

令和4年度開始廃炉・汚染水・処理水対策事業費補助金
(固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発)
(分冊⑤)

4.処理・処分

4.2 処分概念の提示及び安全評価手法の開発

4.2.1 処分概念提示に必要な情報・知識の調査

4.2.2 安全評価手法開発の試行

4.2.2.1 ストーリーボードのプロトタイプ検討

2025年5月

日本原子力研究開発機構

本成果報告は7分冊で構成し、本資料は分冊⑤である。

分冊	タイトル
①	1.全体概要
②	2.性状把握
③	3.保管・管理
④	4.処理・処分 4.1 処理技術
⑤	4.処理・処分 4.2 処分概念の提示及び安全評価手法の開発 4.2.1 処分概念提示に必要な情報・知識の調査 4.2.2 安全評価手法開発の試行 4.2.2.1 ストーリーボードのプロトタイプ検討
⑥	4.2.2.2 重要シナリオ・モデル・パラメータ検討
⑦	4.2.2.3 1F事故廃棄物の特徴を考慮した品質管理下安全評価検討

	頁
4.2 処分概念の提示及び安全評価手法の開発	
4.2.1 処分概念提示に必要な情報・知識の調査	
4.2.1.1 処分概念の妥当性論証に必要な情報・知識の検討	
(1)多様な1F事故廃棄物に対する処分概念構築の手順案	5
(2)処分概念構築の試行	18
(3)改良後の処分概念の試行 解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分	32
(4)改良後の処分概念の試行 水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分	89
(5)改良後の処分概念の試行 水処理二次廃棄物(KURION)中深度処分	134
(6)処分概念を構築するための要件案及びその要件案充足に必要な情報・知識	141
(7)処分概念の妥当性論証に必要な情報・知識の検討のまとめ	182
4.2.2 安全評価手法開発の試行	
4.2.2.1 ストーリーボードのプロトタイプ検討	183

4. 処理・処分

4.2 処分概念の提示及び安全評価手法の開発 研究開発の目標とアプローチ

■ 目標

2021年度に示した処理・処分方策とその安全性に関する技術的見通しを踏まえ、**固体廃棄物の特徴に応じた廃棄物ストリームの構築**に向けて、性状把握を進めつつ、

- **処理・処分方策の選択肢の創出とその比較・評価**を行い、
- 固体廃棄物の具体的管理について**全体として適切な対処方策の提示**に向けた検討を進める。(NDF技術戦略プラン2022より抜粋)

「追跡可能性を確保した廃棄物ストリームの最適化のための処分安全評価手法の整備」

■ これまでの安全評価をベースにしつつも、異なるアプローチが必要。

- 廃棄物の性状・発生量をはじめ、現時点では、**多くのファクターに不確実性**が存在する中で、**安全に処分できる見通しを示す**ことが求められる。
 - **不確実性をすべて保守的に扱うのではなく、できるだけ現実的かつ保守的な設定を出発点とし、どのファクターにどれくらいの保守性を見込んだ評価結果なのかを定量的に示す。また、不確実性の将来的な増減を考慮した感度解析で、安全に処分できる条件範囲を示す。**
 - **処分概念・オプションの選択肢を増やし、その比較をする。**
- 処理や性状把握等**上流工程の最適化に必要な要求事項**に係る情報の**フィードバック**が求められる。
 - **安全に処分できる条件範囲(仮の廃棄物受入基準(以下、WAC(Waste Acceptance Criteria)という。))や感度が高く低減してほしい不確実性を示す。**
 - **検討過程の透明性・追跡性確保のため、安全評価条件の根拠・結果を論理的に整理・文書化する。**

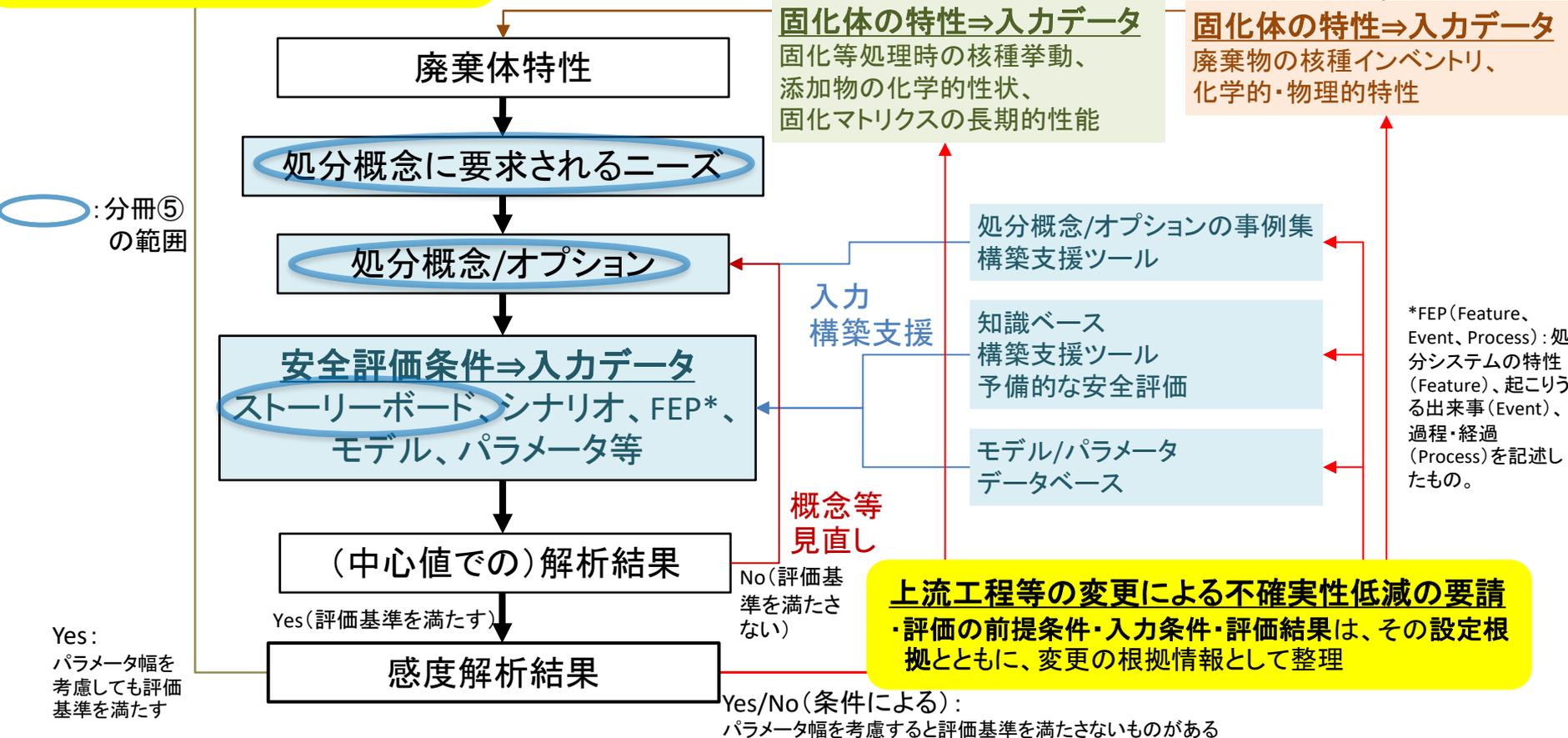
4.2 処分概念の提示及び安全評価手法の開発

廃棄物ストリーム合理化に向けた処分安全評価を中心とする情報の流れと本項目の範囲

- 廃棄物ストリームの合理化における情報の流れを処分概念構築とそれに対応した安全評価解析を実施することを中心に据えて整理
- 固化処理技術や性状把握等の基礎研究に基づいた入力データを用いて、構築した処分概念オプション案の成立性を種々のツールを用いて評価し、検討結果に応じて基礎研究の実施内容にフィードバックをかけることを表現

廃棄体特性データ⇒WACの候補

・評価の前提条件・入力データ・評価結果は、その設定根拠とともに、セーフティーケースへの格納情報として整理



Yes: パラメータ幅を考慮しても評価基準を満たす

Yes/No (条件による): パラメータ幅を考慮すると評価基準を満たさないものがある

4.2.1 処分概念提示に必要な情報・知識の調査

4.2.1.1 処分概念の妥当性論証に必要な情報・知識の検討

■ 検討の進んでいる廃棄物ストリームについて、処分概念に求められるニーズ及びニーズへの対応策として適切な処分概念オプション案を検討する。

- 2021年度までの調査に基づく知見や1F事故廃棄物の特性をベースに、規制要件等の新たな検討条件を加え、廃炉工程や処分の安全性に関する考慮すべきリスクなど、処分概念構築において取り組むべき問題点を明確化する。
- 各リスクに対して適用し得る予防策や影響緩和策等のニーズを提示する。
- ニーズへの対応策として具体的な技術オプションを抽出し、それぞれの対策の効果及びこれを踏まえたリスク低減の複数の経路について、エビデンスベースの信頼性評価等を行い、その中で合理的となり得る処分概念オプション案を提示する。

■ 処分概念を構築するための要件案及びその要件案充足に必要な情報・知識を検討する。

- 前項の作業で提示した処分概念オプション案を構築するために満たすべき要件案を提示する。また、その要件案を満たすことで処分概念が適切に構築されていることを論証するための論証モデルのプロトタイプを試作する。
- 試作した論証モデルのプロトタイプに、これまでに得られた種々のエビデンスを対応付けることにより、各論証の充足度や要件案全体としての信頼性を評価する。要件案の論理構造としての弱部(想定される「批判的質問」に答えるだけのエビデンスが現状では欠けている箇所など)を抽出するとともに、これらの弱部に対する対応方策(対策としての有効性と研究の優先度)を検討する。

■ セーフティーケース構築に向けた基盤情報を整備することを目的とした一連のリスクマネジメント手法を用いて、セシウム吸着装置の水処理二次廃棄物(以下、KURIONという。)、解体廃棄物(コンクリート)に対して処分概念案の構築及び要件案の検討を試行した。

(1) 多様な1F事故廃棄物に対する処分概念構築の手順案

(1)多様な1F事故廃棄物に対する処分概念構築の手順案

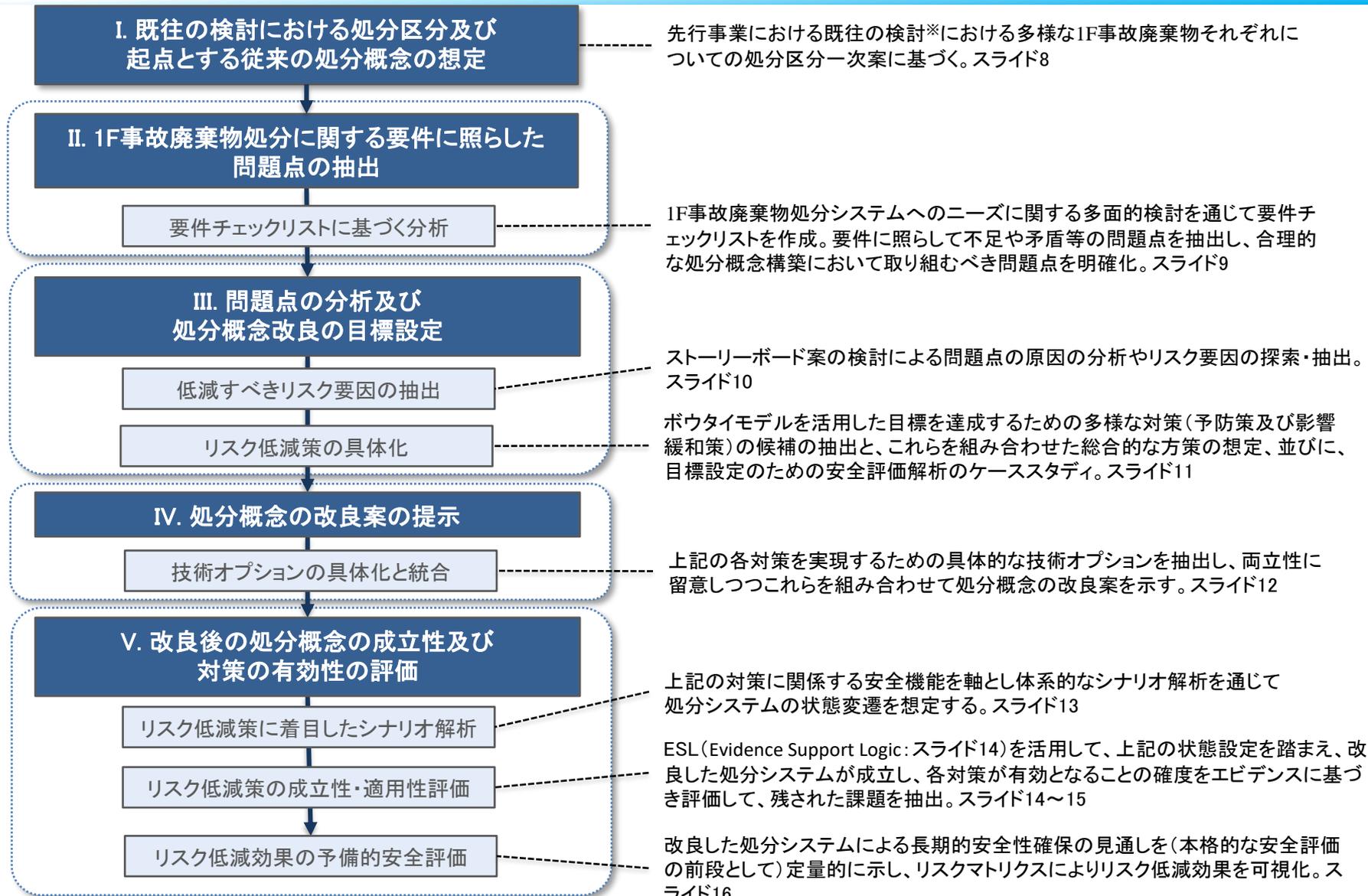
■ 1F事故廃棄物についての処分概念構築

- **背景**: 1F事故廃棄物には様々なものが含まれ、かつ、これらは原子力施設の通常の運転によって発生する従来の廃棄物とはインベントリや性状あるいは物量等が異なるため、それぞれの廃棄物の特性に適した処分概念を選択することが必要となる。
- **目的**: 既往の処分概念(トレンチ、ピット、中深度及び地層処分)を起点としつつ、これらを種々の1F事故廃棄物に適用した場合の問題点を抽出し、これらに対して変更や改良を施すことにより合理的な処分概念を具体化する。

■ 処分概念構築の手法を体系化することの必要性

- **廃棄物の多様性及び事業が学際的なものであることに関するニーズ**: 多様な1F事故廃棄物の処分概念が全体として適切なものとなるためには、全ての廃棄物、関連するすべての分野に共通した手法を適用し、連携を密にして一貫した水準を保つ必要がある。
- **作業の効率性に関するニーズ**: それぞれが数十年を要した処分概念構築(地層処分の場合で50年程度)を多種類の1F事故廃棄物について効率的に行うためには、検討の手順や手法、使用するツール等を標準化することが有用となる。
- **処分概念の合理性に関するニーズ**: 処分概念の合理性を示すためには複数の技術オプションについて並行して検討を行い問題点や矛盾のないものを選定することが必要となるため、複線的な検討プロセスの全体を体系化することが求められる。
- **不確実性及び事業の長期性に関するニーズ**: 廃棄物の性状等について不確実性の大きい現状から事業の進捗に応じて新たな情報が得られるとともに、長期的には事業を取り巻く環境の変化や従事者の世代交代も生じる中で随時その時点での処分概念を見直す必要が生ずる。この際、変更すべき点を的確に見出しそれらに連動して改訂すべき箇所を明確にするためには、元の処分概念がどのような基準やエビデンスに基づき構築されたものであるか等の経緯を記録することが必要となる(変更管理)。
- **ステークホルダーの合意形成に関するニーズ**: 採用する処分概念について多様なステークホルダーの合意を得るためには、結果としての処分概念の妥当性のみならず検討プロセスを開示して手続的正当性も併せて示す必要がある。

(1)多様な1F事故廃棄物に対する処分概念構築の手順案



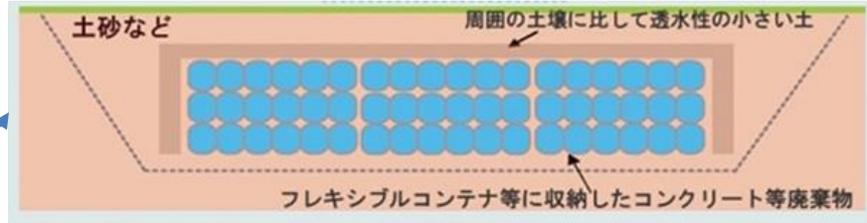
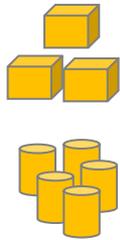
※国際廃炉研究開発機構（IRID）、平成30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金（固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発）」2020年度最終報告、令和3年10月（2021）。

(1) 多様な1F事故廃棄物に対する処分概念構築の手順案

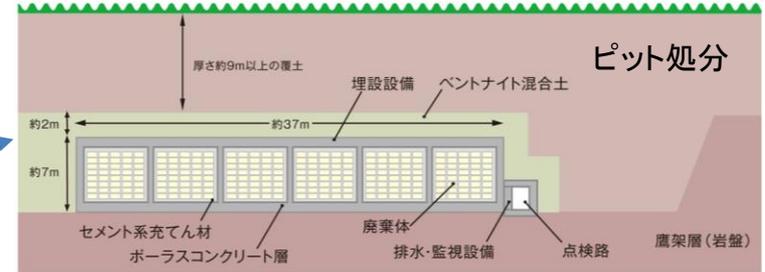
I. 既往の検討における処分区分及び起点とする従来の処分概念の想定

多様な1F事故廃棄物それぞれについての既往検討の処分区分一次案に基づき、従来の処分概念を抽出

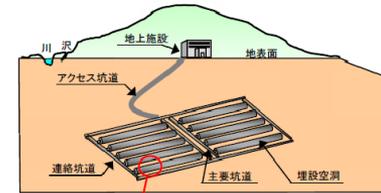
多様な1F事故廃棄物を
既往の一次案
に応じて区分



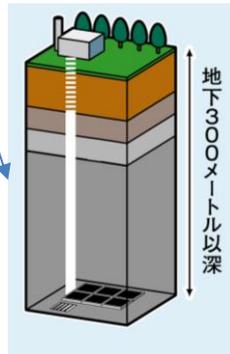
トレンチ処分



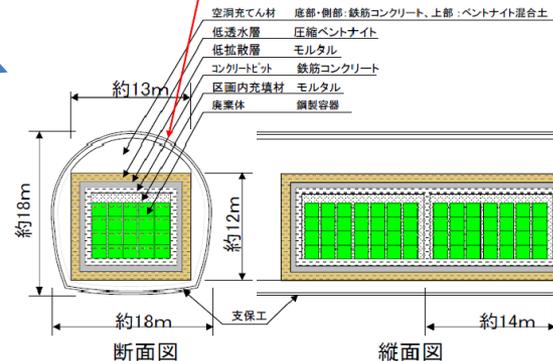
ピット処分



中深度処分



地層処分



断面図

縦断面図

(1)多様な1F事故廃棄物に対する処分概念構築の手順案

II. 1F事故廃棄物の処分概念オプションに求められる要件の抽出と候補となるオプションの問題点の抽出

- 1F事故廃棄物の処分概念オプションの検討にあたっては、長期的安全性確保を前提にしつつも、種々の観点からの“合理性”を少なくとも定性的には視野に含める必要がある(例えば、すべての1F事故廃棄物を地層処分することにより長期的安全性確保の確度はかなり高いものとなるが、このような極端な概念は合理性を欠くものとなる懸念がある)。
- 1F事故廃棄物処分が未だサイトジェネリックな検討段階であり、廃棄物の物量や特性にも不確実性が残されていること、さらに、将来のステークホルダからの多様なニーズが予想されることから、以下のような点を考慮して、1F事故廃棄物に適した処分概念オプションに将来求められる可能性のある要件を、多面的な視点から抽出し、チェックリストの形で整理した。
 - 長期的な安全性の確保のために多様な1F事故廃棄物に特徴的なリスクに対して適切な対策をとること、また、各廃棄物の性状や物量に照らして過不足のない安全確保方策を採用すること。
 - 候補となる地質環境が多岐にわたることから、幅広い条件に適用可能な汎用性のある処分概念、あるいは好ましい条件の「地の利」を活かすことのできる処分概念とすること。
 - 多様な廃棄物を横断する包括的な対策を講ずることにより全体的な合理性を追求すること、また、その際に異種廃棄物や異種材料間の熱・力学・化学的な両立性に配慮すること。
 - 従来の廃棄物に比して物量が顕著に異なる場合にも経済的合理性を確保できること。
 - 社会的ニーズに応えるために事業の可逆性や廃棄物の回収可能性等を確保すること。

要件チェックリストに基づく分析

1F事故廃棄物処分の要件

1F廃棄物の合理的概念の要件	適否	
1F廃棄物の特性への対応	△	通常廃棄物と異なる核種組成・濃度及び物量への対応 (過剰あるいは不適切な対策になっていないこと)
幅広い地質条件への適用	○	境界回避
	△	1F廃棄物に特徴的なリスクの低減 水素ガス影響の抑制
	△	有機物・コロイド影響の抑制
	○	幅広い地下水流動への対応
	△	幅広い生活圏への対応(希釈水量など)
	△	汎用性: 各々の幅広いサイトに適用可能 地盤特性による影響(割れ目影響など)の低減
	△	幅広い化学条件への対応 処分容器の腐食耐性への対応
	△	幅広い物理条件への対応 核種の浸透性を低下させる因子への対応
	○	地盤・浸食による処分場の地盤接近への対応
	△	適応性: 地の利」を活用可能
シナジー効果	○	異種廃棄物のプレシナジーによる平均核種濃度の低減
	△	処分場ないスペースの有効活用
	△	異種廃棄物中の同一核種の濃度干渉による移行低減
	△	他の廃棄物に好ましくない化学環境(アルカリ性、還元性等)の維持
廃棄物やバリア材の多様性への対応	△	将来の影響(核種・核種)の重量回避
	△	異種廃棄物間あるいは異なるバリア材間の両立性 熱的相互干渉の影響回避
	△	相互作用の影響回避 化学的相互干渉の影響回避
	△	力学的相互干渉の影響回避
スクリーンシティ	○	処分場規模に依存しない経済合理性(物量が少ない場合の単体上昇抑制)
	△	処分費用のスケール効果(物量が多い場合の処分単価低減)
社会的ニーズへの対応	○	事業の可逆性
	○	廃棄物の回収可能性

廃棄物中のCs-137及びSr-90濃度がビット処分の基準線量相当濃度を上回っており、従来のビット処分と同様に300年間の制度的管理期間直後の大規模掘削・居住シナリオを想定すると影響が許容できない程度となる。600年～800年程度の間接近の回避あるいは間接近時の影響緩和の対策が必要となる。また、C-14についても廃棄体から瞬時放出の場合は目安線量を上回る可能性があるため固化体による溶出制限が必要。他方、物量はL2廃棄物に比べて小さく、処分概念を変更する余地はある。

ガラス固化等により水分を蒸発させた上で密封性容器に封入し放射線強度が高い初期の数百年間地下水との接触を避ける、あるいは多孔質モルタルやガスバント設置により発生した水素ガスの移行経路を確保する等の対策が必要。

有機物の存在が確認された場合、ガラス固化による有機物の分解あるいは施設底部へのベントナイト層敷設によるろ過機能が必要。

雨水や井戸水等を考慮した場合には最大被ばく線量が目安(10 μSv/y)を上回る可能性。

地下水シナリオにおける支配核種はC-14であり、その安全確保は天然バリア中での移行遅延には依存しないため岩盤中の透水性割れ目の影響は小さい。ただし、有機物影響によりCs-137の移行遅延が制限された場合には影響が生ずる可能性がある。

処分容器による閉じ込めは想定していないが、上記の密封性容器を用いる場合には要検討。

地下水シナリオにおける支配核種はC-14であり、その安全確保は天然バリア中での移行遅延には依存しないため核種吸着性を低下させる因子の影響は小さい。ただし、有機物影響によりCs-137の移行遅延が制限された場合には影響が生ずる可能性がある。

いずれもC-14が支配的影響を持つ中深度処分相当水処理二次廃棄物間の濃度干渉による移行率低減効果が顕著となるようなレイアウト・バリア構成が採用できれば有効。

いずれもC-14が支配的影響を持つ中深度処分相当水処理二次廃棄物間の影響が重なった場合、地質環境条件によっては目安線量(10 μSv/y)を上回る可能性。

地下水シナリオにおける支配核種は有機C-14であり、その安全確保は処分場内の化学環境に依存するものではないため廃棄物中のフェロシアン化合物や有機物等の影響は小さいと考えられる。・ガラス等の固化材を用いる場合には処分場内のセメント系材料の溶解によるpH上昇に伴う溶出促進を避ける方策が必要(廃棄体周辺にベントナイト等pH緩衝材として配置する等)。

遮蔽性能を担保するために肉厚の鉄製容器を用いる場合には腐食膨張による長期的な処分場の変形を考慮する必要がある(L2廃棄物ビット処分では考慮されていない1F廃棄物に特徴的な課題)。

各廃棄物に、候補となる処分概念オプションを適用した場合の問題点を各要件に照らして抽出

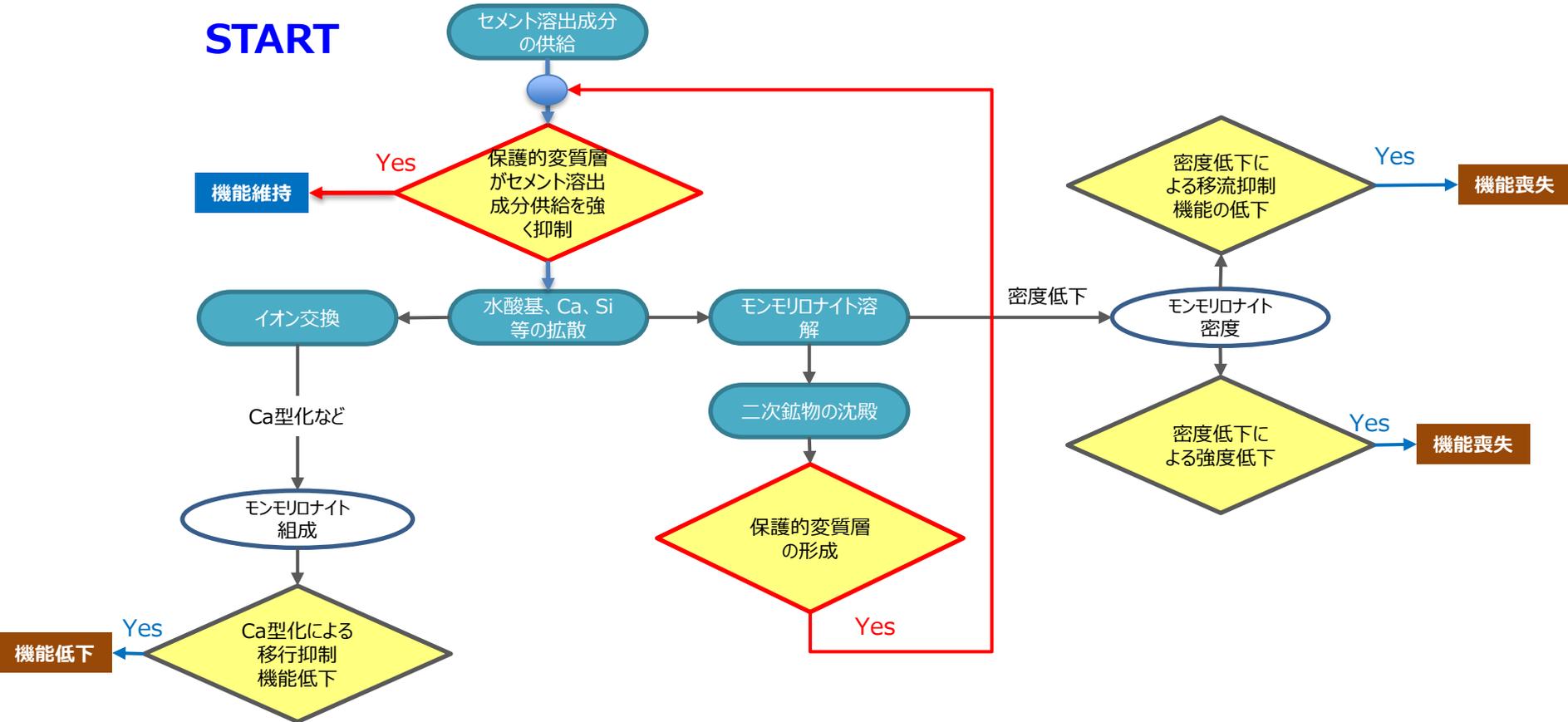
(1) 多様な1F事故廃棄物に対する処分概念構築の手順案

III. 問題点の分析及び処分概念改良の目標設定

- 各廃棄物に、候補となる処分概念オプションを適用した場合、抽出された問題点がどのような要因により、時間とともにどのように顕在化するかを、ストーリーボードのプロトタイプを構築して分析する。

低減すべきリスク要因の抽出例

START

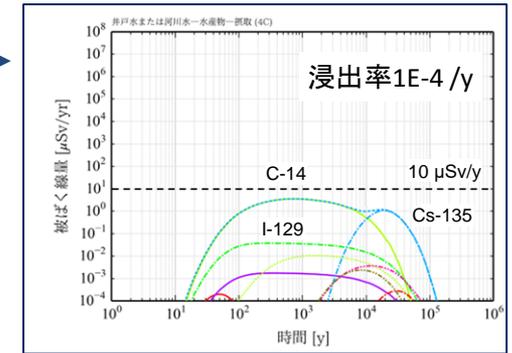
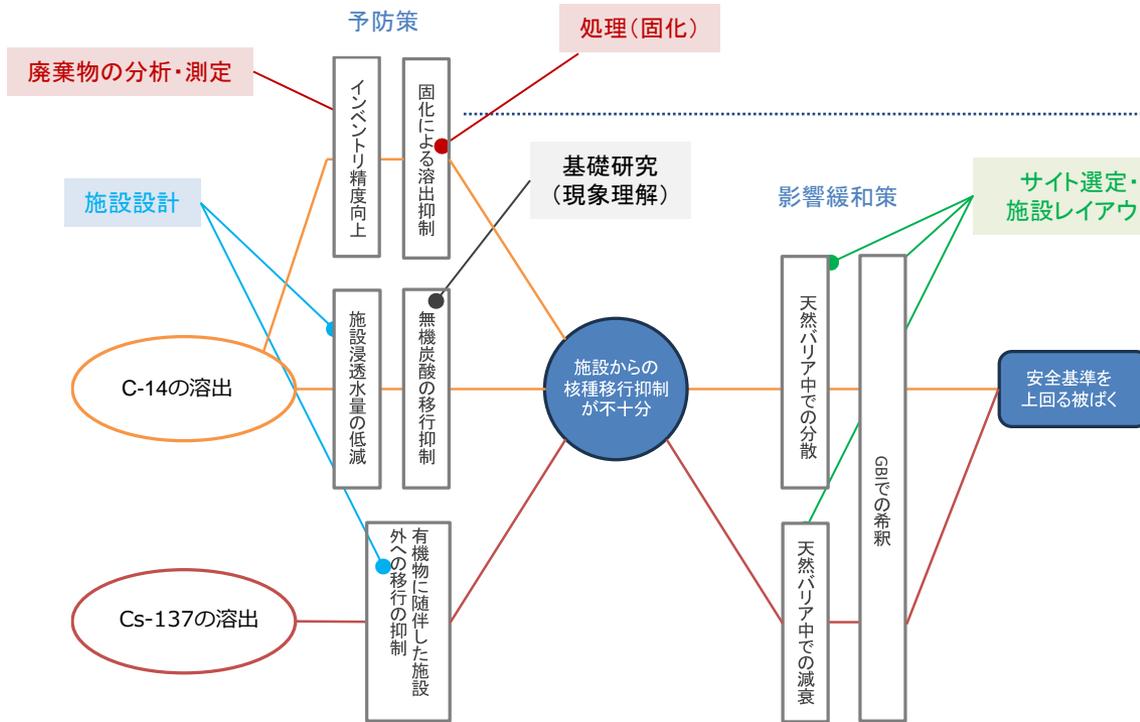


(1)多様な1F事故廃棄物に対する処分概念構築の手順案

III. 問題点の分析及び処分概念改良の目標設定

- **ボウタイモデル**: 1F事故廃棄物処分の長期的安全確保のための予防策及び影響緩和策について、関連する様々な専門分野の知見を活用することに加え、上流側にあたる廃棄物の分析・測定や処理等の技術も考慮して学際的・工程縦断的対策のポートフォリオを構成する。
- **安全評価解析のケーススタディ**: 各対策について予備的安全評価(感度解析)を行い、問題点のうち特に安全性に関するものについて十分なリスク低減効果を上げるために必要な安全性能等のレベルを把握し、その結果に基づき技術的対策を具体化する際の目標を設定する。

リスク低減策の具体化



安全評価解析のケーススタディに基づく技術オプションの目標設定(最大被ばく線量10 μSv/y以下)

学際的検討に基づく複合的なリスク低減策(ボウタイモデル)

