

---

**解 説**

---

**地熱流体の温泉利用と地熱発電利用**西 村 進<sup>1)</sup>

(平成 25 年 4 月 26 日受付, 平成 25 年 5 月 24 日受理)

**Exploitation of Geothermal Fluid for Hot Spring Use  
and Geothermal Power Generation**Susumu NISHIMURA<sup>1)</sup>**Abstract**

The quantitative discussion of hydrothermal system should be comes up as an important to know the circulation of fluid in the crust and mantle of the earth.

The distribution of hydrothermal areas is found along the seismic and volcanic belts of plate boundaries. These belts are typically found along arc with perpendicular direction of trench axis, such as eastern Japanese arc, and the graben structure with some carderas are found in the area of oblique subduction, such as the southern part of Kyushu.

The hydrothermal fluids are composed of supercritical and subcritical H<sub>2</sub>O with supercritical CO<sub>2</sub>. These fluids are pregnant in the cracks in the fault and bed and moved along the main stress direction, especially with vertical directions.

Hot springs and hydrothermal fluids are founds usually along the cracks in the hard rocks and not in the soft sediments, and also are gushed out from the cracks in the drilling holes. The interference with the use for hot springs and geothermal power generations is checked with the monitoring techniques.

Key words : Large circulation of supercritical state of H<sub>2</sub>O, Plate boundary, Pull-apart basin, Critical, crack, Geothermal power generation

**要 旨**

地熱現象は地熱流体の地球内部の大循環をもとに考察することが必要である。なお、地表での地熱流体を湧出させて利用できる地点はプレート境界に分布し、震央分布域・火山活動域と重複する。

火山活動は、東北日本弧のように太平洋プレートの日本海溝軸に垂直の方向に沈み込み、帯状の火山帯が生じ、地熱流体が上昇する場合と南九州のようにトラフの軸に斜交する方向に沈

---

<sup>1)</sup> 特定非営利活動法人シンクタンク京都自然史研究所 〒606-8305 京都市左京区吉田河原町 14, 近畿地方発明センター内。 <sup>1)</sup> NPO Think-tank Kyoto Institute of Natural History, Kinki-chiho Hatsumei Center, Yoshida-Kawaramachi 14, Sakyou-ku, Kyoto 606-8305, Japan. E-mail tkinh-1@isis.ocn.ne.jp, TEL 075-761-2526, FAX 075-761-2544.

み込む場合が見られる。

これらの部分に胚胎する地熱流体は  $H_2O$  の超臨界・亜臨界、熱水で、 $CO_2$  超臨界・二酸化炭素などを伴っている。これらの流体は断層・亀裂・地層中のクラック中を主応力の方向（これは鉛直方向が一番有力）に上昇して、さらに地表近くでは、地下水が加わりさらに上昇して地表の岩盤の割れ目から湧出し、温泉として利用され、掘削してクラックの多い所から湧出して地熱発電に利用されている。

カルデラ内のように水平の厚い堆積物の存在するところは、地表にくるまでに分散するので温泉利用には向かず、深い掘削により温泉利用の邪魔をしないで、地熱発電に利用される。このほか温泉と競合する湧出の場所でも利用上温泉に向かない所や、今までも利用されていないところでは、地熱発電利用が出来る場合もあろう。

しかし、ほとんどの場合は、お互いに干渉する可能性はすべて詳細に調査、検討し、開発が進んでも干渉しているかどうかはモニタリングを必要とするだろう。

キーワード：地熱流体の大循環、プレート境界、プル・アパート盆地、超臨界、クラック、地熱発電

## 1. はじめに

日本温泉科学会第 66 回大会において、公開パネルディスカッション「温泉資源の保護と地熱発電の共生を探る」が計画されていて、温泉と発電に利用される地熱とにはどのような相互関係があり、それらの共生が考えられるか検討することで参加することになった。

