

メキシコ合衆国ラ・プリマベラ地熱開発計画調査

報告書

平成元年2月

国際協力事業団

メキシコ合衆国ラ・プリマベラ地熱開発計画調査

報告書

平成元年2月

国際

615
843
MN

鉱計資

CR(3)

89-64

JICA LIBRARY



1073144[6]

18932

メキシコ合衆国ラ・プリマベラ地熱開発計画調査

報告書

平成元年2月

国際協力事業団

国際協力事業団

18932

序 文

日本国政府は、メキシコ合衆国政府の要請に基づき、同国ラ・プリマベラ地域の地熱開発計画に関する調査を行うこととし、その実施を国際協力事業団に委託した。

当事業団は、日本重化学工業株式会社技術顧問の中村久由氏を団長とする調査団を編成し、1985年1月から1989年2月までの間、数次に亘る現地調査を実施した。調査団は帰国後これによって得られた現地の諸情報並びに収集した資料の解析・検討等の国内作業を経て、ここに本報告書完成の運びとなった。

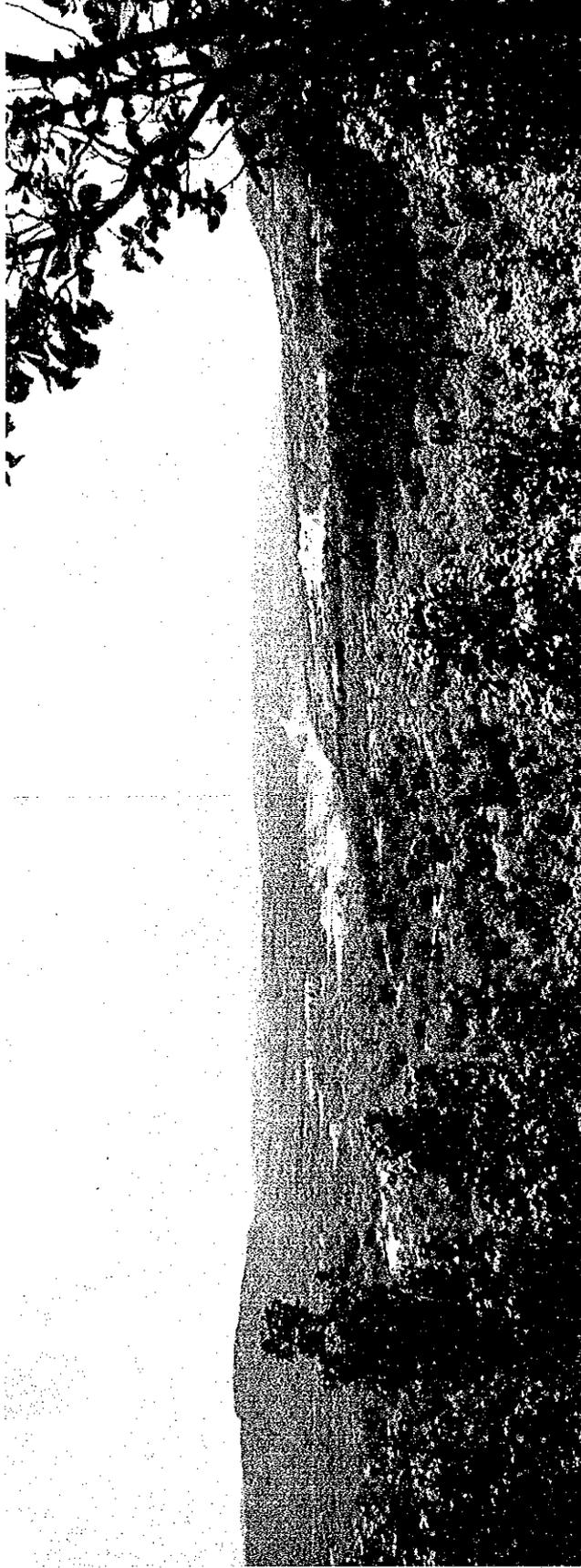
本報告書がメキシコ国における効率的な地熱開発の推進に役立つとともに、同国の経済・社会開発に寄与し、ひいては同国と我が国の友好親善をより、一層深めることに貢献できれば幸いである。

終わりに、本調査に際し、多大のご協力を頂いたメキシコ国政府機関、在メキシコ日本国大使館、外務省及び通商産業省の関係各位に深く感謝の意を表わすものである。

平成元年 2月

国際協力事業団

総裁 柳谷謙介



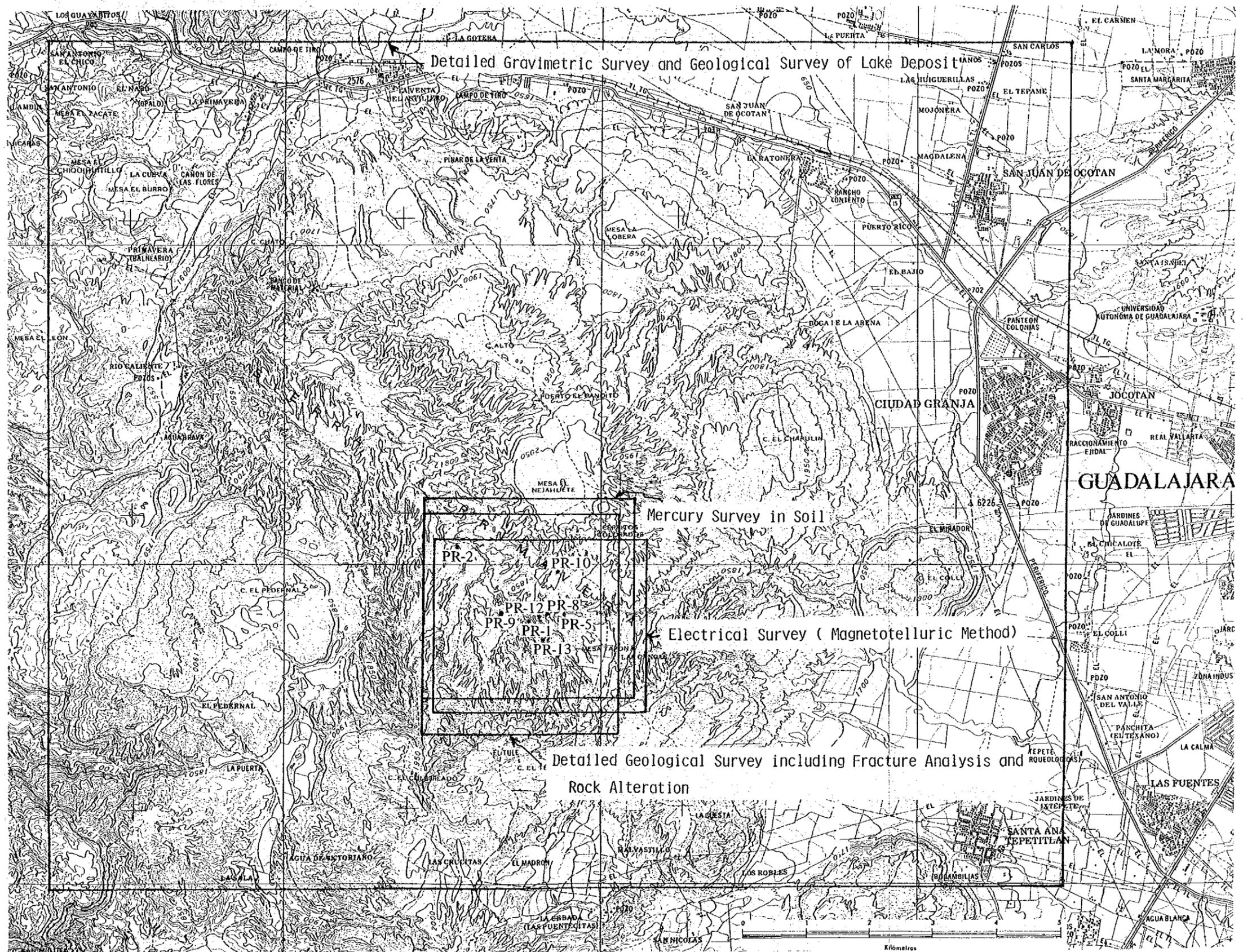
Geothermal Field of the Sierra La Primavera



Areal Photograph around the Sierra La Primavera



Main Geothermal Fields in Mexico



Locality Map of Survey Area

目 次

結 論	1
第1章 総 説	
1. 本計画調査の背景	5
2. 本計画調査の目的	5
3. 調査地域の概要	5
4. 調査経過の概要	6
5. 本計画調査の工程と期間	6
6. 調査団の氏名	6
第Ⅱ章 調査内容	
第1節 第一次調査	13
1.1 地質調査	13
1.1.1 概 要	13
1.1.2 地熱地域の地表地質	14
1.1.3 地熱地域の坑井地質	15
1.1.4 断裂系調査	16
1.1.5 地表変質帯調査	18
1.1.6 坑井コア・カッテングス調査	19
1.2 地化学調査	53
1.2.1 概 要	53
1.2.2 土壌水銀調査	53
1.2.3 地熱流体の化学性状調査	54
1.3 重力探査	70
1.3.1 概 要	70
1.3.2 重力探査結果	70
1.3.3 重力解析と地下構造	72
1.4 電磁探査	97

1.4.1	概 要	97
1.4.2	電磁探査結果	97
1.4.3	電磁探査による比抵抗構造	102
1.5	坑井試験	139
1.5.1	概 要	139
1.5.2	PR-1の坑井試験結果	139
1.5.3	PR-8の坑井試験結果	139
第2節	第一次調査によるPR-12井、PR-13井の掘削地点選定	149
2.1	第一次調査による地熱貯留層の解析	149
2.1.1	地熱貯留層構造	149
2.1.2	地熱貯留層の拡がり	151
2.2	第一次調査による調査井の掘削地点選定	153
2.2.1	掘削地点選定の基本的な考え方	153
2.2.2	ターゲットの選定	154
2.2.3	調査井の計画調査	155
第3節	第二次調査	161
3.1	PR-12井の掘削および調査	161
3.1.1	PR-12井の掘削概要	161
3.1.2	PR-12井のコア・カッテングス調査	161
3.1.3	PR-12井の熱水化学性状調査	163
3.1.4	PR-12井の坑井試験	168
3.1.5	PR-12井の総合評価	172
3.2	PR-13井の掘削	178
3.2.1	掘削計画概要	178
3.2.2	掘削作業概要	178
3.2.3	ビット記録	181
3.2.4	逸泥と逸泥対策	181
3.2.5	ケーシングパイプ挿入およびセメンチング記録	183
3.2.6	坑口装置	185
3.2.7	掘削編成	185

3.2.8	抑留および遺留事故	186
3.2.9	主要資材一覧	188
3.2.10	傾斜測定および検層	188
3.3	PR-13井の調査	223
3.3.1	PR-13井のコア・カッテングス調査	223
3.3.2	PR-13井の熱水化学性状調査	224
3.3.3	PR-13井の坑井試験	225
3.3.4	PR-13井の総合評価	235

第Ⅲ章 地熱貯留層評価のための総合解析

第1節	地熱貯留層構造	241
1.1	これまで実施された調査の総括	241
1.1.1	各坑井の特徴と地下地質断面	241
1.1.2	地下断裂系についての考察	246
1.1.3	地下温度構造	253
1.1.4	坑井の流体化学性状による考察	254
1.2	地熱貯留層構造のまとめ	259
第2節	シミュレーション法による地熱賦存量の評価	290
2.1	シミュレーション法の概要	290
2.2	シミュレーターの概要	293
2.3	評価のためのグリッドモデル(数理的モデル)の作成	295
2.4	マッチングによる最適モデルの選択	317
2.5	将来予測結果	353
第3節	発電規模の策定	368
3.1	現時点での可能発電規模	368
3.2	発電規模策定のための次段階への提言	370

添付資料	1. Geological route map (1 : 2,000 in scale)
	2. Original data of mageto-telluric survey

List of Figs

Fig. II. 1-1	Geological Map	25
Fig. II. 1-2	Correlation and Stratigraphical Columns of the Arroyo El Caracol Formation	27
Fig. II. 1-3	Correlation and Columns of the Cordilleran Volcanics	28
Fig. II. 1-4	Schematic Diagram of Strike-slip Fault	28
Fig. II. 1-5	Principal Stress and Its Trajectory in Caldera Area	32
Fig. II. 1-6	Principal Stress Axis of each Measuring Point in Geothermal Area	33
Fig. II. 1-7	Profile of Principal Stress Trajectory along NE-SW Section in Geothermal Area	35
Fig. II. 1-8	Stress Trajectory Restored by Remnant Magnetization and Fracture Orientation of Cores	36
Fig. II. 1-9	Map Showing Tensional Fracture in Geothermal Area	37
Fig. II. 1-10	Orientation of Tensional Fracture in the Tala Tuff at 35 Measuring Points	38
Fig. II. 1-11	An Example of Surface Outcrop of Altered Rocks	39
Fig. II. 1-12	Locality Map of Surface Altered Rocks for X-Ray	40
Fig. II. 1-13	Zoning Map of Rock Alternation	41
Fig. II. 1-14	Location Map of Soil Mercury Survey	58
Fig. II. 1-15	Distribution Histogram for Mercury Concentration in Soil Sample	60
Fig. II. 1-16	Cumulative Frequency of Mercury Concentration in Soil Sample	61
Fig. II. 1-17	Distribution Map of Hg Concentration in Soil	62
Fig. II. 1-18	Result of the Third-order Trend Surface Analysis for Mercury Concentration Value	63
Fig. II. 1-19	Apparatus for Collecting of Steam Sample	55
Fig. II. 1-20	Relationship between Enthalpy and Chloride Concentration in Deep Hot Water in the La Primavera	67
Fig. II. 1-21	Relationship between Boron and Chloride Concentration in Deep Hot Water	68
Fig. II. 1-22	Relationship between He/Ar and N ₂ /Ar Ratio in Geothermal Gaseous Discharge from PR-1 and PR-8	68
Fig. II. 1-23	Oxygen-18 and Deuterium Compositions of Hot Water of PR-1, PR-8 and Hot Springs and of Meteoric Waters	69
Fig. II. 1-24	Observation of Diurnal Gravity Variation	75
Fig. II. 1-25	Density of Rock Samples in the Sierra La Primavera Area	75
Fig. II. 1-26	Bouguer Anomaly Map ($\rho = 1.90\text{g/cm}^3$)	77
Fig. II. 1-27	Bouguer Anomaly Map ($\rho = 2.00\text{g/cm}^3$)	79
Fig. II. 1-28	Bouguer Anomaly Map ($\rho = 2.20\text{g/cm}^3$)	81
Fig. II. 1-29	Second-order Trend Surface	83
Fig. II. 1-30	Residuals of Third-order Trend Surface	85
Fig. II. 1-31	Third-order Trend Surface	87
Fig. II. 1-32	Residuals of Third-order Trend Surface	89

