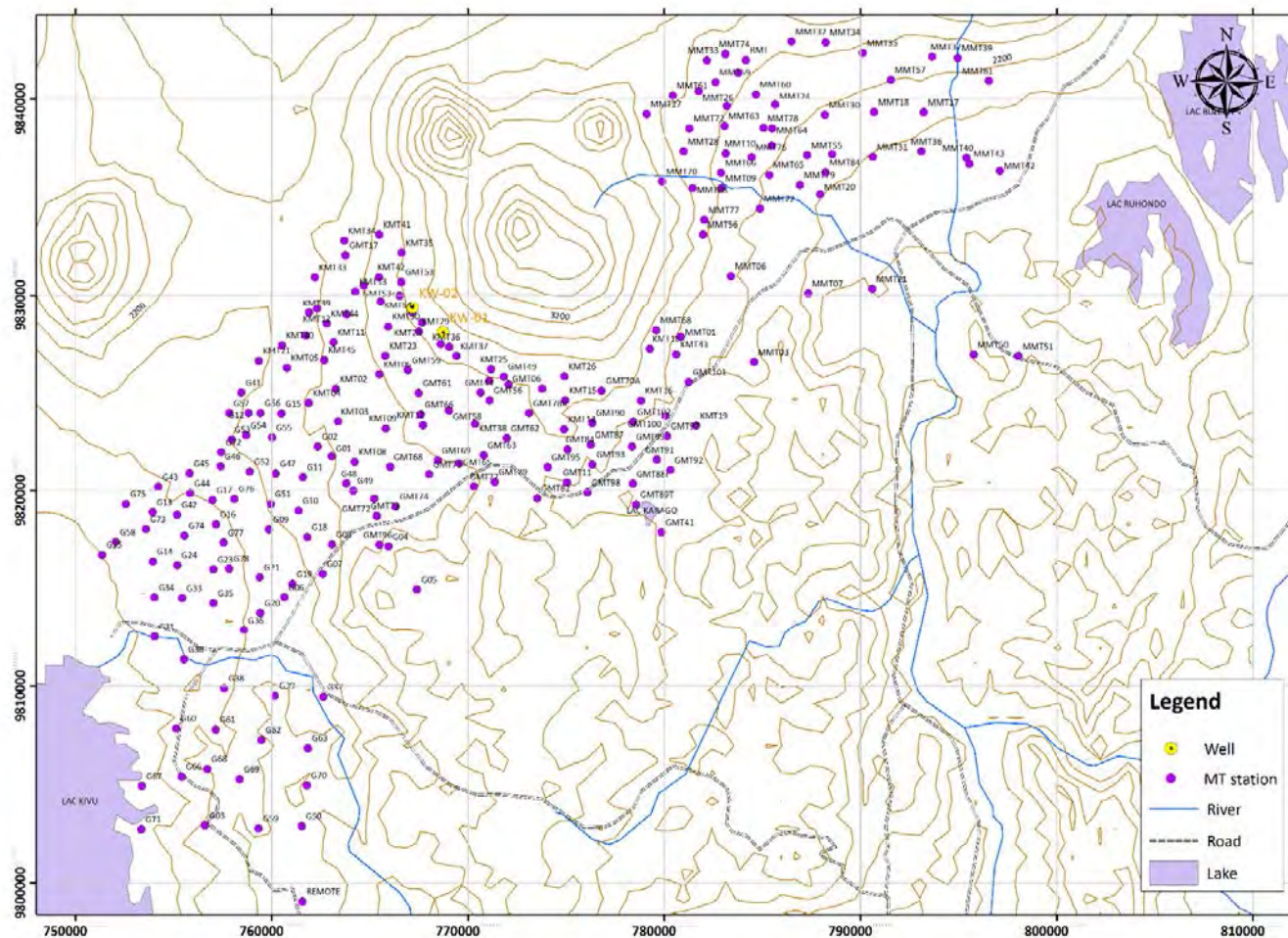


3-2-3 物理探査調査

(1) 北西部地域における既存 MT データ再解析結果

EWSA から Karisimbi, Gisenyi 及び Kinigi 地域で取得された 200 測点以上の MT 探査データの提供を受けた。本業務においては、データ品質に問題があった MT 探査データを除いて、212 測点の MT 探査データを用いて 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データは、北から 35 度東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。また、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 3-2.63 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、また、これらの MT 探査測点の UTM 座標系を表 3-2.18 に示す。



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.63 MT 探査測点位置図

表 3-2.18 MT 探査測点位置表 (1/2)

Station	Easting (UTM)	Northing (UTM)	Elevation (m)	Station	Easting (UTM)	Northing (UTM)	Elevation (m)
G01	763050	9821752	2187	G62	759465	9807252	1993
G02	762337	9822242	2163	G63	761833	9806835	2096
G03	756596	9802914	1809	G66	755405	9805398	1726
G04	765936	9817136	2395	G67	753380	9804918	1505
G05	767400	9814946	2744	G68	756705	9805781	1781
G06	760633	9814549	1885	G69	758361	9805263	1869
G07	762592	9815736	2057	G70	761787	9804951	2130
G08	763067	9817253	2139	G71	753343	9802718	1517
G09	759845	9818016	1967	G72	757426	9821949	1905
G10	761356	9818967	2101	G73	753584	9818027	1658
G11	761583	9820675	2113	G74	755544	9817692	1691
G12	758810	9823939	2050	G75	752568	9819312	1669
G13	753919	9818887	1693	G76	758094	9819579	1872
G14	753934	9816376	1626	G77	757541	9817331	1707
G15	760483	9823912	2102	G78	757827	9816003	1739
G16	757152	9818271	1718	KMT02	763258	9825178	2245
G17	756978	9819507	1821	KMT03	763383	9823519	2243
G18	761812	9817621	2025	KMT04	761885	9824467	2220
G19	761051	9815222	1910	KMT05	760767	9826260	2100
G20	759411	9813745	1861	KMT06	765486	9825929	2398
G21	759379	9815568	1862	KMT08	764222	9821462	2239
G23	757020	9815967	1715	KMT09	765811	9823159	2337
G24	755177	9816184	1651	KMT11	763147	9827566	2225
G25	751353	9816720	1601	KMT12	762317	9829285	2186
G30	755524	9811347	1788	KMT13	764254	9830186	2322
G31	754029	9812523	1642	KMT14	774887	9823118	2814
G33	755432	9814503	1652	KMT15	774945	9824596	2636
G34	754016	9814538	1656	KMT16	778814	9824588	2491
G35	757027	9814249	1704	KMT17	767697	9823342	2408
G36	758575	9812858	1799	KMT18	779265	9827225	2519
G37	762615	9809436	1916	KMT19	781611	9823303	2260
G38	757572	9809873	1690	KMT21	759327	9826615	1970
G39	760151	9809501	2074	KMT22	761731	9827903	2160
G41	758437	9824990	1964	KMT23	765775	9826866	2443
G42	755171	9818765	1719	KMT24	768602	9827468	2635
G43	754208	9820177	1747	KMT25	771164	9826177	2636
G44	755834	9819852	1785	KMT26	774909	9825822	2707
G45	755804	9820872	1869	KMT28	767660	9828563	2640
G46	757388	9821230	1899	KMT29	767502	9828111	2602
G47	760198	9820855	2052	KMT30	765928	9828365	2498
G48	763791	9820353	2235	KMT32	763826	9828985	2312
G49	764146	9819990	2247	KMT33	762189	9830917	2155
G50	761521	9802880	2100	KMT34	763691	9832783	2271
G51	759955	9819313	2015	KMT35	766603	9832162	2578
G52	758875	9820952	1960	KMT36	769038	9827317	2656
G53	757958	9822603	2013	KMT37	769408	9826861	2619
G54	758698	9822814	2039	KMT38	770354	9823403	2522
G55	760015	9822705	2099	KMT39	761890	9829079	2154
G56	759422	9823947	2064	KMT40	760512	9827403	2045
G57	757836	9823940	1957	KMT41	765466	9833089	2457
G58	752046	9817358	1612	KMT42	765454	9830925	2471
G59	759323	9802757	1939	KMT43	780607	9826940	2352
G60	755127	9807838	1675	KMT44	762798	9828510	2221
G61	757140	9807781	1701	KMT45	762663	9826657	2215

[出所] JICA 調査団で作成

表 3-2.18 MT 探査測点位置表 (2/2)

Station	Easting (UTM)	Northing (UTM)	Elevation (m)	Station	Easting (UTM)	Northing (UTM)	Elevation (m)
KMT52r	767156	9829092	2638	MMT81	796541	9840903	2147
KMT54r	765537	9829678	2492	MMT84	788208	9836250	2024
MMT01	780853	9827834	2374	RMT	784154	9841962	2443
MMT03	784578	9826545	2168	REMOTÉ	761557	9799054	2201
MMT06	783396	9830969	2209	GMT06	772054	9825408	2579
MMT07	787335	9830092	1806	GMT11	775042	9820404	2359
MMT08	781446	9835462	2549	GMT17	763752	9832037	2350
MMT09	782906	9835457	2337	GMT41	779851	9817866	2281
MMT10	783124	9837208	2347	GMT44	770634	9824995	2537
MMT17	793226	9839308	2041	GMT48b	771089	9825584	2587
MMT18	790693	9839324	2112	GMT49	771819	9825804	2614
MMT20	787950	9835138	2006	GMT50Y	764681	9830496	2392
MMT21	790595	9830327	1734	GMT51R	773779	9825188	2632
MMT22	784875	9834416	2172	GMT53	766589	9830672	2601
MMT23	785469	9837602	2229	GMT53r	766502	9829972	2574
MMT24	785651	9839710	2297	GMT56	771104	9824598	2540
MMT25	783195	9839633	2411	GMT58	769025	9824081	2450
MMT26	781745	9840376	2484	GMT59	766933	9826136	2493
MMT27	779093	9839223	2643	GMT61	767479	9824968	2464
MMT28	780984	9837318	2513	GMT62	771976	9822670	2561
MMT29	788559	9837181	2078	GMT63	770794	9821798	2449
MMT30	788187	9839173	2180	GMT65	769535	9821382	2395
MMT31	790628	9837040	1984	GMT66	767583	9823867	2421
MMT32	786481	9842909	2458	GMT68	766025	9821202	2310
MMT33	782159	9841952	2512	GMT69	768462	9821531	2380
MMT34	788225	9842870	2435	GMT70A	776804	9825092	2602
MMT35	790108	9842327	2363	GMT71	768016	9820828	2357
MMT36	793094	9837323	1961	GMT72	765216	9819589	2290
MMT37	793656	9842139	2294	GMT73	765341	9818704	2324
MMT39	794952	9842066	2275	GMT74	766310	9819182	2323
MMT40	795401	9836991	1907	GMT77	770297	9820195	2378
MMT42	797105	9836331	1890	GMT78R	773110	9823941	2590
MMT43	795546	9836693	1899	GMT79	771358	9820439	2405
MMT50	795766	9826931	1884	GMT82	773528	9819604	2371
MMT51	798055	9826842	1676	GMT84	775075	9822097	2437
MMT54	783766	9841308	2428	GMT87	776253	9822333	2398
MMT55	787285	9837130	2122	GMT88r	778400	9820339	2325
MMT56	781972	9833088	2430	GMT89T	778569	9819278	2300
MMT57	791542	9840961	2201	GMT90	776323	9823442	2486
MMT59	782609	9840829	2463	GMT91	779611	9821566	2306
MMT60	784665	9840216	2357	GMT92	780309	9821034	2291
MMT61	780425	9840159	2633	GMT93	776329	9821325	2350
MMT63	783064	9838610	2375	GMT95	774056	9821186	2415
MMT64	785501	9838478	2242	GMT96	765479	9817226	2322
MMT65	785356	9836124	2180	GMT97	780129	9822777	2313
MMT66	782894	9836234	2330	GMT98	776096	9819893	2358
MMT68	779594	9828168	2522	GMT99	778362	9822238	2348
MMT70	779888	9835792	2802	GMT100	780065	9823806	2301
MMT72	781282	9838480	2494	GMT101	781240	9825526	2222
MMT74	783112	9842267	2473	GMT102	778416	9823495	2332
MMT76	784451	9837023	2267				
MMT77	782035	9833835	2466				
MMT78	785053	9838503	2274				
MMT79	786912	9835609	2078				

[出所] JICA 調査団で作成

1) 解析方法

i) スタティックシフト補正

電位電極を設置した場所に局所的な地下浅部の比抵抗異常が存在する場合、これが測定されたデータの全周波数成分に影響を及ぼし、見掛け比抵抗曲線が上下にシフトすることがある。この影響はスタティックシフトと呼ばれるが、地下の比抵抗構造を解析する上ではこの影響を取り除くことが重要となる。スタティックシフトは、局所的な地下浅部の比抵抗異常の影響であるため、この影響を受けた測点データは近くに存在するデータとの整合性が乏しく、このため高周波数域の見掛け比抵抗分布において、その分布を乱す傾向を示すことが多い。

今回の解析においては、Uniservicesにより提出されている最終報告書、「Geoscientific Surveys of the Rwandan Kalisimbi, Gisenyi and Kinigi」の添付資料 D4 に記載されている TDEM データを用

いて算出されているスタティックシフト補正係数を利用してスタティック補正を実施した。また、TDEM データが存在しない MT 測点のデータに関しては、平滑化手法を用いた空間フィルターを利用してスタティックシフト補正係数の算出を行った。

表 3-2.19 にスタティックシフト補正係数一覧表を示す。今回実施した 3 次元比抵抗インバージョン解析においては、表 3-2.19 に示すスタティックシフト補正後のインピーダンス値 (Z_{xy} 及び Z_{yx}) を入力データとして用いた。

表 3-2.19 スタティックシフト補正係数一覧表 (1/2)

Station	Static shift xy	Static shift yx	Station	Static shift xy	Static shift yx
G01	1.309	1.068	G62	2.318	1.848
G02	0.886	0.589	G63	1.661	0.642
G03	2.283	2.621	G66	1.095	1.327
G04	0.987	0.478	G67	1.535	0.658
G05	1.198	0.842	G68	1.419	1.513
G06	0.709	0.539	G69	0.735	1.315
G07	1.513	1.514	G70	0.848	0.532
G08	1.983	0.826	G71	1.330	0.891
G09	1.681	1.501	G72	1.356	2.064
G10	3.714	1.440	G73	0.905	0.639
G11	1.075	0.983	G74	1.698	1.249
G12	1.128	1.056	G75	1.142	1.271
G13	0.201	0.342	G76	0.293	0.970
G14	1.869	0.447	G77	0.574	0.576
G15	0.998	1.163	G78	0.719	0.644
G16	2.755	2.202	KMT02	0.590	1.090
G17	1.229	1.159	KMT03	1.724	1.188
G18	0.575	0.453	KMT04	1.656	2.179
G19	1.459	1.361	KMT05	1.631	0.937
G20	0.911	0.799	KMT06	1.202	0.504
G21	1.065	0.954	KMT08	1.285	0.596
G23	1.277	0.504	KMT09	0.985	1.098
G24	0.689	0.468	KMT11	2.363	1.284
G25	0.834	0.854	KMT12	0.914	1.011
G30	0.961	0.906	KMT13	1.027	0.852
G31	2.414	3.068	KMT14	0.862	0.876
G33	1.433	1.122	KMT15	0.548	0.498
G34	1.046	3.653	KMT16	1.748	0.989
G35	1.154	1.236	KMT17	1.200	1.114
G36	1.444	1.821	KMT18	0.497	0.963
G37	0.727	0.710	KMT19	1.597	0.881
G38	2.143	0.961	KMT21	0.798	0.843
G39	2.091	3.853	KMT22	1.022	1.233
G41	0.895	0.725	KMT23	1.603	1.262
G42	0.923	0.796	KMT24	2.497	2.550
G43	0.906	1.079	KMT25	1.380	1.368
G44	1.781	1.412	KMT26	0.927	0.782
G45	0.926	0.628	KMT28	0.667	0.687
G46	1.220	1.098	KMT29	1.178	1.092
G47	1.600	0.529	KMT30	0.801	0.696
G48	1.323	0.947	KMT32	1.110	0.926
G49	1.327	1.200	KMT33	1.181	0.827
G50	1.067	1.644	KMT34	0.955	0.946
G51	0.847	0.578	KMT35	0.460	0.544
G52	1.895	1.058	KMT36	0.758	0.712
G53	1.365	1.244	KMT37	0.377	0.392
G54	1.221	0.583	KMT38	1.322	1.150
G55	0.892	0.878	KMT39	1.260	1.802
G56	0.594	0.959	KMT40	1.340	1.358
G57	1.260	1.295	KMT41	0.897	0.882
G58	1.215	1.348	KMT42	1.046	0.930
G59	1.405	1.805	KMT43	0.943	0.711
G60	0.629	0.779	KMT44	1.666	0.890
G61	0.307	3.210	KMT45	1.074	0.851

[出所] JICA 調査団で作成

表 3-2.19 スタティックシフト補正係数一覧表 (2/2)

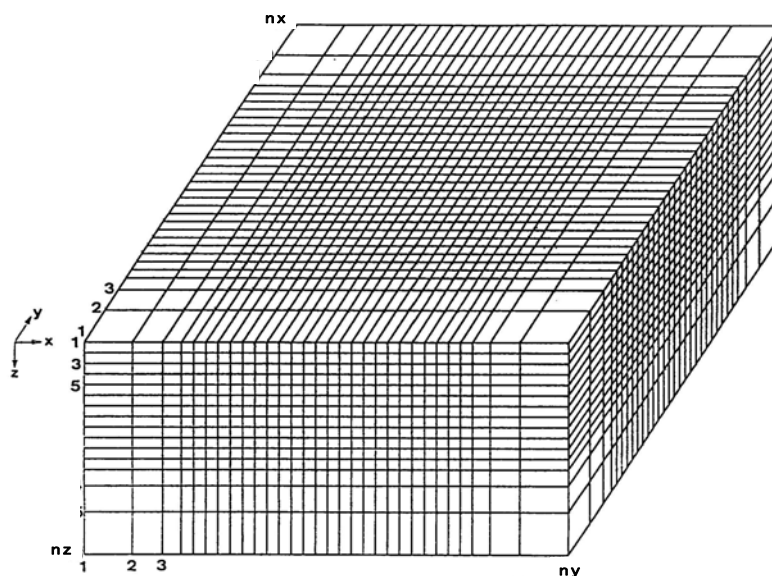
Station	Static shift xy	Static shift yx	Station	Static shift xy	Static shift yx
KMT52r	1.225	1.137	MMT81	0.950	0.956
KMT54r	0.440	0.446	MMT84	1.901	1.567
MMT01	0.653	0.803	RMT	0.923	1.455
MMT03	0.657	0.969	REMOTE	0.613	1.315
MMT06	1.273	1.364	GMT06	1.260	1.288
MMT07	1.325	1.949	GMT11	1.087	1.224
MMT08	1.867	1.161	GMT17	0.974	0.960
MMT09	0.813	1.465	GMT41	1.237	1.584
MMT10	0.968	1.033	GMT44	0.437	0.593
MMT17	1.625	1.015	GMT48b	1.015	0.816
MMT18	0.712	1.241	GMT49	1.000	0.899
MMT20	2.786	2.946	GMT50Y	0.875	0.910
MMT21	8.428	2.923	GMT51R	0.936	0.612
MMT22	1.294	1.080	GMT53	34.424	33.817
MMT23	1.403	1.309	GMT53r	0.719	0.775
MMT24	0.684	0.671	GMT56	0.672	0.482
MMT25	1.563	1.076	GMT58	0.870	0.909
MMT26	0.948	0.593	GMT59	1.229	0.803
MMT27	1.138	1.667	GMT61	6.391	26.451
MMT28	1.342	1.143	GMT62	0.734	0.934
MMT29	0.691	0.641	GMT63	0.565	0.317
MMT30	0.819	1.024	GMT65	0.495	1.012
MMT31	1.475	0.816	GMT66	0.828	1.133
MMT32	0.759	0.895	GMT68	0.984	1.286
MMT33	1.449	0.684	GMT69	1.162	1.188
MMT34	0.971	0.901	GMT70A	0.891	1.977
MMT35	1.022	1.088	GMT71	0.915	1.461
MMT36	0.850	1.124	GMT72	1.515	0.854
MMT37	0.995	0.848	GMT73	1.008	1.551
MMT39	1.594	0.932	GMT74	0.804	1.272
MMT40	1.490	3.197	GMT77	1.891	0.858
MMT42	2.320	2.314	GMT78R	0.638	0.598
MMT43	0.980	2.504	GMT79	1.227	0.877
MMT50	1.639	1.947	GMT82	1.420	1.317
MMT51	0.972	0.293	GMT84	0.905	0.903
MMT54	0.649	0.805	GMT87	0.914	0.873
MMT55	1.562	1.578	GMT88r	0.761	0.746
MMT56	1.213	1.102	GMT89T	0.495	0.570
MMT57	1.929	1.662	GMT90	0.789	0.767
MMT59	1.046	1.127	GMT91	0.972	0.608
MMT60	1.488	1.281	GMT92	1.028	0.791
MMT61	0.690	0.587	GMT93	0.550	0.670
MMT63	1.077	0.963	GMT95	1.477	1.182
MMT64	1.593	1.438	GMT96	0.798	0.476
MMT65	0.802	0.658	GMT97	0.809	1.081
MMT66	1.783	1.848	GMT98	1.028	0.835
MMT68	1.342	0.777	GMT99	1.213	1.331
MMT70	0.988	1.056	GMT100	1.106	0.728
MMT72	0.938	0.916	GMT101	2.036	4.712
MMT74	1.465	1.149	GMT102	2.872	0.769
MMT76	0.820	0.631			
MMT77	1.011	0.801			
MMT78	2.122	1.286			
MMT79	2.109	1.879			

[出所] JICA 調査団で作成

ii) 3次元比抵抗構造解析

a) 3次元比抵抗モデリング解析の概要

3次元比抵抗モデリング解析は図 3-2.64 に示すようなキューブ状の比抵抗ブロックを用いた差分法により電場及び磁場の計算を行い、3次元の比抵抗モデルから算出される各測点における X 方向及び Y 方向のインピーダンス値と実際の測定により得られた各測点の X 方向及び Y 方向のインピーダンス値を数学的にマッチングさせることにより、地下の比抵抗構造を解析する方法である。この 3次元比抵抗インバージョン解析により、1次元層構造解析や 2次元比抵抗構造解析から得られる比抵抗構造に比べて、より精度の高い地下比抵抗構造が把握できることが期待される。



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.64 3次元比抵抗構造モデル概念図

b) 3次元フォワード計算

大地及び大気中の電磁場は、以下に示すマックスウェルの方程式で表現される。

$$\nabla \times E = i\omega\mu H \quad \text{----- [1]}$$

$$\nabla \times H = \sigma E \quad \text{----- [2]}$$

ただし、

ω : 角周波数 ($=2\pi f$)

μ : 大地の透磁率 ($=4\pi \times 10^{-7}$)

σ : 大地の電気伝送率 (mho)

ただし、変位電流は無視できるものとしている。上式[1]及び[2]から

$$\nabla \times (\nabla \times H) = \nabla \times \sigma E = \sigma \times \nabla \times E = k^2 H \quad \text{----- [3]}$$

$$\nabla \times (\nabla \times E) = \nabla \times i\omega\mu H = i\omega\mu \times \nabla \times H = k^2 E \quad \text{----- [4]}$$

ただし、

$$k^2 = i\omega\mu\sigma$$

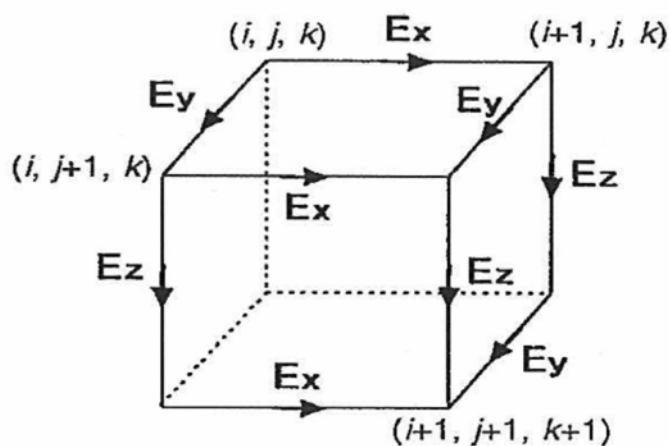
となる。ここで $k^2 = i\omega\mu\sigma$ である。 H を直交座標系の成分 H_x, H_y, H_z に分解すれば、[3]式は以下のようなになる。

$$\left. \begin{aligned} \partial^2 H_x / \partial y^2 + \partial^2 H_x / \partial z^2 - \partial^2 H_y / \partial x \partial y - \partial^2 H_z / \partial x \partial z - k^2 H_x &= 0 \\ \partial^2 H_y / \partial x^2 + \partial^2 H_y / \partial z^2 - \partial^2 H_x / \partial y \partial x - \partial^2 H_z / \partial y \partial z - k^2 H_y &= 0 \\ \partial^2 H_z / \partial x^2 + \partial^2 H_z / \partial y^2 - \partial^2 H_x / \partial z \partial x - \partial^2 H_z / \partial z \partial y - k^2 H_z &= 0 \end{aligned} \right\} \text{--- [5]}$$

また、 E を直交座標系の成分 E_x, E_y, E_z に分解すれば、[4]式は以下のようなになる。

$$\left. \begin{aligned} \partial^2 E_x / \partial y^2 + \partial^2 E_x / \partial z^2 - \partial^2 E_y / \partial x \partial y - \partial^2 E_z / \partial x \partial z - k^2 E_x &= 0 \\ \partial^2 E_y / \partial x^2 + \partial^2 E_y / \partial z^2 - \partial^2 E_x / \partial y \partial x - \partial^2 E_z / \partial y \partial z - k^2 E_y &= 0 \\ \partial^2 E_z / \partial x^2 + \partial^2 E_z / \partial y^2 - \partial^2 E_x / \partial z \partial x - \partial^2 E_z / \partial z \partial y - k^2 E_z &= 0 \end{aligned} \right\} \text{--- [6]}$$

スタaggerド格子を用いた差分法（図 3-2.65 参照）を利用して[6]式を解くと、各格子における電場成分（ E_x, E_y 及び E_z ）を計算することが可能となる。



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.65 スタaggerド格子の概念図

上記、[6] 式に示す 3 つの式を同時に解くに当たって、3 次元比抵抗モデルの境界における電場の値を設定する。設定にあたっては、1 次元層構造比抵抗モデルにより解析的に求まる電場の値を利用した。すなわち、一次元層構造比抵抗モデルから解析的に求まる電場の値を 3 次元比抵抗モデルの側面境界に設定した。更に、地表から上空側に 7 層の空気層を設定し、この空気層は地表から離れるに連れて大きな層厚を有するように設定を行った。なお、この空気層には 10^8 ohm-m の比抵抗を与え、最上部には 1 次元層構造比抵抗モデルから解析的に求まる磁場の値を設定した。また、3 次元比抵抗モデルの底面境界にも、同様に 1 次元層構造比抵抗モデルから解析的に求まる電場の値を設定した。今回の 3 次元比抵抗モデル計算においては、地形の影響を考慮に入れていないが、地形の影響の一部はスタティックシフト補正により取り除かれるものと考えられること、及び観測された見掛比抵抗の分布と地形との相関性が低いことから、地形の影響が解析結果に大きく影響を及ぼしている可能性は低いと考えられた。

上記[6]を解くことにより電場の値 (E_x , E_y 及び E_z) が算出されれば、[7] 式を用いることによって、磁場の値 (H_x 及び H_y) を求めることができる。ここで、二つの極性における電場及び磁場をそれぞれ E_{x1} , E_{y2} , H_{x1} , H_{y1} 及び E_{x2} , E_{y2} , H_{x2} , H_{y2} とすると、最終的に以下の式を用いることによって、インピーダンス値を算出することが可能となる。

$$\left. \begin{aligned} Z_{xy} &= (E_{x2} \times H_{x1} - E_{x1} \times H_{x2}) / (H_{x1} \times H_{y2} - H_{x2} \times H_{y1}) \\ Z_{yx} &= (E_{y1} \times H_{y2} - E_{y2} \times H_{y1}) / (H_{x1} \times H_{y2} - H_{x2} \times H_{y1}) \end{aligned} \right\} \text{----- [7]}$$

c) 3次元インバージョン解析

本解析で用いた 3 次元比抵抗インバージョン計算には、キューブ状の比抵抗ブロックの比抵抗値を求めるパラメータとした平滑化制約付き最小二乗法を利用している。ただし、3 次元比抵抗インバージョン計算においては、データスペース法を用いて解くべきパラメータ数を減少させることにより、通常モデルスペース法と比較して高速な計算を実施している。また、ヤコビアン行列（比抵抗モデルパラメータを変化させた時のインピーダンス値の変化率を表わす）は反復計算毎に求めている。

本インバージョン解析では、以下に示す関数 $W(m)$ に非線形最小自乗法を適用することにより最小化することにより、各比抵抗ブロックの比抵抗値を求めた。

$$W(m) = (m - m_0)^T C_m^{-1} (m - m_0) + \lambda^{-1} ((d - F(m))^T C_d^{-1} (d - F(m))) \text{----- [8]}$$

ここで m は比抵抗ブロックの比抵抗値、 m_0 は比抵抗ブロックの初期比抵抗値、 C_m は比抵抗モデル共分散行列、 d は実測値（インピーダンス成分 Z_{xy} , Z_{yx} ）、 C_d はデータ共分散行列、 $F(m)$ は各比抵抗ブロックの比抵抗値からインピーダンス成分を算出する非線形関数である。関数 $W(m)$ の右辺第 2 項は実測データと計算データの差異を示し、右辺第 1 項は 3 次元比抵抗モデルと比抵抗モデル初期値との差異を示している。また、変数 λ はラグランジュ乗数と呼ばれ、右辺第 1 項（3 次元比抵抗モデルと比抵抗モデル初期値との差異）と右辺第 2 項（実測データと計算データの差異）の重みを変化させる係数である。大きな λ を用いれば、右辺第 1 項（3 次元比抵抗モデルと比抵抗モデル初期値との差異）に大きな重みが与えられるため、滑らかな比抵抗モデルを得ることが可能となる。また、小さな λ を用いれば、右辺第 2 項（実測データと計

算データの差異) に大きな重みを与えられるため、実測データと計算データの差異は小さくなるが、しばしば比抵抗変化のこぼこしたモデルが得られることになる。比抵抗モデル共分散行列 C_m は得られる比抵抗モデルの滑らかさと関係する行列である。

MT データのインバージョン計算は非線形性が大きいいため、最終解を得るためには、非線形関数である $F(m)$ を以下に示すようにテーラー展開を行い、反復計算を実施することが必要である。

$$F(m_{i+1}) = F(m_i + \delta m) = F(m_i) + J_i \cdot (m_{i+1} - m_i) \quad \text{----- [9]}$$

ここで、 i は反復回数を示し、 J_i は反復回数 i 回目におけるヤコビアン行列（比抵抗モデルパラメータを変化させた時のインピーダンス値の変化率を表わす、行列のサイズはデータ数×比抵抗モデル変数の数）を示す。上記[9]式を[8]式に代入し、データスペース法を適用すれば、反復回数 $i+1$ 回目の各比抵抗モデル修正量は以下の式により求めることが可能である。

$$m_{i+1} - m_0 = C_m J_i^T C_d^{-1/2} [\lambda I + C_d^{-1/2} J_i C_m J_i^T C_d^{-1/2}]^{-1} \\ \times [d - F(m) + J_k (m_{i+1} - m_0)] \quad \text{----- [10]}$$

実測データ（インピーダンス成分）とスタaggerドグリッドを用いた差分法により計算される値（インピーダンス成分）の残差二乗和が十分小さくなるまで、[10]式の繰り返し計算を行えば、3次元比抵抗構造モデルの最終解（ m_{i+1} ）を得ることができる。通常、比抵抗モデル変数の数はデータ数と比較して多いため、本解析においては Siripunvaraporn (2005) に紹介されているデータスペース法を用いることでコンピュータ上での計算速度を向上させている。なお、3次元インバージョンにおける入力データにおいては、各比抵抗ブロックの初期値を均質（見掛比抵抗値の平均値）とした。

2) 地熱地域における比抵抗構造

火山地帯に位置する地熱地域において電気探査や電磁探査等の比抵抗探査を実施した場合、その解析においては低比抵抗ゾーン及び比抵抗不連続線に着目する。低比抵抗ゾーンとは一般的に 10 ohm-m 程度（この比抵抗値は地熱地域により異なる）以下の比抵抗値を示す地域であり、熱水活動により形成される熱水変質帯の存在を反映していることが多い。

一般に電気探査や電磁探査によって得られる地熱地域の地下比抵抗構造は3つのゾーンに区分される。それらは、①通常高い比抵抗値を示す表土層、②表土層の下位に存在し、低い比抵抗値を示す低比抵抗ゾーン及び、③最下位に存在し、かつ高い比抵抗値を示す比抵抗基盤域である。ここで表土層とは、地表付近の比較的高い比抵抗値を示すゾーンであり、火山灰や未変質の火山岩を反映していることが多い。この層の情報は低比抵抗ゾーンや比抵抗基盤域に比べれば、地熱構造を検討する上では、さほど重要でないと考えられる。

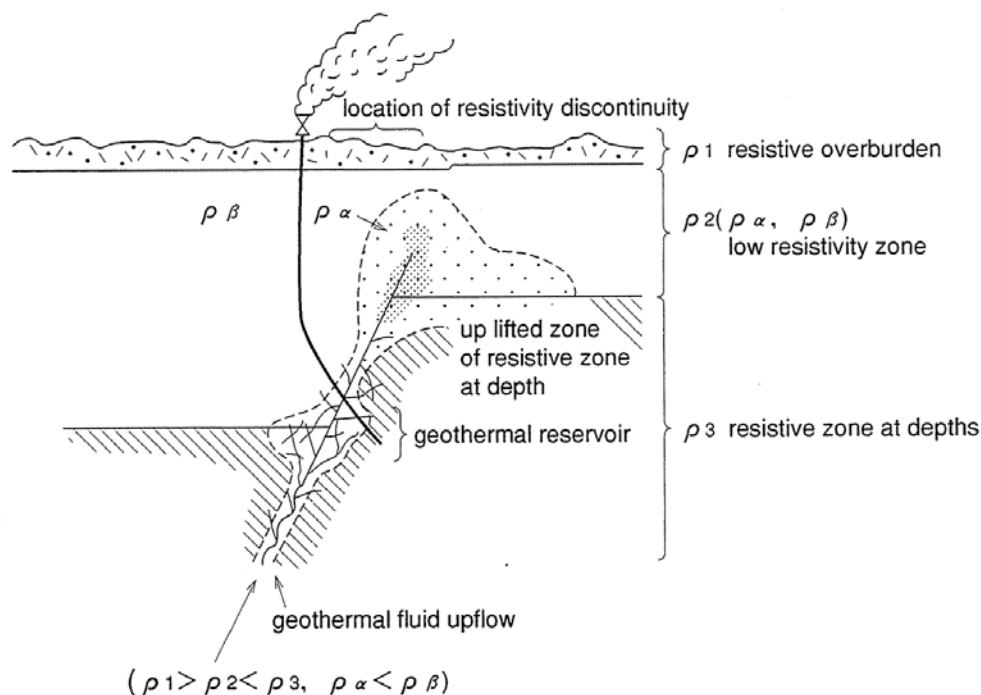
地熱地域における低比抵抗ゾーンは、熱水変質帯（スメクタイト、混合層粘土鉱物等）を反映したものと考えられ、通常 5 ohm-m 以下の非常に低い比抵抗値を示すことが多い。この低比抵抗ゾーンは空隙率が低く、地熱貯留層の帽岩的な役割を担っていることが多い。また、比抵抗基盤域は低比抵抗ゾーンの下位に存在し、低比抵抗ゾーンと比較して高い比抵抗値を示す。

この深部に分布する比抵抗基盤域は、緑泥石、イライト、緑れん石等の高温で生成される熱水

変質帯を反映しているものと考えられ、この比抵抗基盤層が隆起構造を呈している場合には、相対的に周辺域よりも高温となっている地域を示している可能性がある。また、これらの2つのゾーン（低比抵抗ゾーン、比抵抗基盤域）は、地熱地域においては地層の種類とは整合性が無い場合が多い。これは、地下に存在する岩石の比抵抗値が岩石の種類よりも、空隙率、変質度合、温度等により強く影響されるためであると考えられる。

一般的に地熱貯留層周辺の比抵抗構造は、以下のような特徴を示す。

- 顕著な比抵抗不連続示徴が存在し、この示徴がある方向性を持って連続する。また、比抵抗不連続線周辺で比抵抗基盤域の隆起構造が認められる。このような比抵抗不連続構造は断層や断層周辺に存在する破碎帯等の断裂構造を反映することが多い。
- 低比抵抗ゾーンの比抵抗値が、比抵抗不連続構造周辺で特に低い値を示す。この低比抵抗ゾーンは、スメクタイトや混合層粘土鉱物等の熱水変質帯を反映し、地熱貯留層の帽岩の役割を担っていることが多い（図3-2.66中の ρ_α で示す箇所である）。
- 多くの地熱地域では、深部の高温域は低比抵抗域の下部に位置する相対的な高比抵抗域内に存在する。また、この箇所（比抵抗基盤内）では、深部高比抵抗域の隆起構造が認められる。この高比抵抗域の隆起構造は、比較的浅部で生成するスメクタイトや混合層粘土鉱物等の変質帯よりも更に高温で生成するイライトや緑泥石等の変質帯の割合が高くなるために形成されるものと推定される。



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.66 地熱貯留層周辺における比抵抗構造概念図

火山地帯における地熱貯留層は、一般的に断層あるいは断層に沿った破碎帯等に起因する断裂系に沿って発達している場合が多く確認されており、この場合、地熱貯留層の熱水の一部が断裂沿いの破碎ゾーンを上昇し、地熱貯留層の上部にスメクタイトや混合層粘土鉱物等から成

る熱水変質帯を形成することが多い。この熱水変質帯（スメクタイト、混合層粘土鉱物等）は概略 70℃ から 200℃ の温度条件で生成すると考えられており、低い比抵抗値を示すため、地熱地帯で得られる低比抵抗ゾーンは図 3-2.66 に示すように、地熱貯留層の上位に位置し、帽岩の役割を担う熱水変質帯を反映しているものと考えられる。このため、地熱貯留層は断層周辺で、上位に低比抵抗ゾーンが分布している深部高比抵抗域の隆起部内に存在することが多い。

上記のことから、比抵抗構造から地熱開発のターゲット地域を選定する場合には、低比抵抗ゾーンの情報のみでなく、その他、断層等の断裂構造や地質構造、水理構造等を加味して検討する必要がある。

3) 3次元比抵抗インバージョン解析結果

今回、EWSA から提供を受けた Gisenyi, Karisimbi, Kinigi 地域において取得された MT データを用いて、平滑化拘束付き 3次元比抵抗構造インバージョンを実施した。この結果得られた 3次元比抵抗分布データを基に、11 深度（深度 100m、深度 300m、深度 500m、深度 750m、深度 1,000m、深度 1,500m、深度 2,000m、深度 2,500m、深度 3,000m、深度 4,000m 及び深度 5,000m）における解析比抵抗分布平面図（図 3-2.67～図 3-2.77）及び図 3-2.78 に示す A～F 断面における解析比抵抗分布断面図（図 3-2.79）を作成した。

また、上記の 3次元比抵抗構造インバージョン結果から、Kinigi 地域の北部において、明瞭な低比抵抗域が検出された。このため、この Kinigi 地域で検出された明瞭な低比抵抗域の詳細な範囲及び形状を把握する目的で、Kinigi 地域の MT データのみを利用し、更に細かい比抵抗ブロックを用いた平滑化拘束付き 3次元比抵抗構造インバージョンを実施した。この Kinigi 地域詳細 3次元比抵抗構造インバージョン結果を基にして、11 深度（深度 100m、深度 300m、深度 500m、深度 750m、深度 1,000m、深度 1,500m、深度 2,000m、深度 2,500m、深度 3,000m、深度 4,000m 及び深度 5,000m）における解析比抵抗分布平面図（図 3-2.67～図 3-2.77）を作成した。

3次元比抵抗構造解析結果に基づいた調査地域の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碎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碎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。ルワンダ北西部の MT データ解析結果における比抵抗分布平面図から、以下に示す比抵抗不連続線、R1、R2 及び R3 が検出された。

比抵抗不連続線 R1

比抵抗不連続線 R1 は、Gisenyi 地域南部から Karisimbi 地域中央部にかけて概略北東－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、深度 500m から深度 2,000m の解析比抵抗分布平面図（図 3-2.69～図 3-2.73）において明瞭に認められる。

比抵抗不連続線 R2 及び R3

比抵抗不連続線 R2 及び R3 は、Kinigi 地域の北部から中央部にかけて、概略北北東－南南西方向に延びる比抵抗不連続線である。これらの比抵抗不連続線 R2 及び R3 は、深度 1,500m あ

るいは、それ以深の深部における解析比抵抗分布平面図（図 3-2.85～図 3-2.90）において明瞭に認められる。

上記の比抵抗不連続線 R1 は、その示徴も明瞭であり、かつ、規模も大きいため、断層を反映した比抵抗不連続線である可能性が高い。ただし、この比抵抗不連続線 R1 の周辺域においては熱水変質帯の存在を示唆するような 10 ohm-m 以下の低比抵抗域は認められない。このことから、この比抵抗不連続線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は低いものと考えられる。

Kinigi 地域で抽出された比抵抗不連続線 R2 及び R3 周辺においては、深度 1,500m 以深でスメクタイトや混合層粘土鉱物から構成される熱水変質帯を反映している可能性がある 10 ohm-m 以下を示す顕著な低比抵抗域が分布している。このことから、比抵抗不連続線 R2 及び R3 周辺は破碎帯が発達している可能性があり、地下の地熱流体の貯留・流動と関連のある断裂構造を反映している可能性がある。

ii) 低比抵抗域

3 次元比抵抗構造解析結果、Gisenyi 地域及び Karisimbi 地域においては浅部から深部に至るまで、25 ohm-m 以下を示す低比抵抗域は検出されなかった。このことは、Gisenyi 地域及び Karisimbi 地域の地熱活動は比較的弱く、地熱貯留層の帽岩的な役割を果たす熱水変質帯は発達していないことを示唆する。Gisenyi 地域の南西部には温泉の分布が確認されているものの、この温泉と関連するような低比抵抗域はこの温泉周辺域で認められないことから、この温泉水は地表付近のみに分布しており、規模の大きな地熱活動が存在するものとは考え難い。

一方、Kinigi 地域の北部域では、深度 1,500 m あるいはそれ以深において、10 ohm-m 以下を示す低比抵抗域の存在が認められる。この低比抵抗域は、断層を反映している可能性がある比抵抗不連続線 R2 及び R3 周辺域及びこれらの比抵抗不連続線に挟まれる形状で分布していることから、これらの比抵抗不連続線 R2 及び R3 周辺に流動する地熱流体によって形成された地下深部の熱水変質帯を反映したものである可能性がある。

iii) 深部高比抵抗域

規模の大きな高比抵抗域の分布が、Karisimbi 地域南部の深度 1,000 m から深度 2,500 m において認められる（図 3-2.71～図 3-2.74）。この規模の大きな高比抵抗域は、630 ohm-m 以上と非常に高い比抵抗値を示しており、この高比抵抗域の上位には全く低比抵抗域の分布が認められない。このことから、Karisimbi 地域南部の深部に分布するこの高比抵抗域はイライトやクローライト等の高温で生成する熱水変質鉱物を反映したものではなく、破碎帯が発達していない緻密な火山岩を反映しているものと推定される。

4) Karisimbi, Gisenyi 及び Kinigi 地域における比抵抗構造

今回の MT 探査データの解析結果及び前述した地熱地域における比抵抗構造を考慮の上、検討したルワンダ北西部地域における比抵抗構造を以下に記述する。

Karisimbi 地域の南部及び Gisenyi 地域の中央部、深度 1,000 m から 3,000 m において高範囲に分布する 630 ohm-m 以上を示す高比抵抗域が認められた（図 3-2.71～図 3-2.75）。また、この高比抵抗域の北側地域においては、この高比抵抗域と比べて相対的に低い比抵抗を示す地域となっている。上記の Karisimbi 地域及び Gisenyi 地域の南部に分布する高比抵抗域とその北側地域

の相対的な低比抵抗域は比抵抗構造上、線状に分布する大きな変化部となっており、比抵抗不連続線 R1 が認められる（比抵抗不連続線は断層等の構造を反映することが多い）。

この Karisimbi 地域南部から Gisenyi 地域の中央部にかけての地域では、北西－南東方向に延びる形状を示す規模の大きなリニアメントが地質調査により検出されている。比抵抗不連続線 R1 は、この地質調査により検出されているリニアメントと概略同方向で同位置に分布していることから、比抵抗不連続線 R1 は断層を反映しており、この断層周辺には破碎ゾーンが存在する可能性がある。ただし、比抵抗不連続線 R1 の周辺域には 10 ohm-m 以下を示す低比抵抗域が全く存在しないことから、高温の深部地熱流体がこの比抵抗不連続線 R1 周辺を流動・貯留している可能性は低いものと考えられる。更に、この比抵抗不連続線 R1 の南側地域の深部は非常に高い比抵抗域で構成されていることから、比抵抗不連続線 R1 の南側地域は破碎帯が発達していない緻密な火山岩で構成されているものと推定される。

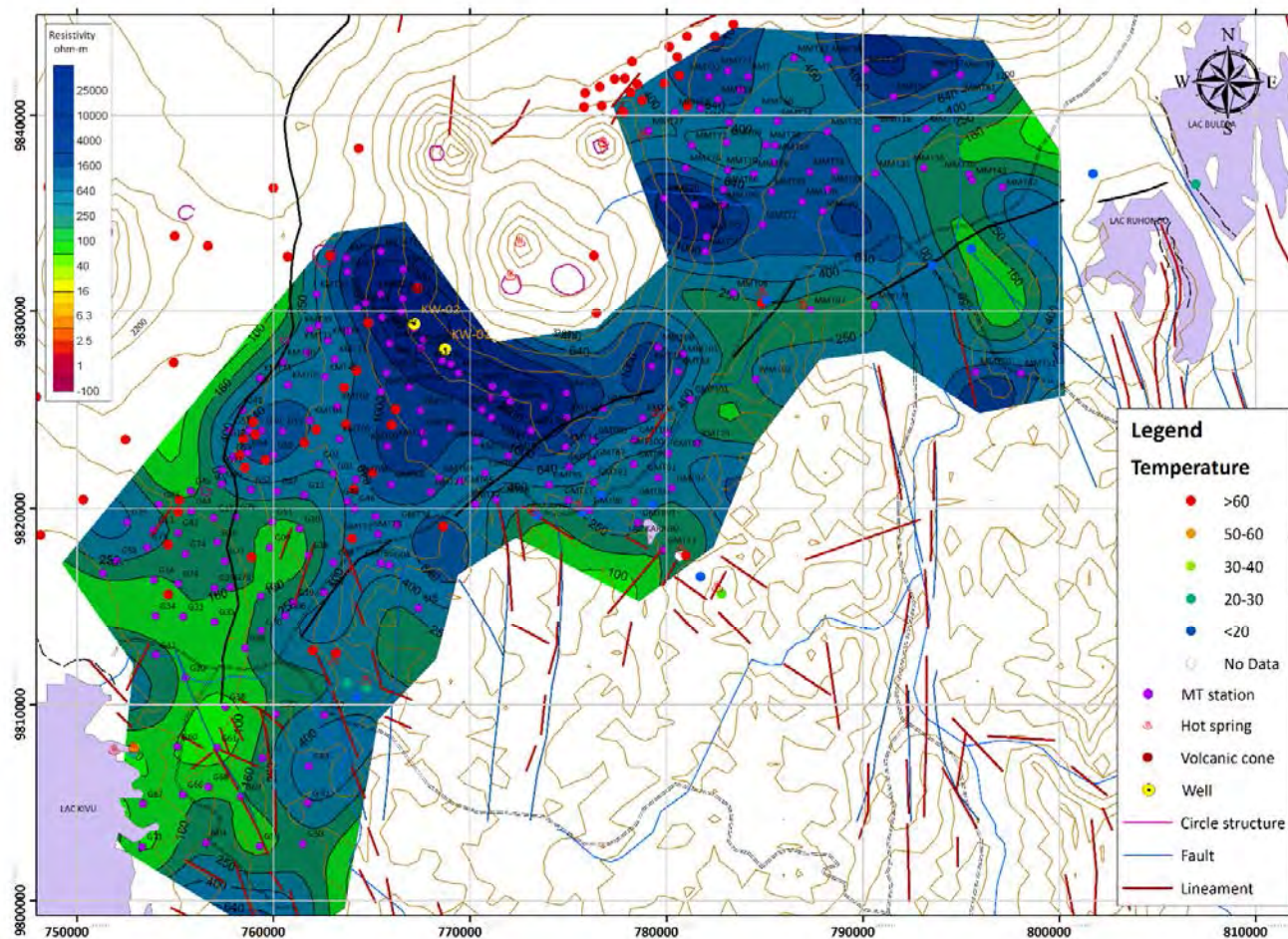
前述したように、多くの地熱地域においては、スメクタイトや混合層粘土鉱物等の変質鉱物から形成された熱水変質帯を反映した、比較的広範囲に分布する低比抵抗域が分布している。このような低比抵抗域は一般的に透水性が低く、このため、深部から上昇してくる高温の地熱流体の上昇を妨げ、その下位に地熱流体を貯留する帽岩的な役割を果たすことが多い。このため、このような低比抵抗域は地熱構造を検討する上で重要な因子である。

