

平成 29 年度
馬曲温泉新源泉調査委託業務
報告書

平成 31 年 2 月

目 次

1. 業務概要.....	1
2. 既存資料調査結果.....	3
2.1 地形概要.....	3
2.2 地質概要.....	3
3. 温泉調査とその方法.....	9
3.1 温泉とは.....	9
3.2 調査方針.....	14
4. 調査概要.....	15
4.1 既存資料調査.....	15
4.2 地表踏査.....	15
4.3 CSMT探査.....	16
4.4 放射能探査.....	23
5. 調査結果.....	29
5.1 地表踏査結果.....	29
5.3 放射能探査結果.....	33
6. 温泉開発の検討.....	39
6.1 まとめ.....	39
6.2 温泉開発の検討.....	40

【巻末資料】

1. 探査データ
2. 既存源泉関係資料
3. 温泉審議会用申請書類（案）
4. 概算経費（案）
5. 現地作業写真
6. 打合せ記録簿他

1. 業務概要

- (1)業務件名：平成29年度 馬曲温泉新源泉調査委託業務
- (2)業務目的：本業務は、開業30年以上を経過し、年々湯量が減少している既設温泉施設の新たな源泉を求め、調査を行い、馬曲温泉の継続した湯量確保を行うことを目的として実施したものである。
- (3)業務位置：長野県下高井郡木島平村住郷 馬曲温泉 (図1.1参照)
- (4)業務期間：平成29年10月2日～平成31年2月28日
- (5)業務内容：表1.1に示す。

表1.1 調査内容および数量

項目	規格等	数量	備考
調査	既存資料収集整理	1式	地表踏査含む
	電磁探査	10点	CSMT探査
	自然放射能探査	100点	
掘削地点の選定	総合解析	1式	
許可申請書類作成	—	1式	温泉審議会用
掘削工法(案)決定	—	1式	概算経費積算

(6)発注者：木島平村役場

(7)受注者：[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

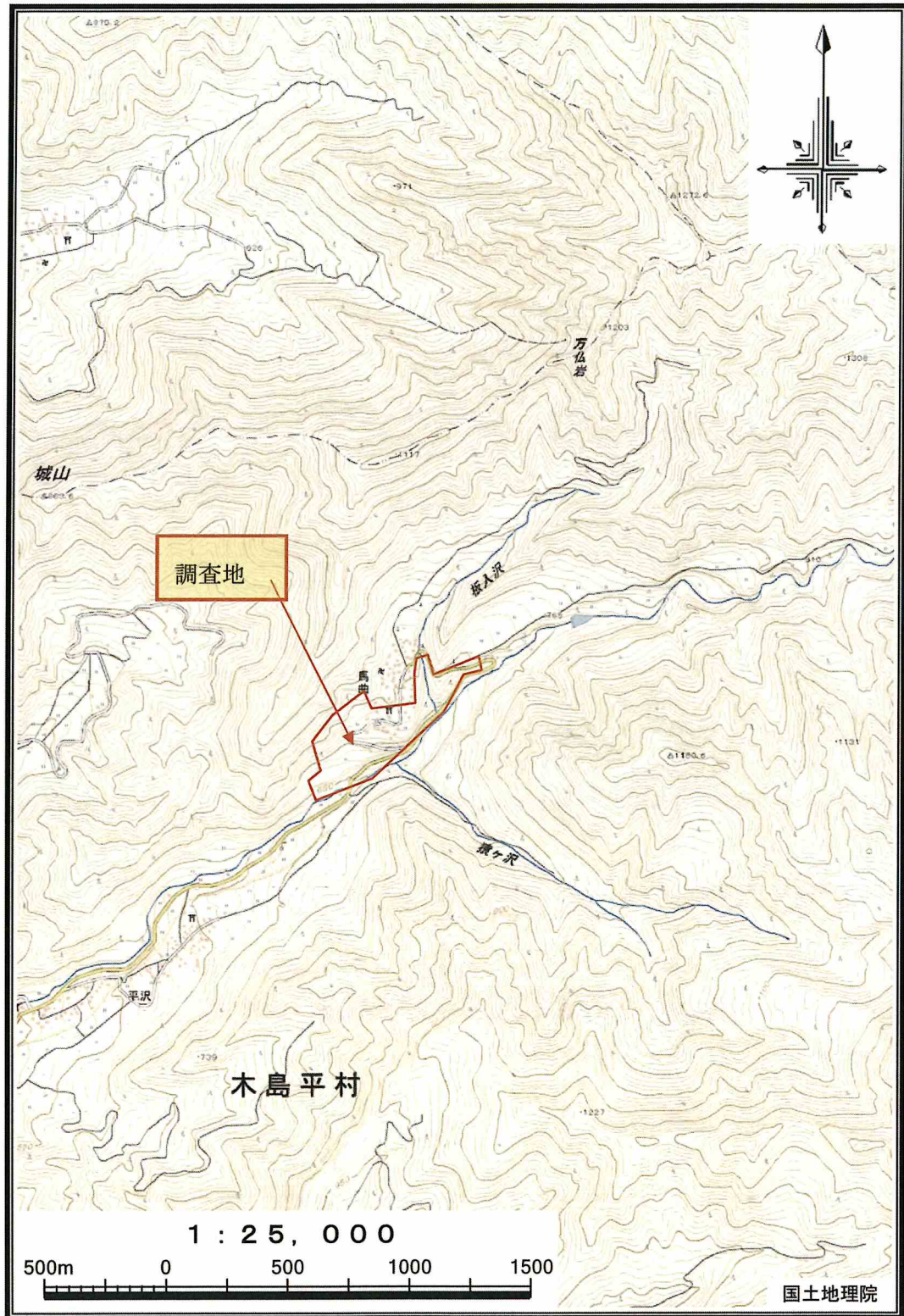


図1.1 業務位置図（電子国土：国土地理院より）

2. 既存資料調査結果

2.1 地形概要

調査地である馬曲温泉は、長野県北東部の木島平村村にあって、村役場の北東方向約2kmに位置している。調査地の北東方から東方にかけては毛無山(1,649m)、城蔵山(1,565m)などの山が連なり、さらにその奥には鳥甲山(2,037m)、苗場山(2,145m)など2,000m級の山々を控え、新潟県との県境を構成している。地区東側に発達するこれらの山々は、河東山地と呼ばれている。このように発達する山系を背景として、水系については、河東山地から源を発する馬曲川や樽川が発達している。これらの河川は木島平村の中心地となる広い扇状地を形成し、調査地である馬曲温泉は、馬曲川沿いの山麓斜面内に発達した谷間の集落に掘削された温泉である。

2.2 地質概要

調査地(図2.1参照)の位置する長野県北東部には、年代的には比較的新しい時代、下部一中部更新統の地質が分布している。それらは、かつての火山活動により供給された火山岩類により構成されており、調査地周辺に分布する地質は、地表(年代的に新しい)より城山溶岩、赤ダレ谷溶岩類、瑞穂火山岩類であるとされている。以下、各地質の岩相について簡単にまとめる。

【城山溶岩】

黒灰色緻密な安山岩溶岩で、0.5~1.0mmの細粒の斜長石が多く含まれる。

一部で板状節理が発達する。

【赤ダレ谷溶岩類】

変質した普通輝石紫蘇輝石安山岩の溶岩および火砕岩と普通輝石含有安山岩溶岩からなる。

変質普通輝石紫蘇輝石安山岩の溶岩は、塊状緻密で場所により板状節理が発達する。一方の火砕岩は、火山角礫岩が主体で、全体に変質が進み局所的に粘土化する部分もある。

普通輝石含有安山岩溶岩は、全体に黒っぽい青灰色緻密な溶岩で、斑晶鉱物は目立たない、場所により板状節理が発達している。

【瑞穂火山岩類】

全体に著しい変質を受けた火砕岩および溶岩からなる。

岩質は灰色緻密な普通輝石紫蘇輝石安山岩である。

温泉周辺の踏査を実施したが、道路切割や溪流にみられる露頭などでも、いわゆる周辺を構成している基盤岩が明瞭に確認できる箇所はなかった。ただし、斜面崩壊により供給されたであろう基盤岩起源の岩石を混入する堆積物や、一部では基盤岩が原位置風化したともみられるような露頭も一部確認している。現地を確認した露頭の事例を次頁に写真で示す。



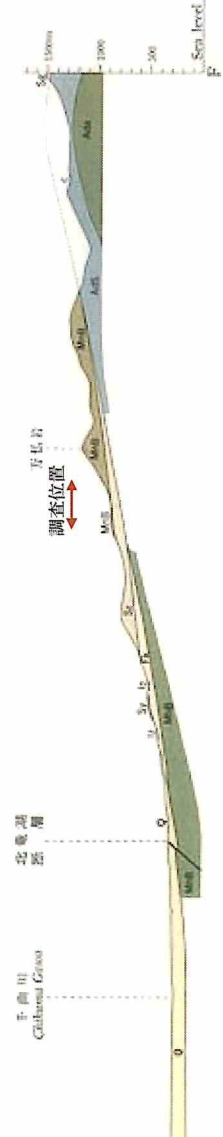
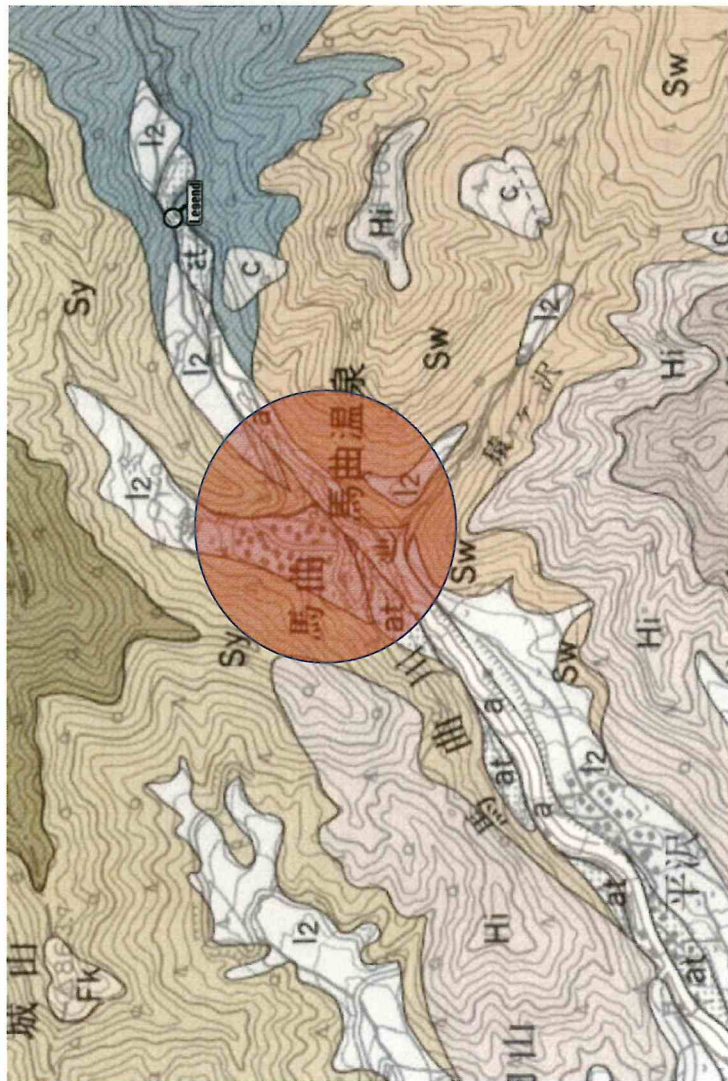
写真1 既設源泉近傍溪岸露頭
安山岩礫を混入する泥流堆積物である。



写真2 既設源泉北側村道切割法面露頭
巨大な転石の可能性もあるが、亀裂の多い安山岩がみられる。



写真3 温泉施設対岸農道切割露頭
50cm角の落石もみられるが、写真2同様安山岩がみられる。



若山群 (products of Kenashiyama Volcano)

カヤの平林溶岩 Kayanotaira-rindo Lava	Kr	普通輝石紫輝輝石安山岩溶岩 Augite-hypersthene andesite lava
平沢溶岩 Hirasawa Lava	Hi	かんらん石含有普通輝石紫輝輝石安山岩溶岩 Olivine-bearing augite-hypersthene andesite lava
滝ノ沢溶岩 Takinosawa Lava	Tk	普通輝石紫輝輝石安山岩溶岩 Augite-hypersthene andesite lava
野沢溶岩 Nozawa Lava	Nz	普通輝石紫輝輝石安山岩溶岩 Augite-hypersthene andesite lava
毛無窪溶岩 Kenashigake Lava	Kc	普通輝石紫輝輝石アイサイト溶岩 Augite-hypersthene dacite lava
東鷹窪溶岩 Sutakagake Lava	Ss	普通輝石含有紫輝輝石アイサイト溶岩 Augite-bearing hypersthene dacite lava
スクライイン溶岩 Sukarain Lava	Sk	かんらん石含有普通輝石紫輝輝石安山岩溶岩 Olivine-bearing augite-hypersthene andesite lava
東鷹湖溶岩 Sutakako Lava	So	かんらん石含有普通輝石紫輝輝石安山岩溶岩 Olivine-bearing augite-hypersthene andesite lava
毛無山東溶岩 Kenashiyama-higashi Lava	Bf	紫輝輝石普通輝石アイサイト溶岩 Hypersthene-augite dacite lava
橋の沢溶岩 Karanosawa Lava	Fs	普通輝石紫輝輝石アイサイト溶岩 Augite-hypersthene dacite lava
中尾溶岩 Nakao Lava	Kg	普通輝石紫輝輝石アイサイト溶岩 Augite-hypersthene dacite lava
北電湖溶岩 Hikage Lava	Hg	普通輝石紫輝輝石安山岩溶岩 Augite-hypersthene andesite lava
万仏宮遺民集積岩 Mandatsuiwa Tuff Breccia	MnB	紫輝輝石含有普通輝石アイサイト火砕岩 (弱溶結) Hypersthene-bearing augite dacite pyroclastics (weakly welded)
城山溶岩 Shiroyama Lava	Sy	普通輝石紫輝輝石安山岩溶岩 Augite-hypersthene andesite lava
小栗神社溶岩 Kosage-jinja Lava	Kl	普通輝石含有紫輝輝石安山岩溶岩 Augite-bearing hypersthene andesite lava
北電湖溶岩 Hokuryuko Lava	Hr	普通輝石含有安山岩溶岩 Augite-bearing andesite lava
鎌ヶ沢溶岩 Sarragasawa Lava	Sw	紫輝輝石普通輝石アイサイト溶岩 Hypersthene-augite dacite lava
福島溶岩 Fukushima Lava	Fk	紫輝輝石含有普通輝石アイサイト溶岩 Hypersthene-bearing augite dacite lava

