

## 特 別 講 演

地表の自然ガンマ線による  
温泉開発位置の探査法について

農業土木試験場

木 村 重 彦

A Method for Prospecting Thermal Water Using Surface  
Distribution of Gamma-rays Coming from Various Nuclides

Shigehiko KIMURA

National Research Institute of Agricultural Engineering

〔要 旨〕

地熱に基づく温水や蒸気が深層から地表や地表近くに到達していたり、それらの地下状態が数多くの試掘等で理解できたような、温泉開発の容易な条件における温泉開発は限界に近づいた。今後はこのような温徴が認めにくく、温泉開発がより困難な条件における温泉開発が主体になると思われる。

このより困難な条件における温泉開発の適地を簡便・迅速に選ぶ1方法として、表層に含む3種の自然放射性核種からの1次ガンマ線量による方法(三核比法と名付けた)を提示し<sup>1)</sup>、若干の野外検討をしたところ、比較的良好な結果を得た。

## 原 理

## 〔基本仮定とそれを妨げる条件〕

わが国で地熱の開発適地は第四紀更新世の火山<sup>2)</sup>、現世で上昇する地層ブロック、新第三紀中新世の緑色凝灰岩、そして同時代以新の石英ひん岩やひん岩<sup>3)</sup>等の周辺とされる。

これらの地域での地熱は次の3つの機構をもつと仮定した。第1に地層運動の単位は鈴木が提案した<sup>4)</sup>1辺が数kmで長さが数十kmという角柱状の地層ブロックであり、地熱の発生やその貯溜量の増加でこのブロックは上昇するとみなした(ただし、ブロックの上昇は一般の地層運動でも起り、両者の区別が必要)。

第2に地熱はこの上昇ブロックの周辺に発生する間隙が垂直方向に深く開いた割れ目部分(以下開孔割れ目という)を上昇するとみなした。開孔割れ目は割れ目系の折れ曲り部、地層が隆起等で引張状態にある弱構造部、杉山が提案した<sup>5)</sup>その状態にある2つの割れ目系の交点等に発生しやすい。

第3に高温な地熱水や地熱蒸気にラドン-222(以下Rnという)は含まないが、地層から移行したRnを濃度数百pCi/1台で含む一般の地下水は地熱に出会う昇温でRnの一部を放出し、この放出Rnのかなりの部分は気体のまま開孔割れ目を上昇して地表に達するとみなした。

よって、地熱開発の適地は前述した地質学的4条件のいずれかを満たし、かつ地熱で上昇する地層ブロックの周辺にある開孔割れ目のうちで、表層のRn濃度が一般の開孔割れ目よりもより高い地点として示される。そこでのさく井深さや現れる地下水位は、温徴が地表や地表近くにある地点でのそれらよりも一般に深くなるが、開孔割れ目のために、採水可能量は予想外に多くなると思われる。

以上の解析を妨げる条件は3つある。第1は一般の開孔れ目の存在である。それは地熱をもつ場合よりRnの上昇量が一般に少ないことで区別できるが、群発地震や活断層運動等で地層が著しく破碎された直後にはRnの上昇量が急増し、この識別を困難にする。第2の妨害条件は一般の開孔割れ目にRnの発生源であるウランやラジウム-226の含有率が高いウラン鉱床や緑色凝灰岩層等が接するときである。第3の妨害条件は一般の開孔割れ目にRnの含有率が高い天然ガス・石油の鉱床が接するときである。鉱床のRn含有率が低くても地表へのガス漏出が適量のときは、ガスが地下水のRnを捕集して割れ目を上昇し、表層のRn量を多くする<sup>6)</sup>。

これら妨害条件は他の測定項目で区別する。各妨害条件は一般に独立して存在しやすいので、逆にこの測定法は割れ目水の開発やウラン・石油・天然ガス等の探鉱、そして地震予知の研究等にも利用できる。

### 〔解析原理〕

測定対象は表層に含む数十の自然放射性核種のうち、ビスマス-214、タリウム-208、カリ-40の3核種からそれぞれ放出される1次ガンマ線の線量(以下にそれぞれをB, T, K, まとめて測定値という)とし、これを3段階に解析する。

第1段階では測定条件が同一地層で同一水分量、地表が水平で植生や人為の影響が無視とみなせる地点を対象に、測定値から直接次の4項目を解析する。

第1の解析項目は1961年にAdams<sup>7)</sup>が提示した表層のウラン、トリウム、カリの含有率の定量とそれに基づく表層地質の解析である。

表層の任意地点で微小体積dVに放射線強度Nのガンマ線源があり、その1次ガンマ線が表層中の距離l<sub>s</sub>、大気中の距離l<sub>a</sub>、全距離lを通過して、有効面積A、計数効率εの検出器に入射する線量dIは一般に

$$dI = N \cdot \epsilon \cdot A \cdot \exp\{-(\mu_s \cdot \rho_s \cdot V_s + \mu_w \cdot \rho_w \cdot V_w)\} l_s + \mu_a \cdot \rho_a \cdot l_a \} dv / (4\pi l^2) \quad (1)$$

ここにμはガンマ線の質量吸収係数、ρは密度、Vは体積存在比、サフィックスのs, w, aはそれぞれ土粒子、水、大気を示す。

(1)式から地表が水平なとき

$$I = \frac{A \cdot \epsilon}{4\pi} \int_0^T \int_{h/\cos\theta}^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_d} \exp\left(-\frac{\mu_a \cdot \rho_a \cdot h}{\cos\theta}\right) \cdot \left[-(\mu_s \cdot \rho_s \cdot V_s + \mu_w \cdot \rho_w \cdot V_w)(1-h/\cos\theta)\right] f[x(\theta, \phi, t), y(\theta, \phi, t)] \cdot \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\phi \cdot dl \cdot dt \quad (2)$$

ここにtは時間、Tは測定時間、θは検出器から求める地点に向かう垂直角、φはその水平角、f(x, y)は検出器からの水平距離X、垂直距離yにおける放射性核種のガンマ線強度、θ<sub>d</sub>はθの最大角である。

(2)式の近似解法はDuvalら<sup>8)</sup>やClarkら<sup>9)</sup>が提示している。

表層の鉱物組成, 密度, 空隙率, 含水率並びに, 検出器の大きさ, 数, 位置が定まると, (2)式は次のように簡略化される。

$$I = C(I_s P + I_a) \quad (3)$$

ここにCは測定上のしゃへい物による影響の補正值, Pは対象核種またはその親核種の地層含有率である。

(3)式のCは実験値で,  $I_s$ と $I_a$ は(2)式で定めることができるので, IにB, T, Kの値を代入すれば, それぞれの親元素であるウラン, トリウム, カリの地層含有率Pが定まる。それらは地層ごとに固有値となる<sup>10)</sup>ので, 3元素の含有量分布を指標として表層地質が解析できる。

この解析の妨害条件は2つある。1つはBとTを与えるそれぞれ不活性気体の親核種Rnとトロン(ラドン-220)の一部が表層の空隙に気体で存在し, その一部が日照, 気温上昇, 気圧減少等で大気中に移り, BやTの値を減少させることである。他の1つは蒸発が陸地起源のためにRn濃度が高い降水がB値を2~3倍に増やすことである<sup>11)</sup>。地表のRnは降水後数時間から翌日までに発散するが, 地下には残る。解析では以上への配慮が必要になる。

第2の解析項目は地層境界の指摘であり, それは各測定値の分布上に急変地点として示される。それが成層構造での境界か間隙が閉じた一般の断層であるかは地形・地質で判定する。

第3の解析項目は貫入岩または断層破碎帯の指摘であり, それは同一とみなせる地層内に, 幅数~数百mで測定値またはTとKが急減する区間として示される。この現象は地層の破碎による各核種の流亡に基づくため, その幅の大小で一般には断層の主副を, その分布状態で断層系の弯曲や断層系の交点を, そして値の減少度合いで破碎の強弱をそれぞれ知ることができる。

第4の解析項目は開孔割れ目の位置とそこからのRn上昇量の指摘である。ウラン系列でRnからビスマス-214に至る各核種の半減期はRnの半減期よりはるかに短い。このため, ビスマス-214の挙動と放射性崩壊数はRnのそれらとはほぼ同じになり, 開孔割れ目をRnが上昇する現象は表層でB値が急増する現象で示される。しかし, 同様の現象は花崗岩等ウラン含有率の著しく高い岩石がウラン含有率の低い地層内に点在するときにも起こる。両者の区分として測定値でKとTの分布が一定または減少のときはRnの上昇, 増加のときはウラン含有率の高い地層の存在となる。

第2段階の解析では第1段階での解析不能地点をB/TとB/Kで解析する。野外測定では第1段階で均一もしくは無視した地形, 表層含水率, 表層密度, 気象(日照・気温・気圧・風速・降水等), 植生, 人為(道路舗装, 施肥, 建物, 石垣, 塀, 橋梁その他の構造物等)の存在や変化が測定値を大幅に乱し, 第1段階の解析を不能にする場合がとくに山地や都市で頻発する。その克服に次の現象に着目した。

