

ニアフィールド長期力学挙動評価技術の開発

日本原子力研究開発機構 高山裕介

1. 背景・目的

2. ニアフィールド長期力学挙動評価技術

- 2.1. 長期力学挙動解析コードMACBECE
- 2.2. 岩盤の力学挙動解析モデル
- 2.3. 金属材料の力学挙動解析モデル
- 2.4. セメント系材料の力学挙動解析モデル
- 2.5. ベントナイト系材料の力学挙動解析モデル

3. TRU廃棄物処分施設の長期力学挙動評価事例

- 3.1. 岩盤クリープによる処分施設の変形量の評価
- 3.2. セメントの割れを伴う挙動が透水性の時空間変化に与える影響の評価

4. まとめ

1. 背景・目的

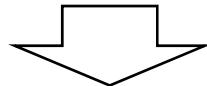
3

これまで

○地層処分という技術の成立性や、その信頼性を示すこと。

→きわめて保守的な仮定の導入による評価の様式化・単純化

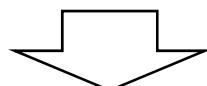
(分かりやすさ・不確実性やあいまいさの回避による評価の頑健性確保)



今後は

○処分事業の進展についてサイト条件等の情報が拡充し、それを利用しつつ、サイト間やデザイン間の適切性の比較やそれに基づく処分施設設計が実施されると考えられる。

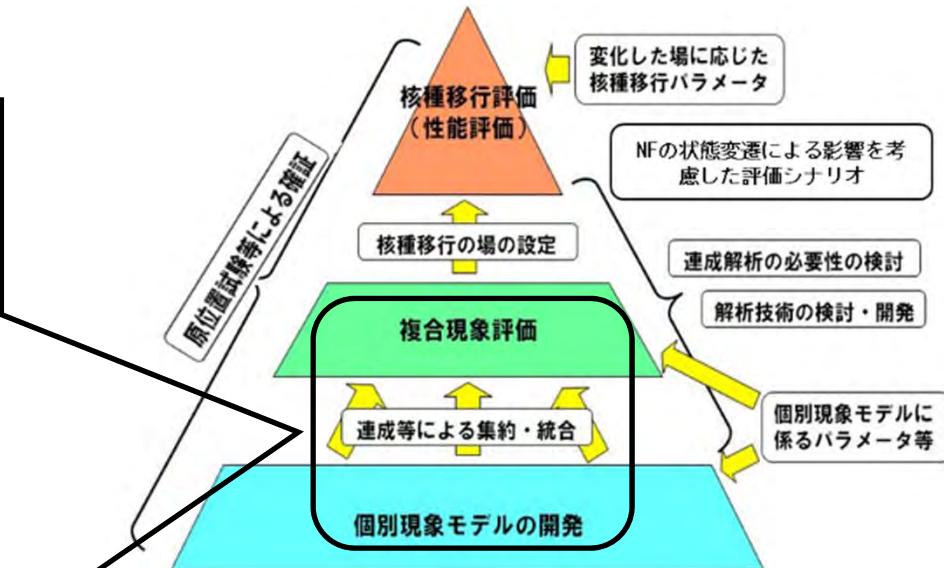
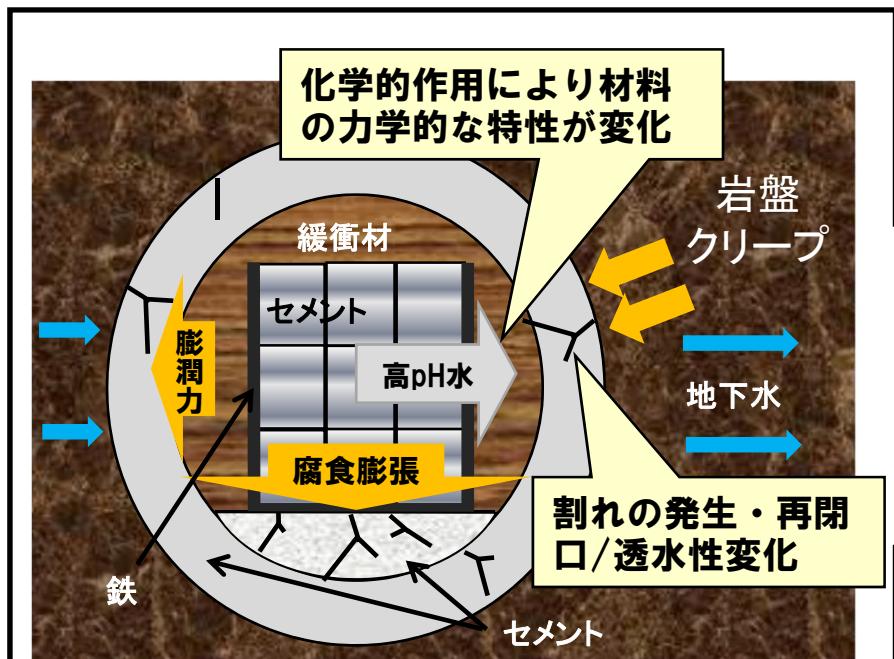
○様式化・単純化された評価技術では、サイト情報等が反映されたより現実的な検討は困難な場合がある。



