

肥後熊本学

肥後の温泉科学

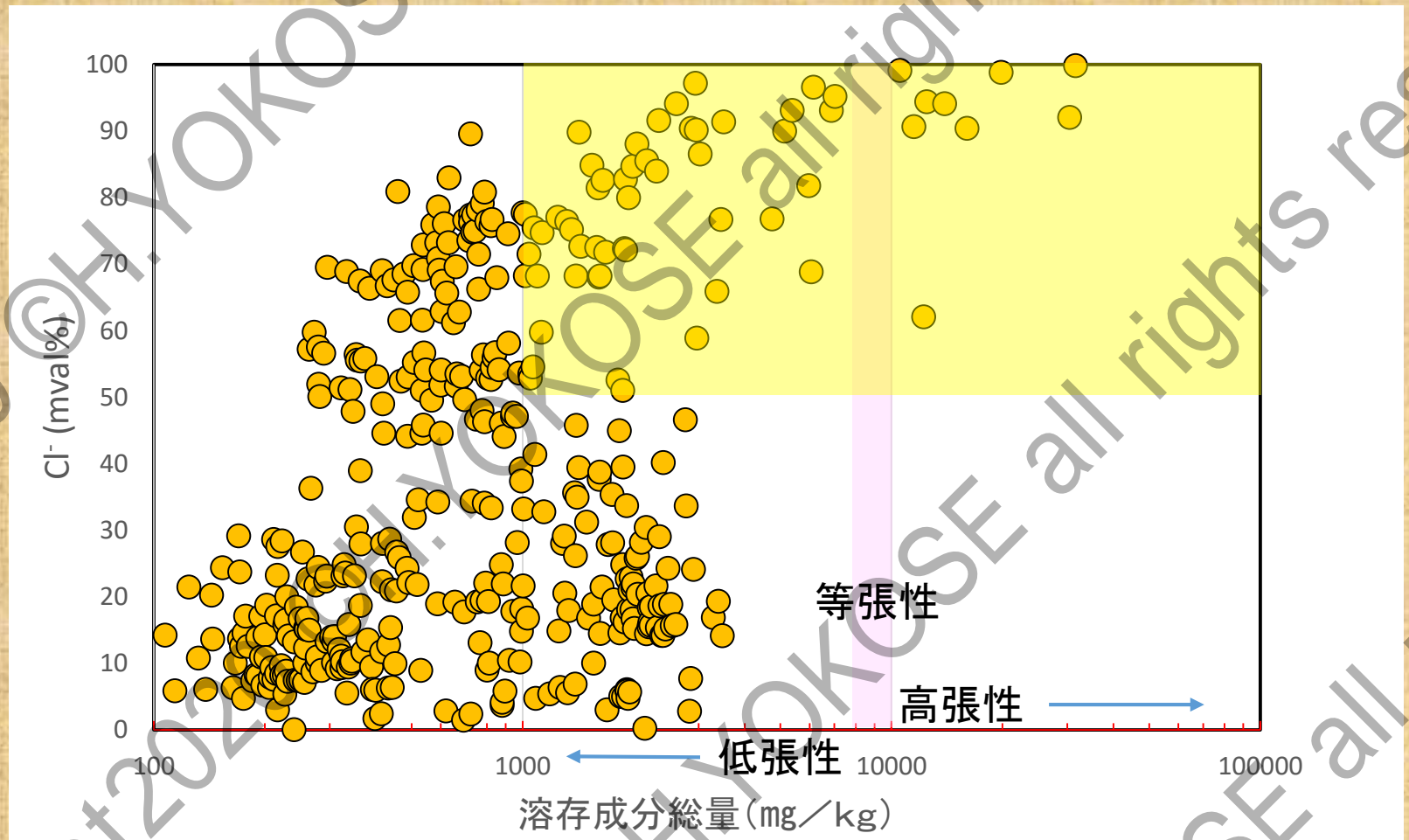
第4回 塩化物泉の起源(マグマの塩と海水)

熊本大学大学院先端科学研究部 横瀬久芳

目次

1. 塩化物泉の分布
2. 化石海水
3. 潮湯と海水浴
4. 化石海水とヨウ素泉
5. 山中の塩化物泉
6. 臨界状態の熱水と塩化物泉
8. メタケイ酸塩が豊富な山中の塩化物泉
7. レイリー散乱とミー散乱

熊本県における塩化物泉



塩化物泉は、溶存成分総量が1000mg/kg以上で、主要な陰イオンとして塩素イオン多く含む場合となる。よって、塩素イオンが少なくとも50ミリバル%以上含まれていれば、塩化物泉となる。

熊本県の塩化物泉

	源泉数	主な温泉地	周辺環境
高張性 (溶存物質が10000mg/kg以上の温泉)	9	熊本平野、上天草、水俣、宇城、富岡、芦北	海に近い環境
等張性(溶存成分が10000mg/kg未満で8000mg/kg以上の温泉)	0	該当なし	
低張性(溶存物質が8000mg/kg未満の温泉)	47	天草、人吉、水俣、杖立、黒川、小国、西合志、河内、芦北、	海岸部のみならず山間部にも多数存在