図2.1 調査地周辺の地質 S=1:50,000 地質図幅飯山

2.3 既存温泉の概要

(1)調査地周辺の温泉

本業務で対象としている馬曲温泉の周辺(直径3km圏内)に既存の源泉はみられない。また、温泉源泉以外の深井戸についても、とくに注目しておくべき井戸はみられなかった。したがって、本業務において最も参考となる資料としては現状で利用されている馬曲温泉既設源泉井戸になる。

①既設源泉の構造と経緯

事前に提供された資料により、既設源泉の構造は図2.2のようなものであることがわかっていいる。また、竣工から現在までの揚湯量および揚湯水位の経年変動が表2.1のようにまとめられる。なお、表2.1に示した比湧出量については、竣工当時から自然水位の変化がないものとして算出している。

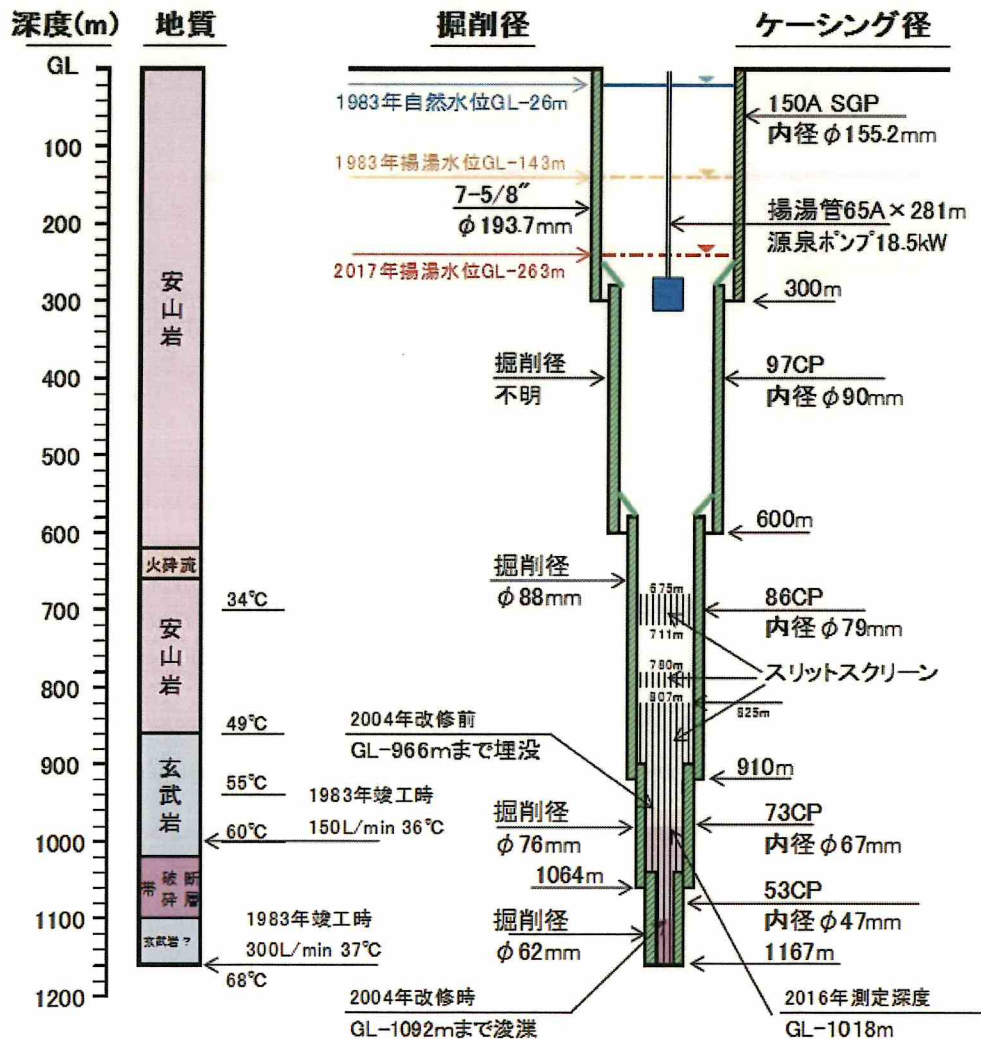


図2.2 既設源泉井戸構造図

表2.1 既設源泉井戸の経年変化一覧表

		①揚湯量 (L/min)	②自然水位 (GL-m)	③揚湯水位 (GL-m)	①÷(③-②) 比湧出量 (L/min/m)	比湧出量 (竣工時を 100とする)
1983年	竣工時	300.0	26.0	143.0	2.56	100.0
2004年	改修前	158.5	不明	243.2	0.73	28.5
2004年	改修後	163.3		234.3	0.78	30.6
2010年	平均値	151.4		280.1	0.60	23.2
2011年	平均値	168.1		259.6	0.72	28.1
2012年	平均値	167.4		230.2	0.82	32.0
2013年	平均値	200.0		261.2	0.85	33.2
2014年	平均値	146.0		237.0	0.69	27.0
2015年	平均値	116.5		233.6	0.56	21.9
2016年	平均値	116.2		256.7	0.50	19.6
2017年	平均値	120.0		263.2	0.51	19.7

注)自然水位は竣工時のまま変わらないものとして比湧出量を算出しました。

GL-966~1092m 間浚渫
リーミング
(Φ86~46mm マルクラウン)
ジェットング 洗浄
(GL-675~-872m)
エアフト洗浄
(揚湯管 GL-960m)

②既設源泉の能力

既設源泉は、1983年竣工から20年が経過した2004年に改修工事が行われ、竣工時の温泉湧出能力を100%とすると、改修完了後の時点でも30%未満の能力に減少してしまっている。これは、スクリーンの目詰まりの他にGL-966m以深がスケールにより埋没していたことが原因として考えられる。改修工事により一時的に比湧出量は回復したものの2015年以降再び減少し、2017年現在は竣工時の20%未満まで低下している。

能力回復を図るために、再度の改修工事の実施も考えられるが、前回の改修工事実施よりさらに10年以上の年月が経過しており、スクリーンの目詰まりや埋没物の堆積・固結化はさらに進行していることが想定されるため、改修工事による能力回復は困難であるものと判断します。

③既設源泉の泉質

調査範囲をふまえ、本業務で検討することになる新源泉井戸については、既設源泉井戸に近い位置で計画される可能性が極めて高い。このため、新規に源泉井戸を掘削し、開発に成功した場合、その泉質について、既設源泉井戸の泉質に近いものが予想される。参考までに、既設源泉の成分分析結果を図2.3に示す。

温泉分析書

(鉱泉分析試験法による分析)

(中No. 16 - 204 号)

1. 申請者 住所 長野県下高井郡木島平村大字住廻973番地の1
氏名 木島平村長 柳澤 萬壽雄
2. 源泉名及び湧出地 源泉名 馬曲温泉 望郷の湯
湧出地 長野県下高井郡木島平村大字住廻4988番地
3. 湧出地における調査及び試験成績
(1)調査及び試験者 社団法人 長野県薬剤師会 検査センター 主任研究員 黒岩 直樹
(2)調査及び試験年月日 平成 16年 12月 13日
(3)泉温 39.6 °C (調査時における気温 4 °C)
(4)湧出量 163 L/分 (掘削による動力揚湯)
(5)知覚的試験 ほとんど無色透明、無味無臭。
(6)水素イオン濃度 pH 8.3
(7)ラドン(Rn) 未測定
4. 試験室における試験成績
(1)試験者 社団法人 長野県薬剤師会 検査センター 主任研究員 黒岩 直樹
(2)分析終了年月日 平成 16年 12月 27日
(3)知覚的試験 ほとんど無色透明、無味無臭。
(4)密度 1.0003 (20°Cにおいて) 0.9985 (20°C/4°C)
(5)水素イオン濃度 pH 8.23
(6)蒸発残留物 327 mg/kg (乾燥温度 110 °C)

5. 本水1キログラム中に含有する成分、分量及び組成

(1) 陽イオン成分	ミリグラム (mg)	ミリバール (mval)	ミリバール% (mval%)	(2) 陰イオン成分	ミリグラム (mg)	ミリバール (mval)	ミリバール% (mval%)
水素イオン H ⁺	—	—	—	フッ素イオン F ⁻	1.0	0.05	1.40
リチウムイオン Li ⁺	0.02	0.003	0.08	塩素イオン Cl ⁻	6.1	0.17	4.75
ナトリウムイオン Na ⁺	58.7	2.55	71.73	臭素イオン Br ⁻	—	—	—
カリウムイオン K ⁺	6.2	0.16	4.50	ヨウ素イオン I ⁻	—	—	—
アンモニウムイオン NH ₄ ⁺	—	—	—	亜硝酸イオン NO ₂ ⁻	—	—	—
マグネシウムイオン Mg ²⁺	0.08	0.007	0.20	硝酸イオン NO ₃ ⁻	—	—	—
カルシウムイオン Ca ²⁺	16.5	0.82	23.07	水酸イオン OH ⁻	—	—	—
ストロンチウムイオン Sr ²⁺	0.03	0.001	0.03	硫化水素イオン HS ⁻	—	—	—
バリウムイオン Ba ²⁺	痕跡	—	—	硫酸水素イオン HSO ₄ ⁻	—	—	—
アルミニウムイオン Al ³⁺	—	—	—	硫酸イオン SO ₄ ²⁻	104.7	2.18	60.89
マンガンイオン Mn ²⁺	0.1	0.004	0.11	リン酸水素イオン HPO ₄ ²⁻	—	—	—
鉄(II)イオン Fe ²⁺	0.3	0.01	0.28	メタ亜硫酸イオン AsO ₂ ⁻	—	—	—
鉄(III)イオン Fe ³⁺	—	—	—	炭酸水素イオン HCO ₃ ⁻	72.0	1.16	32.96
銅イオン Cu ²⁺	—	—	—	炭酸イオン CO ₃ ²⁻	—	—	—
亜鉛イオン Zn ²⁺	—	—	—	メタケイ酸イオン HSiO ₃ ⁻	—	—	—
				メタボウ酸イオン BO ₂ ⁻	—	—	—
陽イオン 計	81.9	3.56	100	陰イオン 計	183.8	3.58	100

(3) 非解離成分

成分	ミリグラム (mg)	ミリモル (mmol)
メタケイ酸 H ₂ SiO ₃	91.7	1.17
メタボウ酸 HBO ₂	0.6	0.02
メタ亜硫酸 HAsO ₂	—	—
リン酸 H ₃ PO ₄	—	—
硫酸 H ₂ SO ₄	—	—
非解離成分 計	92.5	1.19

溶存物質 (ガス性のものを除く)

358.2 mg/Kg

(4) 溶存ガス成分

成分	ミリグラム (mg)	ミリモル (mmol)
遊離二酸化炭素 CO ₂ (遊離炭酸)	5.0	0.11
遊離硫化水素 H ₂ S	—	—
溶存ガス成分 計	5.0	0.11

成分総計

363.2 mg/Kg

(5) その他の微量成分

総水銀 Hg	不検出 (0.0005	mg/kg未満)
鉛 Pb	不検出 (0.01	mg/kg未満)
カドミウム Cd	不検出 (0.005	mg/kg未満)
総クロム Cr	不検出 (0.02	mg/kg未満)
総ヒ素 As	0.013	mg/kg

6. 泉質 単純温泉 (弱アルカリ性低張性温泉)

平成 16年 12月 28日

長野県松本市旭2丁目10番15号

社団法人 長野県薬剤師会 会長 小栗 晴

[分析機関登録番号 長野県第2号]



図2.3 既設源泉温泉分析書

3. 温泉調査とその方法

3.1 温泉とは

(1)温泉の定義と温泉湧出の条件

日本は火山国であり、数多くの温泉があって人々は古来憩い・治療の場として利用してきた。わが国には約2,000カ所の温泉がある。

温泉とは、読んで字のごとく「地中から湧き出る温かい水」のことであるが、温泉法では「温度が25℃以上か、表3.1に掲げる物質をひとつ以上含むもの」と定義している。25℃以下のいわゆる鉱泉であっても、表3.1の物質がひとつでも基準以上含まれれば温泉法では温泉として取り扱われる。

表3.1 温泉の溶存物質含有量

物質名	含有量 (1kg中)
溶解固形物質総量	1000mg以上
遊離炭酸CO ₂	250 //
リチウムイオンLi ⁺	1 //
ストロンチウムイオンSr ²⁺	10 //
バリウムイオンBa ²⁺	5 //
フェロまたはフェリイオンFe ²⁺ ,Fe ³⁺	10 //
マンガンイオンMn ²⁺	10 //
水素イオンH ⁺	1 //
臭素イオンBr ⁻	5 //
ヨウ素イオンI ⁻	1 //
フッ素イオンF ⁻	2 //
ヒドロヒ酸イオンHAsO ₄ ²⁻	1.3 //
メタ亜ヒ酸HAsO ₂	1 //
総イオウS	1 //
メタホウ酸HBO ₂	5 //
メタケイ酸H ₂ SiO ₂	50 //
重炭酸ソーダNaHCO ₃	340 //
ラドンRn	100億分の20キューリー
ラジウム塩R	1億分の1mg以上

温泉の定義としては、先に述べた25℃以上の温度または温泉成分を含むことであるが、温泉を利用するには以下にあげた3要素が必要である。

温泉そのものとして

- ①温度
- ②量
- ③成分

また、温泉が湧出するための条件として

- ①熱源
- ②流体
- ③通路

温泉開発調査とは、温泉が湧出するための条件を調査することである。調査対象としては温泉水の通り道である③通路の調査がもっとも重要である。①熱源については周辺の既存資料や一般的な地温上昇率を用いて検討することが多い。また、②流体については③の通路に流体が分布するかどうかの判断を、調査結果や広域の水文循環を考察することにより検討する。

