

トルコの地熱開発

河田清雄・太田良平

はじめに

トルコはヨーロッパとアジアの2大陸にまたがる特異な位置を占め、ヨーロッパ南東端のイスタンブール周辺のヨーロッパ・トルコ（トラキア）とボスフォラスダーダネルスの両海峡を隔てたアジア・トルコ（アナトリア）からなる。国土面積の97%はアジア側にあり、沿岸部を除けば乾燥した高原性の台地が大部分を占めている。

共和国建国以来50年を迎えたトルコは、従来の伝統的な農業・牧畜生産を基礎とし、工業生産の増強にも力を注いできた。しかしトルコはここ数年来慢性的な電力不足に見舞われ、国策として電力の節約を強く打出している。1973年からスタートした第3次5カ年開発計画における工業生産目標も電力の増強がなくては達成不可能である。

トルコの地熱エネルギー資源の開発にふれる前にトルコの電力事情一般について簡単に説明したい。第1表に示したようにトルコの発電設備と発電電力量は中東諸国としてはその水準を抜いてはいる。しかし隣接するヨーロッパ諸国には及ばず、とくに農業生産以外にこれといった工業のないブルガリアに比較してもはるかに低い水準にある。従来トルコは電力の大半を火力発電によりまかなってきた。しかし石油危機に端を発したエネルギー資源の重要性の国際的な認識を背景にトルコも水力発電用のダム建設に鋭意とり組もうとしている。とくに1974年にはトルコで最大のケバンダム（当初は62万kWを予定し総出力は124万kW）が完成し、一部の付帯設備を除いて発電開始の状態にある。また日本の技術協力により黒海沿岸に近いアイバジユクに建設中のダム（総出力50万kW）も1978年には完成の予定で、これらがフルに運転された暁にはトルコの電力事情は好転するにちがいない。しかし沿岸部を除いては降雨量が少なく、森林にも乏しいトルコとしては貴重な水資源にも限度があり、エネルギー危機の叫ばれている現在、地熱エネルギーの開発は国策的にも重要な課題となってきた。

余り知られてはいないがトルコは中東地域では有数の火山国であり、温泉もほぼ全土にわたって広く分布し

ている。地熱エネルギー開発の予備調査は1962年にM. T. A.（国立鉱物資源調査開発研究所）の水利地質調査班によって温泉調査からはじめられた。現在M. T. A.による地熱開発は石油部（石油・天然ガス地質部）の地熱エネルギー課によって行なわれており11人の地質家と1人の地形専門家がこの課に所属している。この他に物理探査、地球化学および試錐などの専門家が随時協力している。1969年までにM. T. A.が地熱開発に要した経費は第2表のとおりである。

I トルコの地質概観

トルコは南北両側を大陸で挟まれた造山帯に位置し、太古から沈降・堆積・褶曲・隆起および浸蝕を繰り返してきた場所で、先カンブリア紀から現世にいたるすべての地質時代の堆積岩類があり、これらに貫入しあるいは噴出した諸種の火成岩や造山運動に伴った変成岩などからなっている。これらのうち火山岩は国土の約20%を占めて分布し、古いものは先カンブリア紀やオルド

第1表 トルコとその近隣諸国の発電設備と電力量の比較一覧表

	発電設備 (単位1,000kW)		発電電力量 (単位100万kW)	
	1969	1970	1969	1970
トルコ	水力 723 火力 1,259 計 1,982	水力 723 火力 1,569 計 2,292	水力 3,456 火力 4,374 計 7,830	水力 3,028 火力 5,588 計 8,616
イラン	水力 462 火力 851 計 1,313		水力 1,336 火力 4,526 計 5,862	
ギリシア	水力 1,042 火力 1,353 計 2,395		水力 2,031 火力 6,391 計 8,422	
ブルガリア		水力 816 火力 3,301 計 4,117		水力 2,152 火力 17,361 計 19,513