B・T・Kの値はそれぞれの親元素ウラン・トリウム・カリの地層含有率にほぼ比例する。そこでわが国の花崗岩と堆積岩でこれら3元素の地域別含有率の平均値<sup>12)</sup>を整理すると, 図1のようにウランとトリウム, ウランとカリの両者共に比例関係が認められた。このため, 各測定値に偽ピークを与えるウラン含有率の高い岩石の存在, 各測定値を大幅に変える地形, 表層地質, 植生, 人為等の影響は, いずれもB/TとB/Kでみると, どの地層でも大幅に消去されてはほぼ近い値に落ち着き, 同じ地層では非常に近い値になる。

また, 各核種の測定ガンマ線エネルギーはそれぞれ1.76, 2.64, 1.42 MeVという近い値にあるために, 表層に含む各核種からの放出ガンマ線が地層粒子や水でしゃへいされる比率も各核種間で近い値になる。よって, 表層含水率, 表層密度, 気象等の変化で測定値が大幅に変わっても, B/TとB/Kは各地層間で近い値となり, 地層ごとには固有値となる。

以上の理由で, 第1段階での解析不能部分が解析可能部分と同じ地層になるか否かは, 両者の

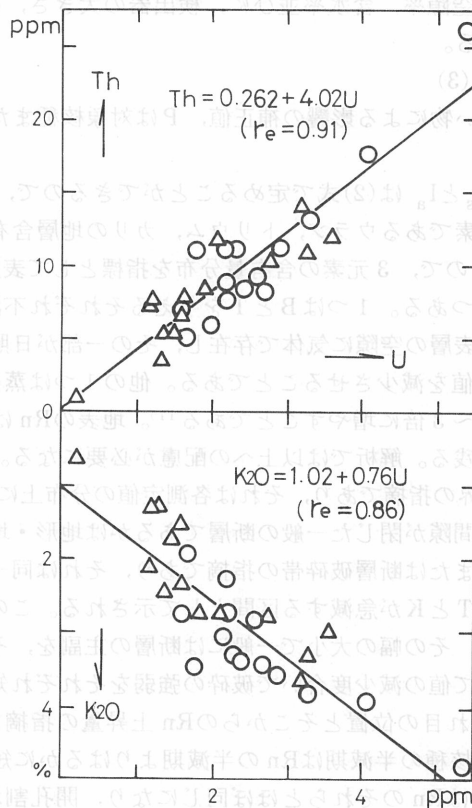


Fig. 1. Correlation of U, Th and  $K_2O$  contents of common rocks in Japan

△: sedimentary rocks ○: granitic

B/TとB/Kが同じになるか否かで定めることができる。また、第1段階で解析不能部分に埋もれた地層の境界地点はB/TまたはB/Kの急変地点として指摘できる。ただし、隣り合う地層のB/TとB/Kの値に差が少ないときは解析できない。貫入岩や断層破砕帯は同一地層内でTとKが減少するために、B/TとB/Kが微急増する範囲として示される。開孔割れ目地点はB/TとB/Kの急増地点として示され、その増加率は割れ目からのRn上昇量に比例するが、この段階で地層境界と区別することはむずかしい。

第3段階の解析では第2段階までに指摘できた諸現象の数値化、とくに断層と開孔割れ目地点の自動選別と後者でのRn上昇の定量である。

この測定法の解析精度は1測定時間が長く、逆に測定距離が短いほど高くなるが、簡便・迅速な測定には1測定時間が短く、その距離を長目にするのが望まれる。この矛盾の対処に短時間測定でも母集団の測定誤差を少なくできる時系列ミルクング法、すなわちB/T、B/K、K/Tの値をそれ以前のn個の平均値で除した変動百分率Fで表わす方法を用いた。分母では各核種ごとにn地点での測定値の合計を用いたので、各核種含有率が部分的に変動しても、母集団で大幅に消去する利点加わる。

この方法での妨害条件は任意点でT又はKの片方のみが急減し、偽の開孔割れ目を示すことである。その存在をB/TとB/KのF値間に差が生じることで見出だし、K/Tも使う修正法で対処した<sup>1)</sup>。既知の単層内でのF値の時系列分布から層内での各核種含有率の変動範囲が定まる。

そしてこの変動範囲をこえたF値によって地層境界が指摘される。この指摘はB/T, B/K, K/TいずれのF値でも良いので、地層区分はかなり詳細にできる。

各F値は図2に示すように進行方向 $F_f$ とその逆方向 $F_b$ の両者を求める。野外でB/TまたはB/Kの分布が図3上段に例示の3条件をもつとき、 $F_f$ と $F_b$ はそれぞれ中・下段に示すように、ピーク出現後のテイリングで上段とは大幅な差を生じる。このため、 $F_f$ または $F_b$ の片方のみで上段の状態は理解できない。しかし両者を用いると、地層境目の位置は $F_f$ 、 $F_b$ いずれか片方の急増地点として、開孔割れ目の位置は両者の急増地点として、それぞれを明瞭に区分して指摘できる。そして後者でのRn上昇量は $F_f$ 又は $F_b$ のいずれか低い方の値R(これを割れ目Rn指標と名付ける)で与えられ、割れ目の幅が定まると図9から表層気体中のRn濃度が定量できる。

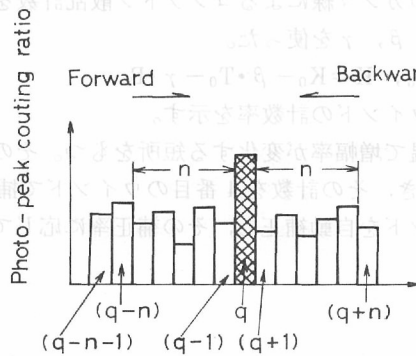


Fig. 2 How to calculate increasing ratio

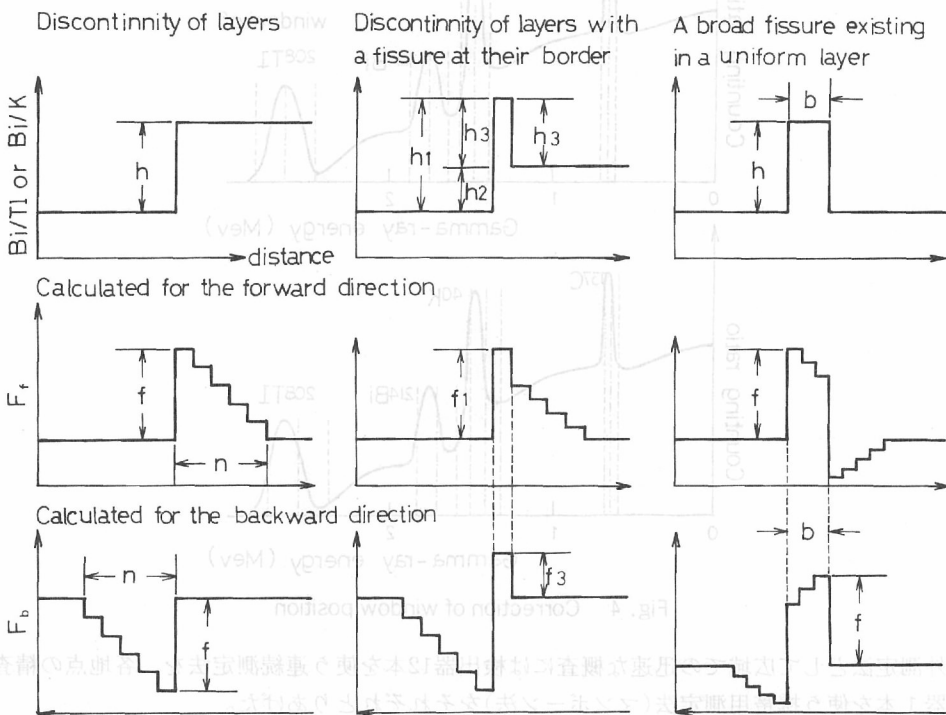


Fig. 3 Typical patterns of gamma-ray intensity expected around discontinuity or fissure

以上の解析で得た表層分布，間隙の閉じた断層の分布，開孔割れ目の分布とそこからのRn上昇量等を指標として，対象地域の地層運動や地熱の存在を想定する。

### 方法

測定は1961年にAdamsが示した方法<sup>7)</sup>に準じた。測定装置は検出器に直径と高さが約13cmの円筒状のヨウ化ナトリウム結晶を用いた4ウインドのシンチレーションカウンターである。検出器の分解能は3核種の光電ピークを明瞭に分離する7%以下を選び，平均5.6%を得た。

各核種の光電ピークを示すエネルギー範囲には図4のようにウインドを設けた。ウインドの計数に含むより高いエネルギーのガンマ線によるコンプトン散乱計数を除去するには，各核種の標準線源を用いた実験で得た $\alpha$ ， $\beta$ ， $\gamma$ を使った。

$$T = T_0, \quad B = B_0 - \alpha \cdot T_0, \quad K = K_0 - \beta \cdot T_0 - \gamma \cdot B$$

ここにサフィックスのゼロはウインドの計数率を示す。

この測定器は使用時間や気温で増幅率が変化する短所をもつ。その補正は検出器の近くに約1 $\mu$ Ciのセシウム-137線源を置き，その計数を4番目のウインドで捕え，図4のようにその計数が常に最高となる位置にウインドを自動補正し，その補正率に応じて他の3つのウインドの位置を修正させた<sup>1)</sup>。

