



## 温泉資源の有効利用と地域貢献

森 康 則<sup>1)2)</sup>

(平成 25 年 8 月 14 日受付, 平成 25 年 11 月 7 日受理)

### Effective Utilization of Hot Spring Resources for Regional Contribution

Yasunori MORI<sup>1)2)</sup>

#### Abstract

While working at a public institute for health and the environment, the author has been conducting research on hot springs. This paper reviews the following three research projects : (1) a feasibility study evaluating the use of inflammable natural gas in incidental gas from hot spring water as an alternative to petroleum, (2) validation of unified regulation for the distance among hot spring drillings, and (3) determination of air radon concentration using a liquid scintillation counter and activated charcoal detector. These research projects indicate that effective utilization of hot spring resources can promote regional contribution in diverse ways.

Key words : hot spring resources, incidental gas from hot spring water, Hot Springs Law, radon, regional contribution

#### 要 旨

これまでに著者は地方公設試験研究所に所属し、温泉資源を対象とする様々な分野の温泉科学研究に従事してきた。本論は、これまでに著者が取り組んできた研究課題の中から、(1) 温泉付随ガスの代替エネルギーとしての実用化の可能性、(2) 温泉掘削の一律距離規制の妥当性の検証、(3) 放射能泉の地域資源としての活用を目指した空气中ラドン簡易分析技術の開発について、総説的に述べたものである。これらは全て温泉資源の有効利用によって、様々な側面の地域貢献を目指して取り組んだ研究課題である。

キーワード：温泉資源，温泉付随ガス，温泉法，ラドン，地域貢献

<sup>1)</sup>三重県保健環境研究所 〒512-1211 三重県四日市市桜町 3684-11. <sup>2)</sup>Mie Prefecture Health and Environment Research Institute, 3684-11 Sakura-cho, Yokkaichi 512-1211, Japan.

<sup>2)</sup>三重大学大学院生物資源学研究所 〒514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577. <sup>2)</sup>Graduate School of Bio-resources, Mie University, 1577 Kurimamachiya-cho, Tsu 514-8507, Japan.

E-mail moriy04@pref.mie.jp, TEL 059-329-2917, FAX 059-329-3004.

## 1. はじめに

著者は、現在地方公設試験研究所に在籍し、温泉資源を対象とする様々な分野の温泉科学的研究に従事している。本論では、これまでに従事した研究課題の中から、(1) 温泉付随ガスの代替エネルギーとしての実用化可能性検討 (森ら, 2012; 森, 2013), (2) 温泉掘削の一律距離規制の妥当性の検証 (森ら, 2010a; 森ら, 2010b; 森, 2013), (3) 放射能泉の地域資源としての活用を目指した空气中ラドン簡易分析技術の開発 (Mori *et al.*, 2013a; 森ら, 2013b; Mori *et al.*, 2013c; 森ら, 2013d) について、それぞれを総論的に述べる。アプローチの違いはあるものの、これらは全て、自治体や地方公設試験研究所の大目的である地域への貢献を目指して取り組んだ研究課題である。

なお、本論の内容の多くは既に報告されているため、詳細な内容については、必要に応じて引用文献を参照されたい。

## 2. 温泉付随ガスの代替エネルギーとしての実用化の可能性

東日本大震災を契機とするエネルギー供給の枠組み変化に伴い、地熱発電や温泉バイナリー発電等、温泉に関連するエネルギーが、代替エネルギーのひとつとして脚光を浴びている。そうした社会的背景の中で、著者は温泉とともに湧出する温泉付随ガス中のメタンを主成分とする炭化水素系の可燃性天然ガスに着目した。濃尾平野に広がる木曾川ガス田の周縁に位置する長島地域 (三重県桑名市) に湧出する温泉は、かつては天然ガスの採掘を目的として掘削されたものの、現在では温泉水の採取を主目的として揚湯されている。このため、本対象地域はメタンをはじめとする炭化水素系天然ガスが多量に含まれることが知られている。そこで、同地域に湧出する温泉付随ガスの石油代替エネルギーとしての実用化可能性の検討を目的として、温泉付随ガスに含まれる可燃性天然ガスの実態調査を行った (森ら, 2012)。

対象地域である長島地域の地下には、鮮新・更新統の湖盆堆積層が卓越しており、この堆積層は東海層群と呼ばれている。本研究で対象とした温泉の位置図を示す (Fig. 1)。これらはその多くが掘削深度 1,500 m 前後の大深度掘削泉であり、取水部は、東海層群の基底層である美麓層、あるいはその周辺層とされる。

温泉付随ガスの分析は、メタンについては熱伝導度検出器 (TCD) ガスクロマトグラフ法、炭素同位体についてはガスクロマトグラフ燃焼同位体質量分析法を用いた (森ら, 2012)。長島地域に湧出する温泉付随ガス中のメタン濃度およびガス水比 (体積比)、日平均揚湯量をそれぞれ Table 1 に示す。メタン濃度につ

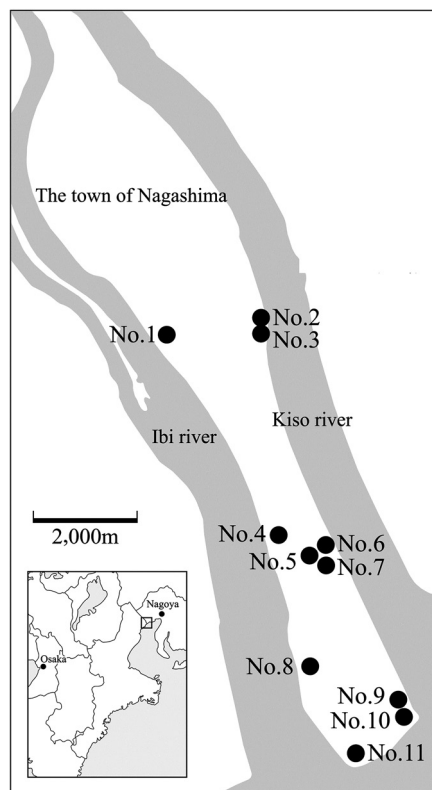


Fig. 1 Locations of observation wells (No.1-No.11) in the Nagashima area. The town of Nagashima (Kuwana City, Mie Prefecture) is a southern suburb of Nagoya, in central Japan. Most wells in Nagashima are 1,500 m deep (Mori *et al.*, 2012).

いては、調査対象の中で No. 2 が最も高く 77.1% であった。次いで No. 3 が 76.5%, No. 1 が 66.4% であった。またガス水比については、No. 3 が 22% と突出して高く、次いで No. 2 が 13%, No. 1 が 10% であった。メタン濃度、ガス水比、揚湯量をそれぞれ乗じて、通常揚湯時にどれだけの量のメタンが大气放出されているかを算出したところ、メタン放出量は、No. 3 が 239 m<sup>3</sup>/日と突出して多く、次いで No. 1 が 78 m<sup>3</sup>/日、No. 2 と No.10 が 24 m<sup>3</sup>/日と続いた。

Figure 2 にメタンの炭素同位体比（以下、 $\delta^{13}\text{C}(\text{C}_1)$ ）とメタン/(エタン+プロパン)比（以下、 $\text{C}_1/(\text{C}_2+\text{C}_3)$ ）の相関プロット図を示す。長島地域の  $\delta^{13}\text{C}(\text{C}_1)$  は -60~-40‰程度であり、また  $\text{C}_1/(\text{C}_2+\text{C}_3)$

Table 1 Methane concentration, gas-water ratio, and volume of water discharged in hot spring water and incidental gas in the Nagashima area, Kuwana City, Mie Prefecture. CH<sub>4</sub> emission was calculated from these parameters (Mori *et al.*, 2012)

