イタリアにおける地熱発電*

三 土 知 芳

Geothermal Electric Plant in Italy

by

Tomofusa MITSUCHI

(Résumé)

The writer visited the geothermal field at Larderello in Tuscania, Italy in October, 1952. A brief history of progress and the status at that date of utilization of underground vapour in generating electricity are described. Emphasis is given upon the peculiar geological occurrence of the vapour. The vapour seems to have its origin in a magma reservoir which is supposed to be seated at a depth of several kilometers below the surface and to be in a state of progressive cooling.

1. はしがき

筆者は1952年アルジェーで開かれた国際地質学会議の帰途、同年10月中旬イタリアを訪れ、Larderelloの地熱発電を視察した。こゝに文献による知識をその折の見聞で補つて一文を草する。従つて発電能力等に関する数字がいささか古いのを遺憾とする。また文中現在としたのはすべて視察当時のことである。

2. 地熱地帯の位置など

Larderello を中心とする地熱地帯はイタリアの中部のやゝ北西寄りてチレニア海に近く、ピサとフィレンツェの中間のやゝ南に位置し、Cecina 川と Cornia 川との上流に当る。いわゆる地熱地帯として噴気があり、また地熱発電が行われている所は南北東西ともに約15 kmで、面積約200 km²を算する。

こゝは概ね起伏のなだらかな丘陵地帯で、高距は海拔200 m ないし500 m であるが、一部には海拔1,000 m におよぶ峰がそびえ立っている。

噴気は蒸気のみが噴出する soffioni と呼ばれるものと池の水のなかから沸き立つて蒸気が噴出する lagoni と呼ばれ、わが国の「お釜」に相当するものがある。第3表に示すように、蒸気中には硼酸 H_3BO_3 が0.03%内外含まれているが、lagoni ではそれが濃縮されて水中に

0.2~0.5%含まれるに至る。このために古くからこゝに硼酸採取の産業が行われてきて、それが地熱発電の端緒となつたのである。

3. 硼酸工業の沿革

この地の噴気の使用は極めて古くから知られ、人々はそれを「地獄」として怖れながらも、それから明礬・硫酸および硫黄を採取し、羊毛加工に利用していた。

1777年トスカナ宮廷の薬剤師長でKöln 生れの Uberti Francesco Hoefer が lagoni の水のなかに、当時鎮静剤として賞用されていた硼酸の存在することを発見し翌年それを発表した。1779年解剖学者 Paulo Mascagni がこの発見を確認し、硼酸を採取するには鉛の鍋を用い薪の代りに蒸気をもつて煮つめるべきことを唱導した。

この発見により、多くの人々が硼酸採取を企てたが、鉄釜を用い、薪で煮るやり方なのであまり成功せず、それらの事業は次第にそのなかの1人で、この地に所領をもつていたフランス貴族 Francesco de Larderel の手に移り、1818年には全く統合されてしまった。Francesco は Mascagni の意見に従い、lagoni に煉瓦でドーム状に蓋を被せ、テラコッタ製の管で蒸気を導き、それを用いて鉛の鍋で煮つめを行い、 H_3BO_3 82%以上の品位の製品を販売し、歐洲の市場でチベット・インドおよびカリフォルニア産のティンカルと競争して観迎された。1842年には Adriano Larderel が鍋をいくつかの仕切をつけた長方形のものに改良し、煮つめの能率を高

* 昭和27年12月6日東京地學協會例會において講演
地學雜誌 Vol. 63, No. 2 (692), 1954.

めた。それで1846年大公 Leopold 二世は Larderel 家の功績を賞で、現在の地を Larderello と命名した。

この頃になるとカリフォルニア地方に硼酸の大鉱床が発見され、1884年には英国にその精製工場が建設されるに至りこの地でも同年2カ所に精製工場を新設したが、事業は酷く圧迫を受けるようになった。1900年社長に就任した Piero Ginori-Conti 公は噴気現象の解明、蒸気開発の可能性、硼酸回収率の向上および蒸気の動力への利用の研究に意を注ぎ、1902年より1912年に至る間に製品の品位を82%から90%に向上せしめる一方鑿井による蒸気利用の実験研究を行わしめた。因みに現在の会社の化学工場の製品は粗硼酸の品位95%、純硼酸の品位99.5%である。