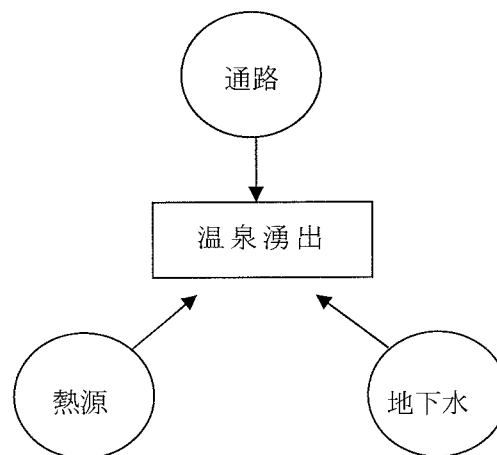


図 3.1 温泉湧出のための3要素

(2) 温泉の賦存状態と調査方法

温泉調査の方法は、温泉水が賦存する地層が未固結で粗粒な堆積物なのか、岩盤なのかにより異なる。

温泉が粗粒な堆積物の粒子の間隙に賦存されている場合には、その地層の連続性・層厚・透水性が問題になる。このような温泉の賦存状態は、一般に「多孔質貯留型」と呼ばれている。

一方、岩盤に発生している亀裂や断層などの間隙に賦存されている場合には、その亀裂や断層などの位置・連続性・規模が問題になる。このような温泉の賦存状態は、「断裂貯留型」と呼ばれている。これらの状況を図3.1に示す。

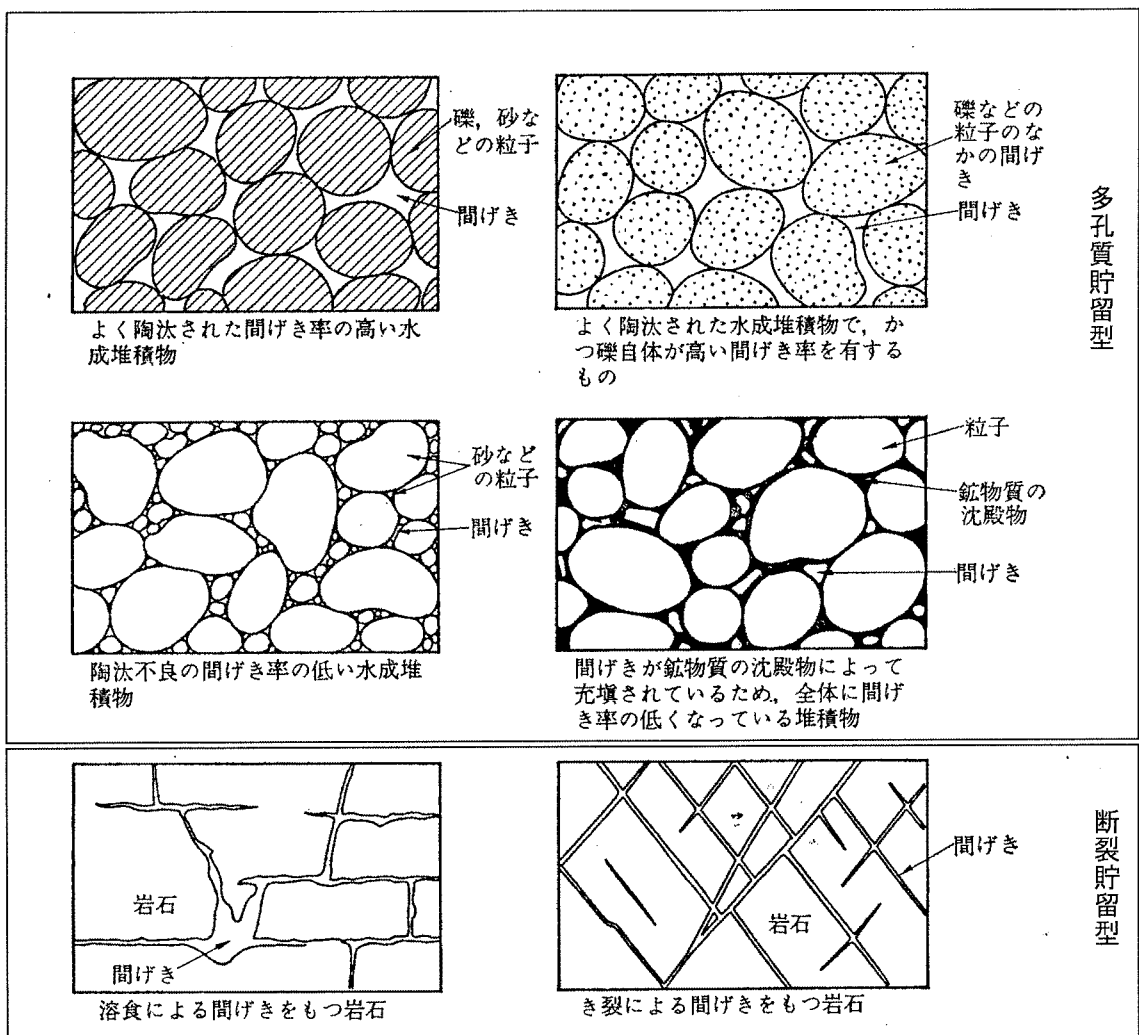


図 3.2 地層による地下水(温泉水)の賦存状況の相違

温泉タイプの違いによる調査内容方法の違いは表3.2のようにまとめることができる。また、一般的な温泉調査の流れを図3.3に示す。

表3.2 温泉貯留タイプによる温泉調査内容

温泉貯留タイプ	多孔質貯留型	断裂貯留型
地層	第四紀～新第三紀鮮新世の未固結堆積物～低固結堆積物など	固結堆積物、火成岩、変成岩など
貯留状態	砂・礫などの粗粒な堆積物の間隙	亀裂・断層等の断裂の間隙
調査対象	①地層の透水性・連続性・層厚の把握 ②地質層序の検討 ③堆積盆構造の把握	①断裂の連続性・規模の把握 ②地質構造の把握
調査内容	①地下地質の想定 ②地表地質にもとづく地下地質の想定 ③比抵抗値による大深度における地質の想定	①既存資料による地下地質の想定 ②地表地質にもとづく地下地質の想定 ③比抵抗値による大深度における地質の想定 ④断裂の位置の想定
調査方法	①既存資料収集 ②地表地質踏査 ③電気探査または電磁探査	①既存資料収集 ②地表地質踏査 ③電気探査または電磁探査 ④放射能探査(断裂系探査)

表3.2に示すように、地下水・温泉調査では一般的に、地表地質を調べる「踏査」、地下地質構造を調べる「地下構造調査」、温泉の通り道である断裂系を調べる「断裂調査」を組み合わせることが多い。

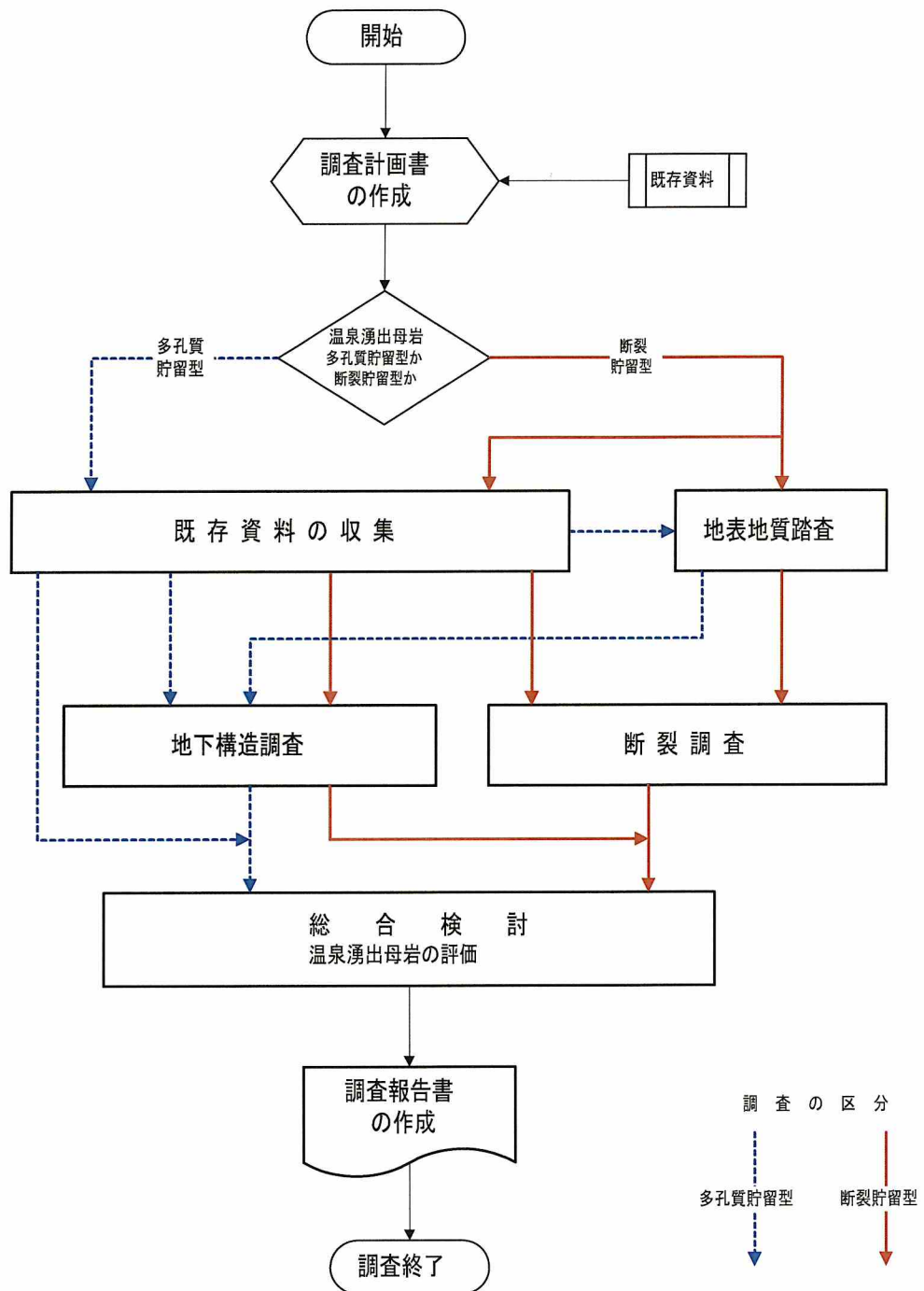


図3.3 温泉調査のフローチャート

3.2 調査方針

調査地に分布する地質は、第四紀の火山活動により供給された火山岩類であると予想される。既設源泉もこれらの地層から湧出しているものと思われる。

これらの地層のうち、温泉を貯留する可能性があるのは、①火砕岩など、空隙が多い岩屑堆積物②溶岩など、硬質で緻密な岩盤中の割れ目、と考えられる。

そのため温泉開発を検討する調査として、地質構造を深い深度まで把握するための電磁探査、地表付近に連続する断裂を把握する自然放射能探査、地層を確認する地表踏査を実施した。

具体的には、電磁探査として地下1,000m以深の地下構造を把握する手法として「CSMT探査」を実施し、地表に達する断裂を調査する手段として、放射能探査のうち携帯式三核比法探査を実施した。

4 調査概要

以下に、本調査で実施した調査について、その概要を示す。

4.1 既存資料調査

公開されている資料や、丸沼高原スキー場が所有している資料について内容を検討し、現地調査結果と併せて検討を行う。

主に以下の資料を利用した。

- 地形図（国土地理院発行数値地図）
- 地質図（地質調査所発行5万分の1地質図、飯山地質図幅）
- 温泉資料（既設源泉関係既往業務報告書、村役場提供）

4.2 地表踏査

調査地周辺の地質の調査をし、周辺地質の面的分布と地質構造の大局を調べる。

既存の地質図を参考に、地形図上にどのような地層が分布するか、地下に分布する岩石の岩相を確認し、温泉貯留層となるか検討する。

4.3 CSMT 探査

(1)CSMT 探査とは

地表からボーリングをしないで地下構造を把握する調査は一般に物理探査と言われ、そのうち電流を流して電場と磁場を利用して測定する調査を電磁探査と言う。

CSMT (Controlled Source Magneto Telluric) 法は電磁探査の一種で、送信源で周波数を変えて電場を発生させることで深度 1500m 程度まで測定できることが特徴である。

調査では送信側で電流を流して電場と磁場を発生させ、受信側で地下を通過してきた電場と磁場を測定し、地下の比抵抗値を把握する。地下の比抵抗値は、地質構造と密接な関係があるため、既存資料や現地での踏査結果と合わせて総合的に判断し、地質構造を把握する。本調査ではノイズの原因である測定時間の誤差をなくすため、GPS からの時刻信号と同期し、測定時間の差による誤差を無くした。また、23 周波数を用いて探査するため、従来 (14 周波数) より緻密な構造を把握できる。図 4.1 に CSMT 探査の概要図を示す。

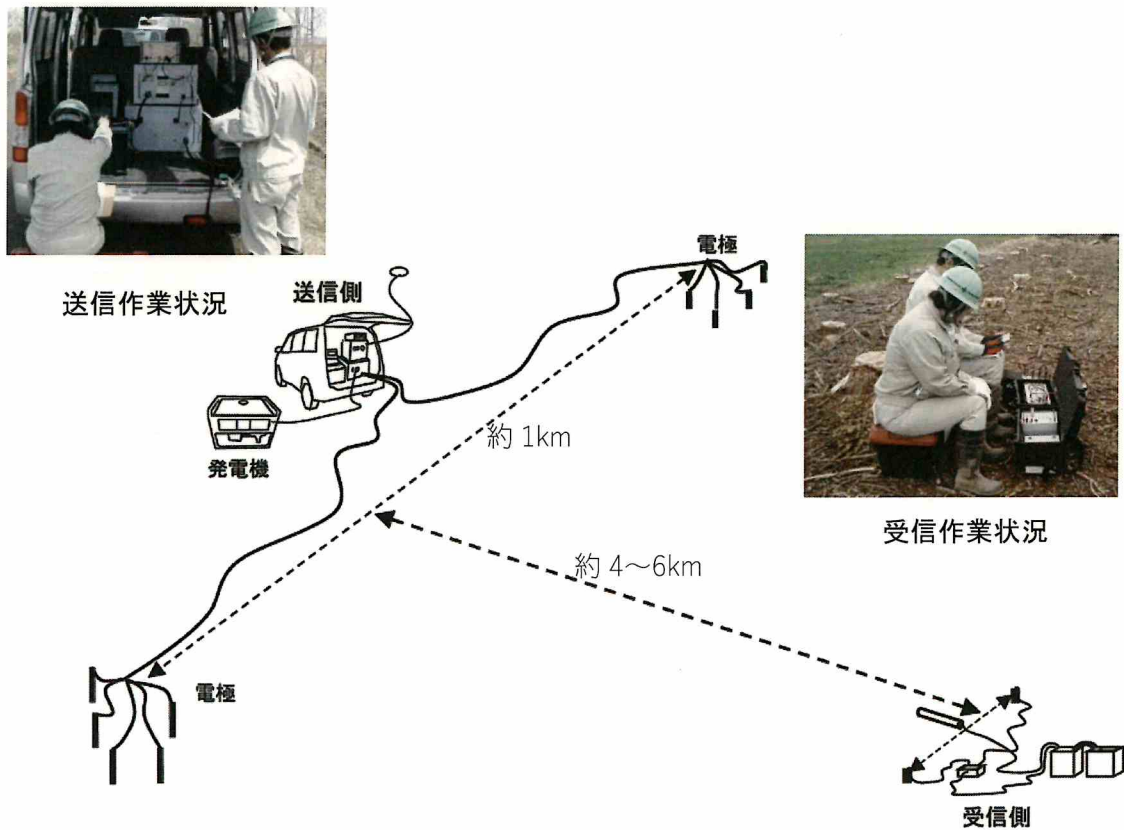


図 4.1 CSMT 探査概要図

(2) 測定原理

地盤に電流を流すと、電場 E と磁場 H が発生する。その電場と磁場の強度比は(インピーダンス)は、地盤の電気抵抗値(比抵抗値)により変化することが知られている。一方、電流源で発生した電磁波は、十分遠くに離れた位置では平面電磁波とみなすことが出来る。平面電磁波における電場、磁場と、大地比抵抗の間には、以下の式が成立することが知られている。従って、電流源から十分離れた測定点での地盤の見掛比抵抗は、近似的に測定に用いた周波数と測定されたインピーダンス(Z=E/H)を以下の式に代入することにより求められる。

$$\rho_a = \frac{1}{2\pi f \mu} \left| \frac{E}{H} \right|^2 \quad \text{----- 式 4.1}$$