筆者の温泉、地熱利用へのかかわりは、1956 年 3 月大学卒業時に（株）近畿ボーリングのアルバイトで霧島観光ホテルの近くの地獄において、ホテルの暖房に使う蒸気を得るために、ハンドレバーの掘削機を用いてで 17m 深度程度のボーリングを行い、蒸気を噴出させる仕事をしたのがはじめである。そのあと桜島に赴き、当時京都大学理学部地球物理教室研究員（後、京都大学防災研究所桜島火山観測所所長）の吉川圭三氏の水準測量の手伝いをした。これらのことがその後の長年の火山、温泉、テクトニクスの研究のきっかけとなった。まず研究手段の開発として、自然放射能の研究から始めた。

1976 年からの 2 年間、地質調査所に地熱の部署が出来、角清愛課長に仙岩地域の火成活動の年代の研究を勧められ、併任研究員として従事したのが地熱研究のはじめであり、そのうち、インドネシアの火山やテクトニクスの長い研究に入った。そのほか国内で活断層の調査を始めたのもそのころである。

1985、86 年に仙人ダムの高熱隧道を中心に高温岩体の調査研究を行い、仙人ダムから仙人岳に至る深い谷沿いに花崗岩の K-Ar 年代を求め 0.8~5.0 Ma の非常に若い年代の花崗岩体が関係することを示した (Nishimura and Mogi, 1986)。このことに関しては、今年、黒部花崗岩体の LA-ICP-MS と SHRIMP U-Pb ジルコン年代測定で 10~0.8 Ma の年代が求められ、確実に若いことが示された (Ito *et al.*, 2013)。日本温泉科学会の入会は 1968 年であるが殆どの夏を海外で過ごし、連続して大会に出るようになったのは 1993 年からである。

温泉は古くから利用されているところも多く、たとえば、1927 年ごろ城崎温泉では、三木屋の内湯騒動から訴訟となったが、第二次世界大戦の終結後まで休審となり、判決があったのは敗戦後である。その後、新しく温泉を掘削するときの条件として、既存泉源に影響を与えてはならないことを決めた温泉法が制定された歴史がある（たとえば、神戸新聞但馬総局編, 2005）。もともと厚生省（現厚労省）、環境庁（現環境省）の管轄のもとに各県や政令都市に温泉審議会がもたれ掘削・利用の許認可が必要となっている。

しかし、後発の地熱発電のための地熱開発は石油・天然ガスの開発の手法を取り入れ、許認可も

通産省（現経産省）の管轄下にあり、深部の地熱貯留層と浅部の温泉帯水層は水理的に隔離されているとの考えにもとづき、地熱貯留層は地表近くの帽岩により、水平に広がり貯留しているとの考えから、簡単にすみ分けられると考えられていたきらいがある。

しかし、最近では1,000mを越す掘削は簡単になされ、温泉が湧出されている。また高温の蒸気を温泉源として利用されるようになってきている。一方、地熱の開発で400m程度の掘削で利用されているものもある。海外の例ではインドネシアのカモジャンやディエンでは、150~200m深度の掘削で地熱発電の蒸気が得られている。

地熱発電の事業の結果既存泉源に影響を与えたとの佐藤（2012）の意見があり、また、そうではないと云う反論がなされたりしている。これらはもっと科学的データをもとに議論が必要である。地熱の開発では貯留層についての考え方についてさらに考察することが必要になってきている。

平成24年、機構改革の波を被り、地熱の掘削の許認可も環境省の所轄になり、温泉との競合も同じ土俵の上で検討されると解決の兆しが考えられたが、環境省のなかに縦割りの慣行がいまでも踏襲されているとみられる。そこで、温泉源と地熱源のすみ分けが可能かとの議論は避けて通れない状況とみてよい。これらのことを考えに入れて、この問題を検討することにする。

## 2. 温泉と地熱発電の熱水との違いがあるのか

地熱発電の開発当初は、先述のように既存温泉のもとになる熱水と地熱発電で利用される熱水の間には貯留層の深度に違いがあり、すみ分けできると説明されたことがある。また地熱発電では地下の高熱を利用し、温泉は湯を利用するとの考えから、熱水から蒸気と湯をわけて利用すればよいと簡単に考えてきたきらいがある。

