

ケニア共和国
エネルギー石油省
ケニア地熱開発公社（GDC）

ケニア共和国
GDCの地熱開発戦略更新支援プロジェクト

ファイナルレポート

平成29年6月
(2017年)

独立行政法人
国際協力機構（JICA）

西日本技術開発株式会社
三菱マテリアルテクノ株式会社

産公
J R
17-052

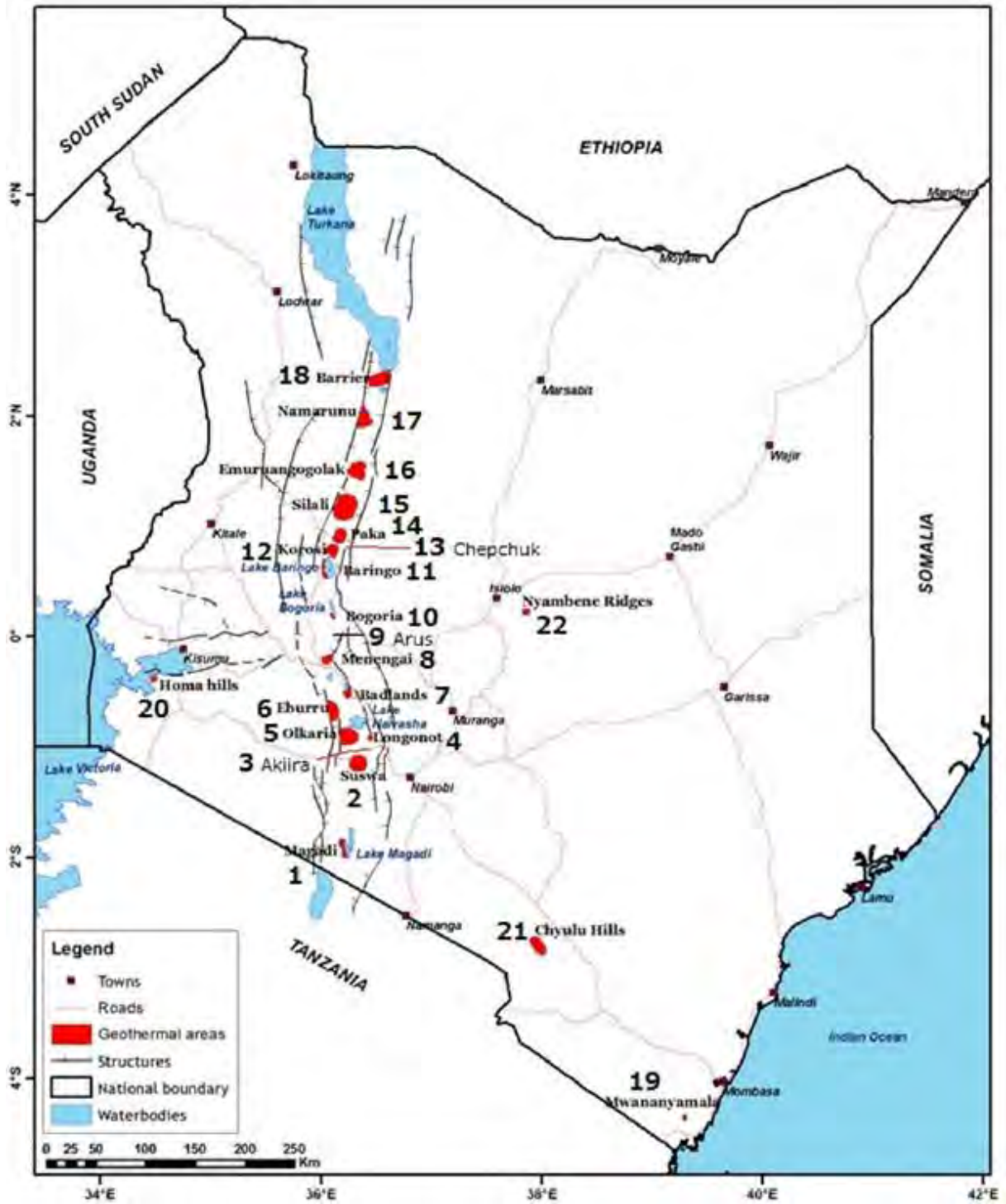
ケニア共和国
エネルギー石油省
ケニア地熱開発公社（GDC）

ケニア共和国
GDC の地熱開発戦略更新支援プロジェクト
ファイナルレポート

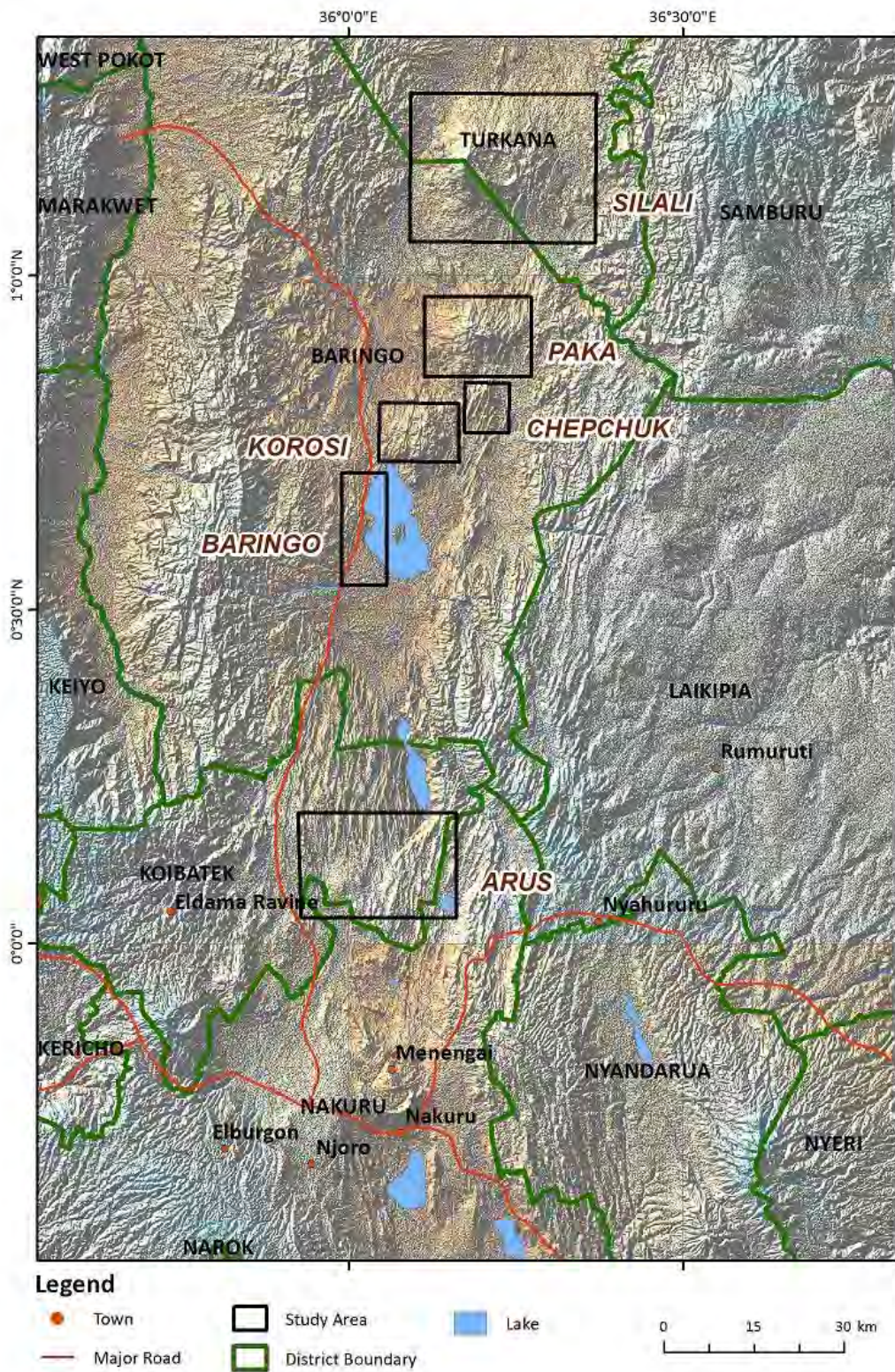
平成 29 年 6 月
(2017 年)

独立行政法人
国際協力機構（JICA）

西日本技術開発株式会社
三菱マテリアルテクノ株式会社



ケニアの地熱地帯位置図



本プロジェクトの対象地熱地点位置図

略 語 表

略語	正式名称
AfDB	African Development Bank
BGS	British Geological Survey
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (German Federal Institute for Geosciences and Natural Resources)
CAC	Community Advisory Council
CDM	Clean Development Mechanism
CER	Certified Emission Reduction
CF	Cash Flow
COD	Commercial Operation Date
EIA	Environmental Impact Assessment
EIRR	Economic Internal Rate of Return
EIB	European Investment Bank
EMCA	Environmental Management and Coordination Act
EMP	Environmental Management Plan
ESIA	Environmental and Social Impact Assessment
FCRS	Fluid Collection and ReInjection System
FIRR	Financial Internal Rate of Return
F/S	Feasibility Study
GCHM	Grievance and Conflict Handling Mechanism
GDC	Geothermal Development Company
GPP	Geothermal Power Plant
H ₂ S	Hydrogen Sulfide
ICEIDA	Icelandic International Development Agency
IDC	Interest During Construction
IEE	Initial Environmental Examination
IPP	Independent Power Producer
IUCN	International Union for Conservation of Nature
JBIC	Japan Bank for International Cooperation
JICA	Japan International Cooperation Agency
KenGen	Kenya Electricity Generating Company Limited
KeRRA	Kenya Rural Roads Authority:
KETRACO	Kenya Electricity Transmission Co. Ltd
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
Ksh	Kenya Shilling
KPLC	Kenya Power and Lighting Company

略語	正式名称
KWS	Kenya Wildlife Service
L/A	Loan Agreement
LCPDP	Least Cost Power Development Plan
masl, mbsl	meters above sea level, meters below sea level
MOU	Memorandum of Understanding
MT	Magneto-telluric
NCG	Non-condensable Gas
NEC	National Environment Council
NEMA	National Environment Management Authority
ODA	Official Development Assistance
ORC	Organic Rankine Cycle
OSHA	Occupational Safety and Health Act
O&M	Operation and Maintenance
PAPs	Project Affected People
pH	Hydrogen Power (Potentia Hydrogenii, in Latin)
PPP	Public-Private Partnership
RAP	Resettlement Action Plan
RAPIC	RAP Implementation Committee
SCC	Stakeholders Coordination Committee
SEA	Strategic Environmental Assessment
SERC	Standards Enforcement Review Committee
STI	Sexually Transmitted Infections
TEM	Transient Electro-magnetic
UNEP	United Nations Environment programme
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
UPS	Uninterruptible Power Supply
USAID/Power Africa	U.S. Agency for International Development Power Africa
VAT	Value Added Tax
WACC	Weighted Average Cost of Capital
WB	World Bank
WHO	World Health Organization
WRMA	Water Resources Management Authority

目 次

I	緒 言	1
I -1	プロジェクトの背景・経緯	1
I -2	プロジェクトの目的	2
I -3	プロジェクトの対象地域	2
I -4	相手国機関	2
I -5	プロジェクトの内容	2
I -6	プロジェクト要員	4
I -7	プロジェクトでの活動実績	6
II	地熱資源ポテンシャルの再評価	10
II -1	既存データ・情報の収集	10
II -2	地質調査	12
II -2.1	リモートセンシング解析	12
II -2.2	補足調査結果	21
II -2.3	室内試験	29
II -2.4	各地点の地質解析	38
II -3	地化学調査	48
II -3.1	補足調査結果	48
II -3.2	各地点の地化学解析	51
II -4	詳細調査（物理探査）	66
II -4.1	MT/TEM 法電磁探査	66
II -4.2	重力探査	86
II -5	資源ポテンシャルの再評価	101
II -5.1	評価方法	101
II -5.2	アルス	107
II -5.3	バリngo	114
II -5.4	コロシ	124
II -5.5	チェプチャク	136
II -5.6	パカ	144
III	地熱発電開発計画	155
III -1	地熱地点のインフラ整備状況	155
III -2	アルス地点の開発計画	160
III -2.1	開発規模と主要設備	160
III -2.2	資源開発計画	160
III -2.3	発電設備計画	164
III -2.4	開発スケジュール及びコスト概略積算	166
III -2.5	経済性評価	168
III -3	バリngo地点の開発計画	174

III -3.1	開発規模と主要設備	174
III -3.2	資源開発計画	175
III -3.3	発電設備計画	178
III -3.4	開発スケジュール及びコスト概略積算	182
III -3.5	経済性評価	186
III -4	コロシ地点の開発計画	194
III -4.1	開発規模と主要設備	194
III -4.2	資源開発計画	194
III -4.3	発電設備計画	197
III -4.4	開発スケジュール及びコスト概略積算	199
III -4.5	経済性評価	201
III -5	チェプチャク地点の開発計画	205
III -5.1	開発規模と主要設備	205
III -5.2	資源開発計画	205
III -5.3	発電設備計画	208
III -5.4	開発スケジュール及びコスト概略積算	210
III -5.5	経済性評価	212
III -6	パカ地点の開発計画	216
III -6.1	開発規模と主要設備	216
III -6.2	資源開発計画	216
III -6.3	発電設備計画	219
III -6.4	開発スケジュール及びコスト概略積算	223
III -6.5	経済性評価	226
III -7	送電線整備	230
III -7.1	概要	230
III -7.2	送電線における電圧降下及び損失	232
III -7.3	400kV 送電系統への接続方法	233
III -7.4	400kV 送変電設備費用	234
IV	環境社会配慮のための補足調査	235
IV -1	環境社会配慮調査に関する資料・データレビュー結果	235
IV -1.1	EIA も含むケニア国の制度、関係機関に関する情報	235
IV -1.2	用地取得・住民移転・貧困層対策関連の情報	246
IV -1.3	保護区に関する情報	248
IV -1.4	文化遺産の保護に関する情報	256
IV -1.5	環境基準及び許容値に関する情報	260
IV -1.6	調査対象範囲内で過去に実施されている EIA 情報	263
IV -1.7	調査対象範囲内で得られている許認可	266
IV -2	地熱直接利用に関する初期検討と周辺住民へのインタビュー結果	267
IV -2.1	直接利用	267

IV -2.2	GDCにおける直接利用の検討状況	267
IV -2.3	インタビューの実施方法、住民の反応	270
IV -2.4	現在の生計手段	270
IV -2.5	現在のエネルギー源及び水源	271
IV -2.6	現在の水及びエネルギーの利用先	274
IV -2.7	直接利用に関する住民の希望	274
IV -2.8	直接利用における注意点	275
IV -2.9	直接利用に関する提案	275
IV -3	環境社会配慮初期調査結果	277
IV -3.1	初期環境影響調査概要	277
IV -3.2	環境影響評価項目の抽出	283
V	地熱開発マスタープラン更新への提言	289
V -1	開発優先度の検討	289
V -1.1	過去の優先度評価	289
V -1.2	本プロジェクト対象地点の優先度評価	291
V -2	地熱発電の経済性の特徴とGDCの役割の重要性	300
V -2.1	地熱発電事業の経済性	300
V -2.2	掘削能力を有する機関育成の重要性	309
V -2.3	GDCのビジネスモデル	312
V -2.4	ODA援助の受け入れ機関としての役割	332
V -2.5	GDCへの期待	333
V -3	GDCのビジネスモデルと開発計画	337
V -3.1	GDCの公社財務モデル (GDC Corporate Financial Model)	337
V -3.2	各ビジネスモデルによる開発可能量のシミュレーション	343
V -3.3	調査対象5地点の特性を反映した開発計画	353
V -4	地熱開発政策への提言	363
V -5	提言のまとめ	369

巻末資料

1. リモートセンシング手法
2. 岩石薄片の偏光顕微鏡写真
3. X線回折チャート
4. スペクトル計測結果
5. 各地熱地点の地化学解析図
6. MT探査データ解析方法と結果
7. 重力探査データ解析方法と結果
8. 環境社会配慮のための補足調査結果表
9. 坑口発電設備の経済性
10. GDC公社財務モデル取扱説明書

図 一 覧

図 I-5-1	プロジェクト概念図.....	3
図 I-5-2	本プロジェクトでの調査内容と概略工程.....	4
図 II-2-1	パカ地点における ASTER SWIR フォールスカラー画像（上）と VNIR フォールスカラー画像上にプロットした既知の地熱徴候（下）との比較.....	14
図 II-2-2	ASTER SWIR RBD 画像（kaolinite、上）と VNIR フォールスカラー画像上にプロットした既知の地熱徴候（下）との比較.....	15
図 II-2-3	アルス地点におけるリニアメント判読結果.....	17
図 II-2-4	バリング地点におけるリニアメント判読結果.....	18
図 II-2-5	コロシ地点（左）及びチェプチャク地点におけるリニアメント判読結果.....	19
図 II-2-6	パカ地点におけるリニアメント判読結果.....	20
図 II-2-7	調査地点位置図（バリング地点）.....	22
図 II-2-8	調査地点位置図（アルス地点）.....	22
図 II-2-9	現地調査状況（バリング地点）.....	23
図 II-2-10	現地調査状況（アルス地点）.....	24
図 II-2-11	調査地点位置図（パカ地点）.....	25
図 II-2-12	調査地点位置図（チェプチャク地点）.....	26
図 II-2-13	調査地点位置図（コロシ地点）.....	26
図 II-2-14	現地調査状況（パカ地点）.....	27
図 II-2-15	現地調査状況（チェプチャク地点）.....	28
図 II-2-16	現地調査状況（コロシ地点）.....	28
図 II-2-17	典型的な粘土鉱物及び方解石の反射スペクトル.....	36
図 II-2-18	ケニア地溝帯内の第四紀火山の分布.....	39
図 II-2-19	アルス地点の地質構造図（画像判読結果）.....	40
図 II-2-20	アルス地点の地質断面図（A-A'断面）.....	41
図 II-2-21	各地点の地質凡例.....	42
図 II-2-22	バリング地点の地質構造図（画像判読結果）.....	43
図 II-2-23	バリング地点北部の地質断面図（Bn-Bn'断面）.....	44
図 II-2-24	バリング地点南部の地質断面図（Bs-Bs'断面）.....	44
図 II-2-25	コロシ地点（左）及びチェプチャク地点の地質構造図（画像判読結果）.....	46
図 II-2-26	パカ地点の地質構造図（画像判読結果）.....	47
図 II-3-1	補足地化学調査での試料採取位置図.....	49
図 II-3-2	噴気ガスの N ₂ -He-Ar 三成分図（JICA データ）.....	52
図 II-3-3	ケニア北部の大地溝帯沿いの地下水位分布.....	53
図 II-3-4	メネンガイ地点の噴気ガスと坑井噴出ガスの地化学温度比較図.....	54
図 II-3-5	ガス化学温度比較図（アルス）.....	55
図 II-3-6	噴気ガスの H ₂ /Ar-CO ₂ /Ar 関係図（アルス）.....	55
図 II-3-7	アルス地点の地化学概念モデル.....	56

図 II-3-8	Chepkoiyo well での熱水噴出状況	57
図 II-3-9	温泉水・井戸水のシリカ温度と NaKCa 温度の関係図 (バリンゴ)	58
図 II-3-10	ガス化学温度比較図 (バリンゴ)	58
図 II-3-11	バリンゴ地点の地化学概念モデル	59
図 II-3-12	ガス化学温度比較図 (コロシ)	60
図 II-3-13	ガス化学温度比較図 (チェプチャク)	60
図 II-3-14	井戸水のシリカ温度と NaKCa 温度の関係図 (コロシーチェプチャク)	61
図 II-3-15	コロシーチェプチャク地点の地化学概念モデル	61
図 II-3-16	パカ地点の噴気位置図	62
図 II-3-17	ガス化学温度比較図 (パカの3地区)	63
図 II-3-18	水素・酸素同位体組成図 (パカ)	64
図 II-3-19	噴気ガスの $H_2/Ar-CO_2/Ar$ 関係図 (パカ)	64
図 II-3-20	パカ地点の地化学概念モデル	65
図 II-4-1	MT 探査測点位置図 (コロシ・チェプチャク)	66
図 II-4-2	解析比抵抗平面分布図 (深度 100m: コロシ・チェプチャク)	67
図 II-4-3	解析比抵抗平面分布図 (深度 200m: コロシ・チェプチャク)	68
図 II-4-4	解析比抵抗平面分布図 (深度 300m: コロシ・チェプチャク)	68
図 II-4-5	解析比抵抗平面分布図 (深度 500m: コロシ・チェプチャク)	69
図 II-4-6	解析比抵抗平面分布図 (深度 750m: コロシ・チェプチャク)	69
図 II-4-7	解析比抵抗平面分布図 (深度 1,000m: コロシ・チェプチャク)	70
図 II-4-8	解析比抵抗平面分布図 (深度 1,500m: コロシ・チェプチャク)	70
図 II-4-9	解析比抵抗平面分布図 (深度 2,000m: コロシ・チェプチャク)	71
図 II-4-10	解析比抵抗平面分布図 (深度 3,000m: コロシ・チェプチャク)	71
図 II-4-11	解析比抵抗断面位置図 (Line-A, B, C, D and E: コロシ・チェプチャク)	72
図 II-4-12	解析比抵抗断面図 (Line-A, B, C, D and E: コロシ・チェプチャク)	73
図 II-4-13	MT 探査測点位置図 (パカ)	77
図 II-4-14	解析比抵抗平面分布図 (深度 100m: パカ)	78
図 II-4-15	解析比抵抗平面分布図 (深度 200m: パカ)	78
図 II-4-16	解析比抵抗平面分布図 (深度 300m: パカ)	79
図 II-4-17	解析比抵抗平面分布図 (深度 500m: パカ)	79
図 II-4-18	解析比抵抗平面分布図 (深度 750m: パカ)	80
図 II-4-19	解析比抵抗平面分布図 (深度 1,000m: パカ)	80
図 II-4-20	解析比抵抗平面分布図 (深度 1,500m: パカ)	81
図 II-4-21	解析比抵抗平面分布図 (深度 2,000m: パカ)	81
図 II-4-22	解析比抵抗平面分布図 (深度 3,000m: パカ)	82
図 II-4-23	解析比抵抗断面位置図 (Line-A, B, C, D and E: パカ)	82
図 II-4-24	解析比抵抗断面図 (Line-A, B, C, D and E: パカ)	83
図 II-4-25	コロシ・チェプチャク地点におけるブーゲー異常図 (仮定密度 2.4 g/cm^3)	87
図 II-4-26	コロシ・チェプチャク地点 50-2,500m 上方接続残差図	88

図 II-4-27	コロシ・チェプチャク地点 50-2, 500m 上方接続残差水平 1 次微分図	89
図 II-4-28	コロシ・チェプチャク地点 3 次元基盤構造解析結果	91
図 II-4-29	コロシ・チェプチャク地点 2 次元密度構造解析断面位置図 (背景: 50-4, 000m 上方接続残差図)	92
図 II-4-30	2 次元密度構造解析結果 (コロシ地点)	93
図 II-4-31	2 次元密度構造解析結果 (チェプチャク地点)	94
図 II-4-32	パカ地点におけるブーゲー異常図 (仮定密度 2.4 g/cm ³)	95
図 II-4-33	パカ地点 50-2, 500m 上方接続残差図	96
図 II-4-34	パカ地点 50-2, 500m 上方接続残差水平 1 次微分図	97
図 II-4-35	パカ地点 3 次元基盤構造解析結果	98
図 II-4-36	パカ地点 2 次元密度構造解析断面位置図 (背景: 50-4, 000m 上方接続残差図)	99
図 II-4-37	パカ地点 2 次元密度構造解析結果	100
図 II-5-1	世界の既開発地熱地点 (66 地点) の資源密度頻度分布	101
図 II-5-2	モンテカルロ解析におけるパラメータの確率分布タイプ	103
図 II-5-3	資源密度と平均貯留層温度の関係図 (世界の既開発地点 66 地点)	104
図 II-5-4	メネンガイ・オルカリアドームスでの坑井 1 本当たりの平均的な噴出量とエンタルピー	106
図 II-5-5	アルス地点の既存地熱系概念モデル	107
図 II-5-6	アルス地点付近での重力探査結果	108
図 II-5-7	アルス地点付近での土壌ガス探査結果 (CO ₂ 濃度分布)	108
図 II-5-8	アルス地点付近での MT/TEM 探査結果	109
図 II-5-9	アルス Steam Jet 付近の地表調査結果集約図	111
図 II-5-10	アルス Steam Jet 付近の地熱系概念モデル	112
図 II-5-11	アルス地点 (Steam Jet 付近) の容積法による資源量試算結果	113
図 II-5-12	バリngo地点の既存地熱系概念モデル	114
図 II-5-13	バリngo地点の重力探査結果 (ブーゲー異常分布図)	115
図 II-5-14	バリngo地点での土壌ガス探査結果 (CO ₂ 濃度分布)	116
図 II-5-15	バリngo地点での MT/TEM 探査結果 (平面図)	117
図 II-5-16	バリngo地点での MT/TEM 探査結果 (断面図)	118
図 II-5-17	バリngo地点の地表調査結果集約図	120
図 II-5-18	バリngo地点南部の地熱系概念モデル	121
図 II-5-19	バリngo地点北部の地熱系概念モデル	121
図 II-5-20	バリngo地点南部の容積法による資源量試算結果	122
図 II-5-21	バリngo地点北部の容積法による資源量試算結果	123
図 II-5-22	コロシ、チェプチャク及びパカ 3 地点の地質断面位置	127
図 II-5-23	コロシ、チェプチャク及びパカ 3 地点の地熱貯留層範囲	128
図 II-5-24	コロシ地点の地表調査結果集約図	129
図 II-5-25	コロシ地点の地質断面図 (K-K'断面)	130
図 II-5-26	コロシ地点の地熱系概念モデル	131

図 II-5-27	コロシ地点の地熱貯留層範囲と物理探査結果集約図 (1)	132
図 II-5-28	コロシ地点の地熱貯留層範囲と物理探査結果集約図 (2)	133
図 II-5-29	コロシ地点の調査井掘削ターゲットゾーン	134
図 II-5-30	コロシ地点の容積法による資源量試算結果	135
図 II-5-31	チェプチャク地点の地表調査結果集約図	138
図 II-5-32	チェプチャク地点の地質断面図 (C-C'断面)	139
図 II-5-33	チェプチャク地点の地熱系概念モデル	140
図 II-5-34	チェプチャク地点の地熱貯留層範囲と物理探査結果集約図	141
図 II-5-35	チェプチャク地点の調査井掘削ターゲットゾーン	142
図 II-5-36	チェプチャク地点の容積法による資源量試算結果	143
図 II-5-37	パカ地点の地表調査結果集約図	147
図 II-5-38	パカ地点の地質断面図 (P-P'断面)	148
図 II-5-39	パカ地点の地熱系概念モデル	149
図 II-5-40	パカ地点の地熱貯留層範囲と物理探査結果集約図 (1)	150
図 II-5-41	パカ地点の地熱貯留層範囲と物理探査結果集約図 (2)	151
図 II-5-42	パカ地点の調査井掘削ターゲットゾーン	152
図 II-5-43	パカ地点の容積法による資源量試算結果	153
図 III-1-1	GDC によるバリング〜シラリの道路・給水設備整備計画	156
図 III-1-2	バリング地点南部の掘削基地	157
図 III-1-3	コロシ地点の掘削基地設置位置図	157
図 III-1-4	パカ地点の掘削基地設置位置図	158
図 III-1-5	掘削工事前給水設備計画図	159
図 III-2-1	坑井仕上げ計画(ケーシングプログラム)の一例 (掘削深度 2,000m、傾斜掘削)	161
図 III-2-2	傾斜掘削計画の一例 (KOP 深度 200m、最大傾斜角 35 度)	162
図 III-2-3	資源開発レイアウト案 (アルス)	163
図 III-2-4	汽水輸送設備・発電設備フロー図 (アルス)	164
図 III-2-5	アルス発電所単線結線図	165
図 III-2-6	アルス 220kV 変電所レイアウト	165
図 III-2-7	アルス地点における各開発形態別の発電コスト・蒸気コスト	170
図 III-2-8	建設費の変化に対する発電コストの感度分析 (アルス地点)	172
図 III-2-9	建設費の変化に対する経済評価の感度分析 (アルス地点)	172
図 III-2-10	生産井平均出力の変化に対する発電コストの感度分析 (アルス地点)	173
図 III-2-11	生産井平均出力の変化に対する経済評価の感度分析 (アルス地点)	173
図 III-3-1	資源開発レイアウト案 (バリング南部)	176
図 III-3-2	資源開発レイアウト案 (バリング北部)	177
図 III-3-3	汽水輸送設備・発電設備フロー図 (バリング南部)	178
図 III-3-4	汽水輸送設備・発電設備フロー図 (バリング北部)	179
図 III-3-5	バリング発電所単線結線図(南部・北部発電所共通)	179

図 III-3-6	バリngo南部 220kV 変電所レイアウト	180
図 III-3-7	バリngo北部 220kV 変電所レイアウト	181
図 III-3-8	バリngo地点南部地域における各開発形態別の発電コスト・蒸気コスト	187
図 III-3-9	バリngo地点北部地域における各開発形態別の発電コスト・蒸気コスト	187
図 III-3-10	建設費の変化に対する発電コストの感度分析 (バリngo地点南部地域)	189
図 III-3-11	建設費の変化に対する経済評価の感度分析 (バリngo地点南部地域)	190
図 III-3-12	生産井平均出力の変化に対する発電コストの感度分析 (バリngo地点南部地域)	190
図 III-3-13	生産井平均出力の変化に対する経済評価の感度分析 (バリngo地点南部地域)	191
図 III-3-14	建設費の変化に対する発電コストの感度分析 (バリngo地点北部地域)	191
図 III-3-15	建設費の変化に対する経済評価の感度分析 (バリngo地点北部地域)	192
図 III-3-16	生産井平均出力の変化に対する発電コストの感度分析 (バリngo地点北部地域)	192
図 III-3-17	生産井平均出力の変化に対する経済評価の感度分析 (バリngo地点北部地域)	193
図 III-4-1	資源開発レイアウト案 (コロシ)	196
図 III-4-2	汽水輸送設備・発電設備フロー図 (コロシ)	197
図 III-4-3	コロシ発電所単線結線図	198
図 III-4-4	コロシ 220kV 変電所レイアウト	198
図 III-4-5	コロシ地点における各開発形態別の発電コスト・蒸気コスト	201
図 III-4-6	建設費の変化に対する発電コストの感度分析 (コロシ地点)	203
図 III-4-7	建設費の変化に対する経済評価の感度分析 (コロシ地点)	203
図 III-4-8	生産井平均出力の変化に対する発電コストの感度分析 (コロシ地点)	204
図 III-4-9	生産井平均出力の変化に対する経済評価の感度分析 (コロシ地点)	204
図 III-5-1	資源開発レイアウト案 (チェプチャク)	207
図 III-5-2	汽水輸送設備・発電設備フロー図 (チェプチャク)	208
図 III-5-3	チェプチャク発電所単線結線図	209
図 III-5-4	220kV チェプチャク変電所レイアウト	209
図 III-5-5	チェプチャク地点における各開発形態別の発電コスト・蒸気コスト	212
図 III-5-6	建設費の変化に対する発電コストの感度分析 (チェプチャク地点)	214
図 III-5-7	建設費の変化に対する経済評価の感度分析 (チェプチャク地点)	214
図 III-5-8	生産井平均出力の変化に対する発電コストの感度分析 (チェプチャク地点)	215
図 III-5-9	生産井平均出力の変化に対する経済評価の感度分析 (チェプチャク地点)	215
図 III-6-1	資源開発レイアウト案 (パカ)	218
図 III-6-2	発電設備等のレイアウト案 (北東からの眺望)	219
図 III-6-3	発電設備等のレイアウト案 (北からの眺望)	220
図 III-6-4	汽水輸送設備・発電設備フロー図 (パカ西部)	220
図 III-6-5	汽水輸送設備・発電設備フロー図 (パカ東部)	221

図 III-6-6	パカ西部発電所単線結線図	221
図 III-6-7	パカ東部発電所単線結線図	222
図 III-6-8	220kV パカ西部変電所レイアウト	222
図 III-6-9	220kV パカ東部変電所レイアウト	223
図 III-6-10	パカ地点における各開発形態別の発電コスト・蒸気コスト	226
図 III-6-11	建設費の変化に対する発電コストの感度分析（パカ地点）	228
図 III-6-12	建設費の変化に対する経済評価の感度分析（パカ地点）	228
図 III-6-13	生産井平均出力の変化に対する発電コストの感度分析（パカ地点）	229
図 III-6-14	生産井平均出力の変化に対する経済評価の感度分析（パカ地点）	229
図 III-7-1	ロンガイーシラリ 400kV 送電線ルート(案)	230
図 III-7-2	ロンガイーシラリの 400kV 送電線・変電所接続の単線結線図(案)	231
図 III-7-3	アルス変電所とアルス発電所の接続単線結線図	233
図 III-7-4	パカ変電所とパカ・チェプチャク・コロシ・バリング南発電所の接続単線結線図	234
図 IV-1-1	環境影響評価の手続き	242
図 IV-1-2	KWS の保護地域図	244
図 IV-1-3	KFS の保護地域管理区域図	245
図 IV-1-4	調査地域周辺の国立公園等位置図	249
図 IV-1-5	ケニア国の保護地区	251
図 IV-1-6	ケニア国の森林保護地域	252
図 IV-1-7	ケニア国のコミュニティー保護地区	254
図 IV-1-8	ケニア国のラムサール条約湿地図	256
図 IV-1-9	ケニア国の世界遺産及び湿地図	257
図 IV-1-10	地域の博物館及び記念物遺跡の地図	259
図 IV-2-1	メネンガイにおけるパイロットテスト設備配置図	268
図 IV-2-2	メネンガイにおけるパイロットテスト実施状況	269
図 IV-2-3	WATER PAN	272
図 IV-2-4	現在の各コミュニティーのエネルギー源及び水源	273
図 V-1-1	地熱地点の地表付近の温度分布と放熱量	291
図 V-1-2	各地点の放熱量と推定資源量の関係	292
図 V-1-3	発電所建設単価の比較	294
図 V-1-4	発電単価の比較	294
図 V-1-5	シラリ地点の地形図	297
図 V-1-6	シラリ地点の地熱系概念モデル（東西断面）	297
図 V-1-7	シラリ地点の推定貯留層範囲（図中の色は標高-3,000mの比抵抗分布）	298
図 V-2-1	開発活動スケジュールの想定	301
図 V-2-2	70 MW モデル地熱発電所の開発手順	302
図 V-2-3	モデル地熱発電所の建設費構成	303
図 V-2-4	モデル地熱発電所の発電コスト構成（国営企業による一貫開発の場合）	304

図 V-2-5	地熱発電の期待収益率・発電コスト特性曲線	305
図 V-2-6	地熱発電と火力発電の期待収益率・発電コスト特性曲線の比較	306
図 V-2-7	電力自由化による中米 6 カ国の電源構成の変化	307
図 V-2-8	事業主体による地熱発電の発電コスト・蒸気コストの違い	308
図 V-2-9	借入金利が発電コスト/蒸気コストに及ぼす影響	309
図 V-2-10	GDC の坑井掘削速度	310
図 V-2-11	坑井掘削能力と 70MW モデル地熱発電所建設単価	311
図 V-2-12	坑井掘削能力と発電コスト/蒸気コスト (GDC 蒸気開発・IPP 発電の共同開発の場合)	312
図 V-2-13	GDC の各種ビジネスモデル	324
図 V-2-14	各種ビジネスモデルの事例	325
図 V-2-15	GDC の各種ビジネスモデルの発電コスト/蒸気コスト	326
図 V-2-16	フィリピンの地熱発電設備と発電電力量の推移	327
図 V-2-17	2 つの BOT スキーム	328
図 V-2-18	IPP モデルと BOT モデルにおける民間企業と GDC の販売価格の概念図	329
図 V-2-19	IPP BOT モデルにおける BOT 期間の影響	330
図 V-2-20	一貫開発と共同開発の開発リードタイム (日本の例)	331
図 V-2-21	円借款の発電コスト低減効果	333
図 V-2-22	地熱開発成功のための Key Success Factors	334
図 V-3-1	Corporate Financial Model の概念図	339
図 V-3-2	本社部門、オルカリア部門及びメネンガイ部門からのキャッシュフロー	339
図 V-3-3	新規プロジェクト (70 MW) によるキャッシュフロー創出	342
図 V-3-4	投資原資の枠内での新規プロジェクト開発の概念図	342
図 V-3-5	GDC の財務制約下での開発可能量 (基本ケース)	344
図 V-3-6	基本ケースにおける地熱発電の平均売電価格の見通し	344
図 V-3-7	開発可能量に及ぼす掘削能力の影響 (IPP モデルの場合)	346
図 V-3-8	各種ビジネスモデルの開発可能量	348
図 V-3-9	各種ビジネスモデルにおける地熱発電の平均売電価格の見通し	348
図 V-3-10	BOT モデルの開発可能量	349
図 V-3-11	BOT モデルにおける地熱発電の平均売電価格の見通し	350
図 V-3-12	ODA 支援を受けた場合の開発可能量	351
図 V-3-13	ODA 支援を受けた場合の地熱発電の平均売電価格の見通し	352
図 V-3-14	調査対象 5 地点を考慮した開発計画	354
図 V-3-15	調査対象 5 地点を考慮したりグ配置計画及び坑井掘削計画	355
図 V-3-16	調査対象 5 地点を考慮した開発計画の見通し	355
図 V-3-17	調査対象 5 地点を考慮した開発計画時における年度末現金残高及び必要リグ台数見通し	357
図 V-3-18	調査対象 5 地点を考慮した開発計画における地熱発電の平均売電/蒸気価格の見通し	357

図 V-3-19	調査対象 5 地点を考慮した開発計画における GDC の収支見通し	360
図 V-3-20	調査対象 5 地点を考慮した開発計画における GDC のキャッシュフロー収支見通し	361
図 V-3-21	調査対象 5 地点を考慮した開発計画における GDC の総資産高見通し	361
図 V-3-22	調査対象 5 地点を考慮した開発計画における政府の収支見通し	362
図 V-4-1	電力ピーク需要と発電設備容量に係る将来予測	364
図 V-4-2	電力需要と発電電力に係る将来予測	365
図 V-4-3	電力供給の電源別構成予測の一例（2030 年 6 月 21～23 日）	367

表 一 覧

表 I-6-1	調査要員表	5
表 I-7-1	作業工程表 (第1期)	7
表 I-7-2	作業工程表 (第2期)	8
表 I-7-3	作業工程表 (第3期)	8
表 I-7-4	作業工程表 (第4期)	9
表 II-1-1	地熱資源に係る収集文献・報告書類	11
表 II-2-1	衛星画像データ処理・解析一覧	12
表 II-2-2	ベースマップ作成に用いた使用データ一覧	13
表 II-2-3	岩石薄片観察結果一覧	32
表 II-2-4	X線回折分析結果一覧 (1)	34
表 II-2-5	X線回折分析結果一覧 (2)	35
表 II-2-6	スペクトル計測結果一覧	37
表 II-3-1	補足地化学調査における現地測定結果	50
表 II-3-2	温泉水・井戸水の化学・同位体分析結果	51
表 II-3-3	噴気蒸気・ガスの化学・同位体分析結果	51
表 II-5-1	容積法計算における計算パラメータの設定	103
表 II-5-2	貯留層特性と推定される生産井1本当たりの発電出力	105
表 II-5-3	アルス地点 (Steam Jet 付近) の資源量試算結果と発電計画案	114
表 II-5-4	バリンゴ地点の資源量試算結果と発電計画案	124
表 II-5-5	コロシ地点の地熱貯留層範囲	126
表 II-5-6	コロシ地点の資源量試算結果と発電計画案	136
表 II-5-7	チェプチャク地点の地熱貯留層範囲	138
表 II-5-8	チェプチャク地点の資源量試算結果と発電計画案	144
表 II-5-9	パカ地点の地熱貯留層範囲	146
表 II-5-10	パカ地点の資源量試算結果と発電計画案	154
表 III-1-1	地熱地点の立地状況 (2002年)	155
表 III-2-1	地熱開発の規模及び主要設備 (アルス)	160
表 III-2-2	開発スケジュール (アルス)	166
表 III-2-3	概略開発コスト (アルス)	167
表 III-2-4	財務評価の前提条件	169
表 III-2-5	アルス地点の建設費合計	169
表 III-2-6	アルス地点における各開発形態別の発電コスト・蒸気コスト (US¢/kWh)	169
表 III-2-7	代替火力発電所の仕様	170
表 III-2-8	アルス地点開発の各代替火力発電所に対する優位性	171
表 III-3-1	地熱開発の規模及び主要設備 (バリンゴ)	174
表 III-3-2	開発スケジュール (バリンゴ)	183
表 III-3-3	概略開発コスト (バリンゴ南部)	184

表 III-3-4	概略開発コスト（バリンゴ北部）	185
表 III-3-5	バリンゴ地点南部地域の建設費合計	186
表 III-3-6	バリンゴ地点北部地域の建設費合計	186
表 III-3-7	バリンゴ地点南部地域における各開発形態別の発電コスト・蒸気コスト (US¢/kWh)	186
表 III-3-8	バリンゴ地点北部地域における各開発形態別の発電コスト・蒸気コスト (US¢/kWh)	187
表 III-3-9	バリンゴ地点南部地域開発の各代替火力発電所に対する優位性	188
表 III-3-10	バリンゴ地点北部地域開発の各代替火力発電所に対する優位性	188
表 III-4-1	地熱開発の規模及び主要設備	194
表 III-4-2	開発スケジュール（コロシ）	199
表 III-4-3	概略開発コスト（コロシ）	200
表 III-4-4	コロシ地点の建設費合計	201
表 III-4-5	コロシ地点における各開発形態別の発電コスト・蒸気コスト (US¢/kWh)	201
表 III-4-6	コロシ地点開発の各代替火力発電所に対する優位性	202
表 III-5-1	地熱開発の規模及び主要設備	205
表 III-5-2	開発スケジュール（チェプチャク）	210
表 III-5-3	概略開発コスト（チェプチャク）	211
表 III-5-4	チェプチャク地点の建設費合計	212
表 III-5-5	チェプチャク地点における各開発形態別の発電コスト・蒸気コスト (US¢/kWh)	212
表 III-5-6	チェプチャク地点開発の各代替火力発電所に対する優位性	213
表 III-6-1	地熱開発の規模及び主要設備	216
表 III-6-2	開発スケジュール（パカ）	224
表 III-6-3	概略開発コスト（パカ）	225
表 III-6-4	パカ地点の建設費合計	226
表 III-6-5	パカ地点における各開発形態別の発電コスト・蒸気コスト (US¢/kWh)	226
表 III-6-6	パカ地点開発の各代替火力発電所に対する優位性	227
表 III-7-1	想定される電圧降下	232
表 III-7-2	想定される送電線損失	232
表 III-7-3	アルス発電所から 400/220kV アルス変電所への送変電設備費用	234
表 III-7-4	パカ・チェプチャク・コロシ・バリンゴ南発電所から 400/220kV パカ変電所への送 変電設備費用	234
表 IV-1-1	環境・社会関係法令及びその関係機関（1）	237
表 IV-1-2	環境・社会関係法令及びその関係機関（2）	238
表 IV-1-3	環境・社会関係法令及びその関係機関（3）	239
表 IV-1-4	環境・社会関係法令及びその関係機関（4）	240
表 IV-1-5	環境・社会関係法令及びその関係機関（5）	241
表 IV-1-6	国立公園、保護区一覧	250

表 IV-1-7	世界遺産	257
表 IV-1-8	世界遺産申請中の候補地	258
表 IV-1-9	地域の博物館及び記念物遺跡	259
表 IV-1-10	蒸気発電設備における排出基準	261
表 IV-1-11	家庭用水における水質基準	261
表 IV-1-12	地熱発電所における排出抑制	262
表 IV-1-13	許容雑音レベル	262
表 IV-1-14	建設サイトでの許容騒音レベル	263
表 IV-1-15	環境社会影響調査報告書	263
表 IV-2-1	直接利用の例	267
表 IV-2-2	インタビューの実施内容	270
表 IV-2-3	現在の生計手段	271
表 IV-2-4	主な生産品	271
表 IV-2-5	改善すべき点	271
表 IV-2-6	現在のエネルギー源	272
表 IV-2-7	現在の水源	272
表 IV-2-8	現在のインフラ	274
表 IV-2-9	直接利用 希望順位	274
表 IV-2-10	実現可能性が比較的高い地熱の直接利用方法（熱利用）	276
表 IV-3-1	全地域共通の調査結果概要	277
表 IV-3-2	アルス地域の調査結果特記事項	278
表 IV-3-3	バリngo地域特有の調査結果概要	279
表 IV-3-4	コロシ地域特有の調査結果概要	280
表 IV-3-5	チェプチャク地域特有の調査結果概要	281
表 IV-3-6	パカ地域特有の調査結果概要	281
表 IV-3-7	シラリ地域特有の調査結果概要	282
表 IV-3-8	環境社会影響評価項目の抽出結果	283
表 V-1-1	BGS(1993)による地熱地点評価表	289
表 V-1-2	KenGen(2002)による地熱地点評価表	290
表 V-1-3	地熱資源ポテンシャル試算結果のまとめ	292
表 V-1-4	対象5地点での開発コスト・経済性評価のまとめ	293
表 V-1-5	スコア評価における各要素の評価基準	295
表 V-1-6	スコア評価による対象5地点の開発優先度評価結果	296
表 V-2-1	蒸気フィールドのモデル諸元	300
表 V-2-2	蒸気フィールド開発活動	301
表 V-2-3	財務条件の想定	302
表 V-2-4	70MW モデル地熱発電所の建設費内訳	303
表 V-2-5	モデル地熱発電所の発電コスト構成（国営企業による一貫開発の場合）	304
表 V-2-6	石炭火力、天然ガス複合火力発電の仕様	305

表 V-2-7	各種発電の期待収益率と発電コストとの関係 (US¢/kWh)	306
表 V-2-8	GDC の坑井掘削状況	310
表 V-2-9	GDC 掘削費の推計	310
表 V-2-10	坑井掘削費と 70MW モデル地熱発電所の建設費	311
表 V-2-11	GDC の初期調査内容と移転価格((ii)初期調査モデル・(iii)共同 SPC モデルの場合)	323
表 V-2-12	GDC の各種ビジネスモデルの内容と売電価格の算出前提	323
表 V-2-13	市中金融と ODA 融資の条件の違い	333
表 V-3-1	GDC の財務状況	338
表 V-3-2	Corporate Financial Model における GDC 資産の部門別初期設定 (2014 年末) [M\$]	338
表 V-3-3	本社部門、オルカリア部門及びメネンガイ部門からのキャッシュフロー	340
表 V-3-4	新規プロジェクト(70 MW)のモデル諸元	341
表 V-3-5	新規プロジェクト (70MW) の坑井掘削本数・リグ台数及び必要資金想定	342
表 V-3-6	リグ台数の制約	343
表 V-3-7	基本ケースにおける開発見通し	345
表 V-3-8	開発可能量に及ばず掘削能力の影響 (IPP モデルの場合)	345
表 V-3-9	初期調査モデル及び共同蒸気開発モデルの資金分担想定	347
表 V-3-10	初期調査モデルにおける開発見通し	348
表 V-3-11	蒸気共同開発モデルにおける開発見通し	349
表 V-3-12	BOT-1 モデルにおける開発見通し	350
表 V-3-13	BOT-2 モデルにおける開発見通し	350
表 V-3-14	ODA 支援を受けた場合の開発見通し	352
表 V-3-15	調査対象 5 地点の開発概要と開発優先順位	353
表 V-3-16	各プロジェクトの開発見通し	356
表 V-3-17	調査対象 5 地点を考慮した開発計画の見通し	356
表 V-3-18	GDC の長期的財務見通し	359
表 V-3-19	GDC の長期的財務見通し (抜粋)	360
表 V-4-1	ケニアでの電源別の発電設備容量と発電電力 (2014~2015 年)	363
表 V-4-2	オルカリアIV・オルカリア I 増設プロジェクト (280MW) での資金調達先一覧	366

I 緒言

I -1 プロジェクトの背景・経緯

2013年時点のケニアの総発電容量1,664MWのうち、46% (770MW) は水力発電が占めており、その他では火力37% (622MW)、地熱14% (241MW) となっていた。同年のピーク時電力需要は1,357MWに達していたが、近年頻発している干ばつの影響で水力発電の稼働が限定的となっているため、電力不足が深刻化していた。また、近年の経済成長を背景に2010-2020年の電力需要は毎年14.5%増で推移することが見込まれたため、同国の電力供給の安定化を促進するためには、新規電源開発が喫緊の課題とされていた。一方、東アフリカの大地溝帯（グレートリフトバレー）に位置するケニアでは、大規模な地熱ポテンシャルが確認されており、天候に左右されない安定的な発電エネルギーとして地熱開発の優先度が高まっている。

ケニアの国家開発計画として2008年に発表された「Vision2030」は、2030年までに国際的な競争力の獲得と経済繁栄を達成することを上位目標としている。「Vision2030」の中では、ポテンシャル7,000~10,000MWと言われる豊富な地熱資源に着目し、地熱エネルギーによる発電能力を2030年までに5,530MWまで引き上げる計画が打ち出されている。また、2014年2月に公表された国家エネルギー計画案では、2013年10月からの40カ月（2016年まで）で地熱電源による出力1,646MW（累計1,887MW）の開発が目標とされている。

「Vision2030」で打ち出された地熱開発目標を達成するため、ケニア政府は地熱資源開発を民間ではなく自らが実施することとし、2009年に地熱開発公社（GDC）を設立した。ケニア政府は我が国に、GDCの能力向上に係る協力を要請し、国際協力機構（JICA）から西日本技術開発への委託により「ケニア国地熱開発のための能力向上プロジェクト」（以下、「能力向上プロジェクト」という。）が2014年2月から開始され、2017年までの約4年間にわたり実施される予定とされた。

GDCは、ケニア全国のほとんどの有望地点（Vision2030の目標うち、5,000MW。全体の約90%）で地熱資源開発を進める役割を担っている。現在はナイロビから北西約150kmのメネンガイ地点の開発を精力的に進めており、同地点では既に20本以上の地熱井が掘削されている。しかし、その他の地点での探査・開発はまだ初期段階にあり、地表調査が行われているのみで、坑井掘削は行われていない。

今後のGDCによる開発については、地点間の開発優先付けを含めた開発マスタープラン（10年間の事業戦略計画と5年間の事業計画。以下、「地熱開発マスタープラン」という。）が作成されつつあるが、基本データである各地点の地熱資源ポテンシャルの予測については、科学的な方法による再評価が喫緊の課題となっている。このような状況下、ケニア政府は地熱開発マスタープランの策定支援に関する協力を要請し、我が国政府はこれの実施を決定した。これを受け、JICAにより2014年2月下旬から3月中旬にかけて本件支援プロジェクトの詳細計画策定調査が実施された。同調査においては、現地の視察や各種情報の収集が行われ、その結果に基づき、本プロジェクトでの対象地点や内容が決定された。

なお、本プロジェクトは上述の能力向上プロジェクトに平行して実施されるものであり、地熱地点の有望性評価とGDCの技術能力向上についての相乗効果が期待される。

I -2 プロジェクトの目的

本件業務は、ケニア国地熱開発公社（Geothermal Development Company : GDC）が開発権を有する地熱有望地点において、地熱資源ポテンシャルを科学的に再評価することにより、GDCの地熱開発戦略（マスタープラン）が適切に見直され、ケニアの地熱開発が促進されることを目的とする。

I -3 プロジェクトの対象地域

本件業務の対象地域は、ケニア西部を南北に縦断する東アフリカ大地溝帯沿いに分布する地熱地帯のうち、既に開発中であるメネンガイ（Menengai）地点より北側にある下記の地熱地点である（口絵参照）。

主要対象 5 地点	アルス（Arus）	
	バリンゴ（Baringo）	
	コロシ（Korosi）	: 詳細調査対象
	チェプチャク（Chepchuk）	: 詳細調査対象
	パカ（Paka）	: 詳細調査対象
提言のみ 1 地点	シラリ（Silali）	

I -4 相手国機関

本調査の相手国機関は、ケニア国地熱開発公社（GDC）及びエネルギー石油省（MOEP）である。

I -5 プロジェクトの内容

本プロジェクトの概念図をを図 I -5-1 に示す。本プロジェクトでは以下の項目の調査・検討を行った。

- 地熱資源ポテンシャルの再評価（容積法による資源量の再試算まで）
- 詳細調査（物理探査：MT/TEM法探査及び重力探査）
- 環境社会配慮のための補足調査（地熱多目的利用のニーズ調査を含む）
- 地熱開発マスタープラン更新への提言
 - 開発優先度の検討
 - 開発体制の違いによるコスト分析
 - 発電プラント導入モデル
 - マスタープラン更新・政策への提言

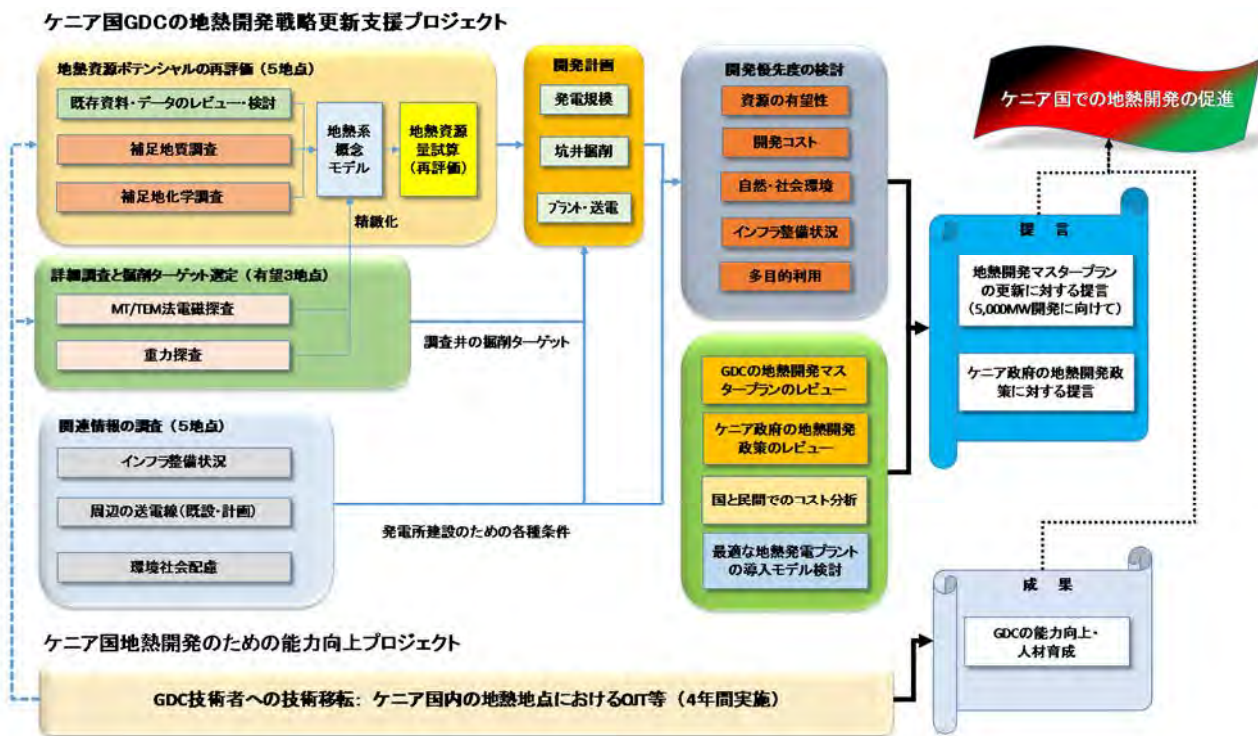


図 I -5-1 プロジェクト概念図

本業務での調査内容と概略工程を図 I -5-2 に示す。本プロジェクトは、2014年11月に開始され、当初は2016年1月までに完了する予定であった。しかし、対象地熱地点付近の治安悪化により、現場での調査（特にMT/TEM・重力探査）が大幅に遅延することとなり、プロジェクト全体の完了も大きく遅れることとなった。調査対象の5地点では、地質・地化学調査と環境社会配慮に係る調査を実施し、地熱資源ポテンシャルの再試算と開発優先度の検討までを行った。そのうちの3地点では、詳細調査としてMT/TEM法電磁探査及び重力探査を実施し、地下構造を詳細に把握したうえで、ポテンシャル試算の精度向上を図るとともに、地熱井掘削ターゲット選定に必要な情報を得た。調査に基づき検討された開発優先度の検討結果を考慮し、GDCの地熱開発戦略の更新及び政府による地熱開発推進政策への助言・提言を取りまとめた。

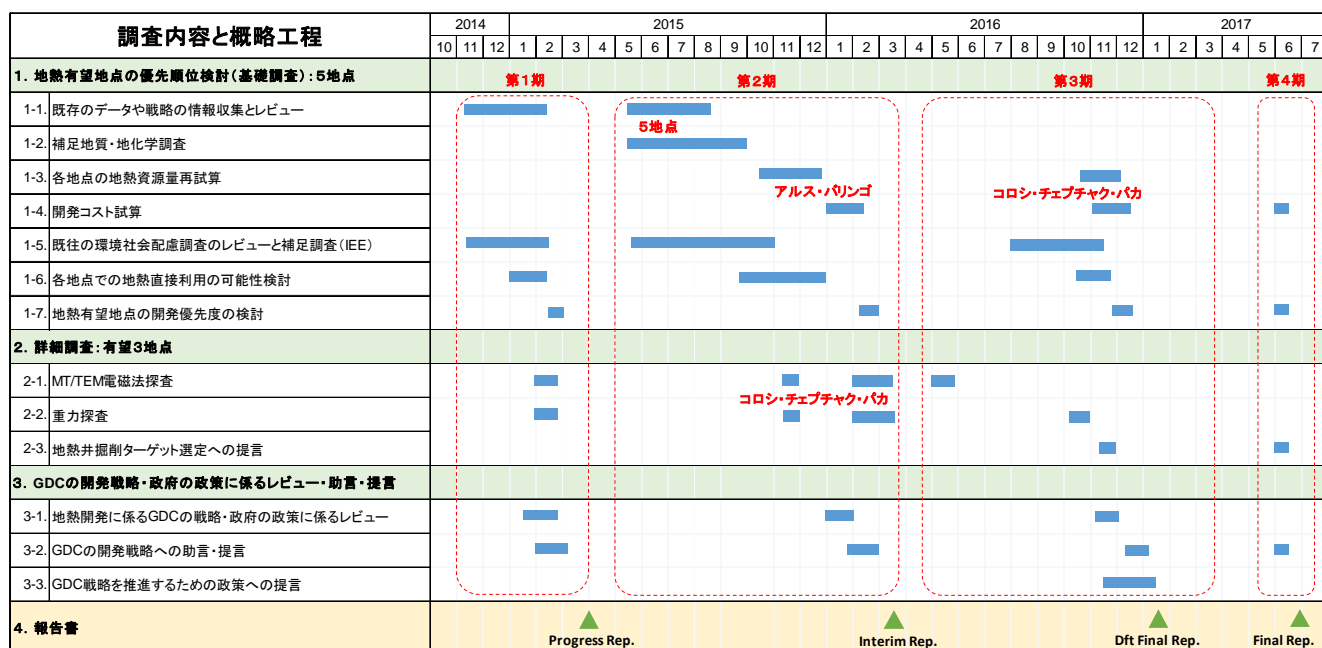


図 I -5-2 本プロジェクトでの調査内容と概略工程

I -6 プロジェクト要員

本プロジェクトは、15名の専門家により実施した。業務従事者ごとの分担業務内容を表 I -6-1 に示す。

表 I -6-1 調査要員表

氏名	担当	業務内容
松田 鉦二	総括/地熱開発計画	プロジェクト総括業務及び技術管理、地熱資源ポテンシャル再評価総括、地熱開発計画、マスタープラン更新提言
副田 宜男	副総括/地質A	プロジェクト総括業務及び技術管理の補佐、地熱資源関連分野業務（地質・地化学・物理探査・貯留層評価）の技術管理、「能力向上プロジェクト」との連携対応、地質調査、地熱系概念モデル構築、掘削ターゲット選定、地熱開発計画
景山 宗一郎	地質B	既存データレビュー、リモートセンシング、地質調査・解析、地質データ取りまとめ
小関 武宏	地化学	既存データレビュー、地化学調査・解析、地熱資源評価
本田 満	物理探査A	電磁探査（MT/TEM法）の計画立案・現地調査・データ解析・評価、既存物理探査データレビュー
賀来 学	物理探査B	重力探査の計画立案・現地調査・データ解析・評価
遠藤 晋	物理探査（補助）	現地調査・データ解析、既存物理探査データレビュー
鴫田 洋行	地熱貯留層評価A	地熱貯留層評価、地熱開発計画
エンリケ リマ	地熱貯留層評価B	地熱資源量評価（容積法）、マスタープラン更新提言
池田 哲	インフラ計画	インフラ計画、地熱開発計画
エルウィン ウルキオラ	発電プラント	最適なプラント導入モデルの検討・提案、地熱開発計画
松尾 照明	送電線計画	送電線計画
星野 隆行 (丸山 奈緒子)	環境社会配慮	環境社会配慮調査、地熱直接利用インタビュー
金子 正彦	政策レビュー/ 経済分析A	地熱開発政策のレビュー、政策提言、開発コスト分析、マスタープラン更新提言
リマ磯村 エンリケ祐樹	経済分析B	開発コスト分析

I -7 プロジェクトでの活動実績

本プロジェクトの第1期から第4期までの作業工程を表I -7-1から表I -7-2に示す。予定されていた現場での主な活動は、対象地点付近の治安悪化や悪天候（洪水）により大きく影響を受けた。資源調査のうち、補足地質・地化学調査の現場作業は2015年6月までに完遂できたが、GDCによる物理探査（MT/TEM・重力探査）のための現場作業は、2016年10月に漸く完了した。

第1期のプロジェクト着手時には、既存関連資料の収集を行うとともに、調査計画をまとめたインセプションレポートを作成した。2014年11月の第1次現地調査では、GDC関係者へのプロジェクト計画の説明を中心としたキックオフミーティングを開催した（2014年11月10日）。また、地熱資源・社会自然環境・電力開発計画（主に送電関係）のデータ・情報の収集をナクル及びナイロビで行い、現地視察としてアルス地点を訪問した。

第2次現地調査は二度に分けて実施した。2014年12月には、主に政策・経済関連の情報・データ収集や関連する協議をナイロビにおいて実施した。また、2015年の1月から2月にかけては、詳細調査の一環として、コロシ地点及びチェプチャク地点でのMT/TEM法探査及び重力探査を実施した。ただし、現場付近の治安状況から、対象地点での現場作業はGDCの技師らで実施され、JICA調査団員はナクルに滞在して、電子メールでの連絡や週に1度程度の打合せを行うことで、測定作業の監理を行った。

第1次及び第2次の国内作業では、収集したデータ・情報の整理・レビューを行った。また、主に経済性の検討として、国/民間による地熱開発コストの分析や、最適な発電プラント導入モデル（坑口発電プラントの利用）に係る検討を行った。MT/TEM法探査及び重力探査に関しては、測定データの整理やデータ品質確認のための予備的解析を行った。

第2期の第3次現地調査（2015年5～6月）では、地質・地化学及び環境社会配慮の補足調査を実施した。治安状況による制限のため、一部地域の現場作業はGDCの技師らのみで行われたり、地熱直接利用に係る住民インタビューは集会を開催して実施したりしたが、対象5地点の現場調査は完遂できた。しかし、同時期に予定されていた物理探査の現場作業は実施できず延期された。

第3次の国内作業では、現地で採取した岩石や水・ガスの室内分析や得られたデータ・情報の整理・解析を行った。引き続き、それらの結果に基づき、物理探査は行わないアルス・バリングの各地点の資源ポテンシャルの再評価と開発コスト試算を行った。また、主に経済性の検討として、国/民間による地熱開発コストの分析や、最適な発電プラント導入モデル（坑口発電プラントの利用）に係る検討を継続して行った。

2015年11月には、MT/TEM法探査及び重力探査の現地測定データの品質確認、データ整理・補正の確認・指導及び再測定の指示等を行うために現地調査を行い、GDCの技師とともにナクルのGDC事務所で作業を実施した。

第3期の第4次現地調査では、カウンターパートへのインテリムレポート内容の説明を行なうとともに、追加情報の収集を行なった。最後に残された物理探査の現場作業は、チェプチャクでの重力探査であったが、GDCにより2016年10月に完了することができた。

第4次の国内作業では、物理探査データの解析に続き、対象5地点の資源量の再評価、調査井掘削ターゲットの選定、開発優先度やマスタープラン更新のためなどの検討を行なった。それらの結果に基づき、ドラフトファイナルレポートを作成した。

2017年2月に実施した第5次現地調査では、ドラフトファイナルレポートの内容をGDCに説明

するとともに協議を行った。第3期から第4期にかけての第5次国内作業において、ドラフトファイナルレポートの修正によるファイナルレポートの作成を行った。

表 I -7-1 作業工程表 (第1期)

作業項目	第1期					
	1	2	3	4	5	6
	2014年度					
期間	10月	11月	12月	1月	2月	3月
1. 国内事前準備作業						
1-1. 関連資料・情報の収集分析		□				
1-2. インセプションレポート作成		□				
1-3. 対処方針会議への出席、インセプションレポート説明		□				
2. 第1次現地調査						
2-1. JICAケニア事務所との打合せ、インセプションレポート説明		■				
2-2. ケニア側へのインセプションレポート説明		■				
2-3. GDCからの既存情報収集		■				
2-4. 対象地点の視察、第2次現地調査以降の踏査計画検討		■				
2-5. 他ドナーの援助動向の確認		■				
3. 第1次国内作業						
3-1. 第1次現地調査で入手した既存資料のレビュー		□				
3-2. 地質・地化学及び社会環境配慮の既存データ分析		□				
3-3. 派遣前会議出席、第2次現地調査計画の説明		□				
4. 第2次現地調査						
4-1. JICAケニア事務所と打合せ、第2次現地調査計画の説明			■			
4-2. GDCと物理探査地点の確認			■			
4-3. 既存情報収集 (政策・経済関係)			■			
4-4. コロン・チェブチャク地点における物理探査 (重力探査及びNMT/TEM探査)					■	
5. 第2次国内作業						
5-1. 収集データ解析				□	□	
5-2. コロン・チェブチャク地点の物理探査データ解析				□	□	
5-3. 技術/経済的に最適な大小規模プラント導入モデルの提案				□	□	
5-4. 国/民間による開発コストの分析				□	□	
5-5. プロGRESSレポート作成						□
報告書						△IC/R △PR/R

表 I -7-2 作業工程表 (第2期)

期間	第2期									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	2015年度									
作業項目	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月
6. 第3次現地調査										
6-1. JICAケニア事務所と打合せ、第3次現地調査計画の説明		■								
6-2. ケニア側へのプログレスレポート説明		■								
6-3. GDCと地質・地化学及び環境社会配慮の補足調査地点および物理探査地点の確認		■								
6-4. 地質・地化学及び環境社会配慮の補足調査 (アルス、バリンゴ、コロシ、チュプチャク、パカ)		■	■							
6-5. 地熱直接利用の希望・可能性に関する住民インタビュー		■	■							
6-6. パカ地点における物理探査 (重力探査及びMT/TEM探査)							■	■		
6-7. 他ドナーの援助動向の確認		■								
7. 第3次国内作業										
7-1. 収集データ解析、採取試料分析										
7-2. 地熱系概念モデルの更新、地熱資源量の再評価 (アルス、バリンゴ)										
7-3. 開発コストの概算 (アルス、バリンゴ)										
7-4. IBEレベル環境社会配慮調査と地熱直接利用インタビュー結果まとめ										
7-5. パカ、コロシ、チュプチャク地点の物理探査の監理およびデータ解析										
7-6. 発電プラントの導入モデルとコスト分析										
7-7. 地熱開発における国・民間別のコスト分析										
7-8. インタリムレポート作成										
報告書										IT/R△

表 I -7-3 作業工程表 (第3期)

期間	第3期										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	2016年度										
作業項目	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
1. 第3次国内作業 (その2)											
1-1. 派遣前会議出席、第4次現地調査計画の説明		■									
2. 第4次現地調査											
2-1. JICAケニア事務所と打合せ、第4次現地調査計画の説明			■								
2-2. ケニア側へのインタリムレポート説明			■								
2-3. ケニア政府の地熱開発政策に関する情報収集			■								
2-4. 調査対象地域に関する補足情報の収集			■								
2-5. 他ドナーの援助動向の確認			■								
3. 第4次国内作業											
3-1. パカ地点等の物理探査のデータ解析 (残りデータ解析の完了)											
3-2. コロシ、チュプチャク、パカの貯留層概念モデル構築、地熱資源量の再評価、掘削ターゲット選定											
3-3. コロシ、チュプチャク、パカの開発コストの算定											
3-4. 対象5地点の開発優先度の検討											
3-5. 地熱開発マスタープラン及びケニア政府の地熱開発政策のレビュー											
3-6. 地熱開発マスタープラン更新に対する提言の取りまとめ (シラリ含む6地点を対象)											
3-7. ケニア政府の地熱開発政策に対する提言の取りまとめ											
3-8. ドラフトファイナルレポート作成											
3-9. 派遣前会議出席、ドラフトファイナルレポート説明											
4. 第5次現地調査											
4-1. 大使館・JICAケニア事務所と打合せ、ドラフトファイナルレポート説明											
4-2. ケニア側へのドラフトファイナルレポート説明											
5. 第5次国内作業											
5-1. ファイナルレポートの作成											
報告書											△DF/R

表 I -7-4 作業工程表 (第4期)

期間 作業項目	第4期			
	1	2	3	4
	2017年度			
	5月	6月	7月	8月
1. 第5次国内作業				
1-1. ファイナルレポートの作成				
1-2. JICAへのファイナルレポート説明				
報告書			△ F/R	

II 地熱資源ポテンシャルの再評価

前章に述べたように、これまでの活動により対象 5 地点の補足地質・地化学調査とコロシ・チエプチャク・パカの 3 地点の物理探査を実施した。それらの結果に基づき、5 地点の地熱系概念モデルを再構築したうえで、地熱資源量の再試算を行なった。

補足地質・地化学調査、物理探査の解析、資源ポテンシャルの再評価の結果を以下に記述する。

II -1 既存データ・情報の収集

対象地点付近における既往の地熱資源調査の結果によるデータ・情報を、GDC の内部データや報告書、さらに公表されている文献等から収集した。収集した文献や報告書類の一覧を表 II -1-1 に示す。

対象地点であるケニア北部のグレートリフトバレー（大地溝帯）付近では、地熱開発を目的とした各種の資源調査が 1990 年代から実施されている。資源調査は、地質調査、地化学調査、物理探査のほか、放熱量調査なども実施されている。ただし、本プロジェクトでの対象 5 地点においては、地熱調査井の掘削はまだ行われていない。GDC は、対象の 5 地点各々について、既存データも含めた地質・地化学・物理探査の結果をまとめた報告書を、2011 年から 2013 年にかけて作成している。

広域的・包括的な資源調査や評価に係る報告書としては、英国地質調査所（BGS）による詳細な地質・地化学調査の結果をまとめたもの（Dunkley et al., 1993）や、KenGen による地熱地点の比較評価の報告書（2002）が代表的なものである。

文献や報告書類以外には、各地熱地点の地形データや一部の探査データの電子ファイルを GDC から収集した。

表 II -1-1 地熱資源に係る収集文献・報告書類

地熱地点	文献名	出典
アルス	DRAFT REPORT OF ARUS GEOTHERMAL PROSPECT AREA	GDC (2013)
	Integrated Geophysical Study of Lake Bogoria Basin, Kenya: Implications for Geothermal Energy Prospecting	Mulwa et al. (2010)
バリンゴ	LAKE BARINGO GEOTHERMAL PROSPECT, INVESTIGATION FOR ITS GEOTHERMAL RESOURCE POTENTIAL, A Geothermal Resource Assessment Project Report	GDC (2011)
	RESISTIVITY STUDIES OF THE LAKE BARINGO GEOTHERMAL PROSPECT, KENYA	Simiyu et al. (2011)
	GEOSCIENTIFIC EVALUATION OF THE LAKE BARINGO GEOTHERMAL PROSPECT, A GEOTHERMAL RESOURCE ASSESMENT REPORT	KenGen (2005)
コロシ/ チェプチャク	KOROSI-CHEPCHUK GEOTHERMAL PROSPECT	GDC Internal
	STRATIGRAPHICAL MODEL OF KOROSI GEOTHERMAL PROSPECT, KENYA	Njue (2014)
	Evaluation of the Geothermal Potential for Korosi/Chepchuk Prospect, Kenya, Using GIS	Shako and Mutua (2012)
	Geochemistry of Fumarole Discharges and Borehole Waters of Korosi-Chepchuk Geothermal Prospect, Kenya	Ochieng et al. (2012)
パカ	PAKA GEOTHERMAL PROSPECT, INVESTIGATION FOR ITS GEOTHERMAL RESOURCE POTENTIAL, A Geothermal Resource Assessment Project Report	GDC (2011)
	PAKA GEOTHERMAL PROSPECT – GEOCHEMISTRY REPORT	GDC (2012)
	Application of Transient Electromagnetics in Static Shift Correction for Magnetotellurics Data Case Study: Paka Geothermal Prospect in Kenya	Mwakirani et al. (2012)
	Joint Inversion of TEM and MT Data from Paka Geothermal Prospect in Kenya	Lichoro and Wamalwa (2011)
	Radon and Soil Gas Surveys in Paka Geothermal Prospect, Kenya	Opondo (2010)
	MIXING TRENDS AND SOLUTE GEOTHERMOMETRY OF BOREHOLE WATERS FROM THE PAKA GEOTHERMAL PROSPECT, KENYA	Opondo (2008)
	GEOTHERMAL MAPPING USING TEMPERATURE MEASUREMENTS	Mwawongo (2013)
広域・総合	GEOTHERMAL EXPLORATION IN KENYA	Omenda (2010)
	RANKING OF THE GEOTHERMAL PROSPECTS IN THE KENYA RIFT VALLEY	KenGen (2002)
	EVALUATION OF HEAT LOSS IN THE NORTHERN KENYA RIFT VALLEY	Ndolo (2000)
	The geothermal activity and geology of the northern sector of the Kenya Rift Valley	British Geological Survey (BGS): Dunkley et al. (1993)