しかし、Gisenyi 地域及び Karisimbi 地域においては、地表から深度 5,000 m に至るまで、40 ohm-m 以下を示す比抵抗域が認められない。このことから、Gisenyi 地域及び Karisimbi 地域では、地熱発電所が稼動している地熱地域と比較すると地熱活動が弱く、スメクタイトや混合層粘土鉱物等で構成される熱水変質帯も発達していないことが示唆される。ただし、Karisimbi 山の山頂付近には MT 探査測点が存在せず、MT データが取得されていないため、現状では Karisimbi 山の山頂周辺の深部の構造を明らかにすることは困難である。

高温の温泉が存在するカラゴ地域やカラゴ地域の南部は、カラゴ地域の北側に分布する高比抵抗域と比較すると、深部で相対的な低比抵抗異常域となっている。ただし、カラゴ地域周辺には MT 探査測点が少なく、また、カラゴ地域の西側地域や東側地域には MT 探査測点が全く存在しないことから、今回の解析によりカラゴ地域周辺の比抵抗構造を推定することは困難である。

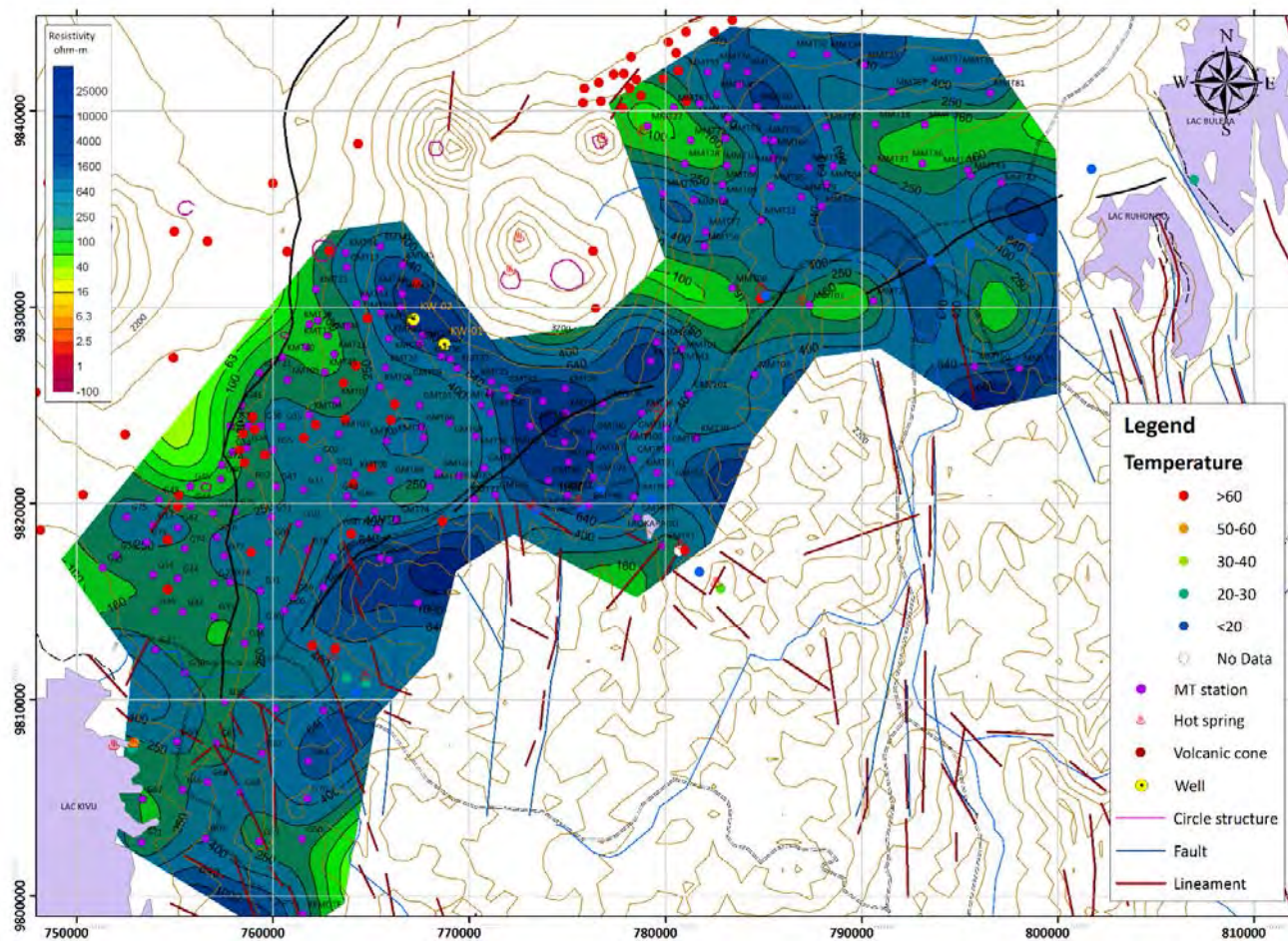
一方、Kinigi 地域の北部域では、深度 2,000 m あるいはそれ以深において、10 ohm-m 以下を示す顕著な低比抵抗域の分布が認められる（図 3-2.86～図 3-2.90）。また、深度 1,500 m 以深において、断層を反映している可能性がある比抵抗不連続線 R2 及び R3 が、この顕著な低比抵抗域の西端部及び東端部に検出されている。これらのことから、比抵抗不連続線 R2 及び R3 は断層を反映しており、それらの断層周辺に存在する破碎ゾーンを通じて深部地熱流体が上昇し、深部低比抵抗域周辺において流動・貯留している可能性がある。

多くの活発な地熱地域では、200°C を越える温度の地熱流体が深部で貯留されている。このような地熱貯留層が存在する場合には、200°C を越える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鉱物を反映する深部高比抵抗域の隆起構造が、地熱貯留層の帽岩を反映する低比抵抗域の下位に認められるのが一般的である。しかし、Kinigi 地域北部の深部に分布する顕著な低比抵抗域の下位には深部高比抵抗域の隆起構造は認められない。このことから、Kinigi 地域北部の深部に認められる低比抵抗域周辺に地熱流体が存在する場合においても、大規模な地熱発電を行えるような高温の流体である可能性は低いことが示唆される。



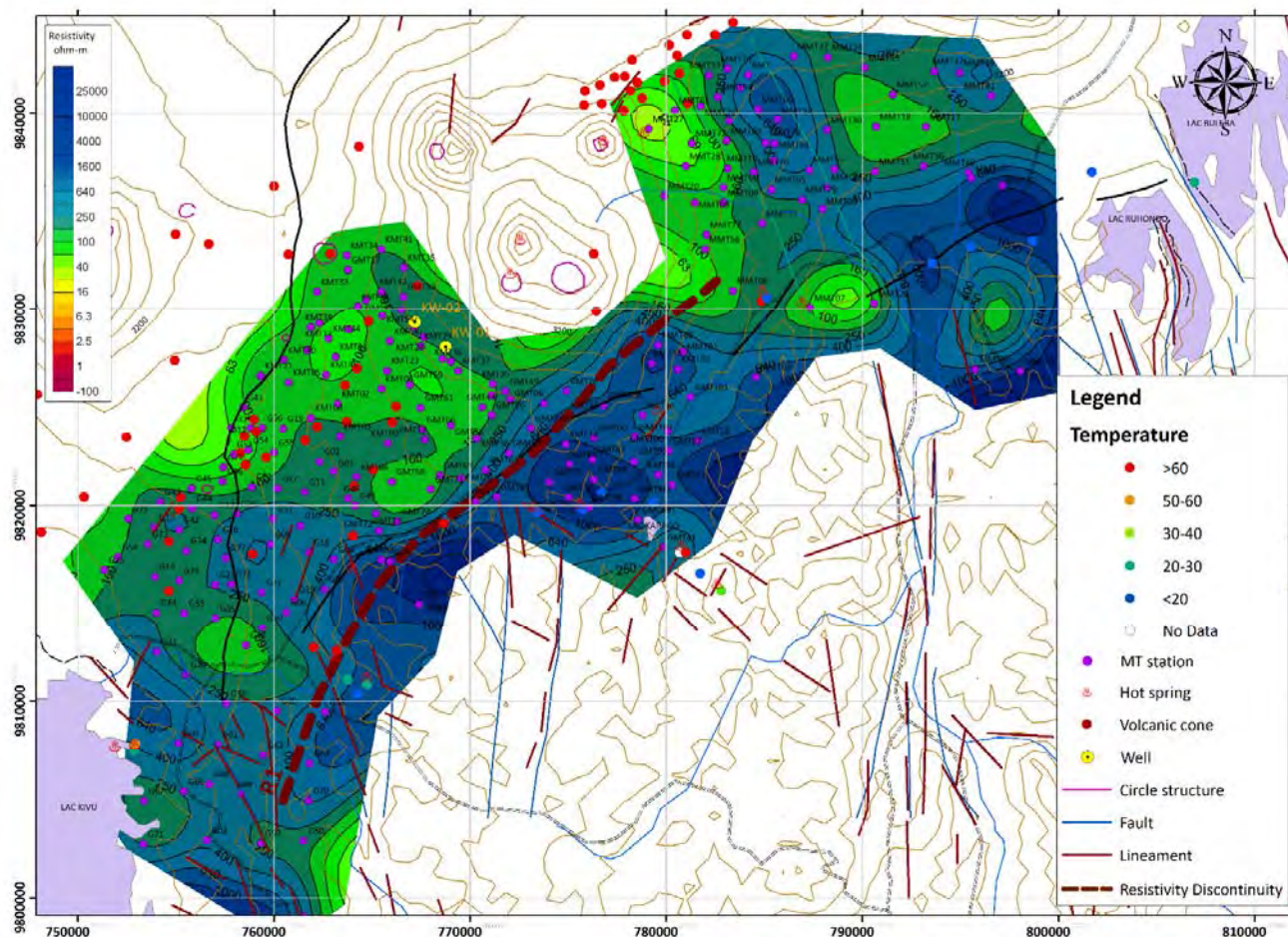
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.67 解析比抵抗分布平面図（深度 100m）



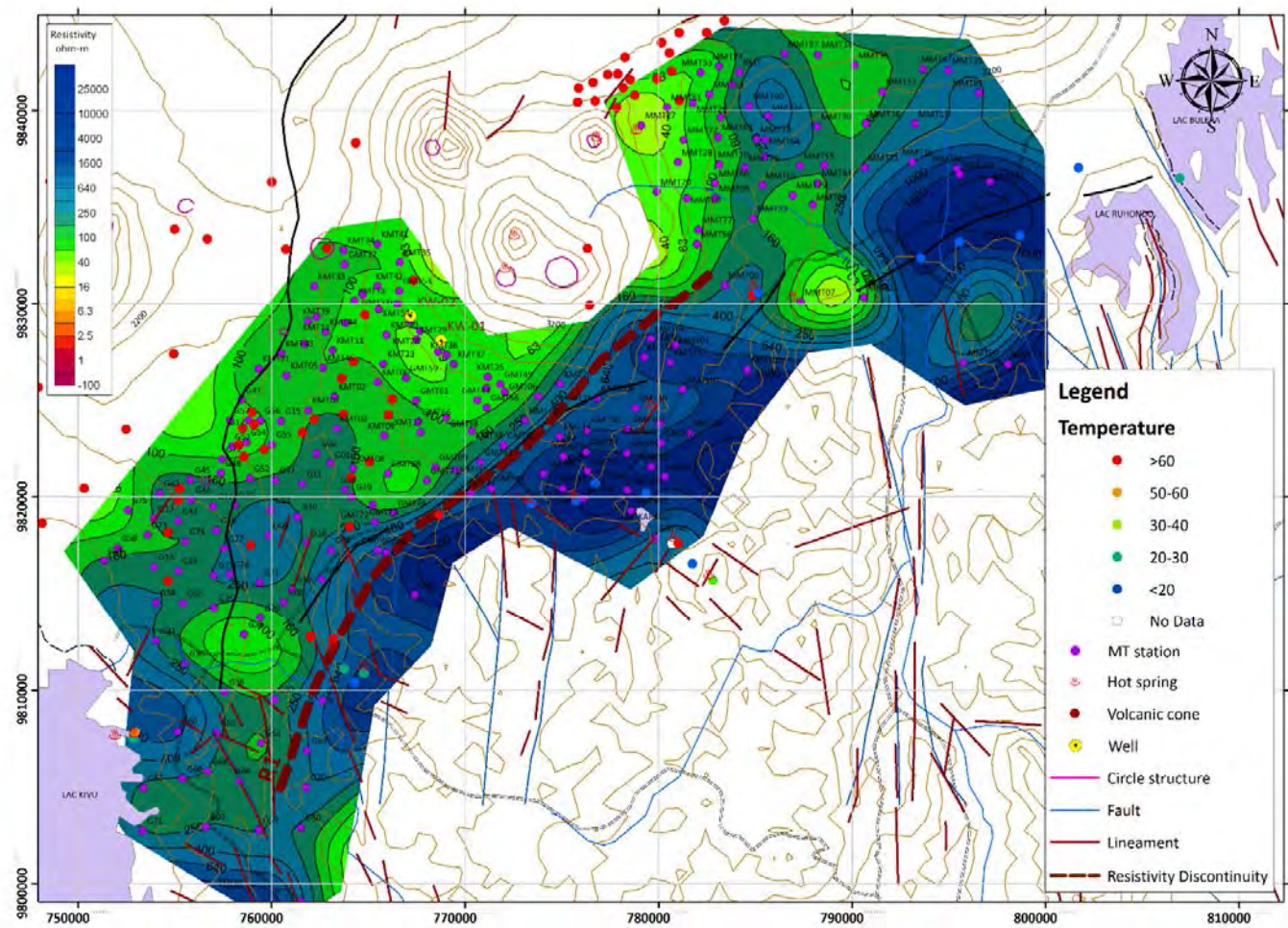
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.68 解析比抵抗分布平面図（深度 300m）



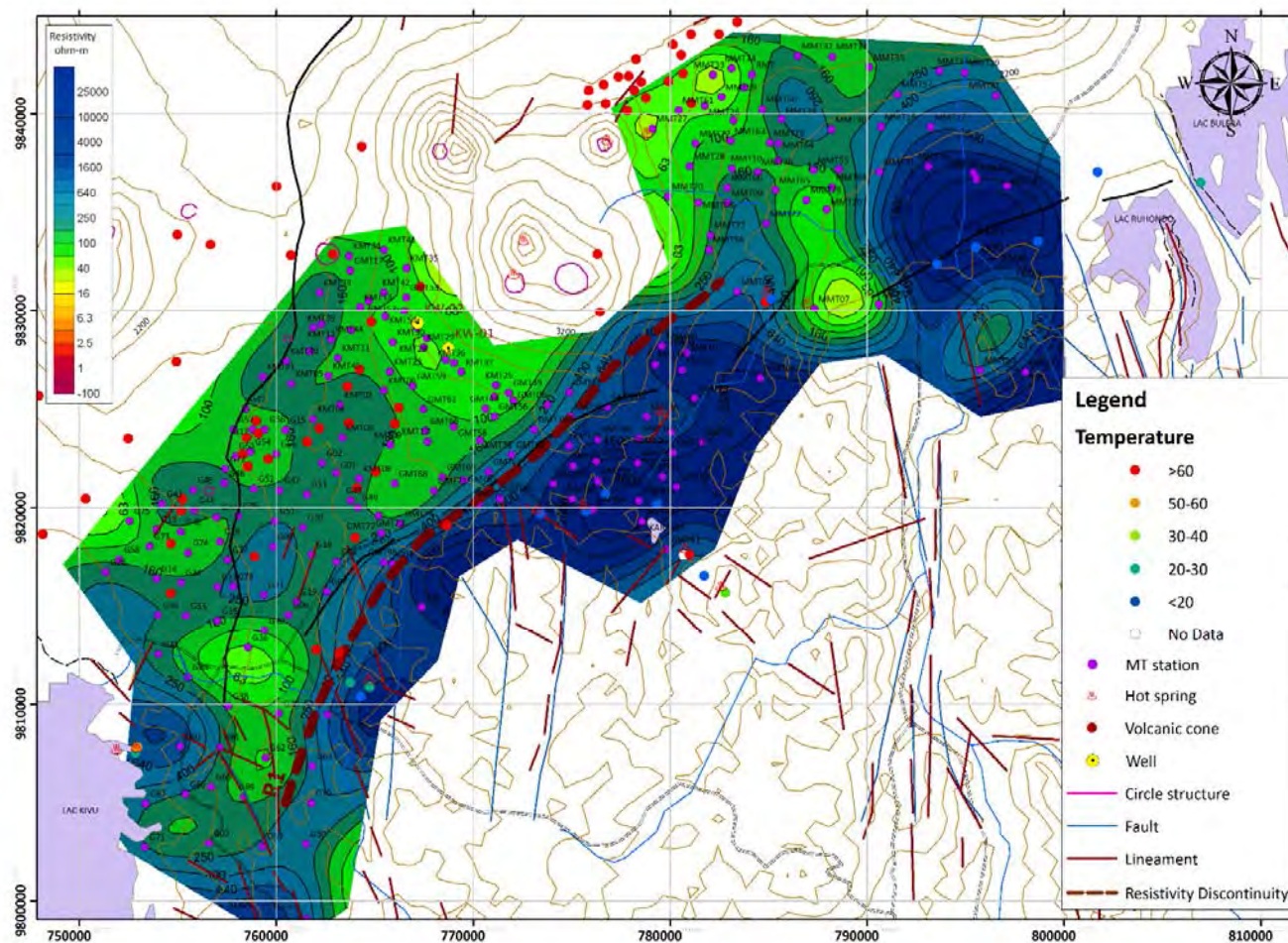
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.69 解析比抵抗分布平面図 (深度 500m)



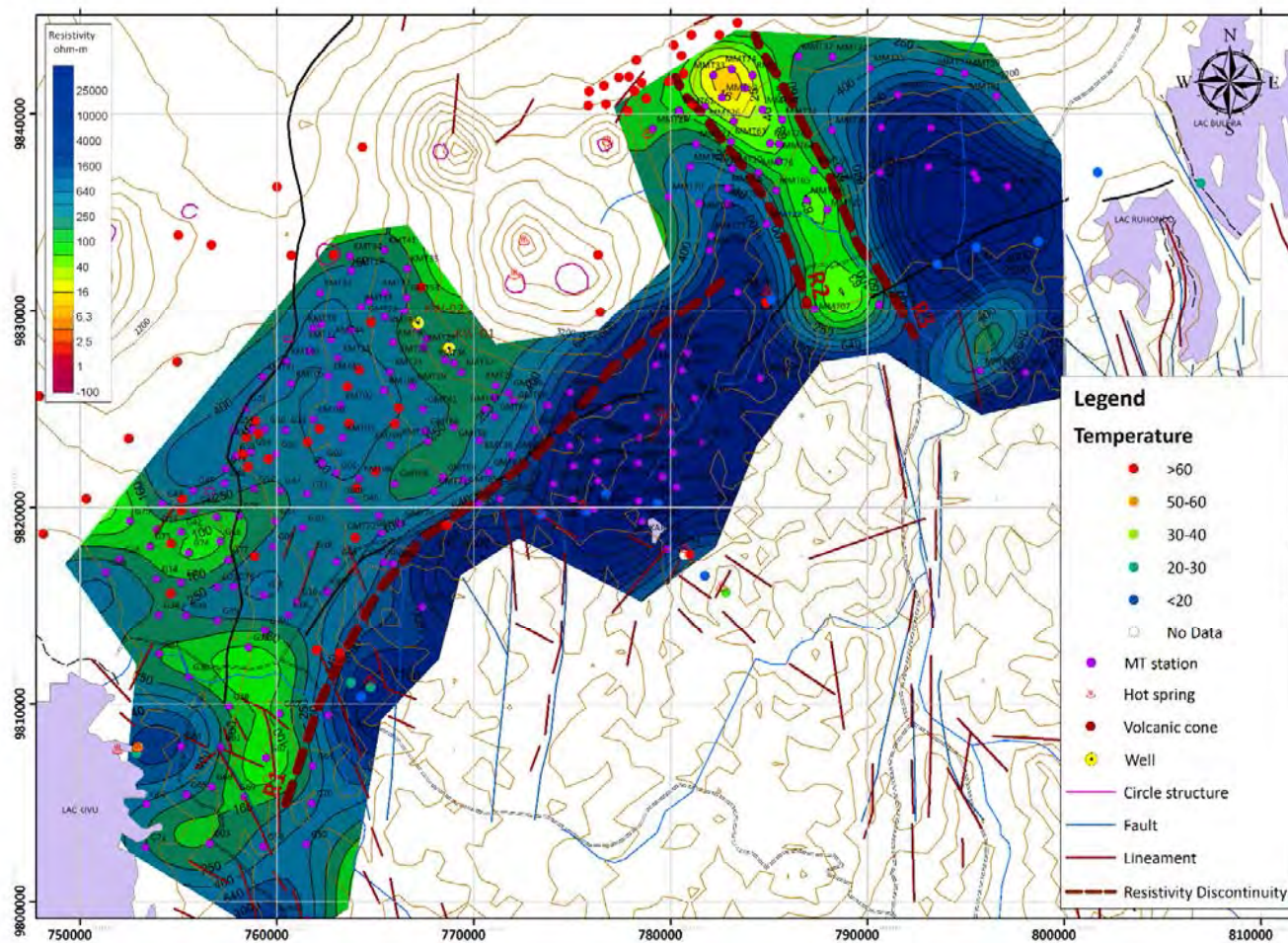
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.70 解析比抵抗分布平面図（深度 750m）



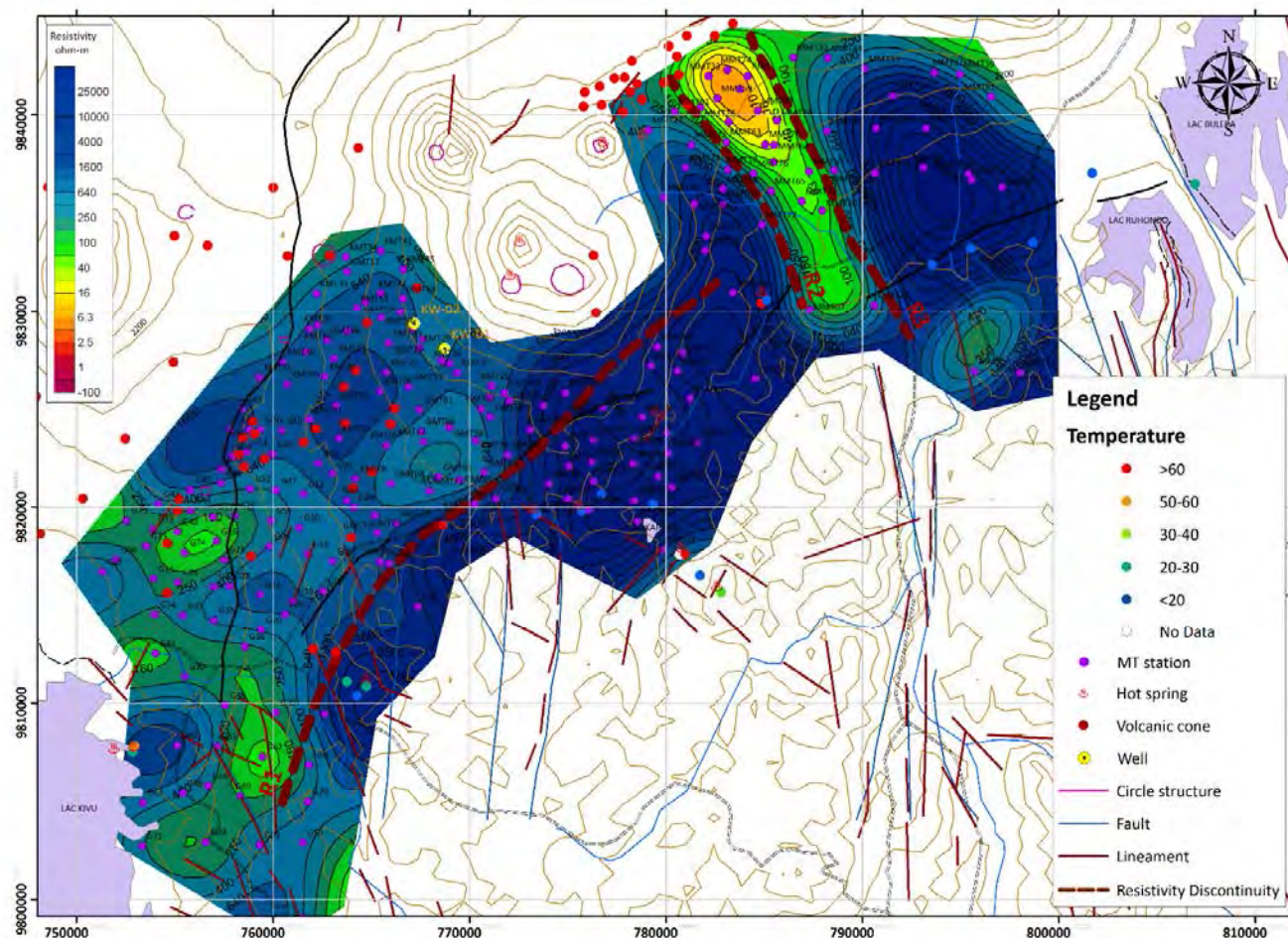
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.71 解析比抵抗分布平面図 (深度 1,000m)



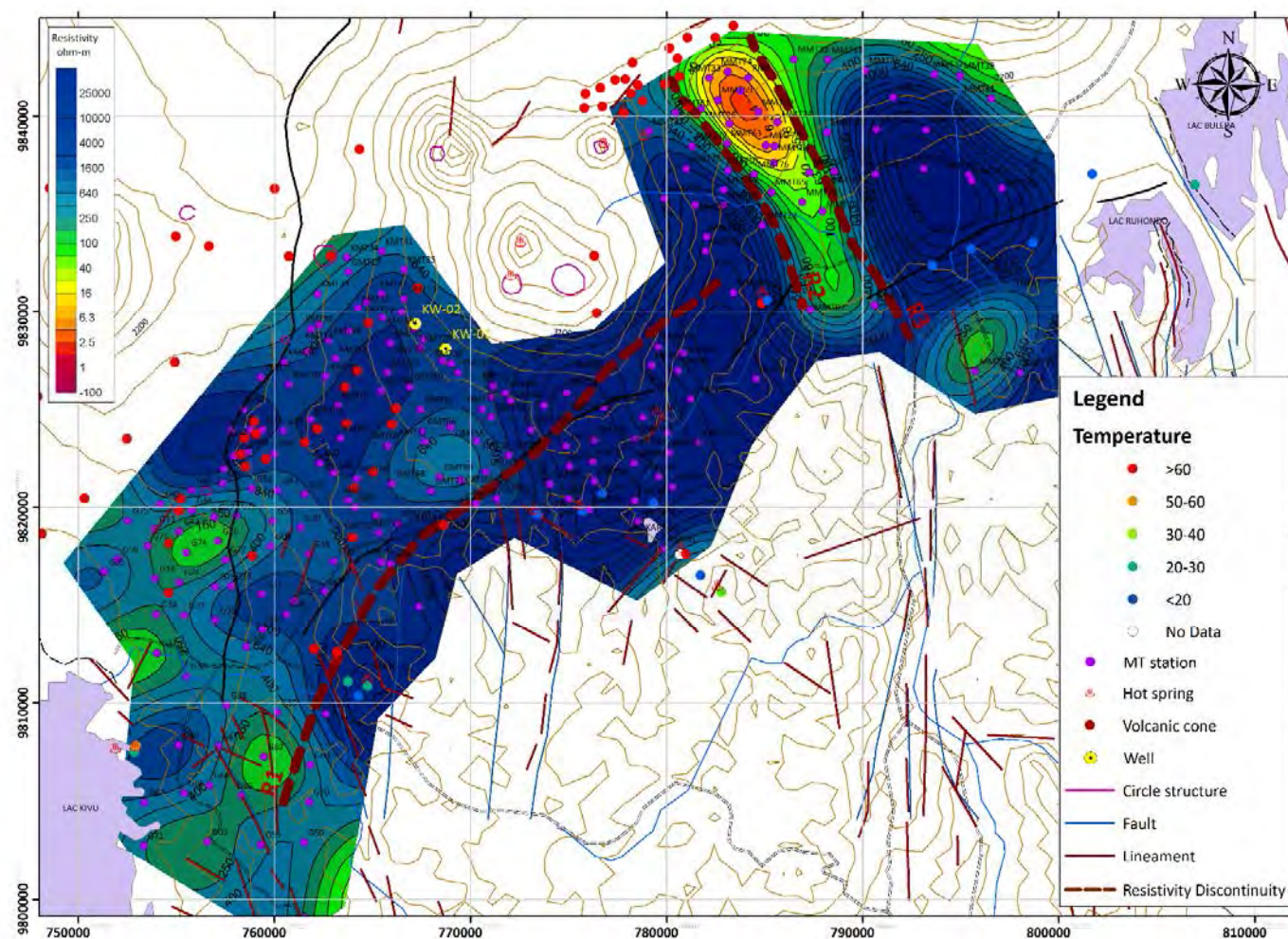
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.72 解析比抵抗分布平面図 (深度 1,500m)



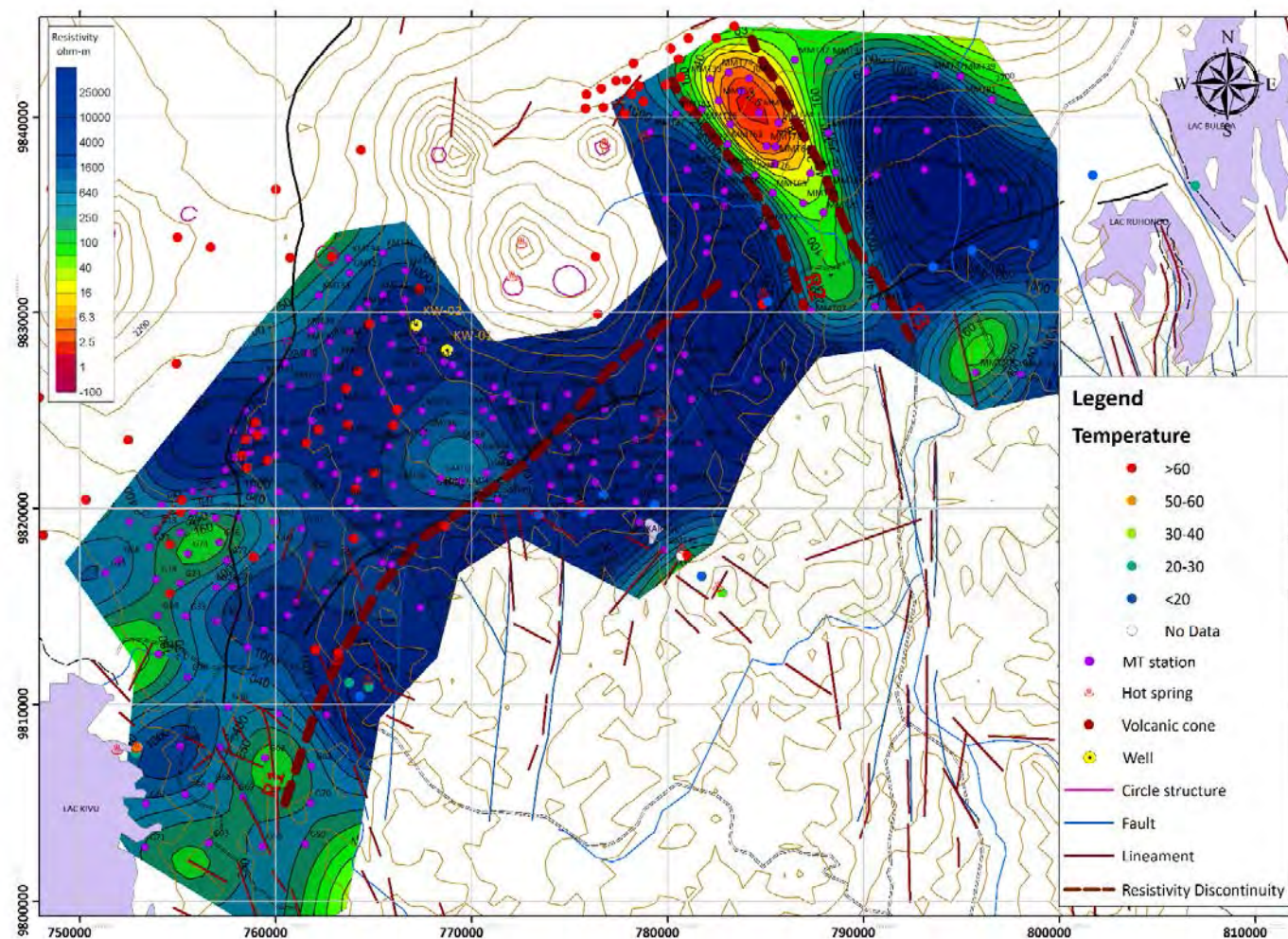
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.73 解析比抵抗分布平面図 (深度 2,000m)



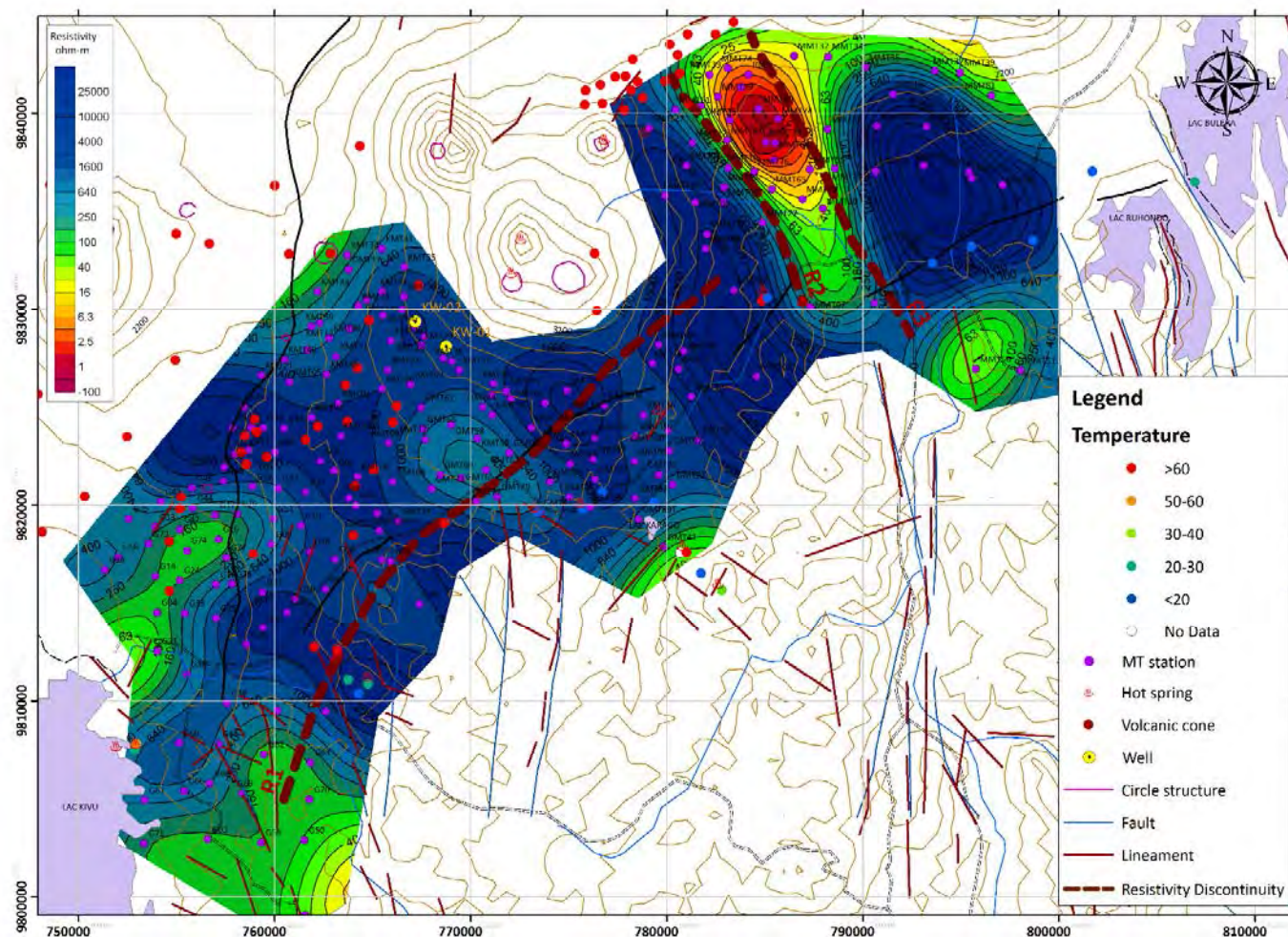
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.74 解析比抵抗分布平面図（深度 2,500m）



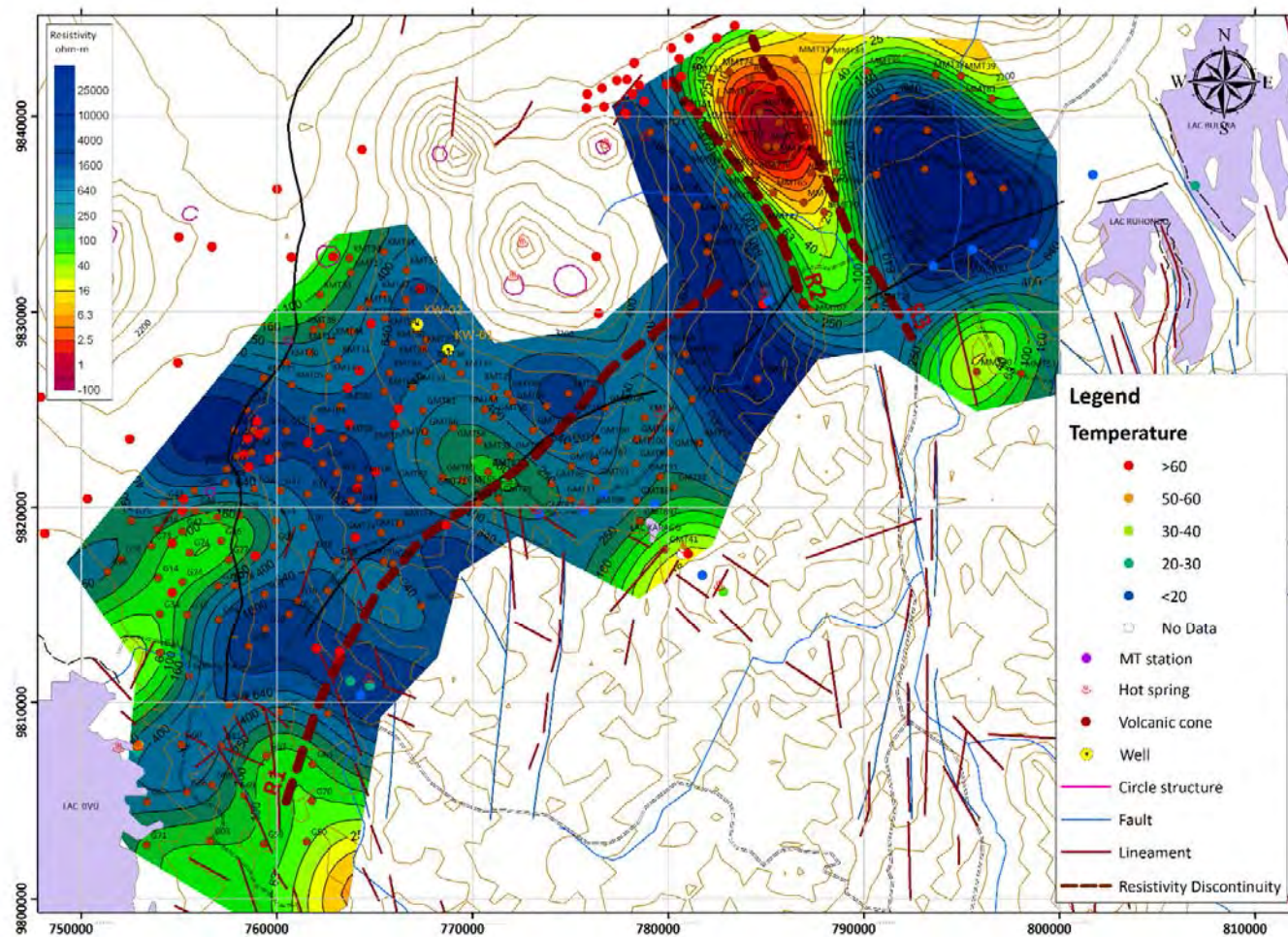
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.75 解析比抵抗分布平面図 (深度 3,000m)



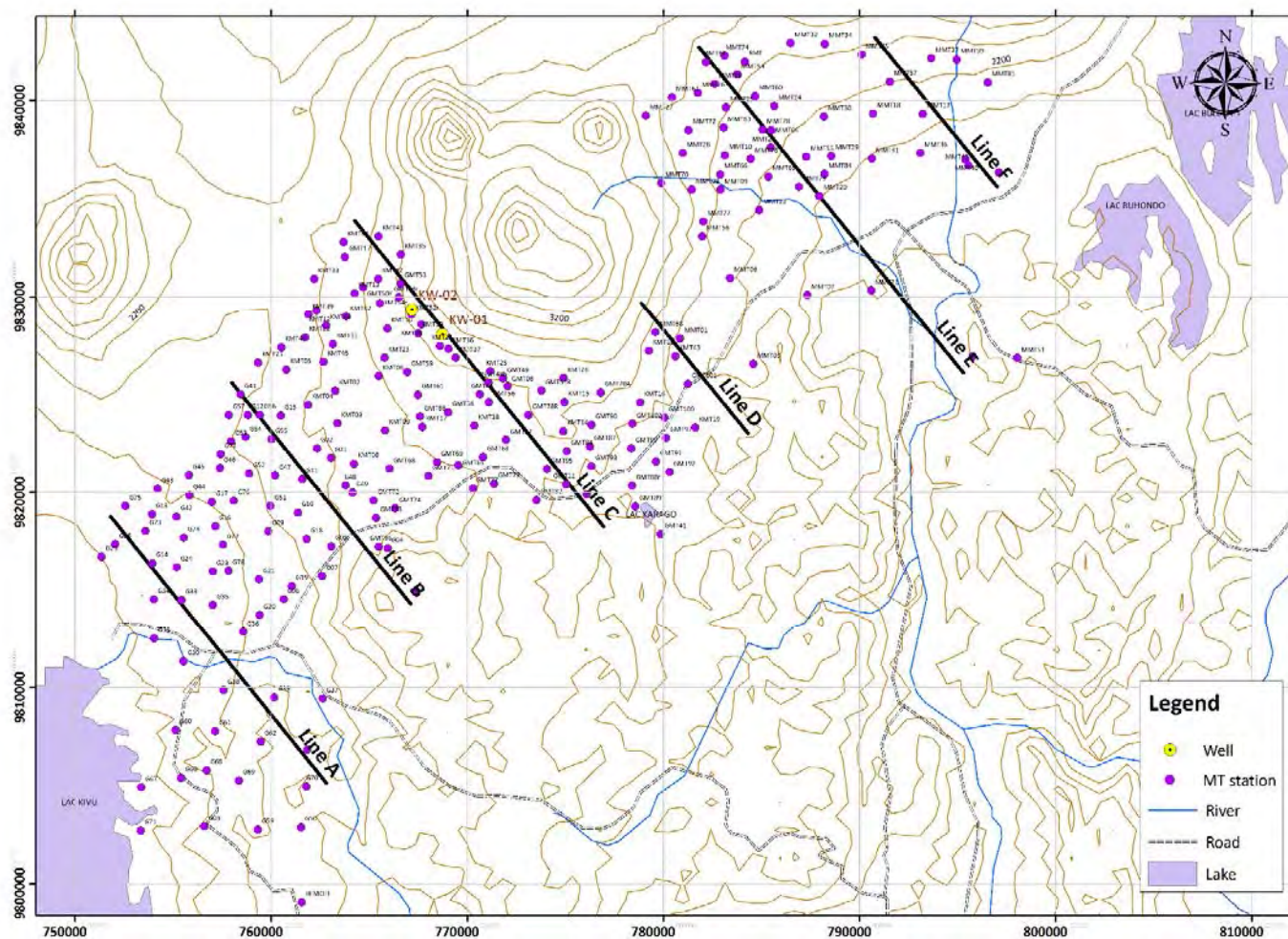
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.76 解析比抵抗分布平面図（深度 4,000m）



