平成30年8月23日(木)
第34 回バックエンド夏期セミナー
“処分の信頼性、安全、技術連携・統合”
TKP ガーデンシティ仙台

ナチュラルアナログ研究のすゝめ

Vol. 2 No. 1 & 2 放射性廃棄物研究 February 1996

特集 ナチュラルアナログ

ナチュラルアナログ研究のすすめ*

湯佐泰久**

資源地質, 53(2), 193~200, 2003

廃棄物処分のナチュラルアナログ研究
ーあまりアナログにこだわるなー*

佐藤 努**・福士圭介***

Vol. 2 No. 1 & 2 放射性廃棄物研究 February 1996

ナチュラルアナログ研究の再考*
ー東濃ウラン鉱床における研究を例にしてー

吉田英一**

ナチュラルアナログ；自然に学ぶ地層処分 657

解説

ナチュラルアナログ；自然に学ぶ地層処分
数万年先を予測する工学技術とは？ 第3回(最終回)

原子力発電環境整備機構 北山 一美,
北海道大学 佐藤 努, 名古屋大学 吉田 英一

北海道大学 大学院 工学研究院
環境循環システム部門 環境地質学研究室

佐藤 努

e-mail: tomsato@eng.hokudai.ac.jp

地層処分屋、特に若い皆様へのメッセージ（2009年8/28天声人語より）

気象予報官にもタイプがあって、その昔は「屋上派」と「地下室派」がいたそうだ。（中略）▼屋上派は屋上で空を眺め、風を確かめる。実況に照らしてデータを修正して予報を出す。片や地下室派は、部屋にこもって資料とにらめっこをする。解析技術は高いが、降っているのに「晴れ」と予報するぐらい、実況には無頓着な人たちなのだそうだ。

（中略）医者がパソコンばかり眺めて、患者の顔を見て診察しない。数値に頼って患者の訴えを聞かない。（中略）科学的根拠に基づく医療が行きすぎたゆえの問題らしい▼その反省から「ナラティブ・ベイスト・メディシン」というのが提唱されているそうだ。訳せば「物語に基づく医療」となる。聞き慣れないが、つまりは話をよく聞き、「ひとりの人間としての患者」を忘れない医療である。

ナラティブ・ベイスト・エンジニアリング

説明会等での意見・質問

国内には地層処分適地はないと思います。

地震や火山がたくさんある日本でも、事実として、80万年前の化石が残っているところはありますよ。

でも、砂や泥に埋まった化石がすべて残っているわけではないのです。溶けたり、粉々になった化石もあるのです。

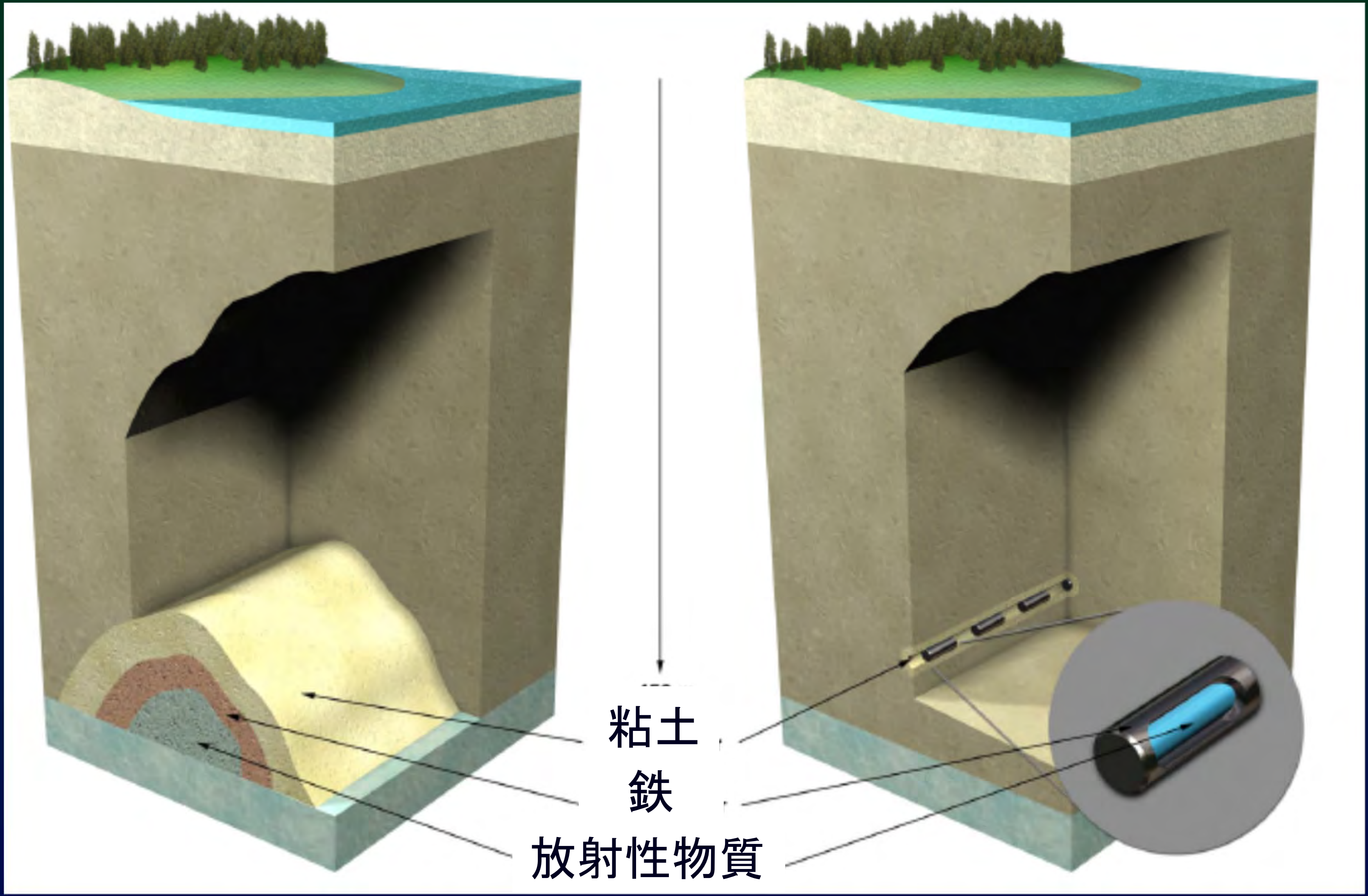
本当にそんな長い間保存（隔離）できるんですか？

大事なことは、どういう条件がそろっていたから残ったのかを、処分しようと考えている人が理解して、説明できるかどうかなのです。

その条件がそろっているところを見つけることができれば、我々も廃棄物を残すことができるのです。

https://tadanoe.com/post-2250

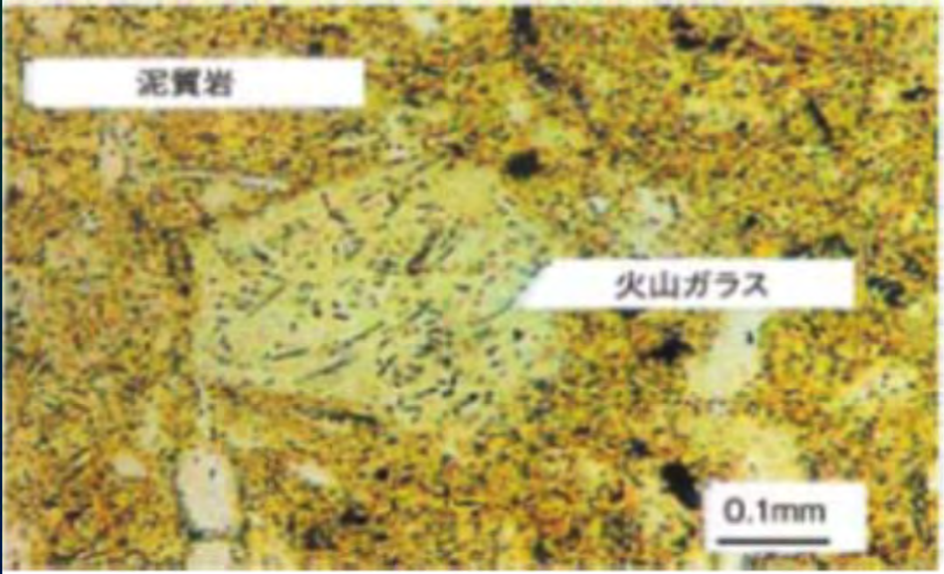
ナチュラルアナログ(NA)研究で示されてきた事例



シガーレイクウラン鉱床と廃棄物処分概念の対比(約13億年前に形成)

NA研究や考古学研究で示されてきた事例

100万年前の火山ガラス



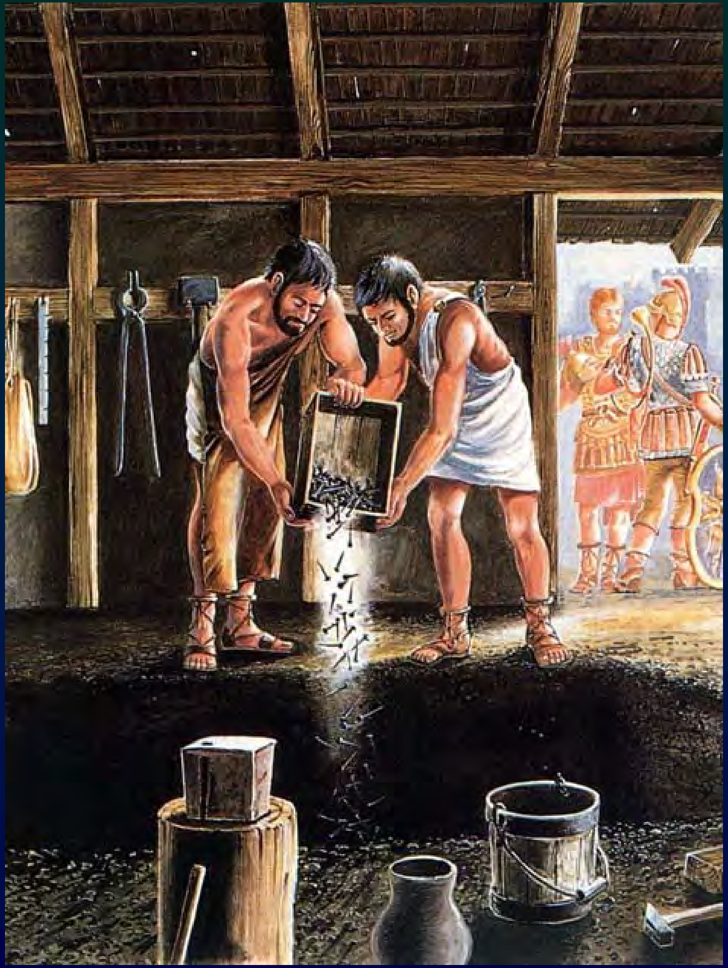
およそ100万年前に堆積した泥質層の中に埋まった「火山ガラス」からは、ガラスの成分の溶けだしがほとんどないことが確認されている（千葉県にて産出）

