

ガテマラ共和国  
地熱発電開発計画調査報告書

1973年10月

海外技術協力事業団

# ガテマラ共和国

## 地熱発電開発計画調査報告書

JICA LIBRARY



1052039[3]

1973年10月

海外技術協力事業団

国際協力事業団	
受入 月日 '84. 3. 19	611
登録No. 00971	64.3
	KE

## は し が き

日本政府はGuatemala共和国政府の要請に基づき、同国で推進中の五カ年開発計画（1971～75年）において最も緊要度の高いエネルギー源である地熱開発計画立案のための調査を実施することとし、その実施を海外技術協力事業団に委託した。

当事業団は本調査の内容を勘案の上九州大学教授、山崎達雄氏を団長とする7名の調査団を編成し、1973年2月27日より3月28日までの約1カ月間同国に派遣した。

調査団は同国Quezaltenango市の南東約8kmに位置するZunil地区において地質野外踏査、噴気および熱水の特性調査、試料収集を行い、それとの関連において同国の地熱帯であるMoyuta・San Marcosなど、ならびにEl Salvador国のAhuchapan地区の概査を行った。

本報告書は、調査団が帰国後、現地にて収集した資料および調査中に採集した岩石、変質鉱物、温泉水等の試料を分析、解析し、その研究結果をとりまとめたものである。

この報告書がGuatemala共和国の地熱発電開発に寄与するとともに、同国と我国との経済技術交流に役立つことを願うものである。

終りに本調査の任に当られた調査団員各位の労をねぎらうとともに、調査団派遣にご協力頂いた西日本技術開発株式会社、株式会社ダイヤコンサルタント、日本重化学工業株式会社の関係各位ならびに在Guatemala日本大使館の方々、通産省、外務省を初めとする関係機関の方々に衷心より感謝の意を表するものである。

1973年10月

海外技術協力事業団

理事長 田 付 景 一

# 伝 達 状

1973年10月

海外技術協力事業団

理事長 田 付 景 一 殿

Guatemala 共和国地熱発電開発

計 画 調 査 団

団 長 山 崎 達 雄

私はここに、Guatemala 共和国 Zunil 地区地熱発電開発計画に関するプレ・フィジビリティ報告書を提出致します。

本調査団は株式会社ダイヤコンサルタント、日本重化学工業株式会社の協力を得て、西日本技術開発株式会社を中心とする7名の専門家で構成され、1973年2月27日より同年3月28日までの約1カ月間現地調査が行われました。

今回の調査はGuatemala 政府の作成した地熱発電に関する基本計画に基づき、Quezaltenango 地区(特に Zunil 地熱地帯)の地熱予備調査および同地区との関連において一般的地熱徴候をみるために同国の Moyuta 地区他、ならびに El Salvador 国の Ahuachapan 地区において調査が行われ、特に Zunil 地区については火山層序、地質構造、噴気および熱水の特性などの調査が行われました。

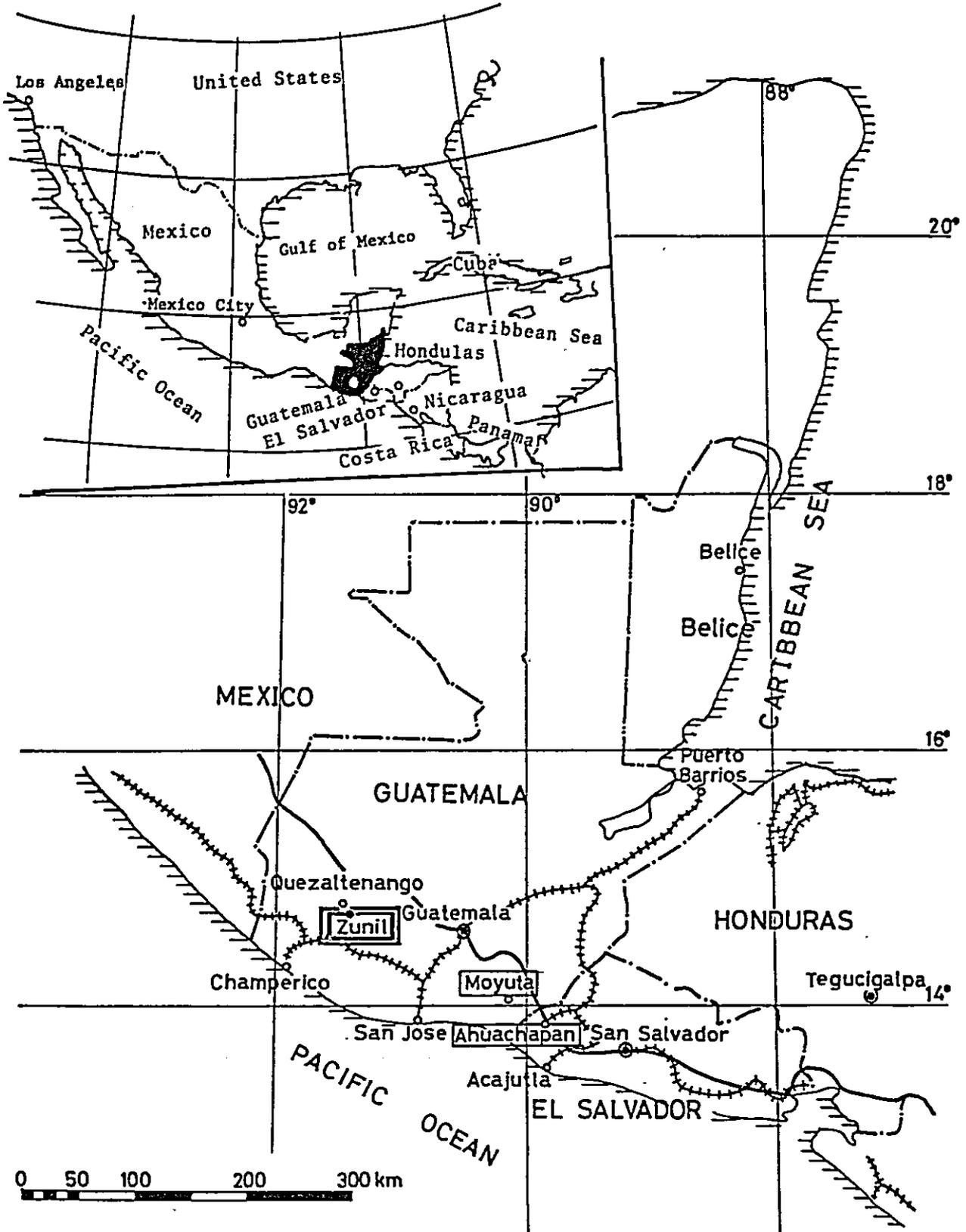
調査団の帰国後、収集試料により実験室内解析をおこなって理論的解明をなし、今後に必要な調査方針を策定し、この報告書を取りまとめました。

結論的に申しますと、当 Zunil 地区は、Guatemala 国で、最も優勢な地熱徴候を有する地帯の一つで、地熱系の規模および機構、化学特性、地質構造などよりみて、おそらく熱水型の有力な地熱帯であると判定されます。したがって、今後の調査を促進するに価するプロジェクトであると信じます。

最後に、調査期間中我々に心からのご協力を賜りました Guatemala 政府とその関係機関 INDE 総裁以下関係者一同および日本大使館大使森純造閣下を始め大使館館員の各位ならびに調査団派遣にご協力頂きました通商産業省、外務省の関係各位、およびその他関係機関の各位に対しまして衷心より感謝の意を表します。

# Location Map

## Surveying Area of Guatemala



# 結

# 論

## 1. 調査経過

Guatemala 共和国地熱発電計画調査団は、昭和48年2月27日東京出発、予定通り同年3月28日帰国した。

この間に、主目的とした Quezaltenango 市の南東約 8 Km の Zunil 地熱帯を踏査、その地熱微候・熱水機構・火山層序・地質構造などの概要を把握し、また数日間、これと一連の火山系に属する同国東部の Moyuta、および隣接の El Salvador 国 Ahuachapan 地熱帯を視察した。化学班は、これに加えて、次の同国各地の地熱帯を概査した。

Zunil 西方の San Marcos 地熱帯；Guatemala 市西方の Amatitlan 地熱帯；Moyuta 周辺地域の Ixpaco, Asuncion Mita, El Coco の各地熱帯。

かくして、短期間ながら各団員の非常な努力によって、多くの新知見が得られ、予察調査としては予期以上の高い水準の成果を収めることができたものと考えられる。調査中に採集した約 150 個の岩石・変質鉱物・温泉水・噴気凝縮水などの諸試料は、帰国後に X 線・顕微鏡・化学分析などの室内研究によって、細かく解析された。

詳細な研究は、なお継続中であるが、以下に今日までの成果を括めて報告する。なお、これらの解析結果は、次の調査の重要な基礎資料となるので、かなり詳しく記述し、また将来解決すべき問題点などもここにしておく。

## 2. Guatemala の火山地域と地熱帯

Guatemala は北から南に、① Peten Lowland ② Central Guatemalan Cordillera (中央山系)、③ Volcanic Province、④ Pacific Coastal Plain の4つの地形区に分けられている(第Ⅲ章)。

この中の Volcanic Province は、中米諸国をほぼ南東に走る新生代の大平洋火山帯に属し、活火山、温泉、地熱微候地に富んでいる。このため Guatemala は世界有数の火山国で、ここに未利用の熱エネルギー源として、豊富な地熱資源を包蔵している。

Volcanic Province に、大小の地窓を造って散在する先第三系基盤岩類の分布と、重力の“Bouguer”異常図を組み合わせることによって、この地域にはほぼ南東に走る延長約 300

Km, 巾数 10 Km の大規模な基盤の陥没構造が推定された。これを Guatemala-Quezaltenango 陥没構造と呼ぶ(第 III 章, 3-3)。この構造は, 同じ Pacific Volcanic Zone に属する El Salvador の中央地溝帯や Nicaragua 国の陥没構造に連なるものと考えられる。

この陥没構造の主として南縁部に沿って, その一部は今日でも活動中の第四紀の火山列が発達し, Guatemala 各地の地熱帯は, これらの火山と密接な関係を有し, その“後火山作用”によって“熱源”が供給され, この陥没構造を充填している新第三紀以降の非常に厚い火山岩類が, これらの地熱帯の“貯留層”となっている。これと全く同様に, 若い新生代の地層に埋められた地溝または陥没帯に, 火山活動が伴って地熱地域が形成された例は, 世界各地に多い(第 III 章 3-3)。

Guatemala 国の Zunil, Moyuta, San Marcos などの有力な地熱帯は, すべて大局的にこのような地質学的な背景を有する。

### 3. Zunil 地熱帯

#### 3-1. 総括(結論)

Quezaltenango 市から南東約 8 Km の Zunil 部落の周辺に, 広く地熱微候が発達している。一括して『Zunil 地熱帯』と呼んだが, 将来調査の進展に伴い, その機構, 規模, 範囲などを明確にして, 再定義および細分されるべきであろう。

Zunil 地熱帯で, 最も活発な地熱微候は, Zunil 部落から南に約 1.5 Km, Samala 川の深い峡谷底部の Fumarole Grande と, その東に隣接する Fumarole Negra を含む区域に発達している。

本域の主な地質は, 基盤の花崗岩類(中生代)と, これを被覆する Zunil group (第三紀火山岩類), およびこれらを買入被覆する Cerro Quemado group (第四紀火山岩類)によって構成されている。

このうち「地熱貯留層」としては, Zunil group の火砕岩などの透水層, および基盤の花崗岩類との不整合面が注目される。「地熱流体の通路」は, 主に北東および東西の断層系, 流紋岩類(第四紀火山岩類)よりなる大小のドームや貫入岩体のまわりに発達する割目などが考えられる。また「地熱源」は, 最近まで溶岩を流出し, 活発な活動を続けた Cerro Quemado 火山の, 後火山作用によるものと推定される。

Fumarole Grande には, 深部熱水を多く含む豊富な湧出量を示す間欠泉があり, その他, この周辺区域には, 盛んな噴気, 温泉, 著しい変質帯が確かめられる。その範囲は 1~2 Km に および, 活発な地熱活動に加えて, 深部熱水の存在を示唆する珪化岩がよく発達していること(第 IV 章, 3), また温泉, 噴気などの化学特性からみても(第 V 章 3-1), この地下には中

性～微アルカリ性の食塩泉型の有力な熱水留りが予想される。したがって、この区域は、いわゆる“熱水型”の有力な地熱フィールドとして、その開発が期待される。

なお、この区域の北方には、Zunil 部落を貫流する Samala 川に沿って多数の温泉が分布し、また南方には Aguas Amargas および Fuentes Georgias 温泉、その他噴気、変質帯、Sulphur Mine などの地熱徴候が広く散在している。

結論として Zunil 地熱帯は、その規模、地熱徴候、地熱系の機構などについて有望な諸条件を具備している。とくに、最も活発な地熱活動を示している Fumarole Grande および Fumarole Negra を含み、その範囲が 1～2 Km の区域に顕著な地熱徴候が集中している。この区域がまず開発の対象となるものと判定される。

その地形は、深い峡谷を造って貫流する Samala 川に激しく侵蝕されて、一般に峻険で複雑である。しかし、右岸部は比較的広く、概ね平坦な溶岩台地に蔽われ、将来の発電所の敷地および孔井を展開するのに適当である。また、台地を切る Highway は舗装を完了して、交通も便利である。

現在の予察段階において、たゞちに地熱包蔵量を数的に取扱うことは、もちろん不可能である。しかし、以上の各条件を考慮して、少なくとも、現在の地熱発電所の経済的な最小単基容量とされている約 30 MW を、第 1 期の目標として引続き調査の価値があるものと確信される。

したがって、次の調査の重点は、この区域に指向されて、引続き地質、物理、化学的な精査と、早急に調査ボーリングが計画されるべきである。なお、平行して、本区域と関連し、その周辺の Zunil 地熱帯全域についても、広く地質学的、およびその他の諸条件の解明が必要であることは言うまでもない。

なお、地熱資源の特殊性からみて、地熱帯の質的および量的な評価ならびに開発計画は、調査ボーリングから試験井、ときに生産井の掘削段階に達して、ようやく具体的となり、結論に近くなる。したがって、Zunil 地熱帯の調査は、少なくとも調査ボーリング、または試験井までを最終目標として、継続実施されるべきであろう。

以下、Zunil 地熱帯を調査分析した成果を集約的に記載する。

### 3-2 火山層序

Zunil 地熱帯周辺の主な地質は、基盤の花崗岩類とこれを被覆する Zunil group (新称、第三紀火山岩類) およびこれらを一貫して貫入被覆する Cerro Quemado group (新称、第四紀火山岩類) の 3 つに大別される。

(1) Zunil 地熱帯周辺は、広く第三紀および第四紀の火山岩類に蔽われ、その基盤の花崗岩類は、本調査地域の北方および東方 Atitlan 湖に至る間に、大小の地窓を造って、局部的に露出し、また Atitlan 湖の水力開発計画による Zunil から北東約 7 Km ～ 12 Km 付近の試

錐 (Jolm - No. 1 など) で、地表から深さ 250 ~ 320 m で確かめられている。これらの資料から、地熱帯の地下には比較的浅く、主として白亜紀の花崗岩類が分布するものと推定される。

特に Fumarole Negra 周辺の Samala 川左岸区域には、花崗岩類を被覆する Zunil group の最下部 ~ 下部 formation が分布しているので、その地下には最も浅く基盤が賦存していることになり、基盤が浅いことは地熱帯として望ましくない。しかし、Samala 川の右岸区域は、断層によってこの基盤は次第に深くなっている。

(2) Zunil group は前述の Guatemala - Quezaltenango 陥没構造を埋める第三紀火山岩の一部に対比される。本域で確かめられる全層厚は約 500 m で、その上、下限はまだ明らかでない。

主に安山岩溶岩および凝灰角礫岩・火砕流堆積物などから成り、主として透水性の火砕岩類が、時に節理、割目の発達する溶岩などが貯留層となり、これを蔽う緻密溶岩などが帽岩となるものと思われる。

この group を含む、Guatemala の第三紀火山岩類の層序は、今日まで知見に乏しい。しかし、本岩類の層序を確立することは、地熱帯の貯留層、帽岩、地質構造などを決定するための重要な課題である。今回はその一部である Zunil group を予察的に 4 つの formation に細分できたが、次の精査でさらに詳しい検討が必要である。

なお、この group の基底の不整合面が、しばしば基盤の花崗岩類の表層風化部を被覆していると云うことは容易に推察され、両者の境界がまた 1 つの地熱貯留層として注目される。

(3) Cerro Quemado group は、地熱帯の主に周辺に巨大な溶岩ドーム、成層火山、溶岩流などを造っている。この中、西に隣接して最近まで活発に活動した Quemado 火山群の後火山作用によって、地熱源が供給されているものと考えられる。この外、地熱帯各所に、しばしば大小のドームを造る、粘性の高い rhyodacites (流紋石英安山岩類) を主とする Cerro la Pedrera lavas の周辺に、間欠泉、噴気、変質帯などの地熱徴候が著しいことに注意される。これは本岩類の貫入によって、岩体周辺に著しく割目が発達し、これが熱源の通路となったためであろう。

なお、Quemado 火山の南東山麓から流下した扇形の溶岩台地を造る Zunil water fall lava は、厚さ 100 ~ 150 m、Fumarola Grande を含む Samala 川右岸の優勢な地熱帯を被覆し、その調査に障害となっている。その他、火山活動史は細かく究明が必要である。

### 3-3. 地質構造と地熱系

Zunil 地熱帯の火山層序の概要を確かめて、1/50000 地質概査図を作成し、地質構造と地熱系の機構を模式図に括めた。なお、帰国後には航空写真の解析から、断層や断裂系などを概

査し、この結果が現地踏査の結果とほぼ一致することを確かめた(第IV章, 2)。

本域には、1つはほぼ東西、他の1つは北東から北北東に走る断層系が認められる。非常に大きく見れば、前者は Guatemala - Quezaltenango 陥没構造に、後者はこれを切る Guatemala City 地溝帯と関連がある。これらの断層および付随する副断層や割目が溶岩や現在の地熱流体の通路と考えられる。

主な貯留層となる Zunil group は、大局的にごく緩く北に傾斜しているため、南部の Fumarola Grande および Negra 区域から順次北方に上部の formation が露出している。逆に南部は下部層を主とし、特に Fumarola Negra を含む Samala 川左岸には、最下部 formation が露れ、このため基盤が最も浅いことになる。

しかし、この基盤は、大部分が北西または西落ち前記断層によって、Quemado 火山地域に向けて、逐次階段状に陥没して深くなっている。その理由は、常識的に巨大量の溶岩を噴出した Quemado 火山地域が、その後に沈降したものと考えられる。したがって、Fumarole Grande を含む Samala 川右岸部は基盤が深くなり、この点からも地熱帯として好条件を示している。

Rhyodacite は、地熱帯各所に大小のドームや貫入岩体を造り、前述のようにこれらの岩体のまわりに発達する割目が、熱源の通路となる。また、これらの岩体自身も断層系に沿って貫入したものと推定される。

地熱帯の熱源は、前述のように Quemado 火山の後火山作用によるものと推定される。

### 3-4. 熱水変質

短期間の調査で、Zunil, Moyuta, Ahuachapan の各地熱帯から断片的に集めた変質岩の試料について、主にX線回折による鉱物組合わせの決定、変質岩の浸出液のpH値などを検討した(第IV章, 3)。将来、変質帯を細かく追跡し、試料を増して精査を必要とするが、今回の解析結果から各地熱帯の特徴を概観することができた。

一般的に、典型的な酸性型の熱水変質が多く、その特徴的な鉱物として、クリストバライト、石英、明ばん石、カオリンなどを含んでいる。この中には、多量のクリストバライトや石英を含む、いわゆる珪化岩を混じえていることがある。これが発達することは、地下に優勢な深部熱水の存在する可能性を示唆する。

Zunil 地熱帯の Fumarole Grande と Fumarole Negra を含む区域は、しばしば珪化岩がよく発達し、浸出液の pH 値も 3~4 の範囲にあることから、中性~弱アルカリ性を示す有力な高温の深部熱水が期待され、もっとも有望な区域と予想される。

しかし、Fuentes Georginas (pH 値 2) Aguas Amargas (pH 値 2.2) の2つの酸性の温泉、さらに南東の Sulphur Mine を含む地区は、各所の変質岩の浸出液が pH 値 1.0

土という異常な強酸性を示している。一般に、深部熱水が中性～弱アルカリ性でも、地表近くで酸化されて、地表の噴気、変質帯では強酸性を示すことがあるので、俄かに断定し難いが、広範囲にこのような異常値を示すことは注目される。したがって、この地区の地下の熱水が酸性で、地熱発電に不適當な憾れがある。

### 3-5. 地熱帯の化学

高温で湧出量が多く、中性の食塩泉型の深部熱水が得られる「熱水系」の場合には、地下の熱水だまりの温度や性状を知るために、温泉水の分析が有効である。しかし、今回の調査で前述1の各地熱帯から得られた計36試料の中、深部熱水が得られたのは、Zunilの間欠泉、San Marcos（3カ所）、Amatitlan湖南岩（数カ所）の3地熱帯に過ぎない。

このため噴気を主として、熱水を伴わない「蒸気系」調査を目的として、団員の古賀が新らしく開発中の次の方法（第V章、2）を予察的に併用した。①噴気ガスの分析； $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ の濃度、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比から地下の熱水の性質などが判る。②噴気凝縮水の分析； $\text{HBO}_2$ 、 $\text{NH}_4$ 、 $\text{Hg}$ 、 $\text{F}$ などの揮発成分の濃度から地熱帯の高温部が指示される。③変質岩（土壌）中の水銀の定量；変質岩や温泉沈殿物中の $\text{Hg}$ 濃度によって、地下の高温部を追跡する。

これらの調査方法によって、以下の結論が得られた。

Zunil地熱帯の規模は大きく随所に地熱徴候が見られるが、深部熱水を多く含み、高温で湧出量が多いのは、Fumarole Grandeの間欠泉のみで、その他は、地下浅所で加熱生成されたものである。おそらく、深部熱水の湧出が地質条件によって妨げられているためであろう。

しかし、間欠泉の外に、活発な噴気、著しい変質帯、多数の温泉などを伴う地熱徴候や規模から、地下に優勢な熱水だまりが予想され、熱水型の地熱帯として有望と考えられる。

この間欠泉はpH値9.0、Cl含量713ppmの食塩泉型で、Na/K比と $\text{SiO}_2$ 濃度から、やや不正確ではあるが、地下の熱水の温度は、 $180\sim 215^\circ\text{C}$ と推定された。噴気ガスから深部熱水は、中性～微アルカリ性の食塩泉型が予想される。これは、変質鉱物からの推定とも一致する（第IV章、3-1）。

また前述の噴気凝縮水の $\text{HBO}_2$ 、 $\text{NH}_4$ 、 $\text{Hg}$ （今回は $\text{F}$ は未測定）について、Fumarole Negraおよび西方の溶岩台地（Zunil water - fall lava）を切るHigh-wayの噴気を検討し、地下が高温であることが予想された。さらに、Fumarole Negraの変質岩からは、最高約200ppmの $\text{Hg}$ 濃度を検出し、有望性が裏付けられた。特にこの $\text{Hg}$ 定量法が高温部を追跡するために、最も有効であることが予察的に確められたので、次の精査で細かく現地に適用することが望ましい。

## 4. 各地地熱帯の開発概況

Zunil 地熱帯とは、一連の中米太平洋火山帯に属す多くの地熱帯が、前述のように Guatemala 国をほと南東に横切り、各地に点在している。この中、東部の Moyuta 地熱帯と、これと隣接する El Salvador 国の Ahuachapan 地熱帯のみが、現在開発計画が進められている。この両者は、Zunil group と対比される第三紀火山岩類を貯留層とし、これを貫入被覆する大きな溶岩ドーム状火山体の、後火山作用によって地熱流体が供給されている。この場合、第三紀火山岩類を切る断層系や小規模な貫入岩体に伴う割目が通路となっているものと考えられる。地表の地熱徴候は、明らかに Ahuachapan が大規模で、すでに多くの試験井、営業井が完了し、現在は第 1 2 号を掘削中で、約 3 万 KW の発電計画が確定、進展中である。

今回の調査で持ち帰った Ahuachapan 地熱帯のコア試料から得られた変質岩はワイラカイト、方解石、緑泥石より成り、日本の大岳地熱帯大岳地区の中性～弱アルカリ性型の変質と一致する。

Moyuta 地熱帯は、主として U. S. A のコンサルタント会社などの協力で調査が進められ、現在は INDE と DGMH によって共同調査中である。現在までに地熱徴候や、5 万分の 1 の地質概査などを終り、予定深度 300 m の調査ボーリングを実施中、さらに電気探査などが準備されている。Moyuta 地域は、その貯留層を被覆する若い溶岩類に地表徴候が露れ、深部熱水の試料が得られなかったため、俄かに地下深部を推定し難いが、今回の調査で行った現地観測と、採取試料を分析した結果、次のように推察される。

(1) Moyuta 地熱帯の Guinea および Marcucey 地区の変質岩試料からは、クリストバライト、モンモリロナイト、束沸石、石膏などの鉱物組合わせが確められ、浸出液の pH 値は 2～3 である。しかし、酸性の噴気、硫黄帯に特徴的な明ばん石に乏しい。これらのことから、この地区は一般的な中性～弱アルカリ性熱水を産する地熱帯の徴候を示しているといえる。

Azulco 地区の変質岩（標高 740～900 m 付近で採取）には、ワイラカイトや濁沸石を含み、浸出液の pH 値が 6～7 の範囲を示している。また珪酸鉱物はすべて石英で、低温で生成されるクリストバライトを含んでいない。

これらのことから、試料を採取した変質岩の露頭は、地下深部で生成されて、その後断層または浸食作用によって、地表に露出したものと推定される。なお、これに作用した地下の深部熱水は、中性～弱アルカリ性であることは、ほぼ間違いなからう。

(2) Moyuta 地熱帯の地熱徴候は活発であるが、地下温度を推定できる深部熱水は得られなかった。約 90°C 内外の温度の高い温泉も確められたが、その大部分は噴気に加熱された浅所水である。このことは、噴気凝縮水の分析結果からも推定される。

噴気ガスからは、Zunil と同様に、深部熱水が存在すれば微アルカリ食塩型が予想される。また、Azulco 地区の変質岩から、かなりの濃度の Hg が定量され、さらに Guinea, Marcucey 地区の噴気凝縮水に Hg が多いことなどから、地下の温度が高いことが予想される。

Moyuta 地熱帯は、このように蒸気系の調査法、とくに Hg に注目することが有効と考えられる。一般的に、Moyuta 地熱帯の規模、地熱活動、変質帯および地質構造などが、Ahuehapan と類似点が多く有望地域と考えられる。

(3) 他の地区における化学的概査から特筆されるものは、San Marcos 地熱帯で、深部熱水が3試料得られ、地下の高温を示す  $\text{SiO}_2$ 、Li の濃度が高く、熱水は弱アルカリ食塩泉型が予想される。また、 $\text{SiO}_2$  濃度と Na/K 比からも深部熱水は  $220 \sim 230^\circ \text{C}$  と推定された。したがって、この地区は、地下に高温の熱水だまりが予想されて、地熱開発の候補地の1つとなるのであろう。

次に、Amatitlan 湖南岸の数点から、深部熱水を含む試料が得られ、 $\text{SiO}_2$  濃度と Na/K 比から約  $200^\circ \text{C}$  の熱水が予想された。

# 目 次

伝 達 状

Location Map

結 論

1. 調 査 経 過
2. Guatemala の火山地域と地熱帯
3. Zunil 地熱帯
  - 3-1 総 括 (結論)
  - 3-2 火山層序
  - 3-3 地質構造と地熱系
  - 3-4 熱水変質
  - 3-5 地熱帯の化学
4. 各地地熱帯の開発概況

## 第 I 章 序 論

- |                    |   |
|--------------------|---|
| 1. 調査の目的 .....     | 1 |
| 2. 範 囲 .....       | 1 |
| 3. 経 緯 .....       | 1 |
| 4. 調査団員の担当分野 ..... | 2 |
| 5. 調査日程 .....      | 2 |
| 6. 謝 辞 .....       | 3 |

## 第 II 章 Guatemala の一般事情

- |              |   |
|--------------|---|
| 1. 面 積 ..... | 5 |
| 2. 地 勢 ..... | 5 |
| 3. 気 候 ..... | 5 |
| 4. 人 口 ..... | 5 |
| 5. 経 済 ..... | 6 |

第Ⅲ章 Guatemala の地質概説 .....	7
1. Peten 低地と Maya 山脈 .....	8
2. Guatemala 中央山系 .....	15
2-1 北部グループ .....	16
2-2 中央グループ .....	16
2-3 南部グループ .....	17
3. 火山地域と Guatemala-Quezaltenango 陥没構造 .....	17
3-1 第三紀火山岩類 .....	18
3-2 第四紀火山岩類 .....	19
3-3 Guatemala-Quezaltenango 陥没構造 .....	20
4. 太平洋海岸平野 .....	22
5. Guatemala の地史概要 .....	22

#### 第Ⅳ章 Zunil 地熱帯の地質

1. 火山層序 .....	29
1-1 概    説 .....	29
1-2 各    論 .....	34
1-2-1 基盤岩類 .....	34
1-2-2 Zunil 層群 .....	35
(1) 最下部層 .....	35
(2) 下部層 .....	37
(3) 中部層 .....	37
(4) 上部層 .....	40
1-2-3 Cerro Quemado 層群 .....	40
(1) Almolonga 溶岩類 .....	41
(2) Cerro El Galapago 溶岩類 .....	41
(3) Volcan de Zunil 溶岩類 .....	42
(4) Cerro Chuicham 溶岩類 .....	43
(5) Cerro Quemado 溶岩類 .....	43
(6) Cerro Tecun Uman 溶岩類 .....	43
(7) Cantel 層 .....	44
(8) Cerro La Padrera 溶岩類 .....	45

(9) Zunil Water-fall 溶岩類 .....	46
(10) 1785年溶岩 .....	48
1-2-4 沖積世堆積物 .....	48
2. 地質構造と地熱系 .....	49
3. 熱水変質 .....	56
3-1 Zunil 地熱帯 .....	59
3-1-1 Fumarole Grande-Negra 地区 .....	62
3-1-2 Sulphur mine 地区および Fuentes Georginas 地区 .....	62
3-1-3 Paxmux Fumarole 地区 .....	63
3-2 Moyuta 地熱帯 .....	63
3-2-1 Guinea および Marucucy 地区 .....	63
3-2-2 Azulco 地区 .....	63
3-3 Ahuachapan 地熱帯 .....	64

## 第V章 地熱帯の化学

1. 結 言 .....	69
2. 地熱開発のための化学 .....	69
2-1 熱水系の場合 .....	69
2-2 蒸気系の場合 .....	74
3. Guatemala の地熱地帯 .....	75
3-1 Zunil 地区 .....	81
3-2 San Marcos 地区 .....	92
3-3 Amatitlan 湖周辺 .....	93
3-4 Ixpaco 地区 .....	93
3-5 Asuncion Mita 地区 .....	94
3-6 El Coco 地区 .....	94
3-7 Moyuta 地区 .....	94
3-8 Ahuachapan 地区 .....	95

## 第VI章 地熱活動と開発状況

1. Zunil 地熱地域 .....	97
---------------------	----

1-1	噴気孔, 温泉および変質岩石の分布	101
1-1-1	第I変質帯 (Paxmux 地区)	102
1-1-2	第II変質帯 (Fumarole Grande-Negra 北部地区)	102
1-1-3	第III変質帯 (Fumarole Grande-Negra 南部地区)	103
1-2	噴気活動と温泉との関係	103
1-3	熱水の存在状態	104
2.	Moyuta 地熱地域	105
2-1	はしがき	105
2-2	地質および地熱徴候	105
2-3	地熱徴候分布	109
2-3-1	Azulco	109
2-3-2	Guinea	109
2-4	地形, その他	109
2-5	調査経過	110
2-6	Rein Randmets 氏の意見	112
2-7	結 語	113
3.	Ahuachapan 地熱地域	114
3-1	はしがき	114
3-2	調査の沿革	114
3-2-1	調査の開始	114
3-2-2	精 査	115
3-2-3	第2次調査計画	115
3-2-4	開発調査	116
3-3	地質と構造	116
3-3-1	広域調査	116
3-3-2	精 査	120
3-4	地熱徴候	128
3-5	Bodvarsson 氏及びBolton 氏による意見	133
3-5-1	概 要	133

3-5-2 主要な検討事項 .....	133
3-6 現況 .....	142

## 第Ⅶ章 立地条件

1. 前提 .....	151
2. 用地 .....	151
3. 気象 .....	152
4. 用水 .....	152
5. 搬入道路 .....	152

## 第Ⅷ章 今後の調査方法

1. 地形図の作成 .....	153
2. 地質調査 .....	154
2-1 Zunil 層群 .....	154
2-2 Cerro Quemade 層群 .....	154
2-3 地質構造 .....	155
3. 変質帯の調査 .....	155
3-1 変質帯の野外踏査 .....	155
3-2 変質帯の細分 .....	155
3-3 変質岩の浸出液の pH 値測定 .....	156
4. 物理探査 .....	156
5. 地球化学的調査 .....	163
5-1 変質岩中の Hg の定量 .....	164
5-2 噴気凝縮水の分析 .....	164
5-3 噴気ガスの分析 .....	164
5-4 温泉水の同位元素測定 .....	164
5-5 全アウトプットの測定 .....	165
6. 調査ボーリング .....	165
7. 発電所設計のための調査項目 .....	165
7-1 気象観測 .....	165
7-2 河川調査 .....	166
7-3 坑井特性試験 .....	166

7-4 諸材料試験 .....	166
-----------------	-----

## 第IX章 電力事情と地熱発電所の基本構想

1. 電力事情 .....	167
1-1 電力需給現況 .....	167
1-2 将来の電力需給予想 .....	167
1-3 電力系統 .....	167
2. 地熱発電所の基本構想 .....	168
2-1 ポテンシャル .....	168
2-2 第I期発電所の定格出力 .....	168
2-2-1 定格出力 .....	168
2-2-3 タービン定格出力 .....	177
2-3 基本構想 .....	177
2-3-1 一般方針 .....	177
2-3-2 発電原価 .....	177
2-3-3 出力 .....	177
2-3-4 発電方式 .....	177
2-3-5 発電所の運用 .....	178
2-3-6 建屋 .....	178
2-3-7 配置 .....	178
2-3-8 蒸気井 .....	178
2-3-9 坑口装置 .....	178
2-3-10 蒸気輸送設備 .....	178
2-3-11 機械設備 .....	178

# 第 I 章 序 論

## 1. 調査の目的

この調査は、Guatemala 共和国の要請にもとづき、同国 Instituto Nacional de Electrificación (INDE) の Quezaltenango 地区地熱発電計画に対し、海外開発計画委託により技術調査団を現地に派遣し、同計画調査に関する予備調査を実施し、開発可能性の基礎的実体を概査することを、目的としたものである。

Guatemala 国は早急な地熱発電開発の実現のため、技術的、経済的援助をわが国に強く望んでいる Project である。

## 2 範 囲

本報告書の範囲は、Guatemala 市の西方約 200 km 付近に位置する Quezaltenango 州 Quezaltenango 市の南東約 8 km の Zunil 地区において、地質野外踏査、噴気および熱水の特性調査、試料収集などをおこない、さらに、Zunil 地区との関連において一般的地熱徴候をみるために、同国内の他の地熱帯である Moyuta、San Marcos、Amatitlan、Ixpaco、Asuncion Mita の各地区、ならびに El Salvador 国の Ahuachapan 地区の概査をあわせておこなった。

## 3 経 緯

Guatemala 共和国は民政の安定と産業の開発を当面緊急な経済政策の基本方針としている。特に工業の育成と農業の発展を促進するため、その基幹をなす電力については、早急な増強対策を最優先に考慮し、かつ国内資源エネルギーの活用促進を計っている。したがって、同国に包蔵する豊富な地熱エネルギーを活用するため、同国政府は Zunil 地区の地熱発電開発計画を策定し、日本政府に対して技術的経済的援助を申し入れた。

そこで日本政府はこの計画の基礎調査を海外技術協力事業団(OTCA)に委託した。事業団は西日本技術開発株式会社、株式会社ダイヤコンサルタントおよび日本重化学工業株式会社の協力

を得て下記の調査団を編成して現地に派遣した。

#### 4. 調査団員の担当分野

区分	氏名	所属	担当
団長	山崎達雄	西日本技術開発(株)顧問 九州大学教授	総括
団員	古賀昭人	西日本技術開発(株)顧問 九州大学教授	地球化学
"	松本徂夫	西日本技術開発(株)顧問 長崎大学教授	地質
"	中村久由	日本重化学工業(株) 地熱事業本部副本部長	地質
"	渡辺憲一	(株)ダイヤコンサルタント 技師長	地質
"	江島康彦	西日本技術開発(株) 火力部付	地熱電源
"	山崎順一	西日本技術開発(株) 東京事業所	電力一般

#### 5. 調査日程

1973年2月27日羽田を出発、2月28日 Guatemala 市に到着、約1カ月間地熱予備調査を実施した後、3月26日 Guatemala 市を出発し、3月28日全員無事に羽田に帰着した。その調査日程は次の通りである。

1973年

- 2月27日(火) 羽田発
- 2月28日(水) Guatemala 到着
- 3月1日(木) 大使館と打合せ、INDEとの打合せ準備
- 3月2日(金) INDE、鉱山局と調査内容打合せ検討ならびに資料蒐集
- 3月3日(土) 資料蒐集ならびに調査準備
- 3月4日(日) Amatitlan地熱帯の概査
- 3月5日(月) Moyuta地熱帯調査
- 3月6日(火) Moyuta地熱帯調査、El Salvador国へ入国
- 3月7日(水) El Salvador国Ahuachapan地熱帯調査
- 3月8日(木) El Salvador国CEL (Comision Ejecutiva Hidro-

electrica del Rio Lempa )との討議, 夜 Guatemala 市へ到着  
 3月9日(金) Zunil地区調査につき大使館と打合せ  
 3月10日(土) Guatemala市よりQuezaltenango市へ移動  
 3月11日(日) Zunil地区概査  
 3月12日(月) Zunil地区地質調査, 地熱徴候調査  
 3月13日(火) 同 上  
 3月14日(水) Zunil地区地質調査, San Marcos地区地熱徴候調査  
 3月15日(木)<sup>\*</sup> Zunil地区地質調査, Amatitlan地区地熱徴候調査  
 3月16日(金) Zunil地区地質調査, Ixpaco地区地熱徴候調査  
 3月17日(土) Zunil地区地質調査, Asuncion Mita地区地熱徴候調査  
 3月18日(日) 団員全員にて調査中間検討  
 3月19日(月) Zunil地区地質調査, Moyuta地区地熱徴候調査  
 3月20日(火) Zunil地区地質調査, 調査結果の検討  
 3月21日(水) Quezaltenango市からGuatemala市へ移動  
 3月22日(木) 現地報告書作成ならびに大使館と打合せ  
 3月23日(金) 現地報告書(英文)作成  
 3月24日(土) INDEに報告書提出ならびに説明  
 3月25日(日) 調査器材および資料取りまとめ荷作り  
 3月26日(月) Guatemala市出発  
 3月28日(水) 羽田着

## 6. 謝 辞

調査期間中, 調査団に心からの協力をいただいた Guatemala 政府とその関係機関に衷心より感謝の意を表す。とくに INDEからは, 常時関係者が現地調査に同行し, 細部について多大の便宜供与がなされ, このほか次の諸機関からも積極的な協力と, 多くの資料が提供された。あわせて厚く謝意を表す。

- (1) Direccion General de Minería e Hidrocarburos (DGMH), Guatemala
- (2) Instituto Geografico Nacional (IGN), Guatemala
- (3) Comision Ejecutiva Hidroelctrica del Rio Lempa (CEL), El Salvador

また, 現地調査について, 森純造日本大使を始め, 大使館各位から, まことに周到格別の

配慮をいただき，適切な指導と協力な支援をいただいた。ここに深甚なる謝意を表す。

## 第II章 Guatemalaの一般事情

### 1. 面積

Guatemalaは中米地峡の最北端に位し、北と西は、Mexicoに、南東はHondurasおよびEl Salvador両国と境を接しており、南は太平洋に面している。

総面積は108,889km<sup>2</sup>で日本の約 $\frac{1}{3}$ 弱である。

### 2. 地勢

西北から東南に中央山脈が走っており、多数の活火山や休火山がある。火山が多いため地震も頻繁で、首都Guatemala Cityの周辺だけでもいままで数回大地震に会っている。

河川は、中央山脈を分水嶺として南北斜面に分かれて流れており、太平洋に流れる川はいずれも急流で、かつ短かく、Caribe海へのものは比較的長大で、その内Motagua川、Paz川はいずれも船運の便がある。湖沼には、Izabal湖、Atitlan湖、Amatitlan湖等があり、いずれも火山湖で風光明媚である。

### 3. 気候

この国は熱帯地方にあるが、標高による気候の差が大きい。海岸低地帯は熱帯性気候(25℃～30℃)であり、高原地帯は温帯(16℃～20℃)である。

11月から4月までが乾季、5月から10月までが雨季である。

### 4. 人口

人口は5369千人(1975年)で、人口密度は1km<sup>2</sup>あたり50人であるが、地域による差が大きい。人口増加率は3.3%で、可成り高い。

1971年における都市人口は総人口の38%、農村人口は62%である。

住民は原住民族が全人口の67%、混血が25%、スペイン系白人は8%に過ぎない。

公用語はスペイン語であるが、原住民の社会では、マヤ語、キチュ語などの土語が使われている。

## 5. 経 済

国民総生産は20億ドル(1972年)で、その成長率は年平均約7%である。

Guatemala経済の基盤は農業であって、労働人口の約68%が農業に従事している。輸出は大半が農産物特にコーヒーと綿花によって占められているので、経済はその生産状況と国際価格に大きく支配される。このような影響を少なくするために、政府は農産物の生産性向上と多角化、電源開発を中心に工業化に努力している。

通貨単位はQuezalで、1 Quezalは100 Centavosである。Quezalの対外交換率は、1924年以来1 Quezal=1米ドルを維持している。

物価は安定しており、生計費指数、卸売物価指数ともにこの10年間殆んど変動はない。

### 第Ⅲ章 Guatemalaの地質概説

Guatemala 共和国は、太平洋を隔てて日本から遙かに遠い。しかし、両国は同じく新生代の環太平洋造山帯・地殻帯・火山帯に属し、言い換えるとこの間に断続があっても、一連の同じ地熱帯に位置しているといつてよからう。

Guatemalaの地質は岩相・地質構造・火山活動・地質時代などについて、日本と数多くの類似点が認められて甚だ興味深いフィールドであるが、今日なお、日本の地質学者にはいわば未知の領域である。この国の地質学的知見は、Institute Geografico National, Guatemala (略称 I.G.N), その他関係諸機関の非常な努力によって、最近著しく増大している。その資料から、Guatemala 全国の地質図 (Geologic Map of Guatemala, 1/500,000. Bonis et al. 1970) が括められ、また地域的には今回の調査地 Zunil 地熱帯のすぐ西に接する Quezaltenango 地方の地質 (with Geologic Map of Quezaltenango Region, 1/250,000. Bonis, 1965) がすでに刊行されている。1/50,000 縮尺の詳細な地質図の作成計画も始められ、しばしば米国の地質学者の協力を得て、まだ数は少ないが精密で、優れた成果が発表されている。その外、地熱帯と直接関係がある Volcanic Province (Guatemala Highland) に関する Williams (1960) の貴重な研究などが加って、この国の地質は次第に解明されている。

短い調査期間に得られ限られた資料から、Guatemala 全国の地質を細かく検討することは非常に困難であり、これは今回の調査の主目的でもないが、将来の調査の便宜上、その概要をここに括めておく。なお、Volcanic Province について、その多くは先第三系の基盤岩類の分布と、Bouguer 異常図を組み合わせることによって、この地域を NW-SE に走る大規模な Guatemala - Quezaltenango 陥没構造を推定することができた (Fig. III-3)。この構造は、中米の Pacific Volcanic Chain と平行し、El Salvador の中央地溝帯および Nicaragua 陥没構造に連なり、大局的に Guatemala 地熱地域の構造を規制するものと考えられるので、併せて報告する。

Guatemala は、北から南に次の4つの主な地形区に分けられている (Fig. III-1) : ① Peten Lowland - 主に白亜紀から若い第三紀までの厚い堆積物からなる盆地状低地, ② Central Guatemalan Cordillera - 主として、古生代~中生代の結晶片岩や堆積岩と花崗岩類よりなり、南に湾曲した東西弧を軸とする褶曲山系, ③ Volcanic Province - 中米を北西から南東に走る Cenozoic Pacific Volcanic Zone に属し、第四紀火山列に蔽わ

れる地域, ④ Pacific Coastal Plain - 北方の Volcanic Province (Highland) から侵蝕された莫大量の碎屑物で埋められた平地。

## 1 Peten 低地と Maya 山脈

Guatemala 北部の Peten 県と Belice を包含する Peten lowland (or basin) は、ゆるやかに傾斜する中生層（主に白亜紀層）と第三紀層より成る標高約 100 m の熱帯性の低地である。この低地は、北に隣接するメキシコの Yucatan 半島に広く展開するいわゆる Yucatan Platform と連続し、その一部を形成するものである。大部分の区域は、乾季には全く水に乏しく、白亜紀の石灰岩類の地域は、標高 30 ~ 100 m の裸の丘陵が連なる広大なカルスト地形を造り、また一方、主に松類が散在 (stud) する広いサバンナ地帯 (Savannas area) が展開し、時に密林を混えている。本域には旧 Maya 帝国の首都であった Tikal を始めとして、かつての輝かしい先コロンビヤ、マヤ文化 (Pre-Columbian Mayan civilization) の夥しい遺跡が知られている。しかし、今日ではほとんど無人の半砂漠状を呈し、往時の様子は明らかでなく、またこの文化を斜陽化した原因はなぜとされている。

Peten Lowland の地質構造は、大局的にその南方の Guatemala 中央山系 (Central Guatemala Cordillera) とほぼ平行し、南に湾曲した東西弧の傾向を示し、言い換えると北に向った半盆地状構造を造っている。このため堆積物は盆地周辺部から中央に向って、白亜紀から若い第三紀までの順次上位の地層が分布し、この間に各地層は岩相の変化を伴い、急速に厚さを増している。

周辺部の白亜紀石灰岩類 (Coban, Ixcoy formations etc.) は、中央部に向うと化学石灰岩類、石膏、岩塩、カリ塩などより成る蒸発残留岩 (注. 一般に、海水が陸地内に封じこめられて、乾燥気候下で蒸発生成された堆積岩をいう) に移化し、その厚さは最大 3,000 m 以上におよぶものと推定されている。

さらに北方に向うと、これらの堆積物を被覆して、全層厚約 1,000 m におよぶ順次若い第三紀層が、Yucatan 半島に向って分布している。これらはほぼ水平に近い地層で、最下部に海成の堆積物を夾み、主部は石灰岩類、石膏、赤色岩層、礫岩などを含み、蒸発残留岩または陸成層である。

なお、Peten Lowland の南部には、北西から南東に走る Sierra del Lacandon と Montana de Chiquibul の低い山脈が連なり、またしばしばゆるやかな褶曲を伴っているため、この区域を南方の Central Cordillera から Peten Lowland への移過部として、Maginal Folded Belt と呼ばれることもある。この地域では前述の白亜紀石灰岩類は、最

Fig. III-1. Physiographic Provinces of Guatemala  
 (After S. Bonis 1967, partly modified)

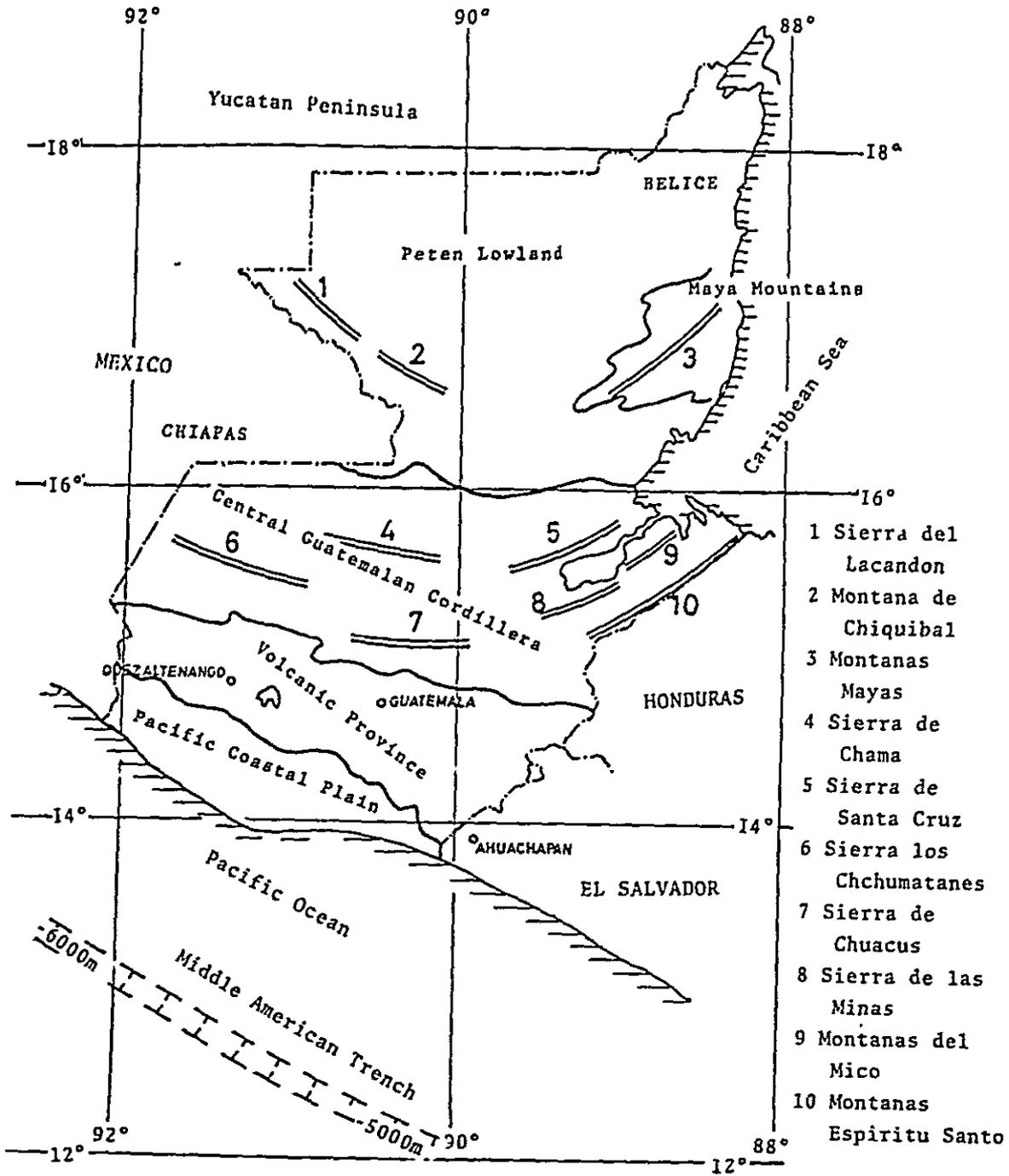


Fig. III -2. Geologic Map of Guatemala  
 (Compiled by YAMASAKI and MATSUMOTO 1973, from  
 Geologic Map of Guatemala 1/500,000)

- Index**
- Quaternary (alluvium, pumice deposits etc.)
  - Oligocene - Miocene - Pliocene (mainly continental)
  - Palaeocene - Eocene (mainly evaporates, partly marine)
  - (Cretaceous) - Eocene (Subinaj formation, red beds.)
  - Cretaceous - Eocene (Sesur formation etc.)
  - Cretaceous (Coban, Itzay carbonates)
  - Jurassic - Cretaceous (Todos - Santiago formation, red beds.)
  - Permian (Chastel) formation, carbonates)
  - Carboniferous - Permian (Santa Rosa group)
  - Upper Palaeozoic
  - Quaternary volcanic rocks
  - Tertiary volcanic rocks
  - Granites (pre - Permian, Cretaceous, Tertiary age)
  - Ultrabasic rocks
  - Palaeozoic metamorphic rocks
  - Fault
  - Quaternary Volcano

