

**地層処分が想定されるTRU廃棄物を  
高レベル放射性廃棄物と併置処分する場合の  
相互影響等の評価について**

平成17年11月28日

日本原子力研究開発機構  
電気事業連合会

# 内 容

- 1 . 併置処分の技術的成立性の考え方
- 2 . 併置処分における相互影響の評価方法及び結果
- 3 . 併置処分における調査、建設、操業、管理等の影響
- 4 . まとめ

# 1. 併置処分の技術的成立性の考え方

## 地層処分が想定されるTRU廃棄物

第1次レポート〔TRU廃棄物処分概念検討書〕

原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会

- ・処分の実現性, 安全性を確保可能

第2次レポート〔TRU廃棄物処分技術検討書〕

- ・HLWのH12レポートの地質環境条件、手法、パラメータとTRU廃棄物特有の手法、パラメータを使用。
- ・第1次レポートからの詳細化・合理化を実施。
- ・諸外国の安全基準に比べて十分低い線量評価結果。

## 高レベル放射性廃棄物(HLW)

H12レポート〔わが国における放射性廃棄物  
地層処分の技術的信頼性〕

- ・日本を代表する地質環境条件
- ・評価された手法, パラメータ
- ・諸外国の安全基準に比べて十分低い線量評価結果。

原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会

- ・我が国における地層処分の技術的信頼性が示されていると判断。
- ・安全基準の策定に資する技術的拠り所となると判断。

HLWとTRU廃棄物について、それぞれ地層処分の実現可能性に係る知見を整理している。

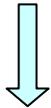
## 技術的成立性の考え方

- ・これまでの知見により、それぞれの処分施設の技術的成立性が示されているので、HLWとTRU廃棄物を併置処分する際に生ずる相互影響等の因子を評価することにより、併置処分が技術的に実現可能であることを示す。

## 2. 併置処分における相互影響の 評価方法及び結果

# 相互影響評価の流れ

## 相互影響因子の抽出

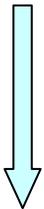


・処分に影響する因子の影響内容、影響因子発生源施設での取扱いを考慮して、併置処分時の相互影響因子を抽出。

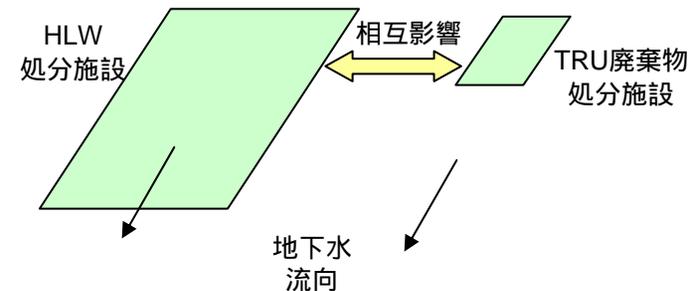


6

## 解析体系，解析の仮定



・HLW及びTRU廃棄物処分の知見を生かすために、各処分施設は同一平面状にあるとし、地下水流向に対して平行に配置すると仮定。



## 相互影響解析

因子	方向	解析	相互影響の着目方向
熱	HLW TRU	熱伝導	HLW処分施設から横方向
有機物	TRU HLW	物質移行	TRU廃棄物処分施設から上流・横方向
硝酸塩	TRU HLW	物質移行	
高pH	TRU HLW	物質移行-地球化学連成	



7, 8



9, 10



11, 12



13, 14

# 併置処分における相互影響因子

## 網羅的な影響因子

熱, 水理, 応力, 化学, 放射線

## 併置処分において想定される相互影響因子の検討

**熱:** HLW発熱によるTRU廃棄物処分施設への熱影響

発熱率が高いHLW処分施設から, TRU廃棄物処分施設内で発熱率が最も大きいハル・エンドピース埋設部の温度制限(80以下)へ与える熱影響を確認する必要がある。

**水理:** 他施設が近隣に存在することによる水理の擾乱

処分施設は併置の採否にかかわらず, 実サイトの水理場に応じた配置をし, 母岩と同等以上の水理特性を有するよう埋め戻すものであるため, 処分サイト全体の地下水流動は大きく変化しないと考えられる。

**応力:** 両施設が近接することによる応力の影響

各施設ごとに許容応力内で坑道の径及び離間距離を設計するため, 応力の影響は処分施設の近傍に限定される。

**化学:** TRU廃棄物処分施設からの化学物質の影響

核種移行に影響する化学物質があるため, 化学物質毎に存在量や核種移行への影響度合いの大きいものについてHLW処分施設への影響を確認する必要がある。

**放射線:** 放射線による人工バリア損傷及び雰囲気の変化

放射線の影響は廃棄体直近に限定される。

## 併置処分相互影響評価での取扱い

**熱** (熱伝導解析による温度上昇幅の確認)

・熱: 廃棄体グループ2の処分坑道の温度上昇

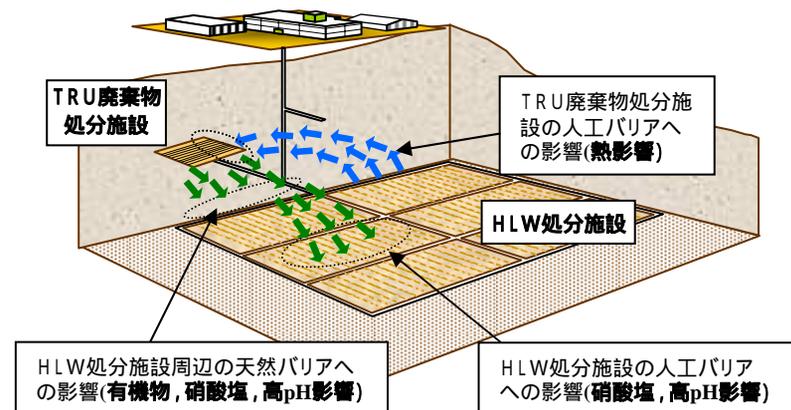
**化学** (物質移行又は物質移行 - 地球化学解析による影響範囲確認)

・**有機物:** セルロースの影響評価 (溶解度及び収着性能への影響あり)

(アスファルト及び溶媒は相対的に影響が小さい)

・**化学物質:** 硝酸塩の影響評価 (収着性能, 金属腐食, 酸化還元雰囲気への影響あり)

・**高pH:** 高pHの影響評価 (収着性能, 金属腐食, ガラス溶解度への影響あり)



# 熱影響(HLW TRU)[影響の概要]

## 【影響源】

•TRU廃棄物の発熱率はHLWより小さいのでHLW側からTRU廃棄物への影響を評価



## 【影響の概要】

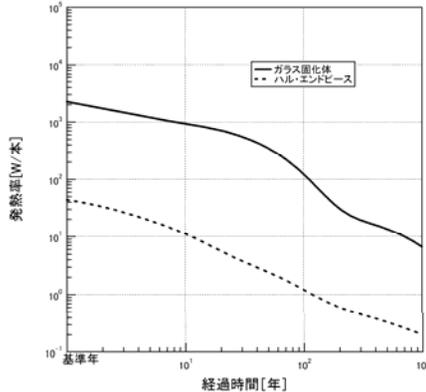
- HLWからの伝熱によりTRU廃棄物の充填材(セメント系材料)の温度が80 を超えると核種の吸着性に影響が生じる。
- TRU廃棄物処分施設のうち、廃棄体グループ2の処分施設は、ハル・エンドピースの発熱により施設内温度が79.5 まで上昇するが、その支配核種はCo-60であるため、30年後には76 以下になる。
- 温度上昇が数 以下であれば、施設材料・断面寸法・坑道間距離等、設計上の工夫により対応可能である。



