

大分縣地熱地帯の電気・放射能・地化学研究調査報告

地熱調査物探班

Résumé

Geophysical and Geochemical Surveys in Otake and Noya Districts
of the Kujū Volcano, Oita Prefecture

For the purpose of the exploitation of subterranean heat in the Otake and Noya districts around the Kujū volcano, Oita prefecture, the writers studied some geophysical and geochemical phenomena by means of X-ray survey, electrical prospecting, and also by chemical analysis of fumaroles, springs and underground CO₂.

Some characteristics obtained by the above methods are as follows ;

1. From the surface distributions of the X-ray strength at the Kora in Otake and Noya districts (Fig. 7 and Fig. 4), it seems that there are some relations not only between the distribution of the X-ray strength and the fumaroles, but also between that of the former and the Aso lava.

2. Comparing the analyses (Table 2) of the fumes from the fumaroles at Beppu, Japan with those of Larderello, Italy (Table 4), there is a little difference in chemical characters between them.

3. There seems to be some relation between the distribution of the underground CO₂ and the fumaroles (Fig. 8 and Fig. 15).

4. From the distributions of the S.P. anomalies (Fig. 5 and Fig. 13), it seems that there are some relations between the positive area of S.P. anomalies and the position of fumaroles.

5. By the data of the resistivity method (Fig. 6 and Fig. 22) it seems that there are some relations between the areas of low resistivity and rock alteration.

6. Large content of underground CO₂ are likely to be seen on alteration zone at the Noya district.

From the economical standpoint it is important to study that quantity of heat energy and vapour volume necessary for the utilization of subterranean heat and vapour are contained in underground or not. The water has tried to calculate, on the simplest assumption, the heat energy and the volume of underground water in a volcanic area, the enthalpy of the vapour energy at high temperature and high pressure, the heat conductivity of rocks, and the passable amount of the vapour through cracks.

1. 緒言

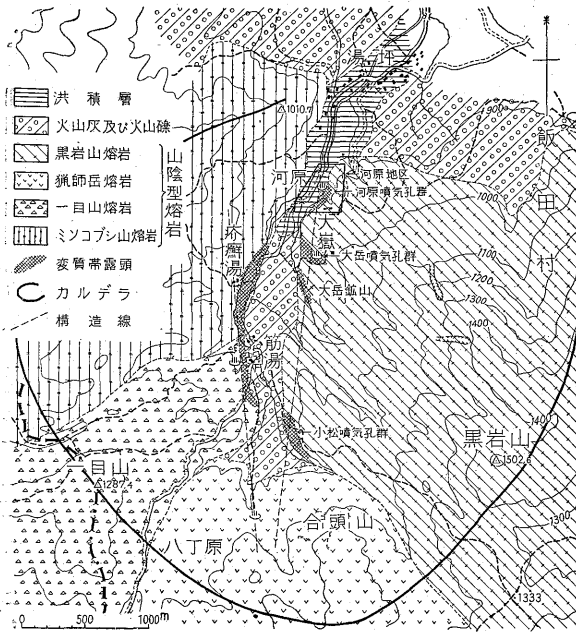
大分県地熱地帯の地質調査に並行して、地熱地帯の電気・放射能・地化学の各法研究調査を行った。これらは地質・地温・試錐の各調査と違って、調査技術も適用方法も、研究の段階にあつた。こゝに得られた結果もなお

研究途上にあることを示している。ともあれ、試みた結果を発表し、一里程標としての役を果したい。なお研究調査実施の分担、期日等は調査分担とともに第1表に示した。

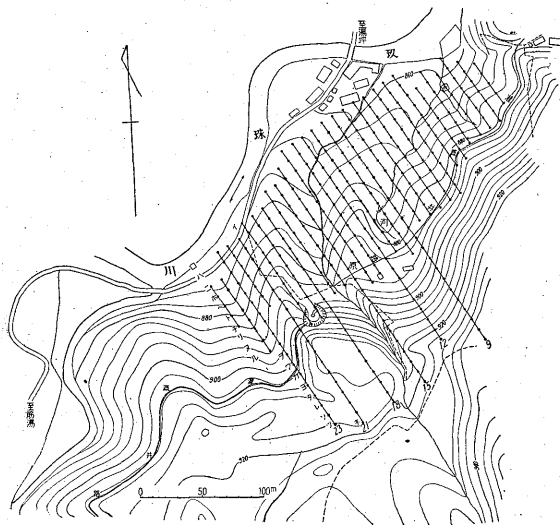
また研究調査地域の地形および地質図は第1図に示した。

第 1 表

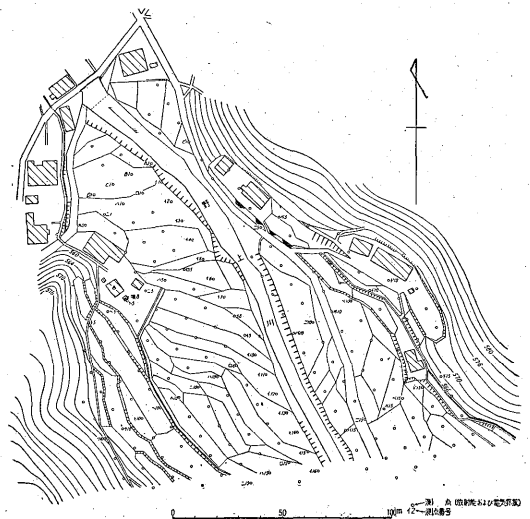
調 査	期 間	地 区	調 査 者
第 1 次 電 気 探 査	26-11-18	玖珠郡飯田村野上町野矢	蜷川 親治 陶山 淳治
第 1 次 放射能探査	"	"	下河原 達哉
第 1 次 地化学探査	"	"	下河原 達哉
第 2 次 電 気 探 査	27-3-17 27-3-28	玖珠郡野上町野矢	二日市 宏
第 2 次 地化学探査	"	"	下河原 達哉



第1図 大嶽地帯地形および地質図



第2図 大嶽地帯地帯電気探索測線および測点配置図



第3図 野矢地区地形測点図(九州配電会社原図)

は水平分布を、野矢地区では幾多の測点で垂直分布の測定を行った。その結果を第2・3・4・5および6図に示した。

2.3 調査結果および考察

2.3.1 自然電位法

噴気孔近傍に電位の異常が認められ、その値は比較的小さく、大嶽地帯河原地区噴気露頭近傍に正の異常が、少し離れた周辺に負の異常が認められる。

この原因は未だ明らかでないが、かつて温泉噴気地帯で行われた調査にも、同様の現象を認めており、地熱蒸気による地下浅所の変質帯と関連ある現象と考えられる。

2.3.2 比抵抗法

大嶽地帯河原地区の結果では、調査区域の南東部山地は(15線ヨ～9線タにかけて)比較的高抵抗となっており、南部山地(18線チ～21線ラ以南)を含むその他の区域は低抵抗となっている。

この原因については明確なことは不明であるが、地熱蒸気が岩石を変質し、粘土化していると考えられる所が低抵抗を示し、変質の進んでいない所、ま

2. 第1次電気探査

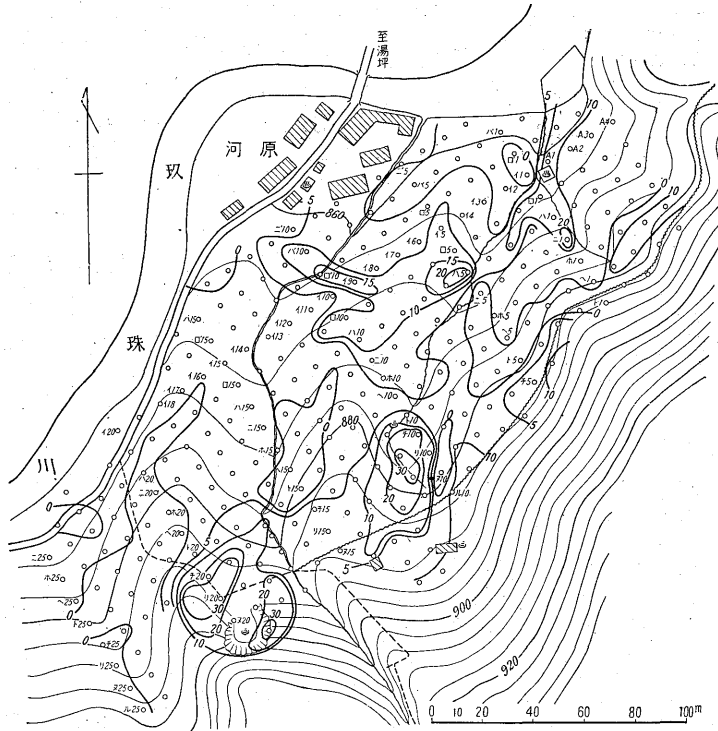
2.1 調査目的

調査地域の地質構造、および地熱蒸気の有無によつて起つている物理現象についての資料をうる目的で電気探査を行った。

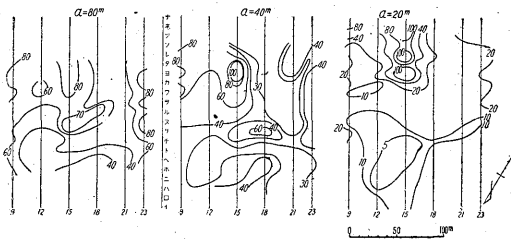
2.2 調査方法

自然電位分布の測定は、大嶽地帯河原地区および野矢地区で行い、比抵抗分布の測定は、大嶽地帯河原地区で

たは珪化した所では比較的高抵抗を示すことが考えられるので、以上の結果は、変質帯の分布と関連ある現象と思われる。したがって南部山地の低抵抗は注目に値する。その他の区域の低抵抗については、農耕地等は地表附近が低抵抗となっている場合が多いため、かような地表附近の条件を無視して、これらの現象が直ちに粘土化帯と関連あるものと考えることができないので、さらに広汎な調査によつて、変質帯との関連性を考えるべき性質のものと思われる。



第4図 大嶽地区自然電位分布図 (九州配電会社原図) 単位 mV



第5図 大嶽地区大地見掛比抵抗分布図 単位 kΩ·cm

要するに地表条件を考慮に入れて、広汎な区域についての分布の測定結果を解釈するならば、その結果は地質構造を推定する場合、良好な資料を提供できると考えられる。

3. 第1次放射能探査

3.1 調査目的

噴気孔周辺での放射性物質の分布状態をみる目的で、大嶽地帯河原地区、および野矢地区の r 線強度分布を測定した。

3.2 調査方法

用いた器械は科学研究所で試作された野外用放射線測定器で、東芝製の r 線用ガイガー・ミュラー計数管(自然計数約 100 count/min のもの)をつけて用いた。この器