トルコの1973年における発電設備と総発電電力量

発電設備	総発電電力量	水力と火力の比率
水力 120万kW	水力 26億1,900万kW/h	21.3%
火力 433万kW	火力 96億7,900万kW/h	78.7%
計 553万kW	計 122億9,800万kW/h	100%

第2表 MTAの地熱開発に要した経費と予算要求一覧表(1969)

年 度	単 位	経 費 トルコリラ (1リラ=20円)
1963		280,000
1964		610,000
1965		490,000
1966		1,200,000
1967		3,300,000
1968		5,400,000
1969		6,000,000
1970		22,000,000*
1971		20,000,000*
1972		20,000,000*

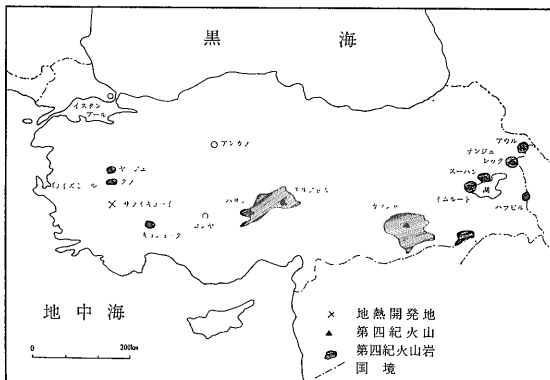
*: 要求額 (但し, 1969年段階)

ピス紀の地層中にも見出されるが 第四紀火山は11個を数えることができ それらの分布を第1図に 火山の概要と火山岩の性質を第3表に示した。 第四紀火山といっても第三紀末から引続いて活動したものが多く 現在では活動が休止し いわゆる死火山あるいは休火山に属する。

これらのうち温泉や噴気孔などの後火山活動があり また降灰などかなり新しい時期の噴出物をもつものがあるが 明らかに有史時代の活動記録を残しているのはただ1例しかない。 すなわちコンヤの近くのチャタルフックの遺跡で 寺院の壁画(紀元前6,200年)に火山の噴火の状景が描かれており これはハサン火山と推定されている。 しかしハサン火山もその他の火山も現在では全く平穏である。

トルコは地中海型岩石区に属し アルカリ岩系およびアルカリ岩系から導かれたカルクアルカリ岩型の岩石からなる。

第四紀火山のうち アウル火山は 海拔5,185 mあり



第1図 トルコの第四紀火山の分布

トルコ第1の高山で 俗にアララト山と呼ばれ ノアの箱舟が漂着した伝説で有名である。 なおトルコ・ギリシア両国間のエーゲ海に浮ぶ小島サントリン火山(イズミールの南西約260km ギリシア領)は活火山でクラカタア型の火山活動で知られ 紀元前からたびたび活動記録があり 最近では1950年に溶岩を流出しており 以後も噴気を続けている。 この火山の岩石は紫蘇輝石安山岩-石英安山岩である。

トルコの第四紀火山のうち温泉や噴気孔など 後火山活動が顕著にみられるのは テンジュレック・ハラビル・ギョジュックなどであるが 硫黄鉱床として探鉱されたことがあるにとどまり 地熱資源としてはまだ利用されていない。

日本の地熱資源は第四紀火山と密接に関係しているがトルコで現在開発されているクズルデレの地熱地帯ではすぐ近傍に第四紀火山はない。 しかしもっとも近いのが北方約70kmを隔てたクラ火山であるが クラ火山の最新の活動は 有史時代と推定されているので この活動と成因的に関係があるのかも知れない。 なお Mc KENZIE, D.P.(1970)の説によると イスタンブール付近からヤーージュ火山・クラ火山を経てこの地熱地帯を通り地中海に延びる線付近を境界とし 東側のトルコプレートが西側のエーゲプレートに向い動いているということであるが この境界線付近にこれら火山や地熱地帯があること また西側区域には第四紀火山が分布していないにもかかわらず 多くの高温の温泉があること(第2図参照)は興味深く 今後の構造地質学的解明が待たれる。