堺市下田遺跡から発掘された銅鐸
粘土の中で、1800年間腐食がほとんどなく、金属光沢が保たれていた

写真提供　（財）大阪府文化財センター

考古学研究で示されてきた事例

87年



ローマの要塞

５ｍの深さに埋蔵

埋蔵後に覆い土

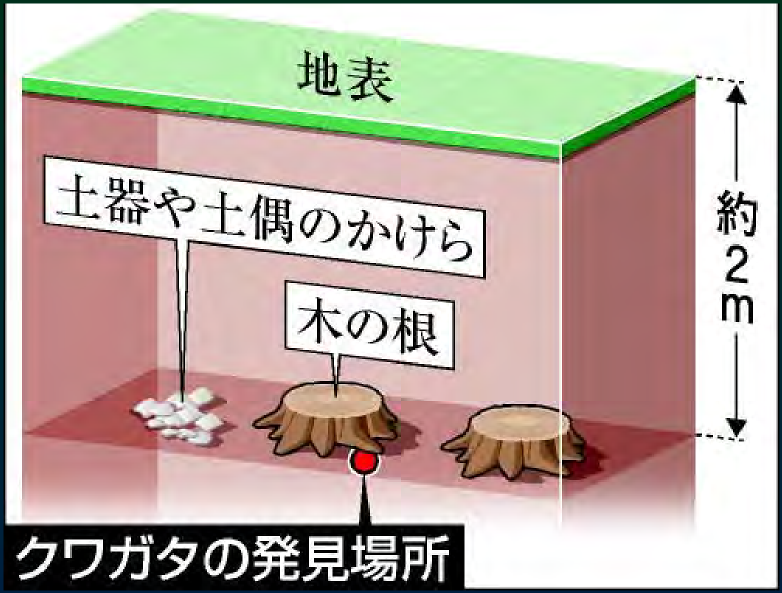
→

1950年に要塞跡発見

発掘

1950年

2500～2800年前のノコギリクワガタが奈良で出土



2011.5.24　日経新聞

NA研究の示し方への批判

藤村 陽　石橋克彦　高木仁三郎

「高レベル放射性廃棄物の地層処分はできるか II
−地層処分の安全性は保証されてはいない−」

ナチュラルアナログをどう理解するか

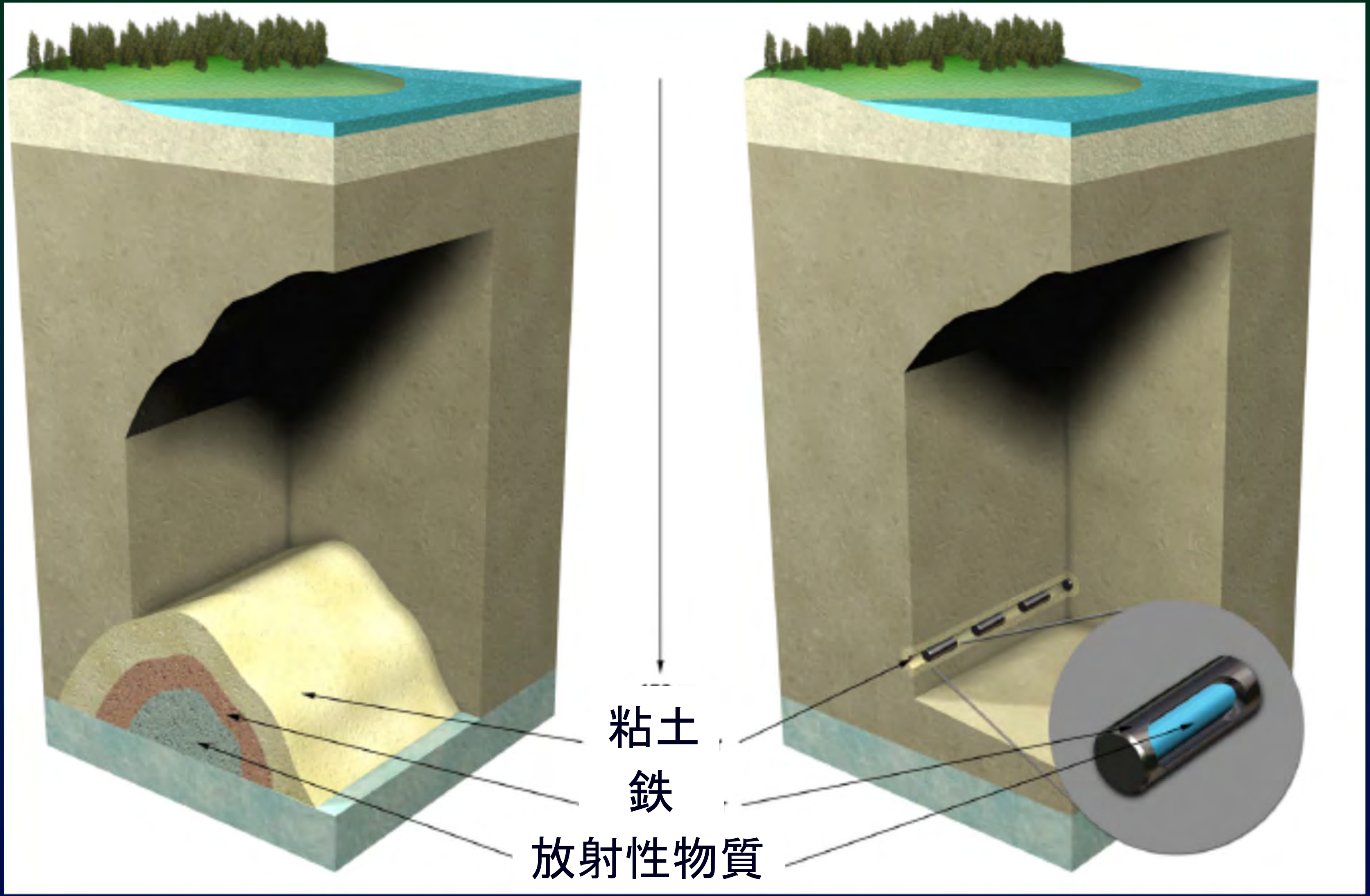
「ナチュラルアナログとは、古代のガラスや金属がいまも形を保って出土したり、ウラン鉱床のウランが何千万年や何億年も動かずに保存されていたといった類のものである。当然のことだが、形が残っていなかったり移動してしまったものについては何もわからない。
(中略)
大事なのは、地質中に保存された場合と保存されなかった場合の条件の違いを明らかにして、望ましい条件が現実の処分場でどれだけ長期間確実に実現するのかを検討することである。」

岩波書店『科学』2001年3月号264～274頁

ナラティブ・ベイストな地層処分研究としてのNA研究

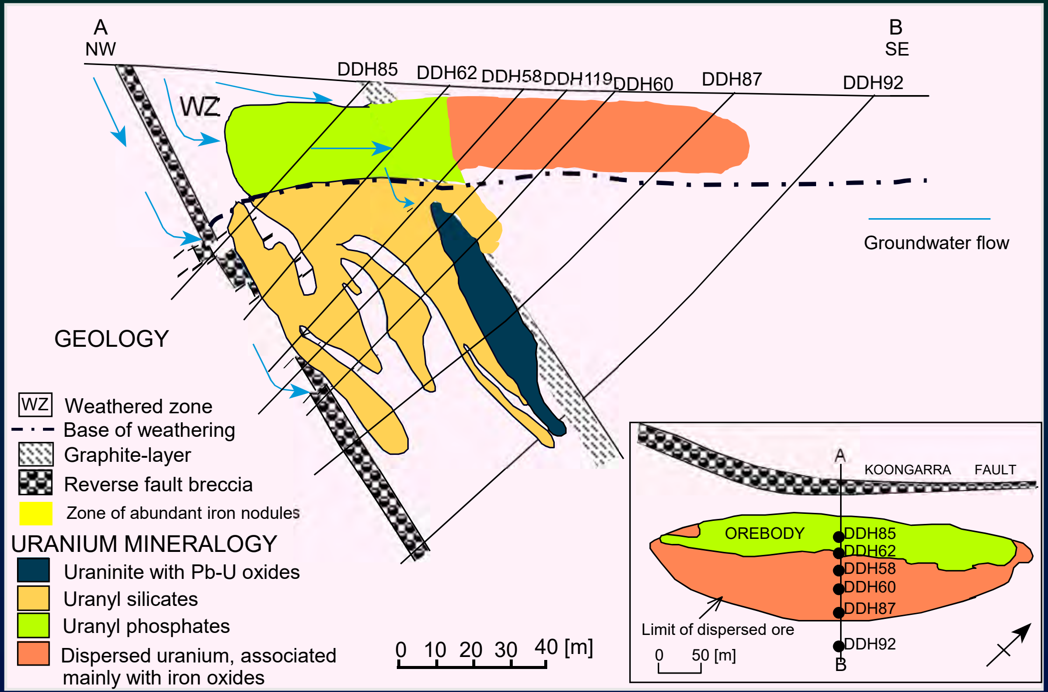
- 豪国クンガラウラン鉱床におけるNA研究
  - UやThなどの地質媒体中での挙動
- フィリピン国ルソン島セイル鉱床におけるNA研究
  - ベントナイト－高アルカリ地下水相互作用
- フィリピン国パラワン島ナラ地区におけるNA研究
  - 高アルカリ地下水からのスメクタイト、C−S−H、M−S−Hの生成とクロッギング

ナチュラルアナログ(NA)研究で示されてきた事例

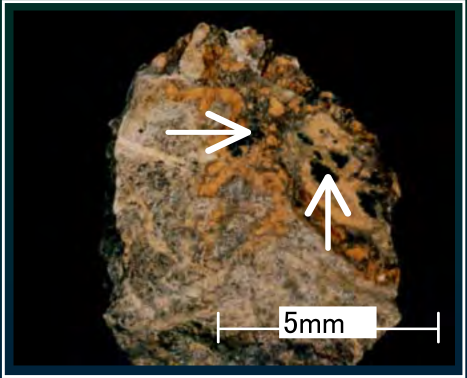


シガーレイクウラン鉱床と廃棄物処分概念の対比(約13億年前に形成)

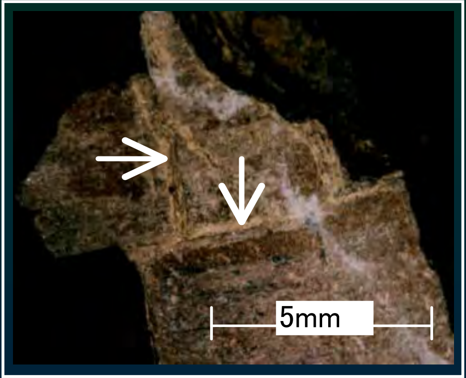
ウラン鉱床が浅い地層に有る場合の研究
断層の近くにウラン鉱床がある場合の研究



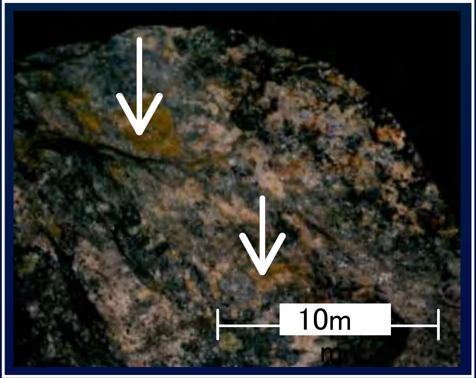
クンガラウラン鉱床の断面図と鳥瞰図



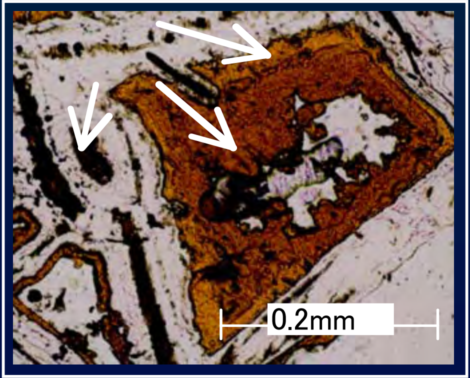
ウラニナイト



スコロドウスカイト



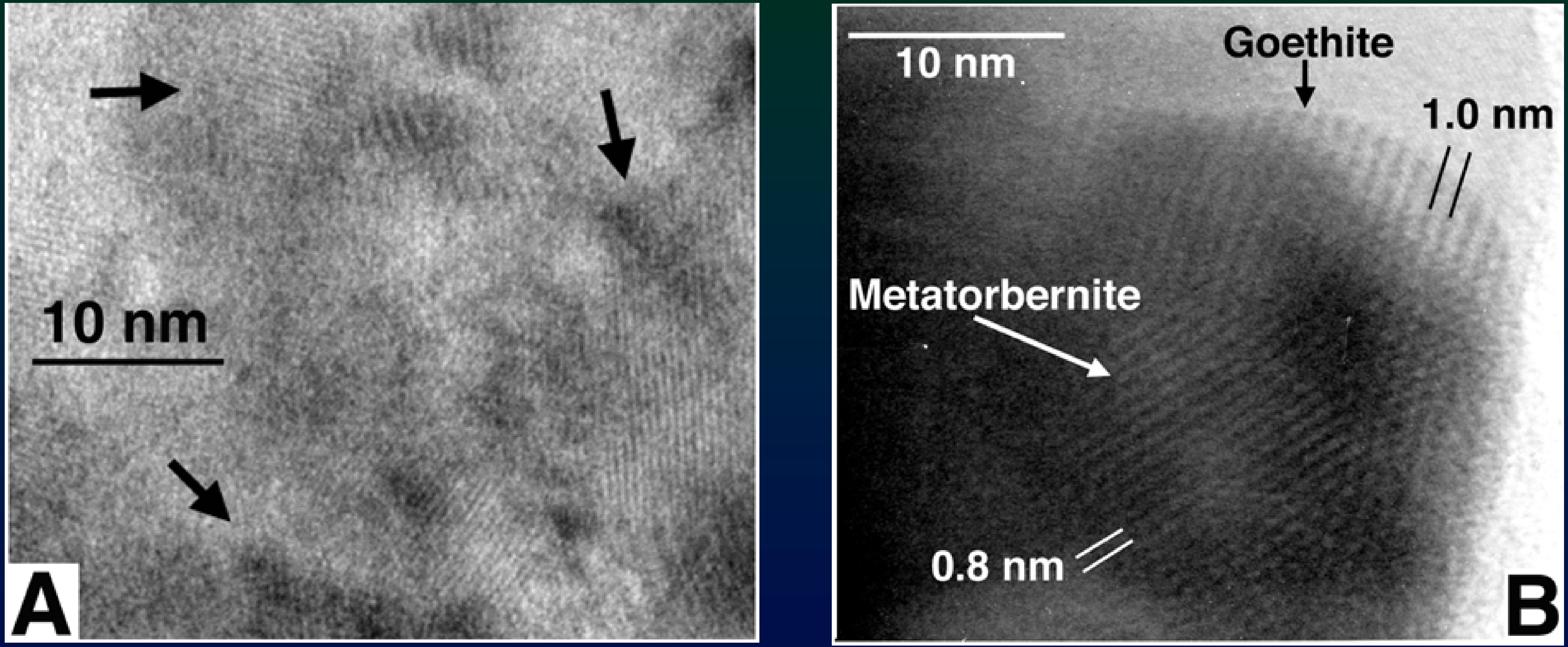
サーレアイト



鉄鉱物

吸着後の相変化にともなう微細鉱物の生成

ゲーサイト、ヘマタイトへの結晶化とともにメタトーバナイトの微細結晶が認められる

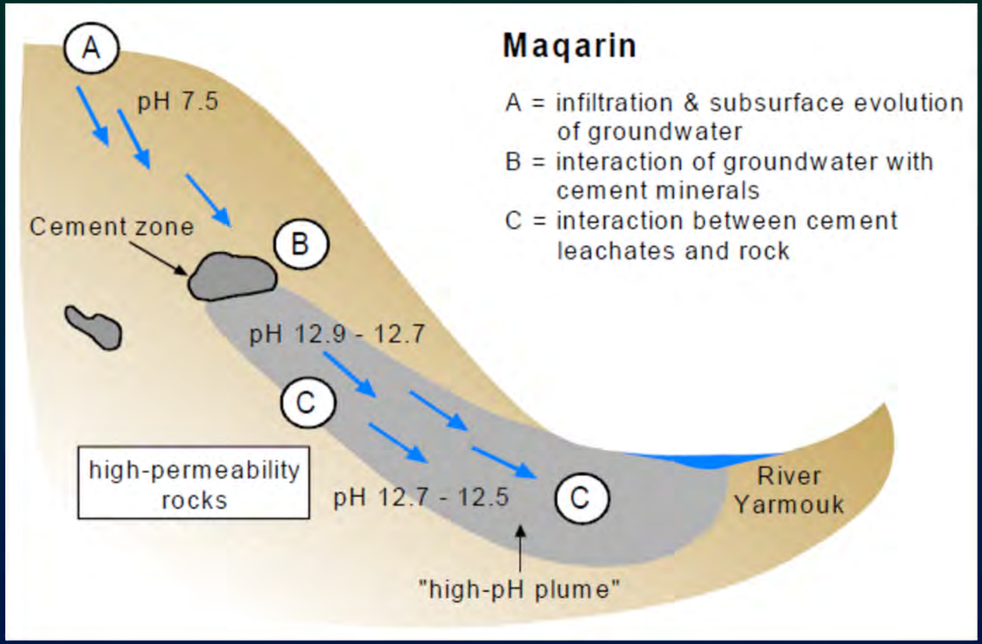


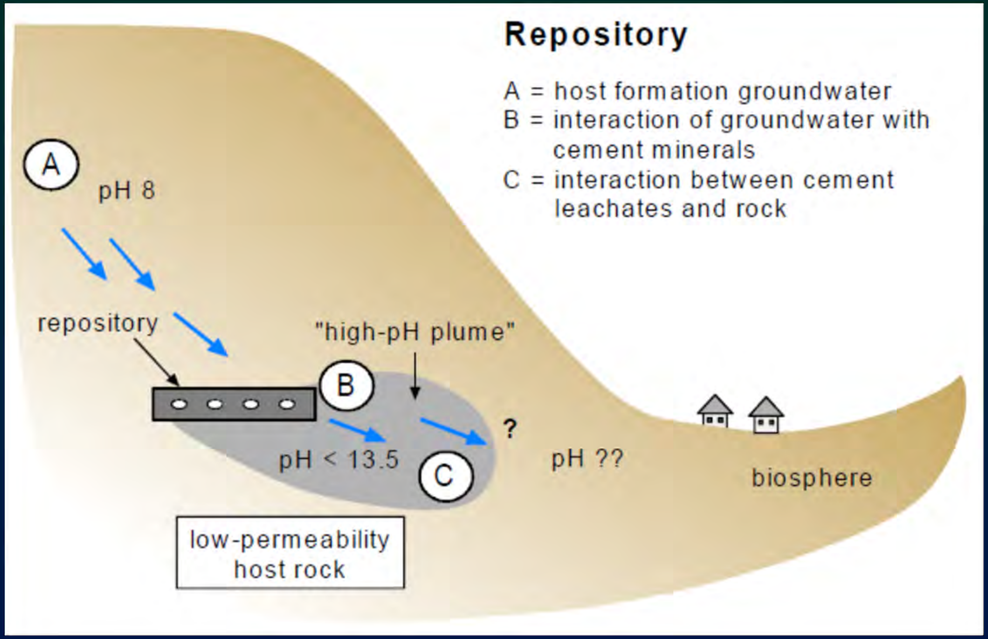
ウラン、リン酸、銅が吸着したフェリハイドライトの相変化後のHRTEM像
（Murakami et al., 2002）

