

地熱のメツカラルデレロ

中村久由

吹き上げる噴煙 すさまじい轟音 地熱蒸気が大地をふるわして井戸もとからほとぼり出るさまを目のあたりに見た人は 誰しも今さらながら地熱活動のはげしき力強さに身が引きしめる思いをするに違いない。この地熱蒸気を利用して26万6,000kW(1966年現在)という世界最大の地熱発電を行なっているラルデレロとはどういうところか 地熱に関心をもつ人であれば一度ならずその土地の魅力に引かれたことであろう。

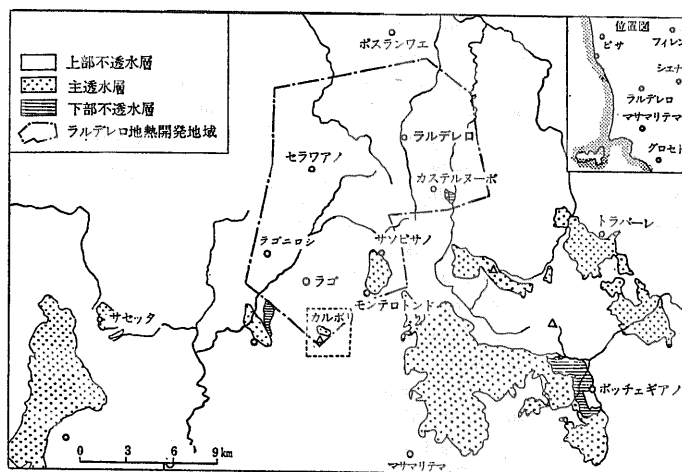
百聞は一見にしかず 筆者もまえまえラルデレロを一度みておきたいと思っていたところ たまたま1968年8月プラハで開かれた国際地質学会の帰途 短時間であったが現地を訪れる機会を得た。

このように有名なラルデレロのことであるからすでに本誌上で紹介済みのことと思っていたところ 意外にこの場所のことに触れたものが少なく わずかに斎藤正次前所長の紹介記事(地質ニュース 第82号)が掲載されている程度にすぎないので あえてラルデレロの見聞記をここに紹介した次第である。もっとも本誌以外の雑誌をみると 湯原浩三(地熱:No. 12 1967 および日本鉱業会分科研究会資料:1967) 早川正巳(地熱:No. 15 1968) 小野寺清兵衛(地熱:No. 15 1968)の諸氏が詳しくラルデレロの地質 熱水機構 物理探査等に関する論文 所見を発表しておられるので さらに興味をお持ちの方は これらの文献を参考にいただきたい。

イタリアの電力は かつて民間の大企業エディソン社により経営されていたが 1962年 中道左派連立内閣が成立した後 この中道左派連立内閣は社会党の年来の主張を入れて電力国有化を実行に移し エディソン社の電力部門を国営のエネル(ENEL 全国電力公社 Ente Nazionale per l'Energia Elettrica National Electric Energy Agency)に接收 地熱発電事業も現在のENELの国有国営企業のもとで行なわれている。

ラルデレロの見学には あらかじめENELの許可をとっておかなければならないが 幸い早川前物探部長がENELの探査開発部の地質専門家 Dr. Raffaele A.Cataldi を紹介してくれたので プラハに出発する前 Dr. Cataldi を通じ見学の許可をもらい ローマに到着すると同時にENELの本社を訪れ ここで Dr. Cataldi および Dr. Pietro Ceron に会い 万事ラルデレロ見学の手はずを整えてもらうことができたのは全く幸いであった。8月27日 ENEL差向けの車でローマを一巡した後午後3時すぎローマを出発 約3時間余りで夕刻念願のラルデレロに足を踏み入れた。ローマからラルデレロまで約210kmあるが この間高速道路が続き実に快適なドライブであった。

現在イタリアで地熱発電を行なっているのは ラルデレロ地域とその東南のモンテアミアータ地域であるがこのうちラルデレロ地域というのは もともとトスカーナ地方にあって このラルデレロ(Larderello)のほか カステルヌーボ(Castellnuovo) セラツアーノ(Serrazzano) ラゴーニ ロシ(Lagoni Rossi) サツソピサノ(Sasso Pisano) ラゴ(Lago)それにモンテロトンド(Monterotondo)等の地熱地域を含む15km×18kmの範囲を指す。一方 モンテアミアータ(Monte Amiata)地域は最近開発に成功した場所で 目下第2のラルデレロを目指し 探査 開発が盛んに行なわれているところである。参考までに ラルデレロ地域の位置図(第1図)とイタリアにおける地熱発電の発電設備・蒸気特性を第1表および第2表に示した。



