

---

原 著

---

## 兵庫県下の温泉付随メタンガスの濃度分布と ガス分離設備によるメタンの除去

矢野美穂<sup>1)</sup>, 川元達彦<sup>1)</sup>

(平成 23 年 4 月 26 日受付, 平成 23 年 5 月 26 日受理)

### Distribution of Methane Gas Associated with Hot Springs in Hyogo Prefecture and the Removal Processes Using Gas Separation Facilities

Miho YANO<sup>1)</sup> and Tatsuhiko KAWAMOTO<sup>1)</sup>

#### Abstract

Due to a fatal accident involving a methane gas explosion at the Spa facilities in Shibuya, Tokyo, in June 2007, the Hot Springs Law was amended in November 2007 (in effect in October 2008). Accordingly, the current Law requires measurement of the concentration of methane gas at all hot spring sources and verified countermeasures to be in place against concentrations of methane gas in excess of a standard level as defined in law. Immediately after the accident, in order to secure the safety of hot spring sources, our laboratory conducted investigations into the relationship between the distribution of methane gas concentrations and geology, as well as methods for the removal of methane from hot spring water. The methane concentrations as measured by the water displacement method at 115 hot spring sources ranged from N.D. to 1,560%LEL (Lower Explosive Limit). A total of 26 hot springs out of all the investigated targets (22.6%) required the removal of methane gas because they exceeded the standard concentration level (50%LEL) that is regulated by Hot Springs Law. Those hot spring sources emitting high concentrations of methane are located in the geological layers of the Osaka, Kobe, Izumi, Tanba and Arima Groups.

Based on their principles of operation, the gas separation facilities that are used for methane removal can be categorized into four different types ; i.e. separation (water tank), ventilation, pressurized separation, and sprinkler system types. At the hot spring sites, gas separation facilities consisting of a single type or a combination of two of these types have been used in practical applications. Among them, both the ventilation and pressurized types are less effective in separating and removing micro-gas bubbles when used 'stand alone'. However, if they are combined with either the water tank or sprinkler systems, they can remove micro-gas bubbles effectively. On the other hand, the sprinkler-type system can

---

<sup>1)</sup>兵庫県立健康生活科学研究所 〒652-0032 神戸市兵庫区荒田町 2-1-29. <sup>1)</sup>Hyogo Prefectural Institute of Public Health and Consumer Sciences, 2-1-29, Arata-cho, Hyogo-ku, Kobe 652-0032, Japan.

remove methane effectively, even if used by itself.

The results revealed that there is a relationship between the distribution of hot springs containing high-concentration of methane gas and the geological data. Furthermore, it was confirmed that the methane gas was effectively removed from the hot spring sources where the level exceeded the standard using dedicated gas separation facilities installed at the sites. In all, useful fundamental data concerning countermeasures against methane gas could be accumulated.

Key words : Methane gas, Hot springs, Distribution of methane gas concentrations, Geology, Gas separation facility

## 要 旨

2007年6月、東京都渋谷区の温泉利用施設で温泉付随メタンガスを原因とする爆発死亡事故が発生し、その後、2007年11月には温泉法が改正(2008年10月施行)され、利用する全ての源泉に対してメタン測定および基準値を超過した場合の対策等が義務付けられた。

当研究所では兵庫県下の多くの源泉における安全確認のために、事故発生直後から温泉付随メタンガスの測定による濃度分布と地質との関連性、メタンの除去対策に関する調査研究を実施してきた。その結果、115源泉における水上置換法で得られたメタン濃度はN.D.~1,560%LEL (Lower Explosive Limit) の範囲であった。このうち、温泉法で規定するメタンの基準値(50%LEL)を超過し、メタン対策が必要となった源泉は26源泉(22.6%)であり、それらの源泉は、大阪層群、神戸層群、和泉層群、丹波層群、有馬層群に位置した。

また、メタンの除去対策に用いられるガス分離設備を、その原理から、自然分離方式(貯水槽)、換気方式、加圧分離方式、散水方式に分類した。換気方式と加圧分離方式では、マイクロバブルガス等の微細な気泡を分離・除去する効果は低いが、貯水槽や散水装置との組合せによる構造により除去できた。一方、散水方式については、マイクロバブルガス等の微細な気泡を分離・除去する効果が高いために、単一の方式で使用した場合でも十分にメタンを除去できる設備であった。

キーワード：メタンガス、温泉、メタンガス濃度分布、地質、ガス分離設備

## 1. はじめに

2007年6月、東京都渋谷区の温泉利用施設で温泉に付随する可燃性天然ガス(メタン)を原因とする爆発死亡事故が発生した。当研究所では、兵庫県下の多くの源泉における安全確認のために、事故発生直後よりメタン分析法を確立(矢野・川元, 2010)し、緊急のメタン測定を実施してきた。その後、2007年11月には温泉法が改正(2008年10月施行)され、利用する全ての源泉について、メタンの測定と基準値を超過した場合には対策等が義務付けられた。

この法改正に対して、内野ら(2010)は北海道内の源泉のメタン調査を実施し、主にメタンが検出された源泉の泉質や成分組成についての解析結果を報告し、一部にはメタンを検出した源泉の分布と地質との関係についても考察している。また、環境省は温泉付随メタンに対する温泉採取施設の安全性の確保を図るために、メタン対策の事例を調査し、貴重な参考資料として取りまとめている(環境省自然環境局自然環境整備担当参事官室, 2009)。しかし、メタンの濃度分布と地質との詳細な関係および基準値を超過したメタンの対策にとって重要なガス分離設備の除去性に関する報告はほとんどなされていない。このため、著者らはこれまでに蓄積してきたメタン調査結果を基に、兵庫県下の源泉におけるメタン濃度分布と地質との関連性について解析を行うとともに、ガス分離設備の構造と除去特性について検討を行った結果、有益な知見が得られたので報告する。

## 2. 方 法

### 2.1 試料の採取

試料は兵庫県下の 115 源泉の温泉付随ガスとし、調査期間は 2007 年 10 月～2011 年 4 月とした (Fig. 3 参照)。メタンの測定場所は環境省の告示 (環境省告示法, 2008) に基づき決定し、サンプリング方法は告示 (告示法, 2008) および環境省のメタン濃度測定手法マニュアル (環境省自然環境局, 2008) に基づき、水上置換法、槽内空気測定法およびヘッドスペース (HS) 法のいずれかを選択した。なお、HS 法とは測定容器内に容量の 5 分の 1 (液相: 気相=1:4) 量の温泉水を採取し、密閉して強く振とうした後の気相を採取する方法である。