クンガラウラン鉱床が我々に教えてくれること

- 地表付近で、大きな断層が鉱床を直撃して、酸素を含んだ大きい流速の地下水が流入し、U(IV)の鉱物（ウラニナイト）と200万年反応すると、ウランは酸化してU(VI)となり下流に移行する。
  - ウランが酸化してU(VI)となっても、鉱物化や吸着等の様々な作用で、下流への移行は制限される。
- 地表付近であっても、酸素を含んだ地下水と反応せず、還元条件が保たれていれば、たとえ大きな断層が近くに生じたとしても、ウラニナイトは200万年以上の間保存される。

高アルカリ環境のナチュラルアナログ研究



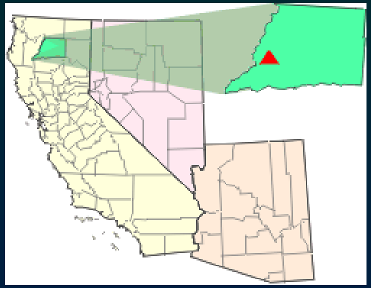


マカリーンナチュラルアナログサイトと廃棄物処分概念の対比
(from Alexander and Mazurek, 1996)

地球表層でのpHの極限環境

pH −3.6

Richmond Mine, Iron Mountain, CA



PNAS, Vol. 96, Issue 7, 3455-3462, 1999

$$4FeS_{2(s)} + 15O_{2(g)} + 14H_2O_{(l)} \dashrightarrow 4Fe(OH)_{3(s)} + 8SO_4^{2-}{}_{(aq)} + 16H^+{}_{(aq)}$$

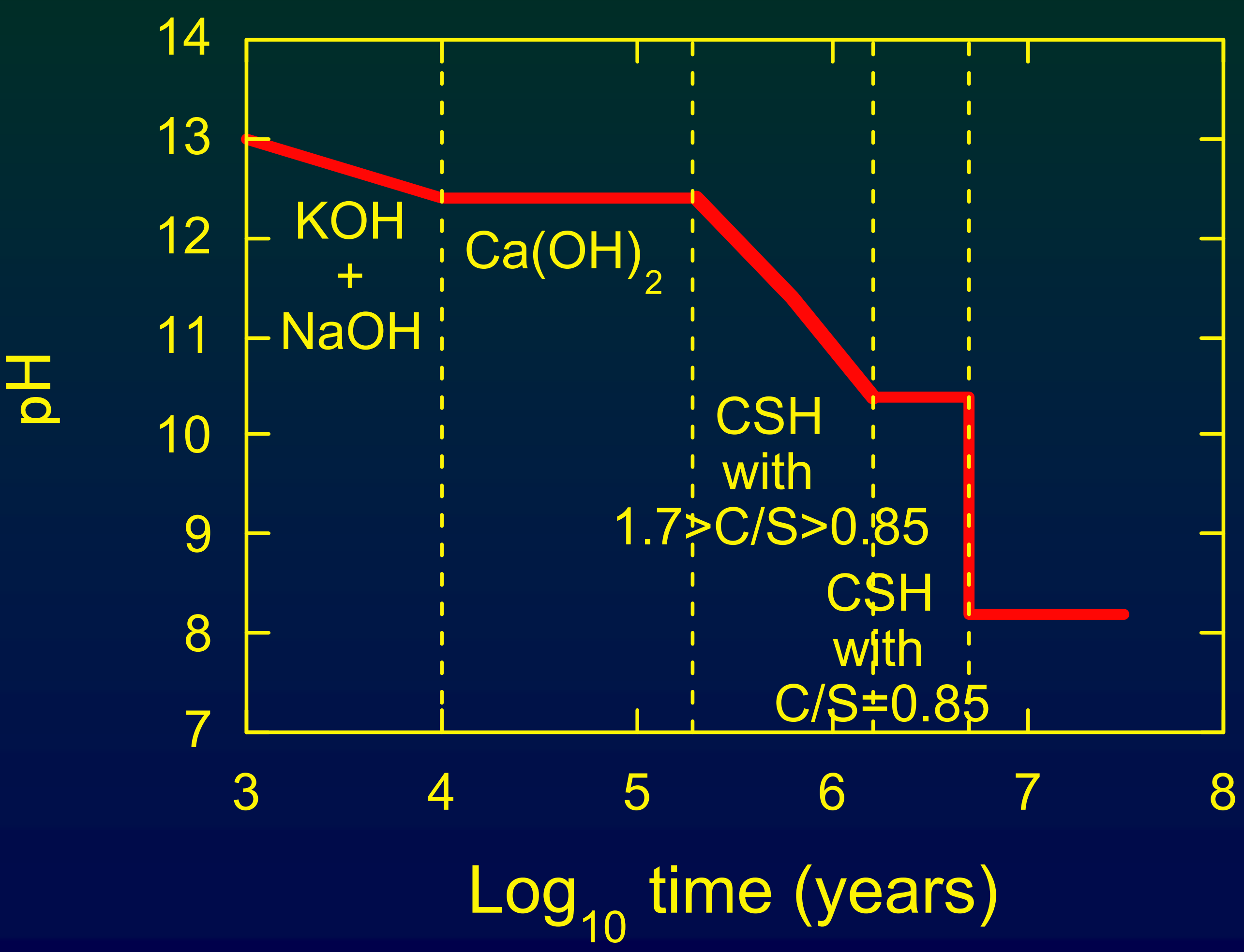
pH 12.9

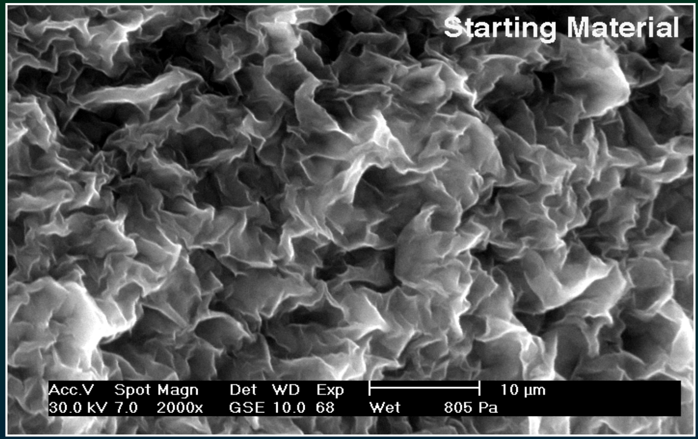
Maqarin, North Jordan

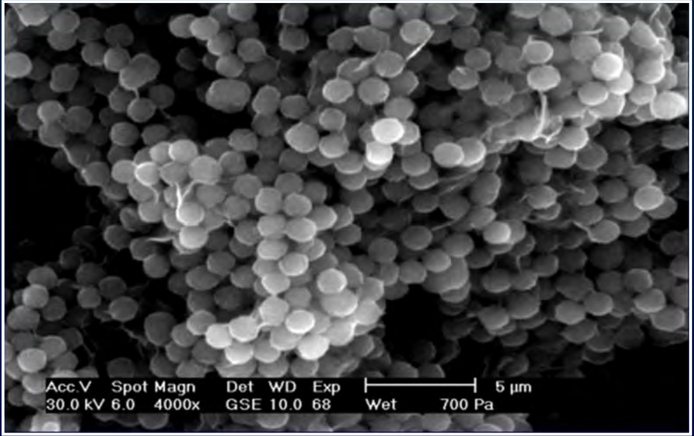
http://www.natural-analogues.com/

オマーンの超塩基性岩周辺に認められる高アルカリ地下水ー地表水相互作用のナチュラルアナログ

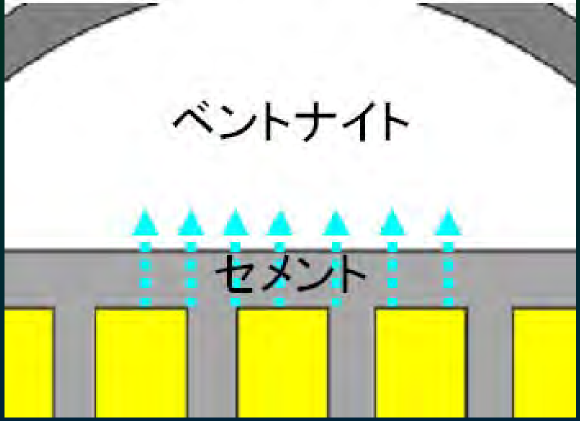
高アルカリ溶液(NaOH)と反応すると
スメクタイトはゼオライト(アナルサイム)に変質