Well ID	Sampling date	CH <sub>4</sub> concentration (%)	Gas-water ratio (%)	Volume of water discharged (m <sup>3</sup> /day)	CH <sub>4</sub> emission (m <sup>3</sup> /day)
No. 1	4/Jan/12	66.4	10	1174	78
No. 2	19/Jan/12	77.1	13	242	24
No. 3	19/Jan/12	76.5	22	1423	239
No. 4	20/Jan/12	42.8	2	503	4
No. 5	20/Jan/12	11.2	9	0	0
No. 6	20/Jan/12	35.8	8	329	9
No. 7	20/Jan/12	24.7	1	1939	5
No. 8	4/Jan/12	54.7	3	1079	18
No. 9	4/Jan/12	19.5	0.05	0	0
No. 10	4/Jan/12	44.9	6	900	24
No. 11	17/Jan/12	42.8	2	1100	11

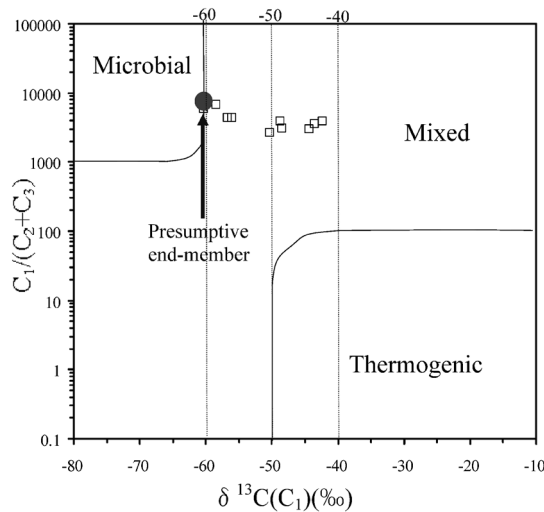


Fig. 2 Correlation between  $\text{C}_1/(\text{C}_2+\text{C}_3)$  and  $\delta^{13}\text{C}(\text{C}_1)$  of gas discharged in several hot springs (□) in Nagashima area, Kuwana City, observed by Mori *et al.* (2012). From the diagram, the methane is assumed to be microbial rather than thermogenic origins.

( $C_2+C_3$ ) は 1,000~10,000 程度と、バーナードダイヤグラム (Bernard *et al.*, 1976) による微生物分解起源の組成領域付近にプロットされた。これらの採取したガスの一部には  $O_2$  の混入が認められており、ガス捕集管内の選択的な同位体分別を考慮すると、本源ガス (エンドメンバ) は、微生物分解起源ガスの組成領域の  $\delta^{13}C(C_1)$  がおよそ  $-60$ 、 $C_1/(C_2+C_3)$  がおよそ 6,000 の付近に位置することが推定された。

これらのバックデータをもとに、長島地域から湧出する温泉付随ガス量の金額換算を試みた。対象地域全体で考えると、温泉の人為的揚湯によって、日量約  $400\text{ m}^3$ 、年間  $15\text{ 万 m}^3$  のメタンが大気放出されていると推定された。燃料ガスを  $100\text{ 円/m}^3$  と仮定して金額換算すると、最もメタン放出量の多い温泉で年間 870 万円分、長島地域全体で年間 1,500 万円分の天然ガスが大気放出されていると推計された。さらに、メタンは地球温暖化係数 21 の温室効果ガスであることから、二酸化炭素換算による温室効果ガス排出量を計算すると、地域全体で年間  $320\text{ 万 m}^3$  排出されているものと推定された (森ら, 2012)。

これらの試算値から考察すると、実用化の商業的な利点は十分にあるように見受けられるが、実際にはいくつかの法規制上の課題がある。その中で主たるものは、鉱業法による鉱区設定と鉱山保安法の規制である。まず、鉱業法では 2012 年 (平成 24 年) 1 月に施行された改正法により、先願方式が改められ、採掘地を国が鉱区候補地 (特定区域) として指定し、開発事業者を募集する方式に改正された。このことにより、新規の事業者が鉱区を新たに取得しようとする場合は、従来のように随時申請ができないこととなり、速やかな事業化を目指す事業者にとっては大きなハードル要因となる可能性がある。また、鉱山保安法では、保安統括者・保安管理者の選任が必要となるが、いずれも実務経験が必要な資格であり、鉱山そのものが希少化している我が国において、新たな有資格者の選任は容易ではない。

以上の結果から、長島地域から湧出する温泉付随ガスには、相当量の可燃性天然ガスが含有され、一部の温泉では商業的な利用が可能な環境に恵まれていながら、実際には十分な有効利用が進んでいないことが明らかになった。エネルギーの「地産地消」が注目される中で、可燃性ガス利用の安全管理との両立を果たしながら、適切な規制緩和を進めることができれば、温泉付随ガスは、石油代替エネルギーとしての実用化が十分に可能な燃料資源であると考えられる。

### 3. 温泉掘削の一律距離規制の妥当性検証

温泉資源の保護のための温泉掘削や動力装置に対する行政的規制のあり方は、温泉法が抱える長年の課題のひとつとなっている。特に、2006 年 (平成 18 年) の群馬県、2009 年 (平成 21 年) の石川県における温泉掘削不許可処分取消請求訴訟による被告 (県) の敗訴事例は、温泉法の許可権者である都道府県に対して、従来の規制のあり方の再考を迫るものであった (布山, 2011)。

このような中で、中央環境審議会 (自然環境温泉小委員会) の答申 (中央環境審議会, 2007) により、環境省により「温泉資源の保護に関するガイドライン」(以下、「ガイドライン」、環境省, 2009) が策定された。同ガイドラインでは、都道府県の自治事務である温泉の掘削の行政処分の判断基準等に対する目安が示されており、「ごく一般的な温泉資源の状況を念頭に記述をしているが、地質の構造、泉脈の状態または周辺での温泉の開発状況に応じて、温泉資源の保護のために必要な対策の内容が異なるのは当然である。最終的には、地域の温泉資源の特性を十分に考慮し、許可等の判断に当たる必要がある」と特記されているように、地域の周辺環境、利用状況、地質等に応じた影響調査の必要性について、改めて指摘している。

そこで本節では、現在温泉掘削の規制方法として最も汎用的に用いられている一律距離規制 (環

境省, 2009) に関連して, 掘削工事そのものによる地球化学的な影響半径を求めるための連続モニタリング調査 (3.1 節) と, ガイドラインに示された動力装置による周辺源泉への影響調査 (3.2 節) について, それぞれ調査事例を報告する。

なお, 本節の内容については, 3.1 節「代替掘削現場における既存温泉の地球化学的影響半径の推定」については森ら (2010a), 森 (2013), 3.2 節「『温泉資源の保護に関するガイドライン』に基づく動力装置による周辺源泉への影響調査」については, 森ら (2010b), 森 (2013) に詳述されているので, 必要に応じて参照されたい。

### 3.1 代替掘削現場における既存温泉の地球化学的影響半径の推定

本研究で, モニタリングの対象とした湯ノ口温泉は, 三重県南部, 熊野市紀和町に位置する (Fig. 3)。過去にこの地域は, 銅山の鉱床として操業されていた経緯があり, 古くから数多くの地質調査の結果が報告されている (例えば Chijiwa and Tomita, 1985)。本温泉は熊野酸性岩の西側に位置し, 深さ 1,300m の熊野層群に設置されたストレーナから取水されている。熊野層群は下位より, 大沼累層, 竹筒累層, 板屋累層, 大河内累層に区分される。竹筒累層は主に泥岩, 砂岩・泥岩互層から成り, 海棲化石を多産する。板屋累層は, 砂岩, 砂岩・泥岩互層, 泥岩からなり, 下部に炭層が挟在する。なお, ビトリナイトの細片は竹筒累層, 板屋累層, 大河内累層に豊富に含まれている。