○保守的に簡単化・様式化された評価手法に加え、より現実性のある評価手法の開発

1. 背景・目的

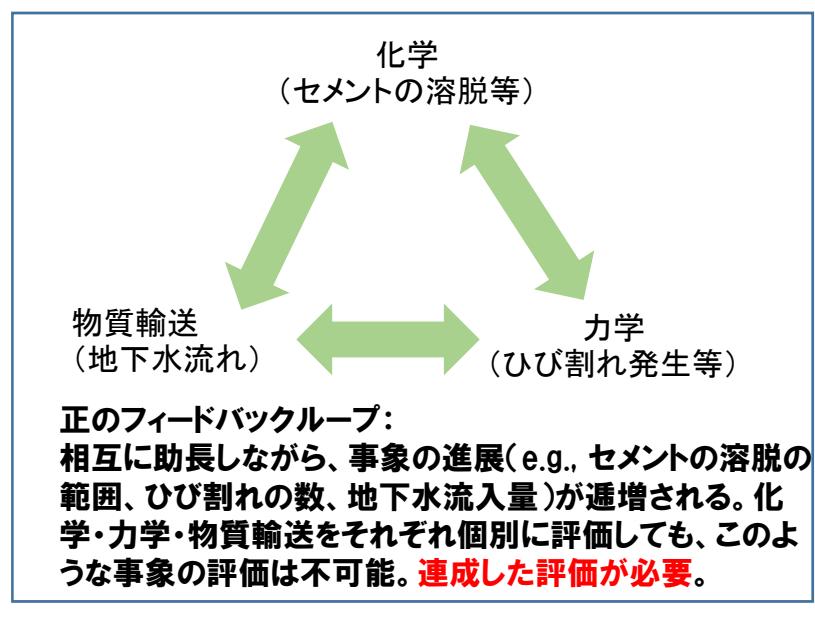
4



複合現象評価技術の開発

期待される効果

- ・より現実的な核種移行の場の設定
- ・人工バリアに期待している安全機能の確認
- ・保守的な設定による評価結果の妥当性確認
- ・経済合理性等の観点からの適切な設計
- ・核種移行や安全機能に与える影響が大きな因子の明示化に繋がり、効果的な研究開発の促進



化学および物質輸送と連携した
力学挙動評価技術の開発が必要

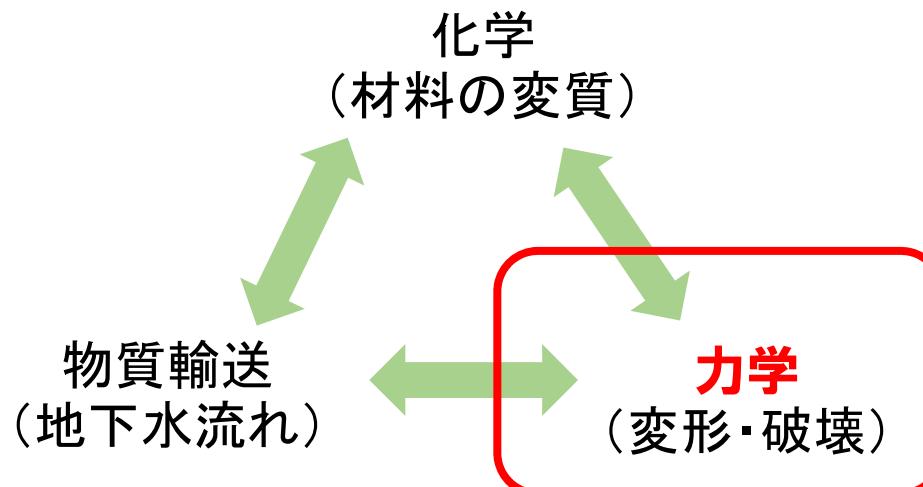
2. ニアフィールド長期力学挙動評価技術

2.1. 長期力学挙動解析コードMACBECE

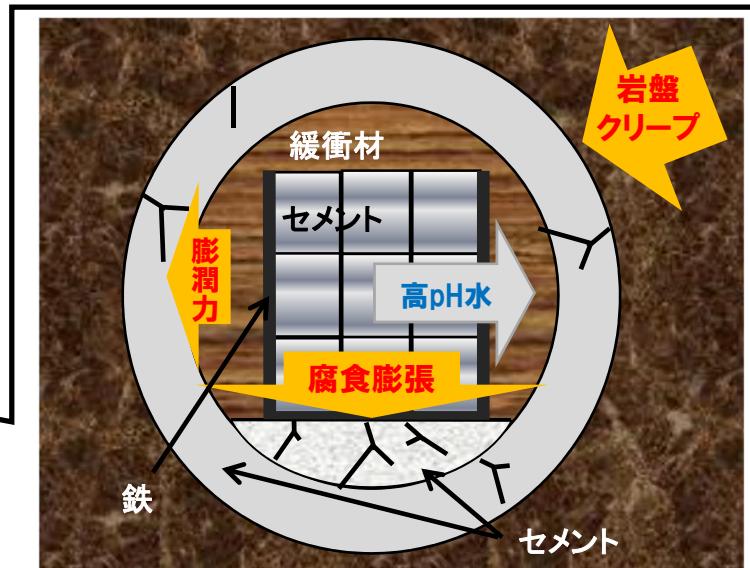
MACBECE: Mechanical Analysis considering Chemical transition of BEntonite and CEment materials

セメント系材料やベントナイト系材料の化学的変遷情報を取り込み、周辺岩盤を含めた処分施設の長期的な力学挙動を解析し、処分施設の変形に関する評価を行うと共に、それに伴う物質輸送特性の変化を評価することが可能な解析コード

