

# TRU廃棄物処分技術検討書 (第2次TRUレポート)の概要 (補足資料)

平成17年12月21日

日本原子力研究開発機構  
電気事業連合会

# 「超ウラン核種を含む放射性廃棄物処理処分の基本的考え方について」 (原子力委員会バックエンド対策専門部会、平成12年3月) に示された技術開発課題と第2次TRUレポートとの関係

[第1回検討会資料第3-1号, p.28(一部改訂)]

## 「超ウラン核種を含む放射性廃棄物処理処分の基本的考え方について」 (原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会、平成12年3月)

- 廃棄物の性状に応じて、適切に区分し、浅地中のコンクリートピットへの処分、余裕深度への処分又は地層処分を行うことが可能であるとの見通しが得られた。
- 地層処分することを想定した場合、**現在の技術により具体的な処分技術概念の構築することができる**と考えられる。
- 地層処分の**安全性を確保することは可能**であると考えられる。
- 今後の**技術開発課題**として、以下の事項が挙げられている。

廃棄体データ: データベースの整備及び充実, (製作された廃棄体に対する信頼性の高い品質管理及び検認手法の整備)

処分施設設計: 合理化及び詳細化

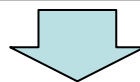
性能評価: 評価の信頼性向上を目指して

- 試験データの取得

- 特有な現象のより正確な把握と評価モデルの構築

(セメント変質, アルカリ/ベントナイト/岩反応, 硝酸塩挙動, ガス発生影響)

ヨウ素閉じ込め性能向上のための研究開発, それを通じた処分の合理化や安全性の一層の向上

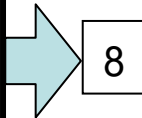


上記に示された技術開発課題に対して、第1次TRUレポートの成果から第2次TRUレポートの対応(詳細化)状況を以下に示す。

# 第2次TRUレポート技術課題対応結果の概要 (1/5)

3

項目		第1次TRUレポートでの成果 (2000年3月)	第2次TRUレポートでの詳細化 (2005年9月)	備考
廃棄体 データ (データ ベースの 整備及 び充実)	種類・発生量	<ul style="list-style-type: none"> <li>施設運転に伴い発生し、既に固形化されたもの</li> <li>当時未処理のものに対して処理を想定したもの</li> </ul> <p>廃棄体発生量: 約56,000m<sup>3</sup></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>旧JNC,日本原燃(JNFL)の最新データ(発生量、処理方法)に基づき物量を新たに積算 [p.2-6 ~ 13]</li> <li>施設の操業期間を変更しJNFLの再処理・MOX燃料加工施設の解体廃棄物を追加 [p.2-9 ~ 11]</li> <li>発電所廃棄物と同等の性状と考えられるチャンネルボックス(CB)及びバーナブルボックス(BP)についても、再処理施設から発生するものとして発生量に追加 [p.2-10]</li> <li>BNGS返還廃棄物データを追加 [p.2-9 ~ 10]</li> <li>構造材料の不純物量及び中性子束分布等を見直すことによりC-14等の放射能濃度を現実的に評価 [p.2-14 ~ 16]</li> </ul> <p>廃棄体発生量: 約140,300m<sup>3</sup></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>日本原燃(JNFL)の今後発生する廃棄物についての発生量,含有放射能量等のデータを取得,拡充</li> </ul>
	区分の考え方	<ul style="list-style-type: none"> <li>浅地中埋設の政令濃度上限値(核種1GBq/t)を参考に余裕深度処分の区分値を設定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>余裕深度処分と地層処分の 核種濃度区分値について,概略的なリスク論的評価など複数の考え方に基づいた試算結果(約20 ~ 約200GBq/t)を算出 [p.6-43 ~ 46]</li> <li>余裕深度処分の 核種濃度区分値を1GBq/t及び100GBq/tとした場合の線量評価を実施し,処分の見通しを示す [p.5-9 ~ 12, p.6-48 ~ 49]</li> </ul>	
	製作された廃棄体に対する信頼性の高い品質管理及び検認手法の整備	<ul style="list-style-type: none"> <li>既存濃縮廃液固化体については核種濃度の実測値等に基づき放射能量等を設定。</li> <li>破壊分析法等による確認が実施されている。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>廃棄物の基となる構造材料の不純物量及び中性子束分布等を見直すことによりC-14等の放射能濃度を現実的に評価 [p.2-14 ~ 16]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>日本原燃(JNFL)の今後発生する廃棄物についての発生量,含有放射能量等のデータの取得,拡充</li> <li>非破壊外部測定法の開発等</li> </ul>



注:第2次TRUレポートでの詳細化欄の【 】内は第2次TRUレポートの該当頁を示す。

# 第2次TRUレポート技術課題対応結果の概要 (2/5)

4

項目		第1次TRUレポートでの成果 (2000年3月)	第2次TRUレポートでの詳細化 (2005年9月)	備考
処分施設設計	人工バリア材料物性	<ul style="list-style-type: none"> <li>•当時の知見の範囲内で劣化セメントの物性を安全側に設定</li> <li>•Ca型化ベントナイトの物性はNa型ベントナイトと同程度と判断</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•変質セメントや変質ベントナイトを含む試料の透水係数, 拡散係数を取得 [p.4-33]</li> <li>•Ca型化ベントナイトの膨潤特性データを取得 [p.3-56]</li> <li>•諸特性の変化を間隙率やモンモリロナイト部分密度を指標として定式化し, 評価に適用 [p.3-56, 4-33]</li> <li>•セメントクリンカー調整又はボゾラン材料の多量添加による低アルカリ性セメントの開発の現状の整理 [p.7-12 ~ 14]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•海水系地下水など地下水組成の異なる環境下でのデータの拡充</li> <li>•低アルカリ性セメントの変質や特性変化に係るデータの取得</li> </ul>
	人工バリア構造解析	<ul style="list-style-type: none"> <li>•大空洞長期クリープ変形解析を実施</li> <li>•既存のモデル・コードを用いて, 人工バリア構造力学安定性解析を実施 (緩衝材の圧密, クリープ変形など)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•ベントナイトの時間的なCa型化への変化を考慮し非線形膨潤モデルによる評価と支持特性の評価 [p.3-56 ~ 57]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•原位置での岩盤クリープに係るデータの取得</li> <li>•人工バリア長期変形評価モデルの高度化と検証</li> </ul>
	処分施設の設計解析	<ul style="list-style-type: none"> <li>•廃棄体の特性(核種の濃度・組成, 含有化学物質)に基づいて4グループに分類し, 多重バリアシステムの概念に基づいてグループごとの施設設計の仕様を例示</li> <li>•岩盤物性, 処分深度などをパラメータとした空洞安定解析を実施</li> <li>•要求性能を満足する緩衝材仕様の設計</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)と長半減期放射性廃物(非発熱性)の両施設を併置した場合の相互影響因子を検討し, 有意な影響を及ぼさないために離間距離, 長半減期放射性廃物(非発熱性)側の坑道配置などの工学的対策を講じた処分成立性を示す [p.6-2 ~ 40]</li> <li>•亀裂などの地質環境を考慮した条件設定と, 実際の施工手順をモデル化した上での掘削可能な空洞規模を示す [p.3-19 ~ 27]</li> <li>•海水影響, ベントナイト系材料のCa型化, 現実的に可能な施工技術等最新の知見を踏まえた緩衝材仕様設計 [p.3-10 ~ 18]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•現実的な地質条件等を考慮したレイアウト, バリア仕様の合理化</li> <li>•空洞安定性評価手法の適用性, 妥当性の検証, 評価手法の具体化等(例えば, 入力地震動の設定など)</li> <li>•建設・操業・閉鎖に係わる工学技術の具体化, 高度化</li> </ul>

