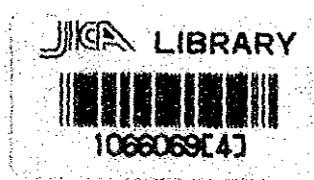


タイ王国サンカンペン地熱開発計画調査 報告書

昭和63年3月

国際協力事業団



17217

タイ王国サンカンペン地熱開発計画調査 報告書

昭和63年3月

国際協力事業団

17717

序 文

日本国政府は、タイ王国政府の要請に基づき、同国北部チェンマイ近郊に位置するサンカンペン地熱地帯における地熱資源量の評価及び将来の地熱発電の可能性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中村久由氏を団長とする調査団を1982年7月から1987年12月までの間、3次にわたり現地に派遣し、タイ王国政府をはじめとする関係機関と共に、地質調査、地化学探査、物理探査、熱流量調査並びに調査井掘削を行い、当該地域における地熱ポテンシャル評価を実施した。

本報告書は、この成果を取りまとめたものである。本報告書がタイ王国の今後の地熱開発に役立てば幸いである。

終わりに、調査に際し、多大のご協力を頂いたタイ王国政府、在タイ日本国大使館外務省並びに通商産業省の関係各位に対し、深く感謝の意を表するものである。

1988年 3月

国際協力事業団

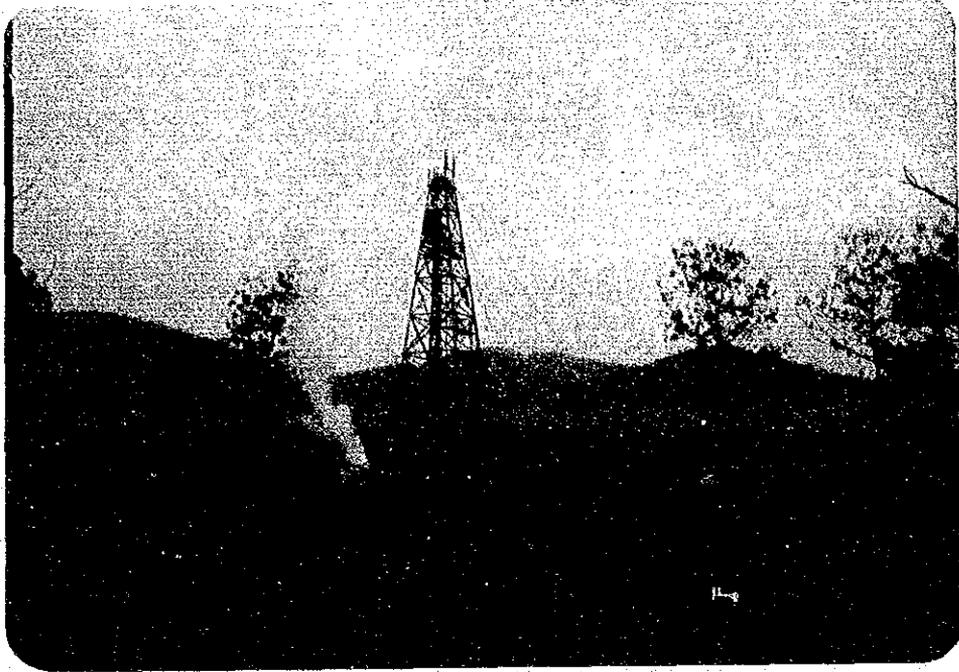
総裁 柳谷謙介



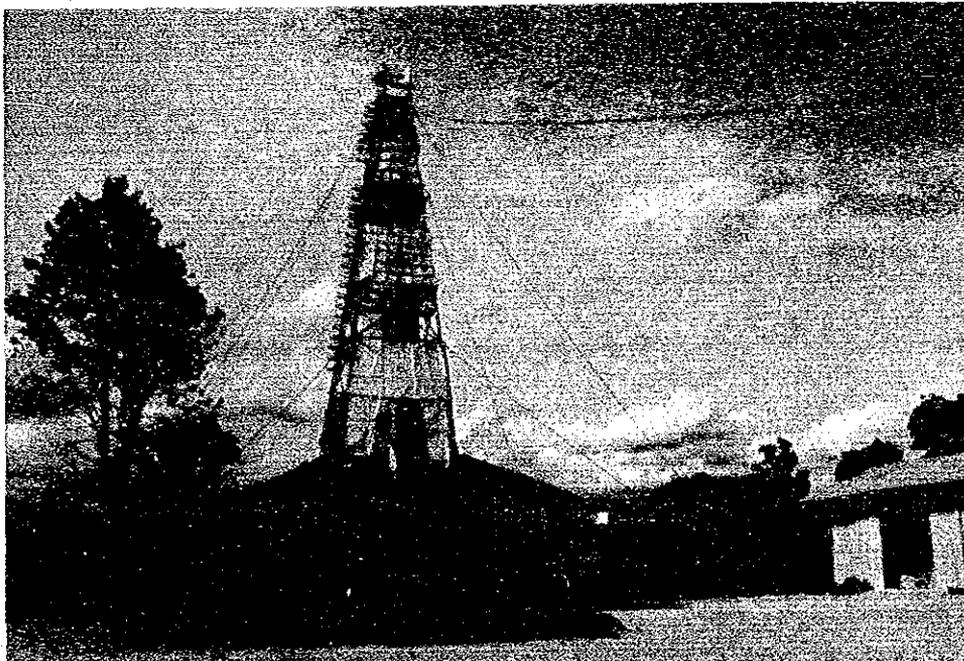
San Kampaeng Area



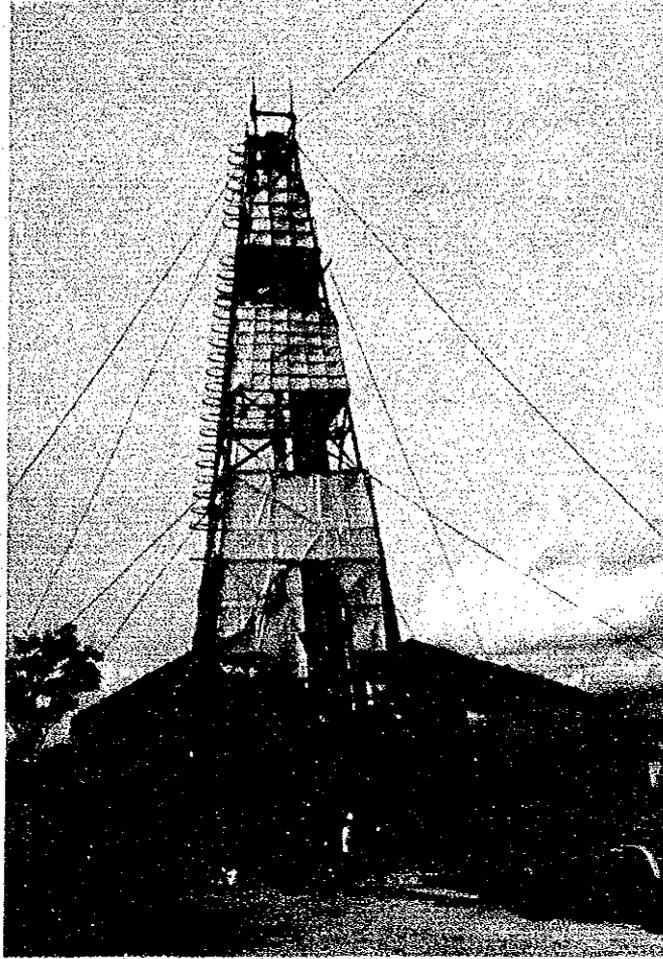
Producing fluid from GTE-8



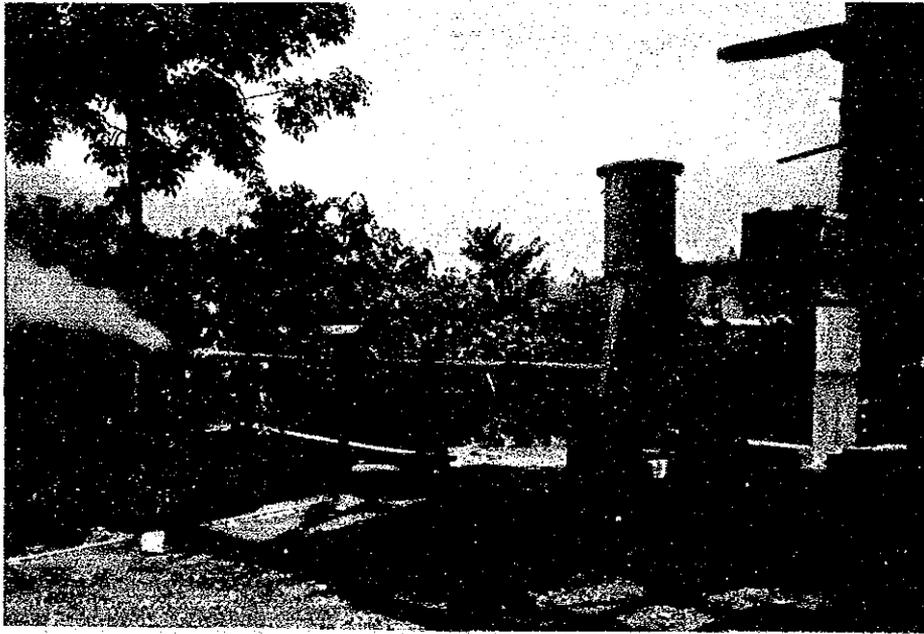
Drilling Site of GTE-7



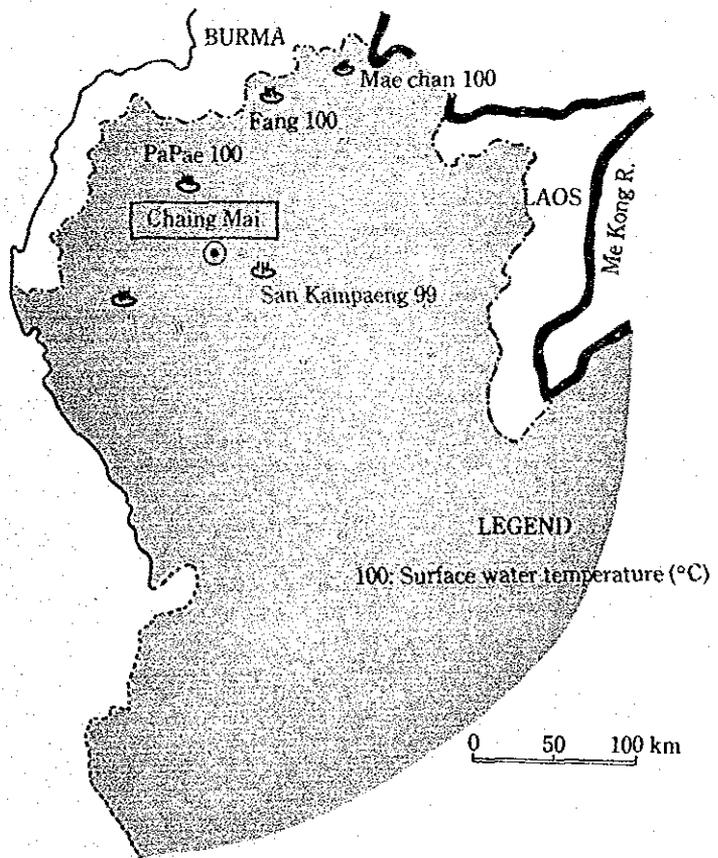
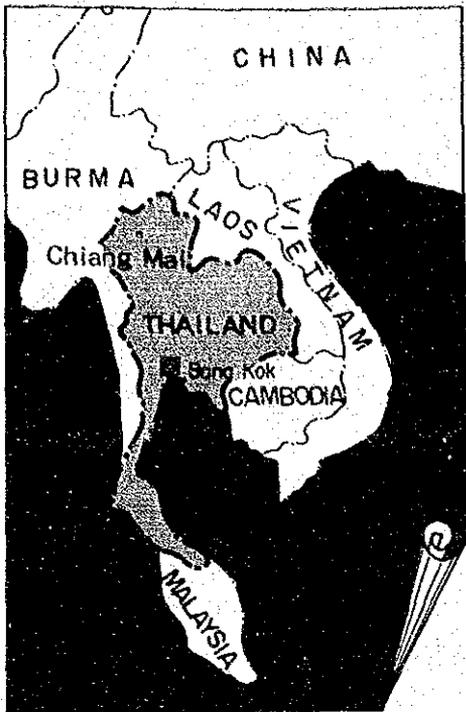
Drilling Site of GTE-8



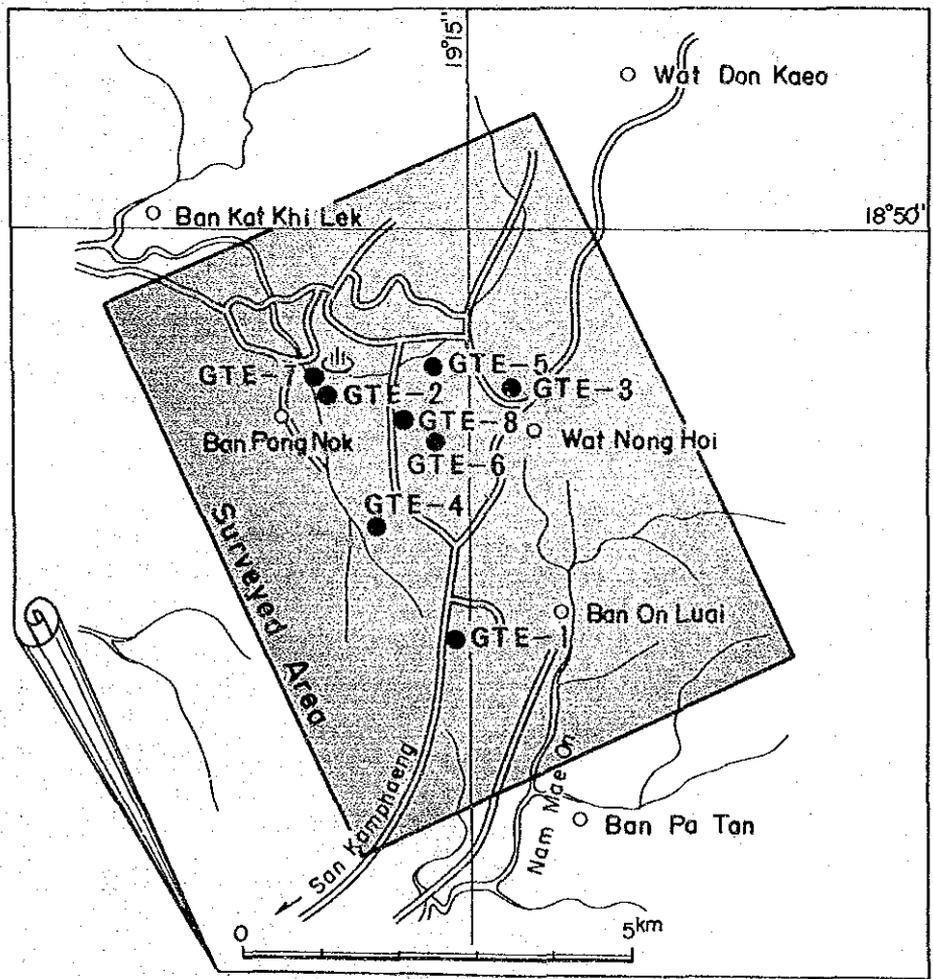
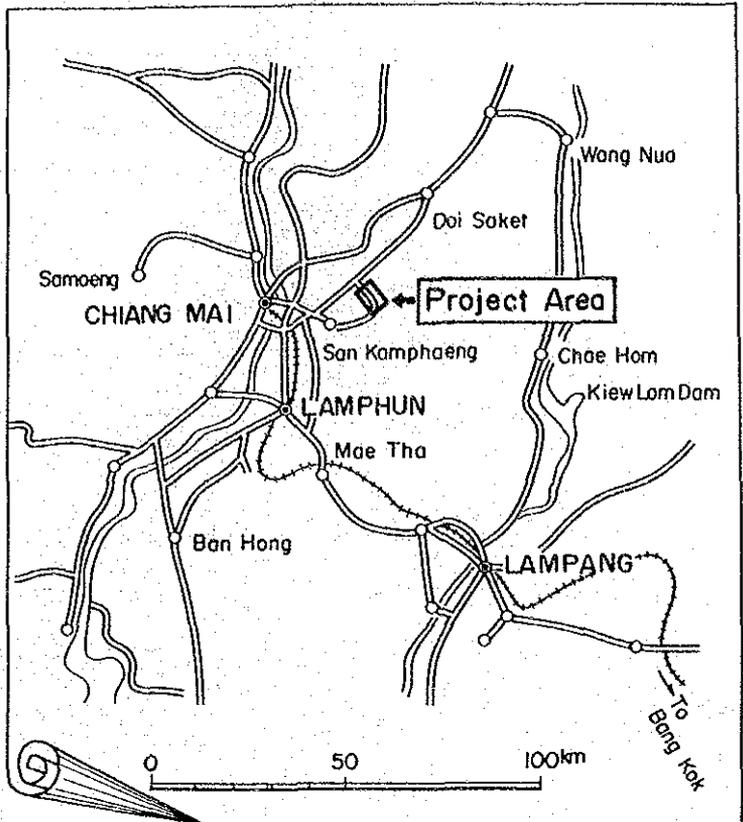
Logging in Production of GTE-8



Piping Line of Characteristic of Flow Rate of GTE-8



Distribution Map of Geothermal Areas in Thailand



Location of Project Area

目 次

結 論	1
I 総 説	
1. 本計画調査の背景	3
2. 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	5
5. 調査工程と期間	6
6. 調査団員の氏名	6
II 調査内容	
1. 広域調査	17
1.1 地質調査	17
1.1.1 概 要	17
1.1.2 地質層序	21
1.1.3 地質構造	23
1.1.4 坑井地質および温度分布	26
1.2 重力探査	30
1.2.1 概 要	30
1.2.2 調査結果	31
1.2.3 重力分布と地下構造	35
1.3 磁気探査	37
1.3.1 概 要	37
1.3.2 調査結果	39
1.3.3 磁気分布と地下構造	41
1.4 弾性波探査	42
1.4.1 概 要	42
1.4.2 現地調査	42

