



北海道大学



水資源とヒトへの健康被害評価のための
数値解析モデリング： 科学者と
コンサルタントとしてのアプローチ

4.23.2013

オハイオ州立大学
北海道大学大学院工学研究院土壤環境評価学分野
茨木 希

化学物質の拡がりを
より適切に評価

十分に安全を確保





自然環境は、化学物質にあふれている



岩石・土壤に含まれる重金属類等の化学物質



事故によってセシウムなどの化学物質が自然環境に流出してきている

A person wearing a green cap and a grey shirt is crouching on the bank of a stream. The water in the stream is a deep, muddy reddish-brown color. The person appears to be using a red tool or container in the water. The surrounding area is filled with dense, dry brush and some green plants. A large, dark pipe or culvert is visible on the left side of the stream, partially obscured by debris and rocks. The overall scene suggests a field study or environmental monitoring in a polluted area.

これらの汚染をマネジメントしなければならぬ

汚染源から受容者に化学物質が到達する

2つのマネジメントアプローチ



汚染源で自然由来の化学物質のマネジメントをする

汚染源



汚染源でのマネジメント

汚染源での濃度を環境基準以下にする
被曝する人が近隣にいない場合でも行う



暴露地点でのマネジメント

化学物質の暴露を基に暴露地点で評価する



汚染源から受容者までの
の汚染の拡がりの全体
像を把握する

汚染源

サイト概念モデル

- プロセスのモデルを適用して
曝露地点での濃度を予測する

受容者

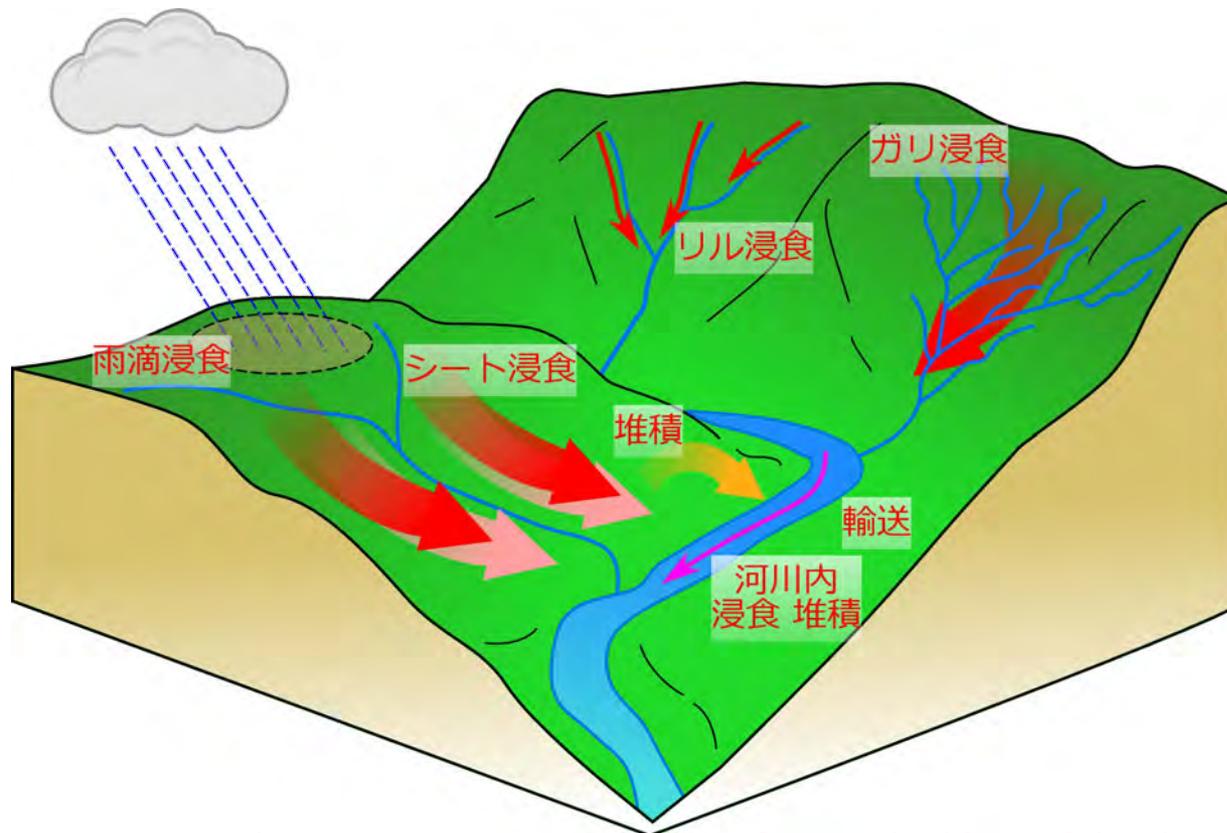
曝露地点での受容者に注目して
マネジメントを行う



暴露地点でのマネジメント

- このマネジメントの利点として
 - 暴露地点での濃度が基準以下となるように汚染源での濃度をコントロールする
 - 汚染源での濃度をコントロールできない場合、計算される**将来の**暴露濃度を元に暴露頻度、期間を調整し、摂取量をコントロールする

セシウムの移動



- セシウムを吸着した土壌は、浸食・堆積・輸送を通して拡がっていく
- これらのプロセスは、相互に関わり合い、複雑である

プロセス特化型

モデル	分類	概要	スケール	インプット/アウトプット
IQQM	概念	総合的水質水量モデルであり、河川流域スケールでの計画と水資源管理政策を評価するためのツールとして作られている。	集水域	インプット要件: 中 アウトプット: 汚染物質(栄養素、土砂、溶存酸素、土砂、塩類、藻)
USLE	経験	集水地域の水による侵食を予測する方法として広く用いられている。土壌流出に関する各種パラメーターの積として土壌流出量が計算される。	丘陵斜面	インプット要件: 高 アウトプット: 浸食
WEP	物理	流域を多数の格子に分割し、格子間の水・物質・エネルギーの循環・輸送を素過程に基づき計算する分布物理型の水循環モデル。	集水域	インプット要件: 高 アウトプット: 流出
MT3DMS	物理	パブリックドメインの飽和帯における溶質移動のモデルであり、世界的業界標準地下水解析コードMODFLOWとリンクされる。	集水域	インプット要件: 高 アウトプット: 化学物質濃度

地表プロセス集中型

モデル	分類	概要	スケール	インプット/アウトプット
PERFECT	物理	土壌管理慣行の影響を解析するために開発され、流出、浸食、豪州乾燥作物地帯での管理オプションに伴う作物生産量を予測する。	田畑	インプット要件: 高 アウトプット: 流出、浸食、作物生産量
ANSWERS	物理	浸食のプロセスの中に、土砂生成、堆積、輸送が入り、栄養塩の拡がりも物理ベースでシミュレーションする。	小集水域 (0.01km ² から 100km ²)	インプット要件: 高 アウトプット: 土砂、栄養素
CREAMS	物理	表面流出や根域の下にある土壌水に存在する汚染物質に対する農作業の相対的な影響を評価する地表モデル。	田畑 (0.4km ² から 4km ²)	インプット要件: 高 アウトプット: 浸食、堆積
GUEST	物理	裸地における土砂濃度の時間的変動を単一の浸食事象において予測するために開発された。	プロット	インプット要件: 高 アウトプット: 流出、土砂濃度
TOPOG	物理	三次元地形特性の水、炭素、溶質、土砂への影響を計算でき、集水域での収支をシミュレーションする。	小集水域 (10km ² まで)	インプット要件: 高 アウトプット: 浸水、浸食ハザード、溶質移動

河川プロセス集中型

モデル	分類	概要	スケール	インプット/アウトプット
EMSS	概念	オーストラリア東南クイーンズランド地域での集水域や水路での水質管理のため開発され、降雨・流出水と汚染物質出流出を扱う。	集水域	インプット要件: 低 アウトプット: 流出, 土砂負荷、窒素負荷、リン負荷
TODAM	物理	浮遊堆積物及び河床に堆積中の放射性核種の移行をシミュレートする1次元の数値解析モデル。	集水域	インプット要件: 高 アウトプット: 流出, 土砂負荷、放射性核種
FETRA	物理	浮遊堆積物及び河床に堆積中の放射性核種の移行をシミュレートする2次元の数値解析モデル。	集水域	インプット要件: 高 アウトプット: 流出, 土砂負荷、放射性核種、化学物質
IHACRES-WQ	経験 / 概念	降雨流出モデルと河川での浮遊土砂の輸送、流出-浮遊土砂、土砂-栄養塩のモデルから構成されている。	集水域	インプット要件: 低 アウトプット: 流出、土砂、栄養塩
SWRRB	概念	大規模の複雑な集水域での水文、土砂、栄養塩、農薬(殺虫剤)輸送をシミュレーションするために開発された。	集水域	インプット要件: 中 アウトプット: 流量、土砂、流出栄養素量、流出除虫剤量

河川プロセス集中型

モデル	分類	概要	スケール	インプット/アウトプット
LASCAM	概念	塩類と水収支モデルであり、集水域スケールでの水文プロセスをシミュレーションするために土砂生成と輸送アルゴリズムを含む。	集水域	インプット要件: 中 アウトプット: 流出、土砂、塩フラックス
LISEM	物理	水文と侵食を取り扱い、その空間分布をシミュレーション結果とし、数多くのプロセスをシミュレーションすることができる。	小集水域 (0.01km ² から 100km ²)	インプット要件: 高 アウトプット: 流出、流出土砂量
SWAT	概念	集水域スケールでの水、土砂、リンなどの栄養塩や農薬等の化学物質の輸送を解析する。	集水域	インプット要件: 高 アウトプット: 流出、土砂、農作物の生育、栄養塩
AGNPS	概念	非点源汚染モデルであり、USDA-ARSにより開発され、農村流域での流出水の水質の予測と分析をする。	小集水域 (0.01km ² から 200km ²)	インプット要件: 高 アウトプット: 流出量、ピーク速度、浮遊物質、窒素、リン、化学的酸素要求量濃度
SEDNET	経験 / 概念	定常状態モデルで丘陵傾斜、ガリ、河川網での川岸からの土砂生成と堆積を予測するために開発された。	集水域	インプット要件: 中 アウトプット: 浮遊土砂、地表流からの相対的貢献率、ガリとバンク侵食プロセス

総合型

モデル	分類	概要	スケール	インプット/アウトプット
WEPP	物理	メインのプロセスとして、浸食、水文学、植物の成長と植物残渣、水利用、水理的、土壌プロセスを取り扱う。	丘陵斜面/集水域	インプット要件: 高 アウトプット: 流出、土砂特性、土砂損失形態
MIKE-11	物理	河川での水質をシミュレーションするためのソフトウェアシステムで、降雨一流出、流体力学、水質、土砂輸送のモジュールから構成される。	集水域	インプット要件: 高 アウトプット: 土砂流出量、流出
HSPF	概念	集水域での水文と水質（窒素、リン、浮遊土砂、他の有毒有機、無機汚染物質）をシミュレーションする。	集水域	インプット要件: 高 アウトプット: 流出、流速、土砂負荷、栄養素濃度

どのモデルを使えば
良いのか？

評価目的への対応性

- 移行挙動の予測
 - 移行による放射性物質の分布の変化の予測
 - **特定の場所への放射性物質の蓄積の可能性の予測**
 - 除染や汚染移動抑制策の効果の予測
 - 除染計画の立案支援
 - 除染に伴う廃棄物の発生量及び汚染程度の予測
-
- 目的によりスケール、媒体が異なってくる
 - **属性**を元にしたモデルの選択

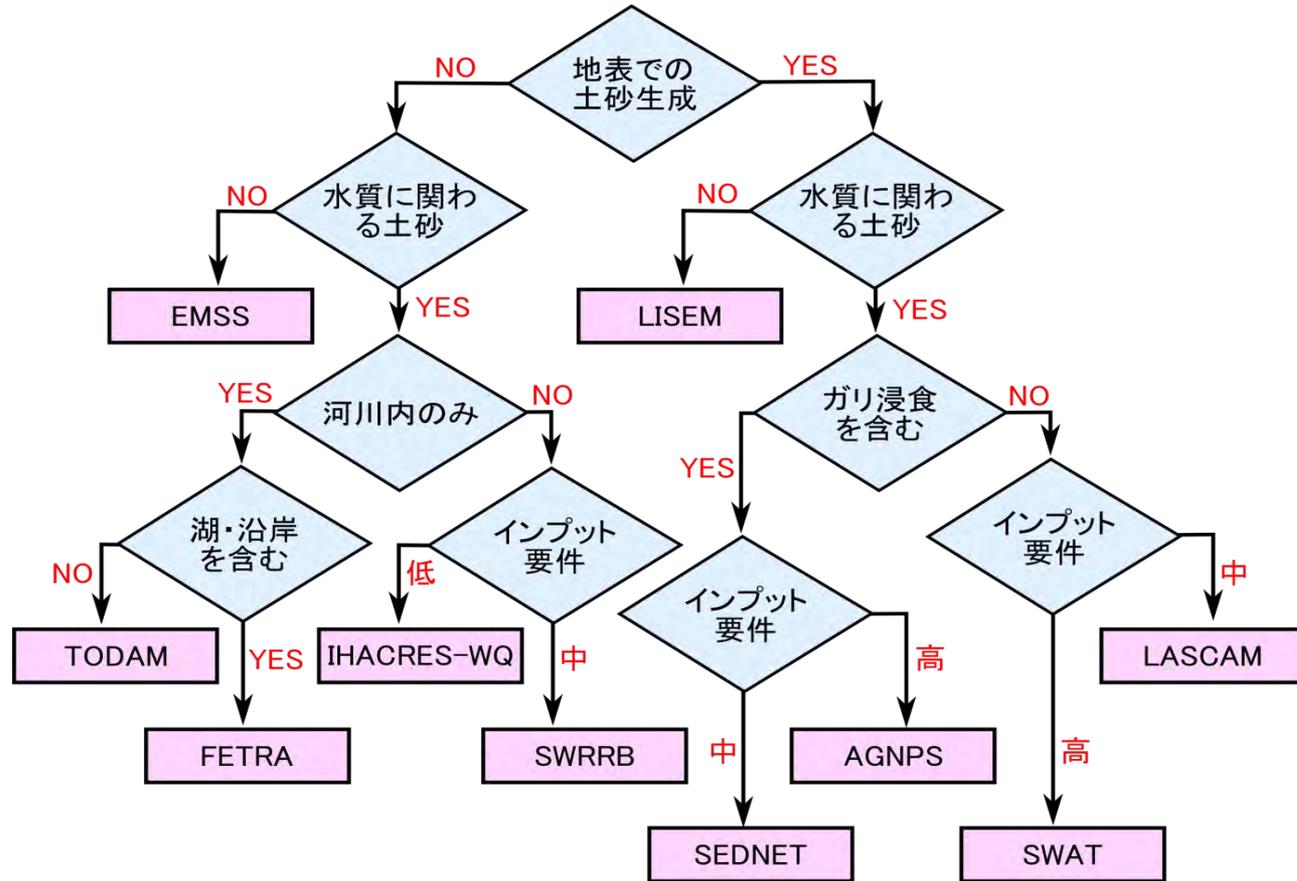
モデルの属性

- 対象とする媒体
 - 単体か複合体か
 - メインとなる媒体
 - 丘陵斜面を扱う場合、浸食量の多いガリなどを含む必要があるか
- スケール
 - プロットサイズから集水域

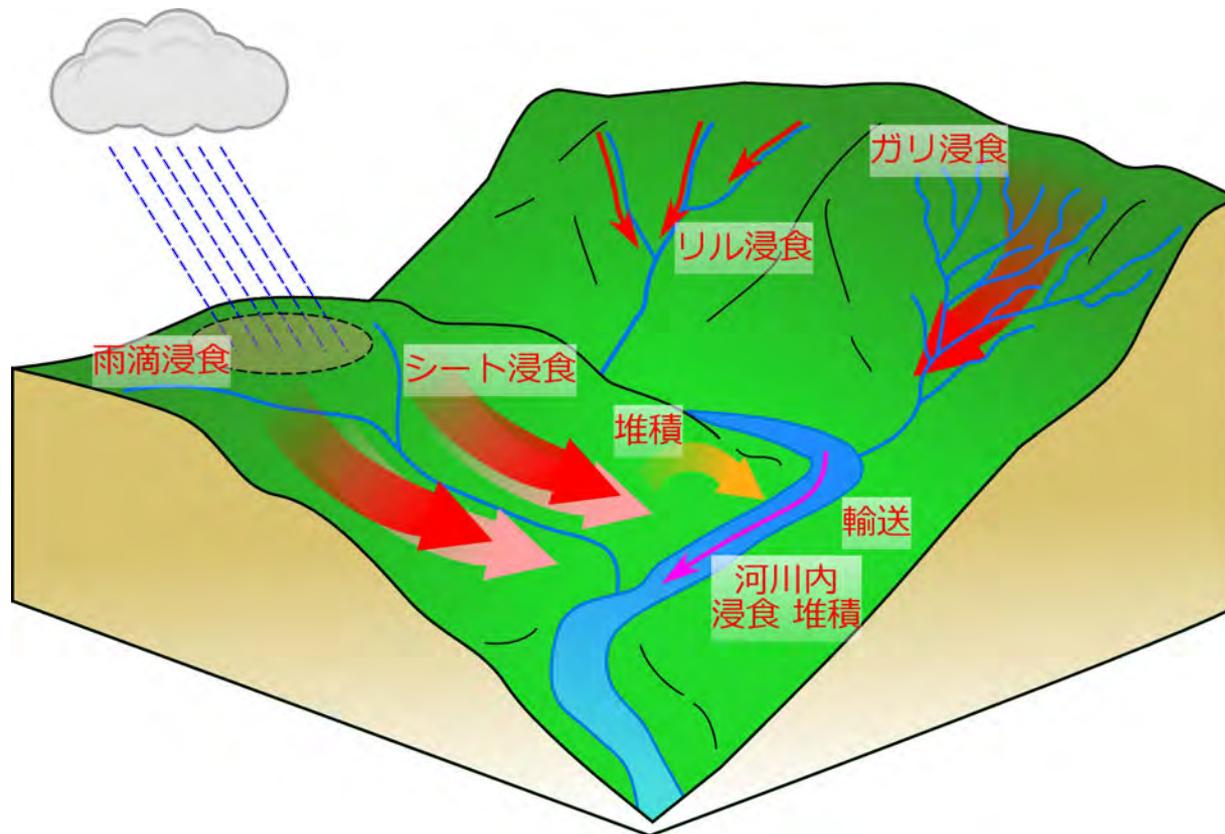
モデルの属性

- 必要とするアウトプット
 - 事象ベース、時間、日単位、年平均
 - セシウム以外の放射性核種も考慮するのか
 - 土砂量のみ注目し、セシウム量は土砂量を元に推定できるか
- インプット・データ
 - 取得可能性とコスト
 - データに含まれる誤差