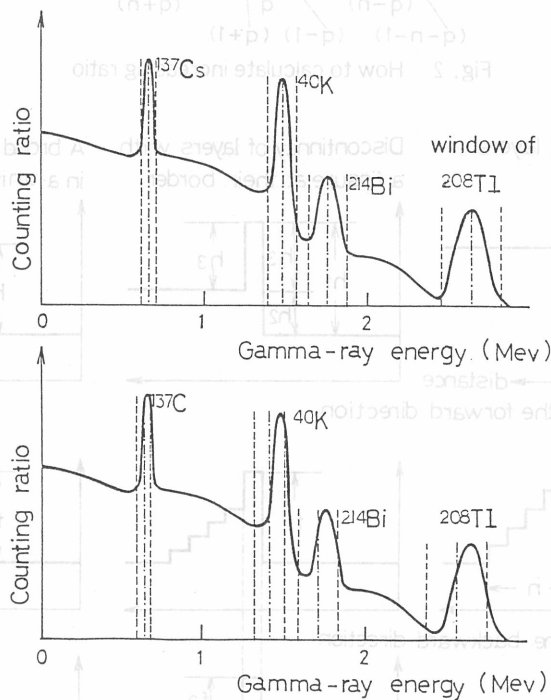


Fig. 4 Correction of window position

野外測定法として広域での迅速な概査には検出器12本を使う連続測定法を，各地点の精査には検出器1本を使う携帯用測定法(マンボーン法)をそれぞれとりあげた。

連続測定法では，表層地質の解析に広く用いられている，測定器をヘリコプターに積み，高度100mを時速100km/hで動き，約1秒単位で測定するエアボーン法と，測定器を自動車に積み，

地上高約65cmを時速数km/hで動き、数十秒単位に測定するカーボン法とをとりあげた。

検出器の地上高に於じた表層のビスマス-214からのガンマ線入射範囲を(2)式で差分計算した。計算条件は地表が水平で、地層の $\rho_s$ が2.65,  $V_s$ が60%,  $V_w$ が20%,  $\mu_s$ が0.0480cm<sup>2</sup>/g,  $\mu_w$ が0.0528cm<sup>2</sup>/g,  $\mu_a \cdot \rho_a$ が0.00571/mとした。

ガンマ線の入射範囲を中心点からの深さと距離で見ると、図5のように最大深さは約30cm, 最大半径はマンボーンが約1.5m, カーボーンが約13m, エアボーンが約400mになった。測定で妨害条件の配慮に重要な中心点からの距離に対する計数積分値で見ると、50%になる半径はカーボーンが1.2m, エアボーンが100mとなり、95%になる半径はカーボーンが7m, エアボーンが300mになった。

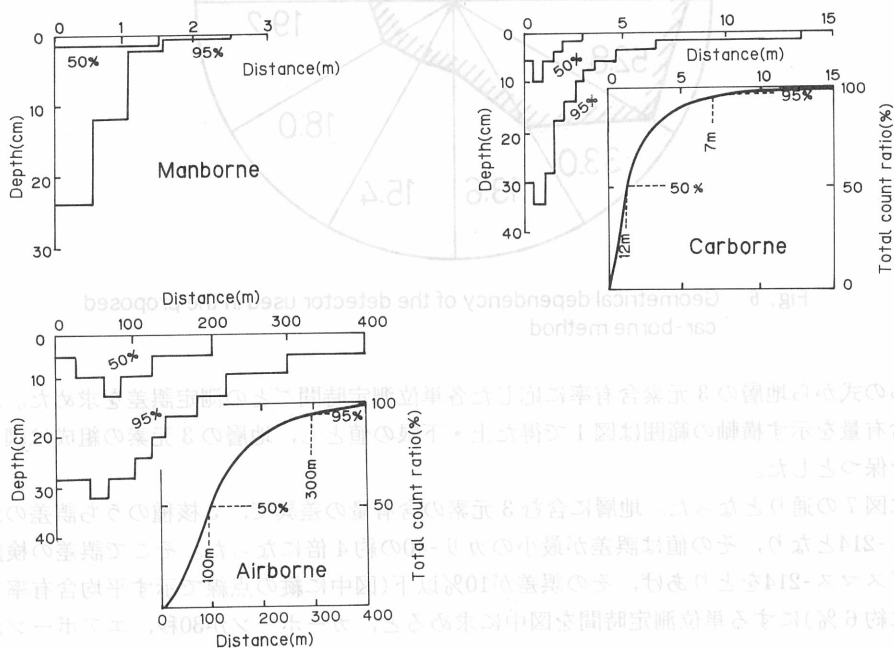


Fig. 5 Calculated results of gamma-ray incident limits of the earth in case of manborne, carborne and airborne

前述の表層条件に検出器12本を用いたときの(3)式のパラメータを(2)式から定めた。カーボーンでは、解析を妨げる道路舗装からの計数が少なくなるよう、しゃへいで測定効率に図6のような指向性をもたせ、このときのC値を標準線源を使う実験で求めた。その結果、

$$I_B' = C (4.06P_u' + 3.2)$$

$$I_B = 0.29 (13.6P_u + 3.2) = 3.9P_u + 0.9$$

$$I_T = 3.35 \times 0.76P_T = 3.4P_T$$

$$I_K = 0.26 \times 0.76P_K = 45P_K$$

ここにIのダッシュはエアボーン, ダッシュなしはカーボーン, サフィックスのB, T, Kはそれぞれビスマス-214, タリウム-208, カリ-40を示す。また $P_w$ ,  $P_T$ ,  $P_K$ はそれぞれ地層のウラン含有率(ppm), トリウム含有率(ppm), カリ含有率(%)を示す。大気中のRnは濃度400pCi/m<sup>3</sup>で、半径1 kmから入射するとした。タリウム-208の $\mu_s$ は0.0390cm<sup>2</sup>/g,  $\mu_w$ は0.0424cm<sup>2</sup>/g,  $\mu_a \cdot \rho_a$ は0.0461/m, カリ-40の $\mu_s$ は0.0528cm<sup>2</sup>/g,  $\mu_w$ は0.0587cm<sup>2</sup>/g,  $\mu_a \cdot \rho_a$ は0.0622/mとした。

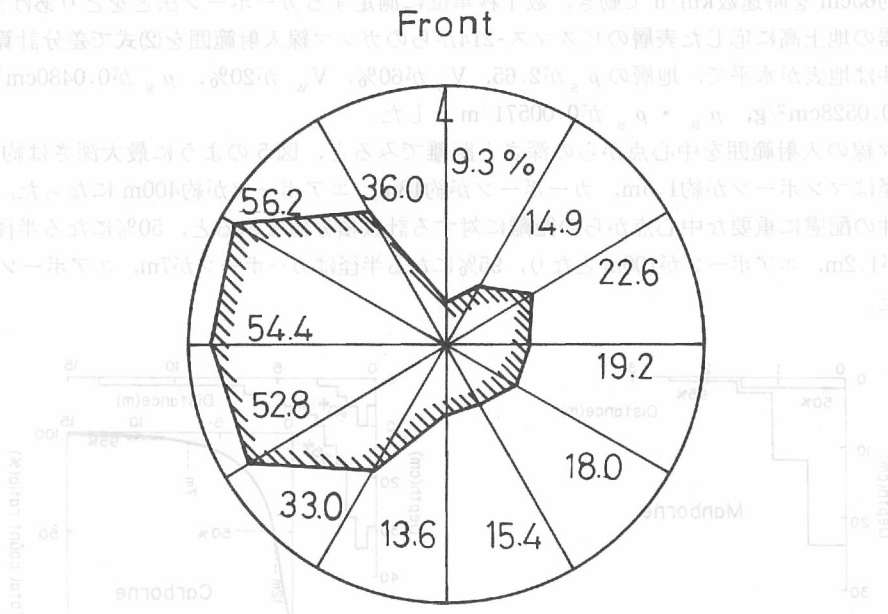


Fig. 6 Geometrical dependency of the detector used in the proposed car-borne method

これらの式から地層の3元素含有率に応じた各単位測定時間ごとの測定誤差を求めた。地層の各元素含有量を示す横軸の範囲は図1で得た上・下限の値とし、地層の3元素の組成は図1の比例関係を保つとした。

結果は図7の通りとなった。地層に含む3元素の含有量の差異で、3核種のうち誤差の最大はビスマス-214となり、その値は誤差が最小のカリ-40の約4倍になった。そこで誤差の検討に安全側のビスマス-214をとりあげ、その誤差が10%以下(図中に縦の点線で示す平均含有率をもつ地層では約6%)にする単位測定時間を図中に求めると、カーボンが30秒、エアボーンが40秒になった。

次に開孔割れ目からのRn上昇に対する検出能を求めた。Rnの上昇状態は表層の容気率Vaが20%の中に1000pCi/lの濃度が1~3mの幅で直線状に分布すると仮定した。

検出器を各位置で静止させたときの測定値の分布は図8のようになる。エアボーンでは割れ目を上昇するRnの影響が200m以上にも分散し、計数のピークは影響がない地点の僅か1~3%増という検出が困難な状態になった。しかし、カーボンでは影響範囲が割れ目外の僅か1.5m以内に限られ、かつ計数のピークは実に400~800%増という検出の容易さを示した。