1.4.3	解析方法	44
1.4.4	判明した地下構造	47
1.5.	深部電気探査	50
1.5.1	概要	50
1.5.2	現地調査	51
1.5.3	解析方法	54
1.5.4	判明した構造	55
1.6.	地化学調査	58
1.6.1	熱水の化学分析	58
1.6.2	水理調査	59
1.6.3	地化学探査	59
2.	精査地域選定のための検討	152
2.1	地熱徴候からの検討	152
2.2	地質構造からの検討	153
2.3	深部探査からの検討	154
3.	GTE-7の掘削および調査解析	156
3.1	掘削地点の選定	156
3.2	掘削状況	156
3.2.1	概要	156
3.2.2	掘削作業	157
3.3	坑井地質調査	165
3.3.1	概要	165
3.3.2	掘削作業	166
3.3.3	変質	167
3.3.4	フラクチャー	168
3.4	岩石試験	168
3.4.1	顕微鏡観察	168
3.4.2	X線回折分析	169
3.4.3	流体包有物測定	169
3.4.4	密度測定	170

3.4.5	帯磁率測定	170
3.4.6	熱伝導率測定	170
3.4.7	熱流量の試算	170
3.5	坑内検層	171
3.5.1	概要	171
3.5.2	検層結果	174
3.6	深部電気探査の再解析	178
3.6.1	電気検層結果との対比	178
3.6.2	再解析方法	179
3.6.3	解析結果	180
3.7	温度分布についての解析	183
3.7.1	概要	183
3.7.2	熱水系と地殻熱流量	184
3.7.3	サンカンベン地域の地熱系モデル	184
3.7.4	地層温度におよぼす浸透水の影響についての試算	185
3.7.5	GTE-7井の掘削より得られた地熱系モデル	187
3.8	総括	188
4.	貯留層解析のための補足調査	254
4.1	概要	254
4.2	フィンガープリント法地化学探査	254
4.2.1	調査方法	254
4.2.2	調査結果	257
4.2.3	判明した断裂構造	258
4.3	地下温度調査	259
4.3.1	温度調査孔の掘削	259
4.3.2	孔内温度測定	260
4.3.3	地温分布と断裂構造との関係	260
4.4	総括	262
5.	GTE-8の掘削および調査解析	282
5.1	掘削地点の選定	282

5.2	掘削状況	282
5.2.1	概要	282
5.2.2	掘削作業	283
5.3	坑井地質調査	289
5.3.1	概要	289
5.3.2	地質	290
5.3.3	変質	291
5.3.4	フラクチャー	292
5.4	坑井テスト	294
5.4.1	坑内検層	294
5.4.2	噴気時の坑井テスト	302
5.5	地流体化学調査	309
5.5.1	目的	309
5.5.2	調査結果	309
5.5.3	化学性状の特徴	309
5.5.4	地化学的考察	310
5.5.5	まとめ	311
6.	貯留層評価	356
6.1	評価方法	356
6.2	計算結果	359
6.3	考察	359
Ⅱ	調査結果の総括的評価	373
1.	貯留層の水理構造	374
2.	地熱開発の可能性	376

付 図

	Distribution Map of Geothermal Areas in Thailand	
	Location of Project Area	
Fig. 1	OEC Specific Performance	377
Fig. 2	Estimate of Reservoir Pressure	379
Fig. 1.1- 1	Major Geological Unit of Southeast Asia	60
Fig. 1.1- 2	General Geology of Northern Thailand	61
Fig. 1.1- 3	Schematic Relationship between Himalayan Orogetic Belt and Indosinian Orogenic Belt	20
Fig. 1.1- 4	Geological Column of San Kampaeng Area	62
Fig. 1.1- 5	Geological Map	63
Fig. 1.1- 6	Geological Profile	65
Fig. 1.1- 7	Zonal Distribution Map of Alteration Zone	67
Fig. 1.1- 8	Complied Column of GTE-1	69
Fig. 1.1- 9	Complied Column of GTE-2	71
Fig. 1.1- 10	Complied Column of GTE-3	73
Fig. 1.1- 11	Complied Column of GTE-4	75
Fig. 1.1- 12	Complied Column of GTE-5	77
Fig. 1.2- 1	Flow Chart of Gravity Survey	79
Fig. 1.2- 2	Distribution of Rock Density	80
Fig. 1.2- 3	G-H Relation	81
Fig. 1.2- 4	Spectral Analysis	82
Fig. 1.2- 5	Bouguer Anomaly	83
Fig. 1.2- 6	Residual Gravity (Third Order Polynomial)	85
Fig. 1.2- 7	Profile of Underground Structure (A-A')	87
Fig. 1.2- 8	Profile of Underground Structure (B-B')	88
Fig. 1.2- 9	Profile of Underground Structure (C-C')	89
Fig. 1.2- 10	Underground Structure	91
Fig. 1.3- 1	Flow Chart of Magnetic Survey	93

Fig. 13- 2 Magnetic Susceptibility Distribution	94
Fig. 13- 3 Diurnal Variation of Geomagnetic Field	95
Fig. 13- 4 Spectral Analysis	96
Fig. 13- 5 Magnetic Response of Prism Model	97
Fig. 13- 6 Magnetic Response of Step Model	98
Fig. 13- 7 Magnetic Response of Dyke Model	99
Fig. 13- 8 Flow Chart of Magnetic Profile Analysis	100
Fig. 13- 9 Total Magnetic Intensity	101
Fig. 13-10 Total Magnetic Anomaly	103
Fig. 13-11 Deep Magnetic Component	105
Fig. 13-12 Result of Magnetic Modeling	107
Fig. 13-13 Underground Structure	109
Fig. 14- 1 Seismic Survey Line Map	111
Fig. 14- 2 Flow Chart of Seismic Survey	113
Fig. 14- 3 Process of Measurement by Common Reflection Point Horizontal Stack Method	44
Fig. 14- 4 Frequency Analysis Section (Line-A)	115
Fig. 14- 5 Frequency Analysis Section (Line-B)	115
Fig. 14- 6 Frequency Analysis Section (Line-C)	115
Fig. 14- 7 Real Trace Amplitudo (Line-A)	117
Fig. 14- 8 Real Trace Amplitudo (Line-B)	117
Fig. 14- 9 Real Trace Amplitudo (Line-C)	117
Fig. 14-10 Map of Estimated Reflector and Discontinuity (Line A)	119
Fig. 14-11 Map of Estimated Reflector and Discontinuity (Line B.C)	121
Fig. 15- 1 Measurement of MT Survey	51
Fig. 15- 2 Method of Measurement of CSAMT Survey	53
Fig. 15- 3 Analysis Process of CSAMT Method and MT Method	123
Fig. 15- 4 Apparent Resistivity Curve	124
Fig. 15- 5 Apparent Resistivity	125
Fig. 15- 6 Total Conductance	127

Fig. 1.5- 7 Structure Isocontours for the Top of the Shallow Conductive Formation	129
Fig. 1.5- 8 Structure Isocontours for the Top of the Deep Conductive Formation	131
Fig. 1.5- 9 Isopachs of the Overburden Overlying the Deep Conductive Formation	133
Fig. 1.5-10 Top of Electrical Basement	135
Fig. 1.5-11 Total Conductance	137
Fig. 1.5-12 Top of Electrical Basement	139
Fig. 1.5-13 Resistivity Profile (A)	141
Fig. 1.5-14 Resistivity Profile (B)	142
Fig. 1.6- 1 Hydrochemical Characteristics of Thermal Waters from Northern Thailand and Other Parts of the World	143
Fig. 1.6- 2 Variation of Chloride Concentrations with Time in San Kampaeng Area	143
Fig. 3.1- 1 Compile Map of Surface Survey (1983)	190
Fig. 3.1- 2 Geothermal Model of the San Kampaeng Field	191
Fig. 3.2- 1 Location of GTE-7	192
Fig. 3.2- 2 Drilling Chart of GTE-7	193
Fig. 3.2- 3 Layout of Drilling Site of GTE-7	195
Fig. 3.2- 4 Result of Mud Temperature Measurement of GTE-7	196
Fig. 3.2- 5 Casing Program of GTE-7	197
Fig. 3.2- 6 Penetration Rate and Core Recovery of GTE-7	198
Fig. 3.3- 1 Compiled Column of GTE-7(1)	199
Fig. 3.3- 2 Compiled Column of GTE-7(2)	201
Fig. 3.3- 3 Compiled Column of GTE-7(3)	203
Fig. 3.3- 4 Compiled Column of GTE-7(4)	205
Fig. 3.3- 5 Compiled Column of GTE-7(5)	207
Fig. 3.5- 1 Outline of Well Logging System	173
Fig. 3.5- 2 Well State in Logging of GTE-7 (Stage 2)	174

Fig. 3.5- 3 Well State in Logging of GTE-7 (Stage 3)	176
Fig. 3.5- 4 Temperature Logging Chart of GTE-7	209
Fig. 3.5- 5 Electrical Logging Chart of GTE-7	210
Fig. 3.6- 1 Comparison of MT Interpretation Result and Electrical Well Logging Result (GTE-7)	211
Fig. 3.6- 2 Flow Chart of Interpretation (2nd time)	212
Fig. 3.6- 3 Example of 1D Model Inversion	213
Fig. 3.6- 4 Comparison of 1D Model Interpretation and Bostick Inverse Interpretation	214
Fig. 3.6- 5 Resistivity Map (SL=- 200m)	215
Fig. 3.6- 6 Resistivity Map (SL=- 500m)	217
Fig. 3.6- 7 Resistivity Map (SL=-1,000m)	219
Fig. 3.6- 8 Resistivity Map (SL=-3,000m)	221
Fig. 3.6- 9 Location Map of Cross Section	223
Fig. 3.6-10 Resistivity Cross Section (Line 1)	225
Fig. 3.6-11 Resistivity Cross Section (Line 2)	227
Fig. 3.6-12 Resistivity Cross Section (Line 3)	229
Fig. 3.6-13 Electrical Basement Map	231
Fig. 3.7- 1 Relationship of Depth and Temperature of Penetration Water	233
Fig. 3.7- 2 Geothermal System Revised by Drilling Data of GTE-7	234
Fig. 4.2- 1 Flow Chart of Fingerprint Geothermal Survey	255
Fig. 4.2- 2 Mass Spectrum in Fingerprint Analysis	256
Fig. 4.2- 3 Point and Pattern of Fault Fractures	264
Fig. 4.2- 4 Contour Map of High Molecular Weight Gas Ratio	265
Fig. 4.2- 5 Contour Map of Total Gas Flux	267
Fig. 4.2- 6 Similarity Analysis	269
Fig. 4.2- 7 Geological Map	271
Fig. 4.2- 8 Gas Concentration Anomaly	273
Fig. 4.3- 1 Location of Temperature Survey Well	275

Fig. 4.3- 2 Well Completion of Temperature Survey Well	276
Fig. 4.3- 3 Depth -- Temperature Curve of Survey Well (1)~(3)	277
Fig. 4.3- 4 Temperature Distribution at the Depth of 100meters	280
Fig. 4.3- 5 Fault Structure and Temperature Pattern	281
Fig. 5.2- 1 Location of GTE-8	313
Fig. 5.2- 2 Drilling Chart of GTE-8	315
Fig. 5.2- 3 Layout of Drilling Site of GTE-8	317
Fig. 5.2- 4 Circulation of GTE-8	318
Fig. 5.2- 5 Casing Program of GTE-8	319
Fig. 5.2- 6 Penetration Rate and Core Recovery of GTE-8	320
Fig. 5.3- 1 Geological Column of GTE-8	321
Fig. 5.3- 2 Homogenized Temperature of GTE-8	323
Fig. 5.4- 1 Well State in Logging of GTE-8 (Stage 1)	295
Fig. 5.4- 2 Temperature Logging Chart of GTE-8	324
Fig. 5.4- 3 Electrical Logging Chart of GTE-8	325
Fig. 5.4- 4 Pressure Logging Chart of GTE-8	326
Fig. 5.4- 5 Well State in Logging of GTE-8 (Stage 2)	297
Fig. 5.4- 6 Temperature Logging Chart of GTE-8	327
Fig. 5.4- 7 Electrical Logging Chart of GTE-8	328
Fig. 5.4- 8 Well State in Logging of GTE-8 (Stage 3)	298
Fig. 5.4- 9 Temperature Logging Chart of GTE-8	329
Fig. 5.4-10 Temperature Logging Chart of GTE-8	330
Fig. 5.4-11 Electrical Logging Chart of GTE-8	331
Fig. 5.4-12 Well State in Logging of GTE-8 (Stage 4)	299
Fig. 5.4-13 Temperature Logging Chart of GTE-8	332
Fig. 5.4-14 Temperature Logging Chart of GTE-8	333
Fig. 5.4-15 Electrical Logging Chart of GTE-8	334
Fig. 5.4-16 Well State in Logging of GTE-8 (Stage 5)	301
Fig. 5.4-17 Temperature Logging of GTE-8	335
Fig. 5.4-18 Electrical Logging of GTE-8	336

Fig. 5.4-19 Layout of Well Testing	303
Fig. 5.4-20 Piping for Measuring Flow Rate of GTE-8	304
Fig. 5.4-21 GTE-8 Well Logging. (Temperature, Pressure)	337
Fig. 5.4-22 Characteristic Curve of Flow Rate of GTE-8	308
Fig. 5.4-23 Change of Production on GTE-8 and GTE-6	338
Fig. 5.5- 1 Relationship among $H_2 N_2$ and CH_4 in Geothermal Gases from GTE-8 and Hot Springs in and around San Kampaeng	339
Fig. 5.5- 2 Relationship among Molal Concentrations of (Na+K), Ca and Mg in Well Waters from GTE-8, GTE-6 and EGAT-1	340
Fig. 5.5- 3 Relationship among Molal Concentrations of Cl , HCO_3 and SO_4 in Well Waters from GTE-8, GTE-6 and EGAT-1	341
Fig. 5.5- 4 Relationship between Molal Concentrations of B and Cl in Well Waters from GTE-8, GTE-6 and EGAT-1	342
Fig. 6.1- 1 Flow Chart of Reservoir Analysis	356
Fig. 6.1- 2 Area of Reservoir Analysis	361
Fig. 6.1- 3 Conceptual Reservoir Model	362
Fig. 6.1- 4 Distribution of Permeability	363
Fig. 6.1- 5 Distribution of Initial Temperature	363
Fig. 6.1- 6 Distribution of Initial Pressure	363
Fig. 6.2- 1 Distribution of Initial Temperature	364
Fig. 6.2- 2 Distribution of Temperature after 10 years -Rate of Production 75t/h	365
Fig. 6.2- 3 Distribution of Pressure after 10 years-Rate of Production 75t/h	366
Fig. 6.2- 4 Distribution of Temperature after 10 years-Rate of Production 750t/h	367
Fig. 6.2- 5 Distribution of Pressure after 10 years-Rate of Production 750t/h	368

Fig. 6.2- 6	Distribution of Temperature after 10 years-Rate of Production 1,500t/h	369
Fig. 6.2- 7	Distribution of Pressure after 10 years-Rate of Production 1,500t/h	370
Fig. 6.2- 8	Change of Reservoir Pressure and Temperature in Time in Production Zone	371
Fig. 6.3- 1	Relation between Rate of Production and Unit Draw Down	372

付 表

表 - 1	調査工程	7
表 - 2	調査期間	9
表 - 3	調査団の構成	12
表 - 4	タイ側カウンターパート	14
表 1.1 - 1	東南アジアの地質概要	17
表 1.1 - 2	産出化石一覧表	144
表 1.1 - 3	火成岩の K - Ar 年代測定結果	23
表 1.1 - 4	変質岩の X 線回折分析結果	145
表 1.2 - 1	重力計仕様	30
表 1.2 - 2	岩石密度測定結果	148
表 1.2 - 3	密度岩体と地層との対応	35
表 1.3 - 1	磁力計仕様	37
表 1.3 - 2	In situ 測定結果	38
表 1.3 - 3	帯磁率測定結果	150
表 1.4 - 1	測線の仕様	43
表 1.4 - 2	波形解析の概要	45
表 1.5 - 1	M T 法測定装置	52
表 1.5 - 2	C S A M T 法測定装置	54
表 1.6 - 1	温泉水の化学成分	58
表 1.6 - 2	熱水の化学成分	59
表 3.2 - 1	GTE-7 掘削作業総括	235
表 3.2 - 2	GTE-7 掘削工程実績	236
表 3.2 - 3	GTE-7 主要掘削装置	237
表 3.2 - 4	GTE-7 消耗資機材	241
表 3.2 - 5	GTE-7 掘削作業の内訳	243
表 3.2 - 6	GTE-7 セメンチング実績	244
表 3.2 - 7	GTE-7 掘削時の大気温度および泥水温度	245
表 3.2 - 8	GTE-7 坑底温度	247

表 3.2 - 9	GTE-7 トリコンビット記録	249
表 3.4 - 1	GTE-7 岩石物性測定結果	168
表 3.4 - 2	GTE-7 顕微鏡観察結果一覧表	251
表 3.4 - 3	GTE-7 X線回折分析結果一覧表	252
表 3.4 - 4	GTE-7 物理測定結果	253
表 3.5 - 1	GTE-7 検層概要一覧	171
表 3.5 - 2	GTE-7 検層経過一覧	175
表 3.5 - 3	GTE-7 検層経過一覧	176
表 3.7 - 1	GTE-7 坑内温度マッチング結果	187
表 4.3 - 1	温度調査孔孔底温度および調査井坑内温度	261
表 5.2 - 1	GTE-8 掘削作業総括	343
表 5.2 - 2	GTE-8 掘削工程実績	344
表 5.2 - 3	GTE-8 掘削作業の内訳	345
表 5.2 - 4	GTE-8 セメンティング実績	347
表 5.2 - 5	GTE-8 逸泥および掘削泥水	348
表 5.3 - 1	GTE-8 変質岩の X線回折分析結果	292
表 5.3 - 2	GTE-8 流体包有物の均質化温度	292
表 5.4 - 1	GTE-8 検層概要一覧	295
表 5.4 - 2	GTE-8 検層経過一覧(1)	296
表 5.4 - 3	GTE-8 検層経過一覧(2)	297
表 5.4 - 4	GTE-8 検層経過一覧(3)	299
表 5.4 - 5	GTE-8 検層経過一覧(4)	300
表 5.4 - 6	GTE-8 検層経過一覧(5)	301
表 5.4 - 7	GTE-8 流量測定項目および使用計器	304
表 5.4 - 8	GTE-8 坑井内測定経過一覧表	305
表 5.4 - 9	GTE-8 坑内検層結果	349
表 5.4 - 10	GTE-8 流量特性測定一覧	307
表 5.5 - 1	GTE-8 蒸気分析結果	352
表 5.5 - 2	GTE-8 蒸気凝縮水分析結果	352
表 5.5 - 3	GTE-8, GTE-6 および EGAT-1 の熱水分析結果	353