温泉利用の歴史は古く、自然に湧いている温泉が自然のまま利用され、主に農閑期などの療養などに温泉が利用されてきた。そのため温泉の利用には、温泉療養の面では湯の成分が大切な要素とされている。観光に温泉が取り入れられるようになり、それまでの自然の湧出量では少なく、量を増やすため掘削がなされ、利用量が多くなるに従い、次第に動力を利用するようになってきた。そのために泉源間での影響が多くみられるようになってきた。その条件でも温泉の質にはできるだけ変化がないように工夫されてきた。最近でも、温泉水の酸化還元の測定により、温泉水は地中からくみ上げ、放置するだけでも、還元状態から酸化状態になり、化学変化が起り、効能が低減するとされている（例えば大河内，2003）。

新しい温泉の開発には、温泉関係者は自分らの経験を偏重し、科学的に検討することは少なかったように思える。

この数年、水の地球大循環に興味もたれるようになり、温泉科学の研究も、マグマ学、プレートテクトニクスの研究と同じ視線で議論されるようになってきた。

一方、地熱の地下での胚胎の構造が、石油・天然ガスの胚胎の構造と類似するとの考察から、物理探査が適用されるようになってきた。しかし、マントルが部分熔融した流体の上方への上昇の機構、沈み込みのスラブからの脱水の流体の上昇の機構が同じように考察されるようになると、地熱利用と温泉利用の違いは、その使用する温度・量の違いがあるだけで、両者とも、水・二酸化炭素の地球大循環の一つのステージのものを利用していると考えてよいようになってきたと思える。

なお、この解説での議論では、最近の厚い堆積物を掘削し、自然の温度勾配（わが国では、ほぼ25℃/100m程度）を利用し、温泉法に適合する地下水を温泉として利用している場合は、地中熱利用とのすみ分けを考えればよいので、この解説での考察はしない。

2.1. 温泉水と熱水の分布

地球上では、地熱（温泉，地熱ともに）の分布域は、ほとんどプレート境界である。すなわち、震央分布域・火山活動域と場所が重複する (Fig. 1)。ただ、火山活動の分布域でないプレート境界にも若く活動している震央分布域に、高温の温泉が得られている (西村, 2013)。

これらの研究から、沈み込み帯のスラブからの脱水により、マグマの発生，熱水鉱床の生成，蒸気・温泉水の湧出などがみられることが判る。沈み込み帯を取り上げても、沈み込むスラブの年代の古さにより、現象は異なることが議論されているが、大筋では同じ考えでよいので、その代表的な東北日本弧の日本海溝軸にほぼ垂直に沈み込んでいる太平洋プレートの例をあげる (Fig. 2)。スラブの深度が 110 km 程度の直上に火山フロントが見られる。その海溝側外帯では、酸性岩の貫入部分に高温の温泉がみられるが、本邦でもっとも多いのは紀伊半島での高温の温泉である (西村, 2011；西村ら, 2009, 2010)。

フォッサマグナ沿いの花崗岩体が急上昇している黒部岩体は高温を呈しているもので、これも高温岩体の例として挙げておこう (Nishimura and Mogi, 1986；Ito *et al.*, 2013)。これもプレート境界である。

