

坑井AMJ-1の第2回噴出試験の坑井特性

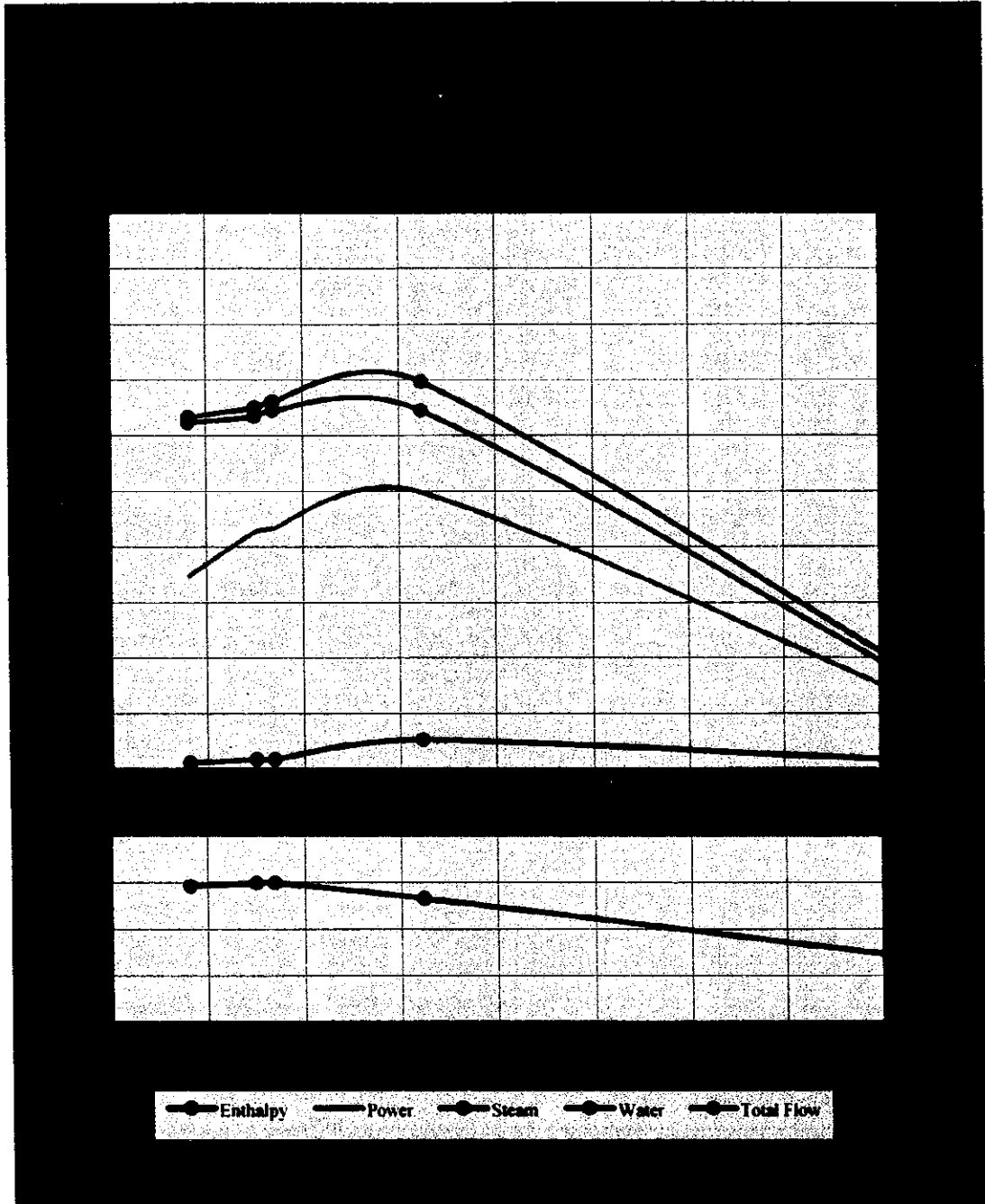
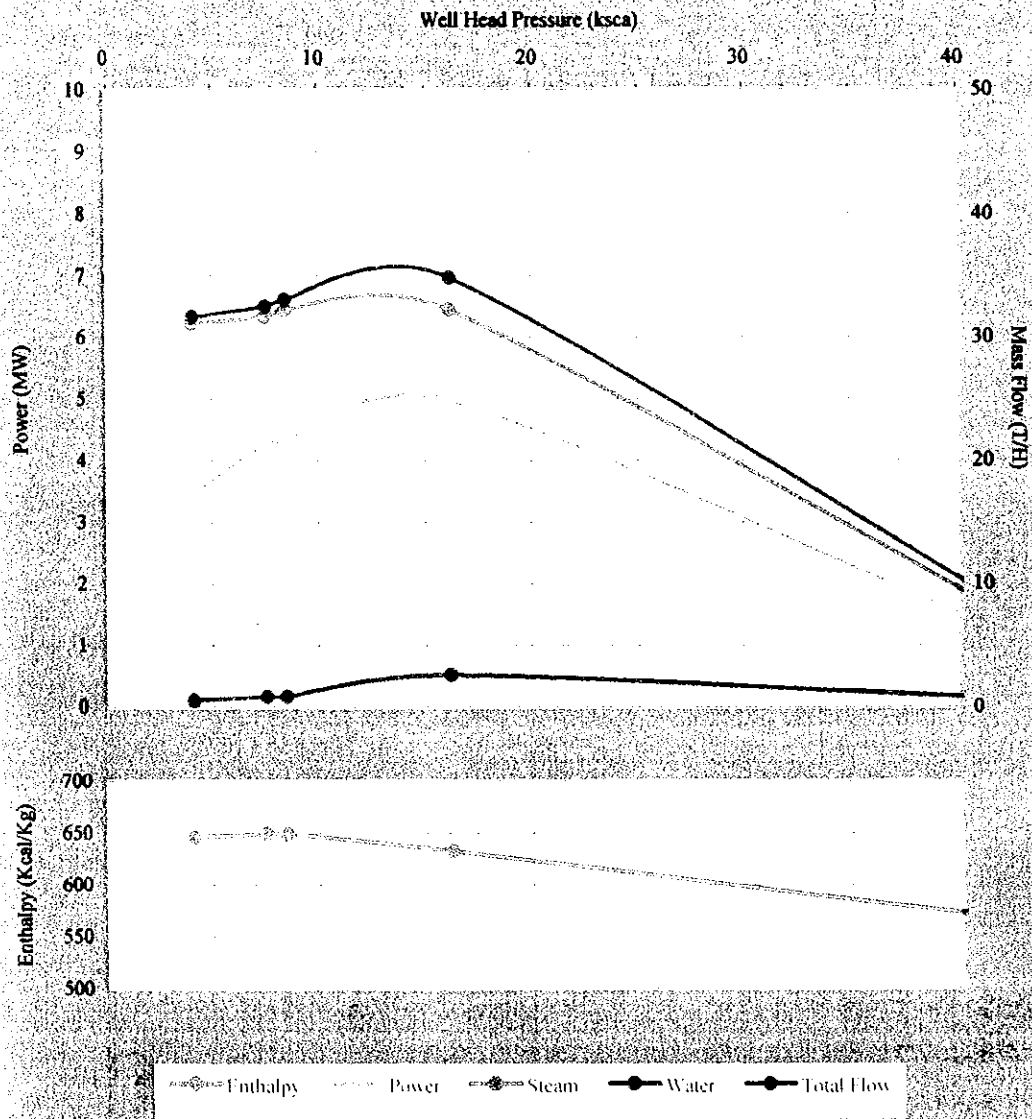
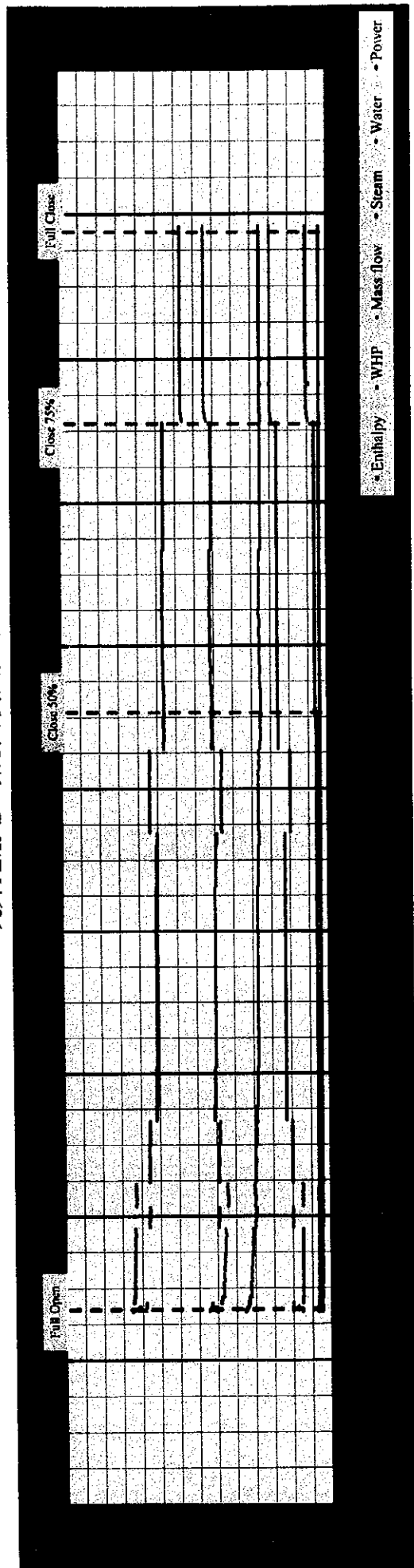


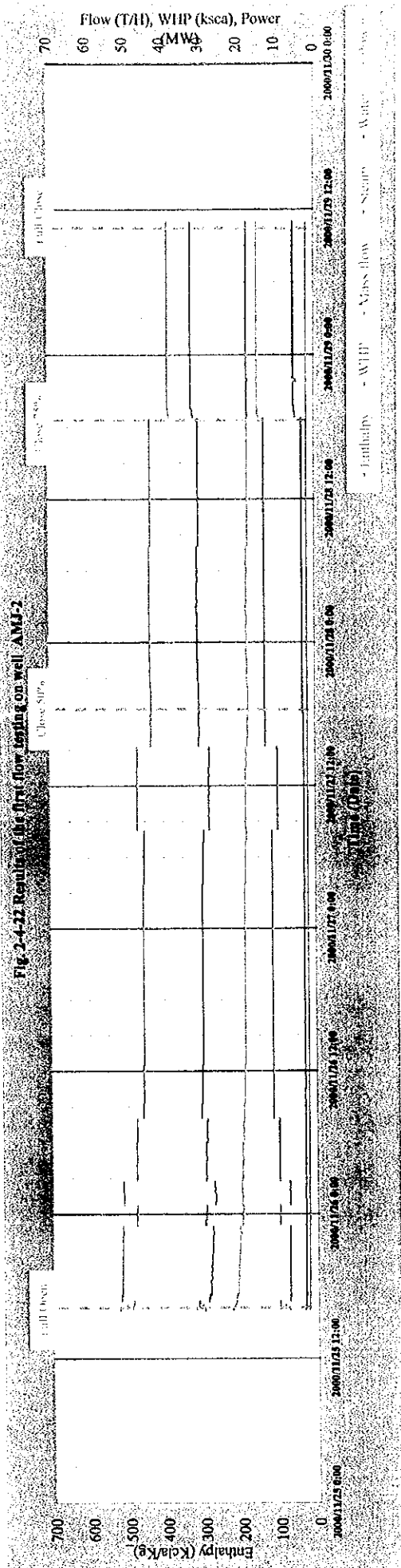
Fig. 2-4-21 Well characteristic curve for the 2nd. flow testing on well AMJ-1



坑井AMJ-2の第1回噴出試験結果



坑井AMI-2の第1回噴出試験結果



坑井AMJ-2の第1回噴出試験の坑井特性

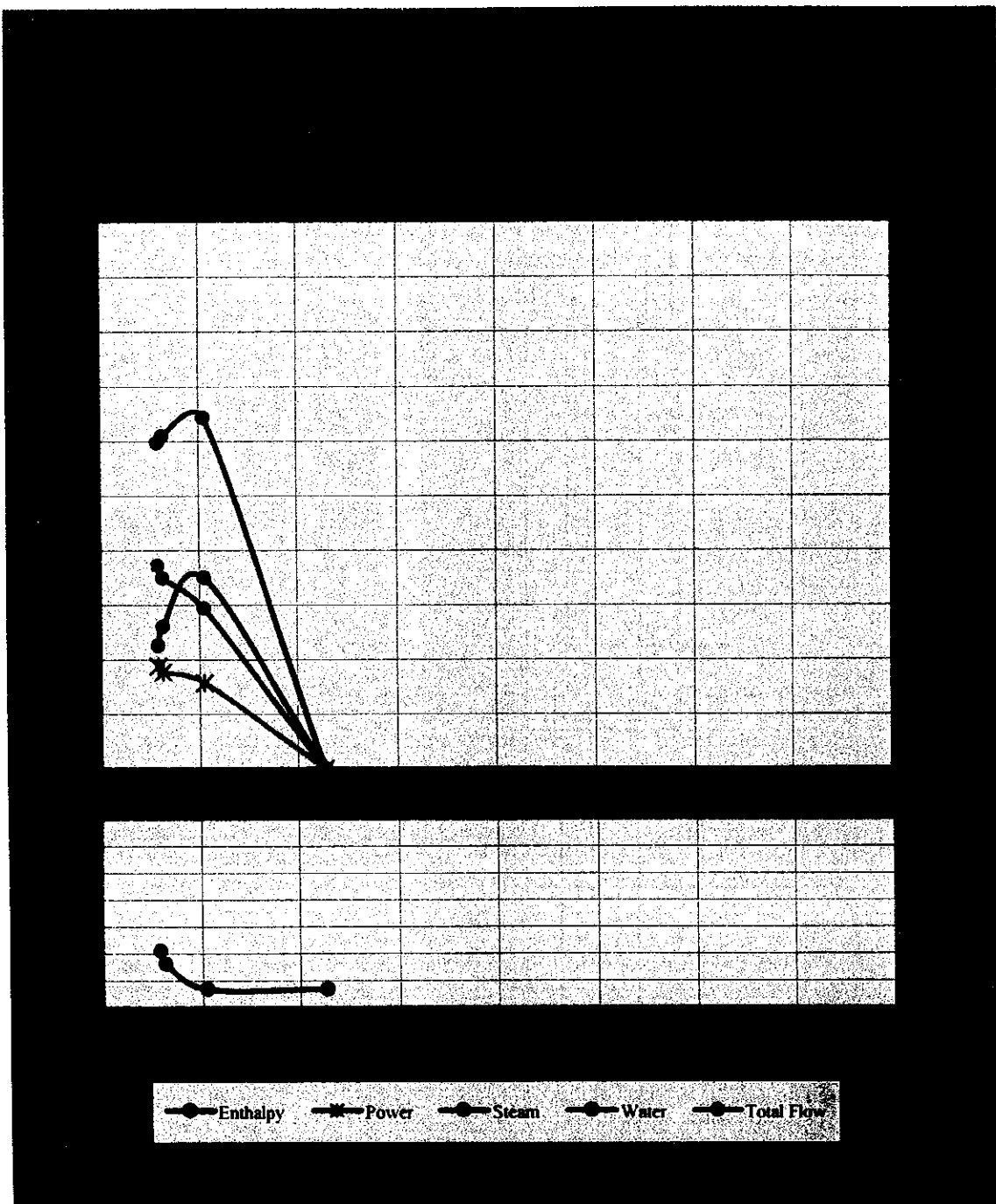
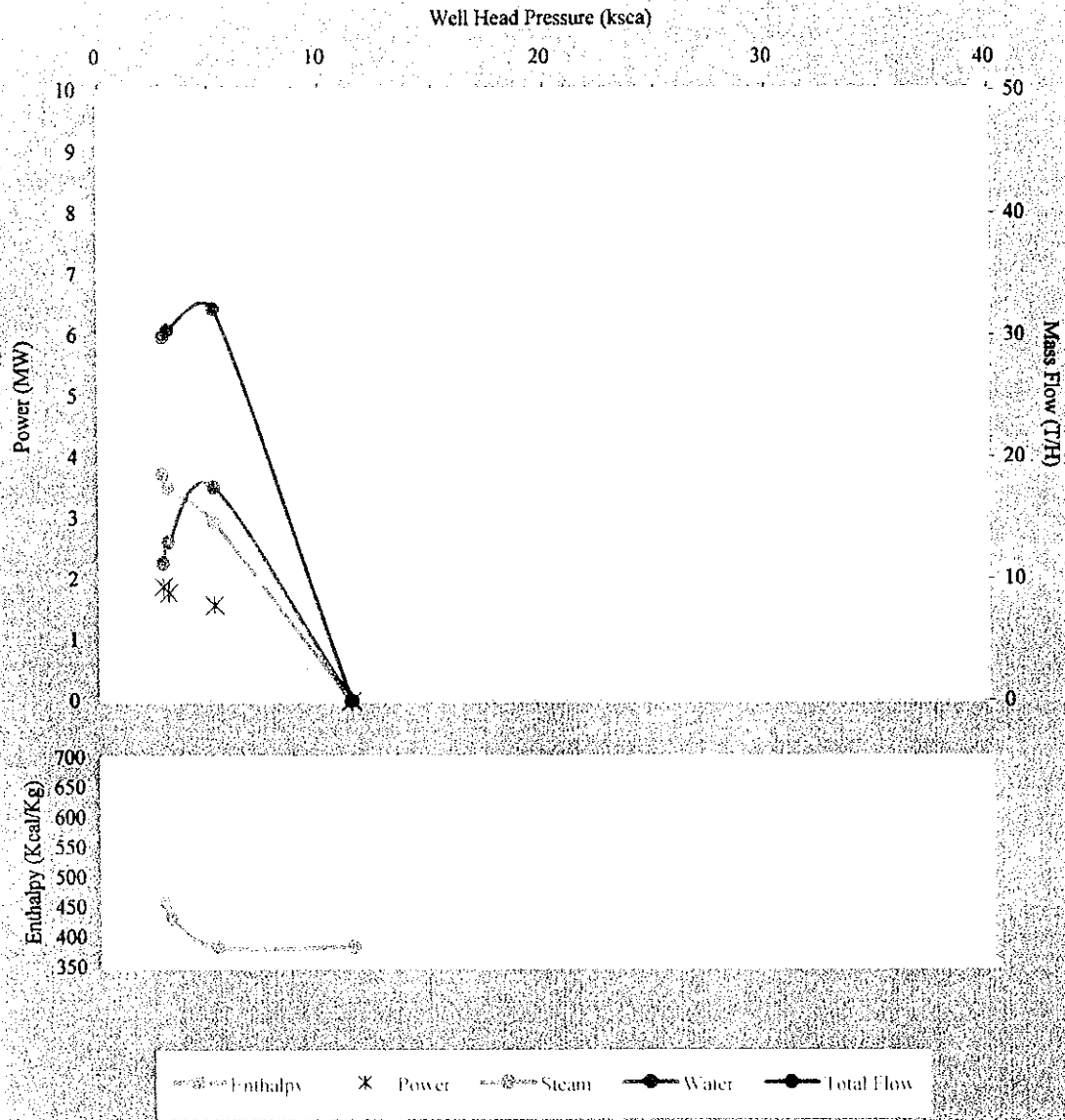
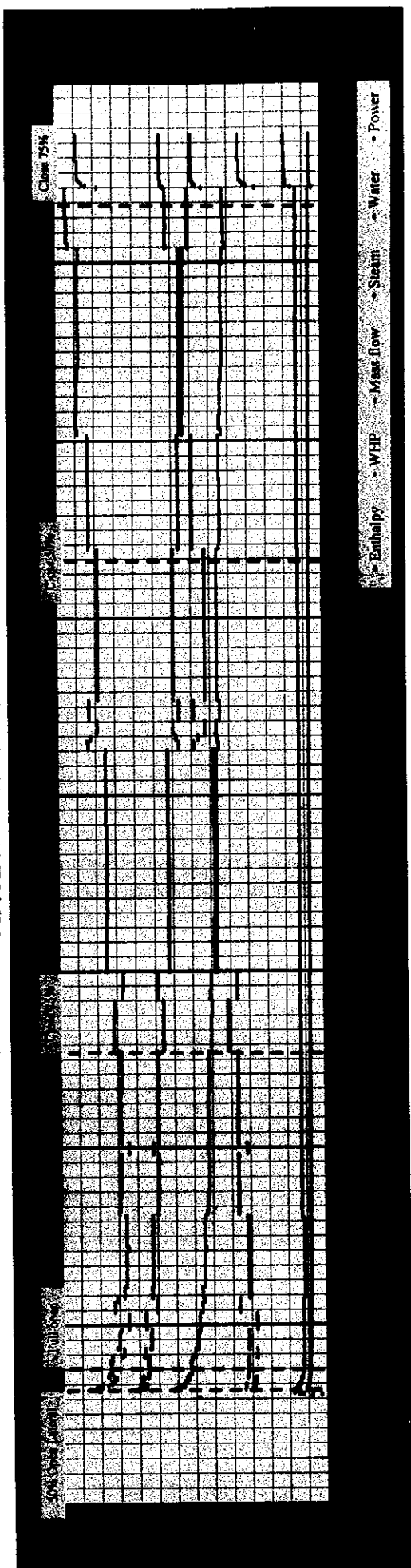