### 2.2 測定方法

測定方法は、既報 (矢野・川元, 2010; 矢野ら, 2011) およびメタン濃度測定手法マニュアル (環境省自然環境局, 2008) により、メタンは可燃性ガス検知器法と水素炎イオン化検出器付ガスクロマトグラフ (GC/FID) 法、酸素、窒素および二酸化炭素は熱伝導度検出器付 GC (GC/TCD) 法を用いた。使用した装置は、可燃性ガス検知器は GP88A (理研計器社製)、GC/FID は HP5890 (アジレント社製)、GC/TCD は GC3200 (ジューエルサイエンス社製) であった。メタンの定量下限値は、可燃性ガス検知器法では 0.2%LEL、GC/FID 法では 0.02%LEL (矢野ら, 2011) であった。なお、%LEL とは各々の可燃性ガスの爆発下限限界値 (Lower Explosive Limit) と測定濃度値との比を % で示した値であり、メタンの爆発下限限界値は 5 vol% であることから、メタン 1%LEL は 0.05 vol% に相当する単位である。

温泉法に基づく検査のうち、温泉法で規定された基準値以上のメタンを含むか否かの検査方法を Fig. 1 に示した。基準値 (水上置換法: 50%LEL, 槽内空気: 25%LEL, HS 法: 5%LEL) を超える

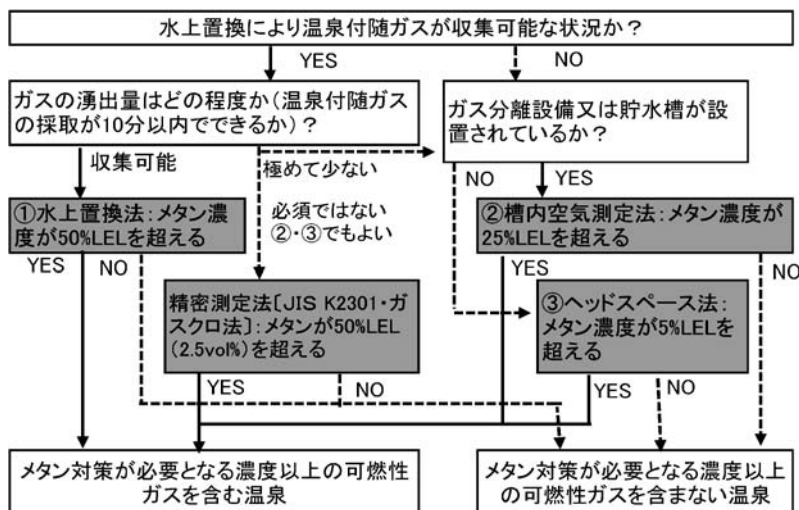


Fig. 1 Flow chart of inspection process for the concentration of methane associated with hot spring water based on Hot Springs Law (Ministry of the Environment, 2008).

図 1 温泉法に基づくメタンの検査方法のフローチャート。環境省自然環境局 (2008), 一部改変

メタンを含む源泉は都道府県知事の採取許可の対象となり、メタンの除去・低減化対策が必要となる。さらに、メタン対策後には確認のための検査が必要であり、その検査方法を Fig. 2 に示した。槽内空気測定法の場合は空気中のメタン濃度が25%LEL 未満、HS 法の場合は気相中のメタン濃度が5%LEL 未満となることが規定されている。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 兵庫県下の温泉付随メタンガスの濃度分布と地質との関係

##### 3.1.1 メタンの濃度分布

兵庫県下の115 源泉について現地調査を行い、温泉付随メタン濃度を測定した。水上置換法で得られた測定結果を Fig. 3 に示した。メタン濃度はN.D.~1,560%LEL の範囲であった。また、水上置換法で不検出となったガスの主成分は二酸化炭素または窒素であった。

なお、ガスの発生が認められない、あるいはガスの発生量が少ないために水上置換法によるガスの採取ができなかった59 源泉については、HS 法による測定を行い、全ての源泉がHS 法の基準値(5%LEL) を超えないことを確認した上で、Fig. 3 の中で5%LEL 未満に分類した。また、施設の構造上、水上置換法およびHS 法による測定が出来なかった1 源泉については、槽内空気測定法の濃度値を示した。さらに114 源泉のうち、メタン検出濃度とその源泉数の構成割合を計算した結果、<5%LEL が83 源泉(72.8%)、<50%LEL が6 源泉(5.3%)、<100%LEL が4 源泉(3.5%)、<300%LEL が5 源泉(4.4%)、300%LEL ≤ が16 源泉(14.0%)であった。また、基準値を超えるメタンが検出され、メタンの除去・低減化対策が必要であった源泉数は26 源泉で、調査源泉の22.6%に相当した。

##### 3.1.2 メタンの検出濃度と地質との関係

メタンの検出濃度と地質との関係を考察するために、メタン濃度が50%LEL 以上であった源泉が位置する地域の地質を地質図(兵庫県土木地質図編纂委員会, 2003a)より調べ、それらの分布を着色してFig. 3 に示した。その結果、大阪層群(表面は沖積層で覆われているためFig. 3 では着色されていないが、下部に大阪層群が存在する(兵庫県土木地質図編纂委員会, 2003b)ものを含む)では8 源泉、神戸層群では7 源泉、大阪層群と神戸層群が混在する地域では2 源泉、和泉層群では3 源泉、大阪層群と和泉層群の境界域では1 源泉、丹波層群、有馬層群(境野溶結凝灰岩)ではそれぞれ2 源泉、大阪層群と丹波層群が混在する地域では1 源泉がメタンを含む源泉に該当した。なお、各地質とその年代は、大阪層群のうち上部亜層群は第四紀の更新世に、中部~下部亜層群は新第三紀の鮮新世に、神戸層群は古第三紀に、和泉層群と有馬層群は白亜紀の前期に、丹波層群はジュラ紀に該当した。

他府県における温泉付随メタンガスの検出と地質との関係については、神奈川県で上総層群や三浦層群を主な温泉採取層とする源泉で、最高濃度で98.5 vol% の高濃度のメタンが検出されていること(代田・小田原, 2008)、北海道でメタンを検出した温泉水を採取した地層は新第三紀に多い

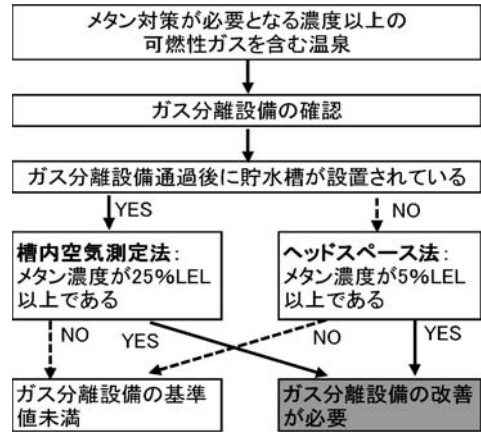


Fig. 2 Flow chart of verification process for the concentration of methane after removal based on Hot Springs Law (Ministry of the Environment, 2008).