MACBECEの対象とする複合現象



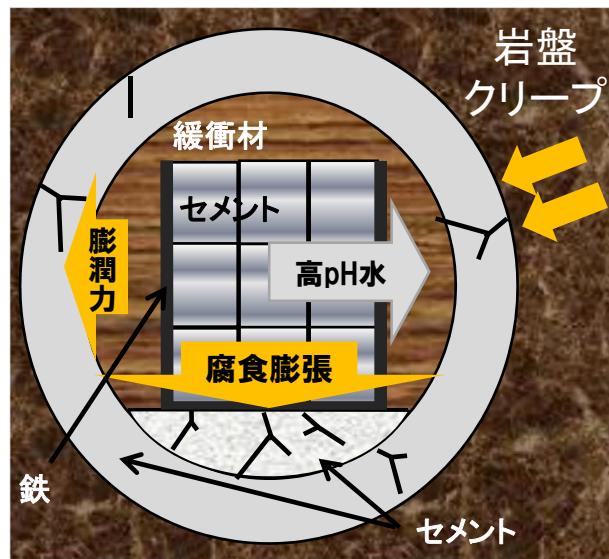
化学/力学/物質輸送連成現象
における力学挙動



周辺岩盤を含めた処分施設
の長期的な力学挙動

2. ニアフィールド長期力学挙動評価技術

2.1. 長期力学挙動解析コードMACBECE



各材料のモデル

期間	MACBECEで取り扱う力学現象例	化学反応解析からの入力情報
処分施設建設・操業時	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤の掘削による応力変化 岩盤クリープ 支保工による岩盤の支持 緩衝材の膨潤圧発生 	
処分施設閉鎖後	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤クリープ 金属の腐食膨張 変質によるセメント系材料の強度・剛性変化 セメント系材料のひび割れ 変質による緩衝材の膨潤性の低下 	<ul style="list-style-type: none"> セメントの溶脱 スメクタイト部分密度、交換性ナトリウム率変化

材料	モデル
岩盤	大久保モデル
金属材料	腐食膨張モデル
セメント系材料	変質による剛性・強度の低下+ひび割れ解放応力載荷+ひび割れによる剛性変化
緩衝材	弾粘塑性構成モデル+変質による膨潤圧低下量を等価な節点荷重として載荷
材料間	ジョイント要素

2. ニアフィールド長期力学挙動評価技術

2.2. 岩盤の力学挙動解析モデル

大久保モデル(大久保ら,1987)

- ・コンプライアンス(弾性係数の逆数)が、一軸圧縮試験等の結果から得られる物理パラメータに応じて時間の経過とともに増加すると仮定したモデル
- ・岩石の時間依存性挙動を表現

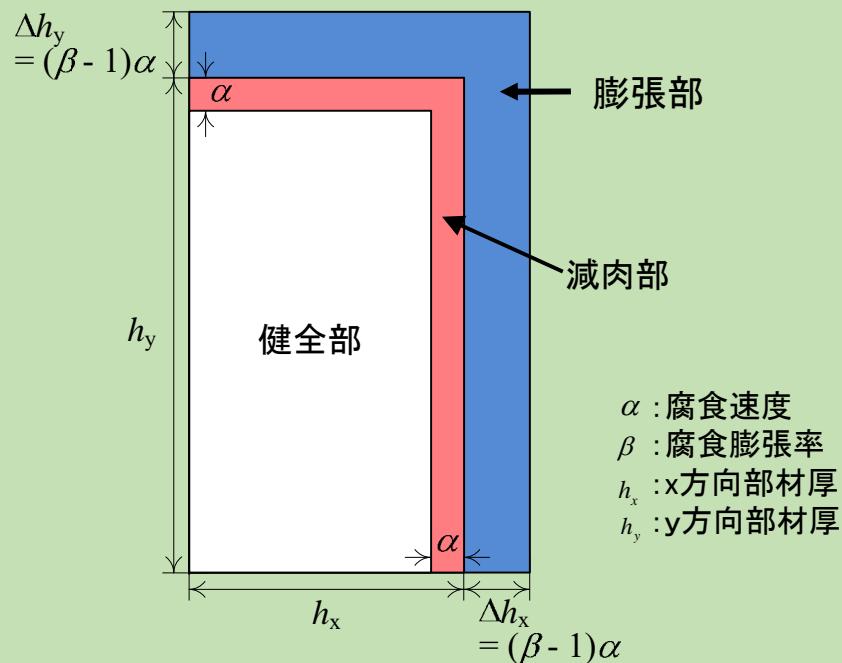
$$\frac{d\lambda^*}{dt} = a \cdot (\sigma^*)^n \cdot (\lambda^*)^m$$

- λ^* :コンプライアンスを初期値で基準化した値
 t :時間
 a :強度を表すパラメータ
 σ^* :破壊接近度
 n :時間依存性の程度を表すパラメータ
 m :延性の程度を表すパラメータ