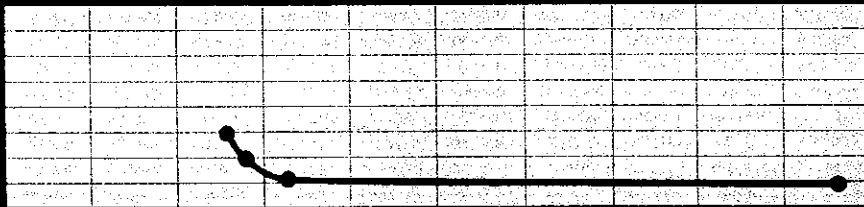
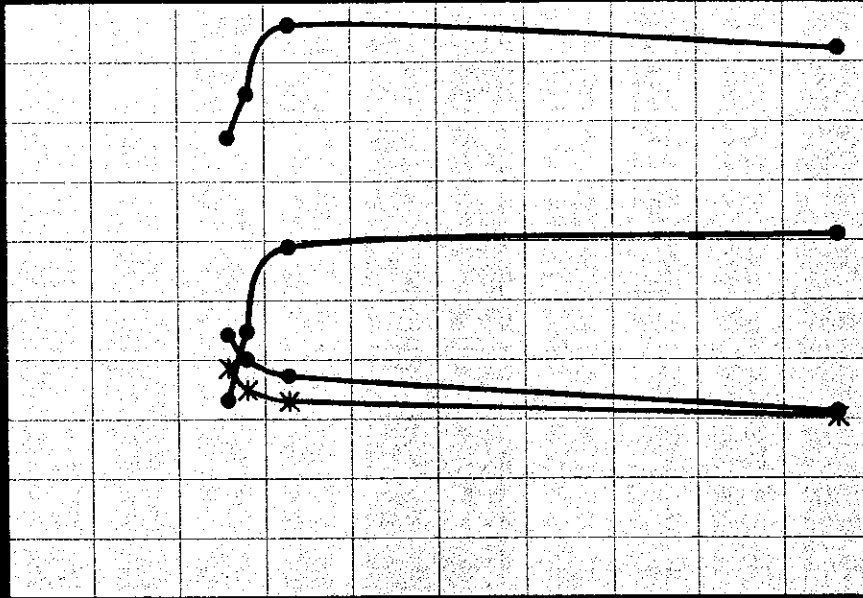
Fig. 2-4-23 Well characteristic curve for the 1st flow testing on well AMJ-2



坑井 AMJ-2 の第 2 回 噴出 試験 結果



坑井AMJ-2の第2回噴出試験の坑井特性



● Enthalpy * Power ● Steam ● Water ● Total Flow

Fig. 2-4-25 Well characteristic curve for the 2nd. flow testing on well AMJ-2

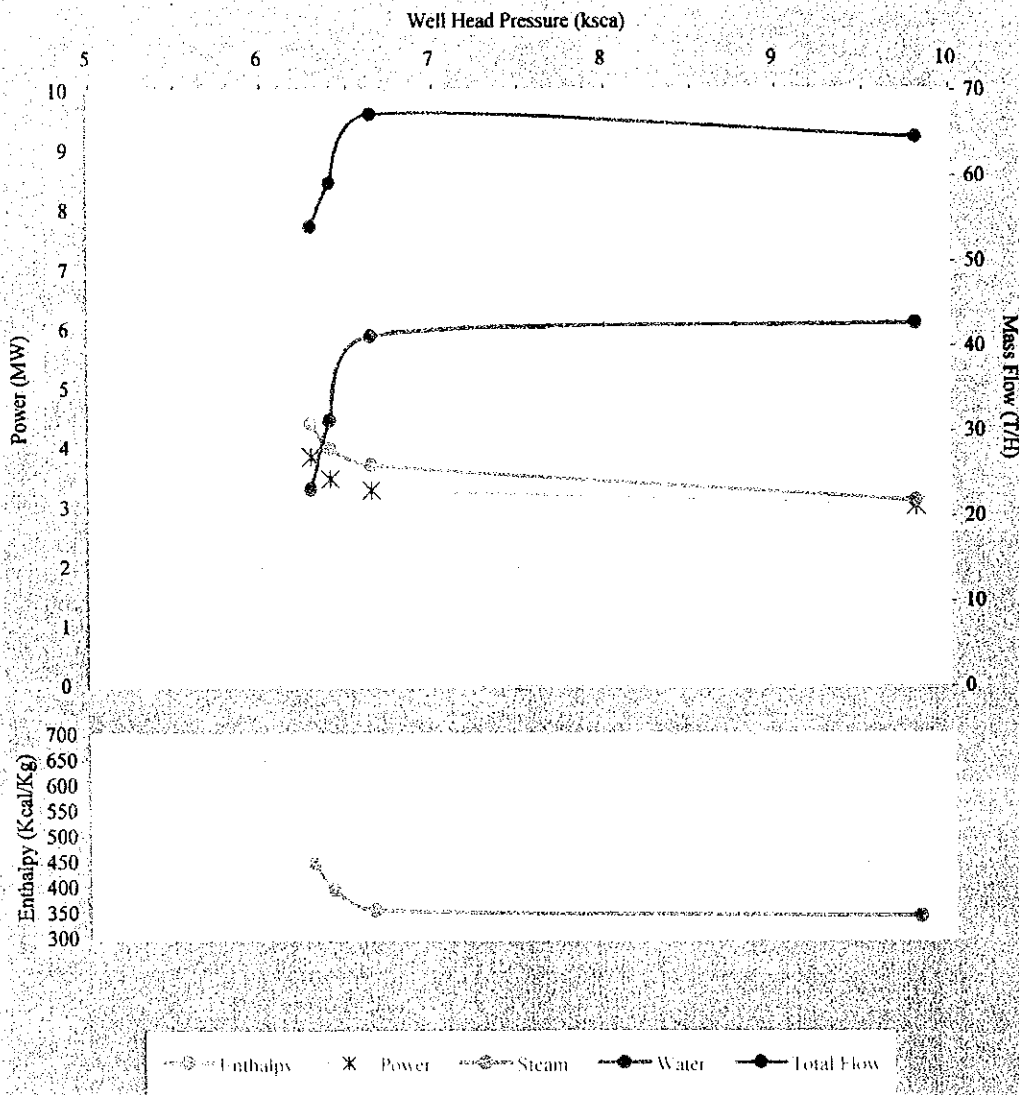


Table 2-4-1 Morphological Data on Zircon
ジルコン結晶系解析結果

Sample No.	Width (mm)	Height (mm)	Prism Index	Pyramid Index	Elongation Index	Flatness Index	Zircon Index	Remark
1602	0.045±0.014	0.120±0.055	0.68±0.16	0.43±0.10	0.39±0.12	0.87±0.14	7449(45)	from outcrop
1611	0.026±0.007	0.055±0.016	0.58±0.15	0.39±0.08	0.33±0.14	0.90±0.06	6439(26)	from outcrop
1703	0.043±0.019	0.102±0.037	0.71±0.13	0.41±0.12	0.40±0.10	0.92±0.05	7449(43)	from outcrop
1901	0.049±0.010	0.093±0.024	0.69±0.10	0.35±0.06	0.32±0.07	0.93±0.09	7439(49)	from outcrop
2003	0.027±0.006	0.051±0.018	0.62±0.11	0.36±0.09	0.28±0.14	0.86±0.10	6439(27)	from outcrop
2101	0.046±0.018	0.056±0.026	0.61±0.06	0.33±0.17	0.21±0.05	0.92±0.06	6329(46)	from outcrop
2215	0.046±0.016	0.112±0.057	0.76±0.09	0.47±0.07	0.31±0.13	0.94±0.03	8539(46)	from outcrop
2506	0.057±0.011	0.100±0.023	0.73±0.10	0.42±0.05	0.22±0.06	0.94±0.04	7429(57)	from outcrop
2803	0.050±0.013	0.112±0.038	0.72±0.09	0.50±0.08	0.27±0.08	0.90±0.07	7539(50)	from outcrop
2806	0.048±0.013	0.098±0.039	0.66±0.08	0.44±0.13	0.27±0.19	0.94±0.04	7439(48)	from outcrop
1902	-	-	-	-	-	-	Zr-free	from outcrop
2402	-	-	-	-	-	-	Zr-free	from outcrop
2812	-	-	-	-	-	-	Zr-free	from outcrop
Cerro Limon	0.066±0.019	0.158±0.043	0.75±0.13	0.47±0.07	0.36±0.11	0.81±0.11	8548(66)	from outcrop, *1)
Amatitlan	0.090±0.016	0.174±0.037	0.54±0.23	0.33±0.05	0.35±0.07	0.89±0.08	5349(90)	from outcrop, *1)
AMF-1-150m	0.081±0.021	0.168±0.028	0.62±0.10	0.44±0.05	0.30±0.11	0.88±0.09	6439(81)	*1)
AMF-2-140m	0.078±0.022	0.159±0.020	0.60±0.12	0.43±0.04	0.34±0.14	0.92±0.04	6439(78)	*1)
AMF-2-550m	0.060±0.011	0.116±0.018	0.79±0.14	0.40±0.08	0.30±0.05	0.93±0.06	8439(60)	*1)
AMF-3-50m	0.076±0.010	0.162±0.017	0.83±0.05	0.42±0.07	0.34±0.08	0.91±0.06	8439(76)	*1)
AMF-3-100m	-	-	-	-	-	-	Zr-free	*1)
AMF-3-1000m	-	-	-	-	-	-	Zr-free	*1)
AMF-4-160m	-	-	-	-	-	-	Zr-free	*1)
AMF-4-1000m	-	-	-	-	-	-	Zr-free	*1)
AMF-4-1300m	0.069±0.015	0.168±0.043	0.46±0.21	0.39±0.09	0.39±0.10	0.88±0.09	5449(69)	*1)
AMJ-1-310m	0.083±0.019	0.186±0.059	0.73±0.09	0.47±0.05	0.40±0.09	0.90±0.07	7549(30)	
AMJ-1-410m	0.075±0.018	0.148±0.041	0.73±0.05	0.44±0.06	0.37±0.08	0.90±0.05	7449(13)	
AMJ-1-1130m	0.057±0.011	0.159±0.041	0.63±0.07	0.47±0.08	0.48±0.13	0.89±0.03	6559(10)	
AMJ-1-1630m	0.099±0.017	0.234±0.089	0.60±0.21	0.45±0.09	0.40±0.09	0.86±0.10	6549(30)	
AMJ-1-1700m	0.105±0.029	0.224±0.055	0.37±0.17	0.31±0.08	0.44±0.08	0.85±0.10	4349(40)	
AMJ-2-190m	0.049±0.006	0.102±0.024	0.75±0.09	0.46±0.07	0.40±0.06	0.91±0.07	8549(17)	
AMJ-2-300m	0.081±0.016	0.176±0.051	0.74±0.09	0.48±0.04	0.39±0.08	0.90±0.08	7549(50)	
AMJ-2-440m	0.082±0.026	0.162±0.052	0.73±0.08	0.43±0.06	0.40±0.09	0.89±0.07	7449(14)	
AMJ-2-1250m	0.099±0.013	0.228±0.049	0.65±0.18	0.44±0.08	0.42±0.09	0.93±0.05	7449(13)	
AMJ-2-1650m	0.080±0.017	0.191±0.042	0.73±0.09	0.45±0.05	0.45±0.08	0.87±0.06	7559(80)	

*1) : Reported in West JEC and Telectro (1995)

Table 2-4-2 Volcanic and Alteration Age around the Amatitlan Geothermal Field
Amatitlan地熱地帯周辺の岩石および変質年代

	Outcrop		Depth(m)				Dating(ka)		T/L Dating(ka)	
	No.	AMJ-1	AMJ-2	AMF-1	AMF-2	AMF-3	F/T	K-Ar	(Volcanic)	(Alteration)
Cerro Limon Dacite									6.1±0.5	
Pacaya Volcanic Rocks										
Op Andesite	2402								8±2	
Op Andesite	2806								9±2	
Op Andesite	2812								4±1	
Basalt			130m						11±2	
Basalt			190m				270±110			
Px-Andesite		150m							11±2	
Post-Calderic Rocks										
Rd Acidic Andesite (dacite)	1602	310m					80±60			
(dacite)			300m				180±80			3.2±0.4
							600±140			
Sf Pumice	2003						150±80		92±10	
	2208									16±4
Bl Scoria										
Lp Pyroclastics		410m					340±140			5±1
Ap Pyroclastics	1611						110±60		55±5	
Tuff Breccia				150m				11000±9400		
Hv Andesite										
Av Px-Andesite	1703						1060±220			
	2803		440m				1160±110			4.7±0.6
					140m		900±260		14100±9000	
	2206									35±5
	2215									46±6
	2217									5±1
	2805									3±1
Syn-Calderic Rocks		780m					1140±310			
		1130m					>3600			
Pre-Calderic Rocks										
Ho-Andesite			1250m				>2690			
Px-Andesite			1650m				>16100			
Px-Andesite					1300m		14100±800			
Dacite		1630m					>11700			
Basement	Granite						15200±800			

Table 2-4-4 Results of X-ray Diffraction Analysis of Well AMJ-2
 坑井AMJ-2におけるX線回折解析結果