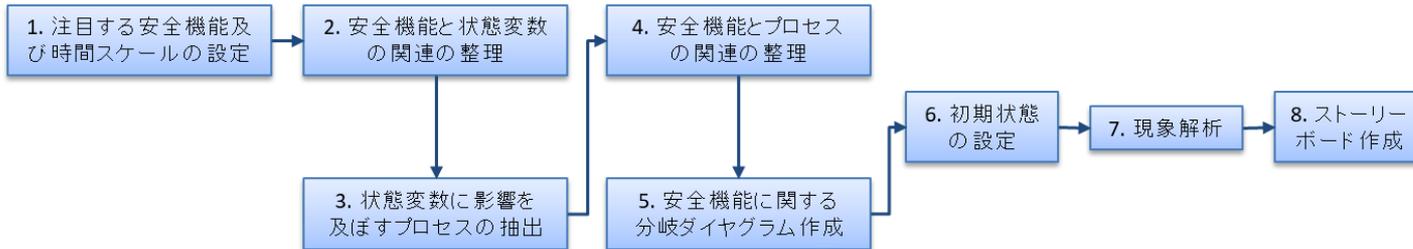
(1)多様な1F事故廃棄物に対する処分概念構築の手順案

V. 改良後の処分概念の成立性及び対策の有効性の評価

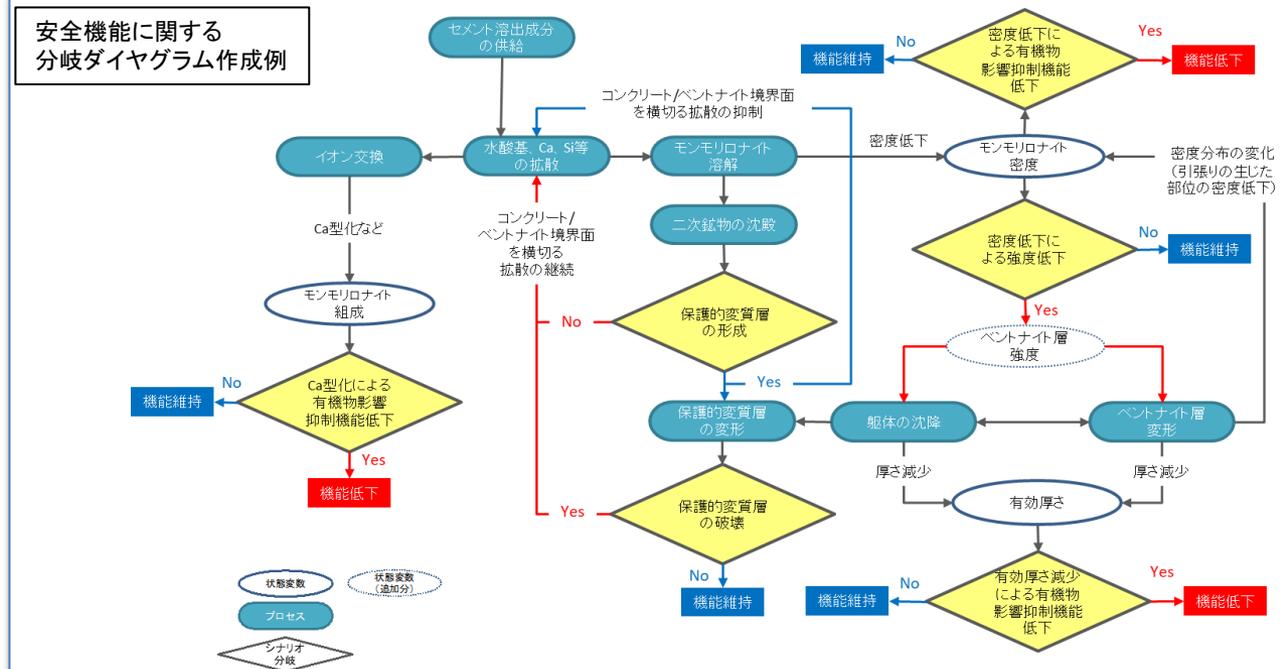
■ 各対策に関する安全機能を軸とし、体系的なシナリオ解析を通じて処分システムの状態変遷を想定する。

リスク低減策に着目したシナリオ解析

トップダウン的検討



ボトムアップ的検討



(1)多様な1F事故廃棄物に対する処分概念構築の手順案

V. 改良後の処分概念の成立性及び対策の有効性の評価

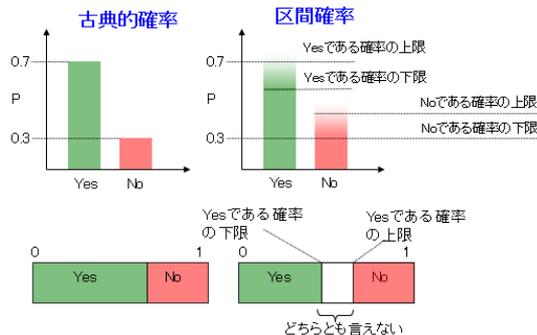
リスク低減策の成立性・適用性評価

- ESL(Evidence Support Logic)は、不確実性存在下で、多様な証拠に基づき検討の対象とする命題が真であることをどの程度の確信を持って主張することができるかをエビデンスと専門家の判断に基づき自己評価する手法。
 - 命題の真偽を判断するために個々にエビデンスによる評価が可能となるような小さな命題に順次細分化することで階層的な論理構造(Decision tree)を作成。
 - 推論結果を真か偽に二分するのではなく、「どちらとも言えない」という不確実性を許容する区間確率を用いることが特徴(特に、入手可能なデータが限定される状況で有用)。
 - 多様な証拠に基づき、検討の対象とする命題が真であることを全体としてどの程度の確信を持って主張することができるかを証拠理論(Evidence theory)に基づき評価。

ESLにおける信頼性評価の算法(Evidence theory)※

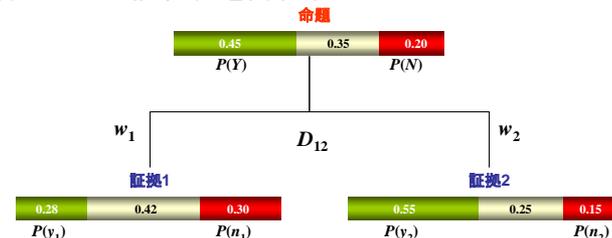
区間確率

- 各エビデンスがそれぞれ上位の命題を支持する程度(緑)、否定する程度(赤)を専門家の知見に基づき主観確率として評価。
- 支持と否定の主観確率の和は必ずしも1とはならず、残差が情報の不確実性のためにどちらとも言えないという判断保留分に相当する。



区間確率の上位命題への伝播

- 各下位命題やエビデンスの重み(十分性:それぞれが上位命題を支持している事例で実際に上位命題が成立していたものの割合(条件付き確率)。専門家の経験に基づき設定)を考慮し、これらで重み付けした和をとることで多面的論拠全体としての信頼性を評価。



$$P(Y) = w_1 P(y_1) + w_2 P(y_2) - \rho_{12} \text{Min}(w_1 P(y_1), w_2 P(y_2))$$

$$P(N) = w_1 P(n_1) + w_2 P(n_2) - \rho_{12} \text{Min}(w_1 P(n_1), w_2 P(n_2))$$

$$\text{ただし、} \rho_{12} = \frac{(1 - D_{12})(w_1 P(y_1) w_2 P(y_2))}{\text{Min}(w_1 P(y_1), w_2 P(y_2))} + D_{12}$$

$$\text{不確実性} = 1 - (P(Y) + P(N))$$

※ Pauley A, Metcalfe R and Egan M (2012). Geological disposal programme design and prioritization in the face of uncertainty: use of structured evidence support logic techniques. Mineralogical Magazine, December 2012, vol 76(8), pp. 3497-3507.

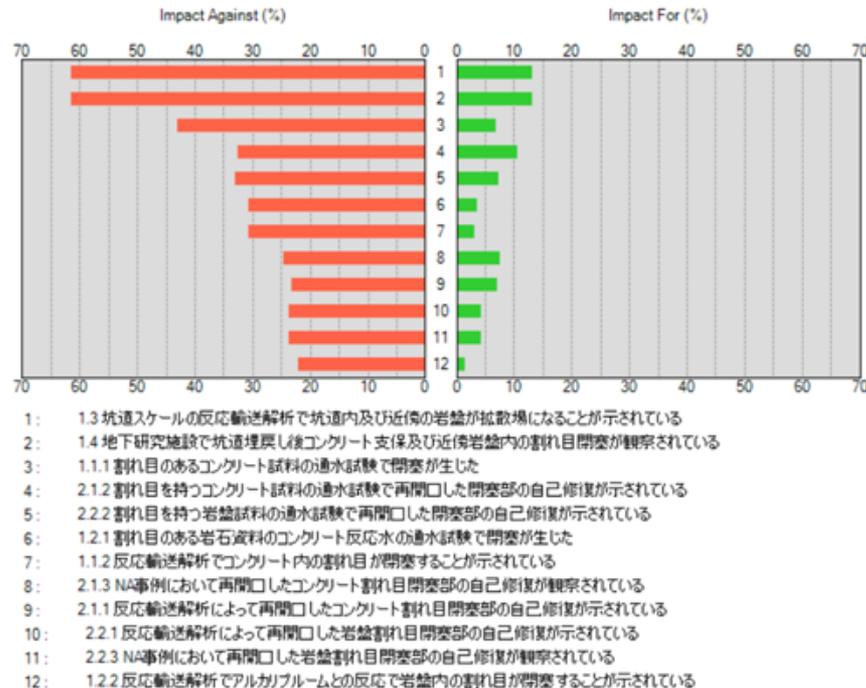
(1)多様な1F事故廃棄物に対する処分概念構築の手順案

V. 改良後の処分概念の成立性及び対策の有効性の評価

リスク低減策の成立性・適用性評価

- 情報の不足しているリスクや予測の困難なリスクに対して、個々には不十分あるいは断片的なエビデンスの全体を用いて対策の有効性や個々の技術オプションの信頼性等を評価することに適用できる。
- **不確実性が顕著な状況**でエビデンスの重要性に関する**感度解析**(Tornado plot 下図参照)を行うことにより、**次のようなエビデンスを入手すれば最も効果的に信頼性を向上することができるか**(不確実性を低減できるか)を把握することができるため、その結果を次段階の研究・開発にフィードバックして合理的な計画立案を支援可能。

コンクリート支保との相互作用により坑道埋め戻し材の周囲はほぼ常時拡散場となる



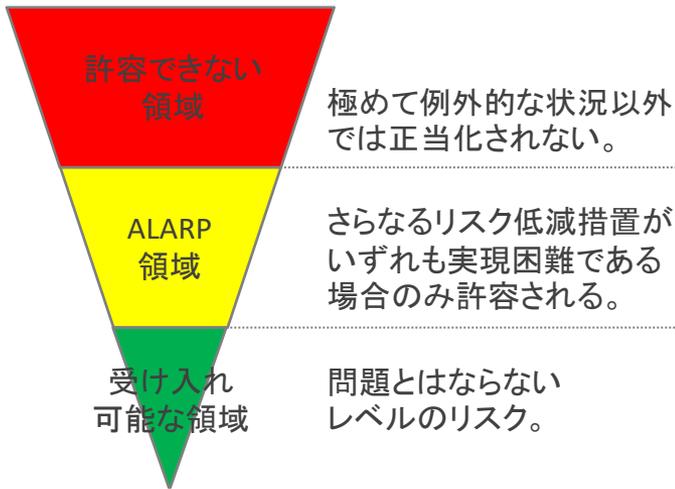
エビデンスの重要性に関する感度解析(Tornado plot)の例※

(1)多様な1F事故廃棄物に対する処分概念構築の手順案

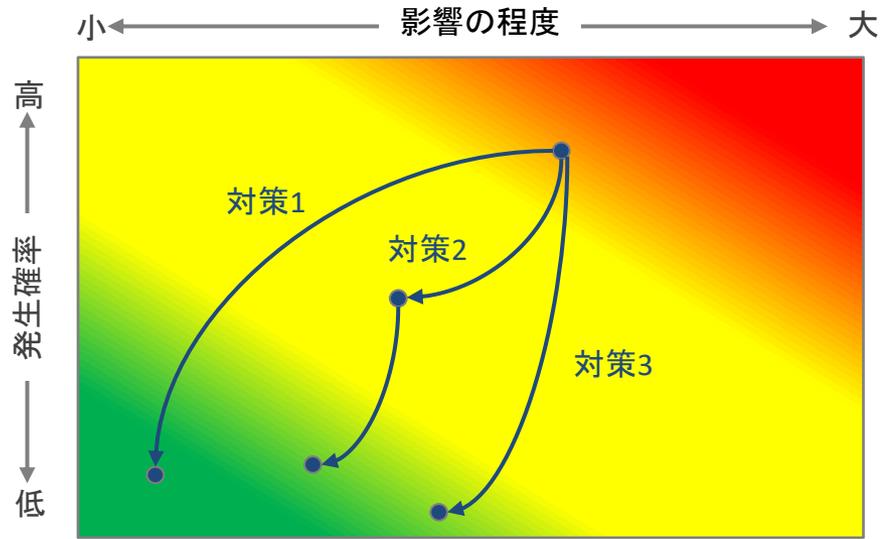
V. 改良後の処分概念の成立性及び対策の有効性の評価

リスク低減効果の予備的安全評価

- 長期的安全確保を前提として、種々の1F事故廃棄物の特性と物量及びその不確実性に配慮した適切な処分概念オプションを具体化する。
- 長期的安全性及びそれとトレードオフの関係となり得るコストや時間あるいは従事者被ばく等の他の指標との間のバランスを(現段階では定性的に)考慮し「適切な処分概念オプション」を模索するために、ALARP(As Low As Reasonably Practicable)に則したリスクマネジメントの考え方を適用する。



ALARPの概念



リスクマトリクスにおける合理的なリスク低減策の模索

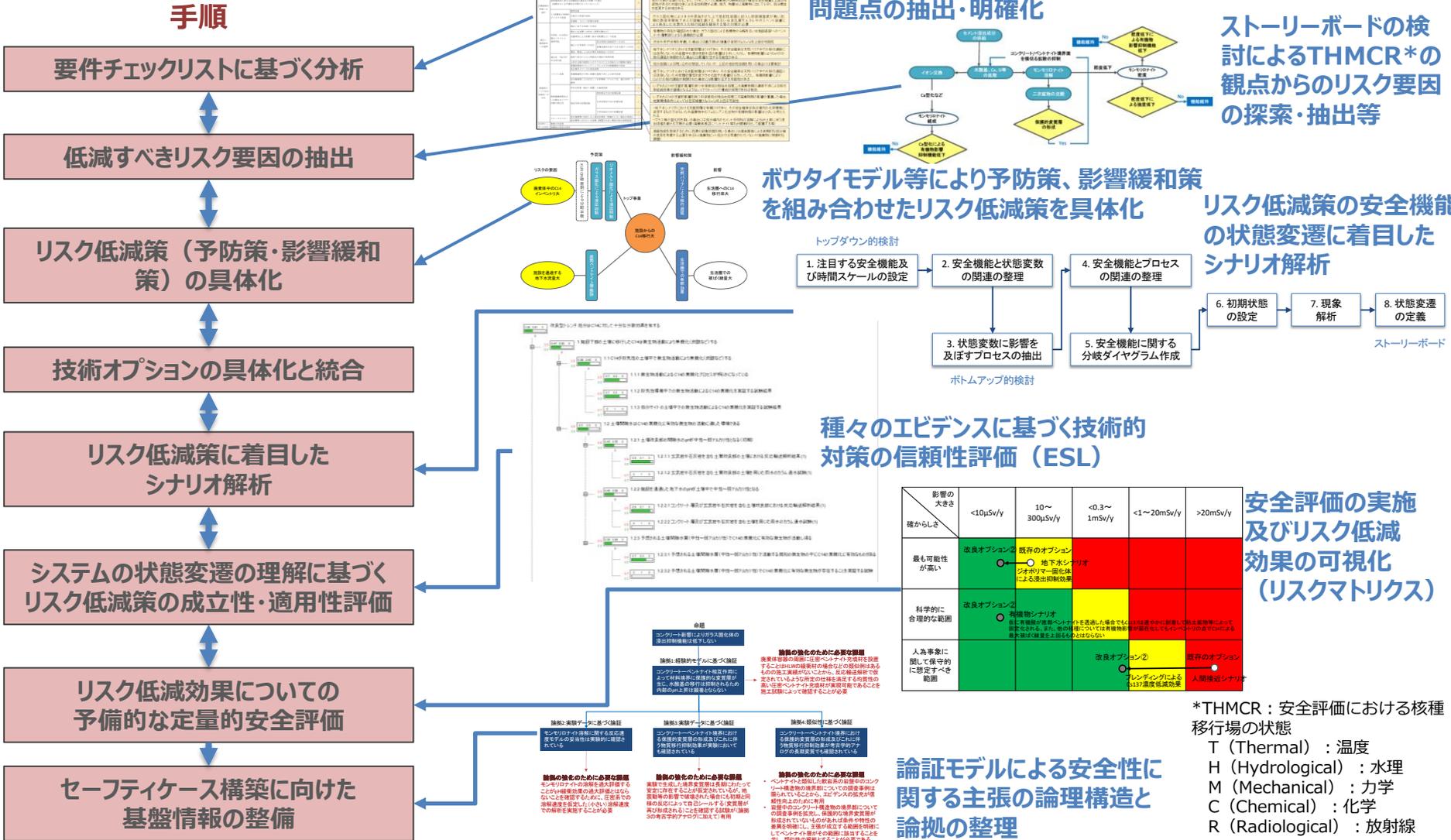
ALARPに則した合理的対策とは、“問題とはならないレベル”にまでリスクを低減可能な種々の対策オプションのうち、コスト、時間、従事者被ばく等の指標に照らして適切なものを選択すること。

(1)多様な1F事故廃棄物に対する処分概念構築の手順案

まとめ

■ 多様な廃棄体特性に合わせた処分概念を具体化するために行う一連のリスクマネジメント手法を作成

要件チェックリストを作成し問題点を抽出した後、安全評価解析を行います。さらに、技術オプションを具体化した上で、システムの成立性・有効性を半定量的な手法で評価する。このように体系化された手法に則って進めることによって、第三者が、正当性や妥当性を評価しやすい枠組みでのリスク評価手順を作成した。



(2) 処分概念構築の試行

(2) 処分概念構築の試行

I. 既往の検討における処分区分及び起点とする従来の処分概念の想定

廃棄物ごとに適用する処分区分を検討するための参考情報として、既往の検討における代表的な1F事故廃棄物に対する処分区分の検討結果を示した。

各廃棄物の処分概念の一次案※

廃棄物名	処分区分 一次案	処分区 分決定 シナリオ	接近シナリオ 支配核種	地下水シナリオ 支配核種	浸透水 抑制 バリア	浸透水量 (m ³ /y/m ²)	充填材 Kd (*2)(m ³ /kg)
KURION	L1	地下水	I-129, Cs-135(>10%)	C-14, I-129(>10%)	要	3E-3以下	0.004以上
AREVA	L1	接近	Se-79, Tc-99(>10%)	C-14, Se-79(>10%)	不要	—	0.004以上
SARRY	L1	地下水	I-129, Cs-135(>10%)	C-14, I-129 (>10%)	要	3E-3以下	0.004以上
スラリー1_鉄共沈	L1	地下水	Se-79, Tc-99(>10%)	C-14, I-129 (>1%)	要	3E-3以下	0.004以上
スラリー2_炭酸塩沈殿	L1	地下水	Se-79, Tc-99(>10%)	C-14, I-129 (>1%)	要	3E-3以下	0.004以上
瓦礫1	L3	接近/ 地下水	Cs-137, Sr-90(<1%)	C-14, I-129 (>1%)	不要	—	0.004以上
瓦礫2	L2	地下水	Cs-137, C-14(>1%)	C-14, I-129 (>1%)	要	1E-2以下	0.004以上
瓦礫5	L1	地下水	Tc-99, Cl-36(>10%)	C-14, I-129 (>1%)	要	1E-3以下	0.004以上
RPV廃棄物(事故前L1)	地層(*1)	接近	Tc-99, Ra-226(>10%)	C-14, TRU(~10%)	要	1E-4以下	0.004以上
PCV廃棄物(金属)(事故前L2)	地層(*1)	接近	Tc-99, Ra-226(>10%)	TRU	不要	—	—
建屋内廃棄物(金属) (事故前L3)	L1	地下水	C-14, Cs-137(>10%)	C-14, I-129 (<1%)	要	3E-3以下	0.004以上
建屋内廃棄物(コンクリート) (事故前非放)	L2	接近/ 地下水	Cs-137, Tc-99(>10%)	C-14, I-129 (>10%)	要	1E-2以下	0.004以上

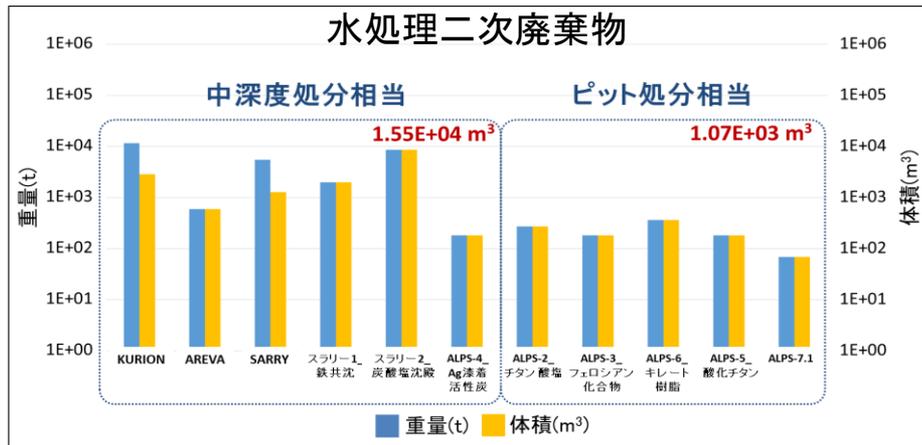
*1: 本評価ではL1で処分が困難な廃棄物は、暫定的に地層処分とした。地下水シナリオの支配核種はL1に対する値。

*2: 地下水シナリオ支配核種に対する充填材Kd。

(2) 処分概念構築の試行

I. 既往の検討における処分区分及び起点とする従来の処分概念の想定

■ 処分概念構築の起点として、各廃棄物について従来の処分区分の割り当て廃棄物の物量グラフ上で各処分区分に属する廃棄物集団をグルーピングし、処分区分ごとの物量を把握することで、1F事故廃棄物処分全体の合理性を考慮した検討ができるようになる。

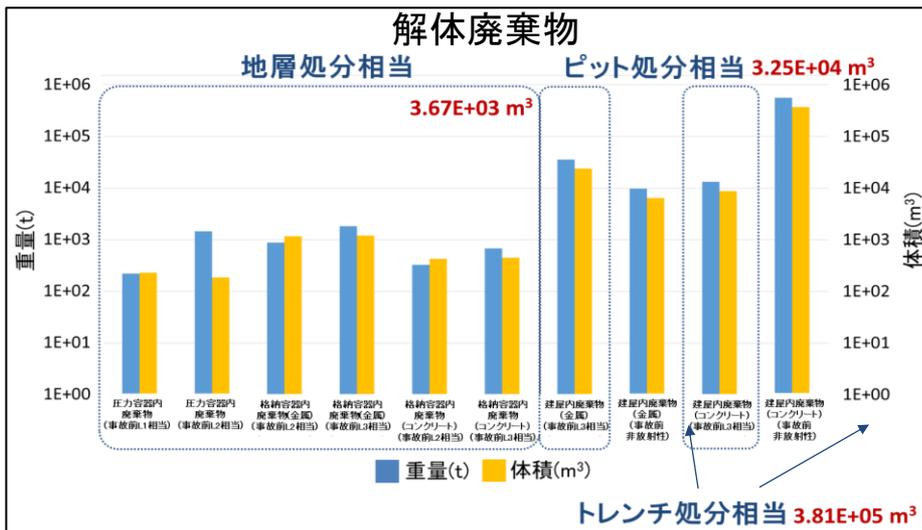


- ピット処分相当に比して中深度処分相当となる廃棄物の量が大きく(約10倍)、対応する通常の廃棄物(全発電所のL1廃棄物)の総量に近い。

- ピット処分の基準線量相当濃度を上回る核種がSr-90、Cs-137に限られることから、中深度処分の合理化あるいはピット処分の高度化等を検討することが重要と考えられる。

- 地層処分相当のうち特にレベルの高いもの(圧力容器内廃棄物(事故前L1相当))以外は人間接近シナリオを除いて中深度処分相当となり得ることから中深度処分概念の改良(ブレンディング等)による対処などを検討することが有用と考えられる。

- 極めて量の大きいトレンチ処分相当の廃棄物に関して、かつての学会標準の評価に比して近年の評価事例(IRIDによるもの等)では生活圏パラメータ(水産物摂取量など)、CやSrの K_d 等についてより厳しい数値に更新されていることから、トレンチ処分によって実際に安全性を確保し得るか否か、必要な改良等について検討を要する。



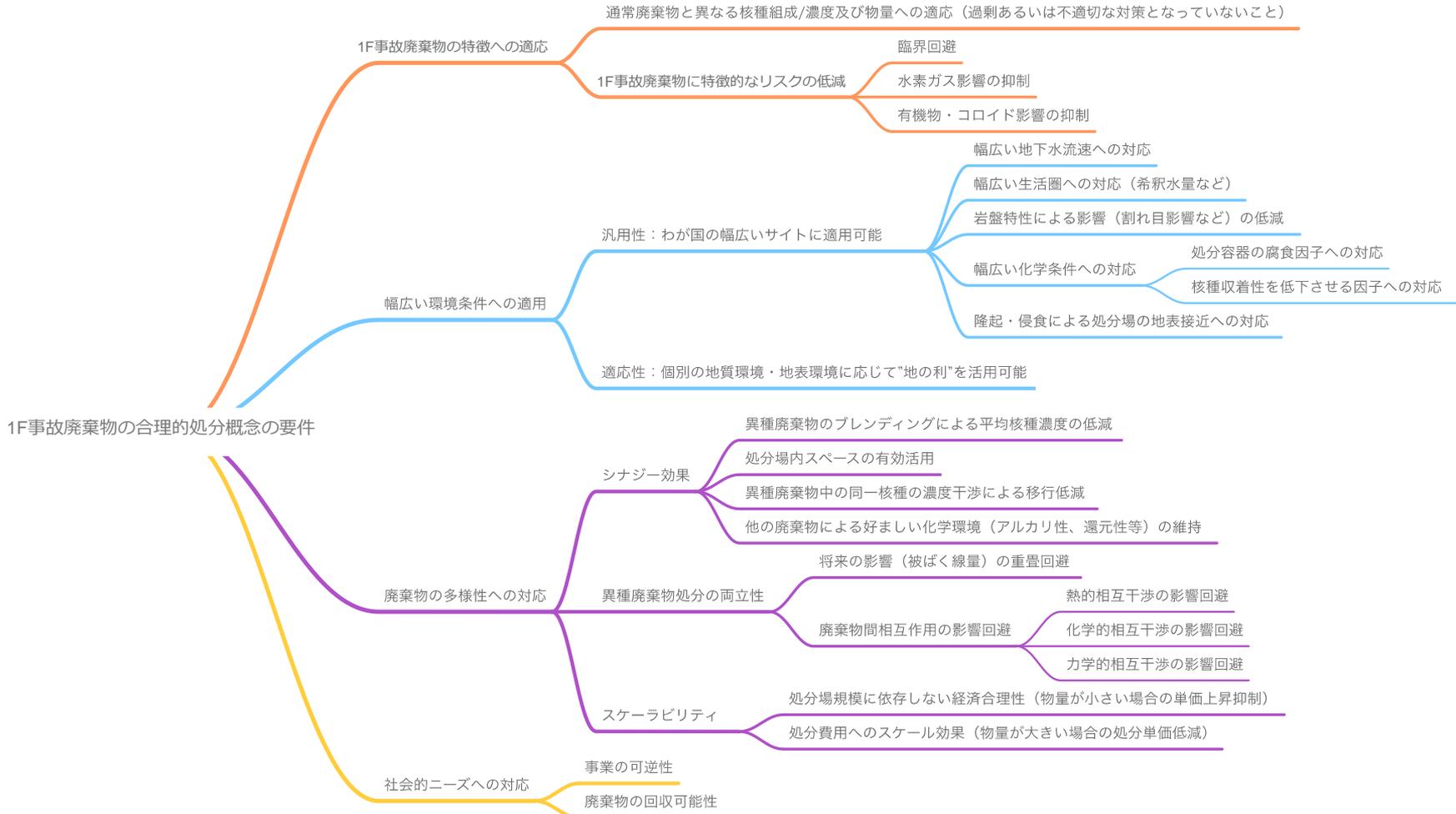
トレンチ処分相当 3.81E+05 m³

(2) 処分概念構築の試行

II. 1F事故廃棄物処分に関する要件に照らした問題点の抽出

■ 処分概念に求められる可能性のある要件の抽出

下図に示す観点から1F事故廃棄物の合理的処分概念構築で取り組むべき課題を明確にして、その要件を抽出した。



(2) 処分概念構築の試行

II. 1F事故廃棄物処分に関する要件に照らした問題点の抽出

■ 要件例①: 通常廃棄物と異なる核種組成/濃度及び物量への適応

● 例1) 水処理二次廃棄物の中深度処分

- 基準線量相当濃度に基づく区分で中深度処分相当となる水処理二次廃棄物の総量は15,500 tであり、中深度処分対象となる通常の廃棄物の総量(約35,000 t(左図参照))の半分程度。
- しかし、核種濃度がピット処分の基準線量相当濃度を上回るのはCs-137あるいはSr-90のみであり、他の核種についてはピット処分相当となる(右図参照)。また、これらの核種の半減期は30年程度であることから、10万年後の処分場深度が隆起・侵食を考慮しても70 m以上であることを求める従来型の中深度処分は過剰となる可能性がある。

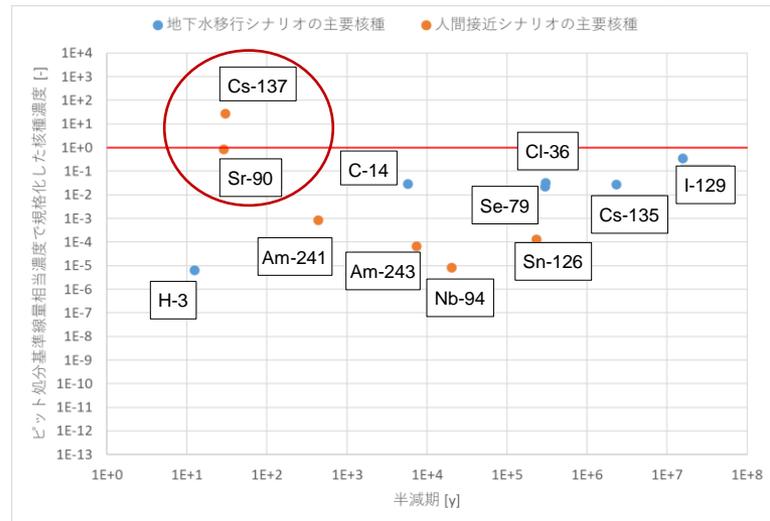
● 例2) 低レベル解体廃棄物(コンクリート)のトレンチ処分

- 事故前非放射性的の建屋内コンクリート廃棄物は大量(約38万 m³)に存在するが、汚染はコンクリート表面近傍に留まっており、分別することなく全体を放射性廃棄物としてトレンチ処分することは不適切となる可能性がある(ただし、表面はつり、粉碎・分別作業等における従事者被ばくなどの問題を考慮して総合的に判断する必要がある)。

廃棄物総重量(約35,000t)



中深度処分対象廃棄物の総量と内訳※



ピット処分の基準線量相当濃度で規格化した核種濃度(KURION)

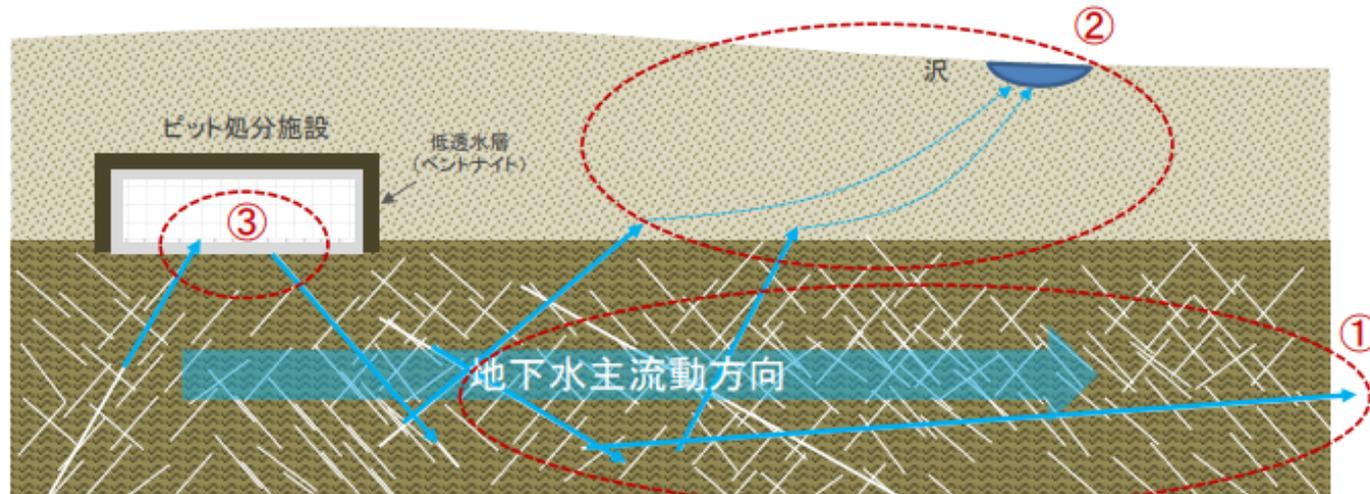
※電気事業連合会, 原子力発電所等の廃止措置及び運転に伴い発生する放射性廃棄物の処分について(平成28年8月23日一部改訂), 2016. 第2回廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合資料(2015年2月12日).

