

本講義資料のご利用にあたって

本講義資料内には、東京大学が第三者より許諾を得て利用している画像等や、各種ライセンスによって提供されている画像等が含まれています。個々の画像等の利用については、それぞれの権利者の定めるところに従ってください。

著作権が東京大学の教員等に帰属する著作物については、非営利かつ教育的な目的に限り再利用することができます。

ご利用にあたっては、以下のクレジットを明記してください。

クレジット：

UTokyo Online Education 人間環境システム学 2021 穴澤活郎



人間環境システム学

温泉水
坑廃水

前回の復習

火山や鉱山による環境問題

水環境の酸性化

酸性河川の例



北上川支流・赤川(1974頃)

中和システムの映像

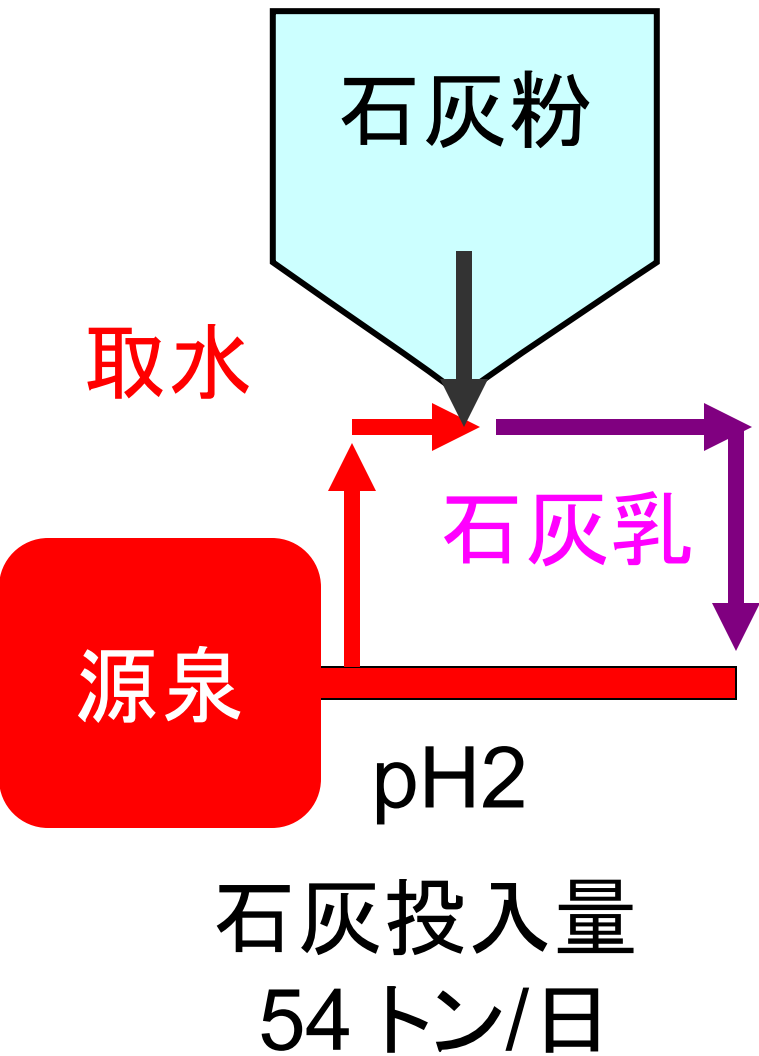
草津温泉



白い水の投入

この施設では、浄水場の浄水タンクから、
浄水タンクの水を、このタンクに投入し、
浄水タンクの水を、このタンクに投入し、
浄水タンクの水を、このタンクに投入し、
浄水タンクの水を、このタンクに投入し、

中和工場 (草津温泉)

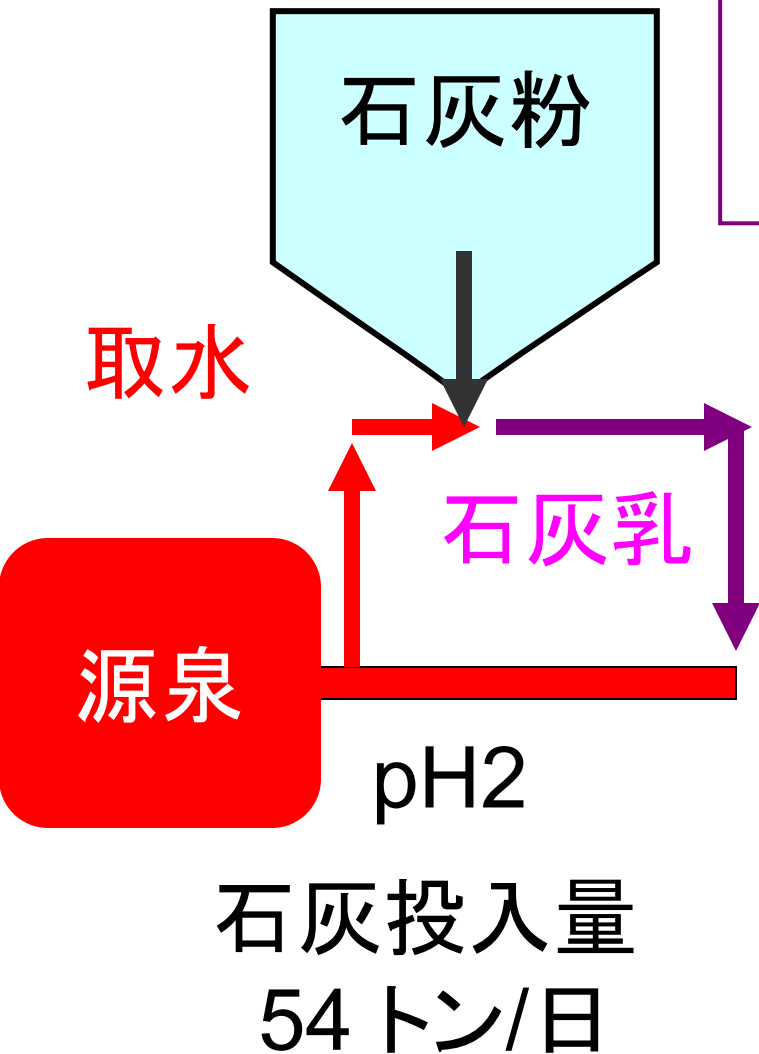


- ・中和槽 無し
- ・凝集槽 無し
- ・沈殿槽 無し



中和工場 (草津温泉)

全ての沈殿物が下流のダムへ
流れ落ちていく



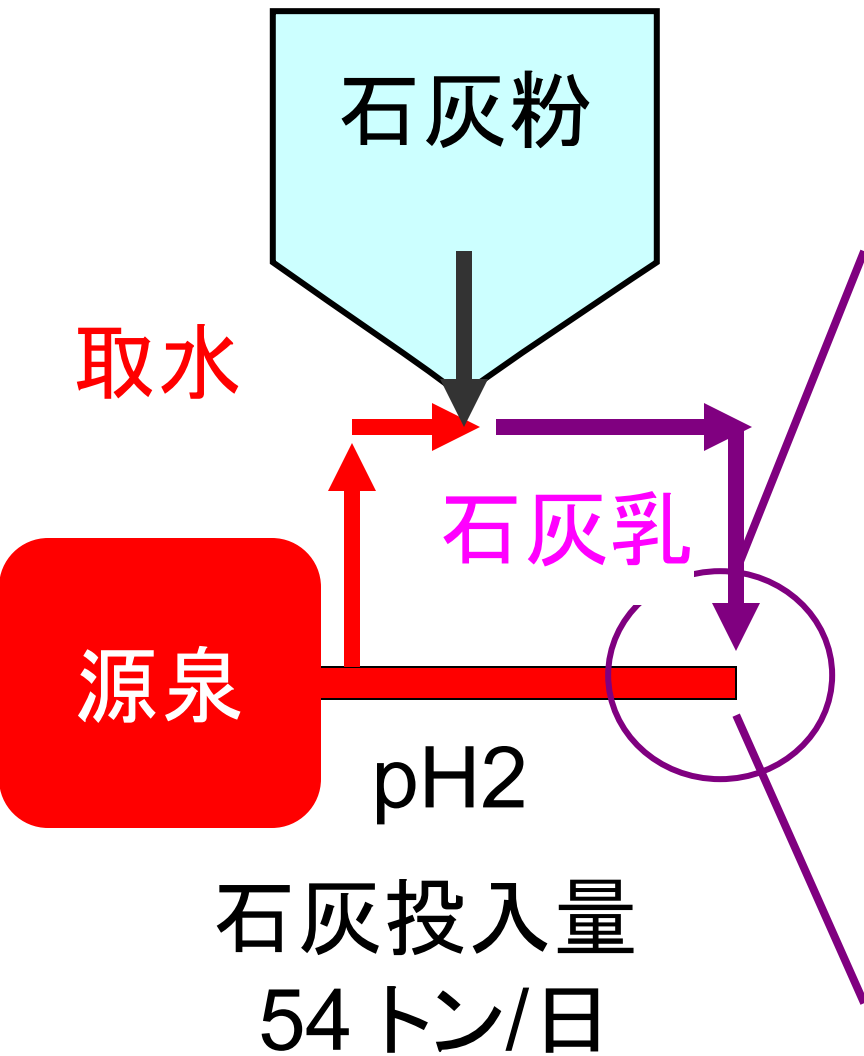


中和施設サイロ内 石灰乳 映像



中和工場 (草津温泉)

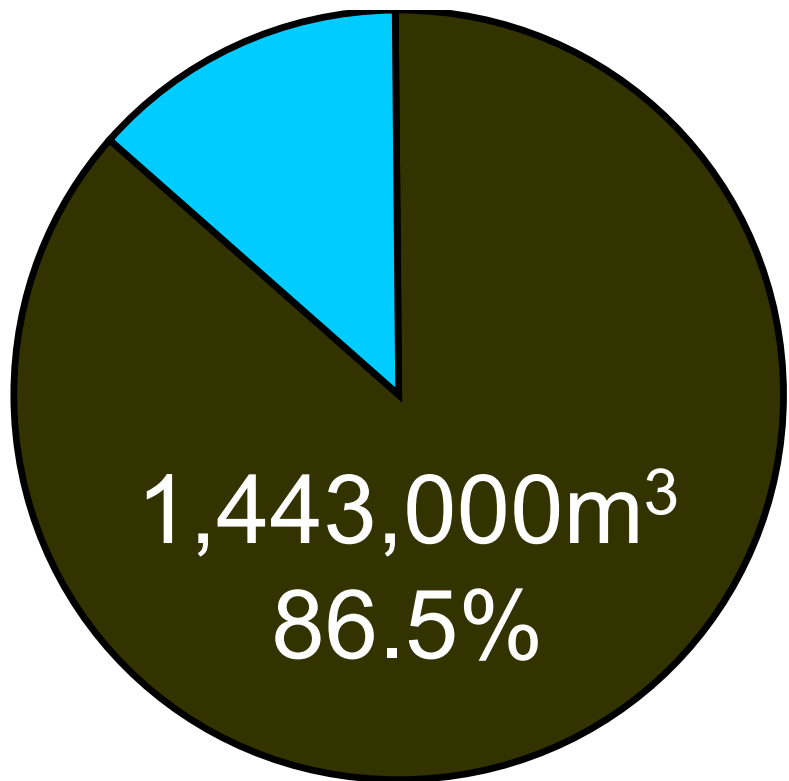
河川への石灰乳の投入



石灰乳投入後
草津温泉・湯川
映像



ダムの沈殿物の貯留および堆砂量



総貯水容量
1,668,000 m³

大規模な浚渫を行わないと
あと数年で容量限界に



品木ダム

浚渫工事 品木ダム 映像



酸性河川の中和事業

高度経済成長期(1955-1973)

- 産業用水の確保
- 電力の確保
- 農地開発
- ⇒ 大規模な中和事業

JOGMEC. “旧松尾鉱山新中和処理施設の運営管理”.
https://www.jogmec.go.jp/mp_control/matsuo_mine_001.html.



酸性河川における大規模な中和施設の建設

中和施設



地図: CraftMAP

400 km



中和施設

草津温泉



400 km

地図: CraftMAP



中和施設

草津温泉

玉川温泉

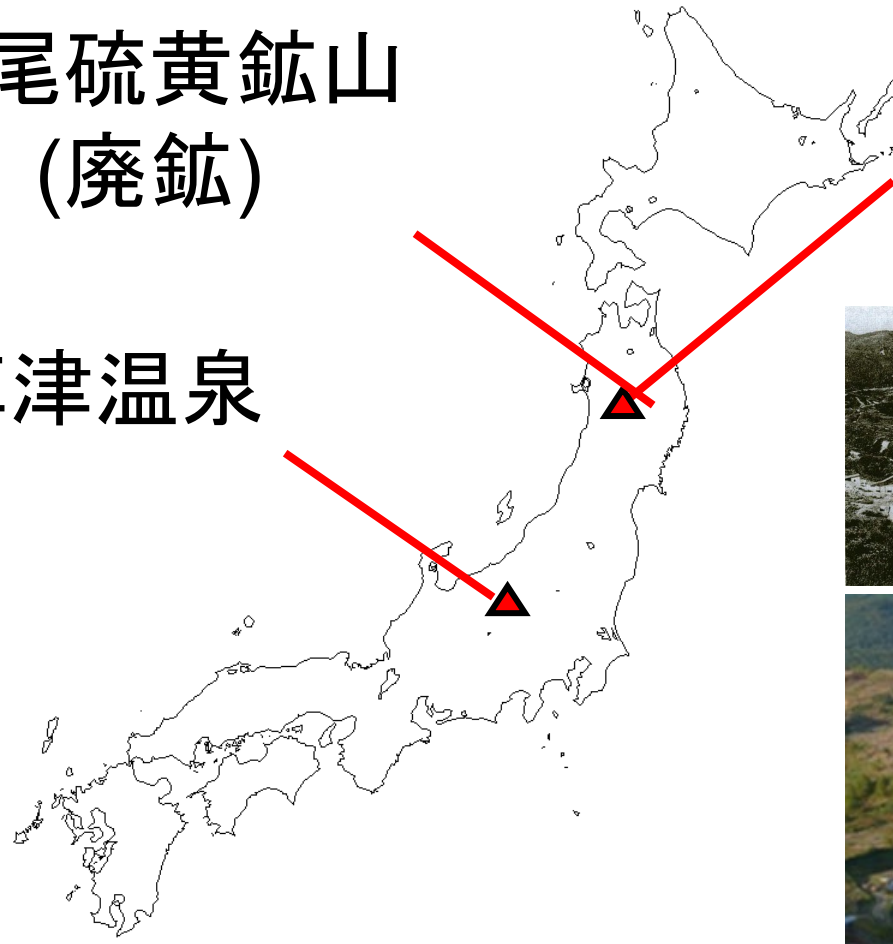


中和施設

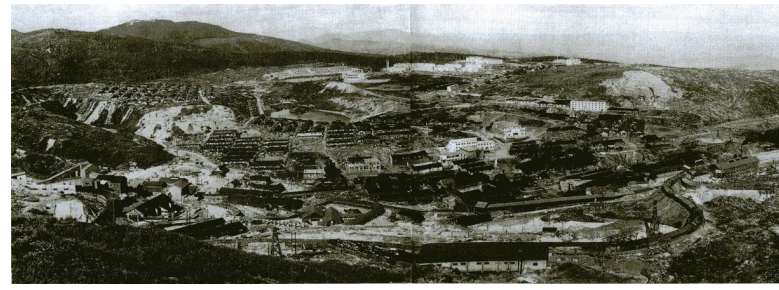
松尾硫黄鉱山
(廃鉱)

玉川温泉

草津温泉



岩手県・JOGMEC
『旧松尾鉱山抗廃水処理施設事業の概要』2010年10月. p.2.



地図: CraftMAP

400 km

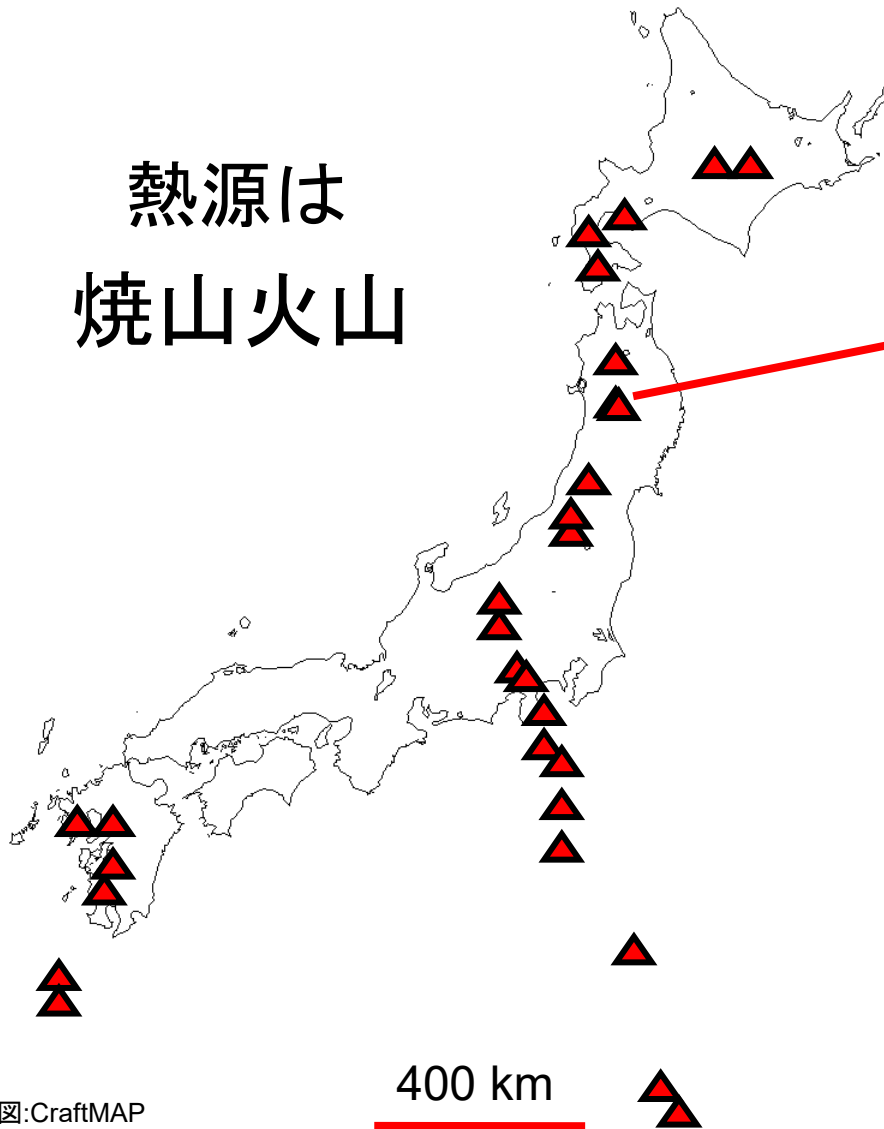
Matsuo Sulfur Mine (1952)

JOGMEC. “旧松尾鉱山新中和処理施設の運営管理”.
https://www.jogmec.go.jp/mp_control/matsuo_mine_001.html.