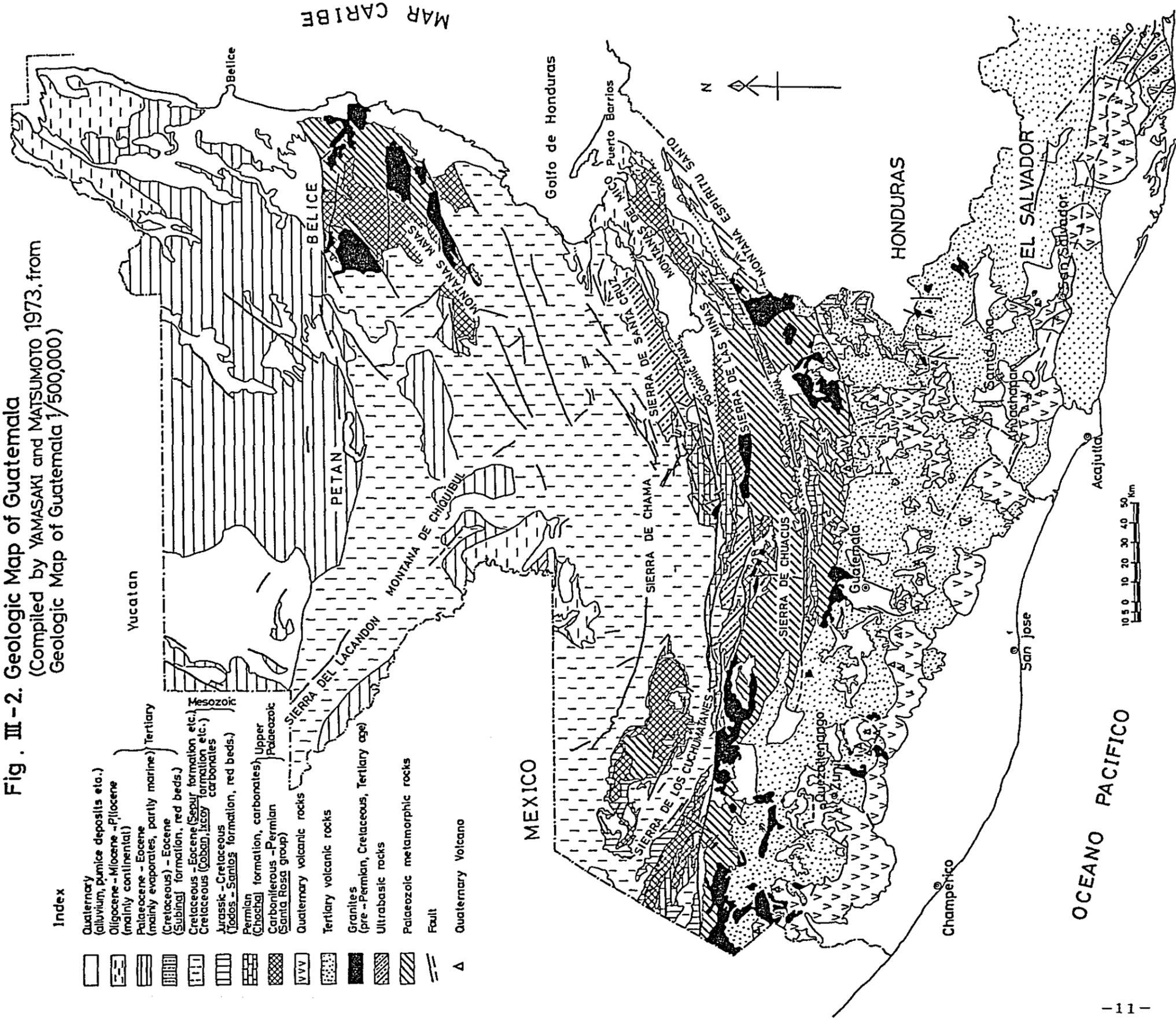
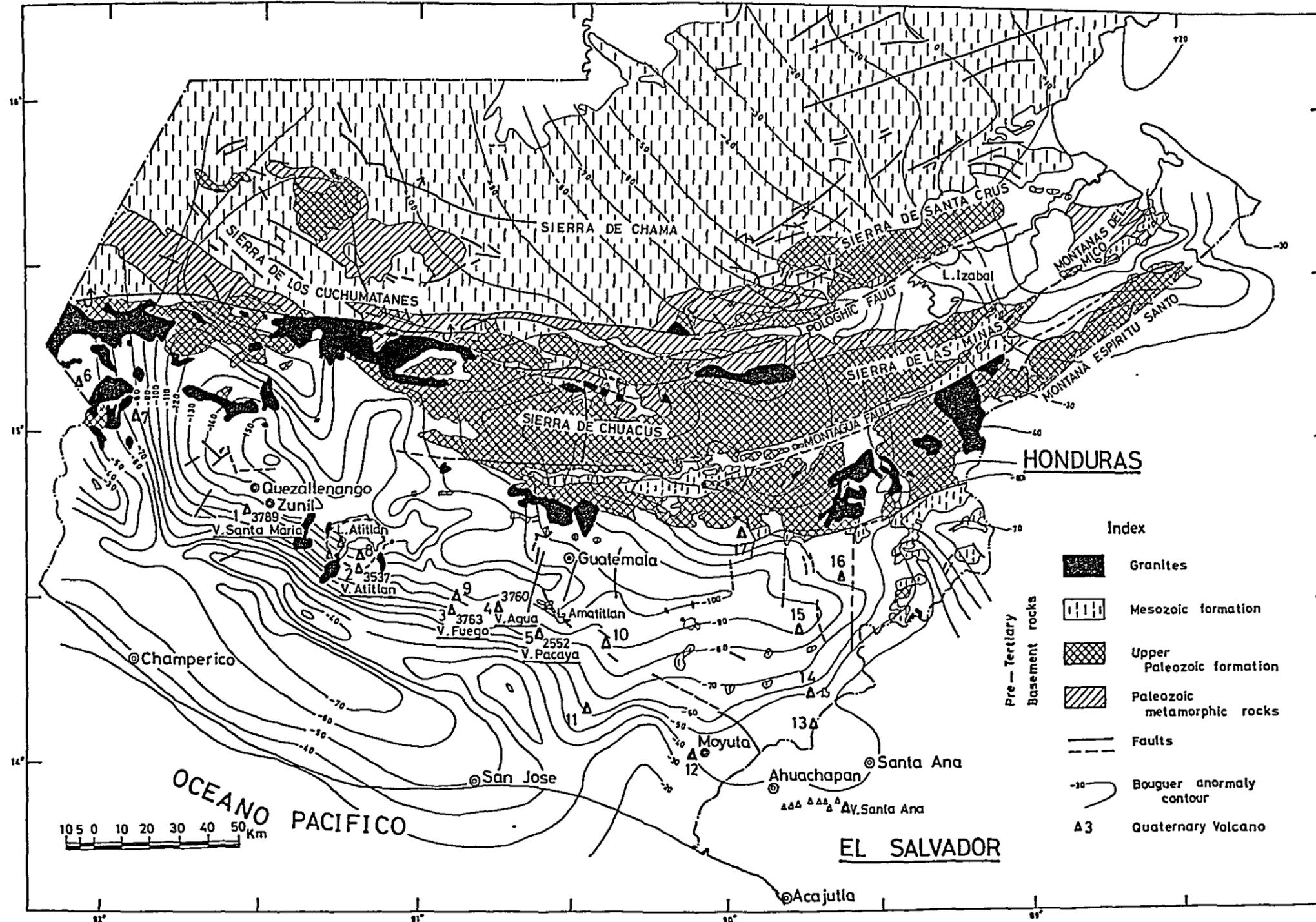


Fig. III-3. Relation between Bouguer Anomaly (unit mgal) and Pre-Tertiary Basement Rocks, Guatemala  
(YAMASAKI and MATSUMOTO, 1973)



- |                          |                        |                      |                         |                       |
|--------------------------|------------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------|
| 1. V. Santa Maria(3790)  | 2. V. Atitlan (3537)   | 3. V. Fuego (3763)   | 4. V. Agua (3760)       | 5. V. Pacaya (2552)   |
| 6. V. Tacana             | 7. V. Tajumulco (4210) | 8. V. Toliman(3158)  | 9. V. Acatenango(3976)  | 10. C. Redondo (1077) |
| 11. V. Tecuamburro(1945) | 12. V. Moyuta (1702)   | 13. V. Chingo (1775) | 14. C. Las Viboras(935) | 15. V. Suchitan(2006) |
| 16. V. Ipala (1650)      | 17. V. Jumay (2180)    |                      |                         |                       |



上部白亜紀 (Campanian) ~ 下部第三紀 (Eocene) の Sepur formation と呼ばれる主に海成のフリッシュ型 (flysh type) 砕屑岩に蔽われている。本岩中には、しばしば多量の蛇紋岩隙を含み、以下の地層にはこの隙が認められないことから、次に述べる Central Cordillera に沿って分布する蛇紋岩体は、本岩の堆積が始まった白亜紀末に始めて地表に露出したものと考えられている。

Peten Lowland の東部の Maya Mountains には、主として上記の地層よりも古いペンシルバニア紀 (上部石炭紀) ~ 二疊紀の砕屑岩類 (最大厚さ約 3,000m) が露出し、一部はこれを貫く花崗岩類 (235 ± 35 m.y. といわれる) によって変質して結晶質岩となっている。Maya mountains は南および北部を断層に切られて、1つの大きな地壘山脈を造っている。

Peten Lowland の地質は、交通不便の不毛の地でなお明らかでないが、今日までに石油探査のための 10本の試錐その他の調査によって、以上のような層序が推定されている。石油鉱床についても、まだ結論が得られてないが、本域の堆積岩の全層厚は、実に最大 10,000m にもおよぶものと推定されているので、石油の可能性については、将来さらに検討されることであろう。

## 2 Central Guatemalan Cordillera

Central Guatemala を横切って、Peten Lowland と同様にほぼ東西に孤状に延びる峻削な山脈群を Central Guatemalan Cordillera と呼ばれている。この Cordillera は西は Mexico の Chiapas 県から、東は Honduras、北部 Nicaragua を経て、さらに遙かに遠く Caribbean 海の Great Antilles 諸島の地質構造軸の一部に連続するものと考えられている。したがって、これらを総括して北部中米山系 (Sierra of Northern Central America) とも呼ばれる。また、Caribbean 海底下の隆起部である Cayman ridge (海嶺)、Nicaragua rise および両者の中間に走る Bartlett trough (海溝、深さ約 5,000 ~ 6,000 m) も、この Cordillera の構造と密接な関係があるものと推定されている。

Guatemalan Cordillera は、主として古生代と中生代に属する変成岩類、褶曲した堆積岩類、花崗岩類、蛇紋岩類などより構成されている。本域には、Cordillera の東西弧にほぼ平行して Motagua および Polochic 2つの主要断層系が追跡される。これらの断層系はほぼ直線的に走り、いちぢるしい破碎帯を深く刻んだ同じ名前の断層谷を造っている。その延長は Caribbean 海底下では、明らかに前述の Bartlett trough (海溝) に連続している。この海溝は、Cordillera を造った造山運動と関連して、ほぼ同時期に起った造海溝運

動によるものと説明されている。Cordillera はこの2つの断層系に区切られて、次の3つのグループに分けられる。

## 2-1 Northern group

Polochic 断層から北の区域で、この区域にはMexico の Chiapas 県の Madre Oriental に連なる Ouchumatanes, Chama, Santa Cruz の山脈が連なっている。本域は主として上位から下位に、次の諸岩層から構成されている。

中生代 Mesozoic	}	白亜紀……………Ixcoy, Ooban
		(Cretaceous) formations(carbonates rocks)
		ジュラ紀……………Todos Santos formation
上部古生代 Upper Palaeozoic	}	(Jurasic) (redbeds)
		二疊紀……………Chochal formation
		(Permian) (Carbonates rocks)
		上部石炭紀～上部二疊紀……………Santa Rosa formation
		(Pennsylvanian ~ early Permian) (clastic rocks) .

本域には Guatemala の基盤岩である下部古生代の結晶質変成岩は見られず、上部古生代の砕屑岩を主とする Santa Rosa formation と、その上位の石灰岩類を主とする Chochal formation が本域の中核をなしている。これらの地層の堆積後、本域は二疊紀末から三疊紀に起った Jalisco pan 造山運動を受けて、ここにモラッセ型の Todos Santos redbeds が局部的に堆積し、その後前述の白亜紀の石灰岩類に被覆されている。

本域には Middle group におけるような花崗岩類の大規模な貫入や広域変質は認められない。ただし、東部の Polochic 断層に沿う Santa Cruz 山脈には、約 1,000 ㎞<sup>2</sup> の露出面積を有する大規模な蛇紋岩の貫入岩体が知られている。

Cordillera の褶曲帯と変質岩は、北方の Peten Lowland に向って、次第にゆるやかに褶曲した中生代および第三紀の堆積岩に移化している。

## 2-2 Middle group

本域は Polichic と Motagua の主断層系に挟まれる区域で、Mexico の Chiapas 県の Madre de Sur から, Chuacus, Minas, Mico の諸山脈が連なっている。

本域には、前記の North group の諸岩層は局部的に露出し、これらに不整合に蔽われる下部古生代の結晶質変成岩類 (Chuacus series) が Middle group の中核を成している。本岩類は著しく褶曲を受け、しばしば押し被せ断層に切れ、中米では最も古い岩石で、かつ

て Pre-Cambrian といわれたこともあるが、今日では多くの方は下部古生代と考えている。

本域は花崗岩類の大規模な貫入によって、広域変成を受けて、雲母片岩、緑泥片岩、結晶質石灰岩、角閃岩、片麻岩などより成る。これらの中には、黒雲母一ざくろ石片岩や藍晶石一十字石片麻岩などを含み、かなり高度の変成相を示している。

これらの変成岩類を被覆する前述の上部古生代の Santa Rosa group の基底部には花崗岩脈を有すること、また Sr/Rb 法による花崗岩の年代は 375 m.y. を示すことから、本域の花崗岩類は上部古生層の堆積が始まった時代にすでに地表に露出していたものと推定される。

数多くの不連続な蛇紋岩体が Northern group と同様に本域でも主要断層系に沿う区域に露出している。なお、本域東部の Isabel 湖周辺では、この蛇紋岩体に伴われる Ni 鉱床が注目されている。

### 2-3 Southern group

本域は Motagua 断層から以南で、Honduras 国境を走る Espiritu Santo 山脈を含む区域である。この地域は一般に変成度が低く、主として千枚岩、変輝緑岩、チャート、グレイワックなどより成る。

## 3 Volcanic Province と Guatemala-Quezaltenango 陥没構造

Guatemala 南部には、新第三紀から現代までに著しい火山活動が起り、主として第三紀の火山岩類や堆積岩類が、その大部分は陸上に堆積して、標高約 1,000 ~ 2,000 m のほぼ平坦ないわゆる Guatemala 高原 (Williams 1960) を造っている。この高原の南縁部には、一部は今日なお活動中で、その多くは約 2,000 ~ 4,000 m の標高を有する 15 以上の第四紀の円錐状火山体の列が太平洋岸に平行して、ほぼ南東方向に配列している (Fig. III-3)。この区域を一括して、Volcanic province と呼ばれている。

その延長は、Mexico の国境からほぼ南東方向に、El Salvador, Nicaragua を経て遠く Costa Rica に連なり、これらを中米における Pacific Volcanic Chain という。この南東方向に走る火山系の構造は、より古い Guatemalan Cordillera の East-West 孤の構造とは斜交し、太平洋岸から約 100 km 沖を走る最大海深約 5,000 ~ 6,000 m の中米海溝 (Middle American Trench) にほぼ平行している。これらの関係は、最近の進歩した Global tectonics の立場から、将来詳しく究明されることであろう。

一方、太陸部ではこの火山系にほぼ平行して走る El Salvador の中央地溝帯 (Central graben) や Nicaragua 陥没構造 (depression, または graben) の卓越した構造が確かめられている。Guatemala でも後述のごとく、本域の Bouguer 異常図と Volcanic province

における基盤岩類の分布から Guatemala - Quetzaltaltenango 陥没構造 (depression zone) が推定される (Fig. III-3)。

これらの成因は、次のように考えられる。北米における白亜紀末から第三紀初めの Laramide 造山運動に対応して、ほぼ同時期中米地域にも太平洋岸に沿って広域に圧縮帯が働き、Guatemala の Volcanic Province を含む Pacific Volcanic Chain の区域には地背斜が形成され、その頂部には伸長歪が起り、このため S E 方向に走る割目系を生じこれがその後次第に顕著な断層系に発達したものであろう。

Guatemala の Volcanic Province の地質については、Williams (1960) の詳細な優れた研究報告があり、これが本域の研究の基礎となっている。しかし、この地域の地質はきわめて複雑で、とくに将来地熱開発のために重要な火山層序を組み立てるためには、なお数多くの地質学者の長期にわたる努力が必要であろう。

Williams は本域の火山岩類を便宜上火山形態に注目して、第三紀および第四紀に分けている。もし、火山体や噴出物などの生成または堆積当時の原形が、よく保存されていれば第四紀とし、これらの原形がかなり侵食または開析されている場合は、第三紀としている。今回の Zunil 地熱帯の調査もほぼこれを準用したが、時代を決定する明確な地質学的証拠は得られなかった (第 IV 章)。

### 3-1 第三紀火山岩類

Guatemala 周辺の中米諸国には、白亜紀の火山活動が知られているが、この国におけるもっとも古い火山活動は、珪藻 (diatoms) によって、中新世に始まり、現代まで続くものと推定されている (Williams 1960)。その活動は、流紋岩から橄欖石玄武岩類までの範囲が包含され、これらの熔岩や火山砕屑岩類が巨大量噴出して、複雑に積み重なっている。この間には、しばしば崖錐、地すべり、泥石流、河川、湖沼などの堆積部が挟まり、さらに層序を複雑化している。

第三紀火山岩類は、主として輝石安山岩質の溶岩、凝灰角礫岩、凝灰岩などより成り、しばしば流紋岩質の凝灰岩や時に溶結凝灰岩を混える火砕流堆積物を挟んでいる。ただし、Guatemala の東部に向って、流紋石英安山岩質の溶岩や火砕流堆積物が著しく増加することが注意されている。地熱帯の地下に分布するこれらの第三紀火山岩類は、この中の緻密岩が帽岩となり、透水層が貯留層の役目を果しているものと考えられる。しかし、この group の層序と共に全層厚は今日まで詳らかでない。今回の調査地域に隣接して、Atitlan project による試錐結果からは、その厚さは基盤の花崗岩まで約 850 m と報告 (Electro-Watt Co. 1971) されているので、恐らくこの group の全層厚は 1,000 m 以上にもおよぶものと予想される。

なお、Guatemala の第三紀火山岩類について注目すべき事実は、南部中米や Caribbean 海

地域で認められている海底噴出の溶岩類、凝灰岩類、または海底の堆積物が全く認められないことで、Guatemalaの第三紀火山活動はすべて陸上であるということである。このgroupにしばしば陸成の珪藻土、泥流、砂礫、粘土などを挟むことから、裏書きされている。恐らくこのgroupは、前述の上昇陸化した地背斜の頂部に生じたGuatemala - Quezaltenango陥没帯( depression zone ) を厚く埋めているものと推定される。

第三紀火山岩類には、中心噴出を指示する四方に向う流理構造、放射状岩脈、岩栓、古い火口丘の形跡などが認められないので、第三紀の火山活動は恐らく多くは割目噴出と考えられている。

第三紀末以降に、本域のこれら第三系はゆるやかに褶曲し、数多くの断層に切られている。これらの断層は、前述Pacific Volcanic chain に卓越するNW - SEに走る主断層系と、これと斜交し、より小規模でN - SおよびNE - SWの方向のものが著しい。有名なGuatemala City grabenを境する断層もN - S方向を示している。今回の調査区域でも同様な傾向が認められ、これらの諸断層およびこれに付随する割目が地熱源の通路となり、しばしば主断層と副断層の交点付近が優勢な地熱帯となることが多いので注目される。

### 3 - 2 第四紀火山岩類

第四紀火山岩類は、主として数多くの円錐状火山体を構成する輝石～角閃石安山岩類によって特徴づけられる。さらに、これら火山体の山頂火口から、その多くは火山活動の末期に、莫大な石英安山岩質火砕流その他の碎屑物を噴出し、また、その斜面からは酸性安山岩類やさらに珪質の溶岩類を噴出して、しばしば火山ドームを造っている。しかし、Guatemala南東部では、安山岩類はしばしば複合火山体を造り、また小さな玄武岩の噴石丘や溶岩流が形成されている。

これらの巨大量の第四紀火山噴出物は、しばしば砂礫、粘土、珪藻土などの陸上堆積物を挟み、ほぼ水平に厚く堆積して広いGuatemala高原を造り、今日なお噴出中の降下火山灰、軽石が加えられている。

この高地の南縁にNW - SEに連なる第四紀火山体の多くは、日本の富士山と匹敵する見事な円錐状火山体を造っている。著名なものは西から東へ次の通りである( Fig. III - 3 ) :  
Volcan Tajumulco ( 4,210 m ), Volcan Santa Maria ( 3,789 m ) と  
Santaguito ( 2,500 m ), Cerro Quemado ( 2,818 m ), Volcan Zunil ( 3,542 m ),  
Volcan Atitlan ( 3,537 m ), Volcan Toliman ( 3,158 m ), Volcan San Pedro ( 2,995 m ),  
Acatenango ( 3,976 m ) と Fuego ( 3,763 m ) の双子火山, Volcan de Agua ( 3,766 m ), Volcan de Pacaya ( 2,552 m ), Volcan

Tecuamburro ( 1,945 m ), Volcan Moyuta ( 1,702 m )。

調査当時にこれらの中、Fuego からは激々たる噴煙が眺められ、また Pacaya からは小規模ながら約半年にわたり溶岩の流出が続いていた。また、調査地の西に隣接する Santa Maria は 1902 年に大爆発を起し、その後 1922 年にはその南斜面に、Santaguito のペレ型火山ドームが突出し、その高さは約 1 年後に約 400 m の高さに成長し、今日でもなおドームの上昇と拡大が続いている。1943 年に活動を始めた日本の昭和火山 ( 406 m ) とよく似ている。

以上の外に、この火山列の間には、美しいカルデラまたはカルデラ状の湖が連なっている。いずれも円錐丘を造る Atitlan, Toliman および Pedero 火山を含む区域には、世界一の阿蘇カルデラとほぼ同じ面積を有す Atitlan 湖があり、これは Guatemala City の南西、Pacaya 火山の北麓に位置する Amatitlan 湖と共にその景観を誇っている。この 2 つの湖は、釜状陥没または火山性陥没構造によるもので、Moyuta 北方の Ayarza 湖 ( 約 2,000 m ) はカルデラ湖とされている ( Williams 1960 )。

### 3-3 Guatemala - Quezaltenango 陥没構造

Volcanic province の基盤岩類は、わずかに変質した泥質堆積物、石灰岩類、花崗岩類で、これらは地域内各所に大小の地窓を造って露出している。黒色頁岩類と千枚岩類などは、北に直接する Central Cordillera 地域に分布する上部古生層 ( Pennsylvanian - Permian ) と概ね対比される。石灰岩類は Guatemala City の近くから得られた大型有孔虫によって、その時代は Albian ( 下部白亜紀末 ) とされ ( Williams 1960 )、前述の Coban formation と対比されている。

本域の火山岩の基盤岩類は、これらの分布から見て、その大部分は花崗岩類と推定される。花崗岩類の時代は、Guatemala City の近くの黒雲母花崗岩と閃緑岩の放射能の年代測定 ( 92 ~ 99.7 m.y. ) の結果から白亜紀とされている ( Williams, 1960 )。しかし、この外、前述のように本域北部には古生代の深成岩類が知られ、またさらに若い第三紀火山活動に伴う花崗岩類の貫入も推定されているので、恐らくこれらの各時代にわたるものが本域の地下に賦存するものと思われる。

このような多くは先第三系の基盤岩類の分布と、Guatemala の Bouguer 重力異常図 ( Instituto Geografico Nacional, Guatemala, 1965 ) を組み合せて、Fig. III-3 図を作った。この図から明らかなように、本域の第四紀火山列にはほぼ平行して、その北側には NW-SE 方向の低重力異常帯 ( 最低約 -100 ~ -150 mgal.  $D=267$  ) が分布している。その巾は数 10 km, 延長は約 300 km にもおよび、概ね Guatemala および Quezaltenango 両市を結ぶ線と一致するので、これを Guatemala - Quezaltenango 陥

没構造と呼ぶ。

多くは地窓を示す先第三系の基盤岩類は、この構造の北および南側に分布している。このことから、この構造線は明らかに基盤の陥没帯を示唆するものであり、第四紀の火山列はこの南斜面に沿って活動したことが判る。一方、このことはこの構造の南東延長と考えられる EL Salvador の中央地溝帯でも、主としてその南側に第四紀火山列が配列している事実ともよく一致している。

ただし、この重力図は、恐らく Guatemala 国の全国的な概査の結果を括めたもので、すでに述べた南北断層系およびこれに伴う例えば Guatemala City 地溝帯、Atitlan・Amatitlan・Ayarza などの陥没またはカルデラ湖、その他について将来なお詳細な調査・研究が必要と考えられる。

このように、新生代以降の造山帯や火山帯に伴われる地溝または陥没構造を特徴とする地熱地域は世界各地に例が多い。Guatemala - Quezaltenago dipression とほとんど同じ規模のものを例示すると (Yamasaki 1972, Kubotera, 1969, Grindley 1965, Isita 1972)。①大岳地熱帯を含む日本の阿蘇一別府陥没構造 (巾約 30~40 Km, 延長約 100 Km 以上), ②New Zealand 地熱地域を構成する White Island - Taupo 陥没構造 (巾約 30 Km, 延長 200 Km 以上), ③ソ連の Kamchatka 半島の地熱地域などである。さらに巨大な構造を示す米国および Mexico 国境にわたる Salton sea (U.S.A.) から Mexicali の地熱帯を包含する大地溝も、規模の大小を別とすると、全く同じ型式に属する。これらは中米諸国を含めて、すべて一連の環太平洋火山帯・造山帯に分布することは興味深い。なお、これらに共通する特徴は以下のように概括される。

(1) 地溝または陥没構造は、第三紀以降の若い地質時代の堆積物に充填されている。この堆積物は固結度の低い砂礫層のこともあり、またしばしば凝灰質岩類や溶岩類がはさまっている。一般に、この中の透水性の凝灰岩、凝灰角礫岩、砂礫層などが貯溜層となり、緻密質の粘土質岩、溶結凝灰岩、溶岩などが帽岩となっている。このような透水層と不透水層の地層境界が重要視される。

(2) 地溝や陥没帯の中には多くの火山体が認められるが、このうちカルデラと、ドームや溶岩ドーム火山と関係する地熱帯が多い。カルデラは火山の噴出によって陥没地帯の中で、さらに陥没した地域で、熱源が上昇する通路となる断層や割れ目に富むため地熱帯として条件が良い。ドームや溶岩ドーム状の火山体は、前述の昭和新山 (Japan), Santiguito Cerro Quemado (Guatemala) などのように、粘性の強い溶岩の貫入で形成される。その影響で貫入岩体のまわりに放射状、円心円状、その他不規則な断層や割れ目が発達して熱源の通路となる。

(3) 地溝や陥没帯を充填する堆積物を切る、新しい断層が発達していることが多い。このこ

とは、なお地殻変動が最近まで続いている不安定な地域ということで、いわゆる「活増層」も認められる。これらの断層はしばしば地溝帯の両側を境する主断層と平行し、または斜交して発達している。熱源が豊富な場所としては、優勢な断層には含まれる所や断層の交点近くが注意されている。要するに断層運動に伴う破砕帯が、熱源の通路や貯溜層としても重要ということになる。

(4) 最近調査精度が細くなるに伴って、地溝や陥没帯の中の局地的な背斜構造の区域が有望視されるようになった。これは石油鉱床が背斜の頂部に貯えられていることとよく似ている。

#### 4 太平洋海岸平野

Volcanic province の南は、第四紀火山列から危峻な斜面を降り、幅約50kmの Pacific coastal plain が拓けている。ここには絶えず火山高地からの火山泥流、地すべり、はげしい洪水などの夥しく大量の碎屑物が供給されて、斜面には広く崖錐、扇状地が発達している。

したがって、本域の堆積物は、時に流紋岩、玄武岩、主として安山岩の巨礫、大礫、sand, clay などから、しばしば降下火山灰や軽石などまで、その種類、構成は変化に富んでいる。

#### 5 Guatemala の地史概要

Guatemala の地質を概観するために、この国の地史の概要を、予察的に Fig. III-4 に括めて説明する。しかし、まだ資料に乏しく、非常に不完全で、将来修正を要する点が多いと思われる。

(1) Guatemala の地史は、Mexico で提唱されている次の2つの造構造輪廻(または造山輪廻)に大別されている: Jaliscoan は概ね下部古生代から二疊紀まで、Mexican はそれ以降の造構造運動を括めたものである。

(2) Jaliscoan geotectonic cycle は、Central Cordillera に分布する Guatemala でもっとも古い下部古生層(Chuacus formation)の堆積に始まる。当時の堆積が行なわれた地向斜(大陸の縁海)は Mexico, Guatemala, 北部 Honduras から広く Caribbean sea に広がり、前面卓状地(大陸)は現在の Yucatan platform にあったものと推定されている。

この地向斜地域は、堆積作用に続いて激しい褶曲と花崗岩類の貫入の時代を迎え、広域に変質作用を受けている。このようにして生成された変成岩類および花崗岩類を、明らかに不

整合に被覆する上部古生層 ( Pennsylvanian ~ Permian ) の基底部には花崗岩礫を含んでいる。したがって上部古生層が堆積を始めた時に、花崗岩類はすでに地表に露出していたもので、その貫入の時期は明らかに上部古生代より古い ( 年代測定の結果は 375 m. y. )。

(3) 上部古生層 ( それぞれ砂屑岩と石灰岩類を主とする Santa Rosa group と Chochal formation ) を堆積した次の地向斜地域は、二疊紀末から三疊紀に Jaliscoan 時代の造山運動が起って、再び褶曲を受けて陸化した。このため Guatemala には三疊記の堆積物は見られない。

この時代に、Jaliscoan 造山運動による地背斜の軸に平行する前述の東西弧方向の多くの割目系を生じ、これらは後に白亜紀末からの造山運動 ( Laramide orogeny, U. S. A. ) を受けることによって、前述の Polchic, Motagua などの大断層に発達したものと考えられている。一方、この東西系の割目は、Caribbean sea に延びて、Bartlett trough ( 海溝 ) の誕生に関係があるといわれている ( 造海溝運動 taphrogenetic movement )。また、このような割目系が、現在 E-W 断層系に沿って分布する蛇紋岩類の貫入を促進したものと推定されている。

(4) Jaliscoan 造山運動によって陸地となった盆地状地形には、主に陸成でモラッセ型の red beds ( Todos Santos formation ) が局部的に厚く堆積して、Jaliscoan geotectonic cycle の時代は終わっている。

(5) 次の Mexican 造構造輪廻は、ジュラ期末から白亜紀の地向斜における砂屑岩から石灰岩類の堆積に始まる ( Coban, Ixcoy etc. formations )。この地向斜は白亜紀末か再び次の大きな造山運動の舞台となる。

(6) 白亜紀末から下部第三紀 ( 始新世 Eocene ) の造山運動は、米国の Laramide 造山運動に対比される。Guatemala では、主として Cordillera 地域と、その南の Volcanic Province に再び大規模な花崗岩類 ( 白亜紀 ~ 第三紀, III-3-3 参照 ) の貫入および褶曲運動が起り、この時期に前述の E-W 方向の Polochic および Motagua などの断層系や Bartlett trough ( 海溝 ) がほぼ完成されたものと考えられる。

一方、前述の蛇紋岩体は、この時期に始めて地表に露出したものと推定されている。その理由は、次の時代の Sepur formation の基底部に含まれている多量の蛇紋岩礫が、この造山運動以前の堆積物中には、全く認められないことによる。

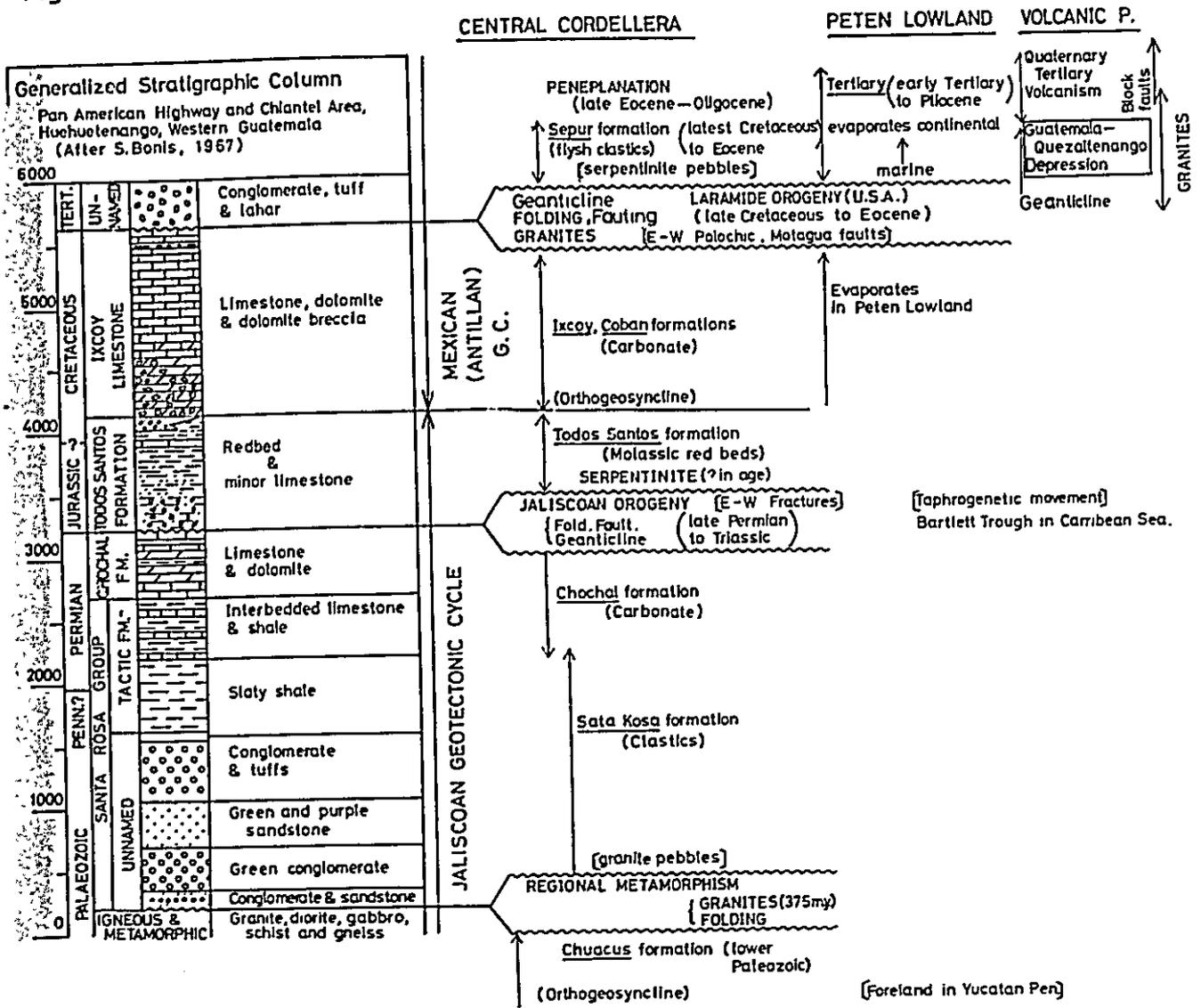
(7) 前項の造山運動とほぼ同時期に、Guatemala では主に Peten Lowland 南部のみに、白亜紀末から古第三紀 ( early Eocene ) の海成フリッシュ型の Sepur formation の堆積が認められる外は、ほとんど全域が陸化し、とくに上部古第三紀 ( early Eocene ~ Oligocene ) には、ほとんど Guatemala 全域が広く準平原化したものと考えられている。その後 Peten Lowland を含むこの国の北部には、大部分が若い第三紀の陸成層、蒸発

残留岩の堆積が続いた。

(8) この造山運動とほぼ同じ、またはこれに続いて、Guatemala の Volcanic province を含み NW - SE に走る中米の Pacific volcanic chain の地域は、広域に圧縮圧が働き、これによって形成された地背斜軸の頂部に、その軸と平行して NW - SE に走る一連の前述の Guatemala - Quazaltenango 陥没構造、El Salvador の中央地溝帯、Nicaragua 陥没構造が形成されたものと考えられる。これらの陥没構造は、新第三紀 ( Miocene ) 以降の火山岩類に充填され、また主に N - S 方向の Guatemala City 地溝帯で代表される地塊運動が起った。現代までなお活発に活動中の第四紀火山列は、この Volcanic Province の南縁部に沿うて分布している。

結論的に、このような Volcanic Province の造構造および火山活動の歴史が、中米諸国を南東に走る地熱地域の地質学的背景とすることができる。

Fig. III-4. Outline of Geologic History, Guatemala (YAMASAKI, 1973)



[ REFERENCES ]

BONIS, S. (1965)

Geology of the Quezaltenango Area, Guatemala (with Geologic Map; 1: 250,000).

Institute Geografico Nacional, Guatemala.

\_\_\_\_\_, (1967)

Excursion Guide Book for Guatemala. "1967 Annual Meet., Geol. Soc. Am., Geol. Bull. No. 4, Inst. Geogr. Nac., Guatemala.

\_\_\_\_\_, et al. (1970)

Geologic Map of Guatemala, 1: 500,000 (Mapa Geologico de la Republica de Guatemala). Institut Geografico Nacional, Guatemala.

DENGO, D and BOHNENBERGER, O (1969)

Structural Development of Northern Central America. Mem. Am. Assoc. Petrol. Geol., No. 11

ERLICH, E. R. (1968)

Recent Movements and Quaternary Volcanic Activity within the Kamchatka Territory. Pacific Geology. I (11th. Pacific Science Congress, 1966).

ELECTRO-WATT ENG. SERV. LTD., ZURICH (1971)

Atitlan Project Feasibility Report.

GRINDLEY, G. W. (1965)

The Geology, Structure, and Exploitation of the Wairakei Geothermal Field, Taupo., Geol. Surv. New Zealand.

HEALY, J. (1963)

Geothermal Resources, El Salvador., N. Z. Geol. Surv.

ISITA, J. (1972)

Geothermal Exploitation ——A General Scope, Jour. Japan Geoth. Ass., Vol. 9, No. 4 pp. 37~61.

KUBOTERA, A. et al. (1969)

Gravity Surveys on Aso and Kuju Region, Kyushu District, Japan., Bull. Earthq. Res. Ins. Vol. 47. pp. 215 ~ 255

MEYER-ABICH, H. et al. (1958)

Active Volcanoes of Central America., Catalogue of Active Volcanoes of the worlds, Part VI., Int. Volc. Assoc., Naples.

McBIRNEY, A. R. (1963)

Geology of a Part of the Central Guatemalan Cordillera; Univ. Calif. Pub. Geol. Sci., Vol. 38, No. 4, pp. 177 ~ 242

ROSE, W. I., R. E. STOIBER and S. BONIS. (1970)

Volcanic Activity at Santiaguito Volcano, Guatemala, June 1968 - August 1969. Bull. Vol., Tome 34-I, pp. 295 ~ 307

WILLIAMS, H. and MEYER-ABICH, H. (1955)

Volcanism in the Southern part of El Salvador. Univ. Calif. Publ. Geol. Sci. 32, No. 1

\_\_\_\_\_, (1960)

Volcanic History of the Guatemala Highlands. Univ. Calif. Publ. Geol. Sci., Vol. 38, No. 1.

\_\_\_\_\_, and McBRINEY, A. R. (1969)

Volcanic History of Honduras, Univ. Calif., Publ. Geol. Sci., Vol. 85, p. 101.

YAMASAKI, T. (1972)

Geologic Problems in Progress of the Geothermal Exploitation, (in Japanese with English abstract), Jour. Japan Geoth. Ass. Vol. 9, No. 3.



## 第IV章 Zunil地熱帯の地質

Quezaltenango市の南東約8 Km, Zunil部落の南には, Samala川の深い峽谷底部の Fumarole Grande と, その東に隣接する Fumarole Negra を含み, この国で最も活発な地熱徴候が発達している。その範囲は1~2 Km<sup>2</sup> におよび, Fumarole Grande の湧出量の豊富な間欠泉と共に, この区域には盛んな噴気, 硫気孔, 温泉, 著しい変質帯が分布している。まず, 開発が期待される区域である。さらに, この区域の周辺にも広く, 各所に温泉, 噴気, 変質帯が散在している (Fig. IV-1)。これらを一括して, 仮に Zunil地熱帯と呼んだが, この名称は将来調査の進展に伴い, その性状, 規模, 範囲などを明らかにして, 再定義されるべきであろう。

Zunil地熱帯は, Guatemala の Volcanic Province をNW-SEに走る前述の Guatemala-Quezaltenango 陥没構造 (Ⅱ-3) の西端部に位置し, また, 負の Bouguer 異常が最大, -160mgal を示すいわゆる Quezaltenango 盆地の南縁部に位する。その西側には, いずれも最近まで, なお活動している巨大なドーム状火山の Cerro Quemado (3,197m), 美しい円錐状成層火山の Santa Maria (3,789m) および Santaguïto dome (2,500m±) などがあり, また南東側には Zunil 火山 (3,542m) から Santo Tomas 火山 (3,505m) に連なる複雑な火山地形が迫っている。これらの火山体に囲まれた Zunil 地熱帯は, そのほぼ中央を Samala 川が北から南に貫流している。

### 1 火山 層 序

#### 1-1 概 説

Zunil 地熱帯を構成する主な地質は, 基盤の花崗岩類を被覆する Zunil group (新第三紀火山岩類), およびこれらを買入または被覆する Cerro Quemado group (第四紀火山岩類) の2つに大別される。この区分は, すでにⅡ-3で述べたように, Williams (1960) に従い火山体や噴出物などの原形がよく保存されているものを第四紀とし, その他を第三紀としたもので, 厳密な地質年代的区分は将来の課題として残されている。

これらは, さらに第IV-1表のように細分され, これによって, 第IV-1の地質図を作成した。

この中, 第三紀火山岩類に関するこのような細分は, 恐らくこの国では最初の試みと思われる。

Table IV-1 Geologic Succession of Zunil Geothermal Area,  
Southeast of Quezaltenango City\* (26th. May, 1973)

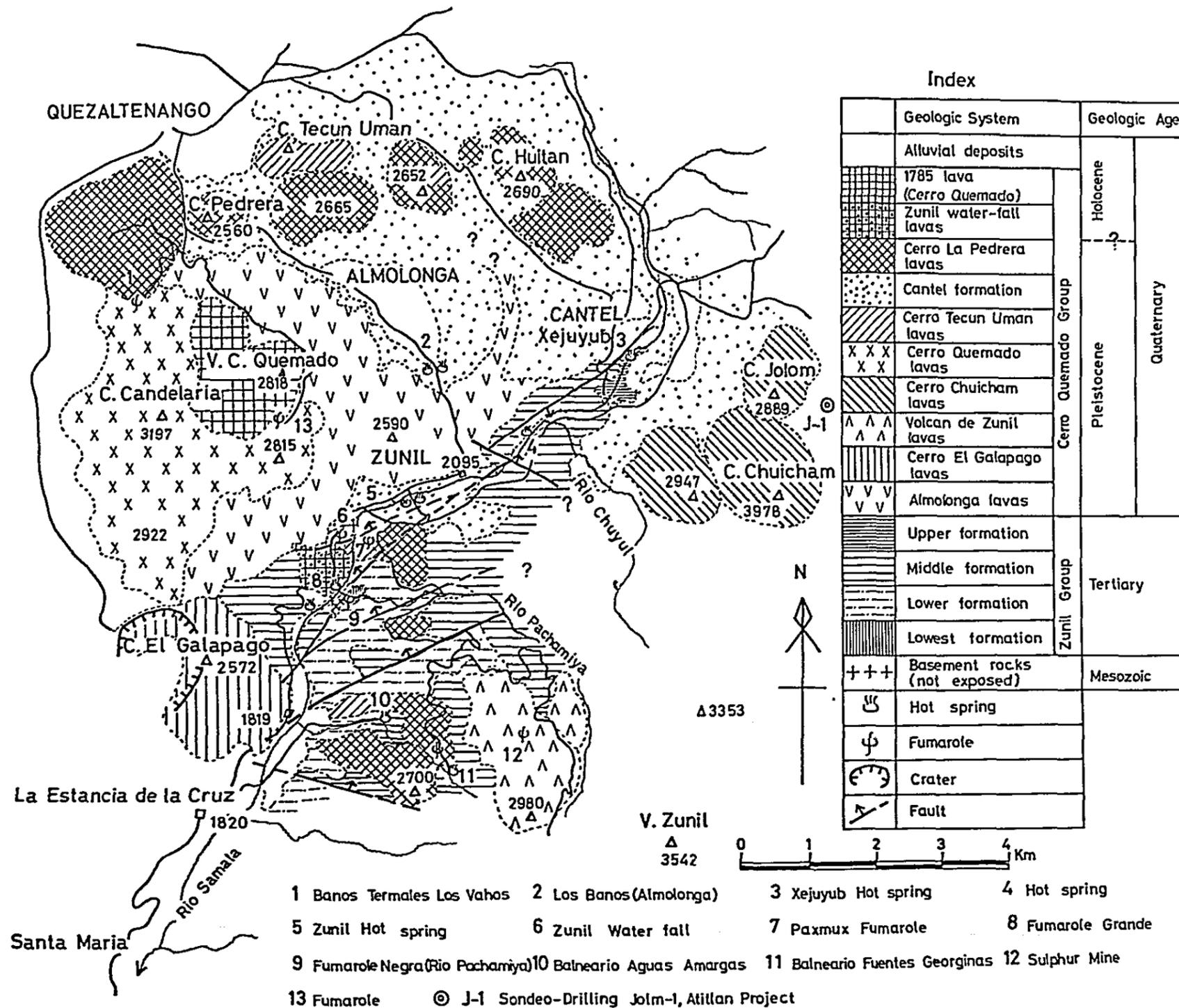
Geologic Age		Geologic System	Rock Type	
Quaternary	Holocene	Alluvial deposits	Gravel, Sand, Clay, Volcanic ash	
		1785 lava (Cerro Quemado)	Biotite hornblende andesite	
		Zunil water-fall lavas	Biotite hornblende dacite	
	Pleistocene	Cerro Quemado Group	Cerro La Pedrera lavas	Au Hy bg Bi Hr glassy rhyodacite Au Hy Bi bg Hr spherulitic rhyodacite
			Cantel formation	Tuff, Tuff breccia, Hr Bi rhyolitic pumice flow deposit, Conglomerate, Diatom bed? etc.
			Cerro Tecun Uman lavas	Augite hypersthene hornblende andesite
			Cerro Quemado lavas	Biotite hornblende dacite
			Cerro Chuicham lavas	(not observed yet)
			Volcan de Zunil lavas	Q OI Au bg Hr Bi andesite
			Cerro El Galapago lavas	Hypersthene augite andesite
			Almolonga lavas	Augite hypersthene bg hornblende andesite
			Tertiary	Zunil Group
Middle formation	Olivine pyroxene andesite, 2 pyroxene andesite, Augite hypersthene hornblende andesite, Hornblende andesite, these lava and tuff breccia			
Lower formation	Hornblende biotite rhyolitic pumice flow deposit, Air fall deposit			
Lowest formation	Olivine hypersthene augite basaltic andesite tuff breccia			
Mesozoic		Basement rocks	Bi granite, Hr Bi granodiorite, Q porphyry	

Au:augite Bi:biotite Hr:hornblende Hy:hypersthene OI:olivine Q:quartz bg:bearing

\* (1) This is a preliminary note of the result of geological reconnaissance during 11-20th, March, 1973.

(2) It will be revised by the detailed survey in future.

Fig. N-1. Geologic Sketch Map of Zunil Geothermal Area, South-east of Quezaltenango City, Guatemala (YAMASAKI and MATSUMOTO, 11th-20th. March, 1973)





る。しかし今回は僅か10日間の踏査によるために、なお将来地質精査、試錐その他の調査を加えて逐次修正が必要であろう。また、この2つのgroupは、本域の地熱帯の成因と直接の関係があり、また重要な貯留層や帽岩などの特徴を解明するためにも、さらに詳しい火山層序学的な検討が必要となるであろう。

このため採取した約100個の試料の薄片を作り、将来の基礎資料としてかなり詳しい顕微鏡観察を行い、その代表例をこの報告にも加えておく。

(1) 基盤の花崗岩類はZunil地質帯には直接露出しない。しかし、本域北方のCajola, Totonicapanおよび東方のAtitlan湖付近に大小の地窓を造って露出し、またAtitlan Projectによるボーリングにおいても花崗岩類が確認されている。これらのことからZunil地熱帯の基盤岩類として花崗岩類が、地下に広く分布発達するものと推定される。

(2) Zunil groupは、Williams (1960) や Bonis (1965) の第三紀火山岩類に属する。これらは大部分が新第三紀の火山活動に由来するものとされているので、概ね日本のグリーンタフ活動に相当するものと推定される。しかし、正確な時代については、なお今後の検討が必要である。これらは、本域のSamala川流域ならびにその左岸部に広く分布発達している。また、4つのformationsに分けたZunil groupは、本域のおよむね下流部から上流に向って、下位から順次上位層が露出する。

(3) Cerro Quemado groupは、Zunil groupに貫入または被覆する数多くの大小の溶岩ドーム状火山体、成層火山体および主に湖成堆積物とみられるCantel formationなどよりなる。これらはすべて第四紀の火山活動に由来するものと考えられる。また、最近まで活発に活動したCerro Quemadoの地下深部に地熱源が期待されるので、このgroupの火山活動歴史を、さらに細かく究明する必要がある。

(4) 沖積層はAlmolonga, Zunilの盆地の沖積平野やCantel付近およびPasac付近の地表部を構成する。

(5) 本域の主な地形的な特徴は以下のようによ約される。

Quezaltenango市は盆地状地形のほぼ中心部に位置している。この盆地状地形は、東西約23Km,南北5~10Kmの広さを有し、標高2,300~2,400mである。この盆地状地形は、火山構造的な陥没に由来するものと考えられるが、今後の調査によって解明されねばならない。またこの盆地状地形は、かつて湖水の時期があり、周囲から火山噴出物の供給を受けて湖成堆積層(lake deposits, Cantel formation)を生成せしめている。

このQuezaltenango盆地の北方には3000m級の山地があり、その南面は断層崖と推定される急崖をなしている。またQuezaltenango南方には数多くの火山が連なっている。例えば、巨大な溶岩円頂丘(lava dome) Volcan Cerro Quemado(3,197m)、溶岩円頂

丘を主峰とする複雑な Zunil (3,542m) 火山地域，成層火山 (stratovolcano) と考えられる Santa Maria (3,772m) など，およびこれらと関連がある多くの火山である。

Samala 川は Quezaltenango 盆地の水を集めて，北方の San Cristobal, Totonicapan からほぼ南南西に流れ，Quezaltenango 市東方において Xequijel 川と合流し，さらに南東流して Cantel に至り，ここからほぼ南西流している。この間に，流路に沿って Zunil 温泉が点々と湧出し，その下流に Zunil 滝がかかっている。この流は，Cerro Quemado 火山の中腹より流出したきわめて新しい lava flow に懸っている滝である。この流から下流側に，著しい地熱活動地域があるが，この付近は急峻な狭い V 字状溪谷をなしている。

## 1-2 各 論

### 1-2-1 基盤岩類 Basement Rocks

基盤岩類は，Zunil 地熱帯の地表には直接露出しないが，Quezaltenango 市の北西方向約 10 Km の Cajola，同じく北東約 12 Km の Totonicapan，Zunil 地熱帯の東南東約 25 Km の Atitlan 湖周辺や Nahualate 川流域に，そのまわりを主として第三紀火山岩類に囲まれて，大小の地窓を造って露出している。これらは黒雲母花崗岩，黒雲母角閃石花崗閃緑岩などである。

また，Atitlan 湖の水力開発計画による試錐においても基盤岩類としての花崗岩類が確認されている (Atitlan project)。これによれば，Cantel の東南東約 3 Km の試錐 (Fig. IV-1. Sondeo-Drilling, Jolom I) (標高 2,610 m) において，深度 250m (ただし深度 235~250m 間はコアがない) で基盤の花崗岩類に達している。したがって，ここでは標高 2,360m に花崗岩類が存在することになる。さらに Cantel の東南東約 8 Km の試錐 (Sondeo-Drilling, no. 7) (標高 2,526.5m) では，深度 320m で，基盤岩の hornblende - biotite granodiorite に達している。したがって，ここでは標高 2,206.5m の位置に基盤岩類が分布することになる。なお，地表に花崗岩類が露出していない Zunil 地熱帯の中心部の標高は，約 1,800~2,000m の標高を示し，ここでは花崗岩類はさらに深く分布するものと推定される。恐らく，本域北東方および東方の花崗岩類は，現代まで大規模に活動した Quemado, Santa-Maria などの西方の火山地域に向って，逐次階段状断層で落ちているものと推定される。しかし，その深度はなお明らかでない。

Zunil group の火山碎屑岩の中に，しばしば異質物質として，黒雲母花崗岩や角閃石黒雲母花崗閃緑岩などが含まれている。特に Lowest formation の中には，基盤岩の花崗岩類群

が数多く混入している。また、Williams(1960)によれば、Santa Maria火山の1902年の火山活動の折に、多くの異質噴出物として、基盤岩の黒雲母花崗岩、角閃石石英閃緑岩、角閃石黒雲母石英モンズナイトなどが確められている。一方、本域の火山岩類中に、時に外来物質として、またしばしばSamala川の現世の河床礫層の礫として、上記の花崗岩類のほか、花崗斑岩や石英斑岩などが見い出される。

以上のことから、Zunil地熱帯の地表では、直接基盤の花崗岩類や花崗斑岩などの露出を見ることはできないが、その地下に広く分布発達するものと推定される。

これら基盤岩類の地質時代は、白亜紀と考えられており(Williams, 1960), Everndenによれば、K-Ar法の年代測定で92 m. y.を示している。おそらく、本域における基盤の花崗岩類の大部分は白亜紀の時代のものであろう。しかし、前述の北方のGuatemalan Cordilleraに分布する古生代から第三紀までの花崗岩類があるいは古生層、中生層なども出現する可能性もある。

この基盤花崗岩類は、Zunil groupによって不整合関係で被覆され、この不整合面は地熱貯留層の1つとして注目されねばならない。また、この深度は、本域における重要な地熱貯留層と考えられるZunil groupの地下の分布状況や厚さなどを決定するために極めて重要であり、将来の大きな調査目的の1つとなる。

### 1-2-2 Zunil 層群 (Zunil group)

Zunil groupはSamala川に沿って、南はLa Estanica de la Cruzから北方に向ってZunil、さらにCantel南側に至る間に、大局的に北に向って、下部層から漸次上部層が分布発達している。従来この国で一括して第三紀火山岩類と称せられていたもの(Williams 1960, Bonis 1965など)に対して、本域ではZunil groupと新しく命名する。これはZunil地熱帯の地下で、貯留層や帽岩などを構成する主要な地質系統である。

このZunil groupは、①輝石安山岩類の凝灰角礫岩を主とするLowest formation、②火砕流堆積物を主とするLower formation、③輝石安山岩の溶岩と同質凝灰角礫岩を主とし、一部に角閃石安山岩溶岩を挟むMiddle formation、④火砕流堆積物と凝灰角礫岩よりなるUpper formationの4 formationに分けられる。この中、Lowest formationとLower formationの間には不整合が確かめられ、それより上位のLower、MiddleおよびUpperの各 formationの関係には、まだ不整合関係は認められなかった。

#### (1) 最下部層 (Lowest Formation)

Lowest formationは、Samala川の支流Pachamiya川の下流部に位置するFumarole Negra付近のみに、非常に小範囲に分布する。ここでは、ほぼ水平な玄武岩質安山岩の凝

灰角礫岩の露出が見られ、確認される層厚は最大約20mで、その下限は不明である。この上面には、かなりの起伏を有する侵食面が認められ、これをZunil groupのLower formationとしたpumice flow depositsが、侵食部を完全に埋めつくして、相当な厚さで堆積している。

なお、この両者は、Fumarole Negraの西側では、後述のCerro la pedrera lavaに一括されるrhyodacite(流紋石英安山岩)のドーム状貫入岩体(径約200~300m)に貫入されている。このドームはその周縁に、貫入角礫岩を伴い、rhyodaciteと第三紀火山岩類との接触面は、大凡N25°W, W45°を示し、ここでは西方の地下から、東方上部に向って貫入した産状を示している。さらに、rhyodaciteのdomeを切る小断層も見られ、この断層面はN53°E, NW65°を示しており、これはCantelからZunil部落を通りLa Estanica de la Cruzに至る後述の北東-南西方向の断層と関連があり、恐らくrhyodaciteはこのような断層に沿って貫入したものと考えられる。

また、このrhyodaciteドームの西側は、V字状の峡谷を造るSamala川の左岸に絶壁を造り、河底に近いその脚部には優勢な間欠泉を伴い、Fumarole Grandeと呼ばれている。このように、このドームと近接して、その両側に、本域で最も優勢なFumarole NegraおよびFumarole Grandeの2つの地熱徴候が確かめられる。これは粘性の高いrhyodaciteの貫入により、その周辺に著しく割目が発達して、熱源の良い通路となったためと考えられる。

このLowest formationの凝灰角礫岩中には、玄武岩質安山岩の角礫を本質物質として含有し、また、異質物質として、白亜紀に活動したと考えられる基盤岩の花崗岩類、花崗斑岩、石英斑岩などの角礫が認められる。これらの角礫は一般に直径数cm~10cmであるが、最大30~40cmに達するものもある。

