

2019. 7. 9

日本原子力研究開発機構

地層処分コロキウム

地層処分には^{まだ} スタンダードもマニュアル もない

大江 俊昭

忘れてはいけない瞬間



2011年3月14日11時1分

技術立国「日本」は？

1-F事故以来、すべてを疑って、見直す！

1-F事故以来、 すべてを疑って、見直せ！

第二次とりまとめ

KBS-3タイプの処分概念がわが国でも
技術的に成立し得る事を示した。

1. なぜ**KBS-3**タイプなのか？
2. 人工バリアと天然バリアのどちらが大事なのか？
何となく、全体的に安全
3. そもそも地層処分は安全なのか？

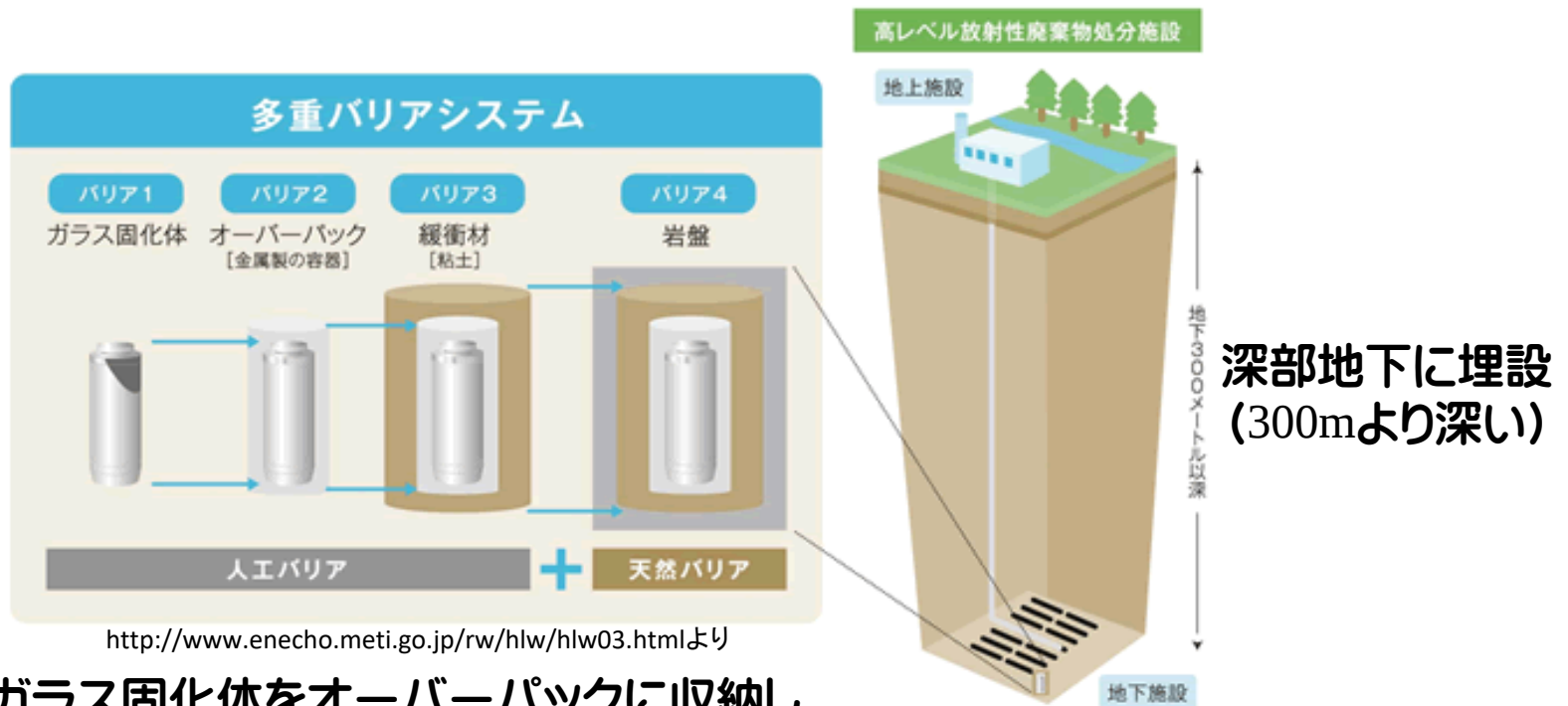


JAEAのHPより

地層処分場のイメージ

※ TRUを除く

スウェーデン**KBS-3**タイプの概念



<http://www.enecho.meti.go.jp/rw/hlw/hlw03.html>より

ガラス固化体をオーバーパックに収納し

ベントナイトの緩衝材で囲み

気になること

まだ実例が無いのに

共通のイメージが浸透 確立したもの(こと)がどれほどあるのか

なぜそうなのか

もはや追跡できない 時とともに記憶(記録)も失われるのではないか

高レベル放射性廃棄物は300mより深い地層中に埋設される

300mの論理的根拠はどこにある 隆起速度? 酸化帯の厚さ?

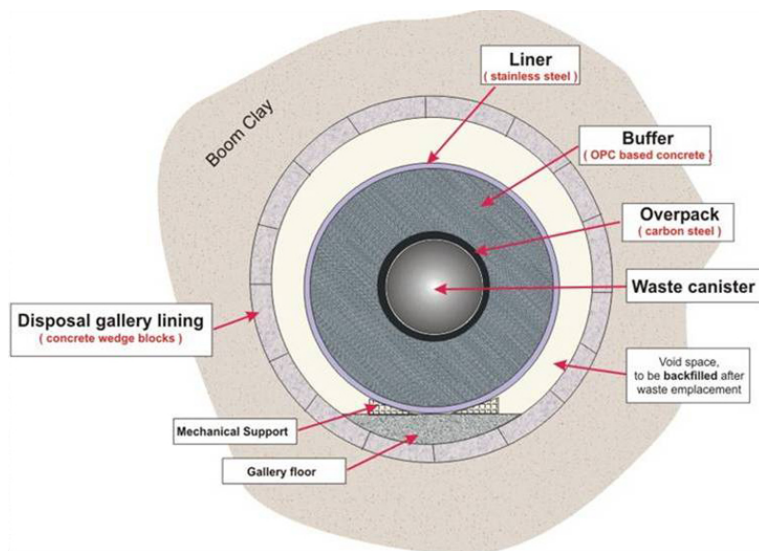
「・・・法律」では最小限必要な深さは地下300mと決められています。
これは一般に利用されている地下施設と一定程度、距離を離すことや、海外の状況などを考慮して決められました。

地層処分ポータル
なぜ300mより深い場所なの?

KBS-3タイプが主流か？

従来のスウェーデンのKBS-3タイプとは異なる処分システム概念

外側に天然粘土層があり
粘土は使わない



ベルギーの概念は粘土層と
スーパーコンテナ

http://science.sckcen.be/en/Disposal_radioactive_waste

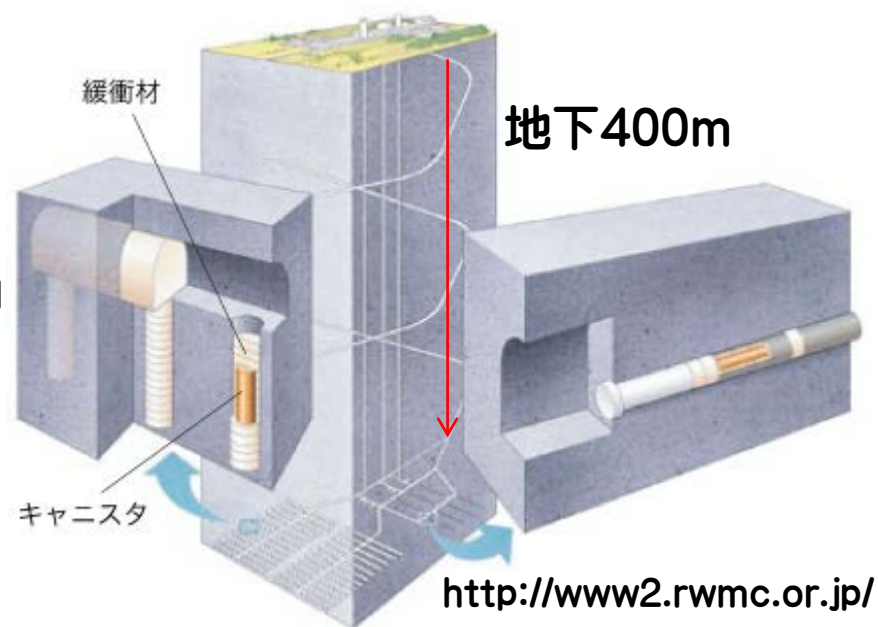


フランスの概念は粘土層と
廃棄物パッケージ

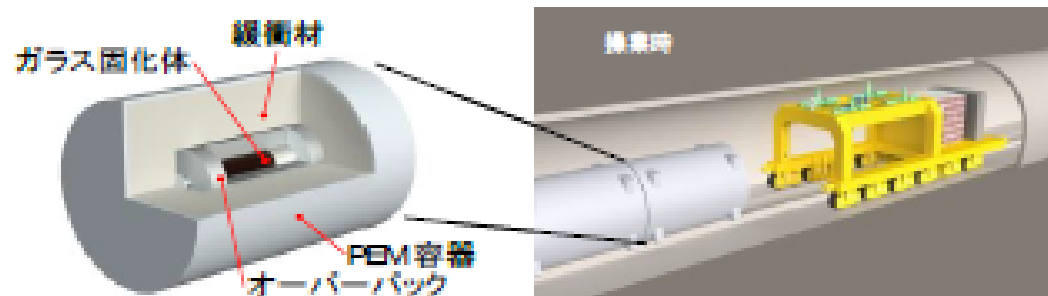
RWMCのHPより

実例が無い

フィンランドのみ建設中
2020年頃に処分場の
操業開始予定



我が国でもKBS-3とは異なる概念
PEM方式検討開始



NUMO包括的技術報告書レビュー版(2018)

