

平成21年10月25日2009年度バックエンド週末基礎講座(北大)

実践講座Ⅲ 地下環境特性

北海道大学大学院工学研究科
環境フィールド工学専攻
五十嵐敏文

講座の内容

- 地下環境特性とその意味
- 処分にもなう地下環境特性の変遷
- サイト選定のプロセス
- 各段階における地下環境特性
- 建設期間中およびそれ以降の課題
- その他

地下環境特性(性能評価)

- 地下水流動: 流速(ダルシー流速)

➡ 透水係数、動水勾配、割れ目性状

- 放射性核種化学種: 酸化数などの化学形態

➡ pH、Eh、温度、共存物質、...

- 放射性核種移行: 移流(実流速)、分散、拡散
収着、(放射崩壊)、...

➡ (有効)間隙率、拡散係数、屈曲度、
分配係数(K_d)、(崩壊定数)、...

地下環境特性(施設建設)

- 力学的検討: 空洞の安定性、掘削影響領域の評価
 ➡ 初期地圧、弾性係数、せん断強度、...
- 熱的検討: 廃棄体の設置レイアウト
 ➡ 熱伝導率、比熱、...
- 人工バリアとの相互作用: 力学的、熱的、化学的作用
- 排水処理、残土処理

ダルシーの式

Darcyが1856年に上水道のろ過砂の実験からこの法則を発見

$$v = \frac{Q}{A} = -k \cdot i$$

ここで、 v : (見かけの) 流速、 i : **動水勾配** (水頭勾配)、 k : 比例定数、 Q : 流量、 A : 土の透水断面積



透水係数 (hydraulic conductivity)

$$i = \frac{dh}{ds}$$

ここで、 s : 浸透方向にそった距離、
 h : **全水頭** ($= p/\gamma_w + z$)、 p/γ_w : **圧力水頭**、
 z : **位置水頭**、 p : 水圧、
 γ_w : 水の単位体積重量

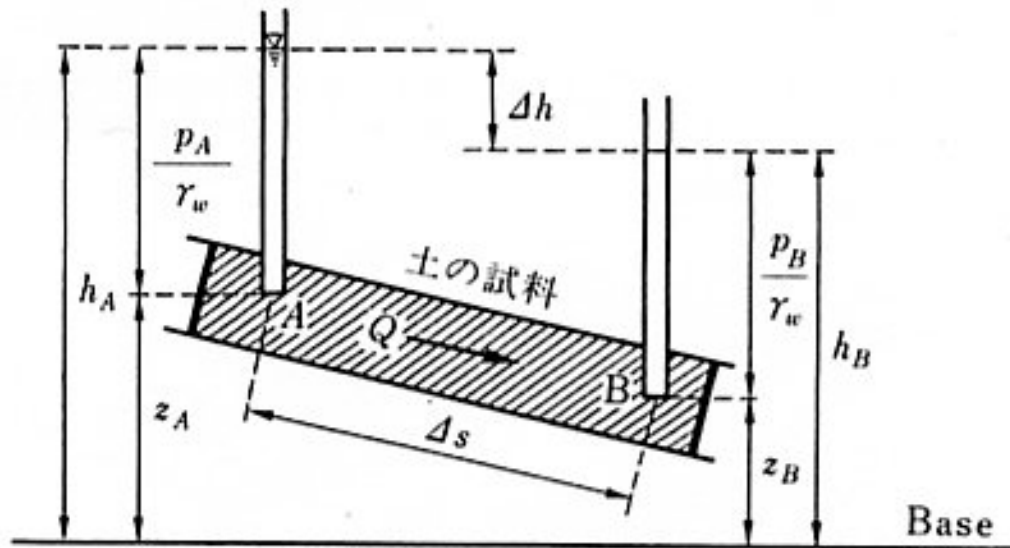


図 1 透水と水頭

pe-pH diagram, Eh-pH diagram, Pourbaix diagram

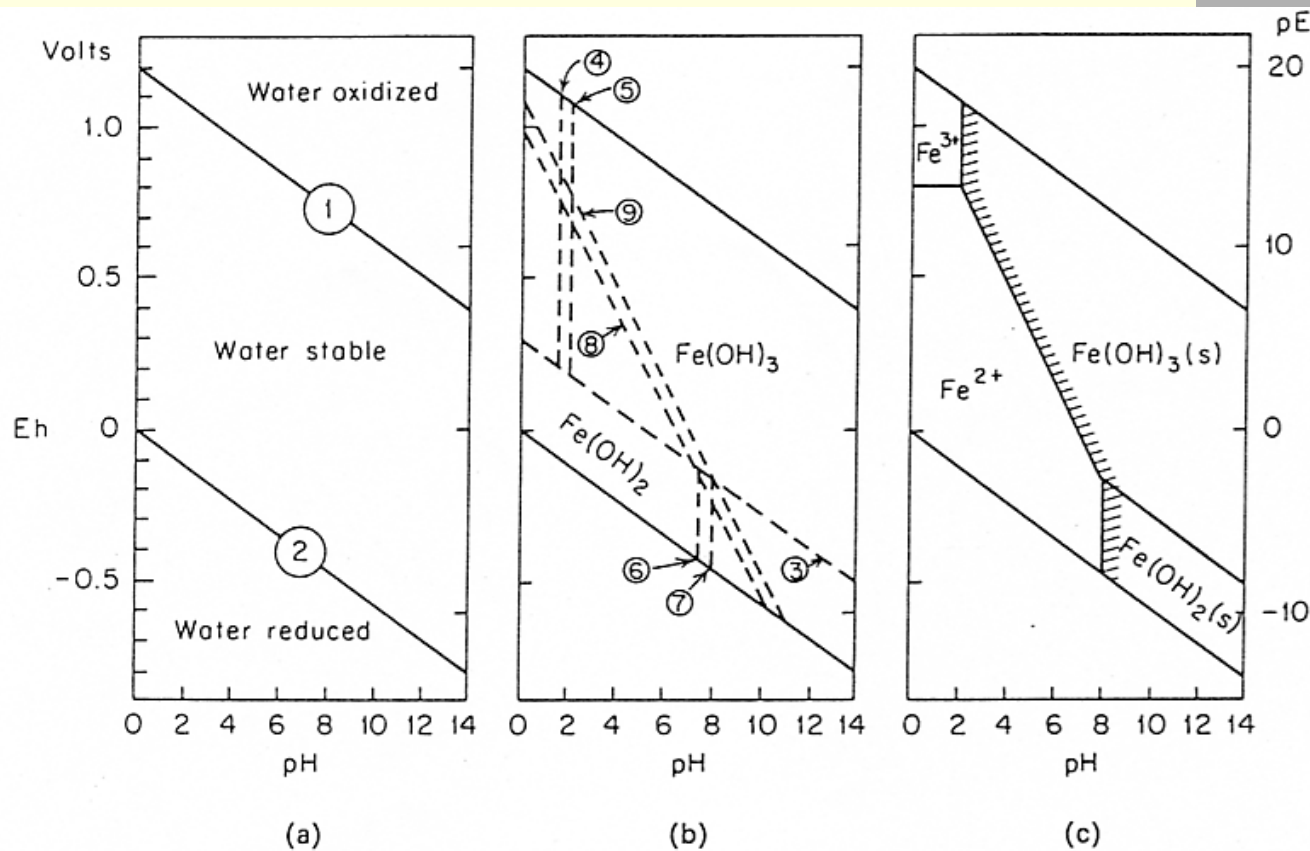
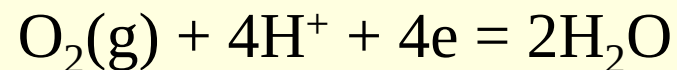


图 2

pE-pH diagrams, 25°C and 1 bar. (a) Stability field for water; (b) construction lines for the Fe-H₂O system (see the text for equations representing number-designated lines); (c) completed diagram showing stability fields for major dissolved species and solid phases.