〔岩石記載〕 Lowest formationを構成する凝灰角礫岩層の本質角礫は、玄武岩質安山岩で、この岩石記載は次のとおりである。

標本番号:No. 73031210, 岩石名:かんらん石紫蘇輝石普通輝石玄武岩質安山岩。

採集地:Pachaniya下流のFumarole Negra

比較的小さな斑晶を有する斑状岩である。新鮮な部分では灰黒色を呈するちみつ岩であるが、しばしば変質~風化して灰色~灰褐色を呈する。

斑晶はかんらん石、紫蘇輝石、普通輝石、磁鉄鉱および斜長石からなるが斑晶の量はそれほど多くない。かんらん石は0.5mm以下の微斑晶として存在するが、すべて変質して蛇紋石や方解石に置き換えられており、周縁に輝石粒の反応縁をもっている。紫蘇輝石は0.5mm以下、普通輝石は最大0.8mm以下の小斑晶として認められる。磁鉄鉱はふつう0.2~0.1mmの微斑晶として認められる。斜長石は1.5mm以下の長柱状を示

し青灰長石～中性長石である。石基は塊間～間粒状組織を示し、微細な短冊状斜長石、輝石粒、磁鉄鉱、チタン鉄鉱、晶子などよりなる。

## (2) 下部層 (Lower Formation)

Lower formation は、主として Samala 川の左岸に分布し、Fig. IV-1, 地質図に示すように、しばしば断層に切られ、多くは平坦面を有する比較的低い丘陵を造っている。前述のように、Lowest formation の侵食面を被覆し、両者は明らかに不整合関係を示している。層厚は少なくとも 70 m 以上、最大 200 m に達するものと思われる。

本層の最下部には、一部に石英安山岩質凝灰角礫岩を挟んでいるが、その上位の大部分は、流紋岩質の軽石流堆積物よりなる。その大部分は陸上の堆積物と考えられる。また、少なくとも 2 枚の軽石流の flow unit が確認され、その間には、いずれも 20～数 cm の層厚を有する降下火砕岩の凝灰岩層および降下岩滓 (スコリア) 層が数枚以上が挟まり、これらの合計は約 2 m の厚さを有している。

この軽石流堆積物の本質物質の軽石の径は、最大数 cm、普通 3～1 cm であり、発泡はあまりよくない。また基質の部分は軽石質火山礫～同質火山灰で、非溶結である。軽石流堆積物には異質物質として基盤岩類や安山岩類が含まれる。

〔岩石記載〕 Lower formation を構成する火砕流堆積物の本質物質の軽石の岩石記載は次のとおりである。

標本番号: No. 73031212, 73031606, 73031607,

岩石名: 角閃石黒雲母流紋岩質軽石, 採集地: Pachamiya 川下流の噴気孔付近の右岸および下流左岸

小孔隙に富む白色ガラスの基地の中に、有色鉱物の黒雲母、角閃石が散点している。

珪晶および微珪晶として角閃石、黒雲母、磁鉄鉱、石英、斜長石を含み、珪晶の量は少ない。角閃石は最大 0.5 mm で、半自形を示すものが多く、緑色種である。黒雲母は 0.7 mm 以下で、しばしば屈曲している。磁鉄鉱は 0.1 mm 以下の微珪晶として認められる。石英は 1 mm 以下である。斜長石は 1.0 mm 以下の長柱状～短柱状を示し、中性長石が多い。石基は、ガラス質であり、少量の角閃石、黒雲母、晶子を含んでいる。

## (3) 中部層 (Middle Formation)

Middle formation は Galapago 火山の北東斜面から Samala 川の両岸部、Samala 川左岸の Balneario Aguas Amargas (温泉) 付近の小さな地窓、その上流の Balneario Fuentes Georginas (温泉) の東側から Zunil 南東方に至る比較的高い斜面一帯、および Cantel 南南東の Samala 川両岸地域にかけて分布する。

Middle formation は輝石安山岩質の溶岩と凝灰角礫岩を主とし、角閃石安山岩質の溶岩と凝灰角礫岩を従とする溶岩と凝灰角礫岩の互層である。これらの各単層の厚さは

20m前後、時に30mに達する。本層は時に凝灰岩、火山礫凝灰岩を挟み、その一部は水底堆積層である。これらは、一般に数mの層厚を有する。Middle formationの全層厚は250mを越し、最大300m以上に達するものと思われる。しばしば堅硬な溶岩類は急崖を造り、Cantel南方のSamala川右岸やPachamiya川右岸などには好露出が見られる。後者は厚さ約20~30mの3枚の溶岩流と凝灰角礫岩の互層で、ここでは最上部溶岩がかんらん石普通輝石玄武岩質安山岩で、下部の2枚は両輝石安山岩である。溶岩には顕著な柱状節理が発達し、板状節理および裂かを伴っているため、熱源の通路となり、時に貯留層として期待される。

このformationには、かんらん石普通輝石玄武岩質安山岩、かんらん石含有紫蘇輝石普通輝石安山岩、両輝石安山岩、かんらん石含有両輝石角閃石安山岩、普通輝石紫蘇輝石角閃石安山岩、角閃石安山岩の各種の岩型が存在する。

〔岩石記載〕 上述のように各種の岩石型が存在する。各岩型ごとの岩石記載は次のとおりである。

標本番号：Nos. 73031701, 73031804,

岩石名：かんらん石普通輝石玄武岩質安山岩,

採集地：Balneario Fuentes Georginas 温泉およびZunil南方Pachamiya川右岸の標高約2,420m点。

備考：No. 73031701はBalneario Fueates Georginas (温泉)産の凝灰角礫岩の本質角礫。

No. 73031804はPachamiya川右岸、標高約2,420m産の溶岩

黒色~灰黒色を呈する堅硬ちみつ岩で、1.5mm以下の斑晶を有する斑状岩である。

斑晶は、かんらん石、普通輝石、斜長石である。かんらん石は1mm以下で、周縁に輝石粒の反応線をもっている。普通輝石は1mm以下の短柱状の自形~半自形を呈する。磁鉄鉱は0.2mm以下である。斜長石は1.5mm以下の自形~半自形を示し、灰曹長石を主とする。石基は塊間組織を示し、微細な短冊状斜長石、紫蘇輝石、普通輝石、磁鉄鉱、チタン鉄鉱、晶子、ガラスなどよりなる。

標本番号：Nos. 73031604, 73031904,

岩石名：かんらん石含有両輝石安山岩,

採集地：Samala川のFumarole Grande下流の左岸およびCantel南南東約2,000mのSamala川左岸

灰黒色を呈するちみつ堅硬岩であり、2mm以下の斑晶を有する斑状岩である。

斑晶は、かんらん石、紫蘇輝石、普通輝石、磁鉄鉱、斜長石と外来結晶として稀に黒雲母を有する。かんらん石は、0.3mm以下の微斑晶として蝕食されたものを認める。しばしば変質して蛇紋石と方解石に置換されている。紫蘇輝石は0.7mm以下の長柱状~短柱状の自形結晶である。普通輝石は1mm以下の短柱状を示す。磁鉄鉱は0.2mm以下の微斑晶である。斜長石は最大2mm、普通1.5~1mmであり、曹灰長石~中性長

石である。また同源捕獲岩と思われる角閃石、普通輝石、斜長石からなる完品質の岩石を認める。石基は填間～玻璃基流品質組織を示し、斜長石、輝石粒、磁鉄鈹、晶子、ガラス、粘土鈹物などからなる。

標本番号：Nos. 72031301, 72031510; 72031601, 72031605; 72031801,  
72031802; 72031803, 72031805; 72032006,

岩石名：両輝石安山岩 採集地：Samala 川兩岸の各地

灰色～灰黒色を呈するちみつ堅硬岩であり、普通 2 mm 以下の斑晶を有する斑状岩であるが、斑晶の大きさは地域ごとに、溶岩流ごとに差があり、斑晶が小さく、1 mm 以下であまり目立たないものもある。

斑晶は紫蘇輝石、普通輝石、磁鉄鈹、斜長石などよりなる。紫蘇輝石は 1 mm 以下で、0.3 mm 以下の岩体もある。普通輝石は普通 1 mm 以下であるが、岩体によっては、2 mm に達するもの、あるいは 0.5 mm 以下のものがある。磁鉄鈹は 0.2 mm 以下のものをみとめる。斜長石は 2～1.5 mm 以下であり、曹灰長石～中性長石である。石基は填間～玻璃基流品質組織を示し、短冊状斜長石、紫蘇輝石、普通輝石、晶子、ガラス、鉄鈹物、粘土鈹物よりなる。

標本番号：Nos. 73031207, 73031905,

岩石名：かんらん石(含有)両輝石角閃石安山岩 採集地：Zunil 南南東約 2000m の Samala 川  
兩岸

灰褐色～灰黒色のやや粗粒の岩石で、2 mm 以下の斑晶を有する斑状岩である。

斑晶としてかんらん石、普通輝石、紫蘇輝石、角閃石、磁鉄鈹、斜長石からなる。かんらん石は 0.8 mm 以下で蝕食形を示し、輝石粒の反応縁を有する。紫蘇輝石は 1 mm 以下、普通輝石は 0.5 mm 以下の自形～半自形の短柱状を示す。角閃石は 2 mm 以下の自形～半自形を示し、周縁はオパサイト化しており、褐色角閃石種である。磁鉄鈹は 0.2 mm 以下の微斑晶である。斜長石は普通 2 mm 以下であるが、最大 3 mm に達し、曹灰長石～中性長石である。石基は填間組織を示し、短冊状斜長石、紫蘇輝石、普通輝石、磁鉄鈹、角閃石、晶子、ガラスなどよりなる。

標本番号：Nos. 73031101, 73031208; 73031906, 73031910, 73031912,  
73031913

岩石名：両輝角閃石安山岩 採集地：Cantel 南方約 1,600m の Samala 川兩岸

灰黒色～灰褐色のやや粗粒の堅硬岩で、2 mm 以下の斑晶が散点する斑状岩である。

斑晶～微斑晶として、普通輝石、紫蘇輝石、角閃石、磁鉄鈹、斜長石をみとめる。普通輝石は 1 mm 以下、紫蘇輝石は 1.5 mm 以下で、この両者は短柱状～長柱状の自形～半自形を示す。角閃石は最大 2 mm に達し、しばしば opacite 化している。残存している角閃石は褐色角閃石または酸化角閃石である。磁鉄鈹は 0.15 mm 以下である。斜長石は 2 mm 以下を示し、曹灰長石～中性長石である。石基は填間組織を示し、短冊状斜長石、輝石粒、磁鉄鈹、晶子、粘土鈹物およびガラスよりなる。

標本番号：No. 73031903, 岩石名：角閃石安山岩

採集地：Cantel 南方東約2,100mのSamala川左岸

灰褐色を呈する粗粒の岩石で、斑晶が3mmにも達する顕著な斑状岩である。

斑晶は角閃石、磁鉄鈹、斜長石であり、その量もきわめて多い。角閃石は3mmに達し普通2mm前後であり、しばしば緑泥石化している。磁鉄鈹は0.3mm以下である。斜長石は普通2mm~1mm、最大3mmに達し、中性長石が多い。石基は玻璃基流品質組織を示し、短冊型斜長石、磁鉄鈹、粘土鈹物、晶子およびガラスよりなる。

#### (4) 上部層 (Upper formation)

Upper formationはCantelの南方約1,000m付近のSamala川両岸に分布し、北に10°前後に緩く傾斜している。この上流側は、ただちに後述のCerro Quemado groupのCantel formationによって不整合に被覆されているので、上限は不明である。

Upper formationは、酸性安山岩質の軽石流堆積物および降下凝灰角礫岩よりなる。軽石流堆積物の本質軽石は、径10cm以下であり、異質角礫として安山岩礫を多量にもっている。降下凝灰角礫岩には、多量の軽石が含まれる。これらの層厚は数10mに達するものと推定される。

〔岩石記載〕 Upper formationを構成する軽石流堆積物の本質物質としての軽石の岩石記載は次のとおりである。

標本番号：Nos. 73031909, 73031911,

岩石名：紫蘇輝石普通輝石黒雲母含有角閃石酸性安山岩質軽石

採集地：Cantel南方約1,000m地点

小孔隙に富む白色ガラスの基地の中に、有色鈹物の小斑晶が散点している。

斑晶および微斑晶として、紫蘇輝石、普通輝石、黒雲母、角閃石、斜長石を認めるが、斑晶の量は少ない。紫蘇輝石は0.5mm以下、普通輝石は1mm以下の短柱状自形結晶として産する。黒雲母は0.8mm以下である。角閃石は1mm以下の長柱状自形結晶として産する。斜長石は、2.5mm以下の長柱状~短柱状、自形~半自形として産し、中性長石が多い。石基は、ガラス質であり、少量の角閃石、黒雲母、斜長石、晶子を含んでいる。

#### 1-2-3 層群 (Cerro Quemado group)

Cerro Quemado groupの大部分は前述のZunil groupに貫入し、一部は溶岩流や火山砕屑岩として被覆している。これらは従来から第四紀火山岩類とされたものであるが、火山形態の保存も良好であることから更新世でも比較的新しい時期に活動したものと考えられる。本域で最も新しいのは現世の1785年の溶岩流である。

これらは、大部分は、Zunil地熱帯を取り囲んで分布するが、一部は地熱帯の中にも角閃安

山岩～流紋岩質，時に輝石安山岩質の貫入岩体としてあるいは溶岩流として産する。

このCerro Quemado groupは，主として各火山体の形態に注目して予察的に次のように細分した。概ね古期のものから，Almolonga lavas，Cerro El Galapago lavas，Volcan de Zunil lavas，Cerro Ohuicham lavas，Cerro Quemado lavas，Cerro Tecum Uman lavas，Cantel formation，Cerro La Pedrera lavas，Zunil water-fall lavas，1785 lava (Cerro Quemado)に細分したが，これらの噴出順序は，なお相当長期の詳細な調査によって，これらをさらに細分して，結論されることであろう。

#### (1) Almolonga 溶岩類

Almolonga lavasは，Zunil地熱帯の西方にある巨大なドーム状のCerro Quemado火山体の基盤を構成している角閃石安山岩体である。この溶岩自身も，巨大なドーム状の火山岩体で，その径はNS方向に約5 Km，EW方向に約5 Kmである。

このドームの一部は，Zunil groupをほとんど垂直方向に切っている。すなわち，Los Banós (Almolonga)温泉から南流する沢と，Samala川の合流点のすぐ東側のSamala川右岸においては，Zunil groupのMiddle formationの輝石安山岩溶岩と凝灰角礫岩の互層と，本岩類は走向N30°W，傾斜NE85°のほとんど垂直な接触面を示している。この地点のAlmolonga lavaは，この面にほぼ垂直，したがって水平に近い柱状節理が見事に発達している。

このAlmolonga lavasは，Cerro Quemado lavas，1785 lava，Zunil water fall lavas，Cerro El Galapago lavasによって貫入または被覆される。

#### 〔岩石記載〕

標本番号：Nos. 73031204，72031205，72031206

岩石名：普通輝石紫蘇輝石含有角閃石安山岩

採集地：Los Banos (Almolonga)温泉およびその下流付近

灰色～灰白色の基地の中に，比較的大きな斜長石，有色鉱物の斑晶をもつ，やや粗粒の斑状岩である。

斑晶および微斑晶として普通輝石，紫蘇輝石，角閃石，磁鉄鈹および斜長石を認める。普通輝石は0.5 mm以下，紫蘇輝石は0.8 mm以下の短柱状自形結晶が多い。角閃石は2 mm以下の長柱状自形結晶として産し，緑色角閃石種であり，周縁がオパサイト化している。磁鉄鈹は0.3 mm以下である。斜長石は最大2 mm，普通1～1.5 mmの長柱状～短柱状自形結晶が多く，中性長石が多い。石基は玻璃基流晶質組織を示し，角閃石，輝石，磁鉄鈹，珪酸鈹物，斜長石およびガラスよりなる。

#### (2) Cerro El Galapago 溶岩類

Cerro El Galapago lavasは，El Galapago火山体を形成する。この火山は両輝

石安山岩質の溶岩流と凝灰角礫岩が互層した成層火山体である。その山頂部に Las Majordas を中心とする火口を有し、その火口より溶岩および火山噴出物を抛出したものと推定される。

El Galapago 火山体は、調査地域外の南西に隣接する Santa Maria 火山の約 4 Km 東山麓に位置し、その寄生火山とも考えられる。さらに検討を要する。

El Galapago 火山体は、南北 2.5 Km、東西 2.5 Km 程度の径を有し、火口の径は約 1 Km の円形である。この火山体は Almolonga lavas に対して貫入関係にあると考えられ、Volcan de Zunil lavas, Cerro Chuicham lavas, Cerro Quemado lavas などとほぼ同時代と推定される。

〔岩石記載〕

標本番号：No. 73032007, 岩石名：紫蘇輝石普通輝石安山岩

採集地：La Estanica de la Cruz 北方のトンネル南口の溶岩

灰褐色～灰黒色を呈するちみつ堅硬岩であり、2 mm 以下の斜長石と輝石の斑晶を有する斑状岩である。

斑晶は紫蘇輝石、普通輝石、磁鉄鈹、斜長石からなる。紫蘇輝石、普通輝石ともに 0.5 mm 以下の短柱状自形結晶が多い。磁鉄鈹は 0.2 mm 以下の自形粒状結晶である。斜長石は 2 mm 以下の長柱状～短柱状の自形～半自形結晶である。石基は hyalopilitic texture を示し、短冊状斜長石、紫蘇輝石、普通輝石、磁鉄鈹珪酸鈹物、粘土鈹物およびガラスなどよりなる。

### (3) Volcan de Zunil 溶岩類

Volcan de Zunil lavas は、Balneario Fuentes Georginas 温泉東方に標高約 3,000m および約 2,800m の 2 つの溶岩円頂丘を造っている。角閃石黒雲母安山岩の火山体である。これらは、未調査の Zunil 火山の主峰とは、一見別個の火山体を構成しているが、恐らくいずれも溶岩円頂丘と考えられるので、仮にこの名称で呼んでおく。

この火山体は、Zunil group に貫入したドームと考えられるが、3,000m 峰ドームから一部は溶岩流として北西方向に流下し、Zunil group の Middle formation を被覆している。

その他の溶岩流との関係は、直接することがないので不明であるが、この火山体も比較的良好な火山形態を残していることから、前述のように El Galapago 火山などとほぼ同時代の活動と推定している。

また、3,000m 峰の北西斜面の標高約 2,740m 付近には、現在なお盛んに活動中の硫気孔があり、最近まで、硫黄鉱山として稼働された形跡がある。

〔岩石記載〕

標本番号：Nos. 73031501, 73031502, 73031504 (以上 3,000 m 峰ドーム),

No. 73031503 (2,800m峰ドーム)

岩石名：かんらん石普通輝石含有角閃石黒雲母安山岩

採集地：Balneario Fuentes Georginas (温泉)東方 3,000 m峰の北西斜面の標高約 2,700 mおよび 2,500 m付近。2,800 m峰ドームの西斜面の標高約 2,650 m付近。

灰色～灰白色の粗粒の斑状岩で、斜長石および有色鉱物が顕著な岩石である。

斑晶として、石英、かんらん石、普通輝石、角閃石、黒雲母、磁鉄鉱、斜長石などの多くの種類の斑晶をもつのが特徴である。石英は 0.7 mm 以下の融食形を示す。かんらん石は 1 mm 以下の融食形で外来結晶と思われる。普通輝石は 0.3 mm 以下の短柱状自形結晶を示す。角閃石は 1 mm 以下の長柱状を示し、褐色角閃石種である。黒雲母は 1 mm 以下の結晶である。磁鉄鉱は 0.3 mm 以下を示す。斜長石は 2 mm 以下の長柱状自形結晶を示し、中性長石を主とする。石基は玻璃基流品質～隠微品質組織を示し、角閃石、珪酸鉱物、斜長石および多量のガラスよりなる。また、かんらん石角閃石微斑状岩様の外来物質が多量に見い出される。

#### (4) Cerro Chuicham 溶岩類

Cerro Chuicham lavas は Cantel の南東方に分布する、いずれも未調査の Jolom (2,890m), Chuicham (3,278m), Chonajtauyub (2,947m) の 3 つのドームを一括したもので、これらは遠望してドーム地形がよく確認される。

#### (5) Cerro Quemado 溶岩類

Cerro Quemado lava は Almolonga lava に貫入する黒雲母角閃石石英安山岩のドームで、Cerro Quemado 火山体の主峰である Candelaria 周辺にいくつかのドームが複合された地形を示している。一括して Cerro Quemado lavas と称する。これは東西約 4 Km、南北約 5 Km の巨大なドームで、Cerro la Pedrera lavas に貫入され、1785 lava に被覆されている。

〔岩石記載〕

標本番号：No 73031201, 岩石名：黒雲母角閃石石英安山岩

採集地：Banos Termales Los Vahos

灰白色の基地に斜長石と有色鉱物の斑晶が顕著な粗い斑状岩である。

斑晶として、黒雲母、角閃石、磁鉄鉱、石英、斜長石を認める。黒雲母は 1 mm 以下の板状である。角閃石は 1.5 mm 以下の長柱状自形結晶であり、褐色角閃石種で、周縁がオパサイト化しているものもある。石英は 1 mm 以下の融食形～高温石英の形である。斜長石は最大 3 mm、普通 1～2 mm の長柱状自形結晶で、中性長石を主とする。石基は、隠微品質～玻璃基流品質組織を示し、黒雲母、角閃石、石英、斜長石およびガラスよりなる。

#### (6) Cerro Tecun Uman 溶岩類

Cerro Tecun Uman lavas は、Quezaltenango 市のすぐ東方に位置する標高約

2,600mのTecun Uman (El Baul) のドームを構成し、両輝石角閃石安山岩質である。このドームは、東西に長く、長径 1.5 Km , また短径は南北 0.5 Km である。このドームのすぐ南側に、後述の Cerro La Pedrera lavas によって構成される 6 つのドームがあるが、これらとの関係は明らかでない。

〔岩石記載〕

標本番号: Nos. 73031103, 7303114.

岩石名: 普通輝石紫蘇輝石角閃石安山岩

採集地: Cerro Tecun Uman の東および南中腹

灰色～灰褐色の基地の中に、斜長石、角閃石の斑晶が顕著な粗粒の斑状岩である。

斑晶として、普通輝石、紫蘇輝石、角閃石、磁鉄鉱および斜長石を認める。普通輝石と紫蘇輝石は、何れも 0.5 mm 以下の短柱状自形結晶である。角閃石は 2 mm 以下の長柱状自形結晶で、褐色角閃石種であり、しばしば周縁はオパサイト化しており、時には酸化角閃石になっている。磁鉄鉱は 0.2 mm 以下である。斜長石は 1.5 mm 以下の長柱状自形結晶であり、曹灰長石～中性長石である。石基は玻璃基流晶質を示し、紫蘇輝石、普通輝石、角閃石、磁鉄鉱、珪酸鉱物、粘土鉱物およびガラスよりなる。また角閃石散斑岩質の外来岩石を包有している。

#### (7) Cantel 層

Quezaltenango市から Cantel および Zunil 周辺に連続性のよい、ほぼ水平層を示す火山噴出物起源の湖成堆積層が認められる。これを Cantel formation と呼ぶ。

恐らく本層は、現在の Quezaltenango 盆地を造った火山性陥没構造に伴って生成された湖の堆積物と考えられる。このことは、盆地のほぼ中央に、 $-160\text{mgal}$  の著しい負の Bouguer 異常が認められ、この盆地の基盤岩類は、すでに Ⅱ-3 (Fig. Ⅱ-3) で述べた Guatemala-Quezaltenango 陥没構造の中でも、一段と沈降した地域を示すことから推定される。

Cantel formation には、凝灰岩層、凝灰角礫岩層、礫層、軽石凝灰岩層、火山礫凝灰岩層、軽石質火砕流堆積層など各種の水底堆積層が含まれる。一部に珪藻土層を挟んでいる (Williams, 1960)。また一部には陸上堆積物らしく見える軽石流堆積物も存在する。

〔岩石記載〕 Cantel formation に含まれる軽石流堆積物中に含まれる本質物質の軽石の岩石記載は次のとおりである。

標本番号: No. 73031902, 岩石名: 角閃石黒雲母流紋岩質軽石

採集地: Zunil Samala 川右岸

小孔隙に富む白色ガラスの基地の中に、有色鉱物の角閃石、黒雲母が散点している。

斑晶および微斑晶として、角閃石、黒雲母が磁鉄鉱、斜長石を認める。角閃石は 1 mm 以下短柱状自形結晶

で、緑色角閃石種である。黒雲母は0.7 mm以下の板状結晶である。斜長石は1.3 mm以下の短柱状自形結晶で、中性長石～灰曹長石である。磁鉄鉱は0.1 mm以下である。石基は大部分がガラスであるが、少量の角閃石、黒雲母、斜長石、晶子を含んでいる。

#### (8) Cerro La Pedrera 溶岩類

Cerro La Pedrera lavas は、流紋岩～石英安山岩質の溶岩で、今回の調査地域の各地に貫入して、大小の溶岩円頂丘、貫入岩体を造り、その一部は溶岩流となっている。これらは非常に新しい火山活動を示し、またIV, 1-2-2, (1)で若干触れたように、しばしば本域の地熱帯に貫入して、地下深部からの熱源が上昇する通路と密接な関係を有するものと考えられる。このため、さらにその産状や成因などを、将来細かく究明する必要がある。

これらの溶岩類はその分布区域 (Fig IV-1) によって2大別され、①Quezaltenango市から東方に続く、それぞれ独立した7つのドーム群と、②Zunil地熱帯において大略南北方向に連なる4つの(あるいはそれ以上)貫入岩体群であり、後者の一部には溶岩流も認められる。

後者はZunil groupを、前者はCerro Quemado groupのAlmolonga lavas, Cerro Quemado lavasに貫入している。Cantel formationとの関係は、なお確認する必要があるが、Cantel formationの一部に、ドームの貫入によって押し上げたような構造が見出されることから、Cantel formation堆積後の活動と推定している。さらに、これらのlavasはCantel formationに含まれる火砕岩と岩質的に酷似することから、両者は密接な関係を有するものと推定している。

Quezaltenango市から東方に連なるドーム群は、西端のLos Banos温泉北側の2,740 m峰から順次東方にLa pedrera峰(2,560 m), 2,665峰, 2,552 m峰, 2,540 m峰, Cerro Huitan峰(2,690 m), 2,600±m峰と連なる。これらは、ほとんど一直線上に、ほぼ東西方向に並んでいるので、これは同じ方向の地下の構造を暗示している。大局的にいえば、Guatemala - Quezaltenango 陥没構造の方向と一致し、Quezaltenango盆地の南縁を走る構造線の一部を表現するもので、このような弱線に沿って、これらのドーム群が貫入したものと推定される。これらのドームは、最大2 Km×2 Km, 最小400m×400m, 平均1Km×1Kmの大きさを有し、標式的な溶岩円頂丘の地形がよく保存されている。

本域南部のZunil地熱帯を貫くものは、前述のSamala川とPachamiya川の合流点の小ドーム(IV, 1-2-2, (2)), およびその東にZunilからFuentes Georgias温泉間に分布する3つの貫入岩体が認められる。後者の3岩体の東縁は、ほぼ南北に直線を示していることから、この線はこれらの岩体の貫入と関係のある地下の構造線(弱線)を反映して

いるかもしれない。すでに述べたように(Ⅱ-3, Ⅱ-5), 南北方向の構造線は, Guatemala City Graben の両側を境するN-S断層などと密接な関係があり, 注意を要する。

上記合流点の小岩体の両側には, 本域でもっとも優勢なFumarole GrandeとFumaroles Negra地熱微候が認められる外, Zunil流の東方の岩体およびFuentes GeogiasとAguas Amargasの両温泉を含む岩体にも, 同じく噴気, 温泉, 変質帯などが作っている。また, これらの岩体自身も時に変質し, その作用の一部は初生(自)変質と考えられる。このように, これらの岩体は本域の地熱系と直接の関係があり, これらの岩体の究明は重要な課題の1つである。

なお, Aguas Amargas温泉谷の両岸は, その東方Fuentes Geogias温泉付近に貫入し, この付近から流出降下した溶岩流と推定しているが, その他は, ほとんどが溶岩ドームを造る貫入岩体である。

〔岩石記載〕 Cerro La Pedrera lavasは流紋岩, あるいは流紋岩と石英安山岩の中間的な酸性岩であるので, 一括してrhyodaciteと呼称することにする。しかしながら, このような酸性岩の岩相はその産状などによって, Table IV-2に示すように非常に変化がある。これらを一括して以下に説明する。

Table IV-2で示したように, 各種の岩型があるが, 一般的に白色~灰白色, 時淡黄白色~淡黄褐色を示すガラス質岩で, 少量の有色鉱物が散点する。多孔質および緻密質の2種に分けられる。

斑晶として, 普通輝石, 紫蘇輝石, 角閃石, 黒雲母, 磁鉄鉱, 斜長石, 稀に石英を認める。輝石は兩種とも, きわめて少量で0.2mm以下である。角閃石は普通1mm以下の長柱状を示し, 酸化角閃石, 緑色角閃石, 褐色角閃石と岩体によって異なる。黒雲母は1mm以下で板状を示す。磁鉄鉱は0.3mm以下である。これらの有色鉱物の何れかを欠くもの, また変質して残存しないもの等各種ある。斜長石は, 2mm以下で, 新鮮なもの, あるいは粘土鉱物化しているものなどあり, 中性長石~灰質長石である。石英は稀に1mm以下のものとしてみとめられる。石基は大部ガラス質であり, 多孔質な軽石質のもの, spherulitic textureを示すもの, 隠微晶質, 微珪長質組織を示すものの各種がある。

#### (9) Zunil Water - fall 溶岩類

Zunil water - fall lavasは, Quemado火山の南東山麓の一隅から流出し, Samala川に向かってほぼ扇状に拡がり, 主にZunil groupを, 一部はCantel formationを被覆した非常に新らしい(多分, 有史時代)溶岩流である。この溶岩流は, Zunil groupおよび急崖を造って突出するCerro La Pedrera lavasなどから形成された, ほぼ現在のSamala川峡谷の左岸にまで達していたものと推定される。その結果, Samala川は一時この溶岩流に堰止められ, 現在のZunil流から上流のZunil部落一帯には堰止湖を形成し, この湖底にはさらに新期の湖底および沖積層が貯えられたものと考えられる。その後, Samala川の激しい侵蝕によって現在のZunil流や, この下流のV字状

Table IV-2 Rock type of Cerro La Pedrera Lavas

Sample No.	Rock Type (rock name)	Locality
73031202	Au Hy bg Bi Hr glassy RD	2740 m Peak
73031203	Au bg Bi Hr glassy RD	Cerro La Pedrera
73032001	Au Hy bg Bi Hr spherulitic RD	2600 m Peak
73031213 73031214 73031604	Au Hy bg Hr Bi spherulitic RD altered RD	Lower reaches of Pachamiya River Left side of Samala River
73031216 73031511	Bi RD	Zunil NWW
73031507 73031508 73031509	Au Hy Bi bg Hr glassy RD Au Hy Bi bg Hr spherulitic RD	Tzanmucubal W
73031505 73031608 73032002 73032003 73032004	(Q Hy) Au bg Hr Bi glassy RD ~ Au bg Hr Bi spherulitic RD ~ altered RD	Balneario Fuentes Georginas ~ Balneario Aguas Amargas

Au: augite                      Bi: biotite                      Hr: hornblende  
 Hy: hypersthene              Q: quartz                      RD: rhyodacite  
 bg: bearing

の峡谷が形成されている。Williams(1960)も同様のことを詳しく報告している。

なお、遠望するとこの溶岩流は、かなり広いほぼ平坦な台地地形を構成し、一応発電所の敷地に適すものと考えられる(後述, VII)。しかし、この溶岩流は、主として暗灰色の塊状溶岩より成り、近接すると地表面にかなりの凹凸が見られる。溶岩流の厚さは最大約100~150mと推定されるが、その基底は一般に緻密な溶岩より成る。Zunil滝の落下口から以下約20~30m間は、この緻密溶岩に相当する。

〔岩石記載〕

標本番号: Nos. 73031102, 73031302, 73031304, 73031305, 73031513

岩石名: 黒雲母角閃石石英安山岩, 採集地: Zunil water - fall 付近

灰白色~暗灰色の基地の中に、斜長石、角閃石が目立つ、粗い斑状岩である。

斑晶として黒雲母、角閃石、磁鉄鈦、石英、斜長石を認める。黒雲母は0.5mm以下で周縁はオパサイト化している。角閃石は1.3~1mm以下の長柱状~短柱状が多く酸化角閃石で、磁鉄鈦は0.3mm以下である。石英は1.2mm以下の融食形~円形を示す。斜長石は2mm以下の長柱状~短柱状自形結晶が多く、中性長石が多い。石基は玻璃基流晶質を示し、短冊状斜長石、角閃石、黒雲母、磁鉄鈦、粘土鉱物、晶子、ガラスよりなる。またこの岩石には、外来結晶の斜長石、普通輝石を認め、また外来岩石としての微斑巔岩質のオフィテック組織を示す斜長石輝石岩が含まれる。

(10) 1785年溶岩

この溶岩は、Williams(1960)によると、1785年のQuemado火山の最終噴出時に流出した塊状溶岩で、角閃石黒雲母安山岩とされているが、直接筆者らは観察していない(註. Gall, F. 1965の最近の報告によると、Quemado火山の最終の噴出は1818年で、この溶岩はその噴出によるものとされている)。

1-2-4 沖積世堆積物

沖積層はAlmolonga, Cantel, Zunil付近の山間低地およびSamala川の兩岸や下流の扇状地の堆積物の外、かなり急峻な斜面にしばしば崖錐や地すべりなどの堆積物が認められる。これらは、礫、砂、粘土の外に、しばしば最近の火山噴出物を挟んでいる。

## 2 地質構造と地熱系

Zunil 地熱帯は、非常に大きく見ると、すでにしばしば述べた Guatemala-Quezaltenango 陥没構造および、その中でも一段と盆状に沈下していると予想される Quezaltenango 陥没構造（火山性陥没構造？）の南縁に位置し、これらの大構造に支配されている。特に東西系の構造は、この構造を表現するものと推定される。

Zunil 地熱帯の地質構造に直接関係する主なものは、①、上記の陥没構造を造る基盤の花崗岩類の地下分布状況、②、これらを被覆する第三紀 Zunil group の層序と構造、③、これらに貫入し、被覆する第四紀 Cerro Quemado group の産状や火山活動史、④、これらの地質系統と断層系との関係などである。

これらを短期間の調査結果から解明することは難かしいが、この間に推定された注目すべき地質構造と、本域の地熱系との関係、その他将来解明すべき問題点などを以下、次の添付図を利用して予察的に纏めておく。

しかし、これらは次の精査によって、かなり修正が必要となるかもしれない。

Fig. IV-1 Geologic Map of Zunil Geothermal Area.

Fig. IV-2 Photo-Geologic Map of Zunil Geothermal Area. (by Kokusai Geosurveys Co. Tokyo, April 1973)

Fig. IV-3 Explanatory Diagram of Zunil Geothermal Area.

注. (1). Fig. IV-2 は帰国後に作成されたものである。

正確な地形補正を省いたので、かなりの誤差がある。また、北部は、写真が不足したため、十分解読されていない。

(2). Fig. IV-3 は説明の便宜上複雑な Zunil 地熱帯の構造を、著しく簡単にして模型的に描いたものである。地熱帯を上流から見た、概ね NW-SE 断面である。

(1) 本域の主な地熱貯留層として期待されるのは、前記の陥没構造を埋めて、基盤の花崗岩類を被覆する Zunil group である。そのため、この group の賦存状況は、地熱帯地下の基盤の花崗岩類の分布や構造に支配される。

花崗岩類は、1-2-1で述べたように、Zunil 地熱帯ではすべて地下に分布し、これらの露頭は本域周辺の東または北東方に、大小の地窓を造って散在している。また Gantel 東方の Atitlan 開発計画の 2本の試錐 (Electro-Watt Co. 1971)で、地表から 250m および 320m の深度で確められている。

これらの資料から、地熱帯の地下でも比較的浅く、基盤に達する可能性があり、これを確かめることが重要な課題となる。

Fig. N -2 Photo-Geologic Map of Zunil Geothermal Area, Guatemala

(by Kokusai Geosurveys Co. Japan, April, 1973)

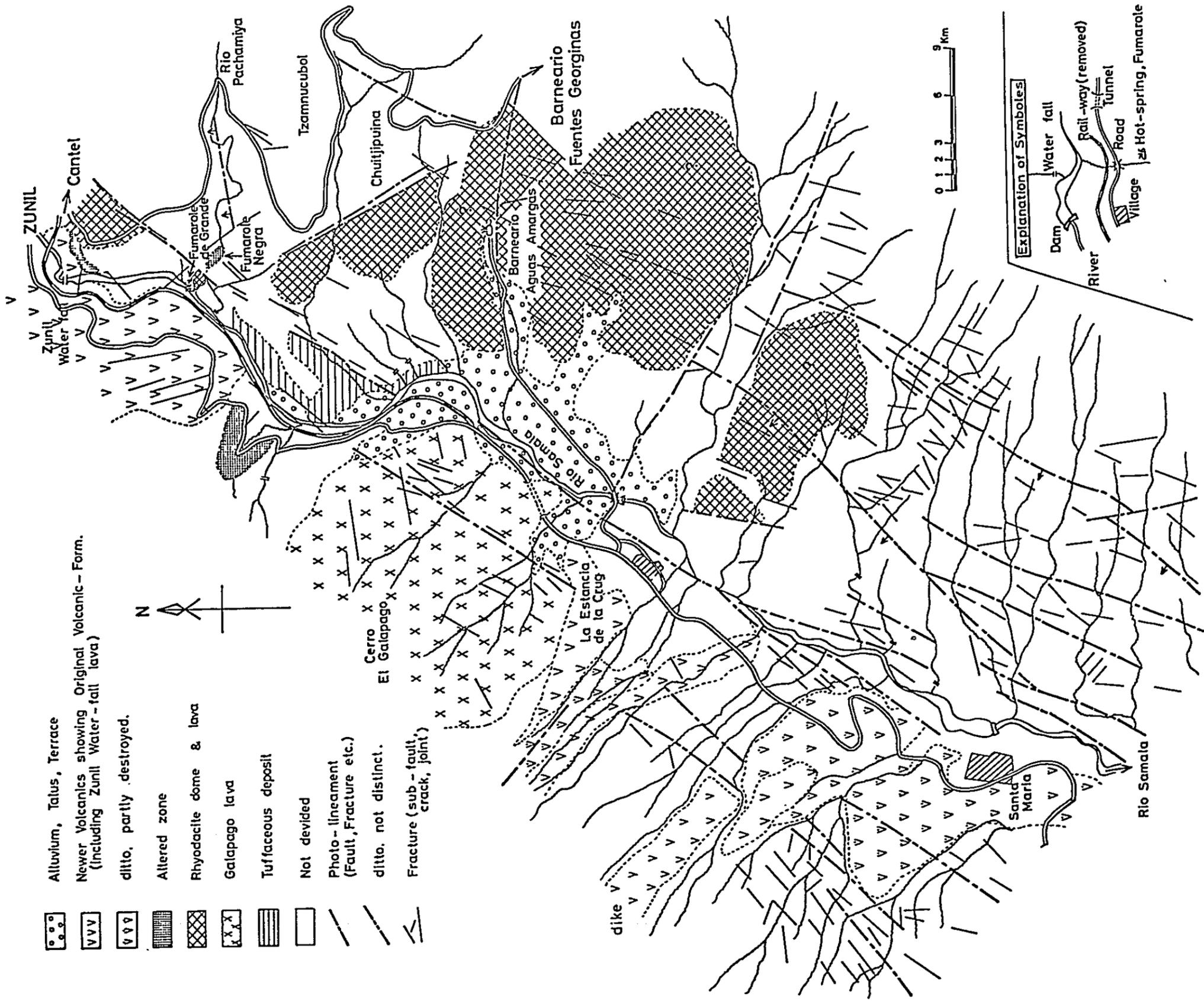
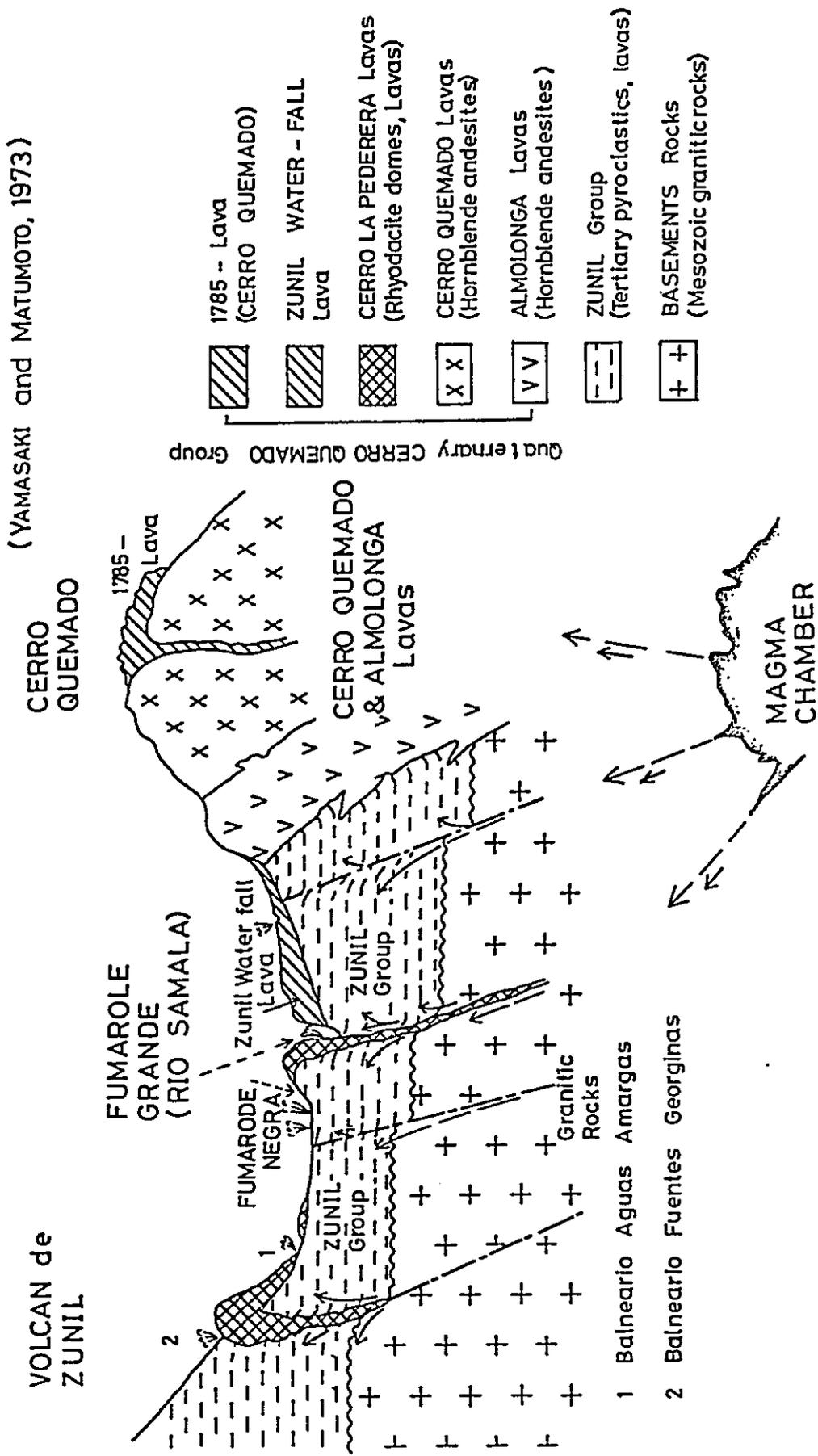




Fig. N - 3. Explanatory Diagram of ZUNIL Geothermal Area, Guatemala



一般に花崗岩類は、よく発達する破碎帯などを伴う特殊な場合を除き、地熱貯留層には不適当とされているので、花崗岩類が地熱帯の地下に浅く分布することは望ましくない。

なお、一般にこの地熱帯における地熱貯留層は、Zunil group 中の透水性に富む凝灰角礫岩や凝灰岩などで、これを被覆する透水性に乏しい緻密な溶岩類が帽岩となっているものと考えられる。時に節理、裂隙に富む溶岩類も貯留層となる。また、しばしば Zunil group は、基盤の花崗岩類の表層風化部を不整合に蔽うているものと推定されるので、不整合面直下の透水性に富む花崗岩の風化帯や風化残留土などが貯留層となっていると考えられる。要するに、透水度が異なる岩石、formation などの境界や不整合面が貯留層として注意が必要となる。

(2) 本域の Zunil group は全体的に北に向ってゆるく傾斜し、Fig IV-1 に示すように Samala 川に沿う区域に北に向うほど、より上位の formation が露出している。したがって、もっとも優熱な Fumaroles Negra や Grand を含む地熱帯の南部には、逆に lower formation が露れ、このため基盤までの深度が浅くなっている。

特に、Samala 川左岸 Fumarole Negra には、本域の lowest formations が小露出し、その周辺には広く lower formation が分布しているので、本域で基盤までの深度が最も浅いことを示している。Zunil group に優熱な熱源を貯えるためには、その帽岩の性質にもよるが、一般に地下に相当な厚さが望ましいので、基盤が浅いことは将来の問題である。しかし、Samala 川の Fumarole Grande から右岸地区には、後述の断層系に隔てられて、middle formation が露出しているので、基盤は次第に深くなるものと予想され、この点では好条件を示している。

ただし、本域の地表で確められる Zunil group は全層厚約 500 m で、その上限と下限は未だ明らかでない。このため、Fumarole Negra の lowest formation の露頭以下、基盤までの厚さは現在全く予想できない。

将来、直接には試錐によって、その他物理調査などによって、明確にされるべきであろう。

また、前に述べた本域外に散在する花崗岩類と、これを被覆する Zunil group の全層の層序を確めて、本域と対比することも有効な手段の 1 つとなると考えられる。なお、Zunil group と対比される Guatemala の第三紀火山岩類の全体の厚さや詳しい層序は今日まで明確でないが、前記の Atitlan project の試錐 (Electro-Watt Co 1971) で確められた厚さは、最大約 850 m と報告されている。恐らく、Zunil group の全層厚は、1,000 m 以上におよぶものと予想している。

(3) Zunil group に続いて、本域周辺には第四紀の Cerro Quemado group の火山活動が起り、主に安山岩類や rhyodacites などから成る大小の溶岩ドーム、成層火山、溶岩流

などが形成された(1-2-3)

この中、地熱帯の西方に位置し、主に Cerro Quemado lavas や Almolonga lavas より成る巨大な溶岩ドームを形成する Quemado 火山は、最近まで活発に活動を続け、非常に新らしい Zunil Water-fall lava や 1785 lava を流出している。また、Quemado 火山の南には、今日なお引続き活動中の Santiaguito ドームを伴う Santa Maria 火山が隣接することなどから見て、熱源となるマグマ溜りは、Fig. IV-3 で示すように、地熱帯の西方地下にあると予想するのが常識的であろう。

地熱流体の主な上昇通路は、この図に示すように、次に述べる断層系およびこれに伴われる破砕帯と考えられる。また、このような通路に沿って、1-2-3で詳しく述べた Cerro la Pederera lavas の粘性の高い rhyodacites が貫入して、各所に独立した大小のドームを造り、その貫入時の圧力によって、これら岩体の周辺には、さらに割目を発達させて、現在の地熱活動の有力な通路の一部となっているものと考えられる。その例として、Fumaroles Grando と Negra が、rhyodacites の小ドームの両側に位置し、その他、Aguas Amargas, Fuentes Geoginas, および Zunil 流東方の温泉、噴気孔、変質岩がいずれも rhyodacite のドームと密接な関係を有することは、すでに述べた通りである。

(4) Zunil 地熱帯の断層系は、今回の短期間の調査で結論することはできないが、この間に主に推定による断層を Fig. IV-1 に、また帰国後に航空写真から判読された断層および断裂系を Fig. IV-2 に示した。これらから明らかなように、本域では NE-SW 系の断層(又は断裂)がよく発達し、またこれより数の少ない NW-SE 系のものも認められる。

Fig. IV-1 に示した Zunil 部落から南方の NE-SW 系の 4 つの断層は、いずれも NW 側が、Quemado 火山の方に階段状に落ちている。これらは、主として、Zunil group の lower formation が造るやや平坦な台地面や同じく middle formation の溶岩台地が断層に切られて、高低差が生じていることから推定したものである。断層の落差はいずれも約 100m 以上である。ただし、Zunil 滝の南側右岸から、 $N65^{\circ}E$  に走り、Zunil 部落に入る断層は、明らかに Zunil water-fall lava を切り、落差は約 30m である。また Fumaroles Negra と Fumarole Grande を境する断層に沿って貫入したと推定される Cerro la pedera lava のドーム(前述 1-2-3)は、この NE 断層系とほぼ平行し、その一部と考えられる  $N35 \sim 55^{\circ}E$  に走る小断層に切られている。

ほぼ NE-SW 方向に、平行して走るこれらの階段状の断層群に支配されて、Samala 川の Fumarole Grande を含む右岸区域が、左岸に比較して、その基盤が深くなっているものと推定される。

ただし、Cantel 南方で、Samala 川右岸に露出する主に安山岩溶岩より成る断崖を切る

NE-SW断層だけは反対にSE側落ちを示している。

NW-SE系の断層は、Fig IV-1, 地質図では2条推定された。1つはAguaus Amargas 温泉より、さらに南方をN70~75°Wに走るN落ち断層で、これはZunil groupの middleおよびlower formationを境することから推定された。他の1つは、Zunil 部落上流側で、N60°W方向を走る予想断層である。

地質図の断層系と、Fig IV-2の航空写真による断層系は、比較的よく一致する。しかし、細かく注意すると、NE-SW系断層は、地質図ではN50~60°E方向を示し、航空写真からは、N35~50°E方向が優勢で若干のづれがある。これらは、将来の調査で細かく究明されるべきであろう。

また、Williams(1960)によると、Zunil 火山群とSamala川との中間を、既ぬSamala川に平行してNNEに走る大断層を推定し、すでに述べたGuatemala City地溝と同じ傾向の断層運動としている。これと同様な断層、や断層系の傾向が、今回作成したこの2つの図にも表現されているので、注意が必要である。

なおすでに、1-2-3で述べたようにCerro la pederera lavasが造るドームや貫入岩体がQuezaltenago市南側では東西方向に、またZunilから南方のFuentes Amargas温泉間では、ほぼ南北に配列し、これらはそれぞれ東西および南北に走る地下の構造線を暗示し、これらの岩体はその線に沿って貫入したものと推定される。

### 3. 熱水変質

Zunil, Moyuta およびAhuachapanの各地熱帯には、噴気、硫気、温泉、変質帯などの数多くの地熱徴候が認められ、これに伴って種々の変質岩が見られる。これらの変質岩の詳細な研究によって、地下の熱水の温度、圧力、化学組成、上昇機構などが究明され、また地熱帯の地質構造、規模の推定など直接、間接に探査に応用される。今回は、忙がしい地質調査中に断片的に集められた試料について、室内実験を行い各地熱帯の一般的な特徴を明らかにすることができた。将来、なお細かく検討が必要である。

帰国後に、採集した試料は、色調、硬度、鉱物組合せ、浸出液のpH値<sup>※</sup>について詳しく検討し、その結果は第IV-3表にまとめている。なお、この中の典型的な変質岩類のX線回折パターンは、Fig IV-4に示している。

これらの実験の結果、Zunil, Moyuta およびAhuachapan(El Salvador)の各地熱帯の変質岩の多くは、典型的な「酸性型」の熱水変質作用を蒙っており、その特徴的な変質鉱物としてクリストパライト、石英、明パン石、カオリンなどを含んでいることが確かめられた。こ

Table IV - 3 Mineral Constituent of Altered Rocks from the Geothermal Areas, Zunil, Moyuta and Ahuachapan  
(T. Yamasaki, Y. Matsumoto, and M. Hayashi, 1973)

Locality	Specimen No.	Color	Hardness	Mineral Constituents												pH*					
				Am	Cr	Qu	Al	Ka	Mo	Ch	La	Wa	Fl	Un	other minerals						
Zunil	Fumaroles Grande-Negra	73031209a	reddish brown	soft	○	○	○										An	3	} Altered rocks formed in the Lowest formation of Zunil group		
		73031209b	pale brown	soft		⊙											An	1			
		73031209c	white	hard		⊙														4	
		73031211	very pale brown	medium		⊙														4	Altered from basaltic rock
		73031213	medium gray	hard	⊙															3	Altered rock from rhyodacitic tuff breccia in a fumarole
		73031214	pinkish gray	medium		○								○						3	Altered rock from rhyodacite in a fumarole
		73031215	very pale brown	medium		○		⊙												3	Altered from intruded glassy rhyodacite
	Sulphur Mine	73031502	very pale brown	soft	⊙												An	1	} Altered rocks near the Sulphur Mine		
		73031502	light gray	soft	○	○	○													1	
	Fuentes Georginas	73031505a	white	soft	⊙		○												1	} Altered rock in a fumarole	
		73031505a	medium gray	medium	⊙	○													1		
		73031506	white	soft				⊙	○										1		
	Paxmux Fumarole	73031512a	white	soft		⊙													4	} Altered rock from rhyodacite in a fumarole of Zunil water fall	
		73031512b	light gray	soft		○		○						⊙					1		
Moyuta	Guinea	73030503a	yellow	soft		○				○!					○		Gp	1	} Altered rock near fumaroles		
		73030503b	yellowish gray	soft		○					⊙				○		Gp, Pt	2			
		73030503c	white	medium				○	○											3	
		73030503d	light gray	soft										⊙	○					2	Mud in a fumarole
	Marucucy	73030504a	grayish pink	soft	⊙	○	○												3	Ditto	
		73030504b	dark brown	soft							○						Gp, St		3	Ditto	
	Azulco	73030601a	grayish green	hard			○				○!				⊙		Ca, Pt	6	} Altered rocks at 900 m in altitude		
		73030601a	white (vein)	medium			⊙				○				○					6	
		73030601b	medium gray	hard							○				⊙		Ca			6	
		73030602	grayish green	medium							○	○			○	○	Pt			7	} Ditto at 880 m in altitude
73030602		white	soft							○	⊙			○		Ca		7			
73030604		very pale brown	soft							○	⊙					Ca		6-7		Ditto at 820 m in altitude	
73030605	white	hard			⊙										Ca			Ditto at 740 m in altitude			
Ahuachapan	73030701	white	soft		⊙			○								Pt		3	} Mud in a fumarole		
	73030701	light gray	soft	⊙	○	○	○											3			
	73030702	grayish green	medium								○		⊙	○		Ca		7		Core of No. 10 well	

⊙ predominant  
○ common  
○ rare

Al: alunite  
Ka: kaolin

Am: amorphous  
La: laumontite

An: anatase  
Mo: montmorillonite

Ca: calcite  
Pt: pyrite

Ch: chlorite  
Qu: quartz

Cr: cristobalite  
St: stibite

Fl: feldspar  
Un: unknown

Gp: gypsum  
Wa: wairakite

\* The pH value of distilled water in which rock powder is immersed.