II -2 地質調査

II -2.1 リモートセンシング解析

本業務の対象地域の多くは、道路の整備状況が悪くかつ治安問題が存在するため、アクセスが困難である。そのため、現地踏査を実施できる範囲はかなり限られたものとなる可能性があるが、それを補完するために、アクセス困難な場所を含む衛星画像データを最大限に活用した地質・熱構造の解析を行った。

衛星画像データや数値標高モデル（以下、DEM）を用いた各種処理・解析を実施することによって、地熱徴候（断裂系、変質帯、熱異常など）に関連する情報を抽出することが可能であり、その結果は資源ポテンシャルの再評価の基礎となる地熱系概念モデルの構築においても有益な情報となり得る。対象地域の5地点について、衛星画像データ処理・解析を実施した。衛星画像データより抽出可能な地熱徴候、使用する衛星画像データ及び適用する処理・解析手法の一覧を表 II -2-1 に示す。

使用した衛星画像データは、地球観測衛星 LANDSAT に搭載されている光学センサである ETM+（以下、LANDSAT/ETM+）、TERRA/ASTER、ALOS/PRISM 及び ALOS/AVNIR-2 である。また、使用した DEM は SRTM-3/DEM 及び ASTER/GDEM である。特に、高い空間及びスペクトル分解能を有する TERRA/ASTER データは、地熱兆候である変質鉱物及び熱異常の抽出に適用した。

現地調査の結果及び現地にて収集した地質図幅等の詳細な地質情報を基に、各種衛星画像データ及び DEM を用いた地質・地質構造判読を実施した。ここで作成された地質・地質構造判読図は、各地熱有望地点の地質情報を統一的な視点でもって解析・集約した総合的な地質図となり、地熱構造の解析や優先順位付けに資する重要な情報の1つとなる。また、現地にて確認した地熱徴候（変質帯、熱異常等）及び試料分析結果（スペクトル測定結果）を教師とした再処理・解析を行ない、より詳細な地熱徴候の抽出を試みた。

表 II -2-1 衛星画像データ処理・解析一覧

地表徴候	使用する衛星画像データ (衛星名/センサ名/観測波長域)	処理・解析手法
断裂系	ALOS/PRISM ALOS/AVNIR-2	パンシャープン処理 ペア画像を用いた立体視地形判読 立体斜度図 上記処理画像を用いた目視判読（リニアメント）
	TERRA/ASTER GDEM（地形データ） SRTM-3 DEM（地形データ）	地形解析（傾斜量/陰影合成図作成） 地形解析結果を用いた目視判読（リニアメント）
変質帯	TERRA/ASTER SWIR	スペクトル解析による変質鉱物マッピング
熱異常	TERRA/ASTER/TIR	地表面温度推定、熱異常域抽出

(1) ベースマップ作成

入手した衛星画像データや第1次国内作業及び第1次現地調査において収集した資料に基づき、第2期に実施した補足地質・地化学調査で利用した各種ベースマップを、地理情報システム（以下、GIS）ソフトウェアである ArcGIS を用いて作成した。ベースマップ作成のために

使用したデータの一覧を表 II -2-2 に示す。ベースマップの例として、パカ地点の TERRA/ASTER 擬似カラー合成画像を巻末資料に示す。

表 II -2-2 ベースマップ作成に用いた使用データ一覧

種類	仕様データ	出典
衛星画像	TERRA/ASTER 擬似カラー合成画像	METI/NASA
DEM	ASTER/GDEM (標高) ASTER/GDEM (等高線) ASTER/GDEM 陰影段彩図	METI/NASA JICA Project Team JICA Project Team
地質及び地熱地域	地質図 地熱微候図 噴気及び温泉の位置情報	MOE MOE GDC
保護地域	国立公園 保護林	GDC GDC

(2) 衛星画像データ処理及び解析

それぞれの対象地点において地熱微候に関する情報を抽出すべく、各種衛星画像データ処理及び解析を実施した。

擬似カラー合成画像作成

既述の ASTER VNIR (可視近赤外放射計) 擬似カラー合成画像に加えて、バンド 4 (1.600～1.700 マイクロメータ)、バンド 6 (2.185～2.285 マイクロメータ) 及びバンド 8 (2.295～2.365 マイクロメータ) の反射強度を割り当てることによって合成画像を作成した。このバンド組み合わせは熱水変質を識別・抽出するのに有効といわれている。本手法の詳細は巻末資料に示す。

パカ地点における ASTER SWIR 擬似カラー合成画像と既存地質情報との比較の結果、マゼンタに発色する幾つかのピクセルは既知の噴気孔に対応していることが明らかになった (図 II -2-1)。それ以外 (既知の噴気孔に対応するもの以外) にもマゼンタのピクセルが観察されるため、これら変質帯である可能性のあるピクセルについては、補足地質・地化学調査において確認を実施した。

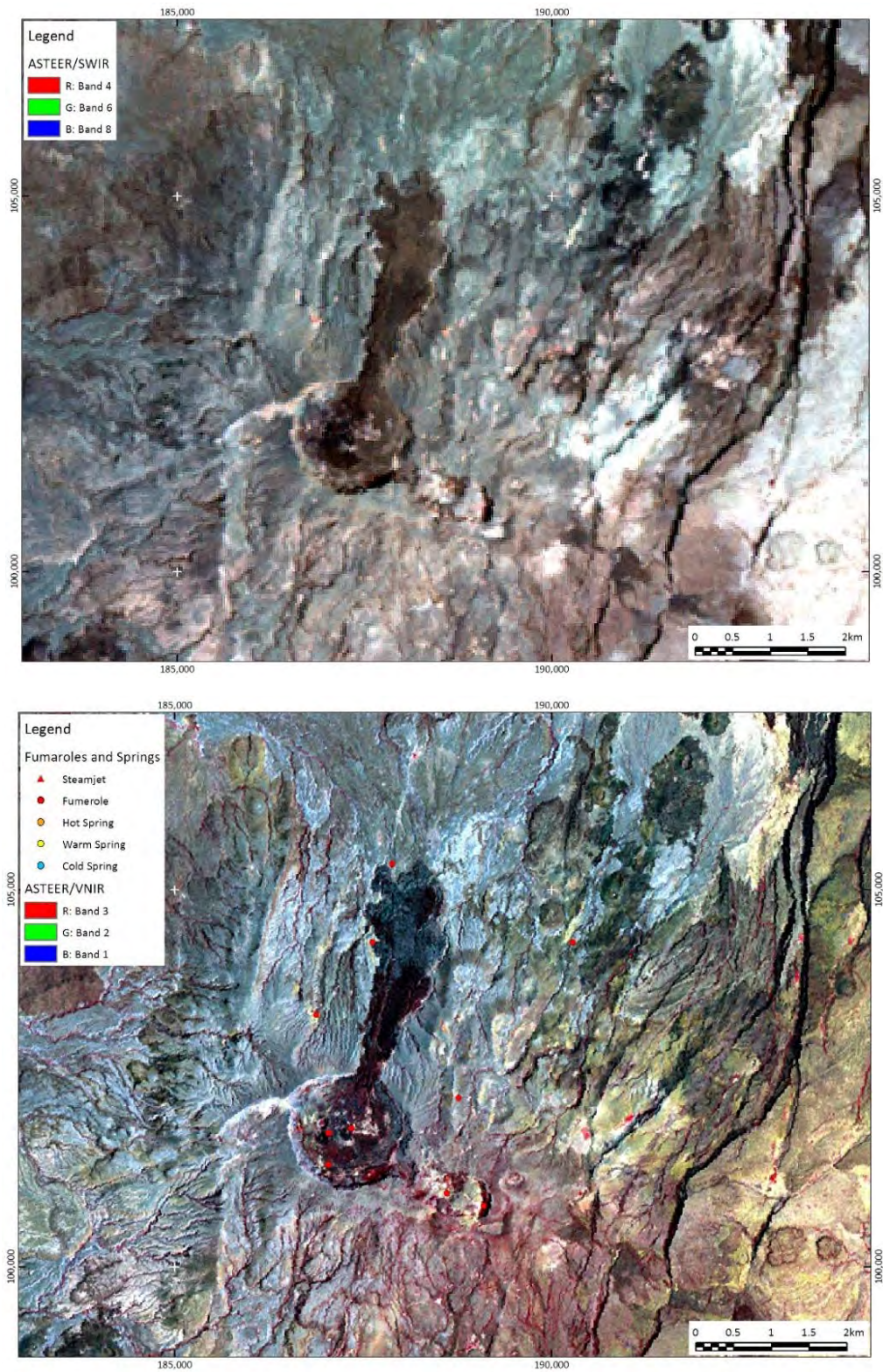


図 II -2-1 パカ地点における ASTER SWIR フォールスカラー画像（上）と VNIR フォールスカラー画像上にプロットした既知の地熱徴候（下）との比較

Relative absorption band-depth 画像

前項において既述した擬似カラー合成画像作成において、対象地域に位置する変質帯とその構成鉱物は、ASTER SWIR データのスペクトル特徴、言い換えると吸収を示す観測波長帯とその深さによって抽出できる可能性が示された。そこで本業務においては、鉱物マッピング手法の一つである relative absorption band-depth (Crowley ほか, 1989、以下、RBD) 法を適用した。RBD 法の詳細については巻末資料に示す。

RBD 法による kaolinite のマッピングの結果と既存の地質情報との比較結果 (図 II -2-2) においては、いくつかの高い異常値を示すピクセルは機知の噴出孔に対応することが明らかになった。

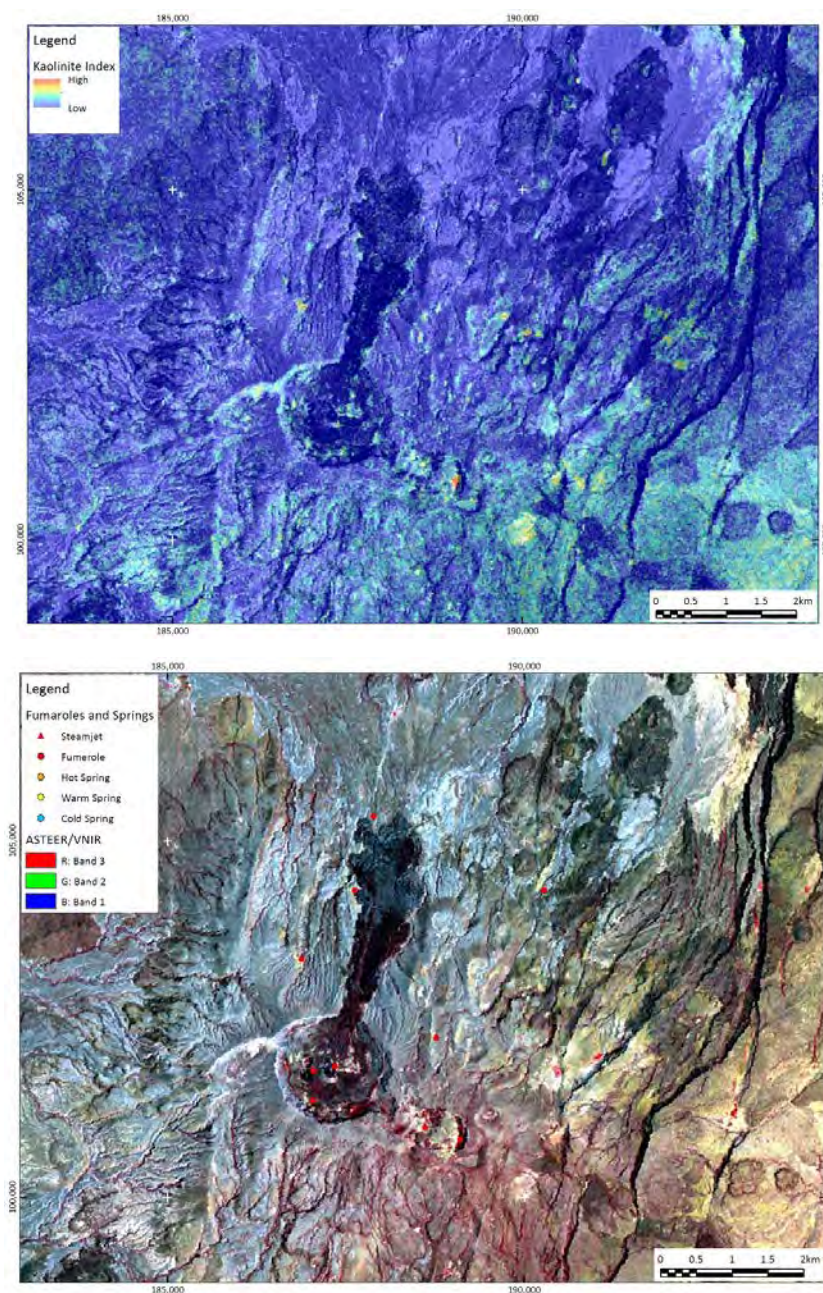


図 II -2-2 ASTER SWIR RBD 画像 (kaolinite、上) と VNIR フォールスカラー画像上にプロットした既知の地熱徴候 (下) との比較

地形解析

地熱徴候の一つである断裂構造に関する地質情報を抽出するために、主として ASTER GDEM データを用いた各種地形解析を実施した。地形解析の例として、パカ地点の傾斜量－陰影合成画像を巻末資料に示す。

ALOS/PRISM 立体衛星画像

断裂構造に関する地質情報を抽出するために、空間分解能 2.5m の ALOS/PRISM データを用いて立体衛星画像（アナグリフ画像）を作成した。パカ地域の立体衛星画像を巻末資料に示す。

画像判読

以上により作成した衛星画像及び地形解析結果を用いて、断裂構造に関する地質情報（リニアメント）を抽出するため画像判読を実施した。各地点におけるリニアメント判読結果を図 II -2-3～図 II -2-6 に示す。対象地域である 5 地点においては、概ね N-S 方向もしくは NNE-SSW 方向のリニアメントが卓越しており、その方向性は地溝帯の伸長方向と一致する。全体的に連続性の良いリニアメントが抽出されるが、これらはリフティングに伴う断層活動（正断層）によって形成された直線的な急崖地形（断層崖）に対応している。また、現地調査の観察結果及び既存地質図等の情報に基づき、画像判読によって岩相区分を実施したが、岩相区分の結果については「地質解析」の項において記す。

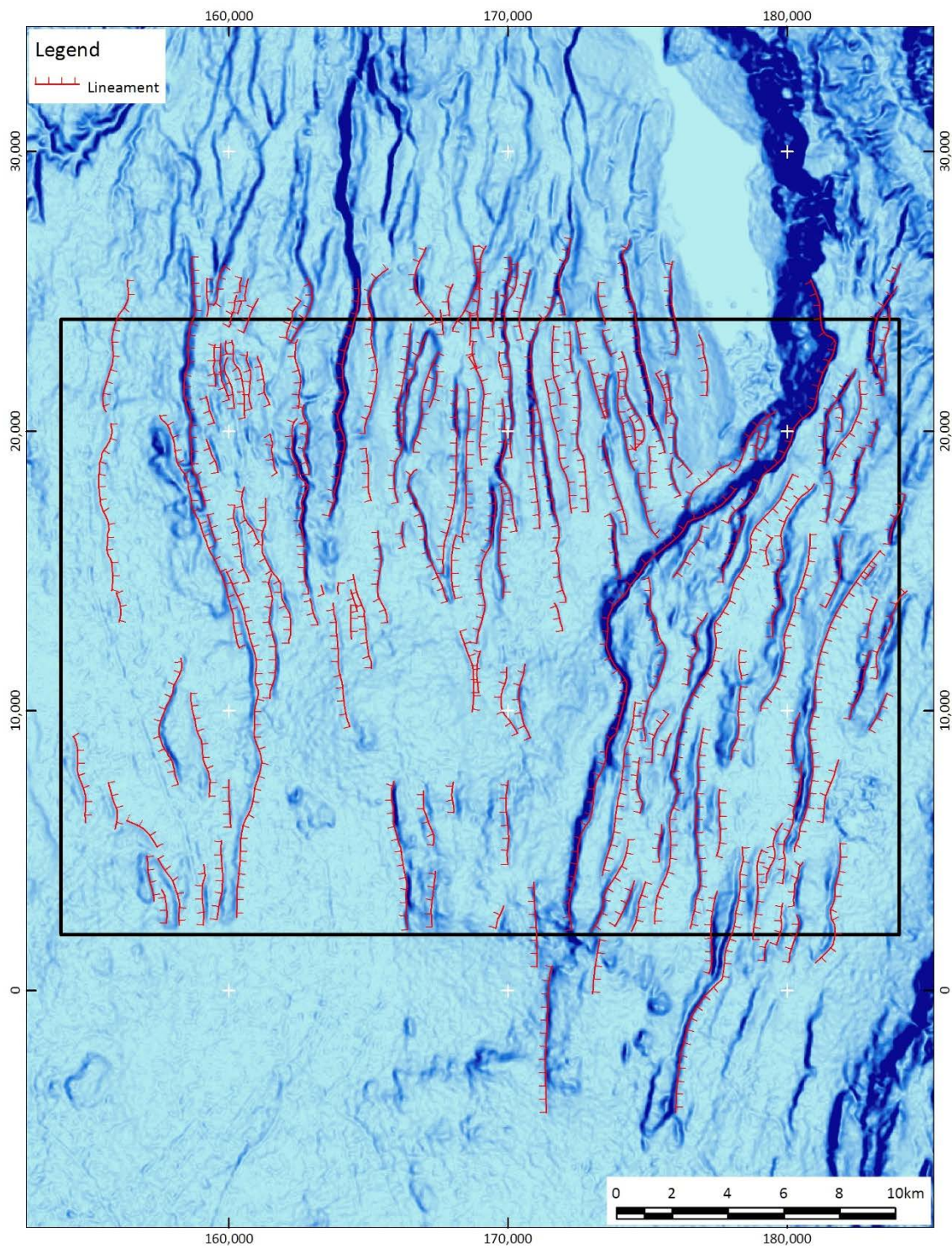


図 II -2-3 アルス地点におけるリニアメント判読結果

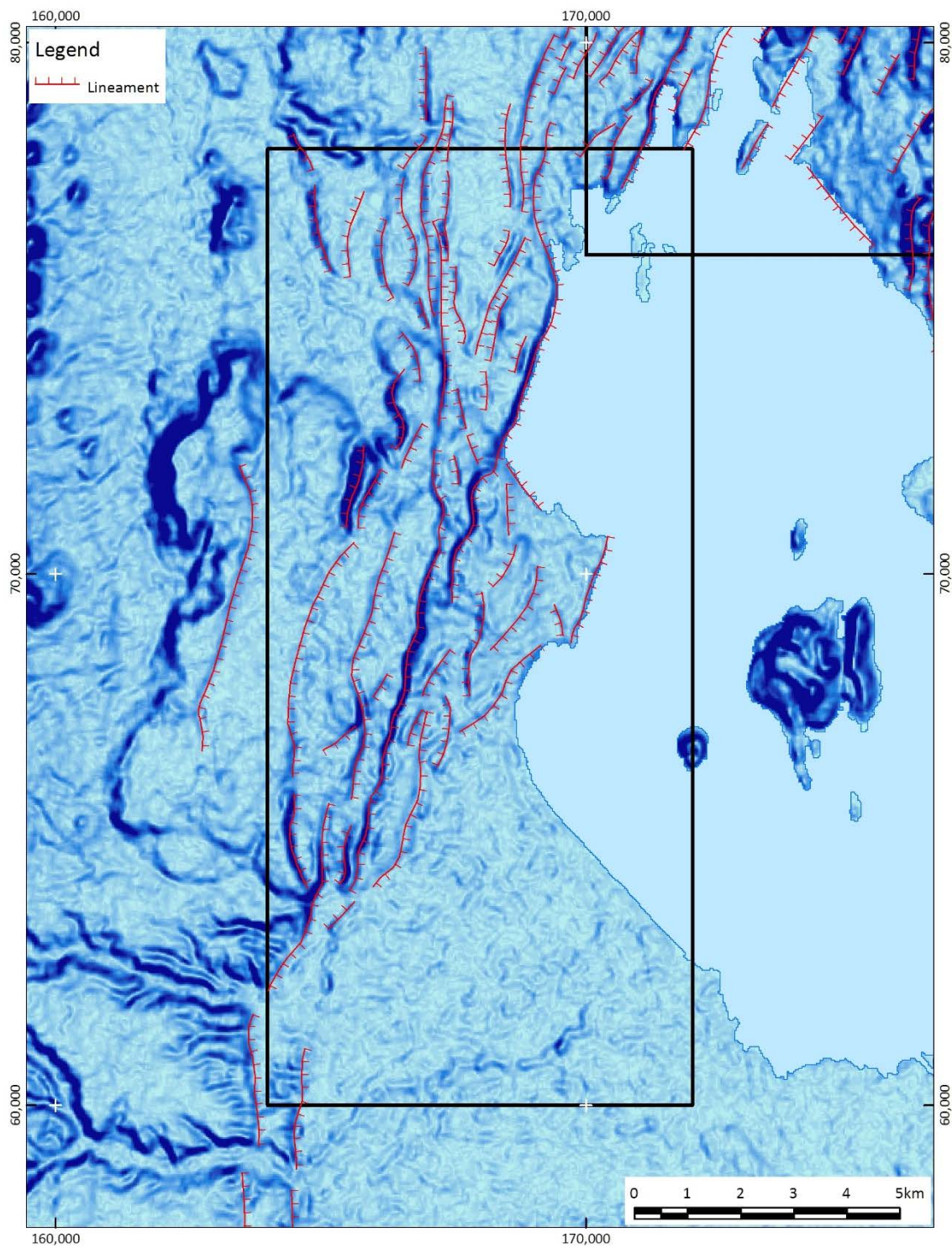


図 II -2-4 バリンゴ地点におけるリニアメント判読結果

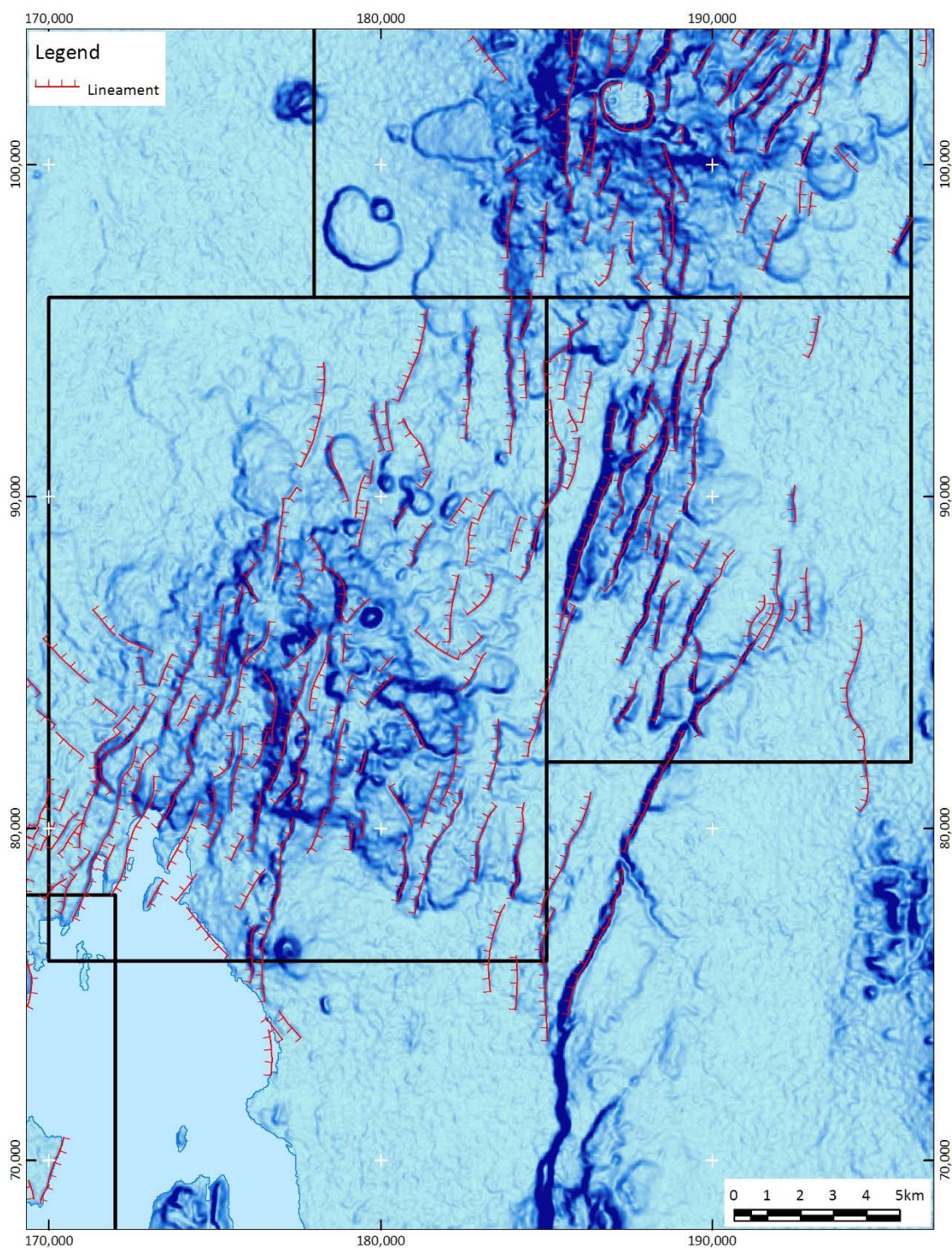


図 II -2-5 コロシ地点 (左) 及びチェプチャク地点におけるリニアメント判読結果

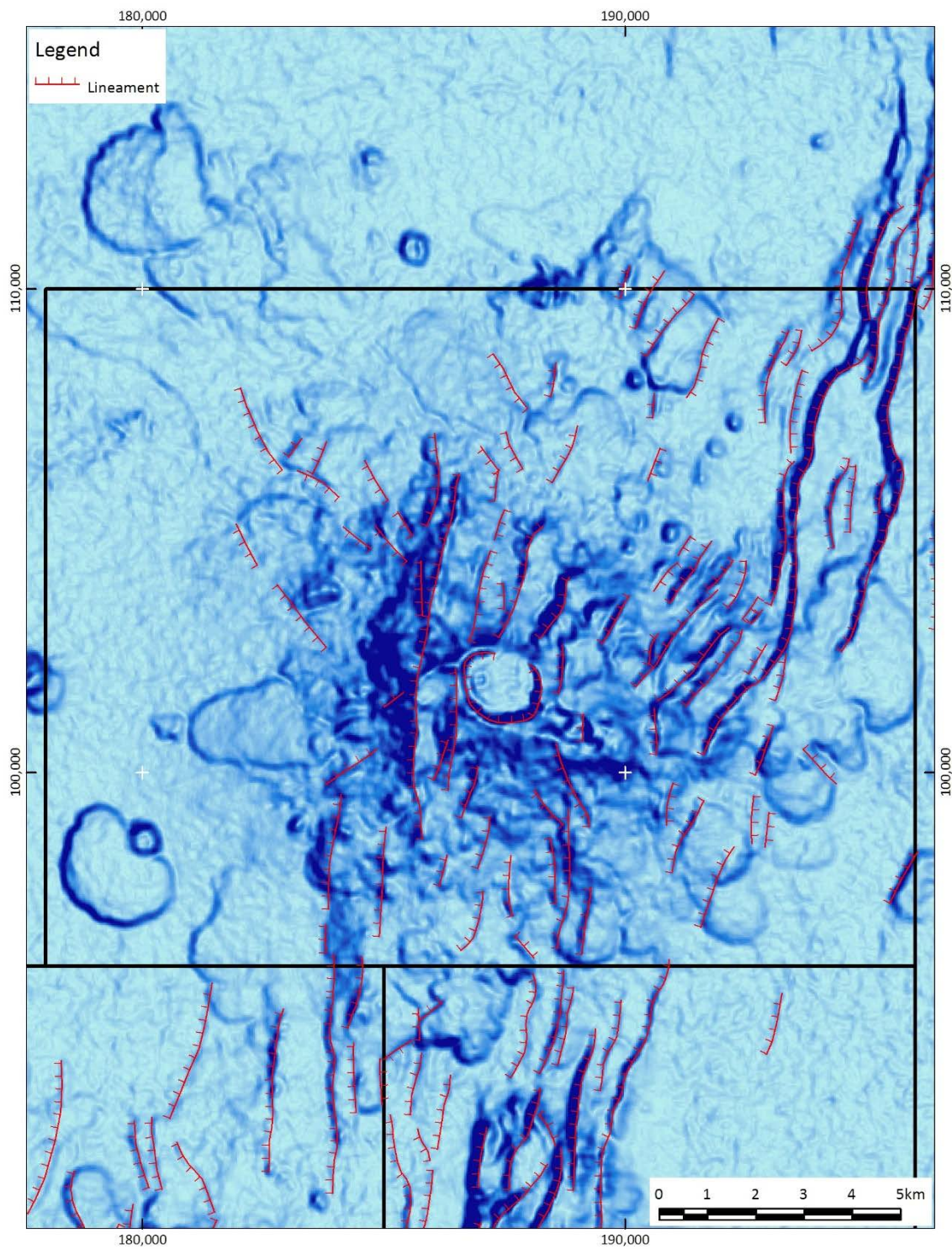


図 II -2-6 パカ地点におけるリニアメント判読結果

II -2.2 補足調査結果

第1期において実施した既存データ・情報のレビュー結果及びリモートセンシング調査結果の確認作業及び不足データの取得を目的とした補足調査(現地調査)を実施した。本調査は2015年5月26日～6月4日(調査団は5月26日～5月29日のみ同行)に実施された。主な調査結果は次の通りである。

(1) バリンゴ地点(5月26日～27日)

主要断層(NNE-SSW系)に沿って分布する既知の北部噴気帯(Moinonin)及び南部噴気帯の2ヶ所を中心に地質調査を行ない、地表に露出する岩相の観察・記載、変質帯分布の把握、地表地熱徴候の状況確認、地質構造の確認及び岩石試料採取を行った。調査地点位置図を図II-2-7に示し、図II-2-9に主要な調査地点の現地状況写真を示す。南部噴気帯においては、噴気孔と思われる箇所を確認したが、噴気を観察することはできなかった。一方、北部噴気帯においては、約150m×50mの範囲にわたって熱水変質作用を受けた火山岩(trachyte)が分布しており、90℃以上の蒸気噴出が観察された。なお、変質帯は南北方向に伸長しており、当該地域における主要な地質構造の方向性とも調和的である。

(2) アルス地点(5月28日～29日)

南北系の断層崖に沿って分布する既知の噴気帯(Steam Jet)と、当該地点の北部に位置する噴気帯を中心に地質調査を行ない、地表に露出する岩相の観察・記載、変質帯分布の把握、地表地熱徴候の状況確認、地質構造の確認及び岩石試料採取を行った。調査地点位置図を図II-2-8に示し、図II-2-10に主要な調査地点の現地状況写真を示す。Steam Jetにおいては、大規模かつ90℃以上の蒸気噴出が複数見られ、断層崖下部の河川沿いにおいては、蒸気噴出に加えて沸騰泉も観察される。噴気帯は南北系の断層に規制されていると考えられるが、東西系の断裂(胴切り断層?)に沿って流下する小河川の河床にも小規模な噴気孔が多数観察される。また、北部噴気帯においては、断層崖の中腹に位置する噴気孔(64℃)が複数確認された。

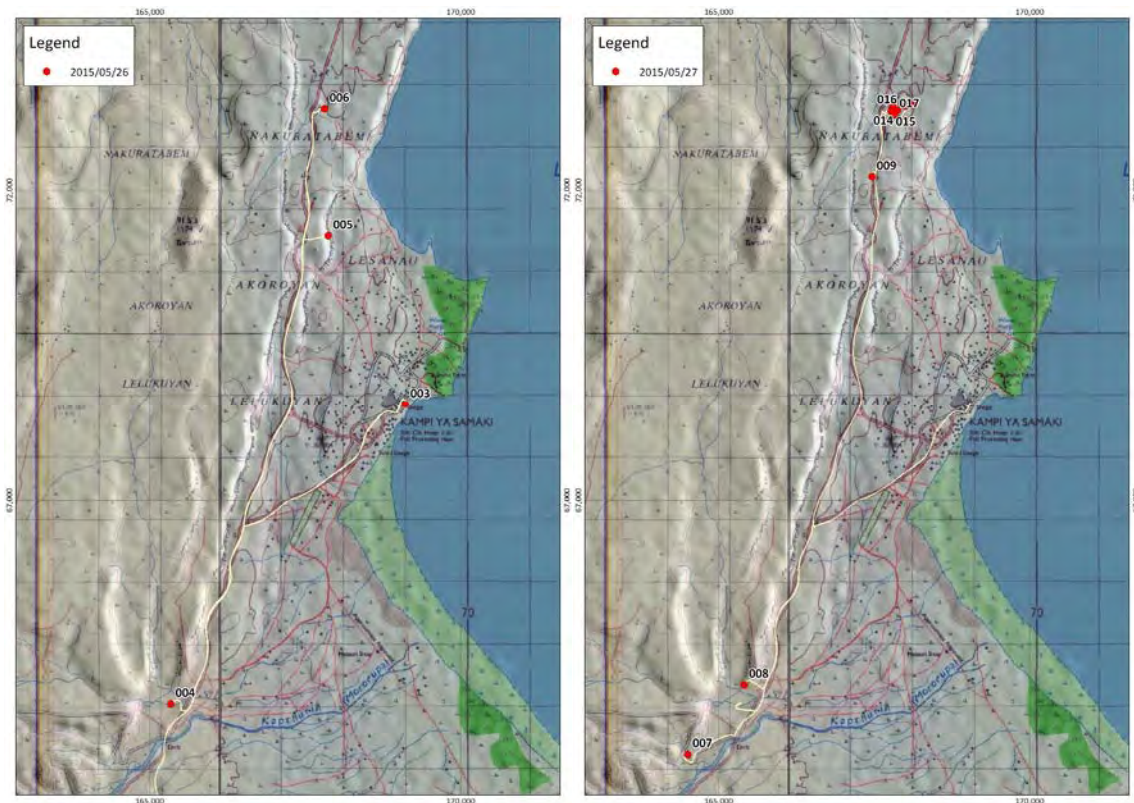


図 II -2-7 調査地点位置図 (バリngo地点)

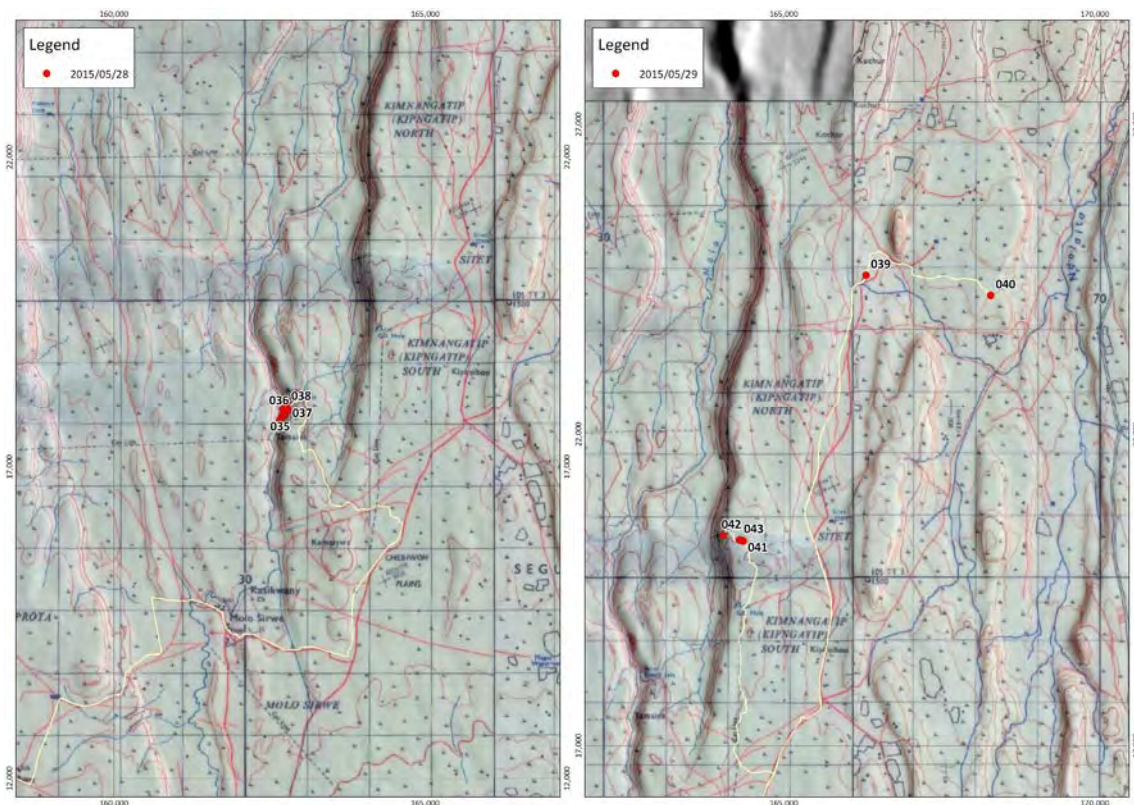


図 II -2-8 調査地点位置図 (アルス地点)

		
<p>南部噴気帯(008)</p>	<p>南部噴気帯(008) 噴気孔? 蒸気は観察されず</p>	<p>南部噴気帯(008) リフティングに伴う断層崖</p>
		
<p>南部噴気帯(008) 石英脈及び trachyte 露頭</p>	<p>北部噴気帯(006) 噴気帯遠景、N-S 方向に伸長</p>	<p>北部噴気帯(006) 噴気孔周辺</p>
		
<p>北部噴気帯(006) 噴気孔、93.5 度</p>	<p>北部噴気帯(006) 噴気孔周辺の強変質岩露頭</p>	<p>北部噴気帯(015) 断裂帯(N30E)</p>
		
<p>北部噴気帯(015) 断層沿いの粘土鉱物</p>	<p>北部噴気帯(017) 弱～中変質岩(trachyte)</p>	<p>北部噴気帯(017) E-W 系断裂系沿いの変質帯</p>

図 II -2-9 現地調査状況 (バリング地点)

		
<p>スチーム・ジェット(019~038) 河川沿いの断層崖</p>	<p>スチーム・ジェット(034) 断層崖上部の蒸気噴出</p>	<p>スチーム・ジェット(034) 噴出孔付近の強変質岩及び 白色沈殿物</p>
		
<p>スチーム・ジェット(032) 河川沿いの中～強変質岩石露頭</p>	<p>スチーム・ジェット(032) 河川沿いの強変質岩石</p>	<p>スチーム・ジェット(026 to 029) 河川沿いの沸騰泉</p>
		
<p>スチーム・ジェット(026 to 029) 河川沿いの沸騰泉</p>	<p>スチーム・ジェット(023 to 025) 東西系小河川沿いの噴出孔</p>	<p>スチーム・ジェット(023 to 025) 小河川沿いの噴出孔(拡大)</p>
		
<p>北部噴気帯(040) 噴気孔、蒸気は観察されず</p>	<p>北部噴気帯(042) リフティングに伴う断層崖</p>	<p>北部噴気帯(042) 噴気孔、64.0°C</p>

図 II -2-10 現地調査状況 (アルス地点)

(3) パカ地点 (5月30日、6月1日)

パカ火山山頂のカルデラ内部及び山体北側に発達する南北系の断層崖に沿って分布する噴気帯を中心に地質調査を行ない、地表に露出する岩相の観察・記載、変質帯分布の把握、地表地熱徴候の状況確認、地質構造の確認及び岩石試料採取を行った。調査地点位置図を図 II -2-11 に示し、図 II -2-14 に主要な調査地点の現地状況写真を示す。パカ火山の山頂は二重カルデラとなっており、中央火口丘（内輪）周辺に多数の噴気が観察される。

(4) チェプチャク地点 (6月2日)

南北系の断層に沿って分布する既知の噴気帯を中心に地質調査を行ない、地表に露出する岩相の観察・記載、変質帯分布の把握、地表地熱徴候の状況確認、地質構造の確認及び岩石試料採取を行った。調査地点位置図を図 II -2-12 に示し、図 II -2-15 に主要な調査地点の現地状況写真を示す。

(5) コロシ地点 (6月3日)

南北系の断層及びカルデラ構造に沿って分布する既知の噴気帯を中心に地質調査を行ない、地表に露出する岩相の観察・記載、変質帯分布の把握、地表地熱徴候の状況確認、地質構造の確認及び岩石試料採取を行った。調査地点位置図を図 II -2-13 に示し、図 II -2-16 に主要な調査地点の現地状況写真を示す。

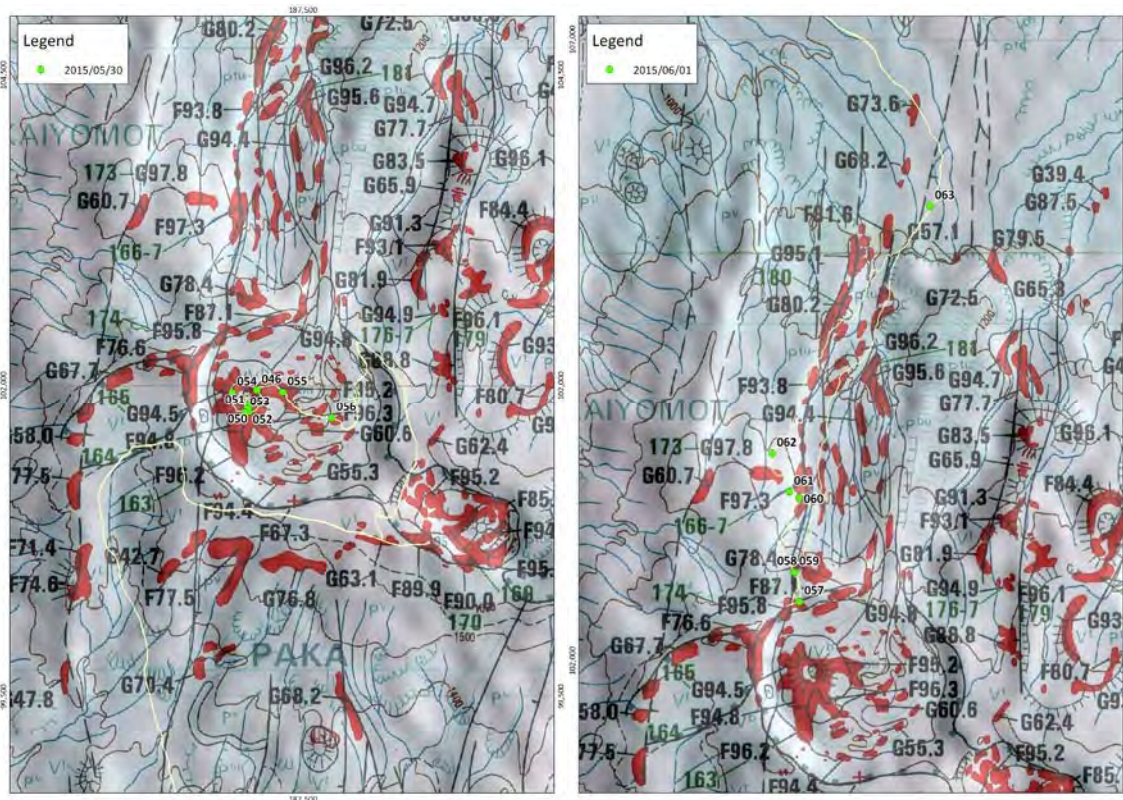


図 II -2-11 調査地点位置図 (パカ地点)



図 II -2-12 調査地点位置図 (チェプチャク地点)

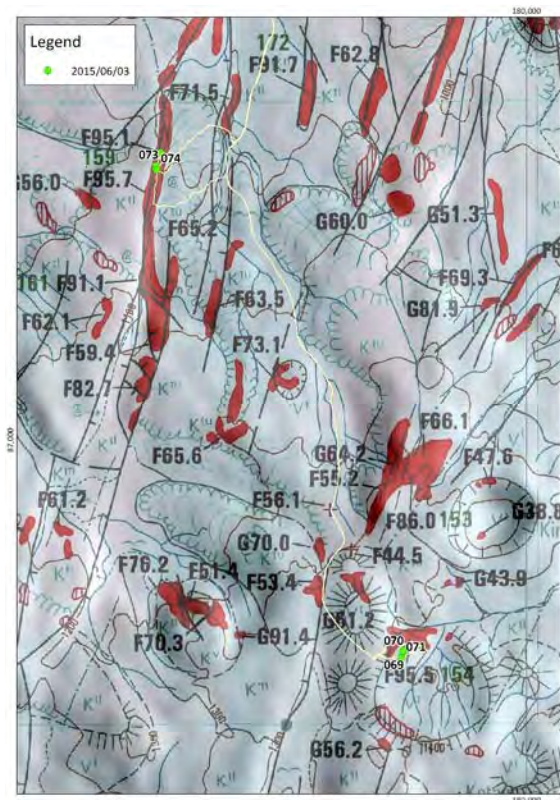


図 II -2-13 調査地点位置図 (コロシ地点)













		
<p>Paka 火山山頂 二重カルデラ</p>	<p>Paka 火山山頂 外輪のカルデラ崖</p>	<p>中央火口丘・上部(048) 噴気孔、83.2°C</p>
		
<p>中央火口丘・上部(048) 噴気孔周辺の強変質岩露頭</p>	<p>中央火口丘・内部(051) 火口壁における不整合</p>	<p>中央火口丘・内部(051) カルデラ底の強変質岩露頭</p>
		
<p>外輪のカルデラ崖(048) 下部より噴気あり</p>	<p>外輪のカルデラ崖(057) 高温の表層、53.7°C</p>	<p>断層崖(059) 噴気孔、79.2°C</p>
		
<p>断層崖(061) 強変質岩露頭</p>	<p>RSにより抽出された変質帯(062) 丘陵部に赤褐色変質</p>	<p>RSにより抽出された変質帯(062) 強変質岩露頭</p>

図 II -2-14 現地調査状況 (パカ地点)

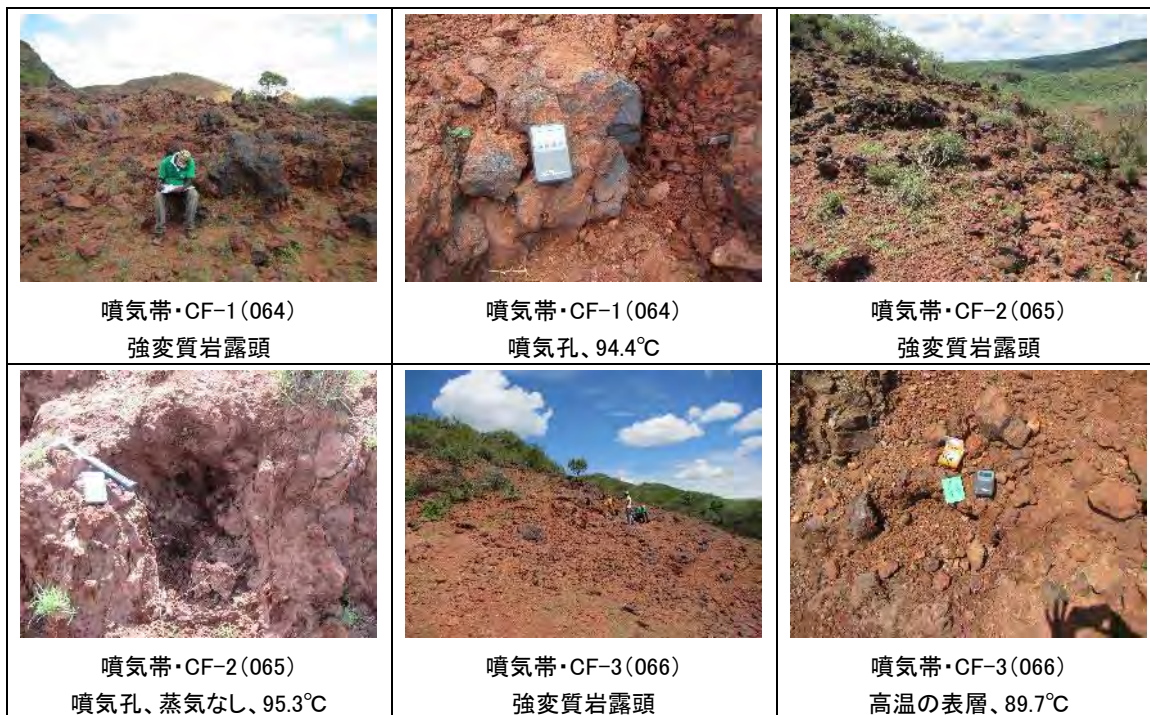


図 II -2-15 現地調査状況 (チェプチャク地点)



図 II -2-16 現地調査状況 (コロシ地点)

II -2.3 室内試験

(1) 岩石薄片観察結果

補足調査において採取した 10 試料の岩石薄片観察結果の一覧を表 II -2-3 に示し、その概要を以下に記す。また、各岩石薄片の写真を巻末に示す。

2015052704-T :

- 【採取地】 バリンゴ地点・北部噴気帯 (Moinomin)
【岩石名】 玄武岩
【組織】 填間状組織
【斑 晶】 柱状の斜長石よりなり、粒径は 0.5mm 程度のものが多く見られる。
【石 基】 0.1mm~0.2mm 程度の比較的粗粒な斜長石を主とし、粒間に角閃石及び aenigmatite を少量含む。また、流理が明瞭である。
【備 考】 斜長石には変質はほとんど認められず、角閃石の一部及びガラス質が粘土鉱物に変質している。

2015052706-T :

- 【採取地】 バリンゴ地点・北部噴気帯 (Moinomin)
【岩石名】 玄武岩
【組織】 填間状組織
【斑 晶】 柱状の斜長石よりなり、粒径は 0.7mm 程度のものが多く見られる。
【石 基】 0.1mm~0.2mm 程度の比較的粗粒な斜長石を主とし、粒間に角閃石及び aenigmatite を中量含む。流理が明瞭である。
【備 考】 斜長石には変質はほとんど認められず、角閃石の一部は褐色に変質しており、角閃石の一部及びガラス質が粘土鉱物に変質している。また、aenigmatite は褐色不透明鉱物に変質しているものが多く見られる。

2015052805-T :

- 【採取地】 アルス地点・Arus steam jet
【組織】 火山碎屑状組織
【岩石名】 凝灰岩
【結晶片】 石英及び斜長石よりなり、円磨度と粒径にはばらつきが見られる。
【基 質】 0.1mm 以下の石英、斜長石及び微細結晶を主とする。
【備 考】 鉱物片の石英及び斜長石には変質はほとんど認められない。基質は全体的に粘土鉱物及び赤褐色に変質した部分が認められ、空隙が多く見られる。

2015052901-T :

- 【採取地】 アルス地点・北部噴気帯
【組織】 完晶質組織
【岩石名】 複輝石玄武岩
【斑 晶】 斜長石、斜方輝石、単斜輝石及び不透明鉱物よりなる。

- 【石 基】 比較的粗粒な斜長石を主とし、粒間に 0.1mm 以下の細粒な輝石を少量、aenigmatite 及び不透明鉱物を微量含む。
- 【備 考】 変質はほとんど認められないが、石基の一部が方解石及び粘土鉱物に僅かに変質している。

2015053003-T :

- 【採取地】 パカ地点・カルデラ内部
- 【組 織】 填間状組織
- 【岩石名】 travertine を伴う単斜輝石玄武岩
- 【斑 晶】 斜長石及び単斜輝石よりなる。
- 【石 基】 0.1mm 以下の細粒な斜長石及びガラス質を主とし、輝石及び不透明鉱物を少量含む。弱い流理が見られ、発泡のため空隙が多く認められる。
- 【備 考】 斜長石には変質はほとんど認められない。輝石の大部分は褐色鉱物に変質しており、ガラス質は粘土鉱物に変質している部分が多く見られる。空隙の中を travertine と見られる方解石が充填する。

2015060103-T :

- 【採取地】 パカ地点・パカ火山北斜面の噴気帯
- 【組 織】 間粒状組織
- 【岩石名】 カンラン石-複輝石玄武岩
- 【斑 晶】 斜長石、カンラン石、不透明鉱物、斜方輝石、単斜輝石よりなる。
- 【石 基】 0.1mm～0.3mm 程度の比較的粗粒な柱状斜長石を主とし、粒間に角閃石及び aenigmatite を少量、輝石、カンラン石及び不透明鉱物を微量に含む。明瞭な流理が認められる。
- 【備 考】 変質はほとんど認められず、石基の一部が褐色に変質する程度である。

2015060201-T :

- 【採取地】 チェプチャク地点・噴気帯 (CF-1)
- 【組 織】 填間状組織
- 【岩石名】 玄武岩
- 【斑 晶】 斜長石よりなり、粒径 0.2mm 程度の比較的細粒な短冊状のものと、0.5mm～1mm 程度の柱状～短冊状のものが多く見られる。
- 【石 基】 0.2mm 以下の斜長石、角閃石及び aenigmatite を主とする。
- 【備 考】 変質はほとんど認められないが、一部斜長石が亀裂に沿って褐色に変質している。ガラス質は全体に黄褐色に変質しており、一部粘土鉱物に変質している。

2015060203-T1 :

- 【採取地】 チェプチャク地点・噴気帯 (CF-3)
- 【組 織】 填間状組織
- 【岩石名】 玄武岩

- 【斑 晶】 強い変質を受けており、大部分が粘土鉱物に変質しているため、斑晶は見られない。
- 【石 基】 大部分は粘土鉱物に変質しているが、0.2mm以下の柱状の斜長石が見られ、ごく僅かに0.1mm以下の微粒の輝石が含まれる。
- 【備 考】 赤褐色に変質している部分が縞状に分布しており、最大で幅0.2mmの石英脈が見られる。

2015060301-T :

- 【採取地】 コロシ地点・噴気帯 (KF-3)
- 【組 織】 完晶質組織
- 【岩石名】 単斜輝石玄武岩
- 【斑 晶】 斜長石及び単斜輝石よりなる。
- 【石 基】 0.1mm～0.3mm程度の比較的粗粒な柱状斜長石を主とし、輝石及び不透明鉱物を少量含む。また、粒間に角閃石を少量含み、明瞭な流理が認められる。
- 【備 考】 斑晶の斜長石の多くは外縁が再結晶化しており、褐色鉱物や粘土鉱物に変質しているものも見られる。単斜輝石は変質して内部に不透明鉱物を生じているものや、緑泥石に変質しているものが見られる。石基は一部粘土鉱物に変質しており、不透明鉱物の周囲では褐色に変質している。

2015060302-T :

- 【採取地】 コロシ地点・噴気帯 (KF-1)
- 【組 織】 間粒状組織
- 【岩石名】 カンラン石-複輝石玄武岩
- 【斑 晶】 斜長石、カンラン石、単斜輝石、不透明鉱物及び斜方輝石よりなる。
- 【石 基】 0.1mm～0.4mm程度の比較的粗粒な柱状斜長石を主とし、不透明鉱物を少量、輝石及びカンラン石を微量含み、粒間に角閃石を少量含む。明瞭な流理が認められる。
- 【備 考】 斑晶の斜長石の一部は外縁が再結晶化しており、亀裂に沿って褐色に変質しているものも見られる。カンラン石及び輝石も外縁や亀裂に沿って褐色に変質しているものが見られる。石基には目立った変質は認められないが、一部褐色に変質している部分が認められる。

表 II -2-3 岩石薄片観察結果一覧

Igneous Rock

Ser. No.	Sample No.	District	Coordination*		Rock Name	Texture	Phenocryst**								Groundmass**							Altered Minerals**												
			X	Y			Qtz	Pl	Bt	Hb	Cpx	Opx	Ol	Opq	Qtz	Pl	Hb	Cpx	Opx	Ol	Aen	Gl	Opq	Qtz	Chl	Sme	Src	Cal	Opq	D				
1	2015052704-T	Baringo	167,809	73,312	Basalt	Porphyritic (Intersertal)		Δ										⊙	○															○
2	2015052706-T	Baringo	167,830	73,221	Basalt	Porphyritic (Intersertal)		Δ										⊙	○															+
4	2015052901-T	Arus	166,324	24,577	Two Pyroxene Basalt	Porphyritic (Holocrystalline)		Δ			+	+						⊙			Δ			+		+						+	+	
5	2015053003-T	Paka	187,058	101,805	Clinopyroxene Basalt	Porphyritic (Intersertal)		+			+							⊙															○	○
6	2015060103-T	Paka	186,945	103,305	Two Pyroxene Olivine Basalt	Porphyritic (Intergranular)		○			+	+	Δ	+				⊙	Δ		+	+	Δ		+									
7	2015060201-T	Chepchuk	188,372	93,539	Basalt	Porphyritic (Intersertal)		○										⊙	○				○	⊙										+
8	2015060203-T	Chepchuk	187,524	93,157	Basalt	Porphyritic (Intersertal)												⊙		+			⊙	Δ	+									⊙
9	2015060301-T	Korosi	179,165	85,335	Clinopyroxene Basalt	Porphyritic (Holocrystalline)		Δ			+							⊙	Δ	Δ				Δ		+							+	+
10	2015060302-T	Korosi	177,060	89,318	Two Pyroxene Olivine Basalt	Porphyritic (Intergranular)		Δ			+	+	+	+				⊙		+	+			Δ										

* Projection: Universal Transverse Mercator, Zone: 37N, Datum: WGS 1984, Spheroid: WGS 1984
 ** Qtz: Quartz, Pl: Plagioclase, Bt: Biotite, Hb: Hornblende, Cpx: Clinopyroxene, Opx: Orthopyroxene, Ol: Olivine, Opq: Opaque Minerals, Aen: Aenigmatite, Gl: Volcanic Glass, Chl: Chlorite, Sme: Smectite, Src: Sericite, Cal: Calcite, Cl: Clay Minerals
 ⊙: abundar (> 30 vol.%)
 ○: common (10 - 30 vol.%)
 Δ: a littele (3 - 10 vol.%)
 +: rare (< 3 vol.%)

Sedimentary and Pyroclastic Rock

Ser. No.	Sample No.	District	Coordination*		Rock Name	Texture	Clasts**								Matrix**							Altered Minerals**													
			X	Y			Qtz	Pl	Bt	Hb	Cpx	Opx	Ol	Opq	Qtz	Pl	Hb	Cpx	Opx	Ol	Gl	Opq	Ui	Qtz	Chl	Sme	Src	Cal	Opq	D					
3	2015052805-T	Arus	162,739	17,849	Tuff	Pyroclastic	○	○																											⊙

* Projection: Universal Transverse Mercator, Zone: 37N, Datum: WGS 1984, Spheroid: WGS 1984
 ** Qtz: Quartz, Pl: Plagioclase, Bt: Biotite, Hb: Hornblende, Cpx: Clinopyroxene, Opx: Orthopyroxene, Ol: Olivine, Opq: Opaque Minerals, Ui: Unidentified Minerals, Gl: Volcanic Glass, Chl: Chlorite, Sme: Smectite, Src: Sericite, Cal: Calcite, Cl: Clay Minerals
 ⊙: abundar (> 30 vol.%)
 ○: common (10 - 30 vol.%)
 Δ: a littele (3 - 10 vol.%)
 +: rare (< 3 vol.%)

(2) X線回折分析結果

補足調査において採取した25試料のX線回折分析結果の一覧を表II-2-4及び表II-2-5に示し、各試料のX線チャートを巻末に示す。分析結果の概要を以下に示す。粘土鉱物に関しては、多くの試料においてkaolinite及びsmectiteが検出された。また、アルス地点のSteam Jetやチェプチャク及びコロシ地点の噴気帯で採取された強変質試料には石英が検出されるが、その多くはカオリナイトを伴うことより溶脱珪化帯が発達すると考えられる。

【粘土鉱物】 kaolinite、smectite、混合層鉱物及びillite

【珪酸鉱物】 石英

【珪酸塩鉱物】 方沸石、斜長石、カリ長石、角閃石、単斜輝石及びaenigmatite

【磷酸塩鉱物】 heteroite

【炭酸塩鉱物】 方解石

【硫化鉱物】 黄鉄鉱、磁硫鉄鉱

【酸化鉱物】 チタン鉄鉱

(3) スペクトル計測

現地調査地点37ヶ所において採取した48試料に含まれる粘土鉱物や炭酸塩鉱物を識別するために、スペクトル計測を実施した。短波長赤外域(short wave infrared region: SWIR)における反射スペクトルは、粘土鉱物や炭酸塩鉱物の識別において非常に敏感な解析手法であり、その波長帯は1,300~2,500nmの領域に相当する。図II-2-17は、米国地質調査所のライブラリより、典型的なkaolinite、illite、smectite及び方解石(calcite)の反射スペクトルを示したものである。短波長赤外域には粘土鉱物や炭酸塩鉱物に固有の吸収帯が、1,400nm、1,900nm及び2,165~2,345nmの間に存在している。これらの吸収帯は、鉱物を構成する水分子やアルミニウムと水酸化基(Al-OH)などの分子振動に起因するものであり、その吸収帯の波長位置や波形の特徴から鉱物の同定や化学組成の推定が可能となる。例えば、図II-2-17に示したkaoliniteのスペクトルには、2,200nm付近に特徴的なダブルレットもしくはショルダーが現れることにより識別が可能となる。また、絹雲母もしくはilliteは2,200~2,345nmに幅広の吸収帯が、smectiteは2,200nm付近に明瞭な吸収帯を有する。方解石は2,330nm付近に幅広かつ深い吸収が見られる。

識別された鉱物の一覧を表II-2-6に、各試料の反射曲線を巻末に示す。検出された鉱物はkaolinite、smectite(montmorillonite)、nontronite、白雲母(muscovite)、灰簾石(Zoisite)、苦灰石(dolomite)、針鉄鉱(goethite)、赤鉄鉱(Hematite)及び磁鉄鉱(Magnetite)である。粘土鉱物に関しては、多くの試料においてkaolinite及びsmectite(montmorillonite)が検出された。この結果はXRDの結果とも調和的である。

表 II -2-4 X線回折分析結果一覧(1)

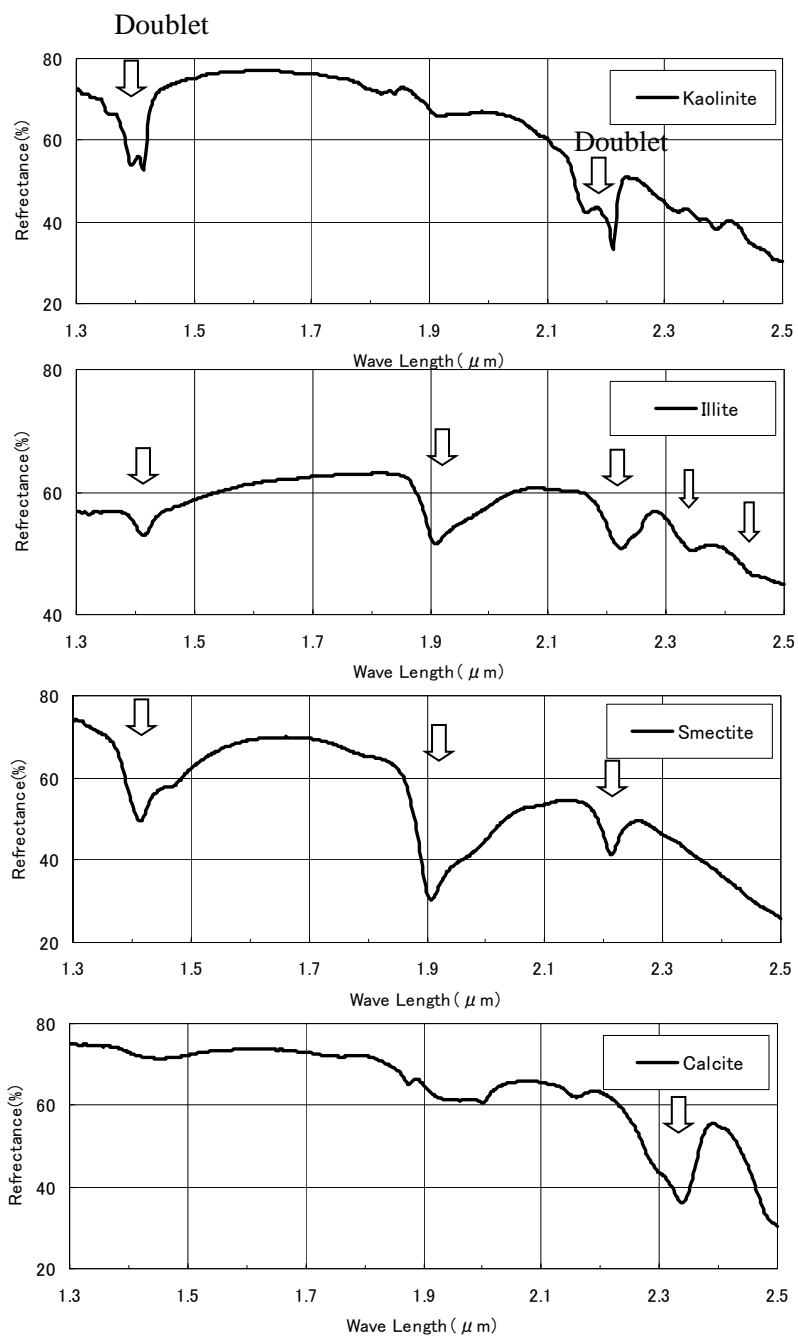
Sample No.	Cr	Tri	Qz	Al	Ha	K	Pyr	Sm	Ch/Sm	L/Sm	ML	Ch	I	Cp	St	Md	Anm	La	Wa	Pl	Kf	Bi	Amh	Cpx	Opx	Pr	Ep	Aen	Gy	Ah	Ba	Ht	Ca	Dol	Sd	Py	Po	Hmt	Goe	Im	Mgt	Bom					
2015052701-X			30.2										○							3.0																											
2015052703-X						○		○												6.5	1.0																										
2015052704-X								○												15.0			1.4				1.1																				
2015052705-X								<0.5												17.0	0.7																										
2015052706-X								○												20.7	1.0																										
2015052707-X								○												34.6	1.2																										
2015052801-X			31.0			○						○									0.9																										
2015052802-X			7.0			0.6														0.6																											
2015052803-X			47.0			<0.5																																									
2015052804-X			26.8			○		○												6.4	5.2																										
2015052805-X			20.7			○		○				○								3.4	4.2																										
2015052806-X			21.5			0.5						○								1.6																											
2015052807-X						○		○				○					1.7			7.2	1.5		0.7																								
2015052901-X								○				○	<0.5	○						7.7			<0.5					0.5																			
2015053001-X			0.5			0.6							<0.5							1.1																											
2015053003-X								○				○								2.7			2.4										2.3			<0.5											
2015053004-X						3.5																																									
2015053005-X								1.8												0.8																											
2015060102-X						1.0		○												3.2																											
2015060103-X1						29.8																																									

Cr Cristobalite ML Random mixed-layer Pyr Pyrophyllite Wa Wairakite Opx Orthopyroxene Ba Barite Py Pyrite Bom Boehmite Value Quartz index Bom Boehmite
 Tri Trydimite Ch Chlorite Cp Clinoptilolite Pl Plagioclase Pr Prehnite Ht Heterosite Po Pyrrhotite QI = 100*I_m/I_q
 Qz Quartz I Illite St Stilbite Kf K-feldspar Ep Epidote Al Alunite Hmt Hematite Im: The maximum intensity of target mineral.
 Sm Smenite Ha Halloysite Md Mordenite Bi Biotite Aen Aenigmatite Ca Calcite Goe Goethite Iq: The maximum intensity of quartz
 Ch/Sm Chlorite/Smectite mixed-layer K Kaolinite Anm Analcime Amh Amphibole Gy Gypsum Dol Dolomite Im Ilmenite which is measured under the same condition.
 L/Sm Illite/Smectite mixed-layer Di Dickite La Laumontite Cpx Clinopyroxene Ah Anhydrite Sd Siderite Mgt Magnetite ○ Oriented analysis

表 II -2-5 X線回折分析結果一覧(2)

Sample No.	Cr	Tri	Qz	Al	Ha	K	Pyr	Sm	Ch/Sm	I/Sm	ML	Ch	I	Cp	St	Md	Anm	La	Wa	Pl	Kf	Bi	Amh	Cpx	Opx	Pr	Ep	Aen	Gy	Ah	Ba	Ht	Ca	Dol	Sd	Py	Po	Hmt	Goe	Im	Mgt	Bom					
2015060103-X2						21.5																																								0.8	
2015060105-X						○		1.1																																							
2015060201-X						0.9		○												3.4																											1.4
2015060203-S			8.1			○		○												10.6																											0.5
2015060302-X			1.3			2.2		○												4.2																											0.9

Cr Cristobalite ML Random mixed-layer Pyr Pyrophyllite Wa Wairakite Opx Orthopyroxene Ba Barite Py Pyrite Bom Boehmite Value Quartz index
 Tri Trydimite Ch Chlorite Cp Clinoptilolite Pl Plagioclase Pr Prehnite Ht Heterosite Po Pyrrhotite QI = 100*I_m/I_q
 Qz Quartz I Illite St Stilbite Kf K-feldspar Ep Epidote Al Alunite Hmt Hematite I_m: The maximum intensity of target mineral.
 Sm Smentite Ha Halloysite Md Mordenite Bi Biotite Aen Aenigmatite Ca Calcite Goe Goethite I_q: The maximum intensity of quartz
 Ch/Sm Chlorite/Smectite mixed-layer K Kaolinite Anm Analcime Amh Amphibole Gy Gypsum Dol Dolomite Im Ilmenite which is measured under the same condition.
 I/Sm Illite/Smectite mixed-layer Di Dickite La Laumontite Cpx Clinopyroxene Ah Anhydrite Sd Siderite Va Vaterite ○ Oriented analysis



(Source: USGS, modified by JICA Study Team)

図 II -2-17 典型的な粘土鉱物及び方解石の反射スペクトル

表 II -2-6 スペクトル計測結果一覧

Sample	alunite	jarosite	gypsum	kaolinite	pyrophyllite	illite (sericite)	smectite (montmorillonite)	nontronite	muscovite	Zoisite	Hornblende	calcite	dolomite	siderite	goethite	hematite	Magnetite	Remark
2015052701				○														XRD: Qz, I
2015052702				○														
2015052703				○			○								○	○		XRD: K, Sm
2015052704								○										XRD: Sm
2015052705							○	○							○			XRD: Sm
2015052706							○	○										XRD: Sm
2015052707								○										XRD: Sm
2015052801				○														XRD: Q, K, ML
2015052802																		XRD: Q, K
2015052803				○														XRD: Q, K
2015052804				○														XRD: Q, K, Sm
2015052805							○	○							○			XRD: Q, K, Sm, ML
2015052806				○														XRD: Q, K, ML
2015052807																		XRD: K, Sm, ML
2015052901																		XRD: Sm, ML, Ch, I
2015053001																		XRD: Q, K, I
2015053001_2																		
2015053002				○			○									○		
2015053005							○		○									
2015053005_2				○			○					○		○				XRD: Sm
2015053005_3																		
2015053006							○					○						
2015053007																		
2015053007_2																		
2015053008				○					○									
2015060101																		
2015060103																		
2015060103_2				○											○			XRD: K
2015060104																		
2015060104_2				○														
2015060105																		
2015060105_2																		XRD: K, Sm
2015060201								○										
2015060201_2								○	○									XRD: K, Sm
2015060202				○				○								○		
2015060202_2							○	○	○									
2015060203				○				○		○					○	○		XRD: Q, K, Sm
2015060301				○			○								○		○	
2015060301_2							○										○	
2015060302																		
2015060302_2																○		XRD: Q, K, Sm
CF-1				○														
CF-2				○					○									
KF-1				○														
KF-3				○														
PF-1				○												○		
PF-3				○			○											
PF-6				○														

II -2.4 各地点の地質解析

対象地域である 5 地点の地質及び地質構造は、東アフリカリフトシステム (East African Rift System: EARS) のリフティングとそれに伴う火山活動によって特徴づけられる。ケニア地溝帯においては、古第三紀後期漸新世頃からリフティング (地殻の分裂) が始まり、伸長場で形成された正断層に沿って沈降運動が起こるとともに、断層に沿ってマグマの上昇が開始された。その後、EARS がブロック化するとともに、ブロック毎の沈降域及び沈降量の差異によってハーフ・グラabenが形成された。また、「ケニア・ドーム」と呼ばれるマントル・プルームに起因する火山活動が現在まで続いており、特に古第三紀中新世においては、短期間に莫大なマグマを噴出した phonolite - trachyte の洪水的火山活動が生じている。第四紀以降、火山活動はより活発となり、EARS のほぼ中央部に大規模な楕状火山が形成された (例: 対象地域内のコロシ火山、パカ火山)。EARS の外縁にはリフティングに伴う主断層 (大規模な正断層) が発達しており、最大 3,000m の比高を有する急崖地形を形成している。主断層は EARS の東西いずれかの外縁に発達しており、主断層側が深く落ち込む非対称なハーフ・グラabenを形成している。また、EARS 内部には主断層とほぼ並行の断層群 (正断層) が発達しており、第四紀火山周辺の断層群には多くの地熱兆候が確認されている。