4. 地質と蒸気の存在

この地を構成する地質は第1表に示す如くであつて、すべて水成岩から成る。

こゝで特異な岩層は Argille scagliose (鱗状粘土の意) と呼ばれるものである。これは泥質岩の中に石灰岩・蛇紋岩・花崗岩その他の岩石の塊が極めて不規則に含まれているものであつて、蛇紋岩塊には径数 km におよぶ大きなものがある。この岩層はその石灰岩に始新世の化石が多く見出されるので、その多くの部分が始新統とされていたが、この岩層が北部アペニン山地に沿って各地に極めて異様かつ不規則な分布を示し、また複雑な構造を呈するので、従来イタリアの地質の解明に著しい障碍となつていた。近年フィレンツェ大学教授 G. Merla 等が、これが造山運動の際に海底で起つた極めて大規模の地すべりの形ですべり動いて、現在の地にきたものであることを唱えてから、従来の地質の解釈に関する多くの混乱が除かれるようになり、今日では、極めて保守的の一部の地質家を除いては、たゞ

第1図 Larderello 地熱地帯近傍図

すべり方の大いさについて異論はあつても、この説に賛同しているよしである。

イタリアの地質調査所長 E. Beneo の談によれば、この地の Argille scagliose はアペニン山系を造つた漸新世末～中新世初にかけての造山期に、コルシカ・サルディニア両島と本土との間のチレニア海の辺りからすべつてきたものであるという。Merla に従えばアペニン造山運動はこの辺りから起つて次第に東漸し、現在の山系となつたものである。

Argille scagliose とその下の原地生地層との境界面は凸凹があり、また前者は後者の種々異つた層準に直接

第2図 Larderello 附近地質模式断面図

第 1 表 Larderello 附近地質一覽表

地 層		岩 石	層 厚 (m)
新原地生地層			
鮮 新 統		礫岩と粘土	
—— 不 整 合 ——			
中新統中上部		礫岩・粘土・砂・泥灰岩	100
—— 不 整 合 ——			
他地生地層			
ジュラ系上部～白堊系下部より漸新統に至る種々異なる階		Argille scagliose (鱗状粘土) に綠色岩・石灰岩等を不規則に混える	0～1,000
—— 不 整 合 ——			
原地生地層			
中生界—漸新統水成岩系— 結晶基礎岩	漸 新 統	グレイワッケ。砂質岩と泥質岩との層	300～400
	漸新統(?)～始新統～白堊系	雑色頁岩。稀に上部にヌムライト石灰岩を挟む	0～40
	ジュラ系上部～白堊系下部	チャート	50
	リアス統～ジュラ系中部	成層した珪質石灰岩	50
	リアス統下部(シネムリアン階)	紅色アムモナイト石灰岩	} 300～400
	リアス統下部(ヘツタギアン階)	塊状の臘様石灰岩	
	レーチック統	暗色石灰岩。Avicula contorta 頁岩を挟む	} 数～500
	三疊系上部(カーニック統?～ノーリック統)	「硬石膏系」。硬石膏・苦灰岩および苦灰質石灰岩の互層	
	—— 不 整 合 ——		
	二疊系	珪岩・含石英礫珪岩。千枚岩を挟む	1,000以上
石炭系?		千枚岩	

している。Argille scagliose の厚さは Larderello 附近では 500 m 内外を普通とするが、最厚は 1,000 m におよび、また所によつては全く欠けていて、原地生地層が地表に露出している。前に述べた高距 1,000 m におよぶ山地は中生代の石灰岩等が露出している所である。

地質構造を支配するものは北東—南西と、北西—南東に走る 2 種の断層群で、原地生地層はモザイク状にいくつもの地塊に分たれている。

注意をひくのは、この地熱地帯の近くには火山が全く存在しないことである。イタリアの活火山は南部の島嶼に数多いが、本土の Vesuvio を最北としてその北になく、また更新世後期に生じた死火山はさらに北におよんでいるとはいえ、その最北のものは Larderello より約 100 km 南東にある Bolsena 山である。これらの死火山は一般に玄武岩質噴出物からなり、その一部を粗面岩質噴出物が蔽っている。なお粗面岩のみからなる火山状の山塊として、Bolsena 山よりさらに約 30 km 北西に Mt. Amiata があり、また同岩のより小さな露出は、地熱地帯をやゝ離れてその周辺に位置する Roccastrada, Montecatini, Sassoforte, Campiglia Marittima 等のそれぞれの附近に見られる。Campiglia Marittima には電気石粗面岩質斑岩の岩脈もある。