の中には、多量のクリストパライトや石英を含むいわゆる珪化岩を混えていることは、地下に優勢な深部熱水の存在する可能性を示唆している。

注※ 蒸溜水に変質岩の粉末を没した液の pH 値。変質をもたらした熱水液の pH 値に近い値を示すものと考えられる (HAYASHI, 1973)。

なお Moyuta の Azulco (露頭) および Ahuachapan (試錐コア) の変質岩の一部には、中性～弱アルカリ性の深部熱水の存在を暗示するような沸石類 (ワイラカイト, 濁沸石) が生成している。しかし, Zunil 地域では, これらの沸石類は認められず, 今回採集した変質岩はすべて酸性型の変質作用によって生成したものと考えられる (ただし, pH 値 9.0 で, Cl 含量約 700 ppm. を示す食塩泉型の深部熱水が, 間欠泉として噴出している Fumarole Grande の変質岩は, 今回は採取できなかった)。特に, 硫黄山付近の変質岩は, 浸出液の pH 値が異常に低く, いずれも 1 前後であることが注目された。

一般に, 深部熱水が中～弱アルカリ性の場合でも, 上昇する過程で降下地下水や空気の酸化作用により, 地下浅所および地表部では, 酸性から強酸性へと変化することが多い (日本の大岳, ニュージーランドの Wairakei など)。したがって, 今回の少数試料の実験結果から, Zunil 地熱帯の硫黄山付近の場合でも, 地下の深部熱水が必ずしも強酸性であるとは断定できない。しかし, 浸出液の pH 値が特に低いことは, 地熱開発を行う上に十分注意を要する。

### 3-1 Zunil 地熱帯

各地に噴気孔, 硫気孔, 間欠泉, 温泉, 変質岩などの地熱徴候が認められ, 活発な活地熱地域であることは疑う余地がない。便宜上, これらを Fumaroles Grande-Negra 地区 (Pachamiya 川の下流); Fumarole Paxmox 地区; Fuentes Georginas 地区; Sulphur Mine 地区の 4 つに分類する。

これら 4 地区のなかでは, V. 3-1 (地熱帯の化学) で詳しく記述するように, Fumaroles Grande-Negra 地区にもっとも優勢な地熱徴候が認められている。変質鉱物から見ても, この地区には, 高温の深部熱水の存在を示す珪化岩が各所に分布し, また浸出液の pH 値も強酸性を示さないことから, もっとも有望と考えられる。

なお, 前述のように Fumarole Grando と, Fumarole Negra は, この両者を境する Cerro Pedrera lavas の rhyodacites (1-2-3, (8)) の小ドーム, および NE 断層に密接な関係を有する。また, この NE 断層は, 北方に延びて Fumarole Paxmax に達しているが, ここには同じく rhyodacite の別個のドームが貫入している。

Fuentes Georginas と Sulphur Mine 地区は, 上記 2 地区から南に離れているので,

Fig. IV-4a. X-ray Diffraction Patterns of Altered Rocks from Zunil Geothermal Area, Guatemala (YAMASAKI, MATSUMOTO and HAYASHI, 1973)

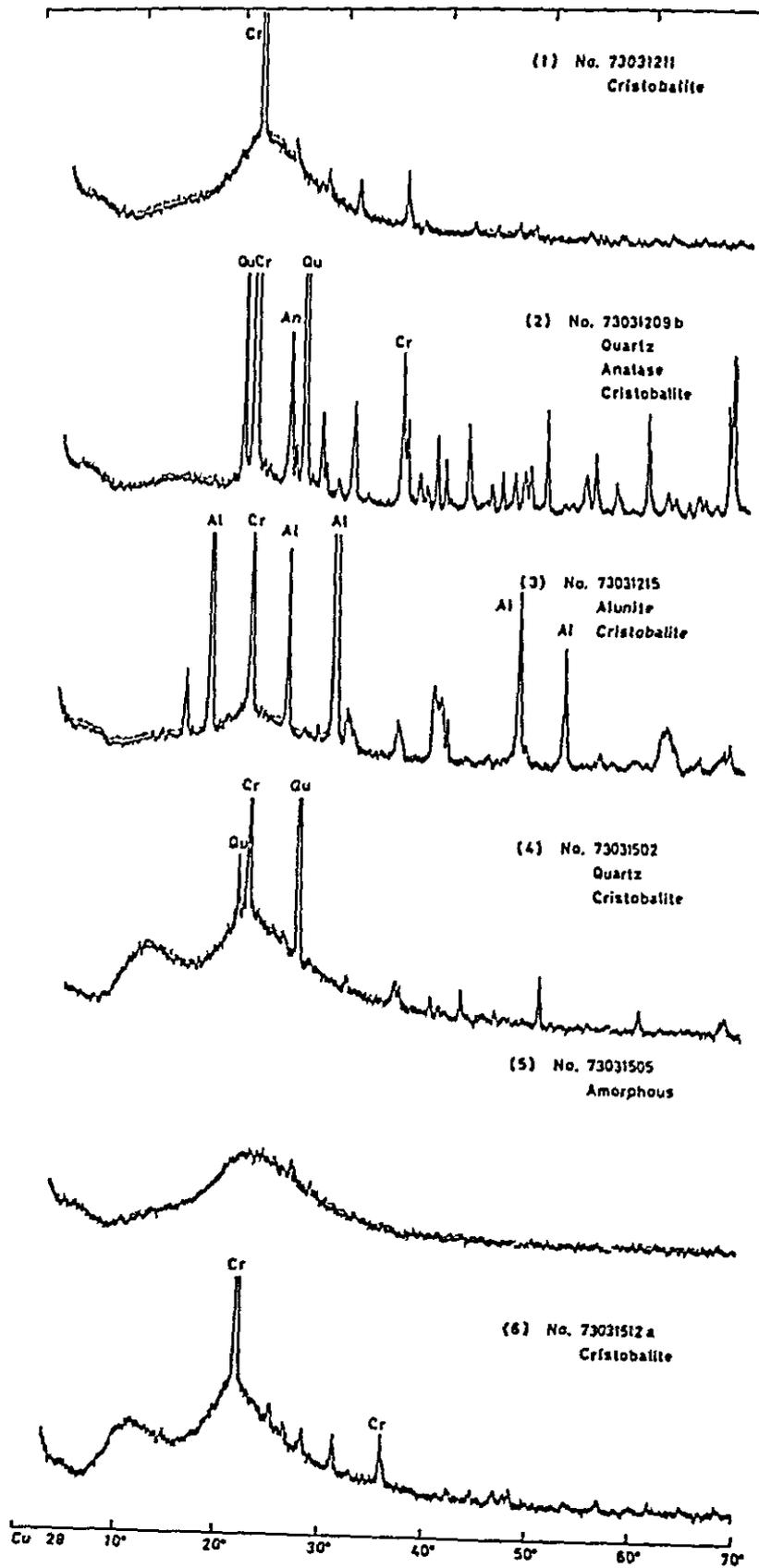
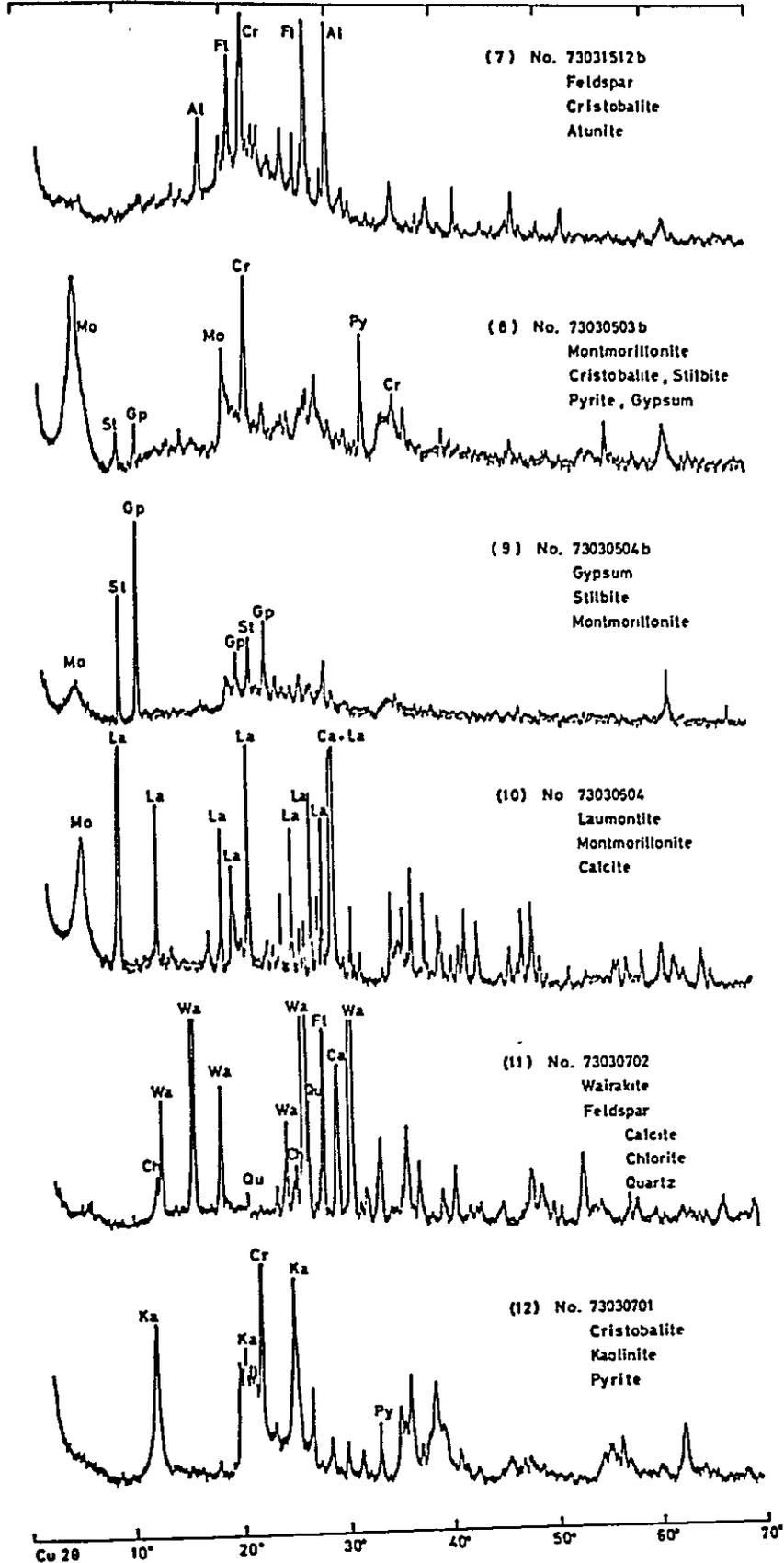


Fig. IV-4b X-ray Diffraction Patterns of Altered Rocks from Geothermal Areas, Moyuta(Guatemala) & Ahuachapan(El Salvador), (YAMASAKI, MATSUMOTO and HAYASHI, 1973)



一応直接の関係は認められない。また、この両地区の変質岩の浸出液のPH値が、いずれも1前後の強酸性を示すので、たとえ高温の熱水が得られたとしても、地熱発電に使用不可能な程度に強酸性を示す恐れがある。将来、試料数を増し、強酸性帯の分布範囲を確かめる必要がある。

### 3 - 1 - 1 Fumarole Grande-Negra 地区

この地区の左岸には、Zunil group の主として lower ~ lowest formation の玄武岩質安山岩や rhyodacite の火砕岩、右岸には輝石安山岩の溶岩や凝灰角礫岩が露出し、これらを前記の rhyodacite の小ドームが貫いている。

これらの各種岩石は、クリストパライトを主とする珪化岩に変わっている。特に、試料 73031211 (Fumarole Negra) は、玄武岩質岩が完全にクリストパライトに交代されていて、強い変質作用を受けたことが判る (Fig IV - 3, ①)。また、試料 73031209b はクリストパライトと石英とを含んでいる (Fig IV - 4, ②)。

試料 73031215 は、明バン石を含む唯一のものである (Fig IV - 4, ③)。明バン石は、硫酸酸性の条件を指示すると同時に、深部熱水が  $SO_4$  を多く含む場合に生成され易い。したがって、本鉱物の分布は小さい方が地熱発電に好都合である。今後その分布状況をさらに確認する必要がある。

本地区の変質岩の浸出液の pH 値は、3~4 の範囲にあり、これは各地の地熱帯における噴気帯の一般的な値を示している。このことから、本地区の深部熱水は、少なくとも中性~弱アルカリ性で、たとえ酸性であるとしても地熱発電に適さない程強くはないものと推定される。

### 3 - 1 - 2 Sulphur Mine 地区および Fuentes Georginas 地区

Fuentes Georginas 地区は、Zunil group および前記地区の小ドームと同質の rhyodacite の比較的大きな貫入岩体で構成される。rhyodacite 岩体の各所に、噴気、硫気孔、変質帯が点在し、またこの岩体から Fuentes Georginas (pH 値 2.1) および Aguas Amargas (pH 値 2.2) の酸性の温泉を湧出している。Sulphur Mine はその東方、Volcan de Zunil lava (角閃石黒雲母安山岩) から成る溶岩ドームの斜面に位置する活発な硫気孔を有する変質帯である。

この地区の変質岩の浸出液は、いずれも pH 1 前後の異常な強酸性を示している。一般に、硫気孔付近の変質岩は pH 1~2 程度の強酸性を示すことが多いが、このように硫黄山および Fuentes Georginas 地区を併せたかなり広い地域にわたって、pH 1 前後であるのは特殊であろう。ごく少数の地表試料のデータではあるが、これらの地域では、深部熱水が地熱発電

に適さない強酸性である可能性がある。

また、変質岩（粘度）は、非晶質物質を多量に含み（Fig IV-4, ④）その典型的なものは試料 73031502 で、この試料は全く結晶質物質を含んでいない（Fig IV-4, ⑤）。このような非晶質物質の化学組成を決定することも必要である。

### 3-1-3 Paxmox Fumarole 地区

本地区は前記の Fumarole Grande の北に隣接し、同様に rhyodacite ドームが貫入し、また両地区を結ぶ NW 断層を通じて関係を有するものと考えられる。

試料は、rhyodacite ドーム斜面に見られる噴気を有する変質帯から 2 個採集した。その 1 つは、クリストパライトから成り（Fig IV-4, ⑥）、他の 1 つはクリストパライト、明パン石、長石（残晶鉱物？）より成っている（Fig IV-4, ⑦）。前者の浸出液の pH 値は酸性、後者は強酸性を示している。

### 3-2 Moyuta 地熱帯

Moyuta の北西約 3 Km 付近に Guinea および Maruceccy 地区、北北東 5 Km 付近に Azulco 地区が位置している。いずれも第四紀の安山岩質～玄武岩質溶岩の分布地域内にある。

#### 3-2-1 Guinea および Maruceccy 地区

地獄中の生成物や周辺の変質岩は、浸出液の pH がいずれも酸性（2～3）であり、クリストパライト、モンモリロナイト、東沸石、石筍などを含んでいる（Fig IV-4, ⑧, ⑨）。しかし、酸性の地獄、硫気帯に特徴的な明パン石は、試料 73030503C に少量含まれるだけである。浸出液の pH 値は、一般的な地獄の平均値に対応している。

#### 3-2-2 Azulco 地区

いずれの試料も、浸出液の pH 値が 6～7 の範囲にある。また、ワイラカイトや濁沸石（Fig IV-4, ⑩）を含んでいることなどから、この地区の深部熱水は中～弱アルカリ性であり、地熱発電に適する pH 値を有するものと期待される。これらの沸石、特にワイラカイトは、日本の大岳地域において、第 1 貯留層（深度 300～500m）の特徴的鉱物であり、地下浅所では生成し得ないと考えられる。さらに、珪酸鉱物はすべて石英であり、低温で生成するクリストパライトを含んでいない。したがって、試料を採取した標高 740～900m 付近の変質岩は、かつて地下深所で熱水変質作用を蒙った後、断層運動または浸食作用によって、今日突出

した小丘陵を形成したものと推定される。

### 3 - 3 Ahuachapan 地熱帯

地表の噴気，温泉，変質帯からの試料は，浸出液の pH 値が酸性であり，クリストパライト，明パン石，カオリンなどを含んでいる（Fig IV - 4，⑪）。一方，営業井 No 10 のコア（深度不明）は，ワイラカイト，方解石，緑泥石よりなり（第 IV - 3，⑫），中性型の変質作用を蒙っている。

〔謝辞〕 帰国後，変質岩の研究について，九州大学生産科学研究所の林正雄博士，若芝路代，甲斐辰次の 3 氏から，積極的なご協力を戴いたので，ここに付記して厚く謝意を表する。

## REFERENCES

BERGMANN, F. A. J. , O. D. SALAZAR (1958)

Descripcion geologica de la hoja Quezaltenango. MS in Direccion General de Minería e Hidrocarburos. Guatemala, C. A.

\_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_ (1959)

Nota preliminar sobre la presencia de sedimentos presumiblemente Pliocenos en la Region de Quezaltenango. Revista Universidad de San Carlos, No. XLVII, pp. 53-57. Guatemala.

BONIS, B. (1964)

Geologic map of Guatemala, Quezaltenango sheet ND 15-7 G.  
Instituto Geografico Nacional (antes Direccion General de Cartografia).

\_\_\_\_\_' (1965)

Geologia del Area de Quezaltenango, Republica de Guatemala.  
Instituto Geografico Nacional, 84 pp. , one geologic map.

\_\_\_\_\_, BOHNENBERGER, O. , STOIBER, R. , and DECKER, R. E. (1965)

Age of pumice deposits in Guatemala. Geological Society of America Bulletin, New York. Vol. pp.

DOLLFUS, A. and E. de MONT-SERRAT (1868)

Voyage geologique dans les Republiques de Guatemala et de Salvador.  
539 pp. Paris.

ELECTRO-WATT ENG. SERV. LTD. , ZURICH (1971)

Atitlan Project Feasibility Report

FISHER, L. (1961)

Middle American Trench: Topography and Structure. Bulletin Geological Society of America. Volume 72, pp. 703-720.

GALL, F. (1965)

Cerro Quemado: Volcan de Quezaltenango. Publicacion Especial 12, Sociedad de Geografia e Historia de Guatemala, Guatemala.

HAYASHI, M. (1973)

Hydrothermal Alteration in the Otake Geothermal Area, Kyushu, Dr. Thesis of Kyushu Univ., Japan, pp. 1-107.

McBIRNEY, A. R., D. F. WEILL (1966)

Thyolite Magmas of Central America. Bulletin Volcanologique. Volume 29, pp. 435-446.

MEYER-ABICH, H. (1956)

Los volcanes activos de Guatemala y El Salvador. Anales del Servicio Geologico Nacional de El Salvador. Boletin 3. San Salvador. 102 pp. XXVI tables.

MEYER-ABICH, H., MOOSER, F. and McBIRNEY, A. R. (1958)

Catalogue of the active volcanoes of the world. Part 6, Central America. Naples. International; Volcanologic Association.

MONTESUSO DE BALLORE, F. B. (1888)

Tremblements de terre et eruptions volcaniques au Centre-Amerique. Dijon. 293 pp.

\_\_\_\_\_, (1894)

Temblores y erupciones volcanicas en Centroamerica. San Salvador, El Salvador. 246 pp. and six plates.

SAPPER, K. (1913)

Die mittelamerikanischen Vulkane. Petermanns Mitteilungen. Ergänzungsheft, No. 178. Gotha. 173 pp.

\_\_\_\_\_, (1925)

Los volcanes de la America Central. Estudios sobre America y Espana. Extra-Serie No. 1. Max Niemeyer Halle (Saale). 116 pp.

SEEBACH, K. (1892)

Über Vulkane Centralamerikas. Abhandlungen der Koniglichen  
Gessellschaft für Wissenschaften zu Gottingen. Bd. 38. 251 pp.

TERMER, F. (1963)

Zur Geographie der Republik Guatemala. Mitteilungen der  
Geographischen Gessellschaft, Hamburg, Bd. 44, pp. 89-275.

WILLIAMS, H. (1960)

Volcanic Histry of the Guatemala Highlands. University of California  
publications in Geological Sciences. Vol. 38, No. 1, pp. 1-86.  
Plates 1-13, 8 figures in text. University of California Press.  
Berkeley and Los Angeles.

ZIES, E. G. (1939)

First report on coordinated study of volcanic phenomena at Santa  
Maria. International Association of Volcanology. Washington, D. C.  
Assembly, Document 5.



## 第V章 地熱帯の化学

### 1. 緒 言

天然温泉水の化学分析は地熱開発のよきガイドとして行われる。種々の成分を定量したり、その成分間の比を求めて、地下の熱水だまりの温度やrockのtype, さらに温泉水の起原, 成因などを知ることができる。これらの方法は、ある温度、圧力下における岩石鉱物と水との間の反応とか溶解度に基づいている。もちろん、地表水によるdilutionや水蒸気の分離、またはpHに依存するfactorを凡ゆる場合に考えねばならない。そのような考慮もとの温泉水や噴気ガスの分析データは、もっと詳細に有望地域を調査したり、地熱発電のためのテストボーリングするさいの有力な手助けになるのは必定である。

Guatemala国の地熱予備調査において、36個の温泉水が各地から採取された。Fig. V-1はGuatemala国の温泉の分布であるが、これらの中、代表的な温泉についてののみ採水が行われた。すなわち、San Marcos 3, Zunil 11, Amatitlan湖周辺 5, Ixpaco 4, Moyuta 9, El Coco 1, Asuncion Mita 1, および隣国のEl SalvadorのAhuachapanの発電井1と近くの地獄地帯の水1, 合計36個である。その他、ZunilやMoyutaの噴気凝縮水が5個採取され、各地の熱水変質物13個、さらにZunilの噴気ガス成分の分析も、以上の目的のために行われた。

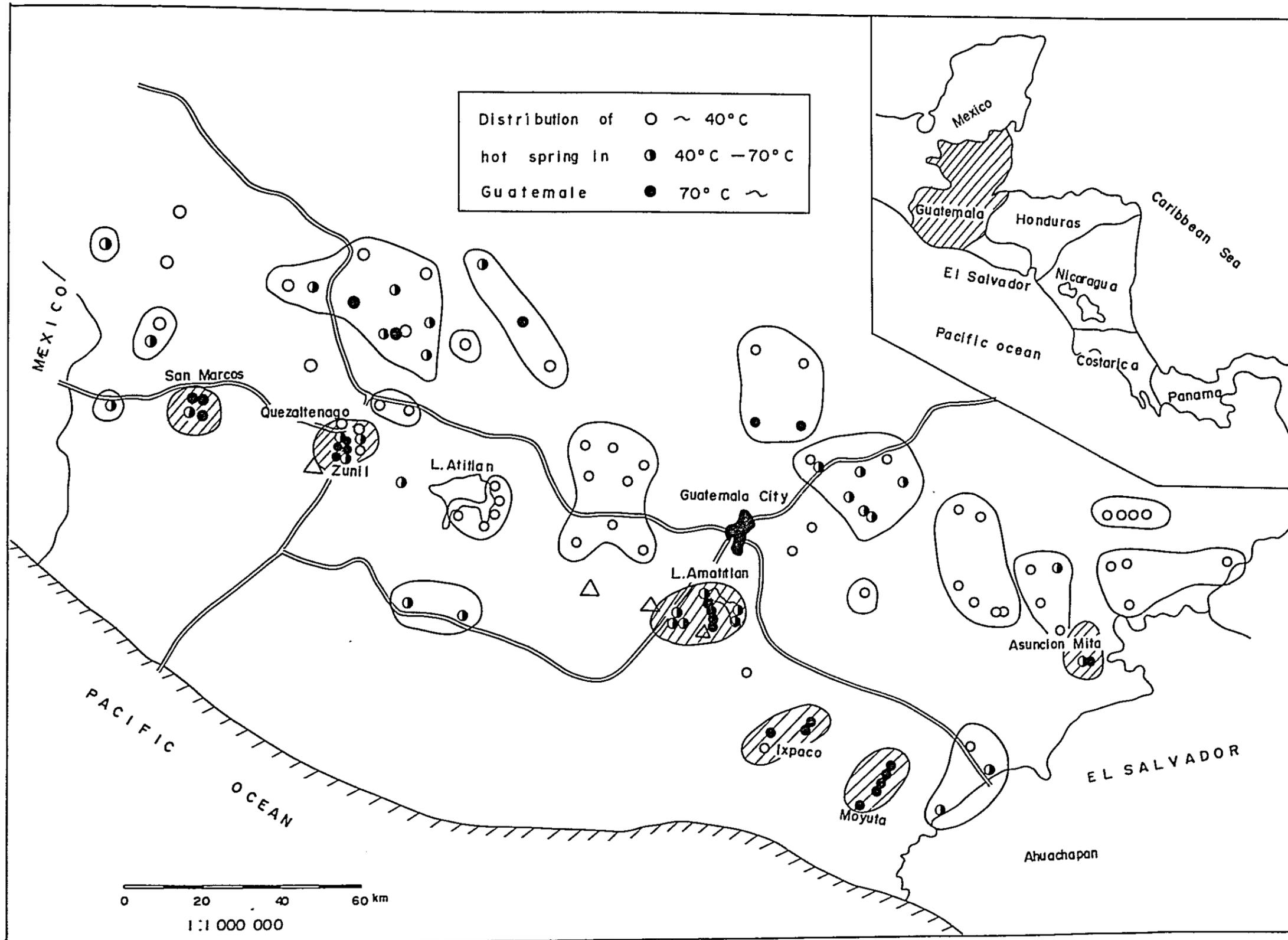
### 2. 地熱開発のための化学

我々が地熱開発のために温泉水を採取分析して、どこが最も高温で有望であるかを決定する場合、その方法として1) 熱水系と2) 蒸気系とに大別される。

2-1 地熱地帯に幾多の高温かつ湧出量の多い温泉がある時、温泉水の化学成分から地下の温度を指示するものとして、次のようなものが考えられる(White: 1970)。

- 1) high SiO<sub>2</sub> ..... high temperature
- 2) low Na/K, low Na/Li ..... "
- 3) high Cl/total carbonate species .. "
- 4) high Na/Ca ..... "

Fig. V - I DISTRIBUTION OF HOT SPRINGS IN GUATEMALA





- 5) low Ca,  $\text{HCO}_3$  .....
- 6) low Mg, low Mg/Ca ..... high temperature
- 7) high  $\text{Cl}/\text{F}$  .....
- 8) siliceous sinter deposit .....  $T > 180^\circ\text{C}$
- 9) calcareous sinter deposit ..... low temperature

これらの条件に合う温泉は高温の熱水だまりから来ていると云えるが、これらのインディケータは単一で考えずに総合的に幾つかについて考えるべきであり、Guatemala国の温泉についても、この方向で考察を試みた。

他の元素の行動について少し述べると、Cl や Bなどは可溶性の元素で、一度岩石から出ると容易には二次鉱物の構造の中に入らない。そのため、 $\text{Cl}/\text{B}$ 比を各温泉で比較する場合にdilutionや蒸発の影響を受けないので、その比が同じであれば同じaquiferから来ているとすることができる。しかし $\text{Cl}/\text{B}$ 比は、もし水が堆積岩を通れば減少するし、またBは蒸気相に多いのでsteam heated waterには $\text{Cl}/\text{B}$ 比は小さくなるはずである。

$\text{NH}_4$ はふつう堆積岩に多い有機物質から生じるが、揮発性なので水蒸気で運ばれ、 $\text{NH}_4$ の多寡は堆積岩の有無とか、蒸気加熱系であるかどうかの指示をしていることになる。

熱水中のLiは普通高温水に多いのでlow  $\text{Na}/\text{L}$  : 比は高温の熱水だまりを示す。Ca, Mg, Fの濃度はcalcite, anhydrite, chlorite, fluorite, Ca-Al-silicateの溶解度により制御され、すべて温度が上れば溶解度は減少する関係がある。そのため、high  $\text{Na}/\text{Ca}$ ,  $\text{Na}/\text{Ng}$ ,  $\text{Cl}/\text{F}$ は一般に地下の高温を示すことになる。

高温高压下の水と岩石との反応実験から、 $180^\circ\text{C}$ 以上の水の $\text{Na}/\text{K}$ 比は温度、圧力に依存することが知られている(Ellis, Mahon, 1964, 1967)。深部の高温水と浅い低温水と混合すれば $\text{Na}/\text{K}$ 比は上昇するが、その逆も真である。 $\text{Na}/\text{K}$ 比法は中性の食塩泉タイプの水については温度を計算するのに使われるが、温泉水中のこの比は $200^\circ\text{C}$ 以下では、しばしば誤差が生じる。酸性泉および $\text{HCO}_3$ や $\text{SO}_4$ の多い水についても適用できない(Koga, 1972)、そのため、他のindicatorについてのチェックも同時になされねばならない。

$110^\circ\text{C}$ 以上の熱水の $\text{SiO}_2$ 濃度は石英の溶解度によって制御される。したがって、地下深部からdilutionなく急速に上昇してくる温泉水の $\text{SiO}_2$ 濃度から地下の熱水だまりの温度を計算することは可能である(Fournier, Rowe, 1966)。

Siliceous sinterとかgeyserは多分地下の温度が $180^\circ\text{C}$ か、それ以上ある所に生じるがcalcareous sinterは低温の所にしか生じない。

$\text{SO}_4$ はanhydrite solubilityにより制御され、高温では減少する。steam heated waterでは $\text{Cl}/\text{SO}_4$ 比は水蒸気中に運ばれた $\text{H}_2\text{S}$ の酸化によって低い。

$\text{HCO}_3^-$ 量は温度、 $\text{CO}_2$ 圧や岩石鉱物により異なるが $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + (\text{Na}, \text{K}) \text{ silicate} = (\text{Na}^+, \text{K}^+) + \text{HCO}_3^- + \text{H-silicate}$

の反応から生じるであろう。この反応はのろいので $\text{SiO}_2$ 濃度や $\text{Na}/\text{K}$ 比が地表近くの反応により影響を受けたとしても、水そのものの $\text{Cl}/\text{HCO}_3^-$ 比はそのままで留まるであろう。steam heated waterは $\text{HCO}_3^-$ が多いので $\text{Cl}/\text{HCO}_3^-$ 比は小さい。一般に $\text{Cl}/\text{HCO}_3^-$ 比が大きい程、深部熱水で高温である。また、calciteの溶解度は $\text{CO}_2$ 圧とか溶液のイオン強度に比例するのでcalciteは低温の方が溶解度は高い。かくしてhigh $\text{HCO}_3^-$ 含量は高い $\text{CO}_2$ 圧か低温を示す。同様にhigh  $\text{Na}/\text{Ca}$ は高温を示す。

Koga(1969)の実験によれば、堆積岩の方が火成岩より多量に $\text{HCO}_3^-$ ができやすいし、また高温の $\text{HCO}_3^-$ 型の水は重曹( $\text{NaHCO}_3$ )タイプ( $\text{Na} \geq \text{Ca}$ )で、低温の $\text{HCO}_3^-$ の多い水は重碳酸カルシウム( $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ )タイプ( $\text{Ca or Mg} > \text{Na}$ )である。いずれにしても $\text{HCO}_3^-$ は浅い水(shallow water)に多いと云える。

## 2-2 蒸気系の場合

熱水を伴わない噴気地帯ばかりの所では上記の熱水系のインディケーターは役に立たない。しかも実際に地熱開発を行おうとする地帯では、蒸気系の場合が意外に多く、ボーリングをやって深部熱水を取りだしたあとの解析ならともかく、予備調査の段階では蒸気系の場合、何が地球化学的インディケーターになりうるかを早急に決定すべき状況に迫られている。後述するように、Guatemalaの地熱地帯であるZunil, Moyutaなどでは深部熱水が地表では余り見られず(Zunilの間欠泉を除く)、特にその感が強かった。

現在、蒸気系の場合の地球化学的探査の体系は未知の部分が多いが、本調査隊は次の如き方法を案出して実行した。1) 噴気ガスの分析：これは採取の技術上、空気の混入を防ぐために手頃の噴気孔が選ばれ、必ずしも全噴気孔についての分析は不可能であるが、噴気中のガス濃度および $\text{CO}_2$ や $\text{H}_2\text{S}$ の濃度さらに $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比から、地下に熱水があった場合のその性質を知ることができ、また熱水だまりからの距離を知ることができる。2) 噴気凝縮水の分析：凝縮水の中には揮発性(volatile)成分が入って来ている。たとえば $\text{NH}_3$ , B, Fなどはありきたりのものであるが、最近Hgの定量が極めて高感度に行えるようになったので(0.0001 ppm)凝縮水中のHgの定量は非常に興味のあるものになった。Hgは最も蒸気になり易い元素であり、温度依存の最たるものと考えられる。したがって、噴気ガス中のHgの定量は地下の高温の場所を探査する一番のインディケーターであるかも知れない。凝縮水の採取は簡単なので、Hg,  $\text{NH}_3$ , B, Fなどのインディケーターについて凝縮水中の各々の濃度を測定比較すれば、その地熱地帯の高温の場所(地表現象と必ずしも一致しない)を図示できるはずである。3) 変質土壤中のHgの定量：Hgは温度

により揮発しやすい元素であるとしても、熱水変質や水蒸気で変質を受けた土壤や温泉沈澱物中にはHgSとしての沈積あるいは地表の温度の低下による吸着がなされているから、変質土壤中のHgの濃度もまた、地下の地熱構造を示すことになる。

以上のような地熱開発における地球化学的インディケータ（1. 熱水系, 2. 蒸気系）の考慮のもとに、以下 Guatemala 国の地熱地帯の考察を進めて行くことにする。

### 3. Guatemala の地熱地帯

前述のように Guatemala における深部熱水（高温の中性の食塩泉型）を求めることから調査は開始された。その結果は Fig. V-1 の斜線を引いた地区について採水、分析がなされたが、分析結果は Table V-1 に示す。また、各温泉水のアニオンの三角図表を Fig. V-2 に示すが、いわゆる高温の深部熱水は数個にすぎず、Amatitlan 湖南岸の 2~3 の温泉、Ixpaco, San Marcos, および Zunil の間欠泉だけであった。他は地下浅水でうすめられた  $Cl-HCO_3$  water か、さもなければ low pH で  $SO_4$  量が大きく  $Cl$  の極めて少ない steam heated water であった。

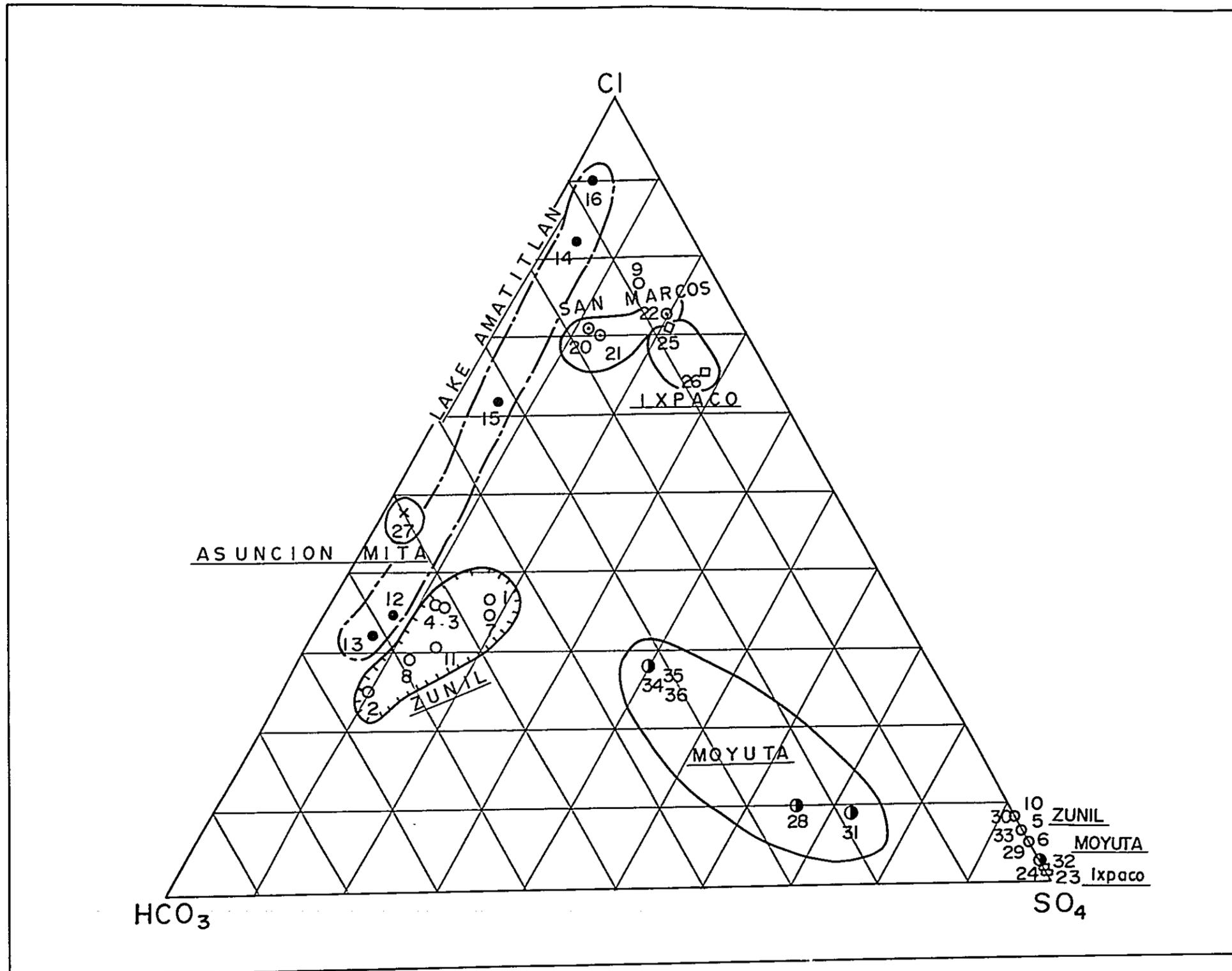
Guatemala は環太平洋火山帯に属し、幾つかの火山がありかつ水量も豊富であるにかかわらず、他の火山国に比し湧出量が多く高温の中性ないしアルカリ性の食塩泉型の温泉は Zunil の間欠泉をのぞき見当らず、 $HCO_3$  や  $SO_4$  の大きいものが多い。これらの理由として、その地帯の岩石構造や地下の熱水だまりから地表までの距離が遠いことが考えられるが、一方、岩石の透過性 (permeability) が小さいことも一般には考えられる。岩石の種類によっても異なり、 $SiO_2$  か calcite により通路や穴がつぶされていても同様な現象が起る。このような所では深部からの食塩泉タイプの高温度の水の流量が制限され地表に達する前に low  $Cl$  water で希釈されるからである。一方、蒸気は水よりも容易に地表に現われ、地下水に凝縮して加熱し  $HCO_3$ ,  $SO_4$ ,  $NH_4$  の多い水を作ることになる。Guatemala の温泉は大体このような理由で作られ、自然の温泉がこのようであっても地下の深部熱水だまりが小さいということにはならないであろう。

Guatemala の温泉水の組成は Fig. V-2 に示されるが、同じ食塩泉タイプであっても Fig. V-3 のように  $Cl/B$  比は湧出地により異っている。Fig. V-3 は  $Cl-B-HCO_3$  の三角図表であるが、San Marcos や Zunil 地区の水の  $Cl/B$  は小で B が多いことを示し、一方 Amatitlan 湖南岸の高温度の水の  $Cl/B$  比は大きく (30位)、B は小さい。Asuncion Mita, Ixpaco, および  $HCO_3 > Cl$  の Amatitlan の水はその中示している。Fig. V-2, 3 から Guatemala の各々の地熱地帯の混泉の特長が分る。

Table V-1 には各成分の原子比 (atomic ratio) がかけられており 2 節であげた熱水系の場合の高温を示す種々のインディケータについて論議することができるが、重複を避けるため

Table V-1 Chemical Compositions of hot spring waters in Guatemala and El Salvador (PPM) Analysed by Koga and Noda (1973)																														
No.	Location	Date	T °C	pH	K	Na	Li	NH <sub>4</sub>	Ca	Mg	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	F	PO <sub>4</sub>	HBO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	As	Na/K	Na/Li	Na/Ca	Ca/Mg	Cl/F	Cl/HCO <sub>3</sub>	Cl/SO <sub>4</sub>	Cl/B	X10 <sup>3</sup> Cl/As	
1	Zunil	1	12/3/73	45	7.2	6	93	0.20	0.3	21	7.0	71	50	150	0.32	0.39	6.8	164	-	0.5	0.04	26.7	140	3.8	2.1	120	0.8	2.0	12.9	4.0
2		2	"	40	6.6	9	86	0.15	0.3	22	9.9	56	29	257	0.19	0.63	3.8	197	-	0.5	0.01	16.1	170	3.4	1.4	160	0.4	2.7	18.2	16.0
3		3	"	55	7.2	15	102	0.25	0.4	15	7.2	82	37	198	0.29	0.57	9.7	195	-	0.7	0.40	11.6	120	5.9	1.3	155	0.7	2.9	10.5	0.4
4		4	"	49	7.4	10	64	0.16	0.3	14	5.2	60	25	148	0.22	0.47	6.7	159	-	0.7	0.04	10.8	120	4.0	1.6	140	0.7	3.4	11.1	3.4
5		5	"	50	2.1	26	72	0.04	0.3	31	12.6	28	520	0	0.10	0.43	11.6	250	0	0.7	0.02	4.7	520	2.0	1.4	160	-	0.1	3.0	2.7
6		6	"	55	2.2	34	96	0.07	0.5	41	23.0	18	460	0	0.00	0.43	4.7	218	0	0.7	0.01	4.8	420	2.0	1.1	-	-	0.1	4.8	5.0
7		7	13/3/73	66	7.2	30	176	0.60	0.4	38	35.7	167	120	402	0.28	1.31	21.0	227	-	0.7	0.20	10.0	90	4.1	0.6	315	0.7	1.9	9.9	1.7
8		8	"	62	7.3	38	265	0.54	0.3	41	52.2	199	110	681	0.35	0.75	24.5	225	-	0.5	0.14	11.9	150	5.6	0.5	310	0.5	2.4	10.0	2.9
9		9	14/3/73	n.d.	9.0	53	558	2.60	0.8	11	2.1	713	185	129	3.4	2.67	107	439	0	1.7	1.38	17.9	60	44.2	3.2	110	9.5	5.2	8.3	1.1
10		10	"	n.d.	3.2	25	105	0.71	0.3	37	19.5	21	310	0	0.10	0.36	3.7	224	0	0.6	0.06	7.2	50	2.5	1.2	120	-	0.1	7.0	0.8
11		11	"	n.d.	8.3	36	319	0.56	0.4	30	46.9	201	135	595	0.30	0.54	28.5	224	0	0.6	0.12	15.1	170	9.3	0.4	380	0.6	2.0	8.7	3.6
12	Amatitlan	1	15/3/73	56	7.3	40	256	0.42	0.2	31	20.6	185	58	545	0.29	0.46	11.4	228	-	-	0.07	10.9	180	7.2	0.9	360	0.6	4.3	20.7	5.8
13		2	"	72	7.0	33	246	0.43	0.3	32	25.7	171	52	548	0.32	0.57	12.3	206	-	-	0.48	12.7	170	6.7	0.8	280	0.5	4.4	17.3	0.8
14		3	"	58	8.3	48	502	1.53	0.2	16	2.2	684	48	170	0.55	0.62	28.0	186	0	-	0.12	17.7	100	27.3	4.4	665	4.0	19.3	30.2	12.1
15		4	"	70	6.9	34	254	0.87	0.1	37	17.2	334	55	307	0.15	0.57	12.3	261	-	-	0.04	12.6	90	5.9	1.3	1180	1.9	8.5	33.7	18.8
16		5	"	79	7.0	88	717	2.54	0.2	57	10.1	1180	37	175	0.34	0.93	46.9	262	-	-	0.20	13.9	90	11.0	3.4	1850	11.6	41.6	31.2	12.3
17	El Coco		5/3/73	29	7.3	3	16	0.01	n.d.	18	10.3	14	0.5	132	0.09	0.12	0.5	105	-	0.5	0.01	8.8	700	0.8	1.1	80	0.2	-	40.0	4.0
18	Auhachapan	1	7/3/73	n.d.	6.4	1178	5380	14.5	n.d.	575	2.0	10584	55	49	1.10	7.5	197	486	-	-	3.11	7.8	110	8.2	179	5150	373	271	66.3	7.2
19		2	"	n.d.	6.8	4	16	0.01	n.d.	32	10.9	6	66	110	0.08	0.50	0.2	108	-	-	0.16	7.0	700	0.4	1.8	50	0.1	0.1	-	0.1
20	San Marcos	1	14/3/73	88	7.9	26	482	4.14	0.2	19	2.8	572	128	238	2.38	4.65	95.6	203	-	1.5	2.13	31.5	40	22.1	4.1	130	4.2	6.0	7.4	0.6
21		2	"	77	8.8	39	555	4.57	0.2	8	1.2	685	175	281	3.1	4.05	115	353	0	1.6	1.30	24.1	40	60.3	4.0	120	4.2	5.4	7.4	1.1
22		3	"	87	8.9	75	558	5.91	0.2	8	1.0	745	265	133	3.2	3.81	124	549	0	1.6	6.44	12.6	30	60.8	5.0	130	9.7	3.8	7.4	0.2
23	Ixpaco	1	16/3/73	20	1.6	16	9	0.02	5.0	15	36.2	14	6300	0	0.03	0.18	0.8	162	0	-	0.01	1.0	130	0.5	0.3	50	-	0.0	20.0	4.0
24		2	"	84	1.7	13	11	0.02	4.0	15	36.4	14	6200	0	0.40	0.15	0.6	219	0	-	0.05	1.5	170	0.7	0.2	20	-	0.0	40.0	0.6
25		3	"	87	7.2	26	626	1.70	0.2	52	3.1	810	307	128	1.5	2.2	83.7	105	-	-	0.67	41.2	110	10.5	1.0	290	10.9	3.6	11.9	2.6
26		4	"	91	7.1	25	623	1.71	0.2	54	2.4	720	427	124	1.6	0.0	75.4	108	-	-	0.41	42.3	110	10.1	1.3	240	10.2	2.4	11.8	3.7
27	Asuncion Mita		17/3/73	70	6.8	117	743	3.06	0.2	41	13.0	643	44	1110	0.36	0.41	47.8	104	690	-	1.73	10.8	70	15.8	1.9	950	1.0	20.1	16.6	0.8
28	Moyuta	1	19/3/73	90	7.0	12	28	0.01	0.3	66	10.9	18	156	73	0.05	0.11	1.4	134	-	-	0.00	3.9	1200	0.4	3.7	170	0.4	0.1	16.7	-
29		2	"	89	3.5	12	36	0.00	4.5	43	21.0	18	700	0	0.13	0.24	0.2	183	0	-	0.00	5.2	-	0.7	1.2	70	-	0.0	-	-
30		3	"	92	3.8	11	25	0.00	0.9	155	10.7	14	500	0	0.07	0.19	0.9	138	0	-	0.00	3.9	-	0.1	8.8	100	-	0.0	20.0	-
31		4	"	89	6.6	9	25	0.00	0.2	72	12.4	14	154	46	0.11	0.51	0.8	164	-	-	0.00	4.8	-	0.3	3.5	70	0.5	0.1	20.0	-
32		5	"	89	2.3	7	27	0.01	4.0	39	21.7	14	2100	0	0.07	0.16	1.7	335	0	-	0.00	6.7	1200	0.6	1.1	100	-	0.0	10.0	-
33		6	"	90	3.2	7	16	0.01	0.3	35	13.7	14	220	0	0.36	0.22	0.5	209	0	-	0.00	3.9	700	0.4	1.5	20	-	0.1	40.0	-
34		7	"	93	8.9	3	11	0.00	0.3	9	1.3	14	27	30	0.03	0.16	0.0	143	0	-	0.01	6.3	-	1.1	4.1	200	0.8	0.7	-	4.0
35		8	"	93	8.8	3	9	0.00	0.3	10	1.1	14	27	30	0.03	0.16	0.0	140	0	-	0.00	5.0	-	0.8	5.6	200	0.8	0.7	-	-
36		9	"	93	8.8	3	11	0.00	0.3	9	1.1	14	27	30	0.03	0.16	0.0	141	0	-	0.01	6.3	-	1.1	5.0	200	0.8	0.7	-	4.0

Fig. V - 2 PROPORTIONS OF CL, SO<sub>4</sub>, AND HCO<sub>3</sub> IN WATERS  
OF VARIOUS HYDROTHERMAL AREAS GUATEMALA





に各地区の温泉の項で述べることにする。

### 3-1 Zunil地区

Zunil地区では11個の温泉水、2個の噴気凝縮水、10個の変質土壌および1個の噴気ガス分析用試料が採取された。Fig. V-4に温泉の所在を示す。

Zunil 1はZunilとAlmolongaの自動車道路の中間にあり温泉場として多くの浴槽があるが500m位離れた所からの引湯と云われる。泉温45°C、重曹泉タイプの単純温泉である。Zunil 2はLos Banos(Almolonga)と呼ばれ、泉温は40°C、同じく浴用に供されており、Zunil 1と自動車道路をへだてて向い合っている。同じく重曹泉タイプの単純温泉。Zunil 3はZunilの町近くのSamala川の岸に湧出しており泉温55°C、幾つかの温泉が近くに湧出し天然風呂形式で入浴したり洗濯が行われている。同じく重曹泉タイプの単純温泉である。Zunil 4はZunilの町から1.5Km上流にあり、川岸に幾つかの温泉が湧出し温泉場も作られている。49°Cで同様に重曹泉タイプの単純温泉である。Zunil 5は2,450mの高地で“Balneario Fuentes Georginas”と呼ばれ、温泉プールや宿泊設備があり泉温50°C、pH 2.1の酸性泉である。温泉場の入口附近は硫気孔となっており、イオウの結晶が析出している。岩石は変質を受けており、表面は70°Cから90°Cで硫化水素臭はそう強くない。Zunil 6は同じく酸性泉でpH 2.2、温泉治療に使われており、山中の湯治場となっている。温泉水は断裂線から湧出しており緑色の藻が水路にそって生えている。ここはBalneario aguas Amargasと呼ばれている。

Zunil地熱地帯の中心は、いわゆるFumarole grandeでSamala川の大溪谷に沿って多くの温泉や噴気が見られる。その付近のスケッチ図はFig. V-5に示す。Zunil 7はこの中で右岸にある南端のもので66°C、付近は同じような温泉が相当量でており、川へ絶壁に黄、橙、褐、緑のきれいな色がパレット状の沈殿物を形成し、主成分は炭酸カルシウムである。川に沿って上流へさらに300m、至る所に急峻な凡そ80~100mの崖のみもとには温泉が湧出し、炭酸カルシウムの沈積物がある。Zunil 8はその1つで62°Cである。さらに100m上流に進むと兩岸は川に迫って狭くなるが、左岸の中腹からZunil 9の間欠泉が見られる。温度は未測定だが沸とう点で湧出量も大きい(500ℓ/min)。白い沈殿物が尾を引いて川に流れこむが、すぐ横に緑の藻をもつ温泉Zunil 10が滝のように川に流れこみ、Zunil 9のpH9.0に比し酸性の3.2である。一方、右岸にはZunil 11の温泉が熱流となってSamala川に流れている。pHは8.3で重曹泉タイプである。

これらZunil地区の温泉を総括すればTable V-1のようにZunil 9が中心で深所から来た熱水に近く、これを遠ざかるにつれ泉温も低くなり $\text{HCO}_3$ や $\text{SO}_4$ が多くなる現象が見られる。すなわち、Zunil 9はClが713 ppmで食塩泉型を示し、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{AS}$ 、 $\text{HBO}_2$ 、 $\text{PO}_4$ 、 $\text{F}$ 、 $\text{Li}$ 、 $\text{NH}_4$ が多い。しかして $\text{Na/Li}$ 比が小さいこと、 $\text{Ca/Mg}$ 、 $\text{Na/Ca}$ 、 $\text{Cl/HCO}_3$ 、 $\text{Cl/SO}_4$ 比の