(2) 処分概念構築の試行

II. 1F事故廃棄物処分に関する要件に照らした問題点の抽出

■ 要件例②： わが国の幅広いサイトに適用可能

- ピット処分や中深度処分の安全評価に用いる学会標準モデルは連続体近似の妥当な岩盤の分布する浅地中処分サイトがベースになっており、幅広い岩種において安全性が成立することを確認することが必要。
- ピット処分における割れ目影響の例
 - ① 割れ目による核種移行の促進: 施設と交差する大規模で透水性の高い割れ目ネットワークを介して核種が速やかにGBI(大規模河川等)に到達する(核種移行時間の短縮)。
 - ② 割れ目による上方向分散: 割れ目ネットワークにより核種が主流動方向からずれて上方向に移行する効果(上方向分散)により透水性の第四紀層や土壤に速やかに至るとともに最寄りの小規模のGBI(沢等)に移行する(核種移行時間の短縮と希釈水量の減少)。
 - ③ 施設底部と交差する割れ目による施設通過流量の増大: 低透水層(ベントナイト層)の敷設されていない施設底部と交差する複数の高透水性を介して施設内部を通過する速い流れが形成される(施設からの核種移行率の増大)。



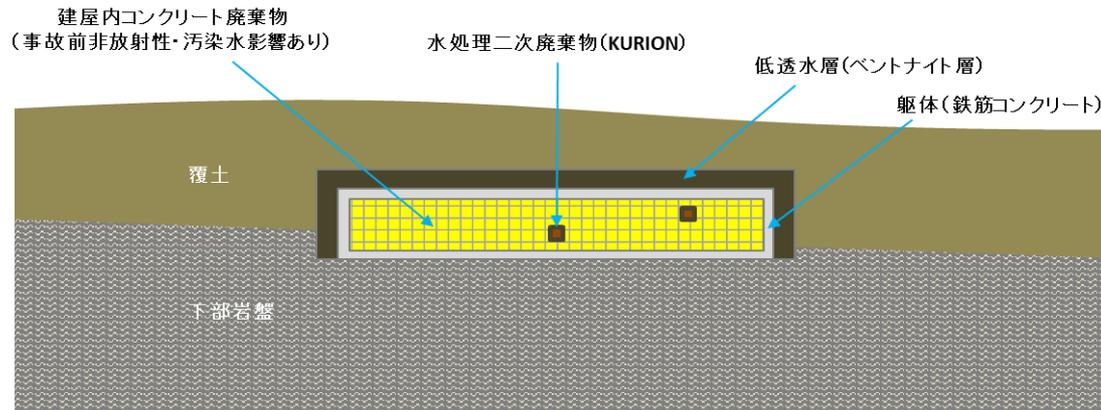
(2) 処分概念構築の試行

II. 1F事故廃棄物処分に関する要件に照らした問題点の抽出

■ 要件例③： 廃棄物の多様性への対応

● 異種廃棄物のブレンドによる平均核種濃度の低減

- 学会標準モデルによれば、制度的管理期間終了後の埋設地の大規模掘削の際の居住者の受ける被ばく線量はピット内の放射性物質(支配的核種はCs-137)の平均濃度に比例する。
- Cs-137濃度の比較的高い水処理二次廃棄物(例えばKURIONのうち特に核種濃度の高い廃棄体)とL2相当と考えられる大量の廃棄物(例えば、汚染水の影響を受けたと考えられる建屋内コンクリート廃棄物)とを一定の割合で混合(ブレンド)することによって、大規模掘削の際の居住者の受ける影響を低減することが可能と考えられる。



KURIONと低レベル廃コンクリートの混合比は1:200あるいは1:20で記録と知識伝承により400年間の人間接近回避を想定

● 処分場内有効スペースの活用

- 地層処分場や中深度処分場におけるアクセス坑道や主要坑道の埋め戻し材として、より低いレベルの廃棄物を用いることによりスペースを有効に活用することが可能。ただし、処分場閉鎖までの期間、これらの低レベル廃棄物を保管するためのスペースが別途必要になるなど、処分場閉鎖までの時系列を念頭において計画全体の合理化を図る必要がある。

(2) 処分概念構築の試行

II. 1F事故廃棄物処分に関する要件に照らした問題点の抽出

■ 要件例④: 異種廃棄物処分の両立性: 被ばく線量の重畳回避、廃棄物間相互作用の影響回避

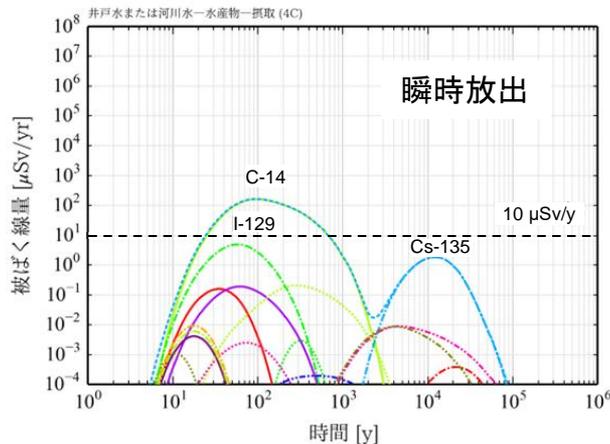
- 水処理二次廃棄物(KURION)の固化による処分時の影響低減等においては、他の水処理二次廃棄物やその他の廃棄物中の重要核種(C-14など)に起因する同時期の線量ピークの重畳を考慮して以下のいずれかの方策をとる必要がある。

- ① ピーク線量を低下させることで重畳効果を考慮しても十分な安全裕度を確保する。
- ② ピーク時期をずらすあるいはGBIが異なる等によって異種の廃棄物間の影響の重畳を回避する。

- 上記の方策のための以下の技術的対策が適用可能であることが当該処分概念の適用性に関する要件となり得る。

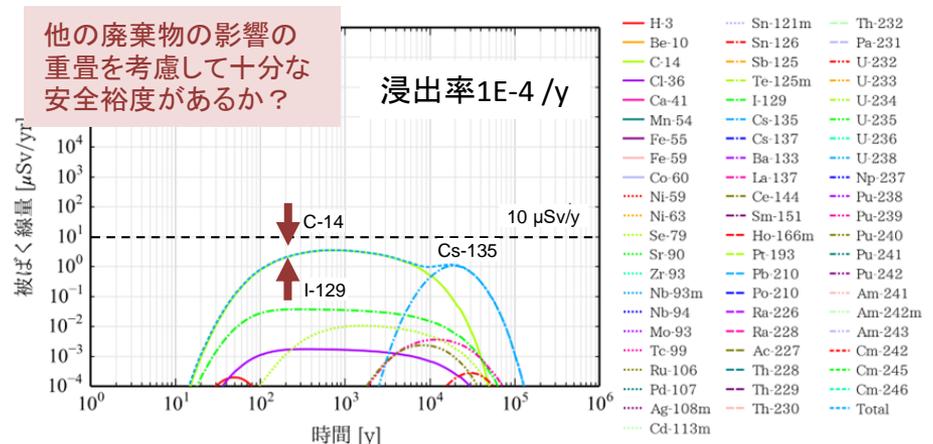
- ① 施設通過地下水流量の低減、固化技術の高度化による核種溶出率の低減、処分容器内での閉じ込めによる減衰、廃棄体間の濃度干渉による移行率低減、低拡散層による人工バリアからの移行率低減及び移行遅延による減衰など。
- ② 地下水移行時間が大きく異なる位置やGBIが異なる位置を選ぶ等の処分場レイアウト。

安全評価解析の例(KURIONピット処分)



ガラス固化
による
浸出抑制

➔



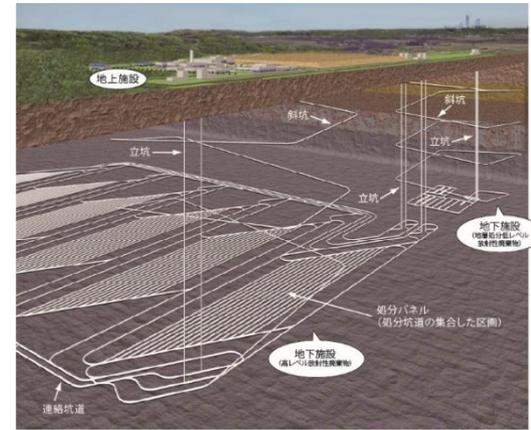
H-3	Sn-121m	Th-232
Be-10	Sn-126	Pa-231
C-14	Sb-125	U-232
Cl-36	Te-125m	U-233
Ca-41	I-129	U-234
Mn-54	Cs-135	U-235
Fe-55	Cs-137	U-236
Fe-59	Ba-133	U-238
Co-60	La-137	Np-237
Ni-59	Ce-144	Pu-238
Ni-63	Sm-151	Pu-239
Se-79	Ho-166m	Pu-240
Sr-90	Pt-193	Pu-241
Zr-93	Pb-210	Pu-242
Nb-93m	Po-210	Am-241
Nb-94	Ra-226	Am-242m
Mo-93	Ra-228	Am-243
Te-99	Ac-227	Cm-242
Ru-106	Th-228	Cm-245
Pd-107	Th-229	Cm-246
Ag-108m	Th-230	Total
Cd-113m		

(2) 処分概念構築の試行

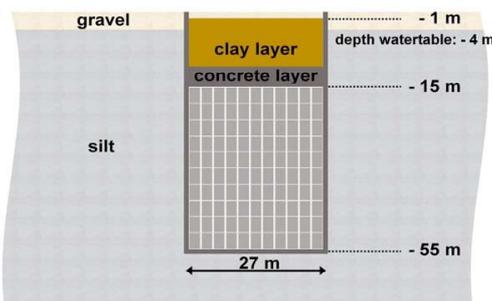
II. 1F事故廃棄物処分に関する要件に照らした問題点の抽出

■ 要件例⑤： スケーラビリティ

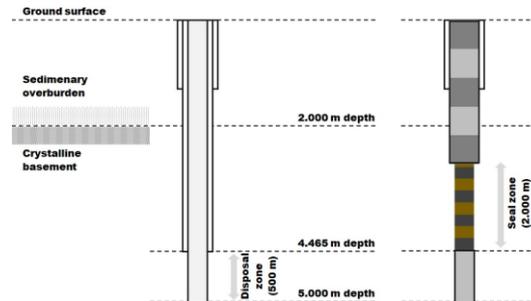
- IAEA※も指摘している通り、従来の地層処分場(右図参照)はアクセス坑道や主要坑道などの設備に関するコストが廃棄物量と比例しない固定費となるため、相当する従来の放射性廃棄物に比して少量の1F事故廃棄物に適用した場合、処分単価が割高になるものと考えられる。
- 他方、以下のような処分概念では処分単価がスケールに依存しないものと考えられる。
 - － 地表からアクセスしクレーン等で廃棄体を地下に定置することの可能なサイロ型処分場(下左図)、地表からボアホール内に廃棄物を定置する深孔処分(下中央図)はほぼ全てのコストが廃棄体の物量比例となる。
 - － 廃鉱山などを処分場に転用する場合、アクセス坑道等は既存のインフラを活用することが可能なため、本来の容量を超えない範囲であれば処分単価は物量によって大きく変化しない。
- 相当する従来の放射性廃棄物に比して1F事故廃棄物が少量である場合や物量に不確実性が大きい場合には経済性に影響を与えることなくスケール可変の概念が望ましい。



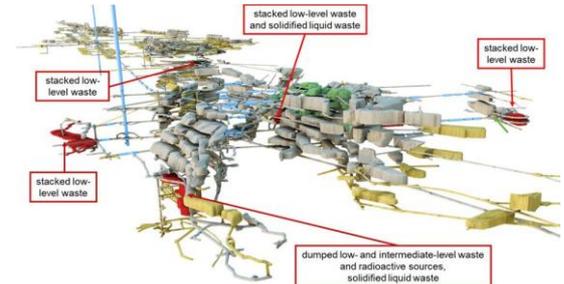
地層処分場のレイアウト例



地表からアクセス可能なサイロ型処分場の概念
VRBINA-KRŠKO (SLOVENIA)



深孔処分の概念例(米国 SSNL)
(左:閉鎖前、右:閉鎖(埋戻し)後)



廃鉱山を転用した処分場の例
(Morsleben)

※ IAEA-TECDOC-1934, Underground Disposal Concepts for Small Inventories of Intermediate and High-level Radioactive wastes, 2020.

(2) 処分概念構築の試行

II. 1F事故廃棄物処分に関する要件に照らした問題点の抽出

■ 要件チェックリストによる従来の処分概念の問題点の抽出例①: 建屋内コンクリート(事故前非放射性)トレンチ処分

下表の各項目に示す1F事故廃棄物の合理的処分概念の要件に対して、建屋内コンクリート(事故前非放射性)の既存のトレンチ処分概念の適否を評価し、否と評価した点については問題点を抽出した。

1F事故廃棄物の合理的処分概念の要件		適否	
1F事故廃棄物の特徴への適応	通常廃棄物と異なる核種組成/濃度及び物量への適応 (過剰あるいは不適切な対策になっていないこと)	△	
	1F事故廃棄物に特徴的なリスクの低減	臨界回避	-
		水素ガス影響の抑制	-
幅広い環境条件への適用	幅広い地下水流通への対応	有機物・コロイド影響の抑制	-
		幅広い生活圏への対応(希釈水量など)	△
	汎用性:わが国の幅広いサイトに適用可能	岩盤特性による影響(割れ目影響など)の低減	-
		幅広い化学条件への対応	処分容器の腐食因子への対応
	核種吸着性を低下させる因子への対応		△
	隆起・侵蝕による処分場の地表接近への対応	-	
適応性:"地の利"を活用可能	-		
シナジー効果	異種廃棄物のブレンドによる平均核種濃度の低減	処分場ないスペースの有効活用	△
		異種廃棄物中の同一核種の濃度干渉による移行低減	-
		他の廃棄物に好ましくない化学環境(アルカリ性、還元性等)の維持	-
	異種廃棄物間あるいは異なるバリア材間の両立性への対応	将来の影響(被ばく線量)の重畳回避	熱的相互干渉の影響回避
化学的相互干渉の影響回避			△
力学的相互干渉の影響回避			-
スケラビリティ			処分場規模に依存しない経済合理性(物量小さい場合の単価上昇抑制)
	処分費用のスケール効果(物量大きい場合の処分単価低減)	-	
社会的ニーズへの対応	事業の可逆性	○	
	廃棄物の回収可能性	○	

・通常のトレンチ処分対象廃棄物に比してC-14、Sr-90、Cs-137の濃度が高い可能性がある。ただし現状の推定値は大きな保守性を有する可能性がある(特にC-14)。
 ・1F事故廃棄物の中で最も物量が大きく、既設の埋設設備と比しても大きい(1号埋設の10倍程度)
 ・コンクリートの汚染箇所は表面付近に限られており、表面の削り等によって大半はクリアランスレベル以下とすることが可能と考えられる。

流量の小さい河川等で地産地消の内水面漁業者が代表的個人となる場合などは最大被ばく線量が目安値を上回る可能性がある。

・Sr-90は土壌への吸着が一定以上あれば移行途中で減衰するもことが期待できる。
 ・C-14の場合は移行遅延による減衰は期待できないが、施設内の上流側と下流側に位置する廃棄体からそれぞれ移行する核種のGBI到達時期の延長によって時間的分散効果を期待し得る。
 ・C-14及びSr-90の吸着(あるいはC-14の同位体置換)に寄与する石灰石、泥岩、凝灰岩等の成分の少ない土壌では K_d が小さく最大被ばく線量が目安値を上回る可能性がある。

水処理二次廃棄物と共にピット処分することで平均核種濃度を低減し人間接近シナリオの影響を緩和し得るが、トレンチ処分が可能であればそちらの方が経済的メリットは大きい。

地層処分施設や中深度処分施設の坑道埋め戻し材として利用し得るがこれらの処分場の閉鎖時期までの中間貯蔵が必要であり正味の経済的メリットが生じるか否かについては疑問がある。

同一サイトにピット処分等の浅地中処分施設が存在し同一の河川湖沼がGBIとなる場合には影響の重畳が問題となり得る。

水処理二次廃棄物がガラス固化体やジオポリマー固化体等と共存する場合にはアルカリブルームの影響を与えることが懸念される。

(2) 処分概念構築の試行

II. 1F事故廃棄物処分に関する要件に照らした問題点の抽出

■ 要件チェックリストによる従来の処分概念の問題点の抽出例②: 中深度処分相当水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

1F事故廃棄物の合理的処分概念の要件		適否		
1F事故廃棄物の特徴への対応	通常廃棄物と異なる核種組成/濃度及び物量への対応 (過剰あるいは不適切な対策になっていないこと)	△		
	1F事故廃棄物に特徴的なリスクの低減	臨界回避	-	
		水素ガス影響の抑制	△	
幅広い環境条件への適用	汎用性:わが国の幅広いサイトに適用可能	有機物・コロイド影響の抑制	△	
		幅広い地下水流速への対応	○	
		幅広い生活圏への対応(希釈水量など)	△	
		岩盤特性による影響(割れ目影響など)の低減	△	
		幅広い化学条件への対応	処分容器の腐食因子への対応	△
			核種収着性を低下させる因子への対応	△
		隆起・侵蝕による処分場の地表接近への対応	○	
適応性:”地の利”を活用可能	-			
シナジー効果	異種廃棄物のブレンドによる平均核種濃度の低減	異種廃棄物のブレンドによる平均核種濃度の低減	○	
		処分場ないスペースの有効活用	-	
		異種廃棄物中の同一核種の濃度干渉による移行低減	△	
		他の廃棄物に好ましくない化学環境(アルカリ性、還元性等)の維持	-	
廃棄物やバリア材の多様性への対応	将来の影響(被ばく線量)の重畳回避	将来の影響(被ばく線量)の重畳回避	△	
		相互作用の影響回避	熱的相互干渉の影響回避	-
	化学的相互干渉の影響回避		△	
	力学的相互干渉の影響回避		△	
	スクーラビリティ	処分場規模に依存しない経済合理性(物量が小さい場合の単価上昇抑制)	○	
処分費用のスクール効果(物量が大きい場合の処分単価低減)		-		
社会的ニーズへの対応	事業の可逆性	○		
	廃棄物の回収可能性	○		

廃棄物中のCs-137及びSr-90濃度がピット処分の基準線量相当濃度を上回っており、従来のピット処分と同様に300年間の制度的管理期間直後の大規模掘削・居住シナリオを想定すると影響が許容できない程度となる。600年～800年程度の人間接近の回避あるいは人間接近時の影響緩和の方策が必要となる。また、C-14についても廃棄体から瞬時放出の場合は目安線量を上回る可能性があるため固化体による溶出制限が必要。他方、物量はL2廃棄物に比して小さく、処分概念を変更する余地はある。

ガラス固化等により水分を蒸発させた上で密封性容器に封入し放射線強度が高い初期の数百年間地下水との接触を避ける、あるいは多孔質モルタルやガスベント設置により発生した水素ガスの移行経路を確保する等の対策が必要。

有機物の存在が確認された場合、ガラス固化による有機物の分解あるいは施設底部へのベントナイト層敷設によるろ過機能が必要。

沢水や井戸水等を考慮した場合には最大被ばく線量が目安(10 μSv/y)を上回る可能性。

地下水シナリオにおける支配核種はC-14であり、その安全確保は天然バリア中での移行遅延には依存しないため岩盤中の透水性割れ目の影響は小さい。ただし、有機物影響によりCs-137の移行遅延が制限された場合には影響が生ずる可能性がある。

処分容器による閉じ込めは想定していないが、上記の密封性容器を用いる場合には要検討。

地下水シナリオにおける支配核種はC-14であり、その安全確保は天然バリア中での移行遅延には依存しないため核種収着性を低下させる因子の影響は小さい。ただし、有機物影響によりCs-137の移行遅延が制限された場合には影響が生ずる可能性がある。

いずれもC-14が支配的影響を持つ中深度処分相当水処理二次廃棄物間の濃度干渉による移行率低減効果が顕著となるようなレイアウト・バリア構成が採用できれば有効。

いずれもC-14が支配的影響を持つ中深度処分相当水処理二次廃棄物間の影響が重畳した場合、地質環境条件によっては目安線量(10 μSv/y)を上回る可能性。

・地下水シナリオにおける支配核種は有機C-14であり、その安全確保は処分場内の化学環境に依存するものではないため廃棄物中のフェロシアン化合物や有機物等の影響は小さいと考えられる。
・ガラス等の固化材を用いる場合には処分場内のセメント系材料の溶解によるpH上昇に伴う浸出促進を避ける方策が必要(廃棄体周辺にベントナイト等をpH緩衝材として配置する等)。

遮蔽性能を担保するために肉厚の鉄製容器を用いる場合には腐食膨張による長期的な処分場の変形を考慮する必要がある(L2廃棄物ピット処分では考慮されていない1F事故廃棄物に特徴的な課題)。

(2) 処分概念構築の試行

II. 1F事故廃棄物処分に関する要件に照らした問題点の抽出

■ 要件チェックリストによる従来の処分概念の問題点の抽出例③: 中深度処分相当水処理二次廃棄物(KURION)中深度処分

1F事故廃棄物の合理的処分概念の要件		通否		
1F事故廃棄物の特徴への対応	通常廃棄物と異なる核種組成/濃度及び物量への対応 (過剰あるいは不適切な対策になっていないこと)	△		
	1F事故廃棄物に特徴的なリスクの低減	臨界回避	-	
		水素ガス影響の抑制	△	
幅広い環境条件への適用	汎用性:わが国の幅広いサイトに適用可能	有機物・コロイド影響の抑制	○	
		幅広い地下水流速への対応	○	
		幅広い生活圏への対応(希釈水量など)	△	
		岩盤特性による影響(割れ目影響など)の低減	○	
		幅広い化学条件への対応	処分容器の腐食因子への対応	△
			核種吸着性を低下させる因子への対応	○
		隆起・侵食による処分場の地表接近への対応	○	
適応性:"地の利"を活用可能	-			
廃棄物やバリア材の多様性への対応	シナジー効果	異種廃棄物のブレンドによる平均核種濃度の低減	-	
		処分場ないスペースの有効活用	△	
		異種廃棄物中の同一核種の濃度干渉による移行低減	△	
		他の廃棄物に好ましくない化学環境(アルカリ性、還元性等)の維持	-	
	異なるバリア材間の両立性	将来の影響(被ばく線量)の重畳回避	△	
相互作用の影響回避		熱的相互干渉の影響回避	○	
		化学的相互干渉の影響回避	△	
	力学的相互干渉の影響回避	△		
スクーラビリティ	処分場規模に依存しない経済合理性(物量が小さい場合の単価上昇抑制)	△		
	処分費用のスケール効果(物量大きい場合の処分単価低減)	-		
社会的ニーズへの対応	事業の可逆性	○		
	廃棄物の回収可能性	○		

L1廃棄物と水処理二次廃棄物の総量は同程度である。他方、人間接近時のCs-137等の影響以外はピット処分により安全確保可能であり、600-800年程度の人間接近の回避が可能であればより合理的な処分概念に変更する余地がある。

ガラス固化等により水分を蒸発させた上で密封性容器に封入し放射線強度が高い初期の数百年間地下水との接触を避ける、あるいは多孔質モルタルやガスベント設置により発生した水素ガスの移行経路を確保する等の対策が必要。

沢水や井戸水等を考慮した場合には最大被ばく線量が目安(10 μSv/y)を上回る可能性。

処分容器による閉じ込めは想定していないが、上記の密封性容器を用いる場合には要検討。

アクセス坑道や主要坑道の埋め戻し材として他の廃棄物を用いることは可能だが、処分場閉鎖までの期間これらの廃棄物の貯蔵施設を用意する必要がある等を考慮して全体的な合理化に貢献するかを検証する必要がある。

いずれもC-14が支配的影響を持つ中深度処分相当水処理二次廃棄物間の濃度干渉による移行率低減効果が顕著となるようなレイアウト・バリア構成が採用できれば有効。

いずれもC-14が支配的影響を持つ中深度処分相当水処理二次廃棄物間の影響が重畳した場合、地質環境条件によっては目安線量(10 μSv/y)を上回る可能性。

・地下水シナリオにおける支配核種は有機C-14であり、その安全確保は処分場内の化学環境に依存するものではないため廃棄物中のフェロシアン化合物や有機物等の影響は小さいと考えられる。
・ガラス等の固化材を用いる場合には処分場内のセメント系材料の溶解によるpH上昇に伴う浸出促進を避ける方が必要(廃棄体周辺にベントナイト等をpH緩衝材として配置する等)。

遮蔽性能を担保するために肉厚の鉄製容器を用いる場合には腐食膨張による長期的な処分場の変形を考慮する必要がある(L1廃棄物中深度処分と共通の課題)。

アクセス坑道や主要坑道等が物量に比例しない固定費となるため、物量が小さい場合には処分単価の上昇が生じ得る(ただし、地層処分等のより深い処分概念に比して影響は小さい)。

(2) 処分概念構築の試行

II. 1F事故廃棄物処分に関する要件に照らした問題点の抽出

■ 要件チェックリストによる従来の処分概念の問題点の抽出例④：地層処分相当解体廃棄物地層処分

1F事故廃棄物の合理的処分概念の要件		通否		
1F事故廃棄物の特徴への対応	通常廃棄物と異なる核種組成/濃度及び物量への対応 (過剰あるいは不適切な対策になっていないこと)	△	<p>地層処分の対象となるTRU廃棄物に比してほとんどの解体廃棄物のインベントリは小さく、地層処分を行った場合、地下水シナリオでは大きな安全裕度が存在する(圧力容器内の比較的レベルの高い廃棄物(事故前L1相当)以外)。このため、緩衝材の省略等の合理化の余地がある。</p> <p>水素ガス発生が問題となる場合には、多孔質モルタルやガスバント設置により発生した水素ガスの移行経路を確保する等の対策が必要。</p>	
	1F事故廃棄物に特徴的なリスクの低減	臨界回避		-
		水素ガス影響の抑制		△
幅広い環境条件への適用	汎用性:わが国の幅広いサイトに適用可能	有機物・コロイド影響の抑制	△	
		幅広い地下水流速への対応	○	
		幅広い生活圏への対応(希釈水量など)	△	
		岩盤特性による影響(割れ目影響など)の低減	○	
		幅広い化学条件への対応	処分容器の腐食因子への対応	-
			核種吸着性を低下させる因子への対応	○
		隆起・侵食による処分場の地表接近への対応	○	
適応性:"地の利"を活用可能	△	<p>有機物の存在が確認された場合、施設底部へのベントナイト層敷設による過機能が必要。</p> <p>圧力容器内の比較的レベルの高い廃棄物(事故前L1相当)については、沢水や井戸水等を考慮した場合には最大被ばく線量が目安(10 μSv/y)を上回る可能性。</p> <p>処分深度300 m以上であるため標高の高い丘陵や山以外ではあまり有効ではない(丘陵等では地下水の動水勾配が大きい等の問題も勘案する必要がある)。</p>		
廃棄物やバリア材の多様性への対応	シナジー効果	異種廃棄物のブレンドによる平均核種濃度の低減	-	
		処分場ないスペースの有効活用	△	
		異種廃棄物中の同一核種の濃度干渉による移行低減	△	
		他の廃棄物に好ましくない化学環境(アルカリ性、還元性等)の維持	-	
	異種廃棄物間あるいは異なるバリア材間の両立性	相互作用の影響回避	将来の影響(被ばく線量)の重畳回避	△
熱的相互干渉の影響回避			-	
化学的相互干渉の影響回避			○	
スケラビリティ	力学相互干渉の影響回避	力学相互干渉の影響回避	△	
		処分場規模に依存しない経済合理性(物量が小さい場合の単価上昇抑制)	△	
社会的ニーズへの対応	事業の可逆性	処分費用のスケール効果(物量が多い場合の処分単価低減)	-	
		廃棄物の回収可能性	○	

アクセス坑道や主要坑道の埋め戻し材として他の廃棄物を用いることは可能だが、処分場閉鎖までの期間これらの廃棄物の貯蔵施設を用意する必要がある等を考慮して全体的な合理化に貢献するかを検証する必要がある。

いずれもC-14が支配的影響を持つ地層処分相当解体廃棄物間の濃度干渉による移行率低減効果が顕著となるようなレイアウト・バリア構成が採用できれば有効。

圧力容器内の比較的レベルの高い廃棄物(事故前L1相当)については、保守的な希釈水量を想定した場合に最大被ばく線量が目安(10 μSv/y)付近となるため、同じくC-14が支配核種となる他の核種の影響の重畳が問題となり得る。

遮蔽性能を担保するために肉厚の鉄製容器を用いる場合には腐食膨張による長期的な処分場の変形を考慮する必要がある(TRU廃棄物中深度処分と共通の課題)。

アクセス坑道や主要坑道等が物量に比例しない固定費となるため、物量が少ない場合には処分単価の上昇が生じ得る。

(2) 処分概念構築の試行

II. 1F事故廃棄物処分に関する要件に照らした問題点の抽出

■ 要件チェックリストによる従来の処分概念の問題点の抽出例⑤: 地層処分相当解体廃棄物中深度処分

1F事故廃棄物の合理的処分概念の要件		通否		
1F事故廃棄物の特徴への対応	通常廃棄物と異なる核種組成/濃度及び物量への対応 (過剰あるいは不適切な対策になっていないこと)	△		
	1F事故廃棄物に特徴的なリスクの低減	臨界回避	-	
		水素ガス影響の抑制	△	
幅広い環境条件への適用	汎用性: わが国の幅広いサイトに適用可能	有機物・コロイド影響の抑制	△	
		幅広い地下水流速への対応	○	
		幅広い生活圏への対応(希釈水量など)	△	
		岩盤特性による影響(割れ目影響など)の低減	○	
		幅広い化学条件への対応	処分容器の腐食因子への対応	-
			核種吸着性を低下させる因子への対応	○
		隆起・侵食による処分場の地表接近への対応	△	
適応性: "地の利"を活用可能	-			
シナジー効果	異種廃棄物のブレンドによる平均核種濃度の低減	異種廃棄物のブレンドによる平均核種濃度の低減	-	
		処分場ないスペースの有効活用	△	
		異種廃棄物中の同一核種の濃度干渉による移行低減	△	
		他の廃棄物に好ましくない化学環境(アルカリ性、還元性等)の維持	-	
廃棄物やバリア材の多様性への対応	異種廃棄物間あるいは異なるバリア材間の両立性	将来の影響(被ばく線量)の重畳回避	△	
		相互作用の影響回避	熱的相互干渉の影響回避	-
			化学的相互干渉の影響回避	○
			力学的相互干渉の影響回避	△
		スケラビリティ	処分場規模に依存しない経済合理性(物量が小さい場合の単価上昇抑制)	△
処分費用のスケール効果(物量大きい場合の処分単価低減)	-			
社会的ニーズへの対応	事業の可逆性	○		
	廃棄物の回収可能性	○		

中深度処分の基準線景相当濃度を上回るが、地下水シナリオでは目安線景を下回る(圧力容器内の比較的レベルの高い廃棄物(事故前L1相当)以外)。ただし、U-234インベントリは比較的大きいため、娘核種であるRa-226やPb-210等により人間接近シナリオにおける影響は10万年以降も依然として大きいため、処分深度については慎重な検討が必要。

水素ガス発生が問題となる場合には、多孔質モルタルやガスベント設面により発生した水素ガスの移行経路を確保する等の対策が必要。

有機物の存在が確認された場合、施設底部へのベントナイト層敷設によるろ過機能が必要。

上述した目安線景を下回る廃棄物のうち圧力容器内の比較的レベルの高い廃棄物(事故前L2相当)については、沢水や井戸水等を考慮した場合には最大被ばく線量が目安(10 μSv/y)を上回る可能性あり。

U-234インベントリは比較的大きいため、娘核種であるRa-226やPb-210等により人間接近シナリオにおける影響は10万年以降も依然として大きいため(100万年でも全ての廃棄物で1 mSv/yを上回る)、処分深度については慎重な検討が必要。

アクセス坑道や主要坑道の埋め戻し材として他の廃棄物を用いることは可能だが、処分場閉鎖までの期間これらの廃棄物の貯蔵施設を用意する必要がある等を考慮して全体的な合理化に貢献するかを検証する必要がある。

いずれもC-14が支配的影響を持つ地層処分相当解体廃棄物間の濃度干渉による移行率低減効果が顕著となるようなレイアウト・バリア構成が採用できれば有効。

上述した目安線景を下回る廃棄物のうち圧力容器内の比較的レベルの高い廃棄物(事故前L2相当)については、保守的な希釈水量を想定した場合に最大被ばく線量が目安(10 μSv/y)付近となるため、同じくC-14が支配核種となる他の核種の影響の重畳が問題となり得る。

遮蔽性能を担保するために肉厚の鉄製容器を用いる場合には腐食膨張による長期的な処分場の変形を考慮する必要がある(L1廃棄物中深度処分と共通の課題)。

アクセス坑道や主要坑道等が物量に比例しない固定費となるため、物量小さい場合には処分単価の上昇が生じ得る(ただし地層処分に比して影響は小さい)。

(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分

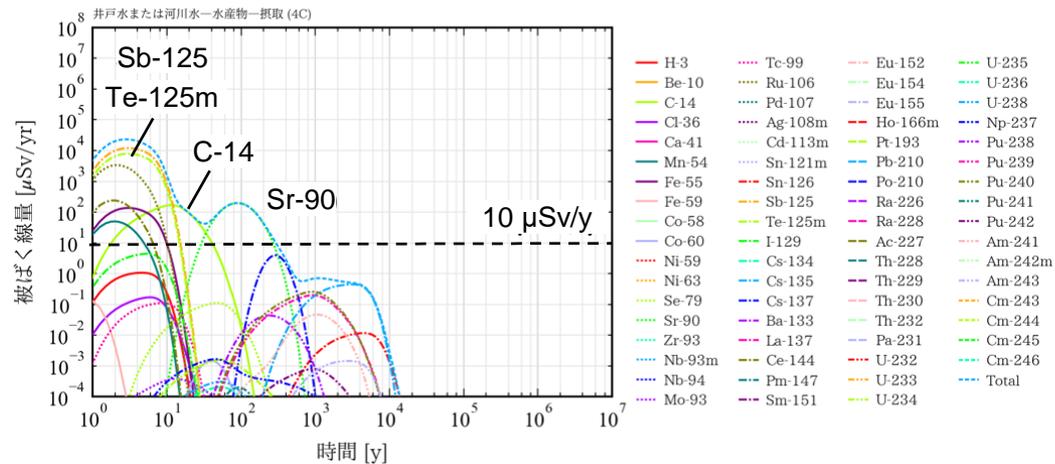
(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分