Fig. II. 1-33	Two-Dimensional Gravity Analysis, Lines A-A' B-B' and C-C' are Shown in Fig. II. 1-27	91
Fig. II. 1-34	Map Showing Structural Analysis for Gravity Survey	93
Fig. II. 1-35	Regional Bouguer Anomaly Map ($\rho = 2.20\text{g/cm}^3$)	95
Fig. II. 1-36	Map of Location and Line for MT Survey	107
Fig. II. 1-37	Positioning of Sounding Station of No.27	98
Fig. II. 1-38	An Example of Setting of Magnetometers, Electrodes and Cables	99
Fig. II. 1-39	Outline of MT Data Acquisition System	109
Fig. II. 1-40	Examples of Field Data Processing Result of Station 06	111
Fig. II. 1-41	Comparison with Field Processor and Final Data Processing of Station 07	113
Fig. II. 1-42	Flowchart of 1-D Model Inversion	114
Fig. II. 1-43	Process of 1-D Model Inversion (Station 07)	115
Fig. II. 1-44	An Example of Result of 1-D Model Inversion (Station 07)	116
Fig. II. 1-45	Distribution Map of Tipper Magnitude, period = 30 sec	117
Fig. II. 1-46	Distribution Map of Skew, period = 30 sec	119
Fig. II. 1-47	Apparent Resistivity Map (TE mode), period = 30 sec	121
Fig. II. 1-48	Resistivity Map (TE mode; SL 1,500m)	123
Fig. II. 1-49	Resistivity Map (TE mode; SL 1,000m)	125
Fig. II. 1-50	Resistivity Map (TE mode; SL 0m)	127
Fig. II. 1-51	Resistivity Map (TE mode; SL -500m)	129
Fig. II. 1-52	Resistivity Map (TE mode; SL -3,000m)	131
Fig. II. 1-53	Pseudo-Cross Section of Apparent Resistivity (TE mode), Line 3	133
Fig. II. 1-54	Cross Section of Resistivity (TE mode), Line 3	134
Fig. II. 1-55	1-D Model Cross Section, Line B	135
Fig. II. 1-56	1-D Model Cross Section, Line 3	136
Fig. II. 1-57	2-D Model Cross Section, Line B	137
Fig. II. 1-58	2-D Model Cross Section, Line 3	138
Fig. II. 1-59	Schematic Diagram of Well Test	140
Fig. II. 1-60	Downhole Temperature and Pressure Curves of PR-1 in the Producing Condition	146
Fig. II. 1-61	Downhole Temperature and Pressure Curves of PR-8 in the Producing Condition	148
Fig. II. 2-1	Conceptual Geothermal Reservoir Model in the La Primavera	152
Fig. II. 2-2	Selection of Well Target of PR-12 and PR-13	157
Fig. II. 2-3	Well Layout of PR-12 and PR-13	159
Fig. II. 3-1	Integrated Column of PR-12	165
Fig. II. 3-2	Sampling Condition of PR-12	164
Fig. II. 3-3	Outline of Logging of PR-12	168
Fig. II. 3-4	Downhole Temperature and Pressure Curves of PR-12 in the Producing Condition	175
Fig. II. 3-5	Characteristics of Well head Pressure VS. Flow Rate of PR-12	177
Fig. II. 3-6	Location of PR-13	190

Fig. II. 3-7	Casing Program of PR-13	191
Fig. II. 3-8	Drilling History of PR-13	193
Fig. II. 3-9	Layout of Drilling Site of PR-13	195
Fig. II. 3-10	Record of Penetration Rate and Lost Circulation of PR-13 (1)~(9)	197
Fig. II. 3-11	Depth of Lost Circulation and Treatments of L/C for PR-13	207
Fig. II. 3-12	7" Slotted Pipe	214
Fig. II. 3-13	Well head Stacks of PR-13 (1)~(5)	215
Fig. II. 3-14	Status of Fish for PR-13 (1)~(3)	217
Fig. II. 3-15	Status of Washover for PR-13 (1)~(2)	218
Fig. II. 3-16	Temperature and Pressure Logging Chart of PR-13 (1,400m)	220
Fig. II. 3-17	Temperature and Pressure Logging Chart of PR-13 (2,000m)	221
Fig. II. 3-18	Injection Test Chart of PR-13	222
Fig. II. 3-19	Integrated Column of PR-13	231
Fig. II. 3-20	Downhole Temperature and Pressure Curves of PR-13 in the Producing Condition	234
Fig. II. 3-21	Recovery of Temperature of PR-13	239
Fig. II. 3-22	Characteristics of Well head Pressure VS. Flow Rate of PR-13	240
Fig. II. 3-23	Prediction Curve of Well head Pressure VS. Flow Rate of PR-13	240
Fig. III. 1-1	Integrated Column of PR-1	263
Fig. III. 1-2	Integrated Column of PR-2	265
Fig. III. 1-3	Integrated Column of PR-5	267
Fig. III. 1-4	Integrated Column of PR-8	269
Fig. III. 1-5	Integrated Column of PR-9	271
Fig. III. 1-6	Integrated Column of PR-10	273
Fig. III. 1-7	Integrated Column of PR-11	275
Fig. III. 1-8	Downhole Temperature and Pressure of PR-2 in Static Condition	277
Fig. III. 1-9	Downhole Temperature and Pressure of PR-5	278
Fig. III. 1-10	Profile of Subsurface Structure in NW-SE Direction	279
Fig. III. 1-11	Profile of Subsurface Structure in NE-SW Direction	281
Fig. III. 1-12	Types of Failure in Experimentally Deformed Limestone at Varying Confining Pressure	247
Fig. III. 1-13	Transcurrent and Transform Faults	248
Fig. III. 1-14	Iso-Structural Contour of Horizon 1 (Boundary between andesite and lithic tuff of the upper Cordilleran Volcanics)	283
Fig. III. 1-15	Iso-Structural Contour of Horizon 2 (Boundary between lithic tuff and andesite)	284
Fig. III. 1-16	Iso-Structural Contour of Horizon 3 (Boundary between andesite and rhyolite of the lower Cordilleran Volcanics)	285
Fig. III. 1-17	Regional Stress Distribution along Pacific Coastal Area of Mexico	251
Fig. III. 1-18	Relation between Folding and Fractures	252
Fig. III. 1-19	Cross-Section of Downhole Temperature Profile	286
Fig. III. 1-20	Cross-Section of Minimum Homogenization Temperature Profile	286

Fig. III. 1-21	Relationship between He/Ar and H ₂ /Ar Ratios of Geothermal Gaseous Discharge	287
Fig. III. 1-22	Relationship between Cf and B Concentration	287
Fig. III. 1-23	Isotopic Composition of Geothermal Water	288
Fig. III. 1-24	Relationship between Cf Concentration and Enthalpy of Hot Water	288
Fig. III. 2-1	Conception of Reservoir Simulation	292
Fig. III. 2-2	Areal Computation Grid used to Simulate the La Primavera Field	297
Fig. III. 2-3	Cross Section of Model used for the Simulation	299
Fig. III. 2-4	Three Dimensional Model of the La Primavera Field	300
Fig. III. 2-5	Temperature in the Initial Condition (Layer 1)	309
Fig. III. 2-6	Temperature in the Initial Condition (Layer 2)	309
Fig. III. 2-7	Temperature in the Initial Condition (Layer 3)	310
Fig. III. 2-8	Temperature in the Initial Condition (Layer 4)	310
Fig. III. 2-9	Temperature in the Initial Condition (Layer 5)	311
Fig. III. 2-10	Pressure in the Initial Condition (Layer 1)	311
Fig. III. 2-11	Pressure in the Initial Condition (Layer 2)	312
Fig. III. 2-12	Pressure in the Initial Condition (Layer 3)	312
Fig. III. 2-13	Pressure in the Initial Condition (Layer 4)	313
Fig. III. 2-14	Pressure in the Initial Condition (Layer 5)	313
Fig. III. 2-15	Appratus for Core Permeability Test	315
Fig. III. 2-16	Relation between Density and Depth	316
Fig. III. 2-17	Relation between Thermal Conductivity and Density	316
Fig. III. 2-18	Experimental Heat Capacities	307
Fig. III. 2-19	Historical Change of the Cumulative Reinjection Flow Amount of PR-2	323
Fig. III. 2-20	Temperature Change of PR-2 due to Reinjection of Water of PR-9	323
Fig. III. 2-21	Production Flow Rate of PR-1	324
Fig. III. 2-22	Production Flow Rate of PR-2	324
Fig. III. 2-23	Injection Flow Rate of PR-2	325
Fig. III. 2-24	Production Flow Rate of PR-5	325
Fig. III. 2-25	Production Flow Rate of PR-8	326
Fig. III. 2-26	Production Flow Rate of PR-9	326
Fig. III. 2-27	Production Flow Rate of PR-12	327
Fig. III. 2-28	Result of History Match of Temperature for PR-1	328
Fig. III. 2-29	Result of History Match of Pressure for PR-1	328
Fig. III. 2-30	Result of History Match of Temperature for PR-2	329
Fig. III. 2-31	Result of History Match of Pressure for PR-2	329
Fig. III. 2-32	Result of History Match of Temperature for PR-5	330
Fig. III. 2-33	Result of History Match of Pressure for PR-5	330
Fig. III. 2-34	Result of History Match of Temperature for PR-8	331
Fig. III. 2-35	Result of History Match of Pressure for PR-8	331
Fig. III. 2-36	Result of History Match of Pressure for PR-9 (Layer 3)	332
Fig. III. 2-37	Result of History Match of Temperature for PR-9	332

Fig. III. 2-38	Result of History Match of Pressure for PR-9 (Layer 4)	333
Fig. III. 2-39	Result of History Match of Temperature for PR-12	333
Fig. III. 2-40	Result of History Match of Pressure for PR-13	334
Fig. III. 2-41	Temperature Distribution after 2,598 Days (1988/6/30), Layer 1	335
Fig. III. 2-42	Temperature Distribution after 2,598 Days (1988/6/30), Layer 2	335
Fig. III. 2-43	Temperature Distribution after 2,598 Days (1988/6/30), Layer 3	336
Fig. III. 2-44	Temperature Distribution after 2,598 Days (1988/6/30), Layer 4	336
Fig. III. 2-45	Temperature Distribution after 2,598 Days (1988/6/30), Layer 5	337
Fig. III. 2-46	Pressure Distribution after 2,598 Days (1988/6/30), Layer 1	337
Fig. III. 2-47	Pressure Distribution after 2,598 Days (1988/6/30), Layer 2	338
Fig. III. 2-48	Pressure Distribution after 2,598 Days (1988/6/30), Layer 3	338
Fig. III. 2-49	Pressure Distribution after 2,598 Days (1988/6/30), Layer 4	339
Fig. III. 2-50	Pressure Distribution after 2,598 Days (1988/6/30), Layer 5	339
Fig. III. 2-51	Water Saturation after 2,598 Days (1988/6/30)	340
Fig. III. 2-52	Distribution of Horizontal Permeabilities in Layer 1	341
Fig. III. 2-53	Distribution of Horizontal Permeabilities in Layer 2	341
Fig. III. 2-54	Distribution of Horizontal Permeabilities in Layer 3	342
Fig. III. 2-55	Distribution of Horizontal Permeabilities in Layer 4	342
Fig. III. 2-56	Distribution of Horizontal Permeabilities in Layer 5	343
Fig. III. 2-57	Distribution of Vertical Permeabilities in Layer 1	343
Fig. III. 2-58	Distribution of Vertical Permeabilities in Layer 2	344
Fig. III. 2-59	Distribution of Vertical Permeabilities in Layer 3	344
Fig. III. 2-60	Distribution of Vertical Permeabilities in Layer 4	345
Fig. III. 2-61	Distribution of Vertical Permeabilities in Layer 5	345
Fig. III. 2-62	Prediction of Pressure after 9,903 Days, Layer 3 (case 1)	359
Fig. III. 2-63	Prediction of Pressure after 9,903 Days, Layer 4 (case 1)	359
Fig. III. 2-64	Prediction of Water Saturation after 9,903 Days, Layer 3 (case 1)	360
Fig. III. 2-65	Prediction of Water Saturation after 9,903 Days, Layer 4 (case 1)	360
Fig. III. 2-66	Prediction of Pressure after 9,903 Days, Layer 3 (case 2)	361
Fig. III. 2-67	Prediction of Pressure after 9,903 Days, Layer 4 (case 2)	361
Fig. III. 2-68	Prediction of Water Saturation after 9,903 Days, Layer 3 (case 2)	362
Fig. III. 2-69	Prediction of Water Saturation after 9,903 Days, Layer 4 (case 2)	362
Fig. III. 2-70	Prediction of Pressure after 9,903 Days, Layer 3 (case 3)	363
Fig. III. 2-71	Prediction of Pressure after 9,903 Days, layer 4 (case 3)	363
Fig. III. 2-72	Prediction of Water Saturation after 9,903 Days, Layer 3 (case 3)	364
Fig. III. 2-73	Prediction of Water Saturation after 9,903 Days, Layer 4 (case 3)	364
Fig. III. 2-74	Prediction of Pressure after 9,903 Days, Layer 3 (case 4)	365
Fig. III. 2-75	Prediction of Pressure after 9,903 Days, Layer 4 (case 4)	365
Fig. III. 2-76	Prediction of Water Saturation after 9,903 Days, Layer 3 (case 4)	366
Fig. III. 2-77	Prediction of Water Saturation after 9,903 Days, Layer 4 (case 4)	366
Fig. III. 2-78	Prediction of Reservoir Pressure near PR-9	367
Fig. III. 2-79	Prediction of Water Saturation near PR-9	367

List of Tables

Table 1	Process of Survey	7
Table 2	Period of Survey	9
Table 3	Members of Study Team	11
Table 4	Members of Mexico- side Counterpart	12
Table II. 1-1	Microscopic Characteristics of Biotite Granite	29
Table II. 1-2	Chemical Analysis of Cutting Samples	30
Table II. 1-3	Description of Faults in Geothermal Area	31
Table II. 1-4	Relationship Between Conjugate Minor Fault and Principal Stress at each Survey Point	43
Table II. 1-5	Remnant Magnetization of Cores	45
Table II. 1-6	Result of X-Ray Analysis for Surface Altered Rock	46
Table II. 1-7	Result of Density, Effective Porosity and Conductivity of Core Samples	49
Table II. 1-8	Mercury Concentration Value in Soil	59
Table II. 1-9	Analytical Method of Hot Water and Steam Condensed Water	65
Table II. 1-10	Chemical Composition of Well Discharge Sample	66
Table II. 1-11	Chemical Geothermometer	55
Table II. 1-12	An Example of List of Gravity Survey	76
Table II. 1-13	Recording Band Width, Parament and Duration of MT Survey	98
Table II. 1-14	Conditions of Well Test of PR-1	140
Table II. 1-15	Results of Measurement of PR-1	145
Table II. 1-16	List of Parameters used for Calculation and Result of Calculation of kh in case of PR-1	142
Table II. 1-17	Conditions of Well Test of PR-8	143
Table II. 1-18	Results of Measurement of PR-8	147
Table II. 1-19	List of Parameters used for Calculation and Result of Calculation of kh in case of PR-8	144
Table II. 2-1	Respective Undertaking for an Exploration Well PR-12	160
Table II. 2-2	Respective Undertaking for an Exploration Well PR-13	160
Table II. 3-1	Chemical Composition of Well Discharge Sample from PR-12	167
Table II. 3-2	Estimate of Reservoir Temperature of PR-12 and PR-13	164
Table II. 3-3	Instruments used for Well Test of PR-12 and PR-13	169
Table II. 3-4	Conditions of Well Test of PR-12	169
Table II. 3-5	Results of Measurement of PR-12	176
Table II. 3-6	List of Paramerters used for Calculation of kh in case of PR-12	171
Table II. 3-7	Results of Calculation of kh in case of PR-12	171
Table II. 3-8	List of Major Drilling Materials of PR-13	196
Table II. 3-9	Records of Bits and Lost Circulation of PR-13	206
Table II. 3-10	Measuring of 20" Casing Pipe of PR-13	208
Table II. 3-11	Measuring of 13 3/8" Casing Pipe of PR-13	209
Table II. 3-12	Measuring of 9 5/8" Casing Pipe of PR-13	210

