

地盤材料学

早稲田大学 理工学術院
創造理工学部 社会環境工学科
小峯秀雄

コンテンツ

- 地盤工学の4つの役割
- 地盤材料学とは？
- 材料を設計するとは？
- 高レベル放射性廃棄物地層処分へのベントナイト系緩衝材の設計を例に
- 福島第一原子力発電所の廃止措置で求められる要件と材料設計の案・事例

地盤工学の4つの役割

地盤工学の4つの役割

- **地盤力学**
 - 発電所基礎の安定性, 補強の必要性など
- **地盤材料学**
 - 放射線遮蔽材, 遮水材, 補強材など
- **地盤環境学**
 - 作業環境保全, 環境影響評価など
- **地盤施工学**
 - 事案に応じた材料選定, 施工法選定, 施工の観点からの技術的必要要件の提示など

廃炉地盤工学



廃棄物処分

地盤施工学

地盤力学

1. 現状の力学的安定性評価
2. さらなる自然災害への対策設計
3. 仮設時の力学的安定性
4. ...

地盤材料学

1. デブリ取出し補助材料
2. さらなる自然災害への対策設計
3. 仮設時の力学的安定性
4. 新材料開発...

地盤環境学

1. 作業環境の安全性確保・モニタリング
2. 地下部における汚染水の状況評価と将来予測
3. 対策工の実施
4. ...

地盤材料学とは？

地盤材料学

- 「土」は、材料という認識を.
- 実績の観点からの再認識
 - フィルダム, 河川堤防, コンクリートの骨材など
- 現場で求められる要件に応じた, 「材料の選定」, 「配合」, 「乾燥密度」, 「含水比」, 「寸法」を設計する.

地盤材料学の大別

- (新)材料開発 今回は

- 材料仕様設計, 配合設計



施工技術

地盤施工学

含水比と含水率

- 農学分野では、「含水率」を使うことが多い。
- 自然の土・土壌において、何割が水分か？という視点と思う。
- 土木工学では、「含水比」を使うことが多い。
- 乾燥した土粒子の質量に対し、何割の水を混ぜるかという視点と思う。
- このことから、そもそも、「土を材料に」という視点があったのでは。
 - 水/セメントも同様ではないでしょうか。

材料を設計するとは？

材料設計の全体概念

- 材料を適用する場面の想定
- その場面の課題の明確化
- 課題解決に求められる材料への要求性能の明確化
- 要求性能達成を定量化するための特性値の選定
- 特性値と材料状態・配合との関係の明確化
 - 実験データ取得, メカニズムに基づく相関関数化
- 材料仕様設計フローの構築

講演者の経験では

- 揚水発電用フィルダムのコア材設計
- 石炭灰灰捨て地の遮水工設計
- 火力発電所内配管周りの埋戻し材設計
- 一般・産業廃棄物処分施設の遮水工設計
- 高レベル放射性廃棄物地層処分のベントナイト系緩衝材の材料仕様設計
- 低レベル放射性廃棄物処分施設の砂・ベントナイト混合土の材料仕様設計
- などなど, 最新の情報も

講演者の経験を例に(1/5) ～材料設計の全体概念～ 揚水発電用フィルダムを例に

- 材料を適用する場面の想定
 - 貯水用ダムの遮水材として適用
- その場面の課題の明確化
 - 材料を現地で採取できるか？外部から搬入しなければならないか？
 - 貯水できる材料か？
 - 建設に必要な量があるか？
 - ……

講演者の経験を例に(2/5) ～材料設計の全体概念～ 揚水発電用フィルダムを例に

- 課題解決に求められる材料への要求性能の明確化
 - 現場採取を可能とするための現地調達性
 - 貯水機能を発揮するために要求される遮水性
 - 大規模施設建設を可能とするために要求される材料量の確保
 - 設定された工期内での完了のために要求される施工性
 - ……

講演者の経験を例に(3/5) ～材料設計の全体概念～ 揚水発電用フィルダムを例に

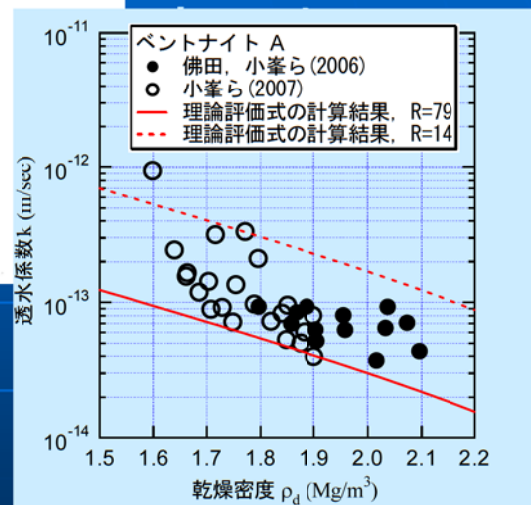
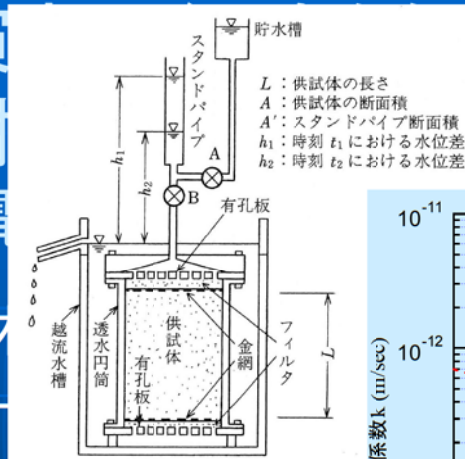
- 要求性能達成を定量化するための特性値の選定
 - 現場調達性を定量化するための「材料賦存分布」
 - 遮水性を定量化するための「透水係数」
 - 遮水性担保の可能性を定量化するための「粒度分布」などの基本的性質
 - 施工性を定量評価するための「締固め特性」

講演者の経験を例に(4/5) ～材料設計の全体概念～ 揚水発電用フィルダムを例に

- 特性値と実験データ

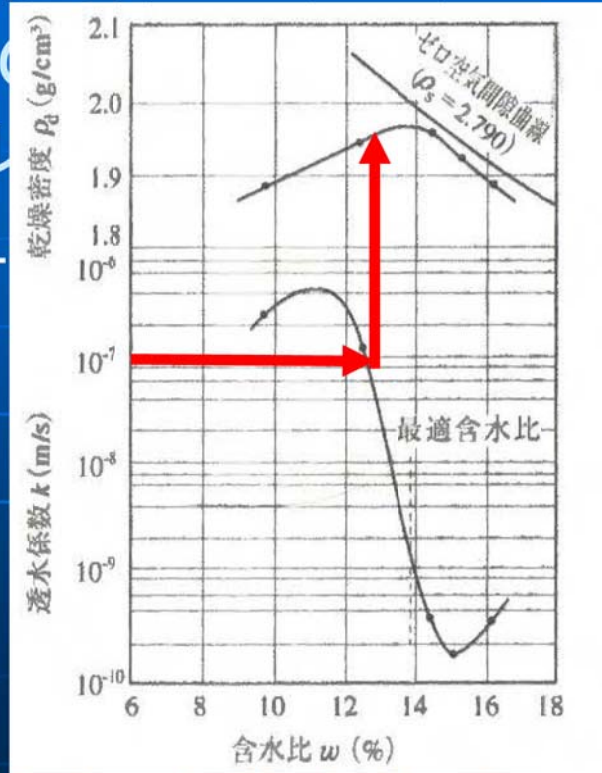
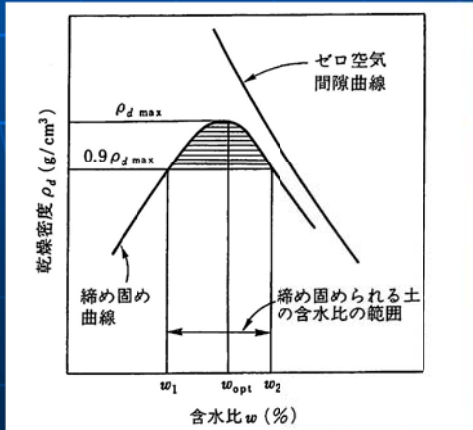
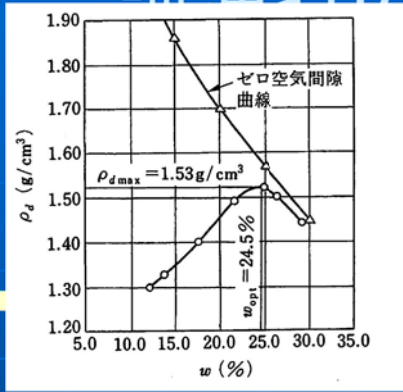