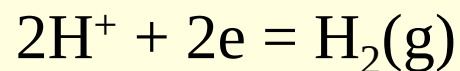


$$K = \frac{1}{P_{\text{O}_2} [\text{H}^+]^4 [\text{e}]^4}$$

$$\log K = 83.1(25^\circ\text{C}, 1\text{bar})$$

$$-\log P_{\text{O}_2} - 4\log[\text{H}^+] - 4\log[\text{e}] = 83.1$$

$$\text{pe} = 20.8 - \text{pH} + \frac{1}{4}\log P_{\text{O}_2} \quad \text{equation ①}$$



$$K = \frac{P_{\text{H}_2}}{[\text{H}^+]^2 [\text{e}]^2}$$

$$\log K = 0$$

$$\log P_{\text{H}_2} - 2\log[\text{H}^+] - 2\log[\text{e}] = 0$$

$$\text{pe} = -\text{pH} - \frac{1}{2}\log P_{\text{H}_2} \quad \text{equation ②}$$

分散と拡散

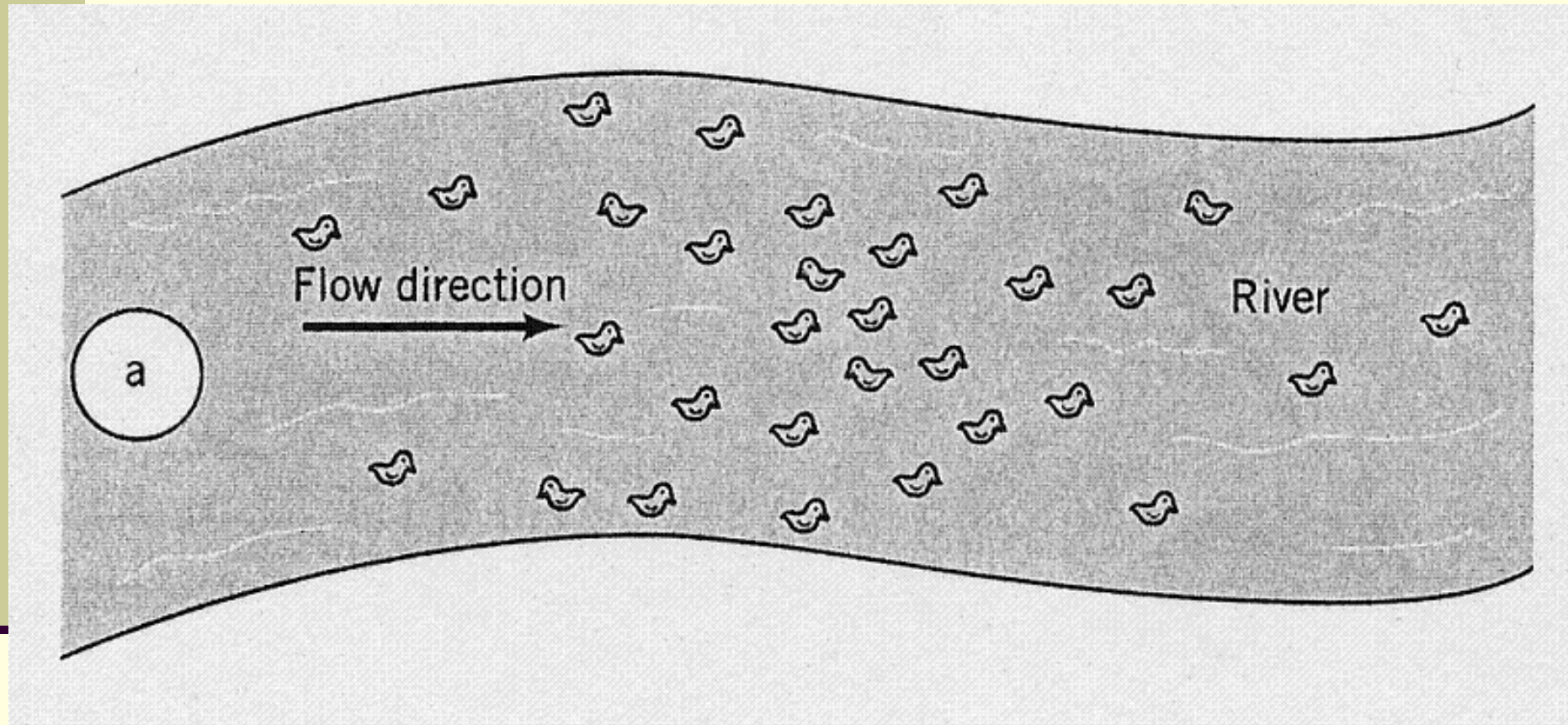


図 3 aから投入されたあひるの河川中での流下状況
(Schwartz and Zhang, 2003)

収着平衡と収着等温線

被収着質がどこまで収着されるか

⇒ 収着平衡 (sorption equilibrium)

$$q = f(C, T) \quad (4.1)$$

⇒ 収着等温線 (sorption isotherm)

ここで、 q : 収着量、 C : 被収着質の平衡濃度 (非収着質がガスの場合、分圧)、 T : 絶対温度

収着平衡に至るまでどれくらいの時間が必要か

⇒ 収着速度

収着モデル

- ヘンリー (Henry) 型

$$q = K_d \cdot C \quad (1)$$

K_d : 分配係数 (distribution coefficient)
核種、媒体、周辺環境に依存

- ラングミュア (Langmuir) 型

$$q = \frac{q_{\max} k_L C}{1 + k_L C} \quad (2)$$

- フロイントリッヒ (Freundlich) 型

$$q = \alpha \cdot C^\beta \quad (3)$$

- その他モデル (イオン交換モデル、表面錯体モデル)

分配係数等のデータベース

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発
部門 地層処分基盤研究開発ユニット 核種移
行研究グループでは、

熱力学データベース (Thermodynamic DataBase: TDB)

収着データベース (Sorption DataBase: SDB)

拡散データベース (Diffusion DataBase: DDB)

を開発

JAEA-SDBシステムの概要

- 37元素、種々の固相（岩石、鉱物、粘土、酸化物、土壌、セメント材料）
- 登録データ：分配係数約24,000、文献約310
- データベースの構成：酸化状態、液固比、pH、Eh、試験雰囲気、温度、試験期間、固液分離法など
- 信頼度を3段階で表示

詳細は

http://migrationdb.jaea.go.jp/nmdb/db/sdb/search_1.jsp

地下環境特性の変遷

- 処分施設掘削・建設前の状態
- 処分施設建設中の状態
- 処分後の状態

	建設前	建設中	埋め戻し後100 ～1000年	1000年以降
酸化還元雰囲気	無酸素 還元環境	大気中酸素濃度	酸素濃度減少、 還元環境へ	無酸素 還元環境
温度環境	30～50℃	大気温度 +α	100℃以下 (崩壊熱)	30～50℃
主要なバリア	-	-	人工バリア (オーバーパック等)	緩衝材 天然バリア

サイト選定のプロセス

- 概要調査地区選定段階(文献調査)
- 精密調査地区選定段階(地表からの調査)
- 処分施設建設地選定段階(地下での詳細調査)