Table II. 3-13	Measuring of 7" Casing Pipe of PR-13	213
Table II. 3-14	List of Major Drilling Materials of PR-13	219
Table II. 3-15	Chemical Composition of Well Discharge Sample from PR-13	229
Table II. 3-16	Conditions of Well Test of PR-13	226
Table II. 3-17	Results of Measurement of PR-13	233
Table II. 3-18	List of Paramerters used in Calculation of kh in case of PR-13	228
Table II. 3-19	Results of Calculation of kh in case of PR-13	228
Table III. 1-1	Summary of Geothermal and Geological Histories of the Sierra La Primavera Geothermal Area	289
Table III. 2-1	Location of Feed Points and Flow Ratio	303
Table III. 2-2	Ranks of Initial Fracture Permeability	304
Table III. 2-3	Matrix Permeability in each Well	305
Table III. 2-4	Matrix Porosity in each Layer	305
Table III. 2-5	Density in each Layer	306
Table III. 2-6	Thermal Conductivity in each Layer	306
Table III. 2-7	Reservoir Pressure for Match (ata)	347
Table III. 2-8	Geothermometers of PR-1	348
Table III. 2-9	Geothermometers of PR-2	349
Table III. 2-10	Geothermometers of PR-5	349
Table III. 2-11	Geothermometers of PR-8	350
Table III. 2-12	Geothermometers of PR-9	351
Table III. 2-13	Geothermometers of PR-12	352
Table III. 2-14	Cases for Reservoir Predictions	355
Table III. 2-15	Well Efficiency in the La Primavera Area	355
Table III. 2-16	Summary of Tentative Production Wells	356
Table III. 2-17	Tentative Efficiency of each Well in Four Cases	357
Table III. 3-1	Well Data in the La Primavera Area	368

List of Photographs

Photo 1	Microscopic Photos of Biotite Granite	51
Photo 2	A: Liquid Inclusion in Vein Quartz from the Core of PR-13 (Depth: 2,004 m)	52
	B: Liquid Inclusion in Vein Ankerite from the Cuttings of PR-10 (Depth: 1,720 m)	52

結 論

本開発計画調査実施の経緯

国際協力事業団 (Japan International Cooperation Agency, JICA) は昭和 60 年 (1985) から 4 年間にわたり、メキシコ電力公社 (Comision Federal de Electricidad) の協力の下に、ラ・プリマベラ地域において地熱開発計画調査を行ってきた。本開発計画調査の目的は、地質調査、地化学調査、物理探査等の結果と、C F E が掘削した調査井および JICA が掘削した調査井から得られた資料および坑井試験等の結果を総合的に解析し、ラ・プリマベラ地域における地熱貯留層を評価し、その結果に基づき地熱発電規模を策定することにある。

上記目的を達成するため本開発計画調査は二段階に分けられ、第一次調査前半の調査として昭和 60 年 (1985) に地質調査、地化学調査、物理探査 (重力および電磁気 (M T) 調査および C F E が掘削した調査井の坑井試験が実施された。当初計画によれば、第一次調査後半の調査として、C F E が深度 750m の温度調査孔 3 孔を掘削することになっていたが第一次調査前半の調査および既存資料の収集により貯留層の実態がほぼ明らかとなり、かつ貯留層域の地下温度分布等についての実態も解明されたので、JICA と C F E が協議した結果、第一次調査後半の調査として、貯留層評価のため有効な資料を収集する目的で、温度調査孔 3 孔の代わりに C F E が深度 2,000 m 前後の調査井 1 坑を掘削することになった。この調査井 (PR-12 井) は昭和 61 年 (1986) 9 月から昭和 62 年 (1987) 1 月までにわたって掘削され深度 2,303 m で掘止めとなった。この坑井試験は同年 2 月に JICA によって実施された。なお、その後の計画変更により、この PR-12 井の掘削と坑井試験は第二次調査に組みこまれることになり、これに続く第二次調査後半の調査として、昭和 62 年度 (1987) に JICA により深度 2,006.8 m の調査井 (PR-13 井) が掘削された。この PR-13 井の坑井試験は、本開発計画調査の最終年度に当たる昭和 63 年度 (1988) に行われたが、これで現地野外調査のすべてが終了したので、以後得られた結果とこれまで収集した資料の総合的な解析に取組み、その結果に基づきラ・プリマベラ地域の地熱貯留層の評価と地熱発電規模の策定を行い、これらの結果をまとめてファイナルレポートを作成する運びとなった。以上が本開発計画調査の経緯である。

調査結果の要約と結論

ここで先ず、上記 4 年間にわたる開発計画調査から得られた結果の要点および結論を述べると次の通りである。

- ラ・ブリマベラ地域の地熱貯留層は深度 1,000 m 以深のコルディリエーラ火山噴出物中の NW-SE 性のフラクチャーで構成される。
- この NW-SE 性のフラクチャーはカルデラ形成時のアップリフト (uplift) によって形成されたものでその中心は PR-1, PR-8 および PR-12 付近に位置すると推定される。
- 地化学温度計、流体包有物および坑内温度測定の結果から得られた地下温度の分布によれば高温部は PR-1 ~ PR-8 付近にある。このことから、本地域の地熱貯留層はアップフロー (up-flow) とアップリフト (uplift) とが一致した縦型の貯留層であると判断される。
- 貯留層の拡がりは、北は PR-10 付近、南は PR-8 の南約 1 km、東は PR-1 の東約 1 km、西は PR-2 の手前までと推定されるので、NW-SE 方向に約 2 km、NE-SW 方向に約 1.5 km の矩形の範囲を占めると考えられる。
- 以上の地熱貯留層構造を勘集し、シミュレーションによる貯留層評価を実施した。使用したシミュレーターは多成分の二相流を取扱うことのできる三次元ダブル・ポロシティ・グリッドモデルを対象としたものである。
- グリッドの平面分割は NW-SE 方向に 4.8 km (20 分割)、NE-SW 方向に 4.2 km (18 分割) とし、立面的なレイヤー分割としては、5 レイヤーを設定した。このうちレイヤー 3 が当地域の主貯留層に相当する。なお、実際の計算に当たっては、上記範囲の外側にバッファゾーンを設けたので計算グリッド数は $22 \times 20 \times 6 = 2,640$ グリッドである。
- 水平 4 方向、垂直 2 方向の全境界は、初期温度、圧力を維持しながら系内と流体の授受を行う開放系として取扱った。
- 初期温度、初期圧力分布は各坑井の温度回復試験および静止時における圧力検層の結果から求め昭和 56 年 (1981) 5 月 20 日を 0 年とした。
- 以上の外、初期浸透率分布 (フラクチャー浸透率およびマトリックス浸透率) および孔隙率、密度、熱伝導率、比熱等の数値は、コアの物性試験の結果を参考にして設定した。
- 継続的に測定されているデータが不足なため、スポット的に行われた、流量特性調査の資料を基に、静止時の圧力検層から得られた貯留層圧力と、噴気時の化学温度計から推定した噴気流体温度の経時変化についてマッチングを実施した。
- マッチングを行った期間は昭和 56 年 (1981) 5 月 20 日を 0 年とし、昭和 63 年 (1988) 6 月 30 日までの 2,589 日間である。マッチングを行った坑井は、PR-1, PR-2, PR-5, PR-8, PR-9 (以上レイヤー 3) PR-9 (レイヤー 4) および PR-12, PR-13 (レイヤー 3)

ー3)の7坑井、8種類であるが、ほぼ満足すべき結果が得られた。

- なお、上記のマッチングにおいて、主にフラクチャーの浸透率を修正することにより実測値と計算値との一致が得られた。何故、フラクチャー浸透率を修正させたかは次の考え方に基づく。すなわち、これまでの坑内検層の結果から、当地域の坑井の多くは地層内フラッシュを起すことが知られており、このことは坑井周辺の浸透率があまり良好でないことを意味するので、浸透率の値の調整がマッチングに大きく影響すると判断されたためである。この結果、フラクチャーの浸透率を低下させることにより、実測値と計算値を一致させることが可能となった。
- 以上述べたヒストリーマッチングにより構築された最適モデルを用い将来予測シミュレーションを実施した。すなわち、所定の発電出力、それに必要な蒸気量、所定の坑口圧を維持させながら生産を継続した場合の貯留層の挙動の予測である。
- 計算には発電出力として50MW、75MW、100MWの三ケースを想定し、各々のケースに必要な蒸気量は500、750、1000 t/h、生産井の坑口圧力は6.5 ataとした。なお、蒸気に付随して生産される熱水は還元することなく地上で処理するものとした。
- 先ず主要生産レイヤーであるレイヤー3、レイヤー4の20年後におけるフラクチャーの圧力と水飽和率の分布をみると、上記いずれのケースにおいても圧力と水飽和率は低下するが、坑口圧を維持することができないほどではない。しかし、出力100MWすなわち蒸気生産量1,000 t/hの場合、圧力低下量、水飽和率の低下量は他のケースに比べはるかに大きい。このことは当地域の系外からの流体の補給が限界に近いことを意味する。
- 上記三ケースの計算結果によれば出力75MWすなわち蒸気生産量750 t/hの場合最も圧力、水飽和率が低下するPR-9を含むグリッドにおいて、発電開始して間もなく、圧力は約68 ata、水飽和率は約35%に落ち着き20年間ほとんどこのまま推移する傾向がみられる。
- 従って、将来予測シミュレーションの結果に基づき、ラ・プリマベラ地域において安定した状態で発電が維持できる可能出力の規模は75MW前後とみるのが妥当であると結論される。

提 言

以上は今回実施した本計画調査の結果と結論であるが、ここで述べた75MWという数値はあくまで可能出力であって、実際に発電所を建設する場合、どの程度の出力にするかについてはさらに次の諸点を検討した上決定する必要がある。

- 既存坑井のうち5坑（PR-1, 8, 9, 12, 13）の蒸気量は測定されているがPR-10, 11の2坑についてはなお未測定である。しかし、この2坑から各々40t/h程度の蒸気量が見込まれるので、現時点ですでに計265t/hの蒸気量（坑口圧8 ata）に応じて26MWの発電が可能である。従って、今後、更に約235t/hの蒸気量が得られるなら50MW、また約485t/hの蒸気量が得られるなら75MWの発電が可能である。
 - 地下温度、圧力および浸透率の分布を勘案し、今後、当地域において掘削可能な生産井の坑数を推定すると約30坑となる。しかし、問題は235t/hないし485t/hの蒸気量を確保するため生産井何坑を必要とするかという点である。
 - 生産井の坑数の多寡は地熱発電のコストにはね返るので、発電出力を決定する以前に経済性を含み、開発可能性調査（Feasibility study）を行う必要がある。
- 以上述べたように、今後具体的に発電所の出力を決定するまでには、なお問題が残されているように思われるので、次の段階として以下述べるような開発可能性調査を含む諸調査を実施することを提案したい。
- 貯留層の挙動を確実に把握するためには、既存の生産井7坑を一斉に長期（約1年）にわたって連続噴気させることが最も望ましいが、反面、未利用のまま蒸気を放出することになるので、経済性の面からみて実際には実施不可能と考えられる。
 - 以上述べた点を補うものとして、ロス・アスプレスで行っているような口元発電（well-head generation）の方法が考えられる。現時点で既存坑井を利用すれば、1ユニット、（5MW）のものが3ユニットすなわち15MWの発電が可能である。その内訳は次の通りである。PR-9：1ユニット、PR-1+PR-12：1ユニット、PR-11+PR-13：1ユニット）。この方法は本格的な発電所完成時までの生産井の遊休時間を活用させることに効果があるのみならず、貯留層挙動についてのデータの収集にも寄与する。
 - 一方50MWないし75MWの地熱発電の経済性について検討が必要である。この場合、経済的に成り立つ生産井の坑数がキーポイントとなる。
 - 上記の調査と平行して今後掘削する生産井が1坑当たりどの程度の蒸気量が見込まれるかを確認するため、今回設定した温度、圧力、浸透率分布を参考にして、2～3本の調査井を掘削することが望ましい。その理由は、この結果を用いることにより、どの地点で生産井を掘削すればどの程度の蒸気量が得られるかの予測が可能となるからである。
 - 以上の経済性調査、蒸気量の確認調査の結果を総括的に評価し最終的に発電所の出力規模を決定することが、次の段階で必要な手順であると結論される。

第 I 章 總 說

1. 本計画調査の背景

メキシコ合衆国は日本と同様に環太平洋火山帯に属し、パリクチンやエルチチョンなどの活火山をはじめとし多数の第四紀火山が存在する。同時に温泉・噴気などの地熱徴候地も多く、その潜在的地熱資源量は膨大のものが見込まれている。同国政府の地熱開発長期計画では、西暦2000年までに全発電量の1.6%に相当する年間600億kWhを地熱発電でまかない、石油を年間1,100万バレル節約することを目標にしている。

この方針に従い、石油資源の保存と他のエネルギー源の多用化を図るため国内に豊富に存在する地熱エネルギー資源の積極的開発に乗り出した同国政府はComision Federal de Electricidad (CFE)を開発主体とし既に、セロ・ブリエイトおよびロス・アスフレスの2カ所で地熱発電所を稼働させており、(セロ・ブリエイト=設備容量620MW、ロスアスフレス=同80MW、1989年2月現在)、さらに地熱有望プロジェクトを鋭意推進しようとしている。その一環として同国政府は1982年(昭57)わが国政府に対して地熱開発計画調査の要請を行なった。これを受けて国際協力事業団(Japan International Cooperation Agency(JICA))は1983年(昭58)に調査地域選定のための予備調査を実施した。

この結果、メキシコ中部高原地帯に分布している中で、ラ・プリマベラ地域は、地熱ポテンシャルが高く、地熱発電の可能性が大きいことが判明した。

本計画調査は、JICAが同国政府からの要請にもとづき、技術協力の一環として、CFEの協力の下にラ・プリマベラ地域の地熱貯留層を総合的に解析し、その結果に基づき地熱発電規模を策定する事を目的として実施されたものである。

2. 本計画調査の目的

本計画調査の目的はメキシコ合衆国政府の要請にもとづき、国際協力事業団(JICA)がCFEの協力の下でメキシコ中部のラ・プリマベラ地域において地質調査、物理調査、調査井の掘削を含む諸調査を実施し、その結果にもとづき、同地域の地熱貯留層を評価し、地熱発電規模を策定することにある。