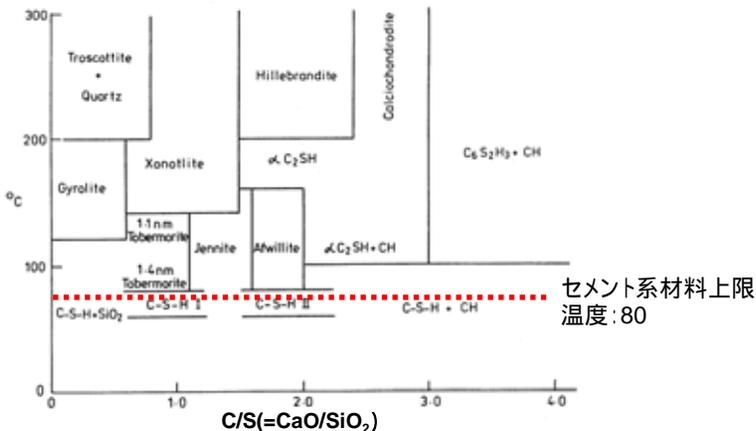
## 【判断目安】

•TRU廃棄物処分施設内の温度:80 以下

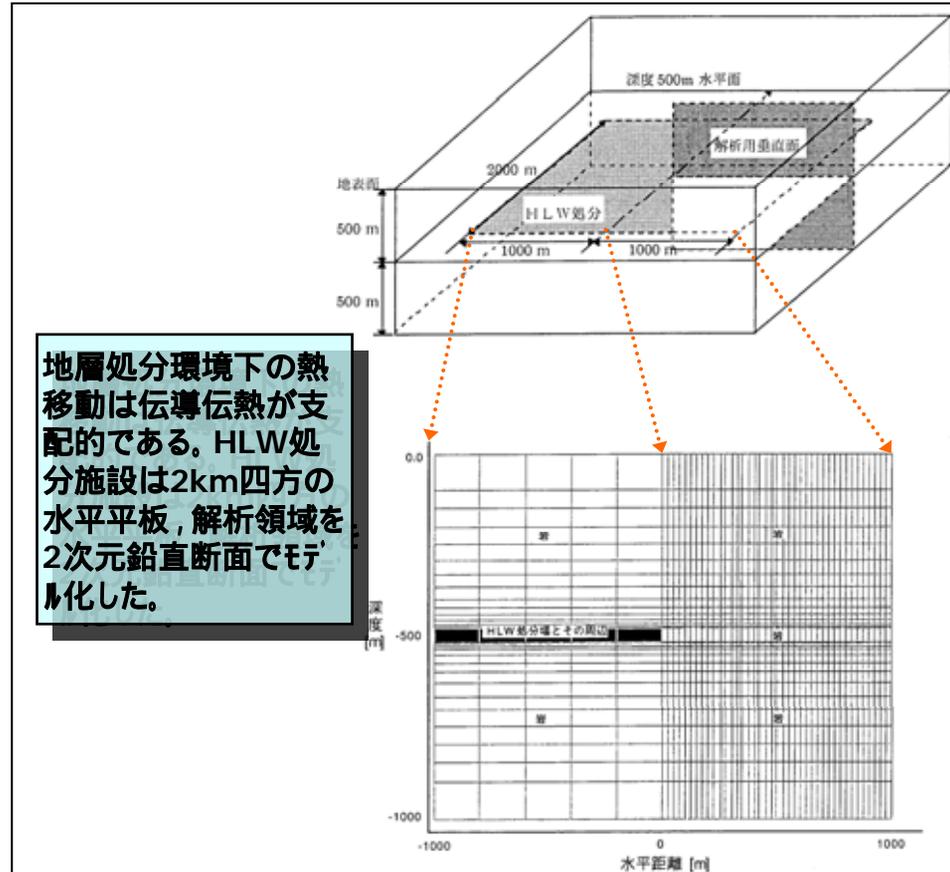
HLW(ガラス固化体)とTRU廃棄物(ハル・エンドピース)の発熱率



セメント系材料の熱変質温度



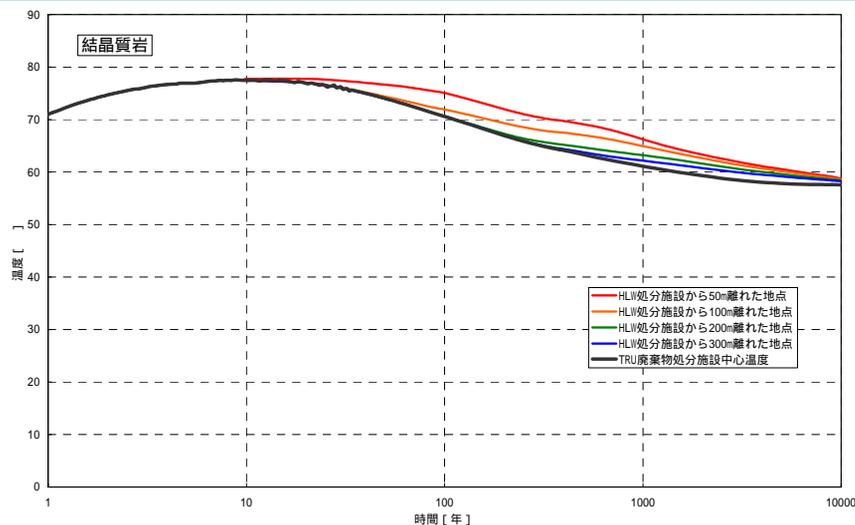
【解析体系】



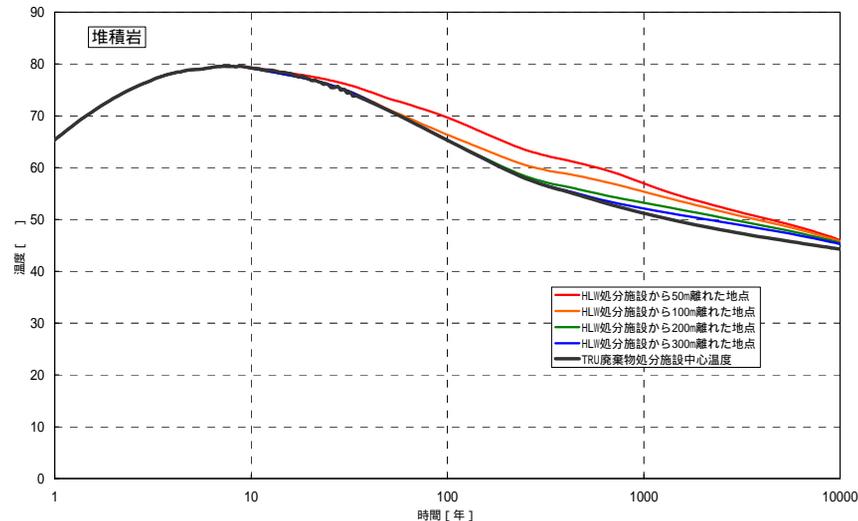
地層処分環境下の熱移動は伝導伝熱が支配的である。HLW処分施設は2km四方の水平平板, 解析領域を2次元鉛直断面でモデル化した。

# 熱影響(HLW TRU) [解析結果]

結晶質岩系岩盤  
(処分深度:1000m)



堆積岩系岩盤  
(処分深度:500m)



TRU廃棄物処分施設の温度上昇のピークは5～20年であり、HLW処分施設から約50mでTRU廃棄物処分施設の温度は80 以下に維持される。

# 有機物(TRU HLW) [影響の概要]

## 【影響源】

含有する有機物

- セルロース系有機物
- イソプロピレン系有機物製品(天然ゴム製品)
- 機器類のパッキン
- アスファルト 等

## 【影響の概要】

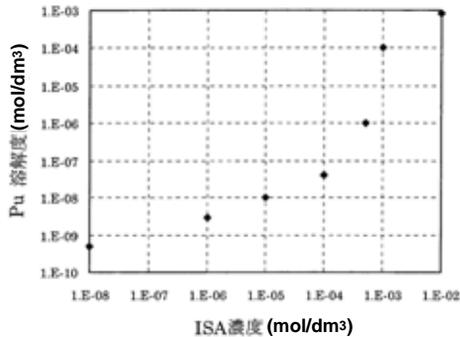
•国内外の知見に基づけば、セルロースの分解生成物であるISA(イソサッカリン酸)が放射性核種の収着性等に影響する(Van Loon & Glaus, 1997)。ISA濃度が $1 \times 10^{-6} \text{ mol/dm}^3$  (mol/L)を超えると、核種の溶解度及び収着分配係数に有意な影響が生じる(Greenfield et al., 1995; Tits et al., 2002)。

## 【判断目安】

ISA濃度で $1 \times 10^{-6} \text{ mol/dm}^3$ 以下

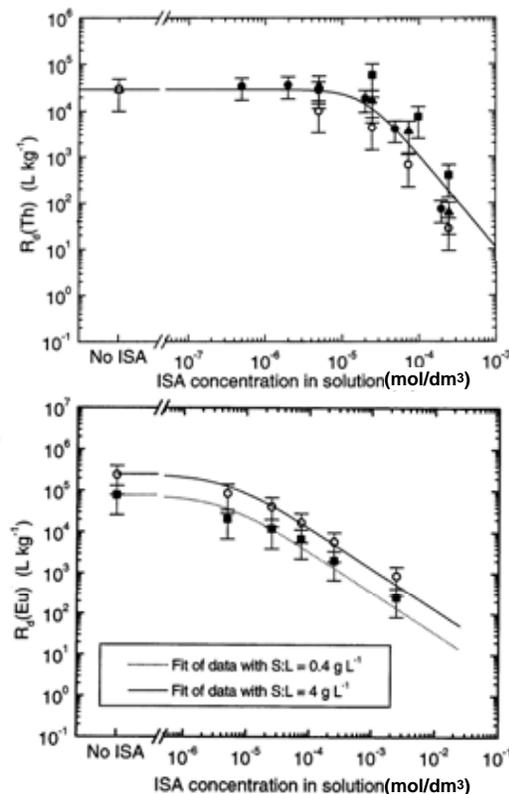
## 【影響】

### Pu溶解度のISA濃度依存性



Greenfield(1995)

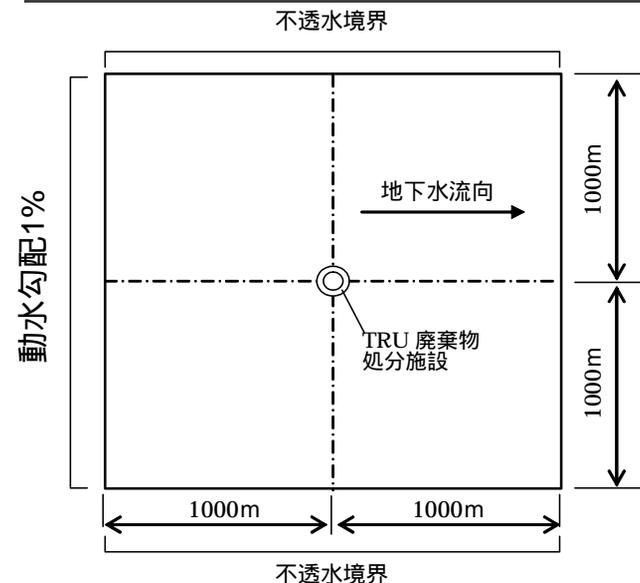
### 分配係数のISA濃度依存性



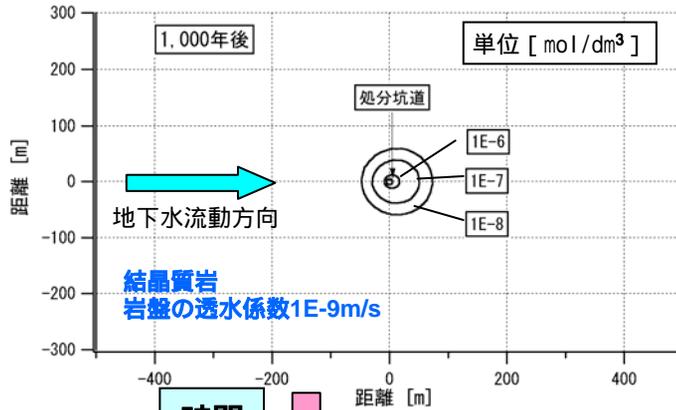
Tits et al., NAGRA NTB 02-08(2002)

## 【解析体系】

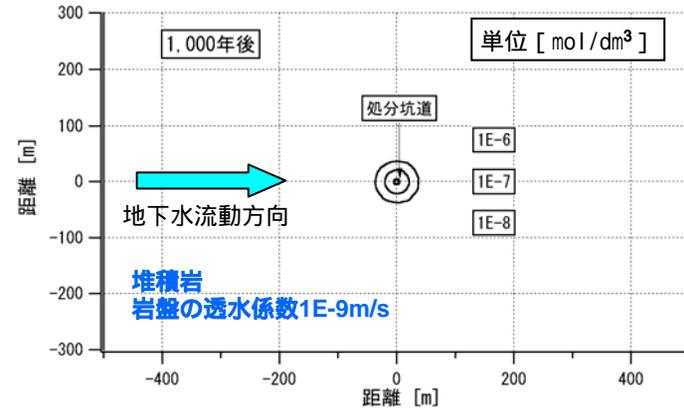
解析体系は処分施設及び周辺岩盤をモデル化した2次元鉛直断面



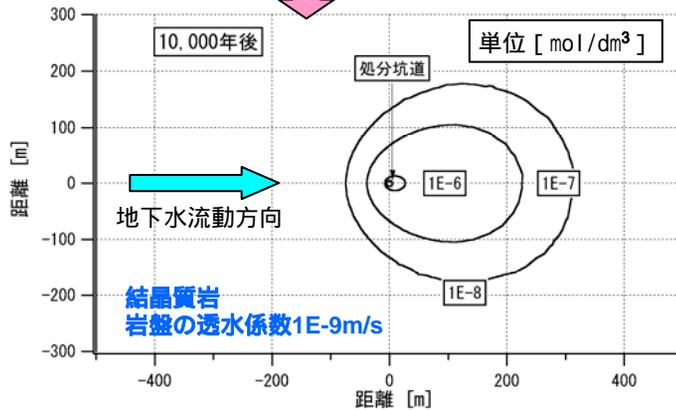
# 有機物(TRU HLW)[解析結果]