ただし、 E : 電磁強度(V/m) f : 周波数(Hz=c/s)
 H : 磁場強度(A/m) μ : 真空の電磁率(H/m = Ω · S/m)
 ρ a : 見掛比抵抗値(Ω · m)

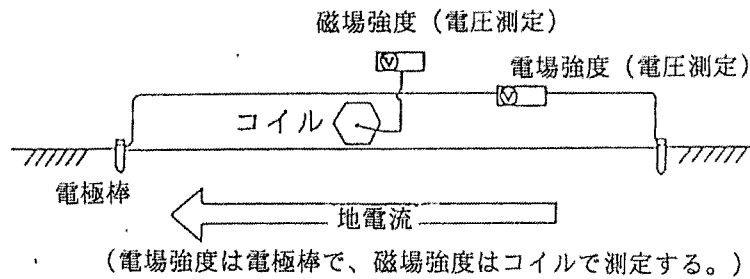


図 4.2 受信地点における測定方法

次に、電磁波の周波数と深度の関係について述べる。

一般に、波は波長が長いと透過性がよく、逆に短いと悪い。電磁波についても同じことが言える。

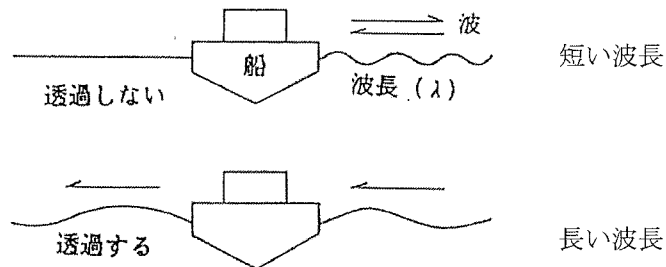


図 4.3 波の波長と透過性

電磁波は、周波数が低いほど深くまで透過していく性質を持つため、低い周波数で深くまでの見掛比抵抗値を、高い周波数で浅い部分の見掛比抵抗を測定することが出来る。周波数と電磁波の透過深度との関係は、マクスウェルの方程式から、入射した電磁波の強度が $1/e$ ($e=2.718$)まで減衰する深度を1つの目安として以下式により求められる。式 3.2 において、探査深度の目安である δ は表皮深度 (スキンドープス) と呼ばれる。

$$\delta = 500 \sqrt{\rho / f} \text{ ----- 式 4.2}$$

ただし、 δ : 透過深度 (スケッチ m)

ρ : 地盤の比抵抗値 ($\Omega \cdot m$)

f : 周波数 (Hz)

CSAMT 探査は、各測定点の地盤に入射する電磁波の電場と磁場との強度関係(電磁感応答)から地盤の見掛比抵抗を測定する探査であり、電磁波の周波数による透過深度の違いにより、深度方向の情報を得ようとするものである。

探査深度は、式 3.2 からわかるように地盤の比抵抗の関数である。したがって、探査深度は周波数のみならず地盤の比抵抗によっても変化する。例えば、低い比抵抗の地盤では、他の測点と同じ周波数を用いているにもかかわらず探査深度は浅くなる。

(3) 現地測定

① 探査位置

図 4.4 に受信点の位置と送信アンテナの位置を示す。

地下構造を調査するCSMT探査は、調査地周辺において500～800m間隔で10点を実施した。CSMT探査の目的は、計画地下の比抵抗値を明らかにし、温泉湧出母岩の評価を行うことなどである。そのため、探査測点はスキー場内に3本の断面線を想定し、三つの断面から立体的に地下の地質構造を把握できるように配置した。表4.1に、各受信地点の特徴を示す。

表4.1 CSMT探査受信地点の特徴

受信地点	特 徴
M-2	既設源泉位置であり、既存温泉資料と対比する。
M-6 ~M-3	既設源泉を横断するM-6～M-3 で地質断面を作成し、地質構造を把握する。
M-8 ~M-10	既設温泉施設を横断するM-8 ~M-10 の地質断面を作成し、地質構造を把握する。
M-1～M-5	上記の2断面に交差する地質断面を作成し、3次的に地質構造を把握する

送信アンテナは、受信点から約 5km 離れたカヤノ平の林道沿いに、約 1.5km の電線を

設置し、電線の両端に 20 本の電極棒を設置した。

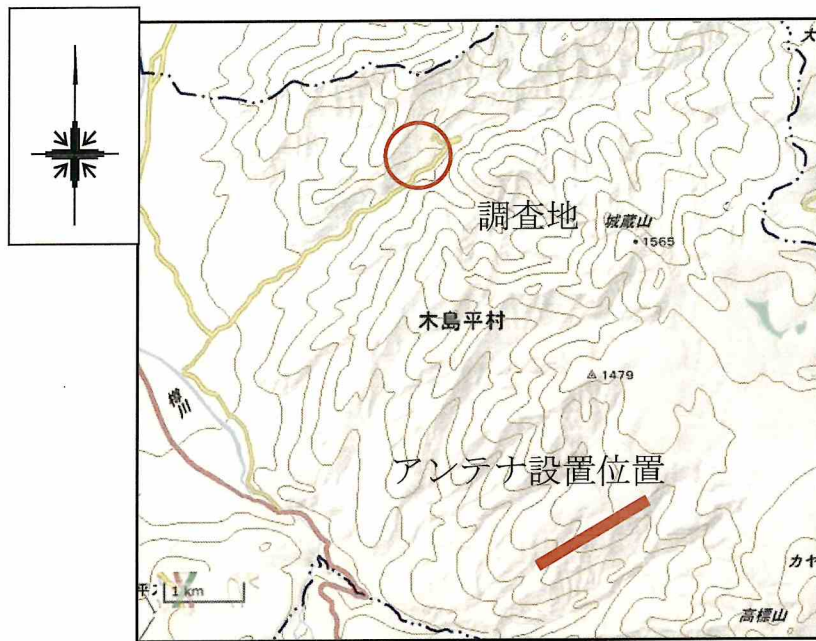


図 4.4 CSMT 探査 送受信点配置図

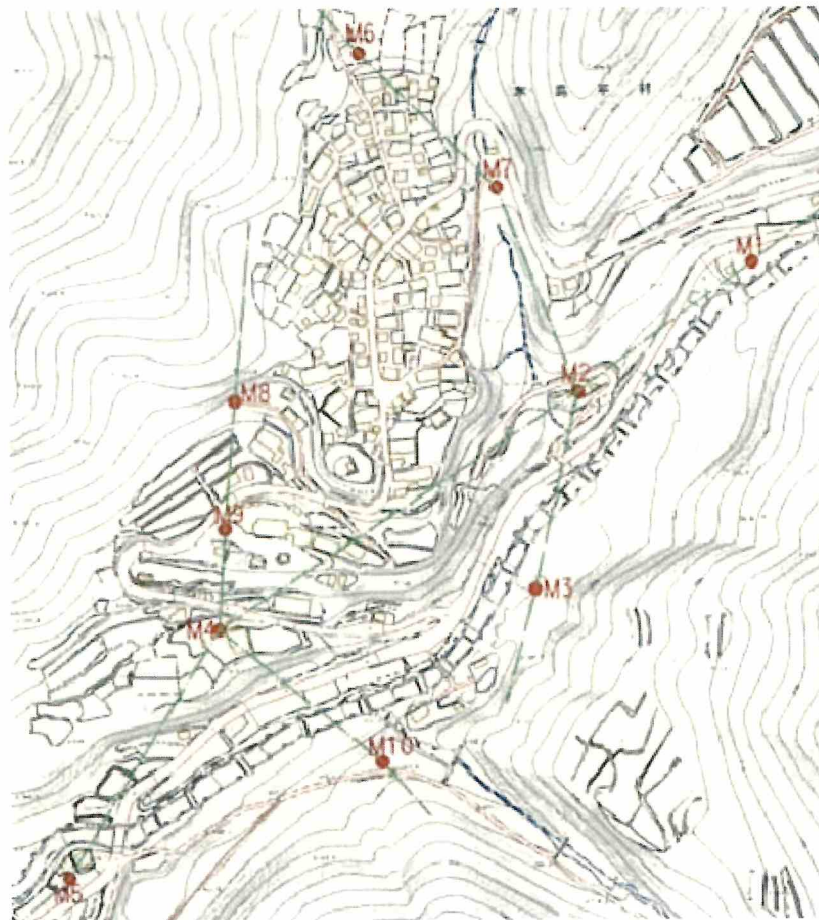


図 4.5 受信点配置図

② 使用機器

使用した機器を表 4.2 に示す。また、機材の写真を写真 1 および写真 2 に示す。

表 4.2 測定機器仕様

内容	項目	仕様
送信機 (トランスミッタ)	最大出力	5kw
	最大電圧	1000V
	最大電流	10A
	送信周波数	[1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192, 20, 40, 80, 160, 320, 640, 1280, 2560, 5120Hz]
発電機	最大出力	6kw
	電圧	200V
	周波数	60Hz, 三相交流
高精度時計	水晶発信器	G P S による完全同期 (送信器と受信器に搭載)
受信機	受信周波数	最大 23 種 [1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192, 20, 40, 80, 160, 320, 640, 1280, 2560, 5120Hz]
	チャンネル数	3ch
	増幅率	0~90dB[10dB ピッチ可変]
	波形処理	フーリエ変換
	測定値	見掛比抵抗, 位相角



写真 1 送信機機材 一式(左: 送信機材、右: 送信アンテナと電極)



写真 2 受信機器 一式

③測定

- a) 送信は、決められた時刻に決められた周波数の電磁波を自動的に送信した。この時の時刻と周波数は、送信側と受信側で GPS が発信する時計と同期することで、同時性を保った。
- b) 送信は、1 時間で 1～8192Hz までの 20 種の周波数を送信した。
- c) 受信点では送信信号が受信点に届いている事を確認するために各周波数のスタッキング後の受信波形を確認しながら測定を行った。
- d) 各周波数の測定が終了した時点で、 ρ_a-f , $\phi-f$ 曲線（見掛比抵抗-周波数, 位相角-周波数）を計算機内のグラフィックで確認し、測定が正常であるか否かを確認した
- e) 1 地点で 20 種類の周波数を測定した後、次の受信点に移動し同様に測定を実施した。1 日に予定した全ての受信点の測定が終了するまで、送信を継続した。

(4) 解析

解析は、コンピュータ処理し、地盤を水平多層構造と仮定して一次元解析を行い、その後ニアフィールド補正を実施した後に二次元解析を実施した。

以下に解析手順を示す。

① データ補間

測定データの中にはノイズにより解析に使用できない周波数のデータが存在する場合があります。このようなデータについては、1 次元解析の前に除去し、スプライン補間にてその周波数のデータを補った。

② 1 次元解析

1 次元解析は水平多層構造の仮定の基、信号源を考慮した式を解き、測定値と解析値とが整合するようなモデルを求めた

③ ニアフィールド補正

送信源を考慮した 1 次元解析とファーフィールドのみの順解析ができる 1 次元解析を用いて、ニアフィールドデータからファーフィールドデータを推定した。送信源を考慮した 1 次元解析を A 解析、ファーフィールドのみの順解析ができる 1 次元解析を B 解析と呼ぶ。

補正の考え方は、はじめに、A 解析によりニアフィールド補正を行い比抵抗構造を求める。次に、その比抵抗構造において、B 解析によりファーフィールドの測定を行った場合に得られる見掛比抵抗値と位相角を計算する。この見掛比抵抗値と位相角がニアフィールド補正後の値となる。

④ 2 次元解析

2 次元解析は、はじめに、計算を行うためのモデルを計算機の中に構築する。このモデルは有限要素法で構築する。有限要素法の解析を行うための要素図は送信源と平行な方向に配置した M1～M5 を通る断面で作成した。

要素幅は、表層では横 25m, 深度方向 20m である。次に、各周波数での見掛比抵抗が測定値と計算値で整合するモデル（各比抵抗ブロックの比抵抗値）を逆解析で求めた。

⑤ 比抵抗断面図

各比抵抗ブロックのセンター座標に比抵抗値を配置させてコンターリングし、比抵抗断面図を得た。

比抵抗は、地層の固体構成物質・間隙率・粘土分・水質・含水量など種々の性質を反映する。一般的な地層の比抵抗値は表 3.2 に示されるが、亀裂の少ない硬質岩盤では高い値を示し、風化・粘土化した部分や亀裂が発達し地下水を含む部分では比抵抗値が低くなる。

