

# 高塩濃度・低塩濃度熱水系の 形成機構と第四紀火山活動の関係

高橋 正明<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

日本において地熱発電を目的とする地熱開発が行われている火山性の熱水対流系地熱資源は、およそ2 Ma以降の第四紀火山活動に関連して賦存していると考えられている。厳密には、火山性地熱資源は、650℃以上のマグマ、650℃以下の高温岩体及び熱水対流系の各「地熱」資源に分類され、熱水対流系地熱資源は、240℃以上の蒸気卓越系（例えば松川地域の地熱系）、150℃以上の高温熱水卓越系、90-150℃の中温熱水卓越系、90℃以下の低温熱水卓越系に、それぞれ分類される（宮崎ほか、1991）。以下では「火山性地熱資源」あるいは「地熱開発が行われている熱水系」を「150℃以上の高温熱水卓越系」の意味に限定して述べる。

しかし、火山性地熱資源の形成に火山活動がどの様に関与しているかについては、①熱的な影響にのみ限定されている、②高温火山ガスなどマグマ起源物質が付加されるなど物質的な影響も及ぼしているという両極端の仮説が存在し、明確な解答が与えられていない状態である（日下部・松葉谷、1986）。

ここでは高橋（1994）を基に、火山性地熱資源の形成への火山活動の影響について概説したい。なお、地熱開発地域（熱水系）の名称は地熱発電所名を用いた。従来、濁川、奥会津、霧島、伏目と地域・地区名で呼ばれてきた地熱開発地域も、それぞれ森、柳津西山、大霧、山川と記した。第1図に、日本の地熱開発地域・地熱発電所の所在地及び諸元を示した。

## 2. 地熱流体の塩化物イオン濃度・同位体及びガス組成

第2図に、地熱開発が行われている熱水系から得られる地熱流体中の塩化物イオン濃度を示した。Chiba (1991)は、大部分の地熱流体は貯留層を構成する鉱物と化学平衡状態にあり、pHとナトリウムイオン濃度を与えると他のイオンの濃度が推定できることを示した。地熱開発が行われている熱水系から得られる地熱流体のpHは鬼首が酸性である以外はすべて中性であること、ナトリウムイオン濃度と塩化物イオン濃度との間には非常によい相関があることを考えると、塩化物イオン濃度は地熱流体の形成機構を示す指標であると考えられることができる。

また、第3図には地熱流体の「水」の起源を示す指標として酸素同位体組成と水素同位体組成の関係（以下、同位体組成）を、第4図には地熱流体中の「ガス」の起源を示す指標として窒素ガスと希ガス（以下、窒素・希ガス組成）の関係を、それぞれ示した。

