6.2.2 開発調査の経緯

（1）調査内容

INDEは、1977年より現在まで、Amatitlan 地域において地熱資源を対象に地球科学的調査を断続的に実施している。その主な調査内容は、以下のとおりである。

- 地質調査（地質図作成、地質構造図の作成）
- 地化学調査（ラドン調査、温泉水・噴気ガス分析）
- 物理探査（重力、磁気、比抵抗探査）
- 小口径試錐調査（深度 130～900m；9 本）
- 大口径試験井掘削（深度 1,500～2,000m；4 本）

（2）経緯

1971 年に Albert Egger が博士論文として、1／50,000 地形図「Amatitlan」の約 500km^2 の範囲の地質図及び岩石学研究を発表した。この範囲には、南部には Amatitlan 湖、北部には Pacaya 火山が位置する（第 6.2.2 図(1)）。また、Amatitlan 湖の周辺地域で 1／25,000 の地質図が作成された。1973 年に JICA の援助により、Amatitlan 湖の南側の湖畔の温泉水（5 試料）が分析された。その結果、地化学温度は 200℃を示した。1977 年には INDE により、Amatitlan 湖の北西側で、地球科学的調査（地質・地化学調査、電気探査）が実施された（第 6.2.2 図(2)）。この時期には Amatitlan 湖の北西側デイサイト・ドーム周辺が有望と考えていた。1979 年には Zunil-Ⅰ地域の調査続行のため、一時的に中断されている。

1981 年にはフランスの BREM により、本地域の 16 試料の温泉水が分析された。1984 年には Wunderman & Rose により、Pacaya 火山の火山層序の研究が行われている。1985 年に、はじめて Giggenbach により、温泉水・噴気ガスの同位体分析が行われた。そして、1987 年から INDE により、予備可能性調査が開始された（第 6.2.2 図(3)）。地化学調査（ラドン調査、温泉水分析）、物理探査（重力・磁気・電気探査）が実施され，小口径試錐調査も行われている。1991 年には INDE により、Amatitlan 湖と Pacaya 火山を包含する範囲で、地質調査、地化学調査（温泉水・噴気ガス分析）、物理探査（電磁探査；MT 法）が実施された（第 6.2.2 図(4)）。その後、OLADE をとおして、IDB と OPEC の資金により、1992～1993 年には INDE により 4 本の大口径試験井掘削が行われ、1995 年には予備可能性調査が完了した。

INDE は本地域の予備可能性調査と Zunil-Ⅱの結果を比較し、可能性調査を行うべき地域として、Amatitlan 地域を選定した。

6.3 既存調査の評価

6.3.1 地質調査

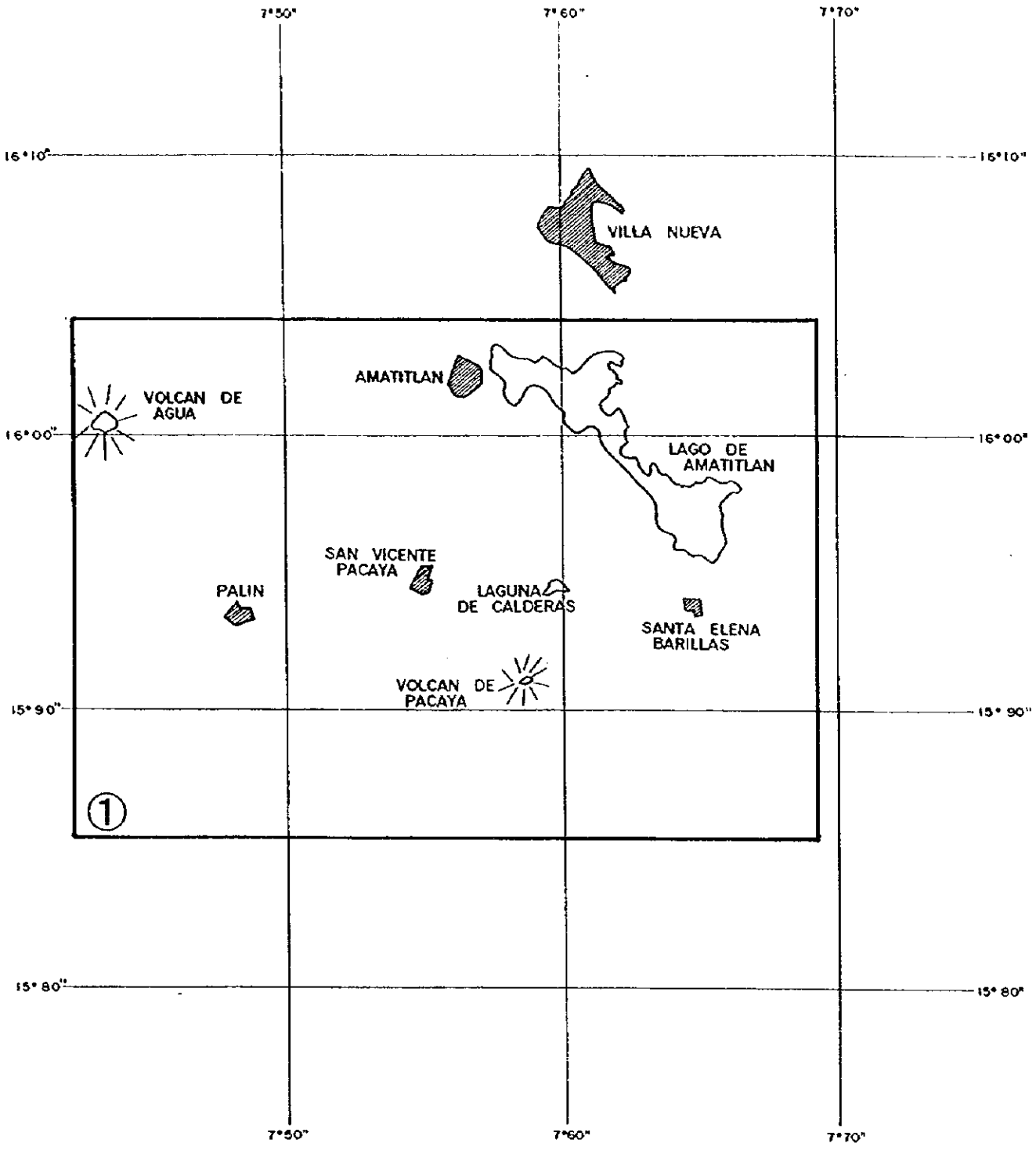
（1）既存調査概要

本地域の地質調査研究は、1971 年の Albert Egger に始まり、現在までに INDE により、断続的に行われている。また、Wunderman(1984)の研究も挙げられる。そして、INDE による小口径試錐と大口径試験井掘削により、地下の地質構造が解明された。

（2）入手既存データ

今回の調査で、以下の地質調査に関する既存データを入手した。

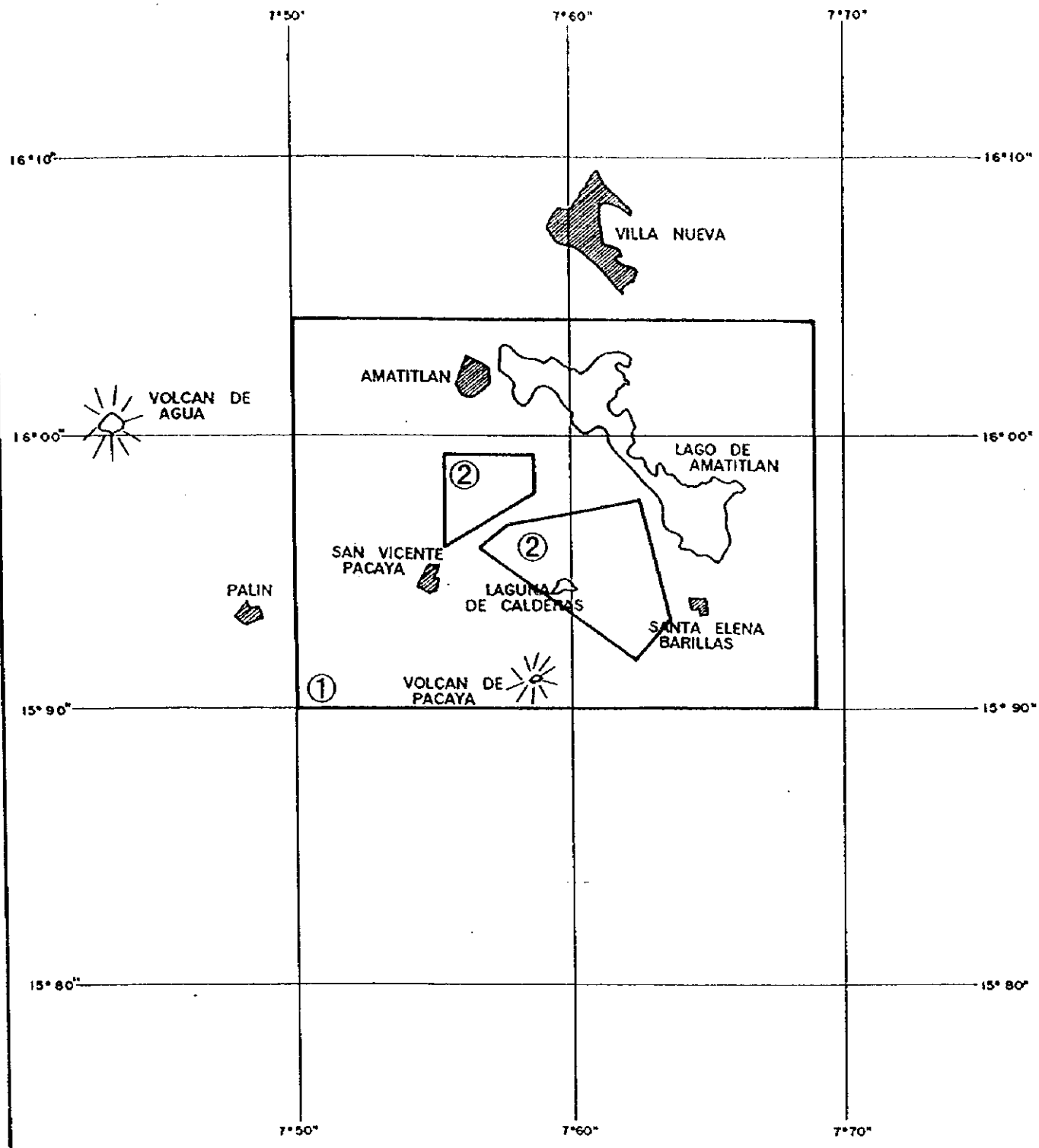
- 予備可能性調査報告書(1995)
- 大口径試験井掘削報告書(1995)



①：Albert Eggenの地質調査範囲

0 10km

第6.2.2 図(1) Amatitlan 地域の開発調査経緯図（1971年）

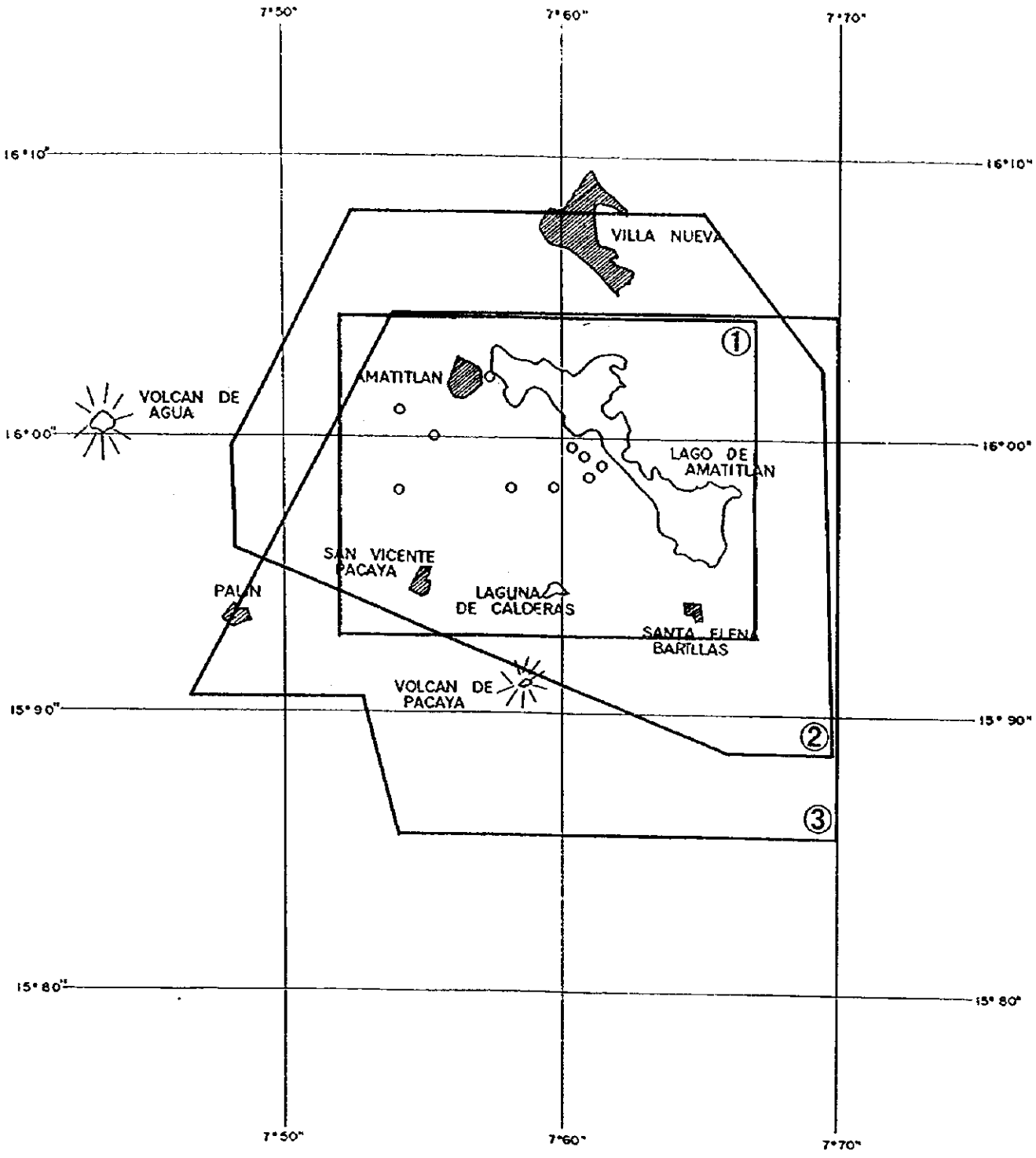


①：INDE調査範囲

②：INDE精査範囲

0 10km

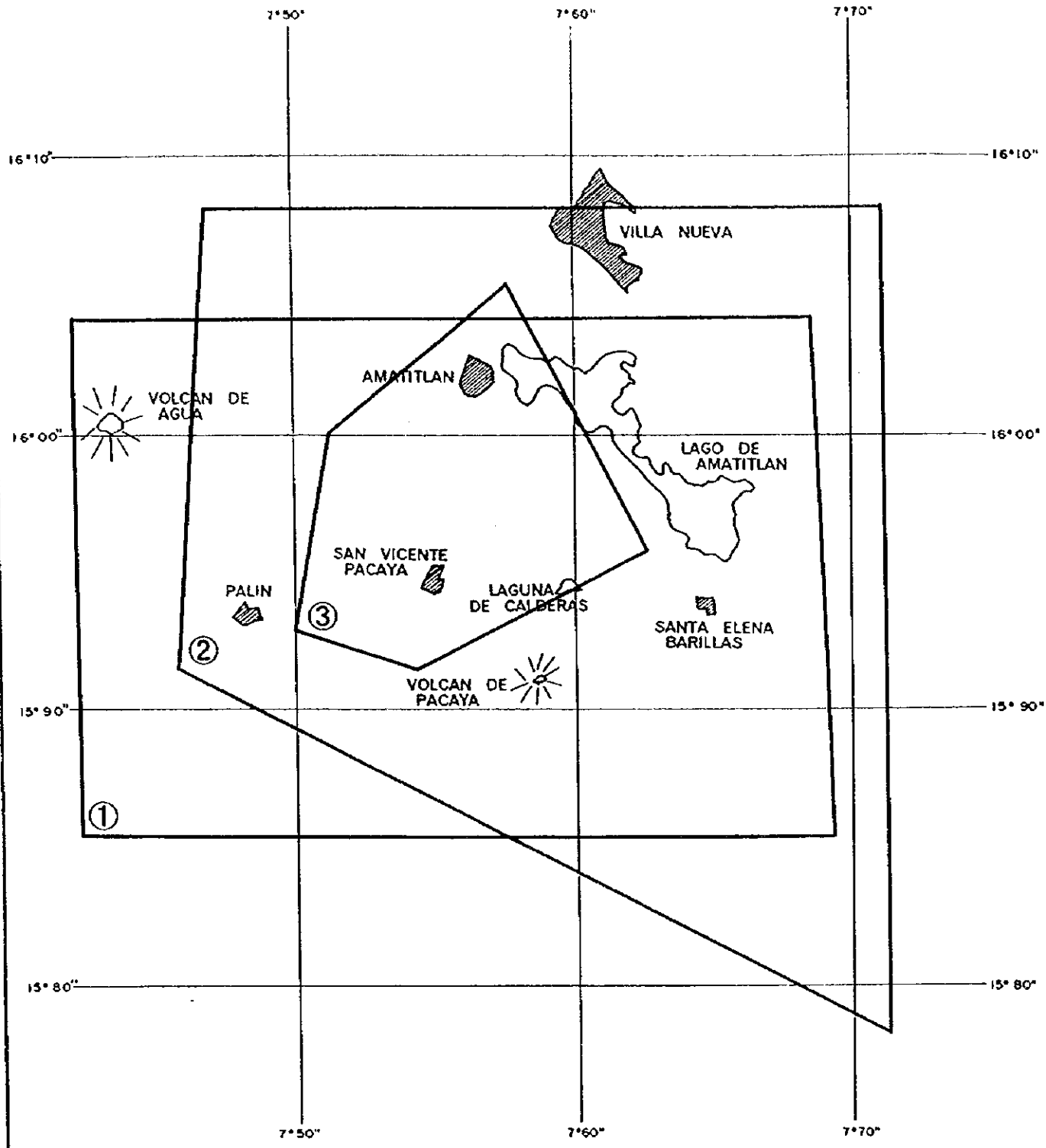
第6.2.2 図(2) Amatitlan 地域の開発調査経緯図 (1977年)



①：INDE調査範囲
②：INDE精査範囲
③：INDE電気探査範囲
○：小口径試錐

0 10km

第6.2.2 図(3) Amatitlan 地域の開発調査経緯図（1987年）



①：INDE地質調査範囲
②：INDE地化学調査範囲
③：INDEMT法探査探査範囲

0 10km

第6.2.2 図(4) Amatitlan 地域の開発調査経緯図（1991年）

（3）既存調査結果

Amatitlan地域はN-S方向の並走する2本の断層で規制されるGuatemara市地溝帯内の南端に位置する（第6.3.1図）。本地域は火山地域で、広く第四紀の火山岩類及び火山性堆積物が分布するため、坑井調査（小口径試錐及び大口径試験井掘削）により地下深部に分布する新第三紀中新世の地層の層序が構築されている。本地域の地質層序は下位から基盤岩類、先カルデラ火山岩類、カルデラ火山岩類、後カルデラ火山岩類、Pacaya 火山岩類及び沖積層に分類できる（第6.3.2図）。

本地域の地質図を第 6.3.3 図に、地質断面図を第 6.3.4 図に示す。本地域の基盤岩類はダイアベースとそれに貫入する花崗岩類で、範囲外のAmatitlan東岸に露出するが、範囲内では大口径試験井AMF－1・4で地下深部で捕捉された。花崗岩類の貫入年代は年代測定（フィッション・トラック法）により、新第三紀中新世と推定されている。

先カルデラ火山岩類は新第三紀中新世～鮮新世の主に安山岩質溶岩・火砕岩類で、基盤岩類を不整合に覆い地下深部に分布する。カルデラ火山岩類は第四紀更新世の主に安山岩質溶岩・火砕岩類で、地下浅部に分布する。後カルデラ火山岩類は広く地表に分布し、安山岩質・安山岩質～流紋岩質溶岩からなる。安山岩質～流紋岩質溶岩はAmatitlan湖の西側にデイサイト・ドームを形成している。Pacaya 火山岩類は主に玄武岩溶岩からなり、Pacaya 火山は現在も噴火活動を継続している活火山である。沖積層はAmatitlan湖畔に分布し、砂・礫からなる。

小口径試錐孔及び大口径試験井の位置も表現した本地域の地質構造図を第6.3.5図に示す。本地域はN-S方向に伸びるグァテマラ市地溝帯内に位置し、N-S 系の断層が卓越する。また、本地域南部には Amatitlan カルデラ構造を規制する断層が多数推定されている。

6.3.2 地化学調査

（1）既存調査概要

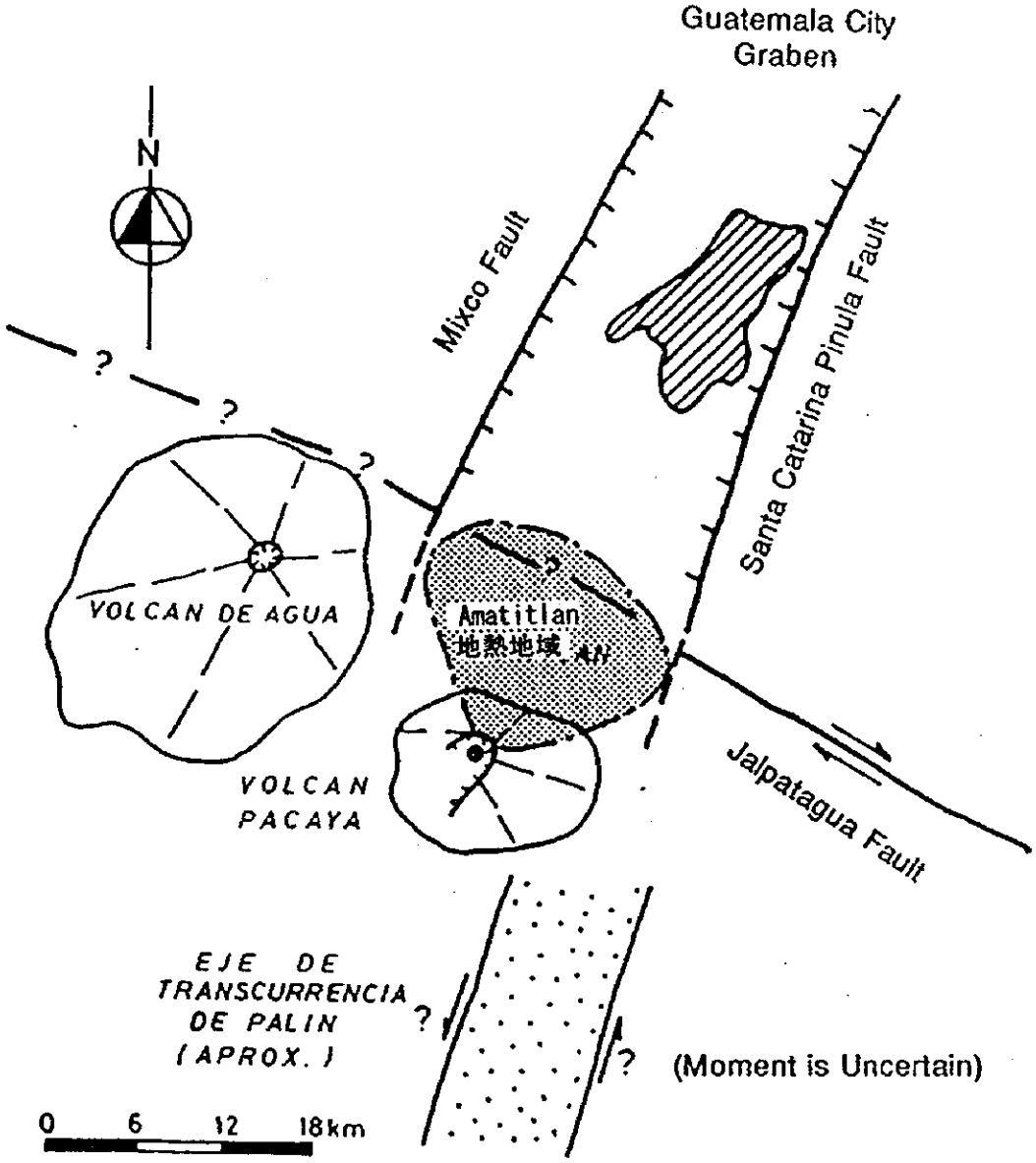
1973年にJICAの援助により、Amatitlan湖畔の温泉水（5試料）が化学分析された。その後、1973年にINDEにより、20試料の温泉水が化学分析された。1984 年には BREM により、16 試料の温泉水が化学分析された。1985 年に、はじめてGiggenbachにより、温泉水・噴気ガスの化学分析（16試料）と同位体分析（13試料）が行われた。

そして、1987 年に INDE により、化学分析（71 試料）とラドン調査が行われた。1989年には、温泉水・噴気ガスの化学分析（62試料）と同位体分析（31試料）が行われた。1993年には地表水の同位体分析が行われ、1995年には流体流動モデルが作成されている。