Henry Darcy



$$k = \frac{1}{k_0 S^2} \frac{\gamma_w}{\eta} \frac{e^3}{1+e}$$

講演者の経験を例に(5/5)



高レベル放射性廃棄物地層処分の
ベントナイト系緩衝材の設計を例に

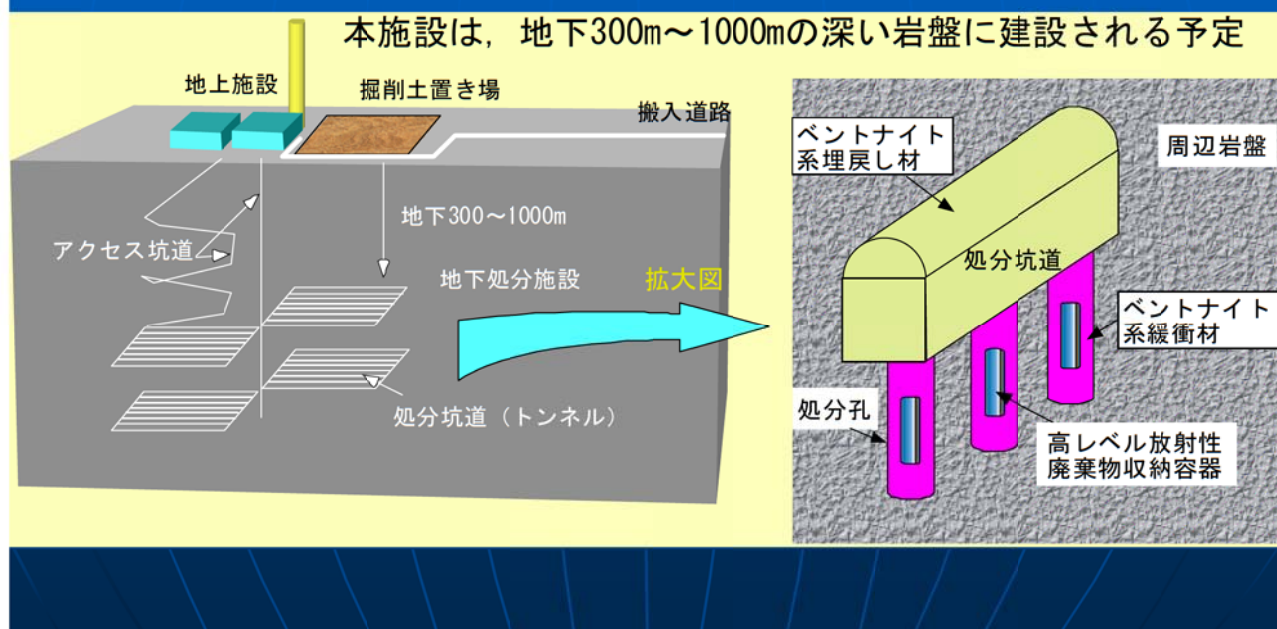
今まで築造したことがないプロジェクトではどうするか？

- 前章では、揚水発電用フィルダムのコア材を例に.
- 数多くの事例があり、それらに基づいて、構築されてきたと考える.
- 福島第一原子力発電所の廃止措置で求められる地盤材料学は・・・
- 経験がない.
- 似た事例もない.
-

高レベル放射性廃棄物地層処分

- 1987年に担当した本プロジェクトでも.
- まったく、同様でした.
- では、何から始めたかを参考事例として
 - 材料設計者が、プロジェクトで起きると想定される事象を設定し、求められる要件・要求性能を明確にし、それに基づき基本設計をするしかない.
 - いわゆる「性能設計」である.