Depth (m)	Alteration Minerals													Relics																								
	I				II				III				IV					V					Others					Relics										
	Opal	Tridymite	Cristobalite	Quartz	Alunite	Halloysite	Kaolinite	Dickite	Pyrophyllite	Smectite	Chl./Smect.	Mica/Smect.	Chlorite	Sericite	Stiblite	Heulandite	Mordenite	Laumontite	Wairekite	Na-feldspar	K-feldspar	Gypsum	Anhydrite	Calcite	Pyrite	Hematite	Gibbsite	Epidote	Diaspore	Sulfphur	Feldspar	Clino-Pyroxene	Ortho-Pyroxene	Hornblende	Mica			
100			2							0.5													1									5						
200			2							2																0.5							5					
300																								1									7					
400										1																							6					
500										2																							13					
600										4																							14					
700										0.5																							6					
800										0.5															0.5								6					
900										0.5																							7					
1000										0.5																							8					
1100														1																			6					
1200														1																			9					
1300														1																			8					
1400														1																			6					
1500														1																			11					
1600													0.5																				6					
1700													1																				5					

Table 2-4-5 Result of chemical and isotope analyses of hot water samples
 熱水試料の化学・同位体分析結果表

NAME	AMJ-1		AMJ-2a		AMJ-2b		AMJ-2c		AMF-2(1998)	
DATE	Nov/25/2000		Nov/27/2000		Nov/28/2000		Nov/29/2000		Oct/22/1998	
W. H. P. (psi)	700		29		33		64		32.7atg	
SAMPLING POINT	silencer muffler		weir box		weir box		weir box		sampling separator	
WATER-TEMP. (°C)	84		90		90		90		<60	
pH(18°C)	7.95		7.57		7.56		7.55		5.25	
EC (μS/cm)	4230		13700		13800		13400		9030	
TSM (mg/L)	3230		9440		9500		9370		6150	
	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L
Na	760	33.06	2540	110.48	2520	109.61	2510	109.17	1630	70.90
K	132	3.38	523	13.38	524	13.40	531	13.58	345	8.82
Ca	10.3	0.51	73.3	3.66	72.5	3.62	67.1	3.35	39.1	1.95
Mg	0.071	0.01	0.117	0.01	0.086	0.01	0.071	0.01	0.018	0.00
total cation		36.95		127.52		126.63		126.11		81.67
Cl	1220	34.41	4480	126.35	4500	126.91	4420	124.66	2970	83.76
SO ₄	28.2	0.59	39.3	0.82	36.7	0.76	32.6	0.68	11.7	0.24
HCO ₃	137	2.25	55	0.90	54	0.88	49	0.80	37	0.61
CO ₃	n. d.	0.00	n. d.	0.00	n. d.	0.00		0.00	n. d.	0.00
total anion		37.24		128.07		128.56		126.14		84.61
	mg/L		mg/L		mg/L		mg/L		mg/L	
Li	1.35		19.5		18.7		18.3		9.90	
Fe	0.26		0.50		0.22		0.38		0.16	
Al	0.35		0.38		0.15		0.20		0.58	
Sr	0.14		0.45		0.41		0.37		0.36	
F	0.79		1.98		2.07		1.91		0.49	
B	42.0		75.6		77.1		74.1		45.9	
Br	5.1		17.9		18.1		17.8		10.1	
I	0.74		0.99		0.91		0.96		1.52	
As	3.56		8.69		8.64		8.41		5.39	
Hg	-		<0.0005		<0.0005		<0.0005		0.0009	
T-CO ₂	111		134		174		139		68	
H ₂ S	-		<0.04		<0.04		<0.04		3.76	
T-SiO ₂	765		1030		1100		1130		745	
δ D(H ₂ O) (‰)	-25		-33		-36		-36		-46	
δ ¹⁸ O(H ₂ O) (‰)	1.5		-1.1		-1.3		-1.6		-3.7	
δ ¹⁸ O(SO ₄) (‰)	-		0.8		2.0		2.0		1.1	
δ ³⁴ S(SO ₄) (‰)	-		10.7		11.5		12.0		15.8	
δ ¹³ C(HCO ₃) (‰)	-		-16.9		-22.8		-22.4		-5.2	
Tritium (T.U.)	-		<0.3		<0.3		<0.3		<0.3	
δ D(H ₂ O)* (‰)	-		-42		-42		-43		-	
δ ¹⁸ O(H ₂ O)* (‰)	-		-2.3		-2.3		-2.5		-	
NOTE									separated from steam at 0.8atg	

n. d. : not determined

* : sampled at sampling separator

Table 2-4-6 Result of chemical and isotope analyses of gas samples

ガス試料の化学・同位体分析結果表

NAME		AMJ-1a	AMJ-1b	AMJ-1c	AMJ-2a	AMJ-2b	AMJ-2c	AMF-2(1998)
DATE		Nov/19/2000	Nov/20/2000	Nov/21/2000	Nov/27/2000	Nov/28/2000	Nov/29/2000	Oct/22/1998
W. H. P.	psi	200	110	46	29	33	64	32.7atg
SAMPLING POINT		sampling separator	sampling separator	sampling separator	sampling separator	sampling separator	sampling separator	sampling separator
SEPARATED PRESSURE	barG	2.4	1.3	1.4	0.5	0.7	0.5	0.8atg
GAS CONTENT	vol%	0.98	1.02	0.97	0.52	0.62	0.58	0.84
GAS CONTENT	wl%	2.28	2.41	2.29	1.22	1.46	1.36	2.01
GAS COMPOSITION								
CO ₂	vol%	89.9	93.8	92.5	88.3	90.6	87.6	96.8
H ₂ S	vol%	2.80	3.90	5.30	9.30	6.90	10.1	2.01
Residual gas	vol%	7.3	2.4	2.2	2.4	2.5	2.3	1.2
RESIDUAL GAS COMPOSITION								
N ₂	vol%	75.3	59.8	53.4	73.0	68.1	64.8	71.1
H ₂	vol%	n. d.	n. d.	7.44	8.46	12.5	13.9	17.8
CH ₄	vol%	7.42	35.5	34.3	12.3	11.7	11.0	8.67
C ₂ H ₆	vol%	-	-	-	-	-	-	0.37
O ₂	vol%	16.4	3.94	4.22	5.32	6.80	9.18	1.68
Ar	vol%	0.84	0.78	0.58	0.92	0.80	1.07	0.34
He	vol%	0.0072	0.021	0.023	0.019	0.019	0.018	0.053
Ne	vol%	0.0015	0.00074	0.00051	0.0012	0.00080	0.0027	0.0007
³ He/ ⁴ He	×10 ⁻⁶	10.37±0.13	10.31±0.14	10.45±0.15	10.46±0.14	10.52±0.12	10.44±0.09	10.64±0.09
⁴ He/ ²⁰ Ne		44	18	68	21	23	23	123
δ ¹³ C(CO ₂)	‰	-6.8	-8.4	-7.4	-6.8	-6.9	-5.9	-3.0
δ ¹³ C(CH ₄)	‰	-30.5	-30.4	-30.4	-27.4	-27.6	-26.5	-33.1
δD(H ₂)	‰	n. d.	n. d.	-379	n. d.	-409	-493	-485
δD(CH ₄)	‰	-208	-221	-227	-196	-205	-187	-227
δ ³⁴ S(H ₂ S)	‰	2.5	1.6	1.0	1.4	1.4	1.4	n. d.
CONDENSED WATER CHEMISTRY								
pH	20°C	6.20	5.85	5.66	5.03	5.03	5.00	-
Na	mg/L	0.902	0.408	0.402	0.380	0.093	0.112	-
Cl	mg/L	1.20	0.54	0.56	0.64	0.12	0.16	-
SO ₄	mg/L	1.5	1.2	0.8	1.3	0.8	1.3	-
As	mg/L	0.014	0.013	0.012	0.006	0.031	0.016	-
Hg	mg/L	0.0009	0.0011	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	-
δD(H ₂ O)	‰	-56	-55	-54	-59	-59	-60	-67
δ ¹⁸ O(H ₂ O)	‰	-3.8	-3.4	-3.3	-6.1	-6.1	-6.6	-7.7

n. d.: not determined due to low concentration of CH₄, H₂ and H₂S

Table 2-4-7 Specifications of borehole surveys for well AMJ-1 and AMJ-2

坑井 AMJ-1 および AMJ-2 の温度・圧力検層の仕様

Concept	Analysis Method	Objectives	Specifications
<p>Static pressure and temperature surveys</p> <p>Stops for surveys to Casing shoe (CS) depth Every 50m of 10 min each. Two stops should be 15m to be used as markers in the recording charts</p> <p>Stops for surveys to total depth (TD) Up to casing shoe, stops every 100m. From CS to TD, every 50m of 10 min each. Additional stops of 10 min. At total loss depths, 15 min stops at 1100m and 1500m to be used as markers in the recording charts</p>	<p>Visual interpretation</p> <p>Statistical regression Analysis on temperature data</p>	<p>Guidance to set casings</p> <p>Estimation of formations temperature</p> <p>Reservoir pressure.</p>	<p>CS depth surveys Set of three (5h, 12h and 24h) P/T surveys before cementing the 9 5/8" CSG.</p> <p>From CS to TD depth: Blind Drilling</p> <ul style="list-style-type: none"> - Drill 100 more after total loss - Run a set of three (5h, 12h and 24h) P/T surveys - Run a set of four (5h, 12h, 24h and 48h) P/T surveys at total depth <p>Normal Drilling</p> <ul style="list-style-type: none"> - Run a set of four (5h, 12h, 24h and 48h) P/T surveys at total depth <p>Logistic Field logistic and measurements done using INDE's tools and crew. Support by Driller</p>

Table 2-4-8 Specifications of Water loss temperature test in AMJ-1
坑井 AMJ-1 の逸水量確認試験要領

Concept	Analysis Method	Deliveries	Specifications
<p>Static pressure and temperature surveys while injecting water</p> <p>Remarks</p> <p>1. The capacity of the water tank was 240m³ and of the mud tank was 120m³, therefore, there was a total water storing capacity of 360m³.</p> <p>2. This capacity represents 20 hours of testing when injecting 30 m³ /h (360m³ / (30.-12.5) m³/h) which will be enough to suppress conduction effects.</p> <p>3. 19 stops in total; from 800m to 1400 10 min. stops every 100mat intervals. From 1400m to 1680m 10 minutes stops at intervals of 20 m. At 1500m and 1600m the stops were 15min. long. The total testing time was 3.25 hours. The total water used was be 100.5 m³ and the water in tanks was be 300 m³ (360-100.5+12.5*3.25). The time required to refill the tanks will was 4.8 hours.</p>	<p>Visual interpretation</p>	<p>Estimation of positions of feed points and its relative injection capacity</p>	<p>Water Injection Select the minimum flow rate available from the rig pumps or set to 30 T/H.</p> <p>P/T surveys Run P/T instruments in the hole 30 minutes after initiating injection to allow for transients to be over.</p> <p>Stops 19 stops in total; from 800m to 1400 10 min. stops every 100mat intervals. From 1400m to 1680m 10 minutes stops at intervals of 20 m. At 1500m and 1600m the stops were 15min. long.</p> <p>Pressure toll Pressure tool was be run with the temperature tool to utilize the pressure readings in the analysis of the injection tests</p> <p>Logistic Field logistic and measurements done using INDE's tools and crew. Support by Simmons</p>

Table 2-4-9 Specifications of Water loss temperature test in AMJ-2
 坑井 AMJ-2 の逸水量確認試験要領

Survey	Analysis Method	Deliveries	Specifications
<p>Static pressure and temperature surveys while injecting water</p> <p>Remarks</p> <p>1. 20.0 m³ /h of water supply capacity. Water pumping capacity 120.0 m³ /h. Storage in the water tank is 50m³ and that of the mud tank is 150m³, therefore, there is a total water storing capacity of 200m³.</p> <p>2. This capacity represents 13 hours of testing when injecting 35 m³ /h (200m³ / (35.-20.0) m³/h) which will be enough to suppress conduction effects.</p> <p>3. The total water to be used will be 140 m³ and the remaining water in tanks will be 140 m³ (200-35*4+20*4). The time required to refill the tanks will be 3.0 hours.</p>	<p>Visual interpretation</p>	<p>Estimation of positions of feed points and its relative injection capacity</p>	<p>Water Injection Select the minimum flow rate available from the rig pumps or set to 35 T/H.</p> <p>P/T surveys Run P/T instruments in the hole 30 minutes after initiating injection to allow for transients to be over.</p> <p>Stops 19 stops in total; from 1000m to 1400 10 min. stops every 100m at intervals. From 1400m to 1700m 10 minutes stops at intervals of 20 m. At 1500m and 1600m the stops should be 15min. long. Total test time 4.0 hr.</p> <p>Pressure tool Pressure and temperature tools will be run together to get pressure readings for the injection tests</p> <p>Logistic Field logistic and measurements by INDE's tools and crew. Support by PITSA</p>

Table 2-4-10 Specifications of Injection and Transient Tests for well AMJ-1
坑井 AMJ-1 の坑井試験要領

Concept	Analysis method	Deliveries	Specifications
Multi Rate Injection Test.	<ul style="list-style-type: none"> - visual interpretation - Plotting and linear regression analysis 	<ul style="list-style-type: none"> - Injectivity Index. 	<p>Flow rates 30, 50 and 70 m³/h during one our each.</p> <p>Instruments Pressure elements with 8 hr and 12 hr clock each.</p> <p>Setting depth 1600m</p> <p>Others Field logistic and measurements done using INDE's tools and crew.</p>
Fall-off Test	<ul style="list-style-type: none"> - Visual interpretation - Horner Semilog plot - Curve matching analysis 	<ul style="list-style-type: none"> - Storativity (ϕch) - Flow capacity (kh) - Skin factor - Wellbore storage 	<p>Duration 3 hours after terminating the last injection rate</p> <p>Others Field logistic and measurements done using INDE's tools and crew.</p>

Table 2-4-11 Specifications of Injection and Transient Tests for well AMJ-2
坑井 AMJ-2 の坑井試験要領

Concept	Analysis method	Deliveries	Specifications
Multi Rate Injection Test.	<ul style="list-style-type: none"> - visual interpretation - Plotting and linear regression analysis 	<ul style="list-style-type: none"> - Injectivity Index. 	<p>Flow rates 62, 82, 112 and 127 m³/h during 15, 30, 30, 15 min respectively</p> <p>Instruments Pruett capillary tubing and MiniMax</p> <p>Setting depth 900m</p> <p>Others Field logistic and measurements done using INDE's tools and crew.</p>
Fall-off Test	<ul style="list-style-type: none"> - Visual interpretation - Horner Semilog plot - Curve matching analysis 	<ul style="list-style-type: none"> - Storativity (ϕch) - Flow capacity (kh) - Skin factor - Wellbore storage 	<p>Duration 15 hours after terminating the last injection rate</p> <p>Readings, set automatically to every 8 min.</p> <p>Others Field logistic and measurements done using INDE's tools and crew.</p>

Table 2-4-12 Results of the curve matching and hydraulic properties for well AMJ-1

坑井 AMJ-1 の坑井試験結果

kh/MU	4.54E-10	m3/Pa.s	Phi*c*h	1.09E-04	m/Pa	Skin Factor	0.9		WB Storage	30	
kh	4.59E-14	m3	kh	4.59E+01	mdarcy-m	Viscosity	0.0001011	Pa.s	Spec. Vol	0.00101	m3/kg
k	2.53E-16	m2	Phi*Ct	6.003E-07	l/Pa	Stabilization Temp. 1600m	264.53	C	Injection Temp.	25	C
h	1.82E+02	M									

Table 2-4-13 Results of the curve matching and hydraulic properties for well AMJ-2

坑井 AMJ-2 の坑井試験結果

TR=k h/MU	2.84E-09	m3/Pa.s	STO= Phi*c*h	5.85E-06	m/Pa	Skin Factor	-0.5		WB Storage	0	
kh	5.52E-14	m3	kh	5.39E+01	mdarcy-m	Viscosity	1.943E-05	Pa.s	Spec. Vol	0.00101	m3/kg
k	5.66E-15	m2	Phi*Ct	6.003E-07	l/Pa	Stabilization Temp. 1600m	279.28	C	Injection Temp.	50	C
h	9.75E+00	M									

Table 2-4-14 Pre-heating up, stimulation and well testing

噴出試験要領

Concept	Analysis method	Deliveries	Remarks
Warming up	<ul style="list-style-type: none"> - Visual interpretation - Bleed the well 	<ul style="list-style-type: none"> - Build up WH pressure - Warm up the upper casing - Initial discharge w/o mechanical stimulation 	Field logistic and measurements done using INDE's tools and crew.
Stimulation	<ul style="list-style-type: none"> - Visual interpretation - Bleed the well - Compress the water level 	<ul style="list-style-type: none"> - First discharge and cleaning the borehole of mud water 	Self pressure build up or connection to other production well or use of Driltech's compressor
Flow Tests.	<ul style="list-style-type: none"> - Lip Pressure and Weir Method 	<ul style="list-style-type: none"> - Steam and water mass flow at WH conditions. - Production enthalpy at WH conditions. - Production characteristic curve 	Field logistic and measurements done using INDE's tools and crew. <ul style="list-style-type: none"> - Foundation construction - Silencers - Weir - Level meter - Discharge pipes - Orifices - Manometers - Differential pressure manometers - Barton recorders - Tools - Spare parts

