

2. 2 地球科学的調査

2. 2. 1 地質調査

2. 2. 2 地化学調査

2. 2. 3 重力・磁気探査

2. 2. 4 電磁探査

2.2 地球科学的調査

2.2.1 地質調査

アマティトラン地域の地熱構造を規制する地質および地質構造を把握することを目的に、現地地表踏査や岩石試料採取および既存データのレビューを通して、調査地域およびその周辺の地質構造を解明し、新期火山岩体、変質帯の分布・性状、熱源、および水理地質を検討した。

現地調査では、地質分布調査・地質構造調査・変質帯調査を実施した。室内解析では、現地調査時に採取した岩石試料を用いて、顕微鏡観察 (13 試料)、X線分析 (全岩分析 25 試料、定方位分析 20 試料)、ジルコン形状分析 (20 試料)、FT (5 試料) および TL (火山岩年代 5 試料、変質年代 5 試料) 年代測定を実施した。得られた結果から推定された火山活動および熱水変質活動の考察に基づき、現地調査等で示された地質構造との関連性を検討した。

1. 広域地質

グアテマラは、北アメリカ大陸と南アメリカ大陸をつなぐ中央アメリカ北部に位置し、北はメキシコ、南はホンジュラス・エルサルバドルと接し、南西側は太平洋に、北東側はカリブ海に面している。本調査地対象地域であるアマティトラン地域 (Fig. 2-2-2) は、南部の首都グアテマラシティから直線距離で 25km 離れた Pacaya 火山の北麓に位置している。

標高 1,200~2,000m のグアテマラ火山高地には、調査地域内部の Volcan de Pacaya をはじめとして Fuego, Actenago, Santa Maria, および Santiaguito 等の最近 100 年の間に噴火した火山がほぼ東西に配列している。この火山列は、中央アメリカ火山弧と呼ばれるもので、メキシコ-グアテマラ国境の Volcan de Tacana からコスタリカ中央の Volcan de Irazu にかけて 1,100km におよび、若い成層火山がほぼ等間隔で分布する。

Fig. 2-2-1 に示すように、グアテマラ海岸より南西方約 100km の海底には中米トレンチが北西-南東方向に存在し、カリブプレートへと南西方から沈み込むココスプレートとのプレート境界とされている (Molnar and Sykes, 1969)。また、中央アメリカ火山弧は、このトレンチに平行して分布しており、ココスプレートの沈み込みによって伴う火山フロント (Sugiyama, 1960) を形成している。すなわち、カリブプレートの南西境界付近では、ココスプレートの N30E 方向への沈み込みに伴うプレート上での活発な隆起運動によって、南北方向の展張場となり、その結果、東西に配列する火山列が形成されたと考えられている。

2. アマティトラン地域の地質

アマティトラン地域の地質は下位より、花崗岩質基盤岩、カルデラ形成前・カルデラ形成期・カルデラ形成後の火山岩類 (主に輝石安山岩および石英安山岩から構成される Amatitlan 複合火山岩類)、Pacaya 複合火山岩類、および洪積・沖積層よりなる (Fig. 2-2-3 および Fig. 2-2-4)。

本地域における地質構造的な特徴は、カルデラ構造、N-S系、NE-SW系の主要断層、デイサイトドームの貫入で特徴づけられる。これらの構造に沿って温泉・噴気の配列や変質帯の伸びが認められ、地下水や地熱流体の流動を規制している可能性が高い。

a. カルデラ構造と地熱活動

Laguna カルデラ付近を通るE-W系の断層が存在し、カルデラの南縁であることがAMF-1, 3, 4の3坑井の掘削結果から明らかにされた (West JEC and Telectro, 1995)。アマティトランカルデラ内部に掘削されたAMF-3の温度プロファイルの逆転現象および透水性が非常に高いなどの特徴から地熱流体が流動しやすい状況にあると推定される。しかしながら、アマティトラン複合火山岩類に厚く覆われたアマティトランカルデラの南縁では顕著な地熱構造は認められないことから浅部では浅層地下水の流入域、すなわち、リチャージゾーンとなっている可能性が高い (Fig. 2-2-5)。

一方、Laguna カルデラ内で、その北壁に多くの噴気帯および変質帯が存在している。その変質状況や噴気の配列はNE-SW系のカルデラ縁または重力探査およびMT探査結果から推定された断層に沿って形成されている。

Los Humitosの東方に認められる噴気帯は、東側のN-S系断層の近傍に位置する。このカルデラは水蒸気爆発により形成されたものと考えられ、カルデラ縁に断層等の断裂構造に起因する可能性が高い。

b. 主断層系と地熱徴候

N-S系の断層は、主にLos Humitosカルデラを挟んで、平行に発達するが、西側のN-S系断層の西方はカルデラ形成後の火山岩類が変質を受けており、比較的若い熱水活動の存在が推定される。Los Humitosカルデラの西端はある程度の深部まで粘土化が進み、シールされているが、カルデラ東端では変質作用がそれほど進まず、現在も開口性のフラクチャーが存在すると判断される。

c. デイサイトドームと地熱活動

Laguna de Amatitlan南岸の温泉・噴気は、主としてデイサイトドームの周辺に発達した裂かから湧出しているものと推定される。ただし、2~3の温泉・噴気はN-S系の断層に伴なう裂かから湧出しているものが観察される。したがって、ドーム形成時のデイサイト質マグマの上昇に伴ない、境界部に裂かが発達し、これが地熱流体の通路となっている可能性が高い。さらに、流体地化学的データ、ドーム形成時期を考慮すると、このデイサイト自体が本地域の熱源の一つとなっている可能性がある。

3. 熱源

火山岩の分布および年代測定の結果から、アマティトラン地域の火山活動は北から南へ移動していることは明らかで、これに伴ない地熱活動の中心も北から南へ移動しているものと推定される。現在も噴出活動中のVolcan de Pacayaを始めとして、第四紀更新世後期、すなわち、約0.7Maから現世にかけて活動したマグマの熱あるいは火山ガスが本地域

の広域的な熱源となっているものと推定される。このことは、後述する地化学解析結果により得られた加熱機構とも整合性が高い。しかしながら、マグマ溜まりの位置についての情報は得られていない。

West JEC and Telectro (1995) は、アマティトラン地域の熱源について、以下のよう

に述べている。

- (1) AMF-2 周辺では、花崗斑岩を含む基盤岩の直上に 300°C 以上の高温域が認められる。
- (2) ジルコン結晶系解析より、ドーム状火山を形成したデイサイトと同様の岩石が、貫入岩として AMF-2 の深度 560-870m に発見された。
- (3) このデイサイトの貫入岩付近での流体包有物の均質化温度分布はバイモーダルで、坑内実測温度は高温側のピークと調和的であり地熱系は新規デイサイト貫入岩によって 50°C 加熱されたことを示唆している。この現象はデイサイト等の貫入岩の存在しない他の坑井 AMF-1, 3, 4 では認められておらず、AMF-2 周辺ではデイサイトの貫入岩によって、現在も地下温度が上昇している可能性がある。
- (4) 結論として、デイサイト質貫入岩は 6,000 年前まで活動した Cerro Limon や Cerro Durazno のようなデイサイト質火山に対比され、これらの火山同様、熱源となっている可能性がある。

4. 水理地質

本調査地域を含む広域的な表流水および地下水系は、大局的にみるとグアテマラシティ地溝に沿って南方に流れ、本地域域北西部の Rio Michatoya 川を経て太平洋側へ流れ出ている。また、アマティトラン周辺だけをみると Volcan de Pacaya, Cerro Grande を分水嶺として、地表水、浅層地下水とも一旦は北方の Lago de Amatitlan 方向へ流入していることが推定される。

地質的に見ると、地下水は、主として溶岩流の割れ目の発達している部分を流動しているものと推定される。また、地表に分布する火砕流堆積物はほとんどがルーズで、透水性が高いため、これらの地層の基底部も地下水の流動部となっていることが予想される。多孔質な火砕流堆積物は、流体の流動、貯留場所になることもあるが、地熱地帯では多くの場合すぐに粘土化や珪化が進み、むしろ流体の流動に対して不透水層の役割を果たす場合が多い。地下深部の地熱流体が存在する深度では、断層に伴なって発達する破碎帯で一般に透水性が高く、特に溶岩や貫入岩、基盤岩などの脆質な岩石が顕著である。このため、調査地域の断層が発達するゾーンに沿って流体の流動が期待され、その深部では地熱貯留層が形成されている可能性が高い。しかしながら、断裂型貯留層では断層それ自体しばしば粘土化して断層面と直行方向には不透水バリアとなっており、断層を境に静水圧や貯留層圧が大きく異なる現象がみられる。

調査地域における浅層地下水は、Pacaya 複合火山やアマティトラン複合火山の溶岩類、およびアマティトラン複合火山に属する火砕岩類の基底部を標高の高い南部の Volcan de

Pacaya の北麓から Lago de Amatitlan 方向に流動していると考えられる。また、Lago de Amatitlan を中心として考えられるカルデラ縁は Cerro Grande および Volcan de Pacaya 山頂付近の地下を通り、Volcan de Pacaya 西側を北西に抜けさらに Rio Michatoya 沿いに谷を横断するもの、Lago de Amatitlan 南部東岸から Laguna カルデラ、San Vicente Pacaya 町を経て、その北西方へ抜けるもの、および Cerro Hoja de Queso と坑井 AMF-2 を通るものなどが挙げられる。いずれも調査地域では東西系の正断層で、Pacaya 複合火山や Amatitlan 複合火山の火山岩類に厚く覆われている。これらは、浅層の地下水の流動には直接影響は与えないものの、地下水の一部が深部に流入する可能性がある。

一方、深部では断層付近に存在する流体は断層に規制されて東西方向に流動するが、南北方向への流動は大きく制限される。ただし、調査地域には Los Humitos カルデラから Laguna カルデラにかけて南北方向に小規模な断層群が発達しており、これらの断層群に沿って流体が流動しているものと思われる。これら断層は地表でも断層地形として明瞭に認められ、また深部では隆起帯を形成する断層の存在が推定されることから、このゾーンに限っては、浅層地下水から深部地熱流体まで南北方向に流体が流動している可能性が高い。この南北方向への流動は、地化学データおよび AMF-3 の掘削結果から支持される。

2.2.2 地化学調査

本調査は、温泉水や噴気の補足的な流体地化学調査および既存データの集約・レビューにより、これまでに理解されている地熱流体の流動状態をさらに明確にするとともに、土壌ガス調査によって地熱流体の流動を規制する構造を把握し、調査井掘削位置選定や将来の開発計画検討のための資料を得ることを目的とした。

1. 流体地化学調査

流体地化学調査では、温泉水・地表水・噴気の補足分析とそれらのデータ及び既存データをを用いた流体地化学解析を実施した。

a. 調査内容及び方法

補足分析としては、既存化学データのクロスチェックおよび新規同位体データの取得を目的として、現地調査により調査地域内および周辺地域の温泉水（抗井熱水を含む）・地表水・噴気ガス（抗井噴気ガス・温泉付随ガスを含む）の採取を行い、それら試料の化学・同位体分析を日本国内で行った。現地調査により温泉水・熱水 6 試料、地表水 6 試料、噴気ガス 3 試料を Fig. 2-2-6 に示した位置で採取した。

現地調査により採取した水・ガス試料は国内に持ち帰り、以下の項目の化学・同位体分析を行った。

- ①温泉水：TSM, Na, K, Li, Ca, Mg, Fe, Al, Cl, SO₄, T-CO₂, HCO₃,
F, B, Br, I, As, T-SiO₂, Sr, H₂S, Hg, $\delta D(H_2O)$, $\delta^{18}O(H_2O)$,

$\delta^{18}\text{O}(\text{SO}_4)$, $\delta^{34}\text{S}(\text{SO}_4)$, $\delta^{13}\text{C}(\text{HCO}_3)$, Tr

②地表水：TSM, $\delta\text{D}(\text{H}_2\text{O})$, $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O})$, Tr

③噴気ガス： N_2 , H_2 , CH_4 , C_2H_6 , O_2 , Ar, He, Ne, $^3\text{He}/^4\text{He}$, $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$,
 $\delta^{13}\text{C}(\text{CO}_2)$, $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$, $\delta\text{D}(\text{H}_2)$, $\delta\text{D}(\text{CH}_4)$, $\delta^{34}\text{S}(\text{H}_2\text{S})$

流体地化学解析としては、既往地化学調査結果の集約・レビューおよび補足分析データの地化学解析により、地熱流体の起源・生成機構・温度・混合・貯留状態等を把握し、熱水系の地化学モデルを再構築して調査地域付近の熱水流動状態を推定した。

b. 解析結果

流体地化学解析の結果から推定される調査域内および周辺部の熱水系の特性・挙動は以下のように要約される。なお、解析結果に基づく熱水系地化学モデルを Fig.2-2-7 に示す。

- Calderas 地区の深部調査井 AMF-1 および AMF-2 により確認された地熱貯留層熱水は、AMF-2 の南側に賦存する天水と少量のマグマ起源水を起源とする 300～340°C の本源的流体から派生したものと考えられる。この地区内においては、高温熱水は蒸気分離を伴って主に北東に向かって流動・上昇しており、その一部は浅部にまで上昇して噴気を形成している。
- Calderas 地区から北方および北東方へ側方流動する高温熱水は、低温地下水による希釈を伴いつつ Lago de Amatitlan 湖岸にまで達し、Cl~Cl-HCO₃ タイプの温泉帯水層を形成している。調査井 AM-1 よりも北西の地域に流動した熱水は、湖岸近くで再加熱されている可能性が高い。熱水層の最高温度は、深部で 250°C、浅部で 200°C と推定される。
- Calderas 地区の高温熱水の一部は、地下水による希釈の割合が大きいですが、比較的速やかな側方流動によって Rio Michatoya 流域の東縁部にも達している。熱水は Rio Michatoya 流域南-北東部に広がり、地下水と混合して最高 140°C 程度の Cl-HCO₃~HCO₃ タイプの温泉帯水層を形成している。
- Rio Michatoya 流域北西部の調査井 AM-5 付近には、Calderas 地区を中心とするものとは別の熱水系が存在する。AM-5 の熱水は主に北西側の高標高地の天水を起源とし、Cl 濃度は比較的 low、深部では約 210°C の温度をもつ。浅部にまで上昇した熱水は Rio Michatoya 流域北西部一帯に広がっている。
- 本調査域内の Calderas 地区に存在する地熱貯留層熱水は、ほぼ化学的な平衡状態に達しており、ある程度の規模をもって存在すると考えられる。調査井 AMF-2 付近から西側の地域に向かって連続する高透水性ゾーンが存在すれば、それに伴って熱水貯留層が広がっている可能性が高い。

2. 土壌ガス調査

現地調査により調査地域付近の土壌ガス中の水銀・ラドン濃度測定を行った。測定結果は、地質構造や流体地化学調査による熱水の流動状態とも関連づけて、地熱流体の上昇域やその流動を規制する構造について考察した。

a. 調査内容及び方法

土壌ガス調査においては、土壌ガス中の水銀 (Hg) およびラドン (Rn) 濃度を携帯用測定器を用いて現地で測定した。測定は、Laguna de Calderas を中心とする約 35km² の範囲を対象として 109 地点で実施した。

現地での測定にあたっては、1 地点について 2 つの土壌ガス採取用測定孔 (直径 5cm, 深度 60cm) が穿孔された。水銀濃度の測定には携帯用気中水銀測定装置を、ラドン濃度の測定には携帯用ラドン計を使用した。

b. 解析結果

土壌ガス中の水銀および全ラドン濃度の分布から、調査域内における地熱流体の上昇域やその流動を規制する構造は以下のように推定される。なお、測定・解析結果に基づく高透水性ゾーンの集約図を Fig. 2-2-8 に示す。

- Calderas 地区のカルデラ北壁沿いには、熱水活動を伴う高透水性ゾーンが存在し、Calderas 西部や Cerro Hoja de Queso 付近では浅部にまで高温流体が上昇している。Calderas 西部の高透水性ゾーンは、北東-南西方向に伸長して El Cedro 南方付近にまで達しており、調査井 AMF-1 および AMF-2 により確認された地熱貯留層がそれらの南西方まで広がっていることを示唆する。
- El Cedro 付近から北西方向に延びる水銀高濃度域は、水銀濃度はさほど高いものではないが、流体地化学調査の結果から想定される Calderas から Rio Michatoya 流域に至る熱水側方流動に関連していることが示唆される。
- Cerro Hoja de Queso 付近から北西方および北方に延びる高透水性ゾーンが存在し、比較的浅部を高温流体が側方に流動していると考えられる。ただし、この地域では直下からの高温流体の上昇流はほとんどなく、北西方や北方では熱水活動は比較的低下しているであろう。
- Cerro Hoja de Queso 北方から Cerro Grande 西方にかけては、南-北および北東-南西方向に延びる高透水性ゾーンが存在する。その高透水性ゾーン沿いの熱水活動は明確ではないが、一つの可能性として、火山体付近で加熱された高温流体が深部で北方へ流動していることを示していることが考えられる。

2.2.3 重力・磁気探査

本調査では、アマティトラン地熱地域の南部において重力・磁気探査を実施し、得られたデータと既存データのコンパイルを行い、AMF-2 周辺の地下構造を明らかにするとともに、得られた解析図を基に重力基盤構造、断層構造などの地質構造を推定し、地熱系モデル作成に用いることを目的とした。

1. 調査内容及び方法

重力・磁気探査の測点数は 204 点であった。重力の測定は米国 LaCoste & Romberg 社製の G-579 重力計を用い、ミリガル変換、潮汐補正、器械高補正およびドリフト補正を行い、測定データとした。磁気の測定は EG&G Geotermics 社製の G-866 及び G-856 を用いた。標高、緯度・経度は Trimble 社製の 4000ST 及び 4600ST を用いた静止測量により得た。

重力測定データは、フリーエア補正、地形補正、ブーゲー補正、大気補正を行い、正規重力値との差からブーゲー異常値を算出した。磁気測定データは、日変化補正、標準磁場補正を行い、IGRF 残差を求めた。それらを基にしたフィルター図や 2 次元モデルを作成し地質構造を検討した。