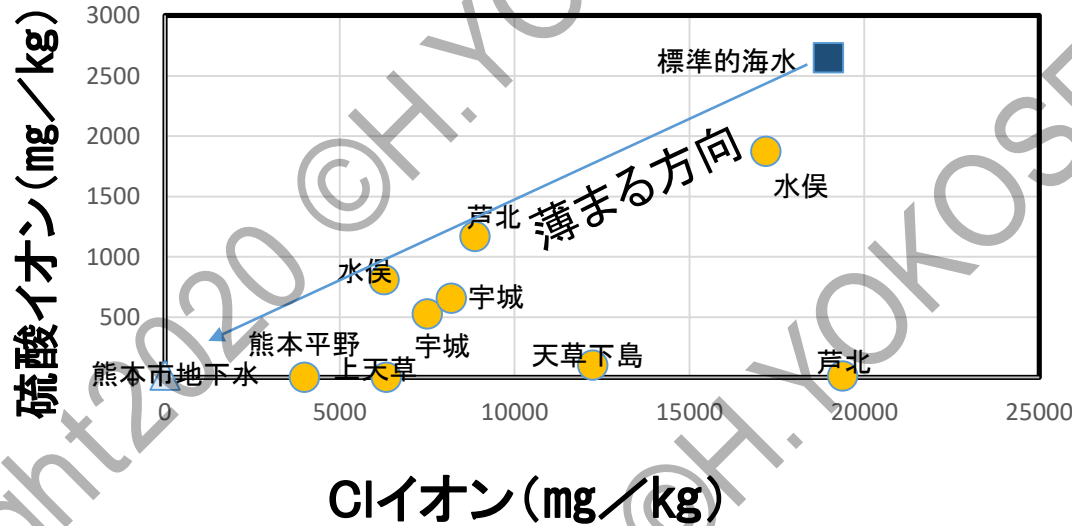
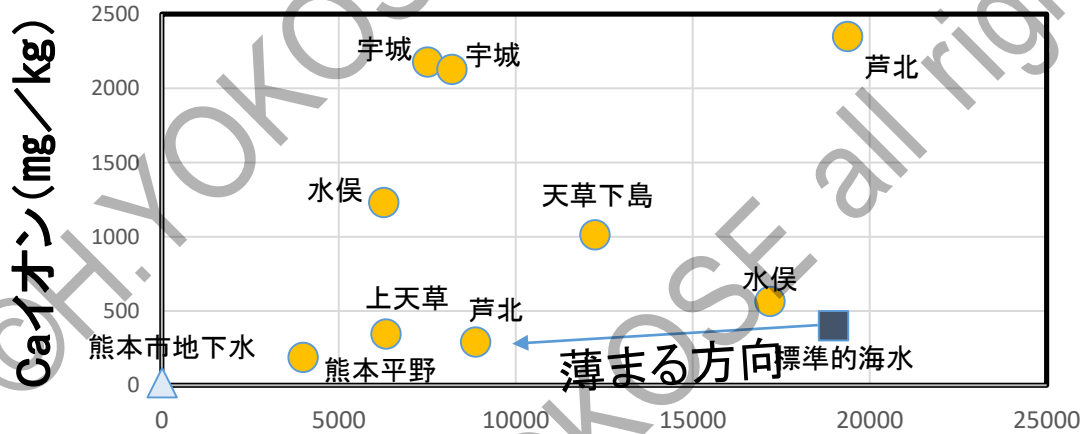
高張性温泉と化石海水

		泉温	pH 値	Na +	K +	Mg 2+	Ca 2+	Fe 2+	total Cation
熊本平野	火の国美 朔の湯	41.1	7.6	3517	10.8	49.5	345	0.8	3933
水俣	水俣温泉	31.2	7.3	2617	295.0	140.8	1230	0.7	4286
上天草	弓ヶ浜温 泉	50.0	6.6	3409	110.1	147.3	188	2.6	3881
宇城	なごみ温 泉やすら ぎの	21.6	6.9	1205	13.6	745.8	2178	0.1	4182
宇城	不知火温 泉	33.3	7.3	2367	18.1	435.6	2128	2.8	5009
芦北	津奈木温 泉	29.1	7.6	4721	169.3	619.7	292	1.0	5805
天草下島	富岡温泉	23.0	7.6	5222	24.0	858.8	1014	3.7	7126
水俣	湯の児温 泉	30.2	7.6	8884	318.6	1263.6	565	1.3	11034
芦北	御立岬温 泉	30.9	7.1	9012	24.5	593.6	2348	4.8	12139
標準的海水		22.	8.1	10556	380.0	1272.0	400		12608
熊本市地下水		17.2	7.4	11	5	7	16		62

高張性温泉と化石海水

		Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	total Anion	溶存物質総計 (g/kg)	CO ₂	H ₂ S
熊本平野	火の国美朔の湯	6340	0.0	80.4	6438	10558	0.0	0.0
水俣	水俣温泉	6275	808.2	89.7	7173	11518	9.6	0.2
上天草	弓ヶ浜温泉	3997	1.1	4194.0	8206	12247	1081.0	0.3
宇城	なごみ温泉	7509	524.0	85.8	8144	12466	9.6	0.0
宇城	不知火温泉	8198	655.6	35.0	8918	13955	4.7	0.0
芦北	津奈木温泉	8866	1168.4	112.4	10176	16038	9.6	0.1
天草下島	富岡温泉	12239	99.6	111.5	12478	19838	1.1	0.0
水俣	湯の児温泉	17189	1872.7	176.6	19244	30474	4.3	0.0
芦北	御立岬温泉	19380	10.3	49.8	19442	31602	25.9	0.4
標準的海水		18980	2649.0	140.0	21769	34377		
熊本市地下水		12	17.8	58.6	88	151		

現海水と化石海水



塩分に富む高張性温泉は、海岸近くに存在していたとしても、海水と地下水が単に混ざりあって湧出しているわけではない。地下深部に閉じ込められた太古の海水は、地層と反応することでその化学成分を変える。硫酸イオンは、地下のCaイオンと反応して硬石膏(CaSO₄)を形成し、取り除かれると考えられている。化石海水は、地層や破砕帯にトラップされた部分にしか存在しない。

潮湯の活用



海水を温めて入浴する施設があり、それは潮湯と呼ばれている。化学組成上、大まかには高張性塩化物泉に類似する。明治以前は、海水浴の習慣はなく、疾病治療法の一つとして、潮湯治が行われていた。資源量の少ない化石海水ではなく、海水を使うのは理にかなっている。

含ヨウ素泉と高張性の塩化物泉

熊本県には存在しない療養泉の一つであるヨウ素泉は、多くの場合高張性塩化物泉(化石海水)に付随している。療養泉としてヨウ素含有量が10ppm以上とされたのは、2014年からの事で、療養泉の区分としてはかなり新しく、古い解説書では取り上げられていない事も多い。