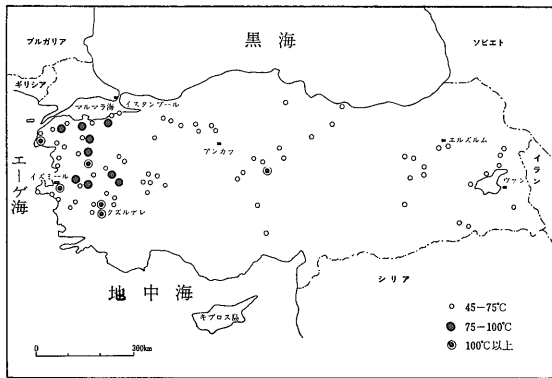
II 地熱地帯の地質と開発状況

1 一般地質

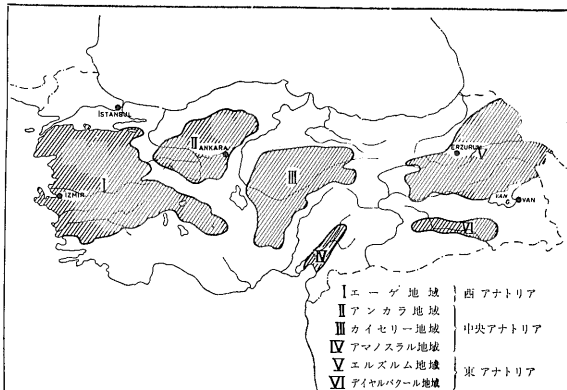
現在地熱開発が行なわれているのはトルコ南西部のクズルデレ(kızıldere)で 鉄道や幹線道路に近接し 交

第3表 トルコの第四紀火山の概要と火山岩の性質

火山	形態	岩石	後火山活動	現世における活動
アウル	成層火山	輝石安山岩 玄武岩	ない	ない
テンジュレック	成層火山	粗面安山岩	温泉・硫気孔・ トラバーチンあり	溶岩の流出
スーハン	成層火山	輝石角閃石安山岩	ない	黒曜岩の流出
ネムルット	成層火山	輝石角閃石安山岩	炭酸孔あり	溶岩の流出 (有史時代?)
ハラビル	成層火山	輝石角閃石安山岩	温泉・硫気孔・ トラバーチンあり	ない
カラジャヤ	溶岩台地	かんらん石玄武岩	ない	ない
エルジャス ハサン	複合火山	玄武岩 各種安山岩	温泉あり	噴火 (有史時代)
ギョジュック	カルデラ 火山	輝石安山岩	温泉・硫気孔あり	ない
ヤーージュ	成層火山?	石英安山岩	ない	ない
クラ	成層火山	粗面安山岩	ない	溶岩の流出 (有史時代?)



第2図 トルコの温泉分布図



第3図 トルコの地熱地帯

通の便はきわめてよい。開発現場は 比高200—500mの起伏する丘陵地帯を幅数 km でほぼ東西に走る沖積平野の北側山麓にある。

クズルデレ地域は 古生代の変成岩類と新第三紀中新世および鮮新世の堆積岩類からなる。古生代の変成岩類は 片麻岩・珪岩・雲母片岩・千枚岩およびミロナイト化した結晶質石灰岩からなる。この結晶質石灰岩の分布は広く 厚さは 250 m以上あるが 地表での露出は少ない。新第三紀中新世の堆積岩は 傾斜不整合で変成岩類の上のり 下位から順に 次のように分けることができる。

- a 基底の泥質礫岩の上に厚い赤色碎屑岩層があり これはマール・シルト岩および砂岩からなるがこの上位に亜炭層がのっている。この赤色碎屑岩層の厚さは 80—100mに達する。
- b 堅く割れ目が多く透過性に富んだ石灰岩からなり 厚さは約 100 mあり 中新世中部に属する。