Table 2-4-15 Specification for the dynamic pressure, temperature surveys

噴出時の坑内検層要領

Survey	Analysis Method	Objectives	Specifications
<p>Dynamic pressure, temperature and spinner surveys</p>	<p>Visual interpretation Wellbore simulation</p>	<p>Disclose relative productivity of the different feed points</p> <p>Estimation of feed points enthalpies</p> <p>Estimation of the feed point production.</p>	<p>Up to 1000m depth surveys One P/T/S survey after the second day of discharge at full open valve or when stable lip pressure readings are recorded</p> <p>Assembly Assemble pressure tool temperature tool and spinner tool with sinker bar of enough weight to stand the drag force of the ascending fluid.</p> <p>Stops for surveys to total depth Up to 1000 m, stops of 10 minutes every 100m. From 1000 to 1700m, every 50m stops of 10 min each. 15 min stops at 1200m and 1600m to be used as markers in the recording charts</p> <p>Logistic Field logistic and measurements done using INDE's tools and crew. S</p>

2. 5 地熱系概念モデル

2.5.1 地質構造

2.5.2 熱源

2.5.3 地下温度分布

2.5.4 熱水系地化学モデル

2.5.5 地熱構造モデル

2.5 地熱系概念モデル

地表調査（地質、地化学、重力・磁気探査、および電磁探査）、坑井調査および既存調査資料を再検討し、アマティトラン地域の地熱系概念モデルを作成した。

地質調査では、本地域の地熱系を規制すると思われる基盤構造、断層構造、貫入岩についての地質構造の抽出を行った。また、火山岩や変質岩の年代測定や岩石鉱物学的な解析による変質帯の分布域から熱源と関係する火山活動や熱水変質活動を明らかにした。地化学調査では、温泉や噴気ガス組成についてデータのレビューに加え、坑井 AMJ-1 および AMJ-2 における噴出流体分析結果から、地熱流体の上昇通路の推定や貯留層熱水の性状、流体の流動状況を解明し、流体流動モデルを作成した。重力・磁気探査および電磁探査結果から推定された花崗岩基盤の隆起構造、熱水変質帯の発達、貯留層分布域、および比抵抗構造についても、坑井 AMJ-1、AMJ-2 から得られた坑井調査結果と比較して検討した。以下にその概要を示す。

2.5.1 地質構造

アマティトラン地域における地質構造は、Fig. 2-5-1 に示すように N-S および NE-SW 系の基盤隆起構造、カルデラ構造、および Fig. 2-5-2 や Fig. 2-5-3 に示すデイサイトの貫入によって特徴づけられる。

1. 基盤隆起構造

地質調査および重力探査の結果から、本調査地域を東西に二分し、概略南北方向に伸びる 1.5~2.0km 幅の隆起帯の存在が推定された。

本隆起帯の西端は、調査地域北方の Lago de Amatitlan 湖畔の Llan de Animas から El Pepinal にかけて N-S 方向に配列し、Cerro Hoja de Queso から坑井 AMF-2 周辺地域までのゾーンで、NE-SW 方向に向きを変えている。坑井 AMJ-2 の深度 1,594m で確認された逸水部は、本隆起帯西端深部に発達する断層に相当するものと解釈される。坑井 AMF-1 および AMF-2 によって 280℃ を超える貯留層が存在することが確認されており、噴気帯や変質帯などの分布の伸びや配列方向もこれに平行している。さらに、Fig. 2-5-3 に示すように本隆起帯西端深部に推定される断裂構造に沿ってデイサイト質貫入岩が分布しているものと判断される。この貫入岩の一部は、坑井 AMF-2 のカッティングス解析においても確認されている。

基盤の標高は、坑井 AMF-1 および AMF-4 で標高 400~500m を示し、相対的な高まりを形成していることが確認された（坑井 AMJ-1 では標高約 230m）。一般的に花崗岩等の不透水性層の隆起帯は、多くの地熱地帯で地熱流体の上昇域に関与している。

2. カルデラ構造

調査地域内には、Amatitlan カルデラ群の南縁の一部が存在すると考えられ、INSIVUMEH (1978)、OLADE (1982)、および Roldan (1993) の報告から、大きく下記の 3 つのカルデラ縁が推定されている (Fig. 2-5-1)。

a. Cerro Grande を通る最も外側にあるカルデラ縁

Cerro Grande および Cerro Chino 北麓を通り、さらに Rio Michatoya 川沿いに谷を形成し、Volcan de Agua 東側に至る。アマティトラン地域において、最初に活動したカルデラと推定される。ただし、調査地域内においてはカルデラ縁沿いに地表地熱徴候が認められないため、地表近くでは、浅層地下水が断層に沿って流入していることが想定される。

b. El Cedro および坑井 AMF-2 南方付近を通る中間に位置するカルデラ縁

上記カルデラの次に活動したカルデラの一部と考えられる。Lago de Amatitlan 南東岸に面する崖壁として残っており、坑井 AMJ-1 と AMF-2 の間、El Cedro, San Vicente Pacaya を経て、その北西方へ抜ける。北端は Jalpatagua 断層によって境される。坑井 AMJ-2 の掘削深度 1,140m 付近で遭遇した逸水層は本カルデラ縁に相当する断層と考えられる。

電磁探査の結果から、坑井 AMJ-1, AMJ-2, AMF-2, および El Cedro にかけての一带で低比抵抗域として確認されている。さらに、後述の地下温度分布の高温異常域がカルデラ縁に沿って北西方向に延びていることから、本カルデラ縁は比較的規模が大きく、破砕が進んでいると考えられ、透水性が高いことが期待される。

c. Cerro Hoja de Queso 南方および坑井 AMF-4 付近を通る最も内側のカルデラ縁

Cerro Hoja de Queso 南方, AMF-4 付近, および San Vicente Pacaya 北方を通り、カルデラ形成の第三ステージに形成されたものと考えられる。

坑井 AMF-4 の深度 1,000m 付近では逸水に遭遇し、浅層地下水の流入が確認されている。また、後述の地下温度分布から、調査地域東部では本カルデラ縁に沿って低温領域が広がっており、Lago de Amatitlan の方向から湖水の流入が示唆されており、透水性が高いことが期待される。

この他、Laguna de Calderas 西方に、小規模なカルデラ構造(Laguna Caldera)が認められる。坑井 AMJ-2 の深度 1,539m で確認された逸水部は、本カルデラ縁を形成する断層に相当するものと考えられる。本地域は、多くの噴気帯および変質帯が存在しており、その変質状況や噴気の配列方向から地表の噴気活動は、この Laguna Caldera に沿っており、高温流体の上昇通路となっている可能性がある。

3. デイサイトの貫入

坑井 AMF-2 の掘削によって、デイサイトの貫入岩が存在することが確認された。これらは Lago de Amatitlan 南岸に露出するデイサイトドーム群と同質の岩石で構成されており、TL 年代測定結果から同時代に形成された可能性が高い。この貫入岩は重力探査の結果から推定された南北方向に延びる隆起帯西端部付近および Laguna de Calderas 西方の小規模カルデラの地下深部に分布しているものと考えられる (Fig. 2-5-2 および Fig. 2-5-3)。坑井 AMJ-1, AMJ-2, および AMF-2 の流体包有物均質化温度の結果から、パイモーダルの温度

分布を示しており、このデイサイトの貫入に伴う新規熱水活動によって再加熱され、地下温度が上昇した可能性が考えられる。言い換えると、デイサイト質マグマの上昇に伴ない、貫入岩境界部付近に裂かが発達し、これが地熱流体の通路となっていることが想定される。

2.5.2 熱源

岩石および変質年代測定結果から、アマティトラン周辺地域の火山活動は北から南へ移動しており、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。調査地域南方の Volcan de Pacaya は、坑井 AMJ-1 掘削期間中(2000年1月)に大規模なストロンボリ型の噴火を行った。この Volcan de Pacaya を始めとして、第四紀更新世後期(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地熱系の広域的な熱源となっているものと推定される。

さらに、本調査地域で掘削された6本の坑井データ、地質構造、後述する地下温度分布、流体地化学解析結果、および既存報告書の資料を基に、アマティトラン地熱地域の直接の熱源を考察した。以下にその概要を示す。

- a. AMF-2 周辺の花崗岩質基盤岩直上付近に 300℃以上の高温域が認められる
- b. ジルコン結晶系解析により、Lago de Amatitlan 湖畔のドーム状火山を形成したデイサイトと同様の岩石が、坑井 AMJ-1, AMJ-2, および AMF-2 において確認された。このうち坑井 AMF-2 で確認されたデイサイト(深度 560-870m)は、AMF-2 東方深部に推定される貫入岩の一部を形成しているものと判断される。また、年代測定の結果から坑井 AMF-2 で確認されたデイサイト質貫入岩は Cerro Limon や Cerro Durazno のデイサイトドーム群とほぼ同じ年代に活動したものと考えられる(3,000~6,000年前)。
- c. デイサイトの貫入岩付近で掘削された坑井の流体包有物均質化温度の分布はバイモデルとなっており、このデイサイト貫入岩によって 50℃程度熱せられた可能性がある。一方、このような現象は、坑井 AMJ-1, AMF-3, および AMF-4 では見られない。
- d. 後述の「地下温度分布」の節に示されるように、坑井 AMF-1, AMF-2, および AMJ-2 に囲まれた範囲が本地域の最高温度を示している。この地域は、Laguna de Calderas 西方の小規模カルデラ縁の形状に調和的である。

以上の結果から、Laguna de Carderas 西方の小規模カルデラの内側において、デイサイト貫入岩が存在し、重力探査の結果から推定される南北方向に延びる隆起帯西端の深部断層構造および小規模カルデラに伴った断層に沿って貫入しているものと推定される。さらに、流体地化学データおよび地下温度分布 (Fig. 4-1)、および貫入時期を考慮すると、このデイサイト貫入岩が、アマティトラン地熱地域に形成される地熱系の直接の熱源となっている可能性が高い。

2.5.3 地下温度分布

本調査地域内で掘削された6坑井の温度検層データおよび流体包有物均質化温度データを基

に地下温度分布を検討した。

- 1) 本地域内の最高温度は、坑井 AMF-2 坑底付近で観測され、花崗岩質基盤岩上面付近で 300°C 以上の地下温度を示す（標高 200m では 320°C）。
- 2) 坑井 AMF-3 では温度の逆転現象が見られ (Fig. 4-3)、標高 500m 付近で 200°C の温度コンターが北方に舌状に延びている。このことから、Laguna de Calderas 付近から基盤の隆起部に沿って、北方に高温の地熱流体が側方流動しているものと判断される。
- 3) 坑井 AMJ-1 付近から NW 方向に温度コンターが屈曲している。この地域周辺では、電磁探査結果による低比抵抗分布域が同じく NW 方向に延びており、カルデラ縁の方向とも調和的である。さらに、地化学解析結果から Rio Michatoya 川流域にまで達する西方への高温流体の流動が想定されていることから、カルデラ縁を構成する断層に沿って、高温流体が流動している可能性がある。
- 4) AMF-4 付近では温度コンターが、ESE 方向に屈曲していることから、最も内側のカルデラ縁に沿って周辺地域よりも相対的に低温の流体が浸入してきている可能性がある。このことは、AMF-4 掘削時に深度 1,000m 付近で逸水し、浅層地下水が流入していることとも調和的である。

以上のことから総合すると、本調査地域の地下温度分布は、Laguna de Carderas 西方の小規模カルデラの中央部に存在するデイサイト貫入岩付近を中心に放射状に温度が低下し、基盤隆起部を形成する断層およびカルデラ縁に伴った断層に沿って流体が流動する温度分布を示している。

2.5.4 熱水系地化学モデル

貯留層流体に関する地化学解析・検討結果に基づき、アマティトラン地熱地域の熱水系地化学モデルを構築した (Fig. 2-5-4)。

坑井 AMJ-1, AMJ-2, AMF-1, および AMF-2 により確認された地熱貯留層は、単一の熱水系を形成している。坑井 AMJ-1 からの噴出流体は蒸気のみであり、坑井 AMJ-2 および AMF-2 からの噴出流体には過剰な蒸気が含まれているが、熱水系は本質的には熱水（液相）卓越型である。それら坑井の貯留層流体は、330°C 前後で Cl 濃度が 2,500mg/L の共通となる本源的流体に由来するものと考えられる。貯留層流体の起源は、基本的には深部にまで浸透した天水と少量のマグマ起源流体であるとみなされる。その天水は、本地城南側の高標高地の降水と北～北東からの Lago de Amatitlan の湖水を含む低標高地の天水が混合したものと推定される。噴出熱水の Cl/B 比は、主な貯留層母岩は、基盤の花崗岩ではなく、火山岩類であることを示唆している。

地熱流体の主な上昇域は、坑井 AMF-2 および AMJ-2 の近傍に位置すると解釈した。その理由としては、それらの坑井の地化学温度が、この地域で最も高温 (290~300°C) の流体の存在を示すことによる。深部高温流体の上昇は部分的な沸騰を伴っていると考えられ、その沸騰により貯留層流体の Cl 濃度 (約 2,700mg/L) は本源的流体の濃度よりもやや高くなっているとみな

される。その流体は上昇に伴ってさらに沸騰することにより、調査井 AMJ-2 の浅部において坑内に流入する比較的低温（280℃未満）で蒸気割合と Cl 濃度が高い（2,800mg/L 以上）流体を生成している可能性が高い。高温流体の大部分はさらに沸騰と蒸気分離を伴いながら北東方向に側方流動し、坑井 AMF-1 の貯留層を形成している。その流体から分離した蒸気の一部は浅部にまで上昇し、Laguna de Calderas 西方の自然噴気を形成していると考えられる。坑井 AMF-1 の貯留層における流体は、蒸気分離の影響を比較的強く受けており、その温度は 250℃程度にまで低下し、Cl 濃度は 3,300mg/L 程度にまで上昇している。Calderas 地域付近で深部から上昇した流体は、主に北～北東方向に向かって側方流動するとともに低温の地下水により希釈され、最終的には Lago de Amatitlan の南岸にまで達している。

調査井 AMJ-1 の地熱貯留層流体も他の坑井の流体と同じ本源的流体に由来するものと考えられるが、貯留層への流体の供給がどのような流路によるものかは明確でない。ただし、坑井 AMF-1 および AMF-2 の化学モニタリングデータによれば、AMJ-1 の貯留層は他の坑井の貯留層と少なくとも若干のつながりがあるものとみなされる。この貯留層の流体は、地層中の透水性が低いことによりかなりの割合で蒸気化しているようである。ガス地化学温度によれば、その貯留層温度は 260～280℃程度と推定される。

Fig. 2-5-4 には記述していないが、既往調査で述べられているように、Rio Michatoya 川流域にまで達する西方への高温流体の側方流動が想定される。Rio Michatoya 川流域付近の多くの温泉は、その側方流動による熱水が浅部の地下水と混合して生成されていると考えられる。

2.5.5 地熱構造モデル

以上、地上調査結果および坑井掘削結果から作成したアマティトラン地域の地熱系概念モデルを Fig. 2-5-1, Fig. 2-5-2, および Fig. 2-5-3 に示す。

本地域に形成されている地熱系は、Laguna de Calderas 西方深部に存在するデイサイトの貫入岩を直接の熱源とし、地域南側の高標高地の降水や Lago de Amatitlan の湖水を含む低標高地の天水を起源とする火山性の熱水対流系である。また、現在も大規模な噴火を続けている Volcan de Pacaya をはじめとして、第四紀更新世後期（約 0.7Ma）から現世にかけて活動した火山活動に起因したマグマの熱あるいは火山ガスもまた広域的な熱源となっているものと思われる。

地下深部に流入した天水は、花崗岩質基盤岩上を北方ないし北東方向に流動し、残留マグマからの熱によって加熱される。加熱された天水は流動中に周囲の岩石と反応し、その化学組成を次第に中性 Cl 型のものへと変化させるとともに、マグマ溜まりからのマグマ水との混合によって形成され、温度が 300～340℃に達する。この深部熱水が、本地域の本源的な地熱流体と想定される。

このようにして生成された深部熱水は、NE-SW 系の基盤隆起帯西端に相当する深部断裂、Laguna de Calderas 西方の小規模カルデラ構造縁を形成する断層、あるいはマグマの上昇に伴い裂かが進んだデイサイト質貫入岩境界部付近に沿って上昇し、断層沿いの破碎帯中に貯留される。