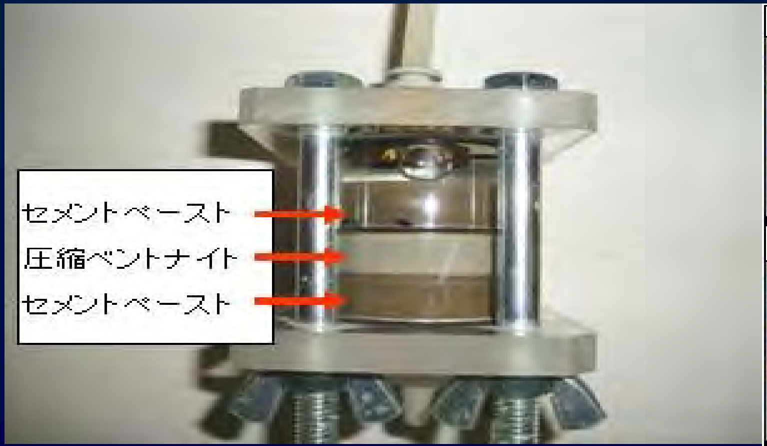


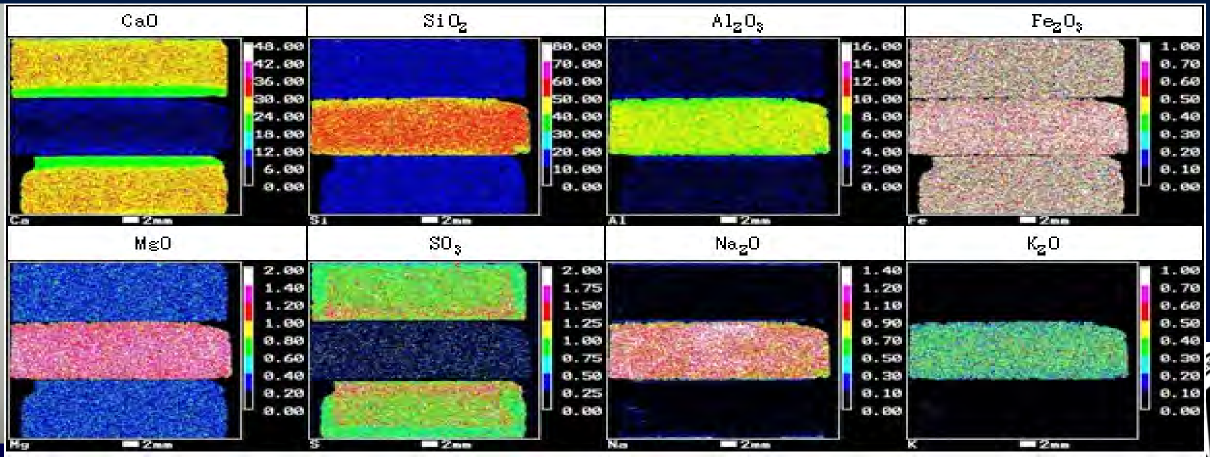
ベントナイトーセメント界面における反応を理解するための実験的研究



地層処分概念図

室内実験系





HMC連成解析

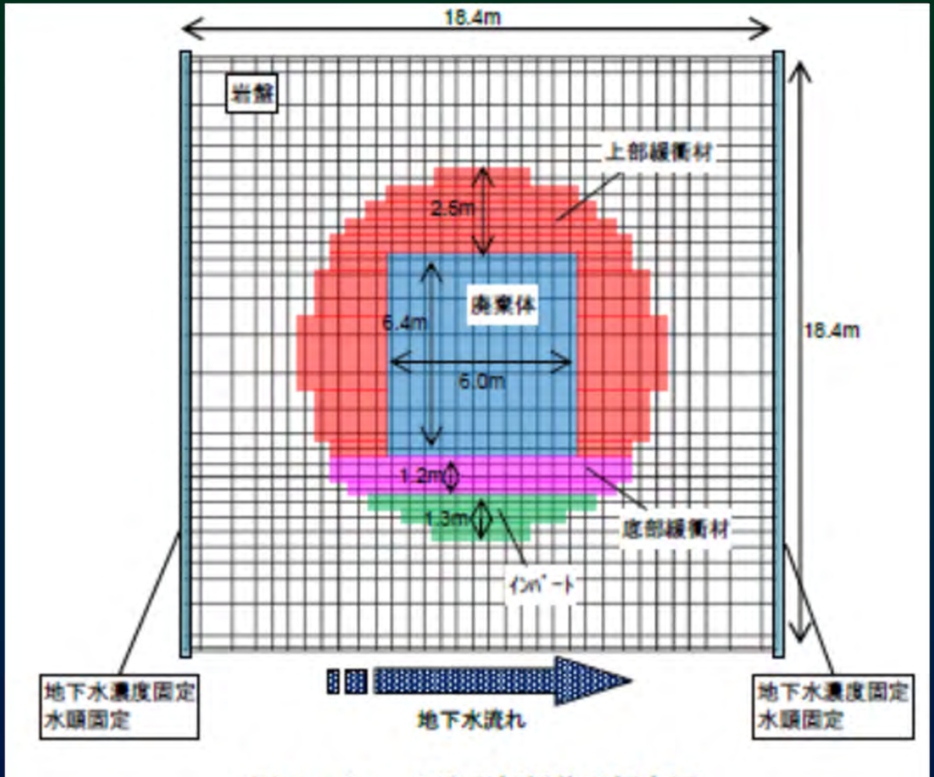
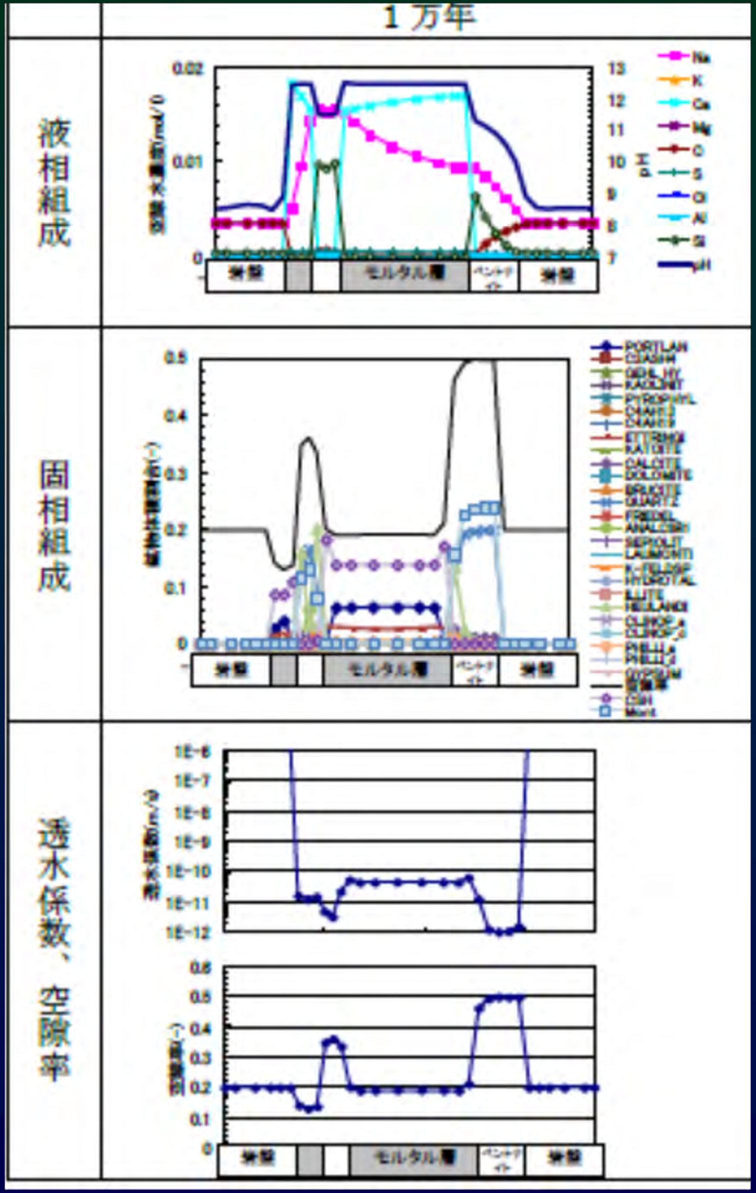
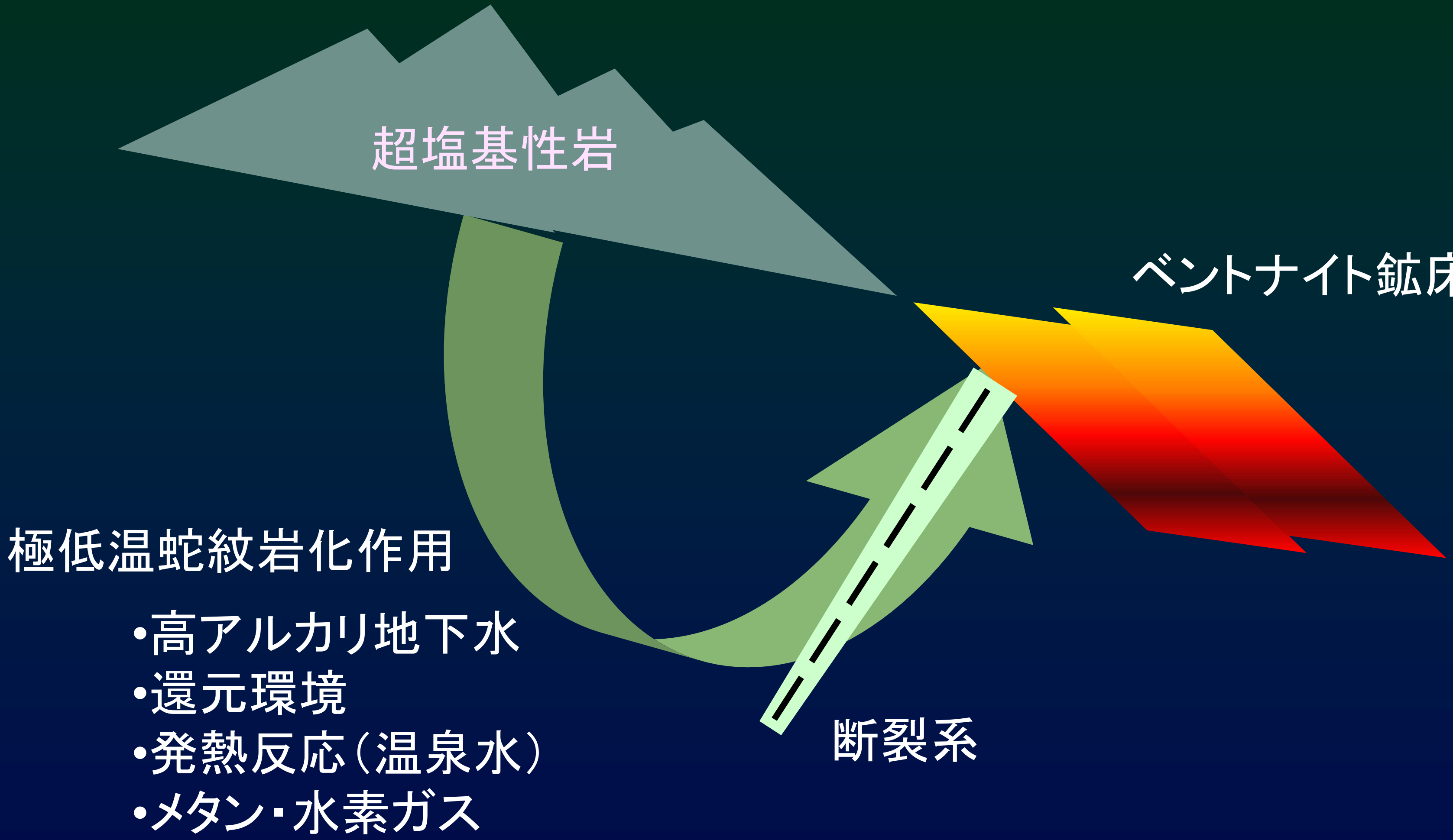


図 5.1.2-1 2 次元解析体系概念図



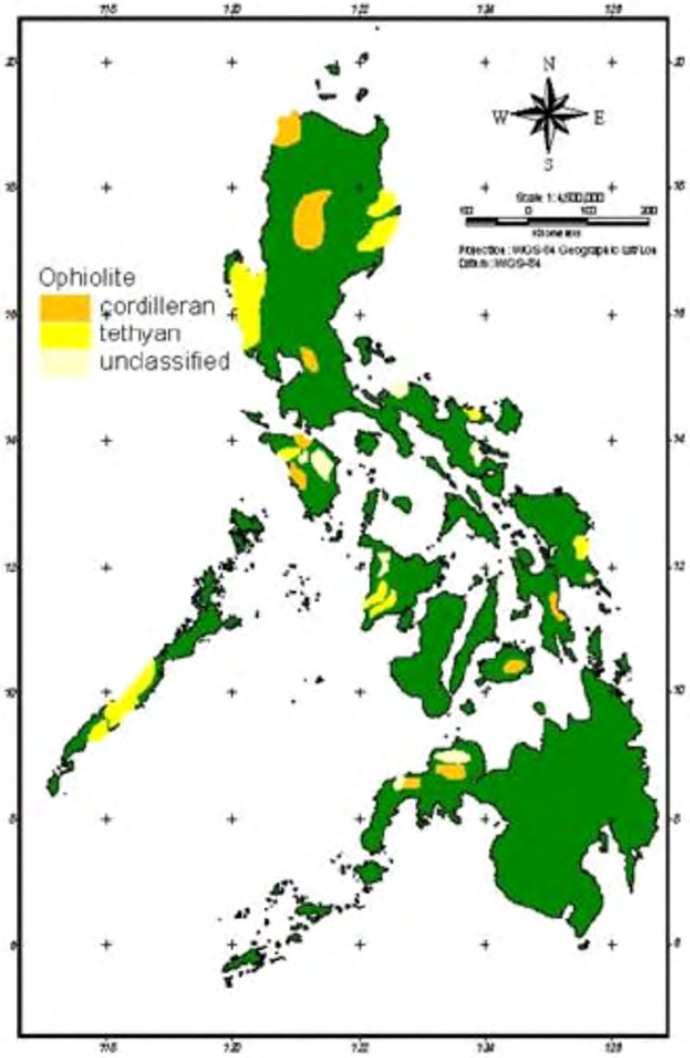
平成28年度地層処分技術調査等事業
TRU廃棄物処理・処分技術高度化開発報告書（第4分冊）
−人工バリア材料長期挙動評価・人工バリア評価の初期条件の設定—