この地域において, 既存の「湯ノ口温泉」(以下, 既存温泉) から水平距離で 35m 離れた地点で深度約 1,400m の代替掘削工事が行われた。その新規の温泉は「新湯ノ口温泉」(以下, 新規温泉) と命名された。既存温泉では, 新規温泉の掘削が終了するまで揚湯が継続されていたため, 直近の温泉掘削工事中に揚湯された既存温泉の温泉水を継続的にモニタリングすることができた。

既存温泉から湧出する温泉水の成分濃度変動を Fig. 4 に示す。亜鉛イオンのスパイク状の上昇は, エアリフト型揚湯ポンプのエア管の交換時期と同期していることから, エア管に含まれる亜鉛のイオン交換作用に起因するものと考えられる。これらの多項目の分析の中で, 掘削工事の進行に伴う特徴的な成分変動を示した塩化物イオンと銅イオンの時系列変動について, それぞれ Fig. 5, Fig. 6

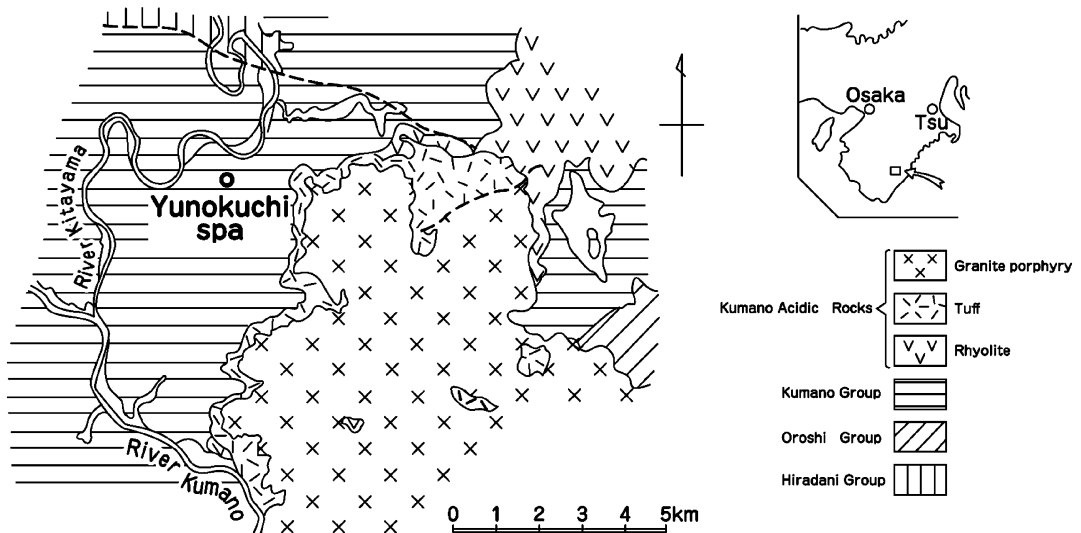


Fig. 3 Geologic map of the area around Yunokuchi hot spring, Kumano City, Mie Prefecture (Agency for Natural Resources and Energy of Japan, 1979 ; Suzuki *et al.*, 1982).

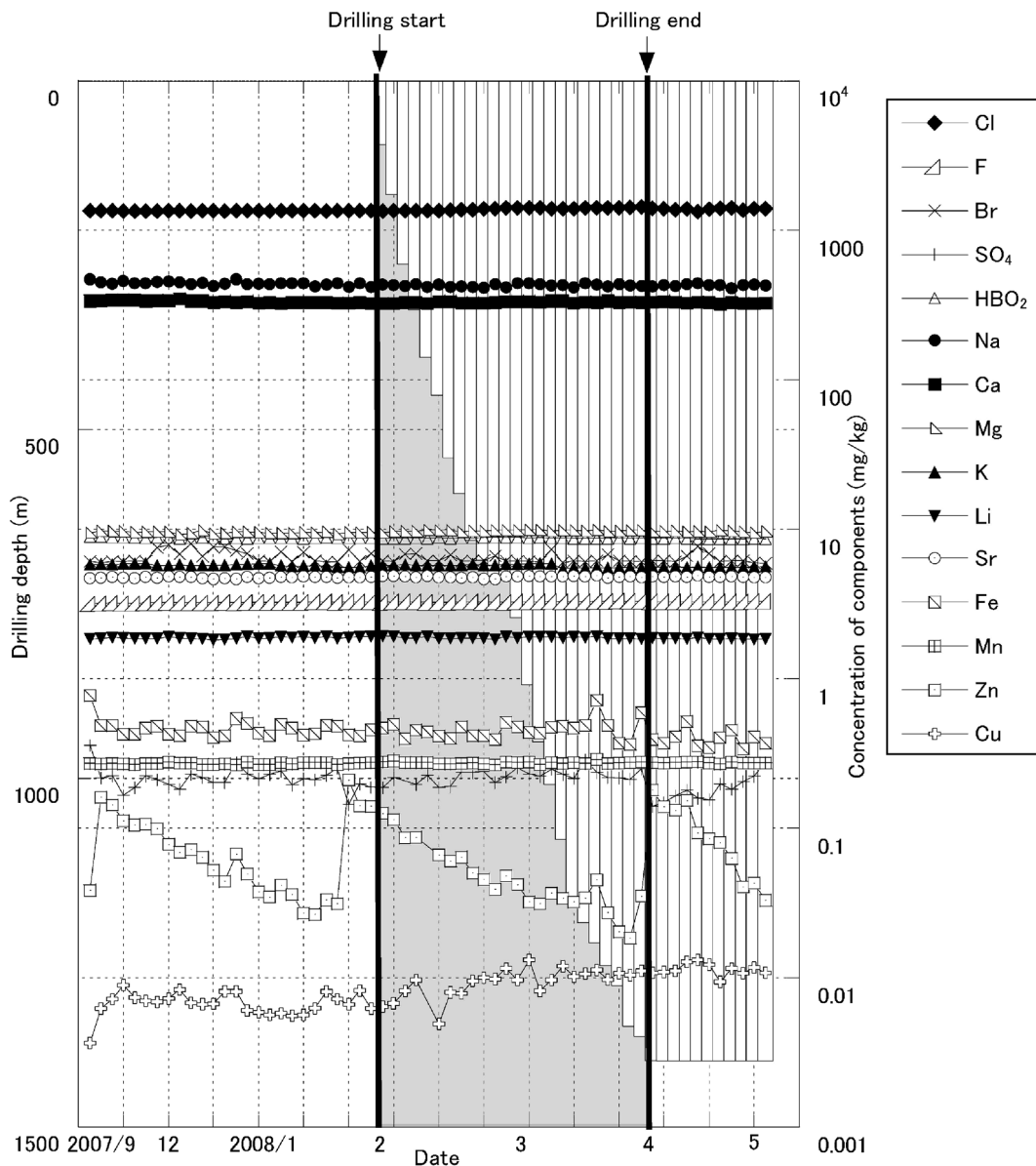


Fig. 4 Drilled depth of a new bore-hole and temporal variation in ion concentrations in the water of an existing Yunokuchi hot spring. Drilled depth is shown as a white bar graph (Mori *et al.*, 2010a). Increases and decreases in zinc concentration may derive from ion exchange action with zinc contained in air piping.