2.3. 金属材料の力学挙動解析モデル

・腐食の進展に伴う剛性の低下、膨張を表現

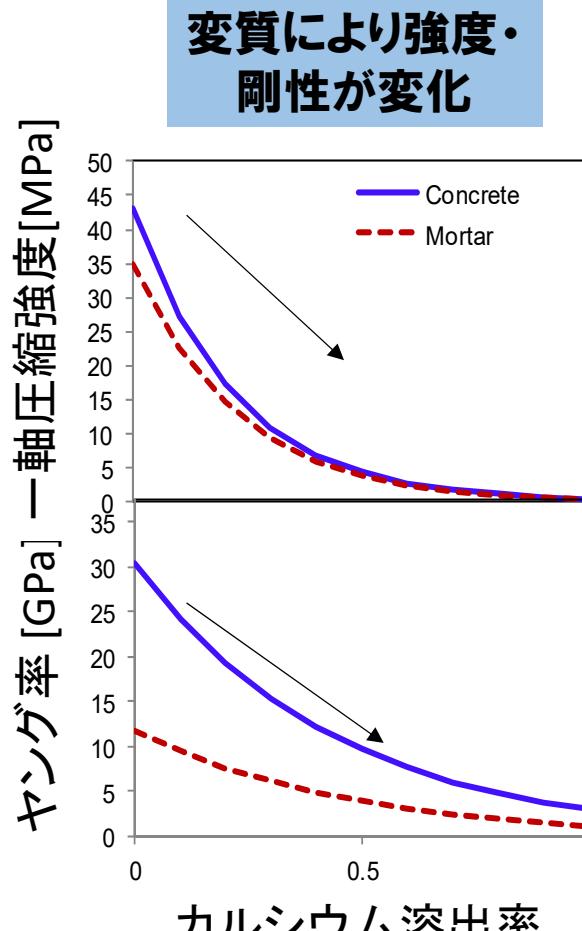
- ✓ 要素の剛性は、健全部と腐食部の割合に応じて算定
- ✓ 腐食膨張による応力増分(腐食速度、腐食膨張率から膨張ひずみ速度を算出し、それと剛性を掛け合わせて算出)を節点荷重として載荷



2. ニアフィールド長期力学挙動評価技術

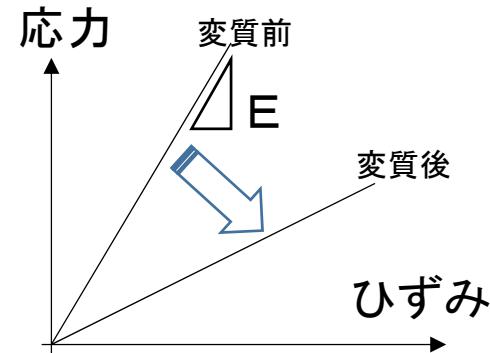
2.4. セメント系材料の力学挙動解析モデル

・変質による強度・剛性の低下およびそれに伴う変形を表現



化学反応解析
からの入力情報

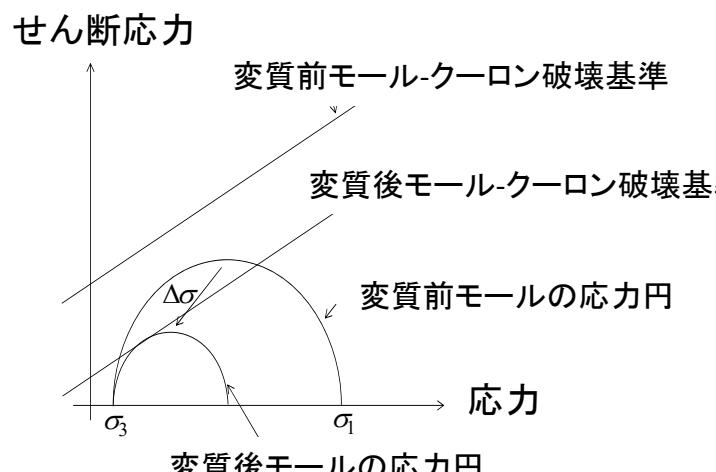
剛性低下による変形



$$\{F_c\} = \int_V [\mathbf{B}]^T [\mathbf{D}] \{\varepsilon\} dV$$

$\{F_c\}$: 等価節点外力
 $[\mathbf{D}]$: 剛性マトリックス
 $\{\varepsilon\}$: 剛性低下によって発生するひずみ
 (σ) : 応力
 $[\mathbf{B}]$: 変位からひずみを求めるマトリックス

強度低下による変形



$$\{F_e\} = \int_V [\mathbf{B}]^T \{\Delta\sigma\} dV$$

$\{F_e\}$: 等価節点外力
 $\{\Delta\sigma\}$: 超過応力

2. ニアフィールド長期力学挙動評価技術

2.4. セメント系材料の力学挙動解析モデル

・ひび割れ発生による力学特性の変化や応力状態を表現

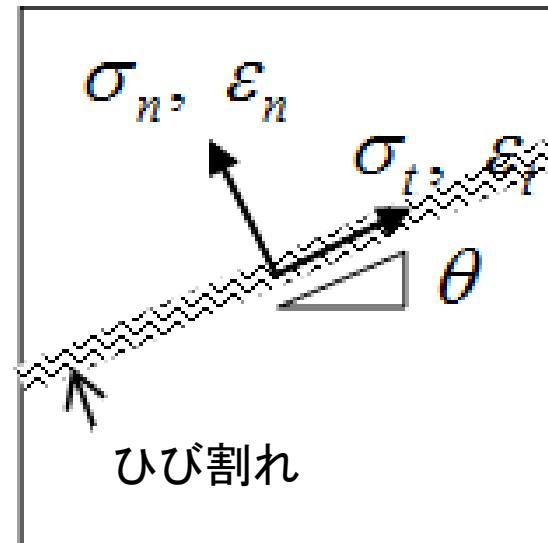
最小主応力が引張強度に達した場合

→ひび割れ判定

①ひび割れ判定要素にひび割れ解放力を載荷。

②ひび割れによる剛性変化。

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_n \\ d\sigma_t \\ d\tau_{nt} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_n & 0 & 0 \\ 0 & E_t & 0 \\ 0 & 0 & G_{nt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\varepsilon_n \\ d\varepsilon_t \\ d\gamma_{nt} \end{Bmatrix}$$