河川集中型での属性を元にしたフローチャート



セシウムの移動



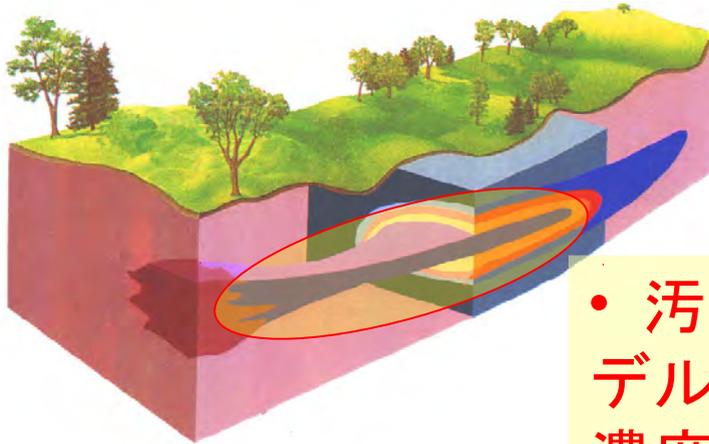
- 総合的モデルを使うのではなく、地表プロセス集中型と河川プロセス集中型を組み合わせることも可能

異なるモデルの組み合わせ

- しかし、それぞれのモデルが扱う
 - 空間的スケール
 - 時間スケールとタイムステップ
 - 結合の仕方に注意を払う必要
- USLE 一年あたりでの丘陵斜面からの土砂生成量の計算のみ
- 生成された土砂の内のどれぐらいの割合がどれぐらいの時間をかけて河川に流入するかという情報が必要

異なるモデル選択の アプローチ

暴露地点でのマネジメント

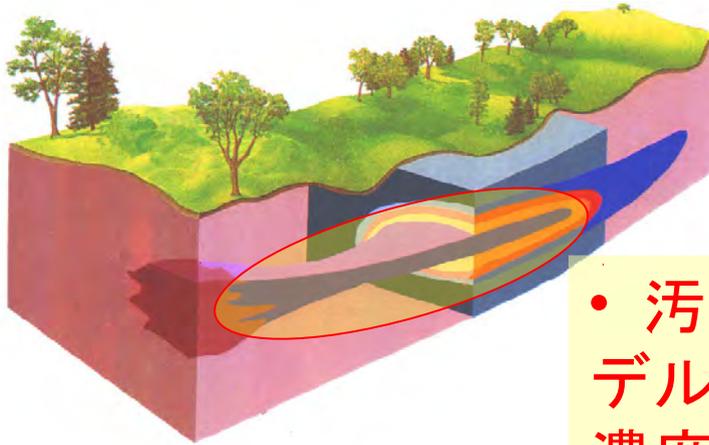


- 汚染の広がるプロセスのモデルを適用して曝露地点での濃度を予測する

- モデルの適用

- 簡単なモデル、複雑なモデルなどいろいろな種類のモデルを適用することができる

段階 (Tier) アプローチ



- 汚染の広がるプロセスのモデルを適用して曝露地点での濃度を予測する

- サイト概念モデルを作る場合
 - 第一段階として複雑なモデルを適用せずに簡単なモデルを適用する
 - 段階を増やしていくにつれてより複雑なモデルを適用する

段階 (Tier) アプローチ

- Tier 1 - スクリーニング (簡単なモデル)
- もしもTier 1での結果でリスクが高いと出た場合
 - Tier 2に進む (より複雑なモデル)
- もしもTier 2での結果でリスクが高いと出た場合
 - Tier 3に進む (複雑なモデル)

段階 (Tier) アプローチ

- 複雑なモデル
 - 多くのプロセス、多次元、土壌の不均一性などを表すことができる
 - 本当に支配的、重要なプロセスは何か？
 - 多くのプロセス—それぞれのプロセスにパラメーターが必要となる
 - 必要とされるパラメーター数が増大
 - それらの値の不確実性も増大
 - モデルを使って得られた暴露濃度の不確実性も増大

段階 (Tier) アプローチ

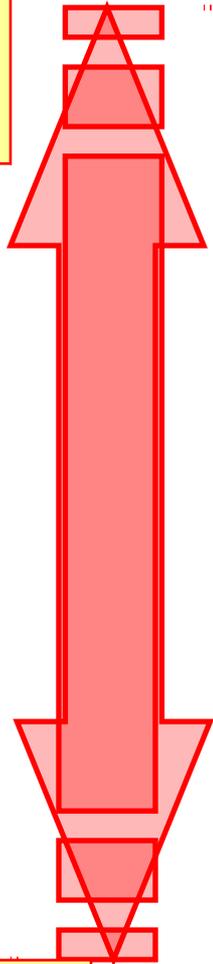
- 単純なモデル
 - パラメータ一数が少ない
 - パラメータ値の不確実性も減少
 - 計算された暴露濃度の不確実性も減少
 - 計算された暴露濃度は実際とは違う可能性が高い
 - しかし、パラメータに保守的な値を使って得られた保守的な暴露濃度でもリスクが低いと計算されるなら可とする

Tierアプローチ

- Tier 1 (例: Ogata-Banks モデル)
 - 1次元地下水流
 - 1次元移流分散 (吸着係数)
- Tier 2 (例: Biochlar モデル EPA)
 - 1次元地下水流
 - 3次元移流分散 (有機溶剤の分解)
- Tier 3
 - 3次元地下水流
 - 3次元移流分散 (より複雑な化学反応)
 - 土壌の不均一性

計算結果の保守性、
安全性

計算結果の精度、
不確実性





地中にあるベンゼンによる汚染

地中にあるベンゼンによる汚染

- 揮発ベンゼンが拡散して、地表から家屋に入っていく
- ベンゼンの拡散係数は、以下のように水分量によって大きく変化する

含水率	有効拡散係数(m ² /day)
0.01	1.45 x10 ⁻¹
0.05	8.83 x10 ⁻²
0.10	4.20 x10 ⁻²
0.25	4.15 x10 ⁻⁴

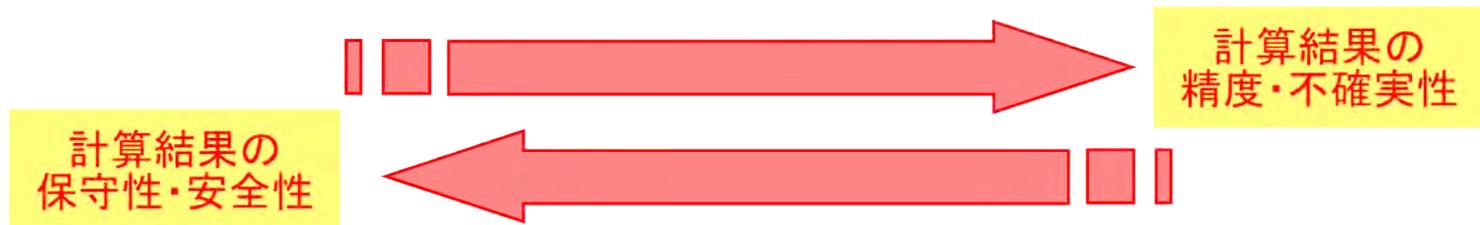
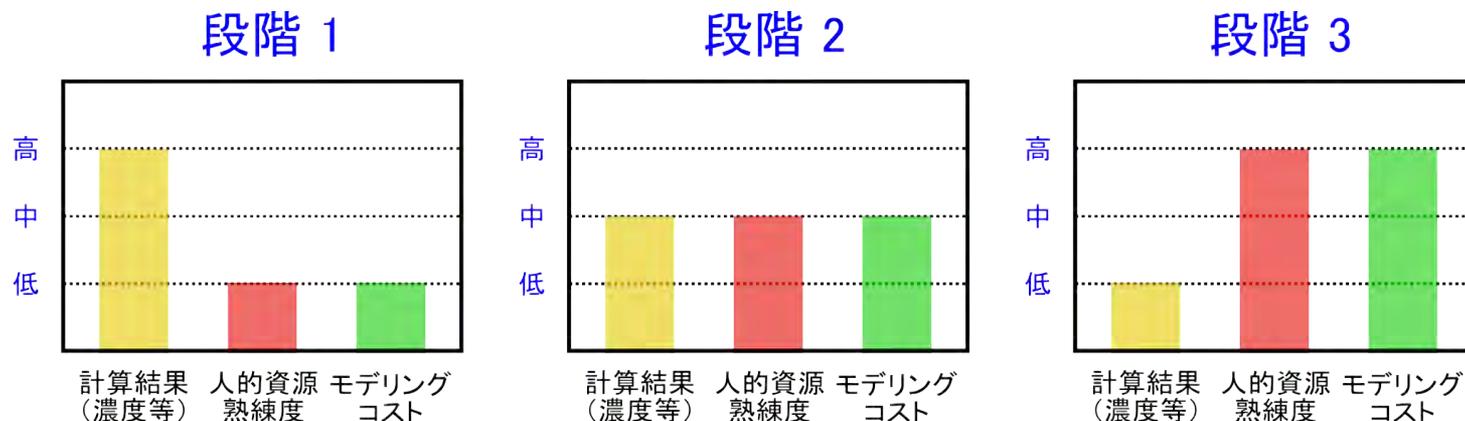
地中にあるベンゼンによる汚染

- Tier 1、2、3 での設定は？
 - 考慮する拡散の次元
 - 地下での土壌水分の分布
 - 汚染源での濃度変化（その仮定）
 - 必要とされるパラメーター？

地中にあるベンゼンによる汚染

- Tier 1、2、3での設定は？
 - 考慮する拡散の次元
 - 地下での土壌水分の分布
 - 汚染源での濃度変化（その仮定）
 - 必要とされるパラメーター？

Tierアプローチ



- 複雑なTier3では結果の信頼性を証明するのが難しい
- 北米の多くのコンサルタントでは、データの確実性、モデルの確実性を考慮し、Tier 1あるいはTier 2のアプローチを取っている

Tierアプローチ

- より複雑なモデルを使い、より正確な暴露濃度を計算する（科学者としてのアプローチ）よりも
- より簡単なモデルを使い、
 - 不確実性の低い
 - 保守的な暴露濃度をもとにマネジメントを行う（コンサルタントとしてのアプローチ）

サイト概念モデルの適用例

- 目的
 - 暴露地点での濃度を環境基準以下にするように汚染源での濃度をコントロールする
 - シミュレーションモデルを使い、将来にわたる暴露濃度を予測する
 - シミュレーション結果の利害関係者への説明を念頭



音威子府

音威子府バイパス (旭川開発建設部)

3 トンネルを建設する (総延長 8,000m)