に示す。その結果、塩化物イオン、銅イオンは掘削工事の開始時までは濃度が安定していたが、掘削工事が進むに連れて濃度上昇が認められた。

一般に、温泉掘削時に掘削泥水が注入されることによって地中の泥水圧が上昇し、地下の帯水状態が変化するものと考えられる。調査対象地域が海成堆積層であること、広い範囲での鉱化作用が認められることから、随所に海塩起源の塩化物イオンや鉱床母岩起源の銅イオンの濃集層が存在す



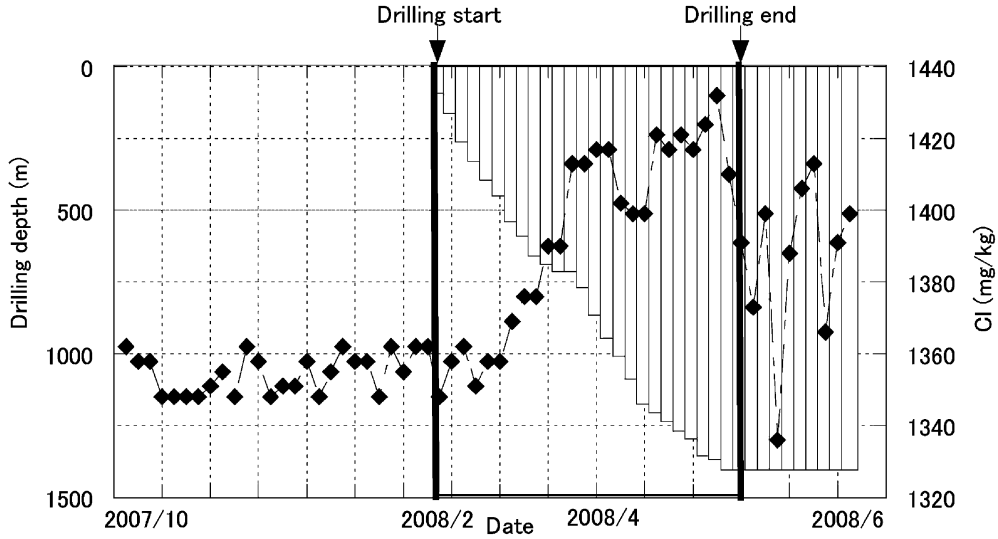


Fig. 5 Observed chloride ion concentrations at a Yunokuchi hot spring during drilling at an adjacent site (Mori *et al.*, 2010a). Drilled depth is shown as a white bar graph. Chloride ion concentrations clearly increased as drilling progressed.

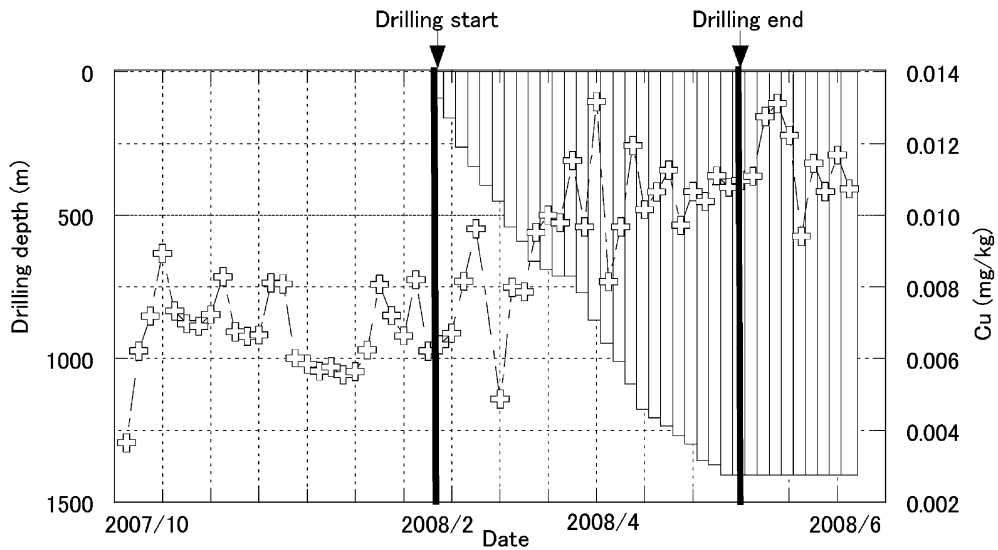


Fig. 6 Observed copper ion concentrations at a Yunokuchi hot spring during drilling at an adjacent site (Mori *et al.*, 2010a). Drilled depth is shown as a white bar graph. Copper ion concentrations clearly increased as drilling progressed.

る可能性が考えられる。このことから、掘削泥水の移流により、塩化物イオンや銅イオンが濃集する各帯水層の地下水が既存温泉のストレーナに到達し、既存温泉の塩化物イオン、銅イオン濃度の異常上昇が引き起こされたものと推定された。また、温泉掘削工事終了後もこれらの異常が引き続き観測されたことから、掘削工事前には見られなかった帯水層間の地下水流動が進行し、不安定な状態となったことが示唆された。

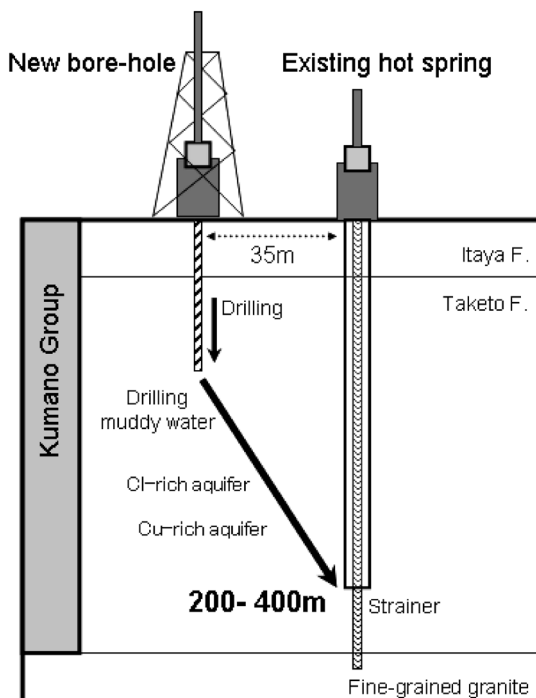


Fig. 7 Model of the geochemical influence of an existing hot spring by the adjacent drilling. The anomalous increases of chloride and copper ions at Yunokuchi hot spring are thought to derive from the mixing with natural groundwater containing higher concentration of these ions.

新規温泉工事に伴い、既存温泉の地下での進行が推察される流体の挙動のモデル図を Fig. 7 に示す。本モニタリング調査の結果から、塩化物イオン、銅イオンの地球化学的変動が始まった際のビット刃とストレーナの直線距離は 200~400m であった。この数値は、温泉掘削工事中に観測された地球化学的影響半径のひとつの実測値と解されるため、温泉掘削許可判断の一律距離制限におけるひとつの参考値としての活用が考えられる。

### 3.2 「温泉資源の保護に関するガイドライン」に基づく動力装置による周辺源泉への影響調査

本調査は、県内有数の温泉集中地域である三重県三重郡菰野町の湯の山地域一帯を対象として行われた。同地域に計画された土地掘削および動力装置の温泉法に基づく許可申請について、三重県自然環境保全審議会温泉部会で審議したところ、同地域は温泉数が多いだけでなく、県内では特に貴重な自然湧出泉が残る地域であり、これらを保護する必要があるとして、「温泉資源の保護に関するガイドライン」に基づく周辺源泉の影響調査を勧奨する意見が出された。

動力を装置しようとする温泉（以下、対象源泉）とガイドラインに基づく影響調査を行う既存の源泉（源泉の稼働率、地質の同一性等から自然湧出泉の 3 源泉を選定。以下、観測源泉）の位置を Fig. 8 に示す。調査方法については、原則的にガイドラインに規定される「動力装置の際の影響調査等実施手法」に準拠した。対象源泉を揚湯しない状態での観測源泉における自然要因によるバックグラウンド変動を把握するための「事前調査」、対象源泉の段階揚湯試験時に、湧出量を段階的に増加させた状態で観測源泉においてどのような影響が出現するかを把握するための「影響調査」、