σ_n : ひび割れに直行方向の応力

σ_t : ひび割れ方向の応力

τ_{nt} : ひび割れ方向に作用するせん断応力

E_n : ひび割れ直行方向のヤング率
(割れが生じていない部位のヤング率に低減率を乗じたもの)

E_t : ひび割れ方向のヤング率
(割れが生じていない部位のヤング率と同等)

G_{nt} : せん断弾性係数
(割れが生じていない部位のせん断弾性係数に低減率を乗じ、ポアソン比を0と仮定したもの)

ε_n : ひび割れに直行方向のひずみ

ε_t : ひび割れ方向のひずみ

γ_{nt} : ひび割れ方向に作用するせん断ひずみ

2. ニアフィールド長期力学挙動評価技術

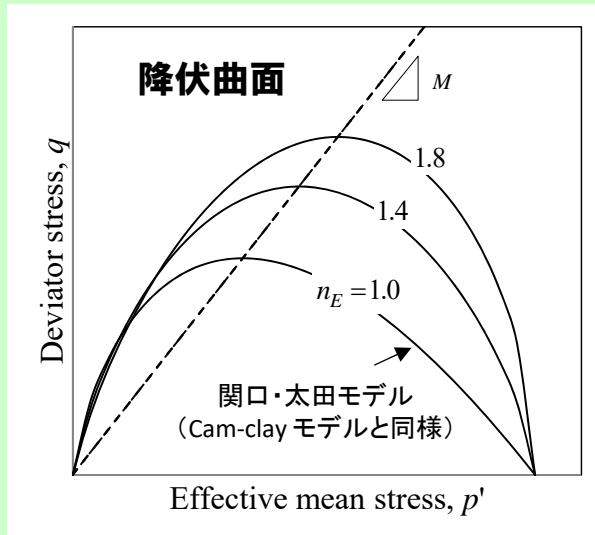
2.5. ベントナイト系材料の力学挙動解析モデル

ECモデル(大野ら,2006) : Exponential Contractancy Model

- ・コントラクタンシーの表現関数に指数関数を使用

$$\text{降伏関数: } f(\sigma', \varepsilon_v^p) = MD \ln \frac{p'}{p'_0} + \frac{MD}{n_E} \left(\frac{\eta^*}{M} \right)^{n_E} - \varepsilon_v^p = 0$$

- σ' : 有効応力テンソル
 ε_v^p : 塑性体積ひずみ
 M : 限界応力比
 D : ダイレイタンシー特性
 p' : 平均有効主応力
 p'_0 : 先行時平均有効主応力
 n_E : 降伏曲面の形状調節係数
 η^* : 関口・太田による応力比パラメータ



変質による膨潤圧低下量を等価な節点荷重として載荷 (Sahara et al. 2006)

$$\text{膨潤圧の経験式: } P_{bal} = 0.00126 \exp(6.0573 \rho_{sme}) [L(ESP) \{J(\rho_{sme}) - 1\} + 1]$$

$$L(ESP) = 2.985 ESP - 0.364$$

$$J(\rho_{sme}) = 2.1272 \rho_{sme}^2 - 6.126 \rho_{sme} + 5.3114$$

ESP : 陽イオン交換容量に対するナトリウムの割合

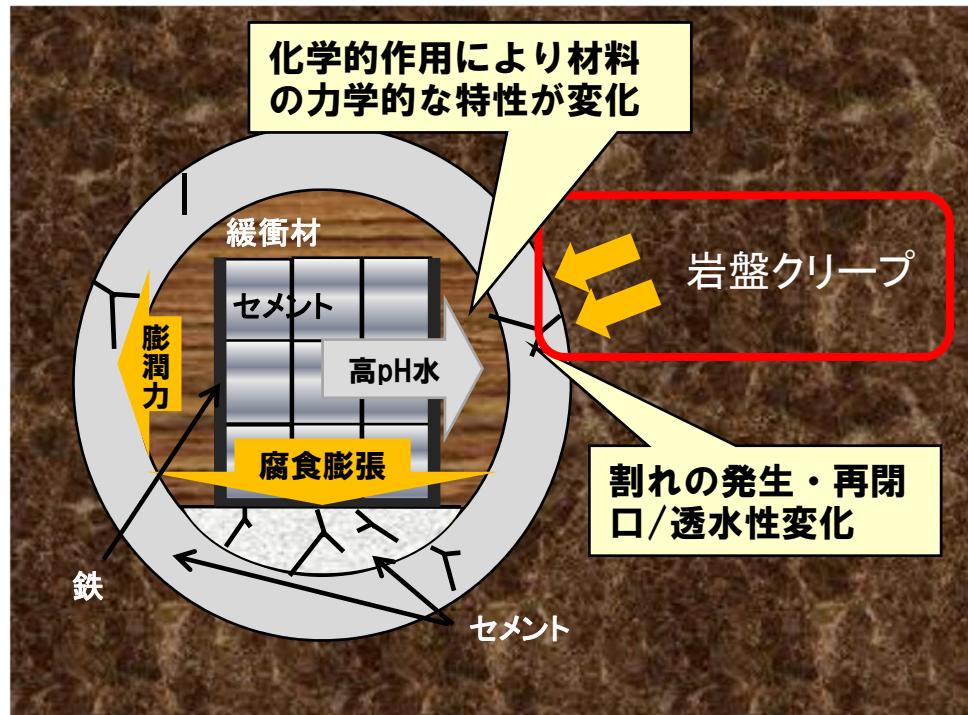
ρ_{sme} : スメクタイトの含有密度

化学反応解析
からの入力情報

3. TRU廃棄物処分施設の長期力学解析例

3.1. 岩盤クリープによる処分施設の変形量の評価

第2次TRUレポートでの取り扱い



①岩盤クリープ解析
(人工バリアは弾性体としてモデル化)