地下にある鹹水(カンスイ:塩分を多く含む水;海水、化石海水 など)は、水溶性天然ガス(メタンを主体)が多量に溶存している場合が多く、南関東(千葉・東京)、宮崎県(日南、宮崎、佐土原)、新潟、秋田、北海道、沖縄で採掘されている。天然メタンガスを分離した後の鹹水が、浴用に提供されて含ヨウ素ナトリウム塩化物泉

として提供されている地域も少なくない。

温泉法改定の原因の一つとなった、2007年の渋谷温泉施設爆発事故も水溶性天然ガスによるものである。東京周辺の温泉地の多くは、大深度掘削(およそ1000m以深)が可能となった事を背景に、沢山の含ヨウ素ナトリウム塩化物泉が浴用に供されている。東京の色付き温泉(黒湯、モール泉 など)の多くは、類似した成因である。

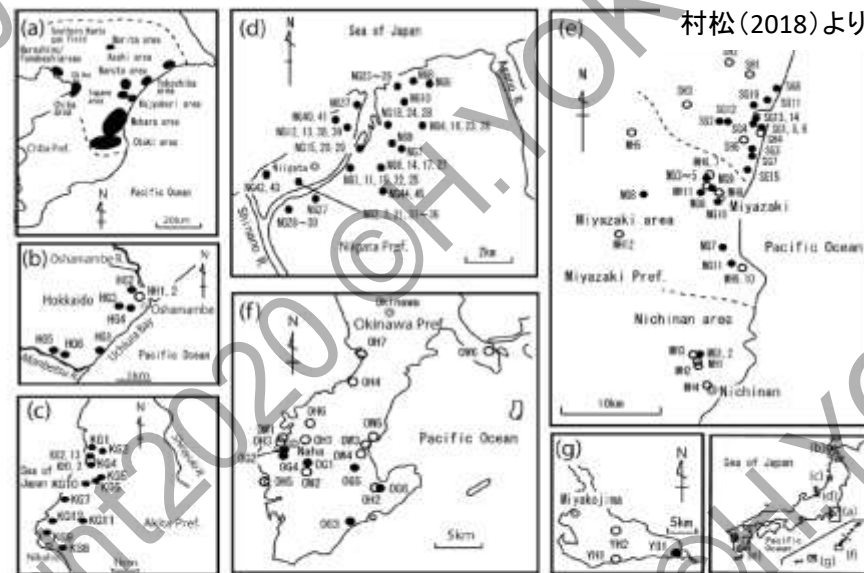
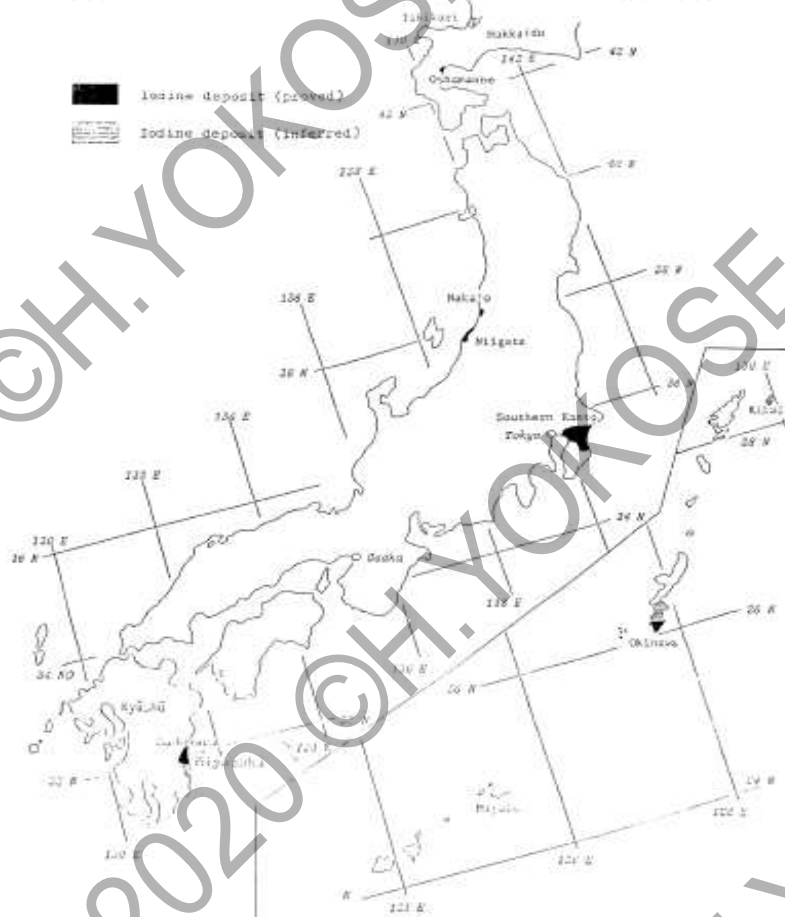


Fig. 1 Well location of the brines, hot spring and ground waters from the water-dissolved gas fields. (a) Southern Kanto field, (b) Oshamambe field, (c) Kisakata field, (d) Niigata field, (e) Nichinan/Miyazaki and Sadowara fields, (f) Okinawa field, (g) Miyakojima field. The well location numbers are the same as in Appendix 1. Solid and open circles show brine, and hot spring and ground waters, respectively.

水溶性ガス田とヨウ素泉との関係

Fig. 1 Distribution of the Iodine deposits of dissolved-in-water type in Japan



日本の水溶性ヨウ素鉱床(福田・永田, 1982)

