



地層処分システムの超長期の安全評価

平成24年3月23日
日本原子力研究開発機構
地層処分研究開発部門



—地質学的現象の将来予測—

【高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について(第1次報告), 原子力安全委員会, H12. 11】

一般公衆に対する評価線量が最大となる時期(10⁶年以上)においても、基準値として定められた放射線防護レベルを超えていないこと等を確認することが基本である。

【高レベル放射性廃棄物処分の安全規制に係る基盤確保に向けて, 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会, H15. 7】

評価期間が長期になると、処分システム領域に対する外乱の発生予測の不確実性が増加することに起因して、計算結果の信頼性が低下する可能性もある。評価期間の設定に際しては、計算上のピーク発生時期と関連する外乱事象発生の予測可能性とを併せ考慮していく必要がある。

【放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な重要事項について, 原子力安全委員会, H16. 6】

評価期間が長いことによって派生する不確実性等については、シナリオの発生の可能性を踏まえた放射線防護の基準を検討することが重要。超長期の防護基準については、天然の放射能濃度との相対的比較等の補完的指標も考慮すべきである。

【ネオテクトニクス】(垣見・松田, 1987)

現在進行中の変動およびそれと同様な特性の続く最近の時代の変動。なお、最近の時代の範囲は地球上の地域によって異なる。

Wegmann (1955) Lebendige Tektonik, eine Uebersicht. *Geol. Rundschau*, 43, 4-34.

【第四紀テクトニクスの特徴】(松田・衣笠, 1988)

第四紀は新第三紀後期(数~10数Ma)に比べて特異な時代である。

- ①増起伏, ②陸化, ③断裂, ④高変形速度
- 圧縮テクトニクス →→ プレートの衝突

【第四紀後期の地殻変動】(垣見・松田, 1987)

- ① 第四紀を通じて一方向に進行してきた(変位の累積性)
- ② その運動方向はほぼ等速的であった(速さの一様性)
- ③ その運動をもたらした応力場は第四紀を通じて持続している(地殻応力の持続性)
- ④ そのような地殻変動は地域ごとに特有のくせをもっている(変動様式の地域性)

【急激かつ局所的な現象】

地震・断層活動や火山・火成活動については、過去数十万年の時間スケールでは、これらの現象は規則的に起こっていることから、今後十万年程度であればその規則性及び継続性からそれらの影響範囲を推論できる。

【緩慢かつ広域的な現象】

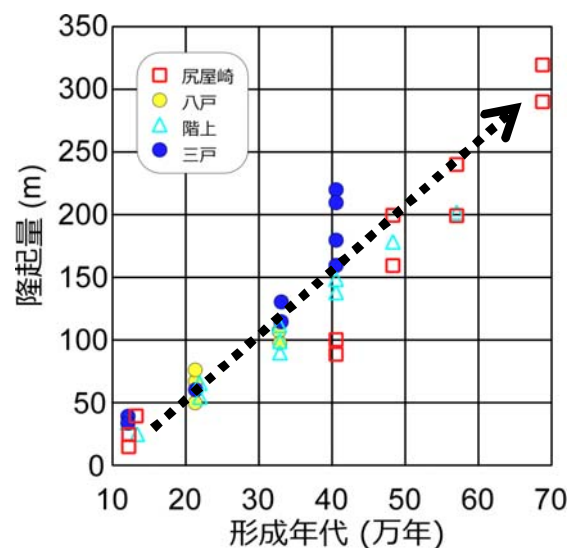
隆起・沈降・侵食及び気候・海水準変動は、過去十万年程度については広域にわたる比較的正確な地質学的な記録が残されている。それらの記録をもとに将来についても十万年程度であれば、その影響の性質や大きさ、また、影響範囲の移動や拡大の速度などを推測できる。

【地殻変動の一樣継続性に基づく外挿による予測の考え方】

第四紀後期の地殻変動の一樣継続性(変位方向の一樣性、変位の等速性)が成立している場合には、過去から現在までの変動傾向・速度を同程度の将来まで外挿することは可能である(松田, 1987, 1988)。

4

第四紀後期の地殻変動の一樣継続性の例



下北半島の海成段丘の形成年代と高度の関係
(核燃料サイクル開発機構, 1999)

➤ 段丘からみた過去数十万年間の変動の方向・速度はほぼ一定

5

外挿法による予測が可能な期間を検討するためには、現在のネオテクトニクスの枠組みの中で変動の一様継続性(変位方向の一様性, 変位の等速性)がどの地域でいつ頃に成立したかを地形・地質学的な情報から検討する必要がある。

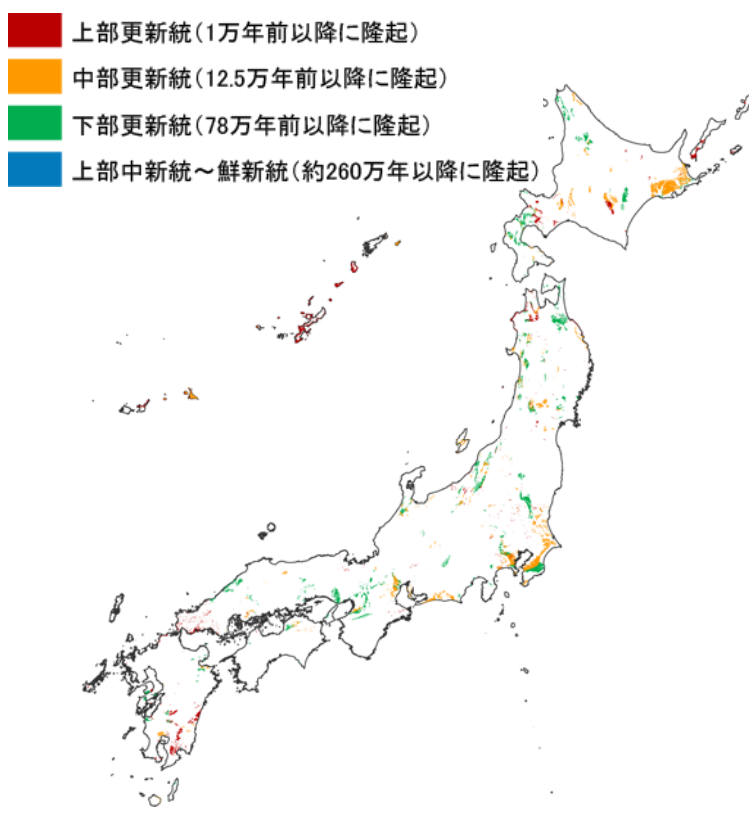


【パラメトリックな時系列解析モデルによる予測可能性】

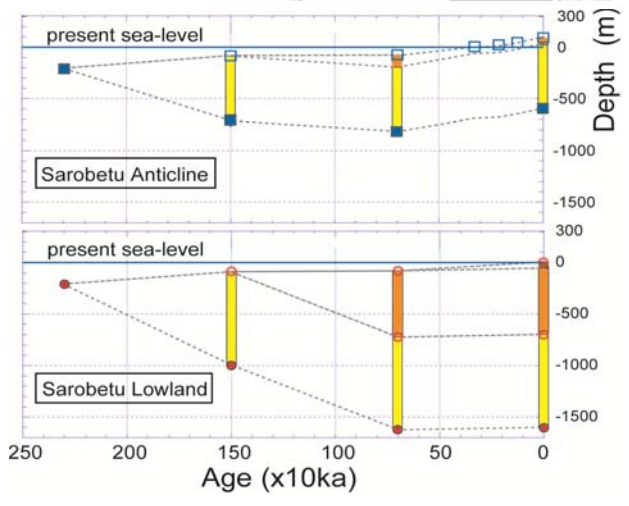
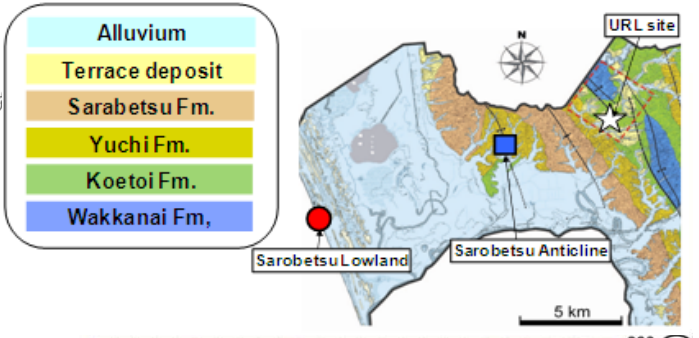
過去から現在までの現象の履歴が、どのような相互関係があったか(自己回帰性)を解析し、その関係性が比較的短い時間は継続すると仮定して、予測値として取り扱う方法。