(b) 高レベル放射性廃棄物処分場の人工バリア（横置き・PEM方式）

安全評価のシナリオ例

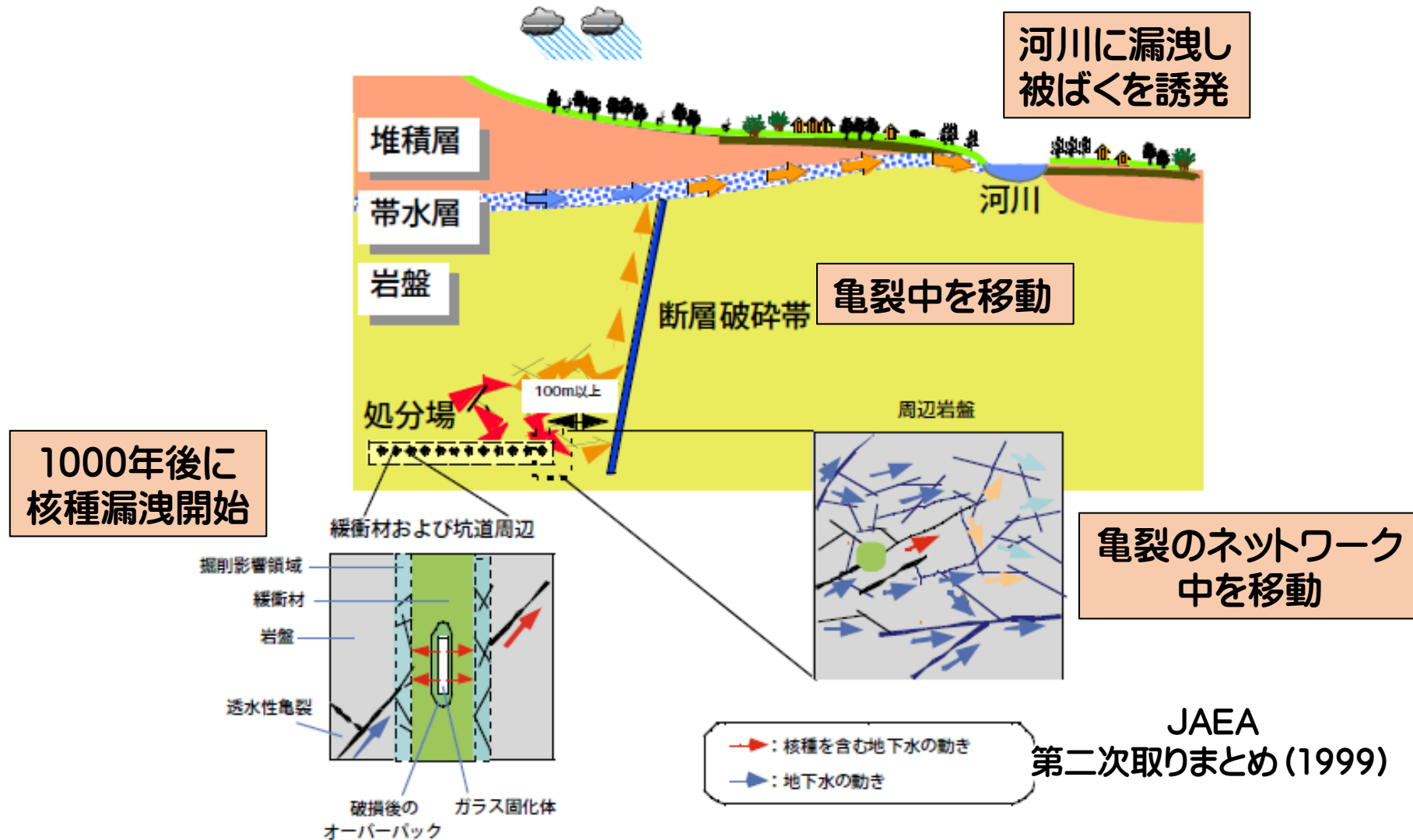
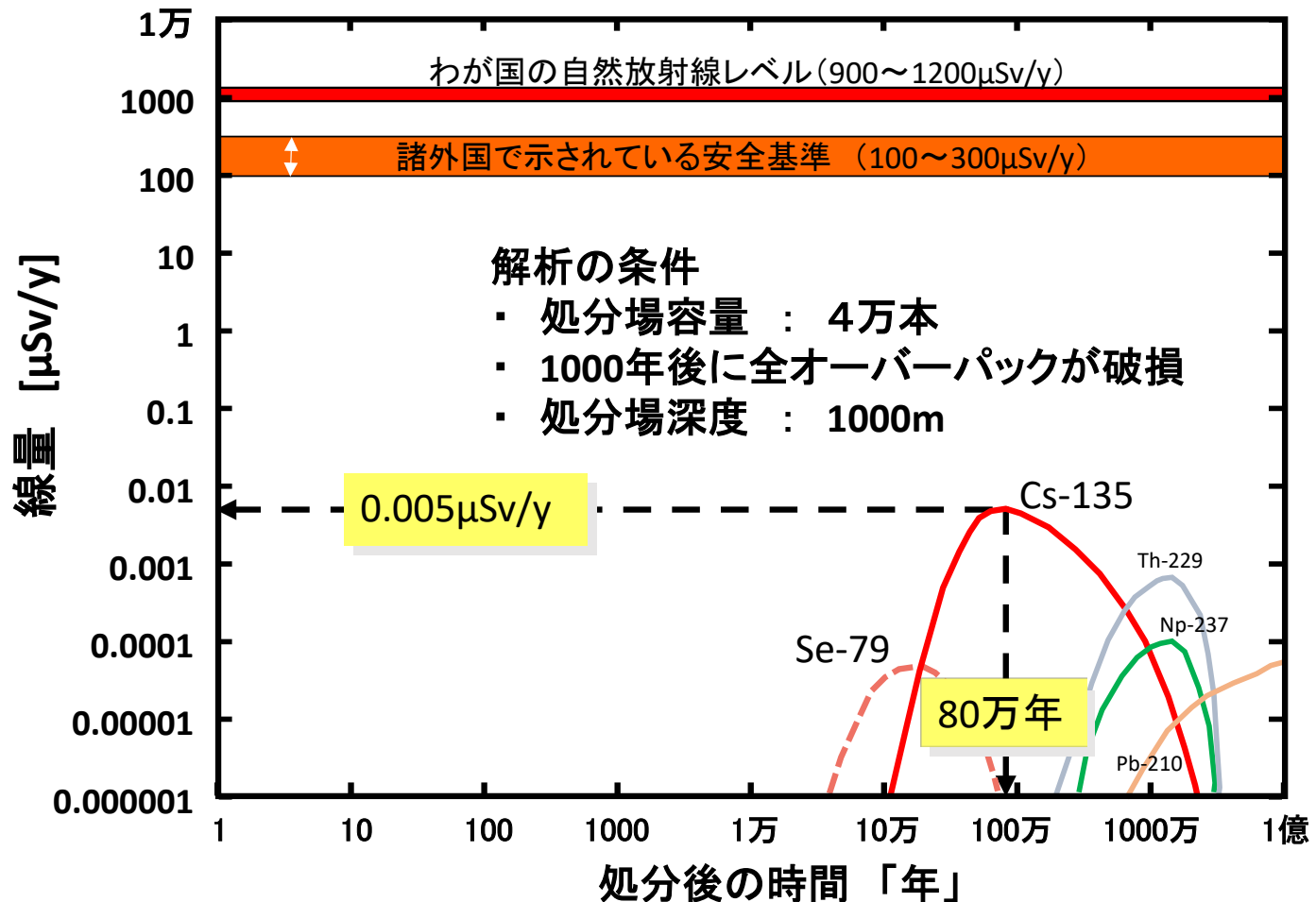


図 5.4-2 レファレンスケースで対象とする場と核種移行プロセスの概念図

被ばく評価の結果

地質環境、処分場仕様の多様性を考慮しても、
地下水を介して与える影響は $300\mu\text{Sv}/\text{年}$ を下回る。



第二次とりまとめは

結果が様々なところで、通り相場的に引用される

◎オーバーパックの腐食寿命は千年である

◎ガラス固化体の溶解寿命は7万年である

これらは安全側の**設定に過ぎない**

一方で、

◎大部分の放射性核種は二アフィールド近傍にとどまっている

◎天然バリア性能は処分場から数10mまでの岩盤で十分な効果が期待できる

重要なメッセージは殆ど**伝わっていない**

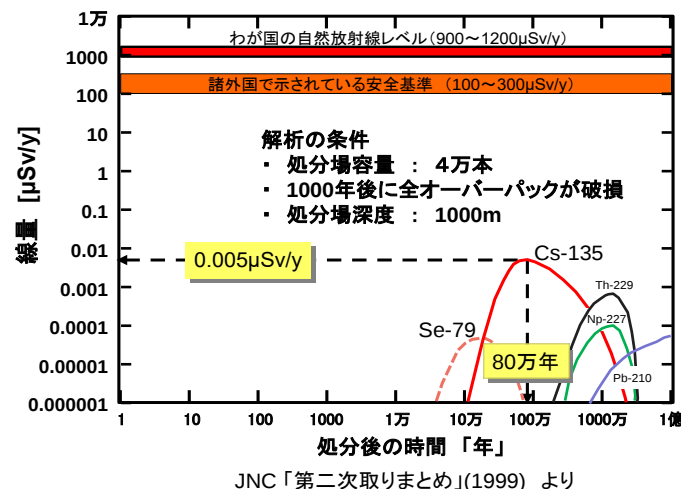
地層処分はどう見られているか

そもそも安全に処分できるんですか？

もし核種が漏れ出ることがあっても自然放射線による被ばくよりも十分低いという安全評価の結果を示すことで、納得を得ようとする。



被曝線量の算出の不確定さが大きい
「理想的な場合には安全」と言うのがいいところ
藤村、地層処分の「安全評価」の問題点



そんな先のことが解かる訳がないでしょう！

数値シミュレーションの結果は一つの可能性に過ぎない。

処分は安全なのか？

「第二次とりまとめ」レファレンスケース

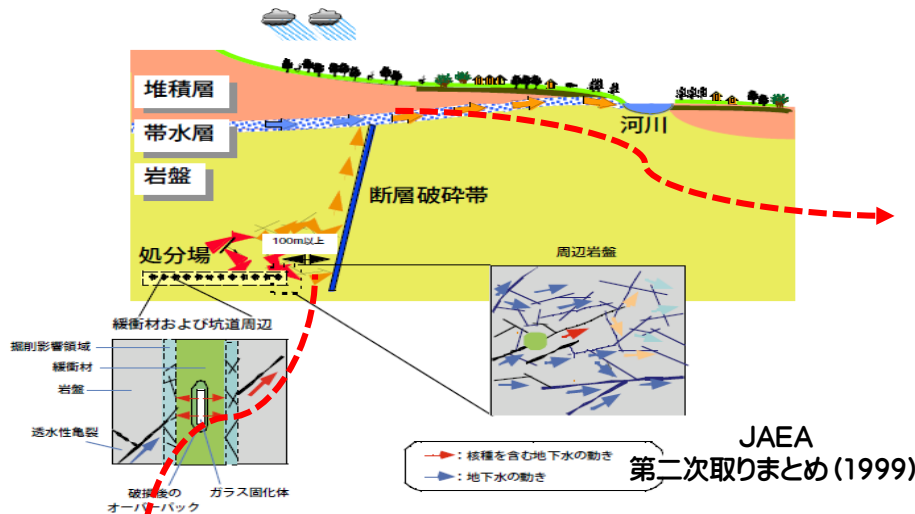
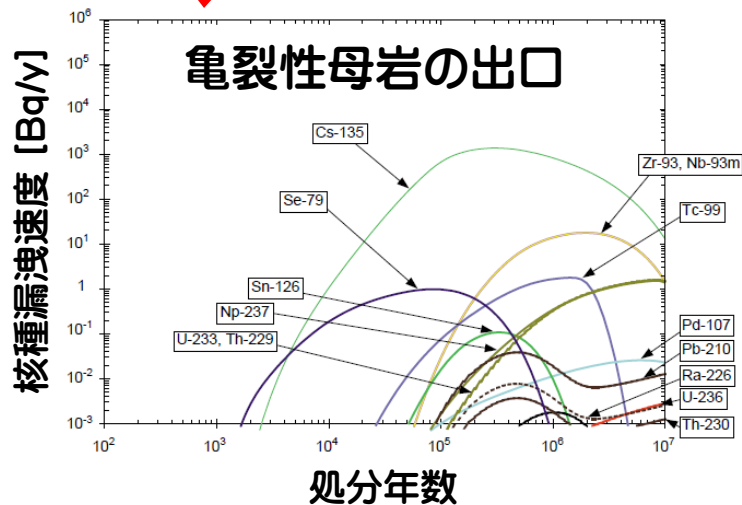
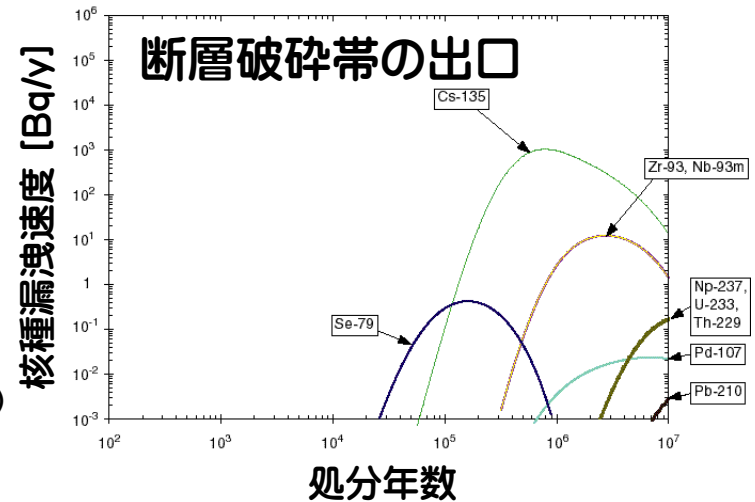