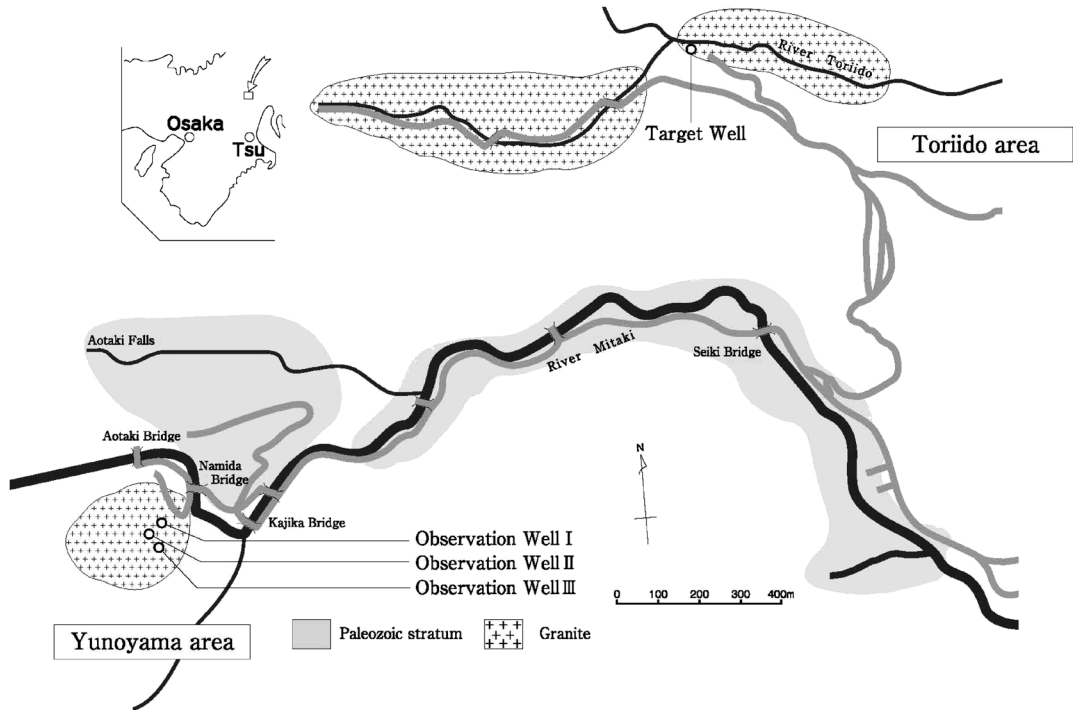


Fig. 8 Location of the observation and target wells on the schematic geologic map in Yunoyama hot spring area, Komono Town, Mie Prefecture (Hot Spring Research Center, 1962 ; Mori *et al.*, 2010b).

対象源泉の段階揚湯，連続揚湯を行った後，揚湯を停止した状態での観測源泉がどのような変動を示すための「事後調査」として，それぞれ現地調査（手観測）および採水を実施した．温度（泉温），pH，湧出量について，事前調査，事後調査の結果を Fig. 9，段階揚湯試験に伴う影響調査の結果を Fig. 10 に示す．

事前調査，事後調査のそれぞれの変動は，同地域における降水や地球潮汐等，自然要因による変動ベースライン（森ら，2006）を考慮すると，対象源泉の人為的揚湯に起因する有意な影響は認められなかった．また影響調査についても同様に，観測源泉の各項目の変動は少なく，いずれの項目もほぼ安定的に推移した．

しかし，対象源泉は段階揚湯試験の進行による人為的な揚湯量の増加とともに，様々な変化が観測された．まず，Fig. 10 に示されるように，pH が第1段階の8.64 から第3段階の8.83 までは比較的安定であったが，その後の第4段階が8.43，第5段階が8.03 と，段階が進むにつれて急激なpH 低下が認められた．

影響調査の溶存成分の変化について，Fig. 11 に示す．これらのグラフから，段階が進むごとに進行した地球化学的変化として，① pH の低下，② ナトリウムイオン，フッ化物イオン，塩化物イオンの濃度低下，③ 硫酸イオン濃度の増加，④ ラドン濃度の上昇傾向の不安定変動，の4点に整理される．この原因として，対象源泉から湧出する温泉水が，深層帯水層を起源とするナトリウムイオン，フッ化物イオン，塩化物イオンを含んだ高アルカリの地下水と，浅層帯水層を起源とする硫酸イオンを含んだ中性に近い地下水のそれぞれの混合が推測されることから，揚湯能力の強さの度合いによって浅層起源流体と深層起源流体の混合割合の変化に起因したものであることが示唆された．

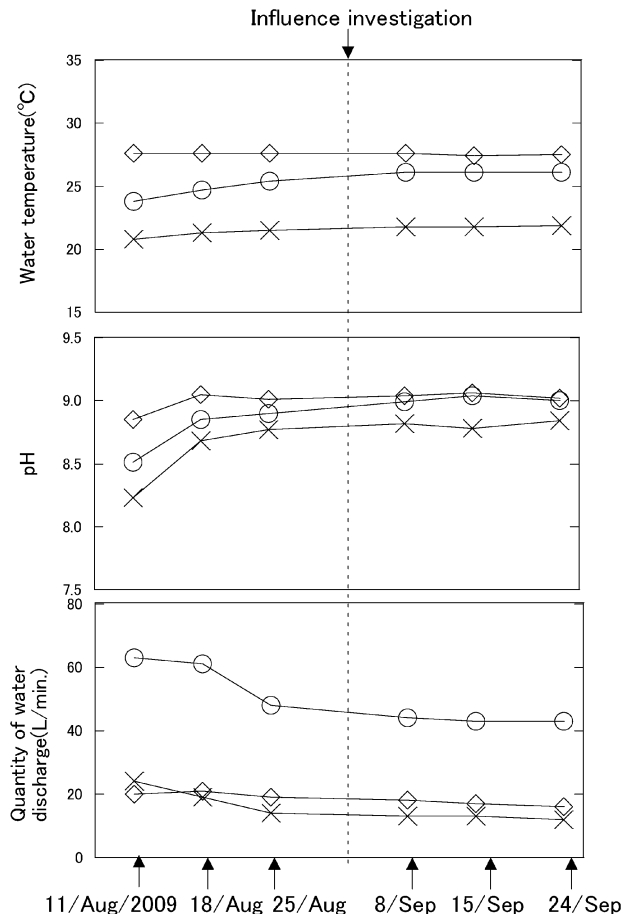


Fig. 9 Temporal variation in water temperature, pH, and volume of water discharged in preliminary and follow-up investigations in Yunoyama hot spring area. Symbols : ○, Observation well I ; ◇, Observation well II ; ×, Observation well III. Dotted line indicates the date of influence investigation (1/Sep/2009). Variation in water quality appears to be stable under both incremental and continuous pumping during the influence investigation of the observation wells.

