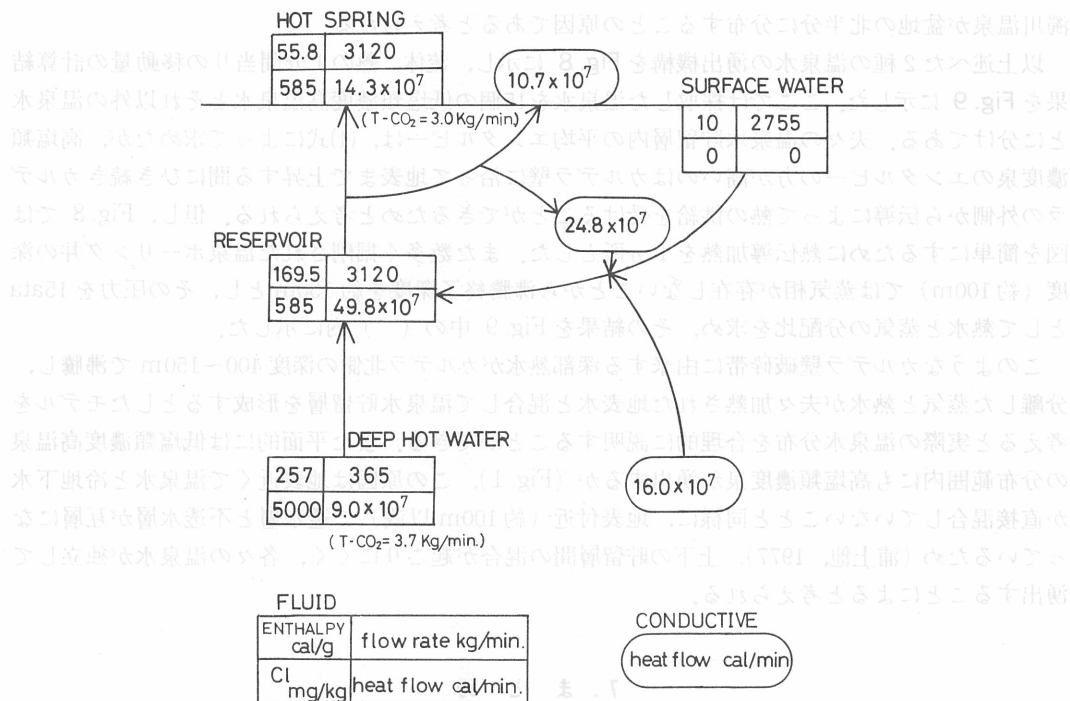


Fig. 6. Heat and water supply system in the Nigorikawa Basin.

気中のCO<sub>2</sub>量を坑井蒸気と同程度(10重量%)とするとT-CO<sub>2</sub>量は25kgとなり、熱の供給に関して伝導の代りに蒸気相を仮定した場合、供給T-CO<sub>2</sub>量がFig. 6に示した3.7kg/分以外に25kg/分が加わることになり、地表放出量から考えて不合理となる。供給熱量の大半が熱伝導によると考えられる理由もここにある。

Fig. 6は濁川の温泉水が全く均一であると見なした場合の最も単純なモデルの計算値であり、Cl=9~3691mg/lというように変動幅が大きい温泉水が湧出する実際の湧出機構はさらに複雑になるので、より現実に近いモデルを次に想定した。

濁川温泉で特徴的なことは盆地中央のやや北西部に低塩類濃度高温泉(Cl < 100mg/l, T > 40°C, 試料No. 8, 9, 10, 20, 22, 23, 25, 26, 29, 37, 40, 41, 44, 49, 52)が集中して分布することである(Fig. 1)。この低塩類濃度高温泉は15個存在し、その湧出量、放熱量、T-CO<sub>2</sub>放出量は夫々全体の24.3%, 25.2%, 17.9%である。これに対しCl放出量は全体の1.3%にすぎない。このことから低塩類濃度高温泉の生成に蒸気相の存在が関与していることが示唆される。

蒸気相は全圧が熱水の飽和圧力を下回った地点から出現するが、h = 257cal/gの熱水の飽和圧力は39.2ataであり、これは水柱圧にして約400mに相当する。深部からカルデラ壁破砕帯に沿って上昇してきた熱水は深度400mに達した所で沸騰を開始し、蒸気と熱水に分離して夫々地表水と混合しCl濃度の異なる2種の温泉水貯留層を形成する。