械に感ずる r 線は、宇宙線によるもの、附近の地表面岩石土壤中の放射性物質からでる r 線、および附近の大気中に存在する放射性ガス (Rn, etc.) からでる r 線の3者からなる。

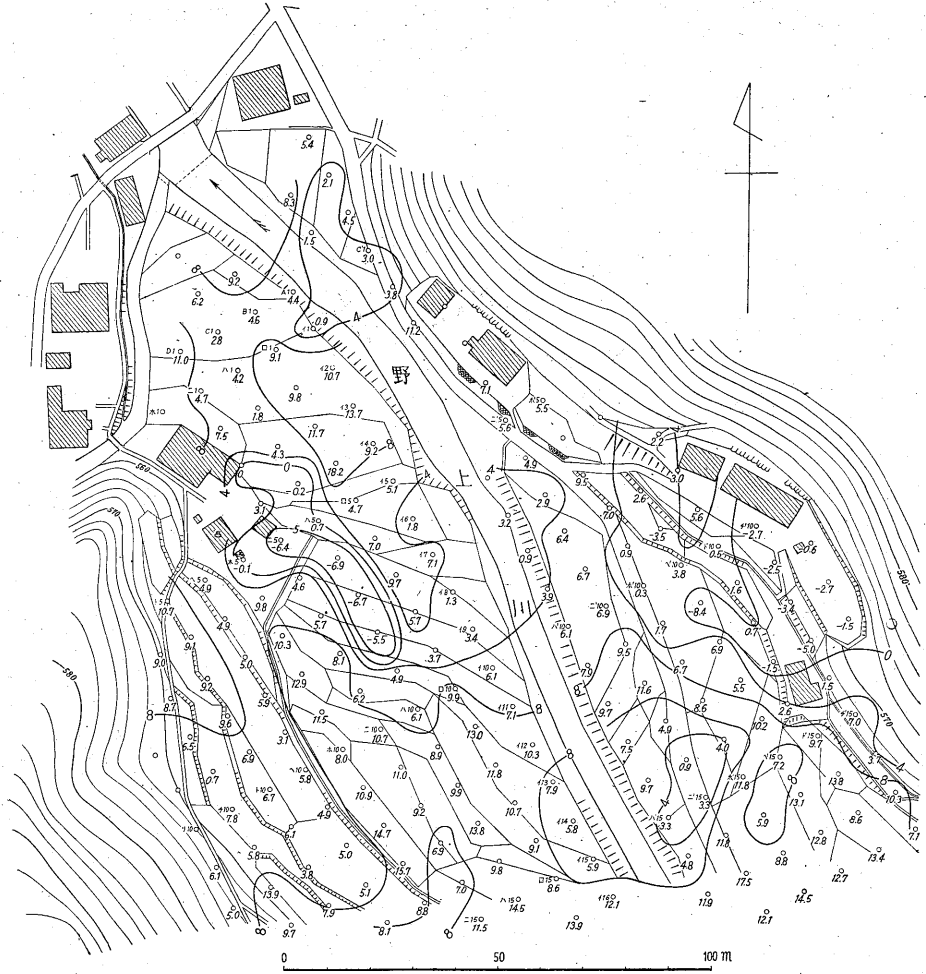
測定には計数管を横にして、地上約 15m の位置に置き、5分間の計数を数えて平均した。

測定結果を第7・8図に示す。調査時間の関係上、大嶽地帯河原地区では北半分は測定できなかった。

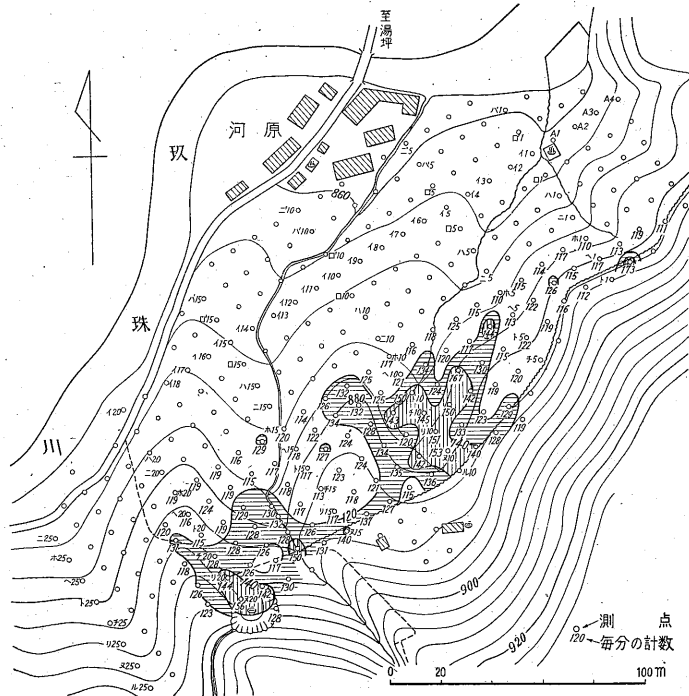
3.3 調査結果および考察

測定結果をみると、両地区とも自然計数より全般的に計数多く、すなわち r 線強度が大きく、殊に噴気孔に近い所は大きな値を示している。これは後述する地中 CO_2 分布も、噴気孔近くで濃度大となることと考え合せると、地熱蒸気とともに放射性ガス (Rn, Tn 等) が噴気孔近くに漏出しているため、あるいはその壊変生成放射性元素の濃縮のためかと考えられる。さらに噴気孔近傍の岩石はかなり変質を受けているから、変質に伴う放射性元素の集散も考えられる。

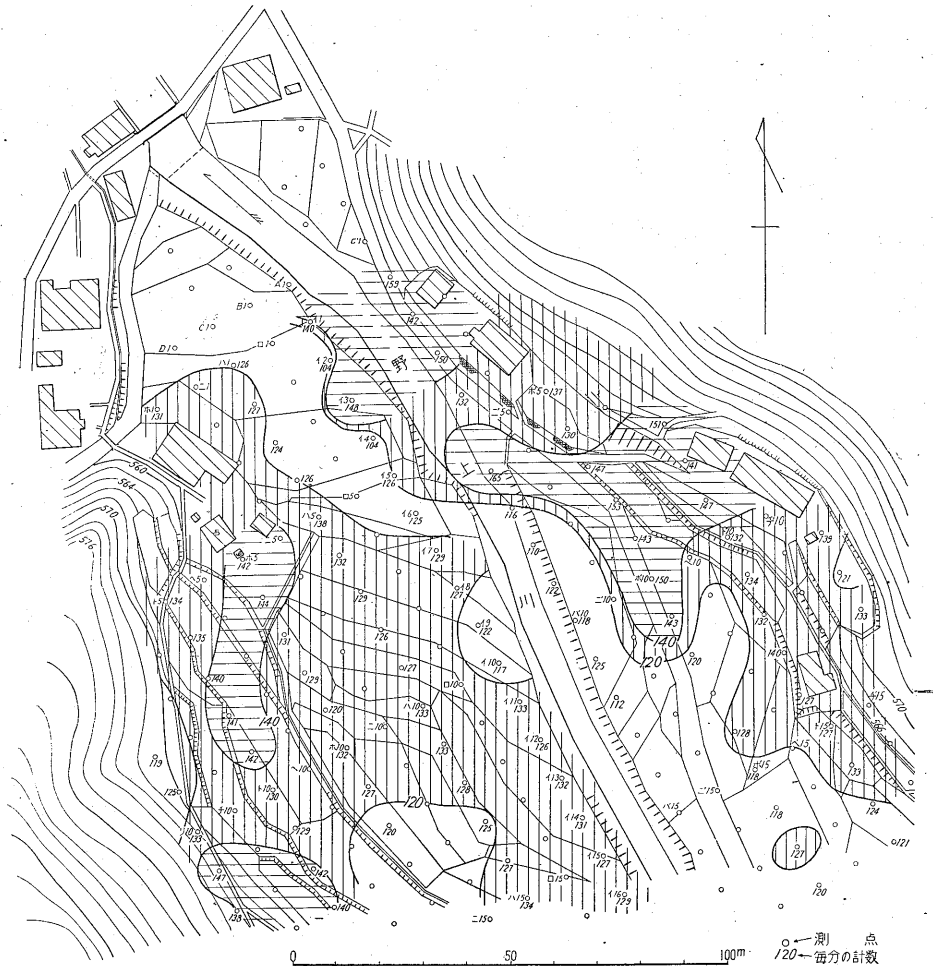
野矢地区では、このほか阿蘇熔岩の露岩部近くで r 線強度の増大が認められた。そこで野矢地帯の道路脇で阿蘇熔岩露岩のみられる第9図の a, b 2地点で露岩中央部岩上に計数管を置いて測つたところ、2地点とも約 200 counts/min という大きな値を示した。阿蘇熔岩、殊



第6図 野矢地区自然電位分布図 単位 mV



第7図 河原地区地表γ線強度分布図 単位 毎分の計数



第8図 野矢地区地表γ線強度分布図 単位 毎分の計数

に玻璃質の阿蘇熔岩にはラヂウムが一般に多いようである(註1)から、その影響がかなり現われているものかと考えられる。

γ線強度の分布は、以上のように噴気孔の存在する付近で大きな異常を示すが、他の原因例えば阿蘇熔岩の露出等でも異常を示す。結局γ線強度分布の異常だけでは、何が原因で、すなわち放射性物質の種類、量およびそれらの集積し方等のどのような組合せで異常が起つたのか、はつきりと知ることができない。