(2) 玉川温泉(秋田県)

玉川温泉

熱源は
焼山火山



地図: CraftMAP



玉川温泉・大噴泉



人体はこの程度の酸には溶解しない

水温 97C, pH 1.2

湧出量: 8,400 dm³ / min

1ヶ所からの湧出量としては日本一

中和工場



玉川温泉・酸性水対策の歴史

- 1939年 地下溶透法開始
 - 酸性水を地下注入し、地下の粘土・岩石類と接触させることで中和を試みる
- 1940年1月 玉川河水の田沢湖導水開始
 - 田沢湖の酸性化が急速に進行
 - 1940年9月 pH6.7 ⇒ pH5.4へ
 - 魚類激減
- 1972年 簡易石灰石中和開始

玉川温泉・酸性水対策の歴史

- 1990年 玉川ダム完成
- 1991年 中和工場運開
 - 中和剤：粒状石灰（粒径：5-20mm）
 - 中和処理：中和槽内
 - 粒状の石灰石が大量に詰まった中和反応槽に酸性水を流入させて中和
 - 動力：自然落差

中和工場 玉川温泉



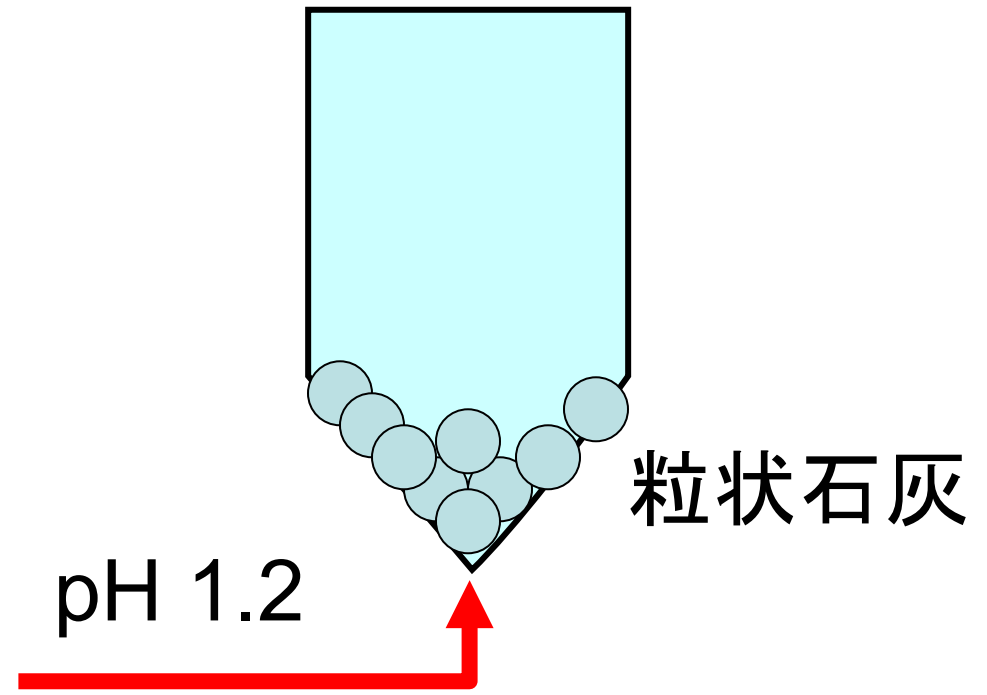
大噴泉

中和工場 玉川温泉



石灰サイロ

石灰サイロ

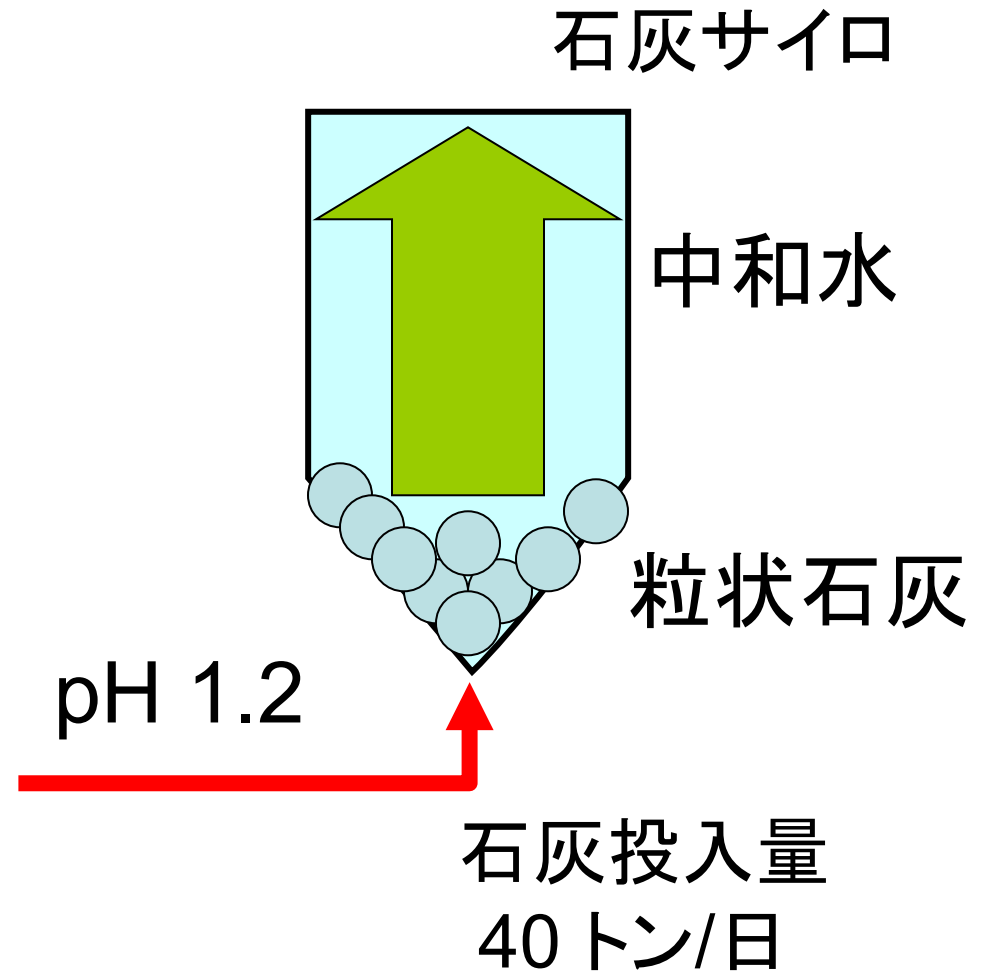


酸性水は粒状石灰により中和

中和工場 玉川温泉



石灰サイロ



石灰サイロ

中和水

粒状石灰

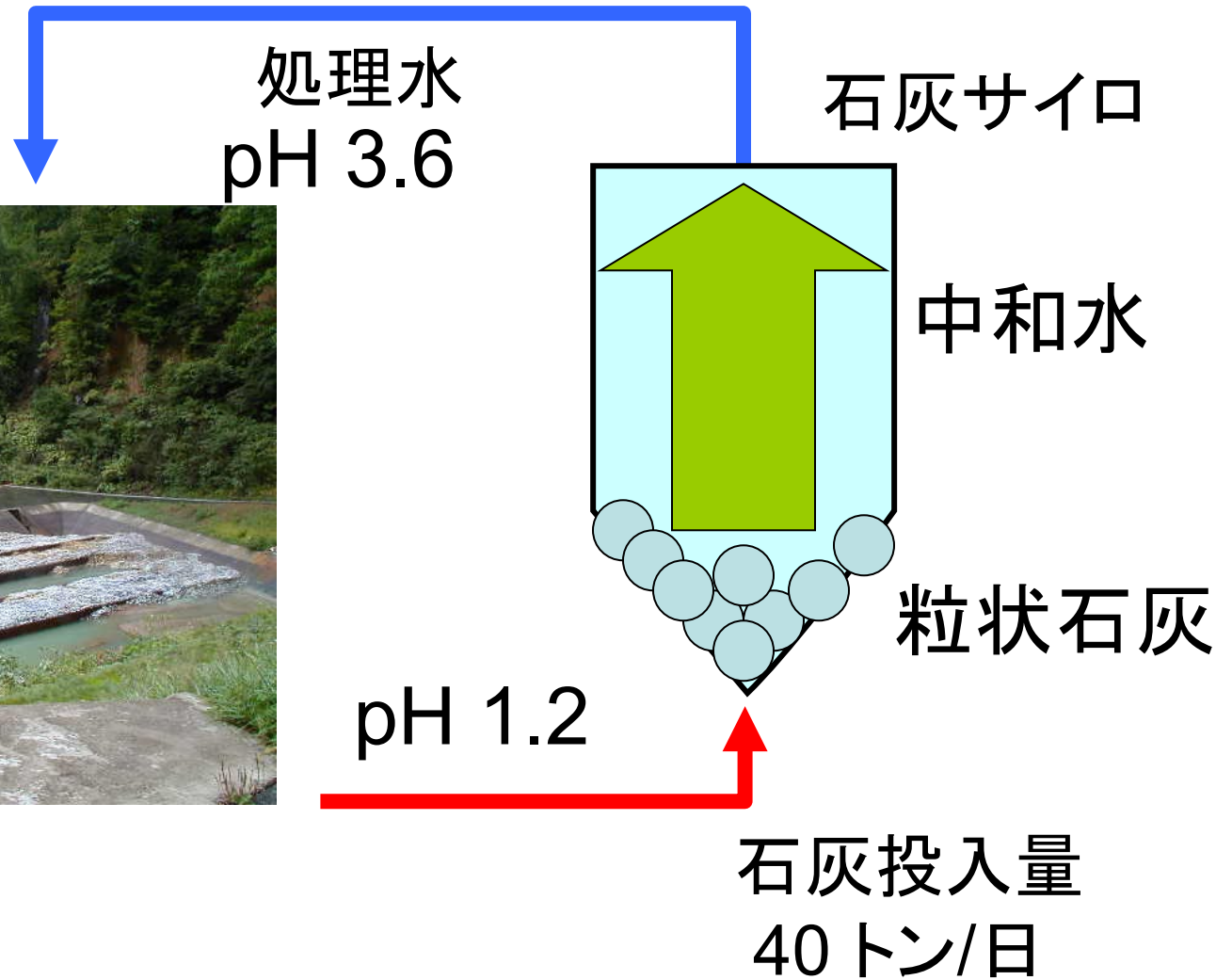
pH 1.2

石灰投入量
40トン/日

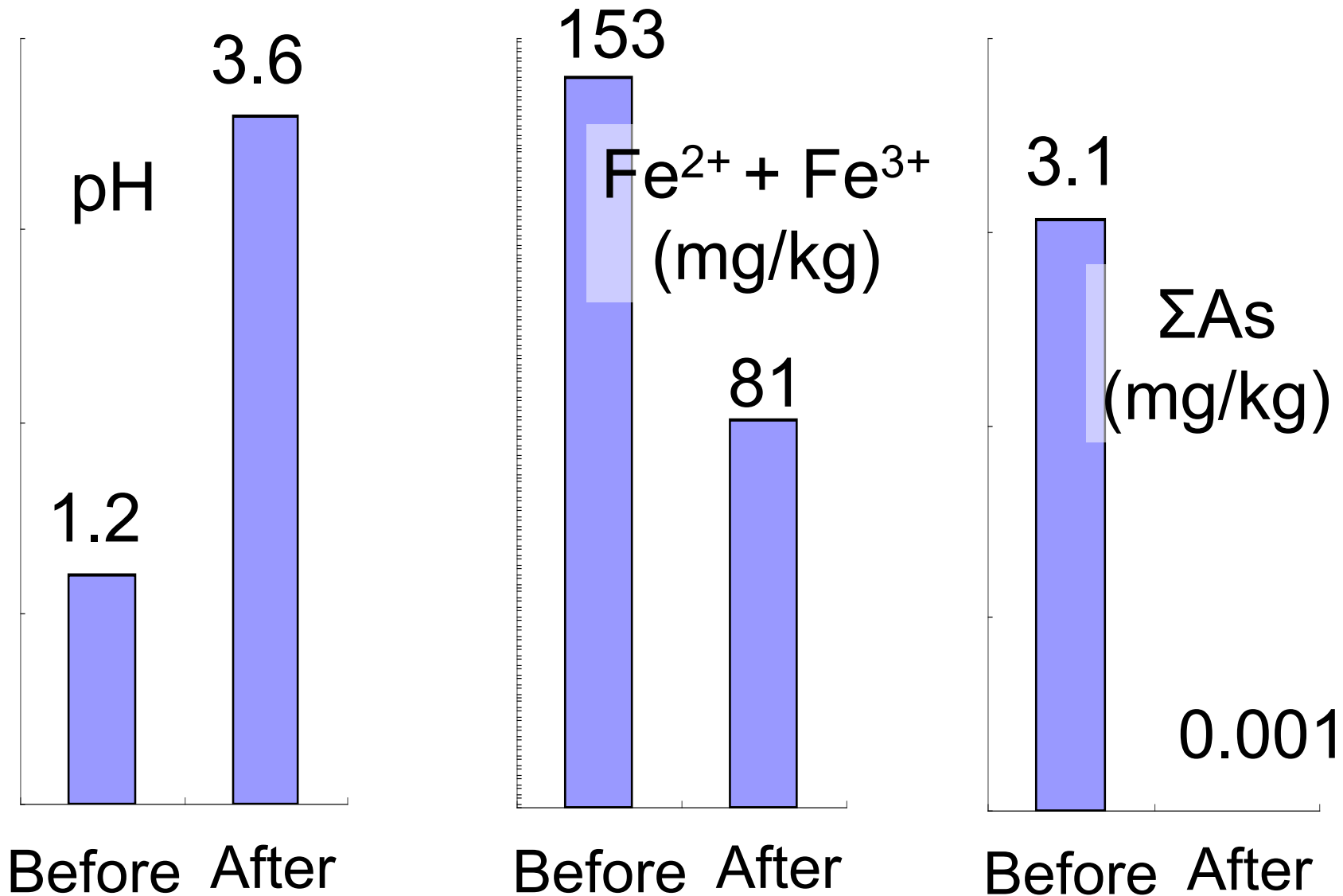
中和工場 玉川温泉



河川



中和效果



玉川ダム(宝仙湖)

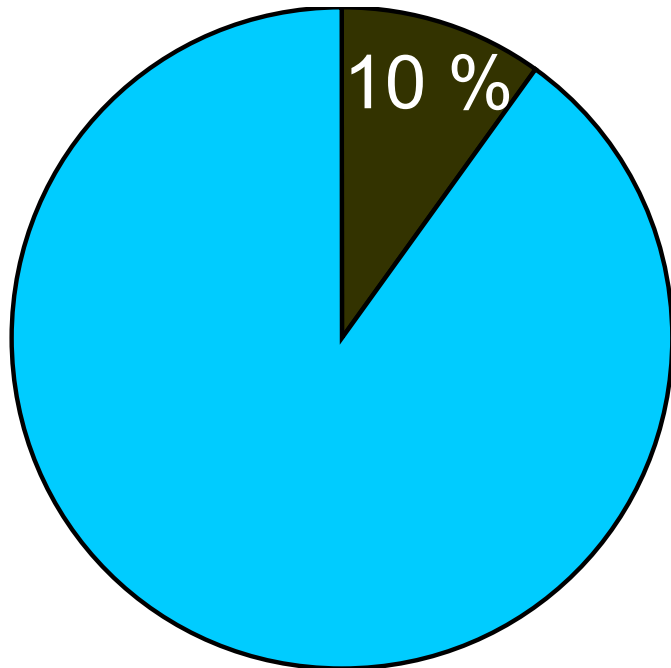


河川一等兵, CC BY-SA 4.0, via Wikimedia Commons

ダムの沈殿物の貯留および堆砂量 (玉川ダム)

沈殿物の貯留量および堆砂量

2,500,000 m³



玉川ダムの堆砂容量

25,000,000 m³

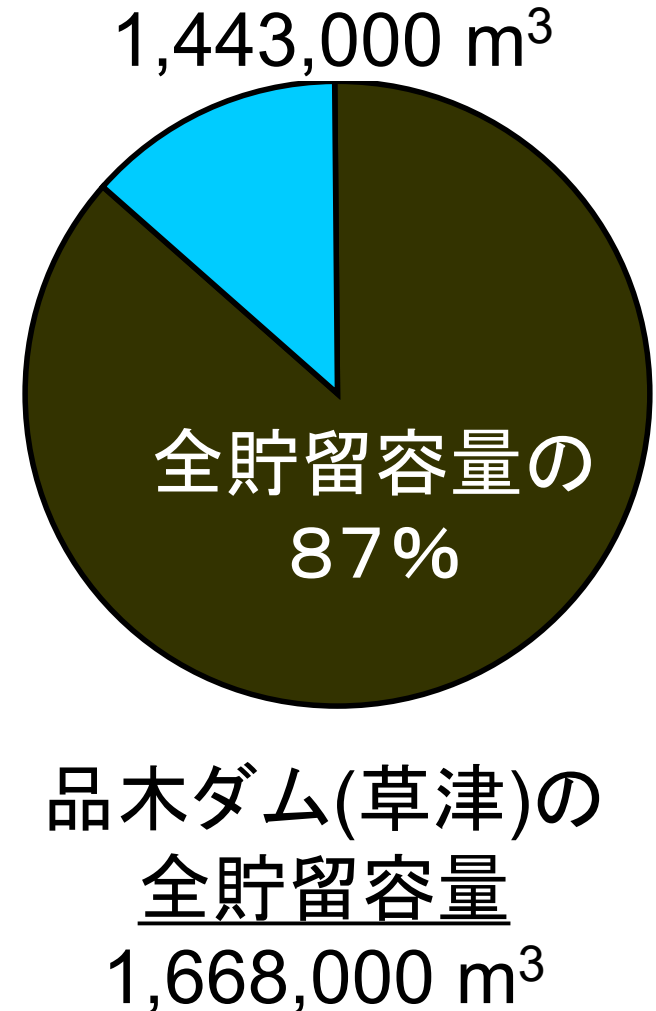
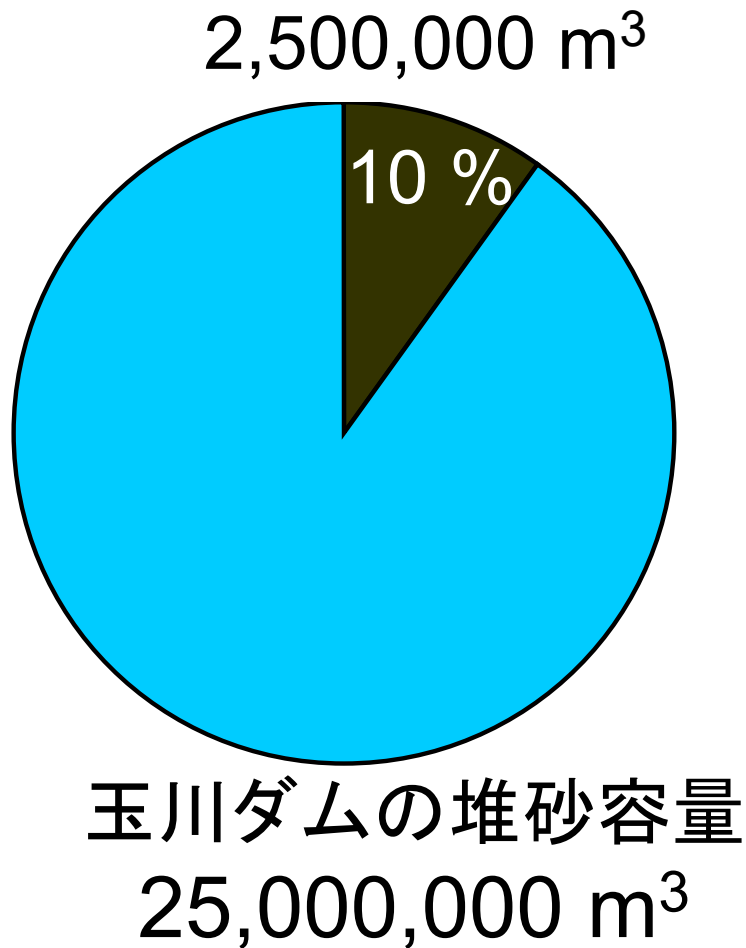
ダム建設後20年
でダム堆砂容量
の約10%の堆砂



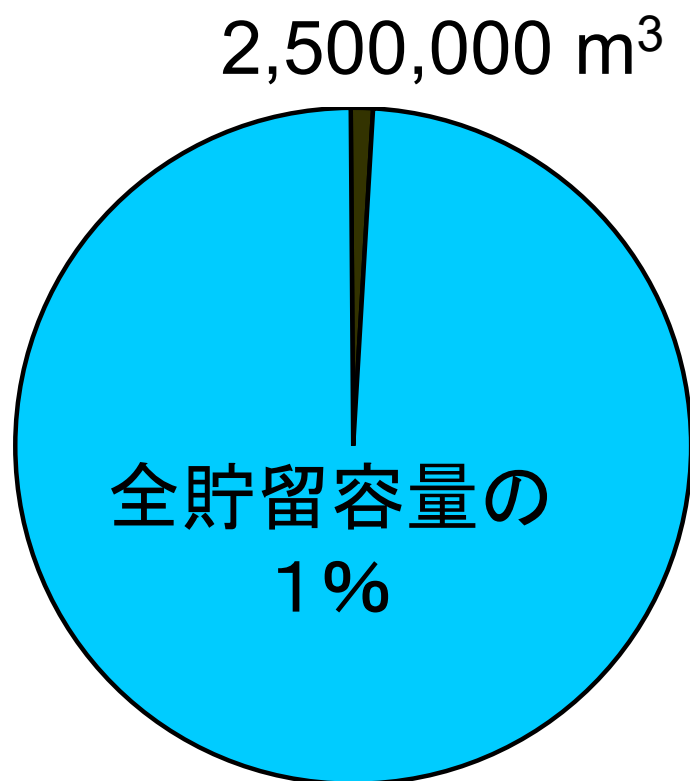
”梅雨の玉川ダム”. 東北地方整備局.