3. 調査地域の概要

調査地域はメキシコ合衆国中部の同国第二の都市グアダラハラ市の南西方約20kmに位置するラ・プリマベラ地域にあり、ラ・プリマベラ火山を含む付近一帯のカルデラ地

域の南北12km東西11~12kmが対象となる。このカルデラは、NW-S E性のテピックチャバラ地溝帯、E-W性のチャバラ地溝帯、N-S性のコリマ地溝帯の3列の地溝帯の交会する部分に形成されたものである。

4. 調査経過の概要

本計画調査は第一次調査から第二次調査に亘る手順で実施された。

第一次調査は昭和59年から同61年まで本地域の地熱貯留層の構造、広がり、深さを把握することを目的とし、地質調査、地化学調査、重力調査、電気探査、坑井試験等が実施された。

当初の予定では、CFEが昭和61年に深度750mの温度調査孔3孔を掘削することになっていたが、第一次調査前半の調査および既存資料の収集により貯留層の実態がほぼ明らかになり、かつ貯留層域の地下温度分布等についても解明されたので、貯留層評価のために有効な資料を収集する目的で、CFEが調査井を掘削することに計画が変更された。

PR-12と呼ばれるこの調査井は昭和61年9月から同62年1月にわたって掘削され深度2,303mで掘止めとなった。なお、その後の計画変更によりPR-12井の掘削は第二次調査に組みこまれ、これに続く第二次調査後半の調査として、JICAにより深度2,006.8mの調査井PR-13井が掘削された。

以上で現地野外調査が全て終了したので、得られた結果と収集された資料を用い、シミュレーションによる総合的な貯留層の解析を実施した。そして、この解析の結果に基づきラ・プリマベラ地域における地熱貯留層の評価と地熱発電規模の策定を含むファイナルレポートを作成し昭和63年度で本計画調査の全工程が終了した。

5. 本計画調査の工程と期間

昭和59年から63年にわたって実施された調査の工程と期間をそれぞれTable-1, 2に示す。

6. 調査団の氏名

JICA調査団の構成員およびメキシコ合衆国側協力者の氏名をTable-3, 4に示す。

Table 2 Period of Survey

(1)

調査項目		期 間	現 地 調 査	国 内 解 析
第 一 次 調 査	インセプションレポート作成			自 S. 59.12.20 至 S. 60. 1.18
	” 現地説明		自 S. 60. 1.20 至 S. 60. 2.17	29日間
	収 集 資 料 解 析			自 S. 60. 2.19 至 S. 60. 3.20
	地 質 調 査		自 S. 60. 6.12 至 S. 60. 8. 9	59日間
	地 化 学 調 査		自 S. 60. 6.24 至 S. 60. 9.20	89日間
	重 力 探 査		自 S. 60. 6.24 至 S. 60. 9.20	89日間
	電 気 探 査		自 S. 60.11.27 至 S. 61. 1.31	66日間
	インテリムレポート作成			自 S. 61. 5.26 至 S. 61. 7. 8
	” 現地説明		自 S. 61. 7.21 至 S. 61. 8. 3	14日間
PR-12井資料収集		自 S. 62. 3. 2 至 S. 62. 3.15	14日間	
第 二 次 調 査	事 前 協 議		自 S. 62. 7.20 至 S. 62. 7.31	12日間
	PR-13井掘削監督		自 S. 62.10.12 至 S. 63. 3.23	164日間

調査項目		期 間	現 地 調 査	国内解析
第 二 次 調 査	PR-12井坑井試験 および地化学調査		自 S. 63. 1. 20 至 S. 63. 2. 12	24日間
	PR-12井地質調査		自 S. 63. 3. 9 至 S. 63. 3. 23	15日間
	PR-13井地質調査		自 S. 63. 6. 20 至 S. 63. 7. 13	24日間
	” 坑井試験 および地化学調査		自 S. 63. 8. 8 至 S. 63. 8. 31	24日間
	貯留層解析および ファイナルレポートの作成			自 S. 63. 6. 20 至 S. 63. 12. 10
	ファイナルレポートの 現地説明		自 H. 1. 1. 30 至 H. 1. 2. 5	7日間

Table 3 Members of Study Team

担当調査	調査段階	氏名	所属機関
団 長	第一次～第二次	中 村 久 由	日本重化学工業(株)
副 団 長	第 一 次 第一次～第二次	三 原 次 郎 佐 藤 浩	日本重化学工業(株) 同 上
地 質 調 査	第一次～第二次 同 上 同 上 第 一 次	佐 藤 浩 村 松 容 一 大 山 勉 阿 部 昭 夫	日本重化学工業(株) 同 上 日鉄鉱コンサルタント(株) 同 上
地化学調査	第一次～第二次 同 上	吉 田 裕 笠 井 加一郎	日本重化学工業(株) 同 上
重力探査	第 一 次 同 上	森 林 成 生 高 橋 郁 夫	日 鉱 探 開 (株) 同 上
電気探査	第 一 次 同 上 同 上	関 純 夫 中 田 晴 弥 篠 原 信 夫	日本重化学工業(株) 同 上 同 上
坑井試験	第 一 次 第一次～第二次 第 二 次	三 原 次 郎 平 子 喜 信 大 柳 雅 寒	日本重化学工業(株) 同 上 日 鉱 探 開 (株)
掘削指導	第 二 次	斉 藤 清 次	日本重化学工業(株)

Table 4 Members of Mexico- side Counterpart

<p>MORELIA:</p>	<p>ING. HECTOR ALONSO ESPINOSA ING. ARTURO GONZALEZ SALAZAR ING. ANTONIO RAZO MONTIEL ING. RAFAEL MOLINAR CESEÑA ING. JAIME MARIO E. VACA SERRANO ING. JOSE PEREZYERA Y ZAPATA DR. JOSE LUIS QUIJANO LEON ING. ZENON CASARRUBIAS UNZUETA ING. SAUL VENEGAS SALGADO ING. FELIPE ARENAS GARCIA ING. ENRIQUE SAMANO SANCHEZ ING. CATARINO CADENAS TOVAR ING. MARCO ANTONIO TORRES RODRIGUEZ ING. MANUEL PINETTE GAONA TEC. MIGUEL LOPEZ DE NAVA ING. MOISES ZEPEDA PEÑA ING. AIDA LOPEZ HERNANDEZ DR. OSCAR CAMPOS E. ING. EMILIO BIGURRA P. ING. FERNANDO HERRERA B.</p>
<p>GUADALAJARA:</p>	<p>ING. LUIS C.A. GUTIERREZ NEGRIN ING. ROBERTO MACIEL FLORES ING. JAVIER VILLA MERLO ING. CESAR DANTE LUCIO ING. SERGIO SANCHEZ R. ING. RODOLFO BECERRA RAZO ING. OSCAR AQUINO MALDONADO ING. JOSE ROSAS ELGUERA ING. ARTURO ROSAS MARQUEZ TEC. MIGUEL CHACON FRANCO TEC. GUILLERMO MEDINA OROZCO SR. GUILLERMO BRISEÑO GARNICA SR. RENE BUCIO CAMBRON SR. ADALBERTO URIBE OJEDA</p>

第 II 章 調 査 内 容

第1節 第一次調査

1.1 地質調査

1.1.1 概要

地質調査では、フィールド調査と坑井のコア、カッティングス調査の2種類の調査を実施した。フィールド調査では主要ルートの2千分の1ルートマップ（付録参照）を作成し、これに基づいてフラクチャー解析、変質帯調査、湖成層の堆積調査を実施した。さらに本地域の主要貯留層となる第三系の岩質と構造を知るために、広域地質調査も実施した。

坑井のコア、カッティングス調査としては、既存5坑井（PR-1, 2, 5, 8, RC-1）から適宜選び出し、コアの密度、孔隙率、熱伝導率、カッティングスの帯磁率、Hg, Asを中心とした化学分析、X線回折分析および流体包有物調査を実施した。

これらの調査の結果以下に示す事が明らかになった。

- ① 本地域の地質層序は、下位から基盤花崗岩類、コルディリェーラン火山噴出物、タラ凝灰岩、セリートス・コロラドス流紋岩、アロヨ・エルカラコル層（湖成層）、メサ・エル・ネファウェテ流紋岩であり、主たる地熱貯留層はコルディリェーラン火山噴出物の下部層（安山岩が主体の地層）中に存在する。
- ② 断裂系の調査によれば、地表からコルディリェーラン火山噴出物上部まではNE-SW系の正断層系（正確には normal-slip with small lateral component fault）がよく発達し、これらの断層はNW-SE系の横ずれ断層によって切られている。以上の断層はカルデラ形成後の隆起に伴って形成されたもので、隆起の中心は、引張りフラクチャーや古応力場復元によればPR-1～PR-8周辺と想定される。
- ③ 地表および坑井カッティングスの変質帯調査によれば、地表ではカオリナイトを主とするNE-SW性の酸性変質帯で特徴づけられるのに対し、坑井の深度1,000m以深の変質鉱物は緑泥石、方解石、混合層鉱物等の中性～アルカリ性熱水変質作用が卓越し、変質作用の中心はPR-1～PR-8周辺と想定される。
- ④ 坑井コア、カッティングスの岩石物性値測定および化学分析を実施したところ、HgとAsの高濃度部分は逸泥を伴うフラクチャー部分とよく対応することが判明した。また、流体包有物の最低充填温度から描いた地下温度断面をみると、当地熱地域の沸騰地熱流体はPR-1～PR-8の地下深部より上昇していることが推定された。

1.1.2 地熱地域の地表地質

エル・カラコル沢上流に位置する地熱徴候地域の地表地質図を約 2.5 km × 3 km (7.5 km²) の範囲で作成した (Fig. 1, 1-1)。この地質図は昭和 60 年のルートマップと同 61 年に作成した C F E の地質図を基に作成したものである。以下、地表にあらわれている下位の地層から順に記載する。

(1) タラ凝灰岩 (Tala Tuff)

タラ凝灰岩はシェラ・ラ・プリマベラカルデラの形成に伴って生じた約 95,000 年前の火砕流堆積物であり、カルデラ内のみならず外側の basin をもうずめ、MAHOOD (1980) によればタラ凝灰岩の分布域は 700 km² におよぶものと推定されている。

地熱徴候地域ではエル・カラコル沢やオンド沢等の V 字沢に沿って露出し、エル・カラコル沢下流からリオ・カリエンテに行くほど下部の地層が出現する。今回の地表調査と坑井資料によれば、タラ凝灰岩は 11 枚以上の flow unit に区分され、全体の厚さは 200 ~ 700 m に達する。この事は、カルデラ陥没が一挙に起きたのではなく、噴出と陥没が同時に進行していったことを示唆する。

タラ凝灰岩は無班晶状軽石を含む溶結凝灰岩で特徴づけられ、中心部ほど溶結度が高く、上部と下部に非溶結部が存在する。この非溶結部には層理が認められ、surge 様の堆積物となっている。また、基底部には降下軽石層が存在する。

(2) セリートス・コロラドス流紋岩 (Cerritos Colorados Rhyolite)

本地域北半分には、湖成層の下位でタラ凝灰岩の上位に流紋岩溶岩が分布している。分布は局所的であり、0 ~ 100 m の厚さで東方にいくほど厚い。本流紋岩は MAHOOD (1980) の older ring domes の流紋岩よりもさらに古く、陥没中央部に生じた溶岩円頂丘に起因すると考えられる。

本流紋岩は多孔質・ガラス質な流紋岩であるが、所々スフェアライトや黒曜石を含み、flow structure がよく発達している。

(3) アロヨ・エル・カラコル層 (Arroyo El Caracol Formation)

タラ凝灰岩の上位には、陥没により形成されたカルデラ湖内に堆積した湖成層が堆積している。湖成層は主として未固結砂岩、軽石凝灰岩、礫から成る層相変化に富む上部と、巨大軽石層、シルト岩、砂岩から成る、より固結度の高い下部に区分される。上部の厚さは 50 m 以上、下部の厚さは 5 ~ 30 m でその境界は一部平行不整合である。不整合の存在は、溶岩円頂丘形成や隆起に伴う湖の陸化、層相変化は湖に堆積している間の

火山活動や隆起・沈降に伴う動揺を表わしている。

下部湖成層は巨軽石層を鍵層として、その上位はシルト岩を主とする地層、その下位は含軽石凝灰質砂岩、シルト岩および凝灰岩から構成されている。また一部には礫岩および水中降下軽石も認められる。巨軽石層は、直径20 cm～6 m大の流紋岩質軽石塊が凝灰質珪藻質シルト中に含まれる層で、カルデラ全域に分布する。軽石塊には放射状の冷却節理が発達していることが多い。この軽石塊はカルデラ中心部に行くほど径が小さく、縁辺部になるほど巨塊となる。また、基質の占める割合は縁辺部ほど多い。MAHOOD (1980)はこの事実から巨軽石層がカルデラ陥没後の中央部流紋岩ドームからカルデラ湖水上を浮遊して供給されたと述べている。

上部湖成層は、礫、含軽石凝灰質砂、細粒砂、凝灰質珪藻質シルトおよび降下軽石等多様な未固結地層から成り、場所による層相変化が著しい。

シェラ・ラ・プリマベラカルデラ全域における本層の柱状対比をFig. 11-2に示す。

(4) メサ・エル・ネファウエテ流紋岩 (Mesa El Nejahuete Rhyolite)

本地域北部はメサ・エル・ネファウエテ山を構成する流紋岩で覆われている。メサ・エル・ネファウエテ流紋岩はolder ring dome (約95,000年前)とyounger ring dome (約75,000年前)のcomposite domeといわれ(MAHOOD, 1980)多孔質、ガラス質、角礫質、黒曜石様など種々の様子を呈している。

1.1.3 地熱地域の坑井地質

これまで掘削された坑井の地質については、昭和60年に実施したシェラ・ラ・プリマベラ周辺の広域調査とCFEの調査資料(SANCHEZ, 1988MS)を基に考察を試みた。

(1) 基盤花崗岩類

昭和60年CFEによって掘削されたPR-9井の深度2,780～2,986mには花崗閃緑岩および石英モンゾニ岩が認められた。これらの岩石は本地域南西方の太平洋岸に広く分布している中生代～新第三紀の花崗岩類と同じものと考えられる。写真1には深度2,985～2,986mで採取されたコアの顕微鏡写真を示し、Table II, 1-1にはその観察結果を示す。この観察結果によれば本岩は黒雲母花崗岩である。

(2) コルディリエラン火山噴出物 (Cordilleran Volcanics)

上記基盤花崗岩類の上位には玄武岩質安山岩と流紋岩溶岩あるいは同質凝灰岩から成

る“Sierra Mader Occidental”に属する火山噴出物が約2,500mと厚く堆積している。PR-1の深度900m付近の石質凝灰岩は、グアダハラ市北方に分布するCordilleran Volcanics (CLOUGH, 1981)の中程度に溶結した火砕流堆積物と酷似しているので、両者は同一の地層に属すると推定される (Fig. II. 1-3)。

本層は石質凝灰岩が主体の上部と安山岩が主体の下部とに区分され、両者の間は不整合と推定される。これは、Figs II. 1-10~11示す地質断面図からわかるように、上部と下部の褶曲が不調和であることから判断した。