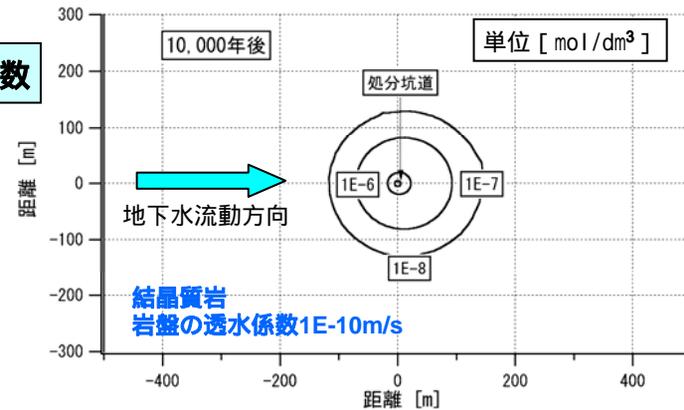
岩種



時間



岩盤の透水係数



## 【ISA濃度が $10^{-6}\text{mol/dm}^3$ 以上となる領域】

- 有機物については10,000年以内でプルームの拡がりが最大になるため、1,000年と10,000年での結果を表示した。
- 結晶質岩の透水係数が $10^{-9}\text{m/s}$ のケースの1,000年後では、上流側と横方向のいずれの場合も10m以内の範囲である。
- 同じケースの10,000年後では、ISAプルームは下流方向には30mまで拡がるものの、上流側と横方向への拡がりには変化はなく、いずれの場合も10m以内の範囲である。
- 岩盤の透水係数を低下させる( $10^{-10}\text{m/s}$ )と、ISAプルームの拡がりは相対的に小さくなるが、 $10^{-6}\text{mol/dm}^3$ の拡がりは、上流側と横方向のいずれの場合も20m以内の範囲に拡大する。
- 堆積岩の場合、結晶質岩に比べて間隙率が大きいことによる希釈効果のため、ISAプルームの拡がりは相対的に小さくなり、上流側と横方向のいずれの場合も10m以内の範囲である。

TRU廃棄物処分施設の上流側及び横方向において、約20mでISA濃度は $1 \times 10^{-6} \text{ mol/dm}^3$ 以下となる。

# 硝酸塩(TRU HLW)[影響の概要]

## 【影響源】

再処理施設で発生する硝酸塩がグループ3廃棄物に含まれる

## 【影響の概要】

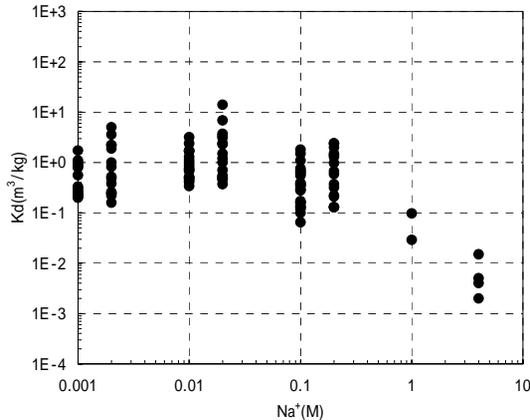
- 硝酸イオンによる人工バリア及び天然バリアの特異的な鉱物学的変質は認められない(武井ほか,2002,2003,藤田,2003,金子ほか,2004)。
- 核種移行抑制機能への影響(核種の収着性の変化)はNa<sup>+</sup>濃度に対するCsの収着分配係数(澁谷ほか,1999,陶山ほか,2004)より、0.1mol/dm<sup>3</sup>程度では核種収着への影響はないと考えられる。
- オーバーパックの局部腐食への影響については、不動態化した場合を想定すると、 $4.5 \times 10^{-4} \text{ mol/dm}^3$ 以下であれば局部腐食の駆動力とならないと考えられる。

## 【判断目安】

硝酸塩濃度で  $1 \times 10^{-4} \text{ mol/dm}^3$ 以下(金属の局部腐食を生じない濃度)

## 【影響】

・岩盤への収着分配係数



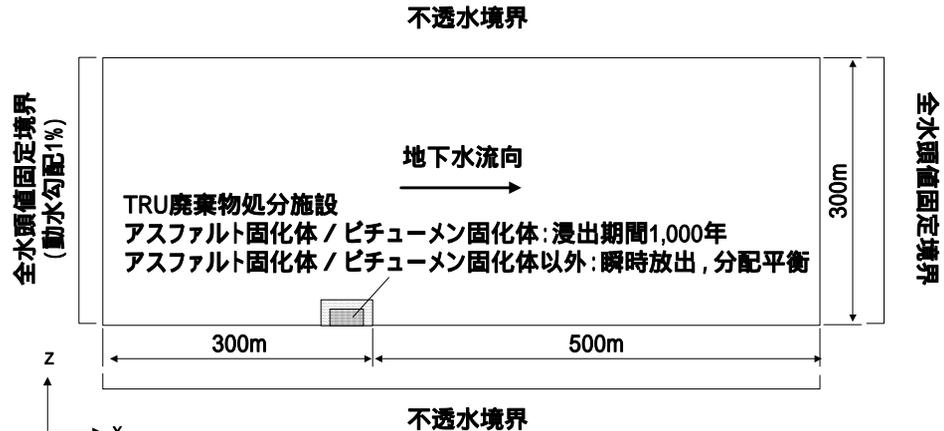
Na濃度とCsの岩盤への収着分配係数の関係 (澁谷ほか, 1999, 陶山ほか, 2004)

・オーバーパックの局部腐食

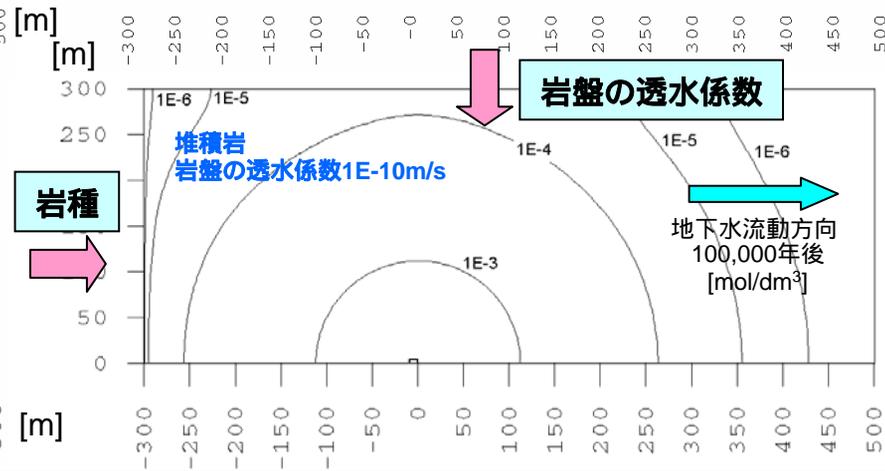
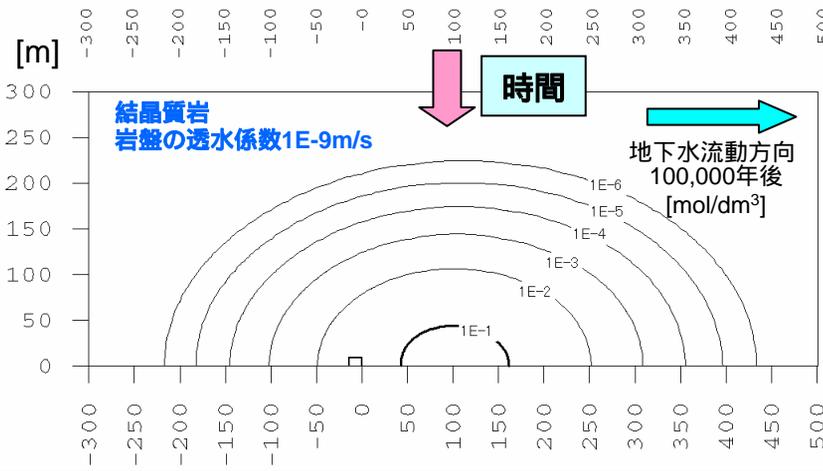
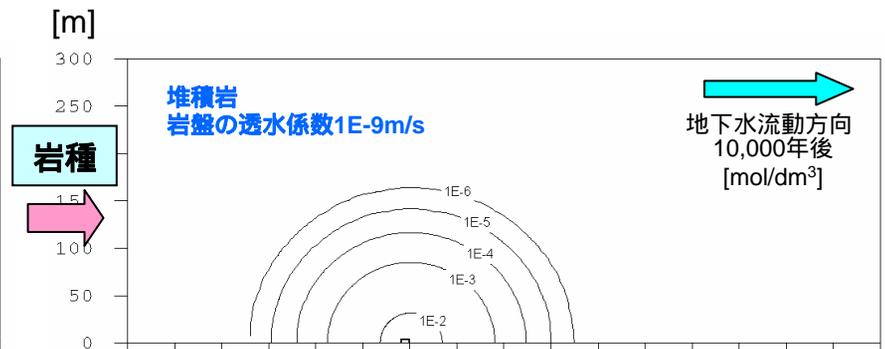
H12レポートの「放射線分解による腐食への影響」を参考にすると、不動態保持電流密度相当のカソード電流密度を供給する緩衝材外側の硝酸イオン濃度は $4.5 \times 10^{-4} \text{ mol/dm}^3$ である。

## 【解析体系】

解析体系は、TRU廃棄物処分施設とその周辺の岩盤をモデル化した2次元鉛直断面



# 硝酸塩(TRU HLW)[解析結果]



**【硝酸塩濃度が $10^{-4}mol/dm^3$ 以上となる領域】**

- 結晶質岩の岩盤の透水係数が $10^{-9}m/s$ のケースの10,000年後では、上流側90m、横方向70m以内の範囲である。
- 時間が経過し100,000年後では、上流側150m、横方向160m以内の範囲に拡大する。
- 岩種を堆積岩に変えると、結晶質岩に比べて空隙率の大きい希釈効果により硝酸塩濃度が非常に高い領域はTRU廃棄物処分施設付近に限定されたものとなる。ただし、拡散係数が結晶質岩に比べ大きいことから、10,000年後では上流側120m、横方向120m以内の範囲である。
- 岩種が堆積岩のケースでさらに岩盤の透水係数を低下させると、地下水流速が低下し、硝酸塩は拡散により拡がり100,000年後では上流側260m、横方向300m以内の範囲に拡大する。
- なお、H12レポートに示されているオーバーパックの担保期間は1,000年であり、硝酸塩が300m程度まで拡がる100,000年後はその担保期間に比べて十分長い。