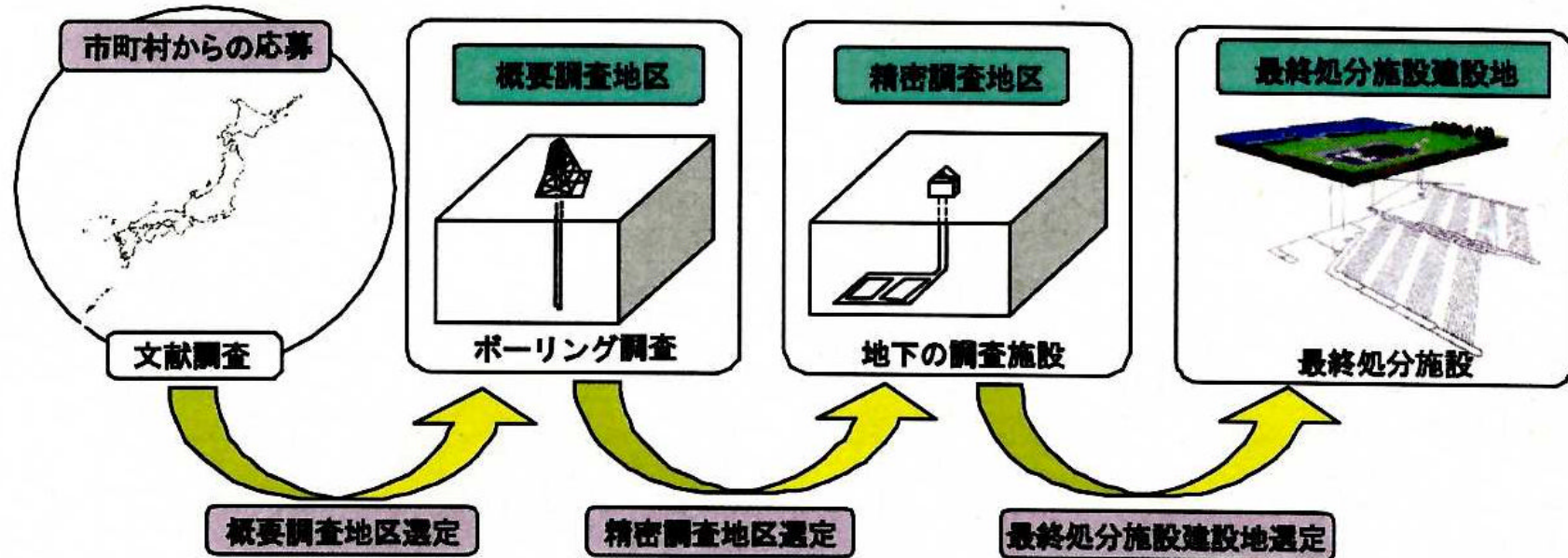


図 3 3段階の処分地選定過程(NUMO-TR-07-01より)

外国における処分サイト選定例

■ スウェーデン

1993-2000 8地点におけるフィージビリティ調査

2002-2008 2地点におけるサイト調査
(エストハンマル、オスカーシャム)

2009 エストハンマルに決定

■ フィンランド

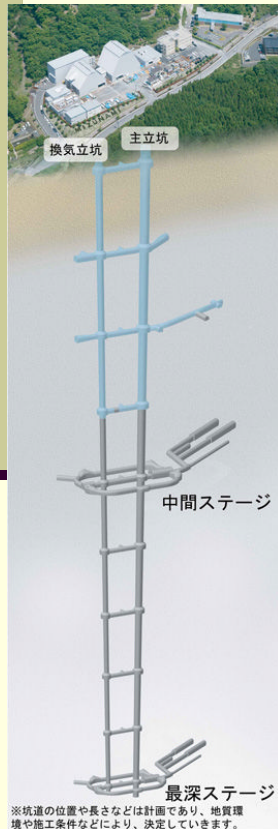
1986-1992 5地点における概略サイト特性調査

1993-2000 4地点における詳細サイト特性調査

2001 オルキルオトに決定

日本の現状

- 概要調査地区選定段階よりも前段階
- 地下研究施設2箇所 → 演習問題必要



東濃地科学センター
主立坑 400m
換気立坑 420m



幌延深地層研究センター
東立坑 155m
換気立坑 250m



JAEAホームページより

建設期間中の課題

■ トンネル湧水

幌延：全窒素(78 mg/L)、ホウ素(48 mg/L)

東濃：フッ素(8.7 mg/L)、ホウ素(1.2 mg/L)

→ 自然由来

■ 掘削土(ずり)置場からの浸出水

⇒ 水質汚濁防止法

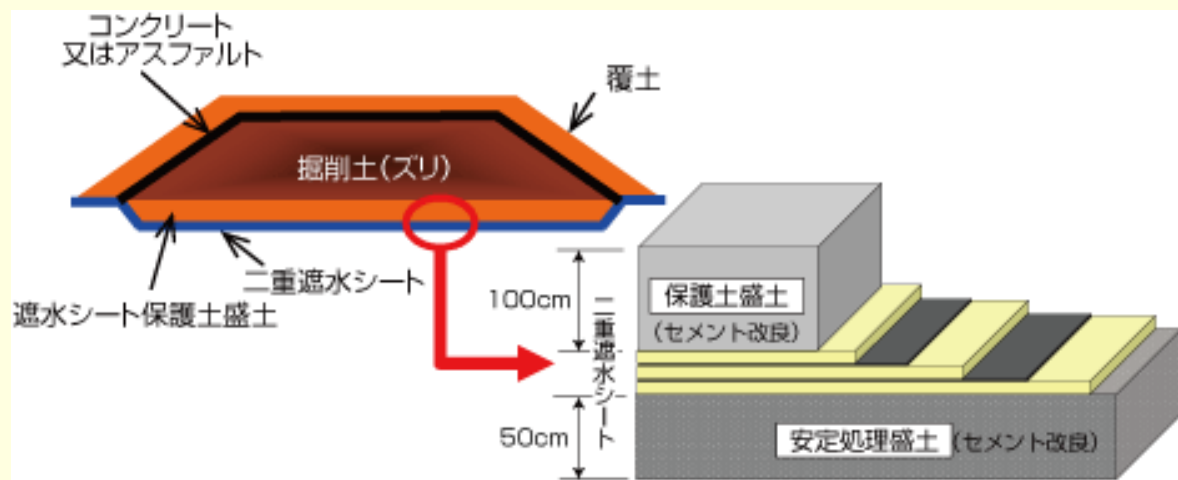
■ 掘削土

⇒ 土壌汚染対策法

掘削残土への対応



掘削土(ズリ)置場
(平成19年11月撮影)



JAEAホームページより

掘削土(ズリ)置場の概念図

土壤汚染対策法（平成15年2月）

- 人為由来に限定
- 溶出量・含有量（1N塩酸抽出量）に基づき評価
- 自然的原因による全含有量の上限値の目安が提示（例えばAsは全含有量で39 mg/kg）（環水土第20号、H15）