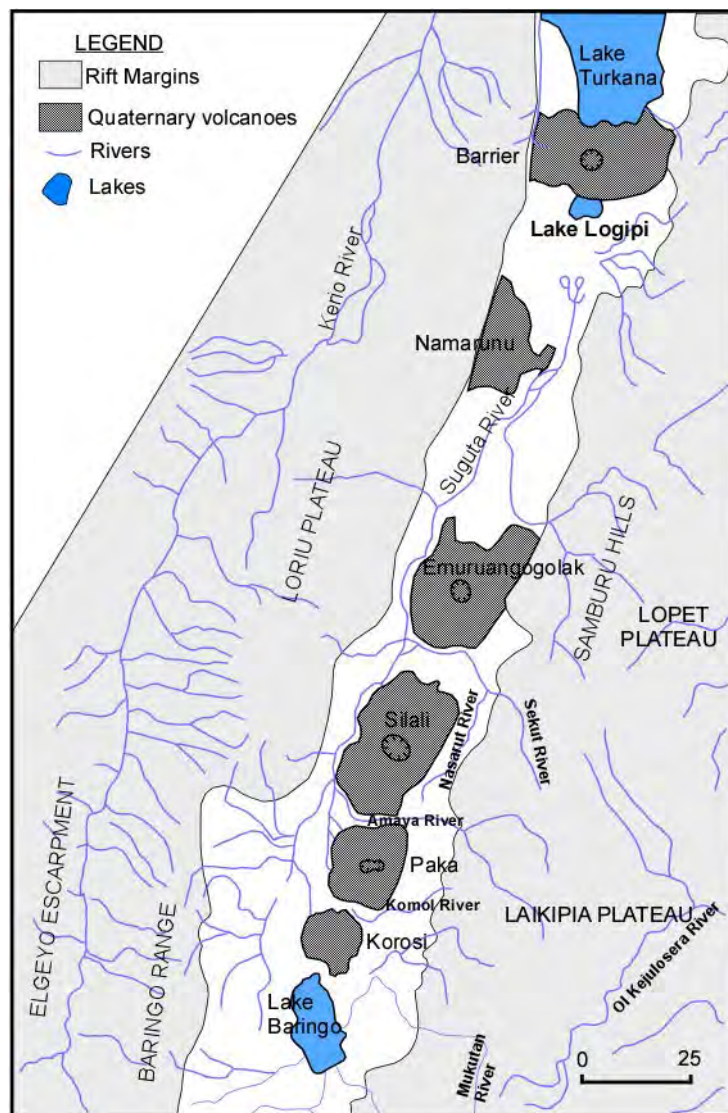
(1) アルス地点

アルス地点の地質構造図 (画像判読結果) を図 II -2-18 に、地質断面図を図 II -2-19 に示す。また、各地点共通の地質凡例を図 II -2-20 に示す。本地点においては、古第三紀の火山岩類 (玄武岩) を基盤として、新第三紀中新世の phonolite (Ap1) 及び玄武岩 (Ab) が広く分布しており、東部においては第四紀更新世から現世にかけて噴出した Lake Baringo phonolite/trachyphonolite (Apu) が覆っている。また、火山岩分布域の平坦地及び凹地には、部分的に堆積岩及び凝灰岩 (Ai) や沖積層 (Qa1) が分布している。本地点の西部から中央部にかけては N-S 系の断層群が、東部の第四系分布域においては NNE-SSW 系の断層群が発達している。これら断層群 (正断層) は局所的な地溝や地塁を形成しており、本地点は階段状の地形を呈している。現地調査における観察に加え、既存地熱兆候 (Steam Jet、噴気帯、温泉) の位置情報と、画像判読により抽出された地質構造とを重ね合わせた結果、地熱兆候の多くは比高の大きな崖地形 (断層崖) を有する断層沿いに分布することが明らかになった。これは、断層活動に伴う開口性裂隙が、地熱流体やガスの通路になっていることを示唆している。

(2) バリンゴ地点

バリンゴ地点の地質構造図 (画像判読結果) を図 II -2-21 に、本地点北部の地質断面図 (Bn-Bn'断面) を図 II -2-22 に、南部の地質断面図 (Bs-Bs'断面) を図 II -2-23 に示す。本地点においては、第四紀更新世の trachyte (Bt)、trachyphonolite (Btp)、玄武岩 (Bb) が広く分布している。また、火山岩分布域の平坦地、凹地及び低地には、堆積岩及び凝灰岩 (Bi) や沖積層 (Qa1) が分布している。本地点においては、概ね NNE-SSW 系～N-S 系の断層群が発達している。これら断層群は急崖を伴う東落ちの正断層であり、本地点東部のバリンゴ湖に向けて徐々に標高が低くなる階段状の地形を呈している。現地調査 (地質及び地化学) において確認された北部の噴気帯 (Moinonin) や Loruk South Well 及び南部の Chepkoiyo Well は上記断層群沿いに分布していることより、これら断層が地熱流体及びガスの流動経路になっていると考えら

れる。



出典：GDC(2011)

図 II -2-18 ケニア地溝帯内の第四紀火山の分布

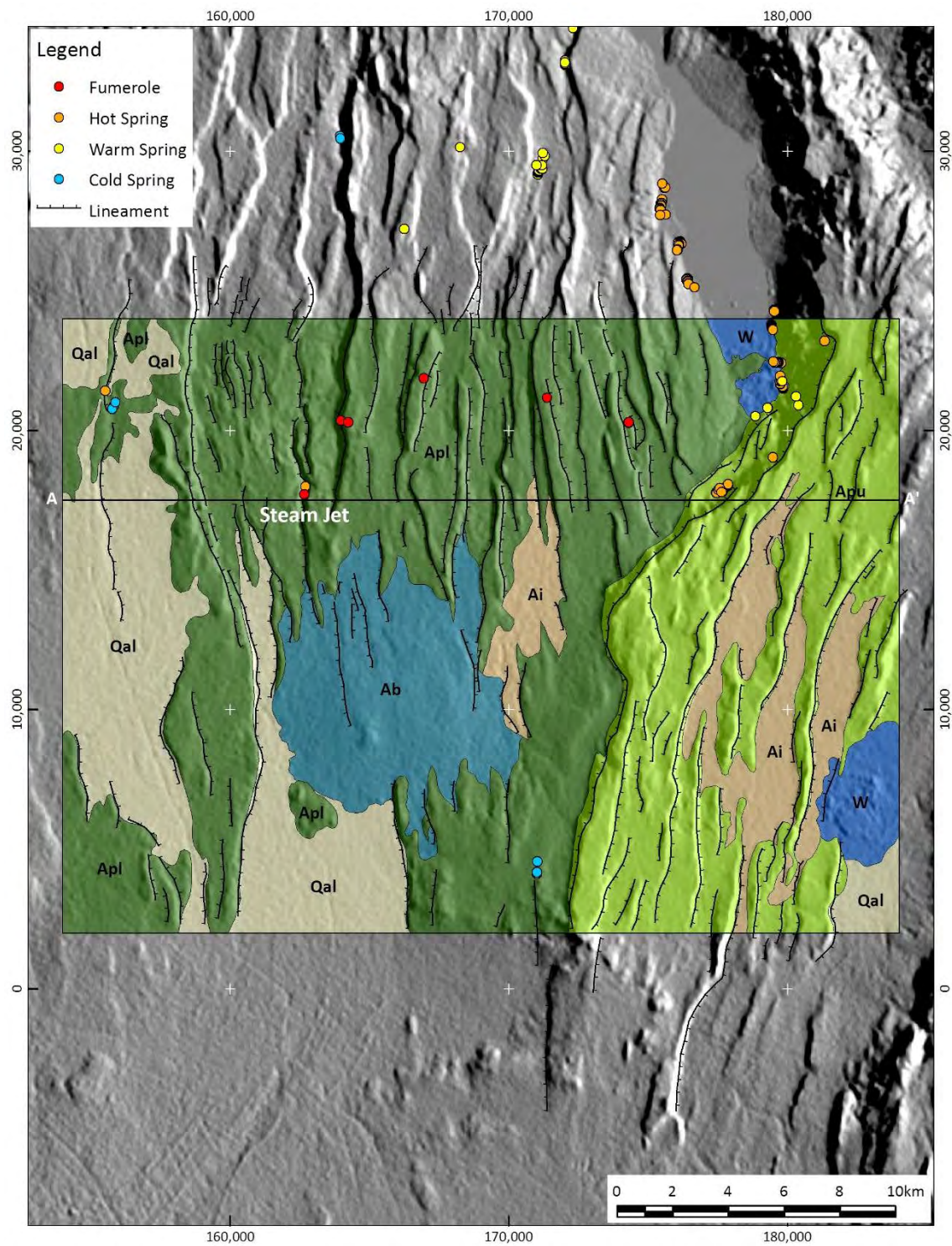


図 II -2-19 アルス地点の地質構造図 (画像判読結果)

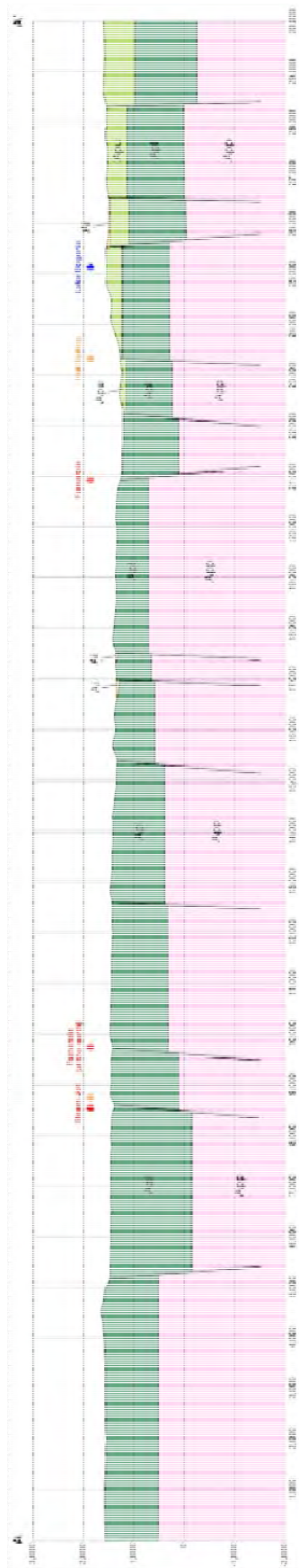


図 II -2-20 アルス地点の地質断面図 (A-A' 断面)

All Area

- Qal Alluvium
- Bv Volcanic Rock
- W Water Area

Arus Area

Pleistocene to Recent

- Ai Lacustrine clays, pyroclastic rocks
- Apu Upper trachyte

Miocene

- Ab Basalt
- Apl Lower trachyte

Korosi Area

Pleistocene to Recent

- Kb Basalt
- Ktu Upper trachyte
- Ktl Lower trachyte
- Kv Pyroclastic rock

Chepchuk Area

Pleistocene to Recent

- Cb Basalt
- Cv Pyroclastic rock

Baringo Area

Pleistocene to Recent

- Bi Lacustrine clays, pyroclastic rocks
- Bb Basalt
- Btp Trachyphonolite
- Bt Trachyte

Paka Area

Pleistocene to Recent

- Pv Pyroclastic rock
 - Pbu Upper basalt
 - PtU Upper trachyte
 - Pbl Lower basalt
 - Ptl Lower trachyte
 - Pm Mugearite
- Pliocene
- St Secuminus Trachyte
 - Ot Orus Trachyte

図 II -2-21 各地点の地質凡例

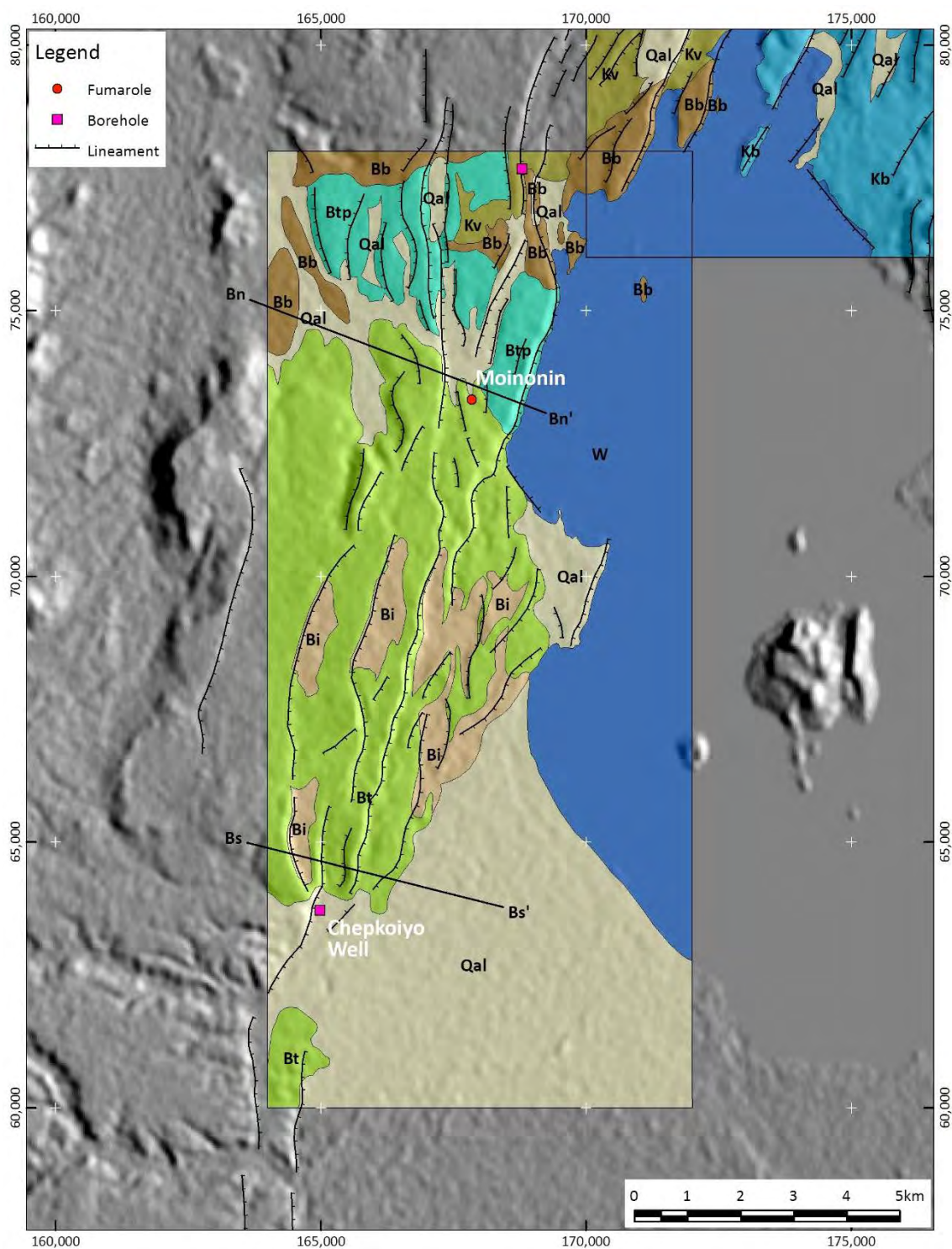


図 II -2-22 バリンゴ地点の地質構造図 (画像判読結果)

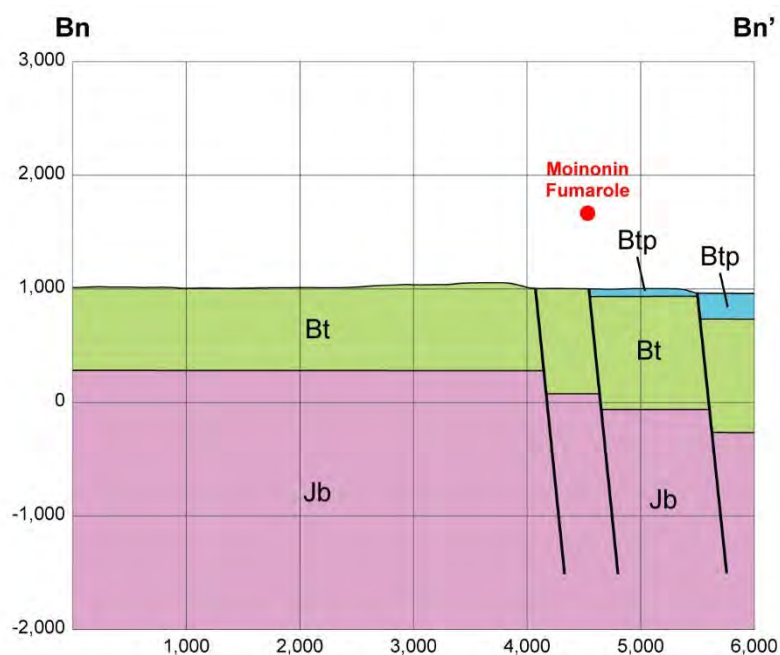


図 II -2-23 バリンゴ地点北部の地質断面図 (Bn-Bn' 断面)

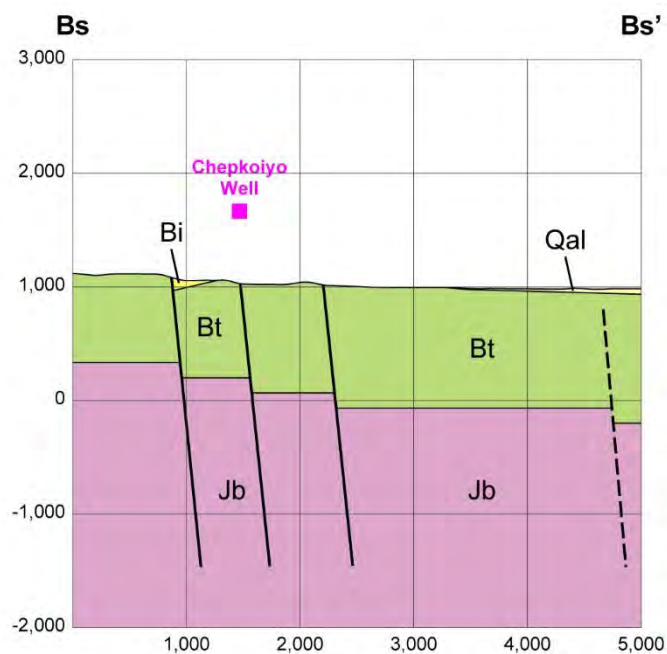


図 II -2-24 バリンゴ地点南部の地質断面図 (Bs-Bs' 断面)

(3) コロシ地点

コロシ地点の地質構造図（画像判読結果）を図 II -2-24 の左側に示す。本地点においては、第四紀以降に形成されたコロシ火山を構成する trachyte (Kt1/Ktu) 及び玄武岩 (Kb) が広く分布している。概ね N-S 系～NNE-SSW 系の断層群が発達しており、北方延長のパカ地点においても同方向の断層群が卓越する。既述の地形解析及び画像判読において（図 II -2-5）、コロシ火山の山腹には小規模な火口丘が観察されるが、これらの分布は上記断層群に規制されている。同じく地形解析において、山腹には多数の溶岩流及びその分布を確認できるが、山頂付近の火口より北西方向もしくは西方に流下している溶岩流が、最も新しい火山活動（数百年前）に伴う玄武岩溶岩 (Kb) に対応している。現地調査における観察に加え、既存地熱兆候の位置情報と画像判読において抽出された地質構造とを重ね合わせた結果、地熱兆候の多くは断層付近に分布していることより、これら断層群が地熱流体及びガスの流動経路になっていると考えられる。

(4) チェプチャク地点

チェプチャク地点の地質構造図（画像判読結果）を図 II -2-24 の右側に示す。本地点においては第四紀更新世の火砕岩 (Cv) が広く分布している。NNE-SSW 系の断層群が卓越しており、特に断層群のうち最も比高が大きく、本地点をほぼ縦断する連続性の良い断層に沿って、現世の玄武岩 (Cb) が噴出しており、岩体周辺には噴気帯が位置している。

(5) パカ地点

パカ地点の地質構造図（画像判読結果）を図 II -2-25 に示す。本地点においては、第四紀更新世以降に形成されたパカ火山を構成する mugearite (Pm)、trachyte (Pt1/Ptu)、玄武岩 (Pb1/Pbu) 及び火砕岩 (Pv) が広く分布する。本地域の中央部から東部にかけては N-S 系～NNE-SSW 系の断層系が発達しており、北西部においては NW-SE 系が卓越する（溶岩の流下方向も同方向である）。なお、N-S 系～NNE-SSW 系と NW-SE 系の南東延長が交わるあたりに、パカ火山山頂の火口（クレーター）が存在している。現地調査における観察に加え、既存地熱兆候の位置情報と画像判読において抽出された地質構造とを重ね合わせた結果、地熱兆候は上記火口の内部や、パカ火山北斜面及び東斜面の断層沿いもしくは火口丘付近に位置している。

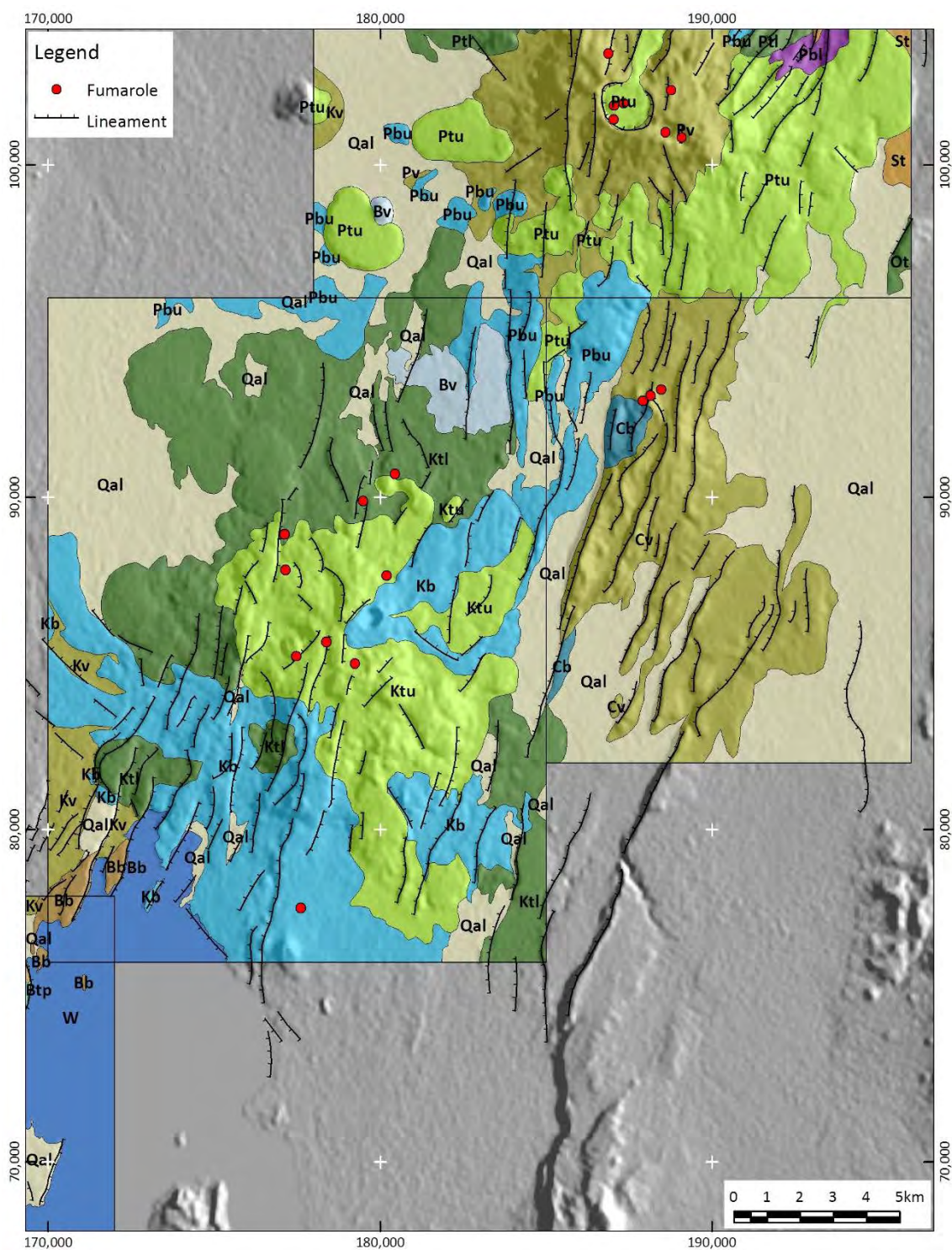


図 II -2-25 コロシ地点（左）及びチェプチャク地点の地質構造図（画像判読結果）

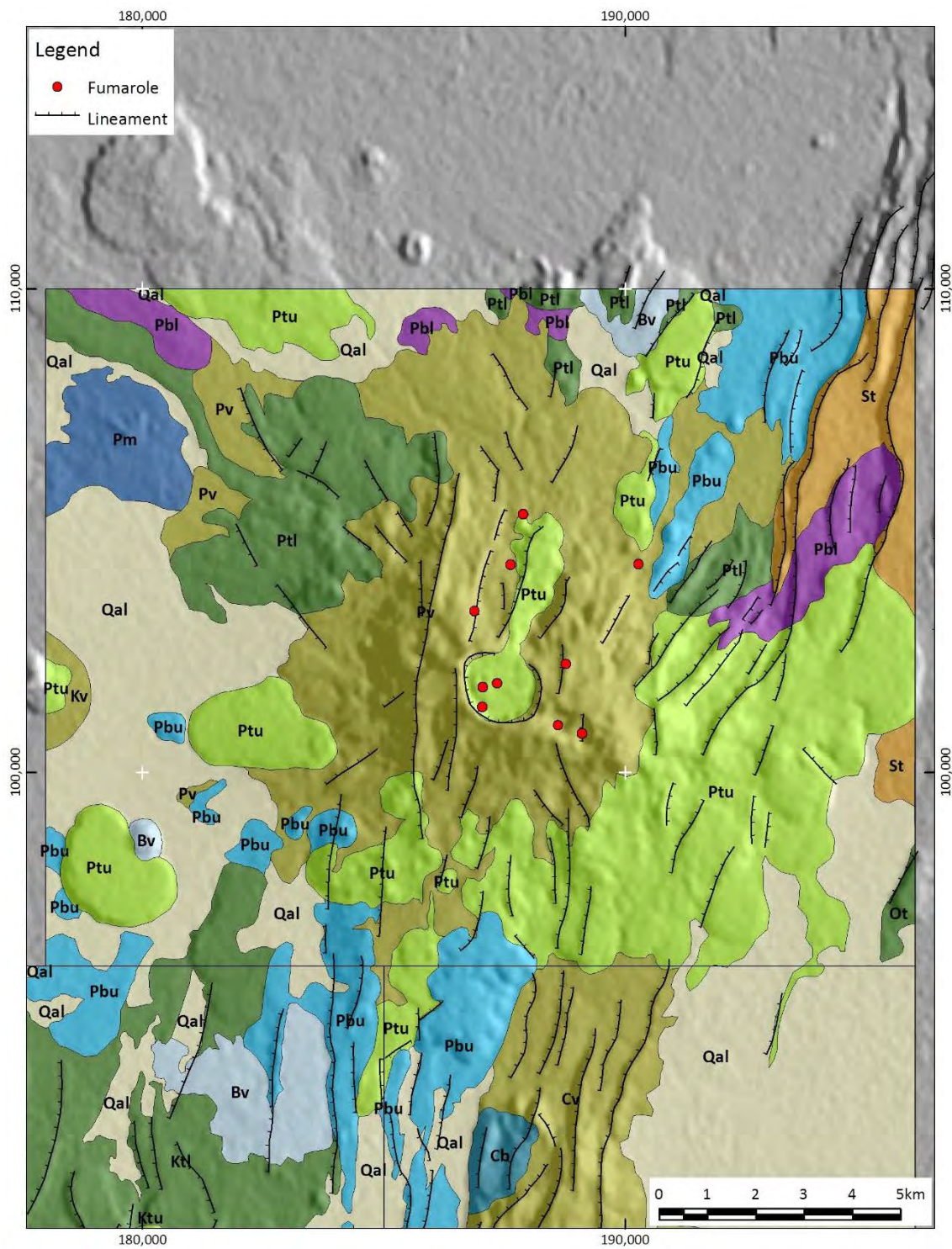


図 II -2-26 パカ地点の地質構造図（画像判読結果）

II -3 地化学調査

II -3.1 補足調査結果

本プロジェクトの対象地点における地熱資源評価のための地化学調査は、これまでも GDC により全地点で行われているほか、Dunkley et al. (1993) などによっても広域的に行われている。本調査では、不足データの取得や既存データのクロスチェックを目的とし、温泉・井戸水及び噴気ガスの採取・分析を実施した。ケニア国内の東アフリカ地溝帯沿いの地熱地帯では、自然湧出する温泉は少なく、噴気が多い傾向がある。生活用水のための水井戸（深度は一般に 200m 以浅：borehole と呼ばれている）が多数あり、水温が高い場合もある。それらのことを考慮したうえで、これまで GDC では実施されていない、水試料の同位体分析やガス試料のアルゴン (Ar) 分析も実施することとした。

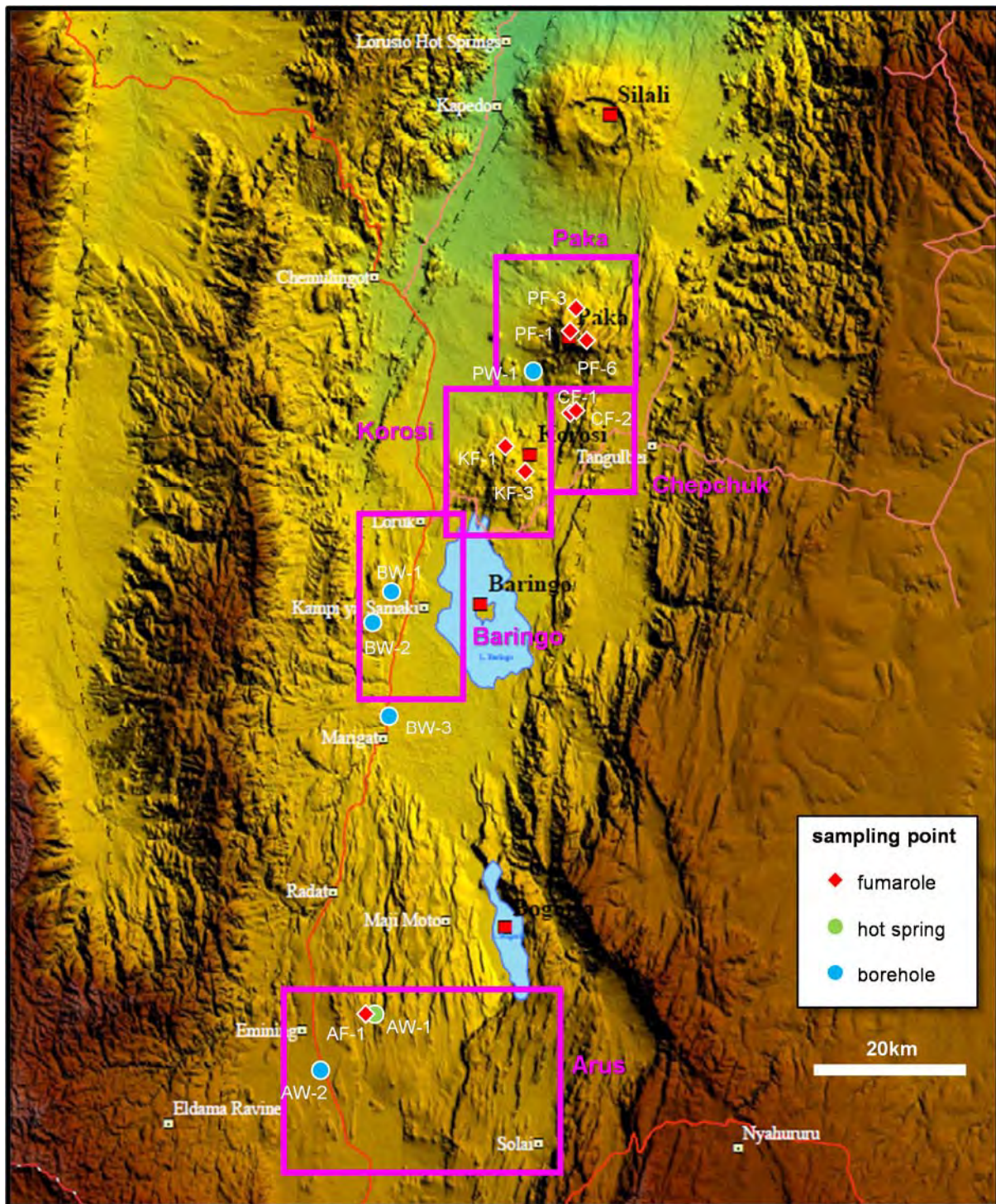
本プロジェクトでの補足地化学調査は、2015 年の 5 月から 6 月にかけて実施した。現地での分析用試料の採取は GDC と共同で実施し、採取地点の選定は GDC とも協議のうえ行った。アルス、バリngo、コロシ、チェプチャク、パカの 5 地点で、温泉水 1 点、井戸水 5 点、噴気ガス 9 点の採取を行った。なお、調査実施時の治安面での影響により、コロシ、チェプチャク、パカでの現場作業は GDC のメンバーのみにより実施された。試料採取位置を図 II -3-1 に、試料採取時の現地での測定結果を表 II -3-1 に示す。

温泉水は、アルス地点の Steam Jet と呼ばれる噴気帯に湧出するもの 1 試料を採取した。その他の地点に自然湧出する温泉は存在しなかった。なお、バリngo湖の中央にある 01 Kokwe 島には多数の温泉があるが、既存データが十分にあったため今回の調査では試料採取は見送った。

井戸水は、アルスで 1 試料、バリngoで 3 試料、パカで 1 試料を採取した。バリngoの 2 試料以外は、これまでデータが無かった新規の水井戸での試料を採取した。ただし、すべての試料の水温は 31.7~34.7℃とさほど高いものではなかった。なお、バリngo地点の南部には Chepkouyo well と呼ばれる水井戸が 2004 年に掘削され、沸騰する熱水 (97℃) の自噴が認められたが、既に埋坑されており、本調査での水試料採取は不可能であった。

噴気ガスは、アルスで 2 試料、コロシで 2 試料、チェプチャクで 2 試料、パカで 3 試料を採取した。いずれも既存データがある地点ではあったが、クロスチェックや Ar の分析を目的として試料を採取した。バリngo地点では、GDC による過去の調査では噴気ガス採取の実績があるが、今回の調査では試料採取可能な圧力が高い噴気を見つけれなかった。ただし、ごく弱い噴気がある場所 (Loruk の南方の Moinonin) で 92~94℃の噴気温度があることを確認した。

採取した試料のうち、噴気ガス試料については、試料変質の影響が懸念される二酸化炭素 (CO₂) と硫化水素 (H₂S) について、ナクルにある GDC の分析所で GDC と共同で分析した。残りの試料はすべて日本へ輸送し、九電産業㈱で分析が行われた。化学・同位体の分析結果を表 II -3-2 及び表 II -3-3 に示す。得られたデータは、既存データとともに解析に利用された。



JICA 調査団作成

図 II -3-1 補足地化学調査での試料採取位置図



アルス地点の温泉（左）と噴気ガス採取（右）



パカ地点での噴気ガス採取

表 II -3-1 補足地化学調査における現地測定結果

No.	地点名	試料名	採取位置地名	試料	試料採取日	位置座標			標高 (m)	気温 (°C)	噴気 温度 (°C)	温泉／井戸水			備考
						UTM	Easting	Northing				温度 (°C)	pH	EC(mS/m)	
1	Baringo	BW-1	Akoroyan	井戸水	27/5/2015	36N	831785	69850	1142	30.9	-	34.7	6.87	82.0	
2	Baringo	BW-2	Arusin	井戸水	27/5/2015	36N	830746	66942	1156	25.2	-	34.7	9.89	95.6	
3	Baringo	BW-3	Losekem	井戸水	27/5/2015	36N	832550	56900	1046	33.9	-	31.7	7.14	90.6	
4	Arus	AF-1 (Arus1)	Arus Steam Jet	噴気	28/5/2015	36N	830694	17861	1394	27.5	94.0	-	-	-	Steam Jet地帯の中央
5	Arus	AF-2 (Arus2)	Arus Steam Jet	噴気	28/5/2015	36N	830689	17905	1397	30.9	93.9	-	-	-	Steam Jet地帯の南部
6	Arus	AW-1	Arus Steam Jet	温泉	28/5/2015	36N	830640	17739	1393	28.2	-	82.3	6.06	18.2	
7	Arus	AW-2	Kures	井戸水	28/5/2015	36N	824609	10049	1587	28.2	-	33.2	7.18	76.6	
8	Paka	PF-1	Paka	噴気	30/5/2015	37N	187029	101783	1528	29.5	91.1	-	-	-	大カルデラの内側
9	Paka	PF-6	Paka	噴気	30/5/2015	37N	189155	100867	1598	27.5	90.7	-	-	-	東クレーターの内側
10	Paka	PF-3	Paka	噴気	1/6/2015	37N	187571	104370	1189	33.8	93.0	-	-	-	カルデラ北方
11	Paka	PW-1	Adomeyon	井戸水	1/6/2015	37N	183342	97239	978	35.7	-	33.8	8.18	4.64	カルデラ南方
12	Chepchuk	CF-1	Lokil	噴気	2/6/2015	37N	188375	93542	1076	33.7	94.4	-	-	-	
13	Chepchuk	CF-2	Lokil	噴気	2/6/2015	37N	187820	93186	1122	34.2	93.3	-	-	-	
14	Korosi	KF-1	Kalapachon	噴気	3/6/2015	37N	179167	85336	1320	35.0	94.6	-	-	-	
15	Korosi	KF-3	Nakapuron	噴気	3/6/2015	37N	176968	88930	1038	36.7	95.7	-	-	-	

表 II -3-2 温泉水・井戸水の化学・同位体分析結果

地点名	採取位置地名	試料名	試料	水温	pH	EC	Na	K	Li	Ca	Mg	T-Fe	Al	NH ₄	Cl	SO ₄	HCO ₃	CO ₃	F	SiO ₂	B	As	δ D(H ₂ O)	δ ¹⁸ O(H ₂ O)
				°C																				
Arus	Arus Steam Jet	AW-1	温泉	82.3	6.39	16.9	8.50	11.6	<0.01	3.69	1.04	0.29	1.53	8.16	0.3	28.7	48	<1	0.42	137	<0.01	<0.005	8.0	0.5
	Kures	AW-2	井戸水	33.2	7.41	65.3	83.5	18.5	-	38.1	22.7	-	-	-	12.1	4.7	433	-	1.06	59	0.01	-	-13.0	-3.1
Baringo	Akoroyan	BW-1	井戸水	34.7	7.18	76.1	120	11.5	0.05	39.4	8.68	<0.04	0.04	<0.01	45.3	27.5	354	-	2.70	100	0.08	<0.005	-10.0	-2.4
	Arusin	BW-2	井戸水	34.7	9.88	87.3	200	2.42	0.37	0.36	0.172	3.74	3.80	<0.01	23.9	20.5	204	117	2.15	182	0.11	0.018	-11.0	-2.6
	Losekem	BW-3	井戸水	31.7	7.41	81.0	112	6.31	-	57.5	22.1	-	-	-	13.8	8.6	548	-	0.61	77	0.02	-	-5.0	-1.5
Paka	Adomeyon	PW-1	井戸水	33.8	8.23	203	503	17.1	0.25	4.50	2.92	<0.04	<0.01	<0.01	152	52.8	1010	-	5.40	91	0.49	<0.005	-10.0	-2.3

表 II -3-3 噴気蒸気・ガスの化学・同位体分析結果

地点名	採取位置地名	試料名	試料	温度	噴気中の NCG濃度	非凝縮性ガス(NCG)中のガス化学成分								蒸気凝縮水の 同位体組成	
						CO ₂	H ₂ S	CH ₄	H ₂	N ₂	O ₂	Ar	He	δ D(H ₂ O)	δ ¹⁸ O(H ₂ O)
Arus	Arus Steam Jet	AF-1	噴気	94.0	4.27	98.7	0.7601	0.298	0.09	0.10	0.0024	0.0014	0.00082	-25.0	-7.3
	Arus Steam Jet	AF-2	噴気	93.9	4.14	99.5	0.0005	0.276	n.a.	0.22	0.0078	0.0052	0.0021	-24.0	-7.1
Korosi	Kalapachon	KF-1	噴気	94.6	2.43	74.5	0.0008	0.410	n.a.	20.02	4.79	0.24	0.0024	-36.0	-7.0
	Nakapuron	KF-3	噴気	95.7	2.25	48.3	0.0009	n.a.	n.a.	40.87	10.35	0.49	0.0013	-39.0	-7.4
Chepchuk	Lokil	CF-1	噴気	94.4	13.57	23.0	0.0009	0.077	n.a.	60.79	15.49	0.72	0.0012	-50.0	-9.5
	Lokil	CF-2	噴気	93.3	1.41	89.8	0.0008	1.148	n.a.	7.27	1.64	0.093	0.014	-71.0	-12.2
Paka	Paka (Inside of large caldera)	PF-1	噴気	91.1	1.50	93.2	0.1247	3.680	2.56	0.37	0.011	0.0073	0.0068	-2.0	-3.2
	Paka (Inside of eastern crater)	PF-6	噴気	90.7	1.41	94.6	0.0069	3.230	0.97	1.12	0.049	0.016	0.0053	-19.0	-5.1
	Paka (North of caldera)	PF-3	噴気	93.0	11.82	13.4	0.0036	n.a.	n.a.	68.54	17.33	0.82	0.00017	-50.0	-9.6

II -3.2 各地点の地化学解析

水・ガスの化学・同位体データを利用した地化学解析では、既存データと補足地化学調査の結果を合わせて利用し、地熱流体の起源や生成機構、地下流体温度などに係る解析・検討を行った。

各地点の既存データの試料採取位置及び各種の地化学解析図を巻末資料に示す。

既存資料やデータ解析の結果から、本調査の対象地点に存在する地熱熱水系に共通する特徴として、以下の3点があると考えられる。

- 地熱流体は主に天水（湖水を含む）を起源とする
- 地熱流体は熱源と想定されるマグマ（主に玄武岩質）由来のガス成分を含有している
- 広域的な地下流体の流動は南から北の方向性がある

天水が起源であることは、温泉水や噴気蒸気の凝縮水の水素・酸素同位体組成から示唆され、Dunkley et al. (1993) などでも述べられている。マグマ由来のガス成分の寄与は、噴気ガス中の微量成分組成 (図 II -3-2) や Dunkley et al. (1993) などによるヘリウム同位体組成から示唆される。広域的な南から北への流動については、水井戸の水位の分布や降水量分布から推定されている (Dunkley et al., 1993 : 図 II -3-3)。

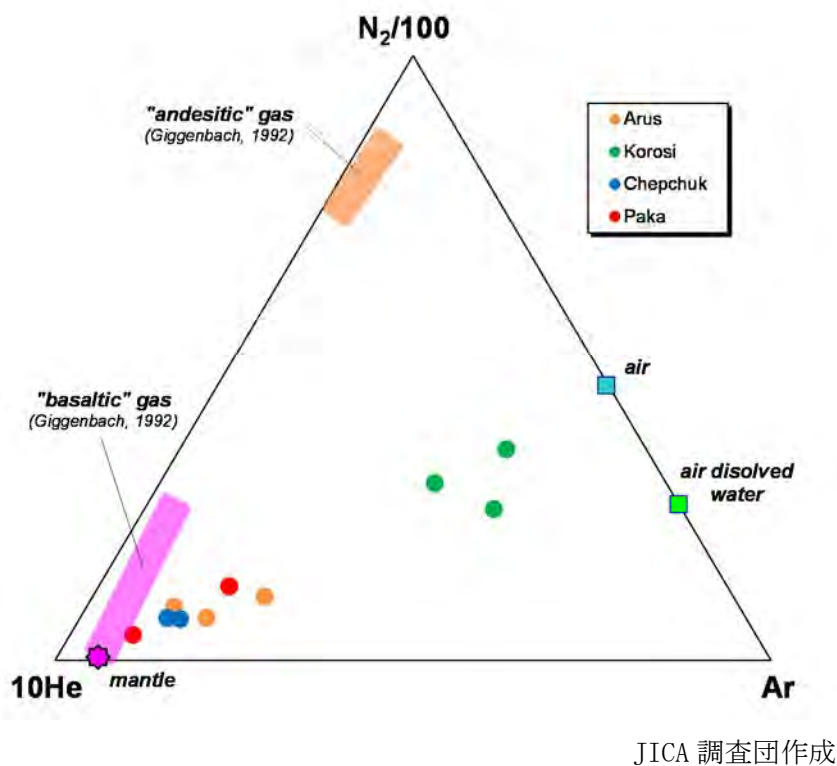
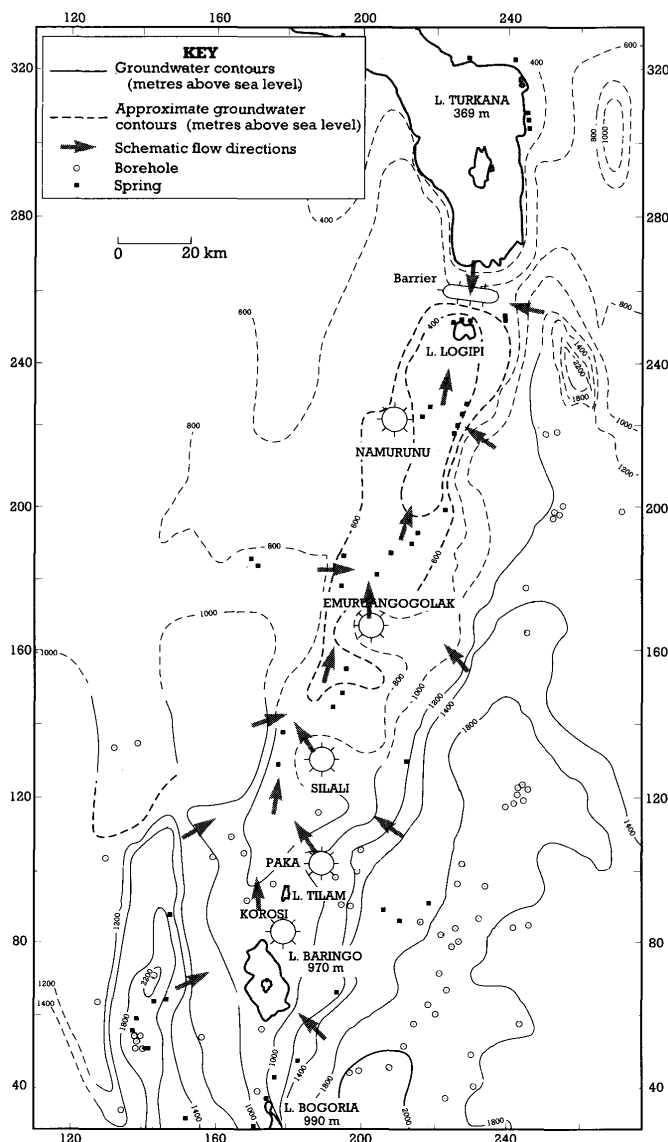


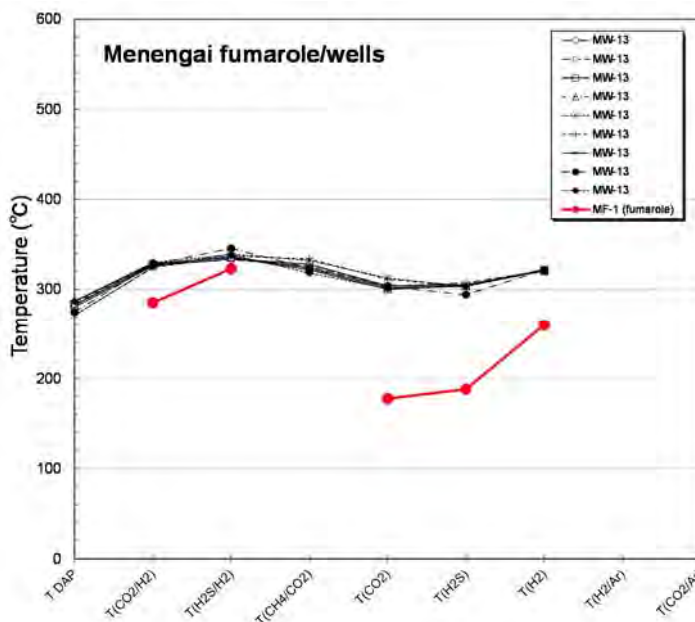
図 II -3-2 噴気ガスの N₂-He-Ar 三成分図 (JICA データ)



出典 : Dunkley et al. (1993)

図 II -3-3 ケニア北部の大地溝帯沿いの地下水位分布

本プロジェクトの対象地点では温泉がほとんど無いため、地表探査段階で重要な地下温度の推定に当たっては、ガス地化学温度計の適切な適用が必要である。本調査では、ガス化学温度の計算に先立ち、噴気ガスの試料採取時もしくは地下のごく浅部で試料に混入したとみなされる大気成分について、各々のデータの酸素 (O₂) 含有量に基づき補正を行った。ガス化学温度計は最大で9種類を適用し、主にそれらの比較により地下流体温度を推定した。ただし、ガス地化学温度の適用においては、GDC が開発を進めているメネンガイ地点での地表噴気ガスと坑井噴出ガスの比較に基づき、CO₂/H₂ 温度や H₂S/H₂ 温度などのガス成分比に基づく温度を重視することとした (図 II -3-4)。また、これまでGDCでは分析されていなかった Ar ガスデータを利用した CO₂/Ar 温度も重視した。



JICA 調査団作成

図 II -3-4 メネンガイ地点の噴気ガスと坑井噴出ガスの地化学温度比較図

対象各地点の地化学解析結果に基づく考察と地化学概念モデルについて以下に述べる。(解析図は重要なものだけを示すが、その他を含む解析図の一式は巻末資料を参照されたい。)

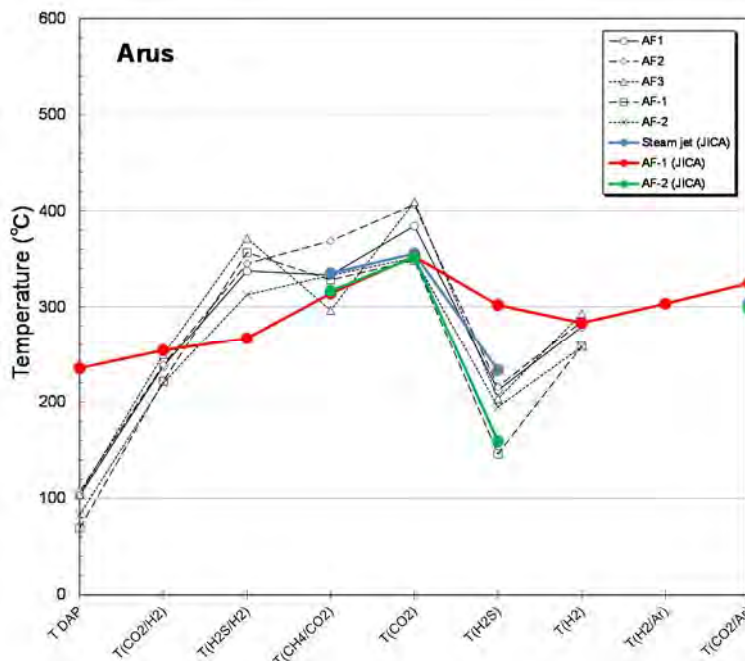
(1) アルス

本地点では、北西部に位置する Arus Steam Jet と呼ばれる噴気帯でのみ、噴気や温泉の地表地熱兆候が認められる。それ以外の地域には、北東部に低温 (39°C) の温泉や中部域に低温 (28~29°C) の弱いガス噴出 (Gas hole と呼ばれている) があるが、高温地熱流体の存在を示唆する兆候は認められない。また、井戸水の化学性状は、一般的な浅部地下水のものであり、高温熱水の寄与を示す特徴は認められない。Steam Jet の近くには水井戸は存在しない。

Steam Jet の噴気帯の温泉水は、弱酸性で溶存成分濃度が低いことから、河川水が周辺のガスや蒸気により加熱されたものであり、深部からの熱水は含まれないものとみなされる。

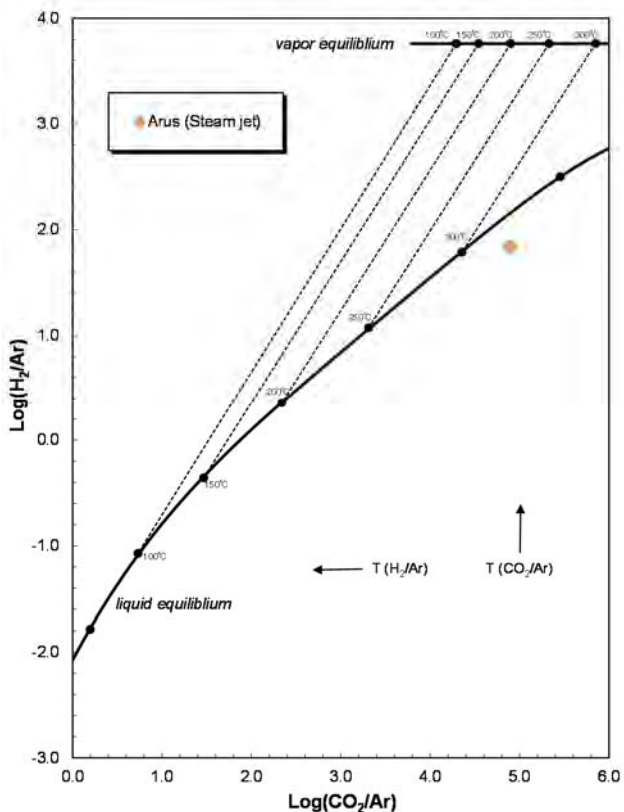
Steam Jet の噴気ガス化学性状は、CO₂ 濃度が特に高い (99mole%以上) という特徴はあるが、熱水系において一般に認められる典型的な化学性状に近いものである。ガス化学温度計より、地下流体の温度は 250°C 以上はあると推定され、300°C 前後も期待できると考えられる (図 II -3-5)。噴気蒸気凝縮水の水素・酸素同位体組成によれば、地下での単段沸騰を想定した場合の蒸気分離温度は 150°C 前後と推定される。CO₂-H₂-Ar 組成に基づく解析図によれば、高温域の地熱流体は主に液体で存在することが推定される (図 II -3-6)。

Arus Steam Jet 付近の熱水系に関する地化学概念モデルを図 II -3-7 に示す。深部には熱水卓越型の貯留層の存在が推定され、その温度は 250°C 以上はあり、300°C 前後に達する可能性もある。断層などに伴う透水性が高い破碎帯を通じて貯留層から浅部へ上昇した熱水は、沸騰により蒸気・ガスを派生し、それらが地表にまで達して噴気を形成している。浅部の蒸気卓越ゾーンの規模はさほど大きくないと推定される。



JICA 調査団作成

図 II -3-5 ガス化学温度比較図 (アルス)

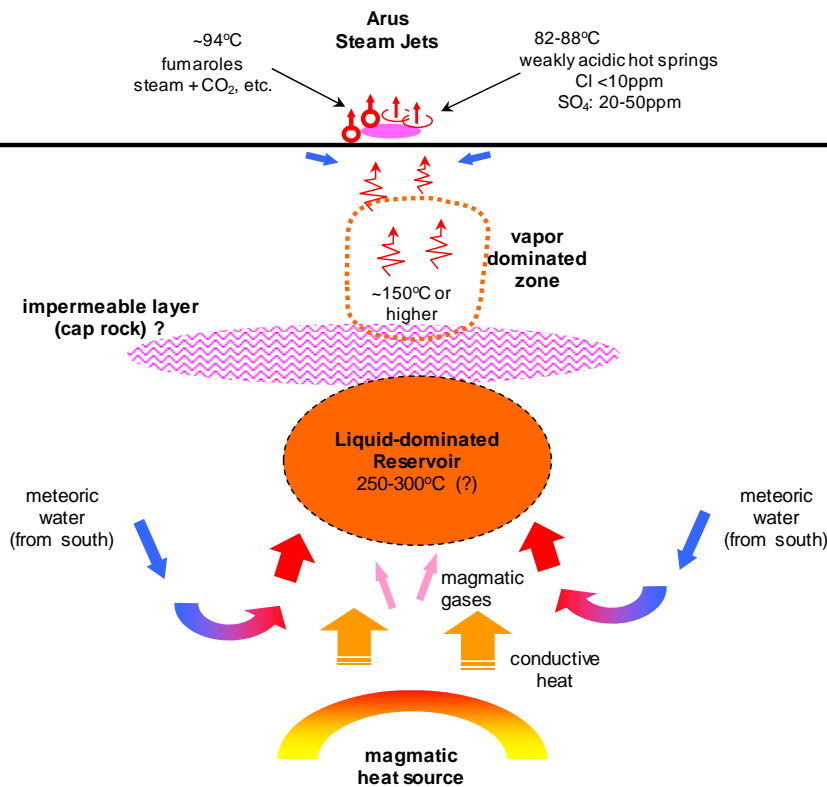


JICA 調査団作成

図 II -3-6 噴気ガスの H₂/Ar-CO₂/Ar 関係図 (アルス)

W

E



JICA 調査団作成

図 II -3-7 アルス地点の地化学概念モデル

(2) バリンゴ

本地点では、バリンゴ湖南西側の水井戸での熱水噴出 (Chepkoiyo well : 図 II -3-8) 及びバリンゴ湖北西側の Moinonin 付近 (Loruk の南方) での噴気の存在が、高温熱水系の存在を示唆するものである。Loruk の南方の水井戸では 48~53°Cの湧出温度が記録されている。なお、01 Kokwe 島北東部の温泉群も顕著な地表地熱兆候である。バリンゴ湖の周辺域には多数の水井戸があるが、Chepkoiyo と Loruk 南方以外では湧出温度は 27~38°Cである。バリンゴ湖東側の一部の井戸水は高い溶存成分濃度を示すものがあるが、地化学温度は低く、冷却した過去の活動による熱水もしくは蒸発により高濃度化した湖水の影響を受けている可能性が高い。

Chepkoiyo well 及び Loruk 南方の井戸水は、Cl 濃度が比較的高い (160~360mg/L)。地化学温度は、Chepkoiyo well の井戸水で 180~200°C程度が算出される。また、Loruk 南方の井戸水で約 150°C (NaKCa 温度) が算出される (図 II -3-9)。

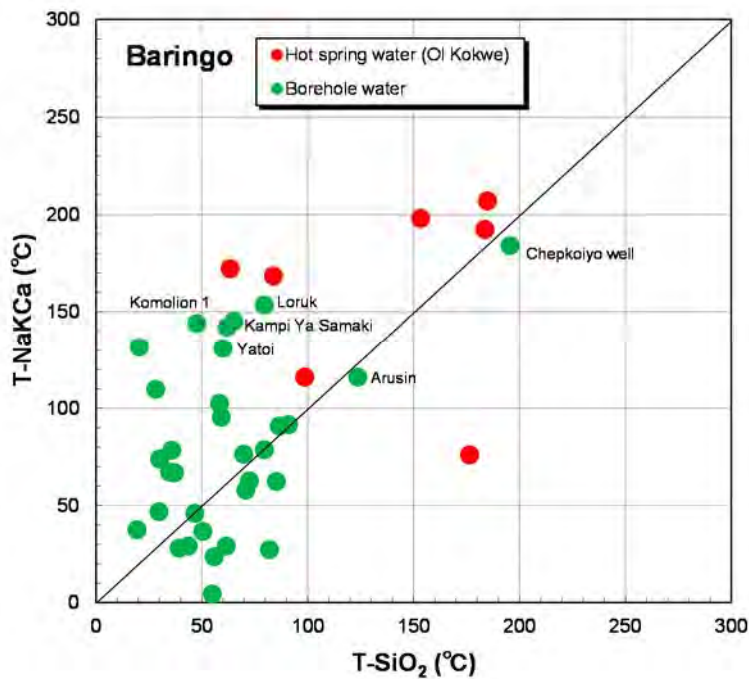
Moinonin 付近の噴気ガス化学性状は、CO₂ 濃度が特に高い (99mole%以上) という特徴はあるが、熱水系において一般に認められる典型的な化学性状に近いものである。ガス化学温度計より、地下流体の温度は 220°C以上はであると推定され、最高では 300°C前後に達する可能性もある (図 II -3-10)。噴気蒸気凝縮水の水素・酸素同位体組成によれば、噴気蒸気は地下の上昇過程で一部が凝縮しているとみなされ、沸騰 (熱水からの蒸気の分離) はやや深部で生じていると考えられる。

バリngo湖の北西側から南西側にかけての熱水系に関する地化学概念モデルを図 II -3-11 に示す。南西部の Chepkoiyo well と北西部の Moinonin 付近との間には 10km 以上の距離があることから、両地域の各々には別個に熱源・熱水系が存在すると考えられる。各々の深部には熱水卓越型の貯留層の存在が推定され、貯留層熱水の主な起源はバリngo湖の湖水である可能性が高い。貯留層の温度は南西部で 200℃以上、北西部で 220℃以上で 300℃前後に達する可能性もある。北西部では、断層などに伴う透水性が高い破碎帯を通じて貯留層から浅部へ上昇した熱水は、沸騰により蒸気・ガスを派生し、それらが地表にまで達して噴気を形成している。また、その上昇した熱水の一部は、浅部で北方に広がり、水井戸の帯水層に流入していると考えられる。



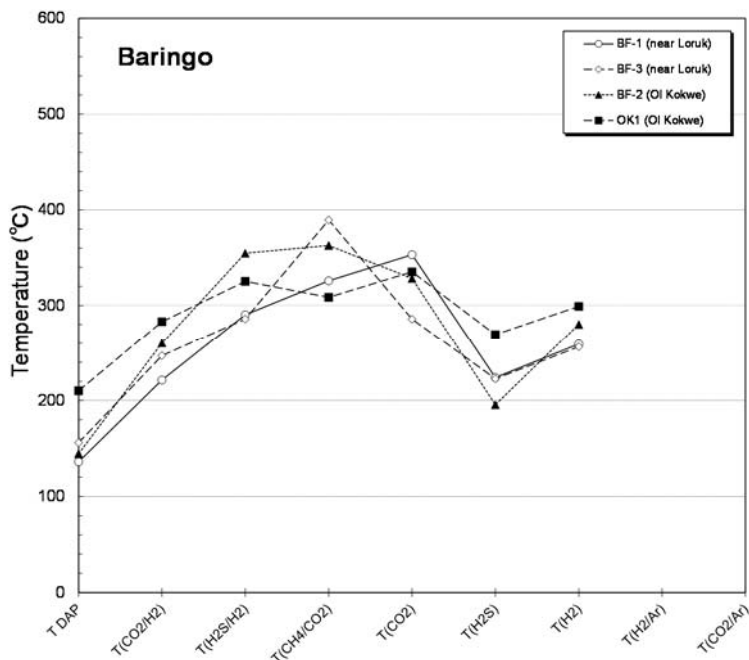
出典：GDC 内部資料

図 II -3-8 Chepkoiyo well での熱水噴出状況



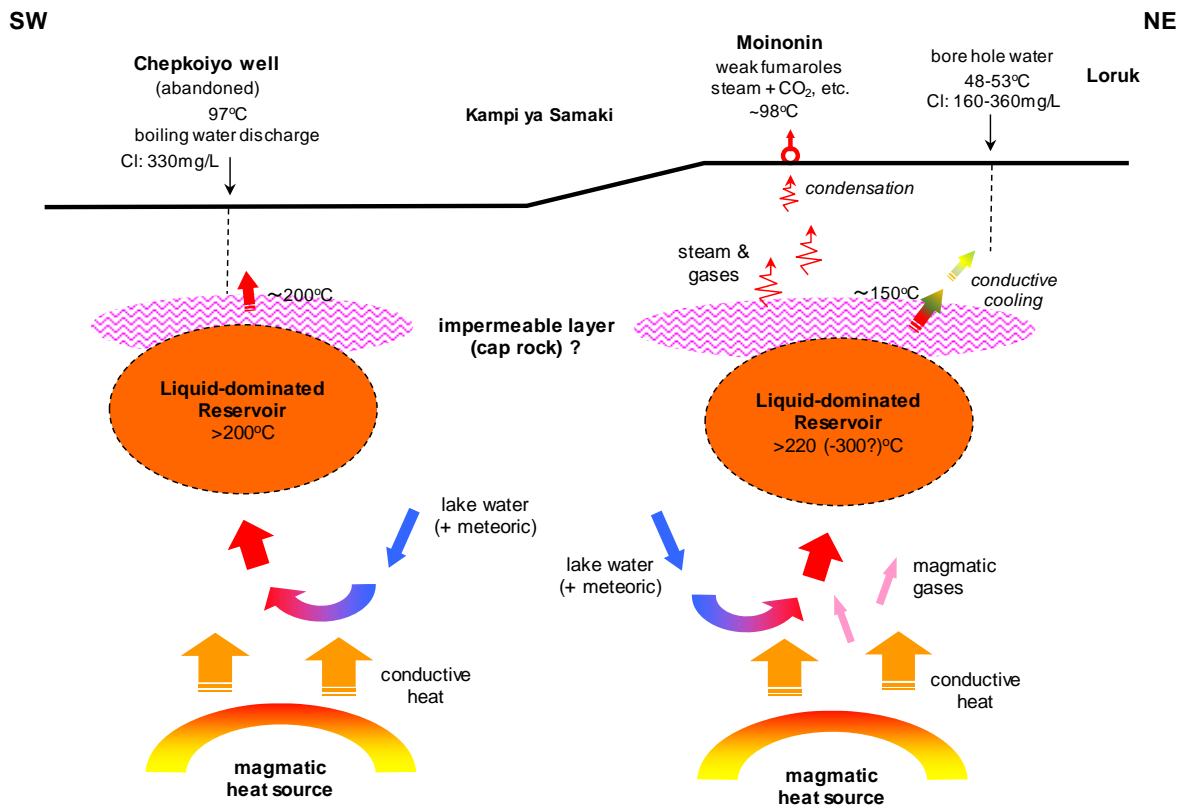
JICA 調査団作成

図 II -3-9 温泉水・井戸水のシリカ温度と NaKCa 温度の関係図 (バリngo)



JICA 調査団作成

図 II -3-10 ガス化学温度比較図 (バリngo)



JICA 調査団作成

図 II -3-11 バリンゴ地点の地化学概念モデル

(3) コロシーチェプチャク

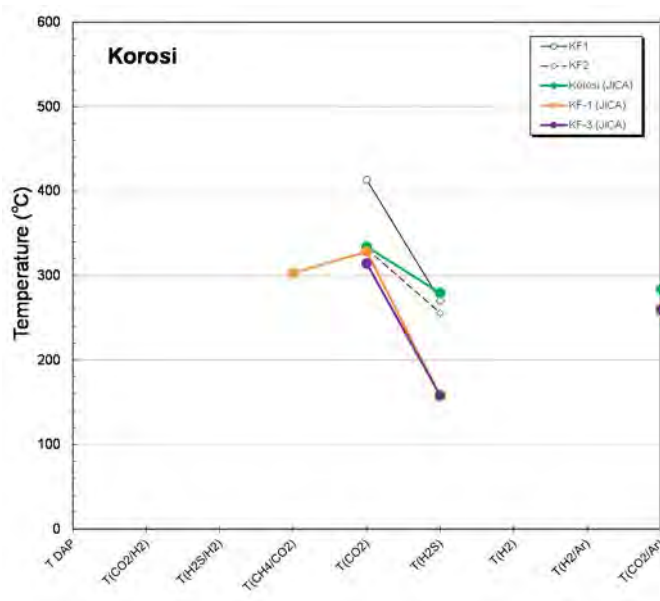
コロシ地点とチェプチャク地点では、いずれも多数の噴気の存在により高温熱水系の存在が示唆される。ただし、噴気の分布範囲はコロシ地点のほうが広い。周辺域の水井戸での湧出温度は 33~38°C 程度と低いが、コロシ地点北部の Nyaunyau や Norwase の水井戸では 60°C、48°C が記録されている。それらの井戸水は Cl 濃度が 100mg/L 以上あり (Nyaunyau では 471mg/L に達する)、高温で溶存成分濃度の高い熱水の寄与がある可能性が高い。チェプチャク地点南部の Chepkalacha の井戸水でもやや高い Cl 濃度が認められる (79~144mg/L)。

コロシ地点の噴気ガスは大気混入の影響が大きいため適用可能な化学温度計の種類が少ないが、深部の地下流体の温度として 260~300°C 程度が推定される (図 II -3-12)。チェプチャク地点では 210~300°C 前後のガス化学温度が算出され、260°C 程度の温度はある可能性が高いと考えられる (図 II -3-13)。噴気蒸気凝縮水の水素・酸素同位体組成によれば、蒸気が熱水から分離する温度はさほど高くないことが推定される。

コロシ地点北部の Nyaunyau の井戸水では NaKCa 温度が 194°C と計算され、井戸水に寄与する熱水の深部での温度が少なくとも 200°C 程度あることを示唆する (図 II -3-14)。

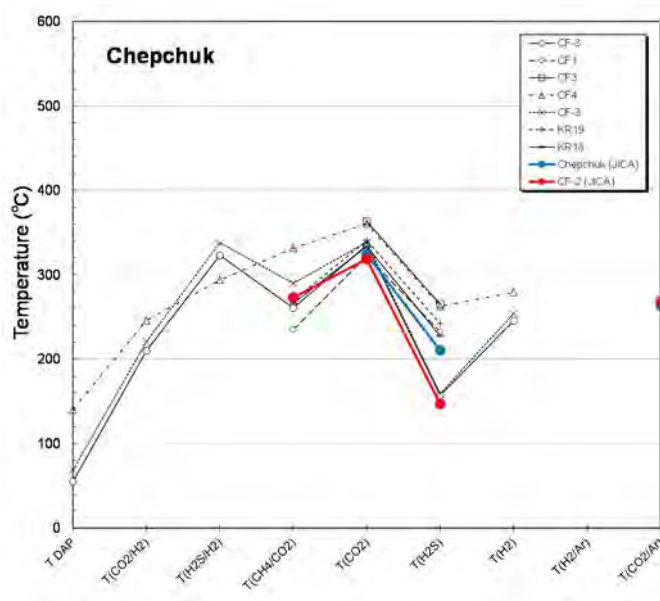
コロシ地点及びチェプチャク地点の熱水系に関する地化学概念モデルを図 II -3-15 に示す。両地点の噴気帯の間には 7km 以上の距離があることから、基本的には両地域の各々に別個に熱源・熱水系が存在すると考えられる。ただし、熱水系の規模はコロシ地点のほうが大きいと考えられる。各々の深部には熱水卓越型の貯留層の存在が推定され、その温度はコロシ地

点で 260～300℃程度、チェプチャク地点で 210～300℃程度（260℃以上の可能性が高い）と予想される。断層などに伴う透水性が高い破碎帯を通じて貯留層から浅部へ上昇した熱水は、沸騰により蒸気・ガスを派生し、それらが地表にまで達して噴気を形成している。コロシ地点では、広域的な地下水の流動方向や本地点の地形を考慮すれば、深部の熱水は北方へ流動していることが推定され、その熱水の一部が、標高が比較的低い Nyaunyu や Norwase の水井戸の帯水層に混入していると考えられる。