高レベル放射性廃棄物地層処分施設

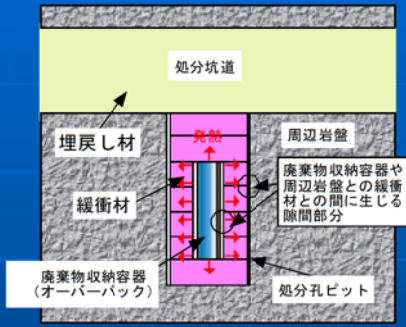


設計における緩衝材の要件項目 設定のポイント

- 緩衝材の設計においては、周辺での現象を時間経過にしたがって把握しておく必要がある。
- 要件項目も、検討すべき期間とあわせて示す必要がある。

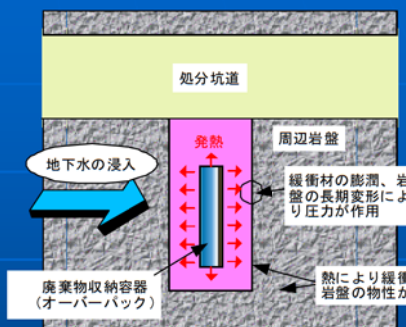
緩衝材を取り巻く事象

「処分坑の建設開始」～「廃棄物収納容器と緩衝材の位置」まで

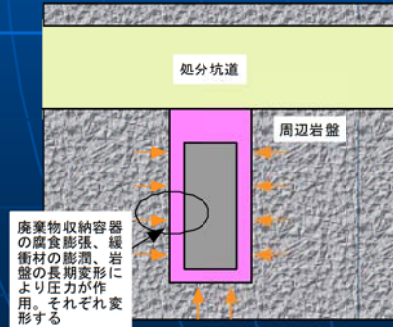


緩衝材には、この隙間部分を膨潤変形により充填する役割が期待されている。この役割は自己シール性と呼ばれている。

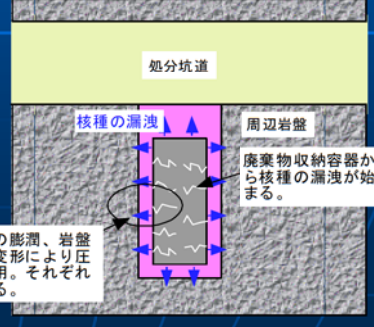
「廃棄物収納容器と緩衝材の位置」～「緩衝材の再冠水」まで



「緩衝材の再冠水」～「廃棄物収納容器から核種漏洩の開始」まで



「廃棄物収納容器から核種漏洩の開始」以降



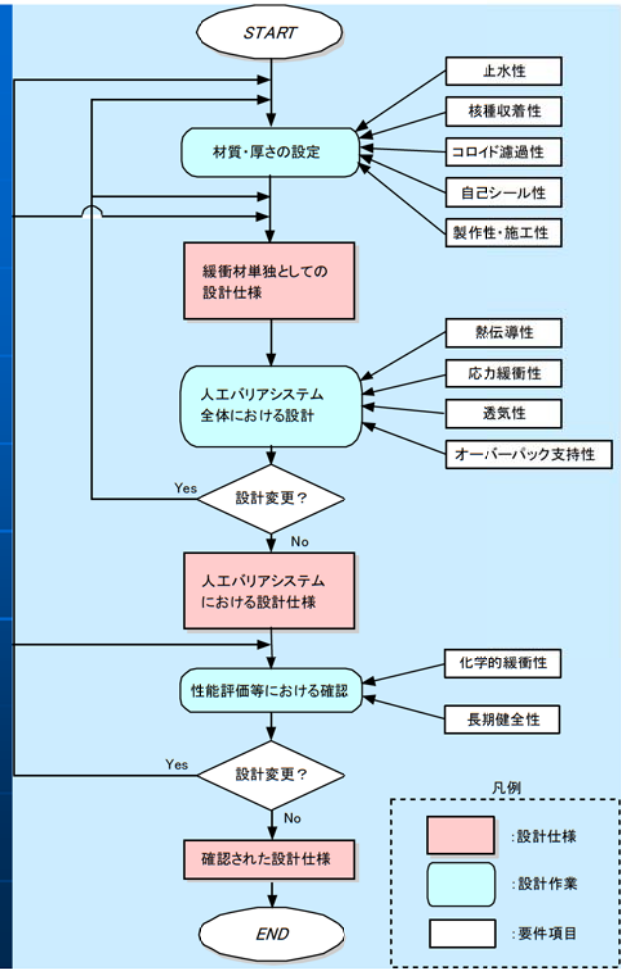
緩衝材の要件項目

緩衝材の要件項目			時間軸 (年)			
要件項目	要件項目内容	カテゴリ※	0	100前後	250	1,000
			C/P設置前 作業期間	0/P設置	緩衝材冠水 地下水O/P接触	0/Pの設計 対象期間
			← 不飽和		飽和 →	
①低透水性	地下水の移動を抑制すること	A				
②自己シール性	緩衝材ブロック間および緩衝材と周辺岩盤とのすき間を充填すること	A				
③核種収着性	核種移行を遅延すること	A				
④熱伝導性	廃棄体の発熱によりバリア機能が低下するほどのバリア内の温度上昇を抑制すること	B				
⑤化学的緩衝性	ベントナイト間隙水のpHを適正に維持すること	C				
⑥オーバーバック支持性	オーバーバックを固定支持すること	B				
⑦応力緩衝性	オーバーバック腐食生成物により生じる応力、周辺岩盤から人工バリアにかかる応力を緩和すること	B				
⑧透気性	オーバーバックの腐食により生成するガスによる、人工バリア破過および核種放出率の上昇を防止すること	B				
⑨コロイド透過性	コロイドを濾過すること	A				
⑩長期健全性	長期にわたりバリア機能が低下するほど変質、流出しないこと	C				
⑪製作・施工性	製作、設置上の容易性、経済性を満足すること	A				

※ カテゴリA：緩衝材単独として設計する要件項目。
 カテゴリB：人工バリアシステム全体の設計において考慮する要件項目。
 カテゴリC：性能評価等において確認する要件項目。

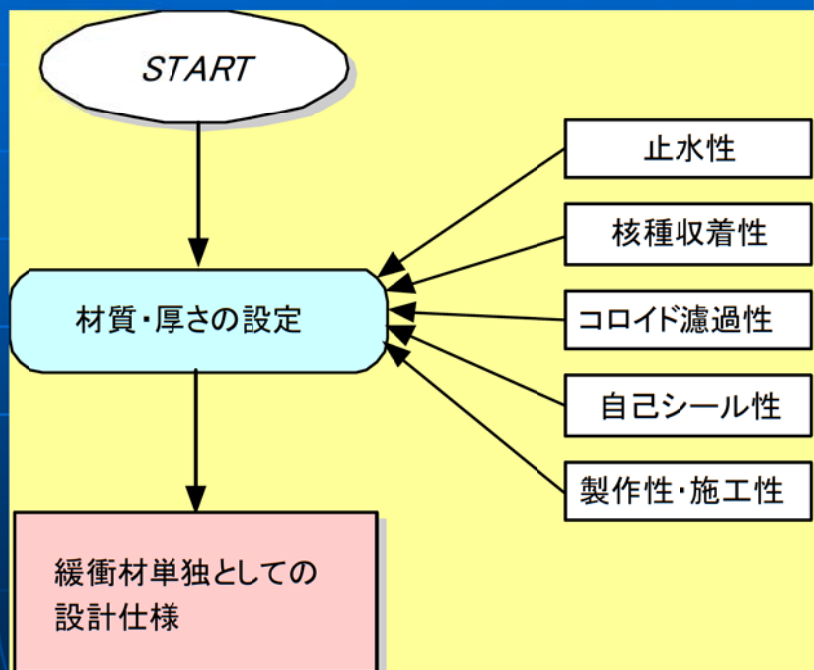
緩衝材の設計 フロー案

- 具体的にコントロールできる設計パラメータは緩衝材の厚さ, 密度, 材質(ベントナイトの種類, 配合率等).
- 現段階において, 要件項目すべてについて定量的な値が示されていない.



緩衝材単独としての設計の試み

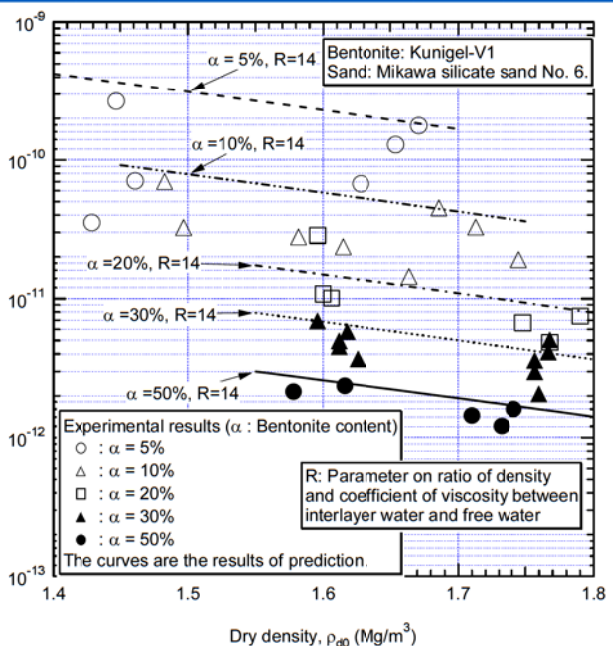
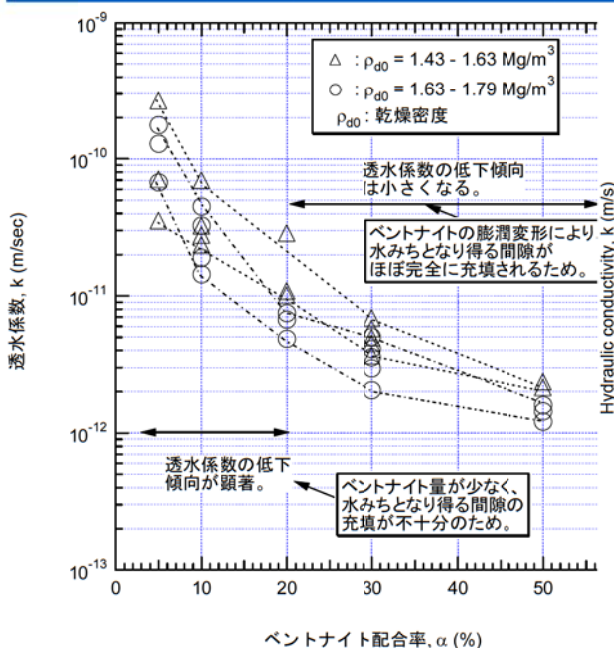
- 低透水性
- 核種収着性
- コロイド濾過性
- 自己シール性
- 製作性・施工性