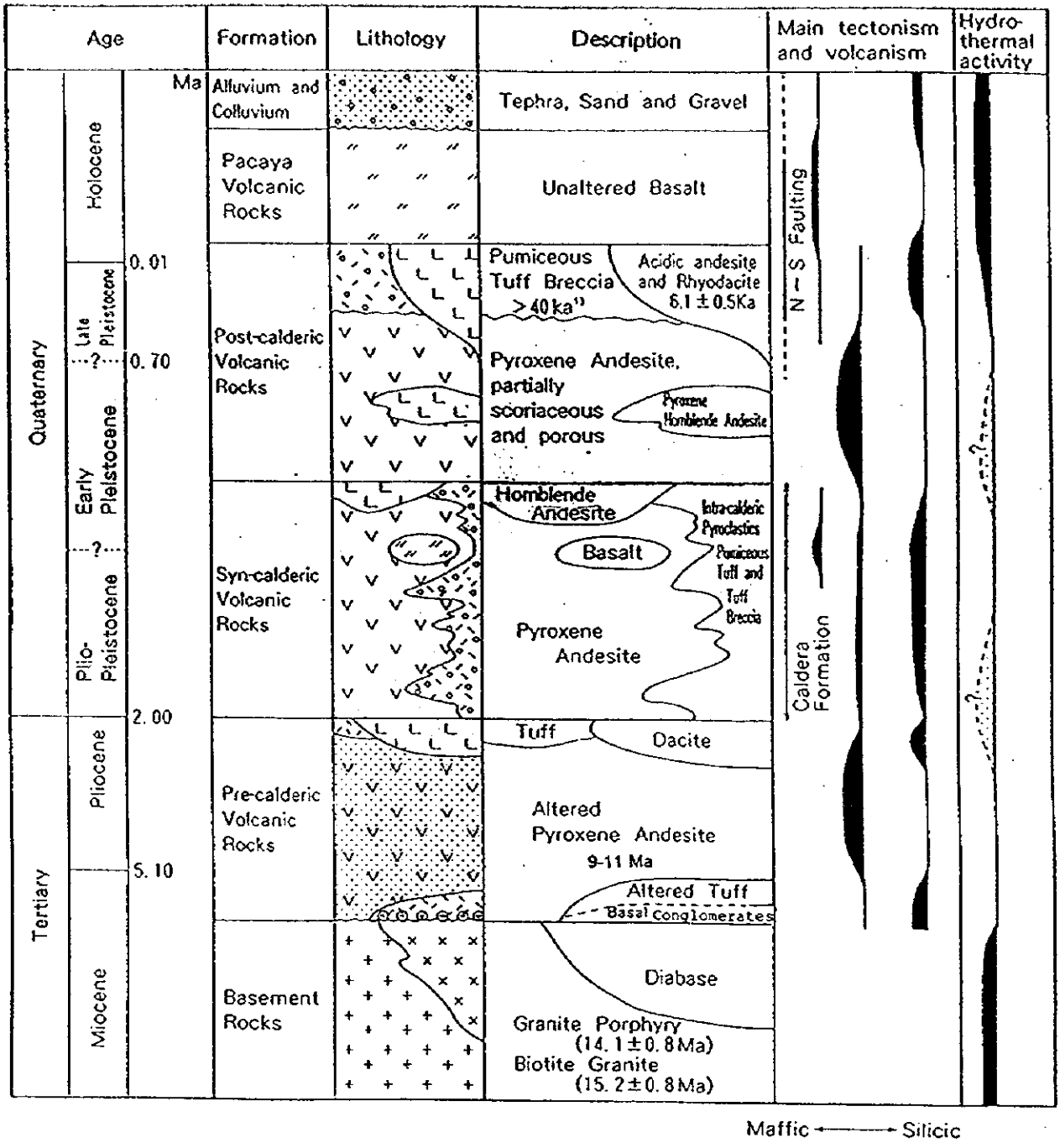
（2）入手既存データ

今回の調査で、以下の地質調査に関する既存データを入手した。

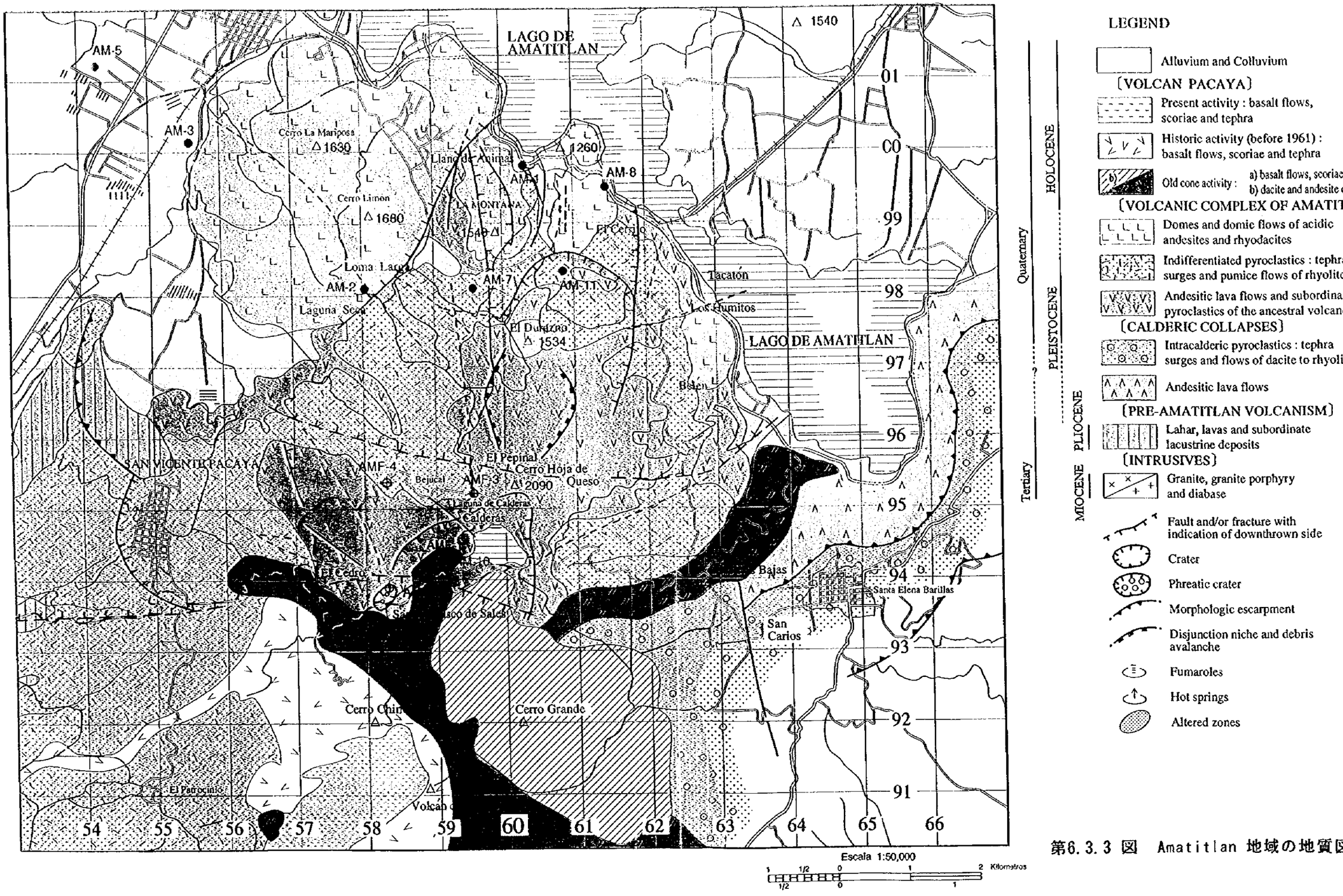
- 予備可能性調査報告書(1995)
- 大口径試験井掘削報告書(1995)
- 温泉水・噴気ガスの化学分析・同位体分析表（INDE所有）



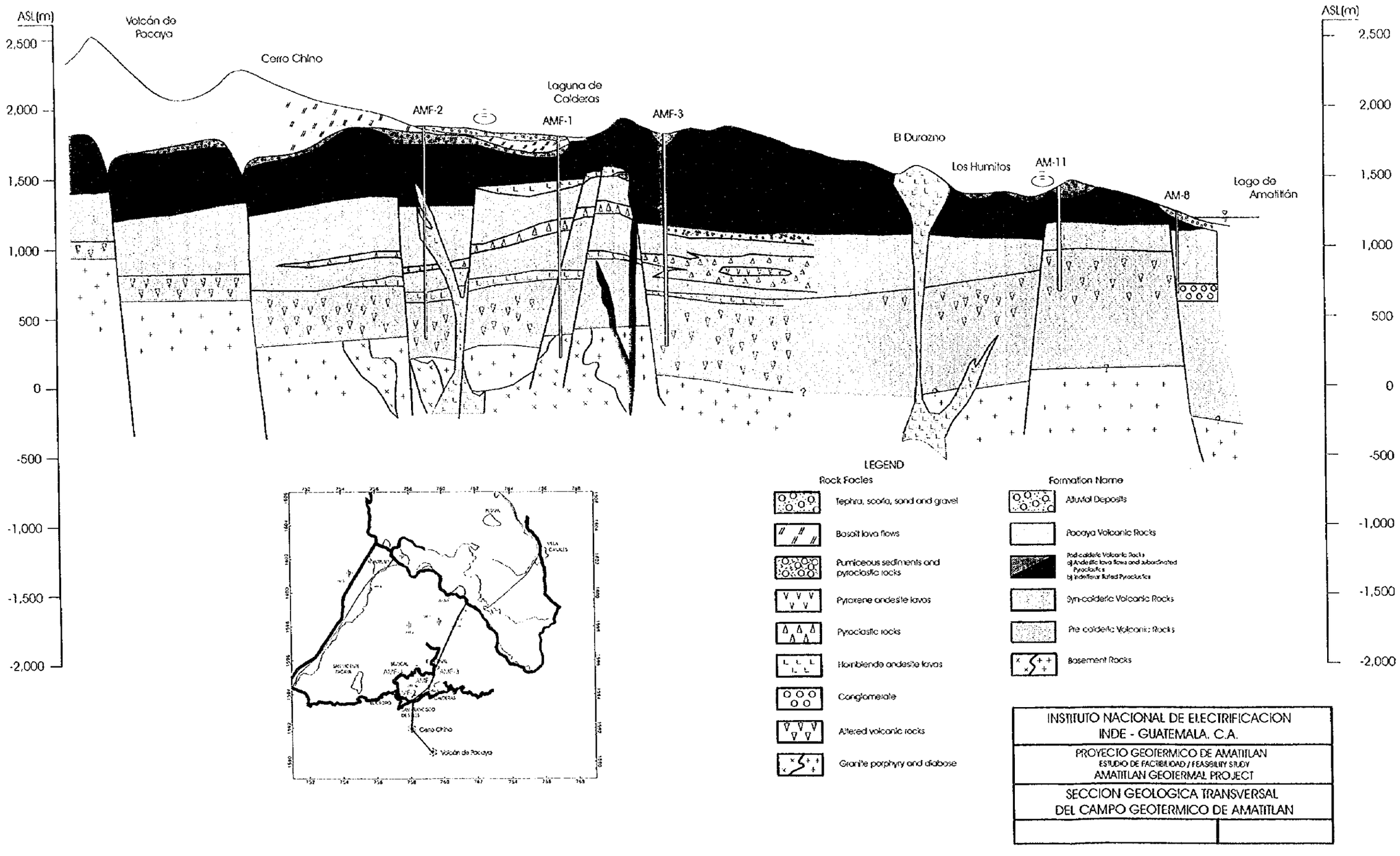
第6.3.1 図　Amatitlan 地域の地質構造上の位置



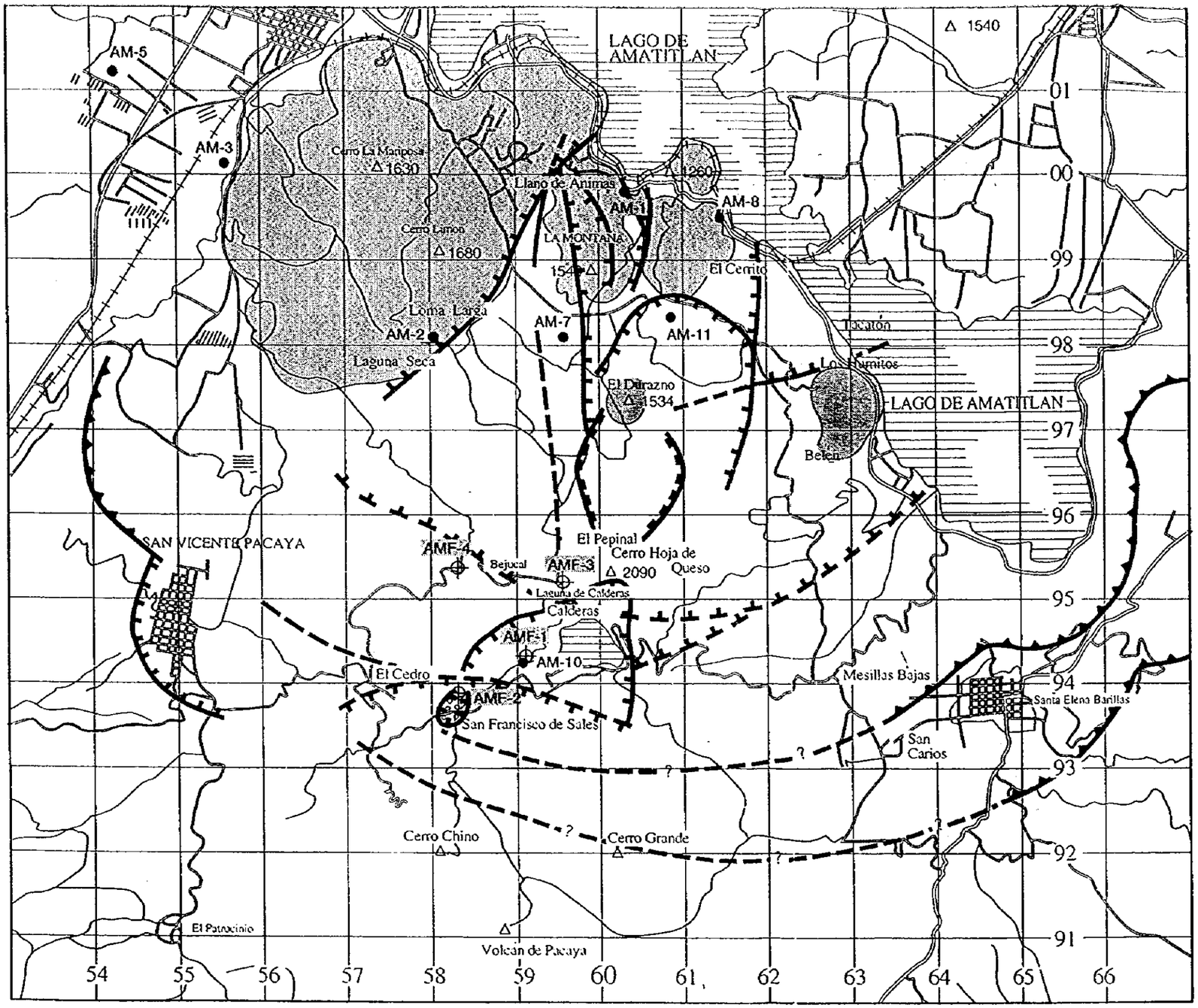
第6.3.2 図　Amatitlan 地域の地質層序

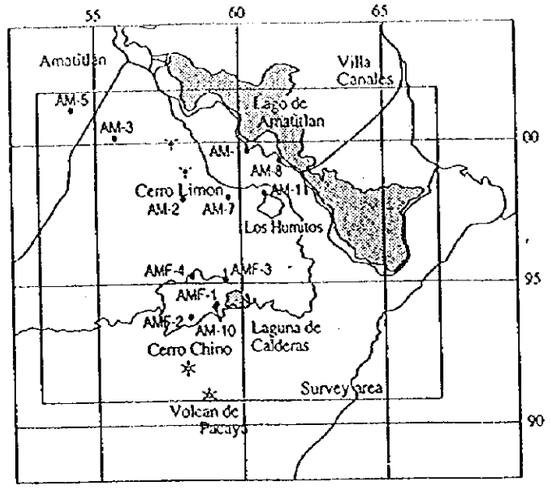


第6.3.3 図　Amatitlan 地域の地質図



第6.3.4 図　Amatitlan 地域の地質断面図





LEGEND

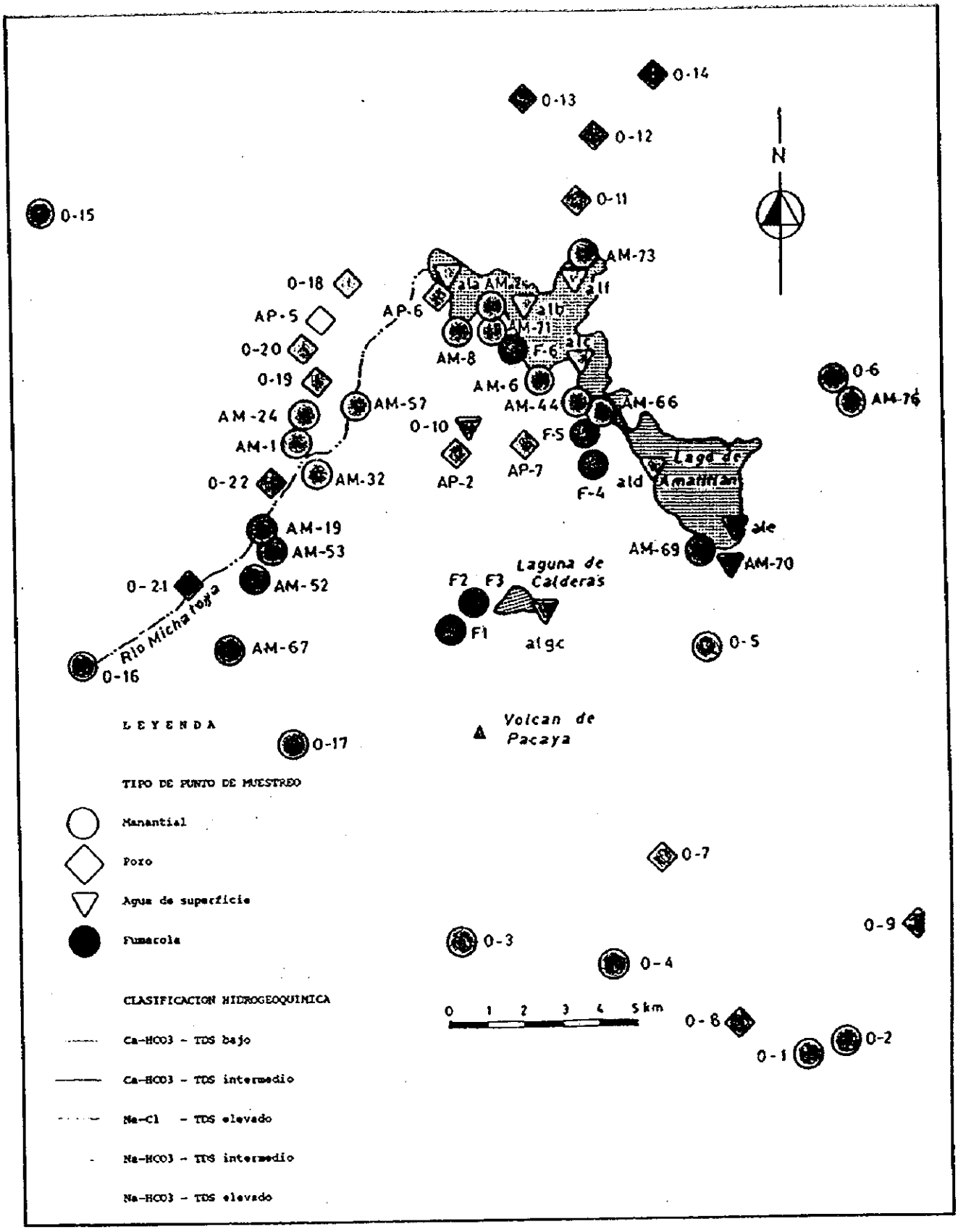
- Dacite domes and flows inside the Amatitlan Caldera
- Fault and/or fracture with indication of downthrown side
- Crater
- Phreatic crater
- Morphologic escarpment
- Disjunction niche and debris avalanche
- Fumaroles
- Hot springs
- Altered zones
- Slim holes
- Exploratory wells

INSTITUTO NACIONAL DE ELECTRIFICACION
INDE-GUATEMALA, C.A.
PROYECTO GEOTERMICO DE AMATITLAN
ESTUDIO DE FACTIBILIDAD/FEASIBILITY STUDY
AMATITLAN GEOTHERMAL PROJECT

R/F

TECTONIC MAP OF THE AMATITLAN GEOTHERMAL FIELD

第6.3.5 図　Amatitlan 地域の地質構造図



第6.3.6 図　Amatitlan 地域の温泉・噴気分布図

第6.3.1 表(1) Amatitlan 地域の温泉水・噴気ガス分析表
(温泉水化学分析)

Análisis hidrogeoquímicos efectuados por el INDE.

	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Li mg/l	Alc. meq/l	SO4 mg/l	Cl mg/l	F mg/l	Br mg/l	SiO2 mg/l	B mg/l	NH4 mg/l	NO3 mg/l
am1	19.0	8.00	230	45.8	0.25	9.00	61.4	176	nd	nd	222	2.13	0.321	nd
am6	17.5	1.50	450	39.8	1.38	2.14	9.39	1004	nd	nd	256	6.70	0.662	nd
am8	19.0	0.50	375	40.3	2.75	1.81	28.5	1317	nd	nd	300	9.14	0.579	nd
am24	11.5	2.50	190	10.2	0.38	4.98	21.8	113	nd	nd	221	2.41	0.0252	nd
am32	25.5	12.5	350	69.5	0.38	12.7	19.1	289	nd	nd	244	3.62	0.0296	nd
am44	26.0	2.50	675	55.1	4.50	2.98	10.7	1087	nd	nd	257	10.5	0.309	nd
am52	62.0	29.0	30.0	5.10	0.13	7.52	nd	14.7	nd	nd	107	0.43	0.0144	nd
am53	37.0	22.0	67.5	15.9	0.13	6.91	15.7	97.9	nd	nd	133	1.52	0.0169	nd
am57	13.5	2.50	210	4.26	0.38	4.11	8.14	235	nd	nd	162	2.42	0.0392	nd
am66	42.0	15.0	220	32.1	0	5.58	37.2	271	nd	nd	241	3.54	0.0151	nd
am67	22.0	4.50	17.5	28.8	0.88	2.00	nd	14.0	nd	nd	76.6	0.11	0.0119	nd
am69	26.3	0.12	210	17.5	0.87	3.13	12.3	294	nd	nd	140	4.78	0.72	nd
am71	32.5	0.75	725	34.3	2.00	1.81	25.5	1170	nd	nd	89.5	0.16	0.437	nd
am73	28.8	0.37	45.0	7.95	0.125	3.74	nd	42.1	nd	nd	80.9	10.7	0.0203	nd
am76	11.3	13.3	7.50	2.08	0.25	1.51	nd	4.8	nd	nd	48.9	4.23	0.0137	nd
a1a	23.8	7.75	105	22.1	0.125	3.15	15.2	153	nd	nd	25.4	1.26	nd	nd
a1b	24.0	8.12	110	14.9	0.25	3.11	10.9	157	nd	nd	23.6	1.72	nd	nd
a1c	22.0	7.62	105	14.9	0.125	3.28	43.2	153	nd	nd	25.0	1.72	nd	nd
a1d	20.0	11.3	80.0	51.0	0.125	3.24	11.8	108	nd	nd	33.2	1.06	nd	nd
a1e	20.0	11.0	80.0	7.65	0.125	3.18	11.2	104	nd	nd	29.6	1.45	nd	nd
a1f	22.5	8.00	105	14.9	0.125	3.12	3.41	153	nd	nd	22.6	1.56	nd	nd
ap21	21.4	7.32	550	40.1	0.50	7.25	67.8	634	nd	nd	330	8.94	0.0504	nd
ap22	21.4	5.18	530	40.1	2.50	7.74	62.4	627	nd	nd	276	9.02	0.099	nd
ap23	19.6	9.46	540	46.0	0.50	7.84	63.1	648	nd	nd	278	7.52	0.0612	nd
ap51	28.6	0.53	625	78.8	nd	25.1	55.7	355	nd	nd	243	7.65	0.0166	nd
ap52	28.6	5.00	575	92.7	0.50	25.3	53.3	348	nd	nd	266	7.70	0.0229	nd
ap53	5.36	7.32	575	89.7	0.50	24.2	18.1	365	nd	nd	172	7.50	0.0229	nd
ap6	25.0	5.21	430	34.3	nd	3.42	43.5	634	nd	nd	192	5.56	0.027	nd
ap71	36.6	2.85	800	65.4	2.00	1.25	137	1213	nd	nd	29.2	7.39	0.139	nd
ap72	37.5	3.93	800	75.4	nd	1.19	140	1236	nd	nd	26.3	7.10	0.149	nd
ap73	34.8	3.57	780	57.8	nd	1.03	135	1220	nd	nd	25.4	7.31	0.248	nd
o1	35.0	30.0	85.0	1.23	0.25	4.74	99.5	71.0	nd	nd	140	1.26	0.0183	nd
o2	30.0	20.0	80.0	11.6	nd	3.79	49.4	46.7	nd	nd	121	0.90	0.016	nd
o3	18.8	4.75	7.50	0.09	nd	1.64	nd	10.5	nd	nd	96.2	0.34	0.0139	nd
o4	15.0	4.62	12.5	nd	nd	1.85	nd	7.66	nd	nd	106	0.71	0.0143	nd
o5	11.3	3.25	nd	1.53	nd	1.16	nd	34.8	nd	nd	83.4	0.28	0.0158	nd
o6	15.0	5.00	nd	1.53	nd	1.52	nd	6.27	nd	nd	101	0.61	0.0171	nd
o7	75.1	39.5	150	34.9	0.125	7.36	250	125	nd	nd	149	1.17	0.0136	nd
o8	11.3	4.25	5.00	1.53	nd	1.48	5.45	10.4	nd	nd	106	0.48	0.0125	nd
o9	16.3	6.75	8.75	2.21	nd	2.02	nd	6.27	nd	nd	85.9	0.77	nd	nd
o10	27.5	10.8	15.0	10.2	nd	3.05	nd	9.75	nd	nd	100	0.37	0.0205	nd
o11	30.0	7.12	37.5	2.97	nd	3.47	nd	43.9	nd	nd	124	0.88	0.0177	nd
o12	18.8	6.50	20.0	nd	nd	2.50	nd	6.96	nd	nd	83.0	0.84	0.0181	nd
o13	30.0	8.50	25.0	nd	nd	3.16	nd	10.5	nd	nd	83.8	nd	0.019	nd
o14	13.8	6.62	18.7	1.48	nd	2.40	nd	6.96	nd	nd	100	0.98	0.0189	nd
o15	11.3	5.37	7.50	3.65	nd	1.39	nd	6.96	nd	nd	69.8	0.71	0.0169	nd
o16	16.3	8.25	12.5	5.09	nd	1.88	nd	17.4	nd	nd	83.0	0.20	0.0147	nd
o17	12.5	5.50	11.3	2.93	nd	1.63	nd	9.75	nd	nd	83.8	nd	0.0143	nd
o18	31.3	7.75	75.0	1.23	0.25	3.75	95.9	26.5	nd	nd	147	1.26	0.0211	nd
o19	26.3	5.00	100	5.21	0.125	4.09	81.4	90.5	nd	nd	115	1.08	0.768	nd
o20	11.3	1.25	220	nd	0.50	2.69	152	192	nd	nd	134	3.22	0.0946	nd
o21	35.0	40.0	45.0	21.7	nd	6.58	15.4	27.9	nd	nd	103	nd	0.0798	nd
o22	25.0	15.0	145	49.3	0.25	7.74	62.6	139	nd	nd	159	1.83	0.102	nd

第6.3.1 表(2) Amatitlan 地域の温泉水・噴気ガス分析表
(温泉水化学分析)

Análisis hidrogeoquímicos efectuados en Italia.