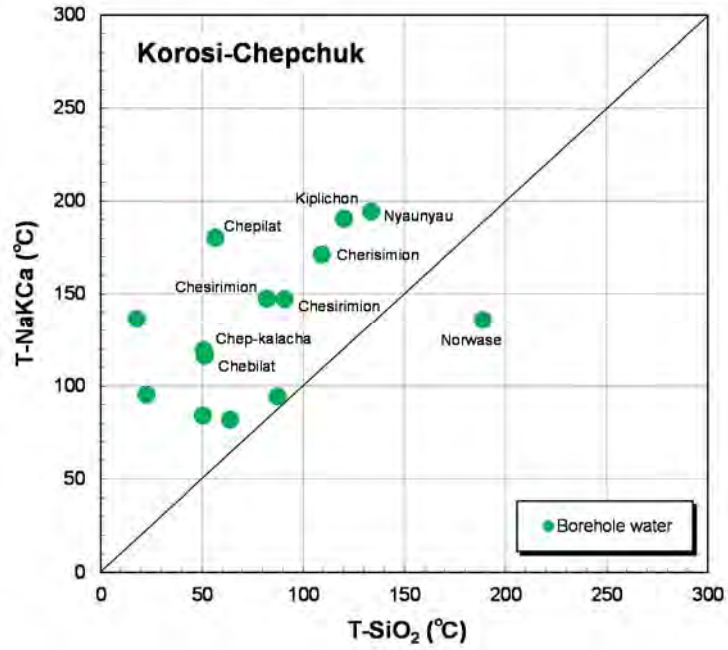
JICA 調査団作成

図 II -3-12 ガス化学温度比較図（コロシ）



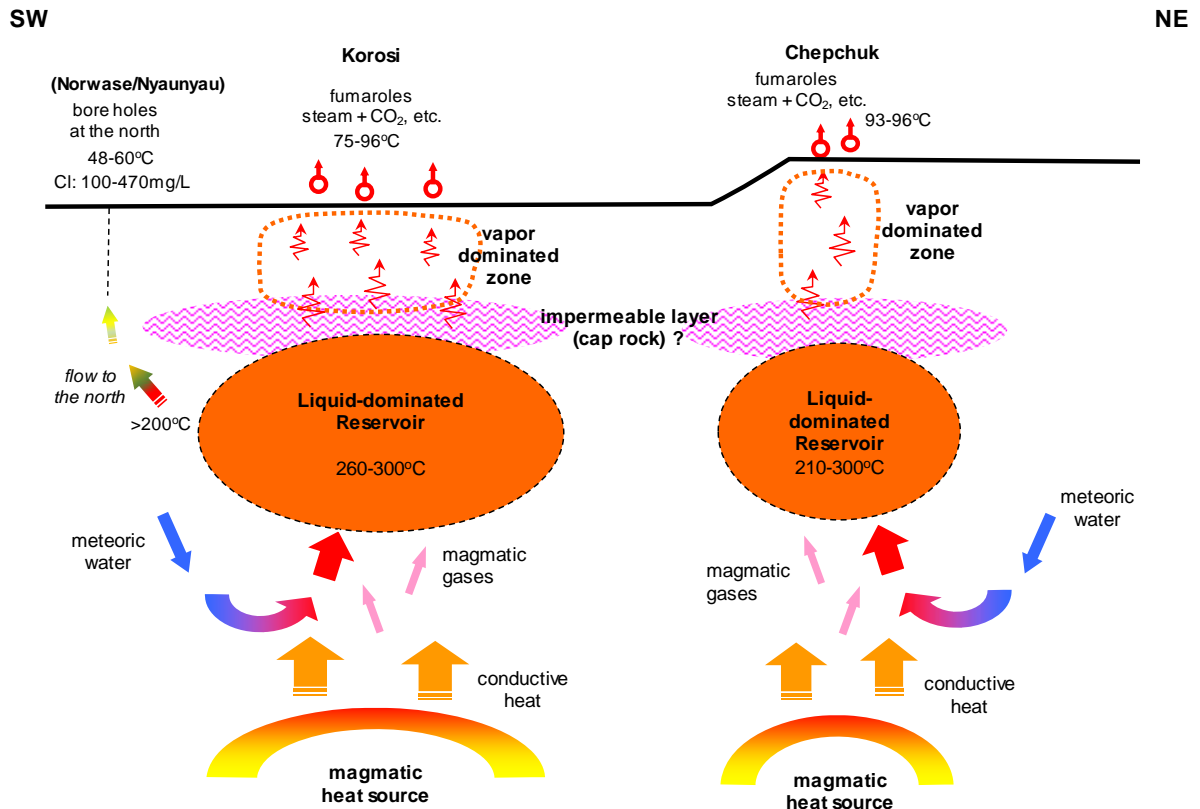
JICA 調査団作成

図 II -3-13 ガス化学温度比較図（チェプチャク）



JICA 調査団作成

図 II -3-14 井戸水のシリカ温度と NaKCa 温度の関係図 (コロシーチェプチャク)



JICA 調査団作成

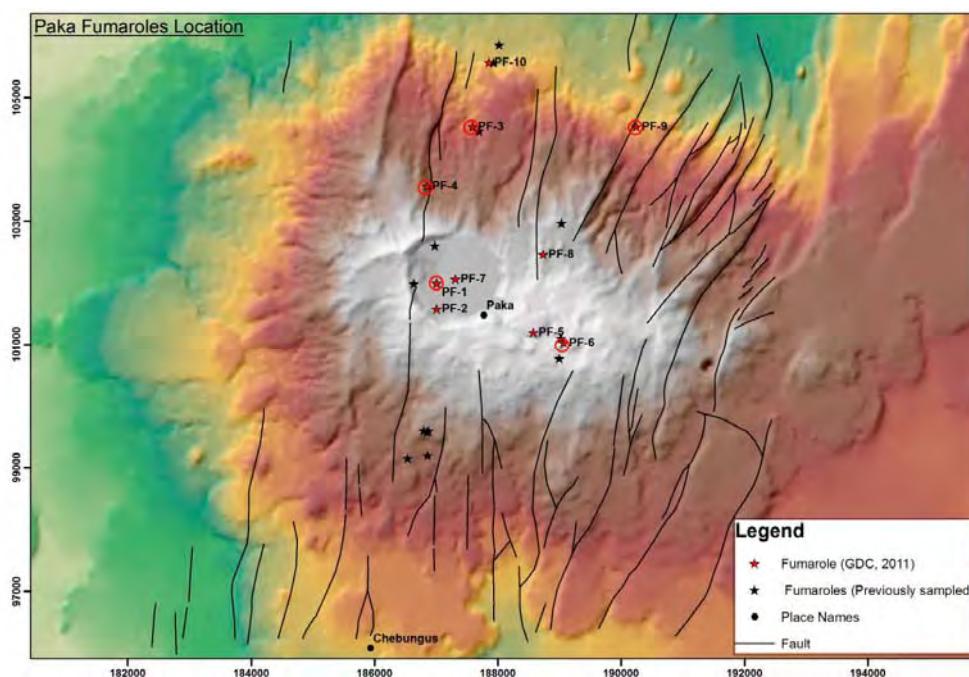
図 II -3-15 コロシーチェプチャク地点の地化学概念モデル

(4) パカ

本地点には活発な噴気が多数あり、パカ火山上部の大カルデラ内、その東のクレーター付近、さらにカルデラ北方の広い地域に分布している（図 II -3-16）。噴気の温度に地区ごとでの大差はなく 91～96℃の範囲にある。自然湧出する温泉は認められない。東方や西方などにはいくつかの水井戸があるが、ほとんどは 5km 以上離れた遠方にあり、それら水井戸での湧出温度は 40℃未満である。パカ火山に最も近い水井戸は南西の Adomeyon にあり、湧出温度は最高で 43℃が記録されており、井戸水の Cl 濃度はやや高い（122～152mg/L）が、高温熱水の混入割合は高くないと考えられる。

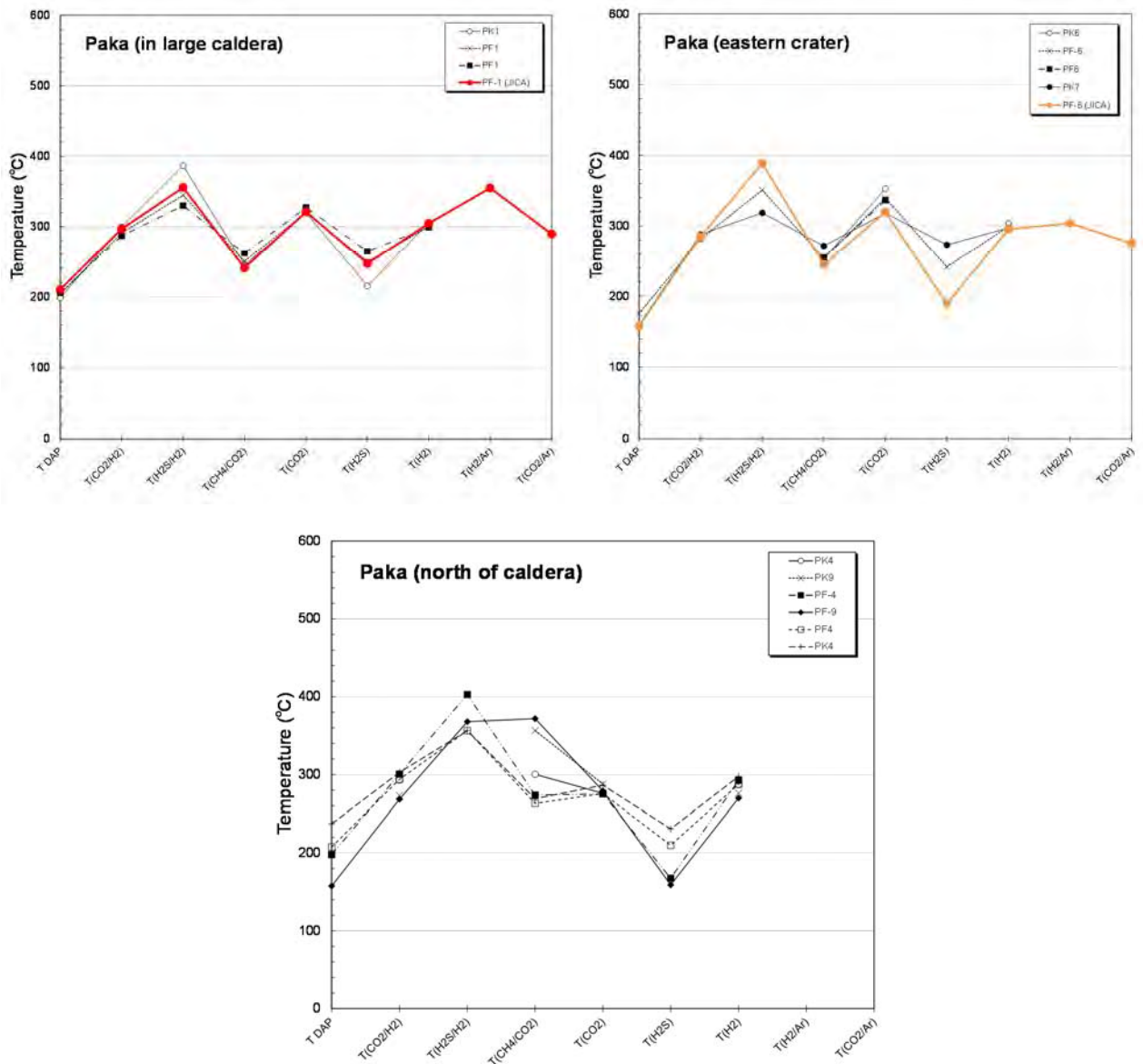
噴気ガスへのマグマ起源ガスの混入割合は比較的高いと考えられる（図 II -3-2 参照）。また、微量ガス成分中の水素（H₂）の割合も比較的高い。ガス化学温度計より、地下流体の温度は 300℃前後もしくはそれ以上であると推定される（図 II -3-17）。噴気蒸気凝縮水の水素・酸素同位体組成によれば、地下での単段沸騰を想定した場合の蒸気分離温度は、大カルデラ内で非常に高く（250～300℃程度）、東クレーター付近やカルデラ北方でも比較的高い（150～200℃程度）ことが推定される（図 II -3-18）。CO₂-H₂-Ar 組成に基づく解析図によれば、高温域の地熱流体は主に蒸気・熱水の二相で存在することが推定される（図 II -3-19）。

パカ地点の熱水系に関する地化学概念モデルを図 II -3-20 に示す。本地点の地下には、蒸気が卓越する二相流体の貯留層が広く分布すると考えられる。ただし、主な流体の起源は天水であり、深部には蒸気の起源となる熱水が卓越する部分もあると推定される。深部での貯留層の温度は 300℃前後もしくはそれ以上であると推定される。地下温度は大カルデラ付近で最も高いと考えられる。地表での噴気の分布や広域的な地下水の流動方向を考慮すれば、深部の熱水は大カルデラ付近から北方に流動している可能性がある。



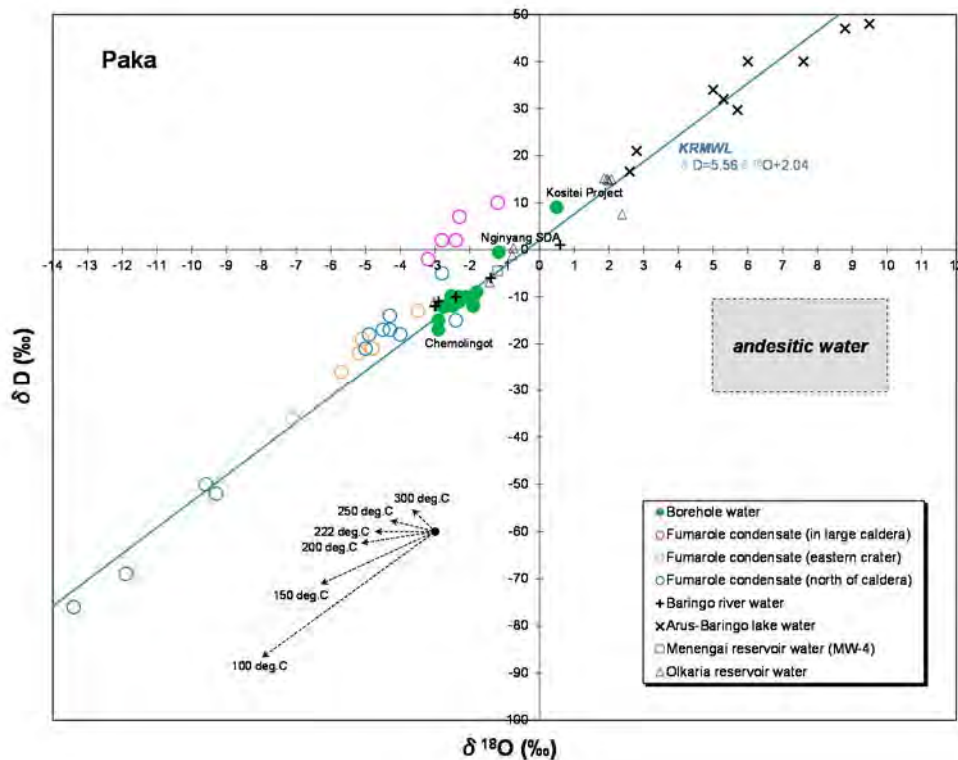
出典：Kipng'ok and Nyamongo (2013)

図 II -3-16 パカ地点の噴気位置図



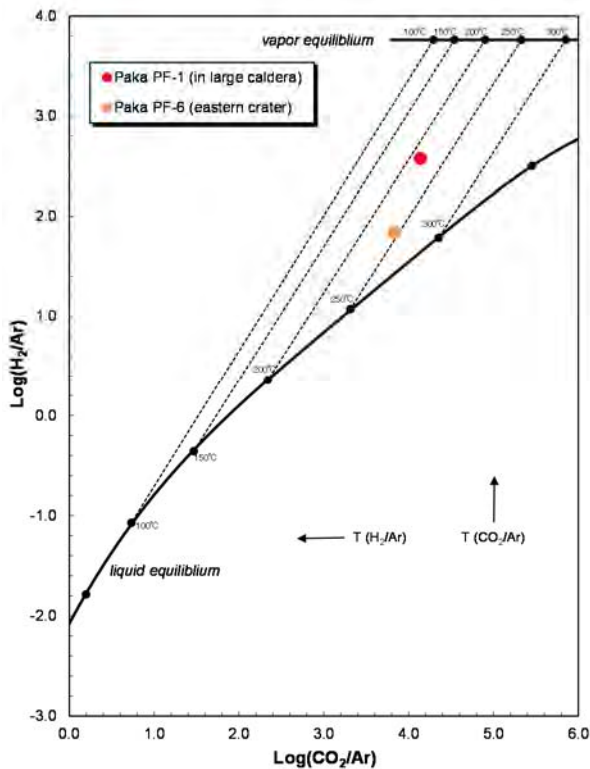
JICA 調査団作成

図 II -3-17 ガス化学温度比較図 (パカの3地区)



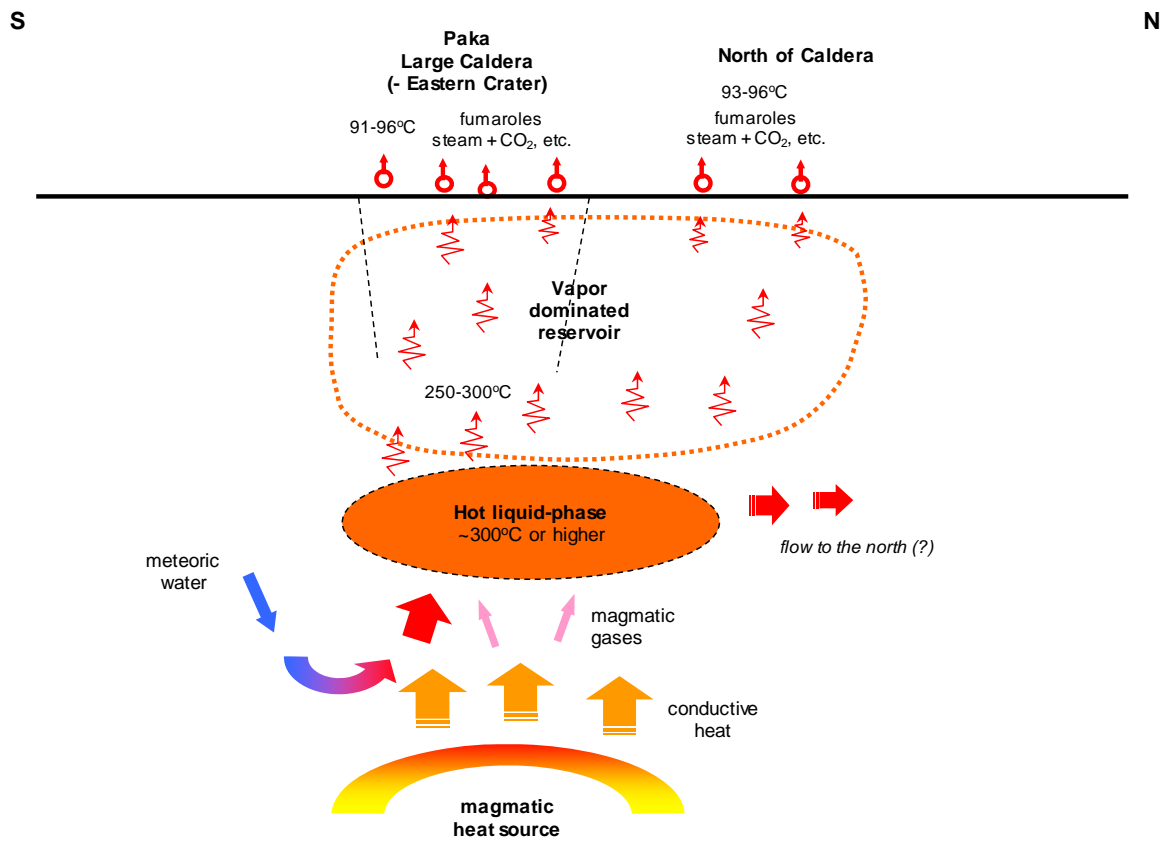
JICA 調査団作成

図 II -3-18 水素・酸素同位体組成図 (パカ)



JICA 調査団作成

図 II -3-19 噴気ガスの H₂/Ar - CO₂/Ar 関係図 (パカ)



JICA 調査団作成

図 II -3-20 パカ地点の地化学概念モデル

II -4 詳細調査（物理探査）

II -4.1 MT/TEM 法電磁探査

(1) コロシ地点及びチェプチャク地点

a) MT/TEM データ解析概要

GDC からコロシ地点及びチェプチャク地点で過去に取得されていた既存 MT データ（107 測点、EDI 形式）の提供を受けた。また、GDC により 2014 年に追加の MT/TEM 探査（測定数 47 点）が実施され、取得された MT データについても提供を受けた。更に既存の TEM データ（測点数 98 点）及び追加 MT/TEM 探査時に取得された TEM データ（測点数 47 点）についての提供も受け、これらの TEM データは MT データのスタティックシフト補正に利用した。

TEM データを用いたスタティックシフト補正及び GDEM データを用いた地形補正後の 151 測点の MT データを用いて、3次元比抵抗インバージョン解析を実施した。3次元比抵抗インバージョン解析に使用した MT データは、南北方向に回転させた周波数 100 Hz から 0.01778 Hz 間の Z_{xy} （インピーダンスの xy 成分）の実部・虚部及び Z_{yx} （インピーダンスの yx 成分）の実部・虚部である。本解析で用いた 3次元比抵抗インバージョン計算は、平滑化制約付き最小二乗法（ガウスニュートン法）を用いたものである。なお、地下の 3次元比抵抗モデルからインピーダンスを求める計算にはスタガード格子を用いた有限差分法を利用した。

図 II-4-1 に 3次元比抵抗インバージョン解析に利用した MT 探査データの測点位置図を示す。

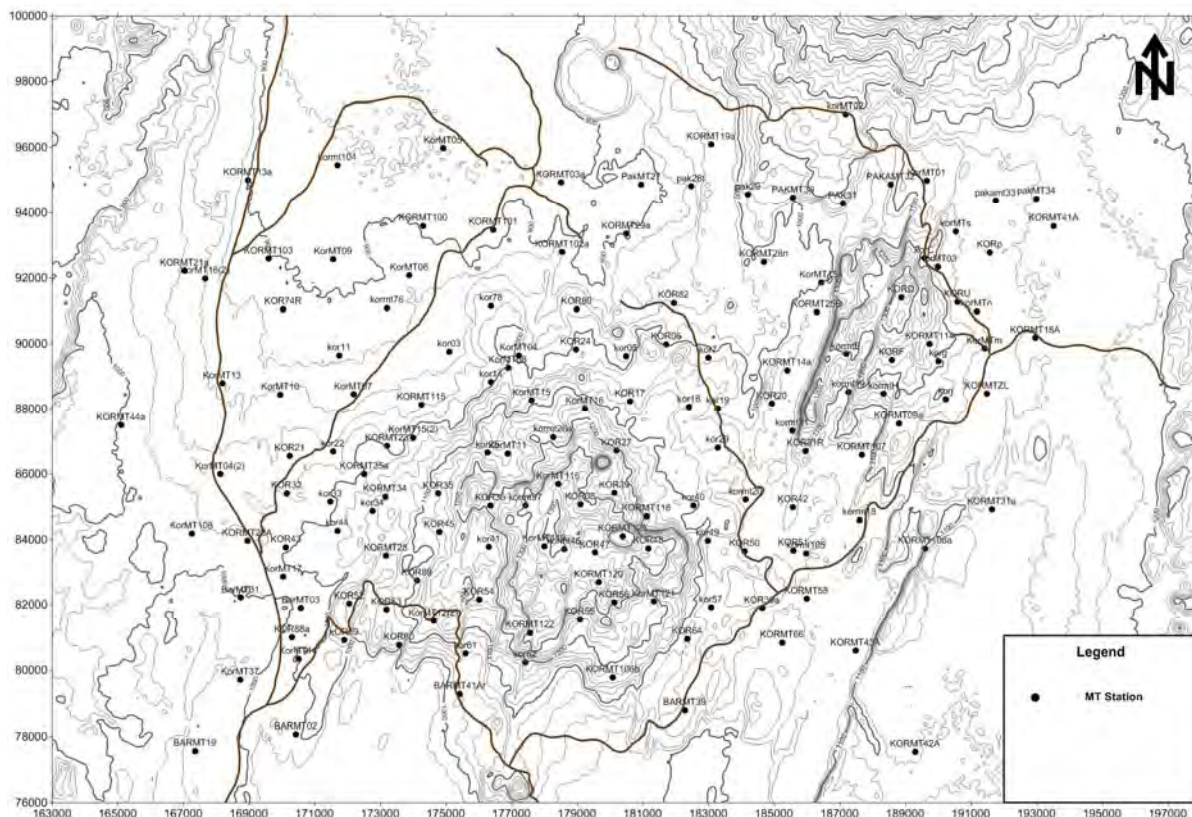


図 II -4-1 MT 探査測点位置図（コロシ・チェプチャク）

今回の MT 探査データの補正、解析方法（スタティックシフト補正、地形補正及び 3 次元比抵抗インバージョン解析）は巻末資料に記述した。また、3 次元比抵抗インバージョン解析の結果得られた 3 次元比抵抗分布データを基に、9 深度（深度 100m、深度 200m、深度 300m、深度 500m、深度 750m、深度 1,000m、深度 1,500m、深度 2,000m 及び深度 3,000m）における解析比抵抗分布平面図（図 II-4-2～図 II-4-10）を作成した。さらに、図 II-4-11 に示す A、B、C、D 及び E 断面における解析比抵抗断面図を図 II-4-12 に示す。

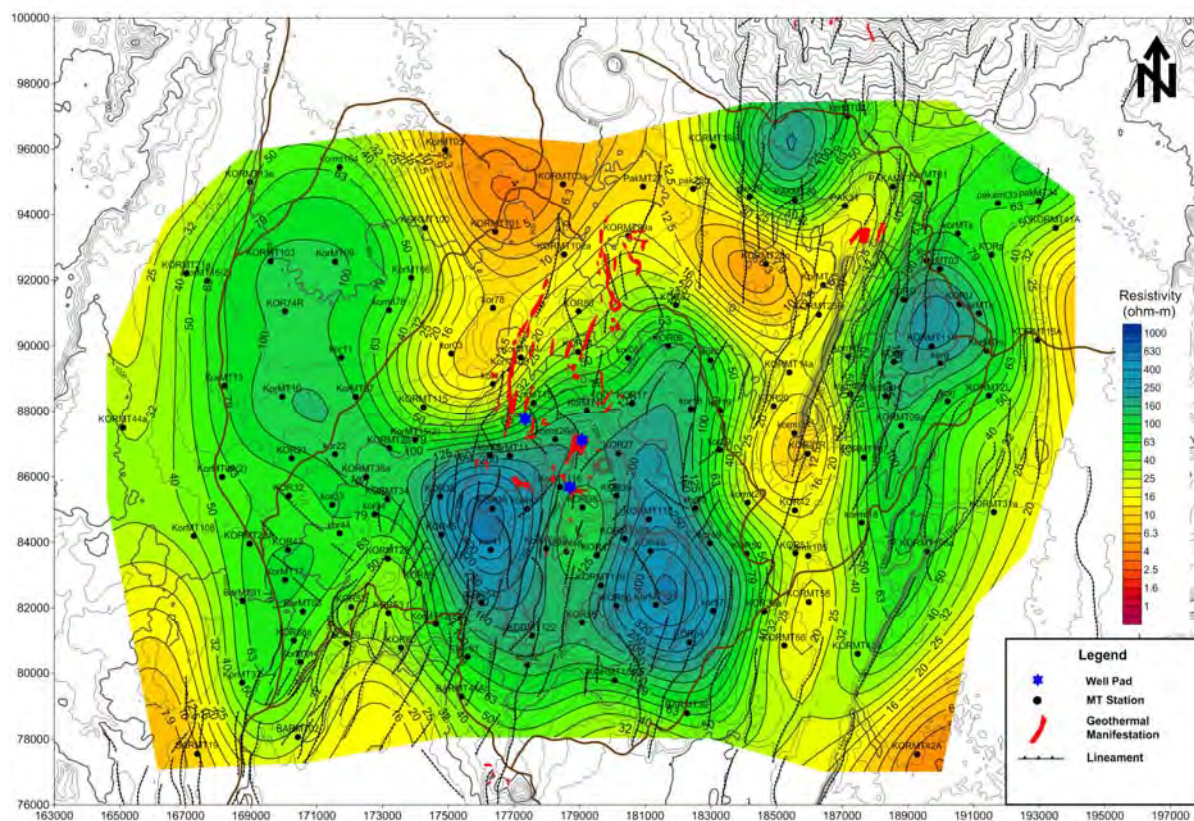


図 II -4-2 解析比抵抗平面分布図（深度 100m：コロシ・チェプチャク）

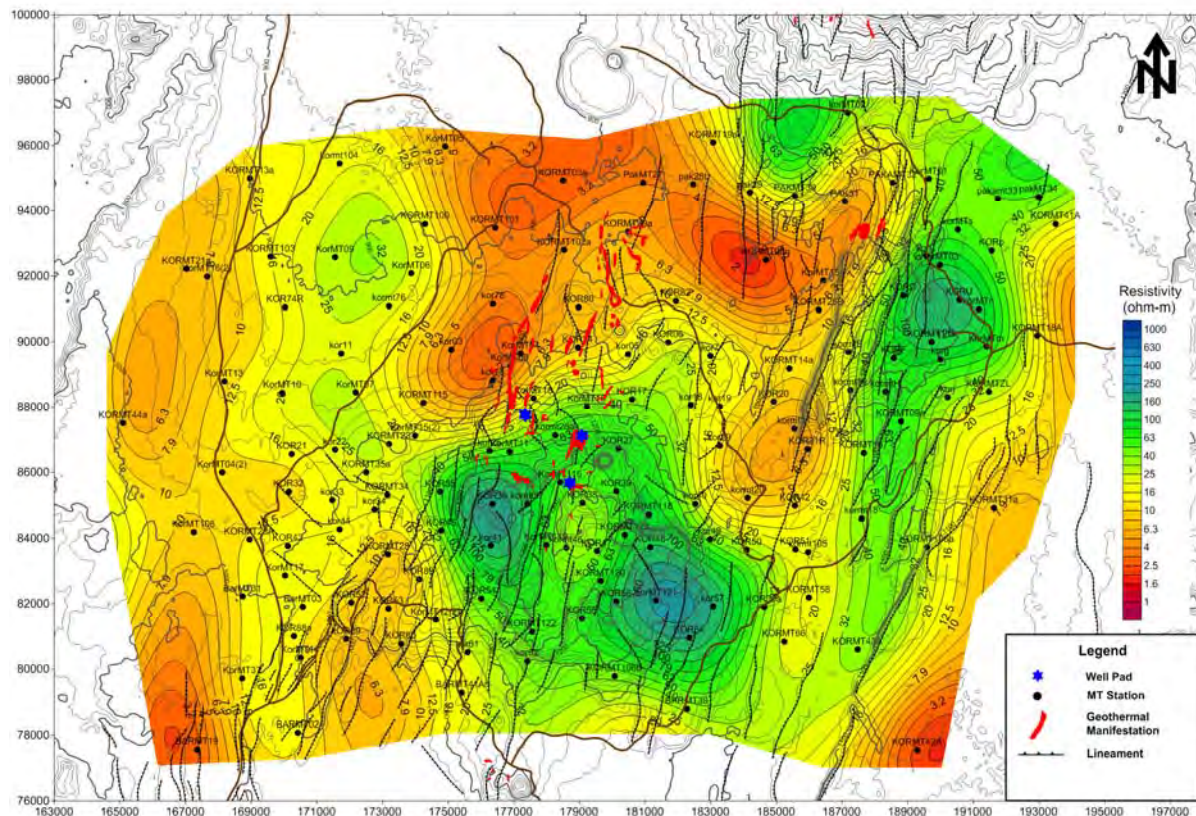


図 II -4-3 解析比抵抗平面分布図 (深度 200m : コロシ・チェプチャク)

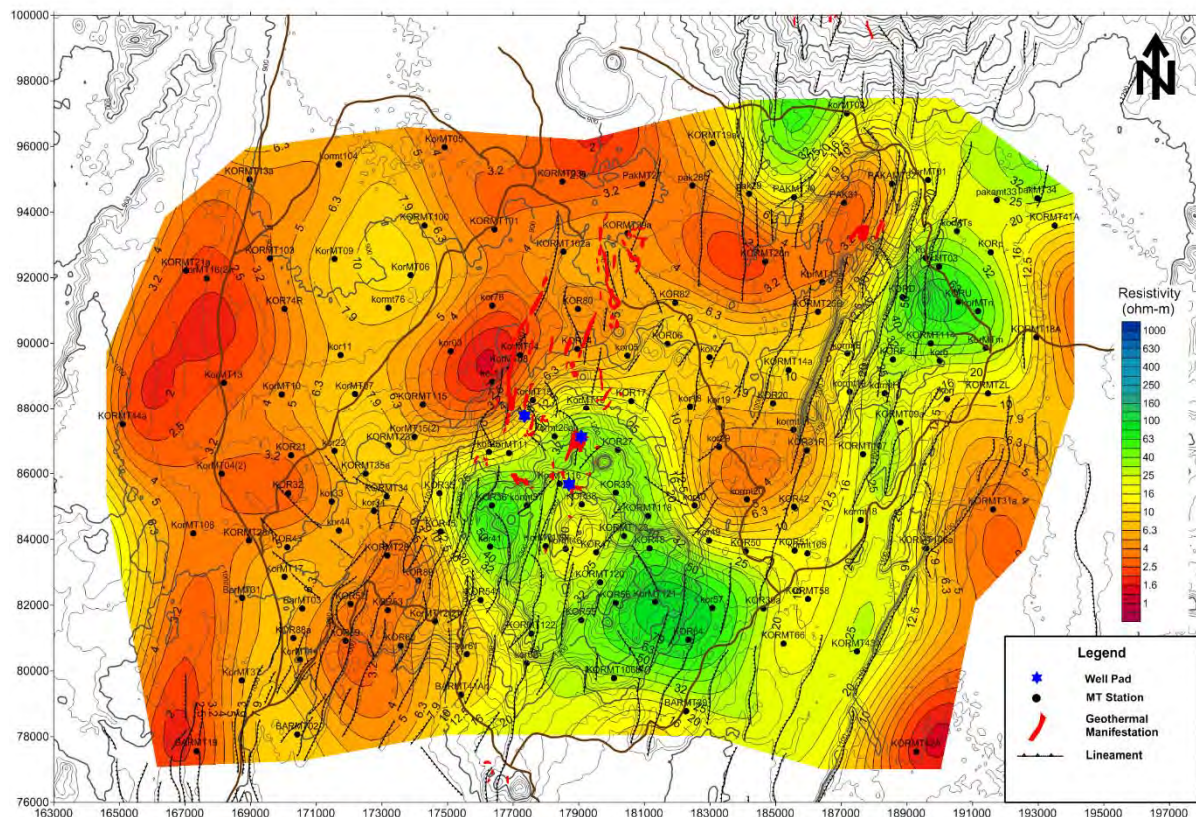


図 II -4-4 解析比抵抗平面分布図 (深度 300m : コロシ・チェプチャク)

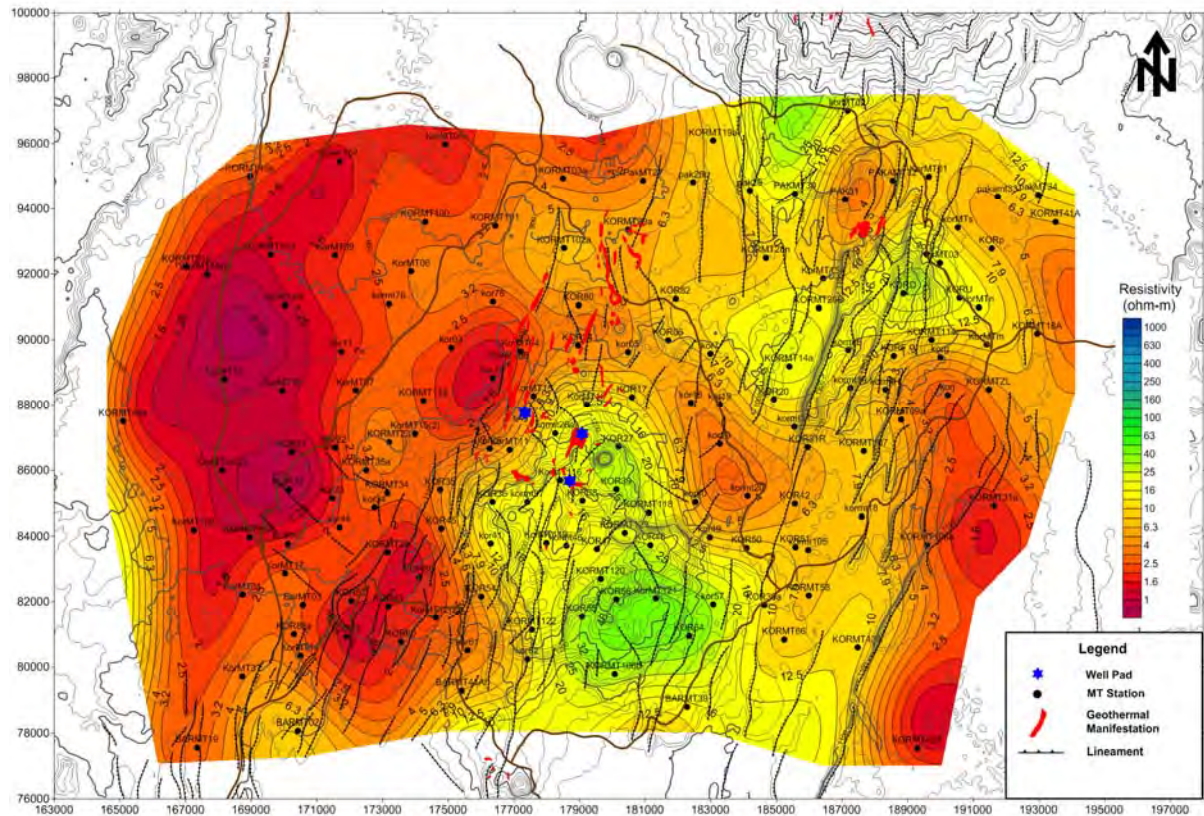


図 II -4-5 解析比抵抗平面分布図 (深度 500m : コロシ・チェプチャク)

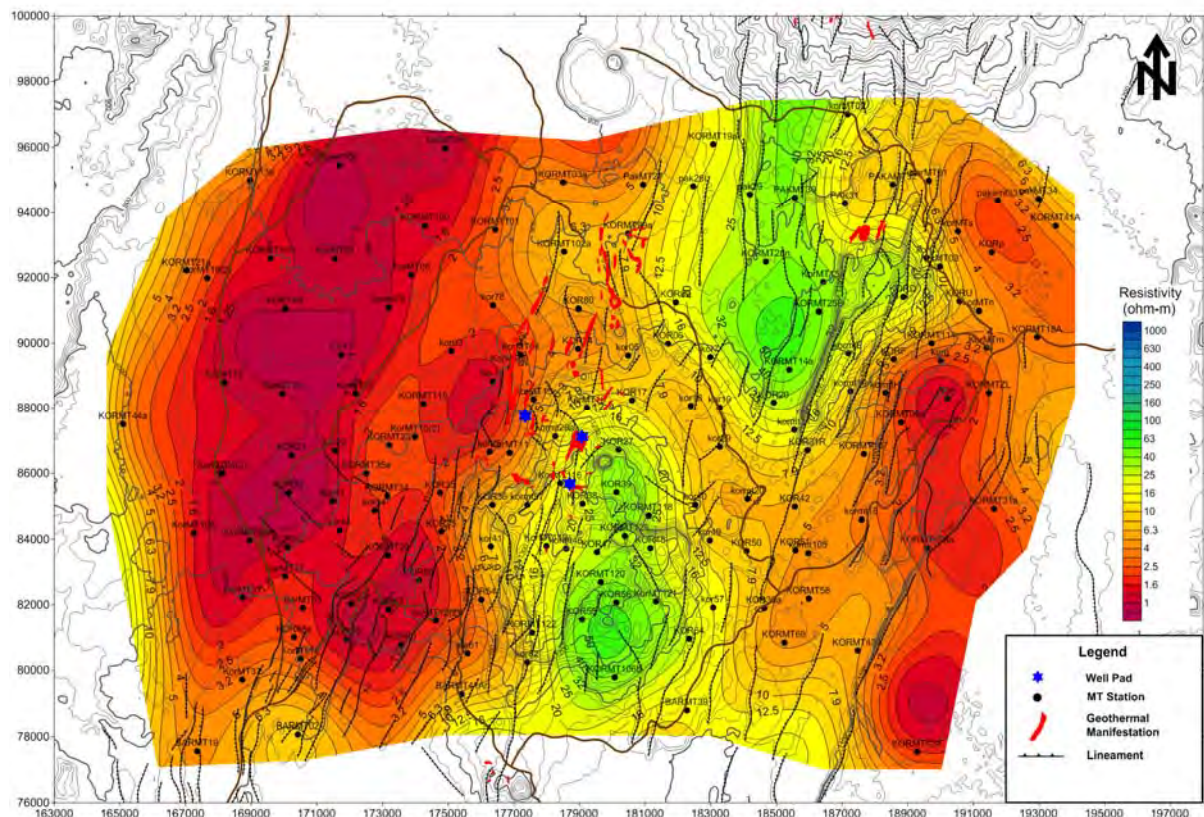


図 II -4-6 解析比抵抗平面分布図 (深度 750m : コロシ・チェプチャク)

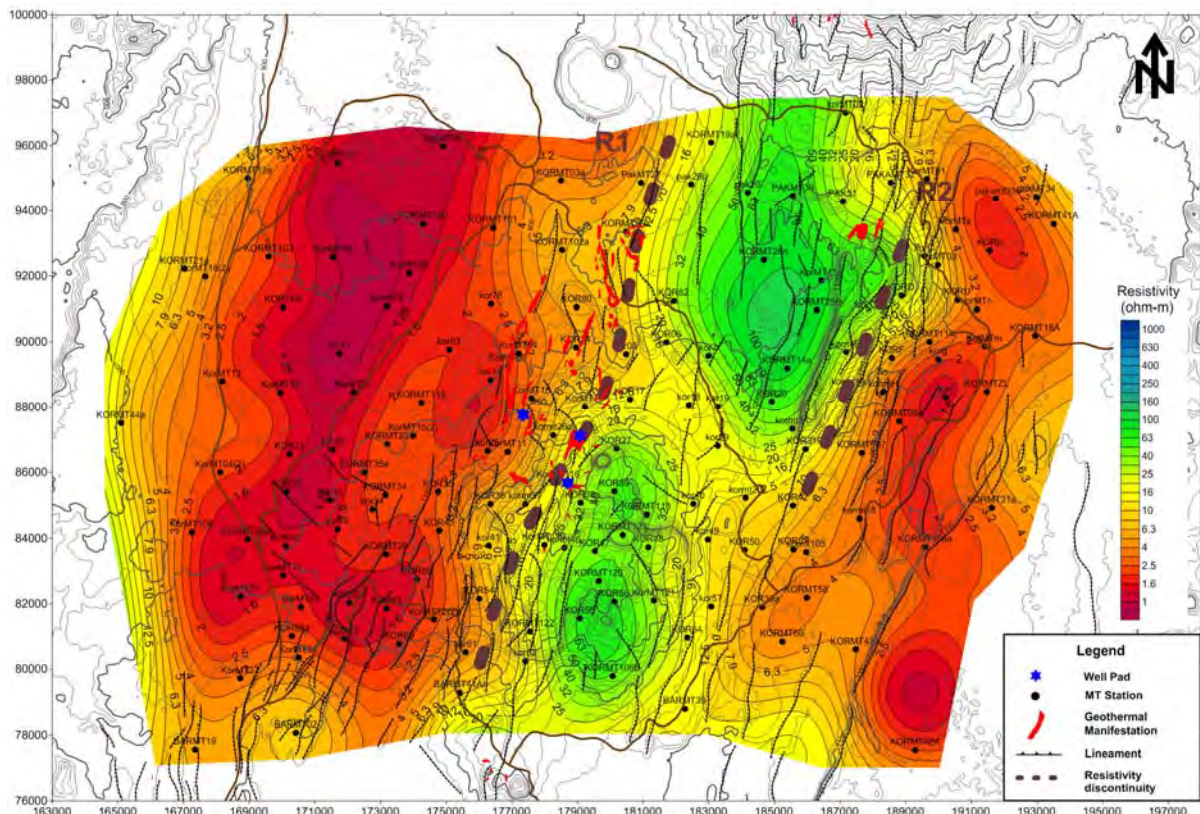


図 II -4-7 解析比抵抗平面分布図（深度 1,000m：コロシ・チェプチャク）

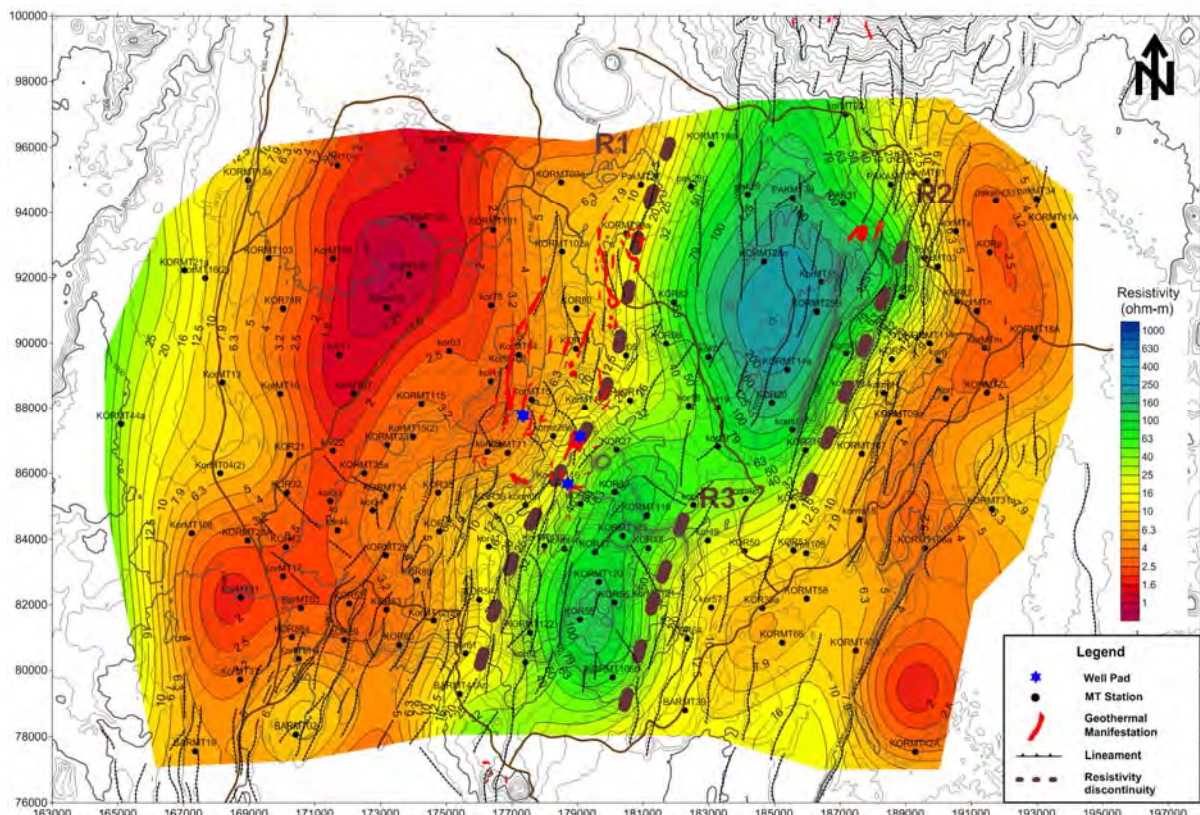


図 II -4-8 解析比抵抗平面分布図（深度 1,500m：コロシ・チェプチャク）

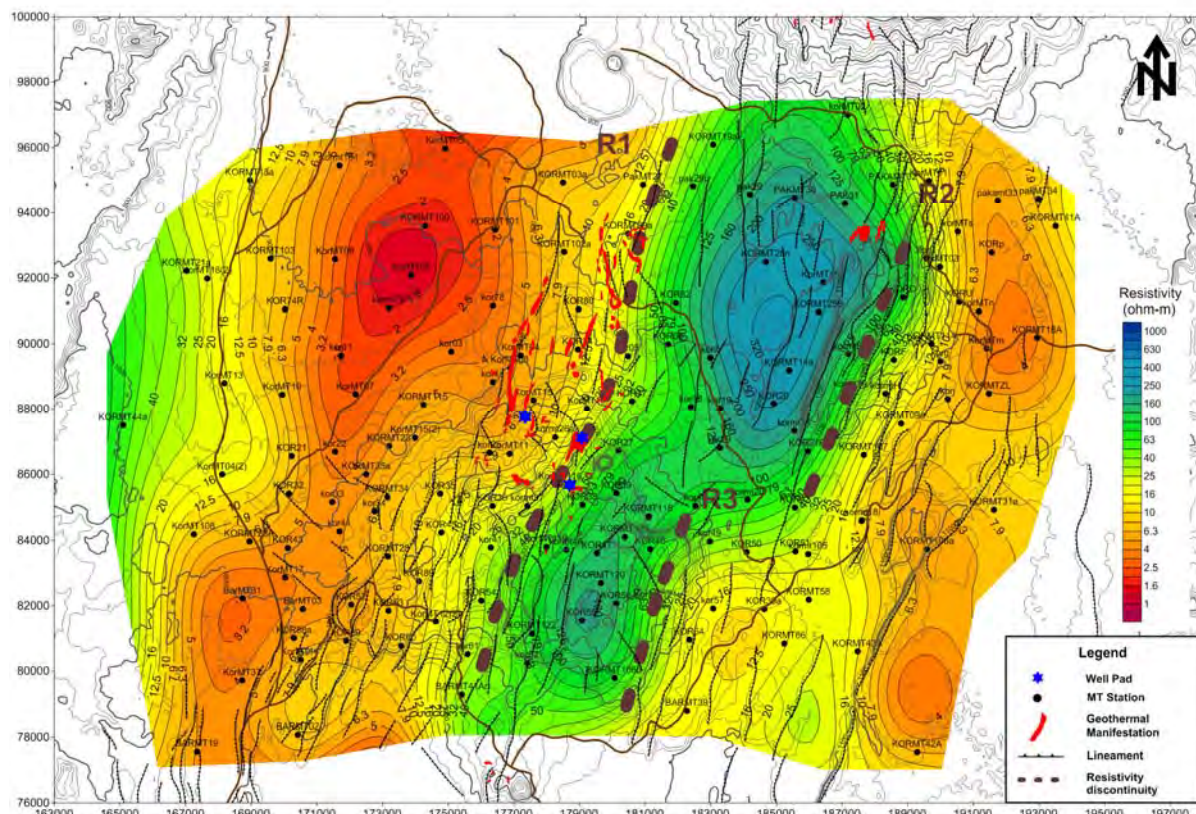


図 II -4-9 解析比抵抗平面分布図 (深度 2,000m : コロシ・チェプチャク)

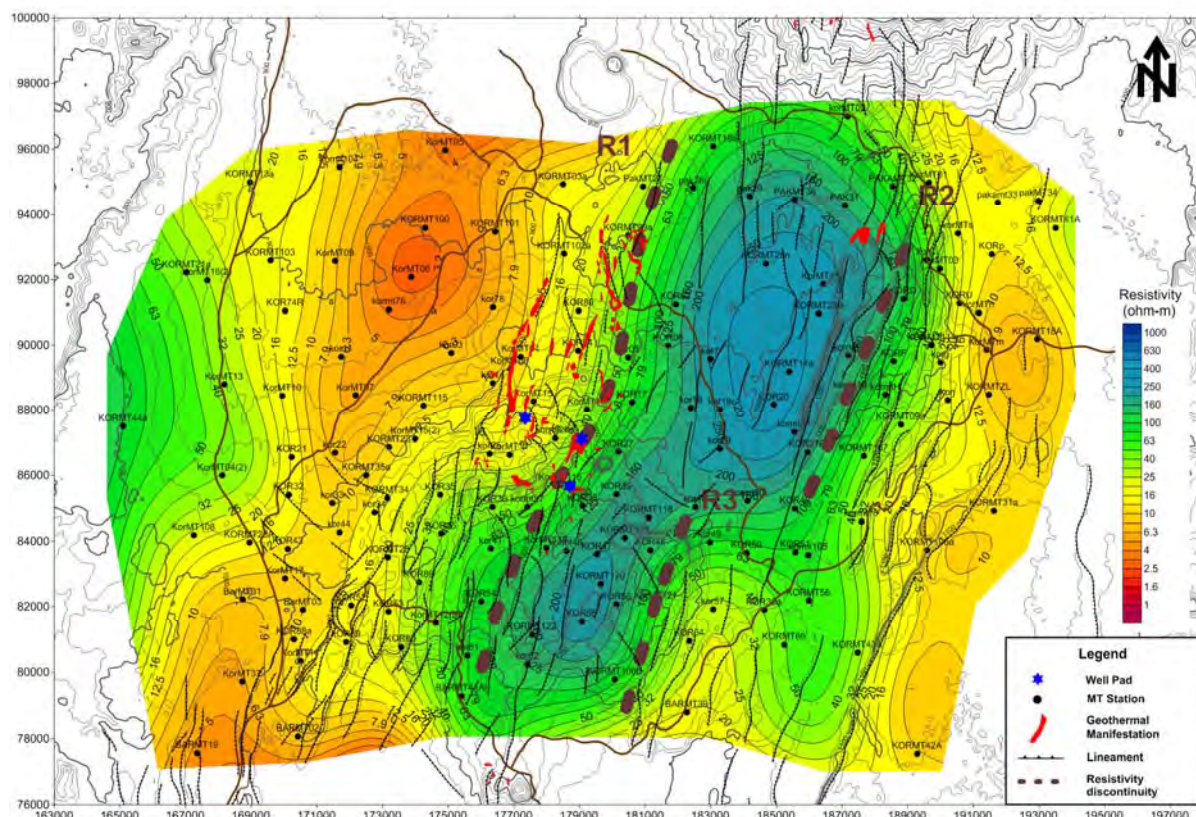


図 II -4-10 解析比抵抗平面分布図 (深度 3,000m : コロシ・チェプチャク)

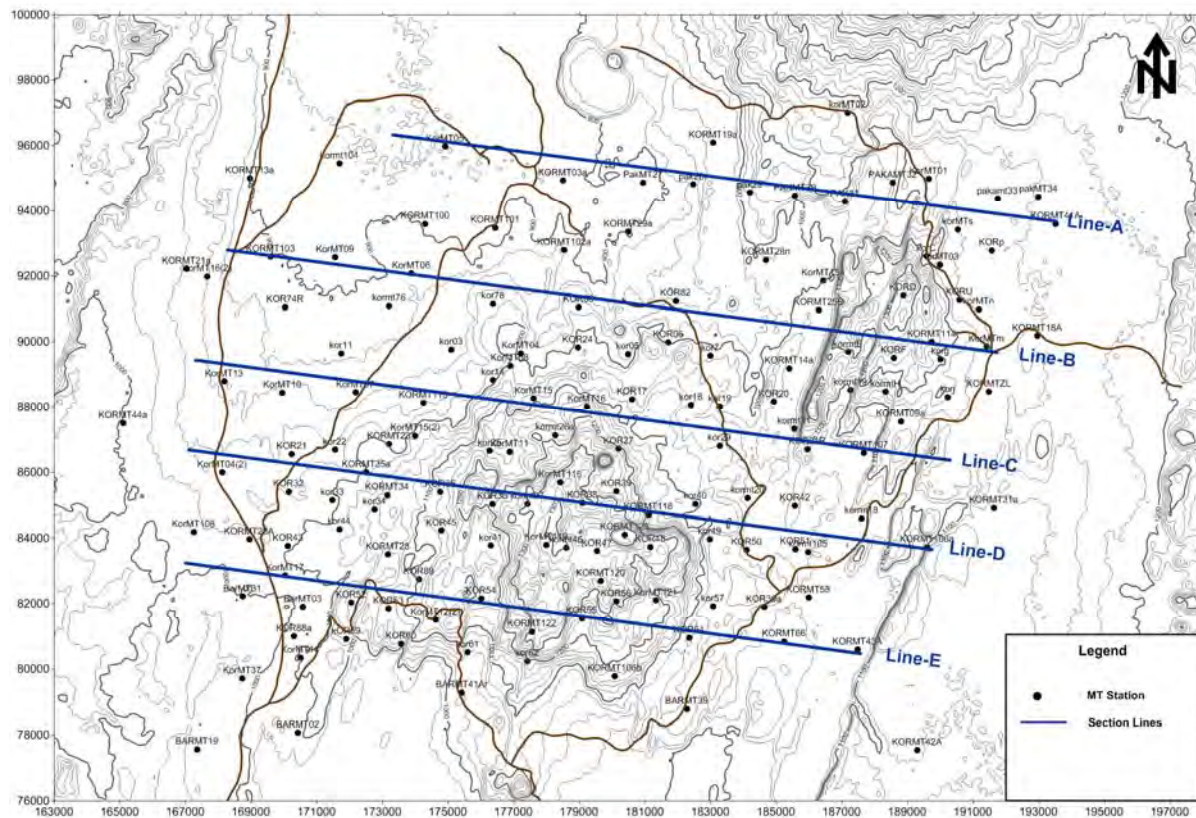


図 II -4-11 解析比抵抗断面位置図 (Line-A, B, C, D and E : コロシ・チェプチャク)

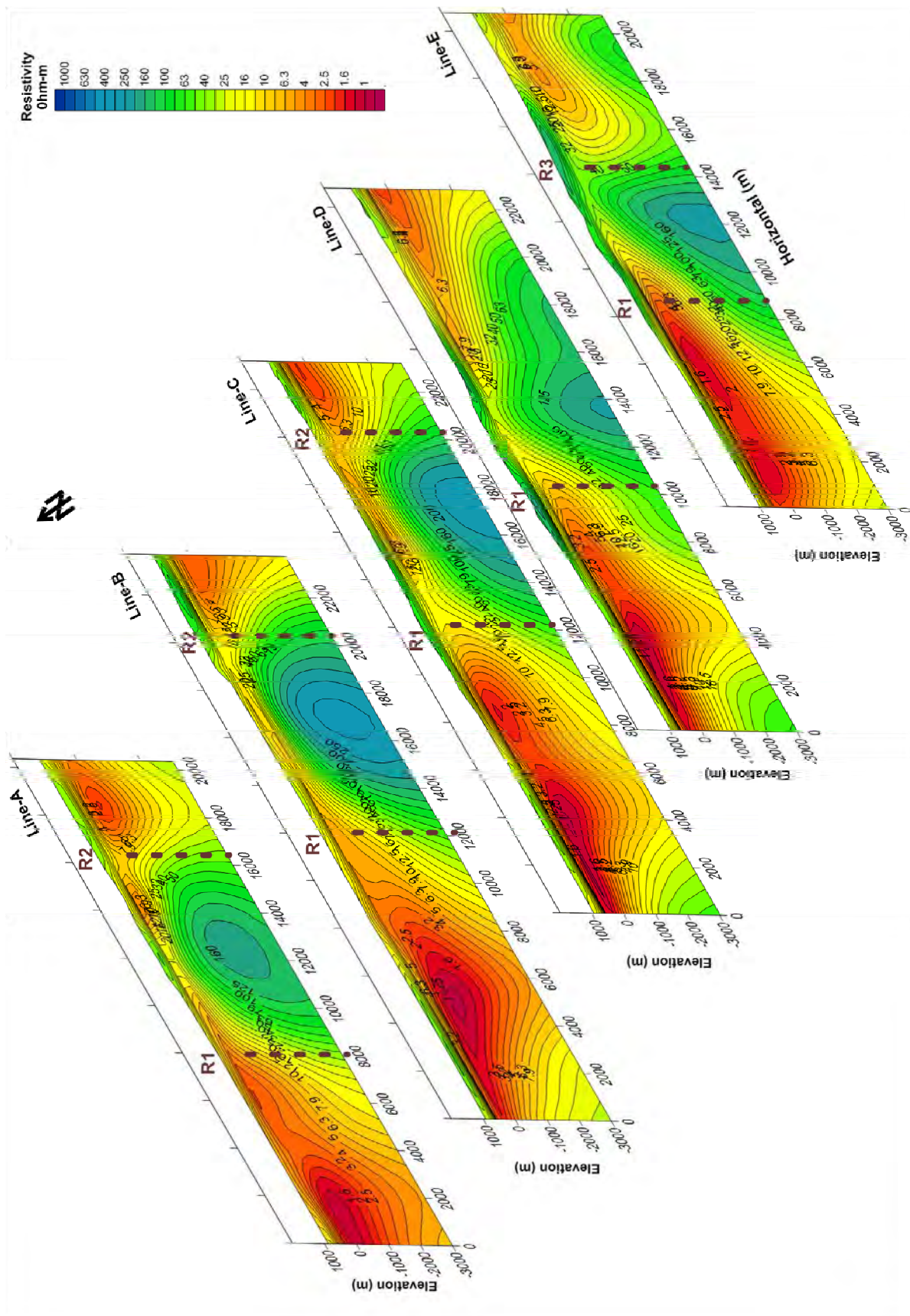


図 II -4-12 解析比抵抗断面図 (Line-A, B, C, D and E : コロシ・チェプチャク)

b) 3次元比抵抗構造解析結果

3次元比抵抗構造解析結果に基づいたコロシ地点及びチェプチャク地点にて解釈される比抵抗構造を以下に記述する。

(i) 比抵抗不連続線

比抵抗不連続構造とは、比抵抗分布から認められる比抵抗構造上の不連続が存在する箇所であり、このような構造がある方向性をもって連続している場合には、その周辺には断層あるいは断層周辺に存在する破砕帯の存在が期待される。一般的に地熱地帯の地下に存在する地熱流体は、断層あるいは断層周辺に存在する破砕帯に貯留されていることが確認されている。このため、比抵抗不連続線を抽出して断裂構造を推定することは、解析対象地域の地熱構造を考察する上で重要である。コロシ地点及びチェプチャク地点の解析比抵抗分布平面図及び解析比抵抗分布断面図から抽出される比抵抗不連続線は以下に示す R1、R2 及び R3 の3本である。

比抵抗不連続線 R1

比抵抗不連続線 R1 は解析対象地域南部から北部にかけて概略北北西－南南東方向に延びる比抵抗不連続線である。この比抵抗不連続線 R1 は、非常に規模が大きく、深度 1,000m から深度 3,000m の解析比抵抗分布平面図（図 II-4-7～図 II-4-10）において認められる。この比抵抗不連続線 R1 の北部及び南部の周辺域には R1 と平行に延びる数本のリニアメントが検出されていることを考慮すると、比抵抗不連続線 R1 の北部及び南部は断層を反映している可能性がある。

比抵抗不連続線 R2

比抵抗不連続線 R2 は解析対象地域の東部を概略北北西－南南東方向に延びる比抵抗不連続線である。この比抵抗不連続線 R2 は、比抵抗不連続線と概略平行に走っており、深度 1,000m から深度 3,000m の解析比抵抗分布平面図（図 II-4-7～図 II-4-10）において認められる。この比抵抗不連続線 R2 の周辺地域においても、過去の調査から R2 と平行に延びる数本のリニアメントが検出されていることから、比抵抗不連続線 R2 に関しても断層を反映している可能性がある。ただし、比抵抗不連続線 R2 の示徴は前述の比抵抗不連続線 R1 と比較すると若干弱い示徴である。

比抵抗不連続線 R3

比抵抗不連続線 R3 は解析対象地域の南部を概略北北西－南南東方向に延びる比抵抗不連続線である。この比抵抗不連続線 R3 は、深度 1,000m から深度 3,000m の解析比抵抗分布平面図（図 II-4-7～図 II-4-10）において認められる。この比抵抗不連続線 R3 の示徴は前述の比抵抗不連続線 R1 や R2 と比較すると弱い示徴である。

(ii) 低比抵抗域

今回の MT 探査データ解析により、コロシ地点及びチェプチャク地点において認められる明瞭な低比抵抗域は主に以下のものである。

a) 深度 500m から深度 1,500m において調査地域の西部に認められる 5 ohm-m 以下を示す低比抵抗域

b) 深度 500m から深度 1,500m において調査地域の東部に認められる 5 ohm-m 以下を示す低比抵抗域

c) 深度 300m から深度 500m において比抵抗不連続線 R1 の中央部～北部と比抵抗不連続線

R2 に挟まれた地域に認められる概略 10 ohm-m 以下を示す低比抵抗域

上記 a) で示した低比抵抗域は、深度 500m～深度 1,500m において調査地域の西部に広く分布しており、この低比抵抗域の東端は概略、比抵抗不連続線 R1 周辺に位置している（図 II-4-5～図 II-4-8）。また、上記 b) で示した低比抵抗域は、深度 500m～深度 1,500m において調査地域の東部に分布しておりこの低比抵抗域の西端は概略、比抵抗不連続線 R2 周辺に位置している（図 II-4-5～図 II-4-8）。これらの低比抵抗域は地熱活動により形成された熱水変質帯（スメクタイトや混合層粘土鉱物）もしくは河川堆積物・沖積堆積物等の堆積物を反映している可能性が高い。ただし、これらの低比抵抗域が河川堆積物・沖積堆積物等の堆積物を反映している場合でも、スメクタイト等の熱水変質鉱物が卓越しているでも、これらの地域の深部は比較的低温である可能性が高い。

(iii) 中～深部高比抵抗域

調査地域の中央部の深度 1,500m～深度 3,000m で、概略比抵抗不連続線 R1 と比抵抗不連続線 R2 もしくは R3 に挟まれる地域において、50 ohm-m 以上の比抵抗値を示す相対的な高比抵抗域が認められる（図 II-4-8～図 II-4-10）。この深部高比抵抗域の南部域及び北部域においては、その上部（浅部）において 5 ohm-m 以下の比抵抗値を示す低比抵抗域は認められない。ただし、この深部高比抵抗域の南部域は火山周辺に位置していることから、この火山周辺の深部に分布する高比抵抗域は高温の貫入岩を反映している可能性がある。

c) コロシ地点及びチェプチャク地点の比抵抗構造

比抵抗不連続線 R1 の周辺及びその西側には、深度 500m から深度 1,500m（図 II-4-5～図 II-4-8）において、5 ohm-m 以下を示す低比抵抗域が分布している。特に、比抵抗不連続線 R1 の中央部周辺域から若干西側にかけての地域では多数の地熱徴候が存在していることから、比抵抗不連続線 R1 周辺で比較的浅部に分布する低比抵抗域は地熱貯留層の帽岩と成り得るスメクタイトや混合層粘土鉱物等から構成される熱水変質帯を反映しているものと考えられる。

一方、50 ohm-m 以上の比抵抗値を示す相対的な高比抵抗域の隆起構造が深度 1,500m から深度 3,000m において、調査地域の南部から北東部にかけての地域で比抵抗不連続線 R1 と R2 あるいは比抵抗不連続線 R1 と R3 に挟まれる形状で、広く分布している（図 II-4-8～図 II-4-10）。この高比抵抗隆起構造内には比較的新しい火山やクレーターが存在しているため、この深部高比抵抗域は貫入岩等が存在し、高温域を示している可能性がある。この高比抵抗域の上位には低比抵抗域が認められていないが、蒸気層が存在する場合には、多量の蒸気のため高比抵抗値を示すと考えられる。このため、この高比抵抗隆起構造の上位には比較的浅部において、蒸気層が存在している可能性がある。特に比抵抗不連続線 R1 の中央部周辺域から南部周辺域にかけての地域及び比抵抗不連続線 R3 の中央部周辺域では、深度 300m から深度 750m において蒸気層を反映している可能性がある 20 ohm-m 以上の比抵抗値を示す相対的な高比抵抗域が認められる（図 II-4-4～図 II-4-6）ことから、高温の地熱流体の上昇域であり、上昇してきた地熱流体が北方に流動して比抵抗不連続線 R1 の中央部～北部周辺域あるいはその若干西側に熱水変質帯を形成している可能性がある。

また、比抵抗不連続線 R1 の西側地域には低比抵抗域が広く分布しているが、この地域の大部分においては深部の深度 2,000m においても 10 ohm-m 以下を示す低比抵抗域となっている（図 II-4-9）。これは河川堆積物や沖積堆積物等の堆積物が分布するため、もしくは深部にお

いても比較的低温で形成される熱水変質帯（スメクタイトや混合層粘土鉱物等）が卓越しているためと考えられる。調査地域西部の深部が上記のどちらの場合であっても、調査地域の西部地域の深部は中央部～南部の深部における温度と比較しては温度が低い可能性が高い。

比抵抗不連続線 R2 北部の若干西側には地熱徴候が存在する。この地熱徴候の周辺地域及びその西側には深度 100m から深度 300m において 10 ohm-m 以下を示す相対的な低比抵抗域が認められ（図 II-4-2～図 II-4-4）、この低比抵抗域はスメクタイトや混合層粘土鉱物等から構成される熱水変質帯を反映しているものと考えられ、この低比抵抗域の直下には高温で形成されるイライトやクローライト等の熱水変質帯を反映している可能性がある相対的な高比抵抗域が分布している。また、この地熱徴候周辺及びその西側地域には多数の NNE-SSW 系のリニアメントが分布しており、これらのリニアメントは地熱流体の流動域となっている可能性がある。

なお、調査地域の中央部（パカ地点とチェプチャク地点の中間地域）の深度 500m から深度 750m においても 10 ohm-m 以下を示す低比抵抗域が存在するが、この低比抵抗域の直下には高温で形成されるイライトやクローライト等の熱水変質帯あるいは蒸気層を反映するような相対的な高比抵抗域が認められないため、比抵抗不連続線 R1 の中央部から南部域やチェプチャク地点の変質帯周辺及び西側地域と比較すると比較すると地熱開発上の有望性は劣るものと考えられる。

以上のことから、MT データの解析結果に基づくと、以下に示す箇所が地熱開発有望地域と考えられる。

- 1) 比抵抗不連続線 R1 の中央部から南部にかけての周辺地域の深部
- 2) 比抵抗不連続線 R3 の中央部周辺域の深部
- 3) 比抵抗不連続線 R2 の北部域の西側に存在する低比抵抗域の深部

ただし、上記の解釈は MT 探査データ解析結果のみに基づいたものであるため、今後、地質データや地化学データとの総合評価を実施して、調査井掘削有望地点を選定する必要がある。

(2) パカ地点

a) MT/TEM データ解析概要

GDC からパカ地点で過去に取得されていた既存 MT データ（149 測点、EDI 形式）の提供を受けた。また、GDC により 2016 年に追加の MT/TEM 探査（測定数 8 点）が実施され、取得された MT データに関しても提供を受けた。更に既存の TEM データ（測点数 106 点）及び追加 MT/TEM 探査時に取得された TEM データ（測点数 12 点）についての提供も受け、これらの TEM データは MT データのスタティックシフト補正に利用した。

TEM データを用いたスタティックシフト補正及び GDEM データを用いた地形補正後の 151 測点の MT データを用いて、3 次元比抵抗インバージョン解析を実施した。3 次元比抵抗インバージョン解析に使用した MT データは、南北方向に回転させた周波数 100 Hz から 0.01778 Hz 間の Z_{xy} （インピーダンスの xy 成分）の実部・虚部及び Z_{yx} （インピーダンスの yx 成分）の実部・虚部である。本解析で用いた 3 次元比抵抗インバージョン計算は、平滑化制約付き最小二乗法（ガウスニュートン法）を用いたものである。なお、地下の 3 次元比抵抗モデルからインピーダンスを求める計算にはスタッガード格子を用いた有限差分法を利用した。

図 II-4-13 に 3 次元比抵抗インバージョン解析に利用した MT 探査データの測点位置図を示す。

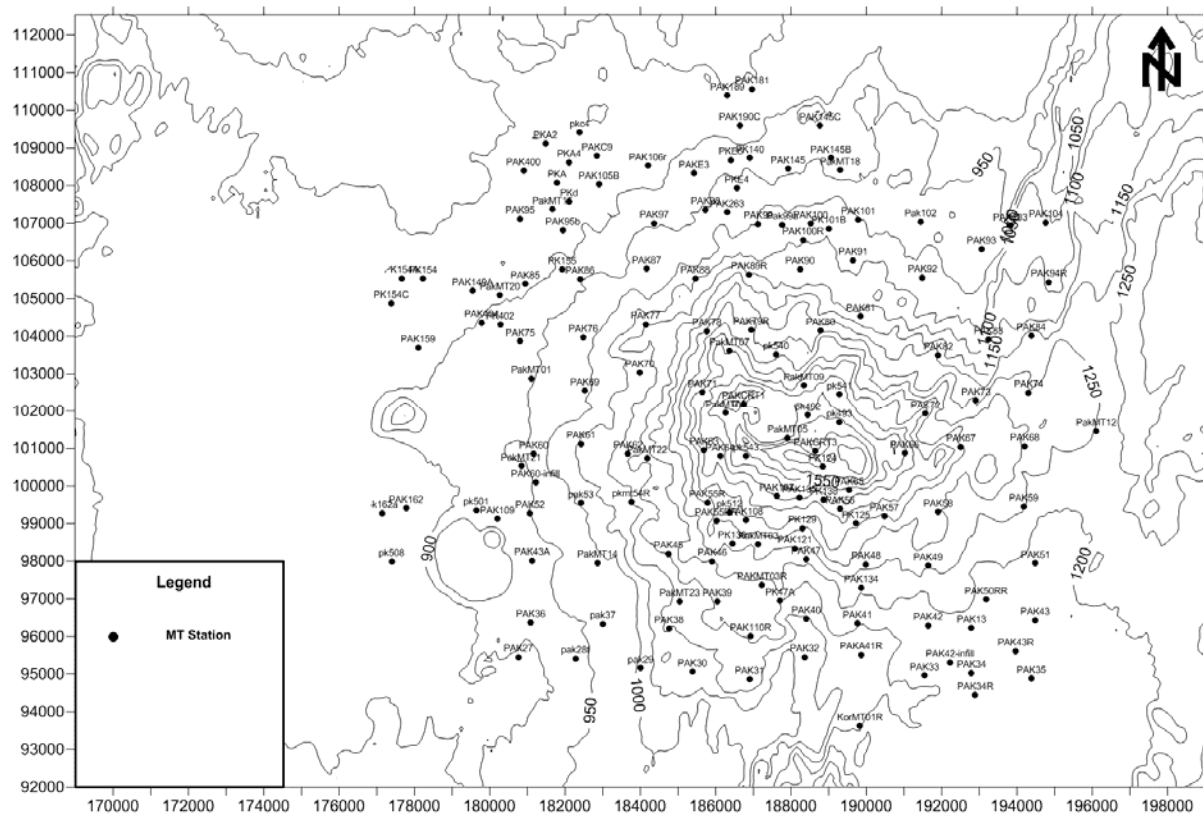


図 II -4-13 MT 探査測点位置図 (パカ)