低透水性については

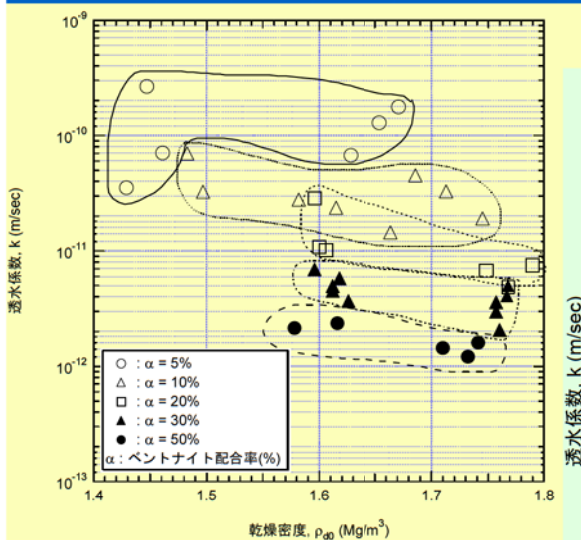
- 緩衝材が拡散場を保持することとした。
- そのためには、 $k=1 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$ よりも小さい値であれば十分条件(ペクレ数が1より小さい)を満足するとした。
- 設計透水係数は、要求される上記の透水係数よりも2オーダー低い、 $k=1 \times 10^{-10} \text{cm/sec}$ とした。透水係数が試験法の違い等によりバラツキやすいこと、精度の高い緩衝材の製作技術がまだ確立していないことなどを考慮し、2オーダー低い透水係数を設定した。

基本的な透水特性の把握

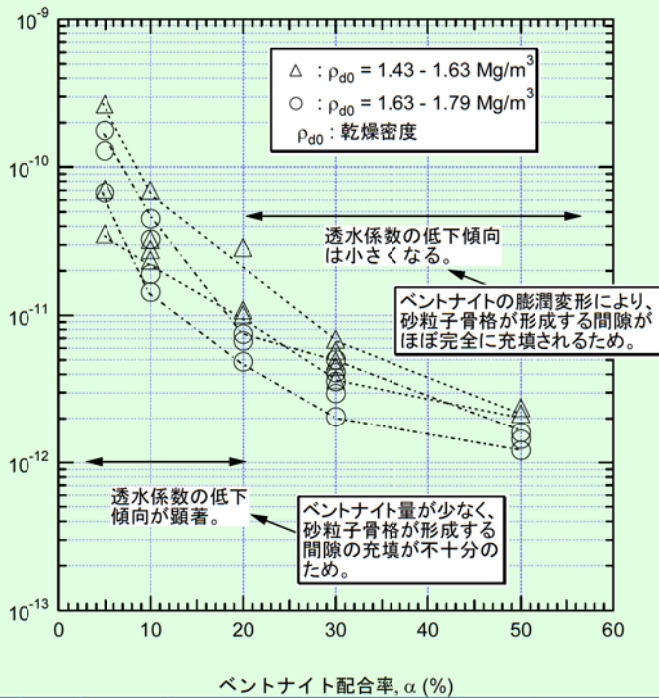


基本的な透水特性

透水係数とベントナイト配合率



透水係数と乾燥密度



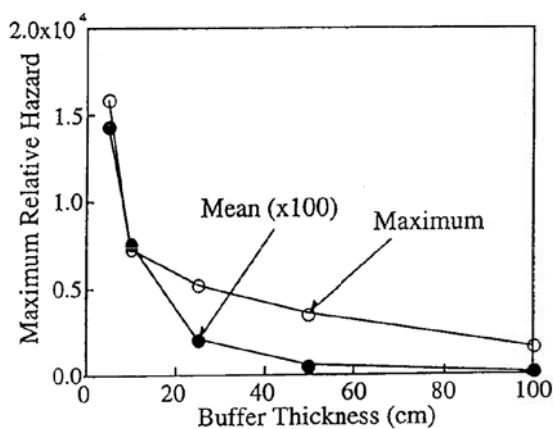
低透水性の観点からの 緩衝材の仕様は

- ベントナイト配合率が30%程度以上あれば、 $1 \times 10^{-10} \text{ cm/sec}$ と同等のオーダーの透水係数が得られる。
- 緩衝材の乾燥密度が 1.2 Mg/m^3 以上であれば、 $1 \times 10^{-10} \text{ cm/sec}$ と同等のオーダーの透水係数がほぼ確保できる。

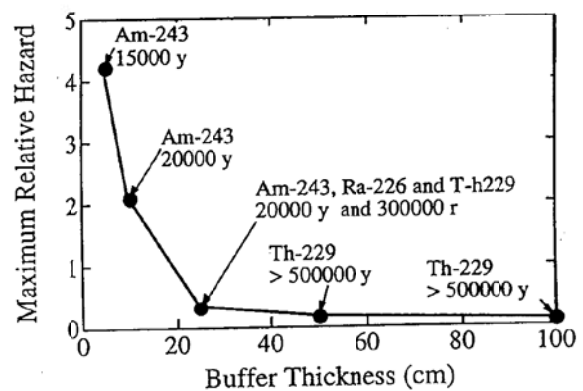
核種移行の観点からの仕様は

- 緩衝材の厚さを変化させて、緩衝材からの核種漏出挙動の解析例がある(塚本他, 1997). その結果, 緩衝材が核種漏出に対し有効に機能するためには, 数十cm程度の厚さが必要である.
- 現在は, この厚さを30cmとされている.

核種漏洩と緩衝材厚さ



パラメータの分布を考慮した場合の緩衝材厚さと核種漏洩率の最大値との関係

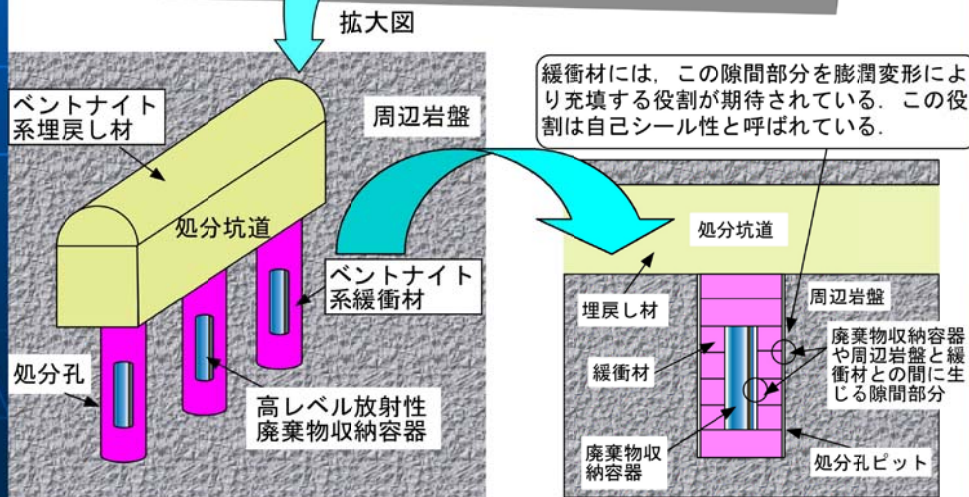
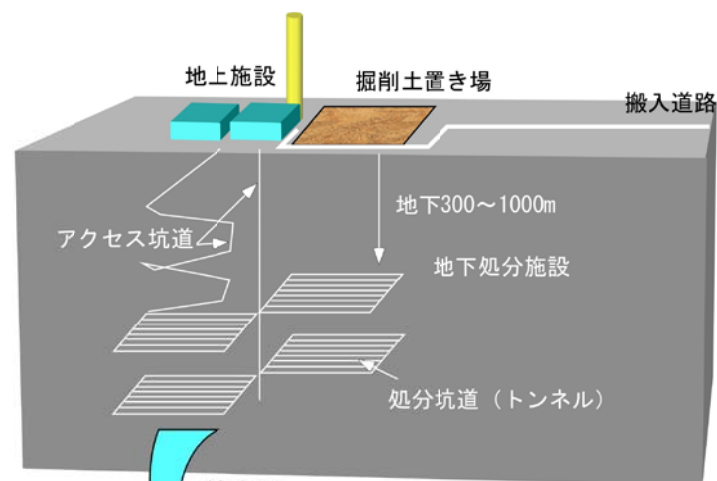