図 5.4-2 レファレンスケースで対象とする場と核種移行プロセスの概念図



安全なことを示すために
「漏れる」速度を示すのか？

矛盾した表現

地層処分は隔離型のはずなのに、

「**隔離**」ではなく「**放出**」の観点で結果を示している。

逆説的ストーリー展開

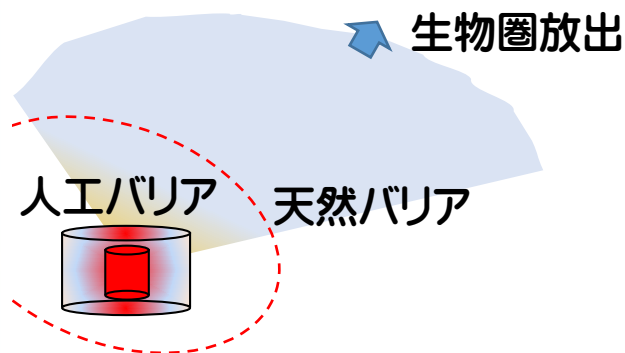
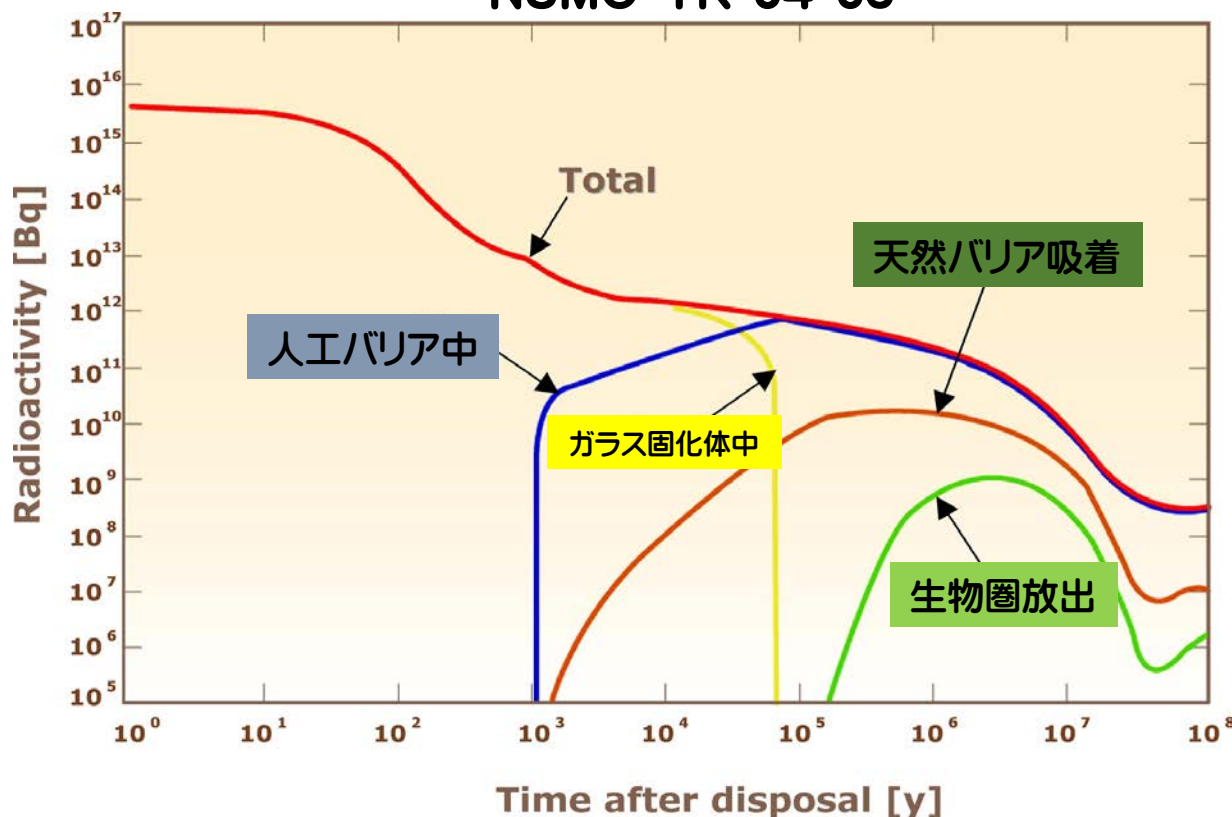
安全評価は一側面に過ぎない

無期限隔離はできなくとも保持はできる

同じ結果を別の角度から見る

放射能の大部分は緩衝材より内側に
[吸着
沈殿] により存在する

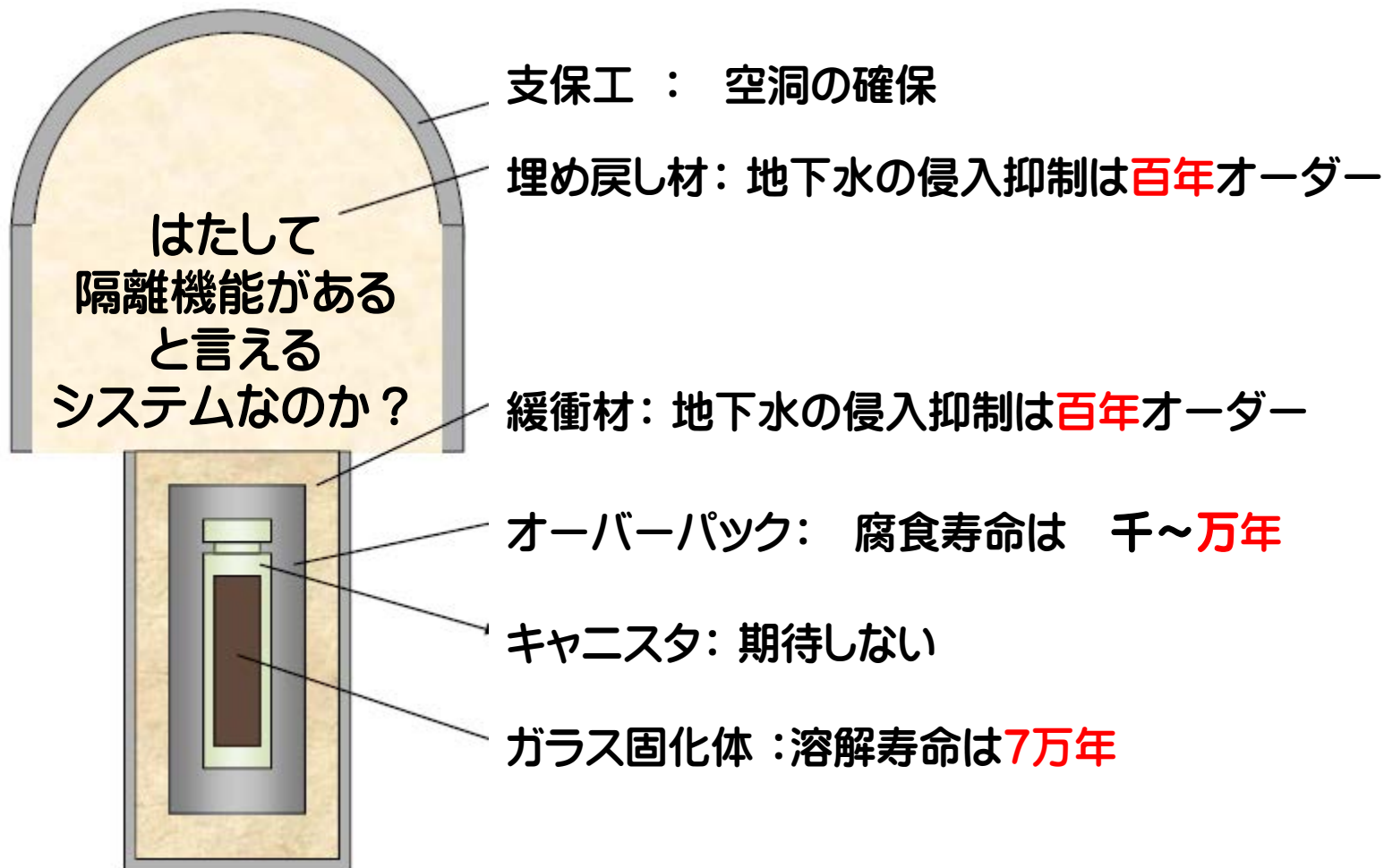
NUMO-TR-04-03



ガラス固化体(初期)と
緩衝材(長期)に
核種の大部分が捕捉

意外と頑張るかもしれない人工バリア

評価結果だけを見ると



※バックエンド週末基礎講座 Oct. 31st 2010

地層処分の安全確保にとって

多重バリアであるから

人工バリアの機能が重要である

天然バリアの機能が重要である

人工・天然バリアの両方とも重要である

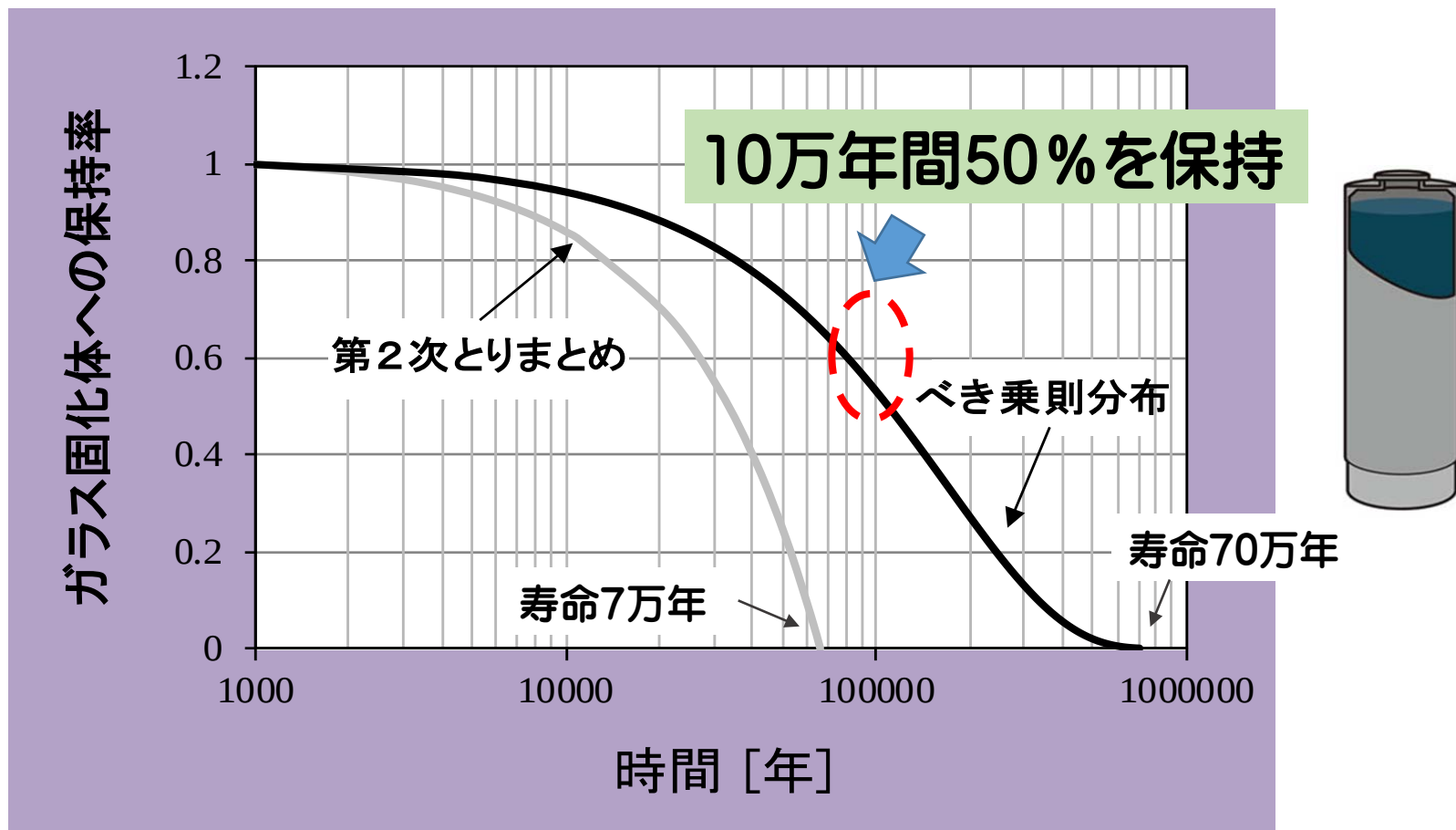
そう判断した根拠は何か？

自分自身、明確に整理していなかった

解析が複雑になると、解釈しづらい

ガラス固化体の評価見直し

Se-79 (6.5万年, 32.7万年との報告もある) やTc-99 (21.3万年) の半減期に迫る



温度変化の考慮、割れの分布則 大江(2017)