図 2 温泉法に基づくメタン対策後の確認のための検査方法のフローチャート。環境省自然環境局(2008)、一部改変

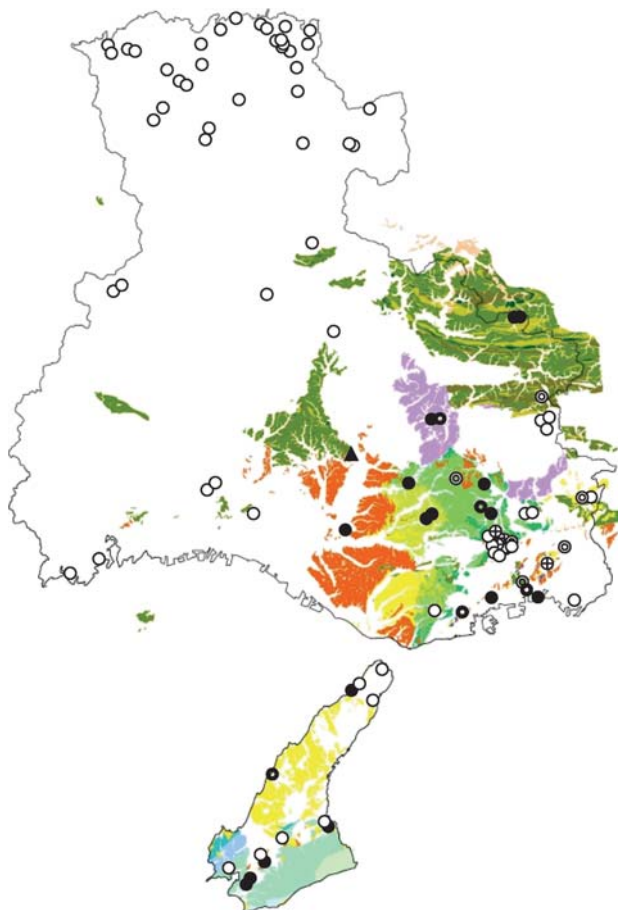


Fig. 3 Distribution of methane gas concentrations associated with hot spring water in Hyogo Prefecture.

Concentration of methane gas associated with hot spring water, measured by the water displacement method. ○\* : <5%LEL, ⊙ : <50%LEL, ⊕ : <100%LEL, ● : <300%LEL, ● : 300%LEL ≤. \* : Includes hot springs with no emission or no detected methane by water displacement method but measured by HS-method. ▲ : 184%LEL (the value in air in tank)

[strata]

- Osaka group : ■ upper subgroup, ■ meso subgroup, ■ lower subgroup
- Kobe group : ■ upper formation, ■ meso formation, ■ lower formation
- Izumi group : ■ shimonada formation, ■ nada formation, ■ kitaama formation, ■ anaga formation, ■ seidan formation
- Arima group : ■ kyono welded tuff
- Tanba group : ■ ■ ■ ■ ■

図 3 兵庫県下の温泉付随メタンの濃度分布.

水上置換法による温泉付随メタンガス濃度の測定. ○\* : <5%LEL, ⊙ : <50%LEL, ⊕ : <100%LEL, ● : <300%LEL, ● : 300%LEL ≤. \* : HS法により測定したメタン濃度値が5%LEL未満の源泉を含む. ▲ : 184%LEL (槽内空気測定法による測定)

[地層]

- 大阪層群 : ■ 上部亜層群, ■ 中部亜層群, ■ 下部亜層群
- 神戸層群 : ■ 上部累層, ■ 中部累層, ■ 下部累層
- 和泉層群 : ■ 下灘累層, ■ 灘累層, ■ 北阿万累層, ■ 阿那賀累層, ■ 西淡累層
- 有馬層群 : ■ 境野溶結凝灰岩
- 丹波層群 : ■ ■ ■ ■ ■



こと（内野ら, 2010）, 古琵琶湖層群から水溶性メタンを含有する温泉が湧出していること（西村, 2004）等の報告に示されているように, 水溶性天然ガスの貯留層は更新世・鮮新世の帯水層であり（氏家, 1994）, 比較的新しい地層に貯留されることが多いと考えられる。そこで, Fig. 3 に着色した基準値を超える高濃度のメタンが検出された源泉が位置する地層の年代について検討した結果, 東京都でメタンガスによる爆発事故を引き起こした源泉が位置する南関東ガス田の上総層群と同年代である更新世・鮮新世の大阪層群以外に, これらの地層の年代よりも古い, 古第三紀, ジュラ紀の堆積層, 白亜紀の溶結凝灰岩層であることが分かった。これについて, 「石炭層の天然ガス（石炭の炭化に伴って生成されるガス）」の場合は, 中生代白亜紀から新生代古第三紀, まれに中生代三畳紀の地層からメタンの検出が認められているとの報告（西村, 2008）があることから, 古第三紀以前の地質から検出されたメタンについては, この種のガスである可能性が高いと推測された。

また, メタンの起源として, メタンは主に微生物による有機物の分解で生成した二酸化炭素からアーケアによる還元で生成するとの報告（金子ら, 2002）がなされている。上記の地層の中で最も古い丹波層群の地質の構成について調べた結果, 丹波層群は, 珪質シルト岩, 黒色頁岩, 砂岩, チャートから構成（兵庫県土木地質図編纂委員会, 2003c）されていることが分かった。黒色頁岩は有機質である（平, 2008）こと等から, これらの地質の構成では多量の有機物を含み, このことが丹波層群でメタンが検出されやすい理由の一つになっているものと考えられた。また, 神戸層群や和泉層群では, 植物や貝の化石を多数含む（兵庫県土木地質図編纂委員会, 2003d; 松浦ら, 1997）ことから, これらの有機物質がメタンの起源のひとつと推測された。

さらに, 白亜紀新世の有馬層群から基準値を超えるメタンが検出された源泉について検討を行った。1) 地質の構成は凝灰岩や凝灰角礫岩を主体とする流紋岩類であり（兵庫県土木地質図編纂委員会, 2003e）, 秋田や新潟のガス田の貯留岩（砂岩, 凝灰岩, 凝灰角礫岩等）（氏家, 1994）と同種の火山砕屑岩であったことから, 有馬層群の地質がメタンの貯留岩に成り得る可能性が考えられた。一方, 2) 岐阜県中津川市の花崗岩からメタンを含む（26.55 vol%）温泉水の湧出を確認した近藤ら（近藤・星野, 1998）は, この事例について, 堆積岩ではない花崗岩からメタンが検出される可能性は低いことから, 離れた地層からメタンが地中を移動してきた可能性を考察しており, 今回の有馬層群のケースについても, 下層に位置する丹波層群（日本地質学会, 2009）に貯留されたメタンの移動の可能性も推測された。