III. 問題点の分析及び処分概念改良の目標設定(低減すべきリスク要因の抽出)

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)をトレンチ処分した場合の問題点の分析

- 解体廃棄物のうち建屋内コンクリート(事故前非放射性)は総体積約37万 m³と際立って大きいことから、放射能レベルや寿命に対して適切な処分区分とすることが1F事故廃棄物処分全体を合理的なものとする上で重要性が高い。
- 同廃棄物中の核種濃度はいずれもトレンチ処分の基準線量相当濃度※を下回るが(次頁参照)、トレンチ処分についてのこれまでの先行事業における安全評価モデル及び入力データセット※※を用いた評価では予想される最大被ばく線量が安全基準を上回ることから、ピット処分に区分することが必要となってしまう(下図参照)。
- 本検討では、同廃棄物トレンチ処分に関するリスクマネジメントの試行の前段として、我が国の地表・地質環境条件の多様性を類型化しつつ人工バリア設置等の工学的対策及び保守性を低減した現実的な評価と言った対策によって影響を低減し、トレンチ処分による安全確保を可能とするための安全評価のケーススタディを実施した。



先行事業と同様のモデル及び入力データセットを用いた場合の建屋内コンクリート(事故前非放射性)トレンチ処分の安全評価結果

※ 原子力安全委員会、“低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について”、平成19年5月21日、(2007)

※※国際廃炉研究開発機構(IRID)、「平成30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金(固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発)」2019年度成果、2020年12月、(2020)。

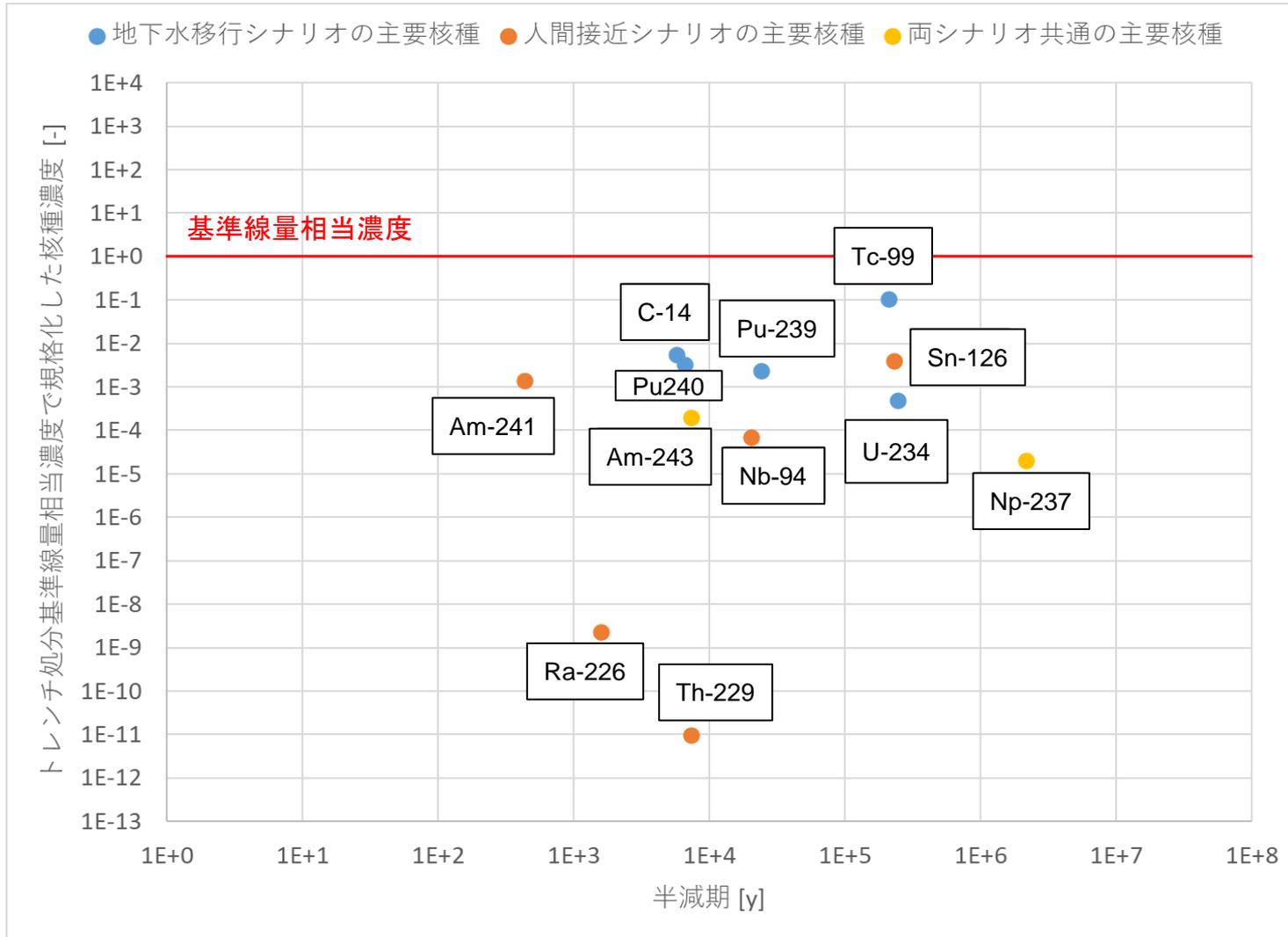
(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分

III. 問題点の分析及び処分概念改良の目標設定(低減すべきリスク要因の抽出)

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)をトレンチ処分した場合の問題点の分析

■ 基準線量相当濃度との比較



(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分

III. 問題点の分析及び処分概念改良の目標設定(低減すべきリスク要因の抽出)

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)をトレンチ処分した場合の問題点の分析

■ 基準線量相当濃度を下回るにも関わらずトレンチ処分で予想される被ばく線量が基準を上回る理由

- 本検討における評価のベースとしている先行事業[※]における安全評価の入力データセットと基準線量相当濃度算出時の解析条件^{※※}を比較した結果、下表に示す各パラメータに関して差異があることがわかった。
- これらのパラメータについて、本検討における入力値と基準線量相当濃度算出時の入力値とを入れ替えてケーススタディを行った。結果の概要は次ページに示す通りであり、水産物摂取量あるいは土壌中の K_d のいずれかを基準線量相当濃度算出時の入力値とすれば安全基準(10 μ Sv/y)を下回り、両者を同時に基準線量相当濃度算出時の入力値とした場合には同基準を2桁以上下回ることがわかった。

パラメータ	単位	先行事業 [※]	基準線量相当濃度算出時の設定値 [※]
施設サイズ (底部サイズ×高さ)	m ³	600×600×4	500×500×5
降雨浸水流速	m/y	1	0.3
ダルシー流速	m/y	28	21.9
土壌 K_d	m ³ /kg	先行事業の設定 [※]	※
水産物摂取量	kg/y	30	1.6
移行距離	m	100	500
希釈水量	m ³ /y	2E+07	1E+08

土壌中の K_d (m³/kg)の比較

	先行事業 [※]	基準相当線量濃度算出時
C	0.0001	0.01
Sr	0.01	0.05

※国際廃炉研究開発機構(IRID)、令和3年度開始「廃炉・汚染水対策事業費補助金(固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発)」、2021年度最終報告、令和4年9月、(2022)。

※※原子力安全委員会、“低レベル放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準値について(第3次中間報告)”、平成12年9月14日、(2000)

(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分

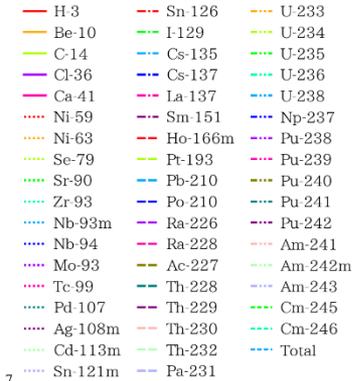
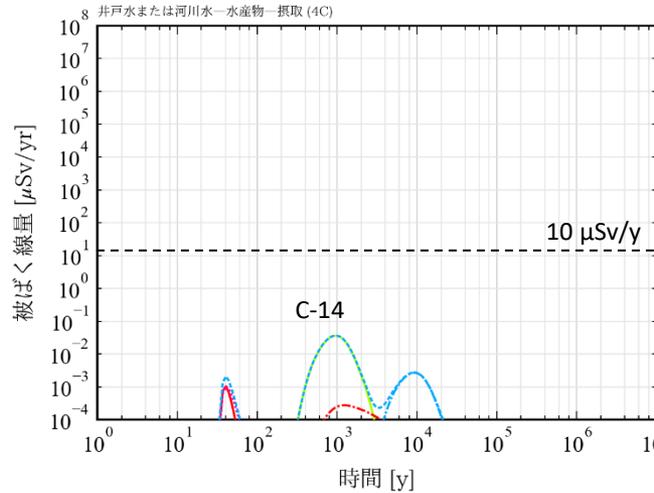
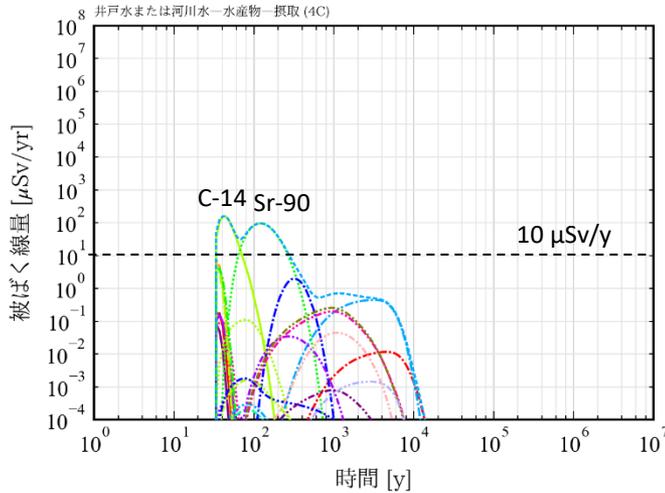
III. 問題点の分析及び処分概念改良の目標設定(低減すべきリスク要因の抽出)

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)をトレンチ処分した場合の問題点の分析

■ 事例によって設定が異なるパラメータの感度調査

case1(本検討結果)

case9(K_d 、水産物摂取量等が濃度上限評価の設定)



解析ケースID	施設サイズ	降雨浸水量 [m ³ /y/m ²]	ダルシー流速 [m/y]	土壌 K_d [m ³ /y]	水産物摂取量 [kg/y]	移行距離 [m]	希釈水量 [m ³ /y]	被ばく経路	最大線量 [μSv/y]	支配核種
case1	本検討設定	1	28	IRID2022の設定	30	100	2E+07	水産物摂取	1.6E+02	C-14
case2	※1	1	28	IRID2022の設定	30	100	2E+07	水産物摂取	1.5E+02	C-14
case3	本検討設定	0.3	28	IRID2022の設定	30	100	2E+07	水産物摂取	7.6E+01	C-14
case4	本検討設定	1	21.9	IRID2022の設定	30	100	2E+07	水産物摂取	1.5E+02	C-14
case5	本検討設定	1	28	※2	30	100	2E+07	水産物摂取	8.6E+00	C-14
case6	本検討設定	1	28	IRID2022の設定	1.6	100	2E+07	水産物摂取	8.7E+00	C-14
case7	本検討設定	1	28	IRID2022の設定	30	500	2E+07	水産物摂取	1.5E+02	C-14
case8	本検討設定	1	28	IRID2022の設定	30	100	1E+08	水産物摂取	3.2E+01	C-14
case9	※1	0.3	21.9	※2	1.6	500	1E+08	水産物摂取	3.6E-02	C-14

※1 現行濃度上限評価の設定。施設底部断面積は500 m × 500 mで本検討(600 m × 600 m)より小さくなるので、降雨浸透量[m³/y]が小さくなる。

※2 土壌(廃棄物層中の充填材としての土壌、天然バリアとしての施設外土壌)については現行濃度上限評価の設定。

廃棄体(本検討ではコンクリート)の K_d については具体的な設定値が記載されていないため、本評価では先行事業※の設定で計算した。

黄色ハッチング: 最大線量が10μSv/yを下回る結果を示す

赤字: 感度解析で変更したパラメータ

(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分

III. 問題点の分析及び処分概念改良の目標設定(低減すべきリスク要因の抽出)

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)をトレンチ処分した場合の問題点の分析

■ 水産物(淡水)の年間摂取量の設定

- 国内外の安全評価事例における水産物(淡水)の年間摂取量について文献調査を行った。
- 日本人の平均的な水産物摂取量が30 kg/yであることは国内事例で共通しているが、一般的にはその大半は海水魚等であり淡水の水産物は1.6%に過ぎないことを考慮して0.18 kg/yとしているケース(原子力発電環境整備機構、包括的技術報告書:わが国における安全、地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—※、以下、NUMO-SCという。)から全てが淡水魚であることを仮定しているケース(浅地中処分の学会標準**)まで大きく異なることがわかった。
- 浅地中処分の学会標準は、浅地中処分サイトの事例に基づき地産地消で生活する内水面漁業者を代表的個人としているのに対して、NUMO-SCでは沿岸部に住む一般の住民を想定しているため日本人の平均的な食習慣を仮定していることが差異の原因と考えられる(サイトジェネリックな本研究でもサイト条件をある程度類別化して検討を加えることにより過度の保守性(それぞれの入力値について想定される幅の下限を選出することによる)を低減できる可能性)。

調査対象国	安全評価事例略称	対象廃棄物	水産物	設定値	補足
日本	NUMO-SC(NUMO, 2021)	HLW+TRU	淡水魚	0.18	
			淡水甲殻類	0.043	
	1F事故廃棄物先行事業評価(IRID, 2022)	L1~L3+地層相当	—	—	設定値不明
	学会標準L1(原子力学会, 2008)	L1相当	淡水魚	10	
			無脊椎動物	1	
	学会標準L2-3(原子力学会, 2017)	L2~L3相当	淡水魚	30	
現行濃度上限値評価(原案委, 2007)	L1~L3相当	淡水魚	1.6		
フィンランド	TURVA-2012(Posiva, 2012)	SF	淡水魚、貝類	10.2	典型的なフィンランド人の食習慣を想定
				32.3	漁業従事者の食習慣を想定
スウェーデン	SR-Site(SKB, 2010)	SF	淡水魚、ザリガニ	—	湖沼面積(GBIごとに異なり、かつ時間変動)から算出されるため不定
	SR-PSU(SKB, 2015)	ILW+LLW		—	
米国	TSPA-LA(DOE, 2008)	SF+HLW	淡水魚	0.23±0.10	連続的な確率変数として取り扱う
フランス	Dossier 2005(ANDRA, 2005)	HLW+ILW	—	—	水産物摂取による被ばくを考慮しない
スイス	Opalinus Clay Project(NAGRA, 2002)	SF+HLW+ILW	淡水魚	6.1	
英国	gDSSC 2016(NDA, 2016)	HLW+ILW+LLW	淡水魚	30	
	LLWR ESC 2011(LLWR, 2011)	LLW	—	—	水産物摂取による被ばくを考慮しない

※原子力発電環境整備機構(NUMO)、包括的技術報告書:わが国における安全、地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—、2021年2月

※※日本原子力学会、日本原子力学会標準 浅地中処分の安全評価手法、2016、AESJ-SC-F026:2016。

(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分

III. 問題点の分析及び処分概念改良の目標設定(低減すべきリスク要因の抽出)

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)をトレンチ処分した場合の問題点の分析

(参考)水産物の年間摂取量の設定値(NUMO-SC)※

水産物名称	年間摂取量[kg/y]			K _d 不確実性の分布	補足
	固定値(最尤値)	最小値	最大値		
淡水魚	0.18				
淡水甲殻類	0.043				

付表 10 生活圏評価パラメータにおける食物の摂取量

単位: kg/年

食物		本報告書用設定値と出典	
農作物	根菜	38.3	厚生労働省, 2014
	葉菜	54.2	厚生労働省, 2014
	穀物	40.3	厚生労働省, 2014
	米	58.1	厚生労働省, 2014
	果物	39.1	厚生労働省, 2014
畜産物	牛肉	5.2	厚生労働省, 2014
	羊肉	0.1	厚生労働省, 2014
	豚肉	12.5	厚生労働省, 2014
	鶏肉	9.2	厚生労働省, 2014
	牛レバー	0.18	厚生労働省, 2014
	鶏レバー	0.32	厚生労働省, 2014
	鶏卵	12.4	厚生労働省, 2014
	牛乳	30.5	厚生労働省, 2014
	淡水産物	淡水魚	0.18
淡水甲殻類		0.043	厚生労働省, 2014, 農林水産省, 2014
海産物	海水魚	11.5	厚生労働省, 2014
	海洋甲殻類	2.7	厚生労働省, 2014
	軟体動物	1.4	厚生労働省, 2014
	海藻類	3.6	厚生労働省, 2014

1.13.13 淡水魚

農林水産省(2014)から、内水面(淡水)での魚類と無脊椎動物の漁獲量および養殖収穫量の和が海面におけるそれのおおむね1.6%であるため、生魚介類のうちの魚(あじ・いわし類, さけ・ます, たい・かれい類, まぐろ・かじき類, その他の生魚)の摂取量に1.6%を乗じることで設定した。

$$(8.5 + 5.5 + 5.2 + 4.2 + 8.1) \times 0.016 = 0.504 \text{ g/日} = 0.18 \text{ kg/年}$$

1.13.14 淡水甲殻類

農林水産省の第88次農林水産省統計表(平成24~25年)(農林水産省, 2014)から、内水面(淡水)での魚類と無脊椎動物の漁獲量および養殖収穫量の和が海面におけるそれのおおむね1.6%であるため、貝類, えび・かに類の摂取量に, 1.6%を乗じることで設定した。

$$(2.8 + 4.5) \times 0.016 = 0.1168 \text{ g/日} = 0.043 \text{ kg/年}$$

(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分

III. 問題点の分析及び処分概念改良の目標設定(低減すべきリスク要因の抽出)

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)をトレンチ処分した場合の問題点の分析

■ 天然バリア(土壌)に対するSrの K_d 設定

- Sr-90は比較的短半減期(約30年)であることから、天然バリアである土壌中の移行遅延によって影響が大幅に低減される可能性がある。
- 国内外の安全評価事例におけるSrの K_d 入力値の設定に関する文献調査を行ったところ、下図に例示するように、事例や媒体の種類によって大きくばらつきがあることがわかった。
- 先行事業※における入力値(0.01 m³/kg)はJAEA SDBの砂岩類についてのデータの対数平均に基づくものであるのに対して、基準線量相当濃度算出時の評価では浅地中処分サイトにおける凝灰岩類を想定しているためSrの収着性が比較的高いことが差異の原因と考えられる(サイトジェネリックな本研究でも岩種等に応じてサイト条件をある程度類別化して検討を加えることにより過度の保守性(それぞれの入力値について想定される幅の下限を選出することによる)を低減できる可能性)。



- : 平均値(中央値、最頻値、最尤値(Best estimated))
- : 最小値(設定値が複数ある場合のみ表示)
- : 最大値(同上)
- : K_d の値域(K_d が連続的の確率変数の場合のみ表示)

※国際廃炉研究開発機構(IRID)、「令和3年度開始「廃炉・汚染水対策事業費補助金(固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発)」、2021年度最終報告、令和4年9月、(2022)。

(3)改良後の処分概念の試行

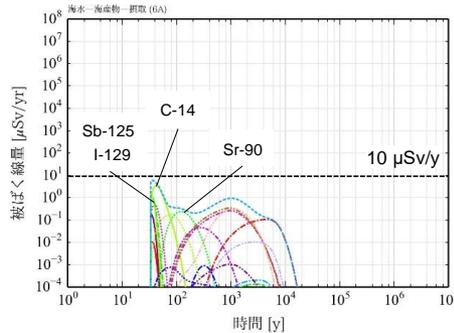
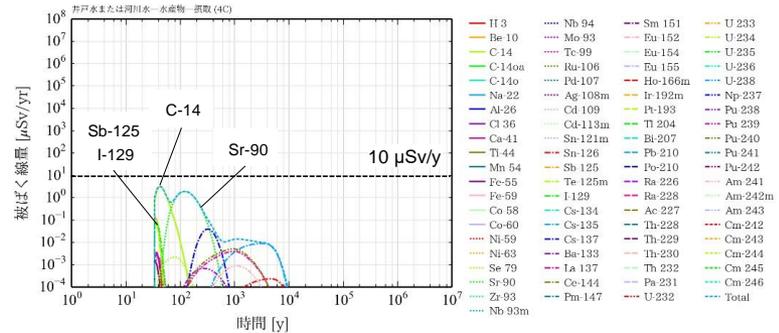
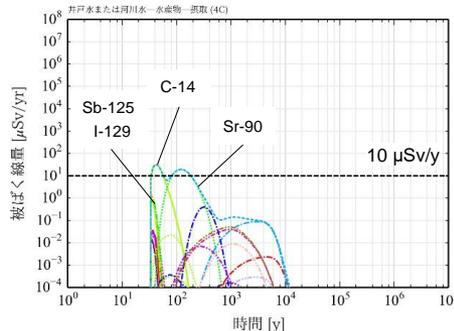
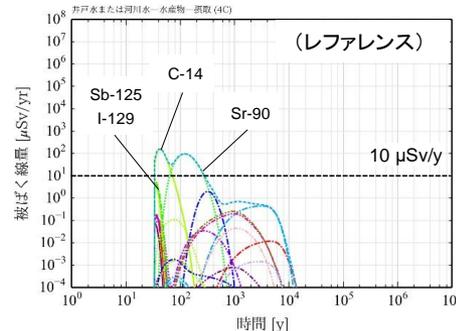
解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分

III. 問題点の分析及び処分概念改良の目標設定(低減すべきリスク要因の抽出)

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)をトレンチ処分した場合の問題点の分析

■ GBIの種類及び規模(希釈水量)の感度

- 希釈効果の異なる種々のGBIに関してそれぞれ被ばく線量評価を行った結果(下図)から、GBIが沿海となるような沿岸域及び大規模な河川(流量 $10^9 \text{ m}^3/\text{y}$ (一級河川の流量平均値))では他の条件はレファレンスと同等のまま(即ち追加的な対策なしで)最大被ばく線量が安全基準($10 \mu\text{Sv}/\text{y}$)を下回る。
- 他方、小規模河川(流量が $10^8 \text{ m}^3/\text{y}$ (一級河川の96%下限値)程度以下)では対策なしには安全基準を満足することができない。
- 以上から、GBIが沿海や大規模河川となる地域と小規模の河川がGBIになる地域は区別して検討することが必要と考えられる。

 GBI_沿海 (海水交換量_4E+8 m³/y)

 GBI_大規模河川 (希釈水量_1E+9 m³/y)

 GBI_小規模河川 (希釈水量_1E+8 m³/y)

 GBI_小規模河川の下限 (希釈水量_2E+7 m³/y)


(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分

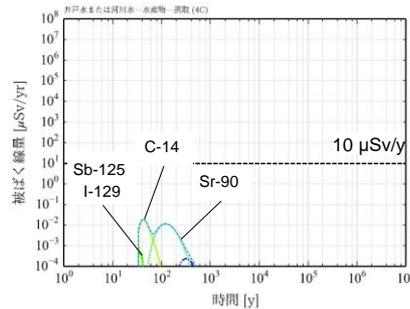
III. 問題点の分析及び処分概念改良の目標設定(低減すべきリスク要因の抽出)

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)をトレンチ処分した場合の問題点の分析

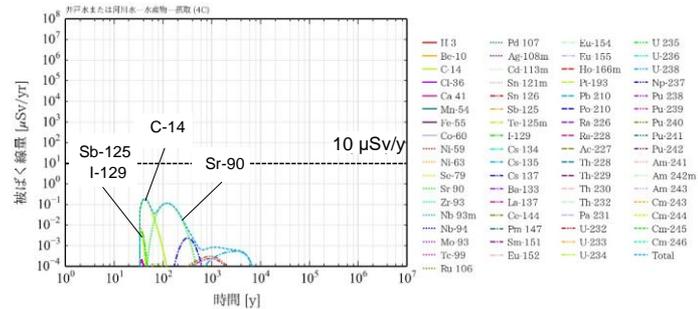
■ 代表的個人に関するパラメータの感度

- 水産物年間摂取量としてNUMO-SC※と同じ0.18 kg/yを仮定した場合、GBIの希釈水量によらず最大被ばく線量が安全基準を下回る(下図)。
- 水産物に関して自給自足の生活を営む内水面水産漁業者(30 kg/yの当該地域で得られた淡水魚類を摂取すると仮定)は国内に存在するが、彼らがICRP Pub.103※※で定めるように被ばくの生ずる集団の上位5%に当たるような集落が必ずしも一般的ではないことから、このような地域とそれ以外とを区分して検討することが合理的と考えられる。

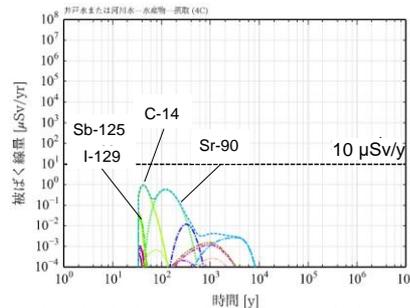
水産物年間摂取量_0.18 kg
GBI_大規模河川(希釈水量_1E+9 m³/y)



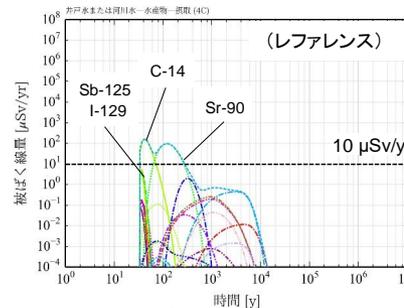
水産物年間摂取量_0.18 kg
GBI_小規模河川(希釈水量_1E+8 m³/y)



水産物年間摂取量_0.18 kg
GBI_小規模河川の下限(希釈水量_2E+7 m³/y)



水産物年間摂取量_30 kg
GBI_小規模河川の下限(希釈水量_2E+7 m³/y)



※原子力発電環境整備機構(NUMO)、包括的技術報告書:わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—、2021年2月
 ※※ICRP, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4), 2007.

(3)改良後の処分概念の試行

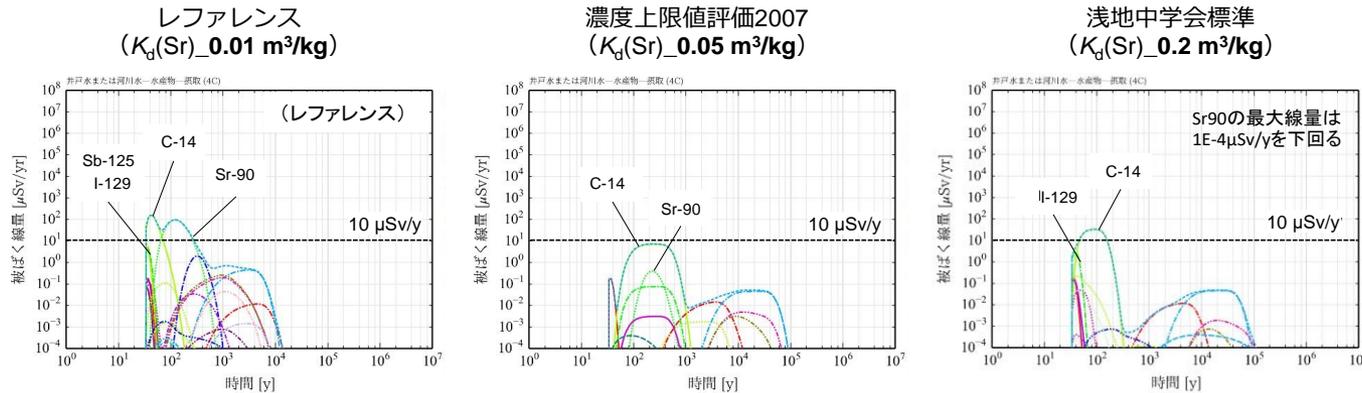
解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分

III. 問題点の分析及び処分概念改良の目標設定(低減すべきリスク要因の抽出)

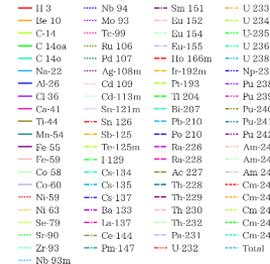
解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)をトレンチ処分した場合の問題点の分析

■ 土壌の核種収着性の感度

- 本検討のレファレンスとした過去の先行事業※、基準線量相当濃度算出時の評価(濃度上限値評価(2007))及び2016年の浅地中処分学会標準**では想定している土壌や岩盤の種類が異なるため主要核種の K_d がそれぞれ異なる。
- Sr-90の $K_d > 0.05 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、C-14の $K_d > 0.01 \text{ m}^3/\text{kg}$ であれば、その他の条件がレファレンスと同じ(無対策)でも最大被ばく線量が安全基準を下回る(C-14のピーク低減効果は次頁に示す時間的分散効果による)。
- 以上から、上記のようなSr及びCの収着性が一定以上であるような土壌のサイトとそれ以外とは区分して考えることが妥当と考えられる。



		レファレンス	濃度上限値評価	浅地中処分学会標準
$K_d(\text{C})$	m^3/kg	0.0001	0.01	0.002
$K_d(\text{Sr})$	m^3/kg	0.01	0.05	0.2
$K_d(\text{Sb})$	m^3/kg	0	0.01	0.045
$K_d(\text{I})$	m^3/kg	0	0.01	0.0001
$K_d(\text{Cs})$	m^3/kg	0.1	1	1



※国際廃炉研究開発機構(IRID)、「令和3年度開始「廃炉・汚染水対策事業費補助金(固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発)」、2021年度最終報告、令和4年9月、(2022)。

**日本原子力学会、日本原子力学会標準 浅地中処分の安全評価手法、2016、AESJ-SC-F026:2016。

(3) 改良後の処分概念の試行

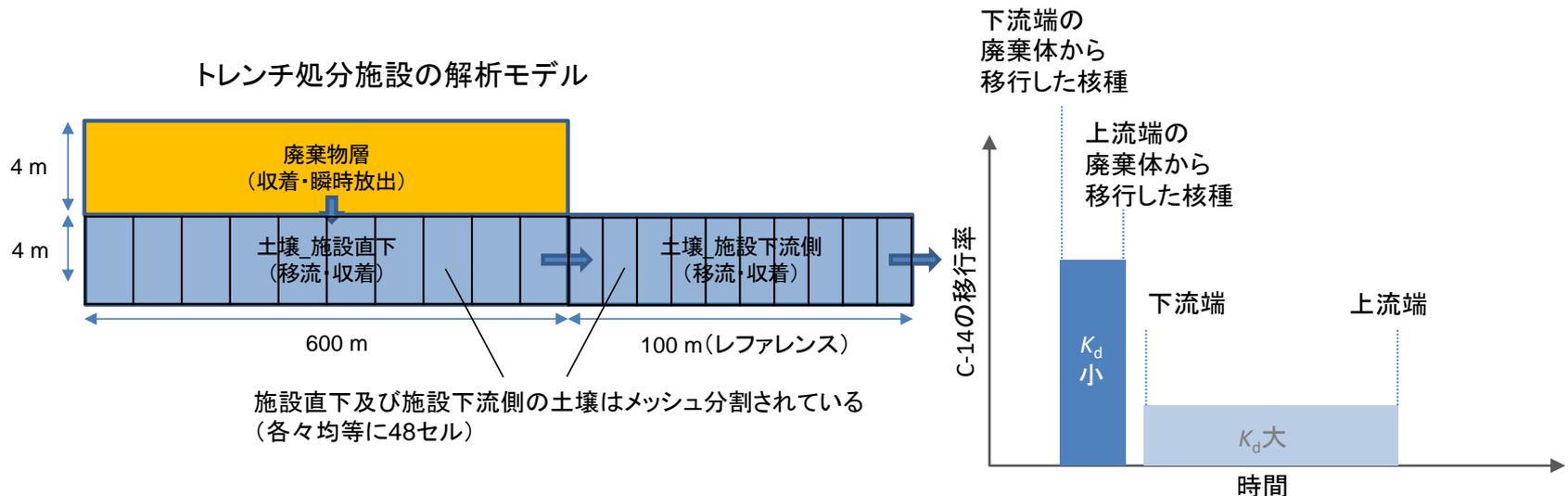
解体廃棄物(建屋内コンクリート: 事故前非放射性) トレンチ処分

III. 問題点の分析及び処分概念改良の目標設定(低減すべきリスク要因の抽出)

解体廃棄物(建屋内コンクリート: 事故前非放射性)をトレンチ処分した場合の問題点の分析

■ C-14の天然バリア中 K_d によってピーク移行率が低下するメカニズム

- C-14の半減期は5000年程度であるため、天然バリア中の K_d によらずトレンチ処分で想定される移行時間では減衰は期待できない。しかし、以下に述べるメカニズムで K_d によってピーク移行率が低減するものと考えられる。
- トレンチ処分施設の地下水流れ方向の長さを考慮したモデル(下左図)では、施設下流端に位置する廃棄体から移行する核種と上流端の廃棄体から移行する核種とではGBIに到着する時期にズレが生じ、このズレに対応する期間にわたってGBIへの核種移行が継続することとなる。
- C-14の移行率のピークはこのGBIにおける核種移行の継続期間が長くなれば低下することとなる。また、この期間は施設長さ(本検討の場合600 m)をC-14の天然バリア中移行速度 v で除した値となり、C-14の K_d が大きくなった場合にはこの v が小さくなるため、GBIにおける核種移行の継続期間が長くなり、結果としてピーク移行率が低減することとなる(下右図)。