2. 解析結果

a. 重力探査

重力探査のまとめとして、重力構造解析図を Fig. 2-2-9 に示す。

本地域は、最適仮定密度 2.0 g/cm^3 のブーゲー異常図によると、調査地域のブーゲー異常値は南端の Volcan de Pacaya 付近で最も高い約 -10.4 mgal 、北端で最も低い約 -48.2 mgal を示し、南高北低の分布となっている。その重力分布から北部の Lago de Amatitlan 低重力異常域とこの南側の地域とに大きく二分される。北部の Lago de Amatitlan 低重力異常域はカルデラ構造を反映していると考えられており、調査地域では -35 mgal コンター付近に認められる重力の急傾斜帯がその南縁と考える。二次元 2 層構造解析の結果から、重力基盤はこのカルデラ縁付近を中心として北側へ 500 m 以上落ち込み、カルデラ内には低密度層が厚く堆積するものとする。

カルデラ縁の南側では、Volcan de Pacaya 高重力異常域を形成する隆起域（以下では Volcan de Pacaya 隆起域）がほぼ南北に延びて分布する。この隆起域に位置する AMF-1 では、標高約 300 m で基盤の花崗岩に到達しており、この地域の基盤深度が浅いことが判明している。この隆起域の重力基盤は、断層を伴いながら北方へ落ち込んでいくと考えられるが、この北部はカルデラ内に半島状に突き出す形となっている。隆起域中央の Laguna de Calderas の南寄りでは盆状構造の存在が推定される。

この隆起域の東西両縁は断層状構造によって区分されている。西縁の断層状構造の方向性は、その北端部では南北方向、El Pepinal から AMF-2 南西寄りまでは、北東-南西方向を示す。AMF-2 南西寄りでは南西方向へ延びるものと南方へ延びるものとに分かれる

が、主要な方向性は後者の南北方向である。

隆起域東縁の断層状構造の方向性は、北部では概略南北方向、Laguna de Calderas 東方では北東-南西方向を示すが、Cerro Grande の北方約 1.5km 付近でその方向を北西-南東方向に転じた後、南部では再び南北方向を示している。

El Cedro の南西寄りには直径 1km 前後の盆状構造が認められる。この北側の周囲には、重力の尾根状の構造が取り囲んでおり、埋没したクレーターの存在を推定させる盆状構造である。

AMF-3 付近から、活火山の Volcan de Pacaya 付近まで連続する、Volcan de Pacaya 隆起帯西縁の断層状構造、および Laguna de Calderas 東方から Cerro Grande 北東方に分布する断層状構造は、AMF-1、AMF-2 および AMF-3 が位置しアマティラン地域の地熱開発上重要な構造であると考えられる。特に、AMF-1 および AMF-2 が位置する Volcan de Pacaya 隆起帯西縁の断層状構造は明瞭で、AMF-1 および AMF-2 において地熱流体の噴出に成功していることから深部まで断裂が発達し、高透水性である可能性が高い。

b. 磁気探査

磁気構造解析図を Fig. 2-2-10 に示す。これは、各解析図から読み取った磁気的不連続線および断面解析結果からの磁気異常体を極磁力異常図に記入したものである。以下では、重力構造と対比しながら考察する。

調査地域の全磁力は、Cerro Grande 山頂、南東斜面および Los Humitos など認められる約 39,600 nT から、Laguna de Calderas 東方約 1 km 付近で認められる約 37,800 nT までの約 1,800 nT の間に分布している。調査範囲内では高振幅の磁気異常を示す地域が多いが、範囲外周辺部では低振幅の異常を示す地域が多い。

磁気的不連続線の主要な方向性は、南北および北東-南西方向である。

調査地域中央を南北に延びる低磁気異常域は、Cerro Grande 付近を除き重力基盤の隆起域にほぼ対応している。花崗岩類はこの地域に分布する岩石の中では磁化強度が小さい岩石であり、花崗岩上面が相対的に浅いために、低磁気異常を示すことが考えられる。また、この中で San Francisco de Sales および Laguna de Calderas 周辺では、低磁気異常が特に明瞭である。San Francisco de Sales 付近では重力の盆状構造が認められ、表層には低密度層の分布が考えられてた。また、AMF-1 付近では変質帯の地表分布も認められる。これら、低密度層における変質による磁気強度の減衰が、低磁気異常の要因である可能性がある。

上記の低磁気異常域の西縁に推定した磁気的不連続線は、重力構造から推定した断層状構造とほぼ一致する。これらを通る AMF-3 から AMF-2 に至る地域は、熱水変質によって磁化が小さくなっているとも解釈でき、AMF-1 および AMF-2 において地熱流体の噴出に成功していることから深部まで断裂が発達し、高透水性である可能性が高い。

Cerro Grande 高磁気異常域北部から北東へ延びる高磁気異常の尾根は、Pacaya 火山岩類の地表分布に良く対応している。

El Cedro 南西方 1km 付近の低磁気異常域は、重力の盆状構造と対応すると考えられ、低密度・低磁性の地層が堆積すると考えられる。

2.2.4 電磁探査

アマティトラン地域での電磁探査では、密度の高い測点配置で精密に調査を実施し、調査地域の地下深部における詳細な比抵抗構造を把握する。その結果、検出される比抵抗分布の形状から断裂構造の分布や貯留層構造等（特に高温が確認されている AMF-1, AMF-2 周辺の断裂構造および調査地域に推定されているカルデラ壁周辺の断裂構造）の位置・方向性等を把握することを目的とする。

3. 調査項目

調査方法	: リモートリファレンス方式地磁気地電流探査
調査面積	: 約 21km ²
測点数	: 61 点
測定成分	: 磁場 3 成分 (Hx, Hy, Hz), 電場 2 成分 (Ex, Ey)
測定周波数	: 0.00055Hz~384Hz の範囲の 40 周波数

4. 比抵抗不連続構造

比抵抗不連続構造とは、前述したように、比抵抗分布から認められる比抵抗構造上の不連続が存在する箇所であり、このような構造がある方向性をもって連続している場合には、その周辺には断層あるいは断層周辺に存在する破碎帯の存在が期待される。

一般に地熱地帯における地下の熱水は、断層あるいは断層周辺に存在する破碎帯に貯留されていることが多いと考えられている。このため、比抵抗不連続線を抽出し、断裂構造を推定することは、調査地域の地熱構造を考察する上で重要である。

調査結果の各深度における解析比抵抗分布平面図および解析比抵抗分布断面図により、抽出される比抵抗不連続線は以下に示す F1, F2, F3, F4 および F5 の 5 本である。Fig. 2-2-11 にこれらの比抵抗不連続線を記載した比抵抗不連続線分布図を示し、各比抵抗不連続線の特徴を以下に記述する。

a. 比抵抗不連続線 F1

調査地域南西部の測点 40 付近から Laguna de Calderas 南部を通り、調査地域北東部の測点 7 付近にかけて、概略東北東-西南西方向に延びる比抵抗不連続線である。本比抵抗不連続線は、Laguna de Calderas より北東部については、比抵抗基盤層等深度分布図および解析比抵抗分布平面図（深度 500m）において認められるが、深部の比抵抗分布を示す解析比抵抗分布平面図（深度 1500m, 3000m）においては認められないため、浅部のみで発達した構造である可能性がある。但し、Laguna de Calderas より南西部につ

いては、深部の比抵抗分布を示す解析比抵抗分布平面図（深度 1500m, 3000m）および解析比抵抗断面図（断面①～⑥）において明瞭に認められることから、深部まで発達した断裂構造である可能性が高い。この比抵抗不連続線の北部には深部においては深部高比抵抗体の隆起部が存在し、浅部には熱水変質帯を反映していると考えられる低比抵抗域が存在することから、地熱流体の流動、貯留を規制する構造である可能性が高い。

b. 比抵抗不連続線 F2

調査地域南西部の Cerro Chino の北側から調査地域北西部の測点 9～10 間にかけて、概略北北西－南南東方向に延びる比抵抗不連続線である。本比抵抗不連続線は、見掛比抵抗分布平面図（1.125Hz）、低比抵抗層等比抵抗線図、比抵抗基盤層等深度線図および解析比抵抗分布平面図（深度 500m）において認められるが、深部の比抵抗分布を示す解析比抵抗平面分布図（深度 1500m, 3000m）においては認められない。このため、本比抵抗不連続線は浅部のみで発達した構造である可能性が高い。本比抵抗不連続線の西側は、浅部から深部に至るまで相対的な高比抵抗域となっている。

c. 比抵抗不連続線 F3

調査地域北西部の測点 2～10 間から調査地域北部の測点 5 付近にかけて、概略東西方向に延びる比抵抗不連続線である。本比抵抗不連続線は、低比抵抗等比抵抗線図および比抵抗基盤層等深度線図で認められるが 2 次元解析結果（解析比抵抗平面図および解析比抵抗断面図）では認められないことから、本不連続線周辺に断裂構造が存在するか否かの判断は現段階では困難である。

d. 比抵抗不連続線 F4

調査地域西部の El Cedro 付近から調査地域北部の測点 6 付近にかけて、概略東北東－西南西方向に延びる比抵抗不連続線である。本比抵抗不連続線は、深部の比抵抗分布を示す解析比抵抗平面図（深度 1500m, 3000m）および解析比抵抗断面図（断面④～⑥）において明瞭に認められるため、深部で発達した断裂構造である可能性がある。本不連続線は比抵抗不連続線 F1 と概略平行に延びており、これら 2 本の不連続線（F1 および F4）に挟まれた地域の深部では、明瞭な深部高比抵抗体の隆起構造が認められる。また、この深部高比抵抗体の隆起構造の上位には熱水変質帯を反映していると考えられる低比抵抗帯が分布していることから、本比抵抗不連続線は、比抵抗不連続線 F1 同様、地熱流体の貯留、流動を規制する断裂構造である可能性がある。

e. 比抵抗不連続線 F5

調査地域北部の測点 5 付近から調査地域中央部の Laguna de Calderas を通り調査地域南東部の測点 48 付近にかけて概略北西－南東方向に延びる比抵抗不連続線である。本比抵抗不連続線は、深部の比抵抗構造を示す解析比抵抗平面図（深度 1500m, 3000m）および解析比抵抗断面図（断面⑨～⑩）において認められるため、深部で発達した断裂構造である可能性がある。但し、本不連続線周辺の Laguna de Calderas より南東部は

浅部から深部まで相対的に高い比抵抗値を示しており、また、地表において変質帯や噴気帯などの地熱徴候も認められない。このことから、本比抵抗不連続線の南東部（調査地域の南東部）周辺において、活発な地熱活動が存在する可能性は低い。

5. 調査地域の浅部比抵抗構造

前述した各比抵抗不連続線の分布と $60\text{ohm}\cdot\text{m}$ 以下を示す低比抵抗域（低比抵抗層等比抵抗線図による $60\text{ohm}\cdot\text{m}$ 以下の地域）を重ね合わせた図面を Fig. 2-2-12 に示す。本図で示した低比抵抗域は、概略、深度 $200\text{m}\sim 700\text{m}$ と比較的浅部に分布している。

本図によれば、Laguna de Calderas 周辺を除けば、概略、 $60\text{ohm}\cdot\text{m}$ 以下を示す低比抵抗域が比抵抗不連続線 F1 および F4 沿いおよびそれらの不連続線に挟まれた地域に分布する。特に、AMF-2～El Cedro 周辺を中心とした低比抵抗域内には、地表において変質帯や噴気帯が存在することから、この低比抵抗域は比較的浅部に存在する熱水変質帯を反映したものである可能性が高い。すなわち、この低比抵抗域周辺の深部で発達した断裂を通じて、深部から上昇してきた地熱流体により、比較的浅部において熱水変質帯が形成されているものと推定される。また、Laguna de Calderas 周辺に分布する浅部の高比抵抗異常域は、カルデラ構造内に浅部から地表水の流入が起こっているために高い比抵抗値を示している可能性が高く、浅部の局所的な異常であると考えられる。

調査地域の東部から南東部にかけての地域では、熱水変質帯を反映すると考えられる低比抵抗域は認められない。このため、この地域において大規模に高温の流体を貯留するような構造が存在する可能性は低い。

6. 調査地域の深部比抵抗構造

前述の各比抵抗不連続線の分布と深度 1500m の解析比抵抗分布における $20\text{ohm}\cdot\text{m}$ 以上の相対的な高比抵抗域を重ね合わせた図面を Fig. 2-2-13 に示す。本図面における高比抵抗域は、解析比抵抗断面図による比抵抗分布を考慮すると、深部高比抵抗体（比抵抗基盤域）の隆起構造部を示しているものである。

本図において、調査地域中央部から北東部、東部にかけての地域で相対的な高比抵抗域が存在しており、概略、深部の断裂構造を反映していると推定される比抵抗不連続線 F4、F5 および F1 に囲まれた地域で深部高比抵抗体（比抵抗基盤域）の隆起構造が存在している。特に、比抵抗不連続線 F1 の Laguna de Calderas から南西側の箇所および比抵抗不連続線 F4 に挟まれた地域は、解析比抵抗断面図（断面④～⑥）からも明瞭な深部高比抵抗域の隆起構造を示しており、この東北東－西南西に延びる比抵抗隆起構造の北端および南端では明瞭な比抵抗不連続構造（比抵抗不連続線 F1 および F4）が認められる。また、前述のように、浅部比抵抗構造によれば、比抵抗不連続線 F1 周辺地域、比抵抗不連続線 F4 周辺地域および、これらの不連続線に挟まれた地域の浅部では、熱水変質帯を示すと考えられる低比抵抗域が広域に分布している。更に、比抵抗不連続線 F1 と F4 に挟まれる地域には地熱流体の噴出に成功した坑井（AMF-1, AMF-2）が存在する。このため、比抵抗不連続線 F1, F4 の周辺地域および、これらの不連続線に挟まれる地域には深部で断裂構造が

発達しており、それらの断裂構造を通じて深部の地熱流体が流動・上昇しているものと推定される。

調査地域の東部には、比抵抗不連続線 F5 が存在し、その北側には深部高比抵抗体（比抵抗基盤域）の隆起部が認められる。但し、調査地域東部においては不連続線 F5 周辺に低比抵抗域が認められないことから、比抵抗不連続線 F5 周辺地域の地下深部において、活発な地熱活動が存在する可能性は低い。

7. 調査結果の要約

電磁探査（MT 法探査）の解析結果、調査地域には、地下の断裂構造を示す可能性がある 5 本の比抵抗不連続線（F1, F2, F3, F4 および F5）が認められた。これらの比抵抗不連続線のうち、F1 および F4 は深部において明瞭な比抵抗不連続示徴を示し、その周辺部（比較的浅部）において、熱水変質帯を示すと考えられる低比抵抗域が分布している。また、これらの不連続線に挟まれる地域において地熱流体の噴出に成功した坑井（AMF-1, AMF-2）が存在することから、不連続線 F1, F4 周辺およびこれらに挟まれた地域の深部では断裂が発達しており、この断裂に沿って、地下深部から高温熱水が上昇し、一部の熱水が地下浅部において側方流動して熱水変質帯を形成しているものと推定される。

このため、深部の地熱貯留層をターゲットとする場合には、比抵抗不連続線 F1 南西部（Laguna de Calderas より南西側）および比抵抗不連続線 F4 南西部（El Cedro から AMF-1 の北部域）が地熱開発上の有望地域と考えられる。

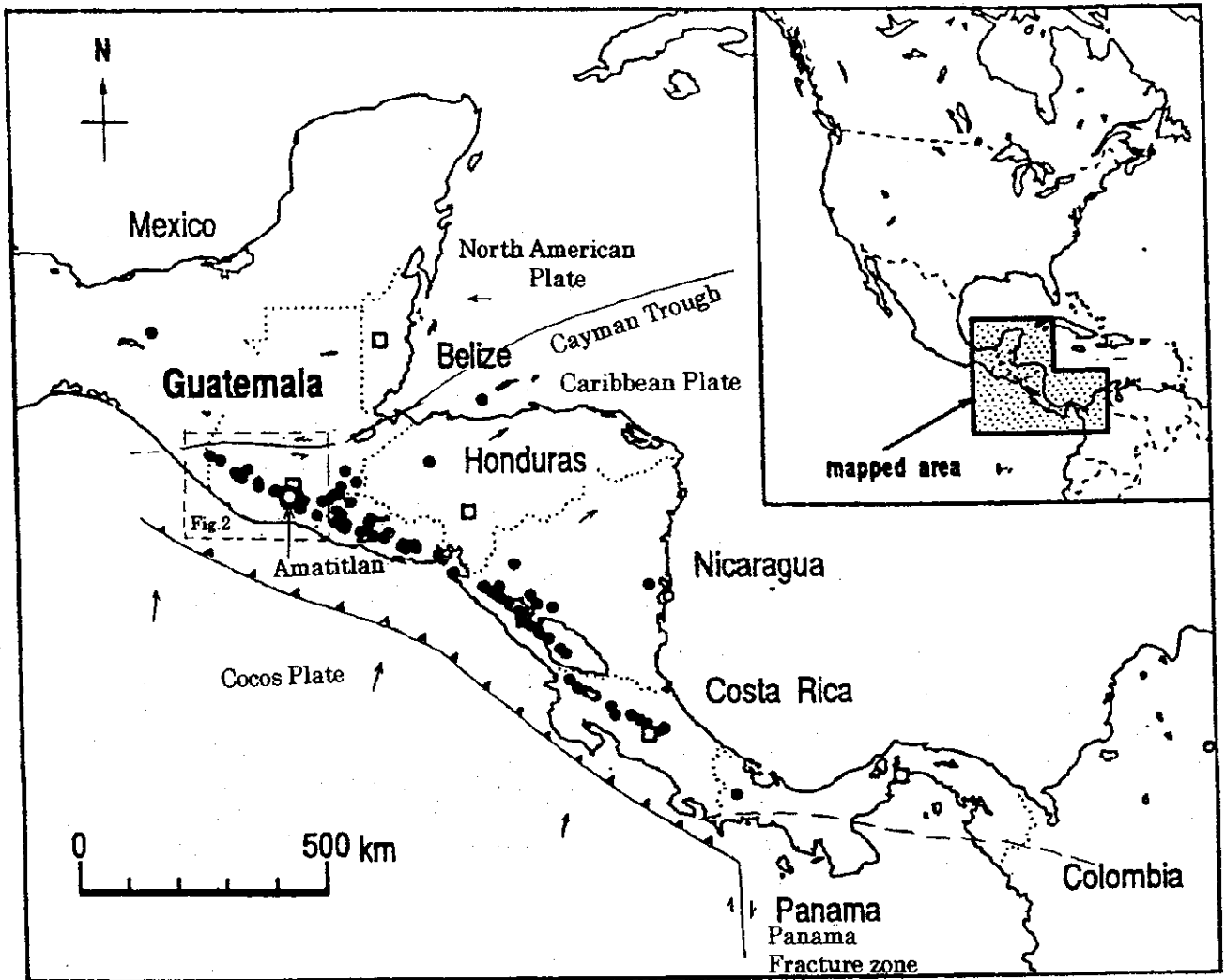


Fig. 2-2-1 中央アメリカの火山列

Volcanic chain in Central America

Solid circle shows volcano active in Holocene (Simkin et al, 1981), and open square show capital. Pacaya Volcano, show in open circle, is located in the north of the volcanic chain. (Modified with S. Kitamura and O. Matis, 1995 and Molnar and Lynn R, 1969)