	Ca mg/l	Mg mg/l	Na+ mg/l	K mg/l	Li mg/l	Alc. meq/l	SO4 mg/l	Cl mg/l	F mg/l	Br mg/l	SiO2 mg/l	B mg/l	NH4 mg/l	NO3 mg/l
am6	33.2	2.32	657	42.5	2.33	2.14	36.2	995	0.75	4.4	244	7.26	0.662	<
am44	50.7	5.80	668	82.9	2.76	2.98	31.9	1114	0.65	4.87	252	8.5	0.309	1.18
am66	38.7	18.1	229	42.5	0.64	5.58	59.5	254	0.28	1.24	254	2.66	0.015	0.70
am71	36.6	0.31	762	51.3	2.45	1.81	85.4	1150	1.04	5.24	236	8.65	0.437	0.32
am73	36.9	9.54	46.9	6.9	0.07	3.74	8.29	32.8	0.33	<	125	0.16	0.0203	0.96
ap21	19.8	5.14	552	46.2	0.69	7.25	57.2	647	0.70	2.48	260.5	5.2	0.0504	<
ap22	19.8	7.89	549	45.3	0.69	7.74	54	653	0.68	2.48	273	8.4	0.099	<
ap23	19.6	7.79	545	45.1	0.70	7.84	53.7	654	0.68	2.54	311	8.6	0.0612	<
ap51	26.3	3.58	767	42.3	1.35	25.1	38.5	351	1.50	1.31	203	8.5	0.0166	<
ap52	27.5	3.57	776	43	1.38	25.3	39.7	358	1.51	1.32	216	8.75	0.0229	<
ap53	4.36	0.53	779	38.95	1.26	24.2	1.47	370	1.58	1.36	151	9.22	0.0229	<
ap71	34.4	2.36	848	54.7	2.53	1.25	124.3	1283	1.36	5.64	16.9	9.24	0.139	<
ap72	37.2	2.41	849	55.95	2.57	1.19	125	1300	1.41	5.76	12.3	9.1	0.149	<
ap73	33.4	2.94	851	56.04	2.53	1.03	123.5	1279	1.35	5.64	8.78	9.62	0.248	<
ala	29.9	10.9	114	14.6	0.18	3.15	7.98	150	0.31	0.62	21.5	0.92	nd	0.90
ale	24.3	14.8	84.96	13.7	0.17	3.18	8.74	96.6	0.27	0.37	33.2	1.08	nd	0.79
alf	30.1	11.	113.5	14.4	0.18	3.12	8.04	149	0.3	0.62	22	1.24	nd	0.94
o1	36.4	34.9	87.2	17.3	0.12	4.74	109.5	62.6	0.26	0.24	118	0.4	0.0175	4.73
o7	83.7	90.6	180	28.7	0.22	7.36	424	121	0.32	0.37	146	0.86	0.0136	0.99
o22	33.7	17.1	207	32.9	0.36	7.74	55	138	0.63	0.56	149	2.0	0.102	0.78

第6.3.1 表(3) Amatitlan 地域の温泉水・噴気ガス分析表
(温泉水同位体分析)

Análisis Isotópicos.

muestra	oxigeno-18	deuterio
AM-1	-8.55	-65.8
AM-6	-7.03	-56.3
AM-44	-6.88	-55.1
AM-52	-9.68	-68.9
AM-66	-7.81	-58.3
AM-71	-6.51	-54.0
AM-73	-7.70	-57.8
AM-76	-7.80	-54.7
O-1	-8.75	-61.5
O-3	-8.74	-61.4
O-4	-8.50	-59.9
O-5	-7.99	-54.9
O-7	-9.12	-64.8
O-10	-7.82	-59.4
O-13	-8.85	-65.2
O-14	-8.40	-61.8
O-15	-10.21	-72.5
O-16	-9.48	-67.3
O-17	-9.22	-63.9
O-20	-8.00	-65.3
O-22	-8.85	-66.3
ALA	-4.96	-42.0
ALC	-4.83	-42.7
ALE	-2.70	-28.0
ALF	-4.93	-43.0
AP-2-1	-5.91	-57.4
AP-2-2	-5.98	-57.1
AP-2-3	-5.95	-56.4
AP-5-1	-5.48	-62.5
AP-5-2	-5.54	-63.0
AP-5-3	-5.49	-61.7
AP-7-1	-6.78	-56.0
AP-7-2	-6.70	-55.8
AP-7-3	-6.74	-56.0
F-1	-14.89	-104.0
F-2	-8.06	-54.4
F-3	-7.70	-53.1
F-4	-14.78	-97.5
F-5	-13.67	-93.5
F-6	-11.91	-84.1

第6.3.1 表(4) Amatitlan 地域の温泉水・噴気ガス分析表（噴気ガス）

Análisis de las muestras recolectadas en botellas con NaOH.

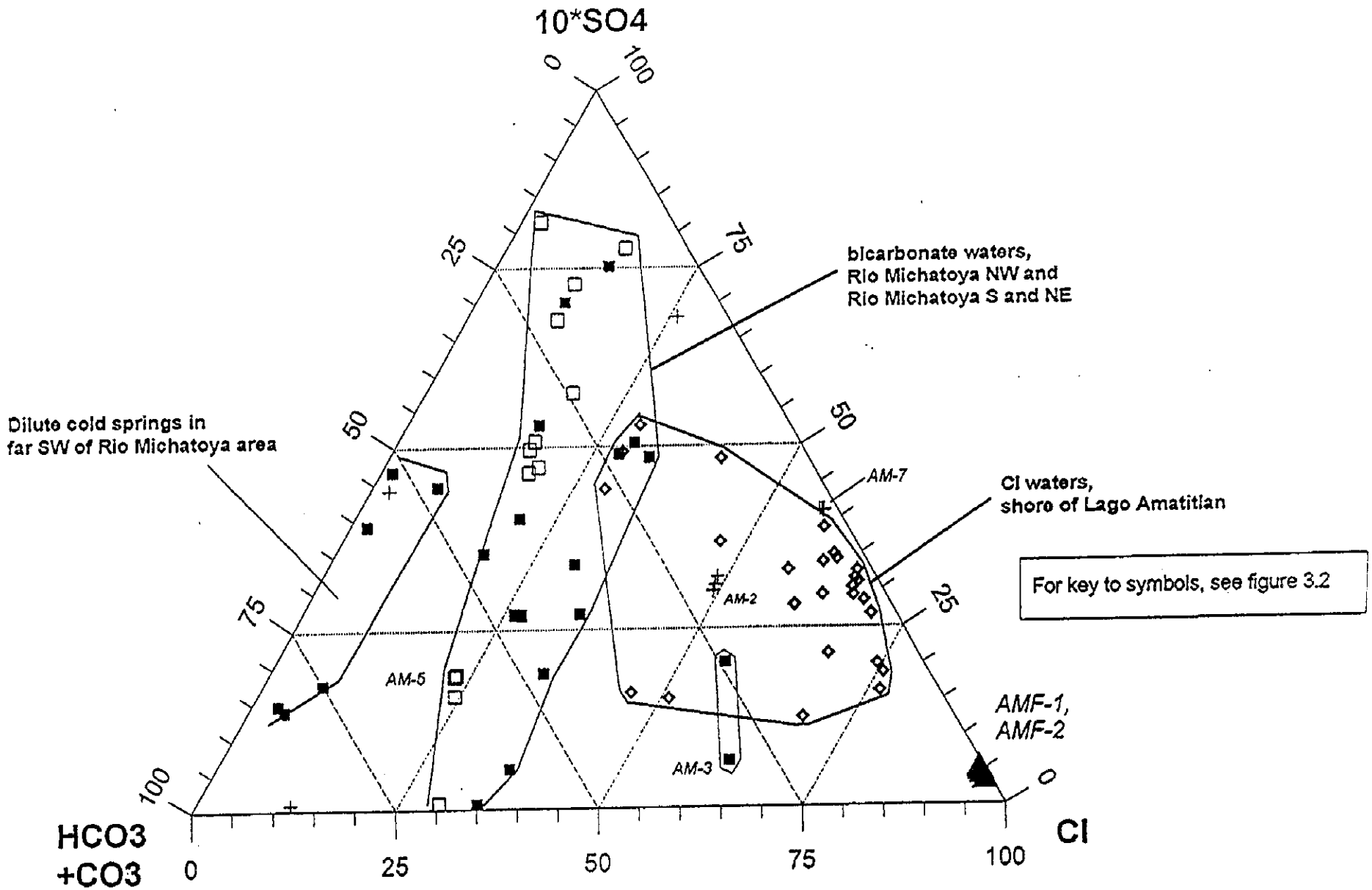
	H2O Vt	CO2 Vt	H2S Vt	H2 Vt	CH4 Vt	He Vt	N2 Vt	O2 Vt	NH3 Vt
F-2	95.79	4.16	0.00696	0.00165	0.001373	0.000024	0.0337	0.0103	0.00086
F-3	95.67	4.275	0.00742	0.00272	0.001394	0.000022	0.0423	0.00218	0.00081
F-5	99.922	0.07472	0.0000395	0.00000556	0.000207	<0.00001	0.00256	0.000702	0.00051
(*) ALC	94.49	5.433	0.011	0.00143	0.00193	0.000037	0.0606	0.00551	0.000771
(*) ALA	99.91	0.0865	0.000405	0.0000045	0.000308	0.0000005	0.00225	0.000108	0.000465

(*)datos de Giggenbach (1986b)

第6.3.1 表(5) Amatitlan 地域の温泉水・噴気ガス分析表（噴気ガス）

Análisis de las muestras de gases incondensables.

	CO2 Vt	H2S Vt	H2 Vt	CH4 Vt	CO Vt	N2 Vt	O2 Vt
F-1	69.3	<0.05	0.0007	0.017	0.000087	25.8	4.7
F-2	71.5	<0.05	0.020	0.032	0.000089	21.6	6.6
F-3	98.4	0.09	0.060	0.038	0.000033	0.97	0.05
F-4	2.82	0.04	0.0002	0.00185	0.000065	75.8	21.2
F-5	0.78	<0.05	0.00025	0.0010	0.000057	77.4	21.7
F-6	32.4	<0.05	0.0025	0.148	0.000415	52.8	14.5



第6.3.7 図　温泉水の陰イオンの三角図

（3）既存調査結果

Amatitlan 地域には多数の温泉・噴気が分布する（第 6.3.6 図）。温泉は約 40 あり、それらの泉温は 50～97℃である。温泉は主に Amatitlan 湖畔、Rio Michatoya川流域に分布し、噴気活動はPacaya火山の南麓に認められる。温泉水、地表水、噴気ガスの化学分析・同位体分析値を第6.3.1表(1)～(5)に示す。解析は小口径試錐孔（AM－2・3・5・7）の熱水、及びPacaya火山の北麓で掘削された大口径試験井（AMF－1・2）の化学分析・同位体分析値も含めて行っている。

温泉水の $SO_4-HCO_3+CO_3-Cl$ の陰イオンの三角図（第 6.3.7 図）では、4 区分される。希釈された低温水にはRio Michatoya川の南西流域の温泉水が、炭酸質水はRio Michatoya 川の北西・南・北東流域の温泉水及び AM－5 の熱水が対応する。塩素に富む水は Amatitlan 湖畔の温泉水及び AM－2・3・7 の熱水が対応する。また、AMF－1・2の熱水は塩素質である。

エンタルピーと Cl 濃度の関係図（第 6.3.8 図）から、熱水上昇域の地熱流体（AMF－1・2の起源流体）の温度は330℃、Cl濃度2,500ppm と推定される。また、酸素・水素の同位体比とＣｌの関係図を第6.3.9図・第6.3.10図に示す。これらの図では、AMF－1・2の地熱流体はマグマ水を反映するPacaya火山山頂の噴気と天水を結ぶ線上に位置する。このことより、AMF－1・2の地熱流体はPacaya火山のマグマ水と天水の混合したものと解釈される。

6.3.3 物理探査

（1）既存調査概要

本地域では、INDE により、多種の物理探査が実施されている。1971 年に 67点の電気探査が実施され、1987年には重力・磁気、電気探査が実施されている。さらに、1988年から1991年には、23点のMT法探査により深部比抵抗探査が実施されている。

（2）入手既存データ

今回の調査で、以下の地質調査に関する既存データを入手した。

- 物理探査総合解析報告書(1991)
- 予備可能性調査報告書(1995)

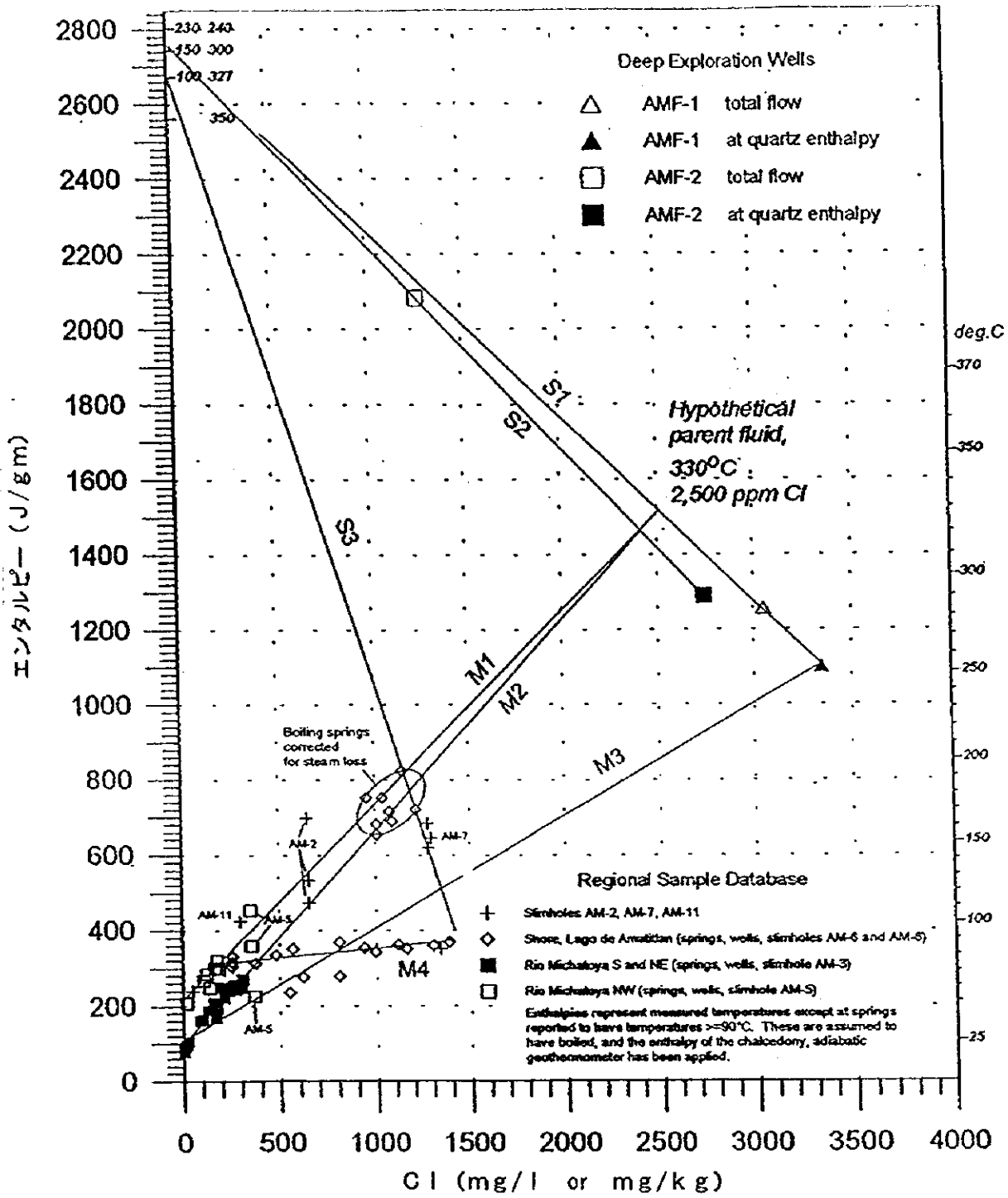
（3）既存調査結果

1）重力・磁気探査

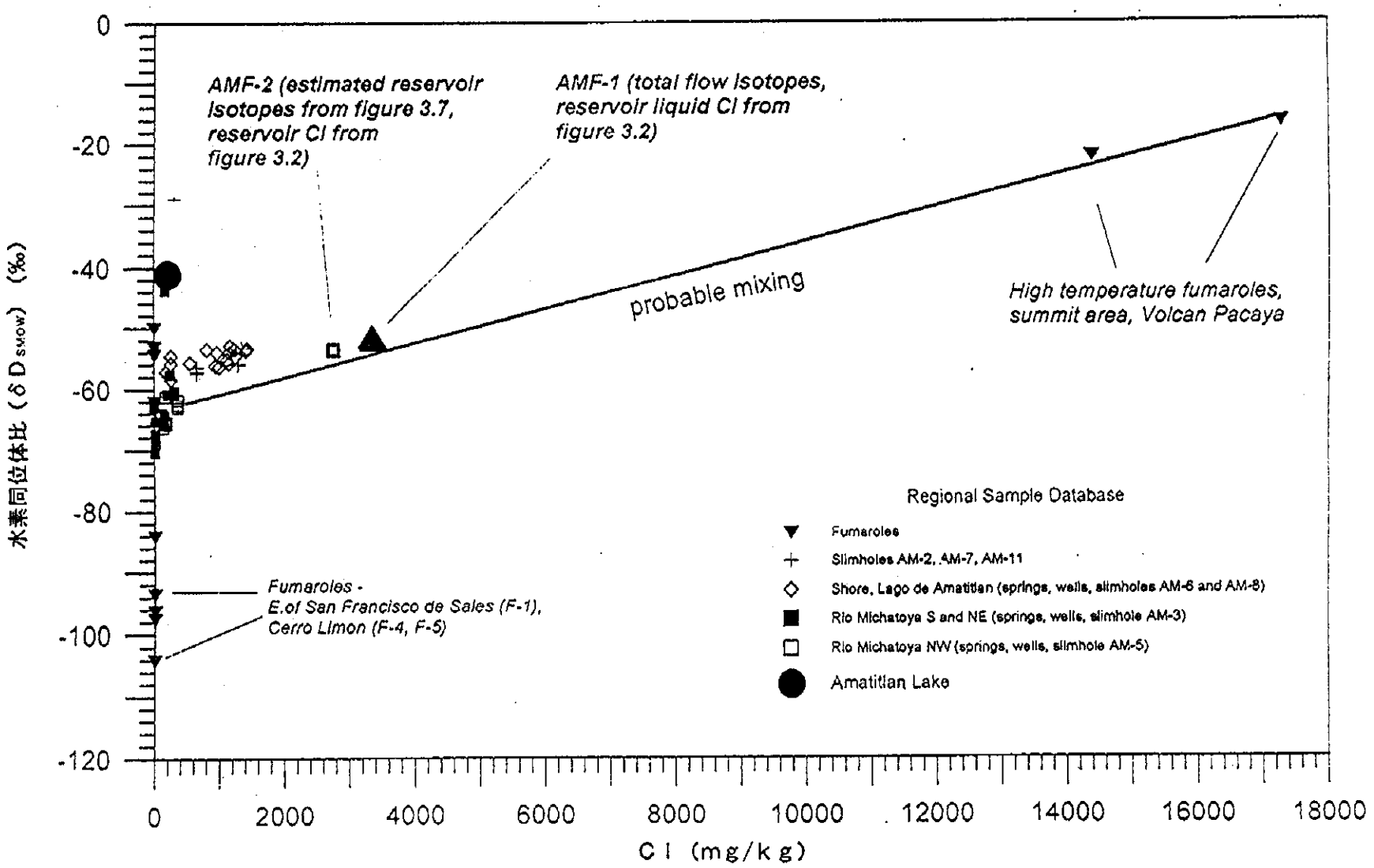
重力探査は INDE 所有の Worden 重力計により、320km2 の範囲で、323 点で測定した（第6.3.11図）。種々の仮定密度が検討されたが、2.4g／cc が最適と判断されている。本地域のブーゲー異常図（仮定密度 2.4g／cc）では、大規模な低重力域で Amatitlan カルデラを反映している（第 6.3.12 図）。また、大口径試験井（AMF－1・2・3・4）周辺およびLagunadeCaldera 周辺には局所的にN－S 方向の構造も読みとれる。

磁気探査は、重力探査と同一側転井おいてプロトン磁力計（Geometrics; G-816）を用いて全磁力を測定している。磁気探査の結果については、時間的制約より十分な平面図の説明がなかった。岩石の帯磁率測定をしていないが、残留磁気が感応磁気に比較して強いことなどが指摘されている。