注: 第2次TRUレポートでの詳細化欄の【 】内は第2次TRUレポートの該当頁を示す。

# 第2次TRUレポート技術課題対応結果の概要 (3/5)

項目		第1次TRUレポートでの成果 (2000年3月)	第2次TRUレポートでの詳細化 (2005年9月)	備考
性能評価	核種移行データの取得・整備	<ul style="list-style-type: none"> <li>溶解度、分配係数等の核種移行データは既存の文献に基づき設定</li> <li>知見が不十分な特性は化学的特性が類似した元素の値を設定する、評価上安全側になるよう保守的に見込むことにより対処</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>熱力学データベース(JNC-TDB)の整備 [p.4-33, p.4-126]</li> <li>ヨウ素(I-129)、炭素(C-14)の岩石やセメントに対する収着分配係数取得し評価に反映 [p.4-126]</li> <li>金属溶出したC-14に有機形態が含まれることを確認 [p.4-132]</li> <li>セメント環境下での核種移行データの取得と評価への反映 [p.4-126]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>海水環境などの多様な環境条件及びバリア仕様の変更を考慮したデータ取得</li> <li>生物圏評価におけるデータ(土壌等への分配係数)の拡充</li> </ul>
	セメント変質	<ul style="list-style-type: none"> <li>普通ポルトランドセメント(OPC)と降水系地下水の化学反応による変質モデルを構築し、化学場変遷を評価</li> <li>場の変遷評価における廃棄体溶出成分やひび割れ等の影響は、セメント系材料の物質移動抑制機能を見捨てることで対処</li> <li>変質に伴う力学影響については仮想的なパラメータスタディーにより影響を概略評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>OPCの水和物と降水系地下水の化学反応による変質モデルに、主たる廃棄体溶出成分の変質への影響及び変質に伴う物質輸送パラメータの変化を反映し、化学反応と物質移行を連成させた評価手法を整備して評価を実施 [p.4-25 ~ 35]</li> <li>変質によるセメント系材料の力学特性変化に伴う構造的変化(空隙率等)とそれによる物質移動特性変化の評価手法を整備し、評価を実施 [p.3-55, p.4-33]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>海水環境などの多様な環境条件での評価</li> <li>ベントナイト・セメント変質による特性変化の知見の拡充</li> </ul>
	アルカリ環境下ベントナイト・岩反応	<ul style="list-style-type: none"> <li>化学的変質としてベントナイトの陽イオン交換のみを考慮し、緩衝材のCa型化と間隙水の高イオン強度化が生じると評価</li> <li>変質に伴う緩衝材の物質輸送特性変化としてCa型化及び高イオン強度条件による透水係数、拡散係数を取得し、安全評価に反映</li> <li>ベントナイト及び岩の他の鉱物(ゼオライト、C-S-H)への変質は、知見不足のため未評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ベントナイトと降水系地下水の変質シナリオ(ゼオライトやC-S-Hの生成を含む)及び化学反応・物質輸送モデルを構築。このモデルを用いてイオン交換挙動、緩衝材構成鉱物の溶解・二次鉱物の生成挙動を解析評価 [p.4-35 ~ 57]</li> <li>変質に伴う物質輸送パラメータの変化を評価し、安全評価に反映 [p.4-44]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>海水環境などの多様な環境条件での評価</li> <li>鉱物の熱力学データ等の不確実性に伴う過度な保守性の合理化</li> </ul>

10, 11

12

13

注:第2次TRUレポートでの詳細化欄の【 】内は第2次TRUレポートの該当頁を示す。

# 第2次TRUレポート技術課題対応結果の概要 (4/5)

6

項目		第1次TRUレポートでの成果 (2000年3月)	第2次TRUレポートでの詳細化 (2005年9月)	備考
性能評価	硝酸塩 影響	<ul style="list-style-type: none"> <li>硝酸塩の影響については、知見が不十分であるため、硝酸塩の広がり予測される範囲において核種の分配係数を幅広く想定することで対処</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>硝酸塩の化学的変遷を化学反応モデルにより検討。その結果を踏まえて、アミン錯体の影響、ガス発生への影響、セメントの溶解挙動への影響、放射性核種の溶解度や分配係数への影響を検討 [p.4-103 ~ 104]</li> <li>グループ3の処分施設内及びその周辺は酸化性雰囲気前提とした溶解度及び分配係数を設定 [p.4-102 ~ 103]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>硝酸イオンの核種の酸化状態への影響に関する知見の拡充</li> </ul>
	ガス発生 影響	<ul style="list-style-type: none"> <li>金属の腐食速度を既存データの範囲内で保守的に設定して水素ガス発生量を計算</li> <li>既存の有機物の微生物分解モデル/データを適用してCH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>、ガス等の発生量を計算</li> <li>均質多孔質媒体を仮定した二相流モデルによるガス移行を計算、押し出し水量を評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>金属腐食、有機物の微生物分解及び放射性分解を考慮したガス発生速度・量の算出 [p.4-106 ~ 107]</li> <li>非放射性ガスを対象としたガス移行挙動に関して、適用性が高いと考えられる手法による移行解析結果を例示し、モデル化と解析上の課題を抽出 [p.4-109 ~ 112, p.4-116 ~ 117]</li> <li>ガス発生に依存した排水速度及び排水量を設定し核種移行解析を実施 [p.4-162 ~ 163]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>亀裂媒体中のガス移行モデルの開発</li> </ul>
	システム性能 評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>堆積岩は均質多孔質媒体の移流・分散モデルを、結晶質岩は単一平行平板亀裂モデルを適用</li> <li>地下水シナリオの変動シナリオや接近シナリオの評価は今後の課題</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>亀裂ネットワークモデルとの比較を行った上で、1次元平行平板の重ね合わせモデルを適用 [p.4-140 ~ 143]</li> <li>各プロセスの重畳及びパラメータの不確実性を考慮した感度解析(包括的感度解析)を実施し、安全評価に大きな影響を与える重要度の高いパラメータを抽出 [p.4-175 ~ 4-184]</li> <li>地下水シナリオの変動シナリオや接近シナリオの解析・評価を実施 [p.4-188 ~ 214]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>人工バリアの長期挙動に対応した核種移行評価手法の詳細化</li> <li>安定同位体を考慮したC-14の生物圏評価</li> </ul>