TRU廃棄物処分施設の上流側及び横方向において、約300mで硝酸塩濃度は $1 \times 10^{-4} mol/dm^3$ 以下となる。

# 高pH (TRU HLW)[影響の概要]

## 【影響源】

TRU処分施設の支保・充填材で使用されるセメントにより高pHとなる。

## 【影響の概要】

•天然バリアへの影響としては、岩盤の構成鉱物の溶解、二次鉱物の生成等による空隙構造の変化が想定される。TRU廃棄物処分施設周囲の母岩領域を対象とした検討より、それらの変化はTRU廃棄物処分施設近傍に限定されると考えられる。(第2次TRUレポート:処分施設周辺岩盤のアルカリ変質(4.4.3))

想定されるHLWの人工バリアへの影響

- 高pHの地下水(pH11以上)によるベントナイト成分の溶解
- 高pH環境(ベントナイト周りの地下水pH12.5以上)で炭素鋼が不働態化
- 高pH環境でのガラス固化体の溶解(pH11以上で顕著な変質が生じる)

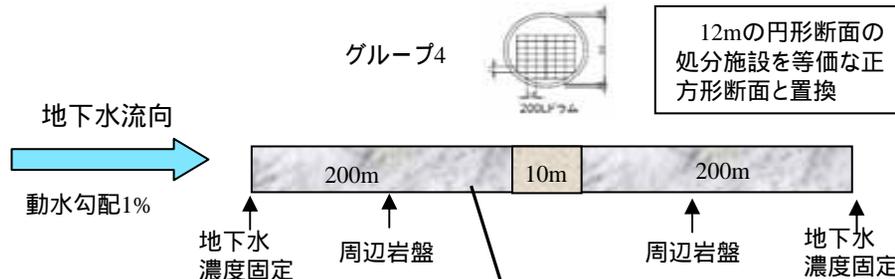
## 【判断目安】

pH11以下(緩衝材の安定に影響を及ぼさないpH)

## 【影響】

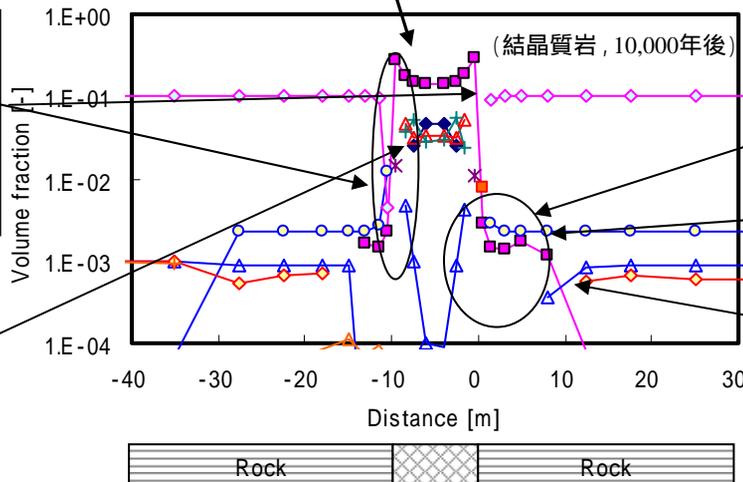
岩盤成分の変化によるpHの緩衝(アモルファスシリカの消失後、カルセドニの溶解)

セメント成分  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の溶解



## 【解析体系】

解析体系は、緩衝材を設けていないTRU廃棄物処分施設とその周辺の岩盤を1次元体系でモデル化

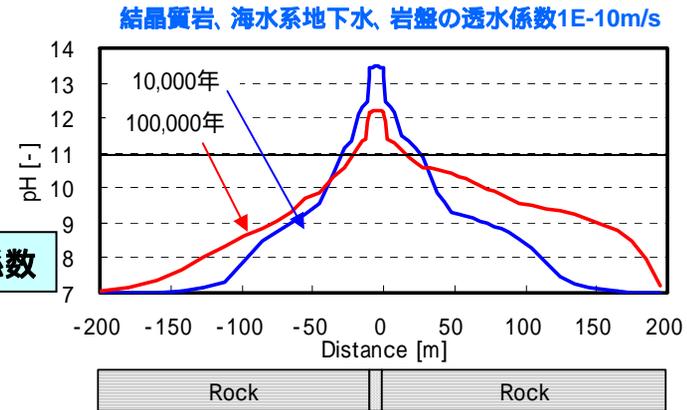
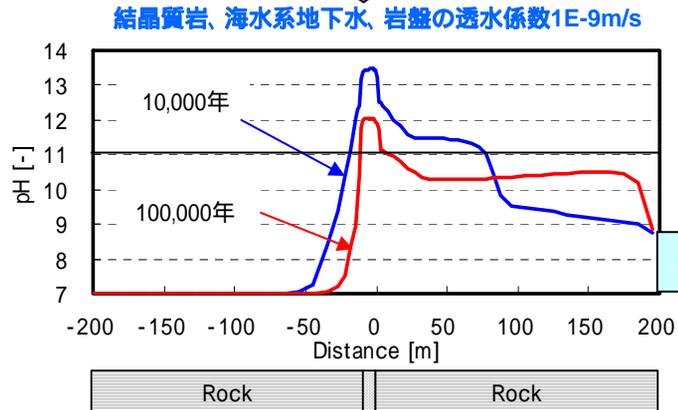
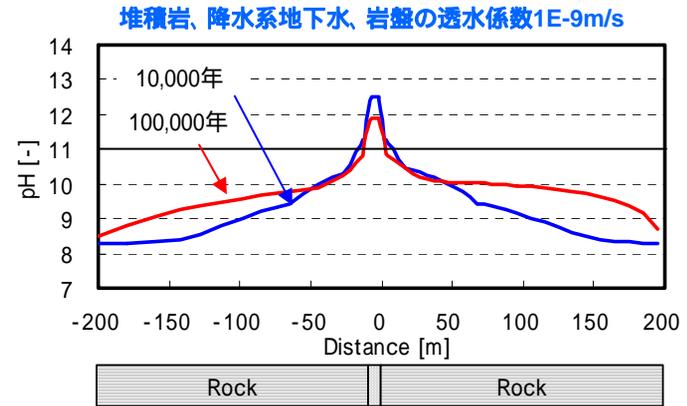
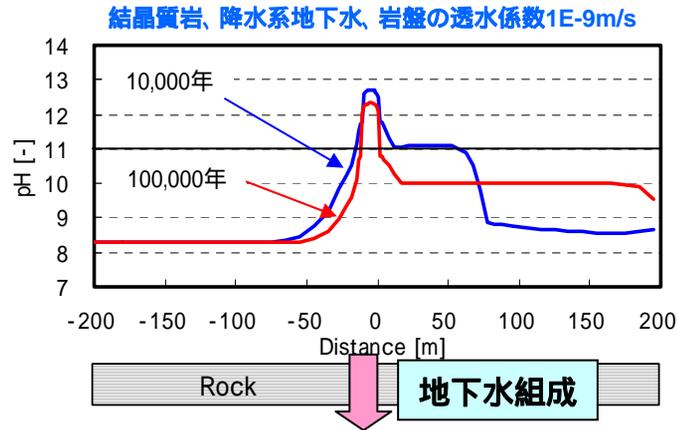


**ゼオライトの生成**  
(Na,Kの固定化)

**CSH(Ca/Si=0.9)の生成**  
(Caの固定化)

**アモルファスシリカの溶解**  
**CSH(Ca/Si= 0.4)の生成**  
(Caの固定化)

# 高pH (TRU HLW)[解析結果]



## 【pHが11以上となる領域】

- 結晶質岩、降水系地下水、岩盤の透水係数が $10^{-9}m/s$ のケースでは、アルカリ成分は移流により下流側へ広がる。上流側でpH11以上となるのは10,000年後で10m以内となる。100,000年後では遊離アルカリ成分が散逸し、同じく10m以内の範囲である。
- 地下水組成を海水系地下水としたケースにおいても、物質移行特性が同じであることから、上流側でpH11以上となるのは10,000年後で10m以内となる。100,000年後では遊離アルカリ成分が散逸し、同じく10m以内の範囲である
- さらに岩盤の透水係数を低下させると、拡散による移行が主となり、上流側でpH11以上となるのは30m以内の範囲である。
- 岩種を堆積岩に変えると、結晶質岩に比べて空隙率が大きいため実流速が小さくなり、拡散による移行が支配的であり、上流側で10m以内の範囲である。

TRU廃棄物処分施設の上流側では処分場から約30mでpH11以下となる。

# 相互影響評価のまとめ

## 熱影響(HLW TRU)

HLW処分施設から約50m離れた地点で、TRU廃棄物処分施設の温度は80 以下に維持される。

## 有機物の影響(TRU HLW)

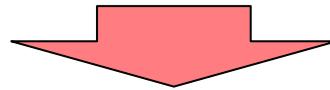
TRU廃棄物処分施設から約20m離れた地点で、核種の溶解度や収着分配係数に影響を生じないISA濃度 $10^{-6}\text{mol/dm}^3$ 以下となる。