改正土壤汚染対策法（平成22年4月）

- 人為由来と自然由来の区別なし
- 搬出汚染土壤
- 指定区域から形質変更時要届出区域，要措置区域へ

とくに北海道では

人為由来の汚染はあるはず（北海道では指定区域1件）

⇒ 土地取引が活発でないため件数も限られ、公にはなりにくい

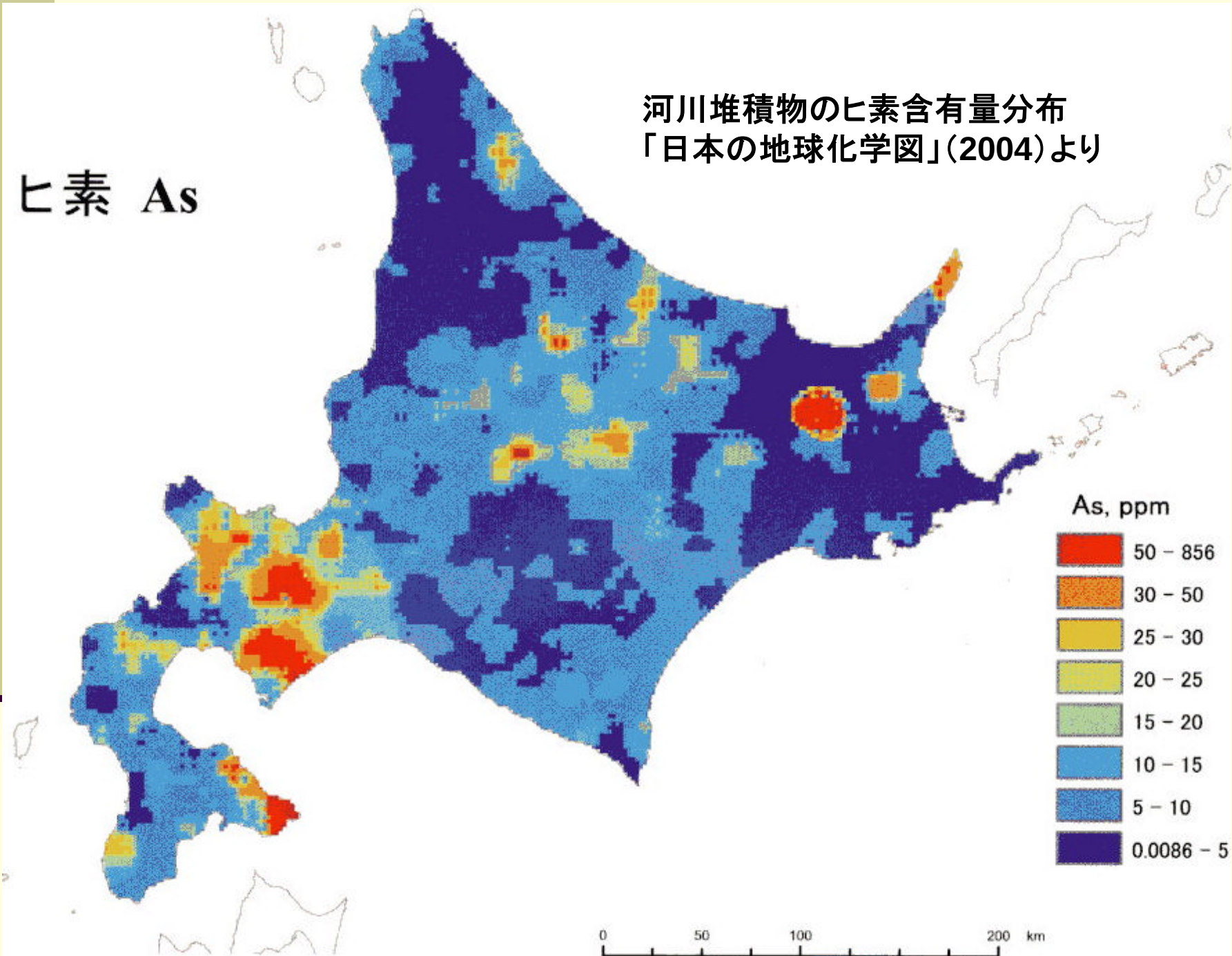
それよりも鉱山、温泉、火山、泥炭地が多いため、

自然由来の重金属類による汚染が多い

⇒ どのような場合対策が必要なのか？
どの程度までの対策が適正なのか？
熊や鹿のリスクまで考慮するのか？

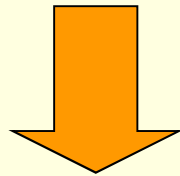
ヒ素 As

河川堆積物のヒ素含有量分布
「日本の地球化学図」(2004)より



道内の自然由来の汚染の特徴

- 岩盤掘削ずり(岩ずり)の重金属汚染
- 温泉・鉱山・泥炭地に由来する土壌・地下水汚染
- ヒ素、鉛、セレン等による汚染



山間部：泥岩、変質火山岩などのトンネル掘削ずり
市街地：鉱山、温泉の影響のある扇状地、泥炭地

自然由来汚染土の対策例

- ① 二重シートによる遮水
- ② 単層のシートによる遮水
- ③ ベントナイト混合土による遮水
- ④ Mg系材料を用いた不溶化
- ⑤ Fe系材料を用いた不溶化あるいは敷土吸着
- ⑥ Ce系材料を用いた敷土吸着
- ⑦ シート遮水による旧トンネル内への埋め戻し
- ⑧ セメント工場への搬出
- ⑨ 土壌浄化施設への搬出
- ⑩ 要対策ずりと無対策ずりとの混合によるpH調整処理
- ⑪ 浸透水の集水・処理
- ⑫ 一体となる地域への埋め戻し

二重シートの例(1)(道内)



二重シートの例(2)(八甲田トンネル)



ベントナイト混合土による遮水例（道内）



セメント固化の例(道内)