高アルカリ水−ベントナイト相互作用を診るには

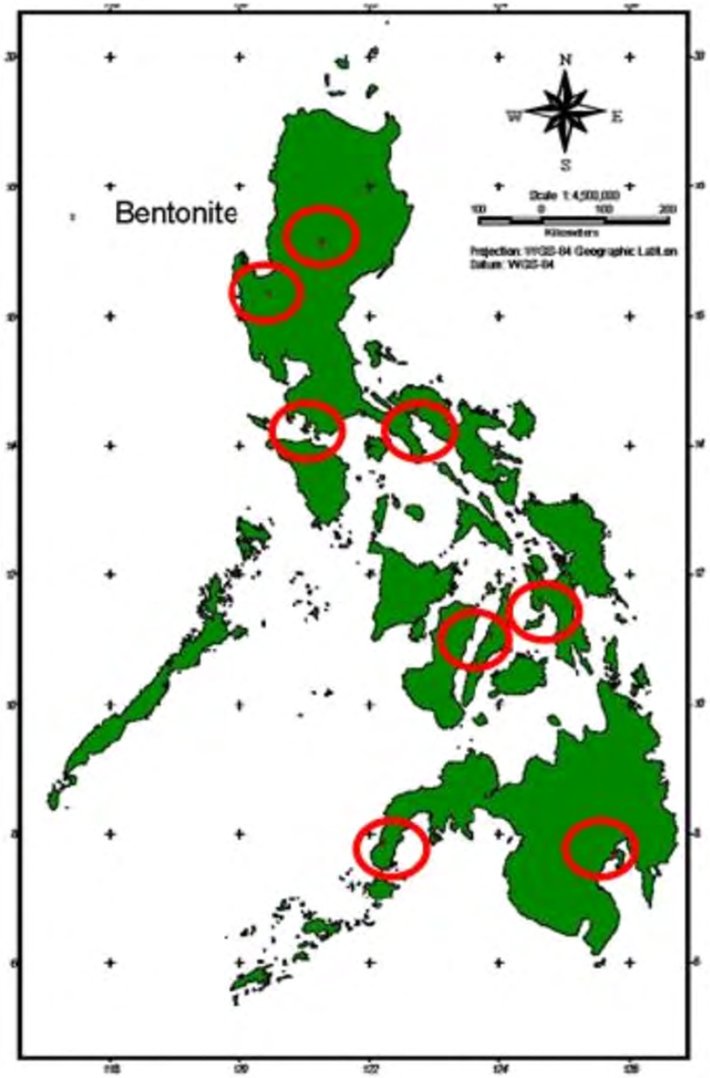


フィリピンにおける超塩基性岩とベントナイト鉱床の分布

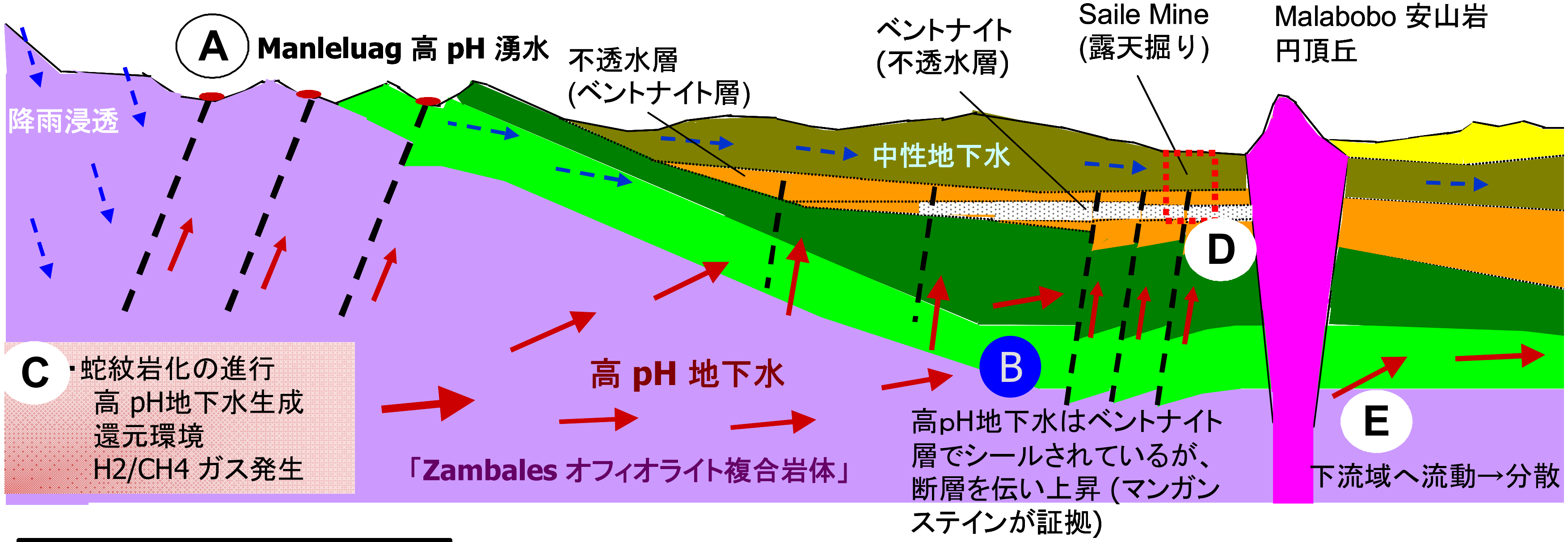
超塩基性岩

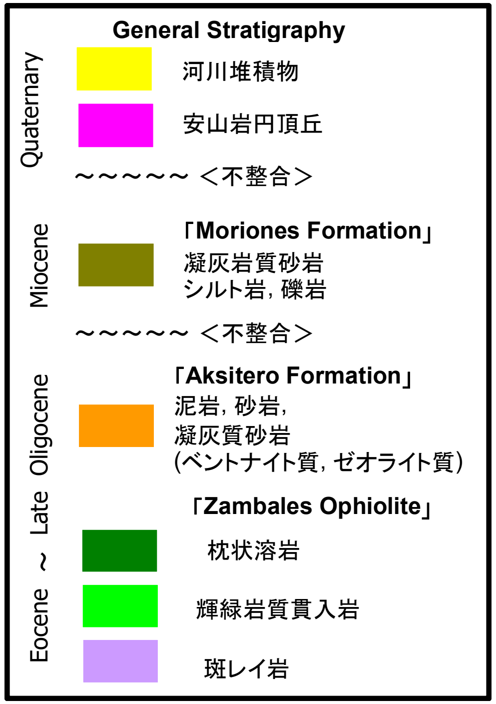


ベントナイト



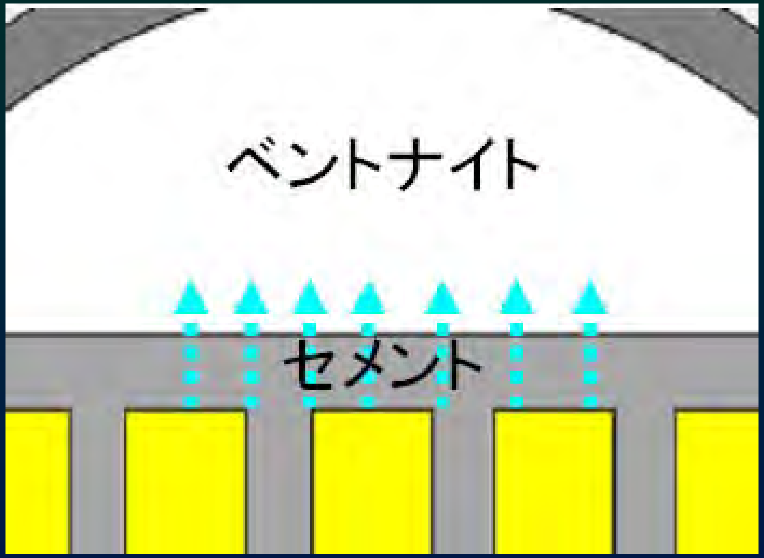
周囲に高アルカリ泉が見つかった粘土鉱床



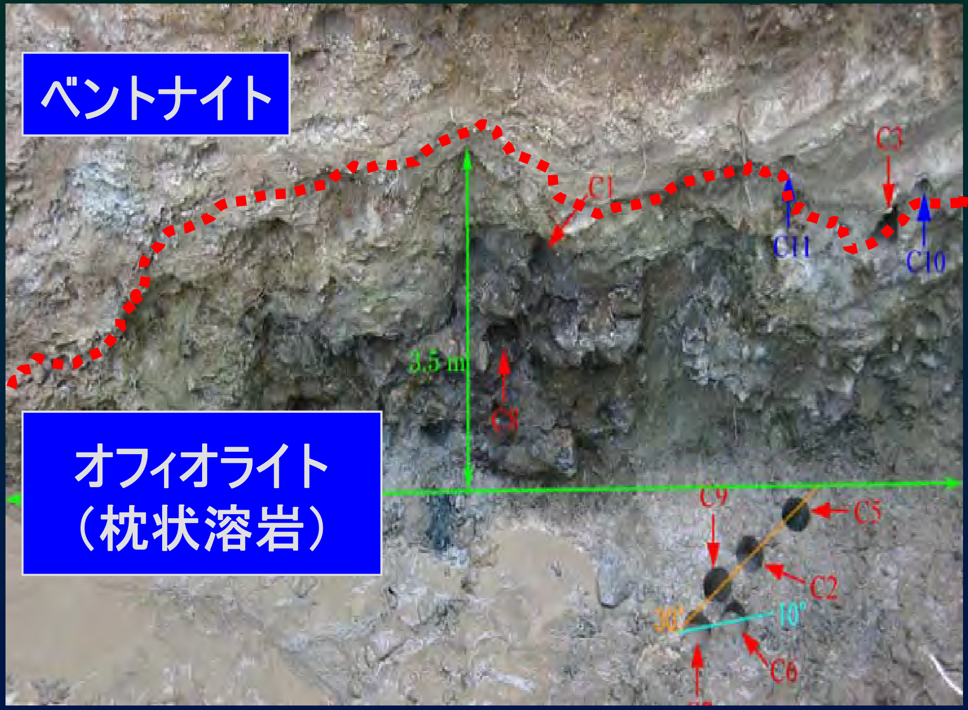


	mangatarem地域
temp(℃)	34.2
pH	11
ORP(mV)	-410
Ca^{2+}(mg/L)	24.3
Mg^{2+}(mg/L)	<0.05