時系列解析モデル(例えば、自己回帰移動平均モデル)の研究例によると、過去の期間(N)に成り立っていた関係性(定常性)は、将来になればなる程、その関係性そのものが変化していると考えられるので、**0.1 N ~ 0.2 N 程度**であれば関係性が継続する確率が高いと考えられている。

沈降場から隆起場への転換の事例(幌延の例)



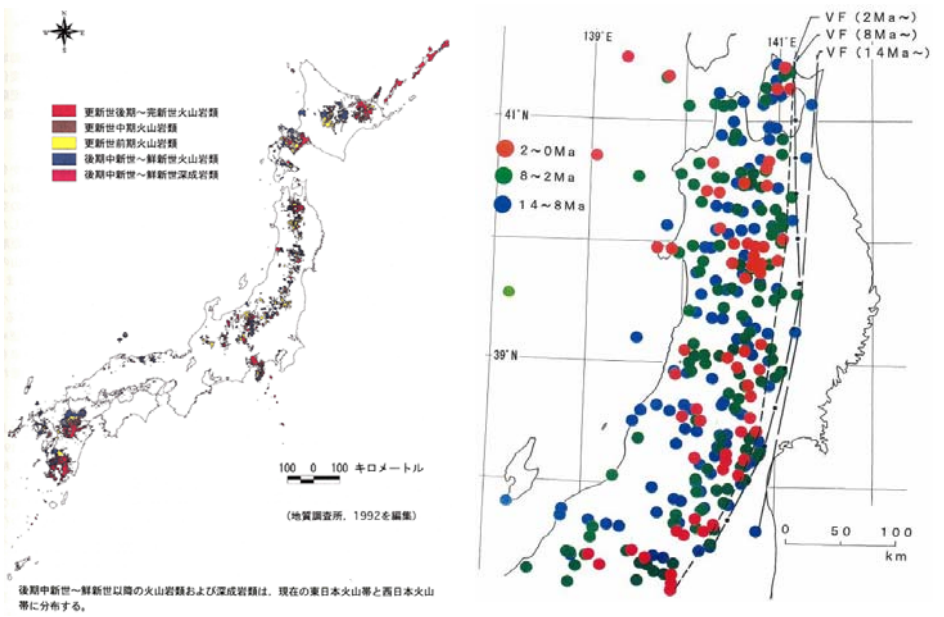
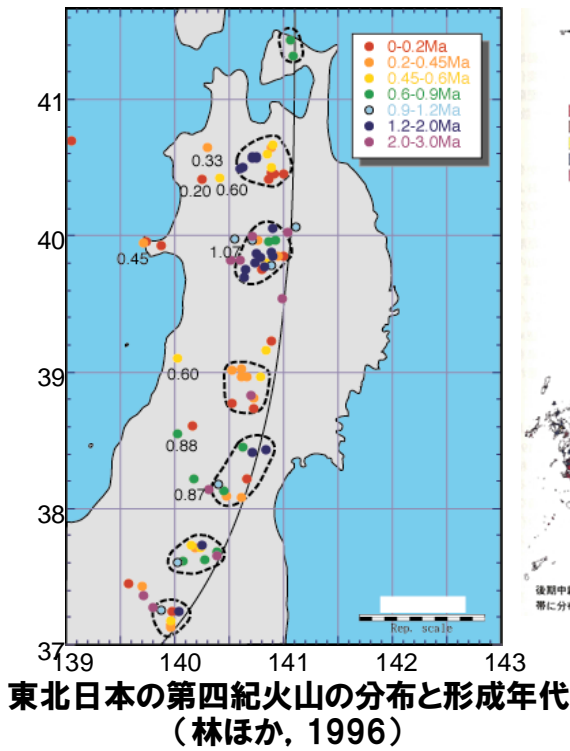
日本列島における更新統の分布



幌延地域の250万年以降の地殻変動

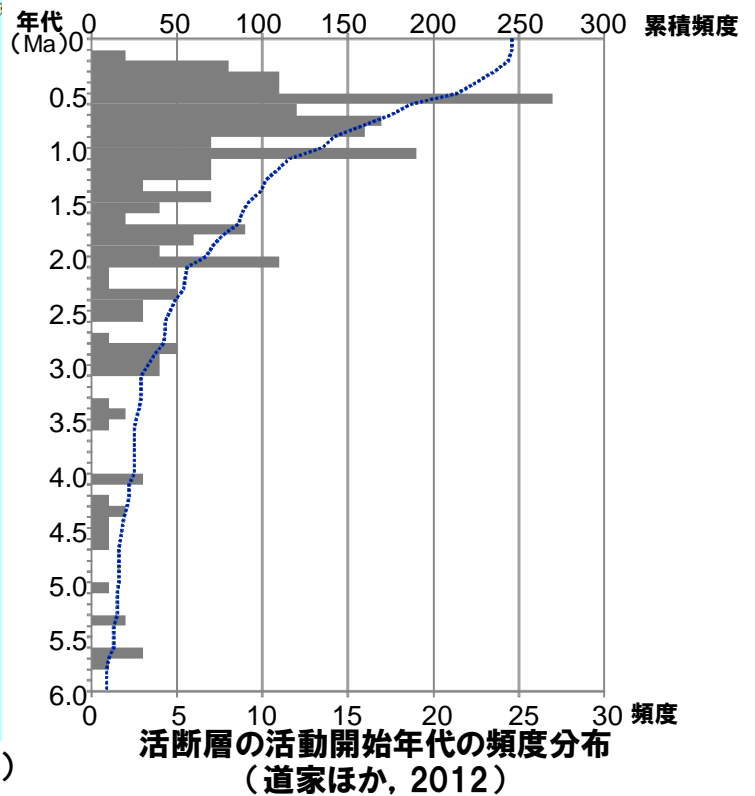
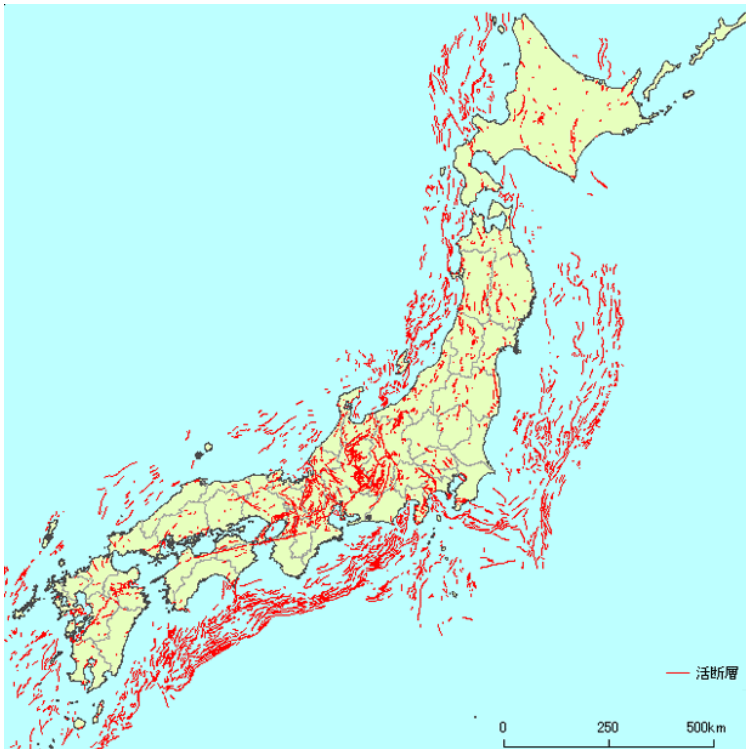
日本列島の沿岸域では、最近数十万年になって沈降場から隆起場に変動方向が反転している地域も存在。