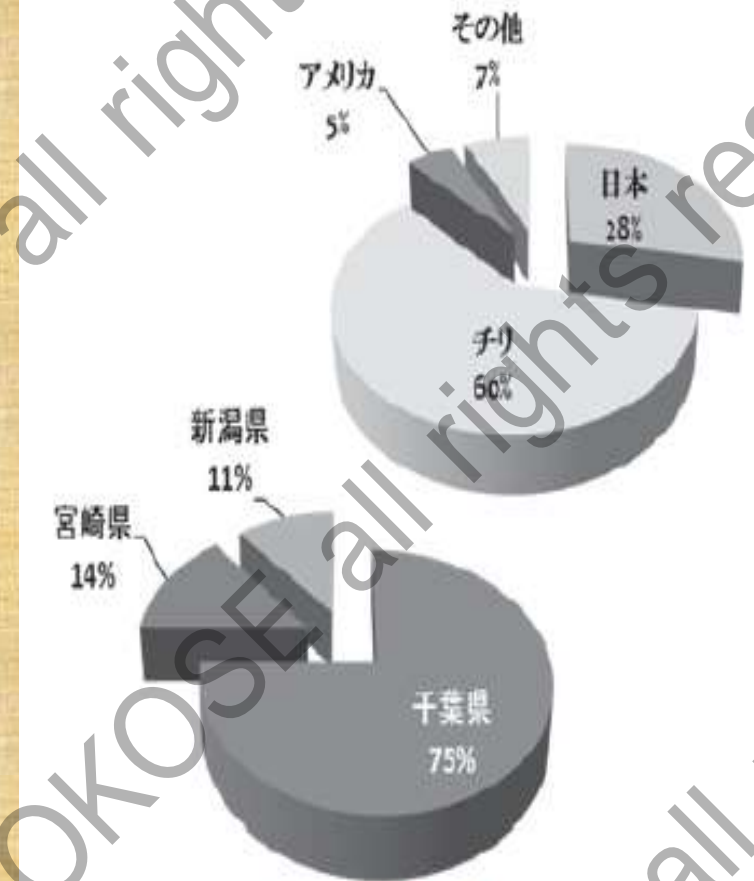


図1 ヨウ素の生産地

(海宝, 2016)

天然ガス採掘のために汲み上げられた地下(500~2000m)の鹹水(化石海水)中のヨウ化ナトリウム(NaI, 100~150ppm)からヨウ素を生成。日本は中国に次いでヨウ素産出で世界2位。千葉県の鹹水中ヨウ素含有量は、海水の約2000倍に達します。

化石海水にヨウ素が2000倍濃縮する理由



化石海水に、ヨウ素が高濃度で含まれるためには、天然ガスが必要。つまり、有機物によるヨウ素の濃縮過程が働いています。定着性藻類は、ヨウ素を $160 \sim 10^5$ 倍に濃縮する事が知られています。つまり、海底に堆積した分厚い堆積物と藻類などの生物遺骸が地中深くにおいて、熱分解や微生物分解する事で形成されと考えられています。ですから、そのような分厚い海洋性堆積物が存在できる地質学的制約から、九州では宮崎県だけに限られます。