中深度処分規制基準での議論

原子力規制委員会

長期の不確かさへの対応

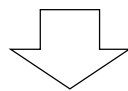
特に「人間侵入シナリオ」と「隆起・侵食」

- ▮ 余裕深度から中深度へ名称変更

地質環境の長期変遷の見通しの提示

- ▮ 10万年間の深度の確保

不確かな情報の中で「安全側」の仮定が妥当かどうか？



制度的管理の導入

濃度制限の考え

ALARAの考え方の導入

中深度処分の規制基準検討では

長期の評価には不確実性が避けられない

ある線量拘束値（規制）を満足することだけで
妥当と判断することはしない

処分場の設計段階での**ALARA**の考え方導入

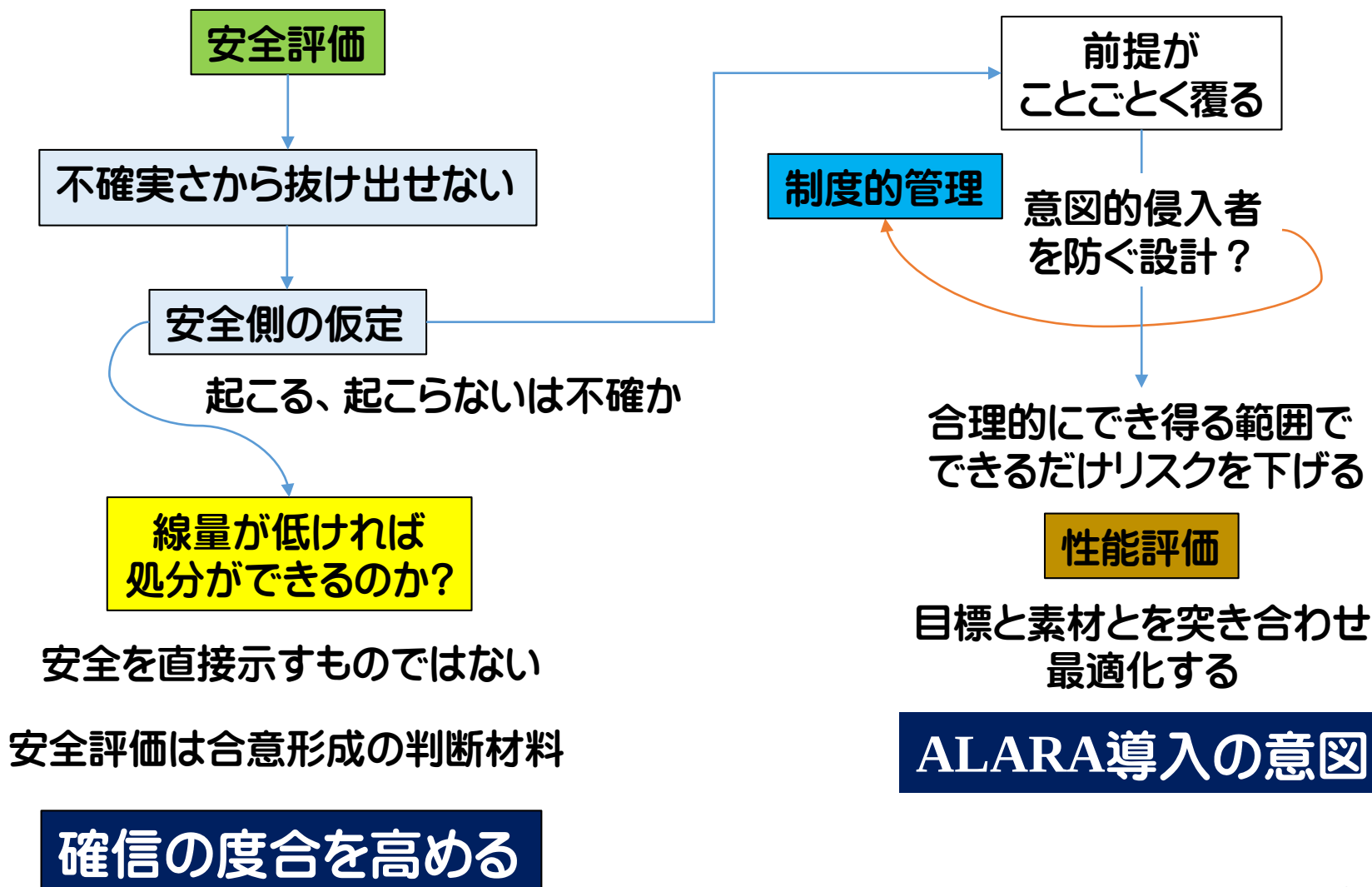
As **L**ow **A**s **R**easonably **A**chievable

合理的にでき得る範囲で、できるだけリスクを下げる



設計プロセス妥当性の審査

安全評価と性能評価



「安全側の設定」の落とし穴

要素毎**勝手**に設定

多くの要素で安全側に仮定したら
最大値と最小値の組み合わせ

どんなシステムが出来上がってしまうのか？

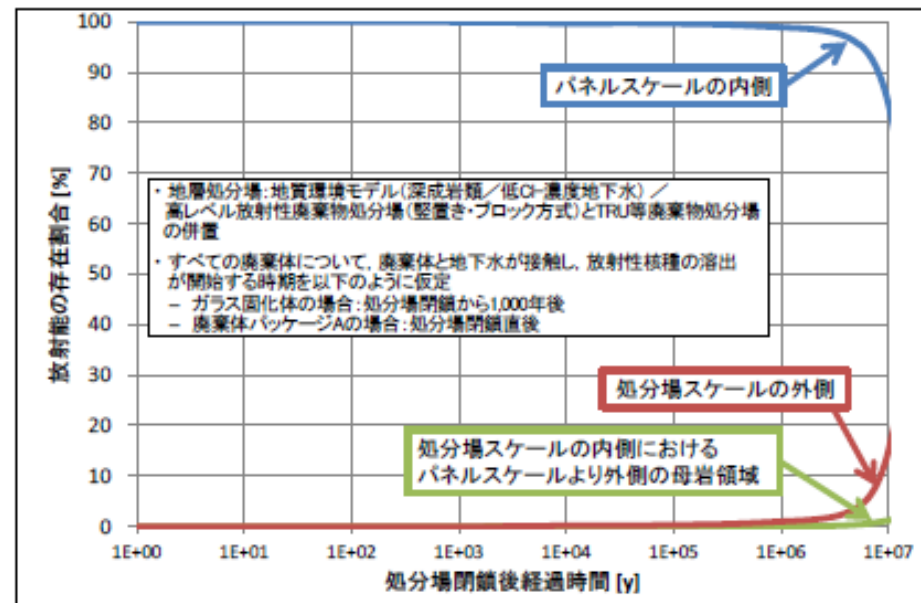
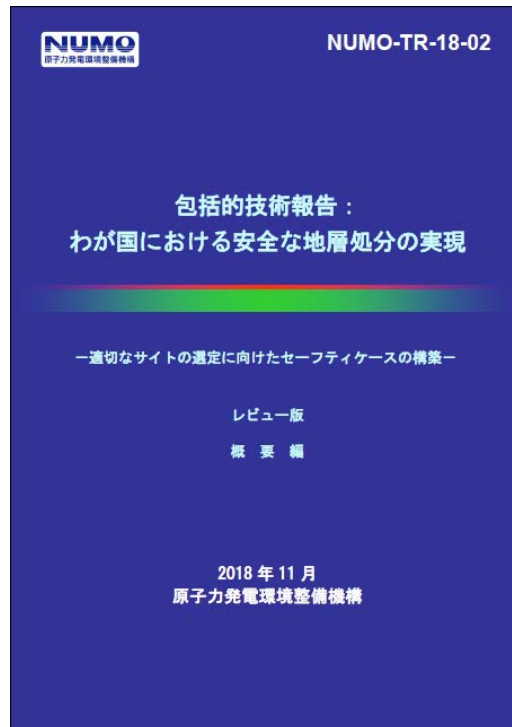
誤差が増す事よりも、
結論が変わることが深刻

「保守的であるとして極端な設定をした評価をもとに設計すると、本当に重要な核種や現象というものとは違ったものに重点を置いた設計になってしまう可能性もある。」

原子力規制委員会、廃炉に伴う廃棄物の規制に関する検討チーム、第29回会合資料

NUMO包括的技術実報告書

JAEA第二次とりまとめの意味を見直す契機



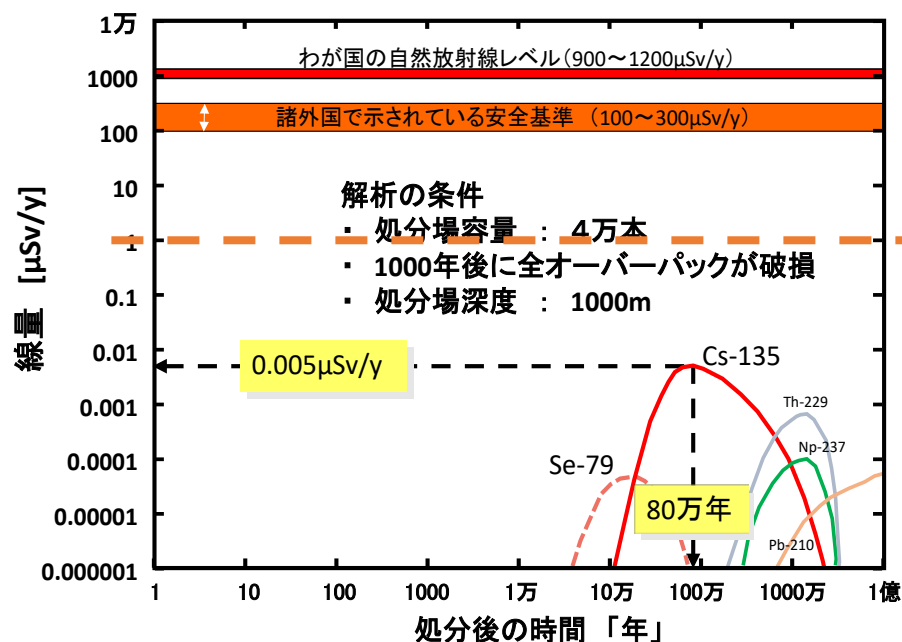
NUMO包括的技術報告書レビュー版(2018)

多くの国で定量的な安全評価の時間枠として設定されている100万年後においても、深成岩類の処分場では放射能全体の約99%がパネルスケールの内側に残存

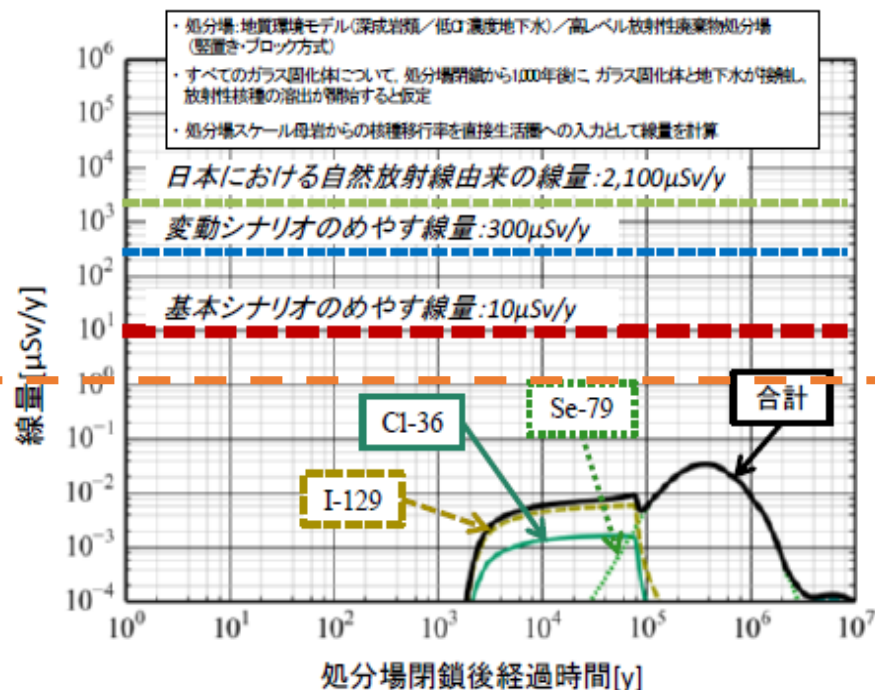
20年経てば結果も変わる

NUMO包括的技術報告書レビュー版(2018)

JAEA第二次とりまとめ(1999)

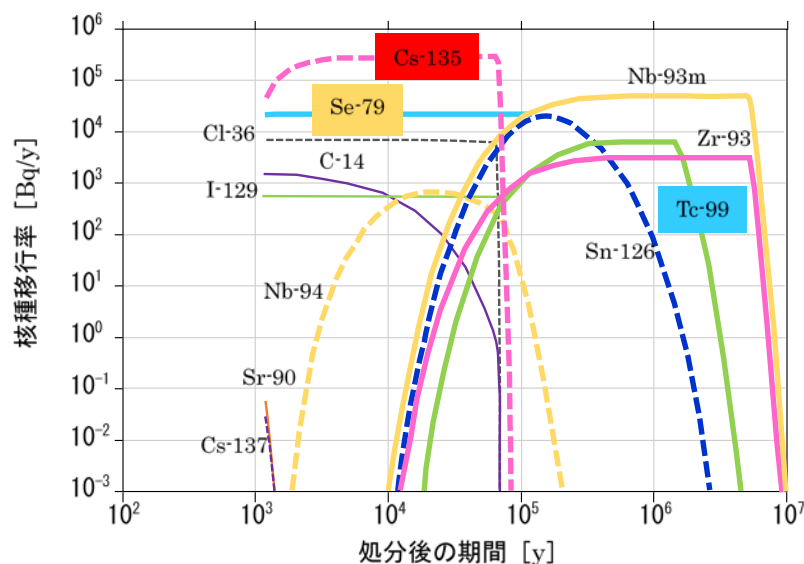
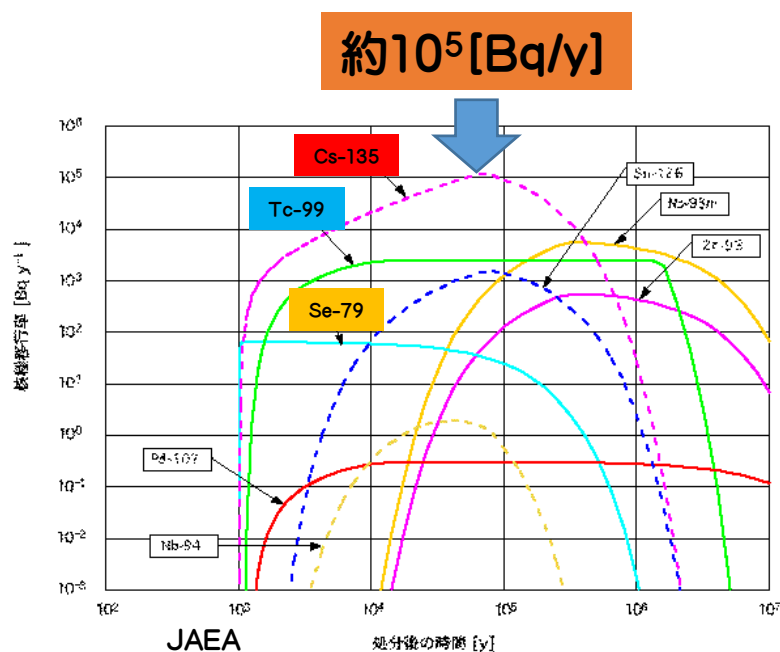