新第三紀以降の火山活動の時空変遷



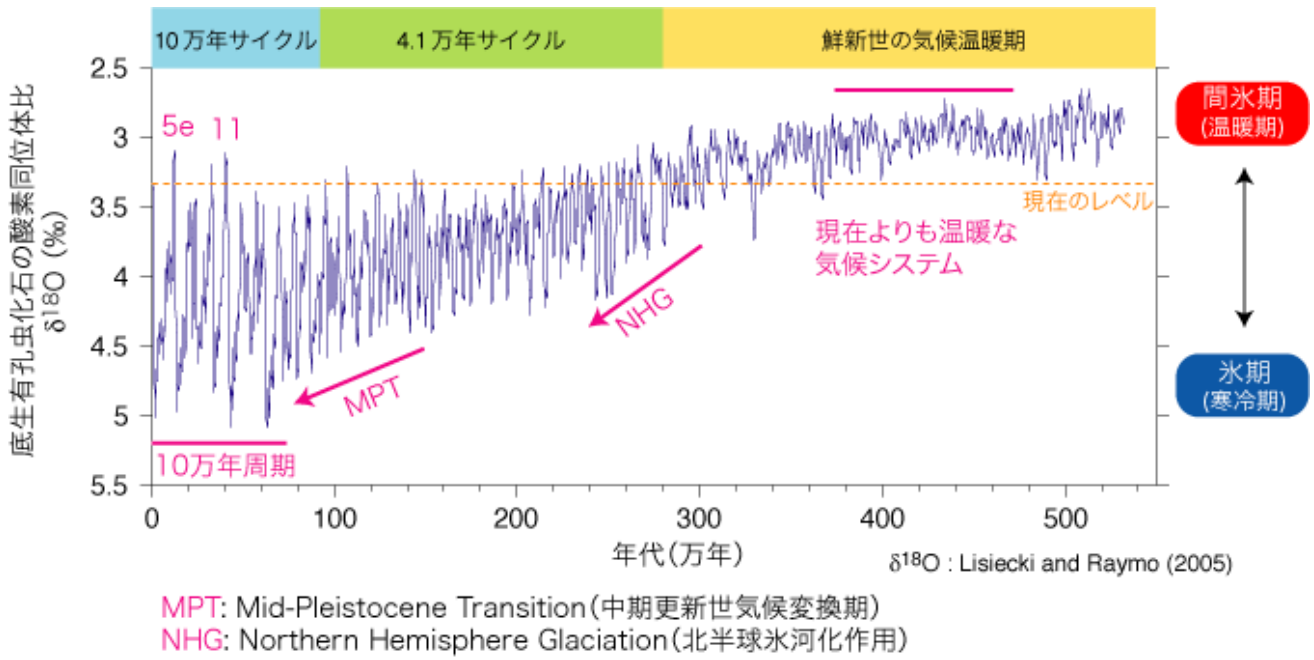
約500万年以降は火山フロントの日本海側(東・西日本火山帯)において活動が限定。但し、火山フロントの日本海側では、過去数10万年間では既存火山の15km以遠においても新規の火山が形成。

活断層の活動の開始時期

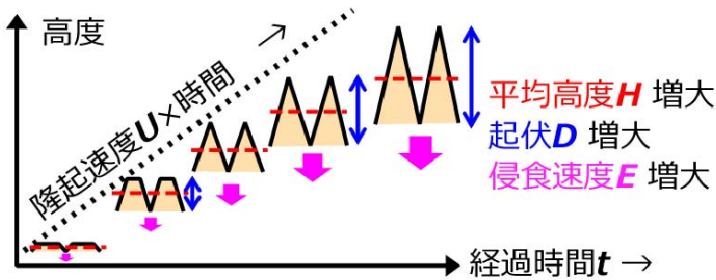


日本列島の活断層の分布(活断層研究会編, 1991)

日本列島の活断層の約80%は、第四紀以降に活動を開始している。そのうち、約50万年前頃に活動を開始した断層が最も多い。東北日本・西南日本内帯は、外帯に比べて分布密度が高い。

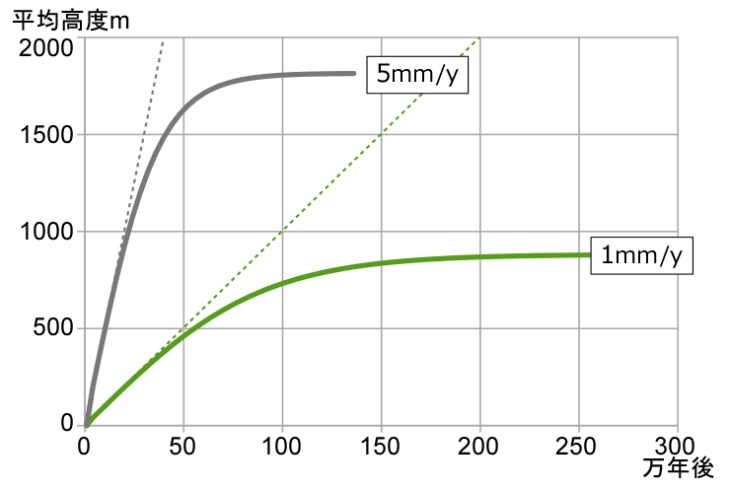


深海底堆積物に含まれる有孔虫化石の酸素同位体比によって過去500万年程度の氷床の総量や海面水温の推定は可能。約70万年前までは気候・海水準変動のサイクル(約10万年周期)は明瞭。

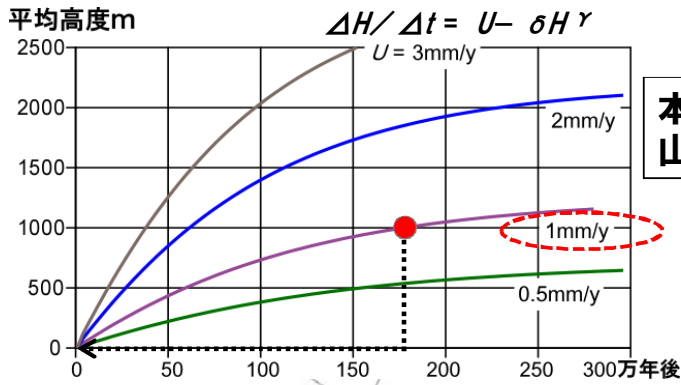


- 山地の平均高度 H の変化
 $\Delta H / \Delta t = \text{隆起速度 } U - \text{侵食速度 } E \dots\dots ①$
- 山地の侵食速度 E は起伏 D の関数
 $E = \alpha D^\beta$ (D : 高度分散量) $\dots\dots ②$
- 山地の起伏 D は平均高度 H の関数
 $D = aH^b \dots\dots ③$
 $\therefore \Delta H / \Delta t = U - \delta H^\gamma \dots\dots ①'$

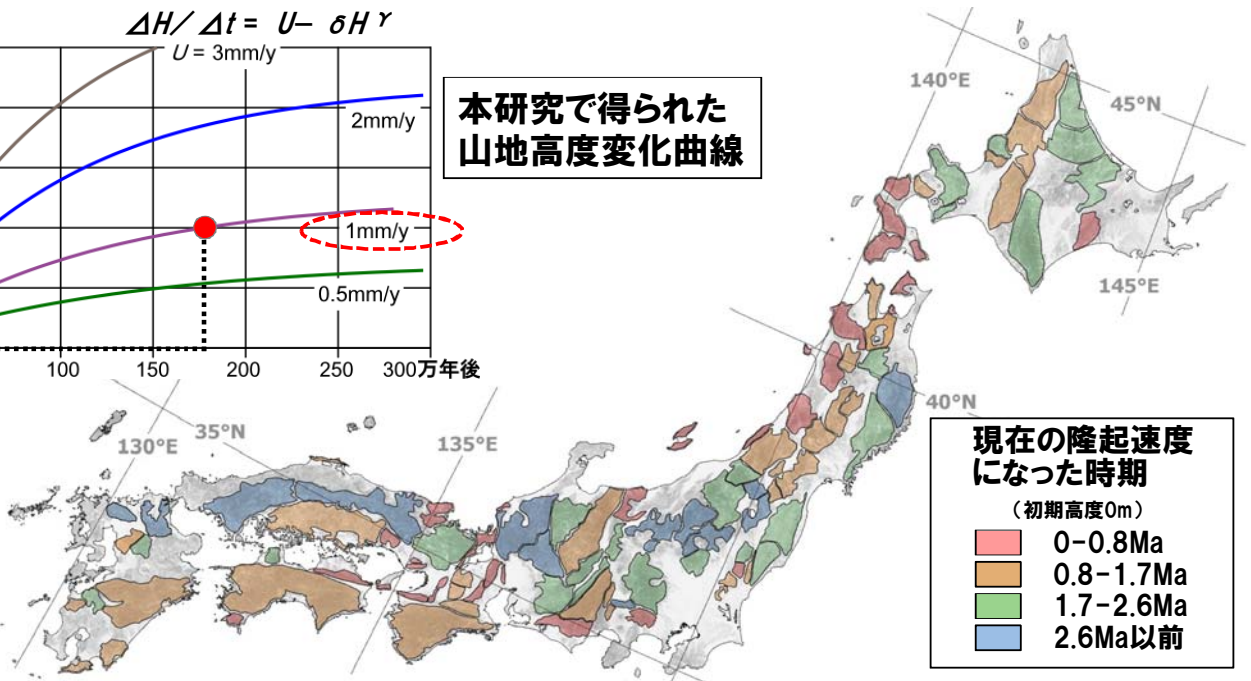
Ohmori (1978) による山地発達モデル



隆起速度一定のもとでの山地高度の変化曲線 (Ohmori, 1978)