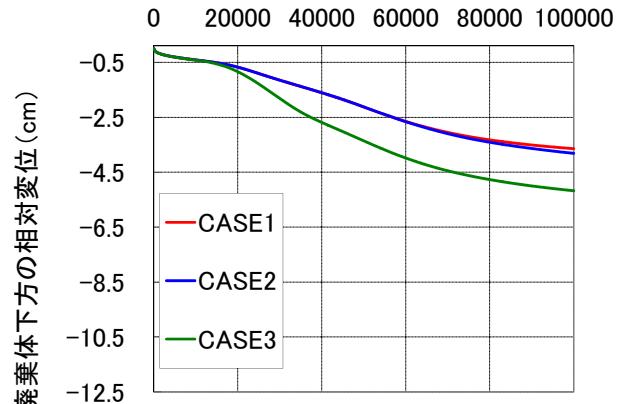
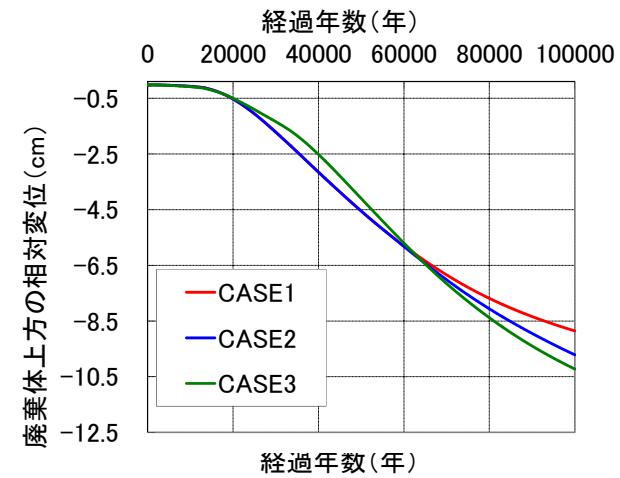
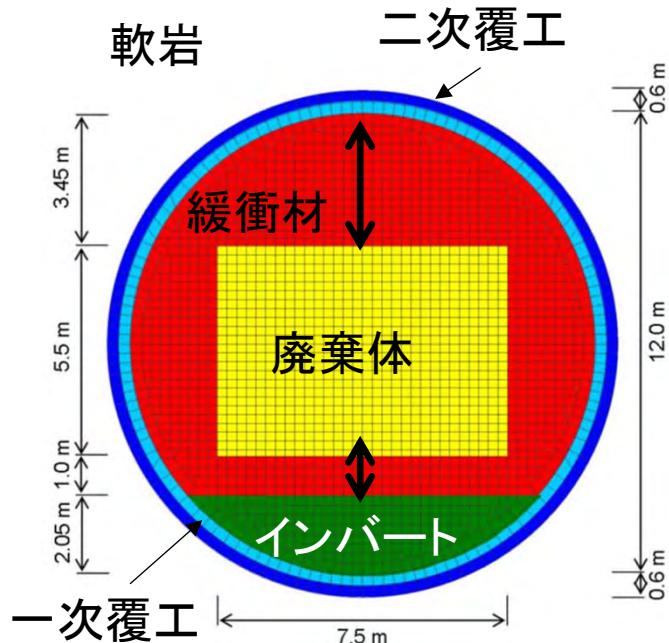
②セメント系材料やベントナイト系材料の化学的変遷を考慮した処分施設の変形解析

第2次TRUレポート:

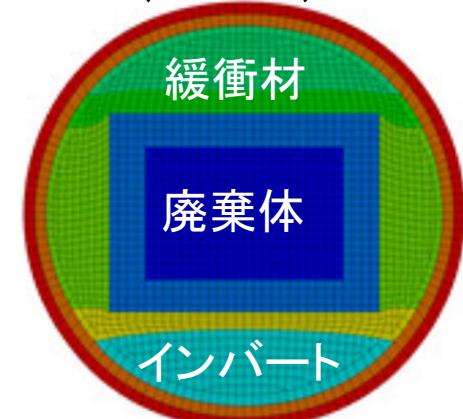
電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構:TRU廃棄物処分技術検討書 -第2次TRU廃棄物
処分研究開発取りまとめ-, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, 2005

3. TRU廃棄物処分施設の長期力学解析例

3.1. 岩盤クリープによる処分施設の変形量の評価



10万年後の変形図
(CASE3)



(変形量10倍表示)