Fig. V-3 MOLECULAR PROPORTIONS OF Cl, B, AND HCO<sub>3</sub> IN WATERS OF VARIOUS HYDROTHERMAL AREAS OF GUATEMALA

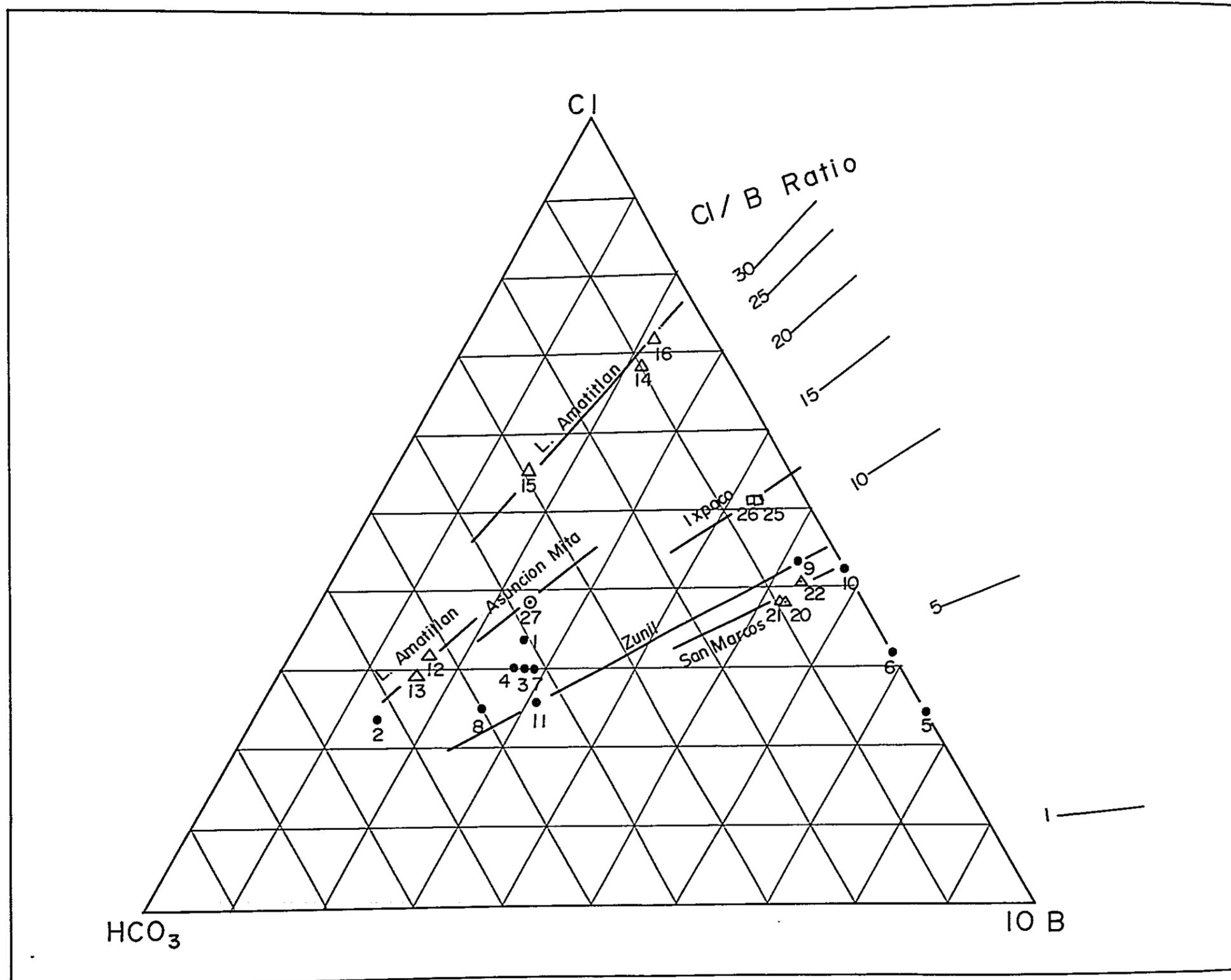




Fig. V - 4 LOCATION MAP OF  
HOT APRINGS IN ZUNIL

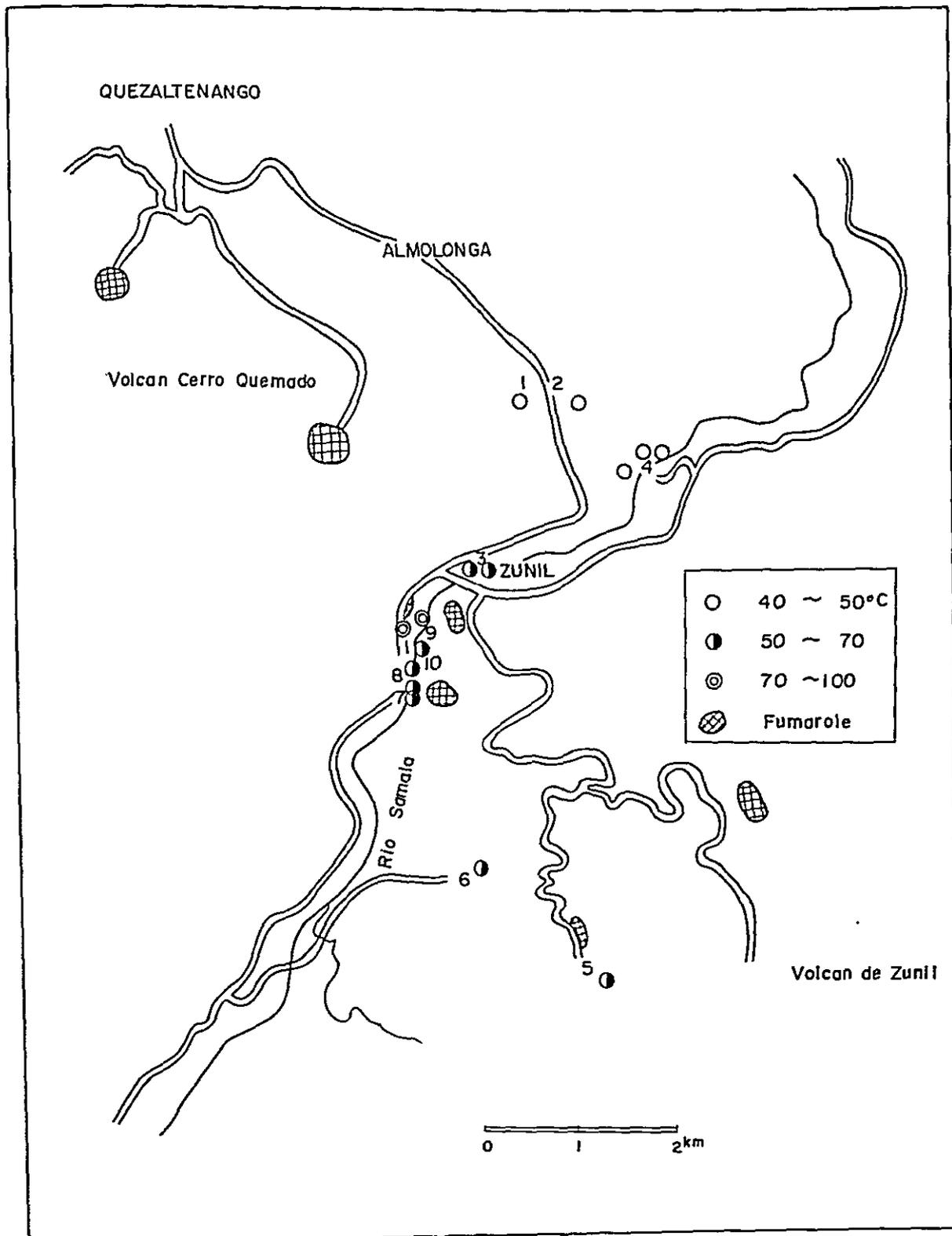
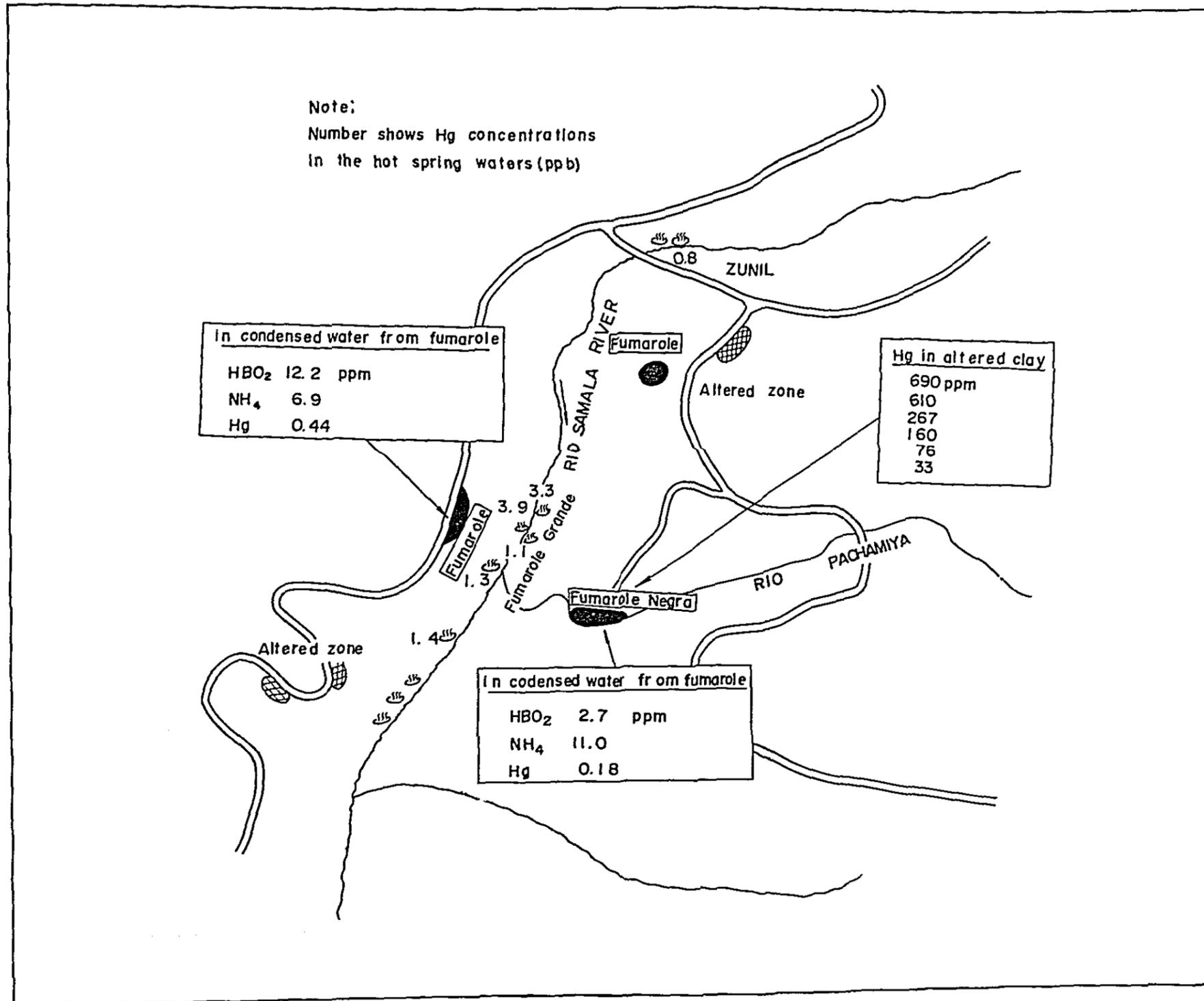


Fig. V - 5 SKETCH MAP OF "FUMAROLE GRANDE" IN ZUNIL





大きいことは地下の高温を示すインディケータを満足している。

Fumarole Grandeの他の温泉，7，8，10，11で興味のあるのはCaに対しMgの多いことで，特に8，11はCa<Mgなる特長を示す。これはHCO<sub>3</sub>が多く余り温度の高くない温泉に起る現象であり，二次蒸気により加熱された浅所の水が壁岩と反応してCaやMgをとかし出し多分周囲岩石に緑泥石(chlorite)などがあり，しかも湧出後，多量の石灰華を沈積しているので，地下の温度はせいぜい100ないし120℃前後と思われる。

SiO<sub>2</sub>含有量はClの少ない温泉でも相当あり，火山地帯の水の常として地下水にも多量にあるに違いない。そしてZunilの温泉のSiO<sub>2</sub>濃度は間欠泉をのぞけばすべて湧出温度で無定形シリカ(amorphous silica)によって飽和されているか，それに近い。したがって，石英と平衡にあるとされる深部熱水のように，SiO<sub>2</sub>濃度から地下の熱水だまりの温度を計算することは不可能である。恐らくZunil 9をのぞけば，地下の温度は110℃以下と推定される。

Fumarole Grande付近の温泉7，8，9，10，11はCl含量とNa/K比間に比例関係がある。すなわち，深部熱水ではNa/K比の小さいほど温度が高くClも多いのに逆の関係で，このこともまたNa/K比法の適用を除外する。この説明として，Fumarole Grandeの地下にCl含量が大きくNa/K比の高い(Zunil 9では17.9)熱水が存在するとし，Cl量が小さくNa/K比の小さい地下水で希釈されているとすれば，湧出している温泉は比較的Clの小さくNa/K比が小さくなったものになる。つまり，Zunil地区の地下水は極めてNa/K比の小さい，たとえばNaが10 ppm，Kが10 ppm，Clがほとんどないといった水であれば，容易に上記の現象は起りうるであろう。Zunil 5，6や10のNa/K比が小さいのは酸性泉のためである。

Fig. V-3に見られるようにZunilの温泉は近くのSan Marcosの温泉と同様にClに比しBが多い特長があるが，ばらつきが多く，Zunil全体での岩石構造はそう単純ではない。

以上のようにZunil地区のいわゆる深部熱水はZunil 9の間欠泉だけであり，SiO<sub>2</sub>法およびNa/K比法から計算された地下熱水だまりの温度はそれぞれ216℃と180℃となり間欠泉であることを考えて180℃以上と推定しうるが，他の温泉水からは第2節に述べた熱水系の地下温度を示すインディケータは，良い結果を示さず適用は困難である。つまり，Cl/HCO<sub>3</sub>比に判然とするようにZunil 9をのぞき，すべてshallow waterである。

しかしながら，Zunil地区の地熱包蔵量は相当にあると思われ，岩石の透過性の関係で(less permeability)このような地表徴候を示すと考えられるが，一方，Zunil各地にある噴気地帯の現象から第2節に述べた地下の高温の場所を求める試みとして1) 噴気ガスの分析，2) 噴気凝縮水の分析，3) 変質粘土鉱物の分析を行った。

噴気地帯はFumarole Grande周辺，Pachamiya川下流の噴気地帯(Fumarole Negra)，更にZunil 5近くの温泉(Balneario Fueates Georgina)近くの道路ぎわ，Volcan de

Zunil 北方の硫気孔, Volcan cerro Quemado 近く, さらに Fumarole Grande 近くの自動車道路の側から弱い噴気が立ち昇っている (Fig. V-5)。ガス分析は Pachamiya 川下流の Fumarole Negra で行った。その結果, 温度 94°C (この高度の沸とう点) 以上, 水蒸気は 99.16%, ガス濃縮は 0.84%, 非凝縮性成分では CO<sub>2</sub> 94.2%, H<sub>2</sub>S 1.3%, その他 4.5% であり 100 モルの水蒸気中には H<sub>2</sub>S が 10.3 ミリモル, CO<sub>2</sub> が 720 ミリモル入っており, CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S のモル比は 70 であった。

CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S 比が小さいことは, 熱水だまりから地表への距離が短かいか, その熱水が酸性であるか, あるいは深くまで熱水がなく蒸気系であることを示しており, 逆に Zunil の分析した噴気のように CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S 比が大きいことは, 地下に中性ないし微アルカリ性の熱水があり (酸性ではない), それからこれら噴気地帯が生じたものと考えられる (Mahon 1970, Koga, Noda 1973)。事実, Zunil 9 のよう pH 9.0 の食塩泉タイプの熱水の湧出はこれらを裏付けるものであろう。一方, CO<sub>2</sub> 量が余りに多ければ (したがって CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S 比は大), 地熱発電を行う場合に炭酸カルシウムの析出がパイプ内に起る可能性もある。

噴気凝縮水については Zunil 地区で 2 点, すなわち, Fig. V-5 の Fumarole Negra (ガス分析地点) と Fumarole Grande の西方, 自動車道路ぎわの弱い噴気孔からとられた。分析結果は Table. V-2 の如くである。

Table V-2, Chemical Analysis of condensed water From Fumarole in Zunil, Analysed Koga (1973)

Location	HBO <sub>2</sub>	NH <sub>4</sub>	Hg
Fumarole Grande	2.7 ppm	11.0 ppm	0.18 ppm
Road side	12.2	6.9	0.44

これらの成分はすべて揮発性 (volatile) のものであり, 地下のこれらの量に関係するが, 同じ熱水だまり (aquifer) から来た蒸気であり, しかも地下の温度に比例してガス状となって来ているとすれば, 噴気凝縮水中のこれらの成分の多寡は地下の温度を指示していることになる。しかしながら, ここで注意せねばならぬのは同じ位の噴気量の場合は確かに HBO<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub>, Hg, F の多い噴気地帯の地下は高温を示しているが, Table V-2 のように Fumarole Negra は極めて優勢な噴気地帯, 道路ぎわは弱い噴気孔の場合, 後者の場合が HBO<sub>2</sub> や Hg が多く一見こちらの地下の温度が高いように見える。しかし, これは水蒸気により稀釈された結果であろうから, 上記の濃度に全噴気量を乗じて比較すべきであろう。とは云え, 道路ぎわの噴気は微弱とは云っても, やはり相当高温であるのは間違いがない。見掛上の地表微候とは地下温度は異なっているという一つの例である。

噴気凝縮水の場合はこのような注意が必要であるが変質土壌の場合は単に比較できる。

Table V-3 Hg contents in altered clays in Zunil

Location	Color	Hg ppm	Collector (sample No.)
<b>Fumarole Negra</b>			
1	reddish brown	690	Matsumoto (73031209a)
2	pale brown	610	" ( b)
3	white	76	" ( c)
4	very pale brown	160	" (73031211)
5	"	33	" (73031215)
6	reddish brown	267	Koga
<b>Balneario Fueates Georgina</b>			
1	medium brown	29	Matsumoto (73031505)
2	white	12	" (73031506)
3	sulfur	1.8	Koga
<b>Sulfur mine</b>	very pale brown	30	Matsumoto (73031502)

Analysed by Koga (1973)

Fumarole Negraを中心に変質土壌中のHgの定量結果をTable V-3に示す。これによると、Fumarole Negraのように極めて優勢な噴気地帯では付近の変質粘土中に多量のHgが凝縮していることが分る。多分、噴気により運ばれたHgは地表近くで温度の低下による凝縮のために土壌に吸着されたもので、絶えず補給されているものと思われる。その形はどんなものかわからないが一部はHgS(辰砂)であると考えられる。かつての硫黄孔地帯で、現在冷えている変質粘土中のHgはTable V-3のように少なく、土壌中のHgを測ることは地下の温度を指示する有力なインディケータートなりうる。Zunil地区にはFumarole NegraのみならずFumarole Grande周辺には幾つかの噴気地帯があるから、これらの地域を系統的に土壌を採取してHgを定量すれば判然とした地熱開発における地球化学的適用が可能であろう。とくにZunilのどこかでかつて古代のインディオ達によって秘密に水銀鉱山から薬品が作られていたと云われており、Hg利用による地熱開発の適用性は大きい。もちろん、凝縮水が容易にとれる噴気では、凝縮水中の $\text{HBO}_2$ 、 $\text{NH}_4$ 、F、Hgも定量すべきである。ただ今回の調査でFは凝縮水の量の問題で測定しなかった。これらの元素化合物が温度により、どのように揮発性であるかは、これからの基礎的モデル実験に期待すべきである。

一方、温泉水中のHg量についてはZunilの温泉水11個について測定された。その結果は次の如くで、Fumarole Grande周辺の温泉水についてはFig. V-5に記入されている。Zunil 1:2.8 r/l, 2:1.0, 3:0.8, 4:2.5, 5:1.3, 6:0.9, 7:1.4, 8:1.3, 9:3.3, 10:1.1, 11:3.9 r/lであり温泉水中には極めて少ない。揮発しやすいので湧出直後に消失するためであろう。高温ではあってもZunil 9や11に多いのはaquiferに近いためであろうと考えられる。

### 3-2 San Marcos地区

San MarcosはQuezaltenangoの西方、およそ50kmの所にあり、San Marcosの町の南に2, 3の地熱地帯が存在する(Fig. V-1)。

SM-1はトンネル横の道路ぎわの崖から湧出しており、泉温88°Cで弱食塩泉型。SM-2は77°CでSM-1近くの洞くつの中にある。道路を越して川は10mの滝となって落ちているが、その滝の裏側は洞くつ状にくぼみ、幾多の温泉が湧出しており床は炭酸カルシウムのテラスとなっている。同じく弱食塩泉である。SM-3はSM-2よりおよそ南に1km離れ、道路より100m位下った谷に多くの温泉や鉱泥(mud pool)と共に湧出している。泉温は87°Cで同様に弱食塩泉型である。

San Marcosの温泉はTable V-1, Fig. V-2に見られるように弱アルカリ性の食塩泉型であるが、Fig. V-3からすればZunilの温泉と同様に $\text{HBO}_2$ が極めて多い特長をもっている。そ

して三者とも  $Cl/B$  比が 7.4 で同一であることは、皆同じ aquifer から来たものであると云える。San Marcos の温泉水は  $SiO_2$  が多いこと、Li が多く、したがって  $Na/Li$  比が小さいこと、 $Na/Ca$  比が大、 $Ca/Mg$  も大、 $Cl/HCO_3$  も比較的大きく As の量が多いことなど、いわゆる地下の高温を示す温泉であるが、特に高温を示すのは SM-3 であり、 $Na/K$  比および  $SiO_2$  含量から計算された地下熱水の温度は 220~230°C を示しており、As は 6.44 ppm の多量を含んでいる。また、SM-2 の洞くつ内は噴気も出ており、これらが運んだと思われる Hg が吸着した沈積物には 65.2 ppm が含まれていた。SM-3 附近が中心であるとしても、SM-2 付近も地下はやはり相当高温なのであろう。

総じて San Marcos 地区は規模はそう大きくなくとも、温泉の化学分析の結果は高温の熱水だまりがあり、地熱開発上の一候補となりうる所である。

### 3-3 Amatitlan 湖周辺

Amatitlan 湖南岸には 70~80°C の食塩泉が数多く湧出していることが知られている。Table V-1 の A-1 は湖から Escuintla へ通ずる道路側の Trailer Park の中にあり、泉温 56°C、温泉プールに利用されている。重曹泉タイプ、A-2 は泉温 72°C、いずれも堀さくされたもので同じく重曹泉タイプ。周囲は湿地帯で、かつては自然湧出の温泉も見られた所である。A-3 は湖の西端、ここから唯一の Michatoya 川が流れ出ているが、その Hotel Los Arcos に湧出しており、浴用や治療に使われ、弱食塩泉タイプで泉温は 58°C である。A-4 は湖の南岸、駅の近くで湖畔の砂の中に湧出しており泉温 70°C、同じく食塩泉タイプ、A-5 は 4 の西方およそ 400 m、通称 chicken pool と呼ばれ湧出量は少ないが泉温は 79°C、 $Cl$  は Guatemala の温泉で最高の 1180 ppm を示した。

Amatitlan 湖南岸の温泉は Fig. V-3 に見られるように同じ aquifer からのもので見られ、 $Cl/B$  は高く 30 を越えており Guatemala の温泉で B の少ないことに特長がある。また F や As も他地区の温泉に比し少ない。 $Cl/HCO_3$  比が大きい A-5 の  $SiO_2$  濃度や  $Na/K$  比から地下温度を計算すれば、それぞれ 198°C、206°C となり 200°C 前後の熱水が地下にあることを示している。

### 3-4 Ixpaco 地区

Ixpaco は Moyuta 道路から南に入った山中にあり (Fig. V-1 参照)、Ixpaco 1 は直径 800 m 位の池で硫黄のために黄白色を呈している。 $H_2S$  あるいは  $SO_2$  の臭気も感じられ、pH は 1.6 のひどい硫酸性である。Ixpaco 2 は池畔にてているもので噴気により加熱された温泉である。したがって  $Cl$  はなく  $NH_4$  が多く、また池水に比し F が多いのは噴気から来たものと考えられる。

Ixpaco 3 と 4 は池より Moyuta 道路に近い El Panal 川の中に湧出しており、温度は

90℃前後、湧出量多く赤、緑、褐色の沈殿物があり、食塩の析出物がある。最初見た感じでは有望な深部熱水と見られたが、Na/K比は高くSiO<sub>2</sub>は意外に少なく、地下の温度も高温とは思われない。

### 3-5 Asuncion Mita地区

Guatemala市の東々南、El Salvadorとの国境近くにある温泉で泉温70℃、湧出口はドーム状にもり上って赤、橙、緑としま模様沈殿物を作って流れている。CO<sub>2</sub>のために白い泡状で湧出して沸とうしているように見える。泉質は含食塩重曹泉であり、SiO<sub>2</sub>の量からも、高温とは思われない。

### 3-6 El Coco

Moyuta道路のEl Salvador国境に近い所に、こもりに住む洞くつ内から相当量湧出している。単純泉できれいな29℃の水だが、人々は恐れて飲用しない。

### 3-7 Moyuta地区

Moyutaは国連、INDEおよび鉱山局により調査され、化学的には種々の温泉、湧水の温度、HCO<sub>3</sub>量、さらに幾つかの噴気のガス成分が測定されている。この地区から9個の高温の温泉水が採水されたが、その内容はGuinea 2個、Marcuccy 4、Azulco 3である。Moyuta 1, 2, 3, 4はいずれもMarcuccyであるがGuineaより20分歩いた所にあり、乾期のためか余り活潑でない噴気地帯のすぐ近くに、ぐつぐつ沸とうしている。湧出量はほとんどなく、地表水を噴気が加熱している感じである。Moyuta 1, 4は中性だが、2, 3は酸性を示し、小さな血の池地獄状の赤色粘土が見受けられた。Clはほとんどないが、Caが多い特長がある。Moyuta 5と6はGuineaの川にある温泉で共に90℃前後、同じく噴気により加熱されたものである。二つとも酸性を示すがMoyuta 5がNH<sub>4</sub>に富むに比しMoyuta 6は少ない。

AzulcoはMoyutaから7km位北々東に位置するが、そこには大きな噴気孔があり、また近くに温泉が湧出している。しかしMoyuta 7, 8, 9はいずれもsteam heated waterであり、アルカリ性を示す。Moyuta地区の温泉水、湧水については鉱山局の調査があり、泉温、HCO<sub>3</sub>の調査がなされているが、Azulco付近の湧泉にHCO<sub>3</sub>の多いのが散見される。

Moyuta地区の温泉水は、やはりSiO<sub>2</sub>が多いが、無定形シリカ(amorphous silica)に対しては不飽和である。反応時間が短かいためであろう。

一方、Moyuta地熱地帯の噴気ガス調査がCuellar(1972)によりなされている。それによれば、Guineaの噴気ガスはCO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>Sとも含有量が多いが、Azulcoは両者とも少ない。Marcuccyは両者の中間を示すが、CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S比は大体100~140を示し、今回、本調査隊が行ったZunilの

70に比しその比は高く、やはり地下に熱水だまりがあるとすれば（地上には全く湧出してない）、それは微アルカリ性の食塩泉であろうと考えられる。

Marcucy, Guinea地区の噴気凝縮水の分析結果は、Table V-4の如くである。

Table V-4, Chemical Analysis of condensed water from fumarole in Moyuta Analysed by Koga (1973)

Location	HBO <sub>2</sub>	NH <sub>4</sub>	Hg
Marcucy	3.4 ppm	4.8 ppm	0.20 ppm
Guinea ①	5.6	27.2	0.41
②	2.2	7.2	0.14

MarcucyよりGuineaの方が噴気量も多く活潑であるが、Guinea ①、②は温泉水のMoyuta 5、6と同じ場所であり、噴気凝縮水と同様、温泉水も5の方がHBO<sub>2</sub>、NH<sub>4</sub>とも多量であるのは（Table V-1参照）、温泉水がこれら噴気ガスにより加熱された水であることを物語っている。

また、Azulcoの噴気孔付近の赤色土壌および近くの変質を受けたドームの頂上（90～95℃）の赤褐色土壌中から、前者は27.0、後者は4.8 ppmのHgが定量された。Zunilに比し多いとは云えないが、噴気凝縮水に多量にHgが入っていることは、Zunil同様にMoyutaの地下の高温を思わせる。

Moyuta地区の地熱開発は深部熱水の湧出が発見できないことから、地球化学的調査は噴気ガスの分析、凝縮水の分析、および変質土壌中のHgの定量に主眼を置くべきであり、良好な結果が得られると期待される。

### 3-8 Ahuachapan

El SalvadorのAhuachapanには現在12本の生産井が掘さくされつつあり、その地球化学的研究はSigvaldsonとCuellar (1970)によりなされた。かつて、近くには巨大な硫気孔や噴気地帯があり、そこで採取した水はAhuachapan 2とTable V-1にあげたように steam heated waterである。掘さくした生産井1号の水は種々分析データがあり強食塩泉で地下の温度は228℃とされている。今回採水した分析結果、最大の違いはヨードであり、Br 42.1, I 8.46 ppmだったのに比しBr 34.4, I 0.246 ppmとなった。この塩分濃度の高い水の起原は興味のある所で、かつてのデータによれば高含量のIからmarine sedimentの存在が疑われて好都合であるが、ボーリングコアで存在しないことが確認されている。したがって、今回のヨードの測定が正しいものと思われ、塩分の起原は未だ未知である。

## References

- Cuellar, G. (1972), Investigacion Geoquimica preliminar de gases fumasolicos en El campo geotermal de Moyuta, Guatemala, Presentado A INDE
- Ellis, A. J., Mahon, W. A. J., (1964), Natural Hydrothermal Systems and Experimental Hot Water/Rock Interactions. Geochim. et Cosmochim, Acta. 28: 1323-1357
- Ellis, A. J., Mahon, W. A. J. (1967), Natural Hydrothermal Systems and Experimental Hot Water/Rock Interactions (Part II), Geochim. et Cosmochim. Acta. 31: 519-538
- Fournier R. O., Rowe J. J. (1966), Estimation of Underground Temperatures from the Silica Content of Water from Hot Springs and Wet-steam Wells, Amer. J. Sci., 264: 685
- Koga, A. (1969), Formation of Bicarbonate Ion in Hot Spring Water, Report on Hot Springs in Ōita Prefecture, Japan, 20: 59-62 (in Japanese)
- Koga, A. (1972), Geochemistry and Exploitation of Geothermal System, J. J. G. E. A., No. 34: 15-23 (in Japanese)
- Koga, A., Noda. T. (1973), Chemical Composition of Fumarole Gases in Beppu Geothermal Area, Japan, Report on Hot Springs in Ōita Prefecture, Japan, (in press)
- Mahon, W. A. J. (1970), Chemistry in the Exploration and Exploitation of Hydrothermal Systems. U. N. Symp. Development Utilization Geothermal, Pisa
- Sigvaldson, G. E., Cuellar, G. (1970), Geochemistry of the Ahuachapan Thermal Area, El Salvador, *ibid.*
- White, D. E. (1970), Geochemistry Applied to the Discovery, Evaluation, and Exploitation of Geothermal Energy Resources, *ibid.*

## 第VI章 地熱活動と開発状況

### 1 Zunil 地熱帯

最近、DGMHのMK. R. Randmets が予備調査を行った Zunil 地熱帯は、Quezaltenango 市の南部から、Zunil 部落、さらに南の Fuente Georginas 温泉に至る周辺一帯を含む地域で、10数カ所の温泉、噴気孔が広く分布している (Fig. IV-1, V-4)。今回、これらの地熱徴候地の中から、開発候補地を選定するために、概査を行った。

これらの地熱徴候地の大部分のものは、温泉、噴気が散点的に湧出し、一般に低温である。化学概査によるこれらの特徴は第V章で述べた通りである。この中で、Zunil 部落から南方に位置し、Samala 川の峡谷底の間欠泉を有する Fumarole Grande、およびその東側の Fumarole Negraを含む区域には、一群の活発な噴気孔、温泉が分布し、これらは同一の地熱系を構成しているとみなされる。この区域の地熱活動は、非常に優勢で先づ開発の対象となるものとして、調査の重点をおくことにした。以下に、主としてこの地区の地熱活動を要約しておく。

この地区は、ほぼその中央を、Zunil 滝から下流に徐々に深い峡谷を造る Samala 川が、北から南に貫流し、これによって地形的に兩岸に分けられる。地質的にもほぼ同様に、Samala 川に近い左岸部を、ほぼその流路と平行して、北東に走る西落ち断層 (正確でないが、落差約100mと予想している) に切られて、この地区は概ね左岸部および右岸部に2分されている。

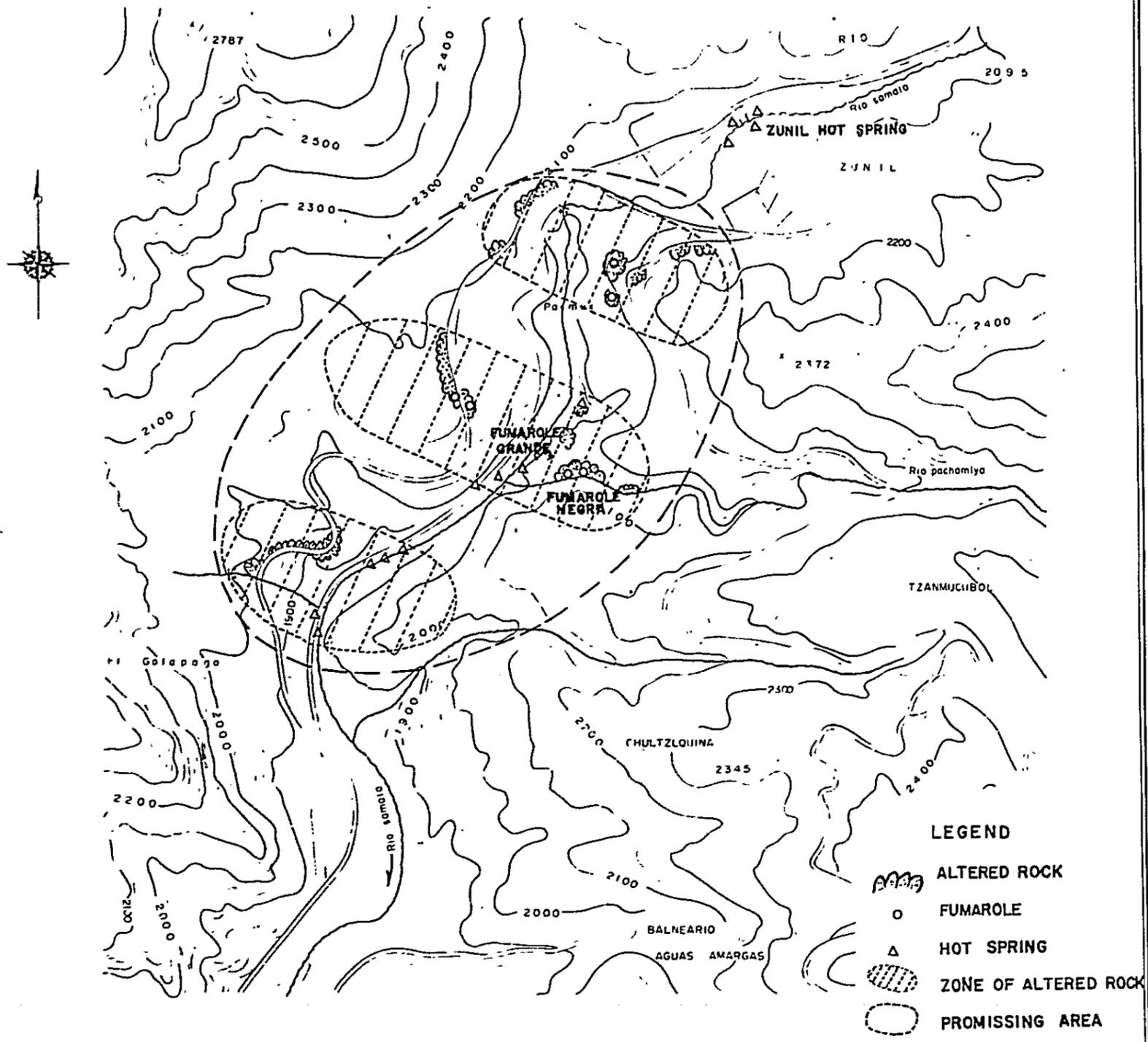
この地質の概要を述べると (第IV章、2)。

(1) 左岸部 (正確に云うと北東断層から東部) には、今回の調査地域に露出する Zunil group (第三紀火山岩類) の lower ~ lowest formation が分布している。したがって、狭い範囲に lowest formation が露出する fumarole Negra が、基盤の花崗岩まで最も浅いことになる。Zunil group の下限は不明で、この lowest formation から基盤の花崗岩までの厚さと層序を確かめることが、次の調査の重要な課題である。ほぼ水平層を示す Zunil group は、しばしばやや平坦な丘陵や台地状地形を造っている。

(2) 右岸部には、主として Zunil group の middle formation が露出しているので、左岸よりも基盤が深くなっている。この点は、地熱帯として、右岸部の方が条件が良い。

なお、右岸の Zunil group は厚さ推定100~150mの非常に新しい Zunil

Fig. VI-1- DISTRIBUTION MAP OF GEOTHERMAL MANIFESTATIONS IN THE ZUNIL FIELD, GUATEMALA



REMARKS  
 ORIGINATED FROM THE TOPOGRAPHICAL MAP "DUEZALTENANGO" (1:50,000)  
 AND REVISED BY K. WATANABE AND N. NAKAMURA'S FIELD SURVEY, MARCH 1973

0 05 10<sup>m</sup>  
 SCALE 1:10,000



water - fall 溶岩(多分有史時代の噴出。第四紀火山類, Cerro Quemado lavas に属す)に蔽われている。この溶岩流は Quemado 火山南東山麓から Samala 川に向かって東に流出し、扇形に拡がった比較的広い台地を造り、現在この地区の北部では Zunil 滝を超えて一部左岸部を蔽い、南部では Fumarole Grande の深い峡谷の右岸の絶壁を造っている。この溶岩の産状から、Samala 川がこの溶岩流で一時堰き止められ、Zunil 滝から上流の今日の Zunil 部落では、湖が形成されたことが、明らかである。その後 Samala 川の激しい侵食作用によって、Zunil 滝を造り、これから下流に狭い峡谷を刻んだものである。

(3) 北東断層に沿って、貫入した rhyodacite (流紋石英安山岩)が2つのドームを造っている。1つは Zunil 滝の東側の比較的大きいドームで、Samala 川左岸の絶壁を造り、その斜面に Paxmux Fumarole が見られる。他の1つは、Fumarole Grande と Fumarole Negra を隔てる小ドームで、同じく Samala 川左岸に断崖を造り、その底部に間欠泉が噴出している。

以上のような地形、地質に支配されて、この地区は概ね Samala 川を境として、右岸は第四紀の溶岩台地、左岸は第三紀火山岩がそれぞれ卓越した対照的な地形、地質を示しているようであるが、地熱徴候は兩岸各所に分布し、大局的に1つの地熱系を構成している。

#### 1-1. 噴気孔、温泉および変質帯の分布

一般に地熱徴候と称されるものは、主として噴気孔、温泉などと、いわゆる温泉作用(熱水変質作用)による変質岩を含み、これらの地熱徴候は、ある方向性をもつて分布するのが普通である。この分布上の特徴を把握するために、現地では約1万分の1縮尺のスケッチ、マップを作成し、これに地熱徴候をプロットした。

帰国後、INDE から提供された5万分の1地形図を1万分の1に写真で拡大して、この地形図に現地の地熱徴候を移したのが Fig. 11-1 である。同図から判るように、地表の地熱徴候は、Samala 川を横切って、大略NW-SEの方向を示す3帯の変質帯が認められる。ここでいう変質帯は、噴気孔、温泉を含め、ある方向に特に地熱活動が卓越する帯状の地熱徴候を指したものである。このように、変質帯がある方向性を示すことは、しばしば日本各地の地熱帯でも指摘されている。これは、現在の地熱活動の場が、地質構造上の弱線に沿って形成され、その活動のあらわれが、地上あるいは地表浅部にまで達していることを示唆するものである。

説明の便宜上、これらの変質帯を、東側から第I、II、III変質帯と仮称し、各変質帯について地熱徴候の概要を述べる。なお、これらの各帯の変質鉱物は第IV章3で説明し、ここでいうI、II、IIIの各帯は、それぞれ第IV章の Paxmux 地区、Fumarole Grande - Negra 地区の北部、および同南部に相当する。また各帯の温泉、噴気ガス、噴気凝縮水、変質岩(土壌)

の地化学的特徴は、第V章で述べている。

#### 1-1-1 第I変質帯(Paxmox地区)

Samala川の右岸には、溶岩台地を切るHigh-wayに軽微な溶岩の変質が見られるだけである。

右岸部には、Zunil 部落からFuentes Georginas 温泉、Sulphur Mine に通じる山道(未舗装の自動車道)の入口から、約0.5km間、かなり強い変質岩がみられる。これは、前記のrhyodacite ドームの西斜面で、この断崖は道路からZunil 滝の直下、左岸底部まで達している。この崖の途中に変質帯を伴う噴気孔が2カ所に認められ、底部に温泉が湧出している。rhyodacite に発達する管孔はN20~40°W、また滝のすぐ下流を走る小断層(落差約30m)はN65°E方向を示し、前記の北東に走る主断層に派生した副断層とも考えられる。

要するにPaxmox地区は、大局的にNW方向に変質帯が広がっているように見えるが、これは主として、粘性の強いrhyodacite の貫入による割目と、北東に走る主断層の影響などが複合して、地熱徴候地を造っているものであろう。

#### 1-1-2 第II変質帯(Fumarole Grande - Negra 北部地区)

右岸の前記の溶岩台地を切るHigh-wayに、微弱であるが噴気活動がみられ、温度は71°Cを示している。しかし、前述のように(第V章3-1)、噴気凝縮水のHg量は地下に相当高温部の存在を示している。この噴気孔の周辺の溶岩も軽微な変質を示している。

一方、左岸では、Samala川の支流のPachamiya川下流部に幅20~40m、長さ180m内外の変質帯が発達し、数箇所から盛んに噴気を生じている。Fumarole Negraと呼ばれる。その圧力は低いが、温度は94°C(標高約2,000mの高地での沸とう点)以上である。孔口に自然硫黄の析出もみられ、また多量のHgが検知されて、地下の優勢な熱源が示唆される(第V章3-1)。

Pachamiya川は、Samala川に入る部分は懸崖(hanging valley)となり、ここに滝を造り、Samala川本流とはいわゆる懸谷の関係を有する。この合流点からSamala川の本流約300m間には、この区域で最も活発な地熱徴候がある。これがFumarole Grandeで、左岸断崖の河水面から約20mの高所に間欠泉がある。約500L/minの豊富な湧出量を有し、前述(第V章3-1)のように、Zunil地熱帯の中で認められる、ただ1つの食塩泉型の深部熱水である。これによって、地下に優勢な熱水だまりを有する熱水型の地熱帯を構成していることが判る。その他、この間欠泉の峡谷の対岸、旧鉄道線路の直下河床から多量に高温の温泉が湧出し、また、これから下流側は線路の路盤高に沿い、またSamala川の兩岸各所からや

温度の低い温泉が湧出している。

地上でみられる地熱活動は、この第Ⅱ帯が最も活発である。強い変質作用を示す石英、クリストバライトを含む珪化岩もしばしば認められ(第Ⅳ章3)、有望な区域である。

要するに第Ⅱ変質帯は、rhyodaciteの小ドームの両側に位置するFumarole GrandeとFumarole Negraを中心とするもので、北東に走る主断層およびこのドームに支配される割目系を通路として、活発な地熱活動を続け、この通路から供給される地熱流体はZunil groupなどに貯留されているものと考えられる。

### 1-1-3 第Ⅲ変質帯(Fumarole Grande - Negra 南部地区)

右岸の溶岩台地を切るHigh-wayを南下して、この台地に被覆されるZunil groupのmiddle formationの区域に入ると、道路の切割や谷川の崖などに、前記の珪化岩をしばしば含む強い変質帯がみられる。しかし、噴気孔などのような活動中の地熱徴候はみられない。

一方、ほぼこの変質帯の延長が、Samala川を横切る、前記のFumarole Grandeの下流部に、数箇所から温泉が湧出する。温度は約60℃から70℃の範囲のものが多く、しばしば湧出口に石灰華を沈澱している。

### 1-2 噴気活動と温泉との関係

上述のように、Zunil地熱帯には、局部的にかなり著しい変質岩を伴って、噴気孔、温泉等の地熱活動がみられる。しかし、すべての変質帯に必ずしも噴気孔、温泉等の熱徴候が伴っていない。例えばZunilからGeorginas温泉に通じる道路上の変質帯(第Ⅰ変質帯)、あるいは溶岩台地から南方のHigh wayの著しい変質帯(第Ⅲ変質帯)などは、現在は休止しているが、かつて明らかに噴気、温泉活動が現在の地表あるいは地表近くまで、達していたことを物語るものである。しかし、現在地熱活動が見られない理由は、その後、①噴気、温泉活動が停止したか、②熱水のポテンシャルが低下して、地上まで到達することができないのか、このいずれかであろう。

この問題はいわば、古く活動し、今日では全くその活動を停止した変質帯、または地熱帯と、今日そのポテンシャルが低下したとしても、地下ではなお活動を続け、生きている地熱帯とを識別することであり、地熱開発のための世界共通の1つの大きな課題として残されている。いい換えると、地熱帯の地熱活動の歴史を組み立てること、勿論、これを俄かに結論することは、非常に難しい。

この地区の場合、Fumarole GrandeやNegraの活動、あるいは、溶岩台地の微弱な噴気にしても、前述の通り、いずれもなお地下の活発な地熱活動を反映していると推定されるの

で、すでに停止したものと考えるのは妥当でない。

地熱活動が次第に弱くなっているかどうかは、別問題として、現在高所にある変質帯に噴気や温泉が直接達していないことについては、単純であるが、次のような考え方もできる。

すなわち、この地熱帯の中央を、深い峡谷を刻んでいる Samala 川の侵食作用によって、その両岸部の地下水面の低下を生じたとする考え方である。この地下水面の低下が、地下に予想される熱水だまりのポテンシャルに影響したという推定である。

このことは、この地区の Zunil 滝直下の温泉、Fumarole Grande の間欠泉付近および下流の温泉群の標高が、例えば、Georginas 温泉への道路入口の高所の変質帯に比べると約 80~100m 低いということから考えられることである。

しかし、地熱帯の地下水、温泉水あるいは熱水が、砂礫層中の地下水のように、広く地層を充たして存在するということは、一般に考え難いので、この説明で十分かどうかは疑問が残る。特に本域のように火山岩類の貯留層を求める場合は、この中で例えば、凝灰岩や凝灰角礫岩などのような、比較的透水性のよい岩石でも一般の砂礫層の場合と同様に取扱われない。しばしば、これに伴われる節理や割目がより良い通路となり、これらが密集した場所が良好な貯留層となることなども考えなければならないので、なお問題が残される。

### 1-3 熱水の存在状態

Zunil 地熱帯の Fumarole Grande を含む地区には、熱水系の地熱機構が推定されることはしばしば述べてきた。この地熱帯の好適な条件は、簡単に云えないが、概括的に地熱流体の通路と、その貯留層、帽岩に注目されねばならない。

Zunil 地熱帯では、貯留層や帽岩として、時に第四紀火山岩類の Cerro Quemado group の一部が当然参加して差支えないが、主として第三紀火山岩類の Zunil group がその役割を果たしているものといえる。

この報告書では、説明を簡単にするために、この Zunil group について、例えば、緻密岩などの一般に透水性の乏しいものを帽岩とし、これに比較して、透水性の良い凝灰岩や凝灰角礫岩などの火砕岩が貯留層となると、概括的に説明している。また、これに加えて、岩石の割目の発達状況も、貯留層や帽岩を決定するために注意を要することを述べている。割目系は当然、火山岩の貫入や断層などの地質構造とも関係があり、地熱流体の主な通路となる。

要するに、やや教科書的に云えば、地熱流体の貯留および通路に関係するものは、その1つは岩石や地層の空隙率、溶岩などの冷却収縮節理、地層面また特に風化部を被覆する不整合面、その他の初生構造に属するものである。他の1つは、これらに2次的に作用した地質構造に属するもので、例えば、断層や褶曲に伴う節理・割目・破砕帯、火山岩の貫入または火山性陥没などによってそのまわりに生じた破砕帯および同心円状や放射状に走る断層や割目系などが、

すべて関係することになる。

Zunil 地熱帯で特に注目すべき事項は、Zunil group の詳細な層序、とくに lowest formation 以下基礎花崗岩類までの厚さと層序、Zunil group と花崗岩類との関係、主に断層系に支配される地質構造と貫入火山岩類との関係などが今後の調査の重点課題となる。

## 2 Moyuta 地熱地域

### 2-1 はしがき

3月5日および、6日の両日 Moyuta Geothermal Area の一部である Guinea と Azulco の2箇所を視察したので、その概要をしるす。

すでに述べた Zunil および、後に記す El Salvador 国の Ahuachapan などと同じように、これらの地熱地帯は、Guatemala 国および、El Salvador 国を横切って、およそ E-W あるいは、WNW-ESE の方向に分布している環太平洋火山帯 (Circum Pacific volcanic belt) および同国の中央地溝帯 (Central graben) に密接な関係をもっている。

Guatemala 国内では、この Volcanic belt は長さ約 300 km、幅は約 70~130 km といわれ、その火山活動は地質時代的に第三紀後期 (Late tertiary) ~ 現世 (Recent) であるといわれる。

Moyuta と Ahuachapan は、わずかに約 35 km を隔つのみであって、いろいろの点で大変よく似ている (参照, Fig. VI-2)。

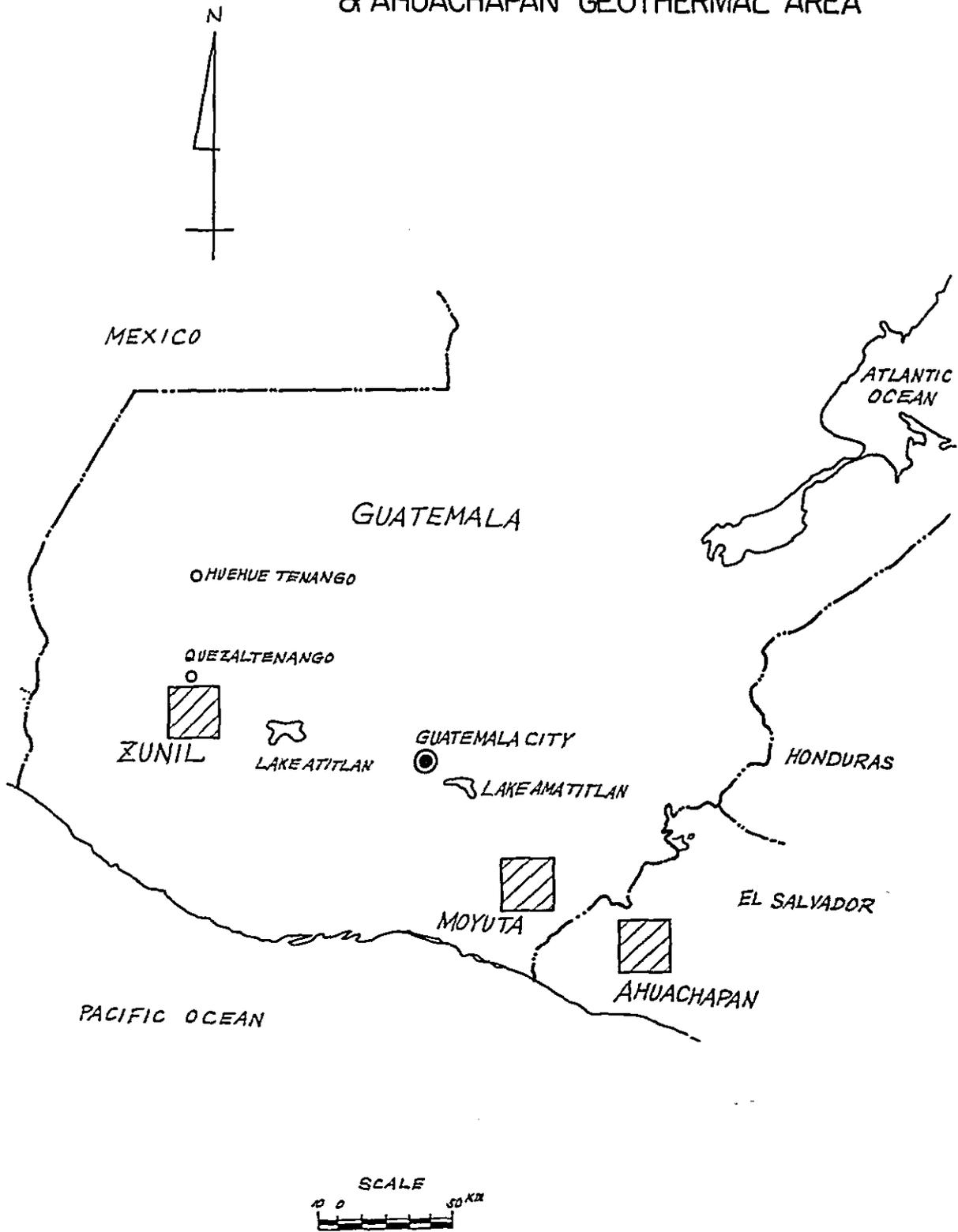
### 2-2 地質および地熱徴候

この地域を構成する地質は主として第四紀 (Quaternary) および、現世火山堆積物 (Recent volcanic deposits) であって、安山岩質~玄武岩質の溶岩流 (Andesitic ~ Basaltic lava flow), 暗色火山灰 (Dark ashes), 集塊岩 (Agglomerates) および、火山角礫岩 (Volcanic breccias) などから成っている。

Moyuta 地区には多数の温泉、噴気孔 (Fumarole), 変質帯 (Altered zone) などの地表徴候が存在している。また、Moyuta 部落の近くには、Moyuta 火山 (標高 1,662 m), および、それに寄生する小火山のほか、岩滓丘 (Cindercone), 溶岩円頂丘 (Lava dome) などが多く認められる。これらの徴候は構造線に沿って分布しているものと考えられる (参照 Fig. VI-3)。

Fig. VI - 2

LOCATION MAP of ZUNIL MOYUTA  
& AHUACHAPAN GEOTHERMAL AREA







## 2-3 地熱徴候分布

今回視察した地熱徴候地はAzulcoおよびGuineaの2個所であり、いずれも地区の東南部に当り、共に同じ地熱系に属するものとみなされている。この付近には、(1)Azulco (Las Nomas)、(2)Guinea (Moyuta 部落の近く)のほか、(3)Marcucci、(4)Padre Marianoと合計4個所のFumarole地域がある。

MarcucciはGuineaの北方約1kmにあり、標高は約650mである。Padre Marianoは火山性陥没(Volcanic depression)の外側に存在している。

### 2-3-1 Azulco

標高約660mでAzulco部落から徒歩約1時間である。実査した範囲ではAzulcoの徴候が最も規模が大きく約4kmの範囲にFumarole、Hot Spring、Altered zoneが、かなり密度濃く分布している。岩石の露出はBasaltが認められる。Alterationはカオリン化作用(Kaolinization)、リモナイト化作用(Limonitization)が認められる。地表徴候は断層に沿って、あるいは断層の交叉点に分布するように見える。

### 2-3-2 Guinea

標高約1,020mの道路のすぐ近くにあり自動車で行くことができる。Fumarole、Hot Spring、泥火山(Mud pot)などが、小さな沢に沿って密集分布している。道路の切割(Cutting)には著しい白色変質部分の露出があり、顕著なKaolinizationが認められる。Azulco、Guinea共に蒸気、あるいは熱水の温度は98℃~100℃である。

これらの地熱徴候はいずれも地下に潜在する熱水貯留層から発散した水蒸気が滲透した地表水(浅所の地下水)と混合加熱して生じたものである。深部の熱水が直接に地上に湧出するものではないようにみられる。この点ではEl SalvadorのAhuachapanとは非常によく似ており、今回の調査の対象であるZunil地区とは若干様子が異なるように思われる。Zunilでは深部熱水の一部が間欠泉(Geyser)あるいは高温泉水としてSamala川の河岸から湧出しているようにみられる。

## 2-4 地形、その他

地形的にはZunilにくらべて、河川による侵蝕はまだそんなに著しく進行していない。すなわちAzulco地区一帯は高距600m~1,000m、Guineaは800m~1,000mであって比較的平坦な地勢の中に徴候が密度濃く集中している。

なお両地区の北方隣接地域には500~600mの平坦地、すなわちMoyuta-Jalpatagua valleyといわれる幅広い谷間が広く分布しており、東・西・南の隣接地域には多数の溶岩円

頂丘 ( Lava dome ) の山塊が分布している。

地形的には Ahuachapan によく類似しており、したがって物理探査、試錐などの作業は容易である。

交通は Zunil と同様に大変便利で Guatemala City より約 110 km、自動車にて約 2 時間半で到達する。付近一帯は牧畜、農産物が若干行われている程度で、コーヒー園が所在する地熱開発に特にさまたげとなるものは考えられぬ。土地の買収についても特に問題点はなく、試錐もこれを特別に規制する法律はなく、どこでも行う事が出来る由である。

## 2-5 調査経過

(1) 1971年国連の援助により Guatemala 全土におよぶ地表の地熱微候の調査が行われ 23 箇所が選択され、Moyuta が最も有望と考えられた。5月に地質予備調査、熱水の採試分析が行われた。

(2) 1972年3月～5月、5万分の1 Scale の地質精査、空中写真の解説、地質構造図の作成。

(3) 1972年2月地形測量 ( INDE による )、80 km にわたる地質断面図の作成。

(4) 現況

1) Fig. VI-3 に示す計画路線に沿って約 14 km × 9 km の範囲に重力、比抵抗の探査をとり進めている。

解析についてはアメリカの会社に依頼しており、又比抵抗調査は、以前に国連より供与された I-P 探査用機械 ( Heinrichs 製 ; Generator 付 ) を使用しているため、探査可能深度は約 300 m 程度で十分効果を発揮していない。

2) 同じ地域内で地温分布の調査を行いつつある。INDE には試錐機はないので、Direccion General de Minería e Hidrocarburos ( 以下 DGMH と称す。 ) にある 2 台の試錐機の内、Winkie 機 ( 能力 100 m 級 ) を使用して行っている。

3) 地質調査及び地温の上昇率の調査のため試錐を実施中である。既に Fig. VI-3 に示したように、D-H-Jocotillo、D-H-Moyuta を終了し、我々の視察時には DDH-I-Soyatea を掘進中であつた。夫々の試錐孔の様子をしるすと