<https://www.thr.mlit.go.jp/tamagawa/03shuhen/01gallery/2019/0627yousu/index.html>

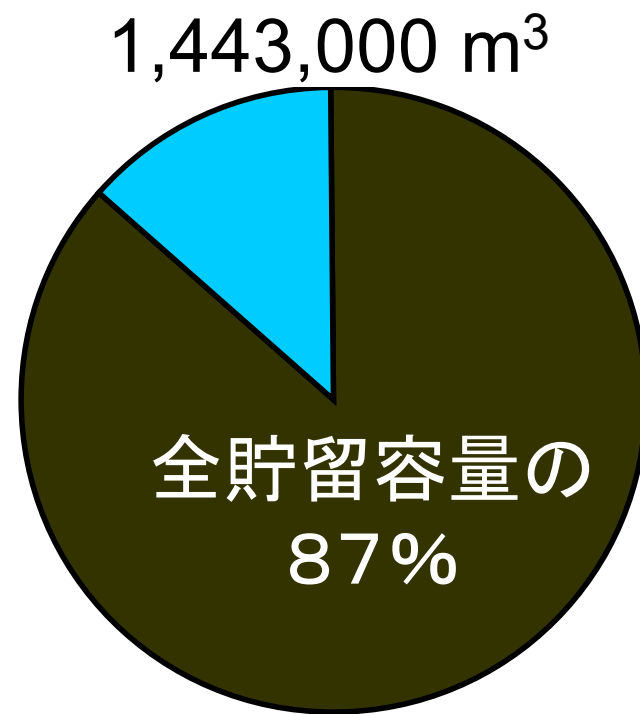
ダムの沈殿物の貯留および堆砂量 玉川 vs 草津(品木ダム)



ダムの沈殿物の貯留および堆砂量 玉川 vs 草津(品木ダム)



玉川ダムの全貯留容量
250,000,000 m³



品木ダム(草津)の
全貯留容量
1,668,000 m³

**(3)旧松尾硫黄鉱山
(廃鉱)**

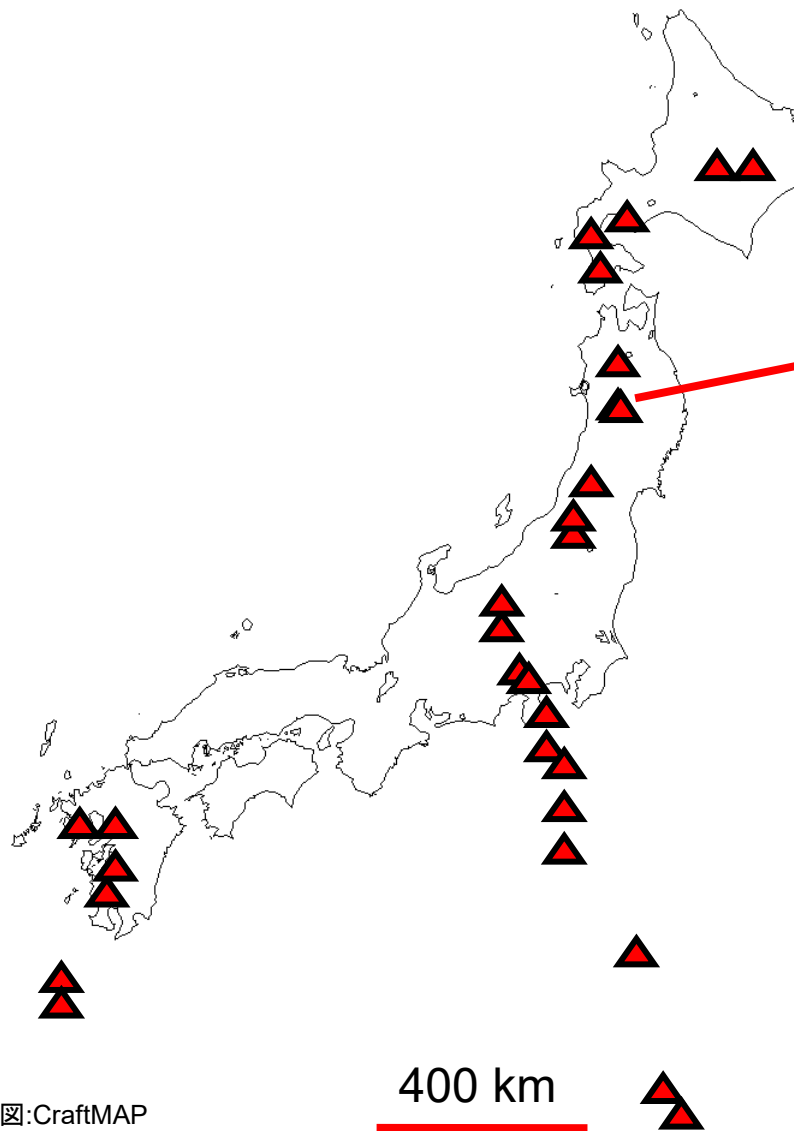
抗廃水

硫黄の用途

- 硫黄単体
 - ゴムの加硫
 - 黒色火薬
- 二酸化硫黄
 - 食品の漂白剤(干し柿)
 - ワインの酸化防止剤
- 硫酸
 - 肥料
 - 合成洗剤
 - 無機薬品

旧松尾硫黄鉱山 (廃鉱)

岩手県・JOGMEC
『旧松尾鉱山抗廃水処理施設事業の概要』2010年10月. p.2.



地図: CraftMAP

400 km

Matsuo Sulfur Mine (1952)

松尾硫黄鉱山の歴史



岩手県・JOGMEC『旧松尾鉱山抗廃水処理施設事業の概要』2010年10月. p.2.

Matsuo Sulfur Mine (1952)

- 1882年 硫黄鉱床の大露頭が発見される
- 1914年 硫黄鉱山として操業
- 1960年 公害規制
- 1969年 松尾鉱業(株)倒産
- 1972年 閉山
 - 義務者不在鉱山へ

松尾硫黄鉱山

- アジア最大の硫黄鉱山(1914 - 1972)
- 硫黄の年間生産量80,000トン
 - 日本の硫黄生産の30% (操業時)
- 労働者 5,000 人、家族 15,000 人
- 現在、日本には操業中の硫黄鉱山は皆無
 - しかし、日本は未だに世界有数の硫黄生産国
 - 米国、中国、ロシア、カナダ、サウジアラビア、ドイツ、日本
 - 公害規制に伴う重油脱硫(1960以降)
 - 原油を輸入し、脱硫による硫黄生産物を輸出

松尾鉱山からの抗廃水

松尾鉱山からの酸性坑廃水による水質汚染

酸性坑廃水で
汚染された川
(赤川)

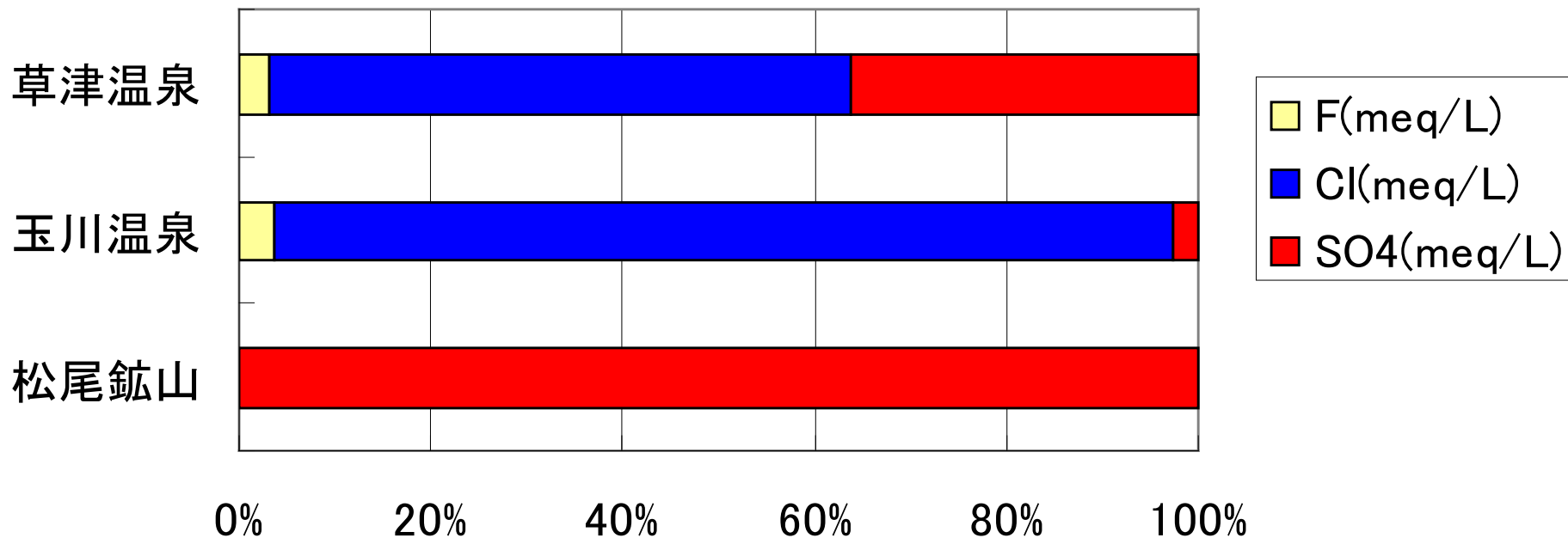


北上川本流

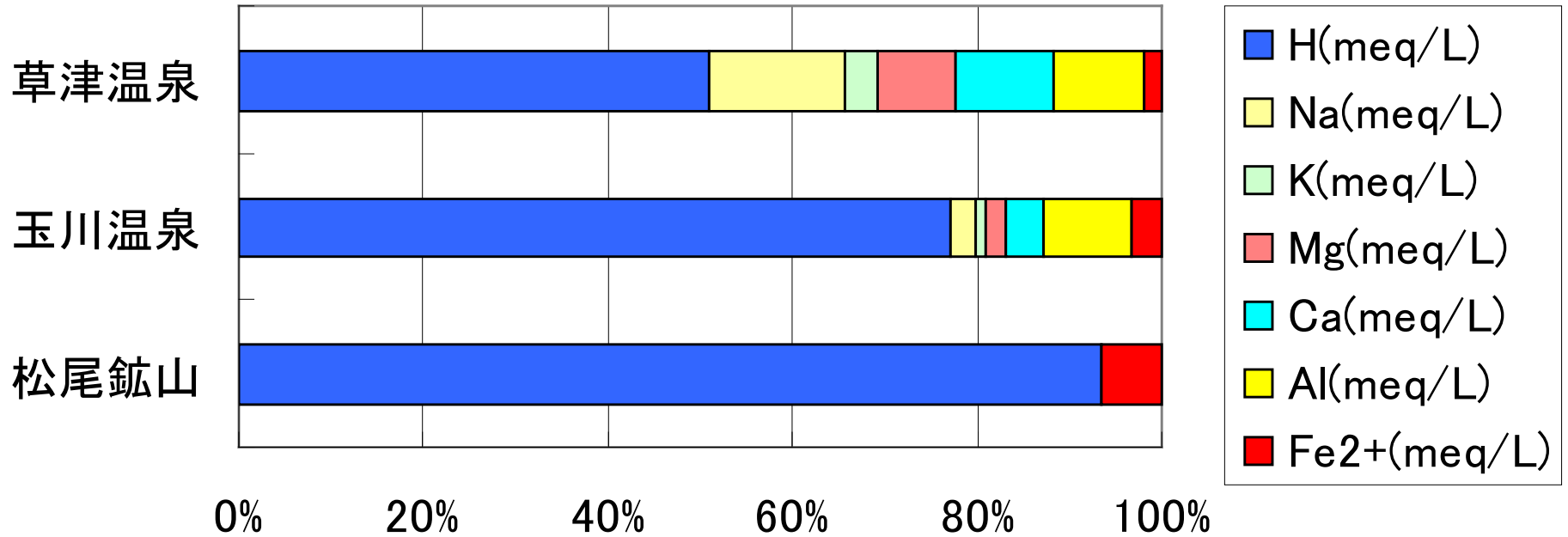
JOGMEC. “旧松尾鉱山新中和処理施設の運営管理”.
https://www.jogmec.go.jp/mp_control/matsuo_mine_001.html.

酸性坑廃水で汚染された河川と北上川本流との合流地点
(1974年)

溶存化学成分(陰イオン)



溶存化学成分(陽イオン)

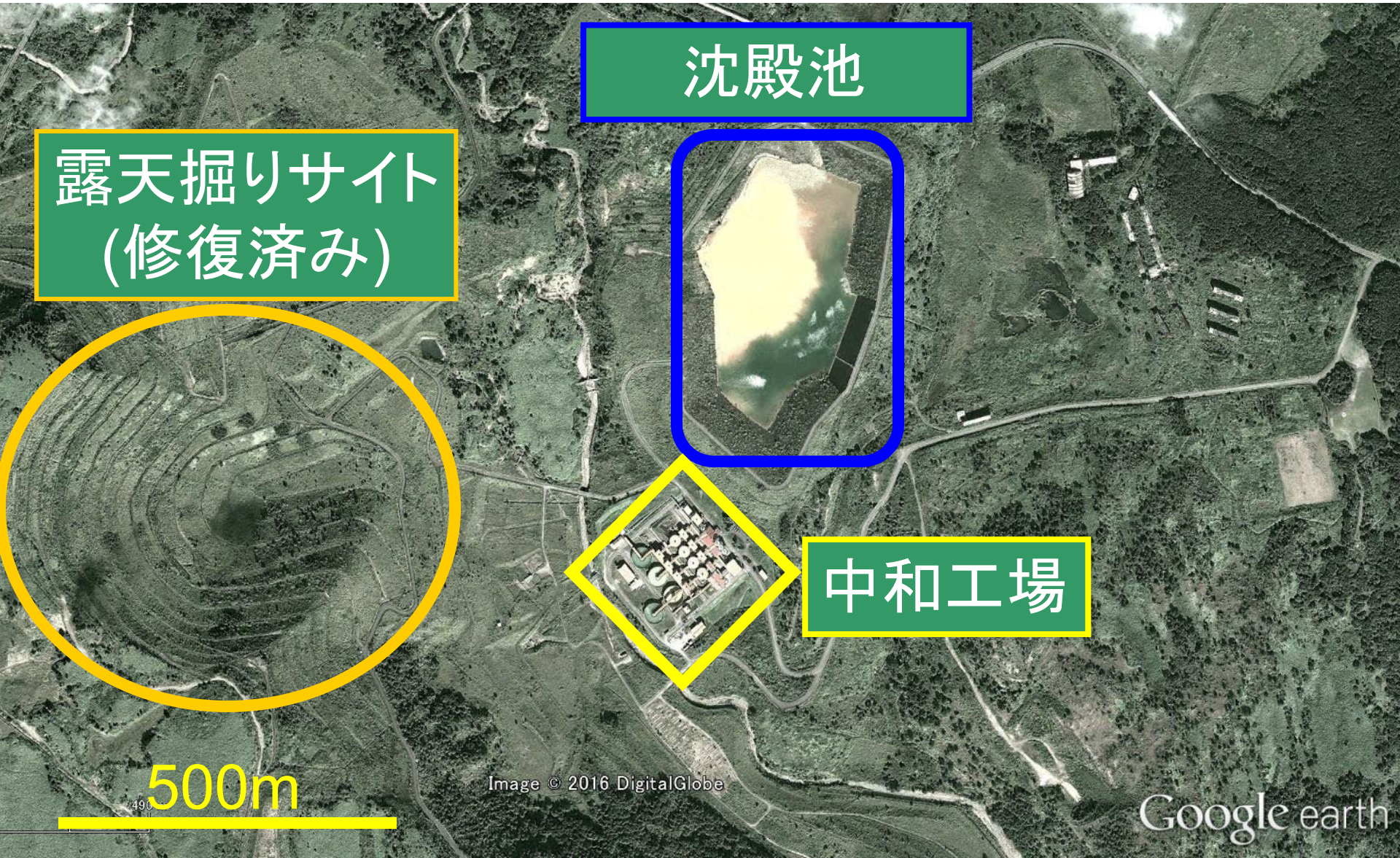


中和処理

旧松尾鉦山

中和工場(松尾硫黄鉱山)

Map data ©2016 Google, Digital Globe



沈殿池

露天掘りサイト
(修復済み)

中和工場

500m

Image © 2016 DigitalGlobe

Google earth

中和施設の概要



JOGMEC.
“旧松尾鉱山新中和処理施設の運営管理”.
https://www.jogmec.go.jp/mp_control/matsuo_mine_001.html.