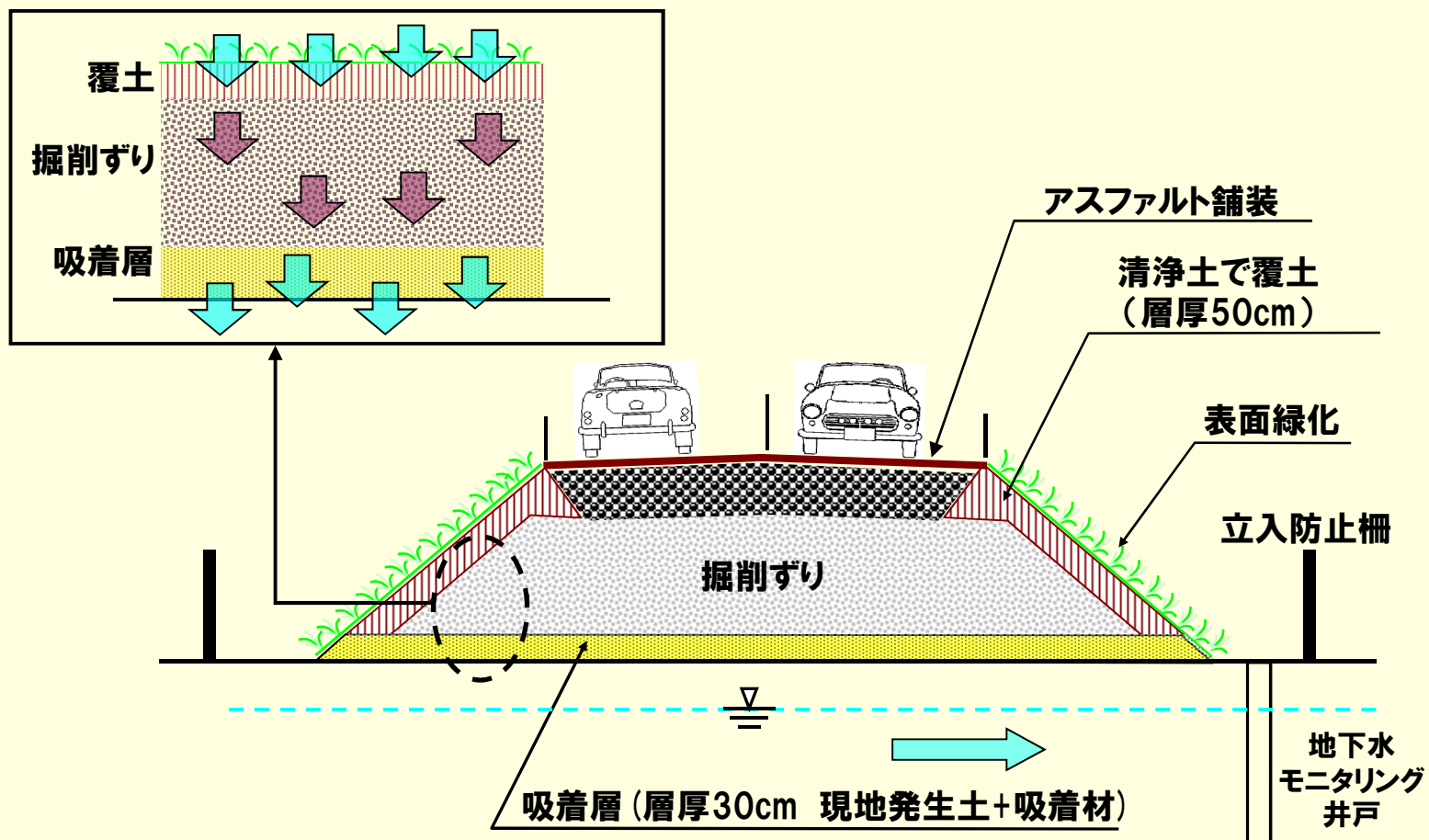


対策合理化のための課題

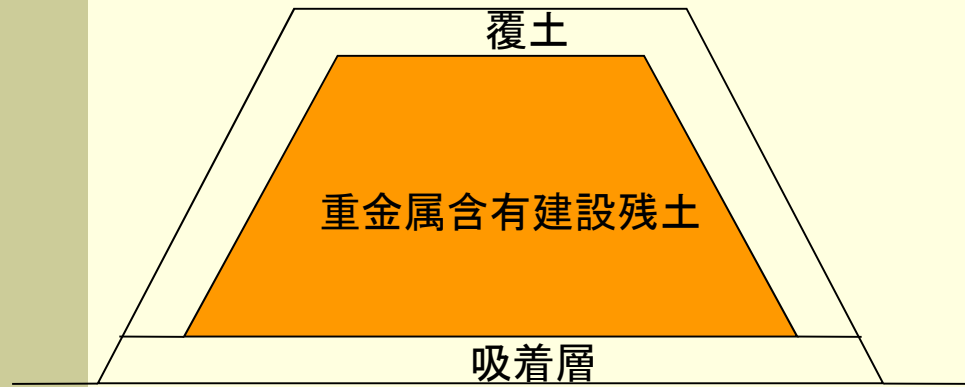
- 発生源(重金属類溶出濃度の経時変化)の評価
溶出量、含有量試験ではなく、埋め立て環境に応じた溶出濃度の変化の把握
- 対策の効果の定量化
各対策による敷地境界などでの濃度変化の評価
- 合理化手法の構築
対策の仕様をパラメータとした敷地境界などでの濃度変化の評価

リサイクルの例

☆吸着層模式概念

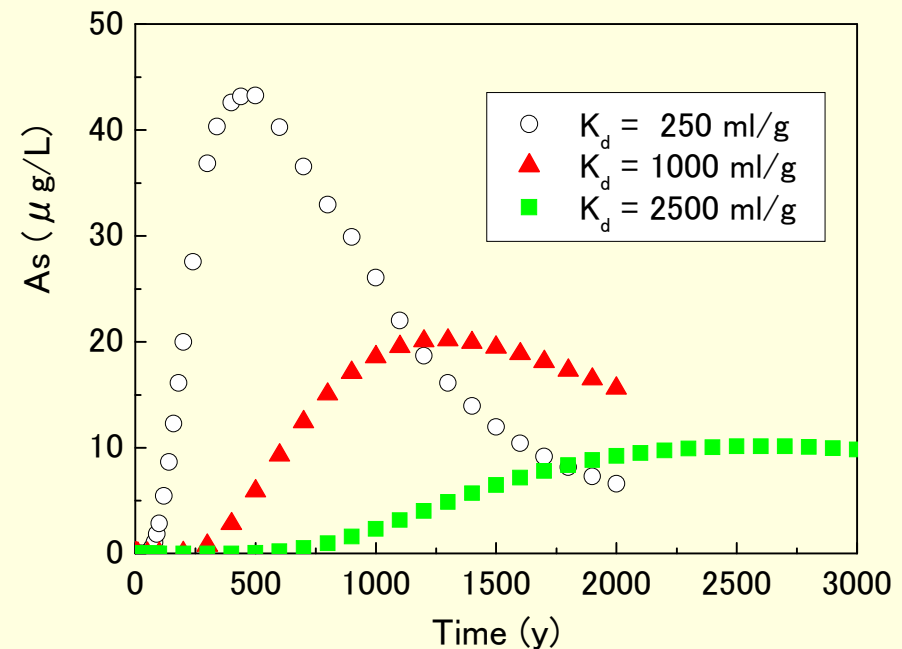
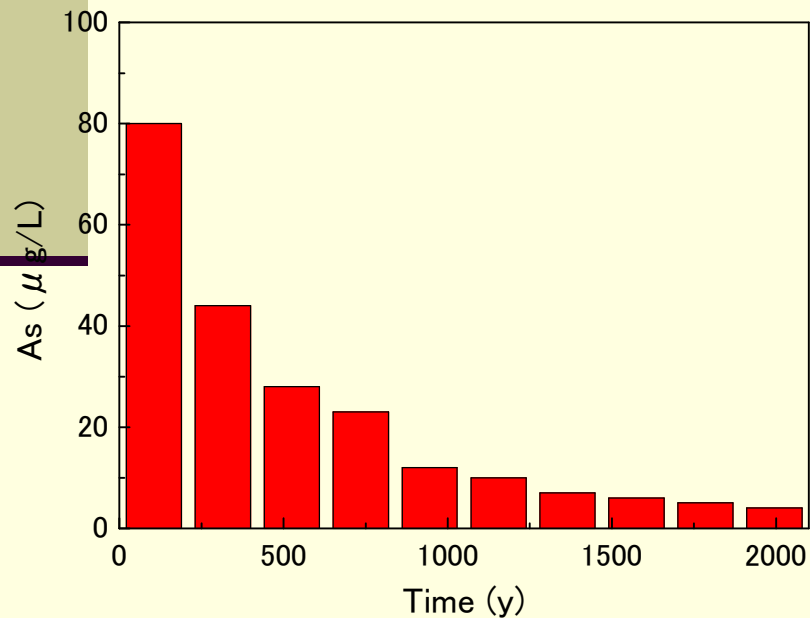