## 硝酸塩の影響(TRU HLW)

TRU廃棄物処分施設から約300m離れた地点で、金属の局部腐食を生じない硝酸塩濃度 $10^{-4}\text{mol/dm}^3$  以下となる。

## 高pHの影響(TRU HLW)

TRU廃棄物処分施設から約30m離れた地点で、緩衝材の安定性に影響を及ぼさないpH11以下となる。



約300mの離間距離の確保により上記の相互影響を回避することは技術的に可能である。

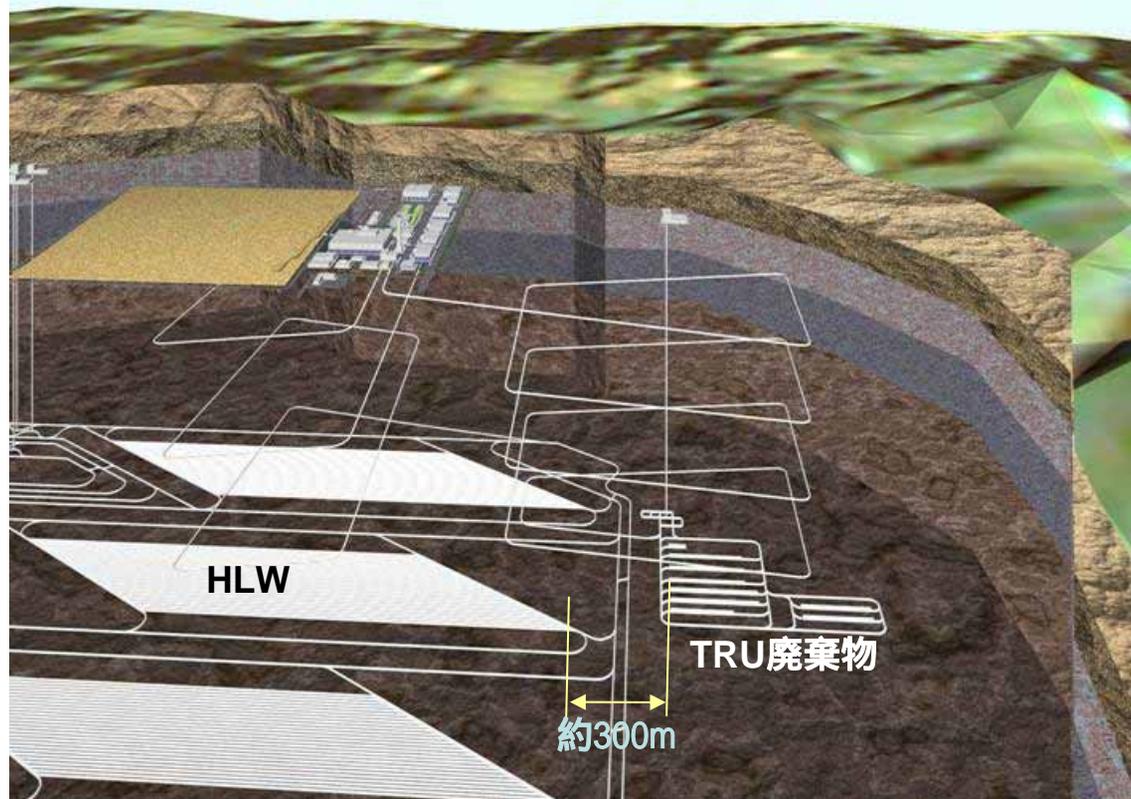
# TRU廃棄物とHLWの併置処分概念の検討例

HLWとTRU廃棄物処分施設間に一定の離間距離を確保することにより、相互影響を回避することが可能となる。なお、実際の処分サイトにおいては、多様な地質環境条件に応じて、HLWの場合と同様、処分施設の配置、工学的対策など有効な措置を組み合わせることが可能である。



## 離間距離

数km四方のHLW処分施設の脇に、地層処分対象TRU廃棄物処分施設を約300mの離間距離をとって配置する場合のイメージ図



## サイト条件に応じた措置

### 処分施設の配置

- ・立体配置
- ・別岩盤配置

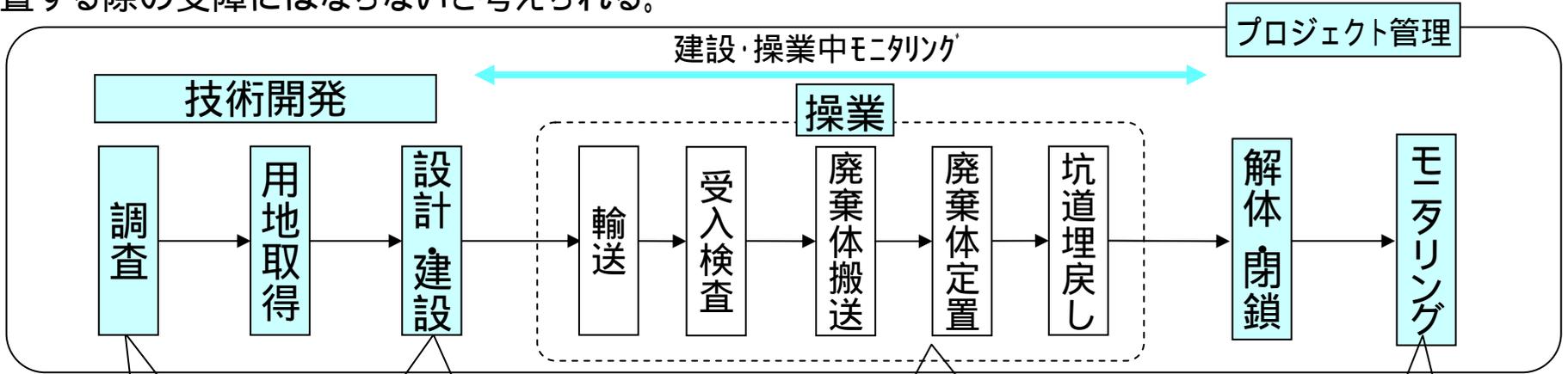
### 工学的対策

- ・プラグ等

・諸外国でもHLWとTRU廃棄物の処分施設は、数百m程度離している。

# 3. 併置処分における調査、建設、操業、管理等の影響

TRU廃棄物処分施設とHLW処分施設では施設の構造及び建設・操業期間が異なる可能性があるが、長半減期核種を比較的多く含むことや地層のバリア機能に期待することを勘案すると、調査工事から施設閉鎖後のモニタリングに至るまで、HLWと同様の管理が適用可能であり、これらの処分の過程が併置する際の支障にはならないと考えられる。



### 調査 (処分地選定)

- 地質調査
- 岩盤物性調査
- 水理地質調査
- 環境影響調査 等

### 処分施設の建設

掘削 (Excavation) → 掘削 (Excavation) → 緩衝材施工 (Buffer material construction) → 構造躯体施工 (Structural body construction)

### 廃棄体定置・坑道埋戻し手順

輸送・受入検査 (Transport/Inspection) → 廃棄体搬送 (Waste Transfer) → 廃棄体定置 (Waste Placement) → 坑道埋戻し (Backfilling)

### 閉鎖後モニタリング

- 敷地周辺環境放射線モニタリング
- 地下水モニタリング 等

## 4.まとめ

- TRU廃棄物とHLWを併置処分した場合、約300mの離間距離の確保により相互影響の回避が可能であることを示した。なお、実際の処分サイトにおいては、多様な地質環境条件に応じて、HLWの場合と同様、処分施設の配置、工学的対策など有効な措置を組み合わせることが可能である。
- TRU廃棄物地層処分時の管理等は、HLW地層処分と同様であり、併置処分への支障とならないと考えられる。
- よって、TRU廃棄物とHLWを併置して地層処分することが技術的に可能であると考ええる。

# 參考資料

# 併置処分における相互影響因子

影響因子	方向	影響の可能性	発生源側の施設での取扱い	
T: 温度	熱	TRU HLW	発熱による温度上昇で人工バリアの変質が促進される可能性がある。	発熱するグループ2のHL・INT・D・Sについてセメント80以下になるよう廃棄体定置密度及び坑道離間距離を確保。その他廃棄体は温度の考慮不要
	熱	HLW TRU	同上	同上(ベントナイト100)。
H: 水理	地下水流動 (核種移行経路)	TRU HLW	・核種移行挙動は水理場に依存 ・元の母岩とは水理特性の異なる領域(処分場)が形成されることによって、広域の水理場が乱れる可能性がある。	・リファレンス及び変動幅の水理条件下で地層処分が成立する見通し。 ・埋め戻し等によって元の母岩と同等以上の水理特性を有するように設計することで擾乱による影響を排除。
M: 応力	岩盤応力	TRU HLW	坑道が近接しすぎると崩落する可能性がある。	坑道(坑道径D)の安定性から坑道離間距離を確保(大断面坑道TRUでも3~4D)
C: 化学	アスファルト	TRU HLW	分解生成物が核種の溶解度及び分配吸着性能に影響する可能性がある。	還元性でアルカリ性では劣化が生じにくく、分解生成物の錯体形成能は低い。
	セルロース	TRU HLW	同上	イソカクシ酸での錯体形成による吸着分配係数の低下を考慮
	溶媒 (TBP等)	TRU HLW	同上	アルカリ環境下での溶解度計算により有意な影響は与えない
	硝酸塩	TRU HLW	・高イオン強度及び酸化性条件によりバリア材料の分配吸着現象に影響する可能性がある。 ・酸化還元雰囲気及び金属腐食等に影響する可能性がある。	硝酸イオンによる吸着分配係数の変化を考慮
	セメント高pH	TRU HLW	高pHにより、ガラスの溶解、オーバーバックの腐食、ベントナイトの変質、核種の溶解・沈殿及び吸着に影響する可能性がある。	高pHによる吸着分配係数の変化を考慮
	コロイド (セメント起源)	TRU HLW	セメントコロイドとの相互作用により、核種の移行挙動(移行速度、吸着性等)が変化する可能性がある。	ベントナイト層による過効果や高イオン強度環境によるコロイド不安定化によりコロイド濃度増加は限定的
	ガス	TRU HLW	ガスにより、処分施設周辺の水理条件が変化する可能性がある。	圧力は上昇するが、透気することからバリアの破損にまでは至らない。処分施設内の間隙水が押し出される。
R: 放射線		TRU HLW	放射線による人工バリア損傷及び酸化還元雰囲気に影響する可能性がある。	廃棄体直近の現象のみを考慮

併置の際の相手側の相互影響への拡張

【限定的】
グループ2坑道の温度が上昇する可能性がある
【実サイトでの考慮】 それぞれの施設で考慮するもの
【限定的】 各処分施設で設計されており、応力の影響範囲は限定される。
【起こりにくい】
核種移行に影響する可能性がある
【起こりにくい】
核種移行及びオーバーバックの寿命に影響する可能性がある
核種移行及び人工バリア材の安定性に影響する可能性がある。
【限定的】
【実サイトでの考慮】 それぞれの施設の状況に応じて考慮するもの
【限定的】 地中遠方への影響は考えにくい

併置処分相互影響評価での取扱い

温度を評価

濃度を評価

濃度を評価

pHを評価

# 熱影響(HLW TRU)[影響解析の概要]

参考2-1

項目		値など		備考
前提条件		500m地点:温度一定境界 水平方向:HLW処分施設中心から2,000m離れた地点を断熱境界		地表温度:15 (H12レポート) 地温勾配:3 /100m(H12レポート)
ガラス固化体の発熱率(W/本) (50年貯蔵後)		処分直後	350	使用コード:ORIGEN-2.1 燃焼度:45,000MWD/MTU 比出力:38MW/MTU 初期濃縮度:4.5%
		10	280	
		100	53	
		1,000	6.3	
解析コード	モデル		2次元伝導伝熱解析	
	名称		TRUMP	
	検証	公開性	公開	
		検証	ITER等の熱解析で使用実績あり	
主要パラメータ	熱伝導率 (W/m・K)	ガラス固化体	1.2	出典:H12レポート
		オーバーパック	51.6	出典:H12レポート
		緩衝材	0.78	出典:H12レポート
		結晶質岩	2.8	出典:H12レポート
		堆積岩	2.2	出典:H12レポート
	比熱 (J/kg・K)	ガラス固化体	960	出典:H12レポート
		オーバーパック	470	出典:H12レポート
		緩衝材	590	出典:H12レポート
		結晶質岩	1,000	出典:H12レポート
		堆積岩	1,400	出典:H12レポート
	間隙率 (%)	結晶質岩	2	出典:H12レポート
		堆積岩	30	出典:H12レポート