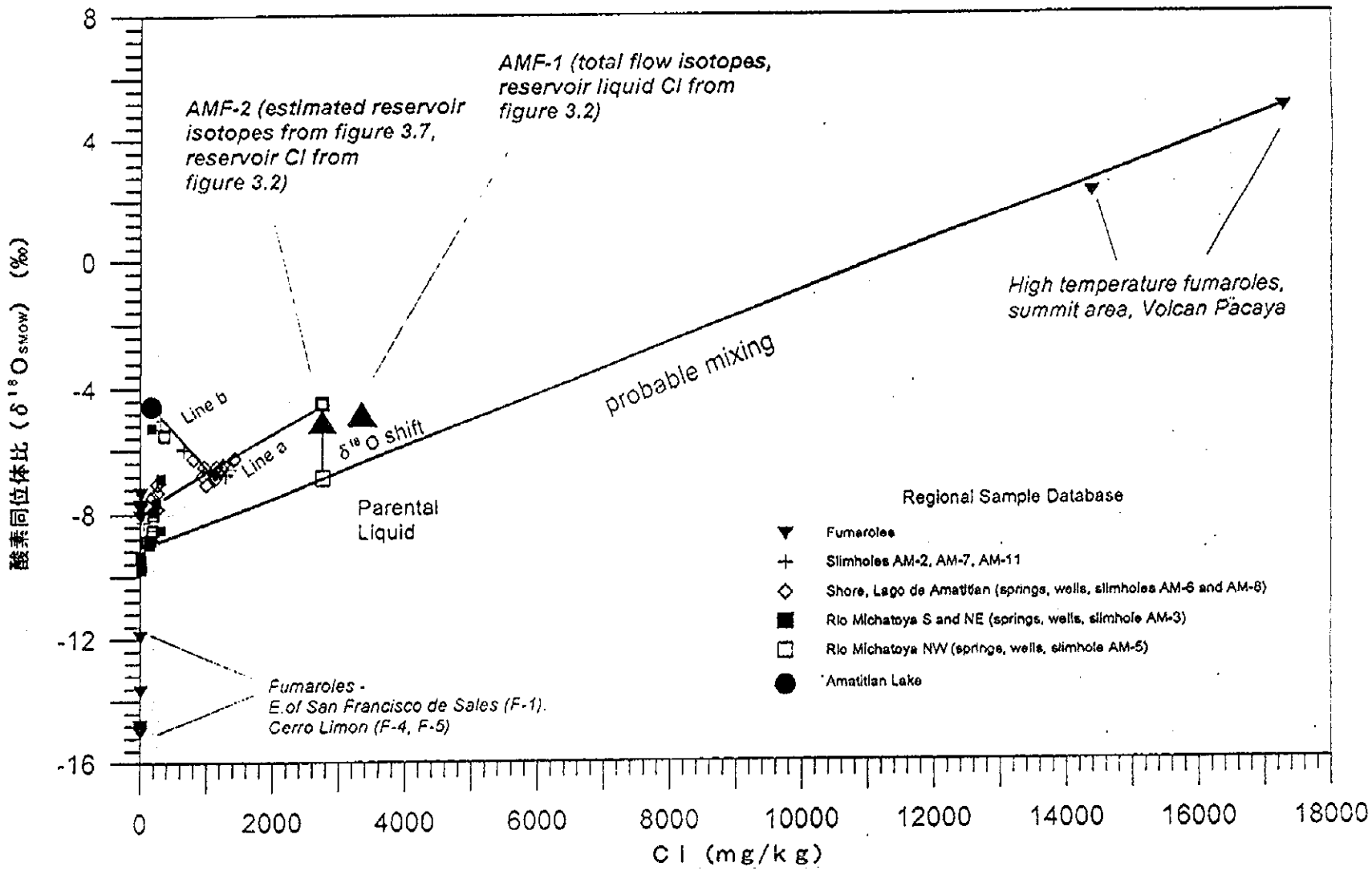
重磁力断面解析結果を第 6.3.12 図に示す（断面位置は第 6.3.14 図を参照）。Amatitlankarudera は階段状に陥没し、最大の陥没量は 2,000m にも及ぶ。また、Amatitlan カルデラ内には多数の断層により、基盤岩に凹凸が生じている。



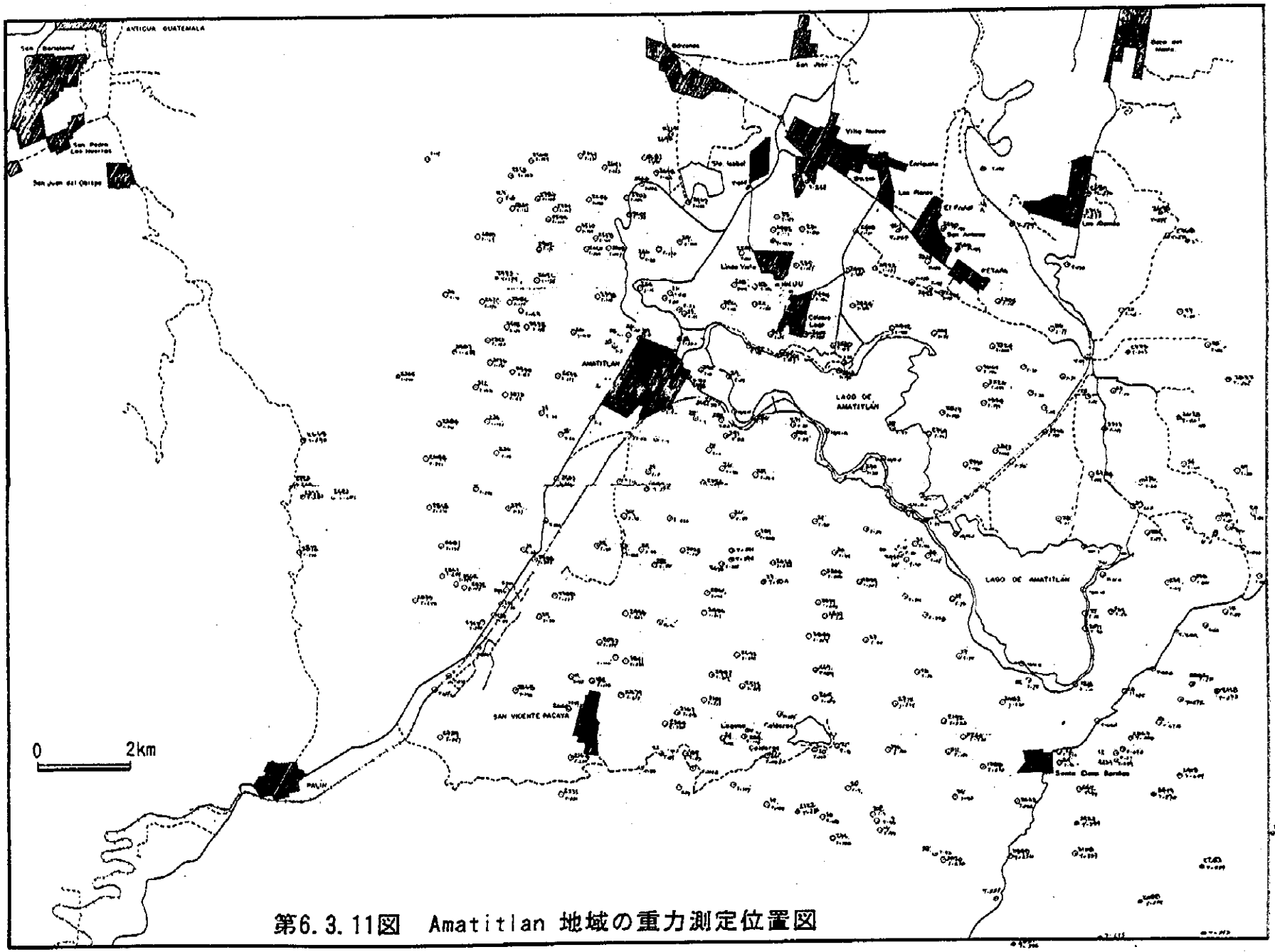
第6.3.8 図　温泉水のエンタルピーとＣｌ濃度の関係図



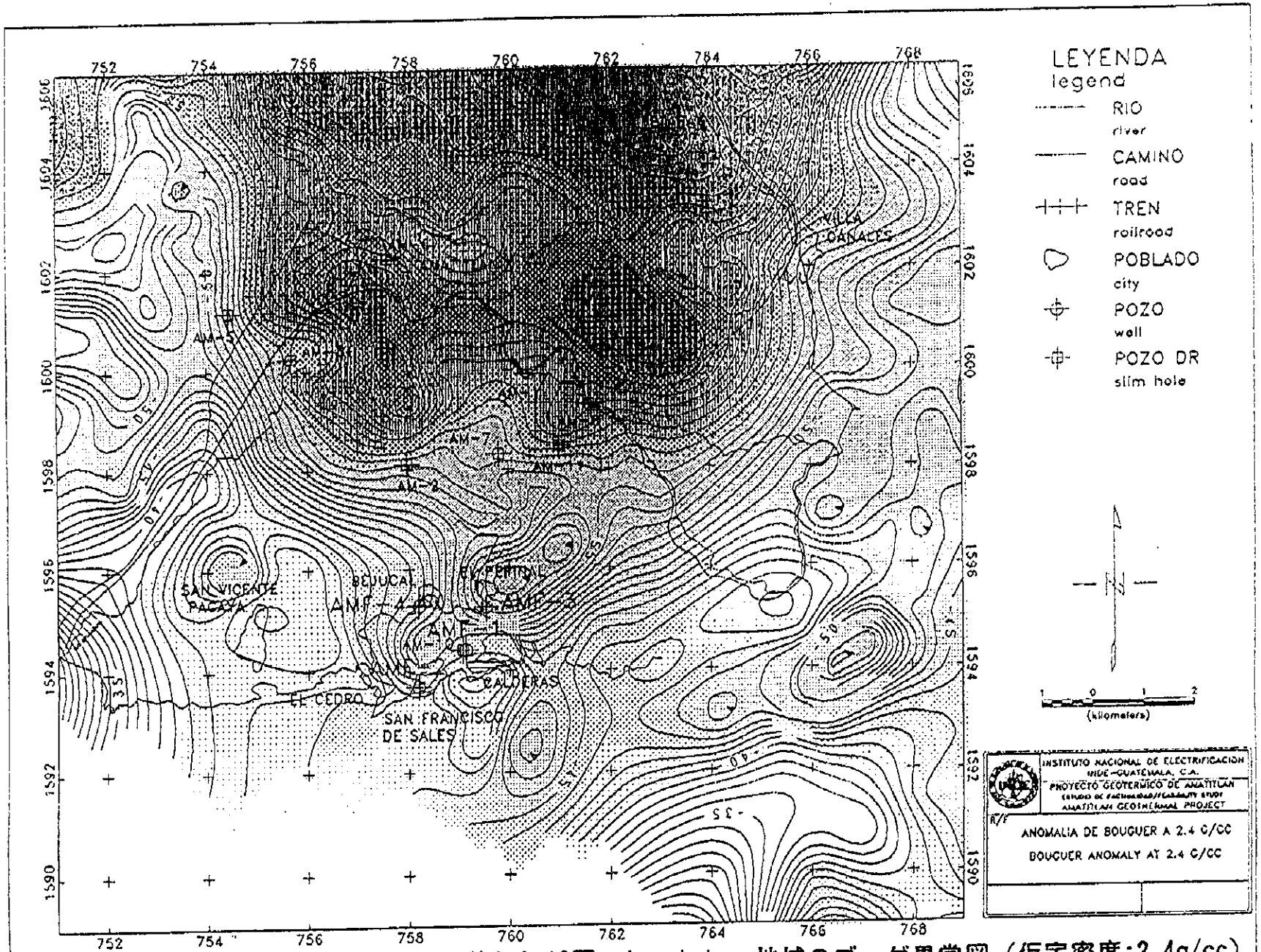
第6.3.9 図　温泉水の水素同位体比とＣｌ濃度の関係図



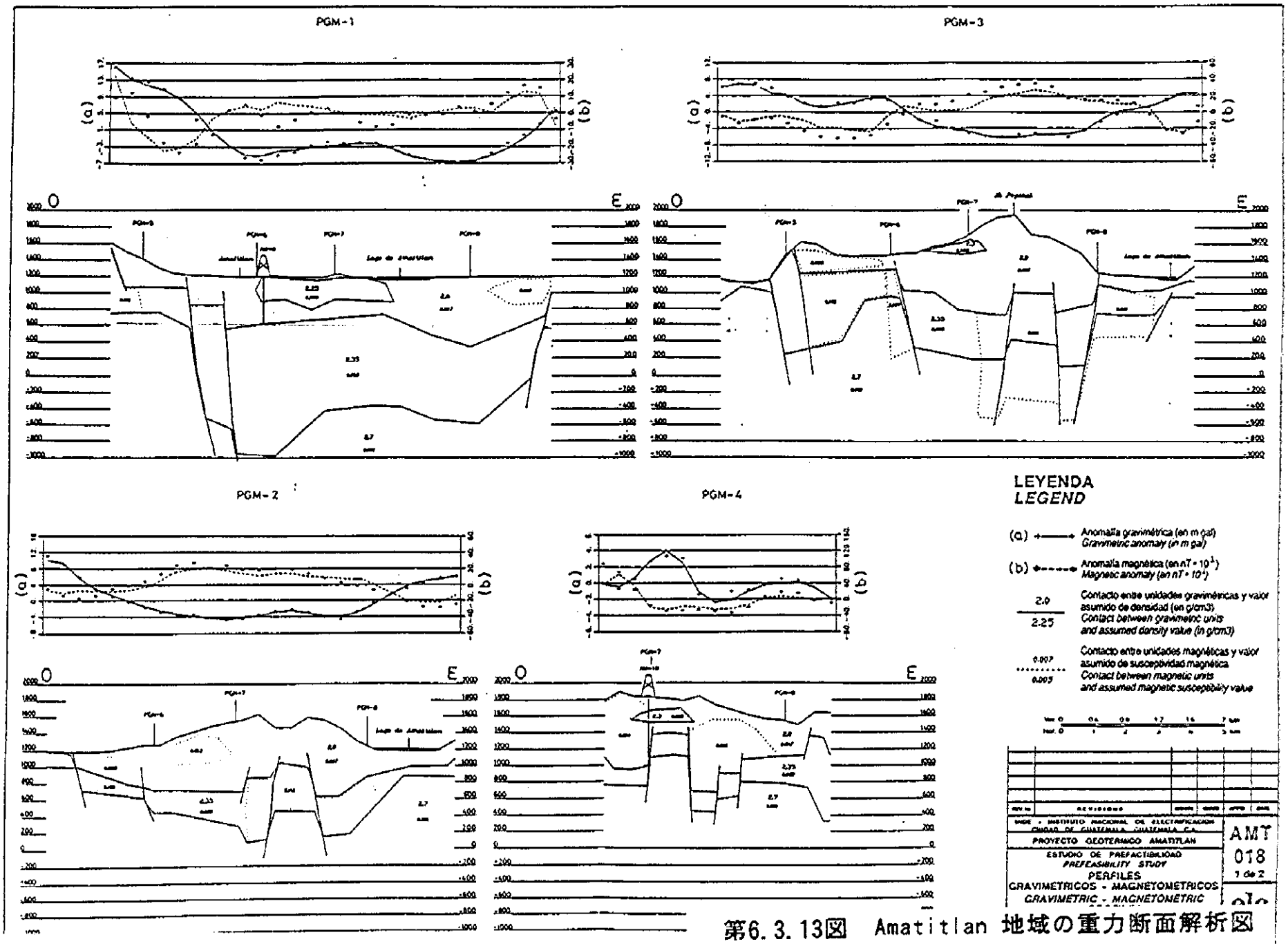
第6.3.10図　温泉水の酸素同位体比とＣｌ濃度の関係図



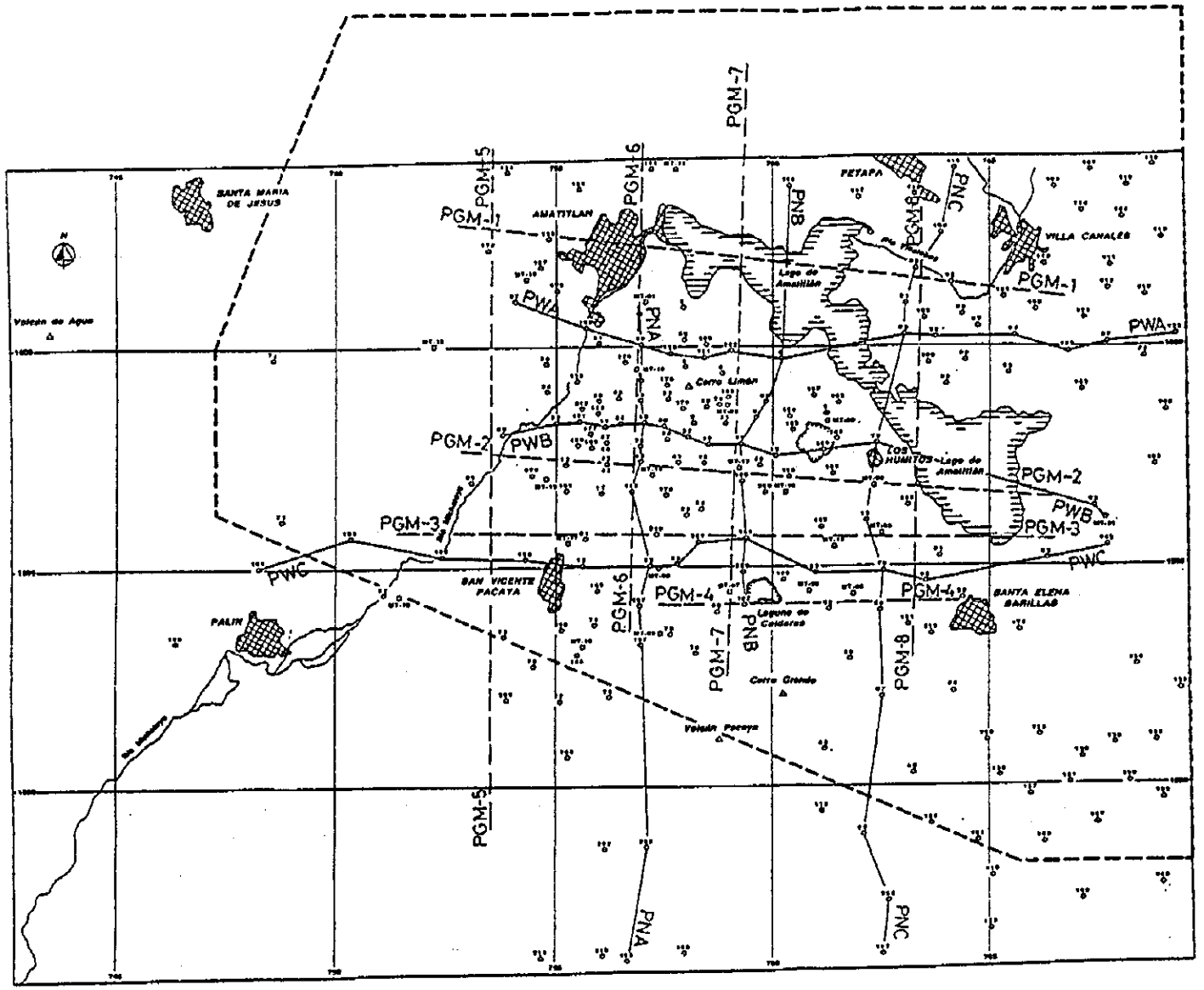
第6.3.11図　Amatitlan 地域の重力測定位置図



第6.3.12図　Amatitlan 地域のブーゲ異常図（仮定密度;2.4g/cc）



第6.3.13図　Amatitlan 地域の重力断面解析図



LEYENDA
LEGEND

- Sondeo eléctrico vertical / *Vertical electric sounding*
- Sondeo magnetotelúrico / *Magnetotelluric sounding*
- Límite del área cubierta por la prospección gravimétrica y magnetométrica / *Limit of the area covered by gravimetric and magnetometric surveys*
- Traza de perfil (geoeléctrica y magnetotelúrica) / *Trace of profile (geoelectric and magnetotelluric)*
- Traza de perfil (gravimétrica y magnetométrica) / *Trace of profile (gravimetric and magnetometric)*

0 1 2 3 4 5 km

REV. No	REVISIONES	DIBUJO	DISEÑO	APROB	DATE

INDE - INSTITUTO NACIONAL DE ELECTRIFICACION
CIUDAD DE GUATEMALA, GUATEMALA C.A.

PROYECTO GEOTERMICO AMATITLAN

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD
PREFEASIBILITY STUDY

PROSPECCIONES GEOFISICAS
MAPA DE UBICACION
GEOPHYSICAL INVESTIGATIONS
LOCATION MAP

AMT 013

elc

第6.3.14図　Amatitlan 地域の比抵抗調査位置図

2）比抵抗探査

シュランベルジャー法による直流法電気探査は、はじめ67点、その後、155点以上実施されている。MT法探査はPhoneix V5を用いて23点の測点について実施している。周波数は384Hzから0.00055Hzまで測定しており、探査深度は10km以上である。取得された信号の品質も比較的良く、十分な深部比抵抗構造解析が実施されている。電気探査の測点を○印で、MT法探査の測点を□印で示した測点図を第6.3.14図に示す。電気探査結果にMT法探査結果が取り込まれ、再解析が行われている。

本地域の比抵抗構造は、大局的に地表から高－低－高の三層構造を示し、深部の比抵抗が高いのが特徴的である。深部に検出される高比抵抗層の上面深度である比抵抗基盤深度は、Amatitlan カルデラで深くなっている（第6.3.15図）。また、大口径試験井（AMF－1・2・3・4）周辺及びLaguna de Caldera周辺には局所的はN-S方向の構造も読み取れる。

比抵抗断面解析結果を第6.3.16図に示す（断面位置は第6.3.14図を参照）。比抵抗構造からも、Amatitlanカルデラは明瞭に読み取ることができる(PWA、PNC、PNA断面）。Amatitlan カルデラ内では、比抵抗基盤深度は重力基盤深度と比較する浅く解析され、熱水変質により比抵抗が上昇したと解釈される。多数の温泉が分布するLago de Amatitlan湖畔では浅部に低比抵抗層が分布する(PNC断面）。

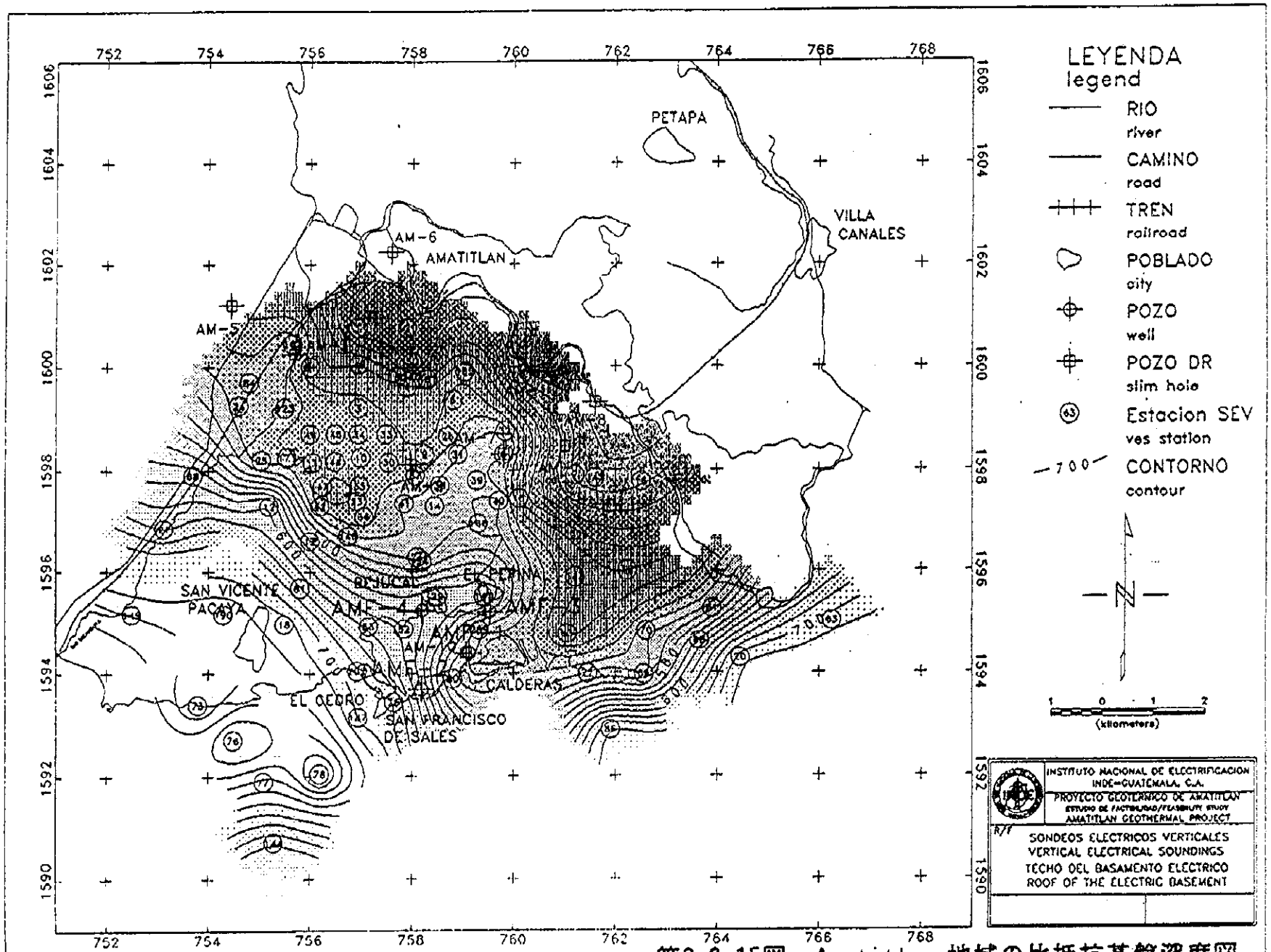
6.3.4 既存坑井調査

（1）小口径詩錐調査

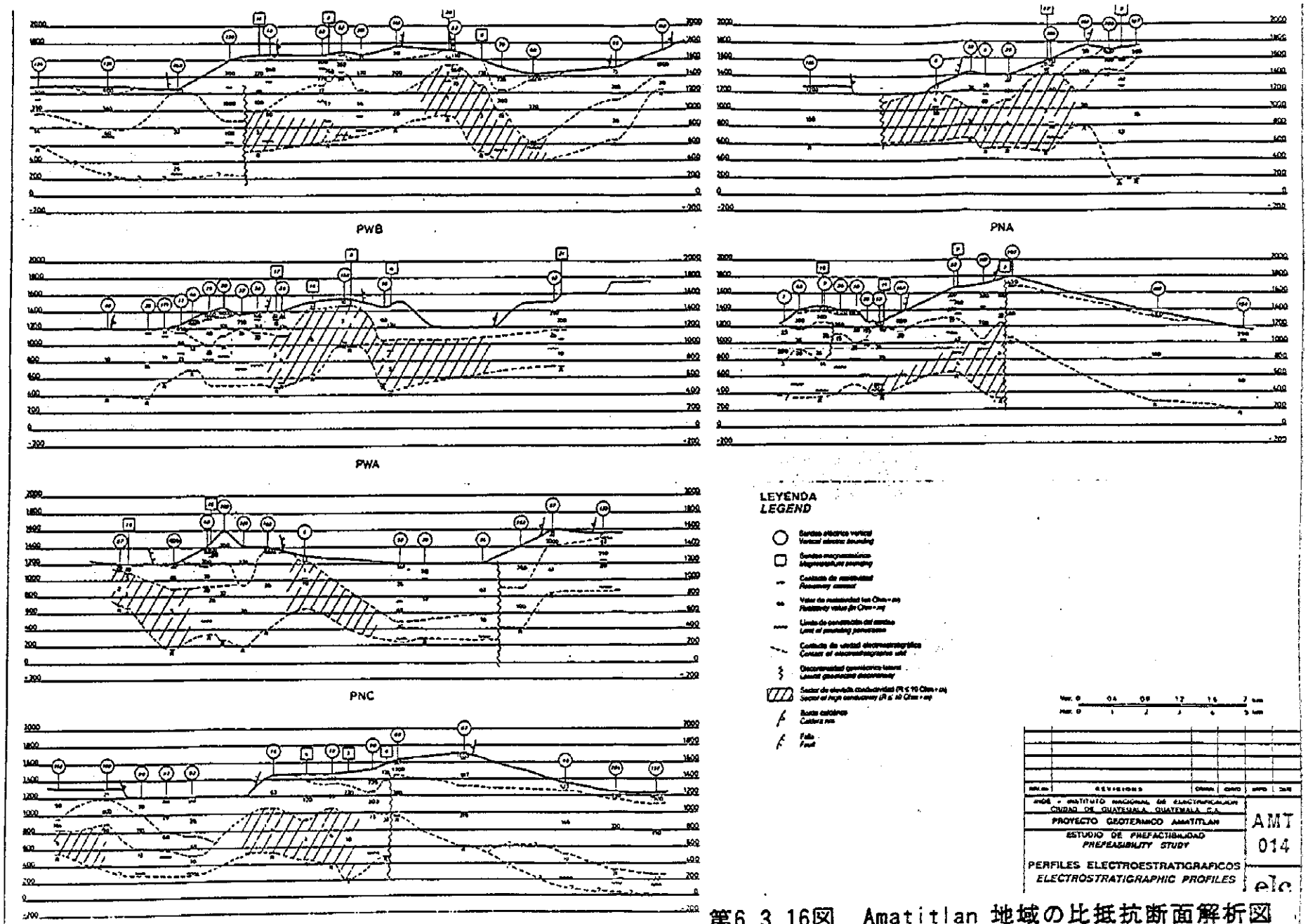
1）既存調査概要

小口径試錐は地下の温度分布を把握するため、1979年から1990年にかけて9本掘削され、それらの深度は130～900mである（第6.3.5図）。Amatitlan湖畔には多数温泉が分布することから、AM－1・6・7・8・11がAmatitlan湖の西岸で掘削された。Amatitlan湖の西側のデイサイト・ドーム周辺ではAM－2・3・5が、噴気活動が認められるPacaya火山の北麓ではAM－10が掘削された。以下に、各孔の深度、孔底温度、最高温度、及び実施年を示す。