14

15

16,

17



# 第2次TRUレポート技術課題対応結果の概要 (5/5)

7

項目		第1次TRUレポートでの成果 (2000年3月)	第2次TRUレポートでの詳細化 (2005年9月)	備考
ヨウ素閉 じ込め性 能向上等	放射性ヨウ 素固定化	・I-129を多く含む廃銀吸着材については、基本的にセメント固化体でも安全な処分が可能との見通しを提示	<ul style="list-style-type: none"> <li>・具体的なヨウ素固定化方法として8つの技術を提示し、開発の現状と取得されているデータを取りまとめ【p.7-5～7】</li> <li>・ヨウ素固定化の機構に応じた長期予測モデルの構築【p.7-7～7-8】</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・長期浸漬試験等の実施による長期予測モデルの検証</li> <li>・固化処理プロセスデータ取得、実規模固化体サイズの評価</li> <li>・処分概念の検討</li> </ul>
	放射性炭素 の閉じ込め	(特になし)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・C-14が十分減衰するまで閉じ込めるための廃棄体容器の開発の現状を取りまとめ【p7-2～3】</li> <li>・高強度高緻密コンクリート製とTi-Pd合金を用いた金属容器に関する開発状況を整理し、両容器とも十分な耐久性を有する見通しを示す【根拠資料集7-02】</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・金属容器の加工部および溶接部の長期健全性評価</li> <li>・コンクリート容器のひび割れ進展・閉そく挙動評価</li> </ul>

18

19

# 廃棄物の発生と特性

発生施設ごとの発生量 (m<sup>3</sup>)

廃棄物分類		第1次TRUレポート	第2次TRUレポート
日本原燃 (JNFL)	再処理操業廃棄物	28,750	50,500
	MOX操業廃棄物	450	900
	再処理解体廃棄物	-	44,300
	MOX解体廃棄物	-	2,000
旧JNC	再処理操業廃棄物	17,800	18,300
	MOX操業廃棄物	2,000	1,300
	再処理解体廃棄物	4,000	8,500
	MOX解体廃棄物	1,800	2,000
返還	COGEMA	1,200	900
	BNGS	-	11,500
合計		56,000	140,300

処分区分ごとの発生量 (核種区分値: 1GBq/tの場合)

処分区分	発生量 (m <sup>3</sup> )
コンクリートピット処分	88,400
余裕深度処分	25,200
地層処分	26,600
合 計	140,300

地層処分対象廃棄体のグルーピング

グループ	主な廃棄体	発生量 (m <sup>3</sup> )	グルーピングの根拠
1	廃銀吸着材のセメント固化体	300	I-129を多く含む廃棄体
2	ハル・エンドピースの圧縮収納体、セメント固化体	6,700	C-14を多く含み、発熱量の比較的大きい廃棄体
3	低レベル濃縮廃液のアスファルト固化体及びモルタル充填固化体など	6,200	硝酸塩を多く含む廃棄体
4	可燃、難燃、不燃性廃棄物のモルタル充填固化体など	13,400	その他の廃棄体
計		26,600	

## < 第1次TRUレポートからの進捗 >

日本原燃(JNFL)解体廃棄物を含めるなど最新の情報を反映し発生量を試算。コンクリートピット処分、余裕深度処分対象と考えられるものを整理。不純物量及び中性子束等を見直し、放射性物質濃度を現実的に評価。

## < 廃棄体特性のまとめ >

地層処分対象の廃棄体量は約26,600m<sup>3</sup> (核種区分値: 1GBq/tの場合)で、全体の約20%。

地層処分対象の廃棄体について、特性に応じたグルーピングを実施。硝酸塩、有機物を含む廃棄体があり、その影響評価を実施。

## < 今後の課題 >

今後発生する廃棄物のデータを取得し、廃棄物データの拡充、精度向上を図ることが必要。

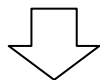
廃棄物データが拡充された後、廃棄体性状に応じた放射性物質濃度測定・検認方法を検討することが必要。



# 緩衝材のカルシウム型化を考慮した 膨潤特性データの取得

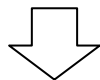
## < 第1次TRUレポートでの取扱い >

緩衝材に用いるNa型ベントナイトは長期的にはセメント系材料の影響でCa型化するが、Ca型化ベントナイトの膨潤特性データが不十分であり、Na型の膨潤圧と弾性係数（線形に膨潤）を用いて人工バリアの変形を評価。



## < 実施内容 >

Na型からCa型に変化させたベントナイトの膨潤特性データを取得し、モンモリロナイト<sup>\*1</sup>の交換性陽イオンの組成及び試験溶液の濃度に応じた経験式を設定。（右図参照）