検出器を種々の速度で移動させたときの計数ピークの検出状態は図9のようになる。エアボーンで単位測定時間1秒、通常移動速度100km/hで測定すると、ピークの計数増は検出が可能な1%以下になる。事実、多摩川沿いの実測でも測定速度の大小には関係なく、一般条件の計数変動は大きく、断層上での計数増は認められなかった。よって、以降の研究にエアボーンは割愛した。一方、カーボンでは単位測定時間30秒、移動速度4km/hで測定すると、ピークは40~120%になった。割れ目でのRn上昇に対する検出限界を、前述した一般の地層での最大測定誤差の2倍である20%にすると、表層気体で検出できるRnの濃度増は、上述の計算結果から幅1mで500pCi/l、幅3mで約170pCi/lになる。



マンボーンでは検出器の数がカーボンの1/12のため、上述の計算結果から測定時間は6分となるが、検出器の位置がカーボンより地表近くになるので5分に定めた。

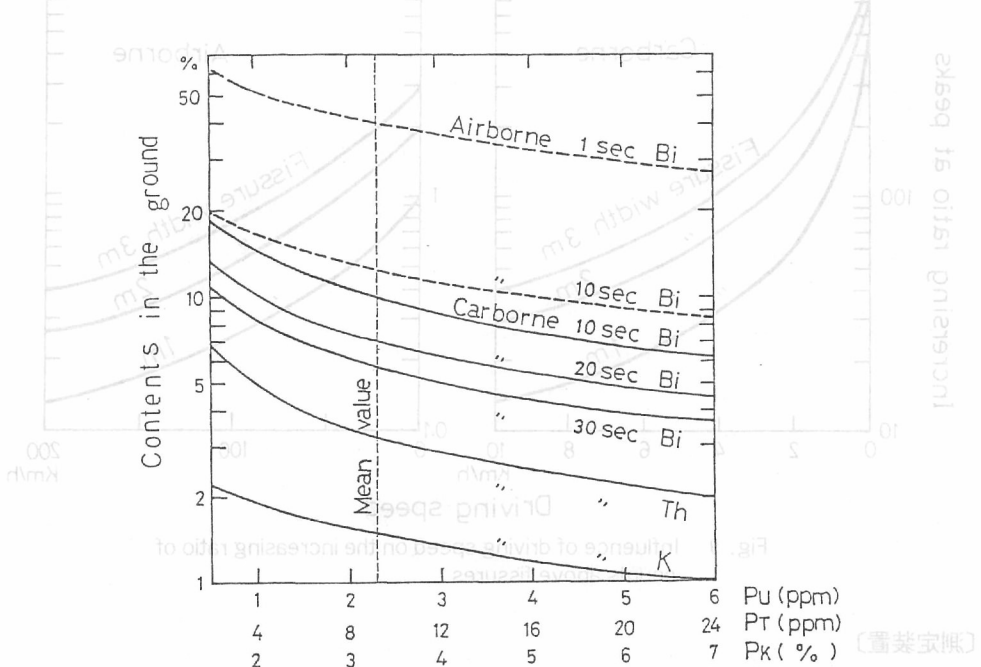


Fig. 7 Counting errors for different geological conditions at different unit measurement periods  
 abscissa : contents in the ground

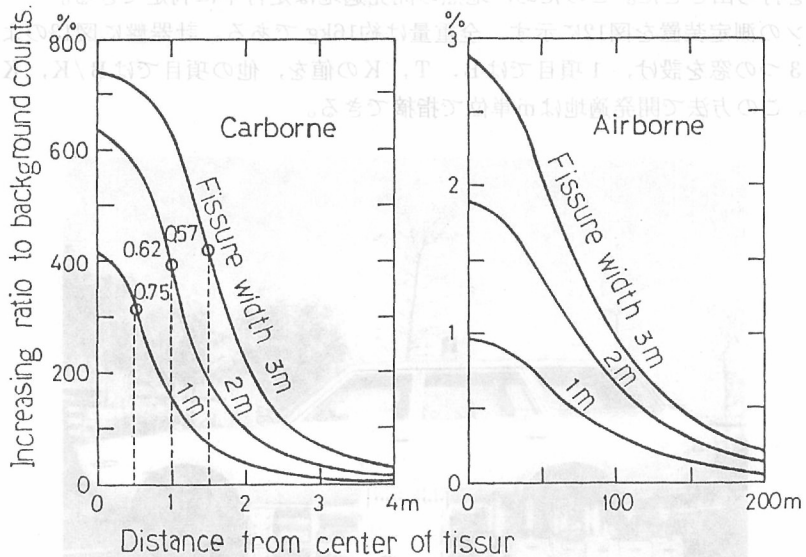


Fig. 8 Distribution of the counting ratio of  $^{214}\text{Bi}$  from  $^{222}\text{Rn}$  through fissures  
 spindle : increasing ratio at peaks

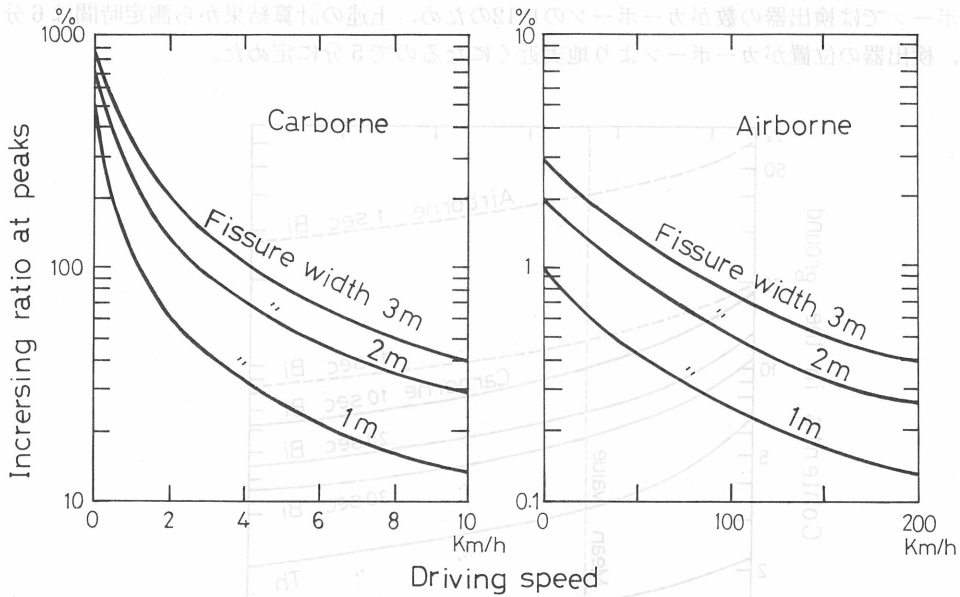


Fig. 9 Influence of driving speed on the increasing ratio of counts above fissures

〔測定装置〕

カーボンの測定装置を図10に示す。全重量は約250kgになった。任意に指定できる単位時間（一般には30秒とした）の測定をした直後に図11の記録がタイプアウト（同時にレコードアウトもできる）される。nは5とした。F値が任意に設定したしきい値をこえると警報が鳴る。鳴り方は $F_f$ がブザー2回、 $F_b$ がブザー1回、両者同時がブザー3回とし、記録紙上には図11の末尾欄に示す\$印を打ち出させた。このため、地熱の開発適地は走行中に判定できる。

マンボンの測定装置を図12に示す。全重量は約16kgである。計器盤に図13のような2項目を表示する3つの窓を設け、1項目ではB、T、Kの値を、他の項目ではB/K、K/T、B/Tの値を示す。この方法で開発適地はm単位で指摘できる。



Fig. 10 Car-borne system

	K	B	T	B/K	K/T	B/T	F <sub>2</sub>		F <sub>3</sub>		F <sub>1</sub>	
							bw	fw	bw	fw	bw	fw
24	916.7	749.7	550.0	0.817	1.666	1.363	2.900-22.70	13.10	6.400	1.000	21.40	
	995.0	776.1	614.0	0.779	1.620	1.264	29.20-25.00	19.30	9.900	20.50	24.10	
	902.6	773.2	558.0	0.856	1.617	1.385	3.900-9.500	4.900	11.20	4.100	9.600	
26	1032.	761.2	558.0	0.737	1.849	1.364	4.500-12.10	26.00	4.400	5.600	12.50	
	995.5	760.7	540.0	0.764	1.843	1.408	13.10-6.100	10.10	7.100	14.60	6.600	
	893.5	1097.	484.0	1.228	1.846	2.268	19.40	55.60	4.800	7.500	10.00	60.00
28	1115.	820.8	566.0	0.735	1.970	1.450	19.00-15.10	11.20	12.60	18.90	16.80	
	972.5	762.5	508.0	0.784	1.914	1.501	12.20-8.000	14.30	4.900	12.40	8.500	
	982.7	804.7	460.0	0.819	2.099	1.719	19.20-2.400	4.300	11.30	17.50	2.600	
30	875.9	607.0	526.0	0.692	1.665	1.154	12.40-32.90	2.800	13.90	12.20	30.20	
	715.0	826.0	418.0	1.155	1.710	1.976	48.40	26.80	1.500	9.800	47.60	23.30
	930.0	636.5	436.0	0.684	2.133	1.460	9.500-16.50	3.700	13.80	9.700	18.80	
32	898.0	483.3	512.0	0.538	1.754	0.944	2.800-41.40	2.600	7.600	2.900	38.90	
	778.5	498.2	522.0	0.640	1.491	0.954	12.60-36.20	20.70	20.10	15.40	33.00	
	1013.	532.3	548.0	0.525	1.849	0.971	5.700-27.70	6.500	6.300	5.500	29.50	
34	1011.	518.3	646.0	0.512	1.566	0.802	98.90-37.40	1.600	12.00	97.40	34.40	
	1005.	458.2	522.0	0.455	1.926	0.877	29.30-21.10	24.70	10.80	35.60	23.20	
	953.1	472.4	554.0	0.495	1.720	0.852	3.400-6.500	2.900	0.500	3.500	6.400	
36	1070.	584.0	588.0	0.545	1.820	0.993	10.50	4.800	15.70	6.800	6.300	5.100
	1195.	513.7	576.0	0.429	2.076	0.891	8.000-15.40	1.900	17.40	8.300	18.10	
	1518.	564.7	648.0	0.371	2.342	0.871	7.700-23.70	21.20	29.10	10.60	30.30	