以上の点から、ガイドラインに準じた調査の実施により、(1) 対象源泉の人為的揚湯により観測源泉の影響は認められなかったこと、また、(2) 対象源泉では、段階揚湯試験の進行により、浅層起源流体と深層起源流体の割合変化による地球化学的变化が進行したことが明らかになった。現行で運用されている段階揚湯試験の方法やガイドラインの影響調査手法では、温泉資源の量的な保全は考慮されているものの、質的な保全についてはほとんど考慮されていない。本調査で得られたように、段階揚湯試験の段階が進むにつれて、温泉成分の濃度の変動するという現象は、どの温泉でも十分に起こる可能性があると考えられる事象である。このことから、特に温泉資源の枯渇に対する予防のためには、量的な保全だけでなく、質的な保全も考慮した対策が必要であると考えられる。

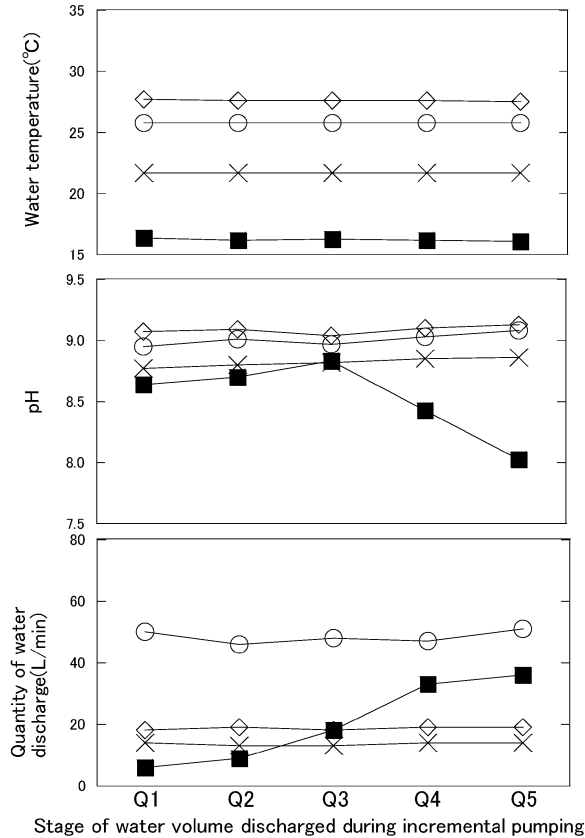


Fig. 10 Temporal variation in water temperature, pH, and volume of water discharged in an influence investigation (1/Sep/2009) in Yunoyama hot spring area. Q1-Q5 represent the stage of water volume discharged during the examination of incremental pumping. Symbols : ○, Observation well I ; ◇, Observation well II ; ×, Observation well III ; ■, target well. Incremental pumping with an increase of the volume of water discharged caused a decrease of pH in the target well.

#### 4. 放射能泉の地域資源としての活用を目指した空气中ラドン簡易分析技術の開発

温泉水中に含まれるラドン ( $^{222}\text{Rn}$ ) は、温泉法および鉱泉分析法指針において、温泉水 1 kg 中に  $20 \times 10^{-10}\text{Ci/kg}$  (5.5 マッヘ単位, 74 Bq/kg) 以上のラドンが含まれるとき、温泉法第 2 条に規定する「温泉」に該当し、さらに  $30 \times 10^{-10}\text{Ci/kg}$  (8.25 マッヘ単位, 111 Bq/kg) 以上のラドンが含まれるとき、「療養泉」として「放射能泉」に該当することが規定されている。

三重県三重郡菰野町の鳥居道山地域における放射能泉湧出地域では、地元自治体を中心となり、地域資源、健康資源、観光資源としての積極的な活用を目指した官民一体の組織による検討が行われている。そこで本研究では、同地域の放射能泉利用施設における空气中ラドンの存在実態を把握し、地域の特徴的な資源としてさらに活用することを目指して、(1) 液体シンチレーションカウンタ (以下, LSC) による活性炭型検出器を用いた空气中ラドンの簡易分析技術の開発、および (2) 同地域の温泉利用施設とその周辺地域における水中・空气中ラドンの存在実態の把握を試みた。(2)

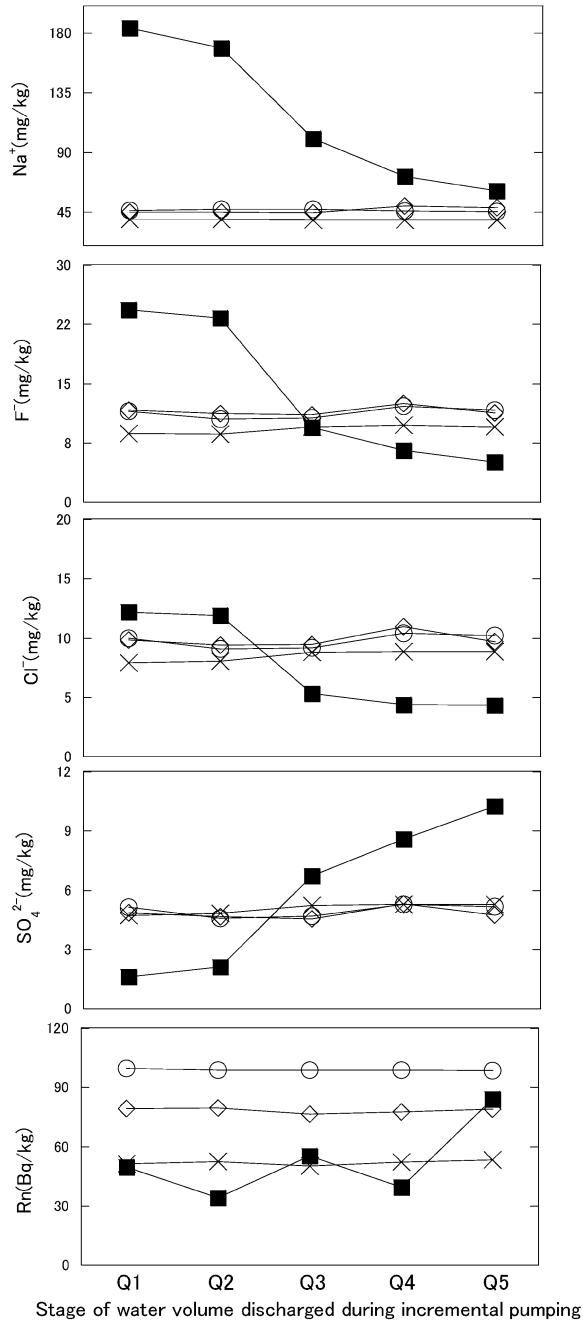


Fig. 11 Temporal variation in Na<sup>+</sup>, F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, and Rn concentrations in an influence investigation (1/Sep/2009) in Yunoyama hot spring area. Q1-Q5 represent the stage of water volume discharged during the examination of incremental pumping. Symbols : ○, Observation well I ; ◇, Observation well II ; ×, Observation well III ; ■, target well. Incremental pumping caused geochemical changes such as decreases in concentrations of Na<sup>+</sup>, F<sup>-</sup>, and Cl<sup>-</sup> ions and increases in concentrations of SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ion and Rn in the target well.

についてはデータ整理中であり、別報による報告を予定しているため、本論では、(1) の分析法開発の成果について、重点的に説明する。なお、本研究については、Mori *et al.* (2013a) に詳述されているので、必要に応じて参照されたい。

空气中ラドン濃度の分析方法には、固体飛跡検出器等が知られているが、従来の方法の多くは特殊性の高い機器を必要とするため、その測定の実施は放射線分析に特化した専門的な測定機関に限られている。その中でLSCは、温泉法に基づく「登録分析機関」の多くが使用できる環境にあるため、比較的汎用的な測定機器と言える。また、活性炭型検出器 (Fig. 12) は、活性炭を装着した安価なディスクポーザブルタイプの検出器であり、さらに取扱が安全かつ簡便である。

LSCによる測定条件を Table 2 に示す。ラドンチャンバ (標準場) による検出器への曝露は、放射線医学総合研究所における「Intercomparison NIRS 2011」と同時に実施し、チャンバ内空气中ラドン濃度の reference value を得た (Janik *et al.*, 2009, Janik *et al.*, 2012)。空气中ラドン濃度は、LSC測定と積分バイアス法 (20-2,000, 40-2,000, 60-2,000 keV の外挿値) により求められた正味計数率 (netcps) と測定機器の機差や条件によって異なる変換係数  $A$ 、ラドン曝露開始時刻  $t_1$  (単位: 日, 以下同)、曝露終了時刻  $t_2$ 、