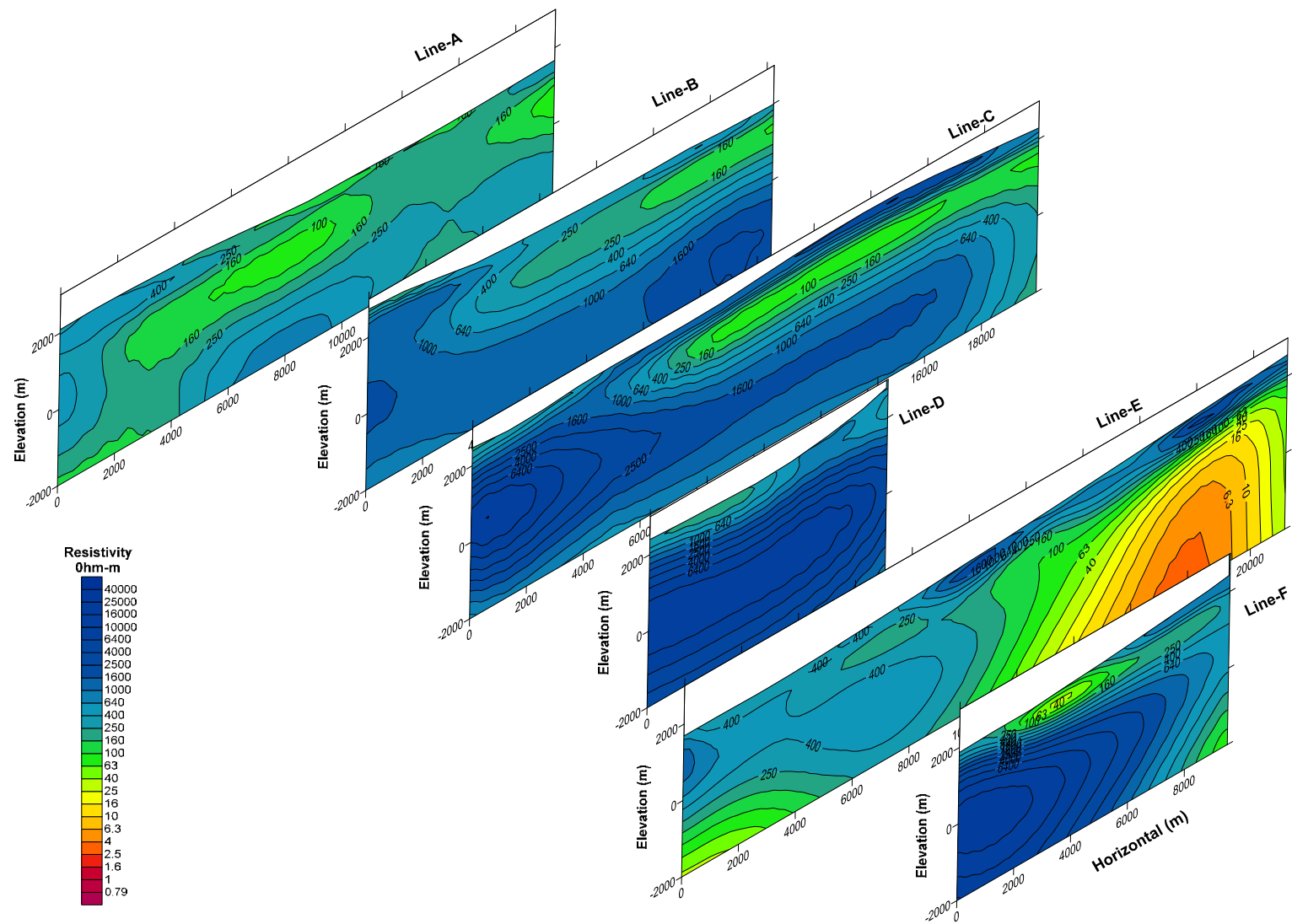
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.77 解析比抵抗分布平面図 (深度 5,000m)



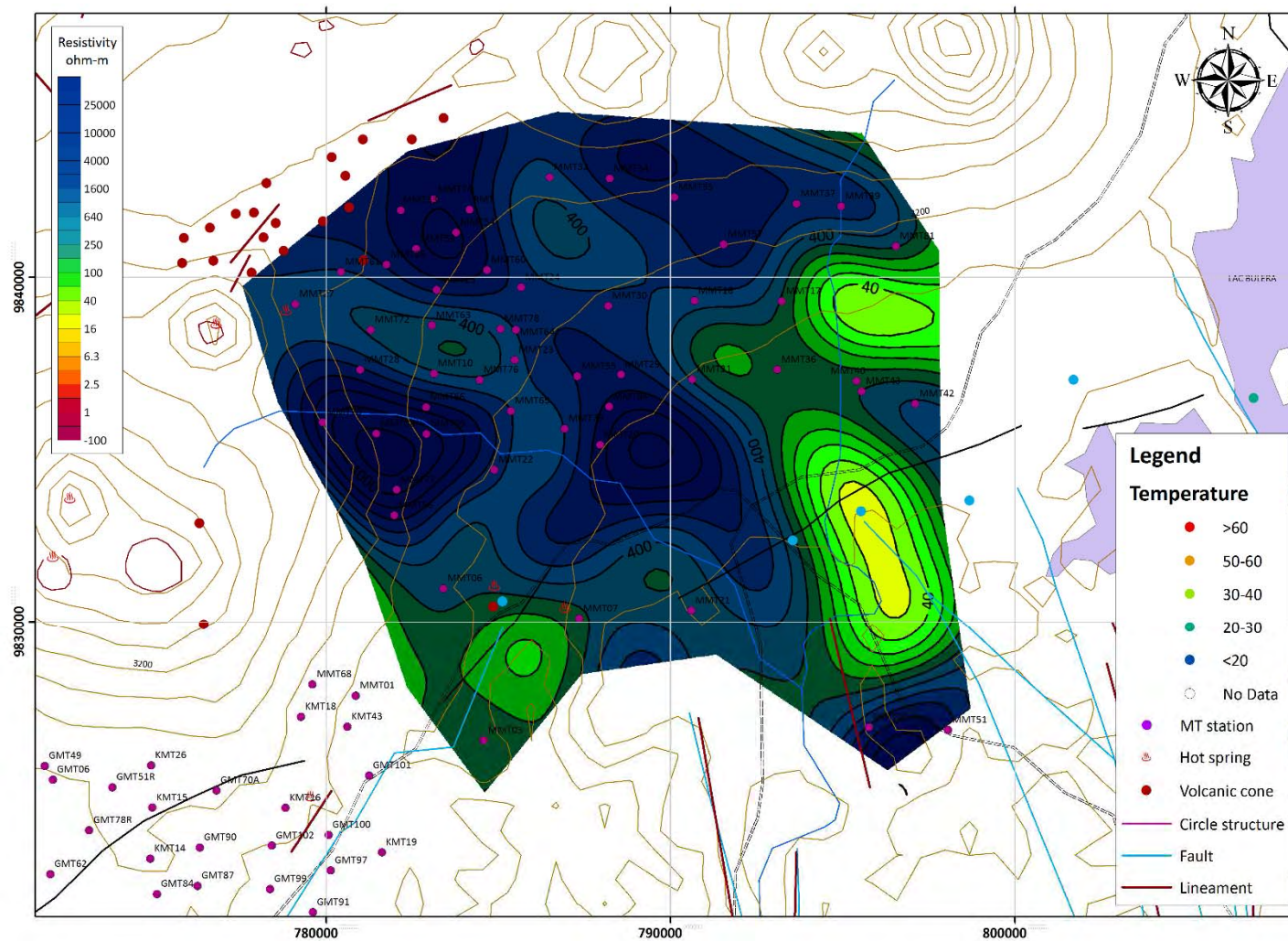
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.78 解析比抵抗分布断面位置



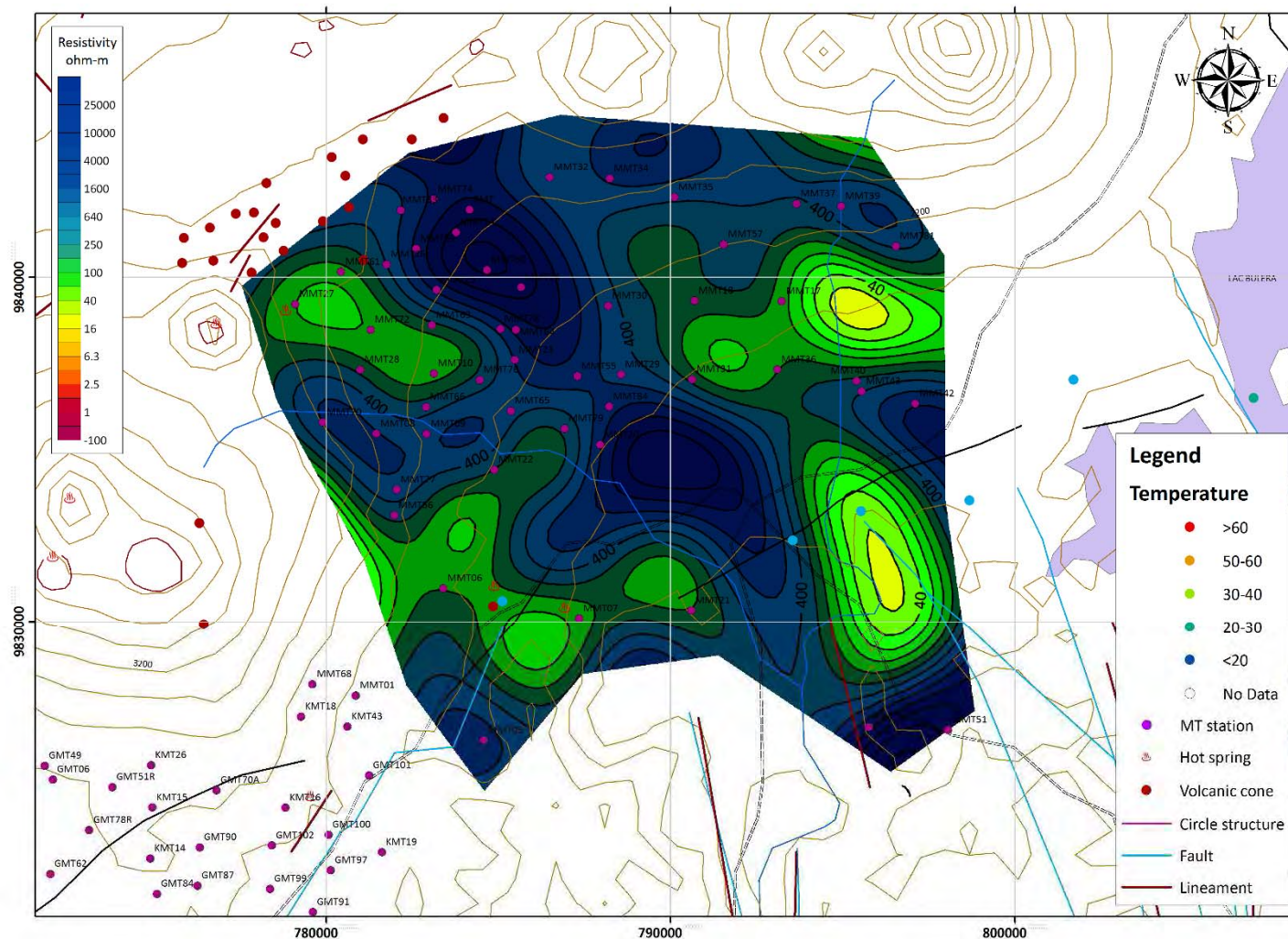
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.79 解析比抵抗分布断面図 (Line-A~Line-F)



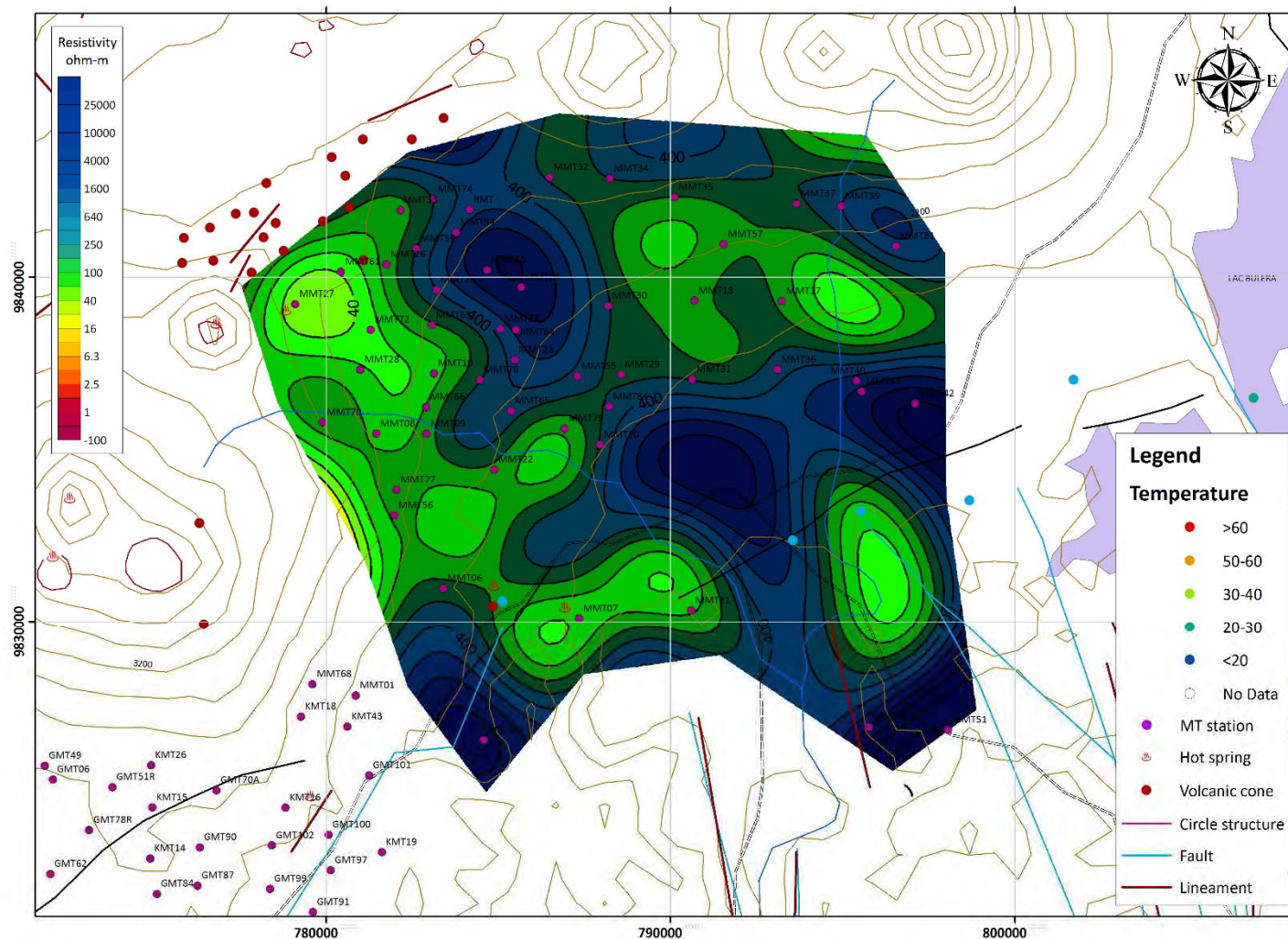
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.80 解析比抵抗分布平面図 (Kinigi 地域、深度 100m)



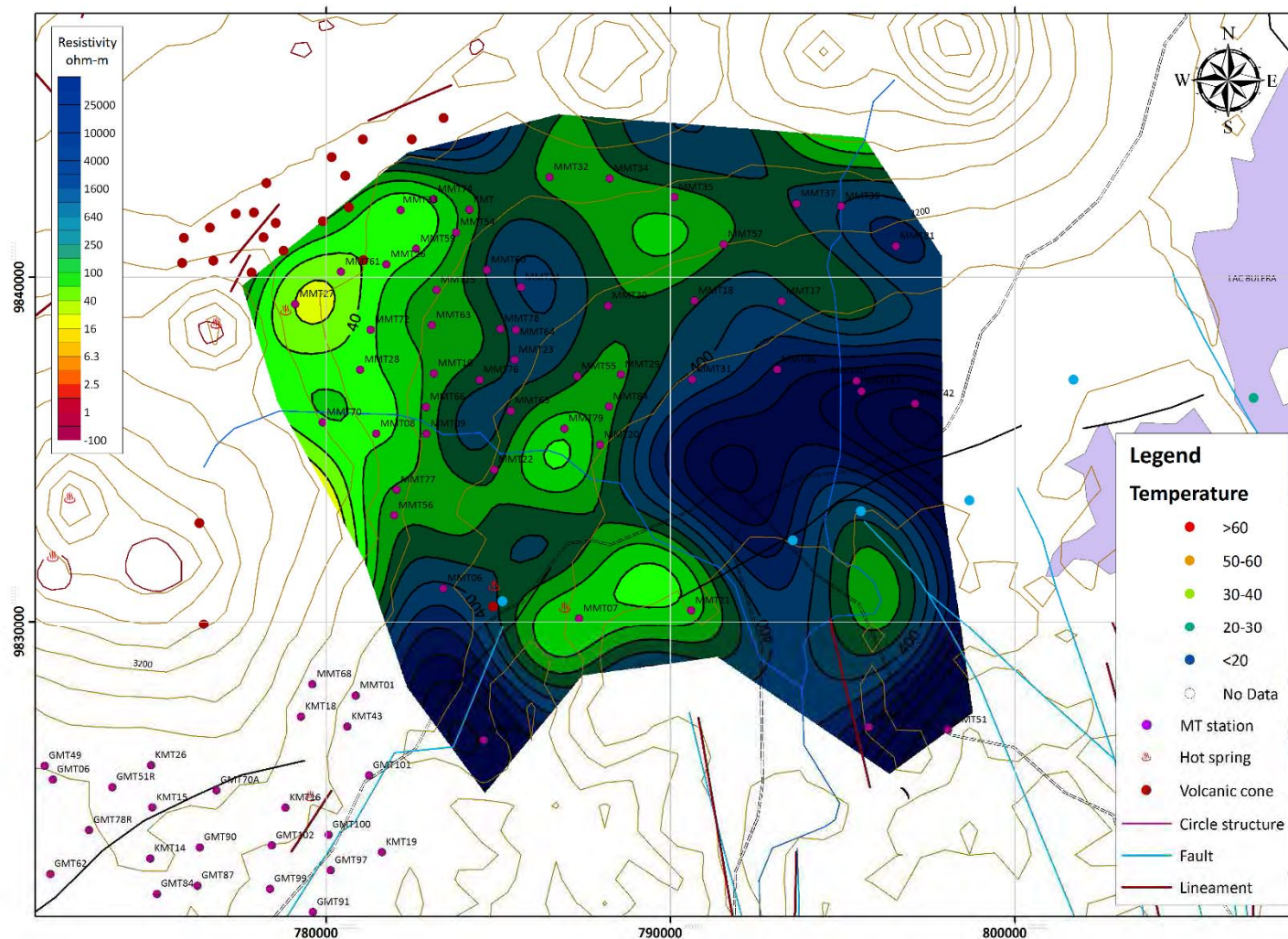
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.81 解析比抵抗分布平面図 (Kinigi 地域、深度 300m)



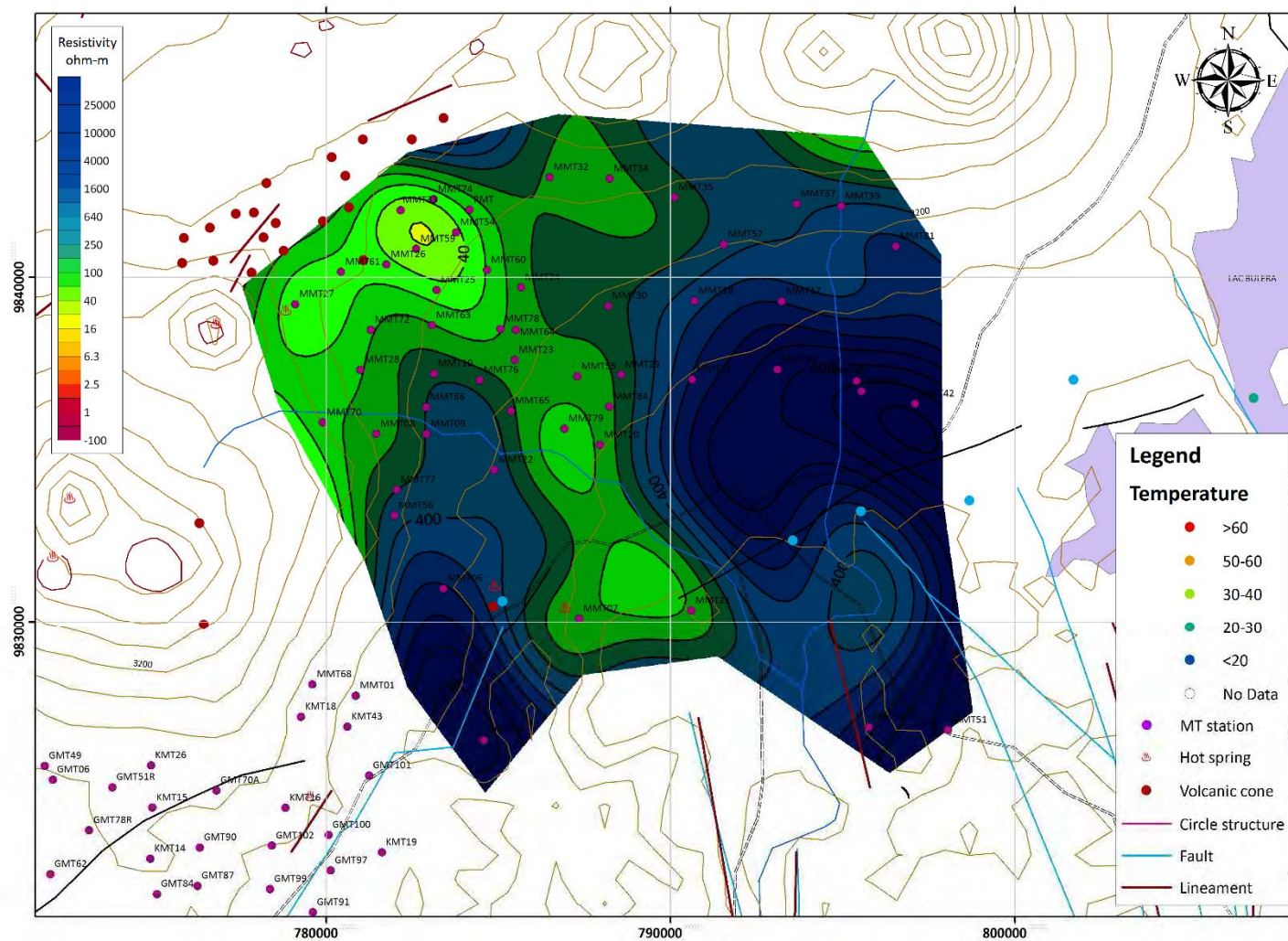
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.82 解析比抵抗分布平面図 (Kinigi 地域、深度 500m)



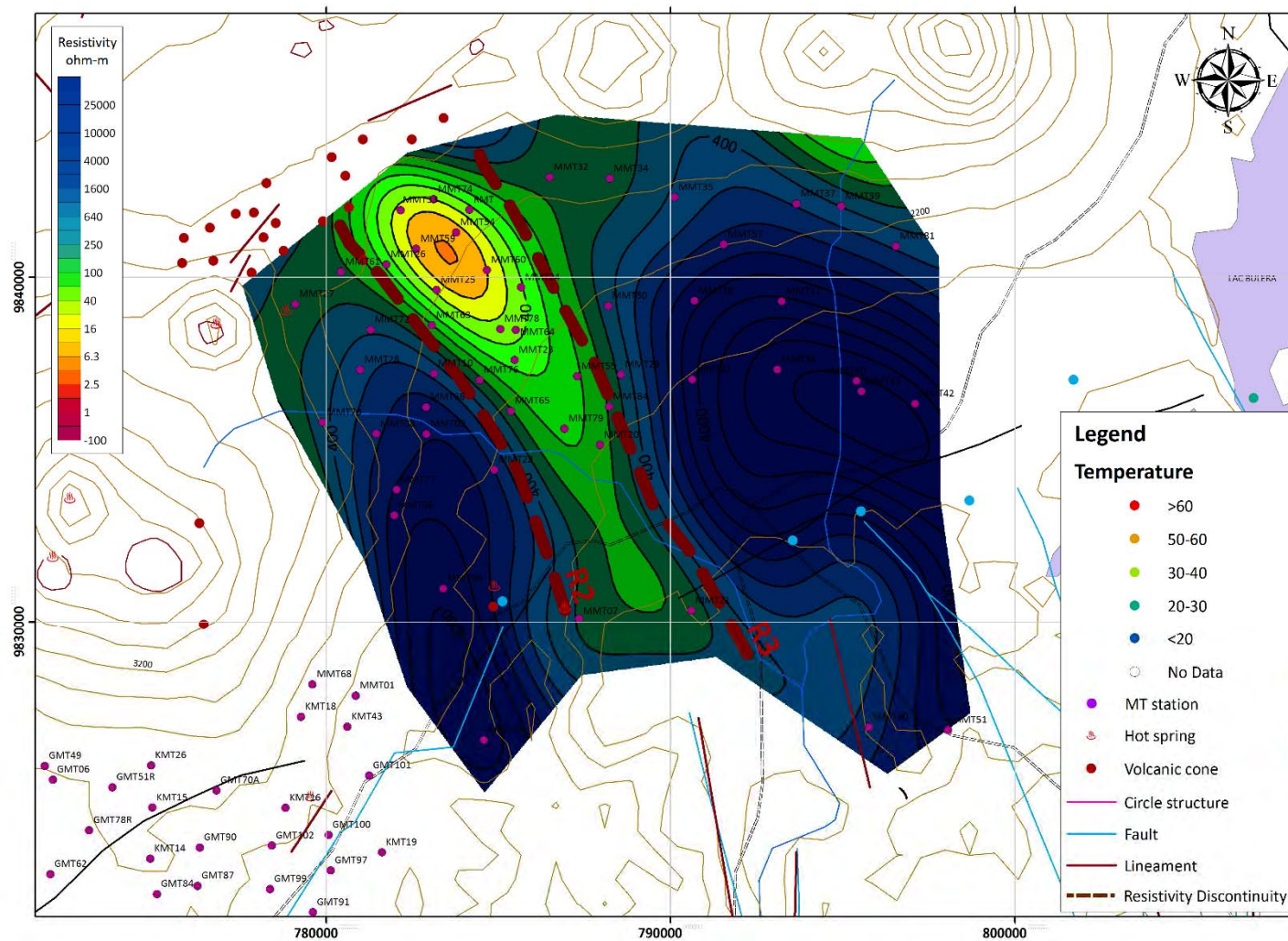
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.83 解析比抵抗分布平面図 (Kinigi 地域、深度 750m)



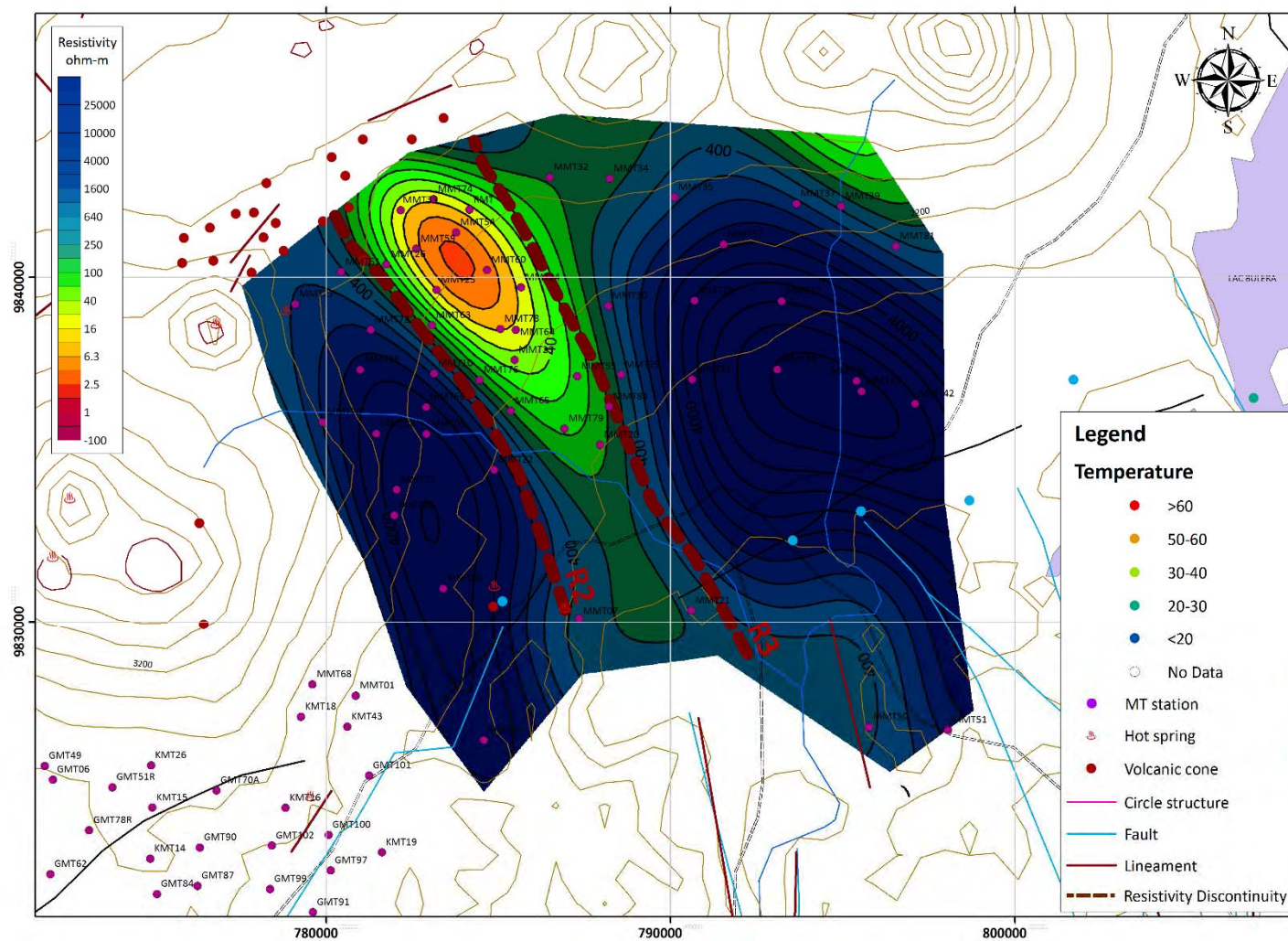
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.84 解析比抵抗分布平面図 (Kinigi 地域、深度 1,000m)



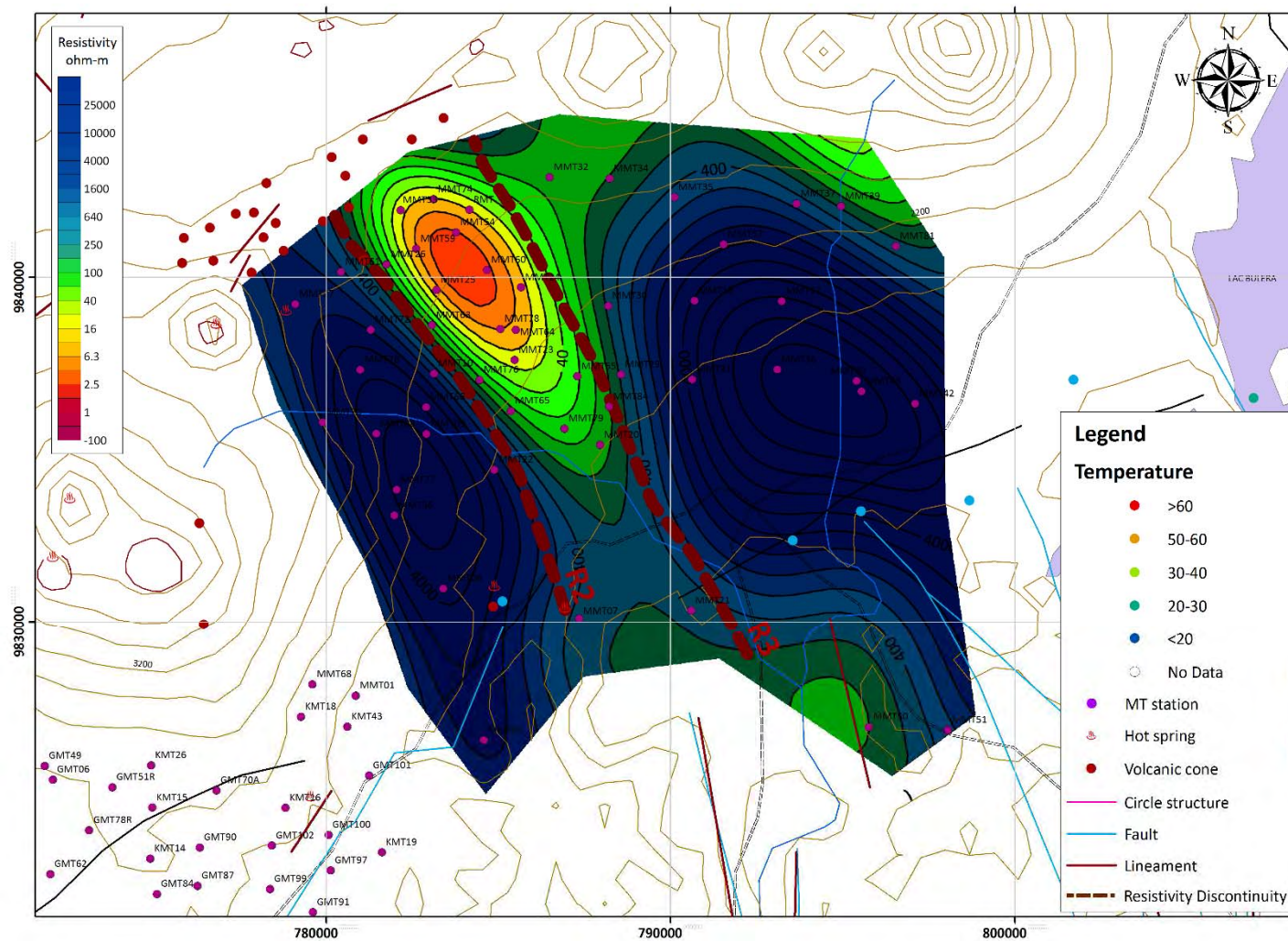
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.85 解析比抵抗分布平面図 (Kinigi 地域、深度 1,500m)



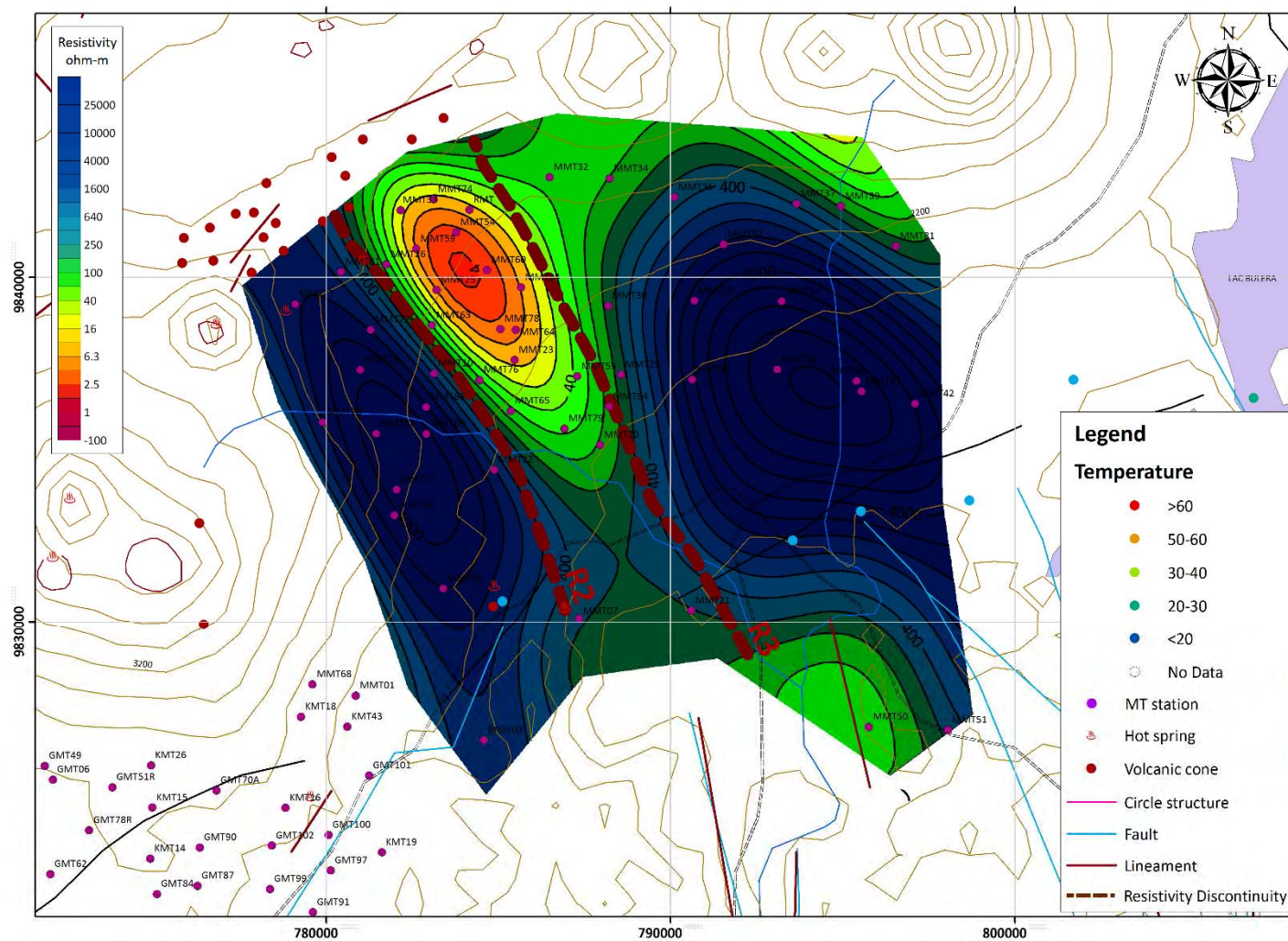
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.86 解析比抵抗分布平面図 (Kinigi 地域、深度 2,000m)



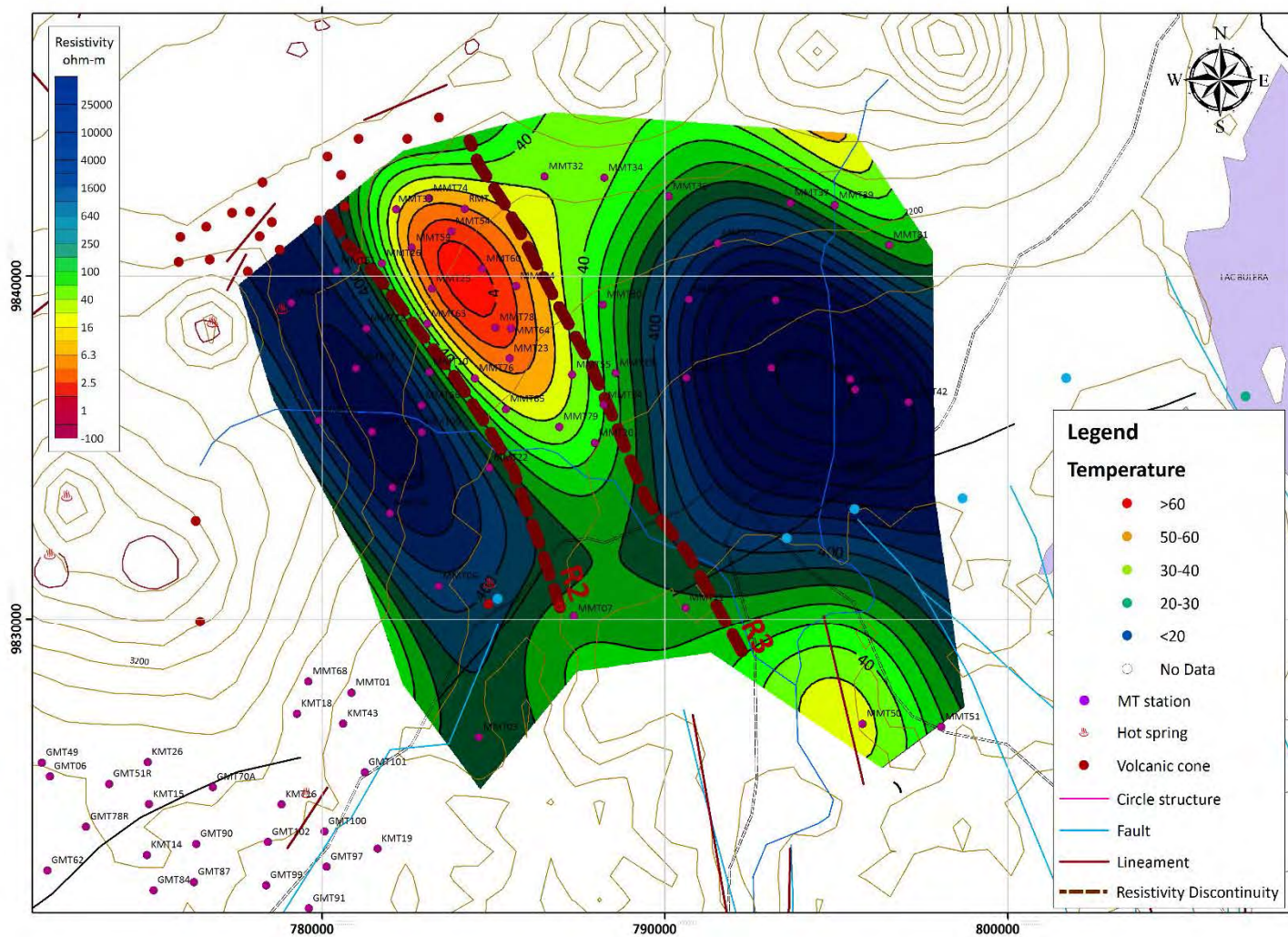
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.87 解析比抵抗分布平面図 (Kinigi 地域、深度 2,500m)



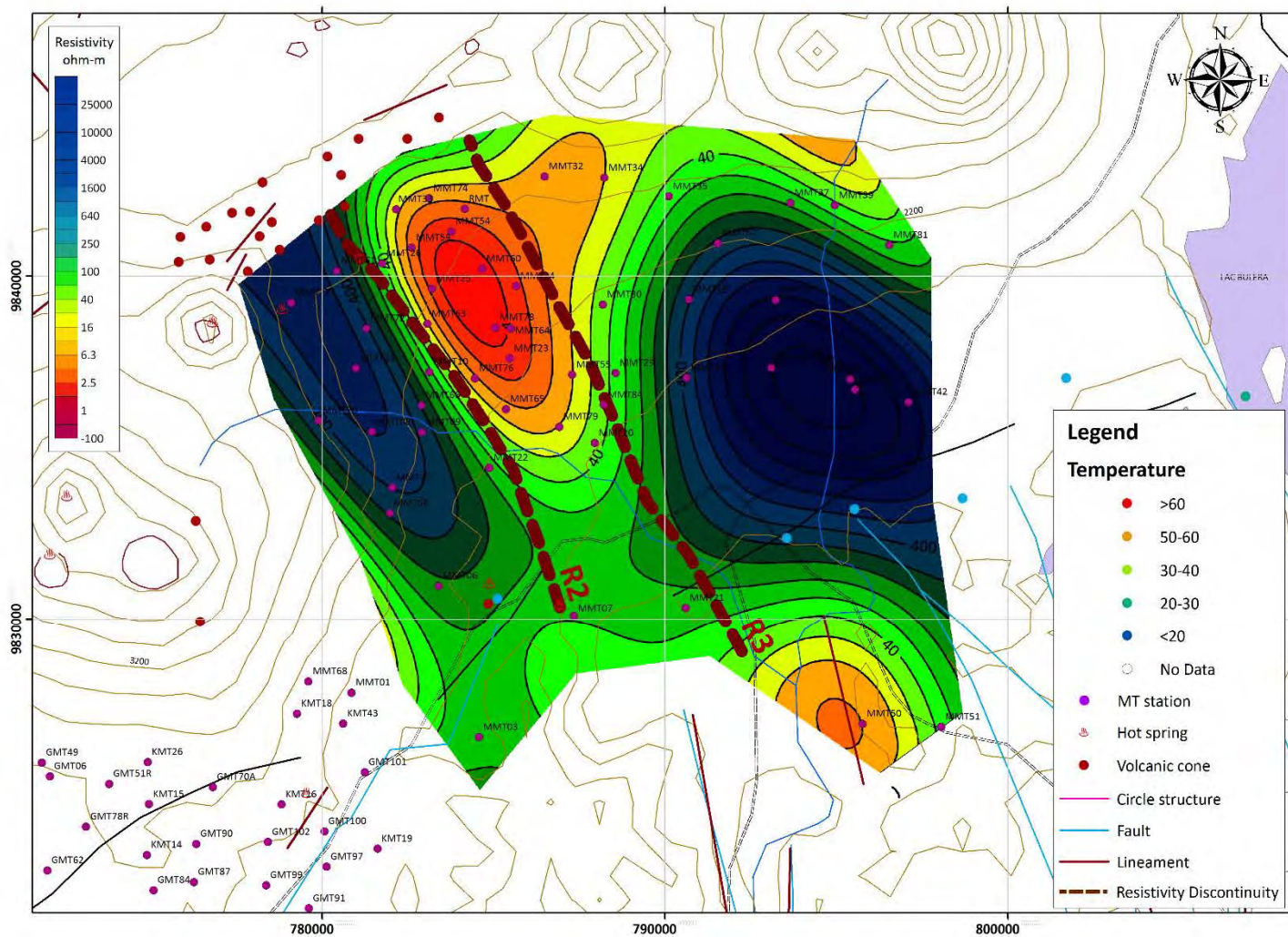
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.88 解析比抵抗分布平面図 (Kinigi 地域、深度 3,000m)



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.89 解析比抵抗分布平面図 (Kinigi 地域、深度 4,000m)



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.90 解析比抵抗分布平面図 (Kinigi 地域、深度 5,000m)

(2) Bugarama 地域における重力探査

1) 現地調査

i) 現地調査実績

現地調査の実績を表 3-2.20 に示す。

表 3-2.20 現地調査実績

項 目	月 日		6月														7月																						
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18					
1. 移動（福岡→キガリ）																																							
2. 資機材準備																																							
3. 移動（キガリ→ブガラマ）																																							
4. 打ち合わせ、測定準備																																							
5. 重力測定																																							
6. データ整理																																							
7. 移動（ブガラマ→キガリ）																																							
8. 機材搬入手続き																																							
9. 移動（キガリ→福岡）																																							

[出所] JICA 調査団で作成

ii) 測定機器

a) 重力計

本調査では、相対重力計を用いて基準点からの重力差を測定し、各測点の重力値を決定した。使用した相対重力計の詳細を以下に述べる。

相対重力計

相対重力測定には、図 3-2.91 に示すカナダ SCINTREX 社製 CG-5 型重力計を用いた。測定においては、1 秒 6 回のサンプリングを 120 秒間行い、統計処理を行うことで測定精度を上げている。また、この重力計は測定データを内部メモリに記録し、データを USB を介してパーソナルコンピュータに簡単にデータ転送できるため、データ処理が非常にやりやすくなっている。表 3-2.21 に CG-5 型重力計の仕様を示す。



【出所】JICA 調査団で作成

図 3-2.91 CG-5 型重力計

表 3-2.21 CG-5 型重力計の仕様

センサのタイプ	溶融石英センサ（静電ゼロ位法）
読み取り精度	1 マイクロガル
標準偏差	5 マイクロガル以下
自動補正機能	潮汐補正、傾斜補正、温度補正、ドリフト補正
データ出力	RS-232C 或いは USB インターフェース
寸法	21cm×22cm×31cm
重量	8kg（コントローラー込みの全重量）

【出所】JICA 調査団で作成

b) GPS 受信機

GPS 受信機は測定地点での位置情報（緯度、経度、標高）を測定する装置である。ブーゲー異常を計算するためには、測定で得られた重力値に各種補正を施す必要がある。この際に、緯度、経度、標高が必要となる。本調査では、表 3-2.22 に示す TOPCON 社製 GRS-1 及び TRIMBLE 社製 5700 L1 の 2 台の受信機を用いた。GRS-1 は 2 周波型、5700 L1 は 1 周波型 GPS 受信機で、アンテナ、受信機及びコントローラーから構成される。アンテナは、高度約 20,000km の GPS 衛星からの電波を受信し、受信機は受信電波より受信点位置を計算するための CPU とプログラムが内蔵された ROM などから構成される。コントローラーは、Windows Mobile を搭載した小型コンピュータで現場において測定条件（測点名、アンテナ高、測定方法、観測時間など）の設定に使用する。GPS 受信機を図 3-2.92 に示す。

表 3-2.22 GPS 受信機仕様

名 称	GRS-1	5700 L1
受信電波	L1 L2 C/A P コード (2 周波型)	L1 C/A コード (1 周波型)
観測精度 (スタティック)	水平 : ± (3mm+0.5ppm×基線長 km) 垂直 : ± (5mm+0.5ppm×基線長 km)	水平 : ± (5mm+0.5ppm×基線長 km) 垂直 : ± (5mm+1.0ppm×基線長 km)
寸 法	215mm×93mm×53mm (受信機本体部)	135mm×85mm×240mm (受信機本体部)
重 量	0.77kg (バッテリー含む)	1.4 kg (バッテリー含む)
データ解析 ソフトウェア	GNSS Pro Ver.7.52 (TOPCON) ,Trimble Total Control™ (TRIMBLE)	
サンプリング間隔	30 秒 (短縮スタティック)	
データ取得時間	30 分 / 1 測点 (短縮スタティック)	
衛 星 暦	放送暦	