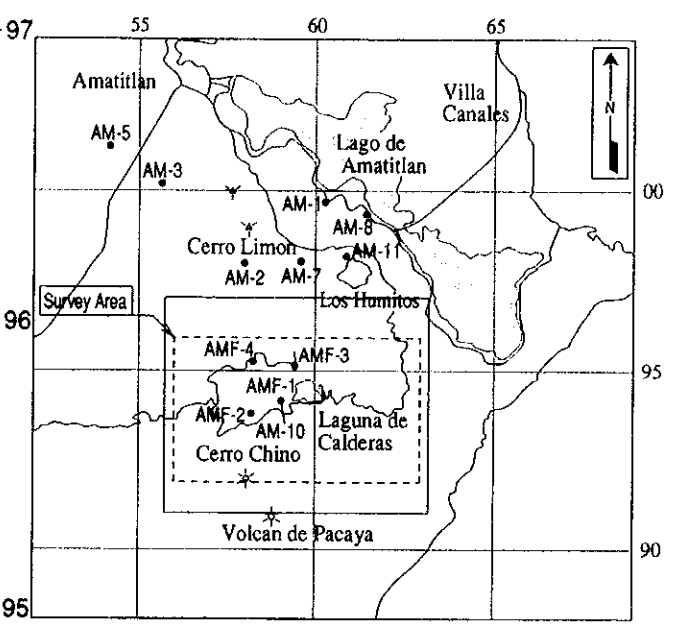
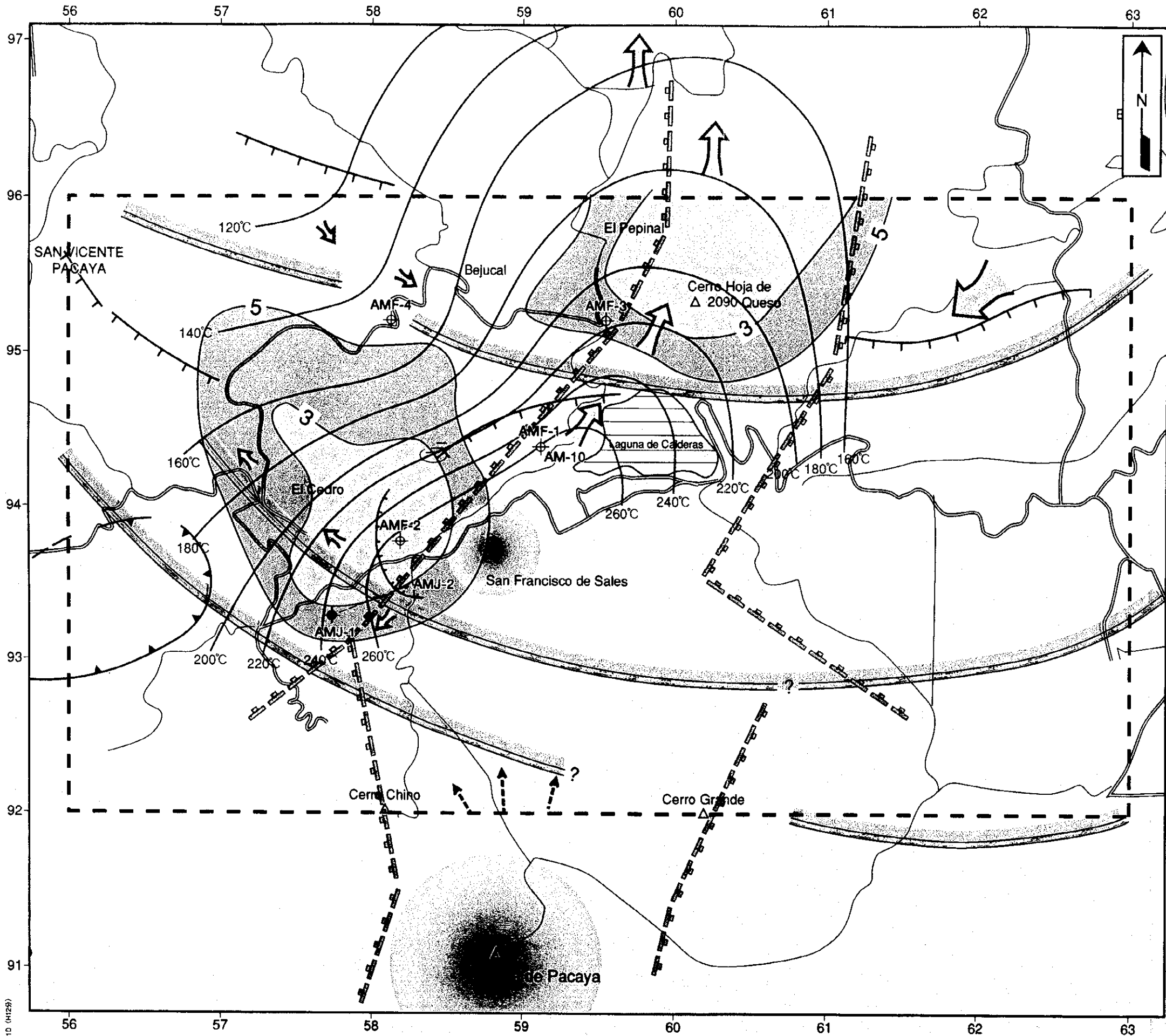
基盤隆起帯西端の標高 500m 付近では、深部の本源的な地熱流体が温度 290~300°C の熱水 (Cl 濃度: 2,700mg/L) となり、断層に伴う破砕帯に貯留され、小規模カルデラを形成する断層に沿って上昇し、噴気帯や変質帯を形成している。この貯留層熱水は、沸騰しながら NE-SW 系断層に沿って AMF-1 付近に達し、ややエンタルピーの低い高塩濃度の熱水貯留層を形成している。

地熱流体の上昇に伴う沸騰は、シリカの沈殿や浅部の熱水変質作用による粘土化帯を形成し、それが地熱貯留層のキャップロックの役割を果たしている。AMF-1, 2 の周辺では、キャップロックの直下に気液 2 相の貯留層が存在している。熱水変質帯は、低比抵抗帯の分布から北方へ帯状に広がる可能性がある。熱水はこの変質帯をキャップロックとして、天水に徐々に希釈されて温度を低下させ、Lago de Amatitlan の湖岸に達し、温泉帯水層を形成している。

一方、調査地域西部で掘削された坑井 AMJ-1, 2 の掘削結果からは、熱水変質作用による粘土化帯はあまり形成されておらず、キャップロックの西方への広がりには期待できない。

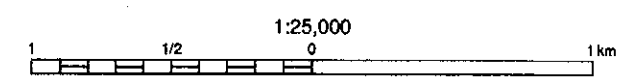
調査井 AMF-3 の温度検層結果から、地下温度の逆転現象がみられる。このことから、Lago de Amatitlan の湖水が南西方へ流入 (標高 500~0m) し、本調査地域北東部の地下温度を低下させている可能性がある。

AMF-2 東方深部のデイサイト質貫入岩は、ジルコン結晶系解析および年代測定の結果からも Lago de Amatitlan 湖畔のドーム状火山を形成したデイサイトと同様の岩石組成・年代を示している。このことから、本地域に発達する地熱系の直接の熱源と考えられるこのデイサイト質貫入岩は Cerro Limon や Cerro Durazno のデイサイトドーム群とほぼ同じ年代に活動した可能性が高い (3,000~6,000 年前)。



凡例

- Estimated uplift obtained from gravity survey
- Phreatic Caldera and abalanche
- (Estimated) Fault
- Caldera Wall
- Low resistivity zone
- Isothermal Line (EL.+750m)
- Magmatic fluid
- Geothermal fluid
- Meteoric water flow
- Survey area
- Exploratory well
- (Estimated) Heat Source



Amatlan Geothermal Development Project	
地熱構造モデル (平面図)	
Geothermal Structural Model	
JICA-WEST JEC	Fig. 2-5-1

M08101401D (H129)

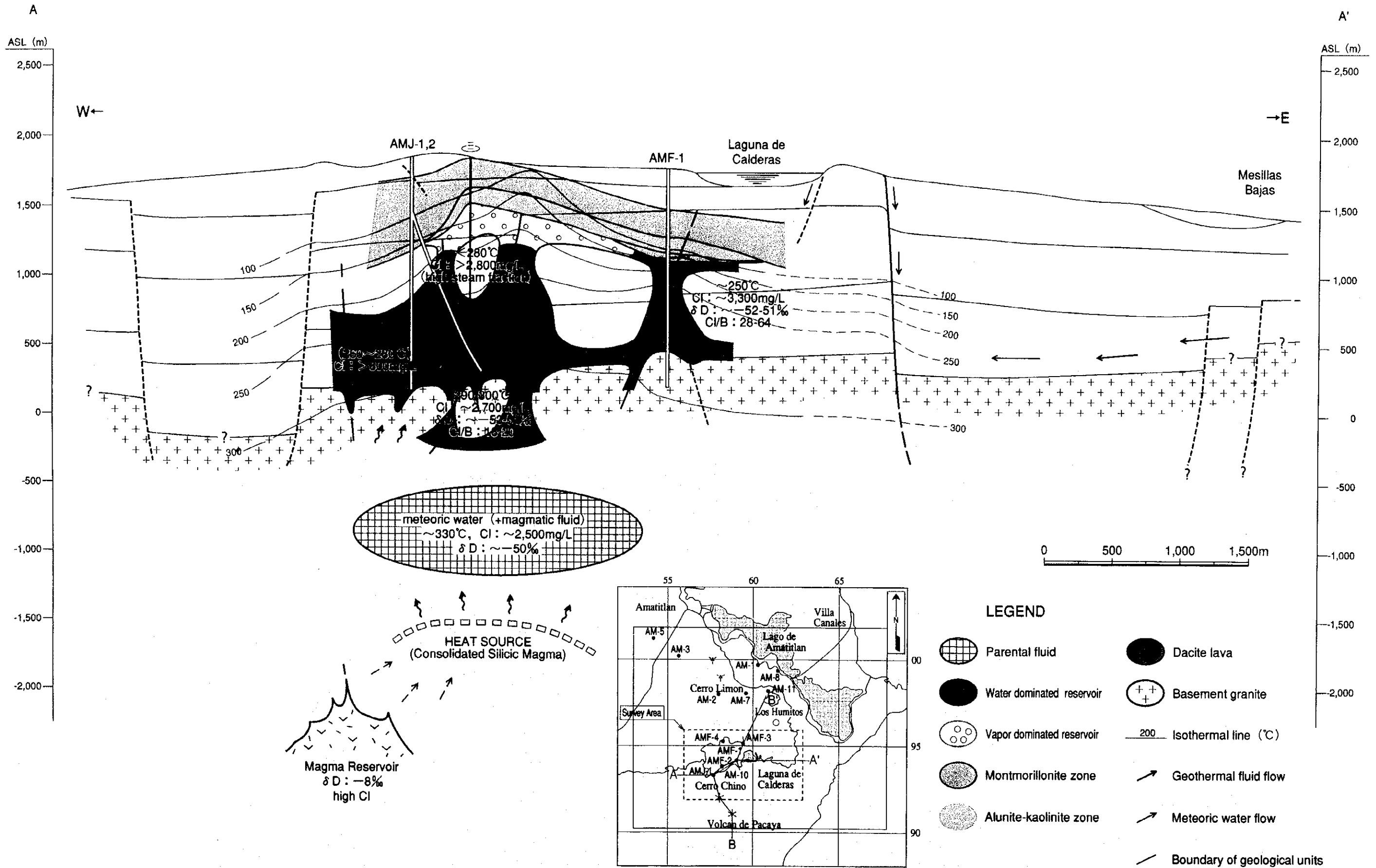


Fig. 2-5-2 Conceptual model of the Amatitlan Geothermal Area (A-A')
 地熱構造モデル (A-A'断面図)

M88101401D (11/29)

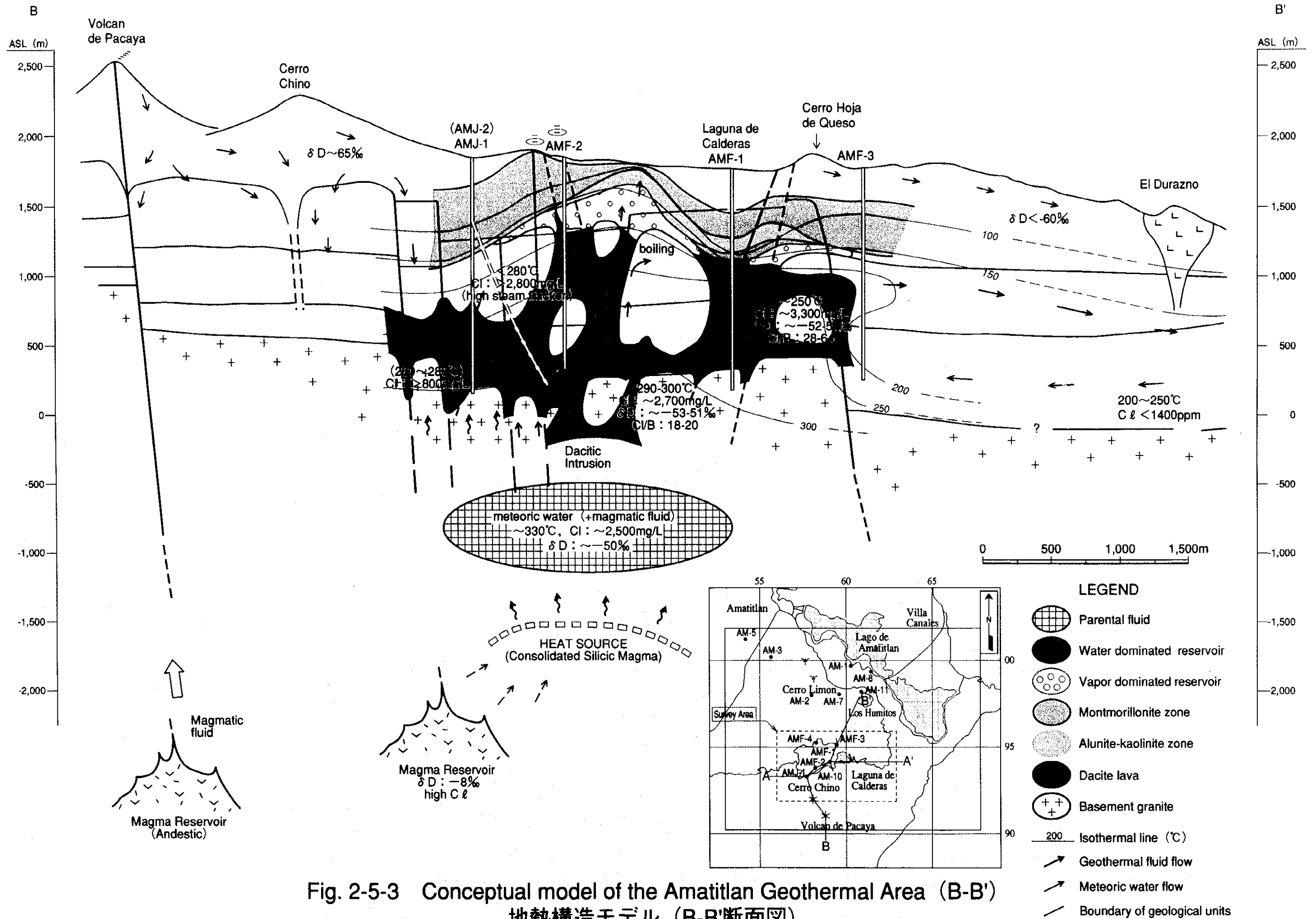
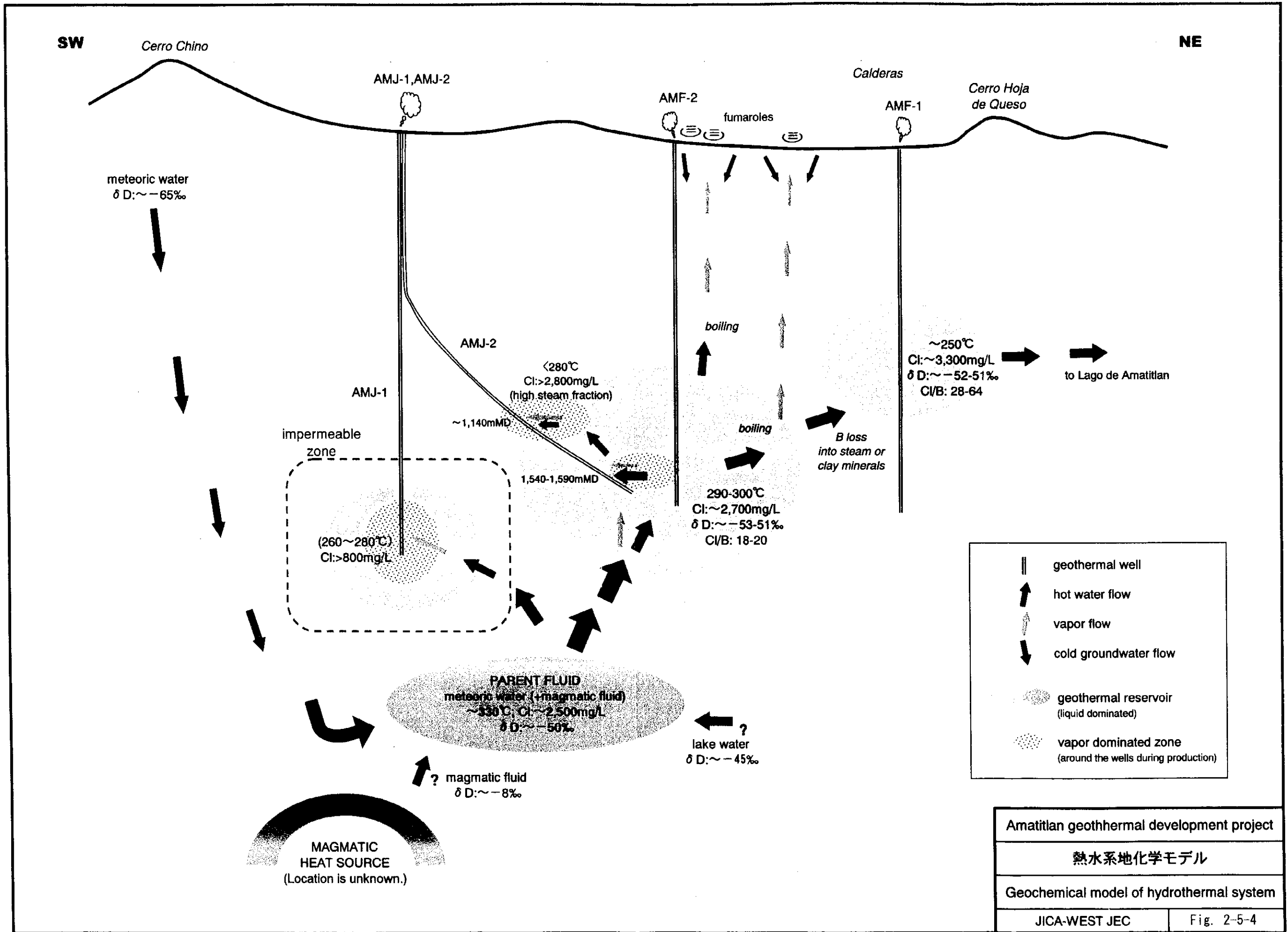