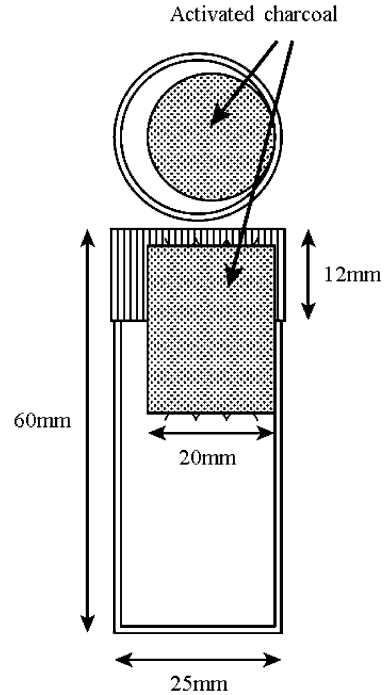


Fig. 12 Schematic drawing and cross-sectional views of the PICO-RAD, activated charcoal radon detector (Iimoto *et al.*, 2005).

Table 2 Liquid scintillation counting measurement conditions and reagents and liquid scintillators (Mori *et al.*, 2013a)

Liquid scintillation counting measurement conditions	
Measuring time	10 min
Background correction	yes
Temperature	15°C
Calculation method	Integral bias method TRIPLE (20-2,000 keV, 40-2,000 keV, 60-2,000 keV)
Reagents and liquid scintillators	
Reagents	DPO : 2,5-diphenyloxazole POPOP : 1,4-bis (5-phenyl-2-oxazolyl) benzene Toluene : for the scintillator (all Wako Pure Chemical Industries, Ltd.)
Liquid scintillators	1. DPO+POPOP toluene solution DPO (20 g) and POPOP (0.5 g) were dissolved in 1,000 mL of toluene to prepare the scintillator ; after adsorption of the detector, 15 mL of the liquid scintillator was promptly added to the detector. 2. Insta-Fluor Plus For the scintillator (PerkinElmer Japan Co., Ltd.) ; after adsorption of the detector, 15 mL of the liquid scintillator was promptly added to the detector.

シンチレータの添加時刻  $t_3$ , 測定時刻  $t_4$  による減衰補正で構成される式(1)により求めた (Passo and Floeckher, 1991 ; Shefsky, 1998).

$$Rn(Bq/m^3) = netcps \times \frac{1}{0.7264} \times \exp\left(\frac{0.693 \times (t_4 - t_2)}{3.825}\right) \times \frac{1}{1 - \exp\left(\frac{-(t_2 - t_1)}{18/24}\right)} \times \frac{1}{1 - \exp\left(\frac{-(t_4 - t_3)}{2/24}\right)} \times 1 \times 37 \times A \dots(1)$$

本測定条件により得られた測定スペクトルを Fig. 13, Fig. 14 に示す. この測定スペクトルから,

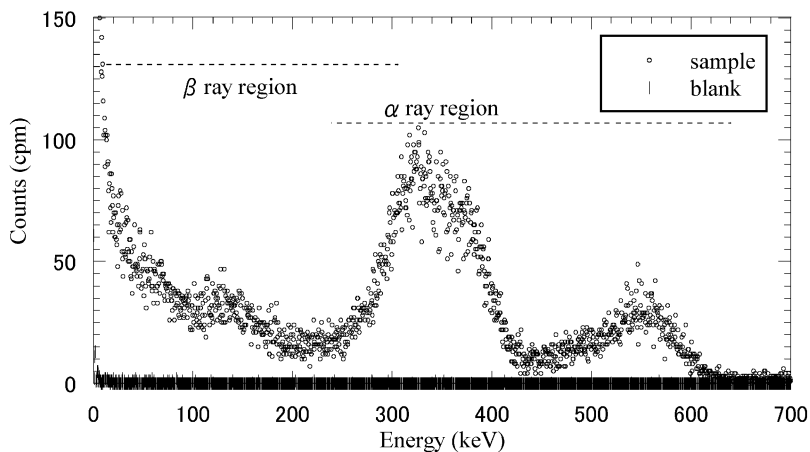


Fig. 13 PICO-RAD measurement spectrum (0-700 keV) of a liquid scintillation counter for radon using a toluene scintillator (DPO+POPOP). Measurement time, 10 min. Peaks attributable to radon's daughter nuclides including  $^{218}\text{Po}$  and  $^{214}\text{Po}$  occur in the high-energy region from about 250 keV to about 620 keV the  $\alpha$  ray region. The measurement conditions in this study involve three window settings at 20-2,000, 40-2,000 and 60-2,000 keV. With these window settings, there is no overlap with  $\alpha$  ray region, successfully confirming that the settings were appropriate.

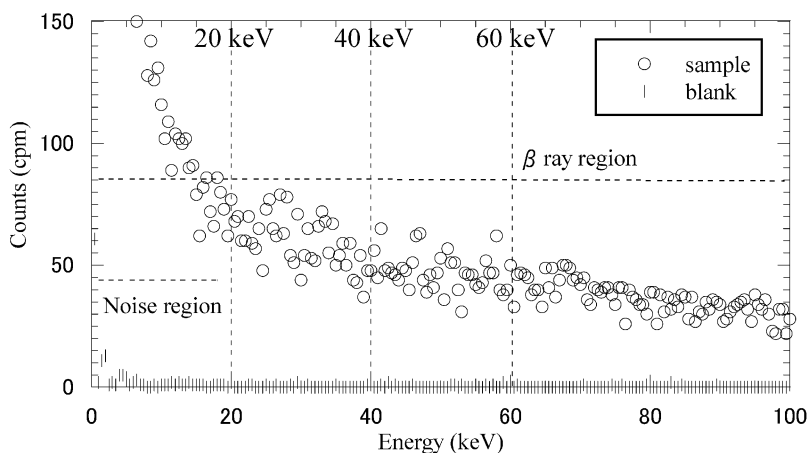


Fig. 14 PICO-RAD measurement spectrum (0-100 keV) of a liquid scintillation counter for radon using a toluene scintillator (DPO+POPOP). In the low-energy region, the noise region is below about 18 keV. The measurement conditions in this study involved three window settings at 20-2,000, 40-2,000 and 60-2,000 keV. There are no interfering peaks, confirming the settings were appropriate.



本分析条件の3ウインドウ設定はノイズ領域や $\alpha$ 線領域に重ならず、その外挿により適切な正味計数率が得られることが確認された。また、Janik *et al.* (2012) による reference value を真値と仮定した場合の変換係数  $A$  を算出したところ、DPO+POPOP トルエンシンチレータを用いた同測定条件下では  $A=1.55$ 、Insta-Fluor Plus を用いた場合では  $A=1.70$  の値が求められた。

この検討された分析法を用いて、三重県内における放射能泉とその周辺地域におけるラドンの存在実態の把握を試みた（森ら, 2013b; Mori *et al.*, 2013c）。一連の調査の結果、三重県菰野町における放射能泉湧出地域周辺では、全国的にも高いレベルの空气中ラドン濃度の値（温泉湧出口に最も近い源泉タンク内の空气中ラドン濃度  $21,000 \text{ Bq/m}^3$ ）が得られた（森ら, 2013d）。こうした温泉科学的な特徴を生かして、健康資源、観光資源、地域おこし資源としての活用の可能性を示唆できることから、本事例は、地域の実態調査からその温泉資源の科学的特徴を捉えて、その特徴を生かした活用方法を提案するという、地域振興を目指した支援方法のひとつのモデルケースになりうる可能性がある。