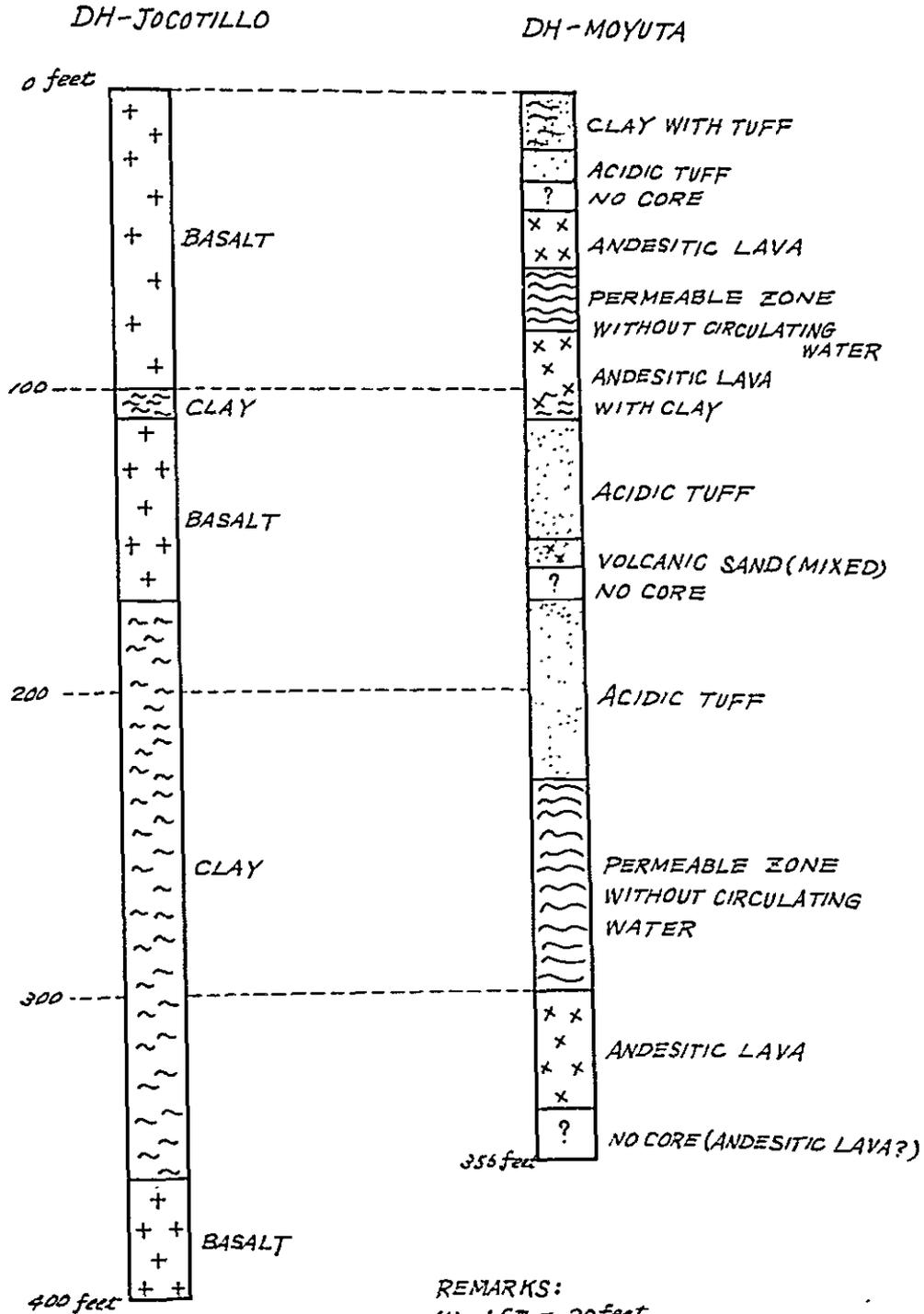
a) D-H-Jocotillo 深度 400 feet にて終了。地質は主として、玄武岩および粘土層よりなる。温度は 40℃。深度 37 feet にて 700 ガロン/分の多量の湧水があつた。地質柱状図、( 参照 Fig. VI-4 )

b) D-H-Moyuta 深度 356 feet にて終了。地質は主として酸性凝灰岩類や安山岩質溶岩よりなる。湧水はなかつた。地質柱状図、( 参照 Fig. VI-4 )。

c) DDH-I-Soyatea 深度 300 m を目標に現在掘進中である。深度 40 feet

Fig. VI-4

GEOLOGICAL COLUMN of HOLES  
IN MOYUTA THERMAL FIELD



REMARKS:  
 (1) 1 cm = 20 feet  
 (2) ORIGINATED FROM MR. R. RANDMETS'S RECORD

で温度34℃。視察時の深度801 feet 引続き掘進の予定。一方操業で7名で行っている。内訳はOperator 1名, Assistant operator 1名, Helper 2名, Assistant helper 3名, 合計7名である。

Guatemalaは人件費の安いこととはあるとしても、日本では、普通2名操業である。勤務時間は7:00～16:00でこの間に1時間の昼食休みをとる。Bit size は初めBX(60mm)で開始、現在はAX(49.2mm)にて掘進中である。いまのところPreventerなどの器材を全く持たないので、徴候に近いところの試錐は危険を恐れて行っていない。

上述の諸作業がアメリカのConsultant会社の指導により行われている。INDEには探査関係の技術者がいないため、INDEとDGMHの共同で、この地熱探査を行っている。El SalvadorのAhuachapanとは異り、国連の資金援助はなく、すべて自己資金でやっている。

INDEには探査用の機器類はないので、DGMHのものを使用している。参考迄にDGMHの所有器材などについてしるすと、

- (1) 物探 I. P器(Heinrichs製; Generator付)1台, Gravimeter 1台, Magnetmeter 2台, Resistivity (Batteries) 1台, EM-Gun (Batteries)
- (2) 試錐 能力100m級Winkie機1台, 300m級Boyles機1台の2台あり、共に以前に国連よりの提供品であって、かなりその性能は低下しているものと思われる。試錐外注の場合はSwissのDauber and Hoffman Co.がある。
- (3) 探査関係技術者としてはDGMHのGeologist Mr. Rein Randmets, Geophysicist Mr. Cesar Recinos, Geochemist Mr. Rodolfo Mendozaの3氏が主なメンバーである。技術者の数は非常に少いようにみうけられた。
- (4) 一般労働条件としてMoyutaでの試錐ではOperatorは\$250/month, ただし、fieldに出く場合は\$50加算。Helperは\$100/month。なおZunilで雇った人夫は\$1～1.5/dayであった。一般に自動車運転手\$140/month, タイピスト\$120/month, 英会話の出来るタイピスト\$140/month内外の由。

またfieldに出て仕事をする場合は原則として22日間連続して働きついで8日間の休暇をあたえることになっている由。ただ必要により22日間以上にわたり、作業をさせることも困難ではないとのこと。

公休出勤には2倍賃金支給とのこと。

## 2-6 Mr. Rein Randmetsの意見

DGMHのGeologist Mr. Rein RandmetsのReport (Preliminary

geologic report of the Moyuta geothermal field, Guatemala) の提供を受けたので、その主要内容及び結論をしるすと(参照 Fig. VI-3)

- (1) 地表は第四紀の Andesitic, Basaltic lava, Pumice, Tuff により被覆されている。
- (2) 地表に近く存在する Agglomeratic の堆積物は非常によい帽岩 (Cap rock) となっている模様。
- (3) 大きな構造として火山構造的陥没が考えられ、これは数字の 8 の字型をしており、その北の大円は経約 18 km, 面積約 175 ㎞<sup>2</sup>, 南の小円は径 9 km, 面積約 95 ㎞<sup>2</sup> で、両者の合計面積は約 270 ㎞<sup>2</sup> という規模である。この陥没地帯の内側では多数の断層による地塊運動が行われ、地熱のよい供給路となる割れ目が多く存在している。
- (4) 断層系としては NW 系, N-S 系, NE 系の 3 系統のものが考えられる。地域の東部に特に著しく断層群が集中して存在している。そしてこれらの断層に伴って地塊運動が行われている。
- (5) 陥没の東南周辺部には多数の地熱徴候の噴気・噴湯が存在し、特に Azulco, Guinea の両者は地表徴候が特に優勢で地下の良好な地熱溜りの存在を示すように思われる。
- (6) 噴気の最高温度は 100℃ であり、カオリン化作用 (Kaolinization), リモナイト化作用 (Limonitization) などの熱水変質作用は約 7~8 ㎞ にわたり分布している。
- (7) 熱水中のシリカの含有量, Na:K の比率によれば問題点はあるが、計算値として 200℃ 以上の地下温度が予想される。また熱水中の Cl の含有量は 2~3 ppm と少いが、これは地表水が熱せられたものと思われる。El Salvador の Ahuachapan では温泉中に Cl が 500~700 ppm あり、深い井戸から得られる熱水中には 8,000 ppm 以上の Cl を含むといわれる。
- (8) HCO<sub>3</sub> は 0~450 ppm が含まれておりかつ、この地域の北方には石灰岩及び大理石の露出が認められることから、この地域の下部には石灰質岩の潜在が考えられる。もし幸いにこの様な構造であれば、イタリーの Larderello とよく似ており、乾燥蒸気の得られる可能性も考えられる。

## 2-7 結語

以上 Moyuta 地熱帯についてその概要をしるしたが、この地区は Zunil 地区に比べ、地熱のポテンシャルは同程度或は以上の感がある。そして地熱開発のための立地条件は Zunil よりも良好であると思われる。Zunil, Moyuta, Ahuachapan は同じ火山帯、地溝帯に存在し類似点が多く、特に Moyuta ~ Ahuachapan は距離的に、35 km を隔つのみでよく似ており将来性があると予想される。

現在 INDE と DGMH の共同でアメリカの Consultant Co. の指導により自己資金で作業をとり進めているが、今後はさらに調査を進め詳細なデータを集めるように探査を行っていくことが望ましい。

### 3 Ahuachapan 地熱地域

#### 3-1 はしがき

3月7日 El Salvador 国の Ahuachapan 地熱地域を短時間ではあるが視察し、かつ先方より資料の提供を受けたので(3-7引用報告書の項参照)その概要をしるす。

現地訪問の節は Ah-12 と称する生産井を掘削中であつた。すでに開削された Ah-1, Ah-5, Ah-6, Ah-7 の各孔井の合計生産量は、蒸気量約 300 T/H, 熱水量約 900 T/H であつて 30 MW の発電所建設が確定しており、積極的に開発中であつた。

開発中の地熱地域は El Salvador 国の西部に位置し Guatemala 国の Moyuta 地熱地域の南東約 35 km に位置している。(参照 Fig. VI-2)

開発地区は Ahuachapan 市街地の東方約 3 km にある。Guatemala 国の首都 Guatemala City および El Salvador 国の首都 San Salvador のいずれからも自動車にて容易に現場に到達出来る。

現地は標高約 700 m ~ 1,300 m の比較的平坦な地形であつて、地勢は Moyuta によく似ている。

立地条件は大変よく、付近にはコーヒー園が存在する程度で、地熱開発のために、特に支障はないように見うけられた。

Ahuachapan 市街地には Estudios de Recursos Geotermicos (地熱資源調査所とも称すべきか?) の事務所があり、Geologist の Mr. José Estevez が駐在していた。市街は可なり大きく色々な店もあり開発の条件には恵まれている。

#### 3-2 調査の沿革

##### 3-2-1 調査の開始

El Salvador 国における地熱資源の調査は 1953 年に始まり同国の CEL (Comision Ejecutiva Hidroelectrica del Rio Lempa = レンパ川水力発電実施委員会) と Servicio Geologico de El Salvador (地質調査所) が共同で主体となり、それに地熱専門家数名が参加して 1959 年までの約 6 年間行われ、種々の地科学調査 (Geoscient-

ific Survey) および11本の浅井戸堀削がAhuachapan 地熱地帯で実施された。その結論は同地帯は有望であり、精査の必要大いにありということでCELは地熱発電可能性調査の援助をUN Special Fund (国連特別基金) から受けられるよう政府に要請した。このSpecial Fund は1965年に承認され、1966年に入ってから次にしるす精査が行われた。

### 3-2-2 精査

この精査はかつてのプロジェクト・マネージャーであったFallen Baily氏と国連が準備した各国の専門家の指導のもとにEl Salvador国の科学者たちにより実施された。

まず地質精査と物理探査が行われ、その結果に基づいて探査井(深堀)の位置が選定され1968年3月から9月までにBerlín地熱地区に2井、Ahuachapan地区に3井(Ah-1, Ch-1, Sa-1)が完成された。また深堀作業の進行に応じて地化学探査が実施された。

これらの調査結果は1968年末にSurvey of Geothermal Resources, Progress Report, UN-CEL としてとりまとめられた。

### 3-2-3 第2次調査計画

1970年1月には国連開発計画(UNDP)のEl Salvador国地熱資源調査技術検討会の勧告(1969年12月)に基づいてプロジェクト・マネージャーがAhuachapan地区の深堀試錐を主体とした第2次調査計画を発表した。その内容の主なものは

#### a) 深堀試錐

試堀井 5本, 深度 600m~900m/本

再注入井 1本, 深度 1,400m

予定総日数 171日

#### b) 浅堀探査井

4本, これは水位観測, 水の化学成分観測を目的とするもの。

#### c) 水文学的調査

河川測定所, 温度測定所の設置, 水理地質コンサルタントによる水理地質図の作成。

#### d) 物理探査の追加

Chipilapa - 1号井の東方地域25km<sup>2</sup>に重力探査を実施すると共に, Chipilapa~La Labor およびCuyanausul全域に比抵抗コンターの作成。

#### e) その他に水の年代測定, 再注入井における沈澱調査が含まれている。

上記の計画に基づいて深堀試錐としてはAh-5, Ah-6, Ah-7, Ah-9, Ah-10が1970年2月から7月までに堀削された。これと相前後してUNDP(国連開発計画)のEl Salvador 国地熱資源調査班はIceland国の地質コンサルタントJohn Jonsson氏

に、Ahuachapan 地域の地質精査を依頼した。この調査の内容は

- a) Ahuachapan 地域100 歳の縮尺1:25,000の地質図の作成。
- b) 地表の地質構成と試錐による地下地質との対比
- c) 地質図、物理探査、地化学探査のデータおよび試錐結果を総合して地熱リザーバー ( Reservoir ) を解析。

上記の地質図作成のための野外作業は3カ月を費している。

### 3-2-4 開発調査

ついで1971年には開発調査の段階に入りUNDPはAhuachapan 地熱地域の全エネルギーポテンシャルの試算、開発計画および経済的検討をUSA Oregon 州立大学Gunnar Bodvarsson 氏およびNew Zealand 国事業省( Ministry of Works)のR.S. Bolton 氏に依頼する一方、それに関連する坑井内の各種計測を同じくR.S. Bolton 氏に依頼した。これらの結果は1971年5月および6月に報告されている。

さらにUNDPは発電所用資材の腐食試験をNew Zealand 国の専門技師W. R. Braithwaite 氏に委託し、その中間報告は1971年に提出されたが、その最終報告は11月上旬試験完了後New Zealand 国の科学工業研究部( Department of Scientific and Industrial Research in New Zealand ) から発表されることになっている。

上記のように1971年は開発のための各種研究に終始し、1972年に入ってからCEL 単独による深掘試錐が継続されAh-4, Ah-8, Ah-11が完了し、調査団が現地視察を行った時はAh-12が掘進中であった。

### 3-3 地質と構造

#### 3-3-1 広域調査(概査)

El Salvador 国をWNW方向に縦断する一大地溝帯( Graben ) の存在は前々から地質学者により提唱されているところであり、その延長は隣国のGuatemala 国にも広がっていると考えられている。Ahuachapan 地熱地域はこの地溝帯の西境に近いところに位置している。(参照 Fig. VI-5)

1968年の国連およびCEL( Lempa 川水力発電実施委員会)の共同調査は、Ahuachapan, Playon de Chipilapa, Playon de Salitre を含む広域に実施され、地表地質調査と共にAh-1(1,205m), Ch-1(984.85m)およびSalitre No.1(865.5m)の3本の調査井が掘削された。(参照 Fig. VI-6)

Mario Jiménez 氏は地表および調査井の地質データから本地域の地質層序をTable VI-1

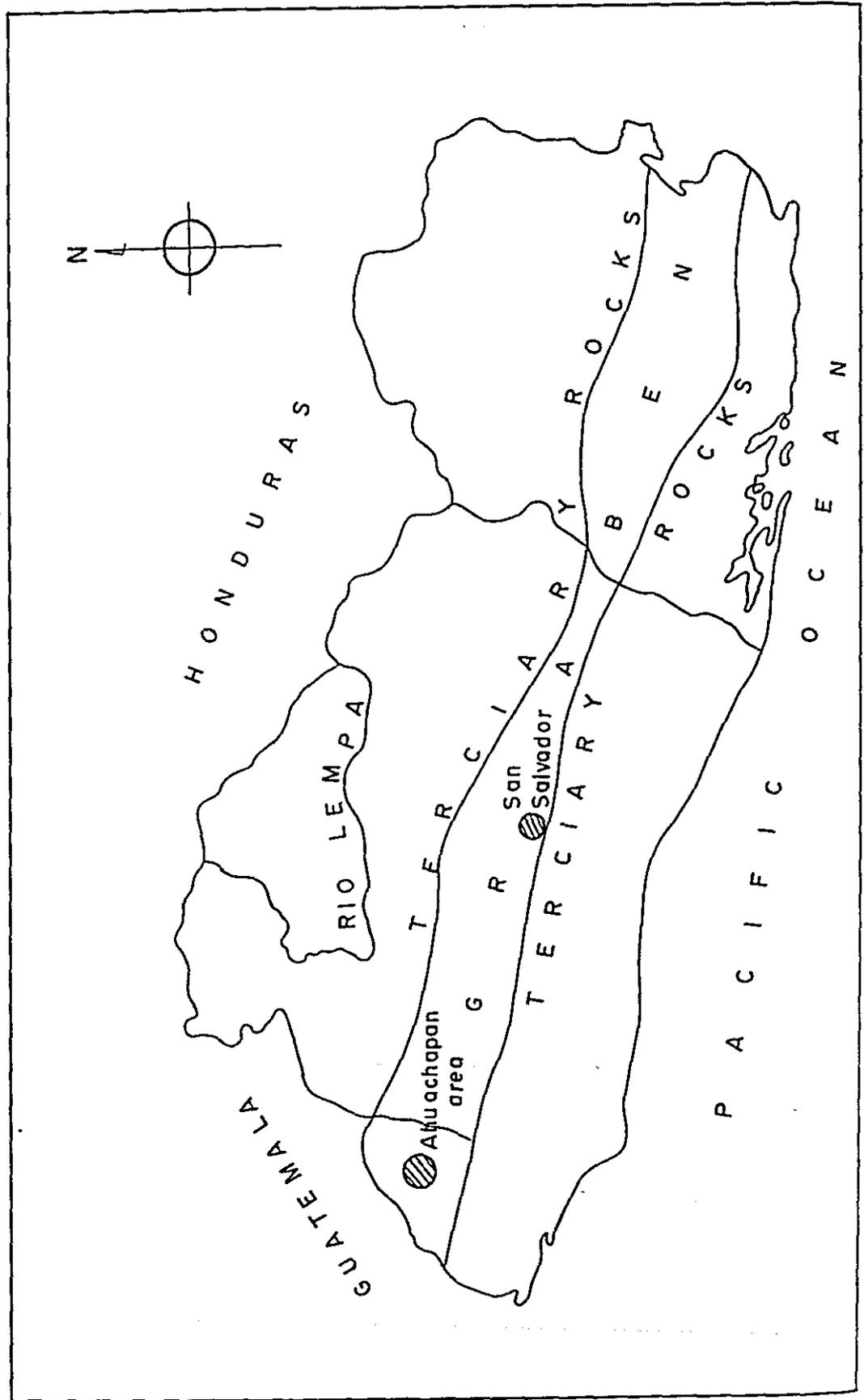
Table VI - I STRATIGRAPHY

Geol - Age		Thick of Formation	Rock Facies
Quaternary	Pleistocene	400 m ~ 600 m	Thick pumice tuffs . Basic lavas . Pyroclastics . Grey welded tuff . Severe weakered tuff and pumice . Dark grey agglomeratic tuff . Thick lamiated basic lava .
Tertiary	Pliocene		Red horizon : yellowish red tuff and agglomerate  Basic lavas and agglomerate with middle to high density .  Compact tuffs .

REMARK : AFTER MR. MARIO JIMENEZ'S DATA (JUNE .1973)

Fig. VI-5 LOCALIZATION OF THE AHUACHAPAN  
GEOHERMAL AREA EL SALVADOR

(After Mario Jimenez's Map)





の如くとりまとめた。

また地質構造としては次の3つの断層系列が認められた。

- a) WNW方向 南部で地溝帯と接触をなすもの。
- b) NE方向 Ahuachapanの西の地域で顕著。
- c) NNW方向 NE方向の後で出来たもので、Laguna Verde地区の熱水徴候はこの系列に伴う。

NE, NNW方向は共に地下の鮮新世(Pliocene)地層の転位(Dislocation)に関係しており、初期の水蒸気の通路となったものと考えられる。

本調査による地熱徴候地としては

- a) Laguna Verde地区
- b) Playon de Salitre地区
- c) Rio Paz地区

の3カ所があげられているが、試錐資料その他からLaguna Verde地区が最も重要で精査すべき価値ありとした。Laguna Verde地区にはAh-1, Oh-1の2本の調査井が掘削されている。

Jiménez氏のAhuachapan 1号井(Ah-1)の地下地質の観察を、Fig. VI-7のようにとりまとめ要約した。

なおPlayon de Salitreに掘削されたSalitre 1号井(Sa-1)は失敗であった。

### 3-3-2 精査

国連の要請により地質調査を実施したIceland国の地質コンサルタントJon Jonsson氏は前記の概査結果に基づいて、最も重要なAhuachapan区域(Ahuachapan市街地~Laguna Verdeを中心とした区域)面積約100km<sup>2</sup>の縮尺1:25,000地質図を作成した。

その時に組立てられた、地質の層序(第四紀層-Quaternary)を、Fig. VI-8にとりまとめ要約した。

Fig. VI-9はJon Jonsson氏の地質図よりLaguna Verde地熱地帯を中心とした区域を抜粋したものである。

この区域には深掘井の他にM-1~M-4(最深300m)の探査井が掘削されているが、これらのデータは層序の確立には余り効果がなかった。しかし深掘井のAh-1, Ah-5, Ah-6, Ah-7の岩石学的対比は比較的容易であり、さらに重要なことは、これらの深掘井の同じ程度の深度に高い浸透性をもった帯(Zone)があることが認められたことである。(参照Fig. VI-10)

ただし、Ah-9とAh-10の2本の深掘井では上記とは異なる結果を示し、これは後述す

Fig. VI - 7 AHUACHAPAN COLUM

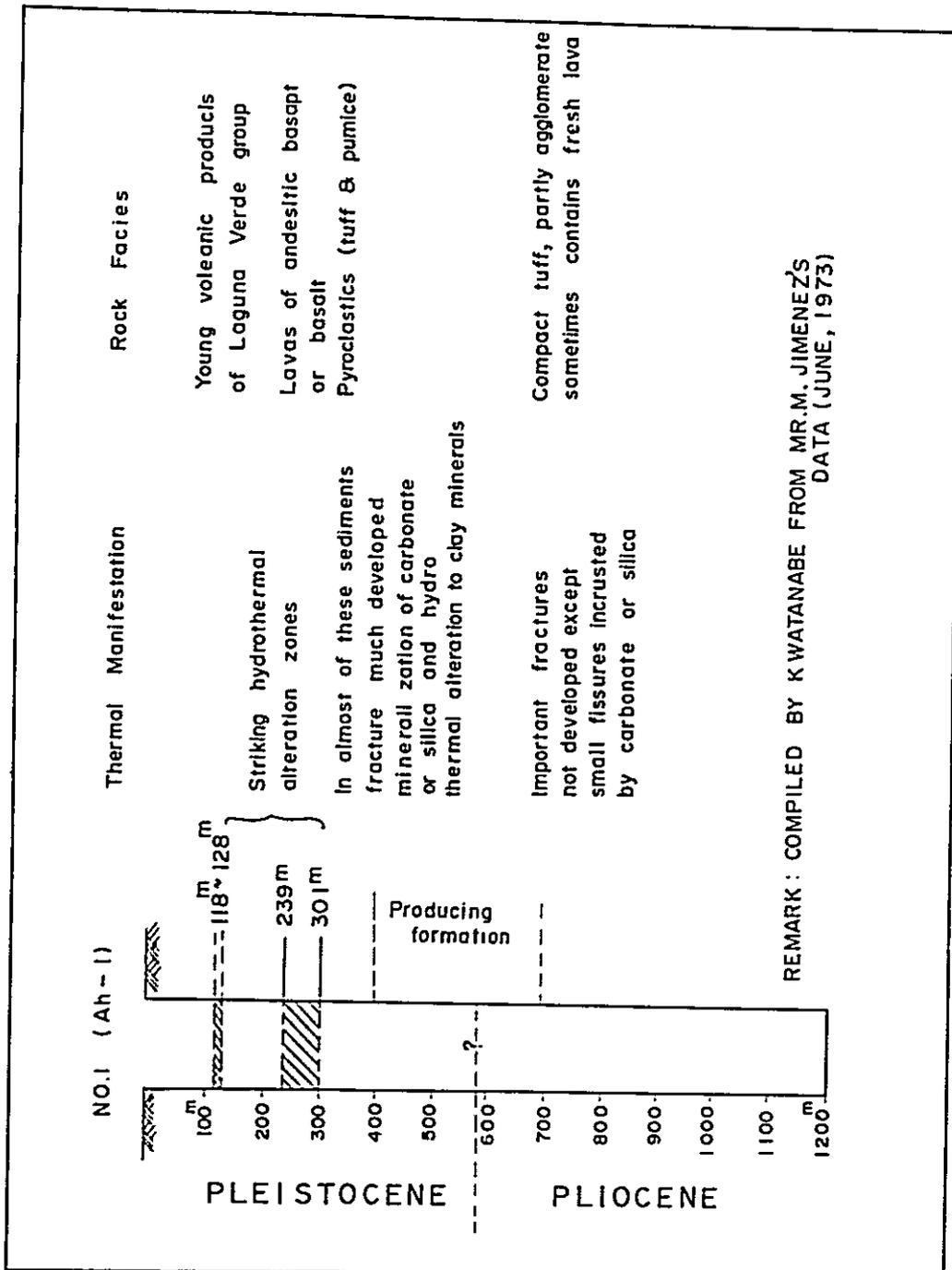
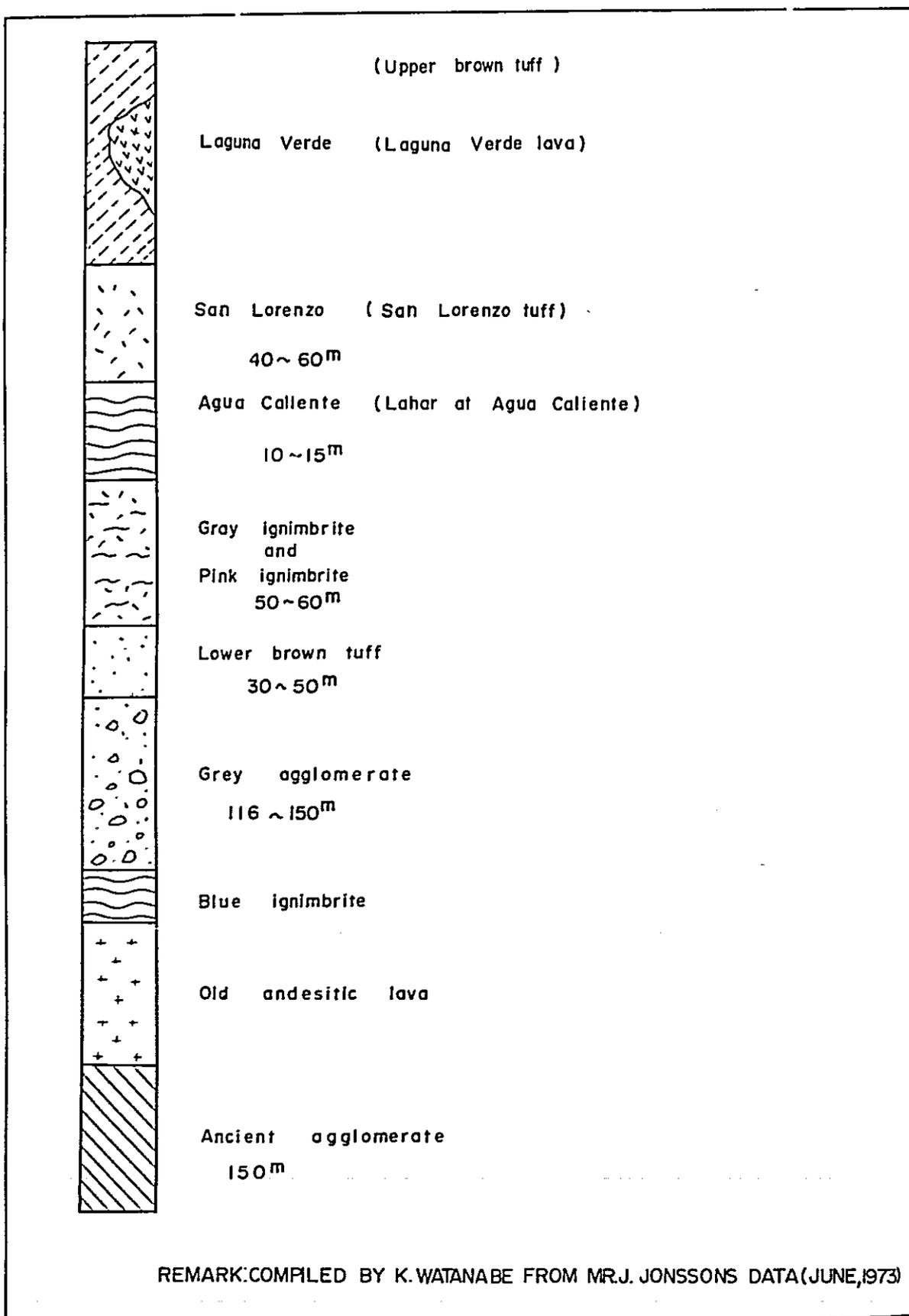
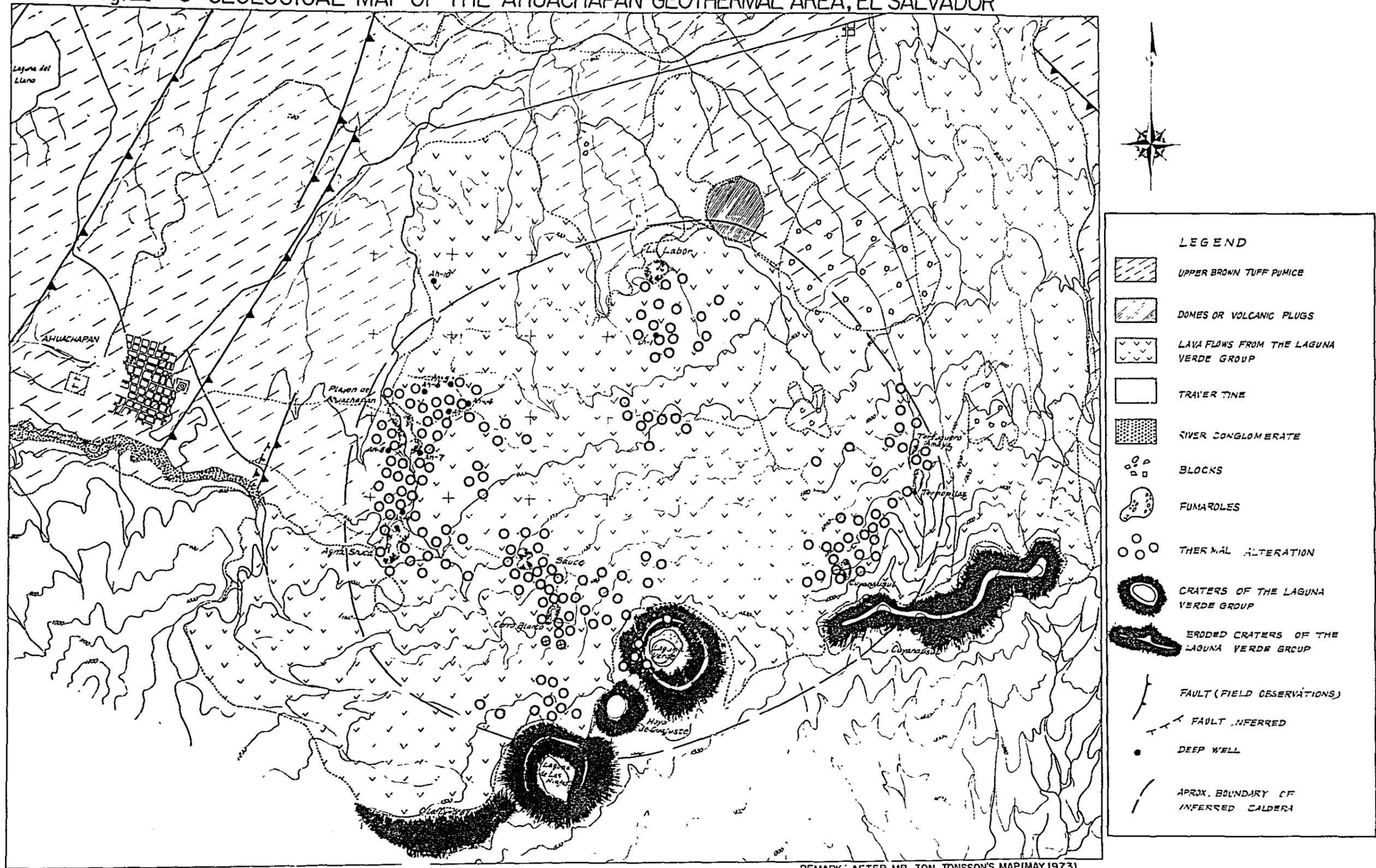


Fig. VI - 8 STRATIGRAPHIC COLUMN

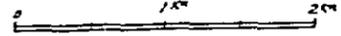


REMARK: COMPILED BY K. WATANABE FROM MR. J. JONSSONS DATA (JUNE, 1973)

Fig. VI - 9 GEOLOGICAL MAP OF THE AHUACHAPAN GEOTHERMAL AREA, EL SALVADOR



SCALE 1:25,000



REMARK: AFTER MR JON JONSSON'S MAP (MAY 1973)



Fig 7-10 SHOWING HIGH PERMEABLE NOZE IN THE DEEP WELLS

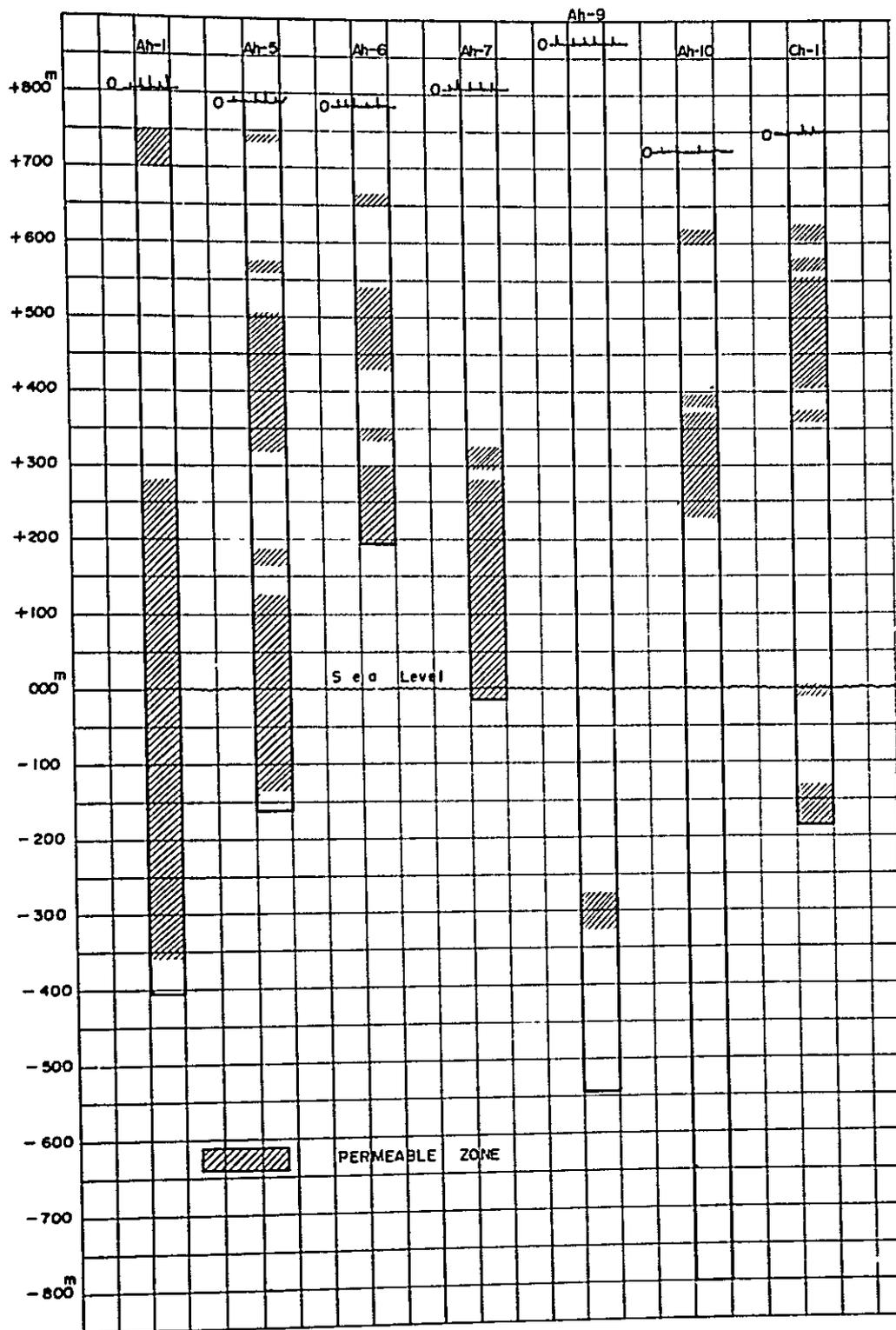
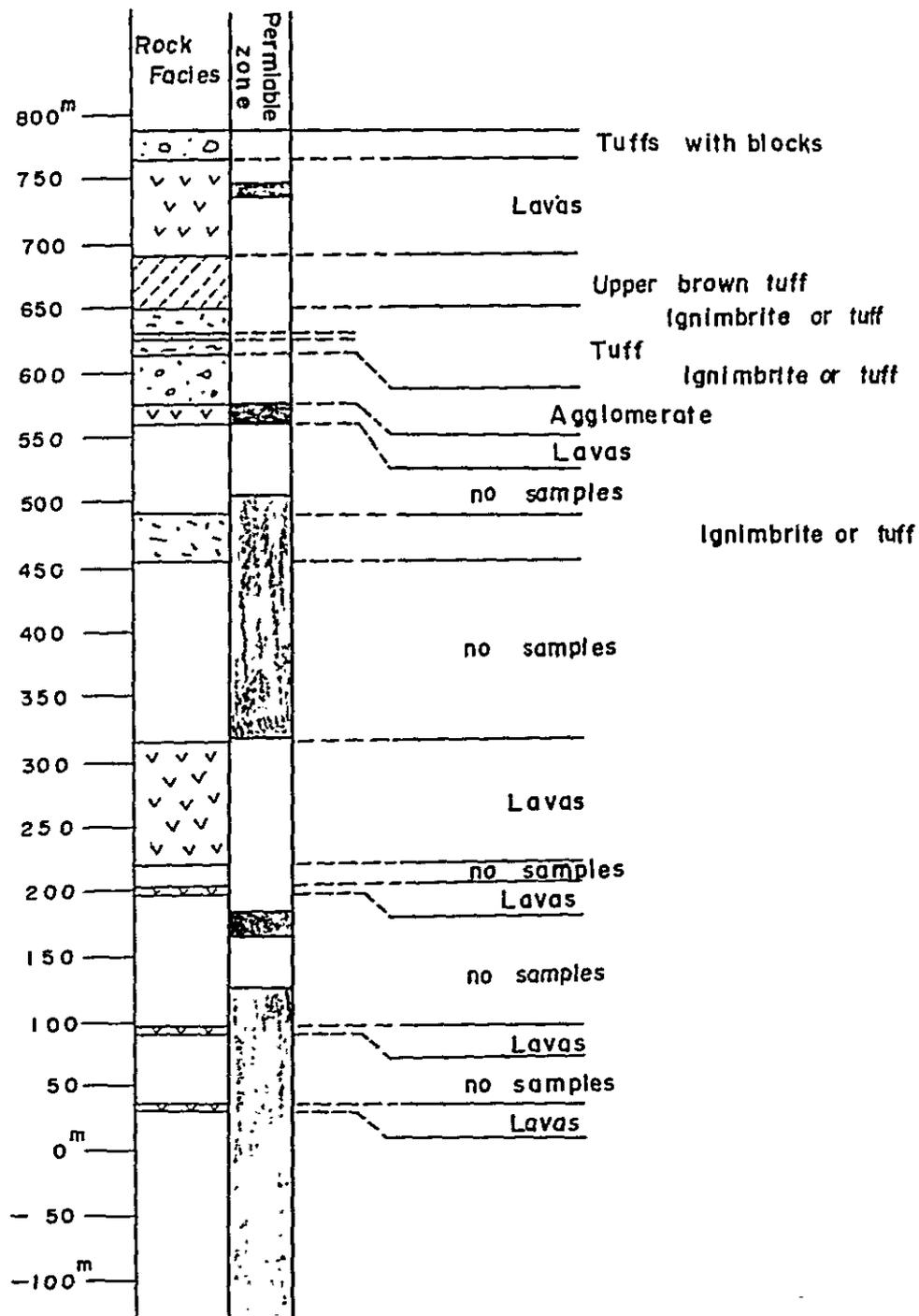
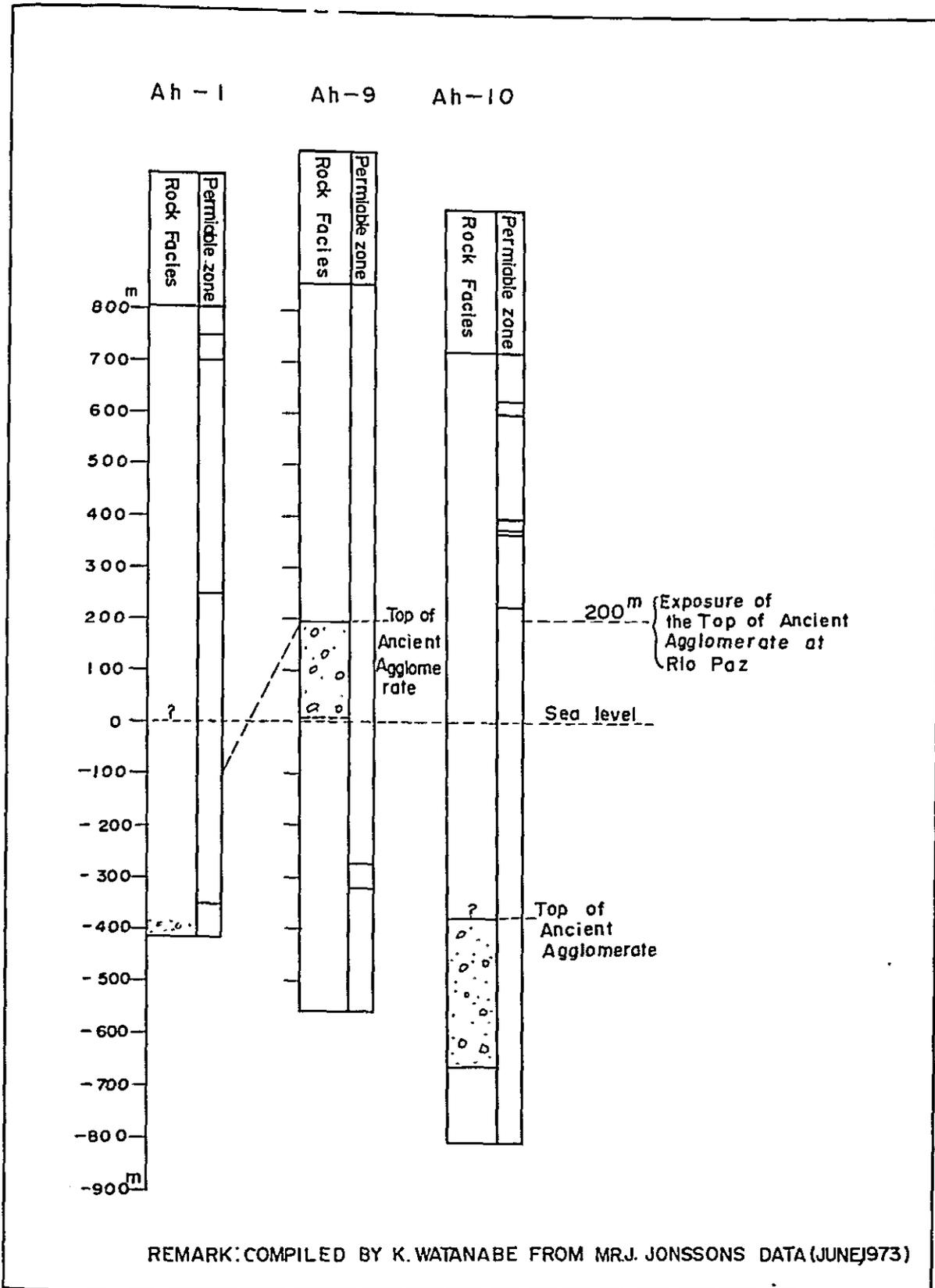


Fig. VI-11 AHUACHAPAN COLUMN NO. 5, DEEP WELL (AH-5)



REMARK: COMPILED BY K-WATANABE FROM MR. J. JONSSON'S DATA (JUNE 1973)

Fig. VI-12 CORRELATION OF AH-1, AH-9 AND AH-10 SHOWS THE TOP OF ANCIENT AGGLOMERATE:



る旧カルデラの外側およびその壁の上か、それに近いところにあるためと考える。

Fig. VI-11はAh-5を例にとり、岩相と滲透帯との関係について、先方資料よりとりまとめ作成要約したものである。

また、Fig. VI-12はAh-1, Ah-9, および Ah-10の対比、特に鮮新世 (Pliocene) の古期集塊岩 (Ancient Agglomerate) の一番上の層準 (Top horizon) の対比を、先方資料より、とりまとめ作成したものである。

Jonsson氏はAh-9孔と地表露頭 (Paz川の露出) では、海拔200m位のところに在り、Ah-1孔では海拔-100m以下にあると考えられるので、Ah-9とAh-1の間には、構造的擾乱 (Tectonic disturbance) がなければならぬ。そしてこの事実はカルデラ存在の大きな証拠であると強調している。

Ahuachapan地区が含まれるEl Salvador国の大きな構造は中央地溝帯であり、これは地背斜 (Geoanticline) の陥没を意味し、その方向はおよそE-Wである。

この地溝帯の南を限る断層は北側が階段状に落ちる1つの断層帯である。

地熱活動に重要な関係があると考えられる、E-W系断層を直角に切る胴切断層 (Transvers faults) が、特にAhuachapan市街地の西に、いくつか認められるが、いずれも東落ちで断層間の地塊は西へ傾動 (Tilting) している。Ahuachapanの街は、これらの傾動地塊 (Tilted block) の上にある。

Ahuachapan地域の、これらの胴切断層 (Transvers faults) の生成時期は比較的古いと考えられ、恐らく地溝帯の形成に随伴したものであろう。そしてそれ以後の構造運動 (Tectonic movement) はあっても著るしいものではなかった様である。

Mooser氏 (1968年) によればAhuachapan市街地の東方の断層は西落ちと考えられている。

Ahuachapan市街地の東方および北方の地熱地帯は、その形状がほぼ三角形をした断層の落ち込み地域の中にあり、これらの断層が地熱活動に重要なものか否かは、今後の問題である。

断層が地表の地熱現象にとって非常に重要なものであると、多くの調査者は推定しているが、著しい火山構造に於ける小規模断層は火山構造には影響していても、真の造構的 (tectonic) 意味はない。Laguna Verde groupの北側斜面に、この種の断層が数カ所推定されている。

深掘井を掘る前にその存在を確認する必要がある場合は、先ず地質精査と物理探査を試みるべきである。

### 3-4 地熱徴候 (物理探査及び地化学探査の結果を含む)

1968年の国連とCEL共同調査の際Mario Jimenez氏が調査区域の内、地熱徴候地としてLaguna Verde, Playon de Salitre及びRio Pazの3地区を挙げ、その内で

Laguna Verde 地区 (= Ahuachapan 地区) が有望と結論したことは既述の通りである。

Laguna Verde 地区は同名の火山群の北にあり多数の噴気孔が観察されるが温泉は少ない。

地質の項(3-3)で述べた様にこの地区では地表は第四紀(Quaternary)に属する安山岩質、玄武岩質溶岩(Andesitic, basaltic lava)と粗粒~細粒の火砕岩(Coarse~fine pyroclastic rock)とから成り、これらは裂隙(fissure)が著しく発達し、岩層は極めて透水性に富んでいて蒸気や熱水の通路に適している。

したがって岩層は変質を受け粘土(Clay)黄鉄鉱(Pyrite)珪酸(Silica)炭酸塩(Carbonate)が普通に見られる。

深部の地層(第三紀層)の物理的特性は試錐コアによれば、透水性は低く、断層や裂隙は不連続で熱水変質作用は著しくない。すなわち貧弱な裂隙は珪酸や炭酸塩で皮殻が出来ているが、黄鉄鉱は余り認められない。

ここで深掘調査井に先行した物理探査について触れる。実施された物理探査は下記の通りである。

a) 磁力探査(Magnetic Survey) }  
b) 重力探査(Gravimetric Survey) } 200 mに実施

c) 電気比抵抗探査(Electric Resistivity S.)

d) 地温勾配調査(Geothermal Gradient S.)

24孔井, 各井戸の深さは100m, 孔径 $3\frac{1}{2}$ (NX)

e) 温度分布調査(Temperature S.)