固定したパラメータを用いた場合の緩衝材厚さと核種漏洩率の最大値との関係

コロイド濾過性の観点からは

➤ Kurosawa
らの研究
(1997)が、
有効なコロイ
ド濾過性が
機能する条
件を提示して
いる。

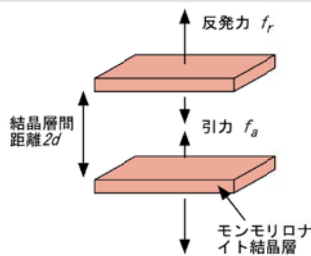
乾燥密度 (Mg/m ³)	ベントナイト配 合率(%)
1.2	約 50%以上
1.4	約 30%以上
1.6	約 25%以上
1.8	約 15%以上



自己シール性の観点からは

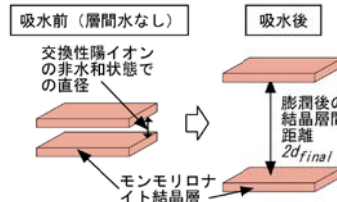
- 緩衝材と周辺岩盤の間および緩衝材とオーバーパックの間に生じる隙間を、緩衝材の膨潤変形により充填することとし、かつ隙間を充填した後になお、緩衝材は1MPaの圧力を発生しているときに有効な自己シール性を発揮すると仮定。

モンモリロナイト結晶と層間に作用する力の概念



モンモリロナイト結晶層間に作用する力の算出式
(拡散二重層理論式)

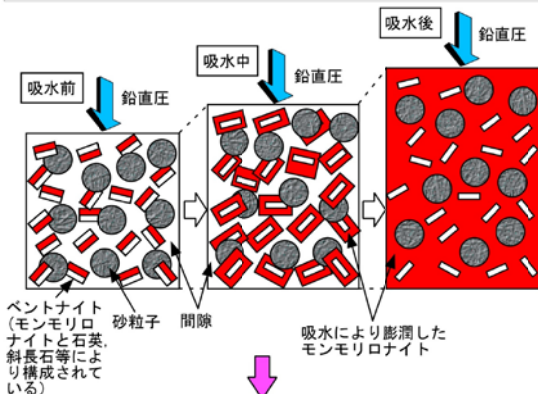
結晶レベルから見たモンモリロナイトの膨潤体積ひずみ



モンモリロナイト結晶レベルの膨潤変形の評価式
(小峯・緒方の提案式)

ベントナイトの主要交換性陽イオンであるNa, Ca, K, Mgの個数、イオン半径、価数などに関するパラメータを用い、陽イオンの種類と組成を考慮

緩衝材・埋戻し材中のモンモリロナイトの膨潤挙動のイメージ

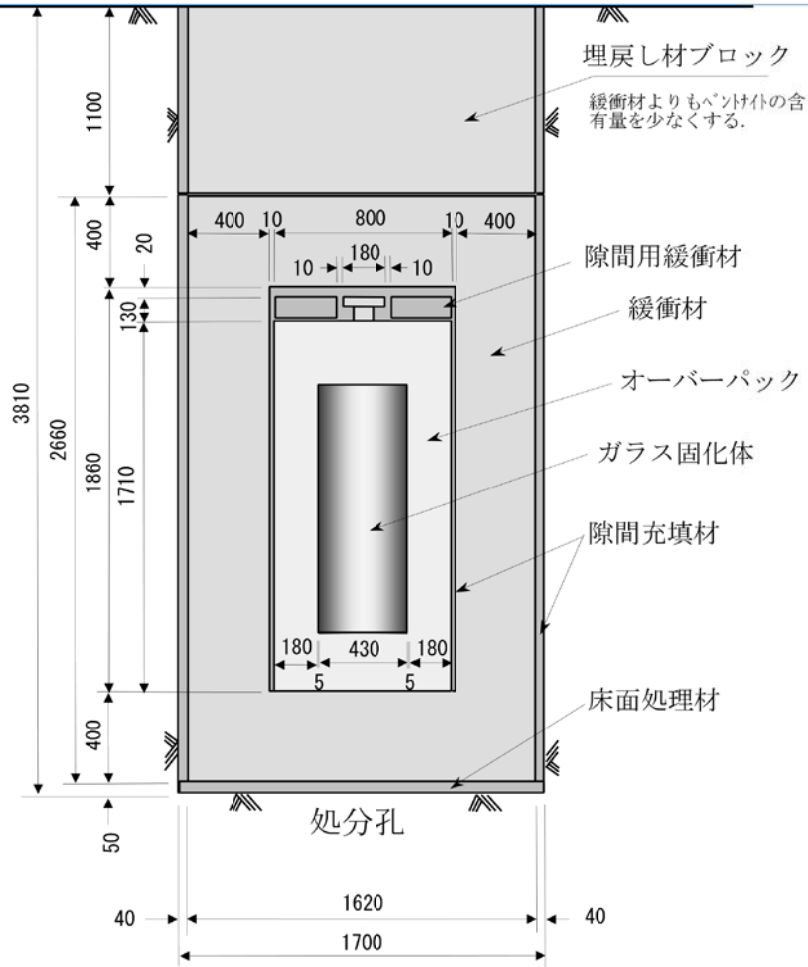


緩衝材・埋戻し材の膨潤変形とモンモリロナイト結晶レベルの膨潤変形を関係づける評価式
(小峯・緒方の提案式)

砂とベントナイトの質量比率に関するパラメータを導入し、配合割合を考慮

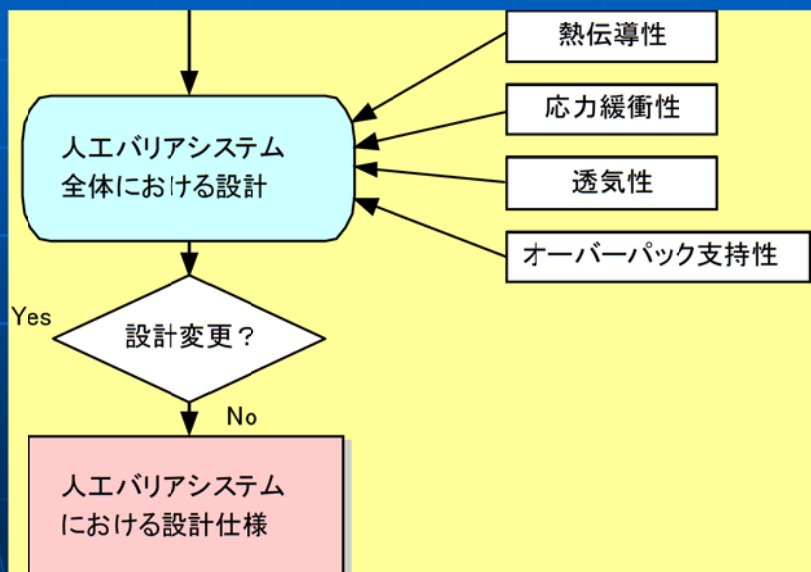
これらの理論式と提案式を組み合わせることにより、緩衝材・埋戻し材の膨潤特性理論評価式を提案