表 5.5 - 4	利用した地化学温度計	354
表 5.5 - 5	GTE-8, GTE-6 および EGAT-1 の地化学温度	355

結

論

結 論

昭和57年度以降6年間に亘りJICAはEGATの緊密な協力の下で、サンカンペン地域における地熱開発計画調査を進めてきた。この間、GTE-7の掘削結果から期待通りの成果が得られず、調査期間はさらに延期されることになったが、GTE-8の掘削の結果および坑井内の諸調査の結果から貯留層の解析、評価に必要な資料が収集され、当計画調査が目的とするサンカンペン地域の地熱貯留層の評価および地熱開発の事前評価についての見解をまとめることが可能となった。

調査の結果を総括すると、サンカンペン地域の地熱貯留層から貯留層の圧力を維持する状態で約1,000 t/hの熱水の生産は可能であり、この熱水を用いてバイナリーサイクル方式による地熱発電を行った場合、5,000kW程度の出力が見込まれる見通しが得られた。

但し、現状におけるバイナリーサイクル発電の経済性は熱水の多目的利用を考慮しない限りなお従来の方式による発電に比べコスト高になることは免れないので、バイナリーサイクル方式による発電が経済的になりつつ時期が到来するまで、本格的な開発調査を延期すべきであると結論される。

とはいえ、今回の計画調査により、サンカンペン地域の地熱貯留層の全貌が明らかとなり、一地域で最少とも5,000kW程度の出力が期待できる点の裏づけが得られたことは本計画調査の成果であると評価されるので、EGATが政策的観点から経済性のみ重点を置くことなく3,000~5,000kW規模のバイナリーサイクル方式による地熱発電所の建設計画を進めようとする場合には、次に示すようなステップに従い開発調査を進める事が望ましい。

- 設定された貯留層の区域内には3本の調査井(GTE-2、GTE-6、GTE-8)があるが、1,000m以上掘削されたものはGTE-8のみである。今後、貯留層の実態を把握する上からいってさらに1,000m以上の調査井を追加掘削する。
- シリカ温度計を用い流体温度を推定した結果では160℃という値が得られた。GTE-8の流体温度は深度900m台で125℃であったが、掘削地点を変えることにより、より高温の熱水が得られるものと期待される。
- GTE-2、GTE-6、GTE-8の掘削結果から判断して、フラクチャーは東側に傾斜すると考えられる可能性が強い。このため次の調査井(GTE-9)は、より地熱徴候地に近づけ、かつ高温帯の中心を結ぶ線よりやや東側によせた附近に掘削地点を求めることが望ましいと思われる。掘削深度は1,500mを目標とする。

- ・ G T E - 9 もまた G T E - 8 と同じように、多数の透水性に優れたフラクチャーに遭遇した場合には次の掘削地点 (G T E - 10) を G T E - 8 のむしろ東南側に移し、果してフラクチャーが存在するか否かを調査することが望ましい。G T E - 8 に加え、上記 G T E - 9 および G T E - 10 を掘削することにより、サンカンペン地域の地熱貯留層の実態がほぼ解明されるものと期待される。

- ・ 上記調査井掘削後、G T E - 8 の場合と同程度の坑内調査を始め坑井間の干渉試験等を行う必要がある。また、貯留層区域内の地質調査も補足的に行うことが必要である。

いま述べた 3,000~5,000kW 規模の発電所を建設する案の他に今回 G T E - 8 から噴出した熱水を利用し、200~300kW のデモンストレーションプラントを設置する案も想定される。

その理由は次のような考え方にもとづく。

- ・ これまで、全世界の非火山国の中で、地熱発電が行われているところはまだ知られていない。非火山国における地熱発電を実証する点、その場所がリゾートエリアとして整備され、観光客が増加している点、ホテル、レストランの電源として利用価値が望める点などを考えると、調査地域内に 200~300kW のバイナリーサイクル発電方式によるデモンストレーションプラントを建設することに十分価値を見出すことができる。

- ・ 発電に使用後の熱水はなお 60℃ 程度の温度を有するので、多目的に利用することが可能である。産業、農業、保養、観光方面等その利用面は広く、地域開発に貢献する点からいっても熱水の多目的利用は大いに推進すべきである。

- ・ 以上述べた理由により、サンカンペン地域に G T E - 8 より噴出する地熱流体を用い、200~300kW 規模の地熱発電所を建設する価値は十分あるといえることができる。

この案は、今回の計画調査の成果を具体的に生かそうとする発想から生まれたものであるが、3,000~5,000kW 発電計画の場合と同様、その経済性を見込む訳にはいかない。従って、この案を採用するかどうかはやはり E G A T の判断に委ねられることになるが、かりに採用された場合、現在、G T E - 8 から得られる熱水の生産量の範囲内で発電の規模を設定し、デモンストレーションプラントを建設することが、直接的であり、かつ効果的であるように思われる。

I. 総 説

1. 本計画調査の背景

タイ王国は非火山国といわれているが、比較的温泉に恵まれ、国内の60以上の地点に温泉の存在が知られている。特に、タイ北部では水温70℃以上の高温泉が約20地点から湧出し、中でもサンカンペン (San Kampaeng)、ファン (Fan)、メチャン (Mae Chan)、パバエ (Pa Pae) そしてメチャム (Mae Cheam) 地域には沸騰泉の存在すら認められている。

タイ王国は、石油代替エネルギー開発の一貫として、地熱資源の開発に着目し、昭和52年(1977年)以降、タイ電力公社 (EGAT; Electricity Generating Authority of Thailand)、チェンマイ大学 (CMU; Chiang Mai University) および鉱物資源局 (DMR; Department of Mineral Resources) が中心となり調査団を組織して温泉地域の概査を行ってきたが、その結果をとりまとめ、いわゆる精査地域としてサンカンペンとファンの二地域を選定した。

本計画調査は、国際協力事業団 (JICA; Japan International Cooperation Agency) がタイ王国からの要請にもとづき、技術協力の一貫として、EGATの協力の下に上記二精査候補地域のうちサンカンペン地域において同地域の地熱貯留層を総合的に解析し、地熱開発の可能性を事前に評価することを目的として実施されたものである。

当初計画では、昭和57年度以降に広域地質構造解明のための第一次調査とJICA調査井掘削地点選定のための第二次調査、昭和58年度は上記調査結果の解析と掘削地点の選定、昭和59年度はJICA調査井の掘削とその結果にもとづく総合評価を行い、ファイナルレポートを作成して3ケ年に亘る地熱開発計画調査を終了する予定であったが、次に述べる理由により、調査期間が昭和62年度まで3カ年延長されることになった。

期間延長の理由は下記のとおりである。

- (1) JICA調査井 (GTE-7) の坑内温度が予想外に低く、坑内温度分布の解析結果から掘削地点は水の滲透地域に位置することが判明し、結果的に貯留層解析のために必要な資料が得られずに終わった。
- (2) 本計画調査の目的遂行のためには調査期間を延長し、貯留層解明のための補足調査を行う必要が生じたが、これにはEGATからの要請を受けて断層追跡調査と地下温度分布調査を実施することに決定した。
- (3) 上記補足調査の結果、地熱貯留層の存在範囲がほぼ明らかになり、かつEGATが貯留層確認のための調査井 (GTE-8) の掘削を行うことになったことから、この調査井を利用し、産出試験、プロダクション検層を行い、その結果にもとづき貯留層の解析さらに地熱開発事前評

価を折り込んだファイナルレポートを作成し、本開発計画調査を終了することが決定した。

以上述べたように、本計画調査の調査期間は当初計画より3カ年延長となったが、EGATのGTE-8の掘削の結果及び坑井内の諸調査の結果から貯留層の解析、評価に必要な資料が得られたので、ここに本計画調査が目的とするサンカンベン地域の地熱貯留層の評価および地熱開発の事前評価についての見解をまとめることが可能となった。

最終年度に実施したプロダクション検層等の結果から、サンカンベン地域における地熱資源は流体温度の点からみて蒸気発電は困難であるがバイナリーサイクル発電には十分利用可能である見通しが得られた。出力規模は5MW程度とみなされるが、現段階では発電コストが高くなり経済的になりたたない点に問題がある。但し、最近この地域がリゾート地域として開発されているので、200～300KW程度のバイナリーサイクル方式によるデモンストレーションプラントを設け、非火山国における地熱発電を実証することと併せてリゾート地域の電力源として活用することが調査結果を生かす面からみて有効な方法であるように思われる。また、発電に使用後の熱水を多目的に利用することも地域開発に貢献するところ大なるものがあると思われる。

2. 本計画調査の目的

本計画調査の目的は、タイ国政府の要請にもとづき、国際協力事業団（JICA）が、タイ電力公社（EGAT）を始めチェンマイ大学（CMU）および鉱物資源局（DMR）の協力の下で、タイ王国北部のサンカンペン地熱地域において地質調査、物理探査、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、地熱開発の可能性についての見解をまとめることにある。

3. 調査地域の概要

調査地域は、タイ王国北部のチェンマイ州、サンカンペン地域にあり、チェンマイ市東方約30kmに位置する。調査地域は、北緯 $18^{\circ}45' \sim 18^{\circ}50'$ および東経 $99^{\circ}13' \sim 99^{\circ}17'$ の範囲を占め、その面積は約50km²である。

地熱徴候地は、調査地域の北西部のWat Pong Hom と Ban Pong Nok の間にあり、多数の高温温泉の湧出によって特徴づけられる（Fig. 2）。

調査地域の西部には海拔500～650mのDoi Luang山地が、南部には海拔500～800mのMae Tha 山地がほぼ南北に走り、その間数kmに亘って海拔350～400mの平地が発達する。

4. 調査経過の概要

本計画調査は第一次調査から第三次調査に亘る手順で実施された。

第一次調査としては昭和57年度に地質構造の解明を目的として地質調査、重力調査、磁気調査およびテスト井を用いての予備的な坑内検層機の検証調査が実施された。

第二次調査は昭和57年度後半に計画され、上記の調査結果を踏まえ、調査井掘削地域の選定を目的として弾性波調査および深部電気探査（MT法）が実施された。

以上の調査結果から西部山地に近いBang Pong Nok 地域に地熱貯留層存在の可能性が認められたため、具体的な掘削地点を選定する必要上、第二次調査の補足調査として昭和58年度にMT法による深部電気探査の補足調査が実施された。

昭和59年度に計画された第三次調査は地熱貯留層の確認、評価を目的として1,500m級のJICA調査井（GTE-7）の掘削、物理検層およびコア調査が実施された。

掘削の結果としては地層が硬かったため1,227.34mで掘止めとなり、かつ割れ目に乏しくまた孔底温度も99.8℃程度にすぎず、この結果からサンカンペン地域の地熱貯留層を評価することは困難であると判断された。

このため、地熱貯留層の確認に重点を置き、EGATの協力の下に、昭和60年度に第三次調査の補足調査として断層追跡調査及び100m深度の地下温度調査が実施された。

上記調査の結果、地熱貯留層の存在範囲について有力な手掛りが得られたためEGATが調査井(GTE-8)を掘削することとなり、この調査井から得られる資料に基づき貯留層の評価を行うことが決定された。

EGATの調査井(GTE-8)は昭和61年度から62年度に亘って掘削され、昭和62年12月に深度1,049mで掘止めとなった。掘削中はしばしば割れ目に逢着し、かつ熱水を噴出したため深度915mから930mに亘るフィードゾーンを利用してプロダクション検層及び流量特性調査を実施し、地熱貯留層解析、評価のための基礎資料を収集した。

サンカンベン地域における地熱開発事前評価は上記の解析結果によりなされ最終的にファイナルレポートを作成し昭和62年度で本計画調査の全過程が終了した。

5. 本計画調査の工程と期間

昭和57年度から62年度に亘って実施された調査の工程と期間をそれぞれ表-1、表-2に示す。

6. 調査団の氏名

JICA調査団の構成員及びタイ側協力者の氏名を表-3、表-4に示す。

表-2 調査期間

調査項目		期 間	現 地 調 査	国 内 解 析
第 一 次 調 査	地 質 調 査		自 S.5 7. 7. 6 至 S.5 7. 8. 5 } 3 1 日間	自 S.5 7. 8. 1 7 至 S.5 8. 3. 3 1
	重 力 探 査		自 S.5 7.1 1. 1 至 S.5 7.1 2. 2 8 } 5 8 日間	自 S.5 8. 1. 4 至 S.5 8. 3. 3 1
	磁 気 探 査		自 S.5 7.1 1. 1 至 S.5 7.1 2. 2 8 } 5 8 日間	自 S.5 8. 1. 4 至 S.5 8. 3. 3 1
	モデルテスト井の 検層と技術指導	(第1回目)	自 S.5 7. 7. 2 8 至 S.5 7. 8. 1 6 } 2 0 日間	—
		(第2回目)	自 S.5 8. 1. 2 3 至 S.5 8. 2. 1 } 1 0 日間	
第 二 次 調 査	深 部 電 気 探 査		自 S.5 8. 1. 4 至 S.5 8. 2. 2 2 } 5 0 日間	自 S.5 8. 6. 1 至 S.5 8. 9. 3 0
	弾 性 波 探 査		自 S.5 8. 1. 4 至 S.5 8. 3. 3 1 } 8 7 日間	自 S.5 8. 4. 1 至 S.5 8. 9. 8
	調査井データの収集		自 S.5 8. 6. 1 5 至 S.5 8. 6. 2 4 } 1 0 日間	
	ドラフトテクニカル レポート現地説明		自 S.5 8.1 0. 1 7 至 S.5 8.1 0. 2 3 } 7 日間	—
第 二 次 調 査 補 足 調 査	深 部 電 気 調 査		自 S.5 9. 1. 1 0 至 S.5 9. 2. 8 } 3 0 日間	自 S.5 9. 2. 1 5 至 S.5 9. 3. 2 0
第 三 次 調 査	調 査 井 掘 削 (GTE-7)	(事前調査)	自 S.5 9. 5. 9 至 S.5 9. 5. 1 8 } 1 0 日間	自 S.6 0. 3. 1 1 至 S.6 0. 3. 2 3

調査項目		期 間	現 地 調 査	国 内 解 析
第 三 次 調 査	調査井掘削 (GTE-7)		(掘削) 自S.59. 6. 5 至S.60. 3. 8 } 261日間	
	物理検層 (GTE-7)		(検層機器整備) 自S.59. 6.21 至S.59. 6.29 } 9日間	自S.60. 3.11 至S.60. 3.23
			(第1回目) 自S.60. 1. 7 至S.60. 1.16 } 10日間	
			(第2回目) 自S.60. 2.25 至S.60. 3. 8 } 12日間	
	コア調査 (GTE-7)		自S.60. 2.12 至S.60. 3. 8 } 25日間	自S.60. 3.11 至S.60. 3.23
第 三 次 調 査 ・ 補 足 調 査	掘削装置の解体		自S.60. 8.26 至S.60. 9.21 } 27日間	—
	撤収指導		自S.60.10.28 至S.60.12. 5 } 39日間	自S.60.12.23 至S.61. 2. 8
	断層追跡調査		自S.60. 3. 5 至S.60.10.15 } 72日間	—
	100m地下温度調査		自S.61. 3.11 至S.61. 3.15 } 5日間	—
	中間報告書説明		—	—
	物理検層		—	自S.60. 9. 3 至S.60. 9.20
深部電気探査		—	自S.60. 9. 3	
弾性波探査		—	至S.60.10. 7	

調査項目	期 間	現 地 調 査	国 内 解 析
第 三 次 調 査 ・ 補 足 調 査	掘削指導 (GTE-8)	(第1回目) 自 S.6 1.1 1.1 0 至 S.6 2. 3.2 0 } 131日間	
		(第2回目) 自 S.6 2. 5.2 5 至 S.6 2.1 2.2 3 } 213日間	
	地質調査 (GTE-8)	(第1回目) 自 S.6 2. 3. 4 至 S.6 2. 3.2 0 } 17日間	
		(第2回目) 自 S.6 2.1 0. 4 至 S.6 2.1 0.2 0 } 17日間	
	坑内検層 (GTE-8)	自 S.6 2. 3. 4 至 S.6 2. 3.2 0 } 17日間	
	坑井試験 (GTE-8)	自 S.6 2.1 0. 4 至 S.6 2.1 0.2 0 } 17日間	
	噴気特性試験 (GTE-8)	自 S.6 2.1 0.1 1 至 S.6 2.1 0.2 0 } 10日間	
	貯留層解析およびフ ァイナルレポートの 作成		自 S.6 2. 8.2 0 至 S.6 2. 9.1 9 自 S.6 2.1 1. 2 至 S.6 2.1 1.2 4 自 S.6 3. 1. 5 至 S.6 3. 1.2 3 自 S.6 3. 2.2 3 至 S.6 3. 2.2 5
	ファイナルレポート の 説 明	自 S.6 3. 2.1 5 至 S.6 3. 2.1 9 } 5日間	

表-3 調査団の構成

担当調査	調査段階	氏名	所属機関
団長	第一～第三次	中村久由	日本重化学工業㈱
地質調査	第一～第三次	若林健介	三井金属資源開発㈱
	同上	田上勇吉	同上
	同上	井出俊夫	日本重化学工業㈱
重力探査	第一次	木村美紀夫	三井金属資源開発㈱
同上及び磁気探査	第一～第三次	三好福次郎	三井金属資源開発㈱
物理検層	第一次及び第三次	武山孝夫	開発工業㈱
	第一次～第三次	小原幸正	日本重化学工業㈱
深部電気探査	第一～第二次	野淵和久	日本重化学工業㈱
	第二～第三次	高杉真司	同上
	同上	関純夫	同上
弾性波探査	第一～第二次	有部明	宇部興産㈱
	同上	野原和良	同上
	同上	河村虹児	同上
	同上	鈴川俊道	同上
	同上	堀敬史	同上
	第二～第三次	高杉真司	日本重化学工業㈱
掘削	第三次	関純夫	同上
	同上	上村尚	日鉄鉱コンサルタント㈱
	同上	昆盛	同上
	同上	藤井究哉	同上
	同上	草野章平	同上
	同上	畠山悦雄	同上
断層追跡調査	第三次	藤貫秀宣	同上
	同上	柴田精久	三井金属資源開発㈱
	同上	福田宗弘	同上
		井出俊夫	日本重化学工業㈱