Neutralization plant at the abandoned Matsuo mine

- 中和施設運開: 1982年
- 酸性坑廃水の流出量 18トン / 分

北上川を守り続けて

～旧松尾新中和処理施設～

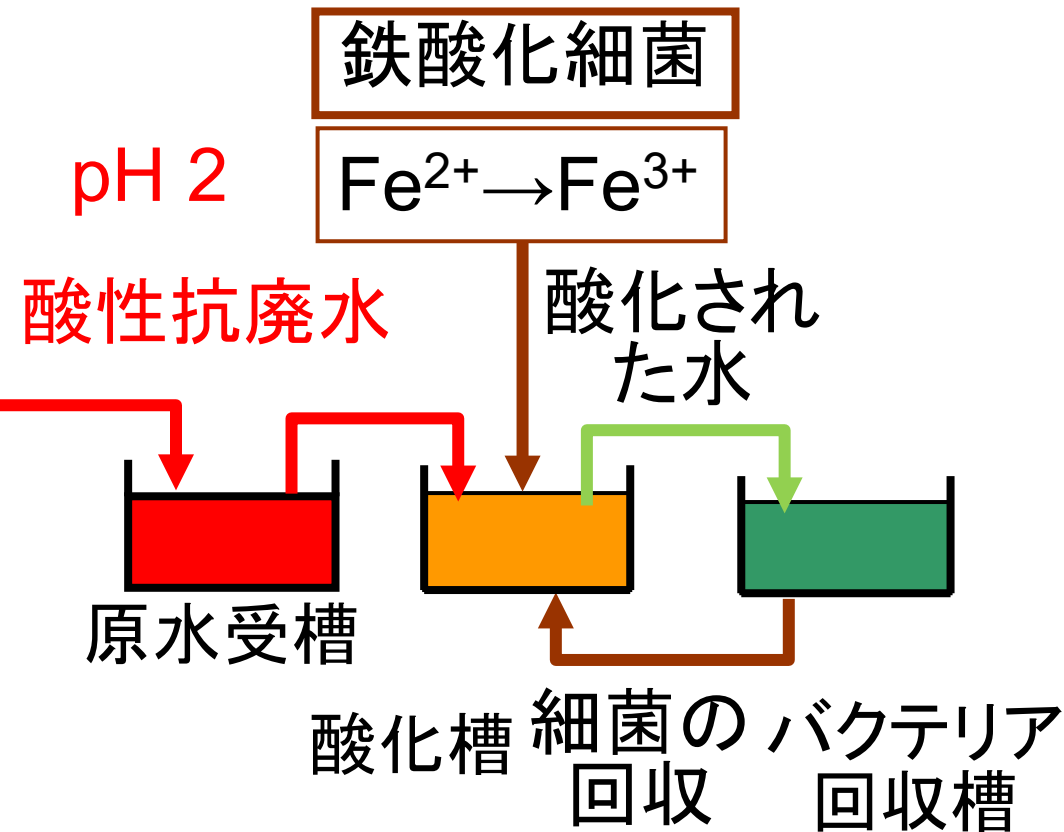
北上川を守り続けて ～旧松尾新中和処理施設～

▶ ⏪ 🔊 0:00 / 10:09

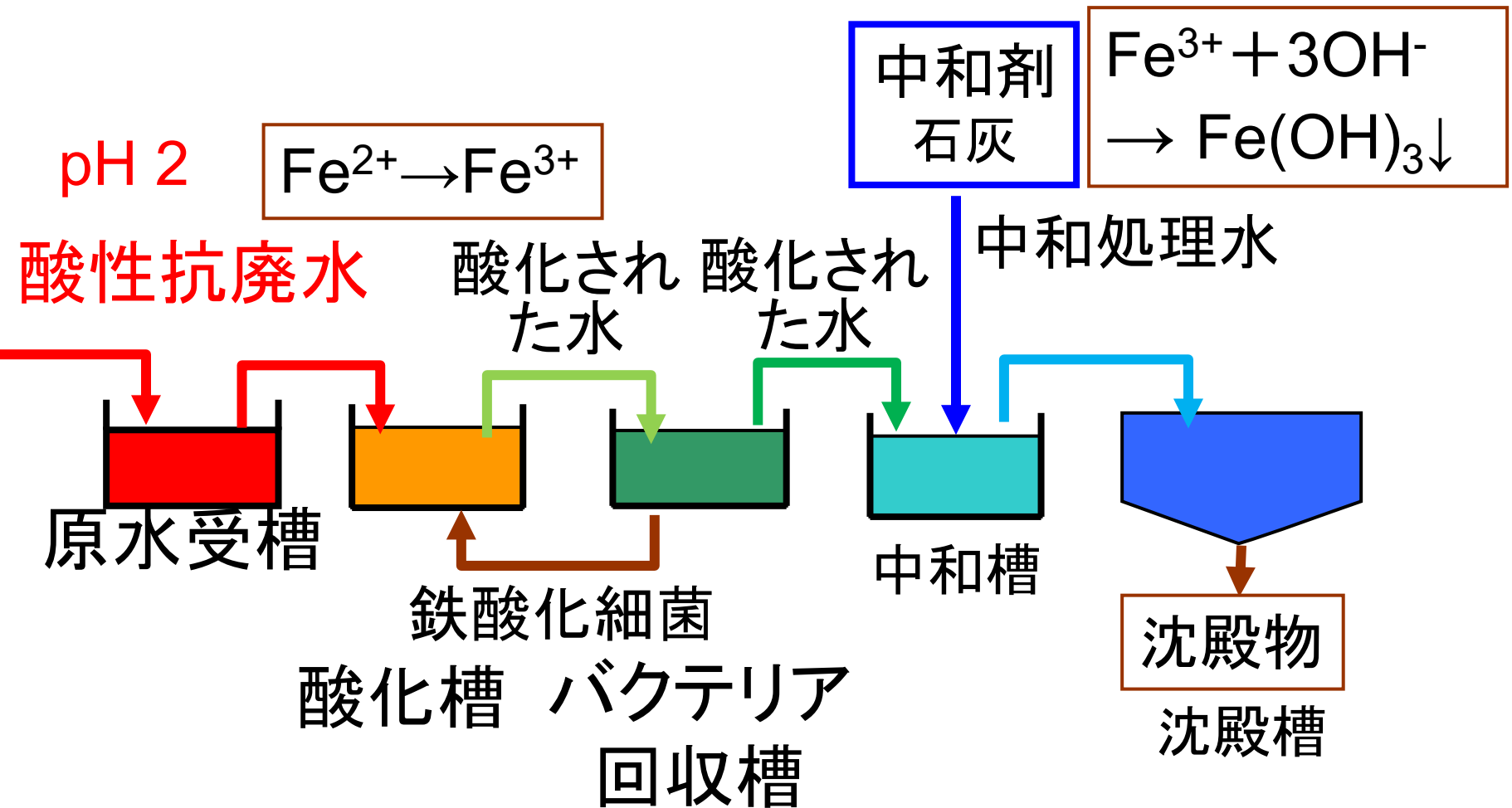


JOGMECchannel. (2013年8月1日). 北上川を守り続けて ～旧松尾新中和処理施設～ [動画].
YouTube. Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=oOrU5fSupYA>.

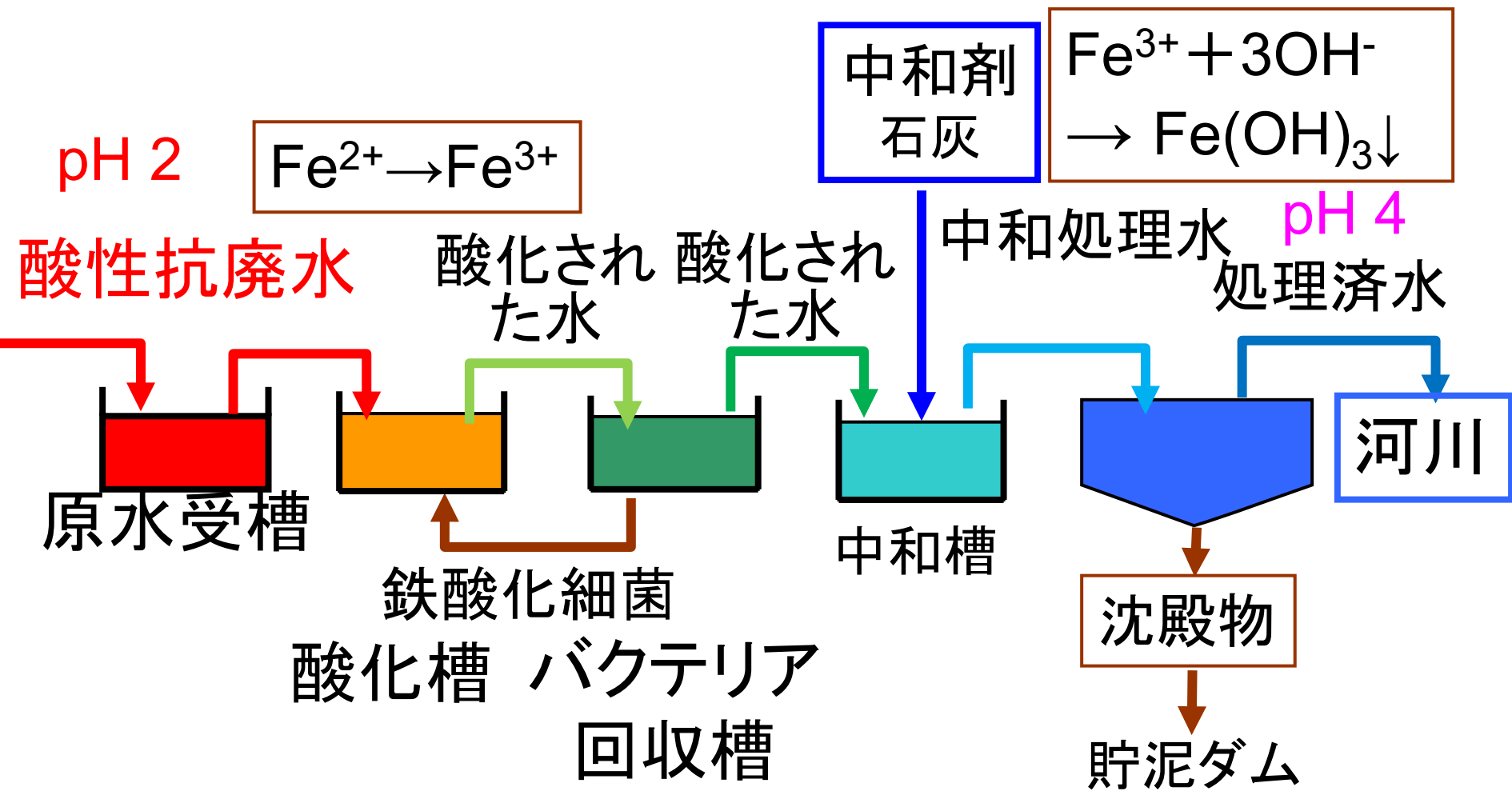
旧松尾鉱山新中和処理施設



旧松尾鉱山新中和処理施設



旧松尾鉱山新中和処理施設



松尾鉱山・抗廃水処理の効果

松川(赤川の下流)と北上川の合流点

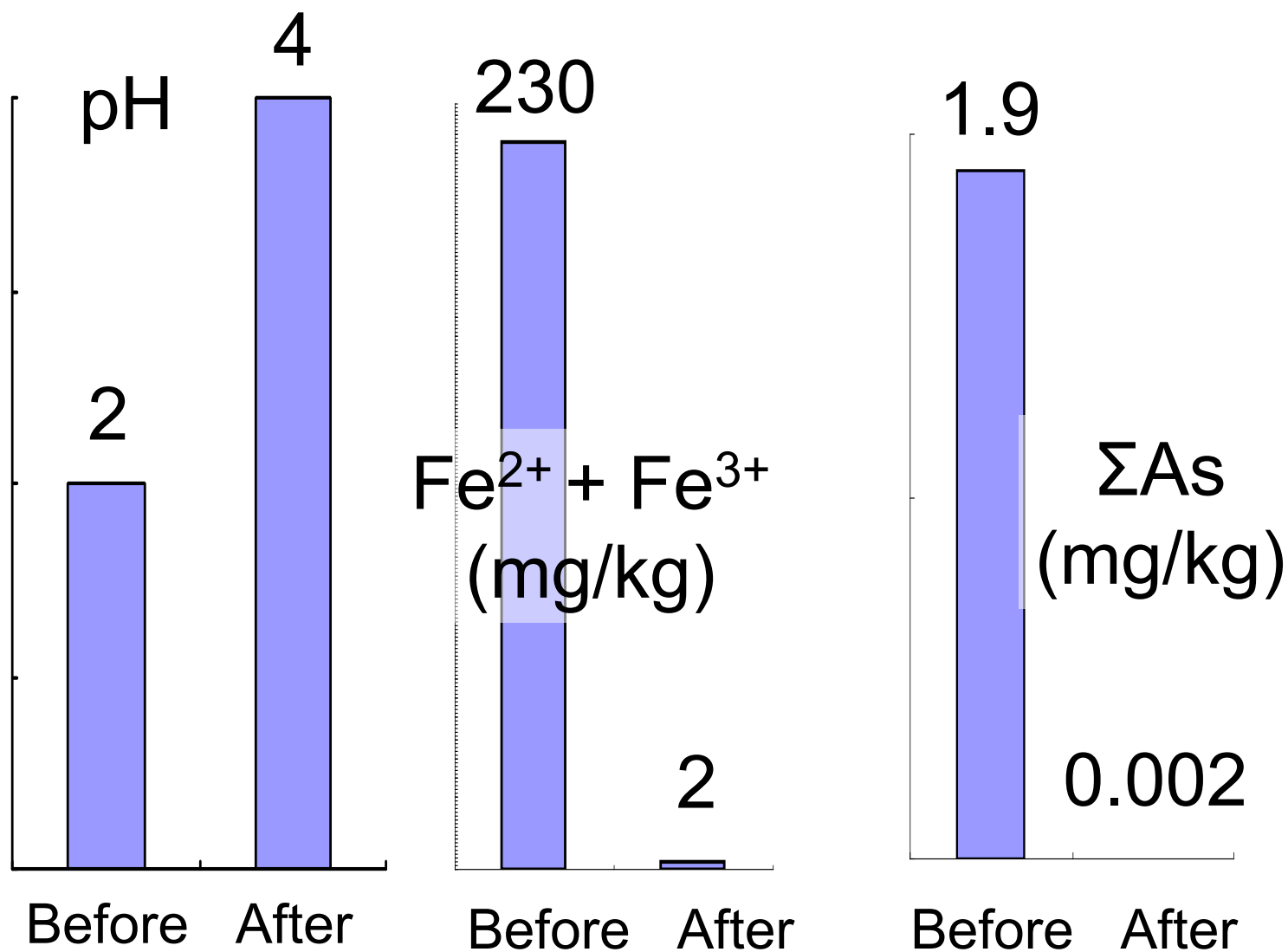


JOGMEC. “旧松尾鉱山新中和処理施設の運営管理”. https://www.jogmec.go.jp/mp_control/matsuo_mine_001.html.

1974年

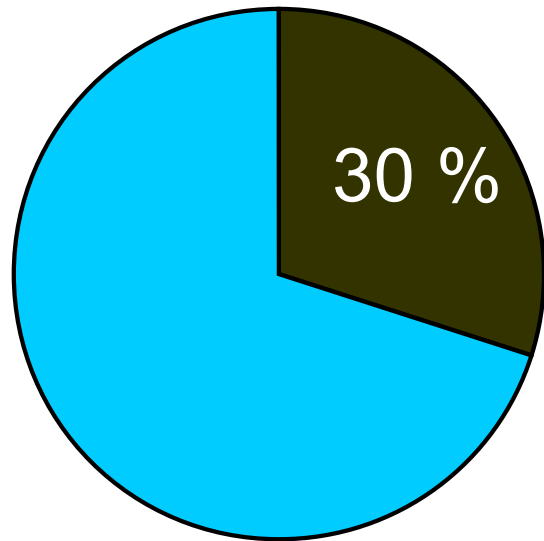
2005年

中和処理の効果



中和沈殿物の凝集状況 旧松尾鉦山貯泥ダム

沈殿物の貯留量
600,000 m³



貯泥ダムの貯留容量
2,000,000 m³

年間の貯留量は 20,000 m³
=貯泥ダム貯留容量の1 %
運転30年で沈殿物の貯留量は総
貯留容量の約30%

沈殿物で貯泥ダムの貯留容量
に達した時にはダムは放棄さ
れ埋め戻される。そして新たな
ダムが設置される。

費用



旧松尾鉱山新中和処理施設

JOGMEC. “旧松尾鉱山新中和処理施設の運営管理”.
https://www.jogmec.go.jp/mp_control/matsuo_mine_001.html.

- 建設 約100億円
 - 玉川中和工場の約3倍
- 中和処理 年間5億円
 - ＞ 草津2億円/年 + 玉川 2億円/年
- 運転30年 410 億円
 - 玉川における20年間の中和処理費用の
 - 約8倍
- 処理がストップした場合
 - 被害総額 500億円
 - 影響 100万人

研究開発中の対策手法

Passive Treatment

電力不要

保守低減

安価

Passive treatmentの例 硫黄還元細菌の利用

酸性坑廃水

重金属
イオン

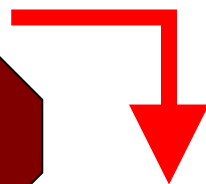
SO_4^{2-}

処理槽

Passive treatmentの例 硫黄還元細菌の利用

酸性坑廃水

重金属
イオン

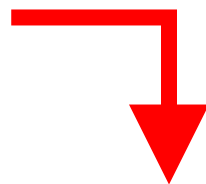


硫黄還元細菌

HS^-

Passive treatmentの例 硫黄還元細菌の利用

酸性坑廃水

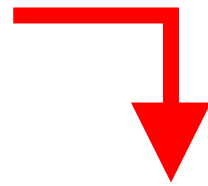


硫黄還元細菌

硫化物

Passive treatmentの例 硫黄還元細菌の利用

酸性坑廃水

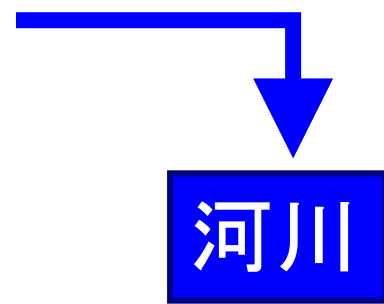


硫黄還元細菌

硫化重金
属の沈殿

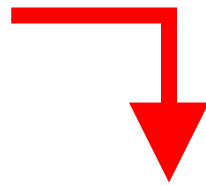
処理水

河川



Passive treatmentの例 硫黄還元細菌の利用

酸性坑廃水



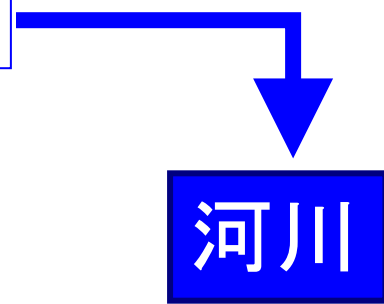
硫黄還元細菌

いまだに研究開発段階

硫化重金
属の沈殿

処理水

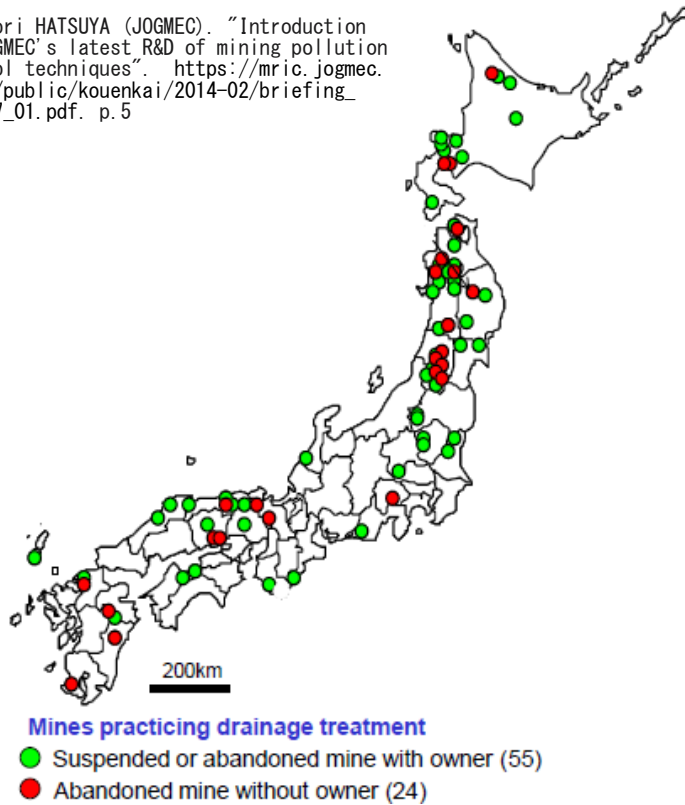
河川



その他の事例

日本全国に散在する廃鉱山

Kazunori HATSUYA (JOGMEC). "Introduction of JOGMEC's latest R&D of mining pollution control techniques". https://mric.jogmec.go.jp/public/kouenkai/2014-02/briefing_140207_01.pdf. p.5