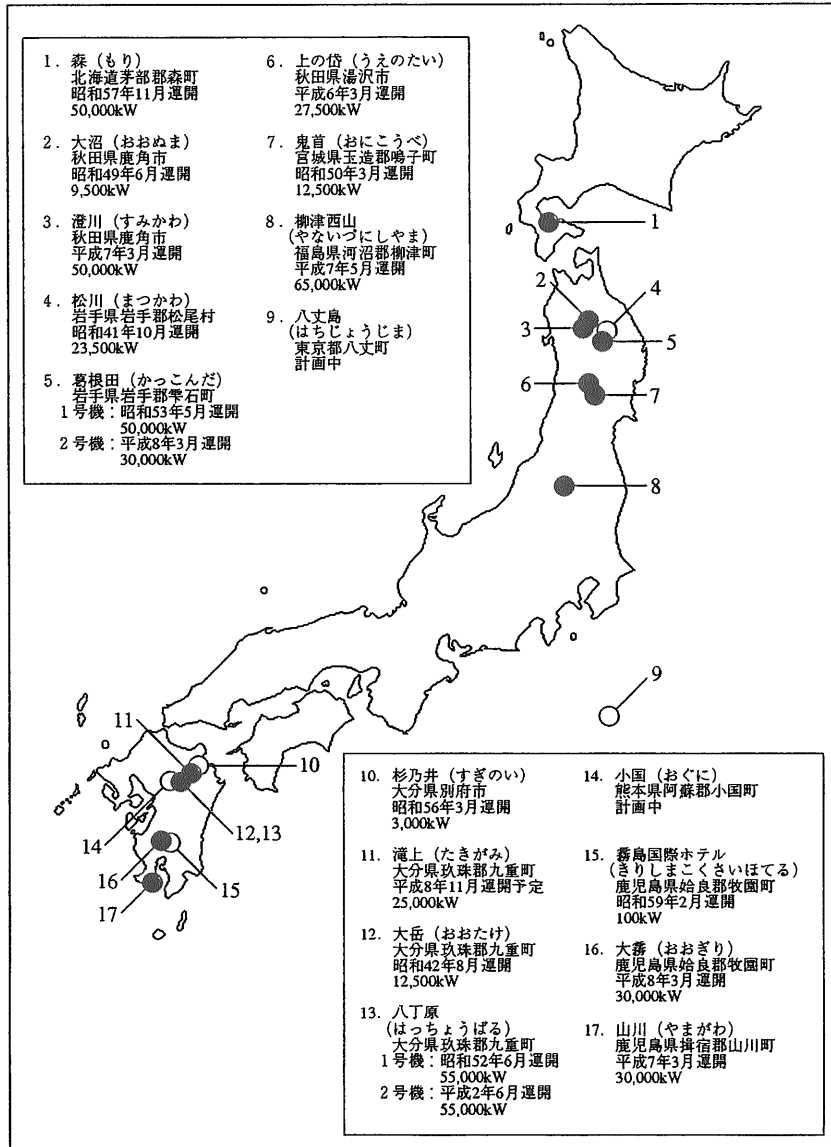
これらの図から以下のことが分かる。

① 森、柳津西山両地域では、塩化物イオン濃度が数千～一万数千ppmと高く、同位体組成が高温火山ガス組成の方向に、窒素・希ガス組成がマグマ組成の方向に、それぞれ著しくシフトする地熱流体が得られる（以下、「高塩濃度」熱水系と呼ぶ）。

② 大沼、澄川、葛根田、上の岱、滝上、大岳、八丁原、及び大霧の各地域では、塩化物イオン濃度が数百～千数百ppmと低く、同位体組成が天水組成に類似するか、数%の酸素同位体シフトを示し、窒素・

1) 地質調査所 地殻熱部

キーワード：火山性地熱資源、火山性温泉、高塩濃度熱水系、  
低塩濃度熱水系、地化学モデル



第1図 日本の地熱開発地点・地熱発電所の所在地及び諸元。黒丸で示した地点が本報告で取り扱った熱水系（高温熱水卓越系）の所在地。

希ガス組成が大気あるいは大気平衡地下水組成に類似する地熱流体が得られる（以下、「低塩濃度」熱水系と呼ぶ）。

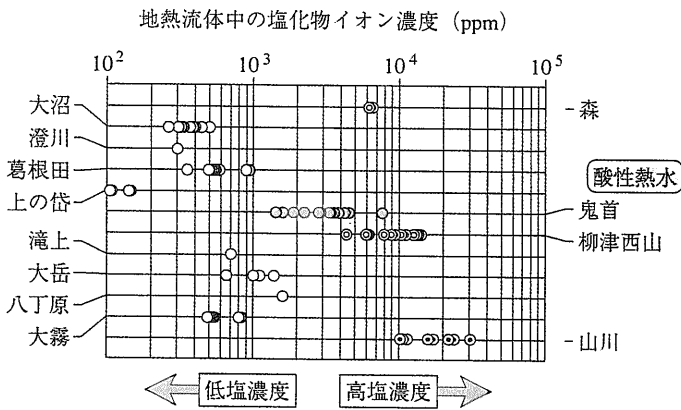
③ 山川地域では、塩化物イオン濃度が1～数万ppmと高く、同位体組成が海水に類似する、あるいは海水と天水の混合線付近に位置する地熱流体が得られる。