深部熱水から分離した蒸気はカルデラ構造に規制されることなく垂直方向に上昇すると考えられるので低塩類濃度高温泉の分布はカルデラ構造の400m等深度線の周辺に集中すると予想される。Fig. 7をみると、この予想と実際の分布が一致することが分かり、さらに上記温泉の分布が盆地中央のやや北西部に集中することから、カルデラ壁破砕帯の中でも特に北側で深部熱水の上昇が盛んであることが示唆される。このように深部での熱水上昇活動が北側に偏っていることが、

濁川温泉が盆地の北半分に分布することの原因であると考えられる。

以上述べた2種の温泉水の湧出機構を Fig. 8 に示し、流体、熱の1分間当りの移動量の計算結果を Fig. 9 に示した。ここでは採取した温泉水を15個の低塩類濃度高温泉水とそれ以外の温泉水とに分けてある。夫々の温泉水貯留層内の平均エンタルピーは、(1)式によって求めたが、高塩類濃度泉のエンタルピーの方が高いのはカルデラ壁に沿って地表まで上昇する間にひき続きカルデラの外側から伝導によって熱の供給を受けることができるためと考えられる。但し、Fig. 8 では図を簡単にするために熱伝導加熱を1ヵ所とした。また数多く掘削された温泉ボーリング井の深度(約100m)では蒸気相が存在しないことから沸騰終了深度を約150mとし、その圧力を15ataとして熱水と蒸気の分配比を求め、その結果を Fig. 9 中の( )内に示した。

このようなカルデラ壁破碎帯に由来する深部熱水がカルデラ北側の深度400~150mで沸騰し、分離した蒸気と熱水が夫々加熱された地表水と混合して温泉水貯留層を形成するとしたモデルを考えると実際の温泉水分布を合理的に説明することができる。また平面的には低塩類濃度高温泉の分布範囲内にも高塩類濃度泉が湧出するが(Fig. 1)、この原因は地表近くで温泉水と冷地下水が直接混合していないことと同様に、地表付近(約100m以浅)で透水層と不透水層が互層になっているため(浦上他, 1977)、上下の貯留層間の混合が起りにくく、各々の温泉水が独立して湧出することによると考えられる。

7. ま と め

濁川盆地の深部にはカルデラ壁破碎帯に由来する熱水とカルデラ外側の先第三紀層内断層に由

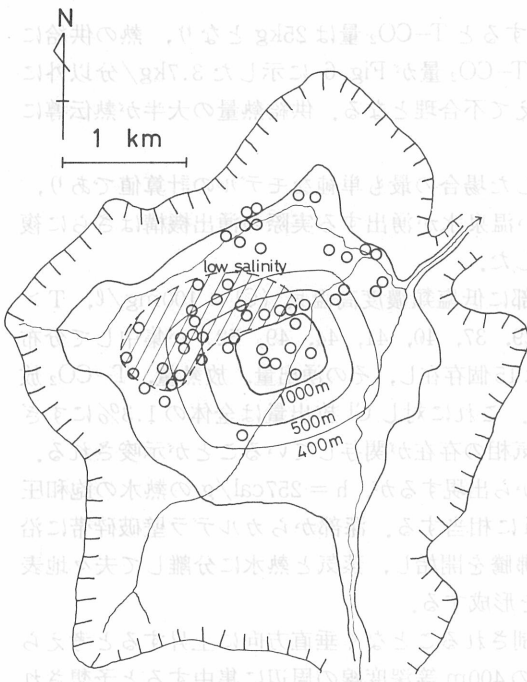


Fig. 7. Distribution map of the low salinity thermal waters related to the underground contour lines of the Nigorikawa caldera.