## < 第2次TRUレポートへの反映内容 >

実験値に基づく膨潤特性の設定と、緩衝材の非線形に膨潤する挙動や膨潤特性の時間的变化を考慮した解析モデルによって、人工バリアの変形をより詳細に評価することが可能。

\* 1: ベントナイトの主要構成鉱物であり、スメクタイト族に分類される。スメクタイトは層状の鉱物であり、層と層の間に水を含むことで膨潤する特性を有する。

\* 2: 緩衝材が締め固めや膨潤圧などを受けて生じた最大応力。

\* 3: スメクタイト(モンモリロナイト)の重量をスメクタイト(モンモリロナイト)の体積と間隙の体積の和で除した値。

\* 4: 第2次TRUレポート3.3.2.2の記述(p.3-56)の図3.3-8, 3.3-9を参考に作成。

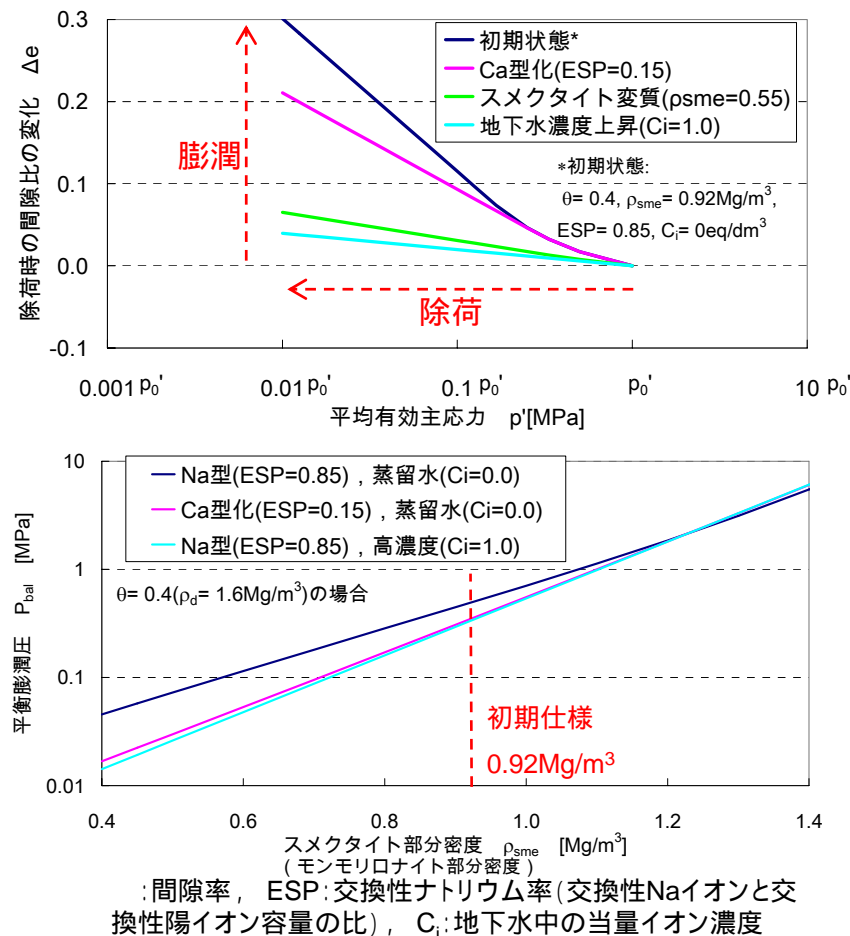


図. 緩衝材の変質に伴う膨潤特性の変化<sup>\*4</sup>

上図: 除荷時の膨潤挙動 (平均応力が先行圧密荷重<sup>\*2</sup>  $p_0$  から  $0.01p_0$  まで減少した時の間隙比増分)

下図: 平衡膨潤圧とスメクタイト部分密度<sup>\*3</sup>の関係

# ヨウ素(I-129)のセメントに対する収着分配係数の整備

10

## <第1次TRUレポートでの取扱い>

限られた条件での実測値や文献値などを参考にデータ設定を実施。変質試料については、海外での設定例を参考に未変質試料の収着分配係数の10分の1を設定。



## <実施内容>

処分施設の化学的な条件を考慮して、液組成、固相条件及び固液の分離方法<sup>\*1</sup>を変えた体系的な収着分配係数の取得をバッチ法により実施。

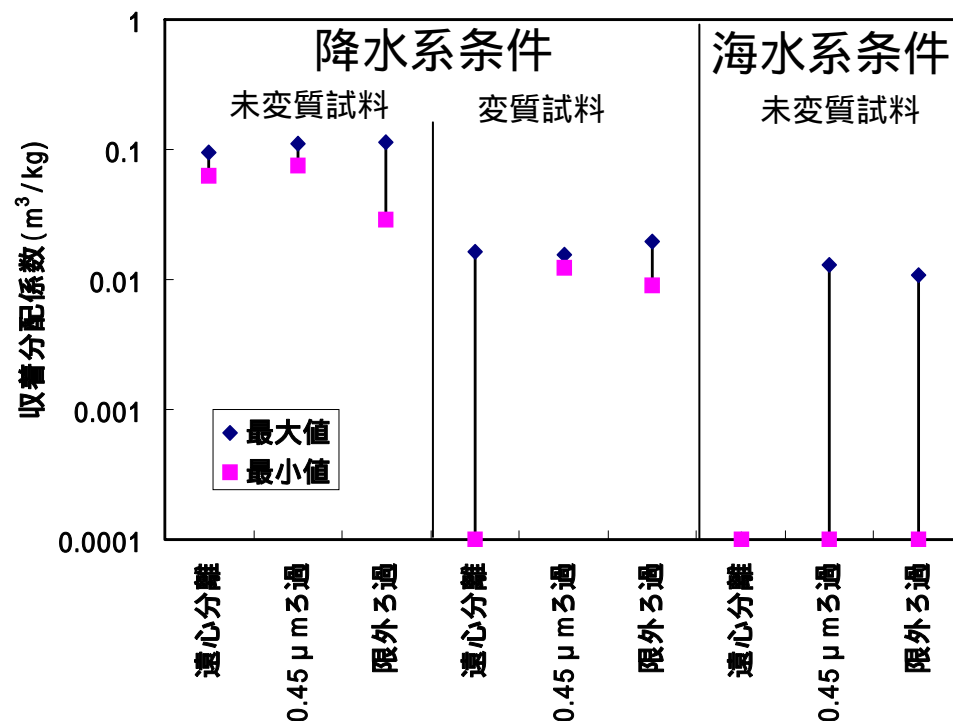


## <第2次TRUレポートへの反映内容>

核種移行解析においては、バッチ収着試験結果(右図参照)から保守性を考慮して、遠心分離での結果に基づき収着分配係数を設定。変質試験については、実測値に基づきデータを設定した結果、データ設定の信頼性が向上。

\*1: バッチ法による収着分配係数の測定については、コロイド等の影響によって固液分離法によって収着分配係数が異なる可能性があるため、本試験では固液分離法を変えた試験も実施。

\*2: 第2次TRUレポート4.5.2.2の記述(p.4-126)で引用した報告(Mihara and Sasaki, 2005)に関連して作成。



(注: 0.0001m³/kgは0m³/kgを示す)

図. 普通ポルトランドセメントペースト硬化体に対するヨウ素の収着分配係数の測定結果<sup>\*2</sup>

# セメント環境下(アルカリ性条件)における 核種の溶解度の取得

## <第1次TRUレポートでの取扱い>

既存の熱力学データベース(TDB)\*<sup>1</sup>による化学平衡計算や文献値などを参考にデータ設定を実施。



## <実施内容>

高アルカリ条件におけるトリウム\*<sup>2</sup>等の核種の溶解度データをサンプリング時間を変えて過飽和法に測定。



## <第2次TRUレポートへの反映内容>

核種移行データ設定においては、化学平衡モデルにより、JAEAが整備した最新の熱力学データベース(JNC-TDB)\*<sup>3</sup>を用いて溶解度を設定。その結果、実測値との比較(右図参照)を示すことにより、設定値の信頼性が向上。

\*1: 固相の溶解度積や液相化学種の生成反応に関する平衡定数をまとめたもの。

\*2: アクチノイド元素の主たるものが地層処分の化学条件(アルカリ性かつ還元性)において原子価はIVとなるため、それらの代表として選定。

\*3: JAEAが整備を行っている熱力学データベース。JAEAのホームページより入手可能。[\(http://migrationdb.jnc.go.jp/\)](http://migrationdb.jnc.go.jp/)