ズリと呼ばれる廃石・残土からヒ素やセレンが溶出する

ズリの総量は、860,000 m³



札幌ドームに敷き詰めると ビル20階分

ズリの総量は、860,000 m³

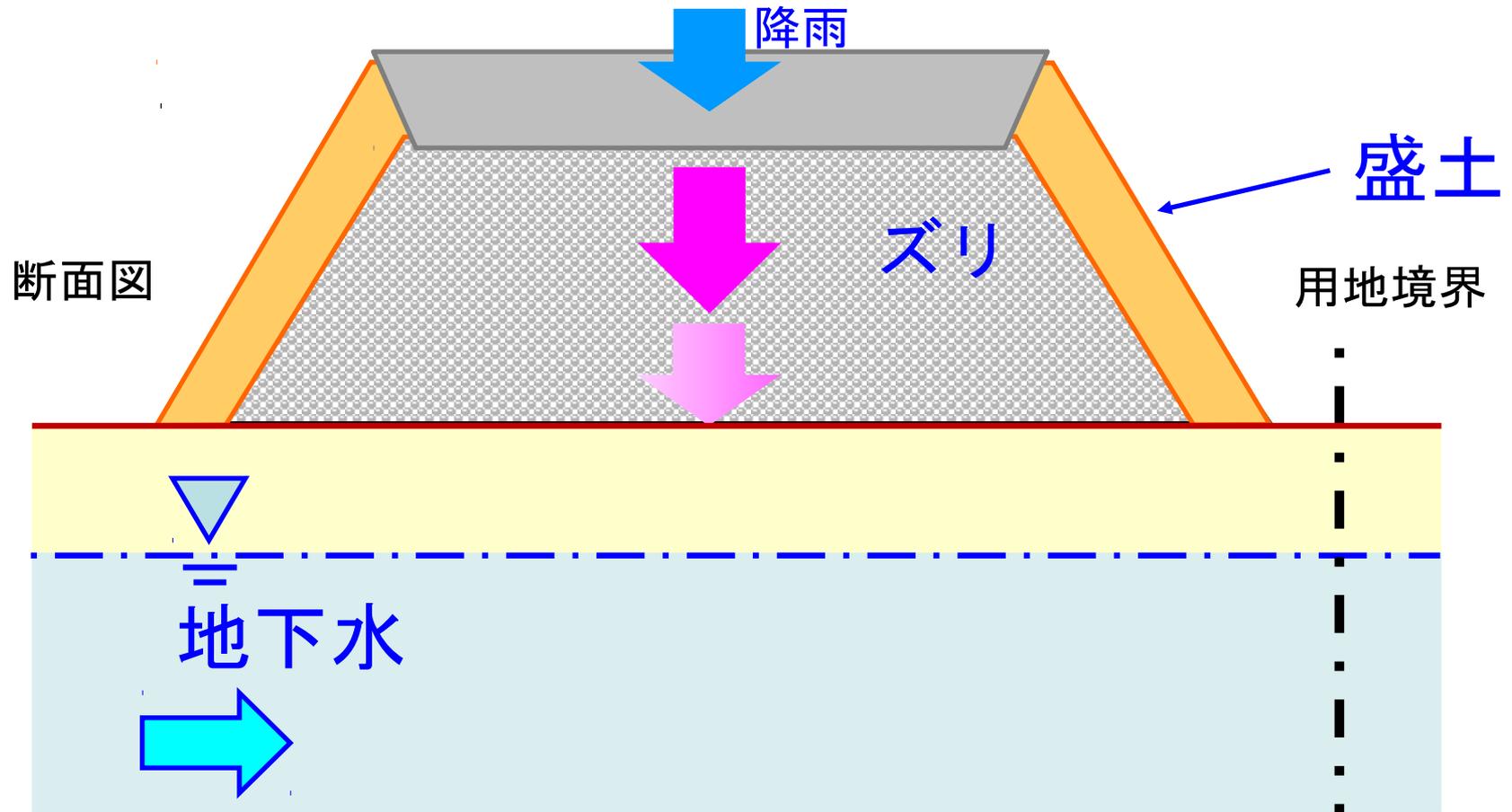


ズリを道路の盛土として使用する

ヒ素が出てくる可能性があるのでマネジメントを行う必要がある

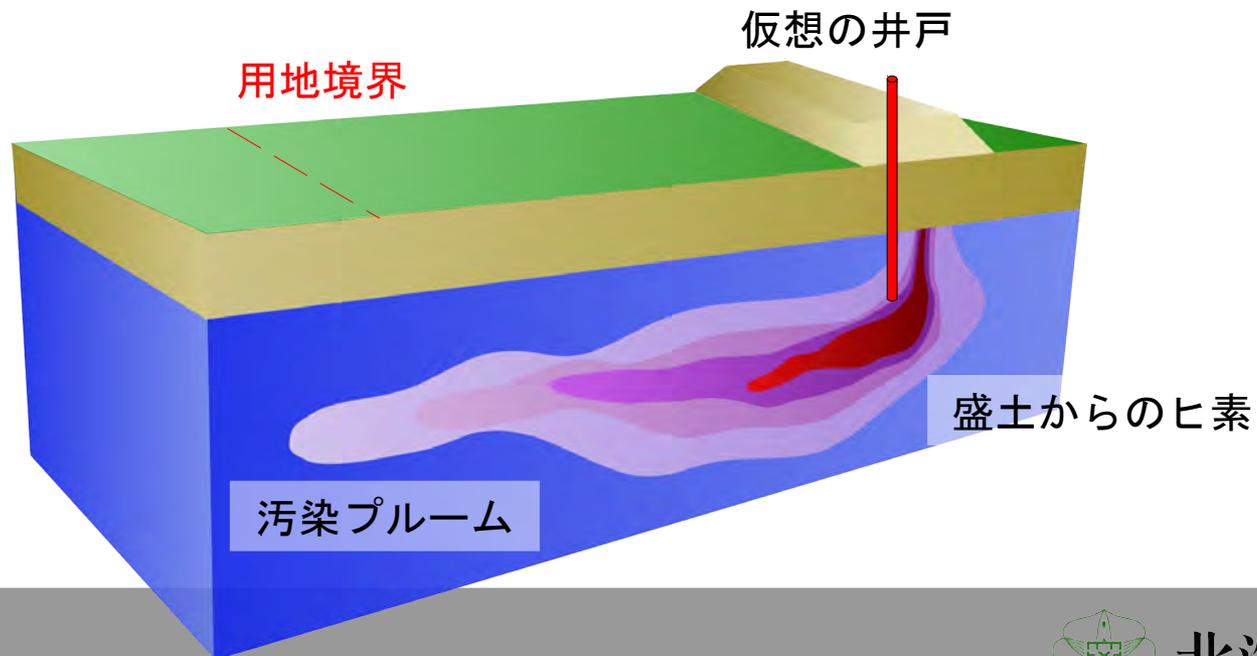
ズリの管理法

- 道路からの降雨浸透によりヒ素がズリから溶出する

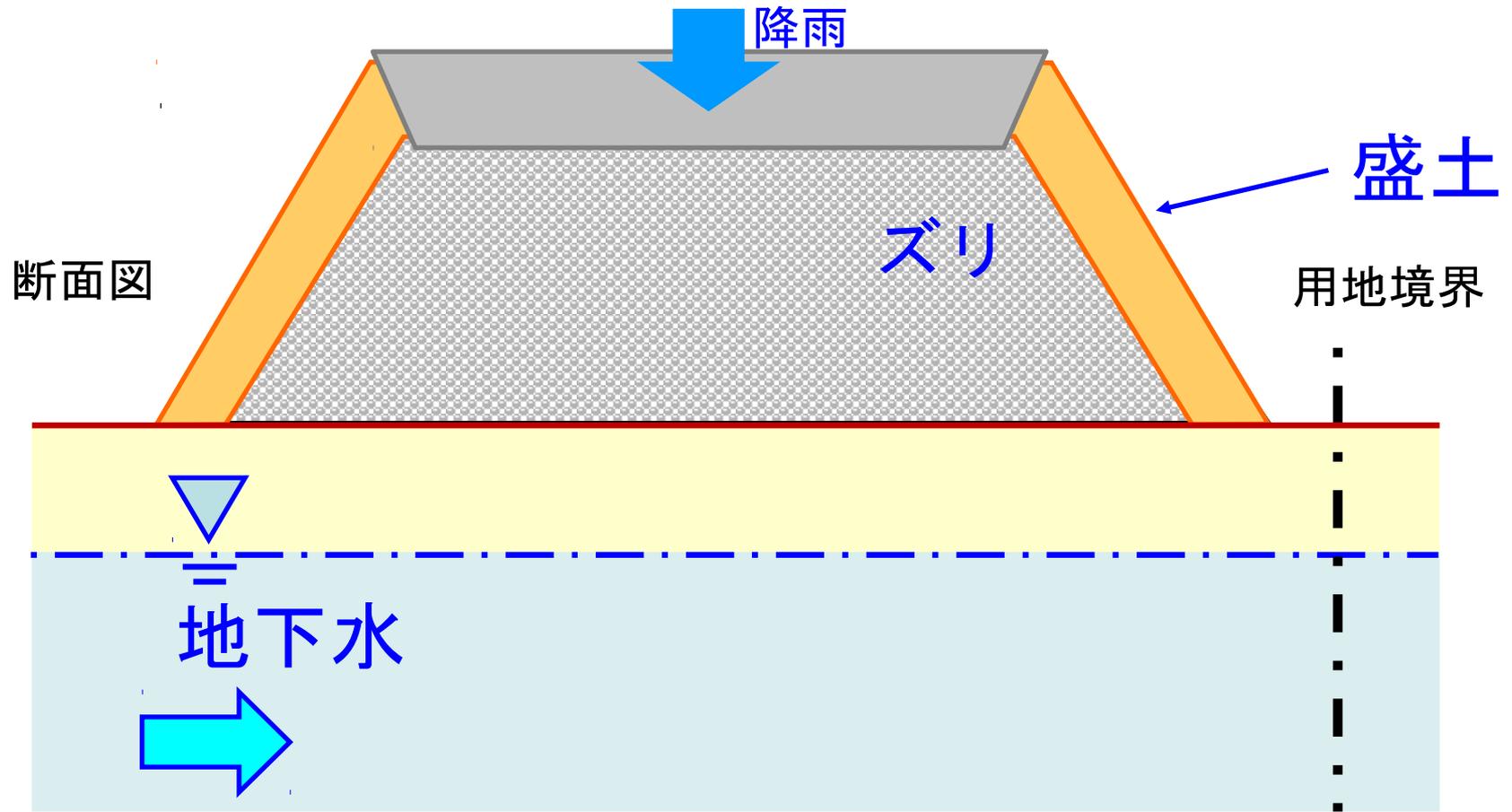


現段階のアプローチ

- 現段階のアプローチ
 - 盛土の真上に人が住み、その水を飲む

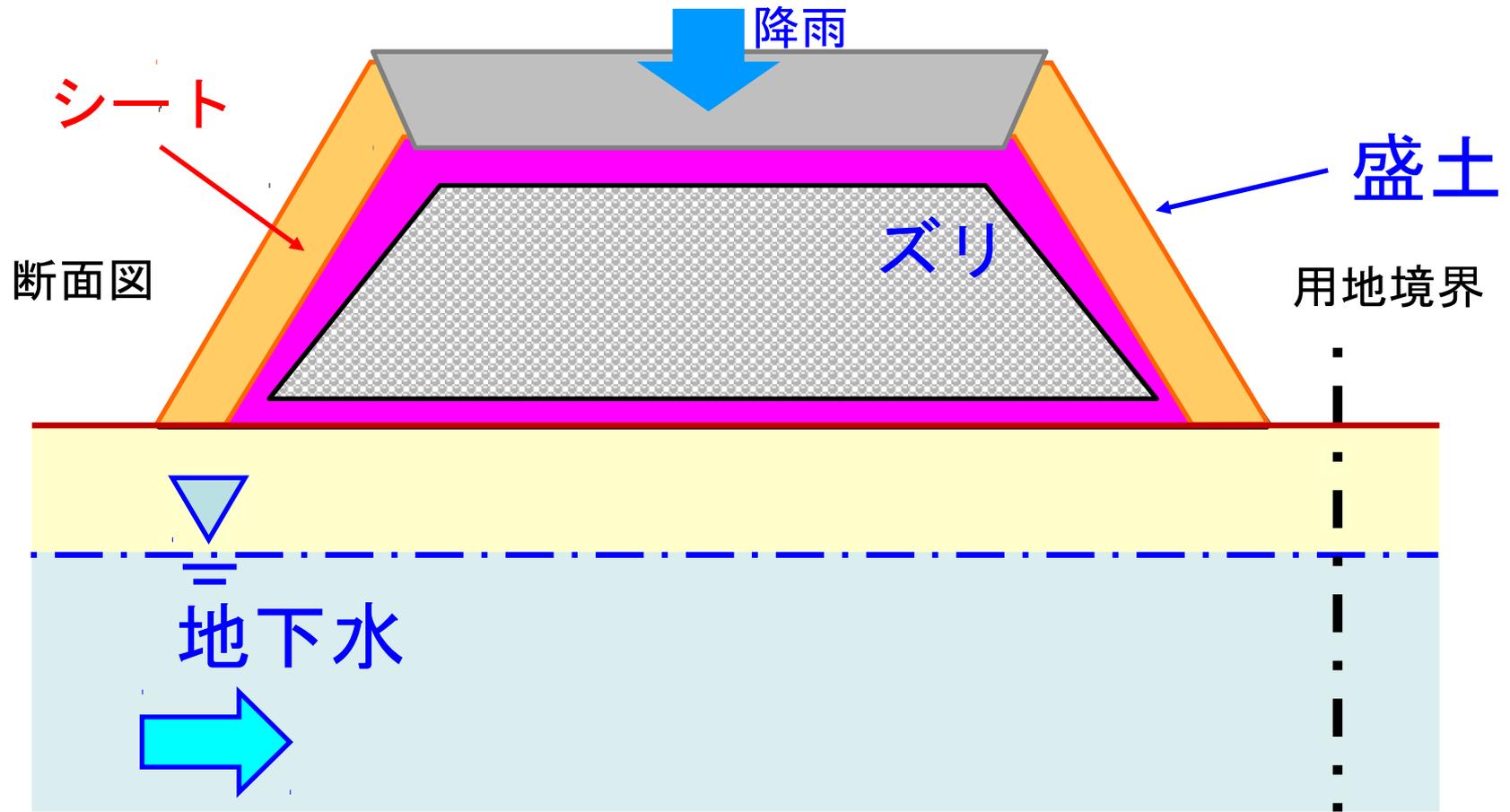


一般的なズリの管理法 シート被覆



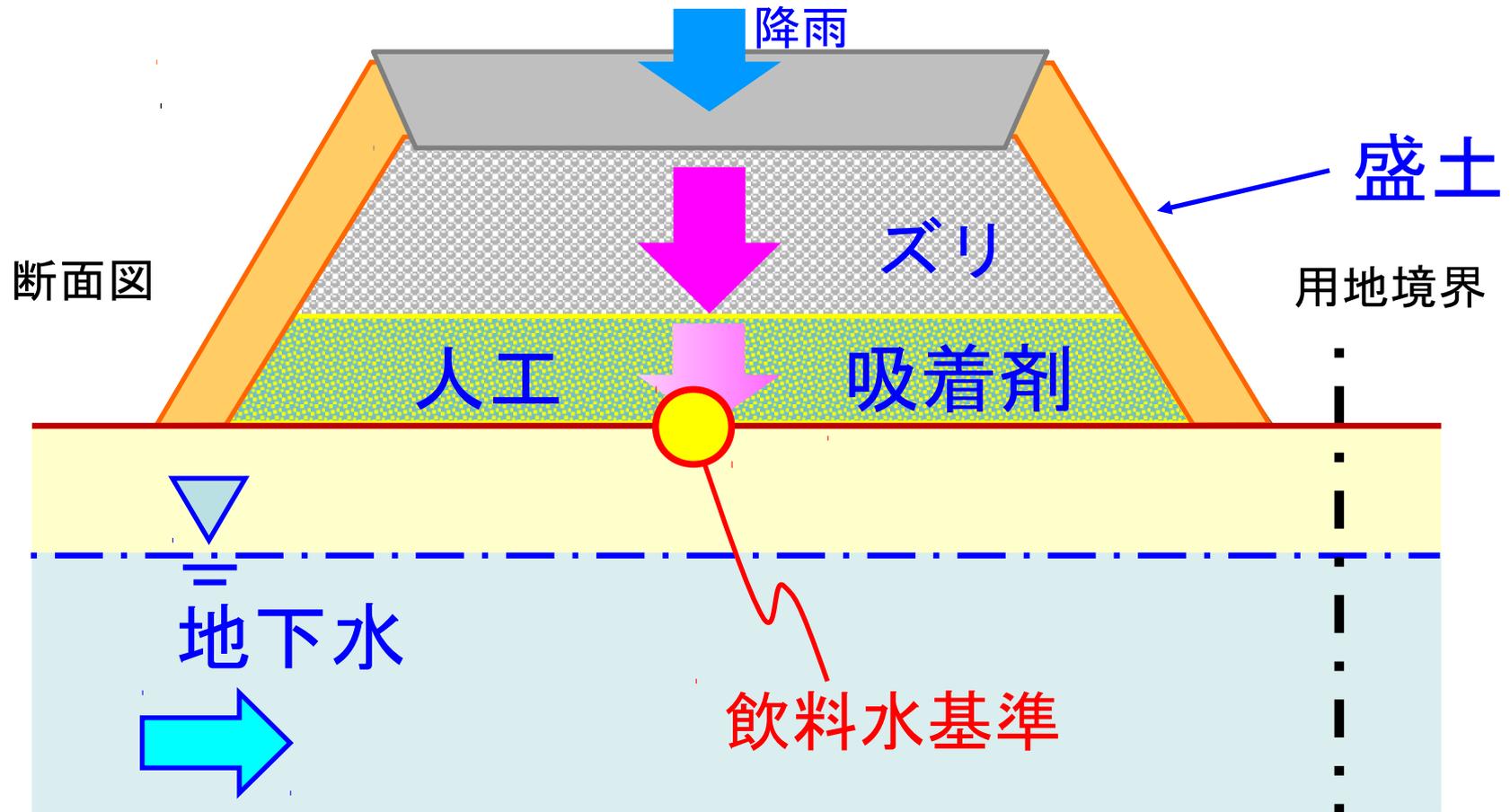
一般的なズリの管理法 シート被覆

- シートで被覆し、降雨浸透をゼロにする



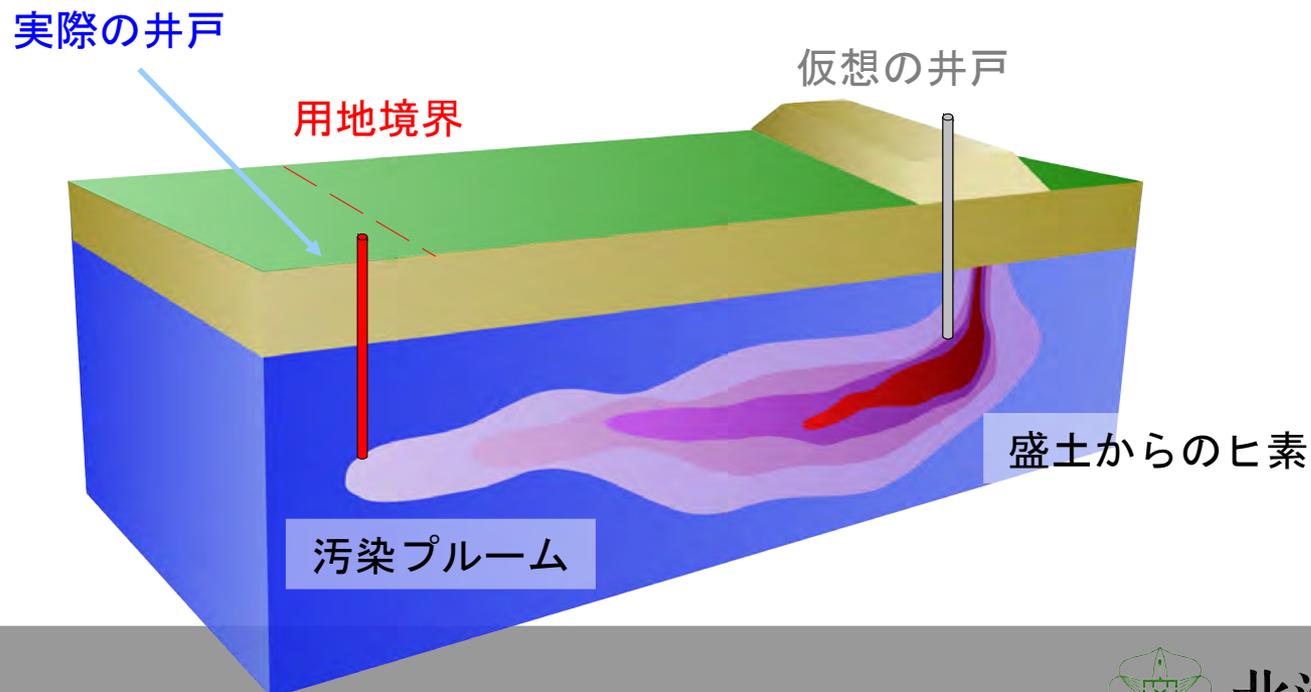
一般的なズリの管理法 人工吸着剤

- ズリの直下で飲料水基準以下になるようにする



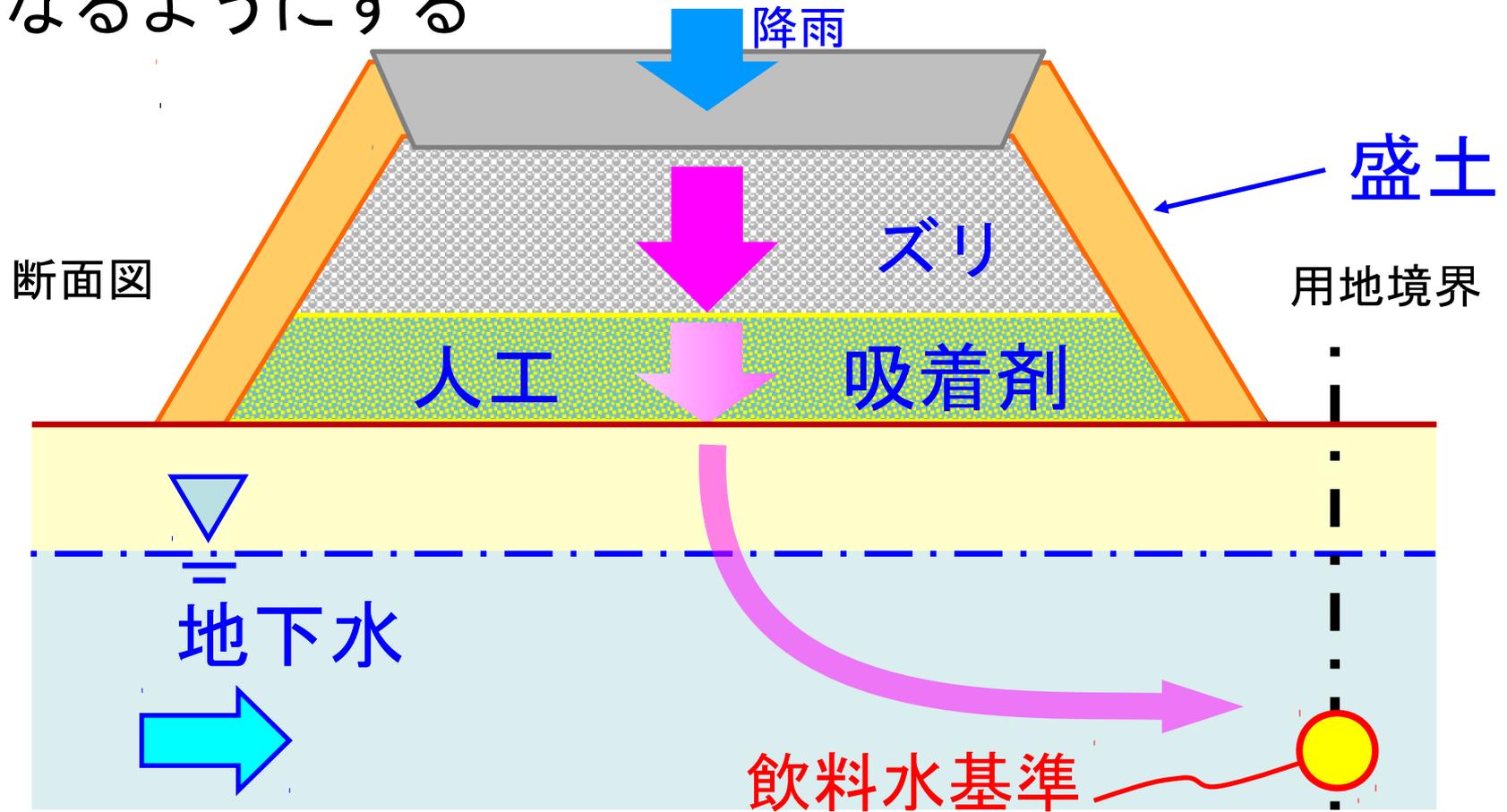
新しいアプローチ

- 現段階のアプローチ
 - 盛土の真上に人が住み、その水を飲む
- **新しいアプローチ**
 - 実際の曝露地点に人が住み、その水を飲む



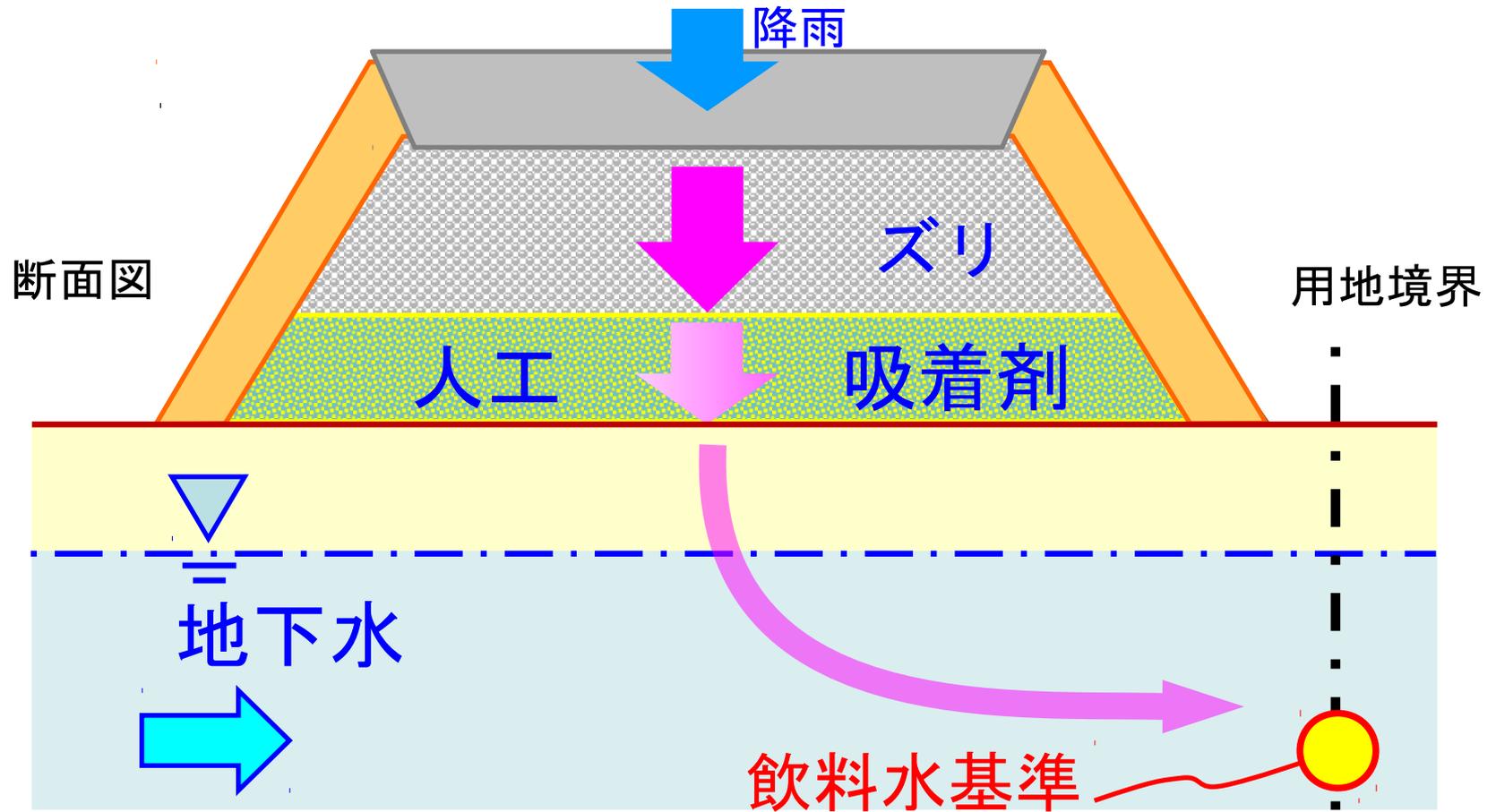
新しいアプローチを元にしたズリの管理方法

- **実際の井戸**ではなく、**用地境界**で飲料水基準以下になるようにする