第1図 ラルデレロ地域の位置と地質略図

第1表 イタリアにおける地熱発電の発電出力

Year	Area	Fluid production To/hr	Electric power Net kW	Fluid rate kg/kWh
1956	Larderello	2,598.5	187,501	13.8
	M. Amiata-Others	42.2	1,126	37.5
	Total	2,640.7	188,627	14.0
1957	Larderello	2,580.8	190,798	13.5
	M. Amiata-Others	39.8	970	41.0
	Total	2,620.6	191,768	13.7
1958	Larderello	2,689.0	203,663	13.2
	M. Amiata-Others	45.9	1,030	44.6
	Total	2,734.9	204,693	13.4
1959	Larderello	2,665.6	219,249	12.2
	M. Amiata-Others	87.0	1,500	58.0
	Total	2,752.6	220,749	12.5
1960	Larderello	2,595.0	217,785	11.9
	M. Amiata-Others	173.1	4,570	37.9
	Total	2,768.1	222,355	12.4
1961	Larderello	2,738.2	237,412	11.5
	M. Amiata-Others	191.8	6,170	31.1
	Total	2,930.0	243,582	12.0
1962	Larderello	2,813.0	242,054	11.6
	M. Amiata-Others	192.0	7,192	26.7
	Total	3,005.0	249,246	12.0
1963	Larderello	2,978.0	250,510	11.8
	M. Amiata-Others	202.0	7,896	25.5
	Total	3,180.0	258,406	12.3
1964	Larderello	2,994.0	260,179	11.5
	M. Amiata-Others	209.0	8,342	25.0
	Total	3,203.0	268,521	11.9
1965	Larderello	2,946.0	265,343	11.1
	M. Amiata-Others	254.0	10,076	25.2
	Total	3,200.0	275,419	11.6
1966	Larderello	2,976.0	266,142	11.2
	M. Amiata-Others	382.0	15,780	24.2
	Total	3,358.0	281,922	11.9

今回見学したのは 狭義のラルデレロ地区であるがローマから海岸沿いに北に走り 自動車は途中で右に折れて山道に入る。 もっとも山道といっても丘陵地であるから屈曲は多いが特に険しい起伏はない。 やがて教会のある小さな部落を通る。 ここがカステロヌーボであることを車の運転手が知らせてくれる。 ここまでくるとラルデレロはもう目と鼻の間である。 そのうち小高い丘の上から冷却塔がみえ始める。 くだらかな丘陵地の斜面に沿って敷設された蒸気の輸送用パイプが夕日に映えてキラキラ反射し マッチ箱のようなアパートが幾つも斜面上に並び 冷却塔から静かに蒸気がたち上

る様子はここがラルデレロかと疑問をおこさせるほど静かな風景である。 かつてこの付近には幾つも自然噴気孔やマッドプール (mud pool) があったそうであるが 現在はなに1つそのような徴候はみられない。 わずかに多分 帽岩と思われる白色の変質した泥岩がそちこちに露出しているだけである。

翌朝 早速発電所やその他の施設を案内してくれる。 まずラルデレロ博物館であるが ここにはラルデレロの開発以来今日までの種々の資料や機具類が保管されている。 観客用のパンフレットも数種類備えてあるが 驚いたことにその中の8ヶ国語で書かれた説明書の中に日本語のものが含まれていることである。 なんでもラルデレロを見にくる日本人が非帯に多いので説明文にも日本語を入れてあるとのこと。 そういえば日本の地熱をみにくる外国人の中ではイタリア人が全くといいほど少ない。 日本人だけでなく8ヶ国語の中には チェコ語 アイスランド語など入っているとところをみると地熱開発の場合 追う者 追われる者の違いがこのような形であらわれているのかもしれない。