日本には約5,000の旧廃止鉱山が散在する

- うち、450箇所は鉱害防止事業が必要
 - 多くの場合所有者が判明しない
- ⇒ 責任者が不在なことが多い

Examples of abandoned mines in Japan

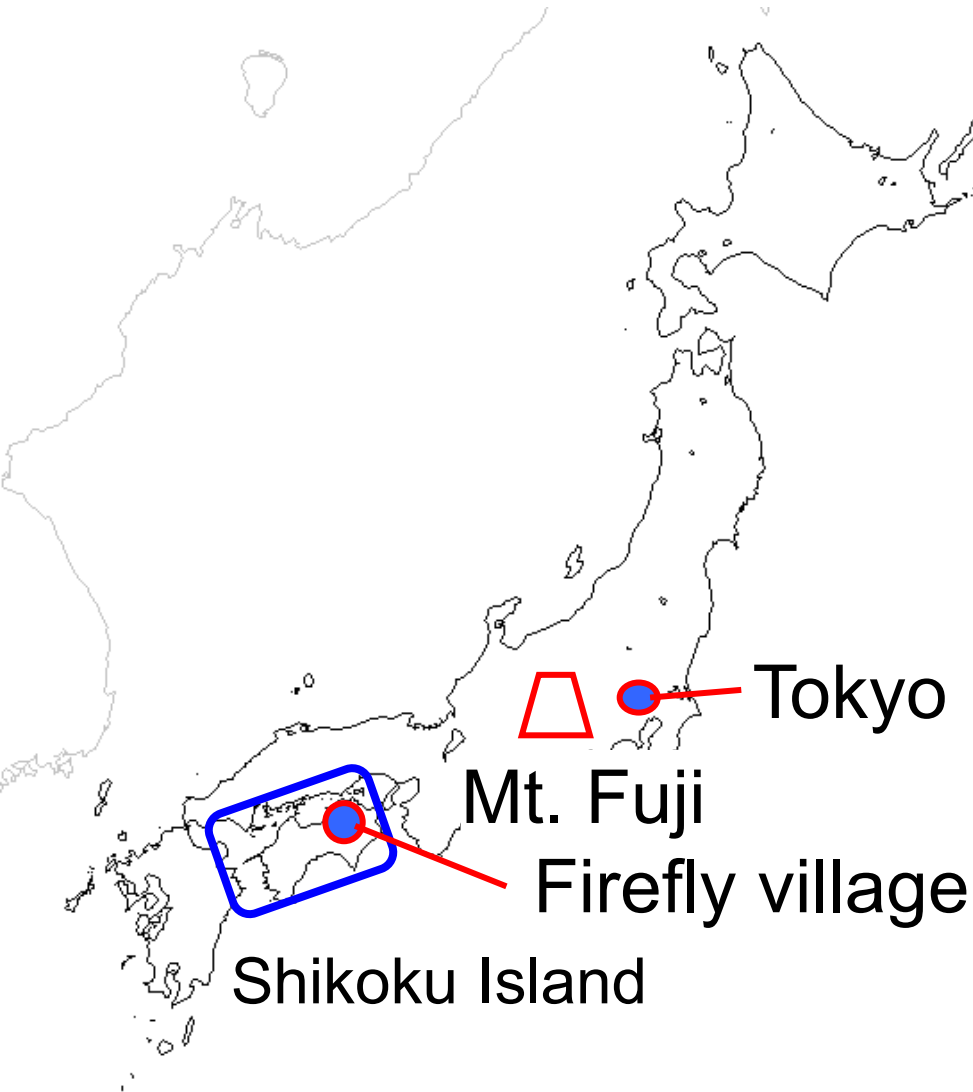
by Jogmec: Japan Oil, Gas and Metals National Corporation

400 km

所有者不在の休廃 鉱山の例

“ホタルの里”

四国・徳島県



ホタルの里 徳島県のある山村

- 美しい水環境



ホタルの里

徳島県のある山村

- 美しい水環境
- ホタルの飛翔



Firefly (*Luciola cruciata*)

Photo by @yb_woodstock from flickr,
<https://flic.kr/p/cgpUkq>, CC BY-SA 2.0



Fireflies flying around

Photo by T.Kiya from flickr,
<https://flic.kr/p/9TnB28>, CC BY-SA 2.0

ホタルと水

- ゲンジボタル (*Luciola cruciata*) 日本で最も普通に見られるホタル



Firefly (*Luciola cruciata*)

Photo by @yb_woodstock from flickr,
<https://flic.kr/p/cgpUkq>, CC BY-SA 2.0

ホタルと水



- ゲンジボタル (*Luciola cruciata*) 日本で最も普通に見られるホタル
- 幼虫は清流に棲む
- 幼虫の餌は淡水の貝・カワニナ
- 成虫は何も食べず、水だけを飲む



Kawanina (freshwater snail)

ホタルと水

- ゲンジボタル (*Luciola cruciata*) 日本で最も普通に見られるホタル

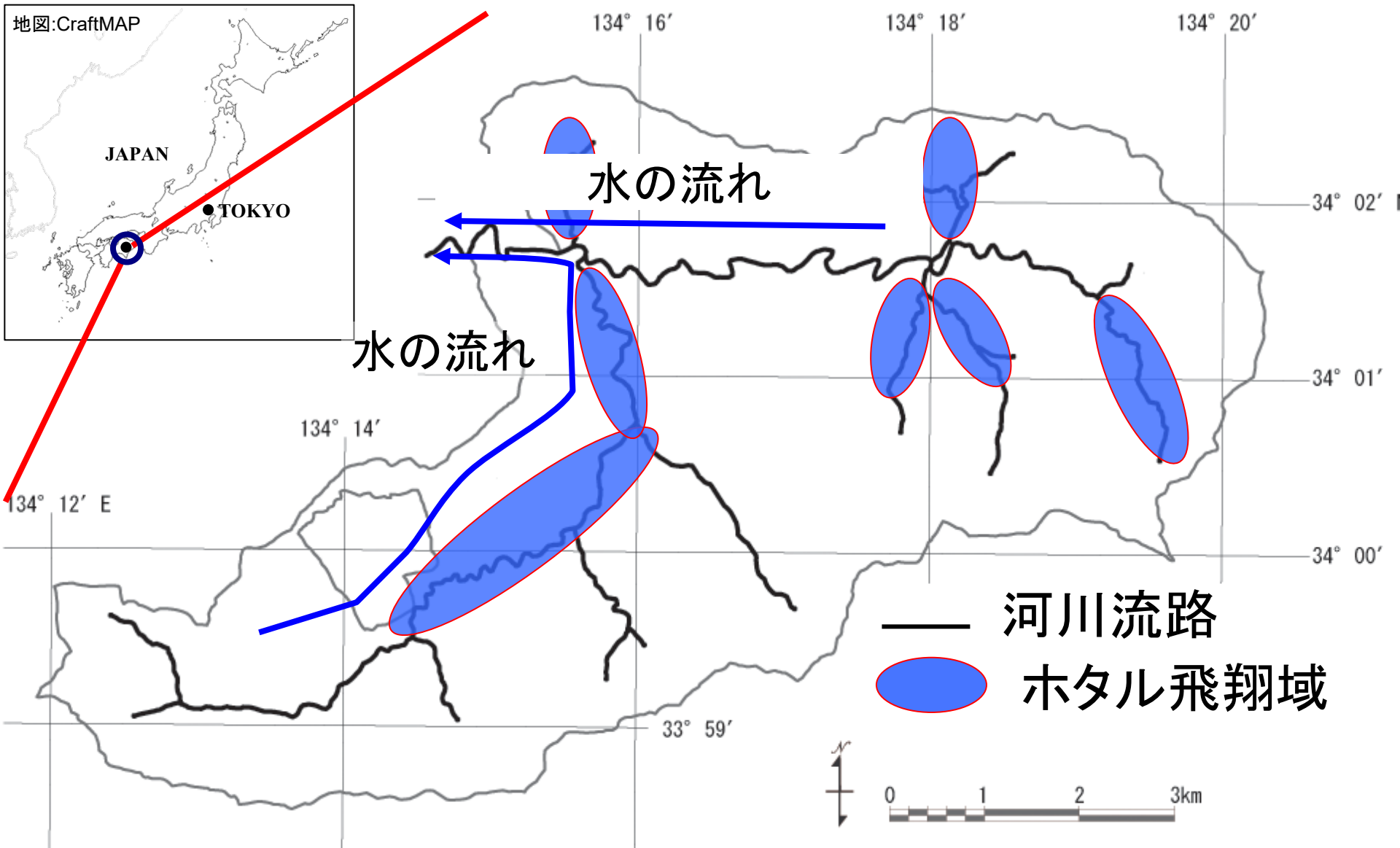
ホタルは水環境指標として有用

- 幼虫の餌は淡水の貝・カワニナ
- 成虫は何も食べず、水だけを飲む



Kawanina (freshwater snail)

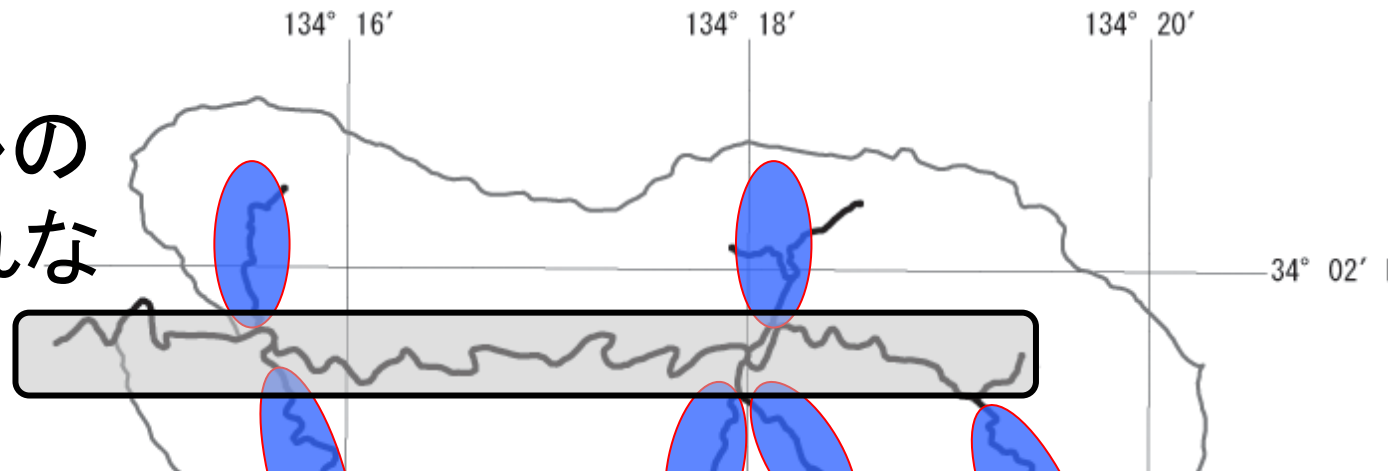
河川流路とホタルの飛翔域



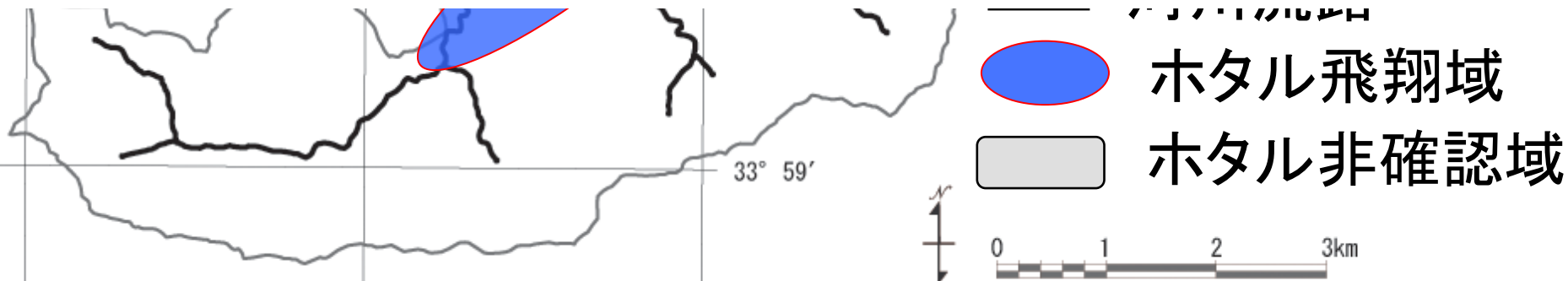
Anazawa, K., Kaida, Y., Shinomura, Y., Tomiyasu, T., & Sakamoto, H. (2004). Heavy-metal distribution in river waters and sediments around a "Firefly Village", Shikoku, Japan: application of multivariate analysis. *Analytical Sciences*, 20(1), 79-84.より

偏在するホタル飛翔域

本流にホタルの
飛翔が見られな
い



流れは緩やかでカワニナやホタル幼虫には好環境
行政が調査した水質は良好
水棲動物の棲息は可能



既往研究

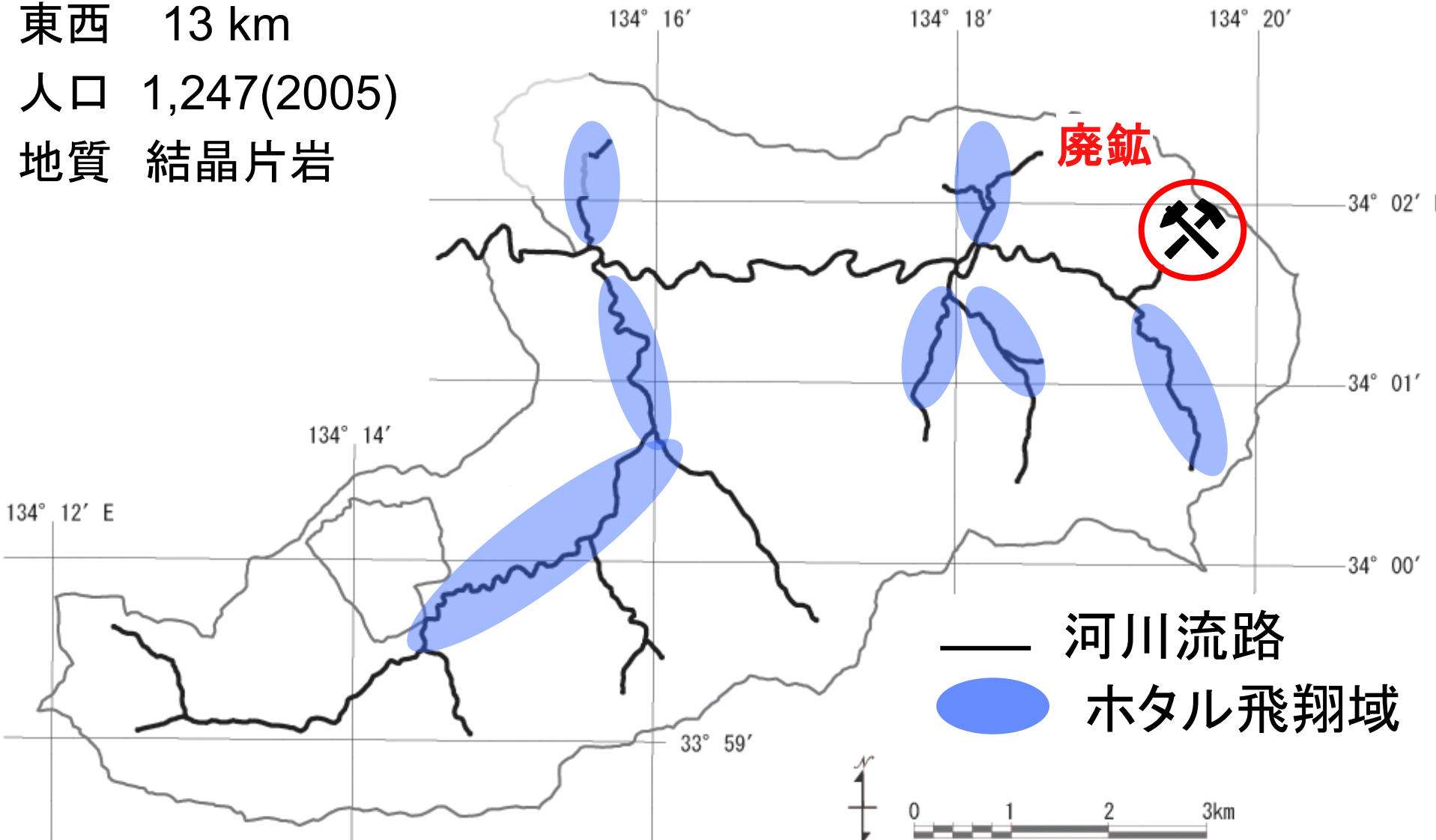
- 河川水の化学分析
 - 水質は良好
 - 環境基準をクリア
- 生物学的調査
 - 林には虫の嫌う木々が散在
 - しかし
 - 「本流域にのみホタルの飛翔が見られない」という事実に対して説明がつかない

研究・調査手法

- 現地調査
 - 電気伝導度 (EC), pH, 水温, 流速
 - 河川水と河川底質の採取
- 化学分析
 - 河川水中の溶存化学成分
 - 陽イオン 原子吸光光度法 (AA)
 - 陰イオン イオンクロマトグラフィー (IC)
 - 重金属:高周波誘導結合プラズマ発光分光分析法ICP-AES, とAA
 - 底質中の重金属類
 - フッ酸 (HF) 処理 + AA
 - 中性子放射化分析 (INAA)
- モデル計算
 - 化学量論
 - 熱力学
- 対策

調査地域 (吉野川市美郷地区)

南北 8 km
東西 13 km
人口 1,247(2005)
地質 結晶片岩



廃鉱山 (東山鉱山)



鉱石残渣(ぼた山)