孔名	深度（m）	孔底温度（℃）	最高温度（℃）	実施年
AM-1	129	62	105 (50m)	79-80
AM-2	490	171	171	82-83
AM-3	509	74	74	83-84
AM-5	434	126	126 (370m)	84-85
AM-6	546	<50	73 (50m)	85-86
AM-7	533	147	178 (300m)	86-87
AM-8	563	58	80 (50m)	88-89
AM-10	890	240	240	89
AM-11	682	82	188 (400m)	89-90



第6.3.15図　Amatitlan 地域の比抵抗基盤深度図



第6.3.16図　Amatitlan 地域の比抵抗断面解析図

2）既存調査結果

（ア）AM－1

AM－1は、Pacaya火山の北北東方約9kmの標高1,188mの地点で掘削され、Amatitlan湖の西岸に位置する。掘削深度は129mである。本孔の地質は、全区間にわたり後カルデラ火山岩類からなる（第6.3.17図(1)）。温度検層は掘削から11日後に実施され、温度曲線は中間部で最高温度を示す。最高温度は深度50m;105℃で，孔底(129m);62℃である。

（イ）AM－2

AM－2は、Pacaya火山の北北西方約7 kmの標高1,346mの地点で掘削され、デイサイト・ドームの南部に位置する。掘削深度は490mである。本孔の地質は、全区間にわたり後カルデラ火山岩類からなる（第6.3.17図(2)）。温度検層は掘削から20日後に実施され、温度曲線は直線的に上昇し、最高温度は孔底(490m)で171℃である。

（ウ）AM－3

AM－3は、Pacaya火山の北西方約9.5kmの標高1,184mの地点で掘削され、デイサイト・ドームの西部に位置する。掘削深度は509mである。本孔の地質は、深度0～50m;沖積層、深度50～320m;後カルデラ火山岩類、深度320～509m;カルデラ火山岩類からなる（第6.3.17図(3)）。温度検層は掘削から12日後で実施され、温度曲線はほとんど上昇せず、最高温度は孔底(509m)で74℃である。

（エ）AM－5

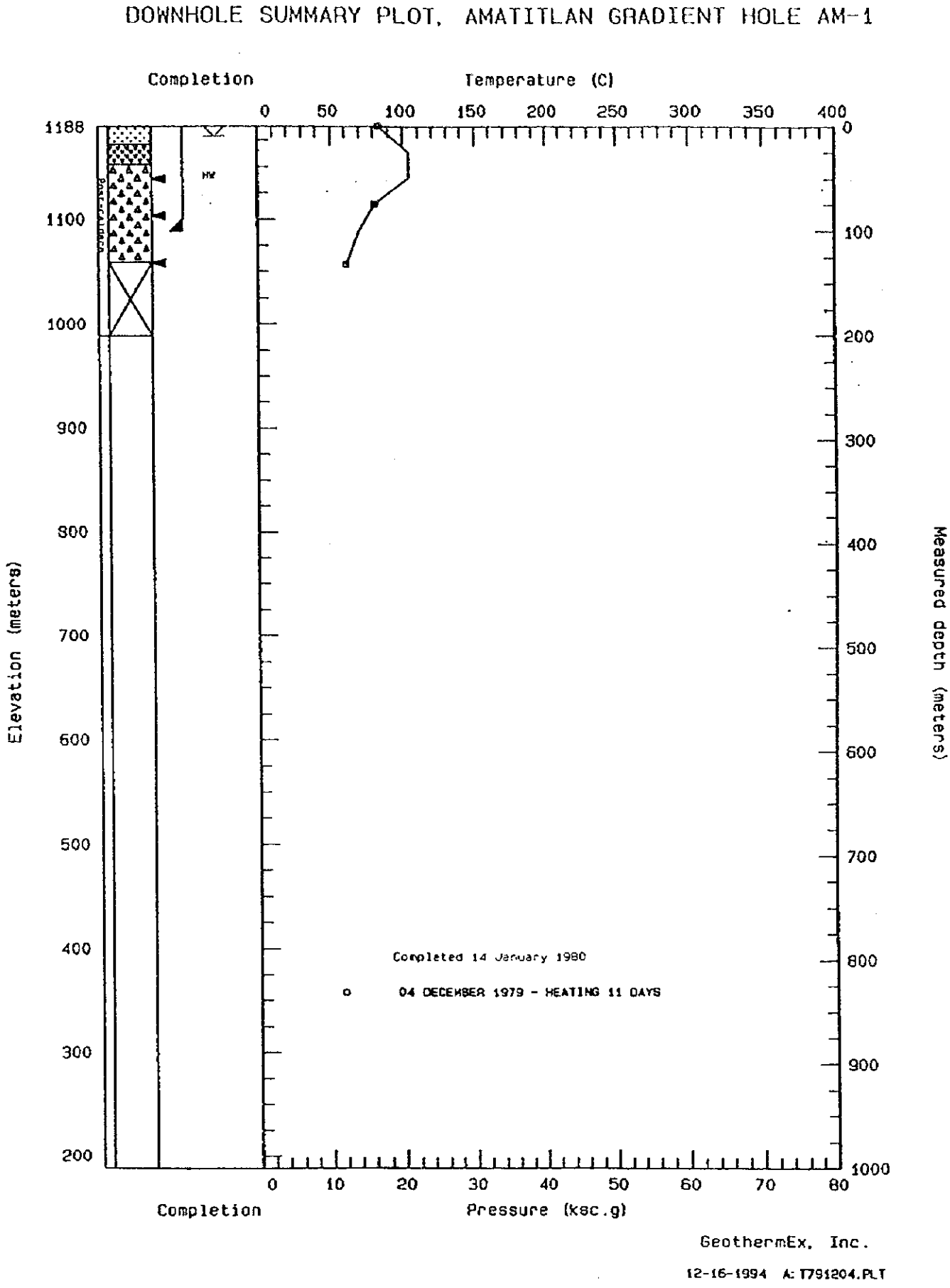
AM－5は、Pacaya火山の北西方約10.5kmの標高1,218mの地点で掘削され、デイサイト・ドームの西方に位置する。掘削深度は434mである。本孔の地質は、深度0 ～260m; 後カルデラ火山岩類、深度260～434m;カルデラ火山岩類からなる（第6.3.17図(4)）。温度検層は掘削中実施され、温度曲線は直線的に上昇し、最高温度は最深測定深度(370m)で126℃である。

（オ）AM－6

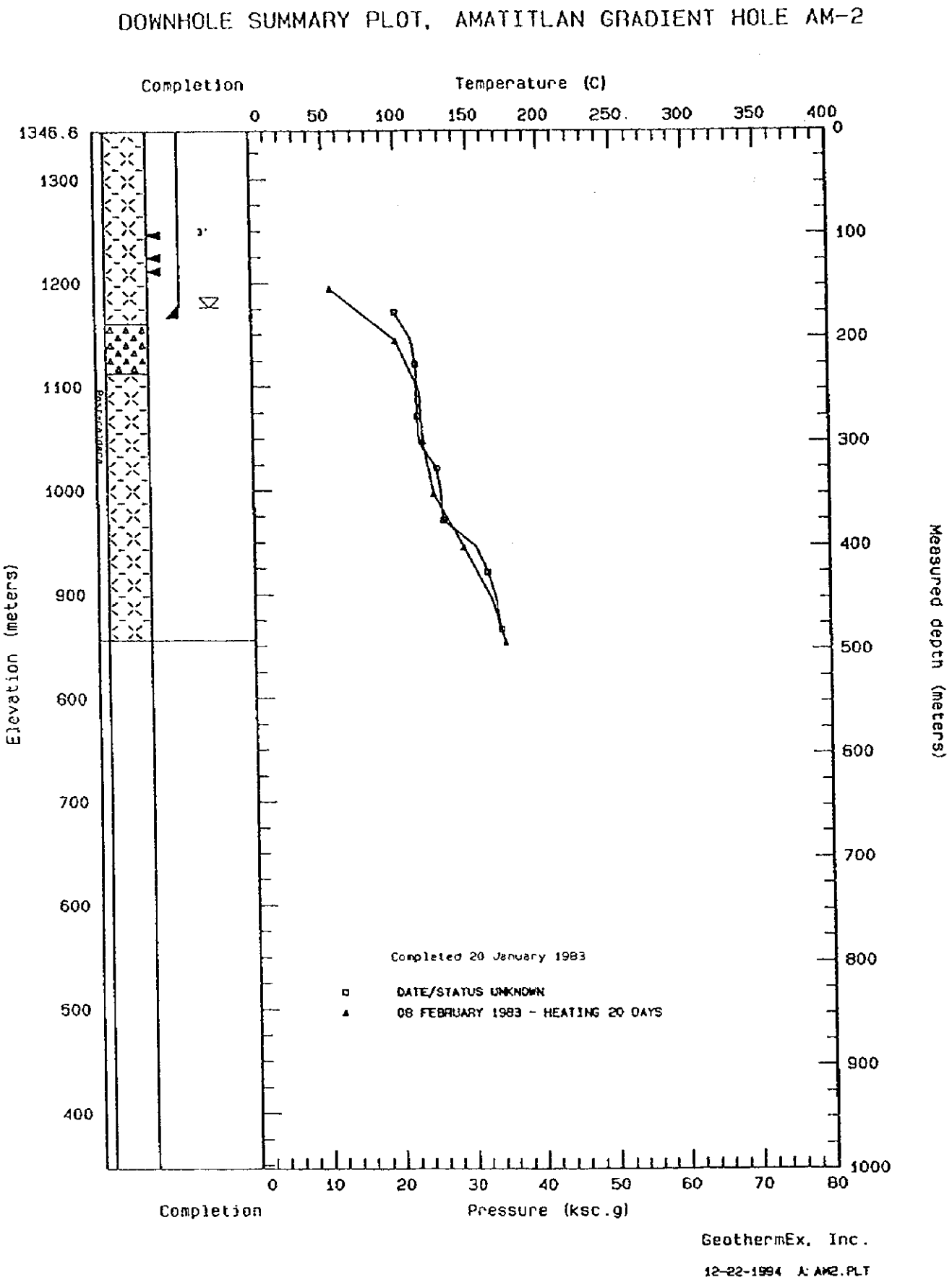
AM－6は、Pacaya火山の北北西方約12.5kmの標高1,195mの地点で掘削され、デイサイト・ドームの北方に位置する。掘削深度は546mである。本孔の地質は、深度0～230m;後カルデラ火山岩類、深度230～546m;カルデラ火山岩類からなる（第6.3.17図(5)）。温度検層は掘削中実施され、温度曲線は中間部で最高温度を示す。最高温度は深度50m;73℃で、最深測定深度(150m)で50℃である。

（カ）AM－7

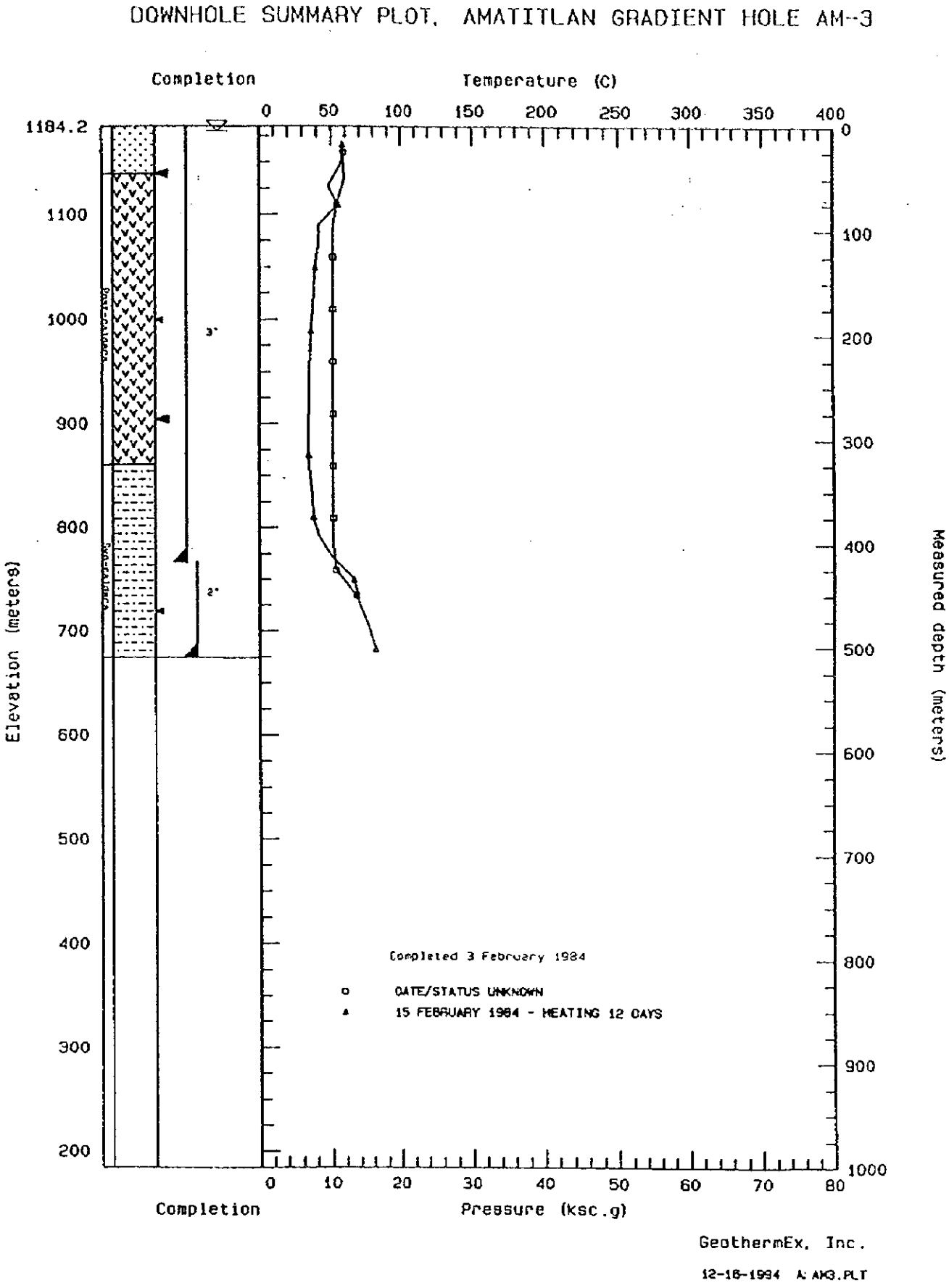
AM－7は、Pacaya火山の北北東方約7kmの標高1,408mの地点で掘削された。掘削深度は533mである。本孔の地質は、全区間にわたり後カルデラ火山岩類からなる（第6.3.17図(6)）。温度検層は掘削から1年後に実施され、温度曲線は中間部で最高温度を示す。最高温度は深度300m; 178℃で、孔底(533m); 147℃である。