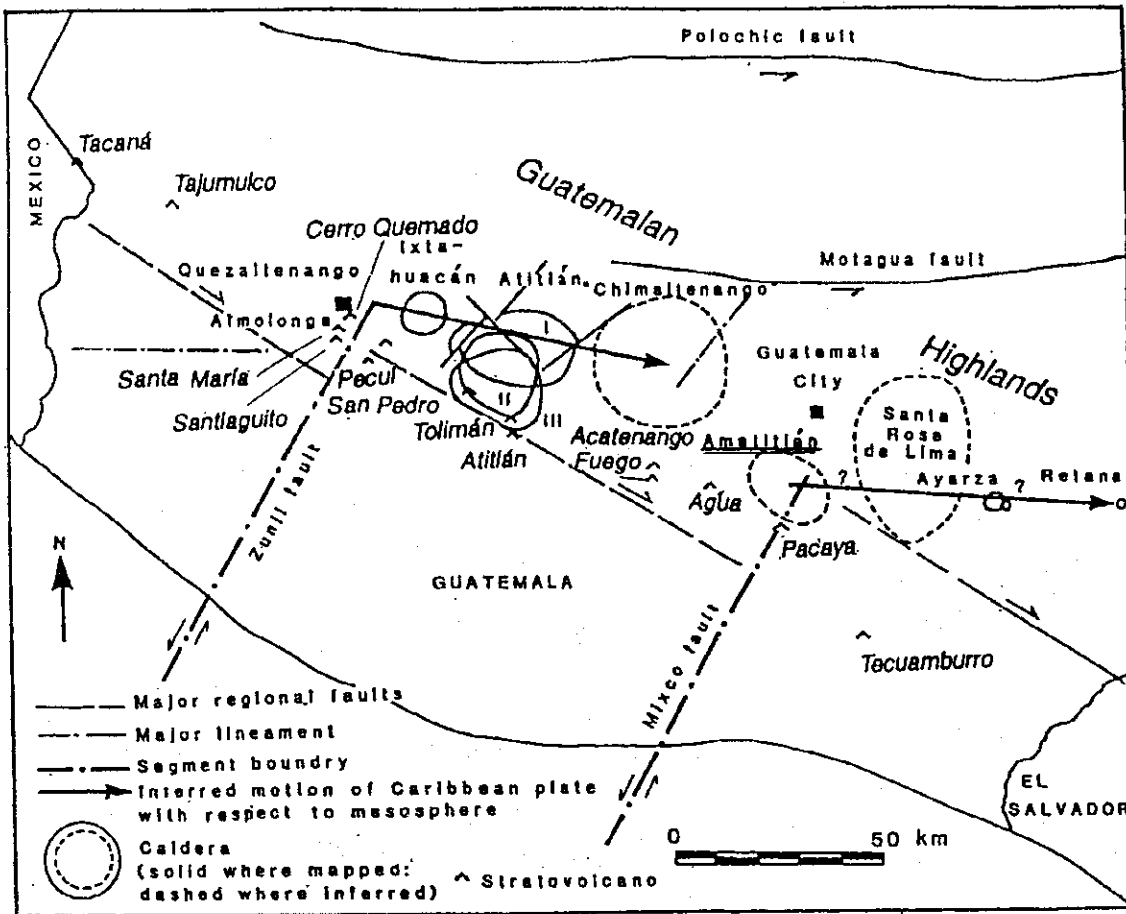
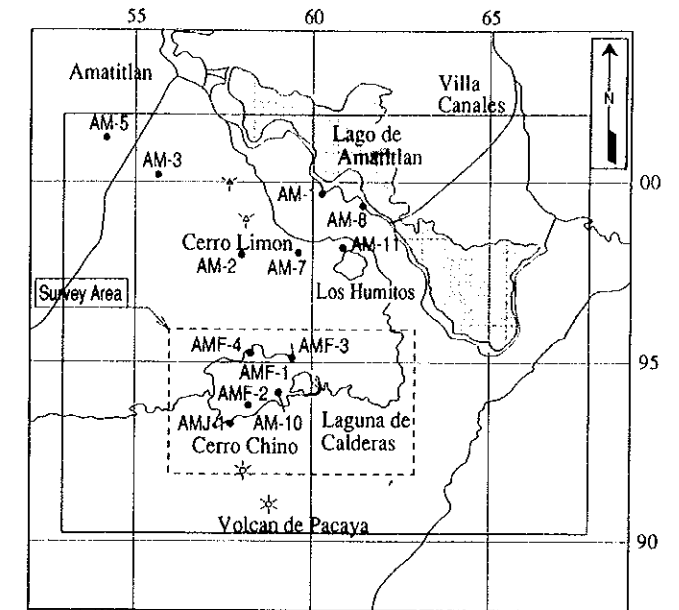
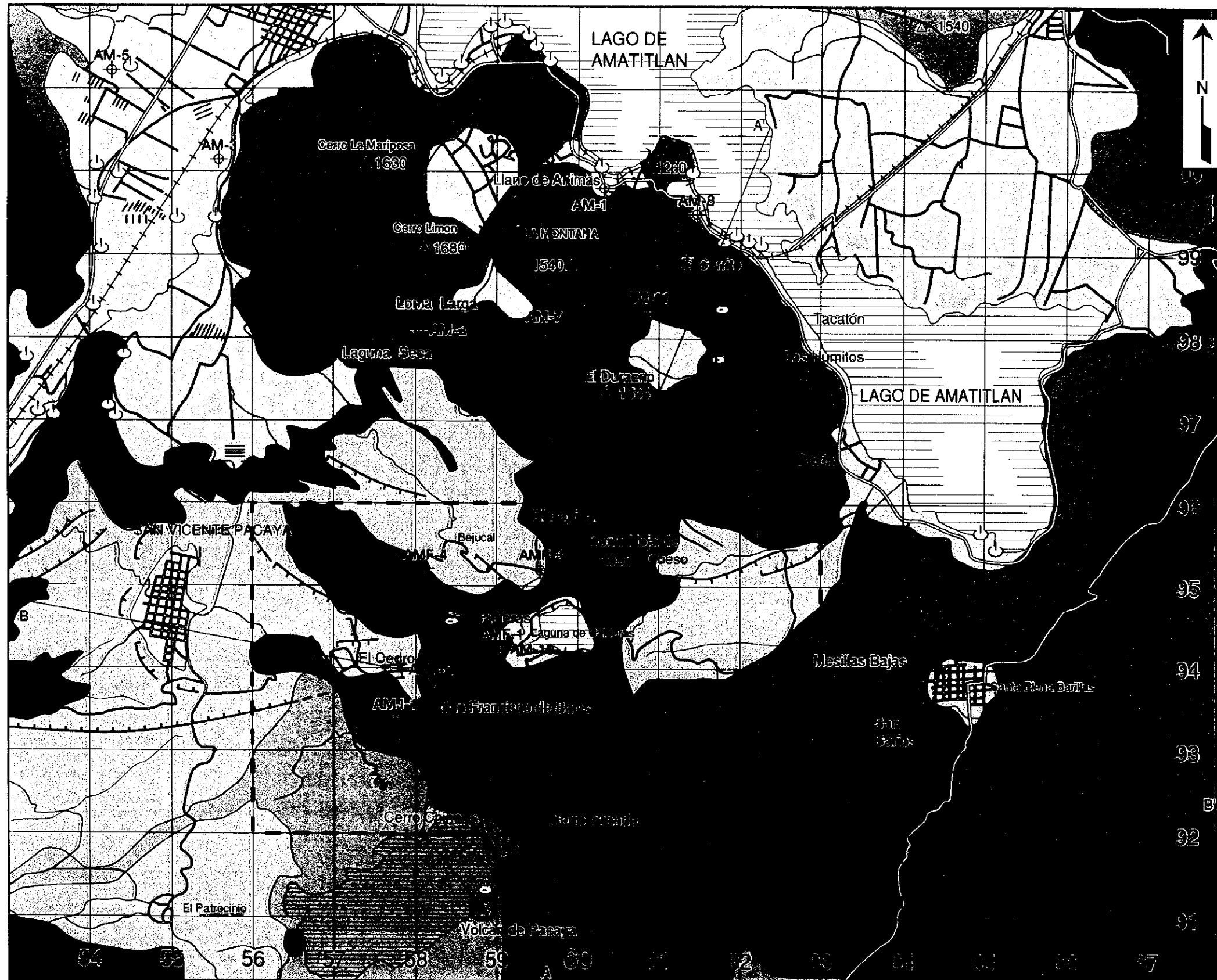


Fig. 2-2-2 広域地質構造図

Regional tectonic map

Apparent migration of loci of caldera formation toward the WNW and SSW. Apparent WNW trend is interpreted as a track of calderas formed above present location of V. Almolonga, astride the Zunil fault. Apparent SSW trend is interpreted as generation of successive calderas at intersection of a proto-Zunil fault (now beneath the Atitran complex) and the volcanic front, as the volcanic front "migrated" trenchward. All migration is interpreted as a consequence of ESE movement of the Caribbean plate relative to the subduction zone and mesosphere at a rate of 0.4cm/yr.

(Modified with C.G Newhall, 1987 and Vallance et al, 1995)



Legend abbrev.	Stratigraphy	Formation and Rock Type	Description	Age
AC		Alluvium and Colluvium	Sand, gravel and Volcanic fall deposit, mainly black volcanic Lapilli	
Pv	Pacaya Volcanic Complex	Younger Pacaya Volcanics	Dark Black, porous, scoriaceous basaltic Lapilli and lava	
Op		Older Pacaya Volcanics	Dark gray, porous, scoriaceous basic Andesite lava	4-8Ka
Rd		Dome and Acidic lava flow	Milk-white-pale brown, porous, Phyolite and Dacite, with gray, acidic andesite	6.13-9.5Ka 9.08-9.11Ma
SI		San Vicente Pacaya Fall deposits	Alterations of milk-white-pale brown, porous pumice fall deposits and dark black-dark gray, m-f-hardness, scoriaceous fall deposits	40-90Ka 0.19Ma
Bf	Post-Caldera formation	Basaltic scoria and lava	Dark black-dark gray, basaltic scoria and lava	
Lp	Amatitlan Volcanic Complex	Los Humitos Volcanic Pyroclastics	Milk-white-pale brown pyroclastics, strong altered Andesite rock particles and rhyolite pumice	
Ap		Amatitlan Volcanic Pyroclastics	Milk-white-pale brown pyroclastics with, rarely Andesite blocks, mainly rhyolite pumice	55Ma
Hv		Hoja de Cuervo Volcanics	Redrad purple, and ash lava, Pz rich with small dark minerals	
Av		(Post-Caldera Formation) Anoxidal Volcanics	Dark gray-gray, partially altered Px andesite lava	1.06Ma
Cp	Syn-Caldera formation	(Syn-Caldera Formation) Volcanic Pyroclastics	Brown-yellow brown, pyroclastics partially with weathered andesite block, lacustrine sediments (clay-silt) and rarely basaltic scoriaceous fall deposits	
Cl		(Syn-Caldera Formation) Andesite Lava flow	Dark gray, weakly altered Andesite, with medium-coarse grained Pl	
Aq	Pre-Caldera formation	Pre-Agua Volcanics	Dark gray, Px Andesite lava and Andesitic Pyroclastics, partially covered with silica deposits near hot-spring	
Gr		Basement Rocks	Pale brown, weakly altered and weathered Granite with, coarse grained Pz and Qz (partially Pegmatitic)	14.12-8.8Ma 15.27-9.8Ma

Pz : Plagioclase Qz : Quartz Px : Pyroxene

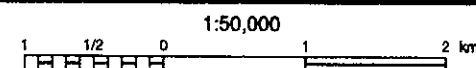
	Alteration zones, Fumarole zones		Crater
	Hot springs, Fumaroles		Phreatic Centre
	(Estimated) Fault		Lineament
	Morphological escarpment (Aerophoto Analysis) Downthrown side		
	Cross section		Survey area