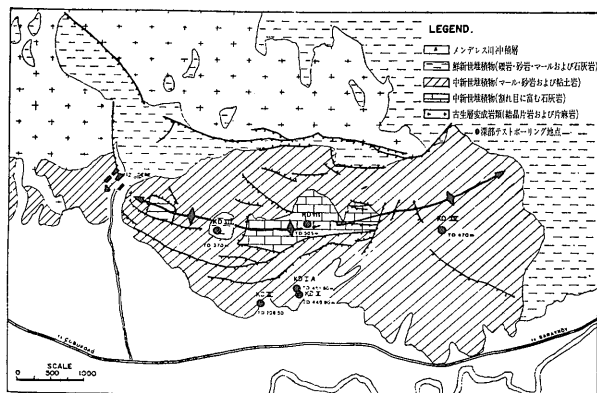
- c 灰色マールを主とし厚さは 350 m前後で中新世上部に属する。本層の下部はマールの中に石灰岩の薄層や縞状またはレンズ状の石膏を挟み珪化を受けており 中部および上部では マールと粘土岩からなり砂岩層を挟む。

新第三紀鮮新世の堆積岩は 上記の中新世堆積岩を不整合に覆い 礫岩・砂岩・石膏に富むマールおよび石灰岩からなり 湖沼または河川の堆積物で厚さは約 200 mに達する。

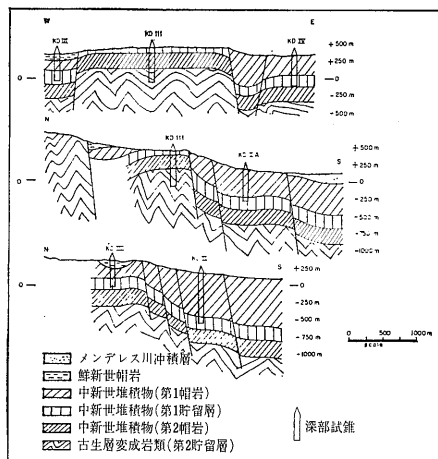
なお前記のほぼ東西に走る沖積平野は地溝と考えられており 山地には東西性の階段断層が発達し 平野に向い 60—300 m順次に落込んでいる。これらの断層はさらに南北性の断層で切られている。

2 地熱の開発

地熱の開発には 熱源・帽岩および蒸気貯留層の3つ



第4図 a クズルデレ地熱地帯の地質図 UYSALLI, H. (1971) より引用

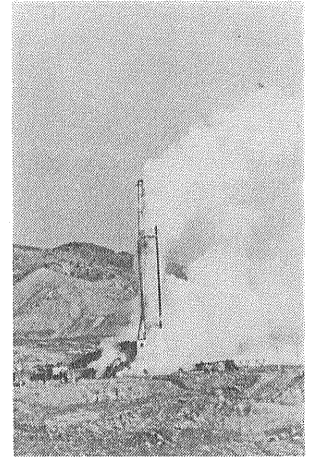


第4図 b クズルデレ地熱地帯の模式断面図

第4表 熱水の化学組成

(単位: ppm)

	クズルデレ温泉	メンデレス川	クズルデレ1号坑井第1貯溜層	クズルデレ6号坑井第2貯溜層
Temp. (°C)	100			
pH	9.0	7.9	8.9	8.9
Cl ⁻	1.3	14	106	114.51
SO ₄ ²⁻	750	240	790	864.56
HCO ⁻	2,560	305	2,790	
F ⁻	18		19.5	27.60
Na ⁺	1,260	28	1,380	1,428.16
K ⁺	175	8	166	176.40
NH ₄ ⁺			5	2.44
Ca ²⁺	1.2	94	2.4	7.74
Mg ²⁺	0.1	48	0.35	1.87
B	23	0.38	26	24.02
SiO ₂	185		220	436.00
H ₂ S (free)	200			
CO ₂ (%)	95			
比電導度 M.H.O.				4.83×10 ⁻⁸