今回の MT 探査データの補正、解析方法（スタティックシフト補正、地形補正及び 3 次元比抵抗インバージョン解析）は巻末資料に記述した。また、3 次元比抵抗インバージョン解析の結果得られた 3 次元比抵抗分布データを基に、9 深度（深度 100m、深度 200m、深度 300m、深度 500m、深度 750m、深度 1,000m、深度 1,500m、深度 2,000m、及び深度 3,000m）における解析比抵抗分布平面図（図 II-4-14～図 II-4-22）を作成した。また、図 II-4-23 に示す A、B、C、D 及び E 断面における解析比抵抗断面図をそれぞれ図 II-4-24 に示す。

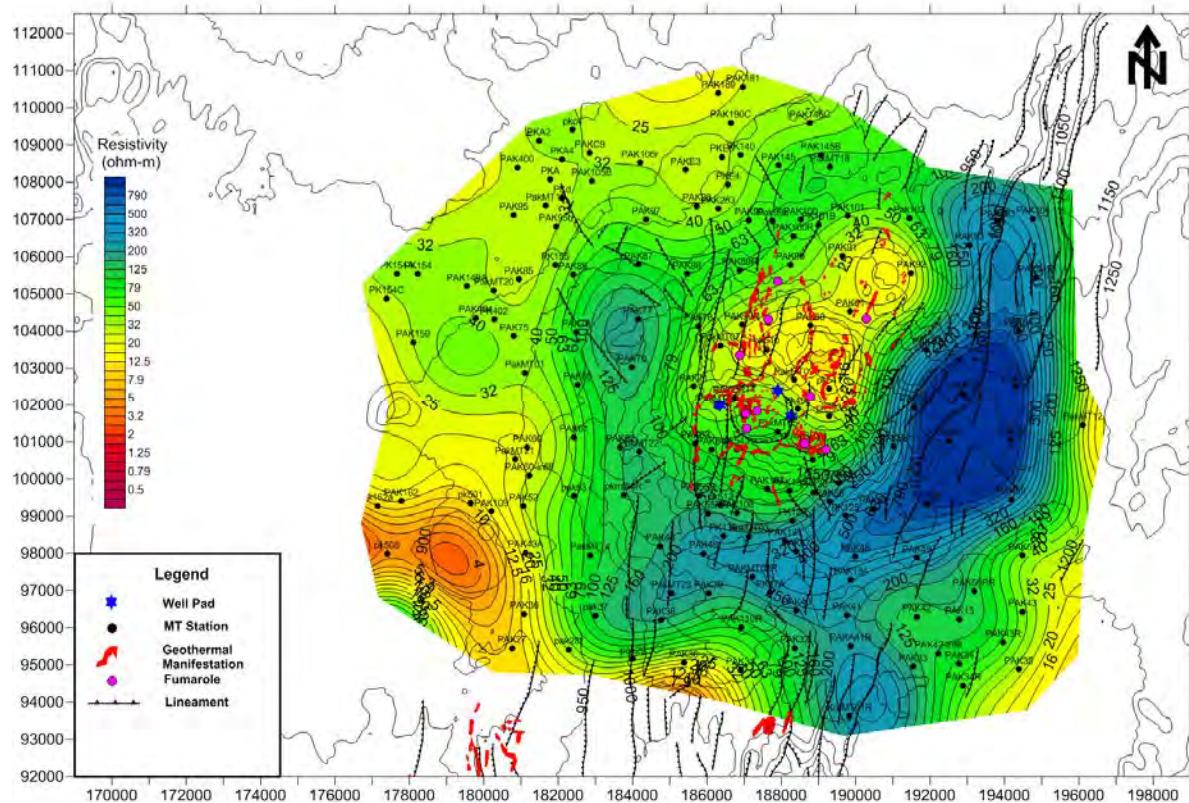


図 II -4-14 解析比抵抗平面分布図（深度 100m : パカ）

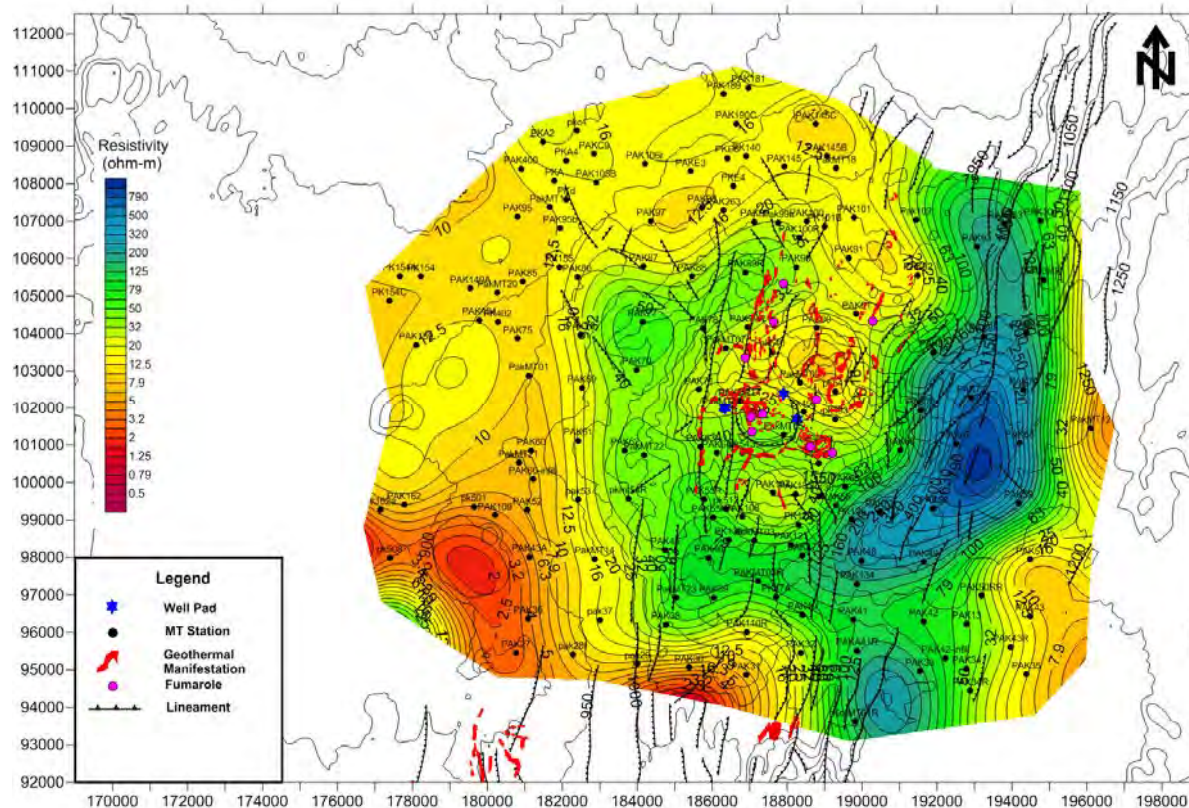


図 II -4-15 解析比抵抗平面分布図（深度 200m : パカ）

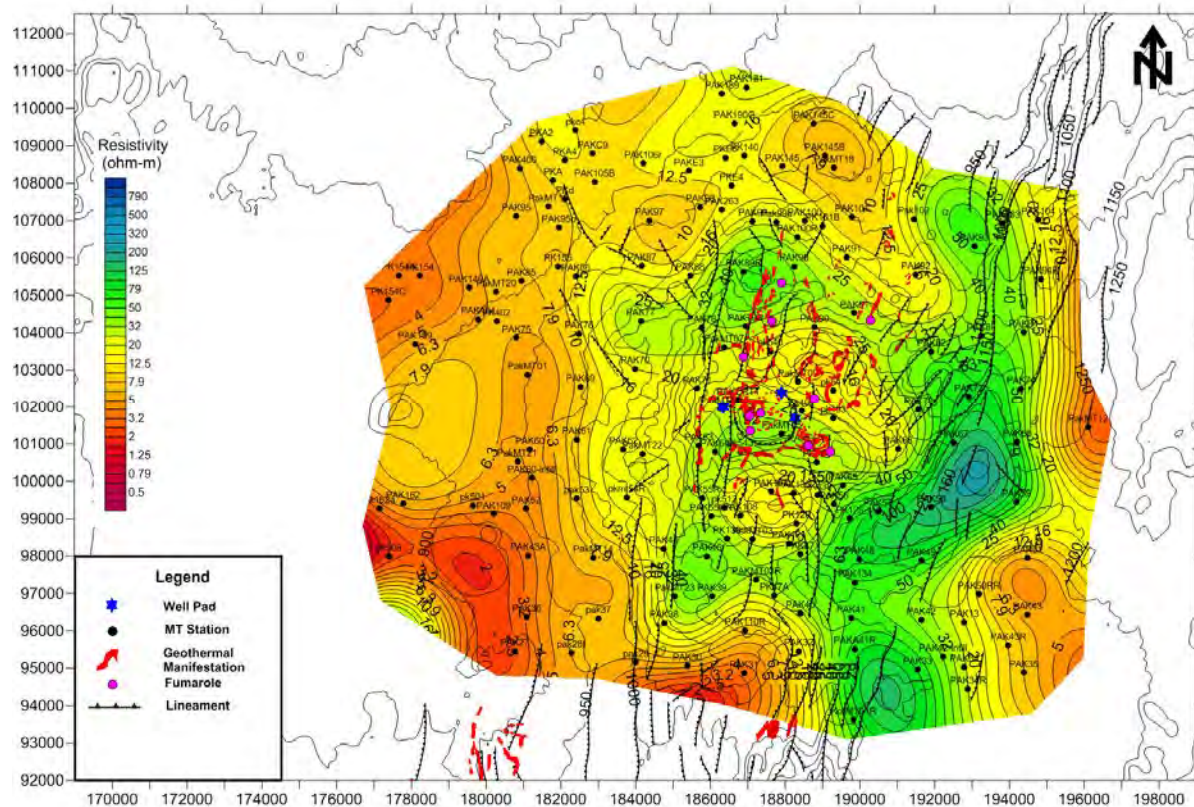


図 II -4-16 解析比抵抗平面分布図（深度 300m：パカ）

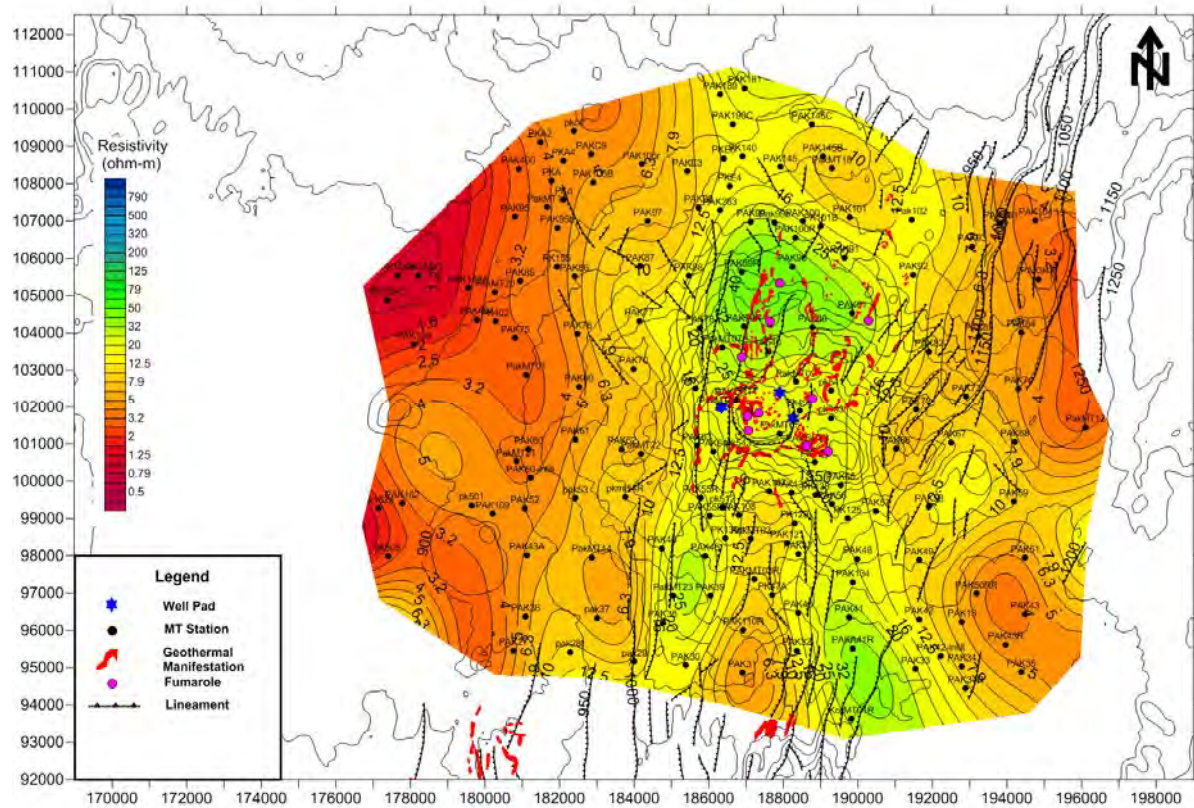


図 II -4-17 解析比抵抗平面分布図（深度 500m：パカ）

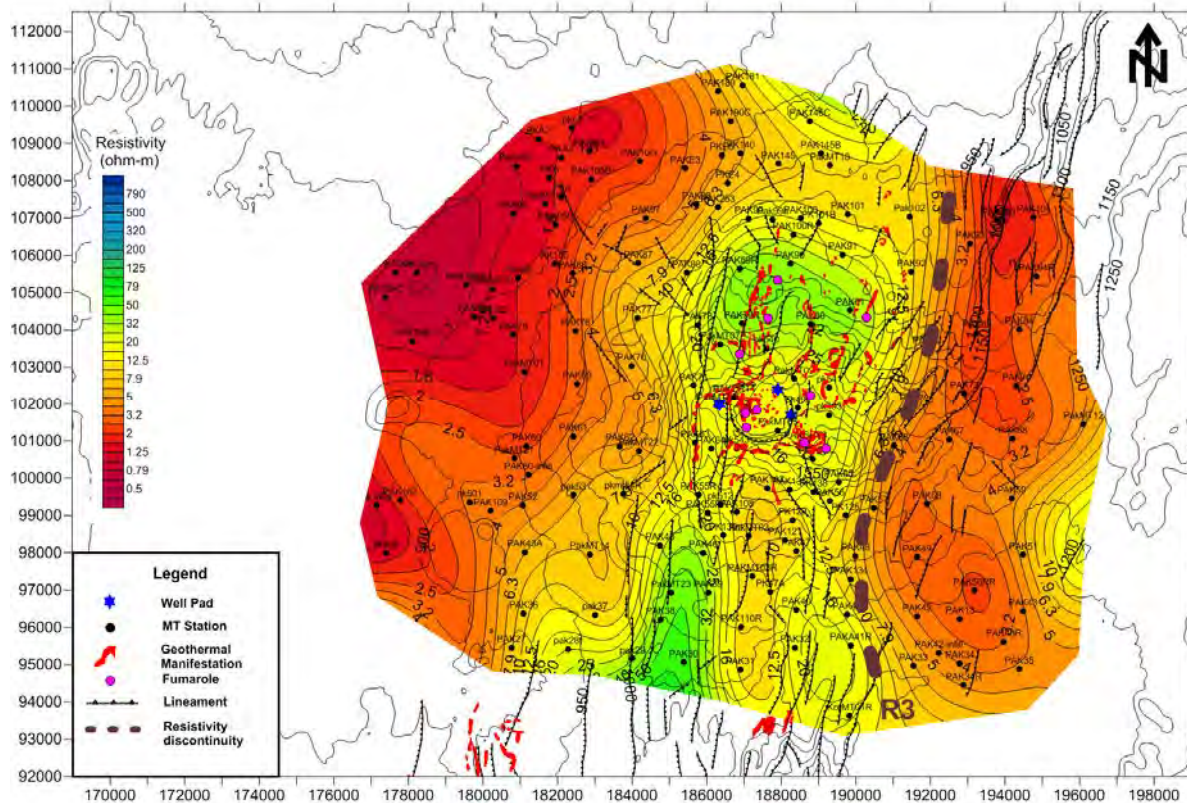


図 II -4-18 解析比抵抗平面分布図（深度 750m : パカ）

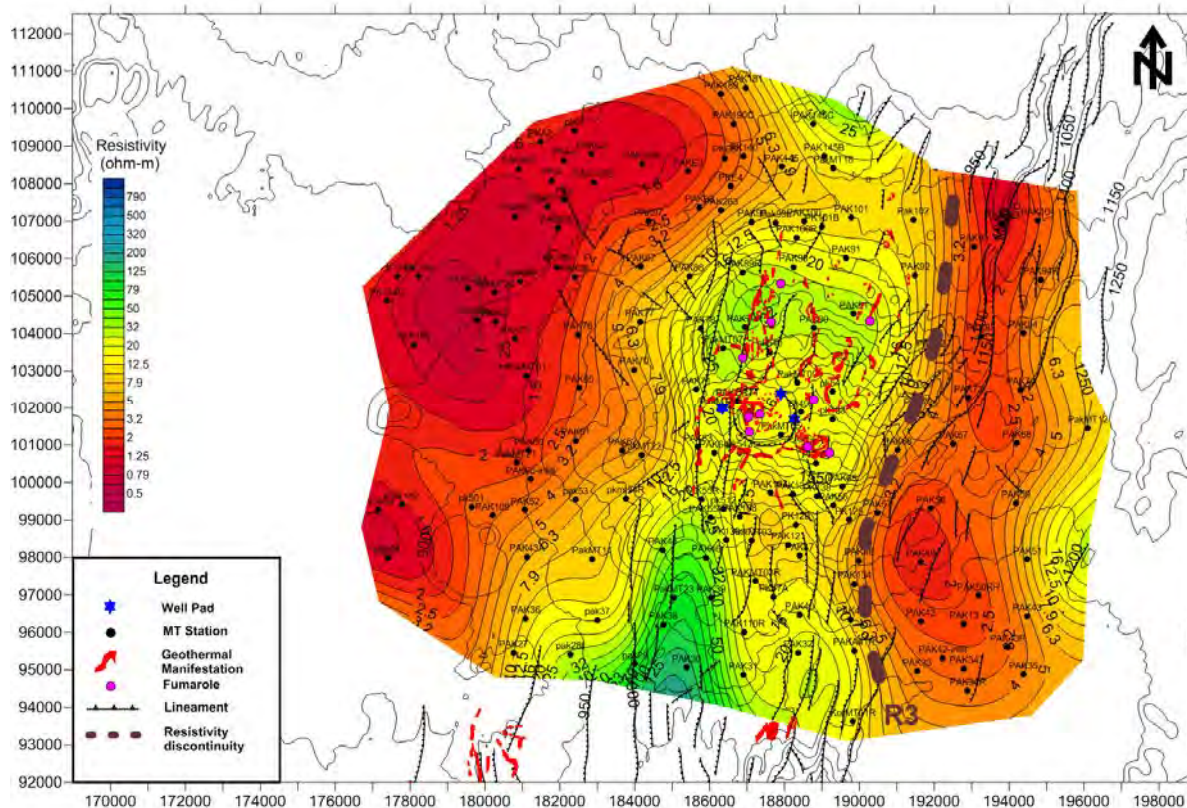


図 II -4-19 解析比抵抗平面分布図（深度 1,000m : パカ）

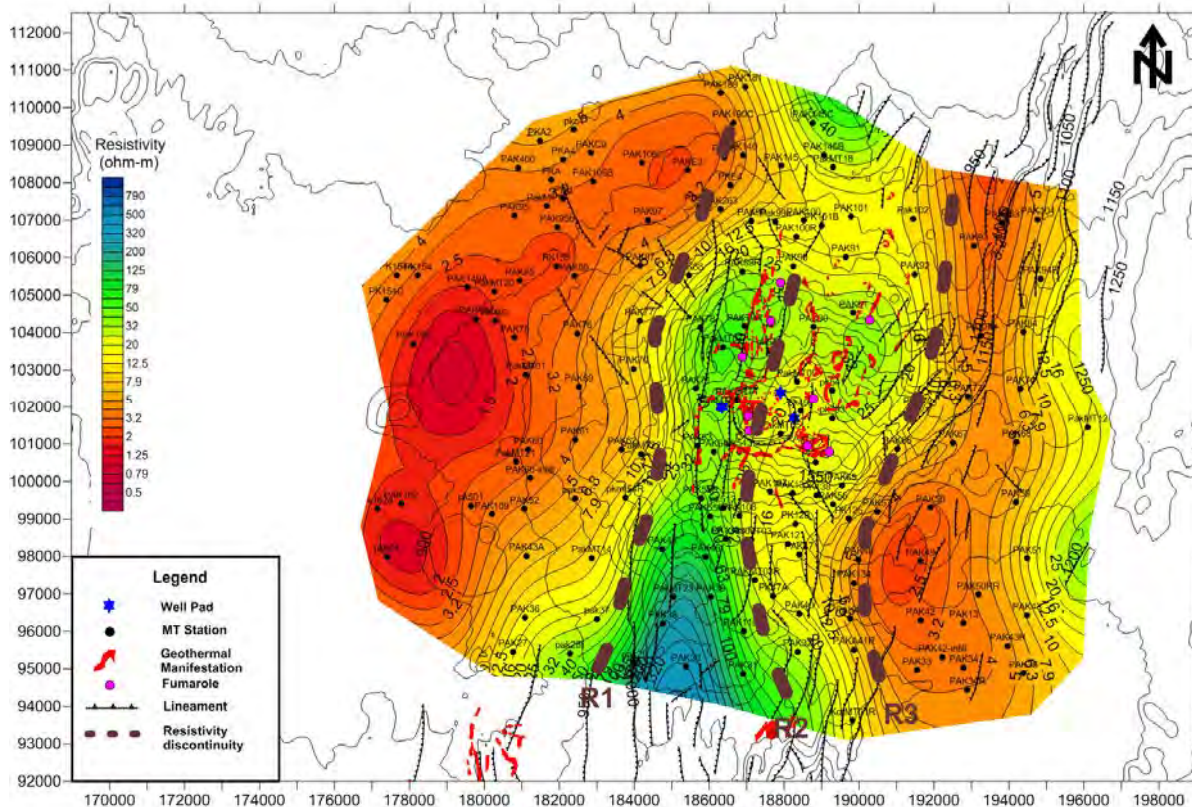


図 II -4-20 解析比抵抗平面分布図（深度 1,500m : パカ）

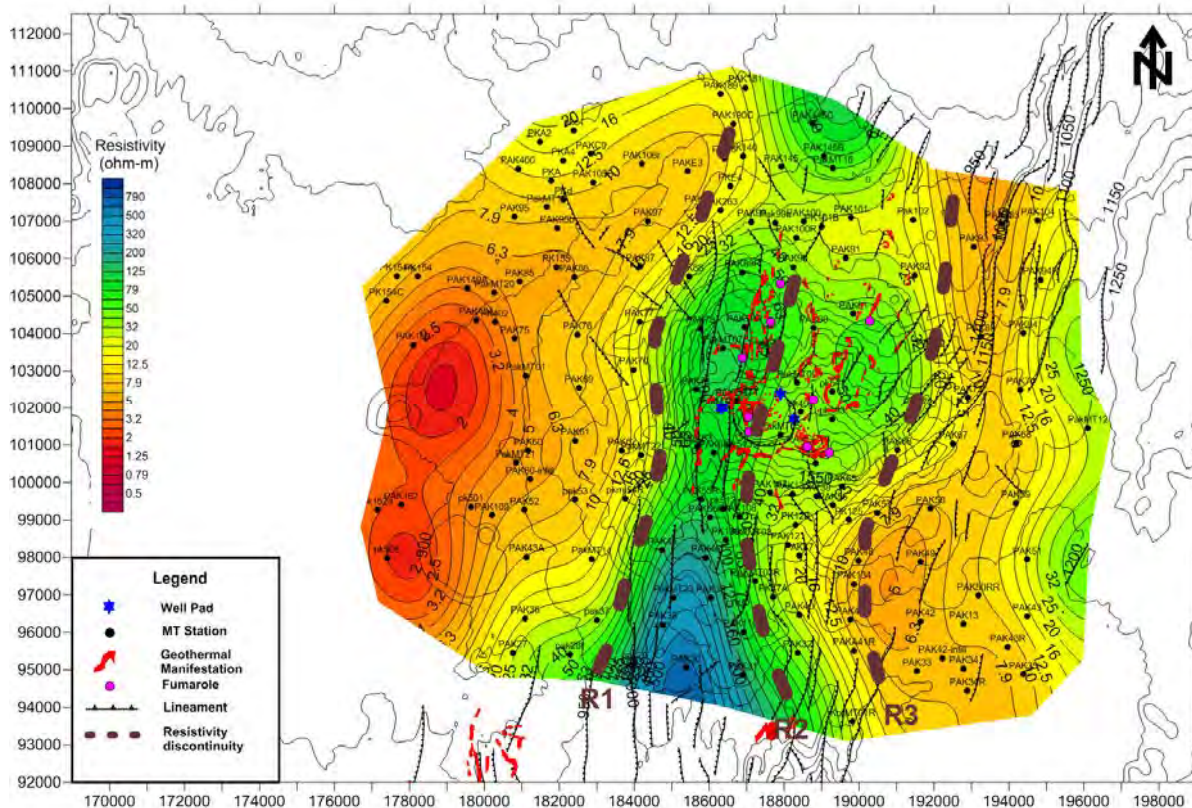


図 II -4-21 解析比抵抗平面分布図（深度 2,000m : パカ）

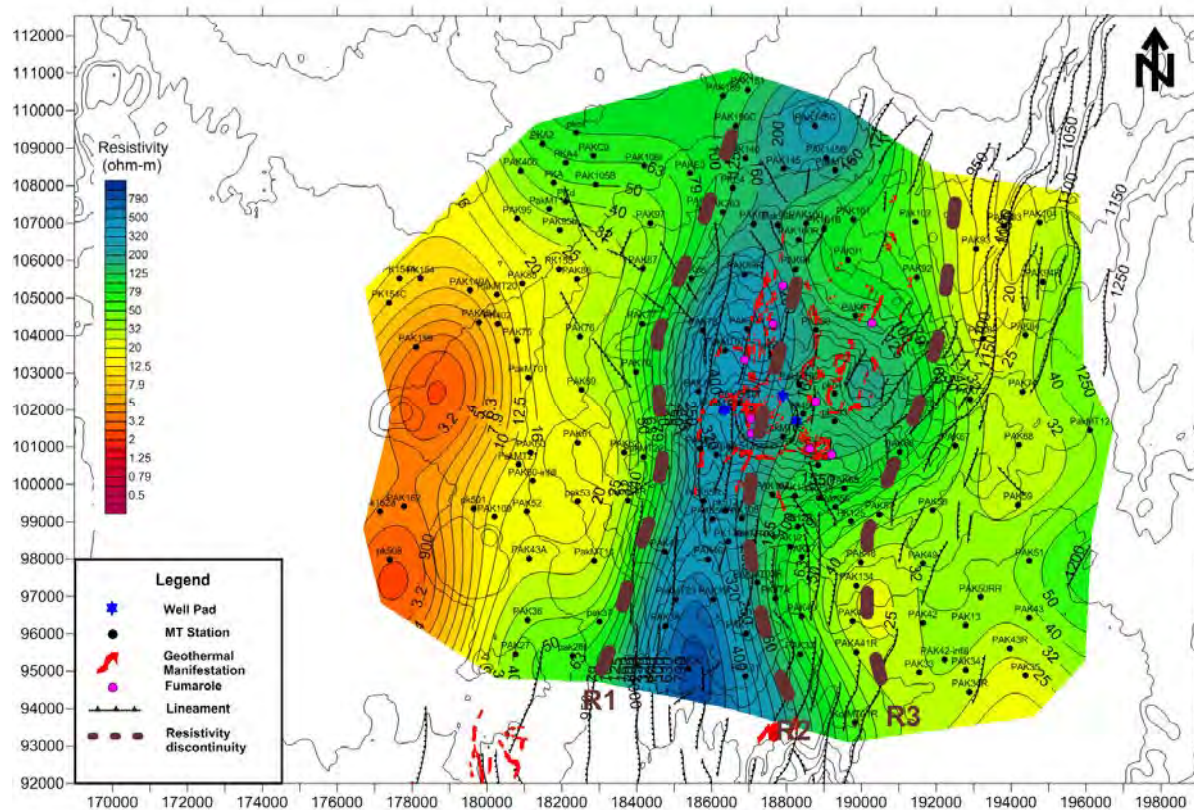


図 II -4-22 解析比抵抗平面分布図 (深度 3,000m : パカ)

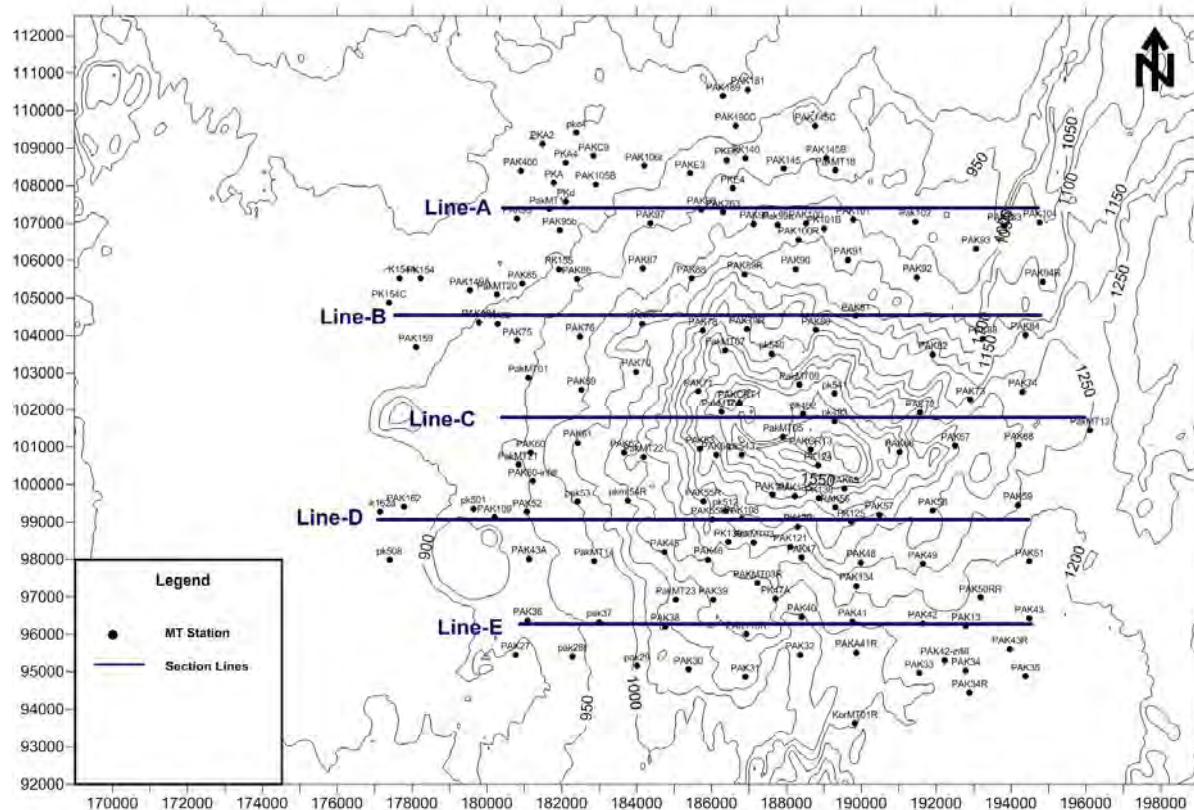


図 II -4-23 解析比抵抗断面位置図 (Line-A, B, C, D and E : パカ)

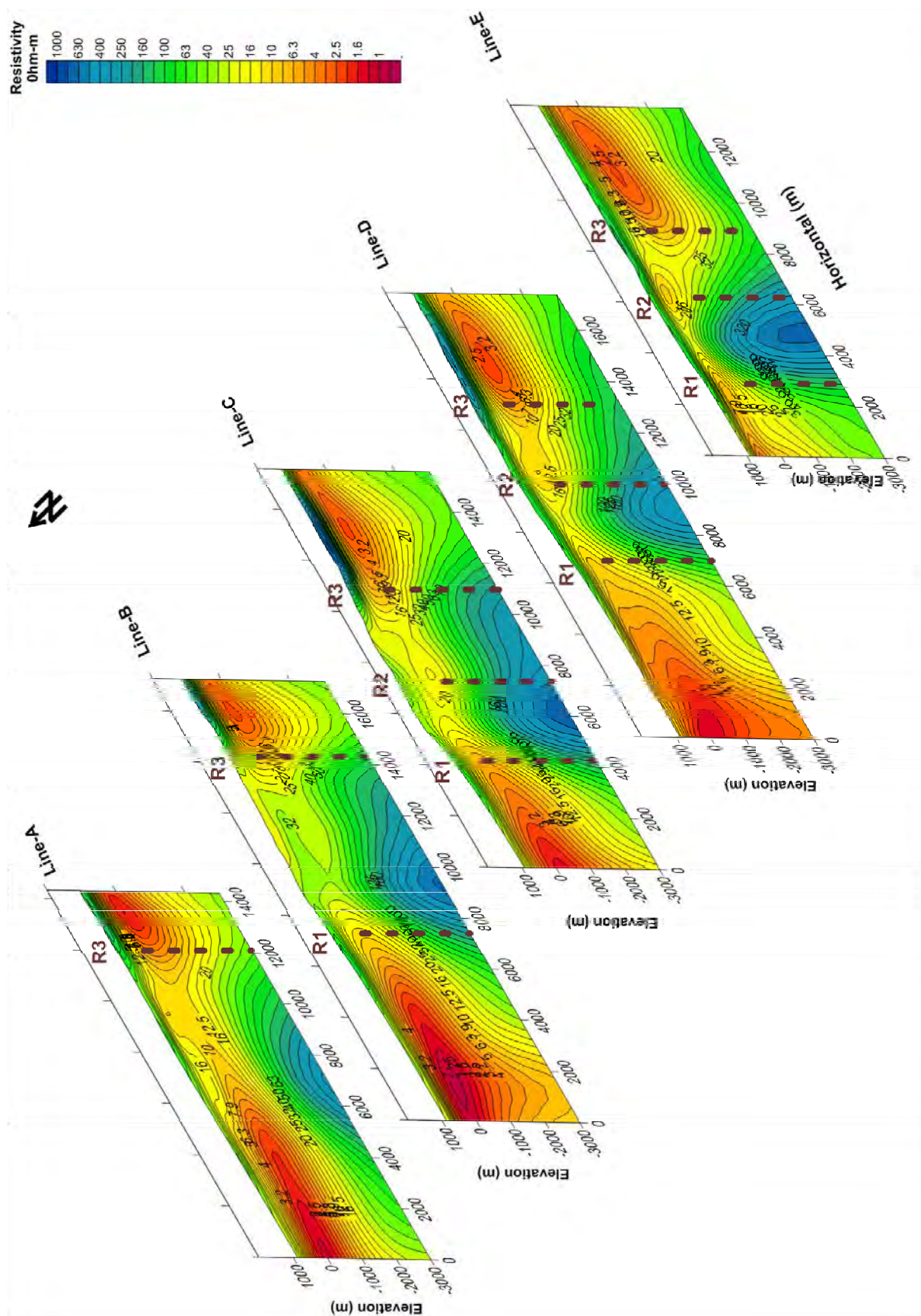


図 II -4-24 解析比抵抗断面図 (Line-A, B, C, D and E : パカ)

b) 3次元比抵抗構造解析結果

3次元比抵抗構造解析結果に基づいたパカ地点にて解釈される比抵抗構造を以下に記述する。

(i) 比抵抗不連続線

パカ地点の解析比抵抗分布平面図及び解析比抵抗分布断面図から抽出される比抵抗不連続線は以下に示すR1、R2及びR3の3本である。

比抵抗不連続線 R1

比抵抗不連続線 R1 は解析対象地域北部から南西部にかけて概略北北東－南南西方向に延びる比抵抗不連続線である。この比抵抗不連続線 R1 は、非常に規模が大きく、深度 1,500m から深度 3,000m の解析比抵抗分布平面図(図 II-4-20～図 II-4-22)において認められることから、比抵抗不連続線 R1 は断層を反映している可能性がある。

比抵抗不連続線 R2

比抵抗不連続線 R2 は解析対象地域の中央部を概略南北方向に延びる比抵抗不連続線である。この比抵抗不連続線 R2 は比抵抗不連続線 R1 と概略平行に走っており、深度 1,500m から深度 3,000m の解析比抵抗分布平面図(図 II-4-20～図 II-4-22)において認められる。この比抵抗不連続線 R2 の示徴は前述の比抵抗不連続線 R1 や後述する比抵抗不連続線 R3 と比較すると弱い示徴であるが、この比抵抗不連続線周辺には複数の噴気帯が存在することから、破碎ゾーンを有する断裂構造を反映している可能性がある。

比抵抗不連続線 R3

比抵抗不連続線 R3 は解析対象地域の東部を概略北北西－南南東方向に延びる比抵抗不連続線である。この比抵抗不連続線 R3 は、深度 750m から深度 2,000m の解析比抵抗分布平面図(図 II-4-18～図 II-4-21)において認められる。この比抵抗不連続線 R3 の中央部周辺地域においては、過去の調査から数本のリニアメントが検出されていることから、比抵抗不連続線 R3 に関しても断層を反映している可能性がある。ただし、比抵抗不連続線 R3 の示徴は前述の比抵抗不連続線 R1 と比較すると若干弱い示徴である。

(ii) 低比抵抗域

今回の MT 探査データ解析により、パカ地域において認められる明瞭な低比抵抗域は主に以下のものである。

a) 深度 750m から深度 1,500m において調査地域の西部に認められる 5 ohm-m 以下を示す低比抵抗域

b) 深度 750m から深度 1,500m において調査地域の東部に認められる 5 ohm-m 以下を示す低比抵抗域

上記 a) で示した低比抵抗域は、深度 750m～深度 1,500m において調査地域の西部に広く分布しており、この低比抵抗域の東端は概略、比抵抗不連続線 R1 周辺に位置している(図 II-4-18～図 II-4-20)。また、上記 b) で示した低比抵抗域は、深度 750m～深度 1,500m において調査地域の東部に分布しておりこの低比抵抗域の西端は概略、比抵抗不連続線 R3 周辺に位置している(図 II-4-18～図 II-4-20)。これらの低比抵抗域は地熱活動により形成された熱水変質帯(スメクタイトや混合層粘土鉱物)もしくは河川堆積物・沖積堆積物等の堆積物を反映している可能性が高い。ただし、これらの低比抵抗域が河川堆積物・沖積堆積物等の堆積物を反映している場合でも、スメクタイト等の熱水変質鉱物が卓越しているでも、これらの地域の深部は比較的低温である可能性が高い。

(iii) 中～高比抵抗域

調査地域の中央部の深度 1,500m～深度 3,000m で、概略比抵抗不連続線 R1 と比抵抗不連続線 R2 に挟まれる地域において、概略 50 ohm-m 以上の比抵抗値を示す相対的な高比抵抗域が認められる (図 II-4-20～図 II-4-22)。この深部高比抵抗域の上部 (浅部) において 5 ohm-m 以下の比抵抗値を示す低比抵抗域は認められない。ただし、この深部高比抵抗域内にはカルデラ構造や火山が存在していることから、高比抵抗域は高温の貫入岩を反映している可能性がある。

c) パカ地点の比抵抗構造

3次元比抵抗インバージョン解析結果から、前述した断裂構造を反映している可能性がある概略南北方向に延びる3本の比抵抗不連続線 R1、R2 及び R3 がそれぞれ調査地域の西部、中央部及び東部に抽出された。

比抵抗不連続線 R1 は非常に明瞭な比抵抗不連続線であり、R1 の西側と東側では比抵抗構造に大きな差異が生じているため、比抵抗不連続線 R1 は地熱流体の流動を規制している断裂構造を反映している可能性がある。ただし、R1 を概略東側の境界として R1 の西側に広範囲に分布する顕著な低比抵抗域は深度 2,000m においても、その大部分において 10 ohm-m 以下の低い比抵抗値を示す (図 II-4-21) ことから、河川堆積物や沖積堆積物等の堆積物等が分布するため、もしくは深部においても比較的低温で形成される熱水変質帯 (スメクタイトや混合層粘土鉱物等) が卓越しているためと考えられる。いずれの場合であっても、調査地域の西部域の深部は、中央部～南部の深部における温度と比較しては温度が低い可能性が高い。本比抵抗不連続線 R1 は地熱活動が活発な地域の概略西端部を示している可能性がある。

また、比抵抗不連続線 R3 の示徴は比較的明瞭であり、比抵抗不連続線 R3 の中央部周辺域には多数の地質リニアメントが分布していることから、R3 は地熱流体の流動・貯留域を規制している断裂構造である可能性がある。ただし、R1 の西側地域同様、R3 の東側に分布する顕著な低比抵抗域も深度 2,000m 程度まで 10 ohm-m 以下の低比抵抗値を示す (図 II-4-21) ため、深部においてスメクタイト・混合層粘土鉱物が深部においても卓越している、あるいは河川堆積物や沖積堆積物等の堆積物等が分布すると考えられ、いずれの場合においても比抵抗不連続線 R3 の東側深部における温度は、調査地域の中央部と比較すると低い可能性が高い。本比抵抗不連続線 R3 は地熱活動が活発な地域の概略東端部を示している可能性がある。

一方、比抵抗不連続線 R1 と R2 に挟まれる地域は深度 2,000m 以深で 50 ohm-m 以上の比抵抗値を示す高比抵抗域の隆起構造となっている (図 II-4-21～図 II-4-22)。この深部高比抵抗域の地表部には多くの噴気帯が確認されており、また、調査地域の中央部ではカルデラもしくはクレーターに関連するリング状の破碎帯が推定されているため、地下深部に存在する熱源と成り得る貫入岩等を反映しており、この地域の深部は高温域となっていることが示唆される。この高比抵抗域の上部には地熱貯留層の帽岩を反映するような低比抵抗域は認められていないが、この地域周辺には地化学調査から蒸気卓越層が推定されており、多量の蒸気のため、浅部においても比較的高い比抵抗値を示している可能性がある。

比抵抗不連続線 R2 の示徴は R1 や R3 の示徴と比較すると若干弱いものの、R2 周辺域には複数の噴気帯が確認されている。このため、比抵抗不連続線 R2 周辺には破碎帯が発達しており、地熱流体の流動域となっているものと期待される。また、浅部ではあるが、深度 100m～200m

においては比抵抗不連続線 R2 北部周辺域において 30 ohm-m 程度以下を示す相対的な低比抵抗域（同深度の周辺地域と比較して比抵抗値が低い地域）が認められる（図 II-4-14～図 II-4-15）。この地域の浅部においては、前述の蒸気層が存在する可能性が高く、このため、熱水変質を受けた場合においても、10 ohm-m 以下の顕著な低比抵抗域とはなっていないものと考えられる。このことを考慮すると、この相対的な低比抵抗域はスメクタイト・混合層粘土鉱物から構成される熱水変質帯を形成している可能性があり、地熱貯留層の帽岩と成り得る熱水変質帯が形成されている可能性がある。また、比抵抗不連続線 R2 北部域周辺に分布する相対的な低比抵抗域の下位の深度 500m～深度 750m においては、蒸気層あるいは高温で形成されるイライトやクローライト等の熱水変質帯を反映している可能性がある 20 ohm-m 以上の比抵抗値を示す相対的な高比抵抗域（同深度の周辺地域と比較して比抵抗値が高い地域）が認められる（図 II-4-17～図 II-4-18）。これらのことから、比抵抗不連続線 R2 の中央部～北部周辺域は断裂が発達しており、且つ浅部において地熱貯留層の帽岩と成り得る熱水変質帯が分布している可能性があることから、掘削井ターゲットとして有望と考えられる。

ただし、上記の解釈は MT 探査データ解析結果のみに基づいたものであるため、地質データや地化学データとの総合評価を実施して、調査井掘削有望地点を選定する必要がある。

II -4.2 重力探査

(1) コロシ地点及びチェプチャク地点

a) 重力探査現地調査及びデータ解析概要

GDC によりコロシ地点及びチェプチャク地点で重力探査（測点数 268 点）が実施された（実施期間：コロシ地域 2015 年 1 月 30 日～2015 年 10 月 6 日、チェプチャク地域：2016 年 10 月 8 日～2016 年 10 月 19 日）。重力測定には相対重力計（CG-5）が用いられ、基点を始点、終点とする閉塞測定が採用された。また、重力測定と同時に測点の位置情報（緯度、経度、標高）を測定するため GPS による GNSS 測量が実施された。なお、重力探査実施期間中、GDC 技術者から JICA チーム技術者にデータが電子メールにより送付され JICA チーム技術者がデータ品質の確認及び再測定の指示等を行った。最終的に測定された全重力データは GDC から JICA チームに提供された。

測定された重力データには各種補正（潮汐補正、器械高補正、ドリフト補正、フリーエア補正、ブーゲー補正及び地形補正）が施され、ブーゲー異常値を算出した。ブーゲー補正及び地形補正に用いる仮定密度は地形とブーゲー異常図を比較する手法、G-H 相関法、F-H 相関法及び上方接続残差分散比較法（CVUR）をそれぞれ実施し、2.4 g/cm³ と決定した（巻末資料 第 Gr-04 図～第 Gr-06 図参照）。

b) 解析結果

(i) ブーゲー異常分布

図 II-4-25 にコロシ地点及びチェプチャク地点のブーゲー異常分布図（仮定密度 2.4 g/cm³）を示す。当該地域のブーゲー異常分布の傾向として概略北北東－南南西方向に延びる高重力異常域が分布しており、この高重力異常は重力基盤の隆起構造を反映しているものと考えられる。高重力異常域の縁部には概略北北東－南南西方向に重力急変部が分布しており、重力基盤深度が急激に変化していると推定される。なお、噴気や変質帯などの地熱徴候はこの高重力異常域

に認められている。

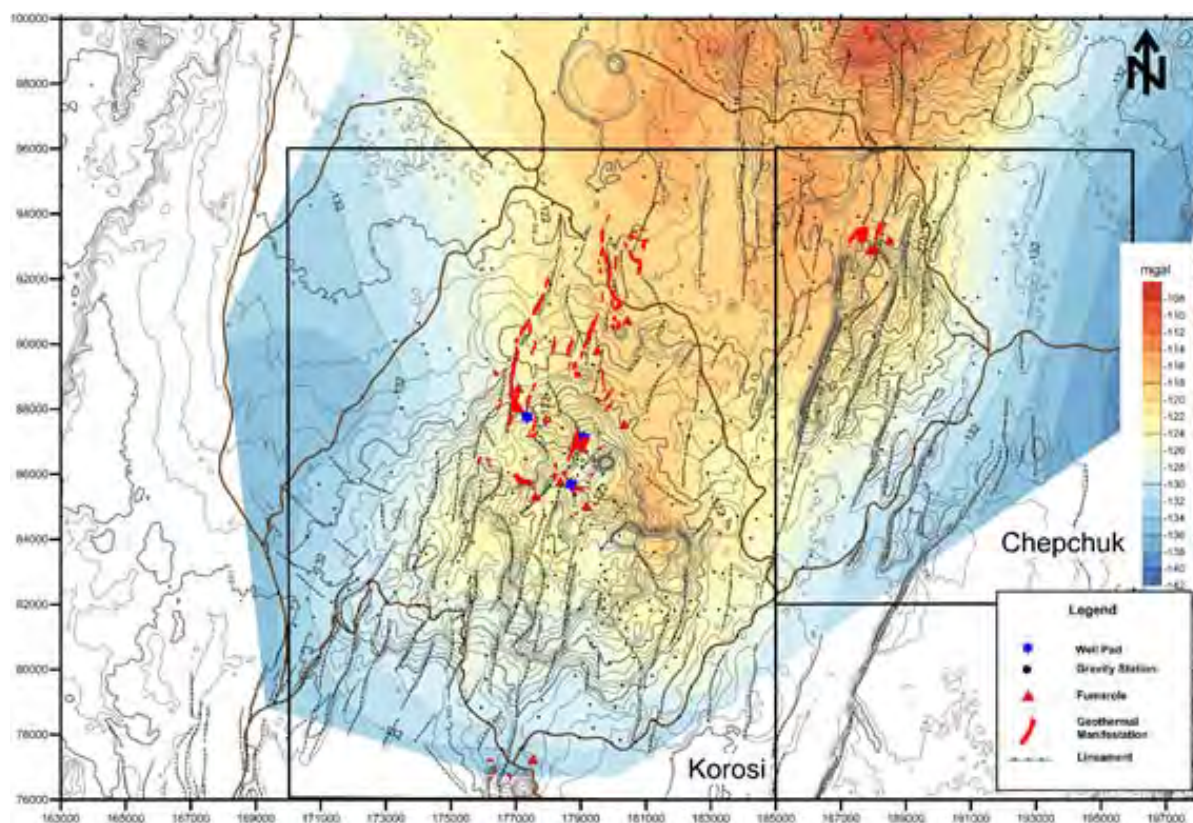


図 II -4-25 コロシ・チェプチャク地点におけるブーゲー異常図（仮定密度 2.4 g/cm^3 ）

(ii) 上方接続残差分布

計算されたブーゲー異常値はごく浅部から深部までの密度異常の影響を含んでいる。したがって掘削ターゲットになる深度の密度異常分布（残差成分）を推定するためには、深部の密度異常に起因した大局的な重力異常（トレンド成分）をブーゲー異常値から差し引く必要がある。このため、本プロジェクトでは傾向面解析及び上方接続解析を実施し、トレンド成分を算出した。以下に上方接続解析結果について述べる。

上方接続とはある一定高度で求められているブーゲー異常値を用いて、その面から高度Hだけ高い面におけるブーゲー異常を計算するフィルタである。高度Hが大きいほどブーゲー異常値における短波長成分（浅部の密度異常により生じる重力異常）が除去されるローパスフィルタとなる。また、異なる2つのHの値を用いて上方接続を実施し、その残差を計算することで残差成分のみを抽出するバンドパスフィルタの役割を果たすことが可能である。当該地域のブーゲー異常値を用いてスペクトル解析を実施したところ、重力基盤とその上面層の境界深度は約2,500mと推定された（巻末資料第Gr-08図参照）。また、重力測定時等に生じるノイズ成分をブーゲー異常値から除去するためブーゲー異常値にH=50mの上方接続を実施し、H=50m上方接続結果からH=2,500m上方接続結果を差し引くことにより残差成分（50-2,500m上方接続残差）の抽出を実施した。図II-4-26に50-2,500m上方接続残差図を示す。

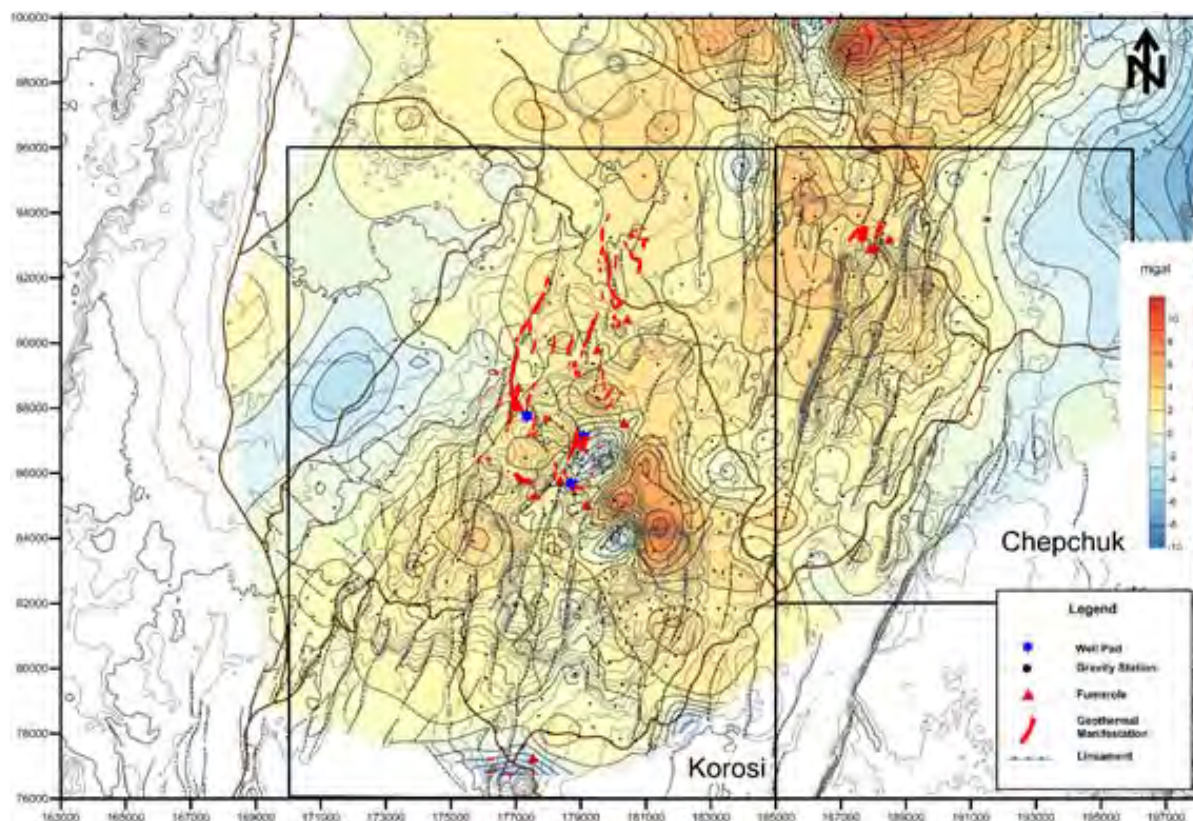


図 II -4-26 コロシ・チェプチャク地点 50-2, 500m 上方接続残差図

コロシ地点

当該地域北西部には概略北東－南西方向に延びる低重力異常域が分布しており、低重力異常域の東部には概略北北東－南西方向に高重力異常域が分布している。この低重力異常域と高重力異常域の境界には概略北北東－南西方向に延びる比較的連続性の良い重力急変部が分布している。また、当該地域東部に南北方向に延びる高重力異常域が確認され、この高重力異常域の西部及び東部には極小的な低重力異常域が分布している。この高重力異常域と低重力異常域の境界にも重力急変部が分布している。

チェプチャク地点

当該地域西部に概略北北東－南南西方向に延びる高重力異常域が分布しており、この高重力異常域は東部に向かうにつれ重力値が減少している。この高重力異常域の縁部には重力急変部が分布している。

(iii) 水平1次微分図

抽出されたリージョナル成分から掘削ターゲットになり得る可能性がある重力急変部を抽出するため水平1次微分解析を行った。水平1次微分は重力急変部を強調するエッジフィルターである。

図 II-4-27 にコロシ地点及びチェプチャク地点における 50-2, 500m 上方接続残差水平1次微分図を示す。水平1次微分の平面分布から各地域において以下に示す水平1次微分値が大きな

値を示し、かつある方向性を持って連続して延びている箇所（重力急変部：重力分布から抽出される線構造で断裂構造を反映している可能性がある）が抽出された。

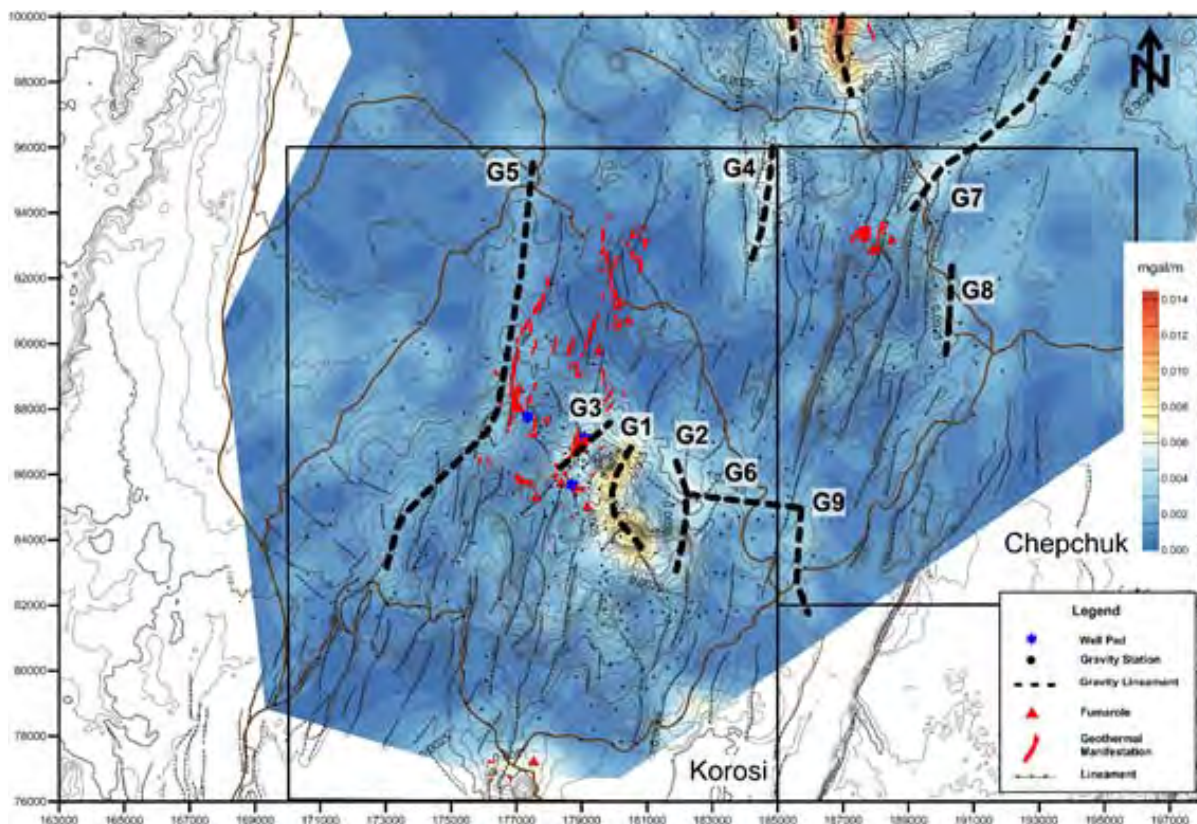


図 II -4-27 コロシ・チェプチャク地点 50-2, 500m 上方接続残差水平 1 次微分図

コロシ地点

- 当該地域中央部東を概略北北東－南東方向に延びる明瞭な重力急変部（G1）
- 当該地域東部を概略北北西－南南西方向に延びる明瞭な重力急変部（G2）
- 当該地域中央部を概略北東－南西方向に延びる明瞭な重力急変部（G3）
- 当該地域北東部を概略北－南南西方向に延びる明瞭な重力急変部（G4）
- 当該地域北部から西部にかけて概略北北東－南西方向に延びる重力急変部（G5）
- 当該地域東部を概略東西方向に延びる重力急変部（G6）

50-2, 500m 上方接続残差水平 1 次微分にて抽出されたコロシ地点における重力急変部は傾向面解析により算出された傾向面残差図（巻末資料第 Gr-15 図）の水平 1 次微分図（巻末資料第 Gr-21 図参照）においても同様に抽出されており、断裂構造を示している可能性がある。また、当該地域は北北東－南南西方向延びるリニアメントが卓越しており、このリニアメントと同方向または類似した方向に分布する重力急変部 G1、G2、G4 及び G5 は断裂構造を示している可能性がある。さらに、重力急変部 G3 は前述した MT 探査において抽出された比抵抗不連続線 R1 と分布方向、分布位置とも調和的であり、また、重力急変部 G3 及び G5 付近には変質帯が分布しており、これらの重力急変部は深部の熱水活動に関連した断裂構造を反映している可能性が示唆される。

チェプチャク地点

- 当該地域北部を概略東北東－南西方向に延びる重力急変部 (G7)
- 当該地域中央部を概略南北方向に延びる重力急変部 (G8)
- 当該地域南西部を概略北－南南東方向に延びる重力急変部 (G9)

コロシ地点と同様に当該地域で抽出された重力急変部は傾向面残差図（巻末資料第 Gr-17 図参照）の水平 1 次微分図（巻末資料第 Gr-22 図参照）においても共通して抽出されており、これらの重力急変部は断裂構造を示している可能性がある。特に重力急変部 G7 及び G8 は当該地域において確認されているリニアメントと類似した方向に分布していることから、重力急変部 G7 及び G8 は断裂構造を示している可能性がある。

(iv) 3次元基盤構造解析

コロシ地点及びチェプチャク地点における重力基盤深度分布を推定するため、3次元基盤構造解析実施した。3次元基盤構造解析は重力基盤とその上面層の2層で構成されるモデルを用いて重力基盤深度の変化により生じる重力異常値を計算するため、重力基盤とその上面層の密度差がインプットデータとして必要である。当該地域は密度に関する情報がないため、アフリカの重力探査結果について記述されている Josphat et al. (2010) を参考にし、密度差を 0.3 g/cm^3 とした。さらに、当該地域の重力基盤深度はスペクトル解析の結果、約 2,500m と推定されていることから（巻末資料第 Gr-08 図参照）、重力基盤深度の変化による重力異常成分は上方接続残差（1,000m 上方接続値から 4,000m の上方接続値を差引いた値）をとることにより抽出し、この上方接続残差値を 3次元基盤構造解析のマッチングデータとした。

図 II-4-28 にコロシ地点及びチェプチャク地点の 3次元基盤構造解析結果を示す。当該地域は概略北北東－南南西方向に延びる重力基盤の隆起帯が大局的に分布している。また、この重力基盤の隆起帯の縁部には重力基盤深度の急変部が確認され、重力急変部 G5、G7 及び G8 がこの重力基盤深度の急変部に位置していることから、これらの重力急変部は重力基盤の隆起により生じた断層である可能性が示された。当該地域では重力基盤とその上面層の密度差が正確で無いことや、コントロールポイント（既存坑井の情報により重力基盤深度が判明している箇所）が存在しないことなどから、本解析で得られた重力基盤深度分布は精度よく決定されたとは言えないものの、前述の密度差を仮定して得られた結果から地表下-2,000m から-3,000m の範囲で重力基盤深度は分布しているものと推定された。

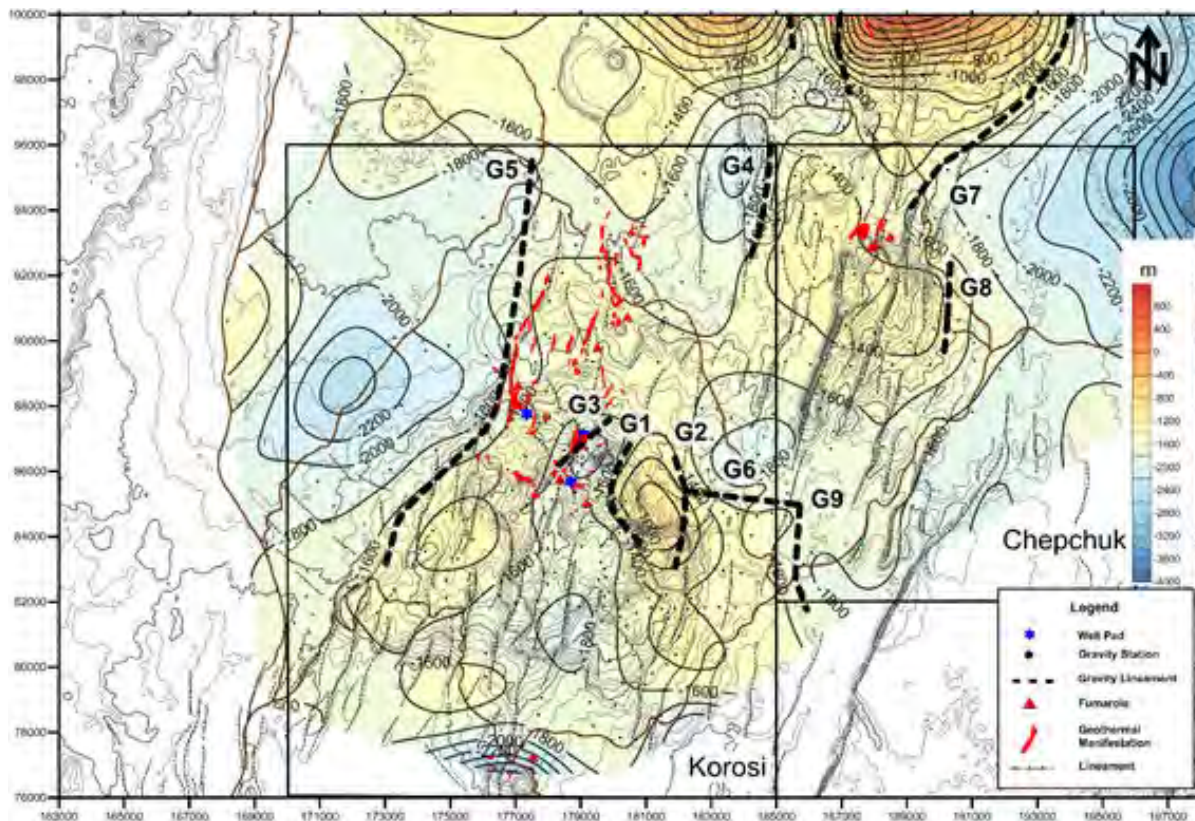


図 II -4-28 コロシ・チェプチャク地点 3次元基盤構造解析結果

(v) 2次元密度構造解析結果

コロシ地点及びチェプチャク地点の2次元的な密度構造を推定するため2次元密度構造解析を実施した。2次元密度構造解析手法はTalwani (1959) を採用した。なお、2次元密度構造解析に使用した密度は、当該地域の密度に関する情報がないため、前述の3次元密度構造解析と同様にアフリカの重力探査結果について記述されている Josphat et al. (2010) を参考にした。

図 II-4-29 にコロシ及びチェプチャク地域において実施した2次元密度構造解析の断面位置図、図 II-4-30 及び図 II-4-31 にコロシ地点・チェプチャク地点における2次元密度構造解析結果を示す。

また、2次元密度構造解析では重力基盤を含めた密度構造を解析するため、スペクトル解析にて推定した重力基盤上面深度 2,500m より深い、50-4,000m 上方接続残差値を2次元密度構造解析のマッチングデータとして採用した。以下に各地域における2次元密度構造解析結果を示す。

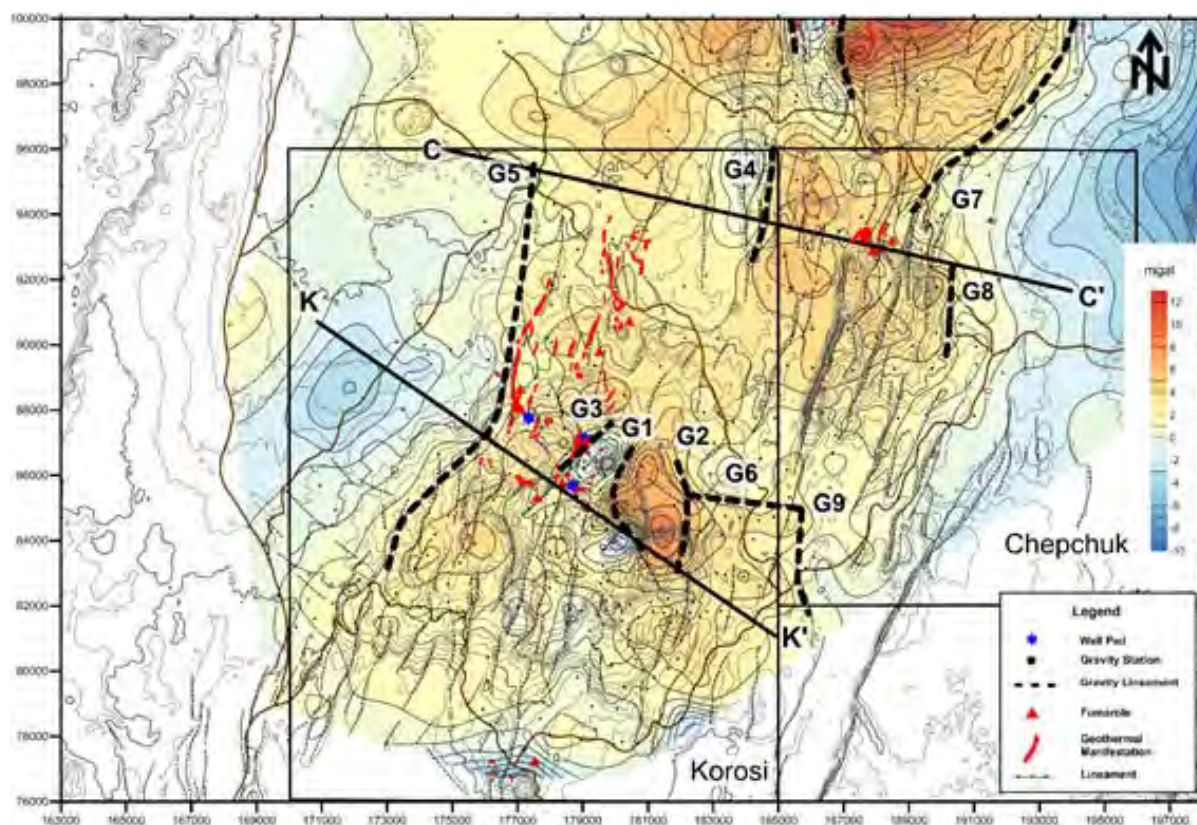


図 II -4-29 コロシ・チェプチャク地点 2次元密度構造解析断面位置図（背景：50-4,000m 上方
 接続残差図）

コロシ地点 (K-K' 断面)

図 II-4-30 より、重力急変部 G3 及び G5 の間において概略北東-南西方向に分布する高重力異常域（図 II-4-29 参照）は重力基盤の隆起に起因するものであることが推定された。また重力基盤の隆起に伴い、重力急変部 G5 に相当する北西落ちの断層及び重力急変部 G3 に相当する南東落ちの断層がそれぞれ推定された。また、当該地域東部において重力急変部 G1 及び G2 の間において概略南北に延びる高重力異常域（図 II-4-29 参照）も同様に重力基盤の隆起に起因するものと推定され、この隆起した重力基盤の両端部には重力急変部 G1 に相当する北西落ちの断層及び重力急変部 G2 に相当する南東落ちの断層がそれぞれ推定された。

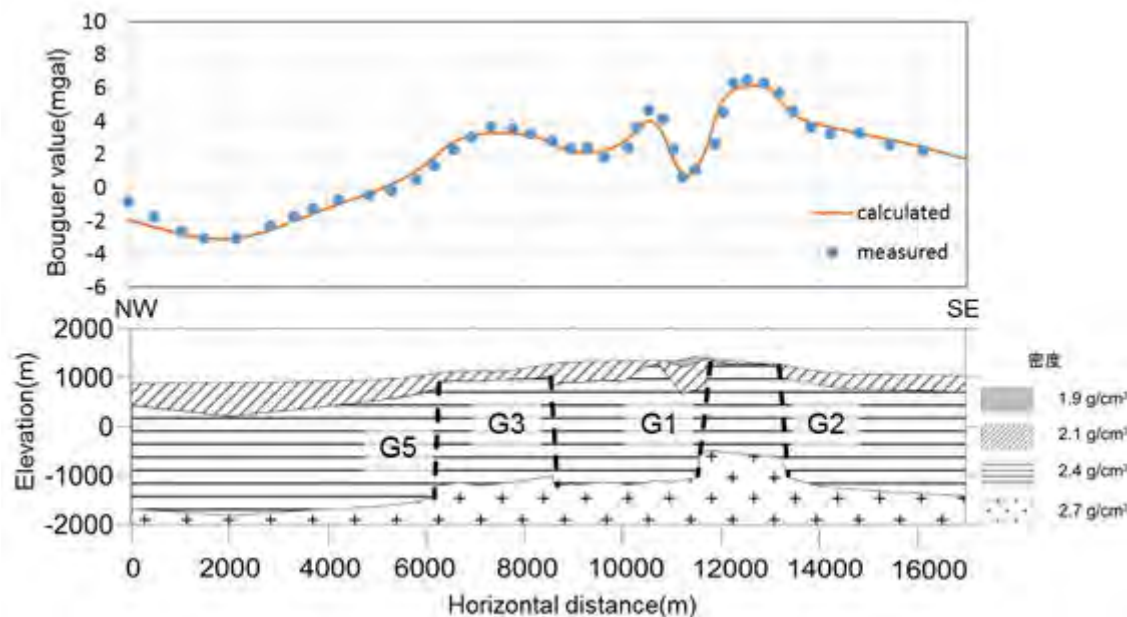


図 II -4-30 2次元密度構造解析結果（コロシ地点）

チェプチャク地点（C-C’ 断面）

当該地域の大局的な重力異常分布は北北東－南南西方向に延びる高重力異常域が分布しており、この高重力異常域の縁部には重力急変部 G5 及び G8 が推定されている（図 II-4-29 参照）。図 II-4-31 に示す 2次元密度構造解析の結果、3次元密度構造解析結果と同様に、この高重力異常は重力基盤の隆起に起因するものであることが示され、隆起している重力基盤の両端部には、重力急変部 G5 に相当する西北西落ちの断層及び重力急変部 G8 に相当する東南東落ちの断層がそれぞれ推定された（図 II-4-28）。また、C-C’ 断面ほぼ中央部に南北方向に延びる低重力異常が分布し（図 II-4-29 参照）、その東部に概略北－南南西方向に延びる高重力異常域が分布しており、これら異常域の境界には概略北－南南西方向の重力急変部 G4 が位置している。2次元密度構造解析の結果、重力急変部 G4 付近において浅部の低密度層の層厚が急激に変化することにより重力急変部 G4 が生じているものと推定され、低密度層厚が急激に変化している箇所では重力急変部 G4 に相当する西北西落ちの断層が推定された。