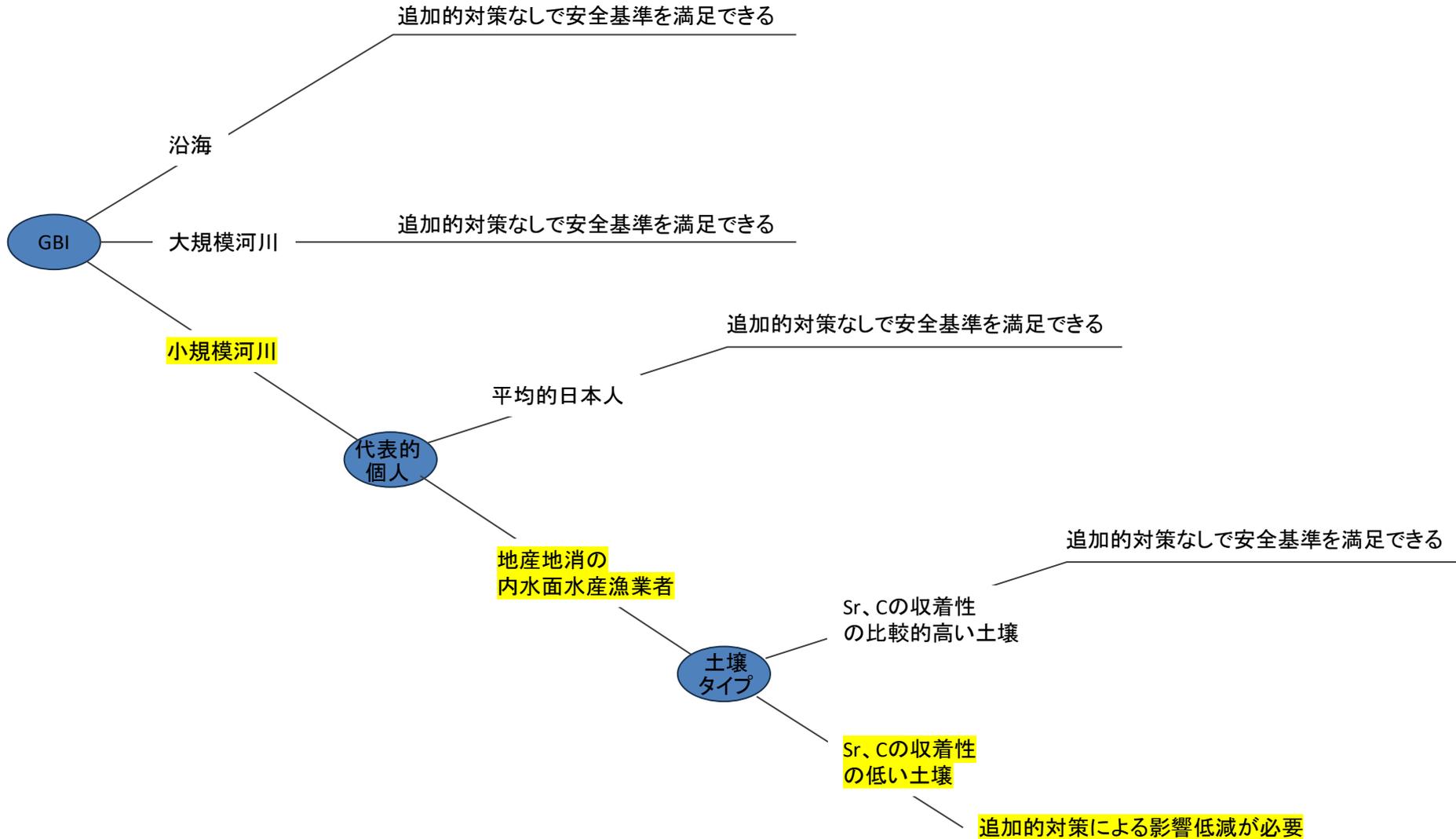
(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分

III. 問題点の分析及び処分概念改良の目標設定(低減すべきリスク要因の抽出)

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)をトレンチ処分した場合の問題点の分析

■ 主要核種の影響に注目した我が国の地表・地質環境条件の類別



(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分

III. 問題点の分析及び処分概念改良の目標設定(低減すべきリスク要因の抽出)

リスク低減のための対策

■ 半減期数年以下の核種(Sb-125、Te-125m、Ru-106等)に関するリスク低減策

- Sb-125(半減期約2.8年)やTe-125m(半減期約58日)等の短半減期核種については、核種移行開始時期を30年程度遅延することができれば、その間に減衰することによってリスクを無視できるほど小さくすることが可能。
- 具体的には、管理期間の監視及び防水シート等による廃棄体と地下水接触の抑制等が有効な対策となり得る。

■ Sr-90に関するリスク低減策

- 先行事業における感度解析によって示されている通り、トレンチ上部を被覆する止水バリアによる浸透水量の低減及び施設内の充填材によるSrの収着によって施設からのSr-90の移行率を低減することが有効な対策と考えられる。
- 加えて、土壌へのSrの収着による天然バリア中の移行遅延とその間の減衰及びGBIでの希釈が生ずるサイトの場合には顕著な影響緩和が期待できる。

■ C-14に関するリスク低減策

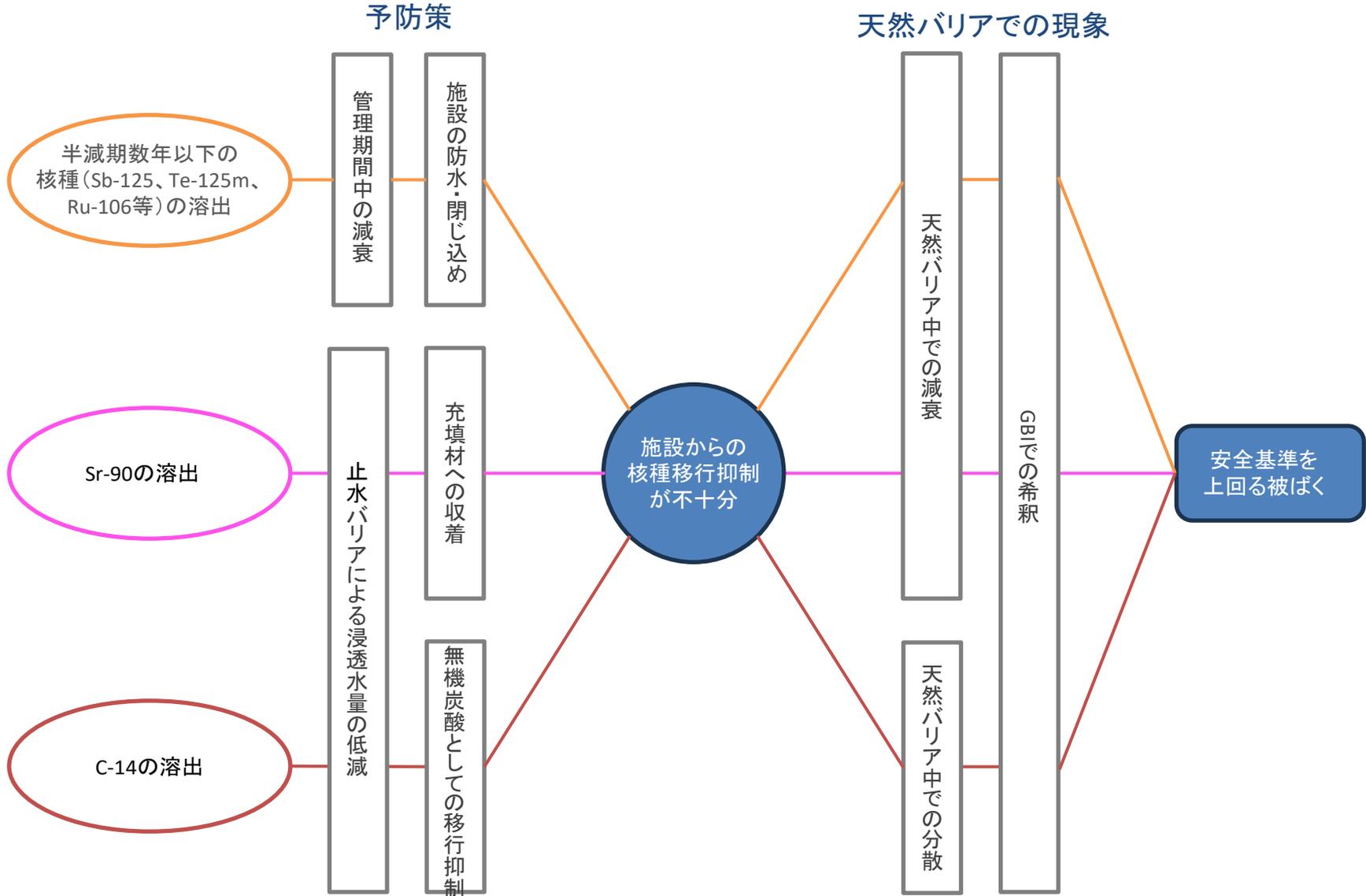
- Sr-90と同様、先行事業における感度解析によって示されている通り、トレンチ上部を被覆する止水バリアによる浸透水量の低減が施設からの移行率を低減することが有効な対策と考えられる。
- 加えて、溶出したC-14が無機形態となった場合にはCalciteとして沈殿することにより無機炭酸としての移行抑制が生ずる可能性がある。
- Sr-90と同様、GBIでの希釈が生ずるサイトの場合には顕著な影響緩和が期待できることに加え、分散によるピーク移行率の低減も有効となる可能性がある。

(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分

III. 問題点の分析及び処分概念改良の目標設定(低減すべきリスク要因の抽出)

リスク低減に関するボウタイモデル



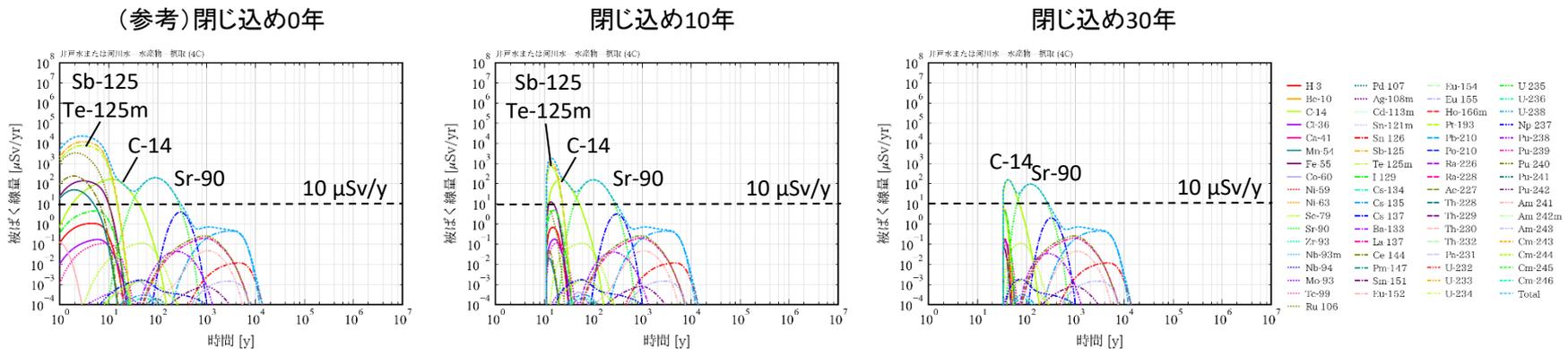
(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分

III. 問題点の分析及び処分概念改良の目標設定(低減すべきリスク要因の抽出)

半減期数年以下の核種の溶出への対策に関する感度解析

- Sb-125(半減期約2.8年)やTe-125m(半減期約58日)等の短半減期核種については、処分に先立つ貯蔵期間及び防水シートによる廃棄体と地下水接触の抑制によって核種移行開始時期を30年程度遅延することができれば、その間に減衰することによってリスクを無視できるほど小さくすることができる。
- 産業廃棄物埋設処分場等において一般的な防水シートである高密度ジオメンブレンの耐久性について調査を行った結果、我が国の年平均気温では少なくとも数十年以上にわたって健全性を保つことが可能であると考えられる。
- 以下の検討では、処分前の貯蔵及びジオメンブレンによる地下水との接触遅延で30年程度以降に核種移行が開始されるという対策を講ずることを前提として、それ以外の主要核種(C-14及びSr-90)のリスク低減に関する要件を導出するためのケーススタディを行う。



被ばく線量経時変化の閉じ込め期間依存性

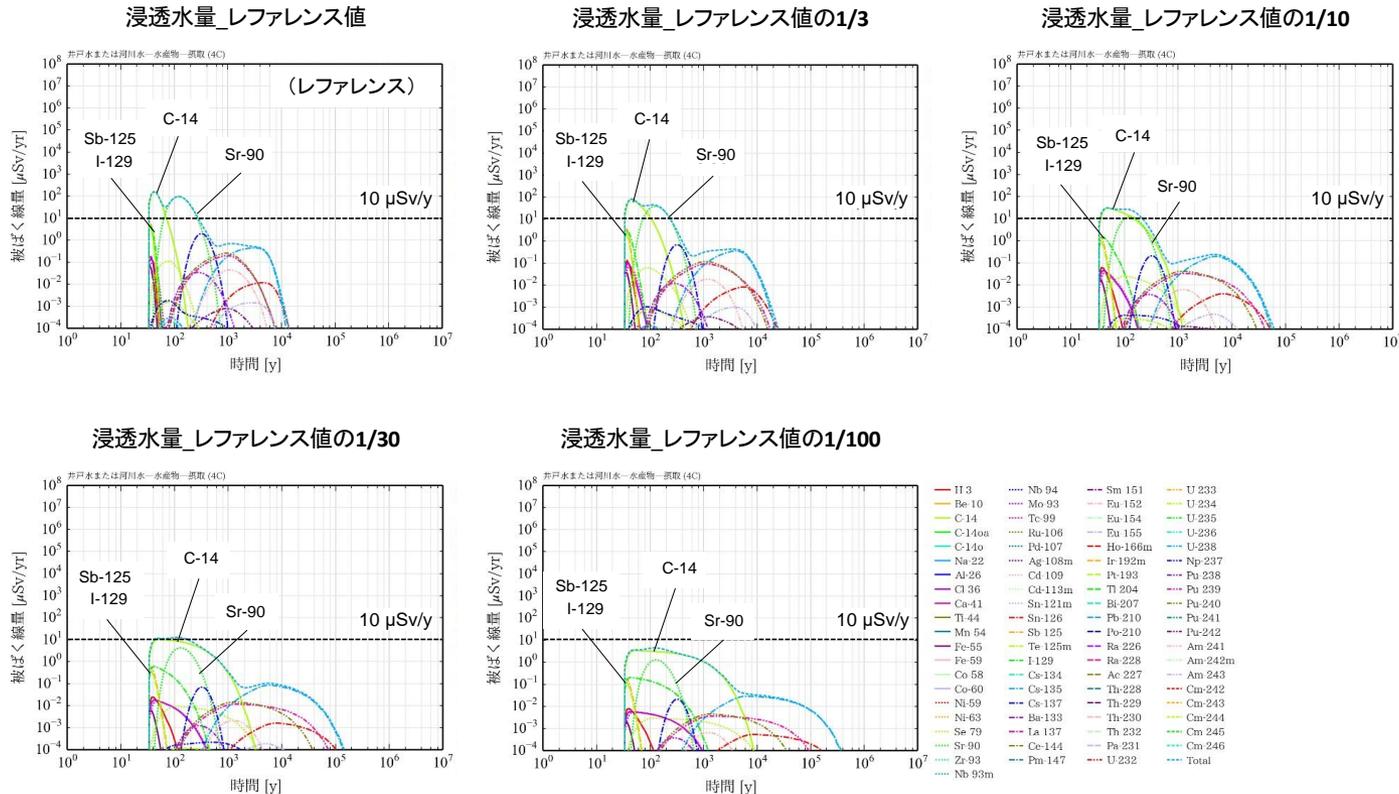
(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分

III. 問題点の分析及び処分概念改良の目標設定(低減すべきリスク要因の抽出)

止水バリアによる施設浸透水量低減の効果

- トレンチ処分施設上部に比較的透水性の低い被覆層を設置することによって上部から施設に浸透する水量を低減することの効果に関するケーススタディを行った。
- 先行事業※と同様、施設浸透水量の低減とともにC-14及びSr-90による被ばく線量はともに低減する傾向を示し、レファレンスの降雨浸透水量(1 m/y)の1/30以下に抑制することによって被ばく線量の最大値が安全基準を下回るようになる。



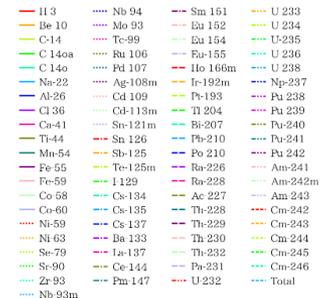
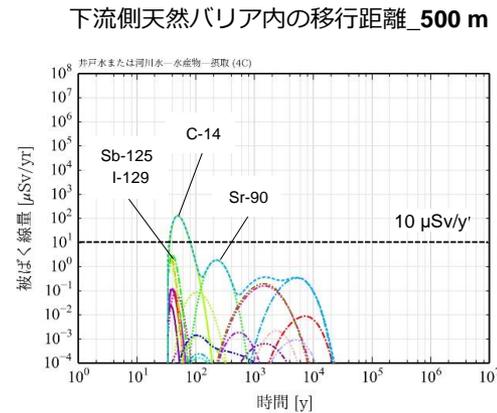
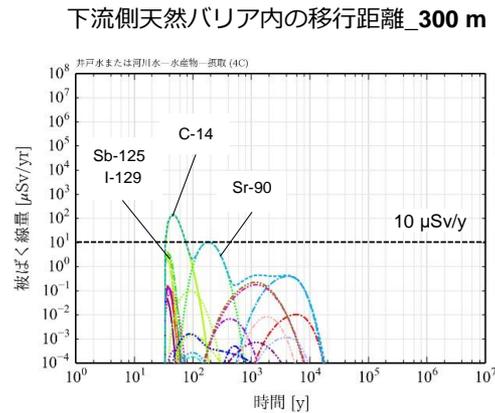
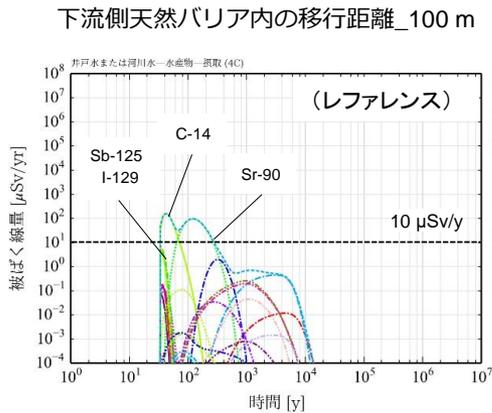
(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分

III. 問題点の分析及び処分概念改良の目標設定(低減すべきリスク要因の抽出)

天然バリア移行距離の増大によるSr-90の影響緩和

- 先行事業で想定されている砂質の土壌のようにSrの収着性の低いサイトにおいても施設下流端からGBIとなる小規模河川までの距離を十分に確保することにより天然バリア中でのSr-90の減衰を期待することができる。
- 基準線量相当濃度の算出時の評価事例に倣い最大500 mまでの移行距離を想定してケーススタディを行った結果、Sr-90の最大被ばく線量は移行距離300 m以上であれば安全基準を下回る結果となった(下図)。
- ただし、C-14の最大被ばく線量は移行距離によって低減されないため、他の対策を組み合わせる必要がある。



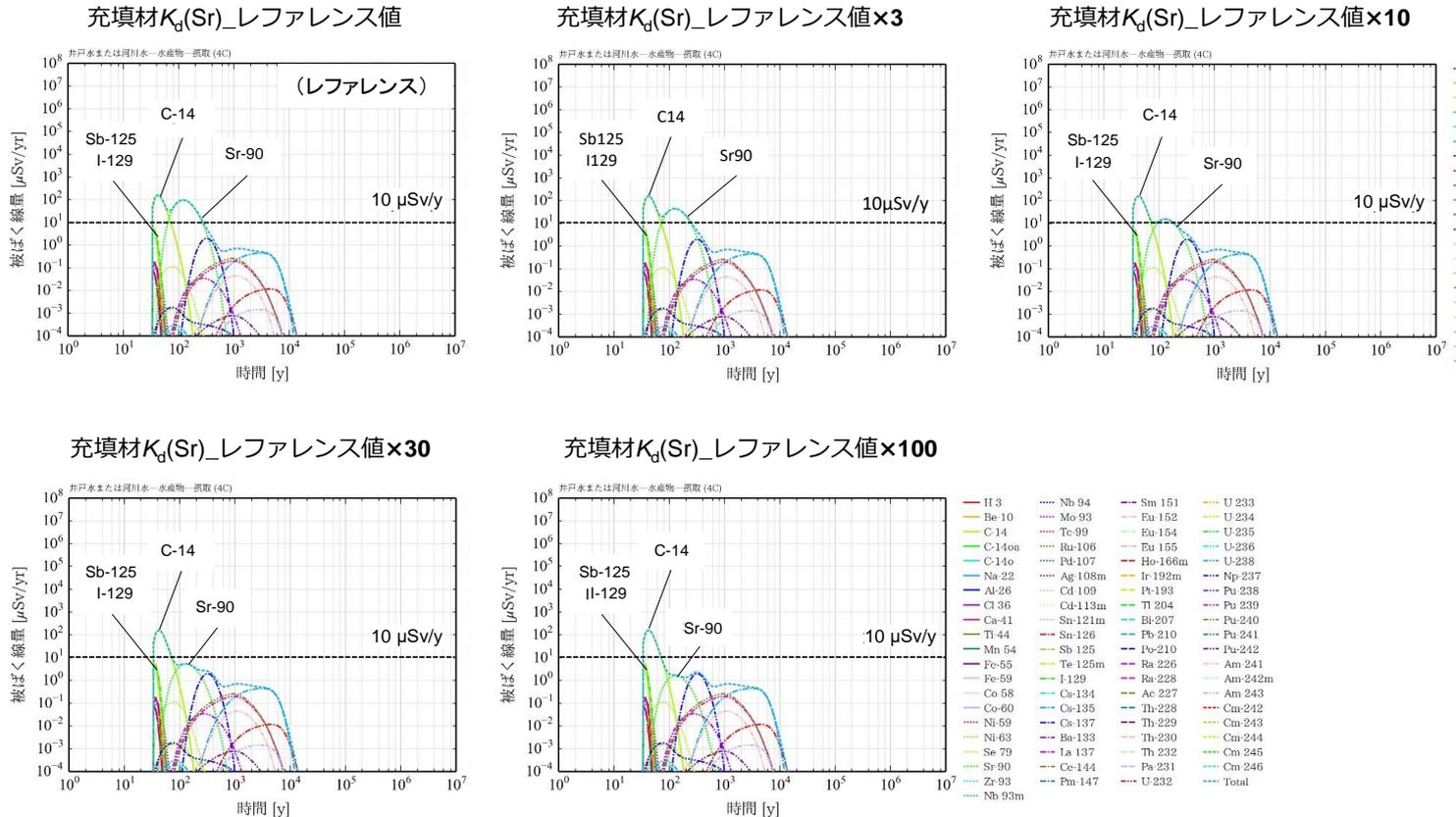
(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分

III. 問題点の分析及び処分概念改良の目標設定(低減すべきリスク要因の抽出)

Srに対する収着性を有する充填材の効果

- トレンチ内部の充填材としてSrの収着性を有する材料を用いることを想定してケーススタディを行った。
- 先行事業※と同様、解析結果は充填材の K_d の上昇に伴いSr-90による被ばく線量は低下傾向を示し、レファレンスの10倍以上であればSr-90による最大被ばく線量は安全基準を下回る(下図)。
- ただし、この対策によってC-14の影響は低減されないため、他の対策を組み合わせる必要がある。



※国際廃炉研究開発機構 (IRID)、令和3年度開始「廃炉・汚染水対策事業費補助金(固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発)」、2021年度最終報告、令和4年9月、(2022)。

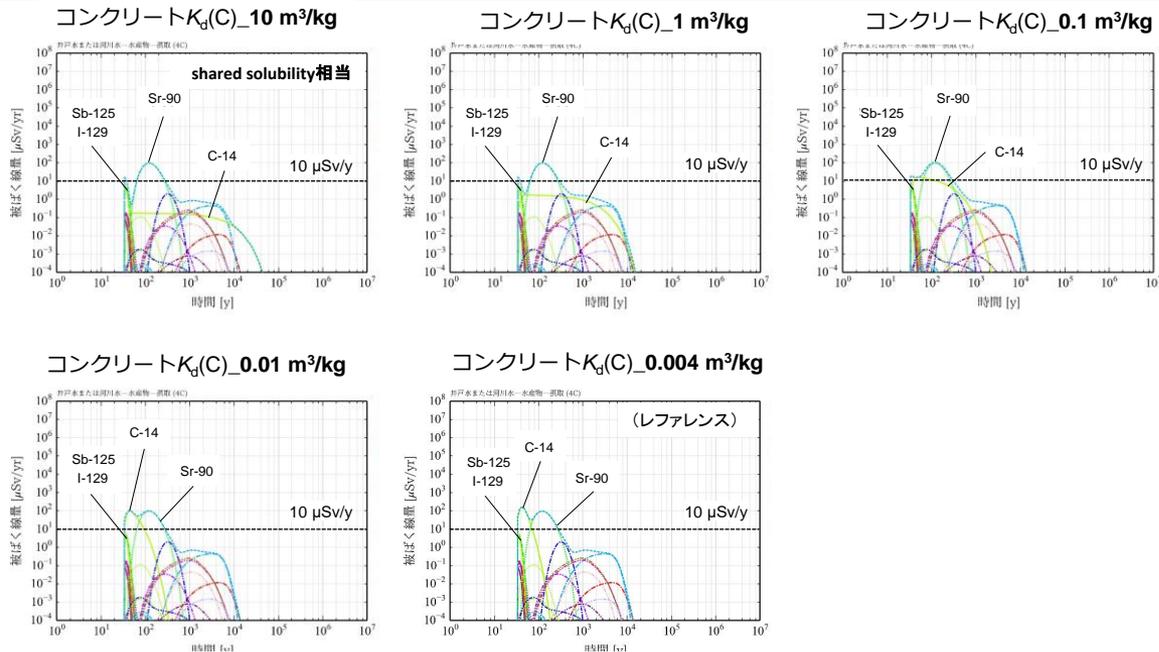
(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分

III. 問題点の分析及び処分概念改良の目標設定(低減すべきリスク要因の抽出)

無機C-14の施設からの移行抑制効果

- コンクリート主体の処分施設においてC-14が無機炭酸として安定となる場合、Calciteとして沈殿するために安定同位体(C-12)との同位体比に応じた溶解度限界(shared solubility)によって液相中の濃度が制限されることが想定される。この場合、施設内全体で同位体間の平衡が成立すると仮定するとコンクリートに対する「みかけの K_d 」は $10 \text{ m}^3/\text{kg}$ に達する(Bradbury and Sarott, 1994*)。
- 事故前非放射性の建屋内コンクリートの汚染箇所は表面付近にとどまると考えられるため、コンクリートの全体で同位体比が均一にならない可能性を考慮して上記の「みかけの K_d 」を種々に変化(低減)させてケーススタディを行ったところ、コンクリートに対する「みかけの K_d 」が $0.1 \text{ m}^3/\text{kg}$ 以上であればC-14による被ばく線量は安全基準を下回る。
- しかし、建屋内コンクリートの表面に付着したC-14が有機、無機いずれの形態であるかは現状不明であり、有機C-14の場合には高pHのアルカリ環境での微生物による無機化が期待し難いという不確実性がある。



*Bradbury M H and Sarott F A, Sorption databases for the cementitious near-field of a L/ILW repository for performance assessment, 1994. Nagra TR 93-08. 117p.

(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分

III. 問題点の分析及び処分概念改良の目標設定(低減すべきリスク要因の抽出)

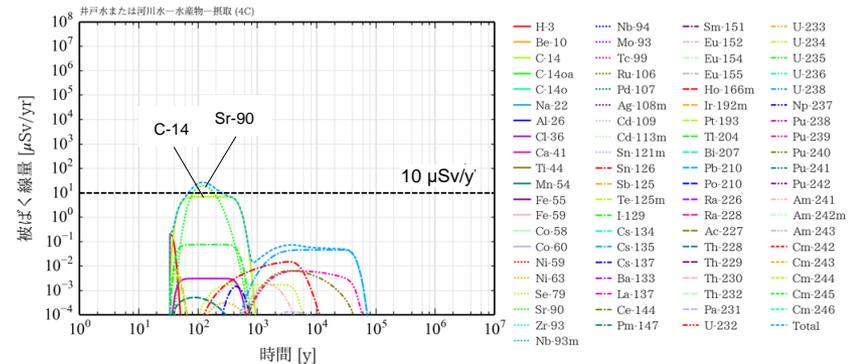
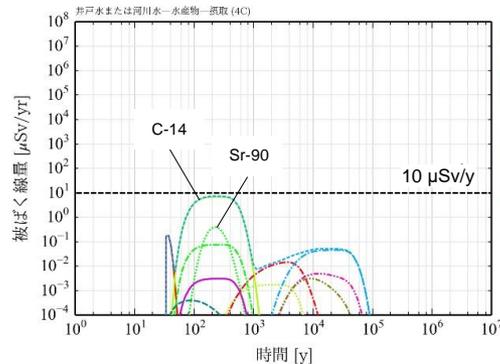
土質改良による影響緩和に関するケーススタディ

- 土質改良により施設直下及び下流側土壌で前出の濃度上限値評価の事例と同等の K_d (C: $0.01 \text{ m}^3/\text{kg}$, Sr: $0.05 \text{ m}^3/\text{kg}$)が担保されることを仮定して核種移行解析及び被ばく線量評価を行った。
- 施設下流側の追加的土壌改良箇所を流動方向に100 m設置することにより、被ばく線量の最大値が安全基準($10 \mu\text{Sv/y}$)を下回る(下図)。
- レファレンスでは $600 \text{ m} \times 600 \text{ m}$ としている施設形状を 1200 m (地下水流動方向) $\times 300 \text{ m}$ と縦横比を変えることによってC-14の時間的分散効果が増大するため、最大被ばく線量はさらに低下する(下図)。

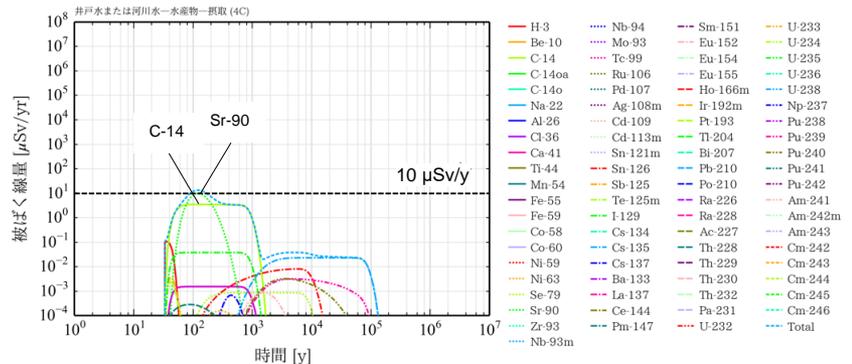
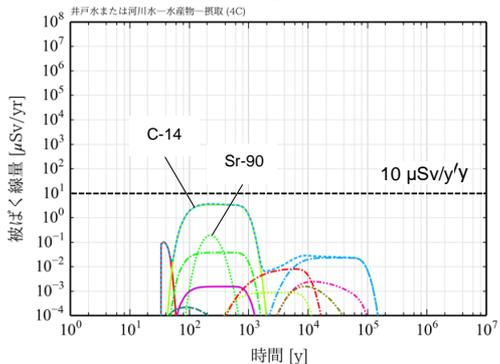
追加的土壌改良箇所_100 m
(K_d 濃度上限値評価2007※)

追加的土壌改良箇所_20 m
(K_d 濃度上限値評価2007※)