ほかに第三紀中新世の火成活動により生じた花崗岩類

はチレニア海の Elba, Montecristo および Giglio の島々に露出し、本土にも地熱地帯に遠くない Gavorrano および Campiglia Marittima 附近にその小露出が見られ、Massa Marittima 近傍ではこの火成活動に関係して生じたと考えられる鉛・亜鉛の鉱床が稼行されている。

問題の蒸気は不透過性の岩石に蔽われた元来多孔質のまたは破碎作用により 2 次的に多孔質となつた岩石のなかに溜つており、それが自然に少しづつ、または鑿井により多量に地表に噴出すると考えられる。これらの多孔質の岩石としてはひゞ割れに富むジュラ系のチャートないし珪質石灰岩、レーチック統～上部三疊系の空洞ある石灰岩ないし苦灰岩、および破碎された二疊系の珪岩がある。これらの蒸気溜りを蔽う不透過性の岩石としては他地生岩層の Argille scagliose、漸新統～白堊系のグレイワッケならびに雑色頁岩、およびリアス統下部の塊状の臘様石灰岩があるが、最も重要なものは Argille scagliose である(第 2 図参照)。

現在鑿井によつて最も優勢な蒸気を得られつゝある Larderello, Castelnuovo V.C. および Serazzano 地区は、発達した Argille scagliose がジュラ系上部のチャート、レーチック統～上部三疊系の石灰岩ないし「硬石膏系」を蔽う所であつて、Larderello 附近では厚さ約 350～600 m の Argille scagliose がレーチック統ない

し二畳系に直接している。

なお蒸気はこれらの多孔質の岩石よりなる地層の上限または下限に沿って豊富に存在するという。

蒸気は恐らく地下深所より断層による破碎帯を伝わって上昇してきて、多孔質の岩石中に集積するもので、このような破碎帯の近くでは豊富な蒸気が得られると考えられている。地表に見られる自然の噴気——soffioni および lagoni——の分布は前述の断層系に支配され、また Argille scagliose がなく、原地生地層の多孔質な岩石が露出している所に多く見られる。

蒸気の探査のためにかつて地表よりする地温分布測定および放射能探査が行われたが、これらは地表近くの状態を示すのみで、目的とするより深い蒸気存在について知る手懸りとはならなかった。また磁気(垂直)異常測定による探査、重力偏差測定による探査および弾性波探査(屈折法)も行われたが、地下構造を積極的に開明する資料は得られなかった。

現在最も信頼し得る方法として用いられている探査法は、綿密な地質調査と比抵抗法による電気探査である。電気探査はフランスの Compagnie Générale de Géophysique (Schlumberger 会社の技術による探査を実施する会社) によって行われているが、この方法では地下 5,000 m までの探査が可能であると称しており、事実深度 1,500 m に達する電気抵抗曲線が描かれている。これらの方法によって知られるのは、地下における地層、特にその界面の状況と、従つてその不連続を示す断層の状況とであつて、それらが開発に直接の指針となるのである。

5. 噴気井の掘鑿

蒸気を採取するために 1832 年から掘抜井戸の手掘りによる掘鑿が試みられ、ようやく 1865 年には深度 20~30 m の坑井からの蒸気採取に若干の成功を収めた。

噴気井の掘鑿には硬軟入り交つた地層の掘進の困難、坑井内の崩壊、さらに蒸気の爆発による人命および機器の損失ならびに坑井の破壊の危険が常に伴うほか、高温の蒸気中に含まれる有害な物質による鉄管の損傷や硫酸塩の沈積による閉塞などの障がある。これらの対策や鑿井能率の向上等に関し、1904 年から 1930 年にかけて種々の研究が行われ、かつそれが実地に応用され、噴気蒸気による発電の実用化が試みられた。