4. 第1次地化学探査

地熱蒸気の存在に関連して起ると思われる地化学的現象を追求することは、地熱地帯研究調査の大事な面である。

噴気(噴気孔から噴出している地熱蒸気)および温泉の

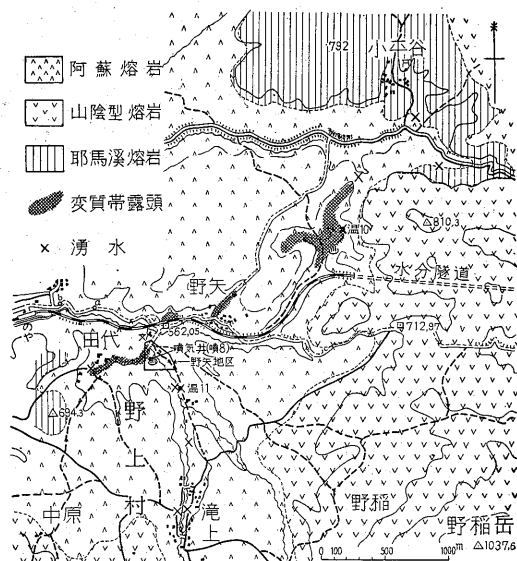
化学成分分析と、その分布状況調査、ならびに噴気孔近くに地温測定のために中村技官らの設けた深さ約1.5mの小孔中にたまっている空気のCO₂濃度(このCO₂濃度は地中から漏出するCO₂ガスの量にほぼ比例するものと考えられる。以後簡単に「地中CO₂濃度」と呼ぶことにする)の分布調査を行った。以下に試料の採取、分析法、結果、結果の考察の4項に分けて述べる。

4.1 試料の採取

採取地点は大嶽地帯河原地区河原噴気孔群で3カ所、大岳および小松噴気孔群(大岳地獄・小松地獄と呼ばれている)からそれぞれ1カ所および2カ所を選んだ。野矢地帯では噴気井1カ所である各噴気孔群内では温度の最高の地点を選んだ(註1)。これらの採取地点は第9・10図および第11図に噴1~噴8として示してある。

註2) 温度の高い所は噴気も強い。しかしあまり過熱された水蒸気は見当らなかった。沸点以下の噴気は当然ながら採取してみると空気が多量に混入している(噴4および噴7)。

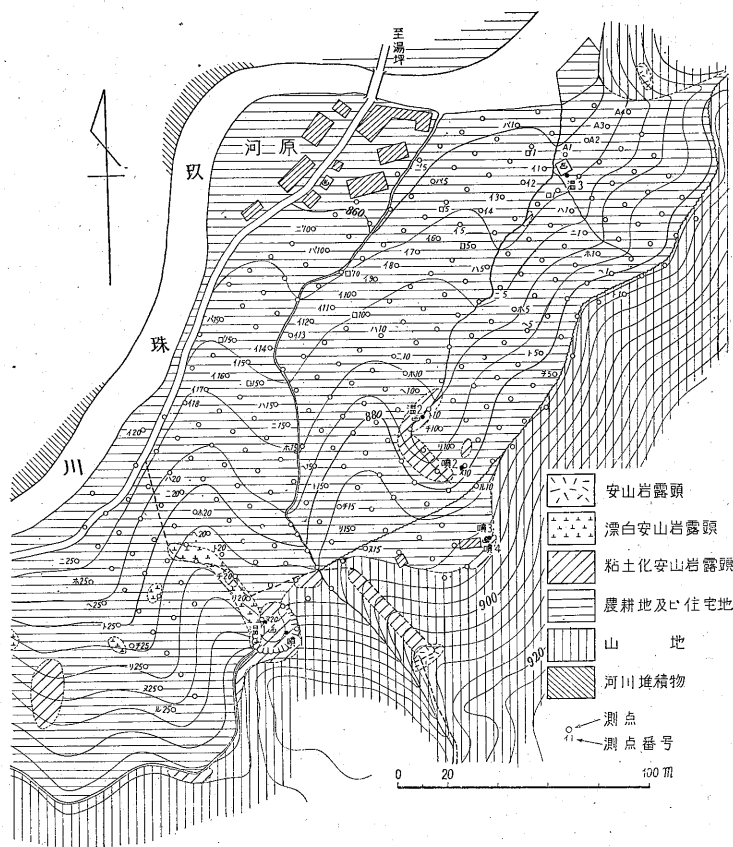
註1) 岩崎岩次: 火山の化学, 190頁, 193頁
齋藤信房: 日化, 67, 13 (1946)



第9図 野矢地帯地形および地質図 附. 噴気および温泉測点



第10図 大嶽地帯噴気および温泉測点図

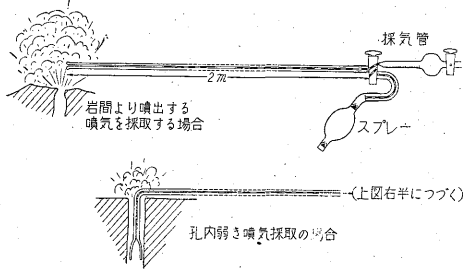


第11図 河原地区地形, 測点および地質図(地形は九州配電会社原図, 地質は大田良平原図)

噴気採取には第12図に示すような方法を取った。すなわちガラス毛細管(内径 1 mm, 長さ約 2 m)の一方を噴気のなか(透明部分)に入れ、一方に真空採気管をつないで、水蒸気分をガラス毛細管中で冷却凝縮させつつ採気管中に流入させる。採取は1地点2回以上行って別々に分析した。

次に温泉の採取について述べる。採取地点は各温泉群ごとに1カ所以上である。ただし最南端の八丁原東縁の温泉は調査できなかつた。これらの採取地点は第9・10および11図に温1~温11として示した。

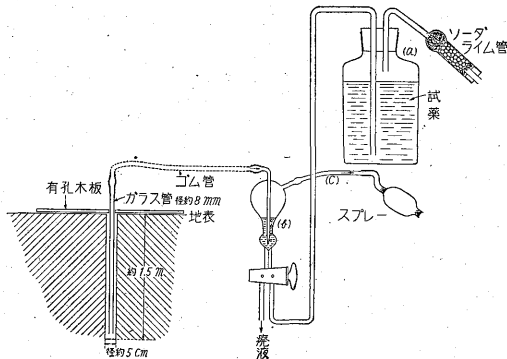
温泉の採水法は、湧出量の多いものはさして問題ないが、湧出量が少なくと採水時に成分変化が起り易いから



第12図 噴気採取法略図

注意を要する。できるだけ空気にふれないようにして採水したが、湧出量少なく、いわゆる坊主地獄状になって白濁しているものは、東洋濾紙5Cで濾過しながら採水したから、若干の空気酸化を受けているであろう。しかしこれらは湧出部でも長く空気にさらされており、また沢水の混入の心配もあり、状況不安定である。これらの状況は第3表の湧出量および備考欄に示す。また温10は、時間不足で土地の人に頼んで採水してきてもらったものである。同じく時間の関係で全試料とも1回の採水のみである。

地中 CO₂ 濃度測定のための地中ガスの採取地点は地温調査測点を利用した。ただし野矢地区では時間不足の



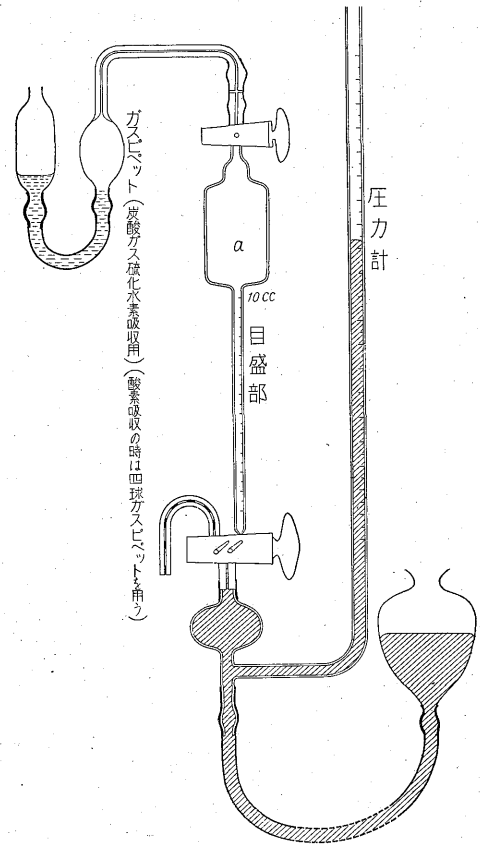
第13図 地中 CO₂ 採取図 (I) および分析器略図

ため一部測定を省略せざるを得なかつた。

地中ガスの採取法は、第13図左に示すように、深さ約 1.5 m の小孔中にガス管を下し、孔口に蓋しておいて、図の右端のスプレーで孔内の空気を採取しつつ測定器(第13図右)に導びく。はなはだ不完全な採取方法であるから、得られた結果の絶対値を考える程度ならこの方法で充分なようである。

4.2 分析法

噴気分析には第14図に示す装置を試作^{註3)}して用いた。図の採気管 a を水銀を用いて真空とし、第12図に示すように噴気を採取して分析した。H₂O は凝縮水量



第14図 噴気分析器略図

を管 a の目盛部で測る。残余ガス中 CO₂+H₂S, O₂, Ne 等はそれぞれアルカリおよびアルカリ性ピロガロール液に吸収させて、定容ガス計量法で定量した。H₂S は凝縮水および残余ガス中 CO₂+H₂S を吸収させたアルカリ液を合した液から“ヨードメトリー”で定量し、CO₂ は残余ガス中 CO₂+H₂S 量、全 H₂S 量および凝縮水に溶解したと思われる CO₂ 量および H₂S 量を計

註 3) 野口喜三雄教授の別府白竜噴気を用いられた装置を参考にした。地熱発電試験研究報告書第一集……工業技術庁 1952-3, p. 79-1

第2表 噴気分析表

噴No.	場所	温度(°C)	H ₂ O (Mol% 重量%)	CO ₂ (%)	H ₂ S(%)	O ₂ (%)	N ₂ etc.(%)	備考
1	河原地獄	96.5	99.04 97.69	0.944 2.274	0.0107 0.519	0.0067 0.0107		H ₃ BO ₃ 0.0005% (重量)以下
"	"	96.5	98.99 97.57	0.996 2.397	0.0083 0.015	0.0090 0.014		HCl 0.0003% (%) 以下
"	"	96.5	99.04 97.71	0.939 2.262	0.0086 0.016	0.0095 0.014		
2	"	95.8	98.98 97.53	1.021 2.457		0.010 0.015		
3	河原地獄 噴気井根本漏洩	96.7	99.05 97.76	0.893 2.152	0.0089 0.017	0.047 0.072		
"	"	96.7	99.09 97.82	0.884 2.131	0.0100 0.019	0.017 0.026		
4	河原地獄 噴気井管口漏洩	88.0	91.41 86.46	0.718 1.658	0.0011 0.002	1.54 2.59	6.32 9.30	空気混
5	大岳地獄	96.4	99.72 99.32	0.269 0.654	0.0048 0.007	0.010 0.015		
"	"	96.4	99.72 99.32	0.263 0.638	0.0040 0.007	0.0095 0.015		
6	小松地獄	96.4	99.57 98.98	0.399 0.968	0.0199 0.037	0.0069 0.001		
"	"	96.4	99.67 99.20	0.315 0.765	0.0160 0.030	0.0050 0.007		
7	"	96.0	95.70 93.11	0.224 0.532	0.0077 0.014	0.80 1.38	3.28 4.96	空気混
8	野矢噴気 井口	97.5	99.95 99.89	0.044 0.106	**	**		H ₃ BO ₃ 0.0005% (重量)以下
8*	"	97.7	99.93 99.83	0.064 0.164	0.0011 0.0021	***		HCl 0.00001% (%) 以下