# 解析コードの説明 (TRUMP)

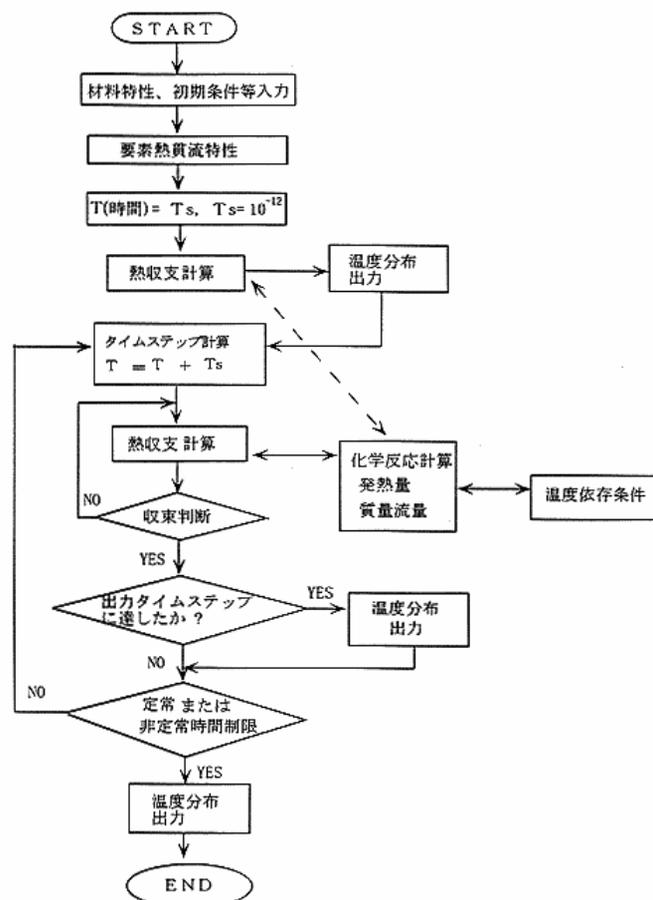
TRUMPは米国カリフォルニア大学で開発された下記の熱輸送基礎方程式を用いる3次元非定常熱輸送計算プログラムであり、対象を要素分割し、各要素の差分形として単位時間の熱変化を取り扱う。計算フローは下図に示すとおりである。

$$\rho \cdot c \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \underline{V} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot K \nabla T + G$$

$$- \rho \cdot Q_a \frac{\partial a}{\partial t} - \rho \cdot Q_b \frac{\partial b}{\partial t}$$

T; 温度  
t; 時間  
ρ; 単位体積重量  
c; 単位重量熱容量  
K; 熱伝導率

a, b; 1次及び2次化学反応重量率  
Q<sub>a</sub>, Q<sub>b</sub>; " 化学反応生成熱  
V; 速度ベクトル (V<sub>x</sub>, V<sub>y</sub>, V<sub>z</sub>)  
∇; (∂/∂x, ∂/∂y, ∂/∂z)  
G; 単位体積・単位時間発熱量



TRUMPの国内使用実績としては、原研のITERの熱解析<sup>1)</sup>等があげられる。

1)長尾ら (2001): Fusion Engineering and Design 58-59, p.673-678(2001) ; JAERI-J 19041

# 有機物(TRU HLW)[影響解析の概要]

参考3-1

項目		値など		備考	
前提条件		地下水流向の固定, 均質場の仮定			
ソース		ISA量: 525kg (=0.5kg × 1,050体)		出典: 倉形ら(1996), JNC ZN 8410 (ハル・エンドピースに含まれる有機物の含有量は 分別*1により0.1wt%以下)	
解析 コード	モデル		均質多孔質媒体モデル 2次元物質移行解析		
	名称		AZURE		
	検証	公開性	非公開		
		検証	旧日本原子力研究所、電力中央研究所及び 日揮間でベンチマーク計算し、検証		
主要 パラメータ	水理 条件	透水係数(m/s)	セメント	4E-6	保守的設定
			ベントナイト	2E-11	出典: H12レポート
			母岩	1E-10, 1E-9, 1E-8	
		動水勾配	0.01		出典: H12レポート
		間隙率(%)	結晶質岩	2	
			堆積岩	30	
	移行 条件	実効拡散係数 (m <sup>2</sup> /s)	セメント	8E-10	出典: 佐藤ら(1992), PNCTN8410 92-164に基 づき、セメント間隙率を0.19として算出
			ベントナイト	3E-10	出典: H12レポート
			結晶質岩	8E-11	
			堆積岩	1.2E-9	
収着分配係数 (m <sup>3</sup> /kg)		セメント	0.17	出典: Van Loon and Glaus(1997)	
		ベントナイト	0	保守的設定	
		母岩	0	保守的設定	
分散長	移行距離の1/10		出典: Gelhar(1985)ほか		

\* 1: マニピレータで大きな有機物を除去後, 水による超音波洗浄で有機物を除去する。分別した有機物は焼却, 無機化する。

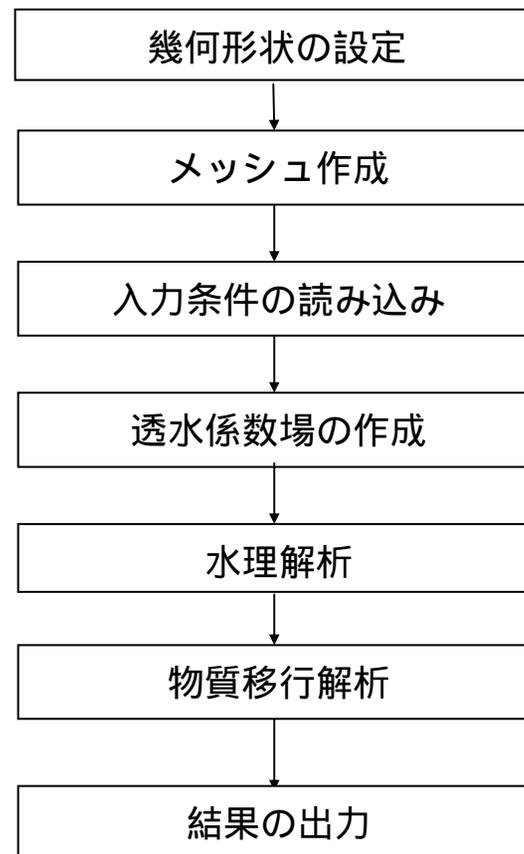
## 解析コードの検証(AZURE)

AZUREはニアフィールドの定常地下水流動解析を目的として開発された二次元物質移行解析コードであり、フラクタルによる不均質透水係数場の作成、有限要素法によるポテンシャル流解析及び放射性核種の移行解析ができる。計算フローは下図に示すとおりである。

AZUREは非公開コードであるが、旧日本原子力研究所及び電力中央研究所が所有する解析コード間でベンチマーク計算を実施し、コードの検証を実施している。

また、AZUREは旧サイクル機構研究<sup>1)</sup>においても使用されている。

1)三木ら(2002):浅地中処分想定廃棄体の処分適合性に関する検討, JNC TJ84002002-56



# 硝酸塩影響(TRU HLW)[影響解析の概要]

参考4-1

項目		値など		備考	
前提条件		均質場の仮定		微生物活動や還元性鉱物との反応による硝酸イオンの分解は考慮していない。	
ソース		硝酸塩総量: $3.25 \times 10^6$ kg ( $\text{NaNO}_3$ 換算)		民間: (185kg × 6,230本 + 740kg × 199本) JNC: (103kg × 16,671本 + 46kg × 4,057本) 返還: (40kg × 1,100本 + 3kg × 250本)	
解析コード	モデル		均質多孔質媒体モデル 2次元物質移行解析		
	名称		Dtransu2D-EL		
	検証	公開性	公開		
		検証	・移流・分散方程式の解析解(1D、2D)との比較 ・塩水侵入問題についての他解析コード(3DFEMFAT)との比較		
主要パラメータ	水理条件	透水係数(m/s)	セメント	4E-6	保守的設定
			母岩	1E-10, 1E-9, 1E-8	出典: H12レポート
		動水勾配(-)	0.01		
		間隙率(%)	結晶質岩	2	出典: H12レポート
			堆積岩	30	
		実効拡散係数(m <sup>2</sup> /s)	セメント	8E-10	出典: 佐藤ら(1992), PNCTN8410 92-164に基づき、セメント間隙率を0.19として算出
	結晶質岩		8E-11		
	堆積岩		1.2E-9		
	移行条件	収着分配係数(m <sup>3</sup> /kg)	セメント	0.0001	出典: 澁谷ほか(1999), 陶山ほか(2004)(岩石/鉱物に対するIの分配係数より設定)
			母岩	0.0001	
浸出期間(年)		1,000		アスファルト固化体	
分散長		移行距離の1/10		出典: Gelhar(1985)ほか	

Dtransuは、ソースプログラムの全てが公開されている。

- ・ 1994 Dtransu2D-ELソースプログラムの公開
- ・ 1995 米アリゾナ大学Neuman教授講演会
- ・ 2001 Dtransu3D-ELソースプログラムの公開

\* 岡山大学、(株)ダイヤコンサルタントのHPでソースプログラムを入手可能

## 解析解や他解析コードとの比較

下記の解析解との比較、他解析コードとの比較が実施されており、良好な結果を得ている(菱谷(2000), 菱谷ほか(2001))。

・ 移流・分散方程式の解析解との比較

- 1次元(Ogata and Banks(1951))

- 2次元(Neuman S.P.(1984))

・ 密度流を考慮した飽和・不飽和解析での3DFEMFATとの比較

# 高pH影響(TRU HLW)[影響解析の概要]

参考5-1

項目		値など		備考	
前提条件		地下水流向の固定、均質場の仮定			
ソース		モルタルの単位セメント量: 483kg/m <sup>3</sup>		設計基準強度30MPa/m <sup>2</sup> を満たすために、以下のモデルモルタルを設定した。 単位セメント量 単位水量 細骨材量 483kg/m <sup>3</sup> 266kg/m <sup>3</sup> 1449kg/m <sup>3</sup>	
解析 コード	モデル		均質多孔質媒体モデル 物質移行-地球化学連成解析		
	名称		PHREEQC-TRANS		
	公開性		非公開		
	検証		<ul style="list-style-type: none"> <li>地球化学反応 広く使用・検証されているPHREEQC Ver2.8 (Parkhurst and Appelo,1999)を使用</li> <li>物質移行 解析解との比較</li> <li>物質移行-化学反応連成解析 第2次TRUレポートの根拠資料集において他解析コード(RAIDEN3)との比較</li> </ul>		
主要 パラメータ	水理 条件	透水係数(m/s)	セメント	4E-6	保守的設定
			母岩	1E-10, 1E-9, 1E-8	出典: H12レポート
		動水勾配(-)	0.01		
	間隙率(%)	結晶質岩	2	出典: H12レポート	
		堆積岩	30		
	移行 条件	実効拡散係数 (m <sup>2</sup> /s)	セメント	8E-10	出典: 佐藤ら(1992), PNCTN8410 92-164に基づき、セメント間隙率を0.19として算出
			結晶質岩	8E-11	出典: H12レポート
堆積岩			1.2E-9		
地下水組成		降水系地下水、海水系地下水		地質環境条件の多様性を考慮して設定	