④ 鬼首地域では、塩化物イオン濃度が数千ppmと高く、同位体組成が天水から高温火山ガスの方向に、

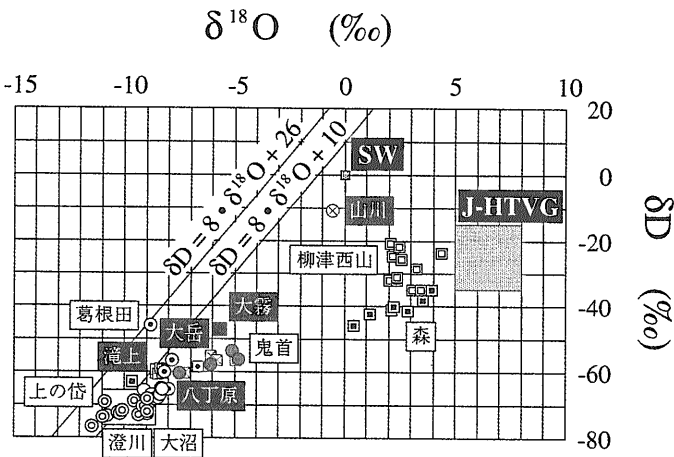
窒素・希ガス組成が大気あるいは大気平衡地下水組成からマグマ組成の方向に、それぞれ若干シフトする、酸性の地熱流体が得られる。

### 3. 熱水系の周辺に存在する第四紀火山・火山性温泉

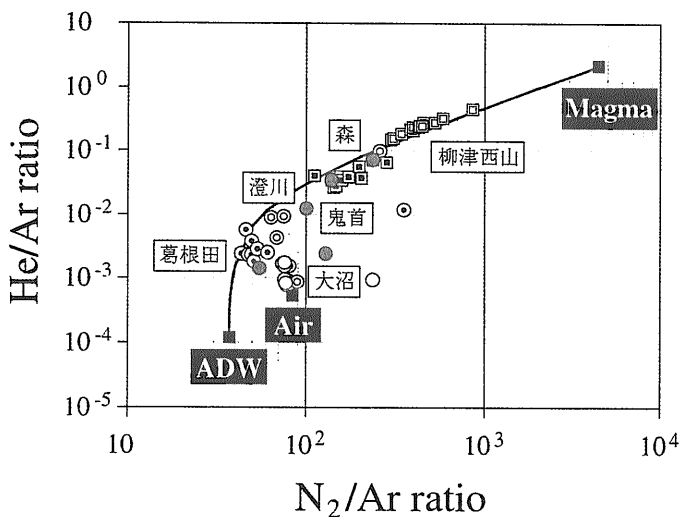
第1表に、地熱開発が行われている熱水系の周辺半径10km以内に存在する、①100℃以上の噴気地



第2図 地熱開発が行われている熱水系から得られる地熱流体中の塩化物イオン濃度。塩化物イオン濃度が2000ppm以下の「低塩濃度」熱水系の地域を左側に、4000ppm以上の「高塩濃度」熱水系の地域を右側にそれぞれ示した。酸性熱水が得られている鬼首熱水系も右側に示した。



第3図 地熱開発が行われている熱水系から得られる地熱流体の酸素同位体組成と水素同位体組成の関係。東北日本の熱水系を黒字で、九州の熱水系を白字でそれぞれ示した。SW：海水、J-HTVG：日本の安山岩・流紋岩質火山の高温噴気から得られる火山ガス(所謂高温火山ガス)の酸素・水素同位体組成の範囲。東北日本の天水(降水、河川水、地下水)の酸素・水素同位体組成は図中  $\delta D = 8 \cdot \delta^{18}O + 26$  のライン付近(酸素同位体組成  $= -9 \sim -12\%$  程度、水素同位体組成  $= -50 \sim -80\%$  程度)に、九州の天水の酸素・水素同位体組成は  $\delta D = 8 \cdot \delta^{18}O + 10$  のライン(酸素同位体組成  $= -7 \sim -10\%$  程度、水素同位体組成  $= -40 \sim -60\%$  程度)付近にそれぞれ分布することが知られている。



第4図 東北日本の地熱開発が行われている熱水系から得られる地熱流体中の窒素ガスと希ガスの関係。ADW：地下水に溶存している窒素ガス，希ガス組成。地下水温度の違いによるADWの位置の違いはほとんどない。Magma：東北日本のマグマ(起源ガス)中の窒素ガス，希ガス組成推定値(Kiyosu,1985)。図中の曲線はADWとマグマ起源ガスの混合線。%の数字はADW中へのマグマ起源ガスの混入率。なお、九州ではADWとマグマ起源のガスは別の混合線になることが知られている(Kita et al.,1993)が、九州の地熱開発が行われている熱水系から得られる地熱流体中の窒素ガス，希ガス組成は報告されていない。