- 採掘期間 1900-1930
- 採掘鉱物 銅
 - 黄鉄鉱(FeS_2), 黄銅鉱(CuFeS_2)
- ぼた山の下部
 - “赤水”が絶え間なく流出

ぼた山からの坑廃水



50 cm

流量
25 dm³/分
~ pH 4

調査地域

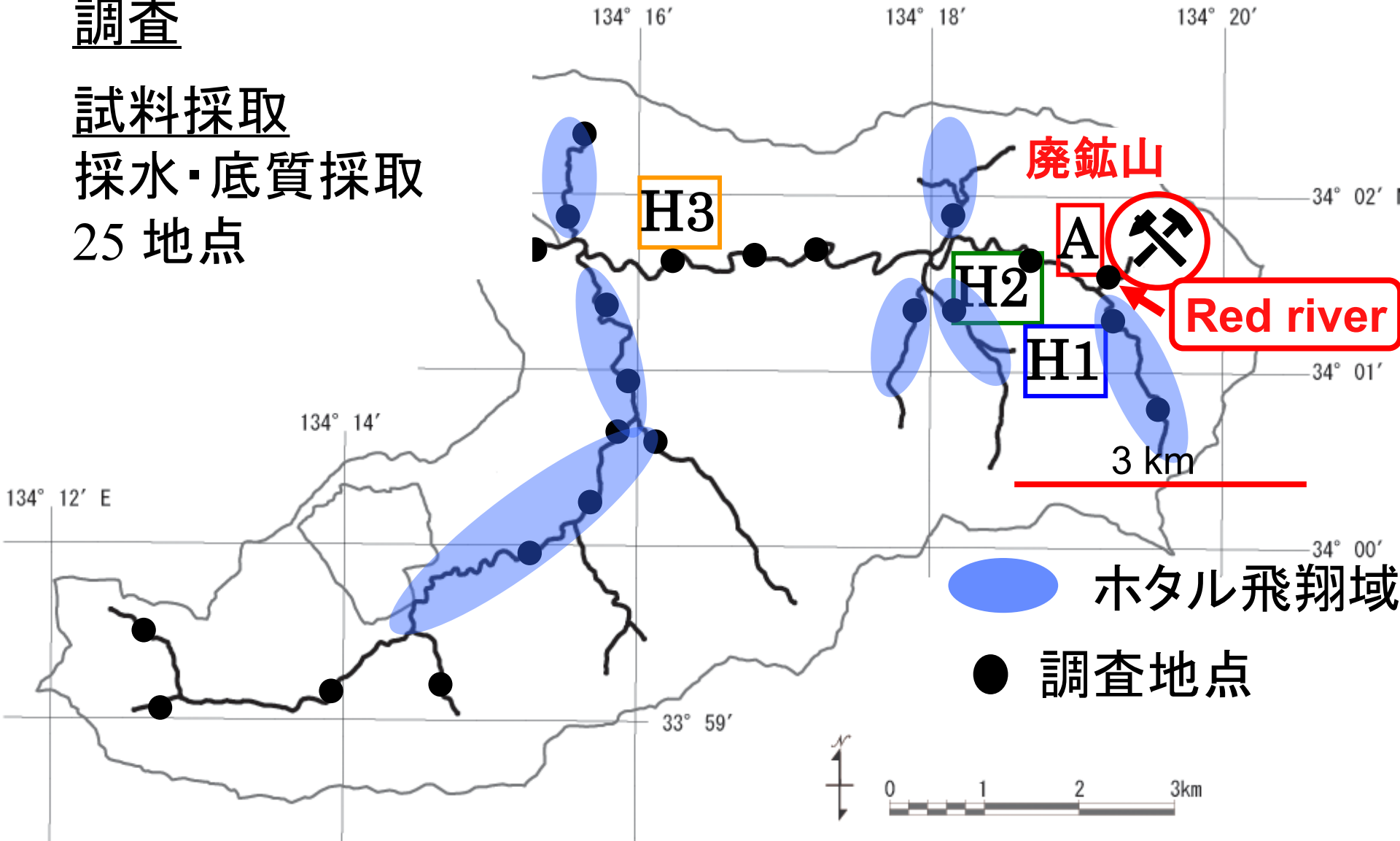
Anazawa, K., Kaida, Y., Shinomura, Y., Tomiyasu, T., & Sakamoto, H. (2004). Heavy-metal distribution in river waters and sediments around a "Firefly Village", Shikoku, Japan: application of multivariate analysis. *Analytical Sciences*, 20(1), 79-84.より

調査

試料採取

採水・底質採取

25 地点



調査地域

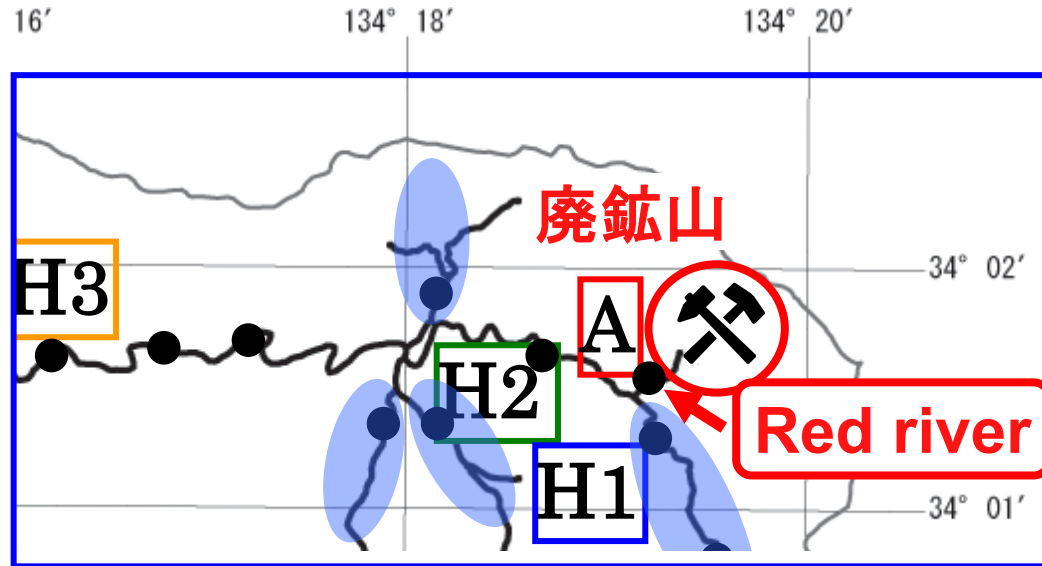
Anazawa, K., Kaida, Y., Shinomura, Y., Tomiyasu, T., & Sakamoto, H. (2004). Heavy-metal distribution in river waters and sediments around a "Firefly Village", Shikoku, Japan: application of multivariate analysis. *Analytical Sciences*, 20(1), 79-84.より

A: 坑廃水 (赤川)

H1: 非汚染河川

H2: AとH1の合流地点
下流70m

H3: 合流地点の3km下流



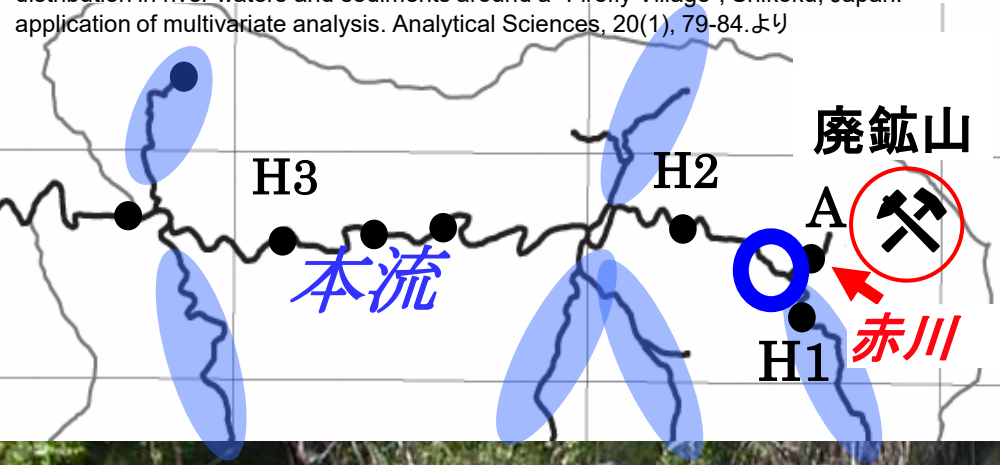
本日はこの地域に注目

● ホタル飛翔域

● 調査地点

赤川 (坑廃水)と天然河川との合流地点

Anazawa, K., Kaida, Y., Shinomura, Y., Tomiyasu, T., & Sakamoto, H. (2004). Heavy-metal distribution in river waters and sediments around a "Firefly Village", Shikoku, Japan: application of multivariate analysis. *Analytical Sciences*, 20(1), 79-84.より



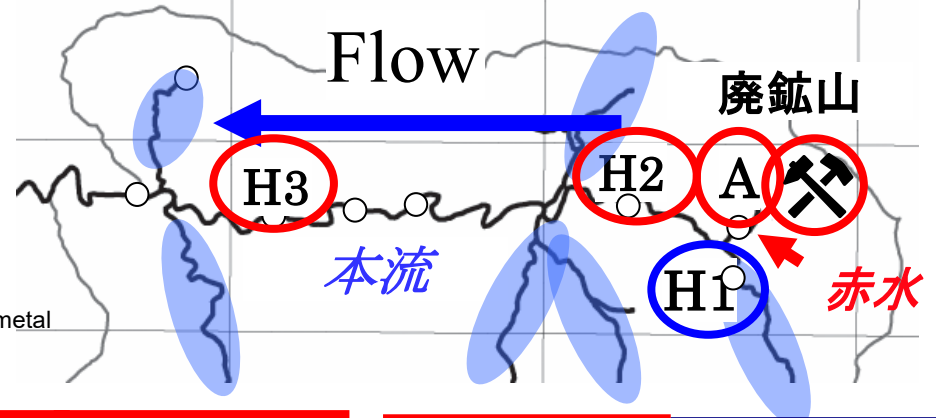
分析結果

河川水



調査風景

溶存態重金属



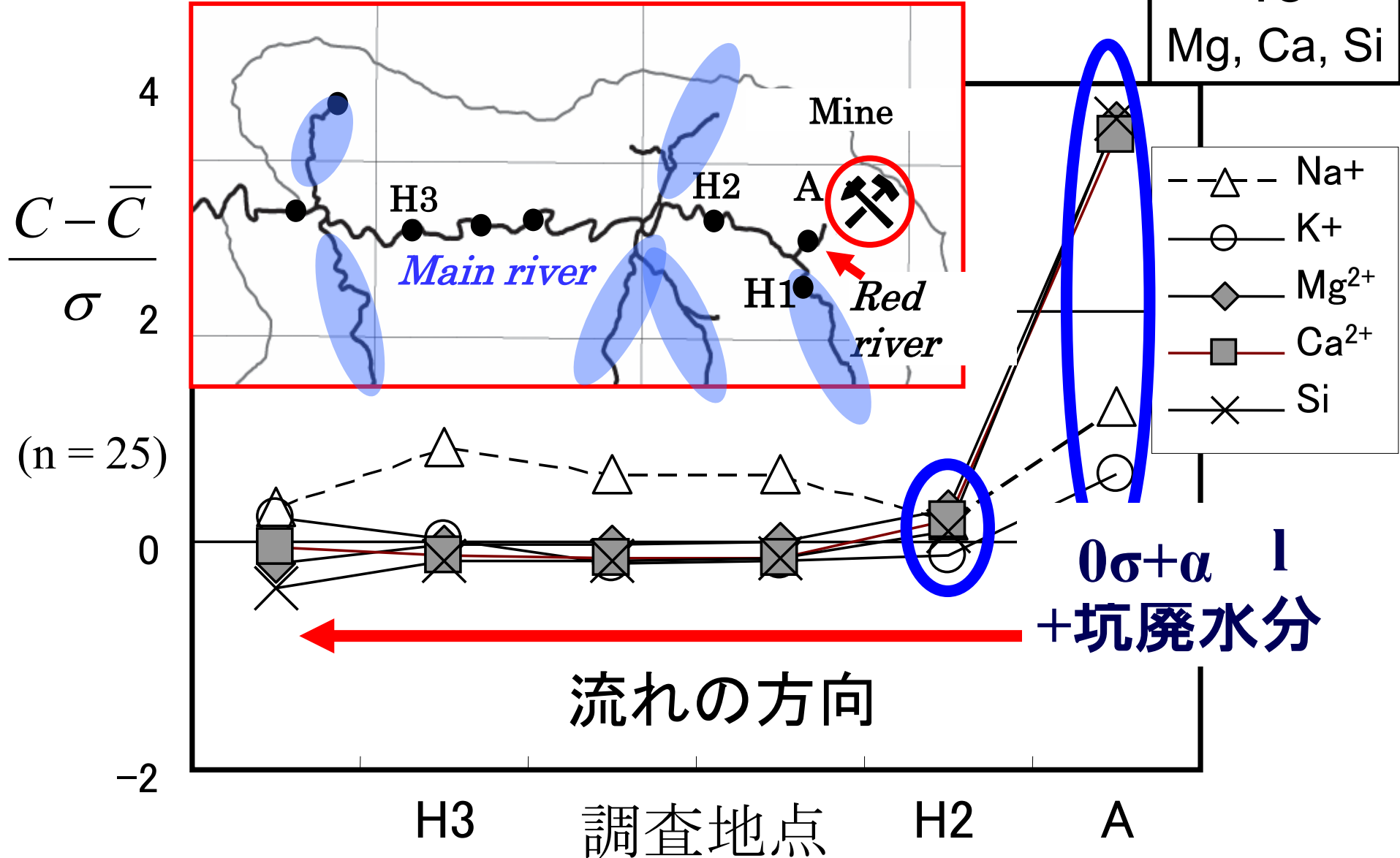
Anazawa, K., Kaida, Y., Shinomura, Y., Tomiyasu, T., & Sakamoto, H. (2004). Heavy-metal distribution in river waters and sediments around a "Firefly Village", Shikoku, Japan: application of multivariate analysis. *Analytical Sciences*, 20(1), 79-84.より

(mg/L)	H1	A	H2	H3	*水道水基準
Cu	0.01	2.64	0.10	0.02	1.00
Fe	0.03	0.19	0.01	0.02	0.30
Mn	0.00	1.16	0.07	0.02	0.05
Zn	0.00	3.77	0.12	0.04	1.00

* Drinking Water Quality Standards in JAPAN

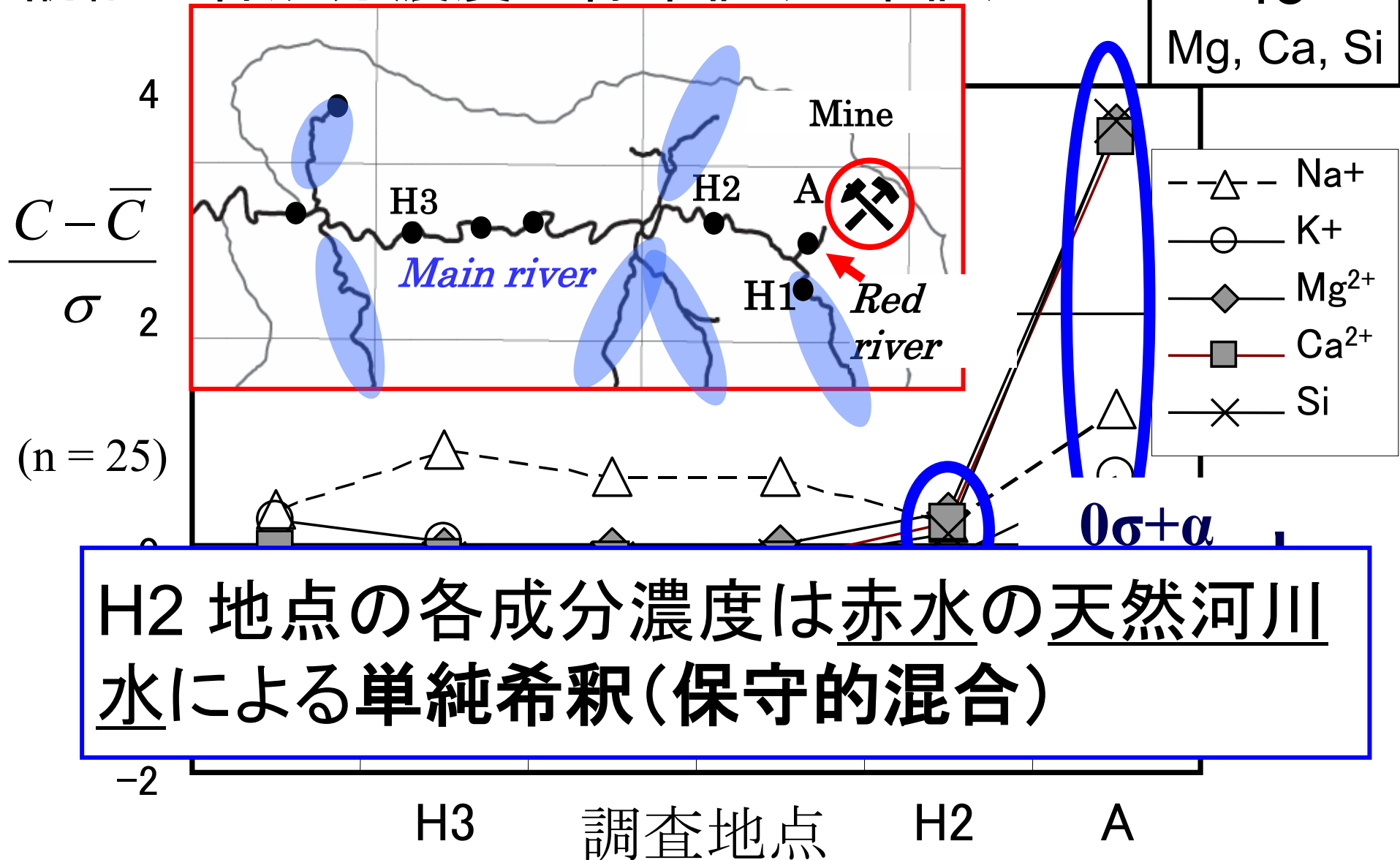
主要溶存成分

縦軸は各成分濃度の標準値(基準値)



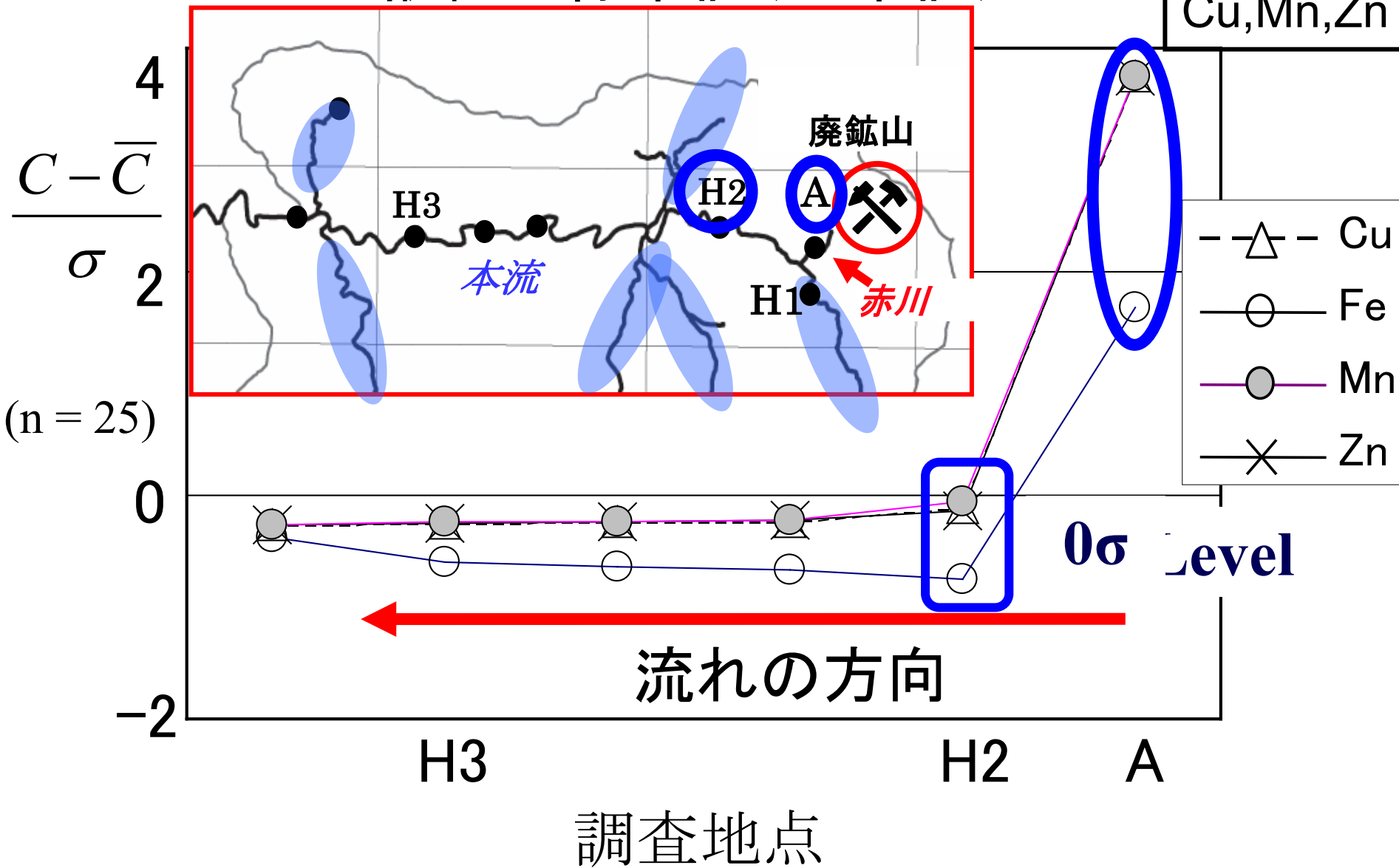
主要溶存成分

縦軸は各成分濃度の標準値(基準値)