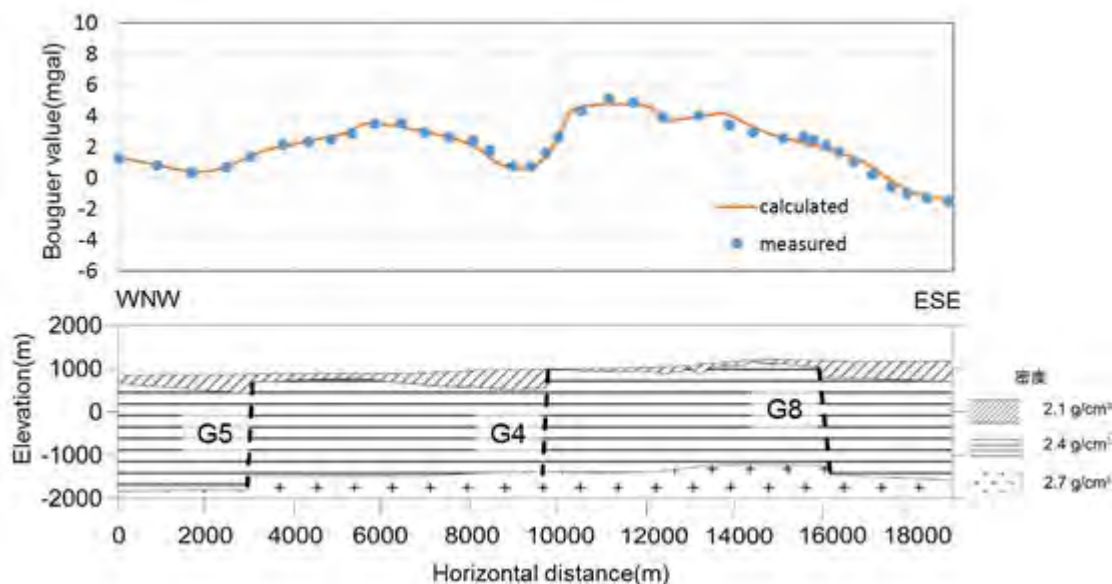


図 II -4-31 2次元密度構造解析結果（チェプチャク地点）

(2) パカ地点

a) 重力探査現地調査及びデータ解析概要

GDCによりパカ地点で重力探査（測点数 191 点）が実施された（実施期間：2016年3月11日～2016年10月19日）。コロシ地点・チェプチャク地点と同様に重力測定には相対重力計（CG-5）を用いた閉塞測定及びGPSによるGNSS測量が実施された。また、JICAチームによる測定されたデータ品質の確認も同様に実施された。

さらに、測定データからブーゲー異常値を算出するために施す各種補正及び仮定密度の算出方法もコロシ地点・チェプチャク地点で実施された手法と同様のものを採用し、当該地域の仮定密度は 2.4 g/cm³とした。（巻末資料 第Gr-04図～第Gr-06図参照）。

b) 解析結果

(i) ブーゲー異常分布

図 II-4-32 にパカ地点のブーゲー異常分布図（仮定密度 2.4 g/cm³）を示す。当該地域は概略南北方向に延びる高重力異常域が分布しており、この高重力異常域東部には概略南北に延びる低重力異常域が分布している。高重力異常域と低重力異常域の境界には重力急変部が分布しており、この重力急変部は当該地域の重力基盤深度が急激に変化することにより生じている可能性が考えられる。また、当該地域東部には低重力異常域が高重力異常域に向かって張り出しているほか、高重力異常域の内部にスポット状に低重力異常域が分布している。

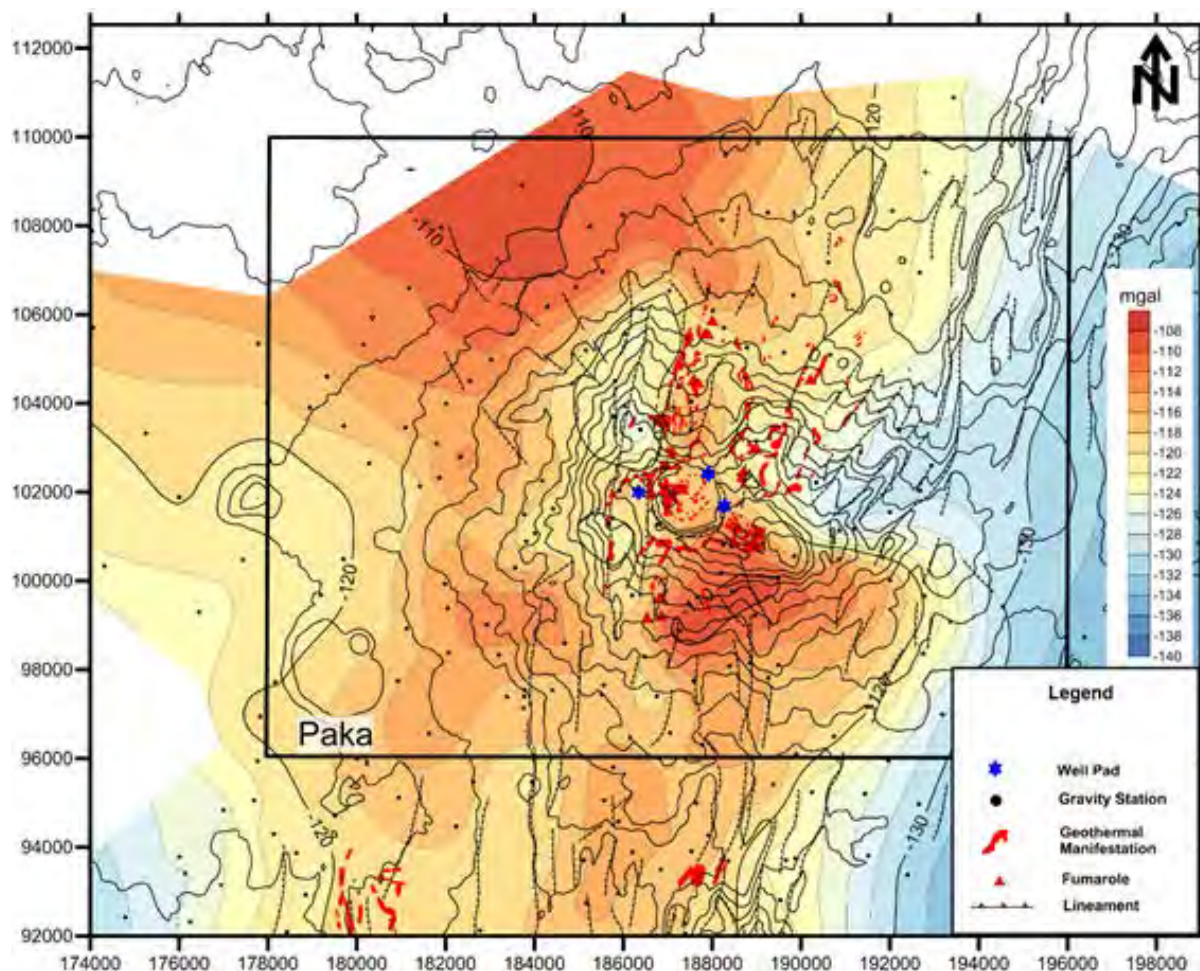


図 II -4-32 パカ地点におけるブーゲー異常図 (仮定密度 2.4 g/cm^3)

(ii) 上方接続残差分布

計算されたブーゲー異常値はごく浅部から深部までの密度異常の影響を含んでいる。したがって掘削ターゲットになる深度の密度異常分布(残差成分)を推定するためには、深部の密度異常に起因した大局的な重力異常(トレンド成分)をブーゲー異常値から差し引く必要がある。このため、本プロジェクトでは傾向面解析及び上方接続解析を実施し、トレンド成分を算出した。以下に当該地域において実施した上方接続解析について述べる。

コロシ地点及びチェプチャク地点と同様に当該地域のブーゲー異常値を用いてスペクトル解析を実施したところ、基盤とその上面層の境界深度は約 $2,500\text{m}$ と推定された(巻末資料 第 Gr-08 図参照)。また、測定時等により生じるノイズ成分を除去するために $H=50\text{m}$ の上方接続を実施し、 $H=50\text{m}$ 上方接続結果から $H=2,500\text{m}$ 上方接続結果を差し引くことにより残差成分($50-2,500\text{m}$ 上方接続残差)の抽出を実施した。

図 II-4-33 に $50-2,500\text{m}$ 上方接続残差図を示す。当該地域中央部及び東部にそれぞれ南北方向及び東西方向に延びる低重力異常域が分布しており、両低重力異常域の間には概略南北方向に延びる高重力異常域が分布している。この高重力異常域付近には変質帯や噴気帯が多く分布しており、この付近には深部の熱水活動に関連した断裂構造が分布している可能性がある。また、先述した低重力異常域は深部熱水の上昇により浅部の岩石が熱水変質を受け岩石密度が低

下したことにより生じた可能性が考えられる。

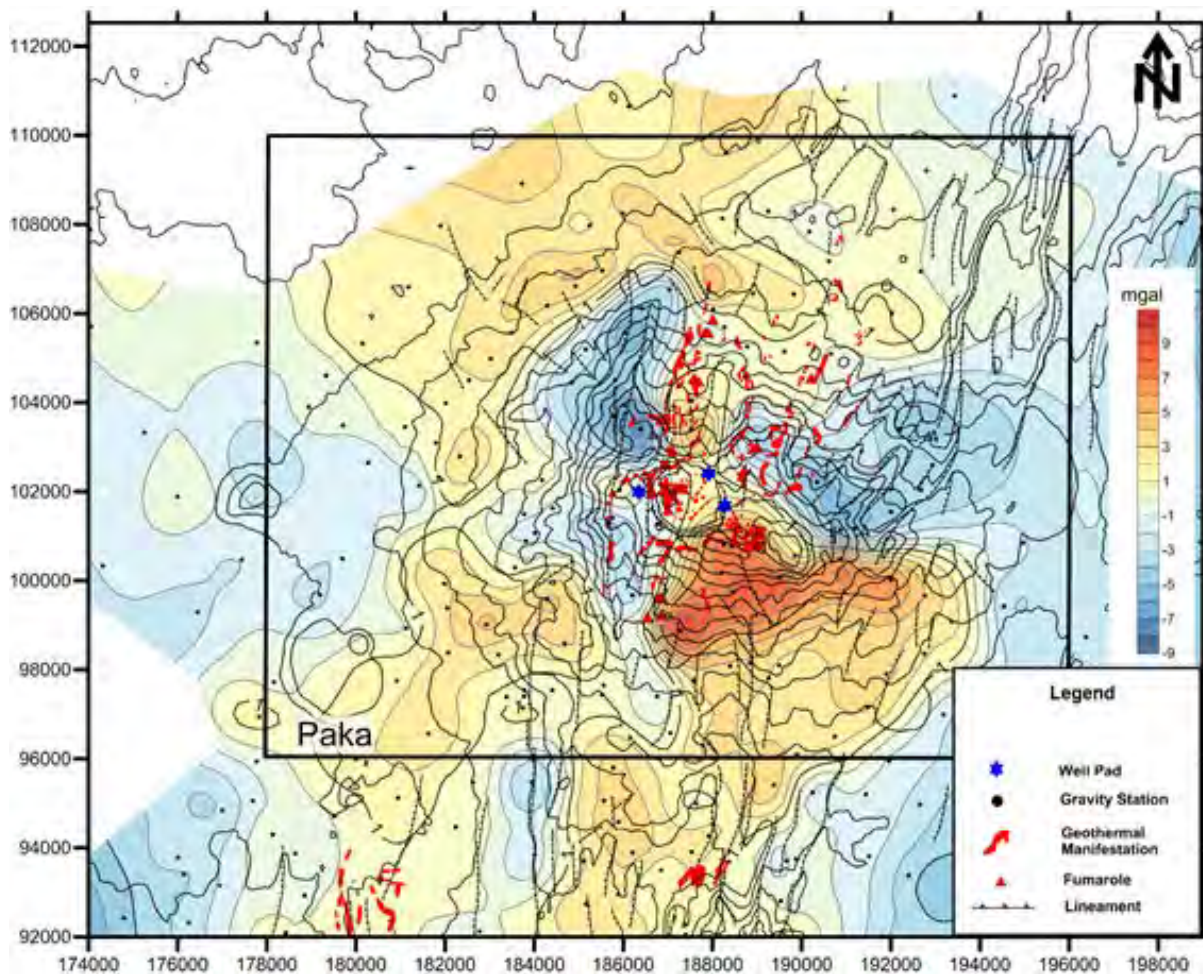


図 II -4-33 パカ地点 50-2, 500m 上方接続残差図

(iii) 水平 1 次微分図

抽出されたリージョナル成分から掘削ターゲットになり得る可能性がある重力急変部を抽出するため水平 1 次微分解析を行った。

図 II-4-34 にパカ地点における 50-2, 500m 上方接続残差水平 1 次微分図を示す。水平 1 次微分の平面分布から各地域において以下に示す水平 1 次微分値が大きな値を示し、かつある方坑井を持って連続して延びている箇所（重力急変部：重力分布から抽出される線構造で断裂構造を反映している可能性がある）が抽出された。なお、以下に示す重力急変部 G7 はチェプチャク地点にて抽出された重力急変部 G7 と同じものである。

- 当該地域南東部を概略北東－南西方向に延びる重力急変部（G7）
- 当該地域中央部を概略南北方向に延びる明瞭な重力急変部（G10）
- 当該地域東部を概略北西－東方向に延びる明瞭な重力急変部（G11）
- 当該地域北部を概略東北東－南西方向に延びる明瞭な重力急変部（G12）
- 当該地域東部を概略北東－西南西方向に延びる重力急変部（G13）

- 当該地域南部を概略東北東－西南西方向に延びる重力急変部 (G14)
- 当該地域南部を概略北北西－南南東方向に延びる重力急変部 (G15)

当該地域で抽出された重力急変部は傾向面残差図（巻末資料第 Gr-17 図参照）の水平 1 次微分図（巻末資料第 Gr-19 図参照）においても共通して抽出されており、これらの重力急変部は断裂構造を示している可能性がある。また、当該地域のリニアメントは概略南北方向に卓越しており、重力急変部 G10 は同様の方向に延びている。さらに、重力リニアメント G10 は先述した MT 探査において抽出された比抵抗不連続線 R1 と分布方向、分布位置が調和的であり、また、当該地域において南北方向に延びる変質帯と重力急変部 G10 は分布方向、分布位置ともに類似している。これらのことから、重力急変部 G10 は深部からの熱水流動を規制している断裂構造を示している可能性がある。

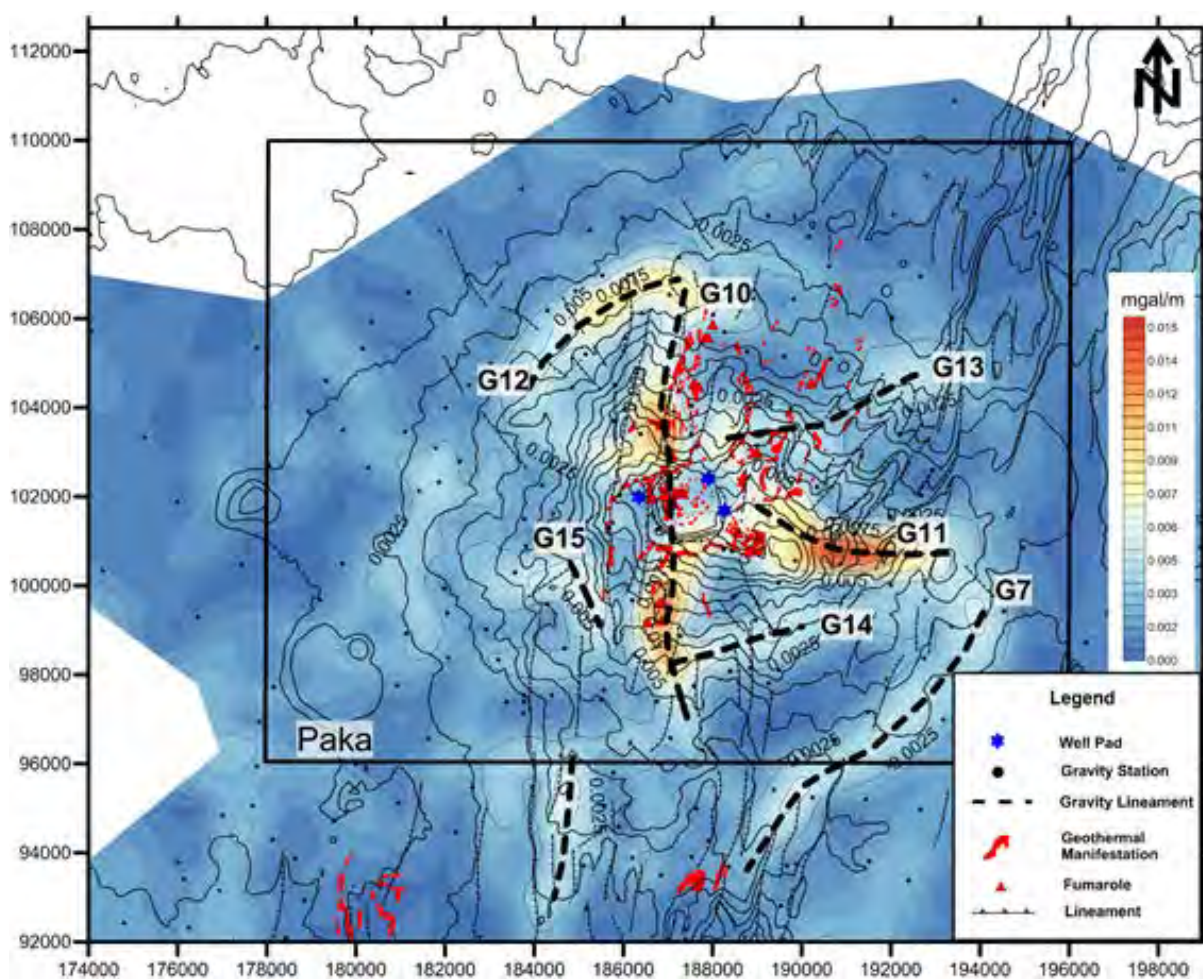


図 II -4-34 パカ地点 50-2, 500m 上方接続残差水平 1 次微分図

(iv) 3次元基盤構造解析

パカ地点における重力基盤深度分布を推定するため、3次元基盤構造解析を実施した。当該地域もコロシ地点・チェプチャク地点と同様に密度に関する情報がないため、アフリカの重力探査結果について記述されている Josphat et al. (2010) を参考にし、密度差を 0.3 g/cm^3 とし

た。また、重力基盤深度の変化による重力異常成分は上方接続残差（1,000m 上方接続値から4,000mの上方接続値を差引いた値）をとることにより抽出し、この上方接続残差値を3次元基盤構造解析のマッチングデータとした。

図 II-4-35 にパカ地点の3次元基盤構造解析結果を示す。当該地域は概略南北方向に延びる重力基盤の隆起帯が大局的に分布している。また、当該地域中央部及び東部にそれぞれ概略南北方向、東西方向に延びる重力基盤の陥没帯が確認された。また、この重力基盤の隆起帯及び陥没帯の縁部には水平1次微分により抽出された重力急変部 G7、G10～G15 が分布していることから、これらの重力急変部は重力基盤の隆起及び陥没により生じた断層である可能性が示された。当該地域もコロシ地点・チェプチャク地点と同様に重力基盤とその上面層の密度差が正確で無いことや、コントロールポイント（既存坑井の情報により重力基盤深度が判明している箇所）が存在しないことなどから、本解析で得られた重力基盤深度分布は精度よく決定されたとは言えないものの、前述の密度差を仮定して得られた結果から地表下-2,000m から-2,500m の範囲で重力基盤深度は分布しているものと推定された。

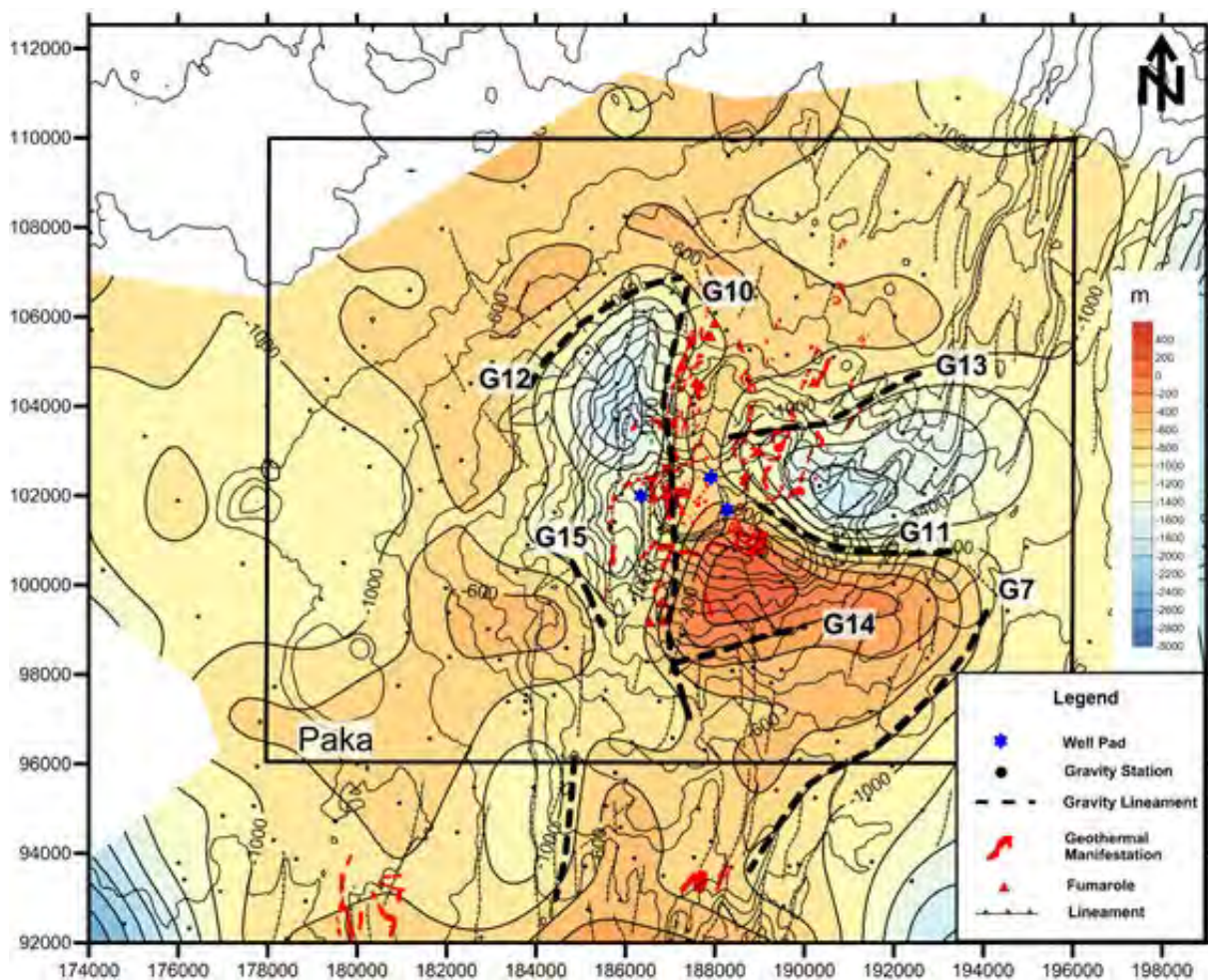


図 II -4-35 パカ地点 3次元基盤構造解析結果

(v) 2次元密度構造解析結果 (P-P' 断面)

パカ地点の2次元的な密度構造を推定するため2次元密度構造解析を実施した。2次元密度

構造解析手法は Talwani (1959) を採用した。なお、コロシ及びチェプチャク地点と同様に当該地域の解析に用いる密度は Josphat et al. (2010) を参考にした。図 II-4-36 にパカ地点において実施した 2 次元密度構造解析の断面位置図、図 II-4-37 にパカ地点における 2 次元密度構造解析結果を示す。

当該地域中央部に概略南北方向の低重力異常域が分布しているが 2 次元密度構造解析の結果、この低重力異常域は重力基盤の沈降及び、浅部低密度層厚が周囲と比較して大きくなっていることに起因することが推定された。重力基盤深度の急変部には重力急変部 G12 に相当する南東落ちの断層及び重力急変部 G10 に相当する北西落ちの断層がそれぞれ推定された。また、2 次元密度構造解析の結果、浅部低密度層厚の増大が低重力異常域を形成している大きな要因となっていると推定される。周囲と比較して低密度層厚が大きい要因としては、先述したように深部熱水が重力急変部 G10 に相当する断層を上昇し、浅部の岩石が熱水変質を受けたことにより、岩石密度が周囲と比較して小さくなったことが可能性として挙げられる。

上述した低重力異常域の東部には高重力異常域が概略南北方向に分布しており、2 次元密度構造解析の結果、この高重力異常域は重力基盤の隆起によるものと推定された。隆起した重力基盤の両端部には先述した重力急変部 G10 に相当する北西落ちの断層及び重力急変部 G13 に相当する南東落ちの断層がそれぞれ推定された。

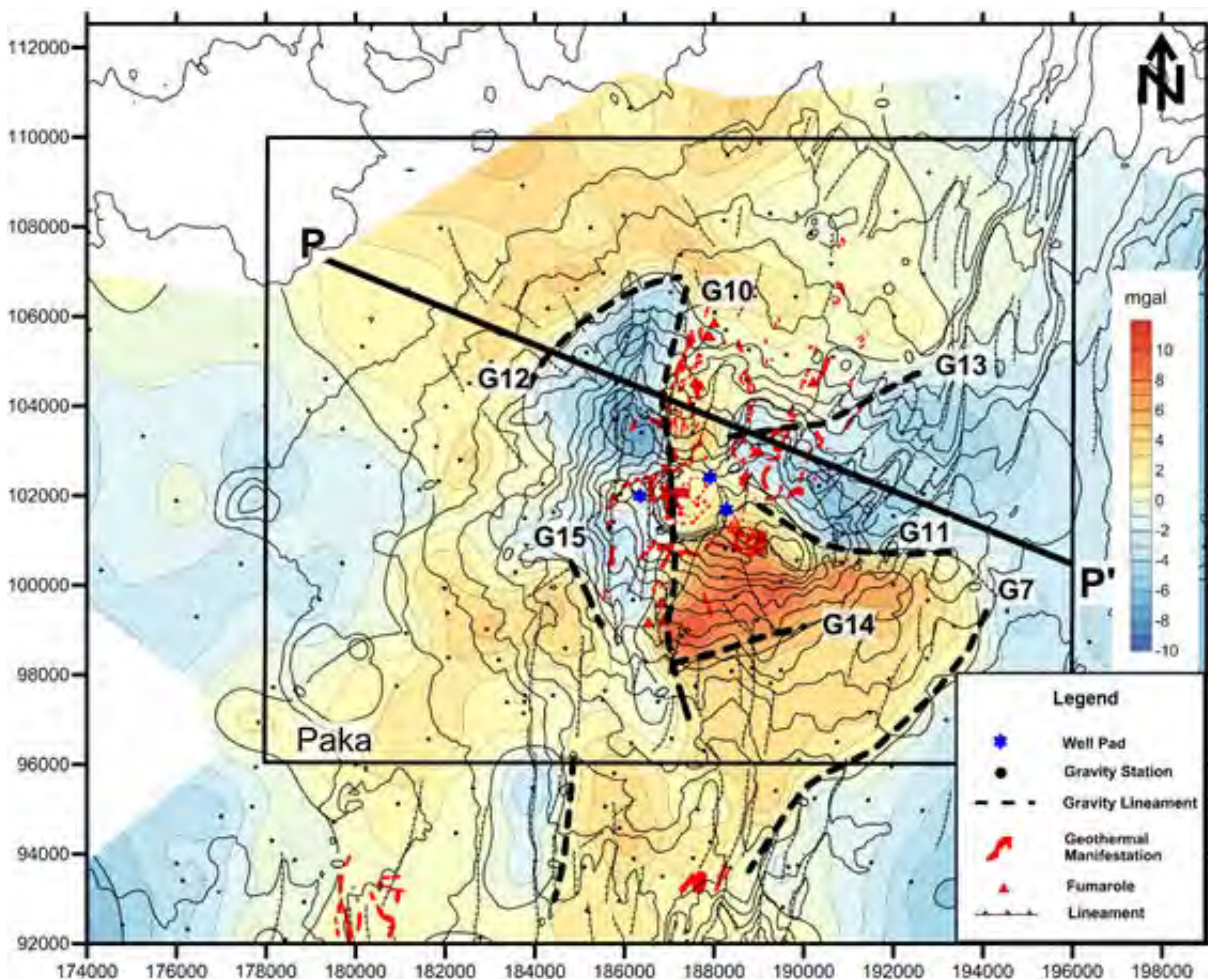


図 II -4-36 パカ地点 2 次元密度構造解析断面位置図 (背景：50-4, 000m 上方接続残差図)

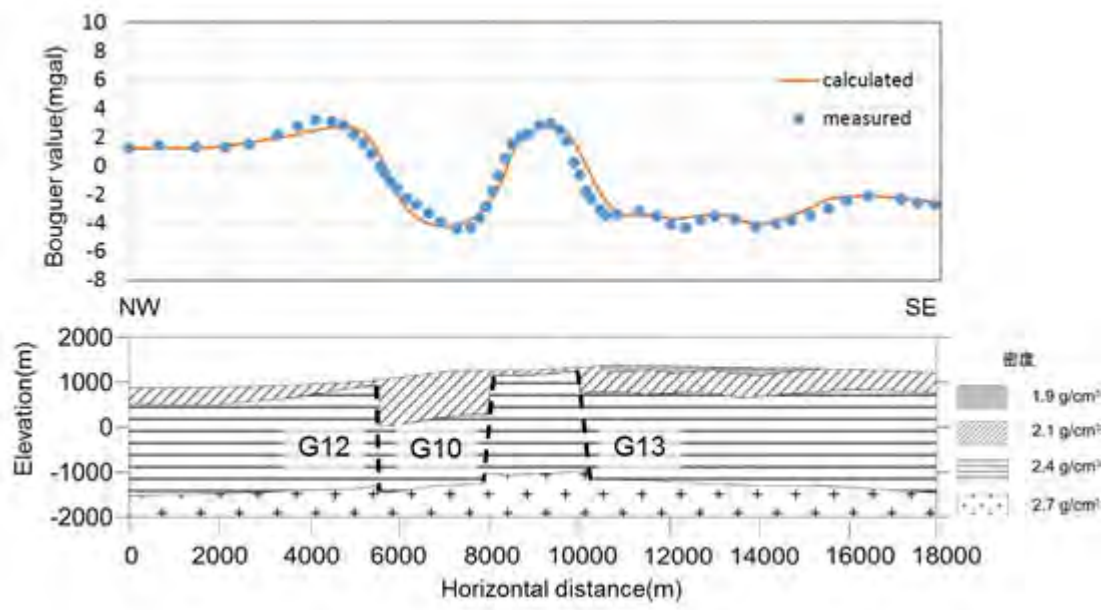


図 II -4-37 パカ地点 2次元密度構造解析結果

II -5 資源ポテンシャルの再評価

II -5.1 評価方法

調査井が掘削されていない地熱地点の資源ポテンシャルの推定では、これまでGDCにおいては、一般的な地表探査段階で実施される地質調査、地化学調査、物理探査の結果に基づき、地熱系の概念モデルを構築したうえで、簡便な方法で資源量試算が行われている。ただし、これまでに構築されている概念モデルは広域的かつ概念的なものであり、必ずしも詳細なものではない。また、資源量試算においては、全世界の既開発の地熱地点における資源密度の平均値（約15MW/km²）を利用し、それに各地点で想定される貯留層面積を乗じるという、概略的な方法が適用されている（図II -5-1）。

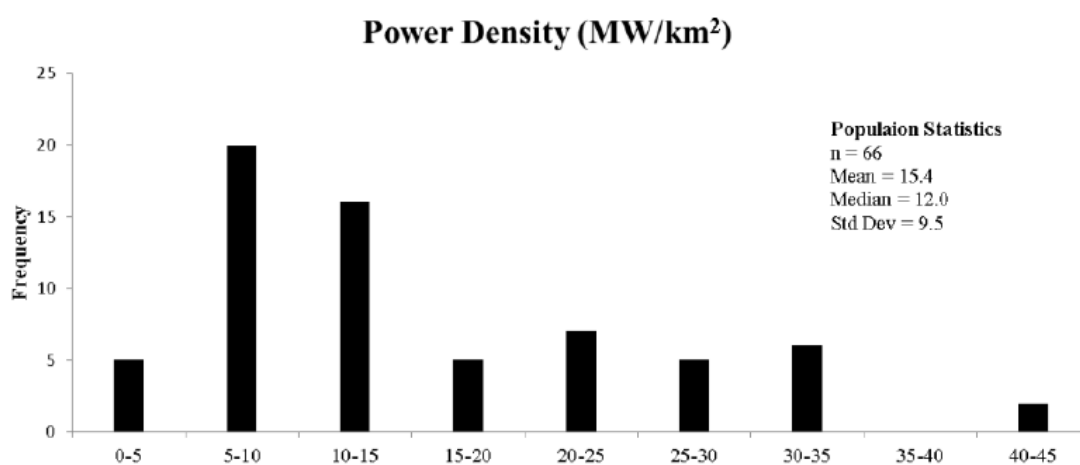


図 II -5-1 世界の既開発地熱地点（66 地点）の資源密度頻度分布

本調査では、本プロジェクトで実施した補足地質・地化学調査の結果や物理探査の結果も合わせて、可能な限り精緻な地熱系概念モデルを再構築し、それに基づき各地点の資源ポテンシャルの再評価を行った。

一般に、地熱系概念モデルは種々の地球科学的データ、すなわち、地質、地化学、物理探査、坑井調査、坑井試験の各データを統合し構築される。また、地球科学的調査の進捗に伴い、モデルは見直し・更新されその精度が向上する。

調査の初期段階においては、地熱資源の存在確度の検証と地熱系の広がり把握することが主な目的であり、この段階では地表地質調査及び地化学調査が実施される（場合によって広範囲を対象とした重力探査などの物理探査も実施される）。これらの調査結果に基づき、地質構造モデルと流体地化学モデルを含む初期段階の地熱系概念モデルが構築される。この段階では地熱資源の存在確度や地熱系の広がりが検証される。また、この初期モデルに基づき、地熱資源の有望範囲の絞り込みが行われ、精査対象地域が検討される。

本調査で構築された地熱系概念モデルは、アルス及びバリングの2地点については最も初期の地熱系概念モデルと位置づけられ、上述したように、地熱資源の存在確度の検証と地熱系の広がりの把握に主眼を置いたモデルである。したがって、今後の調査の進捗によりモデルの見直しと

精緻化が進められ、より詳しい地熱貯留層の特徴の把握が望まれる。コロシ、チェプチャク及びパカの3地点については、電磁探査及び重力探査結果を反映し、他の2地点より精度の高い地熱系概念モデルが構築された。また、この3地点については、構築された地熱系概念モデルに基づき、地熱貯留層の存在確認や地熱流体の特性把握を目的とした調査井の掘削ターゲットゾーンを、高温の地熱流体が賦存する可能性のもっとも高いゾーンとして検討した。

資源量試算においては、地熱系概念モデルに基づく貯留層の体積や温度等のパラメータを用いた容積法を適用し、各パラメータの不確定性も加味したモンテカルロ解析手法も用いることにより、確度の異なる範囲の資源量を求めた。また、参考として、再構築された地熱系概念モデルに基づく貯留層面積により、資源密度法による資源量も試算した。さらに、発電開発に必要な坑井本数を見積もるために、生産井1本当たりの期待される発電出力を求めた。それらの試算方法について以下に述べる。

(1) モンテカルロ解析を適用した容積法による試算

容積法は地熱貯留層内の貯留総熱量を計算し、これから利用可能な地熱資源量やそこから得られる発電量を推定する方法である。貯留熱量は、貯留層温度と利用限界温度との温度差に貯留層の体積、密度及び比熱を乗じることによって得られる。この貯留熱量をすべて利用することは不可能であり、貯留熱量に地上までのエネルギー回収率を乗じたものが利用可能な地熱資源量となる。さらに、この利用可能資源量に熱エネルギーを電力に変換するまでの変換効率を乗じ、プラント運転年数で除することにより最終的な発電出力が求められる。発電出力の計算式を以下に示す。

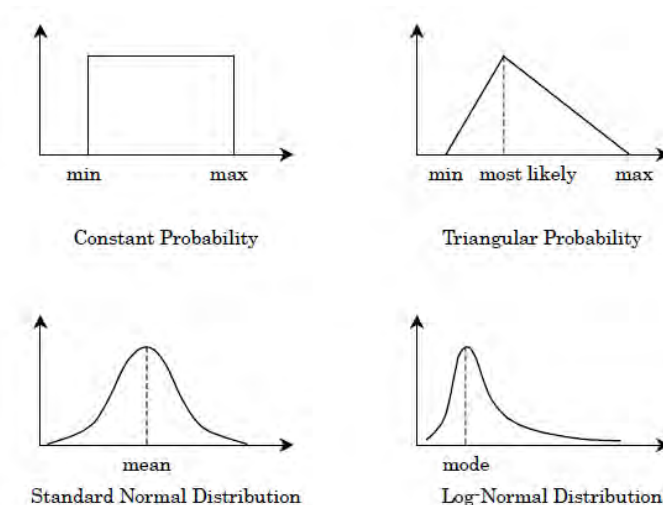
$$\text{発電出力} = (T_r - T_a) \times \frac{\{(1 - \phi) \times C_{p_r} \times \rho_r + \phi \times C_{p_w} \times \rho_w\} \times V \times RF \times CE}{PL \times LF}$$

ここで、

ρ_r, ρ_w	: それぞれ岩石密度、地熱流体密度 (kg/m ³)
C_{p_r}, C_{p_w}	: それぞれ岩石比熱、地熱流体比熱 (kJ/kg-°C)
T_r, T_a	: それぞれ貯留層温度、利用限界温度 (°C)
ϕ	: 岩石空隙率 (%)
V	: 貯留層体積 (km ³)
RF	: 回収率 (%)
CE	: 変換効率 (%)
PL	: プラント運転期間 (年)
LF	: プラント稼働率 (%)

通常、容積法で用いられているパラメータの値を1つに限定することは困難であり、多くの場合これらにはある程度の範囲を想定する。したがって資源量の計算結果についても、パラメータの範囲によって算出される範囲が存在する。モンテカルロ解析は計算結果にどの程度の幅があり、その中で最も可能性の高い数値はどれなのかを統計的に求める手法である。パラメータの確率分布の主なタイプを図 II -5-2 に示す。本調査では各パラメータの組み合わせを

100,000 ケース抽出し、統計的手法により確度 10～90%の地熱資源量を求めた。



出典：JICA (2012)

図 II -5-2 モンテカルロ解析におけるパラメータの確率分布タイプ

本調査での計算パラメータの設定は、原則として表 II -5-1 のとおりとし、岩石密度、岩石比熱、プラント運転期間、プラント利用率は共通の設定値とした。なお、本プロジェクトの対象地点はすべて高温地熱資源の存在が期待されることから、熱-電力の変換効率是一般的なシングルフラッシュ方式での発電を想定したものとした。

表 II -5-1 容積法計算における計算パラメータの設定

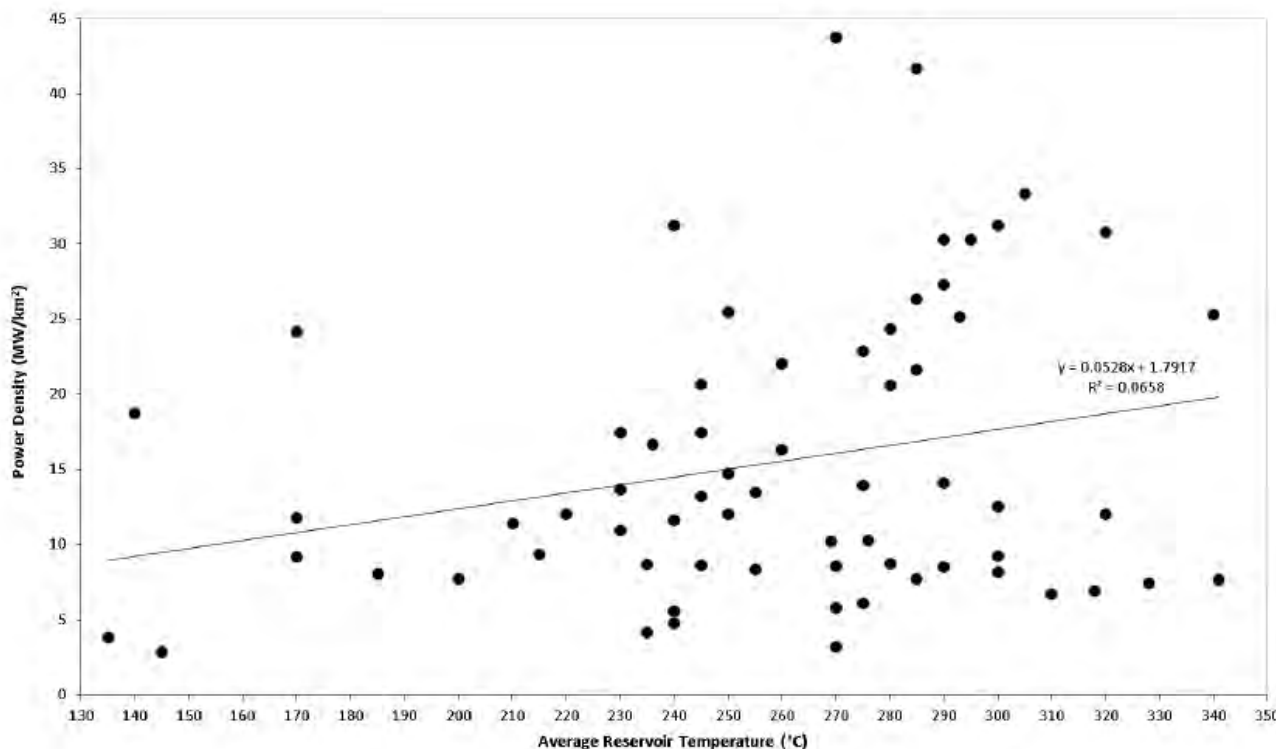
パラメータ	最小値	最確値	最大値	分布のタイプ
貯留層面積 (km ²)	地熱系概念モデルに基づく			constant or triangle
貯留層の厚さ (m)	地熱系概念モデルに基づく			constant or triangle
岩石密度 (kg/m ³)	2400	2500	2600	triangle
岩石空隙率 (-)	地熱系概念モデルに基づく			triangle
回収率 (-)	岩石空隙率に依存			triangle
岩石比熱 (kJ/kg°C)	0.80	0.90	1.00	triangle
貯留層平均温度 (°C)	地熱系概念モデルに基づく			constant or triangle
熱-電力変換効率 (%)	貯留層平均温度に依存			constant or triangle
プラント運転期間 (年)	-	30	-	fixed
プラント利用率 (-)	-	0.90	-	fixed
利用限界温度 (°C)	貯留層平均温度に依存			fixed

(2) 資源密度法による試算

参考として試算する資源密度法による計算では、容積法において設定した貯留層面積に資源密度を乗じて単純に資源量を算出した。資源密度は、既開発地点の平均 (15MW/km²) ではなく、Wilmarth and Stimac (2015) による平均貯留層温度に比例する値を用いた (図 II -5-3)。平

均貯留層温度は概念モデルでの推定温度を用いた。例えば 270℃の場合は、資源密度は以下のように算出される。

$$\text{資源密度 (MW/km}^2\text{)} = 0.0528 \times 270 \text{ (}^\circ\text{C)} + 1.7917 = 16.0477$$



出典：Wilmarth and Stimac (2015)

図 II -5-3 資源密度と平均貯留層温度の関係図（世界の既開発地点 66 地点）

(3) 生産井 1 本当当たりの発電出力

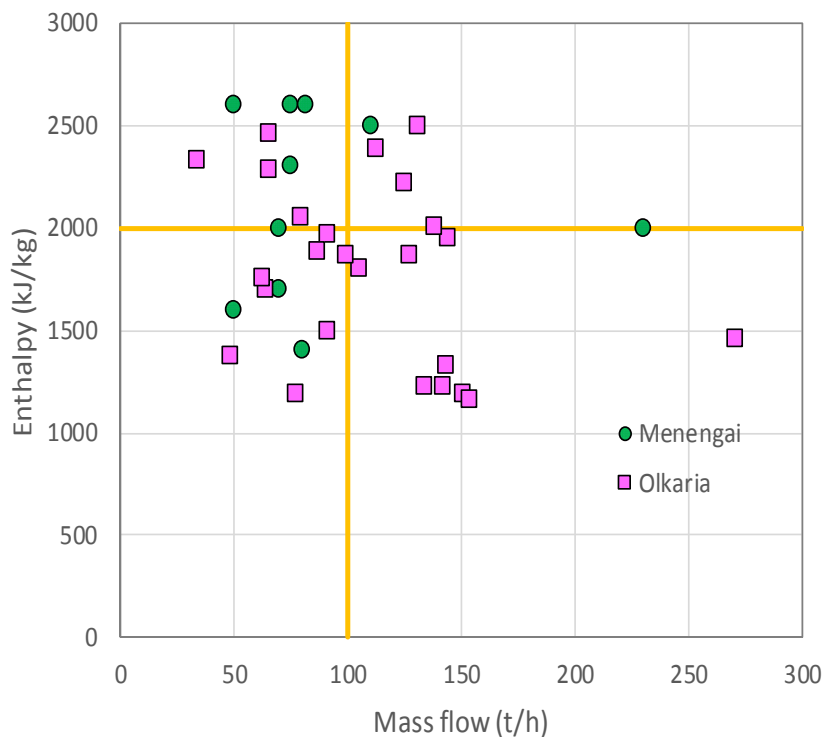
発電開発に必要な坑井本数を求めるためには、坑井 1 本当当たりの予想出力が必要である。JICA(2012)では、地熱貯留層の深度（圧力）、温度及び浸透率一層厚積（kh 値）から、坑井シミュレータ WELLFLOW を用いて坑井 1 本当当たりの予想噴出量を試算し、その結果に基づき一般的な条件での発電出力が求められている（表 II -5-2）。ただし、その試算により求められた予想噴出量は、熱水卓越型の貯留層を想定したものであり、貯留層流体は熱水単相で地熱井坑内に流入し、坑内を上昇するとともに沸騰して蒸気・熱水に分離することを前提としている。後述するように、アルス・バリンゴ・チェプチャクでは熱水卓越型の貯留層の存在が推定されるため、それらの地点については、地熱系概念モデルから平均的な貯留層深度や温度を想定したうえで、この表を用いて生産井 1 本当当たりの発電可能出力と還元すべき熱水の流量を求めた。

表 II -5-2 貯留層特性と推定される生産井1本当たりの発電出力

No.	Class	Feedzone (m)	Production Casing (m)	Reservoir Pressure (bar abs.)	Reservoir Temperature (degC)	Permeability- Thickness Product (kh) (darcy-m)	Fluid Enthalpy (kJ/kg)	Wellhead Pressure (bar abs.)	Steam Flow Rate at WH (t/h)	Water Flow Rate at WH (t/h)	Total Flow Rate at WH (t/h)	Turbine Inlet pressure (bar abs.)	Turbine Inlet Steam (t/h)	Steam Consumption Rate (t/h/MW)	Power Output per Well (MW)	Power Output per Well (MW)	Brine to be reinjectd (t/h)
1	P1-T1	1,000	700	70	200	5	855	4	13.1	98.4	111.4	3	15.10	9	1.68	2	100
2	P1-T2	1,000	700	70	220	5	945	4	33.9	178.9	212.8	3	37.72	9	4.19	4	180
3	P1-T3	1,000	700	70	240	5	1038	7	39.8	201.2	241.0	6	42.45	7	6.06	6	200
4	P1-T4	1,000	700	70	260	5	1134	7	57.9	215.7	273.6	6	60.86	7	8.69	9	220
5	P2-T1	1,500	1,000	120	200	4	857	4	15.4	115.1	130.5	3	17.81	9	1.98	2	120
6	P2-T2	1,500	1,000	120	220	4	947	4	35.2	184.7	219.9	3	39.14	9	4.35	4	190
7	P2-T3	1,500	1,000	120	240	4	1039	7	42.6	214.7	257.3	6	45.41	7	6.49	6	220
8	P2-T4	1,500	1,000	120	260	4	1134	7	69.0	257.0	325.9	6	72.42	7	10.35	10	260
9	P2-T5	1,500	1,000	120	280	4	1234	10	81.6	267.1	348.7	9	84.36	6.5	12.98	13	270
10	P2-T6	1,500	1,000	120	300	4	1341	10	104.1	258.3	362.3	9	106.76	6.5	16.42	16	260
11	P3-T1	2,000	1,500	170	200	3	859	4	16.0	118.4	134.4	3	18.49	9	2.05	2	120
12	P3-T2	2,000	1,500	170	220	3	948	4	34.6	180.5	215.1	3	38.45	9	4.27	4	180
13	P3-T3	2,000	1,500	170	240	3	1040	7	41.9	210.6	252.4	6	44.66	7	6.38	6	210
14	P3-T4	2,000	1,500	170	260	3	1134	7	68.1	254.0	322.1	6	71.55	7	10.22	10	260
15	P3-T5	2,000	1,500	170	280	3	1232	10	85.0	279.6	364.6	9	87.89	6.5	13.52	14	280
16	P3-T6	2,000	1,500	170	300	3	1336	10	116.4	292.0	408.4	9	119.41	6.5	18.37	18	290
17	P4-T1	2,500	1,800	220	200	2	861	4	14.2	104.0	118.2	3	16.38	9	1.82	2	110
18	P4-T2	2,500	1,800	220	220	2	950	4	30.4	157.4	187.8	3	33.72	9	3.75	4	160
19	P4-T3	2,500	1,800	220	240	2	1041	7	36.8	184.4	221.2	6	39.25	7	5.61	6	190
20	P4-T4	2,500	1,800	220	260	2	1134	7	60.3	224.9	285.2	6	63.37	7	9.05	9	230
21	P4-T5	2,500	1,800	220	280	2	1231	10	75.6	249.6	325.2	9	78.18	6.5	12.03	12	250
22	P4-T6	2,500	1,800	220	300	2	1333	10	106.2	268.8	375.0	9	108.98	6.5	16.77	17	270

出典：JICA(2012)

一方、コロシ・パカにおいては、貯留層温度が高く透水性が比較的低いため、貯留層内の熱水の一部が沸騰することにより、地熱流体が蒸気・熱水の二相状態となっている領域が比較的大きく存在することが推定される。そのため、生産井からの噴出流体は、メネンガイやオルカリアドームスと同様に、高エンタルピーになると予想され、表 II-5-2 の試算値をそのまま適用することはできない。本検討では、コロシ・パカでの生産井は、メネンガイ・オルカリアドームスと同様の噴出の能力・特性をもつと考えた。図 II-5-4 に示すように、メネンガイ及びオルカリアドームスの実績データに基づけば、平均的な生産井 1 本当たりの総噴出量は 100 t/h 程度、比エンタルピーは 2,000 kJ/kg 程度であり、コロシ・パカでの生産井は平均してそのような噴出特性をもつと想定した。発電所での汽水分離圧力を 11 bara、蒸気消費率を 6.5 t/h/MW と仮定した場合、生産井 1 本当たりの蒸気量・熱水量はそれぞれ 62 t/h、38 t/h となり、出力は 9.5 MW と計算される。



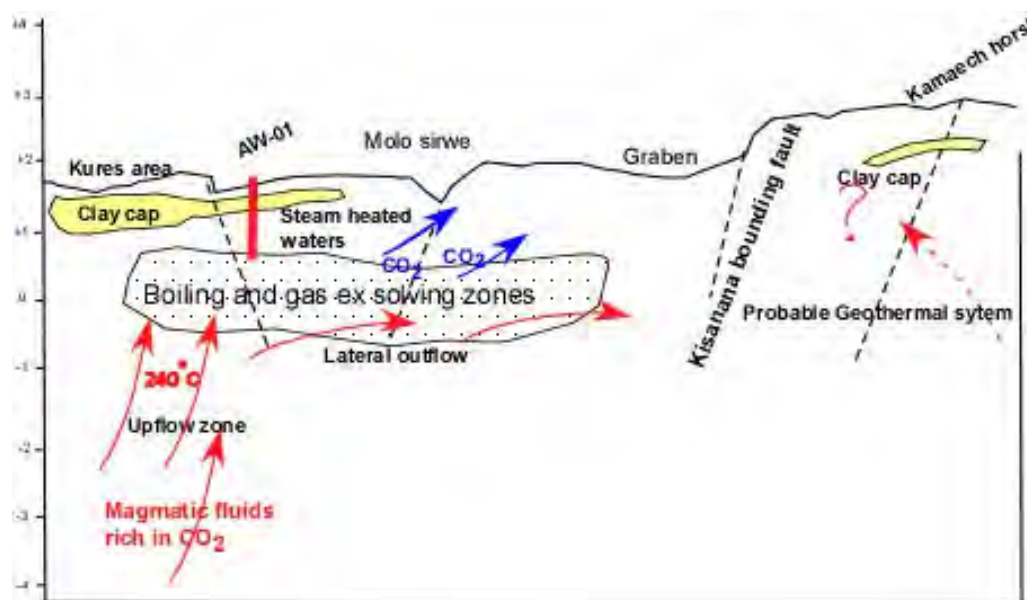
出典：Onyango (2015)と Rop (2012)から調査団作成

図 II -5-4 メネンガイ・オルカリアドームスでの坑井 1 本当たりの平均的な噴出量とエンタルピー

II -5.2 アルス

(1) 地熱系概念モデル

GDC (2013) により構築された概念モデルを図 II -5-5 に示す。このモデルは、広域の調査範囲 (30km×18km) について、噴気・温泉や gas hole (冷噴気) の分布、物理探査の結果などから構築された概略的なものであり、精緻な資源評価や開発計画の策定への適用は困難である。



出典：GDC(2013)

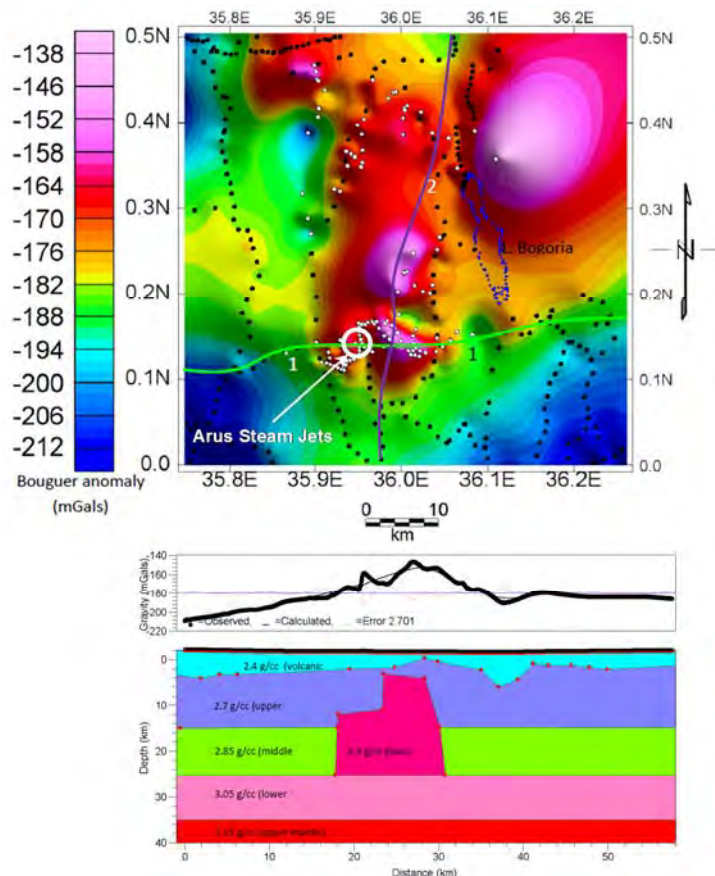
図 II -5-5 アルス地点の既存地熱系概念モデル

アルス地点に関しては、規模が大きく活発な地熱活動を示す北西部の Steam Jet 付近に最も有望な地熱資源が存在する可能性が高い。そのため、Steam Jet 付近に重点を置いた概念モデルの再構築を行った。

大学や KenGen による過去の重力探査によれば、Bogoria 湖の西方にはやや南北方向に伸長した高密度岩体の存在が推定され、その分布範囲の南端付近に Steam Jet の噴気帯が位置している (図 II -5-6)。このことは、その高密度岩体が高温の貫入岩 (新期の固結マグマ) であり、Steam Jet 付近の熱水系の熱源となっていることが示唆される。

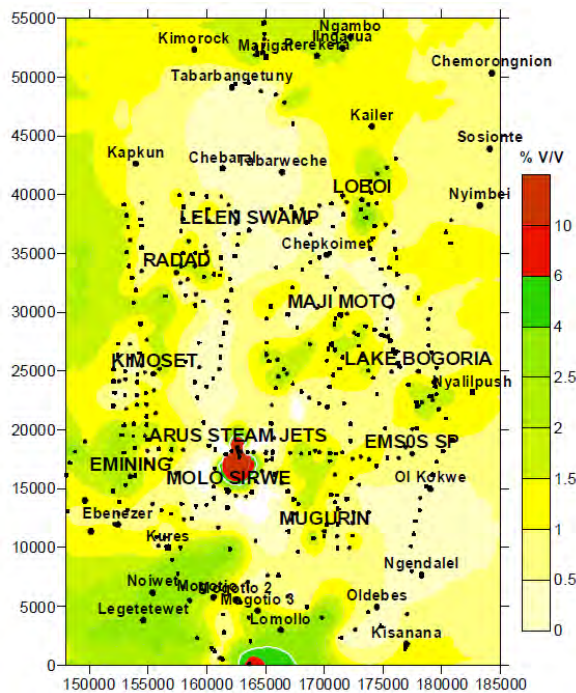
Bogoria 湖周辺までを含む広域の土壌ガス探査の結果によれば、CO₂ 濃度の明瞭な異常値を示すのは Steam Jet 付近のみであり、その場所に顕著な高温流体の上昇流を伴う熱水系が存在することを支持している (図 II -5-7)。

これまでに GDC により実施された MT/TEM 探査は、比較的広域を対象とした概査的なものであり、詳細な地下構造の推定までは不可能である (図 II -5-8)。それでも、Steam Jet 付近には、やや浅部 (標高 1,000m 付近) に、熱水変質による粘土化帯の存在を示唆する低比抵抗域が分布している。



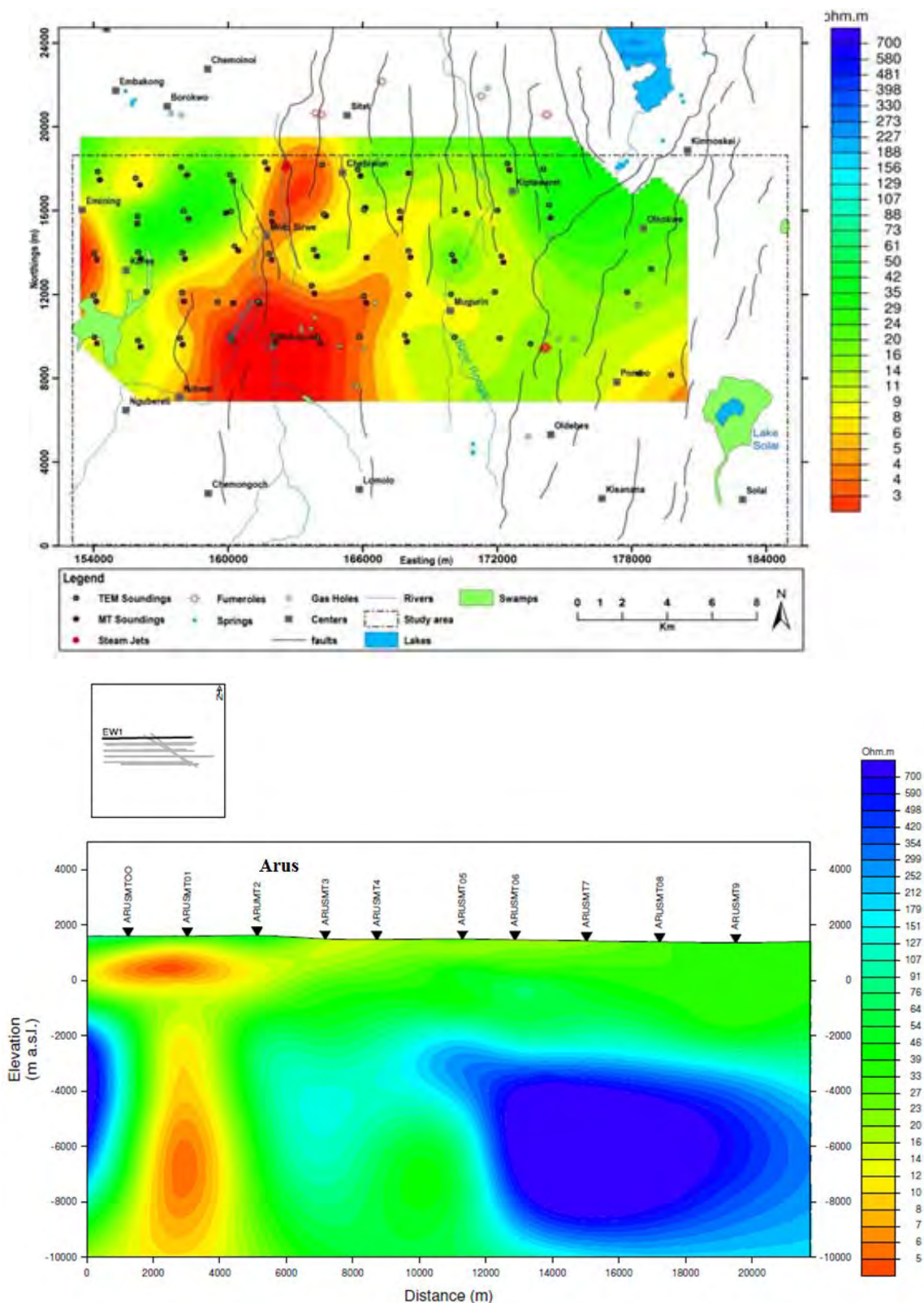
出典：Mulwa and Mariita (2013)

図 II -5-6 アルス地点付近での重力探査結果



出典：Karingithi and Wambugu (2009)

図 II -5-7 アルス地点付近での土壌ガス探査結果 (CO₂ 濃度分布)

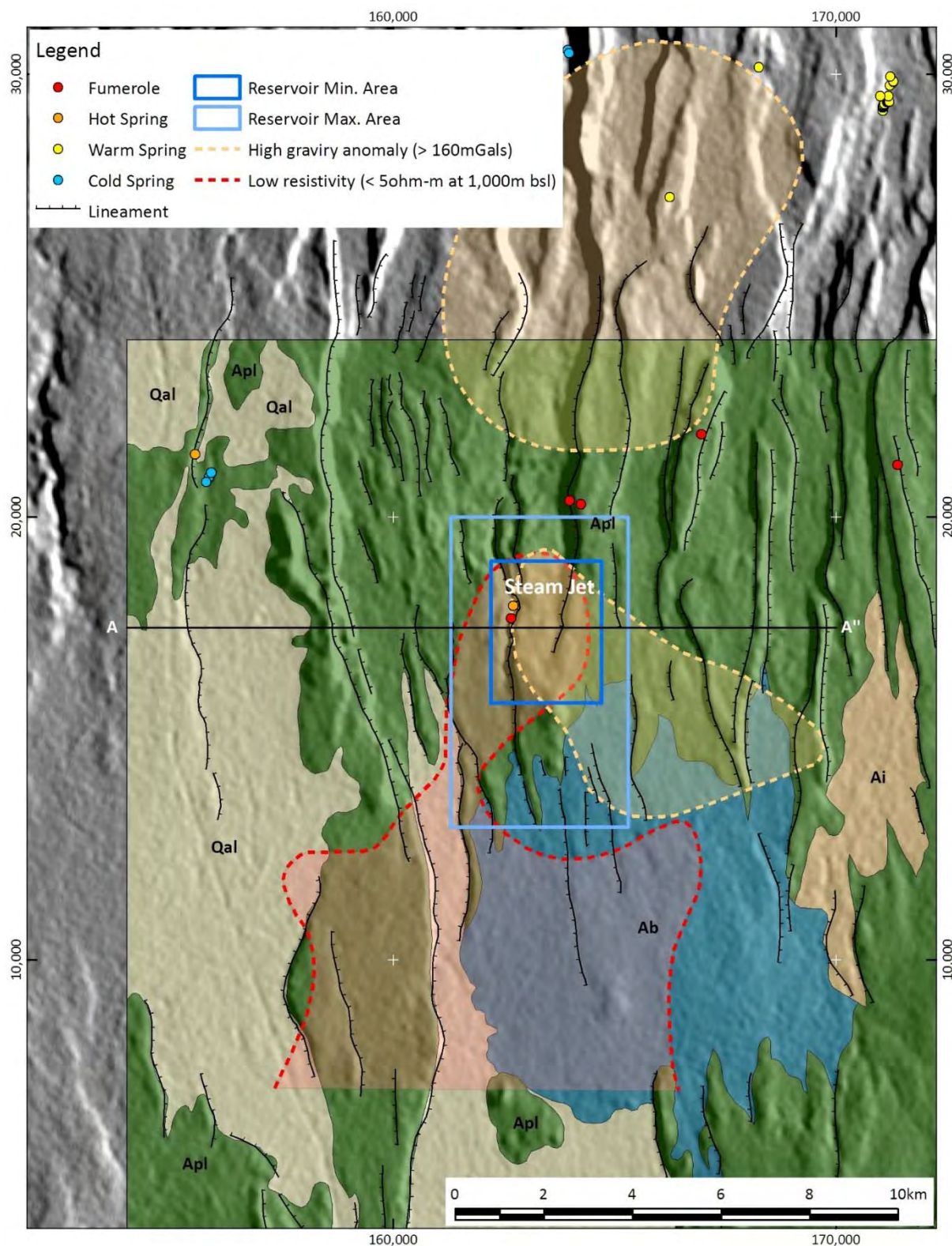


出典：GDC（2013）

図 II -5-8 アルス地点付近での MT/TEM 探査結果
 (上の比抵抗分布平面図は標高 1,000mのもの)

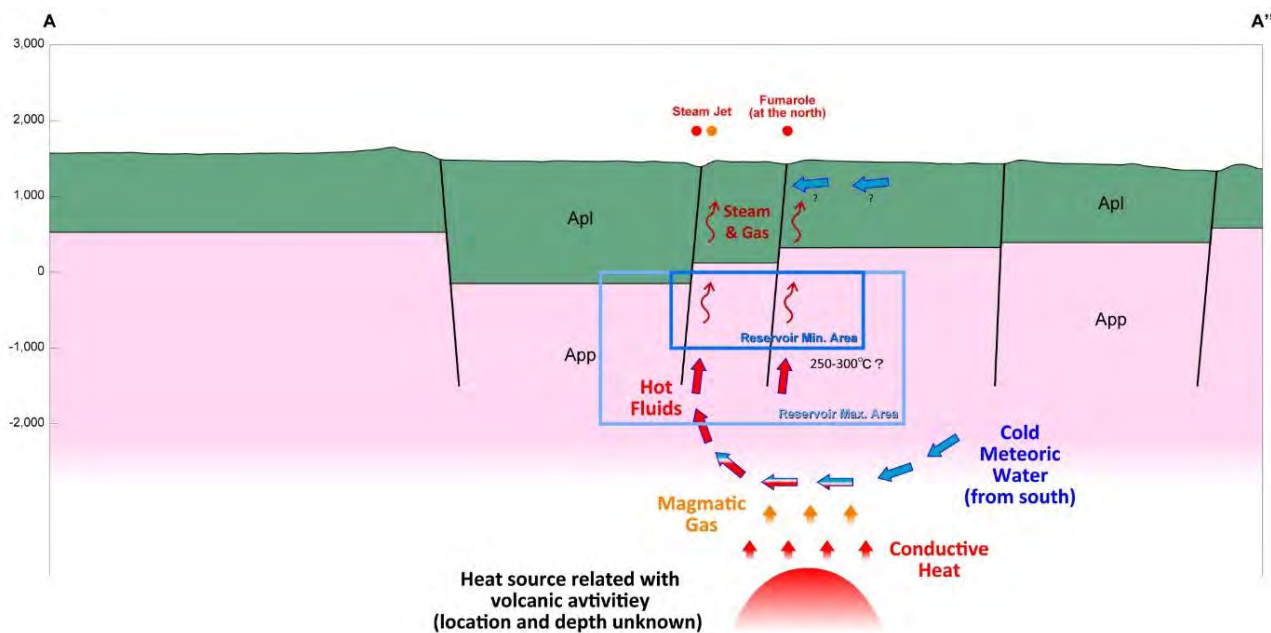
アルス地点北西部（Steam Jet 付近）に関する地表調査結果の集約図を図 II -5-9 に示す。また、本調査により再構築した地熱系概念モデルを図 II -5-10 に示す。概念モデルにおける地熱系の各要素は下表のようにまとめられる。

アルス地点（Steam Jet 付近）の地熱系概念モデル	
熱源	重力異常として検知される高密度の新期貫入岩体
地質構造	南北系の断層群（正断層）が卓越
地熱流体の起源	主に天水であるが、ガス成分はマグマ起源のものを含む
地熱貯留層のタイプ	熱水卓越型（浅部に一部蒸気卓越層）、断層支配型
地熱貯留層分布	Steam Jet 付近及びそのやや東側の断層沿い（比抵抗・重力分布より）
推定貯留層温度	250～300℃（ガス化学温度計による）
流体流動	広域的には南から北の方向、流動経路は主に断層沿い
帽岩	浅部の熱水変質帯が帽岩となっている可能性があるが厚く発達はしていない（Steam Jet 周辺の浅部低比抵抗層付近）
備考	地表物理探査は概査的なものしか実施されていないため、詳細な物理探査（特に MT/TEM 法探査）の実施によるモデルの検証が望まれる。



JICA 調査団作成

図 II -5-9 アルス Steam Jet 付近の地表調査結果集約図

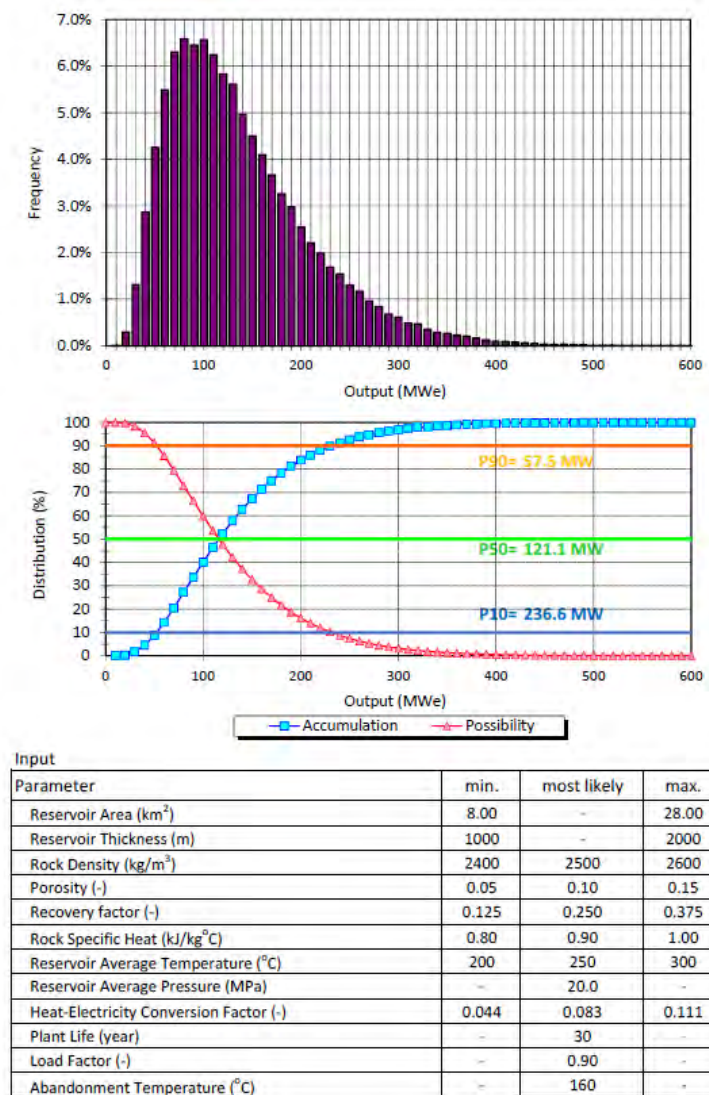


JICA 調査団作成

図 II -5-10 アルス Steam Jet 付近の地熱系概念モデル

(2) 資源量評価

モンテカルロ解析手法を適用した容積法における計算パラメータの設定値と資源量試算結果を図 II -5-11 に示す。貯留層の面積及び厚さは、各々8.00~28.00km²、1,000~2,000mの範囲とした(図 II -5-9 及び図 II -5-10 参照)。貯留層温度については、地化学温度から推定される250~300°Cの範囲に加え、過大評価とならないよう、最低値として200°Cを設定した。



JICA 調査団作成

図 II -5-11 アルス地点 (Steam Jet 付近) の容積法による資源量試算結果

資源密度法による試算では、貯留層面積は上記と同様に 8.00~28.00km² とし、資源密度は平均貯留層温度を 250°C とした場合の 14.99MW/km² を想定した。資源量は 94~360MW と算出される。