本県には, ガス田（可燃性天然ガス）の分布域は認められていない（矢崎, 1976）が, 温泉法で規定された基準値を超える高濃度のメタンが検出された地域として, 大阪層群, 神戸層群, 和泉層群, 有馬層群, 丹波層群が挙げられた。今後, このような層群が分布する地域での掘削については, メタンガスに対する注意が必要と考えられた。

### 3.2 多様なガス分離設備によるメタンの除去特性

ガス分離設備とは, 「設備通過後の温泉水から分離される気体中のメタン濃度が, 温泉法で定められた基準値未満となるまでの設備」と定義されており, 貯水槽, ガスセパレーター等が該当する。さらに, 除去可能なメタンガスの量などは, ガスセパレーターの構造（原理）やメタンの存在状態（気体, 水中に気泡として存在, 気泡の大きさ等）により異なることが想定される。

本研究では, 調査した源泉に対して設置されたガス分離設備を, 環境省の事例集（環境省自然環境局自然環境整備担当参事官室, 2009）に準じて, 分離の基本原理に基づき, 自然分離方式, 散水方式, 加圧分離方式, 換気（機械排気）方式に分類した。なお, 環境省が示す, それぞれのガス分離方式の概念は, 「自然分離方式: ガス分離を主目的とした装置は設けませんが, 温泉水に含まれる可燃性天然ガスが自然に分離するタイプ」, 「散水方式: 温泉水を分流または細分割, あるいは水滴

化させて落下するように対策する設備」, 「加圧分離方式: 送湯圧力環境下の温泉水から自然に分離した可燃性天然ガスが溜まる密閉容器上部から可燃性天然ガスを選択排出するように対策する設備」, 「換気 (機械排気) 方式: 機械により強制的に可燃性天然ガスを排気する設備」である。ここでは, 単一の方式や, それらを組合せた構造として, 11 源泉 (源泉 A~K) を代表例にメタンの除去特性を考察した。なお, 源泉 A~K の湧出口付近で水上置換法により採取された温泉付随ガス中のメタン濃度は, 施設の構造上, 測定値が得られなかった場合を除き, 54~1,230%LEL の範囲であった (Table 1)。

### 3.2.1 自然分離方式 (貯水槽) によるメタンガスの分離・除去方法

温泉の利用施設では, 十分な量の温泉水を確保するために予め温泉水を揚水し, 貯留する貯水槽が設けられていることが多い。この貯水槽は温泉水を貯留する場所としての機能以外に, メタンを分離・除去する分離設備としての機能も兼ね備えている。したがって, 既存の貯水槽をガス分離設備として機能させている施設も多数認められた。このような代表例である源泉 A~E (Fig. 4) について, 各貯水槽における槽内空気および貯水槽通過後の温泉水の HS 法によるメタン濃度の測定結果を Table 2 に示した。なお, 本報の Table 中では, Fig. 1 で示した温泉法で規定されたメタン濃度を超過している測定値に下線を付し, ガス分離設備における測定値を斜体文字で示した。また, 源泉 A~E のガス分離設備を含む施設の構造を Fig. 4 (1)~(3) に示した。源泉 A, B は貯水槽

Table 1 Methane concentrations measured by the water displacement method at hot spring wells from A to K.

表 1 各源泉井戸 (源泉 A~K) における水上置換法によるメタン濃度。

源泉	源泉井戸での水上置換法によるメタン濃度 (%LEL)
A	466
B	54
C	840, 423*
D	548, 238*
E	—**
F	745
G	—**
H	—**
I	—**
J	1230
K	785

\* 2 源泉の混合泉として使用しているため, それぞれの測定値を記載。

\*\* 施設の構造上, 測定不可能であった源泉は一を記載。

Table 2 Methane concentrations in air in water tank and hot spring water after pass through tanks, measured by HS-method at hot springs A, B, C, D and E.

表 2 源泉 A~E における貯水槽での槽内空気及び貯水槽通過後の温泉水の HS 法\* によるメタン濃度。

源泉	源泉水槽 (源泉槽)		第二貯水槽 (沈澱槽)		第三貯水槽 (処理水槽)	
	槽内空気 (%LEL)	通過後の HS 法 (%LEL)	槽内空気 (%LEL)	通過後の HS 法 (%LEL)	槽内空気 (%LEL)	通過後の HS 法 (%LEL)
A	<u>100</u>	2.8	—	—	—	—
B	<u>29.0</u>	1.1	—	—	—	—
C	<u>36.1</u>	1.5	<0.2	1.2	—	—
D	<u>26.0</u>	1.8	5.0	1.5	—	—
E	<u>45.0</u>	<u>6.0</u>	1.6	2.9	0.5	1.0

\*HS 法: 測定容器内に容量の 5 分の 1 (液相: 気相=1:4) 量の温泉水を採取し, 密閉して強く振とうした後の気相中のメタン濃度を測定する方法。

下線を付した値: 温泉法で定められた基準値以上であるメタン濃度値。

斜体で記した値: 測定箇所がガス分離設備であるメタン濃度値。

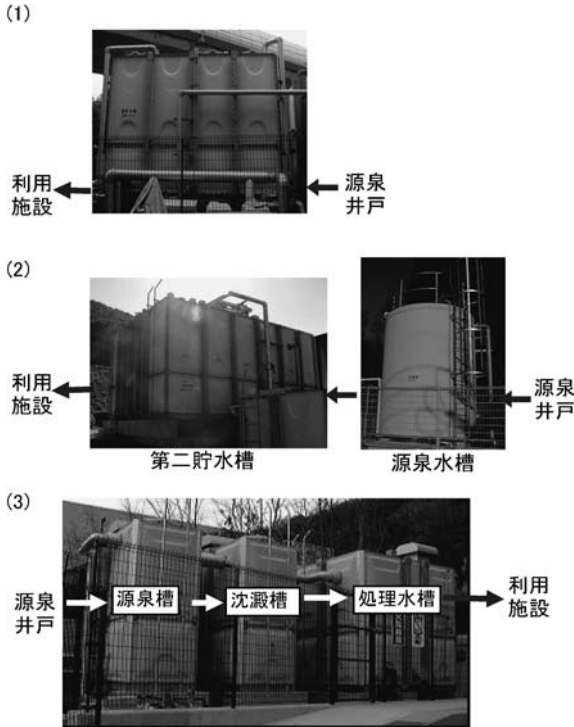


Fig. 4 Separation and removal equipments for methane gas using water storing tanks (one to three tanks). Arrows show flow of hot spring water.