担当調査	調査段階	氏名	所属機関
噴気特性試験	第三次	藤井幸夫	日本重化学工業㈱
坑井試験	第三次	小原幸正	日本重化学工業㈱

表-4 タイ側カウンターパート

調査名	氏名	所属機関
全般	Mr. Chaya Jivacate	EGAT
	Mr. Chai-Asa Bhotirungsiyakorn	EGAT
	Mrs. Amara Atibodhi	EGAT
	Dr. Kamol Takabut	EGAT
	Mr. Kiatichai Patikornsilp	EGAT
	Mr. Songkeat Limsiri	EGAT
	Mr. Chayant Nakswat	EGAT
	Mr. Somchai Wongpornpaxdee	EGAT
	Prof. Tavisakdi Ramingwong	CMU
地質調査	Mr. Surachai Praserdvigai	EGAT
	Mr. Adichat Surinkum	DMR
	Mr. Prapat Sophonpongphipat	DMR
物理探査	Mr. Surachai Praserdvigai	EGAT
	Mr. Visit Coothongkul	EGAT
	Mr. Precha Laochu	DMR
	Mr. Pairoj Pangpolsumrit	DMR
	Mr. Wanchai Prasartkhetwittaya	EGAT
	Mr. Suebsak Solgosoom	DMR
	Mr. Suthep Lertsrimongkol	EGAT
坑内検層	Mr. Jirakom Patumanond	EGAT
	Mr. Buncha Kongsupapakul	EGAT
	Mr. Ekachai Sinratanpakdee	EGAT
	Mr. Pramual Wongpunga	EGAT
	Mr. Sommart Siri	EGAT

調査名	氏名	所属機関
掘削	Mr. Wanchai Silapanon	EGAT
	Mr. Puchong Chinpongsanond	EGAT
	Mr. Surachai Praserdvigai	EGAT
	Mr. Wanchai Prasartkhetwittaya	EGAT
	Mr. Udom Kunarak	EGAT
	Mr. Songsak Bhaddee	EGAT
	Mr. Patana Hutakorn	EGAT
	Mr. Tanit Songchan	EGAT
	Mr. Prasert Kidchalard	EGAT
	Mr. Pratueng Nokyoongtong	EGAT
	Mr. Sompis Boonpairote	EGAT
	Mr. Phadung Dangkongko	EGAT
Mr. Thavorn Jangsri	EGAT	
化学調査	Mrs. Nitiya Petchpaibool	EGAT

その他の協力メンバー

専門	氏名	所属機関
化学	Associate Prof. Benjavun Ratanasthien	CMU
地質	Assistant Prof. Charn Tantisukrit	CMU
物理探査	Associate Prof. Kitichai Wattananikorn	CMU
地質	Assistant Prof. Surapong Lerdtusnee	CMU

EGAT : Electricity Generating Authority of Thailand

DMR : Department of Mineral Resources

CMU : Chiang Mai University

Ⅱ. 調 査 内 容

1. 広域調査

1.1 地質調査

1.1.1 概要

(1) タイ王国の地質構造上背景

サンカンペン地熱地域を含むタイ国北部は、インドシナ半島のほぼ中央部に位置する。タイ国を含む東南アジアの地質は、次のように概括される。

表・1.1-1 東南アジアの地質概要

構造区分			地域	時代
ヒマラヤ期造山帯			ビルマ西半部～アンダマン諸島～スマトラ島～ジャワ島	白亜紀 ～第四紀
インドシナ プラットフォーム	Indosinia	インドシナ期造山帯	インドシナ山脈（中国南部、ビルマ東半部、ラオス、ベトナム、大部分のタイ、マライ半島）	二疊紀～ジュラ紀 (主に三疊紀)
	Annamia	ヘルシニア期造山帯	インドシナ半島（北東タイ、ラオス、カンボジア、ベトナム）	古生代後期 (主に石炭系)
	Kraton	変成基盤岩類	同上	先カンブリア紀～ 古生代初期

インドシナ半島の最古の岩石（基盤岩）は、先カンブリア紀末期または古生代初期の造山運動によって形成された変成岩類（片麻岩類、古生代花崗岩類）であり、ベトナム南部のKontum 高原、ベトナム北部の紅河流域、ビルマ北部のMyitkyina周辺地域およびタイ北部のChiang Mai 西方地域などに分布している。この変成岩類は、古い地塊化した大陸核（Kraton）を構成している（Fig. 1.1-1）。

この大陸核を中心にして順次その外側に、ヘルシニア期（石炭紀）、インドシニア期（二疊紀からジュラ紀におよぶが主として三疊紀）、ヒマラヤ期（白亜紀から第四紀）の三時期の造山帯が分布している。すなわち時代とともに、新しい地層が付加されて大陸が

拡大発達していったと考えられている。

ヘルシニア造山帯はインドシナ半島東部に分布し、Annamia 地塊を構成している。

インドシニア期造山帯は、インドシナ半島全域に広く発達し、Indosinia 地塊を形成している。

変成基盤岩類を含めたヘルシニアおよびインドシナ造山帯は、現在では安定したインドシナ・プラットフォームを構成している。

ヒマラヤ期造山帯は、ビルマからアンダマン海をとおり、スマトラ島・ジャワ島まで延びており、環太平洋のヒマラヤ造山帯であるボルネオ島・フィリピン群島と合体している。またヒマラヤ期造山運動は Indosinia 地塊に対して、ゆるい波曲と断層地塊化運動を与えている。

このような東南アジアの全体的な地質環境を背景として、タイ国北部地域は次の4つの地質構造区に分けられる (Fig.1.1-2)。すなわち、西側から西部構造区 (West Tectonic Province)、西部主要山岳地帯構造区 (Main Western Range Tectonic Province)、中央北部構造区 (Central North Tectonic Province) および東部構造区 (East Tectonic Province) である。

西部構造区は、Mae Sariang および Mae Sot 以西のタイ最西部の地域である。本構造区を構成する地層は、石炭紀からジュラ紀までの厚い炭酸塩岩と碎屑岩であり、火山岩類は認められていない。断層による沈降帯であり、約 300 m におよぶ第四紀の淡水堆積物が発達する。

西部主要山岳地帯構造区は、Mae Sariang と Chiang Mai の間にあるタイ国の主要山岳地帯を含む。本構造区を構成する岩石は、アーチ状の花崗岩の貫入を伴う先カンブリア紀の変成堆積岩類と、これを不整合におおう古生代初期の弱変成大陸棚堆積岩からなる。本構造区は、全体として断層による地塊の上昇によって特徴づけられる。

中央北部構造区は、タイの中央部を巾広く南北に連なる地域をしめ、北方の Chiang Rai から Uttarait をとおり Chanthaburi 付近まで連なる。この構造区を構成する岩石は、古生代中期から中生代初期にかけてのカルクアルカリ岩系の火山岩類と大陸周辺相の堆積岩類からなる。本構造区は、強い褶曲構造と衝上断層によって特徴づけられる。

東部構造区は、タイ北東部の Khorat 高原地帯で代表される。本構造区の岩石は、三疊紀後期から白亜紀にかけての蒸発岩を伴う厚い赤色岩層からなり、大陸における陸成堆積物である。本構造区の褶曲構造は比較的弱い。

次いで、タイ北部の地熱地質的環境について概括する。

タイ北部の地熱地帯はすべて、すでに安定化したインドシニア期造山帯内に分布し、かつヒマラヤ造山運動による波曲的運動と断層地塊化運動を受けている。すなわちヒマラヤ造山帯の後背地として位置づけられる。

またサンカンペン地熱地域は、本造山帯内の中央北部構造区の北西縁部に位置している。

タイ北部の地熱的背景として、ヒマラヤ造山の影響と花崗岩の存在が重要である (Fig. 1.1-3)。

本地域のヒマラヤ造山帯は、インドプレートと衝突しつつあるユーラシアプレートの縁辺部に形成されたものである。ヒマラヤ造山帯はビルマを除いた海域において、海溝 (サブダクション帯) - 島弧 (火山帯) - 緑海 (拡大しつつある小規模な拡大海域) という基本的構造を示す。すなわち、タイ北部の地熱地帯が属するインドシニア造山帯は、インドプレートの沈み込み (サブダクション) による圧縮を広域的にうけていると共に、アンダマン海の拡大による局所的な引張り応力場の影響もうけているものとみられる。

アンダマン海の拡大の中心 (軸) は NE - SW 性であり、NS 性の右横ずれ断層によって切れ、多少位置のずれと拡大の強さは横まるもののタイ国北部にまで延びている可能性が強い。この拡大に伴う引張応力場が、断裂の形成と高温のマントル物質の上昇およびそれに伴う高熱量をもたらしていると考えられる。

タイ国北部は他地域に比べて花崗岩の分布が広く、とくに西部主要山岳地帯構造区および中央北部構造区 (そのうちビルマ国境に近い Chiang Rai 周辺) で著しい。温泉の分布をみるとほとんど花崗岩分布域の内部か近傍である。サンカンペン地域も三疊紀花崗岩に接近した場所とみなすことができる。すなわち温泉 (地熱地) は花崗岩の存在と密接に関係していると考えられる。

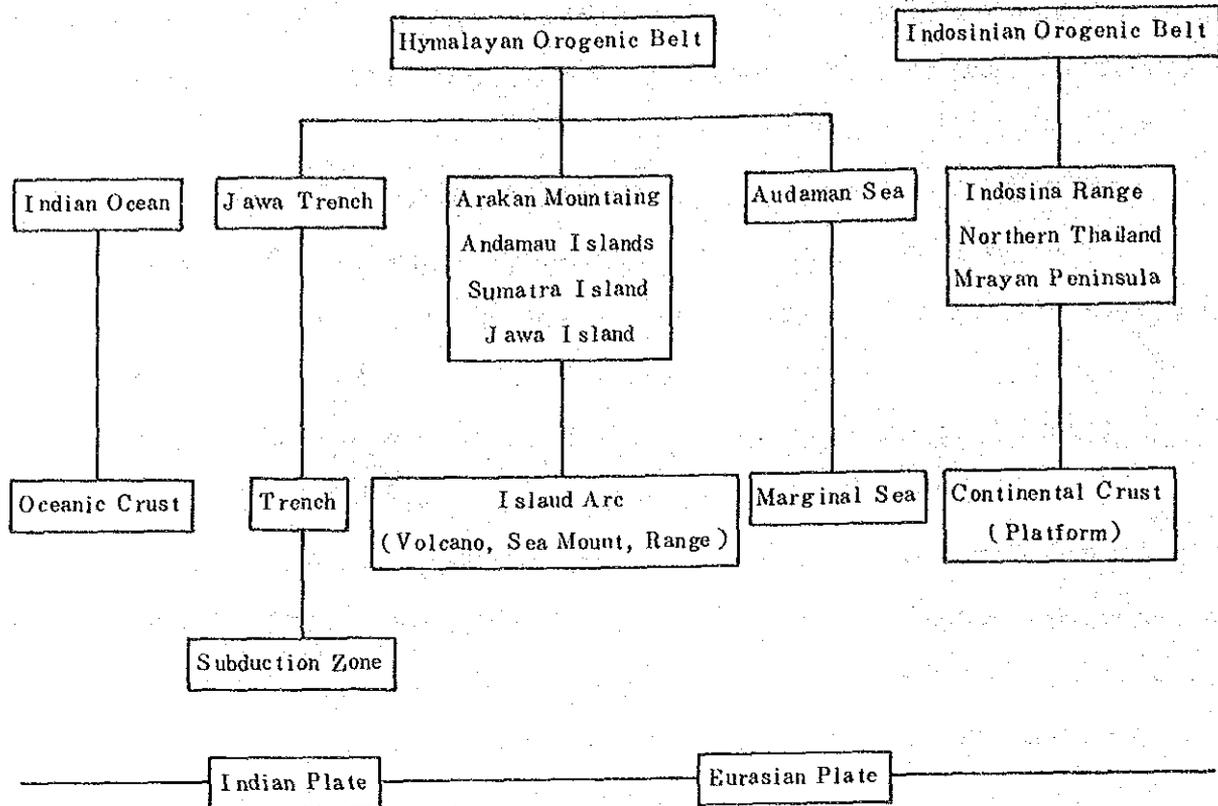


Fig. 1.1-3 Schematic Relationship between Himalayan Orogenic Belt and Indosinian Orogenic Belt

地熱と花崗岩の関係は明らかでないが、花崗岩が熱源として働らく場合と、深部からの熱流体の通路として働らく場合の2つが想定される。

熱源としての花崗岩は放射性元素の崩壊によるものである。タイの花崗岩からの発熱量は、日本の西南日本の花崗岩の値の3倍以上を示し、厚さを10kmと仮定すれば地殻熱流量として1.2 HFUを生ずると計算されている。実際に花崗岩が広く分布し、地殻中でもかなり大規模であることが予想されるので、熱源としての花崗岩の役割は無視することができず、タイ北部地域の熱源の一端を担っていると考えられる。

ただし、通常の花崗岩地域の温泉は最高60~70℃程度であり、ファンヤサンカンペンのような90~100℃に達する高温はまれである。

したがって、地質的にみるとタイ北部の地熱は、アンダマン海の拡大と類似した環境でのマントル物質の上昇によって発生する高熱流を広域的背景とし、石灰紀・三畳紀の花崗

岩体の崩壊熱の蓄積がなされた部分が熱源としての役割はたしていると考えられる。

(2) 調査概要

地表地質調査は、サンカンペン地域を構成する地層の岩相、層序、地質年代および地質構造を明らかにし、地質と地熱現象（地熱徴候、変質帯分布等）との関係あるいは他の調査結果との関係を解明することにより、本地域の地熱貯留層構造を推定することを目的として行われた。

地質調査は、面積約 50km²、ルート長約 95km にわたって実施した。

調査にあたっては、10,000 分の 1 地形図を基本として主要ルートの路線地質調査および変質帯調査を実施した。なお地熱徴候地などくに重要と考えられる地域については、簡易測量を併用して大縮尺の地図の作成および地質スケッチを行った。

現地調査のさいに採取した試料について、室内解析として顕微鏡観察、化石鑑定（表 1.1-2）、年代測定（表 1.1-3）および X 線回折分析（表 1.1-4）を行った。顕微鏡観察は、薄片試料を顕微鏡下で観察して、鉱物を同定し岩石名を決定した。化石鑑定は有孔虫化石を含む石灰岩について行い、時代決定のための資料とした。年代測定は火成岩（玄武岩および花崗岩）を対象として、K-Ar 法によって実施した。X 線回折分析は、地熱徴候地の変質岩試料について実施し、変質鉱物を同定した。

上記の現地調査、室内解析の結果にもとづき、地質図、地質断面図および変質帯分布図を作成した。この結果、本地域を構成する地層の岩質、層序、時代および地質構造が明らかになり、さらに地質構造と地熱徴候あるいは変質帯との関係が把握された。

1.1.2 地質層序

調査地域を構成する地層は、下位から石灰紀の Mae Tha 層、二疊紀中期の Ratoburi 層群中の Kiu Lom 層、三疊紀の花崗岩類および第四紀の沖積層からなる（Fig.1.1-4）。

(1) Mae Tha 層

Mae Tha 層は、調査地域の西部山地および東部山地に分布する。主としてち密質、堅硬な白色塊状の中粒砂岩からなり、東部山地では黒色頁岩の薄層を挟有する。鏡下では石英を主として、少量の絹雲母化した長石を伴う粒径 0.1~10mm の亜角ないし円形状の砂粒からなり、まれに 1.0mm 以上の砂粒を含む。本層は調査地域の基盤をなすものであるが、上位の Kiu Lom 層とは断層関係にあり、直接の層位関係は不明である。ここではタイ側のデータにもとづいて、不整合と推定した。本層の層厚は、上限および下限が明かでないが、

1,600m以上とみられる。

(2) Kiu Lom 層

Kiu Lom 層は、両側を Mae Tha 層に挟まれた形で調査地域の中央部をしめて、ほぼ NNW-SSE 方向に広い範囲に分布する。本層は、その岩相から下部の堆積岩類、中部の石灰岩と火山岩類および上部の火山岩類に3区分される。

Kiu Lom 層下部は、下位から上位に向かって石灰岩・頁岩互層、砂岩層、シルト岩、砂岩チャート互層、チャート層、シルト岩・砂岩互層および砂岩層に区分される。最下位の石灰岩・頁岩互層は、灰白～灰黒色石灰岩と黒色頁岩を主体とし、灰色の砂岩を伴う。石灰岩は、*Neoschwagerina*, *Summatrina* 等の有孔虫化石を産し、時代は二疊紀中期と考えられる。砂岩層は、Wat Pong Hom 北西方の丘陵地に露出する白色中粒砂岩である。シルト岩・砂岩・チャート互層は、西部の Ban Pong Hom から Huai Ang 川にかけての地域と、東部の Nam Mae On から Nam Mae Lai にかけて分布する。本互層はシルト岩を主体とし、砂岩、チャートを挟有する地層である。チャート層は Ban Pong Hom から Huai Ang 川の東側にかけて分布する。本層は大部分チャートからなるが、下部ではシルト岩を、上部では砂岩とシルト岩の薄層を挟有する。シルト岩・砂岩互層は、Ban Pong Hom から Huai Ang 川入口付近に分布する。本互層はシルト岩を主体とし、砂岩を挟有する。砂岩層は、Ban Pong Hom 東方から Ban Pong Nok 東方にかけて分布する。本層は、塊状で堅硬な白色中粒砂岩からなる。

Kiu Lom 層中部は、下部の玄武岩溶岩・同質凝灰岩と、その上位の石灰岩・頁岩に区分される。玄武岩溶岩・同質凝灰岩は、Ban Mae Khu Ha 付近とその南北延長方向に分布する。玄武岩質溶岩は、同質凝灰岩中に5～10mの薄層をなして介在するもので、暗緑色～濃緑色の多孔質塊状の岩石である。上位の石灰岩・頁岩は、調査地域のほぼ中央部の NS 方向に S 字状に突出した小山地列にそって分布する。石灰岩は塊状をなすことが多いが、薄い黒色頁岩層を介在することもある。時代を決定できる化石は少ないが、*Schubertella*, *Kahleria* の存在から、二疊紀中期の可能性が強い。