CLOUGH (1981)によれば本層は7つのunitにわけられ、流紋岩と玄武岩のbimodal火山活動であり、中新統~鮮新統にかけて堆積したものである。安山岩の顕微鏡観察によれば安山岩の変質程度は著しく、輝石類は沸石に置換され、斜長石は緑ロン石、緑泥石化が著しい。本層に属する代表的な安山岩の化学分析値をTable II. 1-2に示す。

(3) タラ凝灰岩

タラ凝灰岩は各坑井に出現し、それらの記載はすでに1.1.2(1)で試みた。Figs. II. 1-10~11からわかるように本地域北方で厚く南方で薄くなっている。

1.1.4 断裂系調査

(1) 断 層

Fig. II. 1-1には2,000分の1ルートマップに基づいてmappableな断層を図示した。断層はNE-SW性の正断層が卓越し、これらはNW-SE性の横ずれの断層によって切られている。この他、PR-2近傍には逆断層が認められる。これらの断層系は、メサ・エル・ネファウエテ流紋岩を切っているため、このドーム形成(数万年前)の後に作られたと考えられる。Table II. 1-3に、地熱微候地域に発達している断層をその性格毎にとりまとめて示す。Table II. 1-3からわかるようにNE-SW性の正断層は共役断層を伴い比較的観察可能である。しかし、NW-SE性は横ずれ的性格をもつために、直接観察できないことが多い。それはFig. II. 1-4に示すように断層面のスリッケンラインを見ない限り横ずれがわからないからである。

地下の断層とその成因については、第III章で述べる。

(2) 古応力場復元

地表で観察される断層はすべてみかけの動き(separation)である (Fig. II. 1-4)。真の

動きを知らないと真の断層の性格はわからないし、地表で認められる断裂系を地下にどのように延長すべきかわからない事が多い。このような場合、岩脈等の鍵markerを使う方法もあるが、今回は古応力場復元による方法によってそれらの解決を試みた。

そこでまず露頭で見られる共役小断層、スリッケンラインおよび引張りフラクチャーによって古応力場を復元した(復元方法はRAGAN, 1968参照)。Table II. 1-4 および Figs. II. 1-5~6 に測定結果を示す。これらの結果から次のことがわかる。

- ① 地熱徴候地周辺では、最大圧縮主応力(σ_1)は垂直に近く最小圧縮主応力(σ_3)はNW-S E方向で水平に近い。この事は本地域においてNE-S Wの走向を持つ正断層が発達しやすい。
- ② 正断層といっても complete normal-slip 断層は少なく、多少水平横ずれ成分をもつものが多い。また、時には oblique あるいは lateral-slip のものもあるので、(1)で述べた断層のうち、横ずれ断層は必ず存在すると考えられる。
- ③ タラ凝灰岩中の最小圧縮主応力(σ_3)はNE-S W方向である。したがって、この層中に発達する断裂系はNW-S E方向が卓越すると考えられる。
- ④ シェラ・ラ・プリマベラカルデラの縁辺部に近づくと最大圧縮主応力(σ_3)はカルデラ壁に垂直方向となる。この事は、復元した古応力場がカルデラ陥没あるいはその後の隆起(おそらく数万年前の最終 uplift 時)に伴って形成されたものと推定される。

次に、古応力場と褶曲・断層との関係をみるために、各主応力軸の断面解析とコア中のフラクチャー観察による応力場の復元を試みた。Fig. II. 1-7に σ_3 に直交するNE-S W断面、Fig. II. 1-8にはコア観察結果による σ_2 および σ_3 の軌跡を示す。なお、コア観察による応力場の復元は次のような手順で実施した。

地熱井から採取したコアには、スリッケンサイドや脈を伴ったフラクチャーが見られる。コアが定方位で採取できないので、一般にフラクチャーの方向性を云々することはできない。しかし、地球磁場が現在に近い最近の岩石では、コアの自然残留磁気を測定すれば、フラクチャーの方向性を吟味できる。そこで、今回は地熱井のコア8個について仮の磁北を決めて採取したのち、無定位磁力計にて自然残留磁気を測定し、真の磁北を求めた。この磁北を基に観察したフラクチャーの応力場を復元した。その結果をTable II. 1-5に示す。以上の結果から次のことがわかる。

- ① σ_1 の傾斜に着目して bending を考えるとNW-S E方向の応力場の背斜、向斜が

描ける。これは、小断層形成等が隆起あるいは沈降と関係し、その動きの軸がNW-S E方向であった事を示している。応力背斜軸はPR-1のすぐ北側、応力向斜軸はPR-9の南側に位置する。

② PR-2 深度 1,360m 以外の主応力方向は地表で得られた主応力方向と調和している。この事は地表調査で判明したフラクチャーは、コルディリエーラン火山噴出物上部までは延長できることを示している。しかし、これ以深については不明である。

③ コア観察から得られた応力背斜軸もまたPR-1の近くに位置するので、PR-1 周辺は地層の変形における応力集中、特に下部からの隆起 (uplift) による背斜状曲げ部に相当すると思われる。

(3) 引張りフラクチャー

地熱徴候地内に存在する地表での引張りフラクチャー分布を作成すると Fig. II. 1-9 に示すようになる。Fig. II. 1-9 によれば引張りフラクチャーはPR-1とPR-8の間によく発達しており、古応力場復元で得られた応力背斜部と一致する。このことは引張りフラクチャーが曲げ褶曲に伴って形成されたことを示唆している。

一方、タラ凝灰岩中に発達している引張りフラクチャーについて、そのOrientationをプロットすると Fig. II. 1-10 のようになる。Fig. II. 1-10 はフラクチャーが一定の方向性を持っていないことを示すので、これらのフラクチャーには火砕流冷却時の熱応力に伴って生じたものも含まれている。

1. 1. 5 地表変質帯調査

地表変質帯調査は、噴気箇所を中心に実施した。現地で噴気の分布や変質の特徴等を観察した後、採取した代表的変質岩試料 82 個を粉末X線回析法によって変質鉱物の同定および変質分帯の設定を行った。変質の地表での観察例を Fig. II. 1-11 に示す。なお、X線分析法は 1. 1. 6 項で述べる。

確認された変質鉱物は石英・クリストバル石・リンケイ石・カオリナイト・ハロイサイト・モンモリロナイト・絹雲母・明ばん石・ギブサイトおよび黄鉄鉱である。これらの変質鉱物のうちで、カオリナイトおよび明ばん石の出現する帯をそれぞれカオリナイト帯、明ばん石帯と呼ぶ。X線回析分析結果を Table II. 1-6、その採取地点を Fig. II. 1-12 に示す。

Fig. II. 1-13 に示すように、当地域の噴気に伴う酸性変質の多くはカオリナイト帯であり、PR-5、PR-8 付近を中心としてNE-SWの方向性を示して主に分布する。明

ばん石帯の分布は非常に限られ、PR-8の北西約150m付近とPR-2の東約200m付近にカオリナイト帯に囲まれて分布する。

1.1.6 坑井コア・カッティングス調査

坑井コア・カッティングス調査のうち第一次調査としては、既存5坑井（PR-1、2、5、8、RC-1）から試料を選択し、コアの密度・孔隙率、熱伝導率、カッティングスの帯磁率、Hg、Asを中心とした化学分析、X線回折分析および流体包有物調査を実施した。以下のそれらの調査方法と調査結果を述べる。

(1) コアの密度、孔隙率、熱伝導率測定

PR-1、PR-2、PR-4、PR-5、RC-1の各坑井で部分的に採取されているコアから12個の半裁試料を採取して、密度、有効孔隙率、熱伝導率を測定した。

密度は試料の各状態での空中重量と湿潤状態での水中重量を測定し、それぞれの重量の関係式により算出した。

有効孔隙率は密度測定値を使用した関係式により算出した。

熱伝導率は、試料半裁面を研磨して準精密仕上げ平面とし、昭和電工K.K.製QTM-D₂型迅速熱伝導率計（Box Probe法）により測定した。

コア試料の密度、有効孔隙率、熱伝導率の測定結果をTable II.1-7に示す。Table II.1-7から次の事が読みとれる。

- ① 凝灰岩類よりも安山岩の方の密度は高く、凝灰岩類の中では地層や深度に関係なく溶結程度の高いものの方が高密度になる傾向がある。
- ② コアの有効孔隙率は岩質によるバラツキが大きく、強溶結凝灰岩ほど小さく、弱溶結凝灰岩ほど大きい。
- ③ コアの熱伝導率は密度と正の相関を示し、密度が高いほど、熱伝導率が良い傾向にある。

(2) カッティングスの帯磁率

火成岩中に高温熱水が浸入すればmagnetiteはpyriteに転移しやすい。すなわち、透水性に富むほど帯磁率が低くなるのではないかという予想のもとに、PR-1、PR-2、PR-8、RC-1の深度1,000m以深の帯磁率の測定を実施した。

試料は、水洗乾燥したもので、粒子の径は、ほとんどが2~3mmで、最大6~7mmに達するものもある。又、ほとんどの試料中には、掘進時に混入したと思われる腐食した

鉄粉がかなり含まれている為、可能な限り取り除いて測定を行った。そのほか、セメント、逸泥防止に用いたココナツの殻等が多量に含まれているものもあり、これらについては測定を行わなかった。

測定機は、Bison社製3101A型帯磁率計を使用し、測定容器は、内径2.95cm、高さ8cmの亚克力製の円筒形容器である。

上記容器に入れたカッティングスを上記帯磁率計で見かけの帯磁率(R)を測定し、更にこれを島津製EL-600型・直示天秤で秤量し試料の重量(W)を測定した。

帯磁率(x)の計算は次の式によった。

$$x = R \times \left(\frac{d}{d'} \right)^2 \times \frac{1}{\alpha'} \times 10^{-8} \text{ (emu/g)}$$

ここで

R : デジダイヤルの読み (emu/cm³)

d : 標準試料の直径 (cm)

d' : 測定容器の内径 (cm)

α' : カッティングス試料の見掛け密度 (g/cm³)

W : 試料の重量 (g)

V₀ : 試料の体積 (cm³)

測定結果を Figs 1.1-1~7 の総合柱状図に示す。その結果、PR-8では低帯磁率部分と坑井掘削中の逸泥はよく対応しているが、他の坑井では岩質と相関し、新鮮な岩石では高帯磁率を、白色粘土化変質部では低帯磁率を示すことが明らかとなった。

(3) カッティングスの化学分析

PR-1、PR-2、PR-8の各坑井の深度1,000m以深のカッティングス試料を採取し、主要成分とCO₂、Sについて化学分析(全岩化学分析)を行ない、また地化学検層としてHg、Asについて化学分析を行なった。

全岩化学分析用試料は、PR-1とPR-8の安山岩層の比較的新鮮部から採取した3試料で、HgとAs分析用試料は、CFEの逸水記録を参考にして採取した102試料である。

全岩化学分析成分のうち、SiO₂、TiO₂、Al₂O₃、MnO、MgO、CaO、P₂O₅は理学電機製3064M型蛍光X線計により分析した。Fe₂O₃は蛍光X線法により求めたT-Feから重クロム酸カリウム滴定法で求めたFeOのFeを差し引くことで算出した。Na₂O、

K₂Oは島津製610-S型原子吸光・炎光光度計を用いての炎光光度法によった。CO₂は中和滴定法、Sは熱分解酸化滴定法により、H₂O土は重量法によった。

地化学検層成分のうちHgは平沼製HG-1型水銀濃度計を用いて低温還元気化法により、Asは島津製610-S型原子吸光光度計を用いて還元気化法により分析した。

全岩化学分析結果についてはすでにTable I. 1-2に示し、Hg、Asの結果についてはFigs I. 1-1~7の総合柱状図に示す。これらの結果をみると、カッティングス中のHgとAsの高濃度部分は地下のフラクチャー箇所をかなり反映することが判明した。すなわち、PR-1では深度1,630mのHgとAsの高濃度は深度1,620m付近の逸泥を反映する。また、深度1,490mのHgとAsの高濃度も深度1,445m付近の全量逸泥を反映している可能性が大きい。PR-2でのHgは深度1,950m付近、Asは深度1,800m付近から深部に向けて高くなっているが、この濃度傾向は深度1,822m以深の連続的小規模逸泥を反映する。PR-8のHgとAsは類似の傾向を示し、深度1,340、1,460、1,560、1,610~1,690、1,740、1,810~1,850mにピークが認められる。これらは深度1,328、1,436、1,564~1,569、1,640~1,643、1,752、1,790~1,793m付近の逸泥に対応する。一方、深度1,130mのAsの高濃度は深度1,100m付近の逸泥を反映すると考えられる。このように、フラクチャー判定には、特にHgとAsが有用であったが、これは火山性起源のHgとAsが岩石中のフラクチャーに濃縮し保存されていることを意味する。

(4) カッティングスのX線回折分析

分析試料は、CFEの顕微鏡観察結果を参考としてPR-1、PR-2、PR-8の各坑井の深度1,000m以深のカッティングスから採取した100試料である。

X線回折は粉末法により、各試料毎にバルク試料と水ひ試料について行った。また、粘土鉱物同定のため必要に応じてエチレングリコール処理試料、塩酸処理試料、100°C加熱処理試料についても回折した。回折計および回折条件は次のとおりである。

回折計	理学電機製ガイガーフレックスRADT III A
管球	Cu
フィルター	Ni (あるいは無フィルターでモノクロメーター使用)
電圧・電流	40KV 30mA
計数管	シンチレーションカウンター
フルスケール	1,000~8,000 cps

時定数	1 sec
スリット系	1° - 0.15mm - 1°
走査範囲 (2θ)	2 ~ 40° (バルク試料)、2 ~ 15° (水ひ試料、各処理試料)
走査速度 (2θ)	2°/min (バルク試料)、1°/min (水ひ試料)
記録紙速度	2 cm/min (全試料)

分析結果を Figs 1.1-1~7 の総合柱状図に示す。同定された鉱物のうち変質作用を指示する鉱物のうち粘土鉱物としては、モンモリロナイト、絹雲母-モンモリロナイト混合層鉱物、緑泥石-モンモリロナイト混合層鉱物、緑泥石、絹雲母および滑石が検出された。その他では、石英、クリストパライト、方解石、ドロマイト、菱鉄鉱、斜プロロ沸石 (~輝沸石)、ワイラケ沸石、黄鉄鉱なども認められた。

地熱徴候地周辺の地表では各所で噴気を伴う変質帯が形成されており、この変質帯ではカオリン粘土が主であることから、地表近くでは酸性変質作用が普遍的であるが、各坑井の深度 1,000 m 以深のキャッシングス試料から検出される主な鉱物は、モンモリロナイト、緑泥石、絹雲母、混合層鉱物、方解石、ドロマイトなどであることから、地下深部では中性~アルカリ性の変質作用が卓越していると思われる。

検出された変質鉱物の分布状況から各坑井での地下温度分布を明瞭に把握することは困難であるが、PR-8 の深度 1,830 m ではワイラケ沸石が認められ、この付近での比較的高温下での変質作用の存在を示している。