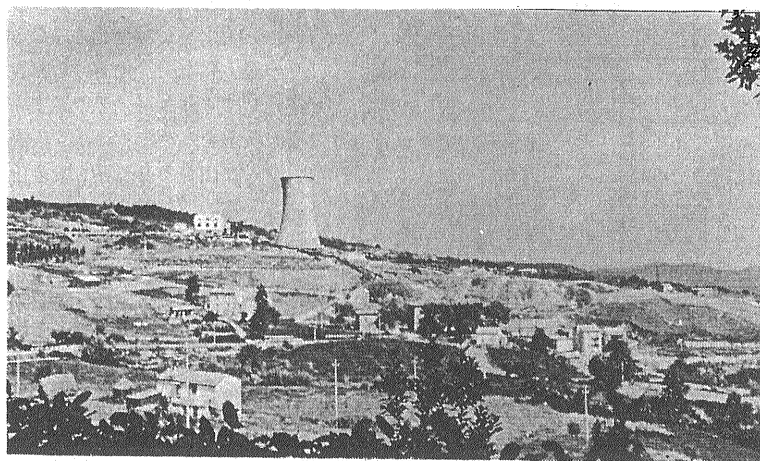
その後 発電所 化学分析室など案内してくれたが その途中

蒸気井のバルブをあけて噴出状況を見せてくれる。 表面は何の徴候もみられない静かな山野であるが 吹き上げる蒸気はさすがすごい轟音を発し 地下に潜^{ひそ}む地熱エネルギーの強烈さを示すのに十分である。 ただ この付近には掘さく中の井戸が1本もなく いずれも発電用の生産井ばかりである。 そして第1表の年間蒸気産出量の推移をみて判るように ラルデレロ地区での蒸気量は この数年ほぼ横ばいの状態にあり その量は一向に増えていない。 言葉をかえすと ラルデレロ地域の蒸気生産量は現在ほぼ限界に達し これ以上生産井を掘っても あまり量の増加は望めぬということである。 こ

第2表 イタリアにおける地熱発電の発電設備

Power Plants Name	Number of Units	Cycle	Ratine of Each Unit MW	Exhaust	Total Installed Capacity MW	Fluid at Intake To/hr	Fluid Pressure ATA	Fluid Tempera Ture °C	Gas Content Inweicht %	Total	
										Installed Capacity MW	Fluid Input To/hr
Larderello 2	3 2	D D	14.5 11	C C	65.5	580	5	207	7	Larderello 248.9	1,930
Larderello 3	3 1 2	D D D	26 24 9	C C C	120.0	930	4.5	205	5.1		
Castelnuovo	1 1 2	D I I	26 2 11	C C C	50.0	230 180	5.5 2.6	205 190	12 4		
Shppolito	1	D	0.9	AE	0.9	16	5.5	193	15		
M Royonoo	1	D	12.5	C	12.5	130	4.4	174	2.5		
Serrazzaho	2 2	D D	12.5 3.5	C E	32.0	320	5.3	190	3	Monte Amiata 20.5	420
Laco	1 1 1 1	D D D D	14.5 12.5 3 6.5	C C C C	36.5	220 75	4.8 2.3	160 123	3 3		
Laconi Rossi	1	D	3.5	AE	3.5	45	5.9	164	3		
Sasso Pisano	1 1	D D	12.5 3.1	C C	15.6	160	5.3	187	3		
Bacnore 1	1	D	3.5	AE	3.5	52	3.6	140	9		
Bacnore 2	1	D	3.5	AE	3.5	53	4.2	146	8.7	20.5	420
Scnna	1	D	3.5	AE	3.5	77	8.2	167	18.6		
Piancastacnaio	2 1	D D	3.5 3.0	AE AE	7.0 3.0	238	5.6	178	20		
	34									357.0	3,300

Cycle: D. Direct Stean Cycle I. Indirect Steam Cycle
Exhaust: C. Condenser AE. Atmospheric Exhaust



カステルヌーボの冷却塔 部落から少し離れた丘の上に発電所があるがここまできるとラルデルロはもう近い

のような意味からいえば ラルデレロはすでに開発上完成された場所ということになるが それだけにラルデレロ地域の地質構造や熱水機構については これまで多くの資料を駆使して興味ある論文が数多く発表されている。その総括的なものについてはすでに早川前物探部長により地熱誌上 (No. 15 1968) で発表されているので ここではいわゆるラルデレロ地域の地質構造 熱水の存在状態に関する特徴を紹介する意味で この地域の中に含まれるカルボリ地区 (Calboli area) の例にふれてみることにする。

カルボリ地区の説明に先立って ごく簡単にこの地方一帯の概況を述べておく。この地方にはかつて数多くの噴気孔 温泉 マッドプール (mud pool) などが存在し 礫産出地として知られていた。丘陵性の山地は次の地層によって構成されるが これらはおのおの水理 水文上からいってもそれ相応の特徴をもつ。地層は上から