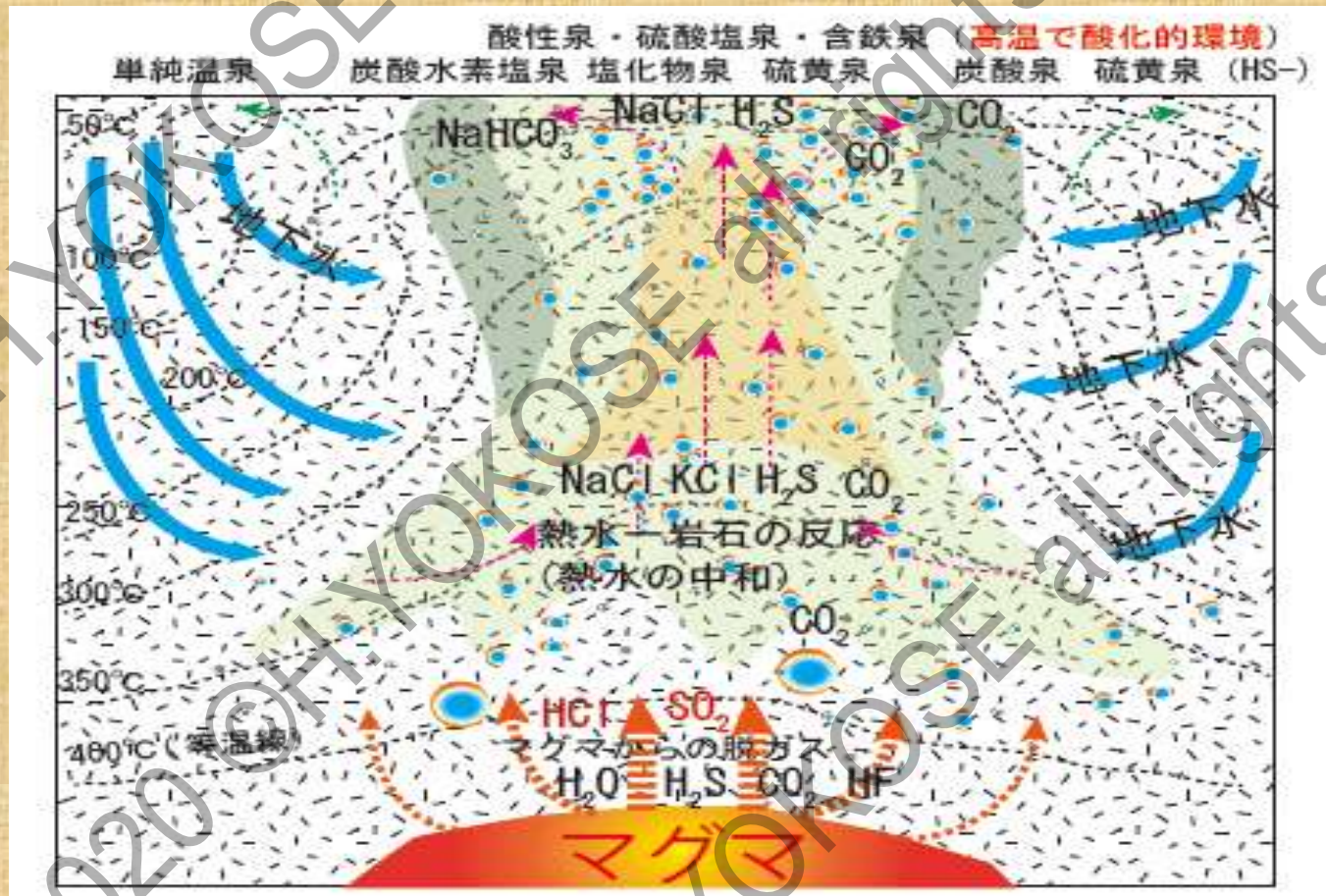
新富町の温泉

モール泉のような色とニオイ(ヨウ素臭あるいは石油臭)が特徴です。

山中の塩化物泉は、低張性アルカリ性高温泉が主体



山中の塩化物泉形成のメカニズム

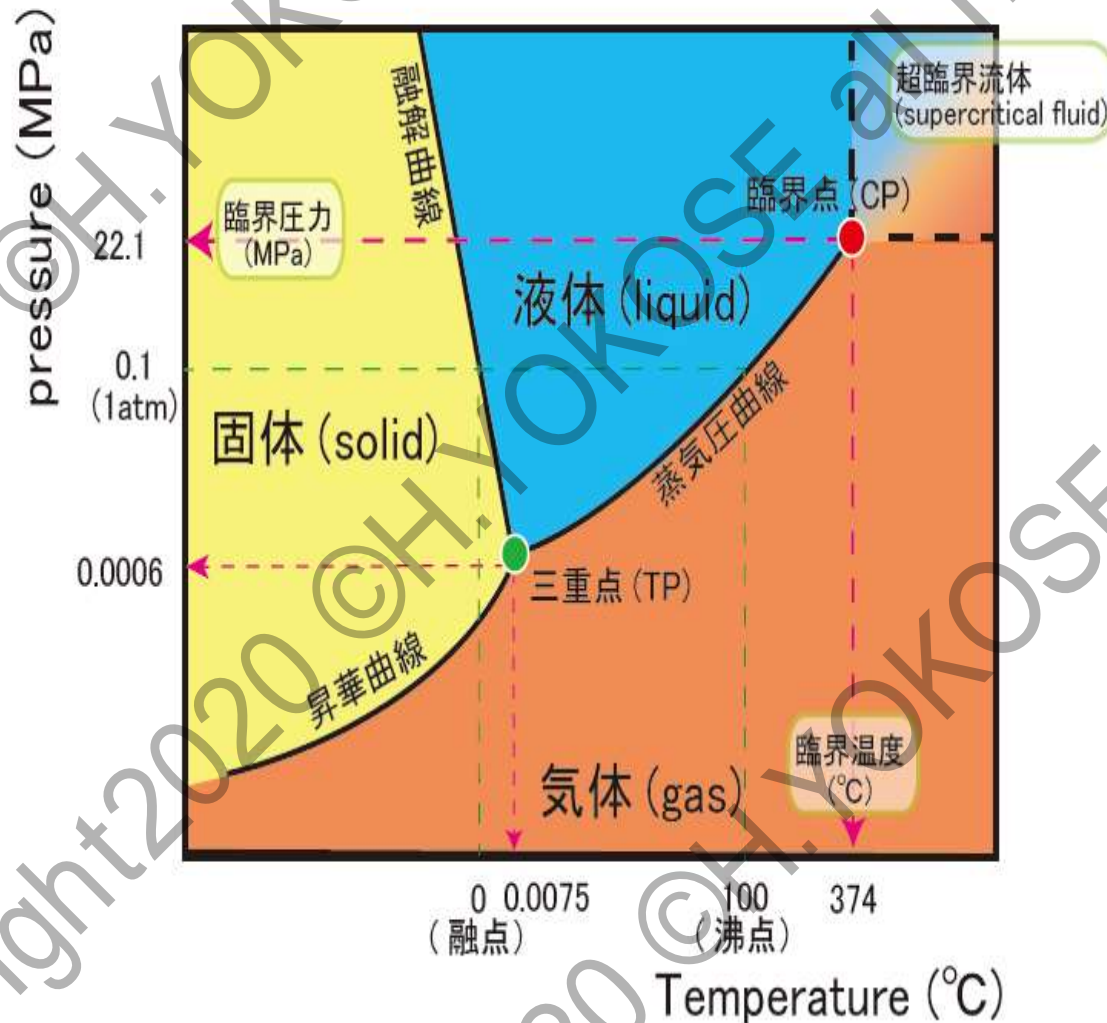


実験的データに基づくと下記のような順番でマグマから揮発性成分が散逸する (Martini, 1996)。



超臨界状態の熱水って何？

水の状態図



超臨界状態の水

地下深部の熱水は温度が高いお湯ではなく超臨界流体という特殊な状況になる。

<特徴>

☆液体と気体の中間的物性(低粘性・低密度)⇒拡散性大

☆強力な酸化力を持つ。腐食しにくい金属なども酸化できる。

☆溶解度が急激に増加する。