解析された比抵抗断面図と表 4.3 などの既存資料を対比し、地表踏査結果・既存の地質文献を参考にして、水理地質構造を検討する。

表 4.3 一般的な地層の比抵抗値

	岩 石	比 抵 抗 値	
		乾 ($\Omega \cdot m$)	湿 ($\Omega \cdot m$)
透 水 層	礫	1,000~15,000	200~10,000
	砂礫	1,000~7,000	200~5,000
層	砂	300~7,000	100~700
	礫岩	300~1,800	100~500
難透水層 (A)	砂岩	200~2,500	100~500
	ローム 凝灰岩	500~5,000	100~1,000
難透 水層 (B)	シルト		100 以下
	粘土		100 以下
	泥岩		100 以下
	頁岩		約 100 以下
非 透 水 層	花崗岩	1,000~10,000	
	安山岩	200~10,000	
	玄武岩	20,000	
	結晶片岩	200~20,000	
	片麻岩	200~20,000	
	溶岩	1,000~20,000	
層	石灰岩	60~500,000	

志村馨：電気探査法より

本調査地においては、火山性堆積物や山岩が広く分布するものと推定できる。火山性堆積物は火山砂・火山礫などから構成されており、砂・礫に近い値を示すことが考えられる。安山岩は岩盤の比抵抗値を示すことが予想されるが、岩盤中に亀裂が発達している場所では、同じ岩相でも相対的に低い比抵抗値を示すことが予想される。

4.4 放射能探査

(1) 原理

一般に地殻を構成している岩石類やその風化生成物として堆積している堆積物には、微量の放射性元素が含まれている。この放射性元素は、自然に放射壊変することが知られているが、このような放射壊変は親核種が壊変した娘核種も放射性同位体である場合が多く、さらに鉛の安定同位体になるまで連続的に壊変することから、壊変系列と呼ばれる。この系列は、ウラン系列・トリウム系列・アクチニウム系列・ネプツニウム系列の4種類存在するとされている。また、軽元素では、概ね1度の壊変で安定同位体となる場合が多く、連続的に壊変するような系列とはならない。

これらの放射性元素は、親核種が放射壊変により、 α 線ないし β 線を放出するとともに、壊変された娘核種では電子が励起状態から基底状態となる際に余剰エネルギーを γ 線として放出する。この γ 線の放出は娘核種が生成されてすぐに発生するため、親核種から放出される放射線に含めて表現される。この原子が励起状態から基底状態へ転移する際に放出される γ 線は、放射性同位体固有の周波数をもつ。

この際に強度が強く、他の放射性同位体の γ 線と分離しやすいことで、測定精度が高いとされる同位体として、ビスマス-214 (^{214}Bi)・タリウム-208 (^{208}Tl)・カリウム-40 (^{40}K) などがある。

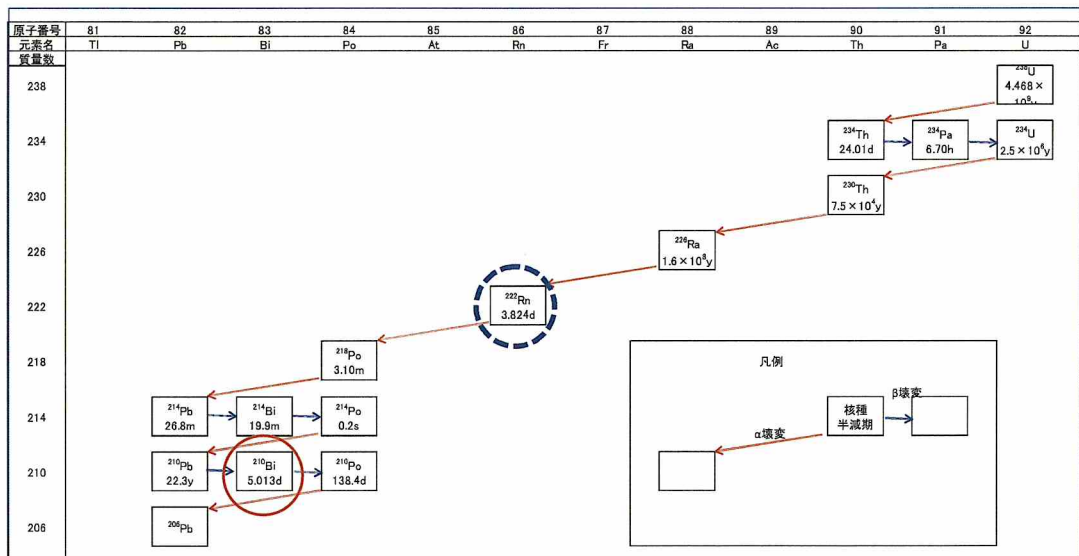


図 4.6 ウラン系列の放射壊変

今回実施した放射能探査では、3種類の放射性核種の測定を行った。測定に用いた核種は、上述したように測定精度が高いとされるビスマス-214 (^{214}Bi)・タリウム-208 (^{208}Tl)・カリウム-40 (^{40}K)である。

図 4.3 にウラン系列の放射壊変を示す。ウラン系列の放射壊変では、 ^{214}Bi が含まれており、 ^{214}Bi の親核種として ^{222}Rn がある。この Rn は希ガスに分類され、気体であり、化学反応性も乏しいことから、次の元素に壊変されるまで移動することが可能となる。したがって、亀裂の多い地層内では、空隙を移動し、上方へ移動しやすくなる。

このため、図 4.7 に示すように、 γ 線強度は断層等の存在する位置で増加する傾向がある。

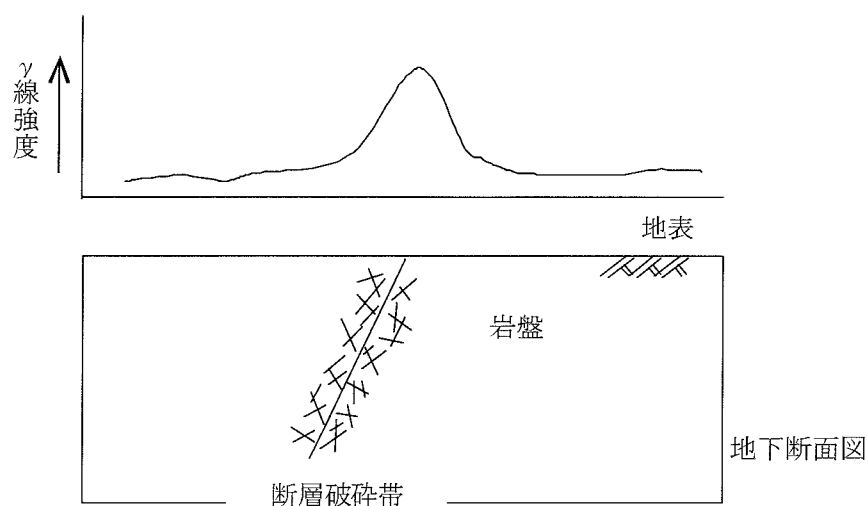


図 4.7 地質構造と地表で検出される γ 線強度例

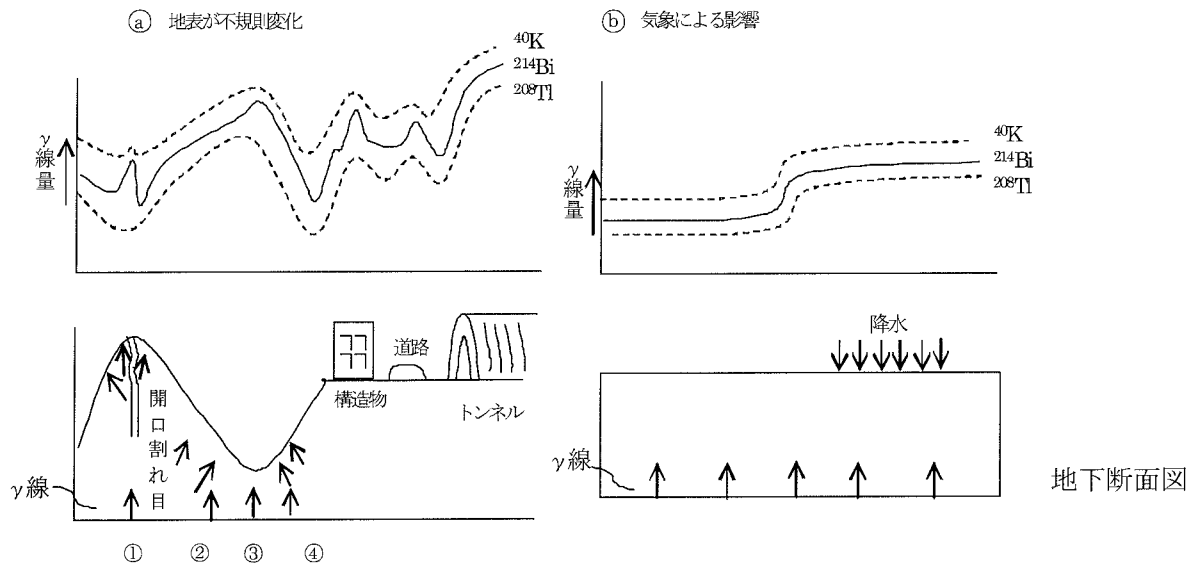
(2) 測定値の影響要因

測定条件（地形・地質・気象）が一様であれば、上述の γ 線強度の絶対値により評価が可能である。しかし、一般には、一様であることは少なく、条件により測定値は変化する。

変化する条件の概念図を図 4.8 と 4.9 に示す。

地形・気象条件による変化を図 4.8 に示す。尾根部では、周囲を囲むものがないため誤差は少ないが、谷部では、測点周辺の地層から放出される γ 線を受けるため、過大に検出される。また、構造物にも自然放射性元素が含まれていることから、構造物周辺では、 γ 線強度が高くなることが多い。また、大気中に浮遊している砂塵等にも放射性元

素は含まれており、降雨がある場合には、雨水にとりこまれて、地表へ供給されることとなる。このため、降雨によって、 γ 線強度が高く検出される傾向にある。



左図 a: 尾根地域で計測する場合、 γ 線は①からのみであるが、谷地形では③のほか②や④の一部を検出するため、測定値が大きくなる。
 右図 b: 降水時には、地下からの γ 線のほか、雨水に吸着した γ 線も測定されるため、測定値が大きくなる

図 4.8 地形・気象条件による γ 線強度変化

また、図 4.9 に示すように、地質によっても、放射性元素が含まれている量に相違があることから、構成物が異なることで、地表で検出される γ 線強度が変化する。

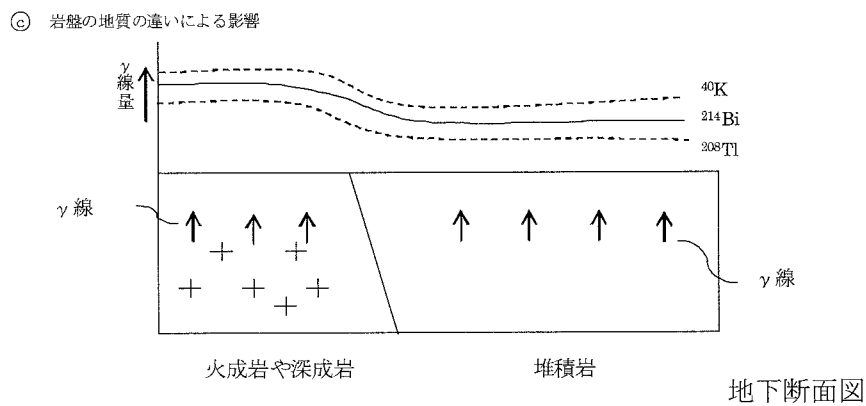


図 4.9 地質条件による γ 線強度の変化

これらの影響要因による γ 線強度変化を除外するため、Bi/K 比および Bi/Tl 比として表現する手法を用いた。

(3) 測定方法

γ 線の測定は、 γ 線を NaI 結晶に当てて光電子に変換し、その電気的パルス信号をシンチレーション波高分析器により計測する方法とした。

測定は携帯型探査装置を用いて、2m 間隔とし、1 点 120 秒間で実施した。用いた測定装置を以下に示す。



図 4.10 7250-5 型自然放射能探査装置

(4) 解析方法

測定された 3 核種の γ 線から、Bi/K 比および Bi/Tl 比を求め、それぞれの比が局所的に変動する異常値を求めた。

異常点の分類として、既存報告書で分類されている A 型異常と B 型異常に区分する。各異常の概略を以下にまとめる。また、概念図を図 4.8 に示す。

1) A 型異常

Bi 値の測定値が大きくなり、Bi/K 比および Bi/Tl 比が大きくなる。

地下水中に Rn が移動し、捕獲されることで、娘核種である Bi 量が増加すると考えられる。一部で、K や Tl を含む鉱物が風化・分解等により、K や Tl が溶脱し、系外へ移動する場合があります、K および Tl が減少する。

2) B 型異常

K 値および Tl 値が減少することで、Bi/K 比および Bi/Tl 比が大きくなる。

A型異常と類似しているが、Rnが地下水中に捕獲されないことで、揮散し、バックグラウンドとの変化がなくなる。一方で、KやTlが鉱物の分解等で系外へ移動し、KおよびTlが減少することによると考えられる。

Bi値・K値・Tl値がいずれも大きくなる中で、Bi/K比およびBi/Tl比も大きくなる。

Bi値が上昇することでA型異常と類似しているが、KおよびTh系列を含む鉱物の系外への移動がなく、やや濃集することにより、値が大きくなる。濃集の要因としては、粘土鉱物等に变化し、残置されている可能性がある。