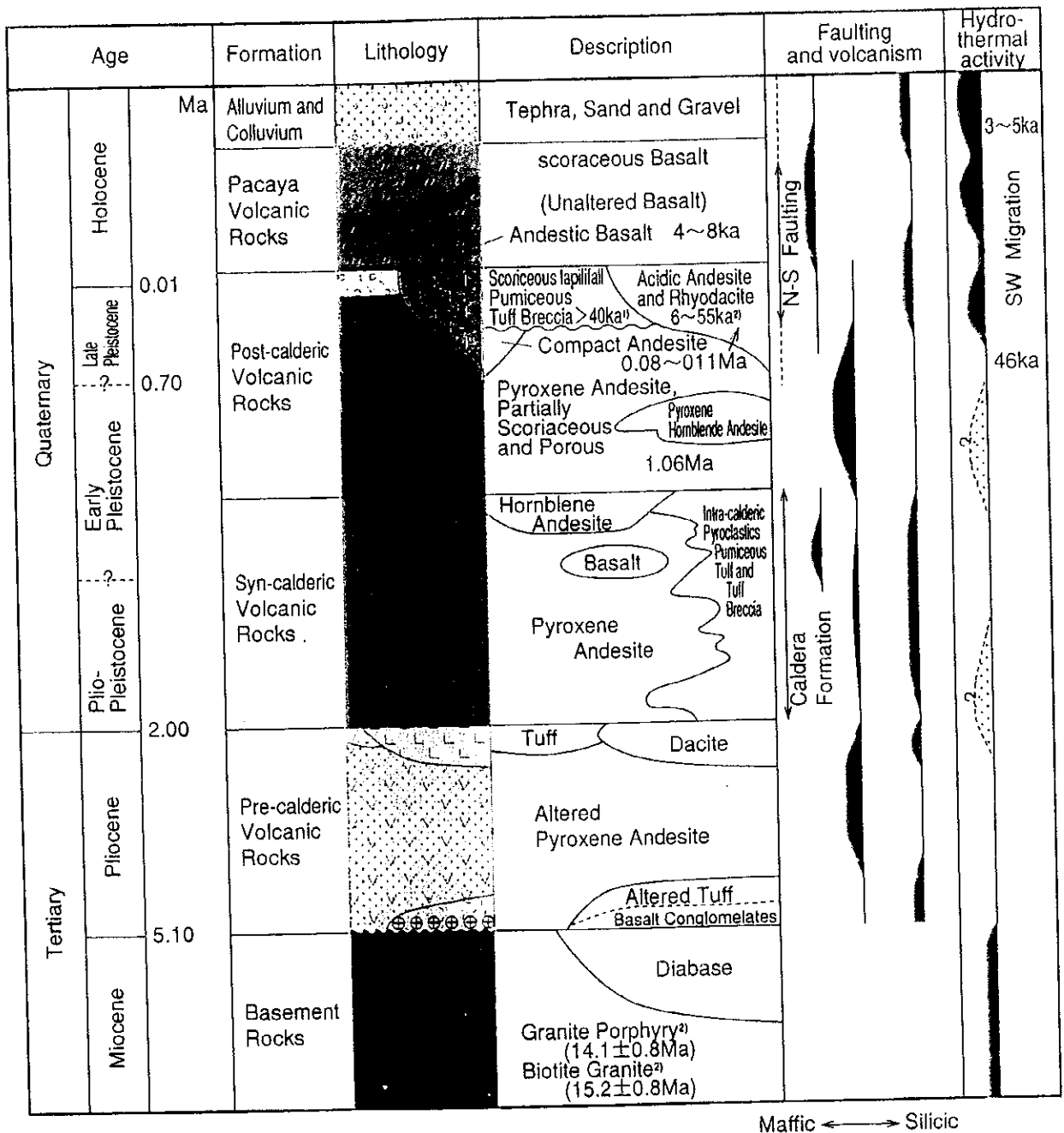
Amatitlan Geothermal Field

地 質 図

Geological Map

JICA-WEST JEC Fig. 2-2-3

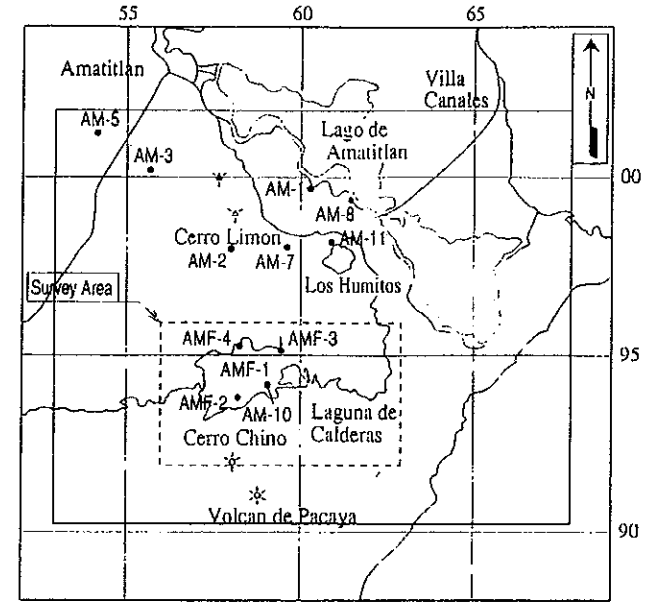
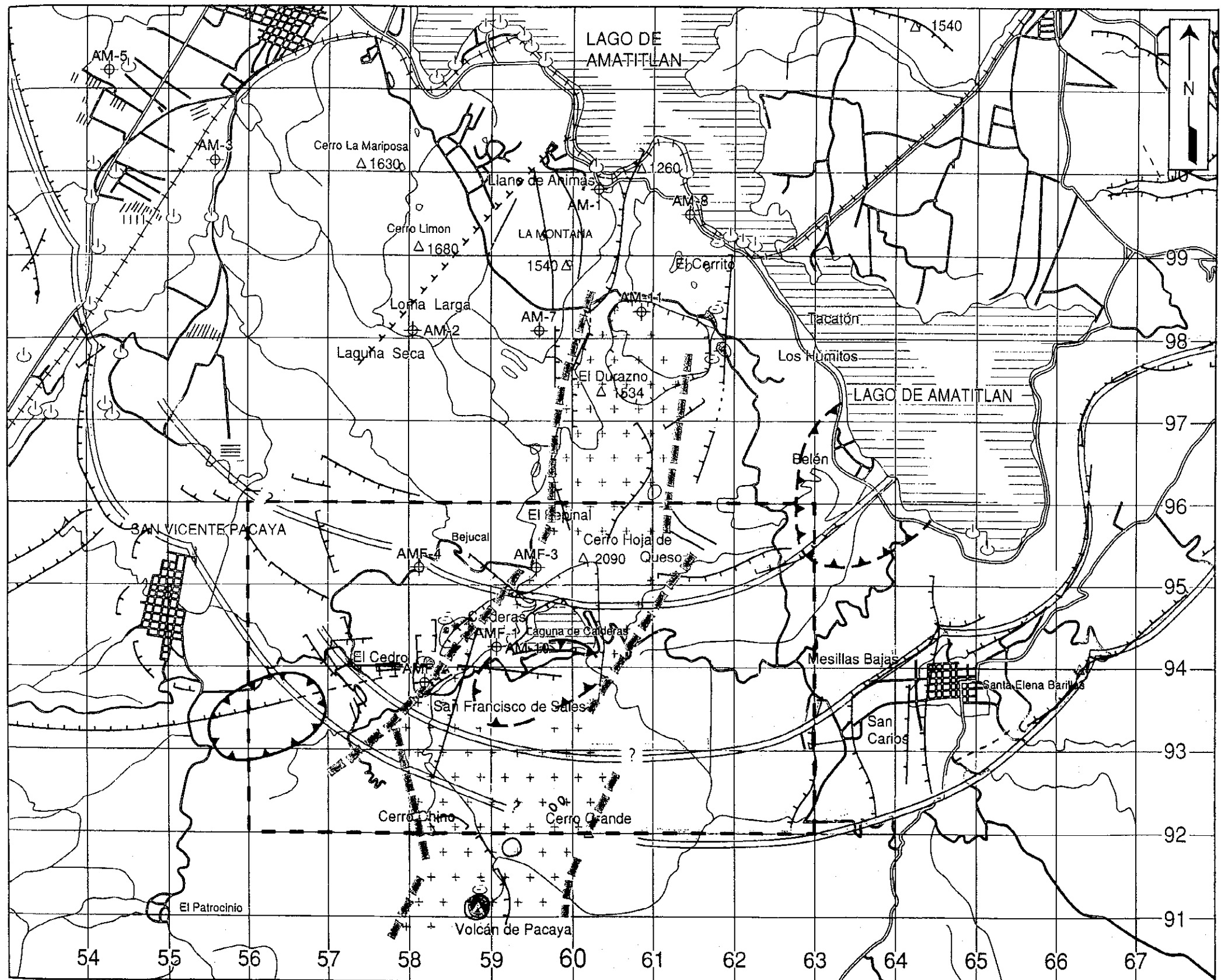




Reference

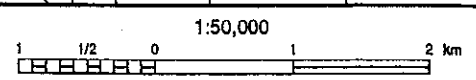
- 1) Koch and Mclean, 1975
- 2) West JEC and Telectro, 1994 and this report

Fig. 2-2-4 アマティラン地熱地域の地質層序
Stratigraphy of the Amatitlan geothermal field

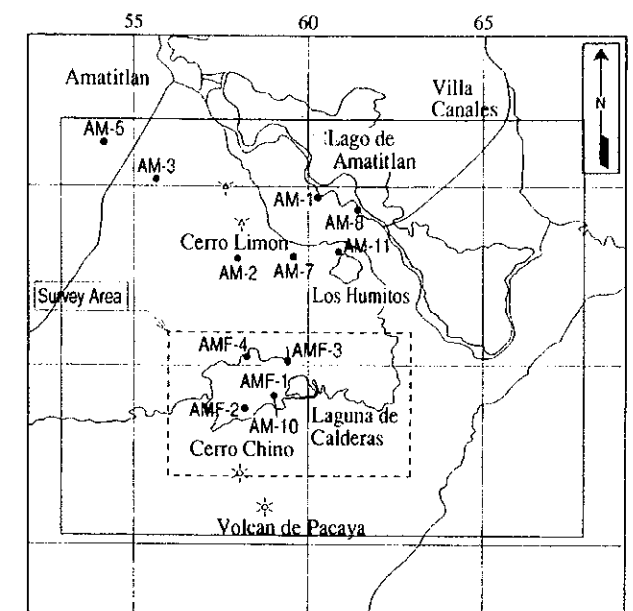
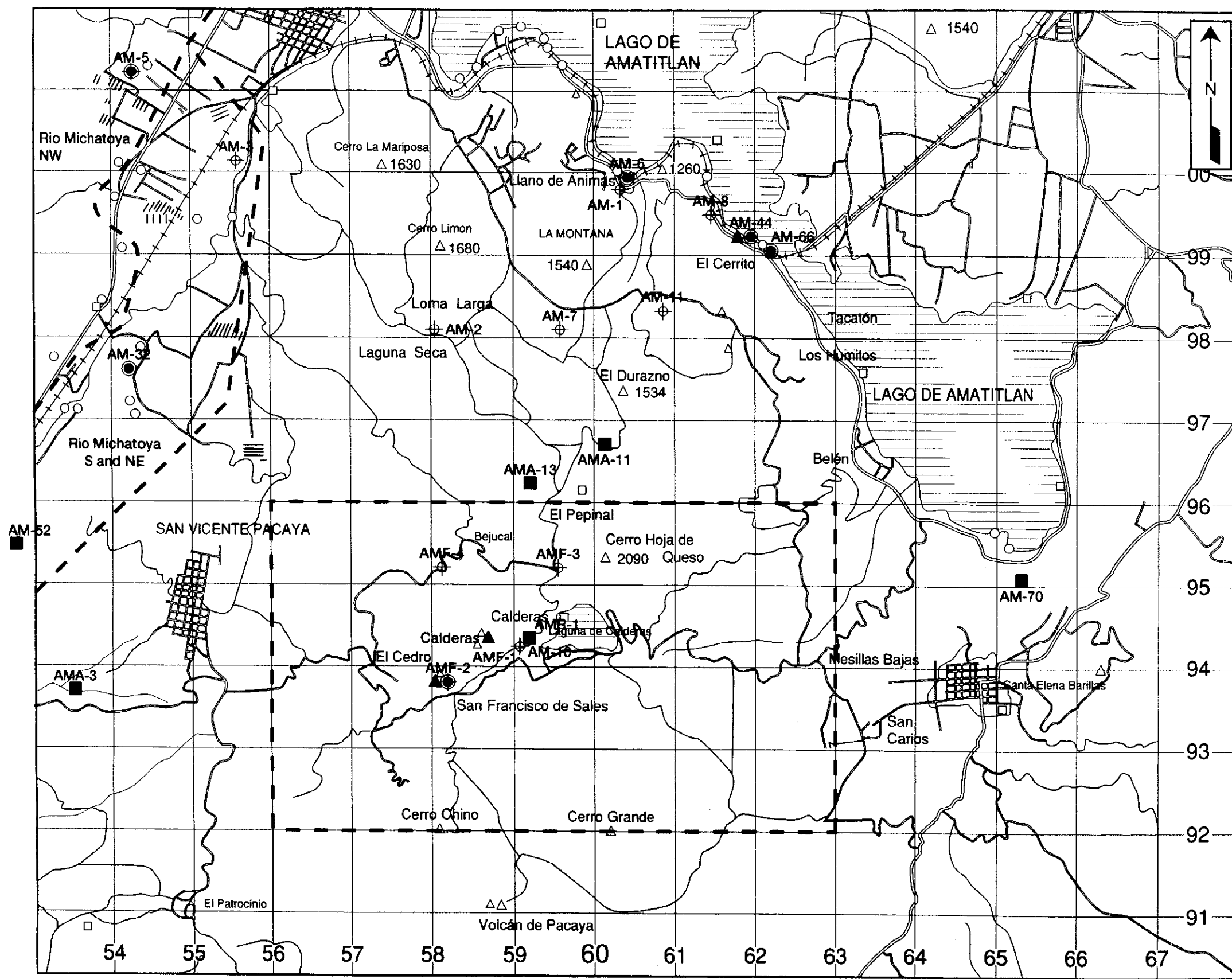


- Legend**
- Estimated uplift obtained from gravity survey
 - Estimated basin obtained from gravity survey
 - Caldera Wall

	Alteration zones, Fumarole zones		Crater
	Hot springs, Fumaroles		Phreatic Centre
	(Estimated) Fault		Lineament
	Cross section		Survey area



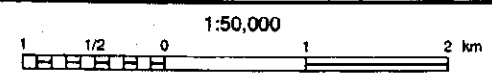
Amatitlan Geothermal Development Project
 地質構造図
 Geological Structure
 JICA-WEST JEC Fig. 2-2-5



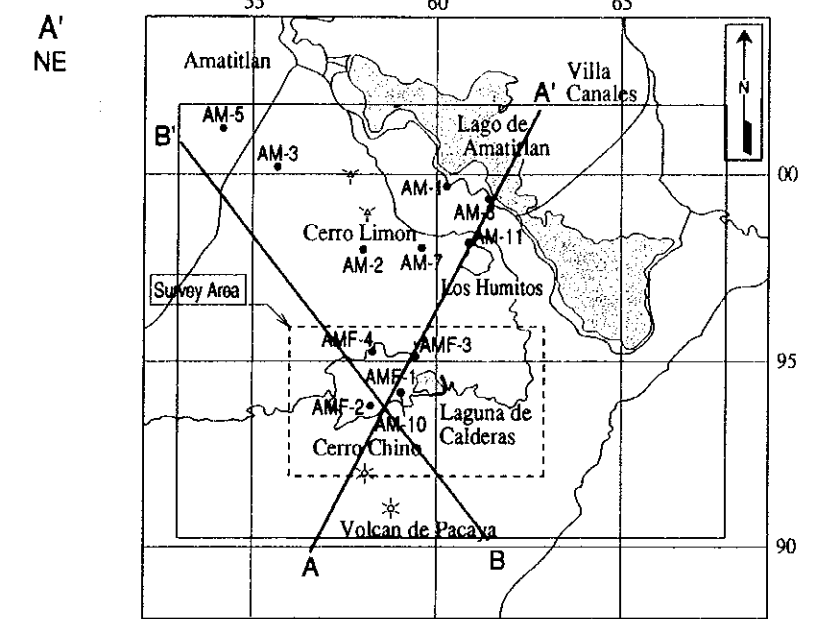
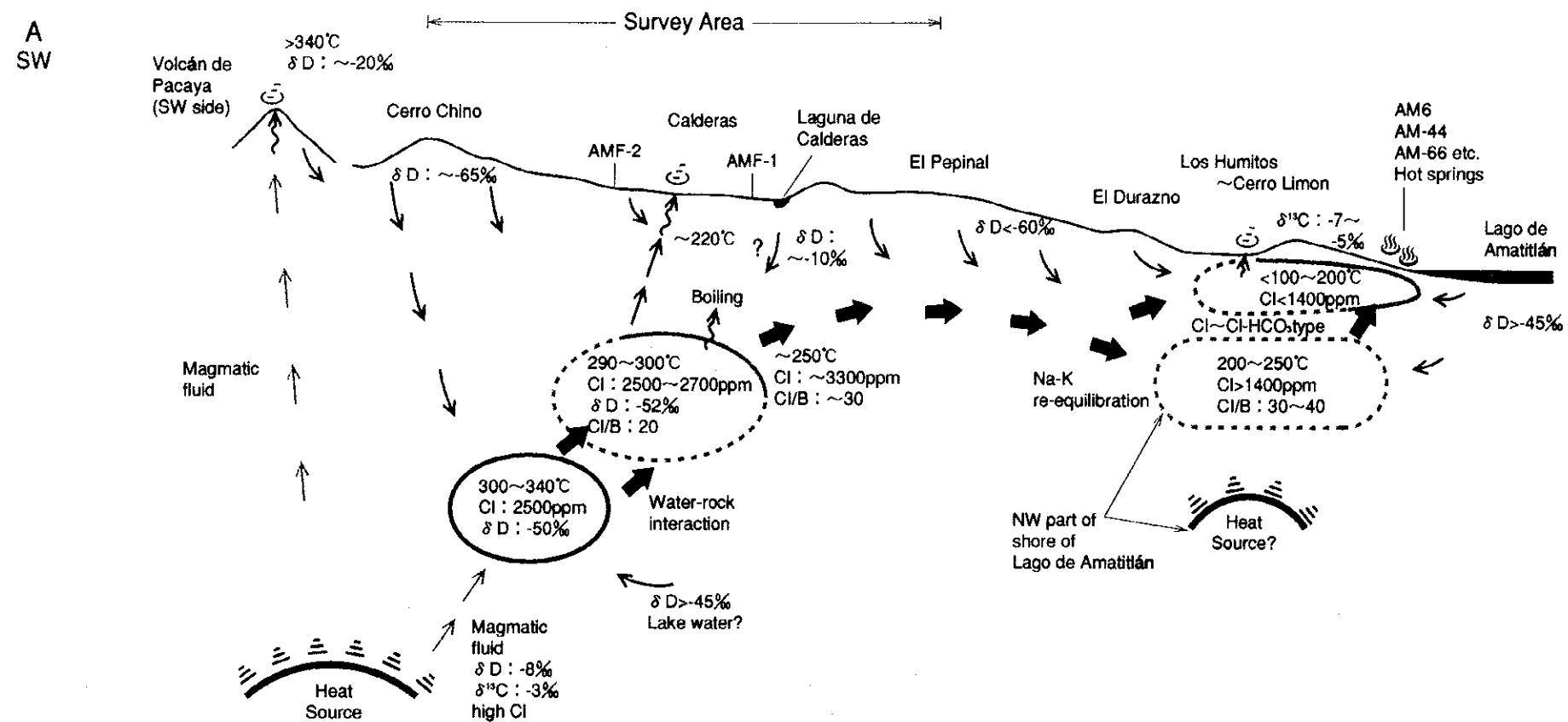
LEGEND

- Hot Spring Water, Well Hot Water (6points)
- Surface Cold Water (6points)
- ▲ Fumarolic and Bubble Gas (3points)
- - - Survey Area
- ⊕ Existing Well
- Existing Data
- Hot Spring water, Well Hot Water
- Surface Cold Water
- △ Fumarolic Gas

Amatitlan geothermal development project	
分析用流体試料採取位置図	
Location map of fluid samples for analysis	
JICA-WEST JEC	Fig. 2-2-6