☆反応速度が非常に速い。

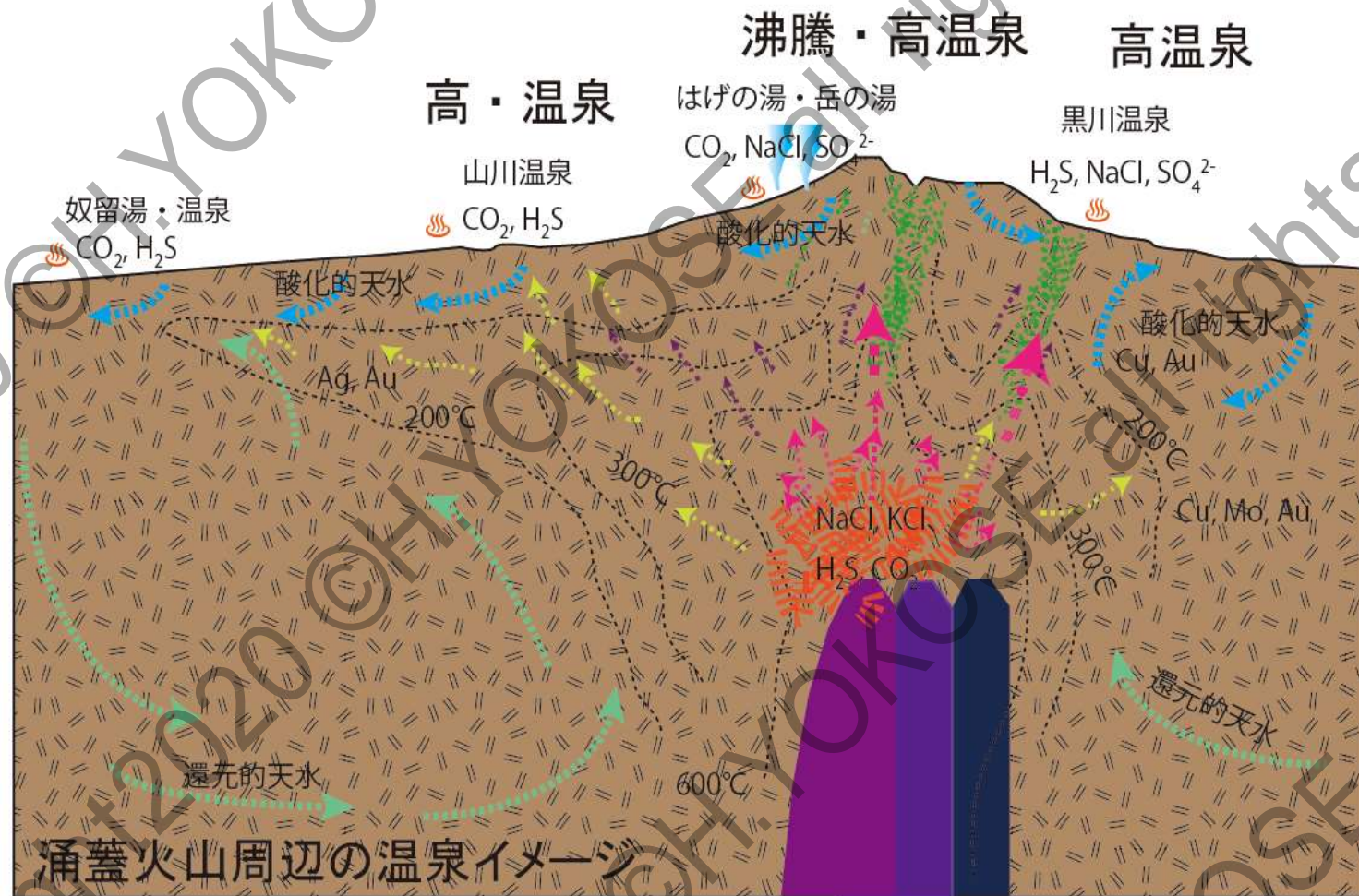
☆水の解離が小さくなり、400°C以上で 10^{-23} となり液性変化変わる。

岩石と熱水の反応痕跡



超臨界状態の熱水は、岩石と激しく反応して様々な成分が熱水中に溶け出す。

わいた火山周辺の温泉形成(横瀬モデル)



わいた火山の熱水系想像図(Hedenquist et al., 2000の熱水系イメージからの類推)

温泉熱の利用



わいた温泉郷の地熱発電



発電後の温泉水

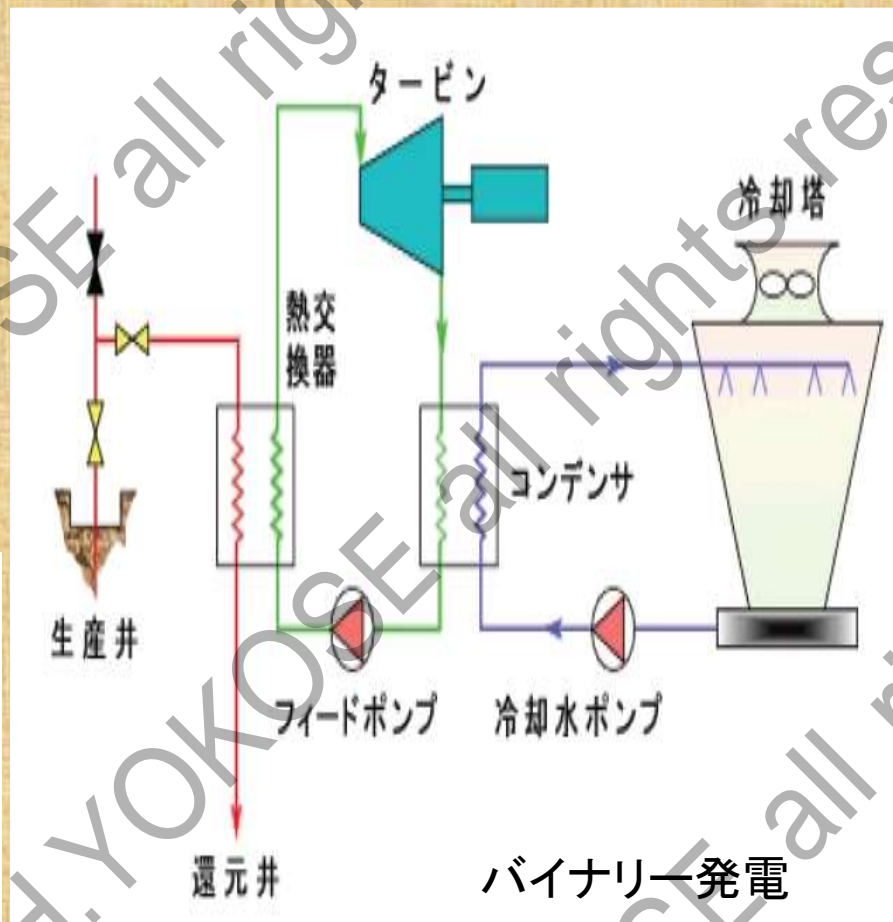
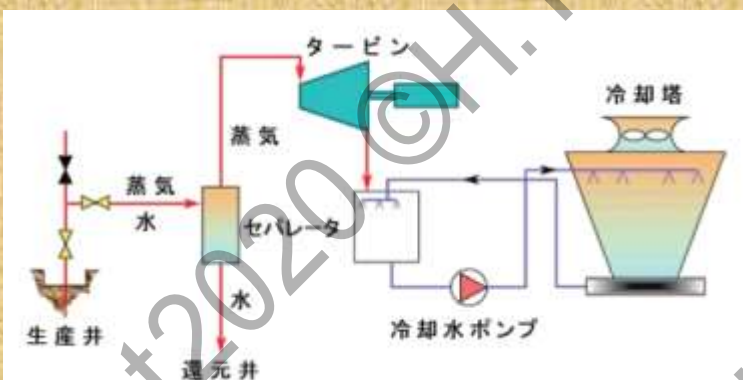
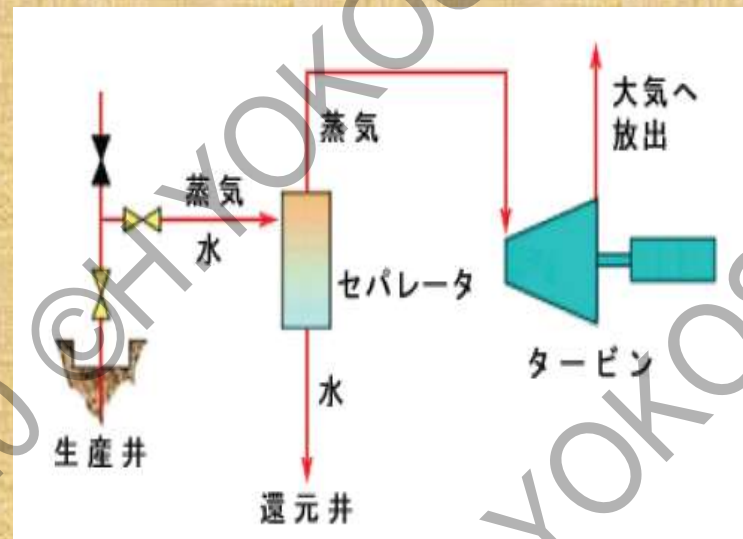