- (1) using one tank ( example of hot springs A and B )
- (2) using two tanks ( example of hot springs C and D )
- (3) using three tanks ( example of hot spring E )

図 4 貯水槽を利用したメタンガスの分離・除去設備。  
矢印は温泉水の流れを示す。(1) 貯水槽が1槽の場合(源泉 A, B の例)、(2) 貯水槽が2槽の場合(源泉 C, D の例)、(3) 貯水槽が3槽の場合(源泉 E の例)

(ガス分離設備通過後の貯水槽内の空気中メタン濃度)まで低減化されていたことから、第二槽までがガス分離設備として機能していることが確認された。

3.2.2 自然分離方式(貯水槽)と散水方式の組合せによる除去方法

源泉 F について、前項と同様に、既存の貯水槽1槽 (Fig. 5 (a)) : 写真では貯水槽が2槽設置されているが、並列に送水して利用するため、ガス分離設備としては1槽)がガス分離設備として機能し、メタンを基準値未満まで低減化できるか否かを検証した。Fig. 2の検査方法に基づき、貯水槽通過後の温泉水について、HS法によるメタン濃度を測定した。その結果、メタン濃度はTable 3に示すように、8.8%LELで基準値を超過し、メタン対策が必要であった。一方、槽内空気は205%LELと高濃度で、貯水槽がガス分離設備として機能し、槽内でメタンが分離されていることを確認できた。さらに、メタンを除去する対策として、貯水槽内の源泉流入管にFig. 5 (b)に示す散水装置を取り付ける方法を採用した。その結果、槽内空気が606%LELと高くなる一方で、貯水槽通過後の温泉水のHS法による測定値は4.7%LELで基準値(5%LEL)未満まで低減化していた。このよう

を1槽 (Fig. 4 (1))、源泉 C, Dは源泉井戸付近に設置した源泉水槽と利用施設付近に設置した第二貯水槽の2槽 (Fig. 4 (2))を有する。また、源泉 Eは大型の排気口を有する源泉槽、沈殿槽、処理水槽の3槽が直列に連結されており (Fig. 4 (3))、順次オーバーフローした温泉水が送水される構造となっている。

源泉 A~E について、Fig. 2の検査方法に基づきメタンの測定を実施した結果、いずれの源泉も貯水槽を通過させることにより、貯水槽がガス分離設備として機能し、温泉法で規定された基準値未満(源泉 A, B: 貯水槽(ガス分離設備)通過後の温泉水のHS法によるメタン濃度値が5%LEL未満、源泉 C, D, E: ガス分離設備通過後の第二貯水槽内の槽内空気が25%LEL未満)となり、メタンは十分に除去されていた (Table 2)。したがって、源泉 A~E については、現状の施設で課題点は認められず、特別なメタン対策は必要でなかった。

また、源泉 C, Dは貯水槽2槽を有する施設であるが、Table 2に示すように、いずれも源泉水槽通過後の温泉水はHS法でメタン濃度が5%LEL未満となっていたことから、源泉水槽1槽でメタンを十分に除去できることが分かった。源泉 Eについては、沈殿槽(第二槽)の槽内空気が1.6%LELと基準値25%LEL未満





Fig. 5 Separation and removal equipment for methane gas using water tanks combined with sprinkling device.

Arrows show flow of hot spring water. (a) tank (b) sprinkling device

図 5 貯水槽と散水装置の組合せによるメタンガスの分離・除去設備。

矢印は温泉水の流れを示す。(a) 貯水槽 (b) 散水装置

Table 3 Comparison data for methane concentrations before and after removal of methane using a sprinkling device at each measurement point at hot spring F.

表 3 源泉 F における各測定箇所での散水装置設置前後のメタン濃度比較。

検査時の状況	源泉井戸		貯水槽
	HS 法 (%LEL)	槽内空気 (%LEL)	通過直後の HS 法 (%LEL)
散水装置設置前	8.7	205	8.8
散水装置設置後	8.7	606	4.7

HS 法：測定容器内に容量の 5 分の 1 (液相：気相=1：4) 量の温泉水を採取し、密閉して強く振とうした後の気相中のメタン濃度を測定する方法。

下線を付した値：温泉法で定められた基準値以上であるメタン濃度値。

斜体で記した値：測定箇所がガス分離設備であるメタン濃度値。

設備として機能し、メタンを基準値未満まで低減化できるか否かを検証した。源泉 G は Fig. 6 に示すように、源泉井戸付近に設置された源泉水槽に温泉水を貯水し、そこから約 700m 離れた 3 施設に配湯している。源泉 G から配湯している 3 施設のうち 1 施設は利用施設敷地内に貯水槽を有するが、その他の 2 施設は温泉スタンド等のため、貯水槽を設けていない構造であった。このため、Fig. 2 に基づく検査方法は、ガス分離設備通過後に貯水槽が設置されていない場合に該当し、源泉水槽通過後の温泉水について HS 法を行った。その結果、源泉水槽通過後の温泉水の HS 法によるメタン濃度値は 6.7%LEL で基準値 5%LEL を超過し、メタン対策のための施設改善が必要と判断された。施設改善に伴うメタンの測定結果を対策順にまとめて Table 4 に示した。最初の対策として、源泉水槽内のメタンガスを排気ファンで強制的に排気する設備を設置した (Fig. 6)。この対策により、源泉水槽内のメタン濃度は顕著に低下 (184%LEL から 25%LEL) したが、HS 法によるメタン濃度値は 6.3%LEL で、対策前 (6.7%LEL) に比べて僅かに減少したものの、基準値未満まで低減化できるほど顕著な効果ではなかった。そこで、次の改善策として、源泉水槽へ導入する温泉水を散水させる対策法を導入した。すなわち、源泉水槽内に設置した源泉流入管に多数の細孔を施し、

に、散水装置の適用により、メタンの除去性が高まることを確認できた。本散水装置は簡易かつ低コストで有用性は高いが、本装置が有効に機能するためには、装置が貯水槽内で水面よりも高い位置にあることが必須であることから、貯水槽の水位制限が重要となっている。

### 3. 2. 3 自然分離方式 (貯水槽)、換気 (機械排気) 方式および散水方式の組合せによる除去方法

源泉 G について、3. 2. 1 項と同様に、既存の源泉水槽がガス分離

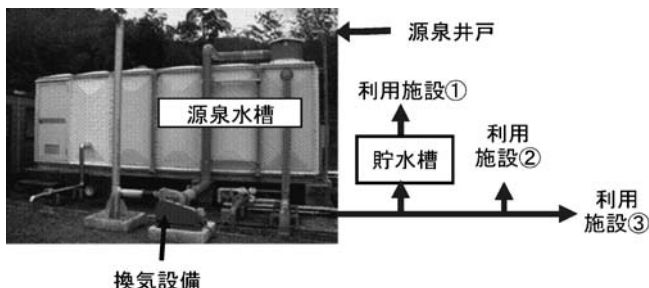


Fig. 6 Separation and removal equipment for methane gas using water tanks combined with exhaust ventilation and sprinkling devices. Arrows show flow of hot spring water.