Fig. 2-5-3 Conceptual model of the Amatitlan Geothermal Area (B-B')
地熱構造モデル (B-B'断面図)



3. 地熱開発計画の策定

3.1 地熱資源量評価

3.2 地熱発電所建設計画

3.3 環境影響調査

3.4 経済・財務評価

3. 1 地熱資源量評価

3.1.1 数値モデル

3.1.2 自然状態シミュレーション

3.1.3 ヒストリーマッチング

3.1.4 将来予測および地熱資源量

3.1.5 出力予想結果

3. 地熱開発計画の策定

3.1 地熱資源量評価

自然状態シミュレーションやヒストリーマッチングの手順および結果については 2001 年 3 月に作成したインテリムレポートに報告されている。また、地熱貯留層発電ポテンシャルを推定するための開発時における貯留層挙動予測についても記述されている。本章では、2001 年度 JICA との契約仕様に従って、地熱開発計画策定につながるより詳細な解析・評価結果を記す。

3.1.1 数値モデル

アマティトラン地熱貯留層の資源量評価の作業手順を第 3-1-1 図に示す。数値モデルを第 3-1-2 図に示す。数値モデルの分割方向は、NS-EW 方向であり、面積は 140 km² (NS 方向: 14km, EW 方向: 10km) である。数値モデルの範囲は、調査データが存在する範囲と比較してかなり広範囲であるが、本地域の地熱系の範囲と、計算結果に対する境界条件の影響をなくすために設定した。深度方向には、貯留層を表現するために 5 層に分割した。第 3-1-3 図にこの 5 層を示す。

第 1 層(AE 層)と第 4 層(AB 層), 第 2 層(AD 層)と第 3 層(AC 層)は、それぞれ同じ形状を示し、ブロック分割数はそれぞれ 225, 285 である。第 5 層(AA 層)のブロック分割数は 190 である。したがって、ブロック分割総数は 1210 である。

さらに、境界ブロックを第 5 層の下面に設定し、深部からの流体流入を表現した。地表部分は第 1 層の上面に地表地形に沿って大気条件を設定した。また、第 2 層では側方への水理的な流動を表現した。

第 3-1-1 図に数値モデルに入力した岩石物性値を示す。これらは、アマティトラン地域で測定された岩石物性値のうち、代表的な数値を採用して数値モデルに設定したものである。浸透率分布の初期値は坑井試験結果に基づいて設定し、自然状態シミュレーションでの地下温度とのマッチング作業を通して修正した。岩石の空隙率については、気液二相状態を示す高温の地熱貯留層の平均的な数値として、どのブロックにも 5%を設定した。貯留層において熱水に満たされたブロックの岩石には、熱伝導率として 2.2W/m°Cの一定値を設定した。比熱については、貯留層部分に 1000kJ/kg°Cを設定した。境界ブロックは、計算の対象から外すために特殊なフラグである” 50,000kJ/kg°C” を設定した。この数値を設定することにより、自動的に質量とエネルギー保存則の計算から除外される。相対浸透率の特性曲線には、蒸気と熱水の残留飽和率としてともに原点(0,0)を通る“X”タイプカーブを採用した。

また、境界条件としては以下の条件を採用した。

1. 数値モデルの底面（第 5 層）の下面に接続するブロック 1 つを設定し、そこに深部からの伝導加熱を表現するための熱源（伝導加熱源）を設定した。
2. 数値モデルの底面（第 5 層）の下面に接続するブロック 6 つ (Pacaya 火山の北部) を設定し、そこから熱と流体の両方が供給されるリチャージ域を設定した。
3. 第 1 層の N サイドに接続するブロック 3 つを設定し、そこから浅層地下水がアマテ

イトラン湖へ流出する現象を設定した。浅層地下水の流出には湖岸線に沿って分布する温泉や噴気帯からの流出も含まれている。

4. 第1層に接続する1つのディスチャージブロック（坑井 AMF-2 の西側）を設定し、本地域における噴気帯での流出を含む浅層地下水の流出を表現できるようにした。
5. 第3層の北東の角に位置する10のブロックに接続する1つのリチャージブロックを設定し、そこから低温流体を数値モデルに流入させることにより、深部の北東から南西部にかけて見られる流体の流動パターンを計算で再現できるようにした。
6. 第3層の南西側に位置する3つのブロックに接続する1つのディスチャージブロックを設定し、そこから Michatoya 川に流出する比較的深い地下水の流動を計算で再現できるようにした。
7. 数値モデルの南部に接続する1つのブロックを設定し、本地域で想定される地表浅部への伝導冷却を設定した。
8. 数値モデルの地表部上部には大気ブロックを設定し、そこから大気（大気温度 30℃）への伝導冷却を計算で再現できるようにした。

3.1.2 自然状態シミュレーション

自然状態シミュレーションの主な目的は、地熱貯留層の温度・圧力分布および流体と熱の挙動に関する計算結果の妥当性を評価し、必要に応じてモデルを修正することである。

本シミュレーションにおいては、最も重要な岩石物性値は浸透率と熱伝導率である。自然状態シミュレーションが将来の予測計算の異なる場合でも、岩石の空隙率、密度や比熱などの流体貯留に関するパラメータは、それほど重要な初期条件ではない。このため、自然状態シミュレーションにおいて貯留層温度分布を満足するマッチング結果を得るためには、岩石の密度、空隙率、および比熱については平均的な数値を採用することで十分であるが、浸透率と熱伝導率についての検討を詳細に行うことが必要である。

多くの地熱系では、地熱貯留層内の熱力学的な状態を維持するために、熱や質量の供給源（リチャージ域）や流出域（ディスチャージ域）が存在する。既に述べたように、リチャージ域は2カ所、ディスチャージ域は5カ所存在し、それらは貯留層温度分布を計算で再現するために必要な条件である。第5層には 336℃ の高温熱水が約 450t/h の流量で流入していることが示された。また、第3層の北東の角からは 50℃ の低温熱水が 620t/h の流量で流入しており、それが本地域の北東-南西方向の流体挙動を表現するために必要な条件であることが示された。一方、ディスチャージについては第1層に浅層地下水の流出、第3層に深部の Michatoya 川への流出を設定した。北東の角から流入する低温熱水の約 75% は、これらのディスチャージ域からモデルの外へ流出している。残りの 25%（156t/h）は、高温の地熱流体と混合し、第1層の浅層地下水のディスチャージ域から流出する。

第3-1-4 図～第3-1-7 図は、数値モデルの4つの層について、それぞれ実測（または推定）温度と自然状態シミュレーションによる計算温度を比較したものである。坑井 AMJ-1 と AMJ-2 の坑内温度が測定されているが、これらの温度は開発中の温度であることに留意する必要がある。

る。したがって、自然状態シミュレーションにおける温度マッチングの対象としては AM シリーズや AMF シリーズの坑井温度データを優先すべきである。

第 1 層における計算温度は第 3-1-7 図に示すように、標高+1,050 m の貯留層温度を表しており ほぼ実測温度と整合している。より信頼性の高いデータが得られている Calderas エリアでは、さらに整合したマッチング結果が得られた。この標高の最高温度は計算では 242°C であり、AMF-1 と AMF-2 の南側で示された。

第 2 層における計算温度は、第 3-1-6 図に示すように、60~260°C の範囲で実測温度分布とよく整合している。ここで注意すべきことは、この層の生産エリアにおける有効な温度データは、その下層と同様に 4 本の AMF シリーズの坑井データに限られることである。

第 3-1-5 図に標高 450m (第 3 層) の実測温度と計算温度の比較を示す。マッチングに有効な温度データが 4 本の AMF 坑井に限られるが、図に示されるように、実測温度データとよく整合している。この温度分布を計算で再現させるためには、既に述べたように数値モデルの本層にリチャージ域とディスチャージ域を設定して、深部の局所的な流体挙動を再現させることが必要であった。

第 3-1-4 図に標高 150m (第 4 層) の推定温度分布を示す。この図は補足資料として示した物であり、データが十分でないため詳細な比較に用いることはできない。この深度においては、実測温度データが不足しており、実測温度コンターもほとんどが推定値に基づくものである。しかしながら、実測温度と計算温度のコンターがともに同じ形状を示し、それぞれ地熱流体の起源が 2 つの火山近くであると考えられる概念モデルと調和的である。

3.1.3 ヒストリーマッチング

坑井試験データとしては 3 種類が得られている。すなわち、1 つは INDE/West JEC が 1994 年に実施した AMF-1 と AMF-2 の噴出試験データ、2 つめは INDE/ICA/CFE が Calderas で 5MW 地熱発電所運転中 (2 年間) に測定した AMF-1, AMF-2, および AMF-3 (還元) の長期噴出試験データ、そして 3 つめに第 2 章で述べた AMJ-1 と AMJ-2 の試験データ (第 2-4 節を参照) である。2 つめのデータはヒストリーマッチングを行ううえで質・量的に最も有効なものであるため、ヒストリーマッチングはこのデータを用いて実施した。AMJ-1 と AMJ-2 の噴出試験は、それぞれが 1 週間ずつ 2 回実施されたが、これは貯留層の特性変化を把握するには時間的に短いと判断される。

第 3-1-8 図と第 3-1-9 図および第 3-1-10 図と第 3-1-11 図に、それぞれ AMF-1 と AMF-2 の長期噴出試験中の噴出量/エンタルピーの経時変化と出力変化を示す。また、第 3-1-12 図に AMF-3 の還元量の経時変化を示す。

坑口圧力の変化は、必ずしも坑底圧力の傾向を代表するものではない。特に、貯留層が気液二相状態を呈している場合は注意を要する。生産井近傍に関し、エンタルピーの経時変化データのみを用いてモデルの精緻化を行った。

1. 坑井試験マッチングの手順

自然状態におけるマッチングでは、岩石空隙率といった貯留項に関するパラメータに対

しては計算結果に与える影響が小さいため、坑井試験や噴出試験データに対するヒストリーマッチングを採用した。しかしながら、坑井試験や噴出試験のデータに含まれる情報は、坑井近傍のごく限られた範囲である可能性がある。このため、それによって見直された空隙率や浸透率は数値モデル全体から見れば必ずしも適用する必要はないと考えられる。したがって、坑井試験や噴出試験データに対するマッチングを通して見直す必要があるのは、生産井、還元井または観測井近傍の水理パラメータだけでよいと考えられる。

もし、坑井試験データとのマッチングによって数値モデルのかなりの領域について浸透率分布の見直しが必要と判断される場合には、再び自然状態シミュレーション作業にまで戻り、実測値に基づく自然状態の貯留層圧力、温度分布がその浸透率分布を採用した数値モデルによって正確に計算で再現できるかどうかを確認しなければならない。その結果、もし計算値が実測値と整合しなければ、両者が整合するまで数値モデルの改良を繰り返さなければならない。

坑井 AMF-1 は第 2 層 (ブロック AD 133) , AMF-2 は第 3 層 (ブロック AC 91) , そして AMF-3 は第 2 層 (ブロック AD 174) に設定した。また、生産ブロックについては、流動エンタルピーの変化をより正確に計算できるように、さらに内部を細かく分割して表現した。そして試行錯誤により、生産井の実測エンタルピー変化が計算によって正確に再現できるようになるまでモデルの修正を繰り返し、必要に応じて自然状態シミュレーションまで作業をさかのぼり、数値モデルの精緻化に努めた。

生産井 AMF-1 と AMF-2 の噴出量変化および還元井 AMF-3 の還元量変化に対する貯留層変化が計算で正確に再現できるまで、数値モデルにおける生産ゾーンの水理特性を繰り返し修正した結果、AMF-1 と AMF-2 の両方で測定されたエンタルピー変化が精度よく計算で再現できた。

2. 1998 年の噴出試験データに対するマッチング

a. 生産井 AMF-1

生産井 AMF-1 は、1998 年 11 月 20 日に測定が開始され、2000 年 12 月 6 日まで有効な噴出データが得られた。フィードポイントが複数存在するために、噴出量はかなり変動している。しかしながら、熱水と蒸気の割合はほぼ一定であり、このことはエンタルピーに大きな変化がなかったことを示している。総噴出量は 90~160t/h の範囲であり、エンタルピーは平均して約 1,300 kJ/kg (310 kcal/kg) であった(第 3-1-8 図)。2000 年 1 月からエンタルピー曲線が顕著に変化しているが、これは記録計の故障と考えられる。実際には噴出状況は安定しており、蒸気量と熱水量の流量割合にも変化は無かった。

AMF-1 に対する計算エンタルピーおよび噴出量変化は、第 3-1-8 図 (黒線) に示すとおりである。記録計が故障している可能性を考慮して、エンタルピーの初期変動値も含めたマッチングを行った。その結果、シミュレーションによる計算エンタルピーは、噴出試験中に測定された実測エンタルピーとよく整合することが確認できた。

b. 生産井 AMF-2

生産井 AMF-2 は 1998 年 11 月 20 日に測定が開始され、2000 年 12 月 6 日まで実施された。総噴出量は約 110t/h で初期エンタルピーは、ほぼ 1,650 kJ/kg (394 kcal/kg) であった。平均すると、総噴出量 100t/h で、エンタルピーは 1,690kJ/kg (403kcal/kg) で安定していた(第 3-1-10 図)。

第 3-1-10 図に示すように、シミュレーションで得られた計算エンタルピーは、実測エンタルピーとよく整合する結果が得られた。シミュレーションでも実測エンタルピー変化傾向が再現でき、実測値との差異も小さいことが確認できた。

3. 現在の貯留層の状態

アマテイトラン・プロジェクトエリアで得られた噴出試験データとのマッチングの結果、数値モデルの妥当性が確認された。すなわち、長期噴出試験や生産中の坑井 AMF-1 と AMF-2 のエンタルピー変化を精度よく計算で再現することができた。

第 3-1-13 図に貯留層上部の温度分布、第 3-1-16 図と第 3-1-19 図に生産領域の温度分布をそれぞれ示す。これらの図でわかるように、初期状態シミュレーションの温度分布と比較して、その形状や温度に大きな変化は認められない。このことは、基本的に貯留層は過剰生産状態にはなっていないことを示唆している

第 3-1-14 図に貯留層上部の圧力分布、第 3-1-17 図と第 3-1-20 図に生産領域の圧力分布をそれぞれ示す。これらのコンターマップを見ると、生産による圧力減衰域は明瞭に現れていない。このことは、本地熱系において十分な地熱流体の供給があることを示唆している。

また、AMF-2 と AMF-4 の間には水理的な境界があることが、温度、圧力コンターの両方から示された。このことは、同等の深度において貯留層実測温度でも急激な変化が見られる現象を説明している。圧力コンターでも、El Cedro 方向に向かうディスチャージ域の存在を示唆している。

第 3-1-15 図に貯留層上部の蒸気飽和率分布、第 3-1-18 図と第 3-1-21 図に生産領域の蒸気飽和率分布をそれぞれ示す。これらは、貯留層上部において蒸気化が進んでいることを示しており、坑井 AMF-1 と AMF-2 のエリアにおける鉛直方向の透水性が小さいことに起因している。こうしたシミュレーションで示された蒸気化については、低温の蒸気フィードゾーンに遭遇した AMJ-2 の地化学データや坑井試験結果とも一致している。

3.1.4 将来予測および地熱資源量

以上述べたように、計算された貯留層モデルは、その挙動を予測する開発シミュレーションに影響をあたえるものである。昨年度、地熱開発シナリオとして、標準的な規模の地熱発電所の運用が継続して行えるだけの貯留層の生産能力あるかどうかの見極めが行われた。そのために、ダブルフラッシュ方式 50MW 地熱発電所の検討が行われた。検討結果は、2001 年 3 月に JICA 提出済みのインテリムレポートに記載されている。

2001 年度の JICA との契約仕様書には、地熱開発に対する 3 つのシナリオの解析が盛り込ま

れている(第 3-1-22 図参照)。3つの地熱開発シナリオは、全て開発対象貯留層を小規模カルデラ(Laguna Caldera)内部に限定したものである。発電所建設候補地2箇所に関しては、次章で詳細に議論されている。候補地の一つはカルデラ内部であり、もう一つはカルデラの外側で El Cedro にある INDE 資材倉庫に隣接した地域である。

3つのシナリオは以下のとおりである。

1. 20MW 発電所の建設
2. 第1段階として20MW 発電所建設。さらに、第2段階として3年後に新規20MW 発電所を建設
3. 20MW 発電設備×2基、合計40MW 発電所の建設