* 噴気をアルカリ液中に導いて H₂O, CO₂, H₂S を固定し分析する。

したがって *** の O₂, N₂ etc は採取されていない。

** 噴気を採取後直ちに分析せず帰庁後分析。コック不良のためこの間空気が侵入し H₂S は酸化, O₂, N₂ etc も定量無意味となつたので H₂O および CO₂ のみ定量す。

第3表 温泉

温No.	場所	水温 °C	pH	T.S.M. (蒸発残渣) mg/l	SiO ₂ mg/l	Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃ mg/l	Ca [#] mg/l	Mg [#] mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ⁻⁻ mg/l
1	河原(小地獄内)	95.0	2.4	1999.	299.	269.	43.3	20.4	0.9	1287.
2	" (北の地獄内)	81.0	2.2	1357.	220.	117.	37.6	10.7	2.3	918.
3	河原田の湯	69.0	4.1	318.	160.	4.	17.4	2.7	1.6	29.6
4	大岳の湯	81.0	6.4	322.	167.	0.5	13.6	2.5	1.7	41.9
5	疥癬の湯 1	57.3	5.8	1067.	52.5	8.	75.9	5.9	338.4	269.9
6	" 2	81.0	6.2	1409.	93.5	3.5	86.7	7.1	470.0	310.1
7	筋湯(両筑屋湯元)	60.0	3.3	793.	132.	13.	10.6	3.0	294.0	107.7
8	小松(地獄内明礬の湯)	87.6	2.0	2251.	314.	227.	20.6	11.6	2.4	1555.
9	小松(地獄内南部)	69.1	3.0	230.	57.5	19.5	8.9	3.3	1.7	127.4
10	野矢冷泉	3.0	3.0	244.	43.	19.5	9.7	4.5	4.2	定量せず*
11	" 野上川畔	30.5	7.6	112.	50.	0.	11.5	3.7	1.9	5.9

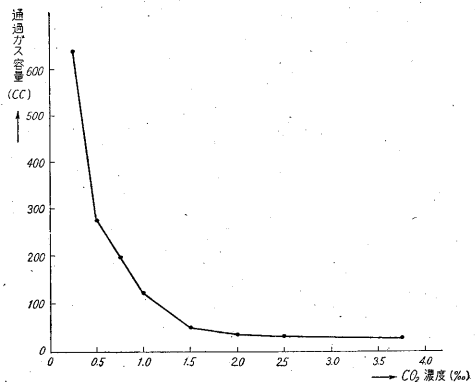
算して、これらの値から全 CO₂ 量を算出する。O₂+N₂ etc. 量が少量の際は O₂ 量の定量を省略した。このごく少量の O₂+N₂ etc. は装置操作中にガラスコック等の漏洩で混入したものか、噴気中にあつたものかはつきり区別できなかつた。H₂O, CO₂, H₂S の分析精度は、同一地点での2回以上の採取分析結果をみれば満足できるものと思われる。また、野矢の噴気については以上に述べた方法のほかに、噴気を同じくガラス毛細管を通して自然冷却しつつアルカリ液中に導き、H₂O, CO₂, H₂S を固定して、それぞれを分析する方法によつて前の方法で得た結果と比較してみた。この方法は前の方法より簡便な方法なので、さらに装置を工夫すれば、他のガス成分も簡易に定量し得て、有用と思われる。なお、噴気1および8の凝縮水を集め、これについて B₂O₃ および Cl⁻ を定量したが、量が少なく有効数字がでなかつた。

温泉水の分析には一般の水分析法を採用した。すなわち、採取現場で pH, 水温, HCO₃⁻ (メチルオレンジ変色点まで酸滴定), 溶存 CO₂ (Na₂CO₃ による滴定) の測定, H₂S の CdCO₂ による固定を行い、試料を持ち帰つて後 H₂S のヨードメトリー法滴定, 帰庁後, T.S.M. SiO₂, Fe₂O₃+Al₂O₃ の重量分析, Ca の KMnO₄ 滴定, Mg は Ca(COO)₂ 濾液につきエチレンジアミンテトラ醋酸ニナトリウムによる滴定註4), Cl⁻ は Mohr 法滴定, SO₄²⁻ は重量分析, B₂O₃ はマンニットを用いてアルカリ滴定を行つた。第4表の分析値はそれぞれの分析精度を考へて、有効数字を記し、参考数字を小さく記してある。

地中 CO₂ 濃度の分析は次のようにして行つた註5)。

註4) この方法はまだ一般に水分析にあまり用いられてないが、よい方法である。
 註5) この方法は "Lunge Zenckedorf; Z. Angew. Chem 1888, 395" の方法の原理を應用して下河原が試作試用したものである。

すなわち第13図に示すようにして試料を採取すると同時に分析器(同図右)に通ずる。分析器は混合指示薬 (Cresol red+Thymol blue) を入れて青色にした 1mol/1000 Na₂CO₃ 液を入れた右側の壺(a)と、その液 0.7 cc を入れて、これに試料ガスを通ずる左の部分(b)とからなる。スプレーで(c)からガスを吸引すれば、試料ガスは(b)部で試薬と反応して、試料ガス中の CO₂ により試料の pH は次第に酸性側に変化し、pH=8.3 で液はバラ色になり、さらに進んで pH<8.2 で黄色になる。液がバラ色になるまでに通じた試料ガスの容積(標準状態で)と、試料ガス(たゞし空気に CO₂ の混じたもの)中の CO₂ 濃度(容積%)との間には実験によれば第15図のような関係にあるから、バラ色までに通じた試料ガスの容積を、スプレーの回数等で測れば、試料ガス中の CO₂ の濃度(%)が測定できる。この方法で測定できる CO₂ の濃度%は第15図から、大体 CO₂ 0.03~0.25 位で、これ以上の濃度のものはこの器械では正確に測れない。幸い今回の目的には充分と思われるので、簡便迅速なこ



第15図 CO₂ 分析器 CO₂ 濃度—通過ガス容量(cc)関係図

分 析 表

HCO ₃ ⁻	B ₂ O ₃	H ₂ S	溶存 CO ₂	湧 出 量	備 考
mg/l 0	mg/l 45	mg/l ~0	mg/l 定量せず	ほとんどなし、噴気の凝縮水が大部分と思われる。	やゝ濁る 濃過す
0	18	~0	〃	同上、附近の噴気凝縮水が泥水状に流れている。	やゝ濁る 同上
128.	~0	~0	284.	少 (0.5~2 m ³ /hour 位)	ガス泡を若干伴なり 透明
124.	~0	~0	55.	少	透明
63.	14	10.2	288	少	ガス泡を若干伴なり 透明 約 10l/hour
76.	24	5.9	定量せず	少	同上 透明
0	21	~0	〃	中 (2~10 m ³ /hour 位)	透明
0	~0	~0	〃	少 噴気凝縮水の集まつたものか。	やゝ白濁 濃過す
0	~0	~0	〃	少 同上、泥水混入の恐れあり。	やゝ濁る 同上
0	~0	定量せず*	〃	少	H ₂ S 臭強く、ガス泡を伴なり 白濁 濃過す
61	~0	~0	1.	少 附近に数カ所あり。	透明、田の下より川畔に湧出

の方法を用いた。

4.3 調査結果

得られた結果を第2・第3表、および第16・第17図に示す。

4.4 調査結果についての考察

噴気成分の分析値(第2表)をみると、大岳地帯の3噴

気孔群の噴気成分、特に河原地区内の3地点の噴気成分はかなりよく似ている。河原地獄に比して大岳地獄はCO₂、H₂Sともにやや少なく、小松地獄はCO₂は少ないがH₂Sがやや多い。野矢地区の噴気はこれに比べるとH₂Oにとみ、CO₂、H₂Sとも著しく少ない。

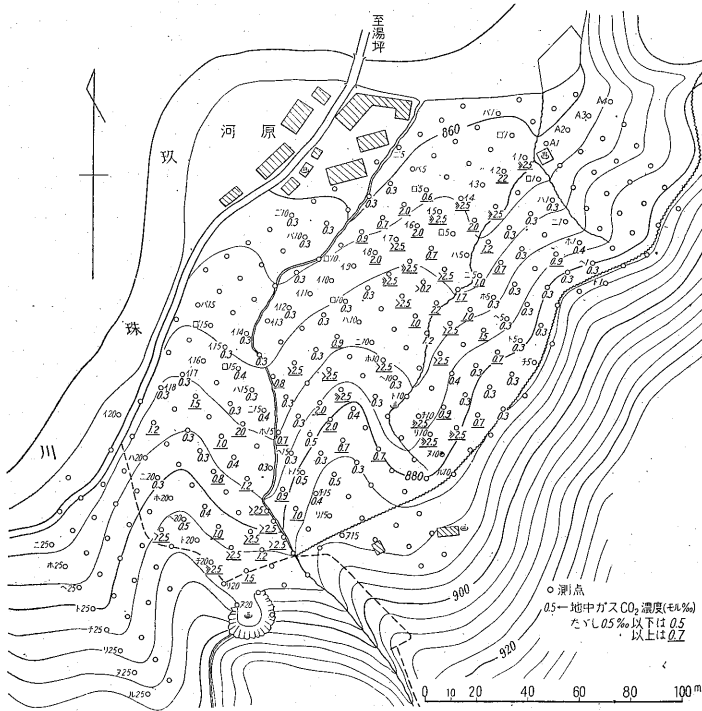
さて大岳地帯の噴気成分は、また同一火山帯に属している別府白竜の噴気成分と比較して、かなりよく似ている。地熱発電に用いられているイタリアの噴気成分とも比較するために、第4表を掲げる。