本研究で得られた
山地高度変化曲線



- 天塩山地，北海道南西部，出羽山地，佐渡島，近畿三角帯等の日本海東縁変動帯や新潟-神戸歪集中帯では約1.0Ma以降に現在の隆起速度になったと推定。

まとめ

- 地形・地質学的情報によると日本列島の多くの地域で，現在の変動方向・速度(一樣継続性)が成立したのは，中期更新世以降と考えられる。
- 山地発達モデルによると，日本海東縁変動帯や新潟-神戸歪集中帯等の地域では，中期更新世以降に現在の隆起速度と同程度になったと推定できる。
- 中期更新世以降に地殻変動の一樣継続性が成立した地域では，外挿法による信頼性が高い予測が行われる期間は，将来十万年程度と考えることが妥当と思われる。

～10万年

～より長期

時間軸

外挿による将来予測を
考慮しない安全評価

急激かつ局所的な現象
(接近シナリオ)

物理的隔離機能
主に力学

概要調査等に基づき、
裕度をもって避けるべき
範囲を提示
→サイト選定によって排除
(安全評価上考慮せず)

新たに発生する事象の
可能性を確率論的に明示
→例えば、稀頻度シナリオに
基づく安全性の検討と
シナリオの起こりうる可能性

地質環境
(天然バリア)

将来予測に伴う
不確実性の増大

核種移行遅延機能
主に水理, 地球化学, 地熱

緩慢かつ広域的な現象
(変動シナリオ)

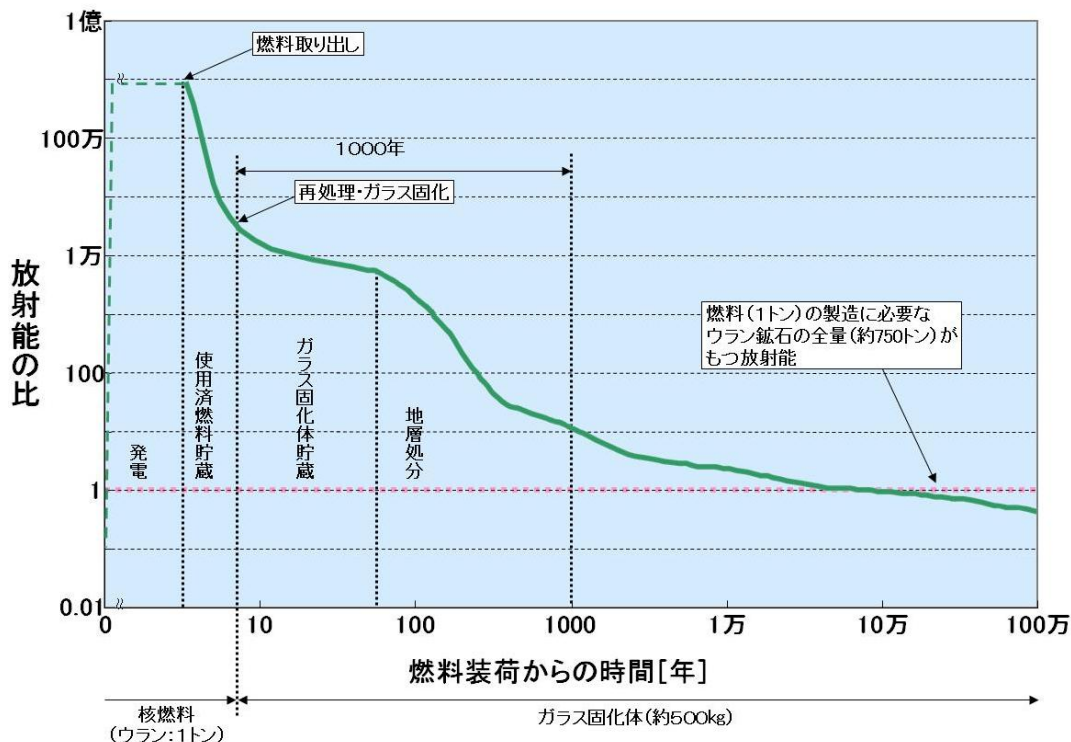
過去数十万年程度の変動
傾向の外挿に基づく将来の
地質環境の変動幅を提示
→その変動幅を考慮した
安全評価

十万年以降は現在の変動
傾向が継続しないことを
前提とした保守的なシナリオ
(例えば、沈降域が隆起域に
反転, 数mm/y.で上昇)の提示
→裕度を見込んだ変動幅を
考慮した安全性の検討

— 性能評価からのアプローチ —

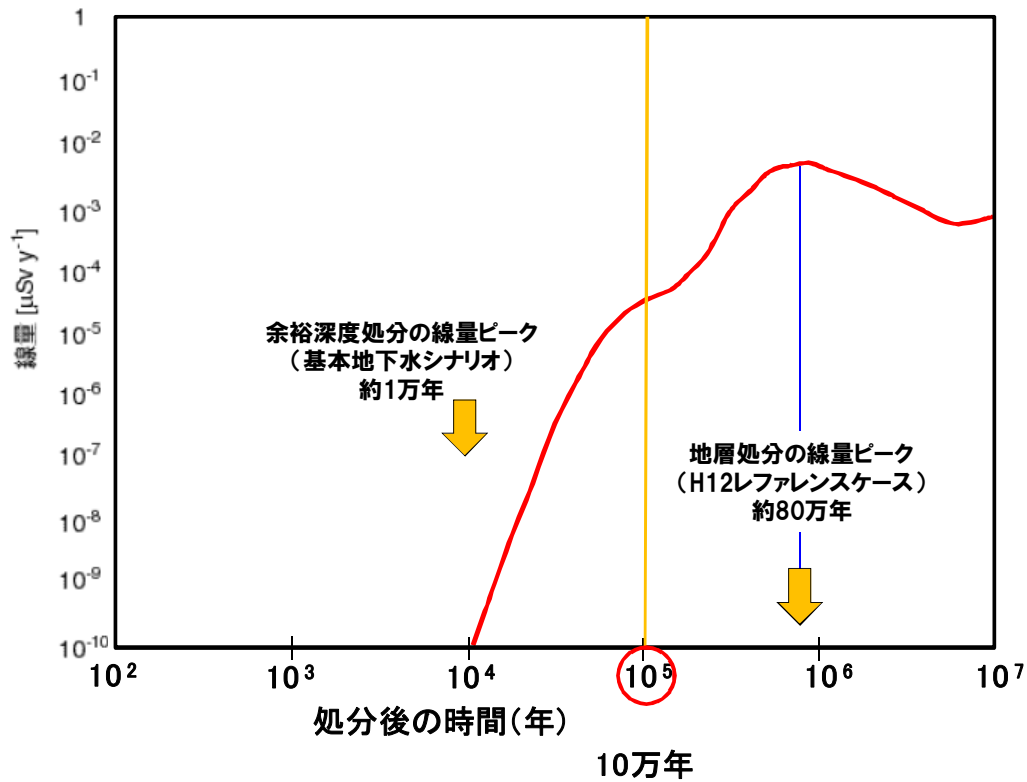
- 地層処分性能評価における超長期の時間のイメージ
- “第2次取りまとめ”における天然事象(隆起・侵食, 海水準変動, 火山活動, 断層活動)の取り扱い
- 超長期の天然事象の取り扱いのアプローチ
 - － 隆起・侵食(地表到達)についての評価事例
 - － 隆起・侵食 その他の現象についての検討状況
 - － 火山直撃についての検討状況
- シナリオ構築における時間段階とシナリオ区分の考え方
 「余裕深度処分の管理期間終了以降における安全評価に関する考え方」を受けた課題の整理

