

地質標本館 特別展



プレートテクトニクスがつくる

なぞの温泉

しん ぶ りゅう たい

「深部流体」

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
地質調査総合センター



GEOLOGICAL MUSEUM

地質標本館



プレートテクトニクスがつくる
なぞの温泉「深部流体」

NON-VOLCANIC
HOT SPRING WATERS **ARIMA**



目次


はじめに..... 3

温泉のいろいろ



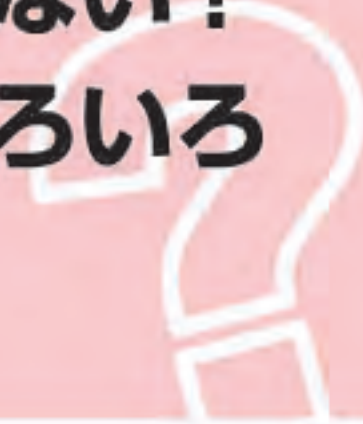
日本にある様々な温泉 4
 日本列島のテクトニクスと地下水 5
 日本にあるなぞの温泉：有馬温泉（深部流体）..... 6-7
 温泉の温度 火山のない所にも高温の温泉が!? 8
 酸性の温泉・アルカリ性の温泉 9
 温泉の塩分 海がない所にも塩水が!? 10
 実は深部流体が関わっていた!? グリーンタフタイプの温泉のでき方 11

**なぞの温泉・有馬温泉
の正体「深部流体」**



有馬温泉はプレートから出てきた水「深部流体」だった！ 12
 ① 水素・酸素の同位体比から考えてみよう！ 13
 ② ヘリウムの同位体比 ($^3\text{He}/^4\text{He}$ 比) から考えてみよう！ 14
 深部流体はどんな所にある？
 ① リチウムと塩素から見てみよう！ 15
 ② 炭酸成分から見てみよう！ 16
 ③ 塩素・臭素・ヨウ素から見てみよう！ 17
 有馬型温泉は西南日本にしかない？ 18
 日本中にある 深部流体がもとになっている温泉 19

**温泉だけじゃない！
深部流体のいろいろ**

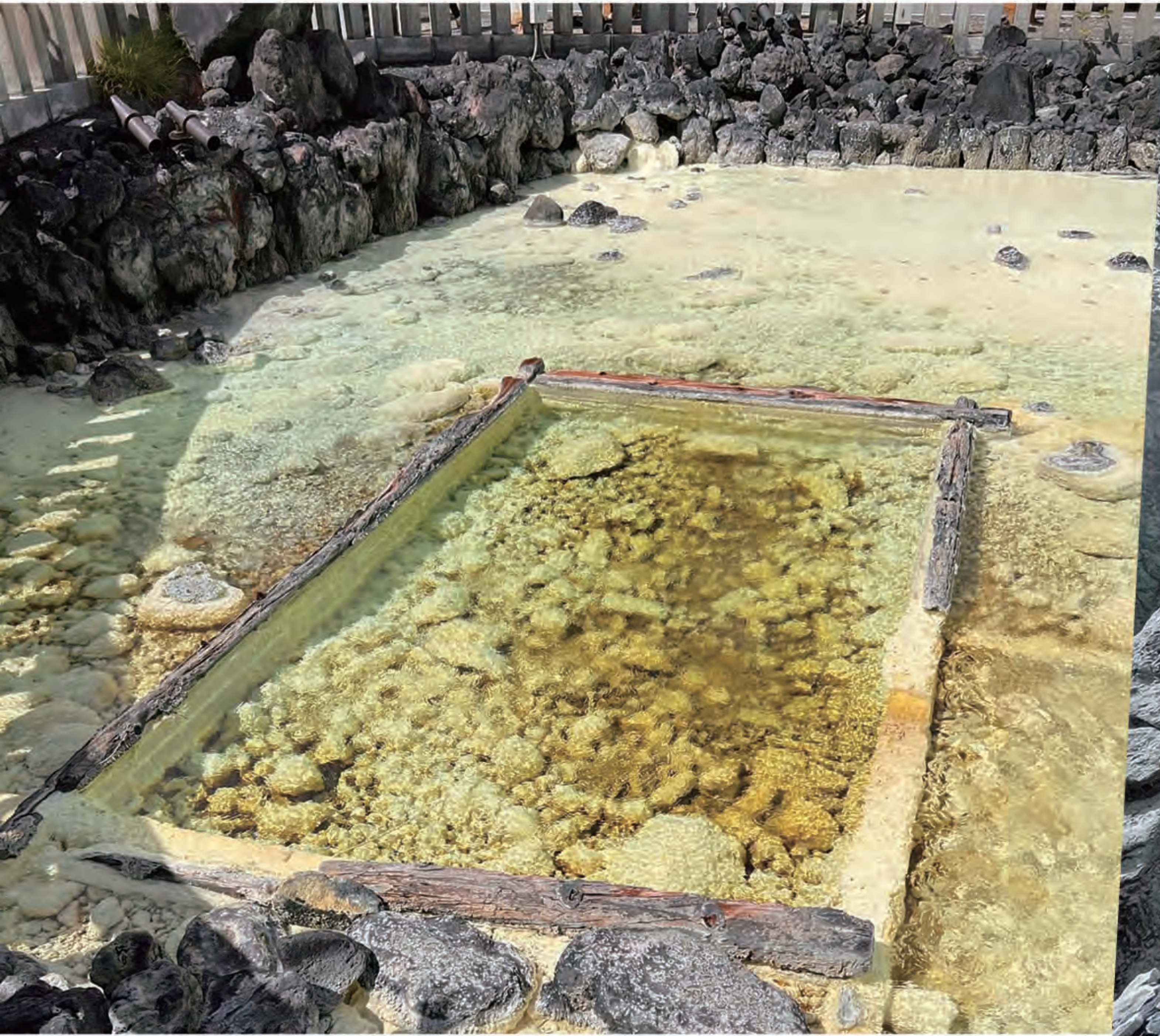


火山岩に含まれる深部流体の量 20-21
 鉱物脈を作る深部流体 22-23
 古くから愛される身近な深部流体 山塩と天然炭酸水（サイダー） 24-25

まとめ..... 26-27

参考文献..... 28

VOLCANIC HOT SPRING WATERS KUSATSU



はじめに

日本にはたくさんの温泉がありますが、火山が列を成して分布する地域から離れた太平洋側に、100℃に達する高温の温泉や、海水の2倍くらい塩分濃度の高い温泉が湧き出しています。それらの温泉は、起源が分からない“なぞの水”として以前より研究者がさまざまな手法で解明しようと試みてきました。

1960年代以降のプレートテクトニクス理論の発展や、様々な観測・分析技術を駆使した研究により、沈み込み帯^{たい}で起こっている様々な地質現象が体系的に理解できるようになってきました。今では、地表に湧き出す“なぞの水”は「プレートとともに地球内部に運ばれた水が、岩石との反応や移動を繰り返した後で、再び地表に出てきたもの」として理解されています。本特別展では、プレートの沈み込みが深く関わる水を“深部流体^{しんぶりゅうたい}”と呼び、近年の研究から分かってきたことをご紹介します。

地質調査総合センターでは、多くの温泉や地下水などの分析を進めるとともに、既存の公表データ（論文や温泉分析書）を取り込んだ深層地下水データベースを公開しています（高橋ほか，2018）。本特別展では、最新のデータを追加して、温泉に関わる約2万点のデータを元に資料を作成しました。

日本にある様々な温泉

日本には多くの温泉があり、その泉質も温度も様々です。これらの温泉はそれぞれ水の起源や形成の仕組みの違いから、いくつかのタイプに分けられます。実際の温泉は複数の種類の水が様々な割合で混合することがありますが、どのような水がどれくらいの割合で混ざり合っ

ているかを明らかにすることは意外と難しく、様々な指標を使って研究されています。また、地表付近では天水（雨や雪）と混ざり合うため、特徴が分かりにくい場合があります。



温泉のタイプ

火山性温泉

- 成因** 火山から熱や火山ガス、水などの物質の供給を受けてできる温泉。
- 場所** 火山に近い場所に見られる。
- 特徴** 高温、酸性、塩素・硫黄・炭酸の成分に富む場合がある。

非火山性温泉

深層熱水タイプ

- 成因** 地下の熱（地温勾配）によって温められてできる温泉。
- 場所** 平野部（第四紀堆積盆など）。
- 特徴** 雨水や海水が起源のものがあり、様々な泉質を示す。

海水・古海水タイプ

- 成因** 陸域に侵入して岩石と反応した海水や、地層中に非常に長い期間閉じ込められた海水でできる温泉。
- 場所** 沿岸部・海成堆積岩地域など。
- 特徴** 塩素成分に富む。油田や天然ガスに伴われている場合もある。

グリーンタフタイプ

→ くわしくは 11 ページ

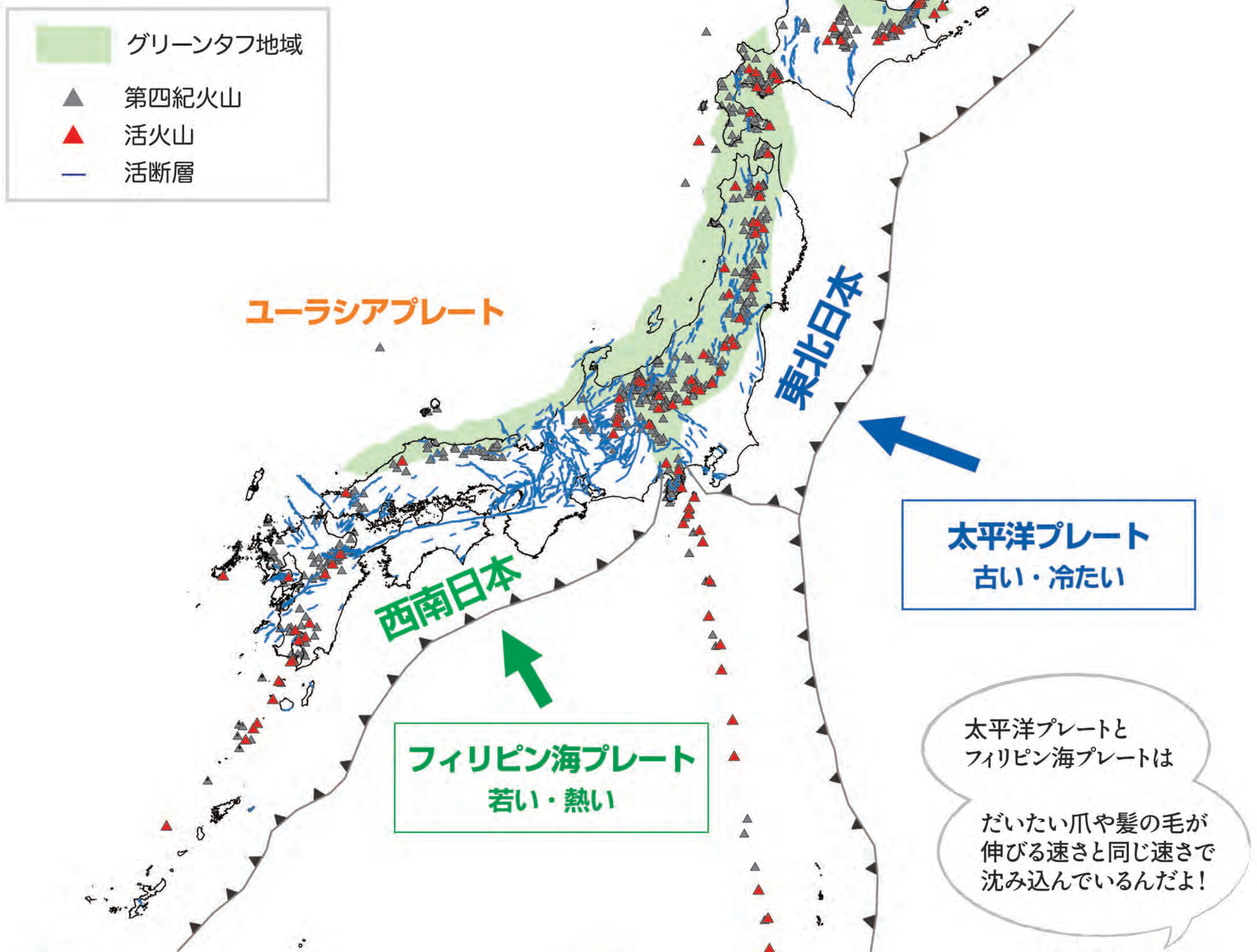
- 成因** グリーンタフ（緑色凝灰岩）と地下水が反応してできる温泉。
- 場所** グリーンタフ地域。
- 特徴** 塩素・硫酸の成分に富む。



日本列島のテクトニクスと地下水

日本列島周辺にはいくつかのプレートがあり、東北日本
の下には太平洋プレートが、西南日本の下にはフィリ
ピン海プレートが沈み込んでいます。日本は、もともとア
ジア大陸の一部でしたが、およそ 1500 万年前までに日
本海が形成され島国になりました。その過程では、海底

火山活動が活発に起こり、グリーンタフと呼ばれる緑色
凝灰岩層を広く形成しました。今は陸地でも昔は海だっ
た場所も多く、現在の地下水の水質に大きく影響を与え
ています。



火山

日本には、111 の活火山があり、第四紀（約
260万年前～現在）に活動した火山や貫
入した岩体を含めると 600 以上になります。
プレートが沈み込む海溝と並行に連なるの
が特徴です（火山フロント）。火山の周辺
には、様々な泉質の温泉が湧いています。

断層

プレートの沈み込みにより日本列島には複
雑な力がかかっており、岩盤を壊すことで
数多くの断層が形成されます。断層は地下
深部からの水の湧き出し口となるため、温
泉の形成に重要な役割を果たします。



あんも 杏桃ちゃん

日本にあるなぞの温泉： 有馬温泉（深部流体）



写真 有馬温泉天神泉源



みんなは
有馬温泉って
知っているかい？

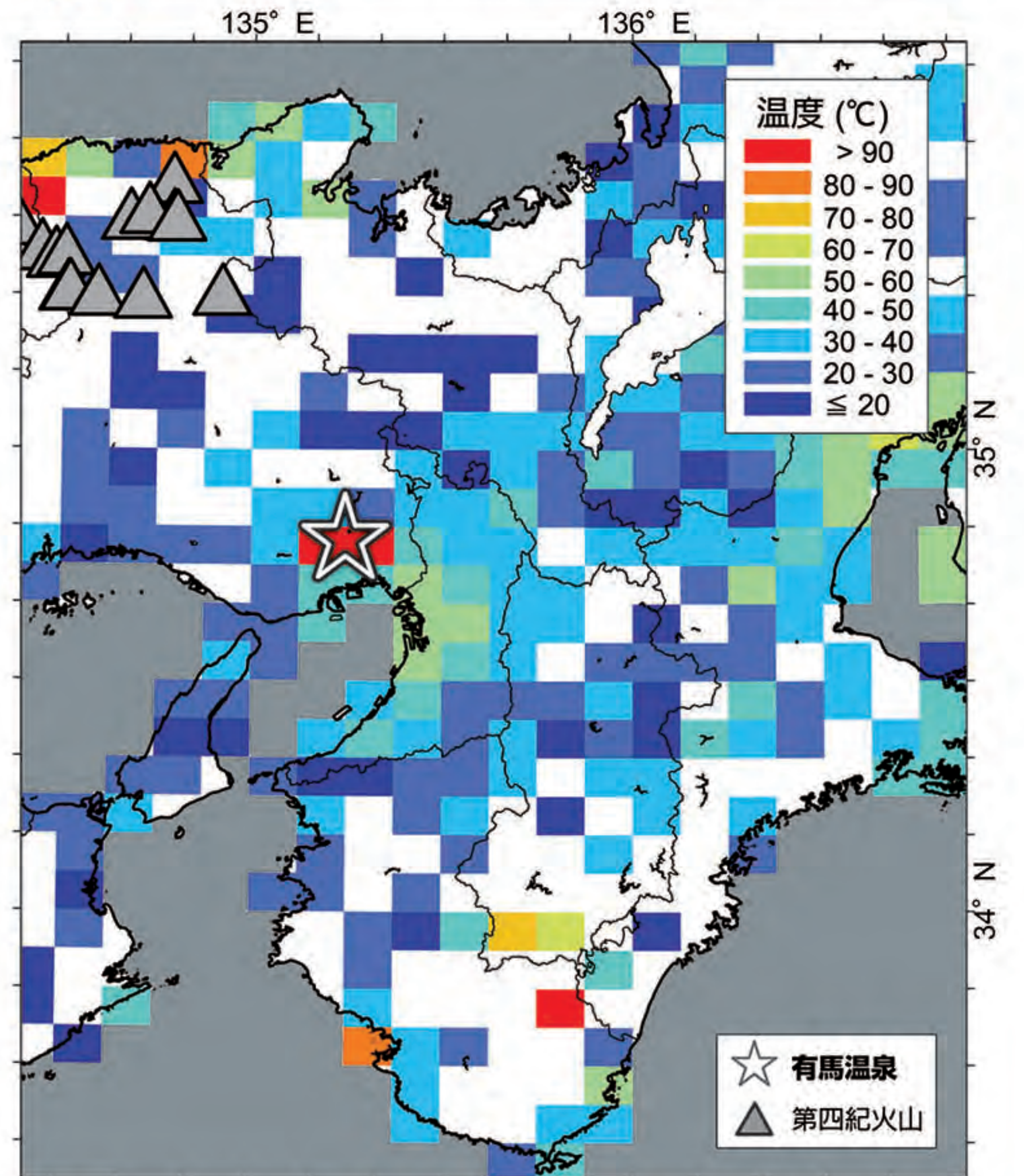
火山から遠いのに熱い
海から遠いのにとても塩辛い
おまけに、サイダーのように
シュワシュワしている