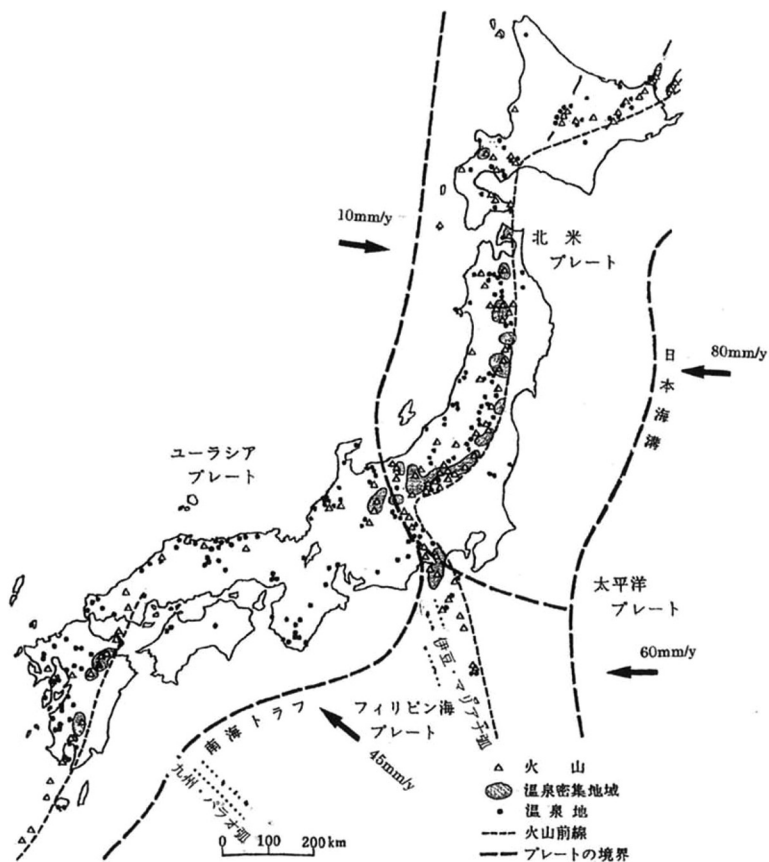


Fig. 1 The distributions of hot springs and active volcanoes with the tectonic movements of plates around Japanese Arc (modified from Shiramizu, 1994).

図 1 わが国の温泉分布と火山の分布と我が国周辺のプレートの動き (白水, 1994 の図に加筆)。

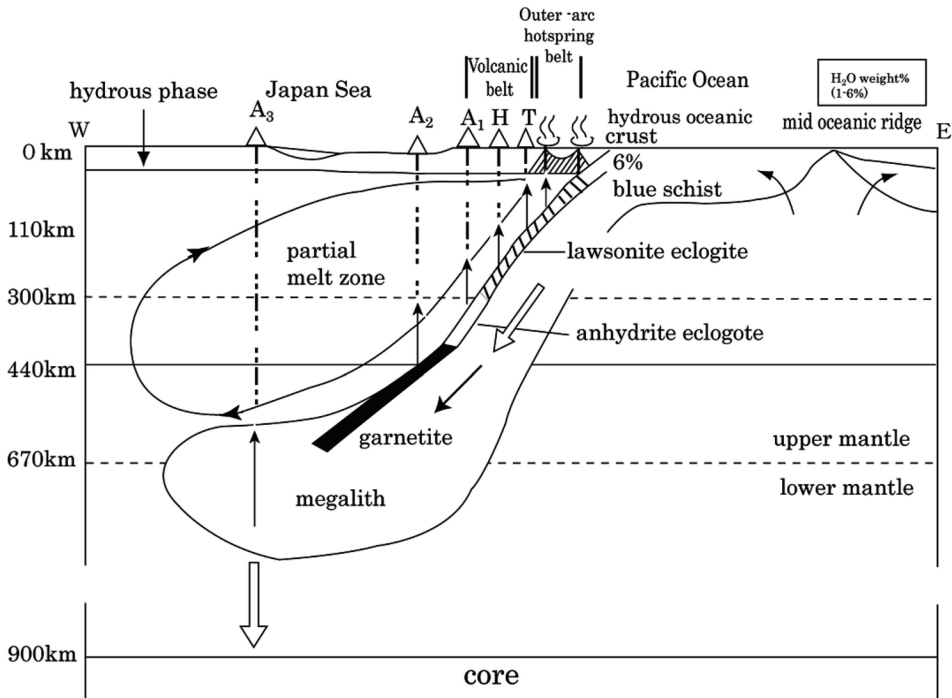


Fig. 2 A model of subduction system across Tohoku Arc, Japan (modified from Nishimura, 2007).

図 2 東北日本弧の沈み込み帯のモデル (西村, 2007 に加筆).