超長期の高レベル放射性廃棄物の放射能



発電によって増加した全放射エネルギーは、約10万年で元の(ウラン鉱石のまま)状態での放射エネルギーと同じレベルになる。

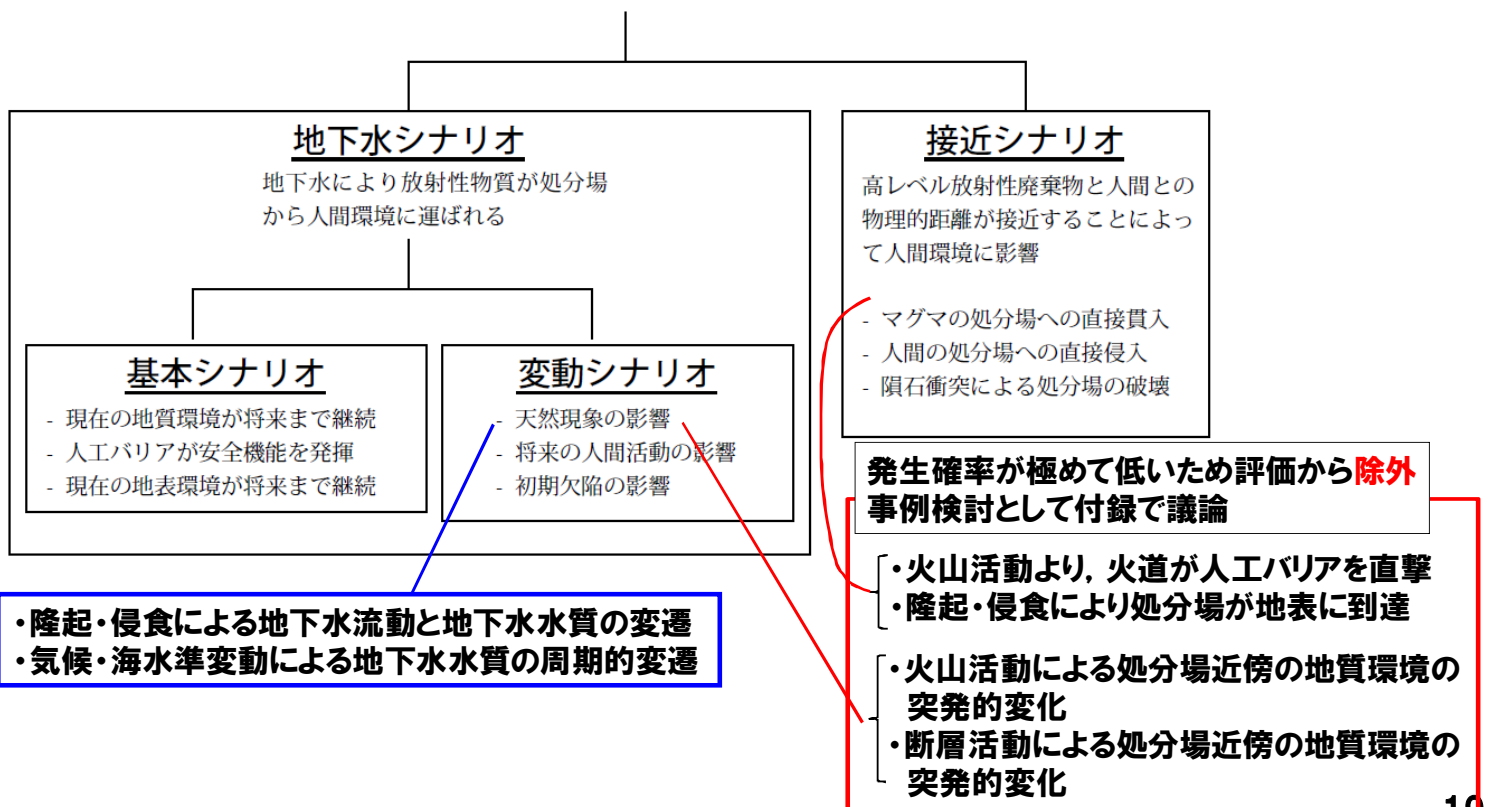
⇒ 放射能濃度、被ばくの程度を示したものではない



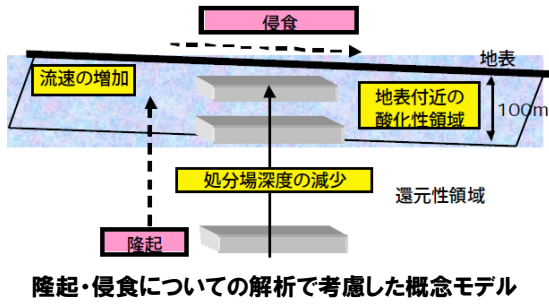
外挿法による地質学的現象の予測可能期間

第2次取りまとめでの取り扱い

安全評価で考慮するシナリオ



■ 概念モデル

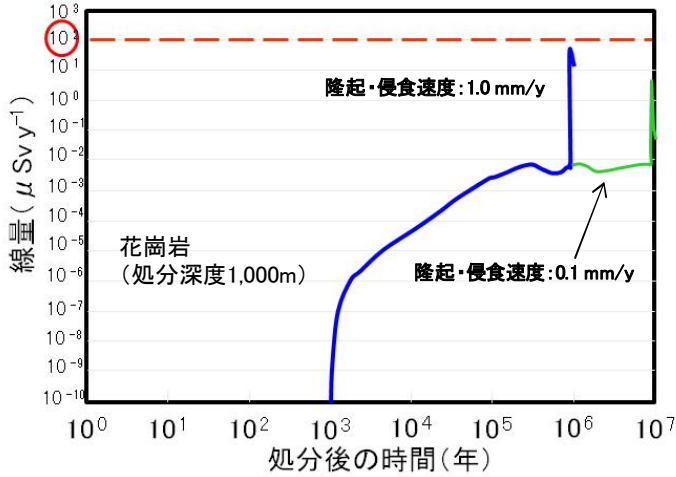


■ 評価方法

□ 隆起・侵食のシナリオにおける仮定:

- 侵食速度が隆起速度と等しい。
- 処分場の深度が処分直後から 0.1 あるいは 1.0mm/y の速度で継続的に減少する。
- 地表付近(100m以浅)での酸化性地下水の侵入
⇒ 溶解度, 分配係数の変更,
透水性の増加(レファレンスケースの10倍)

■ 解析結果



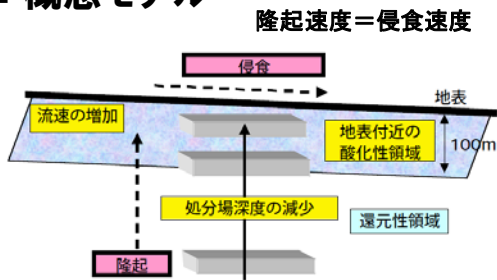
地表付近の酸化性の環境に到達後
速やかに線量のピーク発生

ガラス固化体4万本あたり,

評価点: 母岩100m

(× 生物圏換算係数: 河川水・平野モデル)