結晶質岩、降水系地下水
(レファレンスケース)



深成岩類、低Cl濃度地下水
(基本ケース)

ほぼ同じ人工バリアでも



	核種	JAEA H12	NUMO SC
掘削影響領域流量		0.001	0.9
実効拡散係数	Cs-135	6×10^{-10}	8×10^{-9}
収着分配係数	Tc-99	0.1	5
溶解度	Se-79	3×10^{-9}	3×10^{-8}

ダークホース核種

新第三紀堆積岩類、高Cl濃度地下水

Np-237の放射性壊変により生じる**U-233** が
支配核種となった。

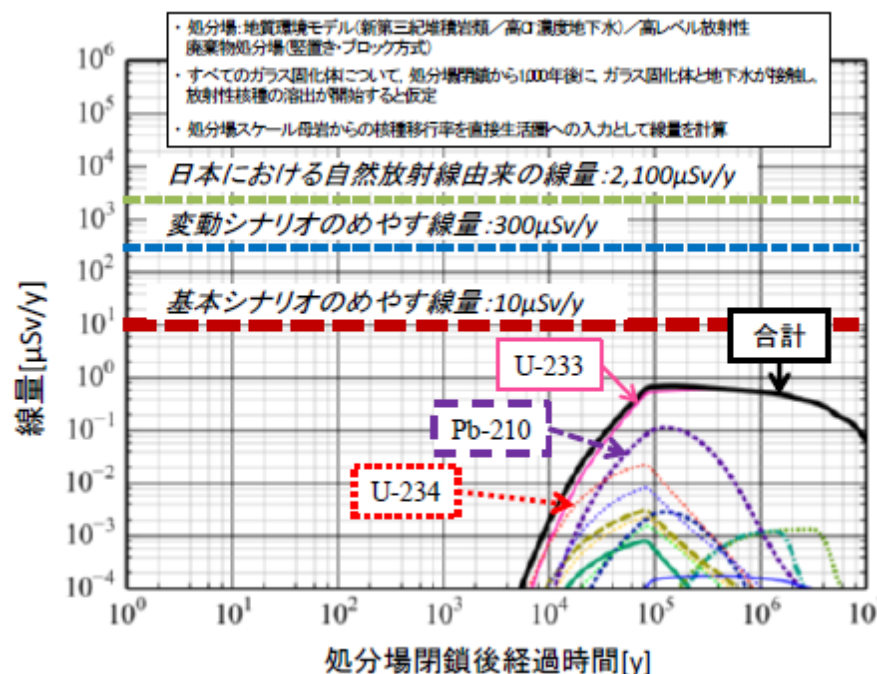
その理由

Np-237 の放射性崩壊によって
U-233が生成され続ける

陰イオンVI 価の炭酸錯体が主体
 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$, $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ など

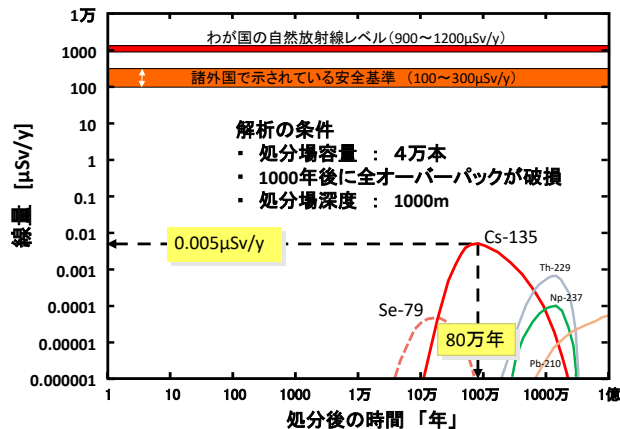
粘土鉱物への収着分配係数が
極めて小さいことから
分配係数を低く設定

溶解度を高く設定



NUMO包括的技術報告書レビュー版(2018)

評価結果に右往左往する



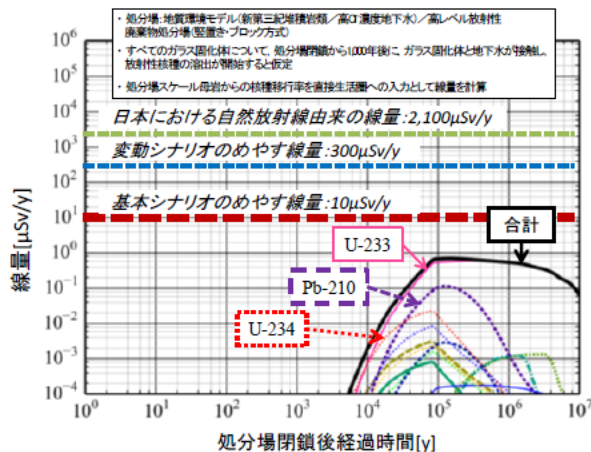
JNC H12 (1999)

Cs-135が重要核種である

安定元素Csによる試験が盛行

単独核種なので影響が判りやすい

今度は**U-233**が重要になる？

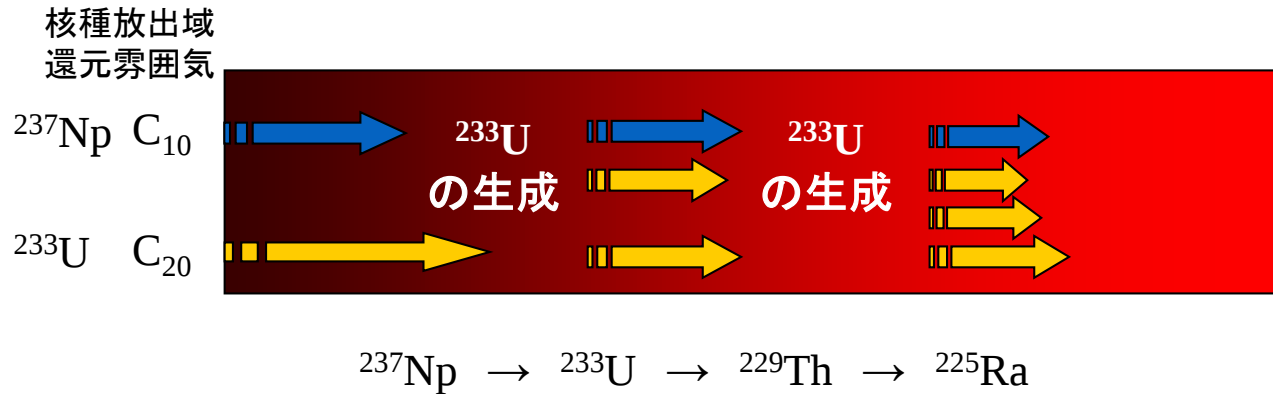


NUMO SC (2018)

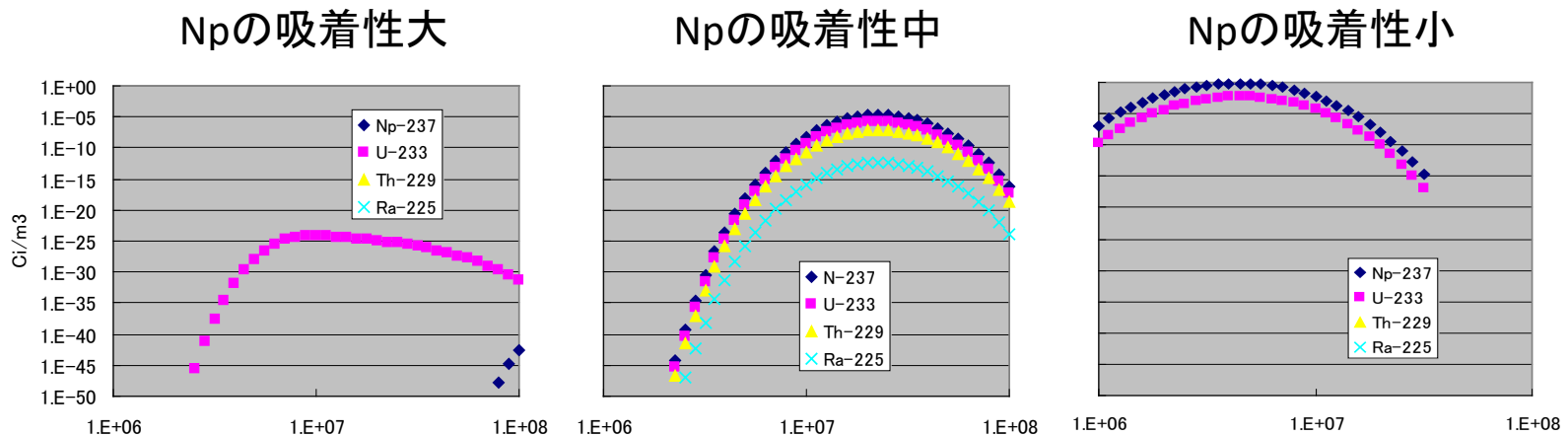
その親核種である**Np-237**
の挙動も同様に重要なはず

NpがUに与える影響を定量的に言えるか？

多重崩壊連鎖を含む解析



U-233の移動パターンは親核種の**Np-237**の吸着性に依存



解析解は複雑

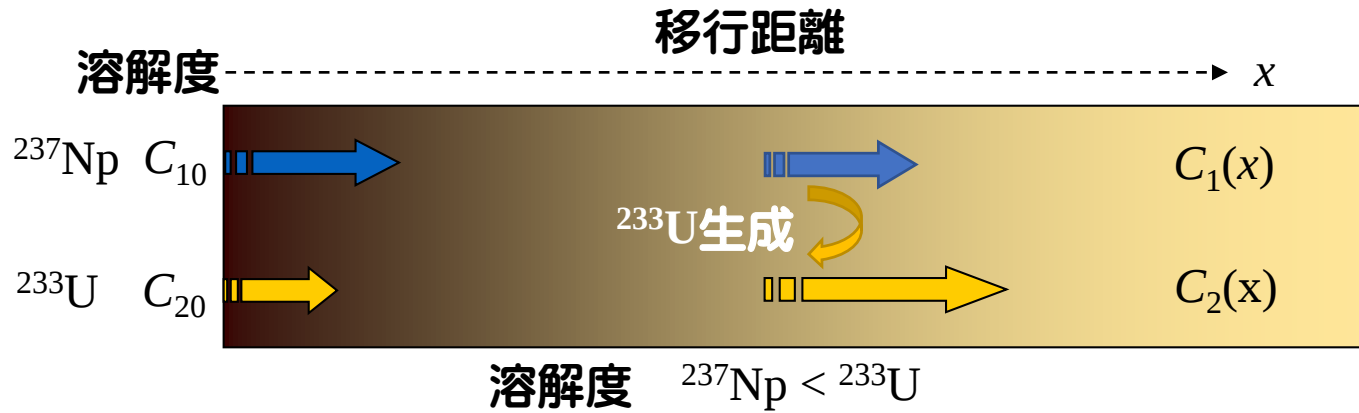
$$C_i(x, t) = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{D}{K_i} \exp\left(\frac{vx}{2D}\right) \times \left\{ C_j^0 \int_0^\infty \frac{p \sin(px)}{\delta_i} (1 - e^{-\delta_i t}) dp + \sum_{j=1}^{i-1} M_i^{(j)} C_j^0 \times \sum_{n=j}^i \int_0^\infty \frac{p \sin(px)}{\prod_{\substack{r=j \\ r \neq n}}^i (\Gamma_{nr} p^2 + \gamma_{nr})} \frac{(1 - e^{-\delta_n t})}{\delta_n} dp \right\}$$