ここでは
そんな不思議な
温泉の秘密を
教えよう

有馬温泉



なぞ1 火山から遠いのに熱い



熱くて
しょっぱくて

サイダーみたいな温泉？

そう
兵庫県にある**有馬温泉**は
なんと、塩分が
海水の2倍の濃さ！

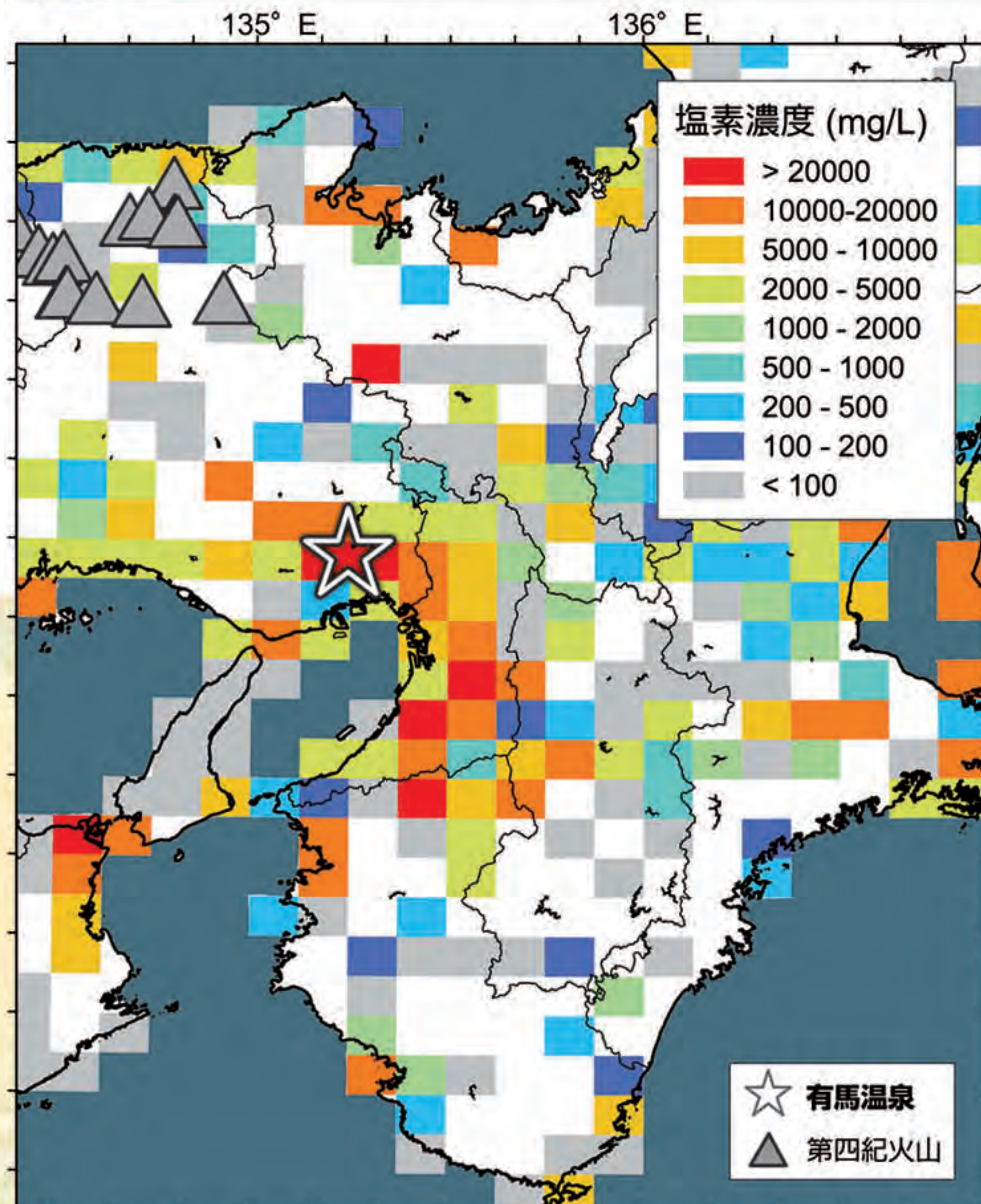
そして、火山などの
熱源もないのに
沸騰するほど高温

昔から研究者たちは
「**深部流体**」
と呼んでいるんだ

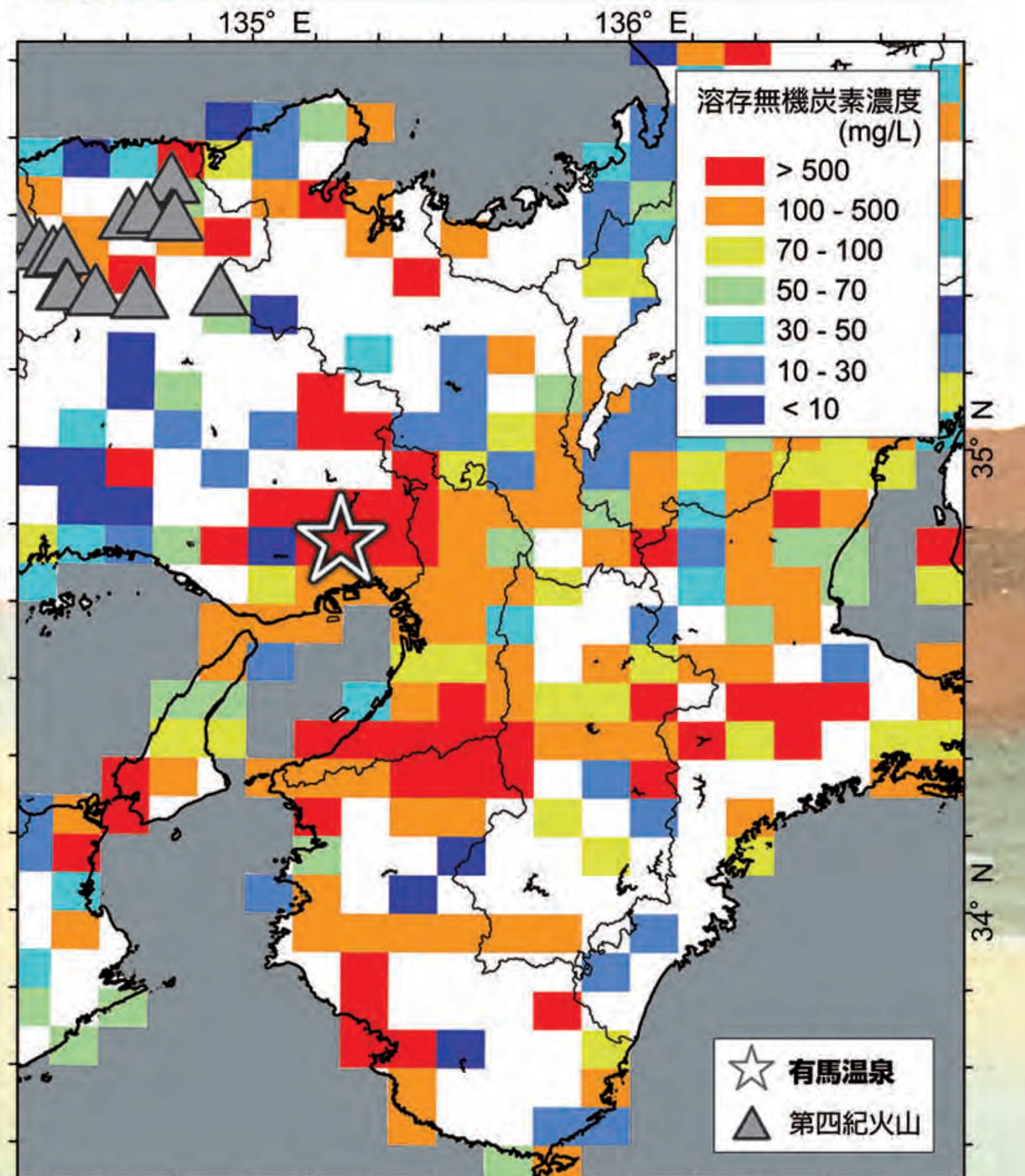
でも、この水が
どうやってできたのかは
なかなか分からなかった

多くの人が
そのなぞを解き明かすため
研究を続けているんだ

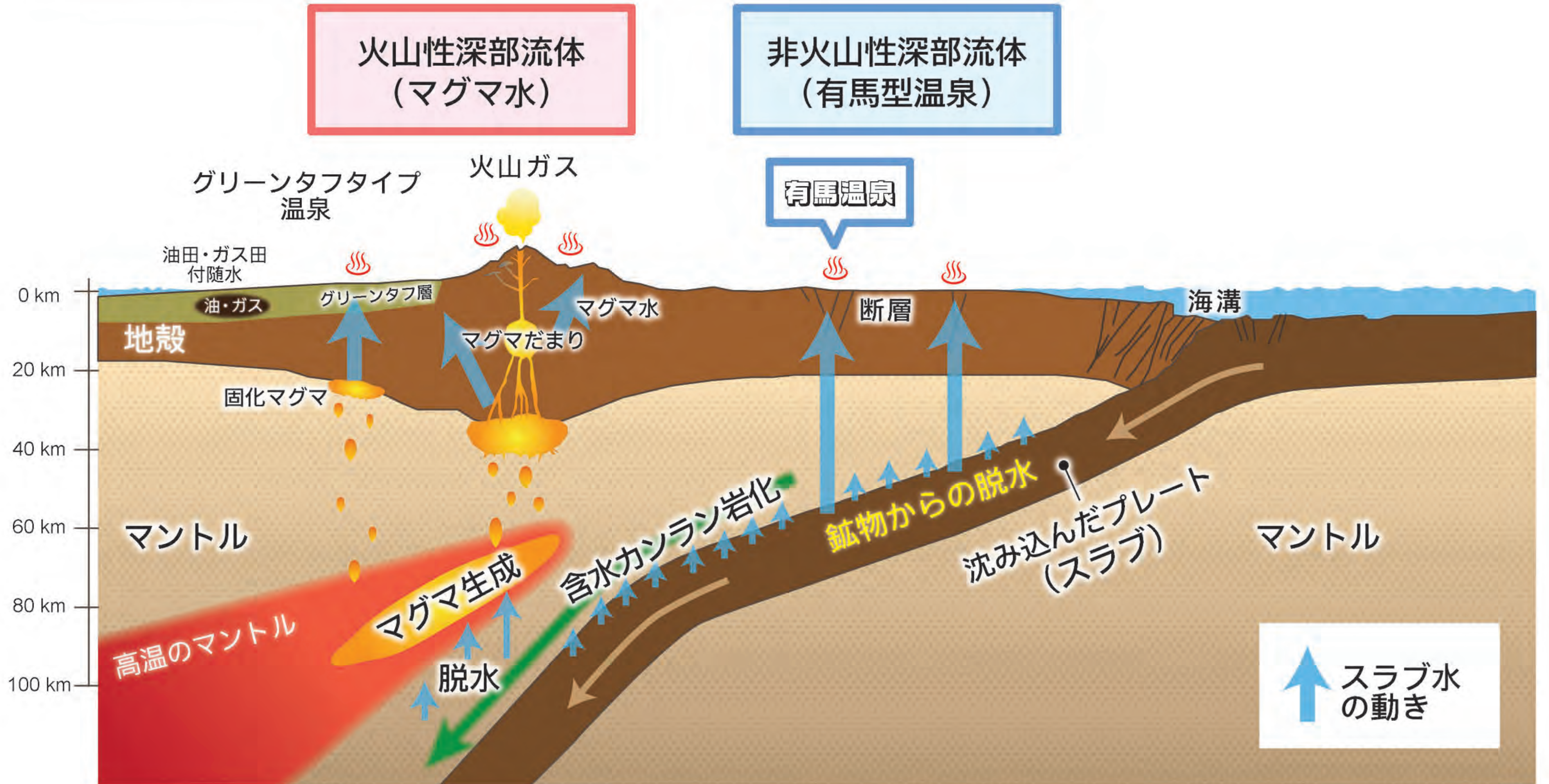
なぞ2 海から遠いのに塩辛い



なぞ3 二酸化炭素がぶくぶく



その答えはプレートの沈み込みにあった!



海底を旅してきたプレートには海水や水を含んだ鉱物がたくさんあるんだ

プレートが沈み込んでいくとき何が起ころんだらうね

とても深い所に潜っていくからきつと圧力もすごく高いのかな?

そうだね

プレートが地下何十キロもの深さに沈み込んで行く間にだんだんと温度や圧力が高くなっていく

実はその間にプレートを作っている鉱物はその場の温度や圧力に合った鉱物に変化するんだ

その変化の途中で水が出てくるんだよ

え?! プレートから水が出てくるの?!

そう! それがなぞの水「深部流体」の正体だったんだ!

ここでは分かりやすく「スラブ水」と呼ぶことにしよう

沈み込むプレートはスラブと呼ばれていて「スラブ起源流体」などと呼ばれるよ

このスラブ水はマントルの高温の部分に入るとマントルを溶かしてマグマを作るんだ

それが地上に出たら火山の誕生だ! マグマは浅い所で火山ガスや温泉として水を放出するのでこれらは**マグマ水**と呼ばれている

上の図を見てごらん**有馬温泉はマグマを作らない低温のマントルの中を通って上がってきた「スラブ水」だったんだ**

プレート中の水は地球内部を旅して再び地表に戻ってくるんだね

火山の近くの温泉も火山のない有馬温泉ももともとは同じプレートから出てきた水なんだ!

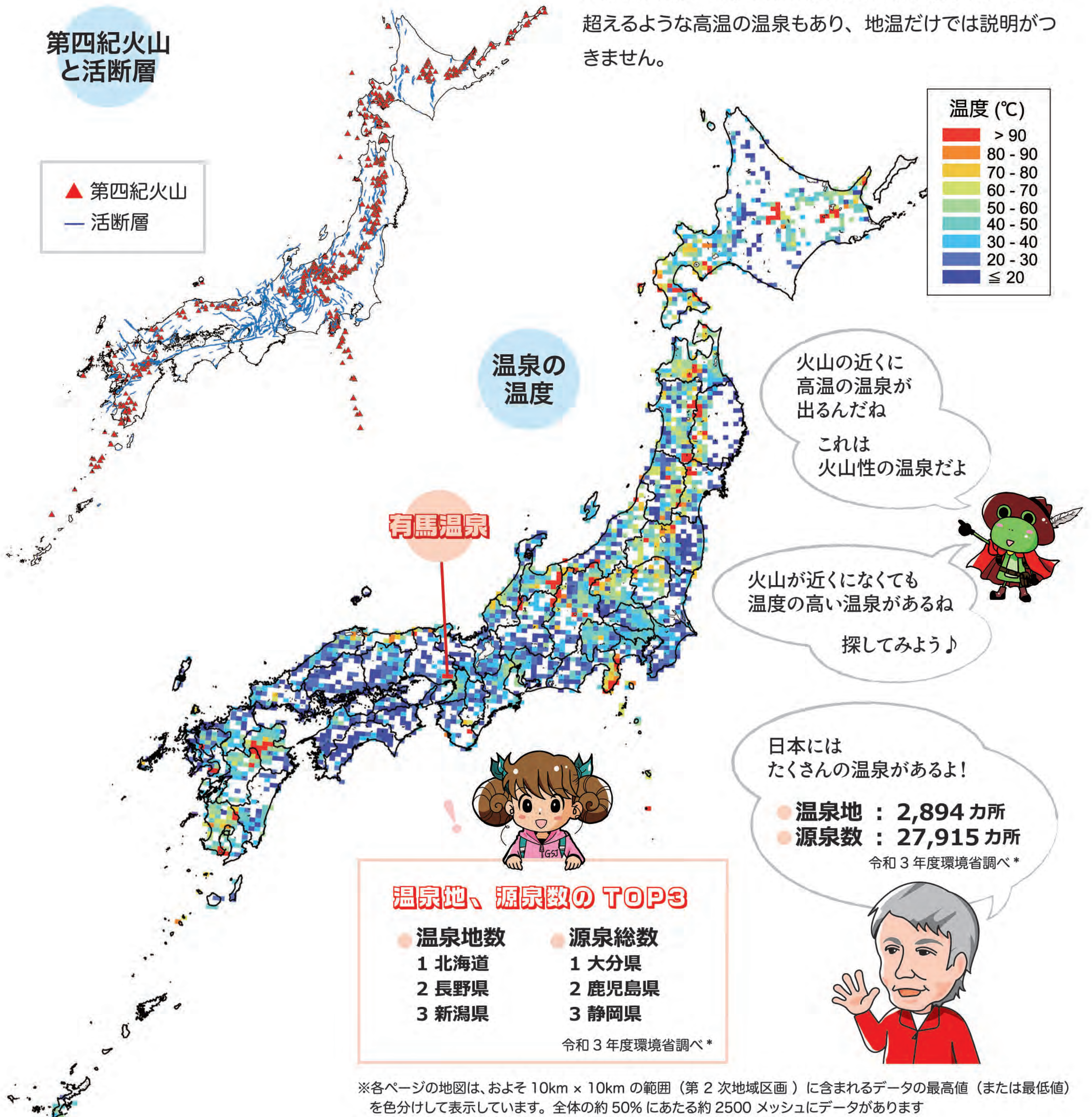
すっごーい!!

温泉の温度 火山のない所にも高温の温泉が!?

火山の分布と温泉の温度マップを見比べてみましょう。
火山の内部にあるマグマは 1000℃前後の高温なので、
火山の近くには高温の温泉が出ます。

一方、火山から離れた場所にも多くの温泉があります。
これらは地下 1000 m もの深さから汲み上げている
ものが多く、地温（100 m 深くなるにつれ 3℃ほど温度が
上がると言われています）によって温められてできた
ものがほとんどです。しかし、火山のない所でも 90℃を
超えるような高温の温泉もあり、地温だけでは説明が
つきません。

第四紀火山 と活断層



温度 (°C)	
Red	> 90
Orange	80 - 90
Yellow	70 - 80
Light Green	60 - 70
Green	50 - 60
Light Blue	40 - 50
Blue	30 - 40
Dark Blue	20 - 30
Dark Blue	≤ 20

温泉の 温度

有馬温泉

火山の近くに
高温の温泉が
出るんだね
これは
火山性の温泉だよ

火山が近くになくとも
温度の高い温泉があるね
探してみよう♪

日本には
たくさんの温泉があるよ!

- 温泉地 : 2,894 カ所
 - 源泉数 : 27,915 カ所
- 令和 3 年度環境省調べ*

温泉地、源泉数の TOP3

- | | |
|--------|--------|
| ● 温泉地数 | ● 源泉総数 |
| 1 北海道 | 1 大分県 |
| 2 長野県 | 2 鹿児島県 |
| 3 新潟県 | 3 静岡県 |

令和 3 年度環境省調べ*

※各ページの地図は、およそ 10km × 10km の範囲（第 2 次地域区画）に含まれるデータの最高値（または最低値）
を色分けして表示しています。全体の約 50% にあたる約 2500 メッシュにデータがあります

* 環境省サイト https://www.env.go.jp/nature/onsen/pdf/3-5_p_1.pdf

酸性の温泉・アルカリ性の温泉

火山に供給されるマグマは、浅い所まで上昇したことで圧力が低くなると、ガス成分を分離します。火山ガスに一番多く含まれているのは水（水蒸気）ですが、それ以外にも、塩化水素（HCl）、二酸化硫黄（SO₂）、硫化水素（H₂S）、二酸化炭素（CO₂）などが含まれます。これらのガスが地下水に溶けることで、酸性の温泉が形成されます。

一方、地下で岩石と水の反応が進むとアルカリ性になることが知られています。

温泉における pH の分類

- pH<3: 酸性
- pH 3~6: 弱酸性
- pH 6~7.5: 中性
- pH 7.5~8.5: 弱アルカリ性
- pH>8.5: アルカリ性

レモン果汁は pH 2.5
海水は pH 8 くらいだよ

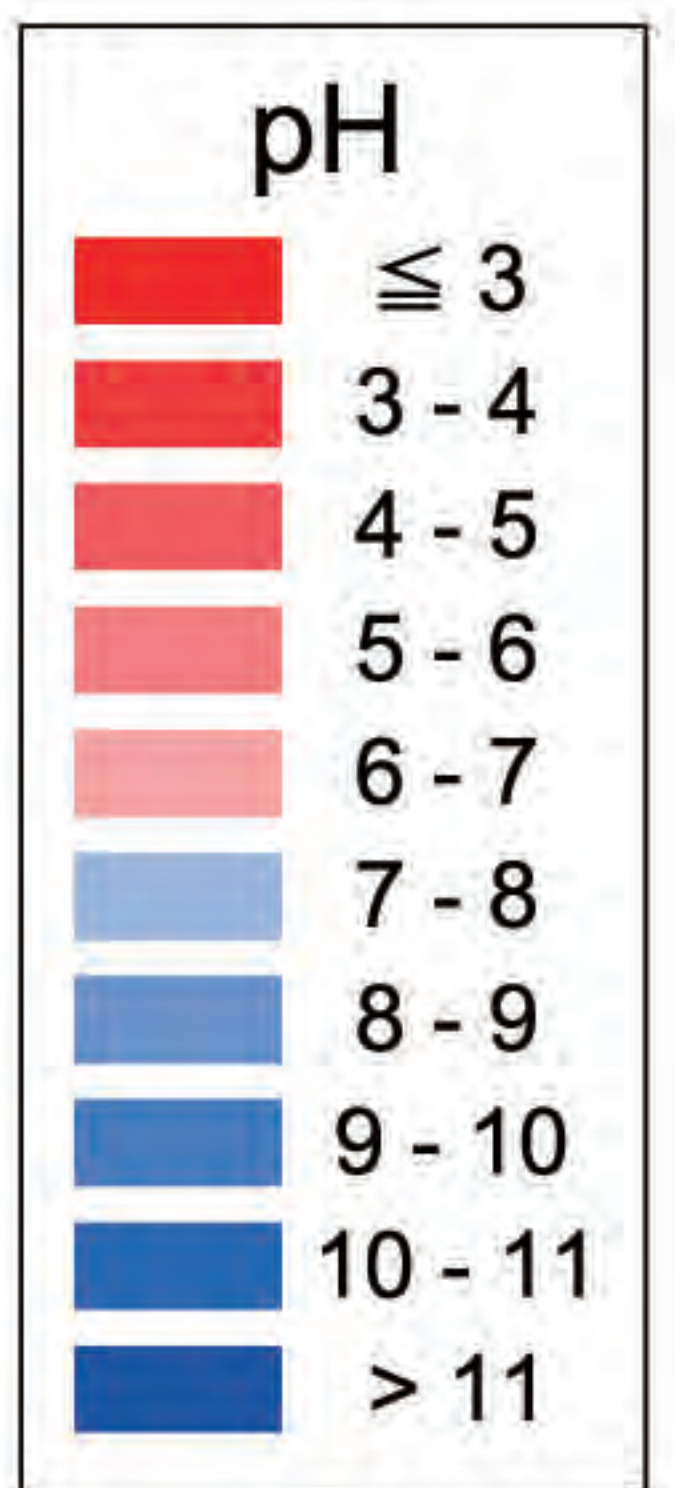


火山の近くに
酸性の温泉が出るんだね

火山から離れた所には
アルカリ性の温泉が
多く見られるね

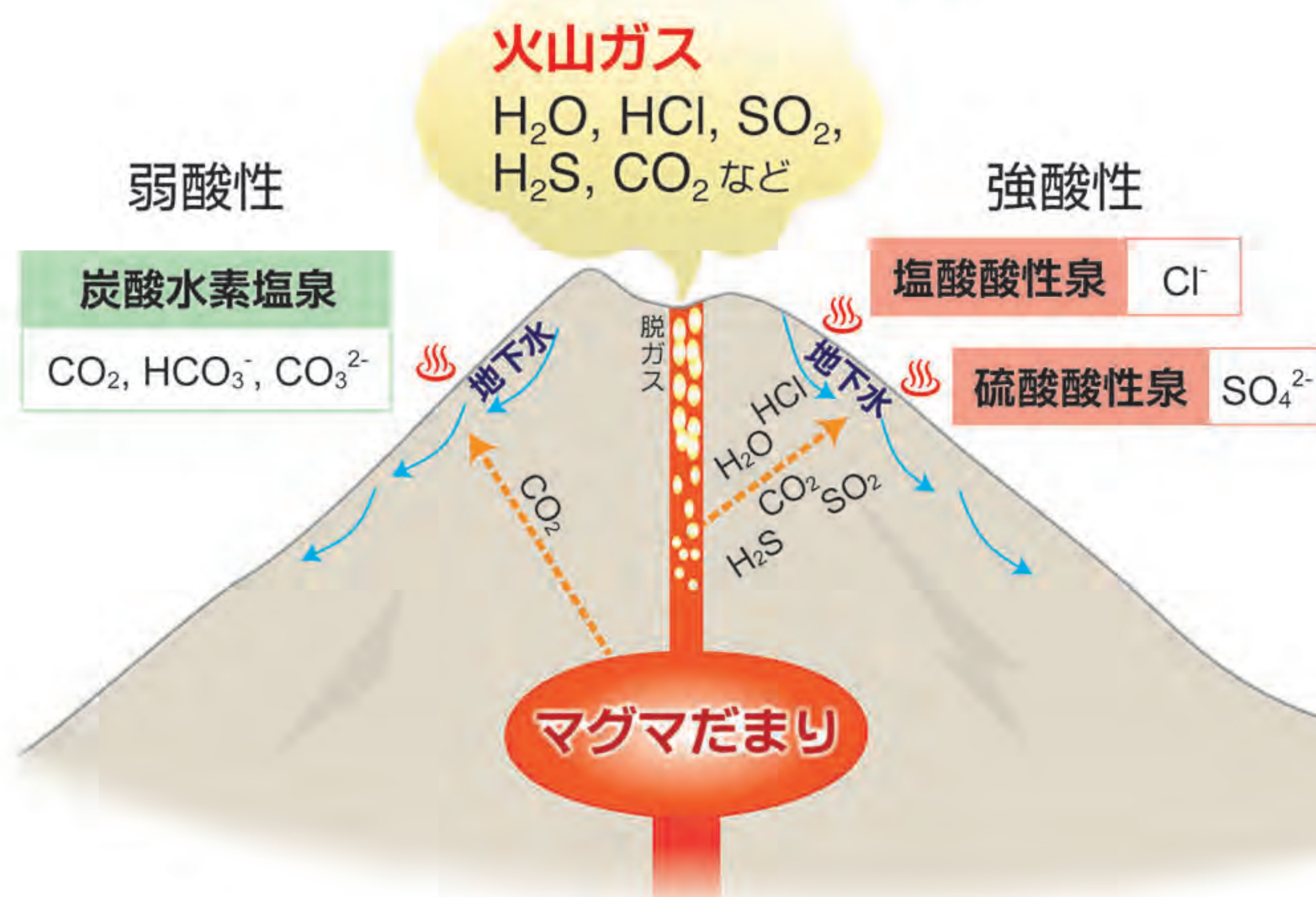


温泉の pH



※区画内に存在するデータのうち、最も低い pH の値を示しています

火山ガスによってできる様々な泉質の温泉



※強酸性の場合、CO₂ は水に溶けず、温泉水からガスとして出ていきます

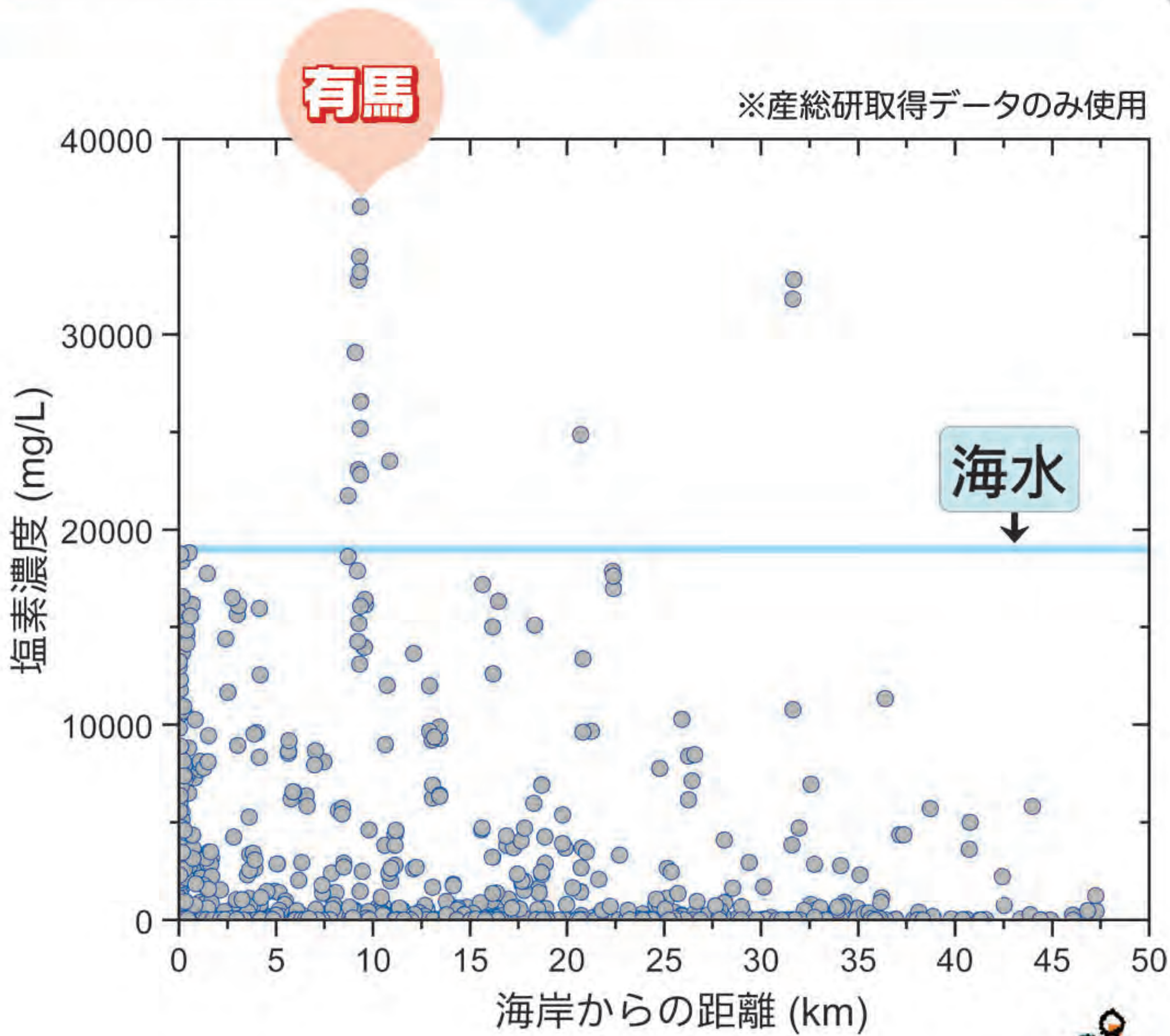
- H₂O (水)
- HCl (塩化水素)
- SO₂ (二酸化硫黄)
- H₂S (硫化水素)
- CO₂ (二酸化炭素)

温泉の塩分 海がない所にも塩水が!?