温泉蒸気を使った蒸し窯



温泉水を使ったバイナリー発電

地熱発電様式



Dicksin and Fanelli (著) 日本地熱学会IGA専門部会(訳・編), 2008 より

九州の地熱発電所

九州電力八丁原発電所 11万kW

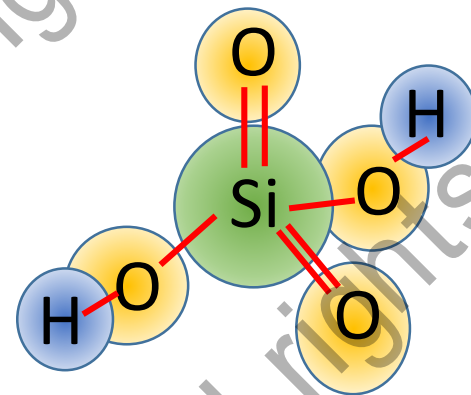
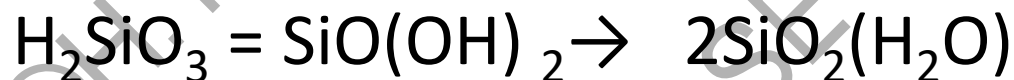
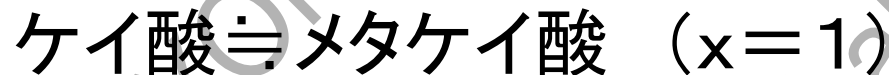


九州電力八丁原発電所 3万kW

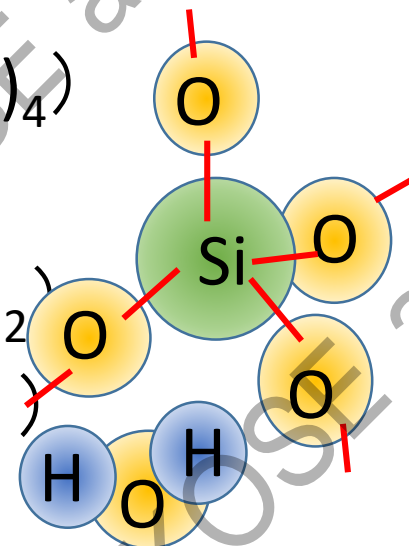
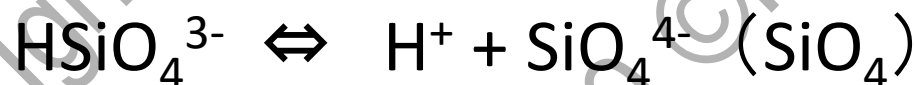
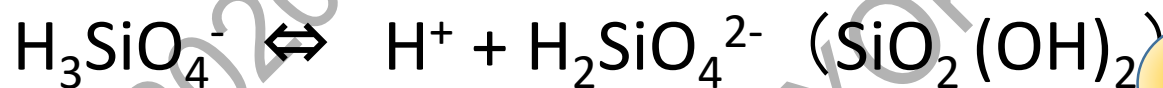
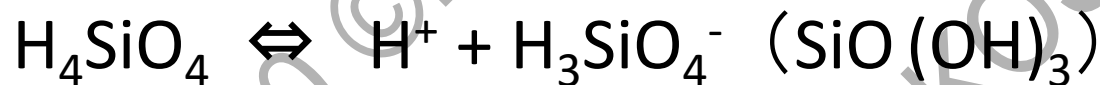


地熱水は、限られた資源なので、共存する温泉群と競合することもある。そのため、大規模な地熱開発は慎重に行う必要がある。

低張性アルカリ性高温泉とメタケイ酸



シリカの加水分解と解離



メタケイ酸塩が多い理由(シリカの溶解度)