最初の間はカナディアン式掘鑿のみが実用に役立ったが、1924 年に小型ロータリー機械が導入され、1928 年には径 17", 深度 600 m の坑井を仕上げ得るに至り、蒸気量 10~30 t/時を得ることが可能になった。しかし掘進が遅く、かつ種々の困難が伴つた。さらに綱式の先をロ

式で進める方法により、60 t/時の坑井も仕上げた。1929 年にはロ式と衝撃式とを併用した強力な機械に循環泥水を用いることになりその結果 1931 年 Larderello 1 号井が成功し、深度 266 m で 205°C、3.4 気圧の蒸気 200 t/時を得、翌 1932 年同 2 号井では深度 211 m で 181°C、1.9 気圧の蒸気 170 t/時を得るというように、次々と成功を収め、1939 年には坑井数 140、深度延長 30,000 m、蒸気量合計 2,000 t/時を算するに至つた。

第 2 次世界大戦の末期 1944 年、撤退する独軍と進攻する聯合軍とにより主な坑井設備は発電所とともに徹底的に破壊されたが、戦後忽ち復興し、後述するように戦前に倍する発電能力に対応する蒸気を得るに至つたのは蒸気の探査に関する技術とともに、掘鑿技術がすでにほぼ確立したためと思われる。

現在鑿井機としては最大は深度 3,000 m まで掘鑿可能なロ式、および 1,500 m まで可能な綱式各数台を有するが、最近ではアメリカ製のロ式機が多く用いられるようである。筆者の見た 1 台は National 社製 Ideal 17 1/2" テーブルのもので、動力としてはドロウウォークスに 145 馬力、ポンプに 175 馬力の電動モーターを用いるものであつた。1947 年にアメリカから Hughs のロックビットが導入されてから掘進速度が著しく向上したよしである。そのほか循環泥水にベントナイトを用い、時に磷酸ソーダを混ぜるなどのテクニックは石油鑿井と変らない。泥水比重は普通 1.2 位である。

現在発電の中心地 Larderello 附近で掘られている坑井の深度は 400~700 m、平均 500 m 内外で、Argille scagliose の直下のレーチック統~上部三畳系、また上部三畳系と二畳系との境界の孔隙ある地層を目的としている。坑井の径は坑口 23", 坑底 9" が普通であり、ケーシングは 12~14" とし、肌 50~200 m はケーシングなしの洞穴として仕上げる。

現在の坑井数は約 100 坑で蒸気量 2,900 t/時を産するが、そのうち中心地 Larderello 附近では約 50 坑で、2,300 t/時を産しており、1 井当りの最大は 320 t/時である。Larderello 附近のものは蒸気の圧力平均 5 気圧、最大 8 気圧、温度普通 200°C、最大 235°C を算する。比較的蒸気の劣勢な他の地区では圧力 2 気圧、温度 135°C のものも利用されている。坑井の深度と蒸気の圧力および温度とは関係がないといわれている。なお坑井の蒸気の減退率は平均年 10% 内外であるという。

坑井間隔は 150 m 以上としているが、なお坑井相互間の干渉が起る場合もあつて、現在開発中のものは 200~300 m となつている。

坑井から蒸気を発電所に導くパイプラインは 6" 位のものを多く見受けるが、最近の優勢な坑井からのものは

18" におよぶものがある。これらはアスベストセメントで蔽つた鉄管を用いる。パイプラインを流れる間の蒸気の圧力および温度の減耗は 1 km 当りそれぞれ 1~2% および 4~5% であるという。

6. 発 電

地下より噴出する蒸気を利用しての発電は、すでに 1894 年より種々の実験が行われたが、発電はやややく 1904 年 3.5 気圧の蒸気を直接に $\frac{3}{4}$ 馬力のレシプロ機関に送り、これを動かして 5 燈の電燈を点すことに成功したのはじまり、翌 1905 年には同じく直接に 35~40 馬力のレシプロ機関を運転して工場照明用電源とした。