海水には塩分（主要成分は塩化ナトリウム：NaCl）が34 g/L（1 Lに34 g）程度溶解していますが、温泉にも多くの塩が溶けているものがあります。海岸付近の温泉では海水がもとになっているものもありますが、標高の高い所や山奥にも、塩を多く含む温泉がたくさんあります。

兵庫県神戸市の六甲山ろっこうさんの北麓ほくろくに湧き出している有馬温泉ありまは、最高で海水の約2倍（70 g/L）もの塩分が溶けています。ほかの地域にも海水よりも塩の濃い温泉がたくさんあります。

近畿・中国・四国地方における温泉の塩素濃度と海岸からの距離の関係



有馬温泉は海水の2倍くらいの濃さなんだ!!

プレートから出てくる深部流体ってかなり濃い塩水なんだな…



有馬温泉

塩素濃度 (mg/L)	
Red	> 20000
Orange	10000-20000
Yellow	5000 - 10000
Light Green	2000 - 5000
Green	1000 - 2000
Light Blue	500 - 1000
Blue	200 - 500
Dark Blue	100 - 200
Grey	< 100

内陸でも昔は海だった場所があって海の中でできた地層中には古い海水が取り残されていることもあるよ

火山ガス中の塩化水素が地下水に溶け込むと強酸性で塩素濃度*が高い温泉ができることもあるんだね



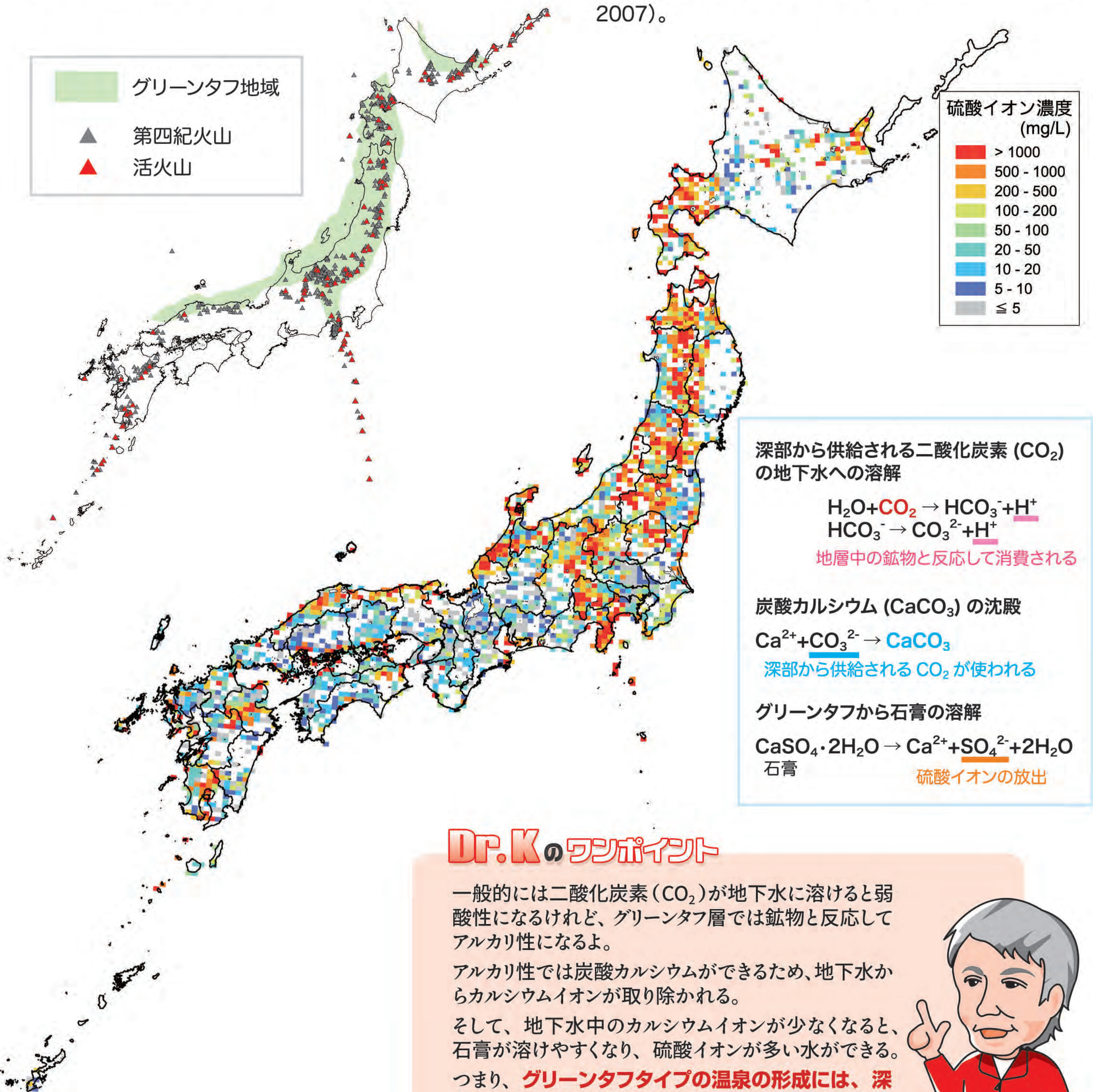
いろいろな理由で塩水ができるんだね

*本特別展で示す塩素濃度は、正式には塩化物イオン（Cl⁻）濃度と言います

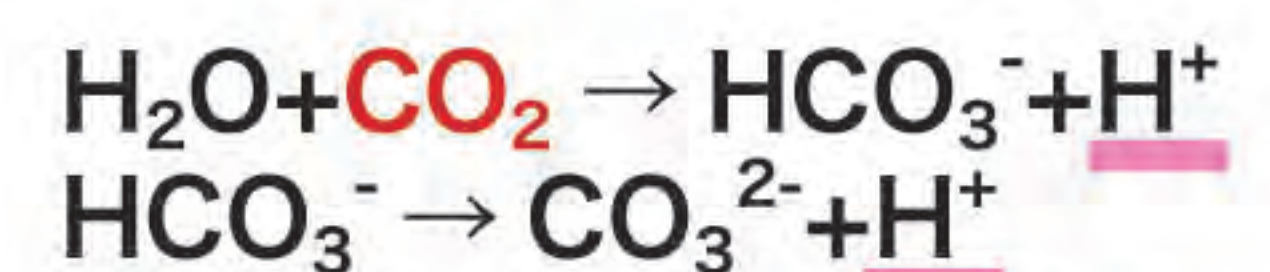
実は深部流体が関わっていた!? グリーンタフタイプの温泉の作り方

日本には、グリーンタフと呼ばれる海底火山活動で形成された地層が広く分布しています。グリーンタフ層中には石膏（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）が多く含まれ、石膏が地下水に溶けることで硫酸イオン（ SO_4^{2-} ）の多いグリーンタフタイプの温泉ができます。

北陸地方の温泉の研究によると、地下水に深部起源の二酸化炭素（ CO_2 ）が供給され、グリーンタフ層を循環する間に、炭酸カルシウム（ CaCO_3 ）の沈殿や、石膏の溶解などが起こり、地下水中の硫酸イオン濃度が高くなったことが明らかになりました（Ohwada et al., 2007）。

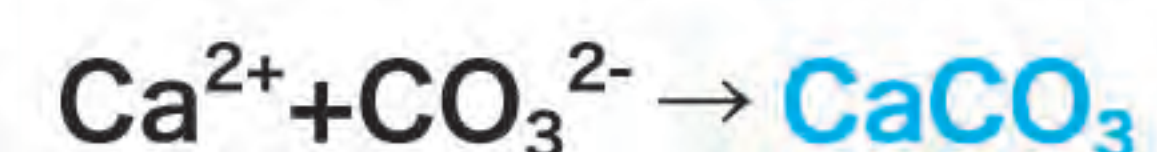


深部から供給される二酸化炭素（ CO_2 ）の地下水への溶解



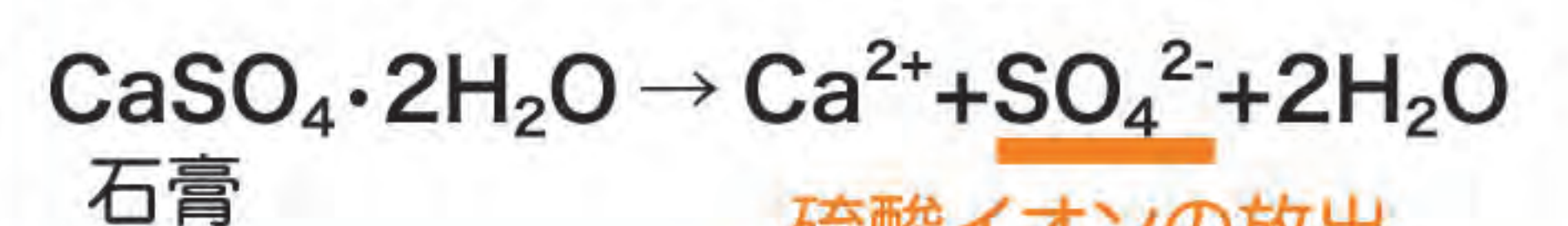
地層中の鉱物と反応して消費される

炭酸カルシウム（ CaCO_3 ）の沈殿



深部から供給される CO_2 が使われる

グリーンタフから石膏の溶解



石膏

硫酸イオンの放出

Dr. Kのワンポイント

一般的には二酸化炭素（ CO_2 ）が地下水に溶けると弱酸性になるけれど、グリーンタフ層では鉱物と反応してアルカリ性になるよ。

アルカリ性では炭酸カルシウムができるため、地下水からカルシウムイオンが取り除かれる。

そして、地下水中のカルシウムイオンが少なくなると、石膏が溶けやすくなり、硫酸イオンが多い水ができる。

つまり、**グリーンタフタイプの温泉の形成には、深部から来た CO_2 が深く関わっていたんだね。**



有馬温泉はプレートから出てきた水「深部流体」だった！

有馬温泉は海水よりも高い塩素 (Cl) を含んでおり、海水がそのもと（起源）となっているように見えますが、溶けている様々な化学成分を見ると、海水よりも火山性の水（マグマ水）と似た特徴を持つことが知られています（下表参照）。しかし、有馬温泉の近くには火山はありません。

地球内部でのマグマの生成には、沈み込んだ海洋プレート（スラブ）から脱水した水「スラブ水」が関係してい

ることが火山の研究から分かっています（→ P7）。しかし、有馬温泉周辺の地下にはマグマの存在が確認されていません。この地域では、沈み込んだプレートからの脱水でスラブ水が発生しても、マグマを作らずに熱水として上昇することが分かってきました。このようなスラブ水を含む温泉を『有馬型温泉』と呼んでいます。有馬型温泉が日本国内のどこで湧き上がっているかは、現在盛んに研究されています。

有馬温泉とマグマ水・海水の特徴

	有馬温泉	マグマ水 (島弧マグマ起源水)	海水	解説 ページ
塩素 (Cl) 濃度 (wt%)	4	1~3	2	10, 13
水素同位体比 (δD , ‰)	-35	-35~-15	0	13
酸素同位体比 ($\delta^{18}O$, ‰)	+6	+5~+10	0	13
ヘリウム同位体比 ($^3He/^4He$)	1×10^{-5}	$1 \sim 1.2 \times 10^{-5}$	1.4×10^{-6}	14
炭素同位体比 ($\delta^{13}C$, ‰)	-5	-8~-4	0	16
リチウム / 塩素比	高	高	低	15
臭素 / 塩素比	低	低	中	17

次のページからは
様々な化学的データを見ながら

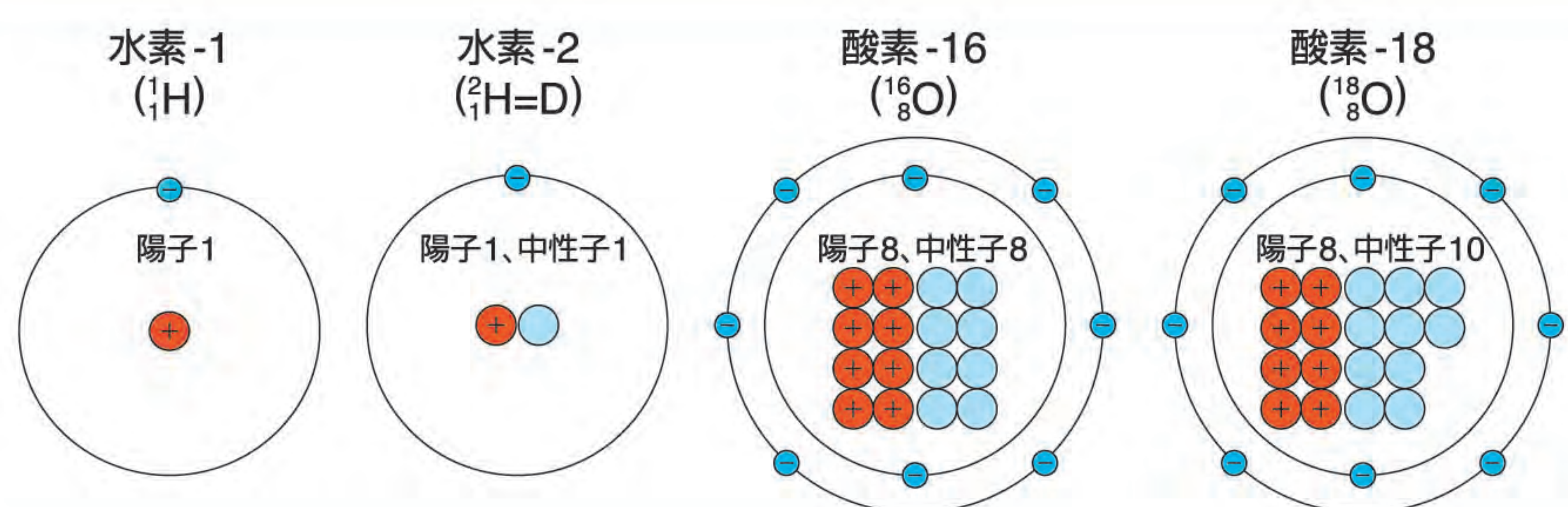
プレートから来た水の特徴を確かめてみよう！



Dr.Kのワンポイント 同位体って知ってる？

元素には重さ（質量数）があるんだ。質量数は陽子の数と中性子の数を足して求めるんだよ。

同じ元素（陽子の数は同じ）でも質量数が違う（中性子の数が違う）場合があって、「同位体」って呼ぶんだ。



水は水素と酸素からできていることは知っているかな？

図のように水素にも酸素にも同位体があるので、水にもいろいろな重さがあることは予想できるかな。

現在の技術では、水の重さの違いをとても厳密に測定できるので、重さの違いの原因が、水素の同位体なのか、酸素の同位体なのか調べるができるんだ。

ただ、重さの違いはわずかだから、百分率 (%) より細かい千分率 (‰) という単位で示すことが多いんだ。

重さの違いの
厳密な測定は

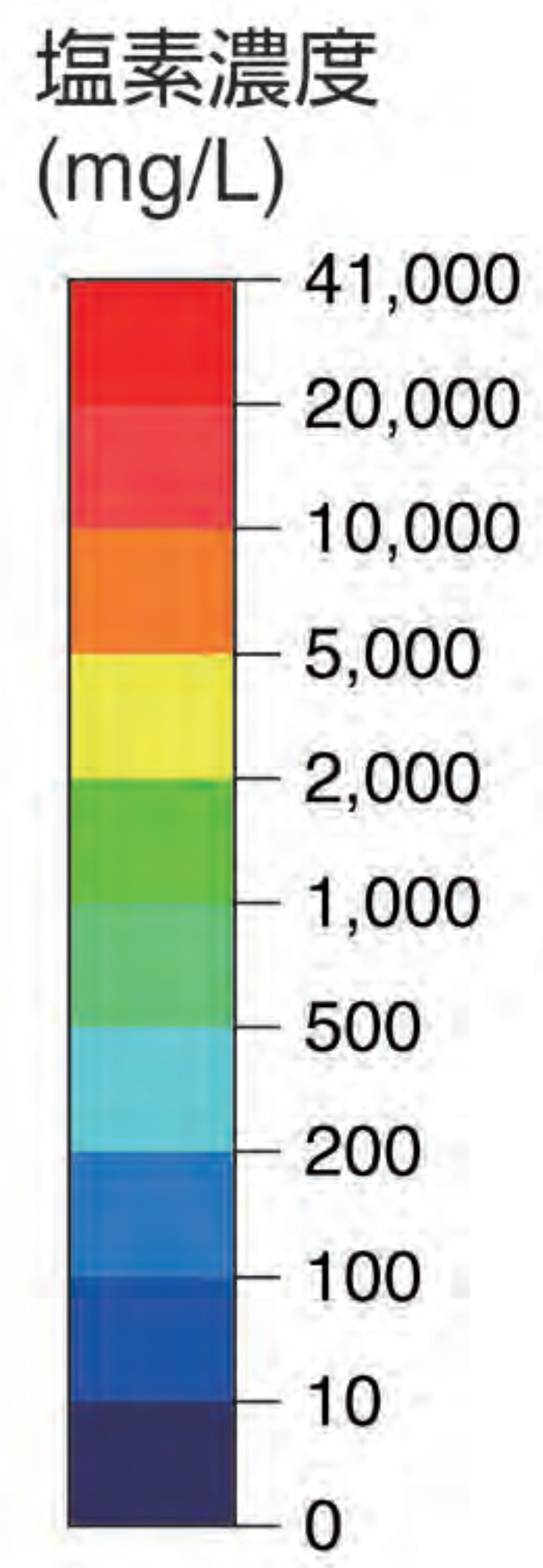
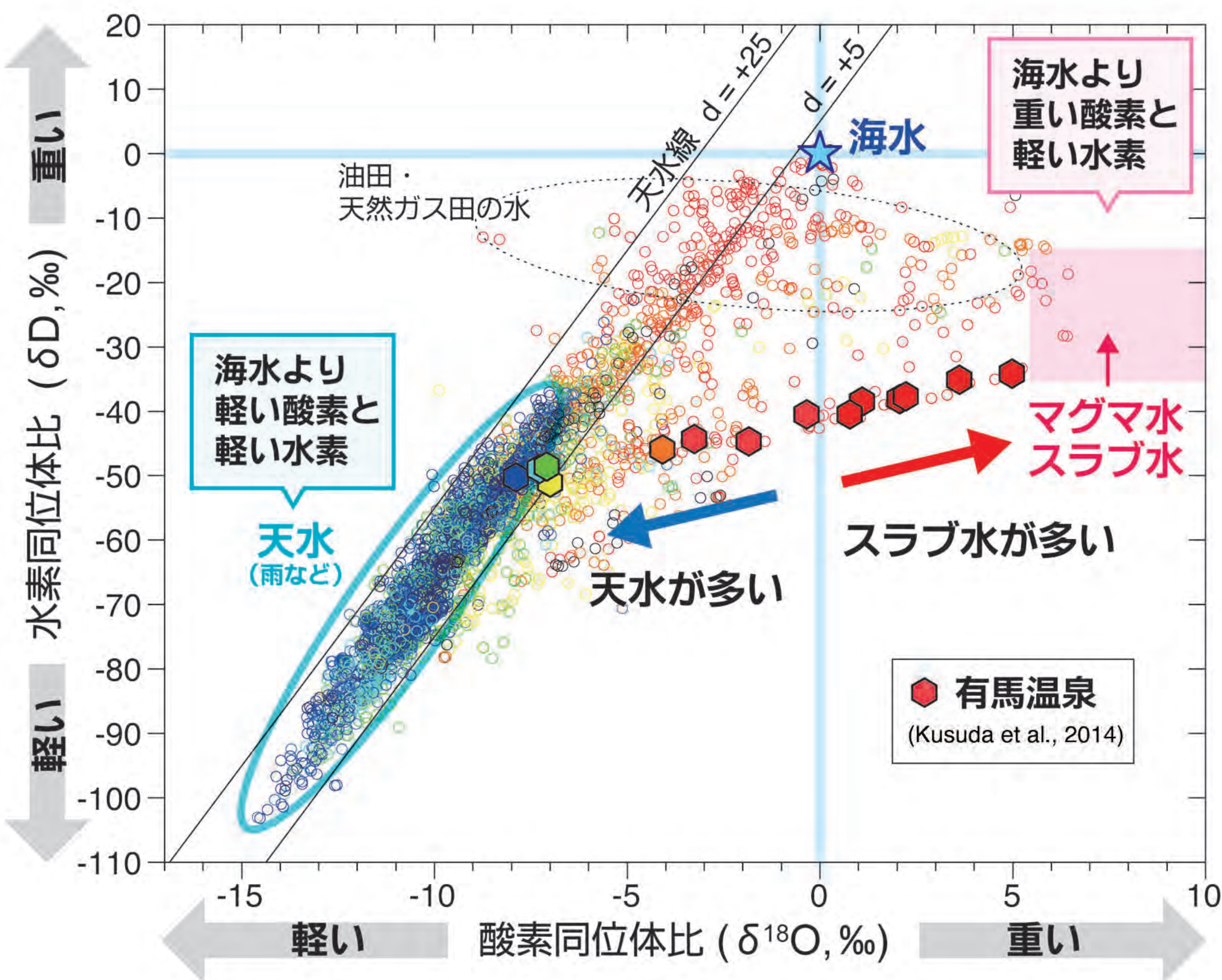
炭素と酸素からできている
二酸化炭素（炭酸ガス）でも
ヘリウムガスでも
行われているよ