## 5. ま と め

以上、著者が主に地方公設試験研究所において取り組んできた、温泉科学に関する様々な分野の研究について総論的に述べた。温泉科学という研究分野は、研究対象とする温泉があって初めて、分析、測定、観測等による現状把握が可能となる。あるひとつの温泉における研究結果をモデル化し、他の温泉地への水平展開を試みる重要性と必要性は大きいとしても、各々の温泉の状況は、地質、周辺環境、その地下における流体の起源や挙動といった、地域の個々の要因に大きく支配されており、他の温泉地で得られた科学的知見に基づくモデルの適用は、相応の不確実性を伴うことは否定できない。

このことから考えると、地域資源としての温泉を持続的に活用し、その恩恵を長きにわたって享受するためには、その受益者である「地域」が主体的に、温泉資源保護や有効利用のための個々の科学的知見を得ようとする姿勢が必要とされるだろう。特に自治体は、その主導的な立場に立つことが要求されることから、地方公設試験研究所はニーズを鋭敏に察知しながら、その専門性を活かして、地域の温泉に関する調査研究やデータ収集等の技術的支援を行うことが求められる。最終的には、多様な主体が、これらの取組を主体的に進める仕組みが構築され、そのことが温泉資源の保護や有効活用につながることを期待される。

## 謝 辞

本稿の投稿の機会を与えて頂きました日本温泉科学会編集委員長の大妻女子大学井上源喜教授に感謝申し上げます。また、匿名の査読者には懇切丁寧な御指摘、御意見を頂きました。

三重県保健環境研究所では、西中隆道所長、天野秀臣特別顧問、志村恭子課長をはじめとする歴代の上司には、的確な御支援・御指導を頂きました。信州大学理学部塚原弘昭名誉教授、名古屋大学大学院環境学研究科川邊岩夫教授、三重大学大学院生物資源学研究科加治佐隆光教授には、厳しくも温かい御指導を頂きました。

共同研究者の先生方、御助言を頂いた先生方、先輩方、友人、同僚の皆様など、ここには御芳名を書き尽くすことができないほどの多くの方々の御支援なくしては、今回の受賞はなかったことと痛感しております。ここに記して深く感謝申し上げます。

## 引用文献

- Bernard, B.B., Brook, J. M. and Sackett, W. M. (1976) : Natural gas seepage in the Gulf of Mexico. *Earth Planet. Sci. Lett.* **31**, 48-54.
- Chijiwa, K. and Tomita, S. (1985) : On the Onuma Formation of the Kumano Group (A study of the Tertiary Formations of the Kumano Coal-field in the Kii Peninsula, Southwest Japan, part 3). *Mem Fac. Sci., Kyushu Univ., Ser. D. Geol.*, **25**, 281-297.
- 中央環境審議会 (2007) : 温泉資源の保護対策及び温泉の成分に係る情報提供の在り方等について, 2007 年 (平成 19 年) 2 月 6 日付け中央環境審議会通知.
- 中央温泉研究所 (1962) : 三重県菰野富士周辺温泉資源調査報告, 1-12.
- Iimoto, T., Tokonami, S., Morishita, Y. and Kosato, T. (2005) : Application of activated charcoal radon collectors in high humidity environments. *J. Environ. Radioactivity*, **78**, 69-76, 2005.
- Janik, M., Tokonami, S., Kovacs, T., Kavasi, N., Kranrod, C., Sorimachi, A., Takahashi, H., Miyahara, N. and Ishikawa, T. (2009) : International intercomparisons of integrating radon detectors in the NIRS radon chamber. *Appl. Radiat. Isot.*, **67**, 1691-1696.
- Janik, M., Ishikawa, T., Omori, Y. and Kavashi, N. (2012) : Technical report on the 4th international intercomparisons for integrating radon/thoron detectors with the NIRS radon/thoron chambers. National Institute of Radiological Sciences, 1-33.
- 環境省 (2009) : 温泉資源の保護に関するガイドライン (2009 年 (平成 21 年) 3 月), 1-57.
- 森 康則, 長谷川圭司, 小川正彦, 橋爪 清 (2006) : 湯ノ山温泉連続モニタリングによる温泉水の地下挙動と湧出モデルの考察. 三重県科学技術振興センター保健環境研究部年報, **51**, 31-38.
- 森 康則, 吉村英基, 前田 明, 志村恭子, 大熊和行, 小川正彦, 橋爪 清, 野原精一, 近藤雅秋, 加治佐隆光 (2010a) : 直近の新規温泉掘削が既存温泉に与える地球化学的影響. *温泉科学*, **60**, 22-36.
- 森 康則, 吉村英基, 前田 明, 志村恭子, 大熊和行, 近藤雅秋, 加治佐隆光 (2010b) : 「温泉資源の保護に関するガイドライン」に基づく動力装置による周辺源泉への影響調査. *温泉科学*, **60**, 161-176.
- 森 康則, 村田 将, 志村恭子, 山口哲夫, 野原精一, 加治佐隆光, 大沼章子 (2012) : 三重県桑名市の長島地域における温泉付随ガス中炭化水素系可燃性天然ガスの代替エネルギー化の検討. *温泉科学*, **62**, 168-181.
- Mori, Y., Murata, S., Yoshimura, H., Maeda, A., Sawada, Y., Shimura, K., Yamaguchi, T., Tajika, Y., Ishikawa, T., Yasuoka, Y. (2013a) : Determination of radon concentration in air using a liquid scintillation and an activated charcoal detector. *J. Hot Spring Sci.*, **62**, 306-317.
- 森 康則, 志村恭子, 川村陽一, 出口 晃, 美和千尋, 石川徹夫, 安岡由美 (2013b) : 放射能泉の利用における被ばく線量評価のためのラドン分析検討および実態調査. 日本健康開発財団研究年報, **34**, 11-19.
- Mori, Y., Deguchi, A., Miwa, C., Iwasaki, Y., Sazumura, E., Maeda, K., Hamaguchi, H., Shimasaki, H., Mizutani, M., Tanaka, N., Kawamura, Y. (2013c) : Estimation of exposure dose due to radon in radioactive spring water—Case study of a hot spring facility in Mie prefecture—. *J. Jpn Soc Balneol Climatol Phys Med.*, **76**, 255-261.
- 森 康則, 澤田陽子, 吉村英基, 前田 明, 山口一司, 志村恭子, 西中隆道 (2013d) : 温泉資源の特徴に着目した健康づくり・地域づくり支援—菰野町千種地域における「鳥居道山観光資源活性化委員会」の取組—. 第 66 回日本温泉科学会大会講演要旨集, 91.

- 森 康則 (2013) : 温泉とは何か—温泉資源の保護と活用—, 三重大学出版会, 1-146.
- 布山裕一 (2011) : 温泉資源の保護に関する課題と展望, 温泉科学, **61**, 149-156.
- Passo, C.J. Jr and Floeckher, J.M. (1991) : The LSC approach to radon counting in air and water.  
In Liquid Scintillation Counting and Organic Scintillators (ed. Ross, H., Noakes, J. and Spaulding, J.D.), 375-384, Lewis Publishers, Chelsea, Michigan.
- Shelsky, S. (1998) : Calibration constants for PICO-RAD radon-in-air sampling vials. The Leader in Portable X ray technology, Niton Corporation, Bedford, Massachusetts.
- 鈴木舜一, 小田幸人, 南部松夫 (1982) : 紀州鉾山付近における中新統のビトリナイトの熱変質. 鉾山地質, **32**, 55-65.
- 通商産業省資源エネルギー庁 (1979) : 1978年度(昭和53年度)広域調査報告書(那智地域), 1-56.  
(2013年9月6日第66回日本温泉科学学会大会にて発表)