Bi値・K値・Tl値のいずれも大きくなるが、Bi/K比およびBi/Tl比に変化が少ない。

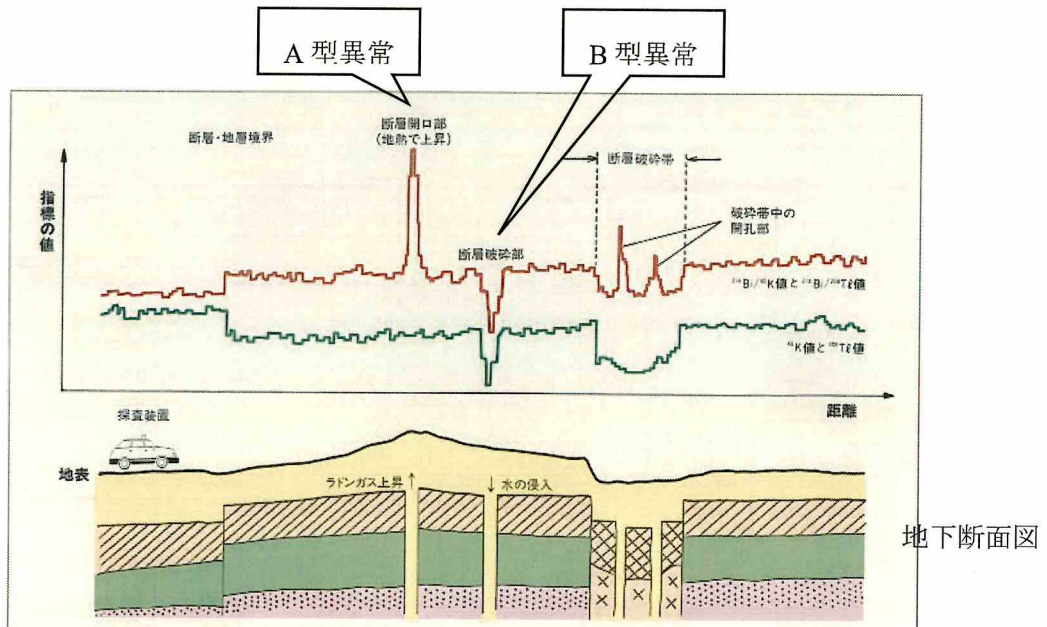


図 4.11 核比を用いた放射能探査結果概念図

(5) 現地測定

放射能探査は、既存資料調査ならびに電磁探査で断裂の可能性が認められた地域を対象に実施した。

測線は想定される断裂に対して、断裂を横断する方向に3測線を設定した。図4.8に探査位置を、表4.5に測線の概要を示す。

表4.4 断裂系探査計画の概要

測線名	測点間隔	測点数
A測線	2m	69点
B測線	2m	51点
C測線	2m	101点
D測線	2m	101点
E測線	2m	101点
計	-	423点

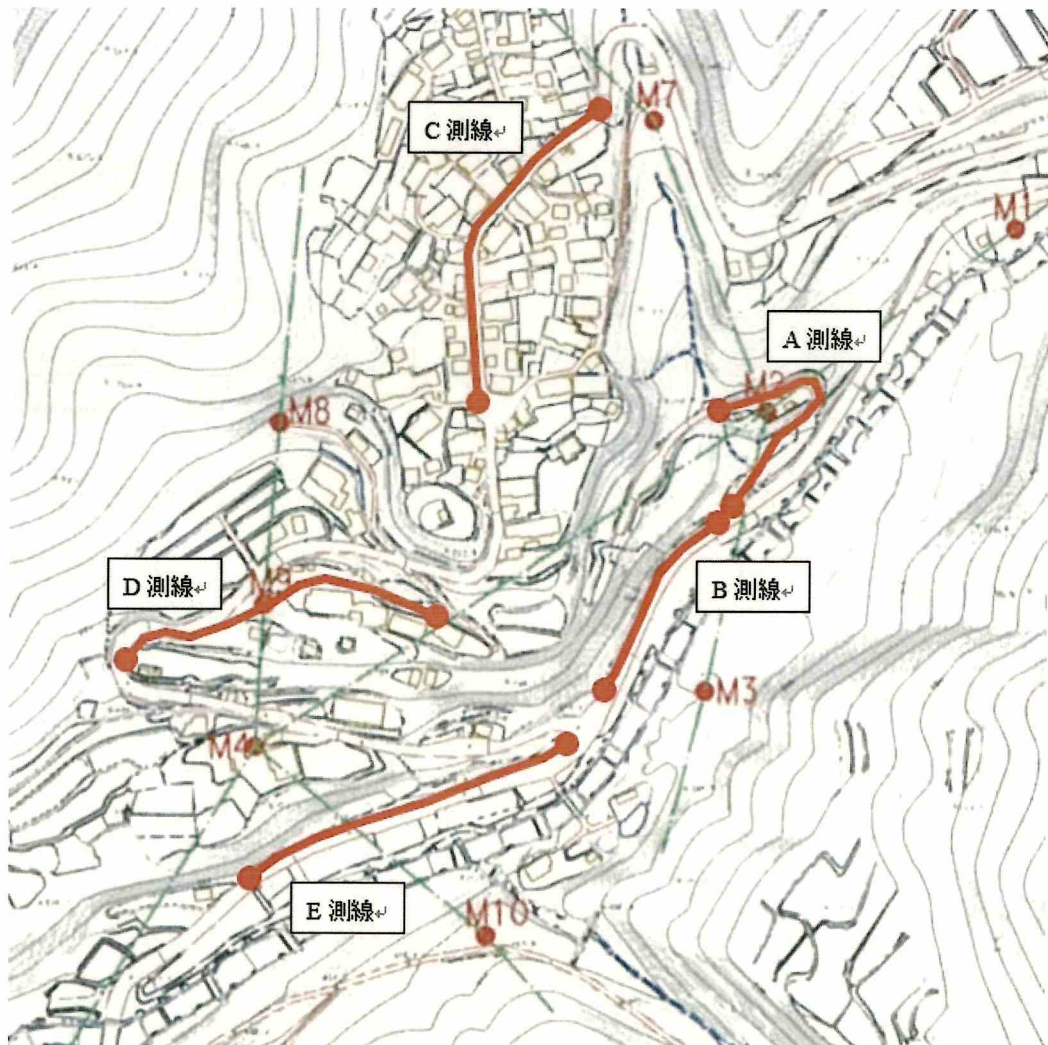


図4.12 放射能探査位置図

5. 調査結果

5.1 地表踏査結果

先にも述べたとおり、調査地周辺には、年代的には比較的新しい時代、下部－中部更新統の地質が分布している。それらは、かつての火山活動により供給された火山岩類により構成されており、調査地周辺に分布する地質は、地表（年代的に新しい）より城山溶岩、赤ダレ谷溶岩類、瑞穂火山岩類であるとされている。

温泉周辺の踏査を実施したが、道路切割や溪流にみられる露頭などでも、いわゆる周辺を構成している基盤岩が明瞭に確認できる箇所はなかった。ただし、斜面崩壊により供給されたであろう基盤岩起源の岩石を混入する堆積物や、一部では基盤岩が原位置風化したともみられるような露頭も一部確認している。現地で確認した露頭の事例を次頁に写真で示す。



写真1 既設源泉近傍溪岸露頭
安山岩礫を混入する泥流堆積物である。



写真2 既設源泉北側村道切割法面露頭
巨大な転石の可能性もあるが、亀裂の多い安山岩がみられる。



写真3 温泉施設対岸農道切割露頭
50cm角の落石もみられるが、写真2同様安山岩がみられる。

5.2 電磁探査結果

(1) 既存資料と電磁探査結果

電磁探査結果を、図 5.1 にまとめて示した。

電磁探査では、既設源泉井戸の近傍で M-2 測点を設定し探査を実施した。

調査地内における比抵抗値は、概ね 3 つに区分することができた。赤色（1000Ωm 以上の高比抵抗値）と黄色から橙色（20～1000Ωm の中比抵抗値）と黄緑色から青色（20Ωm 以下の低比抵抗値）の 3 つである。

既設源泉の井戸柱状図と今回の結果を対比することにより、以下のことがわかった。

- ・地表から深度 800m 以浅の高比抵抗値は、安山岩質の火砕流堆積物や溶岩に対比できる。
- ・深度 800m 以深の中比抵抗値は、柱状図の玄武岩に対比できる。
- ・深度 1000m 付近の低比抵抗値は、柱状図の破砕帯に対比できる。
- ・既存地質資料で示される城山溶岩は、高比抵抗値に対比され、赤ダレ谷溶岩や瑞穂火山岩類は中比抵抗値から低非抵抗値に対比できるものとみられる。

(2) 電磁探査結果とその解釈

既存源泉の柱状図と探査結果を対比することにより、今回の探査で低比抵抗値を示したところが温泉貯留層に相当するものと解釈した。既存の地質資料では、赤ダレ谷溶岩類に該当するものとみられ、温泉貯留層として機能していることをふまえ、火砕岩類卓越部や変質部がこれに相当している可能性が高いものと考えられる。

M-2 測点以外に、類似した比抵抗分布を認めたのは、M-9 測点である。なお、両地点ともに温泉貯留層として想定されるのは、深度 800～1600m の区間である。

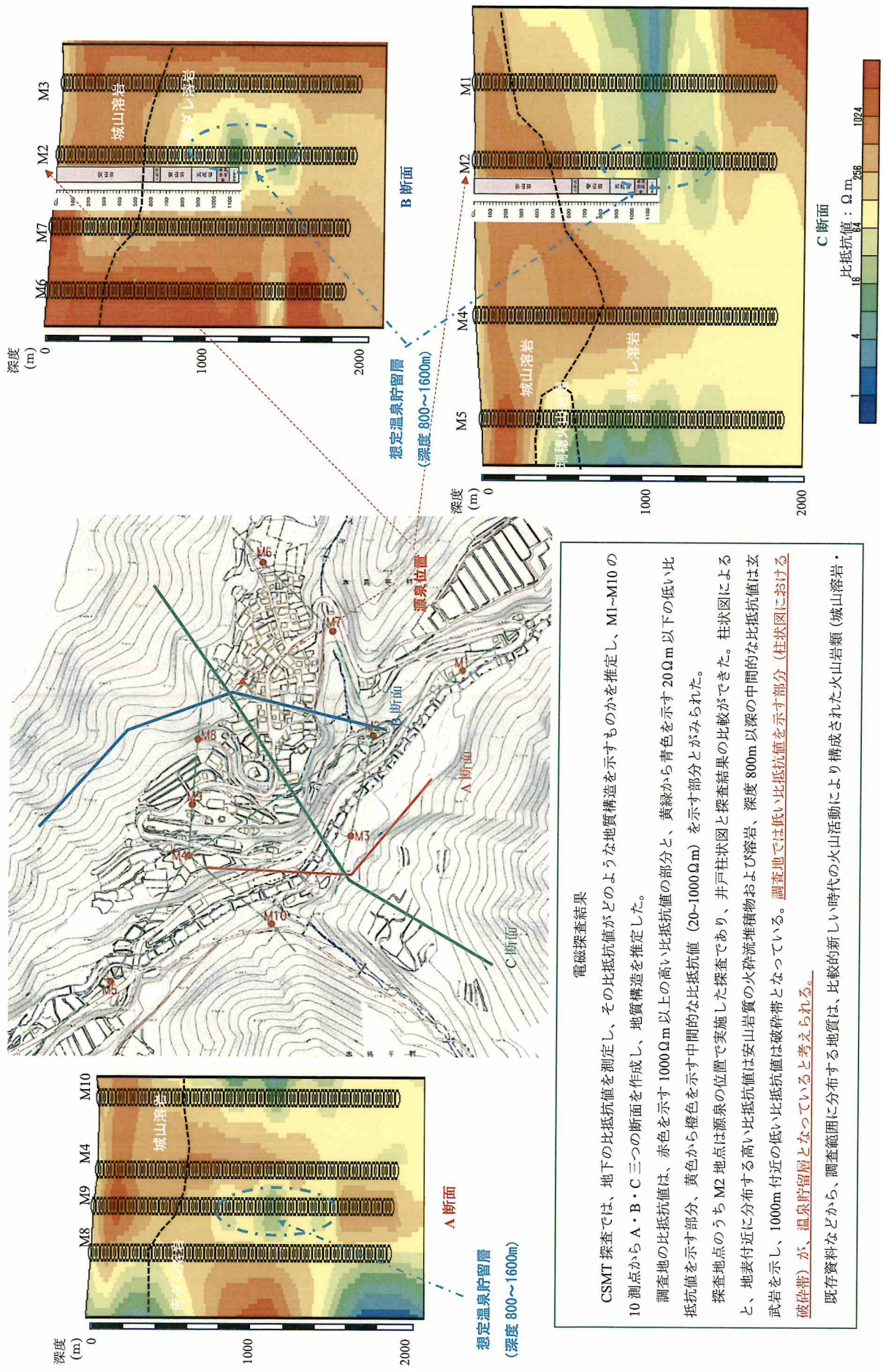


図 5.1 CSMT 探査結果 (比抵抗断面図)

電磁探査結果

CSMT 探査では、地下の比抵抗値を測定し、その比抵抗値がどのような地質構造を示すものかを推定し、M1~M10の10測点からA・B・C三つの断面を作成し、地質構造を推定した。

調査地の比抵抗値は、赤色を示す1000Ωm以上の高い比抵抗値の部分と、黄緑から青色を示す20Ωm以下の低い比抵抗値を示す部分、黄色から橙色を示す中間的な比抵抗値(20~1000Ωm)を示す部分とがみられた。

調査地点のうちM2地点は源泉の位置で実施した探査であり、井戸柱状図と探査結果の比較ができた。柱状図によると、地表付近に分布する高い比抵抗値は安山岩質の火山砕積物および溶岩、深部800m以深の中間的な比抵抗値は玄武岩を示し、1000m付近の低い比抵抗値は破碎帯となっている。調査地では低い比抵抗値を示す部分(柱状図における破碎帯)が、温泉貯留層となっていると考えられる。

既存資料などから、調査範囲に分布する地質は、比較的新しい時代の火山活動により構成された火山岩類(城山溶岩・

5.3 放射能探査結果

自然放射能探査は、既設源泉柱状図に記載される破砕帯をふまえて、調査対象範囲内を全体的に網羅することも意識して、全周を囲む形で5本の測線を設定した(図5.2)。

A測線～E測線の探査結果を図5.3(1)～図5.3(5)に示す。

図5.3(1)～(5)では、横軸に基点からの距離を示し、縦軸に核比を示した図を上段に、縦軸に核種の強度(1秒当たりのカウント数)を示した図を下段に、それぞれ示す。