■ 概念モデル

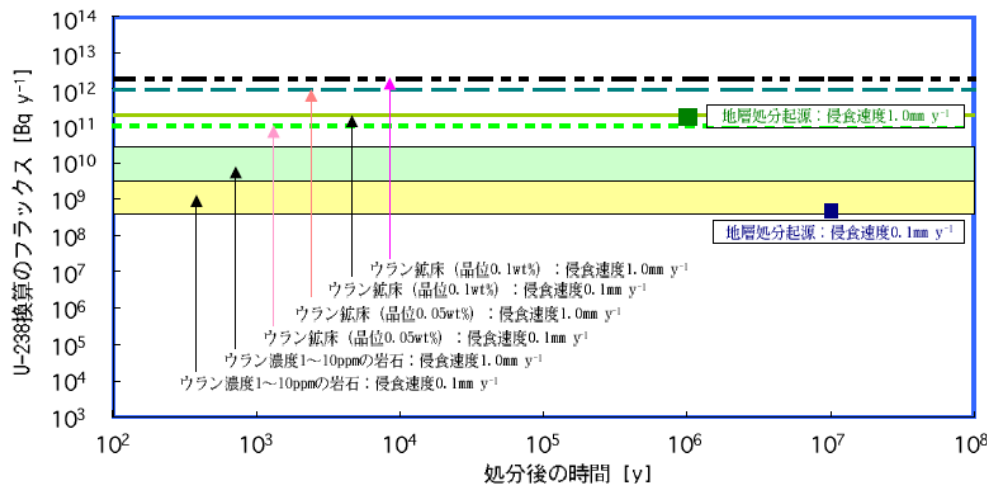


■ 評価方法

廃棄体起源の核種フラックスを天然起源の核種フラックスと比較することにより評価

- 廃棄体起源: 処分場(処分場面積×深度100m均質分布)を含む岩盤が侵食されることによって生ずる核種のフラックス(核種毎の毒性を等価なU-238の核種フラックスに換算)
- 天然起源のフラックス: 岩盤(花崗岩やウラン鉱床を想定)が侵食されることにより生じるフラックス

■ 評価結果



廃棄体起源の核種フラックスが、天然起源の核種フラックスに対して有意な影響を及ぼさない可能性が示された。

目的：地層処分システムの超長期にわたる頑健性を示す

超長期の天然現象の取り扱いについてのアプローチの検討

● 感度解析的アプローチ

簡略化したモデルを用いて、想定される範囲でパラメータを変動させ、影響の把握を行う。

e.g. 隆起・侵食

イベント/残存率	100%		50%	
	シナリオA	シナリオB	シナリオA	シナリオB
地表到達時間				
10万年後	×× mSv/y	△△ mSv/y	……	……
100万年後	○○ mSv/y	……	……	……
200万年後	……	……	……	……

保守的かつ簡略化した評価でシステムの成立性が示せる場合には有効

ただし、

- 過度に保守的な評価では地層処分システムの安全性を示すことが困難な場合がある。
- 過度に簡略化した評価では、地層処分システムが本来持っている性能を適切に表現することができない。
- 現象の説明が伴わないと、ステークホルダーからの信頼を得られにくい。

➡ ● 現象(システム)の理解に基づく概念モデルの構築

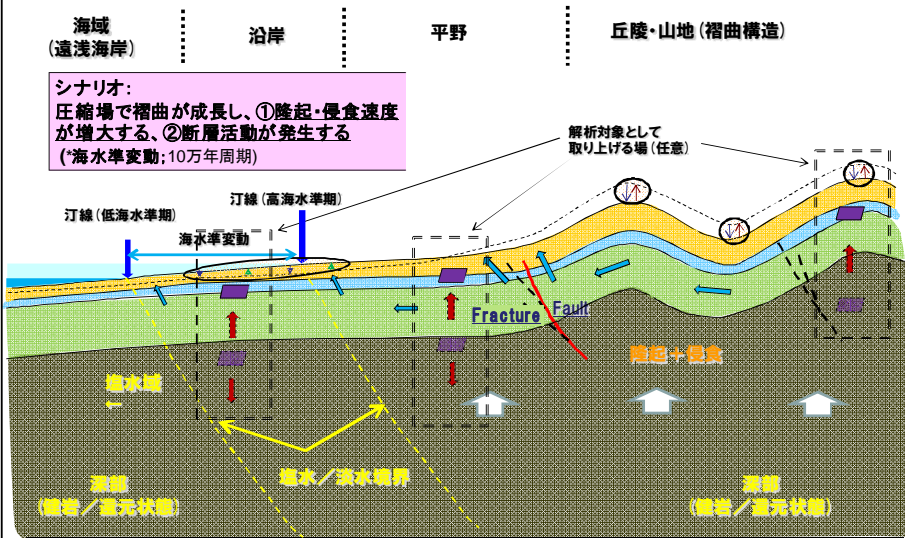
アプローチ

● 現象(システム)の理解に基づく概念モデルの構築

- 評価(予測)期間に係らず事象の発生を前提とする
ある事象に対するシステムの振る舞い・応答を確認することを目的とする
- 評価モデル・パラメータの過度な単純化・保守的設定は避ける
- 現象のプロセスがある程度明らかな事象については、可能な範囲で現象理解に基づく検討を行った設定を行う
(必要に応じた類型化)
- 現象理解に基づく設定が困難なものは、想定される範囲内で類型化、あるいはパラメータとして変動させて感度を確認する

シナリオ区分の議論とは区別する

長期変遷 概念モデル（堆積軟岩・遠浅海岸の一事例）



想定されるイベント/プロセス

- 地表
 - ・ 露出, 削剥
- 風化帯/酸化帯
 - ・ 核種の酸化
 - ・ 帯水層での移行, 希釈, 遅延
- 地表接近前
 - ・ 地形変化等による動水勾配の変化
 - ・ 褶曲や断層破碎帯形成による水理地質構造の変化
 - ・ 透水特性の変化 (深度依存性, 高透水ゾーンの存在)
 - ・ 地球化学環境の変化 (海水準変動の影響)

“一般化できるもの”と“地域や場所が特定されるとある程度の設定が可能なもの”の整理が可能か？

隆起・侵食（処分施設の地表到達, 削剥の評価事例）

Miyahara et al. (2011)

現象（システム）の理解に基づく概念モデルの構築の具体例

■ システムの理解

我が国の地形変化の特徴の整理

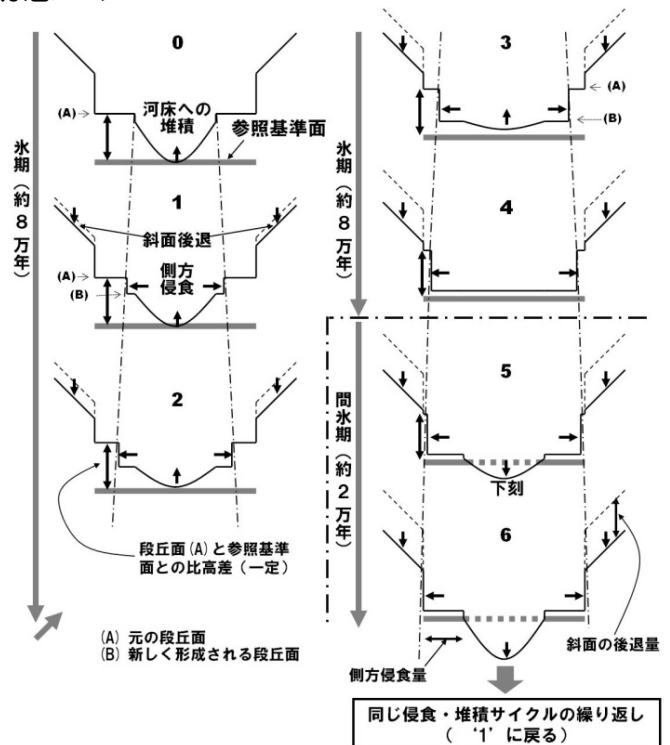


我が国における隆起と河川による侵食によってもたらされる地形変化について、従来の地形学の研究などを基に情報を整理。

⇒ 特に河川中流域では地形変化を検討する要素として

- 1) 河床での侵食/堆積,
- 2) 段丘の形成,
- 3) 斜面の形成と斜面の後退 が重要

■ 概念モデル



河床では、氷期には堆積が、間氷期には下刻が進展
側方侵食と斜面後退は、継続して発生。
1サイクルの間に元の段丘は侵食され、新しい段丘が形成される。
このような侵食の継続により、参考基準面は、下刻、段丘の側方侵食、斜面後退のいずれかによって、少しずつ削られる。

■ 解析条件

設定項目・パラメータ	値
処分場深度	300, 1000m
氷期・間氷期サイクル	氷期: 8 万年 間氷期: 2 万年
平均隆起・侵食速度	0.1, 0.5, 1.0 mm/y
尾根と尾根の距離	300, 1000m
下刻領域の幅	50, 100m
下刻の深さの最大値	50, 100m
段丘高さ	25, 50m
段丘幅	50, 100m
河岸斜面傾斜	20, 40°