Fig. 11 An example of typed-out results of measurement  
 F<sub>1</sub> = dif. of Bi/Tl, F<sub>2</sub> = dif. of Bi/K  
 F<sub>3</sub> = dif. of K/Tl, bw is backward, fw is forward

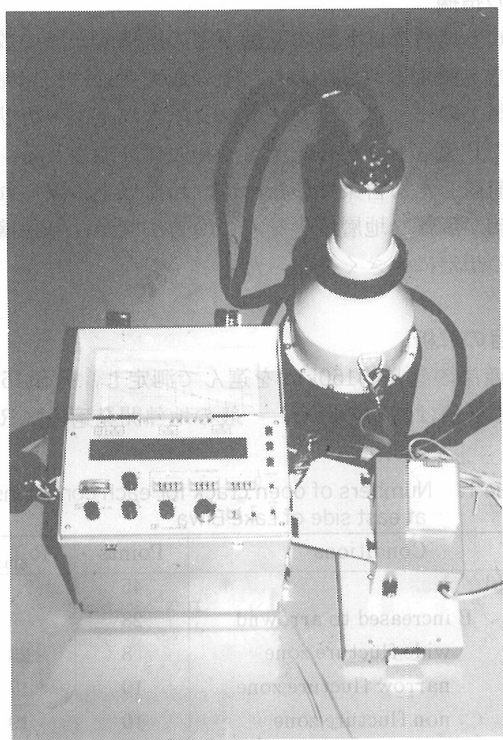


Fig. 12 Man-borne system

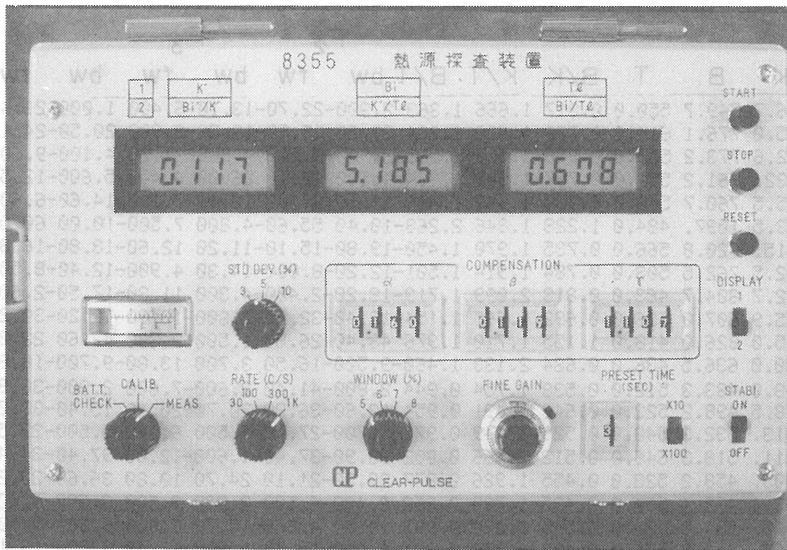


Fig. 13 Panel windows of man-borne system

## 野外検討

### 1. F値による地層境界の指摘

鉱物組成が均一とみなせる地層ではF値の変動がどの核種も一般に数%内に納まった。しかし2～3核種が部分的に急増・減する地点があり、その最大変動は約14%になった。

地層の3元素含有率は図1のようにウラン・トリウムとウラン・カリの比例線を中心に分散するので、既知の地層境界でF値もゼロから数十%の範囲に分散される。そのうち、F値で地層境界が指摘できる範囲は、前述した妨害条件のために、15%以上に限られる。しかし、表層が風化や植生の被覆等でその指摘が困難な地層境界を、この方法でかなり指摘できた。そのことは地層運動を配慮した地熱状態の想定に大きく役立った。

### 2. R値による開孔割れ目の解析

一般地域として琵琶湖西岸の延長約150kmを選んで測定し、R値15%以上の地点は表1のように45ヵ所を得た。最大のR値は23%のため、一般の地熱開発適地はRが25%以上のものについて選べることになる。

Table 1. Numbers of open crack for each conditions at east side of Lake Biwa

Conditions	Points	R <sub>max</sub>
Total	45	
B increased to arrownd	28	
wide fluncture zone	8	23
narrow fluncture zone	10	17
non fluncture zone	10	19
B nearly to arrownd	17	
wide fluncture zone	3	20
narrow fluncture zone	14	18

3. 既開発の温泉等での検証

マグマ近くの湧出とされる秋田県玉川温泉での測定例を図14に示す。熱水が湧出するC点でTは一般条件より2桁多く、岩石のB/T値からみるとBは著しく少ない。それは熱水からの気化がトロンよりRnが高いことを示すと思われる。C点より約100m離れたB点でBとTは著しく多い。それは熱水がB点で一時貯溜されるためと思われる。B>Tになったことは貯溜部から表層までの気体の移動時間を反映したと思われる。A点でBは少ないが、B/Tは12と著しく高い。それは深層からの割れ目がA点にあることを示すと思われる。以上は揭示原理の妥当性を裏付けたといえよう。

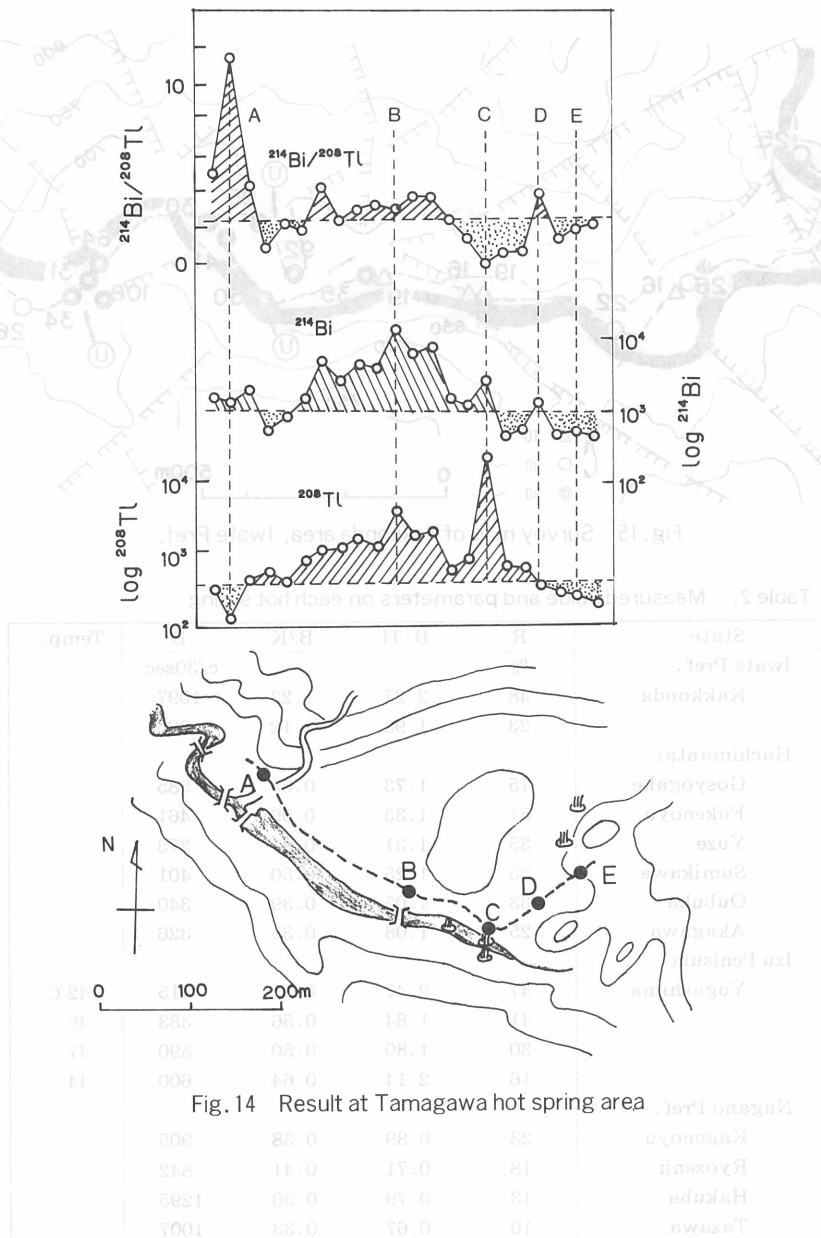


Fig. 14 Result at Tamagawa hot spring area

温泉ガスの地表噴出が著しい岩手県葛根田の地熱開発地域での測定例を図15に示す。測定距離僅か3 km 内に噴出所は数多く、噴出地点でBの増加は十分に大きいため、単位測定時間を1/3の10秒としてRnの上昇状態を詳細に求めた。図中の数字はR値で、15%以上の地点を示す。各地点でTとKは僅かに減少したが、R値増の主原因はBの増加に起因した。R値が高い地点はいずれも地熱発電所の調査が示す断層上となった。図中にPで示す発電所による地熱開発の予定地並びに既開発の温泉でR値は20~30台になり、図中にUで示す地熱採取地点のR値はより大きな最大の50~108%になった。単位時間30秒の測定結果は表2の通りで、後述する温泉の測定値に較べ、B/T、B/K、Bいずれもがかなり高い。しかし、TとKの溶脱は少ないので、R値はそれ程高くない。このように、R値はこの地域の地熱の上昇状態をかなり良く反映した。