- i) 新第三紀の泥岩 頁岩層 全般的な透水性に乏しい地層であって 地熱の貯溜層に対し帽岩の役割を果たす
- ii) おもに石灰岩質の岩石からなる地層で 地質時代は上部ジュラ紀から上部三畳紀にわたる 地熱の貯溜層としての条件に恵まれた地層である
- iii) 最下部の地層であって おもに片岩 千枚岩等の変成岩からなる。その地質時代は中生代である。一般に非透水性であるが 破碎された部分は局部的に透水性が高い

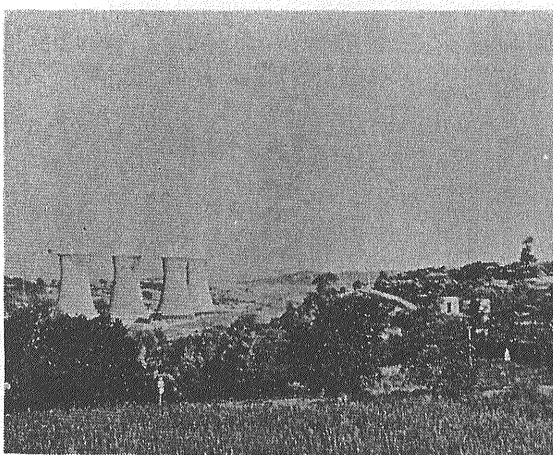
これらの地層は 中新世初頭に褶曲 断層運動をうけ 次いで中新世中—後期から第四紀にかけ 再び構造運動の影響にあずかり その時生じた断層運動により 今日みられるような地層の分布がもたらされた。この際生

じた地塁 地溝はNNW—SSEの方向にならび これに伴う断層や破碎帯に沿い とくに石灰岩質の中に透水性の部分が生じた。

鮮新世後期に 礫産出地域の南東数キロメートルのところへ火成岩が貫入したが これは地表まで達せず地下約2キロメートルのところにとどまった。多くの地質学者は この貫入岩体の北西縁に礫産出地域が位置することから この火成岩が地熱活動の熱源に当ると考えている。一方 深部に存在する熱水の起源は この地方の高地に広く分布する透水性の石灰岩質岩石から供給される雨水であると考えられるが この透水性の地層が地下に潜むところでは 逆に地熱の貯溜層と役割を果たしており 結局 地熱蒸気を最も多く産出するラルデレロ カステルヌーボその他の地区は すべて貯溜層が断層により上にもち上げられたところであって そのような地域では循環性の対流の分流が上向きに流れ 地熱をとり出すのに好適な条件をもつ場所に相当している。

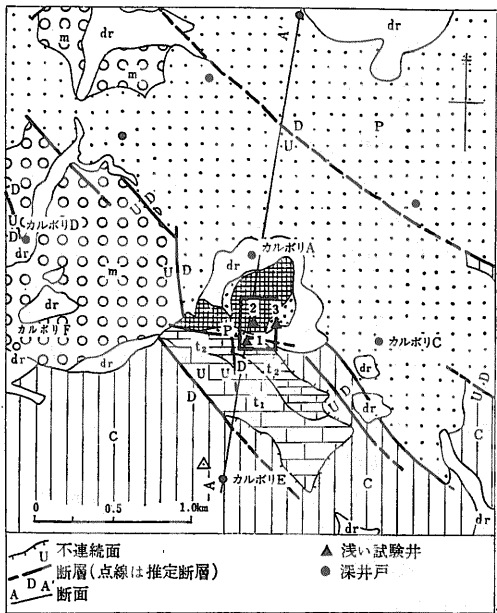
以上が いわゆるラルデレロ地域の概要であるが さらに詳しい状況を理解するため ラルデレロ地域の最南部を占めるカルボリ地区 (Calboli area) の例を 次に掲げる (第1図)。

モンテルトンドとラゴの南に位置するカルボリ地区はすでに述べたように 上から 泥岩からなる帽岩に当る地層 次に中生代の透水性の地層 そして非透水性の変成岩からなり 第2図および第3図の地質図 断面図で示すように 中生層のコアは南西方向に向かって深くなる。このカルボリ地区で1939年に3本の試錐がおろされた。1号井の深度は219m 2号井は70m 3号井は114mであるが このうち2号井からは2t/hの蒸気と13t/hの熱水 そして3号井からは74t/hの熱水が噴出した。