アルス地点に関する資源量試算結果の一覧を表 II -5-3 に示す。試算結果を総合的に評価すれば、現時点で発電開発計画が可能と考えられる資源の規模は、容積法での P50 値及び資源密度法での最小値に近い 100MW (発電端) 程度とみなされる。ただし、本調査での資源量評価は、アルス地点での詳細物理探査及び調査井掘削がまだ実施されていない段階のものであることから、評価結果には多分に不確定要素が含まれている。現時点での発電開発計画としては、資源的リスクを加味して、発電出力を各 50MW に分けた 2 段階での計画立案を推奨する。

表 II -5-3 アルス地点 (Steam Jet 付近) の資源量試算結果と発電計画案

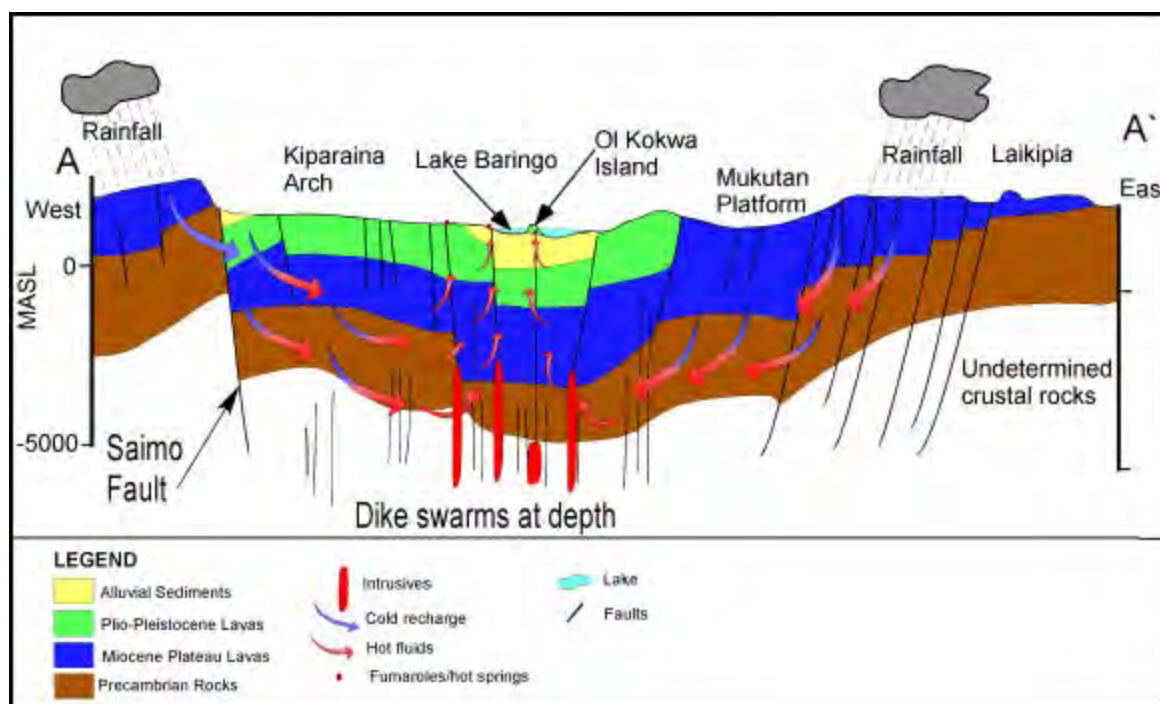
地点名	GDC (2013.4)			JICA調査 (2016)				提案される発電開発計画		
	資源量	発電計画		資源量				初期段階 (MW-gross)	拡張段階 (MW-gross)	合計出力 (MW-gross)
		現状の推定値 (MW)	早期 小規模発電	大規模 発電出力 (MW)	資源密度法 (MW)	容積法 (P90) (MW)	容積法 (P50) (MW)			
アルス	200	Yes	2 X 100?	94 - 360	57.5	121.1	236.6	50	50	100

生産井 1 本当たりの発電出力については、アルス地点の場合、生産井が逢着する貯留層の平均的な特性として、やや深い深度 (深度 2,000m程度) と 260℃前後の温度を想定した。その場合、表 II -5-2 に示した分類では「P3-T4」クラスとなり、生産井 1 本当たり約 10MW の発電出力が期待される (シングルフラッシュ方式)。また、その場合の 1 本当たり発生する還元すべき熱水の流量は約 260t/h が想定される。

II -5.3 バリンゴ

(1) 地熱系概念モデル

GDC (2011) により構築された概念モデルを図 II -5-12 に示す。このモデルは、広域の調査範囲 (20km×20km) について、広域の地質や水理、噴気・温泉の分布などから構築された概略的なものであり、精緻な資源評価や開発計画の策定への適用は困難である。

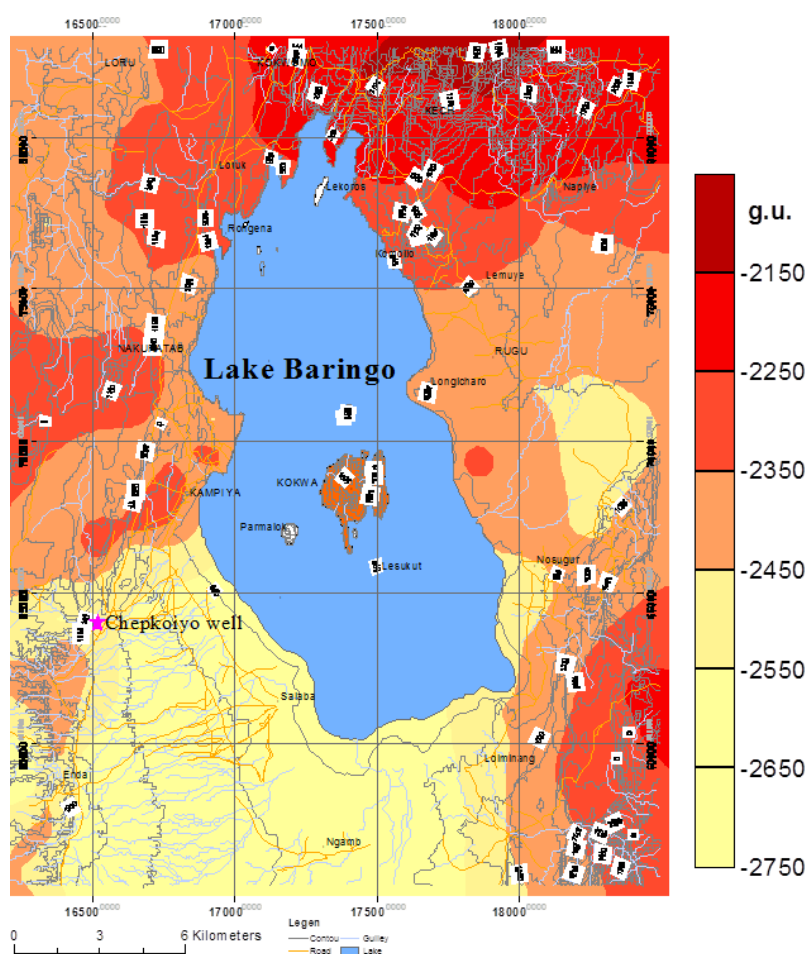


出典：GDC(2011)

図 II -5-12 バリンゴ地点の既存地熱系概念モデル

バリング地点に関しては、01 Kokwe 島の温泉を除けば、バリング湖北西側の Moinonin 付近の噴気帯及び南西側の熱水噴出があった水井戸 (Chepkoiyo well) が、高温の地熱資源の存在を示唆する顕著な兆候である。

KenGen による過去の重力探査によれば、バリング湖周辺では、コロシ付近や南東部の標高が高い地域を除けば、バリング湖の西側に高重力異常が認められる (図 II -5-13)。このことは、バリング湖西側で NNE-SSW 方向に伸びる断層群に沿って、高密度で高温の貫入岩 (新期の固結マグマ) が分布し、熱水系の熱源となっていることを示唆する。



出典：KenGen(2005)

図 II -5-13 バリング地点の重力探査結果 (ブーゲー異常分布図)

GDC による土壌ガス探査の結果によれば、CO₂ の高濃度異常が Moinonin の噴気帯付近に認められ、全般にバリング湖の西側で CO₂ 濃度が高い傾向がある (図 II -5-14)。このことは、バリング湖の西側で、高温流体の上昇流を伴う熱水系が存在することを支持している。

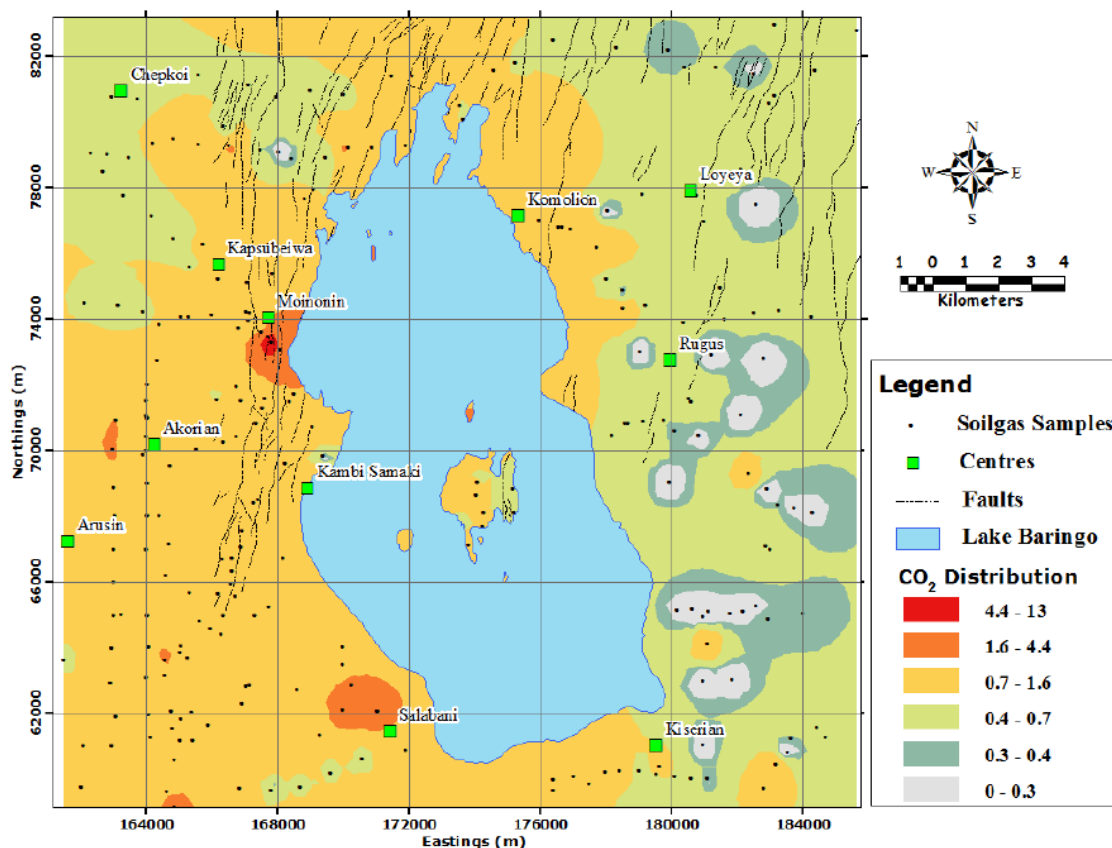
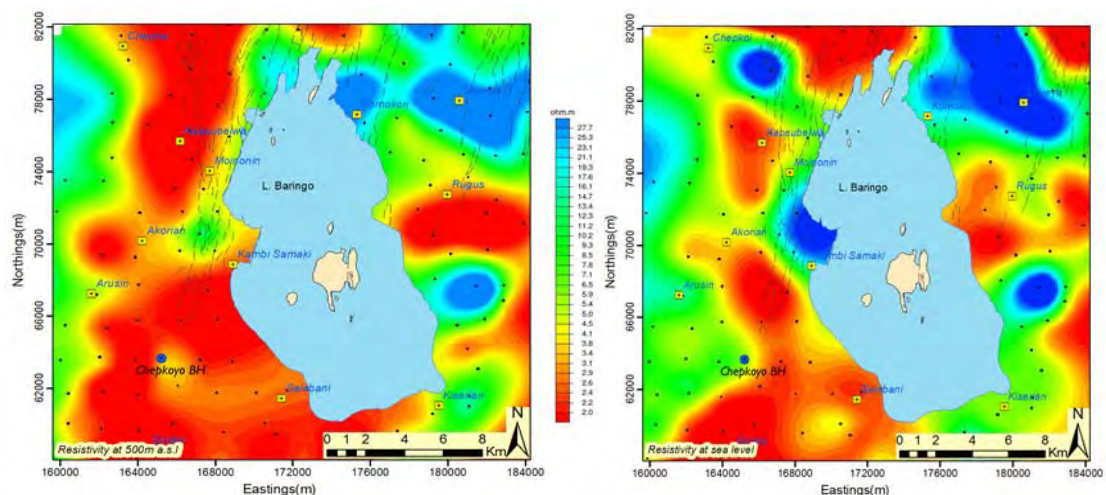


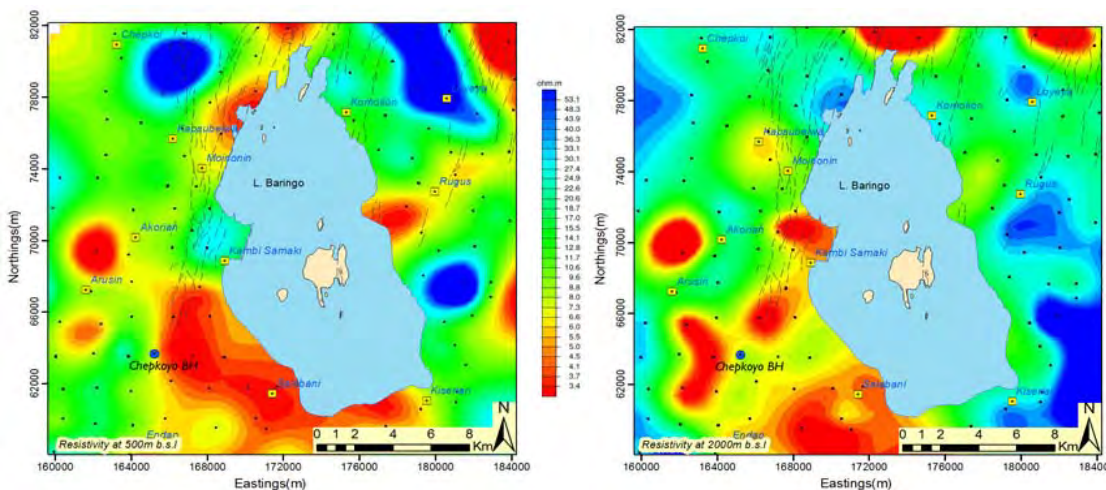
図 II -5-14 バリンゴ地点での土壌ガス探査結果 (CO₂濃度分布)

これまでに GDC により実施された MT/TEM 探査は、比較的広域を対象とした概査的なものであり、詳細な地下構造の推定までは不可能である (図 II -5-15 及び図 II -5-16)。また、GDC による MT 探査データの解析は 1 次元比抵抗インバージョン解析が用いられているが、一般的に 3 次元形状の顕著な低比抵抗異常域が比較的浅部で認められる地熱地域においては、1 次元比抵抗インバージョン解析あるいは 2 次元比抵抗インバージョン解析により得られる深部の比抵抗構造は信頼性が低いことが知られている。このため、この解析結果により得られている比較的浅部に分布する低比抵抗域の分布は地熱貯留層の帽岩的な役割を果たす熱水変質帯の分布を検討する上では有効と考えられるが、この解析結果から深部の地熱構造を検討することは困難である。このことを考慮して比抵抗分布を見ると、バリンゴ湖の西側では浅部 (標高 500~0m) に広く低比抵抗層が分布しており、帽岩となる難透水性の変質帯が広範囲に発達していることを示す可能性が高い。



(標高 500m)

(標高 0m)

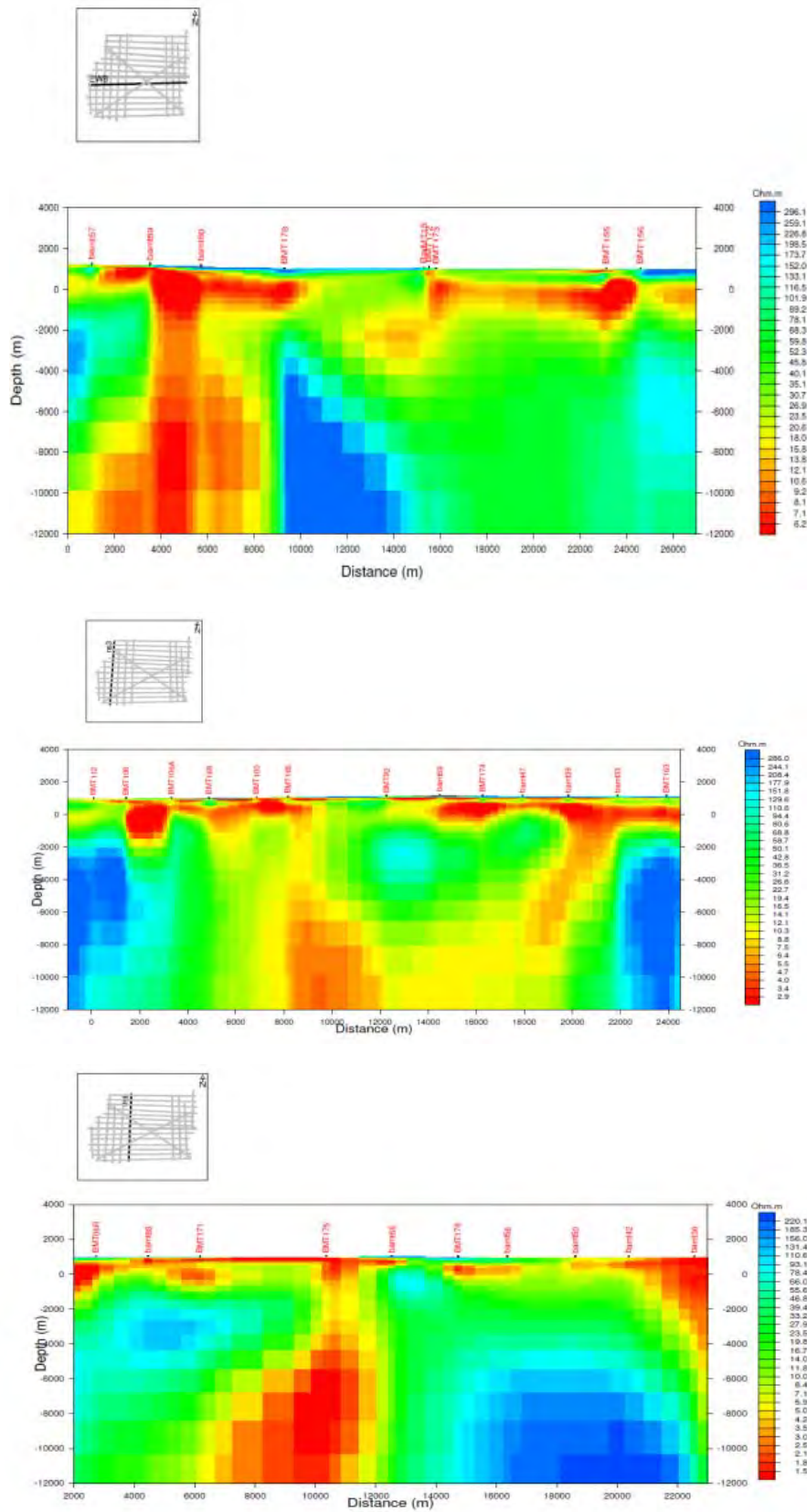


(標高-500m)

(標高-2,000m)

出典：GDC (2011)

図 II -5-15 バリンゴ地点での MT/TEM 探査結果 (平面図)

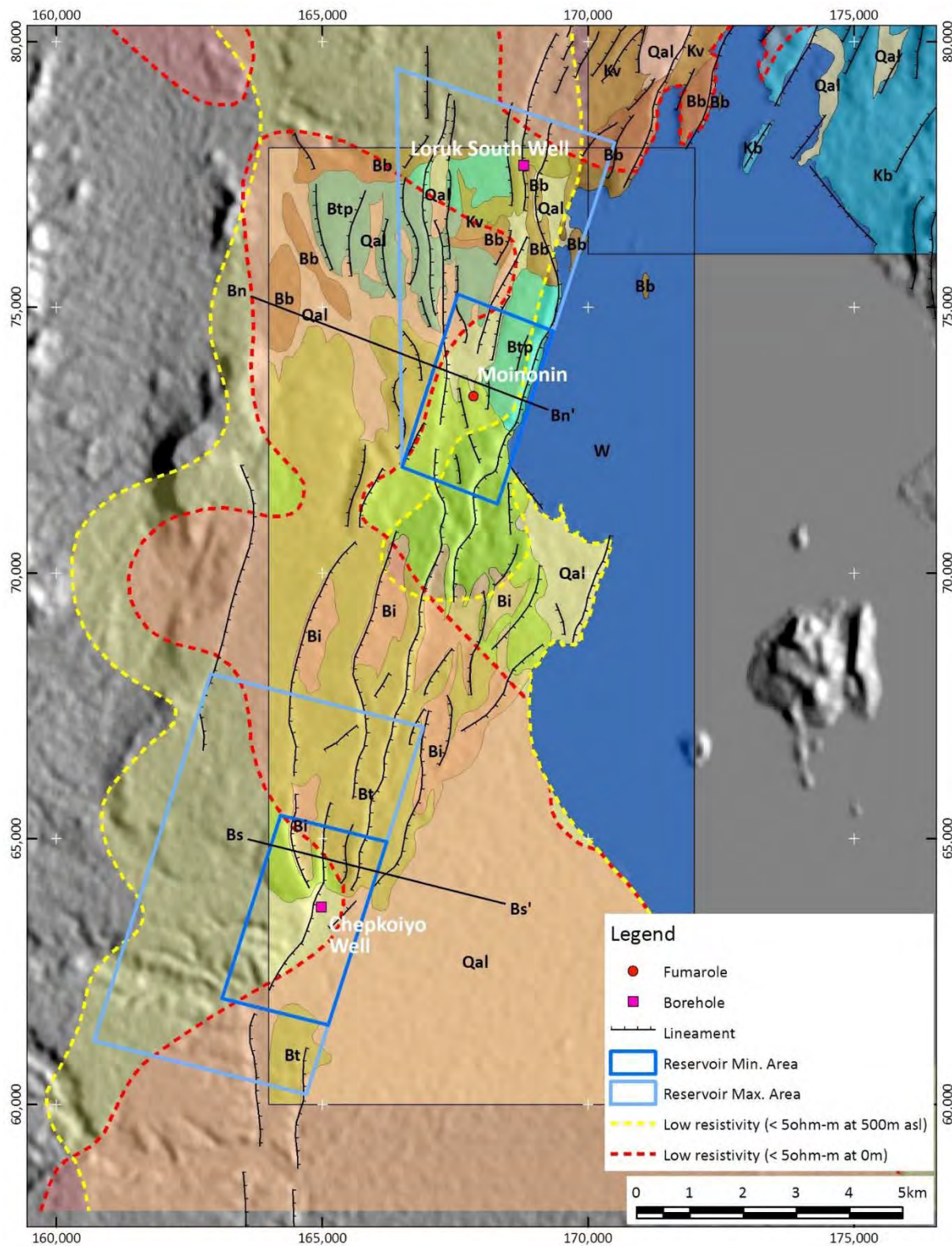


出典：GDC(2011)

図 II -5-16 バリンゴ地点での MT/TEM 探査結果 (断面図)

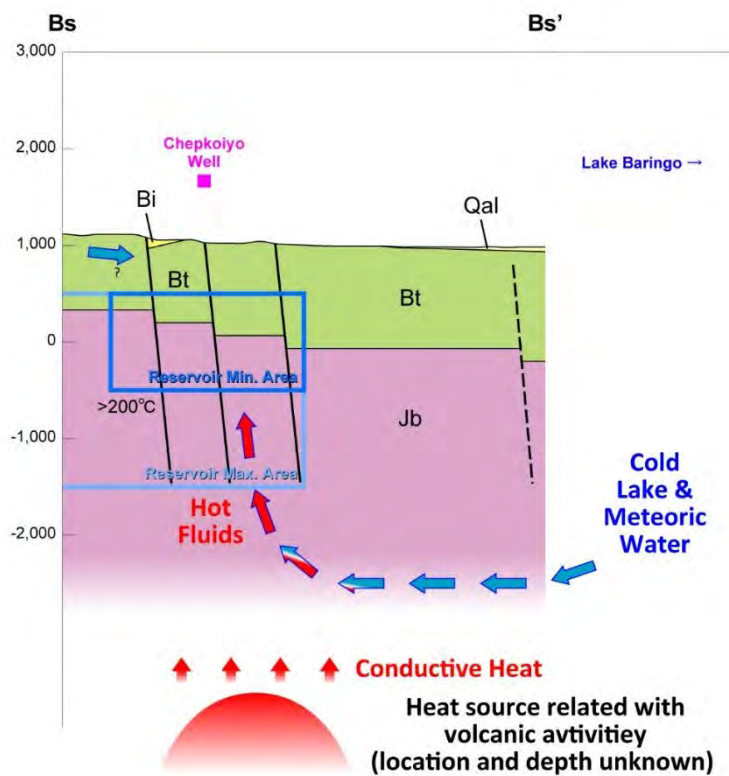
バリngo地点に関する地表調査結果の集約図を図 II -5-17 に示す。また、バリngo地点南部及び北部について本調査により再構築した地熱系概念モデルを図 II -5-18 及び図 II -5-19 に示す。

バリngo地点の地熱系概念モデル（バリngo湖西側の南部及び北部）	
熱源	断層沿いに重力異常として検知される高密度の新期貫入岩体
地質構造	NNE-SSW 系の断層群が卓越
地熱流体の起源	主に天水であり、バリngo湖の湖水が寄与している可能性が高い。 ガス成分はマグマ起源のものを含む
地熱貯留層のタイプ	熱水卓越型、断層支配型
地熱貯留層分布	南部では Chepkoiyo well を中心に、北部では Moinonin の噴気帯付近を中心に、NNE-SSW 系の断層沿いに分布
推定貯留層温度	南部：200℃以上（熱水化学温度計による） 北部：220℃以上で 300℃前後に達する可能性あり（ガス化学温度計による）
流体流動	広域的には南から北の方向、流動経路は主に断層沿い
帽岩	浅部の熱水変質帯もしくは凝灰岩層・礫岩層が帽岩として存在している可能性がある（浅部低比抵抗層付近）
備考	地表物理探査は概査的なものしか実施されていないため、詳細な物理探査（特に MT/TEM 法探査）の実施によるモデルの検証が望まれる。



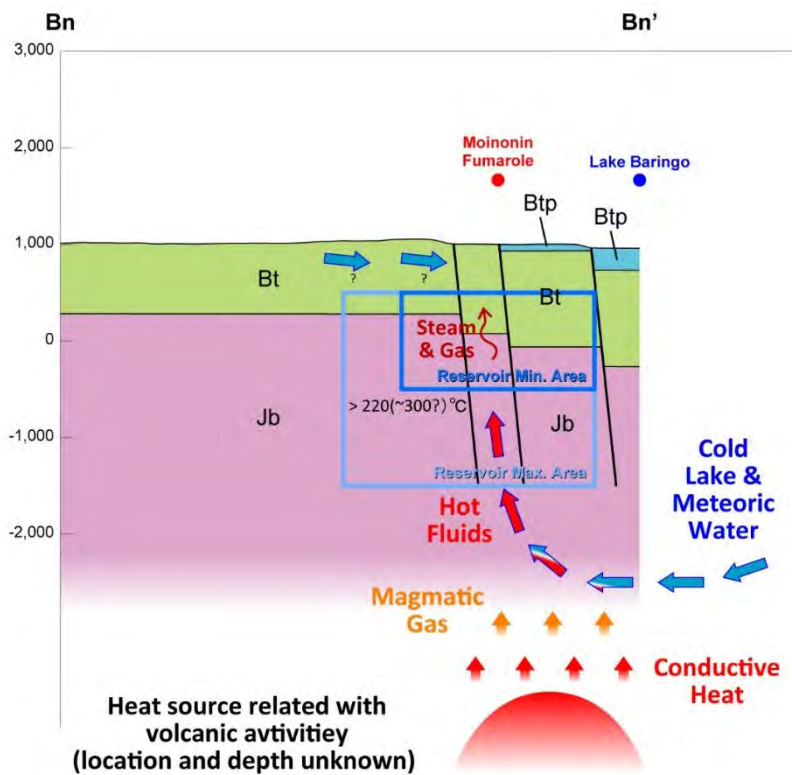
JICA 調査団作成

図 II -5-17 バリンゴ地点の地表調査結果集約図



JICA 調査団作成

図 II -5-18 バリンゴ地点南部の地熱系概念モデル

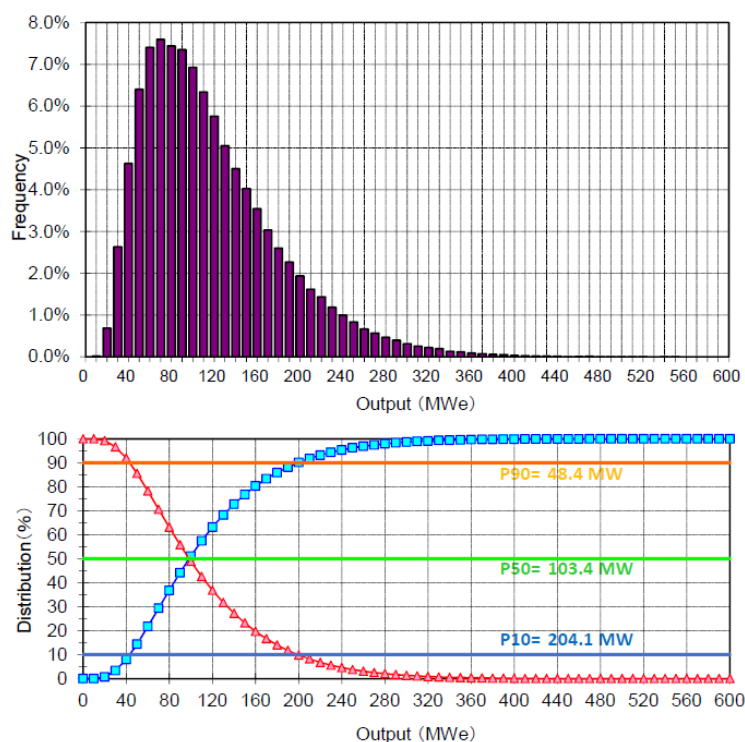


JICA 調査団作成

図 II -5-19 バリンゴ地点北部の地熱系概念モデル

(2) 資源量評価

モンテカルロ解析手法を適用した容積法における計算パラメータの設定値と資源量試算結果を図 II -5-20 及び図 II -5-21 に示す。貯留層の面積は、南部で 7.50~29.30km²、北部で 6.60~22.30km²、貯留層の厚さは南部・北部ともに 1,000~2,000m の範囲とした (図 II -5-17 ~図 II -5-19 参照)。貯留層温度については、地化学温度を参考とし、南部ではやや低めの 200~260°C、北部では 200~300°C と設定した。

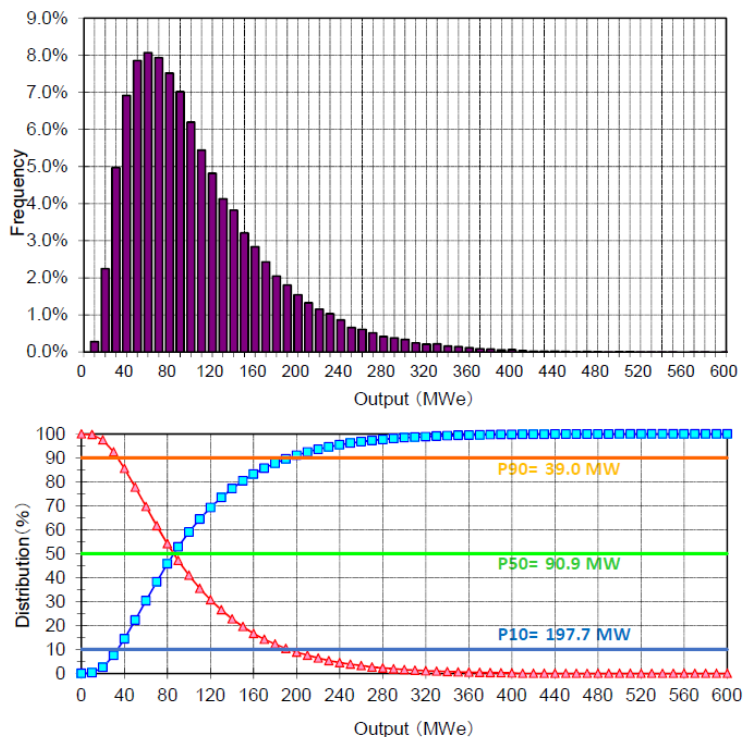


Input

Parameter	min.	most likely	max.
Reservoir Area (km ²)	7.50	-	29.30
Reservoir Thickness (m)	1000	-	2000
Rock Density (kg/m ³)	2400	2500	2600
Porosity (-)	0.05	0.10	0.15
Recovery factor (-)	0.125	0.250	0.375
Rock Specific Heat (kJ/kg°C)	0.80	0.90	1.00
Reservoir Average Temperature (°C)	200	-	260
Reservoir Average Pressure (MPa)	-	15.0	-
Heat-Electricity Conversion Factor (%)	4.4%	-	8.9%
Plant Life (year)	-	30	-
Load Factor (-)	-	0.90	-
Abandonment Temperature (°C)	-	140	-

JICA 調査団作成

図 II -5-20 バリング地点南部の容積法による資源量試算結果



Input

Parameter	min.	most likely	max.
Reservoir Area (km ²)	6.60	-	22.30
Reservoir Thickness (m)	1000	-	2000
Rock Density (kg/m ³)	2400	2500	2600
Porosity (-)	0.05	0.10	0.15
Recovery factor (-)	0.125	0.250	0.375
Rock Specific Heat (kJ/kg°C)	0.80	0.90	1.00
Reservoir Average Temperature (°C)	200	-	300
Reservoir Average Pressure (MPa)	-	15.0	-
Heat-Electricity Conversion Factor (%)	4.4%	-	11.1%
Plant Life (year)	-	30	-
Load Factor (-)	-	0.90	-
Abandonment Temperature (°C)	-	160	-

JICA 調査団作成

図 II -5-21 バリンゴ地点北部の容積法による資源量試算結果

資源密度法による試算では、貯留層面積は上記と同様に、南部で 7.50~29.30km²、北部で 6.60~22.30km² とした。資源密度は平均貯留層温度を南部 230°C、北部 250°C とし、各々 13.94MW/km² と 14.99MW/km² と想定した。資源量は南部で 105~408MW、北部で 99~334MW と算出される。

バリンゴ地点に関する資源量試算結果の一覧を表 II -5-4 に示す。試算結果を総合的に評価すれば、現時点で発電開発計画が可能と考えられる資源の規模は、南部・北部の各々で、容積法での P50 値及び資源密度法での最小値に近い 100MW（発電端）程度とみなされる。ただし、本調査での資源量評価は、バリンゴ地点での詳細物理解探及び調査井掘削がまだ実施されていない段階のものであることから、評価結果には多分に不確定要素が含まれている。現時点での発電開発計画としては、資源的リスクを加味して、発電出力を各 50MW に分けた 2 段階での計画立案を推奨する。

表 II -5-4 バリンゴ地点の資源量試算結果と発電計画案

地点名		GDC (2013.4)			JICA調査 (2016)				提案される発電開発計画		
		資源量	発電計画		資源量						
		現状の推定値 (MW)	早期小規模発電	大規模発電出力 (MW)	資源密度法 (MW)	容積法 (P90) (MW)	容積法 (P50) (MW)	容積法 (P10) (MW)	初期段階 (MW-gross)	拡張段階 (MW-gross)	合計出力 (MW-gross)
バリンゴ	南部	200	実施予定	2 X 100?	105 - 408	48.4	103.4	204.1	50	50	100
	北部				99 - 334	39.0	90.9	197.7	-	2 x 50	100
	合計				204 - 742	87.4	194.3	401.8	50	150 (3 X 50)	200

生産井 1 本当たりの発電出力については、生産井が逢着する貯留層の平均的な特性として、やや浅い深度（深度 1,500m程度）と約 240℃（南部）及び約 260℃（北部）の温度を想定した。その場合、表 II -5-2 に示した分類では、南部は「P2-T3」クラスとなり、生産井 1 本当たり約 6MW の発電出力が期待される（シングルフラッシュ方式）。また、北部は「P2-T4」クラスとなり、生産井 1 本当たり約 10MW の発電出力が期待される（シングルフラッシュ方式）。生産井 1 本当たりに発生する還元すべき熱水の流量は、南部で約 220t/h、北部で約 260t/h が想定される。

II -5.4 コロシ

(1) 地熱系概念モデル

コロシ地点ではこれまでに、GDC によって初期の地熱系概念モデルが示されている。本調査では、既存地熱系概念モデル及び本調査により実施された地質、地化学及び物理探査結果に基づき、地熱系概念モデルを再構築した。図 II-5-22 及び図 II-5-23 にコロシ、チェプチャク及びパカ 3 地点の地質断面位置及び地熱系概念モデルに基づく地熱貯留層範囲をそれぞれ示す。また、図 II-5-24、図 II-5-25 及び図 II-5-26 にコロシ地点の地表調査結果集約図、地質断面図及び地熱系概念モデル図をそれぞれ示す。さらに、図 II-5-27 及び図 II-5-28 にコロシ地点の地熱貯留層範囲と物理探査結果集約図を示す。

コロシ地点は、第四紀以降に形成されたコロシ火山に位置する。火山山頂付近の火口より北西方向もしくは西方に流下している溶岩流が、最も新しい火山活動（数百年前）と判断される。コロシ地点は、東アフリカリフトシステム（East African Rift System: EARS）のリフティングに関連する正断層群の存在で特徴づけられる。地表地熱徴候は火山山頂火口の西部及び北部に分布し、それらは主に断層に沿って分布する（図 II-5-24）。

コロシ地点の地熱系の熱源は、コロシ火山の火山活動に関連するマグマ溜まりやそれから派生する浅部の貫入岩体と考えられる。本地点の地熱流体は、周辺域で地下に浸透した天水を主要な起源としている。地下に浸透した天水はコロシ火山の火山活動に関連する深部マグマもしくは地下浅部の貫入岩からの伝導熱やマグマ起源ガスの流入により加熱・上昇し、中新世以降の火山岩体内に貯留されていると考えられる。コロシ火山山頂火口付近からその南方及び南東方、比抵抗不連続線 R1 と比抵抗不連続線 R3 に挟まれる地域に認められる相対的な高比抵抗域

に地熱系の熱源が推定され、この区域が地熱流体の主な上昇域と考えられる(図 II-5-26(a))。地熱流体は主に、重力リニアメント G3、比抵抗不連続線 R1 や地形リニアメントから存在が推定される南北方向の正断層群に貯留されていると推定される。比較的深部には熱水卓越型の貯留層の存在が推定され、また、その上部には二相流体の貯留層が比較的厚く発達していると推定される。それらの温度は 260~300°C程度と推定される。浅部では蒸気相が卓越しており、その蒸気・ガスの一部が地表にまで達し噴気帯を形成している。深部の熱水は北方へ流動していることが推定され、その熱水の一部が、標高が比較的低い Nyaunyau や Norwase の水井戸の帯水層に混入していると考えられる。

本調査では、構築された地熱系概念モデルに基づき、地熱貯留層の存在確認や地熱流体の特性把握を目的とした調査井の掘削ターゲットとして、高温の地熱流体が賦存する可能性の最も高いゾーンを検討した。

コロシ地点では、コロシ火山内に発達する概ね南北方向の正断層群は地熱流体の主な上昇通路と考えられ、これらの断層系に沿って高温の地熱流体及び高透水性の存在が期待される。これら、重力リニアメント G3、比抵抗不連続線 R1 や地形リニアメントから存在が推定される南北方向の正断層群が、地熱貯留層の存在確認や地熱流体の特性把握を目的とした調査井の掘削ターゲットゾーンとして最も有望と考えられる。図 II-5-29 に調査井掘削ターゲットゾーンを示す。これら掘削ターゲットゾーンは、図 II-5-29 に示すとおり、本地点に造成されている既設掘削基地(東側に位置する基地)から傾斜井掘削により掘削可能な位置にある。

既設掘削基地 KW1、KW2 及び KW3 からの調査井掘削方位の候補を図 II-5-29 に示す。また図 II-5-29 には、各既設掘削基地から傾斜井掘削により掘削可能な範囲(到達可能な偏距を 850m と想定)及び調査井掘削ターゲットゾーン内の掘削ターゲット位置の候補を併せて示す。なお、掘削ターゲット位置については、坑井の干渉を小さくすることを考慮し、各ターゲットの離隔距離を 300m とした。KW2 基地は調査井掘削ターゲットゾーン内に位置するため、調査井は垂直井を想定した。KW3 基地からは調査井掘削ターゲットゾーンへの掘削は困難であるものの、KW3 基地の西側及び東側に存在が推定される南北走向の推定断層が調査井の掘削ターゲットの候補として挙げられる。この掘削は地熱貯留層の広がりを確認することが目的となる。発電所建設段階で掘削される坑井には、坑井間の干渉を小さくするために坑井間の適切な離隔距離が必要となる。図 II-5-29 には坑井間の離隔距離を 300m とし、掘削ターゲットを配置した。

下表に地熱系概念モデルの各要素をまとめる。

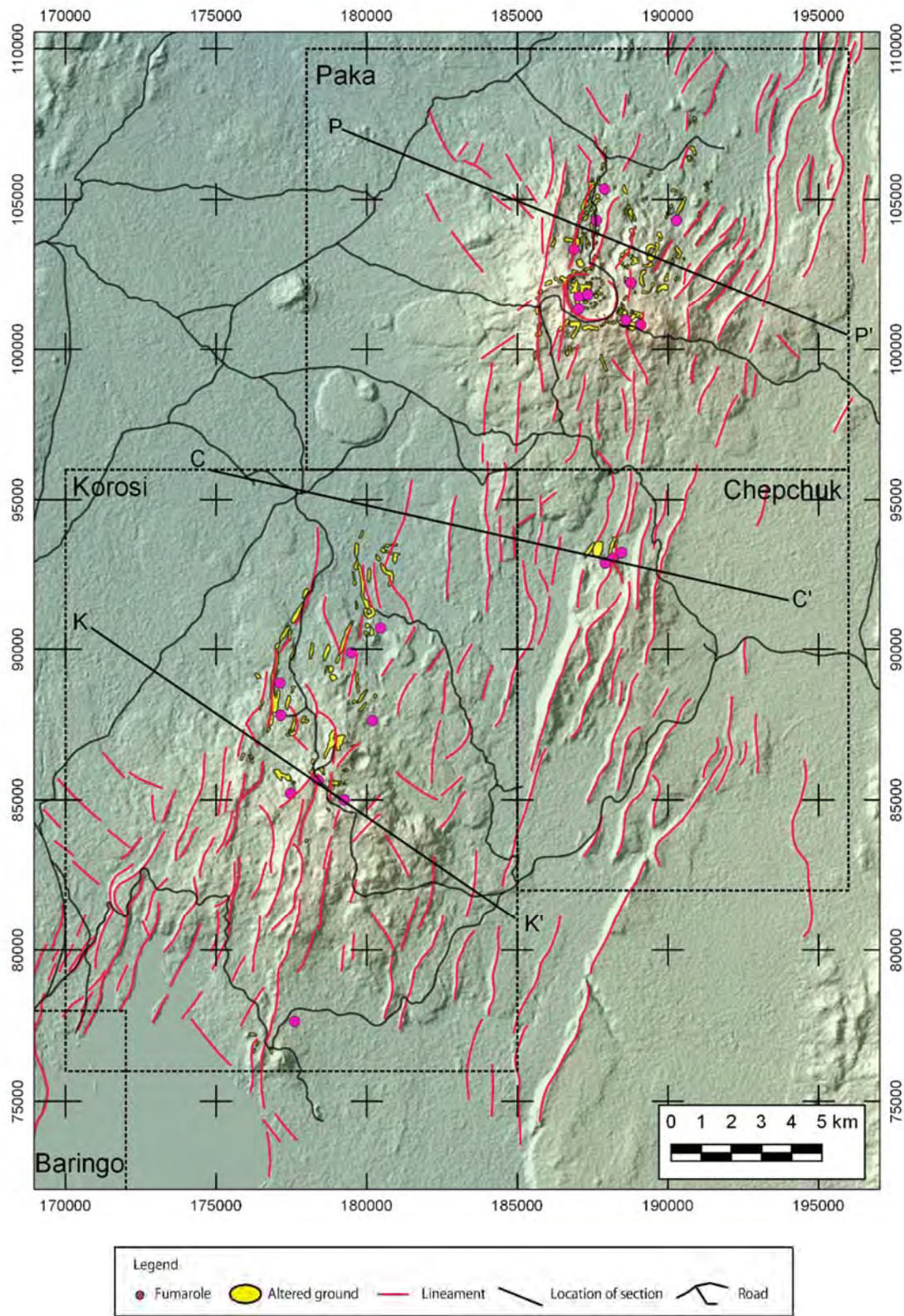
コロシ地点の地熱系概念モデル	
熱源	コロシ火山の火山活動に関連するマグマ溜まりやそれから派生する浅部の貫入岩体が本地点の地熱系の熱源と考えられる。概略比抵抗不連続線 R1 と比抵抗不連続線 R3 に挟まれる地域において相対的な高比抵抗域が深部に認められ、この相対的な高比抵抗域は、地下浅部に貫入した高温の貫入岩体の存在を示している可能性がある。
地質構造	南北系の断層群(正断層)が卓越し、これらが地熱流体の流動を規制する主要な地質構造と考えられる。

地熱流体の起源	主に天水であるが、ガス成分はマグマ起源のものを含む
地熱貯留層のタイプ	深部に熱水卓越型及びその上部に比較的厚い二相流体の地熱貯留層、断層支配型
地熱貯留層分布	コロシ火山を中心とする範囲
推定貯留層温度	260～300℃程度（ガス化学温度計による）
流体流動	広域的には南から北の方向、流動経路は主に断層沿い
帽岩	比抵抗不連続線 R1 の中央部周辺域から若干西側にかけての地域では多数の地熱徴候が存在し、かつ比較的浅部に低比抵抗域が認められることから、この区域には地熱貯留層の帽岩となりうる粘土化変質帯が部分的に発達している可能性がある。
調査井掘削ターゲット	重力リニアメント G3、比抵抗不連続線 R1 や地形リニアメントから存在が推定される南北方向の正断層群

モンテカルロ解析手法を適用した容積法により本地点の現在の可採地熱資源量を計算するため、今回構築された地熱系概念モデルから想定される地熱貯留層範囲を求めた（図 II-5-17～図 II-5-19）。地熱貯留層の面積は、本地点の地熱流体を規制すると考えられる高透水性ゾーンの分布、地表地熱徴候の広がりなど、現在までに得られているデータから推定される地熱系の広がりを推定した。表 II-5-5 にコロシ地点の地熱貯留層範囲を示す。地熱貯留層の分布深度は、掘削可能深度等も考慮して最小値を 1,000m、最大値を 2,000m とした。

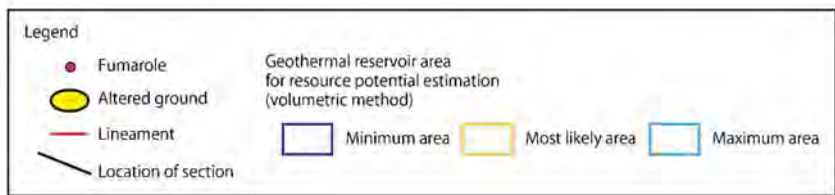
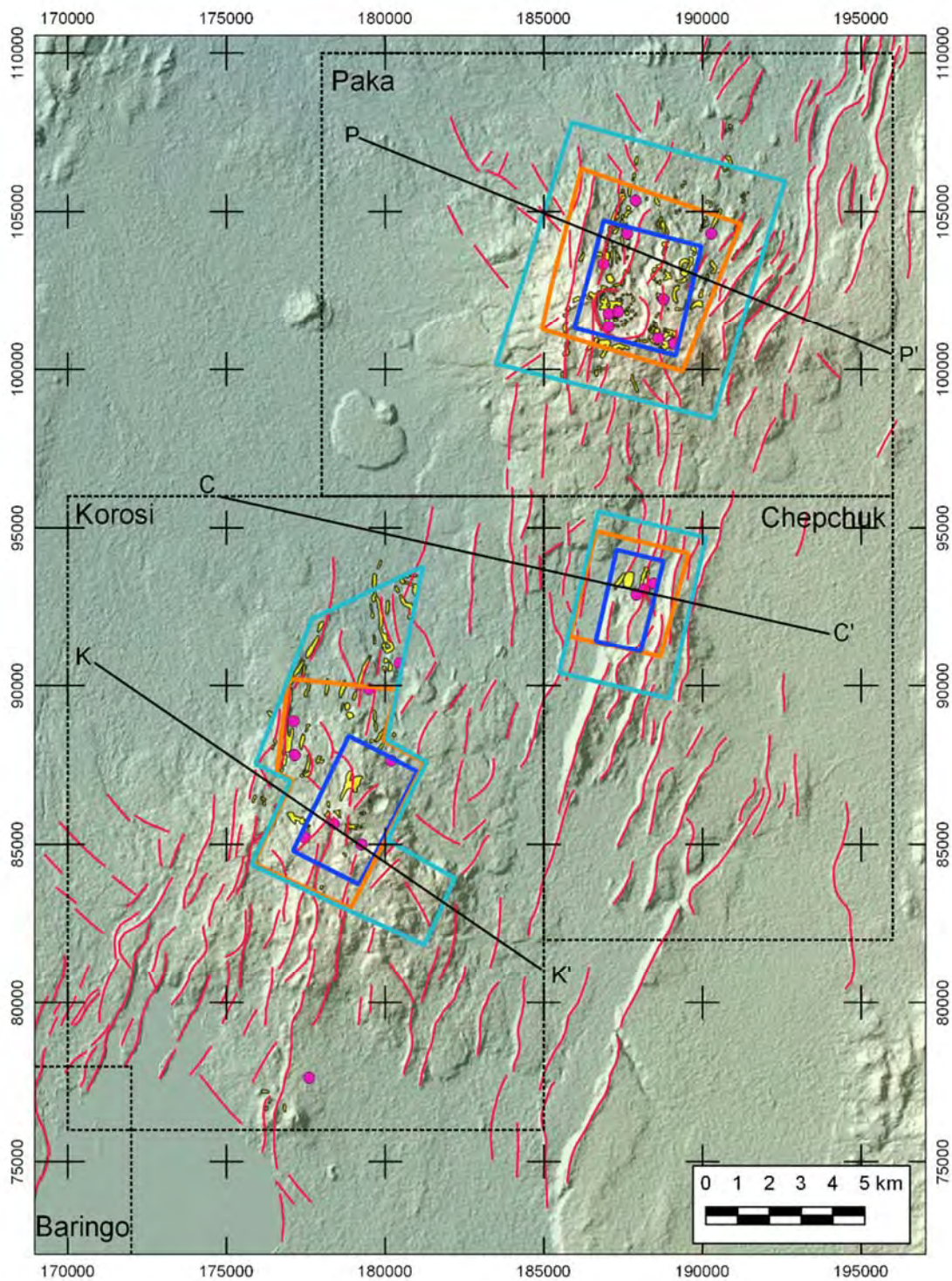
表 II-5-5 コロシ地点の地熱貯留層範囲

最小値	<ul style="list-style-type: none"> ● コロシ火山中心部に存在する噴気帯及び熱水変質帯を含む。 ● 地熱流体の流動を規制する重力リニアメント G3、比抵抗不連続線 R1 や地形リニアメントから存在が推定される南北方向の正断層群を含む。 ● コロシ火山近傍にある、熱水変質の可能性のある重力高異常域中に認められる相対的低異常域を含む（図 II-5-27）。 ● 深度 500m の相対的高比抵抗域を含む（図 II-5-28）。
最確値	最小値の範囲に加え、 <ul style="list-style-type: none"> ● コロシ火山の北方へ広がる噴気・熱水変質帯を含む（図 II-5-24）。
最大値	最確値の範囲に加え、 <ul style="list-style-type: none"> ● 比抵抗不連続線 R1 及び重力リニアメント G5 の間で、コロシ火山の北方へ広がる噴気・熱水変質帯を含む（図 II-5-24）。 ● コロシ火山山頂火口の南東方向にある深部高比抵抗域及び相対的低比抵抗域。東縁は比抵抗不連続線 R2（図 II-5-27 及び図 II-5-28）



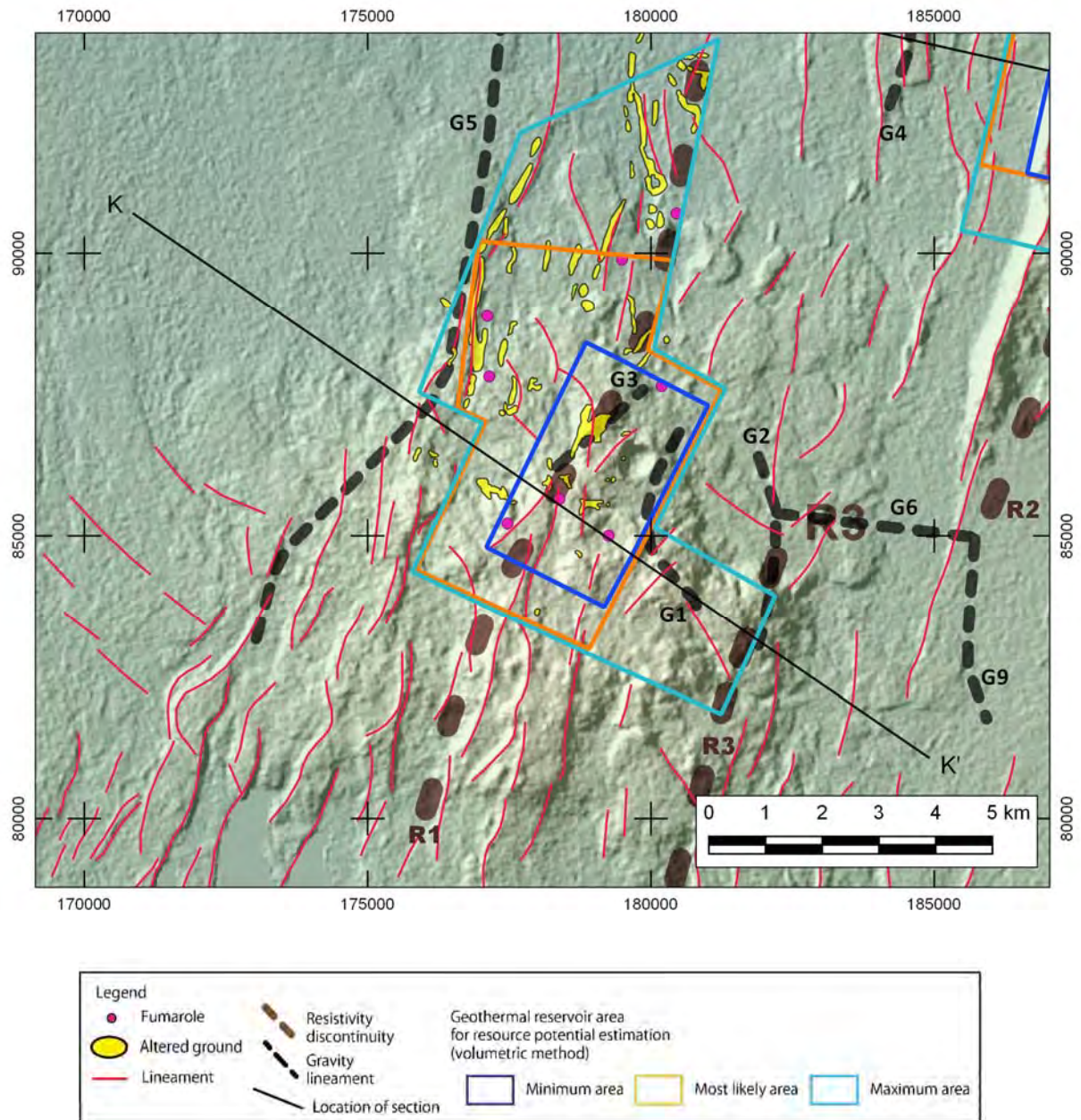
JICA 調査団作成

図 II-5-22 コロシ、チェプチャク及びパカ 3 地点の地質断面位置



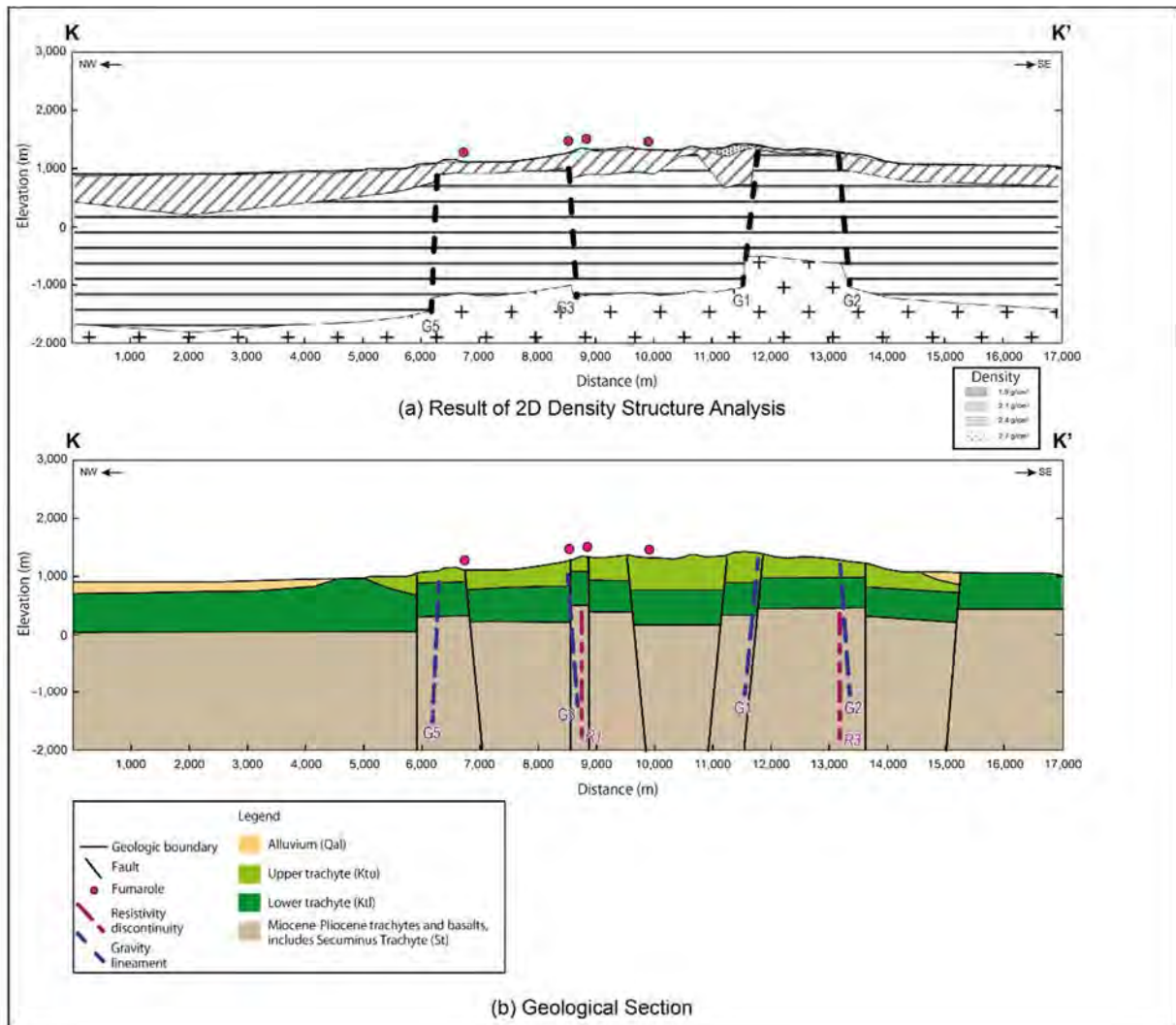
JICA 調査団作成

図 II-5-23 コロシ、チェプチャク及びパカ 3 地点の地熱貯留層範囲



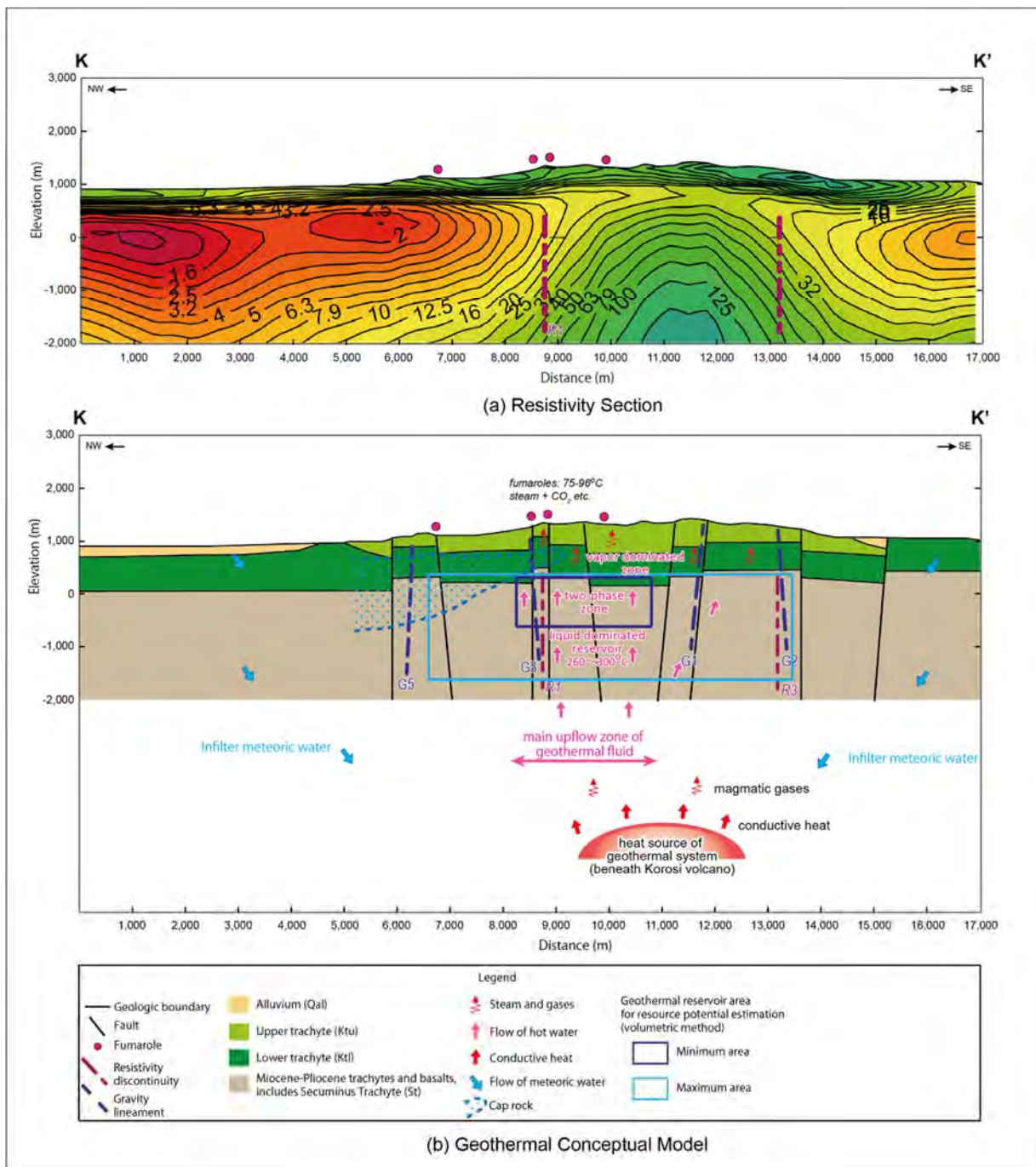
JICA 調査団作成

図 II-5-24 コロシ地点の地表調査結果集約図



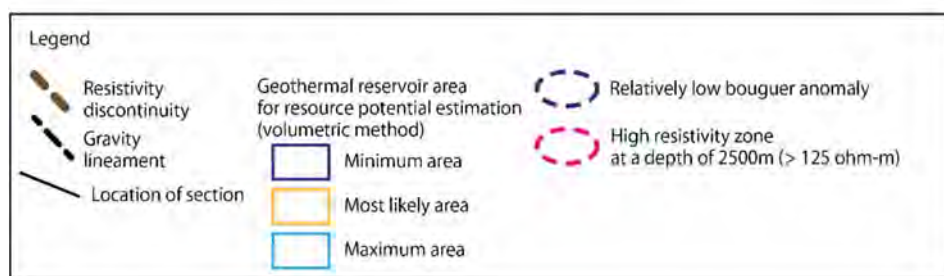
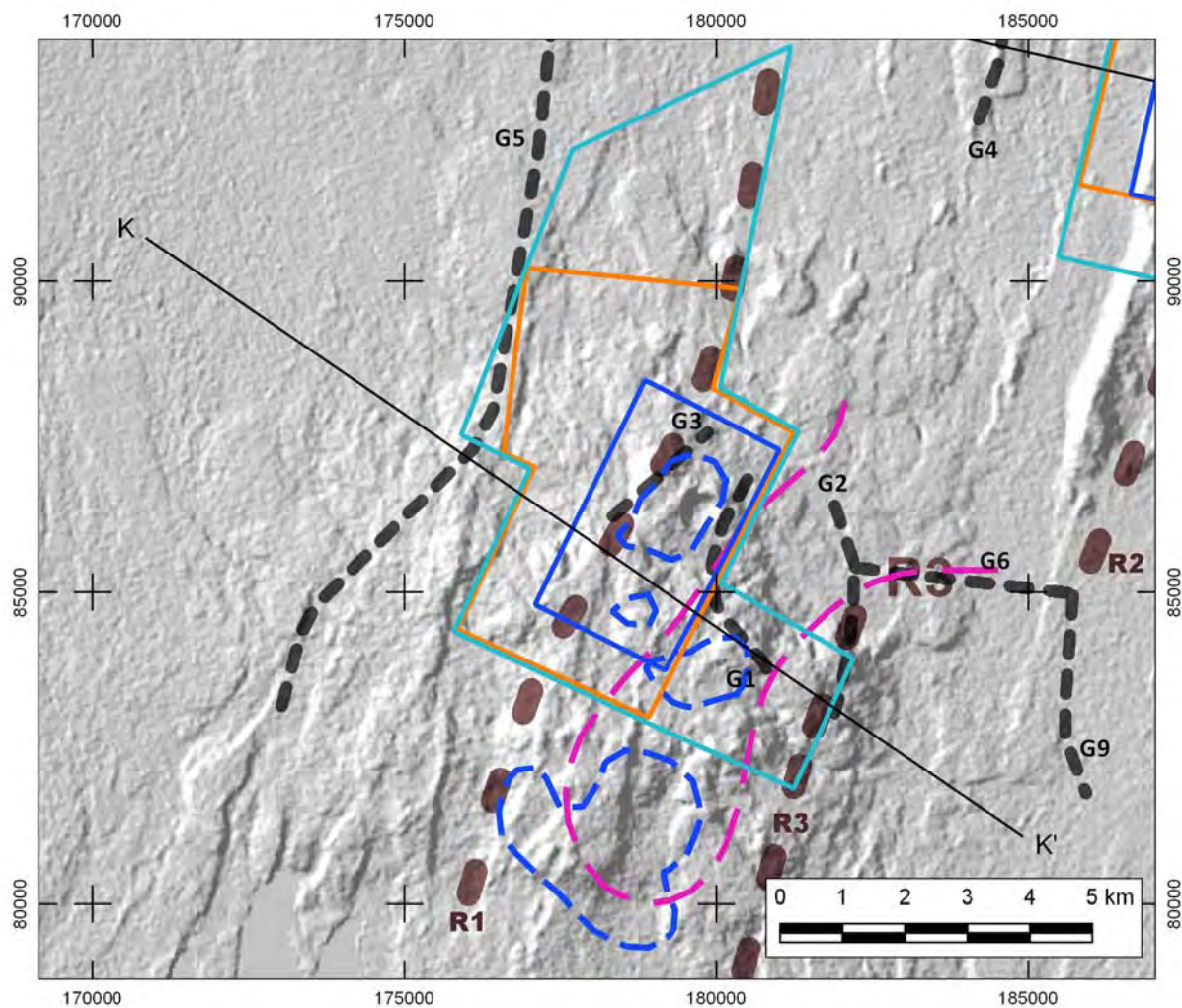
JICA 調査団作成

図 II-5-25 コロシ地点の地質断面図 (K-K' 断面)



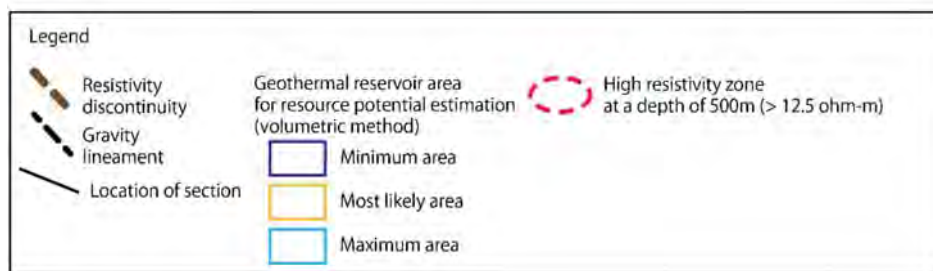
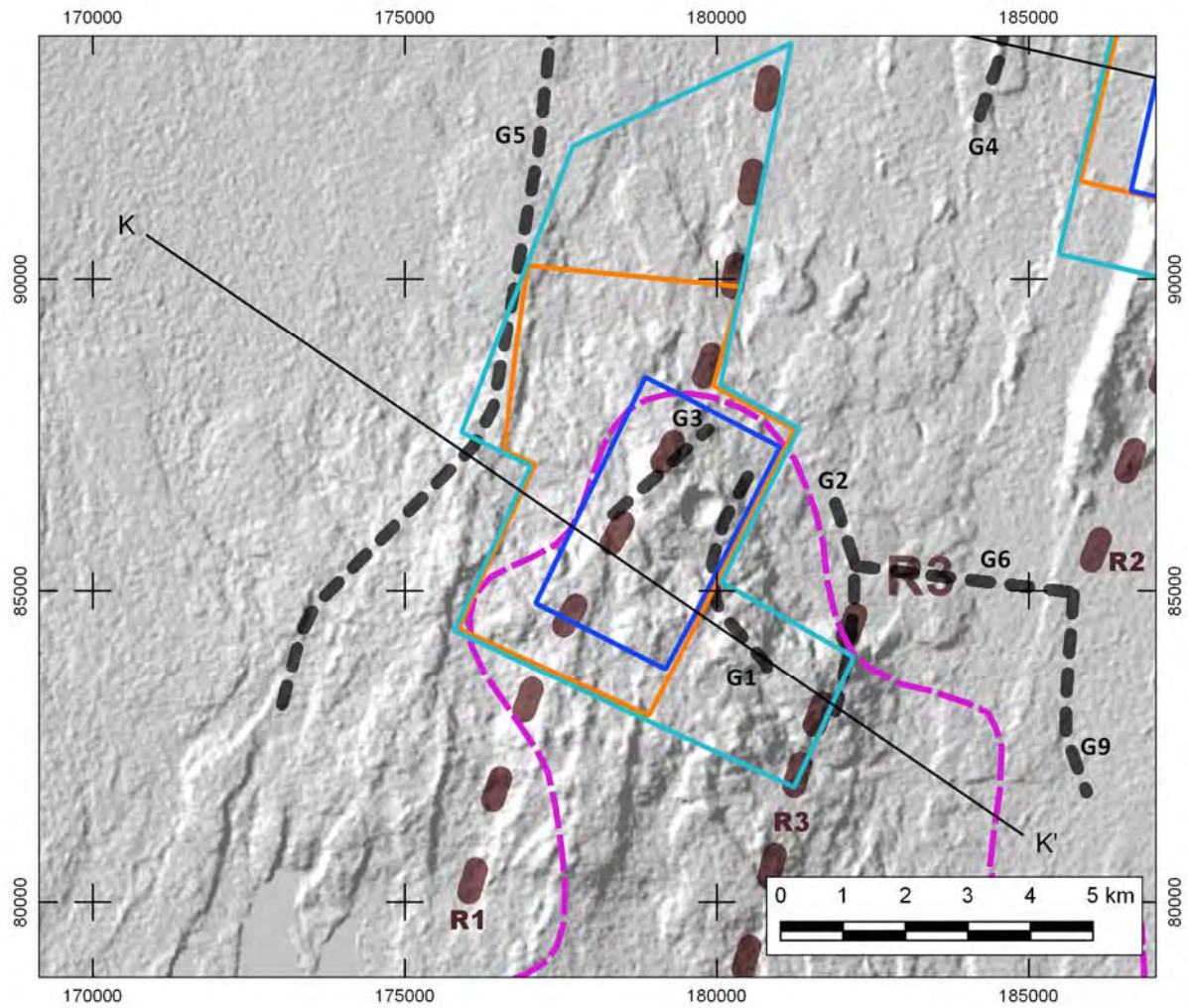
JICA 調査団作成