わが国の温泉・火山分布、プレート境界、プレート・海山列の動きを白水(1994)の図に加筆したものを Fig. 1 に示した。東北の火山と温泉の関係は、たとえば地温勾配で考察すると火山の噴火中心から約 20 km 程度である。しかし、もっと広範囲に地熱構造の発達している構造は、インドネシアのスマトラ (Fig. 3) や南九州のように海溝やトラフの軸と沈み込みの方向が斜交する場所で、プリアートの盆地が見られる場所である。この場所 (Fig. 4) では酸性の凝灰岩を多量に噴出するカルデラを伴った火山がみられる。このほか海山列が沈み込み地殻を割るような地質構造 (たとえば別府・阿蘇やスンダ海峡) も火山・地熱活動は盛んである (Fig. 4; 西村, 2007)。

## 2.2. 地殻・マントルでの流体の移動

地殻の流体は、マントルが部分熔融したマグマや水・二酸化炭素の流体は周辺よりも比重が小さいので、いずれにしても上昇しようとする。深度 1,000 m 程度で二酸化炭素が超臨界流体になり、深度 3,000~4,000 m 程度で水が超臨界となる。また、水は固体のほうが液体よりも比重が小さいので、亜臨界の状態もあるとされている。

噴火活動を観測しても、地下に常にマグマだまりがあるのではない。桜島の観測に、1956 年から 1996 年の間は毎年、桜島や錦江湾周辺の重力・重力鉛直勾配の測定、火山の噴出物の分析などをして過ごし、地震や水準点の高度変化のデータを観測所から頂き、いろいろ考察したが、西南日本での直下型地震の起こる範囲は深度約 12 km 以浅である。マグマだまりも約 12 km 深度程度で初めて時々地震の観測から推定できる程度で、その上部には、噴火の 1 週間前ぐらいに -2 km のところにマグマだまりが出来る程度である。これらのことを示す主な理由の一つはその部分を通る

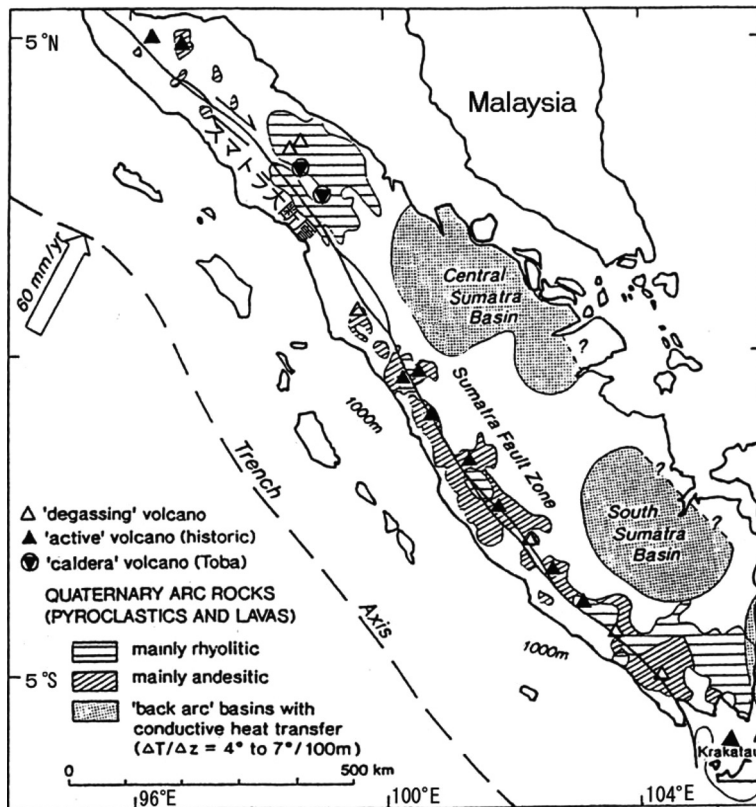


Fig. 3 Volcanic and geothermal areas along Sumatra fault zone. Arrow is shown the direction of subduction and its figure is subduction rate (modified from Nishimura, 1980).