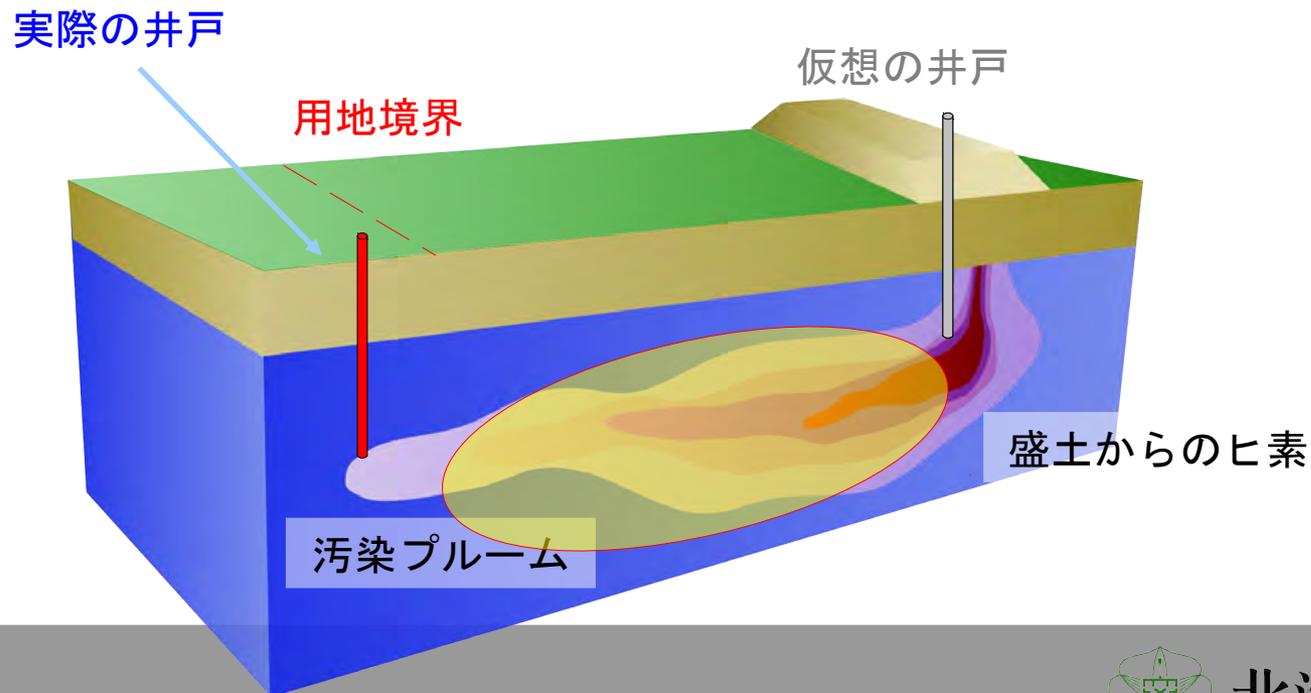
新しいアプローチを元にしたズリの管理方法

- 旭川開発建設部が始める **AK2B** アプローチ



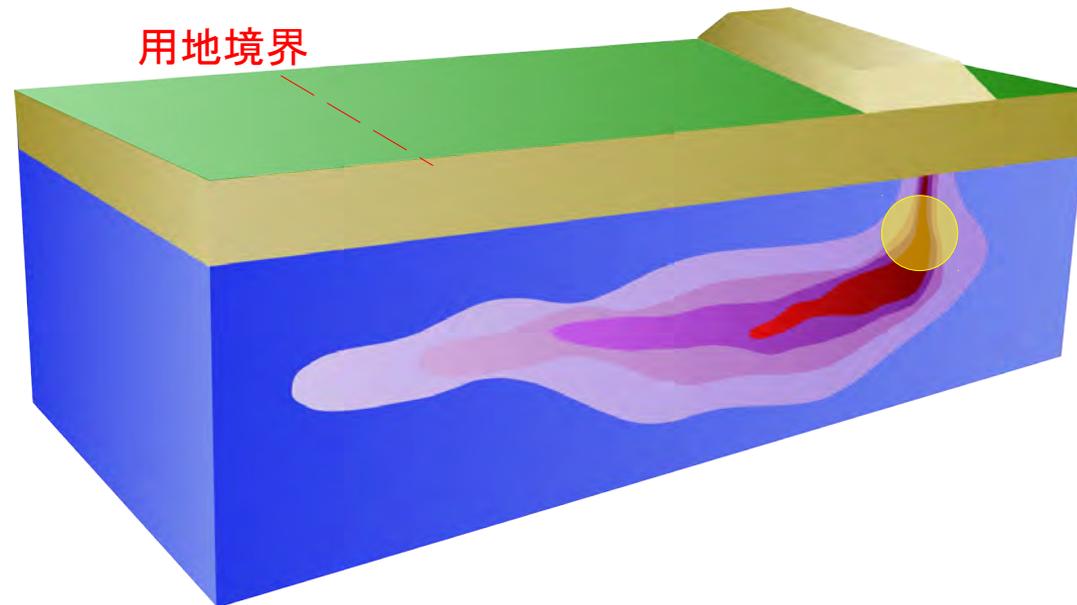
新しいアプローチ

- **新しいアプローチ**
 - 実際の曝露地点に人が住み、その水を飲む
- ヒ素の拡がりをモデルを使って表す
サイト概念モデル



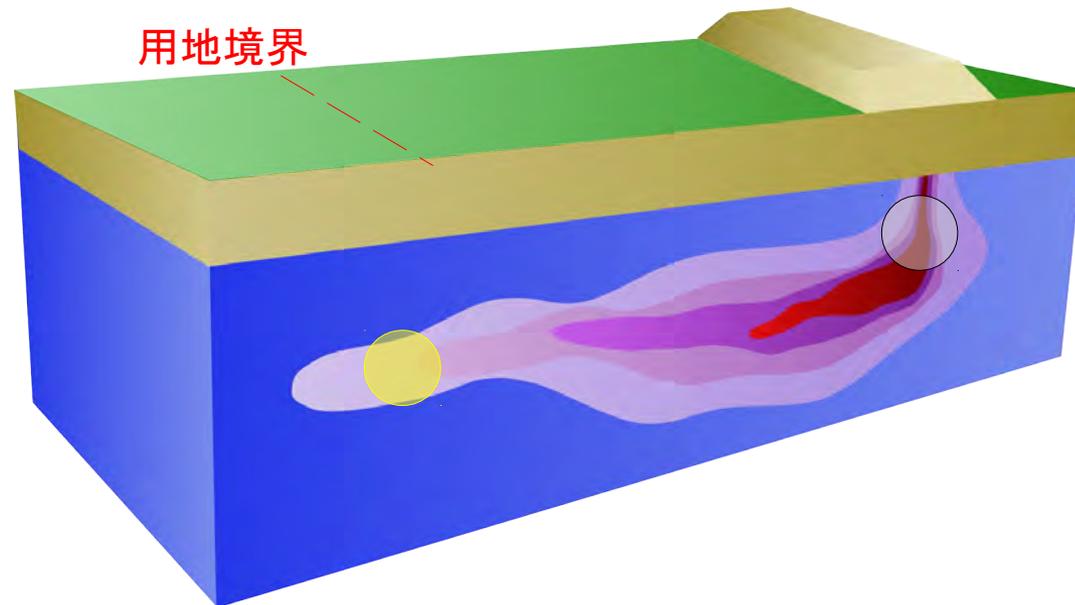
現段階のアプローチ

- 盛土直下で飲料水基準以下にしなければならない
– ズリの処理コストが高い



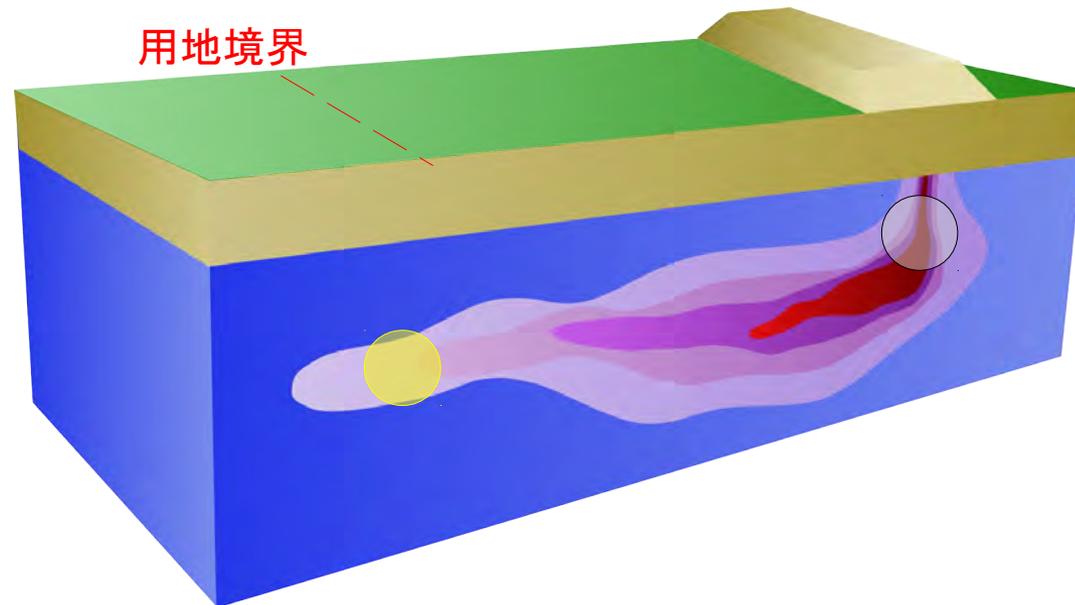
サイト概念モデルを使う利点

- 化学物質は、地下水中に広がることにより、濃度が低下する
- 用地境界で飲料水基準以下になるようにすれば良い



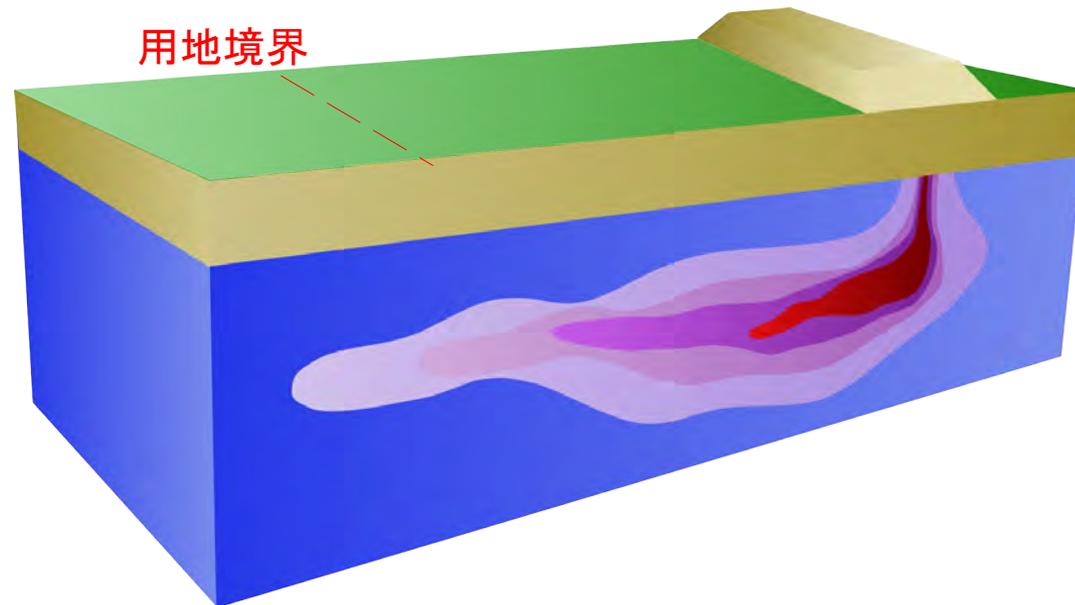
サイト概念モデルを使う利点

- 用地境界や実際の曝露地点で飲料水基準以下にする
 - 盛土直下で濃度が高くても良い
 - 処理コストが削減できる



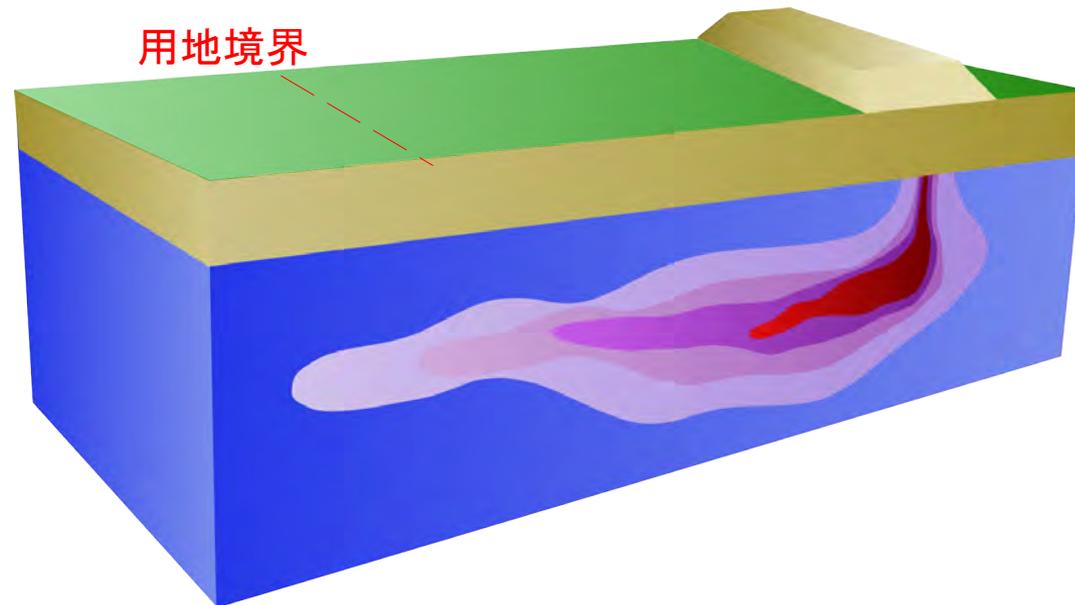
サイト概念モデルでの難しい点

- **将来**の用地境界での化学物質濃度を予測しなければならない



サイト概念モデルでの難しい点

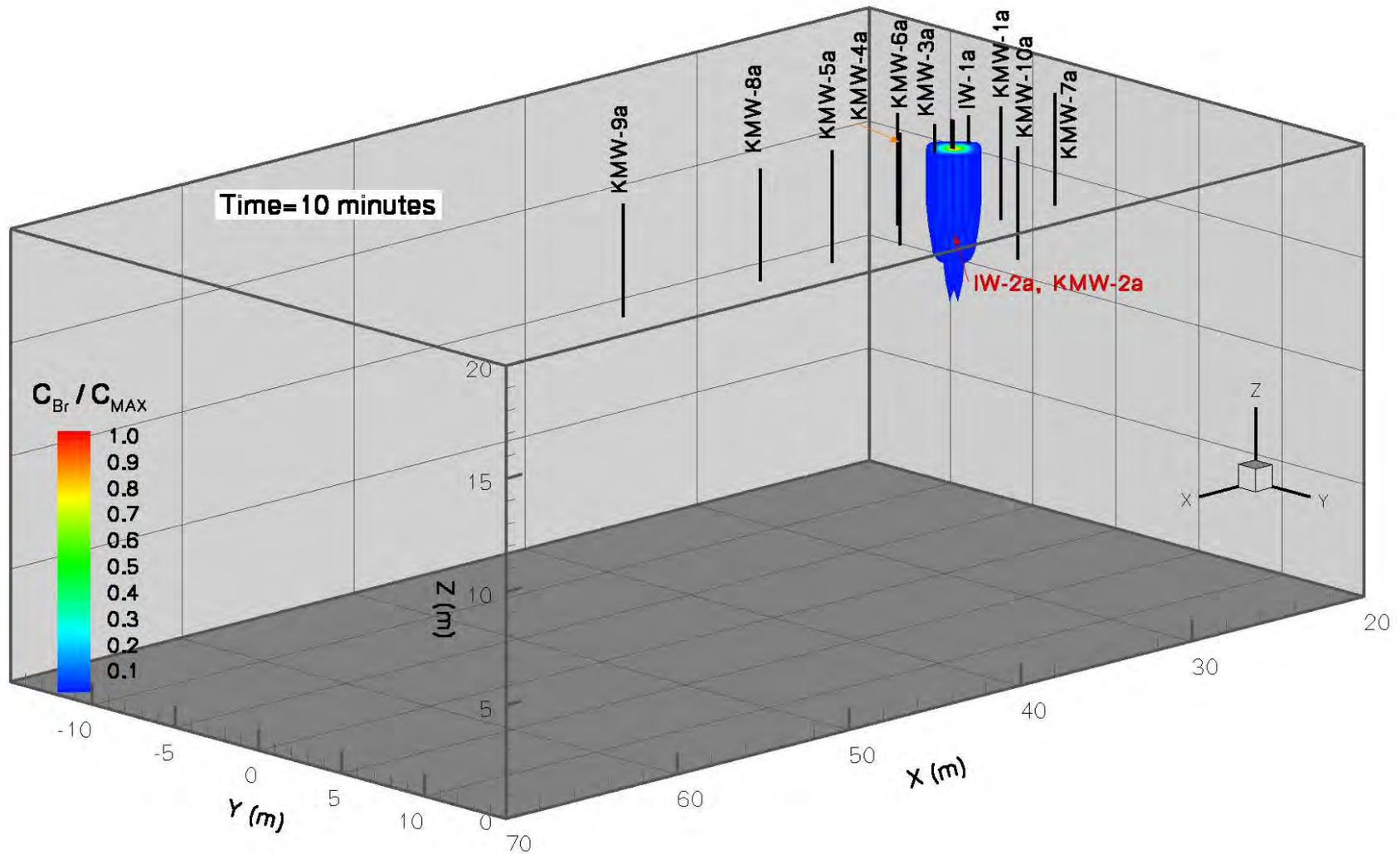
- 将来の用地境界での化学物質濃度を予測しなければならない
- 地下水流が遅いために**将来の濃度を予測**しなければならない（例えば**1,500 年後**）



シミュレーションモデル

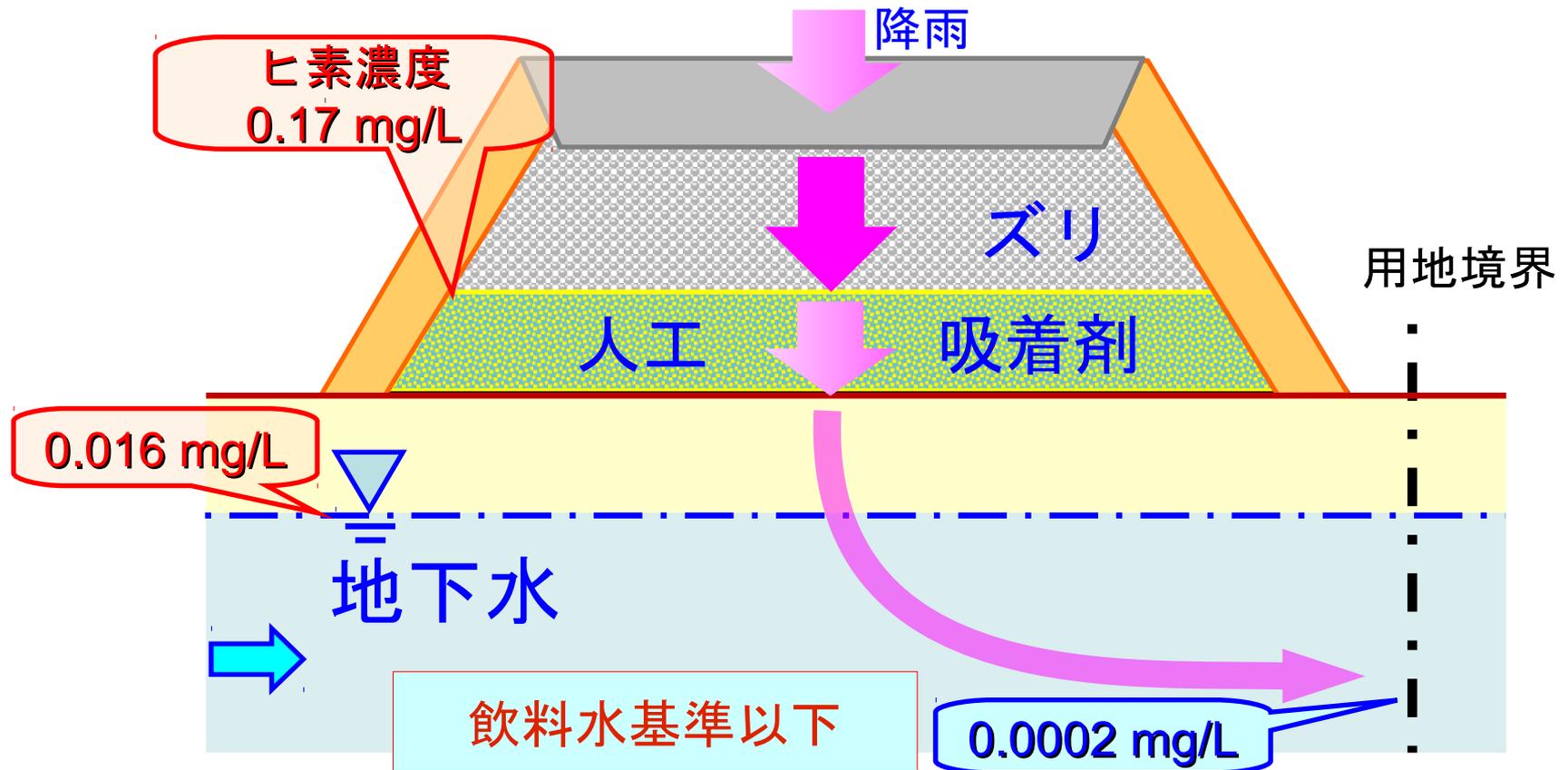