緩衝材仕様



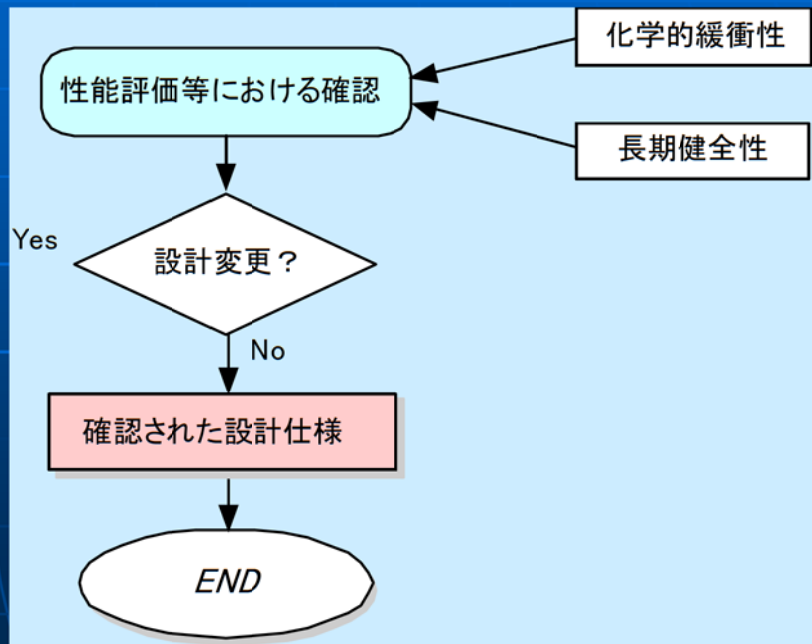
人工バリアシステム全体における設計の検討

- 熱伝導性
- 応力緩衝性
- 透気性
- オーバーパック支持性

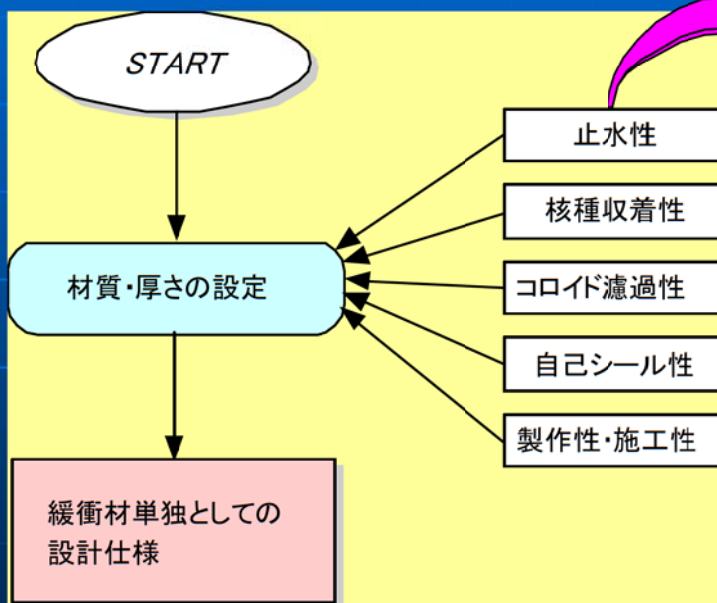


性能評価などによる確認

- 化学的緩衝性
- 長期健全性



考えられる検討課題(1)

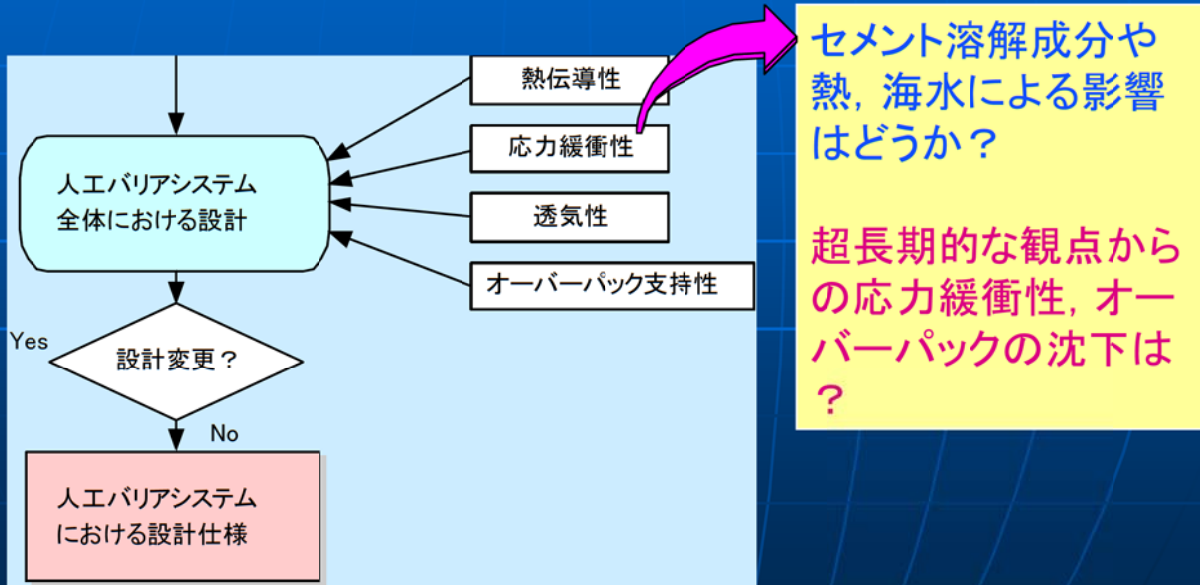


セメント溶解成分や熱、海水による止水性、核種収着性への影響はどうか？

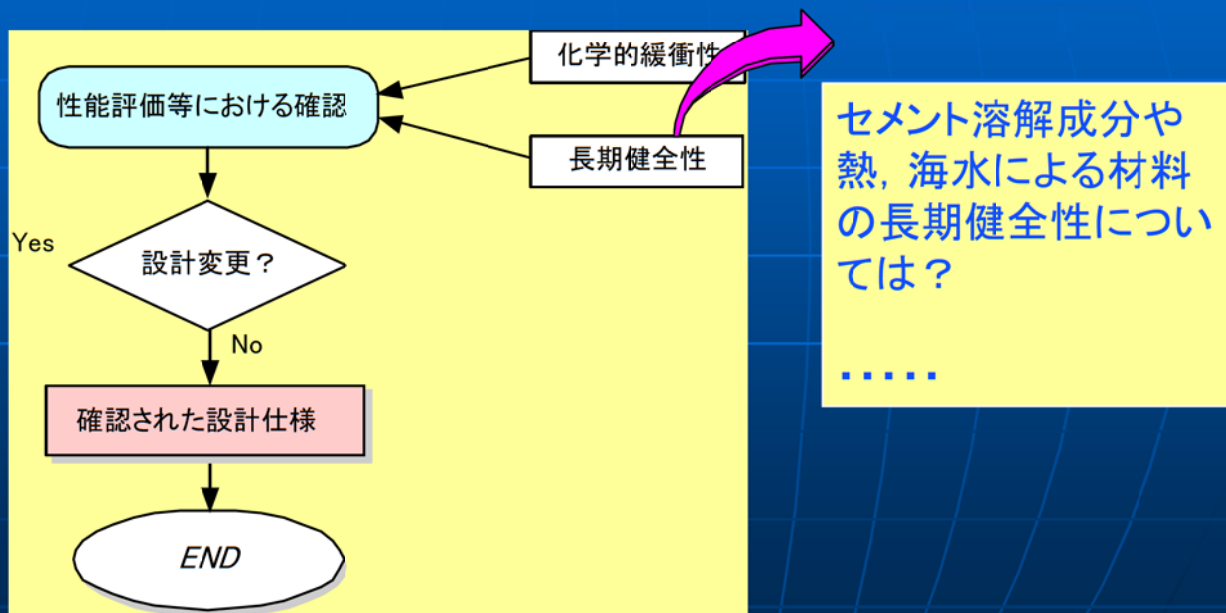
自己シール性の定量的評価は？
緩衝材の流出はどうか？

緩衝材の製作方法は？

考えられる検討課題(2)