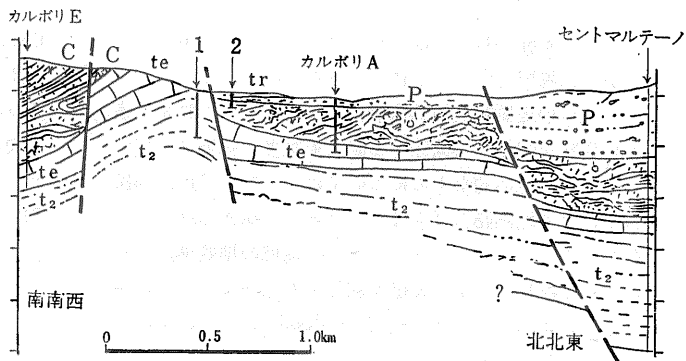


ラルデレロ第2発電所 カステルヌーボとラルデレロとの間の丘の上から写す

ラルデレロの博物館 この中に開発当初からのいろいろな資料が保存されている



第2図 カルボリ地区の地質図



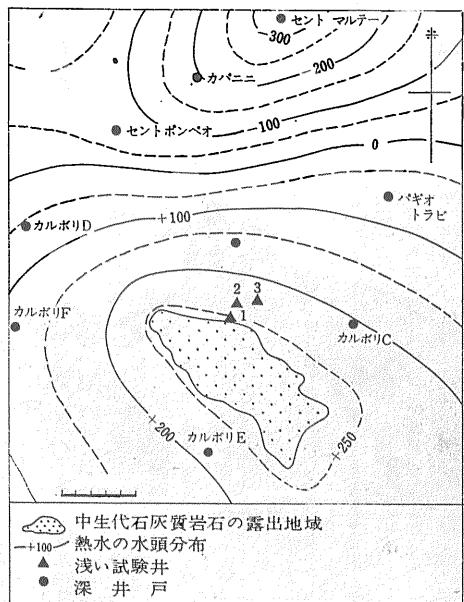
第3図 カルボリ地区の地質断面図

このあと 1952年にカルボリA井と呼ばれる深度240mの生産井が掘さくされた。この深さは非滲透性の帽岩と透水性の貯溜層の境界に当るが当初 圧力5.4ata 温度176°Cをもつ流体が152.2t/h噴出した。この噴出物は最初ほとんど蒸気だけであったが時間の経過と共に熱水を混合するようになり 熱水の量は35—40t/hに増えたが 蒸気の方は5年間に約半分減少した。

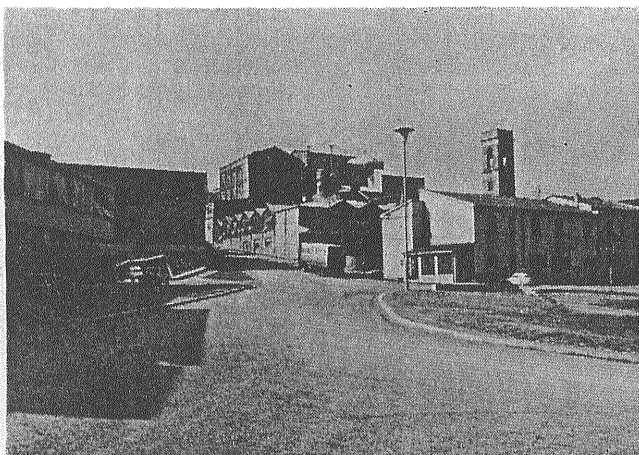
1963年から1968年までの間に カルボリA井の周囲すなわち中生層のコアの周り約1km²の範囲内で さらに8本の井戸が掘られたが 結論的にこれらの井戸からほとんど利用の対象にならぬ程わずかな噴出物しか得られなかったが このうち とくにマルテノ井だけのことについていえば その深さは1,230m 孔底温度300°Cで この地方では最も高い温度を示した。このカルボリ地区には 古くから中生層のコアの近くに地熱徴候があり このほか 温泉沈澱物や変質岩石の分布もみられた。

上で述べた2本のテストボーリングが終わって間もない 1939年に これらの噴気孔の幾つかは消滅するかあるいはその勢力が衰退した。1962年 カルボリA井が噴出した数日後 No.2およびNo.3井からの噴出が突然とまり またすべての噴気孔もその活動を停止した。