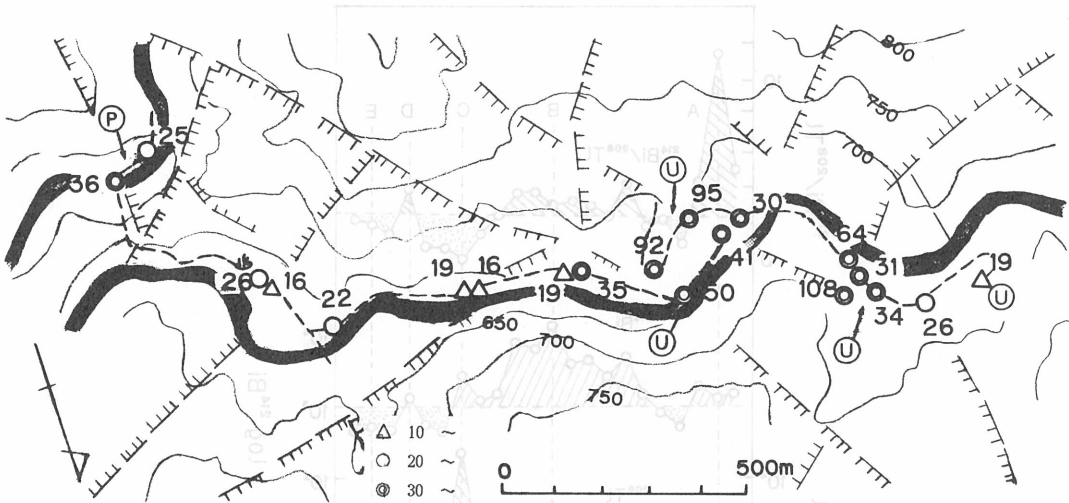


Fig. 15 Survey map of Kakkonda area, Iwate Pref.

Table 2. Measured value and parameters on each hot spring

State	R	B/Tl	B/K	B	Temp.
Iwate Pref.	%			c/30sec	
Kakkonda	48	2.27	1.23	1097	
	23	1.98	1.12	826	
Hachimantai					
Gosyogake	75	1.73	0.65	585	
Fukenoyu	51	1.33	0.99	461	
Yuze	35	1.31	0.41	373	
Sumikawa	35	1.25	0.50	401	
Oubuka	33	1.05	0.39	340	
Akagawa	25	1.08	0.35	326	
Izu Peninsula					
Yugashima	47	2.47	0.81	415	42°C
	41	1.84	0.56	383	46
	30	1.80	0.50	590	47
	16	2.14	0.64	600	44
Nagano Pref.					
Kagenoyu	23	0.89	0.38	905	
Ryozenji	18	0.71	0.41	842	
Hakuba	13	0.79	0.30	1295	
Tazawa	10	0.67	0.33	1007	

著名温泉が集中する八幡平の測定例を表2に示す。R値はすべて25%以上となり、最高の後生掛で75%、次の蒸の湯で51%、他は30%台となり、それらは温泉の湧出規模を良く反映した。これら温泉での測定値は図16に例示のようになり、TとKの溶脱は葛根田地域より著しい。それは地層からの各核種の溶脱は蒸気より熱水の方が高いことを示す。Bは明瞭に増加した。このようにここでもR値は地熱の上昇状態を良く反映し、温泉開発適地をR値で指摘する可能性を示した。

伊豆湯ヶ島温泉地域での測定例を図17に示す。温泉が数多い地域では高いR値の開孔割れ目が数多く分布し、高いR値の分布地域は温泉開発に適することを示した。この立場で図17をみると、この地域の西部や北部に温泉開発の可能性が伺える。

長野県東部での温泉測定例を表2に示す。これまでに較べてR値は低い。それは基盤や割れ目に接触する地層のウラン含有率が低いためと思われる。

山形県東根温泉では約5年前の測定で、異常に高いR値を示したが、再測ではR値が23%に低下した。それは揚湯量の急増で、Rnの上昇力が減少したためと思われる。宮城県の大首地熱発電地域でも過剰揚湯のためか、R値の増加は全く認められなかった。よってR値の経時変化から揚湯量が管理できることになる。

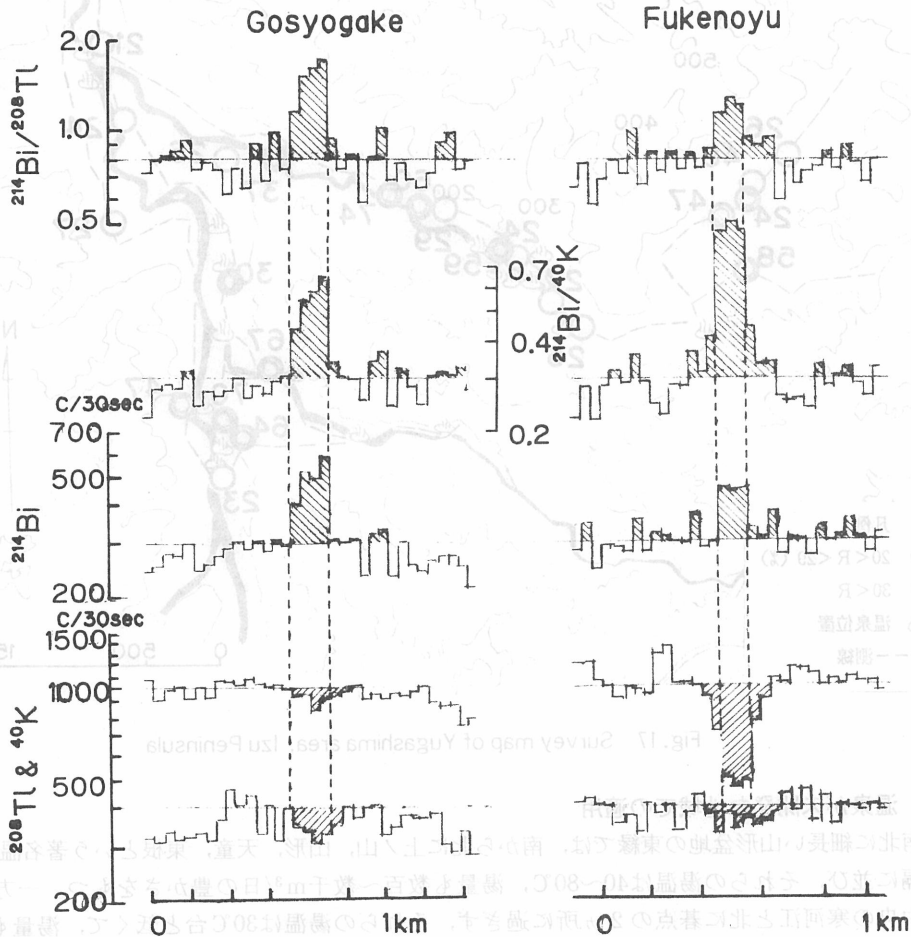


Fig. 16 Distribution of each parameter on hot springs area at Hachimantai, Akita Pref.