トレンチ調査

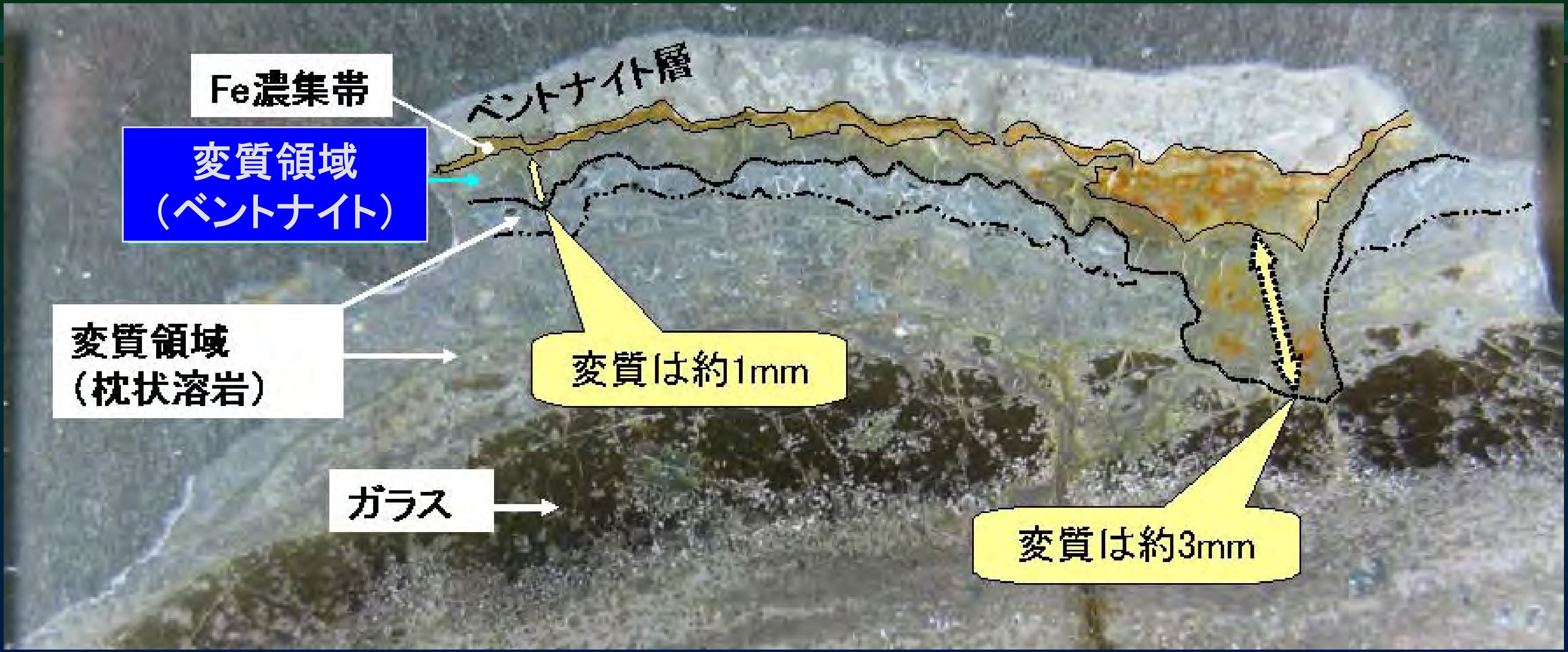


TRU廃棄物の地層処分概念図



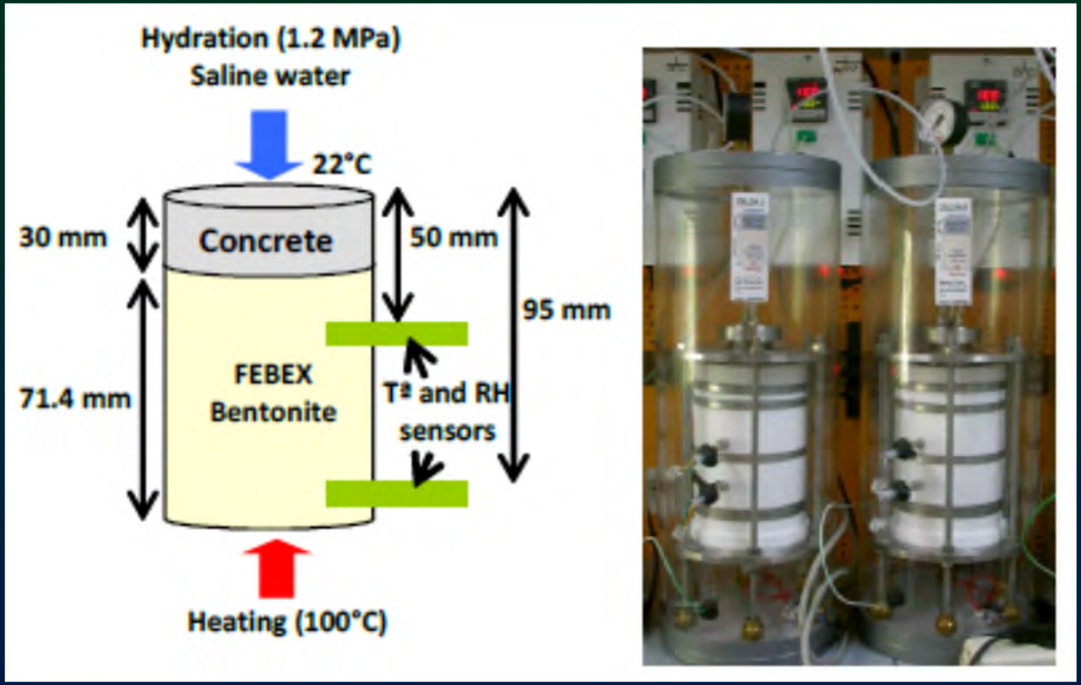
高アルカリ水を供給する岩体とベントナイトのコンタクト部分の発見

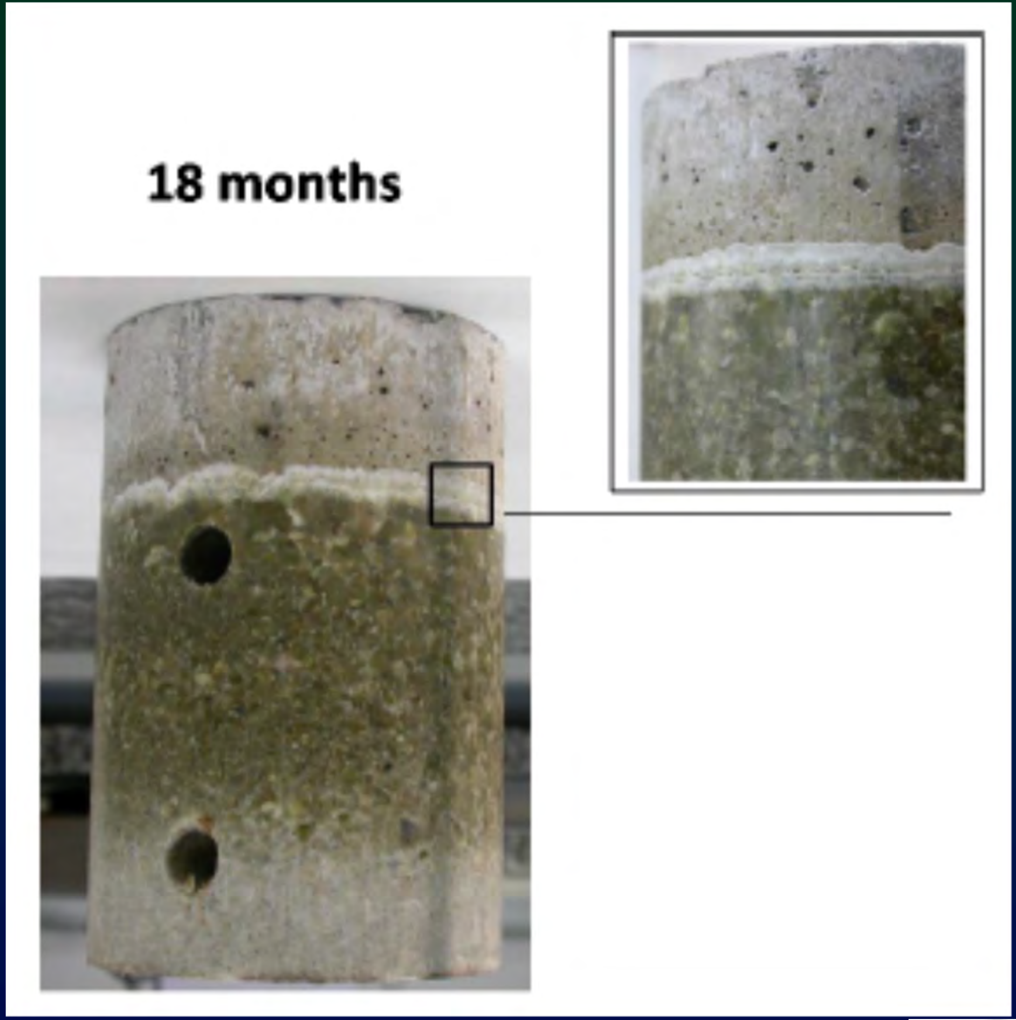
高アルカリ水を出す岩体–粘土界面の顕微鏡写真



・境界面でのベントナイト層と枕状溶岩の変質は確認できた。
・ベントナイト層の変質は1mm～3mmであった。

界面での地化分析ではクロッギングは大流行？

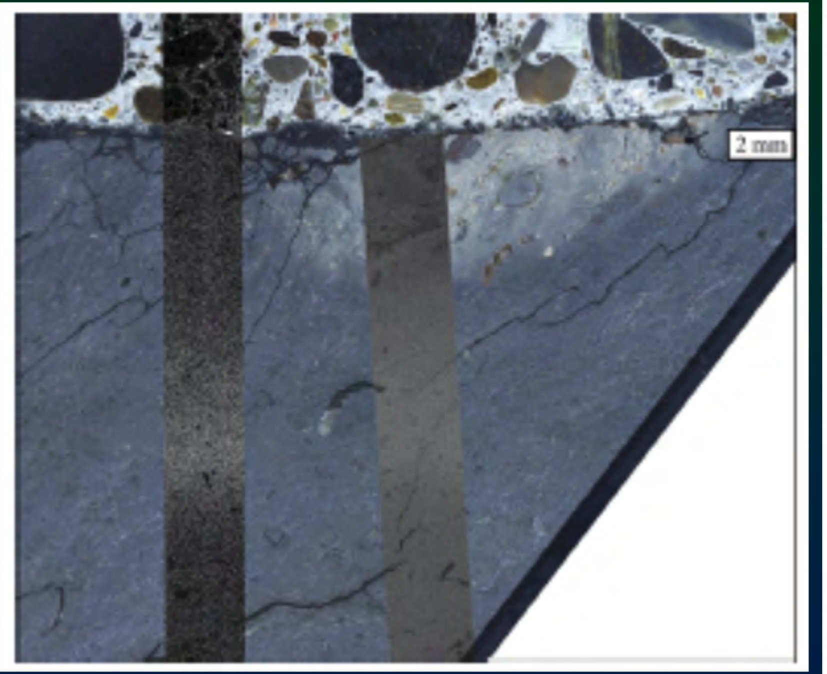


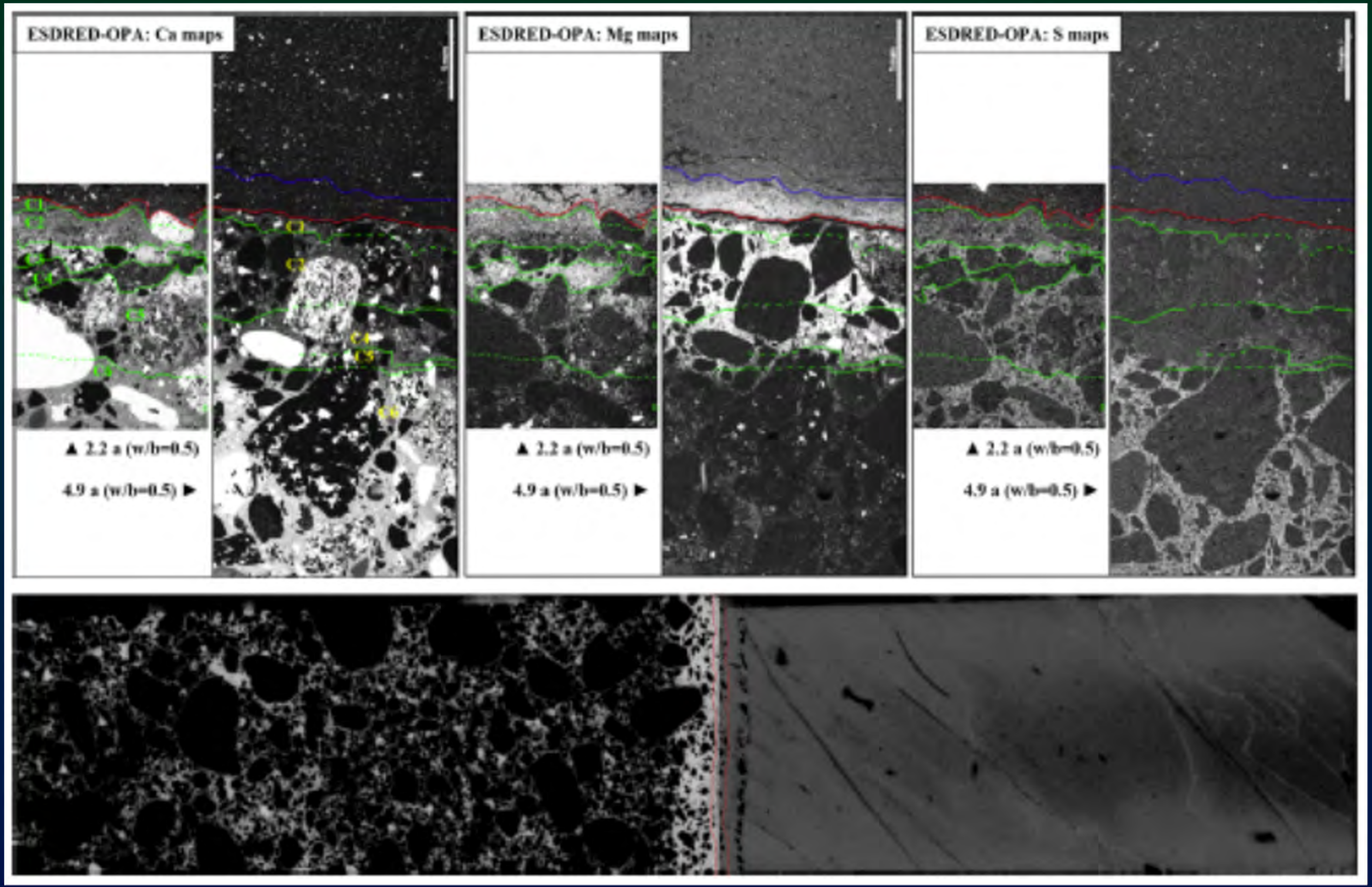


EUのプロジェクトにおけるCIEMATのレポート

Long-term Performance of Engineered Barrier Systems （Torres et al., 20113)

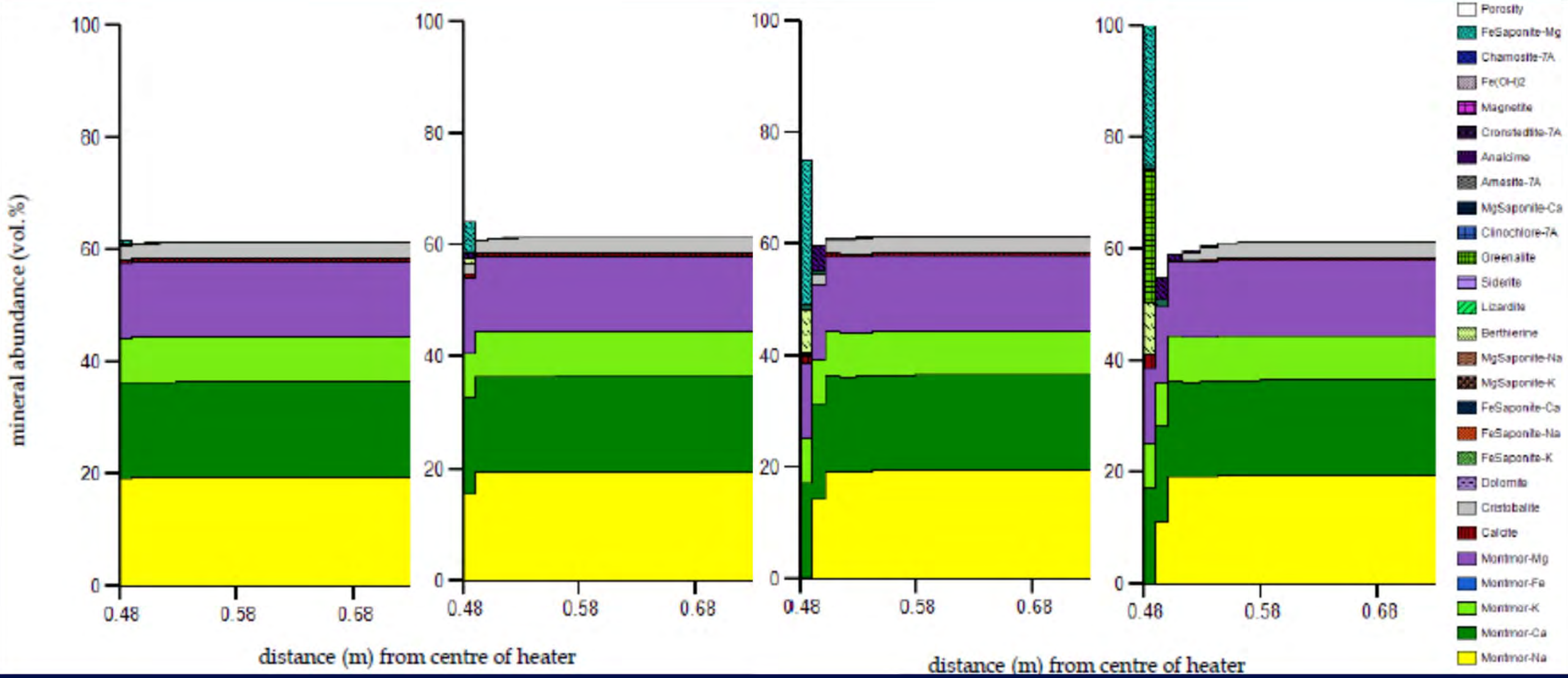
界面での地化分析ではクロッギングは大流行？





スイスMont TerriのCement-Opalinus Clay Interactionプロジェクトのレポート
5-year chemico-physical evolution of concrete–claystone interfaces, Mont Terri rock laboratory (Switzerland)(Mader et al., 2017)

界面での地化分析ではクロッギングは大流行？



Grimsel Test SiteのFEBEXプロジェクトにおける英国RWMのレポート
Geochemical modelling of Iron-Bentonite Interactions(Wilson, 2017)