\*4: 第2次TRUレポートの4.5.2.2の記述(p.4-126)で引用した報告(Mihara and Sasaki, 2005)に関連して作成。

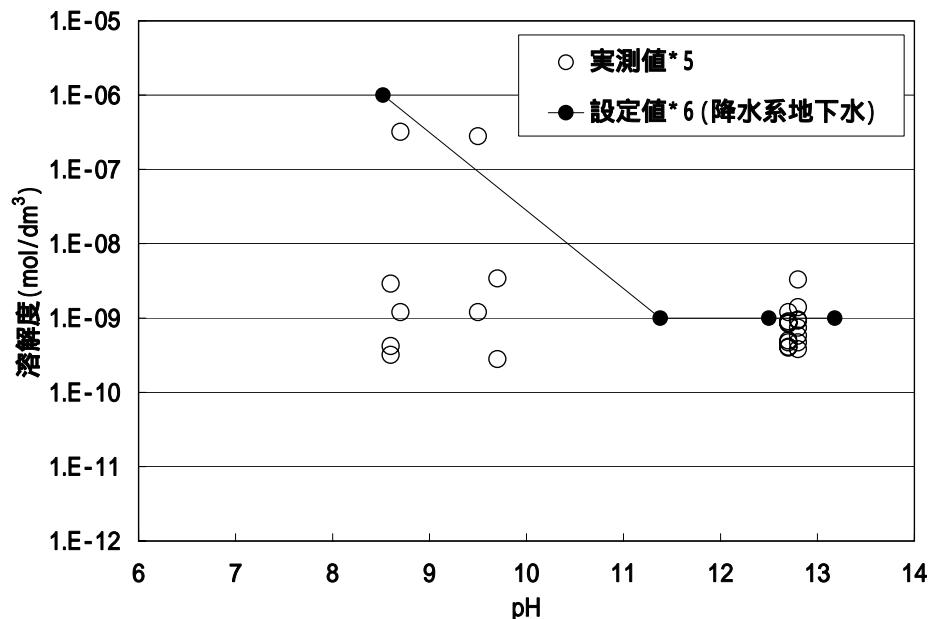


図. トリウム(Th)の溶解度の取得結果と降水系及び海水系地下水における溶解度の設定結果の比較\*<sup>4</sup>

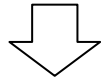
\*5: Thの溶解度をサンプリング時間を変えて過飽和法より測定(最長77日)

\*6: 化学平衡モデルの計算結果に基づき降水系地下水の値を設定

# セメント系材料の変質に関する試験

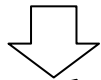
## < 第1次TRUレポートでの取扱い >

粉砕したセメント硬化体の浸出試験結果に基づきセメントの長期挙動を検討。セメント系材料の変質に伴う物質移行特性の時間的な変化を考慮せず。



## < 実施内容 >

ブロック形状の試料に対しての通水変質試験を実施し、セメント硬化体の変質挙動(通液のpH変化<sup>\*1</sup>)や変質(間隙率の変化で整理)に伴う透水性及び力学特性に関わるデータを取得(右図参照)。



## < 第2次TRUレポートへの反映内容 >

人工バリアの長期挙動評価において、実測値に基づく物質移行データの設定を実施した結果、評価の信頼性が向上。さらに、変質に伴う透水性や強度の変化を間隙率との関数で示すことにより、データの取り扱いの汎用性が向上するとともに、人工バリア長期変化を詳細に評価することが可能。

\* 1: ブロック形状の試料についても、粉砕試料での変質の過程と同様にpH13程度の領域 (Region I)、pH12.5程度の領域 (Region II) 及びpH12.5以下の領域 (Region III) として示すことができ、核種移行データ設定に反映。

\* 2: 第2次TRUレポートの4.4.2.2の記述(p.4-33)で引用した報告(三原ら, 2003)を参考に作成。

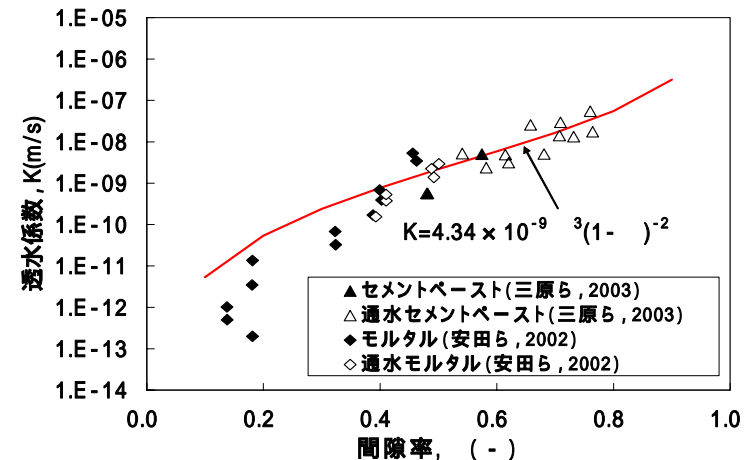
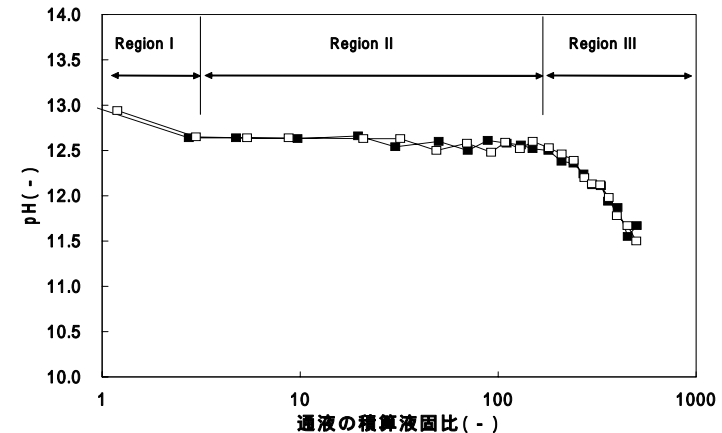


図. セメントペースト硬化体の通水に伴う変質試験結果<sup>\*2</sup>

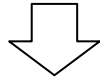
上図: 普通ポルトランドセメント硬化体における通液のpHの変化

下図: 通水により得られた透水係数を間隙率の関係で整理

# 人工バリアの長期挙動評価

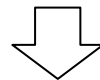
## <第1次TRUレポートでの取扱い>

人工バリアの長期挙動として、化学平衡モデル(モンモリロナイト<sup>\*1</sup>はイオン交換)と物質移行モデルを連成させたモデルで評価を実施。ベントナイトの変質として、カルシウム型化までを定量評価。



## <実施内容>

アルカリ条件におけるベントナイトの構成鉱物(モンモリロナイトの溶解)の溶解速度に関わるデータの取得や評価における二次生成鉱物の組合せ及びアルカリ環境下における熱力学データベースを整備し、種々の変質プロセスを考慮した解析を実施(右図参照)。