Kiu Lom 層上部は、玄武岩質溶岩、凝灰岩、火山礫凝灰岩および凝灰角礫岩で、一部に凝灰質砂岩、チャート、シルト岩の薄層を挟有する。玄武岩溶岩は濃緑色ないし暗緑色を呈し、多孔質塊状で、厚さ数mから20mくらいで比較的連続する地層である。本層の K-Ar 法による年代測定の結果は、 $398 \pm 19 \text{m.y.}$, $206 \pm 19 \text{m.y.}$, $190 \pm 10 \text{m.y.}$, $119 \pm 14 \text{m.y.}$ と非常にばらついた値を示す。これは、本層の噴出時期の環境および噴出後の変質作用

により、年代測定結果に差異を生じたためと考えられる。

(3) 花崗岩類

花崗岩類は、調査地域の北東部 Ban Huai Kaeo 東方に分布している。本岩は、長石の斑晶の大きい斑状の黒雲母花崗岩である。本岩の K - Ar 法による年代測定結果 (表 1.1 - 3) は、 212 ± 10 m.y. であり、その貫入時期は三畳紀末に相当する。

(4) 沖積層

調査地域の中央部から南方にかけての Nam Mae On 川流域と、北西部 Ban Pong Hom 付近の沢沿いには、沖積層が発達し、水田地帯を形成している。これらの沖積層は、周辺の岩石から供給された碎屑物からなり、その層厚は大部分が 10m 以下と考えられる。

表 1.1 - 3 火成岩の K - Ar 年代測定結果

Sample Number	Rock Name	Locality	Mineral	Age (m.y.)	Ar ⁴⁰ Rad SCC/gm $\times 10^{-5}$	Ar ⁴⁰ Rad%	K %
W-006	Basaltic Welded tuff	Wat Don Kaeo	Whole Rock	119 ± 14	0.024 0.024	12.7 20.8	0.05 0.05
W-009	Pyroxene Basalt	Wat Nong Hoi	Whole Rock	389 ± 19	0.067 0.068	42.3 36.9	0.04 0.04
W-017	Pyroxene Basalt (Altered)	Huai Hat	Whole Rock	206 ± 10	0.836 0.852	89.7 91.2	0.99 1.00
T-103	Biotite Granite	Ban Huai Kaeo	Biotite	212 ± 10	2.84 2.90	81.2 86.6	3.27 3.31
T-107	Pyroxene Basalt	Ban Mae Koha	Whole Rock	190 ± 10	0.751 0.751	88.4 90.1	0.96 0.97

The constants for the age calculations are: $\lambda_{\beta} = 4.96 \times 10^{-10} \text{yr}^{-1}$,
 $\lambda = 0.581 \times 10^{-10} \text{yr}^{-1}$, $^{40}\text{K} = 1.167 \times 10^{-4}$ atom per atom of natural potassium.

1.1 3 地質構造

(1) 地質構造の特徴

本地域は主要な断層によって、構造的に Doi Luang 隆起帯、Ban Pong Hom 沈降帯および Mae Tha 隆起帯に区分される (Fig. 1.1 - 5)。これらの構造帯を境しているのは、Huai Pong 断層と Huai Mae Koen 断層であり、いずれも NNW - SSE 性の正断層である (Fig. 1.4 - 6)。

Doi Luang 隆起帯は、地形的にみてほぼ西部山地に対応する。本隆起帯は石炭系の Mae Tha 層の塊状砂岩からなり、NW - SE 性、EW 性および NS 性の断層、NW - SE 性の褶曲構造が発達している。

Ban Pong Hom 沈降帯は、地形的にみてほぼ中央低地に対応する。本沈降帯は、その西部は、Kiu Lom 層中・下部の堆積岩類（砂岩、頁岩、石灰岩、チャートなど）によって、東部はKiu Lom 層上部の玄武岩溶岩、同質火砕岩によって占められている。断層は NNE-S SW 性、NNW-S SE 性およびNW-SE 性が卓越している。本沈降帯には断層とほぼ同方向の褶曲構造が発達するが、あまり著しいものではなく、全体としてみれば東側に向かって上位層が順次出現する同斜構造とみることができる。しかし地層の傾斜は、一般的に50~80°とかなり急傾斜である。

Mae Tha 隆起帯は、地形的にはほぼ東部山地に一致する。本隆起帯はMae Tha 層の砂岩、Kiu Lom 層下部の頁岩およびMae Tha 層に貫入する花崗岩類によって構成される。NNW-S SE 性の断層が卓越するが、それらによって切られるNE-SW 性あるいはEW 性の断層も認められる。またNS 性ないしNW-SE 性の褶曲構造が発達している。このように、Doi Luang 隆起帯とMae Tha 隆起帯は、その構成岩相および構造的特徴からみて、非常に良く似ている。

(2) 断裂構造

本地域には、NNW-S SE 性、NNE-S SW 性、NW-SE 性、NE-SW 性の様々な方向性をもつ断層が発達している。このうちNNW-S SE 性の断層が地質構造上とくに重要であり、前述したHuai Pong 断層とHuai Mae Koen 断層もそのうちの1つである。

Ban Pong Nok からHuai Ang 川上流にかけての地域に認められる3本のNW-SE 性の断層は、Huai Pong 断層に伴って形成された派生断層と考えられる。Huai Pong 断層、Huai Mae Koen 断層はじめ本地域の断層は、実際の断層面はほとんど観察されないが、地表における伸びがほぼ直線的であることから、かなり高角でありかつ正断層と推察される。

本地域では以上述べた断層のほかにも、いくつかの構造性断裂系が認められる。この断裂系の一つに、石英脈に充てんされた節理がある。節理の走向はEW 性のものが多く、褶曲軸にはほぼ直交しており、褶曲に伴う引張り性の割れ目と考えられる。

また地層によって断裂、割れ目の性質が異なることが認められる。すなわち、Mae The 層の石英質砂岩およびKiu Lom 層上部の玄武岩質溶岩、火砕岩は、比較的塊状で割れ目に乏しい。これに対して、Kiu Lom 層中・下部の堆積岩類は、互層をなし上下方向に不均質で、大形の節理の発達には乏しいが、比較的細片化しやすく割れ目に富む。とくにぜい性なチャートはしばしば細礫状に破碎されている。またシルト岩も風化、変質をうけやす

く白色軟質化し、割れ目に富む場合が多い。

(3) 褶曲構造

本地域は全般に褶曲構造が良く発達するが、構造帯によって褶曲の程度や様式が異なる。Doi Luang 隆起帯および Mae Tha 隆起帯では、一般に密な褶曲構造が特徴的で、約 400m ないし 1 km の波長で背斜・向斜をくりかえしている。また褶曲軸はほぼ水平で、NW-SE ないし NNW-SSE 性を示す。地層面の傾斜は 40~60° 前後で、比較的ゆるい褶曲を示す。

これに対して Ban Pong Hom 沈降帯では、褶曲作用はあまり著しくなく、50~80° の東傾斜の同斜構造が特徴的である。本沈降帯の西部および中央部で認められる褶曲構造は、水平~緩傾斜で NNE-SSW 性の軸を示す。

(4) 変質帯

地熱徴候地を中心とする約 2km² の地域について変質帯調査を行い、採取した試料について X 線回折分析を行い変質鉱物を同定した(表. 1.1-4)。検出された粘土鉱物としては、ハロイサイト、モンモリロナイト、サボナイト、セリサイト、緑泥石、カオリンおよびアルナイトなどがあげられ、粘土鉱物以外に石膏、ジャロサイト、黄鉄鉱なども存在する。

本地域の変質帯は、セリサイトと緑泥石を除外した粘土鉱物の組合せにもとづいて、アルナイト帯、カオリン帯、カオリン・モンモリロナイト帯、モンモリロナイト帯およびハロイサイト帯に区分される (Fig. 1.1-7)。

アルナイト帯は、地熱調査井 GTE-2 の南方約 30m の 1 地点でのみ認められ、他の変質鉱物としてはサボナイトが存在する。したがって、アルナイト帯の分布範囲や延びの方向は不明であるが、南方に広がる可能性がある。

カオリン帯は、GTE-2 付近とその東方地域にかけてほぼ EW 方向に分布する。このほか、Ban Pong Hom 北方や西方の山麓道路ぞいにも認められる。

カオリン・モンモリロナイト帯は、GTE-2 の北西方約 80m の温泉湧出地付近と東方約 400m 付近に認められ、カオリン帯の北側に接してほぼ EW 方向に細長く分布している。

モンモリロナイト帯は、Huai Mae Khuba 川にそった主要な温泉湧出地付近に認められ、幅約 200m でほぼ EW 方向に分布する。

ハロイサイト帯は、Wat Pong 付近と Ban Pong Hom 南東約 400m 付近に認められる。分布の延びの方向は、EW ないし NW-SE 性である。

地熱地域の変質鉱物の組合せは、主として熱水の化学組成と温度によって規制されるが、本地域の変質作用をもたらした熱水は200℃程度かそれ以下の温度で、かつpHが中性～酸性の熱水であったと考えられる。

変質帯は、内側から外側に向かってアルナイト帯→カオリン帯→カオリン・モンモリロナイト帯→モンモリロナイト帯→ハロイサイト帯の順に累帯配列を示す。これは熱水の化学性が中心から外側に向かうに従い、酸性→中性および高温→低温に変化したためと考えられる。

すなわち、変質帯はE-W方向の伸びを示し、GTE-2の南を中心として北へ向かって高温型から低温型に変化している。また現在の温泉湧出地は、すべてアルナイト帯からモンモリロナイト帯に含まれており、これらの変質帯が現在の地熱活動と密接な関係にあることを示している。また今回の調査で確認されたアルナイト帯は、地熱活動による変質作用の中心がGTE-2の南方にあることを示唆するものとして注目される。

1.1.4 坑井地質および温度分布

サンカンベン地熱地域では、これまで地熱調査を目的として多数の坑井が掘削されている。その主なものは、地温分布調査を目的とした10m級の浅層ボーリング地温分布と構造調査を兼ねた100m級ボーリング（EGAT-1～15）および500m級（一部1,000m級）地熱調査井（GTE-1～GTE-8）等である。

ここでは500m級地熱調査井の地質状況および温度分布について述べる。

(1) 坑井地質

1) GTE-1 (Fig.1.1-8)

- ① 位置：地域南東部、東経99°14'12"、北緯：18°46'20"
- ② 深度：500m
- ③ 温度：80.4℃(深度462m)

本坑井の最高温度は深度462mにおける80.4℃であり、温度勾配は120℃/100mである。深度200m付近を境として、深部でやや地温勾配が高い。これは浅部が比較的割れ目に富み、冷たい地下水の浸透により温度が低くなっていると解釈される。しかし温度-深度曲線はほぼ直線的であり、伝導による熱伝達が支配的であることを示す。

- ④ 地質：Kiu Lom層上部の玄武岩類が主体をなす。灰緑色玄武岩溶岩と同質凝灰岩・凝灰角礫岩からなり後者が卓越する。

玄武岩溶岩は3層準に発達(深度94~124.5m、196~251m、378~450m)する。凝灰岩は細~中粒玄武岩質凝灰岩で、一部に凝灰角礫岩を挟有する。所々に流理構造や断層によって角礫化した破碎ゾーンが発達する。一部に方解石と石英脈が発達する。また全体に緑泥化作用が著しい。浅部(約150m以浅)で高角の割れ目が多いが、深部では割れ目の数が少なくかつ傾斜がゆるくなる。

本坑井では電気検層により、比抵抗分布と自然電位が測定された。比抵抗分布では、深度、岩相、温度と関係した規則性はほとんど認められない。比抵抗は深度80m以浅および約400m以深で、周辺に比べて若干高比抵抗を示す。

2) GTE-2 (Fig.1.1-9)

① 位置：Wat Pong HomとBan Pong Nokのほぼ中間で、地熱徴候地内に掘削された。

② 深度：500m

③ 温度

地熱徴候地の近くで掘削された調査井で、現在でも坑口から少量ではあるが温泉水が自然湧出している。

掘削終了直後に測定した坑内温度の分布をみると、深度300m付近で最も高く約106℃を示すが、それ以深ではむしろ温度が低下する。しかし、昭和60年2月の再測定結果によれば深度300m付近の温度は以前より低下し、温度分布の形としてはむしろ対流の様相を呈する。坑口の温度が高い(66℃)のは、温泉水が自噴するためである。掘削直後に比べ坑内温度がこのように低下したのは、300m付近で湧出した温泉水の水量が少ないため、地表浅部における冷却の影響が坑井内におよんだ結果とみなされる。

④ 地質：Kiu Lom層下部の堆積岩類であり、シルト岩、頁岩、石灰岩の互層からなる。石灰岩は深度195.1~221.0m、267.3~337.0mおよび430.8~483.5m間の3層準に発達する。全体に方解石脈、石英脈、黄鉄鉱々染が認められる。深度230m付近の炭質頁岩はぜい性を示し割れやすい。

⑤ 電気検層結果：一般に石灰岩は比抵抗が高く、泥質岩は低い傾向にある。自然電位は比抵抗と逆相関を示す。

3) GTE-3 (Fig.1.1-10)

① 位置：GTE-2の約2.5km東方で、Wat Nong Noi近傍

② 深度：

③ 温 度

温度記録は深度150m前後までしかないが、孔底温度は60℃とほぼ一定であり、地温勾配は他の坑井にくらべて非常に小さい。

④ 地 質：Kiu Lom 層上部の玄武岩類。大部分は玄武岩質凝灰岩で、淡緑～暗緑色の細粒も密な岩質で、割れ目に乏しい。一部に玄武岩溶岩・凝灰角礫岩・千枚岩質凝灰岩を挟有する。変質はあまり著しくなく、方解石脈がわずかに認められる程度である。

⑤ 電気検層結果：比抵抗は深度により大きく変化する。全般的には、浅部（深度約75m以浅）で比抵抗が高く、深度で低い傾向を示す。比抵抗分布と岩質・変質との明瞭な関連性は認められない。

自然電位は、深度によってほとんど変化せず低い値を示す。比抵抗分布とは逆相関の関係にあり、高比抵抗のピークと低電位のピークがほぼ一致する。

4) G T E - 4 (Fig. 1.1 - 11)

① 位 置：GTE-1の約1.4km北西の地点

② 深 度：500m

③ 温 度：深度440mで82℃

本坑井の温度分布も直線状に上昇しており、熱伝導型であることを示しているが、深度280m付近を境にして温度勾配が異なる。すなわち280m以浅では8℃/100m(1℃/12.5m)であるが、それ以深では18℃/100m(1℃/5.5m)を示し、その値はおおきくなる。この違いは上記深度を境にして、岩石の熱伝導率が異なる(上部で大、下部で小)ためと考えられる。すなわち上部は凝灰岩・安山岩溶岩からなるのに対し、下部は砂岩・頁岩互層から構成されているのに対応している。

④ 地 質：Kiu Lom 層中・下部・深度0～302.5m間は、安山岩質凝灰岩と玄武岩質安山岩(Kiu Lom 層中部)を主体として302.5～500m間は砂岩と頁岩の細互層(Kiu Lom 層下部)である。全体にせん断破壊をうけ、かなり割れ目が発達しているにもかかわらず、掘削時の逸泥は発生しなかった。このことは、本坑井周辺のせん断割れ目の透水性が、あまり大きくないことを示している。深度415.0mに断層角礫帯が認められる。変質は粘土化、緑泥石化とともに、方解石脈、石英脈も普遍的に認められる。

⑤ 電気検層結果：電気検層は140m付近まで実施された。比抵抗は、玄武岩質安山岩で高く、凝灰岩で低い傾向を示し、岩層の差を反映している。自然電位は全体的に値が低く、かつ変化に乏しいため、岩相・変質・フラクチャーなどの地質との対応は明瞭でない。

5) G T E - 5 (Fig. 1.1 - 12)

① 位 置：G T E - 2 の約 750 m 北東方の地点で、地熱徴候地に隣接する。

② 深 度：500m

③ 温 度：深度 500m で 96℃

本坑井の温度分布も典型的な熱伝導型であって、温度勾配は 12℃/100m (1℃/8.3m) と比較的大きい値を示す。

本坑井は深度 300m 付近で全量逸泥があり、それを境として上部で若干温度勾配が大きく下部で小さい。

④ 地 質：Kiu Lom 層下部の堆積岩類。深度 0 ~ 131.0m 間は、砂岩と頁岩の互層である。深度 131.0 ~ 240.5m 間は、チャート・頁岩・砂岩・安山岩質凝灰岩および凝灰角礫岩の細互層である。

本坑井は、深度 300m で全量逸泥に遭遇した。これは断層 (Ban Mae Khu Ha 断層) の破碎帯か、割れ目にとんだ地層 (チャート層) に起因すると考えられる。

⑤ 電気検層結果：比抵抗の深度による変化、高比抵抗の差が大きい。これは頁岩・砂岩・チャートのリズムミクな互層に起因している。

自然電位は、深度によって小さく波打っているがほとんど変化を示さない。

6) G T E - 6

① 位 置：G T E - 2 の南東 690m の地点

② 深 度：489m

③ 温 度：深度 485m で 118℃

それまでに掘削された調査井の中で唯一の蒸気、熱水を噴出した坑井であり、温度分布は噴出直後に坑口をしぼって測定した結果からえられたものである。すなわち真の地層温度分布を示すものではない。割れ目に到達した坑底の温度は 118℃、坑口では 103℃であるが、この間の温度低下は地表浅部の冷却の影響によるものとみなされる。

④ 地 質：全体に頁岩と砂岩の互層から構成されるが、上部 (深度 0 ~ 230m) では頁岩が卓越し、下部 (深度 230 ~ 489m) では砂岩が卓越する。上部と下部は岩相のみならず、変質や地層の傾斜においても違いが認められる。すなわち、上部は地層の傾斜が 70 ~ 80° と急傾斜でかつあまり変質していないのに対して、下部は地層の傾斜が 20 ~ 30° と緩くかつ石英脈や珪化などの変質作用が著しい。