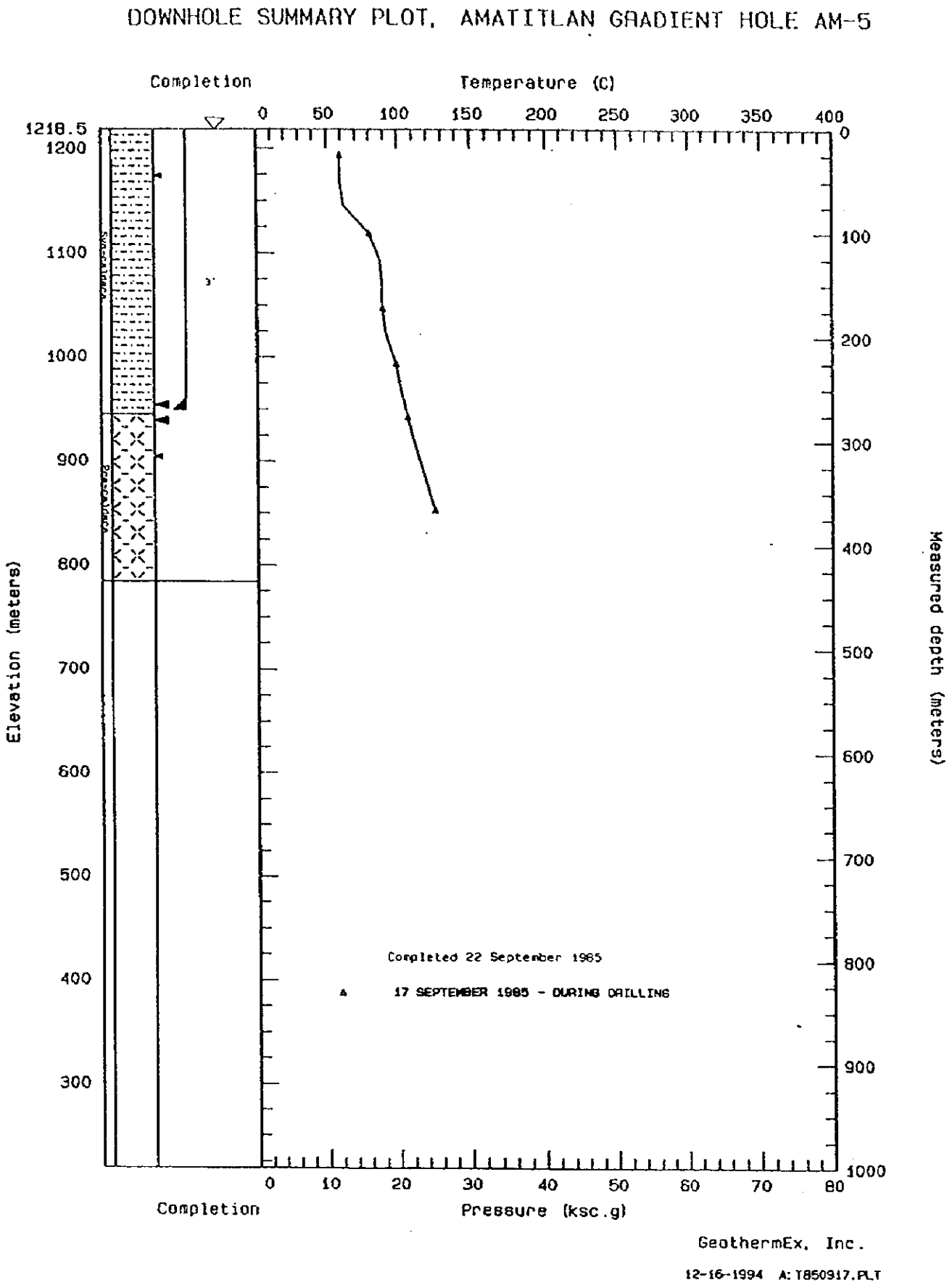
第6.3.17図(1) 小口径試錐の坑井調査結果（ＡＭ－１）



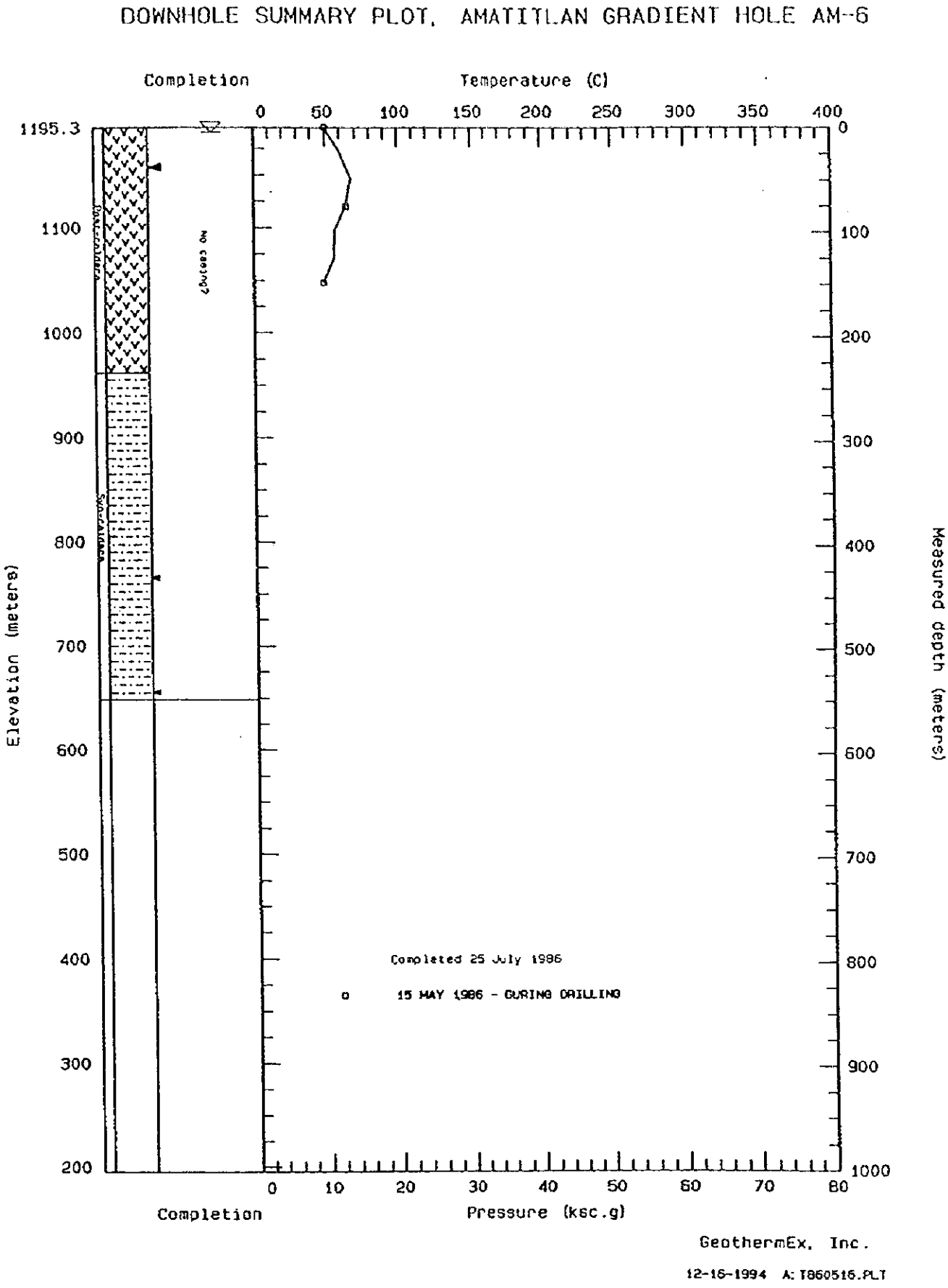
第6.3.17図(2) 小口径試錐の坑井調査結果（ＡＭ－２）



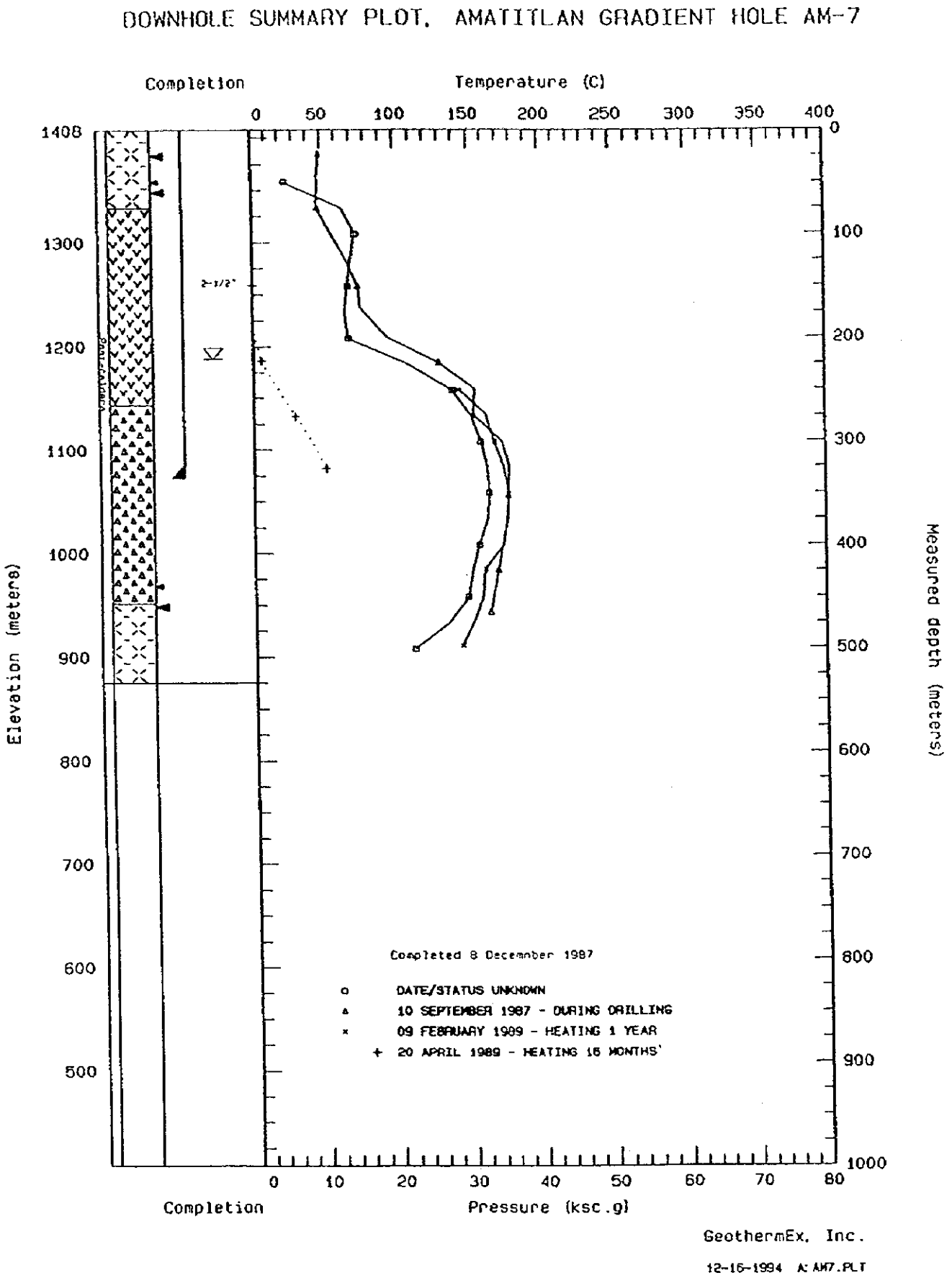
第6.3.17図(3) 小口径試錐の坑井調査結果（ＡＭ－３）



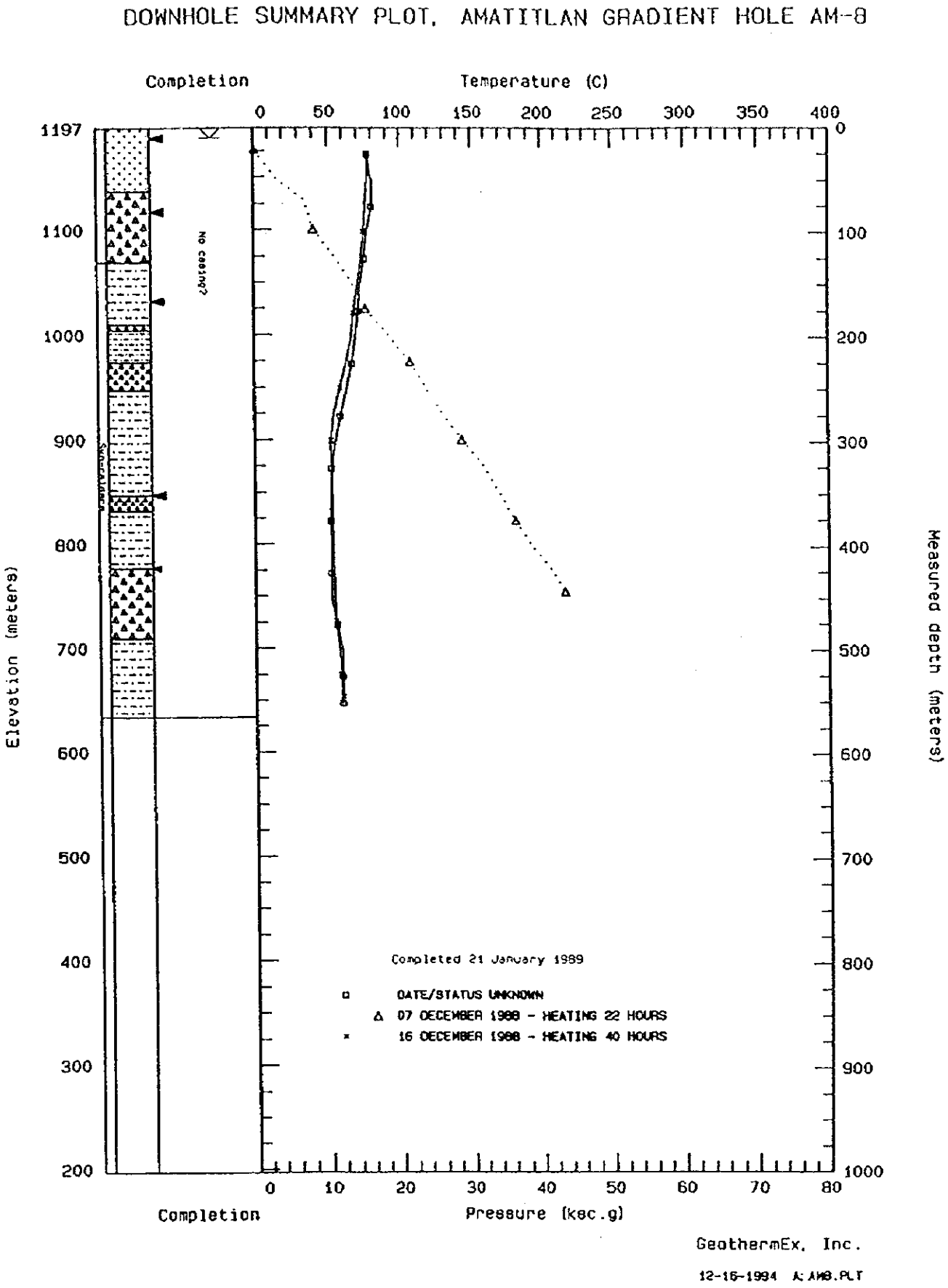
第6.3.17図(4) 小口径試錐の坑井調査結果（ＡＭ－５）



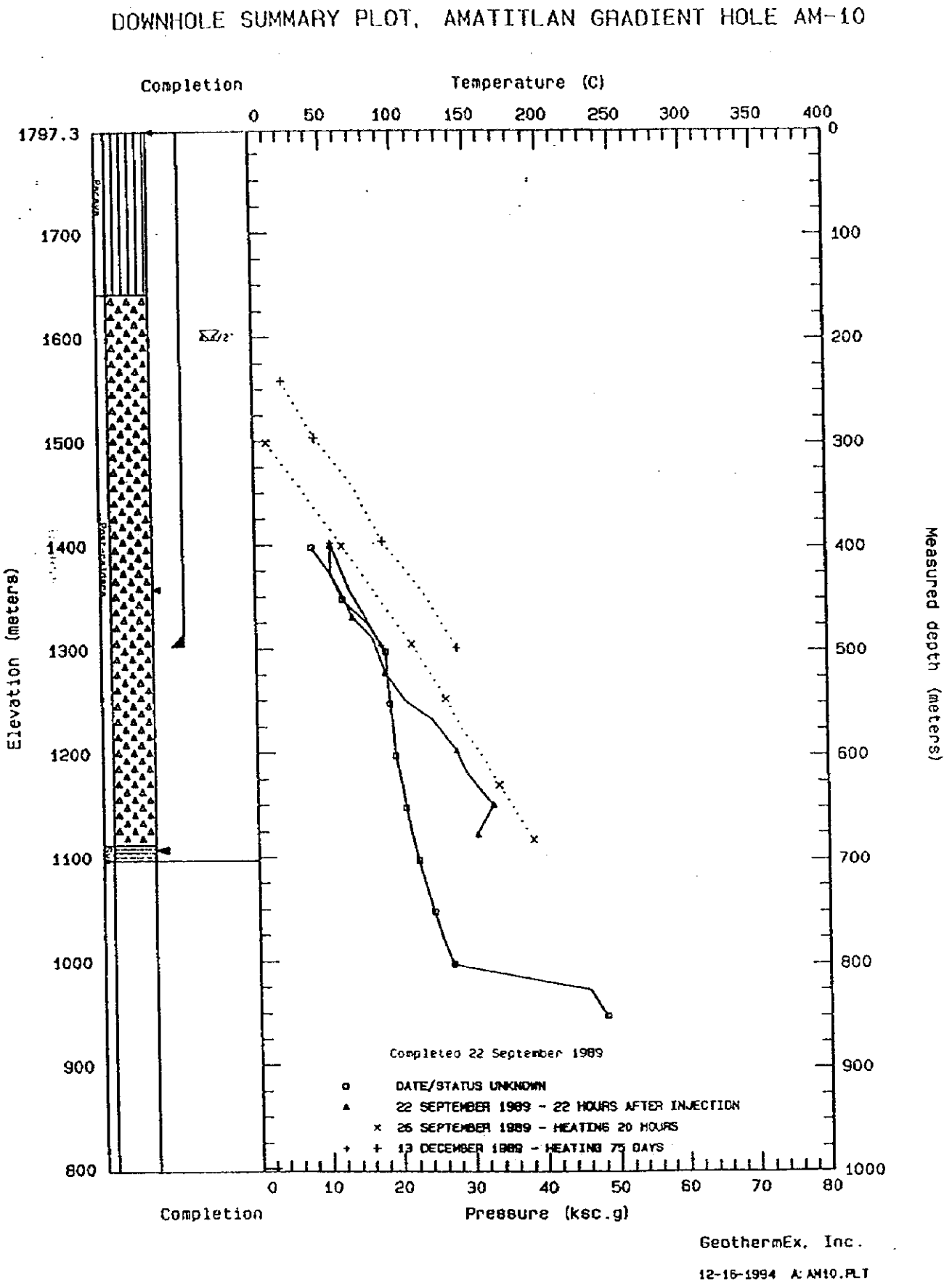
第6.3.17図(5) 小口径試錐の坑井調査結果（ＡＭ－６）



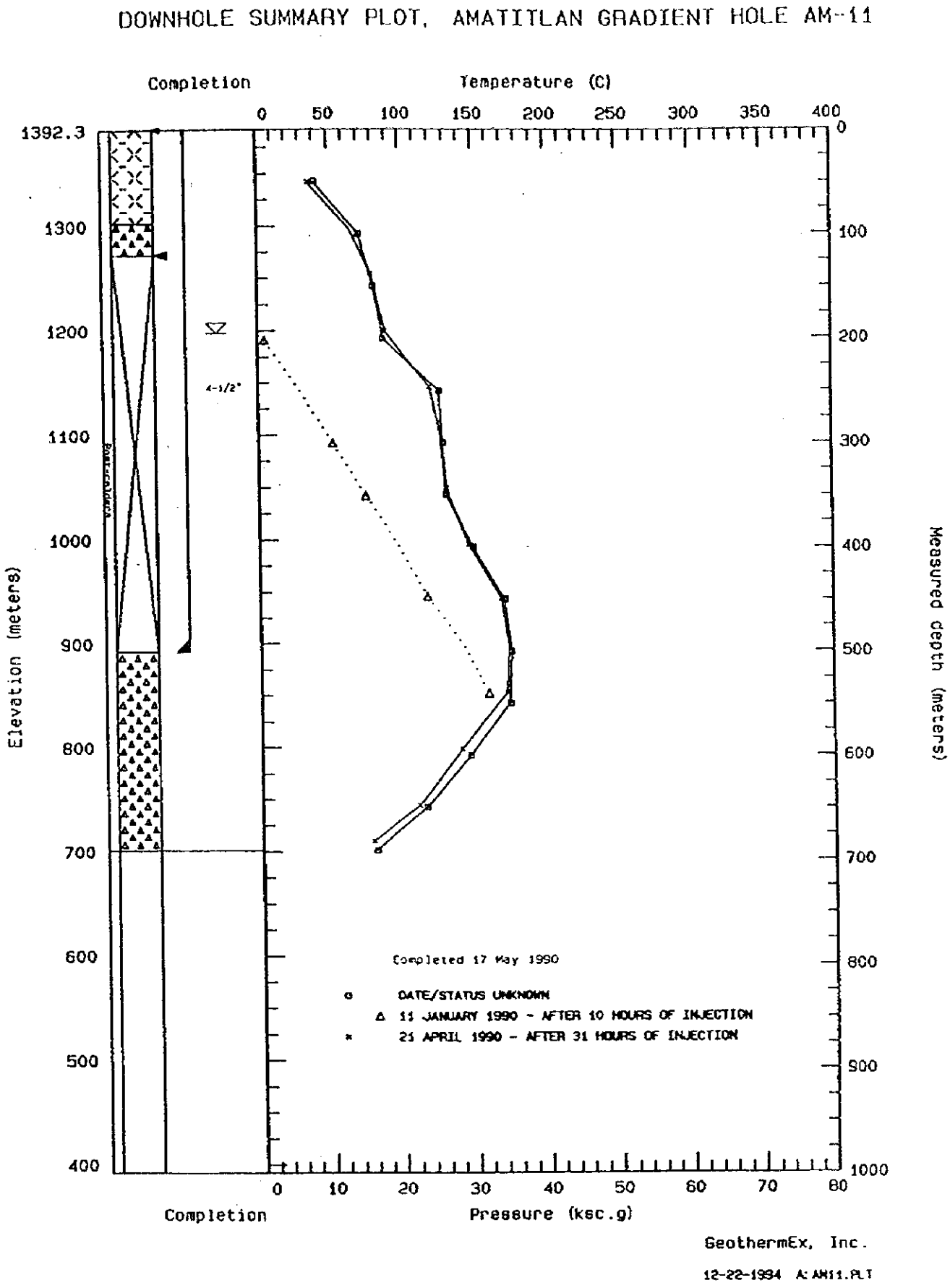
第6.3.17図(6) 小口径試錐の坑井調査結果（ＡＭ－７）



第6.3.17図(7) 小口径試錐の坑井調査結果（ＡＭ－８）



第6.3.17図(8) 小口径試錐の坑井調査結果（AM－10）



第6.3.17図(9) 小口径試錐の坑井調査結果（ＡＭ－11）

（キ）AM－8

AM－8は、Pacaya火山の北北東方約9kmの標高1,197mの地点で掘削され、Amatitlan湖の西岸に位置する。掘削深度は563mである。本孔の地質は、全区間にわたりカルデラ火山岩類からなる（第6.3.17図(7)）。温度検層は掘削から40時間後に実施され、温度曲線は中間部で最高温度を示す。最高温度は深度50m;80℃で、坑底(563m);58℃である。

（ク）AM－10

AM－10は、Pacaya火山の北北東方約3.2 kmの標高1,797mの地点で掘削され、掘削深度は890mである。本孔の地質は、深度0～150m;Pacaya火山岩類、深度150～300m;後カルデラ火山岩類、深度300～890m;カルデラ火山岩類からなる（第6.3.17図(8)）。温度検層が実施され、最高温度は孔底(890m)で240℃である。

（ケ）AM－11

AM－11は、Pacaya火山の北北東方約8.5kmの地点で掘削され、掘削深度は682mである。本孔の地質は、全区間にわたり後カルデラ火山岩類からなる（第6.3.17図(9)）。温度検層が実施され、温度曲線は中間部で最高温度を示す。最高温度は深度400m;188℃で、孔底(682m)82℃である。

3）地下温度分布

AM－1・2・7・10・11で高温が確認された。ただし、AM－10を除き、中間部で最高温度を示し、孔底に向かって温度が低下する。第6.3.18図(1)（標高1,150m準）、第6.3.18図(2)（標高800m準）には、後記する大口径試験井の温度検層結果を加味した地下の温度分布を示す。これらの地下の温度分布図では、南部のAM－10周辺で高温を示し、北部に向かって序々に低温になっているが、中央部のAM－2周辺にも高温域が分布する。

（2）大口径試験井掘削

1）既存調査概要

地下の温度分布、地質構造、及び地熱流体の把握のため、生産井仕様の大坑径試験井が1992年から1993年にかけて4本掘削された。これらの掘削地点は、Amatitlan地域南部の高温が確認された小口径試錐孔であるAM－10の周辺である（第6.3.5図）。これらの坑井では坑井調査として、地質（カッティングス）調査、温度・圧力検層、及び注水試験が行われている。以下に、各坑井の掘削深度、実測した最高温度、及び実施年を示す。

坑井名	深度（m）	最高温度（℃）	実施年
AMF-1	1,581	282	92-93
AMF-2	1,502	295	93
AMF-3	1,500	239	93
AMF-4	2,058	240	93

2）掘削方法

これらの坑井はすべて垂直井で、それらの深度は1,500～2,058mである。掘削作業はメキシコの業者により行われた。使用機材のリストを第6.3.2表に示す。使用リグは1000馬力のロードワークスを有するロータリー式のものである。掘削地点の敷地面積は、40m×50mの2,000m²で、AMF－1の敷地の見取り図を第6.3.19図に示す。

3）坑井掘削・仕上げ

各坑井の坑井掘削・仕上げ結果を第6.3.20図(1)～(4)に示す。坑井掘削・仕上げは基本的に4段で行っている。第一・二段は各坑井共通で、第一段は約40mまで26"で掘削し、20"のケーシングを挿入後セメンチングを行っている。第二段は約300mまで17 1／2"で掘削し、13 3／8"のケーシングを挿入後セメンチングを行っている。第三段は、各坑井ごとに異なり、約800m～1,000mまで12 1／4"で掘削し、9 5／8"のケーシングを挿入後セメンチングを行っている。最終段の第四段は、約1,500m～2,000mまで8 1／2"で掘削し、第三段のケーシング尻より7 5／8"の孔明管をハンガーで吊っている。

4）坑井調査結果

（ア）AMF－1

AMF－1は、Pacaya火山の北方約3.2kmの標高1,797mの地点で掘削され、AM－10の掘削地点から約50m離れている。掘削深度は1,581mで、掘削期間（注水試験期間も含む）は1992年12月2日から、翌年の1993年2月10日までの71日間である（第6.3.21図）。

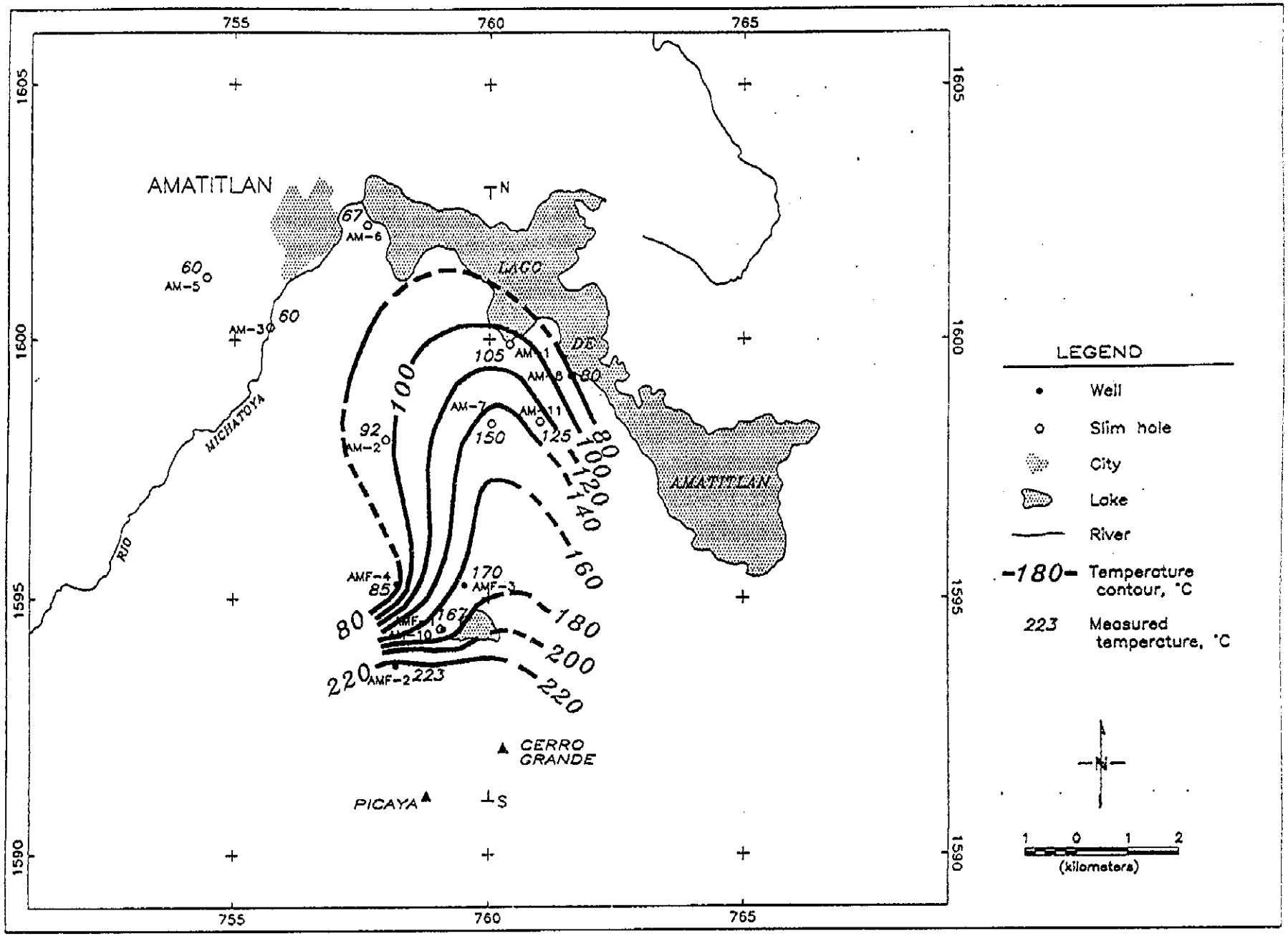
本坑井の地質は、深度0～20m;沖積層、深度20～125m;Pacaya火山岩類、深度125～310m; 後カルデラ火山岩類、深度310～950m; カルデラ火山岩類、深度950～1,300m;先カルデラ火山岩類、深度1,300～1,581m; 基盤岩類からなる。基盤岩類として、ダイヤベースと花崗岩類が確認された（第6.3.22図）。

掘削中に逸水は、深度815m（一部）、深度842m（全量）、深度911～1,581m（全量）の3区間で認められた。注水試験は、55t／h、80t／h、120t／hの多段の流量で行れ、透水性が良好であることが確認された。温度検層は注水試験の前・中・後で実施され、最高温度は深度1,425mで282℃である。透水性の良好な箇所は、温度検層結果では注水試験による温度低下から地熱流体の流入により、温度回復が著しい箇所として抽出できる。透水性の良好な箇所（生産ゾーン）は深度840～900m、深度1,100～1,200m、深度1,500～1,530mの3区間である。また、圧力検層から静水位は約550mである。