施設形状
 600 m (流動方向) \times
 $600 \text{ m} \times 4 \text{ m}$



施設形状
 1200 m (流動方向) \times
 $300 \text{ m} \times 4 \text{ m}$

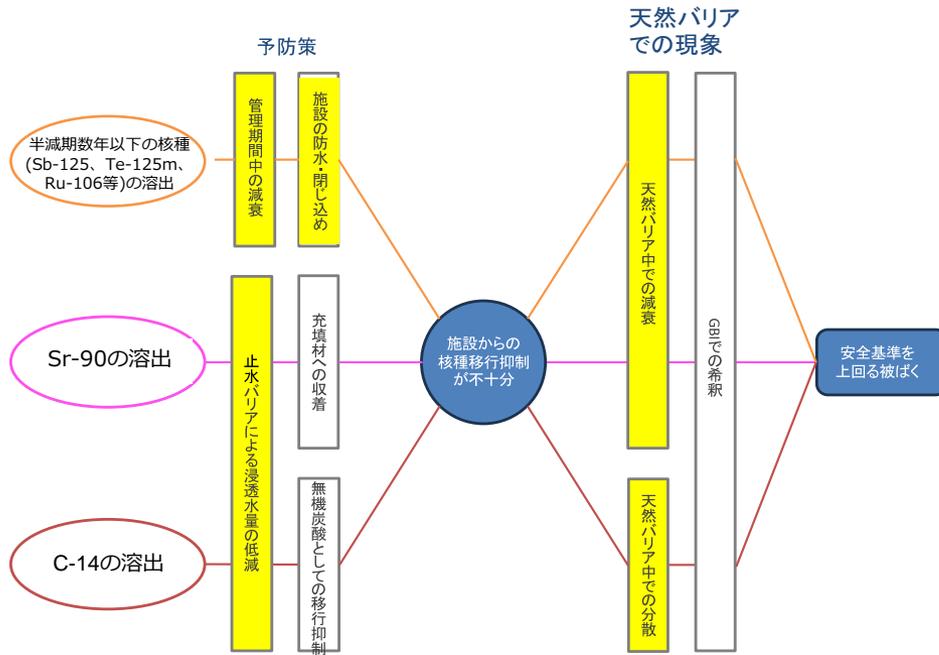


(3)改良後の処分概念の試行

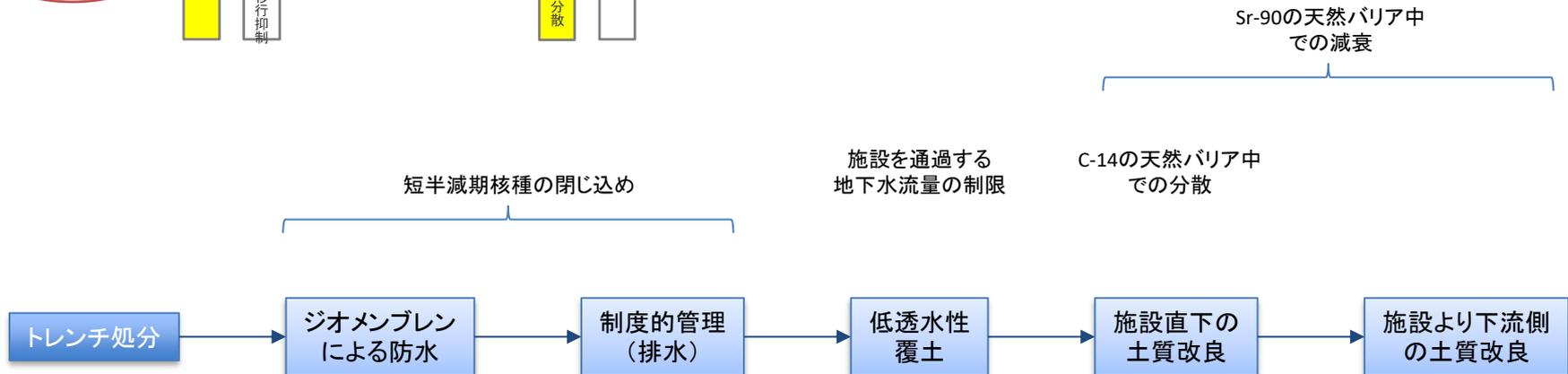
解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分

IV. 処分概念の改良案の提示

合理的処分概念の要件に即したオプションの改良 **解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)_トレンチ処分**



- 問題分析において実施した安全評価に関する感度解析結果を踏まえ、リスク低減に有効となり得る対策として、左図の黄色でハイライトしたものを抽出した。
- これらの対策のそれぞれについて具体的な技術オプションを下図の通り想定し、これらを組み合わせることによって改良型トレンチ処分の概念を構築した。



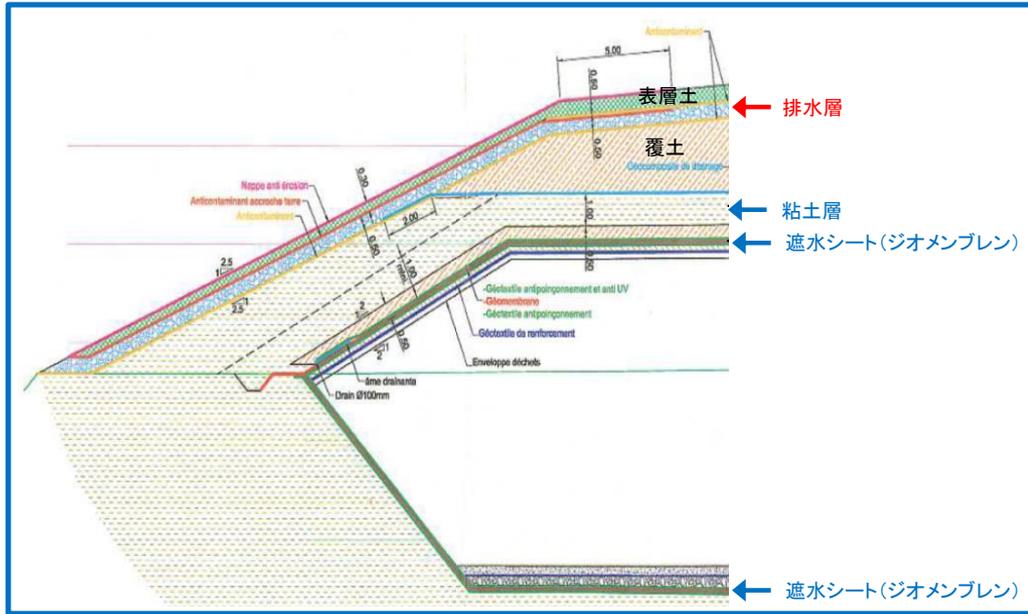
(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分

IV. 処分概念の改良案の提示

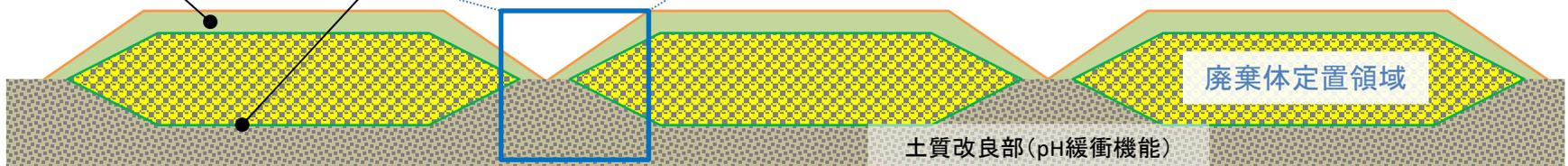
改良型トレンチ処分場の概念 止水バリア(ジオメンブレン及び低透水性覆土)

施設上部にそれぞれ以下の機能を有する複数の層から成る覆土を設置することにより降雨浸透水量を抑制する(フランス(モルヴィリエ処分場)の例※(下図)参照)



- 傾斜を持った透水性の高い礫や砂等の層により降雨の大半を排水する(排水層)。
- 排水層の下部に低透水性の粘土層を設置して施設内への浸透水量を低減するとともに排水層の働きを支援する。
- 粘土層の下部にHDPE製の遮水シート(ジオメンブレン)を設置することにより数10年以上にわたって雨水の侵入を回避する(遮水シートは底部にも設置し施設への地下水の侵入を抑制する)。
- 表層土及び植生層を設置することにより侵食への耐性を確保する。
- 施設直下の土壌には玄武岩等の砕石を混入し、弱酸性の雨水(遮水シートによりコンクリート廃棄物が閉じ込められている初期)、及び施設内を通過しコンクリート溶出成分によりアルカリ性となった間隙水(それ以降)とそれぞれ反応し、土壌間隙水が中性～弱アルカリ性となるように調整する(pH緩衝機能)。

低透水性覆土+遮水シート 遮水シート



※ 佐藤和彦、坂井章浩、秦はるひ、麓弘道、川越浩、斎藤龍郎、長谷川信、欧州地域のウラン廃棄物処分に関する調査—フランス、英国及びスウェーデンにおける処分及び規制の現状—、JAEA-Review 2014-006 (2014)、p.4に加筆

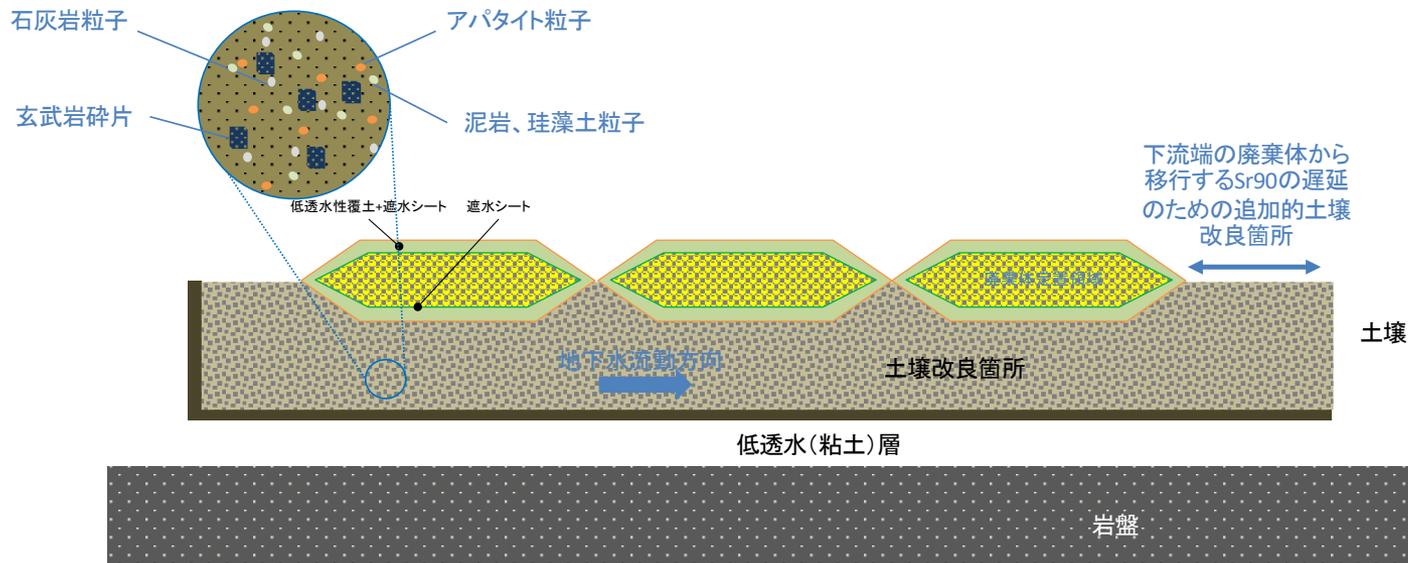
(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分

IV. 処分概念の改良案の提示

改良型トレンチ処分場の概念 C-14の時間的分散及びSr-90の減衰のための土質改良

- 前述の通り、施設下部から土壌に移行するC-14がGBIに到達する時間が施設内の位置によって異なることから時間的分散が生じその効果は施設直下の土壌中のC-14の K_d に比例する。
- そこで、施設建設時に直下の土壌を掘り起こし、好気性環境での微生物による分解で炭酸となっていることが予想されるC-14に対して比較的高い収着性を有する泥岩あるいは珪藻土の粒子及び同位体交換によって移行遅延に寄与する石灰岩の微粒子を混入した上で締め固めるという土壌改良を施すことによりC-14の最大被ばく線量を低減し得るものと考えられる。
- 加えて、アパタイトの粉末等のSrを収着する材料(後述)を合わせて混入することによりSr-90の移行遅延による減衰効果も期待できる(施設下流端の廃棄体から移行するSr-90の移行遅延のために施設下流側も一定の範囲で上記と同様の土壌改良を追加的に行う必要がある(下図参照))。
- 施設を通過した地下水の流路が土壌改良範囲内となるように必要に応じて粘土等の低透水性の底盤及び側壁で囲う(下図参照))。



(3)改良後の処分概念の試行

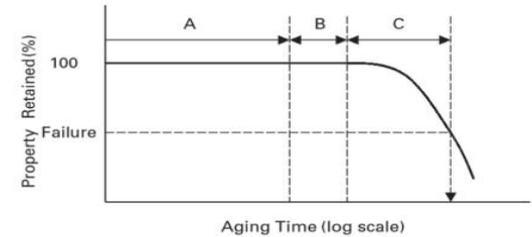
解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分

IV. 処分概念の改良案の提示

(参考)ジオメンブレンとは

• ジオメンブレンの概要

- 非常に低い透水係数 ($10^{-11} \sim 10^{-13} \text{ cm s}^{-1}$) の高分子シートである。
- 高密度ポリエチレン(以下、HDPEという。)ジオメンブレンは強度が高く、低コストであることから、固型廃棄物埋め立て地や汚染地域の垂直壁等、様々な用途で使用されている。
- 配合(HDPEジオメンブレン)
 - ポリエチレン(96~97.5%)
 - 紫外線防止剤(2~3%)
 - カーボンブラック、酸化防止剤、耐熱安定剤(微量)
- 主な劣化メカニズム
 - 酸化劣化
 - ✓ ポリエチレンを含むポリオレフィンが酸化により劣化する。
 - ✓ HDPEジオメンブレンの酸化は次の3段階で評価される。
 - A) 抗酸化剤の枯渇
 - B) 遊離基の連鎖反応による分子組成の変化
 - C) 遊離基の架橋構造が発生し分子構造が変化
 - 紫外線劣化
 - ✓ 紫外線(と熱)への暴露により劣化する。
 - 熱劣化
 - ✓ 熱でブロッキングや固着する場合があります、被覆が割れたり裂けたりすることがある。
 - ✓ 高温環境下では酸化劣化及び紫外線劣化が促進される。
 - 化学的劣化
 - ✓ 化学的劣化による構造変化は鎖の切断(材料が脆くなる)や架橋に至る(材料の剛性が高まる)ことがある。
- 応力亀裂について
 - 劣化による膨張・収縮により、特に継ぎ目に亀裂が生じる事がある。
 - 応力亀裂はHDPEの高い結晶性によりリスクとなる。



A = Period during which depletion of antioxidants occurs
 B = Induction time to onset of polymer degradation
 C = Time to reach the failure level of degradation of a particular property

HDPEジオメンブレンの酸化劣化の概要※

※Kerry Rowe and Henri P.Sangam, Durability of HDPE geomembranes, Geotextiles and Geomembranes 20 (2002) 77-95

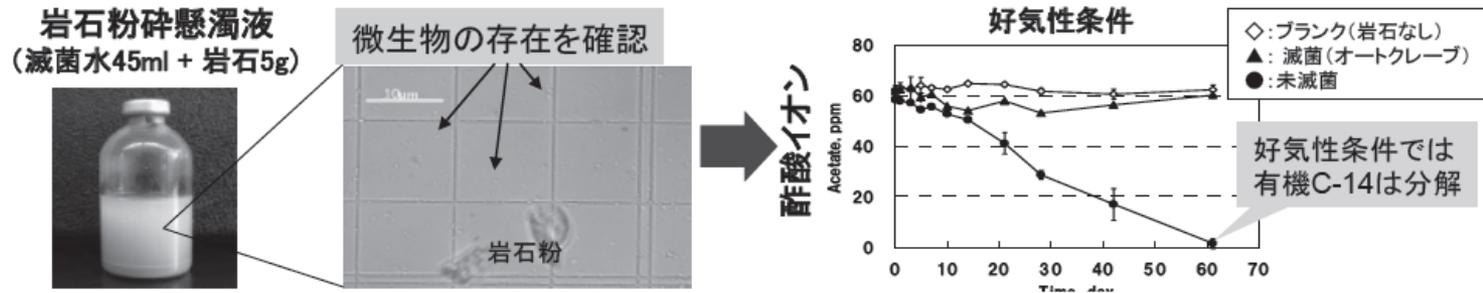
(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分

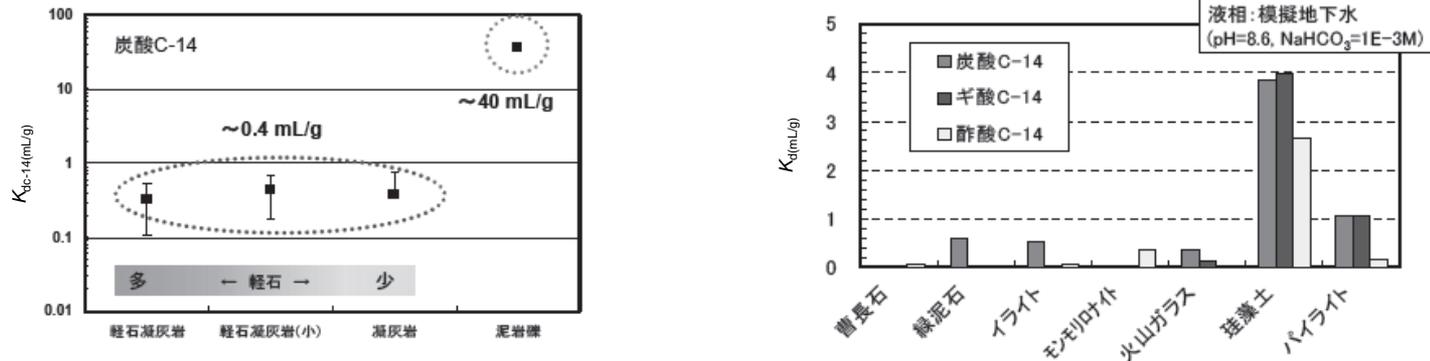
IV. 処分概念の改良案の提示

(参考)浅地中でのC-14の化学形態と移行遅延

- 浅地中処分では、廃棄体から溶出するC-14の多くは酢酸等の分子量の小さい有機物の形態であるものの、地表近くにあるため好気性環境である天然バリア(岩盤)及び土壤中の微生物により分解され無機形態(炭酸)になることが実験的に示されており(下図※)これに基づき許認可資料でも無機炭酸を想定して天然バリア中の K_d が設定されている(許認可関連資料**)。



- 炭酸C-14について種々の岩石及び鉱物に対するバッチ収着試験が行われており、このうち凝灰岩類に対するデータに基づき $0.0001 \text{ m}^3/\text{kg}$ (0.1 ml/g)という許認可申請時の値が設定されている(先行事業の設定と同じ)。他方、泥岩礫に対する炭酸の K_d は $0.04 \text{ m}^3/\text{kg}$ (40 ml/g)に達し、他方、珪藻土は炭酸および酢酸等に対しても一定の収着性 ($K_d \sim 0.004 \text{ m}^3/\text{kg}$ (4 ml/g))を示すことが確認されている※。



※ 宮内善浩、天然バリアにおける炭酸C-14の移行挙動評価、「放射性廃棄物研究のためのネットワーク」第3回情報交換会講演資料集、JAEA CONF 2008-002.

※※ 日本原燃株式会社、廃棄物埋設施設における許可基準規則への適合性について、線量評価パラメータ-分配係数-、2020.

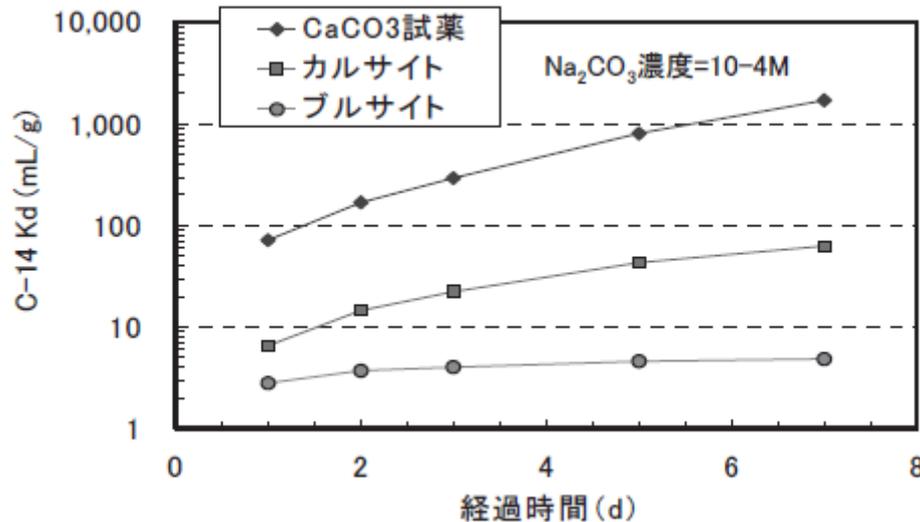
(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分

IV. 処分概念の改良案の提示

(参考)浅地中でのC-14の化学形態と移行遅延

- 炭酸C-14の炭酸塩鉱物を含む系での浸漬試験を行った結果、固相(炭酸塩)中のC-12との同位体交換により「みかけの K_d 」は速やかに上昇することがわかった(下図※)。
- 同位体交換の速度及び K_d の大きさは試料の粒径に依存しており、粒径の小さい CaCO_3 試薬では固相へのC-14の配分が最も速やかに生ずる。



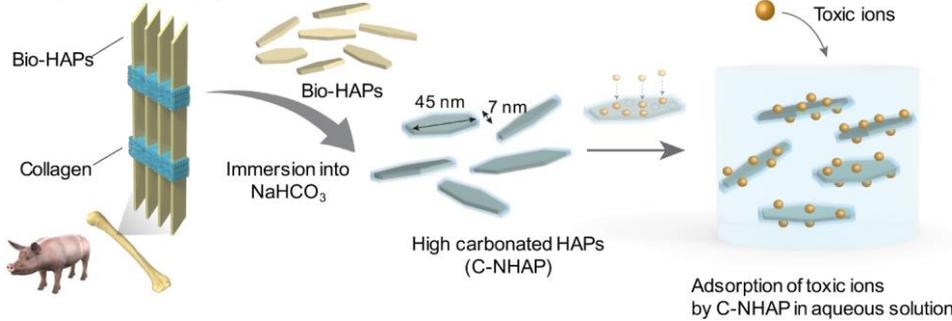
(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分

IV. 処分概念の改良案の提示

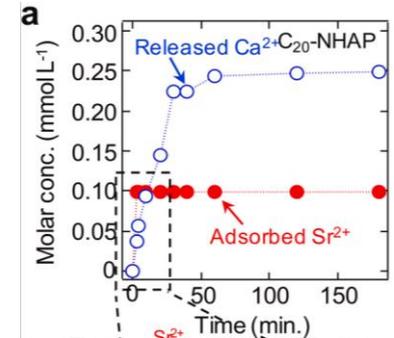
(参考)食品廃骨材を原料にしたSr吸着剤

- アパタイト(燐灰石)は動物の骨の主成分であり、結晶中のCaとの置換によりSrを吸着することが知られているが、Sekine et.al. (2021)^{*}では廃豚骨を原料として生成したアパタイト(Bio-HAPs)をNaHCO₃溶液に浸漬することで極めて高いSrに対する吸着性を有するアパタイトが得られることを示した。
- Bio-HAPsをNaHCO₃溶液に浸漬することで結晶中のリン酸基及び水酸基が炭酸によって置換されるとともに、Ca欠損部分が新たなSr吸着サイトとして機能することがXAFS(X線吸収微細構造解析)による評価で明らかとなっている。

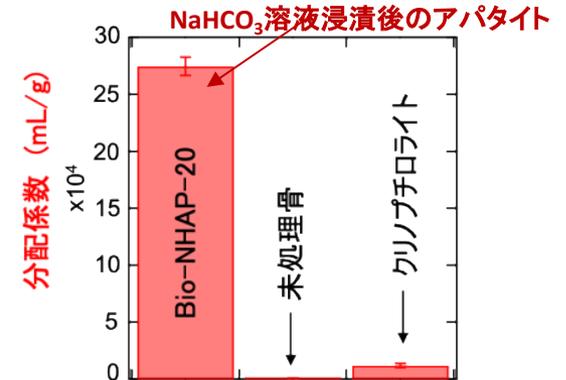


食品廃骨材を原料にしたSr吸着剤(アパタイト)生成の手順^{*}

- 10wt%以上の濃度のNaHCO₃溶液に浸漬した後のアパタイトのSrに対するK_dは約270 m³/kg (2.7E5 ml/g)であり、土壌中に1%程度を混入するだけでもケーススタディで想定したK_d (0.05 m³/kg)をはるかに上回る収着性能を発揮することが期待できる。
- NaHCO₃溶液浸漬Bio-HAPsの原料は世界中で年間7500万トン以上生じている廃骨材であり、また、NaHCO₃溶液浸漬も単純なプロセスであるため、大量に安価で供給可能とされている。



NaHCO₃溶液浸漬によって生ずる吸着サイトの概念^{*}



NaHCO₃溶液浸漬後のアパタイトと他の材料とのK_dの比較^{**}

^{*}Sekine, Y. et al., Carbonated nanohydroxyapatite from bone waste and its potential as a super adsorbent for removal of toxic ions. Journal of Environmental Chemical Engineering. vol. 9, no. 2, 2021, pp. 105114.

^{**} 関根由莉奈、南川卓也、食品廃棄物を原料にした吸着材料の開発研究、第33回廃棄物資源循環学会研究発表会、C6-6-P、講演原稿2022

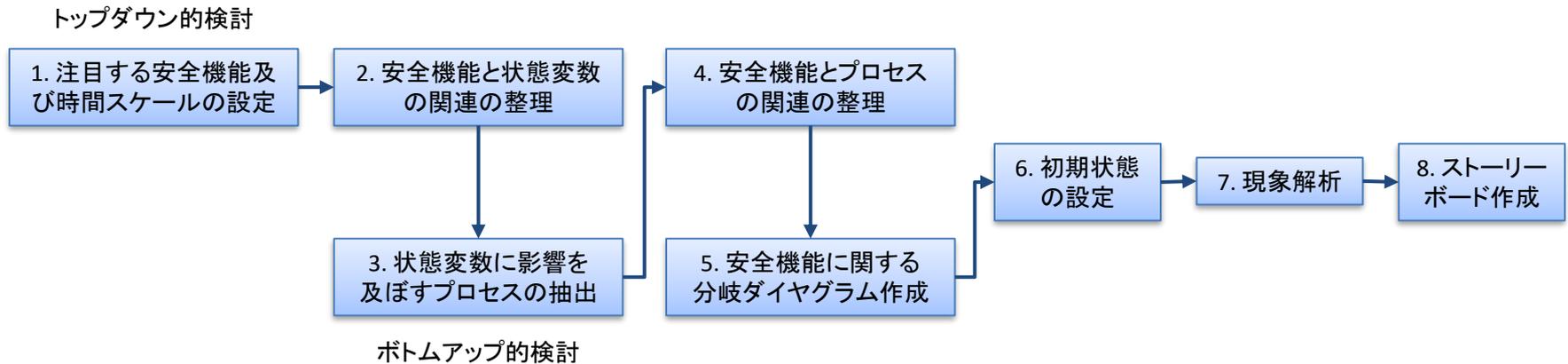
(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分

IV. 処分概念の改良案の提示

C-14の分散機能に着目した施設直下の土壌(土質改良部分)の状態設定

- 前述の通り施設内の上流端と下流端に位置する廃棄体のGBIへの到達時期のズレが時間的分散効果としてC-14の最大移行率を低減することが期待できる。
- そこで、施設直下の土壌を掘り起こしC-14の移行遅延に有効な礫岩や珪藻土あるいは凝灰岩の粒子を混入して再び締め固める土質改良を施すことにより、この時間的分散効果を強化することがリスク低減策として有効となる。
- 以上を踏まえ、本試行では、解体廃棄物(建屋内コンクリート(事故前非放射性))についての改良型トレンチ処分を対象とし、施設から施設直下の土壌に移行したC-14の地下水による移行の遅延に着目して土壌の状態変遷についての現象理解をシナリオとしてとりまとめ、その結果に基づき土質改良によるC-14の時間的分散促進の信頼性を評価する。



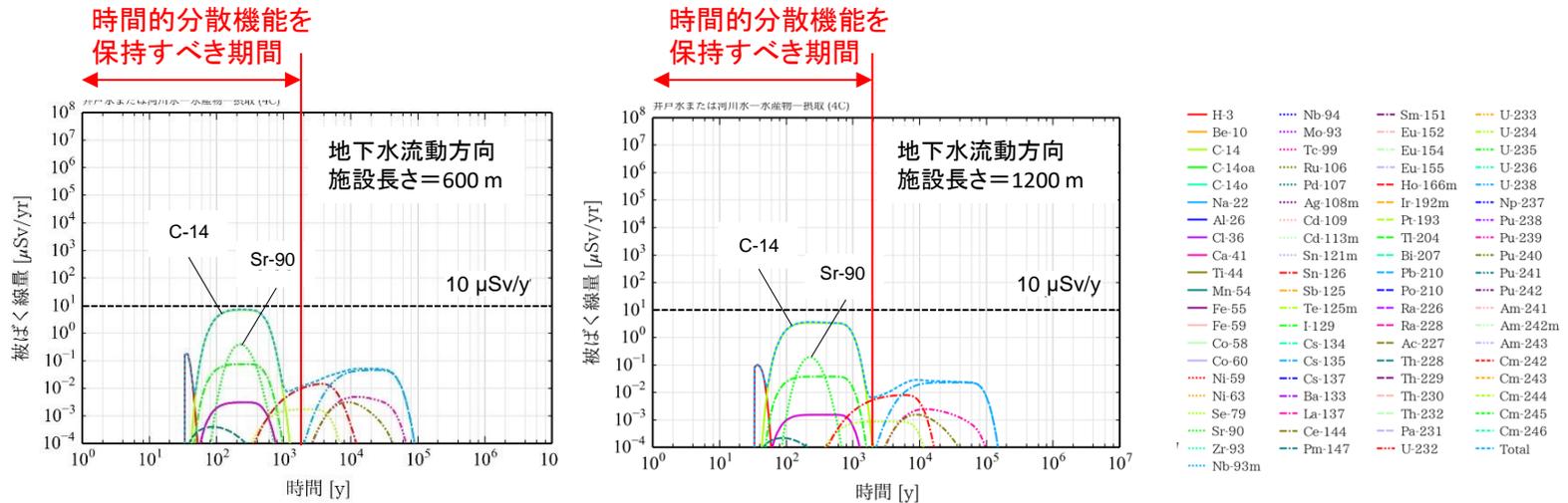
状態設定の手順

(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分 V.リスク低減案に着目したシナリオ解析

C-14の分散機能に着目した施設直下の土壌(土質改良部分)の状態設定:注目する安全機能及び時間スケールの設定

- 解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)をトレンチ処分した場合、先行事業における既往の検討※の条件ではC-14の最大被ばく線量が目安値(10 $\mu\text{Sv/y}$)を上回る(前出の感度解析結果参照:スライド52)。
- 施設直下の土壌の土質改良によってC-14の移行を遅延した場合には、時間的分散効果により最大被ばく線量が低下し、最大被ばく線量は目安値を下回る(下図参照)。
- この場合のC-14の移行期間は最大でも2,000年程度であることから、土質改良を施した施設直下の土壌のC-14移行遅延機能が必要となる時間スケールとして2,000年が目標となる。



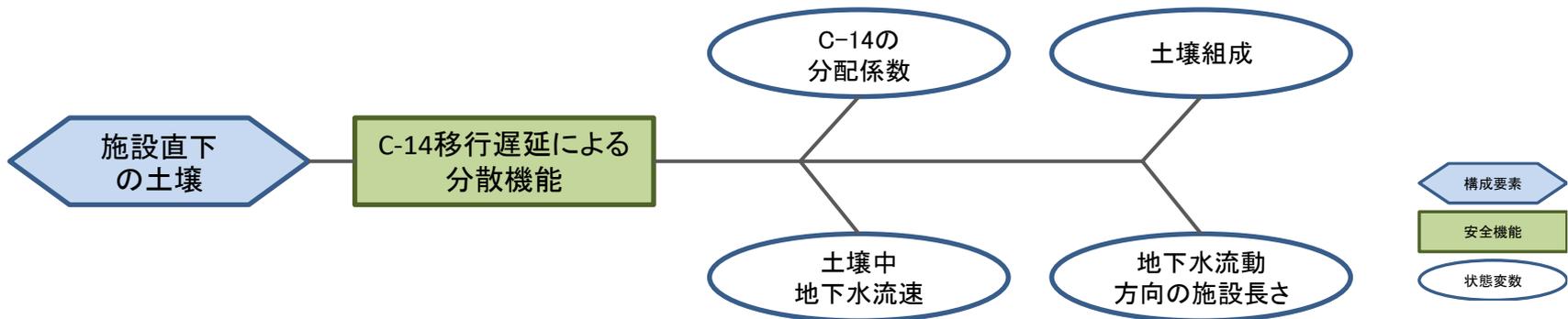
施設直下の土壌を改良した場合の被ばく線量評価結果(スライド52再掲)

(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分 V.リスク低減案に着目したシナリオ解析

C-14の分散機能に着目した施設直下の土壌(土質改良部分)の状態設定:安全機能と状態変数の関連の整理

- 土壌中でのC-14の収着あるいは同位体交換による固相への取り込みの程度は地下水中でのC-14の化学形態(有機か無機か)に依存することに加え、C-14の移行遅延に寄与する泥岩や珪藻土あるいは凝灰岩等が土壌中にどの程度含まれるかに依存する。
- C-14の時間的分散効果は、施設上流端と下流端に位置する廃棄体から移行する核種のGBIへの到達時期のズレによってもたらされるものであるため、施設直下を通過する地下水の滞留時間に比例することとなる。このため、施設直下の土壌中の地下水流速及び地下水流動方向の施設長さが安全機能を規定する状態変数となる。