A測線(図5.3(1))では、Bi/KやBi/Tlが顕著に高くなる地点はとくに確認できない。

B測線(図5.3(2))では、Bi/KやBi/Tlが顕著に高くなる地点はとくに確認できない。

C測線(図5.3(3))では、Bi/KやBi/Tlが顕著に高くなる地点はとくに確認できない。

D測線(図5.3(4))では、Bi/KやBi/Tlが顕著に高くなる地点はとくに確認できない。

E測線(図5.3(5))では、Bi/KやBi/Tlが顕著に高くなる地点はとくに確認できない。

以上の結果から、自然放射能探査では亀裂を示す有望な地点は確認できなかった。

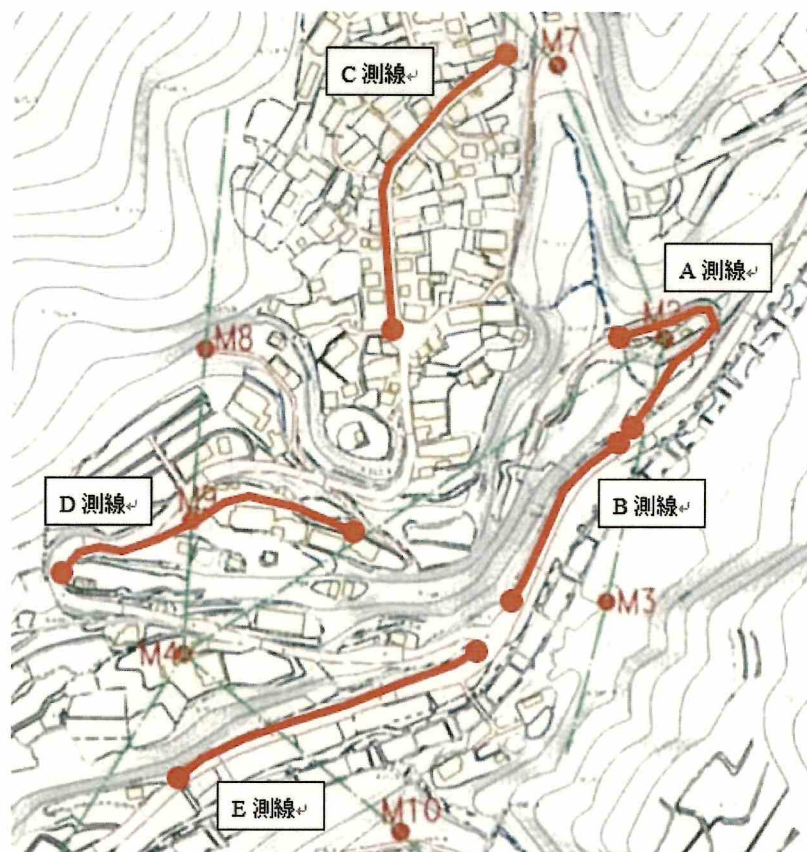


図5.2 放射能探査位置図

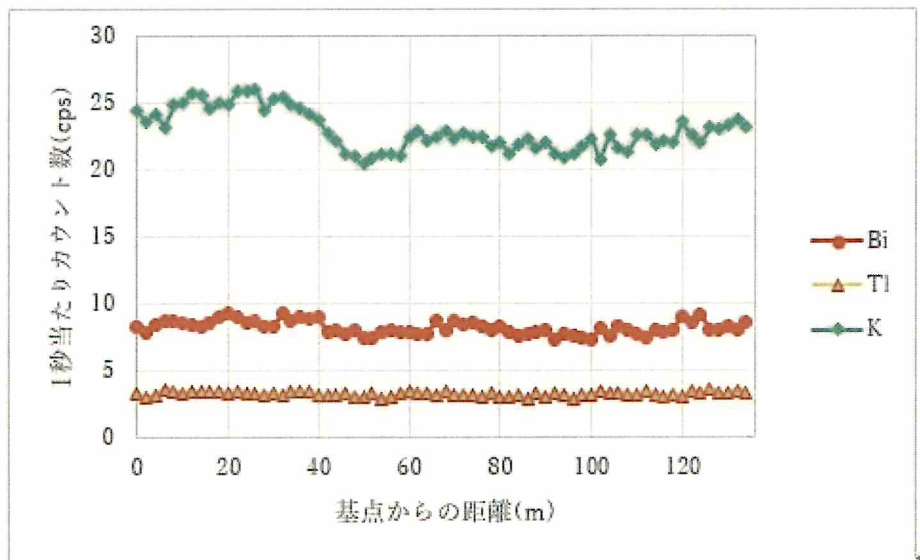
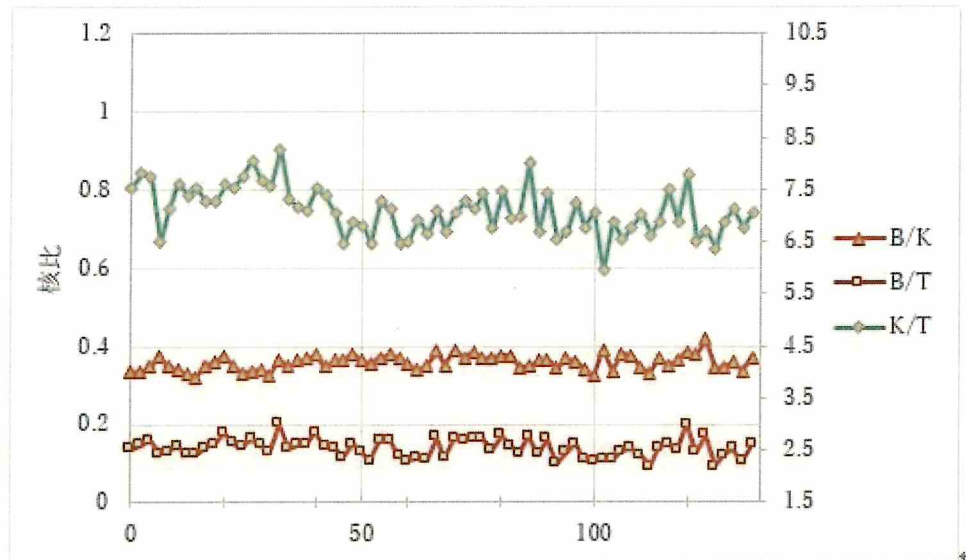


図 5.3(1) 自然放射能探査結果 (A 測線)

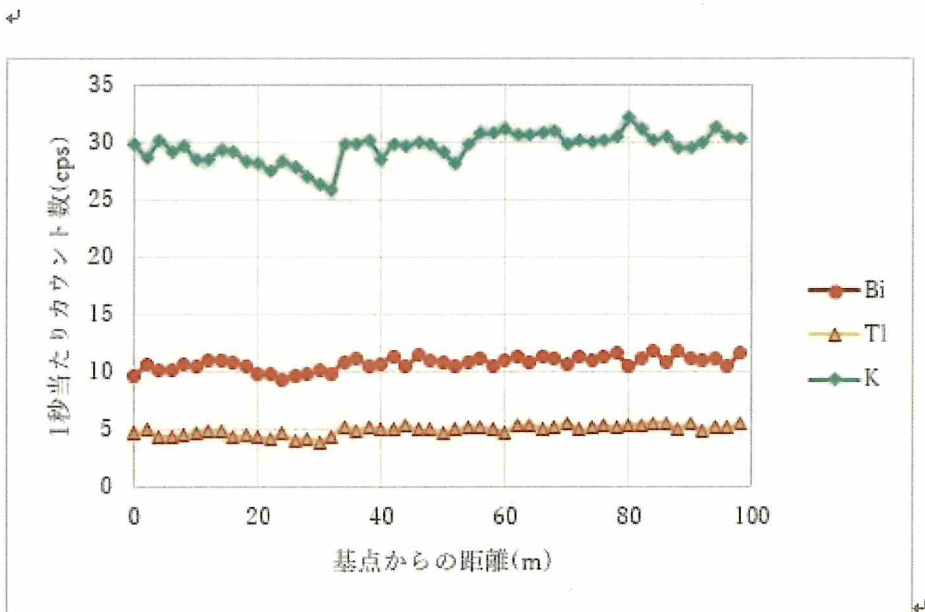
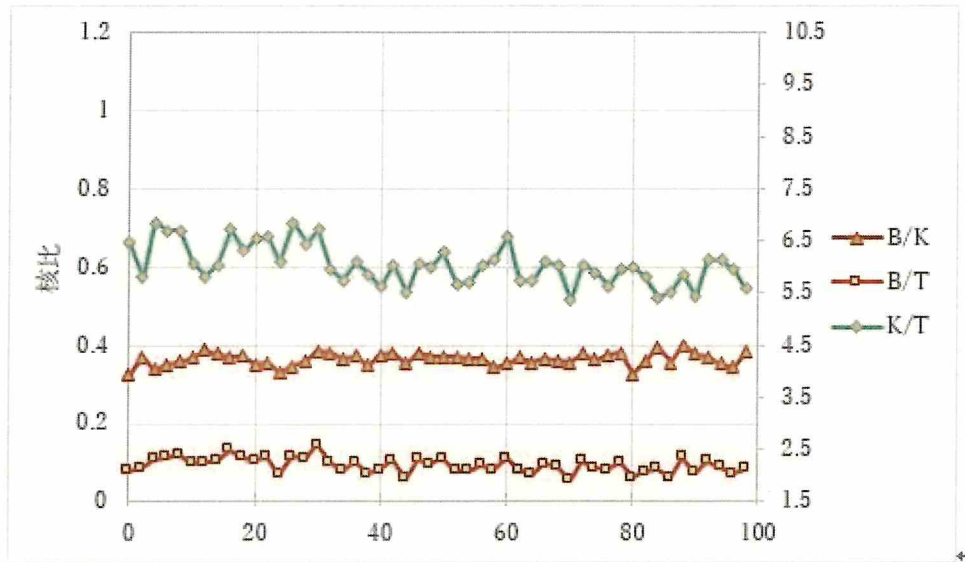


図 5.3(2) 自然放射能探査結果 (B 測線)

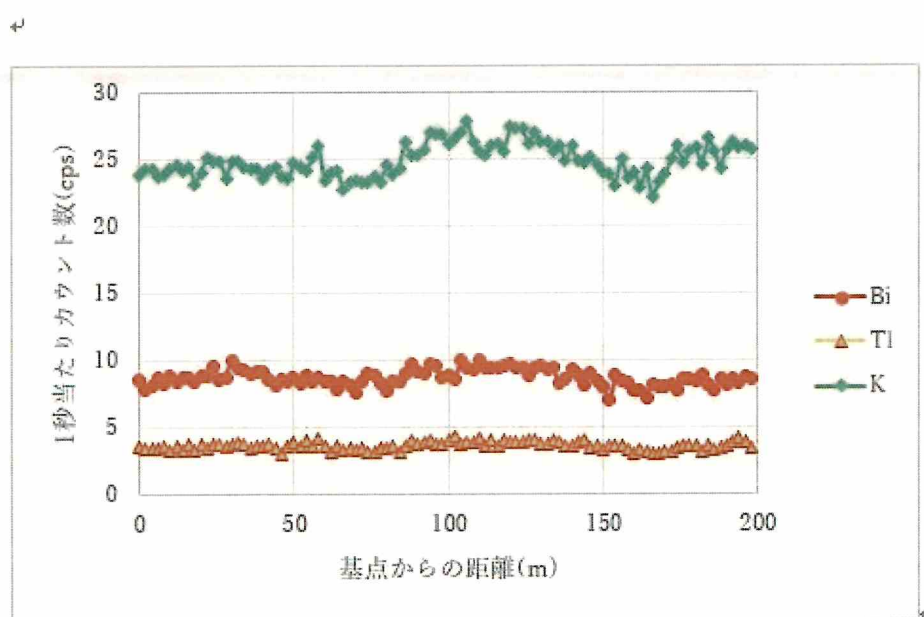
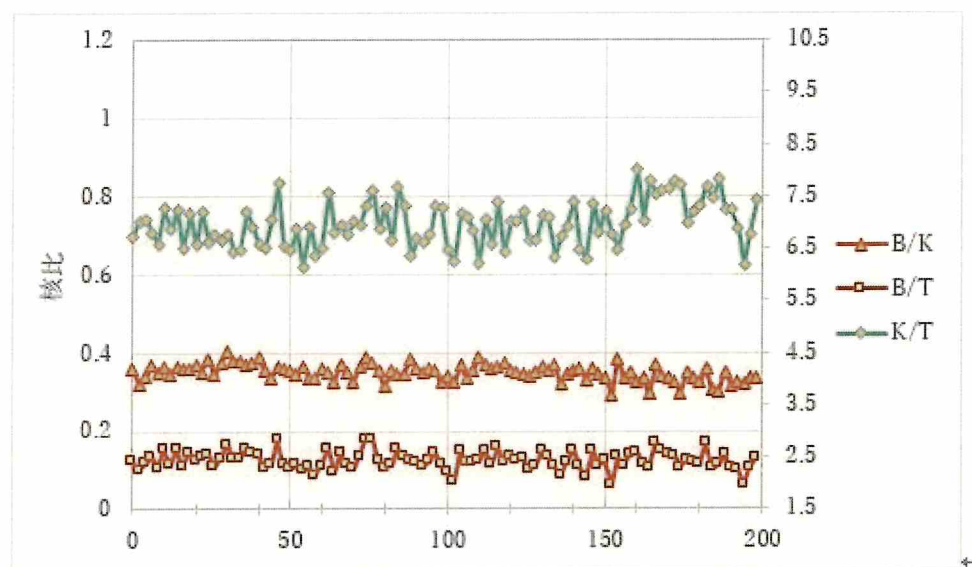


図 5.3(3) 自然放射能探査結果 (C 測線)