\* USGS: US Geological Survey(米国地質調査所)

# 解析コードの検証(PHREEQC-TRANS)

PHREEQC-TRANSは中心となる地球化学反応解析において、USGSが開発・公開しているPHREEQCを使用している。

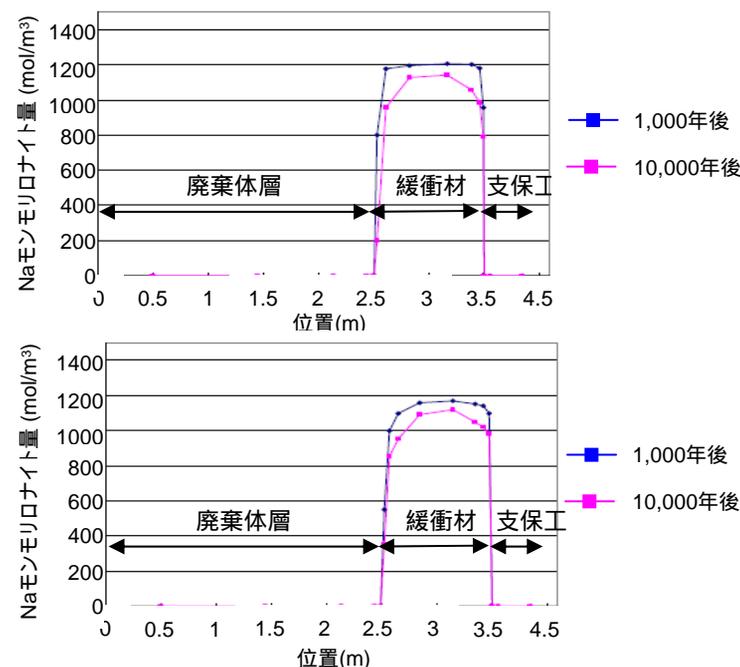
- ・PHREEQCはソースプログラムが公開されており、広く使用されている。
- ・USGSでは現在もPHREEQCの開発が進められており、最新のバージョンを以下のサイトからダウンロードできる。

[http://wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/GWC\\_coupled/phreeqc/index.html](http://wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/GWC_coupled/phreeqc/index.html)

## 解析解や他解析コードとの比較

第2次TRUレポートの根拠資料集において解析コードの検証を行っている。

- ・物質移行解析について解析解と比較した。
- ・セメントペーストに対する通水試験<sup>\*1</sup>のトレース解析を実施し、再現性を確認した。
- ・物質移行-化学反応の連成現象について他の解析コード(RAIDEN3<sup>\*2</sup>)と比較した。



Naモンモリロナイトについての計算結果  
上;RAIDEN3、下;PHREEQC-TRANS

セメント-緩衝材複合系におけるモンモリロナイトの溶解についてRAIDEN3と比較した。両コードの解析結果の整合性を確認。

\* 1: 武井明彦, 藤田英樹, 原澤修(2004): セメント系材料の水理・力学特性の変遷に関する研究( ), JNC TJ8400 2004-024.

\* 2: RAIDEN3, Watson, C., Benbow, S., (2004): RAIDEN 3 v0.9.5 User Guide, Quintessa Report QRS-9018-1.

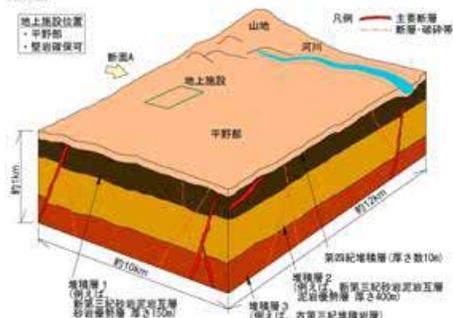
# TRU廃棄物とHLWの併置処分概念検討例

参考6-1

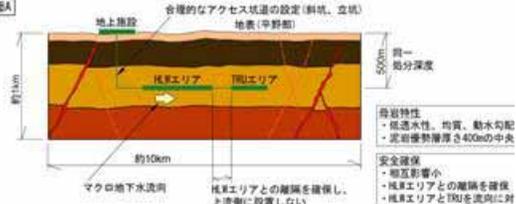
## 内陸部・堆積岩

- HLW/TRU双方の知見を活かすため、HLWとTRU廃棄物エリアは地下水流向に対して平行に設置
- アクセス坑道は原則として地下水流向の上流側に設置

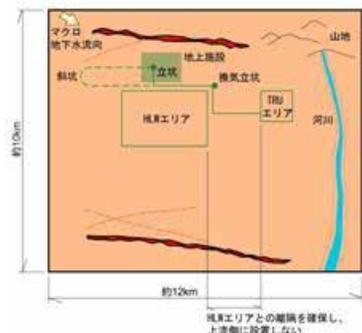
鳥瞰図



断面A



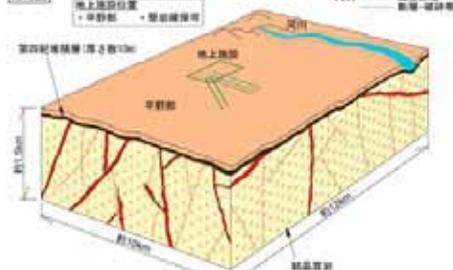
平面図



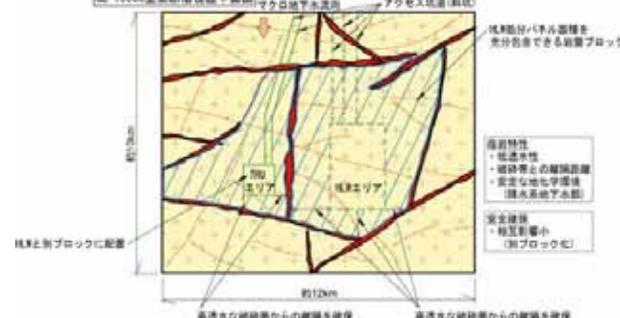
## 内陸部・結晶質岩

- 母岩である結晶質岩中のHLWと同じ深度にTRU廃棄物を設置
- HLW/TRU双方の知見を活かすため、HLWとTRU廃棄物エリアは地下水流向に対して平行とし、別の岩盤ブロックに設置

鳥瞰図



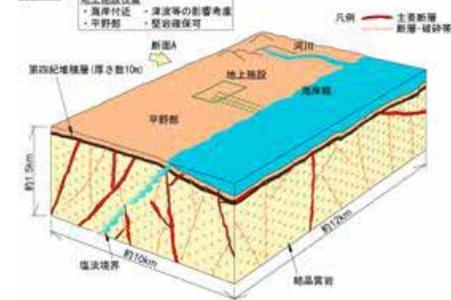
約1000m主要断層位置平面図



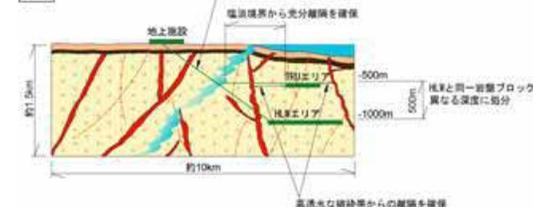
## 沿岸部・結晶質岩

- 処分施設は、塩淡水境界から十分離隔を確保した沿岸海底下に設置
- HLW/TRU双方の知見を活かすため、垂直方向離隔距離を確保

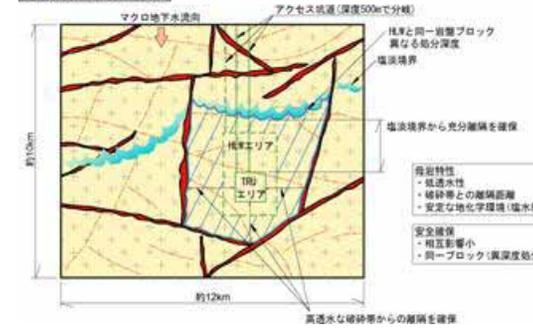
鳥瞰図



断面A



約500m主要断層位置平面図



# TRU廃棄物、HLW及び余裕深度処分対象原子炉施設廃棄物 における処分技術の比較

参考6-2

TRU廃棄物地層処分の処分技術			HLWの処分技術	余裕深度処分の処分技術
事業段階	項目	主な技術		
調査・用地取得	地質調査	・リモートセンシング ・原位置試験 等		
設計・建設	坑道建設	・斜坑、立坑建設 ・連絡坑道、主要坑道建設 ・処分坑道建設		
	緩衝材施工	・緩衝材施工		
	構造躯体構築	・鋼製構造躯体構築 ・コンクリート製構造躯体構築	-	
操業	廃棄体製作	・廃棄体設計 ・廃棄体製作		
	坑道搬送	・斜坑搬送、(立坑搬送) ・水平坑道搬送		
	廃棄体定置	・廃棄体ハンドリング		
	充填材施工	・セメント系材料充填	-	
解体・閉鎖	閉鎖	・埋め戻し材施工 ・充填材施工		
モニタリング	管理	・モニタリング ・回収可能性		

：共通性高   ：共通性あり   ：共通性低   -：対応設備なし

先行して開発が進められているHLWや余裕深度処分対象原子炉施設廃棄物の技術が活用できる

# 諸外国におけるHLWとTRU廃棄物地層処分の状況

諸外国では、高レベル放射性廃棄物と地層処分が想定される廃棄物の処分施設を同一の処分場に計画している国が多い。

国名	スイス	フランス	ベルギー	ドイツ	アメリカ
処分方式	<b>併置処分</b> 長寿命・中低レベル廃棄物* 高レベル廃棄物 (ガラス固化体及び 使用済燃料)	<b>併置処分</b> カテゴリーB廃棄物* 高レベル廃棄物 (ガラス固化体及び 使用済燃料)	<b>併置処分</b> カテゴリーB廃棄物* カテゴリーC廃棄物の一部* 高レベル廃棄物 (ガラス固化体及び 使用済燃料)	<b>併置処分</b> 発熱性廃棄物* 非発熱性廃棄物の一部* 高レベル廃棄物 (ガラス固化体及び 使用済燃料)	<b>単独処分</b> TRU廃棄物 (軍事用)
岩種・深度	オハリナス粘土:約650m 結晶質岩:約1,000m	堆積岩:約500m 結晶質岩:未定	ブーム粘土:約240m	未定 (サイト選定見直し中) (ゴアレベンの場合, 岩塩層:840~1,200m)	操業中 (ニューメキシコ州 カールスバッド近郊) 岩塩層:約650m
レイアウト 【考慮する相互影響】	同一地層でHLW処分エリアとTRU廃棄物処分エリアは、数100m離される。 (高pH)	同一地層でHLW処分エリアとTRU廃棄物処分エリアに区分されている。 (離間距離は不明)	同一地層でHLW処分エリアとTRU廃棄物処分エリアに区分されている。(離間距離は今後検討)	未定	-
安全指標	0.1mSv/y (HSK & KSA, 1993)	0.25mSv/y (DSIN, 1991)	-	0.3mSv/y (BMU, 1976/2001 ; RSK, 1983)	0.15mSv/y (USEPA, 1985/1993 ; USDOE, 1996)