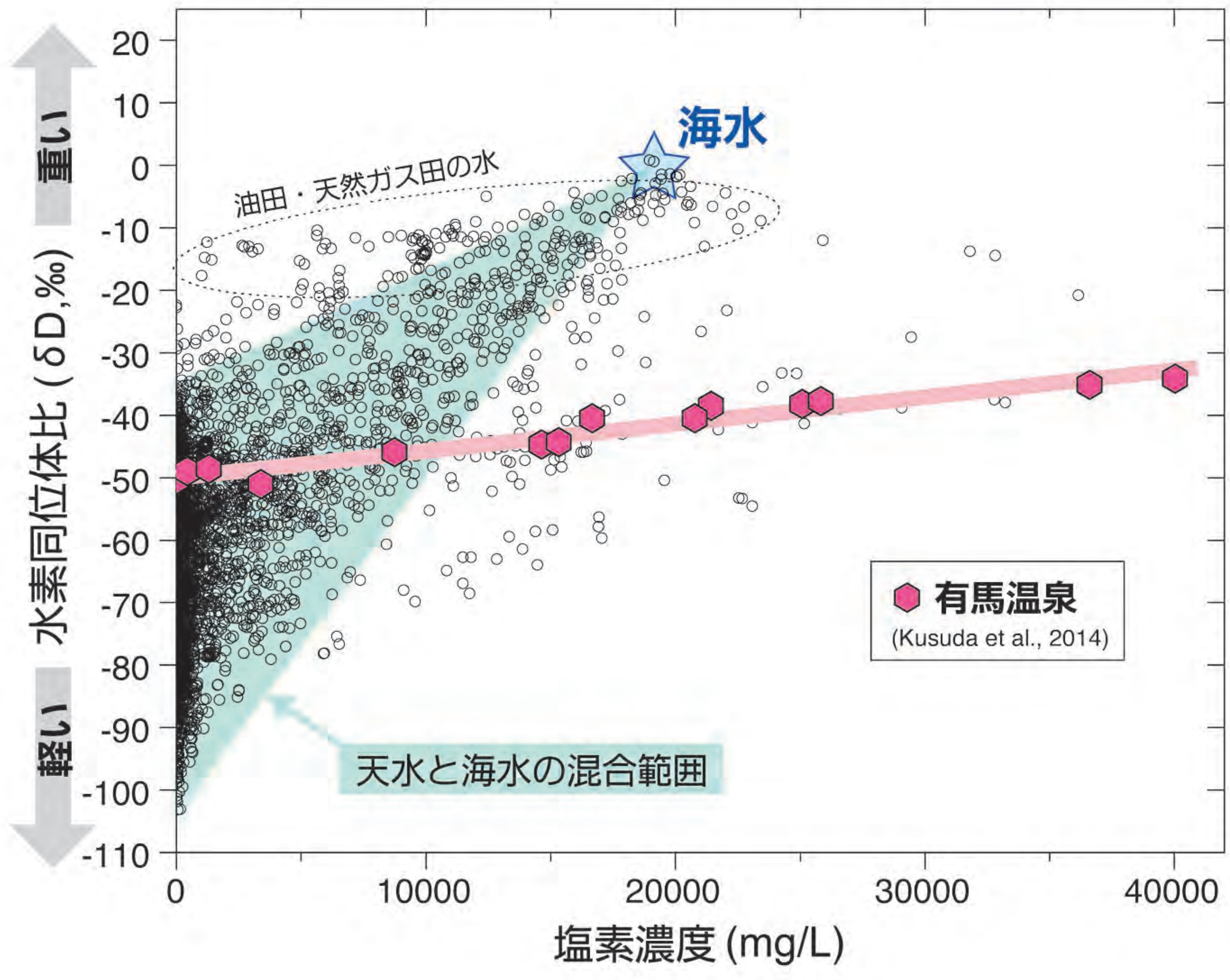
① 水素・酸素の同位体比 (δD 、 $\delta^{18}O$ 比) から考えてみよう!

水の起源を推定するために最も良く使われる指標の一つとして、水の水素・酸素同位体比があります。下の図は全国の温泉水を分析した結果です。天水(雨や雪)・海水・マグマ水といった起源ごとの同位体比の値や範囲がすで

に分かっているため、温泉水を測定することで、その起源や混合が推定できます。水の水素・酸素同位体比は海水を基準値 (0) としています。マイナスは海水よりも軽い、プラスは海水よりも重いことを示します。



有馬温泉の色々な源泉の水を分析すると
天水とスラブ水が混ざったことで説明ができそうだね



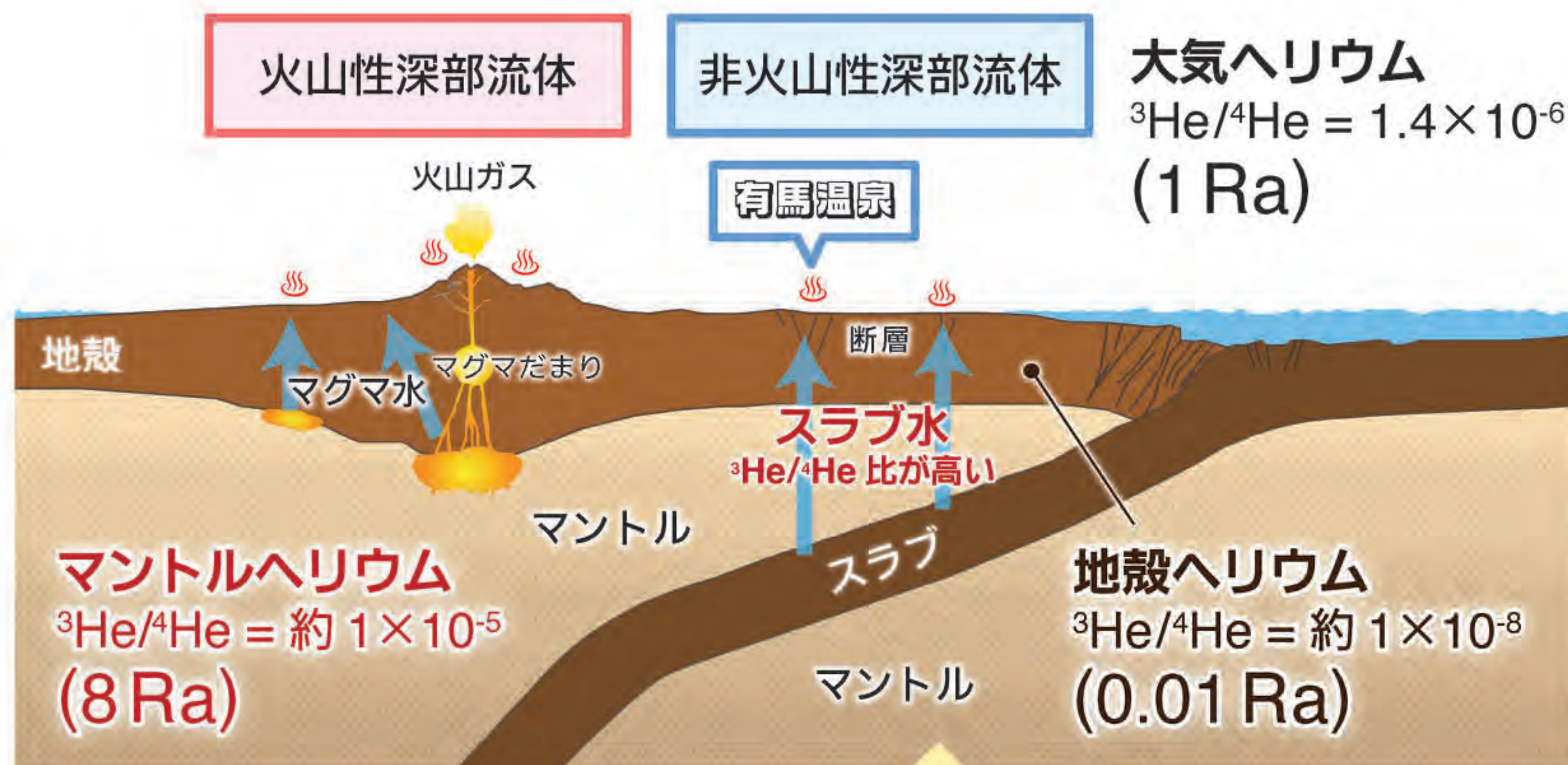
塩素濃度と水素同位体比の関係を見てみよう
有馬温泉は塩素濃度が高いけれど海水から離れた特別な分布を示してる
海水が混ざっているわけではないことが分かるね!



有馬温泉はプレートから出てきた水「深部流体」だった！

② ヘリウムの同位体比 ($^3\text{He}/^4\text{He}$ 比) から考えてみよう！

ヘリウムには ^3He と ^4He の2つの同位体があり、温泉に含まれる ^3He と ^4He の比 ($^3\text{He}/^4\text{He}$ 比) が指標として使われます。大気成分のヘリウム、地殻ヘリウム、マントル中の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比には約3桁の違いがあります。スラブから脱水し、マントルを通過してきた水は、 ^3He を多く含むようになるので、火山性深部流体や非火山性深部流体は高い $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比を示します。



大気、マントル、地殻成分の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の違い
※大気成分のヘリウムを基準にした「Ra」で示すこともあります

ヘリウム同位体質量分析装置



高い $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は
ヘリウムがマントルから来ていることの
証拠になるんだ！



有馬温泉だけでなく
神戸や大阪、紀伊半島など広い地域で
ヘリウム同位体比が高い
不思議な温泉が湧いているよ

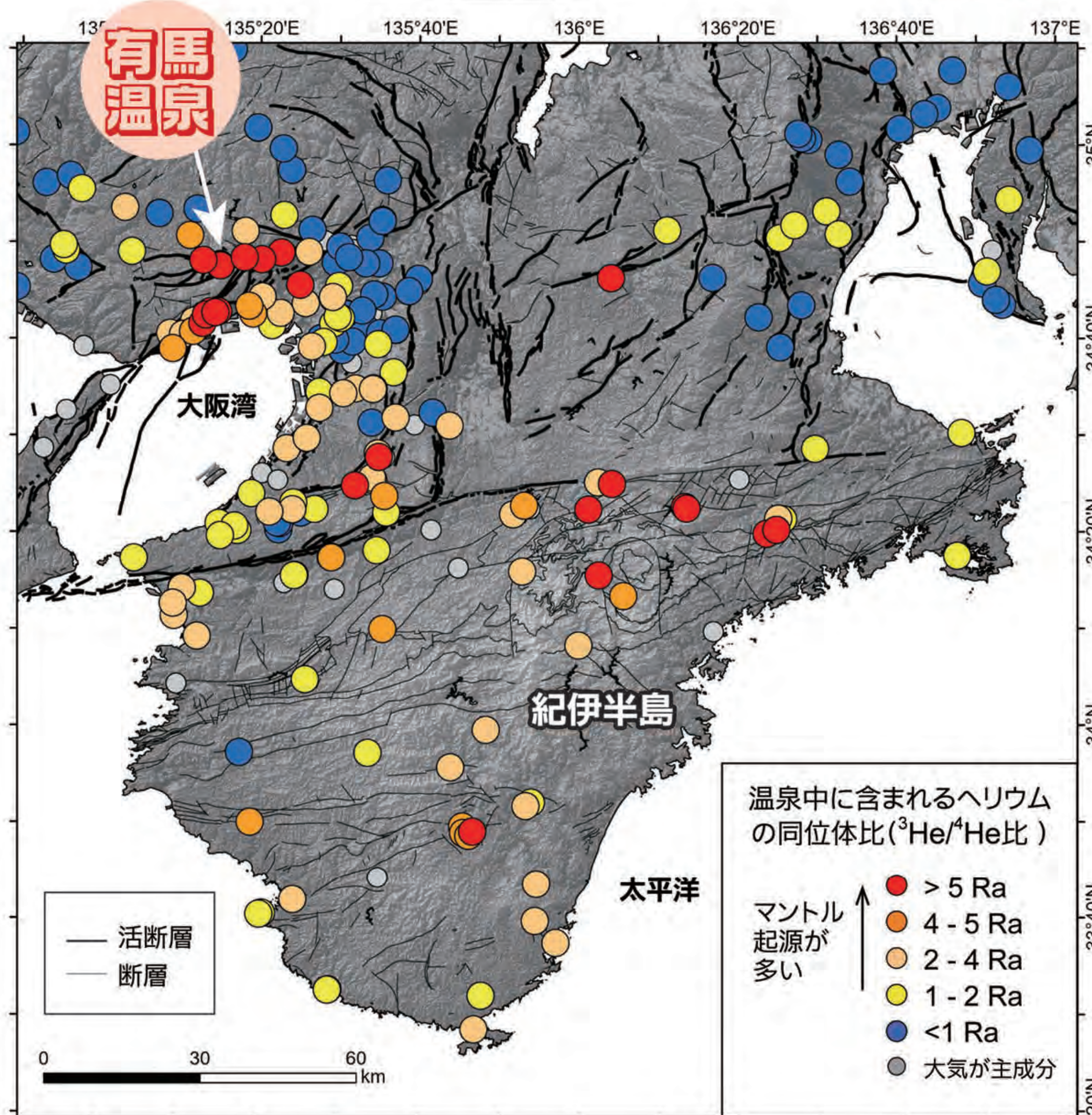
みんな火山が近くにない所だね
断層との関係もありそうかな？



温泉水 1 ml の中に
 $10^{-5} \sim 10^{-8}$ mL しかない ^4He と
 ^4He の 10 万～1 億分の 1
しか存在しない ^3He を
同時に測定できるんだよ！



近畿地方の温泉水の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比を測定すると、有馬温泉や神戸・大阪市内、紀伊半島など広い地域で、マントルヘリウムが含まれることを示す高い $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比が確認できます。この地域では活動的な火山がないため、これらの温泉水中のヘリウムは、マグマではなく、マントルを通過してきたスラブ水が運んできたことが分かります。



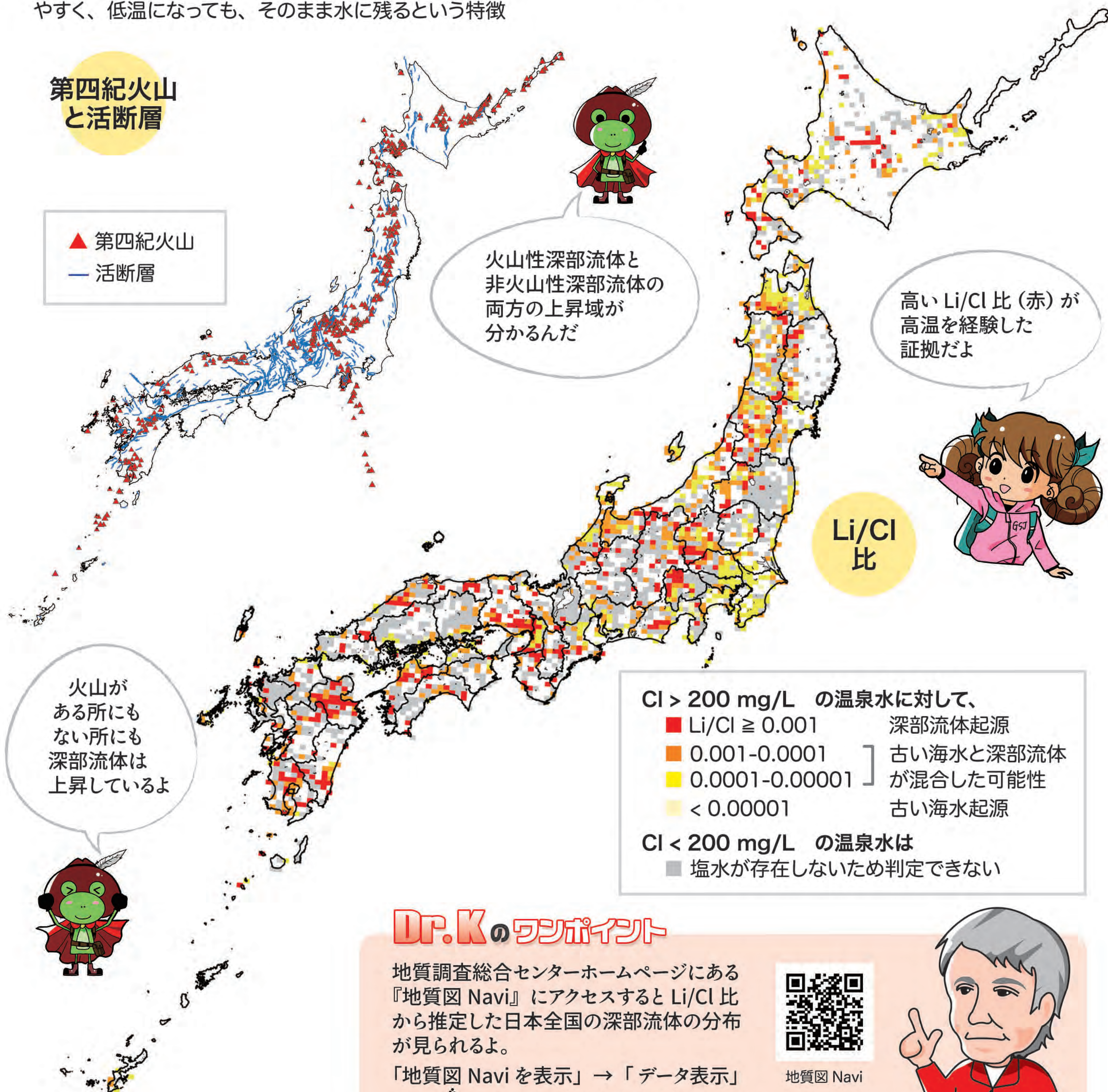
Morikawa et al. (2016) にデータを追加し改変

深部流体はどんな所にある？

① リチウムと塩素から見てみよう！

火山性深部流体も、非火山性深部流体（有馬型温泉）も、どちらも沈み込んだスラブから脱水して作られるため（→ P7）、岩石と高い温度で反応しています。この痕跡は、リチウム（Li）濃度に表れます。それは、岩石に含まれるリチウムは、高温（300℃以上）で水に溶け出しやすく、低温になっても、そのまま水に残るという特徴

があるためです。深部流体が地下水で薄められると、リチウム濃度が低下して深部流体の検出が難しくなります。そこで、深部流体に特徴的な塩素（Cl）も利用した Li/Cl 比が指標として使われます（西尾，2013、風早ほか、2014）。

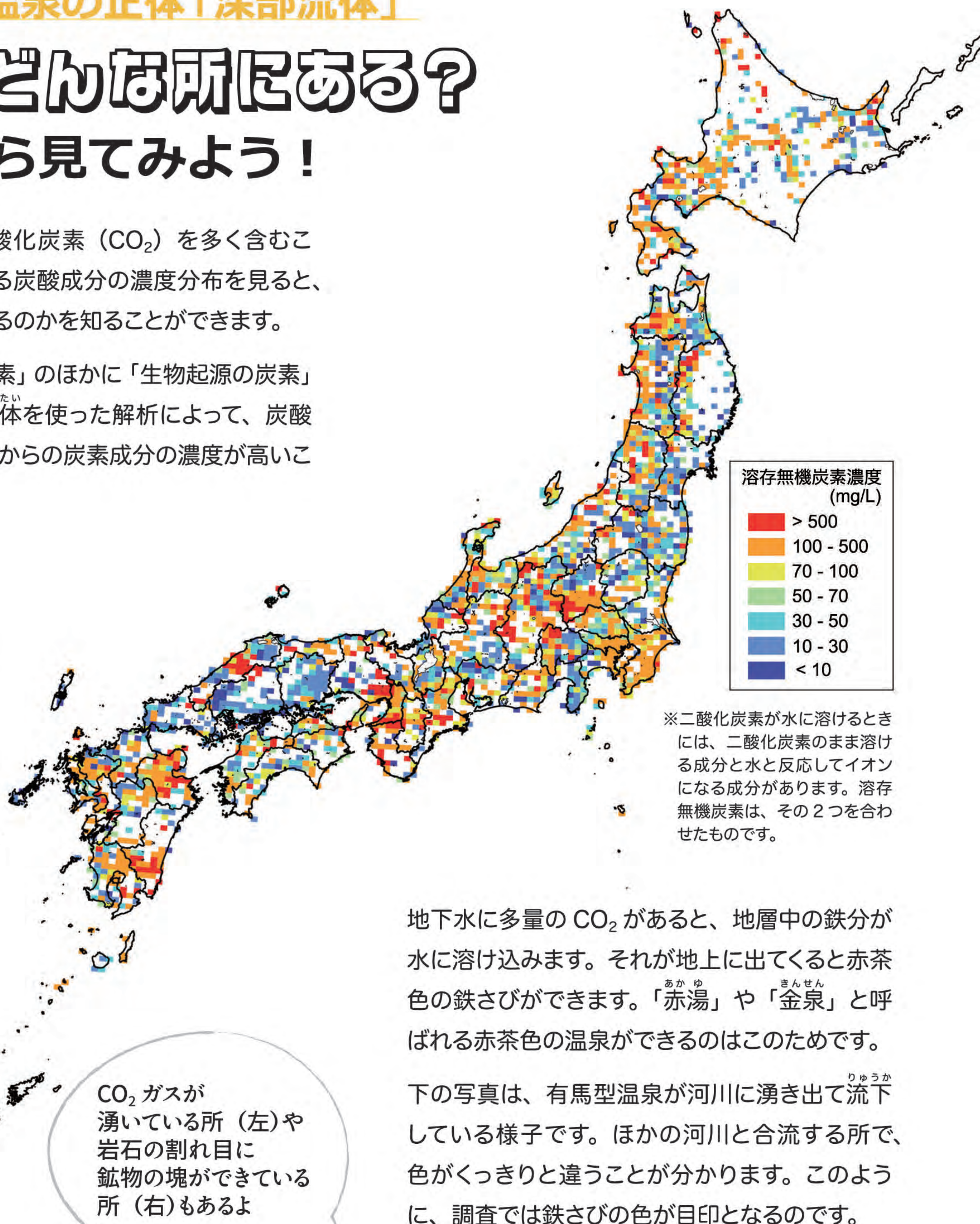


深部流体はどんな所にある？

② 炭酸成分から見てみよう！

深部流体の特徴の一つに、二酸化炭素 (CO₂) を多く含むことがあります。温泉水に含まれる炭酸成分の濃度分布を見ると、深部流体の上昇がどんな所にあるのかを知ることができます。

温泉水には「深部流体起源の炭素」のほかに「生物起源の炭素」も含まれていますが、炭素同位体を使った解析によって、炭酸成分の濃度が高い地域が、深部からの炭酸成分の濃度が高いことが分かっています。



※二酸化炭素が水に溶けるときには、二酸化炭素のまま溶ける成分と水と反応してイオンになる成分があります。溶存無機炭素は、その2つを合わせたものです。

CO₂ は火山ガスに多く含まれているので火山の近くの温泉では炭酸濃度が高いね

それ以外の地域でも炭酸濃度が高い温泉があるよ



どんな所で炭酸濃度が高いのか

ヘリウム同位体比やLi/Cl比といったほかの化学データとも比べてみよう！
(→ P14、15)