また、X線回折では回折強度の弱いことや他鉱物の回折線と重複することなどから確認されていないが、顕微鏡観察によれば、PR-1 と PR-8 ではしばしば緑簾石が認められており、一般的に地下温度が高いことがうかがわれた。

(5) 流体包有物調査

PR-1、PR-2、PR-5、PR-8 および RC-1 のキャッシングスから流体包有物の充填温度に向く石英・方解石・アンケライトを選択し、加熱顕微鏡を用いて測定した。測定結果を Figs 1.1-1~7 の総合柱状図に示す。

以下、坑井毎にその結果を述べる。

PR-1 : 最低充填温度は深度 1,100 m 以浅では静止状態の検層温度 (スタンディングタイム S. T 408 時間) に近いが、これは以深では 42~45°C 程低く、深度 1,500 m 以深の最低充填温度は 260~284°C を示す。流体包有物には気相包有物と液体包有物の共存が認められ、包有物生成時に地熱流体の一部は沸騰現象を

生じていたと推定される。

P R - 2 : 最低充填温度は深度 680 m の 118°C から深度 1,780 m の 150°C へと深部へ向けて漸増するが、それ以深で急激に温度は上昇し坑底付近の深度 1,985 m で 240°C を示す。

P R - 5 : 深度 895 m 以深はカッティングスが欠如しており、測定はそれ以浅で実施した。最低充填温度は深度 350 m の 104°C から深度 580 m の 144°C へと急増するが、それ以深 750 m までは若干の低下が見られる。深度 750 m から 800 m にかけては温度は急上昇している。

P R - 8 : 主要な流入深度と考えられる深度 1,800 m 付近で検層温度に低下が見られる。しかし、この部分および深度 1,250 m を除けば、検層温度カーブと流体包有物の最低充填温度の分布が同様な形であること、さらに深度 1,630 m では両者がかなり近い値を示すことなどから、最低充填温度の分布が、掘削以前の地下温度分布に近いことが推測される。当坑井の最低充填温度の最高値は深度 1,790 m の 292°C であり、P R - 1 井同様包有物生成時に地熱流体の一部は沸騰していたと考えられる。

R C - 1 : 最低充填温度は深度 890 m の 78°C から深度 1,855 m の 122°C へと深部へ向けて漸増する。最低充填温度の最高値は坑底付近の深度 1,855 m の 122°C であり、非常に低温である。

以上 5 坑井の測定結果に、その後掘削された坑井の測定結果を加味し、最低充填温度の断面分析解析を実施したが、その結果は第 Ⅲ 章で述べる。いずれにせよ、当地熱地域における沸騰地熱流体は、P R - 1、P R - 8 付近の地下深部より上昇していることが推定された。流体包有物観察の一例を写真 2 に示す。

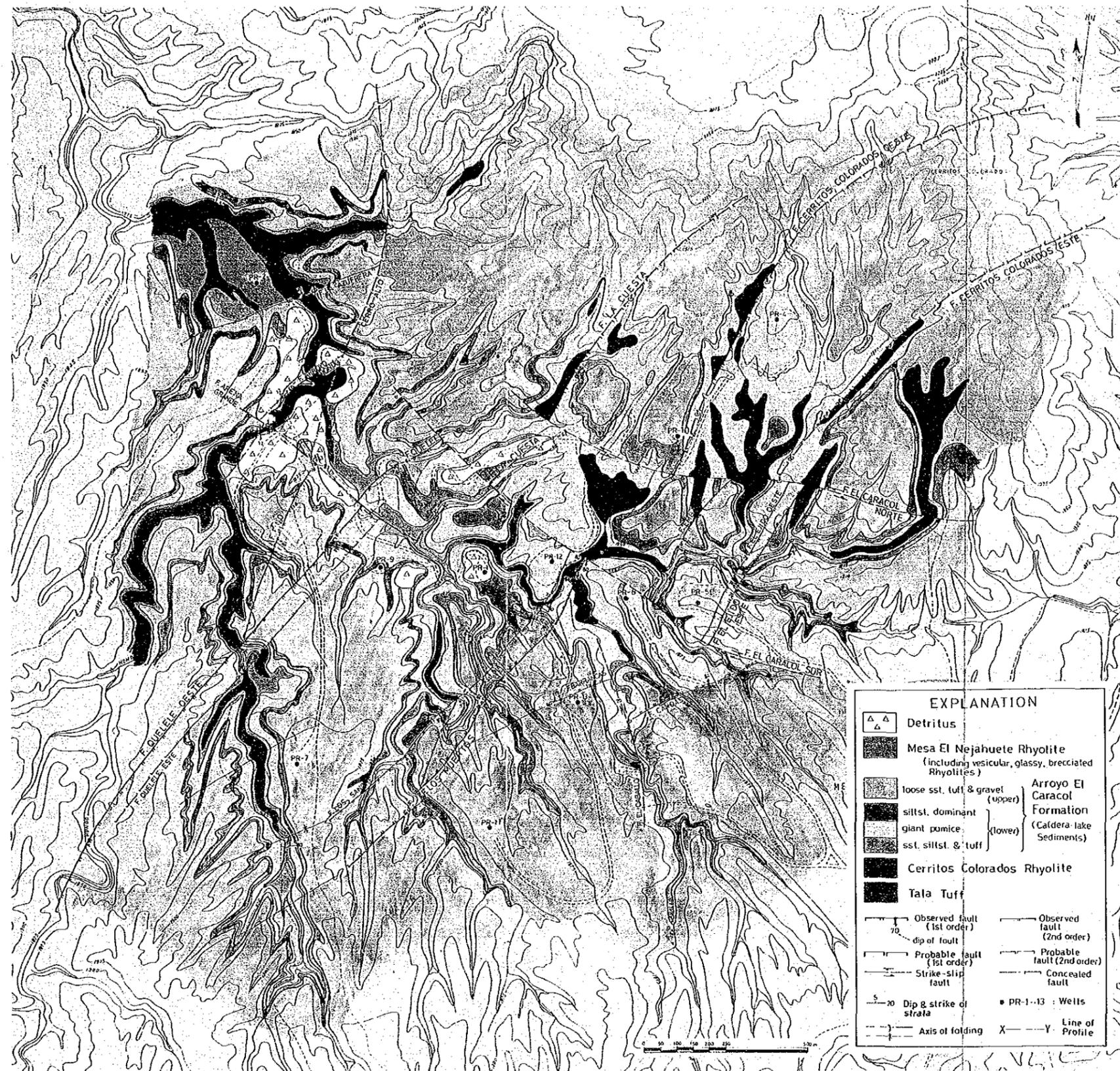


Fig. II. 1-1 Geological Map

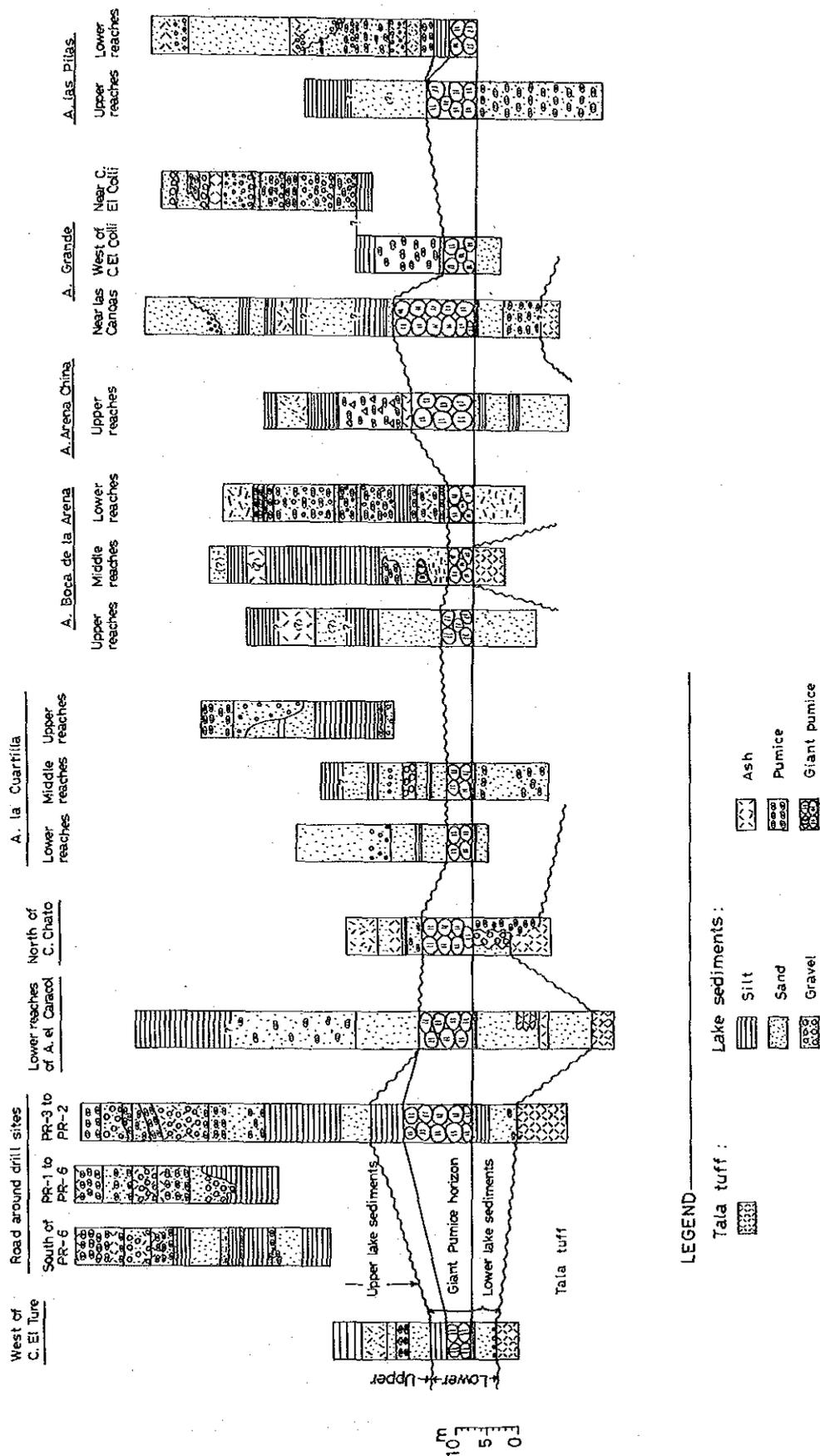


Fig. II. 1-2 Correlation and Stratigraphical Columns of the Arroyo El Caracol Formation

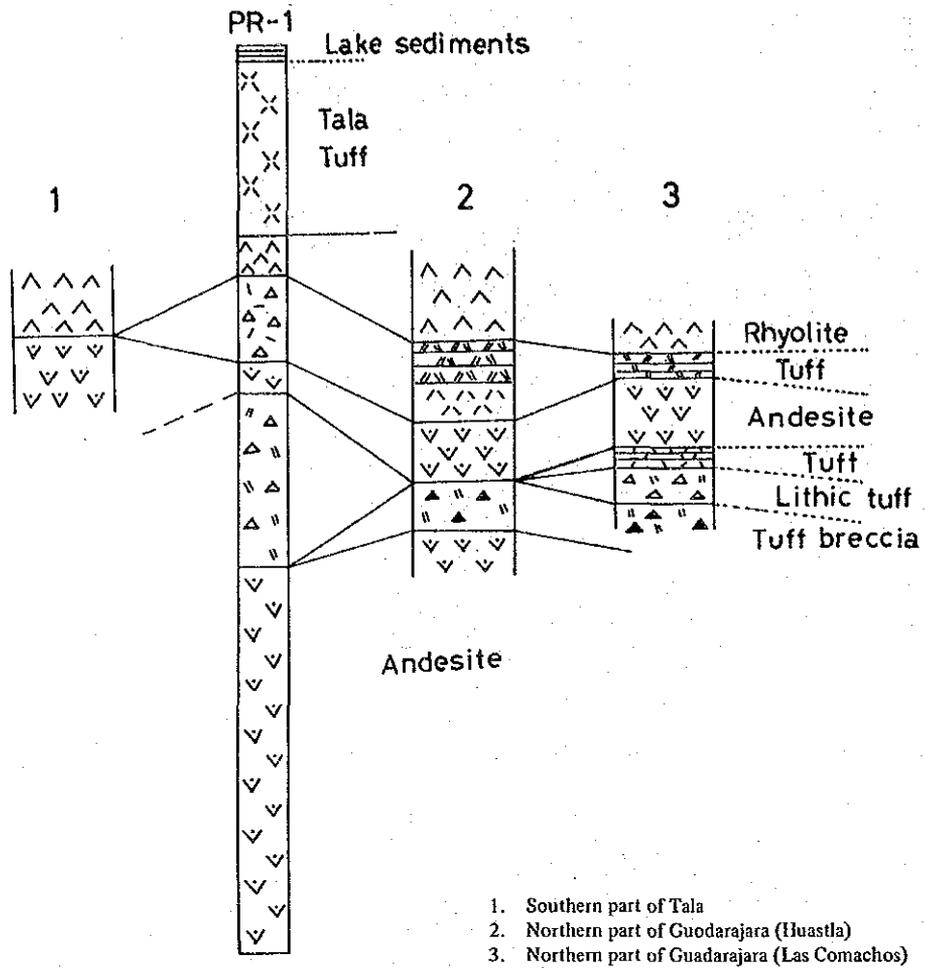


Fig. II.1-3 Correlation and Columns of the Cordilleran Volcanics

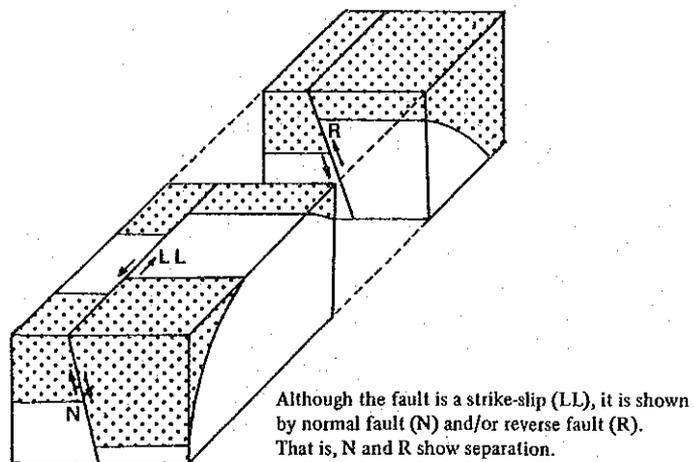


Fig. II. 1-4 Schematic Diagram of Strike-ship Fault

Table II. 1-1 Microscopic Characteristics of Biotite Granite

- 1) Sample No. 2
- 2) Rock Name Biotite Granite
- 3) Locality Well PR-9 Core (depth 2,985 ~ 2,986 m)
- 4) Microscopic characteristics

Texture		Granitic	
		Phenocryst	Groundmass
Mineralogy	plagioclase	1 ~ 3 mm in size, rectangular, euhedral ~ subhedral, albite and carlsbad twinning. Some plagioclases partly alters to sericite and chlorite (10 $\mu\text{m} \pm$ in size).	
	biotite	0.8 to 1.2 mm is size, subhedral, tabular, pale green to green pleochroism. Most characteristically biotite alters to iron-chlorite.	
	quartz	0.5 to 1 mm is size, anhedral	
	K-feldspar	0.5 to 1 mm in size, anhedral	
	opaque mineral	0.1 to 0.5 mm in size, granular, euhedral ~ subhedral.	
	zircon	0.1 to 0.15 mm in size, euhedral ~ anhedral.	
	apatite	0.05 to 0.2 mm, euhedral, rare mineral rectangular.	
	rutile	very rare, 10 to 30 $\mu\text{m} \pm$ in size.	
Alteration		Most mafic minerals alter to chlorite and epidote. Calcite veinlet up to 2 mm in width is developed in the granite. Epidotigation is very strong.	