写真① クズルデレ1 A号地熱坑井から噴出した蒸気

UYSALLI, H. (1971) より引用

が不可欠であるが クズルデレ付近には熱源となる火山はない。 それにもかかわらず多くの噴気孔があり 沸騰点に近い高温の熱水が多量に湧出(140 l/sec)し また断層に沿い熱水変質が認められる。 これらの事実はこの地域の地下深部に高温物質が潜在し 地表近くに高温をもたらしているものと思われる。

前述のようにクズルデレ地域では透過性および不透透性をもった新旧諸種の岩層が重っており 第4図bに示すように 現在までに2つの帽岩と2つの蒸気貯溜層の存在が試錐によって確められた。 すなわち

- 第1帽岩 中新世堆積岩 c
- 第1蒸気貯溜層 同 b
- 第2帽岩 同 a
- 第2蒸気貯溜層 変成岩類のうち ミロナイト化した結晶質石灰岩

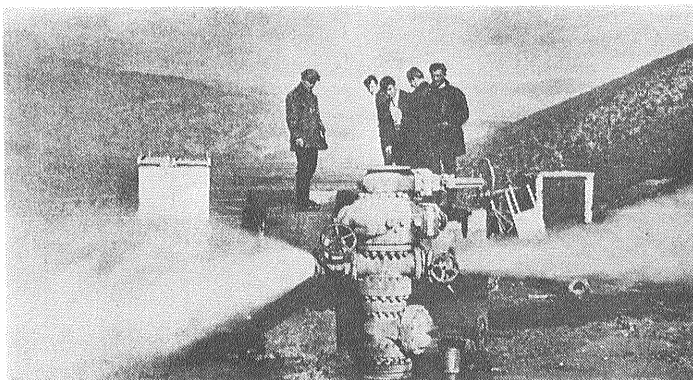
なお第3蒸気貯溜層として変成岩類の片麻岩が見込まれている。 これは野外の露出で見ると透過性に富んでいるが この上にある片岩類の厚さが不定なので試錐が到達しうる深さは予測しにくいという。

3 試錐

クズルデレの地熱地帯で 温度勾配の変化を知るため 300 km² の範囲内に130本の試錐(100mの深さ)が施行されたが その値は深さ10mにつき1.5~6.0℃の上昇であった。 また深部テスト試錐は 1968年4月に初めて実施されて以来 現在までに14本(500~1,700mの深さ)を数える。 この14本のうち 2本は故障のため中止 2本は炭酸石灰の沈着のため閉止したが 残る10本からは現在でもなお蒸気や熱水を噴き出している。 故障のため中止した2本を除いた12本のうち 7本は第1蒸気貯溜層から 5本は第2蒸気貯溜層から噴出している。 第1蒸気貯溜層の底の最高温度は187℃で 第2蒸気貯溜層の底の最高温度は205℃である。

圧力が6 kg/cm² の状態で 上記のすべての坑井からの熱水の噴出量は 130—500 t/h で 蒸気は15—50 t/hである。

蒸気の容量は 1本の坑井で300—7,000 kW の発電能力をもっている。 しかし もっとも心配なのは炭酸石灰の沈着で 絶えず除去作業をくり返してやらねばならない。



写真② クズルデレ地熱坑井から噴出した蒸気の温度と容量の測定

クズルデレ14号坑井では 10.5 kg/cm^2 のもとの熱水と蒸気が 520 t/h 噴出しており 蒸気の含有率は5%である。

クズルデレ6号坑井の出力の内訳は 次のとおりである。

締切圧	14 kg/cm^2
総噴出量	185 t/h
水ガス比	18.6% (主として CO_2 ガス)