## <第2次TRUレポートへの反映内容>

モンモリロナイトの溶解速度を考慮した評価を行うことで、第1次TRUレポートでは、未検討だった変質シナリオを定量評価した。その結果、人工バリアの長期挙動評価の信頼性が向上。

\* 1: ベントナイトの主要構成鉱物。ベントナイトの特性を左右する。

\* 2: カルシウム珪酸塩水和物のこと。セメント化学の分野ではこのように表記する。

\* 3: 第2次TRUレポートの4.4.2.2の図4.4.2.2-8(p.4-48)を参考に作成

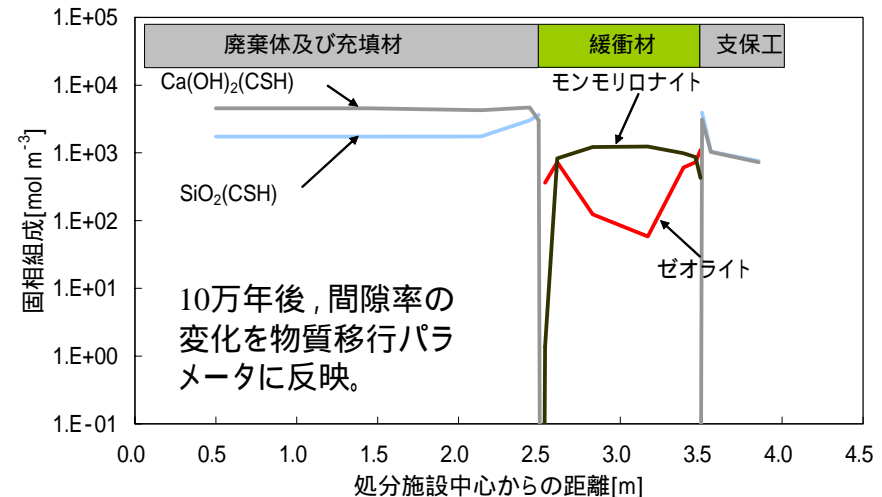


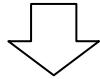
図. 化学反応と物質移行モデルとを連成させたモデルによる人工バリアの長期挙動評価結果の例<sup>\*3</sup>

本解析ケースにおいて、緩衝材との接触側の廃棄体及び充填材領域において、間隙の閉塞が生じ、物質の移行が抑制される。  
 $\text{Ca}(\text{OH})_2(\text{CSH})$ ,  $\text{SiO}_2(\text{CSH})$ : 普通ポルトランセメントの主要水和物の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 及びC-S-Hゲル<sup>\*2</sup>をモデル化したもの。  
 モンモリロナイト: ベントナイトの主要構成鉱物、膨潤性がある  
 ゼオライト: ベントナイトの変質2次鉱物の一つとして設定、膨潤性はない。

# セメント系材料に対する核種の収着分配係数への 硝酸塩の影響

## <第1次TRUレポートでの取扱い>

硝酸塩の影響に関わる知見はほとんど存在しなかったため、イオン強度の高い試験結果を参考に収着分配係数への影響を評価。



## <実施内容>

硝酸イオンの長期的な変遷を考慮して、硝酸イオンの他にアンモニア\*1が存在する条件についてセメント系材料に対する核種の収着分配係数を取得(右図参照)。



## <第2次TRUレポートへの反映内容>

実測値に基づき硝酸塩のセメント系材料への核種の収着分配係数への影響を検討した結果、その評価の信頼性が向上。有機炭素、ヨウ素及び塩素などについて、収着分配係数をイオン強度が高い海水系地下水のデータ設定を用いることの妥当性を示した。

\*1:硝酸イオンは、処分施設内の金属との相互作用の影響により還元され、アンモニアになる可能性がある。

\*2:第2次TRUレポートの4.4.9.4の記述(p.4-104)において引用した報告(諸岡ら, 2004)を参考に作成。

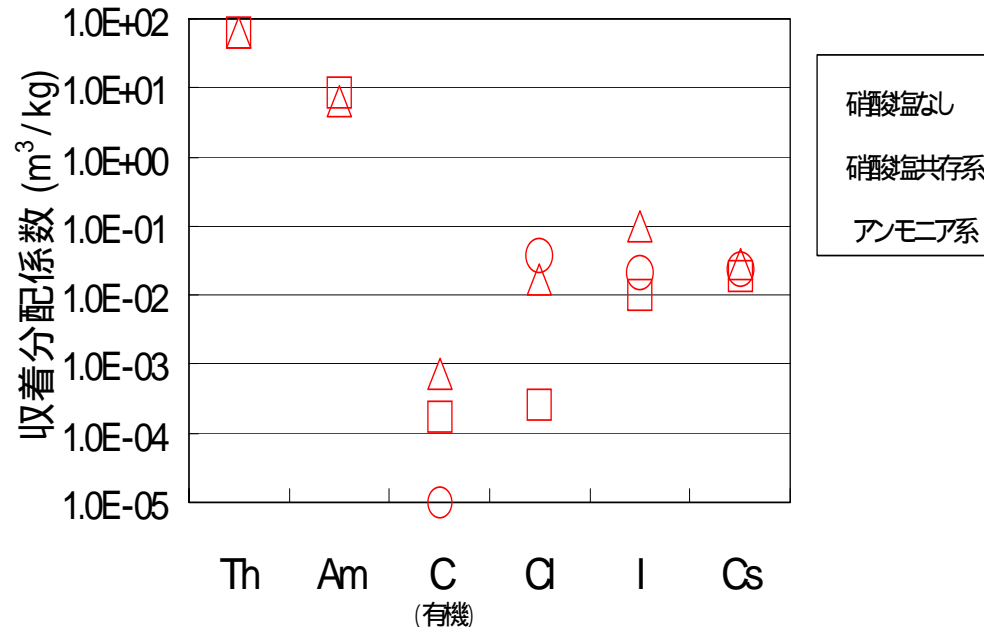


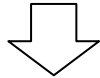
図. 硝酸塩の影響を考慮した条件におけるセメント硬化体に対する核種の収着分配測定結果\*2