既存坑井 AMF-1, AMF-2, AMJ-1 および AMJ-2 の地熱資源量を合計しても、対象とする発電容量はどのシナリオも満たさず、追加補充井の掘削が必要である。生産井および還元井の基地と掘削ターゲットを第 3-1-23 図に示す。

各生産井の出力予測は、噴出量を変化させることにより、坑口圧力を一定にして実施された。まず、生産井が掘削されたブロックの熱力学的な特性を考慮することによって、既存生産井毎の浸透率-層厚積(kh 値)が計算される。この手順は、測定された蒸気・熱水の噴出量が数通りの坑井口元圧力に対して再現されるまで、トライアル&エラー方式で繰り返し実施される。計算は坑井シミュレータを用いて行われた。

これらの kh 値は、各タイムステップの終わりにおいて、噴出量を予測するのに用いられる。同時に、貯留層シミュレーターからの生産井ブロックの熱力学的特性(圧力、温度)も予測に用いられる。噴出特性曲線がまだ得られていない生産補充井(MKU)については、その補充井の最も近くにある既存坑井で求めた数値を採用した。結果として得られるのは、開発期間における蒸気・熱水の噴出量である。坑口における出力が計算され、シングルフラッシュ型の発電技術および各坑井または全坑井の合計の出力変化を表した。噴出量の減衰に伴い設計発電出力に達しない場合には、新規生産井の掘削が設定された。

将来予測シミュレーション期間は25年とした。噴出量の合計と平均エンタルピーから、還元すべき分離熱水量が計算した。分離された熱水は、還元井毎の還元量を見積もるために稼働中の坑井本数で分配した。還元井の追加掘削の必要性を調べるために、各還元井の水位を検討した。水位が口元付近あるいはそれ以上の場合には、新規還元井の掘削が設定された。

3.1.5 出力予想結果

貯留層挙動に関する条件が3つのシナリオとも異なることから、それぞれ個別の計算が行われた。結果は次のとおりである。

1. シナリオ 1: 20 MW

第 3-1-24 図に既存坑井と補充井1孔に対する全出力を、第 3-1-25 図には各坑井別の出力の予想結果を示す。

補充井として、生産井および還元井を各1孔ずつ掘削することによって、発電容量20MWを確保することには、全く問題がない。しかし、第 3-1-22 図に示されているように生産

井 1 孔，還元井 1 孔を予備として掘削することが望まれる。

2. シナリオ 2: 20 MW + 20MW

第 3-1-26 図に既存坑井と補充井 1 孔に対する全出力を，第 3-1-27 図および第 3-1-28 図には各坑井別の出力の予想結果を示す。

追加生産井 5 孔および追加還元井 2 孔を掘削することによって，1 号機（発電容量 20MW）および 2 号機（発電容量 20MW）を安定して、操業させることが可能である。しかし，第 3-1-22 図に示されているように生産井 1 孔と還元井 1 孔を予備として掘削することが望まれる。

3. シナリオ 3: 40 MW

第 3-1-29 図に既存坑井と補充井 1 孔に対する全出力を，第 3-1-30 図および第 3-1-31 図には各坑井別の出力の予想結果を示す。

シナリオ 2 と同じ本数の生産井および還元井を追加することによって，発電容量 (20MW) 2 基，合計 40MW 発電所を安定操業させることには，全く問題がない。しかし，第 3-1-22 図に示されているように生産井 1 孔と還元井 1 孔を予備として掘削することが望まれる。

Fig. 3.1.1 Reservoir Simulation Methodology (貯留層シミュレーション手法)

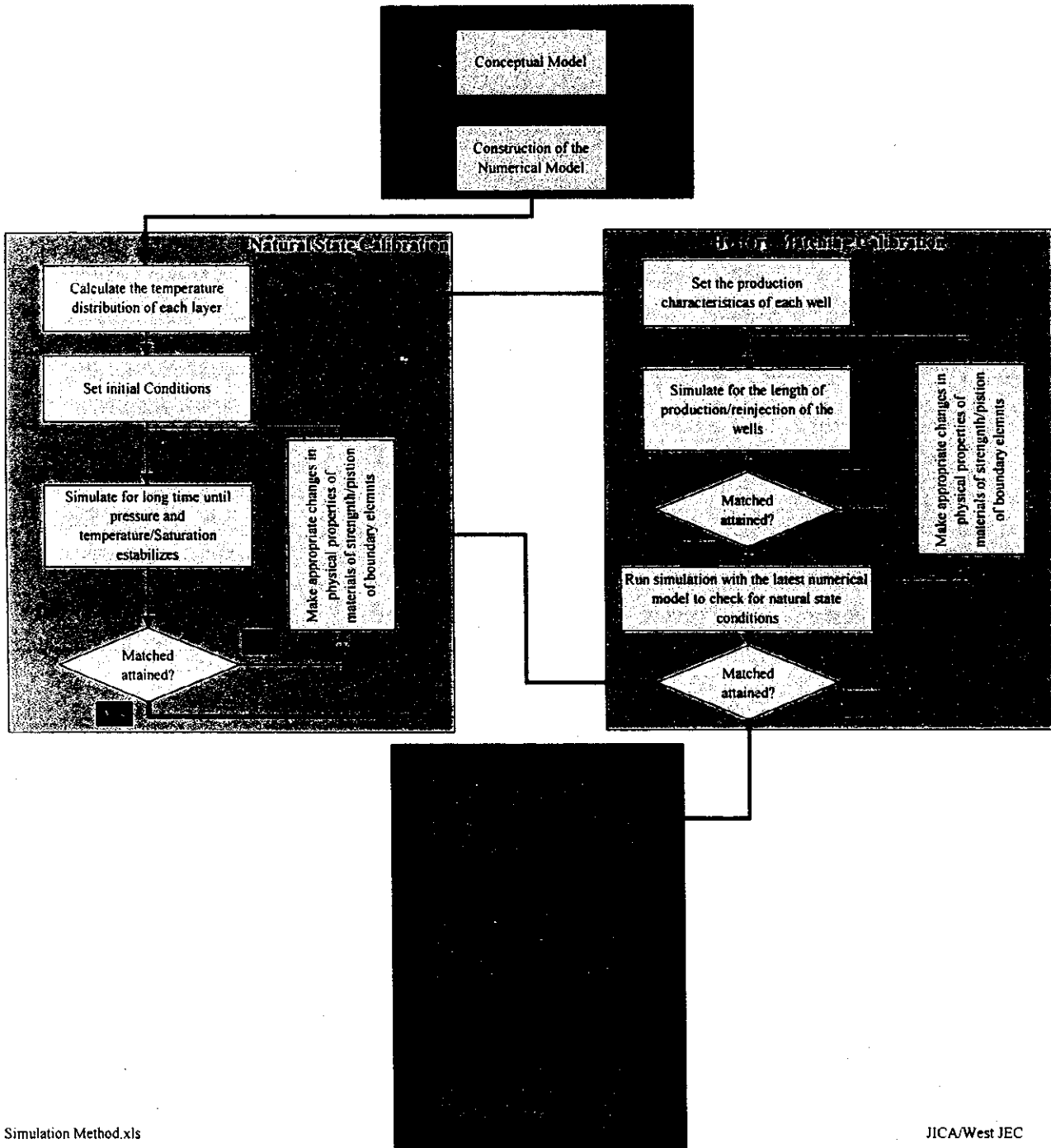
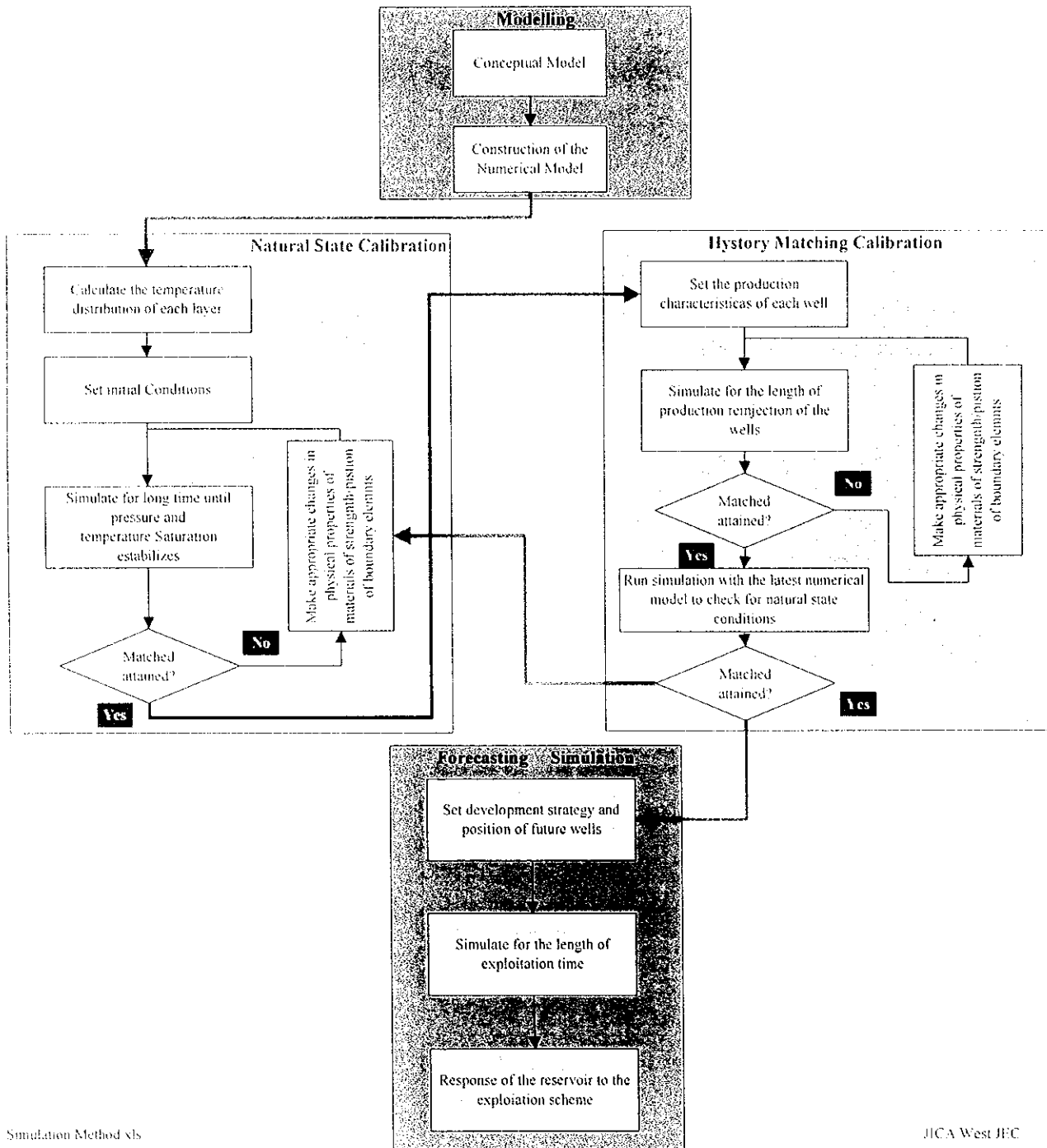
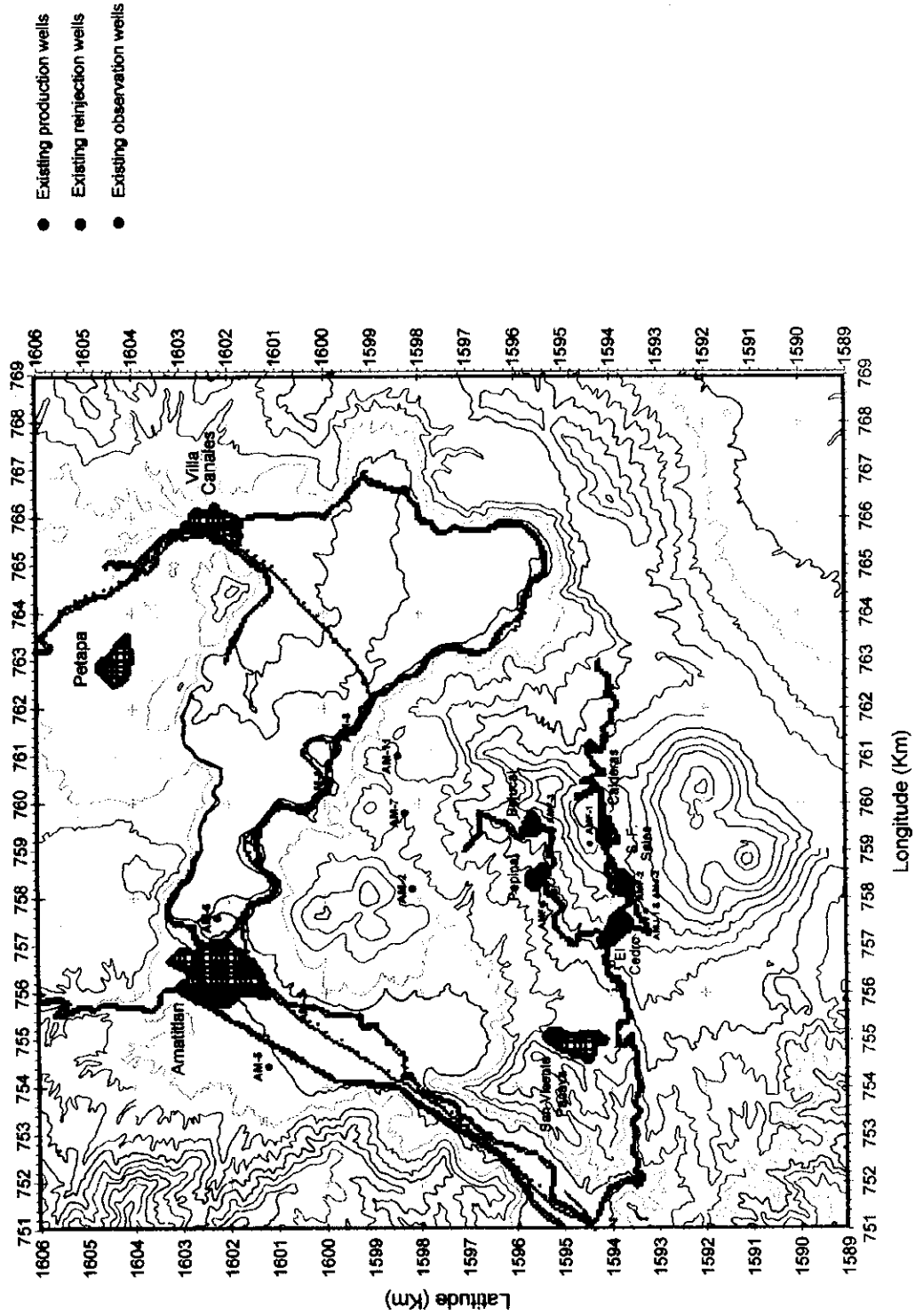


Fig. 3.1.1 Reservoir Simulation Methodology (貯留層シミュレーション手法)



Amatitlan Geothermal Field Reservoir Simulation

Fig. 3-1-2 Control volume and grid used to represent the Amatitlan reservoir
 アマテイトラン地熱貯留層数値モデルのブロック分割



Amatitlan Geothermal Field Reservoir Simulation

Fig. 3-1-2 Control volume and grid used to represent the Amatitlan reservoir
 アマテイトラン地熱貯留層数値モデルのブロック分割