CO₂ ガスが湧いている所 (左) や岩石の割れ目に鉱物の塊ができています (右) もあるよ

きっと深部流体が割れ目から出たんだね



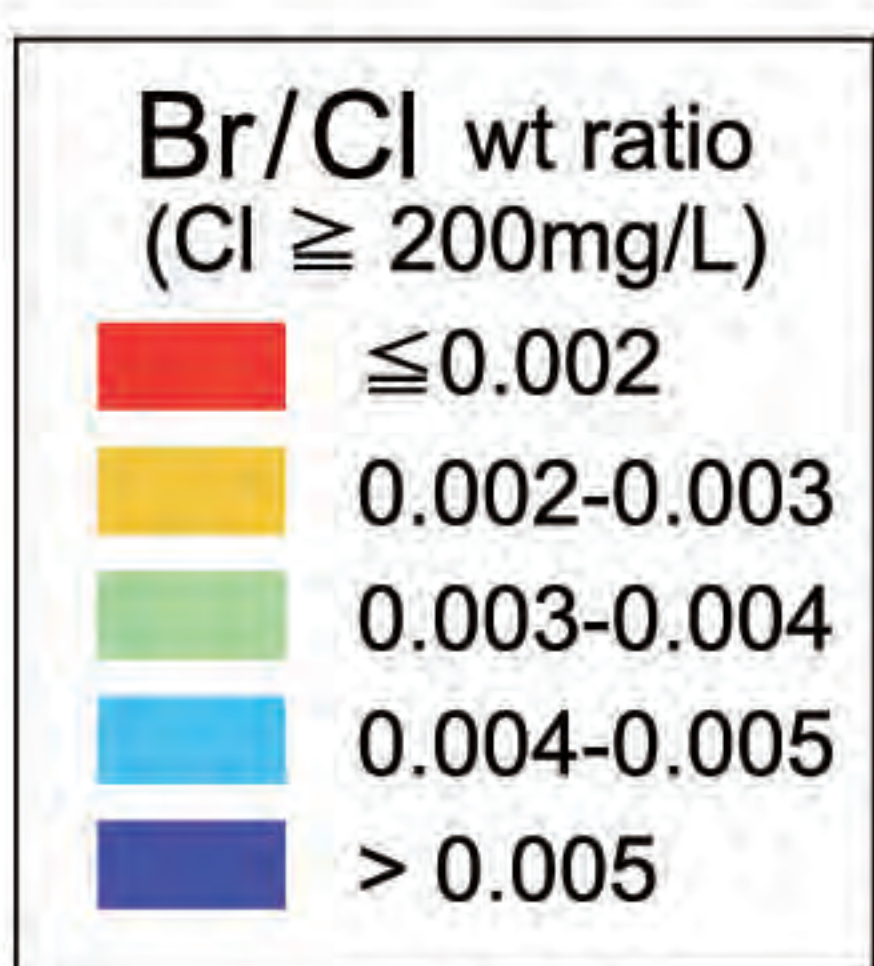
地下水に多量の CO₂ があると、地層中の鉄分が水に溶け込みます。それが地上に出てくると赤茶色の鉄さびができます。「赤湯」や「金泉」と呼ばれる赤茶色の温泉ができるのはこのためです。

下の写真は、有馬型温泉が河川に湧き出て流下している様子です。ほかの河川と合流する所で、色がくっきりと違うことが分かります。このように、調査では鉄さびの色が目印となるのです。

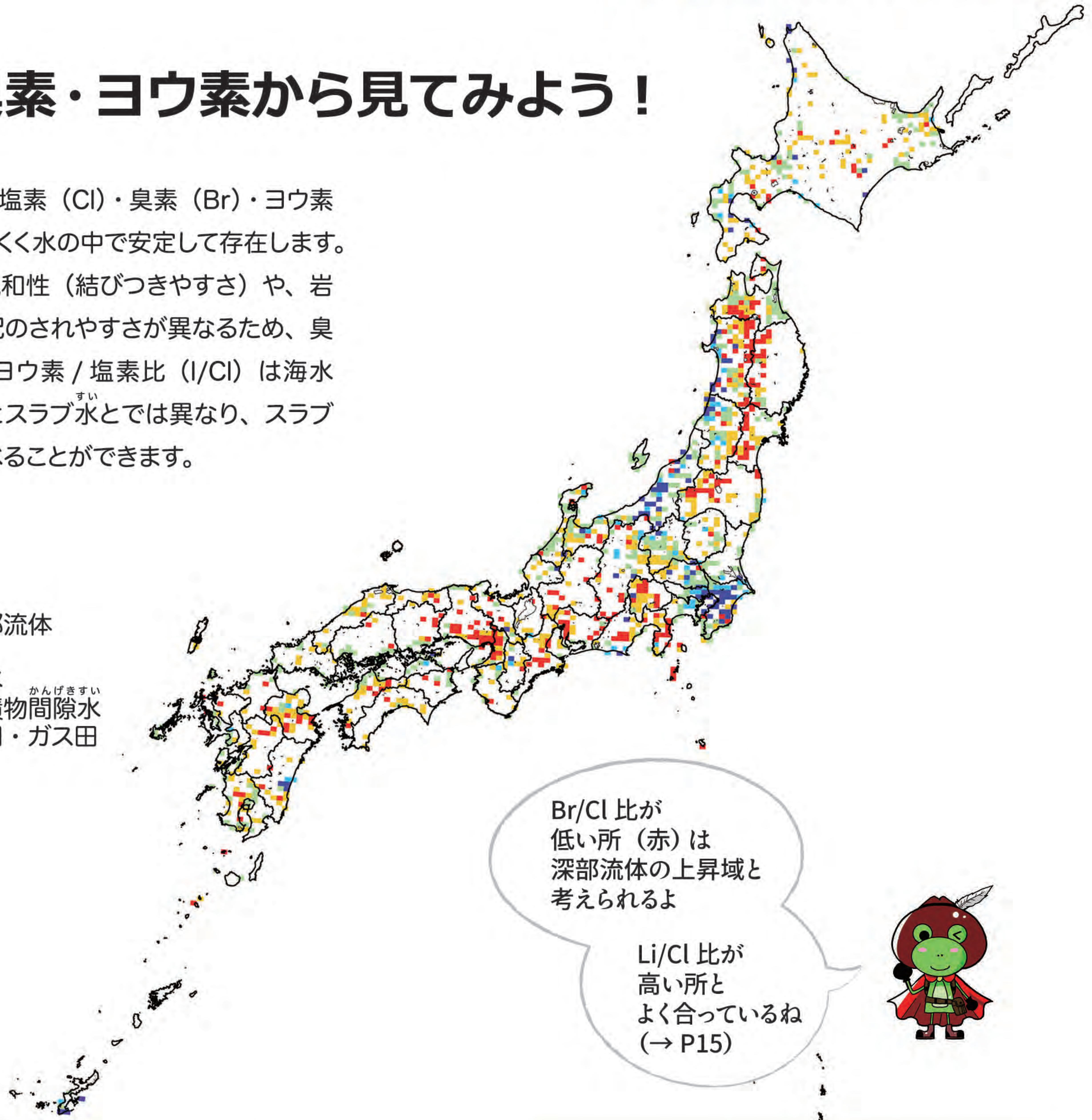


③ 塩素・臭素・ヨウ素から見てみよう！

ハロゲン元素と呼ばれる塩素 (Cl)・臭素 (Br)・ヨウ素 (I) は、岩石と反応しにくく水の中で安定して存在します。元素ごとに有機物との親和性 (結びつきやすさ) や、岩石・マグマ・水への分配のされやすさが異なるため、臭素 / 塩素比 (Br/Cl)、ヨウ素 / 塩素比 (I/Cl) は海水や堆積物の中にある水とスラブ水とは異なり、スラブ水が含まれる温泉を調べることができます。

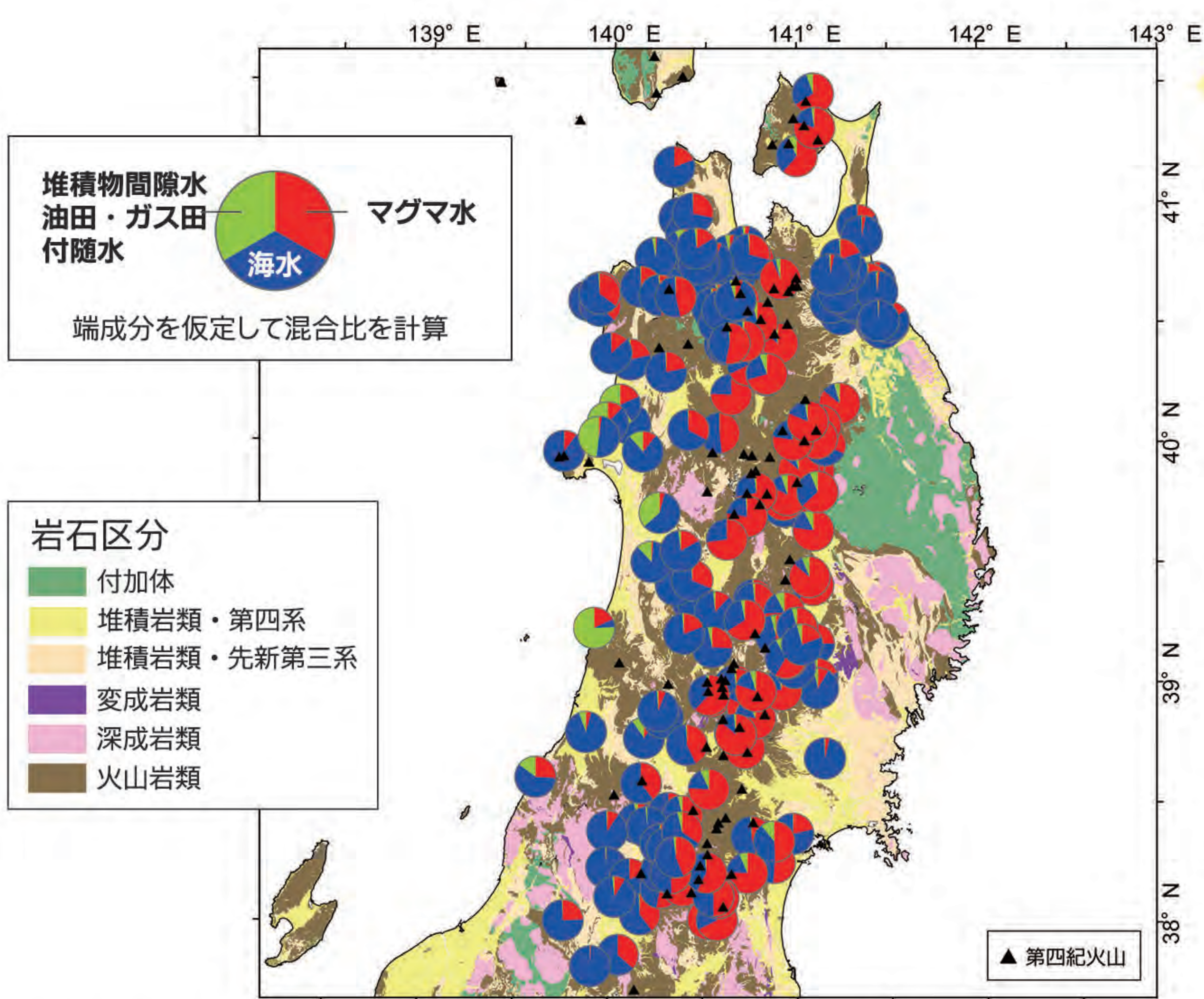


↑ 深部流体
海水
堆積物間隙水
油田・ガス田
↓



Br/Cl 比が低い所 (赤) は深部流体の上昇域と考えられるよ

Li/Cl 比が高い所とよく合っているね (→ P15)



Br/Cl 比、I/Cl 比を利用した塩素 (Cl) の起源解析例

Cl・Br・I の 3 元素を使うことで、Cl の主な起源 (マグマ水・海水・堆積物間隙水 / 油田・ガス田付随水) が推定できます。

実はいろいろな起源の塩素が混ざっていたんだね

昔、海だった地域では内陸でも海水起源の塩素が残っているよ



※塩素濃度 200 mg/L 以上の水を対象に解析 (東郷ほか, 2017, 2019 にデータを追加し改変)

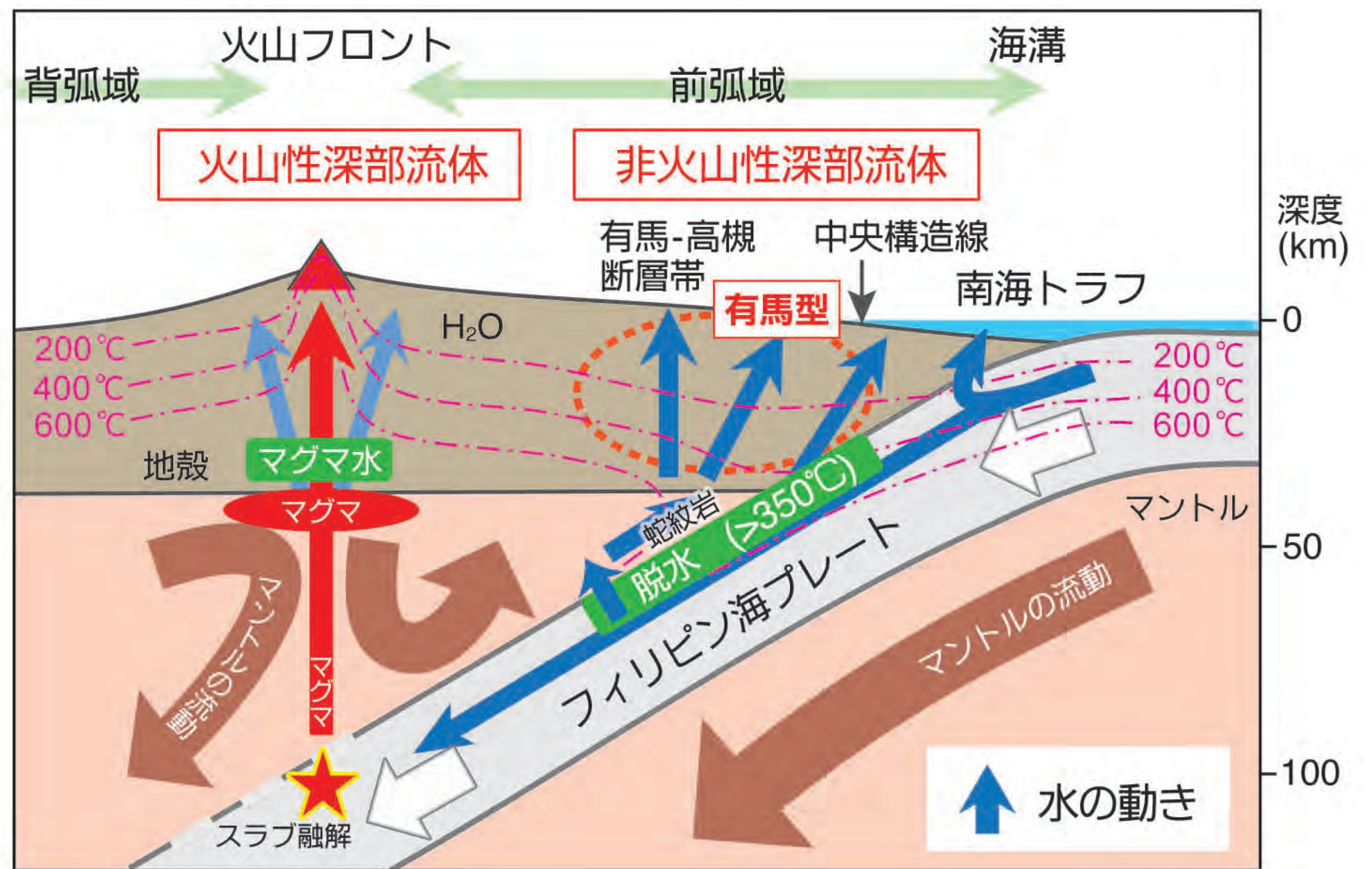
有馬型温泉は西南日本にしかない？

岩石に含まれる含水鉱物（水素を含む鉱物）は、沈み込むプレートとともに地球内部へ運ばれていきますが、深く沈み込むと、高い温度と圧力の状態になり別の鉱物へと変化します。このときに水素や酸素が鉱物から離れて独立した「水」となり（脱水と呼ばれます）、深部流体（スラブ水）が作られます。マントルの中を上昇した深部流体は、マグマの発生に重要な役割を果たします。熱いマ

ントルの中の岩石に水が加わると、岩石が溶けてマグマが生成します。そして、深部流体は火山ガスの主成分である水蒸気のもとになります。このようなマグマ中の水は「マグマ水」と呼ばれます。有馬型温泉とマグマ水の特徴が似ているのは、同じスラブ水を元にできているからなのです。ここでは日本列島を大きく2つに分けて、西南日本と東北日本を比べてみましょう。

西南日本弧

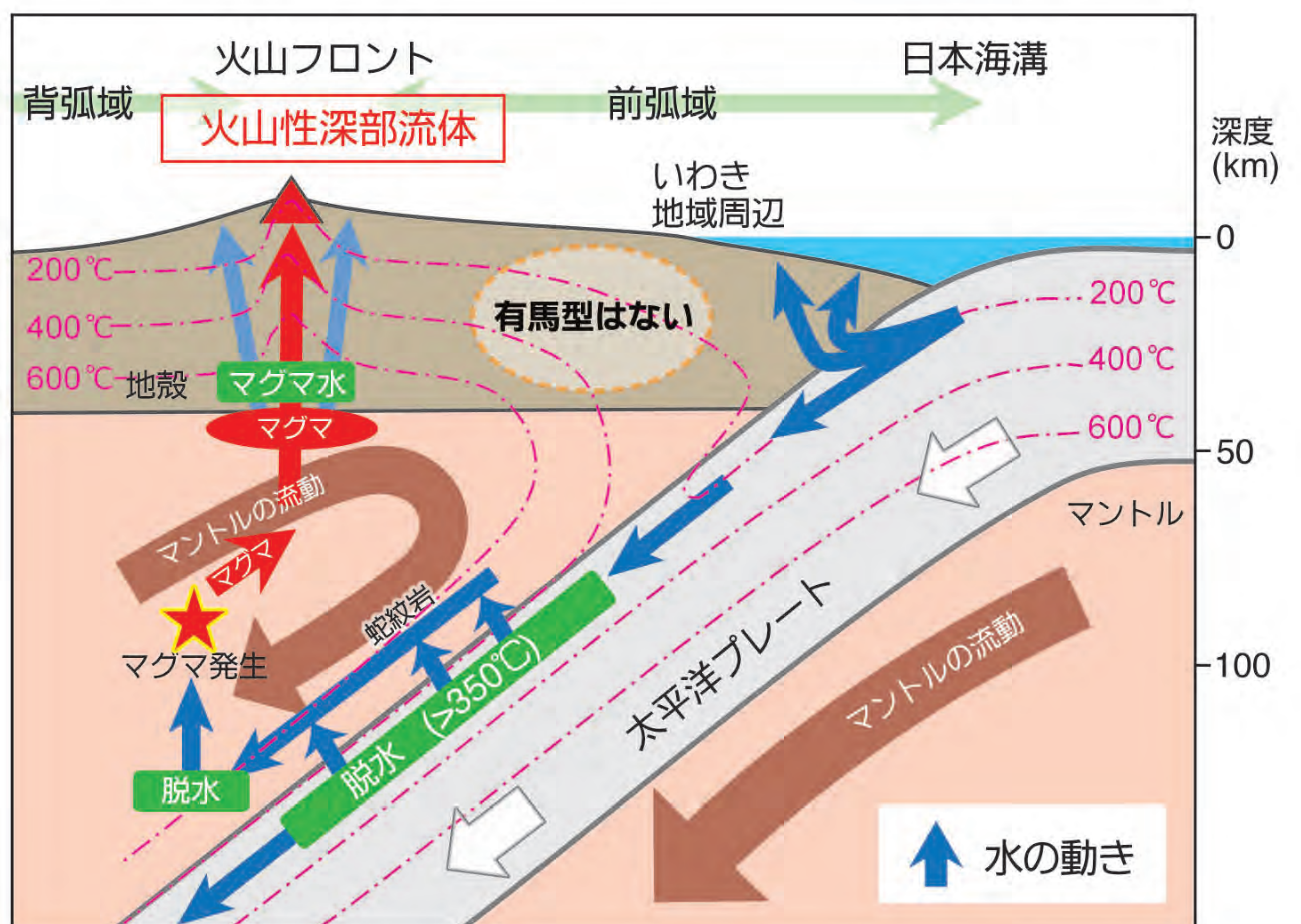
南海トラフで沈み込んだフィリピン海プレートでは、太平洋（前弧）側の深さ60 km（温度600℃）までに大部分の脱水が生じます（非火山性深部流体）。西南日本の前弧域の地下では、マントルはマグマを作る温度・圧力ではないため、深部流体は熱水として表層まで上昇します。前弧域の熱水は四国や紀伊半島でも広く確認されています。



東北日本弧

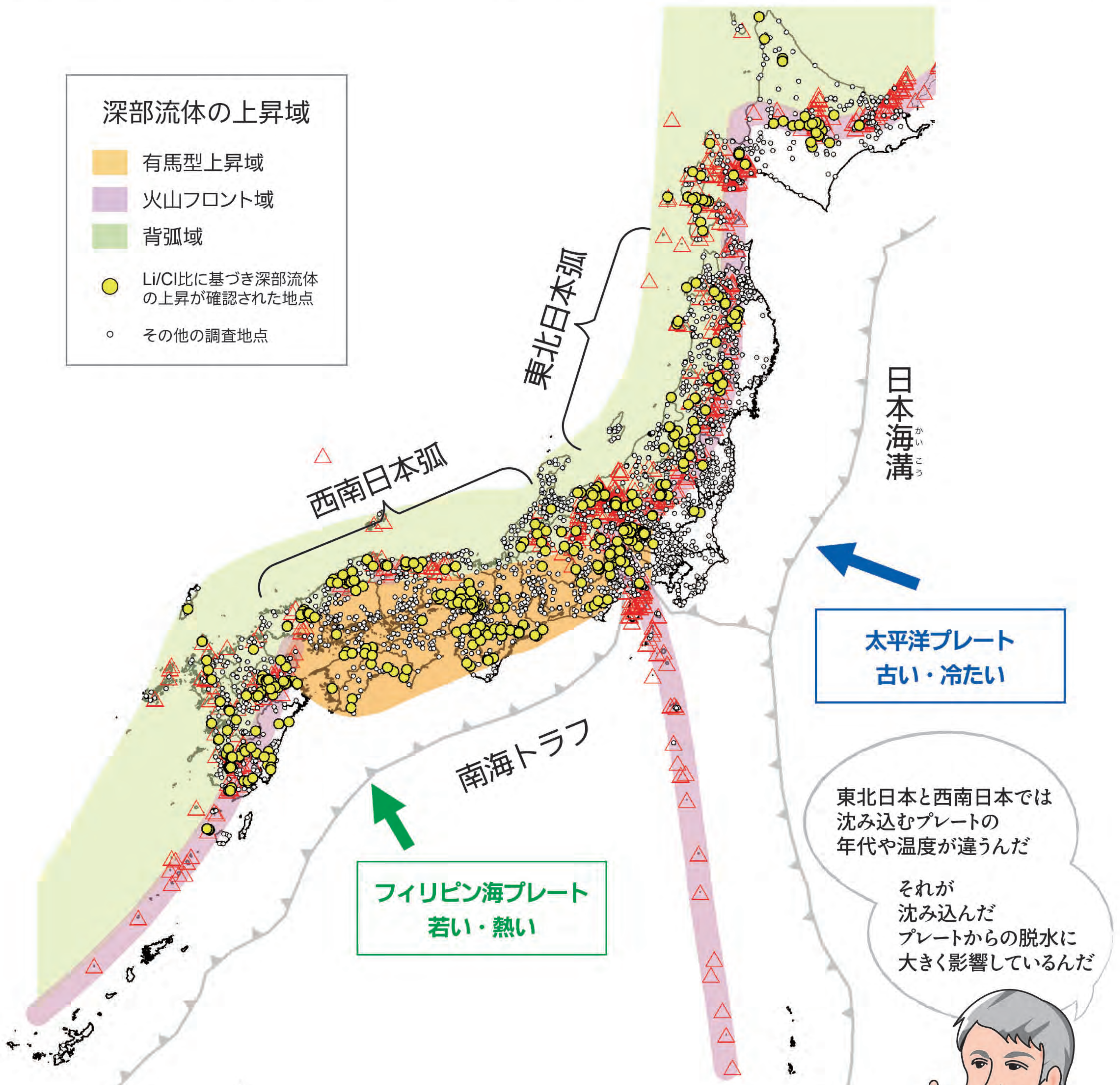
日本海溝で沈み込んだ太平洋プレートから脱水した水は、直上のマントルの中で含水鉱物を作り（蛇紋岩）、さらに深い所まで引きずり込まれます。そして、600℃を超える温度になると、その蛇紋岩から再び脱水が起こり、水はマントルの高温部分（1200-1300℃）を上昇するため、マグマを生成し、火山を作ります。