[出所] JICA 調査団で作成



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.92 GPS 受信機

iii) 測定方法

a) 各測点の重力測定

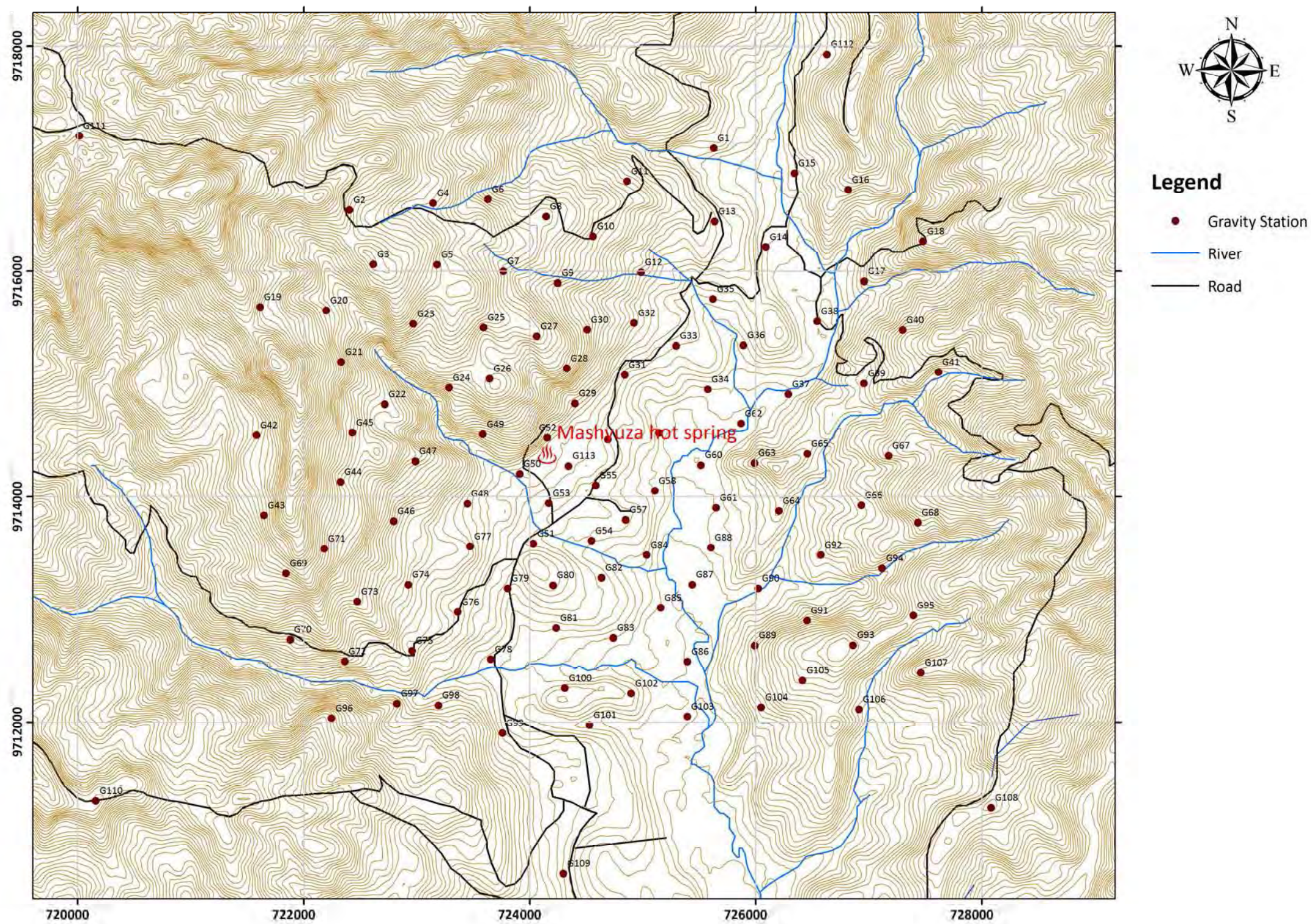
本調査で行った重力探査では、各測点における重力値を、相対重力計を使用して、基準点からの重力差を測定して決定した。重力計から出力される読み取り重力値は、1 秒 6 回のサンプリングを 120 秒間行い、単観測の標準誤差が大きいのものについては再測定を行った。なお、測定は重力計の三脚を地面に突き刺し動かないことを確認した後に測定を行った。

b) 各測点の測量

本調査では基準局となる電子基準点が遠方にあり測量の基準局として適切ではないため探査地域周辺に基準局として GPS 受信機を設置し、各測点の測量を行った。基準局の座標は既知ではないため、電子基準点 NURK を基準局、GRS-1 を移動局として重力測定地点の測量の基準局となる座標の測量を行った。各測点の測量については、基準局に 5700 L1 を設置し GRS-1 を移動局とした。各測点での観測時間は約 30 分とした。GPS のデータ処理には TOPCON 社製、GNSS 統合データ処理プログラム GNSS-Pro ver.7.52 及び TRIMBLE 社製、Trimble Total Control™ を用いた。各測点で測定したデータは基準点 (5700 L1) との間の基線 (2 点間の 3 次元ベクトル) 解析を行った。なお、GPS 測量から求まる高さは準拋楕円体からの高さで、水準測量から得られるいわゆる標高とは異なる。このため楕円体高から標高に変換するためにはジオイド高

を楕円体高から差し引く必要があり、本調査では統合データ処理プログラム Trimble Total Control™ を用いてジオイド高を考慮した GPS データ処理を行い、測点の標高を算出した。

以上の処理を行い、各測点の緯度、経度、標高を求めた。GPS 測量結果を表 3-2.23 に、各測点位置を図 3-2.93 に示す。



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.93 重力探査測点位置図

表 3-2.23 GPS 測量結果 (1)

測点	世界測地系						UTM 座標系		標高 (m)
	緯度			経度			NS (m)	EW (m)	
	度	分	秒	度	分	秒			
G1	-2	33	28.396	29	1	45.250	9717096.277	725627.013	1228.585
G2	-2	33	46.532	29	0	0.991	9716544.167	722404.707	1731.421
G3	-2	34	2.276	29	0	7.811	9716060.152	722614.659	1752.293
G4	-2	33	44.534	29	0	24.931	9716604.399	723144.500	1621.019
G5	-2	34	2.314	29	0	26.067	9716058.090	723178.728	1615.092
G6	-2	33	43.331	29	0	40.599	9716640.594	723628.674	1469.421
G7	-2	34	4.170	29	0	45.077	9716000.143	723766.029	1475.633
G8	-2	33	48.376	29	0	57.263	9716484.788	724143.300	1470.638
G9	-2	34	7.568	29	1	0.602	9715895.013	724245.551	1409.839
G10	-2	33	54.041	29	1	10.743	9716310.091	724559.539	1384.907
G11	-2	33	38.070	29	1	20.498	9716800.275	724861.746	1314.913
G12	-2	34	4.407	29	1	24.500	9715990.944	724984.096	1263.087
G13	-2	33	49.678	29	1	45.573	9716442.437	725635.929	1217.596
G14	-2	33	57.000	29	2	0.235	9716216.747	726088.611	1145.407
G15	-2	33	35.679	29	2	8.397	9716871.397	726341.854	1176.268
G16	-2	33	40.440	29	2	23.771	9716724.388	726816.647	1278.450
G17	-2	34	6.902	29	2	28.398	9715911.167	726958.333	1188.802
G18	-2	33	55.259	29	2	45.293	9716268.025	727480.948	1370.198
G19	-2	34	14.558	28	59	35.438	9715684.373	721613.831	1786.533
G20	-2	34	15.530	28	59	54.385	9715653.593	722199.195	1628.665
G21	-2	34	30.343	28	59	58.671	9715198.305	722330.911	1608.006
G22	-2	34	42.668	29	0	11.134	9714819.066	722715.385	1485.878
G23	-2	34	19.354	29	0	19.298	9715534.921	722968.777	1589.321
G24	-2	34	37.860	29	0	29.582	9714965.870	723285.640	1445.872
G25	-2	34	20.375	29	0	39.447	9715502.572	723591.292	1517.251
G26	-2	34	35.217	29	0	41.189	9715046.495	723644.378	1474.700
G27	-2	34	22.906	29	0	54.604	9715424.061	724059.490	1493.343
G28	-2	34	32.144	29	1	3.266	9715139.851	724326.665	1394.368
G29	-2	34	42.387	29	1	5.619	9714825.042	724398.873	1228.453
G30	-2	34	21.007	29	1	9.116	9715481.723	724507.953	1337.598

[出所] JICA 調査団で作成

表 3-2.23 GPS 測量結果 (2)

測点	世界測地系						UTM 座標系		標高 (m)
	緯度			経度			NS (m)	EW (m)	
	度	分	秒	度	分	秒			
G31	-2	34	34.017	29	1	19.868	9715081.487	724839.537	1158.389
G32	-2	34	19.026	29	1	22.533	9715541.915	724922.614	1223.654
G33	-2	34	25.591	29	1	34.611	9715339.623	725295.497	1157.619
G34	-2	34	38.270	29	1	43.632	9714949.653	725573.586	1109.812
G35	-2	34	12.038	29	1	45.139	9715755.482	725621.454	1159.592
G36	-2	34	25.409	29	1	53.870	9715344.269	725890.564	1136.931
G37	-2	34	39.630	29	2	6.755	9714906.711	726287.996	1103.806
G38	-2	34	18.423	29	2	14.933	9715557.875	726541.712	1128.579
G39	-2	34	36.393	29	2	28.424	9715005.112	726957.673	1215.935
G40	-2	34	20.961	29	2	39.464	9715478.684	727299.560	1297.277
G41	-2	34	33.109	29	2	49.759	9715104.939	727617.077	1295.461
G42	-2	34	51.665	28	59	34.431	9714544.417	721580.925	1574.858
G43	-2	35	14.853	28	59	36.582	9713831.934	721646.293	1585.410
G44	-2	35	5.023	28	59	58.511	9714132.878	722324.313	1531.108
G45	-2	34	50.871	29	0	1.894	9714567.501	722429.494	1538.519
G46	-2	35	16.445	29	0	13.781	9713781.233	722795.564	1348.637
G47	-2	34	59.083	29	0	19.985	9714314.316	722988.089	1410.594
G48	-2	35	11.323	29	0	34.890	9713937.564	723448.025	1221.349
G49	-2	34	51.356	29	0	39.238	9714550.781	723583.323	1298.285
G50	-2	35	2.592	29	0	49.820	9714205.064	723909.721	1186.285
G51	-2	35	22.798	29	0	53.775	9713584.085	724030.946	1139.319
G52	-2	34	52.310	29	0	57.748	9714520.568	724155.208	1213.968
G53	-2	35	11.113	29	0	58.201	9713942.864	724168.281	1155.004
G54	-2	35	21.967	29	1	10.421	9713608.789	724545.325	1115.162
G55	-2	35	5.931	29	1	11.646	9714101.404	724583.960	1134.405
G56	-2	34	52.710	29	1	15.104	9714507.410	724691.447	1142.143
G57	-2	35	15.864	29	1	20.247	9713795.821	724849.213	1128.705
G58	-2	35	7.480	29	1	28.594	9714052.981	725107.523	1091.411
G59	-2	34	50.807	29	1	29.693	9714565.166	725142.302	1086.473
G60	-2	35	0.043	29	1	41.768	9714280.805	725514.944	1078.010

[出所] JICA 調査団で作成

表 3-2.23 GPS 測量結果 (3)

測点	世界測地系						UTM 座標系		標高 (m)
	緯度			経度			NS (m)	EW (m)	
	度	分	秒	度	分	秒			
G61	-2	35	12.380	29	1	46.080	9713901.567	725647.565	1082.157
G62	-2	34	48.077	29	1	53.212	9714647.876	725869.107	1091.819
G63	-2	34	59.494	29	1	57.093	9714296.938	725988.467	1188.054
G64	-2	35	13.225	29	2	4.080	9713874.723	726203.685	1164.125
G65	-2	34	56.822	29	2	12.231	9714378.260	726456.349	1181.963
G66	-2	35	11.561	29	2	27.716	9713924.661	726934.066	1198.665
G67	-2	34	57.324	29	2	35.489	9714361.679	727174.954	1288.720
G68	-2	35	16.567	29	2	43.891	9713770.062	727433.603	1325.242
G69	-2	35	31.614	28	59	42.922	9713316.705	721841.369	1542.602
G70	-2	35	50.724	28	59	44.226	9712729.554	721880.730	1316.688
G71	-2	35	24.394	28	59	53.877	9713537.991	722180.189	1556.561
G72	-2	35	56.846	28	59	59.846	9712540.706	722363.046	1279.781
G73	-2	35	39.688	29	0	3.364	9713067.667	722472.569	1391.422
G74	-2	35	34.732	29	0	17.958	9713219.215	722923.727	1278.907
G75	-2	35	53.776	29	0	19.067	9712634.064	722957.048	1220.033
G76	-2	35	42.720	29	0	32.172	9712973.082	723362.487	1189.494
G77	-2	35	23.680	29	0	35.690	9713557.879	723472.122	1233.907
G78	-2	35	56.262	29	0	41.654	9712556.594	723654.819	1107.406
G79	-2	35	35.797	29	0	46.417	9713185.088	723802.958	1132.942
G80	-2	35	34.866	29	0	59.404	9713213.059	724204.270	1168.579
G81	-2	35	47.277	29	1	0.402	9712831.705	724234.522	1107.660
G82	-2	35	32.694	29	1	13.328	9713279.104	724634.601	1116.552
G83	-2	35	50.075	29	1	16.705	9712744.952	724738.090	1081.109
G84	-2	35	26.063	29	1	26.265	9713482.164	725034.638	1082.055
G85	-2	35	41.367	29	1	30.291	9713011.785	725158.294	1062.490
G86	-2	35	56.784	29	1	37.993	9712537.773	725395.521	1052.085
G87	-2	35	34.654	29	1	39.329	9713217.604	725437.873	1058.160
G88	-2	35	23.868	29	1	44.616	9713548.691	725601.766	1077.573
G89	-2	35	52.166	29	1	57.291	9712678.674	725991.988	1175.605
G90	-2	35	35.708	29	1	58.196	9713184.272	726020.759	1072.862

[出所] JICA 調査団で作成

表 3-2.23 GPS 測量結果 (4)

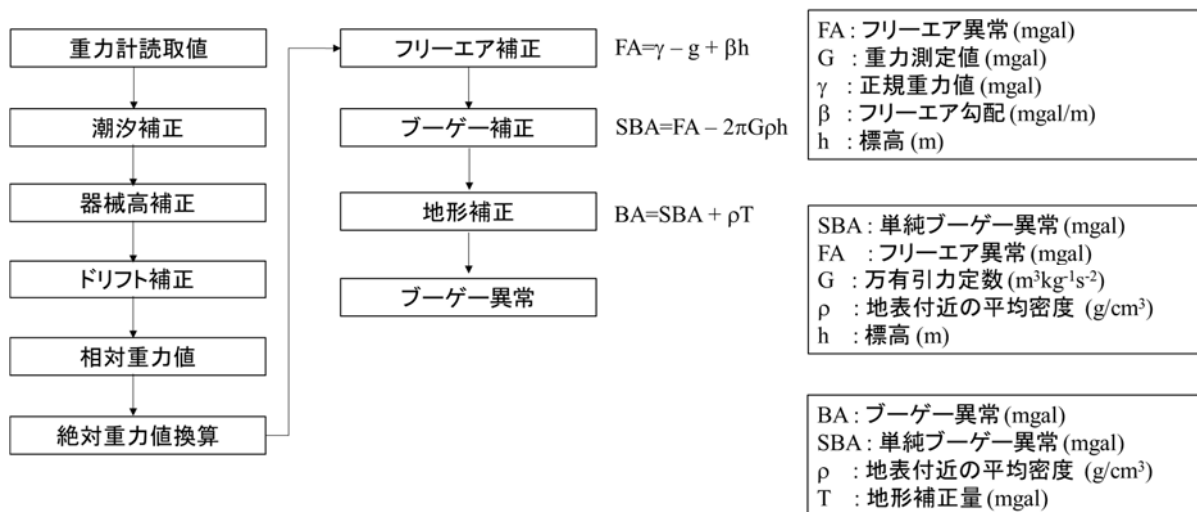
測点	世界測地系						UTM 座標系		標高 (m)
	緯度			経度			NS (m)	EW (m)	
	度	分	秒	度	分	秒			
G91	-2	35	44.993	29	2	12.236	9712898.317	726454.125	1190.772
G92	-2	35	25.956	29	2	16.134	9713482.984	726575.489	1173.240
G93	-2	35	51.984	29	2	25.428	9712682.864	726861.390	1279.619
G94	-2	35	29.865	29	2	33.682	9713362.040	727117.496	1196.259
G95	-2	35	43.464	29	2	42.648	9712943.773	727393.851	1261.956
G96	-2	36	13.354	28	59	56.043	9712033.718	722244.743	1391.289
G97	-2	36	9.100	29	0	14.795	9712163.491	722824.301	1230.693
G98	-2	36	9.539	29	0	26.672	9712149.407	723191.269	1166.390
G99	-2	36	17.595	29	0	45.037	9711901.010	723758.294	1118.127
G100	-2	36	4.580	29	1	2.862	9712299.979	724309.661	1115.379
G101	-2	36	15.237	29	1	9.920	9711972.237	724527.233	1063.941
G102	-2	36	6.061	29	1	21.862	9712253.558	724896.634	1094.723
G103	-2	36	12.671	29	1	37.940	9712049.664	725393.086	1041.619
G104	-2	36	10.017	29	1	59.104	9712130.166	726047.148	1153.520
G105	-2	36	2.242	29	2	10.927	9712368.450	726412.833	1240.349
G106	-2	36	10.546	29	2	27.109	9712112.518	726912.401	1149.878
G107	-2	35	59.960	29	2	44.834	9712436.873	727460.596	1300.727
G108	-2	36	39.033	29	3	5.037	9711235.404	728082.871	1268.070
G109	-2	36	58.151	29	1	2.536	9710654.172	724296.961	1105.580
G110	-2	36	37.464	28	58	48.534	9711296.303	720157.754	1649.656
G111	-2	33	25.190	28	58	43.527	9717203.545	720012.246	1986.776
G112	-2	33	1.231	29	2	17.654	9717929.289	726629.554	1241.532
G113	-2	35	0.379	29	1	3.821	9714272.357	724342.431	1171.290

[出所] JICA 調査団で作成

2) データ処理及び解析方法

i) 重力データ処理

測定した重力値にはブーゲー異常を算出するための各種補正を行った。図 3-2.94 に重力データ処理のフローを示す。



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.94 重力データ処理フロー

a) 潮汐補正

月や太陽の起潮力の変化を補正するものである。潮汐補正では、起潮力による地球の弾性変形及び潮の満ち引きによる潮汐荷重の変化も含めた補正を行う。

b) 器械高補正

重力計のセンサー部と地表との間の高さの差異を補正するもので、地表付近の平均的な重力鉛直勾配 (0.3086 mgal/m) を用いて、次式により補正を行う。

$$V_{hi} = 0.3086 \times Hi$$

V_{hi} : 器械高補正量 (mgal)

Hi : 地表から重力計上面までの高さ (m)

c) ドリフト補正

ドリフト補正は、重力計の経時的なばねの伸びに起因する見かけ上の重力値の変化で、ほぼ時間に比例する。このばねの伸びの影響を補正するものがドリフト補正である。実際のドリフトにはばねの伸びのほかに、運搬時における機械的ショックによるもの (テア) や気温の急激な変化など不規則な要因も含まれている。通常ドリフト補正ではこれらの影響も含めて補正を行っている。測定は基準点を基点とする閉塞測定を行い、基点における閉塞差を重力計のドリフトとみなし、基点からの経過時間に応じて比例配分を行った。

d) フリーエア補正

フリーエア補正は、測点の高さの違いによる影響を補正するものである。重力の鉛直勾配は必ずしも一定ではないが、ここでは平均的な値 0.3086mgal/m を用いて以下の式で補正を行った。

$$F=0.3086 \times h$$

F : フリーエア補正量 (mgal)

h : 測点の標高 (m)

e) ブーゲー補正

ブーゲー補正は、ジオイド面と測点の間に挟まれた物質が重力値に及ぼす影響を補正する。この補正にはブーゲー平板の仮定密度が必要である。本調査での仮定密度は、後述する仮定密度の推定法に基づいて計算された 2.64g/cm³ を用いた。ブーゲー補正量は以下の式で補正する。

$$B=2\pi G\rho h$$

B : ブーゲー補正量 (mgal)

G : 万有引力定数 (6.67×10⁻¹¹m³kg⁻¹s⁻²)

ρ : 仮定密度 (g/cm³)

H : 測点の標高 (m)

f) 地形補正

地形補正は、ブーゲー面からの地形の起伏部分が測点の重力値に及ぼす影響を補正するもので、本調査では SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) の 90m メッシュ (標高) を用いて、測点を中心に半径 60km の円形範囲の地形の影響を計算した。この円形範囲は測点からの距離に応じて極近傍域 (測点が位置する 500m まで)、近傍域 (4km まで)、中間域 (4~16km)、遠方域 (16~60km) の 4 つのエリアに分けて、最後にこれらの影響を足し合わせることで補正値を算出した。

g) ブーゲー異常の算出

以上の補正量を計算した後、次式を用いてブーゲー異常を算出した。

$$\Delta B = g_{\text{obs}} - \gamma + \beta h - 2\pi G\rho h + T$$

ΔB : ブーゲー異常 (mgal)

g_{obs} : 重力測定値 (mgal)

γ : 正規重力値 (mgal)

β : 地表付近のフリーエア勾配 (mgal/m)

h : 測点の標高 (m)

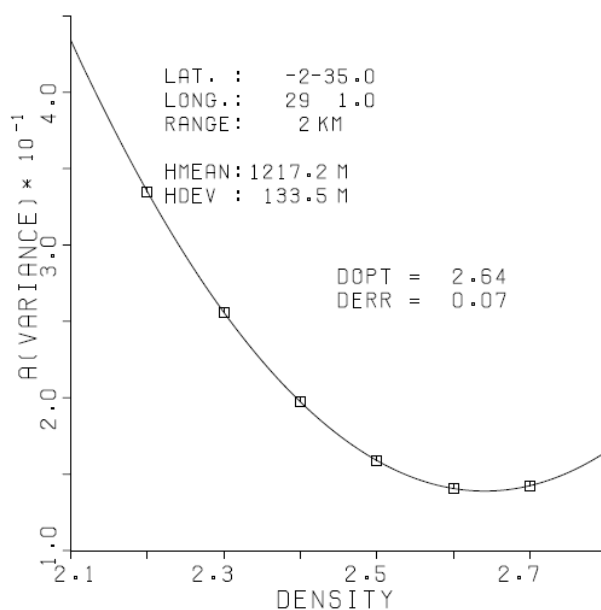
G : 万有引力定数 (6.67×10⁻¹¹m³kg⁻¹s⁻²)

ρ : 仮定密度 (g/cm³)

T : 地形補正量 (mgal)

ii) 仮定密度の評価

仮定密度の決定には、岩石試料の密度測定による方法、G-H 相関を用いる方法、ブーゲー異常と地形図を見比べる方法などがある。本調査ではブーゲー異常と地形図を見比べる方法を計算機で機械的に行う上方接続残差分散比較法 (CVUR 法) (Komazawa, 1995) を用いて仮定密度の推定を行った (図 3-2.95 参照)。本手法は、ブーゲー異常を 2 つの異なる高度へ上方接続後、差を取ることによって短波長成分を取り出す。仮定密度が大きすぎたり小さすぎたりすると地形の影響が出るため、ブーゲー異常の分散量が大きくなる。最終的にこの分散が最小となるものが地形との相関が最も少ない仮定密度となる。本調査では接続高度 $h_1:0\text{m}$ 、 $h_2:200\text{m}$ とし、調査対象地域中心から半径 2km の範囲の平均密度として 2.64g/cm^3 という結果を得たことから、ブーゲー異常値の算出には 2.64g/cm^3 を用いた。



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.95 上方接続残差分散比較法結果

iii) ブーゲー異常

重力探査は、地下の密度分布の不均一性に起因する重力異常を地表において測定し、重力異常の空間分布から逆に地下の密度分布を推定する方法である。

重力探査でいう重力とは、物質と地球が引き合う引力、地球の自転による遠心力、及び月と太陽から物質が受ける引力 (潮汐力) の合力である。自転による遠心力は赤道で最大、極で最小となるため、緯度の異なる測点では重力値は異なる。また、標高の高い地点では地球の中心から離れるため、標高の低い地点よりも引力が小さくなる。潮汐力は測点と月、太陽の相対位置によって変化するため、同一地点で重力を測定しても、測定時刻が異なれば異なる重力値が観測される。地球と物質が引き合う引力には地形の影響も含まれ、山体のような大きな質量の近くではそれに引き付けられる向きに引力が加わる。これらの要因を全て正確に補正してもなお、重力値は場所によって異なる値をとる。重力探査では、各測点の重力値と、平均的な重力値とのずれを重力異常と呼び、その大きさをブーゲー異常値という指標で測る。このブーゲー

異常が地下の密度分布の不均一性に起因する重力異常であり、重力探査における解析（地下構造の検討・抽出）の対象となる。

iv) 傾向面解析

傾向面解析は、図 3-2.96 に示す地下深部の構造に起因する長波長のブーゲー異常成分を抽出することを目的として実施される。傾向面解析による傾向面は、フィルター処理のうち、ローパスフィルター処理（短波長成分を取り除く処理）を施すこととほぼ等価であり、重力異常の長波長成分を低次の n 次の曲面で近似することである。具体的には、ブーゲー異常値の分布 $\Delta g(x, y)$ を用いて、多項式の各係数を最小二乗法により求める。各次数の傾向面はそれぞれ次の式で表される。

- 1 次傾向面 : $\Delta G_1(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y$
- 2 次傾向面 : $\Delta G_2(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2$
- n 次傾向面 :

$$\Delta G_n(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 + \dots + a_{m-1}xy^{n-1} + a_my^n$$

ここに $m=n(n+3)/2$ である。

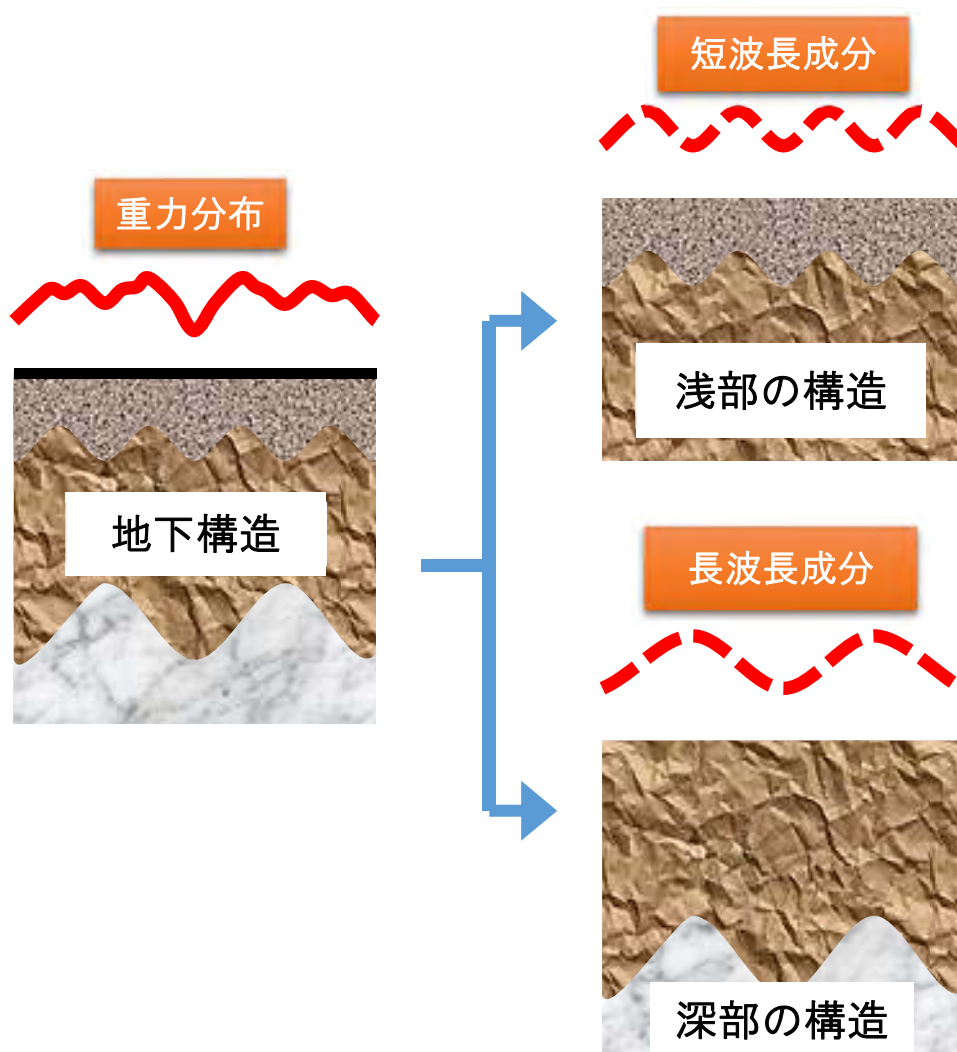
ブーゲー異常値 $\Delta g(x, y)$ から n 次の傾向面を差し引いた n 次傾向面残差は、重力異常値に一種のハイパスフィルター処理（長波長成分を取り除く処理）を施した結果を表す。

v) 上方接続フィルター

ある一定の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ーである。これは x 方向の波数 m 、 y 方向の波数 n のフーリエ係数に、

$$w_{mn} = \exp\left(-\sqrt{(m^2 + n^2)}H\right)$$

の重みを付けることに相当する。波数の大きな成分ほど小さい重みが付けられることとなるため、上方接続フィルターはローパスフィルター（短波長成分を取り除く平滑化作用）となることが明らかである。また、異なる 2 つの H の値を用いて上方接続を行い、その差を計算することで、バンドパスフィルターの役割をさせることも可能である。



[出所] JICA 調査団で作成

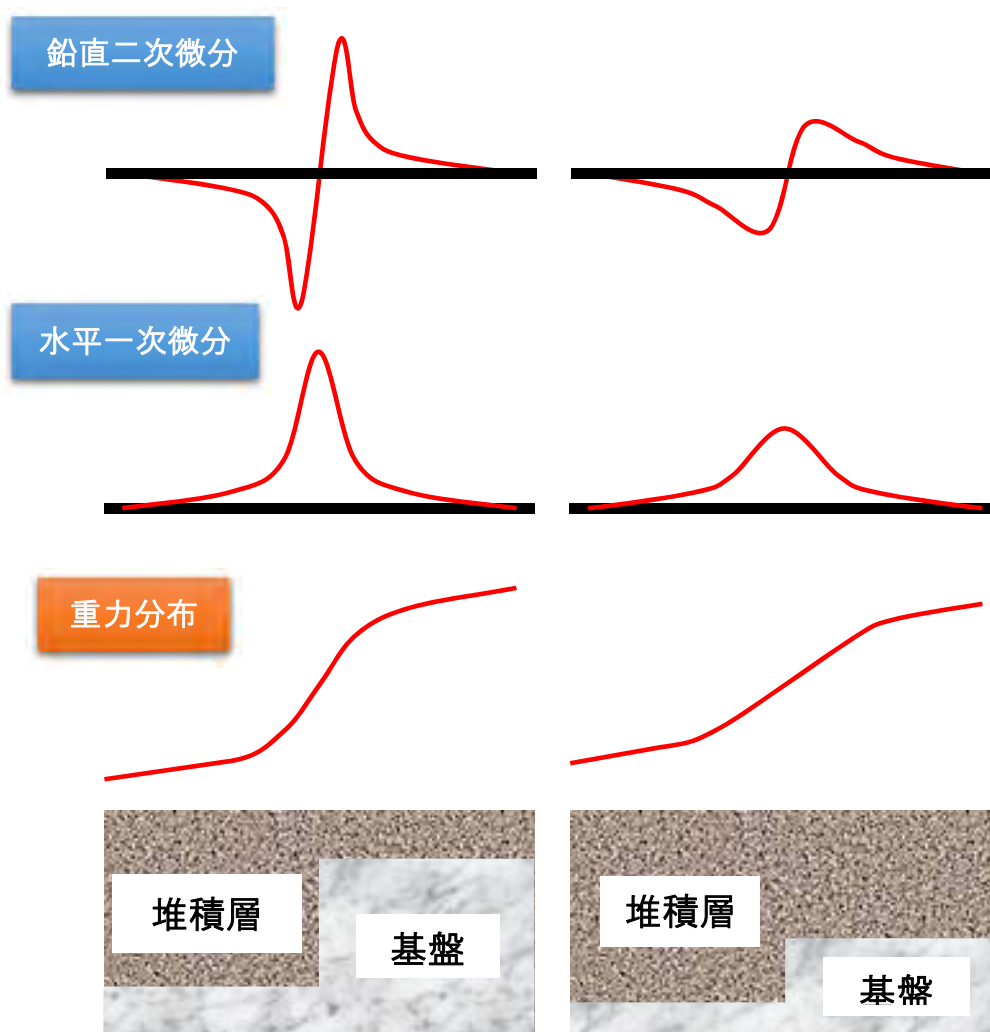
図 3-2.96 フィルタ解析概念図

vi) 水平 1 次微分及び鉛直 2 次微分フィルター (図 3-2.97 参照)

水平一次微分フィルターとはブーゲー異常の水平勾配を求めるもので、構造の境界を強調するハイパスフィルターである。ブーゲー異常のフーリエ係数を求めておき、その係数に対応する波数をかけて逆フーリエ変換を求めることで x 方向、y 方向の微分値を求めることもできるが、通常は格子点値が求められているため、差分をとって最大振幅を求めることが多い。水平 1 次微分は直感的に理解しやすいが、微分値の大小で陥没構造の落差を判断しがちであり、深部の大きな規模の構造を見落とすことや、過小評価する可能性があるという短所を有している。このため、本解析においては、水平 1 次微分値の大きさのみでの判断は行わず、水平 1 次微分平面分布における極大値の連続性を検討して、重力構造（重力リニアメント）を抽出した。

鉛直 2 次微分も、ハイパスフィルター的一种であり、重力分布の局所的な分解能を高め、断層状構造などによる密度分布の急激な変化を伴った線状構造の抽出を目的として行われる。重力の鉛直 2 次微分は、ポテンシャル理論から、水平 2 次微分の和として表現される。これは、重力異常の曲率を表わしているとも解釈できることから、格子化データのサンプリングフィルターの手法が用いられる。

なお、本解析では、格子間隔 200m の水平一次微分及び鉛直二次微分を実施した。



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.97 水平 1 次微分及び鉛直 2 次微分フィルターの概念図

vii) 3次元基盤構造解析

図 3-2.98 のような鉛直下方に無限に長い直方体による点 (A,B,C)における重力値 (G) は、

$$G = \gamma\rho\{F(X1,Y1,Z) - F(X2,Y1,Z) - F(X1,Y2,Z) + F(X2,Y2,Z)\} \dots (1)$$

で与えられる。

ただし、

$$X1 = A - x1, \quad X2 = A - x2$$

$$Y1 = B - y1, \quad Y2 = B - y2$$

$$Z = |z - C|$$

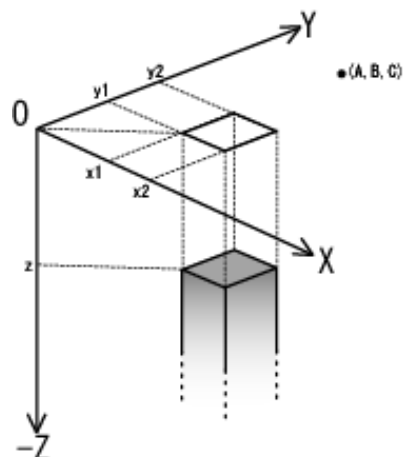


図 3-2.98 3次元基盤構造解析概念図

$$F(x, y, z) = -\iiint \frac{z dx dy dz}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}}$$

$$= x \ln \left(\frac{y + \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}{\sqrt{x^2 + z^2}} \right) + y \ln \left(\frac{x + \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}{\sqrt{y^2 + z^2}} \right) - z \tan^{-1} \left(\frac{xy}{z\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right)$$

である。

計算点と基盤を表す直方体が X 方向、Y 方向に格子状に同じように並んでいるとする。点(x_i, y_j, z)における(x_k, y_l, D_{kl})の直方体による重力値を G_{ij^{kl}}とすると、基盤による相対的な重力異常値 ΔG_{ij}(z)は基盤深度の平均値を D₀とおくと、

$$\Delta G_{ij}(z) = \sum_k \sum_l \{G_{ij}^{kl}(z, D_{kl}) - G_{ij}^{kl}(z, D_0)\} \dots (2)$$

と計算される。測定値 g*と計算値が最もよく合うような D_{kl}をイタレーション法によって求める。

測定値からその平均値を引いたものを δg*とする。D_{kl}の第1近似を

$$D_{kl}^{(1)} = D_0 + \lambda \delta g_{ij}^* / 2\pi\gamma\rho \dots (3)$$

とする。この基盤による重力異常値を上式で計算する。

$$g_{ij}^{(1)} = \Delta G_{ij}(z_{ij}) = \sum_k \sum_l \{G_{ij}^{kl}(z_{ij}, D_{kl}^{(1)}) - G_{ij}^{kl}(z_{ij}, D_0)\} \dots (4)$$

g_{ij}⁽¹⁾からその平均値を引いたものを δg_{ij}⁽¹⁾とする。δg_{ij}⁽¹⁾と δg*の残差の二乗和の平均が十分小さければその時の D_{kl}を最適解とする。もし、大きければ、第2近似として、

$$D_{ij}^{(2)} = D_{ij}^{(1)} + \lambda (\delta g_{ij}^* - \delta g_{ij}^{(1)}) / 2\pi\gamma\rho \dots (5)$$

を式(2)に代入して、

$$g_{ij}^{(2)} = \Delta G_{ij}(z_{ij}) = \sum_k \sum_l \{G_{ij}^{kl}(z_{ij}, D_{kl}^{(2)}) - G_{ij}^{kl}(z_{ij}, D_0)\}$$

を計算し、以下残差二乗和の平均値が十分小さくなるまで反復計算を繰り返し、最適解を求

める。

3) 解析結果

i) ブーゲー異常

当該地域のブーゲー異常分布図を図 3-2.99 に示す。ブーゲー異常値を計算するために必要な岩石の仮定密度は、 2.64g/cm^3 とした。各種補正後の各測点におけるブーゲー異常値一覧を別添資料 2-3 に示す。

本地域は、Karama 地域及び Kiziho 付近に高重力異常が認められている。一方、Cyamura 付近を中心に低重力域が見られ、北北東部に延びる傾向を示している。この低重力異常は、地溝帯を示唆していると考えられる。

ii) 傾向面解析

ブーゲー異常分布のトレンド成分（大局的な傾向）を求め、その値をブーゲー異常値から差し引くことにより、リージョナル成分（中～小規模の 2 次的な構造）を抽出することを目的として、ブーゲー異常値を用いた傾向面解析を実施した。なお、本解析では、ブーゲー異常に対して 1 次から五次までの傾向面解析を行い、これらを検討した結果、調査対象範囲の大局的な重力分布を表わしているものとして 2 次の傾向面を最適と判断した。

調査対象範囲におけるブーゲー異常値の傾向面解析結果を基に作成した 2 次傾向面図及び 2 次傾向面残差図（中～小規模の傾向）をそれぞれ、図 3-2.100 及び図 3-2.101 に示す。

図 3-2.100 に示す 2 次傾向面図は、南部の Cyamura や Nyabishungu 付近を中心に重力値が小さく、調査地域の深部の大局的な重力基盤構造を反映している。

ブーゲー異常分布から 2 次傾向面を差し引いた 2 次傾向面残差は、重力基盤構造の上部を反映したものと考えられる（図 3-2.100 参照）。この残差図では、中部から北東部にかけて低重力異常が、南西部、北部及び東部に高重力異常が分布し、これらの重力異常の境界部付近には重力の急変部が認められる。つまり、これらの重力急変部は、地下の密度構造の不連続性を示唆している。

このような急変部が、平面的に線状に連なって分布する場合には、断層等の構造を反映することがある。このため、断層等の構造を抽出する目的で、2 次傾向面残差分布における水平 1 次微分値を計算して、その分布平面図を作成した。水平 1 次微分平面図（2 次傾向面残差分布図から算出）を図 3-2.102 に示す。この分布図において、水平 1 次微分値の極大値が連続して分布している場合には、その箇所に密度構造上の境界部が分布する可能性が高い箇所である。この水平 1 次微分の平面分布の連続性から、以下に示す重力の急変部（重力分布から抽出される線構造で断層等の構造を反映することがある）が抽出された。

- 北部を概略北－南方向に延びる明瞭な重力急変部（G1）
- 東部を概略北－南方向に延びる明瞭な重力急変部（G2）
- 中央部を概略西北西－東南東方向に延びる明瞭な重力急変部（G3）
- 西部を概略北北西－南南東方向に延びる明瞭な重力急変部（G4）
- 南部を概略北－南方向に延びる明瞭な重力急変部（G5）
- 南東部を概略東－西方向に延びる明瞭な重力急変部（G6）
- 北西部を概略東北東－西南西方向に延びる重力急変部（G7）

- 西部を概略北－南方向に延びる明瞭な重力急変部（G8）
- 南部を概略東北東－西南西方向に延びる重力急変部（G9）

iii) 上方接続

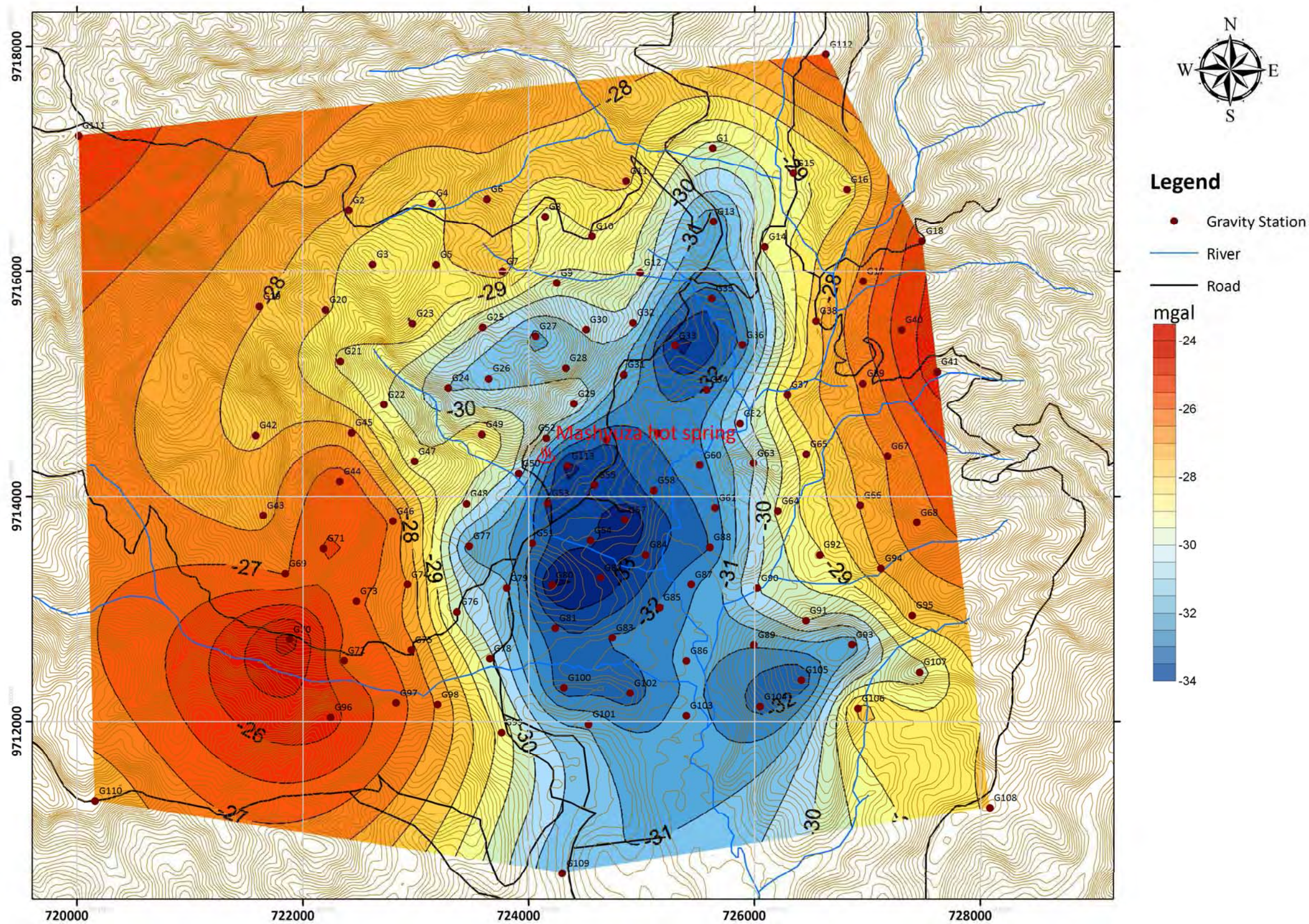
中～大規模な構造を把握するために、前述の傾向面解析とは異なるフィルター解析手法である上方接続を実施した。上方接続とは、地表からある一定の高さで観測した場合の重力値を計算するための方法であり、ローパスフィルター（短波長成分を除去した平滑化）の意味合いがある。このため、ブーゲー異常分布から浅部の小さなノイズ構造を反映する微小な分布傾向を取り除くことができ、解析地域における中～大規模の構造を把握することが可能となる。本解析においては、100m と 3,000m の上方接続を実施して、ブーゲー異常上方接続図(100～3,000m)を作成した（図 3-2.103 参照）。この解析は、浅部の小さなノイズ構造及び周辺域を含む非常に大きな構造の両方の影響を除去するバンドフィルターの意味を持つ。

本分布図は、前述の 2 次傾向面残差図（図 3-2.101 参照）と類似した分布を示している。なお、本図の特徴としては、中部から北東部にかけて低重力異常が、南西部び東部に高重力異常が分布していることが挙げられる。前述の傾向面解析と同様に、断層等の構造を抽出する目的で、上方接続に基づく水平 1 次微分値を計算して、その分布平面図を作成した。水平 1 次微分平面図（上方接続図から算出）を図 3-2.103 に示す。この水平一次微分の平面分布の連続性から、以下に示す重力の急変部が抽出された。

- 北部を概略北－南方向に延びる明瞭な重力急変部（G1）
- 東部を概略北－南方向に延びる明瞭な重力急変部（G2）
- 中央部を概略西北西－東南東方向に延びる明瞭な重力急変部（G3）
- 西部を概略北北西－南南東方向に延びる明瞭な重力急変部（G4）
- 南部を概略北－南方向に延びる明瞭な重力急変部（G5）
- 南東部を概略東－西方向に延びる明瞭な重力急変部（G6）
- 北西部を概略東北東－西南西方向に延びる重力急変部（G7）
- 西部を概略北－南方向に延びる重力急変部（G8）
- 南部を概略東北東－西南西方向に延びる重力急変部（G9）