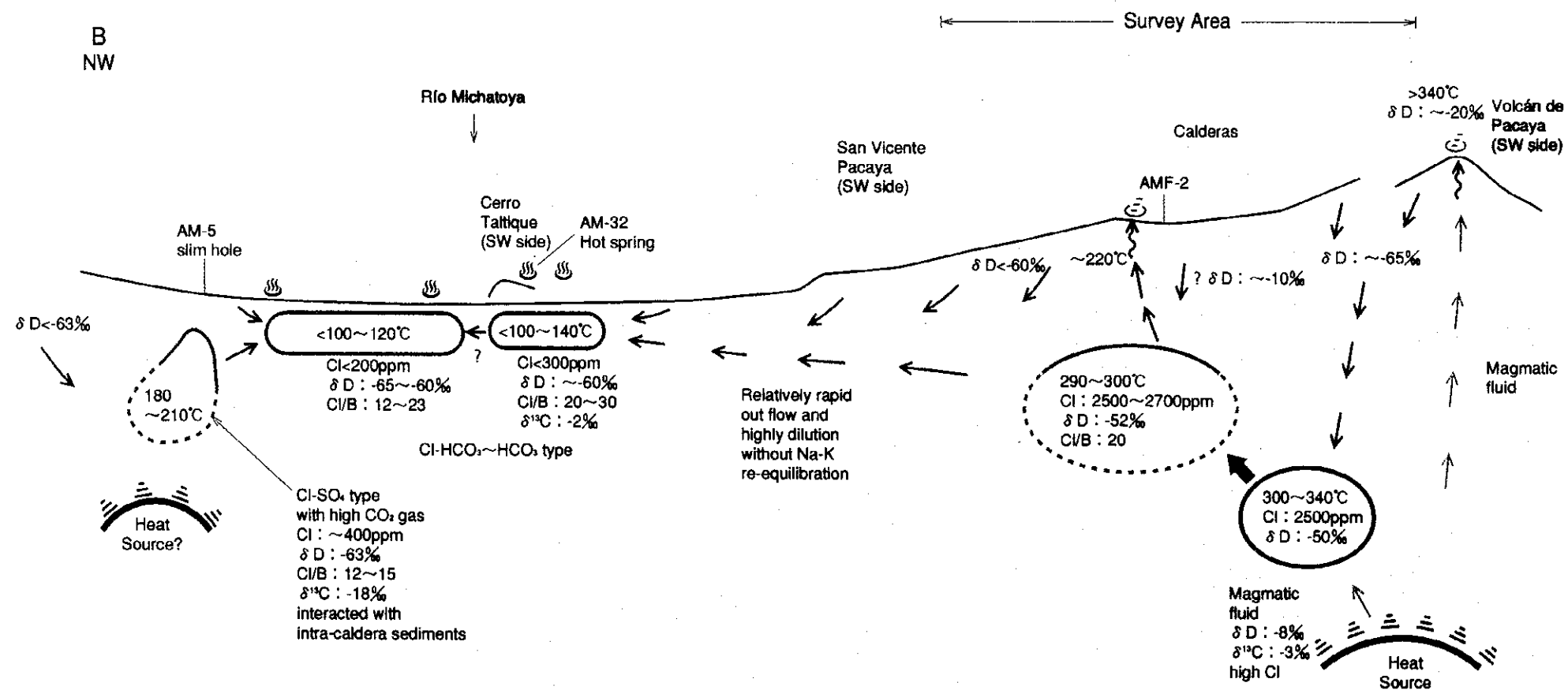


MB6101-07A

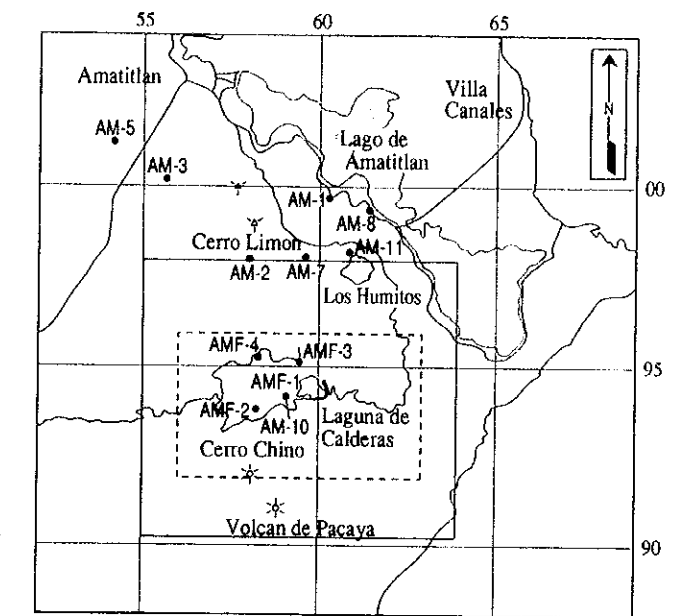
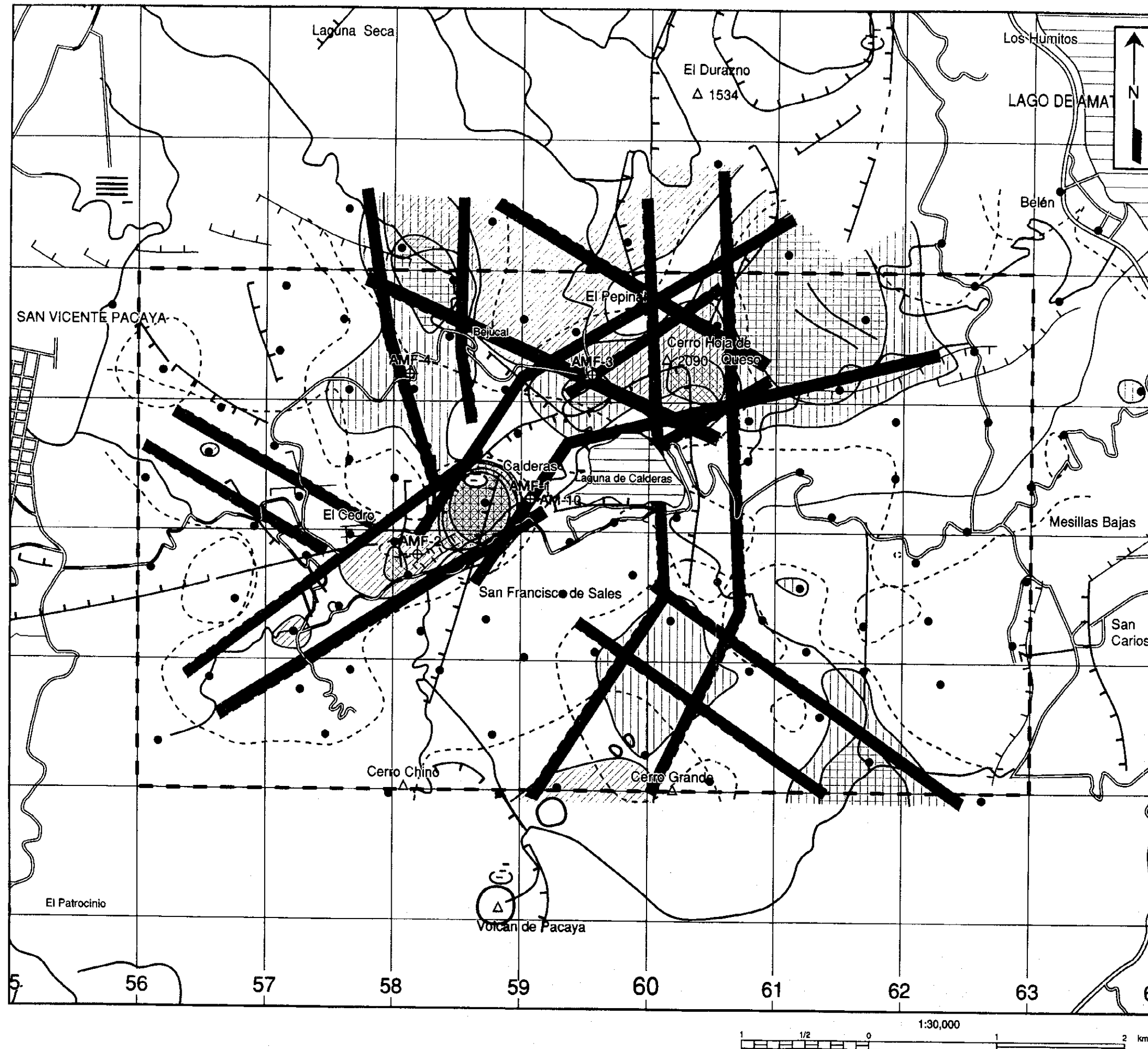


LEGEND








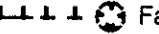

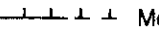
- High temperature reservoir
- Low temperature reservoir (Hot spring aquifer)
- Parental fluid of the Amatitlán geothermal system
- Thermal water flow
- Boiling and steam flow
- Meteoric cold water flow



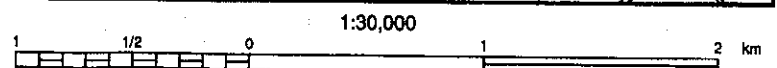
Amatitlán geothermal development project
 熱水系地化学モデル図
 Geochemical model of hydrothermal system
 JICA-WEST JEC Fig. 2-2-7



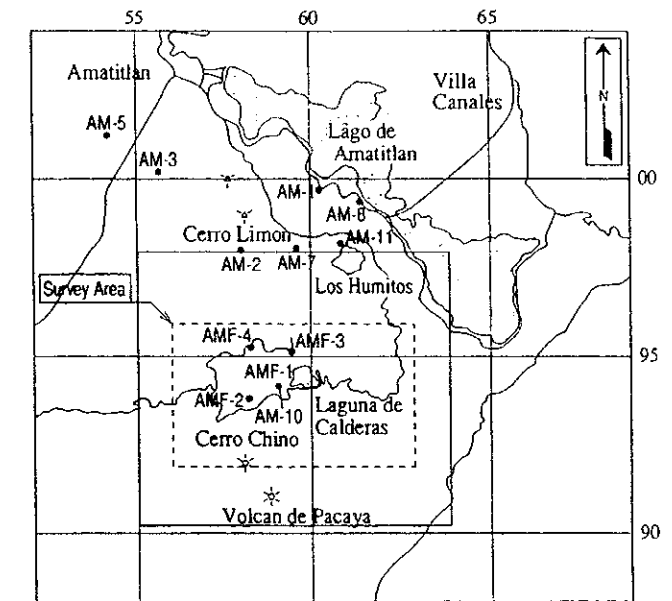
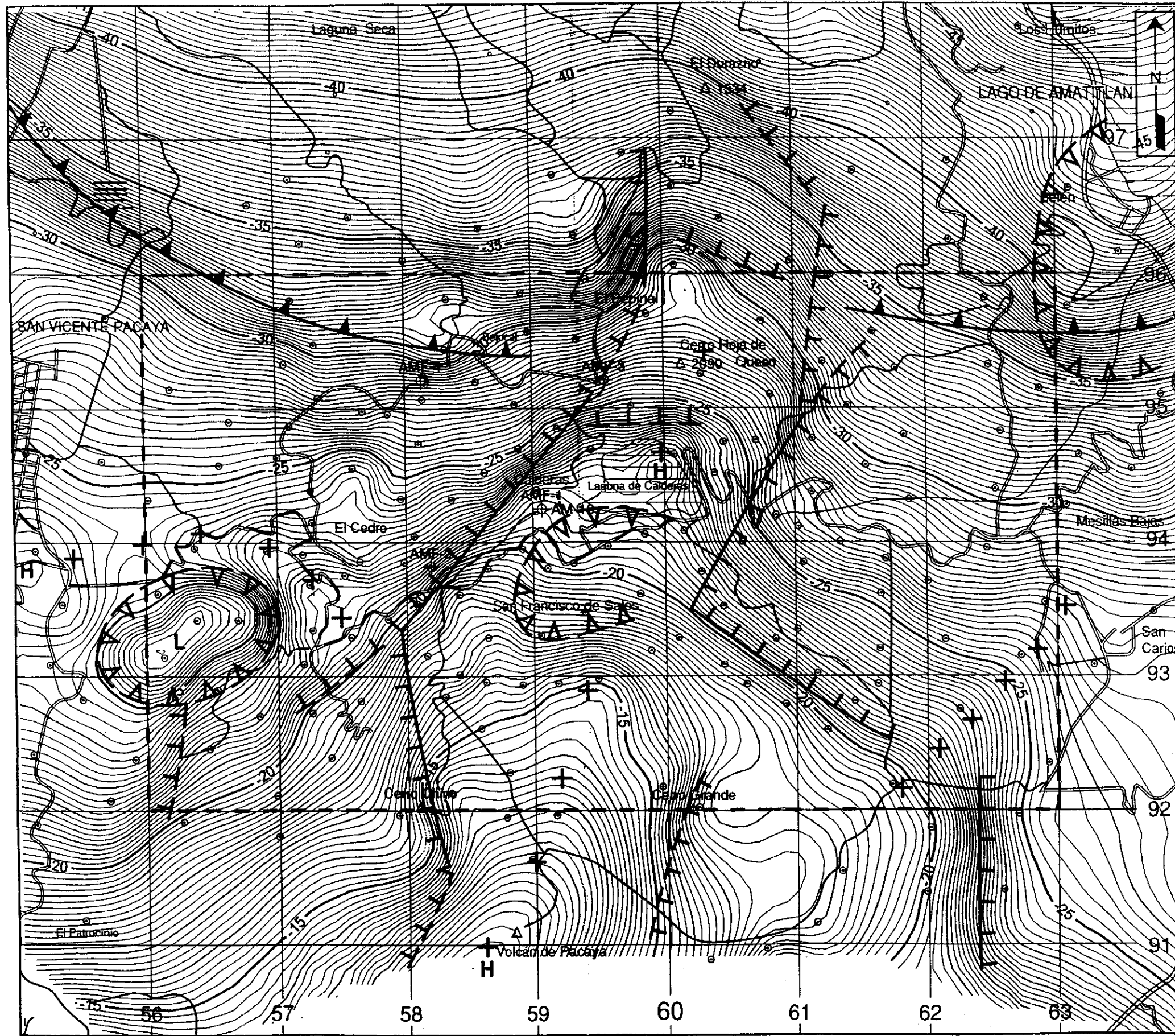
LEGEND

-  Permeable Zone Based on Hg Distribution
-  Hg Anomaly
-  Permeable Zone Based on Corrected Distribution
-  Corrected Rn Anomaly
-  Sampling Station(109 points)
-  Survey Area
-  Existing Well
-  Fault, Caldera Wall
-  Crater
-  Morphologic Escarpment








Amatitlan geothermal development project
 土壤ガス調査による高透水性ゾーン集約図
 Compiled map of permeable zone by soil-gas survey
 JICA-WEST JEC Fig. 2-2-8



M88101-401B

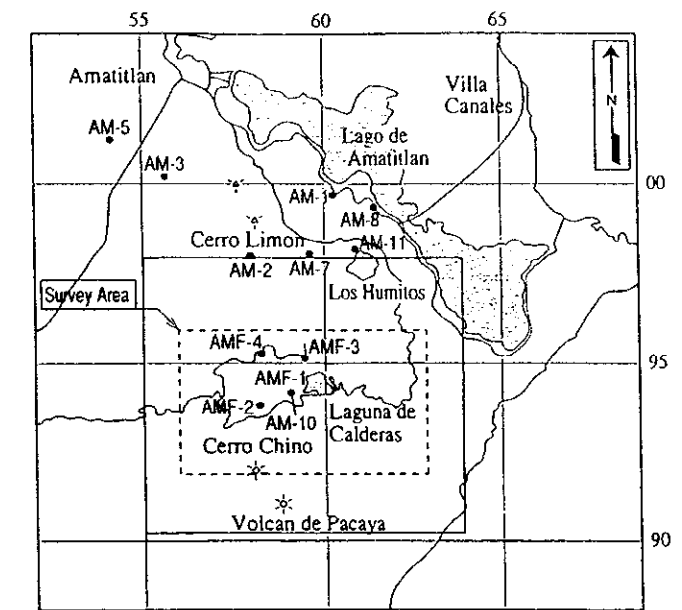
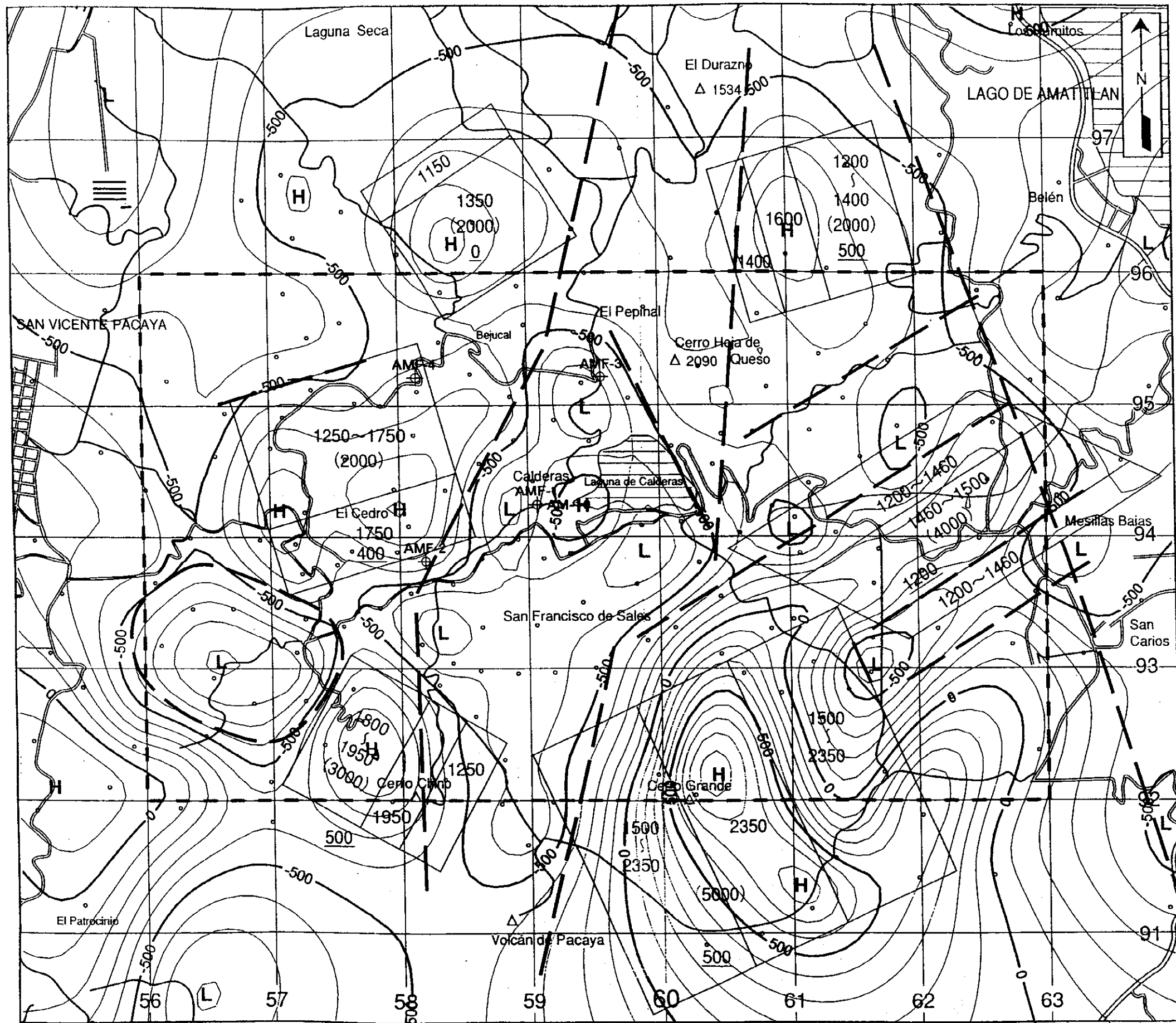


Legend

-  : Survey Area
-  : Exploratory Well
-  : Caldera Rim Estimated from Gravity
-  : Basin
-  : Gravity Lineament(major)
-  : Gravity Lineament(minor)
-  : Basement Uplift trend

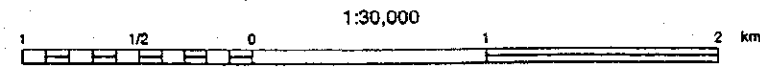
Amatitlan Geothermal Development Project	
重力解析図	
Gravity Interpretation Map	
JICA-WEST JEC	Fig. 2-2-9