吸着層工法設計例



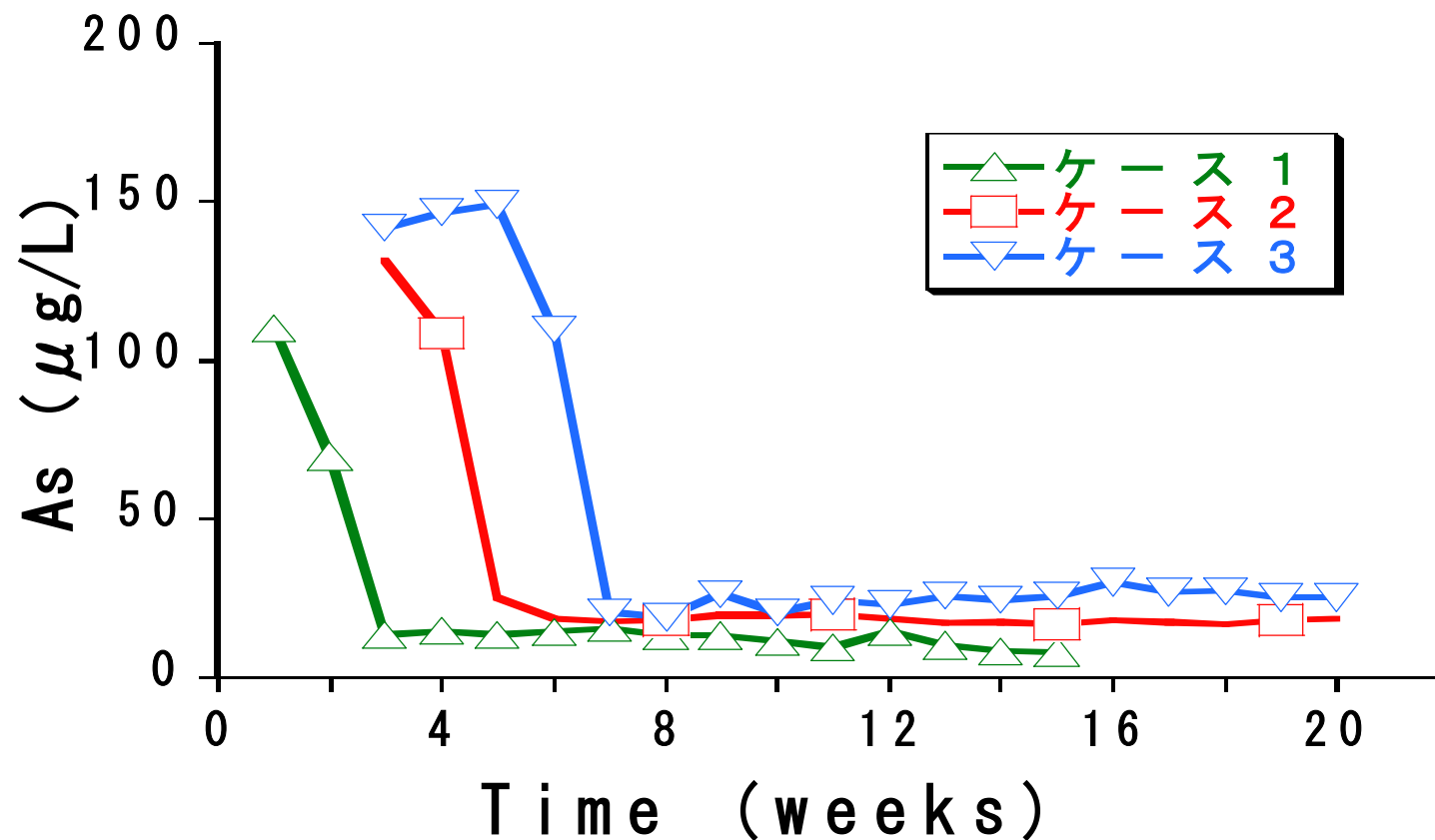
主な条件

- ・吸着層厚 0.3 m
- ・残土高さ 5 m
- ・吸着層密度 1.77 g/cm³
- ・吸着層分配係数 250~2500 ml/g



溶出濃度変化把握のためのカラム試験

■ 充填層厚の影響

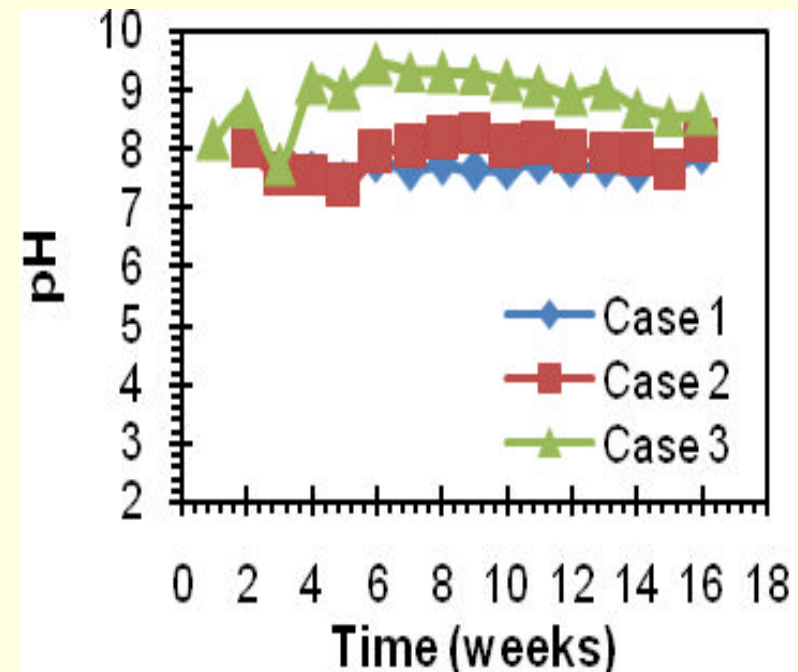
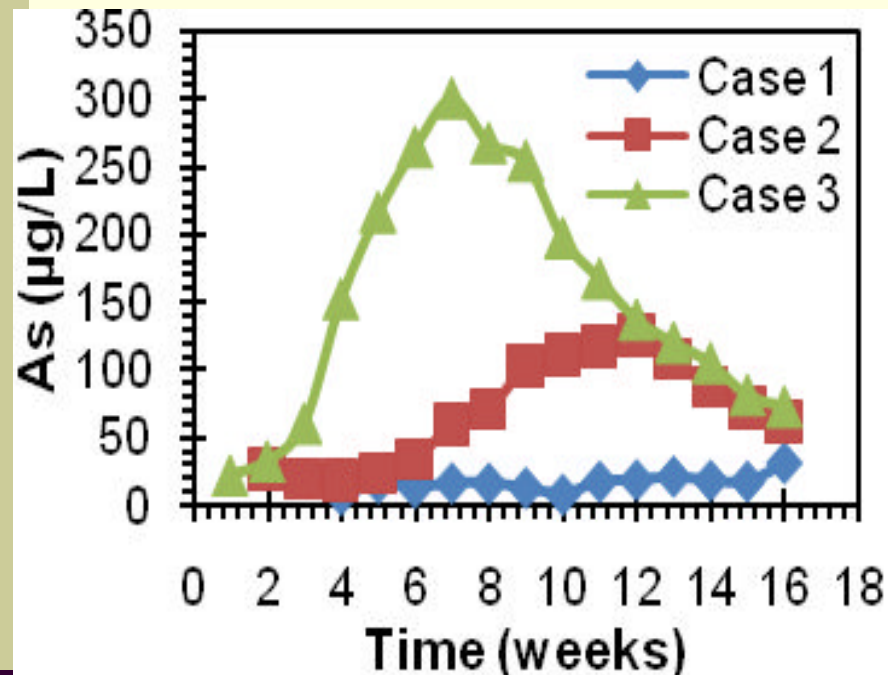