注目する安全機能及び関連する状態変数

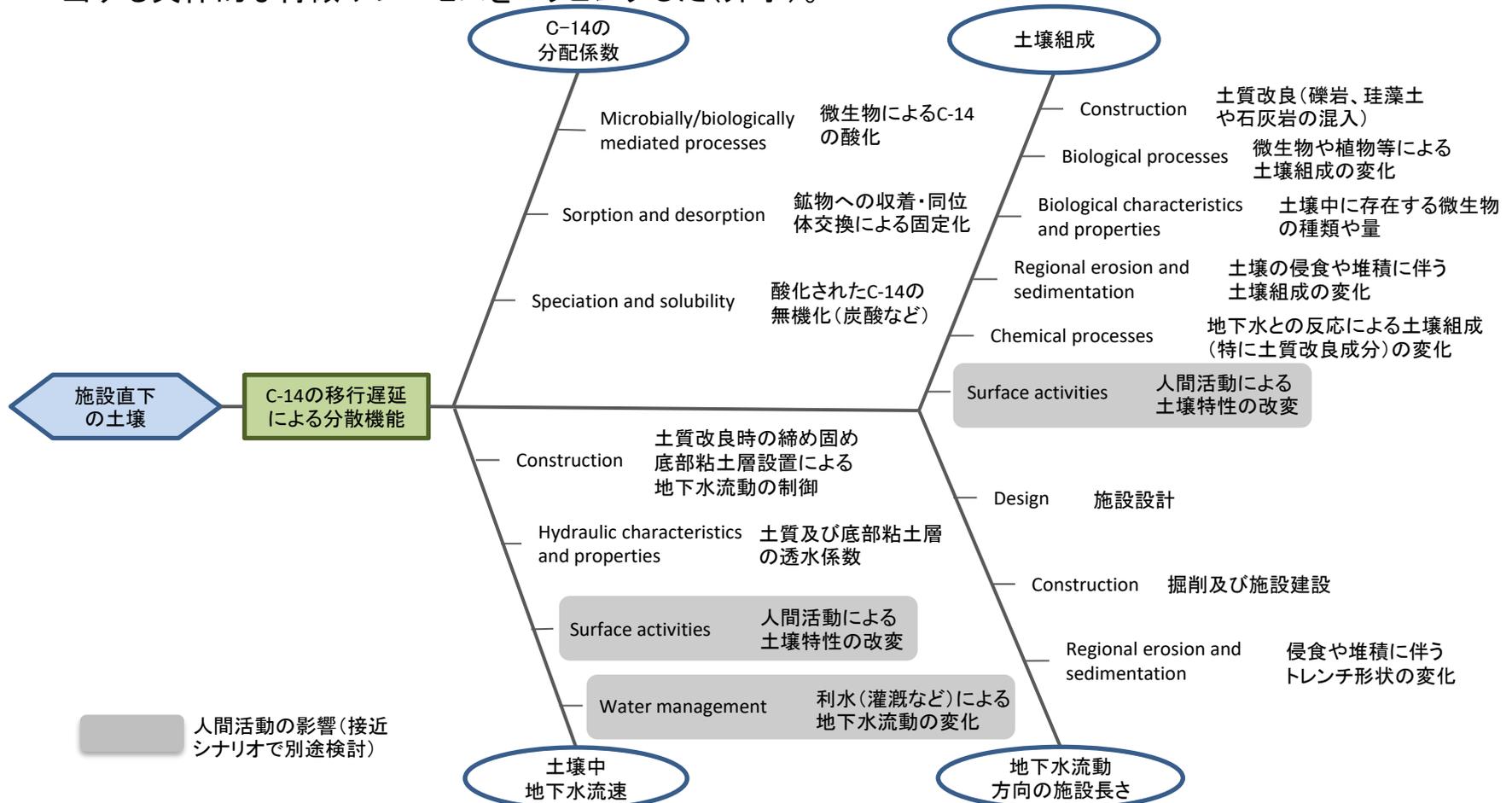
(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分 V.リスク低減案に着目したシナリオ解析

C-14の分散機能に着目した施設直下の土壌(土質改良部分)の状態設定:

状態変数に影響を及ぼすプロセスの抽出と安全機能とプロセスの関連の整理

- 前頁において整理した安全機能を規定する状態変数の時間的変遷に影響を及ぼす可能性のあるFEP(英字)をFEPデータベース※から抽出し、施設直下の改良した土壌中でのC-14の移行遅延による分散機能に該当する具体的な特徴やプロセスをマッピングした(邦字)。



※NEA (2019), International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste Version 3.0, OECD Publishing, Paris

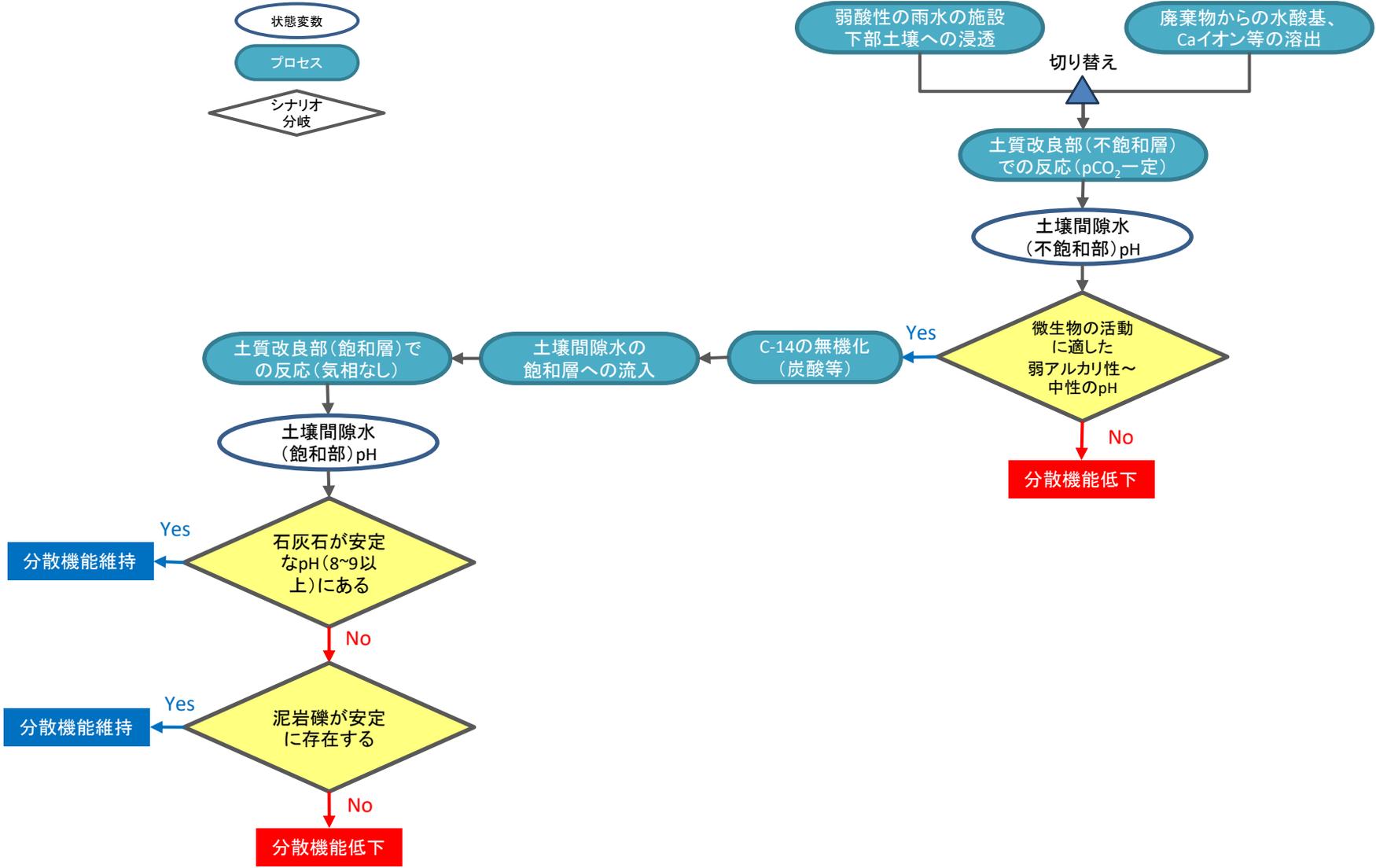
(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分 V.リスク低減案に着目したシナリオ解析

C-14の分散機能に着目した施設直下の土壌(土質改良部分)の状態設定:安全機能に関する分岐ダイアグラム作成

初期の50年程度(ジオメンブレンによる遮水)

雨水の施設への浸透開始以降



(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分 V.リスク低減案に着目したシナリオ解析

C-14の分散機能に着目した施設直下の土壌(土質改良部分)の状態設定:安全機能に関する分岐ダイアグラム作成

■ 施設直下の土壌に浸透する水質の切り替え

- a. 廃棄体層の周囲にある遮水層(ジオメンブレン)が健全であり制度的管理の一環としての排水も行われる初期の50年程度は廃棄物層を迂回した雨水(弱酸性)が施設直下の土質改良部(玄武岩等の碎石を含む層)に浸透する。
- b. 制度的管理が終了し遮水層が機能を失う時期以降は雨水が施設内を通過し、コンクリート廃棄物と反応してアルカリ性となって土質改良部に浸透する。

■ 土質改良箇所(施設下部の土壌)におけるC-14の移行遅延に関する分岐のポイント

- i. 不飽和の土質改良部の間隙水質が上記a.、b.いずれの時期においても土壌中の微生物の生存可能な範囲であり有機C-14が無機形態(炭酸等)となるか否か。
- ii. 不飽和の土質改良部を通過して下部の飽和層に至る地下水が上記a.、b.いずれの時期においても中性から弱アルカリ性で石灰岩が安定して存在する水質にあるか否か。
- iii. 上記の水質が上記a.、b.いずれの時期においても土壌中の泥岩礫が安定して存在する水質にあるか否か。

■ 基本シナリオの設定に必要な検討

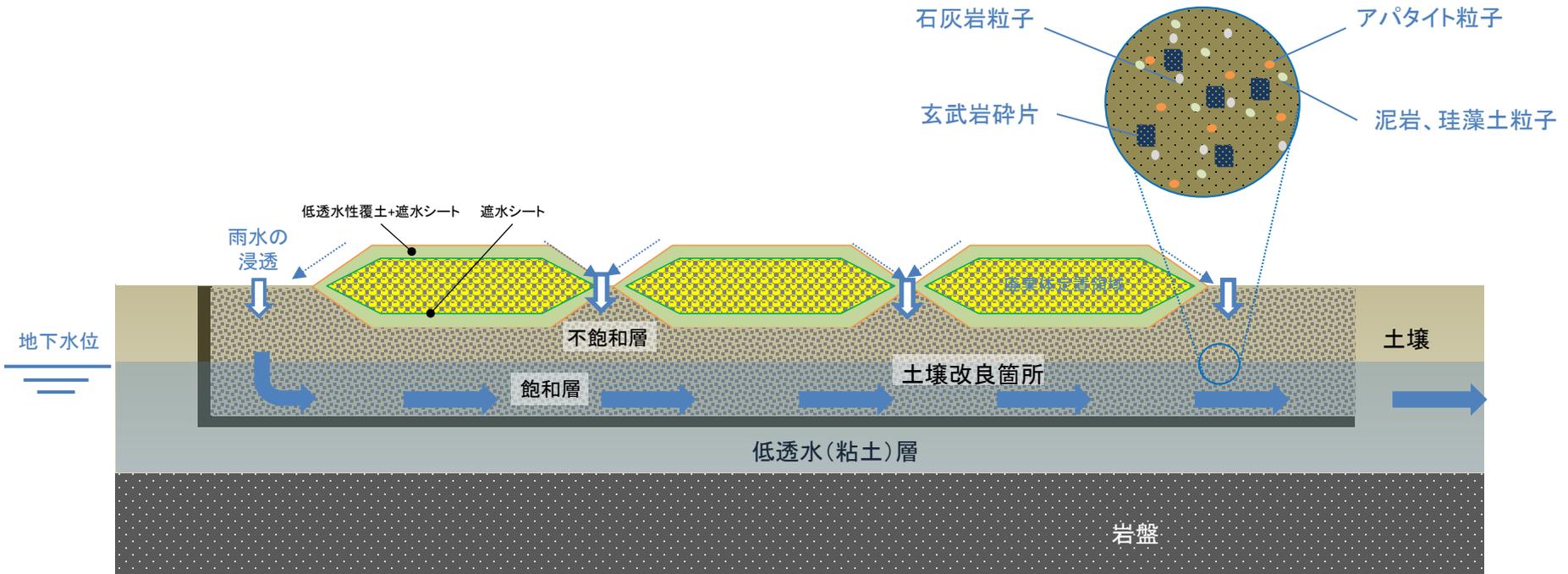
- 初期条件の設定
 - ・ 施設下部の土質改良(掘り起こし及び玄武岩及び泥岩礫や粉碎した石灰岩混入後の締め固め)の施工状況。
 - ・ 施設上流側及び底部(土質改良箇所の下)に設置する低透水層(粘土層)の施工状況及び地下水流動状況。
- 土壌改質部の変質の予想: 上記i.～iii.に答えるための反応輸送解析及びエビデンスに基づく妥当性の評価

(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分 V.リスク低減案に着目したシナリオ解析

C-14の分散機能に着目した施設直下の土壌(土質改良部分)の状態設定:初期状態の設定

- トレンチ処分施設は地下水位より上にあり、制度的管理(排水)及びジオメンブレンシートの遮水機能により廃棄物(コンクリート)層は不飽和状態にある。
- 雨水はトレンチ上部の低透水性覆土及びジオメンブレンシートに沿って土質改良を施した土壌(不飽和層)に導かれ、その後同じく土質改良を施した飽和土壌に至る。
- 底部(土質改良を施した施設下部の土壌の直下)及び施設下流側の端面以外の3つの側面に設置する低透水性(粘土)層によって上流側及び深部の地下水循環系からは隔てられているため、施設敷地内に降った雨水が地下に浸透してその後施設下部の土壌中を水平に流下する。
- 土質改良を施した土壌にはpH緩衝用の玄武岩の碎片、C-14の移行遅延に有効な泥岩礫及び粉碎した石灰岩の粒子が所定の割合で含まれる(Srの移行遅延のために含めるアパタイトについては別途検討)。



(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分 V.リスク低減案に着目したシナリオ解析

C-14の分散機能に着目した施設直下の土壌(土質改良部分)の状態設定:現象解析(反応輸送解析)

本検討では、以下3つの構成要素からなる解析体系を構築した。

○ 廃棄体層

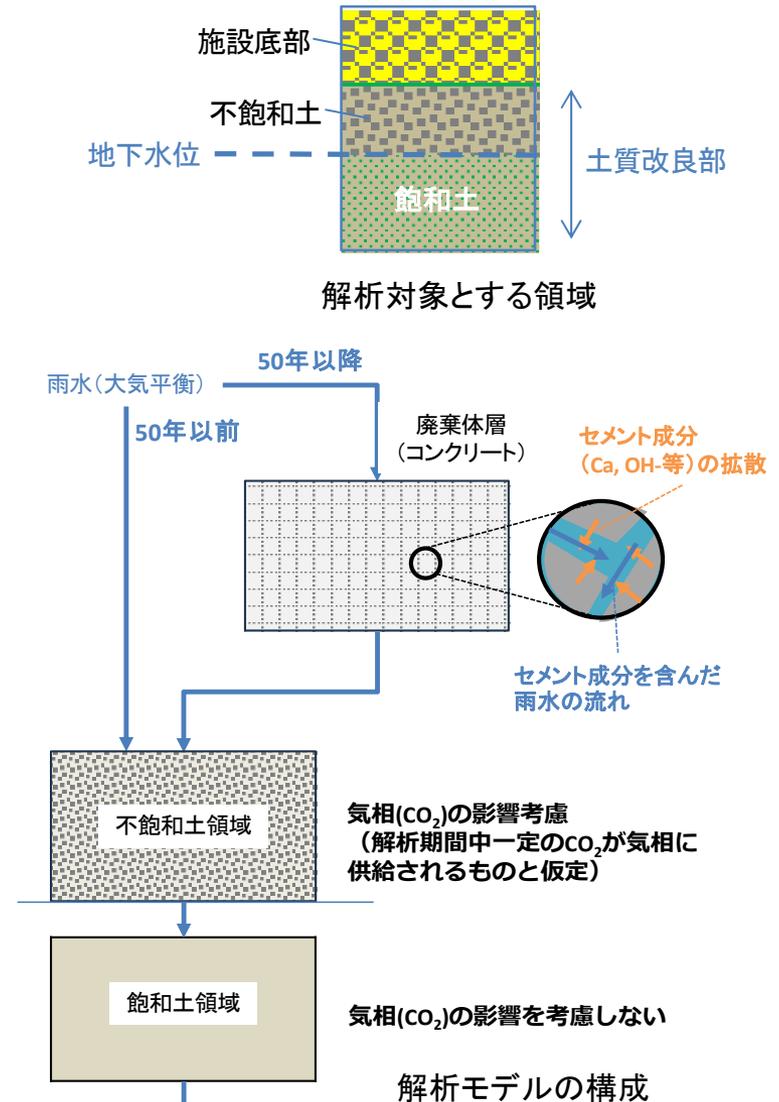
- 廃棄体層を構成する解体コンクリート(解体ガラ)は充填時に空隙が生じるため、雨水が施設に浸透するようになってからはその空隙部に雨水が流れこむと考えられる。
- 本解析では空隙部を流れる雨水にコンクリートのマトリクス部からセメント成分(Ca、OH等)が拡散で移行すると考えた。

○ 不飽和土領域(土質改良部)

- 施設直下の土質改良部のうち、地下水面より上側は不飽和状態であり、土壌には気相が存在するものと考えられる。
- 本解析では間隙水の水質について、土質改良部に含まれる鉱物の沈殿・溶解反応の他、土壌における気相(CO₂)の影響を受けるものと考えた。
- ここでは、解析期間中一定のCO₂が気相に供給されるものと仮定した。

○ 飽和土領域(土質改良部)

- 施設直下の土質改良部のうち、地下水面より下側は地下水で飽和しているものと考えられる。
- 本解析では間隙水の水質について土質改良部に含まれる鉱物の沈殿・溶解反応の影響を考慮した。



(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分 V.リスク低減案に着目したシナリオ解析

C-14の分散機能に着目した施設直下の土壌(土質改良部分)の状態設定:現象解析(反応輸送解析)モデルの詳細

- 全期間を通じてミキシングセル1、2、土質改良部には1 m/yで雨水が流入。
- 50年以降はミキシングセル2に廃棄体領域からセメント成分が拡散し雨水と混合する。その後ミキシングセル2から土質改良部(不飽和土領域)に混合した雨水が流入する。
- 不飽和土領域では、気相を考慮した解析モデルを用い、**土壌によって幅のあるpCO₂をパラメータとした解析を行う(次ページ参照)**。
- 各境界の水頭値および透水係数は固定、廃棄体領域の実効拡散係数のみを右表のように切り替える。

透水係数設定

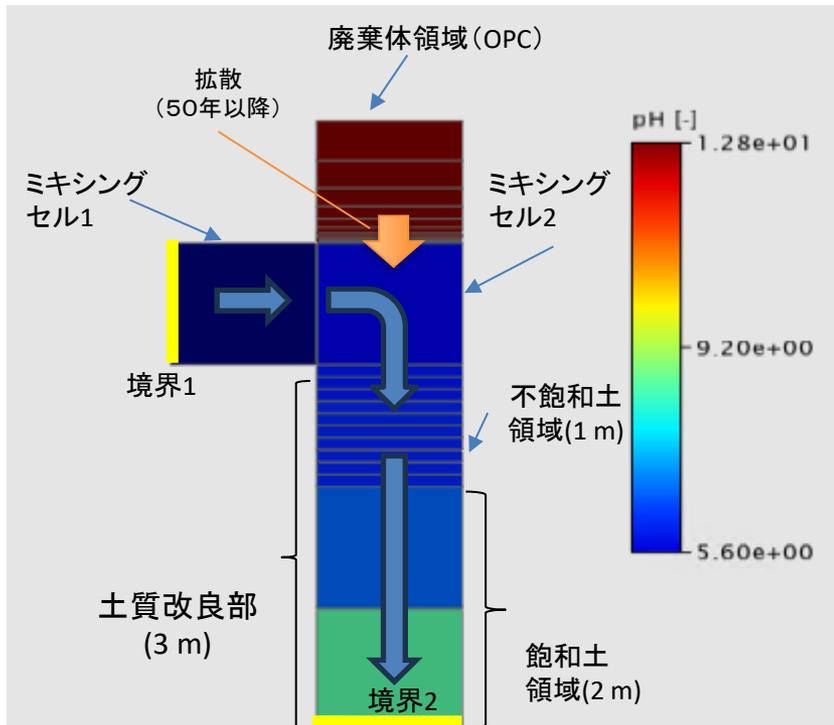
	透水係数[m/s]
ミキシングセル1	3.2×10^{-8}
ミキシングセル2	3.2×10^{-8}
玄武岩	3.2×10^{-8}
廃棄体3	10^{-15}

実効拡散係数設定

	50年まで[m ² /s]	50年以降[m ² /s]
ミキシングセル1	10^{-20}	10^{-20}
ミキシングセル2	(※2) 2.27×10^{-9}	(※2) 2.27×10^{-9}
玄武岩	10^{-20}	10^{-20}
廃棄体	10^{-20}	(※1) $2.27 \times 10^{-9} \times \theta^{3.05}$

※1 NUMO-SC※から引用

※2 自由水の実効拡散係数(NUMO-SC※から引用)



境界条件設定

	化学	水頭[m]
境界1	雨水濃度	3
境界2	地下水濃度	0

不飽和土領域のpCO₂

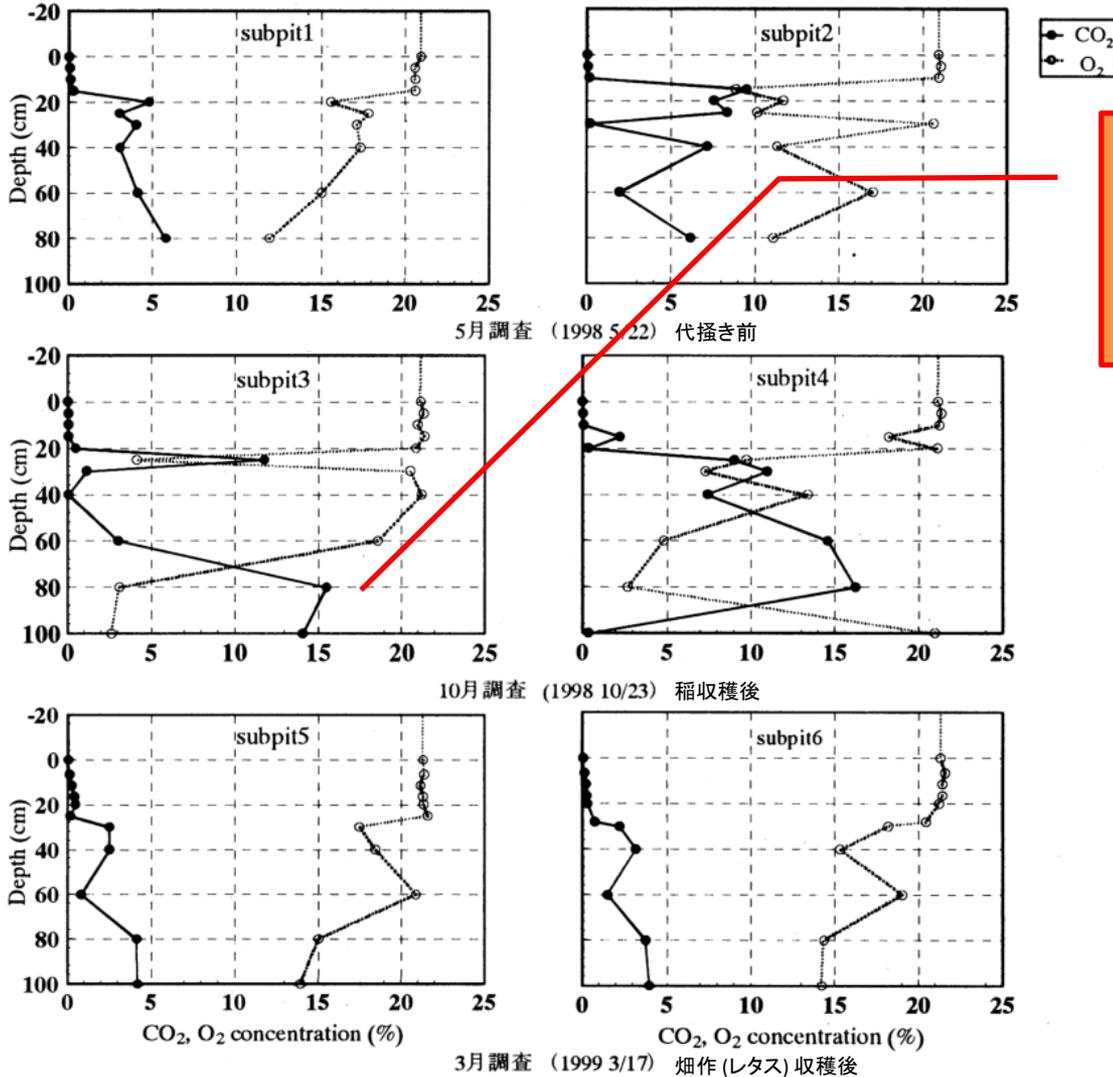
	pCO ₂ [atm]
Case1	4×10^{-4} (大気との平衡)
Case2	1×10^{-2} (圃場試験)
Case3	1×10^{-1} (圃場試験変動)

※原子力発電環境整備機構(NUMO)、包括的技術報告書:わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—、2021年2月

(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分 V.リスク低減案に着目したシナリオ解析

(補足) 土壌におけるCO₂分圧について



地表付近は大気CO₂分圧程度だが、土壌深部ではCO₂濃度が10%程度まで上昇するケースもある。

藤川智紀、宮崎毅、関勝寿、井本博美: 田畑輪換圃場における土壌微生物数分布とCO₂、O₂ガス濃度分布の相関について. 農業土木学会論文集、2000(208)、443-452.

(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分 V.リスク低減案に着目したシナリオ解析

C-14の分散機能に着目した施設直下の土壌(土質改良部分)の状態設定:現象解析(反応輸送解析)(考慮する鉱物)

- 土質改良部に含まれる玄武岩の鉱物組成や二次鉱物はBeeriling et al.(2020)*に基づき設定。
- 廃棄体層の初期水和物やセメント影響を想定した二次鉱物はNUMO-SC**を参照して設定。
- 二次鉱物は全領域で溶解沈殿設定、速度式はBeeriling et al.(2020)およびNUMO-SCを参照して設定。
- 玄武岩層の初期鉱物は玄武岩0.8 vol%を想定して設定。

	鉱物名
土質改良部初期鉱物 (Beeriling et al., 2020) *赤字は本解析で追加	Labradorite
	Augite
	Kfeldspar
	Ilmenite
	Forsterite
	Fayalite
	Quartz (10 vol%)
	Calcite (10 vol%)
OPC初期水和物 (NUMO-SC)	Portlandite
	C16SH
	Ettringite
	KatoiteSi1
	Hydrotalcite

	鉱物名
二次鉱物(玄武岩層のみの解析で想定、Beeriling et al.(2020))	Calcite
	Amorphous silica
	Gibbsite
	Goethite
二次鉱物(セメント影響想定、NUMO-SC)	C07SH~C15SH
	Dolomite
	Analcime
	(Calcite)
	Brucite
	Friedel_Salt
	Sepiolite
	C4AH13
	Straetlingite
	Monosulfoaluminate
	Gypsum
	Monocarboaluminate

	初期間隙率
ミキシングセル	0.99
廃棄体層	0.129
土質改良部	0.25

*Beerling, D.J. et al. Potential for large-scale CO(2) removal via enhanced rock weathering with croplands. Nature. vol. 583, no. 7815, 2020, pp. 242-248.

**原子力発電環境整備機構(NUMO)、包括的技術報告書:わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—、2021年2月

(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分 V.リスク低減案に着目したシナリオ解析

(補足) 土壌改良部鉱物組成および溶解速度

$$rate = A \cdot [k_H(a_{H^+})^n + k_{H_2O} + k_{OH}(a_{OH})^m] \cdot (10^{SI_{Mineral}} - 1)$$

Basalt Formulation	Mineral	Acid kinetic parameters			Neutral kinetic parameters		Base kinetic parameters		
		logK	E _{app}	n	logK	E _{app}	logK	E _{app}	n
Normal-Alkali-Basalt (faster weathering)	Labradorite	-7.87	42.1	0.63	-10.91	45.2	-15.57	71	-0.57
	Augite	-6.82	78	0.7	-11.97	78	-	-	-
	Forsterite	-6.85	67.2	0.47	-10.64	79	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Kfeldspar	10.06	51.7	0.5	-12.41	38	-21.2	94.1	-0.82
	Fayalite	-	-	-	-	-	-	-	-
Normal-Tholeiite (slower weathering)	Ilmenite	-8.35	37.9	0.42	-11.16	37.9	-	-	-
	Augite	-6.82	78	0.7	-11.97	78	-	-	-
	Enstatite	-9.02	80	0.6	-12.72	80	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Kfeldspar	10.06	51.7	0.5	-12.41	38	-21.2	94.1	-0.82
	Labradorite	-7.87	42.1	0.63	-10.91	45.2	-15.57	71	-0.57
	Ilmenite	-8.35	37.9	0.42	-11.16	37.9	-	-	-

初期鉱物	Volume fractions [-]
Labradorite	4.24 x 10 ⁻³
Augite	1.57 x 10 ⁻³
Kfeldspar	6.25 x 10 ⁻⁴
Ilmenite	2.78 x 10 ⁻⁴
Forsterite	9.96 x 10 ⁻⁴
Fayalite	3.03 x 10 ⁻⁴
Inert (basalt)	8.77 x 10 ⁻⁴
Total (basalt)	8.89 x 10 ⁻³
Quartz	1.00 x 10 ⁻¹
Calcite	1.00 x 10 ⁻¹
Inert (soil)	0.541
Porosity	0.250
Total	1

土壌改良部の鉱物組成

玄武岩に含まれる鉱物の溶解速度係数(Beerling et al., 2020*)

*Beerling, D.J. et al. Potential for large-scale CO(2) removal via enhanced rock weathering with croplands. Nature. vol. 583, no. 7815, 2020, pp. 242-248.