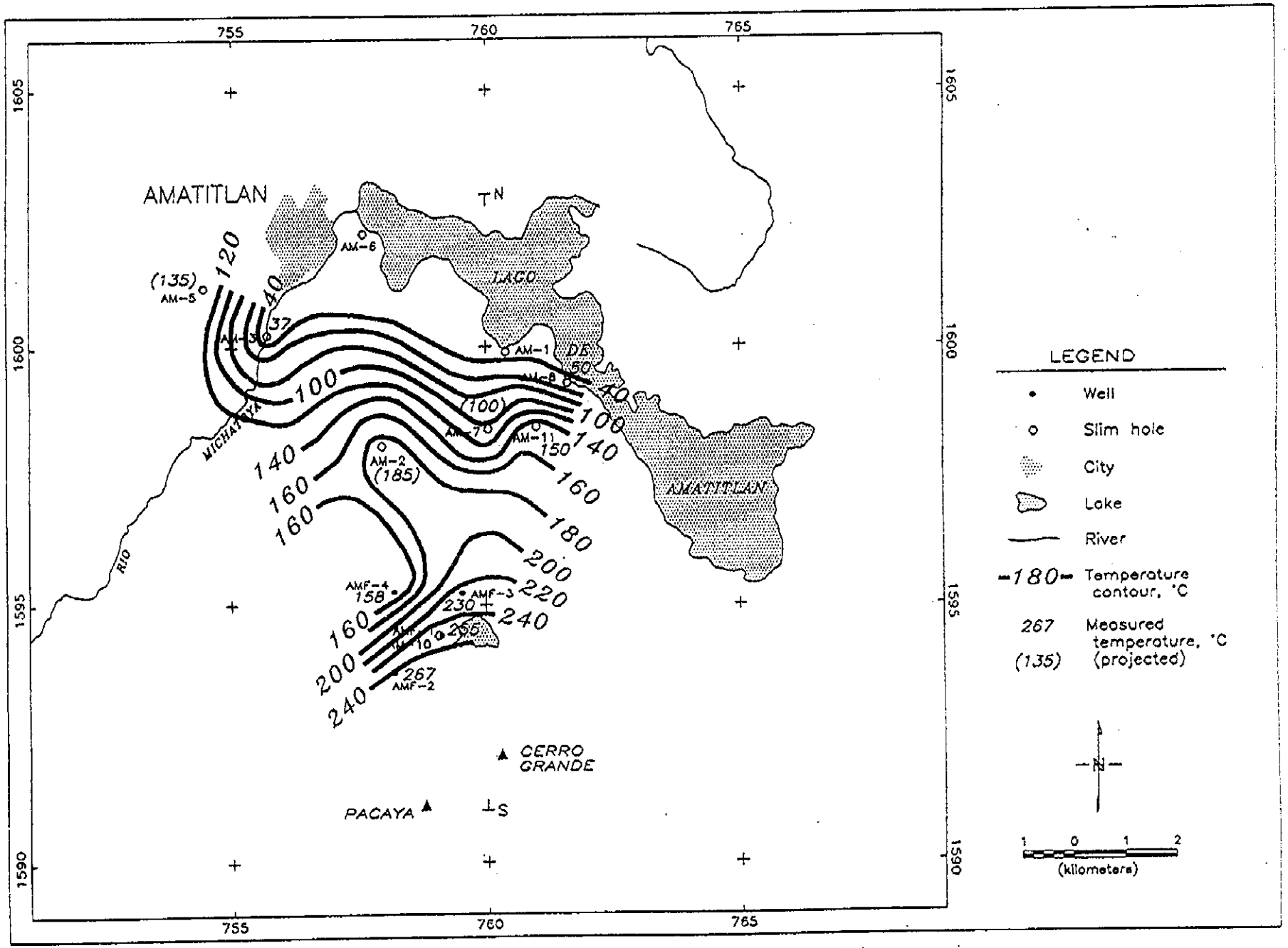
（イ）AMF－2

AMF－2は、Pacaya火山の北北西方約3 kmの標高1,868mの地点で掘削され、AMF－1の掘削地点から南西方に約1km離れている。掘削深度は1,502mで、掘削期間（注水試験期間も含む）は1993年2月21日から、同年4月13日までの52日間である（第6.3.23図）。また、AMF－1からのリグ移動期間（AMF－1のリグダウン、移動、AMF－2のリグアップ）は12日間である。

本坑井の地質は、深度0～18m;沖積層、深度18～50m;Pacaya火山岩類、深度50～560m;後カルデラ火山岩類、深度560～1,180m;カルデラ火山岩類、深度1,180～1,502m;先カルデラ火山岩類からなる。この坑井では、基盤岩類は捕捉されていない（第6.3.24図）。掘削中に逸水は、深度705m（全量）、深度888m（一部）、深度1,030m



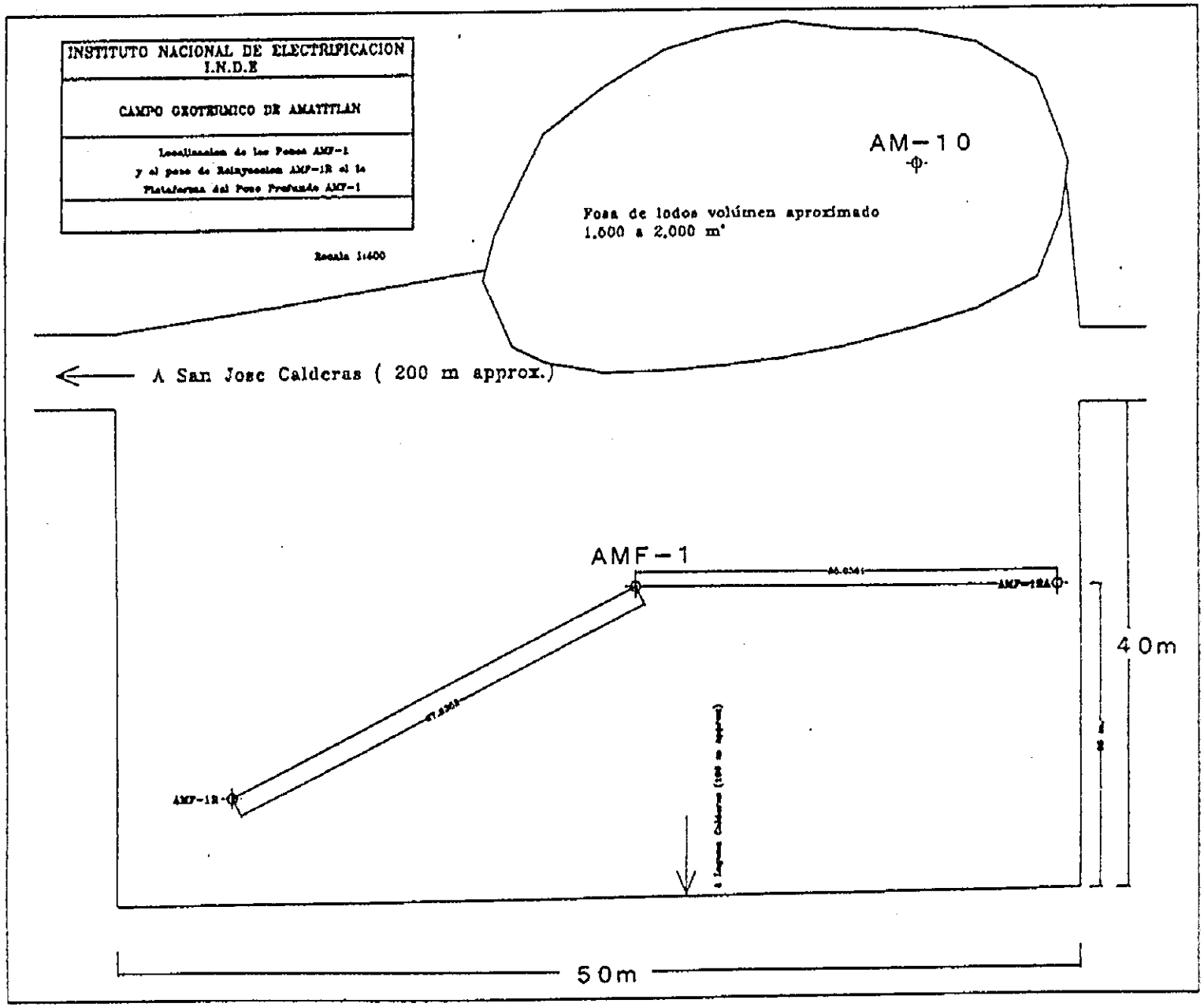
第6.3.18図(1) 地下温度分布図（標高1,150m準）



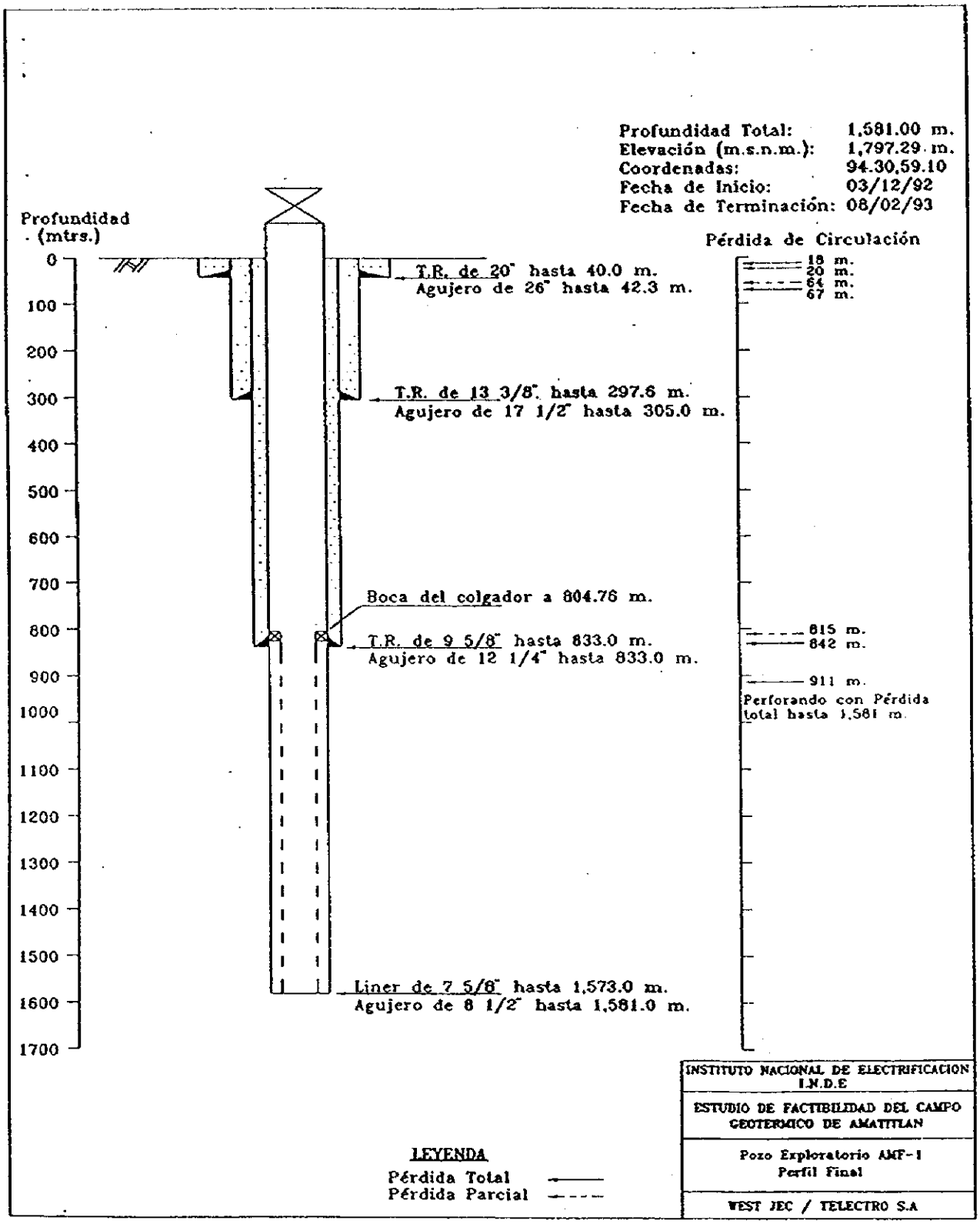
第6.3.18図(2) 地下温度分布図（標高800m準）

第6.3.2 表　大口径調査井掘削の使用機材

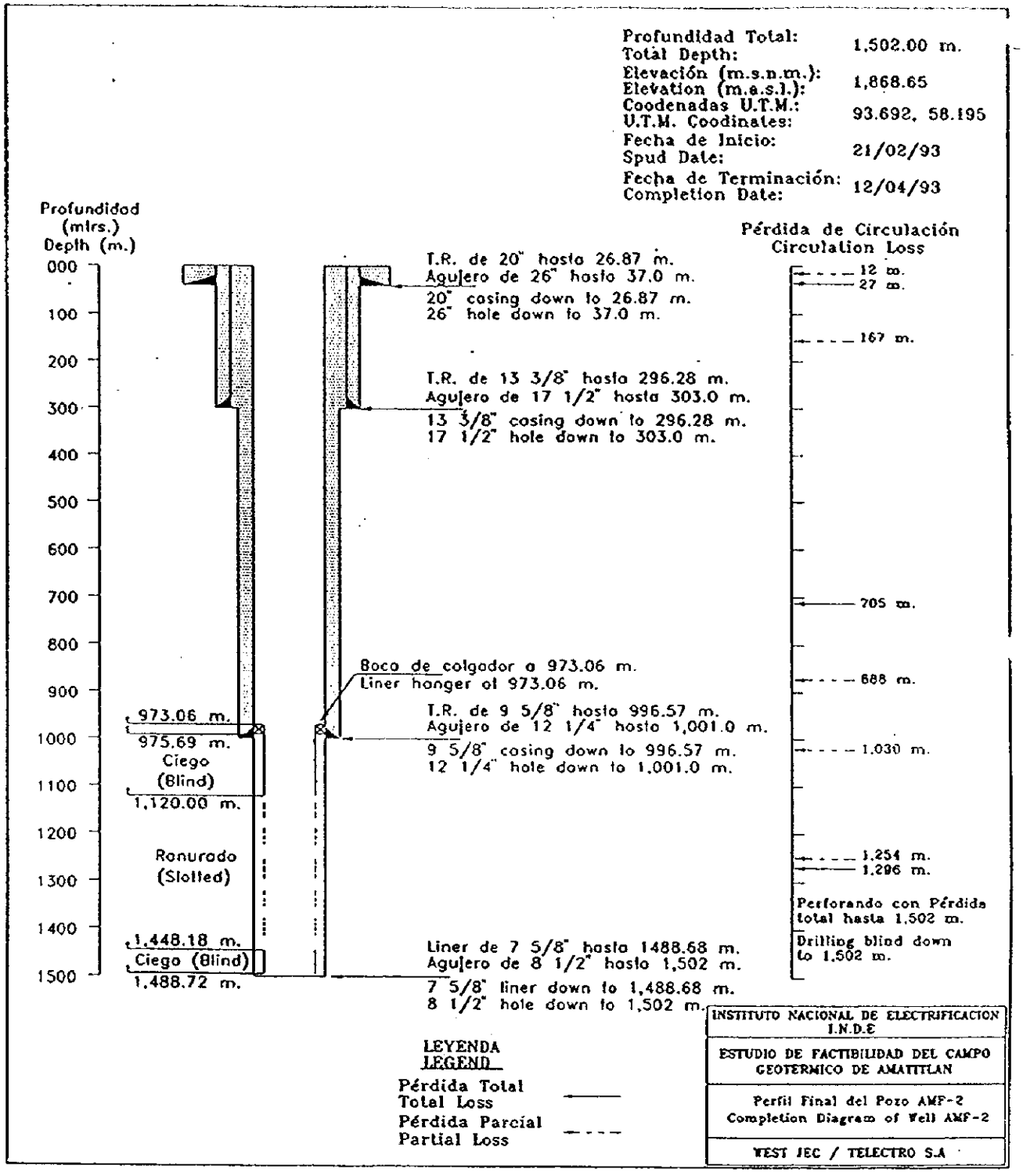
a.Rig	Ideco H-1000 self-propelled rambler rig equiped with Caterpillar 1000 HP engine
b.Mad pump	Ideco T-800 triplex slush pump with 800 HP engine 2 sets
c.Rotary	Ideco LR-275
d.Drilling block	Ideco UTB-265
e.Swivel	Ideco TL-300
f.BOP	Annular-#3000,5000　Ram-#3000,5000
g.Cementing Unit	Dowell Truck-mounted cementing unit
h.Drill pipe	4.5"XH-Grade-G
i.Drill collar	9",8",6.5"
j.Mud tanks	Shaker,Suction,Mixing
k.Drilling tools	Stabilizers,Reamers



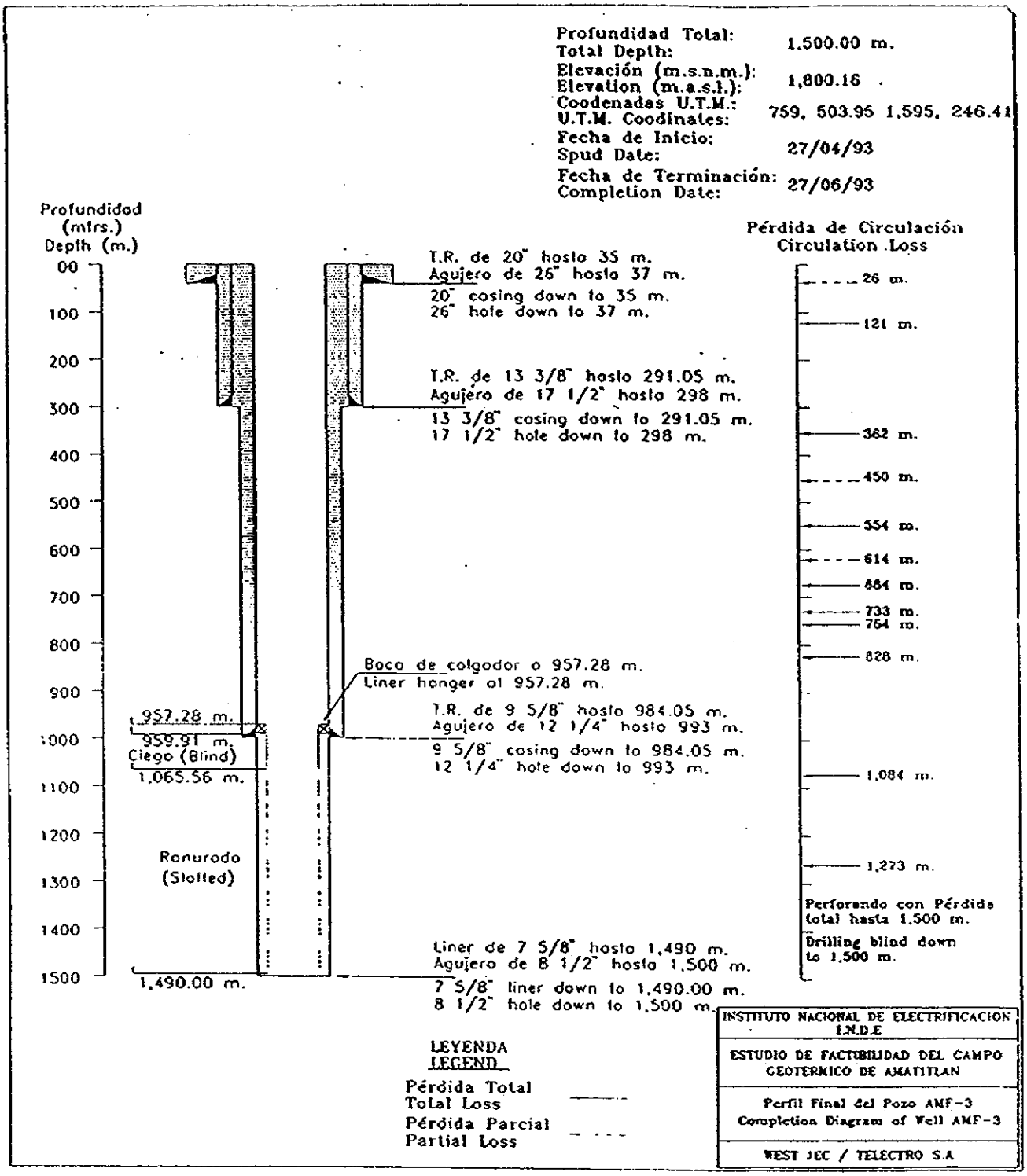
第6.3.19図　ＡＭＦ－１の敷地見取り図



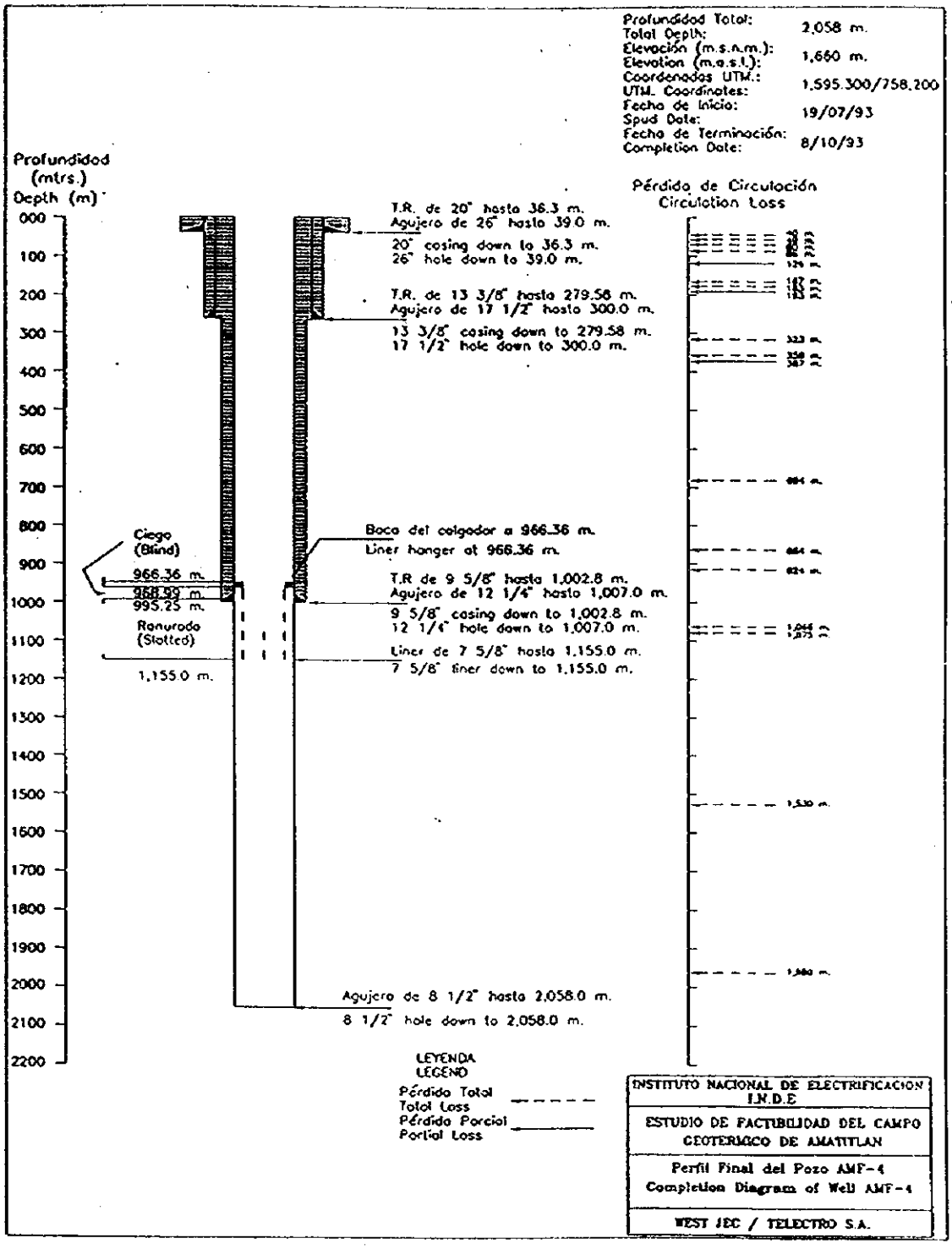
第6.3.20図(1) 大口径調査井のケーシングプログラム（ＡＭＦ－１）



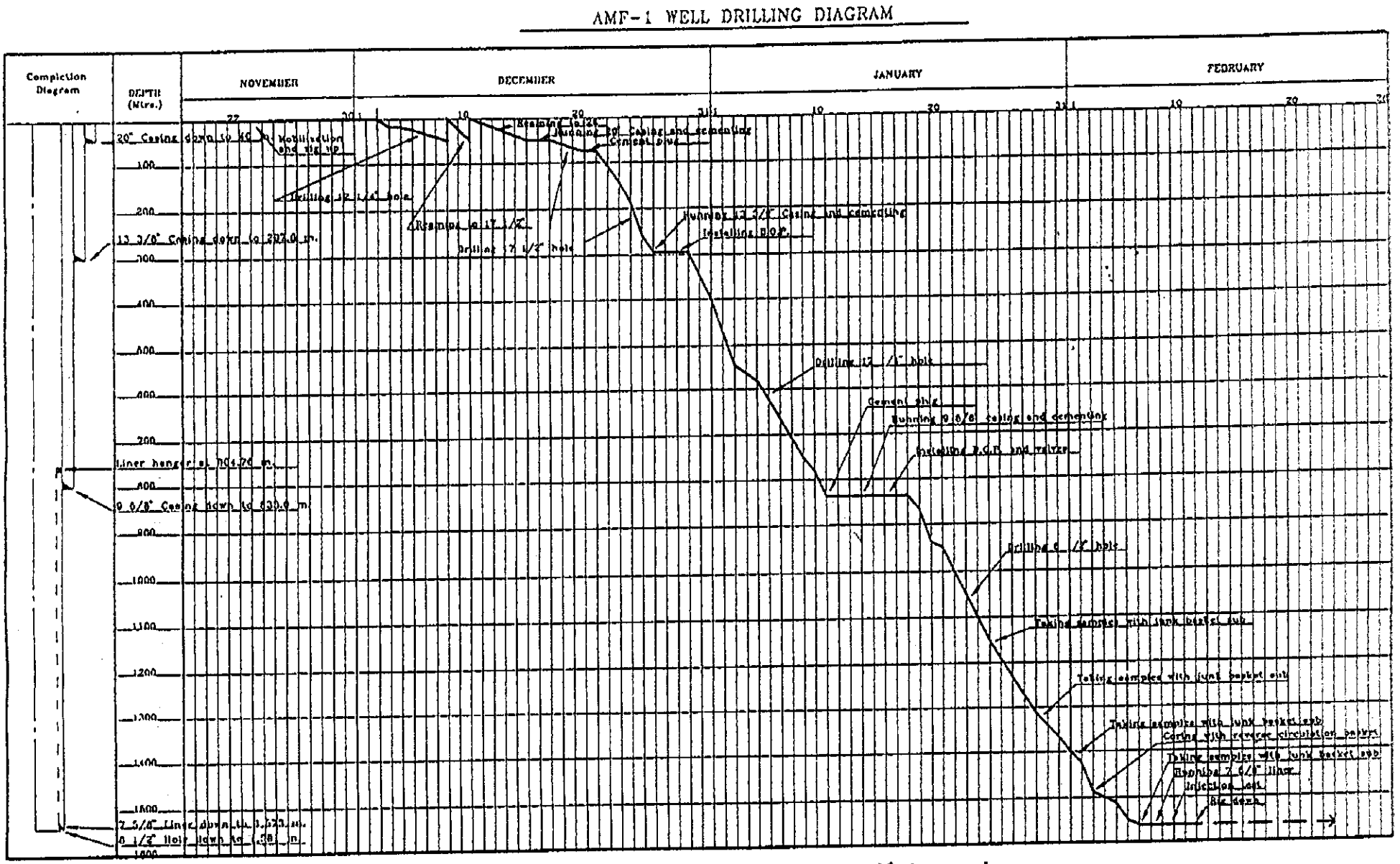
第6.3.20図(2) 大口径調査井のケーシングプログラム（AMF－2）



第6.3.20図(3) 大口径調査井のケーシングプログラム（AMF－3）



第6.3.20図(4) 大口径調査井のケーシングプログラム（ＡＭＦ－４）



第6.3.21図　ＡＭＦ－１のドリリングチャート

（一部）、深度 1,254m（一部）、深度 1,296～1,502m（全量）の 3 区間で認められた。注水試験は、67t／h、120t／h の 2 段の流量で行われ、透水性が良好であることが確認された。温度検層は注水試験の前・中・後で実施され、最高温度は深度 1,480m で 295℃である。透水性の良好な箇所（生産ゾーン）は深度 1,300 ～1,400m 間である。また、圧力検層から静水位は約 600m である。