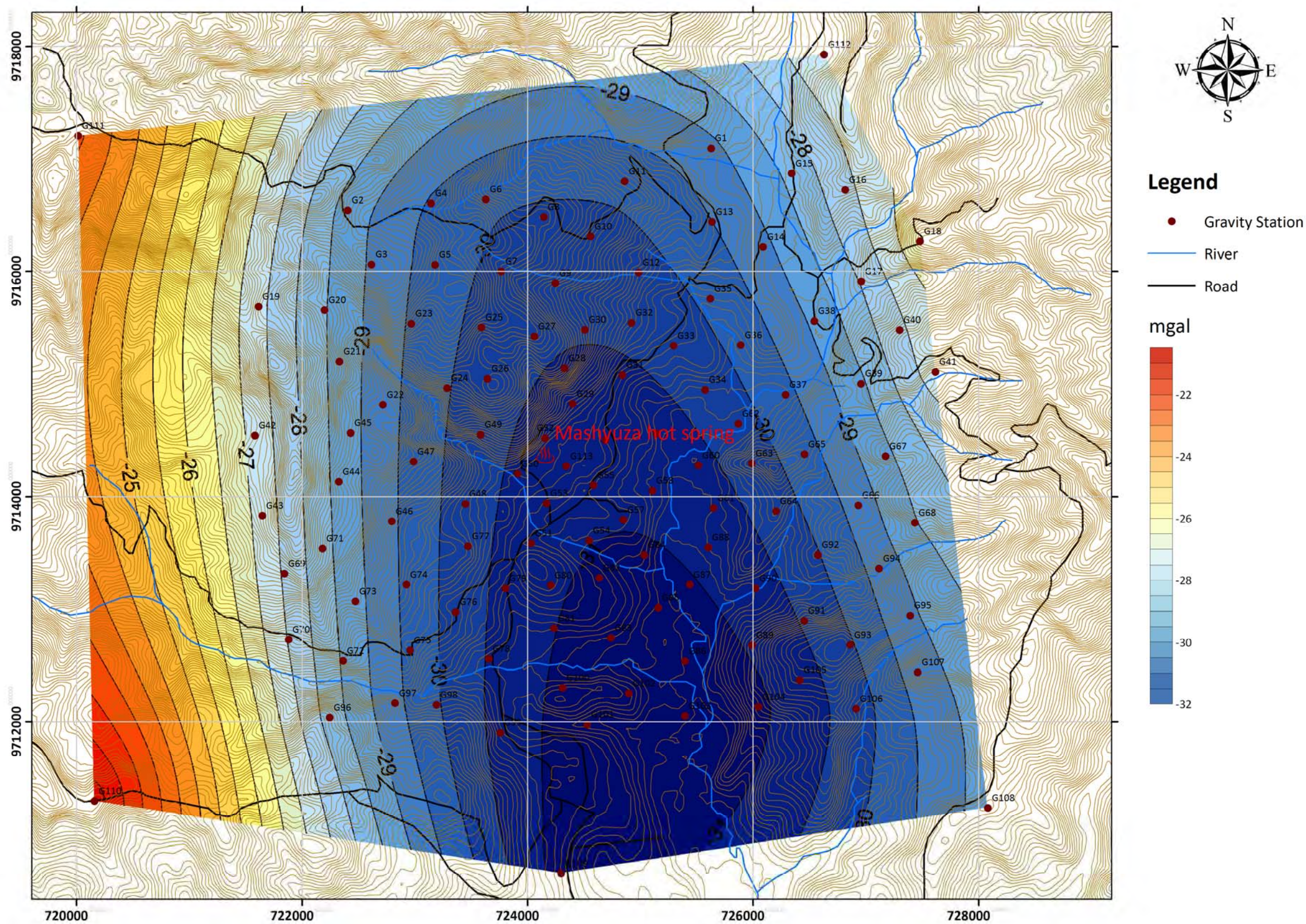
これらの上方接続に基づく水平 1 次微分の平面分布から抽出された重力リアメントは、2 次傾向面残差の水平 1 次微分の平面分布から認められたものとほぼ同じである。すなわち、異なる解析手法から抽出された同様の重力リアメントは、断層等を示唆している可能性がある。

これらの重力リアメントのうち、G1～G3 は地溝帯の東西側の縁辺部に位置する断層等を示している可能性がある。また重力リアメント G3 の中央部付近には Mashyuza 温泉が位置していることから、G3 は地熱流体が流動する断層や断層沿いに存在する断裂構造を示唆していると考えられる。なお、その他の重力リアメントについても地熱流体の流動を規制する断層等を反映している可能性はあるが、それらを示唆するその他の情報は得られていない。



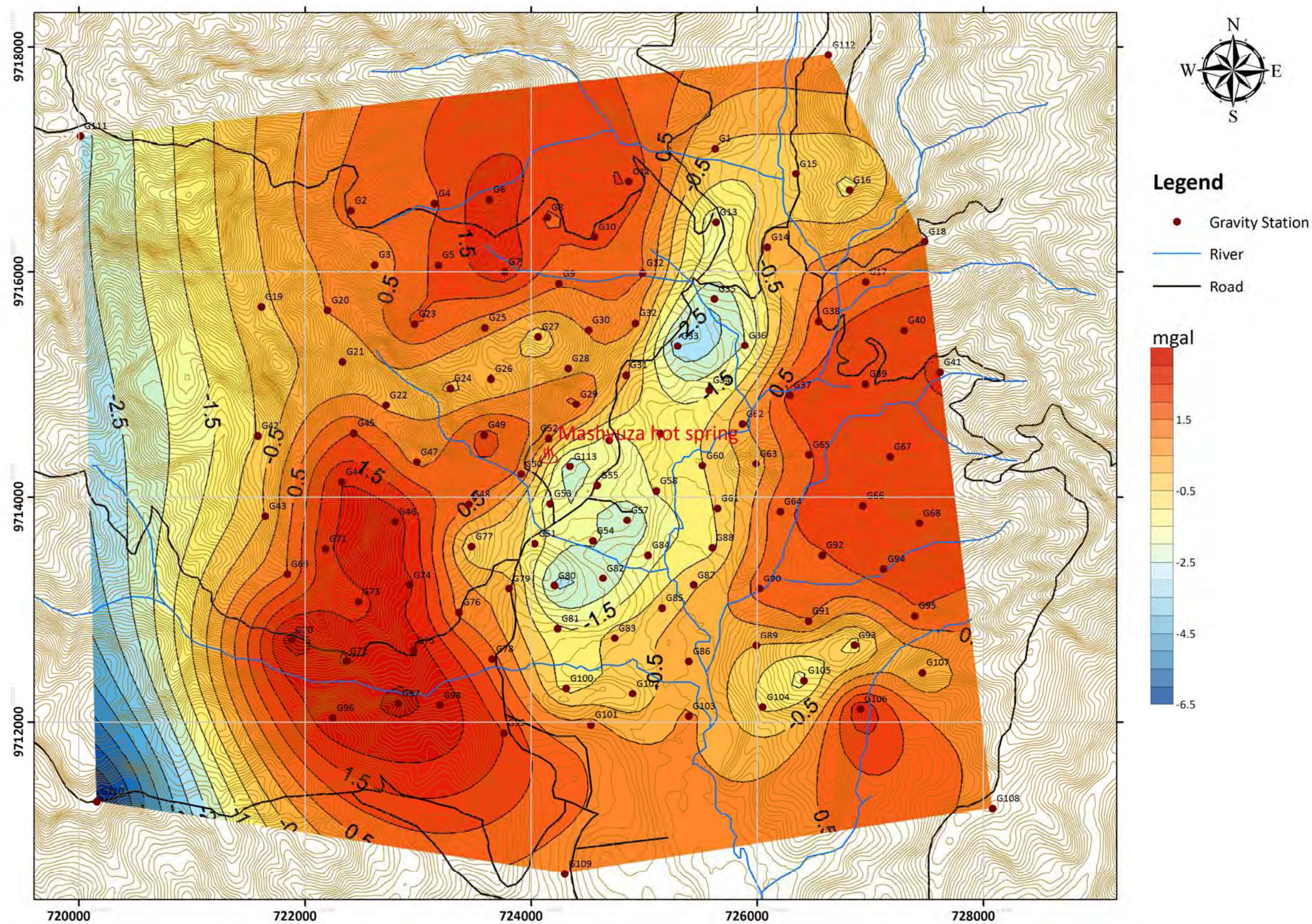
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.99 ブーゲー異常図 (仮定密度 ; 2.64g/cm³)



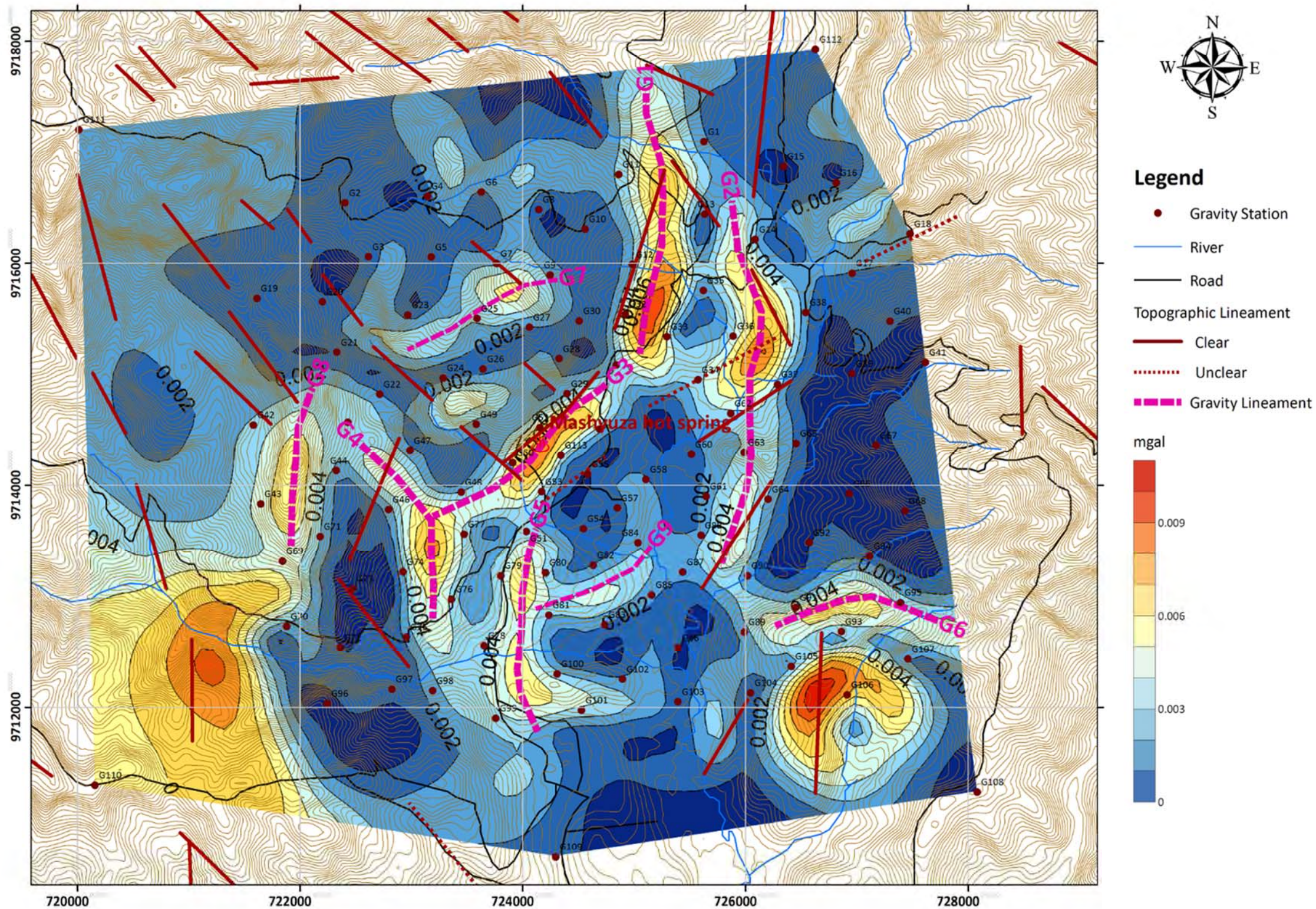
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.100 2次元傾向面図



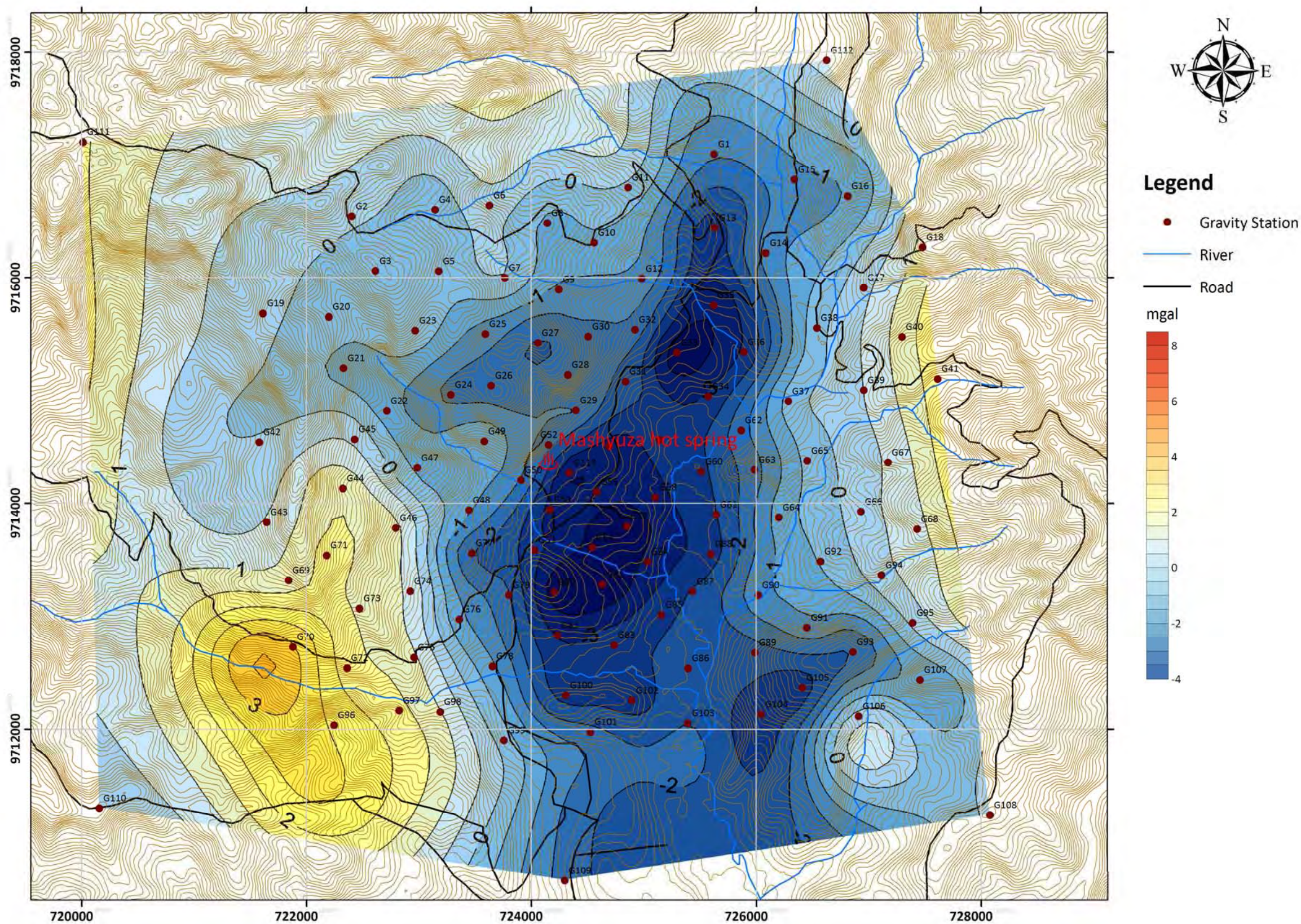
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.101 2次傾向残差図



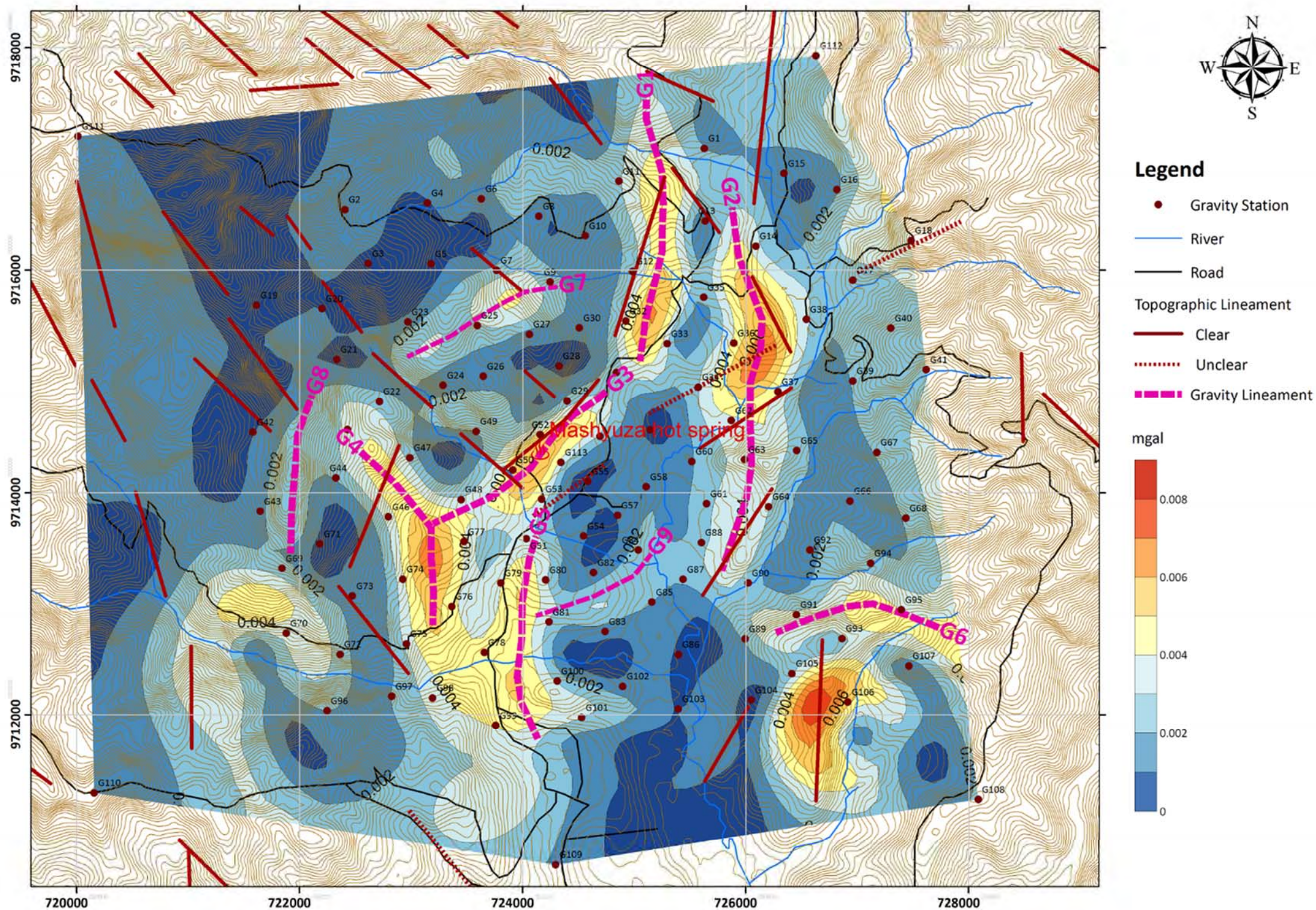
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.102 2次傾向面残差水平1次微分図 (S=200m)



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.103 上方接続図 (100~3000m)



[出所] JICA 調査団で作成

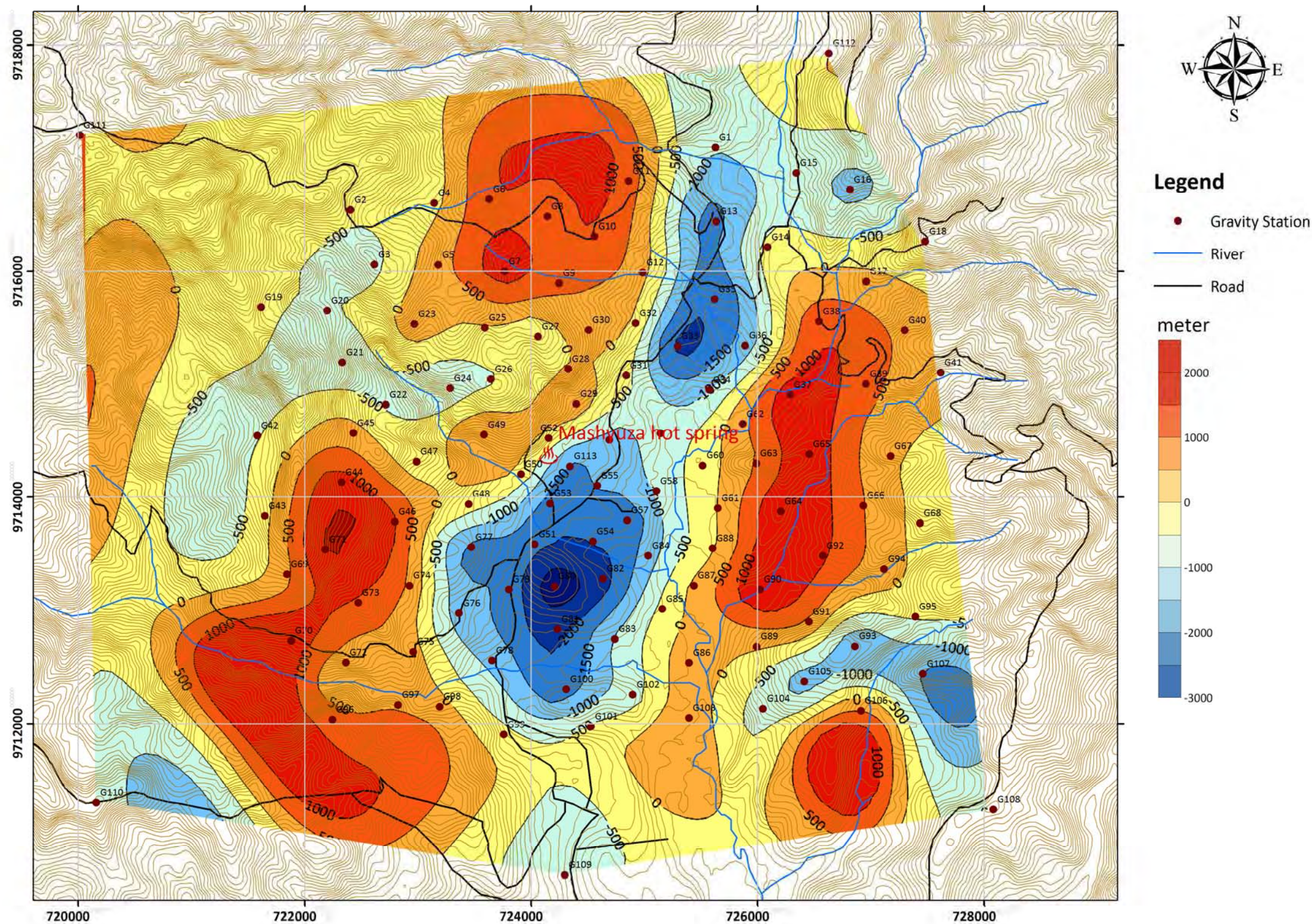
図 3-2.104 上方接続 (100~3000m) 水平 1 次微分図 (S=200m)

iv) 3次元基盤構造解析

当該地域における基盤構造の分布を推定するために3次元基盤構造解析を実施した。本解析は、基盤岩とその上面に堆積する火山岩との密度差を与えることで、最適な基盤の上面深度を推定するものである。ただし、本地域付近の岩石密度に関する情報が存在しないことから、当該地域の密度差としては、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) で示されている 0.3g/cm^3 と仮定することとした。

図 3-2.105 に示す 3次元基盤構造解析結果によると、前述の本地域中央部に位置する地溝帯と考えられている付近で最も基盤深度が深く、基盤深度の急変部がこの地溝帯の縁に位置する重力リニアメント G1、G2、G3 付近に認められる。この傾向は、重力リニアメント G1、G2、G3 が断層等の構造を示唆しているものと考えられる。

基盤岩とその上面に堆積する火山岩との密度差が正確でないことや、コントロールポイントが存在しないことなどから、本解析で得られた基盤構造の分布は精度良く決定されたものではないが、前述の密度差を仮定して得られた平均的な基盤上面深度は、地表下 2,000m 程度と推定される。



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.105 3次元基盤構造解析結果

3-2-4 地熱ポテンシャル評価

(1) 詳細調査実施地域の地熱系概念モデル

第 3-2.2 節及び第 3-2.3 節に記述された地質、地化学及び物理探査結果にもとづき、詳細調査対象地域の地熱系概念モデルを構築した。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解析して構築される。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、この初期モデルにもとづき、地熱資源の有効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詳細調査対象地域の地熱系概念モデルは Karisimbi 地域を除いて地表の地球科学的データに基づいて構築されている。今後の調査の進捗によりモデルの見直しと精緻化を進めることが望まれる。なお、Karisimbi 地域の地熱系概念モデルは調査井掘削の結果に基づいて構築されている。

1) Karisimbi 地域

図 3-2.106、図 3-2.107 及び図 3-2.108 に Karisimbi 地域の比抵抗構造、地質断面図及び地熱系概念モデルをそれぞれ示す。

Karisimbi 地域北方は Virunga Volcanoes Range (VVR) に位置し、Karisimbi 地域南方はマイロナイト化した原生代の花崗岩—千枚岩複合岩帯を形成する Butare Horst に位置する。本調査では Karisimbi 地域の地熱系概念モデルを、Karisimbi 北部域（以下、Karisimbi 地点）と Karisimbi 南部域（以下、Karago 地点）の 2 地域に分けて構築した。

Karisimbi 地点は第四紀後期に噴火した Karisimbi 火山近くに位置する。この第四紀後期の火山活動は Karisimbi 地点における地熱系の熱源の 1 つであると考えられる。ただし、調査井 KW-01 及び KW-02 の掘削結果によると本調査井周辺の地下で高温領域が存在する情報は得られていない。

地熱開発に適した地熱貯留層の形成に重要な要素の一つである帽岩（キャップロック）、すなわち、地熱貯留層の上部や周辺部の難透水性層については、調査井中の変質鉱物が非常に少なく、3D インバージョン解析においても Karisimbi 地点に 25 ohm-m 以下の低比抵抗域は認められないことから、Karisimbi 地点の地熱活動は比較的活発でなく、地熱貯留層の帽岩となる変質帯も卓越していないと考えられる。

透水層（高透水性ゾーン）は地熱流体の賦存や流動、更には地熱流体の噴出勢力等に大きく係わる。Karisimbi 地点において、原生代の硬質岩が分布していることから判断すると、本地域及びその周辺での流体の流動は主に断層によって規制されていると考えられる。また、Butare Horst における原生代基盤岩の地質構造から判断すると、第四紀火山岩の下位にある基盤岩中に割れ目が発達していると考えられる。ただし、本地域の調査井掘削結果、地質調査及び物理探査調査から透水性の高い地質構造は抽出されていない。

なお、Karisimbi 地点の深度 1,000～2,500m 間には 640ohm-m 以上の高比抵抗域が分布しているが、この高比抵抗域はイライトや緑泥石のような高温変質鉱物の存在を反映しているのではなく、割れ目が卓越していない透水性の低い岩帯を反映していると考えられる。

また、調査井 KW-01 の坑内温度は深度が深くなるとともに、一定の勾配で高くなることが確認されている(図 3-1.7 及び図 3-1.10)。これは本調査井付近では熱伝導が卓越していることを示唆している。

したがって、Karisimbi 地点の地熱活動は地熱発電所が運用されているような他の地熱地域と比較すると活発ではないことが示唆され、地熱発電に利用可能な地熱系は形成されていないと考えられる。

Karago 地点には Karago 及び Mbonyebyombi の 2 つの温泉が存在する。本地域の地質、地質構造及び地表地熱徴候の分布から判断すると、流体流動は断層及び割れ目に伴う透水層により規制されていると考えられる。断層は、垂直方向(深度方向)の透水性を与え、地熱系の形成に重要な役割を果たしていると考えられる。本地域では地形リニアメントから存在が推定される北西-南東方向の断層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。

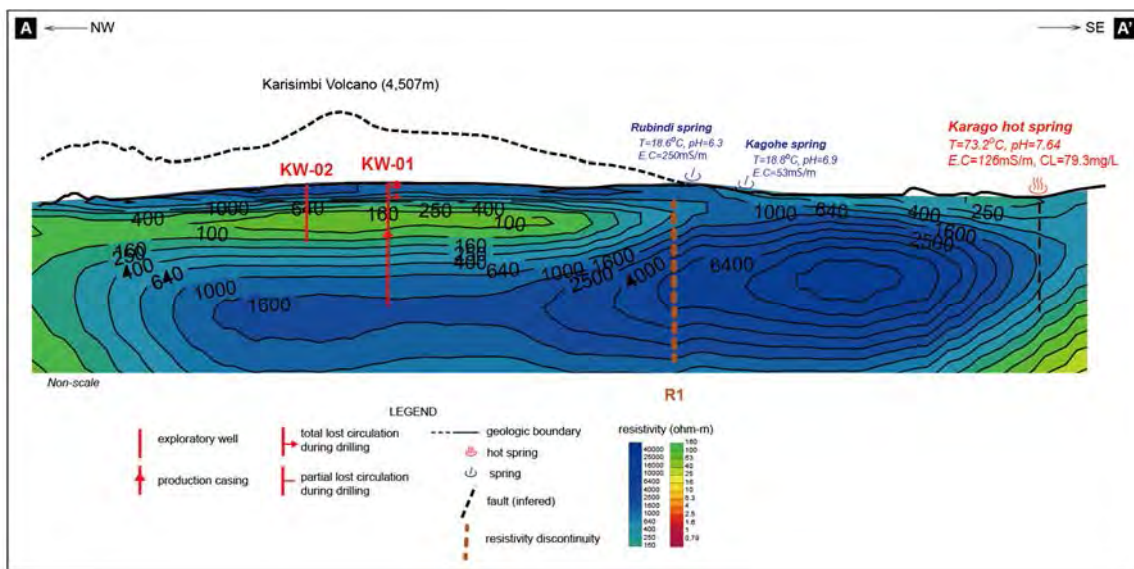
Karago 地点は原生代基盤岩(花崗岩)が分布しており、新しい時代の火山活動は認められない。本地域の温泉は断層沿いの天水を起源とし、地温勾配による熱伝導もしくは地下深部に存在する貫入岩からの熱伝導により加熱されていると推定される。また、本地域の深部には、明瞭ではないものの低比抵抗域が認められており、地下深部に比較的温度的の高い領域が存在する可能性がある(図 3-2.77、図 3-2.106)。

温泉水の水素同位体比、酸素同位体比及び Cl 濃度から、本地域の温泉の湧水は天水起源と判断される。温泉水は HCO_3 型で伝導加熱型である(図 3-2.38)。シリカ温度と Cl 濃度は、Karago と Mbonyebyombi の湧水の混合を示しており、起源が同じ流体が希釈され地表に湧出していると判断される(図 3-2.44)。

Karago 地点の流体流動モデルについては次のように考えられる。より標高の高い地点で地下に浸透した天水が地下深部において加熱され、花崗岩中に発達した北西-南東系の透水層沿いを地下浅部まで上昇し浅部帯水層として貯留されている。地化学温度によると浅部帯水層の温度は約 81°C であり、流体は割れ目に沿って上昇し、Karago 及び Mbonyebyombi に湧出する。温泉水中の Cl 濃度に基づくと、その起源はより深部に存在することが推定される(図 3-2.108)。一般的に地化学温度計は深部の貯留層温度推定において有用であるが、本地域では信頼できる値がシリカのみであり深部貯留層温度を推定するのは困難である。したがって、深部貯留層の存在確度及びその温度の検証についてはより精緻な地球科学的調査が求められる。

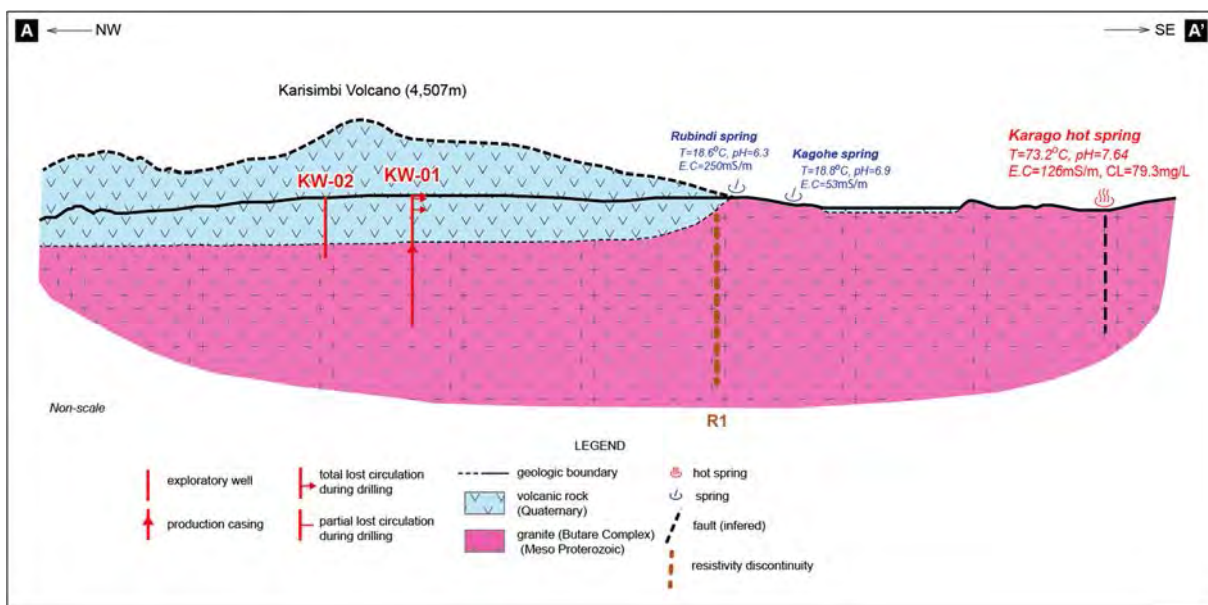
地下の地球科学的情報、すなわち物理探査及び坑井掘削データが少ないため精度は高くないが、Karago 地点の地熱系概念モデルに基づいて地熱資源評価を行った。モンテカルロ解析手法を適用した容積法により本地域の現在の可採地熱資源量を計算するため、今回構築された地熱系概念モデルから想定される地熱貯留層範囲を求めた。地熱貯留層の面積は、本地域の地熱流体を規制すると考えられる高透水性ゾーンの分布、地表地熱徴候の広がりなど、現在までに得られているデータから推定される地熱系の広がりを推定した。本地域では北西-南東系の断層及び地熱徴候に沿って想定される透水層を含む範囲とした(図 3-2.109)。また地熱貯留層の厚みは掘削可能深度を考慮して決定した。ただし、今回構築された地熱系概念モデルは初期段階のモデルであるため、推定された地熱貯留層範囲は今後の地熱資源調査の進捗に伴い見直される

必要がある。



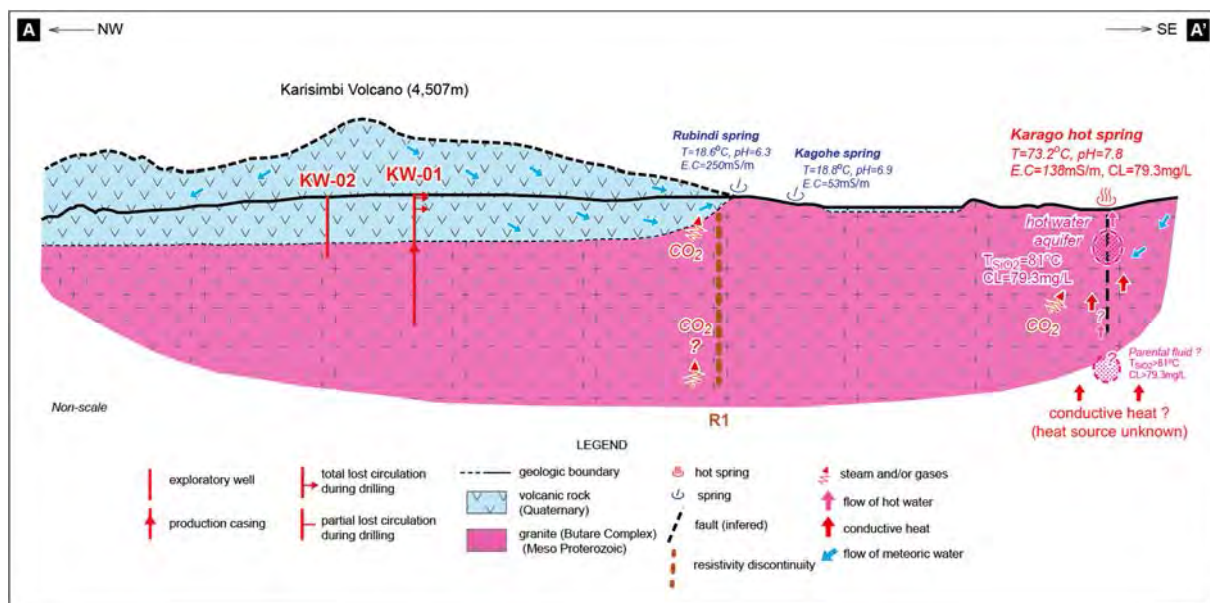
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.106 Karisimbi 地域の比抵抗断面



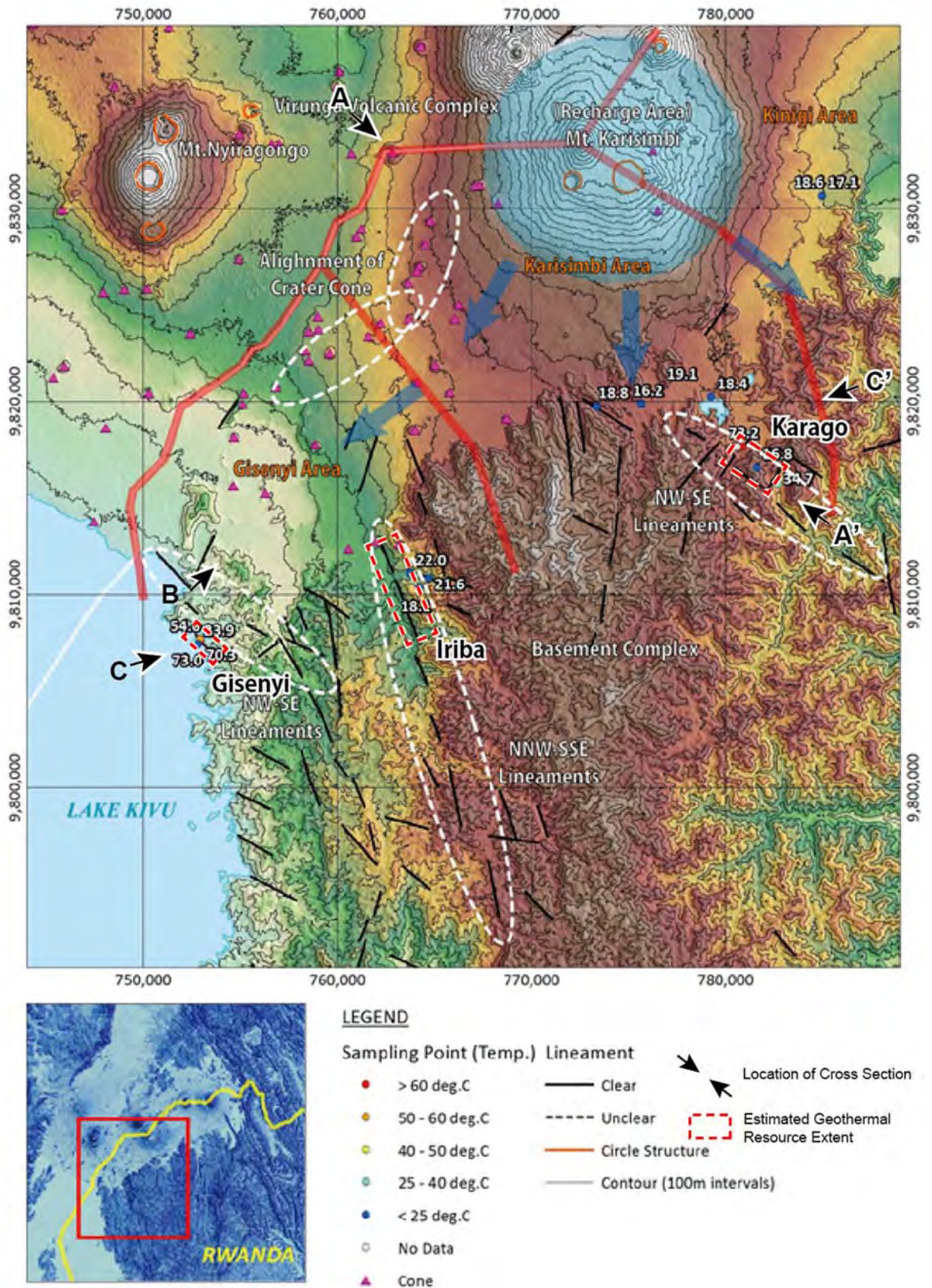
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.107 Karisimbi 地域の地質断面



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.108 Karisimbi 地域の地熱系概念モデル



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.109 Karisimbi 及び Gisenyi 地域の地熱貯留層推定範囲

2) Kinigi 地域

図 3-2.110、図 3-2.111 及び図 3-2.112 に Karisimbi—Kinigi 地域の比抵抗構造、地質断面図及び地熱系概念モデルをそれぞれ示す。

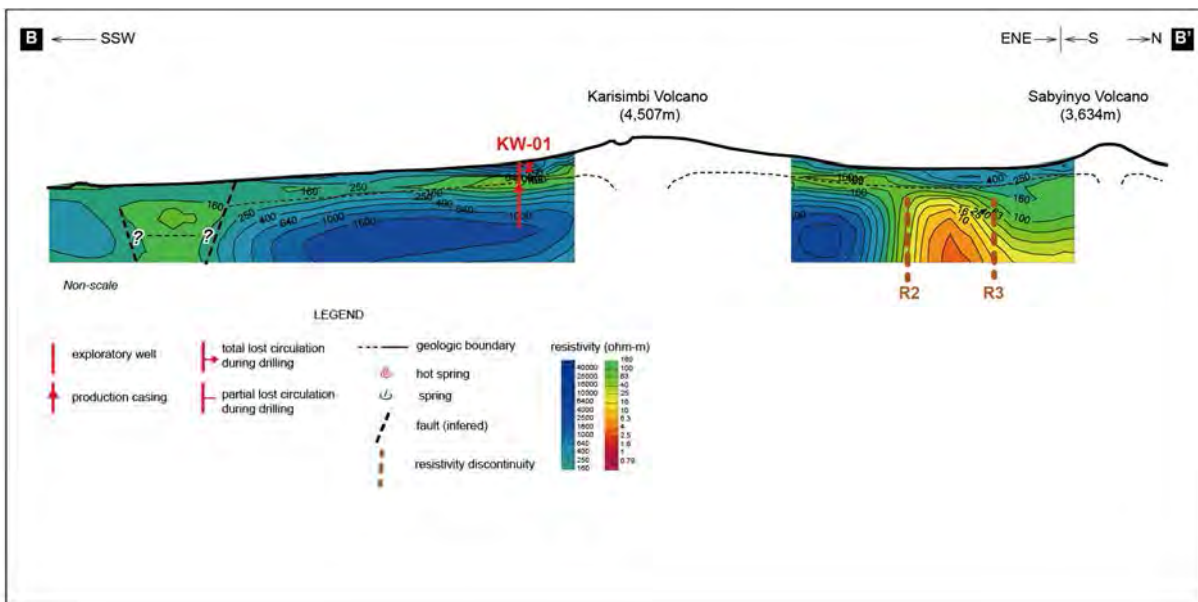
Kinigi 地域北方は第四紀後期火山が分布する Virunga Volcanoes Range (VVR)に位置し、Kinigi 南方はマイロナイト化した原生代の花崗岩—千枚岩複合岩帯を形成する Butare Horst に位置する。

Kinigi 地域北方は第四紀の火山、すなわち Karisimbi、Visoke、Sabinyo、Gahinga 及び Muhavura 付近に位置する。Mt. Sabinyo は安山岩溶岩を噴出しており、本調査で測定された K-Ar 年代はおよそ 50 万年前の値を示す。第四紀中期に安山岩溶岩を噴出させていることは、現在の地熱系の熱源となりうるマグマ溜まりが Mt. Sabinyo の地下浅部に存在する可能性を示唆する。Kinigi 地域の熱源はこれら火山活動に関連したものであると推定される。本調査において実施された Mt. Sabinyo における火山岩の年代測定は 1 試料のみであったため、今後、Kinigi 地域の地熱系の熱源評価のためにはさらなる火山岩年代測定により Mt. Sabinyo の火山活動史を把握することが望まれる。

Kinigi 地域において、噴気や温泉及び変質帯のような地熱地表徴候は認められない。ただし、Rubindi、Mubona 及び Cyabararika などの冷泉が北部火山地域の地形境界及び南部の Butare Horst で認められており、その湧水中には CO₂ ガスが含まれる。

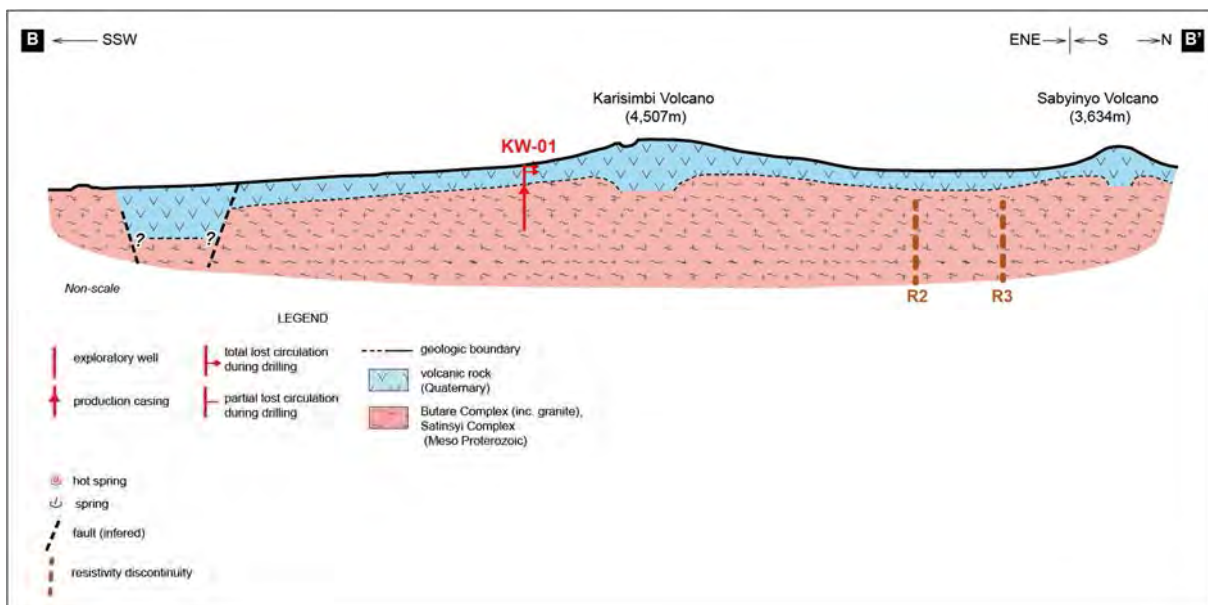
MT データの再解析の結果、Kinigi 地域北方の深度 2,000m 以深に明瞭な低比抵抗域の存在が把握された (図 3-2.86～図 3-2.90)。また、深度 1,500m 以深に比抵抗不連続線 R2 及び R3 が抽出された。Kinigi 地域南方(Butare Horst)の地質構造は北北西—南南東系の断層が卓越していることを考慮すると、比抵抗不連続線 R2 及び R3 が火山岩の下位にある原生代基盤岩中に発達した北北西—南南東系の断層の存在を示している可能性が示唆される。深部の地熱貯留層の存在の可否は不明であるが、高温の地熱流体が比抵抗不連続線 R2 及び R3 に伴う割れ目を上昇し、低比抵抗域を流動している可能性がある。Kinigi 地域北方の深度 2,000m 以深に認められた明瞭な低比抵抗域が現在の地熱系の存在と関わりがあるかを判断することは現時点では困難であるものの、この低比抵抗域の近傍に地熱系の熱源となる可能性のある第四紀の安山岩質火山が存在することを考慮すると、低比抵抗域が現在の地熱活動と関わりがあることは考えうるひとつの可能性である。