深度1.5m, 南部で実施

これらのうちで深掘調査井の位置決定に大きな役割を果たしたのは電気比抵抗調査である。

地熱地帯の基礎的なパラメーター(Parameter)は温度と透率である。貯留層が高温でクロール(Cl)成分の多い場合は比抵抗法は、深部の温度に関し貴重な情報を提供する。本調査地域ではいくつかの低比抵抗帯(Zone)が観察されたが、必ずしもすべてのゾーンに地下高温を期待することは出来ない。

Playon de Agua Shucaの低比抵抗帯の様に水理学的にも岩石学的にも条件のそろっているゾーンだけに期待が出来る。

この理由で1967年5月Ahuachapan No.1(Ah-1)Chipilapa No.1(Ch-1)の2本の深掘調査井の位置が決められた。これら2本の試料の分析結果によればクロール(Cl)は8,500ppmである。

この比抵抗調査, 地質構造, 地化学調査などからAhuachapan 地域ではAh-1号井の東方へもまた西方へもNNWの断層まで生産層が側方に連続すると考えられる。しかしChipilapa 地域ではEW方向の目をつめた密度の高い比抵抗測定を行うべきであるとJiménez氏は

勧告している。

また物理探査を担当したJose Gonzalez氏は5~10Ωmのゾーンを限定するためLos Ausoles地区の南部を、さらにまた本地熱地域の東の限界を得るためにLabor~Chipilapa区域の詳細な比抵抗調査をなすべきであると述べている。

同年度Ahuachapan地熱地域の地化学探査を担当したGudmunder E. Sigvaldason氏とGustavo A. Cuéllier氏は300kmに亘る地域の地表徴候を調査した結果、次の如くのべている。

- a) 噴気活動。高さ700~1,400mの火山塊の北斜面に限定される。代表的なものはCuyanausul (temp. 123°C), El Sauce, Agua Shuca, Playón de Ahuachapan, La Labor
- b) 地表変質を伴う蒸気地区。数カ所。活動は非常に弱い。
- c) 温泉。南部の火山塊と北西のPaz川との間の平原に見られる。Lorenzo, Los Salitres, Los Toles。Los Salitresだけは第三紀鮮新世(Pliocene Tertiary)の溶岩から湧出。その他は第四紀(Quaternary)の堆積物から湧出している。温度は40°C~102°C。

Sigvaldason, Cuéllierの両氏はさらに, Ah-1, Ch-1の2本の深掘調査井についても調査を進め、主な生産ゾーンは第三紀層と第四紀層の境界と思われる500m深度のところと、もう1つは下部の800m~900mのところにあるとした。温度はAh-1では228°C, Ch-1では200°Cである由。

また熱水変質については、余り著しくなく斜長石(Plagioclase)と輝石(Pyroxene)は一部残っており、カンラン石(Olivine)とハリ質基質(Vitric groundmass)は変質した緑泥石(Chlorite)、方解石(Calcite)と二次石英(Secondary quartz)が出来ている。また深部では緑簾石(Epidote)やぶどう石(Prehnite)を伴っている。

Ah-1号井の坑口圧力は9 atg, 流出量は107 Kg/sec 蒸気量は35.5 T/Hである。

なお両氏は各種地表徴候ならびに深掘調査井より試料採取を行い、地表の熱水とAh-1号井の深部貯留層溶液の分析結果をTable VI-2にとりまとめ両者の理論的解明は今後の問題であるとしている。

温度のインディケータ(Indicator)として珪酸(SiO<sub>2</sub>), ソジウム, ポタシウムの原子比(Sodium to Potassium Atomic Ratio = Na/K)を取りあげて論議を進めると共に温泉水中の塩化物(Chloride)と硼素(Boron), 硫酸塩(Sulfate)と重碳酸塩(Bicarbonate)についても興味あるものとして検討している。

地熱ガス(Thermal gas)は噴気孔から試料をとり分析されたが、硫化水素(H<sub>2</sub>S)が極めて少ないことが特徴であった。

Table VI-2 ANALYSIS OF THERMAL WATER FROM FUMAROLE AND Ah-1 DEEP WELL

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO <sub>2</sub>	183	167	148	133	91	85	120	102	101.5	97	(456)
Na	417	403	210	124	460	450	495	520	521	520	5025
K	57	53	42	28	11.3	11.3	15.7	20.1	19.5	19.3	905
Ca	48	48	29	26	189.5	187.5	136.2	112.4	96.8	105.3	354
Mg	13.2	13.2	14	17	10.9	12	13.8	8.9	13.8	10.2	23.4
Cl	596	581	323	193	406	405	612	711	681	709	8730
F	0.2	0.2			2.0	2.0	2.0				1.5
SO <sub>4</sub>	49.5	58.0	19	11	860	830	540	575	535	555	28
HCO <sub>3</sub>	348	342	251	224	24.4	12.0	61	4.9	4.9	4.9	49
CO <sub>2</sub>								15.6	15.6	15.6	
B	(10)	(10)	6.7	4.1	6.4	6.3	11.8	15.5	13.6	13.8	131
PH	8.32	8.12	7.33	7.42	8.43	8.43	8.19	8.29	8.26	8.22	7.02
MHO					2.71-10-3	2.68-10-3	2.79-10-3				23 x 10 <sup>-2</sup>
TQC	63	63	43	36	90	90	50	101	102	101	(220)

1. El Playon de Salitre, March 1968  
 2. Playon de Salitre, March 1968  
 3. San Lorenzo, July 1968  
 4. San Lorenzo, July 1968  
 5. Los Salitres, May 1968  
 6. Los Salitres, May 1968  
 7. Rio Paz, border marker at Paso Jobo, May 1968  
 8. Los Toles, July 1968  
 9. Los Toles, July 1968  
 10. Los Toles, July 1968  
 11. Ahuachapan No.1-drill hole (7.6 - 68)

(According to enthalpy measurements the analysis of the Ahuachapan reservoir fluid in this table should be corrected using a factor of 0.963)

水素の含有量は高温のインディケーター ( Indicator ) と一般に考えられ 0.5 % を超せば貯留層の温度は 200℃ 以上であることを意味しているが本調査地では

Playon de Ahuachapan	0.1 %
El Sauce	0.3
Ouyanausul	1.4
La Labor	0.0

の数字を示し、南方に規則正しく増加していく。

Ah-1号井の非凝結性ガスの量は比較的 low 最初のテストでは、ガス/水が 15 ml/l, その後では 45 ml/l であった。その成分は

CO <sub>2</sub>	80~50 %
H <sub>2</sub>	40~10
N <sub>2</sub>	2~10

で水素量が高い。

この孔井で測定した温度は 228℃ でこの温度は水の珪酸分からの計算値とよく一致する。しかし Na/K で計算すると 270℃ となる。この2つのインディケーター ( Indicator ) の相違についての理論づけは可能であるとしている。

最後に本地域の深部貯留層の大きさについて、これは1つの方法で決められるものではなく、深掘試験、電気比抵抗調査、地温勾配調査に地化学データが組合わされて初めて推定出来るものであるとし、本地域では 20~30 km の掘りを持つものであらうとしている。

貯留層の大きさについては Jonsson 氏は最大径 7 km で 38 km の区域を地質、構造的に考えている。(参照 Fig. VI-9)。

この範囲は彼の考えている旧カルデラに近いものである。一般にカルデラ陥没では先ず湖が出来、その中に火山活動が継続する時は著しく破碎され角礫化するであろうから岩層は透水性の高いものになる筈である。

Jonsson 氏は Ahuachapan 高温地熱地帯の地史について次の様にとりまとめた。

- (1) Irazu タイプの大型中央火山の形成。これは溶岩と凝灰岩からなり、地熱活動は限られていた。
- (2) 大噴出がおこり古期集塊岩 ( Ancient Agglomerate ) が形成されたあと、カルデラ陥没がおきた。
- (3) カルデラ内の火山活動、著しい地熱活動、カルデラ充填。
- (4) 背斜の陥没と中央地溝帯の形成、火山現象の再開、Laguna Verde group の活動、その噴出物である溶岩、凝灰岩によりカルデラ充填完了。
- (5) Laguna Verde group の活動休止、高温地熱活動。

この地史は地熱活動区域と熱水変質区域が旧カルデラの大きさと形状を反映するものであるとする論拠に立っている。

### 3-5 Bodvarsson 氏および Bolton 氏による意見。(1971年)

#### 3-5-1 概要

1971年 Mr. Gunnar Bodvarsson (Oregon State University, U.S.A) および Mr. R. S. Bolton (Ministry of Works, New Zealand) の両氏により開発のための検討がなされている。興味のある提案もなされているので、それらの概要を参考にしるす。ただ今回調査団に先方より提供された資料(主として既調査報告書)は一部であって、不十分の点はまぬがれない。

この調査は El Salvador の UNDP の地熱資源探査班の要請で 1971年5月~6月行われたもので主として物理的特性および経済性のポテンシャルについての報告書である。

#### 3-5-2 主要な検討事項

(1) 既知の垂直構造(最大試錐孔深度 1,200m)は、3つの地下水面により特徴づけられており、生産に関係のある地層水準は第3の地下水準である。これは高距 300m から下部(深度不明)に拮つている灰色の溶岩(Gray lavas)である。全生産井はこの層準より生産されている。そして井戸内の温度は、この地層から深度 1,200m までほんの僅かの、すなわち  $10^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C} / \text{km}$  ( $1 \sim 2^{\circ}\text{C} / 100\text{m}$ ) の温度変化はあるがほとんど等温である。

地層の孔隙率(Porosity)や透過性(Permeability)はごく僅かであるが、しかし透過性の大きい水平な数枚のシート状の地層あるいは大きな流量をもつチューブ状の開口部により大きな、水平な、よい透過率の部分が出来ている。

(2) 生産される熱水は化学的には均質でない。個々の井戸ではクロール(Cl)について 25% に達する変化がある。これは局所的に貯留層(Reservoir)の中に水の数種の異なる成分のものが存在することを示している。 $\text{SiO}_2$  および  $\text{Na} / \text{K}$  による計算温度は  $245^{\circ}\text{C} \sim 255^{\circ}\text{C}$  であり実測値の最大は  $236^{\circ}\text{C}$  である。これは貯留層の中で温度とガスの逸失による僅かの蒸発を示すものと解釈されている。(Sigvaldason and Cuéllar 1970, Glover 1970) この蒸発した蒸気は地表近い地下水系に対し熱源となり得るであろう。

地表水および貯留層の水の重水素(Deuterium)の研究は貯溜水が天水起源であることを示している。それ故、塩水は海水起源ではなく塩分は蒸発による濃縮がすすめられた結果に過ぎない。

(3) この地区の地熱系は陥没したカルデラ構造により規制されていると云われる。Jónsson 氏はその直径を7kmと推定した。その証拠は主として地表の地熱活動の分布、変質岩 ( Altered rock ) の分布に基づいている。さらにJónsson 氏はAh-9の試錐がカルデラ仮説に都合よく構造性不連続 ( Structural disconformity ) を示していることを指摘している。(参照 Fig. VI-13)。

しかし、それらの意見はよく一致していない。

(4) Ward 氏およびJacob 氏 ( 1971 ) の常時微動調査 ( Microearthquakes Survey ) は走向約 N 1 0°E, 傾斜約 8 0°E の活断層様構造のあることを示している。それら N-S 系の断層は、ほぼ平行しており、約 2 km 程の間隔をもっている。(参照 Fig. VI-13)。

さらにこの断層説は Ah-9 の試錐の断層角礫 ( Fault breccia ) により支持されている。

Ahuachapan 地域での常時微動調査 ( Microearthquake survey ) によれば、その震源は構造性起源のもので、ある個所に集っている。Iceland 国における如く地表の微候の下に不規則に分布しているものとは異なるように見うけられる。Ahuachapan 地域では地熱活動の源にもっと直接的に関係があるように見える。

Iceland 国とは違ってここでは地熱活動の源は地表の微候の主な地域の真下にあるのではなくて、地熱活動の源は南か東に少し離れているという解釈である。

(5) Ah-1, Ah-5, Ah-6, Ah-7, Ah-9, Ch-1 の井戸の静水圧 ( Static pressure ) はフィールド ( Field ) を横切って全体にその圧力分布が一様であることを示している。

海水準での圧力は約 5 2.5 kg/cm<sup>2</sup> であり、地下水面は海拔約 6 0 0 m である。開発が始って以来検知出来るような圧力の変化はない。生産中の Ah-1 の圧力は非常に僅かの変化しか示さないが、Ah-5 の最大噴出の時に 1 4 kg/cm<sup>2</sup> の低下がある。

これは 3 番目の地下水の層準の下位の地層での比較的低い浸透性の示徴である。しかし絶対的には、井戸を閉鎖すると圧力が大変早く回復することから浸透性は高いと云える。

(6) 温度測定での最も著るしい特徴は Ah-1, Ah-5, Ah-6, Ah-7 における深度に伴う温度分布がよく似ていることである。(参照 Fig. VI-14)。

4 つの井戸では海拔約 2 5 0 m で温度は最高で、海拔約 5 0 m まで低下したり逆転したりする。この深度より深い井戸は温度は一定である。圧力と同様に開発が始ってから温度には検知出来る様な変化はない。

(7) 生産井については海水面すなわち 8 0 0 m より深く掘る必要はないと云える。また温度の逆転は次の如く

a) もっと深いところの、より冷たい水の混合。

Fig. VI-13 AHUACHAPAN GEOTHERMAL AREA FAULTS INDICATED BY MICROEARTHQUAKE SURVEY

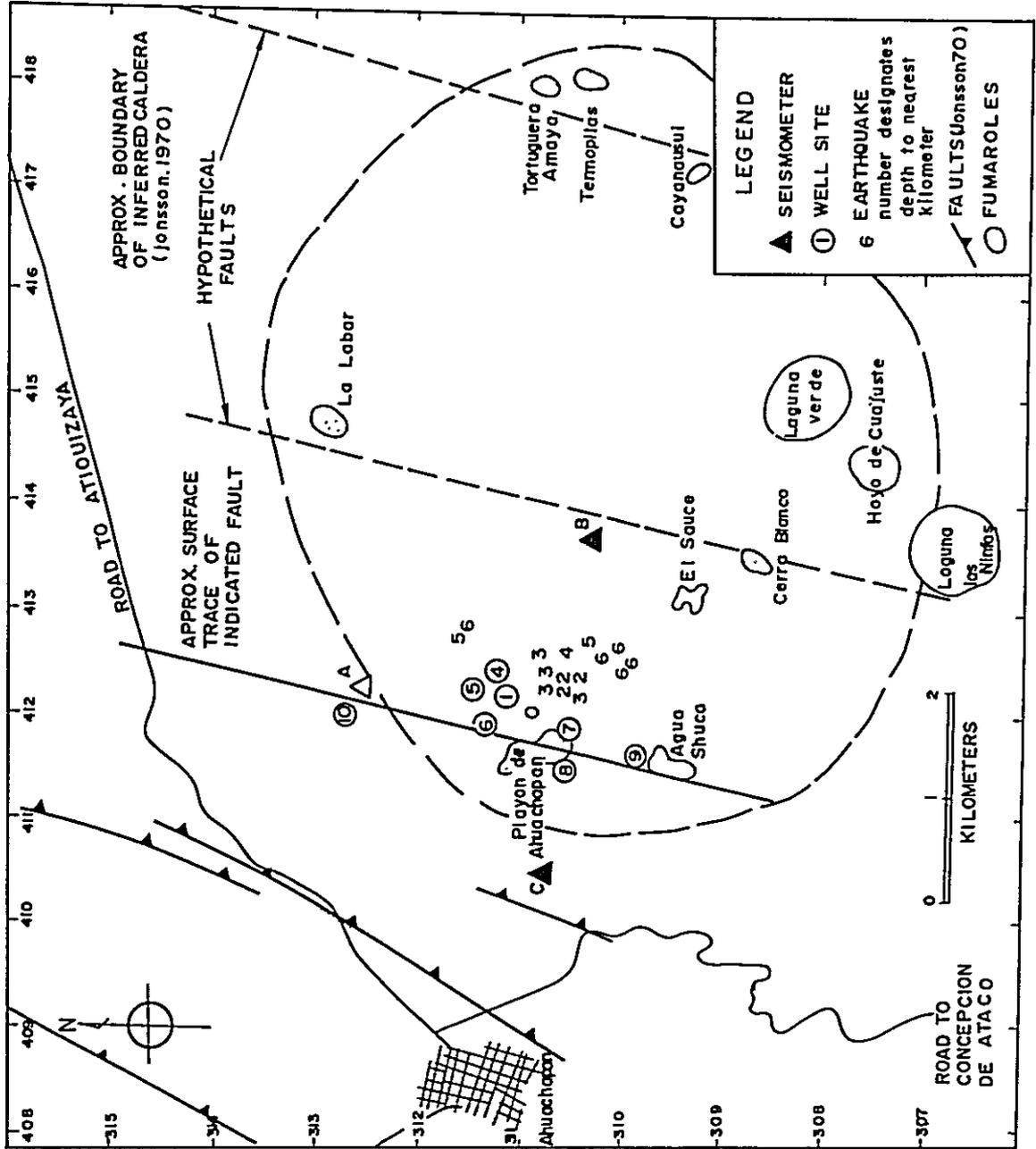
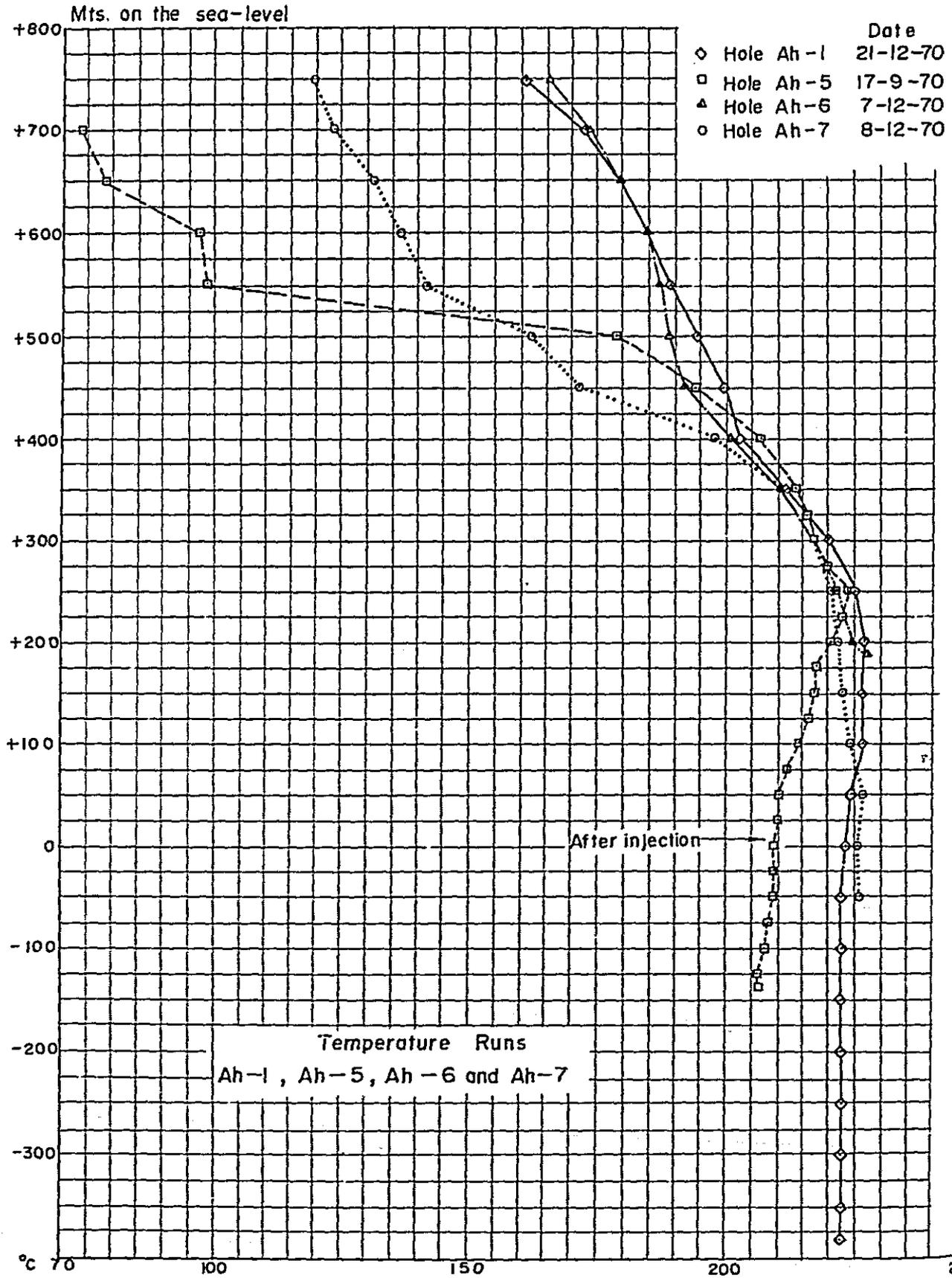


Fig. VI-14 GENERAL GRAPH OF TEMPERATURE



- b) 離れた場所にある源からの熱水の一時的な流れ(この系は熱的非平衡にある)。
- c) 試錐により流れが増大し熱的非平衡がおこり離れた源から流れがおこる。
- d) 上昇熱水系における第2の垂直対流運動。
- e) 観測された温度は真の温度ではなく、井戸の中での局所的な熱的現象かあるいは観測誤差などの仮説が考えられる。

(8) 源のタイプ ( Source Models )

- a) 地熱地域の下部の局所的な熱源。すなわちカルデラ型モデル。
- b) Ahuachapan 地域の南～南東の主要熱源による離れた源のモデル。

の2つの説が考えられる。

(9) 開発計画については埋蔵エネルギーは、これを最小限に見積って計画を立案するのが合理的である。そして発電能力も漸次ふやしてゆき、段階的に期間をおいて発電所を建設して行くのがよいと思われる。

発電所および建設に関する投下資本の償却は一般に15～25年であるが、Ahuachapanでも操業期間は25年以上を考えないで建設されねばならぬ。

しかし国家的に考えれば、これはむしろ短いように思われるし、また貯留層がもっと大きくなる可能性があれば25年以上にしてもよい。この報告書では基本計画期間としては50年間を採用する。つまり50年間に亘り100MW発電の形で開発操業されるであろうと言うことである。

12～15年間の間に33MWの発電所を3段階で3つ建設し漸次その規模を大きくして行くことがよいと思われる。

1974年 33MW, 1979年 33MW, 1984年 33MW

(操業期間は50年間を考える)

離れたSource Model の考え方が適用されれば実際その能力は大きくなるであろう。2～3年の間に探査の作業によりはつきりするであろう。

(10) 井戸からは

- a) 50～120kg/secの量を生産している。  
(180T/H～432T/H, 熱水:蒸気=3:1)
- b) 9 5/8" 管で、坑口圧力 ( Well head pressure ) は6 ata。
- c) 生産層の深度は500m～1,200m。

そして生産井は1本当り5MWと考えられ100MW発電には約20本必要とみられる。5本の井戸が駄目の場合を考慮して必要本数は25本とみられる。最初建設する33MWの発電には10%の予備を考えて、現在の4本にさらに3本の新しい生産井が必要である。

現在Ah-1, 5, 6, 7より蒸気が生産されておりその対象区域は約1～2km<sup>2</sup>である。

すでにのべたが、Source models の考え方は東あるいは東南のもっと広い範囲からよい蒸気が生産される可能性のあることを暗示している。

将来の生産井を掘る対象地域として、それを Fig. VI-15 に示している。そして東または東南のやや海拔の高くなる地区に潜在する可能性のある離れた source models からは、もっと高い温度が得られるであろう。

(1) Paz 川に対する公害問題のため地表での熱水の処理は困難が多く、したがって再注入(Reinjection)の方法を考慮せねばならない。熱水を第三番目の地下水層に、温度 $150^{\circ}\text{C}$ ~ $160^{\circ}\text{C}$ で再注入することは困難ではないと思われる。Ah-5号井で約3カ月間再注入を行ったが、鉱物の沈殿とか、注入による悪い結果はなかった。

ある最小限の距離は離すようにして、十分な深度で再注入をする時には、悪い長期間の影響はこれをさけることが出来る。

最初につくる33 MWの発電所のための再注入井の位置は、長期間の影響も考慮して主要蒸気生産地区より2~2.5 km以上離すことが望ましい。その予定場所については Fig. VI-15 に示している。

33 MWの発電所のためには能力 $250\text{ kg/sec}$  ( $900\text{ T/H}$ )の井戸が2つ必要である。1本の失敗を考慮して最大深度1,200 mの井戸3本を掘削するのがよい。

また、パイプの中で $\text{SiO}_2$ を沈殿させないで $150^{\circ}\text{C}$ 以下で再注入出来るかどうか分っていない。しかし低い温度で再注入は出来ると考えられるので、今後実際に試験を行い特に $100^{\circ}\text{C}$ の低い温度での再注入の試験を行うべきである。

(2) 色々の調査を行ったが地熱系の構造についてはまだ少ししか分っていない。すでにのべたように地熱系、Source models については、まだ結論が得られていない。離れた Source models の考え方は適切な仮説ではあるが、はっきりした野外での証拠を欠いている。これは今後の問題である。

常時微動調査(Microearthquake method)はこれに対する解明の唯一の物理探査法である。またAhuachapan 地域を通る垂直地震調査断面図(Vertical seismic profile)を得ることは大変役にたつと思われる。これは常時微動調査との関連あるいは地震屈折法調査(Seismic refraction survey)を基礎とする探査により分る。後者の方法がより正確なデータを得ることが出来る。

井戸からの流出、圧力、化学調査などの十分正確なデータを得るために適切な設備(adequate instrumentation)を準備することが大切である。さらに水の面、層準での圧力(Levels and formation pressures)は適当な期間をおいてよく監視されねばならない。この地域から産出される総流量(Gross withdrawal of fluids)の調査のため重力絶対値定点観測(Microgravity survey)を行わねばならない。

Fig. VI-15 LOCATION OF PROPOSED PRODUCTION AND REINJECTION WELLS

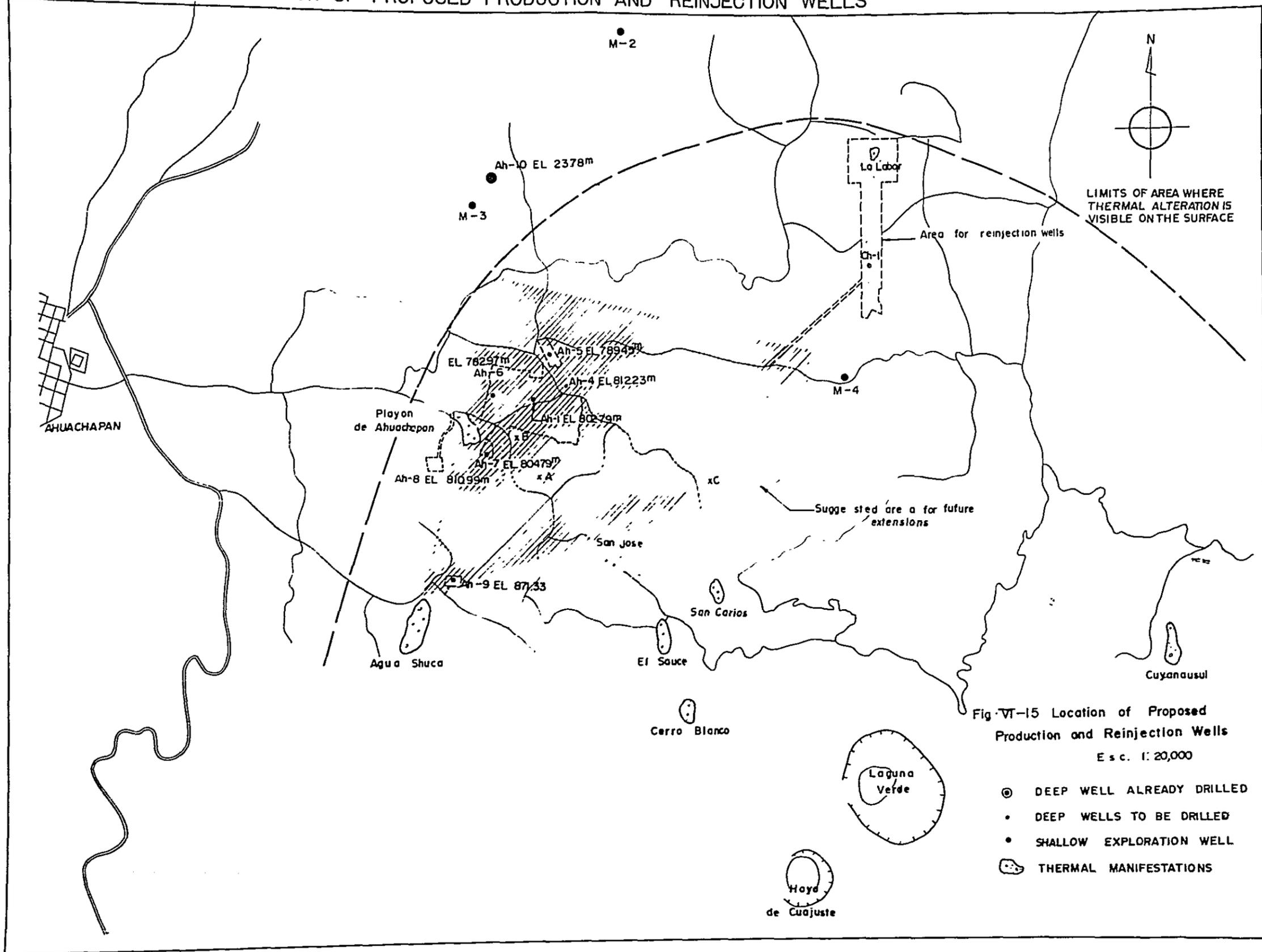


Fig. VI-15 Location of Proposed Production and Reinjection Wells  
E s c. 1: 20,000

- ⊙ DEEP WELL ALREADY DRILLED
- DEEP WELLS TO BE DRILLED
- SHALLOW EXPLORATION WELL
- ☉ THERMAL MANIFESTATIONS



孔井下底部の測定の精度，日常の試験計画，それらの記録は現場管理としてやるべき仕事と云われている。(Bolton, 1971)

### 3-5-3 結論および提案の大略

(1) Ahuachapan 地熱地域の第一次の源 (Primary source) はこの地域の南および南東に少し離れて位置している。熱水系は陥没したカルデラ (Collapse caldera) の構造には支配されていない。

(2) Ahuachapan での地域的地熱貯留層は  $40 \text{ km}^3$  とみられ，その平均温度は  $228^\circ\text{C}$  とみられる。正味の最小限の得られるエネルギーは Single flash operation でノミナル  $5 \text{ GWy}$  すなわち  $4 \times 10^{10} \text{ kWh}$  である。実際にとり出し得る貯留層の大きさはマグニチュードより大きな単位の可能性がある。

(3) 見積った最小限の貯留層が Ahuachapan での地熱資源の開発計画の基礎となる。おおよそ計画は次の如く考えられる。1974年 33 MW, 1979年 33 MW, 1984年 33 MW (稼働期間は50年間を考える)

(4) 最初の33 MWの発電所をつくるには，3本の生産井が追加掘削され，その位置についてはすでに1孔はきめられている。残りの2孔は Ah-1 の周囲がよい。正味100 MWの発電のためには，おおよそ25本の井戸が追加掘削されねばならない。将来の生産井掘削についての探査対象地域は Fig. VI-15 にその概略を示している。

しかし，グループによる井戸の掘削を考慮するように強くすすめたい。

(5) 第一の33 MWの発電所における支管および坑口装置を含む蒸気の原価は， $1.09 \sim 1.31 \text{ mills/kWh}$  とみつもられ，償却率，利率によってかわる。

(6) 最近の現場試験の結果に基づいて，約  $150^\circ\text{C}$  の温度で有害なことがらを生ずることなく，流出する熱水を局所的貯留層に再注入することは可能であると思う。

初めの発電の段階で深度  $1,200 \text{ m}$  以上の3つの井戸が掘削されることが望ましい。その位置は Fig. VI-15 に示してある。

再注入の原価はその井戸の寿命，償却率，利率によるが，大体  $1.15 \sim 1.87 \text{ mills/kWh}$  とみつもられる。

(7) 再注入の際の温度は  $150^\circ\text{C}$  以下に下げることが可能と思われる。今後再注入試験は下げた温度で行うことが望ましい。

(8) 今後行われる物理探査は常時微動調査 (Microearthquake survey) および Microgravity survey を行うのが望ましい。

(9)

a) 掘削については  $13 \frac{3}{8}''$  O.D. のパイプを使用すれば  $9 \frac{5}{8}''$  のパイプより40%

以上その生産が増加する。ただし巻揚，ポンプにつき大きな能力が必要となる。

b) Ah-1の周囲で圧力の低下が小さいことは，浸透性がよいわけで，このようなタイプでは，井戸の間隔をつめてもよいことを示すように思われる。すなわちグループ掘削(間隔は50m以上はあけない)をすることが経済的利益である。

c)  $1\frac{3}{8}$ " の生産井なら井戸の数は10本ですみ，Ah-1の周囲で全部掘削出来ると思われる。

しかし，色々の問題点もあるので，グループ掘削と再注入についてはよく注意して行わなければならない。

d) 井戸の深度は800m以上は必要ない。

(10) Ahuachapan の井戸の中で発見された温度の逆転 ( Temperature inversion ) は，源の条件につきその解析に役立つように思われる。Ah-1の中での静止状態における温度は海拔+200mから-100mまでの間で5℃の減少があり平均約1.6℃/km(1.6℃/100m)温度が逆に下っている。最大の温度低下の勾配はもう少し高いかあるいは約2.5℃/km(2.5℃/100m)である。

これは最近いわれる他の離れた源からの熱水の水平流動により説明される。

しかし現在のデータでは不十分であって，この問題について議論することは出来ない。

### 3-6 現況

以上Ahuachapan 地熱地域についてその沿革，地質および構造，地熱徴候，検討事項，特徴などについてしるしたが，現在Ah-1, 5, 6, 7の各孔井からそれぞれ約65～95 kg/sec (230 T/H～340 T/H, 蒸気+熱水)の生産量がある。2相流 ( Two phase flow ) で蒸気量約300 T/H, 熱水量約900 T/Hの生産量で蒸気：熱水は約1：3である。なお先方提供資料には記載されていないが，Ah-4にて2相流，約500 T/H(蒸気138 T/H, 熱水362 T/H)が生産されている旨聴取した。したがって現在の総生産量は蒸気約430 T/H, 熱水約1,260 T/Hとなる。

各孔井の状況(1962年9月19日現在)はTable VI-3に示す通りである。

調査団が現地訪問の節にはAh-12号井を掘削中であつた。El Salvador 国の試錐会社FORAMINES DRILLING CO. が5,000 m 級の試錐機により掘削工事を行っていた。その詳細は聴取していないが，セメント，パイプ，オイルなどを含まず1m当り単価は\$150との事であつた。3方操業で(8H×3)1方約8人～10人とのことである。

このプロジェクトのEl Salvador の主要関係メンバーは，Mr. José Estevez (Geologist, 現場駐在)

Mr. Alberto Vides ( Civil engineer ), Mr. Mario Jimenez ( Geologist ),

Table VI - 3 DRILLED HOLES AND PROJECTED HOLES IN THE AHUACHAPAN AREA

( Report on 19th Sept. 1972 )

Hole No.	Contractor and Period	Dates of Initiation and Termination	Elevation above Sea Level (meters)	Production Pipe		Slotted Pipe		Total		Depth (meters)	Production		Pressure in Hole Head (kg/cm <sup>2</sup> )	Diameter of Discharge Pipe (Inches)	Chemical Composition					
				Diameter (inches)	Depth (meters)	Diameter (inches)	Depth (meters)	Diameter (inches)	Depth (meters)		Total (T/H)	Vapor (T/H)			Total Solids (P.P.m)	Chlorides (P.P.m)	Boron (P.P.m)	Sulphates (P.P.m)	Mixed CO <sub>2</sub> (millimoles)	Mixed SH <sub>2</sub> (100 moles)
Ah - 1	Lofland Bros 1st Phase ONU - CEL	Apl. 25, 1968 Jun. 1, 1968	802.79	9 5/8 O.D	486.16	—	—	8 3/4 ø	1205.00	325.04	87.30	10.08	10.05 ø	19 300	10 890	162	34	2.43	0.137	
Ah - 5	Lofland Bros. 2nd Phase ONU - CEL	Jun. 6, 1970 Jul. 1, 1970	789.45	9 5/8 O.D	456.93			8 3/4 ø	951.63	234.72	58.14	7.22	6.37 ø	16 700	9 370	134	35	2.82	0.083	
Ah - 6	Lofland Bros. 2nd Phase ONU - CEL	Feb. 2, 1970 Feb. 25, 1970	782.97	9 5/8 O.D	454.30	—	—	8 3/4 ø	591.16	346.03	97.52	7.10	10.05 ø	20 500	11 665	178.5	34	1.15	0.120	
Ah - 7	Lofland Bros. 2nd Phase ONU - CEL	May 22, 1970 Jun. 4, 1970	804.79	9 5/8 O.D	483.36			8 3/4 ø	950	301.68	48.49	6.02	6.37 ø	21 600	12 298	188.3	35	2.11	0.153	
Ah - 9	Lofland Bros. 2nd Phase ONU - CEL	Feb. 28, 1970 Mar. 27, 1970	871.33	9 5/8 O.D	484.48	7 5/8 O.D 7 O.D 5 O.D	1424.03	8 3/4 ø	1424.03	Production intermittent bad Permeability				40 137	24 300	300	50	Data no Confident		
Ah - 10	Lofland Bros. 2nd Phase ONU - CEL	Mar. 31, 1970 May 18, 1970	723.78	9 5/8 O.D	485.59	7 5/8 O.	1524.00	8 3/4 ø	1524.00	Reinjection hole : Impermeable				Normal : outside of Geothermal region				—	—	
Ah - 4	Foramines S.A. CEL Project	Jun. 1, 1972 Aug. 4, 1972	812.23	13 3/8 O.D	487.16	—	—	12 1/2 ø	640.00	500		8.40	Head 9.5 ø	15 606	8 705	117.2	33	Instable Expansion of hole not yet		
Ah 8	Foramines S.A. CEL Project	Aug. 8, 1972 Sep. 18, 1972	810.99	13 3/8 O.D	469.23	—	—	12 1/2 ø	988.00	Measurement not yet, as of Sep. 19, 1972				No data as of Sep. 19, 1972						
Ah - 2	Foramines S.A. CEL Project																			
Ah - 3	Foramines S.A. CEL Project																			
Ah - 11	Foramines S.A. CEL Project																			
Ah - 12	Foramines S.A. CEL Project																			
Ah - 13																				
Ah - 14																				

REMARK : COMPILED BY K. WATANABE FROM CEL'S RECORD



Mr. Mauricio Menendes ( Electrical engineer ), Mr. Gustavo Cuellar ( Geochemist ) の諸氏である。

現在の孔井の配置, 発電所予定地などは Fig. VI - 16 に示している。

### 3 - 7 引用報告書

先方より提供をうけた Ahuachapan area に関する報告書は次の如くである。

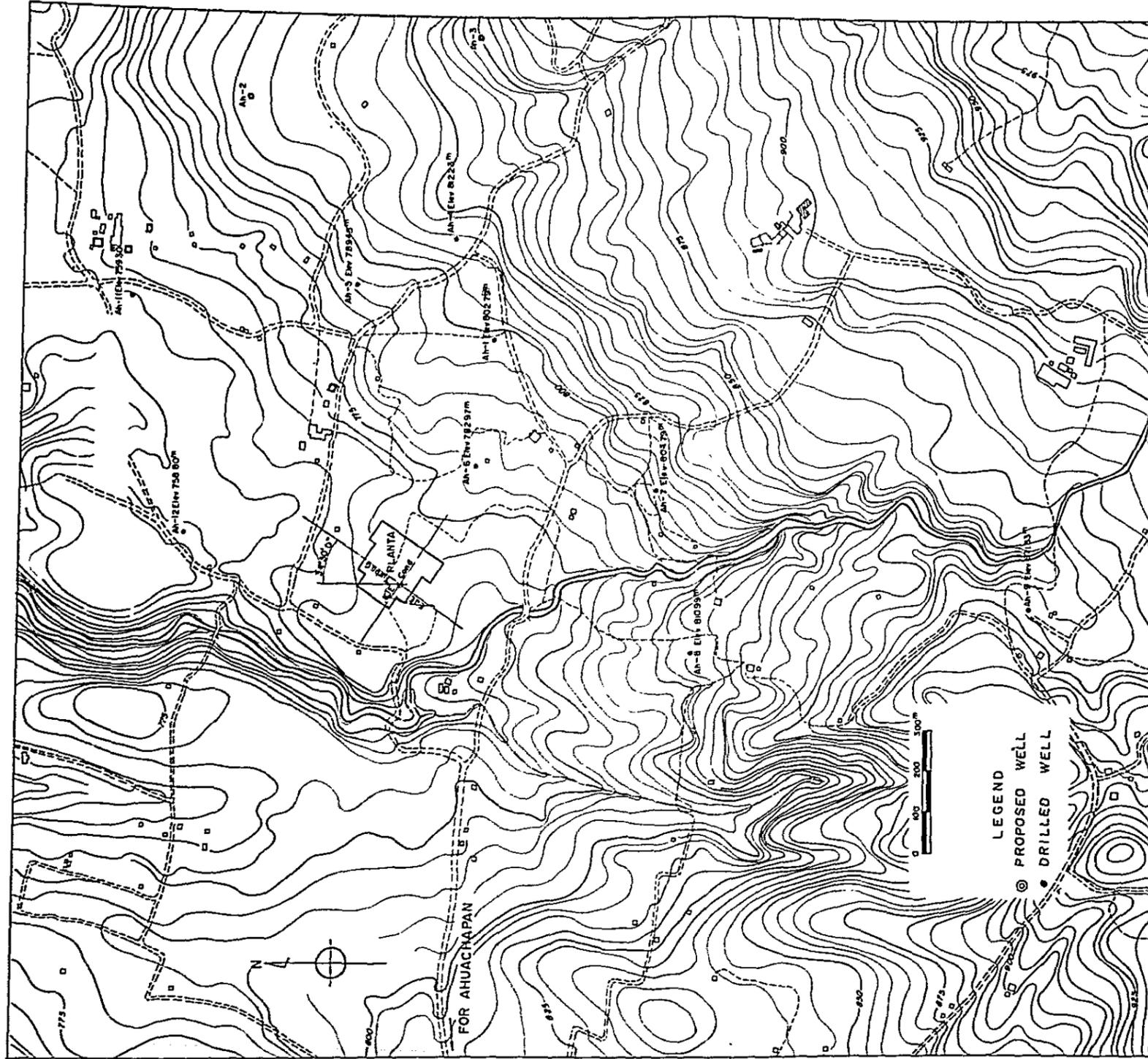
#### (1) UN - CEL Survey of Geothermal Resources

El Salvador, Progress Report. December 1968

<u>Title</u>	<u>Author</u>
Introduction	
Reporte Geologico del Area de Ahuachapan ..	Eng. Mario Jimenez
Levantamientos Geologicos en la Area	
Geothermal de Ahuachapan.....	Eng. Jose Gonzalez Garcia
Geochemistry of the Ahuachapan Thermal	
Area .....	Dr. Gudmundur E. Sigvaldason and Mr. Gustavo Cuellar
Informe de Perforacion y Mediciones	
de Temperatura.....	Eng. Alberto Vides R.
Testing of Well No. 1 Ahuachapan.....	Dr. Sveinbjorn Bjornsson
Proposal for Further Drilling in the	
Ahuachapan Field.....	Dr. Sveinbjorn Bjornsson, Eng. Jose Gonzales G. and Mario Jimenez
Suggestions for Drilling Programme	
in the Ahuachapan Area .....	Eng. Petur K. Sverrisson

- (2) Project Manager UNDP Survey of Geothermal Resources El Salvador.  
Work Plan for Stage 2 of Phase II including  
Programme, January 1970

Fig. VI -16 LOCATION OF WELLS





- (3) William J. Turner, Results of Field Test for Feasibility of Subsurface Disposal of Saline Water in Chipilapa-1 Well, March 1970 (UNDP Survey of Geothermal Resources, El Salvador)
- (4) Jon Jonsson, Report on Geological Investigations in Ahuachapan, July 1970 (UNDP Survey of Geothermal Resources, El Salvador)
- (5) W. R. Braithwaite, Program for Testing the Corrosion Resistance of Engineering Materials for a Geothermal Power Plant at the Ahuachapan Geothermal Field, Sept. 1970 (UNDP Survey of Geothermal Resources, El Salvador)
- (6) Gunnar Bodvarsson and R. S. Bolton, A Study of the Ahuachapan Geothermal Field, May 1971 (UNDP Survey of Geothermal Resources, El Salvador)
- (7) R. S. Bolton, A Commentary on Well Measurement and Measurement Programmes, June 1971 (UNDP Survey of Geothermal Resources, El Salvador)
- (8) W. R. Braithwaite, Interim Report on the Corrosion Test Program on Engineering Materials for the Ahuachapan Geothermal Power Plant, September 1971

### 3-8 結語

以上El Salvador 国 Ahuachapan 地熱地域についてその概要をしるしたが、現地視察は短時間でありかつ先方より提供された報告書も一部のため不十分の点が多い。Ahuachapan 地区では1953年に最初の調査をCEL と Servicio Geologico de El Salvador (地質調査所)の共同で開始した。現在まで約20年間を経過している。その間1966年より国連の援助を受け、国連による調査が始った。国連の作業開始より、現在まで約7年間を経過している。

現在は所要の蒸気の生産に成功し、発電所建設が確定、積極的にとり進めているところである。

この間、すでにのべた様に地質調査、物理探査、地化学探査、試錐作業、腐食試験、再注入試験など色々の方法により基礎調査から建設前の調査まで行っている。

Guatemala 国の Zunil とは類似の点も多く今後参考になり Zunil 調査には大変役にたつであろう。また、Zunil, Moyuta はすでにしるしたように地質的にも似た点が多く Guatemala 国の地熱資源開発は非常に有望で、将来性があると考えられる。

なお引用報告書のスペイン語によるものについては、関武夫氏(株・ダイヤコンサルタント)の御援助をうけたので、付記して厚く謝意を表す。

## 第Ⅶ章 立地条件

### 1. 前 提

Zunil 地区は、まだテストボーリングの実績がないので、坑井から噴出する流体が蒸気であるか、あるいは気水混合物であるか不明である。しかし、地熱徴候から見て、気水混合物が噴出する可能性が大きいので、ここでは九州地方の大岳地区と同じく、気水混合物が噴出するものとして検討した。

### 2 用 地

Zunil 周辺で地熱発電所用地として利用できる比較的平坦な用地は、Zunil の西南西約 2 km (5 万分の 1 地形図 61-34 付近) にある台地のみである。この台地は high-way に沿って L 字型をしており、約 125ha の広さである。

この 125ha の用地は、全体としてはほぼ平坦で、最高の勾配のところでも、約 1/5 の勾配である。

今、第Ⅰ期地熱発電所用地として必要な面積を考えよう。第Ⅰ期発電所の出力を 30MW、タービン入口圧力を  $35 \text{ kg/cm}^2 \text{ g}$ 、冷却塔型式を強制通風型と仮定する。発電所本館、冷却塔、変電所を含む発電所構内用地面積は、1 ha が必要である。1 本当り坑井出力を 3MW、坑井間隔を 150m とすると坑井専有用地が 20ha が必要である。発電所構内用地 1 ha は、坑井専有面積の中に含むことができるので、第Ⅰ期 30MW 発電所用地は 20ha となる。

発電所用地 1ha の地点として、台地のほぼ中央右より、(5 万分の 1 地形図 61:4-34:1) を選定した。この主な理由は次のとおりである。

- (a) 地熱徴候地の近くであり、蒸気生産地帯として有望である。
- (b) 今後の開発予想地区に余り離れていない。
- (c) high way からも近く機械搬入に便利である。
- (d) Samala 川本流からの直線距離が約 300m で採水に便利である。さらに、この周辺は水が豊富であるので、付近の支流あるいは伏流水からも採水できる。

なお発電所敷地の標高は 2070m である。

### 3. 気 象

Zunil の記録がないので、近くの、Quezaltenango の記録によった。年間平均気温は 15.2°C，最高気温は 8 月の 17.3°C，最低は 1 月の 12.0°C である。

年間平均湿度は、82%，年間降雨量は 915mm である。

### 4. 用 水

掘さく用水の必要量は約 300 T/H，発電所雑用水の必要量は約 30T/H である。この程度の水量は、十分付近の Samala 川から取水することができる。

### 5. 搬入道路

用地のすぐ近くを high way が通っているので、機器の搬入は、若干取付道路を整備することによって、容易にできるようになる。

## 第Ⅷ章 今後の調査方法

予察の結果 Zunil 地熱帯は、優勢な地熱徴候が確かめられ、その地質構造や熱源の上昇機構などの概念が把握された。さらに結論および各項で今後解明すべき問題点を詳しく指摘した。これらを細かく究明し、この地熱帯を開発するための今後の調査法をここに提案する。なお、現在のところ Fumarole Grande と Fumarole Negra を含む区域が、もっとも有望視されるので、この地区に重点をおき、これと関連して、Zunil 地熱帯全域を広く解明することを目的とした。

### 1. 地形図の作成

今回の調査には、DGC (Dirección General de Cartografía, Guatemala) で刊行の本域の 5 万分の 1 地形図が改版中とのことで、止むなく旧版をそのままコピーして使用した。このため、鮮明を欠き、また地熱帯を切る主要幹線道路が未訂正であるなど、さらに縮尺の関係もあって、細かい位置の決定や記録、その他について、かなりの不便を生じた。

したがって、今後引続いて、実施される地質、物理、化学などの諸調査の精度の向上、効率化を計るためには、さらに精度のよい、少なくとも縮尺 1 万分の 1 程度の地形図が先づ必要となる。その精度は、概ね航空写真を図化し、基準三角点の測量成果表によって修正された程度で十分であろう。

本件に関して、Guatemala 国の関係機関と公式に具体的な協議は、まだ行われていない。しかし、帰国時に、同国の一部の担当者には、精度の良い地形図の必要性を伝え、善処を依頼した。また、再確認が必要であるが、その際に、Guatemala 国で航空写真から、縮尺 1/12,500 の地形図が作成できるとのことであった。

これらの点を含めて出来る限り早く、Guatemala 国の関係機関と連絡の上、\*航空写真や、地形図の準備を促進する必要がある。ただし、この地形図は、直接次期の調査を目的とするもので、さらに将来、調査が進展した場合は、調査の目的によって、局所的な実測図が必要となることは、云うまでもない。

なお、今回の調査のために、Guatemala 国から提供された航空写真の中で、調査地域と関係があるものは、Fig. IV-2 の範囲内のものである。これらを利用して、第Ⅳ章 2 で述べたように、今回は帰国後に航空写真による地質構造の概査を行った。

しかし、同図から判るように、これらの航空写真は Zunil 部落の南側から Samala 川の下流部を目的に作成されたものと想像され、Zunil 地熱帯の中心区域が北限となっている。したがって、次の調査を目的として Zunil 地熱帯を中心とする地形図の作成、および航空写真から地質の解析を行うためには、さらに範囲を拡大して、航空写真の整備が必要である。

## 2 地質調査

今回はごく短期間に、Zunil 地熱帯の火山層序を予察的に決定し、縮尺 5 万分の 1 の地質図を作成し、地熱帯の構造や機構を概観することができた。併せて、多数試料について、かなり詳しい岩石記載を行い、次期調査の基礎資料の整備が終った。今後、引続き精度を高めて、この間に残された問題の解明と、Zunil 地熱帯全域について、1 万分の 1 程度の地質図の完成を目的とする。

### 2-1, Zunil 層群 (Zunil group)

Zunil 地熱帯の主な貯留層となる Zunil group は、北部の Cantel から南に、Samala 川に沿って露出し、この間で確かめられた厚さは約 500m、上下限は明らかでない。この group の詳細な層序は、全露頭を追跡して確立されねばならない。この層序は、本域の構造を決定するための基礎であり、また、地下の地熱帯の帽岩や貯留層などの性状、位置などを推定するのに役立つ。

Fumarole Negra に露出する Zunil group の lowest formation から以下、基盤までのこの group の層序や厚さは、本地域の地表では確かめられない。この間の層序は、本地熱帯の基盤までの深度を決定するために重要である。

これを解明するために、調査地域外各所に地窓を造って分布する花崗岩の露頭周辺の第三紀火山岩類の層序を検討し、これと本域の Zunil group との対比が必要である。この調査は、本域北方の Cajola, Totonicapan および Atitlan 湖周辺が適切な候補地と考えられる。

これらの層序対比に成功すると、本域の基盤の深度や構造がかなり明らかになると期待される。

### 2-2, Cerro Quemado 層群 (Cerro Quemado group)

地熱帯周辺の第四紀以降、ごく最近まで活動した Cerro Quemado group は、この地熱帯の熱源として重要である。これらの火山活動史は、なお詳細な検討が必要である。なおこの中、特に地熱帯内に大小のドームや貫入岩体を構成する rhyodacite (Cerro Pedrera lava) は、しばしば直接に間欠泉、温泉、噴気、変質帯と関係を有し、この岩体の貫入によって、周

辺に地熱の通路となる割目系を発達させていると考えられる。このため、本岩体の産状と地熱徴候との関係は、細かく検討を要する。また、これらのドームや貫入岩体の分布が、断層系と関係を有するので、両者の関係をさらに追究する必要がある。

### 2-3, 地質構造

ほぼ東西～南西、および北東～北北東に走る2つの断層系が顕著に発達しているため、これらが細かく追跡されねばならない。一般に地熱帯を切る平行した主断層に挟まれる区域や、2つの断層の交点部に優勢な熱源が貯えられているので、重要な調査項目の一つとなる。

前項でも述べたように、断層系と火山活動の関係も十分な注意が必要である。

## 3. 変質帯の調査

### 3-1, 変質帯の野外踏査

Zunil地熱帯の変質帯はFumarole GrandeやFumarole Negraを含む優勢な区域によく発達し、またその他の周辺各所に散在する。不規則に集めた変質岩(粘土、土壌を含む)の試料を検討の結果、これらは全体的に「酸性型」の変質を示し、しばしば多量のクリストバライトや石英を含む、いわゆる珪化岩が確かめられた。珪化岩の存在は、地下に深部熱水の存在を示唆している。

次期の精査では、珪化岩を主とする珪化帯、およびその他の粘土化帯、硫化帯などの各変質帯を識別し、綿密に、系統的に試料が採取される。各変質帯は調査全域にわたって、細かく追跡され、その性状、分布、方向性などが確かめられ、また、熱水、蒸気などの通路となる断層、節理、破碎帯、火山ドーム周辺の割目などの地質構造との関係が検討される。その他、原岩の違いによる変質程度などが注意され、また原岩の自変質や風化作用とは区別されねばならない。

### 3-2, 変質帯の細分

採取資料はX線回析、偏光顕微鏡などによって、詳細に解析し、鉱物組合せを決定する。これに基づいて野外で追跡された変質帯は、例えば、含有する主成分鉱物によってカオリン帯、明ばん石帯、クリストバライト-石英帯などに細分される。

細分した変質帯の地表分布から、熱水の通路となる断層などとの関係が、一層細かく究明され、また優勢な区域を指示する手懸りともなる。さらに、変質鉱物に作用した深部熱水の温度条件や化学的性質を、ある程度推定することもできる。

試錐によって、コアやスライムを採取、処理することができる段階になると、地表調査と全く同様に、試錐孔内における変質帯の垂直方向の分布が明示される。これらは、貯留層の位置、

あるいは熱水の物理化学的性質を推定することにも利用される。例えば、試錐孔内において貯留層付近の変質鉱物の組合わせから、熱水の噴出前にその熱水の pH 値が予測可能である。

なお将来、若干の試錐孔および地表調査の結果を組み合わせることが可能になれば、変質帯の垂直および水平方向の分布が、立体的に表現されることになり、地熱帯の規模や熱水の上昇機構が次第に明確となってくる。より多数の試錐結果が利用されるようになれば、もちろんその精度は一段と高くなっていく。

### 3-3, 変質岩の没出液の pH 値測定

変質岩の没出液の pH 値（第1章, 3-1）を測定し、pH 値等高線図を画くと、地表および浅所では、熱水の通路を中心として、その周辺に向かって、酸性の側からアルカリ性に向う傾向がある。熱水の上昇、移動を追跡するために有用である。

また、深部熱水が強酸性～酸性の場合には、地表の変質岩の pH 値が、広い範囲に強酸性～酸性を示す。Zunil 地熱帯南部の Aguas Amargas 温泉周辺は、広く pH 値が 1 付近で、異常に低く、これに該当する憶れがある（第1章, 3-1）。逆に、Fumarole Grande 周辺は、この pH 値が 3～4 の範囲にあって、中性～弱アルカリ性の深部熱水を有する地熱帯の一般的な傾向と一致する。この結果は、さらに試料数を増加して、詳細に検討する必要がある。なお、この調査は pH 試験紙を使用すれば、簡便であるから、すべての露頭、コア、スライムについての精査が望ましい。

## 4. 物理探査

Zunil 地熱帯で、最も顕著な地熱徴候は、Zunil 滝から下流の Fumarole Negra を含む Samala 川の両岸区域で、この地区が先ず開発の対象となる。この地区は、Samala 川に近い左岸部を概ねその流路と平行し、北東に走る西落ち断層（予想落差 100m）に切られて、概ね左岸部および右岸部に 2 分される。この地区で、物理探査に必要な地質条件を括めておく（第IV章, 2, 第VI章）。

- (1) 左岸には、今回の調査地域に露出する Zunil group（第三紀火山岩類）の lower ~ lowest formation（下限不明）が分布し、基盤の花崗岩類が比較的浅いことが予想され、その深度を確かめる必要がある。
- (2) 右岸には、主に Zunil group の middle formation が Samala 川の河底や南部に露出し、このため左岸より基盤深度は深くなっている。また Zunil group を被覆して、非常に新らしい、厚さ推定 100～150m の溶岩流（主に塊状、基底部は緻密）が広く台地を造っている（Zunil water-fall 溶岩の台地）。

Table VIII-1 Plan of geophysical exploration in Zunil geothermal area

調査種目	目的	調査方法	測線計画	現時点での当地区調査の実施順位
1) Fumarole Grande および Fumarole Negra を含む, Samala 川を挟む両岸地域における地震探査 (屈折, 反射法)	1) 基盤の花崗岩類までの深度と, Samala 川にほぼ平行して, その左岸を北東に走る北西落ち推定断層の調査確認。	屈折法	測線は反射法の測線を使用。この場合, 反射用爆発孔とは別に, 測線両翼に屈折用爆発孔の設定が必要となる。	1
		反射法 (水平四重合法)	4 測線 6.5 Km 爆発点数 65 孔 測点間隔 25 m 爆発孔間隔 75 m	
2) 同上地域で地震探査の測線を利用したの電気比抵抗探査 (垂直法)	2) 第三紀火山岩類の貯留層の推定。変質帯の分布	比抵抗垂直法	シュランベルジャー電極配置 4 測線 12.5 Km 測点数 $\begin{cases} \frac{AB}{2} = 1,000m & 22 \text{点} \\ \frac{AB}{2} = 750m & 8 \text{点} \end{cases}$	1
3) 重力および磁気探査	3) 地震探査の補備調査。Samala 川を挟む両岸地域の地質構造調査。	重力法	測点 5 Km × 5 Km 範囲 16 点 / 区 周辺部測点 1.5 Km × 1.5 Km 3 点 / 区	2
		磁気法	同上	

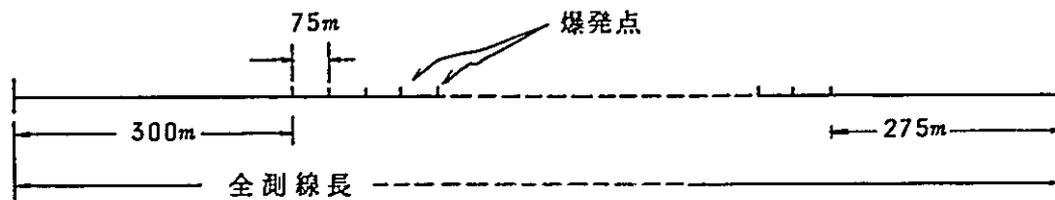


Table VIII-2 Seismic Survey (Common Depth Point Horizontal Data Stacking Method, 4-Fold)