- 汚染物質の移行を数式で表し、将来の汚染物質の広がり、濃度を計算する

化学物質の地下水中での移行



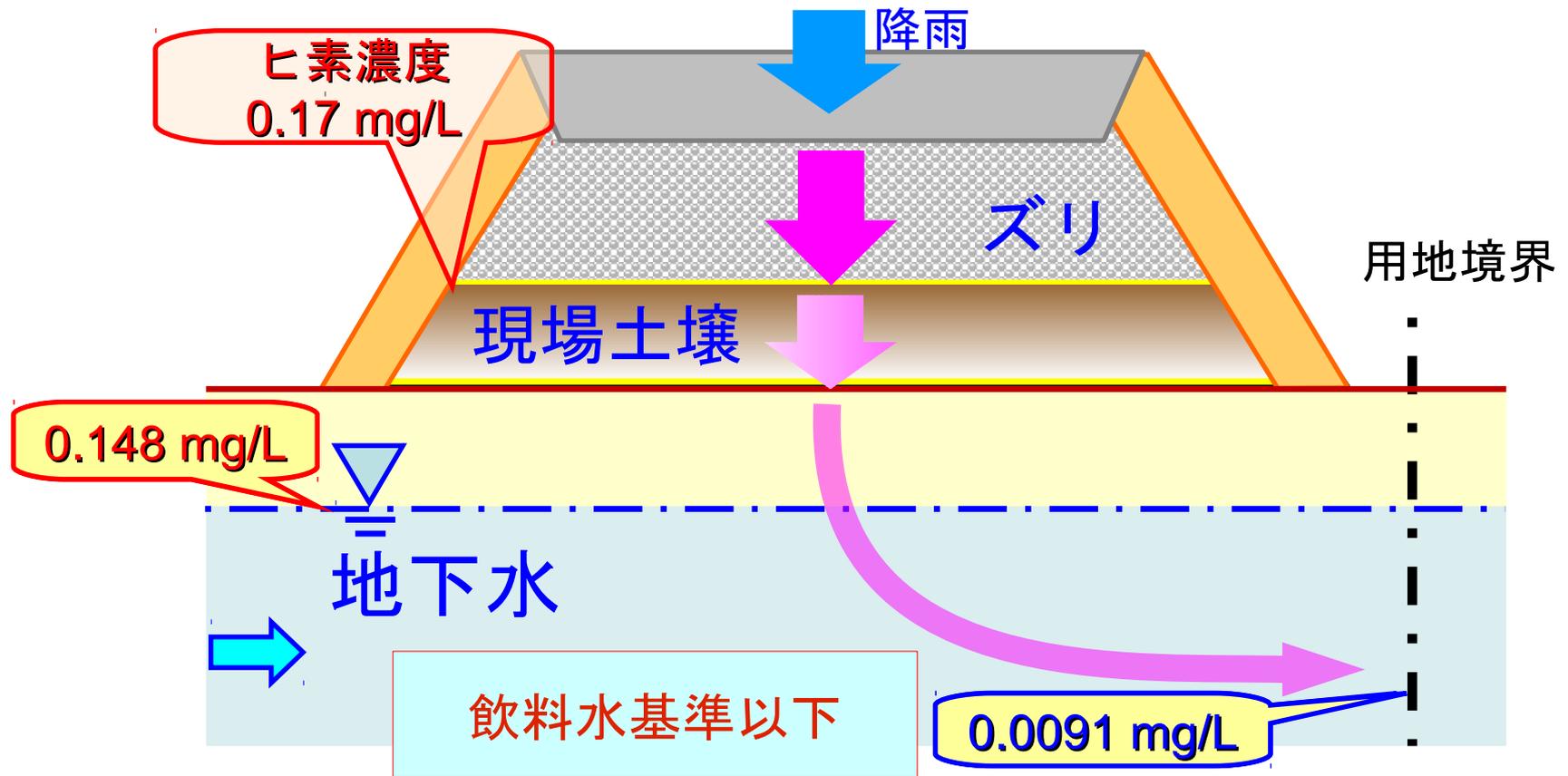
計算例

- 地下水中にヒ素が移動することにより、希釈が起こり、ヒ素濃度が低下する



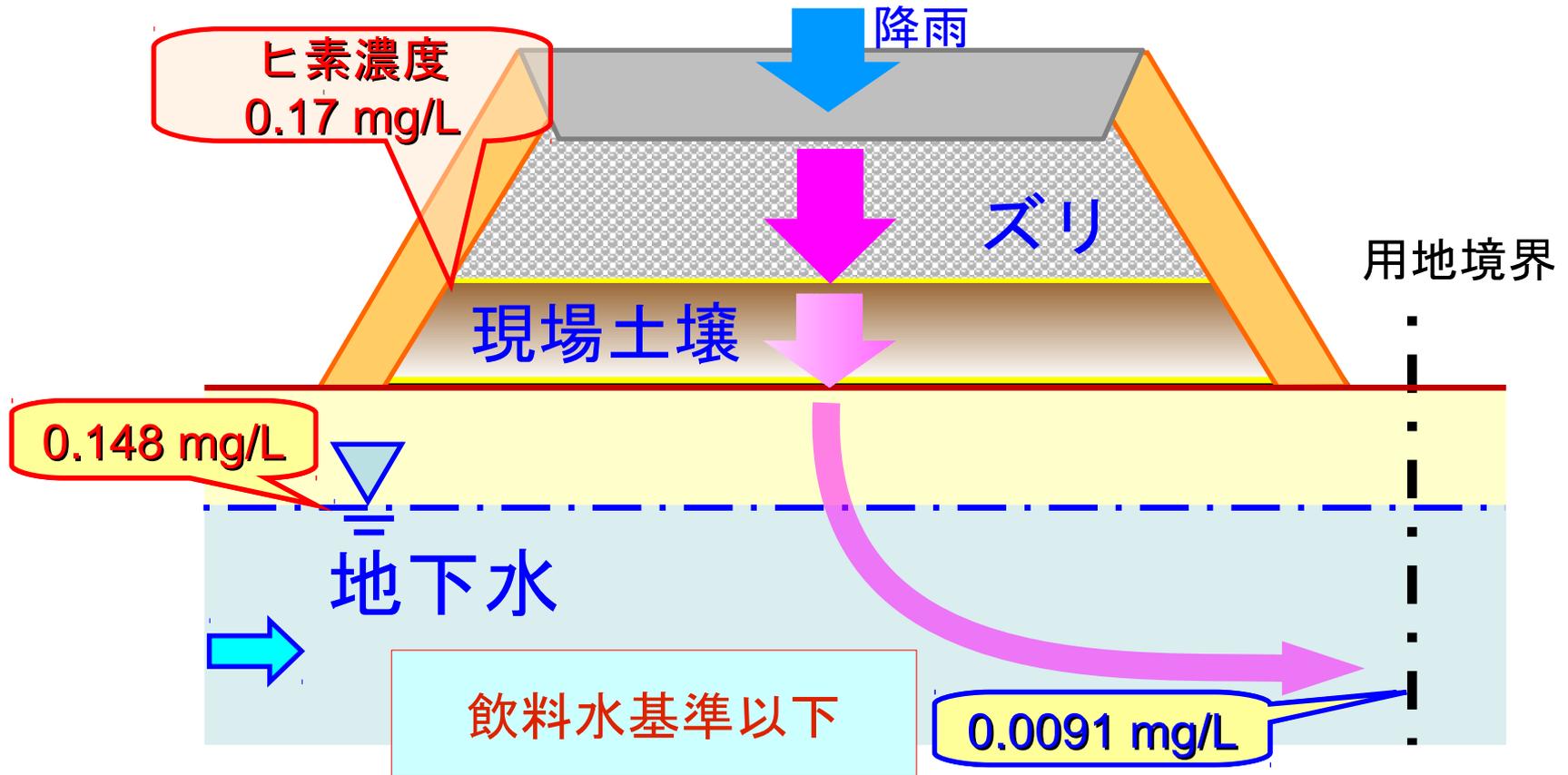
計算例

- 吸着能力の低い現場土壌を使っても用地境界で飲料水基準以下になる



計算例

- 処理コストを削減でき、用地境界での安全を十分に確保できる



この新しいアプローチ
は、いいことずくめ

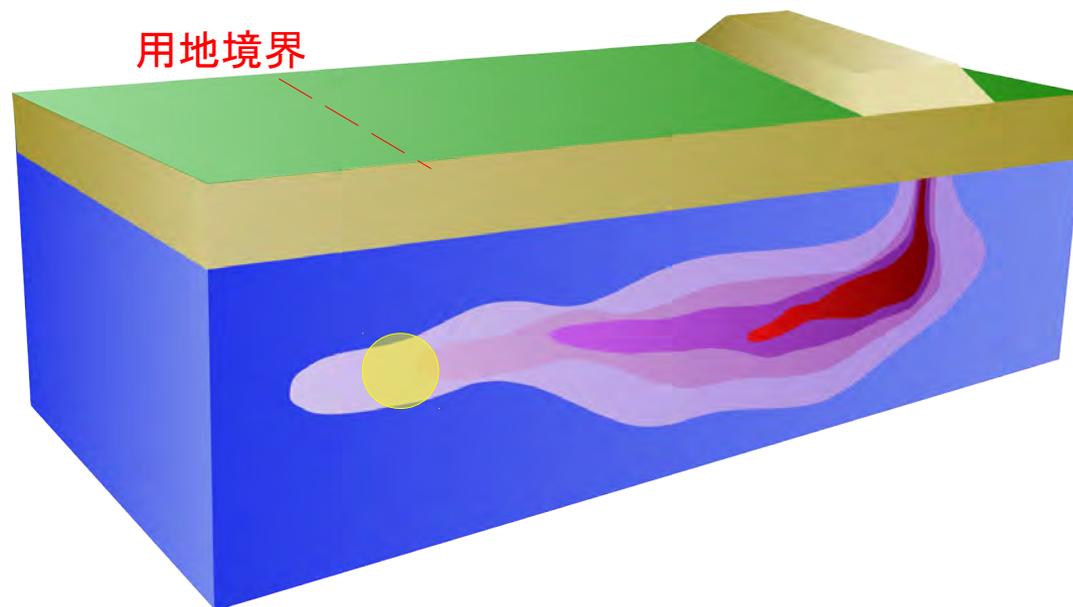
A high-angle photograph of a person rappelling down a steep, light-colored rock face. The person is wearing a white long-sleeved shirt with red stripes on the sleeves, dark pants, and a safety harness. Their arms are outstretched horizontally. A blue rope is attached to their harness and extends down the rock face. To the left of the rock face, a river flows through a rocky, vegetated area. The overall scene is outdoors and appears to be a training or safety exercise.