# ガス発生速度より得られた金属の腐食速度

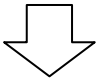
## <第1次TRUレポートでの取扱い>

既存の腐食実験によって取得された文献値より値を設定し、ガス発生速度を算出。



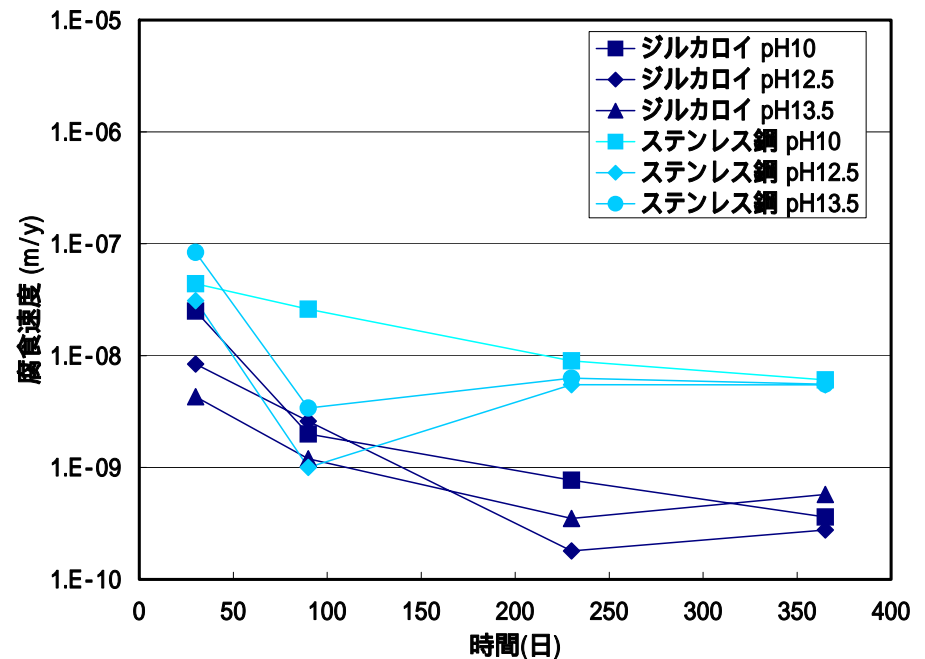
## <実施内容>

ジルカロイやステンレス鋼などの腐食速度が小さい金属に対して、アンプルを用いたガス発生測定試験手法を開発。低酸素かつアルカリ環境でのガス発生速度を取得。既存の腐食データと比較が容易なように腐食速度に換算してデータを整理<sup>\*1</sup>(右図参照)。



## <第2次TRUレポートへの反映内容>

水素ガス発生に基づく腐食速度を参照しデータ設定を実施した。その結果、データ設定の信頼性が向上。



図． アルカリ性条件におけるジルカロイ及びステンレス鋼の腐食速度の測定結果<sup>\*2</sup>

\* 1 : 各々金属に対して以下の反応を考慮して腐食速度を算出。

ステンレス鋼:  $3\text{Fe} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{H}_2$

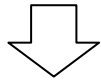
ジルカロイ:  $\text{Zr} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZrO}_2 + 2\text{H}_2$

\* 2 : 第2次TRUレポートの4.4.10.1の記述(p.4-106)において引用した報告(三原ら, 2002)を参考に作成。

# 地質媒体中における核種移行モデル

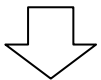
## <第1次TRUレポートでの取扱い>

地質媒体中における核種移行経路を一本の亀裂に代表させて解析を実施。また、均質多孔質媒体モデルを用いて解析を実施。



## <実施内容>

高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)の地層処分の評価で用いられた1次元平行平板モデルの重ね合わせが長半減期放射性廃棄物(非発熱性)処分に特有な核種(C-14及びI-129)についても適用可能か否かを検討。C-14及びI-129について、3次元の亀裂ネットワークモデル<sup>\*1</sup>による解析を行い、1次元平行平板モデルの解析結果との比較を実施(右図参照)。



## <第2次TRUレポートへの反映内容>

3次元亀裂ネットワークモデルを1次元の平行平板モデルにて近似できるものとして評価を実施し、地質媒体中におけるより詳細な核種移行モデルの適用が可能。

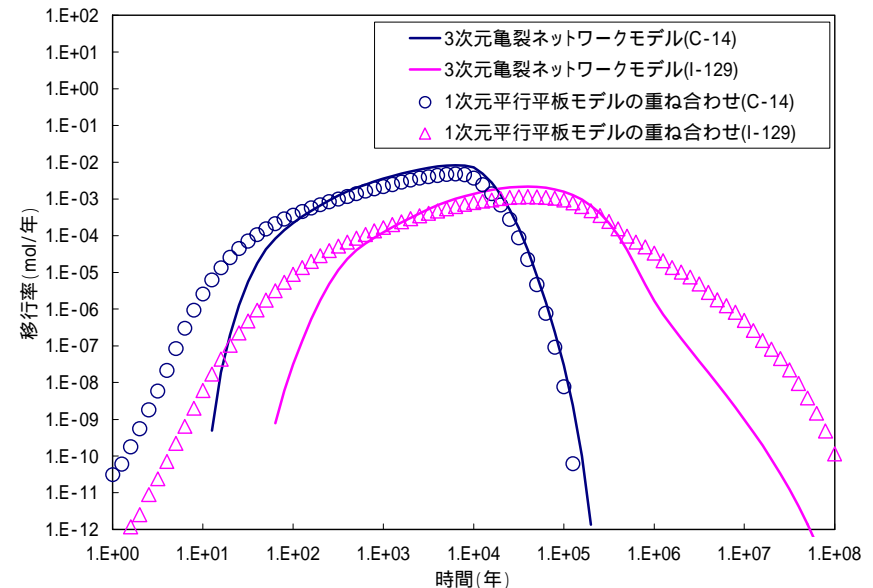


図. 1次元平行平板モデルの重ね合わせと3次元亀裂ネットワークモデルとの比較結果<sup>\*2</sup>

\* 1: 亀裂を含む地質媒体(岩盤中)での地下水および物質の移行経路を表現するモデルの一つ。まず、岩盤中に存在する個々の亀裂を表現するモデルを作成し、それに基づき個々の亀裂から構成されるネットワーク状の移行経路を表現するモデルを作成する。

\* 2: 第2次TRUレポートの4.5.2.4の記述(p.4-140)に関連。

# 包括的感度解析による安全評価に大きな影響を与える 重要度の高いパラメータの抽出結果

## <第1次TRUレポートでの取扱い>

安全評価において、地質環境の多様性、処分における種々の事象及びパラメータの不確実性の重畳を考慮した包括的な感度解析は未実施。



## <実施内容>

安全評価において重要な人工バリア変質の影響、ガス影響及びコロイドの影響等の事象を考慮するとともに解析に必要なパラメータの変動幅を考慮した感度解析(包括的感度解析)を実施し、重要度の高いパラメータを抽出(右図参照)。



## <第2次TRUレポートへの反映内容>

重要度の高いパラメータとして、亀裂透水量係数の対数平均値を抽出するとともに、処分の安全性に影響を及ぼす重要な事象を抽出した。その結果、レファレンスの地質環境条件においては、様々な個別現象を網羅的に考慮しても、処分の安全性が確保されうること示した。

\* 1: 第2次TRUレポートの4.5.4.3の図4.5.4-4(p.4-180)