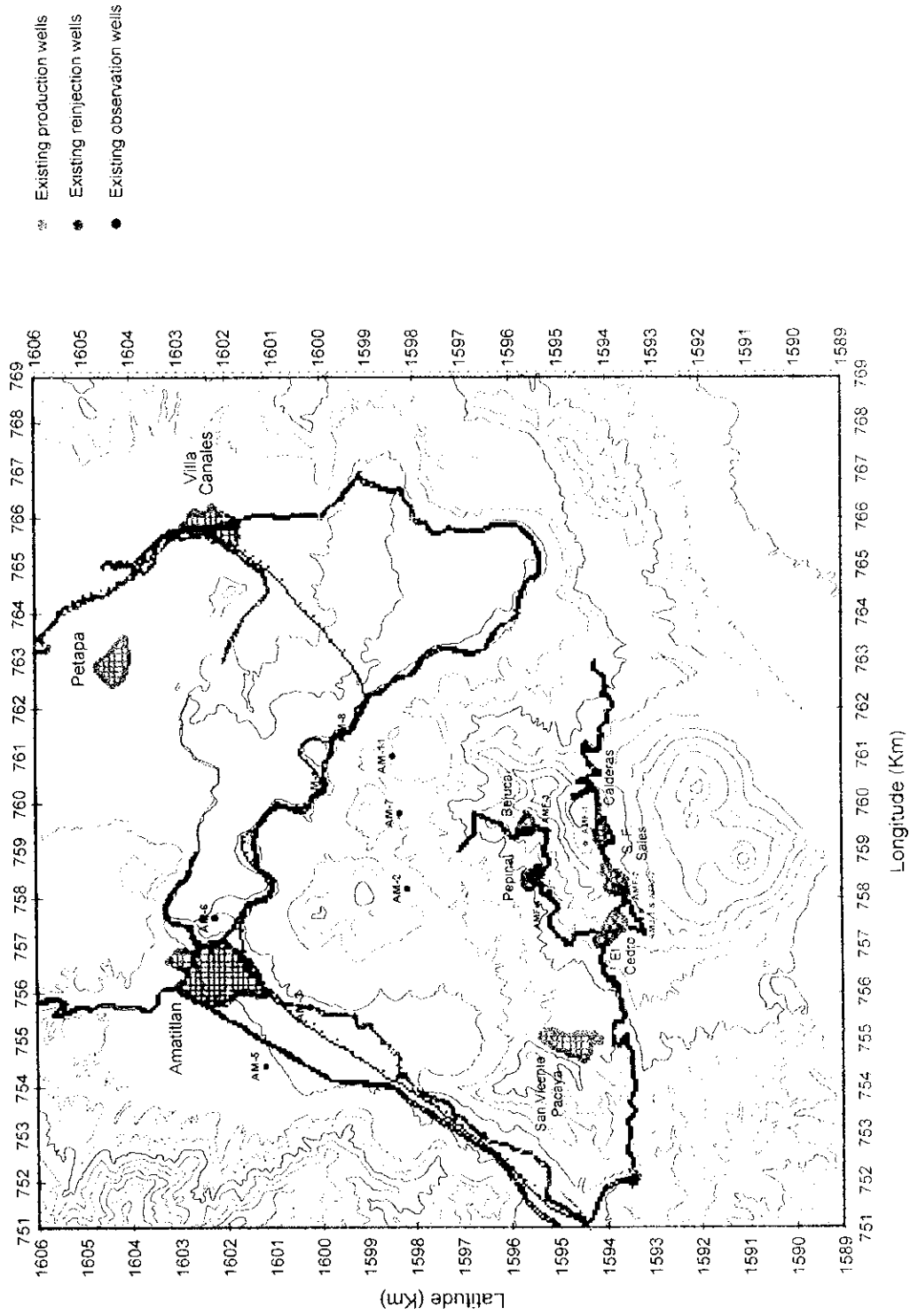
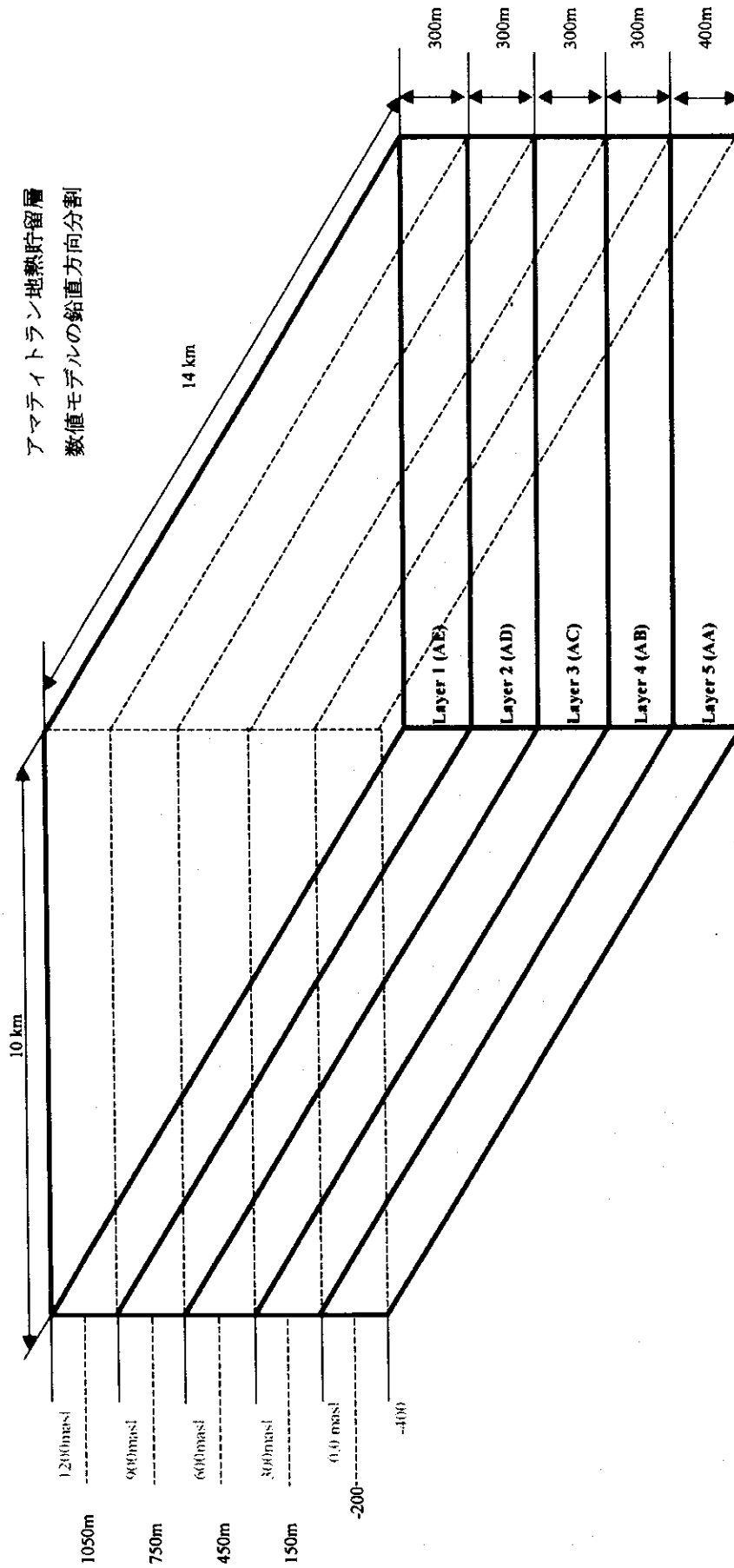
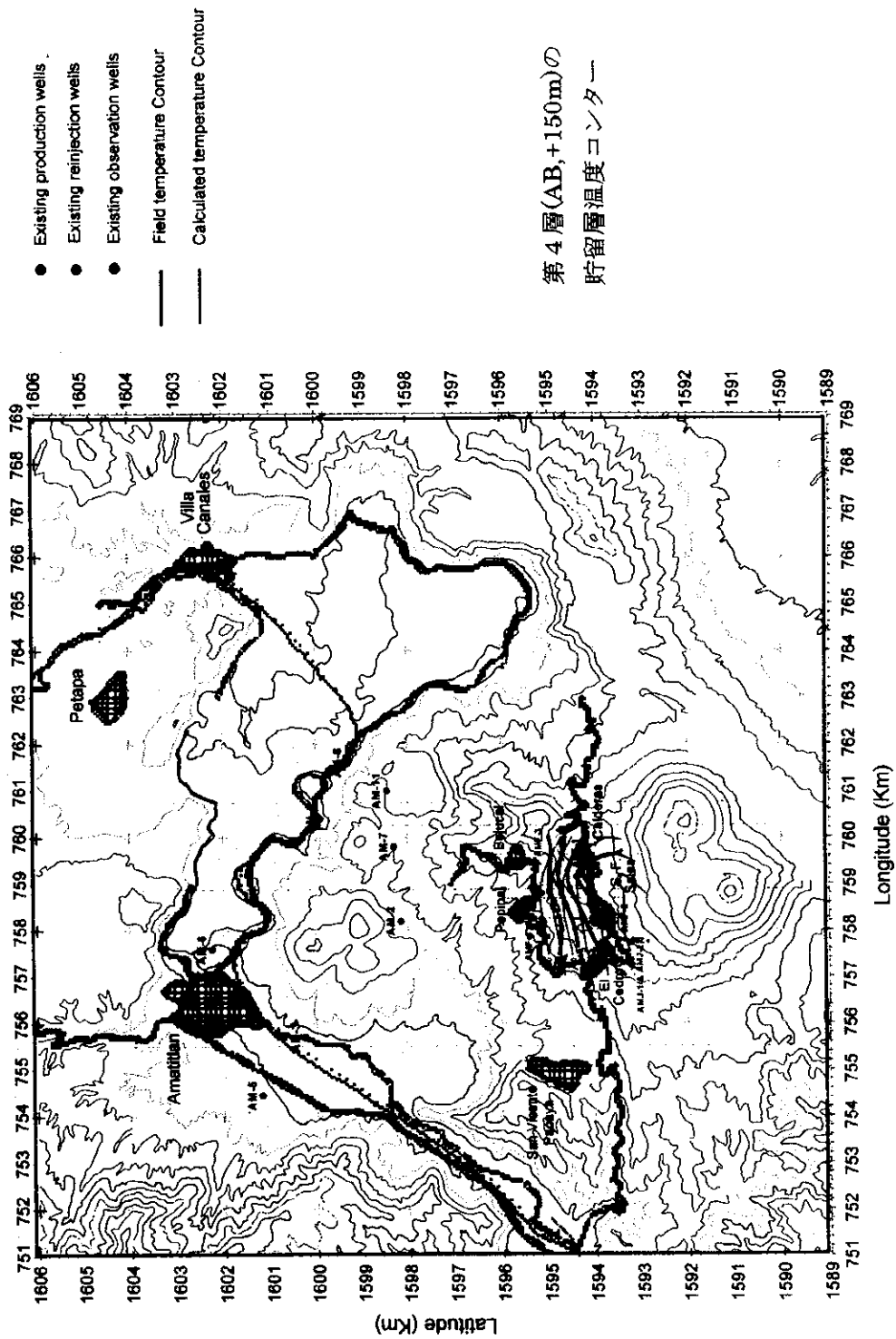


Fig. 3-1-3 Layers of the control volume



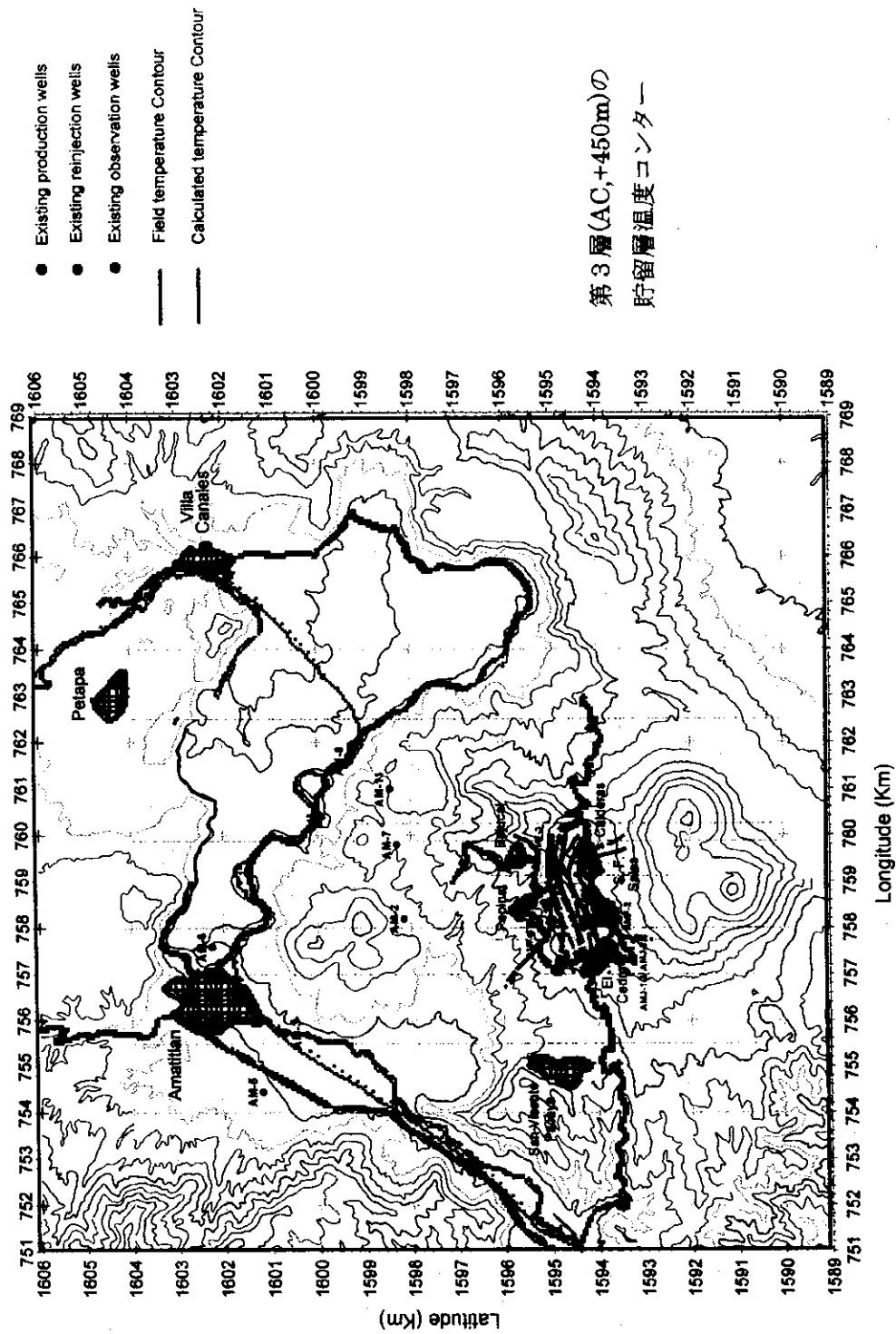
Amatitlan Geothermal Field Reservoir Simulation

Fig. 3-1-4 Contour map of field and calculated temperatures, layer 4 (AB, +150 m)



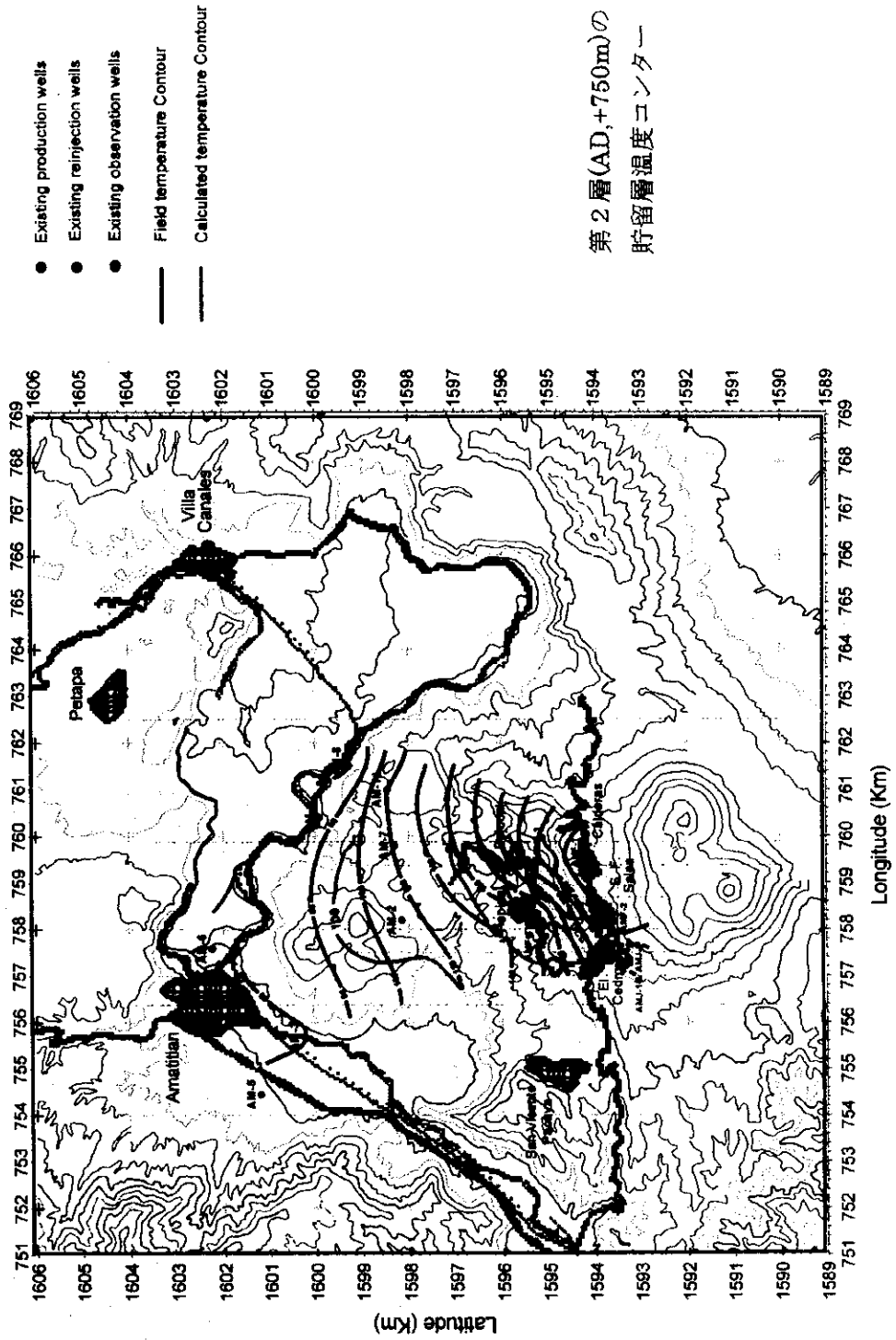
Amatitlan Geothermal Field Reservoir Simulation

Fig. 3-1-5 Contour map of field and calculated temperatures, layer 3 (AC, +450 m)



Amatitlan Geothermal Field Reservoir Simulation

Fig. 3-1-6 Contour map of field and calculated temperatures, layer 2 (AD, +750 m)



Amatitlan Geothermal Field Reservoir Simulation

Fig. 3-1-7 Contour map of field and calculated temperatures, layer 1 (AE, +1050 m)