地熱貯留層の存在の可否は把握されていないが、構築した地熱系概念モデルに基づいて Kinigi 地域の地熱資源評価を行った。モンテカルロ解析手法を適用した容積法により本地域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。地熱貯留層の面積は、本地域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度を推定した。最小範囲は深度 3,000m の低比抵抗域とし、最大範囲は深度 3,000m の低比抵抗域を含む R2 及び R3 の間とした (図 3-2.113)。比抵抗分布から判断すると、地熱貯留層の分布上限は深度 1,500m 付近と推定されその厚さは掘削可能深度を考慮して決定した。ただし、今回構築された地熱系概念モデルは初期段階のモデルであるため、推定された地熱貯留層範囲は今後の地熱資源調査の進捗に伴い見直される必要がある。



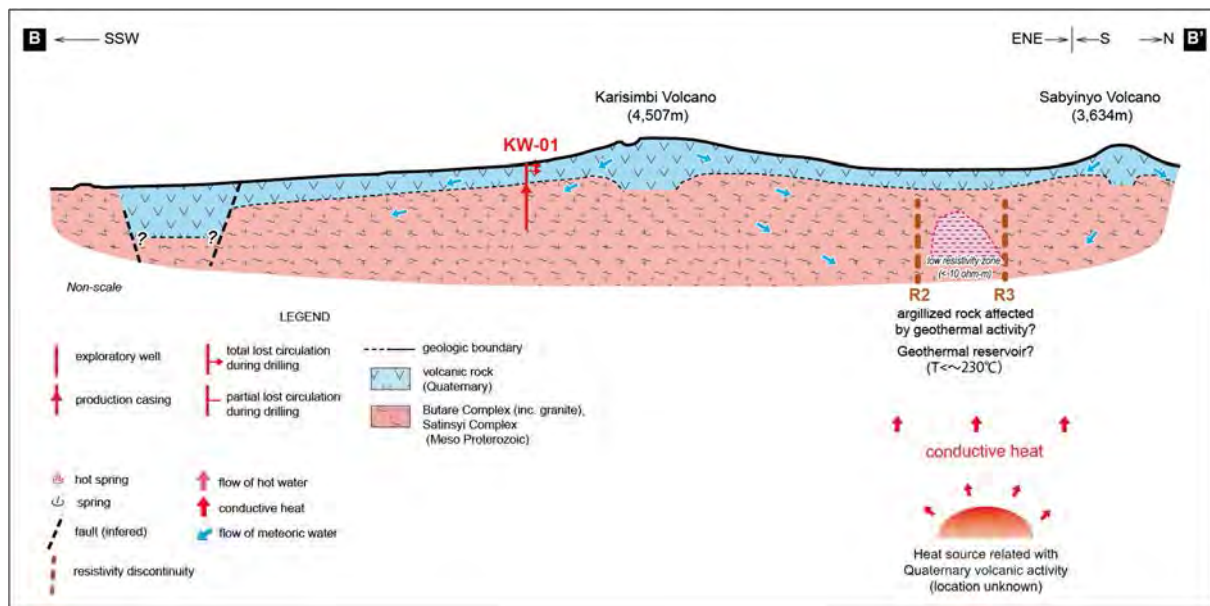
[出所] JICA 調査団で作成 (2015年3月作成)

図 3-2.110 Karisimbi - Kigini 地域の比抵抗断面



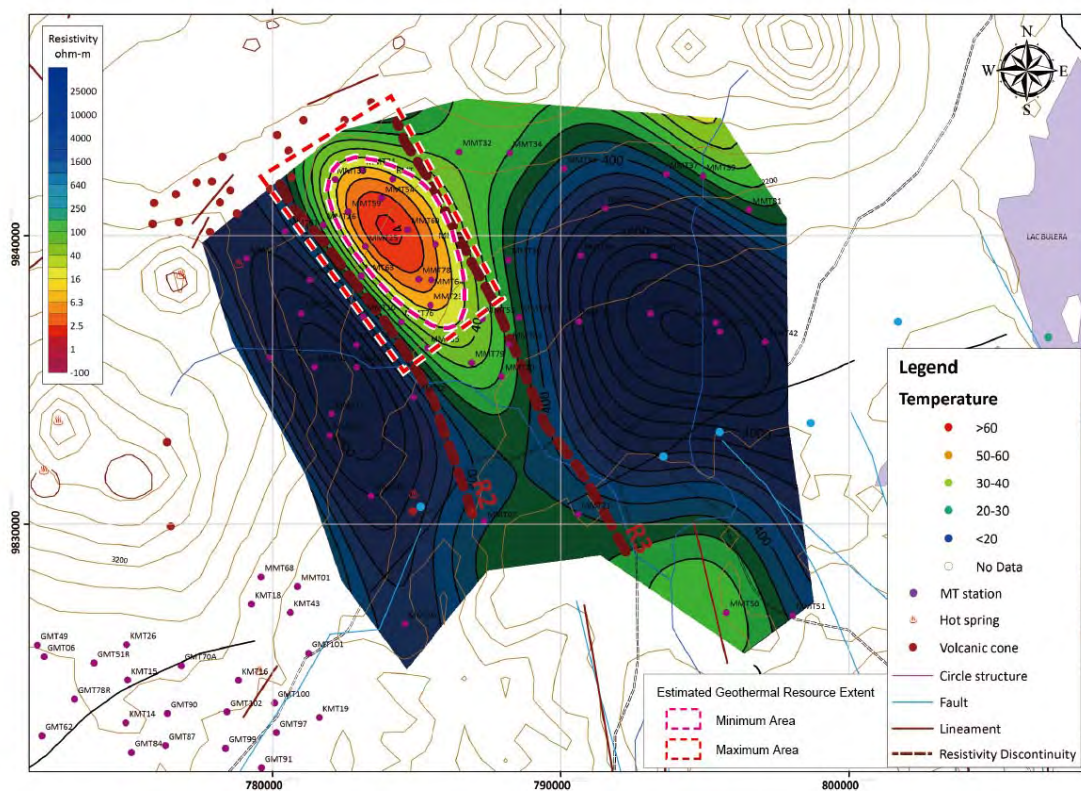
[出所] JICA 調査団で作成 (2015年3月作成)

図 3-2.111 Karisimbi - Kigini 地域の地質断面



[出所] JICA 調査団で作成 (2015年3月作成)

図 3-2.112 Karisimbi – Kigini 地域の地熱系概念モデル



[出所] JICA 調査団で作成 (2015年3月作成)

図 3-2.113 Kigini 地域の地熱貯留層推定範囲

3) Gisenyi 地域

図 3-2.114、図 3-2.115 及び図 3-2.116 に Gisenyi 地域の比抵抗断面、地質断面図及び地熱系概念モデルをそれぞれ示す。

Gisenyi 地域北部域は第四紀後期火山が分布する Virunga Volcanoes Range (VVR)に位置し、Gisenyi 地域南部域はマイロナイト化した原生代の花崗岩－千枚岩複合岩帯を形成する Butare Horst に位置する。

透水層（高透水性ゾーン）は地熱流体の賦存や流動、更には地熱流体の噴出勢力等に大きく係わる。層序、地質構造及び地熱地表徴候の分布から判断すると、流体流動は断層に伴う透水層により規制されていると考えられる。断層は、垂直方向（深度方向）の透水性を与え、地熱系の形成に重要な役割を果たしていると考えられる。本地域では衛星画像解析及び地質調査により北北西－南南東系及び北西－南東系の断層が推定される(図 3-2.33)。Gisenyi 温泉の周辺では、北西－南東系の地形リニアメントが推定断層として明瞭に認められており、これらは地熱流体の流動を規制している地質構造と考えられる。

Gisenyi 地域では、南北方向の“Recent” Border Fault 及び北東－南西方向の Accomodation Zone が主要な地質構造であるが (BGR (2009))、これらが地熱活動を規制する地質構造であることを示唆するデータや情報は確認されていない。なお、“Recent” Border Fault (BGR (2009)) は衛星画像解析により地形崖及びリニアメントとして認められる。また、比抵抗不連続線 R1 は北東－南西方向の Accomodation Zone (BGR, 2009)に関連する可能性がある(図 3-2.69～図 3-2.77)。また、Accomodation Zone に沿って第四紀後期と推定される火山クレーターや火山円錐丘及び冷泉が分布しており、Accomodation Zone に沿って破砕帯が発達していることが示唆される。

Gisenyi 地域には温泉及び第四紀の火山が存在するが、地表～深度 5,000m 付近まで 40ohm-m 以下の低比抵抗域は確認されておらず、それは温泉や比抵抗不連続線 R1 周辺でも同様である。比抵抗構造に基づく、Gisenyi 地域の地熱活動は、地熱発電所が運用されているような他の地熱地域と比較して活発ではないと判断される。

Gisenyi 地域の温泉水中の水素同位体、酸素同位体 CI 濃度から判断すると、温泉水の起源は天水であり、熱伝導型を示唆する HCO₃ 型に分類される(図 3-2.51)。比較的高い CI 濃度は温泉水中に深部の高温貯留層熱水が混入していることを示唆している。

Gisenyi 温泉周辺の流体流動モデルに関して、Gisenyi 温泉より標高の高い地域で地下に浸透した天水が熱伝導により加熱され、原生代基盤岩中に発達した北西－南東系の高透水性ゾーンに沿って地下浅部まで上昇し、貯留されていると考えられる。その帯水層の温度は地化学温度計によると約 80°C であると考えられる。割れ目に沿って上昇した流体は Gisenyi 温泉に湧出する。温泉水中の CI 濃度から判断すると、流体の起源はより深部であると考えられる(図 3-2.115)。

一般的に地化学温度計は深部の貯留層温度推定において有用であるが、本地域では信頼できる値がシリカのみであり深部貯留層温度を推定するのは困難である。したがって、深部貯留層の存在確度及びその温度の検証についてはより精緻な地球科学的調査が求められる。

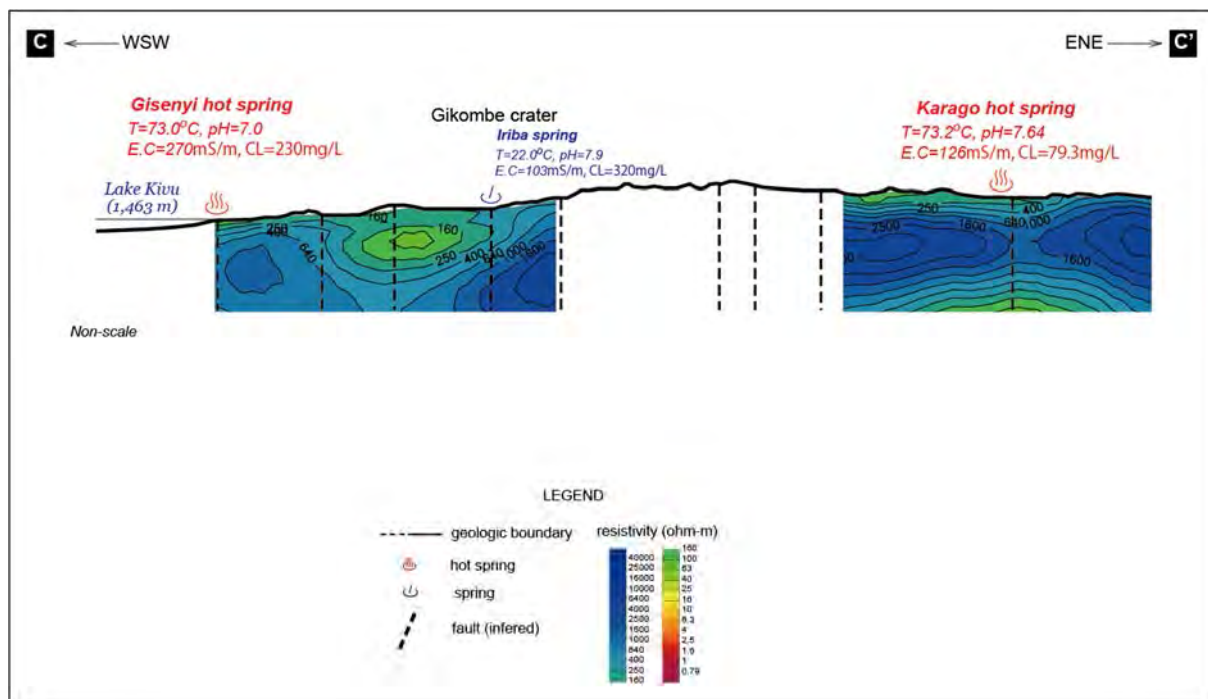
地下の地球科学的情報、すなわち地球物理学及び坑井掘削データが少ないため精度は高くないが、Gisenyi 地域の地熱系概念モデルに基づいて地熱資源評価を行った。モンテカルロ解析手法を適用した容積法により本地域の現在の可採地熱資源量を計算するため、今回構築された地熱系概念モデルから想定される地熱貯留層範囲を求めた。地熱貯留層の面積は、本地域の地熱流体を規制すると考えられる高透水性ゾーンの分布、地表地熱徴候の広がりなど、現在までに

得られているデータから推定される地熱系の広がりやを推定した。地熱貯留層の範囲は、図 3-2.109 に示す北西－南東系に沿って推定される高透水性ゾーンを含む範囲とした。地熱貯留層の厚さは掘削深度を想定した。

Iriba の湧水温度は 22°C と低い、Cl 濃度は最大で 320mg/L であり、これは深部の高温熱水が混入していることを示唆している。地化学温度は 79°C と見積もられ、浅部帯水層の温度を示していると考えられる(図 3-2.116)。温泉水中の Cl 濃度から判断すると、起源となる高温熱水が Iriba 地域の深部に存在する可能性がある(図 3-2.116)。Iriba 地域の流体流動を規制しているのは北北西－南南東系の推定断層であると考えられる。Iriba 温泉付近には第四紀の火山である Gikombe クレーターが認められる。本調査によって Gikombe クレーター周辺の火山岩の K-Ar 年代値は 100 万年前の値を示すことが明らかにされた。これらより本地域の地熱系の熱源は第四紀の火山活動に伴うものであると考えられる。

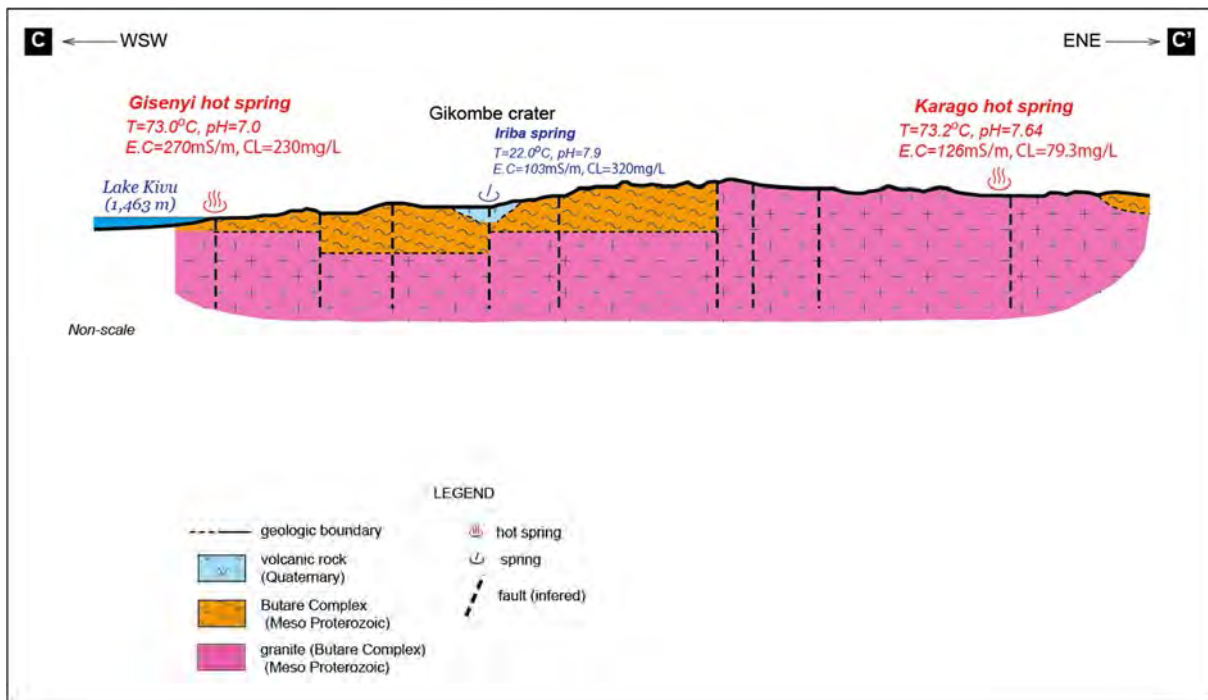
地下の地球科学的情報、すなわち地球物理学及び坑井掘削データが少ないため精度は高くないが、Iriba 地域の地熱系概念モデルに基づいて地熱資源評価を行った。地熱貯留層の面積は、本地域の地熱流体を規制すると考えられる高透水性ゾーンの分布、地表地熱徴候の広がりなど、現在までに得られているデータから推定される地熱系の広がりに基づき、図 3-2.109 に示すとおり、北北西－南南東系に沿って推定される高透水性ゾーンを含む範囲とした。地熱貯留層の厚さは掘削可能深度を考慮して決定した。

ただし、今回構築された地熱系概念モデルは初期段階のモデルであるため、推定された地熱貯留層範囲は今後の地熱資源調査の進捗に伴い見直される必要がある。



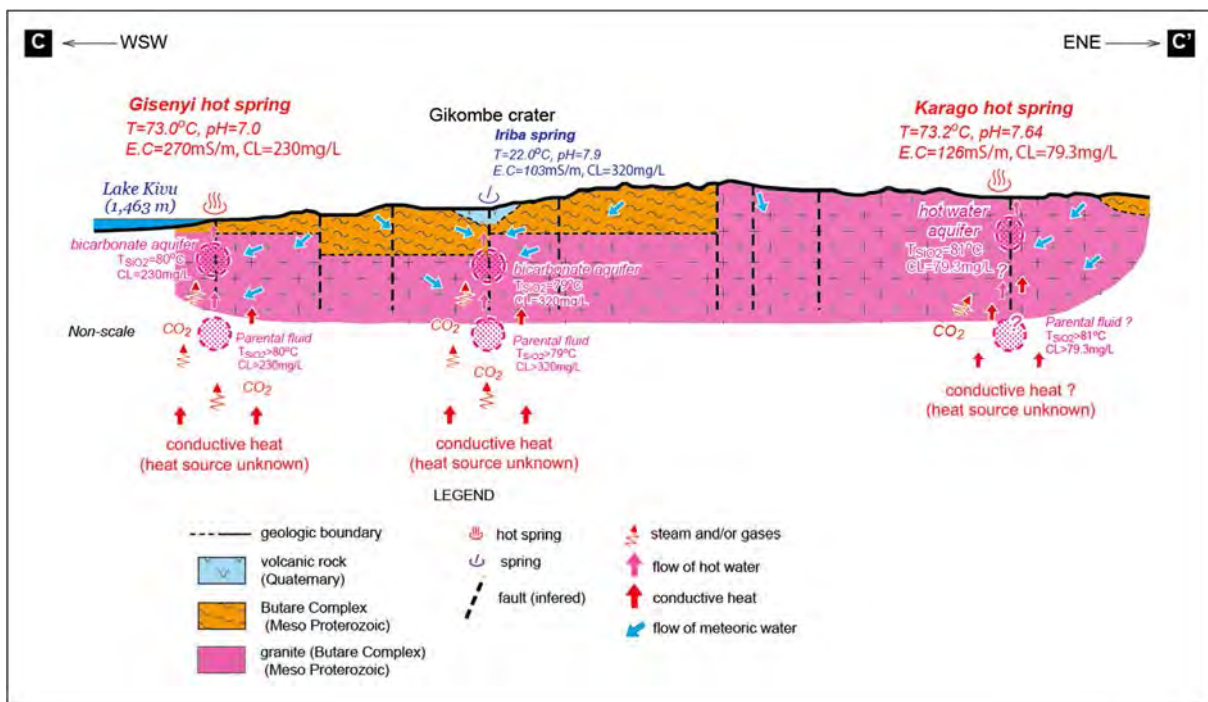
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.114 Gisenyi – Karisimbi 地域の比抵抗断面



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.115 Gisenyi – Karisimbi 地域の地質断面



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.116 Gisenyi – Karisimbi 地域の地熱系概念モデル

4) Bugarama 地域

図 3-2.117 及び図 3-2.118 に Bugarama 地域 (Mashyuzza 温泉周辺) の地質断面図及び地熱系概念モデルを示す。Bugarama 地域は原生代基盤岩、第三紀玄武岩及び第四紀沖積層から成る。Bugarama 地域に分布する火山岩 (玄武岩) の K-Ar 年代値は約 1,220 万年前の値を示し、熱源と

なりうる新しい火山は存在しない。したがって本地域における地熱系の熱源は、地殻深部におけるマグマ物質の伝導熱もしくは貫入岩の伝導熱であると考えられる。

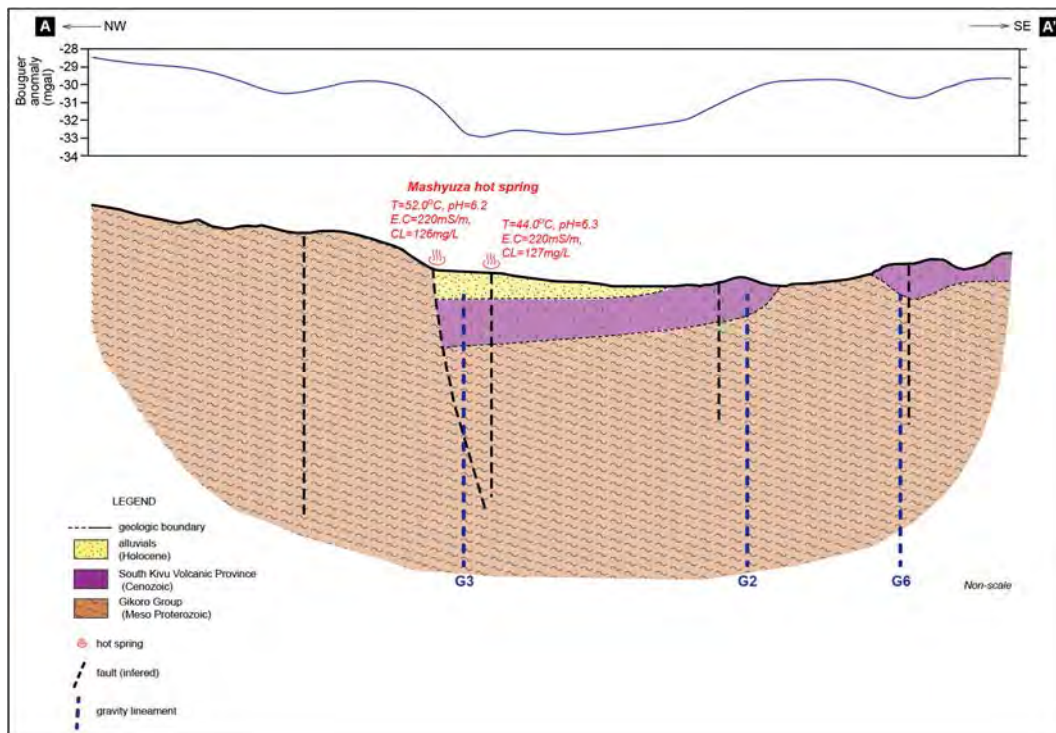
透水層（高透水性ゾーン）は地熱流体の賦存や流動、更には地熱流体の噴出勢力等に大きく係わる。層序、地質構造、地熱地表徴候の分布及び重力探査結果から判断すると、流体流動は断層に伴う透水層により規制されていると考えられる。断層は、垂直方向（深度方向）の透水性を与え、地熱系の形成に重要な役割を果たしていると考えられる。Bugarama 地域の地質構造は地溝構造の存在で特徴づけられ、これは本調査で実施された重力探査において明瞭に把握された。重力探査結果によると、ブーゲー異常域は調査域の北部から北東部にかけて分布する。重力探査によって断裂と推定された重力リニアメントの分布は、本地域の地溝構造の両側が断層によって規制されていることを示している。Mashuyza 温泉は重力リニアメント G3 の中心部付近に位置している。なお、重力リニアメント G3 は地形リニアメントとも一致する。したがって、重力リニアメント G3 は断層を示しており、地熱流体は断層周辺に伴う破碎帯を流動していると考えられる。他の重力リニアメントも地熱流体を規制する構造を反映している可能性があるが、現時点では詳細は不明である。

温泉中の水素同位体、酸素同位体及び Cl 濃度から、本地域の貯留層熱水は天水起源であると推定される。ただし、Cl 濃度の最大値は 150mg/L であり、高温の深部貯留層熱水が混入していることが示唆される。シリカ温度及び Cl 濃度の関係は Bize と Mashuyza の温泉の起源が同一であることを示しており(図 3-2.60)、両地域の温泉は同じ起源熱水が希釈され地表に湧出していると判断される。

Bugarama 地域の流体流動モデルについて、Mashuyza 温泉より標高の高い、西方から北西に位置する山体の地下に浸透した天水が熱伝導により 63℃ 以上まで加熱され、重力リニアメント G4（北西－南東系）及び G3（北東－南西系）に伴う高透水性ゾーンに沿って上昇していると考えられる。重力リニアメント G3 に沿って熱水は浅部まで上昇し、変成岩及び火山岩中に発達した割れ目に貯留されている。熱水は上昇の過程で地下水及び河川水といった浅部の低温水により希釈されている。地化学温度は帯水層の温度が 63℃ 程度であることを示している。

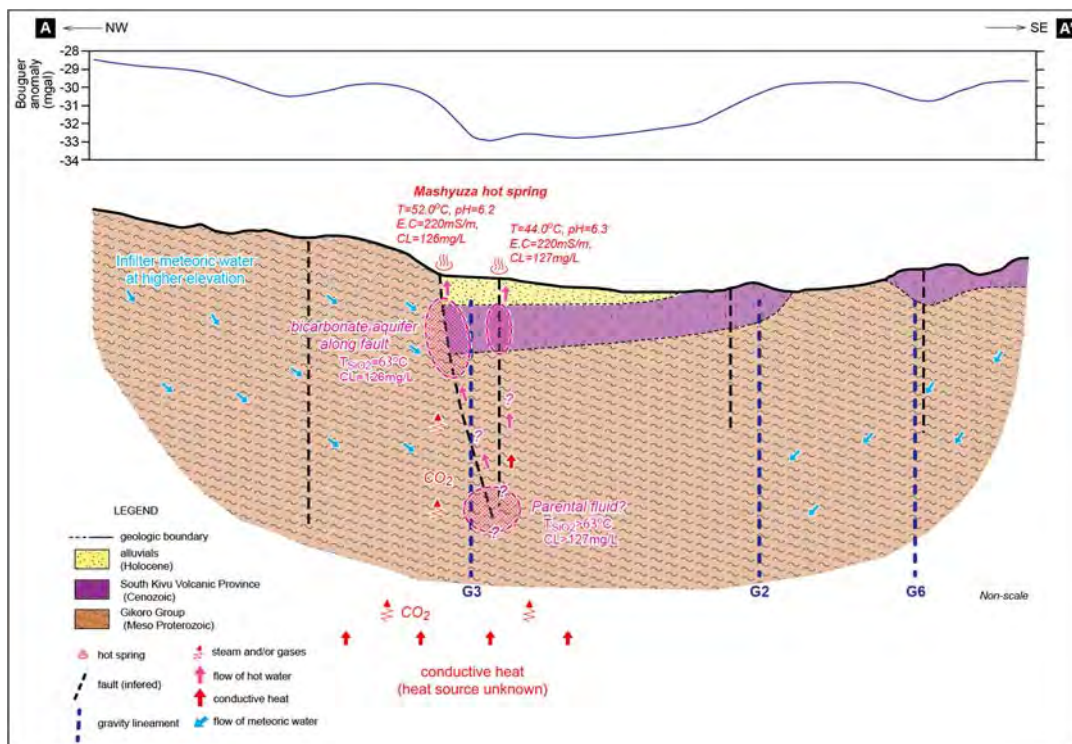
図 3-2.119 に示すとおり、Bugarama 地域の深部にはより高温の地熱貯留層が存在する可能性があるが、現時点ではその存在は確認されていない。一般的に地化学温度計は深部の貯留層温度推定において有用であるが、本地域では信頼できる値がシリカのみであり深部貯留層温度を推定するのは困難である。したがって、深部貯留層の存在確度及びその温度の検証についてはより精緻な地球科学的調査が求められる。

地下の地球科学的情報、すなわち地球物理学及び坑井掘削データが少ないため精度は高くないが、Bugarama の地熱系概念モデルに基づいて地熱資源評価を行った。地熱貯留層の面積は、本地域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に基づき推定した。最小推定範囲は主要な高透水性ゾーンの存在が推定される重力リニアメント G4、G3 及び G1 を含む範囲とした。最大推定範囲は G4、G3 及び G1 に加えて G7 を含めた範囲とし、東側の境界は地溝構造の東縁とした。地熱貯留層の厚さは掘削可能深度を考慮して決定した。ただし、今回構築された地熱系概念モデルは初期段階のモデルであるため、推定された地熱貯留層範囲は今後の地熱資源調査の進捗に伴い見直される必要がある。



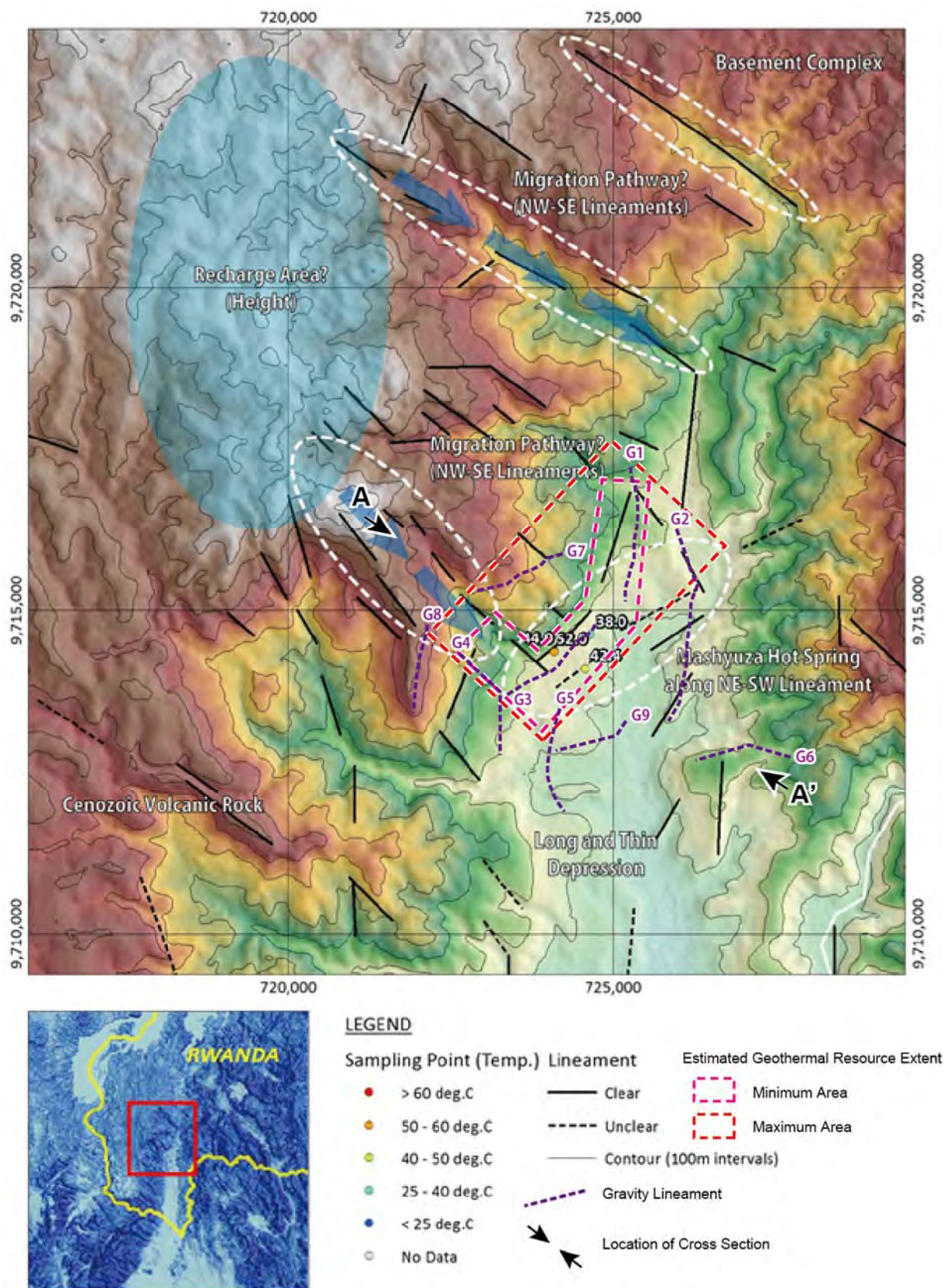
[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.117 Bugarama 地域の地質断面



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.118 Bugarama 地域の地熱系概念モデル



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.119 Bugarama 地域の地熱貯留層推定範囲

(2) 詳細調査実施地域の地熱資源量評価

1) 評価方法

貯留層体積などのパラメータを仮定して容積法による各地域の地熱資源ポテンシャルを検討した。容積法は地下に貯留されていると想定される総熱量を計算し、利用可能な熱エネルギーに対応する電気エネルギー（発電出力）を推定する方法である。なお、容積法の計算では、モンテカルロ解析手法を適用して確率統計的にポテンシャルを求めた。

発電出力の計算式を以下に示す。

$$\text{発電出力 [MWe]} = (Tr - Ta) \times \{(1 - \phi) \times Cpr \times pr + \phi \times Cpw \times pw\} \times V \times RF \times CE / (LF \times PL)$$

pr、pw	:	それぞれ岩石密度 (kg/m ³)、地熱流体密度 (kg/m ³)
Cpr、Cpw	:	それぞれ岩石比熱 (kJ/kg・°C)、地熱流体比熱 (kJ/kg・°C)
Tr、Ta	:	それぞれ貯留層温度 (°C)、利用限界温度 (°C)
φ	:	岩石の空隙率 (%)
V	:	貯留層体積 (km ³)
RF	:	回収率 (%)
CE	:	変換効率 (%)
LF	:	プラント稼働率 (%)
PL	:	プラント運転期間 (年)

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通常困難であり、不確実性を伴っている。このため、統計学的な解析法であるモンテカルロ解析手法を適用して確率論的にポテンシャルを求めることが多い。今回の試算においてもこの手法を適用した。モンテカルロ法では、図 3-2.120 に示すような矩形ないしは三角形の確率分布が通常用いられる（最大値と最小値のみが示されている場合は矩形、最大値と最小値及び最確値が示されている場合は三角形の分布が適用されていることが多い）。

貯留層体積

貯留層の面積は、物理探査結果や地熱概念モデルを基に推定し、Kinigi と Bugarama は矩形分布を、その他の地域では最確値を設定した。また、厚みは全地域で 1,000 m から 2,000 m の矩形分布とした。貯留層体積は厚みと面積を掛け合わせることで求められる。なお、面積と厚みについては更なる調査による再検討が必要である。

貯留層温度及び利用下限温度

各地域ともに、温泉水等の地化学温度及び地熱系概念モデルに基づき最小値及び最大値を求め、矩形分布を設定した。利用限界温度は、バイナリー方式を考慮して 80 °C で一定と仮定した。

岩石密度

最小値は、花こう岩が分布する Karago 地点では 2,500kg/m³、その他の先カンブリア紀の地層から成る地域では 2,600kg/m³、とし、最大値はすべての地域で 3,000kg/m³ とし、矩形分布とした。

岩石比熱

一般的な岩石の値を採用し、最小値と最大値をそれぞれ $0.8\text{kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ 及び $1.0\text{kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ と仮定し、矩形分布とした。

岩石空隙率

先カンブリア紀の地層から成る地域では、最小値と最大値をそれぞれ 1% 及び 5% と仮定した。Bugarama 地域では、新生代の地層が分布するため、1% 及び 10% の矩形分布とした。

流体の密度及び比熱

想定される貯留層温度、圧力から蒸気表を基に算出した。

回収率

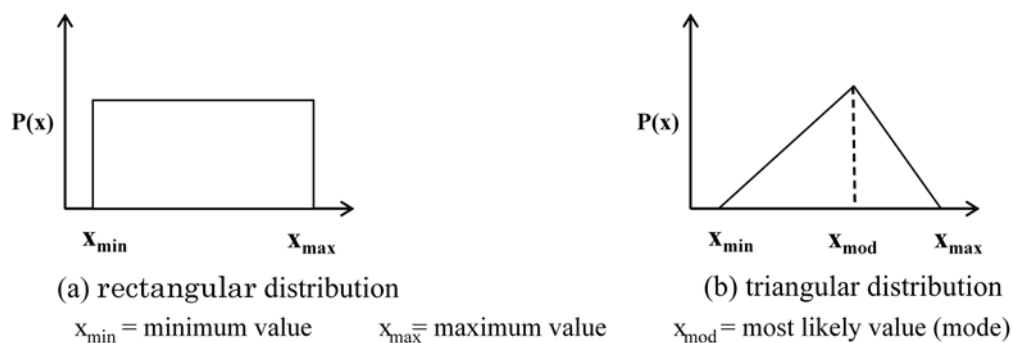
一般的に空隙率の 2.5 倍程度の値とされていることから、最小値と最大値をそれぞれ空隙率の 2.5 倍と仮定し、矩形分布とした。

変換効率

バイナリーシステムを考慮して最小値、最大値をそれぞれ 2.0%、11.0% と仮定し、その平均値を最確値とした三角形分布とした。

プラント運転期間及びプラント稼働率

プラント運転期間は 30 年、プラント稼働率は 85% でそれぞれ一定と仮定した。



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.120 仮定した確率分布

2) 地熱資源量推定結果

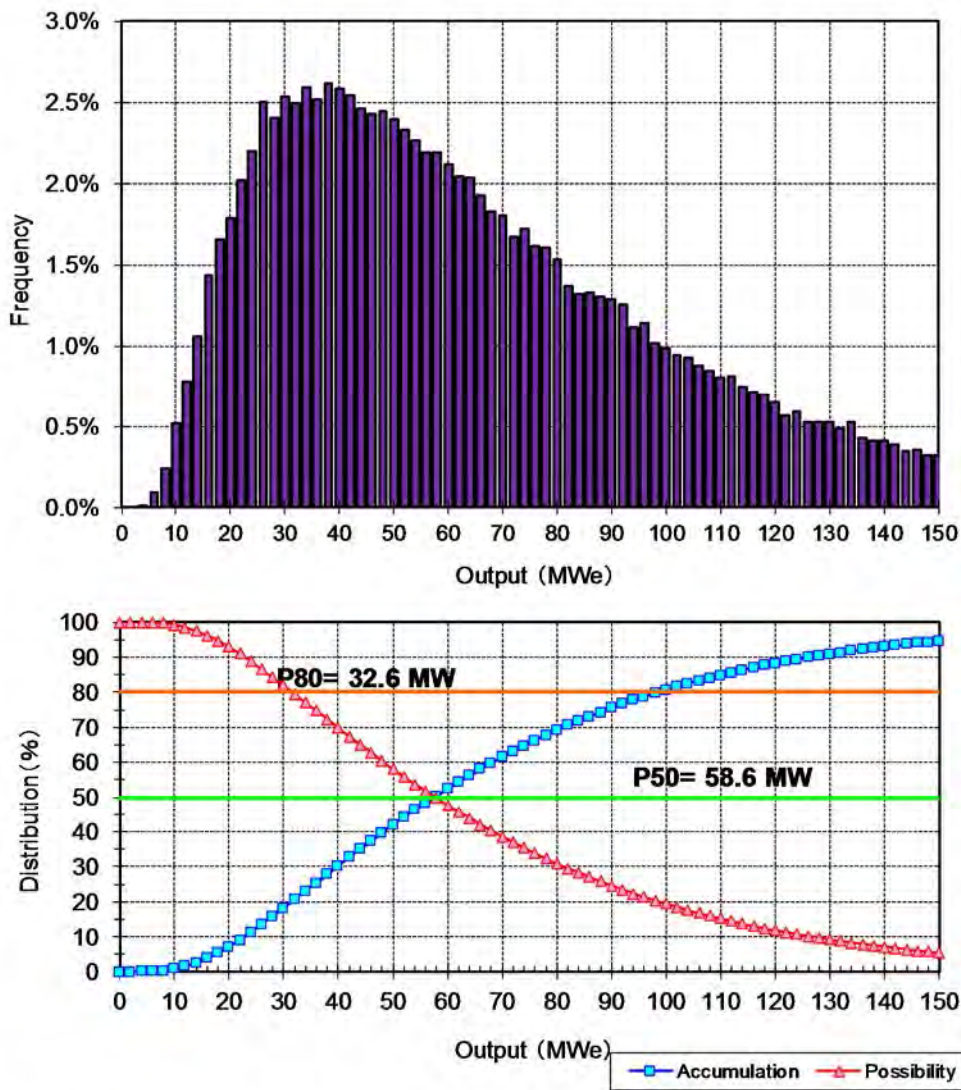
上記のパラメータ設定に基づいて、抽出した5地域の地熱資源量を算出した。結果を図3-2.121から図3-2.125に示す。モンテカルロ法による資源量計算結果は幅をもった確率分布で表現されることから、ここでは信頼水準80%及び50%の値の資源量をそれぞれ求めた。

各地域の資源量計算結果一覧を表3-2.24に示す。詳細調査対象地域の合計地熱資源量は信頼水準80%で47.3MWe、信頼水準50%で89.5%とそれぞれ見積もられた。

表 3-2.24 詳細調査実施地域の地熱資源量計算結果一覧

地域名	信頼水準 80% の資源量 (MWe)	信頼水準 50% の資源量 (MWe)
Kinigi	32.6	58.6
Bugarama	6.6	15.1
Gisenyi	1.9	3.7
Karago	2.5	4.9
Iriba	3.7	7.2
Total	47.3	89.5

[出所] JICA 調査団で作成 (2015年3月作成)

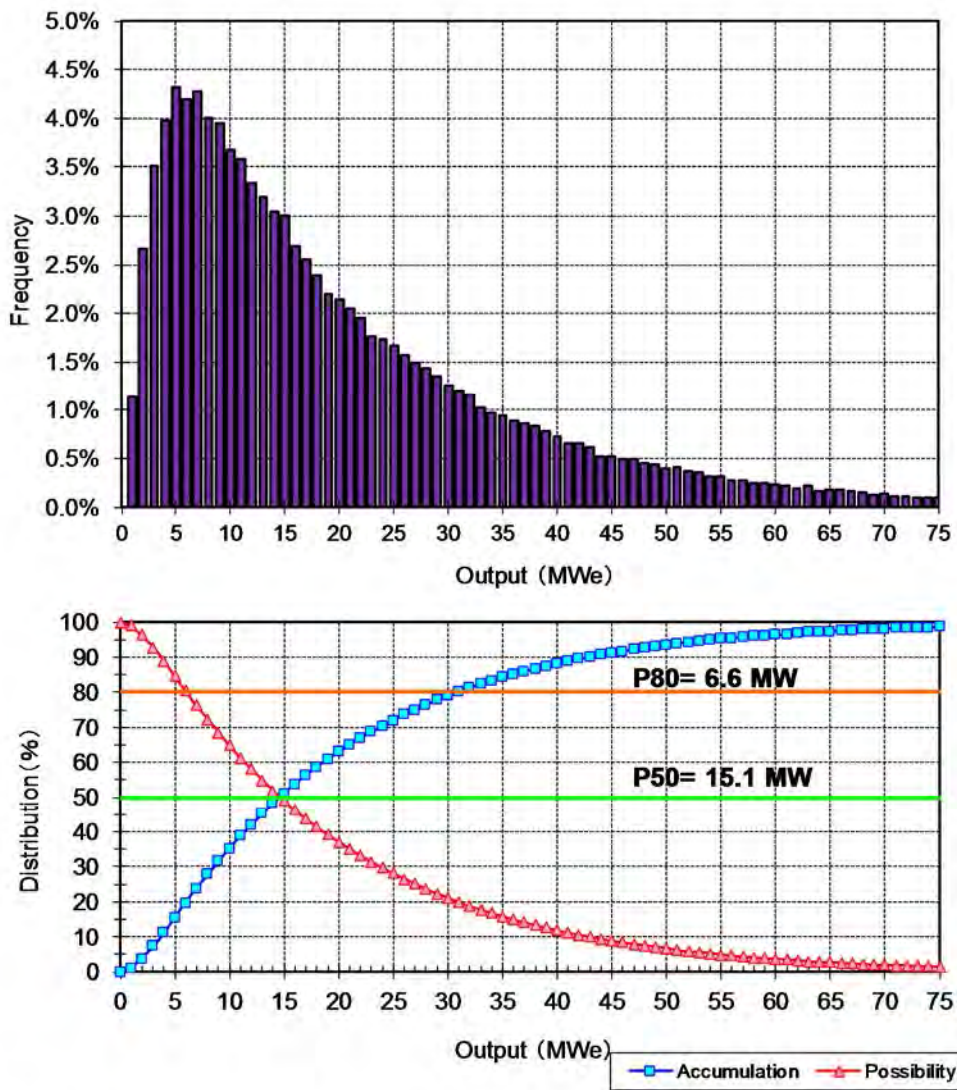


Input

Parameter	min.	most likely	max.
Reservoir Area (km ²)	17.83	-	35.93
Reservoir Thickness (m)	1000	-	2000
Rock Density (kg/m ³)	2600	-	3000
Porosity (-)	0.01	-	0.05
Recovery factor (-)	0.025	-	0.125
Rock Specific Heat (kJ/kg°C)	0.80	-	1.00
Reservoir Average Temperature (°C)	150	-	230
Reservoir Average Pressure (MPa)	-	22.5	-
Heat-Electricity Conversion Factor (-)	0.02	0.065	0.11
Plant Life (year)	-	30	-
Load Factor (-)	-	0.85	-
Abandonment Temperature (°C)	-	80	-

[出所] JICA 調査団で作成 (2015年3月作成)

図 3-2.121 モンテカルロ解析を適用した容積法による資源量計算結果 (Kinigi 地域)