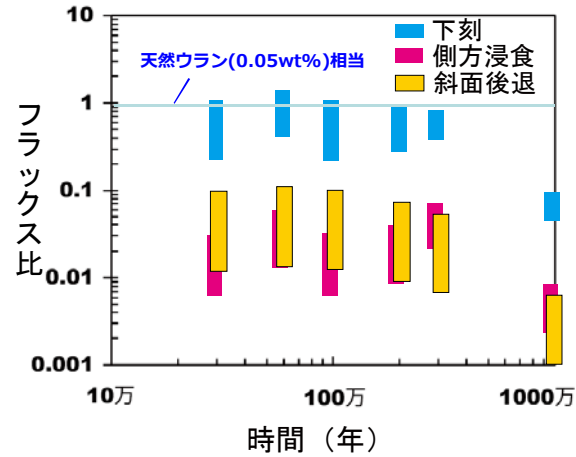
廃棄体中の放射性物質は全て処分場内(2km×2km×3m)に存在すると仮定。

処分場深さ，隆起・侵食速度は，複数の値を設定

地形に関する設定値についても，複数の値による感度を確認することで不確実性に対応

■ 解析結果

放射性核種による放射能毒性の違いを補正して，天然ウラン(0.05wt%)の毒性と比較。

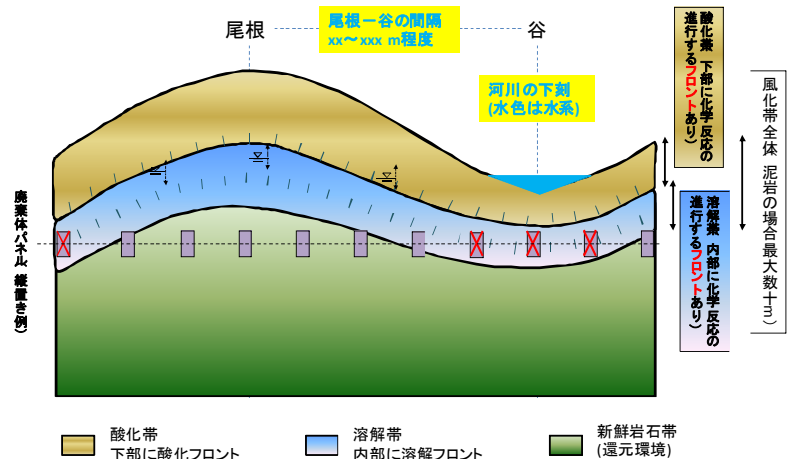


天然の放射性核種のフラックスを目安として，高レベル廃棄物地層処分システムの頑健性を例示

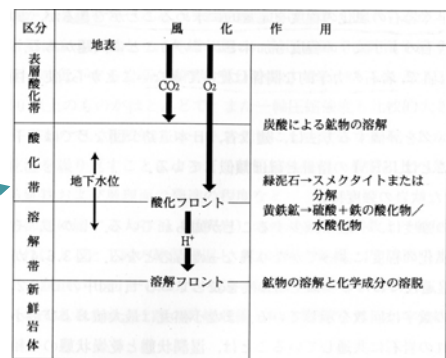
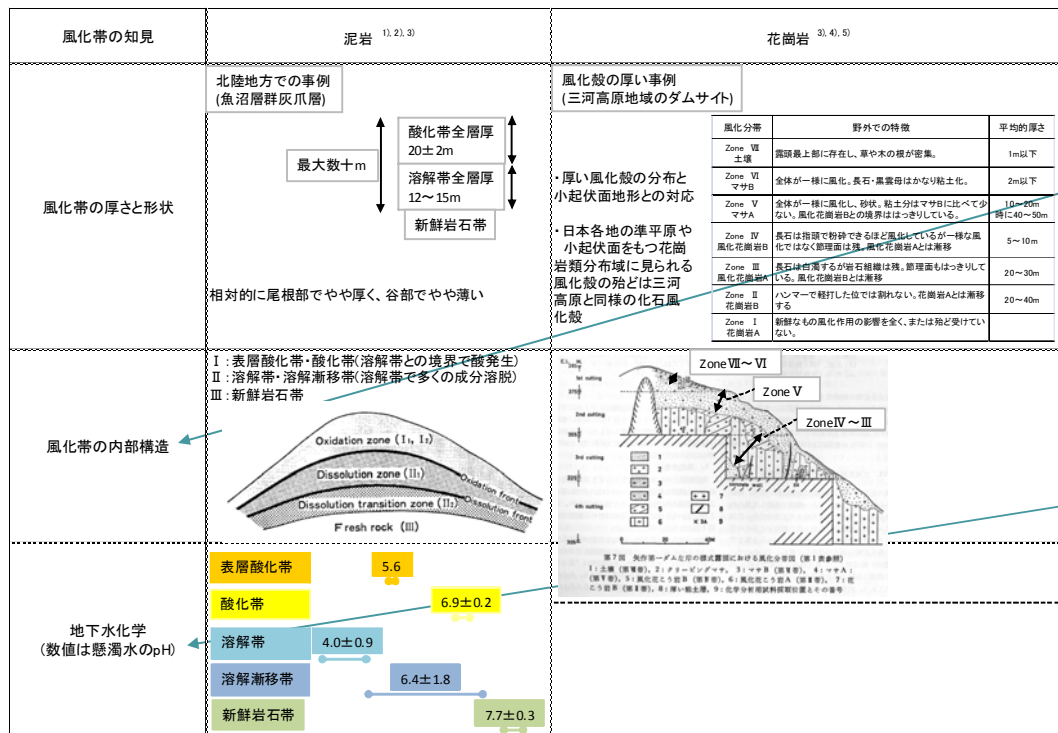
線量換算(河川水・平野)では 最大6mSv/y

課題：地層処分システムが地表に到達する前の取り扱いの高度化の検討

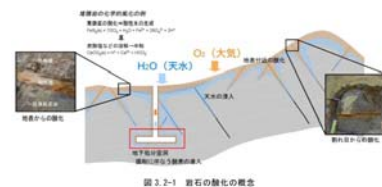
- 還元性から酸化性雰囲気に移る地表からの深度
酸化領域の設定（地形との関係）
：侵食による地形変化と廃棄体の位置による酸化性雰囲気突入の時間差
- 天然バリアに期待できる機能
移行遅延
：酸化帯での地下水流動，分散，収着
- 人工バリアに残存する機能
ガラス固化体としての残存
緩衝材の止水性
オーバーバックの化学的緩衝性
：人工バリアの影響により，地表近傍まで還元性が保たれる可能性
- 工学的な対処
パネルの配置
：パネル深度差に依存した，酸化性雰囲気への突入時期の時間差



科学的理解に基づく現象の取り込みにより，酸化性雰囲気への突入が処分システムに与える影響を，より適切に評価できる可能性の検討
⇒ 核種は時間的，空間的に分散して放出される可能性



Zone	Synthetic Zone	MINERAL composition	Chemical change	pH	Porosity	Redox condition	Process
W1	I	CO ₂ , C, Si, FeO, CaO, MgO, Na ₂ O, SiO ₂ , H ₂ O (+)	less gain	5.6	56	Oxidizing	Oxidation & dissolution
W1	II	#	#	6.9	52.1	#	#
W1	III	CO ₂ , C, FeO, MgO, K ₂ O, TiO ₂ , Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , CaO, Na ₂ O, H ₂ O (+)	H ₂ O ⁻	4.0	48.1	Reducing	Dissolution
W1	IV	#	#	6.4	45.4	#	#
W1	V	CO ₂ , C, Fe ₂ O ₃ , H ₂ O (+)	H ₂ O ⁻	7.7	41.4	#	#