以上の他 J I C A 調査井 (G T E - 7) および E G A T 調査井 (G T E - 8) については項を

改え記載する。

1.2 重力探査

1.2.1 概要

(1) 重力測定

調査に用いた重力計は La Coste & Romberg 社製 G-283 および G-366 である (表 1.2-1)。重力測定のための閉塞用基点 No.1000 は、EGAT CAMP から西方約 100m 離れた診療所宿舎入口のコンクリート床上に設定し、重力基準値として $S.V = 978,497,981 \text{ mgal}$ とした。

測点数は面積約 50 km^2 内に合計 230 点である。測点設定はタイ側によって実施された伏開測線とその周辺の道路や歩道を利用したが、これらの位置決定は $1/10,000$ 地形図あるいは簡易測量によった。

表 1.2-1 重力計仕様

名称形式	La Coste & Romberg, INC. Model G Geodetic Gravity Meter	
型	283	366
観測範囲	0~7,386.54 mgal	0~7,404.56 mgal
恒温槽温度	51.7°C	49.0°C
Reading Line	2.80	2.90
購入年月	1971年9月(オーバーホール1981年6月)	1974年9月
本体寸法	14×15×20 (cm)	17×15×22 (cm)
本体重量	8.6 kg	9.1 kg

(2) 水準測量

水準測量は EGAT 水準測量班によって全測点につき実施された。標高の基準は EGAT CAMP 内に設定された基準点 BMCS-18 における 392.418m を用いた。

(3) 岩石試料の採取

重力値の地形補正および解析のために、調査地域に分布する岩石試料計 84 個を採取し、密度測定を実施した。

(4) 重力値の補正

重力測定値に対し、潮汐補正、ドリフト補正、地形補正、高度補正、ならびに緯度補正を行った (Fig. 1.2-1)

(5) データのコンパイル

タイ側機関 (DMR) により実施された重力探査の結果と、今回の重力探査の結果とを編集した。両者の間では重力基点、ならびに水準点が異っている。そこで同一地点と考えられる両測点データの対比からコンパイル係数を求めてタイ側データを補正し両者を統合した。重力図を作成する段階で今回の測点に近いものおよび調査地域からはずれる測点および等重力線が著しくゆがむ個所の測点については除去した。最終的なコンパイル点数は87点である。

(6) 密度測定

地形補正のための補正密度は、①岩石試料密度測定 (Fig. 1.2-2) (表. 1.2-2)、②G-H関係 (Fig. 1.2-3)、③地形図と重力図との相関度、の3種類の方法によって検討した。その結果にもとづき、本地域の補正密度を $\rho = 2.6 \text{ g/cm}^3$ と定めた。

(7) 等重力線図の作成

作成方法は次のように行った。測定データならびにコンパイル点の各点について、補正済重力値を計算する。ついで $150 \text{ m} \times 150 \text{ m}$ の格子を設定し、各格子点上の重力値は各格子点から一定距離内に存在する重力測点からの距離の逆自乗加重による平均値計算によって求める。格子点重力値の等しい値を結び等重力線図を作成する。

(8) フィルター処理ならびに断面解析

等重力線図には種々の要素による波長が含まれるので、各種のフィルター処理および処理図を作成した。これらは3次傾向面解析による3次残差図、スペクトル解析 (Fig. 1.2-4) による深部成分解析図および浅部成分解析図である。

断面解析はTalwaniの方法によって2次元断面解析を行った。解析断面は (A-A')、(B-B')、(C-C') の3本について行った。

1.2.2 調査結果

(1) 解析図

解析にもとづき次の図面を作成した。

等重力線図 ($\rho = 2.6 \text{ g/cm}^3$) (Fig. 1.2-5)

3次傾向面図

3次残差図 (Fig. 1.2-6)

深部成分解析図 (1,200m)

浅部成分解析図 (900m)

断面解析図 (A-A') (Fig. 1.2-7)

断面解析図 (B-B') (Fig. 1.2-8)

断面解析図 (C-C') (Fig. 1.2-9)

地下構造平面図 (Fig. 1.2-10)

(2) 密度測定結果

岩石試料の密度測定結果により、調査地域の岩石の密度は次のように区分できる。

① 高密度岩石

玄武岩質凝灰岩	}	2.93g/cm ³	} Kiu Lom 層上部
凝灰角礫岩			
火山礫凝灰岩			
玄武岩	.....	2.94 "	

② 中密度岩石

石灰岩	2.72 "	} Kiu Lom 層中～下部 Mae Tha 層 その他
砂岩	.....	2.58 "
花崗岩	.....	2.57 "
石英脈	.....	2.62 "

③ 低密度岩石

頁岩	2.56 "	} Kiu Lom 層中～下部
砂岩	.....	2.54 "
チャート	.....	2.46 "

(3) 重力分布の概要

等重力線図 ($\rho=2.6\text{g/cm}^3$) によれば、等値線の最高は - 2.25mgal、最低は -12.25mgal である。

等値線の配列は、大局的にみて NS 性を示す。とくに調査地の東端部、中央部および西端部の 3 地域で、NS 性の等値線が密に配列している。これらの地域には、Huai Mae Koen 断層、Huai Mae Khu Ha 断層、Ban Mae Khu Ha 断層、Huai Pong 断層等の断層が地質調査で推定されている。

Ban Mae Khu Ha 付近から Ban On Klang 付近にかけての一带は東端部と中央部にみられる等値線の密なゾーンに挟まれた地域で、等値線は粗く重力変化の少ない高重力域となっている。この地域は Kiu Lpm 層上部に属する玄武岩、玄武岩質凝灰岩、凝灰角礫

岩、火山礫凝灰岩等が分布するが、これらの地層の中での密度変化は少ないことが考えられる。

中央部にみられる等値線の密な部分の配列は、南北に長く連続している。ここには上述の Huai Mae Khu Ha 断層が位置している。この断層の西側に分布する Kiu Lom 層中部の石灰岩は、密な等値線群の西端に位置し、石灰岩層の走向と等値線の傾向とはほぼ一致している。

Ban Nong Boyen 付近から Ban Pong Nok 付近にかけての一带は、中央部と西端部にみられる等値線の密なゾーンに挟まれた地帯で、等値線は粗く、重力変化の少ない低重力域となっている。この地域は Kiu Lom 層中～下部の頁岩、チャートおよび砂岩が分布している。

地熱微候地はこの大きな NS 性の低重力域中にあるが、微候地の北側の等値線は、WNW - ESE 性を示す

この地域の西側は、Huai Pong 断層によって Mae Tha 層の砂岩と接しているが、この断層付近から西方へ重力値が増加し、やや密な等値線の配列がみられる。

(4) 重力傾度

地域の重力傾度を表現する方法として、3次曲面による近似を行った。

調査地域東部の Ban On Klang 付近を最高重力地域として、Ban Nong Hoi 方面に北方へ張り出す高重力帯がある。西部では Huai Pong 川付近を中心とした NS 性の長軸を示す低重力帯が特徴的である。この高および低重力帯の中間域、および東端域と北西端域には、南北方向に等重力線が密に配列している。西部の低重力帯は等重力線図に比べると、その位置がより西側に分布している。この理由として、この低重力帯の東側に比べ西側の等重力線の傾度が緩いことから数値処理上、低重力帯が西側に分布するように表現されたものと考えられる。

(5) 3次残差による重力分布

3次残差図によると、等値線の最高値は + 2.0mgal、最低値は - 2.0mgal である。重力分布はおおよそ 3km 程度の規模のユニットに分けられる。

高重力異は、Ban Mae Khu Ha 断層以東の玄武岩類が分布する地域において、Huai Mae Khu Ha 付近の NW-SE 性の異常、EGAT CAMP 付近から南方および Ban Mae Pa Khang 付近に NS 性の異常が存在する。

Huai Pong 断層の北方延長部の Ban Kat Khi Lek 付近および Mae Tha 層の砂岩が

分布する Doi Luang 東側には NW-SE 性の高重力異常が存在する。

低重力異常は、Ban Mae Khu Ha 付近、その北西延長部の Ban Pang Riap Riua 付近および Huai Ang 川付近に存在するほか、Wat Hua Fai 付近にも分布している。

(6) 重力分布断面

断面解析図において、等重力線断面、フィルター断面、地下構造断面、地質構造断面の各断面を総括した。

等重力線断面図は、補正密度 $\rho = 2.6 \text{ g/cm}^3$ の等重力線（ブーゲー異常）断面に、2次元シミュレーション結果をプロットした。

フィルター断面図は、3次残差、スペクトル解析（深部成分）の結果を表現した。

地下構造解析断面図は、シミュレーションの結果得られた構造モデルを表現した。

地下構造断面図は、上記の解析結果に地表地質情報を加味し、地質構造を推定した。

シミュレーションの結果得られた密度構造は、各断面に共通して高密度岩体 ($\rho = 2.80 \text{ g/cm}^3$)、低密度岩体 ($\rho = 2.50 \text{ g/cm}^3$, 2.60 g/cm^3) および中密度岩体 ($\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$) に区分される。

断面中央から東側の高重力異常は高密度岩体 ($\rho = 2.80 \text{ g/cm}^3$) によって説明され、これは断面の東西両側の低密度岩体 ($\rho = 2.60 \text{ g/cm}^3$) とほぼ垂直的に接する形状が示される。

各重力断面の西端部で重力値が増加しているが、断面計算を行うには、情報が不足しているため、密度モデルは $\rho = 2.60 \text{ g/cm}^3$ で一様に設定した。

断面西部の低重力異常は低密度岩体 ($\rho = 2.60 \text{ g/cm}^3$ および $\rho = 2.49 \text{ g/cm}^3$) の存在によって説明される。断面中央部の重力勾配の急斜部では、その勾配によって解析された中密度岩体 ($\rho = 2.70 \sim 2.64 \text{ g/cm}^3$) の形状が各断面で異なる。A-A'断面と B-B'断面では、重力勾配が緩いことから中密度岩体容積が大きいものに対して、C-C'断面では最も重力勾配が急で中密度岩体の容積が小さいと解析される。

密度岩体と地層との対応は次の表 1.2-3 ように考えられる。

表 1.2-3 密度岩体と地層との対応

断面 密度岩体	A-A'	B-B'	C-C'
$\rho = 2.8$	Kiu Lom 層上部	Kiu Lom 層上部	Kiu Lom 層上部
$\rho = 2.7$	Kiu Lom 層中～下部		
$\rho = 2.66$		Kiu Lom 層中～下部	
$\rho = 2.6$ (東側)			Kiu Lom 層下部(砂岩)
$\rho = 2.6$ (西側)	Kiu Lom 層中～下部	Kiu Lom 層中～下部	Kiu Lom 層中～下部
	Mae Tha 層(砂岩)	Mae Tha 層(砂岩)	Mae Tha 層(砂岩)
$\rho = 2.49$	Kiu Lom 層下部 (チャート)	Kiu Lom 層下部 (チャート)	
$\rho = 2.64$			Kiu Lom 層下部 (チャート)

重力断面図は、まず地質断面と密度測定結果から初期モデルを作り、シミュレーション計算をくりかえし行い、密度モデルの形状および密度を変化させて最適値を求めたものである。最終的な重力断面は、地質断面と調和的である。

1.2.3 重力分布と地下構造

本地域の地下構造は、重力分布からみて大規模な断層あるいは構造線を境界として、次の [I]、[II]、[III] および [IV] の 4 ブロックに分けられる。

[I] ブロック；Huai Mae Koen 断層の東部地域

[II] ブロック；Huai Mae Koen 断層から Kiu Lom 層中部の石灰岩層までの地域

[III] ブロック；石灰岩層から Huai Pong 断層までの地域

[IV] ブロック；Huai Pong 断層および Doi Luang 断層の西部地域

[I] ブロックには、Kiu Lom 層の頁岩と Mae Tha 層の砂岩が広く分布する。

本地域の西側に分布する玄武岩類との密度的差異によって、本ブロックは低重力域として表現されている。Huai Mae Koen 断層付近にみられる等重力線の密な配列は、この断層が N S 性の密度境界になっていることを示す。断面解析の結果から、Huai Mae Koen 断層はほぼ垂直であると考えられる。

[II] ブロックは、Kiu Lom 層上部の玄武岩類が分布している。等重力線の間隔がゆるいことから、玄武岩類の中での密度変化は小さいと考えられる。また断面解析の結果から、

本層の層厚が厚いと推定される。本岩の密度は平均 $\rho = 2.93\text{g/cm}^3$ と地域内で最も大きく、NS方向に広く分布する高重力域を形成している。

本地域内にはHuai Wai 断層、Huai Mae Khu Ha 断層やこれと斜交する断層が存在するが、Huai Mae Khu Ha 断層の南部を除き、これらの断層の影響は重力分布に表れていない。

[Ⅲ]ブロックとの密度的境界は、中央から南部ではHuai Mae Khu Ha 断層であり、中央から北部はHuai Mae Khu Ha 断層に斜交する断層である。この斜交する断層は、地熱調査井GTE-3付近からBan Pan Rua 付近へNW-SE方向にのびている。Huai Mae Ha 断層は垂直状であり、その斜交する断層は東へ傾斜することが断面解析から推定される。

[Ⅲ]ブロックは[Ⅱ]ブロックの西側に位置しDoi Luang 断層付近まで分布し、低重力域で特徴づけられる。[Ⅲ]ブロックは、さらにBan Mae Khu Ha断層およびHuai Pong 断層によって、東から西に[Ⅲ-1]、[Ⅲ-2]および[Ⅲ-3]に細分される。[Ⅲ-1]地域では[Ⅱ]ブロックと同じく玄武岩類が地表に分布するが、重力分布は西に向かって小さくなる。断面解析の結果、[Ⅲ-1]地域の密度は $\rho = 2.66\sim 2.70\text{g/cm}^3$ と東側の[Ⅱ]ブロックの $\rho = 2.80\text{g/cm}^3$ より小さい値となっている。

Ban Mae Khu Ha 断層の西側の[Ⅲ-2]地域に、砂岩・頁岩・チャート等の堆積岩類が分布する。これらの岩石は調査地域で最も低密度であり、[Ⅱ]ブロックおよび[Ⅳ]に分布する地層との密度差から低重力異常が表現されている。

3次残差図によるとこの[Ⅲ]ブロックの低重力帯中にさらに低重力域が表現されており、この付近にWNW-ESE性の断層が考えられる。この低重力域は、GTE-2付近から[Ⅲ-1]地域の玄武岩類の分布地域までの約 $1.5\text{km} \times 2\text{km}$ の範囲である。

[Ⅲ-3]地域は、Huai Ang 上流の地域でHuai Pong 断層とDoi Luang 断層にはさまれた地域である。この地域はHuai Pong 断層よりも、Doi Luang 断層がより明瞭な密度境界をなしている。[Ⅲ-3]地域には、Mae Tha 層の砂岩が分布する。

[Ⅳ]ブロックは、北部でHuai Pong 断層および南部でDoi Luang 断層により[Ⅲ]ブロックと接している。[Ⅳ]ブロックのMae Tha 層の砂岩はKiu Lom 層の堆積岩類よりも密度が若干大きいため、[Ⅲ]ブロックに対して高重力域を形成すると考えられる。南部のDoi Luang 断層は、密度境界をなし、その西側の[Ⅳ]ブロックは[Ⅲ-3]ブロックに対して高重力域となっている。この理由としてステップ状の断層構造の存在がこの付近に考えられる。

1.3 磁気探査

1.3.1 概 要

(1) 磁気測定

調査に用いた磁力計は Geometrics 社製の携帯型プロトン磁力計 G-806 および G-846 2 台、記録計 1 台および帯磁率計 1 台である (表. 1.3-1)

表 1.3-1 磁力計仕様

型 式	製 作 所	精 度
プロトン磁力計 Model G-806	GEOMETRICS	感 度 1 γ
プロトン磁力計 Model G-846	GEOMETRICS	感 度 1 γ
アナログ記録計 Model EPR-100A	東 亜 電 波 機	感 度 1 mv / 7.5 cm
帯磁率計 Model 3101	BISON INSTRUMENTS	$1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-1}$ CGS/CC

(2) 磁気基点と日変化測定

地磁気の日変化補正を行うための、EGAT CAMPの休憩小屋を磁気基点と定め、日変化観測を行った。調査期間中における地磁気日変化の振幅はおよそ 50 γ の程度であり、著しい磁気変化を起こす磁気嵐現象は認められなかった。測定値の 1 例を Fig. 1.3-1 に示す。基点における磁気基準値は 43,556 γ と定めた。

(3) 測点および測定方法

調査中央部では EGAT によって伐開された測線を利用し 100~200m 間隔で、調査地周辺では道路を利用して 200~500m 間隔で測定を行った。測点位置の決定は伐開測線上では杭により、道路上では間縄とポケットコンパスによって行い、1/10,000 地形図上に位置を記入した。調査地は人工ノイズのきわめて少ない地域であったが、わずかな磁気変動が認められたので、1 測点につき最低 5 回の読み取りを行い平均して求めた。

(4) 帯磁率測定

現地において In situ 測定を 9 箇所行ったが (表 1.3-2)、風化の進んでいない露頭個所が少なかったため、帯磁率測定はボーリングコアを含む岩石試料の 84 個について実施した (Fig. 1.3-2) (表. 1.3-3)。

(5) 日変化補正

磁気基点における全磁力値を 43,556 γ と定めたので、測点に於ける測定値 R_{st} と、同時刻における基点の重力値 R_{Bt} により、日変化補正值 ΔR_t 、日変化補正済値 R_s を次式に

より求めた (Fig. 1.3-3)。

$$\Delta R t = 43,556 - R B t$$

$$R s = R s t + \Delta R t$$

$$= R s t + (43,556 - R B t)$$

表 1.3-2 In situ 測定結果

測定番号	岩種	測定値
S-1	石灰岩	2×10^{-6}
S-4 68	砂岩	Tr
S-5-1 50	チャート	2.5×10^{-6}
S-6 14	凝灰角礫岩	Tr
S-7-1 26	安山岩	3.2×10^{-6}
S-7-2 4	凝灰岩	1.3×10^{-6}
S-7-3 15	凝灰岩	2.4×10^{-6}
S-9	チャート	1.3×10^{-6}
G-24 47	砂岩, チャート	5×10^{-6}