図 3 スマトラ断層系と火山・地熱地帯の分布。  
矢印はインド洋プレートの進行方向とその速さ (西村, 1980 に加筆)。

地震波, 特にS波が観測されることによる。また, その速度は方向により異なる。すなわち異方向性がみられる。このことは常にマグマだまりや地熱流体のたまりがあるのではないことを示している。

熱水はほぼ3,000 m以深で超臨界状態になり, その超臨界流体の物性は含有元素により非常に異なる挙動をすることが報告されている。二酸化炭素は約1,000 m以深では超臨界流体である。ガス体の二酸化炭素は臨界状態から抜けると水の中にマイクロバルブ状態で含有し, 或る温度・圧力のもとで分離し, 熱水の上昇の大きな浮力になる。これらのさらなる物性の解明はこれからの問題になるが, この物性がモニタリングの大きな対象となる。

夕張における二酸化炭素の炭層固定の研究 (2002~2007) の時に, 二酸化炭素の超臨界の研究もすすめ, 炭層での超臨界の二酸化炭素の浸透の仕方がほぼ理解でき, モニタリング方法をまとめることが出来た (特定非営利活動法人シンクタンク京都自然史研究所, 2008)。この分野は今後, さらに発展されるべきであろう。

これらの流体は, 断層帯や地層クラックに胚胎し (Fig. 5), このクラックは主応力の方向に伸びる織物をするときの糸の錘のような形をして, 主応力の方向に圧力差が生じる方向に伸びていて,

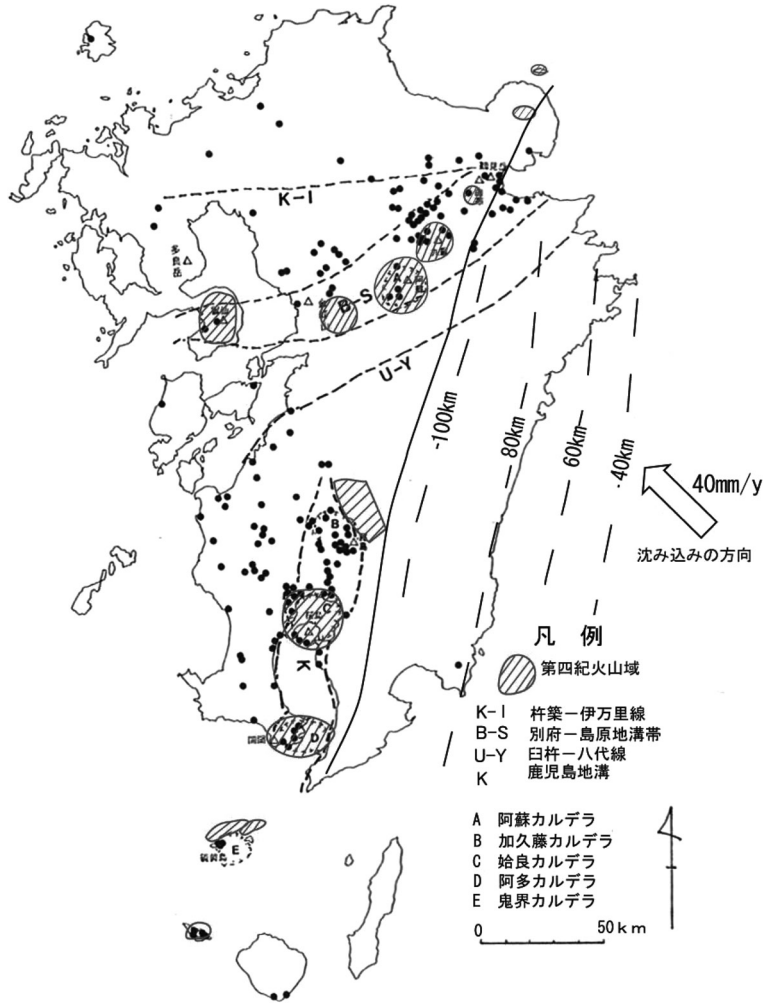


Fig. 4 The distribution of hot springs (●) (Tsuyuki, 1992) in Kyushu District, with the areas of Quaternary volcanic eruptions. Arrow is shown the direction of subduction of Phillipine Sea plate, and its figure is subduction rate.