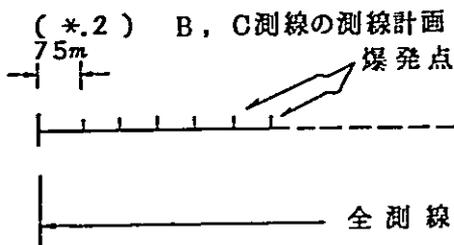
位 置		測 線 長 (*)	発 破 孔 数 と 削 孔 数
右 岸	Samala 川に平行 (南 北 方 向)	A. 2,225 m	10 m × 23 孔 = 230 m
	A 測線に交叉 (東 西 方 向)	B. 1,250 m	10 m × 12 孔 = 120 m
左 岸	Pachamiya 川沿い (東 西 方 向)	C. 1,550 m	10 m × 16 孔 = 160 m
	Pachamiya 川南西 支流沿い(東西方向)	D. 1,475 m	10 m × 13 孔 = 130 m
計		4 測線 6,500 m	10 m × 64 孔 = 640 m

(註) 測線計画は現地地形により若干変更することがある。

(\*.1) A, D 測線の測線計画

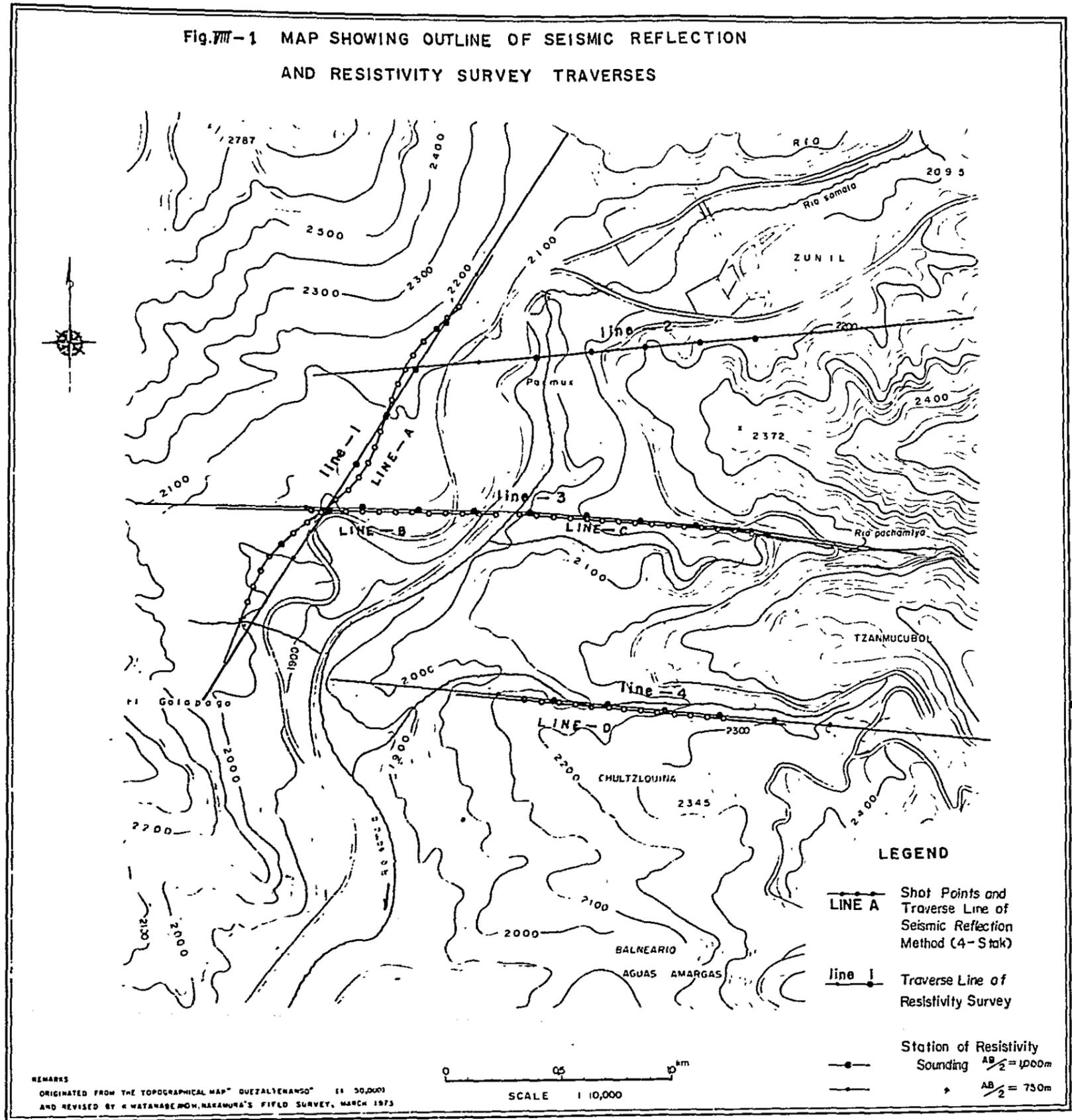


- 発破点間隔 ——— 75 m
- 発破点両端に 275~300 m の測線を加え全測線長とする。



- 発破点間隔 ——— 75 m
- 発破点片側に 425 m の測線を加えて全測線長とする。

Fig.VIII-1 MAP SHOWING OUTLINE OF SEISMIC REFLECTION  
AND RESISTIVITY SURVEY TRAVERSES





(3) 北東断層に沿って、rhyodaciteが貫入し、Fumarole Negraの西側には小ドーム、Zunil 滝東側には比較的大きいドームを形成している。

したがって、物理探査の主目的は基盤の深度および断層の位置や落差の決定となる。その他の問題を含めて、今後必要な調査項目をTable VIII-1, VIII-2に括めて提案する。

これらの調査項目の中で、例えば、地震探査や比抵抗探査の測線を、Samala川の深い峡谷を横断して設定することは、地形上困難と思われた。しかし、Fig. VIII. 4-1に示したように、右岸ではSamala川の支流Pachamiya川に沿い、またはこれとほぼ平行する南側の支流に沿い、あるいはFuentes Georginas温泉に通じる道路をできるだけ利用することなどによって、地形による標高変化の条件が少なくなるように、測線を設定することが可能と思われる。

問題は、このような地形地質の場所で、物理探査を行っても、所期の成果が得られるかどうかということである。物理探査の専門家の意見は、次の通りである。

- (1) 兩岸地域における地質構造上の相違を把握するという目的であれば、Fig. VIII-1に示した測線によって十分目的を達することが可能である。
- (2) 適用探査法は単一調査法では、調査効果も少ないので、少なくとも、2方法以上の多数法の組み合わせによる調査結果と、地質調査の結果を総合解析することによって、調査目的に沿う結果が得られる。
- (3) 今回の予察によって、調査の重点が比較的狭い開発対象地区にしぼられているので、調査法の経済性、開発計画に対する調査結果の利用の迅速性ならびに、この調査地域における調査結果の効用度などの諸条件を総合的に検討考慮すると、今後の探査法として、地震探査法の反射法、水平4重合法および比抵抗垂直探査法を併用する探査が最も適当である。

しかし、基盤岩と予想されている花崗岩類の変質、破碎の程度により、反射波の検出に困難を生ずることもあり得る。

このような問題はあるが、日本国内やAhuachapánでは、地震探査あるいは、比抵抗探査または、両者の組み合わせの結果に基づいて、試錐位置を選定し、非常に効果があった例が多いので、ここに以上の調査法を提案する。

## 5. 地球化学的調査

Guatemala国の地球化学的な予察の結果、地下の熱水だまりを推定することが可能な深部熱水を含む試料は、Zunil地熱帯の間欠泉、San MarcosおよびAmatitlán地熱帯を除き、ほとんど採取できないことが明らかになった。したがって、このような熱水系の調査法よりも、噴気に富む地熱帯の蒸気系の調査法を重点的に採用することを提唱する（結論および第V章2

参照)。

特にボーリングによって、深部熱水が得られる調査段階に達するまでは、ZunilあるいはMoyuta地熱帯においても、豊富な噴気と、変質岩(土壤)に注目するのが効率的で、精力的に計画的な精査が望ましい。蒸気系の調査法は、団員の古賀が新らしく開発中であるが、これをGuatemala地熱帯に利用すれば、世界で最初の試みとなる。

#### 5-1, 変質岩中の $H_g$ の定量

変質岩中の $H_g$ の定量は、蒸気系の調査で最有力と考えられる。操作も比較的簡単で、多数試料を取扱うことによって地熱帯の高温部を指摘することが可能である。

現在、このための基礎実験も進展中で、例えば、変質岩を加熱すると、 $100^{\circ}\text{C}$ までは著しくないが、 $100\sim 150^{\circ}\text{C}$ で $H_g$ は急速に消失することが確められ(古賀ら、未発表)、逆にいえば地下の加熱温度に比例して、 $H_g$ は噴気などと共に容易に地表に運ばれ、ここで急冷されて変質粘土や温泉沈殿物などに沈積、吸着されることを示している。

#### 5-2, 噴気凝縮水の分析

揮発成分のB, F,  $\text{NH}_3$ ,  $H_g$ , などの定量によって、地熱帯の高温部を追跡するものである。とくに、この場合も最も蒸気になり易い $H_g$ の定量が興味深い。 $H_g$ の定量は、最近の分析機器の進歩で、甚だ高感度(0.0001ppm)になったので有効であろう。

#### 5-3, 噴気ガスの分析

現在、噴気ガスの分析結果は、積極的に探査に利用されていない。しかし、噴気ガスは地下の状態を反映し、地表に数多くの情報を伝えている。ガス濃度、 $\text{CO}_2$ や $\text{H}_2\text{S}$ の濃度、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比は、地下の熱水の性質を指示する(Koga and Noda, 1973)。また、地熱発電における石灰華の障害を事前に予測することも可能である。

この方法は、空気の混入を防ぐために適切な噴気孔の選定や採取技術が必要であるが、少なくとも主な噴気孔について多数の分析が望ましい。

#### 5-4, 温泉水の同位元素測定

温泉水そのものの構成分子である水素と酸素の同位体、Tritium( $\text{H}_3$ ), Deuterium(D), Oxygen-18( $^{18}\text{O}$ )を測定し、これらを地表水と比較して、温泉水の年齢、経歴、温度などを知らることができる。また $^{34}\text{S}$ の測定によって、温泉の成因を推定することも可能である。

## 5-5, 全アウトプットの測定

Zunil 熱地帯には、広く各所に多数の温泉水が湧出し、これらはすべて Samala 川に流入する。したがって、Samala 川の定点、および各支流の分岐点で採水し、これらの分析結果から、この地域のすべての温泉から出てくる化学成分の全アウトプット (output) を計算することが必要である。

## 6. 調査ボーリング

Zunil 地熱帯では、主として Zunil group と、これに不整合に被覆される基盤の花崗岩類との境界面付近が、地熱貯留層として最も期待される。しかし、本域の Zunil group は、露頭で確かめられた lowest formation 以下は地下に覆在しているので、その基盤の深度、およびこの間の Zunil group の詳しい層序と層厚、または基盤との関係などは、試錐以外に、実物について正しく確認する方法はない。また、試錐によって、始めて熱水の分布やその性状、地下の温度勾配などを実際に知ることができる。

現在の探査技術 (物理・化学・地質) は著しく精度が向上しているが、地熱地帯の特殊性からみて、その評価および開発計画は調査ボーリングによって、ようやく結論に近づくといいても過言でない。Zunil 地熱帯においても、最終的には少なくとも調査ボーリングまでを目標にして、調査が継続されることを特に関係当局に要望したい。

調査ボーリングの種類・口径・深度・所要本数などについては、なお詳細に検討を要するが、本域における重要な課題の一つである基盤岩の深度と、この間の Zunil group の層序を確認するために、出来る限りコア・ボーリングを採用することが望ましい。この深度と今回の予察結果から、俄かに結論することは非常に難しいが、極めて大胆にいえは約 1000m 程度の調査ボーリングによって、概ね目的を達し得ると思われる。

調査ボーリングの時期については、意見が別れるところであるが、ボーリングの結果得られるコア (または検層) によって、物理探査の解析効果も増大することは当然であり、できる限り早目に採用されることが望ましい。

## 7. 発電所設計のための調査項目

### 7-1, 気象観測

気象観測は、Zunil 用地内で、発電所設計開始の 2 年前から、次の項目の調査が必要である。

- (1) 風向風速：自動記録により連続観測

- (2) 湿度：毎日1回読取記録
- (3) 気温：毎日1回読取記録
- (4) 気圧：毎日1回読取記録
- (5) 降水量：毎日1回読取記録

#### 7-2, 河川調査

河川調査は、Zuni 1 付近の Samala 川および小河川について、発電所設計開始の2年前から、次の項目の調査が必要である。

- (1) 水量測定：毎週1回
- (2) 水温測定：毎週1回
- (3) 水質測定：3ヵ月1回

#### 7-3, 坑井特性試験

生産井が完成した後、3ヵ月に1回次の項目について調査することが必要である。

- (1) 蒸気量, (2) 熱水量, (3) 含有ガス量, (4) 含有ガス成分, (5) 蒸気の成分, (6) 熱水の成分

#### 7-4, 諸材料試験

発電所設計の1年前から、噴出蒸気ならびに熱水中で、使用予定の材料について試験を実施し、適性材料を選定することが必要である。

7-4 発電所設計前に、発電所敷地の地質および地耐力について調査することが必要である。

## 第IX章 電力事情と地熱発電所の基本構想

### 1 電力事情

#### 1-1 電力需給現況

電力需給現況は、1957年から1971年までの15年間のデータがある。

設備容量は、1957年に29.2 MWであったものが、1971年には162.4 MWと5.5倍になった。発電電力量は124.4百万 kWhであったものが、606.2百万 kWhと約5倍になった。1964年までは Guatemala Electric Company ( Empresa Electrica de Guatemala ) によってのみ発電されていたが、1965年から INDE による発電が加わり、現在では半分以上の発電を INDE が受持っている。

需要最大は、1957年に28.5 MWであったものが、1971年には119 MWと約4倍の増加となり、load factor も、49.8%が58.2%と漸次増加している。需要の内訳は、1957年に住宅42%、工業33%、商業15%、その他10%であったものが、1971年には住宅30%、工業41%、商業15%、その他14%となり、工業の割合が増加している。

#### 1-2 将来の電力需給予想

将来の電力需給予想は、1975年から1989年までの15年間について言えば、次の通りである。年間の電力需要は、1975年に、1052百万 kWhであるものが、1989年には、4937百万 kWhとなり、発電電力量も1209百万 kWhが、5610百万 kWhと増加する見込みである。増加率は年12%~10%が見積られている。

#### 1-3 電力系統

この国の電力系統は、Central system、Eastern systemおよびWestern systemの3つに分れている。Eastern systemとCentral systemとは66 kvの送電線で連結されているが、Western systemは独立している。

系統電圧は、Central systemが138 kvと66 kv、Eastern systemが66 kvと33 kv、Western systemが、50 kvである。

## 1-4 発電設備

水力発電所は、既設分として INDE 所有のものが4つあり、設備容量合計 89 MW であり、年間発生電力量は、330 百万 kW である。

汽力発電所は、既設分として EEG (Guatemala Electric Co.) 所有のものが2つあり、設備容量合計 30 MW、年間 200 百万 kWh を発電している。INDE による建設計画分として、Escuintla に 1976 年までに、3 units があり、合計設備容量 133 MW で、年間 1240 百万 kWh を発電する予定である。

ガスタービン発電所は、INDE と EEG 所有のものが1つづつあり、設備容量合計 37.5 MW、年間 90 百万 kWh を発電している。

ディーゼル発電所は、EEG 所有のものが2つあり、設備容量合計 9 MW、年間 9 百万 kWh を発電している。

1976 年までに設備容量合計は、298 MW となり、年間発生電力量も、1669 百万 kWh が見込まれている。

## 2 地熱発電所の基本構想

### 2-1 ポテンシャル

先に述べたように、地区地熱徴候地の内、平坦な開発可能用地は Zunil の西南西約 2 km の所にあり、125 ha の広さがある。この中であれば、どこでも坑井を掘ることができる。

気水混合型の坑井の間隔は、150 m をとることが必要であるので、1 本当りの坑井の専有面積は 2 ha となる。

したがって、この用地には 60 本余の生産井を掘さくすることが可能である。有効率を 80 % として、50 本の生産井が得られる。1 本当りの出力を 3 MW と仮定すれば、この area のポテンシャルは 150 MW 程度と考えられる。

### 2-2 第 I 期発電所の定格出力

蒸気量、圧力等の蒸気条件は、実際に掘さくされた蒸気井の噴出物を測定しなければ判明しない。一般的に云えることは、基盤岩が浅ければ、低出力の蒸気井しか得られないが、基盤岩が深ければ強力な蒸気井を得る可能性が大きいと云うことである。

まだ探査を行っていないので、判っきりしたことは云えないが、次のように仮定して、第 I 期発電所の基本構想を立てた。

Table IX - 1 Actual Data of Electrification in Guatemala (1957 - 1971)

項 目 \ 年	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971
電 源 設 備 ( MW )															
汽 力	7.0	7.0	18.5	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
Diesel	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
Gas Turbine	-	-	-	-	-	-	-	12.5	25.0	25.0	25.0	37.2	37.2	37.2	37.2
火力小計	16.0	16.0	27.5	39.0	39.0	39.0	39.0	51.5	64.0	64.0	64.0	76.2	76.2	76.2	76.2
水 力	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	26.2	26.2	26.2	26.2	86.2	86.2
合 計	29.2	29.2	40.7	52.2	52.2	52.2	52.2	64.7	77.2	90.2	90.2	102.4	102.4	162.4	162.4
発生電力量 ( 百万 kWh )															
汽 力	40.2	45.5	70.3	98.0	140.4	164.7	203.7	216.7	245.8	238.7	231.7	235.5	256.5	199.7	248.3
Diesel	12.3	23.8	21.4	7.6	3.6	4.8	6.1	12.9	14.0	12.9	13.8	15.0	14.5	18.3	3.4
Gas Turbine	-	-	-	-	-	-	-	9.5	36.6	71.9	84.2	119.0	134.4	78.4	79.0
火力小計	52.5	69.3	91.7	105.6	144.0	169.5	209.8	239.1	296.4	323.5	329.7	369.5	405.4	296.4	330.7
水 力	71.9	74.6	73.6	79.1	66.7	69.5	64.1	67.1	64.6	83.5	106.1	105.5	125.8	278.5	275.5
合 計	124.4	143.9	165.3	184.7	210.7	239.0	273.9	306.2	361.0	407.0	435.8	475.0	531.2	574.9	606.2
電 源 構 成 ( 百万 kWh )															
Guatemala Electric Company	124.4	143.9	165.3	184.7	210.7	239.0	273.9	306.2	354.0	348.0	332.8	286.0	312.1	256.8	269.2
I. N. D. E	-	-	-	-	-	-	-	-	7.0	59.0	103.0	189.0	219.1	318.1	337.0
最 大 電 力 ( MW )	28.5	30.0	37.2	41.0	45.5	50.8	56.9	65.6	76.0	85.9	88.3	94.1	105.0	115.9	119.0
Load Factor ( % )	49.8	54.8	50.7	51.3	52.9	53.7	55.0	53.1	54.2	54.1	56.4	57.6	57.9	56.6	58.2
需 要 電 力 ( 百万 kWh )	105.9	122.5	139.0	154.9	176.7	199.8	229.9	260.1	306.7	348.7	376.9	411.9	460.7	502.0	531.8
損 失 ( % )	14.9	14.9	15.9	16.1	16.1	16.4	16.0	15.0	15.0	14.3	13.5	13.5	13.3	12.7	12.3
需要電力の内訳 ( % )															
住 宅	42	41	41	42	40	39	36	34	32	31	31	30	30	29	30
工 業	33	35	35	33	34	34	38	40	41	42	41	41	41	42	41
商 業	15	15	15	15	16	15	14	14	14	14	15	15	15	15	15
市町自治体	3	3	4	5	5	8	8	9	9	9	9	10	11	11	11
政 府	7	6	5	5	5	4	4	3	4	4	4	4	3	3	3
年 増 加 率 ( % )															
需 要 電 力	-	5.1	24.2	10.0	11.1	11.6	11.9	15.4	15.8	13.0	2.8	6.6	11.6	8.3	2.7
発 生 電 力	-	15.7	14.9	11.7	14.1	13.4	14.6	11.8	17.9	12.7	7.1	9.0	11.8	9.0	5.4

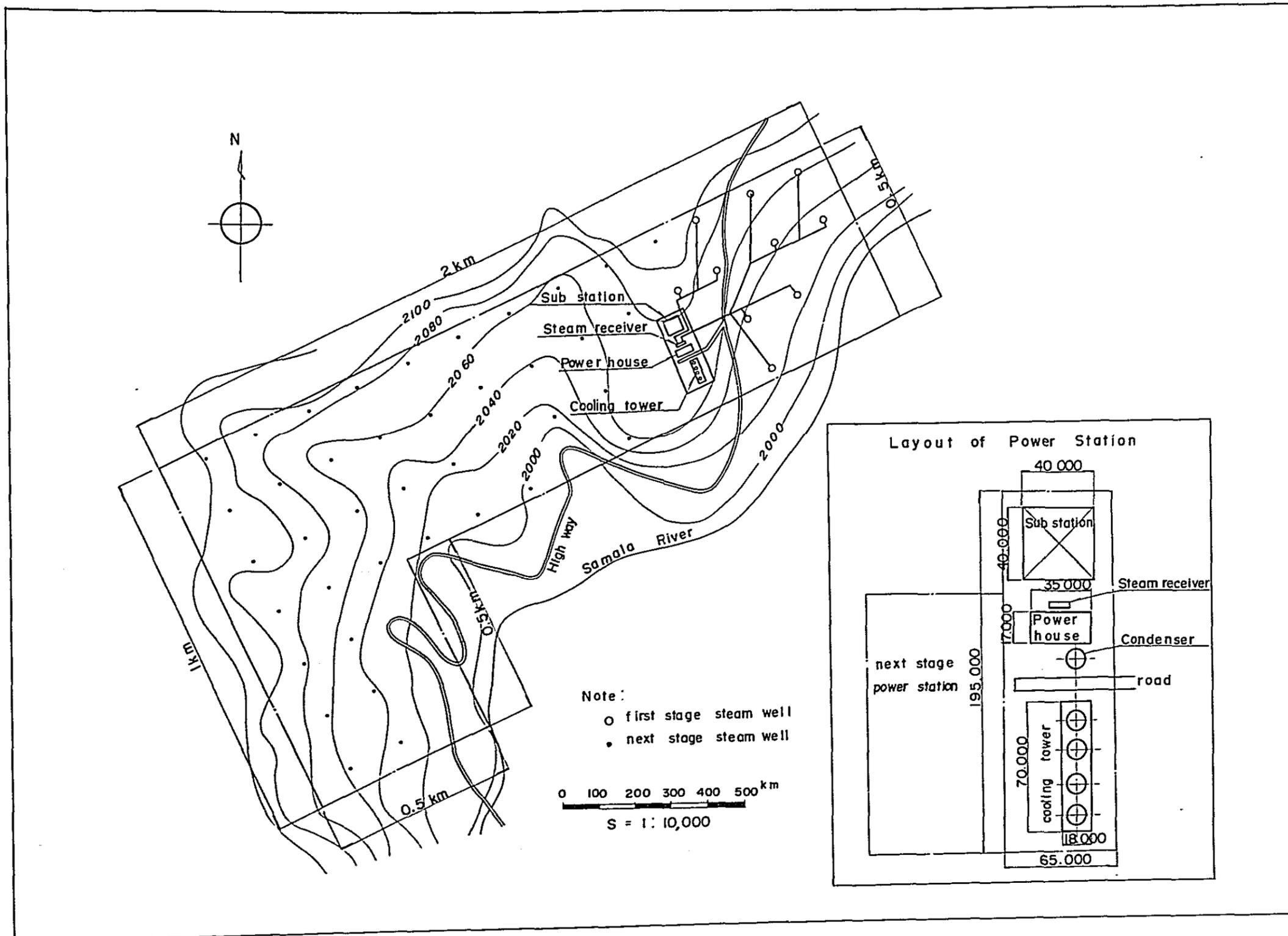
Table IX - 2 Demand Estimation in future

年	年間需要電力量 百万 kWh	損 失 %	年間發生電力量 百万 kWh	季 節 別 需 要 電 力			
				Dry Season		Wet Season	
				發生電力量 百万 kWh	發生電力 MW	發生電力量 百万 kWh	發生電力 MW
1970	589	13	677	330	127	347	134
1971	662	13	761	371	143	390	151
1972	744	13	855	417	161	438	169
1973	836	13	961	469	181	492	190
1974	938	13	1078	526	203	552	213
1975	1052	13	1209	590	228	619	239
1976	1178	12	1339	653	252	686	265
1977	1318	12	1498	731	282	767	296
1978	1472	12	1673	816	315	857	331
1979	1642	12	1866	911	352	955	369
1980	1830	12	2080	1015	392	1065	412
1981	2035	12	2313	1129	436	1184	457
1982	2261	12	2569	1254	484	1315	508
1983	2507	12	2849	1390	537	1459	564
1984	2777	12	3156	1540	595	1616	624
1985	3070	12	3489	1703	658	1786	690
1986	3388	12	3850	1879	726	1971	762
1987	3734	12	4243	2071	800	2172	839
1988	4105	12	4665	2277	879	2388	923
1989	4506	12	5120	2499	965	2621	1013
1990	4937	12	5610	2738	1058	2872	1110

Table IX - 3 Install Capacity in Guatemala, 1976

發電所名	会社名	既設または計画	設備容量 MW	発生電力量		
				Dry Season 百万 kWh	Wet Season 百万 kWh	計 百万 kWh
水力						
Complejo Micheloya-Rio Hondo	INDE	既設	10			
Santa Maria	INDE	既設	6	27	40	67
Los Esclavos	INDE	既設	6.5 x 2	15	52	67
Jurun Marinaia	INDE	既設	20 x 3	90	106	196
小計			89	132	198	330
火力						
La Laguna	EEG	既設	3.5 x 2	-	-	200
Guacalate			11.5 x 2			
Escuintla	INDE	1972	33	-	-	240
		1975	50	-	-	400
		1976	50	-	-	400
小計			163			1,240
Gas Turbine						
La Laguna	EEG	既設	12.5	-	-	30
Guacalate	INDE	既設	12.5 x 2	-	-	60
小計			37.5			90
Diesel						
Castellana	EEG	既設	1 x 5	-	-	5
La Laguna	EEG	既設	1 x 4	-	-	4
小計			9			9
合計			298.5			1,669

Fig. IX - 1 LOCATION OF ZUNIL GEOTHERMAL POWER STATION





### 2-2-1. 定 格 出 力

第Ⅰ期発電所の定格出力は30MWとした。これは、経済的に発電しうる最少のユニット容量である。

### 2-2-2 坑 井 出 力

1本当りの坑井出力は平均3MWとした。

### 2-2-3. タービン入口圧力

タービン入口圧力は $3.5\text{kg/cm}^2\text{g}$ （飽和蒸気）とした。

## 2-3 基 本 構 想

### 2-3-1 一 般 方 針

- (1) 経済的で安全な設備を開発することを第一とする。
- (2) 発電原価は新鋭火力原価と同等以上とする。
- (3) 熱サイクルは、できるだけ簡単なものとする。
- (4) 本発電所は完全なベースロード発電所として計画し、90%以上の高利用率信頼度のあ  
るものとする。

### 2-3-2 発 電 原 価

発電原価は、最新の大容量重油専焼火力発電所と競合できるものとする。地熱発電所の発電原価は大部分建設費に比例するので、できるだけ簡単な設備とし、建設費を低減することが必要である。

### 2-3-3 出 力

定格出力は30MWとし、過負荷出力は39MW（30%増）とする。最終発電所出力は、第Ⅰ期30MW、第Ⅱ期50MW、第Ⅲ期50MW、合計130MW程度を予想し、第Ⅰ期投資規模を検討する。

### 2-3-4 発 電 方 式

坑口分離天然蒸気直接利用復水蒸気タービン発電

### 2-3-5 発電所の運用

最小限の人員で、起動、停止運営ができる設備とする。

### 2-3-6 建 屋

できるだけコンパクトで簡素な屋内式本館を設ける。付属事務所、一般倉庫、油倉庫も設置する。

### 2-3-7 配 置

本館と冷却塔を平行に配置し、その間に復水器を設置する。各蒸気井からの蒸気を集める蒸気だめ (steam receiver) は、本館の復水器と反対側に置く。屋外変電所 (sub station) は、北端に設置し、送電線の取出しが容易になるようにする。第Ⅱ期以降の増設は西側に延ばしてゆく。

### 2-3-8 蒸 気 井

第Ⅰ期発電所の周辺に、150mの間隔を置いて10本の蒸気井を配置する。蒸気井の口径は、最終8<sup>5</sup>/<sub>8</sub> inとする。

### 2-3-9 坑 口 装 置 (Wellhead equipment)

- (1) 汽水分離器 (Steam water separator) は、底部出口サイクロンセパレータ (Bottom outlet cyclone separator) を各坑井毎に設置する。
- (2) 坑井毎に消音器 (Silencer) を設置する。この消音器には蒸気流量測定装置を取付け、定期的に蒸気量を測定できるようにする。
- (3) 坑口配管 (Wellhead piping) にガス採取ノズル (Gas sampling nozzle) を取付け、ガス量および成分を定期的に測定できるようにする。

### 2-3-10 蒸気輸送設備 (Steam transmission line)

- (1) 噴出した蒸気は坑口で分離し、蒸気単相で発電所まで輸送するものとする。
- (2) 経済上、蒸気輸送ルートは地上敷設とし、合流管をできるだけ使う。
- (3) 本館近くに、蒸気だめ (Steam receiver) を設置する。

### 2-3-11 機 械 設 備

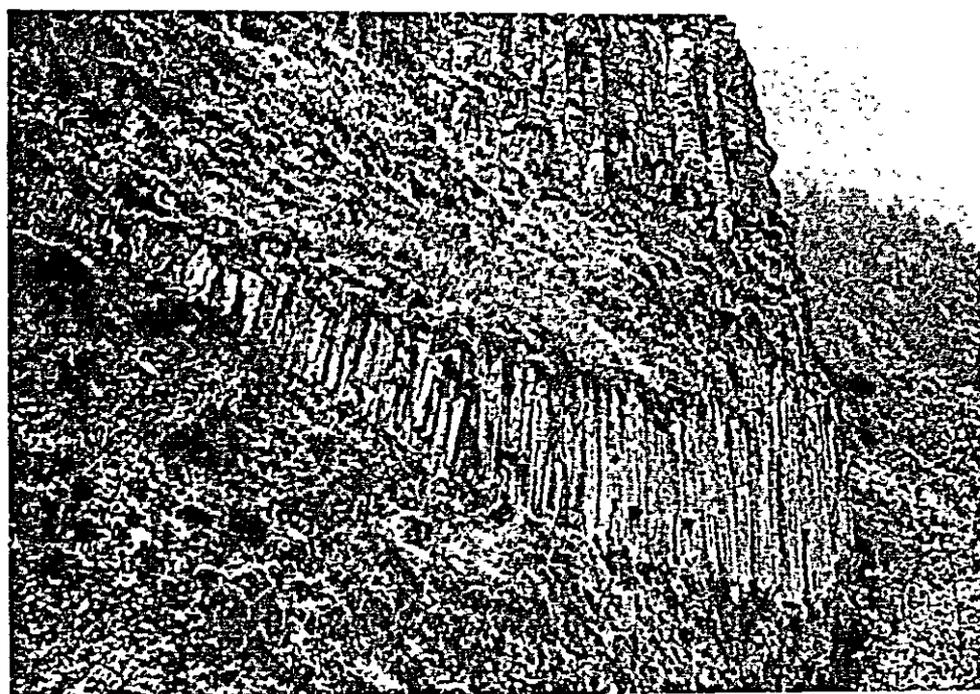
- (1) 汽機 (Turbine) は1段噴射復水式 (Single flash Condenser type) とする。

- (2) 復水器 (condenser) は、噴射式バロメトリック型 (Barometric jet type) とする。
- (3) ガス抽出器 (Gas extractor) は、蒸気エジェクタ (Steam ejector) を用いる。
- (4) 冷却水は、機械通風式冷却塔 (Mechanical forced cooling tower) によって冷却され、再循環されるものとする。冷却水補給 (cooling water makeup) は、復水 (condensate) の全量を用い、外部からの補給水を少なくする。



Samala 川の峡谷を上流より望む。

右側（右岸）は，Zunil water-fall lava からなり，左側（左岸）は Cerro La Pedrera lavas の貫入してきた rhyodacite の急崖である。また，左側および手前の平坦面は，Zunil group の Lower formation の pyroclastic flow deposits からなる。手前側（北側）が N-E 系の断層（fault）が落ちている。



Zunil group の Middle formation の輝石安山岩溶岩流（pyroxene andesite lava flow）に見られる柱状節理（columnar joint）



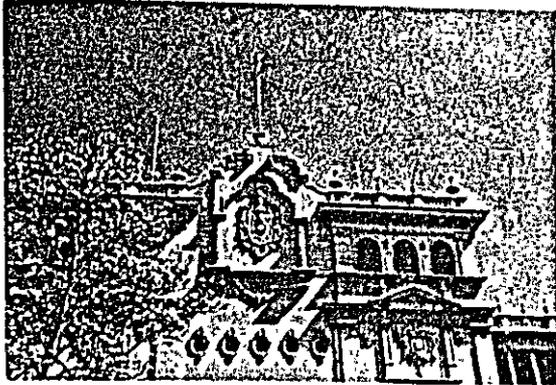
Mapa de Relieve de Guatemala (リリーフマップ)



Zunil water-fall より下流を望む。

右側(右岸)は Zunil water-fall lava よりなり, 左側(左岸)は Zunil group の Lower formation の pyroclastic flow deposits よりなる。さらに, これらが造る台地面は, N-E系の断層で手前側(北側)が落ちているので, 二段になって見える。下流の峡谷には間欠泉が見られる。

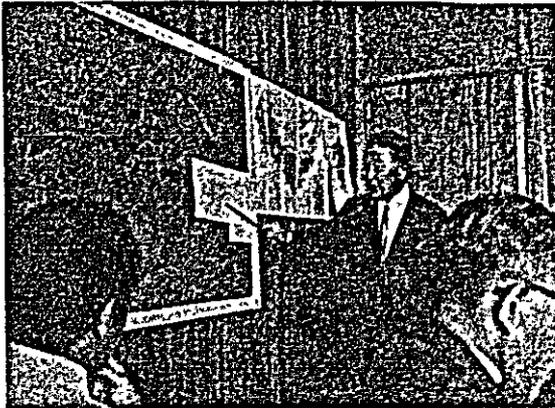
写真 1



Guatemala 政庁  
(Palacio Nacional)



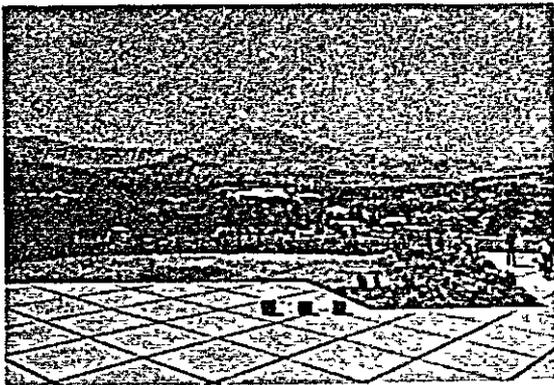
リリーフ マップ  
(Mapa de Relieve de Guatemala)



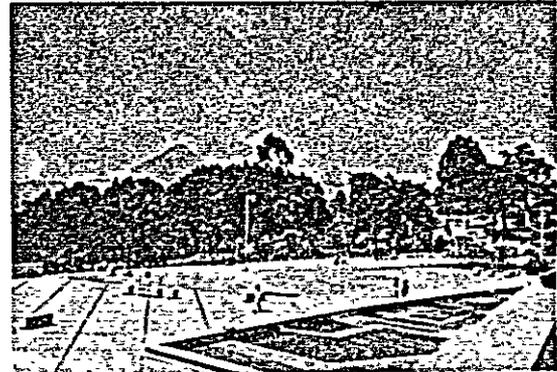
INDEにおける団長報告



INDEにおける報告会

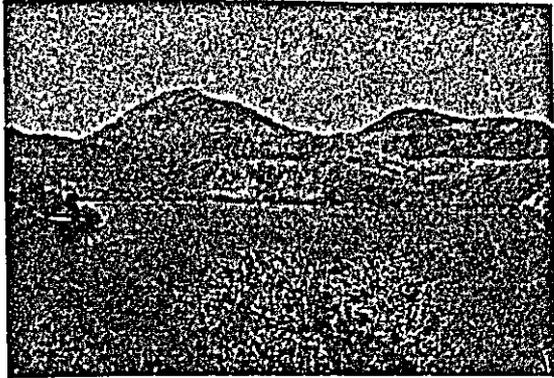


Pacaya 火山 (Volcan de Pacaya)

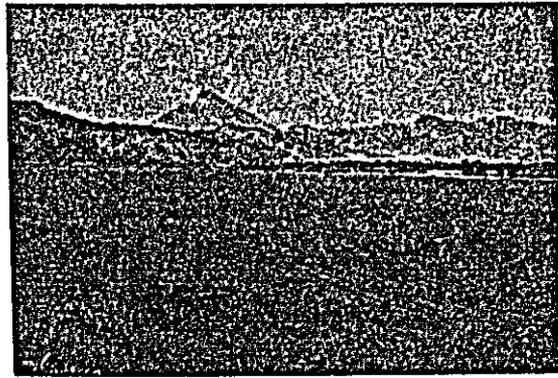


Agua 火山 (左) と Fuego 火山

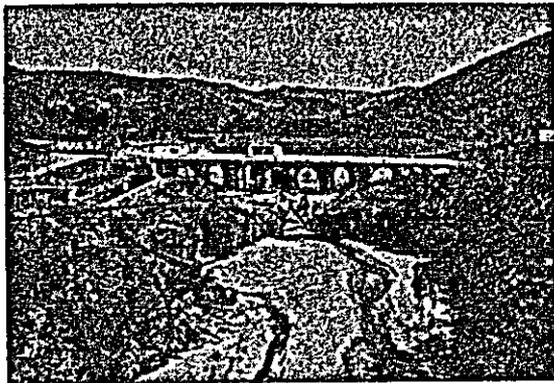
写真 II



Amatitan 湖



Amatitlan 湖と Agua 火山



El Molino のダム



Molino ダムサイトの石英安山岩質溶結凝灰岩 (dacitic welded tuff)

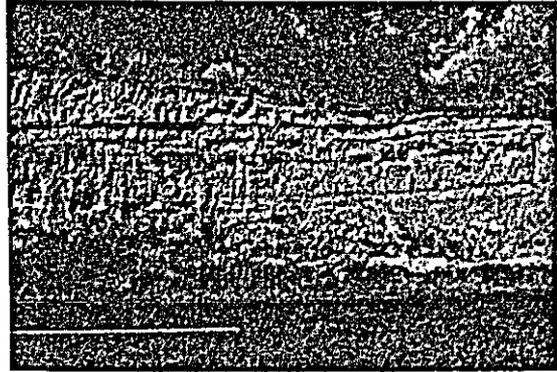


Moyuta のカルデラ (Caldera)

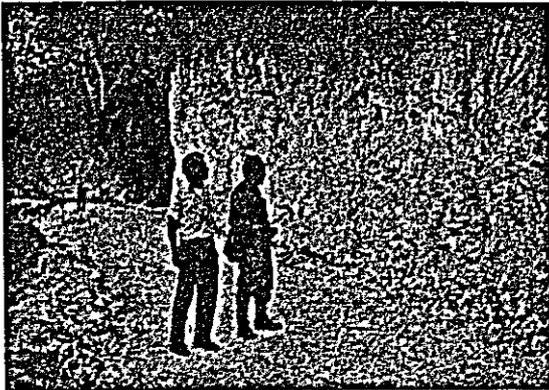
写真 Ⅱ



Moyuta 北方における降下火砕岩



Moyuta 北方における第四紀の湖成層



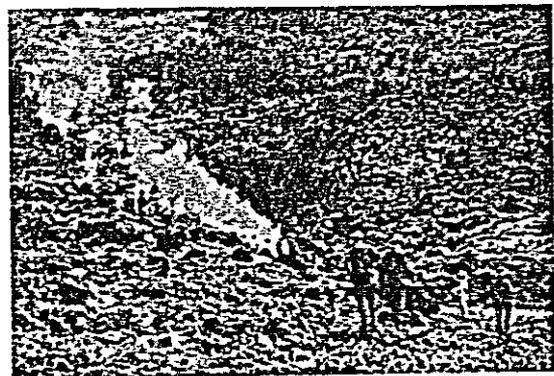
Guinea 付近の熱水変質, Moyuta



Guinea 温泉, Moyuta

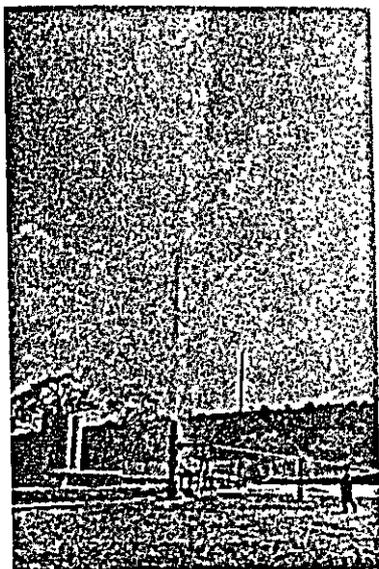


Marukuchi の変質帯, Moyuta

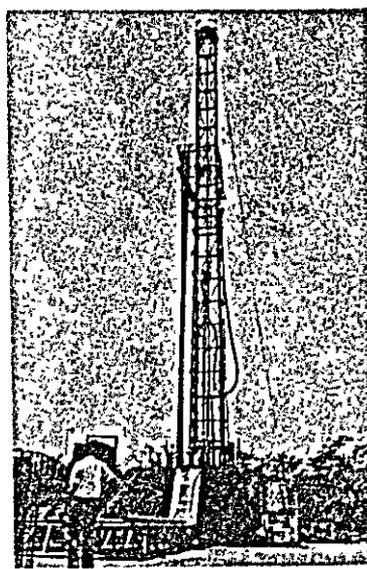


Azulco 地熱帯, Moyuta

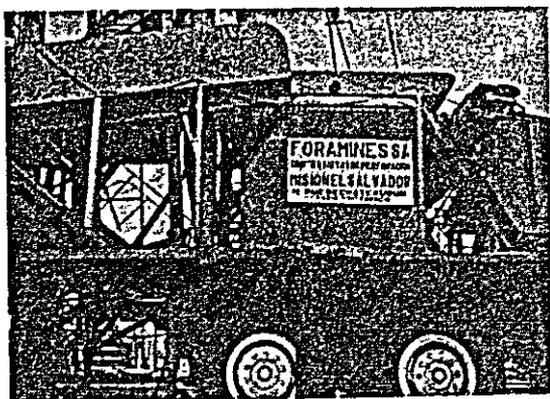
写真Ⅳ



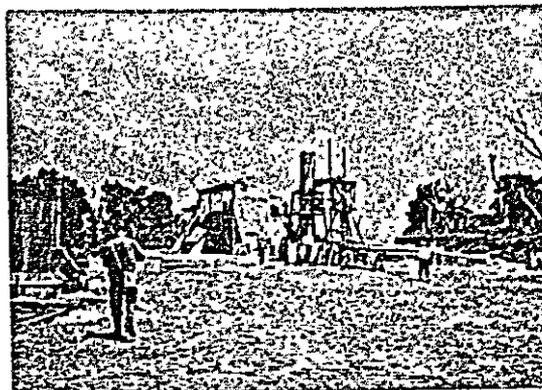
噴出中の坑井, Ahuachapan



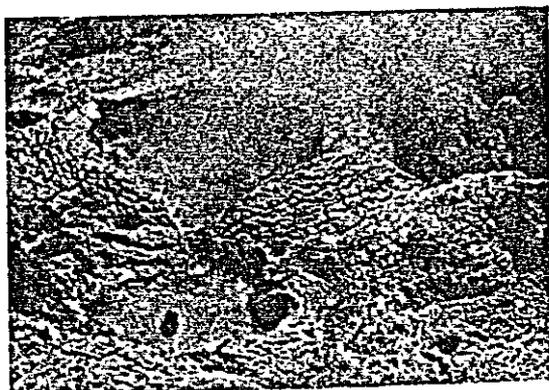
掘さく中の坑井, Ahuachapan



ボーリング機械, Ahuachan



坑口装置 (Wellhead equipment),  
Ahuachapan

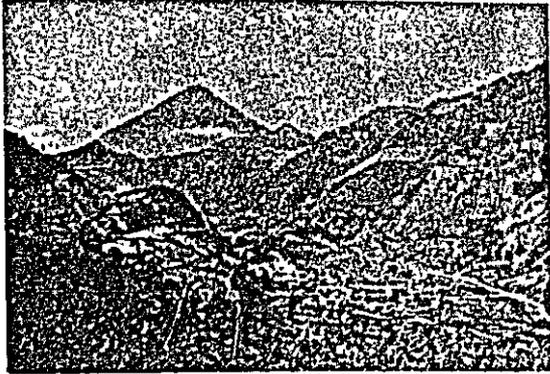


坊主温泉, Ahuachapan



地獄, Ahuachapan

写真 V



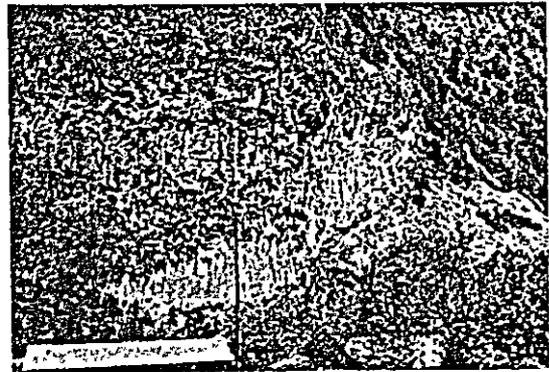
Santa Maria 火山



Zunil 地熱帯のキャニオン



Zunil グループの中部層 (Zunil GroupのMiddle formation)



Zunil グループの中部層



Zunil グループの中部層, 輝石安山岩溶岩の柱状節理 (Pyroxene andesite lavaのcolumnar joint)



Zunil GroupのMiddle formationに貫入したAlmolonga lava.

写真 VI



Zunil water-fall



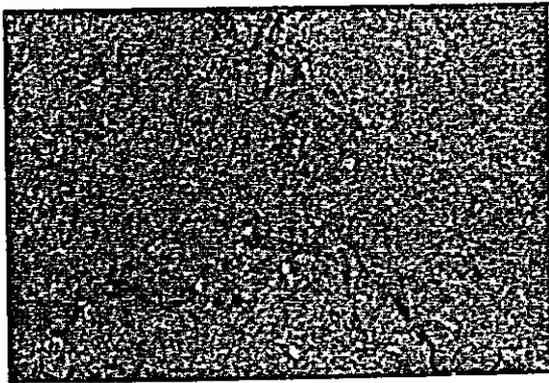
Zunil water-fall と断層 (fault)



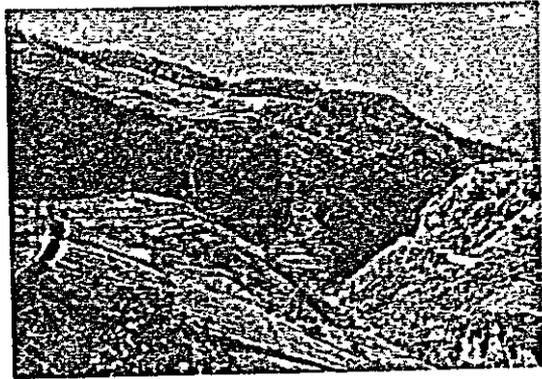
Fumarole Grande, Zunil 地熱帯



Fumarole Grande, 遠望



Cantel formation の火砕流堆積物  
(Pyroclastic flow deposit)



Zunil Group の Lower formation  
の台地面 (左下方) と Zunil water-  
fall lava (右)

写真Ⅶ



Fumarole Grande



Ditto



地熱利用



Sinterの堆積物



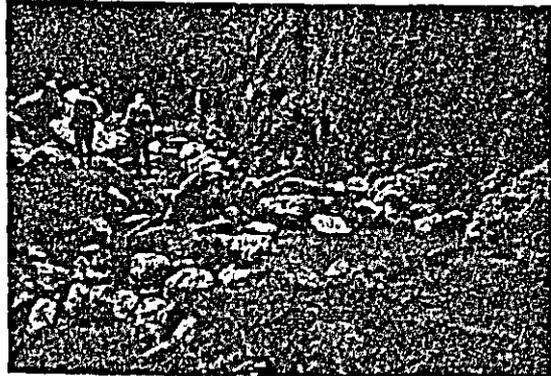
Fumarole Grande のキャニオン



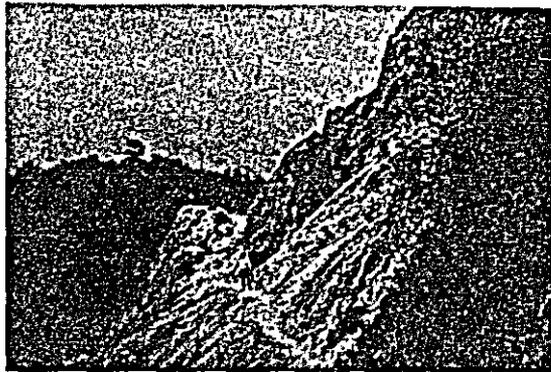
Paxmux Fumarole の遠望, Zunil



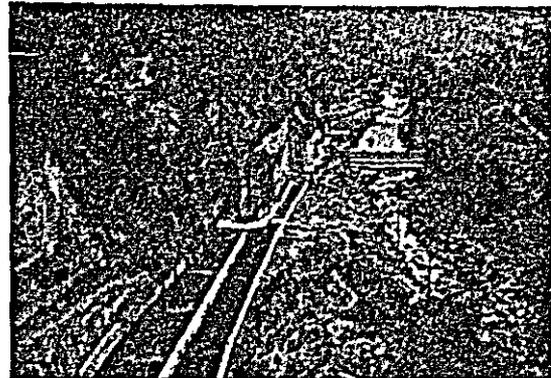
Hot Spring, Zunil



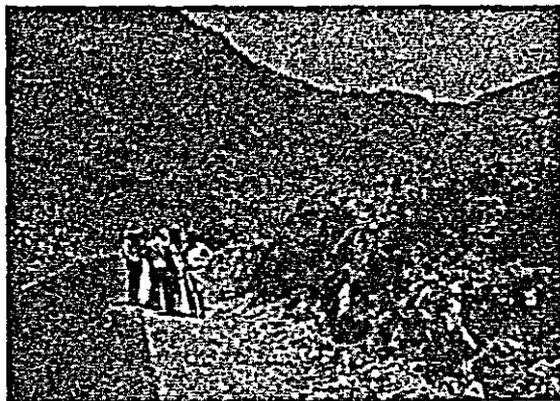
Hot Spring, Zunil



Zunil water-fall の変質帯



Zunil 下流の発電用水路, 左の崖は  
Zunil Group の Upper formation

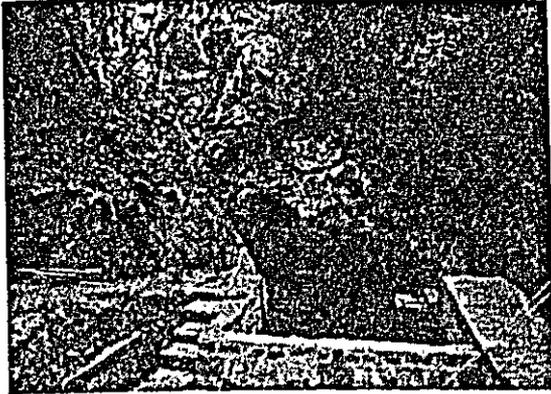


道路際の噴気, Zunil 南西方



Balneario Aguas Amargas

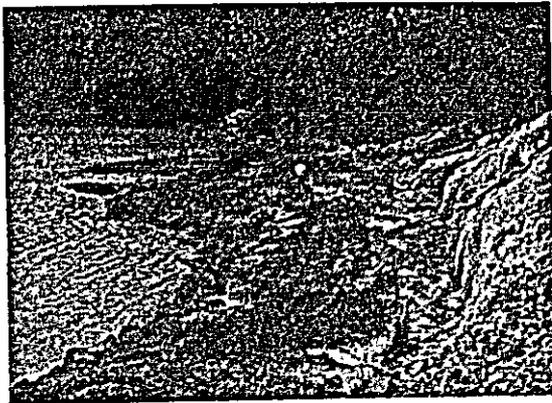
写真Ⅱ



Balneario Fuentes Georginas



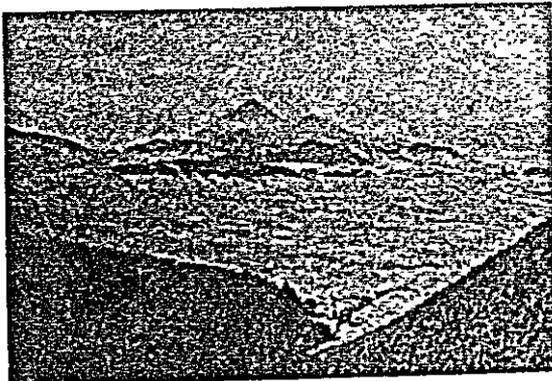
Asuncion Mita : 71℃の含重曹炭酸食塩泉, 水酸化鉄, 水酸化アルミ, 炭酸カルシウムの沈殿物で, パレット状にきれいである。温泉は炭酸ガスで噴出しているように見える。



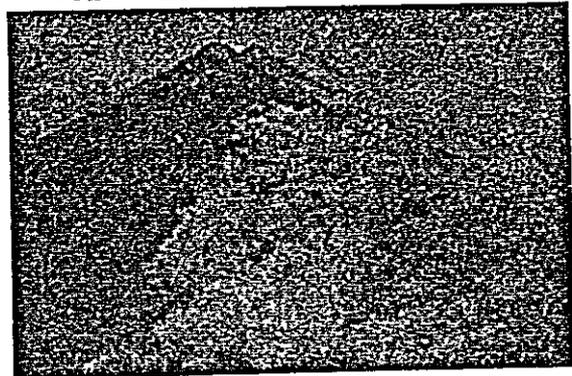
Ixpaco : 硫黄を含む湖, PHは1.6, 湖畔に噴気で加熱された温泉が出ている。



Ixpaco : 高温(82℃)の食塩泉, 岩石に付着しているのは, 食塩とtravertineのsinter.



Quezaltenango 盆地と Santa Maria 火山



Volcan de FuegoとVolcan de Agua



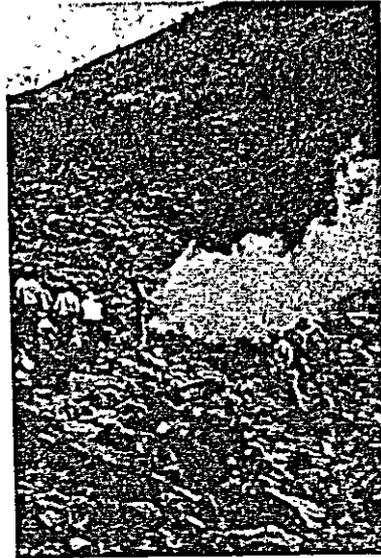
Zunil Hot spring, Guatemala.



Ahuachapan geothermal area, El Salvador.



Guinea Fumarole, Moyuta geothermal area, Guatemala.



Azulco Fumarole, Moyutageo thermal area, Guatemala.