数値積分のために、数値解法と手間があまりかわらない。

猫も杓子も**数値**解法

答えは出るが、イメージが湧かない

解析を簡単に



定常濃度

$$C_2(x) = C_{20} \cdot e^{-\left(\beta_2 - \frac{V_2}{2D_2}\right)x} + C_{10} \cdot \frac{\lambda_1 \frac{R_1}{R_2}}{D_2(\beta_2^2 - \beta_1^2)} \cdot \left[e^{-\left(\beta_1 - \frac{V_2}{2D_2}\right)x} - e^{-\left(\beta_2 - \frac{V_2}{2D_2}\right)x} \right]$$

単位距離移動する間の核種の生成と減衰

$$\beta_i^2 = \frac{V_i^2 + 4D_i\lambda_i}{4D_i^2} \quad (\text{高橋2016})$$

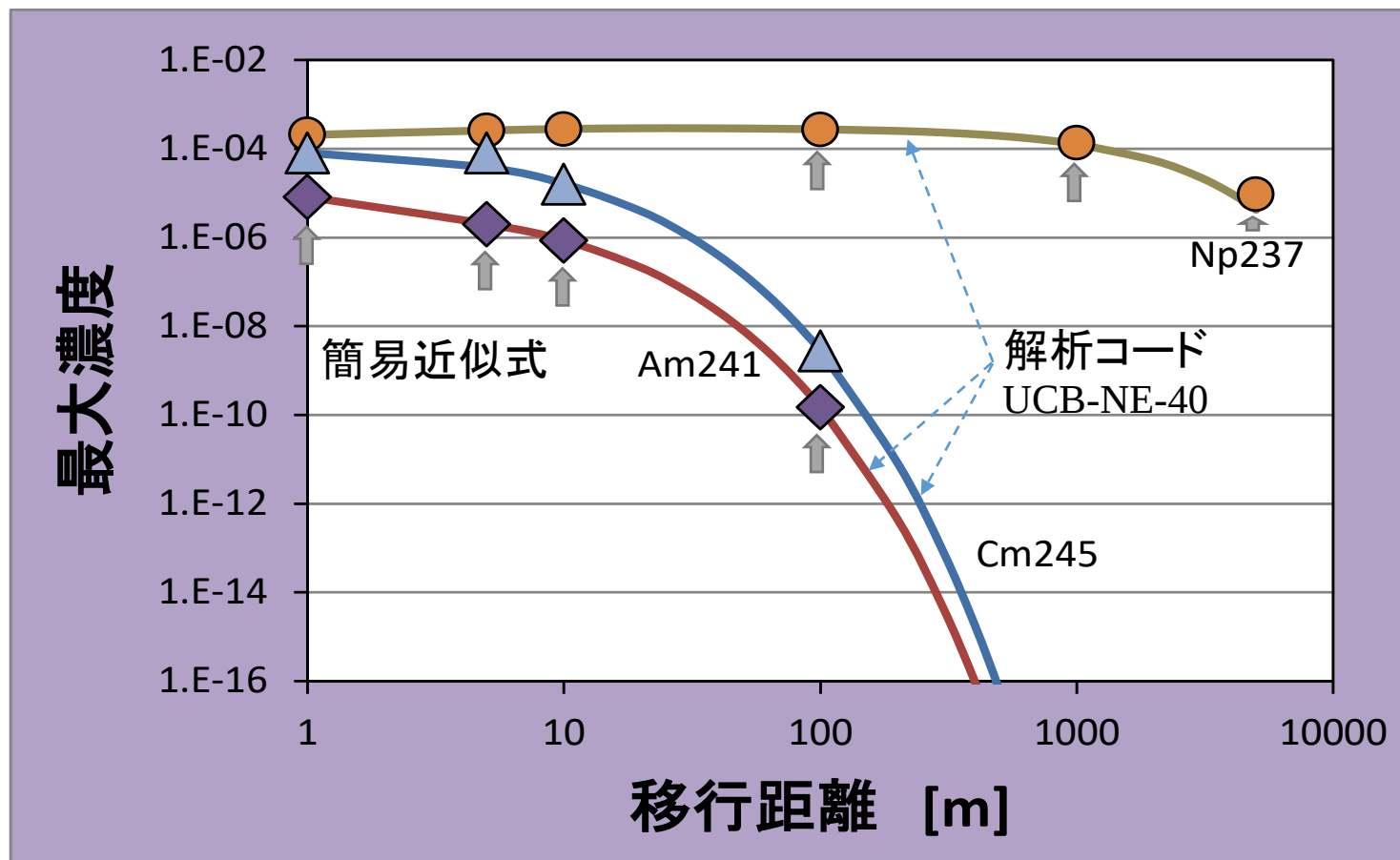
cf. 放射性壊変の式

$$N_2(t) = N_{20} \cdot e^{-\lambda_2 \cdot t} + N_{10} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \left[e^{-\lambda_1 \cdot t} - e^{-\lambda_2 \cdot t} \right]$$

単位時間経過する間の核種の生成と減衰

近似式の妥当性は

$^{245}\text{Cm} \rightarrow ^{241}\text{Am} \rightarrow ^{237}\text{Np}$ の事例



(高橋2016)

いくら方程式が解けても

複雑な方程式 数値シミュレーションでほぼ解けてしまう

数値計算病

式の意味は？

結果を支配する重要因子は？

を知らずして答えをだすだけ

結果の理解が難解

本質的意味が把握しづらい

結果の吟味が容易にできない



「**語らずして**」方程式を解いたことにはならず

複雑化する解析

亀裂ネットワーク

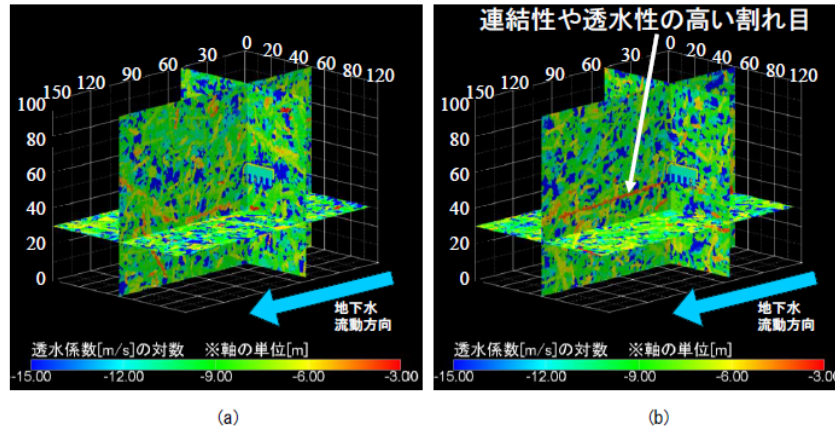


図 6.4-7 異なる二つのリアライゼーション a, b に対応した地下水流動解析モデルの有限要素の
透水係数分布の例

NUMO包括的技術報告書レビュー版(2018)