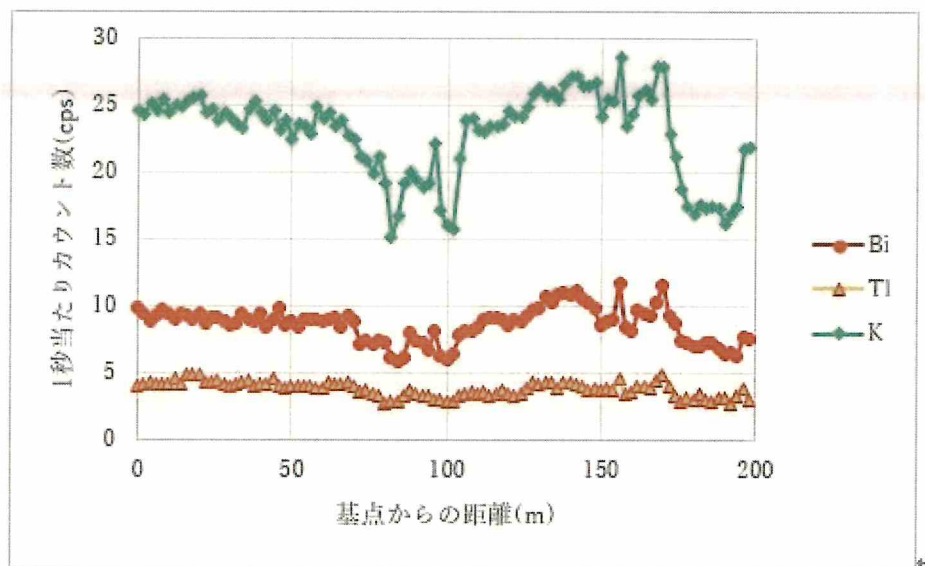
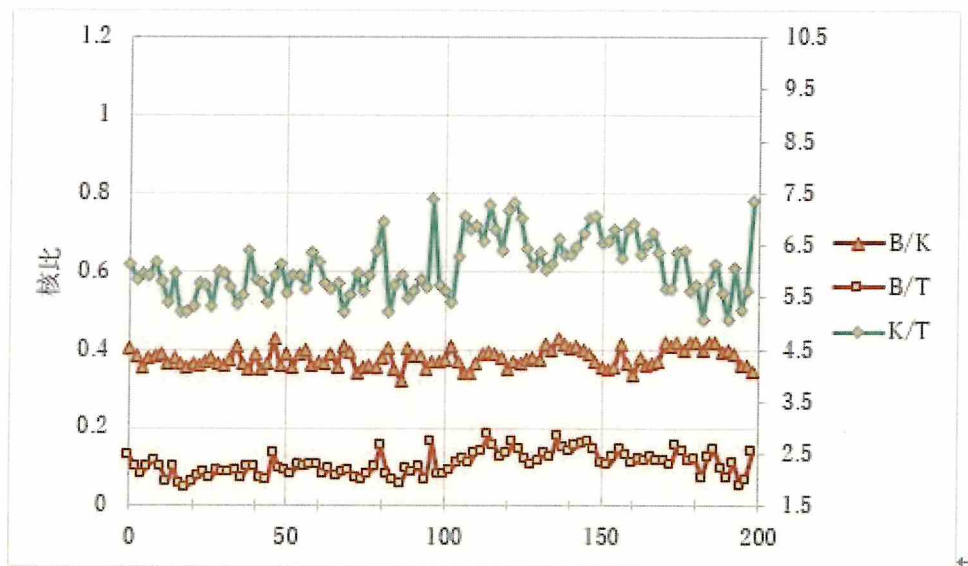


図 5.3(4) 自然放射能探査結果 (D 測線)

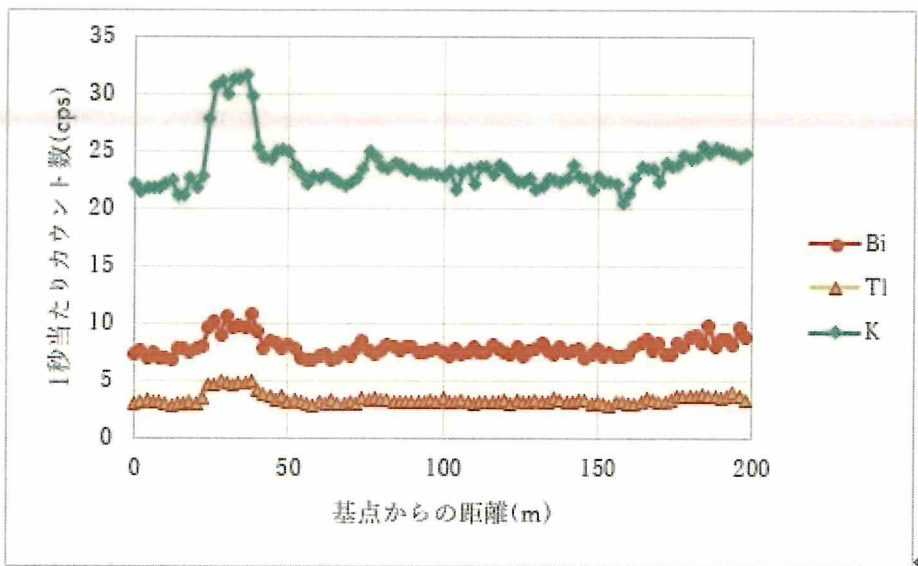
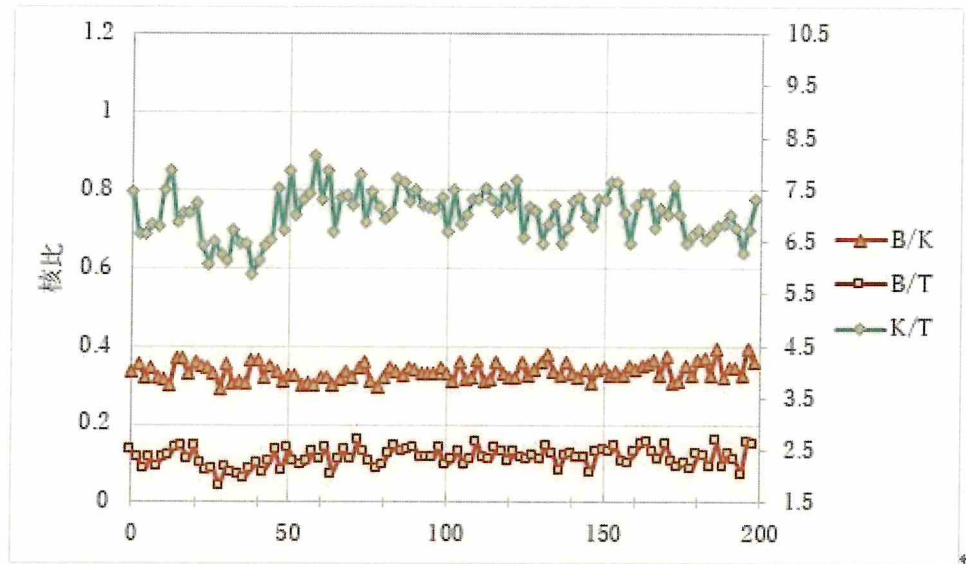


図 5.3(5) 自然放射能探査結果 (E 測線)

6. 温泉開発の検討

6.1 まとめ

以下に調査結果をまとめて示す。

- 既存資料および地表踏査結果では、調査地周辺には比較的新しい時代の火山活動により供給された火山岩類により構成されていることがわかり、現地踏査でもそのような調査地の基盤を構成する火山岩類の表面を覆う泥流堆積物などの分布を露頭で確認している。
- CSMT 探査では、既設源泉の井戸柱状図と比抵抗値を対比することにより、調査地における地質分布状況と温泉貯留層を想定することができた。今回の探査で低比抵抗値を示す箇所が、既設源泉における温泉貯留層に相当しているものと解釈できるため、このような低比抵抗値をしめす箇所が温泉開発適地であると判断した。
- 自然放射能探査は、既設源泉柱状図に示される破碎帯の存在を意識して、調査地全体を網羅できるように測線を配置して実施した。しかしながら、各測線ともに明瞭な断裂を示すような変位はみられず、高角度で連続する断層のような構造は確認できなかった。

6.2 温泉開発の検討

(1)調査結果から判断する新源泉掘削地点の選定

調査の結果に関わらず、既設源泉の近傍で新規に掘削を行えば、既設源泉竣工当時と同性能を有した井戸となるかは別としても、温泉湧出の可能性は非常に高いものと判断する。ただし、近傍での掘削工事については既設源泉への影響なども含め、工事期間中に温泉施設が使用できなくなるリスクも伴うことから、ここでは既設源泉井戸付近を除外した地点を選定した。

調査結果をふまえ、当該地周辺で温泉を貯留する可能性があるのは、既存地質資料で示される赤ダレ谷溶岩類の火砕岩類卓越部や変質部に相当する箇所であると考えられる。このようなところは、電磁探査では低比抵抗値を示し、既設源泉の井戸柱状図との対比でも確認していることから、地下深部で低比抵抗値を示すような箇所を有する地点が、温泉開発成功の可能性が高い地点であると判断した。

具体的には、既設源泉近傍 M-2 測点の比抵抗分布に類する M-9 測点付近が温泉掘削の候補地としては適していると判断するが、実際に掘削工事を行うにあたり、仮設および搬入条件を満足し、かつ施工用地が確保できるということもふまえ、既設入浴施設付近（下段駐車場）が適地であると考え（図 6.1）。

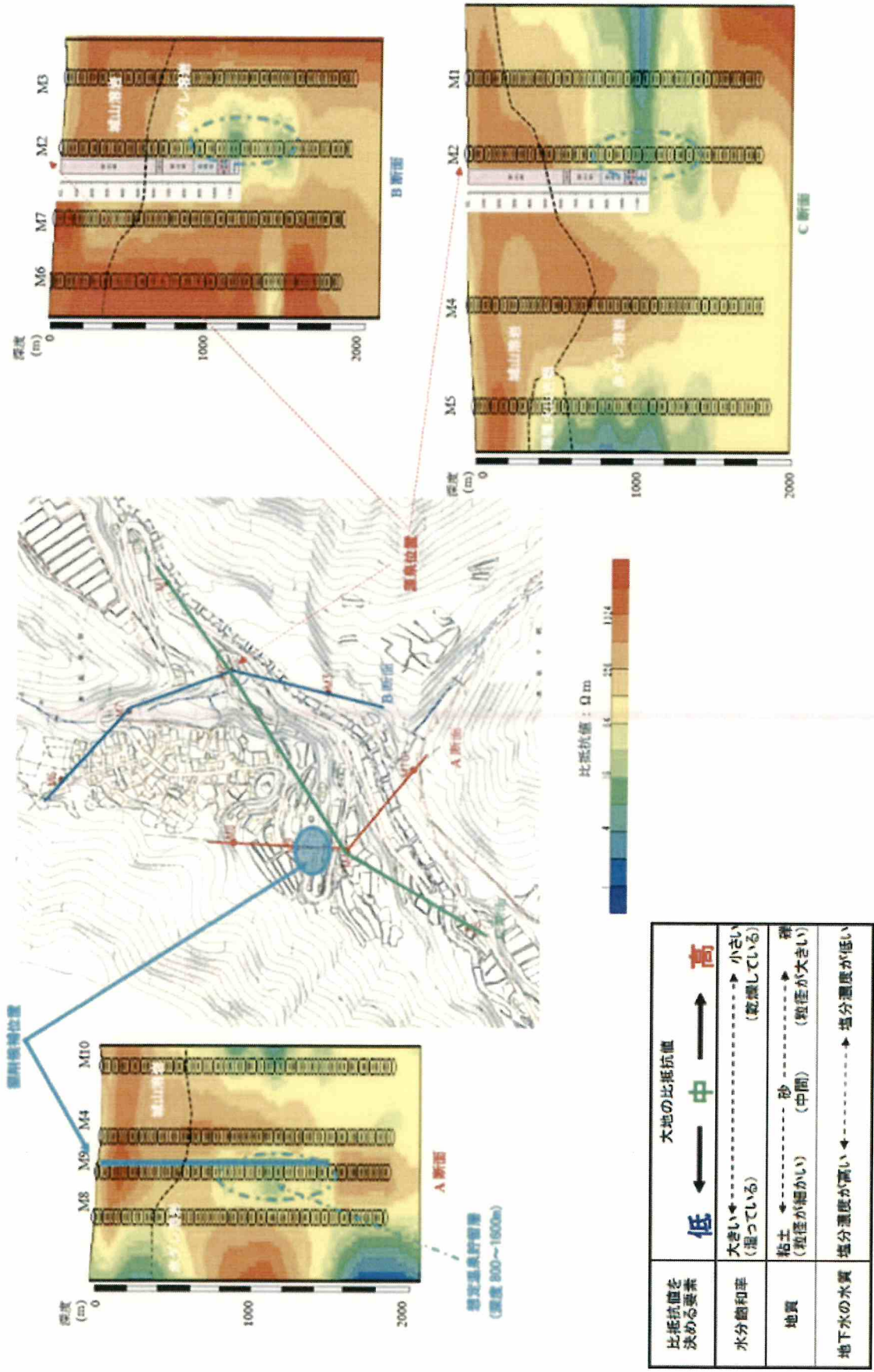


図 6.1 新規掘削候補地点提案図

(2)温泉掘削仕様の提案

温泉貯留層となっているものとみられる破碎帯（低比抵抗値帯）を捉える可能性を高め、かつ湯温を確保するために、掘削深度は1500m程度必要であると考えます。また、既設源泉井戸は、管径が小さく埋没がみられ、改修工事も困難であったことをふまえ、極力管径を大きくすることを提案する。

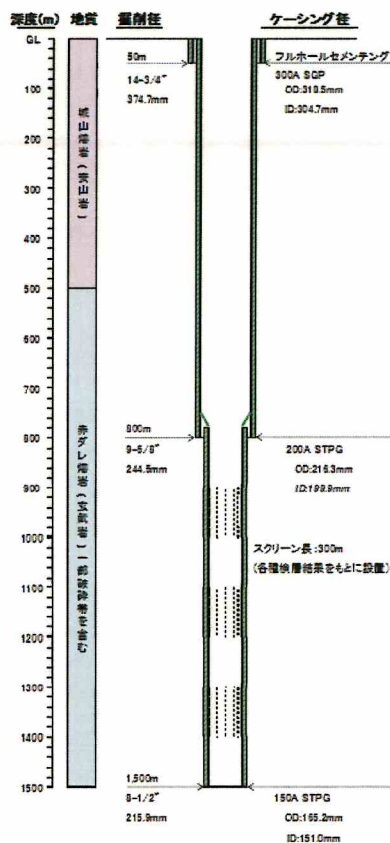
掘削は、温泉掘削で一般的に用いられるロータリー工法を提案し、仕様としては2案を示す。

【新設案1】

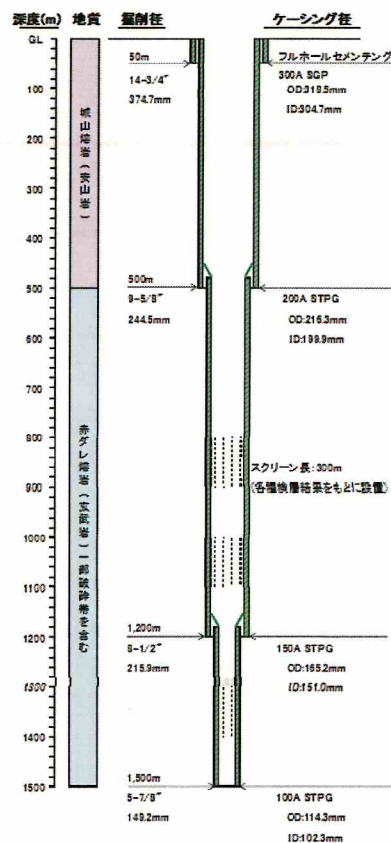
取水を想定する地下800m以深を、同一口径（200A）で仕上げる。

【新設案2】

既設源泉設置深度（1200m）までは200A仕上げで掘削し、状況確認後に提案深度（1500m）まで150A仕上げで掘削する。



【新設案1】



【新設案2】