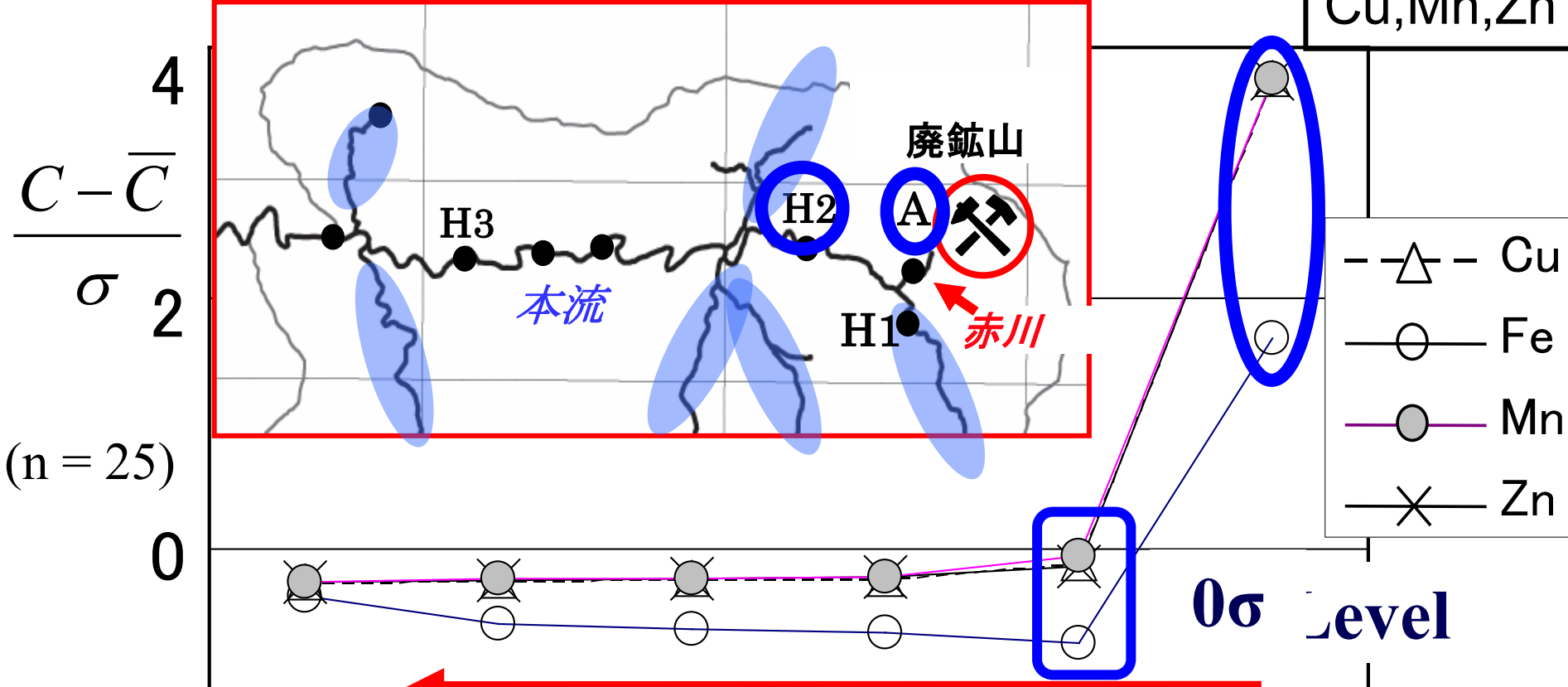
溶存態重金属

縦軸は標準値(基準値)



溶存態重金属

縦軸は標準値(基準値)



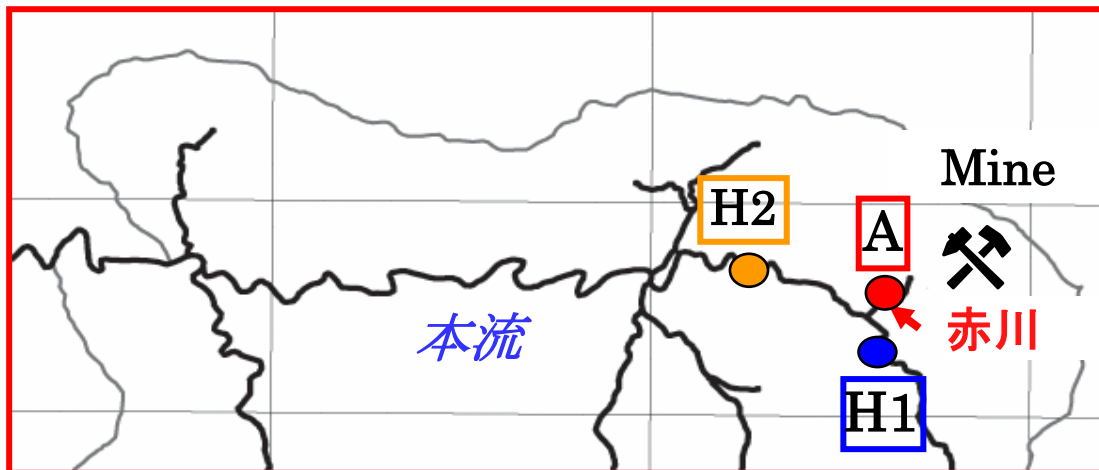
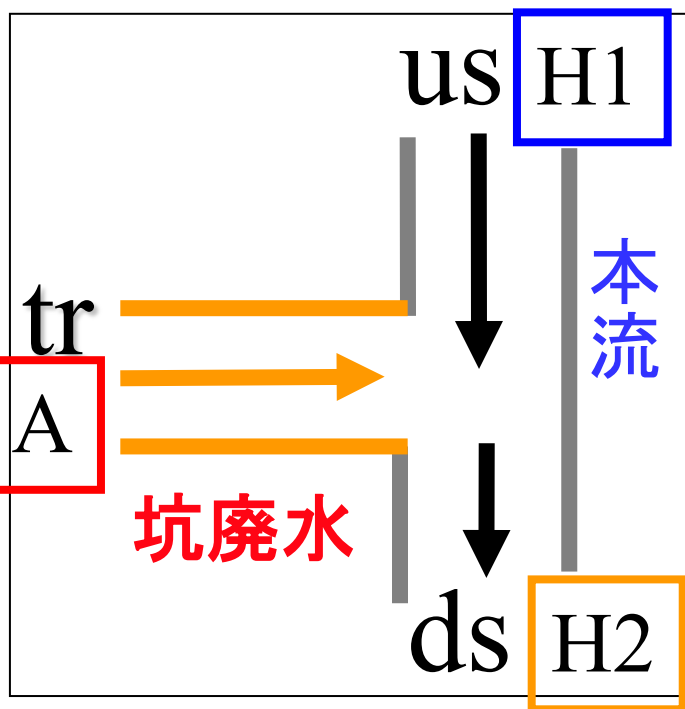
重金属類は赤川からは供給されず(A)?
 赤川の重金属はどこへ?消えた?

化学量論

希釈 / 除去 (沈殿)
の量的評価

“保守的混合”後の化学成分濃度 (C*)

$$C_{ds}^* = \{C_{us}(F_{ds} - F_{tr}) + C_{tr}F_{tr}\} / F_{ds}$$



C: 溶存濃度 (mg/L)

F: 流量 (m³/s)

us: 上流(H1)

tr: 合流地点(A)

ds: 合流地点の下流70m(H2)

Anazawa, K., Kaida, Y., Shinomura, Y., Tomiyasu, T., & Sakamoto, H. (2004). Heavy-metal distribution in river waters and sediments around a “Firefly Village”, Shikoku, Japan: application of multivariate analysis. *Analytical Sciences*, 20(1), 79-84.より

合流地点下流域の水質は

“保守的混合”によるものか“除去作用”を伴うか？

■保守的混合 (単純希釈)の場合

$$■ C_{ds(\text{測定値})} / C_{ds(\text{計算値})}^* = 1$$

■沈殿や収着による除去作用がある場合

$$■ C_{ds(\text{測定値})} / C_{ds(\text{計算値})}^* < 1$$

■岩石や地質からの付加(溶解)がある場合

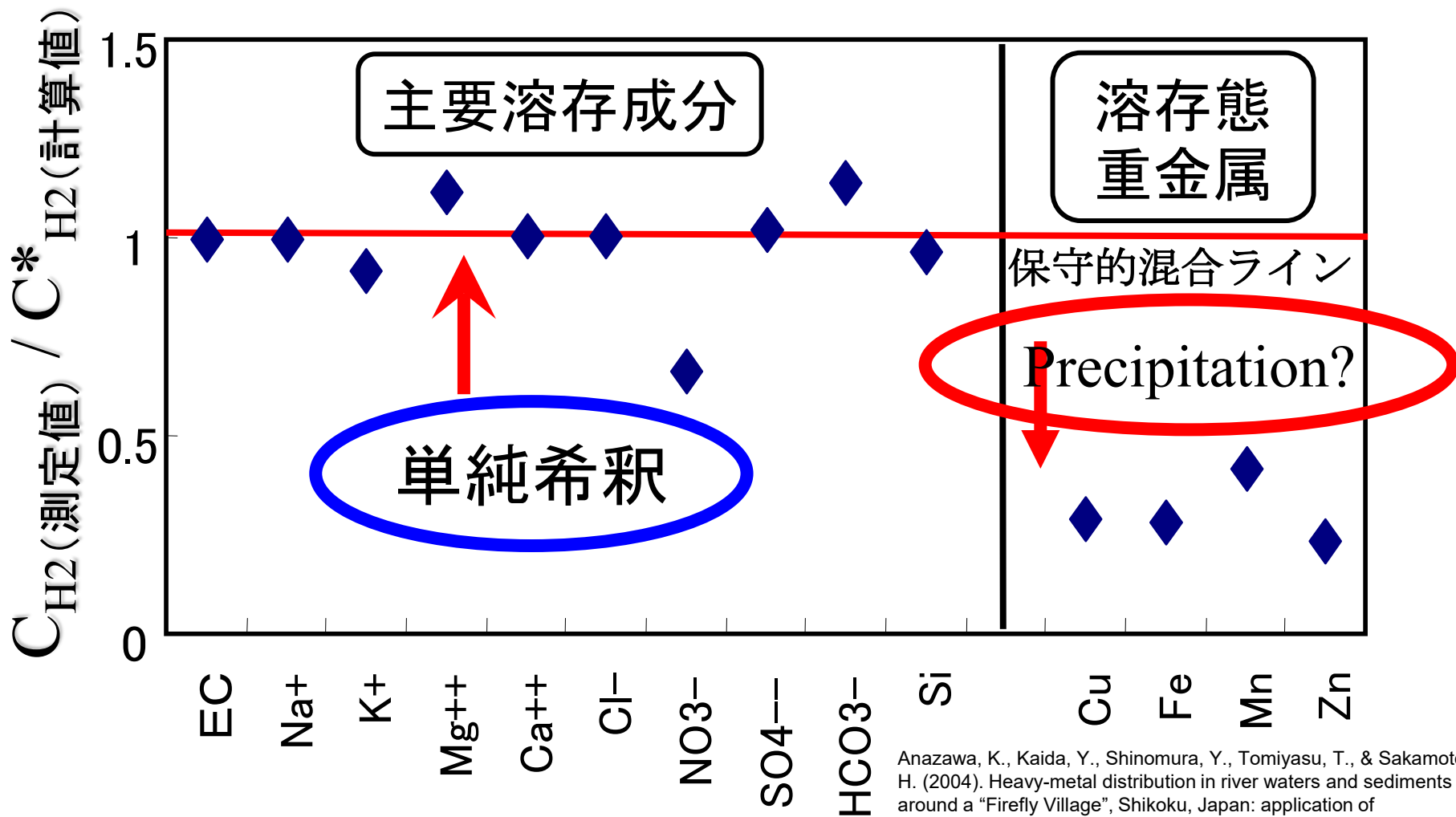
$$■ C_{ds(\text{測定値})} / C_{ds(\text{計算値})}^* > 1$$

前提条件: 分析値の高い信頼性

計算結果は現地調査と化学分析の信頼度も評価することになる

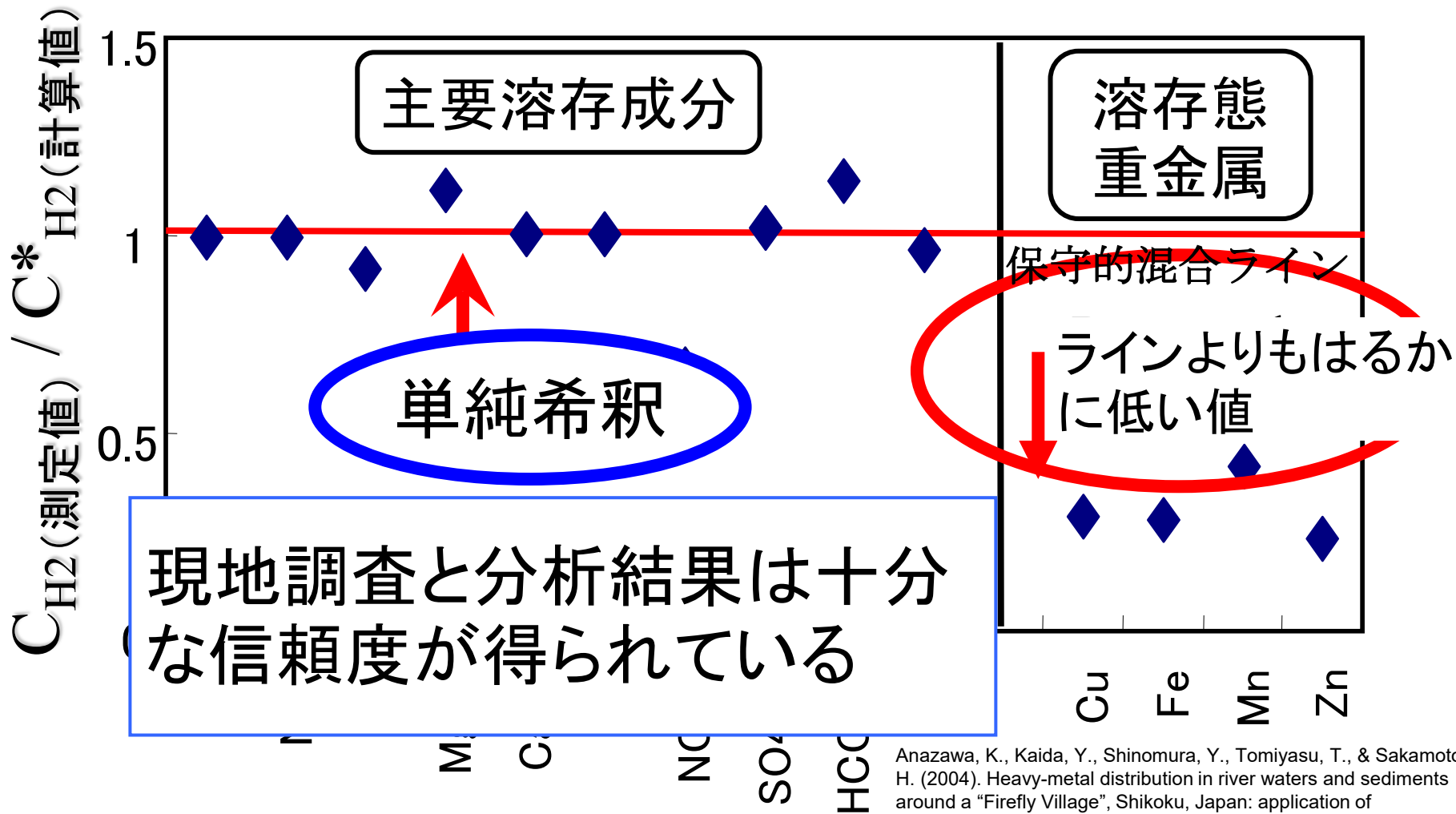
単純希釈のみか、それとも + α か？ (H2)

流量比: $F_A:F_{H1}=13:87$

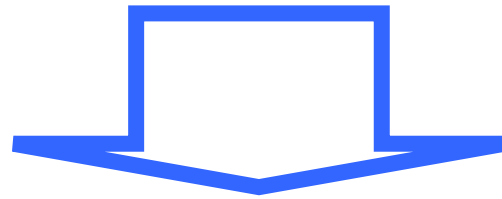


単純希釈のみか、それとも + α か？ (H2)