⇒ 酸化帯/風化帯 概念モデルの構築へ
 例えば、地層、岩石特有の風化帯厚さ等の違いに着目した類型の試み

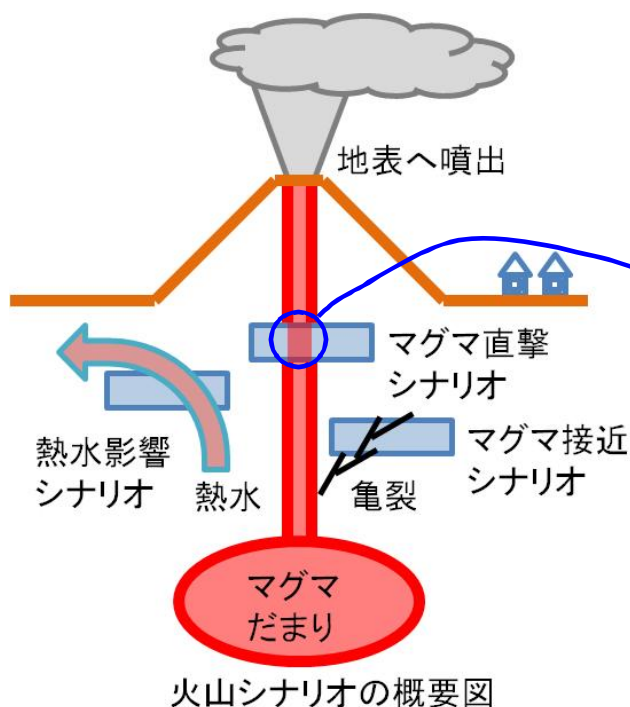
- 引用文献
- 1) 千木良雅弘(1988): 泥岩の化学的風化-新潟県更新統灰爪層の例-地質学雑誌, 94, pp.419-431.
 - 2) 千木良雅弘(1995): 風化と崩壊、近未来社, pp.107-152.
 - 3) 関 陽児(1998): 土壌風化帯の形成と水質変化、地質調査所月報.1998,49,12,639-667
 - 4) 木宮 一邦(1975): 花こう岩類の物理的風化指標としての引張強度-花こう岩の風化-第1報-地質学雑誌,81,6,349-364
 - 5) 木宮 一邦(1992): 建設工事における風化・変質作用の取り扱い方3. 硬岩の風化作用土と基礎.40,7,67-74

火山直撃

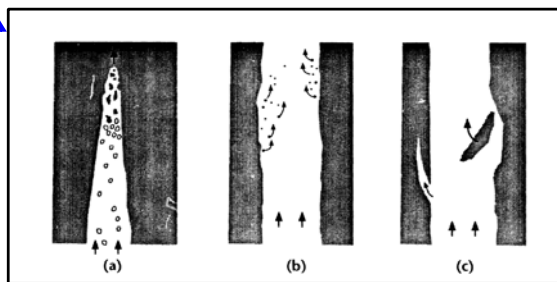
超長期の評価では、マグマによる処分場直撃シナリオも除外とはならない可能性がある。

⇒ マグマによる廃棄体取り込みと噴出物による希釈に関する科学的情報に基づく検討を試行

- ① 火道周囲の岩石の取り込みメカニズムの理解
- ② 火道の大きさ噴出量に関する情報の整理



① 火道周囲の岩石の取り込みメカニズムの理解



Valentine et al.(1993)

マグマによる火道周囲の岩の取り込みメカニズム

⇒ マグマへの廃棄体混合概念モデルの構築へ

② 火道の大きさ噴出量に関する情報の整理

フラックス比を計算する際に用いるパラメータ(火道形状や大きさ, 噴出量)は火山観測により得られている情報を利用する。

	噴出量	噴出期間	火道の形状	
1983年 三宅島	$6.21 \times 10^6 \text{m}^3$ $1.26 \times 10^7 \text{t}$	1983年 10月3日 ~4日 (15時間)	A~K火口は滑らかな 曲線で結ばれ, 長さは 約3.1km。 地表に現れたピットク レーターの直径から, 地下深部における幅 は10m以下と推定さ れる。	
1990年 雲仙岳	$2.1 \times 10^8 \text{m}^3$	1990年 7月 ~ 1995年 2月	新旧の溶岩岩脈が密集する 「火道域」を形成 (火道掘削より)	

➡ 事例の調査・整理の継続

➡ 概念モデルの構築
パラメータ値の設定

現象理解に基づく概念モデルの構築:現状

現状

- 隆起・侵食: 酸化帯の取り扱いについて調査・整理に基づく概念モデルの検討中
- 火山直撃: マグマへの廃棄体取り込みに関する概念モデルの検討中

課題

- 概念モデルに取り込めるものと, パラメータ化して感度解析的に取り扱わざるを得ないものとの区別
- 地域性などを考慮した分類, 区分の可能性
- 何を評価指標とするか?
 - 線量: 生物圏の設定の考え方は?
 - 時間変化について, 何をどこまで考慮すべきか?
 - 天然放射能(ナチュラルフラックス)との比較

「余裕深度処分の管理期間終了以降における安全評価に関する考え方」の記述

時間段階に応じた状態設定の考え方

期間	閉鎖前段階		閉鎖後段階		埋設施設が地表付近に近接することが想定される期間
	建設・操業期間	過渡的な期間	多重バリア機能に期待する期間	主に天然バリア機能に期待する期間	
定義	埋設施設の閉鎖が完了するまでの期間	埋設施設及び周辺の地質環境の状態変化が安定的な状態に移行する期間	長期的に安定な地質環境のもと、埋設施設の状態変化が緩慢に変遷していく期間	埋設施設の状態設定において、排除・低減が難しい内的・外的要因による影響が顕在化する期間	隆起・侵食、海水準変動に伴い埋設施設が地表付近に近接することが想定される期間
状態設定の考え方	<ul style="list-style-type: none"> 現状の技術で合理的に達成できる範囲で人工バリアの損傷・劣化を抑制するよう設計されていること 埋設施設の状態監視を行い、将来の状態設定に必要な情報の信頼性の向上を図るとともに、設計・施工の品質管理 	<ul style="list-style-type: none"> 不均一な過渡的变化を勘案しつつ、人工バリアの損傷・劣化の影響が抑制・緩和されるように配慮すること 閉鎖後短時間で飽和状態に至る等の、安全評価上の保守性を優先したモデルを使用する際は、そのモデルが確かに安全評価上の保守性を満足して 	<ul style="list-style-type: none"> 科学技術的知見に基づく外挿を基本とした手法の利用 これらのよりどころとする科学技術的知見の多くが評価期間に比して非常に短期間であることよって生じると考えられる不確かさを考慮した状態設定を行うこと 	<ul style="list-style-type: none"> 想定される劣化や、これを評価する際の不確かさを考慮してもなお期待できる機能については考慮 バリア材に固有の物性として期待できる特性や、天然バリアが本来的に有する機能に基づくとともに、不確かさに対する保守性を考慮した状態を設定すること 	<ul style="list-style-type: none"> 地表付近の地質環境の状態設定に応じた状態を設定すること 埋設施設のみならず地表付近の地質環境の状態を精度よく設定することは難しいことから、それらの不確かさを勘案しつつ、安全評価上の保守性を適切に考慮した状態設定を行うこと

埋設深度（仮定）	余裕深度処分 50m	地層処分 (HLW) 500m
基本地下水シナリオ・レファレンスケースの線量ピーク	約1万年	約80万年
地表到達時期 (隆起・侵食速度0.3mm/y)	17万年	177万年
(隆起・侵食速度0.1mm/y)	50万年	500万年

埋設施設が地表付近に近接することが想定される時間が余裕深度処分と地層処分では大きく異なることに留意が必要

シナリオの区分について

「余裕深度処分の管理期間終了以降における安全評価に関する考え方」の記述（抜粋）

- **基本シナリオ**: 発生の可能性が高く、通常考えられるシナリオであり、過去及び現在の状況から、処分システム及び被ばく経路の特性並びにそれらにおいて将来起こることが確からしいと予見される一連の変化を考慮したもの
- **長期変動現象の状態設定(基本設定)**: 長期変動事象に関する過去の変動傾向とその要因を踏まえ、できるだけ確からしいものとする。
具体的には、プレート運動や気候変動は、それらの過去の変動傾向とその要因が今後も継続すると見なし、それらを外挿して設定することを基本とする。

⇒ 地層処分において埋設施設が地表付近に近接することが想定される数十万年オーダの時間スケールに対して、高々数万年程度の過去の変動傾向を外挿して設定することが“確からしい”と言えるか？

- 天然現象を考慮した、地層処分システムに対する超長期の性能評価については、感度解析的アプローチとともに、現象理解を取り込んだ、評価の為の概念モデルの構築を実施中
- 課題：評価指標として何を選択するのが適切か？
- 課題：余裕深度処分と地層処分の評価時間の違いを、安全評価の考え方でどのように取り扱うべきか？