結果が予見できれば
苦労しない

どのような結果になるのか？ ある程度の方角が見えるには

本質を抜き出す

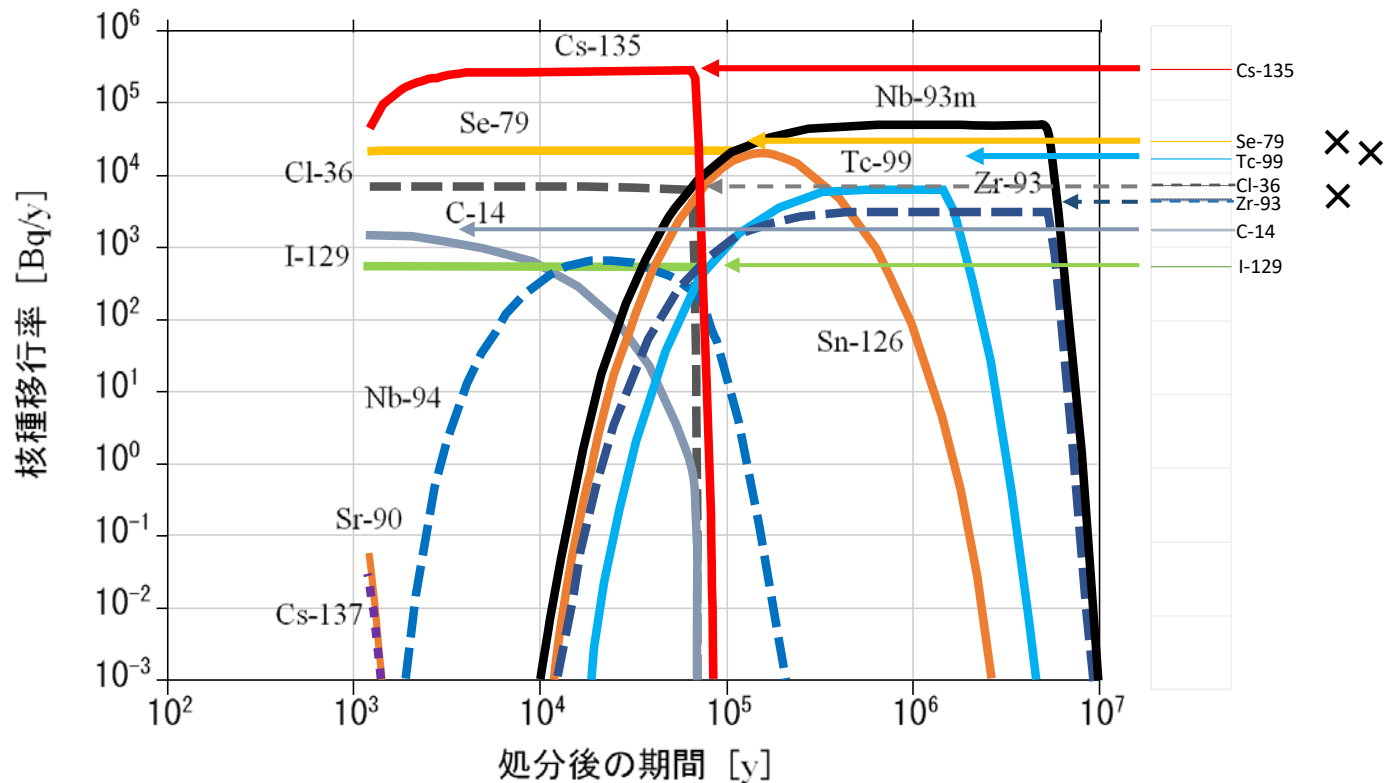
Abstraction

定常状態や最大濃度に着目

Simplification

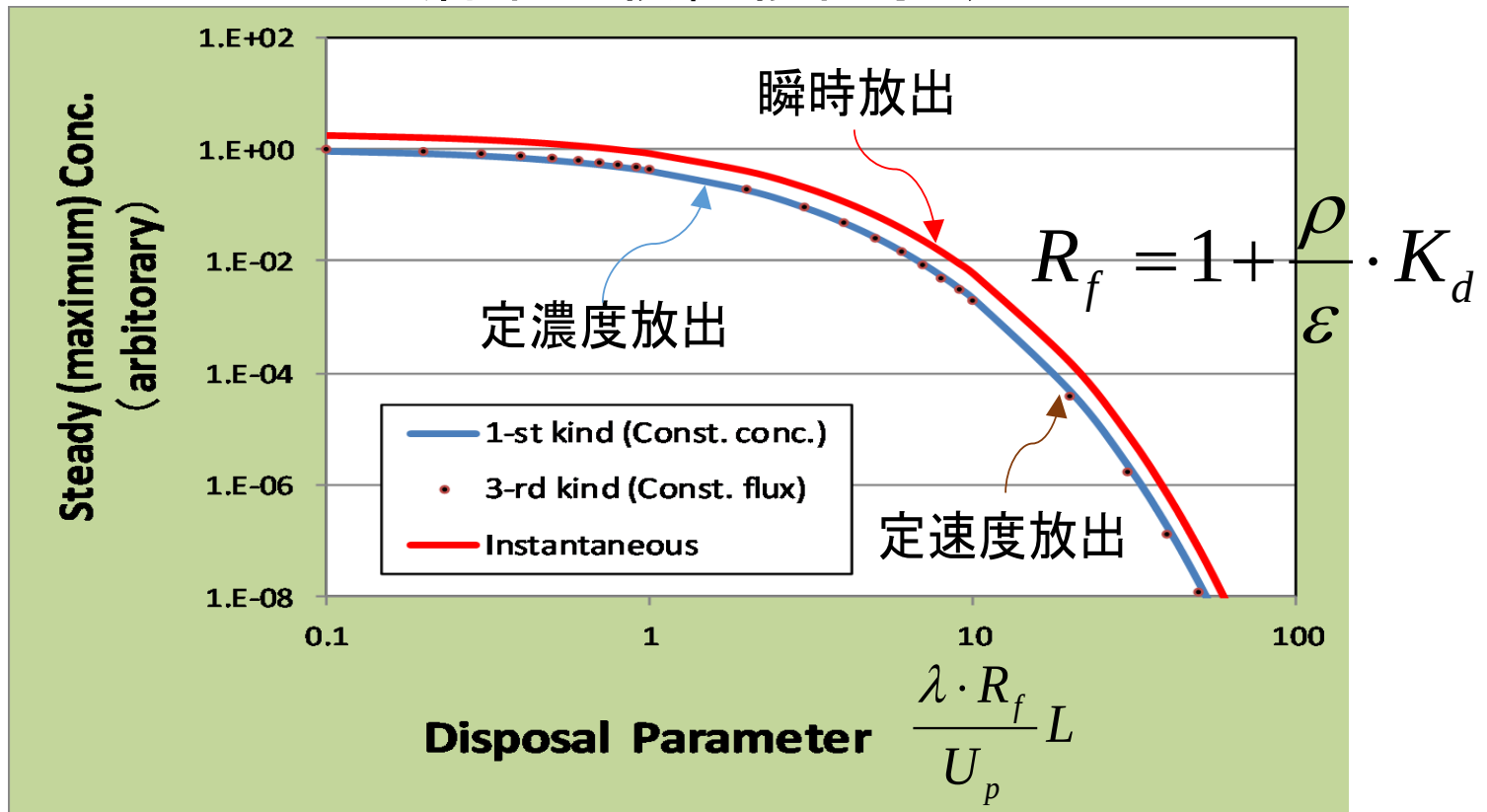
手計算でもある程度判る

$$\text{放出速度} = \left\{ \begin{array}{l} \text{ガラスマトリックス溶解速度} \div \text{緩衝材の遅延係数} \quad \bigcirc \text{可溶性元素} \\ \text{緩衝材高さ} \times \text{円筒単位高さ当たりの定常拡散放出速度} \quad \bigcirc \text{難溶性元素} \end{array} \right.$$