考えられる検討課題(3)



吉川絵麻氏：早稲田大学学位請求論文から

福島第一原子力発電所の廃止措置で求められる要件と材料設計の案・事例

複数の特性を有する 超重泥水の合理的な配合設計

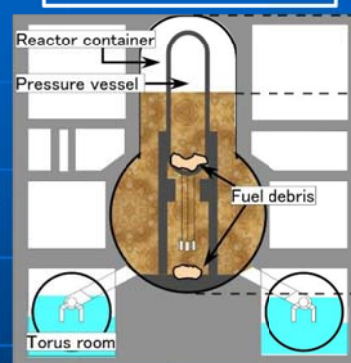
既往の知見・技術「地盤安定液」



- ・水、分散剤
- ・パライト
- ・ベントナイト

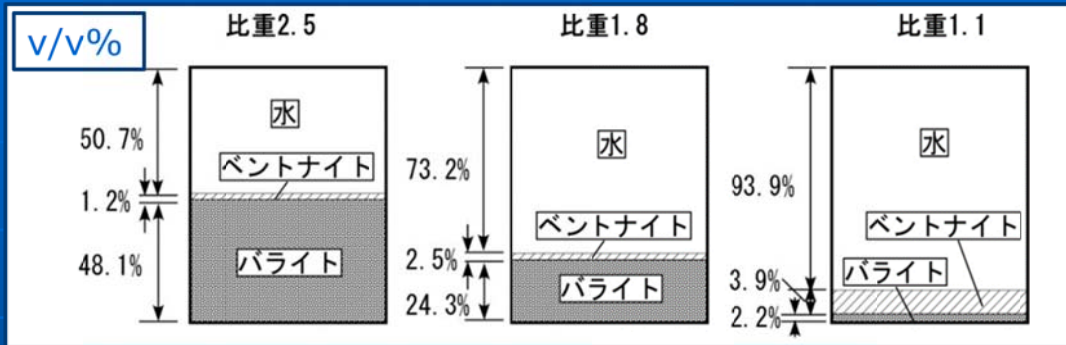
充填

事故原子炉の廃炉



特性	廃止措置に対して有効な効果
高流動性	充填施工，燃料デブリや切削粉の取出し媒体
粘性，低透水性	汚染水漏洩の抑制
高比重	ガンマ線遮蔽（作業被ばくの回避，機械の長寿命化）
高含水	中性子線遮蔽，粉塵飛散防止

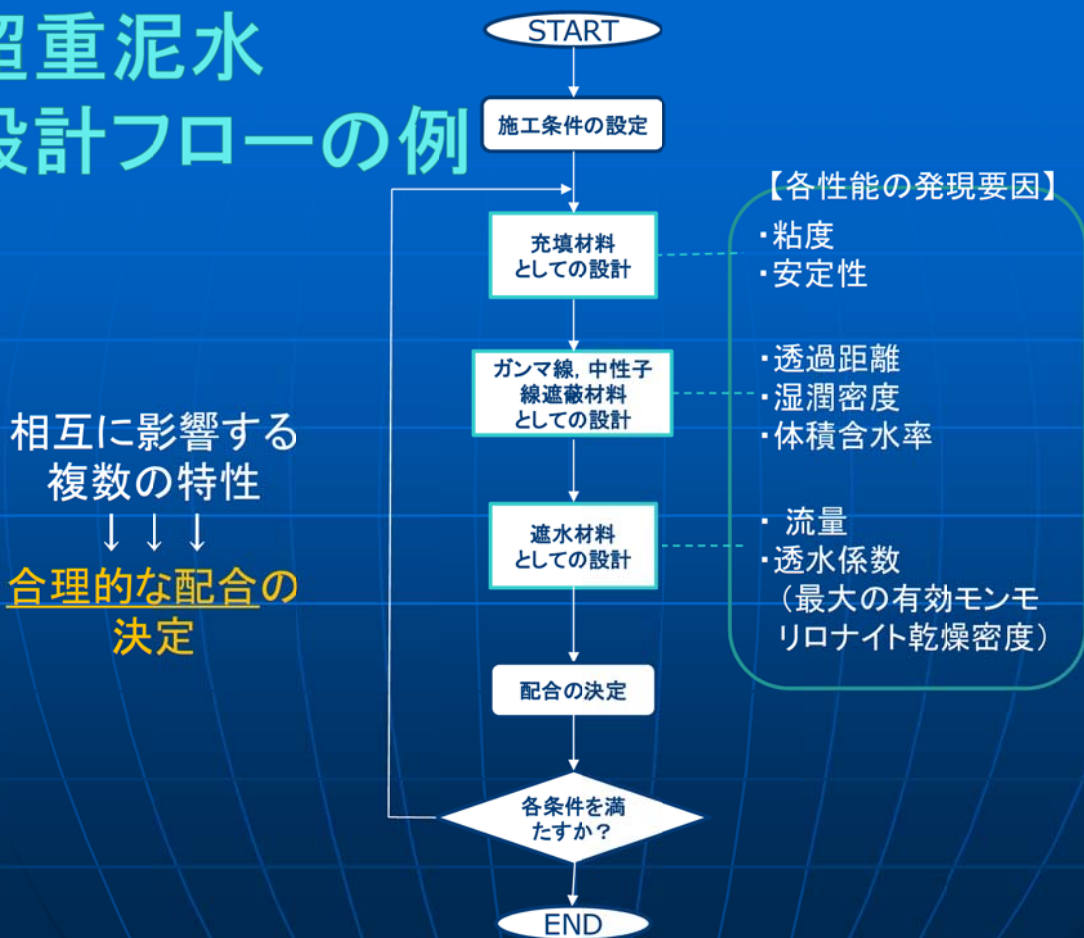
超重泥水の配合例



目標比重	2.5	1.8	1.1
含水比 $w(\%)$	24.6	67.1	477.4
湿潤密度 ρ_t (Mg/m^3)	2.58	1.80	1.11
乾燥密度 ρ_d (Mg/m^3)	2.07	1.08	0.19
間隙率 $n(\%)$	50.7	73.2	93.9
有効モンモリロナイト密度 ρ_{em} (Mg/m^3)	0.0352	0.0486	0.0576