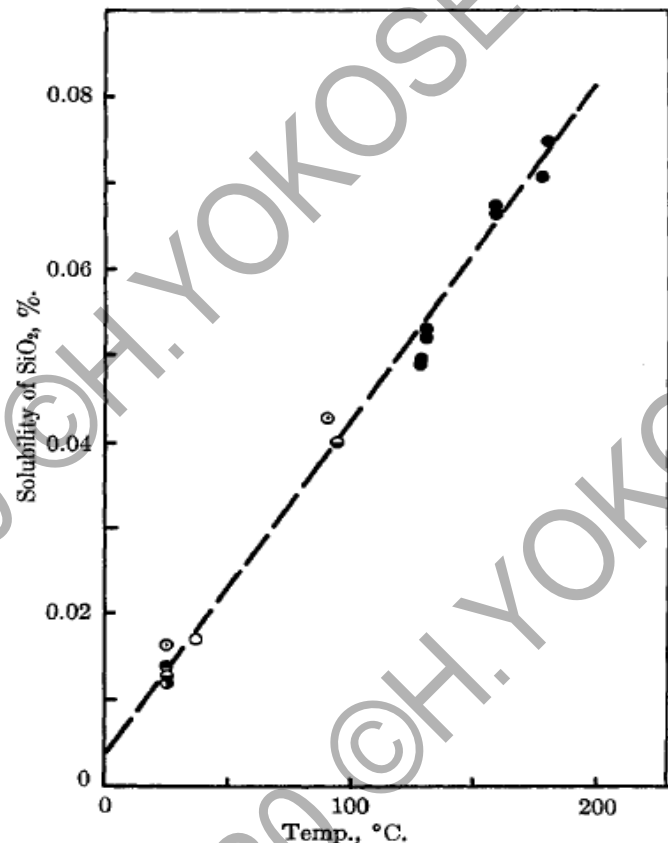


Fig. 1.—Solubility of amorphous silica: ○, Struckman²; ●, Gardner³; ○, Sychalski⁵; ●, Hitchen⁵; ○, Lenher and Merrill⁴; ○, Jephcott and Johnson.⁷

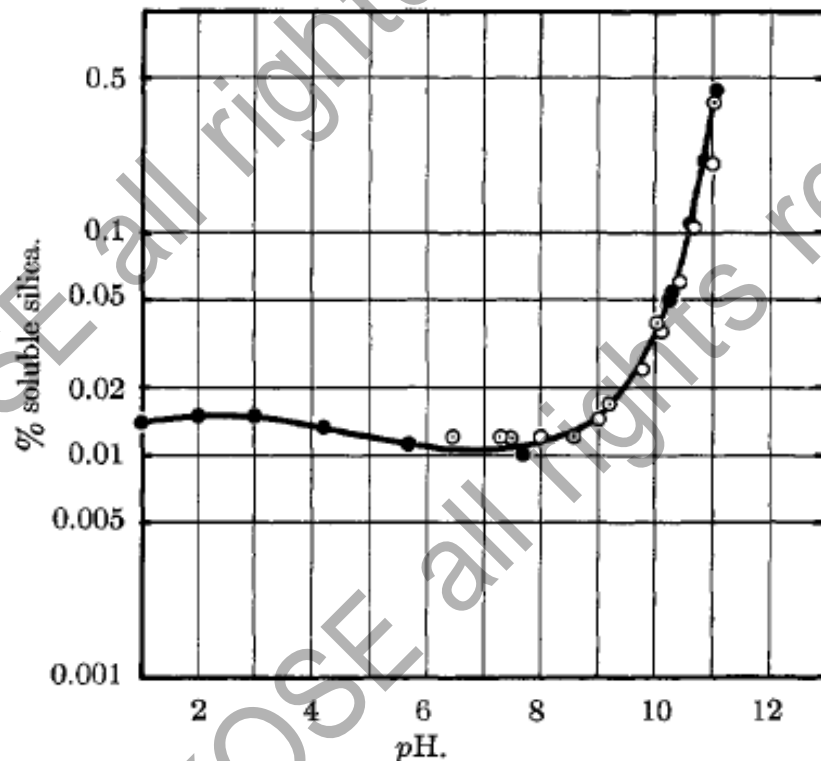


Fig. 2.—Solubility of silica in water: ○, sols by removal of Na⁺ from sodium silicate solution; ●, suspensions of "Silica A," pH adjusted with HCl or NaOH; ○, calculated from equation 1. Alexander et al. (1954)

高温でアルカリ性の温泉の方がシリカが溶解できると予想される。つまり、山中の塩化物泉である低張性アルカリ性高温泉に今流行りのメタケイ酸が多く含まれている。逆に、そのような温泉は、温度低下に伴ってシリカが析出する事も併せて予想される。

シリカの溶解度とコバルトブルーの温泉



ポカリスエットと豊礼の湯の温泉水



シリカの微粒子が太陽光を散乱する

わいた温泉郷

粒子による光の散乱

高温の温泉水中に析出したシリカの微粒子が太陽光を散乱する。

レイリー散乱は、入射光の波長の1/10以下の粒径で起こり、散乱強度は単位体積当たりの粒子数に比例し、入射光波長の4乗に反比例する。

青の波長は約400nmで赤の波長が800nmなので、粒径が40nm以下の場合、青が赤に対して16倍強く散乱する。つまり、我々が目にする色は青みを帯びる。

粒子が入射波長よりも大きくなると波長依存性がなく全反射して太陽光なら白色を呈する(ミー散乱)。なので、大量の微粒子とそれらの凝集体からなる大きな粒子とが太陽光と相互作用する事でコバルトブルーの温泉を作り出しています。

レイリー散乱と青い露天風呂の関係



96.5°C pH 8.36 ナトリウム-塩化物泉

だから、シリカの微粒子がしやすい高温のアルカリ性塩化物泉や硫黄泉が青白くなる。(青:レイリー散乱、白:ミー散乱)

レイリー散乱+ミー散乱+太陽光



湯布院: 97°C pH9.0
ナトリウム塩化物泉



海地獄: 98°C 含食塩酸性泉

湯布院も別府の海地獄も原理的にはいっしょです。

まとめ

- 塩化物泉には大きく分けて2種類ある。
- 高張性中性低温泉（主に海岸近く）
 - 化石海水
 - 鹹水（水溶性ガス田：化石海水+有機物）
 - 含ヨウ素ナトリウム塩化物泉
- 低張性アルカリ性（あるいは中性）高温泉（主に山中）
 - マグマ性熱水（火山活動の産物）
- 化石海水は資源量が限られる。
- 含ヨウ素ナトリウム塩化物泉は、ヨウ素資源
- 潮湯でも代用できる高濃度塩化物泉
- マグマ水は超臨界状態で、地殻との反応が著しい