Table II. 1-2 Chemical Analysis of Cutting Samples

Sample locality		PR-1, 1,540 m	PR-8, 1,160 m	PR-8, 1,710 m
Rock name		Andesite	Andesite	Basaltic andesite
Chemical composition	SiO ₂ (%)	57.6	59.6	49.9
	TiO ₂	1.33	1.60	1.62
	Al ₂ O ₃	15.9	15.5	16.3
	Fe ₂ O ₃	4.15	4.06	4.16
	FeO	3.03	2.92	5.17
	MnO	0.12	0.12	0.16
	MgO	2.48	1.52	5.21
	CaO	5.05	4.49	8.25
	Na ₂ O	3.93	4.25	2.55
	K ₂ O	2.83	2.34	0.37
	P ₂ O ₅	0.25	0.38	0.28
	H ₂ O (+)	1.77	1.73	3.37
	H ₂ O (-)	0.26	0.16	0.28
	CO ₂	1.00	0.75	2.34
	S	0.05	0.04	<0.01
	Sum	99.75	99.46	99.96
CIPW Norm classification	Q (%)	12.80	17.16	13.72
	C	0.11	0.46	2.80
	or	16.72	13.83	2.19
	ab	33.25	35.96	21.58
	an	17.10	15.05	24.30
	en } hy	6.18	3.79	12.98
	fs }	0.06	—	3.66
	mt	6.02	5.02	6.03
	hm	—	0.60	—
	il	2.53	3.04	3.08
	ap	0.58	0.88	0.65
	(cc)	(2.27)	(1.71)	(5.32)
	pr	0.09	0.07	<0.02
		sum	97.71	97.57
	Sum of Salic mineral	79.98	82.46	64.59
	Sum of Femic mineral	15.46	13.40	26.40
	D.I. (Q + or + ab)	62.77	66.95	37.49

Table II. 1-3 Description of Faults in Geothermal Area

Category of fault	Magnitude of fault	Name of fault	Dip & strike of fault	Fault character	Remarks
NE-SW trending faults	1st Order	Quelele Oeste fault	N34E 78E }	Normal-separation fault	} Same fault, probable in the northern part
		La Cuesta fault	N64E 64E N63E 66E	Normal-separation fault	
		Embalse fault	N30E 70E }	Normal-separation fault	} Same fault, obscured in the southern part
		Cerritos Colorados Oeste fault	N35E 80E Strike of NNE ~ NE	Probable fault, east side down	
	Los Muertos fault	N26E 76W }	Normal-separation fault	} Same fault, coincides with axis of an anticline in the southern part	
	El Ejido Este fault	N58E 90	Normal-separation fault		
	Cerritos Colorados Este fault	N26E 77W Strike of NE	Probable fault, west side down		
	2nd order	Quelele Este fault	Strike of N30E	Probable fault, west side down	Conjugate set with Quelele Oeste
		Los Sanchez fault	N30E 82E }	Normal-separation fault	Conjugate set with Los Muertos
El Ejido Oeste fault		N29E 88E	Normal-separation fault	Conjugate set with El Ejido Este	
NW-SE trending faults	1st Order	El Caracol Norte fault	Strike of WNW	Probable left-lateral-slip fault	Probable high angle north dip
		El Caracol Sur fault	Strike of NW ~ WNW	Probable right-lateral-slip fault	
		Arena Grande fault	N83W 83N	Probable left-lateral-slip fault	
Others	2nd Order	La Azufrera fault	N60E 70N	Normal-separation fault	
		Arroyo Hondo fault	N40E 72N	Normal-separation fault	
		Pino fault Cerro Alto fault	N20E 81E NS trending	Normal-separation fault Probable fault, east side down	} Same fault
		Barrancas fault Canoas fault	N60E 77N N70E 84N	Normal-separation fault Normal-separation fault	} Same fault
		El Caballo fault	N20W vertical	Probable Right-lateral-slip fault	

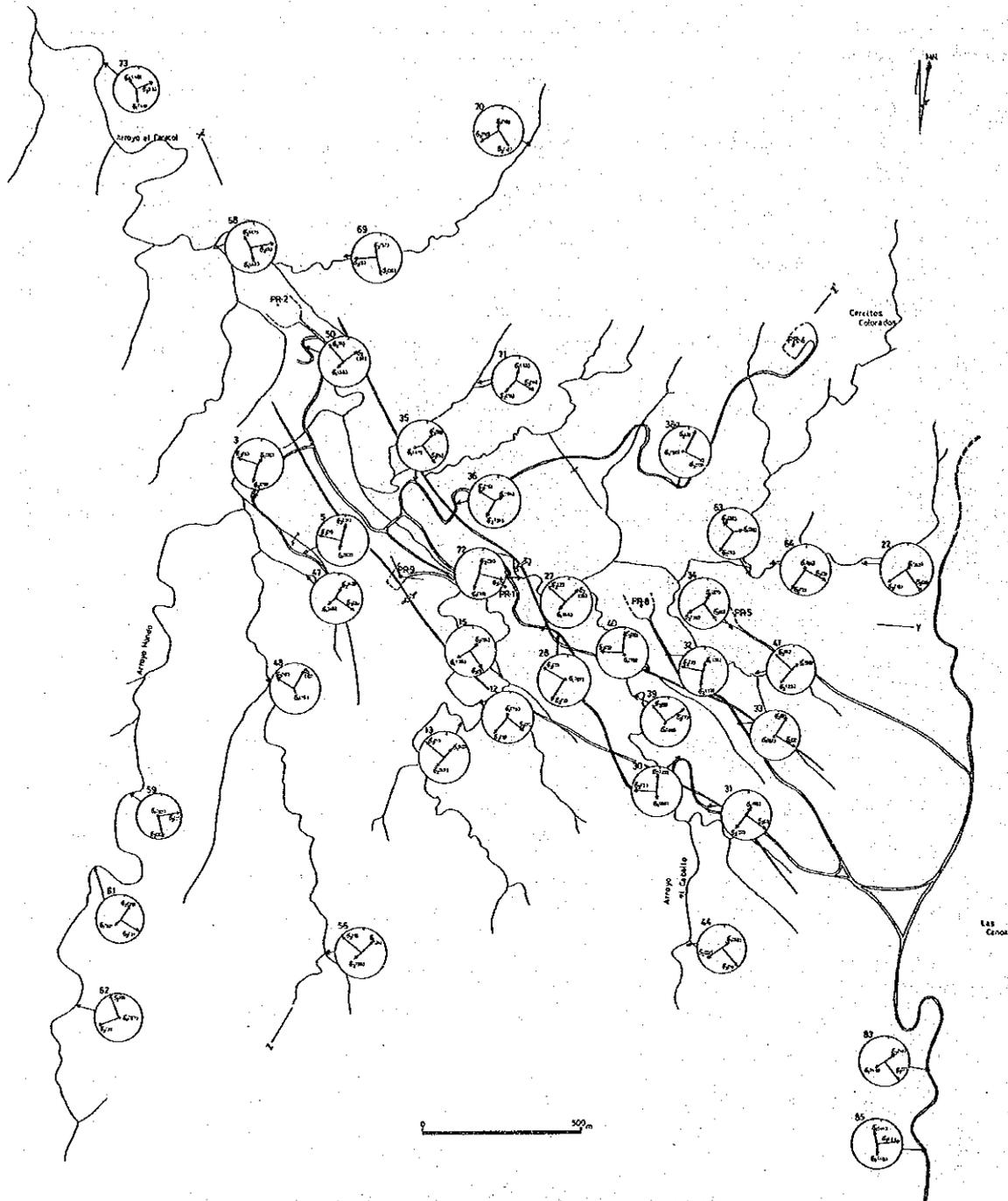


Fig. II. 1-5 Principal Stress and Its Trajectory in Caldera Area

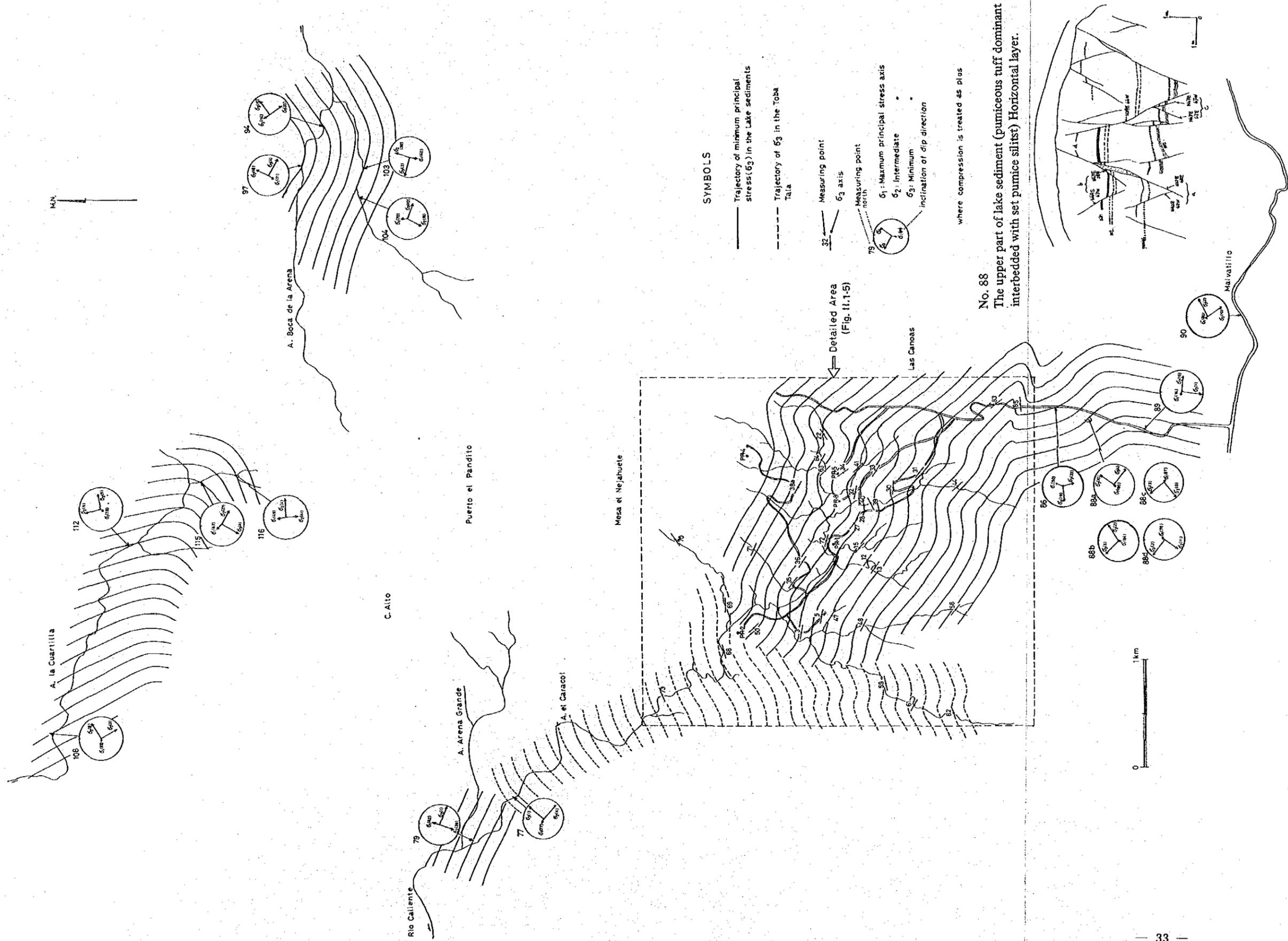


Fig. II. 1-6 Principal Stress Axis of each Measuring Point in Geothermal Area

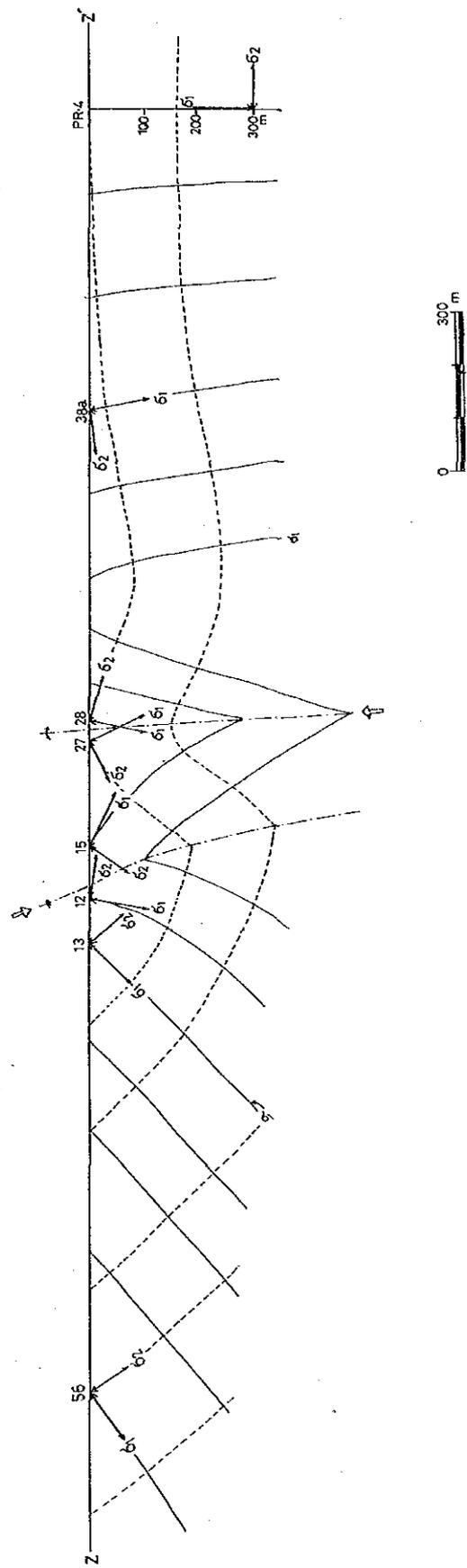


Fig. II. 1-7 Profile of Principal Stress Trajectory along NE-SW Section in Geothermal Area