天然蒸気を直接タービンに送ることは、蒸気中の有害物質により金属が腐蝕されるのと、蒸気中の炭酸ガスを主とする非凝縮性ガスを除去するのに多量のエネルギーを損失するのとで、困難であつた。それで 1913 年には天然蒸気を熱交換器に通じ、清水から蒸気を作り、これでタービンを運転する間接式の方法が採用され、復水器を備えた 250 KW のタービン発電機を設備した。この 2 次蒸気圧は 1.25 気圧である。この成功により翌 1914 年には Larderello に同様式の 2,750 KW のタービン発電機 3 台を設けた。その後鑿井の進のため、優勢な蒸気が得られるようになり、1932 年には Larderello には 3 台のタービン発電機による 12,000 KW の設備が作られた。その間、直接式のものも引続き試みられ、復水器のない排気開放型のは実用化され、その小型のものが各所に設置された。かくて次第に大規模な発電が行われ、第 2 次戦当時には 135,800 KW の能力を有するに至つた。

第 2 表 Larderello 会社発電所表

発 電 所	台数	発 電 能 力	
		各台 KW	計 KW
Larderello 第 2 *	7	11,000	77,000
Larderello 第 3	4	25,000	100,000
	2	9,000	18,000
	4	11,000	44,000
Castelnuovo V. C.	1	2,000	2,000
	2	3,500	7,000
Serrazzano	2	3,500	7,000
Sasso Pisano	2	3,500	7,000
Monterotondo	1	3,500	3,500
Travale	1	3,500	3,500
計	24	—	262,000

* Larderello 第 1 発電所は 1948 年中以来使用していない

第 3 図 地熱発電方式略図

1944 年には前述のように戦禍による徹底的な破壊をこうむつたか、戦後マーシャル援助計画による資金援助を受けて急速に復興し、現在では第 2 表に示す如く、戦前に倍する 262,000 KW の能力を備えるに至つている。

現在行われている発電方式には第 3 図に示したように 3 式がある。A は直接式で、天然蒸気をそのままタービンに送りこみ、排気は放出する、復水器を備えない最も簡単な型式である。この型式は効率はいくつか、Monterotondo 等比較的蒸気量の少ない地区の発電所に用いられるほか、簡単かつ小型である所から、新に開発がはじめられた所に急急に設置されるものである。

B は間接式で、熱交換により得た清水蒸気をもつてタービンを動かすもので、復水器を有する。この地は水が乏しいため、復水器の水は巨大な冷却塔を通じて循環させる。この型式は熱交換のために複雑でかつ大型である。Larderello 第 2 発電所、Larderello 第 3 発電所の 6 台のうち 9,000 KW 2 台、および Castelnuovo 発電所に用いられている。

C は最近完成した新直接式と称すべきものであり、Larderello 第 3 発電所の 25,000 KW 4 台がこれである。直接天然蒸気をタービンに入れることは A と同様で

あるが、復水器を備え、極めて大型で大発電用である。天然蒸気は有害な物質を含み、金属を腐蝕する懸念があるにもかかわらず、このような新直接式が可能になったのは金属材料の進歩に負う所が多いと考えられる。タービンの羽根は不銹鋼を用いる。それで天然蒸気は空気に触れない限り障害を起さないといわれている。

各式の効率は次の如くである。

	蒸気圧 (気圧)	蒸気 温度	KW当り 蒸気消費 (kg)
A 直接式	4.4	185°C	19
B 間接式	2(2次)	120°C(2次)	14
C 新直接式	4.75	185°C	9.5

ただし硼酸回収のためにはB式がよいのであつて、これから化学工場に行く水は当然 H_3BO_3 の濃度が高く、2.5%におよぶという。

現在この他の地熱発電の年産は20億KW時であり、イタリアの年産約300億KW時の約7%を占めている。Larderello 会社と呼ぶこの会社は、国有鉄道が株の70%を保有し、電気はすべて国鉄に売られ、国鉄の電化に重要な役割を果たしている。その価格は1KW時5リラ(1リラ=邦貨58銭)のよしである。

7. 蒸気の成因

この地の天然蒸気の成因について種々の説があるが、すべて臆測の範囲を出でない。しかし、第3表に見られるように、蒸気中に相当量の硼酸を含むこと、火山ガスに一般な水素・ヘリウム・メタン・硫化水素・炭酸ガス等をふくむこと、また蒸気が著しい放射能を有することなどは、蒸気が主として岩漿性のものであることを思わせる。もちろん、天水に由来する地下水が岩漿性の蒸気