⇒配合によって特性が大きく異なる。

超重泥水 設計フローの例



設計条件の例

【要求される条件】

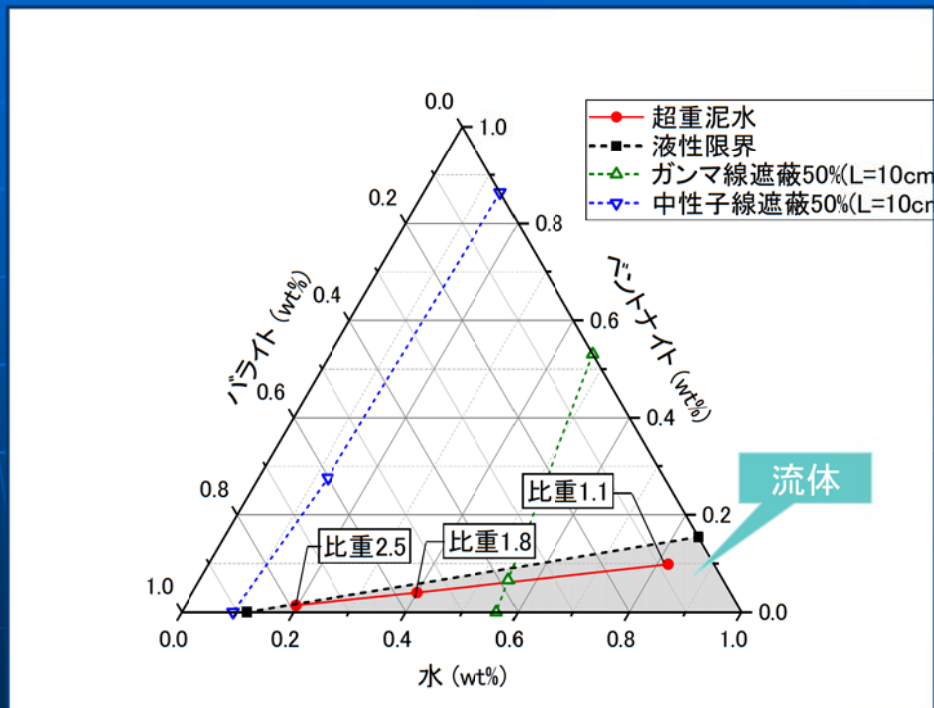
1. 充填可能な流体
2. 厚さ10cmの充填でガンマ線量が50%以下
3. 厚さ10cmの充填で全中性子線量が50%以下
4. 透水係数 1.0×10^{-9} m/sec以下
5. 低コスト



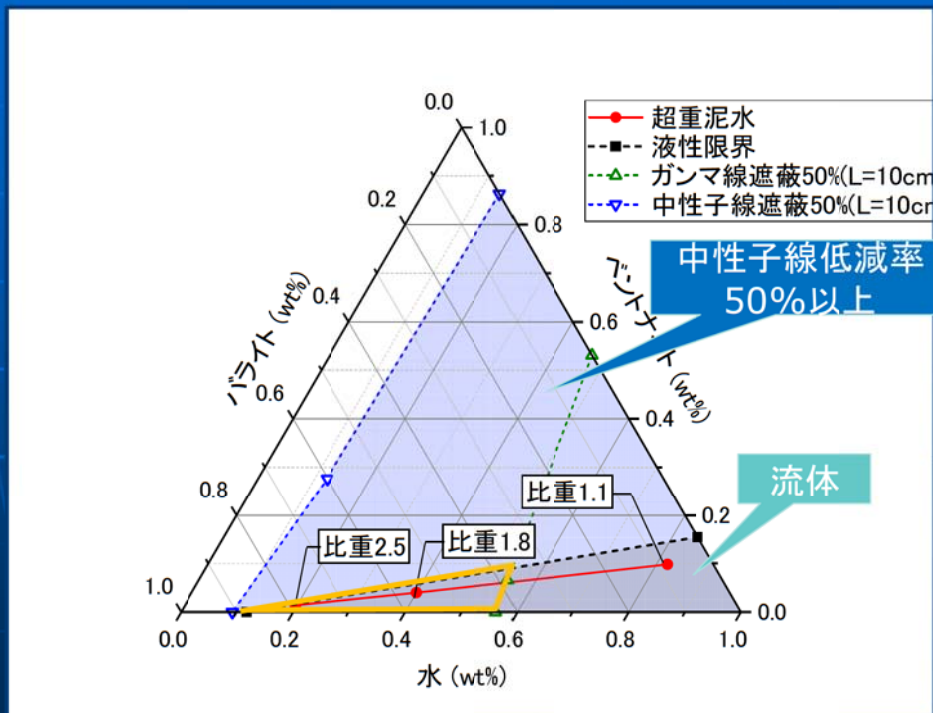
【置き換えられる材料指標】

1. 液性限界以上の含水比
2. 比重1.5以上
3. 体積含水率30%以上
4. 有効モンモリロナイト乾燥密度 0.1 Mg/m^3 以上
5. 低比重

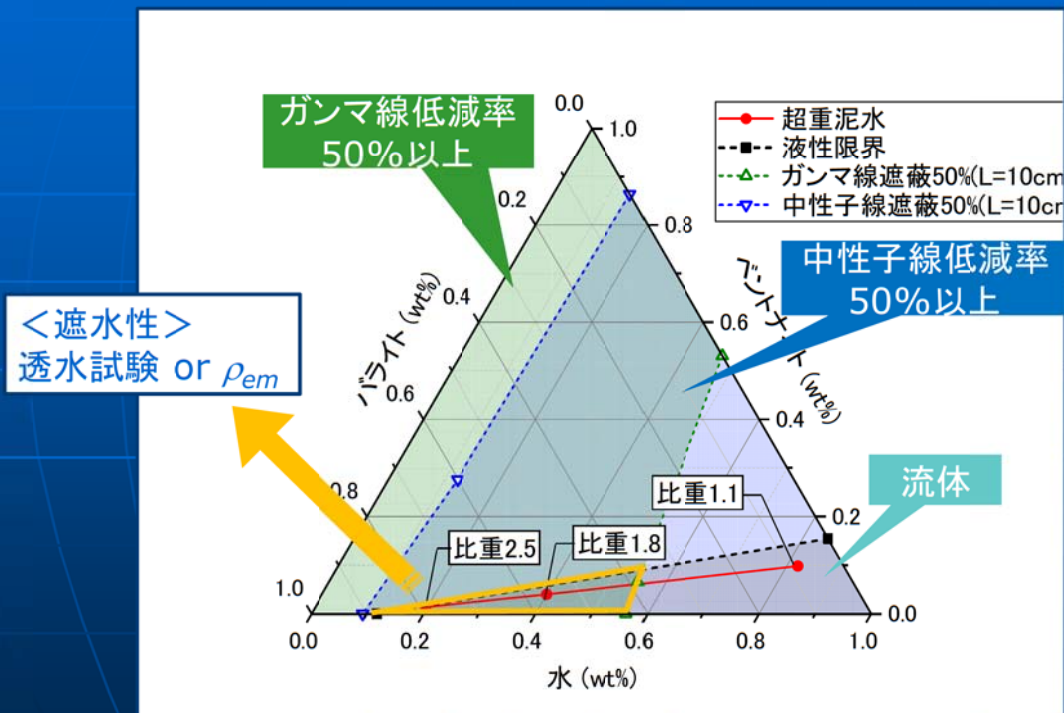
三成分図を用いた超重泥水の配合例 〈流体の範囲〉



三成分図を用いた超重泥水の配合例 <中性子線遮蔽>



三成分図を用いた超重泥水の配合例 <ガンマ線遮蔽>



まとめ

- 地盤材料学という観点から、土質材料を組み合わせて材料設計を行う考え方を述べた。
- 具体的な事例として、
- フィルダムのコア材を例に
- 高レベル放射性廃棄物処分の緩衝材を例に
- 福島第一原子力発電所廃止措置に向けた「超重泥水」の一例を

- ほんの数例を示しました。
- まだまだ、これからです。
- このような考え方で、どんどん新しい性能を持つ材料の開発を！