（ウ）AMF－3

AMF－3 は、Pacaya 火山の北北東方 4.2km の標高 1,800m の地点で掘削され、AMF－1 の掘削地点から北東方に約 1km 離れている。掘削深度は 1,500m で、掘削期間（注水試験期間も含む）は 1993 年 4 月 27 日から、同年 6 月 28 日までの 63 日間である（第 6.3.25 図）。また、AMF－2 からのリグ移動期間（AMF－2 のリグダウン、移動、AMF－3 のリグアップ）は 15 日間である。

本坑井の地質は、深度 0～660m;後カルデラ火山岩類、深度 660～1,120m;カルデラ火山岩類、深度 1,120～1,500m;先カルデラ火山岩類からなる。この坑井では、基盤岩類は捕捉されていない（第 6.3.26 図）。

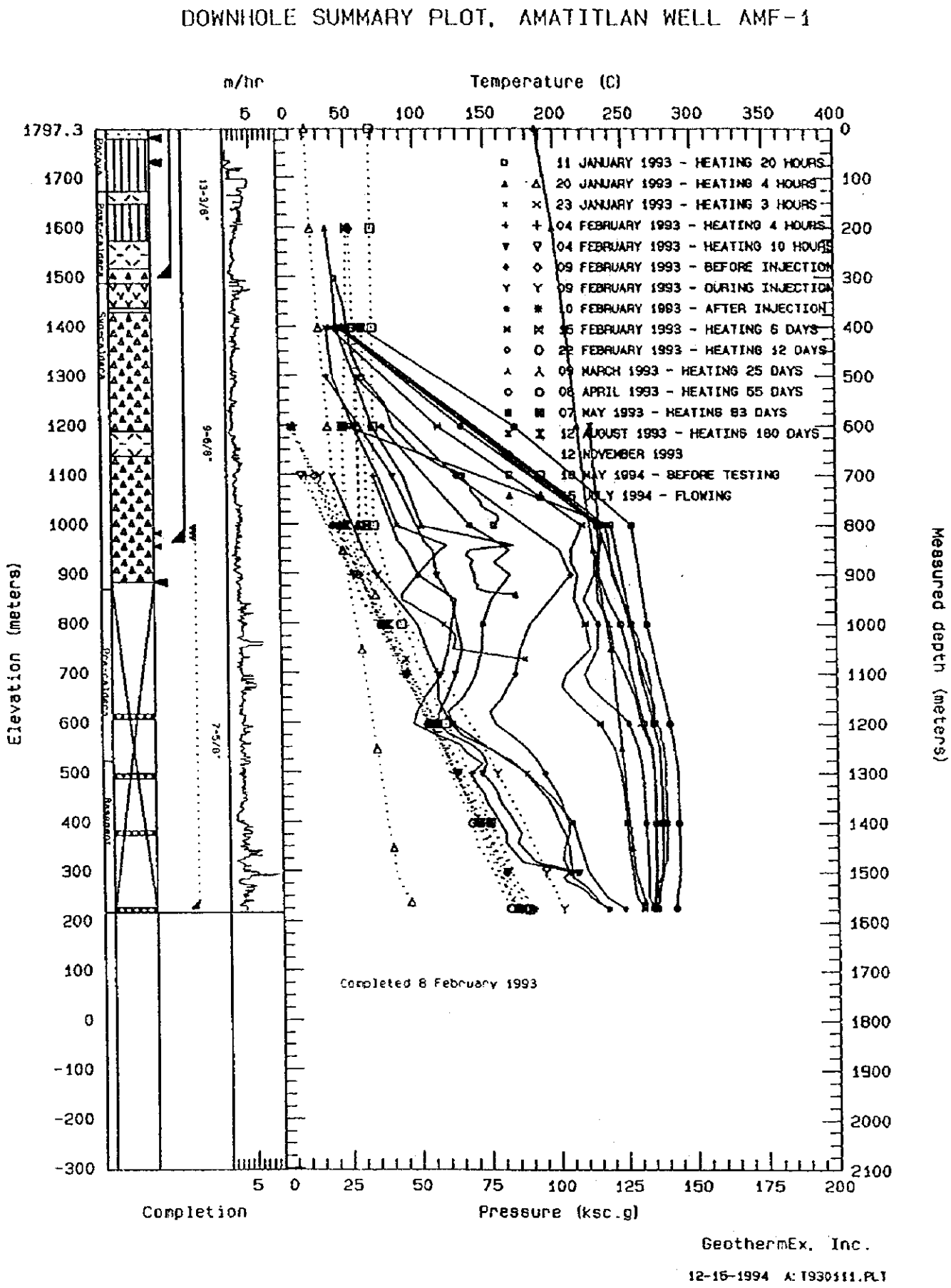
掘削中に逸水は、深度 828m（一部）、深度 1,084m（一部）、深度 1,273～1,530m（全量）の 3 区間で認められた。注水試験は 230t／h の流量で行れ、透水性が良好であることが確認された。温度検層は注水試験の前・中・後で実施され、最高温度は深度 1,000m で 239℃である。温度曲線は深度 1,000m まで上昇し、それ以深では低下し、坑底の深度 1,500m では 200℃以下になる。また、圧力検層から静水位は約 600m である。

（エ）AMF－4

AMF－4 は、Pacaya 火山の北北西方 4.5km の標高 1,660m の地点で掘削され、AMF－1 の掘削地点から北西に約 1.5km 離れている。掘削深度は 2,058m で、掘削期間（注水試験期間も含む）は 1993 年 7 月 19 日から、同年 10 月 12 日までの 86 日間である（第 6.3.27 図）。また、AMF－3 からのリグ移動期間（AMF－3 のリグダウン、移動、AMF－4 のリグアップ）は 21 日間である。

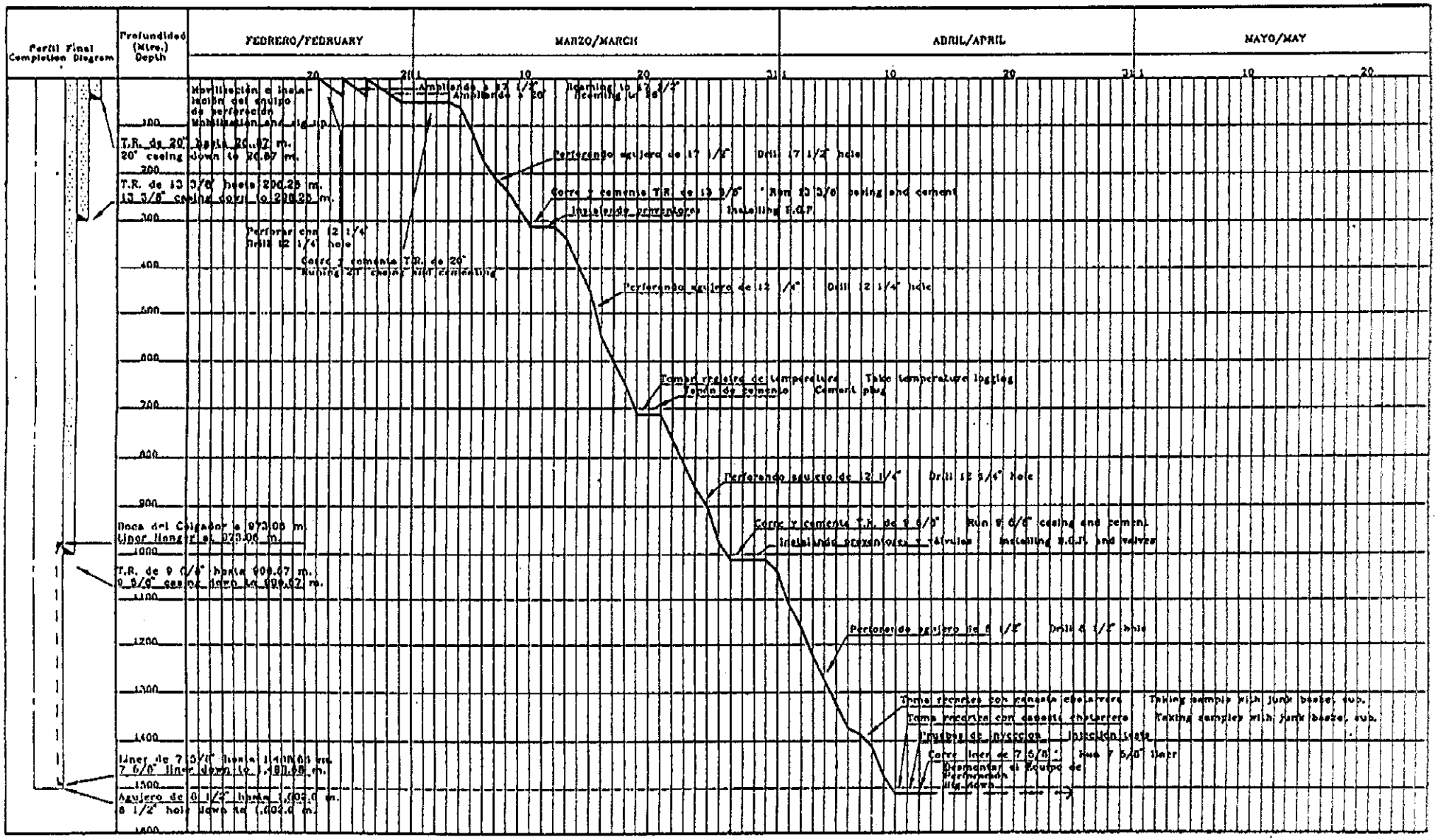
本坑井の地質は、深度 0～310m;後カルデラ火山岩類、深度 310～880m;カルデラ火山岩類、深度 880～1,300m;先カルデラ火山岩類、深度 1,300～2,058m;基盤岩類からなる。この坑井では、基盤岩類としてダイヤベースと花崗岩類が確認された（第 6.3.28 図）。

掘削中に逸水は、深度 864m（一部）、深度 924m（一部）、深度 1,066m（一部）、深度 1,075m（一部）、深度 1,530m（一部）、深度 1,980m（一部）で認められたが、全量逸水は生じなかった。注水試験は、55t／h、80t／h、120t／h の多段の流量で行れ、透水性が不良であることが確認された。温度検層は注水試験の前・中・後で実施され、最高温度は深度 1,800m で 240℃である。また、圧力検層から静水位は約 600m である。

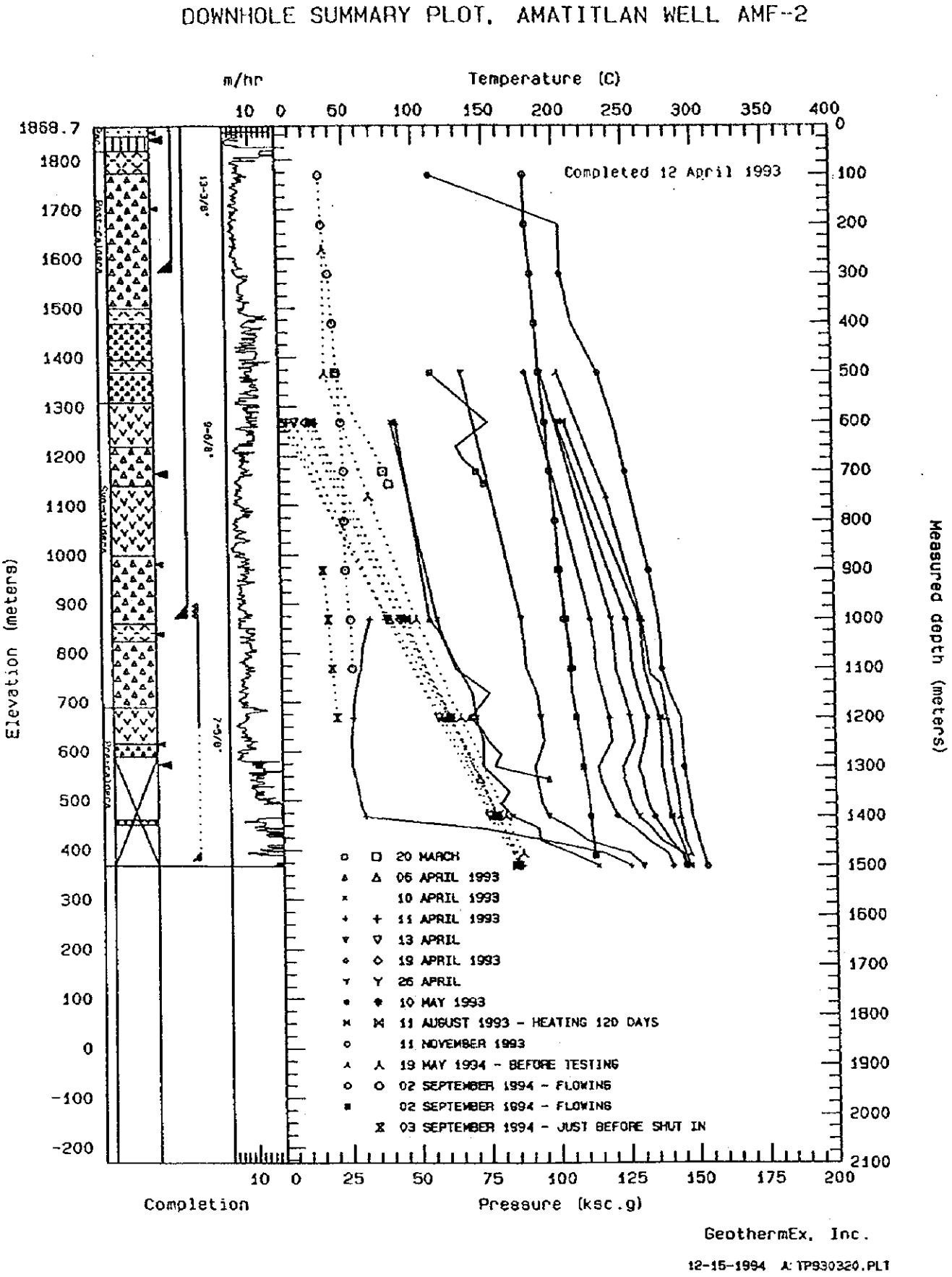


第6.3.22図　ＡＭＦ－１の坑井調査結果

DIAGRAMA DE PERFORACION DEL POZO AMF-2
DRILLING DIAGRAM OF WELL AMF-2

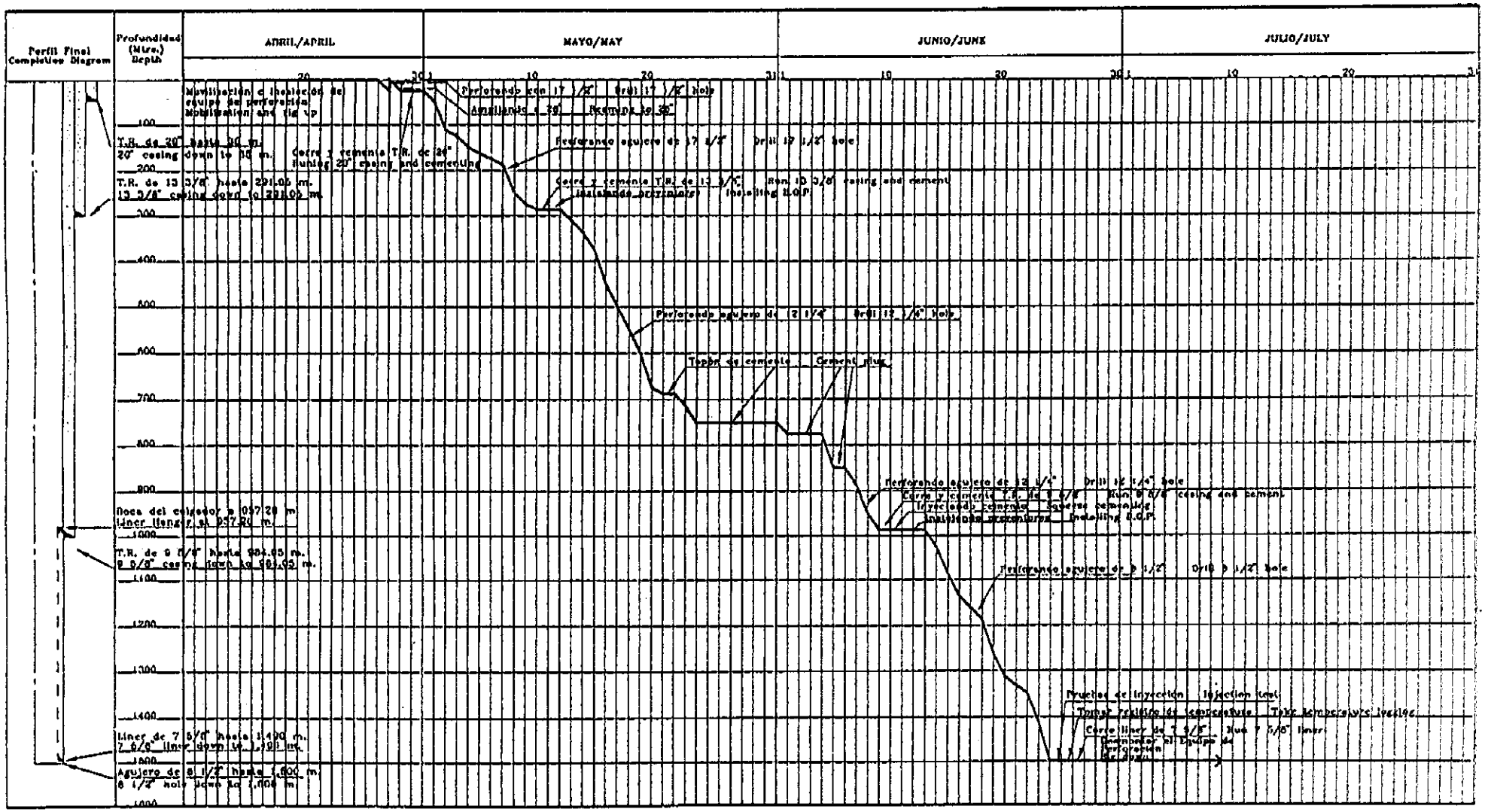


第6.3.23図　AMF－2のドリリングチャート

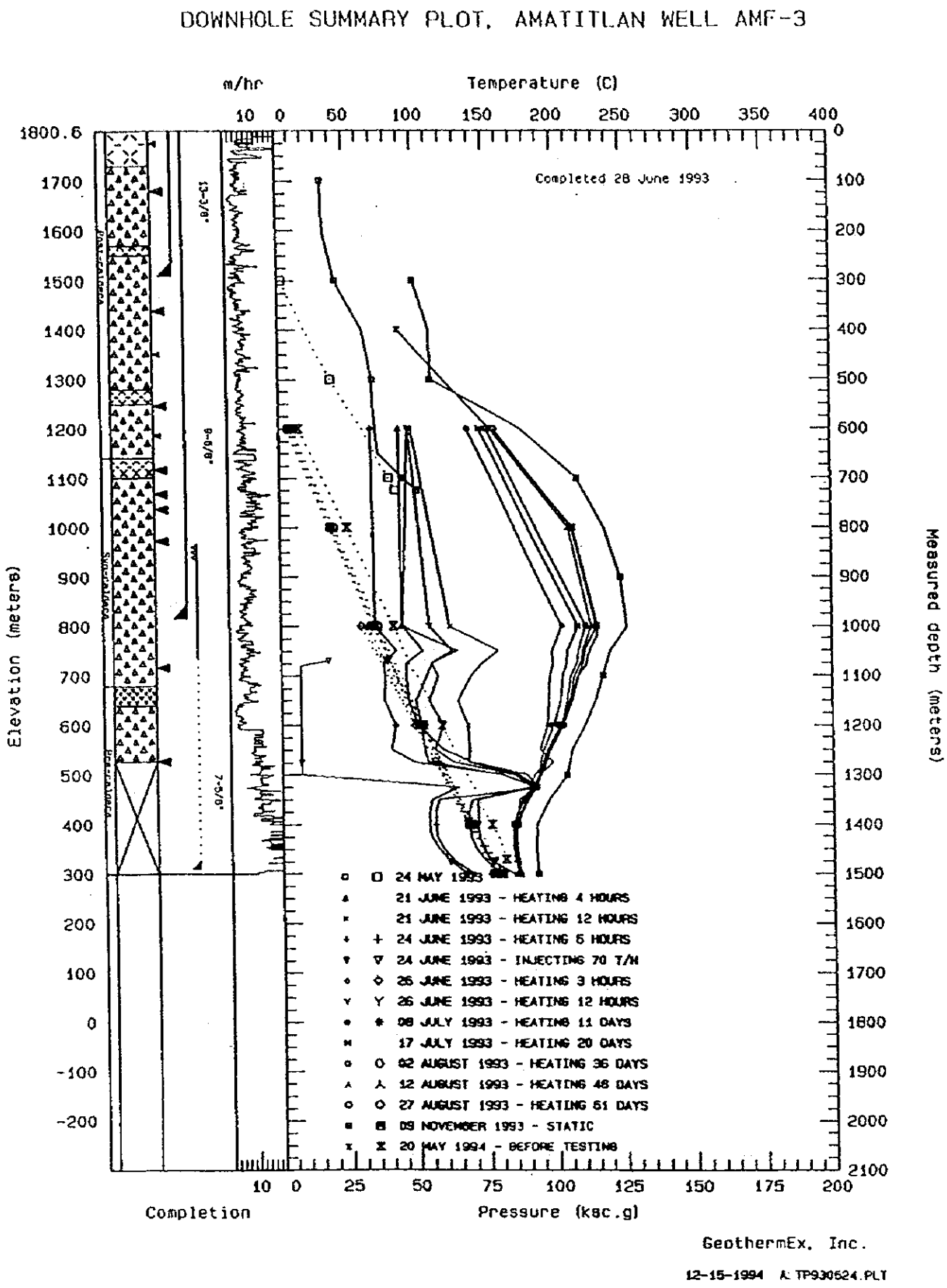


第6.3.24図　ＡＭＦ－２の坑井調査結果

DIAGRAMA DE PERFORACION DEL POZO AMF-3
DRILLING DIAGRAM OF WELL AMF-3



第6.3.25図　AMF－3のドリリングチャート



第6.3.26図　ＡＭＦ－３の坑井調査結果