図 6 貯水槽, 排気設備および散水装置の組合せによるメタンガスの分離・除去設備。矢印は温泉水の流れを示す。

Table 4 Comparison data for methane concentrations before and after removal of methane using an exhaust ventilation and a sprinkling device at each measurement point at hot spring G.

表 4 源泉 G における各測定箇所での換気装置及び散水装置設置前後のメタン濃度比較。

検査時の状況	源泉水槽		第二貯水槽 (利用施設①)		貯水槽が設置されていない施設 (利用施設②)
	槽内空気 (%LEL)	通過直後の HS 法 (%LEL)	槽内空気 (%LEL)	通過直後の HS 法 (%LEL)	HS 法 (%LEL)
対策前	<u>184</u>	<u>6.7</u>	1.0	測定せず	測定せず
対策 1 後: 排気設備の設置	25.0	<u>6.3</u>	0.6	3.3	<u>6.2</u>
対策 2 後: 散水装置の設置	測定せず	2.0	<0.2	1.7	2.2

HS 法: 測定容器内に容量の 5 分の 1 (液相: 気相=1:4) 量の温泉水を採取し, 密閉して強く振とうした後  
の気相中のメタン濃度を測定する方法。

下線を付した値: 温泉法で定められた基準値以上であるメタン濃度値。

斜体で記した値: 測定箇所がガス分離設備であるメタン濃度値。

温泉水がシャワー状に散水される構造とした。これにより, HS 法によるメタン濃度を 2.0%LEL まで低減化することができた。

前項目 (3.2.2) のメタン対策で認められた結果と同様に, 散水方式は温泉水と空気との接触面積を増加させ, 温泉水中に含まれるメタンの揮散を促進する効果があることから, メタンが水中に残留しやすい条件下では, 特に有効であることが分かった。

### 3.2.4 加圧分離方式と自然分離方式 (貯水槽) との組合せによる除去方法

既存の貯水槽 1 槽を有する源泉 H について, 貯水槽がガス分離設備として十分に機能しているか否かを検証したが, 本貯水槽のみではメタンガスを基準値未満まで低減することはできなかった。また, 新規の施設である源泉 I は, Fig. 1 に基づく測定で基準値を超えるメタンが検出された。したがって, これらの源泉ではメタン対策が必要となり, 源泉井戸と貯水槽との間に Fig. 7 に示す加圧分離方式のガスセパレーターを設置した。源泉 H については対策前後のメタン濃度の測定結果を, 源泉 I については新規施設のため対策前の測定値が無いことから, 対策後のみのメタン濃度の測定結果をまとめて Table 5 に示した。ガスセパレーターの設置により, 後続の貯水槽内のメタ

Table 5 Comparison data for methane concentrations before and after removal of methane using a pressurized gas separator at each measurement point at hot springs H and I.

表 5 源泉 H, I における各測定箇所での加圧分離方式のガスセパレーター処理前後のメタン濃度比較.

源泉	検査時の状況	源泉井戸		ガスセパレーター		貯水槽	
		HS 法 (%LEL)	排気口 (%LEL)	通過直後 HS 法 (%LEL)	槽内空気 (%LEL)	通過後の HS 法 (%LEL)	
H	加圧分離方式のガスセパレーター設置前	16.8	—	—	447	15.8	
	加圧分離方式のガスセパレーター設置後	18.0	728	施設の構造上測定不可能	4.0	17.0	
I	加圧分離方式のガスセパレーター設置後	13.0	95.0	14.0	4.0	3.5	

HS 法：測定容器内に容量の 5 分の 1 (液相：気相=1：4) 量の温泉水を採取し、密閉して強く振とうした後の気相中のメタン濃度を測定する方法。

下線を付した値：温泉法で定められた基準値以上であるメタン濃度値。

斜体で記した値：測定箇所がガス分離設備であるメタン濃度値。

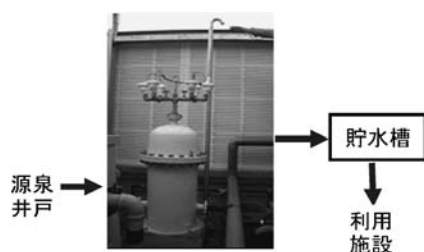


Fig. 7 Separation and removal equipment for methane gas using a pressurized gas separator combined with water tanks.

Arrows show flow of hot spring water.

図 7 貯水槽と加圧分離方式のガスセパレーターの組合せによるメタンガスの分離・除去設備。矢印は温泉水の流れを示す。

メタン濃度は源泉 H では対策前の 447%LEL から基準値 (25%LEL) 未満の 4.0%LEL まで顕著に低減でき、源泉 I でも 4.0%LEL であり、基準に適合した。

次に、メタンの除去・低減化の過程を検証した結果、ガスセパレーターの排気口のメタン濃度値は、源泉 H で 728%LEL、源泉 I で 95.0%LEL と高濃度であり、ガスセパレーターによりメタンガスが十分に分離・除去されていることを確認できた。一方、源泉 H では貯水槽通過後の温泉水の HS 法によるメタン測定値は、対策の前後で、それぞれ 15.8%LEL、17.0%LEL と、いずれも HS 法の基準値 (5%LEL 未満) を超過し、対策の前後でメタン濃度はほとんど変化しなかった。さらに源泉 I についても、ガスセパレーター通過前後の HS 法によるメタン濃度を測定した結果、それぞれ 13.0%LEL、14.0%LEL と基準値を超過し、対策の