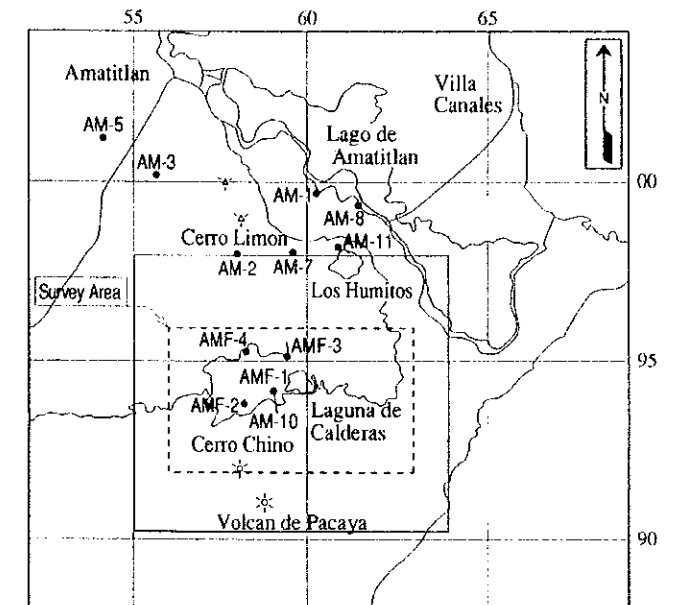
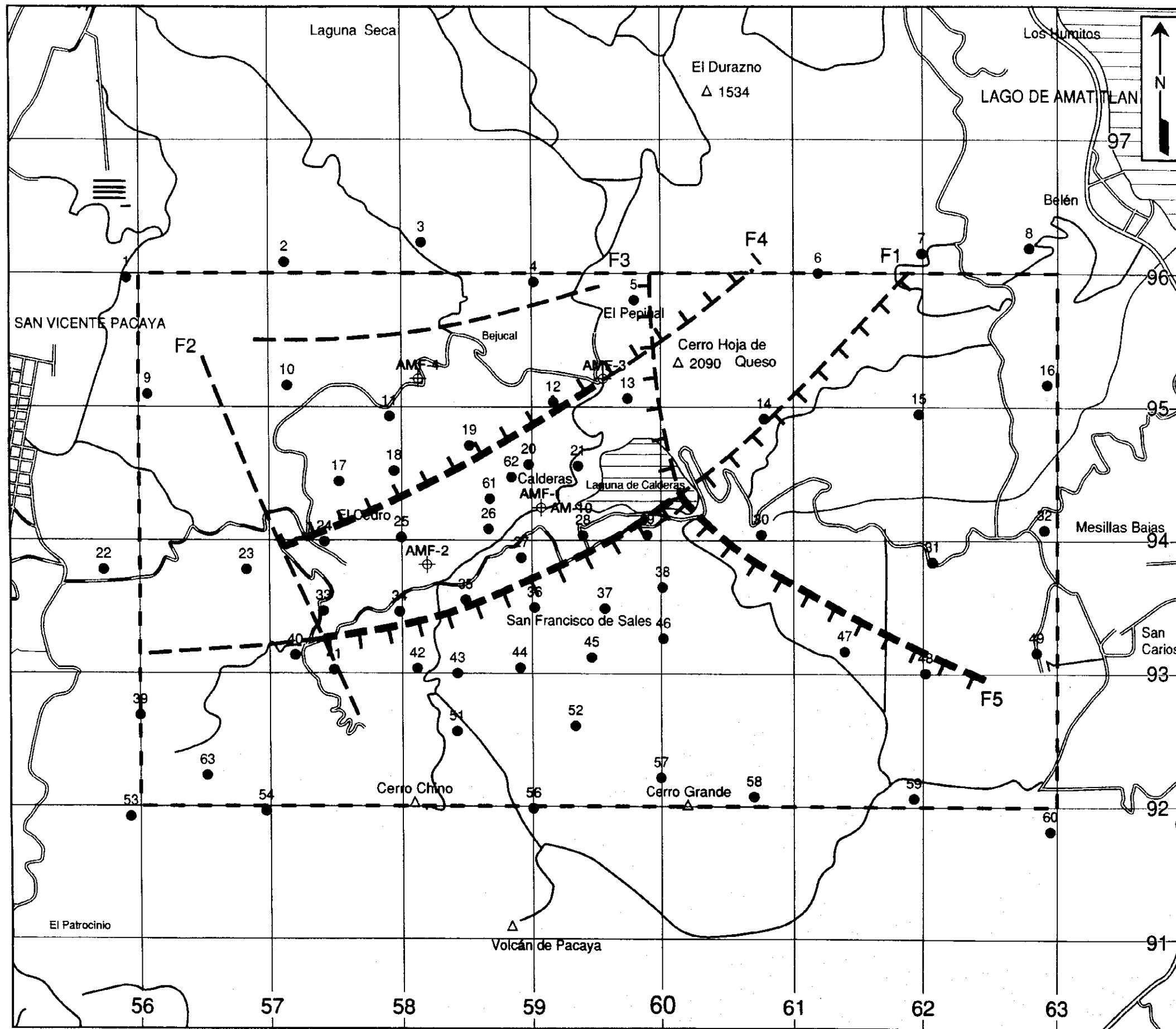
AP8101401A



- Legend
- : Survey Area
 - : Exploratory Well
 - : Magnetic Discontinuity
 - : Magnetic Body
 - 1600 : Top Depth of Magnetic Body
 - (2000) : Magnetic Susceptibility $\times 10^{-6} \text{emu/cm}^3$
 - 500 : Bottom Depth of Magnetic Body

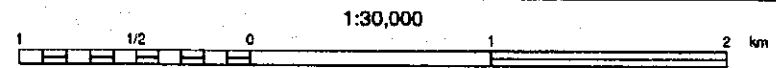
Amatitlan Geothermal Development Project	
磁気解析図	
Magnetic Interpretation Map	
JICA-WEST JEC	Fig. 2-2-10



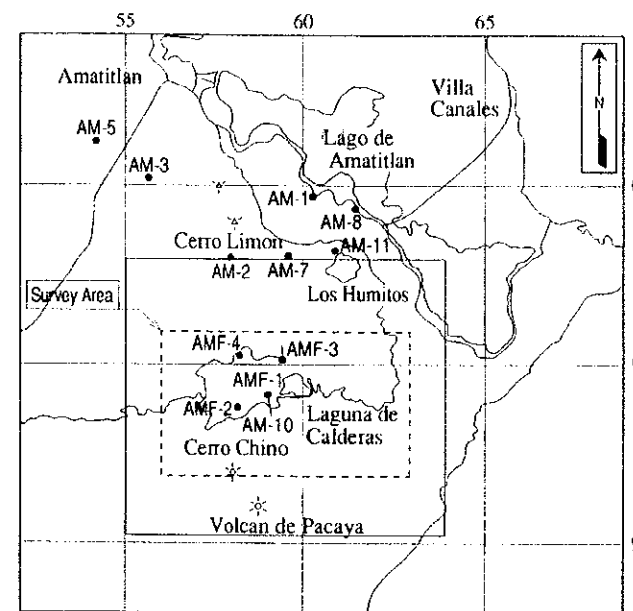
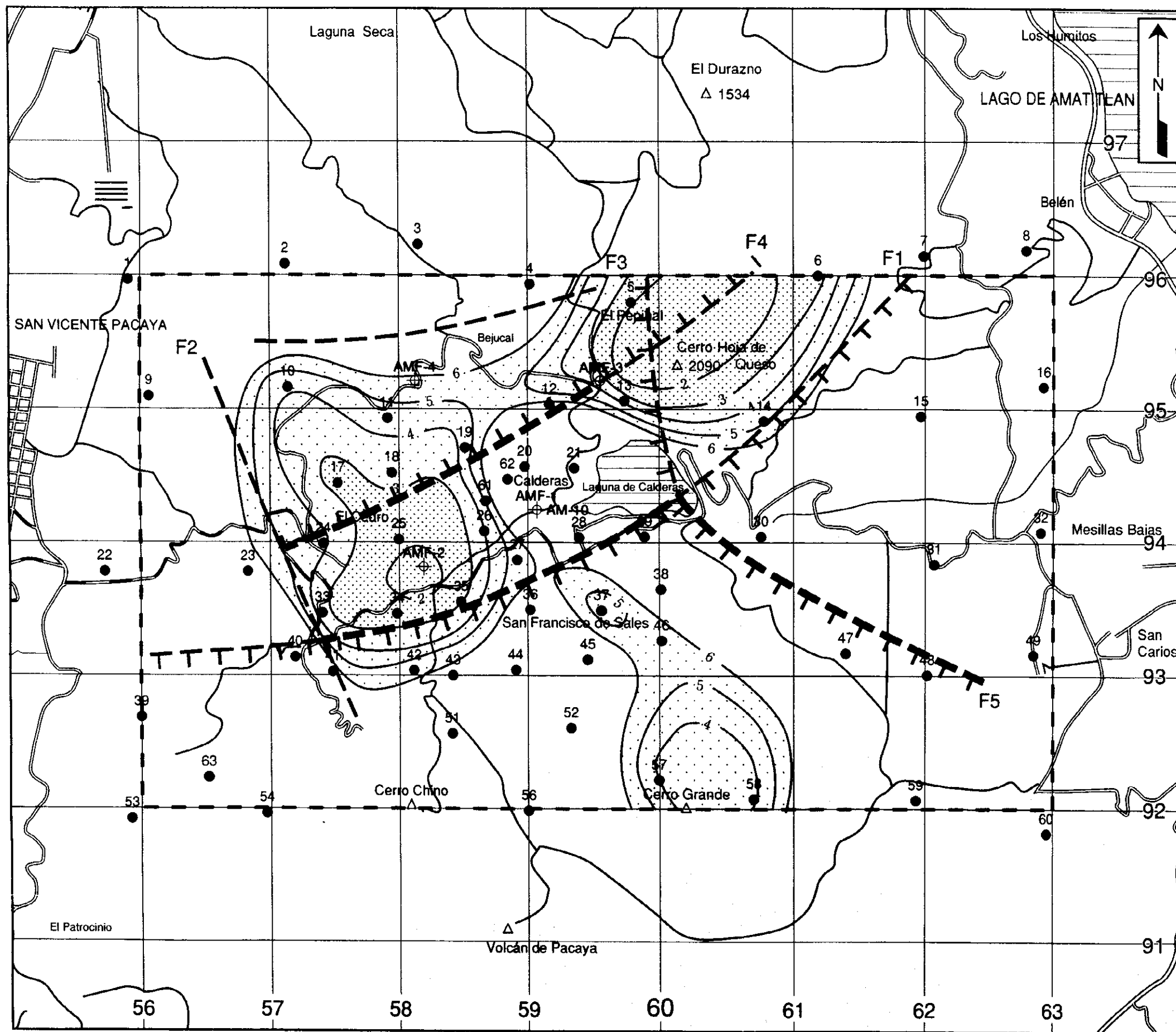


- Legend
- : Survey area
 - : Exploratory well
 - : MT station
 - : Resistivity discontinuity

Amatitlan Geothermal Development Project	
比抵抗不連続線分布図	
Resistivity discontinuities distribution map	
JICA-WEST JEC	Fig. 2-2-11



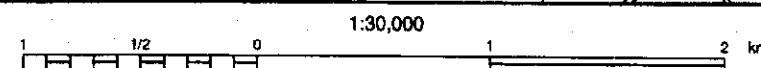
MBE101401A



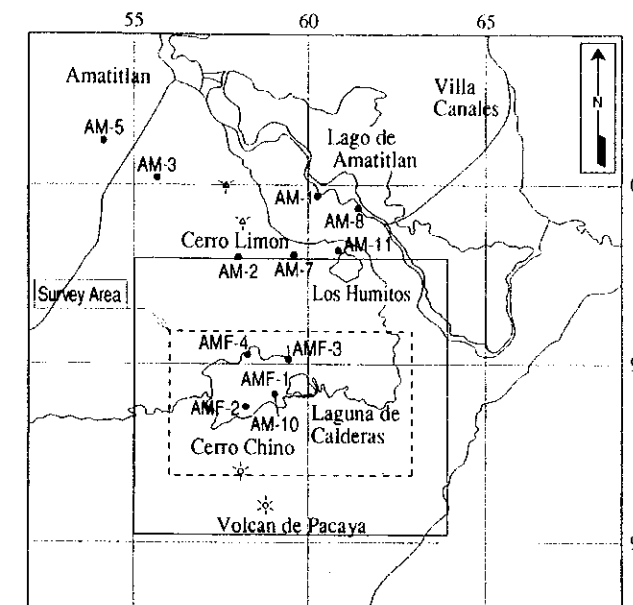
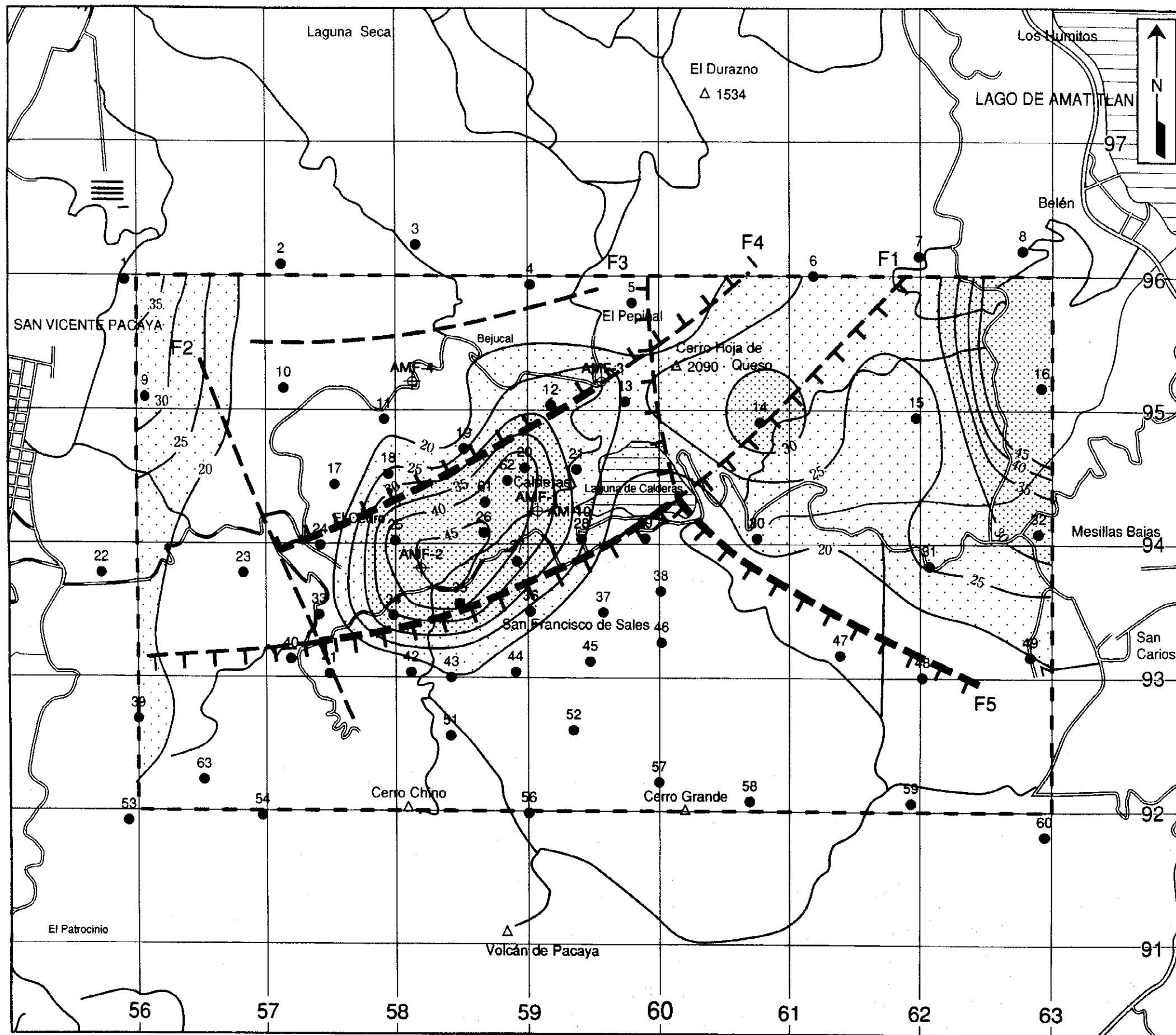
Legend

- : Survey area
- : Exploratory well
- : MT station
- : Resistivity discontinuity
- : Contour line of resistivity (Low resistivity layer, ohm-m)

Amatitlan Geothermal Development Project	
浅部比抵抗構造解析図	
Resistivity structure in shallow zone	
JICA-WEST JEC	Fig. 2-2-12



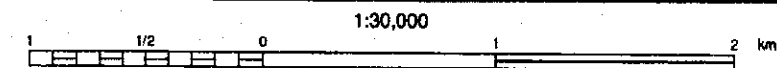
498101.001A



Legend

- : Survey area
- : Exploratory well
- : MT station
- : Resistivity discontinuity
- : Contour line of resistivity (Resistivity distribution at 1500m deep)

Amatitlan Geothermal Development Project	
深部比抵抗構造解析図	
Resistivity structure in deep zone	
JICA-WEST JEC	Fig. 2-2-13



MB101407A

2. 3 調查井掘削結果

2.3.1 調查井 AMJ-1 号井

2.3.2 調查井 AMJ-2 号井

2.3 調査井掘削結果

2.3.1 調査井 AMJ-1 号井

1. 業務概要

前年度に作成した掘削仕様書に基づき、掘削工事現地再委託のための国際入札および契約交渉を1999年8月に実施した。入札の結果、2業者の応札があったが、最終的に隣国 El Salvador の Berlin 地熱地帯で多くの掘削実績を有する Simmons 社が受注し、掘削作業を行った。掘削作業は1999年12月23日から開始され、2000年2月5日に深度1,700.5mで掘止めとし、坑井試験を実施した後、2月10に坑内作業を完了した。

坑井の掘削位置は次の通りである。

標高	1,885m
座標	X: 757,737
	Y: 1,593,207

2. 掘削作業

掘削機材の搬入・据付は1999年12月22日に完了した。ラットホール及びマウスホールの掘削を12月23日、24日に実施した後、17-1/2"ビット編成でAMJ-1号井の掘削を12月25日16時30分に開始した。深度2m掘削中に部分逸水が発生し、逸水防止剤(LCM)で処理した。深度8mでは全量逸水となり、2回のセメントプラグを行った。17-1/2"ビット編成で深度10mまで掘削し、硬質岩盤に遭遇したために12-1/4"ビット編成に取り替え、深度32mまで逸水なく掘削した。17-1/2"ビット編成で深度10mから深度32mまで掘削後、26"ホールオープナー編成による掘削に入った。深度11.4m掘削中に部分逸水が発生し、30"コンダクターパイプ尻が侵食(Wash-out)されたため、この部分に対して1回のセメントプラグを行い、深度11.4mまでセメントを浚渫した。2000年1月1日に20"ケーシングを深度10.8mまで挿入し、セメンチングを実施した。セメント硬化待機20時間後、30"コンダクターと20"ケーシングを切断、20"ケーシングヘッド、21-1/4"2000#BOP、フローラインを取り付けた。