噴気孔から噴出する火山ガスの化学成分と、火山活動との関係については、R. Bunsen のアイスランド火山の噴気孔火山ガスの研究を始め、古くから多数の研究がある。そして“噴気孔に関する Deville の法則”というものが知られており、Vesuvio 火山等多くの火山での研究をみるに、この法則は大略あてはまるようである。地熱発電に利用できる噴気は、水蒸気を主成分とし、H₂S、SO₂等の腐蝕性成分の少ないような組成のものが望ましく、この組成の噴気の存在するのは、上の Deville の法則によれば、火山の周辺部で活動の末期に期待されることになり、事実おおよそそのようである。

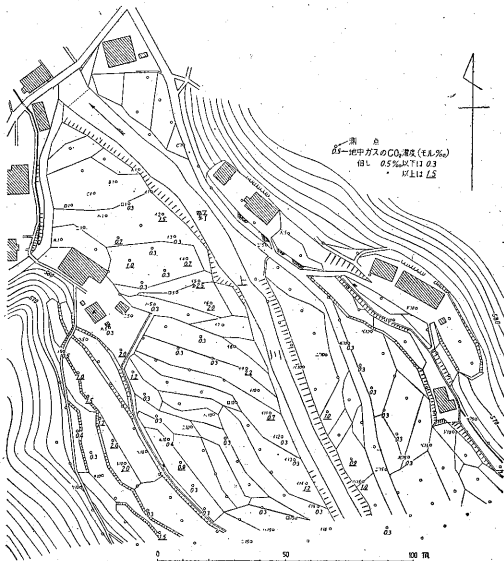
ただし、われわれの調査した大岳地帯内の3噴気孔群の噴気成分分布相互関係について、この法則をもつて云々することは当を得ないと思われる。Deville の法則はもつと大きな範囲の地域的および時期的経験法則で、小地域での成分変化は局地的な種々の原因で変動するものようである。なお噴気の成因的考察を温泉とも関連して後で行いたい。

温泉分析結果から、まず大岳地帯の9個の温泉を大体3個の型に(野矢地帯のものは個々に)分けて考察することができよう。

温 1・2・8 は第1の型に属し、pH 2.0~2.4 蒸発残渣、SiO₂、Fe₂O₃+Al₂O₃、Ca⁺⁺、Mg⁺⁺、SO₄⁻⁻が多く、Cl⁻が少ない。水温は高く、噴気孔と直接関係し、大部分噴気凝縮水と思われるものである。しかもいわゆる坊主地獄状を呈し、空気酸化を充分受けたと思われ、噴気中のH₂Sが酸化されてH₂SO₄を形成し、これが周囲の岩石等を侵して、前記の諸成分が増したものであろう。温9はこの型のものに沢水が混入したものかと思われる。ま



第16図 河原地区地中CO₂濃度分布図(九州配電会社原図)



第17図 野矢地区地中CO₂濃度分布図

第4表 天然蒸気の化学成分比較表(重量%)

	H ₂ O	CO ₂	H ₂ S	N ₂	CH ₄ , H ₂	H ₃ BO ₃	NH ₃
大岳地帯 河原地獄(噴1.3平均)	97.71	2.243	0.017	0.027	—	<0.0005	—
〃 大岳地獄(噴5平均)	99.32	0.646	0.007	0.015	—	—	—
〃 小松地獄(噴6平均)	99.09	0.866	0.034	0.009	—	—	—
野矢地帯 野矢噴気井(噴8平均)	99.86	0.135	0.002	—	—	<0.0005	—
別府* 白竜	97.05	2.93	0.014	0.008	—	—	—
〃* 白竜自然噴気	87.	13			—	—	—
九重山* 硫気口(7孔平均)	95.	1.6	0.985	2.02	—	—	—
イタリ* ラルデルロ その1	94.587	5.185	0.086	0.042	0.04	0.05	0.01
〃* 〃 その2	95.529	4.185	0.092	0.030	0.110	0.035	0.019

* 九州工業大学学報第2号実藤修作“発電用天然蒸気に就いて”より転掲
このうち別府のは野口喜三雄, 上野精一, 地熱開発技術委員会報告のもの,
九重山のは大分県庁, 大分県の地質と地下資源63頁から計算とある。

た温1・2にはB₂O₃が認められた。

温3・4は第2の型に属し, 弱酸性で蒸発残渣少なく, そのうちSiO₂は160mg/l内外重炭酸塩が大半を占め, Cl⁻, SO₄⁻とも少ない。湧出地点から考え第2の型も大部分地熱蒸気の凝縮水と考えられるが, 第1の型と違って空気酸化をあまり受けていない。

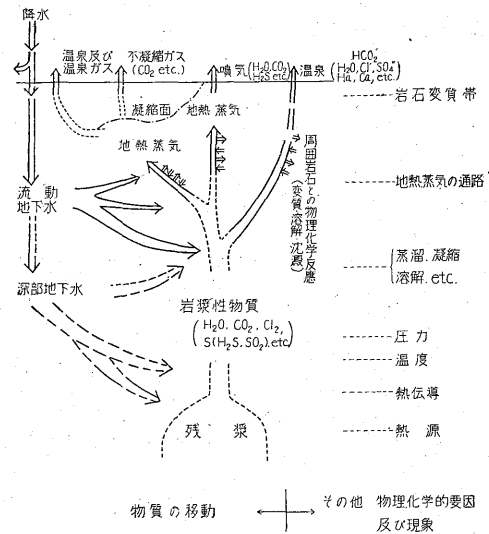
温5・6は第3の型に属し, Cl⁻400mg/l内外を示し, SO₄⁻も300mg/l内外, HCO₃⁻は70mg/l内外, Ca⁺⁺がやゝ多く, B₂O₃が認められ, H₂Sを含有, SiO₂は比較的少ない。温7はこの型と第2の型との間でこの型に近いものと思われる。

この第3の型は, Cl⁻が400mg/l内外を示す点で特に注目されなければならない。同時にこの型に属する温5・6およびほぼ属する温7が, 太田技官のいわゆる南北に走ると考えている2本の構造線の西の方の線の上に存在し, 第1, 第2の型の温泉, および3つの噴気孔群が東の方の線の上に存在する事実は注目に値すると思われる。これらの事実, すなわち噴気や温泉でみられる高度の水および水と共存する種々の化学成分の特異な分布は地熱地帯の構造を考えるうえに重要である。こゝで一度これらを成因的に考えてみるとして第18図の概念図を作ってみた。

第18図は, 定性的に地熱地帯を考えたものである。噴気(地熱蒸気)や温泉についてのわれわれの観察や調査は, 地表から, すなわち図の上の方からみたものだが, これを地下, すなわち図の下の方の考察と結び付けてみよう。

まず岩漿性水, および岩漿性物質について, 文献から若干ひろってみよう(以下(1)(2)(3)(4))。

(1) 岩石を加熱すると著量のガスを放出することが



第18図 地熱地帯の概念図

知られており, 例えば E. S. Shepherd 等註6)は黒曜石・安山岩・玄武岩・花崗岩等岩石中のこの種の火山ガスについて研究し, またこれらを熔岩湖からの火山ガス等とも比較している。それによれば火山岩の揮発成分の分布は一般に偶発的で, 著しい規則性は認められないが, 揮発成分中では水がきわめて多く, 大体80%以上を占める。Lassen peakの安山岩の1試料についての加熱してでてくる火山ガスの分析値を第5表に示す。

(2) Goranson 註7)は花崗岩・黒曜石等の試料について, 高温, 高压でどの位の水を含有しうるかの実験を行っている。それによれば, 900°C 圧力 4.09 キロパー

註6) E. S. Shepherd, H. E. Meruin: J. Geol., 35 (1927). 97.

註7) R. W. Goranson: Am. J. Sa 22 (1931) 481.

第5表 Lassen peak の安山岩中の火山ガス
(E. S. Shepherd)

	岩石中重量百分比	体積百分比 (1200°C)
CO ₂	0.00906	2.070
CO	137	0.623
H ₂	003	0.412
N ₂	127	0.577
A	001	0.003
SO ₂	047	0.009
S ₂	376	0.882
Cl ₂	166	0.297
F ₂	457	1.524
H ₂ O	0.13327	93.658
計	0.15347	9.5 cc/g

ルで花崗岩熔融体中に水は9.30%も含ませうることを示している。黒曜石もほぼこれに近い。

(3) 鉱物中の液体包有物の化学成分とその組成についていくつかの研究があるが、Newhouse^{註8)}は火成岩中および鉱脈中の鉱物では、液体包有物は一般にNaCl水溶液を主成分とすることを述べている。その例として彼の引用しているものの一つにKönigsberger & Müller^{註9)}の分析値(第6表)がある。これと似た岩石中の液体包有物として、島根県浜田市附近に発見された

第6表 Alpine vein 産石英中の液体包有物の
化学組成 (Königsberger & Müller)

	Quartz from Bachistock	Quartz from Aaremassin
H ₂ O	83.4%	85. %
CO ₂	9.5	5.
Na	2.0	2.5
K	0.7	} 1.5
Li	0.2	
Ca	0.3	0.3
Cl	1.6	1.5
SO ₄	0.5	0.7
CO ₃	1.8	3.5
計	100.	100.

霞石玄武岩中の岩漿水^{註10)}と思われるものの例がある。これらの液体包有物は岩漿性物質近縁のものであろう。

(4) 温泉水中に岩漿性物質がどれ位くるといふ問

註8) Naewhouse, W. H.: Econ. Geol. 27 (1932) 419.