クズルデレの地熱地帯では 地熱坑井が経済的にひきあうかどうかを確かめるために 現在なお開発テストが行なわれている。

調査結果では 第2貯溜層の結晶質石灰岩のほうが第1貯溜層の石灰岩よりも熱水に対する蒸気の比率が高く有利であることが分った。

地熱坑井の開発テストでは クズルデレ1A号 6号 7号 8号と14号をあわせて $25,000 \text{ kW}$ の発電が計画されている。

あ と が き

M. T. A. における地熱エネルギー開発計画は予定よりも大幅に遅れている。当初は 1970年にクズルデレで出力 $25,000 \text{ kW} - 50,000 \text{ kW}$ の発電を行なうための準備作業をはじめて 将来は $200,000 \text{ kW}$ 発電を目指して 1971年からその準備段階の作業に入る予定であった。しかし現在 まだ発電が行なわれたというニュースはきいていない。どのような理由で大幅に遅れているのかわからないが 技術面と予算面で困難な事情のあることが予想される。さらに 1974年の7月にはじまったキプロス紛争もこの国の内外情勢を大きく転換させた。

エーゲ海周辺の石油開発が この地域の権利を強く主張する隣国ギリシアとの間に大きな紛争の種をまいた現在 国内エネルギー資源の開発はこの国の急務である。

日本の2倍もある広大な面積にもかかわらず 人口はわが国の $\frac{1}{3}$ である。国土の大半は アナトリアにみられるような乾燥したやせ地である。地熱開発の行なわれているクズルデレの周辺は 植生も少ない不毛地帯で人口密度も低い。起伏の少ない平坦な地形と交通の便のよさは 発電のための諸施設の建設に適しており 住民に対する公害はほとんど問題にならない。このような点で 将来はきわめて有望である。

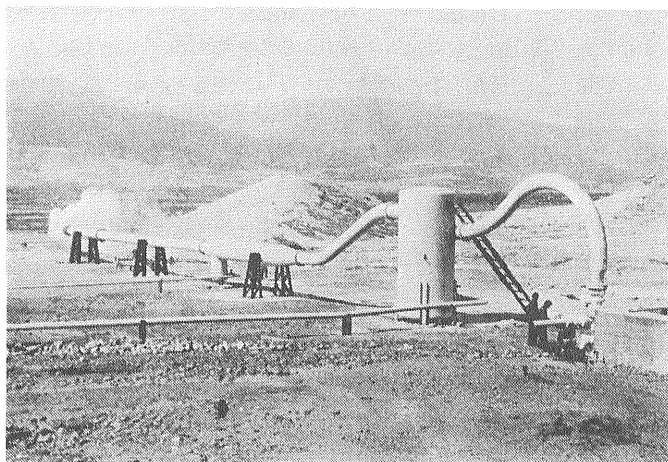
抜けるようにコパルトブルーに澄みきったアナトリア高原で羊の群れを追う遊牧民の素朴な生活の中にも 地熱発電の近代的な響きが こだまする日も近いことであろう。

謝 辞 トルコの電力事情や水力発電用ダム建設の状況などについて御教示を頂いた 電源開発株式会社海外技術協力部主査の市原伊角氏と E. P. P. C. インターナショナルのシニアエンジニアの成田饒氏に厚く御礼申し上げます。なお本文中の地熱地帯の地質や開発の現状は M. T. A. 刊行のパンフレット「地熱エネルギー」(トルコ語)と ハイリ・ウイツサリイ氏(M. T. A. 地熱開発プロジェクト担当)の論文を翻訳し これに筆者らの知見を加えたものである。引用した資料が古いことや 不慣れたトルコ語の翻訳による読みづらい部分があるかも知れないが お許し願いたい。

(筆者らは地質師)

文 献

- UYSALLI, H. (1971) : Kizildere Geothermal Field, Turkey. 地熱, ser. no. 30, vol. 8. no. 4
- M.T.A. (1969) : JEOTERMAL ENERJİ
- McKENZIE, D.P. (1970) : Plate Tectonics of the Mediterranean Region. Nature, vol. 226
- OTA, R & DINÇEL, A. : Volcanic Rocks of Turkey. (in press)
- 財団法人 海外電力調査会(1973) : 海外電気事業便覧



写真③
クズルデレ地熱坑井から噴出した蒸気
を熱水から分離する設備