(6) 磁気平面図の作成

日変化補正済値および測点位置を電算機に入力し、全磁力図、全磁力変化図および Upward 図を作成した。

(7) スペクトル解析

全磁力図および全磁力変化図には、種々の要素による波長が含まれている。この波長の大小によって、浅部構造と深部構造に区分する方法がスペクトル解析である (Fig. 1.3-4)。本調査地域内の磁気構造は、平均深度 760m の Regional 成分 (HR) と、平均深度 65m の Near Surface 成分 (HN) に大別される。この結果をもとに深部成分解析図と、浅部成分解析図を作成した。

(8) モデル計算

磁性体による応答は、調査地域の磁気 3 要素 (全磁力、偏角、伏角) によって様々に変化するので、調査地域ごとにその特性を明らかにしておく必要がある。そこで磁性体の形状として最も応用性のあるプリズムモデルについて 3 次元計算を、またダイク状モデルと断層状モデルについて磁北からの角度と傾斜を変化させて 2 次元モデル計算を行った。こ

の結果を (Fig. 1.3-5, 6, 7) に示す。

(9) 断面解析

磁気平面図に示した3本の断面線 (A-A'、B-B'、C-C') について、2次元の断面解析を実施した。地質情報、岩石の帯磁率および多数のモデル計算等を考慮して、複数の磁性体からなる地下構造モデルを作成する。電子計算機は、与えられた地下構造モデルについて地表での磁気応答を計算する。計算結果と磁気断面値が一致しない個所につき、地下構造モデルの入力値 (位置、形状または帯磁率) を自動的に変化させ、新しい地下構造モデルについて磁気分布を計算し、より近似した方の地下構造モデルを出力する。通常このような操作を1回だけ行ったのでは、高い一致性を得ることは難しい。従って再度解析者が計算結果を加味し、新しく地下構造モデルを作り直し、計算機に入力し直す。以上の繰り返しを行うことによって、磁気断面値と一致性の高い計算結果を示すような地下構造モデルを得ることができる (Fig. 1.3-8)。

1.3.2 調査結果

(1) 解析図

解析結果にもとづいて、次の図面を作成した。

全磁力図 (Fig. 1.3-9)

全磁力変化図 (Fig. 1.3-10)

Upward 図

深部成分解析図 (Fig. 1.3-11)

浅部成分解析図

断面解析図 (A-A')

断面解析図 (B-B')

断面解析図 (C-C')

(Fig. 1.3-12)

地下構造図 (Fig. 1.3-13)

(2) 帯磁率測定結果

帯磁率測定結果により、以下の事項が明らかになった。

- 1) 玄武岩類の帯磁率は、 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ cgsemu 程度まで幅広く分布する。
- 2) 全般に帯磁率のバラツキが大きく、同一岩積でも帯磁率の変化が大きい。
- 3) 頁岩、砂岩、石灰岩等の堆積岩類の帯磁率は、ほとんど 10^{-6} cgsemu 以下の小さい値

を示す。

4) 花崗岩の帯磁率は、 10^{-5} cgsemu 程度と低い。

5) 本調査域の岩石で高い帯磁率を示す岩石は、Kiu Lom 層上部の玄武岩類である。

(3) 磁気分布の概要

全磁力図と全磁力変化図における等値線の形状はほとんど同一であるので、全磁力変化図について説明する。

全磁力図では最高 $+112.5 (+43,536) r$ 、最低 $-184.6 (+43,536) r$ の磁気変化を示すのに対し、全磁力変化図の範囲は零を基準として最高 $+113 (+43,536) r$ 、最低 $-175 (+43,536) r$ である。

正および負の磁気異常は小さく閉じた等値線として表現され、全域にわたって広く分布している。閉じた等値線の占める領域は小さく、長径およそ $200 - 800m$ 程度である。閉じた等値線は玄武岩類の分布域に多くみられるが、必ずしも玄武岩類の分布に一致するものではなく、むしろ Ban Mae Khu Ha 断層および Huai Mae Khu Ha 断層の周辺またはそれらに囲まれた範囲に多く分布している。また閉じた等値線は Huai Wai 断層沿いにも分布がみられる。負の異常のうち面積のより大きなものは上記の断層沿いに、あるいは上記の断層と斜交する断層付近に分布する。一方頁岩、チャート、砂岩が分布する地域では、磁気異常はほとんどみられない。

負異常については、 $-10r$ の等値線で囲まれている長径約 $1,000m$ 程度の異常が EGAT CAMP 西方約 $800m$ 、地熱調査井 GTE-4 の北方約 $700m$ 付近および東部の Huai Ko Pong 川上流にもおよそ長径 $1,500m$ 程度の規模の負異常が分布する。

(4) 磁気深部成分の概要

深部成分解析図は全磁力変化図と対比して、次のような特徴を示す。

磁気異常の変化は、最大 $47r$ 、最小 $-55r$ となっている。閉じた等磁力線が示す磁気異常の個々の領域はより広いのに対して、磁気異常の数は減少している。

正異常および負異常の位置は、全磁力変化図の正負異常の位置とほぼ一致する。Huai Mae Khu Ha 断層、Ban Mae Khu Ha 断層や Huai Wai 断層の周辺部のほか Huai Mae Koen 断層沿いにも異常の分布がみられる。

長径約 $1,000m$ 程度の負異常が EGAT CAMP 西方約 $800m$ 、地熱調査井 CTE-4 の北方約 $700m$ 付近に存在する。

(5) 断面解析

各断面には次の全磁力変化図、フィルター断面図および地下構造断面図を表示した。

フィルター断面図は、スペクトル解析結果（深部成分および浅部成分）および Upward Continuation の各断面を表現している。

地下構造断面図は、シミュレーションの結果得られた構造モデルを表現した。

解析された磁性体は、いずれも Kiu Lom 層中の地下浅部から深部にダイク状に存在している。

計算された帯磁率は $3 \sim 37 \times 10^{-4}$ cgsemu であり、Kiu Lom 層の玄武岩類が示す帯磁率の範囲に入っている。

1.3.3 磁気分布と地下構造

磁気探査の解析結果から、本地域の地下構造は次の3ブロックに分けられる。

[Ⅰ]ブロック；Huai Mae Khu Ha 断層およびHuai Wai 断層の東部地域

[Ⅱ]ブロック；Huai Mae Khu Ha 断層およびHuai Wai 断層からBau Mae Khu Ha 断層までの地域

[Ⅲ]ブロック；Ban Mae Khu Ha 断層の西部地域

[Ⅰ]ブロックには、Kiu Lom 層が広く分布する。

本ブロックで解析された磁性体の個数は比較的少なく、分布は不規則である。

[Ⅱ]ブロックは、Kiu Lom 層中部の石灰岩層を境にしてその東側に Kiu Lom 層上部が、西側に Kiu Lom 層中～下部が分布する。Huai Wai 断層、Huai Mae Khu Ha 断層および Ban Mae Khu Ha 断層などの NS 性の断層とこれに斜交する NW-SE 性の断層が存在する。解析された磁性体はきわめて多く、そのほとんどは上記の断層付近に集中している。これらの断層に沿う磁性体のほかに、Ban Mae Khu Ha 付近に NS 方向に配列する磁性体がある。

[Ⅲ]ブロックは、Kiu Lom 層中～下部の堆積岩類が分布する地域である。岩石の帯磁率測定結果によると堆積岩類の帯磁率は小さく、本ブロックには特異な磁性体の存在は認められない。調査地域東部の Huai Mae Koen 断層以东においても、状況は同じである。

上述のように本地域の磁性体の分布は Kiu Lom 層中部にあり、かつほとんど Huai Wai 断層の南部、Huai Mae Khu Ha 断層および Ban Mae Khu Ha 断層に沿って存在していることが判明した。断層との関係が強いことから、Ban Mae Kh Ha 付近等の磁性体が存在

する付近に、潜在断層が存在する可能性も考えられる。帯磁率測定結果によると、Kiu Lom 層上部が他層準に比べて高い磁性を示すが、その中でのはらつきも大きい。しかし、磁性体の分布は、Kiu Lom 層上部の分布、形状との関係は認められず、むしろ断層との位置的関係が最も強いと考えられる。磁性体としては、地層中の強磁性鉱物の濃集、玄武岩中のとくに磁性の強い岩相、または高磁性貫入岩体が考えられる。しかし前二者が正しいとすれば、磁性体の分布は地層の走向や分布に一致すると思われる。しかし磁性体の分布は断層と位置的に関係しているので、磁性体の存在は断層沿いに火成岩体が貫入した可能性、または断層を境界として地層が変化していることを示すと考えられる。

1.4 弾性波探査

1.4.1 概要

本調査は反射法により地層面、断層などの地質構造を解明し、破碎帯などの地熱流体の賦存を規制する構造を推定することを目的として行われた。

弾性波探査は、地下浅所で人工地震を起しその震源より発生した弾性波を利用して、地下構造を推定する探査法である。反射法弾性波探査は、地下の弾性的性質（反射係数）の異なる地層境界より反射する反射波を用いて調査する調査法である。

一般に地熱地帯のような複雑な地質構造の地域では、微弱な反射波となることが予想される。これに対処するため本探査では、共通反射点、水平方向6重合法を採用した。

本探査における測線数は5測線（A、B、C、D、Eの各測線）、総測線延長は14.225m、発破孔数は315孔である。

1.4.2 現地調査

(1) 測線設定

反射法による弾性波探査を行うにあたりA、B、C、DおよびEの計5測線を設定した。

これらの測線は、有望地域と考えられるHuai Pong断層沿いの地域を主たる対象として設定した。その内容・規模はFig1.4-1および表1.4-1のとおりである。

表 1.4-1 測線の仕様

測線名	測線長 (m)	展開数	測 点		爆 発 点		測線方向
			数	間隔 (m)	数	間隔 (m)	
A 測線	5,475	99	220	25	105	50	北 西
B 測線	2,025	30	82	25	36	50	北 東
C 測線	2,025	30	82	25	36	50	北 東
D 測線	2,025	30	82	25	36	50	北 東
E 測線	2,675	43	108	25	49	50	北 東
計	14,225	232	574	-	262	-	

A 測線は、今回の調査地域の北西山地より数条の推定断層を横断し、南東方面の Ban Mai 部落にいたる約 6.5km の測線である。

B～D 測線は、A 測線にはほぼ直交する、NE-SW 方向のそれぞれ約 2 km の測線であり、調査地域の西方山地の山麓より東方の平地部に向かって設定した。

E 測線は、調査地域の最南部に設けられた 2.7km の測線で、全般に低標高の丘陵地形上に設定されている。

(2) 発破孔掘削

可搬式ロータリー試錐機 6～10 台を用いて深度 10m まで掘削し、保孔のために $\phi 76\text{mm}$ の塩ビ管を挿入して仕上げた。

(3) 発破および観測

発破作業は測線上に掘削された発破孔の孔底に 10.0～12.5kg の爆薬を充填し、水充填発破を行った。

観測作業は、米国 SIE 社製の磁気テープ録音式 24 成分地震探鉱装置 (PT100+MR20R-6B) および同 ETL 社製受振器 (EV-15 型、固有周波数 20 CPS) 36 グループを使用して測定した。受振器配置は 6 個の群設置 (間隔 2 m、測線方向の直線配列) とし、さらに反射波の S-N 比 (信号対雑音比) の向上および構造解像性の増大を計るため主として終端発破による水平 6 重合法を実施した (Fig. 1.4-2.3)

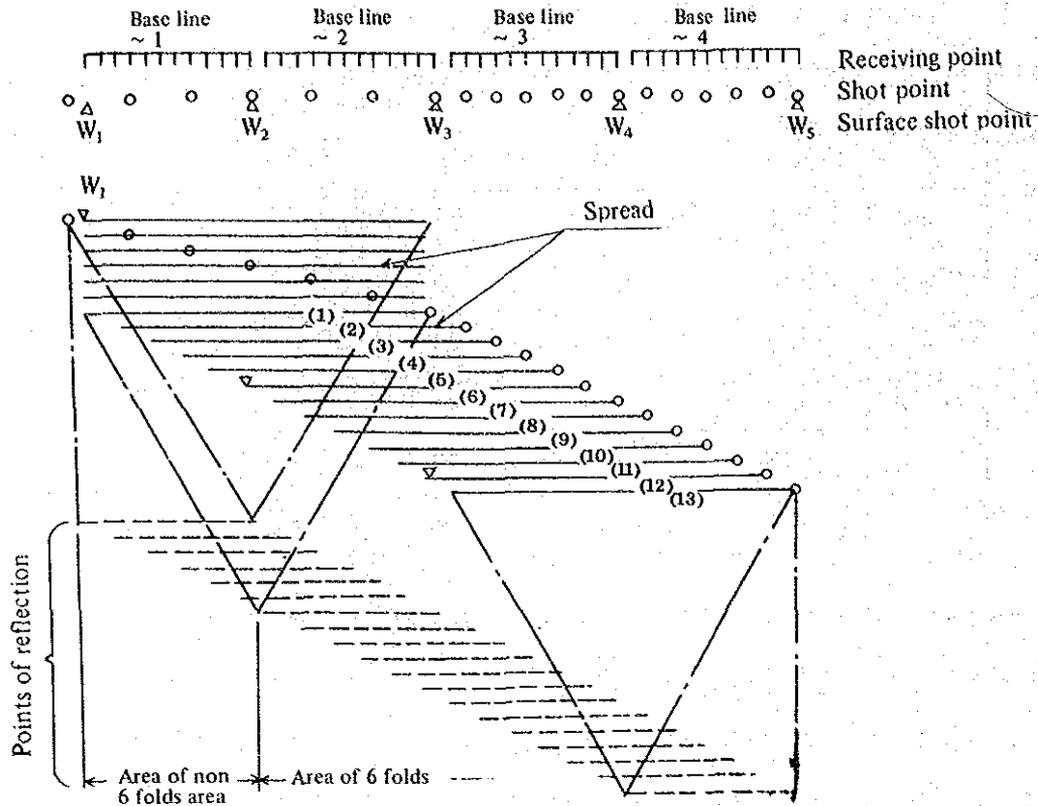


Fig. 1.4-3 Process of Measurement by Common Reflection Point Horizontal Stack Method (6 fold)

1.4.3 解析方法

(1) 解析方法

1) 屈折法解析

屈折法により静補正計算を実施し、解析基準面（今回は海拔300m）までの表層（風化層）補正と高度補正を行った。補正量は2層構造計算式より求めた。

また静補正用の屈折法解析とは別に、浅層速度層の分布を把握するために初動走時曲線を用いた屈折法3層構造計算も行った。

2) 反射法による深部構造の解析

水平重合処理は、1つの反射点について震中距離の異なるいくつかの記録から、距離の相異なる反射走時の違いを補正して1つの記録に重合し、反射波を強調しようとするものである。すなわち、この方法によると、不規則な雑音はシグナルとは逆に時間的ズレを持つため、各点の重合にさいし互いに干渉して減衰することとなり、結果的に反射波のS-N比が向上されることとなる。

また、こうして得られた重合記録に対して周波数分布解析、S-N比分布解析、回折

源分布解析なども実施し、地質構造解釈上の資料とした(表 1.4-2)。

表 1.4-2 波形解析の概要

種 別	成 果 物	結果の利用範囲	方 法
波 形 解 析 トレース型式 (L, H群)	周波数-時間曲線 振 巾-時間曲線 周波数頻度曲線 振巾頻度曲線 振 巾-周波数曲線	波形特性の把握	電算機による数 値解析
	フーリエ解析図 またはパワー解析図	波形特性の把握	同 上
波 形 解 析 断 面 形 式 (各測線)	周波数分布図 S-N比分布図	地熱源, 変質部判定	同 上
側面反射解析 断 面 型 式 (各測線)	側面反射解析図 側面反射分布総括図	浅部における地層・ 岩層境界断層・構造 線の判定	目視による読取 法
回折源解析 断 面 型 式 (各測線)	回折源分布総括図	深部における地層・ 岩層境界断層・構造 線の判定	同 上

(2) 追加解析方法

弾性波探査の既取得データをもとに以下の追加解析を実施し各処理断面を測線 A、B、Cについて作成した。

1) 周波数解析断面図

周波数解析断面図 (Instantaneous Frequency 断面図) は実際の反射波データをヒルベルト変換 (Hilbert Transform) し、これらを実部 (R(t)) と虚部 (I(t)) に分解して求め両者の位相変化率 ($W(t) = -\frac{d\theta(t)}{dt}$) をカラー表示した (Fig. 1.4-4, 5, 6)。

なお、図中では暖色～白色に至るほど低周波数帯が卓越している事を示し、寒色系に至るほど高周波数帯が卓越している事を示している。

2) 反射波振幅断面図

反射波振幅断面図 (Real Trace Amplitude 断面図) はウェーブレット処理後の各反射波の振幅値 (Rm) をその強弱によって分類し、これらをカラー表示した (Fig. 1.4-7, 8, 9)。

(3) 弾性波探査結果の見直し解析方法

前回行った弾性波探査解析は各処理断面と地質層準を直接対応づけることに主眼をおいた。しかし、弾性波探査（反射法）は本来成層構造を基本として組み立てられており、CTE-7 掘削によって明らかになった本調査域の複雑な地質環境下においてその処理断面をそのまま地質解釈に適用することには少なからず無理があったと考えられた。

従って、以上の地質的環境を考慮した弾性波探査結果の見直しが必要と考えられ、とくに断裂系の抽出に力点を置いた再解釈を行った。本作業は測線 A、B、C についてのみ実施し、通常の処理断面（時間断面図、深度断面図）からの反射面、縦方向の不連続の抽出を主体とした。

なお、上記作業中においては追加解析で作成した各物性解析断面図も参考にし、反射面、縦方向の不連続の品質判定や断裂系の抽出を行う上での 1 つの根拠とした。

各作業の概要を以下に示す。

1) 反射面の抽出

各測線の処理断面図から明瞭な連続した反射面を抽出した。断面図は基本的に時間断面図、深度断面図を使用し反射波振幅断面図を参考とした。

マイグレーション後の時間断面図、深度断面図とマイグレーション前のものについての比較、検討も行ったが、マイグレーション前の処理断面図の方がむしろ良質であり、解釈によりふさわしいものと判断しこれを使用した。

しかし、処理断面中には反射波だけでなく多くの多重反射波、回折波が存在しており、これらと実際の地質構造を直接結びつけることには無理があるものと考えられた。そこで、抽出した反射波をそれぞれの明瞭度や連続性に従って階級分けを行い表示した。反射波の抽出・階級分けは時間断面図をもとに行い反射波振幅断面図も参考にした。