註9) Königsberger, J. and Müller, J. W.: Centr. Miner.; 76, 1906

10) 坪井誠太郎・菅原健・小穴進也: 科学, 14 (1944) 102

題はなかなか判定の難しい問題であるが、この種の研究の例としてはAllen^{註11)}等のyellow-stone parkの温泉に関する熱量計算による推定、野満隆治等^{註12)}の別府温泉中の岩漿性水量の温泉湧出量および降雨量等による推定(50.5%という)、柴田雄次等^{註13)}の重水濃度測定による温泉水中岩漿性水量推定の試み等がある。

次に深部地下水はどんなであろうか。浅部地下水は静止していると考えられている。海成水成岩層では深部地下水として同生水(connate water)すなわち海水成分に近いものを持つことがあり、火山の基盤をなす水成岩層でもこの程度のものの存在する可能性はある。しかし火成岩内、あるいは流動地下水の滲透して溜つた深部地下水は、降雨成分に似て含有塩分は少ないと考えられる。

第18図について、噴気や温泉に現われてくる化学成分の由来を考える定性的根源を以上で述べたが、次に定量的に熱量や水量の移動を考えなければならない。しかしわれわれの得た噴気や温泉成分の分析値を定量的に第18図に結びつけて考えるのはまだ無理である。第18図の概念を頭に描きながら、地形や地質も考えて大嶽地帯を概観すると、熱源としては九重山か、黒岩山基底熔岩が、温泉や地熱蒸気の通路としては、黒岩山安山岩体の周縁が、直接あるいは間接に関係しているように思われる。黒岩山は九重火山群の、現在活動の続いている中心九重山に近く、大嶽地帯周辺では、最も新しい安山岩体である。噴気と温泉との分布を綜括すると、この黒岩山安山岩体の西側周縁に接して、噴気群および第1、第2の型の温泉が並び、その西に変質帯の発達がみられ、その西縁に第3の型の温泉が並んでいる。

野矢地帯の温泉については、数も少なく、取立てて考察することもできない。温10は硫化水素泉らしく、温11は普通の地下水が地温のやゝ高い処を通つて温められただけの水らしい。

地中CO₂の分布をみると(第16図・第17図)、噴気孔あるいは噴気井周辺の特に地温の高い範囲にCO₂の含量が相対的に大きくなつている。これらは地熱蒸気が露頭附近では、地表近くごく浅い処で凝縮し、不凝縮性ガスの一部が遊離して地表へと漏洩しているものと考えられる。われわれは、この現象を蒸気地帯の探査にどの位利用できるかを、今後さらに測定を精密化して検討してみたいと考えている。このような不凝縮性ガスと思われるものの漏出は、実際第1図大嶽鉱山の印のところの坑道附近で沢山みられ、硫化水素臭が強い。また温泉が

註11) E. T. Allen, A. L. Day: "Hot Springs of the Yellowstone National Park (1935).

註12) 野満隆治・池田嘉二郎・瀧野滄彦: 地球物理. 2 (1938) 97.

註13) 柴田雄次・野口喜三雄・金子修: 日化, 58 (1937) 1013.

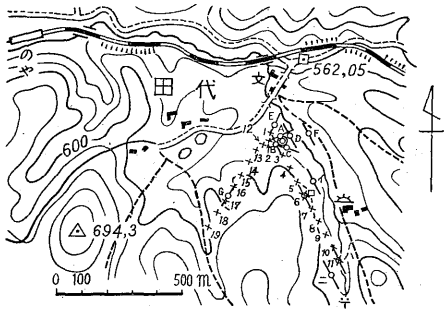
小穴進也: 日化, 60 (1939) 1005.

スとして温3・5・6・10等にみられるものも同様のものと考えられる。第18図左上部にその概念が示してある。

5. 第2次電気探査

5.1 調査目的

野矢地区の試錐が深度約45mに達した際、亀裂に遭逢して逸水はなほだしく、ケーシング挿入の必要が生じたので、挿入前の機会を利用して地熱地帯電気探査法の1手段として、坑井内電気探査を試みた。同時に附近で垂直比抵抗探査を試みた(第19図参照)。



- ◎ 試錐位置
- ▲ 垂直比抵抗法測点記号
- ▲ " " の周りの電極展開方向
- ▲ " " 位置
- × 地中CO₂測点番号
- × " " 位置

第19図 野矢地帯垂直比抵抗法調査および地中CO₂調査測点図

5.2 坑井内電気探査

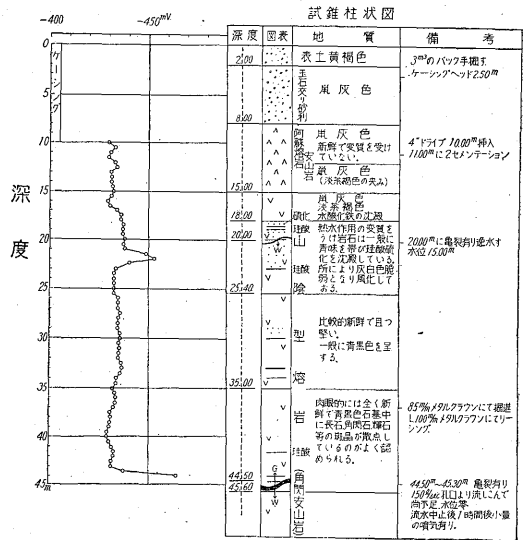
坑井内電気探査は、鉛極を用いて比抵抗分布と自然電位分布を調べた。しかし前者は残念ながら逸水註14)による吸込空気泡が多く測定値が得られず、後者(自然電位分布)のみ辛うじて測定できた。

その結果を第20図に示す。同図左には試錐柱状図の一部を示してある。第20図の電位の値は基準硫酸銅電極(坑井外に置いた)に対する鉛電極の各深度での値を示し、深度による相対的な電位変化の様子が知られる。試錐柱状図と比較して、黄鉄鉱のある処に、相対的に20~30mVの負の異常がみられる。

5.3 地表電気探査

5.3.1 調査方法

垂直比抵抗探査は常法により、遠電極に流電電極C₁と、基準電位電極P₁を置き、測点(第11図に示した)の両側に測点よりそれぞれ2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90, 100mを離して流電電極C₂と測定電位電極P₂



第20図 野矢試錐孔内自然電位曲線図

を対称位置に置いて測定した。

測定器はL10を用いたが、予想外に見掛比抵抗が低くC₂P₂間隔の広い(約60m以上)場合は測定器の精度以下の低抵抗を示したので、結果図には示さないことにした。

5.3.2 調査結果および考察

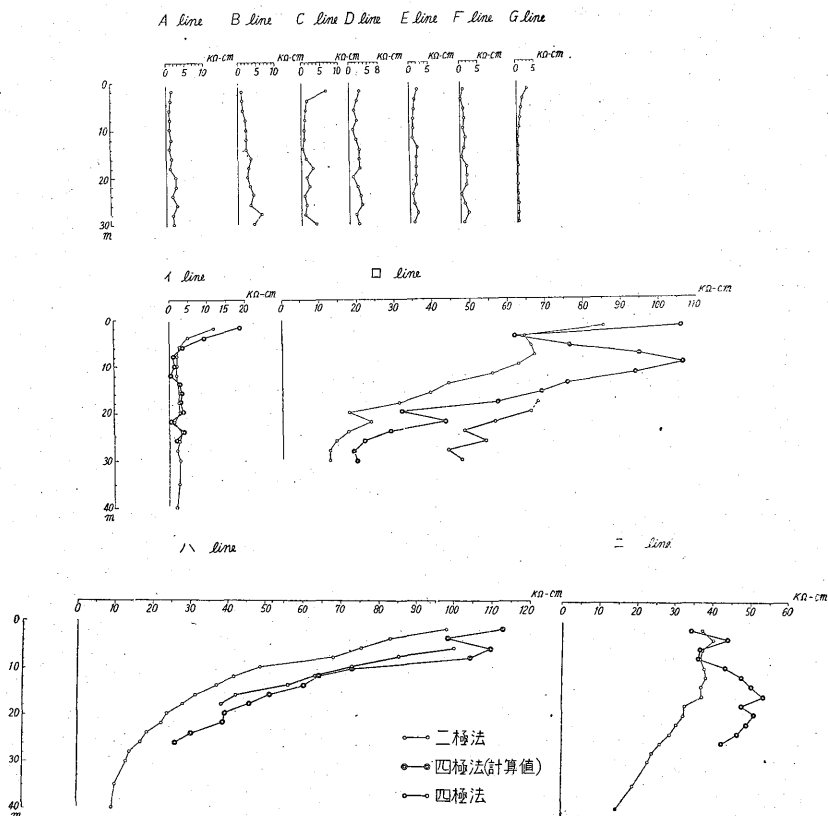
測定結果を第21図に示す。図の横軸は見掛比抵抗値(KΩ-cm⁻¹)で、縦軸は測点の両側にひらいたP₂-C₂極間距離の半分すなわち測点-P₂間距離を示し、ほどその深度までの大地比抵抗の反映を示す。

この結果から、測点A, B, C, D, E, FおよびGは地表から少なくとも深さ30mまではきわめて抵抗が低いことがわかる。測点口、ハおよびニはこれに比べてずつと高抵抗である。また測点イは地表近くは少し抵抗が高いが、深さ10m前後からかなり低抵抗になっている。たゞし測点A, B, C, D, E, Fの両側約30mの地表は大平水田である。測点Gは両側約5m水田で、そのほかは阿蘇熔岩の露出が所々にみられる斜面になっている。また測点イ、ハおよびニの周囲約30mの地表は水田および畠で、測点口は丘の上、草原地である。

垂直比抵抗法の結果を、地質状況と対比して考えると、測点A, B, C, D, EおよびF附近は地温の高いいわゆる地熱蒸気の露頭近い位置にあり、地表条件も考慮しなければならないが、地表下少なくとも30mまで、きわめて低い抵抗を示す地点附近は、浅所まで地熱蒸気により岩石が変質し、ある程度粘土化しているように思われる。

以上電気探査の結果は、地下浅所にある地熱蒸気によ

註14) 逸水量 100-150l/sec という。



第21図 野矢深度比抵抗曲線図

る変質帯の分布、およびその他の地質構造推定の資料となりうるが、今回の調査では十分な広さの探査ができなかつたので、地下の状態を充分反映する資料を提供し得なかつたことは遺憾であつた。

6. 第2次地化学探査

6.1 調査目的

前に述べた地中 CO₂ 濃度分布について、こゝでは垂直電気比抵抗による探査結果と関係づける意図も含めた試験を行った。

6.2 調査方法

第19図に示したように地中 CO₂ 分布測定のための測点を設け、第22図に示すように作孔し、地中空隙を作り、そこに集まつてくる地中空気中の CO₂ を前と同様の方法で分析測定した。

試料採取法は第22図に示したように、孔の上部をうづめて、前回よりやゝ厳密に行つたが、完全にその地点附近の地中空気を代表するかどうかはまだ疑問である。測定を各点とも2~4回行い、また日を変えて再測定したり(測点番号1, 4および5)して、できるだけ誤差を少なくする方法をとつた。