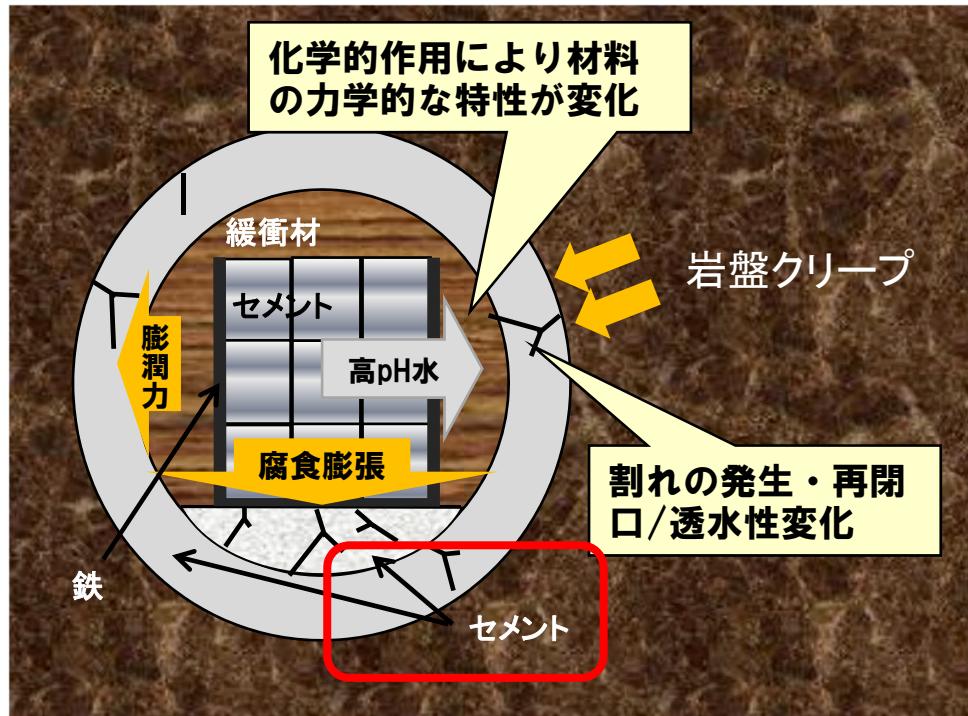
	10万年後の鉛直内空変位(cm)
CASE1	12.0
CASE2	13.0
CASE3	14.7

解析ケース	緩衝材	セメント系材料
CASE1	変質無	廃棄体領域の外側領域の1mでカルシウムが25%溶出, 一次覆工および二次覆工のカルシウムがすべて溶出
CASE2	イオン交換	
CASE3	スマクタイトの溶解	

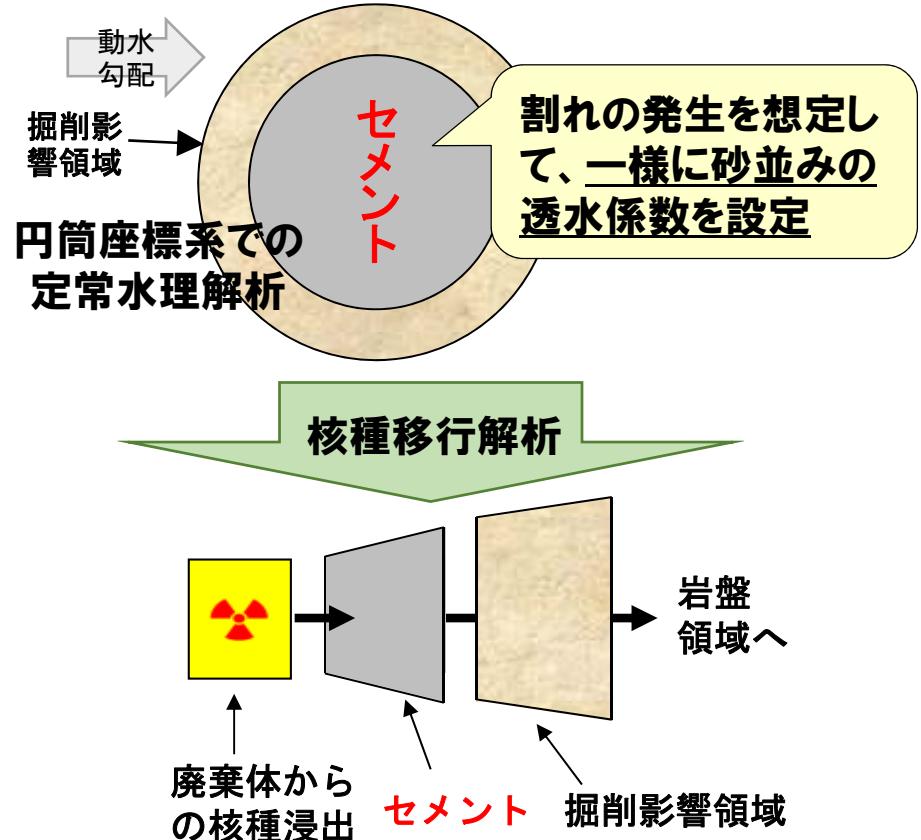
第2次TRUレポートの評価
(約30cm)と比較して半分程度となることが示された