21-1/4"BOPの作動テスト後、17-1/2"ビット編成を降下した。セメント頭に深度7mで到達し、セメント浚渫を1月3日に開始した。深度32mまで坑内浚渫を行った後、17-1/2"ビット編成による掘削に入った。掘削中、深度83mと深度151mで部分逸水が発生したが、逸水防止剤で処理した。17-1/2"ビット編成で深度300.2mまで問題なく掘削し、1月9日に13-3/8"ケーシングを深度295.7mまで挿入し、セメンチングを実施した。セメント作業中に部分逸水が発生し、スラリーの地上回帰が得られなかった。セメント硬化待機24時間後、20"ケーシングと13-3/8"ケーシングのアニュラー部に対して3回のトップジョブセメンチングを行った。その後、20"坑口装置を取り外し、13-3/8"ケーシングを切断、13-3/8"ウェルヘッド、13-5/8"-5000#BOP、フローラインを取り付けた。

13-3/8"ケーシング及びBOPを含むウェルヘッドの耐圧テストを圧力600psiで15分間実施した。12-1/4"ビット編成を降下し、セメント頭に深度275mで到達し、セメント浚渫を1月12日に開始した。深度300.2mまでセメント浚渫を行った後、12-1/4"ビット編成による掘削に入った。この区間において逸水は全く発生せず、深度807.2mまで問題なく掘削した。坑内検層(温度および圧力)を実施後、1月20日に9-5/8"ケーシングを深度803.3mまで挿入し、セメンチングを実施した。セメント硬化待機24時間後、13-3/8"ケーシングと9-5/8"ケーシングのアニュラー部耐圧テストを行った結果、圧力降下が認められたため、1回のトップジョブセメンチング(スクイズセメンチング)を行った。その後、13-3/8"坑口装置を一旦解体し、9-5/8"ケーシングを切断、13-3/8"ウェルヘッドにエクспанションスプール、10"-600#マスターバルブを組み込み、再び13-5/8"-5000#BOP、フローラインを取り付けた。

9-5/8"ケーシング及びBOPを含むウェルヘッドの耐圧テストを圧力600psiで15分間実施した。8-1/2"ビット編成を降下し、セメント頭に深度777mで到達し、セメント浚渫を1月23日に開始した。深度807.2mまでセメント浚渫を行った後、8-1/2"ビット編成による掘削に入った。深度1011m、深度1168m、深度1231mで部分逸水が発生したが、逸水量は3~4 m³/hrと少なく、掘削を続けるうちに自然閉塞した。その後、深度1429mで16 m³/hrの逸水が発生し、徐々に増加、深度1493mでは全量逸水状態になった。低粘性の泥水と清水で掘削を続けたが、深度1502mで60 m³/hrの部分逸水となった。深度1531mまで掘削後、坑内状況チェックのために揚降管(ワイパートリップ)を実施したところ、坑底から深度1490mまでの区間で大きな揚荷重がかかり、大きな坑内抵抗が見られた。再び8-1/2"ビット編成を降下し、深度1480mで抵抗があったため、深度1531mまで逸水15 m³/hrの状態で坑内浚渫を実施した。掘削の坑内残留による障害と判断されたため、その後の掘削には清水を使用せずに、低粘性の泥水を使用し、深度1700.5mまで逸水5~20 m³/hrで掘削した。その後坑井評価のための坑内検層に移行し、坑内温度および透水性を評価して、INDEとの協議に基づき、深度1700.5mでの掘止めを決定した。第2回目の坑内検層時に検層ゾンデが深度1001mで抑留され、その回収を試みたが、最終的に検層ワイヤーが切断し、検層ゾンデは坑底に遺留した。8-1/2"ビット編成で深度1696mまで坑内浚渫後、2月7日に7-5/8"ライナーを深度1690.0mまで挿入した。孔明管は深度1690.0m~深度1395.4m、盲管は深度1395.4m~深度758.2m、ライナーハンガートップは深度756.9mにセットした。7-5/8"ライナー挿入後、逸水層の透水性を改善するため、マッドポンプを使用して3回のハイドロフラクチャリング(地層破壊)を実施した。1回目と2回目のフラクチャリングは、ドリルパイプを深度550mまで降下してBOP(パイプラム)を閉め、ドリルパイプを通して注水し、注水レート約160 m³/hrでポンプ圧力630psiとなった。3回目はドリルパイプを揚管してBOP(ブラインドラム)を閉め、キルラインから注水し、注水レート約150 m³/hrでポンプ圧力50psiであった。ハイドロフラクチャリングの結果、逸水量は掘削完了時の12 m³/hrから75 m³/hrに増大し、あきらかな効果が見られた。2月10日に検層器を用いて逸水量試験(ウォーターロステスト)と圧力遷移試験

(トランジェントテスト)を行い、坑井試験を終了した。同日、メインバルブを締め切り、掘削作業を完了した。

3. まとめ

AMJ-1号井の掘削は、掘削作業にかかわる事故もなく順調に進み、地熱貯留層には、予想より深部の1,500m以深で遭遇した。AMJ-1号井掘削結果は次のようにとりまとめられる。

- 1) 予定深度1,500mに対して、深度1,700.5mまで増掘した。
- 2) 高温の貯留層に1,500m以深で遭遇したと考えられる。
- 3) 最終的な回復温度は300℃前後であると考えられる。
- 4) 透水性はあまり良くない。
- 5) 掘削中の逸水があまり発生しなかったため、掘削機材の追加はほとんど生じなかった。

2.3.2 調査井 AMJ-2 号井の掘削

1. 業務概要

前年度と同様に、新たに作成した掘削仕様書に基づき、掘削工事現地再委託のための国際入札および契約交渉を2000年6月に実施した。入札の結果、2業者の応札があったが、最終的に Guatemala の Amatitlan および Zunil 地熱地帯で多くの掘削実績を有する Perforaciones Integrales Termicas, S. A. (PITSA) 社が受注し、掘削作業を行った。掘削作業は年2000年8月26日から開始され、2000年11月4日に深度1,705mで掘止めとし、坑井試験を実施した後、11月13日に坑内作業を完了した。

坑井の掘削位置は次の通りである。

標高	1,885m
座標 X:	757,732
座標 Y:	1,593,213

2. 掘削作業

掘削機材の搬入・据付は2000年8月25日に完了した。ラットホール及びマウスホールの掘削を8月26日に実施した後、17-1/2"ビット編成でAMJ-2号井の掘削を8月27日午前0時に開始した。17-1/2"ビット編成で深度8.0mまで掘削し、26"ビット編成に取り替え、同深度まで逸水なく拡張掘削した。その後、20"ケーシングを深度8.0mまで挿入・セメントチングした。セメント硬化待機24時間後、30"コンダクターと20"ケーシングを切断、20"ウェルヘッド及びフローラインを取り付けた。

8月29日に12-1/4"ビット編成を降下、セメント頭に深度7.0mで到達し、セメント浚渫を深度8.0mまで行った。12-1/4"ビット編成で深度13.0mまで掘削後、17-1/2"ビット編成に取り替え、同深度まで拡張掘削、引き続き掘削に入った。深度105.0mで部分逸水が発生したが、掘削を続けるうちに自然閉塞した。深度156.0mで再び部分逸水が生じ、掘削

を中断して逸水防止に移行、作業中にドリルパイプ落下事故が発生した。オーバショット、プアボーイグラブ、バスケットでフィッシング作業を繰り返したが、完全に遺留物を回収できず、プラグバックセメンチングを2回行い、深度 119.0mからサイドトラックした。その後は深度 156.0m、深度 201.0mで部分逸水となったが、LCM 泥水で対処し、深度 300.0 mまで掘削した。9月28日に 13-3/8"ケーシングを深度 293.4mまで挿入・セメンチングした。セメンチングにおいては、セメント後押し中に逸水が発生し、スラリーの地上回帰が得られなかったため、20"ケーシングと 13-3/8"ケーシングのアニュラー部に対して2回のトップジョブセメンチングを行った。セメント硬化待機 24 時間後、20"坑口装置を取り外し、13-3/8"ケーシングを切断、13-3/8"ウェルヘッド、13-5/8"-3000 #BOP、フローラインを取り付けた。

13-3/8"ケーシング及び BOP を含むウェルヘッドの耐圧テストを 600psi 15 分間実施した。12-1/4"ビット編成を降下、セメント頭に深度 271.0mで到達し、セメント浚渫を 10月3日に開始した。深度 300.0mまでセメント浚渫を行った後、12-1/4"ビット編成による掘削に入り、深度 385.0mで 8-1/4"ダウンホールモーターを使用してキックオフし、目的方位へ向けて傾斜掘りを始めた。この区間において逸水は全く発生せず、深度 1000.0mまで問題なく掘削した。

ワイパートリップ実施後、10月18日に 9-5/8"ケーシングを深度 996.3mまで挿入・セメンチングした。セメント硬化待機 36 時間後、13-3/8"坑口装置を一旦解体し、9-5/8"ケーシングを 13-3/8"ウェルヘッドの位置で切断、13-3/8"ウェルヘッドにエクспанションスプール、13-5/8"-3000 #BOP を取り付けた。その後、13-3/8" ケーシングと 9-5/8"ケーシングのアニュラー部耐圧テストを行った結果、圧力降下が認められたため、1回のトップジョブセメンチングを行った。

9-5/8"ケーシング及び BOP を含むウェルヘッドの耐圧テストを 600psi 15 分間実施した。8-1/2"ビット編成を降下、セメント頭に深度 966.0mで到達し、セメント浚渫を 10月22日に開始した。深度 1000.0mまでセメント浚渫を行った後、8-1/2"ビット編成による掘削に入った。深度 1203.0mまで掘削した時点でツールズ抑留事故が発生したが、強引作業を繰り返し行くとともに、2回のオイルスポットを実施し、抑留回復に成功した。その後、目的方位への傾斜掘りを続け、深度 1538.0mで 50m³/hr の部分逸水が発生、深度 1539.0 mでは全量逸水 (75 m³/hr 以上) となった。深度 1542.0mまで全量逸水で掘削し、ビット及び掘削編成を替えて掘削を再開したところ、逸水量は 20 m³/hr に減少していた。8-1/2"ビット編成で深度 1705.0mまで逸水 10~50 m³/hr で掘削を続け、11月5日に 7"ケーシングを深度 1690.2mまで挿入した。孔明管は深度 1689.9m~深度 1088.3m、盲管は深度 1088.3m~深度 961.7m、ライナーハンガートップは深度 961.1mにセットした。7"ケーシング挿入後、逸水層の透水性を改善するため、マッドポンプを使用して3回のハイドロフラクチャリングを行った。ドリルパイプを深度 199.0mまで降下しパイプラムを閉め、ドリルパイプを通して坑内へ注水した。注水レートは約 152 m³/hr であり、ポンプ圧力は 250psi から 100psi まで降下した。ハイドロフラクチャリングの結果、逸水量は 53

m³/hr から 126 m³/hr に増大した。11月8日から11月13日の間で各種坑内検層を行い、11月13日にリグをリリースした。

3. まとめ

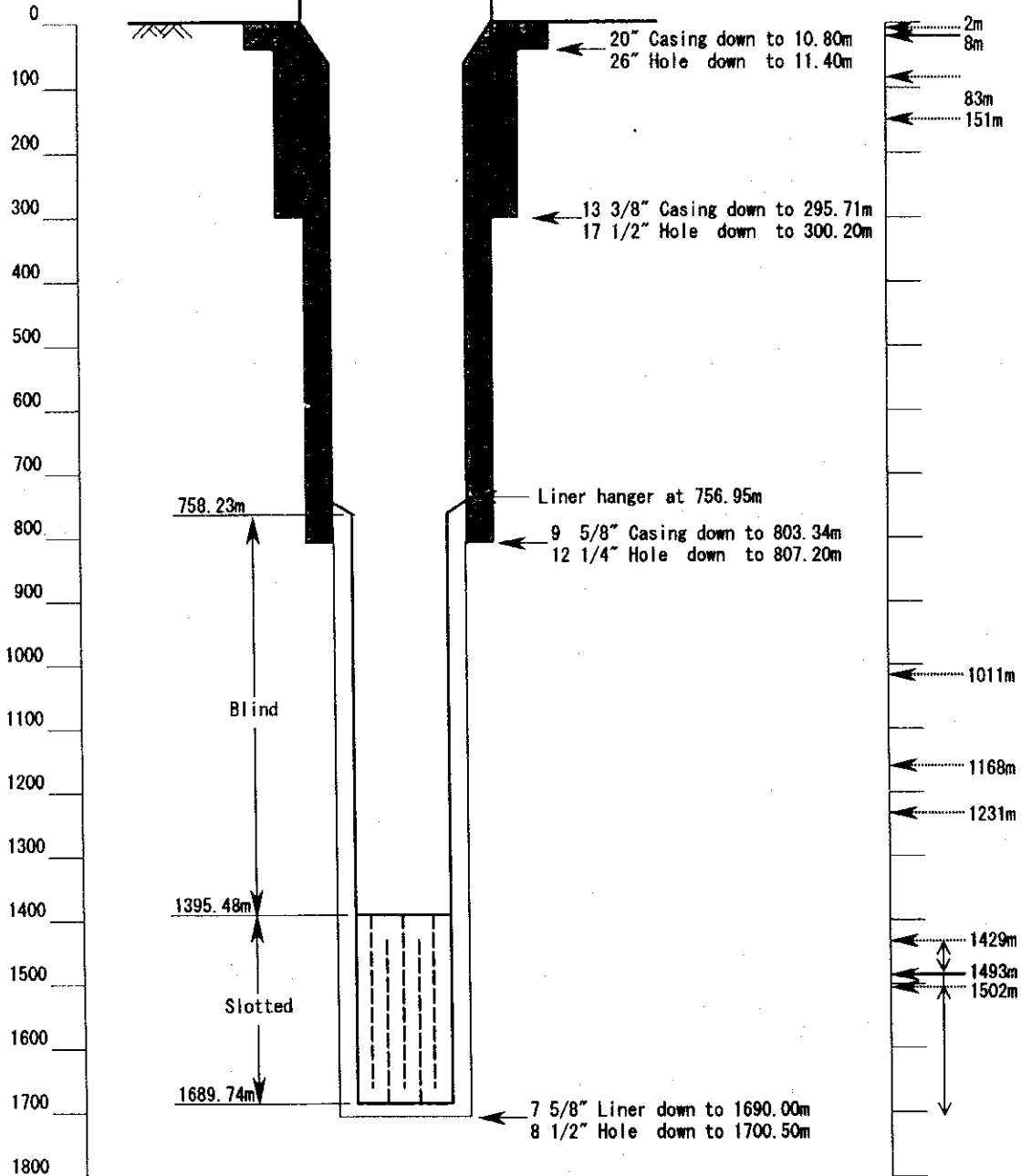
AMJ-2号井の掘削は、坑内抑留等の掘削作業にかかわる事故はあったが、比較的短時間で回復することができ、若干の工程遅延はあったものの、1539m以深の地熱貯留層に予想通り遭遇した。AMJ-2号井掘削結果は次のようにとりまとめられる。

- 1) 予定深度 1,700m に対して、ほぼ計画通りに深度 1,705m まで掘削した。
- 2) 高温の貯留層に 1,539m 以深で遭遇したと考えられる。
- 3) 最終的な回復温度は 300℃ 前後であると考えられる。
- 4) AMJ-1 号井と比較して透水性は良い。
- 5) 掘削予定工期 70 日間に対して、80 日間で完了した。工期が延びた原因はドリルパイプ切断、ドリルパイプ抑留等の坑内事故の回復作業によるものである。
- 6) 掘削中の逸水があまり発生しなかったため、掘削機材の追加はほとんど生じなかった。

Total Depth 1700.50m
 Elevation 1885.00m
 Coordinates unknown
 Spud Date 25/12/1999
 Completion Date 07/02/2000

Depth (m)