東北日本の前弧域では、福島県いわき地域や北茨城地域周辺を除き、高温の温泉は確認されていません。



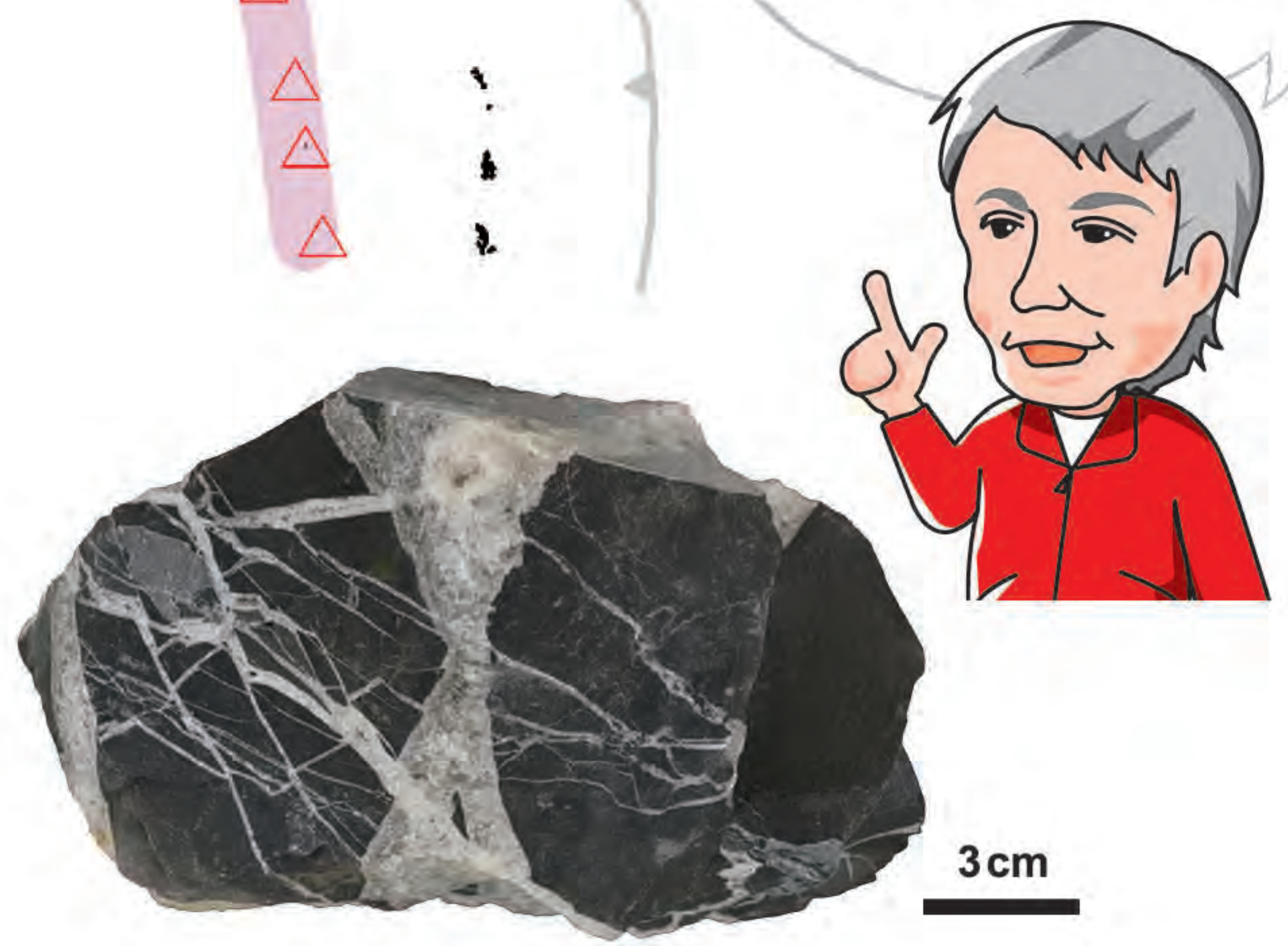
片山ほか（2010）、風早ほか（2014）を加筆修正。温度構造は Peacock & Wang (1999) による

日本中 にある 深部流体がもとになっている温泉



深部流体の通り道

深部流体は、断層や岩盤の割れ目を通して地下深部から上昇します。上昇速度が早ければ高温、遅ければ途中で冷めてしまい低温の水になります。深部流体は、様々な元素を高濃度に溶かし込んでいるため、断層や割れ目を移動する途中で鉱物を沈殿させます。岩石によく見られる白い線状の鉱物脈（→ P22、23）は、過去に深部流体が通った痕跡です。



鉱物脈の例（北海道・光竜鉱山3号脈）

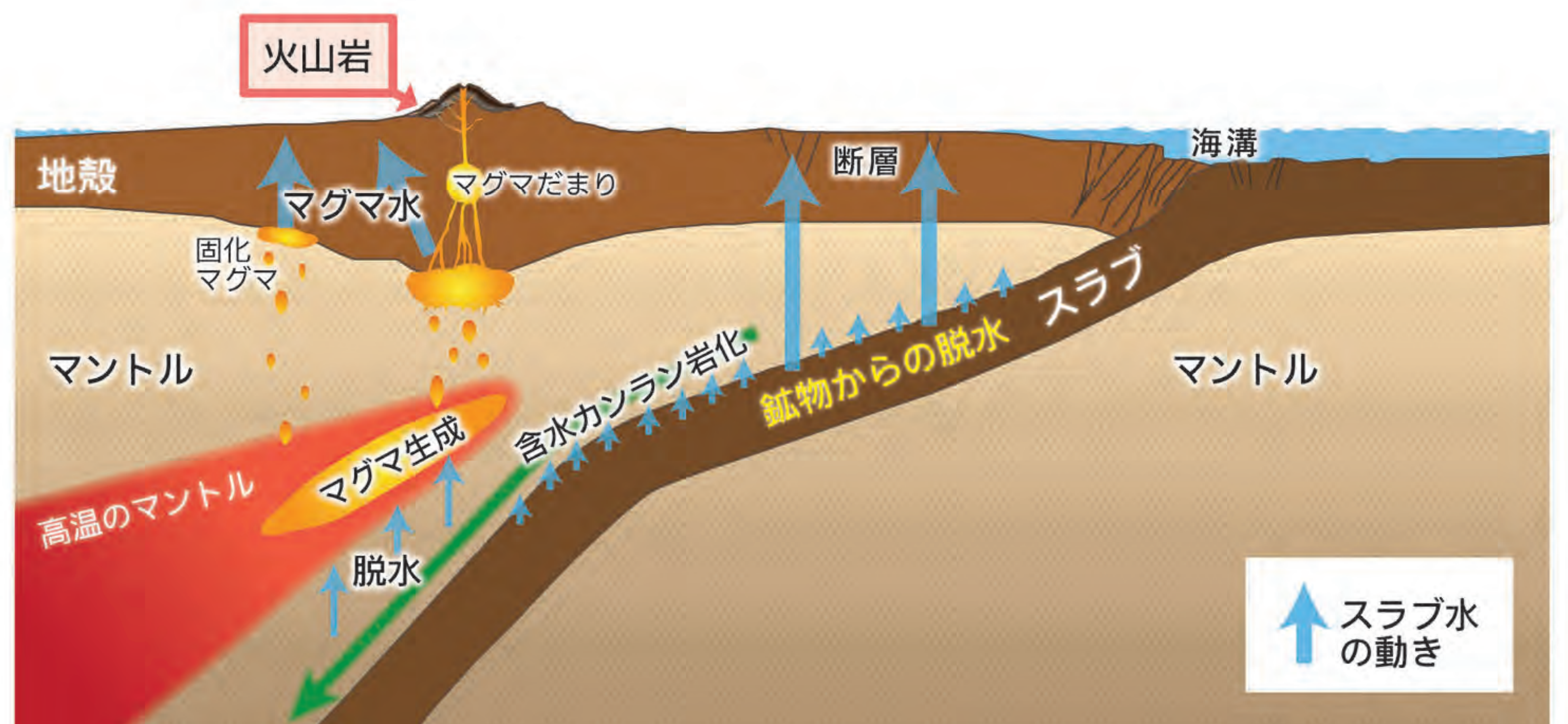


東北日本と西南日本では沈み込むプレートの年代や温度が違うんだ
それが沈み込んだプレートからの脱水に大きく影響しているんだ

火山岩に含まれる深部流体の量

これまで温泉の話をしてきましたが、火山岩の化学組成を対象に研究をすることで、マグマを作るマントルに含まれていた流体の量やそのもととなった流体がどこから来たのかを知ることができます。

火山岩を調べることで
マグマができる場所の
スラブ水のことが
分かるんだ



中部日本の地下では、フィリピン海プレートと太平洋プレートの2つの海洋プレートが沈み込んでいます。この地域の火山岩を調べると、マントルには2つのプレートから脱水したスラブ水が、様々な割合で含まれていることが分かりました。

また、両方のプレートからの流体が関与しているため、ほかの地域と比べて、マントルに含まれる流体の量が多いことが分かってきました。このことは、中部日本の広い地域で火成活動が生じていることとも関係します。

中部日本の火山を作るマグマには
フィリピン海プレートと
太平洋プレートの
両方から脱水した
スラブ水が
含まれるよ

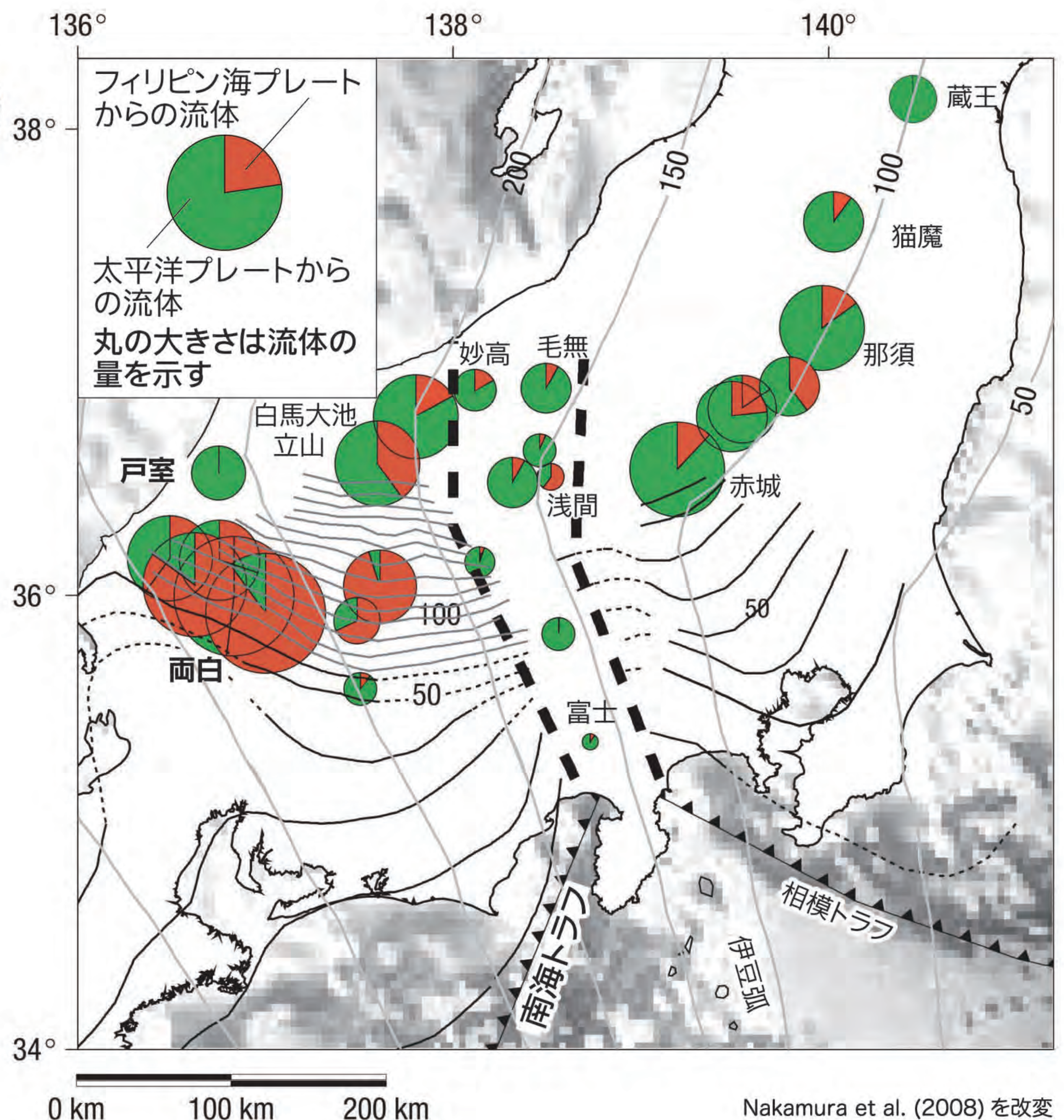


中部～東北日本の第四紀火山
を作ったマグマに含まれる
スラブ水の量と起源の図

Dr.Kのワンポイント

富士山～妙高山にかけての地域では流体の量は少ないけれど、その東西では、フィリピン海プレートと太平洋プレートからの脱水したスラブ水の量が異なるんだ。

図中の数字はプレート上面の深度(km)だよ。



Nakamura et al. (2008) を改変

マグマができる場所には、 どれくらいの量のスラブ水が来ているのだろうか？

日本列島の地下のマントルを比較すると、中部日本の地下でマントルに含まれる流体の量が特に多いことがよく分かります。地下深くのマントルは、どこでも同じではなくて、スラブ水がどのくらい来ているか（流体量）によって違ってきます。千島弧～東北日本弧と伊豆 - 小笠原弧では0.1%前後の流体量ですが、これは世界と比べると平均的な値です。一方、琉球弧は多め、中部日本は1%以上でとても多く、これは世界的にも極めてまれです。その理由は、フィリピン海プレート起源のスラブ水のためです。