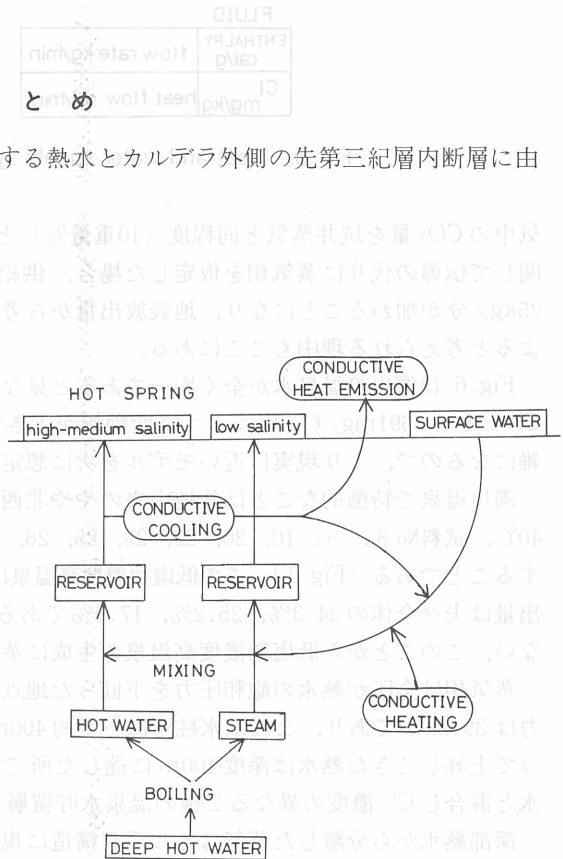


Fig. 8. Hydrothermal system consisting of two types of the reservoirs in the Nigorikawa Basin.

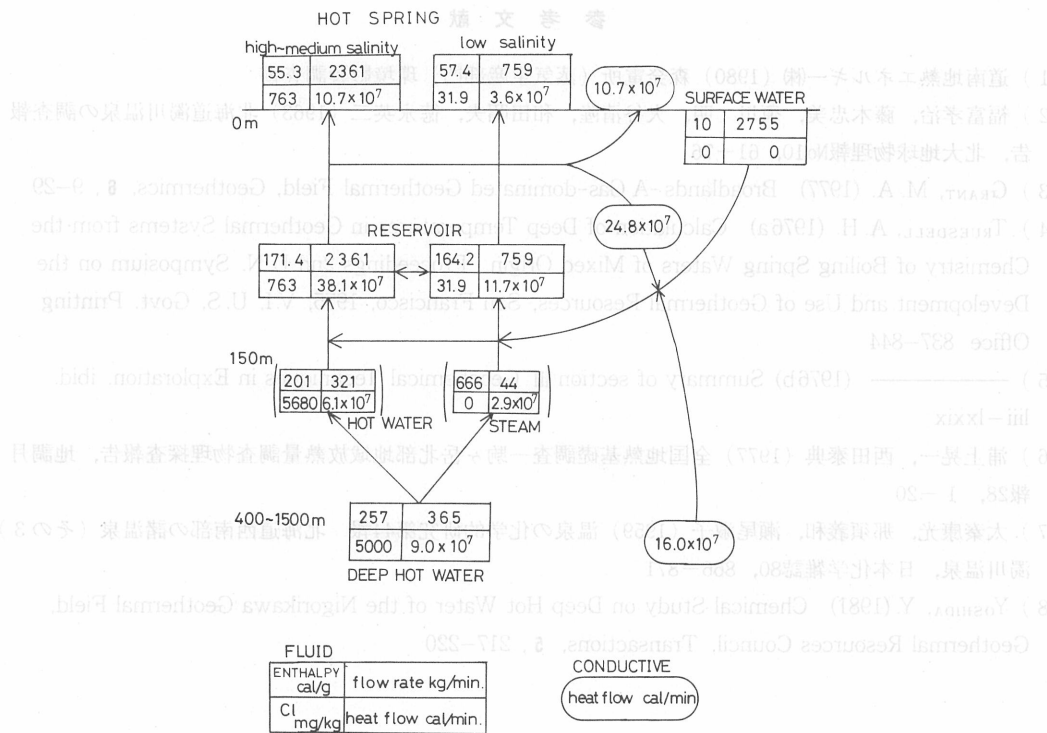


Fig. 9. Heat and water supply system based on the existence of two types of the reservoirs in the Nigorikawa Basin.

来する熱水の2つが存在するが、濁川温泉の源熱水となっているのはカルデラ壁破砕帯由来の熱水と考えられる。この深部熱水は1分間当り365kgの割で主に北部のカルデラ壁に沿って上昇し、深度約400mで沸騰を開始し、蒸気相を生成する。蒸気はすでに熱伝導によって加熱された地表水と混合して低塩類濃度高温泉の貯留層を形成し、残った深部熱水は地表水と混合して中～高塩類濃度高温泉の貯留層を形成する。温泉水のCl<sup>-</sup>濃度が大きな変動幅を持つのに対し、T-CO<sub>2</sub>濃度とエンタルピーがほぼ均一であるのは、2つの貯留層が不透水層によって隔てられて熱水の混合が起きない反面、CO<sub>2</sub>ガスの移動がある程度自由であることと、熱移動の大半が伝導によるためと考えられる。これら貯留層の深度は温泉ボーリング井よりやや深い深度の100～150mとみなされ、中～高塩類濃度泉貯留層内では混合作用の進行、すなわち時間の経過とともにNa, K, Caに関して熱水—岩石間の交換反応は進行するものの完全には平衡状態には至らないが、SiO<sub>2</sub>に関しては平衡状態にあると考えられる。