\* : 日本では、地層処分が想定されるTRU廃棄物に相当する。

スイス: Kristallin-, Safety Assessment Report, NTB93-22, 1994, Nagra ; Project OPALINUS Clay, Safety Report, NTB 02-05, 2002, Nagra

フランス: DOSSIER 2001 ARGILE, 2001, ANDRA

ベルギー: SAFIR2, NIROND 2001-05 E 2001, ONDRAF/NIRAS

ドイツ: Environmental Policy Joint Convention on The Safety of SF and R/W Management, DBE Webサイト: <http://www.dbe.de/>

アメリカ: WIPP Webサイト: <http://www.wipp.ws/>

BMU (1976/2001) : 「電離放射線による障害防止に関する政令」

DSIN (1991): 安全基本規則No.III.2.f 「放射性廃棄物の地層処分」

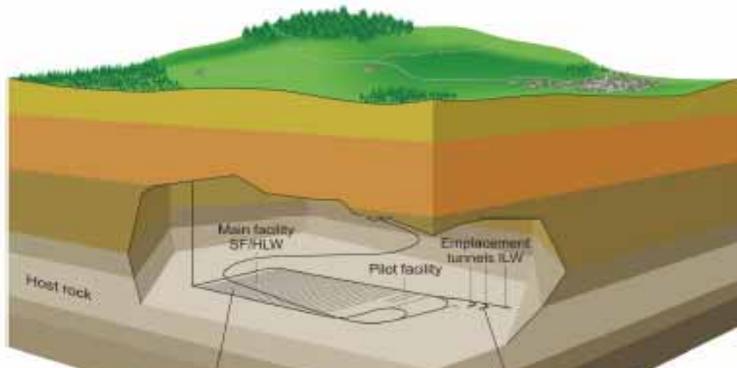
HSK & KSA (1993) : Protection Objectives for the Disposal of Radioactive Waste.

RSK (1983) : 「鉱山における放射性廃棄物の最終埋設処分のための安全基準」

USDOE (1996) : Title 40 CFR Part 191 Compliance Certification Application for the Waste Isolation Pilot Plant, WIPP Carsbad Area Office, Carsbad.

USEPA (1985/1993) : 40 CFR Part 191 : Environmental Radiation Protection Standards for Management and Disposal of Spent Nuclear Fuel, High-Level, and Transuranic Radioactive Wastes, Final Ruling.

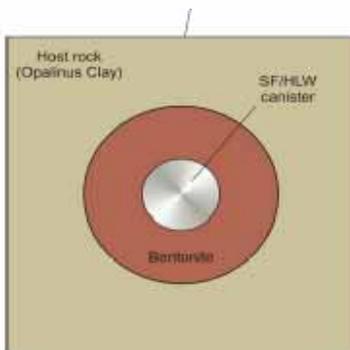
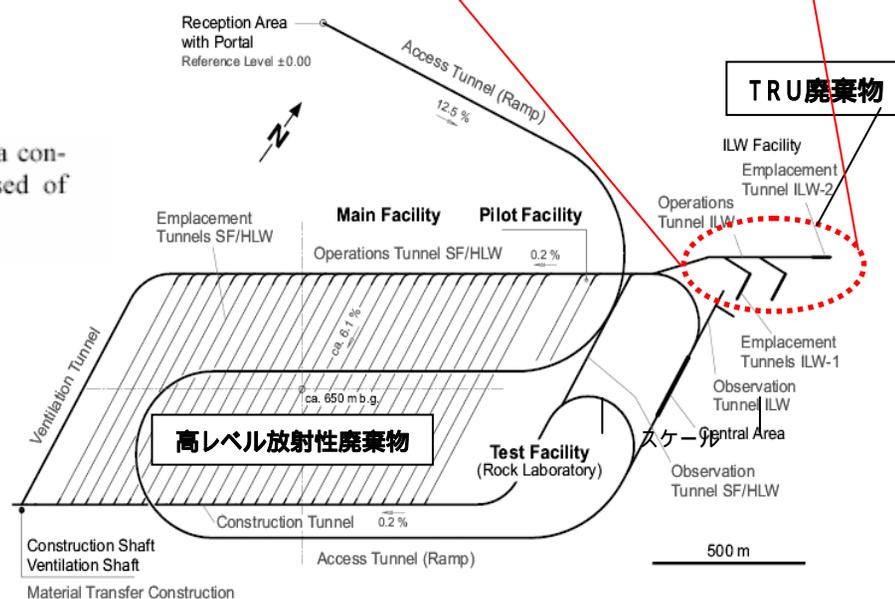
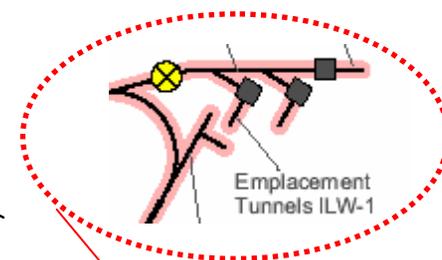
# スイスにおけるHLW・SFとTRU廃棄物の併置処分概念図



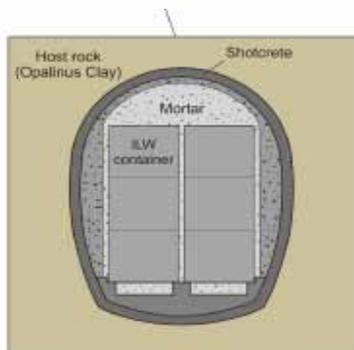
Note that seals are considered to comprise highly compacted bentonite, along with a concrete bulkhead. Plugs at the entrances to ILW emplacement tunnels are composed of concrete.



シール: 高圧縮ベントナイト  
プラグ: コンクリート



Emplacement tunnel SF/HLW  
高レベル放射性廃棄物



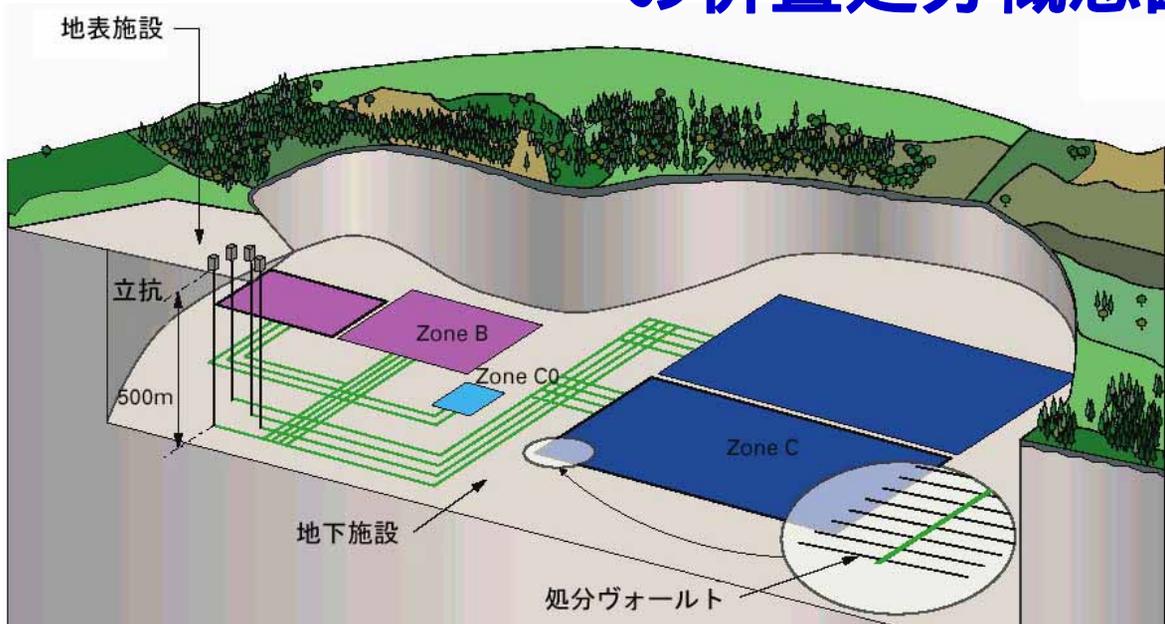
Emplacement tunnel ILW  
TRU廃棄物

オパリナス粘土層における地層処分施設断面図

オパリナス粘土層における地層処分場レイアウト

出典: Nagra NTB 02-05: Project Opalinus Clay

# フランスにおけるHLW・SFとTRU廃棄物の併置処分概念図



- Zone B: 中レベル放射性廃棄物  
(アスファルト固化体、セメント固化体等)
- Zone C: 高レベル放射性廃棄物  
(ガラス固化体及び使用済燃料)
- Zone C0: ガラス固化体のうち、マルケールのガラス固化試験装置(PIVER)及びマルケールガラス固化施設(AVM)で製造されたもの

出典: Dossier 2005 Argile(2005)



セル構造一例: カテゴリーB廃棄物用

# 諸外国における併置処分の相互影響及び対応策

	スイス(NAGRA, 1994a;2002)	フランス(ANDRA, 2001)	英国(King et al., 2002)
基本的な考え方	人工バリア材及び劣化生成物の影響を回避するために、ILW処分坑道はHLW・使用済燃料処分坑道と分離する。	TRU廃棄物とHLWの相互影響を軽減するために処分エリアを2分割し、ある程度の離間距離を確保する。	ILW/LLW処分施設からのセメントブルームとHLW・使用済燃料処分施設のベントナイトの相互作用を回避するため、両者を分離する。
考慮する相互影響	ILW処分坑道の埋戻し材及び構造躯体から発生する高pHブルームは母岩を変質させ、HLW・使用済燃料処分坑道のベントナイトを変質させる可能性がある。	-	熱的影響は、100mの離間距離を確保すれば、許容できるレベルになる。 ILW/LLW処分施設からの高pH及び有機物の分解生成物が、HLW・使用済燃料処分施設のベントナイト、ガラスの溶解速度及び核種の溶解度等に影響する可能性がある。
対応策	結晶質岩サイトではILW処分坑道は母岩亀裂を利用し、HLW・使用済燃料処分坑道から隔離する。堆積岩サイトでは、母岩が比較的均質であるため、ILW処分坑道はHLW・使用済燃料処分坑道から数100mの離間距離を確保する。	-	HLW・使用済燃料処分施設とILW/LLW処分施設の間には低透水性岩盤が必要である。また、アクセス坑道にはプラグを設置し、トンネル周辺岩盤にはグラウトする。離間距離の目安は、500mである。

LLW: 低レベル放射性廃棄物, ILW: 中低レベル放射性廃棄物, HLW: 高レベル放射性廃棄物