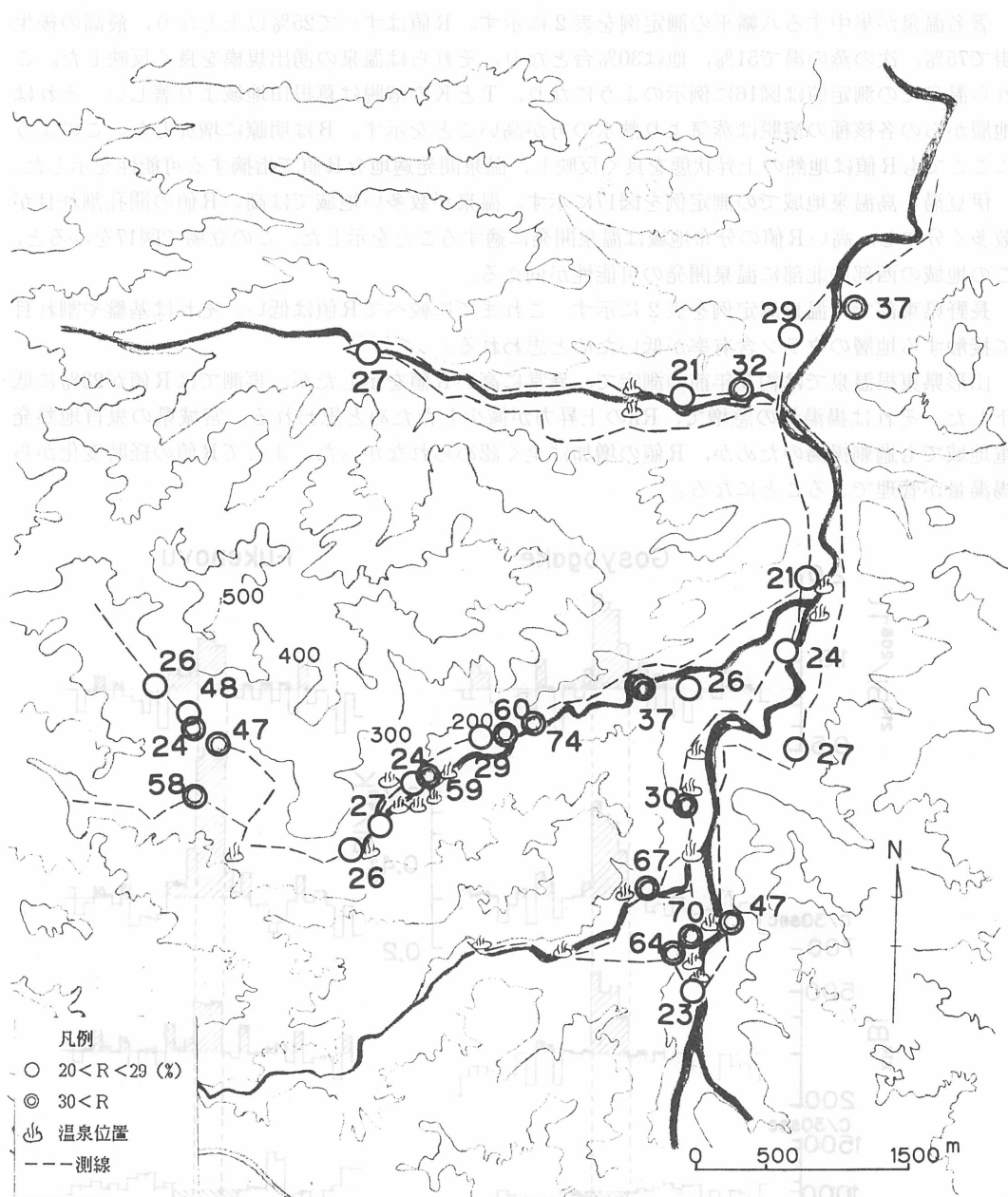


Fig. 17 Survey map of Yugashima area, Izu Peninsula

#### 4. 温泉が未開発な地域での適用

南北に細長い山形盆地の東縁では、南から北に上ノ山、山形、天童、東根という著名温泉が数km間隔に並び、それらの湯温は40~80℃、湯量も数百~数千m<sup>3</sup>/日の豊かさをもつ。一方の西縁では中央の寒河江と北に基点の2ヵ所に過ぎず、それらの湯温は30℃台と低くて、湯量も数十m<sup>3</sup>/日と東縁の温泉群より1~2桁少ない。しかし第四紀の構造運動をみると、盆地の形成は南部から北部に移った<sup>13)</sup>。この最近に活動した北部は両側山地の上昇が似ているので、東縁の東根温



泉に近い湯温や湯量をもつ温泉を西縁に開発する可能性があるかと想定した。

調査結果は図18の通りである。細い線で示す測線で得た開孔割れ目の位置はそのR値に応じて図中の3ランクの記号に分けて書き、かつR値をその傍に数値で示した。それらから想定した割れ目系を太い長点線で示した。図中の西縁を南北に走る割れ目系は既知の断層に一致する。東縁の山沿いに断層が指摘されているが、圧縮場のためか開孔割れ目は点在し、割れ目系の想定を困難にした。

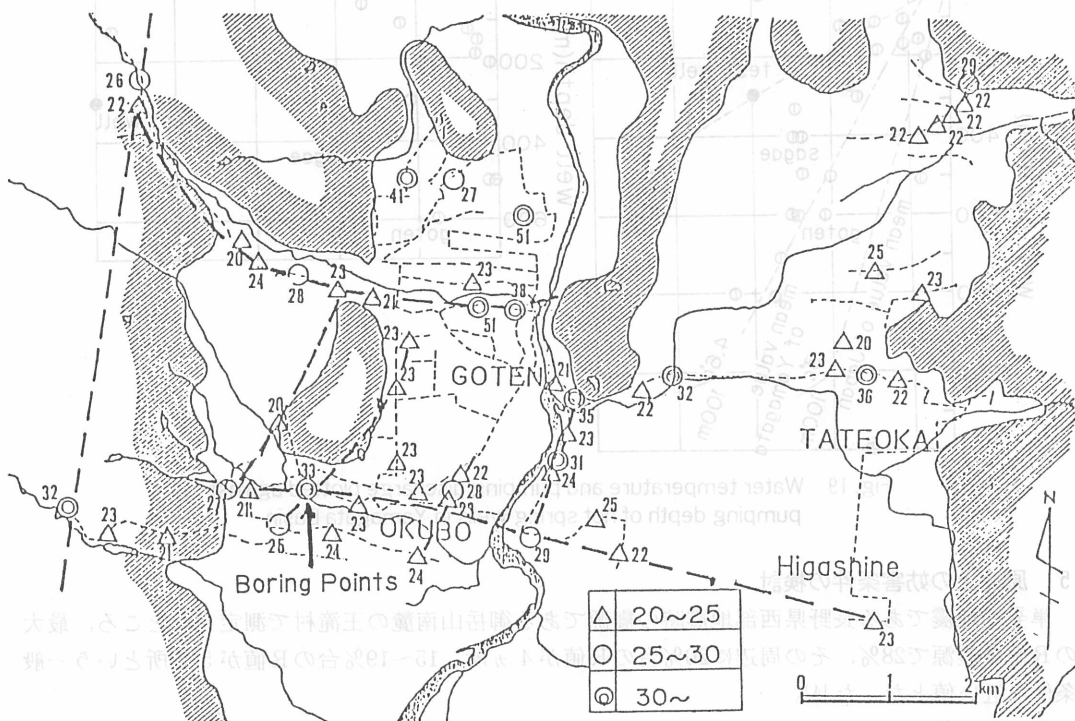


Fig. 18 Survey map of Murayama area, Yamagata Pref.

R値の最大は基点温泉の北部と北西部の51%地点である。また後述する試掘点のR値33%より大きなR値の開孔割れ目は4ヵ所ある。しかし、いずれもそれらの周辺にある測線には開孔割れ目を見出せなかった。それは東縁の断層と同様に、これらの地点での地層は圧縮場にあり、地熱の存在を示す地層ブロックの上昇は認めにくいと判断した。

東縁の最南端に△印の23%地点で示された東根温泉を起点に、西に走る割れ目系をみると、測線がそれを横切る地点のほとんどは開孔割れ目となり、またその割れ目系の近くに数多くの開孔割れ目地点が示された。それはこの割れ目系に接する地層ブロックが地熱で上昇していると想定される。そこでこの割れ目系のうちR値が最大の33%を示した地点を地熱開発の適地を選んだ。その地点は地表温微が全く認められない水田地域であった。

携帯用装置の精査で得た100m離れた2つの開孔割れ目地点にそれぞれ310mの井戸を掘ったところ、いずれも自然水位は35mと自噴しなかったが、湯温は約60℃、揚水可能量は5mの水位低下で1500m<sup>3</sup>/日となった。井戸深さに対する湯温の関係を山形盆地とその周辺の温泉井のそれらと比較すると、図19の左のようにこの2井は比較的浅層で高温を得ている。100m当りの温度上昇はわが国平均3℃の約6倍である17℃になった。深さを配慮した利用湯量は図19の右のよ

うにこの地域の有数な温泉となった。透水係数は採湯層である砂層で $10^{-3} \sim 10^{-4}$  cm/秒に見込め  
たが、実測値は $10^{-2}$  cm/秒となり、割れ目を裏付けた。

以上から、提示の方法は少なくともこの地域の地熱開発に満足な成果を与えた。

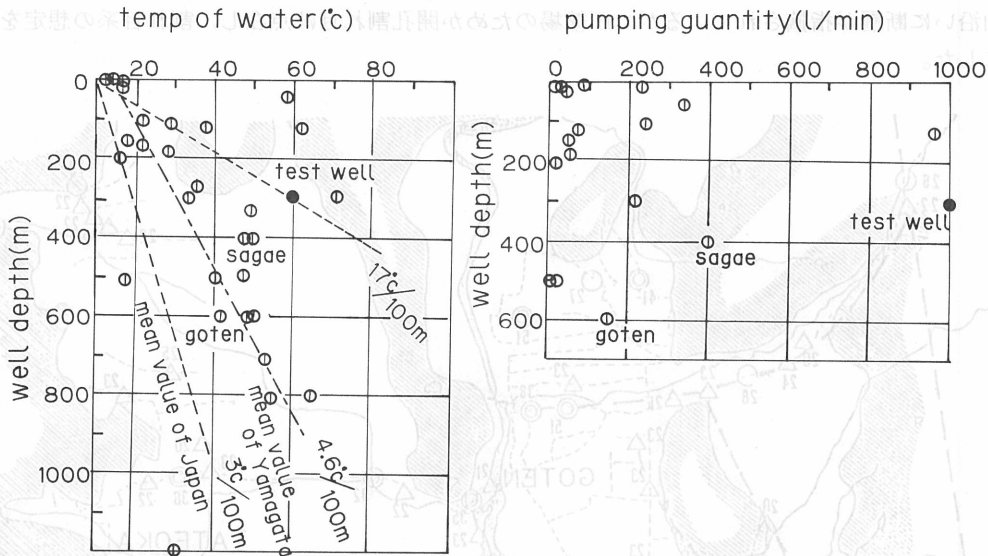


Fig. 19 Water temperature and pumping discharge plotted against pumping depth of hot spring wells in Yamagata Basin