第1表 地熱開発が行われている熱水系の周辺半径10km以内に存在する、100℃以上の噴気地帯、90℃以上の酸性温泉、90℃以上の温泉（ただし酸性温泉を除く）、及び2Ma以降の第四紀火山の一覧表。90℃以上の酸性・中性温泉には20%以上の組成比を持つ陰イオンを多い順に示した。第四紀火山では、大カルデラ火山に☆を、小カルデラ火山には注釈を、歴史時代に噴火記録を持つ火山には◎印をそれぞれ付けた。

地熱開発 地点名称	100℃以上の噴気地帯 90℃以上の酸性温泉	90℃以上の温泉 (酸性温泉除く)	2Ma以降の第四紀火山
森 (濁川)		上の湯 (Cl型) 銀婚湯 (Cl型)	濁川 (小カルデラ火山)
大沼 澄川	藤七(八幡平)、秋田焼山 大沼、蒸の湯、御生掛、新山沢 湯田又沢、叫沢 玉川 (Cl型)	銭川 (Cl-SO <sub>4</sub> 型)	荷葉 秋田駒ヶ岳 ◎ 乳頭・高倉 岩手 ◎ 玉川 八幡平 秋田焼山 ◎
葛根田	岩手山、秋田駒ヶ岳 滝の上(葛根田) 空噴・小釜(乳頭) 黒湯(乳頭) (SO <sub>4</sub> SO <sub>4</sub> -Cl型) 大釜(乳頭) (SO <sub>4</sub> SO <sub>4</sub> -Cl型)	網張 (SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub> 型) 滝の上 (Cl型)	玉川 八幡平 秋田焼山 ◎
上の岱	泥湯 新湯 荒湯 川原毛 (Cl型) 赤湯又沢 (SO <sub>2</sub> 型)	小安 (Cl型) 栗駒 (Cl型) 大湯 (Cl型) 裾の湯 (SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub> 型) 新湯 (SO <sub>2</sub> 型)	鳴子 鬼首 ☆ 高日向 栗駒 ◎ 高松
鬼首	荒湯 女釜男釜 片山	宮沢 (Cl型) 鳴子 (SO <sub>4</sub> -Cl型) 東鳴子 (HCO <sub>3</sub> -Cl型) 中山平 (HCO <sub>3</sub> 型)	
柳津西山 (奥会津)		西山 (Cl型)	沼沢 (小カルデラ火山) 砂子原 (小カルデラ火山)
滝上		湯布院 (Cl-HCO <sub>3</sub> 型)	九重 ◎ 豊肥
大岳 八丁原	九重硫黄山 小松地獄、大岳地獄 川原地獄、岳湯地獄 八丁原 (Cl型)	黒川 (Cl型) 牧ノ戸 (SO <sub>4</sub> 型)	万年山 耶馬溪 由布 鶴見・伽藍 ◎
大霧 (霧島)	白鳥 えびの高原(白鳥硫黄山) 栗野岳(八幡地獄) 銀湯・白水越(銀湯・金湯・木良・白水越) 手洗(湯の池・手洗)、栄之尾(林田)、硫黄谷(明響) 新湯、湯之野、高千穂峰 丸尾 (SO <sub>2</sub> 型)	白鳥 (SO <sub>2</sub> 型) えびの高原 (Cl型) 丸尾 (Cl型)	霧島 ◎ 加久藤 ☆
山川 (伏目)	東方 鯉 (SO <sub>2</sub> 型) 成川 (SO <sub>2</sub> 型) 児が水 (SO <sub>2</sub> 型)	指宿 (Cl型) 成川 (Cl型) 長崎鼻 (Cl型)	阿多 ☆ 開聞 ◎

帯及び90℃以上の酸性温泉、②90℃以上の温泉（ただし酸性温泉を除く）、及び③2Ma以降の第四紀火山を示した。熱水系の周辺半径10km以内に限るのは、火山性地熱資源が火山の噴火中心から半径10km以内のみ賦存する可能性が考えられるからである(山口ほか, 1992)。この表から以下のことが分かる。