日本列島における第四紀火山ごとの マグマ生成場に付加されるスラブ水の 量の比較

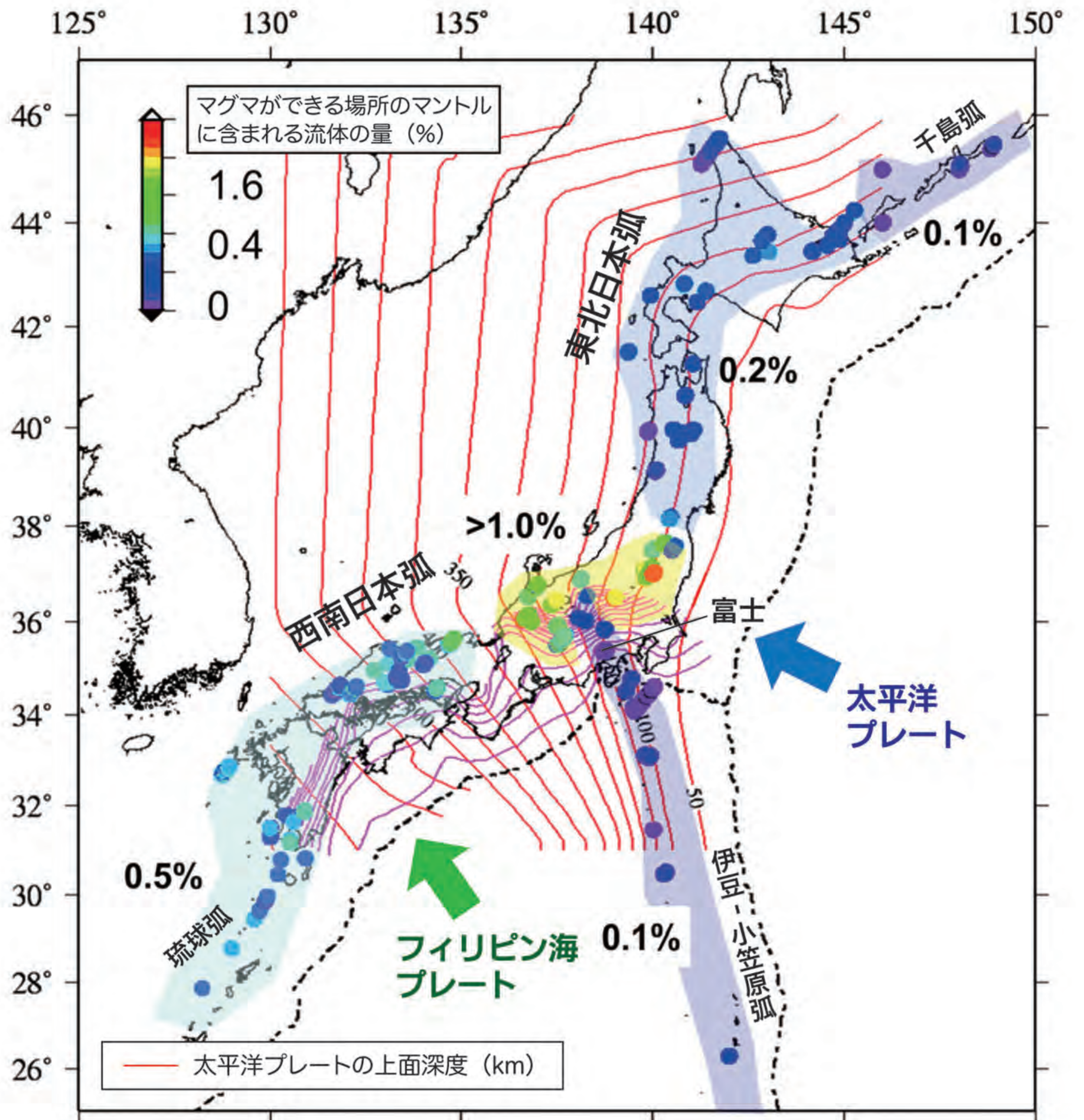
マグマができる場所の
マントルに含まれている
流体の量は

中部日本では
1%以上で
ほかの地域と比べて
すごく多く
じゃぶじゃぶだって
ことが分かるね

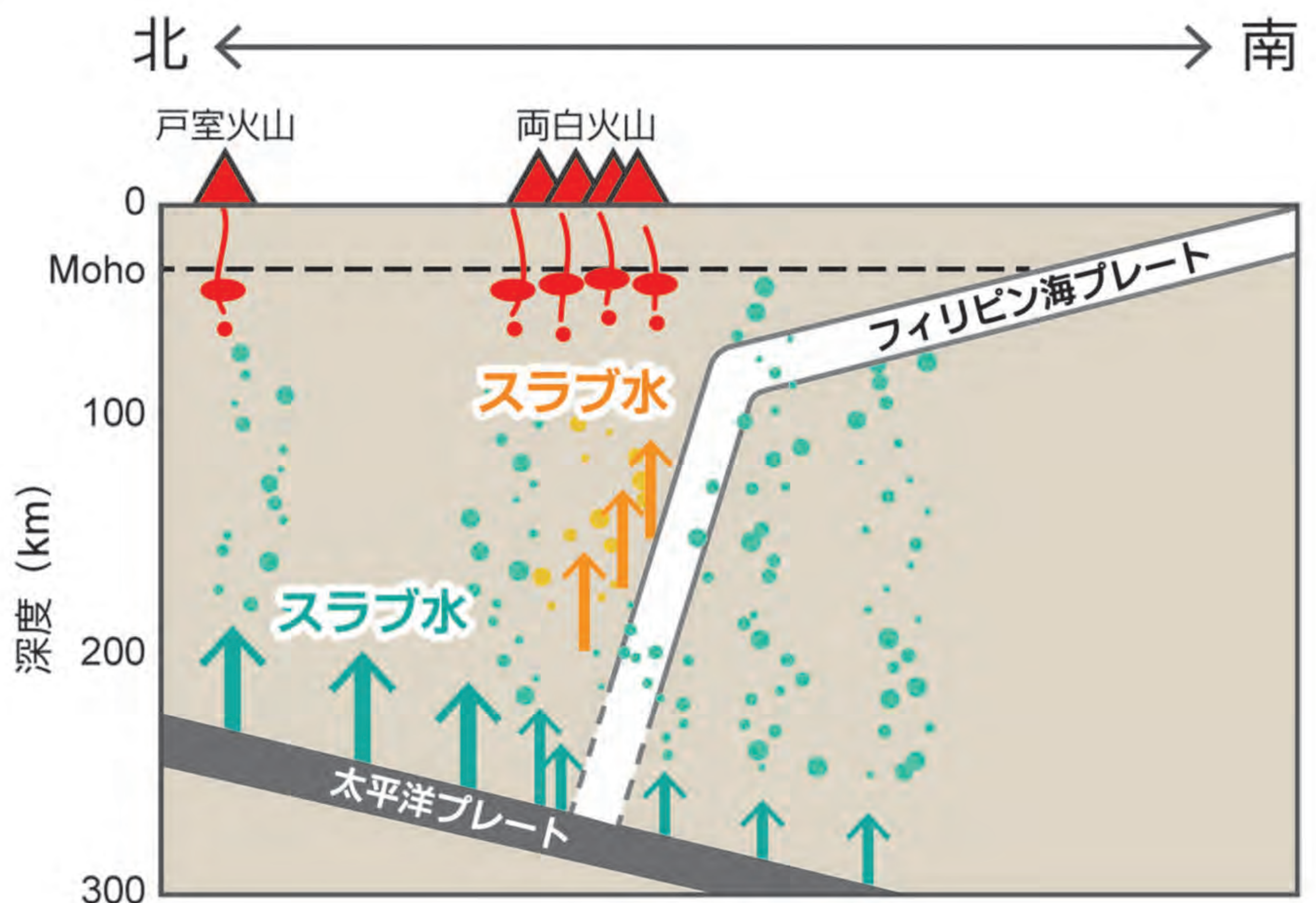


中部日本におけるプレートからの スラブ水の供給の概念図

断面を西から見た場合、フィリピン海プレートは図の右から左へ進む途中で折れ曲がりますが、太平洋プレートは図の奥から手前側にほぼ均一に沈み込んでいます。



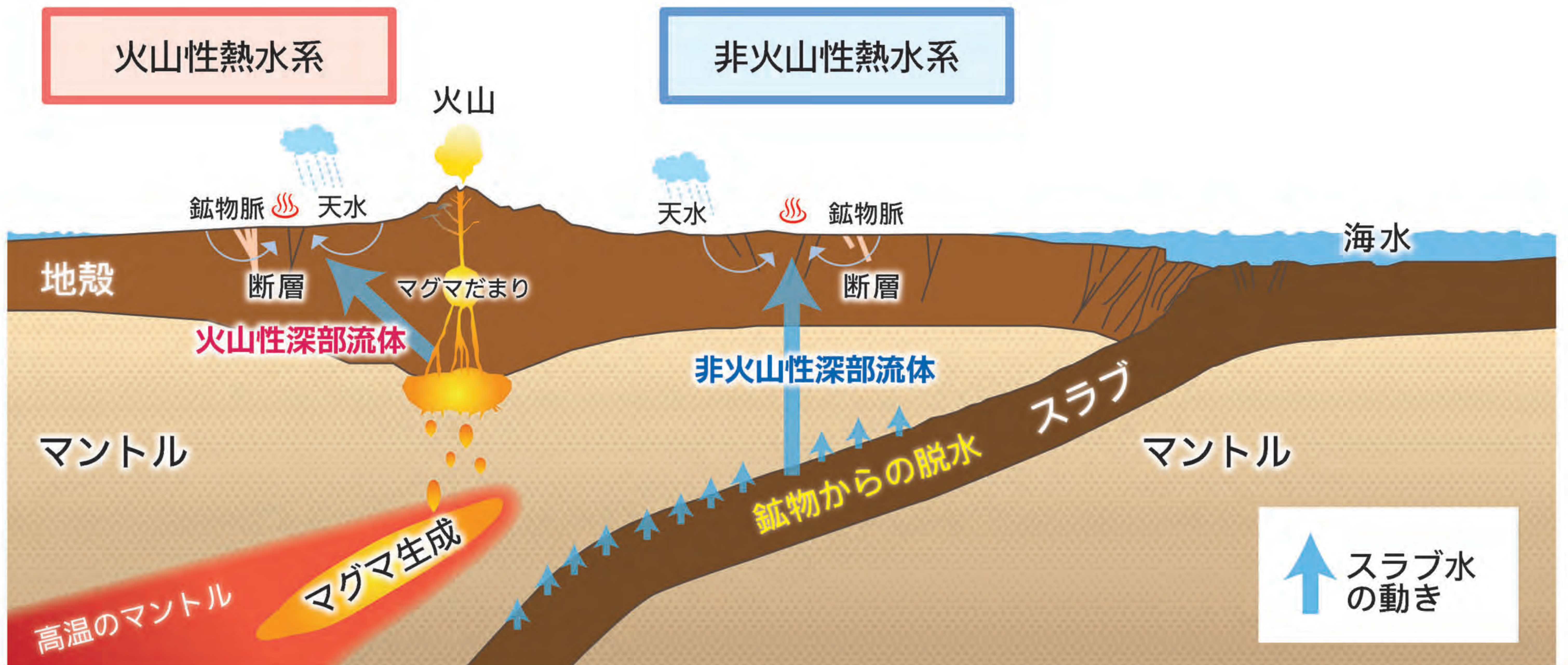
Nakamura et al. (2019) を改変



鉱物脈を作る深部流体

地下に断層や割れ目ができる、そこが深部流体の抜け道になり、深部流体は地表付近まで上昇します（下図）。そこでは、温度や圧力の低下などにより、深部流体に含まれていた化学成分が溶けきれなくなり、様々な鉱物が

晶出して「鉱物脈」を形成します。鉱物脈には、火山活動に伴う火山性熱水系と伴わない非火山性熱水系があります。



火山性熱水系の鉱物脈

鹿児島県・^{ひしかり}菱刈鉱山では、過去の火山性深部流体の活動によってできた有用金属を含む鉱物脈（金鉱脈）が形成しました。

① 金-石英-氷長石脈の露頭（鉱物脈の断面）

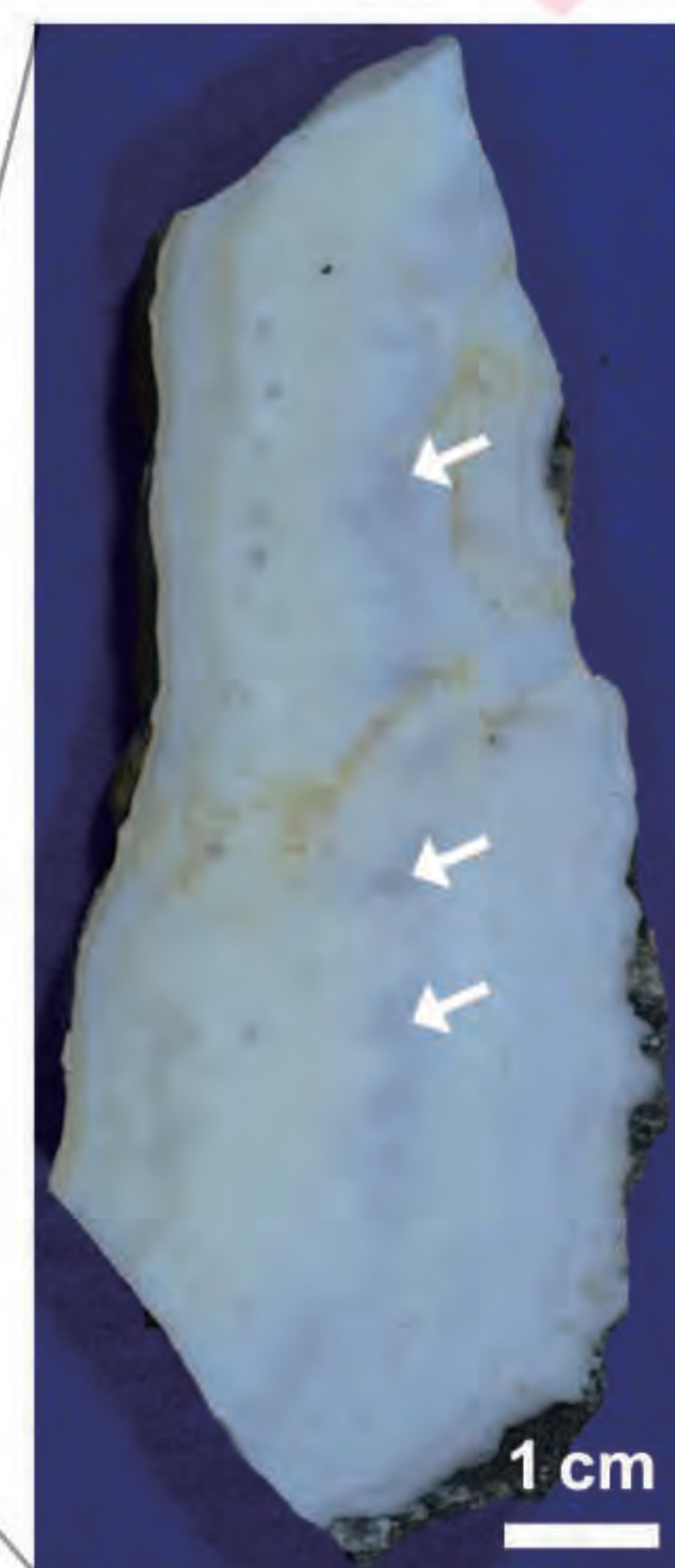
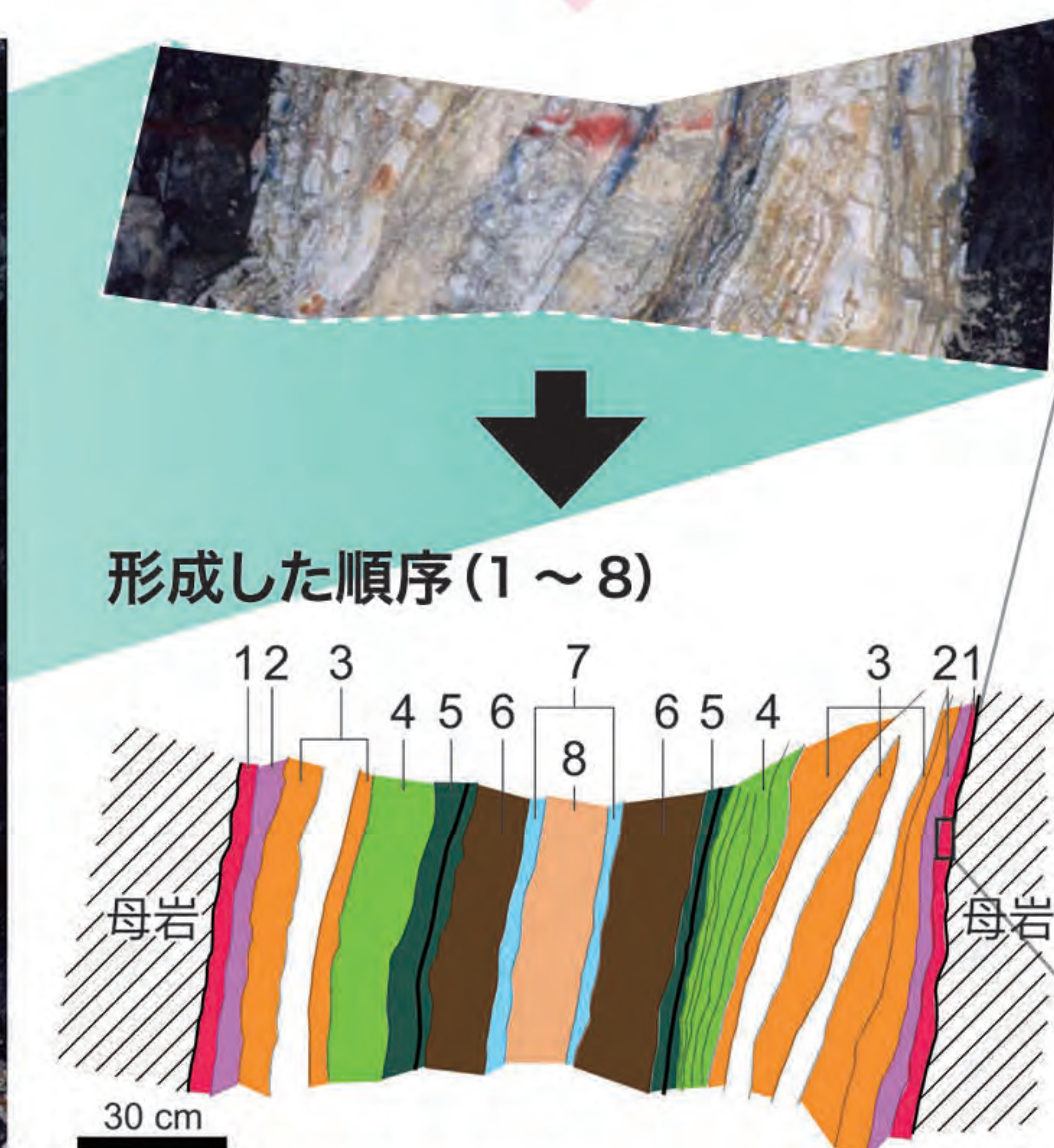
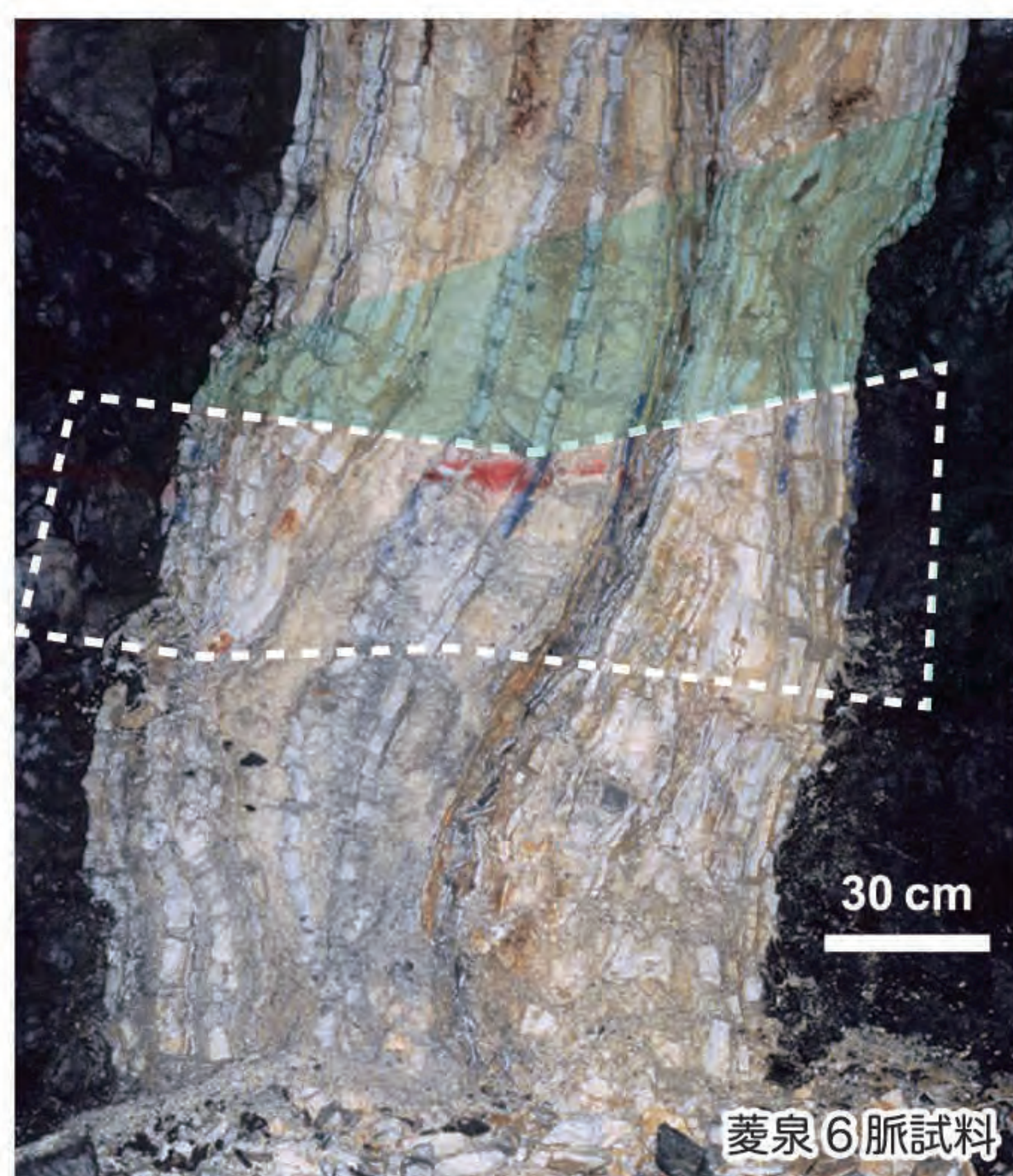
断層を通った熱水が繰り返し鉱物を晶出させたため、鉱物脈は縞状を示します。

② 鉱物脈のスケッチ（①の点線内）

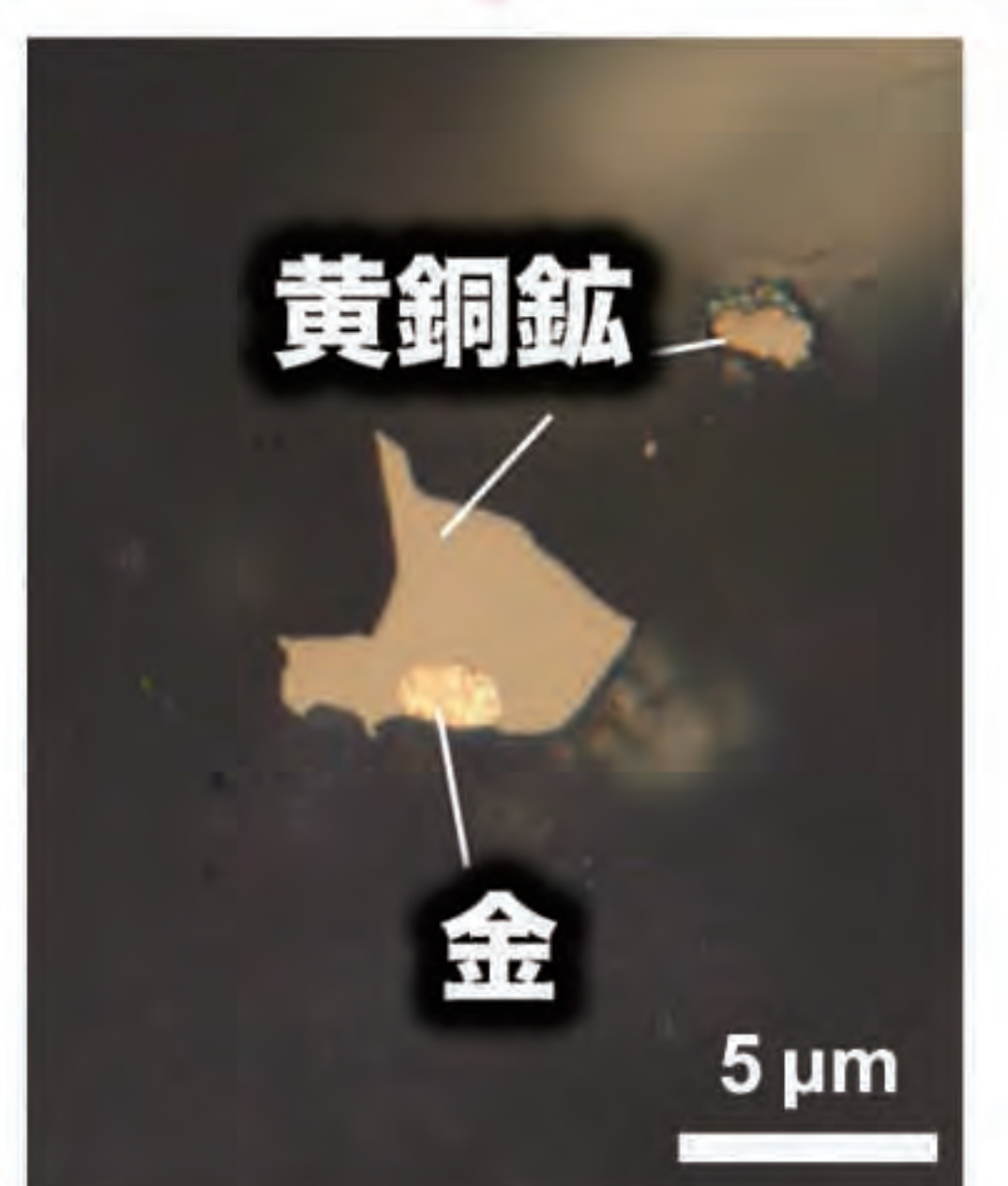
解析から結晶が断層（割れ目）の外側から内側に成長していったことが分かります。

③ 鉱物脈試料（切断面）

金はやや黒っぽい部分（矢印先）に含まれます。



④ 顕微鏡で見える金（エレクトラム）と黄銅鉱



①～④は全て Shimizu (2015) より引用

非火山性熱水系の鉱物脈

有馬温泉周辺では、非火山性深部流体が作った鉱物脈が露出しています。



有馬温泉近くの鉱物脈
(褐鉄鉱 - 緑泥石脈の写真)

緑泥石は地下深部の断層中で酸素に乏しい還元的な深部流体から形成しました。その後、隆起・侵食を受けて浅くなった所の断層中で、深部流体と酸化的な雨水との混合や、二酸化炭素の脱ガスにより、褐鉄鉱が形成しました (Shimizu et al., 2021)。

流体包有物

鉱物は成長するとき流体を取り込むことがあります。その流体を「流体包有物」と呼びます。流体包有物はほとんどガスと水から成り、少量の塩分が溶けています。流体包有物の試料の温度を変化させながら観察すると、流体包有物の状態の変化から、元の流体の温度や化学組成、またどのような環境で鉱物脈ができたかなどが分かります。

ふつうの流体包有物は
1 mm より小さくて
顕微鏡で観察できる
程度の大きさなんだ



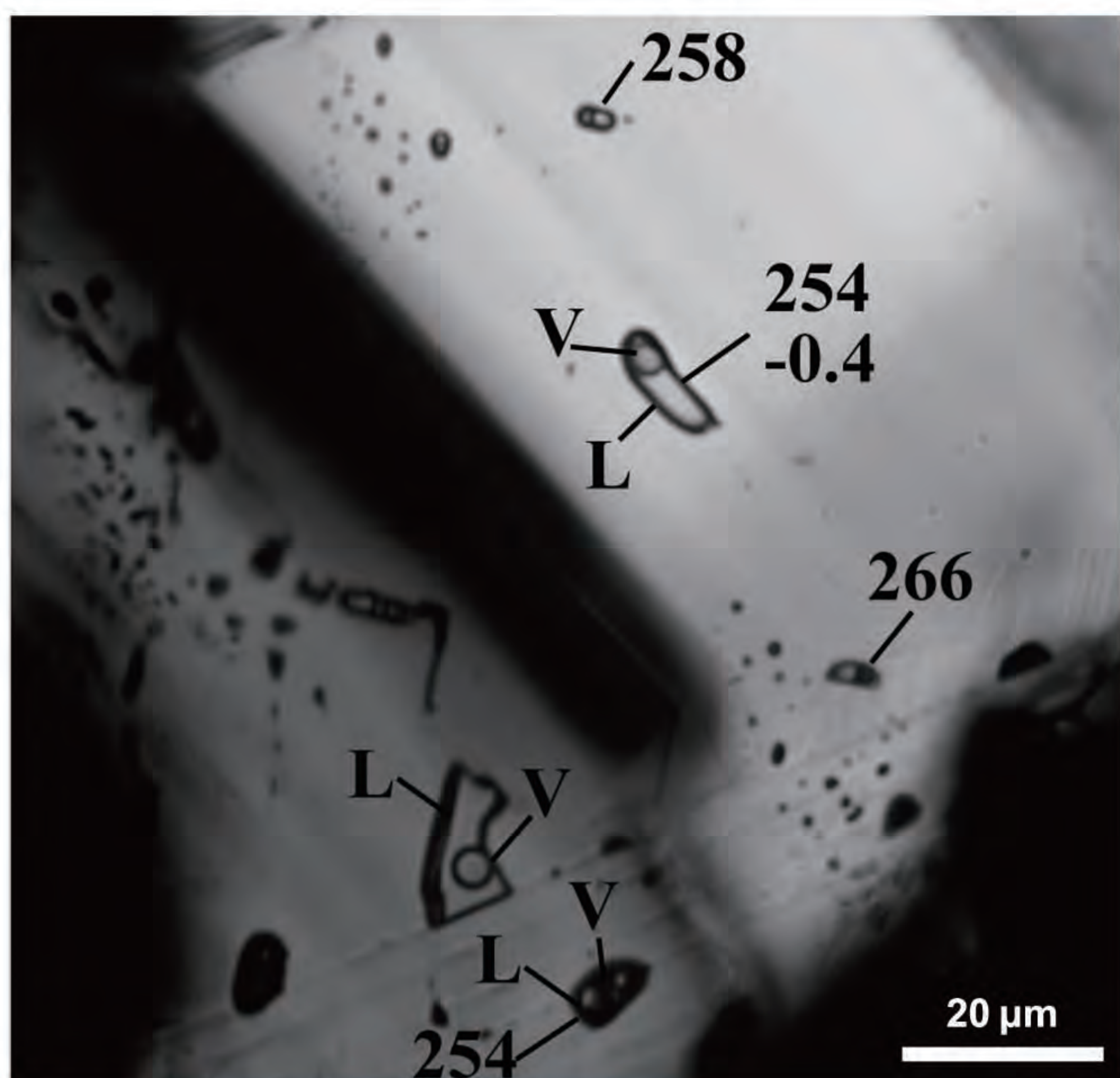
閃亜鉛鉱 (ZnS) の流体包有物
(北海道豊羽銅 - 鉛 - 亜鉛鉱床) の写真