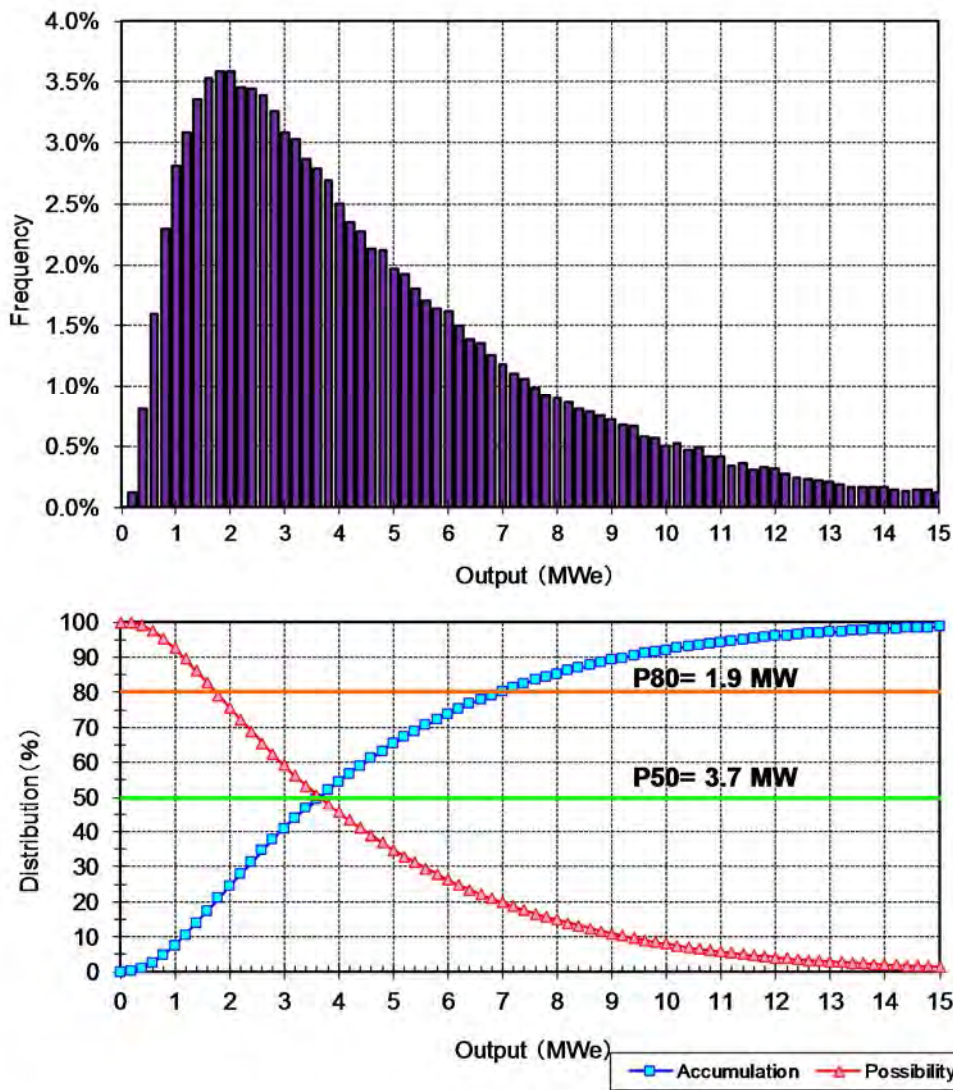


Input

Parameter	min.	most likely	max.
Reservoir Area (km ²)	3.40	-	8.30
Reservoir Thickness (m)	1000	-	2000
Rock Density (kg/m ³)	2600	-	3000
Porosity (-)	0.01	-	0.10
Recovery factor (-)	0.025	-	0.250
Rock Specific Heat (kJ/kg°C)	0.80	-	1.00
Reservoir Average Temperature (°C)	100	-	220
Reservoir Average Pressure (MPa)	-	12.5	-
Heat-Electricity Conversion Factor (-)	0.02	0.065	0.11
Plant Life (year)	-	30	-
Load Factor (-)	-	0.85	-
Abandonment Temperature (°C)	-	80	-

[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.122 モンテカルロ解析を適用した容積法による資源量計算結果 (Bugarama 地域)

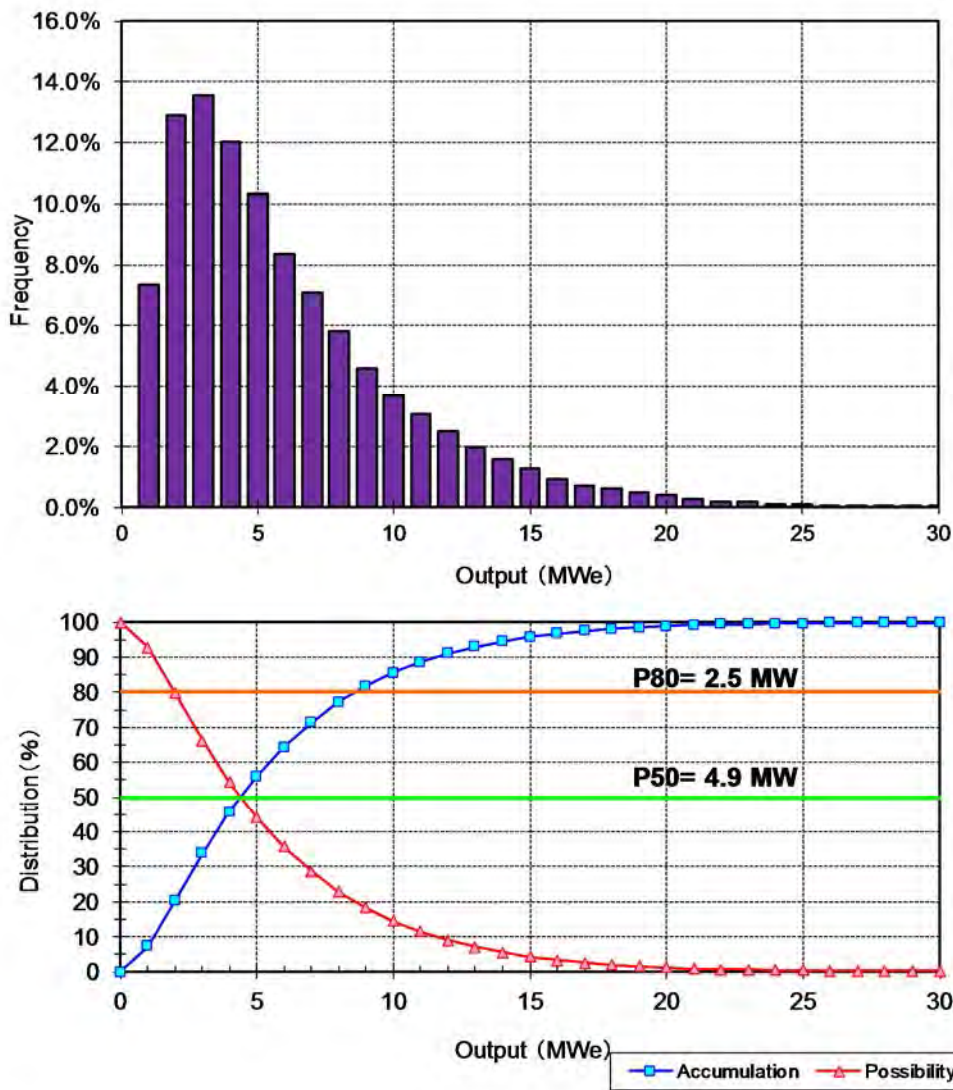


Input

Parameter	min.	most likely	max.
Reservoir Area (km ²)	-	2.50	-
Reservoir Thickness (m)	1000	-	2000
Rock Density (kg/m ³)	2600	-	3000
Porosity (-)	0.01	-	0.05
Recovery factor (-)	0.025	-	0.125
Rock Specific Heat (kJ/kg°C)	0.80	-	1.00
Reservoir Average Temperature (°C)	100	-	220
Reservoir Average Pressure (MPa)	-	12.5	-
Heat-Electricity Conversion Factor (-)	0.02	0.065	0.11
Plant Life (year)	-	30	-
Load Factor (-)	-	0.85	-
Abandonment Temperature (°C)	-	80	-

[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.123 モンテカルロ解析を適用した容積法による資源量計算結果 (Gisenyi 地域)

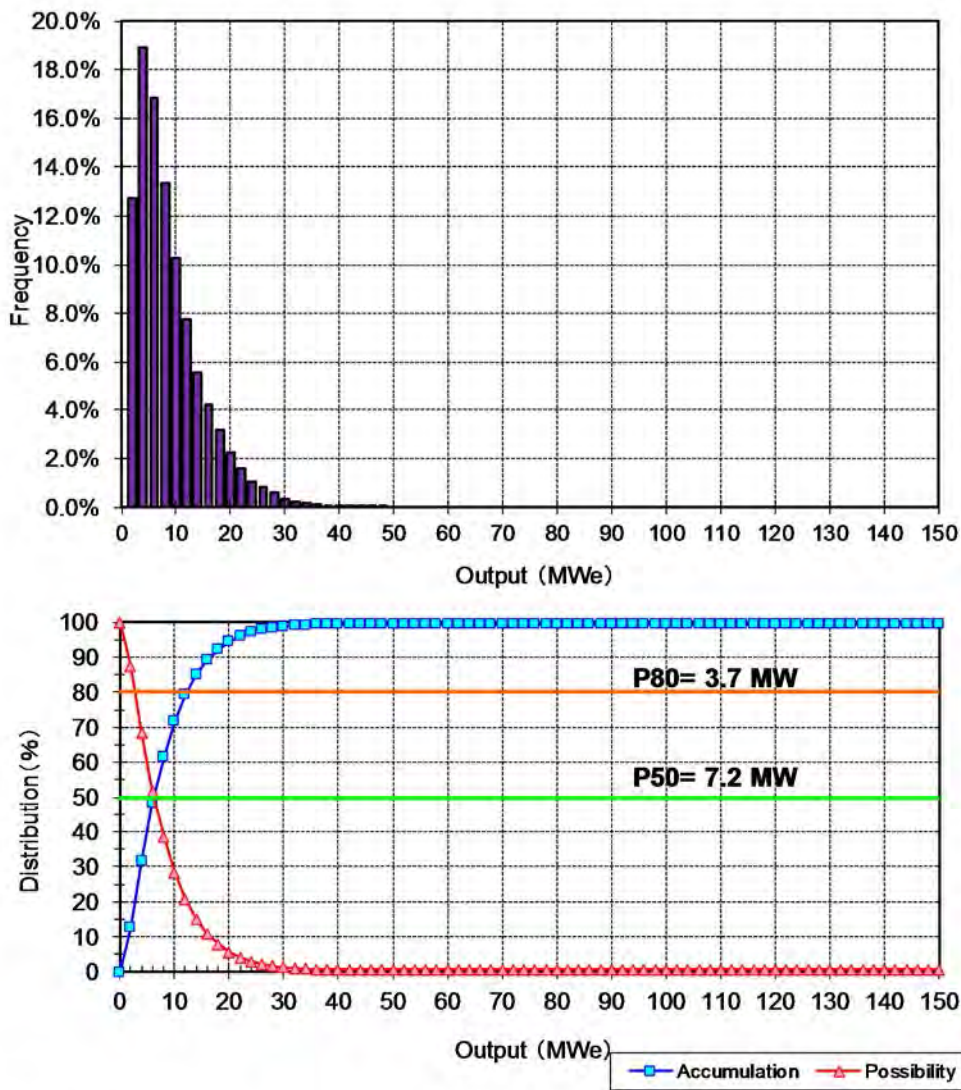


Input

Parameter	min.	most likely	max.
Reservoir Area (km ²)	-	3.75	-
Reservoir Thickness (m)	1000	-	2000
Rock Density (kg/m ³)	2500	-	3000
Porosity (-)	0.01	-	0.05
Recovery factor (-)	0.025	-	0.125
Rock Specific Heat (kJ/kg°C)	0.80	-	1.00
Reservoir Average Temperature (°C)	100	-	200
Reservoir Average Pressure (MPa)	-	12.5	-
Heat-Electricity Conversion Factor (-)	0.02	0.065	0.11
Plant Life (year)	-	30	-
Load Factor (-)	-	0.85	-
Abandonment Temperature (°C)	-	80	-

[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.124 モンテカルロ解析を適用した容積法による資源量計算結果 (Karago 地域)



Input

Parameter	min.	most likely	max.
Reservoir Area (km ²)	-	6.25	-
Reservoir Thickness (m)	1000	-	2000
Rock Density (kg/m ³)	2600	-	3000
Porosity (-)	0.01	-	0.05
Recovery factor (-)	0.025	-	0.125
Rock Specific Heat (kJ/kg°C)	0.80	-	1.00
Reservoir Average Temperature (°C)	100	-	180
Reservoir Average Pressure (MPa)	-	12.5	-
Heat-Electricity Conversion Factor (-)	0.02	0.065	0.11
Plant Life (year)	-	30	-
Load Factor (-)	-	0.85	-
Abandonment Temperature (°C)	-	80	-

[出所] JICA 調査団で作成

図 3-2.125 モンテカルロ解析を適用した容積法による資源量計算結果 (Iribia 地域)

3) 推定地熱資源量に関する考察

今回の資源量の推定にはモンテカルロ法を適用した容積法を用い、前出の 5 地域の地熱資源量を推定した。モンテカルロ法による資源量計算結果は幅をもった確率分布で表現され、ここでは信頼水準 80% 及び 50% の値をそれぞれ求めた。

解析の結果、5 地域の合計地熱資源量は信頼水準 80% で 47.3MWe、信頼水準 50% で 89.5% とそれぞれ見積もられた。Kinigi 地域は、他地域と比べて明瞭な低比抵抗構造が見られていることから最も調査・開発の優先度が高いと評価される。次いで、同様に低比抵抗構造が検出された Bugarama 地域のポテンシャルが高く評価された。Karagao、Gisenyi 及び Iriba の各地域は、Kinigi 地域や Bugarama 地域と比べて、面積が小さいために、推定資源量は 1.9~3.7MWe と見積もられた。

地熱資源量の推定に用いた各パラメータは、できる限りこれまでの調査・解析結果に基づいて設定した。しかしながら、ルワンダにおいて始めて掘削された Karisimbi 地点の調査井は貯留層温度が低く、またその他の地域では坑井が掘削されていないため、資源評価対象地域の地下の温度構造を推定することは困難であった。したがって、今回の資源量評価に用いた地熱貯留層温度は、深部に 200°C 前後の地熱流体が賦存しているとの仮定を基に設定した。

今後は、調査井の掘削により地熱構造（地質構造や温度構造）に関するより詳細な情報を得て、今回の設定パラメータを検証するとともに、ポテンシャル評価精度の向上を図る必要がある。

4) 地熱井の生産能力の検討

Kinigi 地域と Bugarama 地域での生産井からの噴出量を予測するため、九州大学と西日本技術開発(株)で開発した坑井シミュレータ「WELLFLOW」を用いて坑井の噴出量予測シミュレーションを実施した。シミュレーションにおける主要な入力データはフィードポイントの深度、貯留層温度、貯留層圧力及び地層の透水性（「kh」と呼ばれる指数）である。

坑井のフィードポイント深度は地熱概念モデルに基づいて Kinigi 地域で 3,000m、Bugarama 地域で 2,000m と想定した。貯留層温度については、資源量評価の際に想定した貯留層温度のうち、Kinigi 地域では 220°C と 230°C、Bugarama 地域で 210°C と 220°C を適用した。貯留層圧力は、Kinigi 地域については Karisimbi 地点の掘削結果を基に水位として約 600m を想定した。一方、Bugarama 地域については参考となるデータが皆無であることから、水位として約 600m と 300m の 2 種類を想定した。kh 値については、5 darcy-m、10.0 darcy-m とした。これらの条件を用いて、両地域の生産井からの噴出量を予測した。

なお、各地域の生産井 1 本あたりの出力を検討するにあたり、富士電機の 2,000kW バイナリー設備のデータ（坑口圧力 3bar、蒸気量 21.6 t/h、熱水量 147.6 t/h）を参考として用いた。坑口圧力 3bar での両地域の生産井からの予測噴出量を表 3-2.25 に示す。Bugarama 地域の水位 300m 程度の場合と Kinigi 地域の蒸気量は似通った値となり、また両地域の平均蒸気噴出量が 2,000kW に必要な蒸気量の約 2 倍であることから、両地域の生産井は 4,000kW 程度であると予想された。

表 3-2.25 Kinigi 及び Bugarama 地域の生産井からの噴出量予測結果

地域名	水位 (m)	蒸気量 (t/h)	熱水量 (t/h)
Kinigi	約 600	34.0～56.5	152.1～219.1
Bugarama	約 300	37.4～63.7	194.7～287.3
	約 600	20.9～40.8	109.2～184.0

[出所] JICA 調査団で作成 (2015 年 3 月作成)

3-3 地熱開発計画の策定

3-3-1 地熱開発優先順位付け

各地域の温泉水の化学組成から期待される温度、地質調査・物理探査結果に示される地熱資源の有望性及び現在の調査段階を考慮して、ルワンダにおいて地熱調査を進める優先順位を検討した。検討に際しては地形状況などの自然環境なども考慮した。これらは地熱開発においては期待される地熱資源ポテンシャルとともに、地熱発電開発検討の重要な要因となる。

ルワンダにおいては地熱発電に適した地熱貯留層の存在は確認されておらず、地熱開発を進める上では、地熱資源存在有無のリスクが依然として高い。本調査による地熱資源評価によって、ルワンダの地熱地域において地熱資源量が相対的に高いとされた Kinigi 及び Bugarama 両地域においても、地熱発電開発の実施可能性を判断するためのデータは十分ではない。このため、本調査で行う地熱開発優先付けは、地熱発電開発の実施可能性を判断するためのデータ取得を目的とする地熱調査の実施優先順位付けとしての優先順位付けを行った。

優先順位付けにおいては、将来の地熱発電開発に重要な要素をその判断材料にするとともに、地熱発電開発の実施可能性を判断するための資源調査を実施する観点から重要と判断される要素も考慮した (表 3-3.1)。具体的には、地熱ポテンシャル、地形状況、アクセス、国立公園・保護林などである。

表 3-3.1 主要地熱地域の地熱資源、社会環境及びインフラの状況

Field Name	Altitude (m. a.s.l.)	Base camp (hours to the site)	Site Condition	Topography	Natural/Social and Environmental Constraints	Hot Spring		Geological structures controlling geothermal activity	Heat source of geothermal system	Host rock of reservoir	Possibility of existence of geothermal reservoir	Estimated reservoir temperature	Resource Potential	
						Tmax	Clmax						at 80% Confidence Level (MWe)	at 50% Confidence Level (MWe)
Kinigi	2,576 m (at the proposed drilling site No. 1)	30 minutes from Ruhengeri city by car (20 km), 5 km to the site, unpaved road	Few residents	Flat location and gentle slope	Close to the Volcanoes National Park. Following constraints are listed: 1) resettlement of residents 2) compensation of cultivated area	N/A	N/A	NNW-SSE trending faults inferred from 3D MT inversion analysis	Related with Quaternary volcanic activity	Proterozoic basement	Although uncertainty of presence geothermal reservoir remains, there is a possibility of that geothermal reservoir extent in and around low resistivity zone detected at a depth of 2,000 m and deeper and along resistivity discontinuity R2 and R3.	Assumed to be around 200 oC	32.6	58.6
Bugarama	1,180 m (at hot spring site)	50 minutes from Cyangugu city by car (15 km). From Kibangiro town to the site, unpaved road	No resident. Hot spring is located close to cement factory. Bath use of the hot spring	Flat location. Hot spring is located at topographic boundary of graben (fill) and steep slope of the mountain	-	52 oC	127 mg/L	N-S to NE-SW trending faults bounds western margin of Bugarama graben (gravity lineaments G1, G2 and G3) and NW-SE trending fault (gravity lineament G4 etc.)	Conductive heat of the magmatic materials situated at deeper part of the crust, or conductive heat of intrusion rocks.	Tertiary basaltic rocks and Proterozoic basement	There is uncertainty whether geothermal reservoir at deeper depth exist or not. Cl concentration in hot spring water suggests that a possibility of presence of parental fluid at deeper depth.	Shallow aquifer: 63 oC Parental fluid: > 63oC	6.6	15.1
Gisenyi	1,470 m (at hot spring site)	25 minutes from Gisenyi city by car (6 km).	Hot spring is close to residential area (distance: 100m) Bath use of the hot spring	High relief topography at the coast of Kivu lake	-	73 oC	230 mg/L	NW-SE trending faults inferred from topographic lineaments	Related with Quaternary volcanic activity in and around Virunga volcanic region	Proterozoic basement	There is uncertainty whether geothermal reservoir exist or not. Cl concentration suggests a possibility of presence of parental fluid at deeper depth	Shallow aquifer: 80 oC Parental fluid: > 80oC	1.9	3.7
Karago	2,278 m (at hot spring site)	1 hour from Gisenyi city by car. 30 minutes on foot to the hot spring from parking point.	Hot spring is located valley floor close to the Karago lake.	High relief topography	-	73.2 oC	79.3 mg/L	NW-SE trending faults inferred from topographic lineaments	High geothermal gradient, or conductive heat of the magmatic, or conductive heat of intrusion rocks.	Proterozoic basement (granite)	There is uncertainty whether geothermal reservoir exist or not. Cl concentration suggests a possibility of presence of parental fluid at deeper depth	Shallow aquifer: 81 oC Parental fluid: > 81 oC	2.5	4.9
Iriba	1,961 m (at spring site)	30 minutes from Gisenyi city by car. 30 minutes on foot to the spring from parking point.	Spring is located valley floor	Moderate or relatively high relief topography	-	22.0 oC	320 mg/L	NNW-SSE trending faults inferred from topographic lineaments	Related with Quaternary volcanic activity, such as Gikombe crater	Proterozoic basement	There is uncertainty whether geothermal reservoir exist or not. Cl concentration suggests a possibility of presence of parental fluid at deeper depth	Shallow aquifer: 79 oC Parental fluid: > 79oC	3.7	7.2

[出所] JICA 調査団で作成

ルワンダの地熱開発計画を策定するにあたり、まず、地熱地域の調査及び開発優先順位を評価する基準について検討した。基準に関しては、地熱資源の有望性を最も重要視し、次いで、地熱調査の進捗状況を重視した。更に、地熱地域の自然環境、特に地形状況もあわせて重視した。評価基準とランク分類の関係及び各地域の評価結果を表 3-3.2 に示す。その結果、地熱資源評価が実施された 5 地域のうち、今後の地熱調査を進める最も優先度が高い地域として Kinigi 及び Bugarama の 2 地域が選定された。

表 3-3.2 評価基準とランク分類の関係及び各地域の評価結果

Evaluation Item	Rank	Criteria	Kinigi	Bugarama	Gisenyi	Karago	Iriba	
Geothermal resource	Estimated Resource Potential	A	at 80% Confidence Level : > 10 MWe		A	B	C	C
		B	at 80% Confidence Level : > 5 MWe					
		C	at 80% Confidence Level : < 5 MWe					
	Hot spring	A	Temp.: > 50 oC and Cl max: > 100 mg/l		C	A	A	B
		B	Temp.: > 50 oC or Cl max: > 100 mg/l					
		C	Temp.: < 50 oC and/or Cl max: < 100 mg/l					
	Heat source	A	Presence of Quaternary volcanoes in and around the field		A	C	A	C
		B	-					
		C	Absence of Quaternary volcanoes in and around the field					
	Geological structures controlling geothermal activity	A	Detected by geological and geophysical study		B	A	B	B
		B	Detected by geological study or geophysical study					
		C	unknown					
Topography	A	Flat or small valley with calm slope		A	B	C	C	
	B	Partially steep slope						
	C	Deep valley with steep slope						
Protected area etc.	A	None		B	A	A	A	
	B	Within the non-strictly protected area / near the strictly protected area						
	C	Very Close to the strictly protected area						
Exploration Stage	A	Stage Phase 2: MT survey done		A	B	C	C	
	B	Stage Phase 2: Gravity or MT survey done						
	C	No gravity and MT survey done or partly covered						

[出所] JICA 調査団で作成 (2015 年 3 月作成)

3-3-2 地熱開発計画

(1) 発電開発計画の検討

ルワンダの地熱地域において地熱資源量が相対的に高いとされた Kinigi 及び Bugarama 両地域においても発電に適した地熱貯留層の存在は確認されておらず、両地域の地熱開発上の資源リスクは高い。そのため、現段階において詳細な地熱発電開発計画を策定することは困難であるが、本調査によって得られた地熱ポテンシャル評価結果に基づき、両地域の地熱発電開発計画を今後の開発調査実施の参考として検討した。地熱発電開発計画の詳細は、地熱調査井掘削を含む地熱資源フィジビリティ調査によって検討されるものである。

両地域での開発規模、すなわち地熱発電所の設備容量は、推定された資源量に基づき想定した。本検討では、発電プラントのタイプは地熱資源量及び資源の特徴からバイナリー発電プラントを想定した。開発規模に応じて必要な地熱井の数は、坑井の生産能力（及び還元能力）の推定結果に基づき算出した。両地域において想定される発電開発の規模及び主要設備を表 3-3.3 に示す。

表 3-3.3 Kinigi 及び Bugarama 地域において想定される発電開発の規模及び主要設備

Field Name	Resource Potential P80 (MWe)	Plant Capacity (MWe)	Power Unit	Number of Production Wells	Number of ReInjection Wells
Kinigi	32.6	20	5MW x 4	5	3
Bugarama	6.6	5	5MW x 1	2	1
Total	39.2	25	-	-	-

[出所] JICA 調査団で作成 (2015 年 3 月作成)

発電所の設備容量は、確度 80% の推定資源量に基づき少し余裕をみて設定した。各発電事業計画において必要とされる生産井の掘削本数（発電プラント運転開始後の補充井掘削を除く）は、各地域での坑井 1 本当当たりの噴出量 4,000kW 相当として算出した。必要とされる還元井の掘削本数については、発電に必要とされる生産井の本数と生産井 1 本当当たりから生産される熱水量、更に推定された還元井 1 本当当たりの還元容量（300t/h）に基づき算出した。坑井の掘削深度に関しては、各地域の地熱系概念モデルに基づき、Kinigi 地域では生産井は 3,000 m、還元井は 1,500m、Bugarama 地域では生産井及び還元井とも 2,000～2,500 m が必要と想定される。

(2) 開発手順・スケジュール

1) 地熱資源開発の一般的な流れ

地熱資源の開発には開発リスクが伴う。すなわち、資源の賦存状況（分布範囲や品質など）を目で直接確認することができないため、開発失敗というリスクを常に伴っている。費用対効果も考慮して、この開発リスクを軽減するため、段階的地熱資源開発が通常進められ、各段階では、次の段階へ進めることの是非が検討・判断される。第 1 段階は探査段階であり、フィジビリティスタディ段階、建設段階を経て運転・保守段階と進む。第 1 段階の最終目標は、地熱

資源存在の可能性、地熱資源の化学的・物理的性状及び地熱資源量（継続可能な最適発電規模）を把握することにある。第1段階の探査段階は、更に以下の3段階に細分することができる。

- フェーズ1 有望範囲を抽出するための広域調査段階
- フェーズ2 地熱資源の広がり及び地熱構造を把握するとともに調査井掘削ターゲットを選定するための精査段階
- フェーズ3 開発対象とする地熱貯留層の化学的・物理的特性を坑井掘削により明らかにするとともに地熱資源量を評価する資源量評価段階

広域調査段階では、有望範囲（最重点調査域）を抽出するため、対象地域全域での調査が行われる。精査段階では、広域調査で絞り込まれた有望範囲内で、地熱資源確認のための調査井掘削地点を選定することが可能な精度での精密調査が行われる。資源量評価段階では、地熱資源確認のための調査井が掘削され、噴出試験が行われる。噴出試験結果とこれまでの探査結果に基づいて、3次元貯留層シミュレーションによる資源量評価が行われるが、その精度を向上させるためには、3本以上の調査井を掘削することが望まれる。

広域調査段階、精査段階及び資源量評価段階の各段階で、その段階で得られた情報を基に地熱概念モデルが作成される。このモデルには、地熱活動を規制している地質要素、高温異常域の広がり、流体の流動パターンが理解しやすい形で記載される必要がある。多くの地熱探査手法が存在するが、1つの手法のみではこれらの要素を全て把握することができない。このため、いくつかの探査手法を組み合わせる必要がある。ただし、その組み合わせは対象とする地熱地域によって異なる。地質調査、地化学調査及びMT調査は世界的に見ても比較的汎用性の高い探査手法であるが、最適な探査手法の組み合わせは、対象とする地熱地域の特性を考慮した上で個別に検討しなければならない。なお、複数の探査手法が適用されることから、それらの結果を総合的に解釈した上で概念モデルを作成することが必要となる。

フィジビリティースタディ段階では、探査段階で評価された最適開発規模及び噴出試験により確認された蒸気・熱水品質を基に、地熱発電所の概念設計が行われる。更に、この概念設計に基づいて、プロジェクトの経済・財務評価が行われる。この段階までに、発電所並びに送電設備を含めた開発に関わる全ての環境影響評価を終了しておくことが望まれる。

建設段階では、発電プラント及びFCRS（蒸気・熱水輸送及び還元システム）の詳細設計を経て、建設工事施工業者が競争入札により決定され、落札業者によりプラント建設が行われる。このプラント建設期間内に、予定している出力での発電に不足している生産井及び還元井が掘削され、その長期噴出試験が実施される。

運転・保守段階においても、蒸気生産・熱水還元実績、補充井掘削結果等の蓄積されたデータに基づく概念モデルの精緻化・貯留層シミュレーションが安定した蒸気生産を継続させる（貯留層管理）ためにも必要である。

これら地熱資源開発の一般的な流れに基づき、Kinigi 地域及び Bugarama 地域の地熱資源開発計画及びスケジュールを検討した。

2) Kinigi 地域及び Bugarama 地域の地熱開発手順及びスケジュール

Kinigi 地域及び Bugarama 地域ともに地熱発電に適した地熱貯留層の存在は確認されておらず、地熱開発における資源リスクは依然として高い。また、地熱開発の規模などの開発計画の

詳細を検討するための情報、すなわち、地熱貯留層の規模や特徴に関する情報も不足している。したがって、今後、両地域で地熱開発を進めるうえでは、地熱貯留層の存在有無の確認、地熱貯留層の規模や特徴を把握するための資源調査を実施する必要がある。今後、必要と考えられる調査の内容は、補足地表調査（フェーズ2）及び地熱井掘削を含む地熱資源調査（フェーズ3）であり、フェーズ2実施後において、フェーズ3実施可否の判断を行う必要がある。

フェーズ2：地表調査

- 補足地質・地化学調査
- 物理探査
- 地熱資源評価/調査・開発計画策定

フェーズ3：地熱調査掘削及び資源評価（地熱資源フィジビリティ調査）

- 敷地造成、アクセス道路建設
- 地熱調査井掘削・坑井試験
- 噴出試験
- 地熱資源評価/開発計画策定/概念設計等

地熱資源フィジビリティ調査の主な目的は次のとおりである。

- 地熱資源リスクの低減
- 地熱貯留層の存在確認
- 地熱ポテンシャル及び地熱貯留層の特性把握

フィジビリティ調査

地熱資源量評価に基づく最適開発規模検討結果を踏まえ、地熱発電所の概念設計を行う。一般にこの段階において経済・財務評価を行い、経済的観点からのプロジェクト実行可能性が検討される。フィジビリティ調査の後、建設段階に移行される。

プロジェクト着手に先立ち、まず発電所建設に必要な許認可の取得が行われ、コンサルタントが選定される。次いでプロジェクトの調達が開始され、コントラクターが決定される。各コントラクターとの契約発効後、直ちに設計・製作、輸送、建設工事、試運転が実行され、プロジェクトが完成、営業運転が開始される。プロジェクトの内容及び工程については、Kinigi 地域及び Bugarama 地域ともに地熱資源調査及びフィジビリティ調査により更新・見直す必要がある。建設段階における実施内容は以下のとおりである。

建設段階

- コンサルタントサービス
- 坑井掘削・試験
- 地熱流体輸送設備の建設
- 地熱発電所の建設
- 送変電設備の建設

想定される Kinigi 地域及び Bugarama 地域における事前調査着手（地熱資源評価）からプロジェクト完了までの実施スケジュールを表 3-3.4 から表 3-3.7 に示す。スケジュールについては、政府開発援助（ODA）を利用した場合及びその他資金を利用した場合のふたつのケースを想定

した。

表 3-3.4 Kinigi 地域プロジェクト実施スケジュール (5MW x 4) (円借款ケース)

Activity	Duration (month)	Year																																																	
		1				2				3				4				5				6				7				8				9				10				11				12				13	
Exploration Stage																																																			
<i>Phase 2</i>																																																			
Engineering Services by Consultant	12	[Gantt bar: Months 1-12]																																																	
Surface Study	11	[Hatched bar: Months 1-11]																																																	
Judgement to Progress Next Stage (Phase 3)																																																			
<i>Environmental Study, Acquisition of Permission etc.</i>																																																			
	2	[Gantt bar: Months 1-2]																																																	
<i>Finance Procurement of Phase 3</i>																																																			
<i>Phase 3</i>																																																			
Engineering Services by Consultant	33	[Gantt bar: Months 1-33]																																																	
Resource FS in Kinigi	32	[Hatched bar: Months 1-32]																																																	
Exploratory Well Test Study/Evaluation	32	[Hatched bar: Months 1-32]																																																	
Judgement to Progress Next Stage (Exploitation)																																																			
<i>Environmental Impact Assessment, Feasibility Study</i>																																																			
	12	[Hatched bar: Months 1-12]																																																	
<i>Appraisal Mission, E/N, L/A</i>																																																			
	12	[Hatched bar: Months 1-12]																																																	
Construction Stage																																																			
<i>Procurement Engineering Consultant</i>																																																			
	9	[Gantt bar: Months 1-9]																																																	
<i>Engineering Services by Consultant</i>																																																			
	55	[Gantt bar: Months 1-55]																																																	
<i>Procurement of Contractor</i>																																																			
	17	[Gantt bar: Months 1-17]																																																	
<i>Steam Field Development (for 20 MW)</i>																																																			
Survey, Design	4	[Gantt bar: Months 1-4]																																																	
Field Development, Rig Mobilization	6	[Gantt bar: Months 1-6]																																																	
Drilling & Testing (5 production wells, 3 reinjection wells)	16	[Hatched bar: Months 1-16]																																																	
<i>Fluid Collection and Reinjection System (5MW x 4)</i>																																																			
Survey, Basic design	6	[Gantt bar: Months 1-6]																																																	
Design, Fabrication & Delivery, Construction/Installation	20	[Hatched bar: Months 1-20]																																																	
<i>Power Plant (5MW x 4)</i>																																																			
Survey, Basic design	6	[Gantt bar: Months 1-6]																																																	
Design, Manufacturing, Delivery, Construction/Installation	20	[Hatched bar: Months 1-20]																																																	
Commissioning	3	[Gantt bar: Months 1-3]																																																	
<i>Transmission Line and Switchyard</i>																																																			
Survey, Basic design	6	[Gantt bar: Months 1-6]																																																	
Design, Manufacturing, Delivery, Construction/Installation	17	[Hatched bar: Months 1-17]																																																	
Post Construction Stage																																																			
	12	[Gantt bar: Months 1-12]																																																	
<i>Warranty Period (inc. Operation and Training)</i>																																																			
	12	[Hatched bar: Months 1-12]																																																	

[出所] JICA 調査団で作成 (2015年3月作成)

表 3-3.5 Kinigi 地域プロジェクト実施スケジュール (5MW x 4) (他資金のケース)

Activity	Duration (month)	Year																																																			
		1				2				3				4				5				6				7				8				9				10				11				12				13			
Exploration Stage																																																					
Phase 2																																																					
Engineering Services by Consultant	12	[Hatched]																																																			
Surface Study	11	[Hatched]																																																			
Judgement to Progress Next Stage (Phase 3)																																																					
Environmental Study, Acquisition of Permission etc.	2	[Hatched]																																																			
Finance Procurement of Phase 3																																																					
Phase 3																																																					
Engineering Services by Consultant	33	[Hatched]																																																			
Resource FS in Kinigi	32	[Hatched]																																																			
Exploratory Well Test Study/Evaluation	32	[Hatched]																																																			
Judgement to Progress Next Stage (Project FS)																																																					
Environmental Impact Assessment, Feasibility Study	12	[Hatched]																																																			
Judgement to Progress Next Stage (Exploitation)																																																					
Finance Procurement of Exploitation																																																					
Construction Stage																																																					
Procurement Engineering Consultant																																																					
Procurement Engineering Consultant	6	[Hatched]																																																			
Engineering Services by Consultant																																																					
Engineering Services by Consultant	53	[Hatched]																																																			
Procurement of Contractor																																																					
Procurement of Contractor	15	[Hatched]																																																			
Steam Field Development (for 20 MW)																																																					
Survey, Design	4	[Hatched]																																																			
Field Development, Rig Mobilization	6	[Hatched]																																																			
Drilling & Testing (5 production wells, 3 reinjection wells)	16	[Hatched]																																																			
Fluid Collection and ReInjection System (5MW x 4)																																																					
Survey, Basic design	6	[Hatched]																																																			
Design, Fabrication & Delivery, Construction/Installation	20	[Hatched]																																																			
Power Plant (5MW x 4)																																																					
Survey, Basic design	6	[Hatched]																																																			
Design, Manufacturing, Delivery, Construction/Installation	20	[Hatched]																																																			
Commissioning	3	[Hatched]																																																			
Transmission Line and Switchyard																																																					
Survey, Basic design	6	[Hatched]																																																			
Design, Manufacturing, Delivery, Construction/Installation	17	[Hatched]																																																			
Post Construction Stage																																																					
Warranty Period (inc. Operation and Training)	12	[Hatched]																																																			

[出所] JICA 調査団で作成 (2015年3月作成)

表 3-3.6 Bugarama 地域プロジェクト実施スケジュール (5MW x 1) (円借款ケース)

Activity	Duration (month)	Year																																																			
		1				2				3				4				5				6				7				8				9				10				11				12				13			
Exploration Stage																																																					
Phase 2																																																					
Engineering Services by Consultant	12	[Hatched]																																																			
Surface Study	11	[Hatched]																																																			
Judgement to Progress Next Stage (Phase 3)																																																					
Environmental Study, Acquisition of Permission etc.	2	[Hatched]																																																			
Finance Procurement of Phase 3																																																					
Phase 3																																																					
Engineering Services by Consultant	30	[Hatched]																																																			
Resource FS in Bugarama	29	[Hatched]																																																			
Exploratory Well Test Study/Evaluation	29	[Hatched]																																																			
Judgement to Progress Next Stage (Project FS)																																																					
Environmental Impact Assessment, Feasibility Study	12	[Hatched]																																																			
Appraisal Mission, E/N, L/A																																																					
Appraisal Mission, E/N, L/A	12	[Hatched]																																																			
Construction Stage																																																					
Procurement Engineering Consultant																																																					
Procurement Engineering Consultant	9	[Hatched]																																																			
Engineering Services by Consultant																																																					
Engineering Services by Consultant	45	[Hatched]																																																			
Procurement of Contractor																																																					
Procurement of Contractor	17	[Hatched]																																																			
Steam Field Development (for 5 MW)																																																					
Survey, Design	3	[Hatched]																																																			
Field Development, Rig Mobilization	6	[Hatched]																																																			
Drilling & Testing (1 production well, 1 reinjection well)	4	[Hatched]																																																			
Fluid Collection and ReInjection System (5MW x 1)																																																					
Survey, Basic design	9	[Hatched]																																																			
Design, Fabrication & Delivery, Construction/Installation	8	[Hatched]																																																			
Power Plant (5MW x 1)																																																					
Survey, Basic design	3	[Hatched]																																																			
Design, Manufacturing, Delivery, Construction/Installation	12	[Hatched]																																																			
Commissioning	3	[Hatched]																																																			
Transmission Line and Switchyard																																																					
Survey, Basic design	9	[Hatched]																																																			
Design, Manufacturing, Delivery, Construction/Installation	8	[Hatched]																																																			
Post Construction Stage																																																					
Warranty Period (inc. Operation and Training)	12	[Hatched]																																																			

[出所] JICA 調査団で作成

表 3-3.7 Bugarama 地域プロジェクト実施スケジュール (5MW x 1) (他資金のケース)

Activity	Duration (month)	Year 1				2				3				4				5				6				7				8				9				10				11				12				13			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4								
Exploration Stage																																																					
<i>Phase 2</i>																																																					
Engineering Services by Consultant	12	[Hatched]																																																			
Surface Study	11	[Hatched]																																																			
Judgement to Progress Next Stage (Phase 3)																																																					
<i>Environmental Study, Acquisition of Permission etc.</i>																																																					
Environmental Study, Acquisition of Permission etc.	2	[Hatched]																																																			
Finance Procurement of Phase 3																																																					
<i>Phase 3</i>																																																					
Engineering Services by Consultant	30	[Hatched]																																																			
Resource FS in Bugarama	29	[Hatched]																																																			
Exploratory Well Test Study/Evaluation	29	[Hatched]																																																			
Judgement to Progress Next Stage (Project FS)																																																					
<i>Environmental Impact Assessment, Feasibility Study</i>																																																					
Environmental Impact Assessment, Feasibility Study	12	[Hatched]																																																			
Judgement to Progress Next Stage (Exploitation)																																																					
<i>Finance Procurement of Exploitation</i>																																																					
Finance Procurement of Exploitation	12	[Hatched]																																																			
Construction Stage																																																					
<i>Procurement Engineering Consultant</i>																																																					
Procurement Engineering Consultant	6	[Hatched]																																																			
<i>Engineering Services by Consultant</i>																																																					
Engineering Services by Consultant	40	[Hatched]																																																			
<i>Procurement of Contractor</i>																																																					
Procurement of Contractor	12	[Hatched]																																																			
<i>Steam Field Development (for 5 MW)</i>																																																					
Survey, Design	3	[Hatched]																																																			
Field Development, Rig Mobilization	6	[Hatched]																																																			
Drilling & Testing (1 production well, 1 reinjection well)	4	[Hatched]																																																			
<i>Fluid Collection and ReInjection System (5MW x 1)</i>																																																					
Survey, Basic design	3	[Hatched]																																																			
Design, Fabrication & Delivery, Construction/Installation	8	[Hatched]																																																			
<i>Power Plant (5MW x 1)</i>																																																					
Survey, Basic design	3	[Hatched]																																																			
Design, Manufacturing, Delivery, Construction/Installation	12	[Hatched]																																																			
Commissioning	3	[Hatched]																																																			
<i>Transmission Line and Switchyard</i>																																																					
Survey, Basic design	3	[Hatched]																																																			
Design, Manufacturing, Delivery, Construction/Installation	8	[Hatched]																																																			
Post Construction Stage																																																					
<i>Warranty Period (inc. Operation and Training)</i>																																																					
Warranty Period (inc. Operation and Training)	12	[Hatched]																																																			

[出所] JICA 調査団で作成

3-3-3 各地域の地熱開発調査実施計画

地熱発電開発プロジェクトはハイリスク・ローリターン の典型例とされてきた。安定した発電の持続が可能な最適出力規模を知るためには、前述したような段階的調査が必要と考えられる。最初に有望範囲を把握するための広域調査（フェーズ1）が必要である。その次に、広域調査で抽出された有望範囲の精査（フェーズ2）が行われ、地熱資源の広がりや掘削ターゲットが明らかにされる。この精査結果に基づいて対象地域におけるおおよその地熱ポテンシャルが容積法（Stored heat or volumetric method）により見積もられる。この見積もられた地熱ポテンシャル概算値は当面の開発目標となる。ただし、この概算値はその地域における持続可能な最適発電規模とは必ずしも一致しない。持続可能最適発電規模を知るためには、次段階の調査井掘削と噴出試験結果に基づく地熱資源評価（フェーズ3）が必要である。

開発検討初期段階では、上述のように、期待できる発電規模が一般的には不明な状況にある。持続可能最適発電規模を知るためには3段階の調査が必要であり、この調査のための費用調達が必要となる。しかし、段階的に調査を実施したからといってプロジェクトが必ずしも順調に進展するとは限らず、プロジェクト断念というケースも起こり得る。このような開発リスクの存在が地熱発電開発への民間参入の障壁となっている。民間の参入を促進させるための優遇策を講じている国もある。我が国では、フェーズ1からフェーズ3に対応する調査が国によって行われてきた。すなわち、民間が負担すべき開発リスクを低減させることにより、民間の参入を促進させる政策がとられている。インドネシアにおいても、フェーズ1とフェーズ2に対応する調査が国によって行われており、民間が負担すべき開発リスクの低減による地熱発電開発

促進策が講じられている。

ルワンダにおいては地熱発電開発の経験がほとんど蓄積されていないことも考慮すれば、同国における地熱開発を促進するためには今後も国が先導的にフェーズ 1 とフェーズ 2 に対応する調査を実施することが望まれる。また、地熱発電開発に関するノウハウがあまり蓄積されていないことから、MININFIRA 等の政策立案者や REG などの先導調査実施者などに対する能力向上支援も重要と考えられる。

ルワンダの各地熱地域の調査の進捗状況を考慮すると、今後地熱開発を進める場合には、いずれも地域においてもフェーズ 2 の実施が必要となる。各地域において想定されるフェーズ 2 及びフェーズ 3 調査は以下のとおりである。表 3-3.8～表 3-3.10 及び図 3-3.1 に Kinigi 地域において想定される調査内容を示す。また、表 3-3.11～表 3-3.13 及び図 3-3.2 に Bugarama 地域において想定される調査内容を示す。表には調査実施にかかる費用概算を示しているが、ルワンダ側実施者の REG に係る費用は含んでいない。これら調査の費用は JICA、AfDB、UNEP、EU、Geothermal Risk Mitigation Fund などからの支援が候補として挙げられる。

表 3-3.8 Kinigi 地域で想定される地熱開発調査 (フェーズ 2)

Project Name	Resource Exploration Survey in Kinigi (Phase 2)		
Prospect	Kinigi		
Area	Kinigi		
Project Outline	To carry out supplemental surface geoscientific surveying to update the geothermal conceptual model and for select drilling targets in the Kinigi field.		
Details	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Supplemental geological and geochemical study ➤ Gravity survey (200 stations) ➤ Supplemental MT/TEM survey ➤ Resource Assessment/Planning (Integrated analysis) ➤ Study of multi-purpose utilization 		
Beneficiary	REG		
Scheme	Development Study	Category	Resource survey
Project Scale	Approx. 1 year Approx. USD 0.8 million Supplemental geological geochemical study: 0.07 million (inc. lab. analysis) Gravity survey (200 stations) : 0.35 million Supplemental MT/TEM survey: 0.35 million Resource Assessment/Planning (Integrated analysis) : 0.05 million Study of multi-purpose utilization: 0.01 million		
Remarks	Permission for works in the National Park is required. Supplemental MT/TEM survey is recommendable in case of that the survey can be done in the National Park and area in Uganda.		