① 森、柳津西山両地域の周辺半径10km以内に

は、火山性温泉として中性NaCl型の温泉、また第四紀火山として歴史時代に噴火記録のない小カルデラ火山のみが存在する。

② 大沼、澄川、葛根田、上の岱、滝上、八丁原、大岳、大霧各地域の周辺半径10km以内には、火山性温泉として多数の噴気地帯、高温の酸性・中性温泉が、また第四紀火山として歴史時代に噴火記録を持つ火山を含む大カルデラ火山、成層火山など多数

の火山が存在する。

③ 山川地域及び鬼首地域の周辺半径10km以内には、前述の「低塩濃度」熱水系の周辺と同様に、火山性温泉として多数の噴気地帯、高温の酸性・中性温泉が、また第四紀火山として歴史時代に噴火記録を持つ火山を含む大カルデラ火山、成層火山など多数の火山が存在する。

#### 4. 「高塩濃度」熱水系・「低塩濃度」熱水系の形成機構と第四紀火山の活動との関係

ここで、2の①と3の①、2の②と3の②を比較・検討すると以下のことが推定できる。

(1) 「高塩濃度」熱水系から得られる地熱流体は、同位体組成あるいは窒素・希ガス組成から見ると、マグマ起源物質が付加されて形成されている、すなわち火山から「物質的な影響」を受けて熱水系が形成されているように見える。

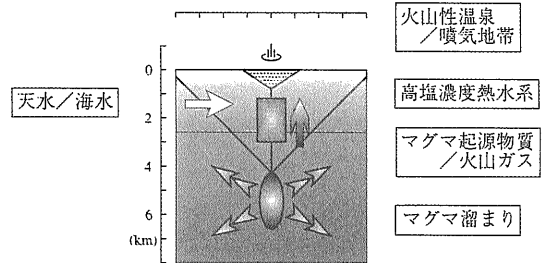
しかし一方地表の地熱微候・火山活動の証拠、すなわち地表部分にマグマ起源物質が放出されている証拠には乏しい。この場合、熱水活動が火山活動そのものである、すなわち熱水活動と火山活動が一体化していると考えられる。第5図に「高塩濃度」熱水系の形成機構を模式的に示した。

(2) 「低塩濃度」熱水系から得られる地熱流体は、同位体組成あるいは窒素・希ガス組成から見ると、マグマ起源物質の付加は極めて少なく、天水、大気及び岩石-水反応の関与のみを示す、すなわち火山からは「熱的な影響」のみを受けて熱水系が形成されているように見える。

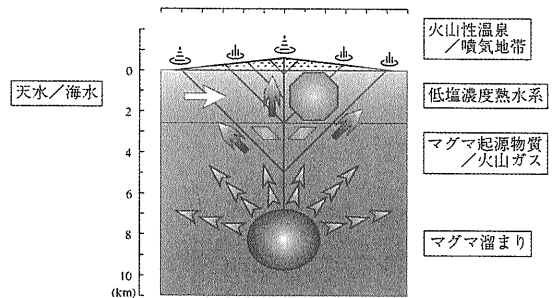
しかし一方地表の地熱微候、火山活動の証拠、すなわち地表部分にマグマ起源物質が放出されている証拠は数多くある。この場合、熱水活動（正確には、地熱発電に用いられる中性NaCl型流体の形成に係わる熱水活動の地域）と火山活動（正確には、火山（噴火）活動・「火山性温泉」形成に係わる熱水活動の地域）は分離（棲み分け）していると考えられる。第6図に「低塩濃度」熱水系の形成機構を模式的に示した。

また、上記(2)の考察、模式図を参考にすると、2の③、④と3の③は以下のように推定できる。

(3) 山川地域の熱水系は海岸近くにあり、他の「低塩濃度」熱水系が天水（淡水）を起源とする地下水か



第5図 模式的に示した「高塩濃度」熱水系の形成機構。模式図を作成する上での仮定については高橋(1994)を参照。



第6図 模式的に示した「低塩濃度」熱水系の形成機構。模式図を作成する上での仮定については高橋(1994)を参照。

ら地熱流体が形成されている(天水起源熱水系:野田・高橋, 1992)のに対し、海水を起源とする地下水から地熱流体が形成されている(Akaku et al., 1991)という違いがあることが推定できる。ただし、同位体組成は海水と天水の混合線付近にあり高温火山ガス方向にはシフトしていないこと、多数の噴気地帯、高温の酸性・中性温泉、及び第四紀火山が近傍に存在している状態を考えると、「低塩濃度」熱水系と類似した機構で形成されていることが推定できる。そのためここでは山川地域の熱水系を「低塩濃度」熱水系の一種と考える。