この手法は安全？

どういう状態になったときに安全に支障が生じる可能性があるか？

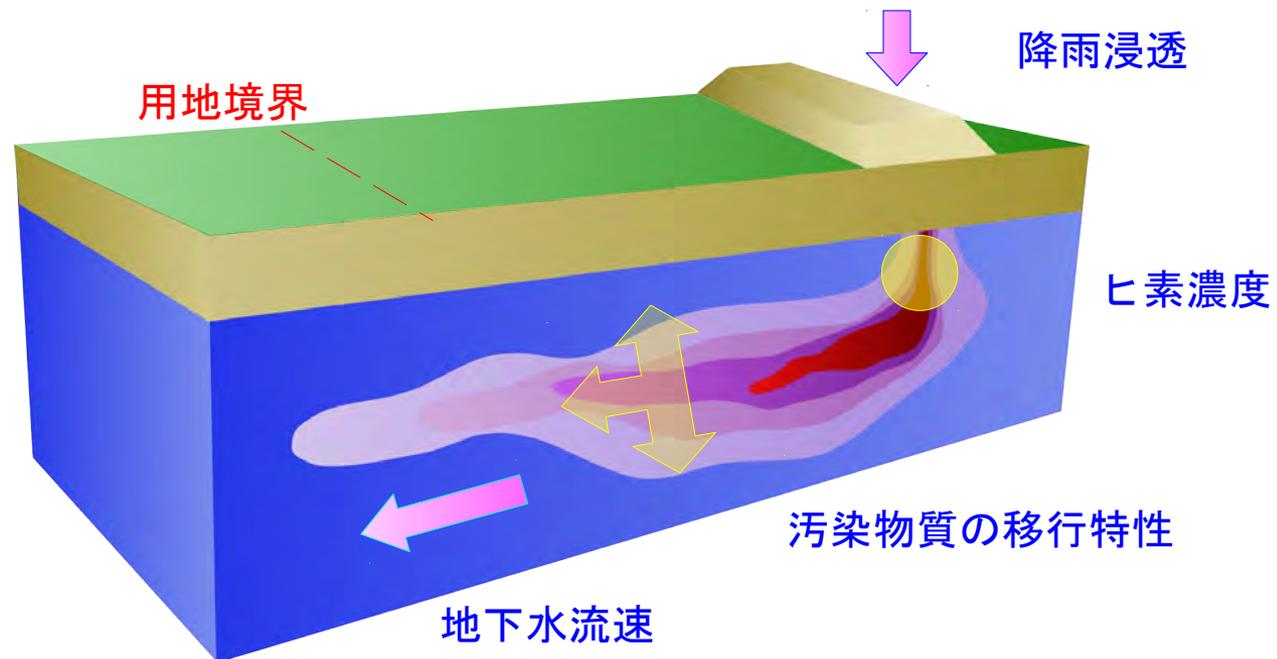
どういう時に安全に支障が生じるか？

- サイト概念モデルを使う場合
 - 将来の化学物質濃度を予測しなければならない
 - シミュレーションモデルを使って濃度を予測
 - モデルパラメーター値が必要



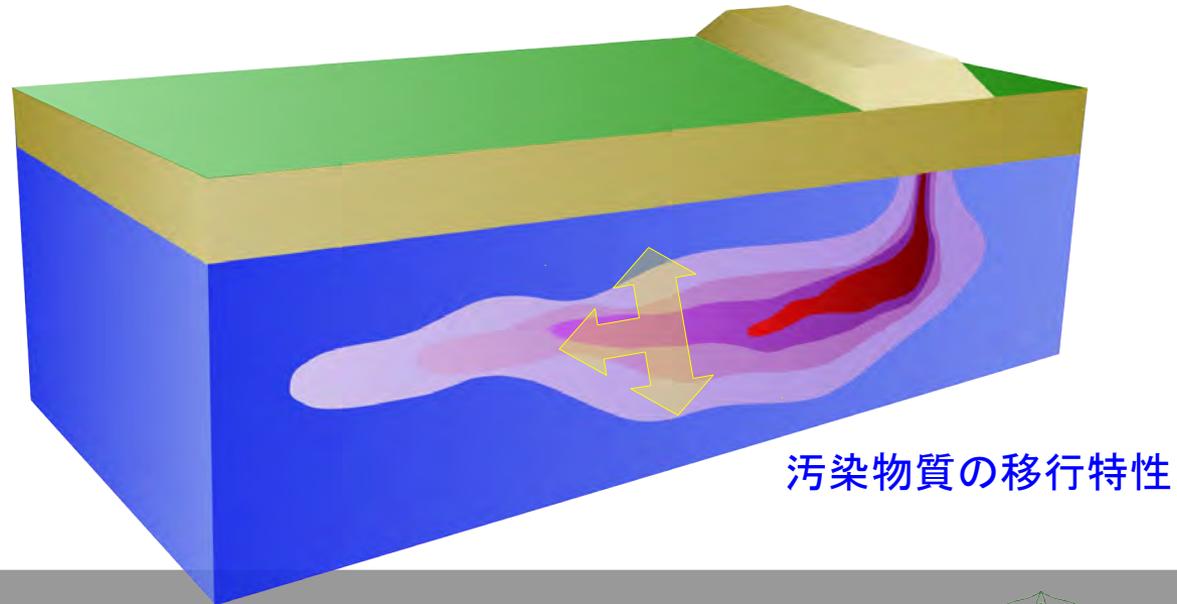
安全に支障が生じる可能性

- **パラメータ値が妥当でない場合**
 - 予測濃度が高くなり、安全に支障が出る可能性
- 地層の不均一性や調査技術の限界もあり、100% 正確な値を得ることは、**不可能**



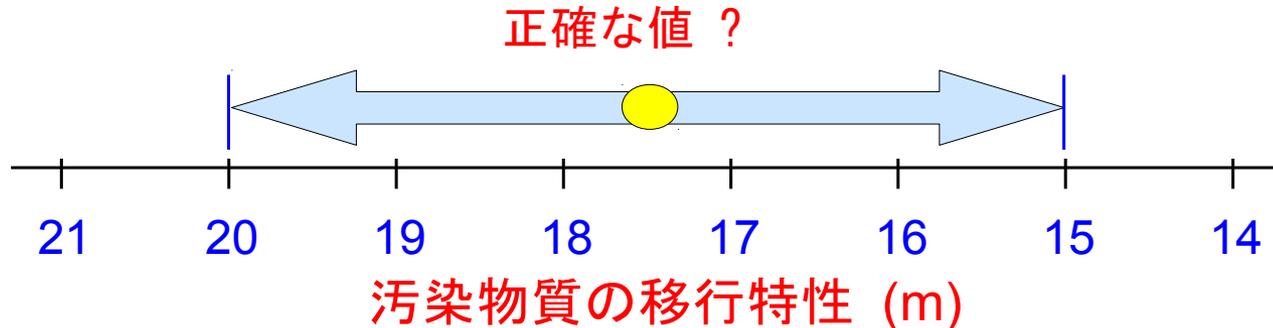
パラメータ一値？

- パラメータ一値には、範囲がある



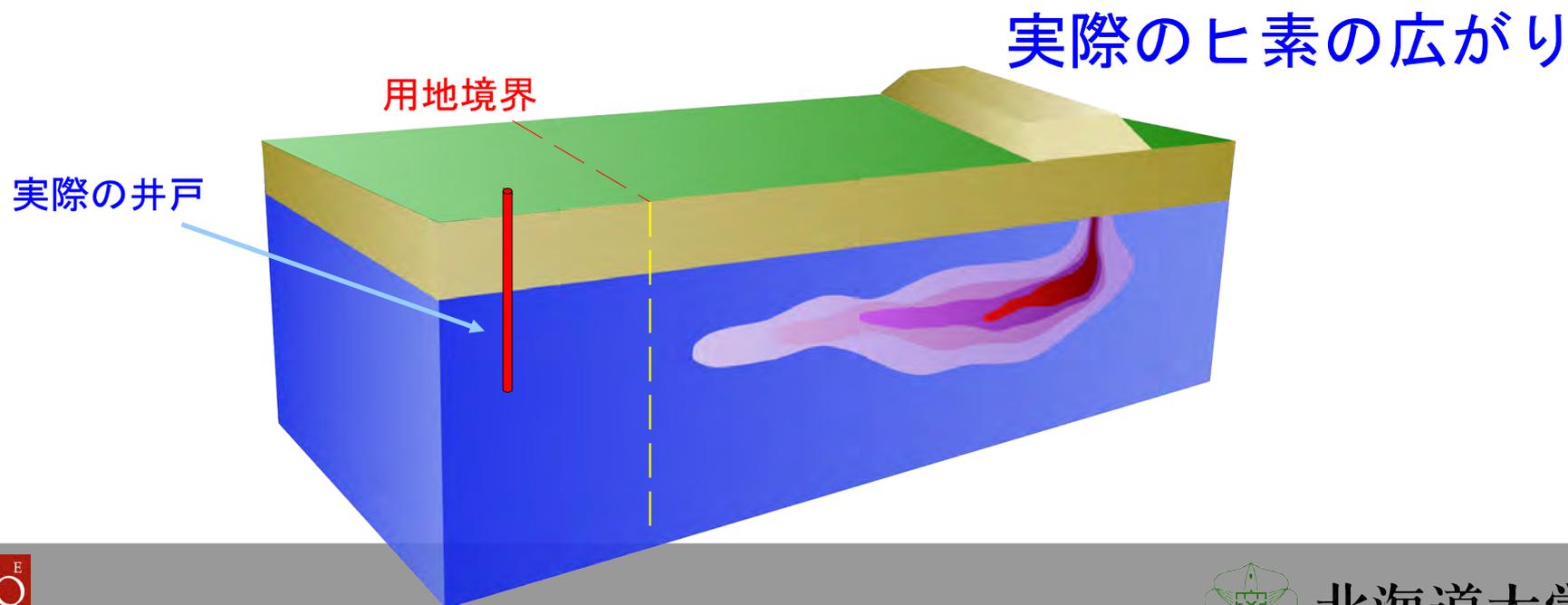
パラメータ一値？

- パラメータ一値には、範囲がある



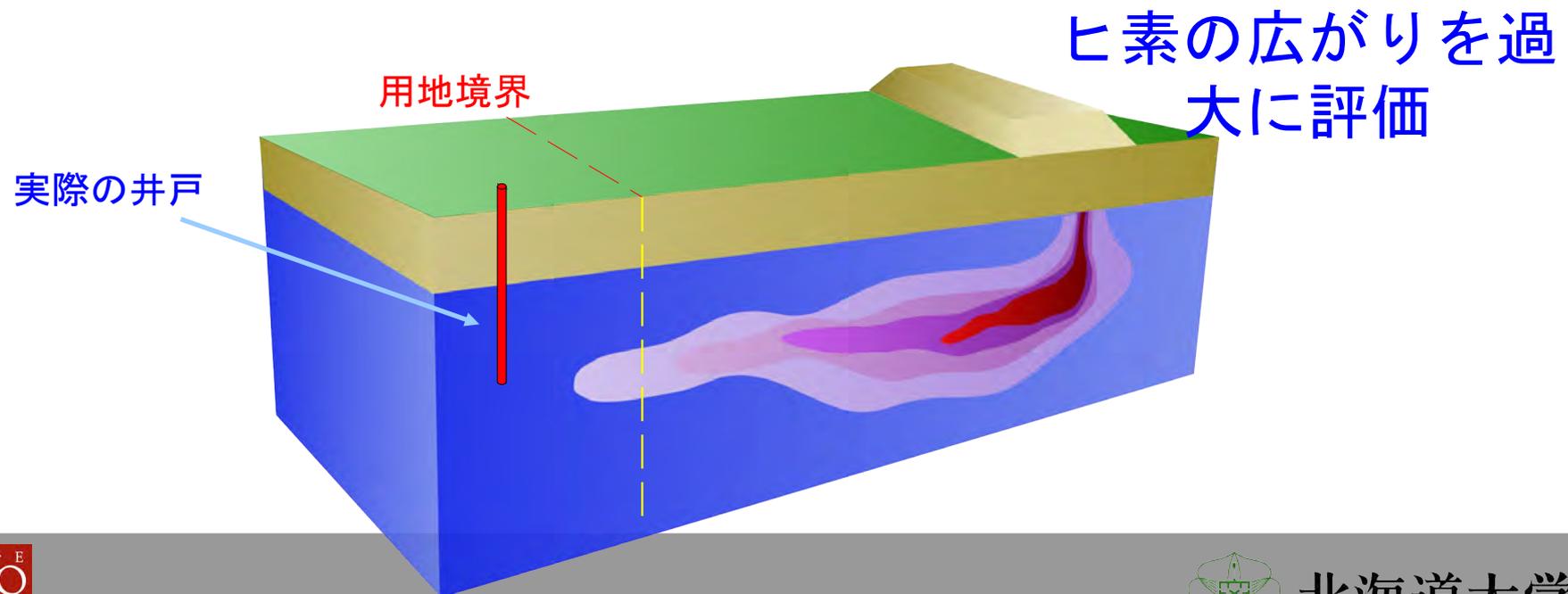
- その範囲でパラメータ一値を特定することは可能
- 曝露地点で濃度が意図的に高くなるように値を設定する

用地境界で濃度を意図的に高くする



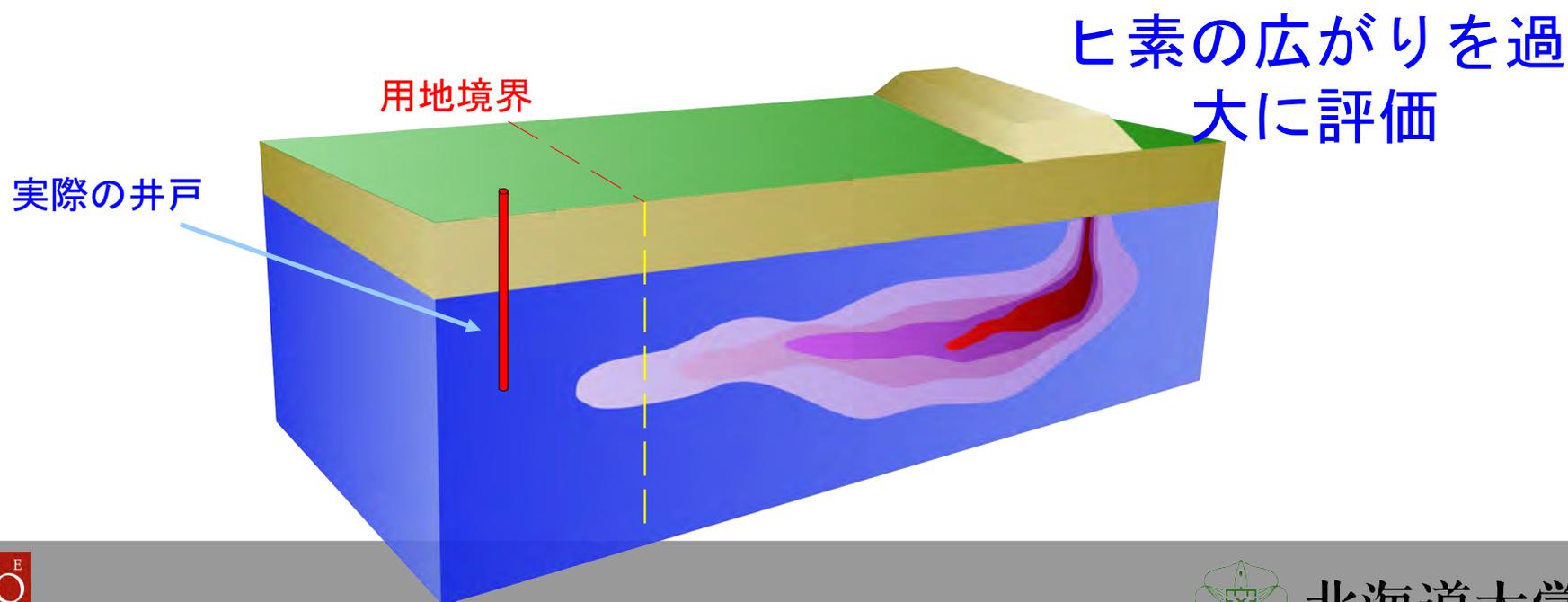
用地境界で濃度を意図的に高くする

- **パラメーターを安全側に設定**することによって、**実際の汚染物質の広がりよりも過大に評価**する
- **この高い濃度でも飲料水基準以下になる**ようにする