第3表 噴出蒸気の平均組成 (1kg 中)

H_2O	955.52 g
CO_2	42.65
可燃性ガス (CH_4 , H_2)	0.19
H_2S	0.88
N_2	0.16
H_3BO_3	0.30
NH_4	0.30
稀ガス (He, Ar, Ne)	1 cm ³

非凝縮ガスの平均組成 (1m³ 中)

CO_2	942.20 l
H_2S	25.
CH_4	9.40
H_2	17.90
N_2	5.50
稀ガス (He, Ar, Ne)	0.025

により加熱され、2次的に気化したものも混つてはいるであろうが、蒸気の組成に一般にあまり著しい変化が認められないことから、天水よりのものが占める割合は極めて小さいということができよう。ただし、温度の比較的低いものには天水が多く混在しているものがあるらしく、たとえば、Travale の140°Cの蒸気では硼酸分が一般より低いという。なお自然噴気は、Iagoni にせよ、soffioni にせよ、その温度がその地点における気圧に応じた沸点温度を超えることがなく、従つて100°Cには達しない。

蒸気をもたらす岩漿に関係があるものとして、地熱地帯に近くその周辺に露出する、新しい時代の噴出岩たる粗面岩があげられる。そのなかには前述の如く硼酸塩鉱物である電気石をもつものもある。この岩漿が地下ですでに固結したものは、その後の地殻変動と剝削作用により、一部前述の中新世花崗岩として地表に露出しているものであるが、地下深くにはまだ冷却固結し終らない粗面岩質ないし花崗岩質の岩漿溜りが存在すると想像される。この岩漿の冷却過程において圧力が高められている水蒸気を主とするガス体が、断層等による破碎帯を通じて上昇してくるものと推察される。このような岩漿溜りの深さは、Vesuvio 火山などで推測されるように地下5~6kmであろう。そして岩漿溜りは数100km²というような広がりをもつものとしてもさしつかえなからう。

8. むすび

Larderello の地帯でまず注目すべきことは、それが現在の火山と直接関係がなく、蒸気が中生代ないし古生代の水成岩中に存在することである。このことは、わが国の噴気を有する地熱地帯が、ほとんどすべて火山地帯に限られていることと大いに事情を異にする。ここではしたがつて地熱開発可能地域がある広がりをもつことを予想し得る。またここには Argille scagliose の如き特殊な岩層が分布して多孔質の岩石を蔽い、これが石油鉱床でいわゆるキャップ ロックの役目を果たしている。

これらの事柄は、この地の地熱発電事業が硼酸採取工業に端を発して漸次発展してきたこととともに、この地の地熱発電に恵まれた特殊事情をなしている。だからといつて幾多の失敗を繰返しつつも研究に研究を、改良に改良を重ね、今日の盛大な事業を成立せしめた創意と努力とを過少評価することはできない。今日では探査・掘鑿および発電とつづく一連の技術がほとんど確立していることは、大戦中の徹底的な破壊にもかかわらず、マーシャル援助計画による援助があつたとはいえ、数年にして戦前に倍する発電所を建設、運転し得たことにもうかがえる。

イタリアではこの地のほかに、地熱発電としてナポリに近い Lago del Fusaro に最近深度 1,200 m の鑿井が行われたが、熱泉を得たのみであつたよしであるし、Volcano 島・Ischia 島・シシリア 島南海岸等に行われた試験についても、成功に至つたとは報告されていない。これらはすべて火山地帯にある。このことと Larderello の状況とは、わが国で従来実験が行われ、または企画されている所がすべて火山の噴気地帯であることに對し、再考させることではなかろうか。そして火山における噴気現象のみにとらはれることなく、地下の大きな熱源を探索しての地熱開発の可能性に思をめぐらすべ

きではなかろうか。

稿を終るに當り、現地視察の便宜を与えられた Larderello 会社当局各位に深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- A. Mazzoni: The steam vents of Tuscany and the Larderello plant. Firenze, 1948.
工業技術庁: 地熱発電試験研究報告書, 第1集, 1952.
“Larderello” S. p. A.: Brevi note sui suffioni boraciferi Toscani e sulla loro utilizzazione industriale. Bologna, 1952.