界面での地化分析ではクロッギングは大流行？

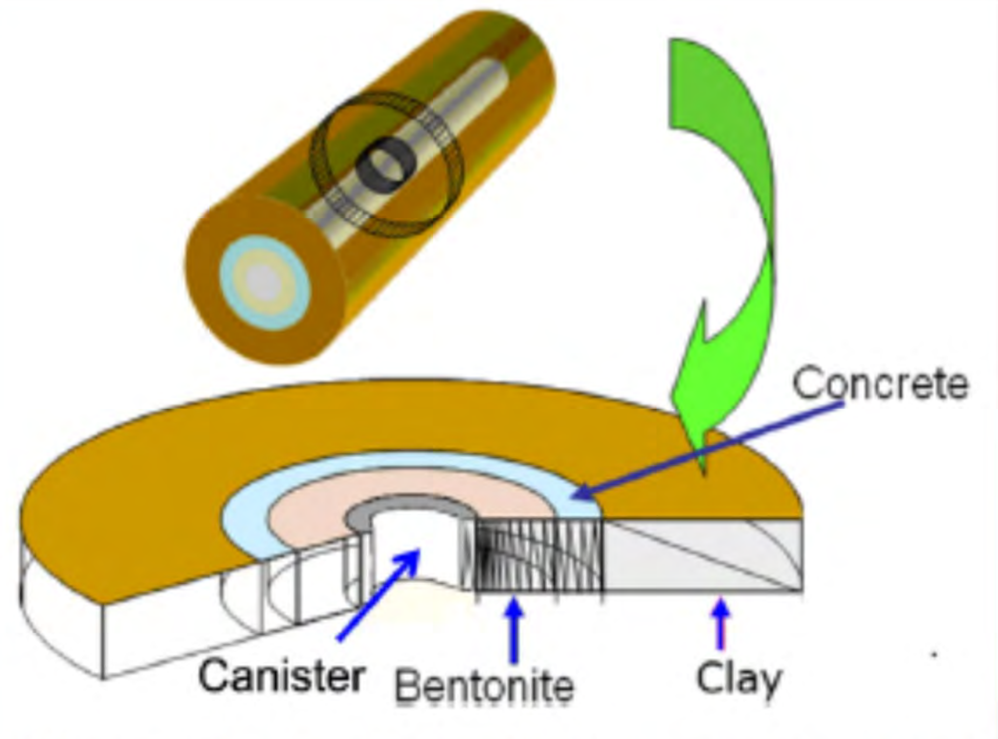
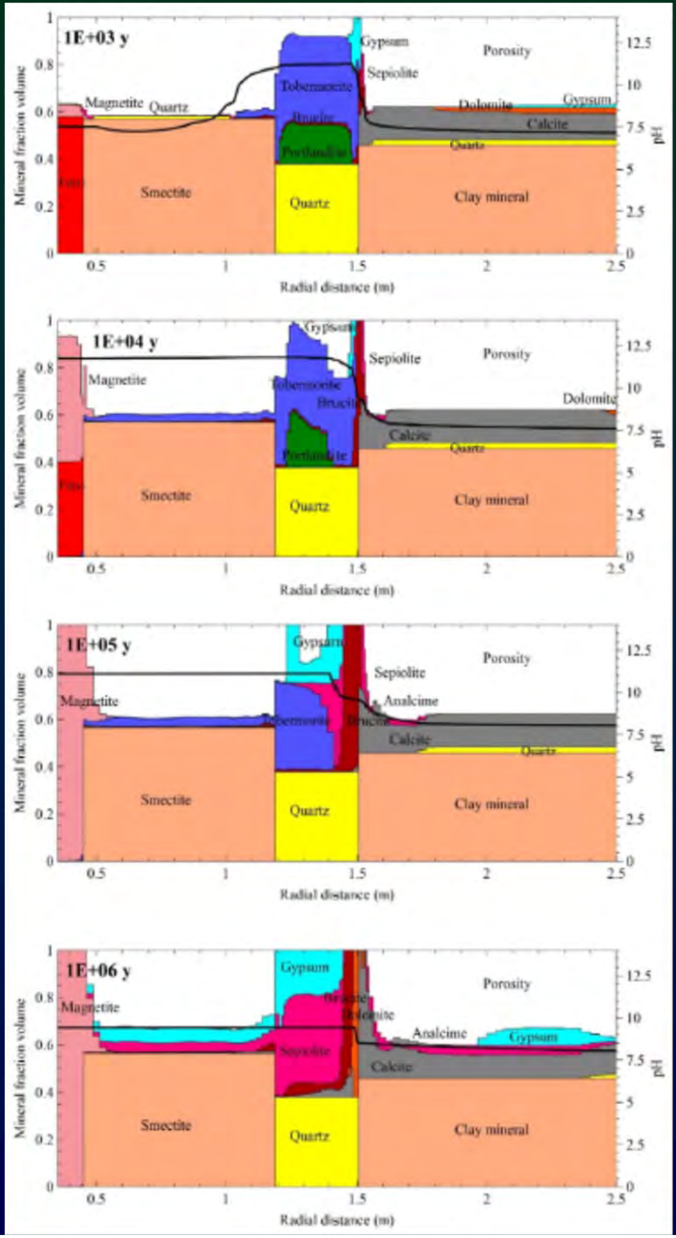


Fig. 1. Scheme of the multibarrier system of a HLW repository in clay according to the Spanish Reference Concept (Yang et al., 2008a).



スペインのレファレンス解析

Long-term non-isothermal reactive transport model of compacted bentonite, concrete and corrosion products in a HLW repository in clay (Mon et al., 2017)

界面での地化分析ではクロッギングは大流行？

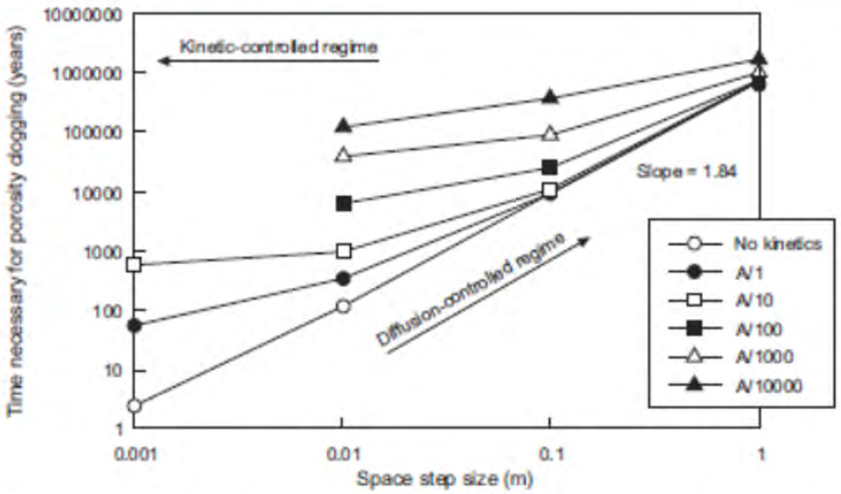
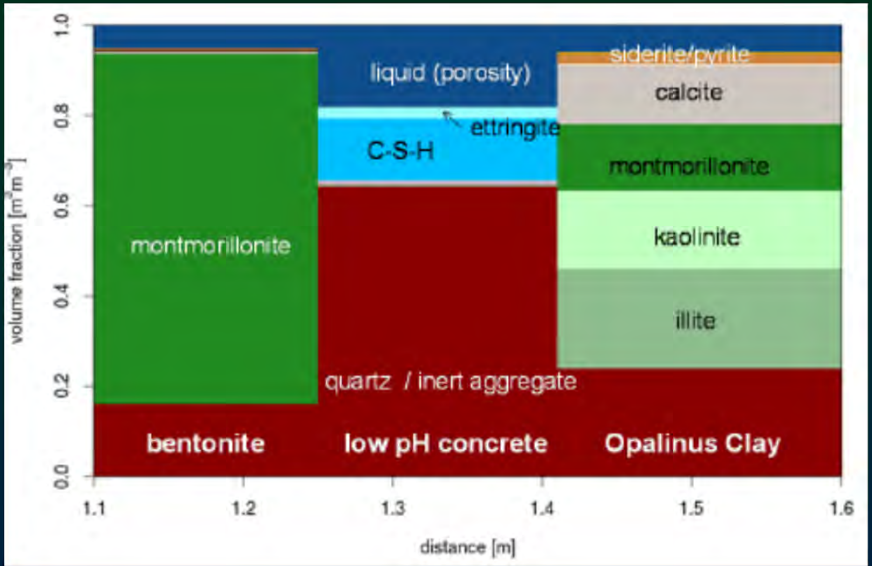
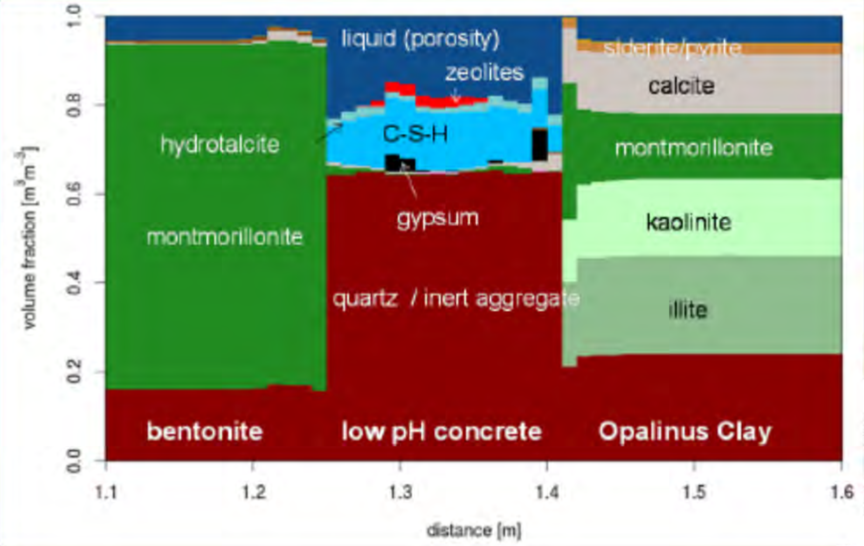


Fig. 5-3: Variation in the time necessary for porosity clogging as a function of both the spatial discretization and the reaction rate from Marty et al. (2009).

"A" denotes the specific reactive surface area which is changed to simulate varying reaction kinetics. A/1 denotes the fastest and A/10000 denotes the slowest reaction.



10,000年後



NagraのTechnical Report 12-01
The Long Term Geochemical Evolution of the Nearfield of the HLW Repository(Bradbury et al., 2014)

異なる化学組成の岩石（材料）の界面ではグロッギングはよく観察される一般的な現象

クロッギングが起きると・・・

- 空隙が充填される。
- 変質領域を制限する。

NAや実験でその事実だけを示すと・・・

都合がいい、と批判される！

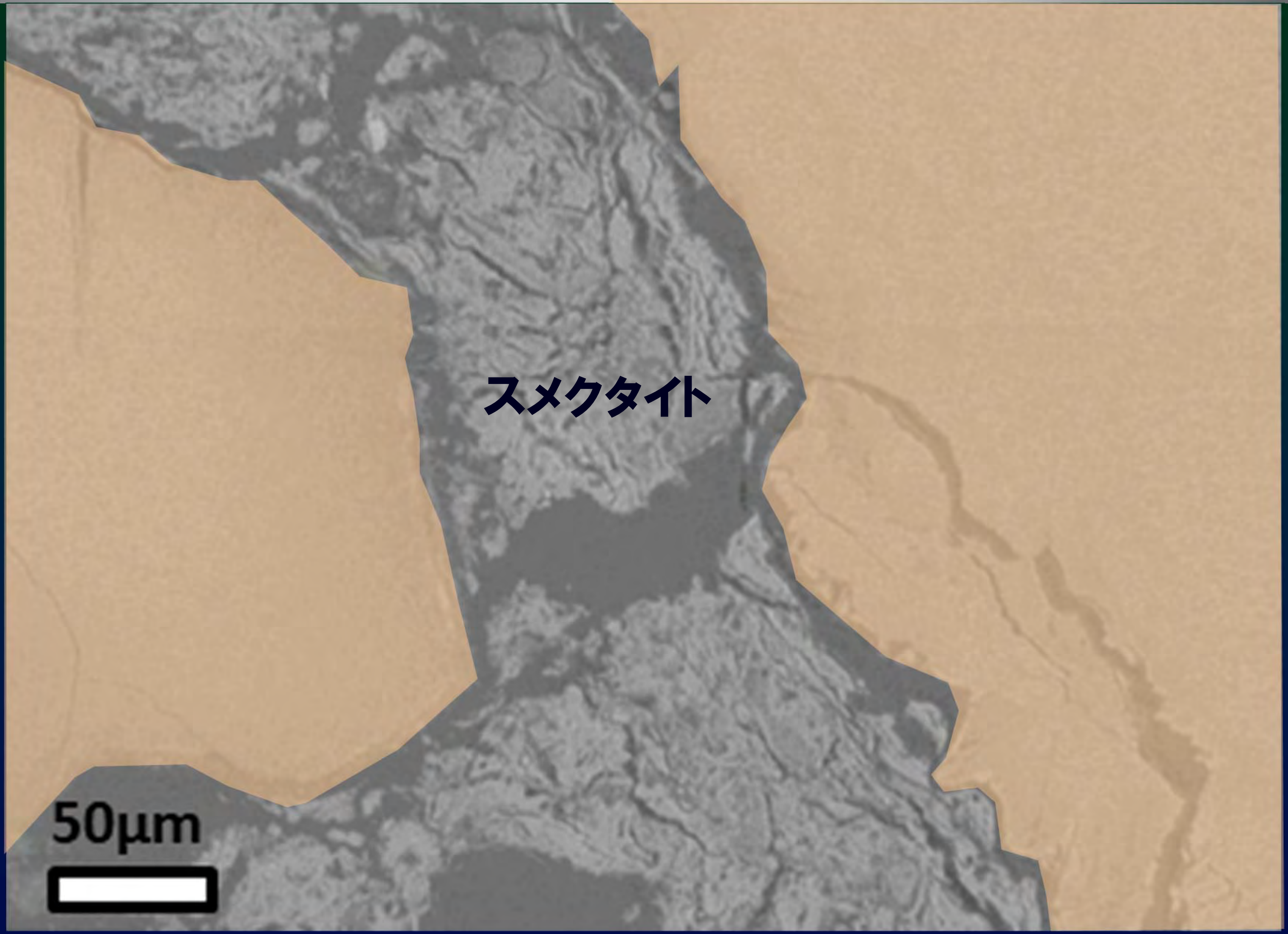
特に、解析結果で、クロッギングしている鉱物が、天然ではあまり認められない鉱物や高温でしか生成しない鉱物が示されていると、強烈に批判される！