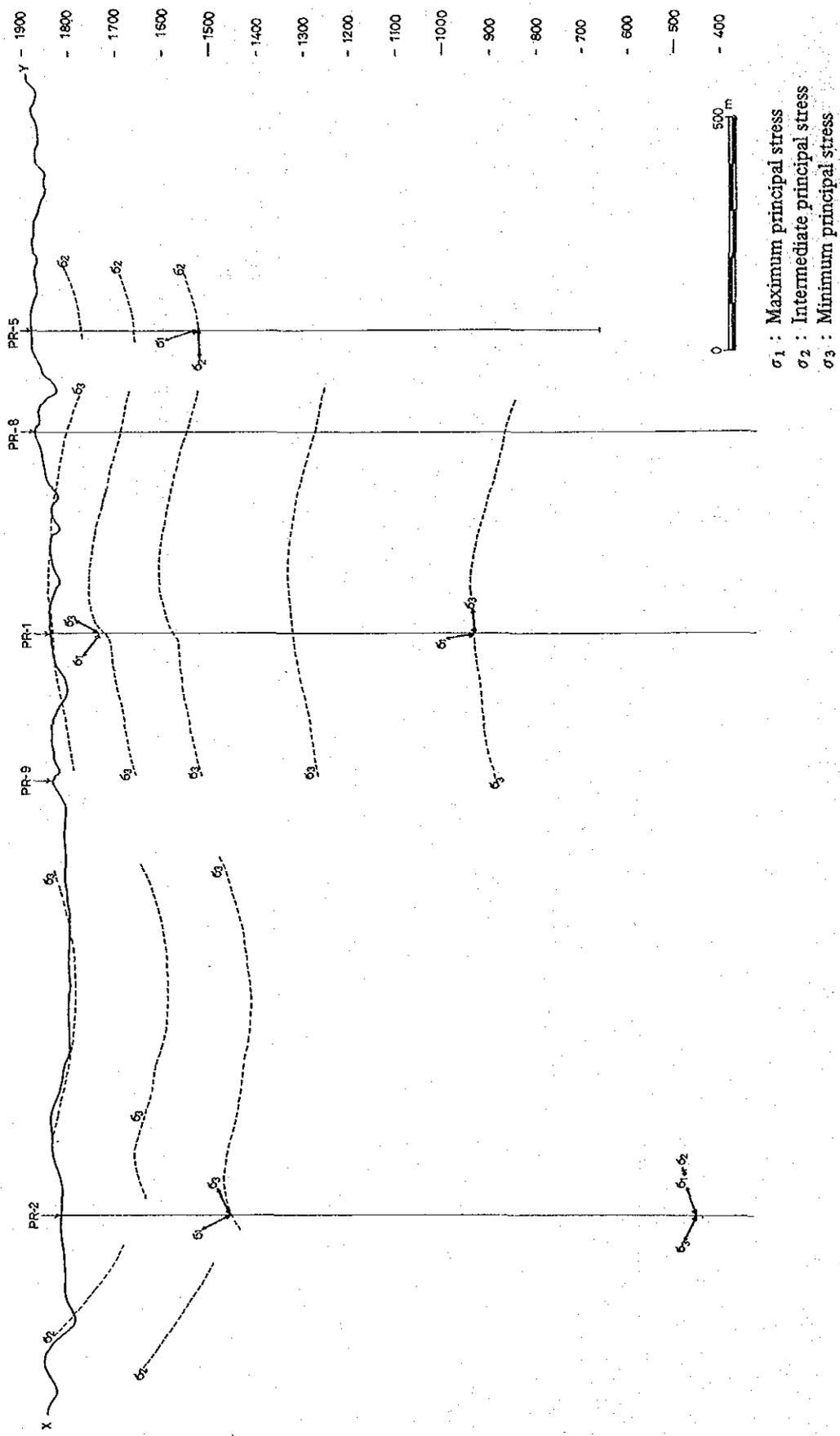


Fig. II. 1-8 Stress Trajectory Restored by Remnant Magnetization and Fracture Orientation of Cores

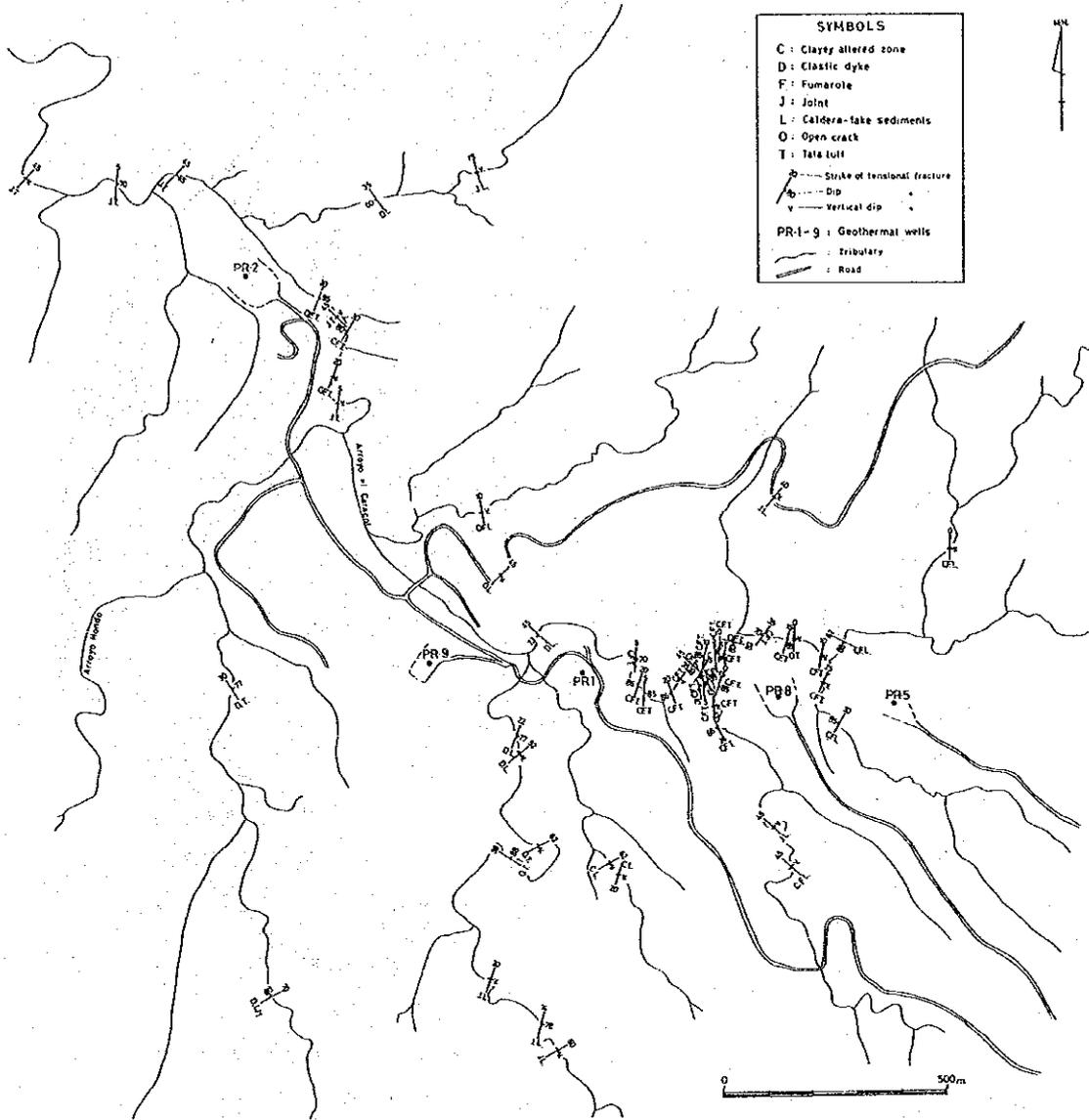


Fig. II. 1-9 Map Showing Tensional Fracture in Geothermal Area

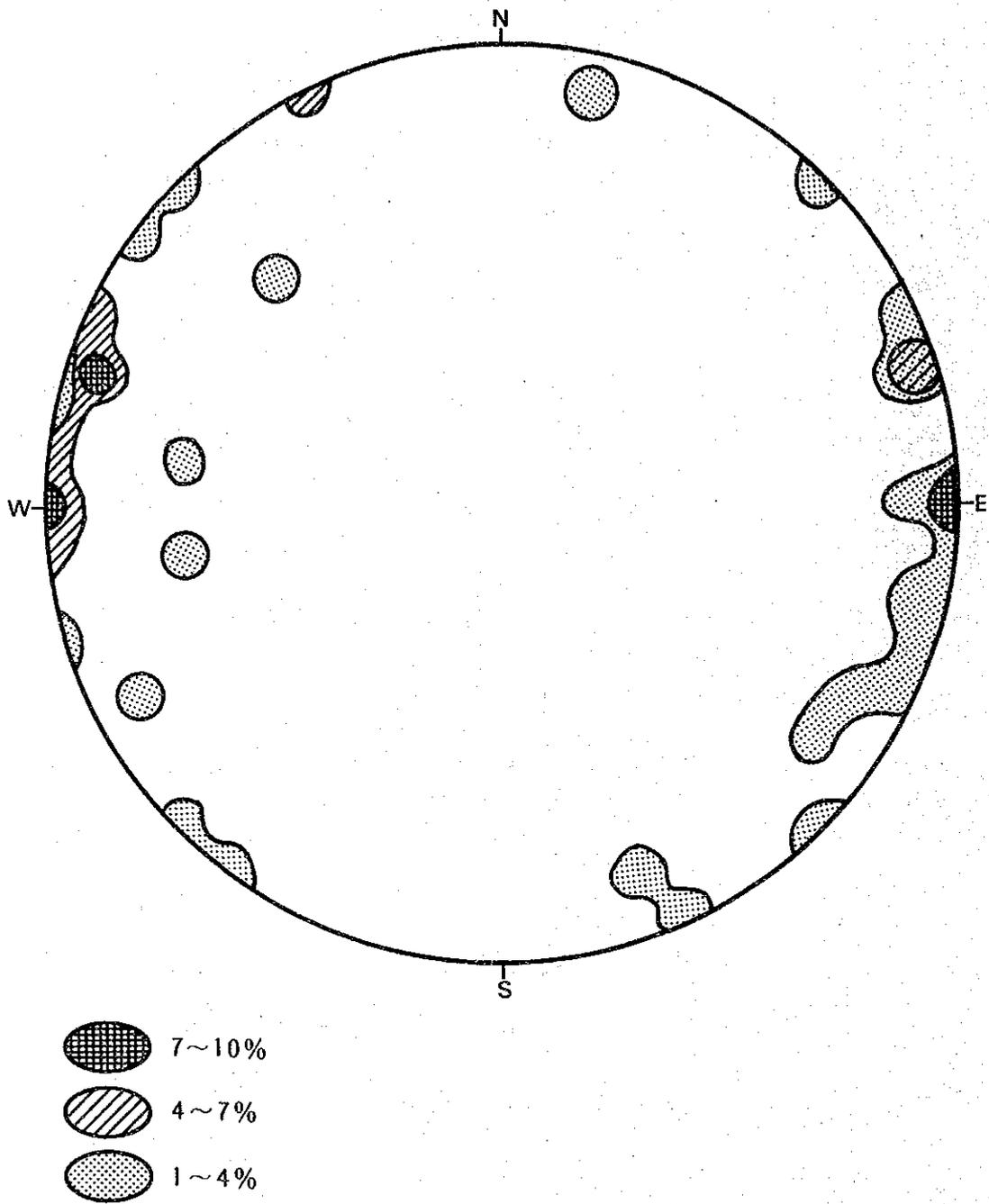


Fig. II. 1-10 Orientation of Tensional Fracture in the Tala Tuff at 35 Measuring Points

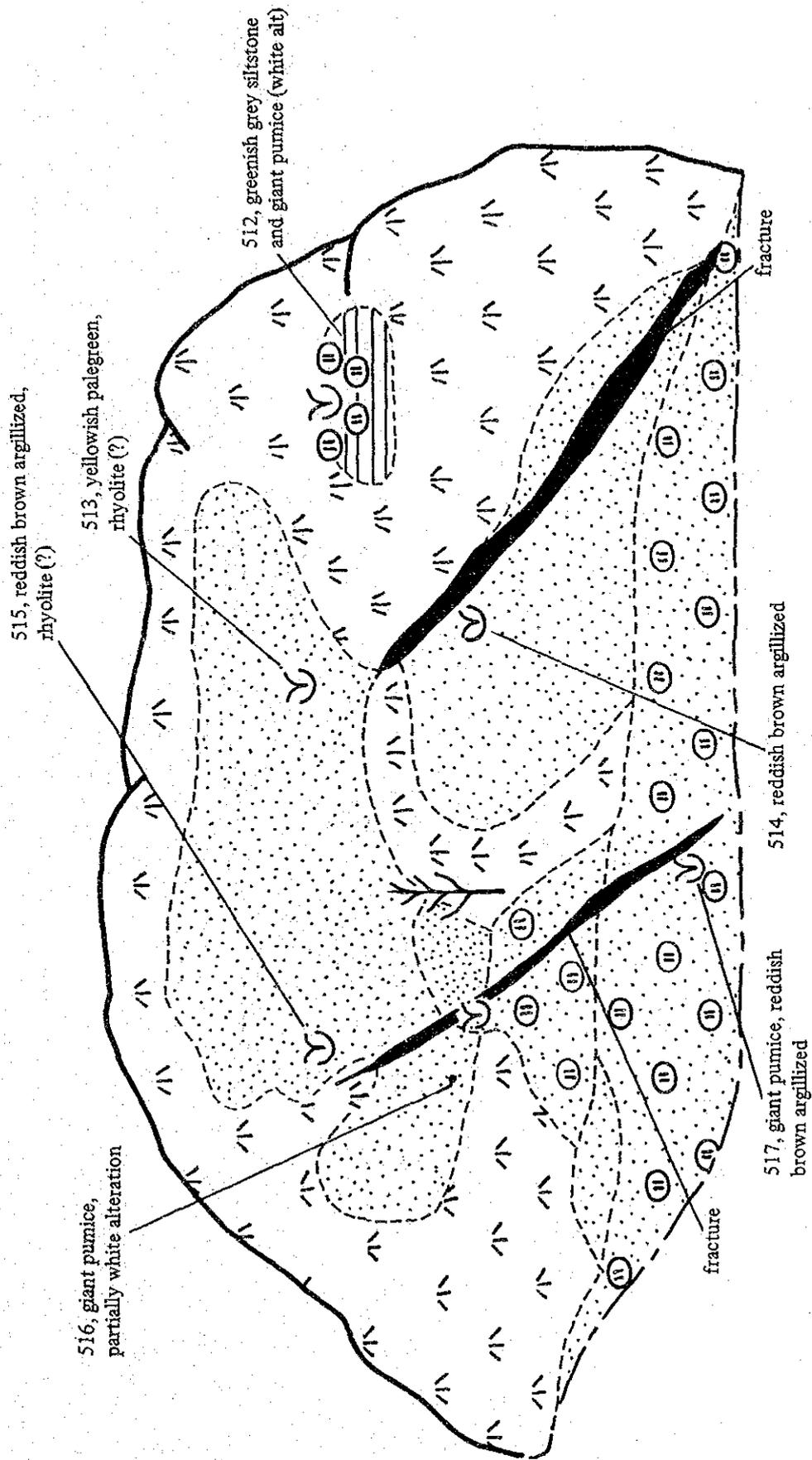


Fig. II. 1-11 An Example of Surface Outcrop of Altered Rocks