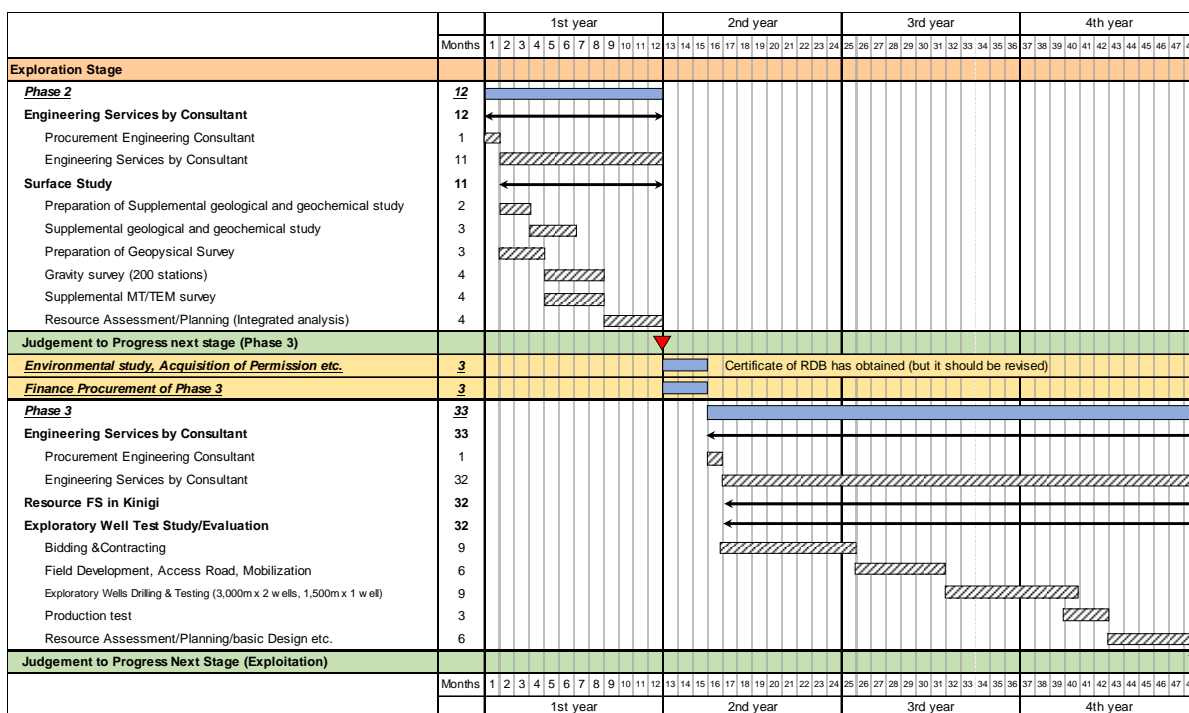
[出所] JICA 調査団で作成 (2015 年 3 月作成)

表 3-3.9 Kinigi 地域で想定される地熱開発調査 (フェーズ3)

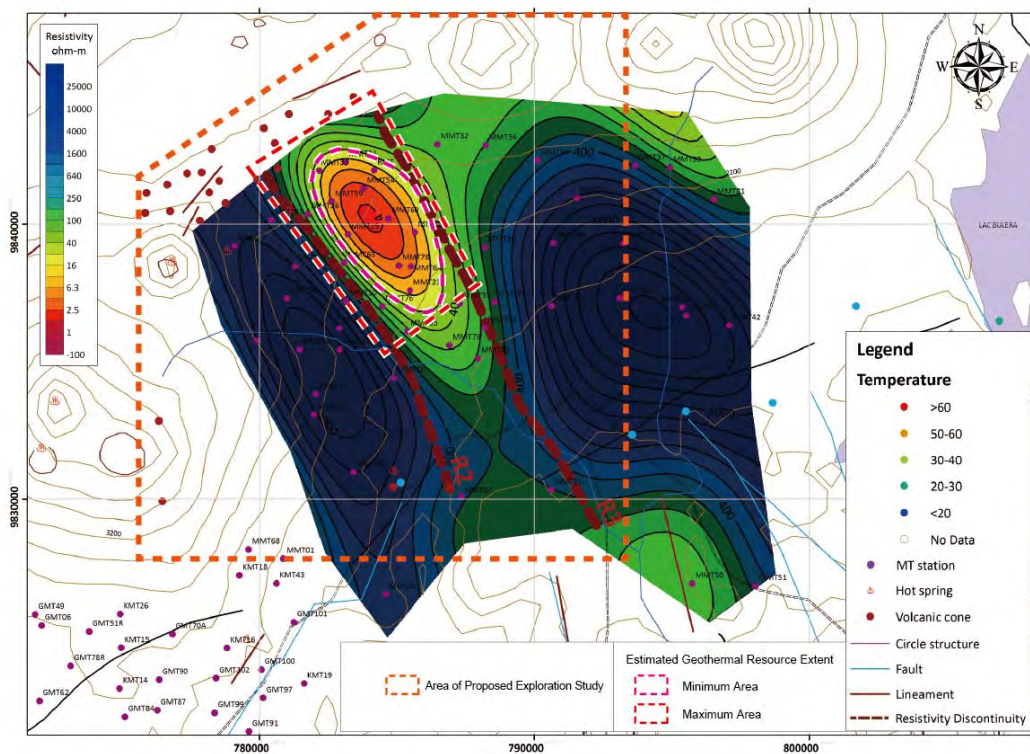
Project Name	Resource Feasibility Study in Kinigi (Phase 3)		
Prospect	Kinigi		
Area	Kinigi		
Project Outline	To carry out an exploration survey including drilling three (3) exploration wells in the Kinigi field to confirm presence of a geothermal reservoir and to evaluate the geothermal resource.		
Details	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Exploratory Well Drilling & Testing (3,000m x 2 wells, 1,500m x 1 well) ➤ Production testing ➤ Resource Assessment/Planning/basic Design etc. ➤ Study of multi-purpose utilization 		
Beneficiary	REG		
Scheme	Development Study	Category	Resource survey
Project Scale	Approx. 3 years	Approx. USD 26 million	
Remarks			

[出所] JICA 調査団で作成 (2015年3月作成)

表 3-3.10 Kinigi 地域で想定される地熱開発調査の実施スケジュール



[出所] JICA 調査団で作成 (2015年3月作成)



[出所] JICA 調査団で作成 (2015年3月作成)

図 3-3.1 Kinigi 地域の地熱開発調査対象地域

表 3-3.11 Bugarama 地域で想定される地熱開発調査 (フェーズ 2)

Project Name	Resource Exploration Survey in Bugarama (Phase 2)		
Prospect	Bugarama		
Area	Mashyuza		
Project Outline	To carry out supplemental surface geoscientific surveying to update the geothermal conceptual model, and select drilling targets in the Bugarama field.		
Details	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Supplemental geological and geochemical study ➤ Review of existing geophysical survey data (TEM, Magnetic etc.) ➤ Supplemental MT/TEM survey ➤ Resource Assessment/Planning (Integrated analysis) ➤ Study of multi-purpose utilization 		
Beneficiary	REG		
Scheme	Development Study	Category	Resource survey
Project Scale	Approx. 1 year Approx. USD 0.5 million Supplemental geological and geochemical study: 0.07 million (inc. lab. analysis) Supplemental MT/TEM survey: 0.4 million Resource Assessment/Planning (Integrated analysis): 0.05 million Study of multi-purpose utilization: 0.01 million		
Remarks			

[出所] JICA 調査団で作成

表 3-3.12 Bugarama 地域で想定される地熱開発調査 (フェーズ 3)

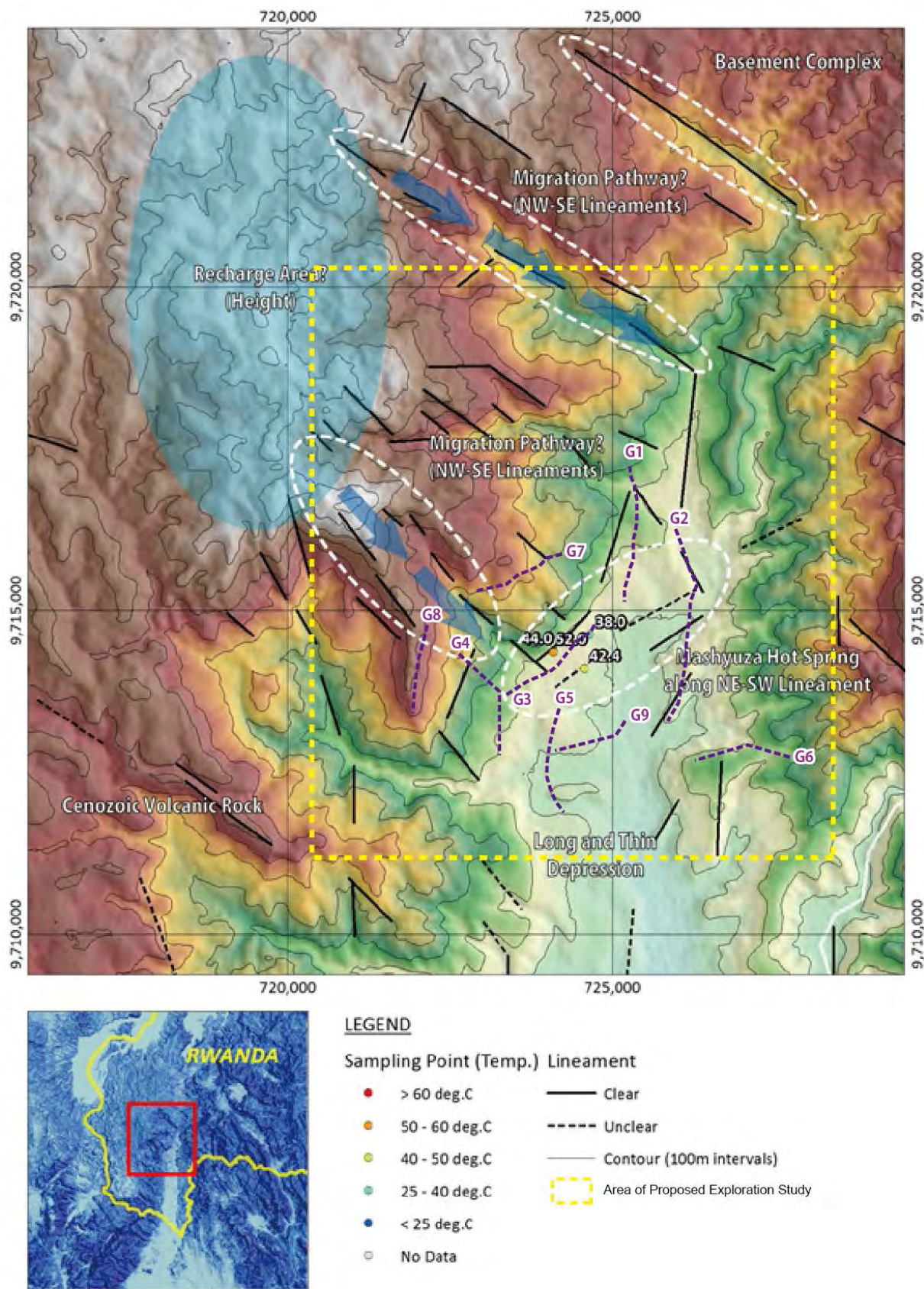
Project Name	Resource Feasibility Study in Bugarama (Phase 3)		
Prospect	Bugarama		
Area	Bugarama		
Project Outline	To carry out an exploration survey including drilling two (2) exploration wells in the Bugarama field to confirm presence of a geothermal reservoir and to evaluate the geothermal resource.		
Details	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Exploratory Well Drilling & Testing (2,000-2,500 m x 2 wells) ➤ Production testing ➤ Resource Assessment/Planning/basic Design etc. ➤ Study of multi-purpose utilization 		
Beneficiary	REG		
Scheme	Development Study	Category	Resource survey
Project Scale	Approx. 2.5 years	Approx. USD 18 million	
Remarks			

[出所] JICA 調査団で作成

表 3-3.13 Bugarama 地域で想定される地熱開発調査の実施スケジュール

	Months	1st year												2nd year												3rd year												4th year											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
Exploration Stage																																																	
<i>Phase 2</i>																																																	
Engineering Services by Consultant	12	←-----→																																															
Procurement Engineering Consultant	1	▨																																															
Engineering Services by Consultant	11	▨																																															
Surface Study																																																	
Preparation of Supplemental geological and geochemical study	2	▨																																															
Supplemental geological and geochemical study	3	▨																																															
Preparation of Geophysical Survey	3	▨																																															
MT/TEM survey (50-70 stations)	4	▨																																															
Resource Assessment/Planning (Integrated analysis)	4	▨																																															
Judgement to Progress next stage (Phase 3)																																																	
↓																																																	
<i>Environmental study, Acquisition of Permission etc.</i>																																																	
Finance Procurement of Phase 3	3	←-----→																																															
Certificate from RDB																																																	
<i>Phase 3</i>																																																	
Engineering Services by Consultant	30	←-----→																																															
Procurement Engineering Consultant	1	▨																																															
Engineering Services by Consultant	29	▨																																															
Resource FS in Bugarama																																																	
Exploratory Well Test Study/Evaluation	29	←-----→																																															
Bidding & Contracting	9	▨																																															
Field Development, Access Road, Mobilization	6	▨																																															
Exploratory Wells Drilling & Testing (2,000-2,500m x 2 wells)	6	▨																																															
Production test	3	▨																																															
Resource Assessment/Planning/basic Design etc.	6	▨																																															
Judgement to Progress Next Stage (Exploitation)																																																	
↓																																																	
Months																																																	
1st year												2nd year												3rd year												4th year													

[出所] JICA 調査団で作成



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-3.2 Bugarama 地域の地熱開発調査対象地域

地熱調査実施の優先度が最も高いとされた Gisenyi 地域及び Bugarama 地域以外の主要な地熱地域である Gisenyi、Karago 及び Iriba の各地域で地熱調査の進捗状況はフェーズ 2 の段階にある。これら 3 地域に関しては、Gisenyi 地域及び Bugarama 地域と同様に、地熱発電に適した地熱貯留層の存在の有無を判断できるデータが不足している。また、これら 3 地域の推定地熱資源量は確度 80% で 5MWe 以下と小さな値を示し、現段階において地熱発電プロジェクトを検討できる段階にはない。したがって、本調査では、今後、これらの地域で地熱開発調査を進める場合に必要と考えられる地熱調査（フェーズ 2）の内容を検討した。フェーズ 2 の調査を実施した上で、地熱資源評価を行いその結果に基づきフェーズ 3 実施の判断を行うことが望まれる。

これまでに得られた地熱資源の情報や自然・社会環境等を考慮すると次の調査が推奨される。

Karago 地点

フェーズ 3 実施可否判断のための補足地表調査（表 3-3.14）

Gisenyi 地域

Kivu 湖岸に湧出する温泉地を対象とした地熱資源多目的利用調査（表 3-3.15）。Gisenyi 温泉地周辺の地形を考慮すると地熱発電開発は困難と判断されるため、湧出する温泉等を利用した調査を実施することを提案する。

Iriba-Mufumba 火口丘地域

Mufumba 火口丘は、Gisenyi 温泉の北方に位置する火山群のひとつである（図 3-3.3 に Mufunba 火口丘の位置を示す）。この地域を対象とした広域地表調査の実施を提案する（表 3-3.16）。この調査の目的はこの地域の中で地熱資源有望地域の絞り込みを行うことである。

Bugarama 地域の Bize 温泉地点は調査の進捗初期段階のフェーズ 1 の段階である。本地点において想定されるフェーズ 1 の調査内容を表 3-3.17 に示す。Bize 温泉地点は図 3-2.10 に示すとおりである。

表 3-3.14 Karago 地点で想定される地表補足調査 (フェーズ 2)

Project Name	Resource Exploration Survey in Karago (Phase 2)		
Prospect	Karisimbi		
Area	Karago		
Project Outline	To carry out supplemental surface geoscientific surveying to update the geothermal conceptual model, for selection of drilling targets in the Karago field.		
Details	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Supplemental geological and geochemical study ➤ Supplemental MT/TEM survey (40-50 stations) ➤ Resource Assessment/Planning (Integrated analysis) 		
Beneficiary	REG		
Scheme	Development Study	Category	Resource survey
Project Scale	Approx. 1 year	Approx. USD 0.5 million	
Remarks			

[出所] JICA 調査団で作成

表 3-3.15 Gisenyi 温泉地域で想定される地熱資源多目的利用調査

Project Name	Study of Multi Purpose Utilization in Gisenyi hot spring area		
Prospect	Gisenyi		
Area	Gisenyi hot spring		
Project Outline	To carry out supplemental geological and geochemical surveying to update the geothermal conceptual model, and study of multi-purpose utilization in the Gisenyi hot spring area.		
Details	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Supplemental geological and geochemical study ➤ Resource Assessment/Planning (Integrated analysis) ➤ Study of multi-purpose utilization 		
Beneficiary	REG		
Scheme	Development Study	Category	Resource survey
Project Scale	Approx. 1 year	Approx. USD 0.3 million	
Remarks			

[出所] JICA 調査団で作成

表 3-3.16 Iriba-Mufumba 火口丘地域で想定される地表補足調査（フェーズ 2）

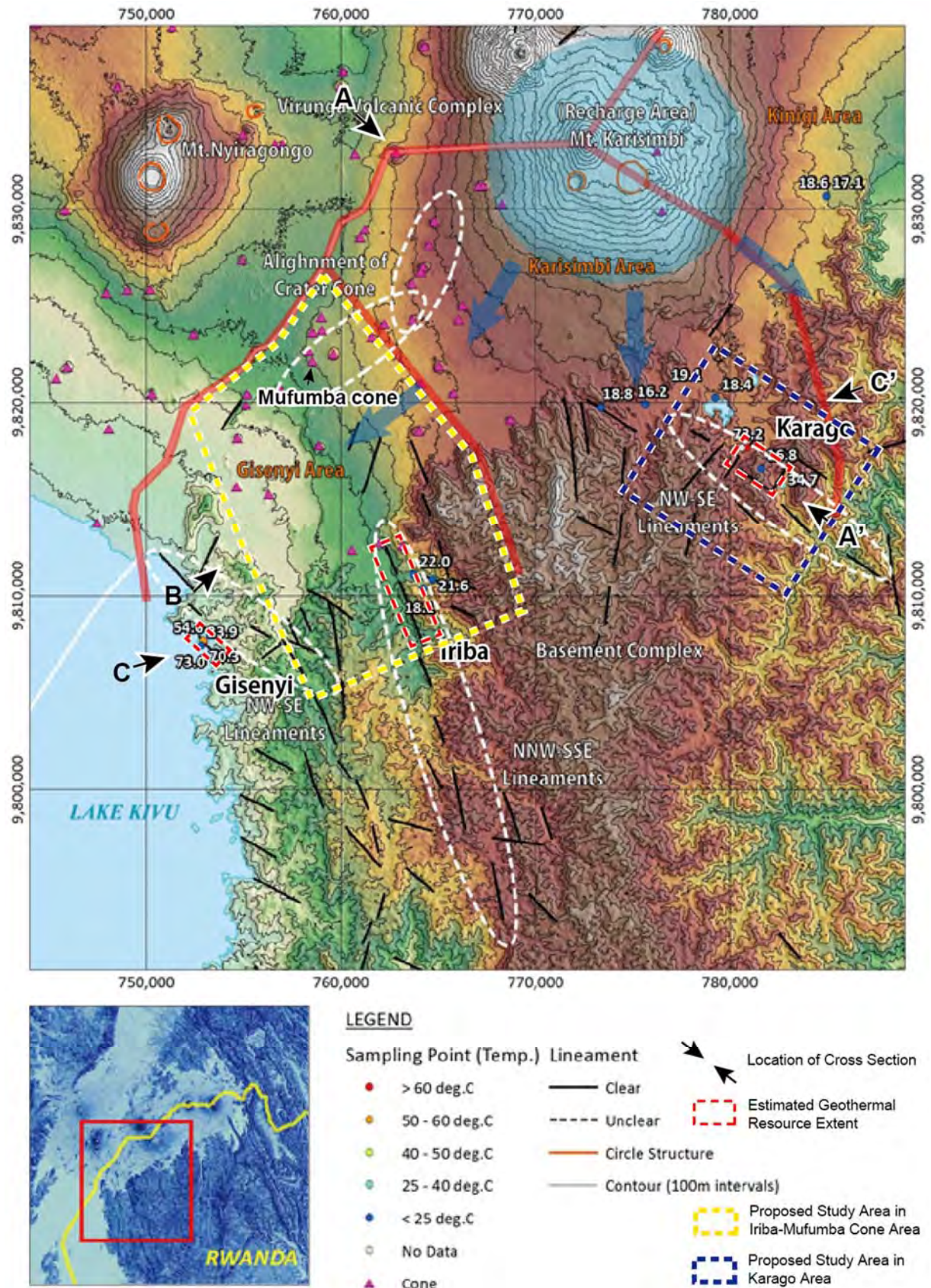
Project Name	Resource Exploration Survey in Iriba-Mufumba cone area (Phase 2)		
Prospect	Gisenyi		
Area	Iriba-Mufumba cone area		
Project Outline	To carry out supplemental surface geoscientific surveying to update the geothermal conceptual model and to detect prospective area		
Details	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Supplemental geological and geochemical study ➤ Regional gravity survey, covering Iriba and Mufumba cone area (200 stations with spatial interval of 1-2 km) ➤ Integrated analysis and selection of prospective area ➤ Formulation of detailed surface study in detected prospective area 		
Beneficiary	REG		
Scheme	Development Study	Category	Resource survey
Project Scale	Approx. 1 year Approx. USD 0.5 million		
Remarks	Surface study including TEM and Magnetic will be conducted financed by EU. Iriba is not included.		

[出所] JICA 調査団で作成

表 3-3.17 Bize 温泉地点で想定される地表補足調査（フェーズ 1）

Project Name	Resource Exploration Survey in Bize hot spring area (Phase 1)		
Prospect	Bugarama		
Area	Bize		
Project Outline	To carry out surface geoscientific survey to construct preliminary geothermal conceptual model and to detect prospective area		
Contents	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Supplemental geological and geochemical study ➤ Construction of preliminary geothermal conceptual model ➤ Planning of detailed geoscientific survey including geophysical survey 		
Beneficiary	REG		
Scheme	Development Study	Category	Resource survey
Project Scale	Approx. 1 year Approx. USD 0.5 million		
Remarks			

[出所] JICA 調査団で作成



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-3.3 Karago 地点、Gisenyi 温泉地及び Iriba-Mufumba 火口丘地点の補足調査対象地域

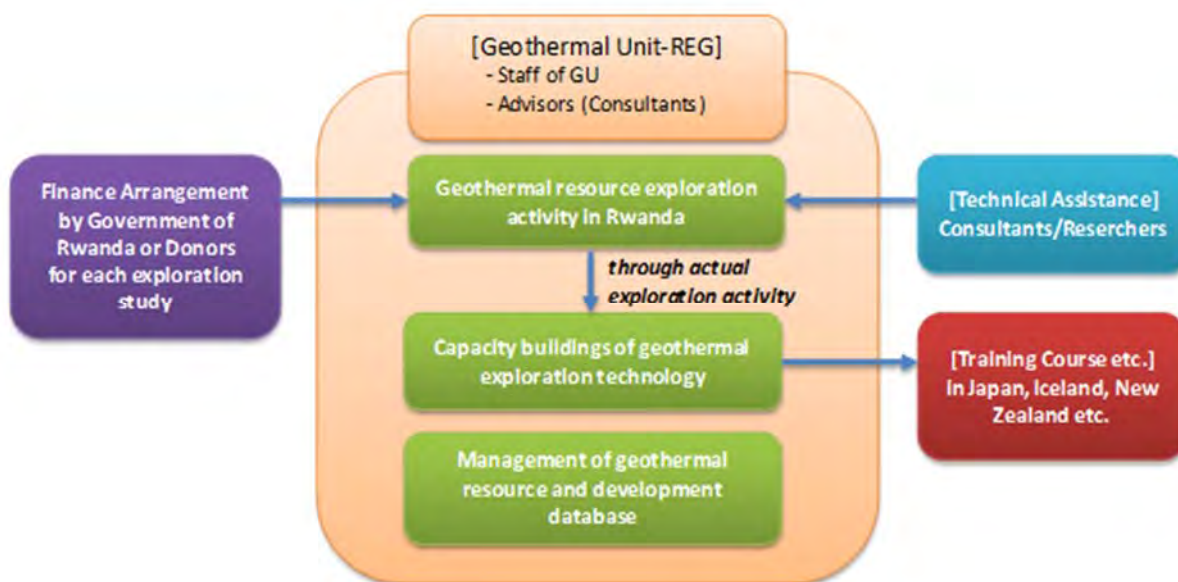
ルワンダにおける地熱開発調査の実施主体は、REG/EDCL の Geothermal Development Unit である。表 3-3.18 に Geothermal Development Unit の人員構成を示す。2016 年 2 月現在、Geothermal Development Unit には 8 名のスタッフが在籍するが、それらのほとんどは地熱開発調査の経験が乏しく、Geothermal Development Unit のスタッフのみで適切な地熱開発調査を実施することは困難と判断される。そのため、地熱開発の経験豊富な国外のコンサルタントや研究者・技術者等の協力のもと、Geothermal Development Unit のスタッフがルワンダの地熱開発調査を進めることが望ましいと考えられる。これらの調査を通じ、Geothermal Development Unit の能力向上も期待できる。図 3-3.4 に Geothermal Development Unit を中心としたルワンダにおける地熱開発の体制の一例を示す。また、ルワンダにおける地熱開発の推進と Geothermal Development Unit の能力向上の観点から考慮すべき点を以下に列記する。

- 実際の地熱開発調査実施による Geothermal Development Unit のスタッフの能力向上（地熱開発の経験豊富な国外のコンサルタントや研究者・技術者等との共同作業による）。また、国外で開設されている地熱研修コースへの参加（日本、ニュージーランド、アイスランド、ケニアなど）。
- 地熱資源及び開発データベースの運用
- 地熱開発計画及びプロジェクトマネジメント（調達や経済・財務評価）に関する能力向上及び専門家による支援
- 地熱開発調査に必要な基礎的調査用具や解析ソフトウェアの充実

表 3-3.18 Geothermal Unit の人員構成

(as of Feb 2016)	
Assignment	Number of Staff
Head	1
Geochemist	2
Geophysicist	2
Reservoir Engineer	1
Drilling Engineer	1
Multi-purpose utilization	1

[出所] JICA 調査団で作成



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-3.4 Geothermal Unit を中心としたルワンダにおける地熱開発の体制の一例

3-3-4 地熱開発データベースの構築

本調査では、ルワンダにおける地熱発電開発有望地域の地熱資源に関する情報を収集・整理するとともに各種解析を行った。これらの結果は本業務で構築した地熱開発データベースに格納される。本業務で構築したデータベースは第4次現地調査においてREGに導入される予定である。本調査では、電力開発データベース（POWER DB）が構築され、地熱開発データベースは地熱分野の情報をこの電力開発データベースに付加して構築されたデータベースである。データベースはマイクロソフト社のAccessに関連付けて構築した。本データベースでは、それぞれ異なる分類のデータや情報がそれぞれ個別の形式で格納され、それらは互いに連関を持たせて格納しているため、格納データの重複を最小限にすると同時に、必要となるデータの取り出しについても効率的かつ柔軟に対応できる形式とした。地熱開発データベースの仕様及び取り扱い方法は、電力開発データベースについて述べた第2.7節に記載されるとおりである。

このデータベースの性質は、ある特定の地熱地域に関する詳細情報を格納したものだけではなく、ルワンダ全土における共通データ及び各地熱地域に関する基本情報を格納したものである。この地熱開発データベースを利用することによって、地熱開発に関する必要なデータの閲覧・更新を容易に行うことが出来るため、今後のルワンダにおける地熱発電開発の促進に活用されるものと考えられる。

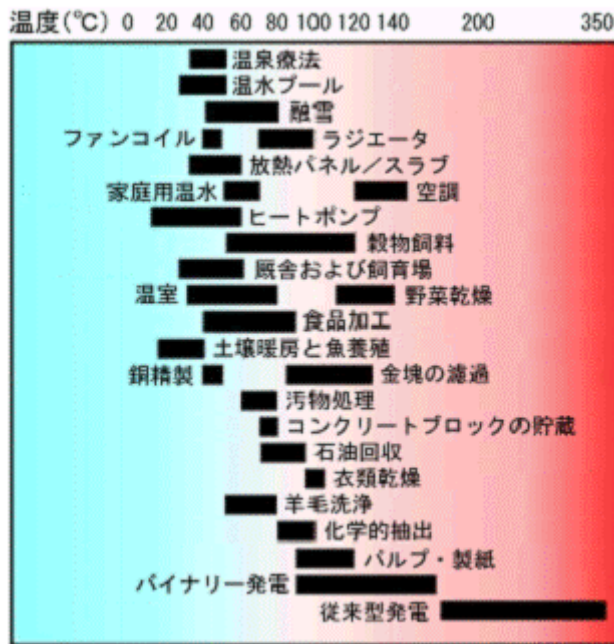
当初は社内サーバーにインストールする予定であったが、まだ準備できていなかったため、第4次現地調査において担当スタッフのコンピュータにインストールし、正常に作動することを確認したとともに、操作方法を説明した。GUは本データベースを本格的に使用する意向を示し、スタッフのPCへインストールを開始していた。データベースはGUの要望に沿ったものであるとの評価であった。

これまでは、各専門家が個々に資料や情報を持っていたために、十分な情報共有がなされていなかったが、今回のデータベース導入により、REG、特にGU内での情報共有化及びこれらの情報を基にした活発な技術協議等が期待される。

3-4 地熱多目的利用

3-4-1 地熱多目的利用の概要

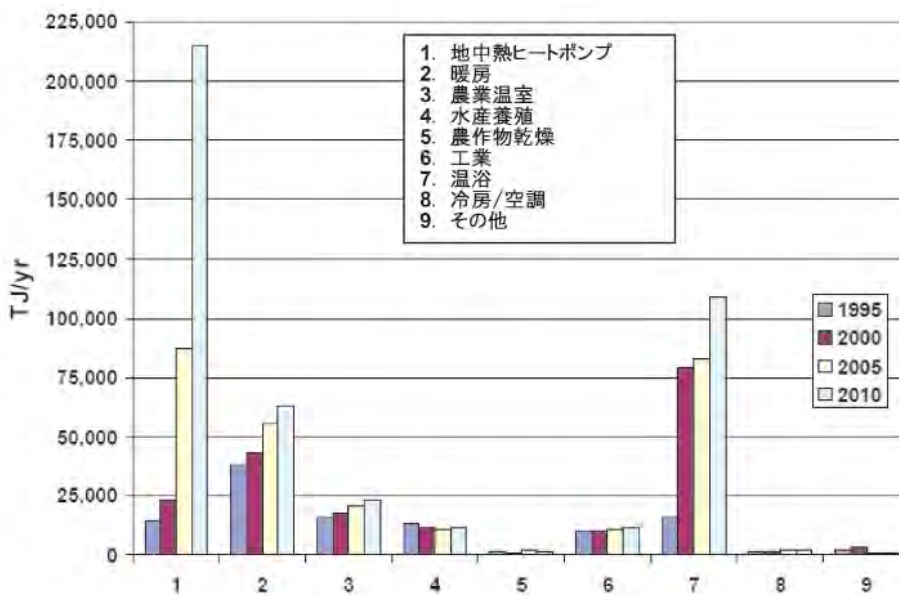
地熱資源の利用可能性を図3-4.1に示す。従来型発電、バイナリー発電に加えて、温泉療法、温水プール、融雪、農業用温室、冷暖房などがある。



[出所] <http://grsj.gr.jp/whatbook/chapter5.html>

図 3-4.1 地熱資源の利用可能性

用途別の地熱利用量の推移（1995～2010年）を図 3-4.2 に示す。地熱の直接利用として、地中熱ヒートポンプが急速に伸びている。地中熱ヒートポンプとは、年間を通じて一定である地中の温度を利用して冷房・暖房を行うシステムである。また、暖房、温浴、農業温室、水産養殖、農産物乾燥、工業、冷房/空調、融雪等に利用されている。



[出所] 日経研月報 2012.11

図 3-4.2 用途別地熱利用量の推移

地熱直接利用上位 10 カ国を表 3-4.1 に示す。地熱直接利用を行っている国は、米国、中国、スウェーデン、ノルウェー、ドイツ、日本、トルコ、アイスランド、オランダ、フランスなどである。ヒートポンプや暖房としての利用が圧倒的に多いが、日本、トルコ、中国では、温浴利用も多い。

表 3-4.1 地熱直接利用上位 10 カ国

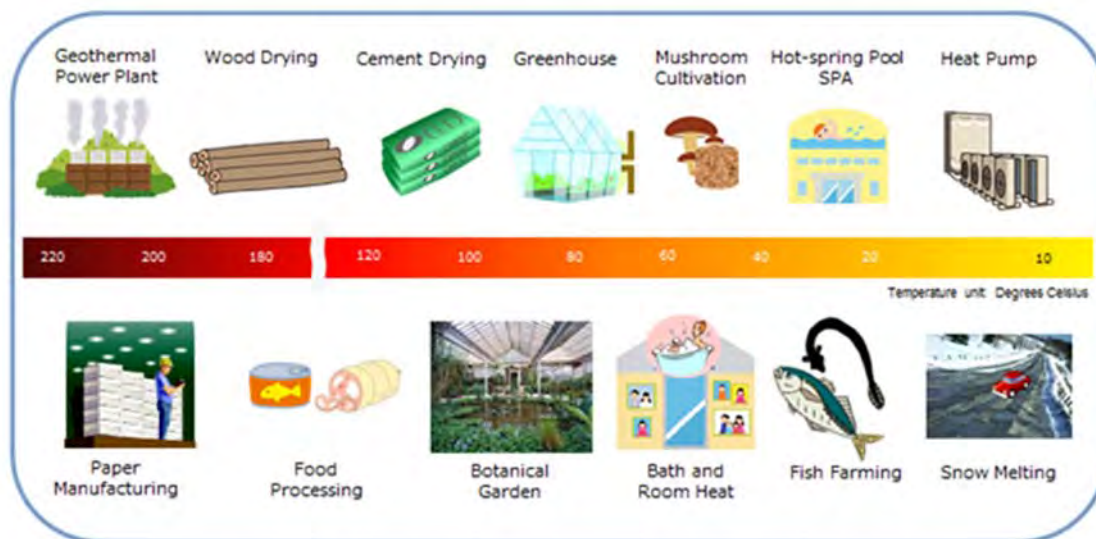
設備容量計 (MWt)		設備容量内訳			
		ヒートポンプ	暖房	温浴	その他
米国	12,612	95%	2%	1%	2% 養魚、温室
中国	8,898	59%	15%	21%	6% 農工業
スウェーデン	4,460	95%	3%	0%	2%
ノルウェー	3,300	100%	0%	0%	0%
ドイツ	2,485	90%	8%	2%	0%
日本	2,100	1%	4%	86%	9% 融雪、温室
トルコ	2,084	2%	49%	26%	23% 温室
アイスランド	1,826	0%	76%	4%	20% 融雪
オランダ	1,410	99%	0%	0%	1% 温室
フランス	1,345	74%	22%	1%	2% 養魚、温室

[出所]日経研月報 2012.11

3-4-2 ルワンダにおける地熱多目的利用の可能性

(1) 温度別の地熱多目的利用用途

温度別の地熱多目的利用用途を図 3-4.3 に示す。ルワンダの地熱資源の温度などの特性、地熱資源の周囲の自然環境・土地利用状況、各施設が必要とする利用条件などを踏まえ、ルワンダにおける地熱多目的利用の可能性について検討した結果を以下に示す。



[出所]JOGMEC

図 3-4.3 地熱多目的利用用途（温度別）

(2) 地熱多目的利用の可能性の概要

ルワンダにおける地域別の地熱多目的利用の可能性を表 3-4.2 に示す。南部地域の Mashyuza 温泉では、既に 47～53℃ の温泉が湧き出しており、SPA、温泉プールとしての利用が可能である。

北西部の Kinigi 地域では、現在は利用可能な地熱資源がないため、将来、熱水や蒸気が得られた場合は、SPA、温泉プールや花卉栽培用温室における地熱直接利用の可能性がある。

Karago 地域では、現在、73℃ の温泉が湧出しているが、地積が限定されるため、SPA、温泉プールなどの施設の建設が困難である。また、将来、190℃ 程度の蒸気が得られた場合、製茶工場の乾燥用熱源として利用可能である。

Gisenyi 地域では、70～73℃ の温泉が湧出しているものの、地積が限定されるため、施設の建設が困難であり、地熱直接利用は期待できない状況である。

Iriba 地域では、22℃ の冷泉が湧出しているが、温度が低く、利用は難しい。将来、80℃ 程度の温泉が得られれば、SPA、温泉プールとしての利用が可能である。

表 3-4.2 ルワンダにおける地域別の地熱多目的利用の可能性

地 域		特 性	利 用 用 途
南 部	Bugarama (Mashyuza)	(1) 47～53℃ の温泉	(1) SPA、温泉プール
		(2) 将来、蒸気が得られた場合	(2) 米の乾燥
北西部	Kinigi	現在、利用可能な地熱資源なし。将来、熱水や蒸気が得られた場合、右記の可能性あり	(1) SPA、温泉プール (ゴリラツアーとの連携) (2) 花卉（バラ等）の温室栽培 (3) ジャガイモの乾燥 (4) 除虫菊の乾燥
	Karago	(1) 73℃ の温泉 (2) 将来、190℃ 程度の蒸気が得られた場合	(1) 地積が限定されるため、施設の建設が困難 (2) 製茶工場の乾燥用熱源
	Gisenyi	(1) 70～73℃ の温泉 (2) 将来、蒸気が得られた場合	(1) 地積が限定されるため、施設の建設が困難 (2) ジャガイモの乾燥
	Iriba	(1) 22℃ の冷泉 (2) 将来、80℃ 程度の熱水が得られた場合	(1) 温度が低く、利用困難 (2) SPA、温泉プールの可能性あり

[出所] JICA 調査団で作成

表 3-4.3 にルワンダにおける現在と将来の地熱資源別の地熱多目的利用の可能性を示す。

表 3-4.3 ルワンダにおける地熱資源別の地熱多目的利用の可能性

Category	Resources	Utilization equipment	Purpose	Place
Current Candidates	Hot spring	SPA	Domestic	Mashyuza
		Hot spring pool		
Future Candidates	Hot spring	SPA	Export	Kinigi
		Hot spring pool		Iriba
	Hot spring or Stem	Greenhouses for Flower Cultivation	Export	Kinigi
		Tea Drying		Karago
	Steam	Potatoes Conservation	Export Finally	Kinigi, Gisenyi
		Pyrethrum drying		Kinigi
		Rice Drying		Domestic
	Fish Drying such as Sambaza	Export	Gisenyi	

[出所] JICA 調査団で作成

3-4-3 南部地域の Mashyuza 温泉における地熱多目的利用ビジネスモデル

南部地域の Mashyuza 温泉は、標高 1,200m 程度であり、利用可能な地積は 150 m × 400 m 程度である(図 3-4.4)。Mashyuza 温泉では、既に 47~53°C の温泉が湧き出しており、SPA、温泉プールとしての利用が可能である。ここはセメント会社である CIMERWA Ltd の所有地であり、この民間企業が SPA や温泉プールを建設し、従業員の福利厚生の一環として利用する、あるいは一般に開放して広く利用してもらう方法が考えられる (表 3-4.4、図 3-4.5)。

この施設の運営については、外部に委託するなど、O&M を含めたサービスレベルのマネジメントが成功の鍵となる。15 年間の IRR は約 9% である。IRR の試算結果を、別添試料 2-4 に示す。



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-4.4 Mashyuza 温泉における地熱利用可能性

表 3-4.4 Mashyuza 温泉における地熱利用ビジネスモデル

Category	Outline
Concept	SPA with Hot spring, Private room bath, Massage room, Restaurant and Market
Main targets	Women and Families
Land owner	Private, CIMERWA Ltd
Area	150m x 400m
Implementing body	Private
Approximate initial cost	1 Mil. USD
Payout time	7.4 years
IRR	9%
Conditions of success	Service level management including Operation and Maintenance

[出所] JICA 調査団で作成



Public SPA



Public SPA for Kids



Roofed hot spring pool



Private room bath

[出所] JICA 調査団で作成

図 3-4.5 Mashyuza 温泉における SPA のイメージ

Mashyuza 温泉における考え方は、北西部の Kinigi 地域における SPA、温泉プールに応用可能である。

3-4-4 北西部の Kinigi 地域における地熱多目的利用ビジネスモデル

北西部の Kinigi 地域は、標高 2,600m 程度である。この地域は農地であり、ジャガイモや除虫菊が栽培されている（図 3-4.6）。Kinigi 地域では、今後、試掘が行われる予定であり、熱水が得られれば、南部地域の Mashyuza と同様に SPA、温泉プールに利用可能である。また、蒸気や熱水が得られれば、バラなどの花卉栽培用温室に利用することが可能である（図 3-4.7）。栽培したバラなどは、Kigali 国際空港経由でオランダなどに輸出する。なお、バラ輸送中は保冷する必要がある。

Karisimbi 地域の近くの Bigogwe における最高気温、最低気温、平均気温を図 3-4.8 に示す。平均気温は 14°C、最高気温は 20~23°C、最低気温は 6~9°C である。バラ栽培の場合、昼間は 23°C 程度、夜間は 18°C 程度に気温を保つことが必要であり、地熱資源を利用して温室内の気温をコントロールする。なお、花卉栽培には淡水の確保が重要である。

Kinigi 地域におけるビジネスモデルを表 3-4.5 に示す。事業主体は、民間企業を想定している。商品の差別化や持続的な O&M が成功の鍵となる。15 年間の IRR は約 15% である。IRR の試算結果を別添資料 2-4 に示す。



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-4.6 Kinigi 地域における地熱利用可能性



Appropriate Temperature
Day : 23 degrees Celsius
Night : 18 degrees Celsius

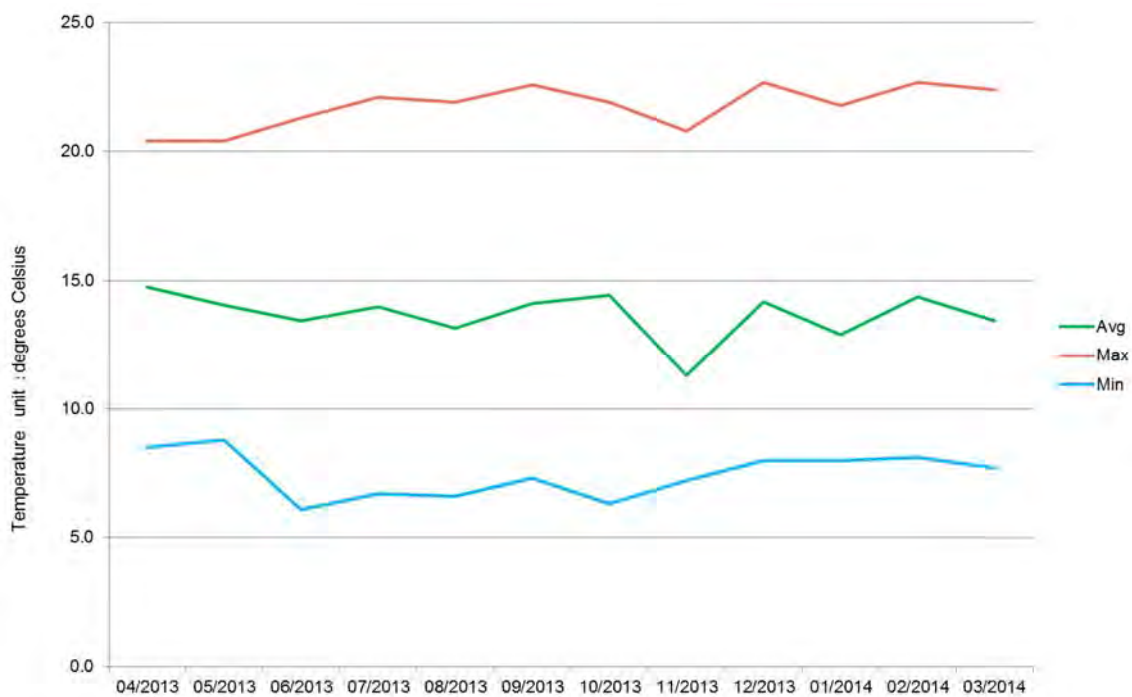
Greenhouses for Roses Cultivation



Rwandan Roses

[出所] JICA 調査団で作成

図 3-4.7 ルワンダにおけるバラの温室栽培の例



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-4.8 Bigogwe における気温

表 3-4.5 Kinigi 地域における地熱利用ビジネスモデル

Category	Outline
Concept	Greenhouses for Flower Cultivation
Main targets	Roses for export
Land owner	Private
Area	20 ha
Implementing body	Private
Approximate initial cost	8 Mil. USD
Payout time	5 years
IRR	15%
Conditions of success	Differential Marketing Operation and Maintenance

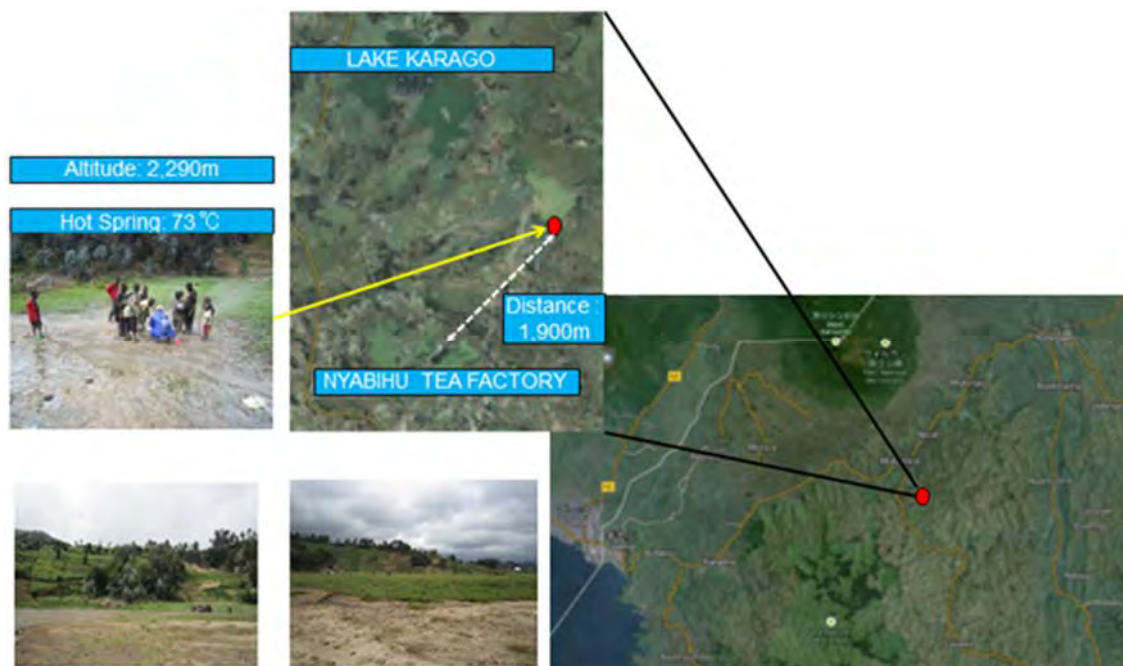
[出所] JICA 調査団で作成

3-4-5 北西部の Karago 地域における地熱多目的利用ビジネスモデル

北西部の Karago 地域は、標高 2,290m 程度であり、既に 73℃ の温泉が湧き出している(図 3-4.9)。ただし、湖水内にあるため、乾季には温泉源が地表に現れるが、雨季には温泉源が水没する。また、温泉源の周囲は小高い丘や山であり、SPA や温泉プールを建設する土地を確保するのが困難である。

将来、190℃ 程度の蒸気が得られた場合、温泉源から約 1,900m 離れたところに位置する民間の製茶工場 (NYABIHU Tea Factory : ケニア資本) の乾燥用熱源として利用できる。現在、製茶工場は、木質バイオマスを熱源としており (図 3-4.10)、このコストを下回るコストで蒸気を供給できることが条件である。

REG が温泉源から製茶工場までのパイプラインを建設し、製茶工場に蒸気を供給・販売するケースと製茶工場がパイプラインを建設するケースが考えられる。O&M を含めたパイプラインインフラのマネジメントが成功のカギとなる。製茶工場がパイプラインを建設するケースでは、15 年間の IRR は約 8% である (表 3.4-6)。IRR の試算結果を別添資料 2-4 に示す。



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-4.9 Karago 地域における地熱利用可能性



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-4.10 製茶工場における木質バイオマス利用

表 3-4.6 Karago 地域における地熱利用ビジネスモデル

Category	Outline
Concept	Tea Drying
Main targets	Private, NYABIHU Tea Factory
Current energy use	Fire woods 6.0 m3 of fire woods for 2 tons of made tea
Steam pressure and temperature	10-11 Bars, 190 degrees Celsius
Implementing body	Private
Approximate initial cost	151,300 USD
Payout time	7.8 years
IRR	7.5%
Conditions of success	Operation and Maintenance

[出所] JICA 調査団で作成

3-4-6 北西部の Gisenyi 地域における地熱多目的利用の可能性

北西部の Gisenyi 地域の標高は、1,470m 程度である。ここでは、70～73℃ の温泉が湧出しているものの、地積が限定されるため、SPA や温泉プールなどの施設の建設が困難であり、地熱直接利用は期待できない状況である(図 3-4.11)。

なお、現在、一部の地元住民は、温泉の湧出口付近にバナナや卵を入れてボイルしており、調理という観点で多少の温泉利用が行われている。



[出所] JICA 調査団で作成

図 3-4.11 Gisenyi における地熱利用可能性

3-4-7 北西部の Iriba 地域における地熱多目的利用の可能性

Iriba 地域では、22 °C の温泉が湧出しているが、温度が低く、利用は難しい。将来、80 °C 程度の温泉が得られれば、SPA、温泉プールとしての利用が可能である。