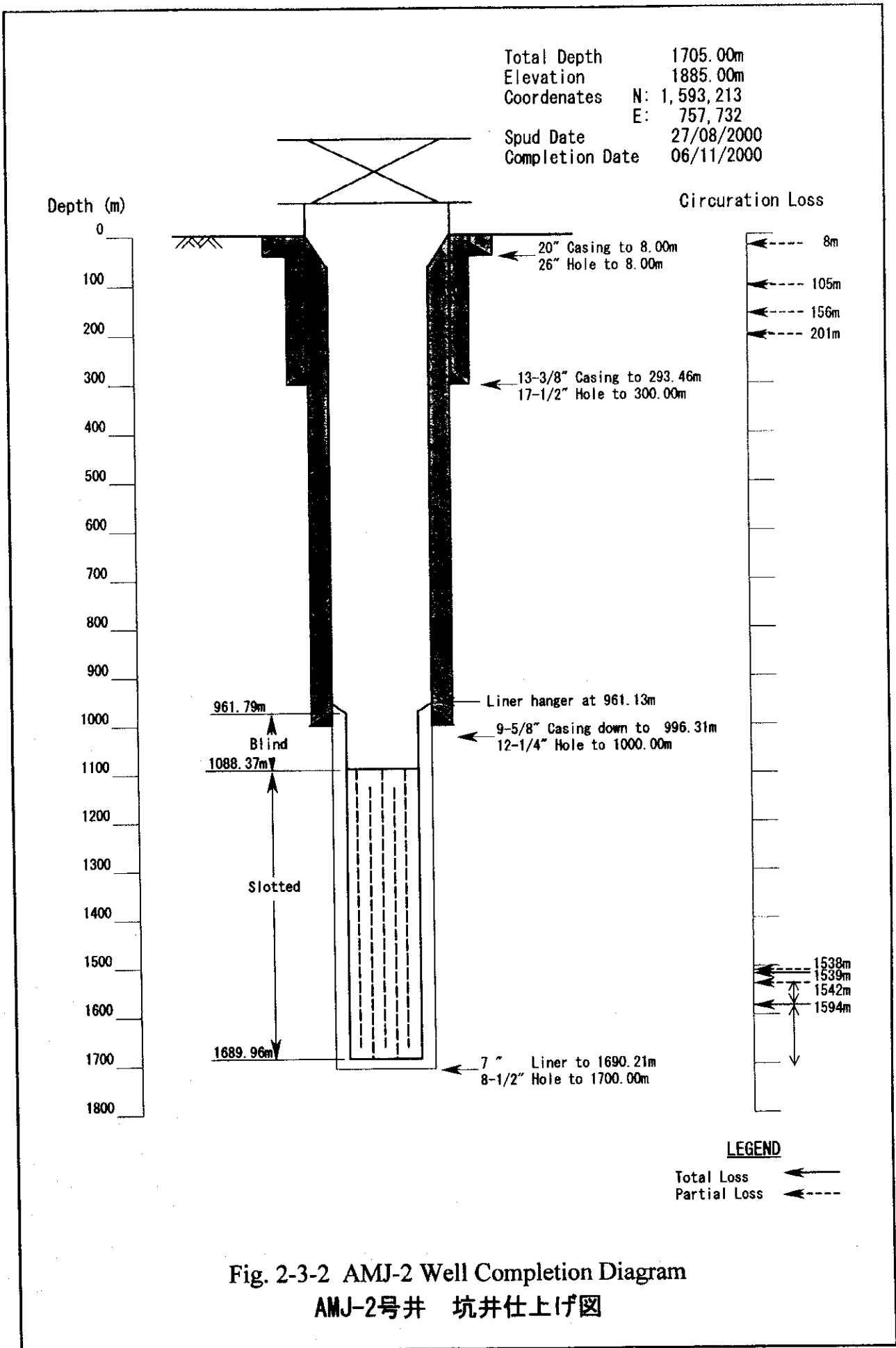
Circuration Loss



LEGEND

Total Loss ←
 Partial Loss ←

Fig. 2-3-1 AMJ-1 Well Completion Diagram
 AMJ-1号井 坑井仕上げ図



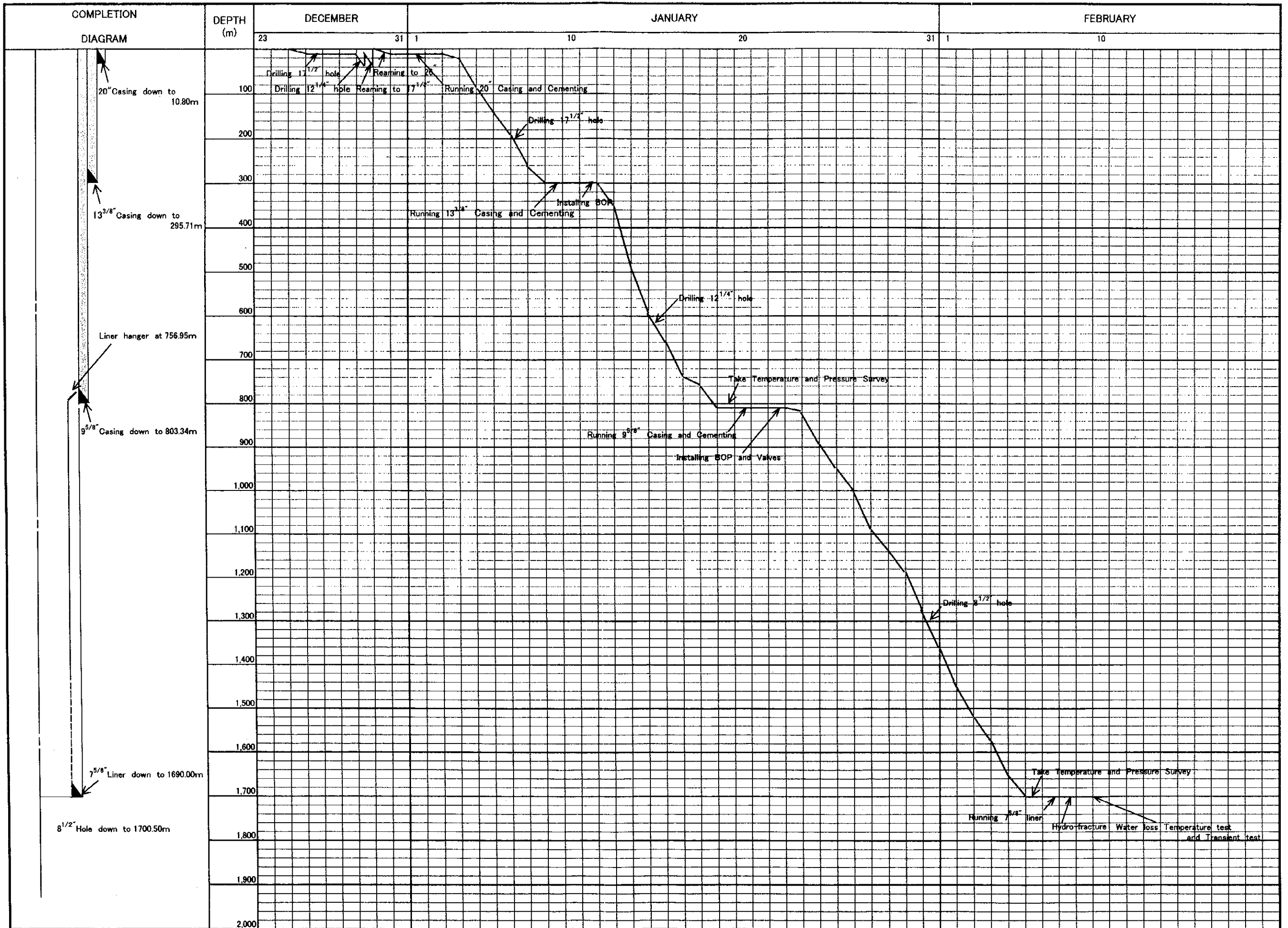


Fig. 2-3-3 AMJ-1 Well Drilling Diagram

AMJ-1号井 掘削実績

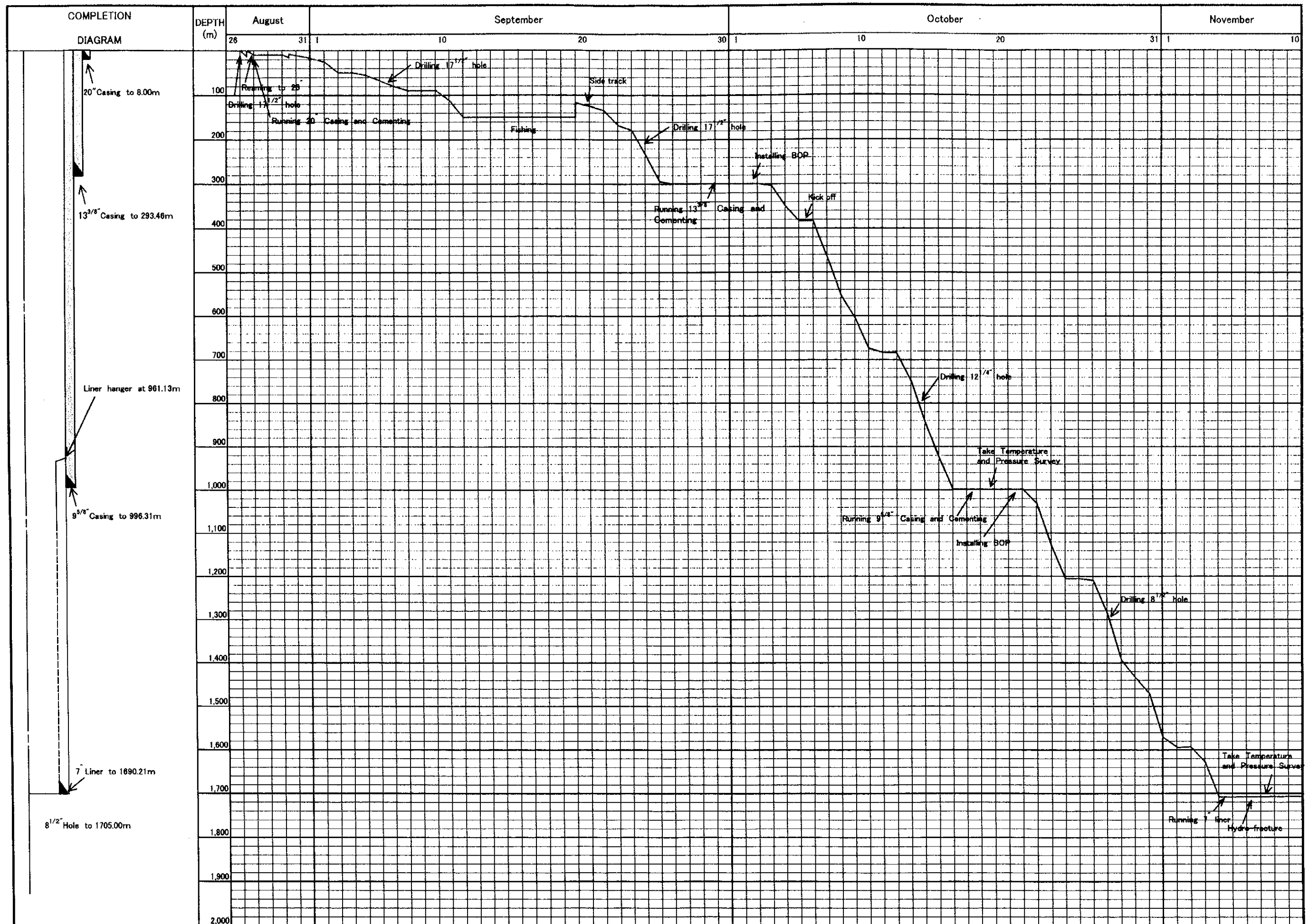


Fig. 2-3-4 AMJ-2 Well Drilling Diagram

AMJ-2号井 掘削実績

Table. 2-3-1 Rig Time Distribution on Well AMJ-1

坑井 AMJ-1 の掘削時間分析

Operation	26" hole	17-1/2" hole	12-1/4" hole	8-1/2" hole	Total
Rig up and Rig-down	61:00	—	—	14:30	75:30
Drill actual	96:45	94:00	105:30	231:45	528:00
Reaming and drill out cement	4:30	8:15	8:00	9:00	29:45
Coring	—	—	—	—	—
Condition mud and circulate	10:30	7:00	11:45	23:15	52:30
Trips	14:30	17:15	18:45	53:15	103:45
Lubricate rig	—	1:15	1:00	1:15	3:30
Repair rig	7:45	0:45	0:30	1:45	10:45
Cut off drilling line	—	—	—	2:00	2:00
Deviation survey	—	1:00	1:30	2:30	5:00
Wire line logs and hydro-fracturing	—	—	25:45	44:00	69:45
Run casing and cement	6:15	18:15	22:00	15:15	61:45
Wait on cement	54:15	44:00	36:00	—	134:15
Nipple up BOP	19:30	9:30	20:30	—	49:30
Test BOP	—	0:15	1:00	0:30	1:45
Drill stem test	—	—	—	—	—
Plug back	6:30	—	—	—	6:30
Squeeze cement	—	—	—	—	—
Fishing	—	—	—	4:30	4:30
Stand by	—	—	17:45	43:30	61:15
Totals	281:30	201:30	270:00	447:00	1200:00

Table 2-3-2 Rig Time distribution on Well AMJ-2

坑井 AMJ-2 の掘削時間分析

Operation	26" hole	17-1/2" hole	12-1/4" hole	8-1/2" hole	Total
Rig-up and Rig-down	24:00		3:45		27:45
Drill actual	16:00	235:45	152:30	161:00	565:15
Reaming and drill out cement	—	25:45	35:15	18:00	79:00
Coring	—	—	—	—	—
Condition mud and circulation	—	27:00	10:45	7:45	45:30
Trip	4:00	65:00	71:00	58:45	198:45
Lubricate rig	—	1:00	2:00	1:30	4:30
Repair rig	—	41:00	69:45	36:00	146:45
Cut off drilling line	—	—	1:00	—	1:00
Deviation survey	—	1:00	5:45	8:00	14:45
Wire line logs	—	—	5:30	—	5:30
Run casing and cement	4:00	63:45	30:15	20:00	118:00
Wait on cement	24:00	107:00	52:30	—	183:30
Nipple-up BOP	11:00	30:00	10:30	—	51:30
Test BOP	—	—	6:00	0:45	6:45
Drill stem test	—	—	—	—	—
Plug back	—	11:15	—	—	11:15
Squeeze cement	—	—	—	—	—
Fishing	—	143:00	—	60:30	203:30
Stand by	—	82:30	—	6:15	88:45
Total	83:00	834:00	456:30	378:30	1752:00

Table. 2-3-3 Drilling Equipment for Well AMJ-1

坑井 AMJ-1 の掘削設備

Item	Description	
Mast	Make: DRECO, Type: Cantilever, Model: M13621-800	
Substructure	Make: DRECO, Type: Box on Box, Capacity: 500,000lbs	
Crown Blocks	Shieves: 55" × 1(first line), 42" × 5	
Hook Blocks	Make: NATIONAL, Model: 545G350, Rating: 350ton	
Drawworks	Make: NATIONAL, Model: 80UE, Drive: GE 752(1000HP)	
Rotary Table	Make: NATIONAL, Model: C-275, Size: 27-1/2"	
Swivel	Make: NATIONAL, Model: P-400, Rating: 400ton	
Pipe Spinner	Make: SPINNER HAWK, Model: J29	
Kelly Bushing	Make: DEN CON, Type: R-H	
Tongs	Make: BLOOM VOSS, Type: 100	
Hydraulic Winch	Make: BRADEN, Model: PD12C, Rating: 6ton	
Wire Line Unit	Home make, Wire Line Size: 9mm	
Mud Pumps	No,1 Pump	Make:NATIONAL, Model:9-P-100, Drive:GE752
	No,2 Pump	Make:NATIONAL, Model:9-P-100, Drive:GE752
Shaker	Make: BRANT, Type: Tandem	
Desander	Make: SWACO, Model: 30839	
Desilter	Make: SWACO, Model: 30856	
Blowout Preventers	Annular	Make: HYDRILL, Size: 21-1/4" , WP: 2000psi Make: SHAFFER, Size: 13-5/8" , WP: 5000psi
	Pipe Ram	Make: SHAFFER, Size: 13-5/8" , WP: 5000psi
	Shear Ram	Make: SHAFFER, Size: 13-5/8" , WP: 5000psi
Cooling Tower	Home make	
Engines	Make: CATERPILLAR, Model: D398(910HP), 3ea	
Generators	Make: BROWN BOVERI, Model: 718, 800kw, 600volts, 3ea	
Tanks	Home make, Mud Tank 1100bbls,2ea, Water Tank 600bbls,3ea	

Table 2-3-4 Drilling Equipment for Well AMJ-2

坑井 AMJ-2 の掘削設備

Item	Description	
Mast	Make: IDECO, Model: HFM138-550, Height: 138ft	
Substructure	Make: IDECO, Type: Box on Box, Capacity: 550,000lbs	
Crown Blocks	Make: IDECO, 6Sheaves, Capacity: 350ton	
Hook Blocks	Make: National IDEAL, Model: 540G250, Capacity: 497,200lbs	
Drawworks	Make: Wilson, Model: Super Mogul 42, Rating: 800HP	
Drawworks Engines	Make: Detroit Diesel, Model: 12V71, Rating: 550HP, 2ea	
Rotary Table	Make: National IDEAL, Model: C-275, Size: 27-1/2"	
Swivel	Make: IDECO, Capacity: 200ton	
Kelly	Type: Hexagonal 5-1/4"	
Hydromatic Break	Make: PARMAC, Model: D631228	
Tongs	Make: BJ, Size: 4-1/2" ~ 13-3/8"	
Mixing Pump	Make: Mission Magnum, Model: 6-8R	
Mud Pumps	No,1 Pump	Make: IDECO, Model: MM600, Drive: 16V71
	No,2 Pump	Make: IDECO, Model: MM600, Drive: 16V71
Shaker	Home make, Type: Tandem	
De-sander	Make: SWACO	
De-silter	Make: SWACO	
Blowout Preventers	Annular	Make: HYDRILL, Size: 13-5/8" , WP: 5000psi
	Pipe Ram	Make: SHAFFER, Size: 13-5/8" , WP: 3000psi
	Shear Ram	Make: SHAFFER, Size: 13-5/8" , WP: 3000psi
Cooling Tower	Home make, with fan and 7.5HPmotor	
Tanks	Home make, Mud Tank : 40kl, 3ea, Water Tank : 18kl, 2ea	

Table. 2-3-5 Drift-angle Survey Data of Well AMJ-1

坑井 AMJ-1 の傾斜測定記録

Date	Measured depth	Drift-angle	Remarks
Jan. 4, 2000	39 m	0° 45'	17-1/2" hole
Jan. 5, 2000	102 m	0° 50'	17-1/2" hole
Jan. 6, 2000	152 m	0° 45'	17-1/2" hole
Jan. 8, 2000	247 m	0° 15'	17-1/2" hole
Jan.13, 2000	355 m	1° 00'	12-1/4" hole
Jan.13, 2000	456 m	0° 45'	12-1/4" hole
Jan.14, 2000	552 m	0° 50'	12-1/4" hole
Jan.15, 2000	650 m	1° 00'	12-1/4" hole
Jan.17, 2000	753 m	0° 45'	12-1/4" hole
Jan.24, 2000	869 m	1° 00'	8-1/2" hole
Jan.26, 2000	964 m	1° 00'	8-1/2" hole
Jan.28, 2000	1068 m	1° 00'	8-1/2" hole
Jan.29, 2000	1163 m	0° 50'	8-1/2" hole
Jan.30, 2000	1257 m	0° 45'	8-1/2" hole
Feb. 1, 2000	1352 m	0° 45'	8-1/2" hole
Feb. 5, 2000	1512 m	0° 30'	8-1/2" hole
Feb. 5, 2000	1652 m	0° 10'	8-1/2" hole