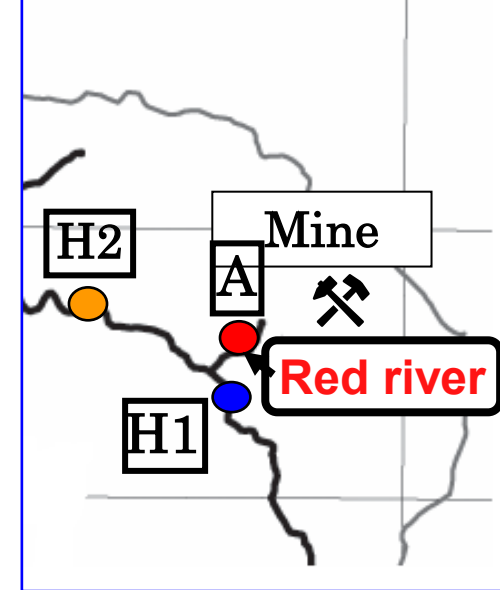
流量比: $F_A:F_{H1}=13:87$



もし溶存態重金属が
合流地点で**沈殿する**なら



河川底質中の重金属濃度はH2
で上昇するはず↑



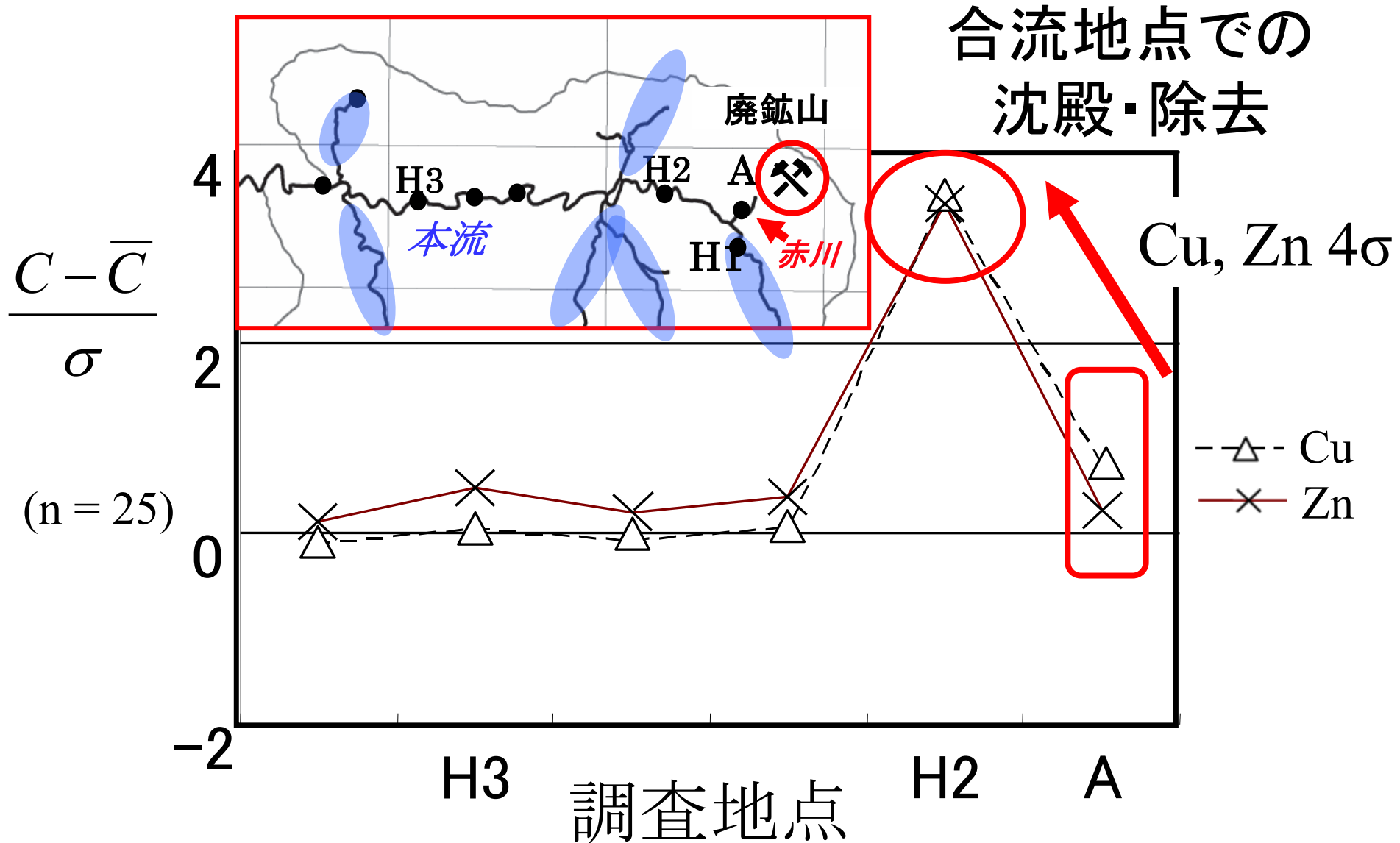
Anazawa, K., Kaida, Y., Shinomura, Y.,
Tomiyasu, T., & Sakamoto, H. (2004).
Heavy-metal distribution in river waters
and sediments around a "Firefly Village",
Shikoku, Japan: application of
multivariate analysis. *Analytical Sciences*,
20(1), 79-84.より

河川底質の 分析結果



河川底質中の重金属分析値

縦軸は標準値(基準値)

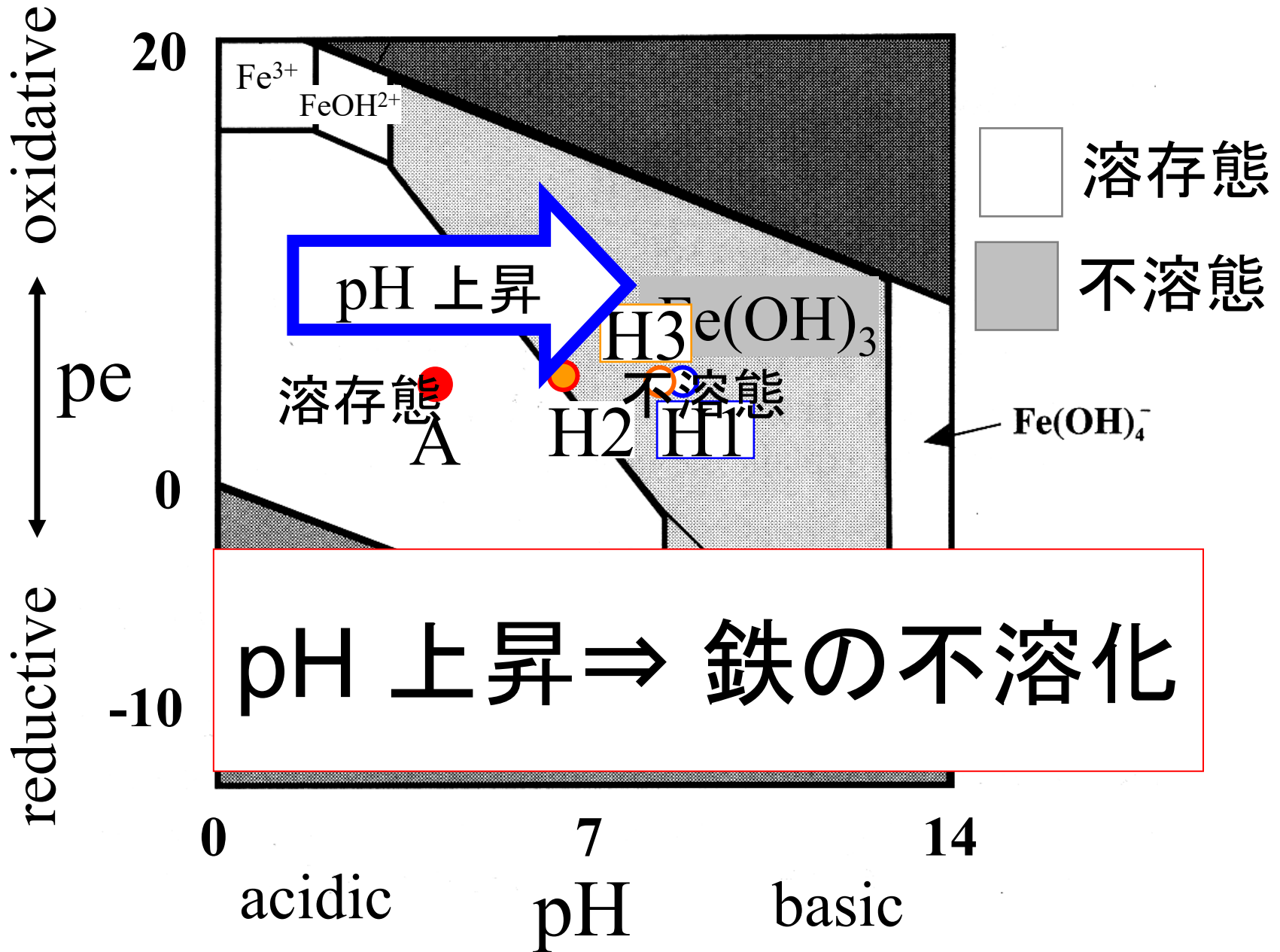


天然河川との合流地点で
溶存態重金属類が沈殿

重金属を沈殿させているもの

熱力学による検証

pe-pH diagram for Fe



坑廃水と天然水との混合による沈殿反応

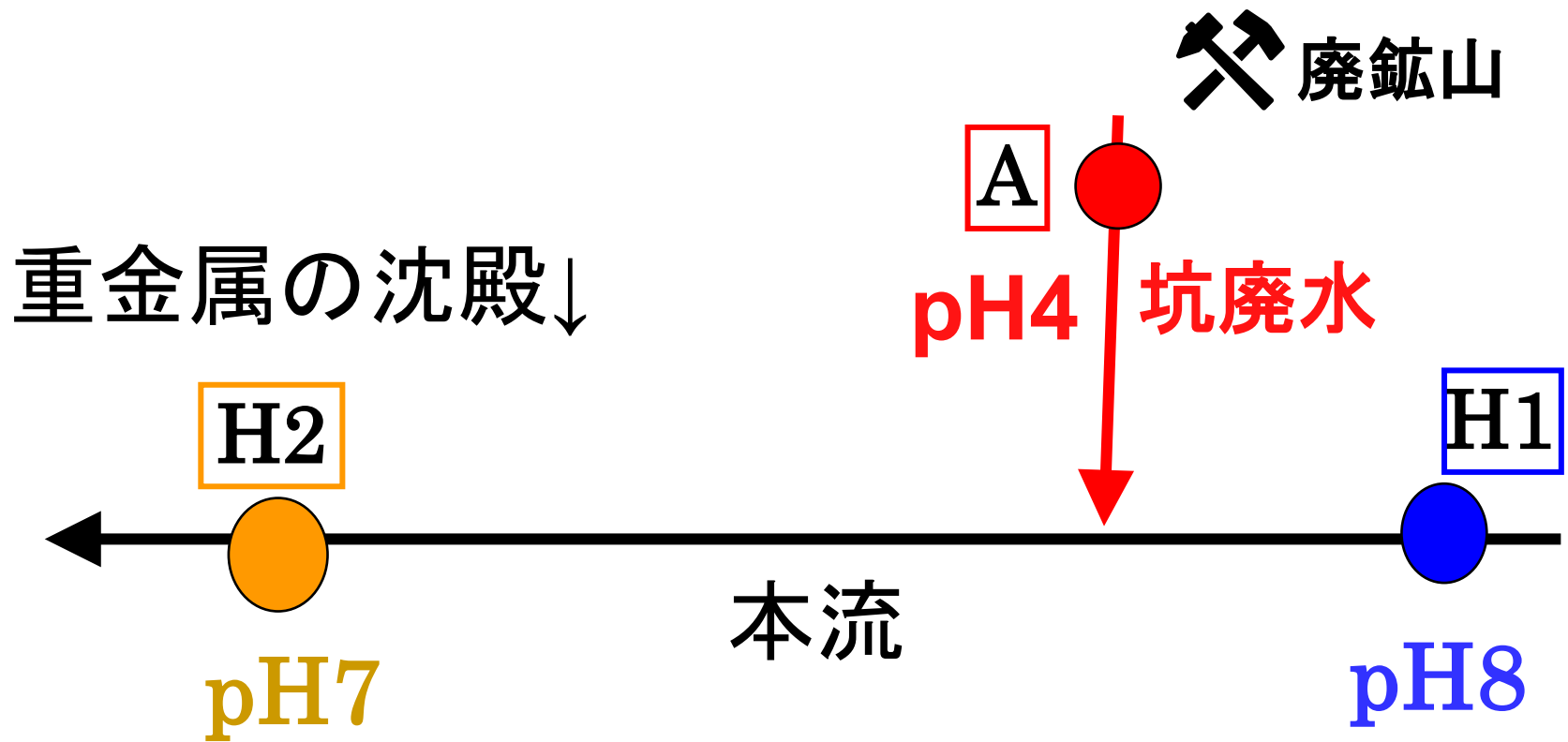
H2地点での相形態	飽和指標 (不溶性 > 0)	化学式
Hematite	16.66	<u>Fe</u> ₂ O ₃
Pyrolusite	8.10	<u>Mn</u> O ₂
ZnSiO ₃	1.51	<u>Zn</u> SiO ₃
Antlerite	0.65	<u>Cu</u> ₃ (OH) ₄ SO ₄

By thermodynamic data base Wateq4f.dat

pH 上昇 ⇒ 重金属類の不溶化

中和 による重金属類の 沈殿

重金属類 中和と沈殿



ホタルとカワニナはなぜ棲息できないのか？

河川底質中の重金属類、銅 (Cu)

原因は「水」ではなく「河川底質」

対策

この結果から何ができるか？

坑廃水問題への対策

- この地域の特徴
 - 坑廃水の特徴
 - 高濃度の Cu, Fe, Mn, Zn
 - 酸性: ~pH4
 - 費用不足: 責任者不在、負債者不在
- 対策のポイント
 - 安価
 - 低環境負荷
- 方法論
 - 天然河川に流注する前に重金属を沈殿させる
 - 中和・沈澱反応の促進

中和施設のイメージ



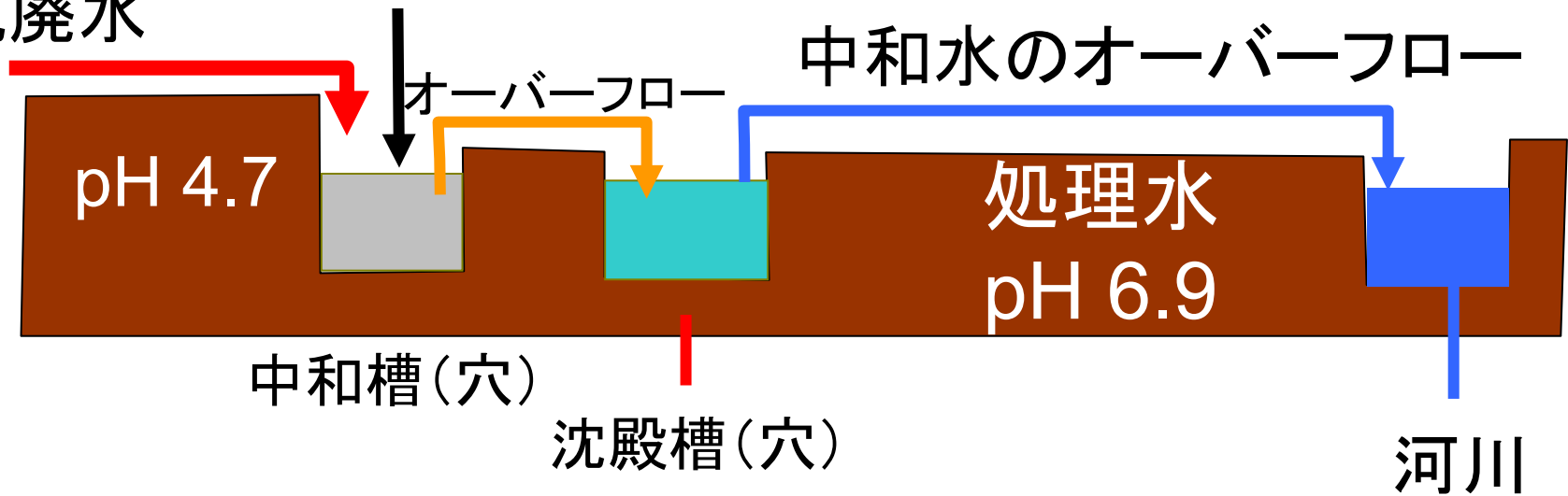
予算不足のため不可能

草津中和工場 (2008)

中和施設のイメージ

石灰粒

坑廃水

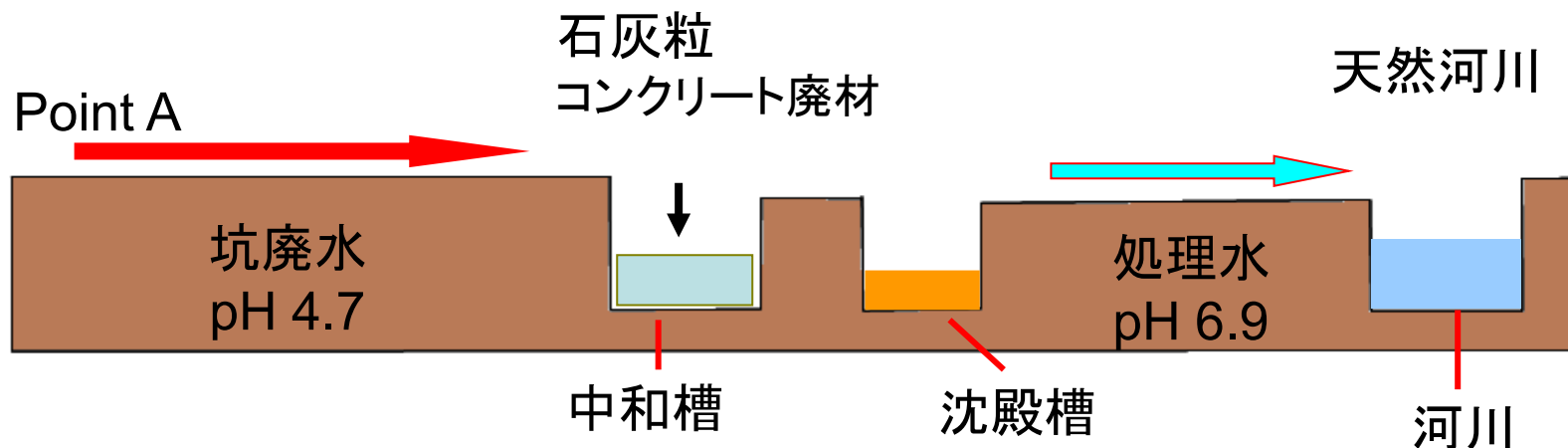


溶存態重金属類の沈澱を促進させるために河川
流路に小さな池を作り、中和剤(石灰粒100トン/
年)を投入する

費用：～約4万円/年

環境負荷と重金属除去効率の試算

- 中和剤：石灰粒(コンクリート廃材など)
- 仮定：反応効率は今回の調査結果レベル



坑廃水の化学成分の変化と重金属の除去効率

	反応前 mg dm ⁻³	反応後 mg dm ⁻³	効率(%)	沈澱量 トン/年
Cu	2.64	0.59	77	3.10
Fe	0.19	0.00	100	0.23
Mn	1.16	0.00	100	1.57
Zn	3.77	0.04	99	6.88
Ca	52.97	91.02		-32 溶解
pH	4.71	6.88		

穴澤活郎, 篠村善徳, 富安卓滋「「ほたるの里」徳島県吉野川市美郷地区における坑廃水の重金属挙動と対策試案」.環境情報科学論文集 Vol. 21(2007)より

石灰の溶解による環境負荷

- 溶存態カルシウムの年間溶解量

- Ca²⁺ : Δ32(トン/年)

- Ca²⁺ の現行流量は 369(トン/年)

- i.e., 本流 (H3)における Ca²⁺ 18mg/L は

- ⇒ 20 mg/L に上昇

- 20 ppm は日本の典型的河川のカルシウム濃度

- 溶存態カルシウムの環境負荷は受容可能レベル

費用の試算

- 化学反応効率 10%
- 投入石灰量(CaCO_3) 80トン / 年
- 石灰購入費 24,000円 / 年
- 人件費その他 20,000円 / 年
- 総費用 44,000円 / 年

After Mining Environment Management, May 2000、pp.18-19

ホタルの郷

- 含有重金属の坑廃水
 - 天然河川との合流地点で中和・沈殿
 - 合流地点で溶存態重金属は水相から除去
- 対策 (シミュレーション)
 - 方法: 中和・沈殿
 - 反応効率
 - 鉄・マンガン・亜鉛: ~99%
 - 銅: 77%

まとめ

中和事業

- 下流域に多大な環境影響
 - 保守管理が大変
 - 事業を継続するのが困難になることも
- 一度開始するとやめることができない
 - 下流域では上流域の中和処理が前提での開発が進められている
- 小規模な酸性河川は全国に散在
 - 小規模な中和？ 放置？