- どのような岩石（材料）の組み合わせの界面で
- どのような鉱物が
- どのように空隙をクロッギングしていくのか（あるいはしないのか）？

- どのような岩石（材料）の空隙に
- どのような組成を持つ溶液が流れたら
- どのように空隙をクロッギングしていくのか（あるいはしないのか）？

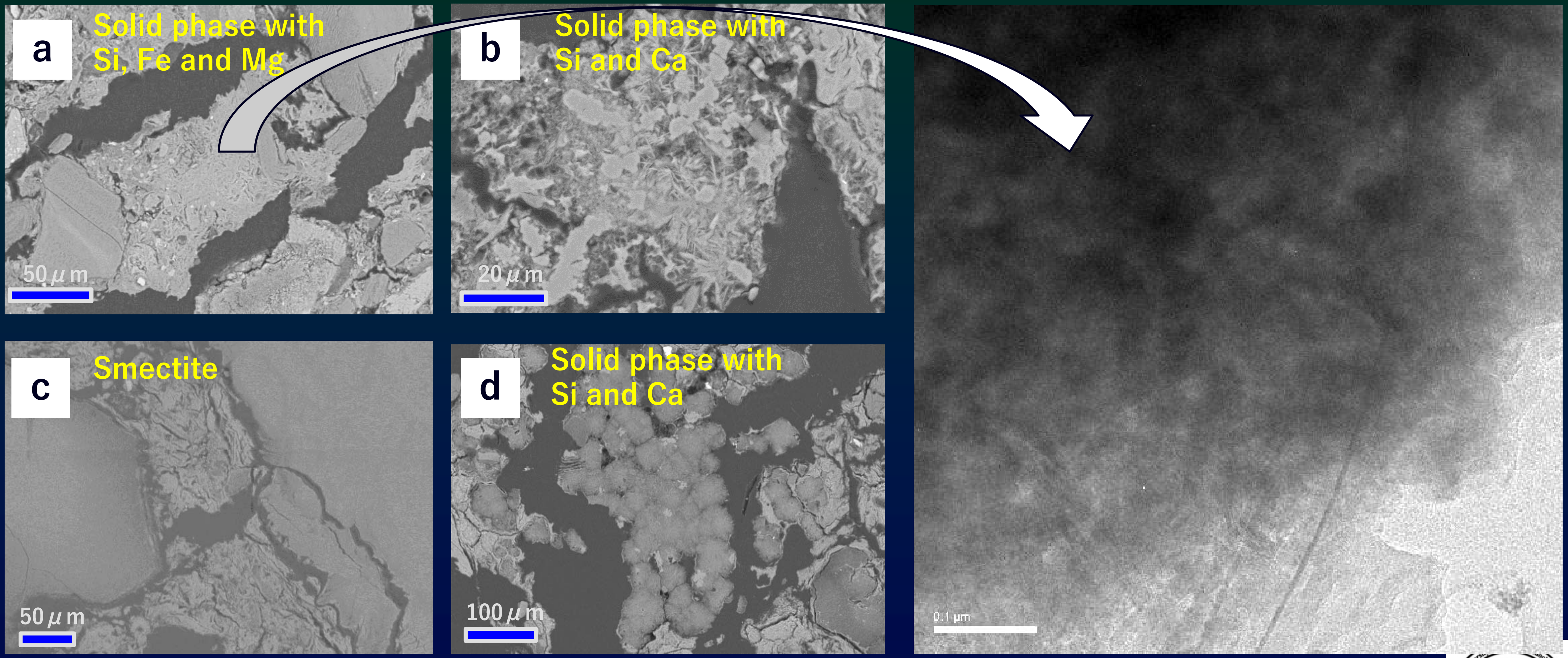
フィリピンパラワン島にある高アルカリ水

超塩基性岩の堆積物がスメクタイトやC−S−H、M−S−Hでクロッギングされていた



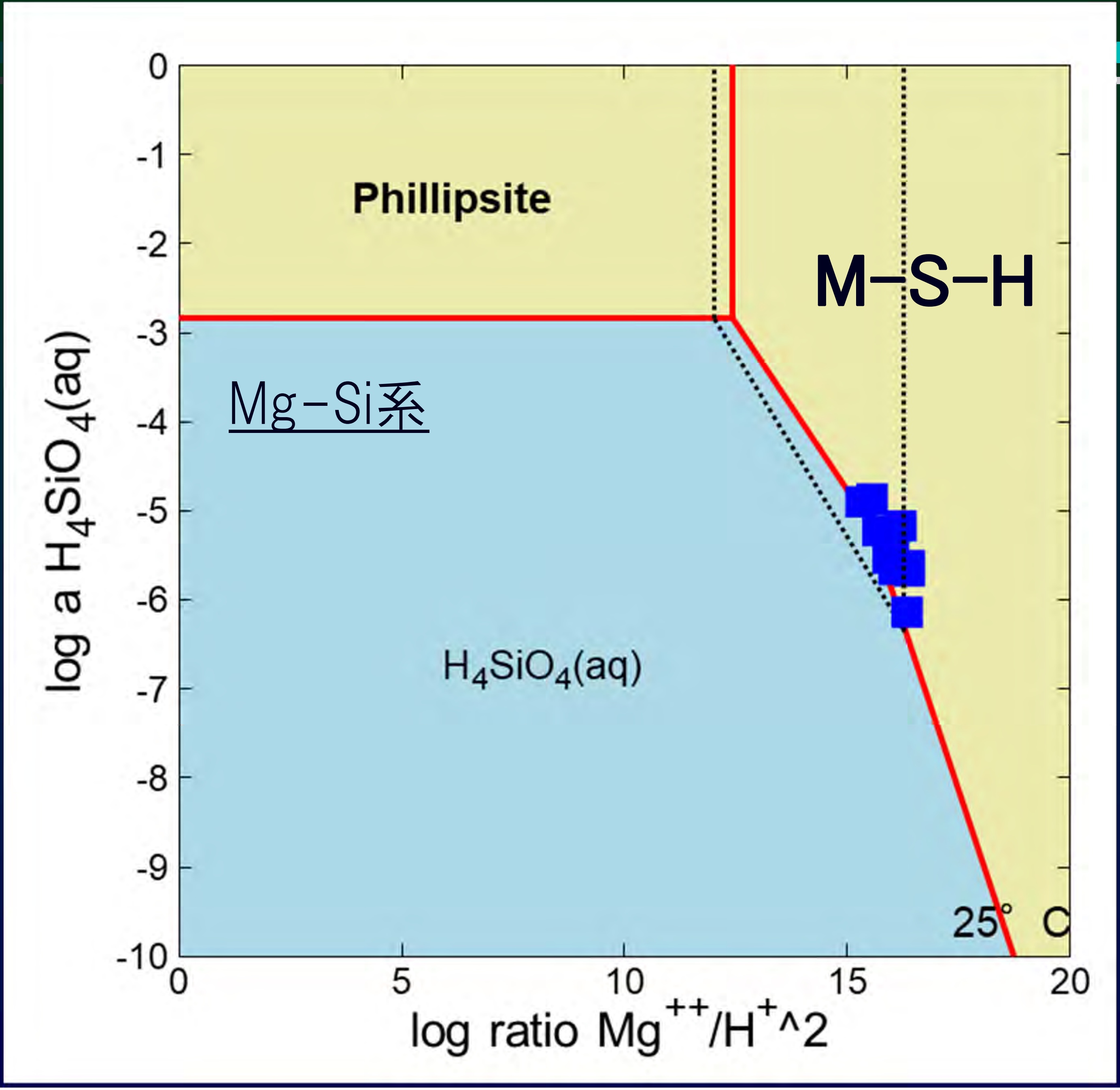
粒子間を埋めるように産しているFe,Mg型スメクタイト

超塩基性岩の堆積物がスメクタイトやC-S-H、M-S-Hでクロッギングされていた



Shimbashi, et al. (2018)

サイトの高アルカリ地下水の化学とM–S–H



✓ 溶液のMg,Si濃度はM–S–Hによって規定されている。

➢ 二次生成物のM–S–Hは高アルカリ地下水から沈殿形成したと考えられる。

佐藤のメッセージ

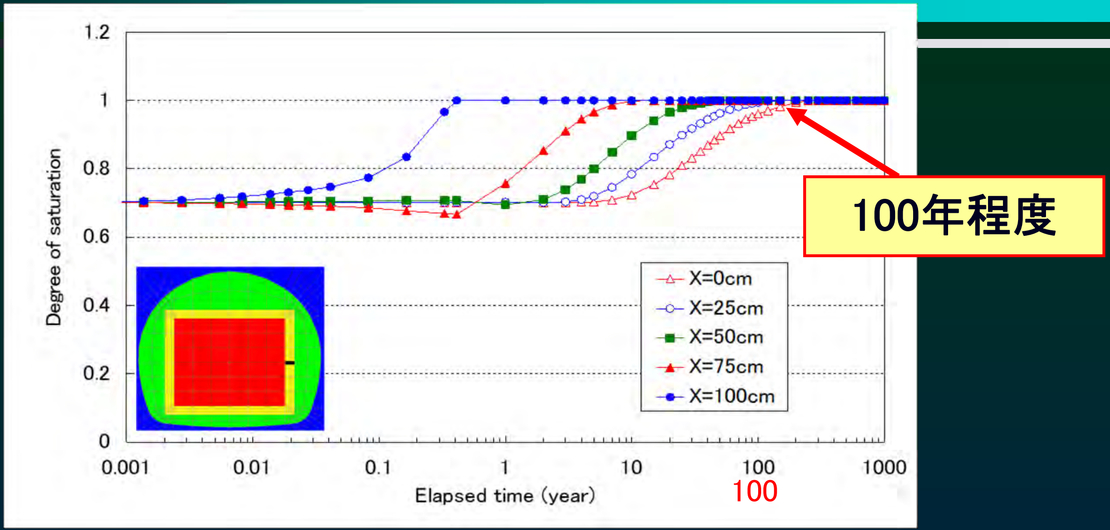
- 天然が相手の場合でも、天然と対話していない。
- Narrativeとはある出来事の言語記述（ことば）を何らかの意味のある連結によってつなぎ合わせたものでなければならないのに、個々のエビデンスばかりに偏重して、言葉をつなぐことによって意味づけるものにしていない。
- お客さんを納得させるにはエビデンス・ベイスト・エンジニアリングだけではなく、ナラティブ・ベイスト・エンジニアリングの視点もなくてはならない。
- そのための材料として、ナチュラルアナログ研究は「唯一無二」な存在。なのでナチュラルアナログ研究を皆さんにすゝめます。

これはどう説明するの?
ー月布鉱山と土浮山鉱山の例ー

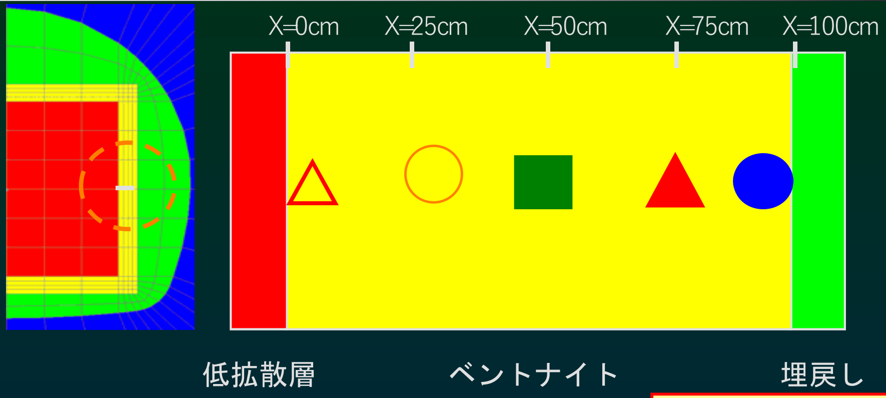
飽和していたらどうして坑道掘りできるの？
水が来ているところは盤膨れして掘れなくなる。

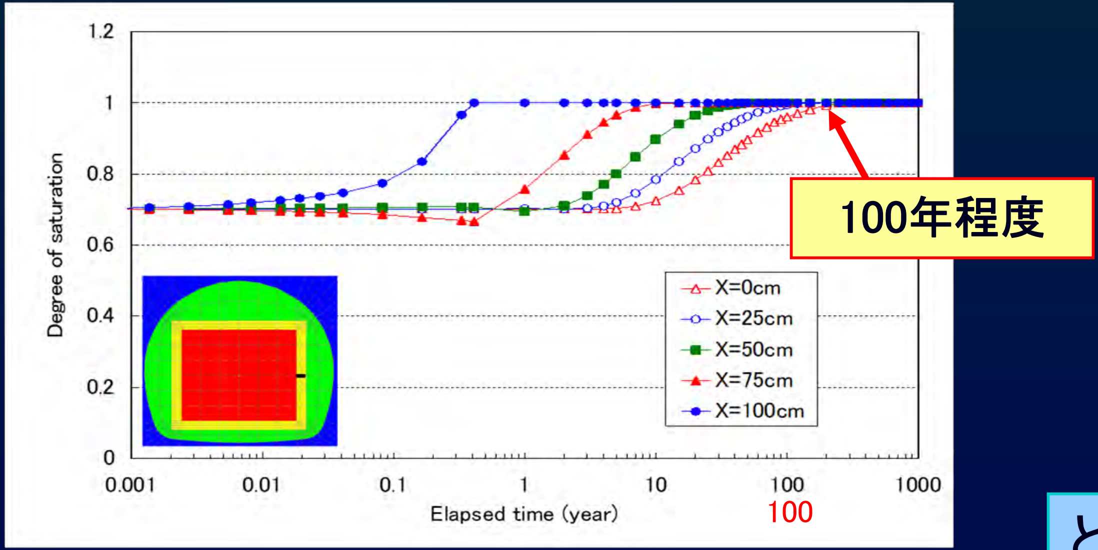
どうしてベントナイト鉱山の露天掘りで水たまりができるの？
ちゃんと止水しているからではないの?

解析では結構速く飽和するらしいですね！

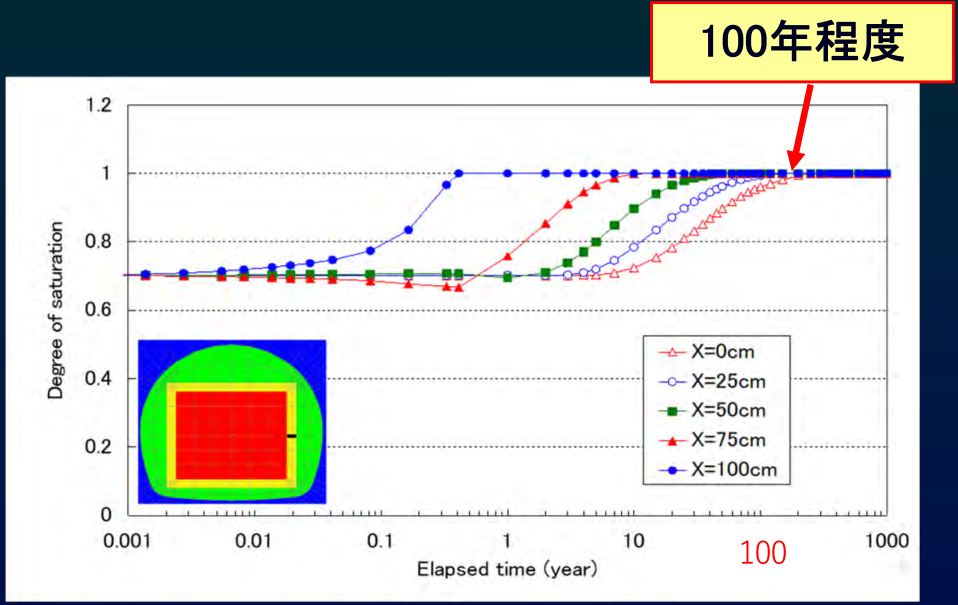


岩盤:の弾性係数：2,000MPa、セメントの弾性係数：25,000MPa





岩盤:の弾性係数：2,000MPa、セメントの弾性係数：2,500MPa



岩盤:の弾性係数： 7 80MPa、セメントの弾性係数：2,500MPa

どのケースも概ね100年程度で完全に飽和する←本当?

本研究の一部は、経済産業省の委託事業「放射性廃棄物重要基礎技術研究調査」により実施した研究成果の一部であります。

ご清聴ありがとうございました