図 II-5-26 コロシ地点の地熱系概念モデル



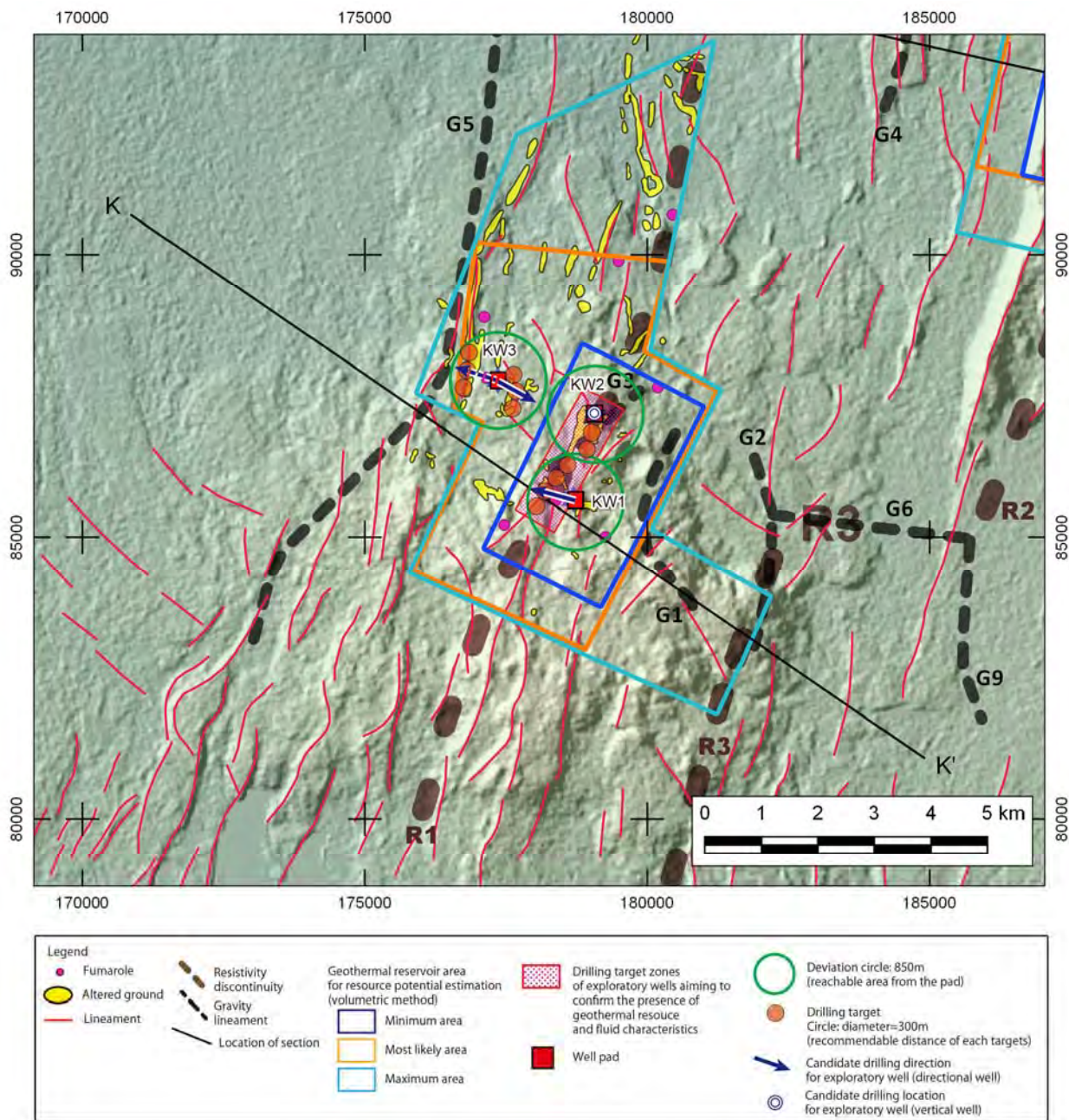
JICA 調査団作成

図 II-5-27 コロシ地点の地熱貯留層範囲と物理探査結果集約図 (1)



JICA 調査団作成

図 II-5-28 コロシ地点の地熱貯留層範囲と物理探査結果集約図 (2)

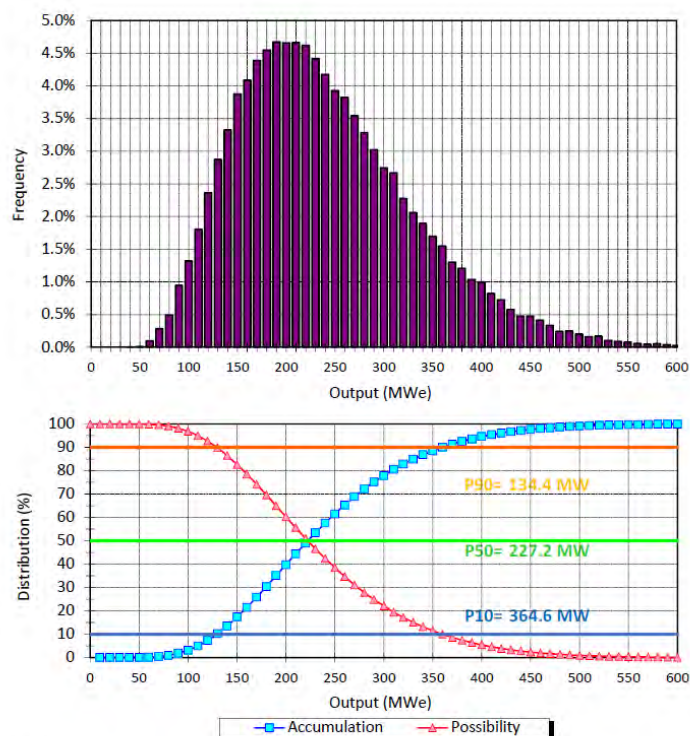


JICA 調査団作成

図 II-5-29 コロシ地点の調査井掘削ターゲットゾーン

(2) 資源量評価

モンテカルロ解析手法を適用した容積法における計算パラメータの設定値と資源量試算結果を図 II -5-20 に示す。貯留層の面積は 9.70~41.40km²、貯留層の厚さは 1,000~2,000m の範囲とした(図 II -5-17~図 II -5-19 参照)。貯留層温度については、地化学温度を参考とし、260~300°C と設定した。



Input

Parameter	min.	most likely	max.
Reservoir Area (km ²)	9.70	23.80	41.40
Reservoir Thickness (m)	1000	-	2000
Rock Density (kg/m ³)	2400	2500	2600
Porosity (-)	0.05	0.08	0.10
Recovery factor (-)	0.125	0.200	0.250
Rock Specific Heat (kJ/kg°C)	0.80	0.90	1.00
Reservoir Average Temperature (°C)	260	-	300
Reservoir Average Pressure (MPa)	-	15.0	-
Heat-Electricity Conversion Factor (-)	0.089	-	0.111
Plant Life (year)	-	30	-
Load Factor (-)	-	0.90	-
Abandonment Temperature (°C)	-	160	-

JICA 調査団作成

図 II -5-30 コロシ地点の容積法による資源量試算結果

資源密度法による試算では、貯留層面積は上記と同様に 9.70~41.40km²とした。資源密度は平均貯留層温度を 280°Cとして、16.58MW/km²と想定した。資源量は 161~686MW と算出される。

コロシ地点に関する資源量試算結果の一覧を表 II -5-3 に示す。試算結果を総合的に評価すれば、現時点で発電開発計画が可能と考えられる資源の規模は、容積法での P50 値に近い 210MW（発電端）程度とみなされる。現時点での発電開発計画としては、資源的リスクを加味して、初期段階として 70MW 1 基の開発の後に、拡張段階において 70MW 2 基を設置する、段階的開発の計画立案を推奨する。

表 II -5-6 コロシ地点の資源量試算結果と発電計画案

地点名	GDC (2013.4)			JICA調査 (2016)				提案される発電開発計画		
	資源量	発電計画		資源量				初期段階 (MW-gross)	拡張段階 (MW-gross)	合計出力 (MW-gross)
	現状の推定値 (MW)	早期 小規模発電	大規模 発電出力 (MW)	資源密度法 (MW)	容積法 (P90) (MW)	容積法 (P50) (MW)	容積法 (P10) (MW)			
コロシ	450	Yes (A few 5-10MW units)	3 X 150	161 - 686	134.4	227.2	364.6	70	2 x 70	210

生産井 1 本当たりの発電出力については、メネンガイやオルカリアドームスと同程度の能力として、生産井 1 本当たり約 9.5MW の発電出力が期待される（シングルフラッシュ方式）。また、その場合の 1 本当たりが発生する還元すべき熱水の流量は約 36t/h が想定される。

II -5.5 チェプチャク

(1) 地熱系概念モデル

チェプチャク地点ではこれまでに、GDC によって初期の地熱系概念モデルが示されている。本調査では、既存地熱系概念モデル及び本調査により実施された地質、地化学及び物理探査結果に基づき、地熱系概念モデルを再構築した。図 II-5-31、図 II-5-32 及び図 II-5-33 に地表調査結果集約図、地質断面図及び地熱系概念モデル図をそれぞれ示す。また、図 II-5-34 に地熱貯留層範囲と物理探査結果集約図を示す

チェプチャク地点は第四紀更新世の火砕岩 (Cv) が広く分布している。NNE-SSW 系の断層群が卓越しており、特に断層群のうち最も比高が大きく、本地点をほぼ縦断する連続性の良い断層に沿って、現世の玄武岩 (Cb) が噴出しており、岩体周辺に噴気帯が位置している (図 II-5-31)。

チェプチャク地点の地熱系の熱源は、チェプチャク地点に分布する第四紀火砕岩や現世の玄武岩を噴出させた火山活動に関連するマグマ溜まりやそれから派生する浅部の貫入岩体と考えられる。その位置の具体的な情報は得られていないが、高温の貫入岩を反映している可能性のある深部高比抵抗域が地表地熱徴候の西側に認められることから (図 II-5-33(a) 及び図 II-5-34)、この存在が推定される貫入岩が地熱系の熱源である可能性がある。

本地点の地熱流体は、周辺域で地下に浸透した天水を主要な起源としている。地下に浸透した天水は第四紀後期の火山活動に関連する深部マグマもしくは地下浅部の貫入岩からの伝導熱やマグマ起源ガスの流入により加熱・上昇し、中新世以降の火山岩体内に貯留されていると考えられる。地熱流体は主に、比抵抗不連続線 R2 及び地形リニアメントにより認識される NNE-SSW 系断層に沿って流動していると考えられる (図 II-5-33)。本断層に沿って現世の玄武岩が噴出し、地表地熱徴候も認められるこの区域が地熱活動の中心と考えられる。深部には熱水卓越型の貯留層の存在が推定され、その温度は 210~300°C 程度と推定される。浅部まで上昇した熱水は、圧力低下のために沸騰し、その蒸気・ガスの一部が地表にまで達し噴気帯を形成している。広域の流体流動は南部から北部に向かう、もしくは、標高の高い東側から西側ないし北側への流動が考えられる。

本調査では、構築された地熱系概念モデルに基づき、地熱貯留層の存在確認や地熱流体の特

性把握を目的とした調査井の掘削ターゲットとして、高温の地熱流体が賦存する可能性の最も高いゾーンを検討した。

チェプチャク地点の地表地熱徴候付近には、キャップロックの存在を示唆する浅部低比抵抗域が認められる。また、この低比抵抗域の直下にはより地下温度が高いと推定される相対的な高比抵抗域が分布している（図 II-5-33(a)及び図 II-5-34）。ここには、地形リニアメントや比抵抗不連続線 R2 で示される NNE-SSW 系の断層群が存在し、これら NNE-SSW 系の断層群が地熱流体の流動を規制していると考えられることから、これら比抵抗不連続線 R2 及び地形リニアメントにより認識され、地表地熱徴候を伴う NNE-SSW 系断層が、地熱貯留層の存在確認や地熱流体の特性把握を目的とした調査井の掘削ターゲットゾーンとして最も有望と考えられる。図 II-5-35 に調査井掘削ターゲットゾーンを示す。

下表に地熱系概念モデルの各要素をまとめる。

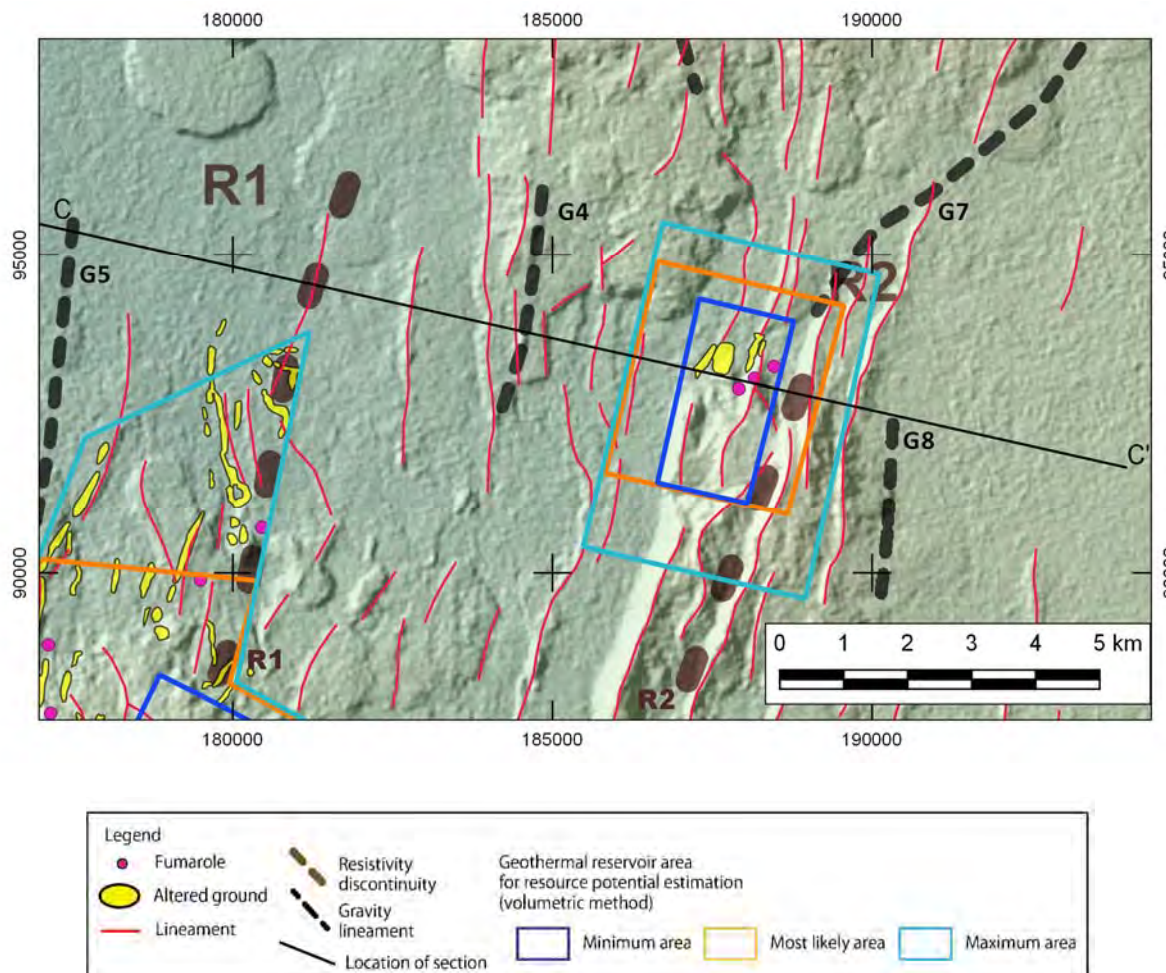
チェプチャク地点の地熱系概念モデル	
熱源	本地点においては第四紀更新世の火砕岩 (Cv) が広く分布するほか、NNE-SSW 系の断層群に沿って現世の玄武岩 (Cb) が噴出している。本地点の熱源はこれら第四紀の火山活動に関連した関連するマグマ溜まりやそれから派生する浅部の貫入岩体と考えられる。
地質構造	NNE-SSW 系の断層群が卓越し、特に断層群のうち最も比高が大きく、本地点をほぼ縦断する連続性の良い断層に沿って、現世の玄武岩 (Cb) が噴出しており、岩体周辺には噴気帯が位置している。これら NNE-SSW 系の断層群が地熱流体の流動を規制する主要な地質構造と考えられる。比抵抗不連続線 R2 はこの断層に沿うことから、この断層の深部構造を示していると判断される。
地熱流体の起源	主に天水であるが、ガス成分はマグマ起源のものを含む
地熱貯留層のタイプ	熱水卓越型、断層支配型
地熱貯留層分布	地表地熱徴候を伴う NNE-SSW 系の断層群に沿う範囲
推定貯留層温度	210~300°C程度 (260°C以上の可能性が高い)
流体流動	広域的には南から北の方向、もしくは、東から西及び北の方向と推定
帽岩	比抵抗不連続線 R2 北部の西側に位置する地表地熱徴候付近に、深度 100m から深度 300m において 10 ohm-m 以下を示す相対的な低比抵抗域が認められることから、これが地熱貯留層の帽岩となりうる粘土化変質帯である可能性がある。
調査井掘削ターゲット	比抵抗不連続線 R2 及び地形リニアメントにより認識され、地表地熱徴候を伴う NNE-SSW 系断層

モンテカルロ解析手法を適用した容積法により本地点の現在の可採地熱資源量を計算するため、今回構築された地熱系概念モデルから想定される地熱貯留層範囲を求めた（図 II -5-17

及び図 II -5-19)。地熱貯留層の面積は、本地点の地熱流体を規制すると考えられる高透水性ゾーンの分布、地表地熱徴候の広がりなど、現在までに得られているデータから推定される地熱系の広がりを推定した。表 II-5-7 にチェプチャク地点の地熱貯留層範囲を示す。地熱貯留層の分布深度は、掘削可能深度等も考慮して最小値を 1,000m、最大値を 2,000m とした。

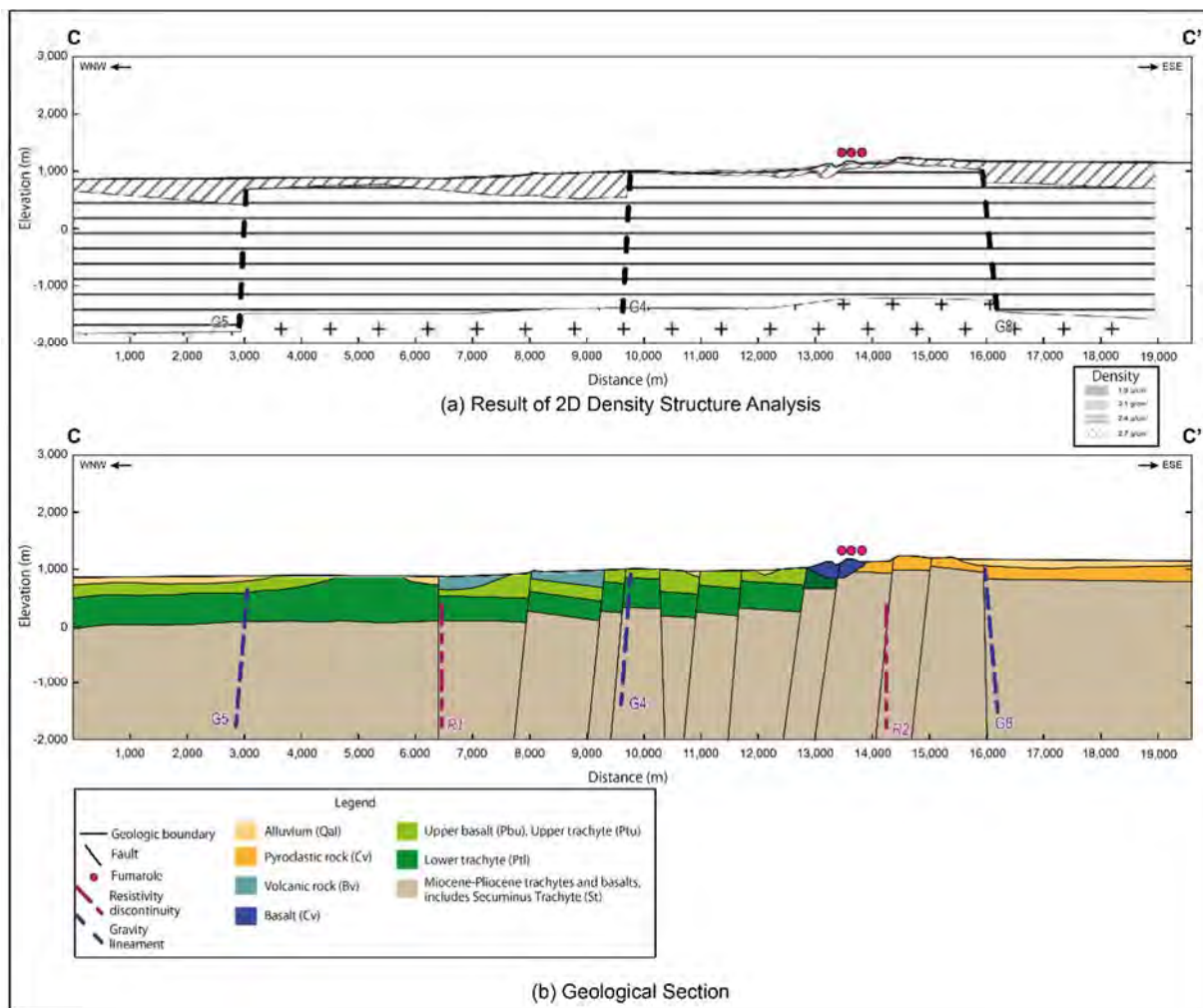
表 II-5-7 チェプチャク地点の地熱貯留層範囲

最小値	<ul style="list-style-type: none"> ● 地表地熱徴候を伴い、地形リニアメント及び比抵抗不連続線 R2 で示される本地点で最も比高の大きな NNE-SSW 系の断層群に沿う範囲
最確値	最小値の範囲に加え、 <ul style="list-style-type: none"> ● 地表地熱徴候近傍にある浅部低比抵抗域及び深部高比抵抗域及び比抵抗不連続線 R2 に東縁を限られる範囲 (図 II-5-34)
最大値	最確値の範囲に加え、 <ul style="list-style-type: none"> ● 本地点の地熱流体の流動を規制する NNE-SSW 系の南北方向への延びを考慮



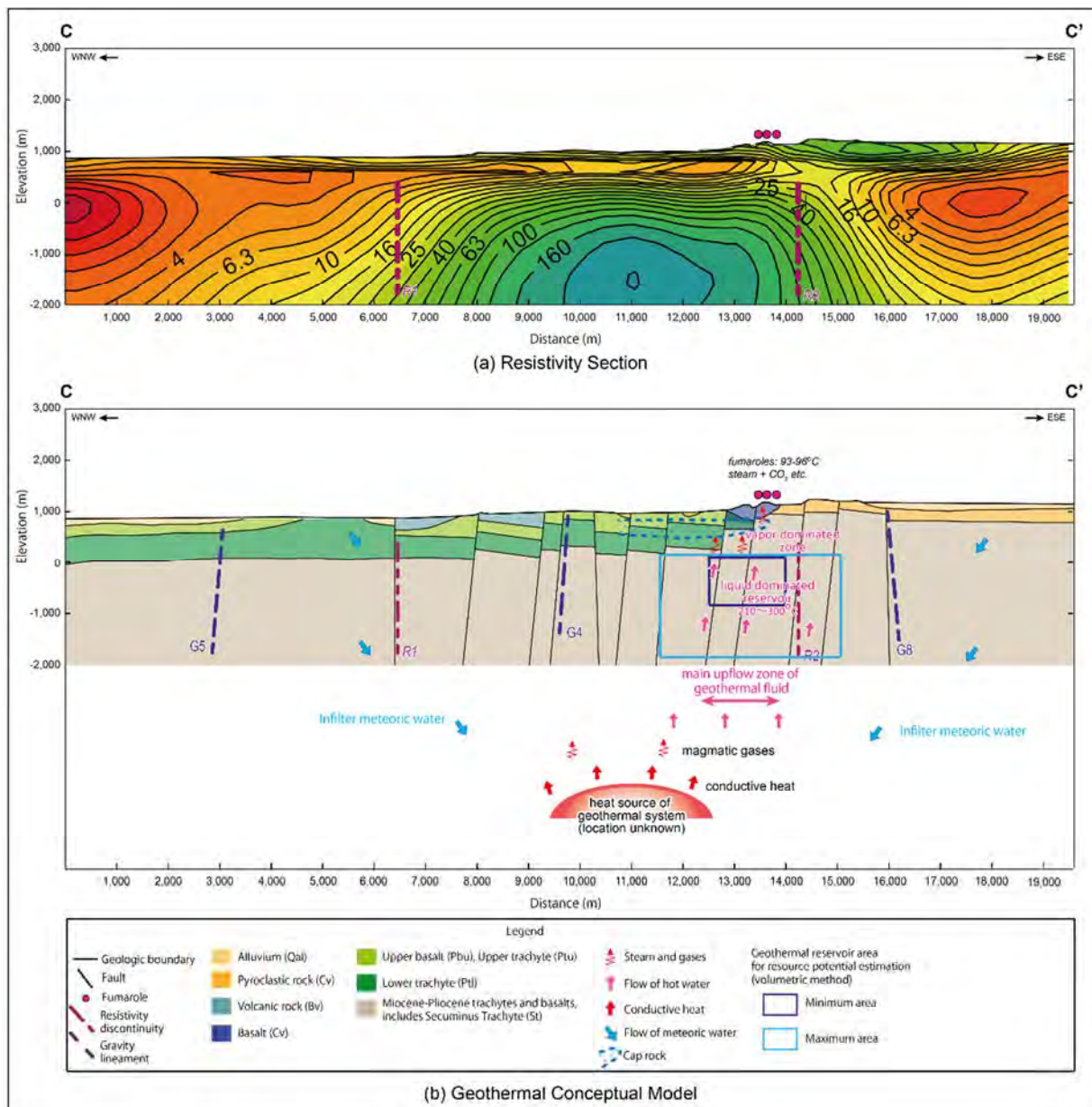
JICA 調査団作成

図 II-5-31 チェプチャク地点の地表調査結果集約図



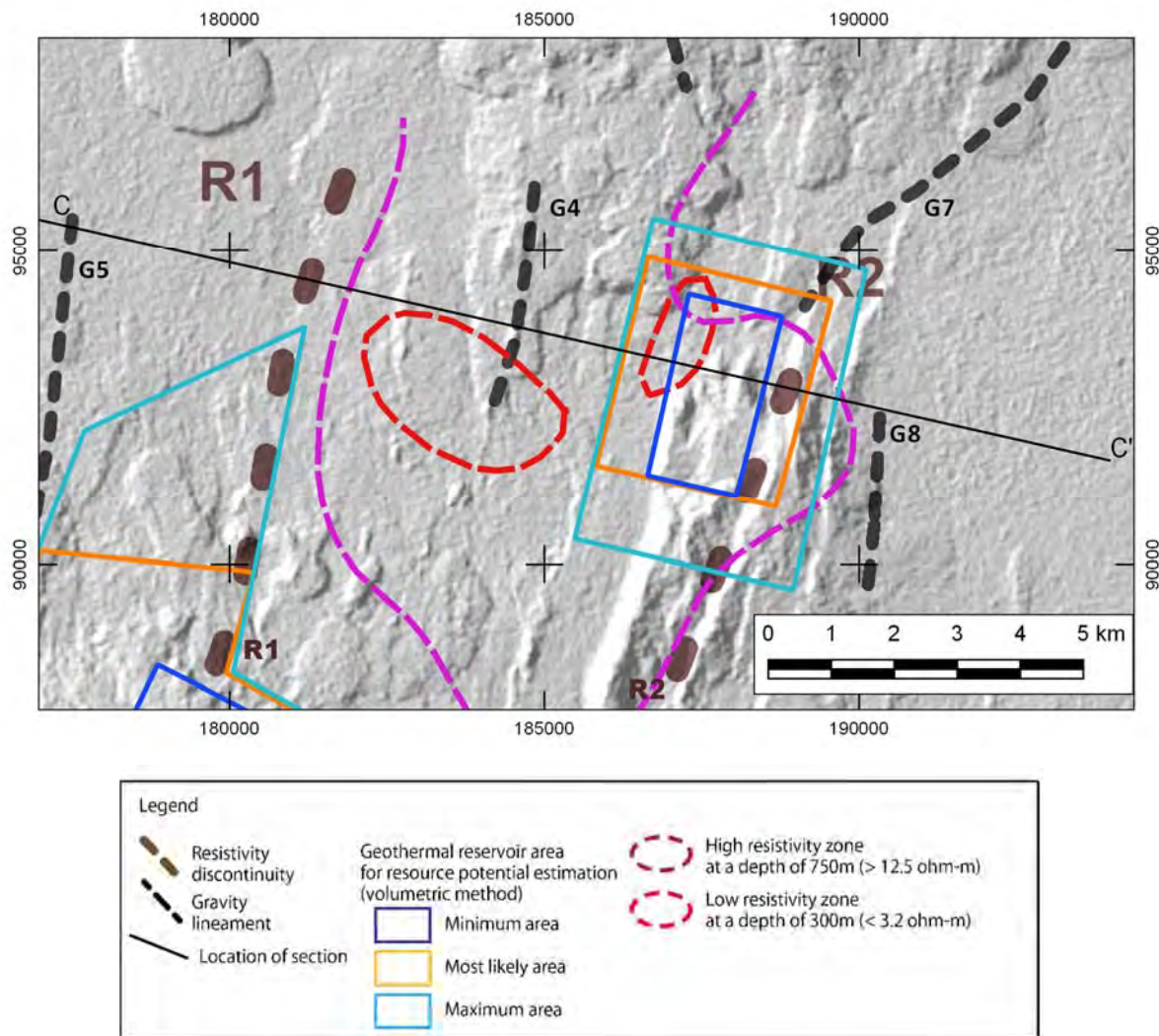
JICA 調査団作成

図 II-5-32 チェプチャク地点の地質断面図 (C-C' 断面)



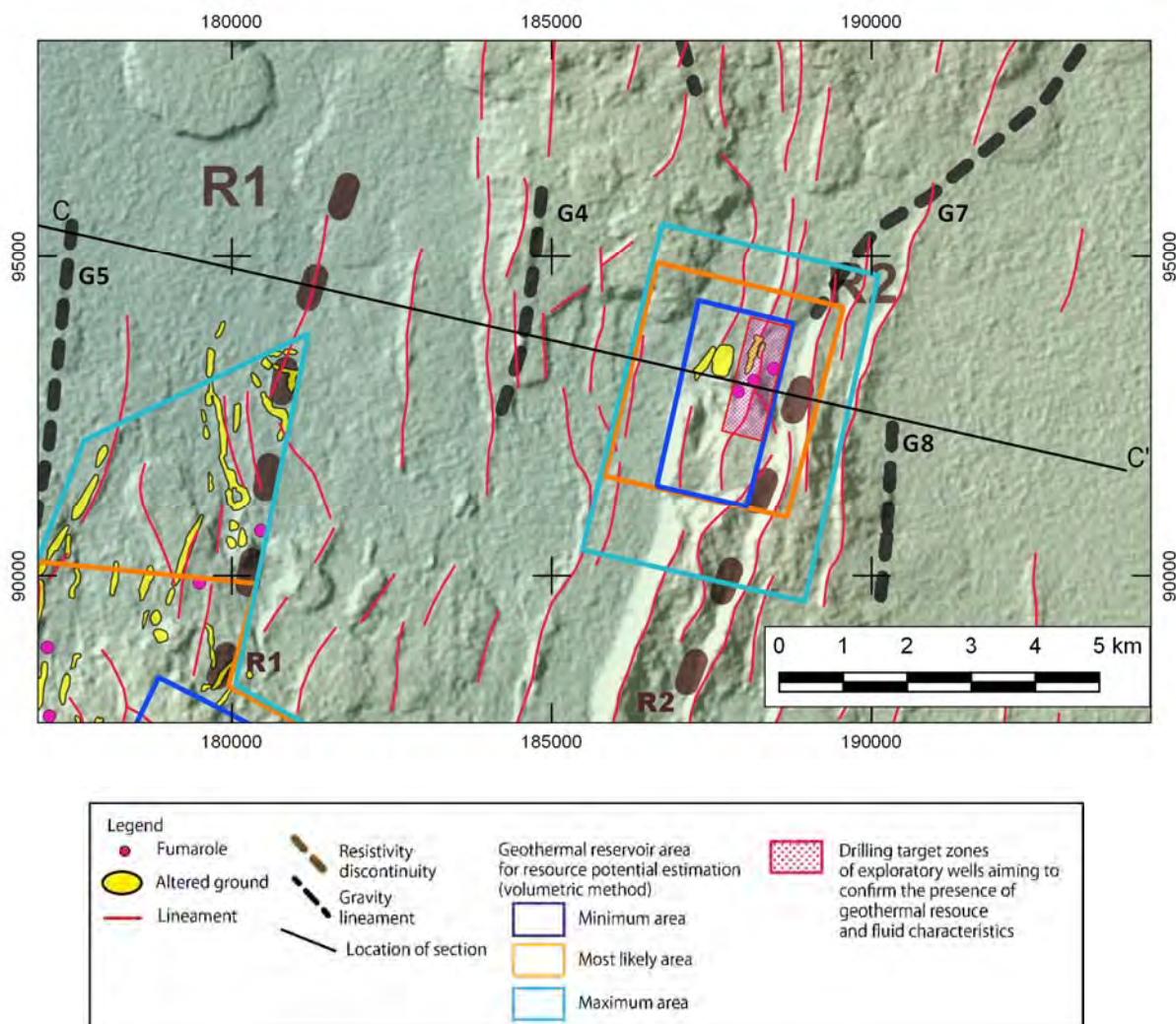
JICA 調査団作成

図 II-5-33 チェプチャク地点の地熱系概念モデル



JICA 調査団作成

図 II-5-34 チェプチャク地点の地熱貯留層範囲と物理探査結果集約図



JICA 調査団作成

図 II-5-35 チェプチャク地点の調査井掘削ターゲットゾーン

(2) 資源量評価

モンテカルロ解析手法を適用した容積法における計算パラメータの設定値と資源量試算結果を図 II -5-20 に示す。貯留層の面積は 4.40~18.50km²、貯留層の厚さは 1,000~2,000m の範囲とした (図 II -5-17~図 II -5-19 参照)。貯留層温度については、地化学温度を参考とし、210~300℃の範囲に加え、最確値として 260℃を設定した。

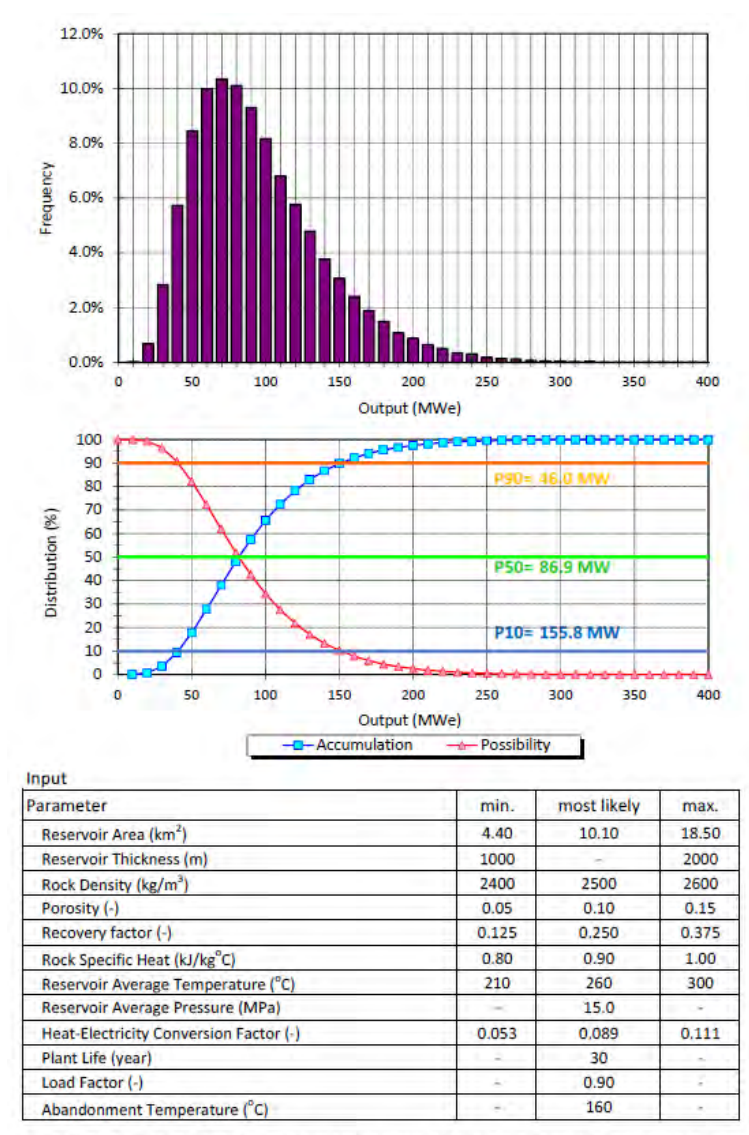


Fig. XX Probability Distribution of the Geothermal Potential for Chepchuk Geothermal Field

JICA 調査団作成

図 II -5-36 チェプチャク地点の容積法による資源量試算結果

資源密度法による試算では、貯留層面積は上記と同様に 4.40~18.50km²とした。資源密度は平均貯留層温度を 260°Cとして、15.52MW/km²と想定した。資源量は 68~287MW と算出される。

チェプチャク地点に関する資源量試算結果の一覧を表 II -5-3 に示す。試算結果を総合的に評価すれば、現時点で発電開発計画が可能と考えられる資源の規模は、容積法での P50 値に近い 80MW（発電端）程度とみなされる。現時点での発電開発計画としては、資源的リスクを加味して、発電出力を各 40MW に分けた 2 段階での計画立案を推奨する。

表 II -5-8 チェプチャク地点の資源量試算結果と発電計画案

地点名	GDC (2013.4)			JICA調査 (2016)				提案される発電開発計画		
	資源量	発電計画		資源量				初期段階 (MW-gross)	拡張段階 (MW-gross)	合計出力 (MW-gross)
	現状の推定値 (MW)	早期 小規模発電	大規模 発電出力 (MW)	資源密度法 (MW)	容積法 (P90) (MW)	容積法 (P50) (MW)	容積法 (P10) (MW)			
チェプチャク	100	Yes (A few 5-10MW units)	1 X 100	68 - 287	46.0	86.9	155.8	40	40	80

生産井 1 本当たりの発電出力については、チェプチャク地点の場合、生産井が逢着する貯留層の平均的な特性として、やや深い深度（深度 2,000m 程度）と 260°C 前後の温度を想定した。その場合、表 II -5-2 に示した分類では「P3-T4」クラスとなり、生産井 1 本当たり約 10MW の発電出力が期待される（シングルフラッシュ方式）。また、その場合の 1 本当たりに発生する還元すべき熱水の流量は約 260t/h が想定される。

II -5.6 パカ

(1) 地熱系概念モデル

パカ地点ではこれまでに、GDC によって初期の地熱系概念モデルが示されている。本調査では、既存地熱系概念モデル及び本調査により実施された地質、地化学及び物理探査結果に基づき、地熱系概念モデルを再構築した。図 II-5-37、図 II-5-38 及び図 II-5-39 に地表調査結果集約図、地質断面図及び地熱系概念モデル図をそれぞれ示す。また、図 II-5-40 及び図 II-5-41 に地熱貯留層範囲と物理探査結果集約図を示す。

パカ地点は、第四紀更新世以降に形成されたパカ火山に位置し、東アフリカリフトシステム（East African Rift System: EARS）のリフティングに関連する正断層群の存在で特徴づけられる。地表地熱徴候はパカ火山火口の内部やパカ火山北斜面及び東斜面の断層沿いもしくは火口丘付近に分布する（図 II-5-37）。

パカ地点の地熱系の熱源は、パカ火山の火山活動に関連するマグマ溜まりやそれから派生する浅部の貫入岩体と考えられる。本地点の地熱流体は、周辺域で地下に浸透した天水を主要な起源としている。地下に浸透した天水はパカ火山の火山活動に関連する深部マグマもしくは地下浅部の貫入岩からの伝導熱やマグマ起源ガスの流入により加熱・上昇し、蒸気が卓越する二相流体の状態で、中新世以降の火山岩体内に貯留されていると考えられる。パカ火山直下が地熱流体の主な上昇域と考えられ、重力リニアメント G10、比抵抗不連続線 R2 及び地形リニアメントから存在が推定される南北方向の正断層群が地熱流体の主な上昇通路と推定される（図 II-5-39）。特に、パカ火山を南北方向に縦断し、地表地熱活動の中心域の地下深部に認められる比抵抗不連続線 R2 は、地熱流体の流動を規制する主要な断層と考えられる。地下流体の温度は 300°C 前後もしくはそれ以上であると推定される。浅部まで上昇した蒸気・ガスの一部は、地表にまで達し噴気帯を形成している。深部の熱水は大カルデラ付近から北方に流動している可能性がある。

本調査では、構築された地熱系概念モデルに基づき、地熱貯留層の存在確認や地熱流体の特性把握を目的とした調査井の掘削ターゲットとして、高温の地熱流体が賦存する可能性の

とも高いゾーンを検討した。

パカ火山内に発達する概ね南北方向の正断層群は地熱流体の主な上昇通路と考えられ、これらの断層系に沿って高温の地熱流体及び高透水性の存在が最も期待される。パカ地点においては、南北方向の地形リニアメントから推定される正断層、比抵抗不連続線 R2 及び重力リニアメント G10 など、パカ火山体内に発達する南北方向の断層系が、地熱貯留層の存在確認や地熱流体の特性把握を目的とした調査井の掘削ターゲットゾーンとして最も有望と考えられる。

図 II-5-42 に調査井掘削ターゲットゾーンを示す。これら掘削ターゲットゾーンは、図 II-5-42 に示すとおり、本地点に造成されている既設掘削基地から傾斜井掘削により掘削可能な位置にある。

既設掘削基地 PW1、PW2 及び PW3 からの調査井掘削方位の候補を図 II-5-42 に示す。また図 II-5-42 には、各既設掘削基地から傾斜井掘削により掘削可能な範囲（到達可能な偏距を 850m と想定）及び調査井掘削ターゲットゾーン内の掘削ターゲット位置の候補を併せて示す。PW3 基地の西側に存在が推定される南北走向の推定断層は、調査井掘削ターゲットゾーンとはされていないものの、地熱貯留層の広がりを確認する目的としては、この南北走向の推定断層も調査井の掘削ターゲットの候補となりうる。発電所建設段階で掘削される坑井には、坑井間の干渉を小さくするために坑井間の適切な離隔距離が必要となる。図 II-5-42 には坑井間の離隔距離を 300m とし、掘削ターゲットを配置した。

概念モデルにおける地熱系の各要素は下表のようにまとめられる。

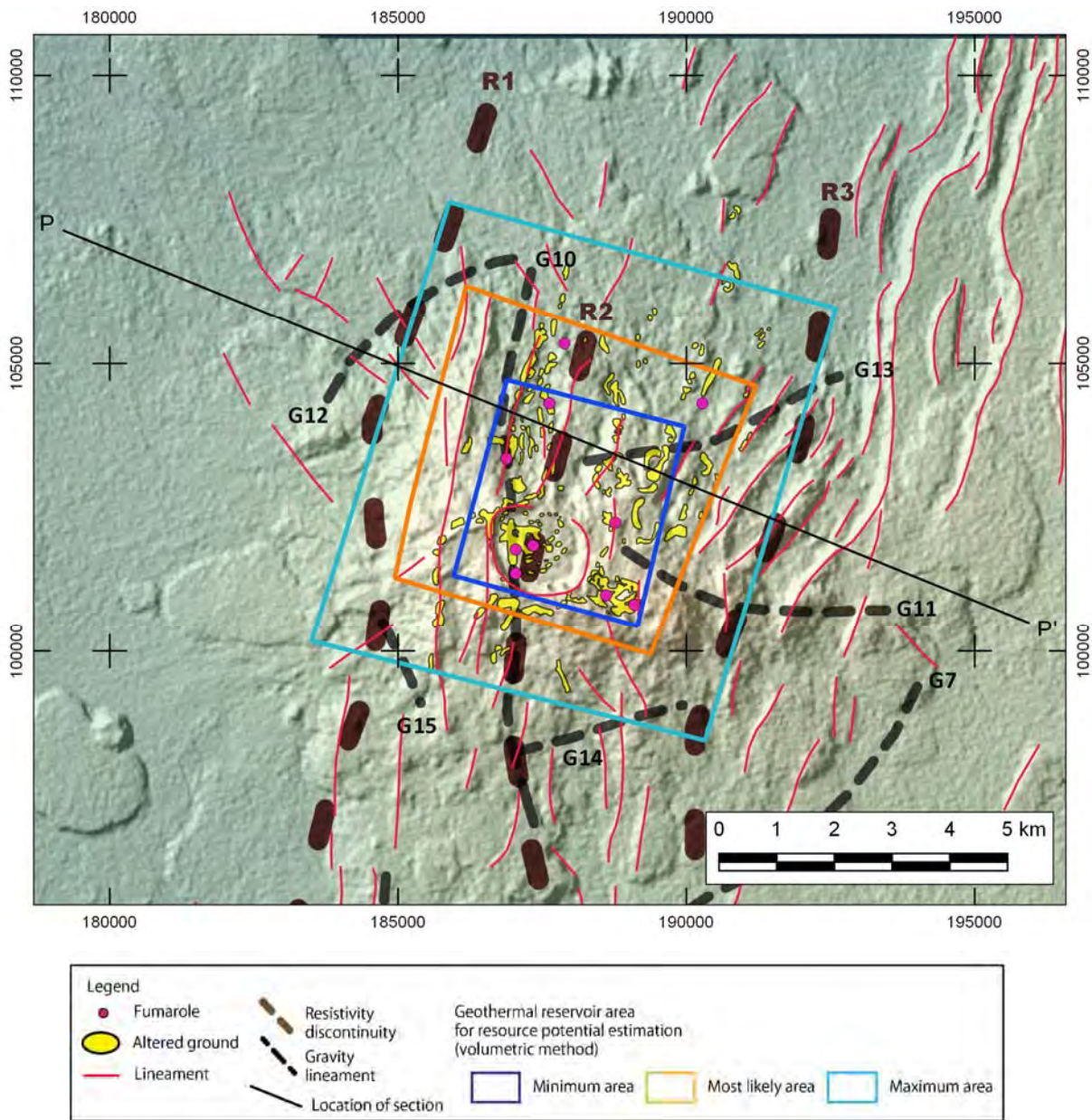
パカ地点の地熱系概念モデル	
熱源	パカ火山の火山活動に関連するマグマ溜まりやそれから派生する浅部の貫入岩体。パカ火山直下に認められる高重力異常（図 II-5-38(a)）や相対的な高比抵抗域（図 II-5-39(a)）は地下浅部に貫入した高温の貫入岩体の存在を示唆する。
地質構造	南北系の断層群（正断層）が卓越し、これらが地熱流体の流動を規制する主要な地質構造と考えられる。
地熱流体の起源	主に天水であるが、ガス成分はマグマ起源のものを含む。
地熱貯留層のタイプ	蒸気が卓越する二相流体、断層支配型
地熱貯留層分布	パカ火山を中心とする範囲
推定貯留層温度	300°C前後もしくはそれ以上（ガス化学温度計による）
流体流動	広域的には南から北の方向、流動経路は主に断層沿い
帽岩	電磁探査により得られた比抵抗分布にもとづくと、パカ火山近傍では地熱貯留層の帽岩を反映するような低比抵抗域は顕著には認められず、帽岩の発達は比較的乏しいと判断される。ただし、地表地熱活動の中心部付近で浅部低密度層が厚く、熱水変質を受けている可能性が示唆されること、また、地下浅部に存在が推定される多量の蒸気が浅部における低比抵抗域の把握を困難にしている可能性があること、などから、帽岩が一定規模で存在している可能性もあり、これは坑井掘削により検証される必要がある。

調査井掘削ターゲットゾーン	パカ火山体に発達する南北方向の断層系（南北方向の地形リニアメントから推定される正断層、比抵抗不連続線 R2 及び重力リニアメント G10 など）。
---------------	---

モンテカルロ解析手法を適用した容積法により本地点の現在の可採地熱資源量を計算するため、今回構築された地熱系概念モデルから想定される地熱貯留層範囲を求めた（図 II -5-17～図 II -5-19）。地熱貯留層の面積は、本地点の地熱流体を規制すると考えられる高透水性ゾーンの分布、地表地熱徴候の広がりなど、現在までに得られているデータから推定される地熱系の広がりを推定した。表 II-5-9 にパカ地点の地熱貯留層範囲を示す。地熱貯留層の分布深度は、掘削可能深度等も考慮して最小値を 1,000m、最大値を 2,000m とした。

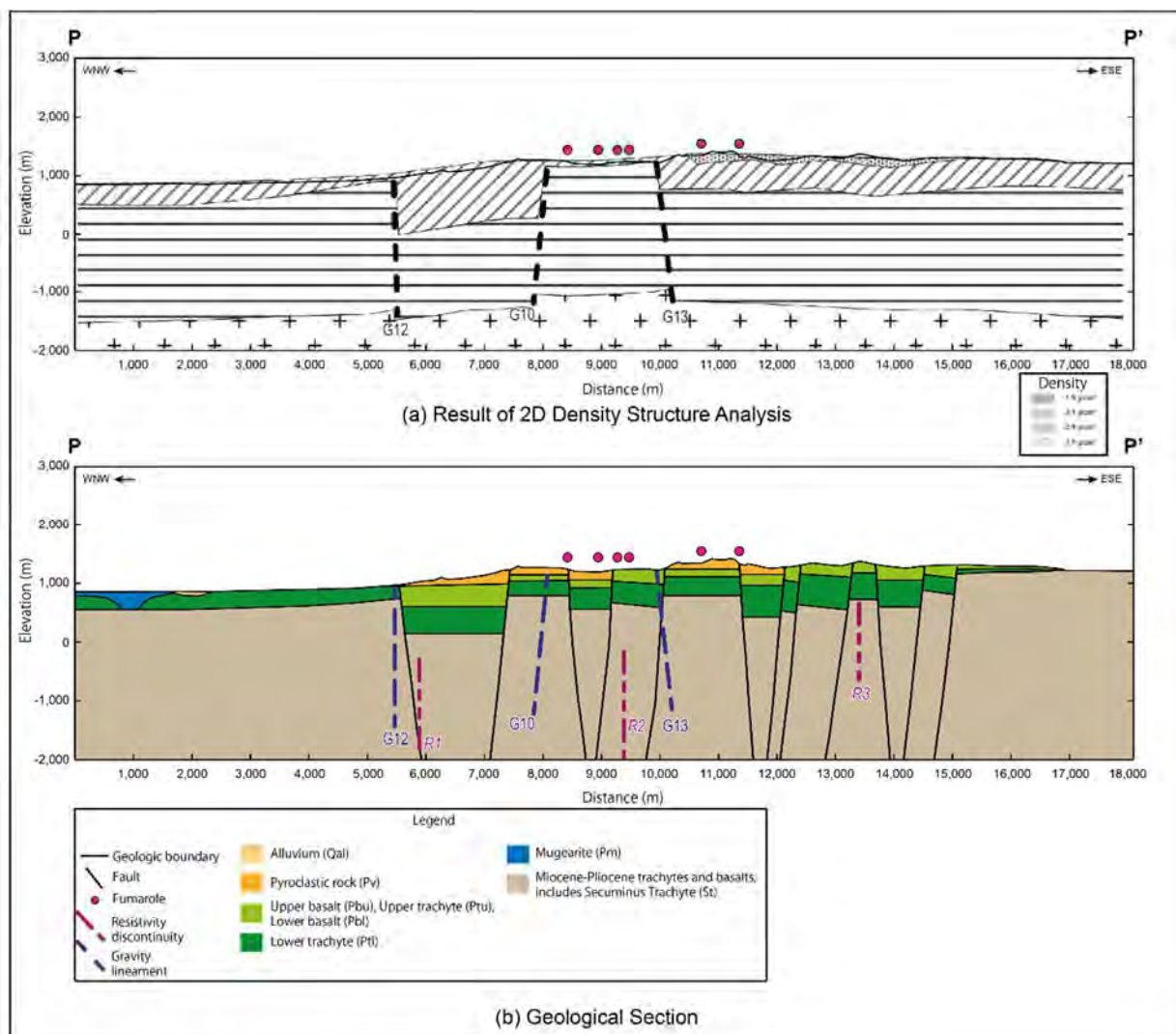
表 II-5-9 パカ地点の地熱貯留層範囲

最小値	● 本地点の地熱活動の中心で主要な地表地熱徴候を含むパカ火山中心部
最確値	最小値の範囲に加え、 ● 高温の貫入岩体の存在を示す可能性のあるパカ火山直下の深部高比抵抗域（図 II-5-40）を概ね含む。 ● 粘土化変質もしくは浅部蒸気層の存在を示す可能性のある浅部低比抵抗域（図 II-5-41）を概ね含む
最大値	最確値の範囲に加え、 ● 北縁、南縁をそれぞれ地表地熱徴候の分布域 ● 西縁を地熱活動が活発な地域の西端部を示していると考えられる比抵抗不連続線 R1 とし、東縁を地熱活動が活発な地域の東端部を示していると考えられる比抵抗不連続線 R3 とした。



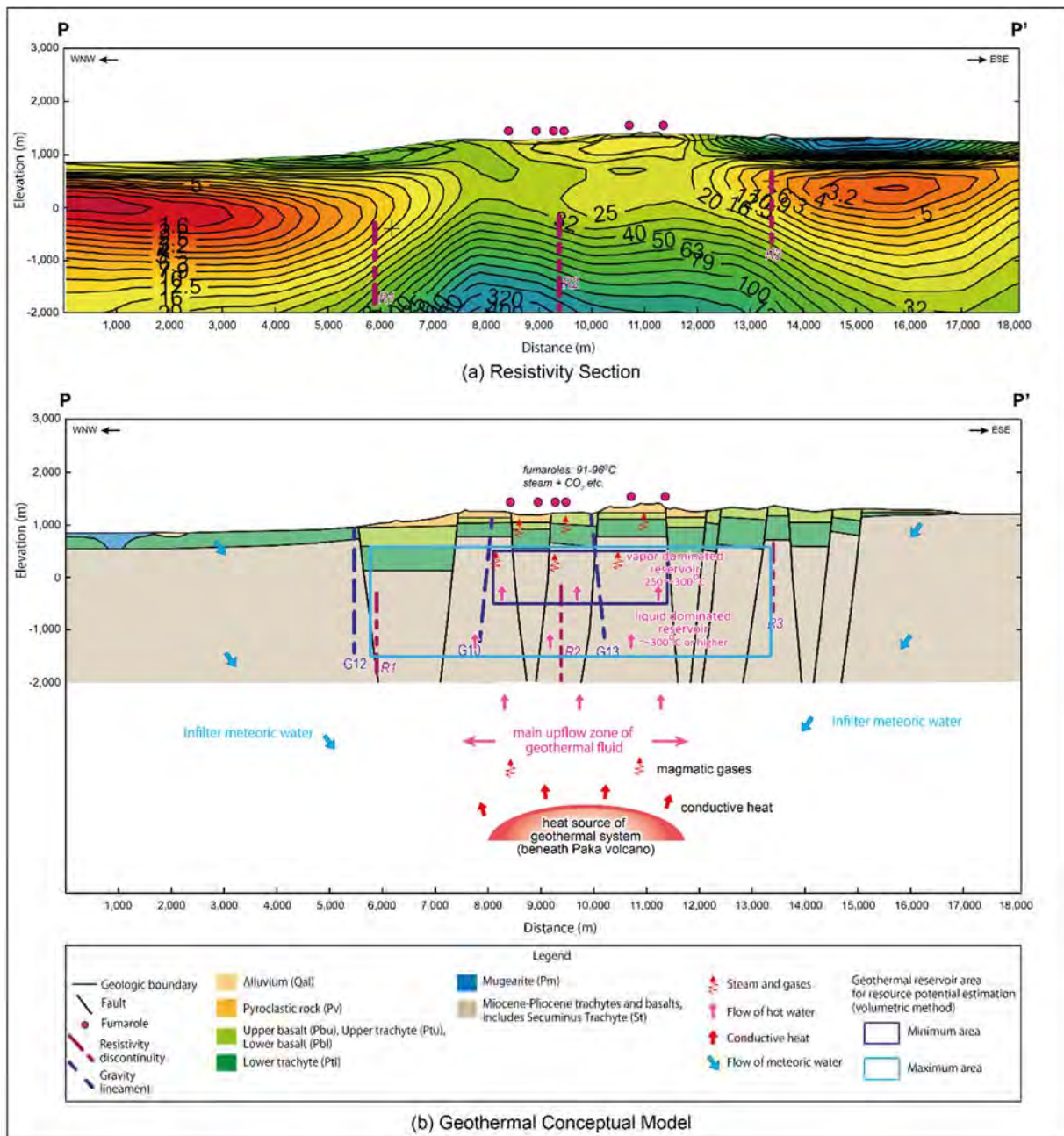
JICA 調査団作成

図 II-5-37 パカ地点の地表調査結果集約図



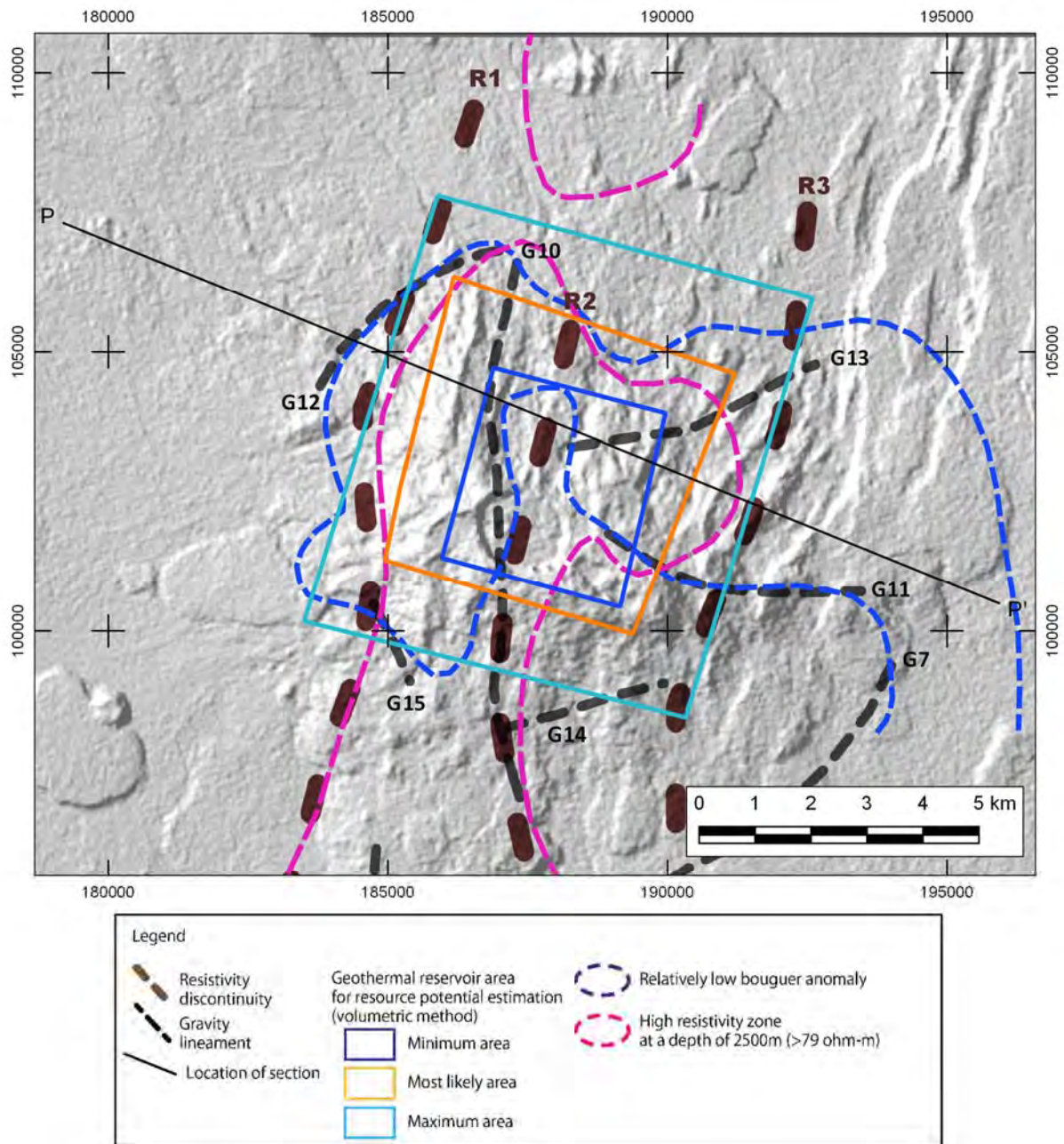
JICA 調査団作成

図 II-5-38 パカ地点の地質断面図 (P-P' 断面)



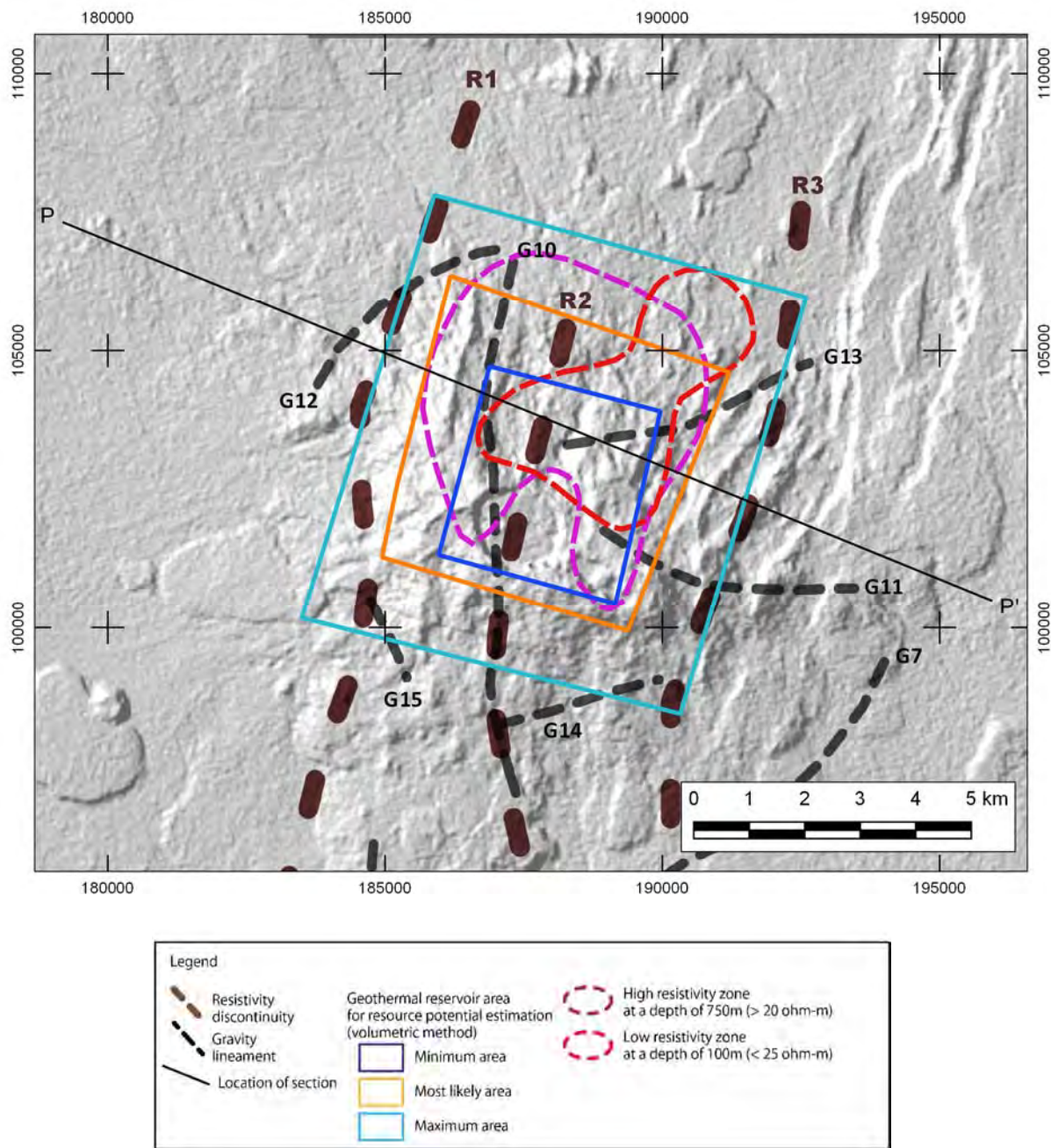
JICA 調査団作成

図 II-5-39 パカ地点の地熱系概念モデル



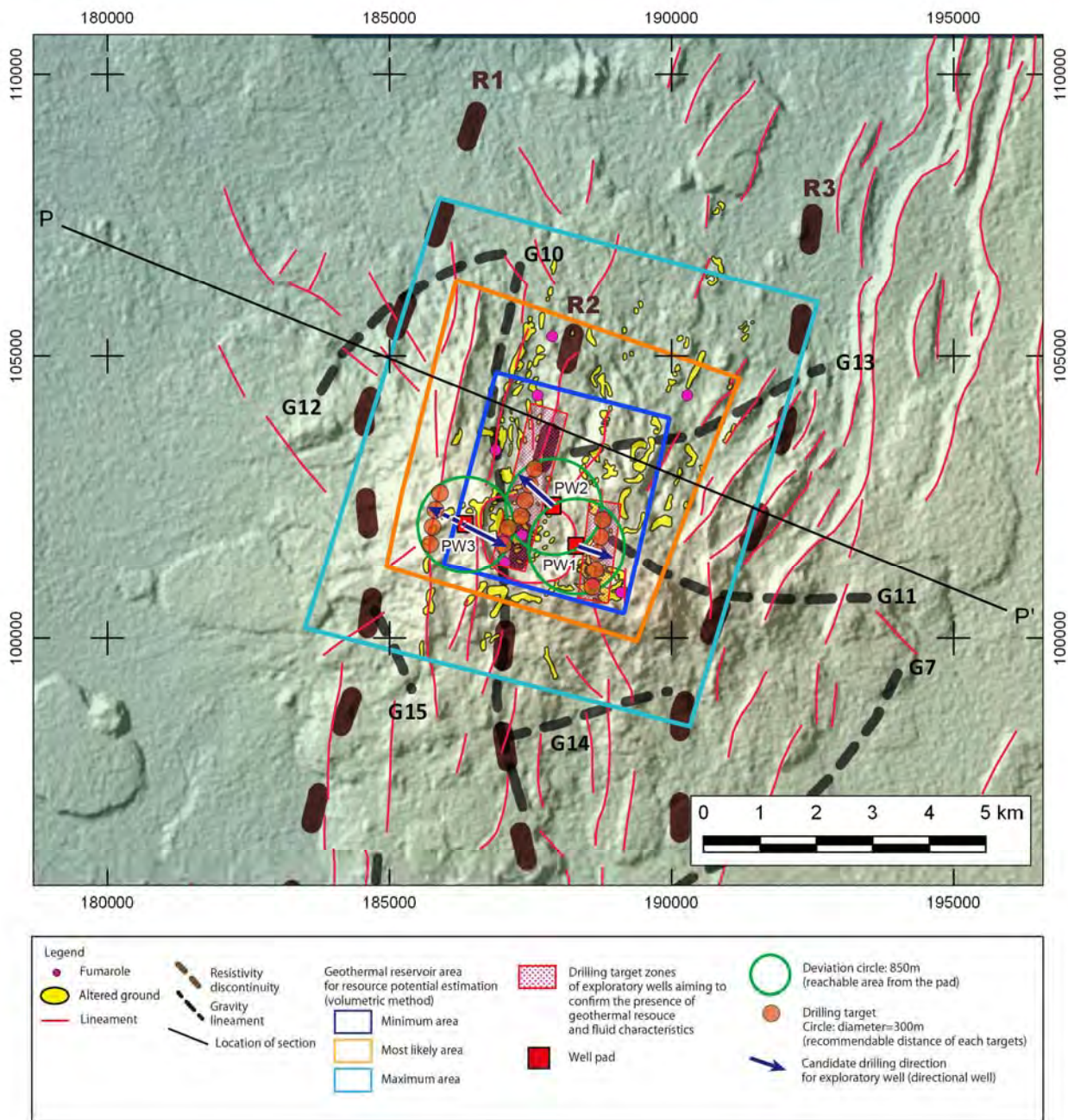
JICA 調査団作成

図 II-5-40 パカ地点の地熱貯留層範囲と物理探査結果集約図 (1)



JICA 調査団作成

図 II-5-41 パカ地点の地熱貯留層範囲と物理探査結果集約図 (2)

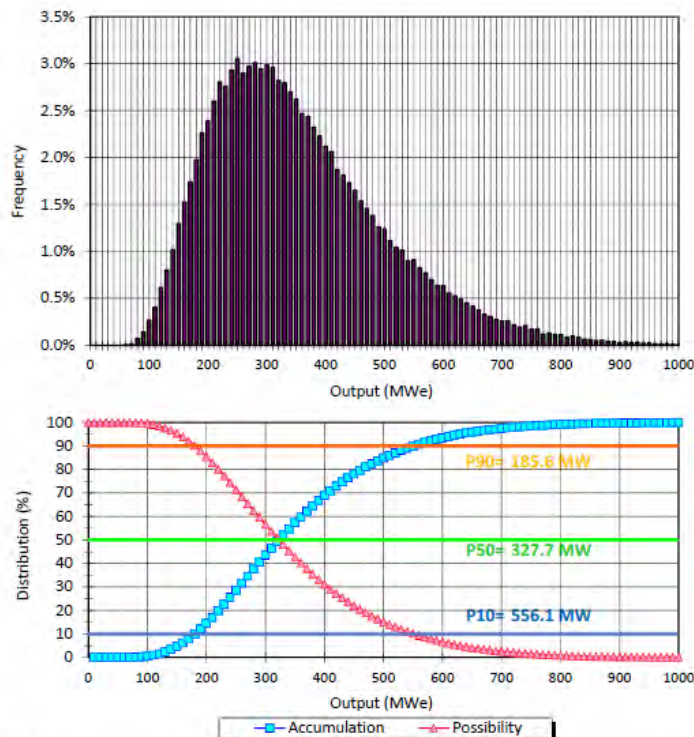


JICA 調査団作成

図 II -5-42 パカ地点の調査井掘削ターゲットゾーン

(2) 資源量評価

モンテカルロ解析手法を適用した容積法における計算パラメータの設定値と資源量試算結果を図 II -5-20 に示す。貯留層の面積は 11.50~55.50km²、貯留層の厚さは 1,000~2,000m の範囲とした (図 II -5-17~図 II -5-19 参照)。貯留層温度については、地化学温度から推定される 250~300℃ の範囲に加え、最高値として 330℃ を設定した。



Input

Parameter	min.	most likely	max.
Reservoir Area (km ²)	11.50	25.50	55.50
Reservoir Thickness (m)	1000	-	2000
Rock Density (kg/m ³)	2400	2500	2600
Porosity (-)	0.05	0.08	0.10
Recovery factor (-)	0.125	0.200	0.250
Rock Specific Heat (kJ/kg°C)	0.80	0.90	1.00
Reservoir Average Temperature (°C)	250	300	330
Reservoir Average Pressure (MPa)	-	15.0	-
Heat-Electricity Conversion Factor (-)	0.083	0.111	0.126
Plant Life (year)	-	30	-
Load Factor (-)	-	0.90	-
Abandonment Temperature (°C)	-	160	-

Fig. XX Probability Distribution of the Geothermal Potential for Paka Geothermal Field

JICA 調査団作成

図 II -5-43 パカ地点の容積法による資源量試算結果

資源密度法による試算では、貯留層面積は上記と同様に 11.50～55.50km²とした。資源密度は平均貯留層温度を 300°Cとして、17.63MW/km²と想定した。資源量は 203～979MW と算出される。

パカ地点に関する資源量試算結果の一覧を表 II -5-3 に示す。試算結果を総合的に評価すれば、現時点で発電開発計画が可能と考えられる資源の規模は、容積法での P50 値に近い 320MW（発電端）程度とみなされる。現時点での発電開発計画としては、資源的リスクを加味して、初期段階として 70MW 1 基の開発の後に、拡張段階において 70MW 3 基及び 40MW 1 基を設置する、段階的開発の計画立案を推奨する。

表 II -5-10 パカ地点の資源量試算結果と発電計画案

地点名	GDC (2013.4)			JICA調査 (2016)				提案される発電開発計画		
	資源量	発電計画		資源量				初期段階 (MW-gross)	拡張段階 (MW-gross)	合計出力 (MW-gross)
	現状の推定値 (MW)	早期 小規模発電	大規模 発電出力 (MW)	資源密度法 (MW)	容積法 (P90) (MW)	容積法 (P50) (MW)	容積法 (P10) (MW)			
パカ	500	Yes (A few 5-10MW units)	5 X 100	203 - 979	185.6	327.7	556.1	70	3 x 70 + 40	320

生産井 1 本当たりの発電出力については、メネンガイやオルカリアドームスと同程度の能力として、生産井 1 本当たり約 9.5MW の発電出力が期待される（シングルフラッシュ方式）。また、その場合の 1 本当たりに発生する還元すべき熱水の流量は約 36t/h が想定される。