### 8. 謝 辞

日本重化学工業(株)の中村久由博士からは多くの御助言を賜わり、また粗稿を読んでいた。試料の採取、分析において同社探査部の藤井幸夫、明野利寛、出口俊光、猿舘正大、畑山敏彦、関龍三の諸氏には多くの御指導、御協力をいただいた。これらの方々に厚く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 道南地熱エネルギー(株) (1980) 森発電所(蒸気生産部門) 環境影響調査書
- 2) 福富孝治, 藤木忠美, 須川 明, 大谷清隆, 和田昭夫, 徳永英二 (1963) 北海道濁川温泉の調査報告, 北大地球物理報No.10, 61-76
- 3) GRANT, M. A. (1977) Broadlands-A Gas-dominated Geothermal Field, *Geothermics*, **6**, 9-29
- 4) TRUESDELL, A. H. (1976a) Calculation of Deep Temperatures in Geothermal Systems from the Chemistry of Boiling Spring Waters of Mixed Origin, *Proceedings 2nd U.N. Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources*, San Francisco, 1975, V.I, U.S, Govt. Printing Office 837-844
- 5) ————— (1976b) Summary of section III Geochemical Techniques in Exploration, *ibid.* liii-lxxix
- 6) 浦上晃一, 西田泰典 (1977) 全国地熱基礎調査一駒ヶ岳北部地域放熱量調査物理探査報告, 地調月報28, 1-20
- 7) 太秦康光, 那須義和, 瀬尾淑子 (1959) 温泉の化学的研究第44報 北海道西南部の諸温泉(その3) 濁川温泉, 日本化学雑誌80, 866-871
- 8) YOSHIDA, Y. (1981) Chemical Study on Deep Hot Water of the Nigorikawa Geothermal Field, *Geothermal Resources Council, Transactions*, **5**, 217-220

Fig. 9. Heat and water supply system based on the existence of two types of reservoirs in the Nigorikawa Basin.



熱の由来が断層帯を通過するものである。この水蒸気が地下深くに侵入し、そこで再び加熱される。このようにして、地下深くに侵入した水蒸気は再び加熱され、地下深くに侵入した水蒸気は再び加熱される。このようにして、地下深くに侵入した水蒸気は再び加熱され、地下深くに侵入した水蒸気は再び加熱される。このようにして、地下深くに侵入した水蒸気は再び加熱され、地下深くに侵入した水蒸気は再び加熱される。このようにして、地下深くに侵入した水蒸気は再び加熱され、地下深くに侵入した水蒸気は再び加熱される。

参 考 文 献

- 1) 道南地熱エネルギー(株) (1980) 森発電所(蒸気生産部門) 環境影響調査書
- 2) 福富孝治, 藤木忠美, 須川 明, 大谷清隆, 和田昭夫, 徳永英二 (1963) 北海道濁川温泉の調査報告, 北大地球物理報No.10, 61-76
- 3) GRANT, M. A. (1977) Broadlands-A Gas-dominated Geothermal Field, *Geothermics*, **6**, 9-29
- 4) TRUESDELL, A. H. (1976a) Calculation of Deep Temperatures in Geothermal Systems from the Chemistry of Boiling Spring Waters of Mixed Origin, *Proceedings 2nd U.N. Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources*, San Francisco, 1975, V.I, U.S, Govt. Printing Office 837-844
- 5) ————— (1976b) Summary of section III Geochemical Techniques in Exploration, *ibid.* liii-lxxix
- 6) 浦上晃一, 西田泰典 (1977) 全国地熱基礎調査一駒ヶ岳北部地域放熱量調査物理探査報告, 地調月報28, 1-20
- 7) 太秦康光, 那須義和, 瀬尾淑子 (1959) 温泉の化学的研究第44報 北海道西南部の諸温泉(その3) 濁川温泉, 日本化学雑誌80, 866-871
- 8) YOSHIDA, Y. (1981) Chemical Study on Deep Hot Water of the Nigorikawa Geothermal Field, *Geothermal Resources Council, Transactions*, **5**, 217-220