前後でメタン濃度に変化は認められなかった。これらの結果から、本ガスセパレーターには HS 法の測定値に反映される水中メタンを顕著に除去・低減化させる効果は認められないことが分かった。この理由として、本ガスセパレーターの説明書によれば、『本ガスセパレーターは、流水中の気泡化したガスを分離排気するもので、マイクロバブル (気泡の直径が 10  $\mu\text{m}$  ~ 数 10  $\mu\text{m}$  のガス) や白濁化した微細な浮遊気泡の分離排気に対応するものではない』との記載があったことから、この種のガスセパレーターでは、温泉水中の微細な気泡のメタンまでの除去を必要とする場合、適切ではないと考えられた。したがって、本ガスセパレーターを単独で使用する場合、検査方法は HS 法となることからメタンの基準値を超過する可能性が高く、今回の源泉 H, I の施設構造に示したように、後続に貯水槽を組合せた構造が必要と考えられた。

また、Fig. 2 に従い源泉 H の槽内空気を検査した結果、「メタン濃度は 25%LEL 未満」で槽内空気の基準値を満たしているとの判断に至ったが、貯水槽通過後の温泉水については、HS 法で 17.0%LEL

と基準値 (5%LEL) 以上であったことから, 本源泉水では水中に残留しやすいメタンによる影響が大きいと考えられた. メタンガスの水中での存在状態や設備の構造等によっては, 貯水槽内のメタン濃度は 25%LEL 未満となるが, 貯水槽通過後の温泉水の HS 法では 5%LEL 未満とならない場合が認められたことから, このような源泉水に対する対策法としては, 散水方式の適用が望ましいと考えられた. また, 災害防止の観点から, 両者の測定値が基準値を満たす規制方法の必要性が考えられた.

### 3.2.5 散水方式による除去方法

既存の貯水槽 1 槽を有する源泉 J, K について, 貯水槽がガス分離設備として十分に機能しているか否かを検証したが, 本貯水槽のみではメタンガスを基準値未満まで低減化することはできなかった. したがって, これらの源泉ではメタン対策が必要となり, 源泉井戸と貯水槽との間に散水方式のガスセパレーターを設置した.

源泉 J のガスセパレーターは, 細孔を施した板 (分散板) を複数枚重ねたところに温泉水を噴射, 通過させて温泉水中のメタンガスを分離・除去する構造であり, 源泉 K は 3.2.3 項と同様に温泉水をシャワー状に流出させることにより, メタンを除去する構造であった. いずれのガスセパレーターも散水の効果を利用したものであり, それぞれの構造を Fig. 8 (1), (2) に, メタン濃度の測定結果を Table 6 にまとめて示した.

源泉 J は, ガスセパレーターの設置により, 貯水槽内の槽内空気を 125%LEL から 18.0%LEL に, また貯水槽通過後の HS 法による測定値についても 9.5%LEL から 4.0%LEL に低減することができた. さらに, 分散板の数を増やして改良した結果 (改良後), 槽内空気は 5.9%LEL に, 貯水槽通過後の HS 法による測定値は 1.8%LEL に減少したことから, 除去性を高める方法として, 分散板を増やす方法も有効であることが分かった.

また, ガスセパレーター通過前後でのメタン濃度の比較については, 通過前の HS 法による測定は実施していないが, 源泉井戸における水上置換法によるメタン濃度が高濃度 (1,230%LEL) であったことから, 同様に源泉井戸での HS 法による濃度値も基準値 (5%LEL) を大幅に上回る値であることが推測された. 一方, ガスセパレーター通過後の温泉水の HS 法による測定結果は基準値 (5%LEL) 未満まで低下していたことから, ガスセパレーターによりメタンは十分に分離・除去されたことが分かった.

源泉 K についても, ガスセパレーターの設置により, 貯水槽内の槽内空気を 67.0%LEL から 1.8%LEL に低減化することができた. また, HS 法の測定値についても, ガスセパレーターの通過前後で測定値が 17.0%LEL から 1.0%LEL に減少しており, 顕著な分離・除去効果が認められた.

これらの結果から, 散水式のガスセパレー

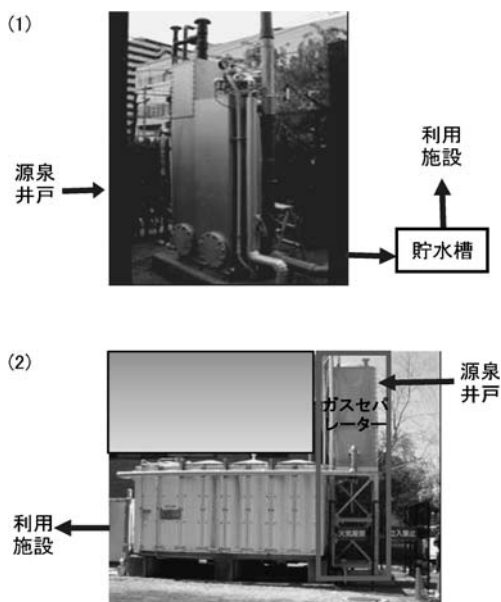


Fig. 8 Separation and removal equipment for methane gas using a gas separator with function of sprinkling system. Arrows show flow of hot spring water.

図 8 散水方式のガスセパレーターによるメタンガスの分離・除去設備. 矢印は温泉水の流れを示す.



Table 6 Comparison data for methane concentrations before and after removal of methane using a gas separator with function of sprinkling system at each measurement point at hot springs J and K.

表 6 源泉 J, K における各測定箇所での散水方式のガスセパレーター処理前後のメタン濃度比較.

源泉	検査時の状況	源泉井戸		ガスセパレーター		貯水槽	
		HS 法 (%LEL)	排気口 (%LEL)	通過直後 HS 法 (%LEL)	槽内空気 (%LEL)	通過後の HS 法 (%LEL)	
J	散水方式のガスセパレーター設置前	測定せず	—	—	<u>125</u>	<u>9.5</u>	
	散水方式のガスセパレーター設置後	測定せず	<u>100&lt;</u>	<u>11.0</u>	18.0	4.0	
	散水方式のガスセパレーター改良*後	測定せず	<u>100&lt;</u>	3.8	5.9	1.8	
K	散水方式のガスセパレーター設置前	<u>17.0</u>	—	—	<u>67.0</u>	<u>5.5</u>	
	散水方式のガスセパレーター設置後	<u>17.0</u>	<u>45</u>	1.0	1.8	測定せず	

HS 法：測定容器内に容量の 5 分の 1 (液相：気相 = 1 : 4) 量の温泉水を採取し、密閉して強く振とうした後の気相中のメタン濃度を測定する方法。

下線を付した値：温泉法で定められた基準値以上であるメタン濃度値。

斜体で記した値：測定箇所がガス分離設備であるメタン濃度値。

\*分散板の枚数を増やすことによる改良。

ターは、3.2.4 項で述べたガスセパレーターの除去特性と異なり、ガスセパレーター通過後の温泉水の HS 法による測定値についても、基準値未満まで低減化できることが分かった。すなわち、本ガスセパレーターはマイクロバブルのように温泉水から分離し難い付随ガスについても、散水の効果により十分に分離・除去が可能であった。また、この方式では、ガス分離設備として後続に貯水槽を設置する必要性は低く、単独でも十分にメタンガスの分離・除去が可能な設備であった。一方で、散水方式の装置による温泉水の泉温や気体成分への影響等については、注視すべき課題と考えている。