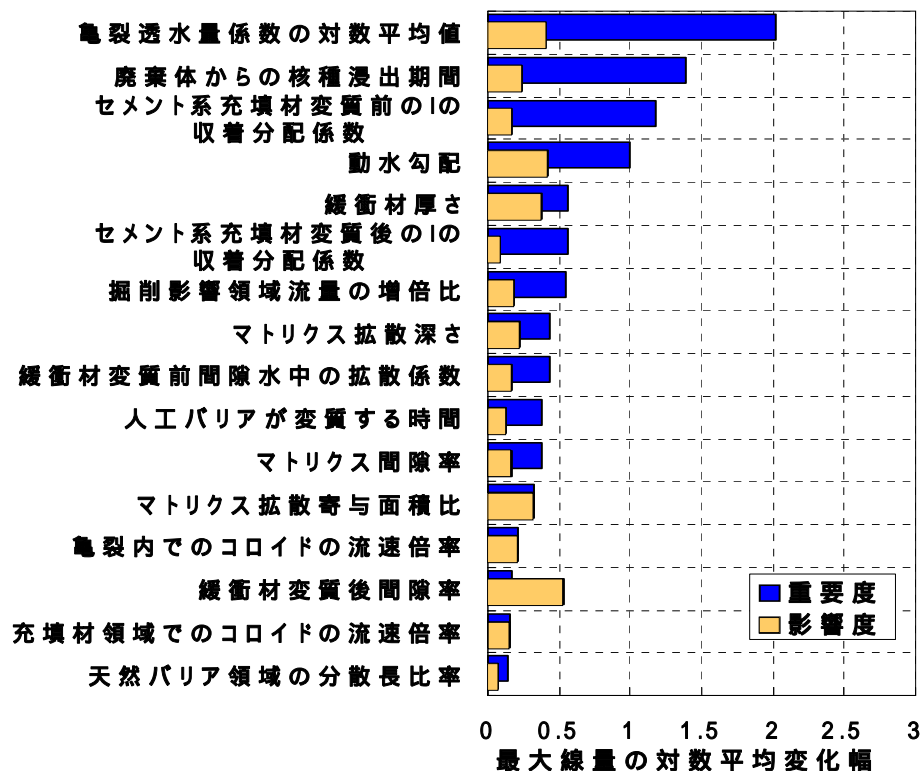


図. 包括的感度解析によるパラメータの  
相対的重要度の抽出結果\*1

(影響度 = 重要度\*2/パラメータの変動率)

\* 2: パラメータの変動幅に対する最大線量の変化量を表す。本解析では、パラメータの設定範囲を横軸、最大線量を縦軸として得られた近似多項式の最大値と最小値の差と定義した(詳細については、第2次TRUレポートp.4-175参照)。

# ヨウ素固定化技術開発

## < 第1次TRUレポートでの取扱い >

我が国の幅広い地質環境条件に柔軟に対応する上で有効となる固化体性能の向上を目指した固化処理技術の高度化を課題として示した。



## < 実施内容 >

8つのヨウ素固定化技術について、固化体性状調査、各種溶液条件下での浸漬試験等を実施。また、固化処理プロセスのヨウ素回収率の調査を実施。



## < 第2次TRUレポートへの反映内容 >

開発の現状と取得データを取りまとめ、4つの技術(表中 \* 1)について $10^5$ 年以上のヨウ素放出期間 \* 2に見通しを得た。

\* 2: 廃棄体からI-129を長期間にわたり放出抑制(コントロールリリース)することで、I-129の被ばく線量を低減する。  
放出期間 $10^5$ 年以上で約1桁の被ばく線量低減が可能。  
(備考) I-129の半減期は長く( $1.6 \times 10^7$ 年)、放射能減衰による被ばく線量低減には期待できない。  
廃棄体/容器等による閉じ込めに効果は見込めない

表. 検討したヨウ素固定化技術

固化技術	固化体中でのヨウ素固定化	性能評価モデル(想定)
岩石固化体 * 1	SiO <sub>2</sub> 結晶(石英) 粒間にAgIを固定	石英粒間拡散モデル
アパタイト固化体	フッ素アパタイト(Ca <sub>10</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> F <sub>2</sub> )結晶マトリクス中にヨウ素吸着セライトを固定	浸出モデル
AgIガラス * 1	ガラス(3AgI-2Ag <sub>2</sub> O-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )構成成分として固定	浸出モデル (表面層による浸出抑制)
BPIガラス	ガラス(6.5PbO-3B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -0.5ZnO)マトリクス中にヨウ素を固定	浸出モデル (表面層による浸出抑制)
セメント固化体 * 1	エトリンガイトとモノサルフェートにIO <sub>3</sub> <sup>-</sup> を吸着	分配平衡モデル
合成ソーダライト	合成ソーダライト(Na <sub>8</sub> (AlSiO <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> I <sub>2</sub> )成分としてヨウ素を固定	溶解平衡モデル
合成鉛アパタイト	合成鉛アパタイト(Pb <sub>10</sub> (VO <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> I <sub>2</sub> )成分としてヨウ素を固定	収着モデル(イオン交換)
銅マトリクス固化体 * 1	銅マトリクス中に廃銀吸着材を固定	浸出モデル

# C-14の長期閉じ込め技術

## <第1次TRUレポートでの取扱い>

C-14が処分システムの安全評価上の重要核種であることが示されたが、その影響低減のための対策は未検討。



## <実施内容>

C-14の半減期が、5,730年であることに留意して、その10倍の期間を目標(6万年)\*1として閉じ込めが可能な容器の開発を検討。閉じ込め可能なものとして高強度高緻密コンクリート及びチタン合金-炭素鋼複合容器を選定し、長期の閉じ込め関わるデータ及び評価を実施。



## <第2次TRUレポートへの反映内容>

高強度高緻密コンクリート及びチタン合金-炭素鋼複合容器ともにC-14の6万年間閉じ込め可能性について見通しを得た。

\* 1: 半減期の10倍の期間、核種を閉じ込めることにより、放射性核種量は初期と比較して1,000分の1となる。

閉じ込めによるC-14影響低減	
高強度高緻密コンクリート容器	チタン合金-炭素鋼複合容器
<ul style="list-style-type: none"> <li>・継ぎ目とひび割れのない一体成形 水浸透を抑制</li> <li>・高強度高緻密コンクリートの低透水性 透水係数 <math>4 \times 10^{-19} \text{cm/s}</math></li> <li>・水浸透 / 化学劣化評価で成立性を評価 6万年後の水浸透距離 14 cm 化学劣化深さ 4 cm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・幅広い環境(pH、温度、塩化物イオン濃度)で優れた耐食性 脱不働態化しない すき間腐食感受性無し</li> <li>・水素化物層の成長速度および亀裂深さを予測し、成立性を評価 6万年後の水素化物層 35 <math>\mu\text{m}</math> 亀裂深さ 17 <math>\mu\text{m}</math></li> </ul>

第2次TRUレポート 表7.3-1から抜粋