図 4 九州の温泉分布 (●) (Tsuyuki, 1992) と第四紀の火山活動の領域。矢印はフィリピン海プレートの沈み込みの方向とその速さ。

流体の進み方により、連携したり、連携が切れたりして流体が上昇する。そのことから考えると、このような断層や堆積面は鉛直に近い高角のほうが多いように思われる。

時にカルデラが発達し、その中の浅い堆積層がほぼ水平で、クラックが減圧により脱ガスしたことにより、地表近くで沈殿（スケール）ができ、クラックを閉じ込めるようなことがあれば、いわゆる帽岩のようなものが現れることがある。しかし、流体の移動はガスを伴い比重差で上昇するので、普通は高角度の方が盛んになる。断層の場合も高角度の方が地熱活動が盛んになる。

東北地方のような沈み込みをするところの火山活動では、各火口から 20 km 範囲程度しか高温度勾配の場所がない。近畿の有馬温泉、南紀白浜温泉では、同位体の研究によりマントルに含まれる

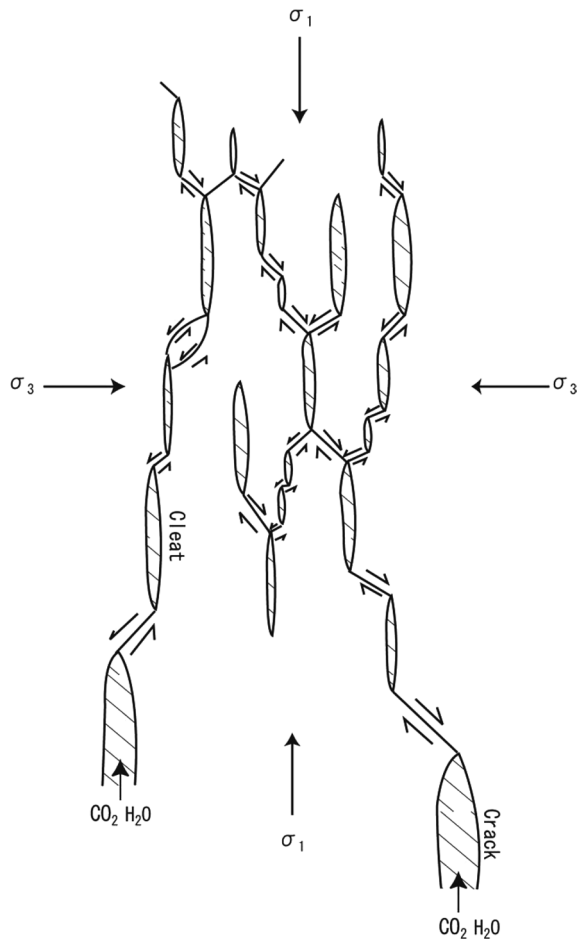


Fig. 5 Schematic diagram of injection of fluids in cracks and cleats in the faults and beds.  
 $\sigma_1$  and  $\sigma_3$  are shown maximum and minimum main stress, respectively (Nishimura, 2011).

図 5 地層の中の流体が胎胎するクラック・クリートとその進行の概念図。

$\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  は最大主応力と最小主応力を示す. 流体は最大主応力の方向に進行していく (西村, 2011).

成分を含んで湧出しているが、火山活動は見られない。これらの温泉がどのように地表に湧出してくるかをみると、熱水は酸性岩の最後の活動により形成された岩頸の周り緩み域を伝い上昇して、12 km 深度より浅いところでは上昇場所を活断層に乗り換えて上昇している (西村ら, 2009, 2010)。

昨年の「温泉資源の保護に関するガイドライン (地熱発電関係)」に地熱貯留層概念図が示されている。火口付近で天水が地下に浸透し、温められて溶岩流の割れ目などから蒸気を主として湧出しそれを集めて、温泉として利用されている強酸性の温泉がある。たとえば安達太良山の頂上近くに湧出している岳温泉のような利用のされ方もある。またこの概念図では温泉は通常は地表近くの堆積物から湧出しているように考えられているが、調べると岩盤の割れ目の断層や亀裂から湧出し