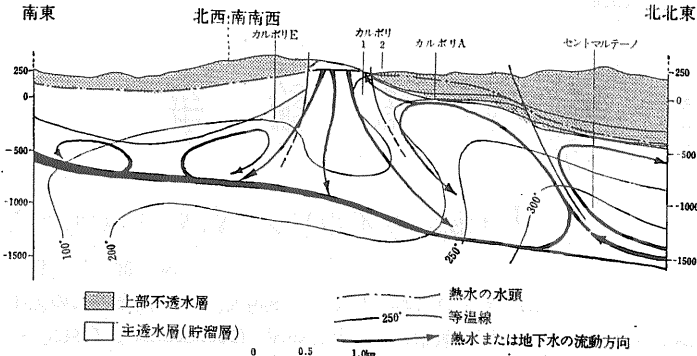
この事実は 井戸および地熱徴候が帽岩の下にある貯溜層から熱の供給をうけていることを物語っているがこのような事からは ラルデレロ地熱地域の南を占め



第4図 カルボリ地区における熱水の水頭分布



硫酸工場 かつて自然噴気から硫酸を抽出していたが 現在ではアメリカトルコから原料を輸入し硫酸を生産している。



第5図 カルボリ地区における熱水の循環機構

大きくみれば地表水の滲透地域に当るカルボリ地区の性格を暗示している。

この中生層の露出地域が地表水の滲透地域に当ることは種々のデータから証明される。先ず同位元素の分析からその水が地表水起源であることが確められたが一方 礫産出地域(いわゆる地熱地域)で掘られた井戸を利用して貯溜層に含まれる水の水頭分布を調べてみると透水性の中生層が露出する地域の水頭が他の場所より高いことが知られた。これはカルボリ地区の特徴をあらわす1つの事からであるがこの水頭はほぼ北に向かって漸次低くなり遂に海面より著しく低くなる(第4図)。

一方 実際測定した種々の深さでの温度 さらに各井戸の密閉圧から計算された温度にもとづいて温度分布図が得られるがそれを第5図に示す。

この結果 滲透地域に降った雨水の温度(13°C)と北側のマルテノ井で測定された300°Cとの温度差から透水性の地層の中に対流が生じることが十分に理解でき

る(第5図)。対流の機構は非常に複雑であるがこの温度分布図から地熱の中心地域に当るラルデロ地区と雨水の滲透地域に当るこのカルボリ地区とではボーリングをしてもその様子がかなり違うことが予測できる。すなわちラルデロの場合にはその全部が気化するような形で熱水を引き出しうるがカルボリ地区ではむしろ滲透地域からの水を取りこんで貯溜層の中の温度を下げてしまうということである。

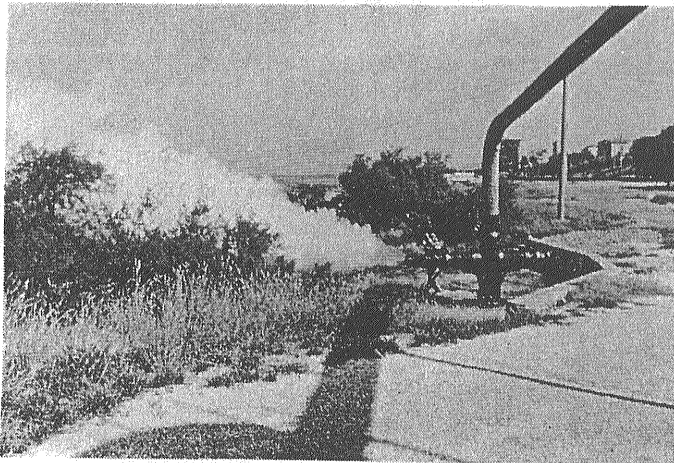
このようにカルボリ地区は同じラルデロ地域の中に含まれているがラルデロ地区のような活動の中心部と違い水の滲透循環などを理解する上好都合なデータを提供する場所として重要な意味をもっているといつてよい。

以上カルボリ地区について簡単な説明を加えたが要するに透水性の地層が広大な地域に分布しそれが地表に露出するところでは水の供給地となり地下に潜むところでは地熱蒸気の生産地になることをカルボリ地区そしてラルデロ地区のおのおのが示しているということである。

いずれにしても地下から莫大な熱の供給をうけると同時に帽岩をもつ透水性の地層が地熱の貯溜層としての好条件をもちつつ広い範囲に潜在することが今日のラルデロの存在を高からしめた大きな理由であるといふことができる。

地表そのものの風景は平凡な丘陵そのものに過ぎないがいま述べたような構造上の非凡さに今さらながら胸うたれつつ再びローマに向かう車の人となったのである。

(筆者は前応用地質部長 現国連エチオピア駐在地熱開発調査隊長)



見学の途中 バルブを開いて噴出試験を行なった蒸気井 蒸気が乾いているので噴出響が高く 話声がきこえないほどである