以上の解析結果から、基準値を超える高濃度のメタンが検出された源泉では、種々の方式のガス分離設備の設置により、それらの特徴的な除去機構から効果的にメタンが除去されている実態が確認できた。

#### 4. ま と め

兵庫県下の温泉付随メタンに対する安全確保のために、メタンの濃度分布と地質との関係、温泉法でメタン対策が必要となる施設について、メタンの除去特性に関する研究を実施した。115 源泉を対象とした結果、水上置換法で得られたメタン濃度は N.D.~1,560%LEL の範囲であった。温泉法で規定されたメタンの基準値を超過し、メタン対策が必要となった源泉は 26 源泉 (22.6%) であり、それらの源泉は、大阪層群、神戸層群、和泉層群、有馬層群、丹波層群に位置した。

また、メタンの除去対策として用いられているガス分離設備を、その原理から、自然分離方式 (貯水槽)、換気方式 (気化したガスの排気)、加圧分離方式 (マイクロバブル以上の大きさに気泡化したメタンの分離・除去)、散水方式に分類したが、これらの単一方式や複数の方式を組合せた構造

が多数認められた。ガス分離設備の特徴として、自然分離方式の貯水槽のうち、1槽ではメタン濃度が高い源泉に対して十分に除去出来ない場合も認められたが、2槽を連結することにより基準値未満までの除去が可能であった。換気方式と加圧分離方式のガスセパレーターでは、メタンの除去率は単一の方式で低い結果を示したが、貯水槽や散水装置との組合せにより基準値未満までの除去が可能であった。散水方式のガスセパレーターでは、マイクロバブルガス等の微細な気泡までのメタンガスの分離・除去が可能であり、単独で使用しても十分にメタンを除去できる設備であった。このように、これらの各分離方式による除去特性を把握し、各源泉における温泉付随メタンガスの性状や施設の構造に応じて、ガス分離設備を選択・活用することが、メタンの除去対策を行う上で重要と考えられた。

本研究結果から、採取許可対象となった県内の源泉に設置されたガス分離設備の特徴的な除去機能により、効果的にメタンが除去されている実態を明らかにし、今後のメタン対策に資する有益な根拠データを蓄積することができた。

## 謝 辞

本研究を実施するに当たり、ご協力頂きました兵庫県健康福祉部健康局薬務課ならびに県下の健康福祉事務所関係各位に深謝いたします。また、本報で用いた地質図を作成いただいた柏原なおこ氏に深く感謝いたします。

## 引用文献

- 代田 寧, 小田原 啓 (2008) : 神奈川県における温泉付随ガスの実態調査結果 (第1報), 神奈川県温泉地学研究所報告, 40, 79-84.
- 兵庫県土木地質図編纂委員会編 (2003a) : 兵庫の地質—兵庫県地質図 (1 : 100,000)—1996, 財団法人兵庫県まちづくり技術センター, 神戸.
- 兵庫県土木地質図編纂委員会編 (2003b) : 兵庫の地質—兵庫県地質図解説書・地質編—1996, p. 232, 財団法人兵庫県まちづくり技術センター, 神戸.
- 兵庫県土木地質図編纂委員会編 (2003c) : 兵庫の地質—兵庫県地質図解説書・地質編—1996, pp. 80-85, 財団法人兵庫県まちづくり技術センター, 神戸.
- 兵庫県土木地質図編纂委員会編 (2003d) : 兵庫の地質—兵庫県地質図解説書・地質編—1996, pp. 174-181, pp. 162-167, 財団法人兵庫県まちづくり技術センター, 神戸.
- 兵庫県土木地質図編纂委員会編 (2003e) : 兵庫の地質—兵庫県地質図解説書・地質編—1996, pp. 123-129, 財団法人兵庫県まちづくり技術センター, 神戸.
- 金子信行, 前川竜男, 猪狩俊一郎 (2002) : アーケアによるメタンの生成と間隙水への濃集機構, 石油技術協会誌, 67 (1), 97-110.
- 環境省告示法 (2008) : 温泉法施行規則第六条の三第一項第一号及び第三号並びに第六条の六第一項の規定に基づき環境大臣が定める方法等, 平成二十年七月二十三日環境省告示第五十八号.
- 環境省自然環境局編 (2008) : 温泉法におけるメタン濃度測定手法マニュアル (2008年12月改訂), pp. 7-17, 環境省.
- 環境省自然環境局自然環境整備担当参事官室編 (2009) : 温泉法に基づく可燃性天然ガスによる災害の防止対策に関する事例集, pp. 10-11, 環境省.
- 近藤和男, 星野一男 (1998) : 花崗岩山地でえられた含メタン温泉について, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 3, 223-227.
- 松浦浩久, 吉岡敏和, 宮地良典, 水野清秀 (1997) : 大阪湾周辺地域の地質図の編纂, 地質調査所

月報, 48 (1), 13-16.

日本地質学会編 (2009) : 日本地方地質誌 5 近畿地方, pp. 183-187, 朝倉書店, 東京.

西村 進 (2004) : 琵琶湖周辺の炭酸泉. 温泉科学, 54, 55-64.

西村 進 (2008) : 天然ガスを含む温泉について. 温泉工学会誌, 30 (2), 87-97.

平 朝彦 (2008) : 地層の解説, pp. 147-148, 岩波書店, 東京.

内野栄治, 青柳直樹, 中山憲司 (2010) : 北海道における改正温泉法によるメタン検出温泉の分布とその地球化学的特徴. 温泉科学, 59, 282-294.

氏家良博 (1994) : 石油地質学概論, pp. 109-122, 東海大学出版会, 東京.

矢野美穂, 川元達彦 (2010) : 接触燃焼式可燃性ガス検知器法及びガスクロマトグラフ法による温泉付随メタンガスの測定値に与える酸素濃度の影響. 分析化学, 59 (2), 131-136.

矢野美穂, 山崎富夫, 川元達彦 (2011) : 温泉付随メタンガス測定におけるガスクロマトグラフ法と接触燃焼式可燃性ガス検知器法との比較. 兵庫県立健康生活科学研究所研究報告, 2, 41-46.

矢崎清貴編 (1976) : 日本油田・ガス田分布図 (第 2 版), 地質調査所.