(4) 鬼首地域の熱水系からは酸性の熱水が得られており、同位体組成、窒素・希ガス組成から見ても、マグマ起源物質の地熱流体への付加が考えられる(清棲, 1986)。しかし「高塩濃度」熱水系と違い、多数の噴気地帯、高温の酸性・中性温泉、及び第四紀火山が近傍に存在している。第6図に示した模式図を参考にすると、鬼首地域では、上記(2)で述べた「低塩濃度」熱水系の近傍にある火山活動の地域、すなわち火山（噴火）活動・「火山性温泉」形成に係わる

熱水活動の地域そのものを開発している可能性が推定できる。そのためここでは鬼首地域の熱水系は「低塩濃度」熱水系が形成される火山地域に存在していると考えられる。

## 5. おわりに

日本の地熱発電を目的として開発されている熱水系は、①塩化物イオン濃度が高く、同位体組成、窒素・希ガス組成がマグマ起源物質の寄与を示す、熱水活動と火山活動が一致化しているように見える「高塩濃度」熱水系と、②塩化物イオン濃度が低く、同位体組成、窒素・希ガス組成がマグマ起源物質の寄与を示さず、天水、大気及び岩石-水反応の関与のみを示す、熱水活動と火山活動が分離（棲み分け）しているように見える「高塩濃度」熱水系に分類できることが分かった。このことは、火山活動の火山性地熱資源の形成への関与は、①熱的な影響にのみ限定されている場合も、②高温火山ガスなどマグマ起源物質が付加されるなど物質的な影響も及ぼしている場合も存在していることを示している。

今後は、例えばある場合には酸性Cl型温泉が存在し、別の場合には中性のNaCl型温泉が存在する理由の解明から、火山性温泉と火山活動の関係、更に火山活動と火山性温泉、火山性地熱資源の関係を地球化学的に解明したいと考えている。

## 参考文献

- Akaku, K., Reed, M.H., Yagi, M., Kai, K. and Yasuda, Y. (1991): Chemical and physical processes occurring in the Fushime geothermal system, Kyushu, Japan. *Geochem.J.*, vol.25, p.315-333.
- Chiba, H. (1991): Attainment of solution and gas equilibrium in Japanese geothermal systems. *Geochem.J.*, vol.25, p.335-355.
- Kita, I., Nitta, K., Nagao, K., Taguchi, S. and Koga, A. (1993): Difference in  $N_2/Ar$  ratio of magmatic gases from northeast and southwest Japan: New evidence for different state of plate subduction. *Geology*, vol.21, p.391-394.
- Kiyosu, Y. (1985): Variation in  $N_2/Ar$  and  $He/Ar$  ratios of gases from some volcanic area in Northeastern Japan. *Geochim.Cosmochim. Acta*, vol.19, p.275-281.
- 清棲保弘 (1986): 鬼首地域における地熱流体の起源. 地球化学, vol.20, p.59-68.
- 日下部 実・松葉谷 治 (1986): マグマ性揮発物質・火山ガス・地熱水. 火山, vol.30, p.S267-S283.
- 宮崎芳徳・津 宏治・浦井 稔・高倉伸一・大久保泰邦・小川克郎 (1991): 全国規模地熱資源評価の研究. 地調報告, no.275, p.17-43.
- 野田徹郎・高橋正明 (1992): 地熱系に関与する起源水の地球化学的分類とその意義. 地球化学, vol.26, p.63-82.
- 高橋正明 (1994): 化学的に見た第四紀火山と熱水系の関係—なぜ高塩濃度と低塩濃度の熱水系が存在するのか—. 地質学論集, no.43, p.156-168.
- 山口 靖・金原啓司・玉生志郎・角 清愛・田中啓策 (1992): 300万分の1日本地熱資源図. 日本地質アトラス (第2版), 地質調査所編集, 朝倉書店.

TAKAHASHI Masaaki (1996): Relationship between formation mechanisms of high and low salinity type of geothermal fluids and Quaternary volcanic activities.

< 受付: 1996年4月23日 >