ケース1:
泥岩層厚15cm

ケース2:
泥岩層厚30cm

ケース3:
泥岩層厚45cm

カラム試験(浸透水量の影響)

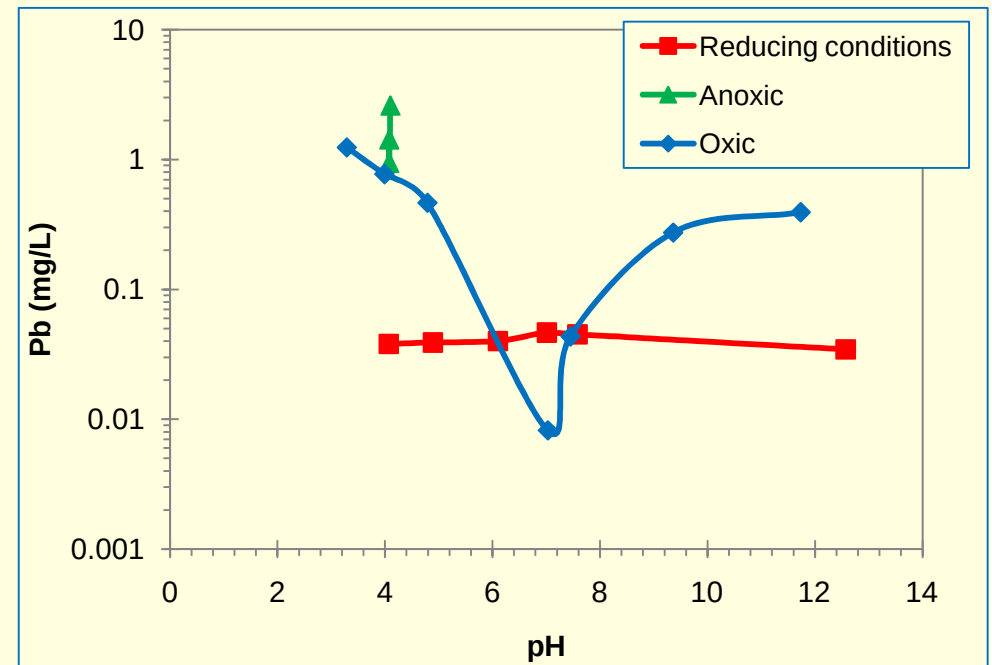
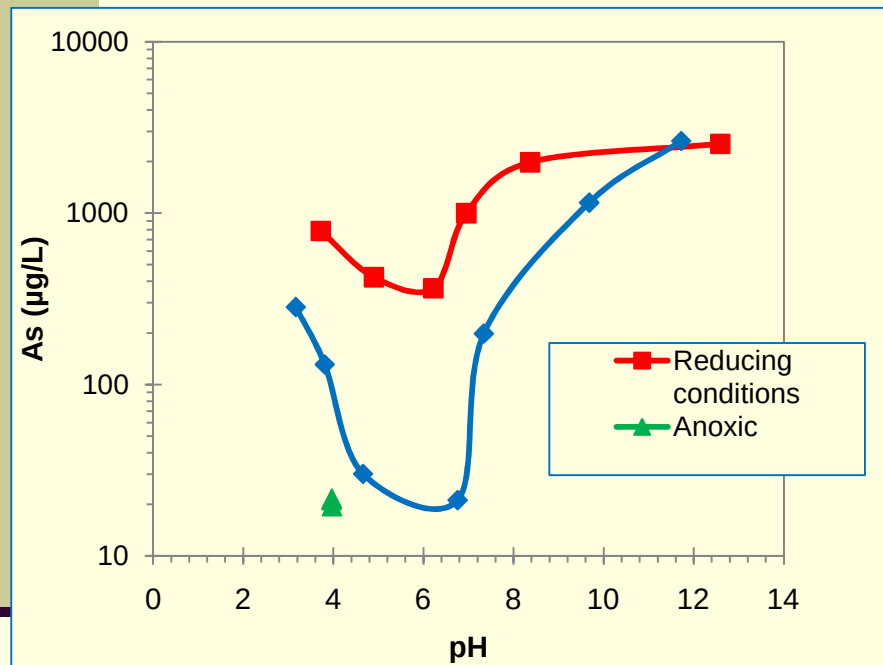