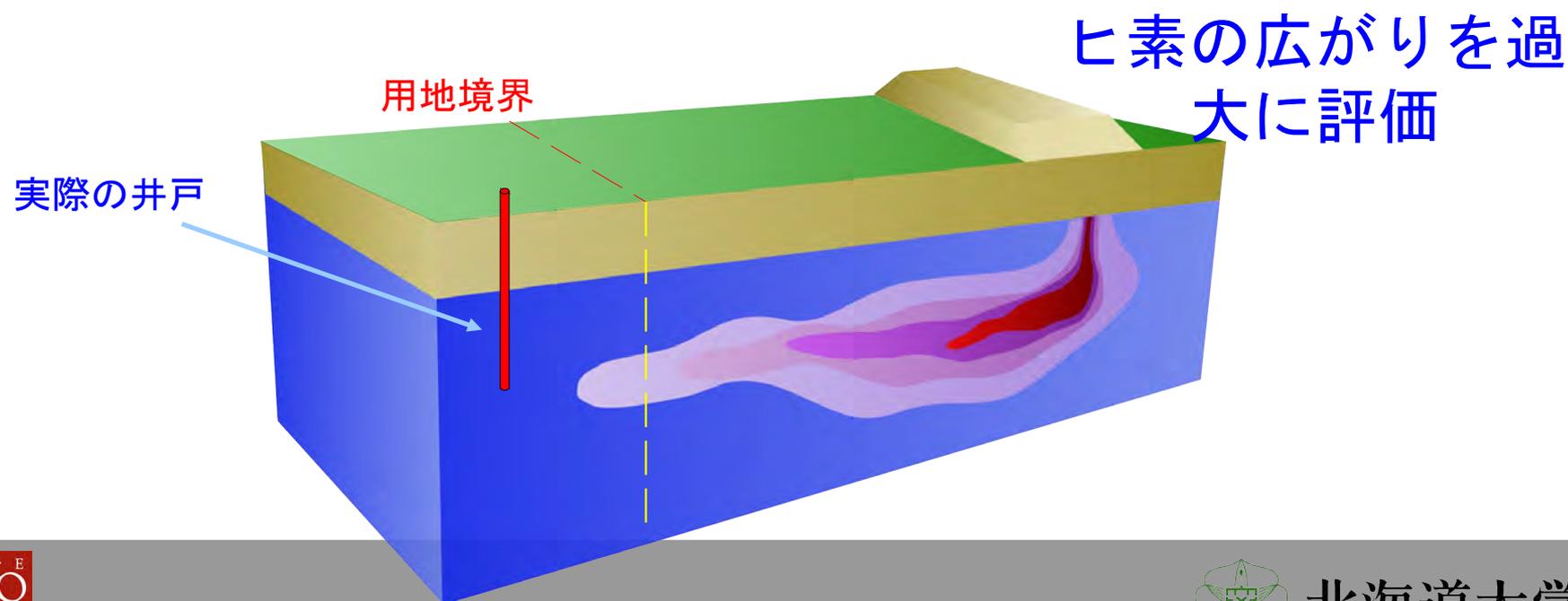
用地境界で濃度を意図的に高くする

- パラメーターを安全側に設定することによって、実際の汚染物質の広がりよりも過大に評価する



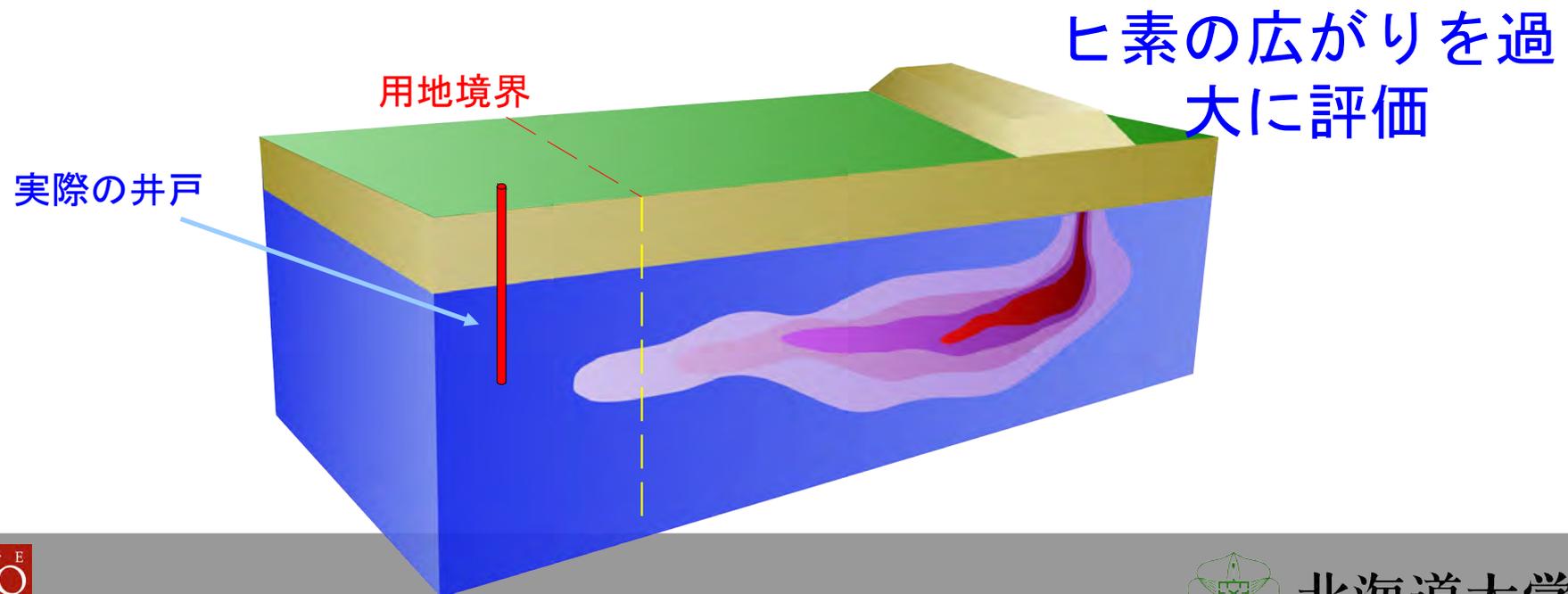
用地境界で濃度を意図的に高くする

- 保守的なモデル（Tier 1, 2）を使うことによって、実際の汚染物質の広がりよりも過大に評価する
- この高い濃度でも飲料水基準以下になるようにする



安全策として

1. パラメーターを安全側、保守的なモデルを使い、**用地境界**で**飲料水基準以下**になるようにする
2. 実際の曝露地点は、用地境界は一致しないので用地境界での評価は、**保守的**評価

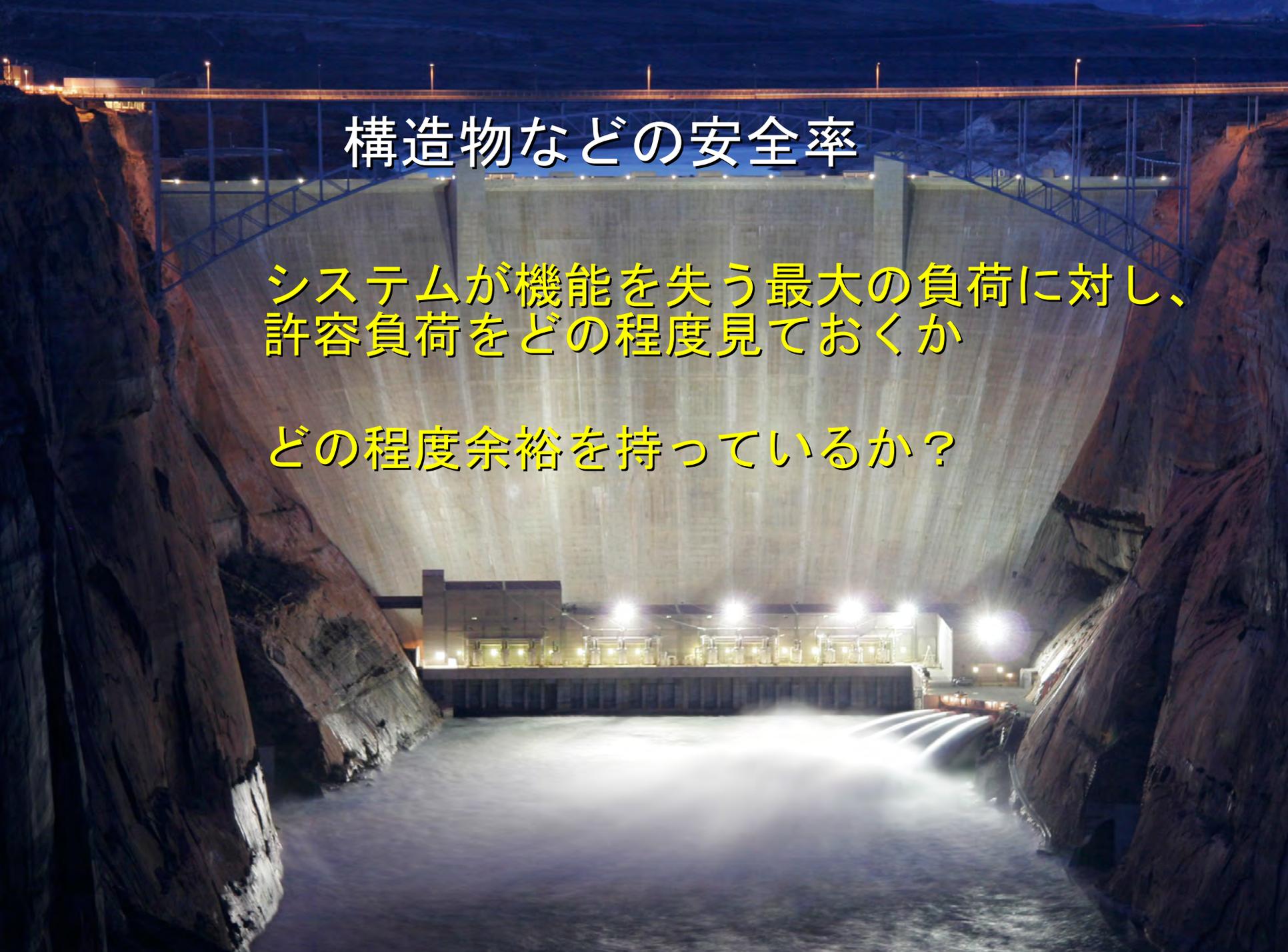


安全率は？

構造物などの安全率

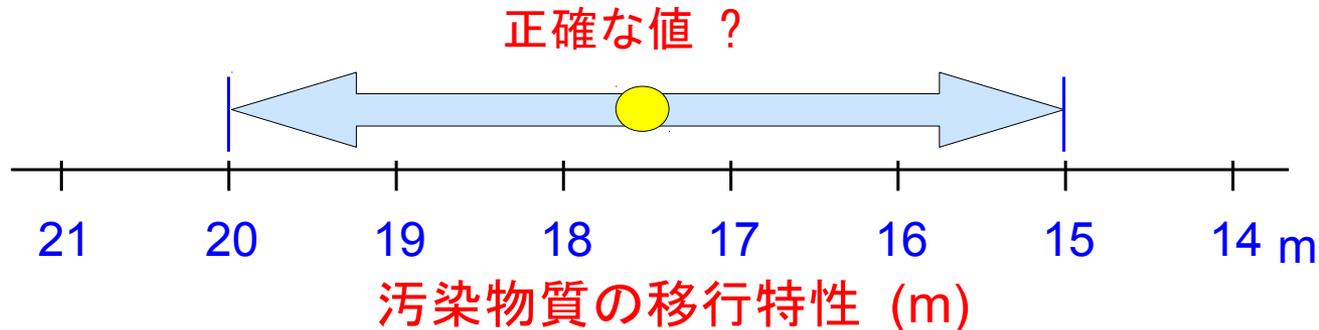
システムが機能を失う最大の負荷に対し、
許容負荷をどの程度見ておくか

どの程度余裕を持っているか？



パラメーター値？

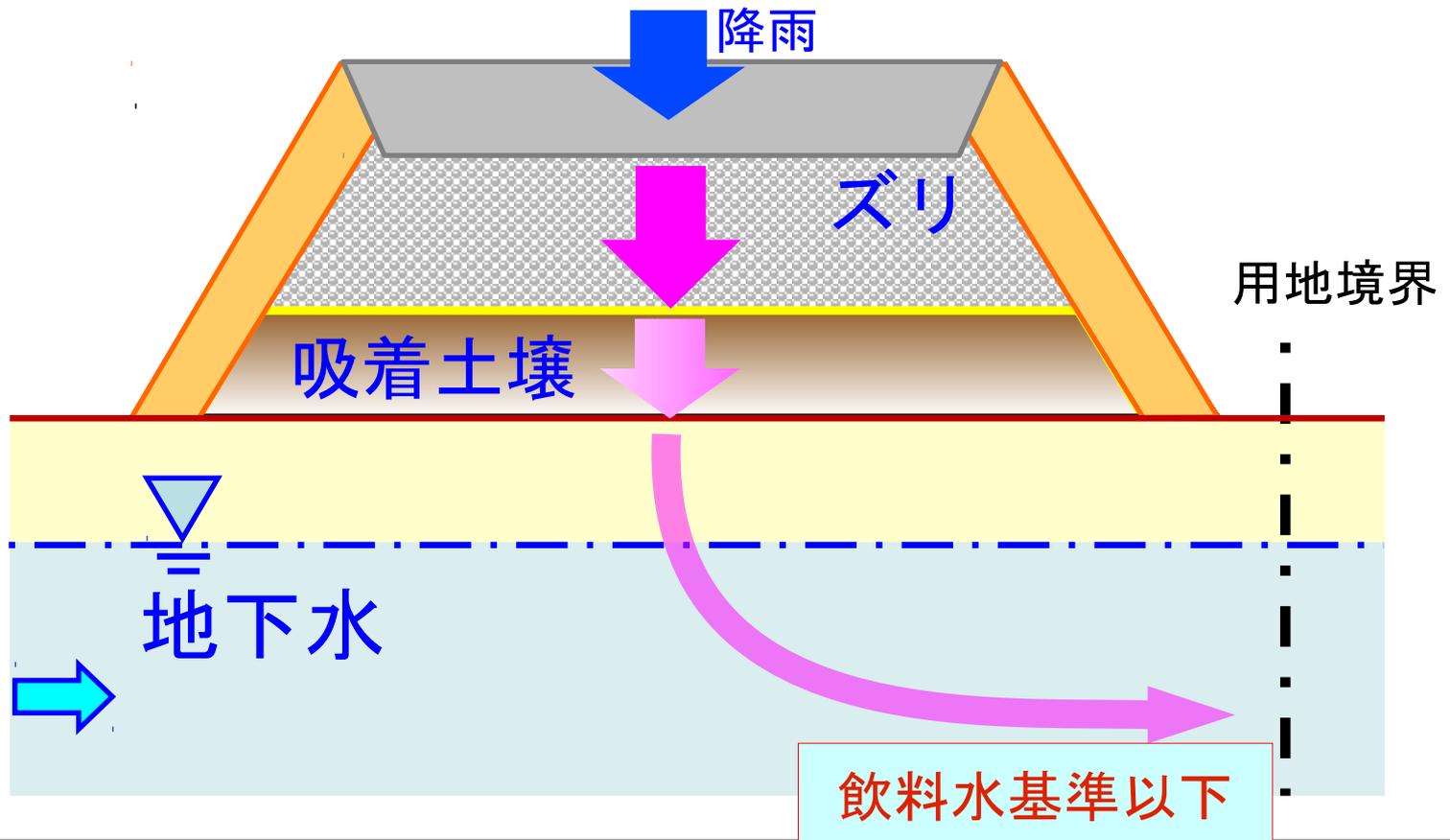
- パラメーター値には、範囲がある



- 正確な値を得ることは、**不可能**なので**安全率**を設定できない
- どのような対策？

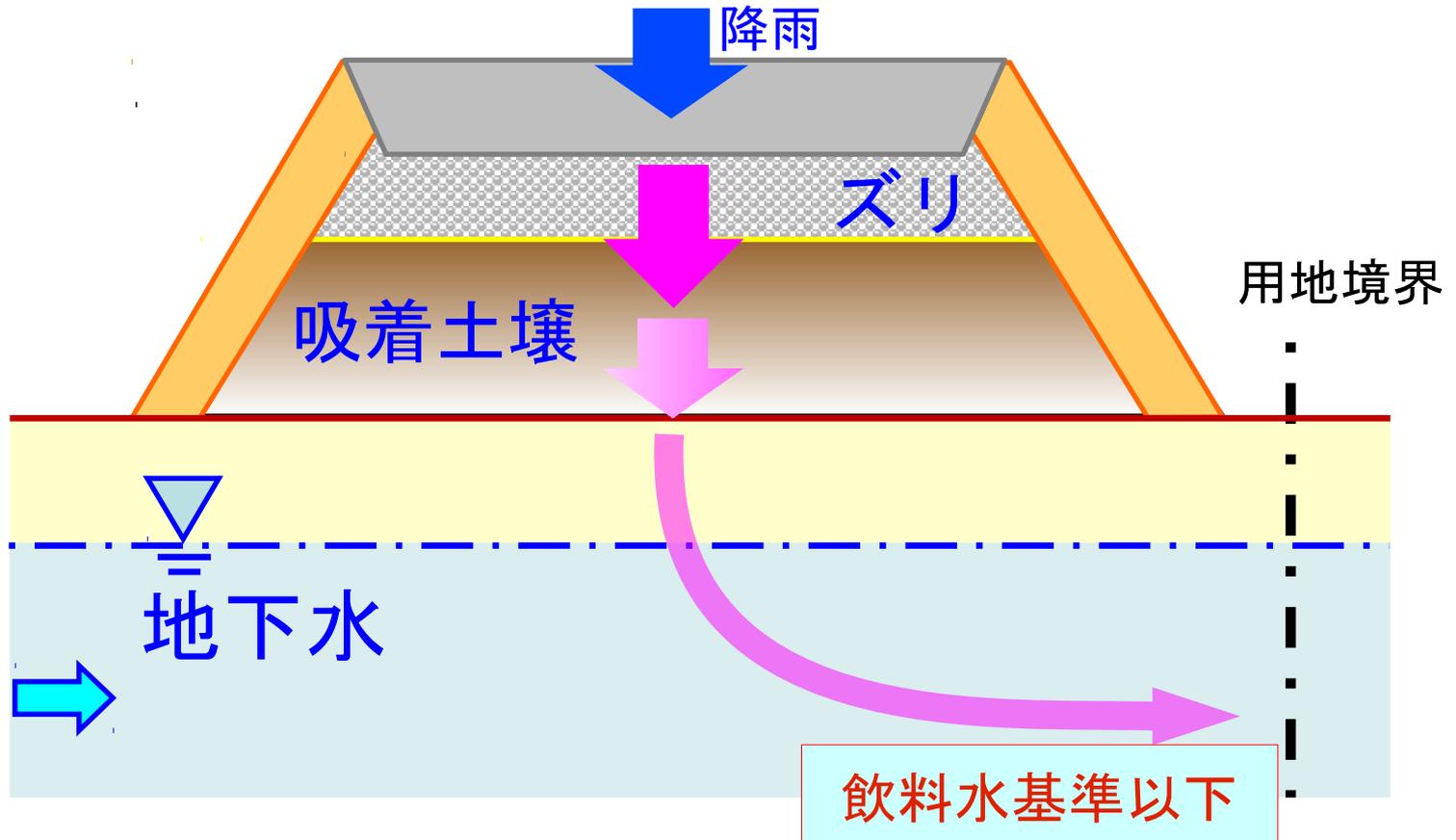
安全率に類似した対策

- 用地境界での安全を十分に確保できる吸着土壌層の厚さを計算する



安全率に類似した対策

- 計算された吸着土壌層よりも厚くし、より安全側にし、「安全率」を確保する



検証のモニタリングで基準値超過する場合



基準値超過する場合の対応 (1)