ガス (V) と水 (L) が観察されます。

3桁の数値は均質化温度¹を表し、約 250 ~ 260°C の流体から閃亜鉛鉱が形成されたことを意味します。負の数値は解凍温度²を表し、塩濃度 (NaCl 相当) に換算すると 0.7 wt% であり、低塩濃度の流体を表します (Shimizu and Morishita, 2012)。

¹ 流体包有物を加熱した時に一相になる温度 (例えば気液二相包有物を加熱して、一相の流体になる温度)。

² 流体包有物を冷凍してから加熱した時、解凍する温度。



温泉だけじゃない！深部流体のいろいろ

古くから愛される 身近な深部流体

山塩と天然炭酸水(サイダー)

ここまで深部流体について紹介してきましたが、私たちが研究を始めるよりもずっと以前から、深部流体は人々の生活を支えてきました。

海から遠い内陸部に住む人々にとって、山奥で湧く塩水は「敵に塩を送る」の故事を引くまでもなく、まさに命の水でした。山塩はミネラル成分が多く含まれ、通常販売されている食塩より味覚的に甘いと言われます。

また、各地に湧く炭酸水は日本では約150年前から飲料として製造・販売され、人々に愛され続けています。

ここでは、各地の山塩と天然炭酸水(サイダー)の歴史を少しだけ紹介します。ここに紹介する塩や炭酸の起源は、よく分かっていないものもあります。深部流体に関する研究は、まだまだ発展途上です。私たちはもっと面白いことが解明できるよう、日々研究を進めています。



大塩天然炭酸水 源泉

かなやままち 福島県金山町

阿賀野川の大きな支流の1つである只見川中流にある金山町大塩では、現在では日本唯一の天然炭酸水が井戸から採取され、販売されています。現地に行くと「炭酸水」の看板を掲げた井戸があり、鉱泉が湧き出す様子を見ることができます。また井戸の脇には鉱泉の水を汲めるよう蛇口が設けられています。



いいなんちょうとんぼら 島根県飯南町頓原

明治14年ドイツ・フランクフルトで開催された万国博覧会で紹介されました。明治23年頃から炭酸水を瓶詰めし「琴月堂の天然炭酸水」(琴引泉)として昭和初期まで販売しました。現在も頓原リフレッシュセンターの源泉として利用されています。ただ残念ながら現在では飲用は禁止されています。



船小屋温泉場

ちくごしおしま 福岡県筑後市尾島、 みやま市瀬高町

船小屋温泉場では、鉱泉に砂糖を入れて天然サイダーを作ることができます。矢部川の対岸には新船小屋温泉の長田温泉場にも飲泉場があります。



こうべし 兵庫県神戸市

明治32年に、川崎造船所(現在の川崎重工業)を設立した川崎正蔵が、神戸市の布引山麓に湧出していた鉱泉を原料に、「ダイヤモンド」というブランドの高級サイダーの製造を開始し、国内外に広く販売しました。
参考2)



かわにしし たからづかし 兵庫県川西市・宝塚市

明治時代、政府の依頼を受けたウィリアム・ガウランドは、湯治場として使われていた平野鉱泉が飲料としても優れていることを明らかにしました。この地で、日本で初めての飲料水工場が建設され、天然に湧き出した炭酸水を瓶に詰めたサイダーの製造が開始されました。その後、ジョン・クリフォード・ウィルキンソンも宝塚市で炭酸鉱泉を発見し、鉱泉を瓶詰して国内外で広くミネラルウォーター(炭酸水)を販売しました。
参考1)

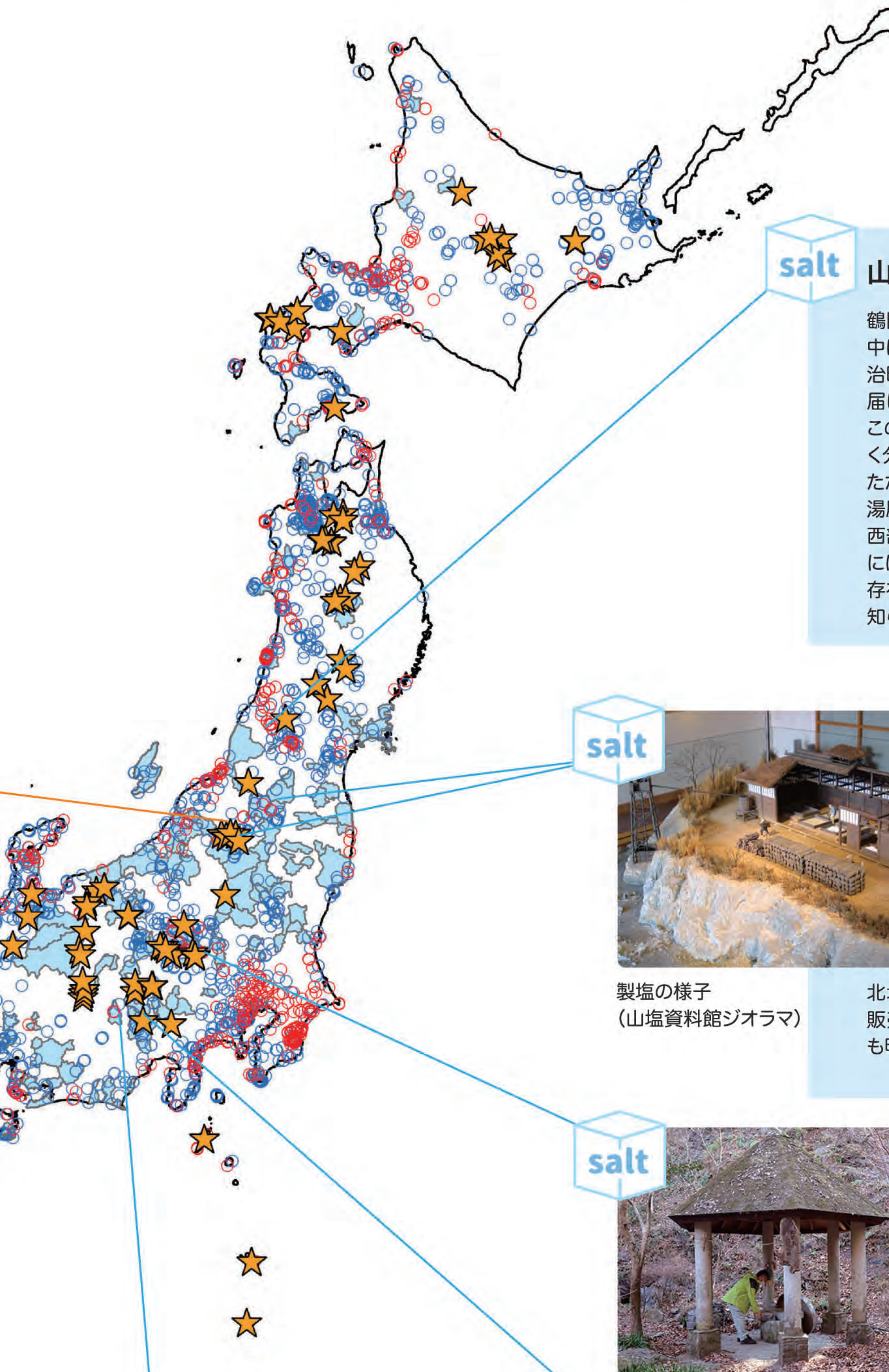


当時の炭酸水に含まれていた炭酸はプレートの沈み込みによってもたらされた二酸化炭素だったんだね



1) アサヒ飲料 HP (<https://www.asahiinryo.co.jp/rd/tansan/history/>)
2) 株式会社布引源泉所 HP (<http://www.nunobiki.co.jp/info.htm>)
3) 国土交通省 東北地方整備局 酒田河川国道事務所 (<https://www.thr.mlit.go.jp/sakata/road/60history/019.html>)
4) 株式会社ジテンオン (<https://chimei.jitenon.jp/data/kanji.php?kanji=%E5%A1%A9>)

- ★ 二酸化炭素ガスの湧出が認められる地点
- 塩素濃度 10000mg/L 以上の地点
- 塩素濃度 1000-10000mg/L の地点
- 地名に塩が付く地域がある市町村⁴⁾



salt

山形県鶴岡市、寒河江市、山形市

鶴岡市から山形市へと続く六十里越街道が田麦俣から湯殿山へと至る山中に、海水よりもはるかに高濃度の塩水が湧き出る場所があります。明治時代には、笹小屋で塩水を利用して豆腐が作られ、湯殿山参籠所に届けられていました。この塩水の起源はよく分かっていません。ただ田麦俣、月山・湯殿山から山形盆地西部にかけての地域には多数の食塩泉が存在していることが知られています。



豆腐を製造していた昭和初期の笹小屋³⁾

salt

福島県北塩原村・只見町塩沢

磐梯山北山麓にある大塩裏磐梯温泉には大塩の塩井と呼ばれる史跡があります。江戸時代にはこの塩井から得られる塩水を利用して製塩が行われていました。海から遠く離れた場所で製塩が行われたのは、海水を使った製塩地からの運搬費が非常に高額で、自前で製塩した方が安いという理由からでした。北塩原村では現在でも会津山塩という名前で温泉水から製塩が行われ販売されています。福島県内では60 kmほど南西にある只見町塩沢でも明治時代まで製塩が行われていました。



製塩の様子
(山塩資料館ジオラマ)

salt

群馬県藤岡市

三波川変成帯が分布する地域に八塩温泉と呼ばれる塩水が湧出しています。明治時代から温泉として使われるだけでなく、塩水そのものが内服用「生長霊泉」として東京へ出荷されていました。「塩の湯口八箇所」と言われるように、昔は8ヶ所で塩水が湧いていたそうです。塩不足に見舞われた第二次世界大戦中は製塩も行われていました。現在も神流川左岸の数ヶ所に深さ数メートル程度の塩泉があり、旅館や介護施設の源泉として使用されています。



八塩温泉 源泉

salt

長野県大鹿村鹿塩

中央構造線の有名な露頭がある地域で、海水とほぼ同じ塩素濃度の塩水が湧き出す場所があります。明治時代、徳島から来た黒部銃次郎は、湧き出す塩水を使って製塩事業をしながら、「この地に岩塩がある」と信じて坑道掘削を行いました。岩塩は見つかりませんでした。その坑道は「黒部の洞窟」として今も残っています。また塩水を利用した製塩が行われ販売されています。

今では、大鹿村で湧出する塩水は、有馬温泉と同様にフィリピン海プレートから脱水したスラブ水だと考えられています (Kusuhara et al., 2020)。



鹿塩温泉 山塩

salt

山梨県早川町奈良田

糸魚川 - 静岡構造線沿いの地域。奈良田八幡社公園内に塩水が湧出しています。奈良田の七不思議の1つ「塩の池」で、塩を得られなくて難儀していたところ、奈良王(孝謙天皇)が地の神に頼み塩気の多い泉が湧き出したとの伝説があります。製塩し奈良田名物として販売していた時期もあるそうです。



製塩の碑 (奈良田)

まとめ

火山性深部流体

スラブ水はマントルの岩石を溶かしてマグマを作り、マグマに溶けこんだまま上昇します。そして火山活動によって再びマグマから放出されたものです。

4、7-9、18-19 ページ

グリーンタフタイプ温泉

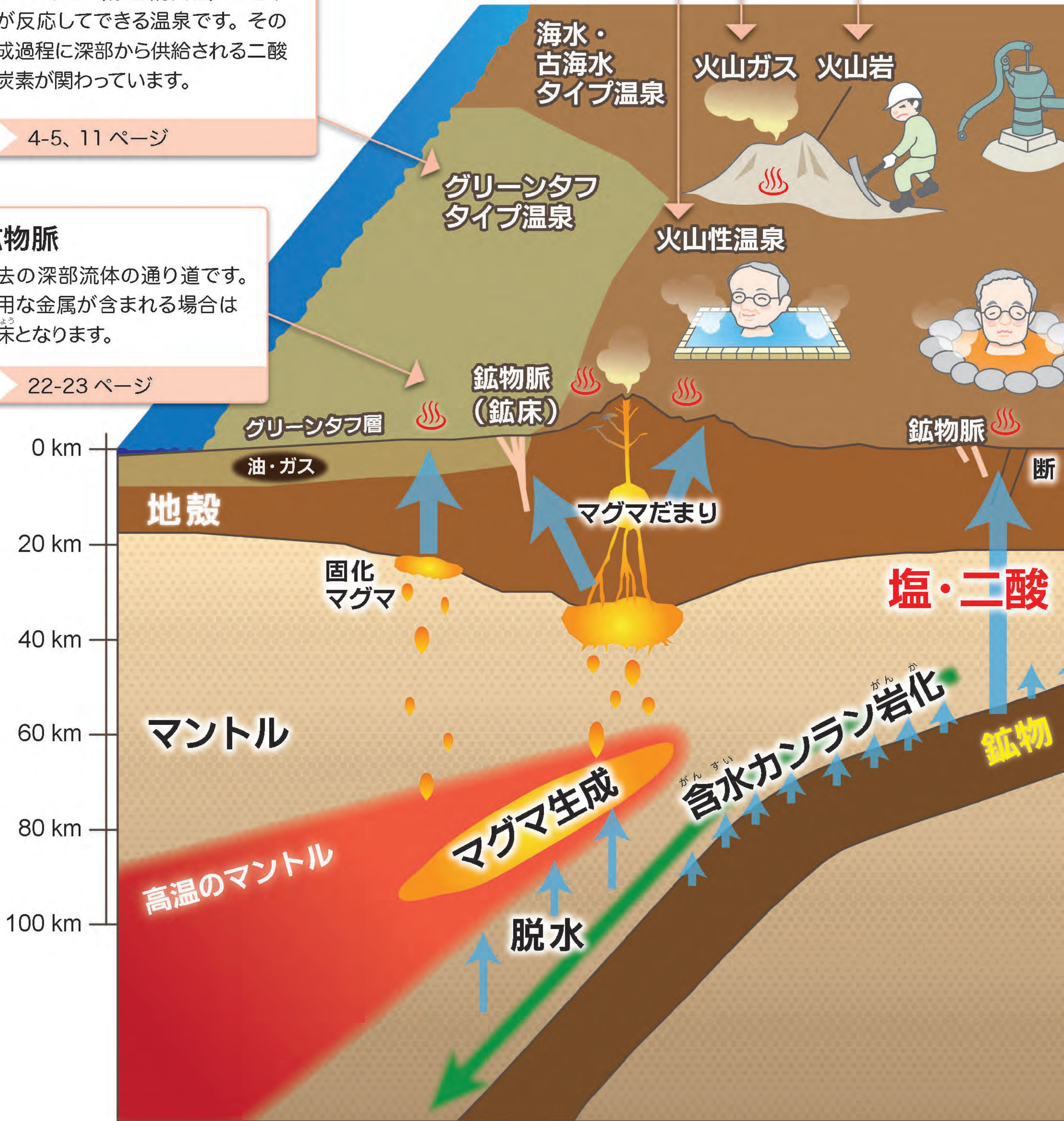
グリーンタフ（りょくしょくぎようかいがん 緑色凝灰岩）と地下水が反応してできる温泉です。その形成過程に深部から供給される二酸化炭素が関わっています。

4-5、11 ページ

鉱物脈

過去の深部流体の通り道です。有用な金属が含まれる場合はこうしょく 鉱床となります。

22-23 ページ



火山岩

化学分析により火山岩のもととなったマグマに含まれていた水の量がわかります。沈み込むプレートの違いにより、マグマの中の水の量は、東北地方、中部地方、九州地方で異なることがわかっています。

20-21 ページ

深部流体からの恵み

深部流体がもたらす塩や二酸化炭素は古くから山塩や天然炭酸水として親しまれてきました。

24-25 ページ



非火山性深部流体

スラブ水がマグマを作らずにそのまま地表付近まで上昇したものです。

6-7、12-19 ページ

↑ スラブ水の動き

【参考文献】

- 鹿野和彦 (2018) グリーンタフの層序学的枠組みと地質学的事象. 地質学雑誌, 124, 781-803.
- 片山郁夫・平内健一・中島淳一 (2010) 日本列島下での沈み込みプロセスの多様性. 地学雑誌, 119, 205-223.
- 風早康平・高橋正明・安原正也・西尾嘉朗・稲村明彦・森川徳敏・佐藤 努・高橋 浩・北岡豪一・大沢信二・尾山洋一・大和田道子・塚本 斉・堀口桂香・戸崎裕貴・切田 司 (2014) 西南日本におけるスラブ起源深部流体の分布と特徴. 日本水文科学会誌, 44, 3-16.
- Kusuda, C., Iwamori, H., Nakamura, H., Kazahaya, K., Morikawa, N. (2014) Arima hot spring waters as a deep-seated brine from subducting slab. Earth, Planets and Space, 66, 119.
- Kusuhara, F., Kazahaya, K., Morikawa, N., Yasuhara, M., Tanaka, H., Takahashi, M., Tosaki, Y. (2020) Original composition and formation process of slab-derived deep brine from Kashio mineral spring in central Japan. Earth, Planets and Space, 72, 107.
- Morikawa, N., Kazahaya, K., Takahashi, M., Inamura, A., Takahashi, H. A., Yasuhara, M., Ohwada, M., Sato, T., Nakama, A., Handa, H., Sumino, H. and Nagao, K. (2016) Widespread distribution of ascending fluids transporting mantle helium in the fore-arc region and their upwelling processes: Noble gas and major element composition of deep groundwaters in the Kii Peninsula, southwest Japan. Geochimica et Cosmochimica Acta, 182, 173-196.
- Nakamura, H., Iwamori, H. and Kimura, J.-I., (2008) Geochemical evidence for enhanced fluid flux due to overlapping subducting plates. Nature Geoscience 1, 380-384.
- Nakamura, H., Iwamori, H., Nakagawa, M., Shibata, T., Kimura, J.-I., Miyazaki, T., Chang, Q., Vaglarov, B. S., Takahashi, T. and Hirahara, Y. (2019) Geochemical mapping of slab-derived fluid and source mantle along Japan arcs. Gondwana Research, 70, 36-49.
- 西来邦章・伊藤順一・上野龍之(編) (2012) 第四紀火山岩体・貫入岩体データベース. 地質調査総合センター速報, no.60, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 西尾嘉朗 (2013) リチウム同位体による地殻流体研究の新展開—地殻活動の全貌解明に向けて—. 日本水文科学会誌, 43, 119-135.
- Ohwada M., Satake, H., Nagao, K., Kazahaya, K. (2007) Formation processes of thermal waters in Green Tuff: A geochemical study in the Hokuriku district, central Japan. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 168, 55-67.
- Peacock, S. M., Wang, K. (1999) Seismic consequences of warm versus cool subduction metamorphism: Examples from southwest and northeast Japan. Science, 286, 937.
- 産業技術総合研究所 (2009) 活断層データベース 2009年7月23日版. 産業技術総合研究所研究情報公開データベース DB095. https://gbank.gsj.jp/activefault/index_gmap.html
- 産総研地質調査総合センター, 20万分の1日本シームレス地質図 V2(地質図更新日:2022年3月11日), <https://gbank.gsj.jp/seamless/>
- Shimizu, T. (2015) Elemental analysis of bonanza ores of the Ryosen veins, Hishikari epithermal Au-Ag deposit, Japan, using micro X-ray fluorescence (μ -XRF). Bulletin of Geological Survey of Japan. 66, 1-14.
- Shimizu, T., Manaka, M., Kazahaya, K. and Tsukamoto, H. (2021). Petrographic and mineralogical study of hydrothermal alteration of the Rokko Granite at Hakusui-kyo and Horai-kyo along the Arima-Takatsuki Tectonic Line in western Japan. Island Arc, 30, e12407.
- Shimizu, T. and Morishita, Y. (2012) Petrography, chemistry, and near-infrared microthermometry of indium-bearing sphalerite from the Toyoha polymetallic deposit, Japan. Economic Geology, 107, 723-735.
- 高橋正明・風早康平・安原正也・塚本 斉・佐藤 努・高橋 浩・森川徳敏・清水 徹・宮越昭暢・戸崎裕貴・東郷洋子・稲村明彦・半田宙子・仲間純子・中村有理・竹内久子・大丸 純・清水日奈子・尾山洋一・大和田道子・切田 司 (2018) 深層地下水データベース (第2版). 地質調査総合センター研究資料集, no.653, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 東郷洋子・風早康平・高橋正明・森川徳敏・高橋 浩・戸崎裕貴・佐藤 努・堀口桂香 (2017) ハロゲン元素比を用いた塩水の起源推定. 2017年度日本地球化学会第64回年会講演要旨集, 129.
- 東郷洋子・風早康平・高橋正明・森川徳敏・戸崎裕貴・佐藤 努・高橋 浩・中村有理・堀口桂香 (2019) ハロゲン元素比による東北地方の塩水の起源推定. 2019年度日本火山学会講演予稿集, 210.

※図中の地質図(岩石区分)は産総研地質調査総合センター(2022)、第四紀火山は西来ほか(2012)、活断層は産業技術総合研究所(2009)、グリーンタフ地域は鹿野(2018)による。

【執筆】

地質調査総合センター 活断層・火山研究部門 深部流体研究グループ

風早康平・清水 徹・清水日奈子・高橋 浩・高橋正明・東郷洋子・中村仁美・森川徳敏(五十音順)

【編集】

東郷洋子 地質調査総合センター 活断層・火山研究部門
森川徳敏 地質調査総合センター 活断層・火山研究部門
高橋正明 地質調査総合センター 活断層・火山研究部門
森田澄人 地質調査総合センター 地質情報基盤センター
瀬口寛樹 地質調査総合センター 地質情報基盤センター

【デザイン・レイアウト】

都井美穂 地質調査総合センター 地質情報基盤センター

【発行】2024年4月25日 初版
2024年6月10日 第1版修正版

【発行元】

国立研究開発法人産業技術総合研究所 地質調査総合センター
〒305-8567 茨城県つくば市東 1-1-1 中央事業所 7 群
<https://www.gsj.jp>

地質調査総合センター研究関連普及出版物 No.262, G75204

クリエイティブコモンズ ライセンス表示 改変禁止