5. 原理上の妨害条件の検討

単発的地震である長野県西部地震時の震源である御岳山南麓の王滝村で測定したところ、最大のR値は震源で28%、その周辺に20%台のR値が4ヵ所、15~19%台のR値が5ヵ所という一般条件に近い値となった<sup>14)</sup>。

しかし、数ヵ月にわたる群発地震後の割れ目状態を福島県喜多方市の西にある山都町で測定してみると<sup>15)</sup>、図20に示すように数多くの開孔割れ目でR値は一般より1桁も多い300%になった。その後約5年の間に多くの割れ目でR値は半減期3.3年の比率で減少し、地震後約14年で一般の開孔割れ目のR値になる。このようにR値は、地震時やその後の地震の破碎状態をよく反映し、今後の地震予知研究への有効性を示した。

開孔割れ目の浅層にウラン鉱が存在する影響を、岐阜県土岐市にある動力炉・核燃料開発事業団の敷地内で測定したところ、地表踏査や他の測定法で検出が困難であった断層を、単位測定時間30秒でR値20%、単位測定時間20秒で52%、単位測定時間10秒で89%というそれぞれ明瞭なR値の増加で指摘できた。このため、動力炉・核燃料開発事業団ではこの装置で中国雲南省のウラン探鉱を行い、大きな成果をあげている。

結 び

温徴が認めにくい広域から、地熱の開発適地を簡便・迅速に求める三核比法を提示して野外検討し、次の結果を得た。

- 1) 開発適地は地質学的4条件のいずれかをもつ地域で、上昇する地層ブロック周辺の開孔割れ

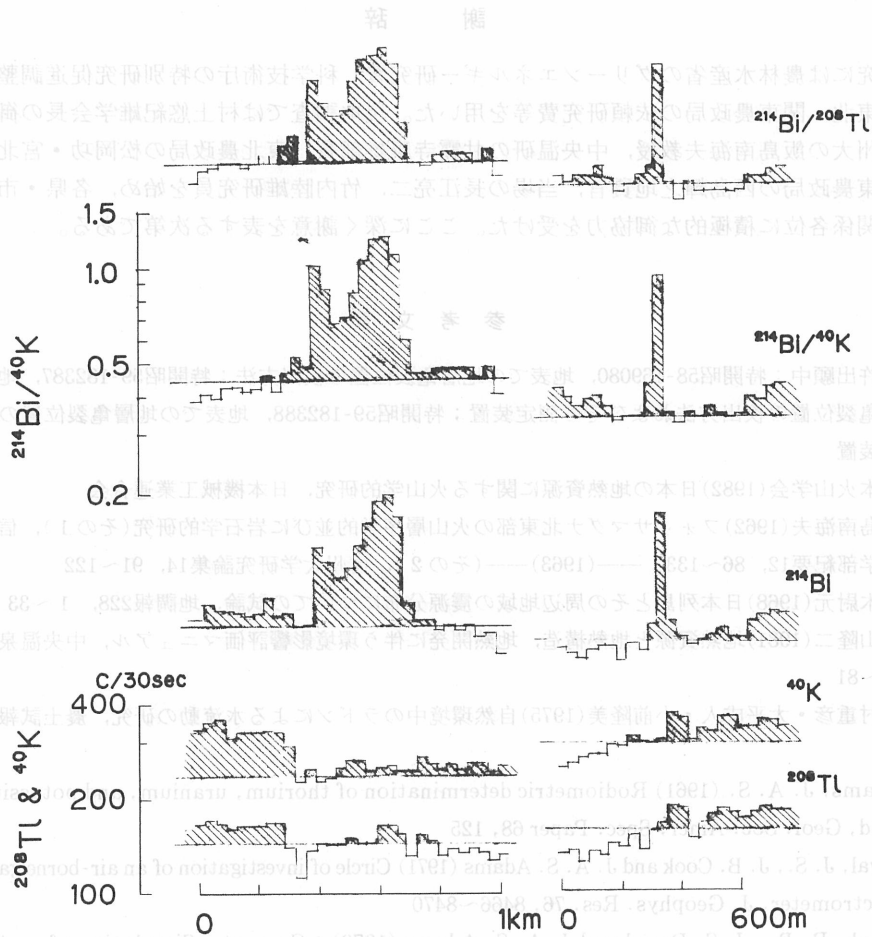


Fig. 20 Distribution of each parameter on earthquake area at Yamato, Fukushima Pref.

- 目からのラドン上昇量が高い地点と想定した。
- 2) その地点の検出は、表層に含むビスマス-214, タリウム-208, カリ-40の1次ガンマ線量から求めた。検出器にNaIを用い、カーボンで概査し、マンボーンで精査した。各ガンマ線量をB, T, Kとすると、B/TとB/Kについて、進行方向と逆方向の各移動平均の残差の低い方の差異Rが高いほど適地とした。
  - 3) 既知の断層や温泉地でこの方法の測定結果を地質構造、湯温、湯量等と比較し、その実用性を裏付けた。そこで、地熱が未開発な水田地域に見出だしたR値の高い地点に井戸を2本掘ったところ、いずれも310mの深さから湯温60℃、揚湯量1500m<sup>3</sup>/日という良好な温泉が開発できた。
  - 4) この方法は温泉開発のほか、山地での亀裂地下水の開発位置の設定、地震地域での地震予知研究、ウラン・石油・天然ガスの探査等にも利用できると思われる。

## 謝 辞

本研究には農林水産省のグリーンエネルギー研究費、科学技術庁の特別研究促進調整費、農林水産省東北・関東農政局の依頼研究費等を用いた。現地調査では村上悠紀雄学会長の御指導を受け、信州大の飯島南海夫教授、中央温研の甘露寺康雄部長、東北農政局の松岡功・宮北順一地質官、関東農政局の西島輝之地質官、当場の長江亮二、竹内陸雄研究員を始め、各県・市町村で多くの関係各位に積極的な御協力を受けた。ここに深く謝意を表する次第である。

## 参 考 文 献

- 1) 特許出願中：特開昭58-169080, 地表での地層亀裂位置の検出方法；特開昭59-182387, 地表での地層亀裂位置の検出方法およびその測定装置；特開昭59-182388, 地表での地層亀裂位置の携帯用測定装置
- 2) 日本火山学会(1982)日本の地熱資源に関する火山学的研究, 日本機械工業連合会
- 3) 飯島南海夫(1962)フォッサマグナ北東部の火山層序学的並びに岩石学的研究(その1), 信州大学教育学部紀要12, 86~133；——(1963)——(その2), 信州大学研究論集14, 91~122
- 4) 鈴木尉元(1968)日本列島とその周辺地域の震源分布についての試論, 地調報228, 1~33
- 5) 杉山隆二(1981)地熱資源と地熱構造, 地熱開発に伴う環境影響評価マニュアル, 中央温泉研究所, 62~81
- 6) 木村重彦・太平成人・小前隆美(1975)自然環境中のラドンによる水流動の研究, 農土試報13, 1~34
- 7) Adams, J. A. S. (1961) Radiometric determination of thorium, uranium, and potassium in the field, Geol. Soc. Amer. Spec. Paper 68, 125
- 8) Duval, J. S., J. B. Cook and J. A. S. Adams (1971) Circle of investigation of an air-borne gamma-ray spectrometer, J. Geophys. Res. 76, 8466~8470
- 9) Clark, R. B., J. S. Duval and J. A. S. Adams (1972) ; Computer Simulation of an Air-borne Gamma-Ray Spectrometer, J. Geophys. Res., 77, 3021~3031
- 10) Adams, J. A. S. et. al. (1972) Development of remote methods for obtaining soil information and location of construction materials using gamma ray signatures for project THEMIS, Ann. Ref. U.S. Army Eng. Waterway Exper. Stat. Corps Eng.
- 11) 八丈島での調査で出現(未発表)
- 12) 金谷弘の未発表資料, 一部の発表資料には, 金谷弘(1964)地調報251, 1；石原舜二・金谷弘(1973)鉱山地質, 特別5, 30；金谷弘・石原舜二(1973)岩石鉱物鉱床, 68, 211；石原ほか6名(1973)地調報24, 269；Kanaya, H. and M. Kawasaki : Tap. Assoc. Min, Pet. Econ. Geol. 70, 286；Kanaya H. and S. Ishihara (1975) Nat. Rad. Env. II, 2, 517
- 13) 東北農政局計画部(1982)；山形盆地地区地盤沈下調査報告書(地形, 地質編), 124.
- 14) 木村重彦・小前隆美・長江亮二(1987)地中の亀裂に関する研究, 昭和59年長野西部地震による土砂災害に関する緊急研究報告書, 科技厅研究開発局, 202~207.
- 15) 木村重彦・小河靖男・山都群発地震調査グループ(1984)地表ガンマ線等による群発地震後の割れ目調査, 第2回地域災害シンポジウム論文集, 地震震動研究会福島支部, 7, 17.