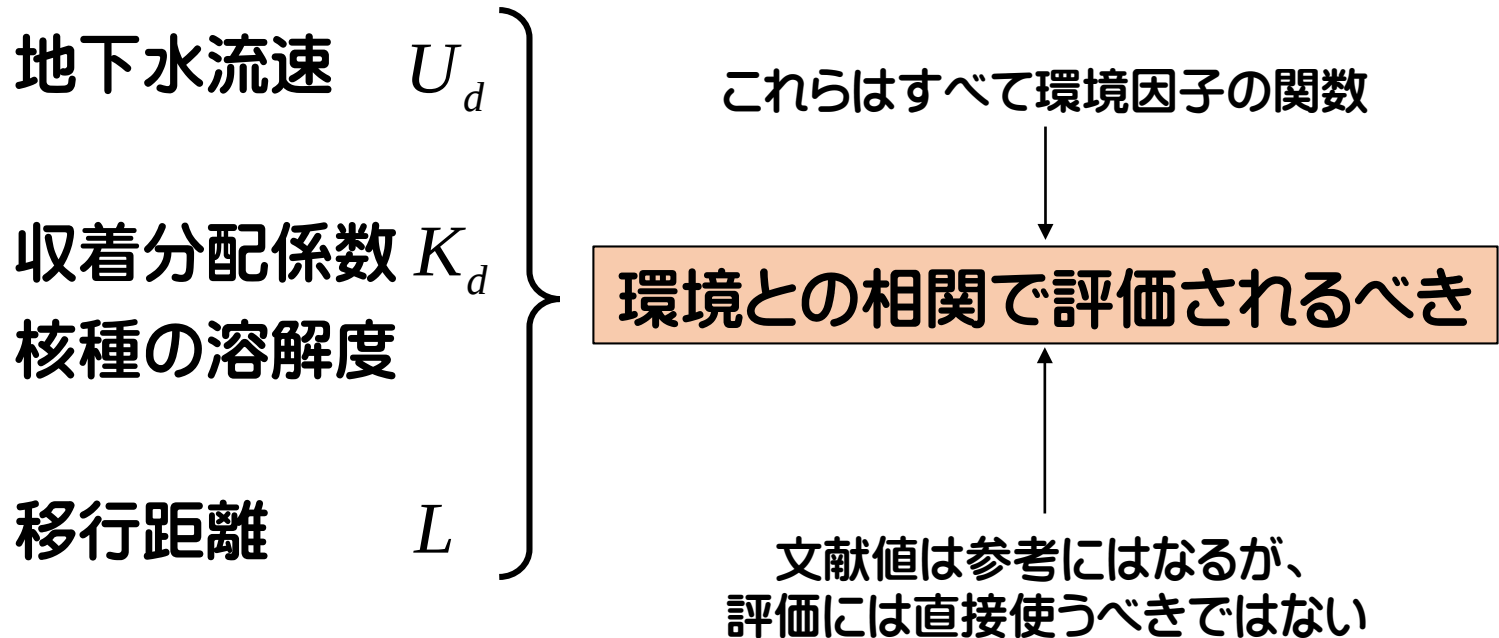
最大濃度を支配する因子

地層中の核種移行挙動



入口境界条件に拘わらず、最大濃度を支配する因子は同じ

安全評価上の重要因子

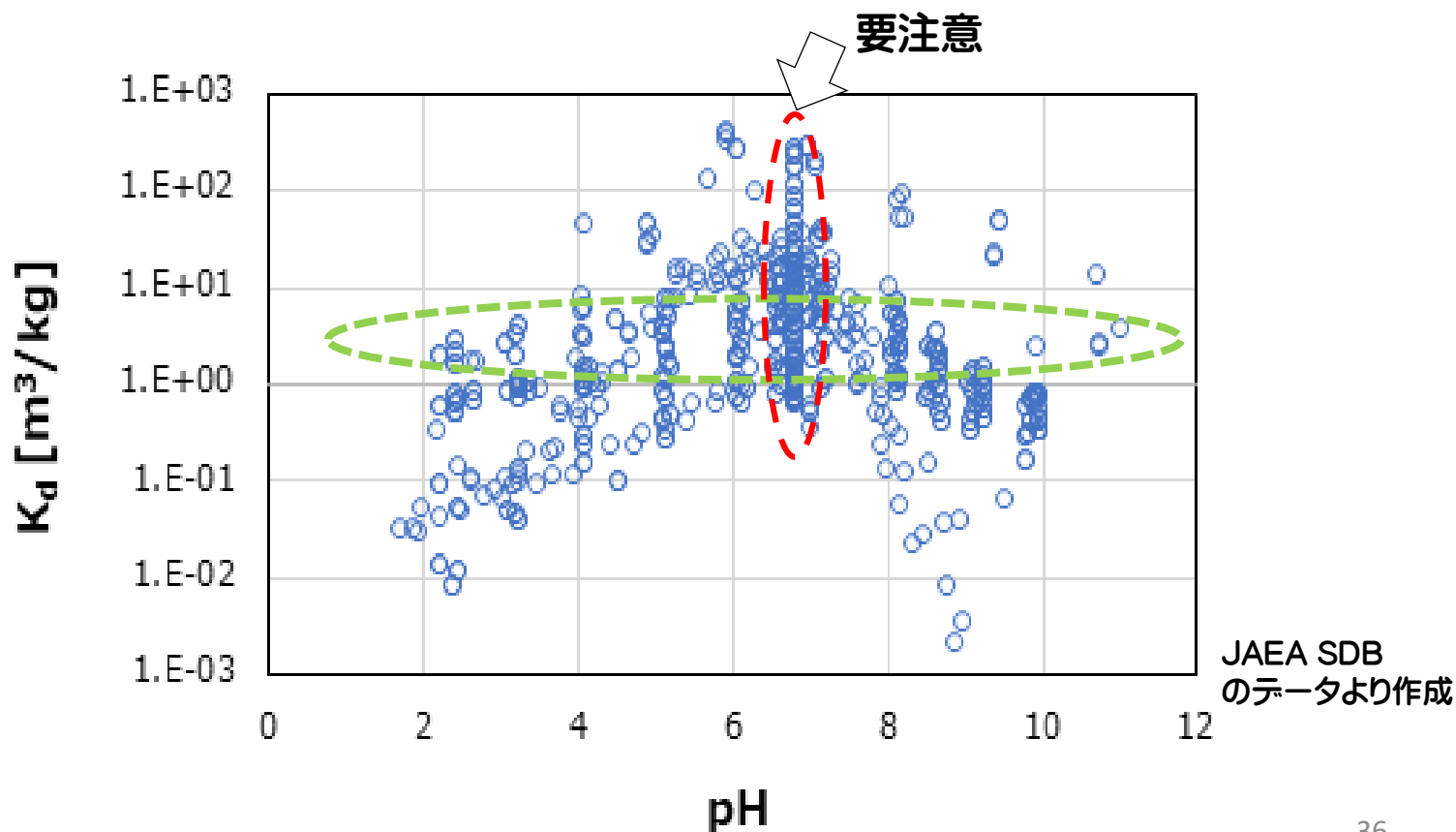


地下水流速に文献値を直接利用することはまずない。
分配係数を文献から安易に引用することはよいのか？

安易に文献を探っても

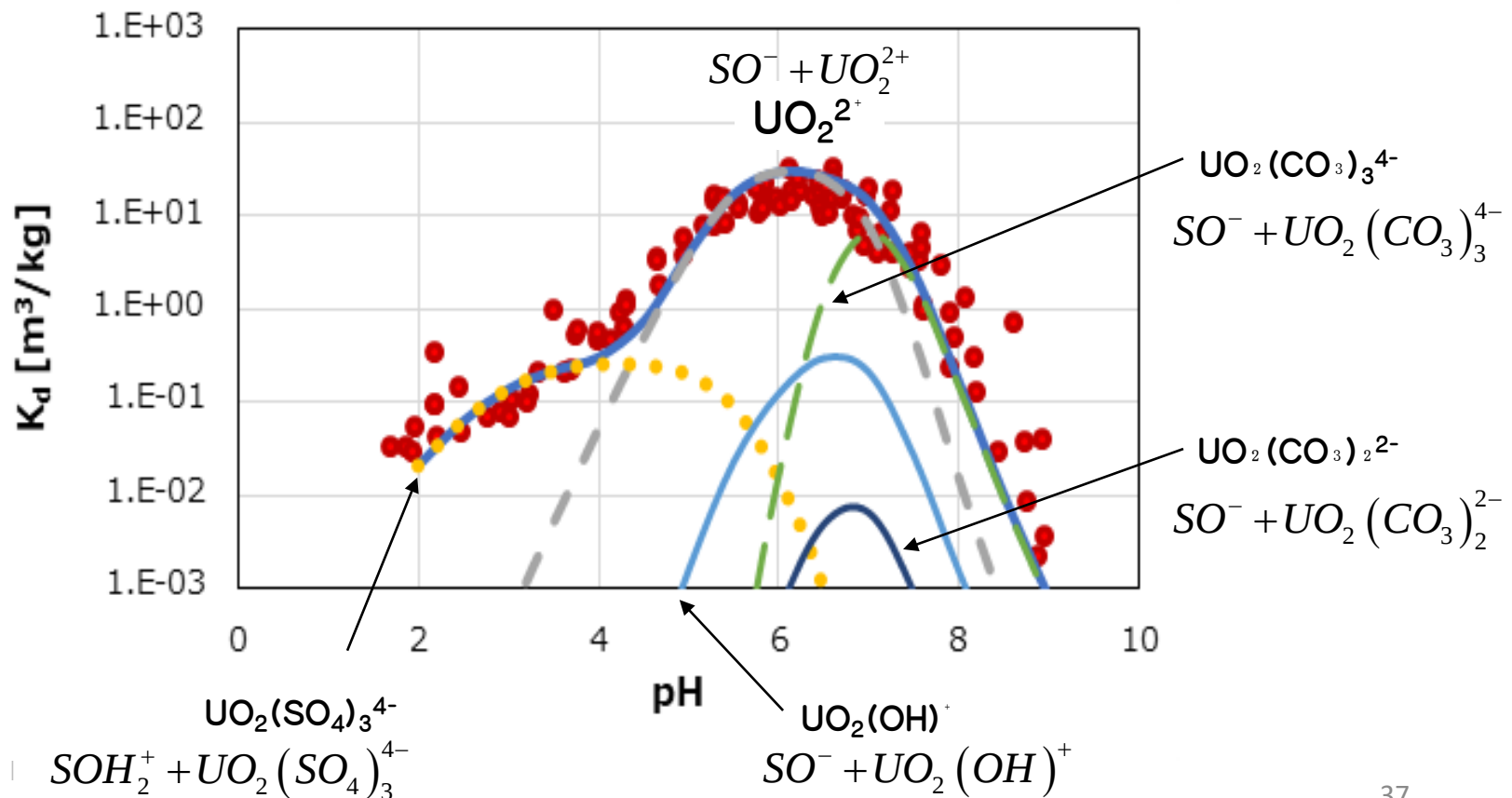
花崗岩に対するウランの収着分配係数

1~10 m³/kg のデータの数が多い = 確率が高い？



一貫性のあるデータを抽出すれば

Basic Stern Modelを用いた表面錯体モデル



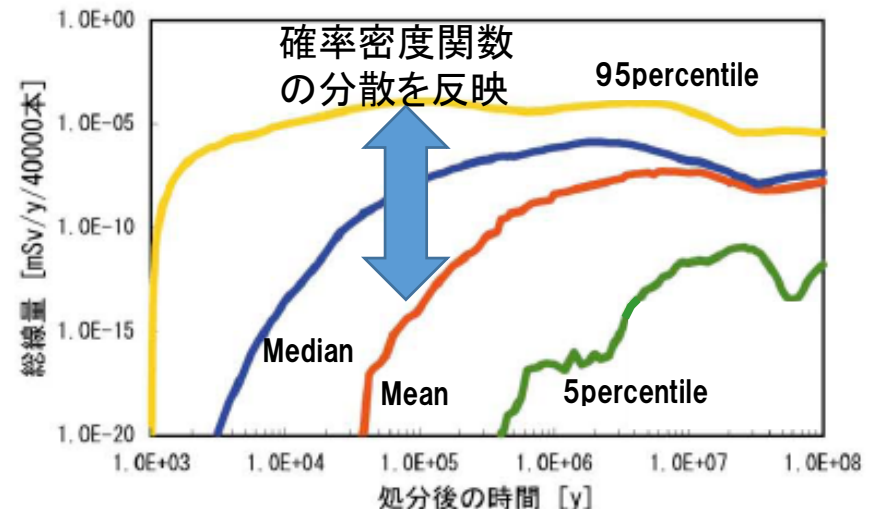
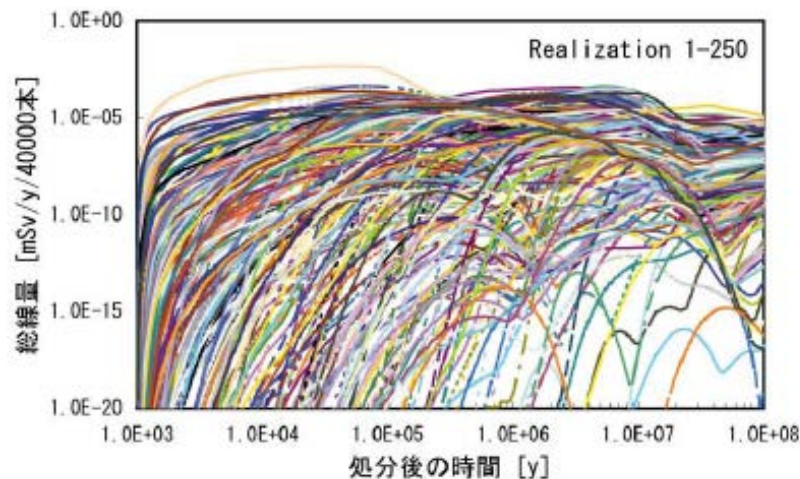
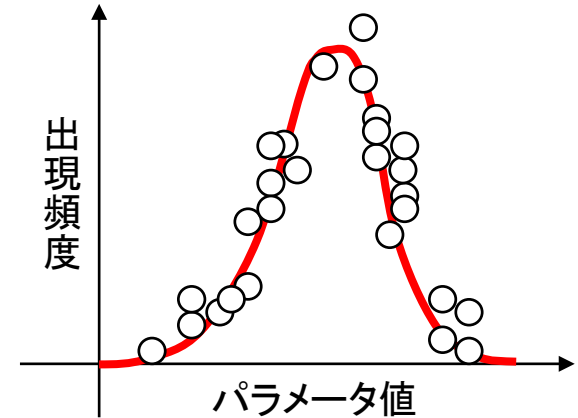
不確実性解析では伝わらない

モンテカルロシミュレーション

ランダムサンプリング → 核種移行解析

多数回の計算(リアライゼーション)

パラメータの確率密度関数



モンテカルロシミュレーション解析結果

若杉他、サイクル機構技報、No.14(2002)

確からしいパラメータの設定

分配係数

不確定な状況を放置すること
「今後の課題」化はもうできない

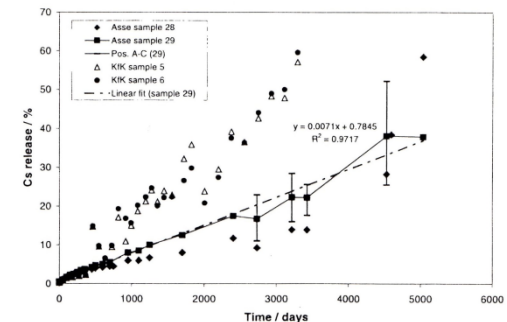


ウランの分配係数 (RWMC)

ソースターム

安易な分配平衡モデルへの転換は？

固化体からの浸出速度の積み上げによる
実験的サポートはどこへ



セメント固化体からのCs浸出データ
Kienzler et al.,(2000)

～の引用は その根拠まで遡る覚悟が必要

応用則を作り出す努力

スウェーデンKBS-3タイプの処分場概念からスタート

花崗岩

ベントナイト

データは豊富にあるのに、

堆積岩系のデータは極端に少ない

第二次とりまとめの結果

Csのデータは豊富にあるのに、

Uのデータは極端に少ない

目先の利用に囚われず

結果を演繹的に解釈



遠い将来を予測する？

誰もが不確かなことだと思っている。

不確か＝確かでないこと 「広辞苑」

計測値のばらつきの程度を数値で定量的に表した尺度
「Wikipedia」

真の値 ある特定の量の定義と合致する値。

備考：特別な場合を除き、観念的な値で、
実際には求められない。「JIS Z8103」

真の値の大小よりも、見積もりの幅の大きさ

「本当のところが判らない」 ではなく **「落ち着きどころが見えない」不安**

真の値を知ることはいできない

メートルを定めた子午線大計測

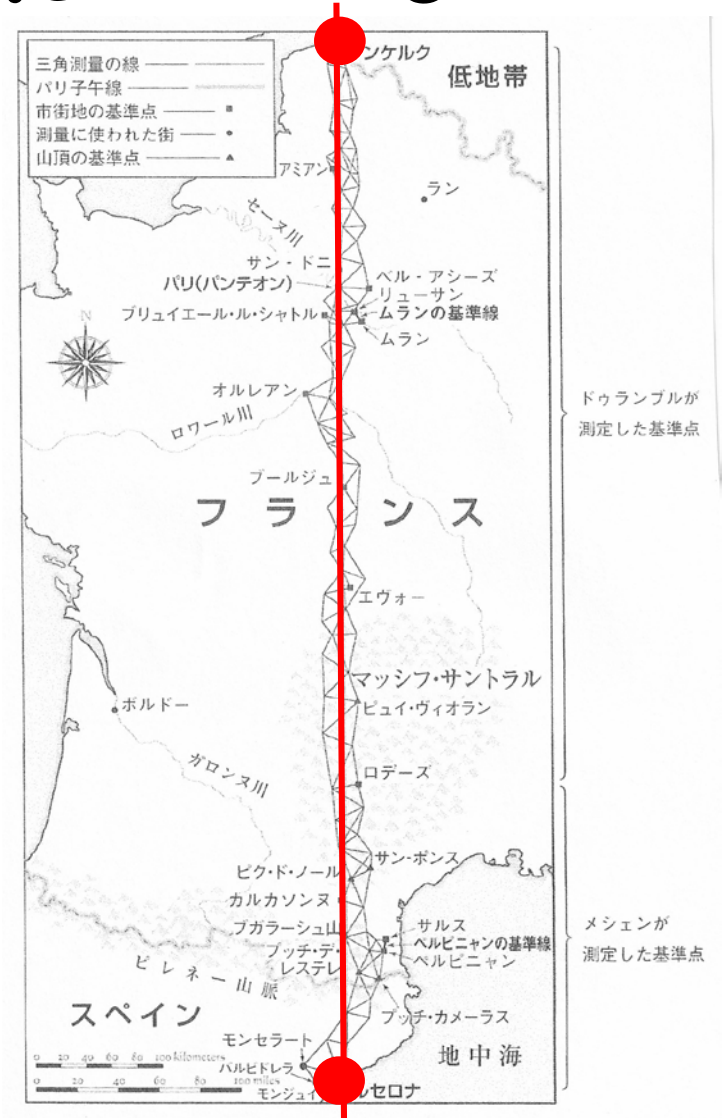
1792年 フランス革命の最中

1m = 子午線の長さ × $\frac{1}{4}$ のさらに1千万分の一



現在最も精密な値
(人工衛星から)
よりも**0.2mm**短かった

注) 現在の1mは真空中を光が1/299792458秒間に進む距離
(1983)



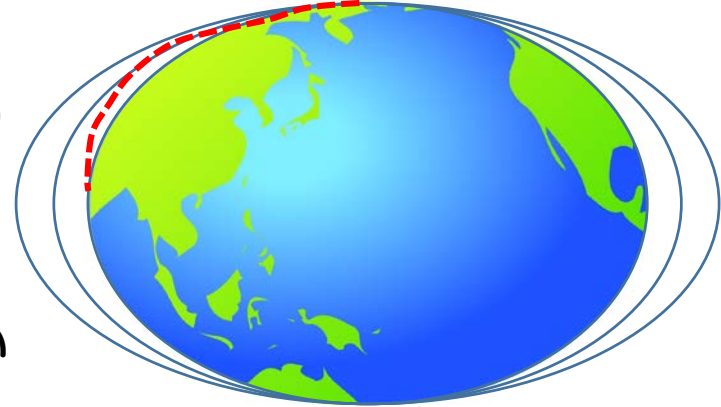
ケン・オールダール、「万物の尺度を求めて」より

誤差論の萌芽

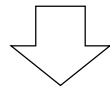
実測 精密なデータでは偏曲率が場所によって異なっている

測定機器の系統的誤差によるズレが
精密な測定を繰り返しても排除できない
ことを知らなかった

ラプラス 回転楕円体



精密度 と 正確度 の区別があいまい



ルジャンドルの最小二乗法
ガウス分布

1735年～1739年の測定で得た値の倍の値！？
南米エクアドル
北極圏ラップランド

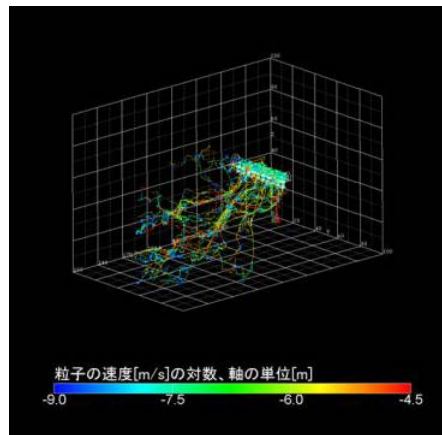
せつかくの精密なデータは棄却され、古いデータを使った

シミュレーションと精度

高度な解析手法で「精密度」が上がるかもしれないが、

真値を知らないのだから

「正確度」の向上にはつながらない



本来見えないものが、
あたかも
本物のように見える

NUMO包括的技術報告書レビュー版(2018)

完璧など人類は達成したこともないし、
今後も恐らく達成することはないだろう ドウランブル

安全評価を行う大江的意味

遠い将来の計算は、
将来の影響を予測するものではないし、
予測できるものでもない。

タイムスリップ



NHK タイムトンネル (1967)

もし、自分がその場にいたとすれば、
今の、自分たちの尺度をもって、「処分」という行為が
許容できるかどうか、

一つの判断材料を提供するだけ。

放射能は絶対漏れない？

漏れるかどうか

遠い将来を正確に予測することはまだ力不足

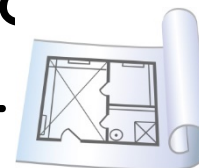
漏れるとしたらどうなるか

短期的に有効な対策

長期的に有利な選択

を考えて

設計



立地



事業期間中は漏れていないことを監視

不都合が予見される事態があれば



回収

結びに代えて

地層処分では、
確立したものは何もないと謙虚に思うべし

マニュアルに従って粛々と進めることなど、まだまだ、できない。

正しいと思うのは傲慢である
真値近づくことはできるかもしれないが
真値を知ることはできない

皆が認めるスタンダードに従っていれば正しいは、「間違い」。

大事なことは
正しいことではなく「正直」なこと