ているのが常で、温泉の掘削もその割れ目にめがけてなされている。堆積物中では、湧出の力も弱く分散し、また湧出の位置も移動するので、堆積物を掘削して、温泉が得られている例は知らない。また温泉はクラックの多い鉛直に近い断層や亀裂を上昇しているのがほとんどである。また熱水も同様なところを上昇しているところをとらえていることが多い。もしこのような状況下で、熱水からの沈殿物や熱水による変質により、その上部に不透水層（帽岩）が作られるとするなら、下流の方に流れてしまい、熱水貯留構造が形成されるとは考えにくい。ただ、カルデラ内部に水平に近い成層した堆積層が見られるときには帽岩を見出すことが可能であると考えている。しかし、温泉の方も同じ貯留層があればそれをねらうはずである。火山活動を見ても常にマグマだまりがあるところは殆どない。結論的にいえば、温泉源と熱水源を区別することは難しい。

### 3. 地熱発電と温泉地の共生のために

地熱発電と温泉地の共生のためには、どのようなことが検討され、守るべきかが本論において与えられた課題と考える。温泉源と地熱源が明瞭に区別できなければ、既存泉源を守るという観念から、考えなければならない。

すなわち、掘削による既存泉源への影響をなくすることが大切で、権利から考えると先願権の考えを生かすべきである。ただし地熱の方が汲み上げ量、温度が高いため、より注意を要するだろう。またこの考えからでは、すべての井戸は掘削時の諸試験、地質柱状図、物理検層の結果すなわち井戸の台帳を一つのところに登録する必要があるだろう。そのようにして、お互いに影響しない方法を模索することが必要と考える。温泉への影響の指摘は、時期的に対応しているかだけの問題ではなく、温泉や地熱井等の状況を計測しておいて、科学的にその影響現象を説明できる資料を示すことが必要であろう。

また利用される前からモニタリングをする必要があるだろう。モニタリングの一例は別に検討し提案し互いにもっともよい手段をまとめる必要がある（特定非営利活動法人シンクタンク京都自然史研究所, 2008）。

#### 引用文献

- Ito, H., Yamada, R., Tamura, A., Arai, S., Horie, K. and Hakada, T. (2013) : Earth's youngest exposed granite and its tectonic implications : the 10-0.8Ma Kurobegawa Granite. Scientific Reports/3 : 1306/DOI : 10.1038/srep01306.
- 神戸新聞但馬総局編（2005）：城崎物語 改訂版。255頁，神戸新聞総合出版センター，神戸市。
- 西村 進（1980）：南九州の火山活動と火山。京大防災研年報，23，B-1，1-19。
- 西村 進（2007）：鳥弧の地熱活動と沈み込みプレート—南九州とスマトラの地熱・温泉の類似性から—。温泉科学，57，42-53。
- 西村 進（2011）：近畿地方の高温泉とその地質構造。温泉科学，60，481-491。
- 西村 進（2013）：大陸縫合帯（Suture zone）の温泉（4）—まとめ—。温泉科学，63，59-65。
- Nishimura, S. and Mogi, T. (1986) : The interpretation of discordant ages of some granitic bodies. J. Geotherm. Res., Soc. Jap., 8, 145-164.
- 西村 進，桂 郁雄，西田潤一（2009）：近畿地方中・南部の高温泉とその地質構造（1），—白浜温泉と有馬温泉の探査結果から—。温泉科学，49，103-111。
- 西村 進，城森 明，川崎逸男，西田潤一，桂 郁雄（2010）：近畿地方中・南部の高温泉とその地質構造（2），—白浜温泉と有馬温泉の電磁探査の結果から—。温泉科学，60，145-160。

大河内正一 (2003) : 生きている温泉とは何か. 74 頁, くまざさ出版, 東京.

佐藤好億 (2012) : 地熱発電の隠された真実. 474 頁, 日本秘湯を守る宿, 福島.

特定非営利活動法人シンクタンク京都自然史研究所 (2008) : 二酸化炭素炭層固定化技術開発・モニタリング技術の検討. 自然と環境, Vol. 10 Supplement (2), 146 頁, 京都.

白水晴雄 (1994) : 温泉のはなし, 技報堂, 201 頁, 東京.

露木利貞 (1992) : 九州における温泉と地質—鹿児島温泉を中心として. 露木利貞教授退官記念, 117 頁, 鹿児島.