ケース1: 降雨浸透量 20 mm/w, 泥岩層厚20 cm

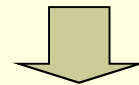
ケース2: 降雨浸透量 40 mm/w, 泥岩層厚20 cm

ケース3: 降雨浸透量 80 mm/w, 泥岩層厚20 cm

溶出量に及ぼすpHやEhの影響

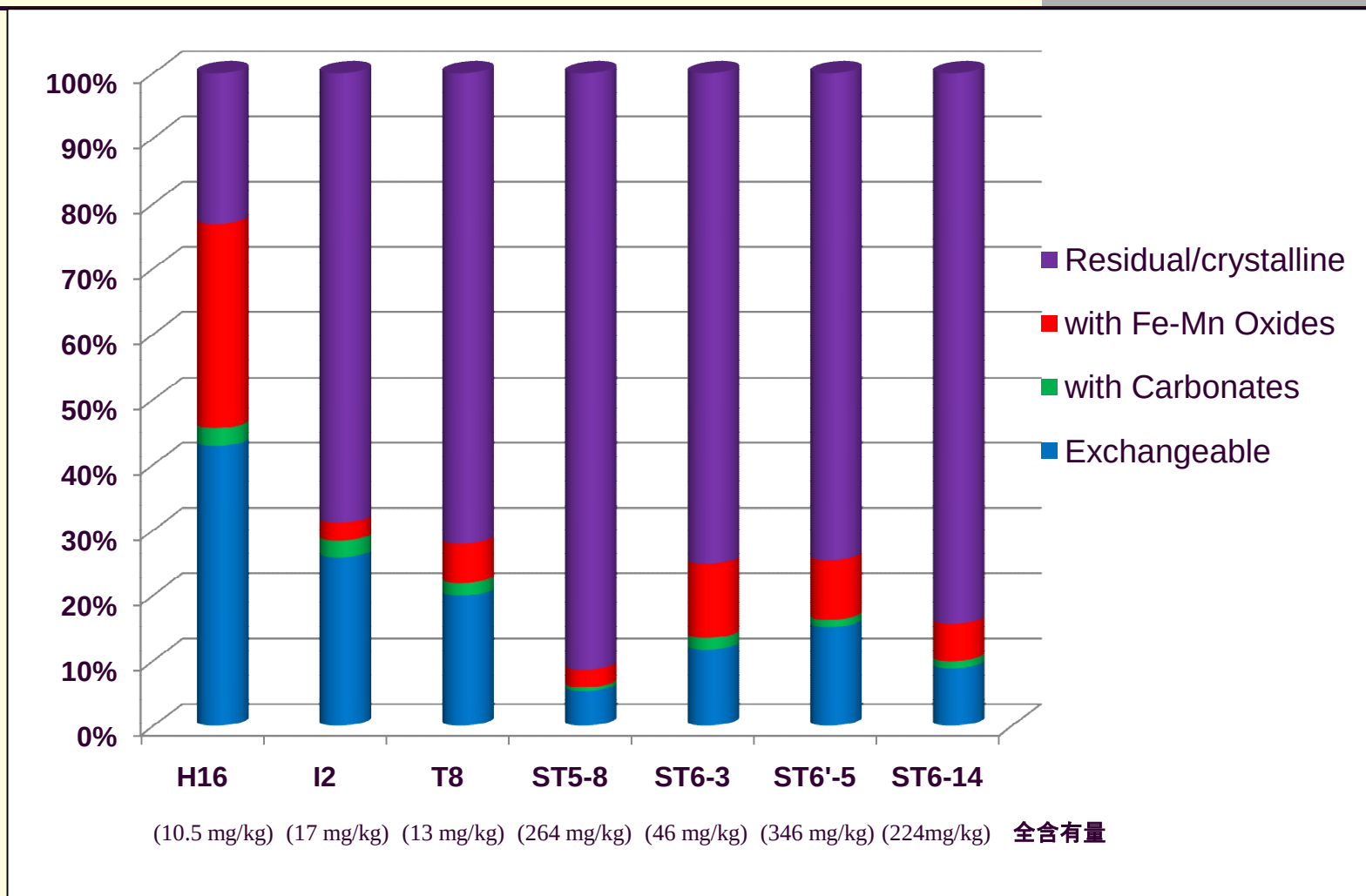


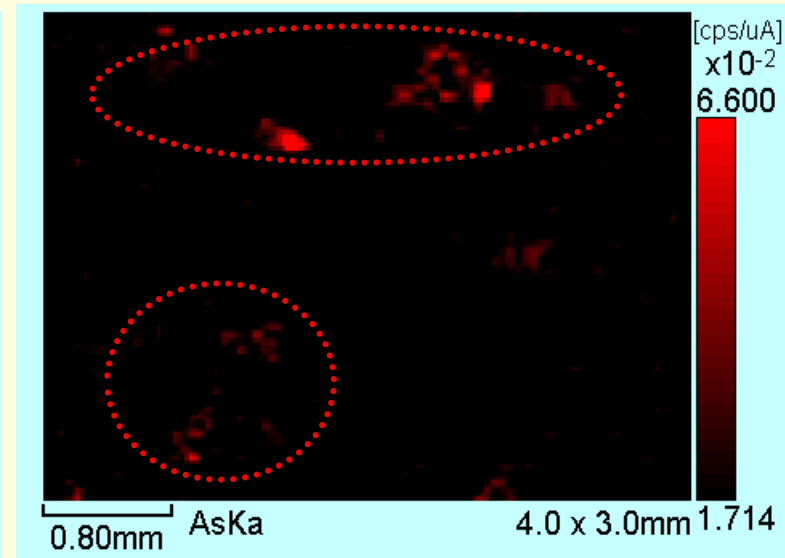
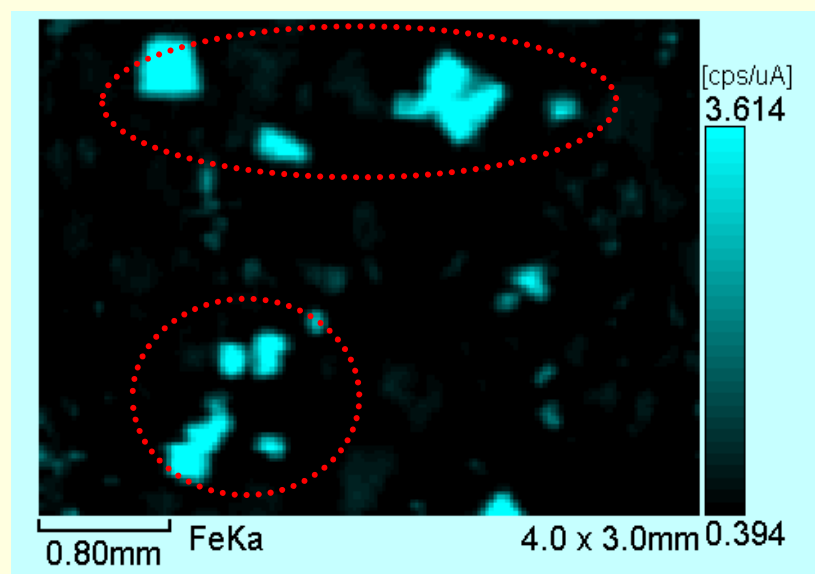
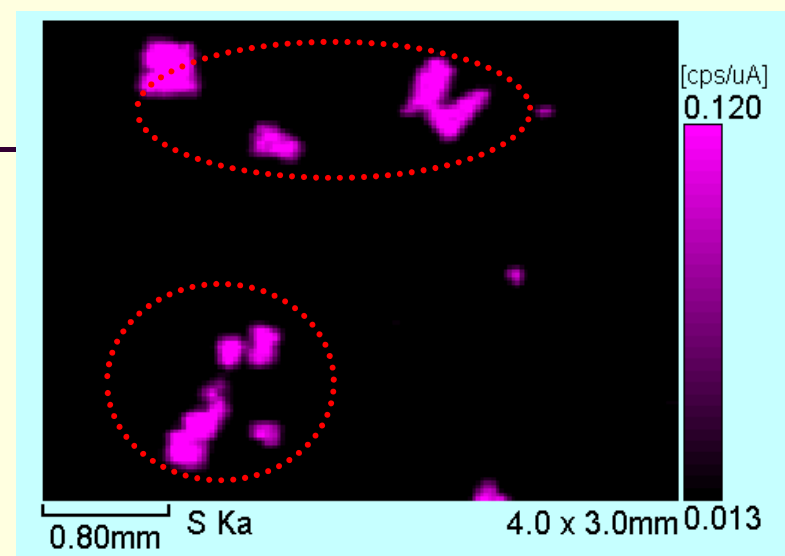
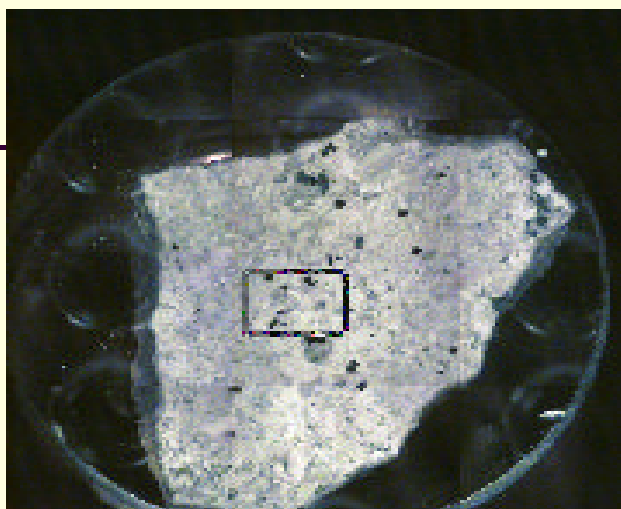
pH、Ehなどによって溶出量異なる



現地環境に近い条件で実施することが必要

Asの固相中の形態(分別抽出)





模擬土捨場試験



実現象を模擬した試験による発生源評価

性能評価・安全評価の検証

- 地下水流動：**地下水年代測定**による検証

$^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ 、 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$

^{36}Cl の半減期30万年

^{129}I の半減期1570万年

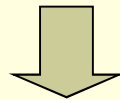
地下水流動解析結果を年代測定によって検証

地下水年代と地層の形成年代との比較

- 核種移行：**ナチュラル・アナログ**による検証

まとめ

- 処分後の評価も重要であるが、建設期間中の課題も重要
- 多くの経験が必要（想定外の事象、シナリオもある）



多くの概要調査地区と少しの精密調査地区が必要

- 性能評価・安全評価の結果をできる範囲で検証
- 広い知識を活用し、チャレンジ