現地状況調査により要因を特定

要因が特定できればそれに対する対策を実施

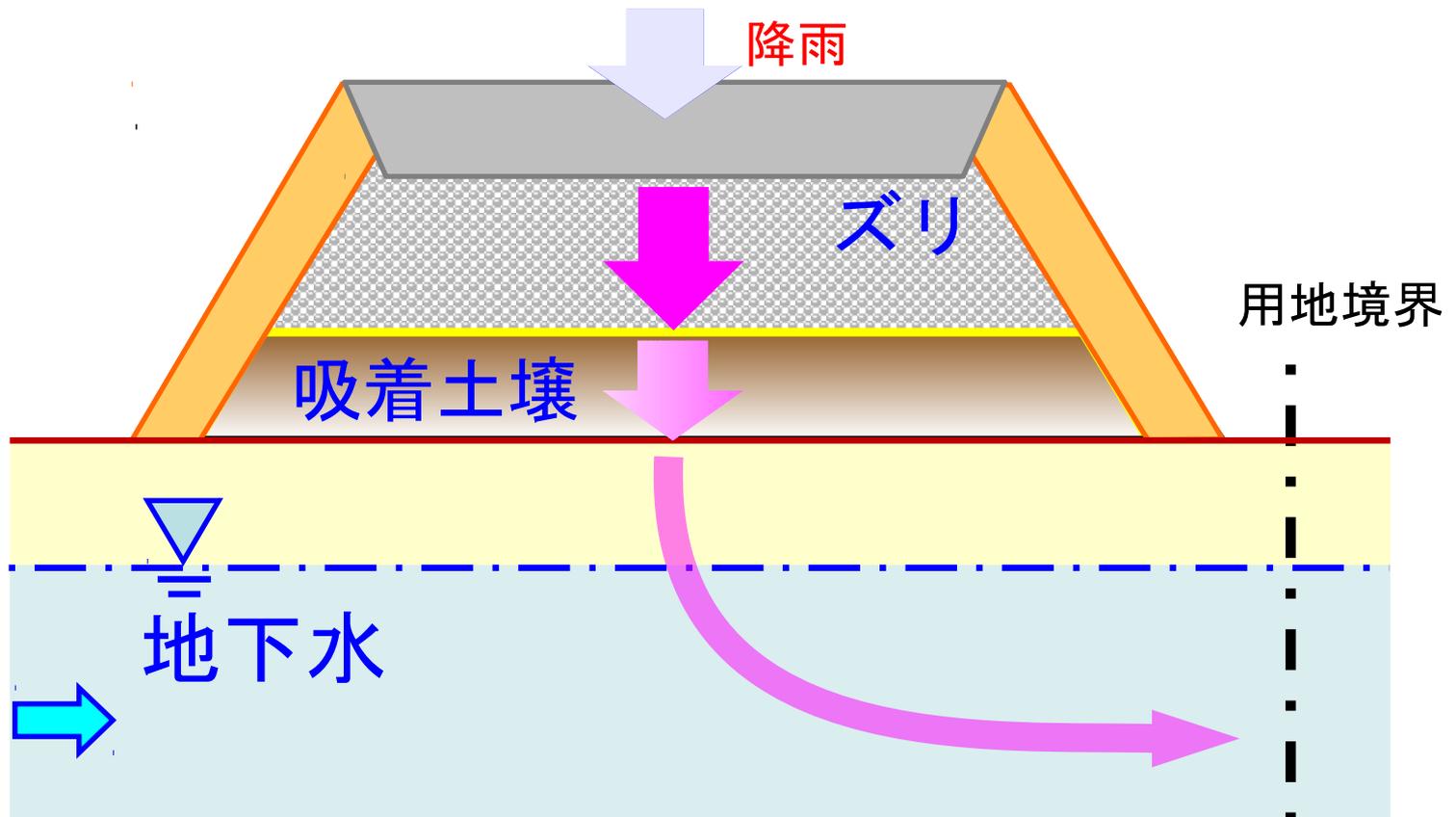


基準値超過する場合の対応 (1)

道路からの降雨浸透がヒ素の移行に大きな影響を及ぼす因子の一つ

基準値超過する場合の対応 (1)

- 降雨浸透を最小限にし、ヒ素の移行を最小限にとどめる



基準値超過する場合の対応 (2)

地下水流れ方向に使用されている井戸がある場合
健康への影響をより定量的に評価



健康への影響をより定量的に評価

飲料水基準

飲料水として 2L/day、30年間飲み続けると仮定

曝露地点での井戸水

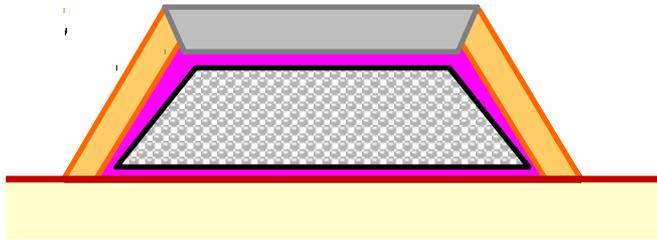
井戸水の使用目的（飲用、生活用水、灌漑）
摂取率、頻度、期間等

この新しいアプローチ
について
まとめてみると



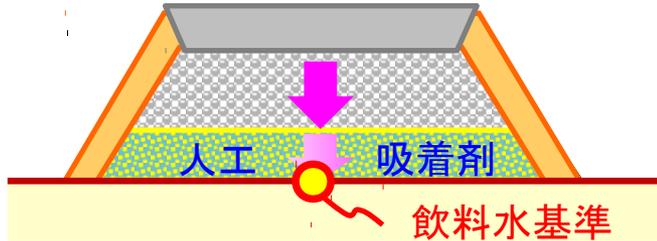
コスト

コスト



シート被覆

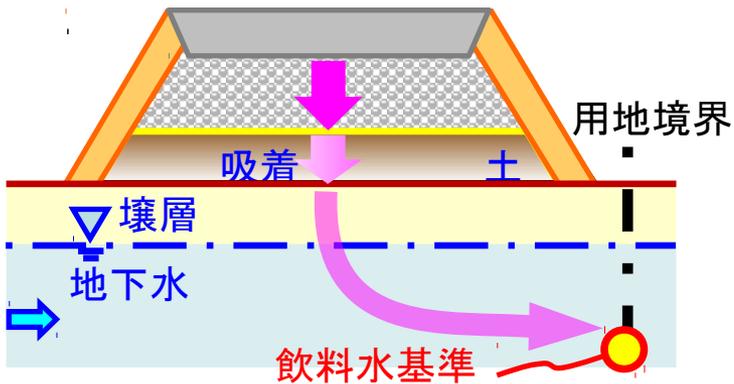
70%削減



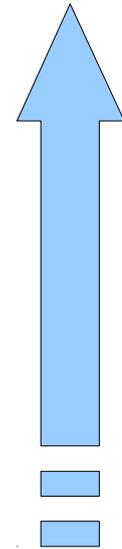
吸着剤

93%削減

サイト概念モデル



コスト大

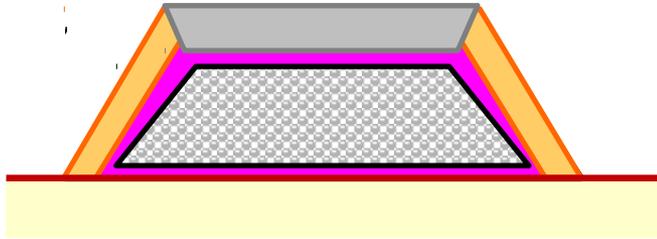


コスト小

保守性

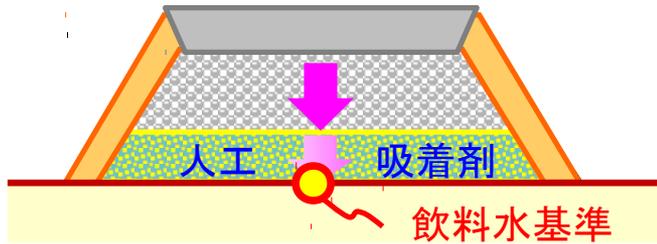


保守性



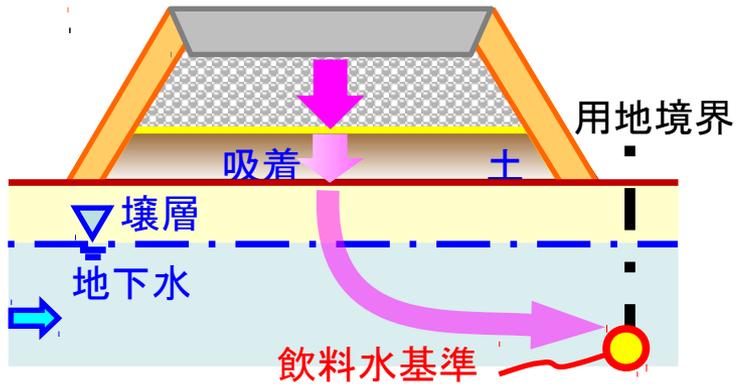
シート被覆

超保守的

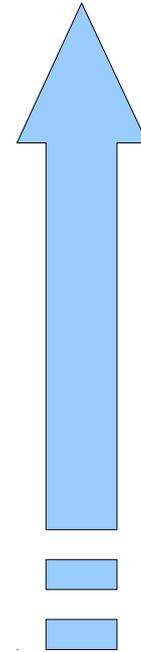


吸着剤

サイト概念モデル



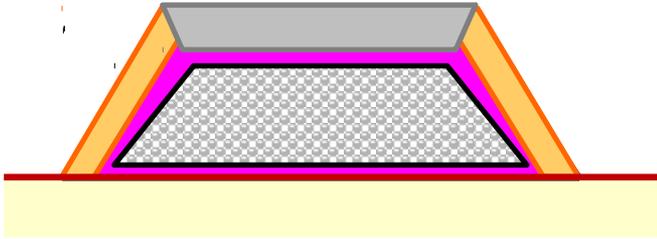
保守的



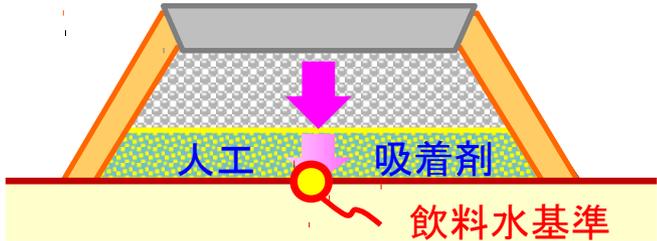


曝露地点での安全対策の考慮

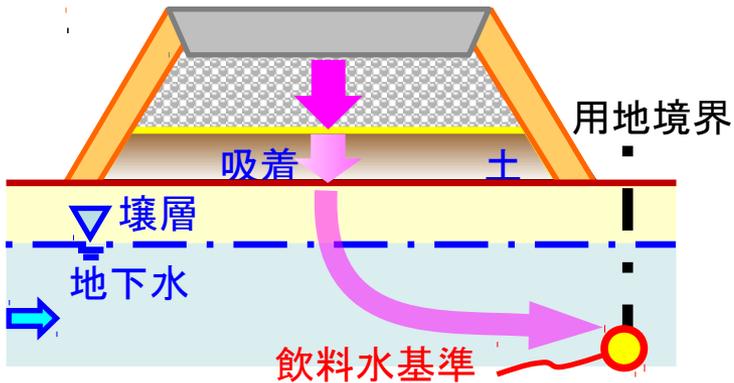
曝露地点での安全対策の考慮



シート被覆

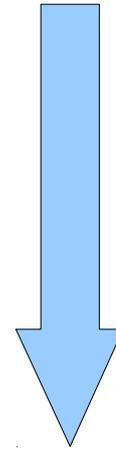


吸着剤



サイト概念モデル

小

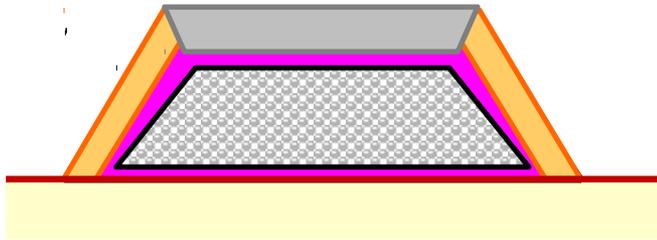


大

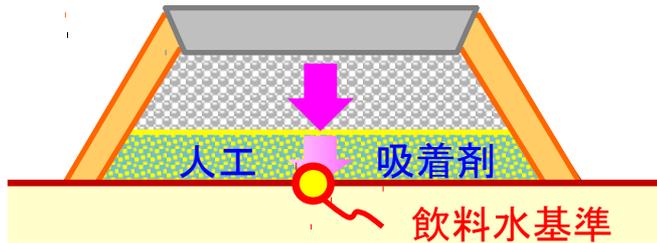


モデルを使う
コンサルタント力

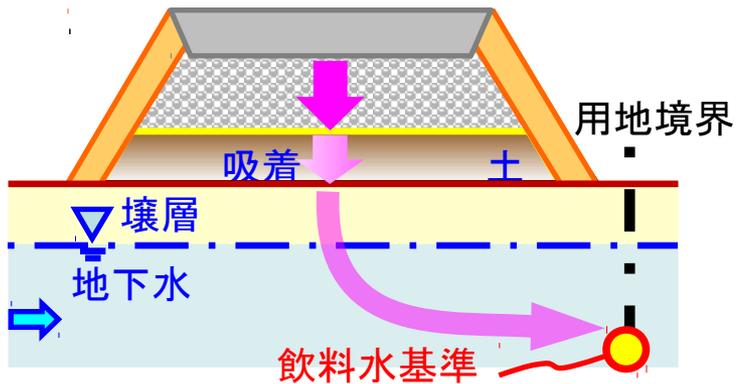
コンサルタント力、技術



シート被覆

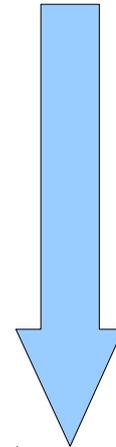


吸着剤



サイト概念モデル

小



大

曝露地点での安全対策



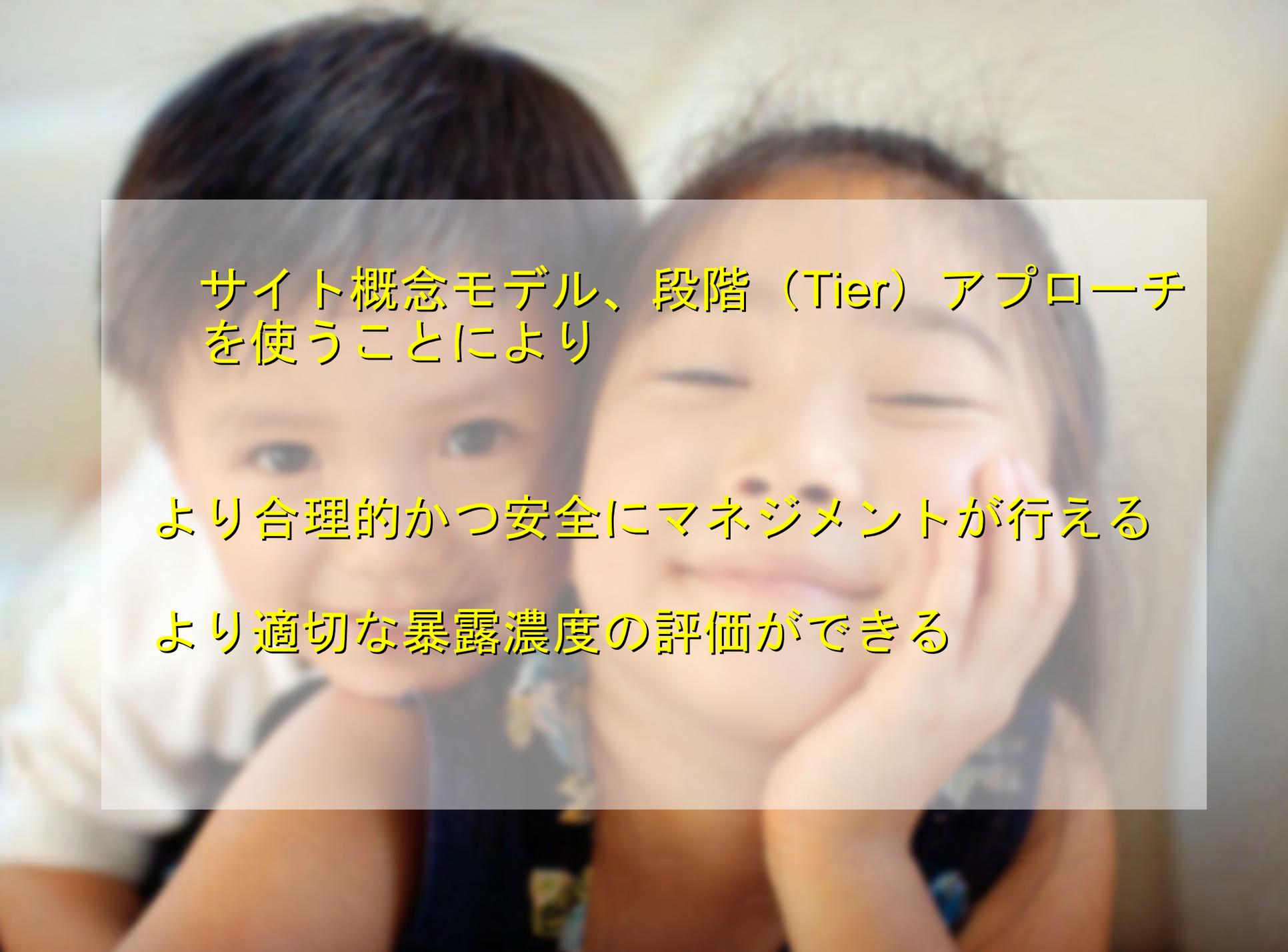
多重対策で対応

多重対策

1. 用地境界で濃度が意図的に高くなるように**モデルパラメーター**を設定
2. **保守的なモデル (Tier 1, 2)** を使う
意図的に高い濃度でも飲料水基準以下を達成
3. 吸着土壌層等を計算**よりも厚く**し、「安全率」を確保する
4. 実際の暴露地点ではなく、**用地境界で評価**

曝露地点での安全対策

検証のモニタリングで基準値超過する場合
でも対応策を用意



サイト概念モデル、段階（Tier）アプローチ
を使うことにより

より合理的かつ安全にマネジメントが行える

より適切な暴露濃度の評価ができる