6.3 調査結果および考察

測定結果を第7表に示す。

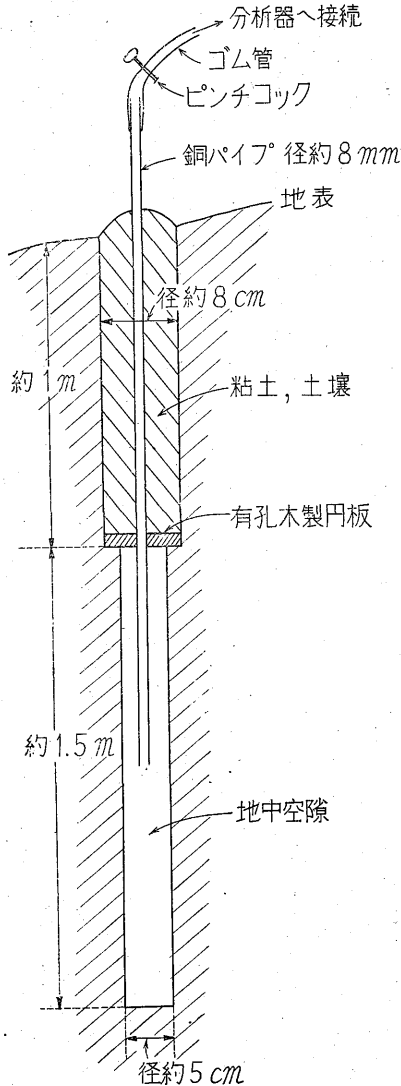
この結果をみると、測点番号2, 11, 12, 14, 16, 17, 18, 19の地点は地中 CO₂ 濃度が高い。これらの地点は前章の垂直比抵抗の値の低い地域、すなわち地質的にみて地熱蒸気の露頭近くの変質帯に相当するようにみえる。この方法で地熱地帯を広く調査すれば、若干参考になる資料は得られるものと思われる。

7. 結 語

河原地区および野矢地区の自然電位分布図(第4図・第6図)によれば、噴気孔近傍に若干の自然電位異常が認められる。

河原地区の大地見掛比抵抗分布図(第5図)によれば、噴気孔近傍は低抵抗が認められる。これらの低抵抗は地表の影響も考えられるが、岩石変質帯の存在を示すようである。

河原地区および野矢地区の地表 r 線強度分布図(第7図・第18図)によれば、噴気孔近傍では r 線強度の増大が認められ、阿蘇熔岩露出部近くでも r 線強度の増大が認められる。



第22図 地中CO₂採取図(II)

大嶽地帯および野矢地帯の噴気の化学成分分析結果(第3表・第4表)をイタリー、別府等と比較すると(第5表)大差はない。温泉の成分の型とその分布に注目すべき点がある。

また大嶽地帯河原地区および野矢地区の地中CO₂濃度分布図(第16・第17図)によれば、噴気孔近傍で地中CO₂濃度が大きくなるのが認められる。

以上の地化学的現象を、地熱地帯の構成と関係づけるために、地熱地帯の概念図(第18図)を作り考察した。

第2次調査においては野矢試錐の坑井を利用して、自然電位を測定し(第20図)、また試錐地近傍で、垂直比抵抗法による調査を行ったが(第19図・第21図)、西の方の測点はすべて非常に見掛比抵抗が低い。これは岩石

第7表 野矢地帯地中CO₂濃度測定表

測点番号	地中CO ₂ 濃度(CO ₂ %)	測点番号	地中CO ₂ 濃度(CO ₂ %)
1	0.09	11	0.22
2	0.095	12	>0.25**
3	>0.25**	13	測定できず***
4	0.14	14	≧0.25**
5	0.09	15	測定できず
6	0.09	16	≧0.25**
7	0.08	17	≧0.25**
8	0.15	18	≧0.25**
9	0.095	19	>0.25**
10	0.18		
	0.11		
	0.18		
	0.15		

* 2~4回の測定の平均値を示す。

** >0.25は0.25%より少し大の意。また ≧0.25はそれよりも少し大、≧0.25%はさらに大の意である。

*** 孔中から空気が採取できず、吸引すれば減圧になつてなかなか恢復しない。

変質帯の存在によるものかと思われる。

同じく試錐地近傍で調べた地中CO₂濃度(第19図・第7表)によると、垂直比抵抗法による見掛比抵抗の低かつた西の方、特に南西の方には、地中CO₂濃度の大きな地点が分布する。これも岩石変質帯と関係があるものかと思われる。

8. 地熱地帯の調査について

特に地熱地帯の熱量、水量の計算を基にして

地熱蒸気を利用して、発電を行う試みは、イタリーで今世紀の始めから行われ、今日では総出力約25万kWに達しているといわれる。わが国では大正年間から少数の研究者により断続的に研究されており、この間の状況については、いくつかの報文註15)がある。

それらによると、地熱地帯の調査には、地質調査、試錐が行われ、地温測定註16)や電気探査註17)が試みられ、また火山や岩漿等に関する知識が間接に援用されてきた。そしていわゆる地熱地帯の構成について、いろいろと推論されている。例えば、地表近くでの蒸気圏の形成に関する奥田克巳等註18)の考えや、火山岩漿溜や、その

註15) “地熱発電試験研究報告第一集”工業技術庁1952-3の附録に文献資料として載つたものがある。

註16) 脚注(1)の56頁に2, 3, 4地温分布調査の項がある。

註17) 同上 57頁に2, 3, 5電気探査の項がある。

註18) 「地熱発電の研究」[奥田克巳・若杉節夫・藤野勉: 商工省地熱開発技術委員会, 1938-9]

第8表 地熱発電に必要な地熱蒸気の水量と熱量

	水 量	熱 量 ^{註20)}
250,000 kWh/h	約 3,100 t/h	約 2.0×10^9 Kcal/h
同上 100年分	" 2.7×10^9 t/100 years	" 1.8×10^{15} Kcal/100 years
3,000 kWh/h	" 40 t/h	" 2.6×10^7 Kcal/h
同上 100年分	" 3.5×10^7 t/100 years	" 2.3×10^{13} Kcal/100 years

第9表 残漿の保有熱量

残漿の体積	温度	0°C	200°C	400°C	600°C	1,000°C
1 km ³ = 10 ⁹ m ³		0	1.5×10^{14} Kcal	3.0×10^{14} Kcal	4.5×10^{14} Kcal	7.5×10^{14} Kcal
1,000 km ³ = 10 ¹² m ³		0	1.5×10^{17} Kcal	3.0×10^{17} Kcal	4.5×10^{17} Kcal	7.5×10^{17} Kcal

エネルギー等を数量的に取扱つて、蒸気圏の賦存状態を考察している実藤修作^{註19)}の考え等がある。

今回行われた地熱地帯の電気、放射能、地化学の各研究調査も、これらにならつたところが多いが、2.1に述べられているように、地熱地帯調査法としては調査技術としても、適用方法としてもまだ研究途上のものである。その結果を検討し、整理しながら筆者の感じたことは、やはりいわゆる地熱地帯の構成についての推論がまず必要だということであつた。特に物理的調査の技術や適用方法を考えず推論しなければならない。

一方4において噴気や温泉等の地化学研究調査の結果を整理し、考察を進めるうちに地熱地帯の概念図(第20図)に想到した。これは主として地熱を伴つた水の動きを、定性的に推論したものである。

さて地熱発電という開発に必要な条件を考えて、特に地熱を伴つた水の動きを、前の定性的推論から一步を進めて、ある程度定量的に計算することによつて地熱地帯構成の規模を推論し、それを基に調査の技術や適用方法を考えてみる事ができる。以下にその計算を試みる。

第一に発電に必要な地熱蒸気の熱量と水量を計算してみる。イタリーでの実際によれば、250,000 kWhの発電に3~5 atm、約200°Cの地熱蒸気(約95%重量)は過熱水蒸気である(第4表参照)。約3,100 t/h消費している。この地熱蒸気を持つ熱量は、0°Cの水を0として、約650 cal/g地熱蒸気(3~5 atm, 200°C)となる。したがつて250,000 kWh および 3,000 kWhの発電に必要な地熱蒸気の熱量と水量は次の第8表のようになる。

註19)「発電用天然蒸気について」実藤修作：九州工業大学学報、第2号 1941-10

註20) 水量×650 cal/g から計算した。電力相当の熱量として計算するところの約1/10になる。1/10は効率に相当するものと考えられる。

次に熱源として考えられるものは第18図^{註21)}に書いた残漿の持つ熱量であろう。その計算をしてみると、残漿の平均比重を2.5とし、地下数kmにおける温度、圧力下での平均比熱を0.3と仮定する。

これらが0°Cの時の保有熱量を0としての各温度での保有熱量を計算すると、第9表のようになる。

次に水量を考えよう。水源としては第18図^{註22)}に書いた岩漿性水、深部地下水、および降水からくる地下水が考えられる。岩漿性水は他の岩漿性物質を伴つて動くが、量的にどの位岩漿から発散されるものかはつきりしない。おそらく10⁶ t(最少)~10⁷ t(平均)~10⁸ t(最大)/1 km³ 岩漿体であろうか。次の深部地下水量を計算しよう。火山岩の間隙率が1~2%で、こゝに深部地下水が飽和していると考えれば、その量は1~2×10⁷ t/km³ 火山岩体となる。以上2者は始めにあつたと思われるものだが、後から地下水に補給される源として降水がある。降水量は年平均3,000 mm とすれば、3×10⁸ t/100 years km²、すなわち約340 t/h km² となり、補給源として期待される。

さて地下の水の一部はすでに高温の状態で存在するであろう。一部は低温のまま存在し、さらに一部は降水から補給され、いずれも時間の経つにつれて熱量が次々と供給されて、過熱水蒸気になつて始めて地熱蒸気として利用を待つことになる。

もし、利用可能な地熱蒸気がすでに地中に蓄えられているとしたら、その容積や熱量はどれ位になるであろうか、地熱蒸気は水蒸気が大半を占めるから、いろいろな温度圧力下での水の比体積とエンタルピー(含熱量)を示してみよう。

この表から、例えば圧力5 kg-cm⁻²、温度250°Cの過

註21) 大分縣地熱地帯の物理探査および地化学探査による研究調査附図^{註22)} 前出

第10表* 水および過熱水蒸気の比体積**とエンタルピー(含熱量)

$$\left[\begin{array}{l} \text{比体積 単位 } \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} = \text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1} \\ \text{エンタルピー } \text{ } \text{cal} \cdot \text{g}^{-1} = 10^3 \text{ Kcal} \cdot \text{t}^{-1} \end{array} \right]$$