最終的な表示は縦軸を深度軸とし、時間断面図上からの反射波と深度断面図上からのものを対応させることによって深度軸の反射波の階級分け表示を行った。

図上に高い階級で表示した反射面は地層の境界や岩相の物性的なコントラストと対応している可能性が高いと考えられるが、階級の低いものは回折波、重複反射波の可能性もある。しかし多数の反射波の階級分け表示をすることで他の調査結果との比較が可能になり、解釈の精度が向上するものと考えられる。

2) 反射面の縦方向の不連続

調査測線を断層破砕帯が横切る場合、反射面の不連続となってそのまま現われることが

多い。

しかし、処理断面図中の反射波の縦方向の不連続は複雑な地質構造による処理上の問題や多重反射波、回折波の影響による可能性も多く、これらと実際の断層破砕帯を直接結びつけることは危険であると考えられた。

そこで抽出した反射波の不連続についてもそれぞれの明瞭度に従って階級分け表示を行った。

反射面の縦方向の不連続抽出と階級分けは時間断面図をもとに行い反射波振幅断面図、周波数解析断面図を参考にした。

最終的な表示は縦軸を深度軸とし、反射面と同様の手順で深度軸のものの階級分け表示を行った。

高い階級で表示されているこれらの不連続は断層、破砕帯と対応している可能性が高いが、階級の低いものは速度解析等の処理上の問題や回折波、重複反射波の影響によるものの可能性もある。しかし反射波の場合と同様に可能性のあるものすべてを階級分け表示することで、他調査結果との比較が可能となり地質的な解釈の精度が向上するものと考えられる。

3) 低周波数卓越帯域の抽出

断層、破砕帯等の内部摩擦の大きな岩体を反射波が通過する場合、その周波数は低周波数が卓越する傾向となる。

ここでは、これらの傾向に注目し周波数解析断面図より低周波数卓越帯を抽出して、他の処理断面図や他調査結果との比較を行った。ただし、ここで言うところの周波数値 (Instantaneous Frequency) は反射波の位相値 ($\theta(t)$) の変化率 ($W(t) = -\frac{d\theta(t)}{dt}$) であり、他の地質条件にも影響される。従って、抽出した低周波数卓越帯と断層、破砕帯とを直接結びつけることはできないが、他の処理断面図や他調査結果との比較により、断層、破砕帯位置の輪郭づけが可能になるものと思われる。

1.4.4 判明した地下構造

第2次調査後の解析においては、深度計算、重合処理、波形解析などの手法で時間断面図や深度断面図を作成し、それに地質的解釈を施した。しかし、弾性波探査(反射法)は本来成層構造を前提としたものであり、本地域のように複雑な地質構造の場所において、その処理断面をそのまま地質解釈に適用することにはかなり無理があると思われた。そこで、解析

結果においては、追加解析および見直し解析から得られた反射面、縦方向の不連続周波数解析結果などを中心に述べてゆく。

(1) 弾性波探査構造解析図

抽出した反射面および反射面の縦方向の不連続を同一図上に表記し、これらを弾性波探査構造解析図として (Fig. 1.4-10~11) に示す。各測線の構造解析図について以下に概説する。

1) 測線 A

処理断面図中に多くの多重反射波が混入しているものと考えられ真の反射面を直接抽出することは難しい。しかし、各反射波が比較的良く連続しており明瞭な反射波もいくつか存在している。これはこの測線がほぼ平坦な場所に位置していることから静補正 (Static Correction) 上の問題をほとんど克服しているためと考えられ、この意味においては比較的良質な断面とすることができる。

とくに、測点 40 から 120 付近にかけての深度 - 2,000 m 付近の反射波が明瞭であり、これらが実際の反射面と対応する可能性が高いと思われる。

反射面の縦方向の不連続については処理断面図中に多く認められるものの、ほとんどが回折波、多重反射波の影響や処理上の問題によるものと考えられ、断層、破碎帯と直接対応づけられるほど明瞭なものを抽出することは難しい。

以上の中では測点 90 付近のものが比較的明瞭であり、静補正用、屈折法解析結果中の浅部の低速度帯 (2,900m/s) とともに良く対応している。

2) 測線 B

測線 A の場合と同様に多くの多重反射波が混入しており、質的にも測線 A とほぼ同等である。

しかし、測点 25 から測点 60 付近にかけての深度 - 2,000 m 付近の反射波は測線 A のものより明瞭で良く連続しており、これらが実際の反射面と対応する可能性はより高い。

深度 - 4,000~4,500m 付近にも比較的明瞭で連続したものが認められるが、上記の反射面からの重複反射波の可能性が高い。また、反射波の多くが、測点数の大きな方 (北東) に向けて傾斜する傾向が興味深い。

反射波の縦方向の不連続については測点 40 付近のものが比較的明瞭である。

3) 測線 C

測線 A、B の場合と同様に多くの多重反射波が混入しており、質的にも両者と同等で

ある。

反射波は測点 10 から測点 40 付近にかけての深度 - 1,600 ~ - 2,300m 付近のもの、測点 50 から測点 75 付近にかけての深度 - 2,300 ~ - 2,500m 付近のものが比較的明瞭である。

また、測線 B の場合と同様に反射波の多くが測点数の大きな方（北東）に向けて傾斜する傾向が興味深い。

反射波の縦方向の不連続については、測点 30 および測点 60 付近のものが比較的明瞭である。

(2) 低周波数帯卓越域の抽出と構造解析図との比較

作成した周波数解析断面図と構造解析図との比較・考察を以下に行う、

1) 測線 A

低周波数帯卓越域は、測点 5 ~ 測点 40 付近、測点 80 ~ 測点 110 付近、測点 130 ~ 測点 150 付近などに比較的明瞭に認められる。これらはいずれも浅部から深部までほぼ連続的に分布している。また、測点 45 ~ 測点 70 付近の深度約 - 0.5km ~ - 3.5km にかけても、やや不明瞭だが低周波数帯卓越域が見られる。

構造解析図については、測点 80 ~ 測点 110 付近の低周波数領域に対応する位置に、明瞭な縦の不連続 1 本を含む合計 3 本の不連続が認められ、断裂系の発達する可能性が高いと思われる。また測点 5 ~ 測点 40 付近、測点 130 ~ 測点 150 付近の低周波数領域に対応する位置にもそれぞれ明瞭な縦の不連続が認められ、断裂系の発達する可能性が比較的高いと思われる。

測点 45 ~ 測点 70 付近にみられる低周波数領域にも、不明瞭ではあるが 3 本の不連続が見られる。

なお、一般的に、深部（深部約 - 6,000m より深い所）ではほぼ全域が低周波数卓越域となっている傾向があるが、これは高周波成分が減衰により微弱になったためと考えられる。

2) 測線 B

低周波数帯卓越は、測点 1 ~ 測点 25 付近に明瞭なものが認められる。これは浅部 ~ 深部までほぼ連続的に分布している。また測点 50 ~ 測点 80 付近の深度約 - 0.5km ~ - 4.0km にかけても不明瞭な分布ではあるが低周波数帯卓越域が見られる。

構造解析図において、測点 1 ~ 測点 25 付近の低周波数領域に対応する位置には明瞭

な縦の不連続は認められない。また測点 50～測点 80 付近の低周波数領域にも明瞭な縦の不連続は認められない。

明瞭な縦の不連続は測点 40 付近に見られるが、その付近はむしろ高周波数領域になっており両者の対応は良くない。この理由としては、不連続はあっても周辺の破砕帯の発達が悪いことなどが考えられる。

3) 測線 C

低周波数帯卓越域としては、測点 1～測点 15 付近の深度約 - 1.0 ～ - 4.5km の範囲、および測点 25～測点 45 付近の深度約 - 1.0 ～ - 5.0km の範囲の 2 ケ所が比較的明瞭なものとして上げられる。

構造解析図では、上記の 2 ケ所には比較的明確な不連続が認められ、断裂系の発達する可能性がある。また明確な不連続が測点 60～測点 70 付近に認められるが、その付近においては低周波数帯は微弱である。

1.5 深部電気探査

1.5.1 概要

本調査は、地磁気-地電流探査法 (MT 法) および電磁垂直探査法 (CSAMT 法) により、誘導電場と磁場の比を測定することによって比抵抗 (または導電度) 分布を調べ、地熱貯留層に関する情報を得ることを目的として行われた。

MT 法での観測成分は、地下における自然の電場 2 成分 (E_x 、 E_y) および磁場 3 成分 (H_x 、 H_y 、 H_z) である。CSAMT 法の観測成分は、ループにより誘起される磁場 2 成分 (H_x 、 H_z) および電場 1 成分 (E_y) である。

第 2 次調査における MT 法の測点は 33 点で、CSAMT 法の測定は MT 法とまったく同じ地点について行い 33 点である。

解析の結果、代表的周波数についての見掛け比抵抗数分布が明らかになった。さらに、1 次元モデル解析にもとづき、各測点での比抵抗柱状が求められ、トータルコンダクタンス分布あるいは比抵抗構造図として導電性地層の頂部構造、被覆層のアイソパック (等層厚線図)、電氣的基盤の形状が把握された。そして、解析の結果明らかになった導電性異常地域について 2 次元モデル解析を行い、導電性地層およびフラクチャーの存在位置を推定した。

補足調査は第 2 次調査によって明らかになった低比抵抗地域を中心として、第 3 段階調査

の調査井掘削位置の選定と、調査地域南東部の Ban Mae 地区の低比抵抗帯のひろがりと形状を明らかにすることを目的とした。補足調査におけるMT法の測定数は20点で、CSAMT法の測点はMT法とまったく同じ地点について行った20点である。

解析方法は第2次調査と同様で、とくにトータルコンダクタンス分布、導電性地層の頂部の形状および2次元モデル解析を重点に行った。

1.5.2 現地調査

(1) MT法の測定方法

1) 測定作業手順

MT法の測定作業手順は以下のとおりである (Fig.1.5-1)。

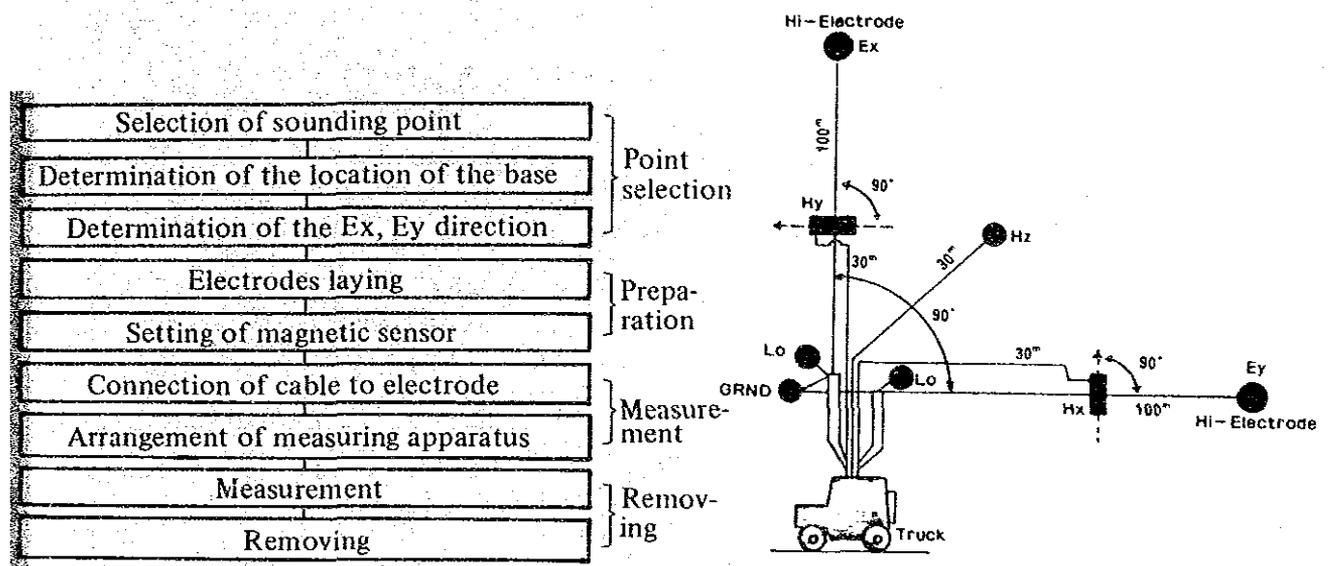


Fig. 1.5-1 Measurement of MT Survey

2) 選 点

予定された測点近傍で測定可能な場所を選点した。さらに現地の状況から測線設定が可能なベース地点を選び、その位置からたがいに直交する100mの2測線を設定した。

3) 測定準備

Hx, Hy コイルは、Ey, Ex とそれぞれ直交するようにコンパスで方向を決定し、水準器により水平に設定した。また、Hz 用コイルは約60cm程度地中に埋込み、水準器で垂直に設置した。

これらのコイルには、直射日光、風を避けるため木箱またはポリバケツをかぶせて盛土し、動かないようにした。

また、電極へのケーブルの接続はワイヤーナットを用いて行うが、接続ポイントへの直射日光を避けるため、コネクションボックスをかぶせて、さらに草木をかぶせた。

4) 測定

測定手順としては、まず測定器の結線を行い、次にコイル抵抗および接地抵抗の測定を行った。続いて各ケーブルをパネルへ接続しアンプの調整を行い、カセットテープをデータロガーにセットしてしばらくの間信号チェックをした。その後、データロガーをスタートさせ記録を開始した。

測定中はグラフィックペーパーを監視し、ノイズが認められた場合には原因をチェックした。また、200秒までの周期の電磁場を解析するため、データはシングル測定の場合25分の記録を1ファイルとして、ノイズのない記録を4ファイル以上とった。

5) MT法測定装置

測定に用いた装置の仕様は以下のとおりである(表1.5-1)。

表 1.5 - 1 MT法測定装置

装 置	数量	仕 様
電界用増幅器ユニット	2	(1st Stage) Input Level 1 μ V Max.Gain 2 \times 10 1.00Hz High Cut Filter
		(2nd Stage) Max.Gain 10 0.33Hz High Cut Filter
磁界用増幅器ユニット	3	Max.Gain 2 \times 10 0.33Hz High Cut Filter
波形記録計	1	Full Scale \pm 5V Chart Speed 0.085cm/s, 0.17cm/s (2Stage Variable)
データロガー (ダブルカセット)	1	Full Scale \pm 5V Sampling Rate 100ms/1DATA 5 Sample Multiplexer
バッテリー	2	12V, 100A
磁気センサー(誘導型コイル)	3	115mm ϕ \times 1,050mmL ab, 10kg
付 属 品	1式	ケーブル(MT用)、電極、工具

(2) CSAMT法

1) 測定方法

1 KW発電機により発電した後、送信機(トランスミッター)で電流を一辺が約300mの正方形のループに流し、人工磁場を発生させた。送信周波数は第2次調査では280、140、70、35、17.5、8.75、4.38、2.19、1.09、Hzの9ステップであり、補足調査では2,240、1,120、560、280、140、70、35、17.5、8.75、4.38、2.19、1.09、Hzの12ステップで行った。

このループから、約700~1,500m離れた所に受信器(レシーバー)を設置し、 H_x 、 H_z 、 E_y の各センサーによって信号を受信した。受信信号は $10\mu V$ から $20\mu V$ と小さいのでまず増幅器で増幅し、その後ループに流れている周波数に合せたバンドパスフィルター、50 Hzのノッチフィルターをとおし、最終的には平均化した値をデジタル化し表示盤より直読・記録した(Fig. 1.5-2)。

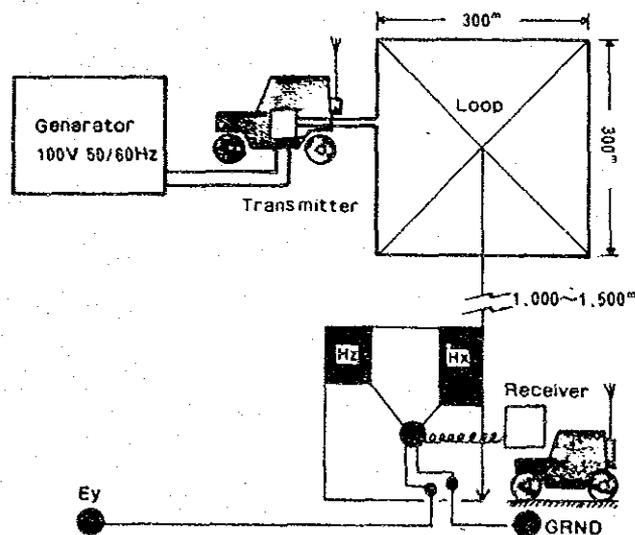


Fig. 1.5-2 Method of Measurement of CSAMT Survey

2) CSAMT法測定装置

測定に用いた装置の仕様は以下のとおりである(表 1.5-2)。

表 1.5-2 CSAMT法測定装置

装 置	数量	仕 様
送 信 機	1	Frequency 280, 140, 70, 35, 17.5, 8.75, 4.38, 2.19, 1.09, Hz Power 1KW
受 信 機		Input Level 10 μ V 出力表示デジタル 4桁 Band Pass Filter, Notch Filter 50Hz/60Hz
センサー		地電流センサー × 1 磁場センサー × 2
(付属品) 工 具	一式	データ処理用ハンドヘルドコンピュータ 一式
その他	一式	(補足調査で使用)

1.5.3 解析方法

調査により得られたデータに1次元モデル解析を実施し、トータルコンダクタンス分布図、電氣的基盤図などを作成した。またそれらの図上で認められた導電性異常地域について2次元モデル解析を行った。本解析のフローをFig1.5-3に示す。

CSAMT法の解析においては、次の関係式を用いて見掛け比抵抗 ρ_a を計算した

$$\rho_a = (K/\mu_0 f) \{ E_y/H_x \}$$

ここで

K : 補正係数

μ_0 : 誘磁率

f : 周波数

E_y , H_x は現場の測定で得られるループで誘起された磁場、電場成分である。

MT法の測定データは、次の項目について数値計算された。

- ① 座標系回転後の実測見掛け比抵抗値対周波数(エラーバー表示付)のプロット
- ② インバージョン解析より求めた柱状比抵抗分布にもとづいて計算した見掛け比抵抗曲線
- ③ 平均回転角