3. TRU廃棄物処分施設の長期力学解析例

3.2. セメントの割れを伴う挙動が透水性の時空間変化に与える影響



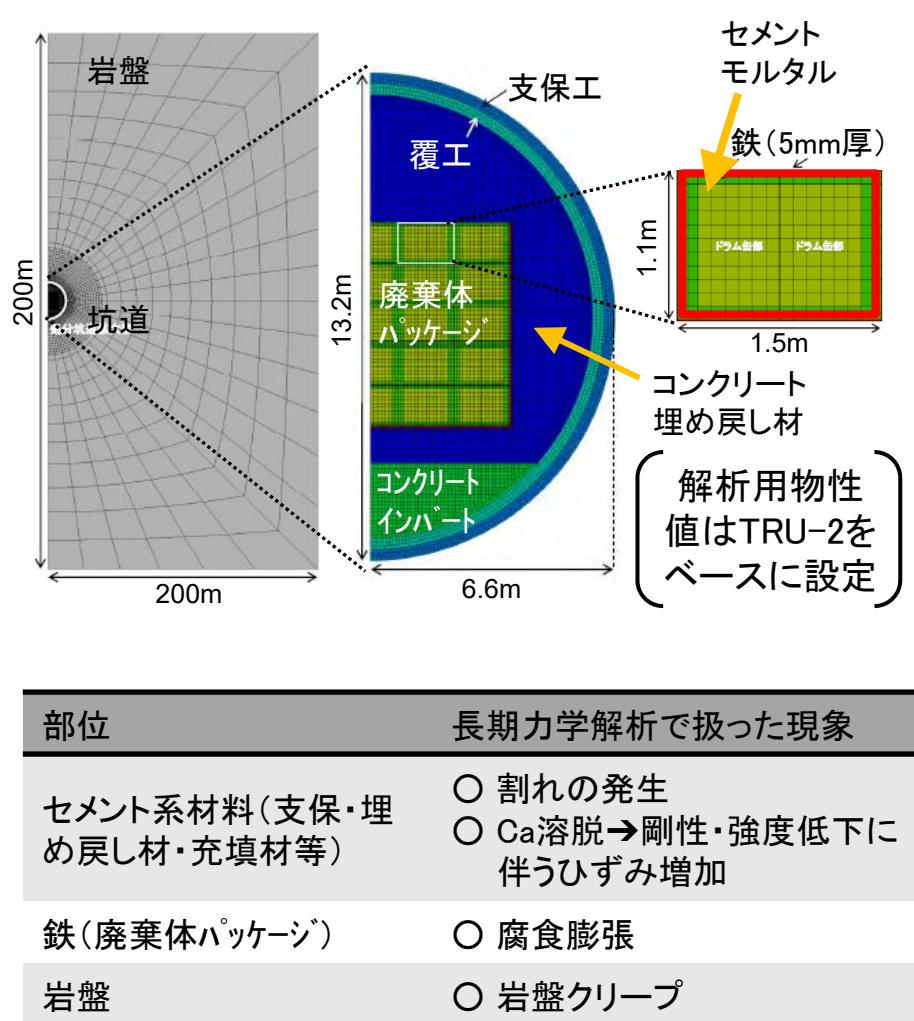
第2次TRUレポートでの取り扱い



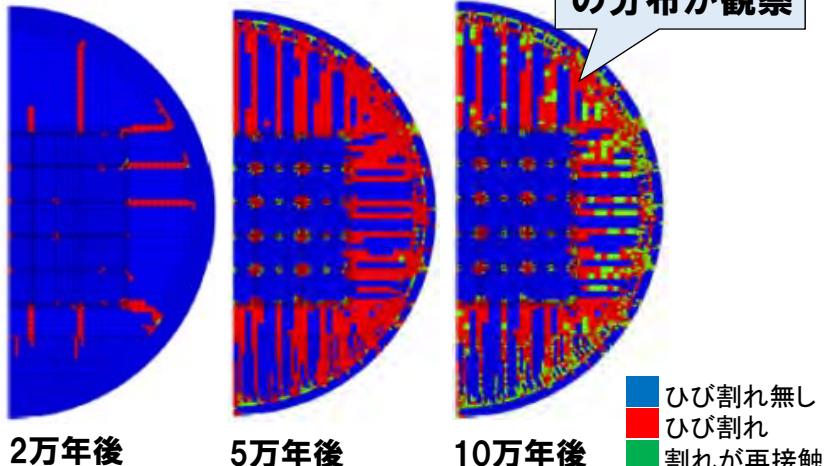
人工バリアにおける1次元核種移行解析の概念

3. TRU廃棄物処分施設の長期力学解析例

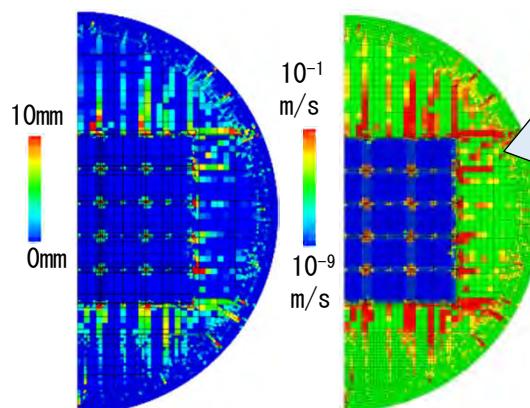
3.2. セメントの割れを伴う挙動が透水性の時空間変化に与える影響



ひび割れ発生挙動
局所的な割れの分布が観察



割れの開口幅
透水係数



割れの発生・材料の変質に対応した透水係数の評価が可能

場の状態変遷における局所的な割れの発生・進展とそれによる透水係数の空間分布の評価が可能に

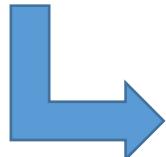
これまで

○地層処分という技術の成立性や、その信頼性を示すこと。

今後は

○保守的に簡単化・様式化された評価手法に加え、より現実性のある評価手法の開発が必要

→ 複合現象評価技術の開発



長期力学挙動評価技術の開発を実施

- セメント系材料やベントナイト系材料の**化学的変遷**に伴う力学特性変化を取り扱うことが可能
- 周辺岩盤を含めた**処分施設の長期的な力学挙動**を解析し、**処分施設の変形**とそれに伴う**物質輸送特性の変化**を評価することが可能

複合現象評価技術開発においては、**多様な専門家**（地質、化学、材料、土木、水理、微生物、計算工学 etc）の知識を集約して、研究開発を実施していくことが必要。

従って、多くの研究分野にまたがる裾野の広い研究開発であり、みなさんのご協力が求められている。

ご清聴ありがとうございました。

本研究は、経済産業省からの委託事業である「地層処分技術調査等事業 セメント材料影響評価技術高度化開発」（平成23～26年度）および「地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発」（平成27～29年度）の成果の一部を含むものである。