圧力 (kg-cm ²)	温度(°C)											
	0°	50°	100°	150°	200°	250°	300°	350°	400°	450°	500°	550°
1	1.0002 0.0	1.0121 50.0	1730 639.1	1976 663.2	2215 686.5	2453 709.9	2691 733.5	2927 757.5	3164 781.9	3400 806.7	3636 832.1	3871 858.1
5	0.9999 0.1	1.0119 50.0	1.0433 100.1	1.0906 150.9	443.7 682.2	483.7 706.8	532.8 731.1	581.3 755.6	629.3 780.4	677.2 805.5	724.8 831.1	772.4 857.3
10	0.9997 0.2	1.0117 50.1	1.0430 100.2	1.0902 151.0	210.5 676.1	237.5 702.8	263.0 728.1	288.0 753.3	312.6 778.4	336.9 804.0	361.0 829.8	385.0 856.1
20	0.9992 0.5	1.0112 50.3	1.0425 100.4	1.0896 151.1	1.1561 203.5	114.0 694.0	128.1 721.9	141.3 748.5	154.2 774.7	166.7 800.8	179.1 827.3	191.2 854.0
50	0.9977 1.2	1.0099 51.0	1.0409 100.9	1.0877 151.6	1.1532 203.8	1.2495 259.2	46.47 699.5	53.14 732.9	59.04 762.8	64.57 791.4	69.89 819.5	75.07 847.6
100	0.9952 2.4	1.0077 52.0	1.0384 101.8	1.0845 152.3	1.1485 204.3	1.2409 259.3	1.3979 320.7	23.07 699.2	27.10 740.4	30.45 774.7	33.47 806.2	36.32 836.6
200	0.9905 4.7	1.0036 54.0	1.0337 103.6	1.0784 153.8	1.1395 205.3	1.2254 259.4	1.3612 318.4	1.671 393.1	10.31 676.6	13.06 733.7	15.13 776.6	16.89 812.8
300	0.9859 7.1	0.9995 56.0	1.0291 105.4	1.0726 155.3	1.1312 206.2	1.2118 259.6	1.3328 317.0	1.558 383.9	3.02 524.5	6.98 677.4	8.90 740.2	10.35 786.0

— の左側は水, 右側は水蒸気

* 芝倉吉編「物理常数表」, p. 147 による

** Henning による

熱水蒸気 10⁷t は, 約 4.84×10⁹m³=4.84 km³, 含熱量 7.07×10¹² Kcal となる。

もし熱水の形で地下に蓄えられているとすれば, 容積や熱量はどうなるであろうか。第10表から, 例えば圧力 50 kg cm⁻², 温度 250°C の熱水 10⁷t は約 1.25×10⁷m³, 含熱量 2.59×10¹² Kcal となる。この熱水が減圧されて圧力 5 kg-cm⁻², 温度 250°C の過熱水蒸気になるためには 4.48×10¹² Kcal の熱量が不足である。

この熱量不足を, ほかから供給せずに減圧気化させたら, 一部は水蒸気になり, 一部は熱水の形で残り, 自己の温度が低下する。例えば前の熱水 10⁷t は圧力約 5 kg-cm⁻² 温度の平衡な(等しい)熱水 0.79×10⁷t となる。

またこの熱量不足 (4.48×10¹² Kcal) を 1 km³ の残漿の保有熱量から補うとすれば, 残漿温度は約 6°C 低下することになる(第9表参照)。

熱量と水量とはそれぞれ移動する。その移動について簡単な仮定を置いた場合の例を計算してみよう。

まず岩石の熱伝導量を計算するために次式を適用する。

$$dQ = k \cdot S \cdot \frac{dt}{dn} \cdot dr \dots \dots \dots (1)$$

ただし

k: 岩石の熱伝導率 (単位 cal·cm⁻¹·deg⁻¹·sec⁻¹)

S: 等温面の面積 (" cm²)

$\frac{dt}{dn}$: 等温面の温度勾配 (" deg·cm⁻¹)

dr: 時間 (" sec)

dQ: 通過熱量 (" cal)

例えば k=1.10⁻³~10⁻² cal·cm⁻¹·deg⁻¹·sec⁻¹

$$S = 100 \text{ km}^2 = 10^{12} \text{ cm}^2$$

$$\frac{dt}{dn} = 1^\circ\text{C}/10\text{m} = 10^{-3} \text{ deg} \cdot \text{cm}^{-1}$$

$$dr = 1 \text{ hour} = 3.6 \times 10^3 \text{ sec}$$

と仮定すると, dQ=3.6×10⁹ cal=3.6×10⁶ Kcal となる。

次に細長い管を, 水や水蒸気が通過する量を計算する。次のポアゼイユの法測((2)式)が適用されるとする。

$$V = \frac{\pi(P_1 - P_2)}{8\eta l} r^4 t \dots \dots \dots (2)$$

ただし η: 粘性係数 (単位 cm⁻¹·g·sec⁻¹)

π: 円周率

P₁-P₂/l: 管の単位長さの両端での流体の圧力差(圧力勾配)

(P₁, P₂ はそれぞれ両端の圧力, l は管長

(単位 dyn·cm⁻³)

r: 管の半径 (" cm)

t: 時間 (" sec)

V: 流過する流体の容積

ただし圧力は $\frac{P_1 + P_2}{2}$ のとき

水および過熱水蒸気の粘性係数は第11表に示す。

例えばいま圧力 $\left(\frac{P_1 + P_2}{2}\right)$ 50kg-cm⁻², 温度 300°C

の過熱水蒸気の場合は $\eta=0.207 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1} \cdot \text{g} \cdot \text{sec}^{-1}$ (第4表より)

$$\text{圧力勾配} \left(\frac{P_1+P_2}{1} \right) = 1 \text{ atm}/50 \text{ m} = 1.013 \times 10^6 \text{ dyn} \cdot \text{cm}^{-2} / 5 \times 10^3 \text{ cm} = 2.026 \times 10^2 \text{ dyn} \cdot \text{cm}^{-3}$$

第11表 水および過熱水蒸気の粘性係数表*

温度(°C)	20°	50°	100°	200°	300°	400°	500°
1			0.129	0.167	0.202	0.236	0.269
1.033	10.09	5.49	2.84				
15.86				1.38			
50.			2.94	1.38	0.207	0.240	0.242
87.61					0.96		
100			3.01	1.41		0.245	
.200			3.24	1.46	0.99	0.257	0.244
300			3.43	1.51	1.02	0.40	0.249

— 線の左側は水, 右側は水蒸気
(単位は $10^{-3} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{g} \cdot \text{sec}^{-1}$)

* 芝亀吉編「物理常数表」, p. 75, 76, 88 による

$r=0.5 \text{ cm}$ $t=1 \text{ hour}=3.6 \times 10^3 \text{ sec}$ とすれば

$$V = \frac{3.14 \times 2.026 \times 10^2}{8 \times 0.207 \times 10^{-3}} \times 0.5^2 \times 3.6 \times 10^3 = 8.73 \times 10^7 (\text{cm}^3) = 87.3 (\text{m}^3)$$

第10表から

$$\approx 1.9 \text{ t}$$

”

$$\approx 1.3 \times 10^6 \text{ Kcal}$$

となる。

次に圧力 $\left(\frac{P_1+P_2}{2} \right) 200 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$, 温度 300°C の熱水の場合は $n=0.99 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1} \cdot \text{g} \cdot \text{sec}^{-1}$ (第11表より)

圧力勾配註23) $\left(\frac{P_1+P_2}{1} \right) = 1 \text{ atm}/20 \text{ m} = 1.013 \times 10^6 \text{ dyn} \cdot \text{cm}^{-2} / 2 \times 10^3 \text{ cm} = 5.065 \times 10^2 \text{ dyn} \cdot \text{cm}^{-3}$ $r=0.5 \text{ cm}$, $t=1 \text{ hour}=3.6 \times 10^3 \text{ sec}$ と仮定すれば

$$V = \frac{3.14 \times 5.065 \times 10^2}{8 \times 0.99 \times 10^{-3}} \times 0.5^2 \times 3.6 \times 10^3 = 4.52 \times 10^7 (\text{cm}^3)$$

註23) 管が垂直ならば静水圧は深さ約 10m につき 1 atm 増加するが, この圧力勾配では静水圧を除いて考える。

$$= 45.2 (\text{m}^3)$$

第10表から

$$= 33.2 \text{ t}$$

”

$$= 1.1 \times 10^7 \text{ Kcal}$$

となる。

以上, 地熱発電に必要な地熱蒸気の水量と熱量, 期待すべき熱源と水源の量, 水および過熱水蒸気の占める容積と保有熱量, 簡単な仮定下での水および熱の移動量に関する計算(方法と数値)を示した。

これらは地熱開発に必要な地熱地帯の大きさについての概念の基礎となるし, また構成についての定量的知識の基礎ともなるものである。

これはまだいくつもの仮定のうえに立つており, おもに熱と水についての考察のみであり, それも一部分でしかない。地熱地帯構成の推論としては, このほかにまだ基礎的に考察研究すべき問題が多々ある。特に水や熱を容れるべき地層, 岩石等の微細あるいは集合構造や, 岩石の熱あるいは熱水による変成等の問題は重要な研究問題であろう。しかしともかくも, 地熱開発に必要な地熱地帯の構成規模は, 熱と水とのこゝに示した計算からある程度推論することができる。その計算の示すところは, 例えば $3,000 \text{ kWh} \sim$ は数万 kWh の発電を行うためには, 少なくとも数~数 10 km^3 の安全率を大きくとれば, 数 $100 \sim$ 数 $1,000 \text{ km}^3$ の地塊にわたる地熱地帯を対象とすべきであるということになる。

したがつてもし例えば $3,000 \sim$ 数万 kWh の発電候補地としての地熱地帯を調査するとすれば, 調査の技術および適用方法としては, 少なくとも数~数 10 km^3 の調査能力があるものが望ましいことになる。

最後に以上の考察と調査技術の現状から, 今後の開発調査の方途についての筆者の意見としては, 地質構造, 地熱分布, 水の分布, および試錐岩芯による岩石物性等の調査を目的とした数多くの試錐が望ましい。物理探査法による構造調査は, その(同じ目的のための)一助となる。たゞしそれらの適用方法としては, やはり少なくとも数~数 10 km^3 に及ぶようにすることが望ましい。これらの結果が得られれば, それに附随して, 現象調査としての地質, 放射能, 地化学等の調査を行うのは有効であろう。

(昭和26年11月および27年3月調査)