(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分 V.リスク低減案に着目したシナリオ解析

C-14の分散機能に着目した施設直下の土壌(土質改良部分)の状態設定:現象解析(反応輸送解析)結果(Case1)

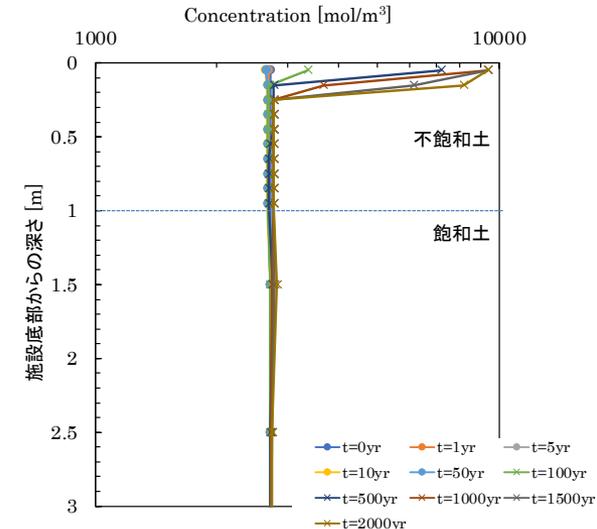
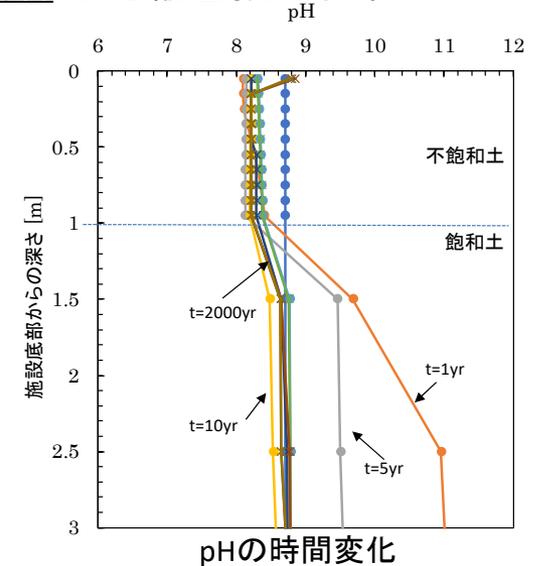
■ 不飽和土壌領域(施設底部からの深さ<1 m)

- 気相(CO₂)の影響により、反応初期から2000yrにかけて中性~弱アルカリ性(pH=8~9)を維持する。
- 結果を詳しく見ると、50年以降、セメント成分の流入により一時的にpHが上昇する挙動が見られるが、100年程度で元のpHに戻る。
- 2000年間では、施設底部付近の25 cm程度の領域においてのみCalciteの沈殿反応が起こる。

■ 飽和土壌領域(施設底部からの深さ>1 m)

- 反応初期は玄武岩の溶解によりpHが上昇する(pH~11)。
- 時間とともに玄武岩に含まれるアルカリ材が枯渇し、pHは低下する。
- 2000yrの段階では不飽和土から流入する間隙水のpHと同程度(中性~弱アルカリ性)になる。
- 2000年間ではCalciteの存在量にほとんど変化はない。

Case1のpCO₂の設定はスライド68参照



石灰岩(Calcite)濃度の時間変化

(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分 V.リスク低減案に着目したシナリオ解析

C-14の分散機能に着目した施設直下の土壌(土質改良部分)の状態設定:現象解析(反応輸送解析)(Case2及びCase3)

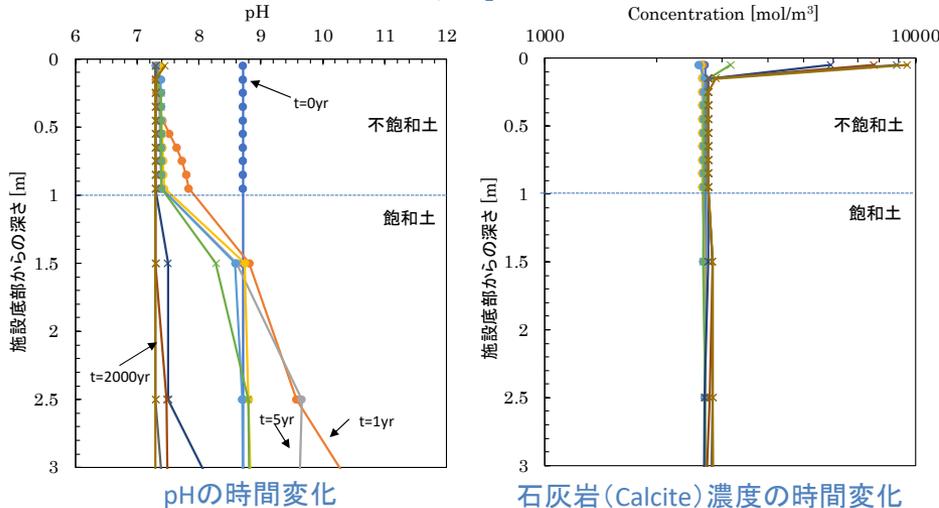
■ 不飽和土壌領域(施設底部からの深さ<1 m)

- Case2では7.4、Case3では6.7程度のpHとなっており、 pCO_2 の値の上昇と共にpHが下がる傾向にある。
- Case2ではCase1と同様、施設底部付近においてのみCalciteの沈殿反応が起こるが、その範囲は15 cm程度であるCase1より狭い。
- Case3では、施設底部付近において初期にCalciteが沈殿するが、次第に溶解するようになり、2000年では20 cm程度の領域でCalciteが溶解する。ただし、それより下側の領域では初期の存在量とほぼ変化がない。

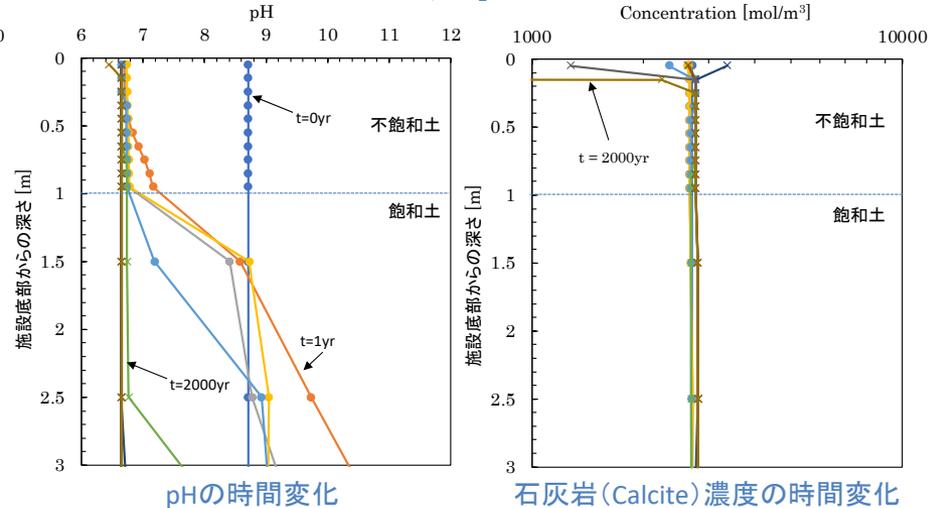
■ 飽和土壌領域(施設底部からの深さ>1 m)

- 反応初期は玄武岩の溶解によりpHが上昇し(pH~11)、時間とともに玄武岩に含まれるアルカリ材が枯渇し、pHが低下する挙動はCase1と同様。
- 2000yrにかけて不飽和土から流入する間隙水と同程度までpHが低下するため、やはり pCO_2 の値の上昇と共にpHが下がる。
- CO_2 分圧によらずCalciteの存在量は初期からほぼ変化しなかった。

Case2 ($pCO_2=0.01 \text{ atm}$)



Case3 ($pCO_2=0.1 \text{ atm}$)



Case2、3の pCO_2 の設定はスライド68参照

(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分 V.リスク低減案に着目したシナリオ解析

C-14の分散機能に着目した施設直下の土壌(土質改良部分)の状態設定:現象解析(反応輸送解析)のまとめ

- セメント廃棄物のトレンチ処分を想定し、廃棄体層下部に玄武岩とCalcite、石英を含む土壌改良層を設置した反応輸送解析を実施した。
 - Case2では7.4、Case3では6.7程度のpHとなっており、 $p\text{CO}_2$ の値の上昇と共にpHが下がる傾向にある。
 - Case2ではCase1と同様、施設底部付近においてのみCalciteの沈殿反応が起こるが、その範囲は15 cm程度であるCase1より狭い。
 - Case3では、施設底部付近において初期にCalciteが沈殿するが、次第に溶解するようになり、2000年では20 cm程度の領域でCalciteが溶解する。ただし、それより下側の領域では初期の存在量とほぼ変化がない。
- 解析結果(pHの時間変化)
 - Case1では反応初期は玄武岩の溶解によりpHが上昇し(pH~11)、時間とともに玄武岩に含まれるアルカリ材が枯渇し、pHが低下する。
 - Case1では2000yrにかけて不飽和土から流入する間隙水と同程度までpHが低下するため、やはり $p\text{CO}_2$ の値の上昇と共にpHが下がる。
 - Case1では CO_2 分圧によらずCalciteの存在量は初期からほぼ変化しなかった。
- 解析結果(Calciteの溶解・沈殿)
 - $p\text{CO}_2$ の高いCase3では、不飽和土壌領域では最上部において土質改良により混入した石灰岩(Calcite)が溶解する挙動が見られたが、それ以外の領域では顕著な変化は見られなかった。
 - C-14の移行遅延を期待する飽和土壌ではいずれのケース(Case1、2、3)においてもCalciteの溶解は生じておらず、C-14の分散効果が生ずるものと考えられる。

Case1、2、3の $p\text{CO}_2$ の設定はスライド68参照

(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分 V.リスク低減案に着目したシナリオ解析

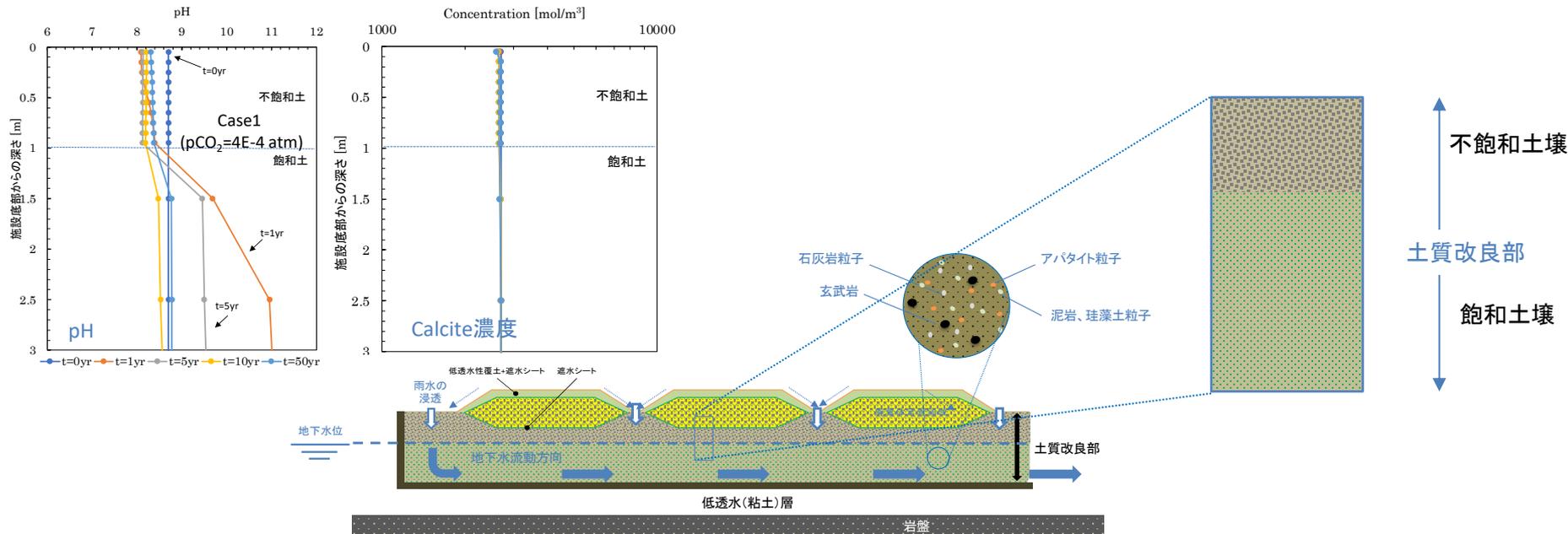
C-14の分散機能に着目した施設直下の土壌(土質改良部分)の状態設定: ストーリーボード作成(初期の50年間)

■ 地下水流動

- トレンチ処分施設は地下水位より上にあり、制度的管理(排水)及びジオメンブレンシートの遮水機能により廃棄物(コンクリート)層は不飽和状態にある。雨水はトレンチ上部の低透水性覆土及びジオメンブレンシートに沿って土質改良部(不飽和土領域)に導かれ、同層を通じてその下層(飽和土領域)に至る。
- 底部(土質改良を施した施設下部の土壌の直下)及び施設下流側の端面以外の3つの側面に設置する低透水性(粘土)層によって上流側及び深部の地下水循環系からは隔てられているため、施設敷地内に降った雨水が地下に浸透してその後施設下部の土壌中を水平に流下する。

■ 化学的条件

- 不飽和土壌では $p\text{CO}_2$ の影響によりpHは8程度にとどまる。一方、飽和土壌においては玄武岩の溶解によって初期にはpH10を上回る箇所があるが10年程度経過すると8.5程度で安定する($p\text{CO}_2$ が大気程度である場合)。 $p\text{CO}_2$ が高い場合には、不飽和土壌のpHは中性程度となり、飽和土壌においても底部を除き同程度のpHとなる。
- 好気性環境である不飽和土壌は中性～弱アルカリ性であり、 CO_2 を排出する微生物の活動に適した環境となる。
- 土質改良として土壌に混入したCalciteはCase1、2、3の全てのケースで安定に存在する。



(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分 V.リスク低減案に着目したシナリオ解析

C-14の分散機能に着目した施設直下の土壌(土質改良部分)の状態設定: ストーリーボード作成(長期:50年~2000年)

■ 地下水流動

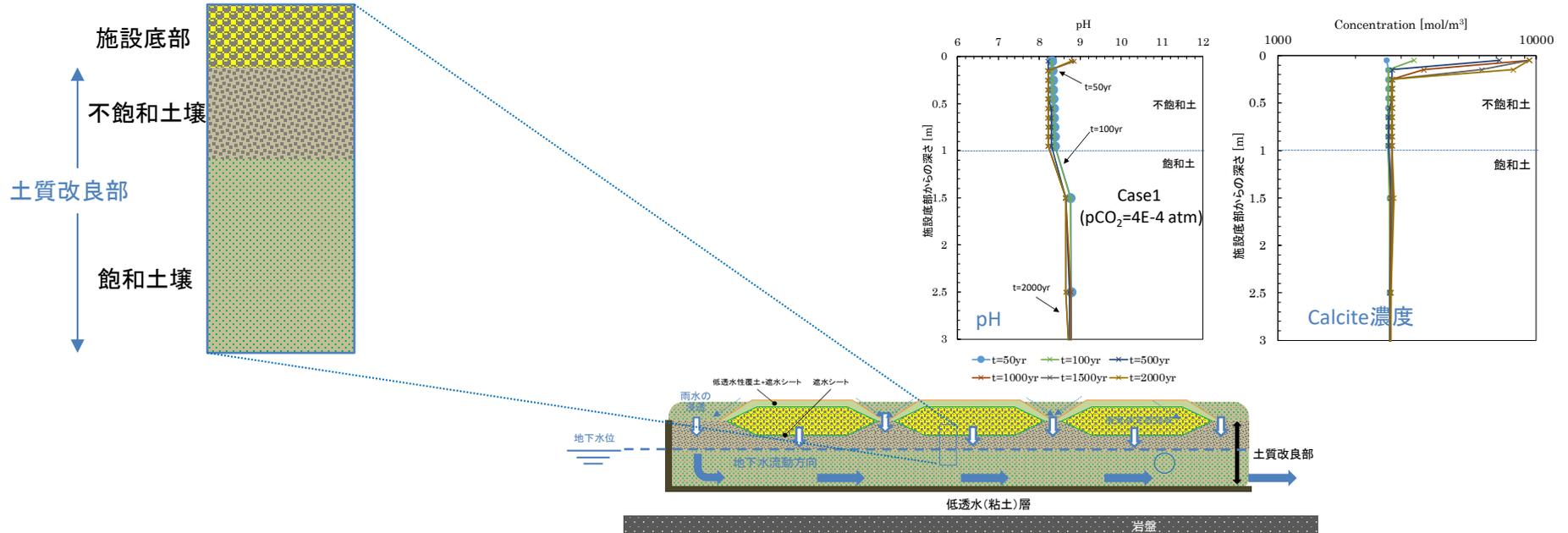
- 制度的管理(排水)の終了及びジオメンブレンシートの劣化により、雨水が廃棄物(コンクリート)層を通じて下部の土壌に浸透する。
- 地下に浸透した雨水は低透水性(粘土)層の機能によって施設下部の土壌中を水平に流下する。

■ 化学的条件

- 不飽和土壌では pCO_2 の影響によりpHは8程度にとどまる。一方、飽和土壌においては玄武岩のpH緩衝性により8.5程度で安定する(pCO_2 が大気程度である場合)。 pCO_2 が高い場合には、不飽和土壌のpHは中性程度となり、飽和土壌においても底部を除き同程度のpHとなる。
- 好気性環境である不飽和土壌は中性~弱アルカリ性であり、 CO_2 を排出する微生物の活動に適した環境となる。
- 土質改良として土壌に混入したCalciteは全てのケースで安定に存在する

■ C-14の挙動

- 不飽和土壌中の微生物活動によって有機形のC-14も無機化され炭酸等となる
- 無機炭酸中のC-14は土質改良によって混入しその後も安定に存在するCalcite中のC-12との同位体交換によって固相に取り込まれるため、その移行は地下水の流れに対して顕著に遅延される(スライド58のCalcite等を含む収着試験の結果は $0.1 \text{ m}^3/\text{kg}$ 程度の K_d を示す)



(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分 V.リスク低減策の成立性・適用性評価

各エビデンスによって細分化された命題が支持あるいは否定される程度及び残された不確実性を関連分野(微生物及び地球化学等)の専門的知見を有する当社スタッフにヒアリングし評価を行った(今後、必要に応じて専門家のワークショップ等を通じブラッシュアップ)

0.39 0.61 0 改良型トレンチ処分はC-14に対して十分な分散効果を有する。

0.5 0.47 0.53 0 1 施設下部の土壤に移行したC-14は微生物活動により無機化(炭酸など)する。

0.5 0.58 0.42 0 1.1 C-14が好気性の土壤中で微生物活動により無機化(炭酸など)する。

0.5 0.7 0.3 0 1.1.1 微生物活動によるC-14の無機化プロセスが明らかになっている。

0.5 0.7 0.3 0 1.1.2 好気性環境中での微生物活動によるC-14の無機化を実証する試験結果

0.7 0 1 0 1.1.3 処分サイトの土壤中での微生物活動によるC-14の無機化を実証する試験結果

0.5 0.5 0.5 0 1.2 土壤間隙水はC-14の無機化に有効な微生物の活動に適した環境である。

0.5 0.45 0.55 0 1.2.1 土壤改良部の間隙水のpHが中性~弱アルカリ性となる(初期)。

0.5 0.9 0.1 0 1.2.1.1 玄武岩や石灰岩を含む土壤改良部の土壤における反応輸送解析結果(1)

0.7 0 1 0 1.2.1.1 玄武岩や石灰岩を含む土壤改良部の土壤を用いた雨水のカラム通水試験(1)

0.5 0.45 0.55 0 1.2.2 施設を通過した地下水のpHが土壤中で中性~弱アルカリ性となる。

0.5 0.9 0.1 0 1.2.2.1 コンクリート層及び玄武岩や石灰岩を含む土壤改良部における反応輸送解析結果(1)

0.5 0 1 0 1.2.2.2 コンクリート層及び玄武岩や石灰岩を含む土壤を用いた雨水のカラム通水試験(1)

0.5 0.35 0.65 0 1.2.3 予想される土壤間隙水質(中性~弱アルカリ性)でC-14の無機化に有効な微生物が活動し得る。

0.5 0.7 0.3 0 1.2.3.1 予想される土壤間隙水質(中性~弱アルカリ性)で活動する既知の微生物の中にC-14の無機化に有効なものがある。

0.7 0 1 0 1.2.3.2 予想される土壤間隙水質(中性~弱アルカリ性)でC-14の無機化に有効な微生物が存在することを実証する試験

← エビデンス1(スライド80-81)

← エビデンス2(スライド82)

← エビデンス3(前出の反応輸送解析)

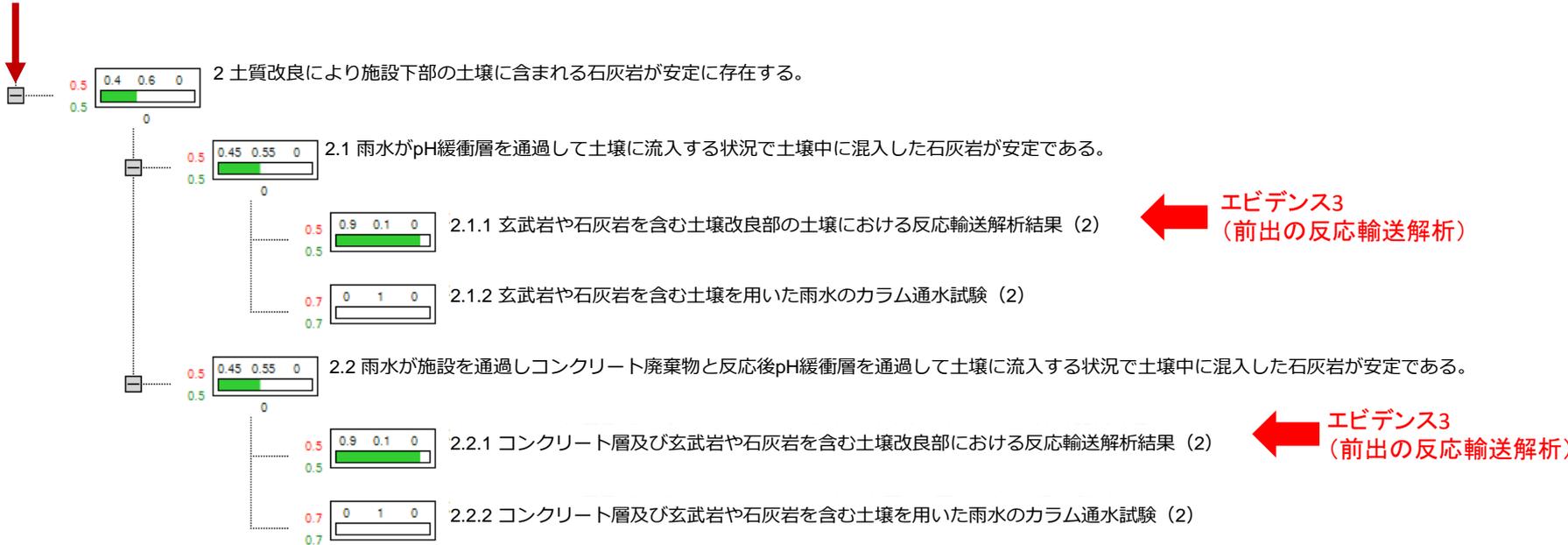
← エビデンス3(前出の反応輸送解析)

← エビデンス4(スライド83)

次スライドに続く

(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分 V.リスク低減策の成立性・適用性評価



(3)改良後の処分概念の試行

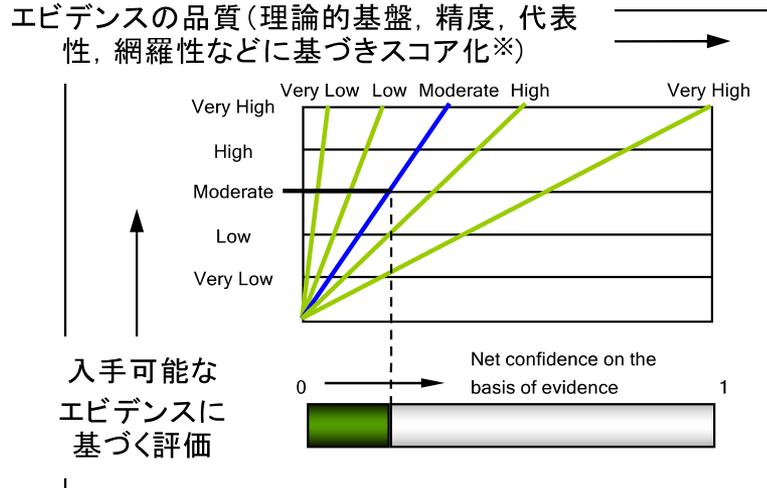
解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分 V.リスク低減策の成立性・適用性評価

(補足)各エビデンスに基づく末端命題の評価

- Decision treeの末端にあたる各命題に対して、入手可能なエビデンス(一つの命題に対して複数存在し得る)がそれを支持(肯定)あるいは否定する程度をそれぞれYesあるいはNoの主観確率として表現する。
- 情報が不足している等の理由で判断が困難な場合は「保留(どちらとも言えない:白)」を適用する。
- エビデンスの品質に応じて評価結果を較正する(下図)。

Yes:あるエビデンスが命題を支持(肯定)する確からしさ
保留:情報不足等の理由でどちらとも言えない(YesとNoの和が1に満たない場合の残余の不確実性)
No:あるエビデンスが命題を否定する確からしさ

エビデンスに基づく区間確率設定の考え方



- 各エビデンスによる末端命題の支持あるいは否定の程度を決めるにあたっては、試験結果や解析結果あるいは観察事実等が命題に対してどのような意味を持っているかという観点に加えて、これらのエビデンス自体の「品質」に留意する必要がある。
- 解析結果に関しては、使用したモデルの理論的基盤の有無や専門家間のコンセンサスの有無あるいは入力パラメータの精度などに留意する必要がある。
- 試験や測定結果の場合には、実際の環境と実験条件の差異や測定精度あるいは再現性の有無などに配慮することが必要。
- 統計的なデータや状況依存性のある結果等については、これらを網羅する統計的に有意な数のデータが得られているかといった点に注意して品質を評価することが求められる。

※Funtowicz and Ravetz (1990): Funtowicz, S. O. and Ravetz, J. R. "Uncertainty and Quality in Science for Policy". Dordrecht: Kluwer.

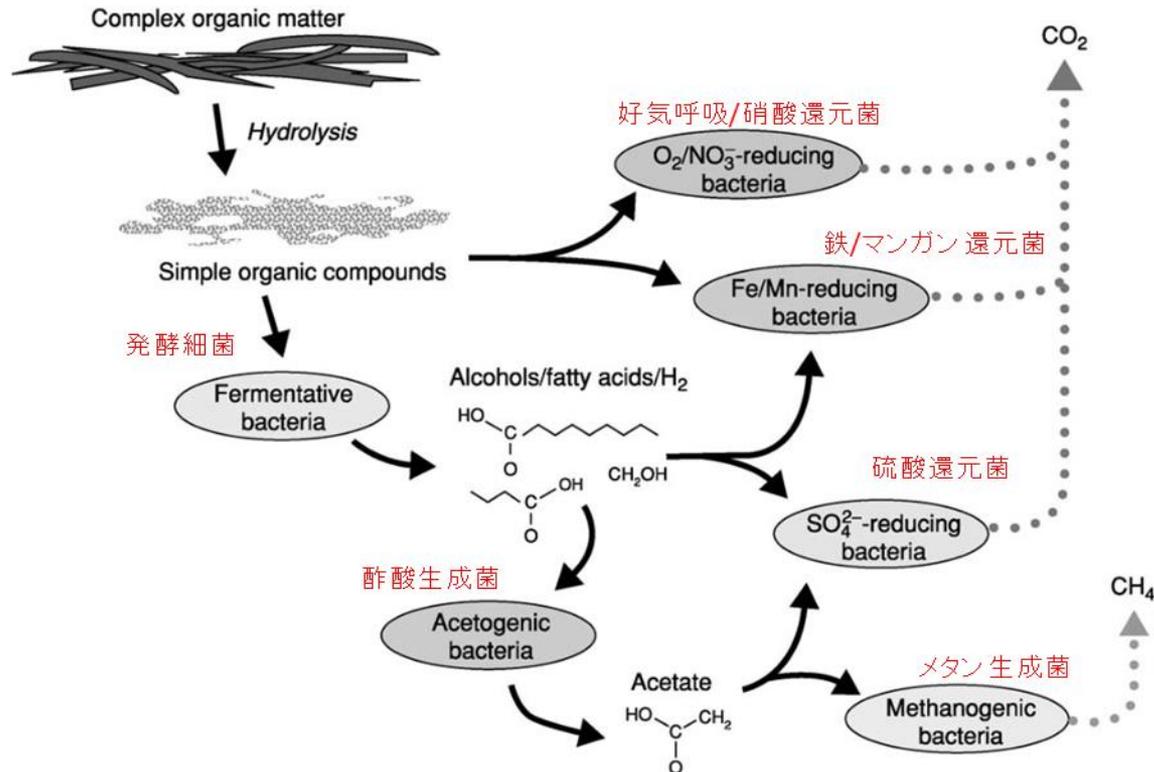
(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分 V.リスク低減策の成立性・適用性評価

エビデンス1:微生物活動によるC-14の無機化プロセスが明らかになっている(1/2)

■ 微生物活動による有機物分解プロセス

- 一般的に土壌には植物残渣や動物の遺骸・排泄物、あるいは微生物の死骸等として有機物が供給される。
- 土壌において有機物は下の図に示すように、種々の微生物によりCO₂まで分解される*。
- 好気性環境では微生物活動により主としてCO₂が排出される。



*Inglett, P. et al. Anaerobic soils. Encyclopedia of Soils in the Environment. 2005, pp. 72-78.

(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分 V.リスク低減策の成立性・適用性評価

エビデンス1:微生物活動によるC-14の無機化プロセスが明らかになっている(2/2)

■ 土壌における有機物分解に係る主な微生物代謝

- 好気性細菌
 - ・ 酢酸を含む有機物を酸素を用いて二酸化炭素と水に分解する。
 - ・ 反応式の例: $\text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
- 硫酸・硝酸還元菌
 - ・ 硫酸を硫化水素に、硝酸を亜硝酸や窒素に還元し、酢酸を含む有機物を分解する。
 - ・ 反応式の例: $\text{CH}_2\text{O} + 4/5\text{NO}_3^- \rightarrow 1/5\text{CO}_2 + 2/5\text{N}_2 + 4/5\text{HCO}_3^- + 3/5\text{H}_2\text{O}$
- 鉄・マンガン還元菌
 - ・ 鉄やマンガン還元し、酢酸を含む有機物を分解する。
 - ・ 反応式の例: $\text{CH}_2\text{O} + \text{MnO}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{CO}_2 + \text{Mn}^{2+} + \text{H}_2\text{O}$
- 発酵細菌 + 酢酸生成菌
 - ・ 発酵細菌群の代謝により有機物をアルコールや脂肪酸、酢酸まで分解する。
 - ・ 反応式の例: $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + 2\text{H}_2$
- メタン生成菌
 - ・ 酢酸の分解や、 CO_2 と H_2 からメタンを生成する。
 - ・ 反応式の例: $\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$

■ 酢酸中のCが好気性環境では主に CO_2 として無機化される仕組み

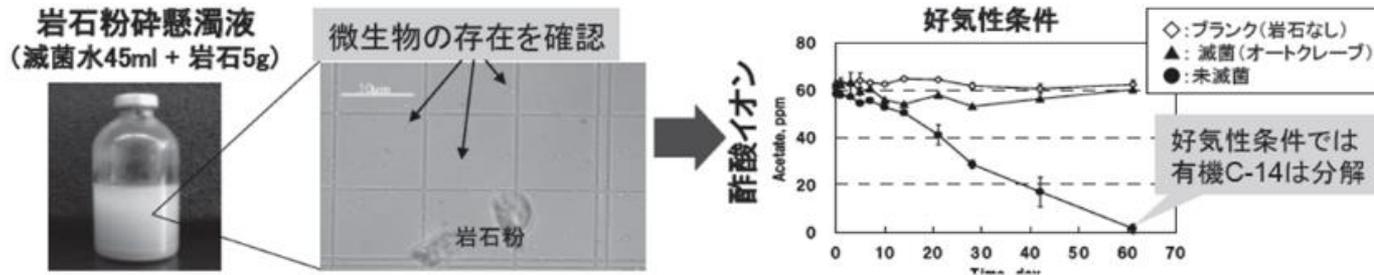
- 好気性環境では酢酸は CO_2 に分解される(嫌気性環境であっても硫酸が豊富に存在する環境では硫酸還元菌が優位に活動するため、酢酸は CO_2 に分解される)。
- 嫌気性環境において酢酸の一部はメタン生成菌によって CH_4 として環境中に放出されるが、その場合も、好気性環境(あるいは硫酸の豊富な環境)まで CH_4 が拡散すれば、 CH_4 は CO_2 に酸化されるため、いずれにしても好気性環境の生成物としては CO_2 を想定すれば良い。

(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分 V.リスク低減策の成立性・適用性評価

エビデンス2:好気性環境でのC-14の無機化に関する試験

- 浅地中処分施設における浅地中処分では、廃棄体から溶出するC-14の多くは酢酸等の分子量の小さい有機物の形態であるものの、地表近くにあるため好気性環境である天然バリア(岩盤)及び土壌中の微生物により分解され無機形態(炭酸)になることが実験的に示されており(下図※)これに基づき許認可資料でも無機炭酸を想定して天然バリア中の K_d が設定されている(許認可関連資料***)。このような知見は、C-14が好気性の土壌中で微生物活動により無機化することについての肯定的なエビデンスであると考えられる。



好気性環境でのC-14の無機化に関する試験※

※ 宮内善浩、天然バリアにおける炭酸C-14の移行挙動評価、「放射性廃棄物研究のためのネットワーク」第3回情報交換会公園資料集、JAEA CONF 2008-002.

*** 日本原燃株式会社、廃棄物埋設施設における許可基準規則への適合性について、線量評価パラメータ-分配係数-、2020.

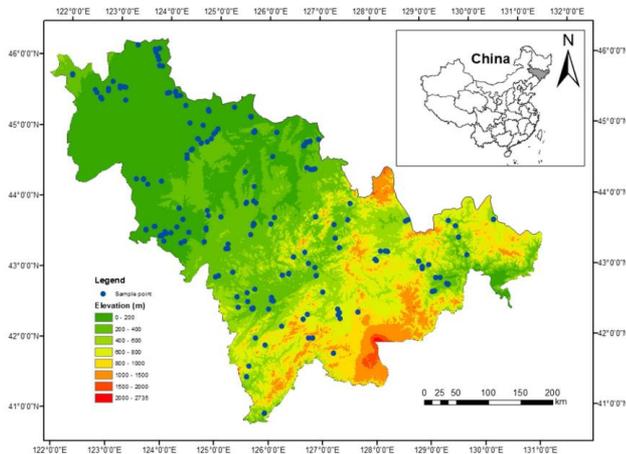
(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分 V.リスク低減策の成立性・適用性評価

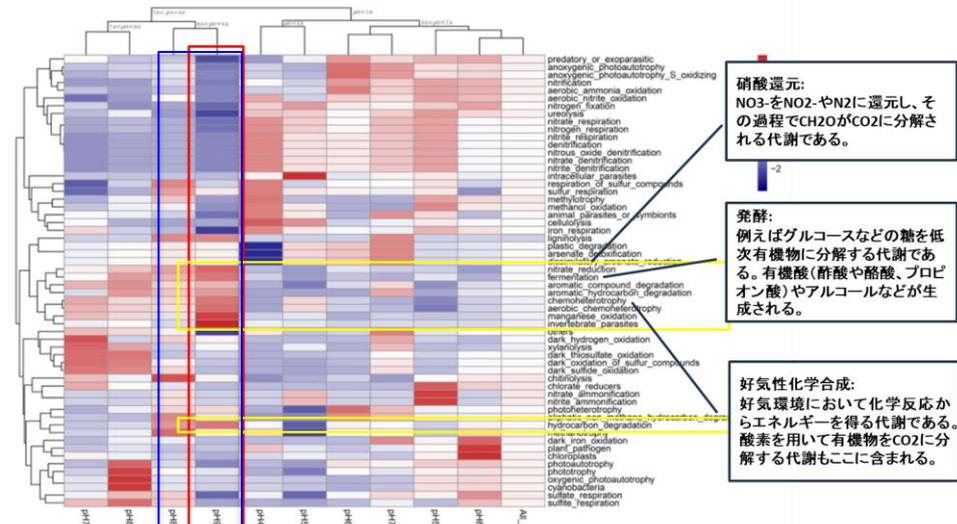
エビデンス4: 予想される土壌間隙水質(中性～弱アルカリ性)で活動する既知の微生物の中にC-14の無機化に有効なものがある

■ Wang et al. (2019)*による研究成果の概要

- Wang et al. (2019)は中国・吉林省の各地の広範な農地土壌を約200試料採取し(左図)、微生物分布と生態学的機能に影響を与える環境因子を検証した。
- 土壌の16S rRNA解析から得られた分析結果に基づき、微生物の代謝様式を推定した。
- 土壌pHごとの微生物の代謝様式のヒートマップ(右図)では、各pH(横軸、順不同)における各微生物代謝(縦軸)の度合いを赤色(卓越)～青色(稀有)で示している。
- 土壌pH = 8.5 ~ 9.0の環境下(青枠)では、好気性化学合成細菌、硝酸還元菌、発酵細菌等の微生物活動(黄枠)が卓越していることが明らかとなった(右図)。
- この結果は中性～弱アルカリ性、かつ好気性環境下では、土壌微生物は酢酸等に含まれるC-14をCO₂に分解されることを支持するエビデンスとなる。



中国・吉林省の農地土壌試料採取地点



土壌pHごとの微生物の代謝様式のヒートマップ

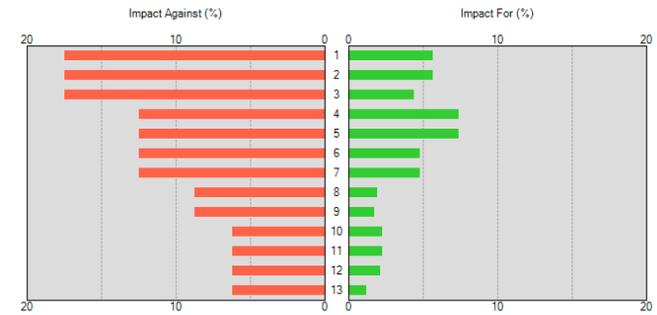
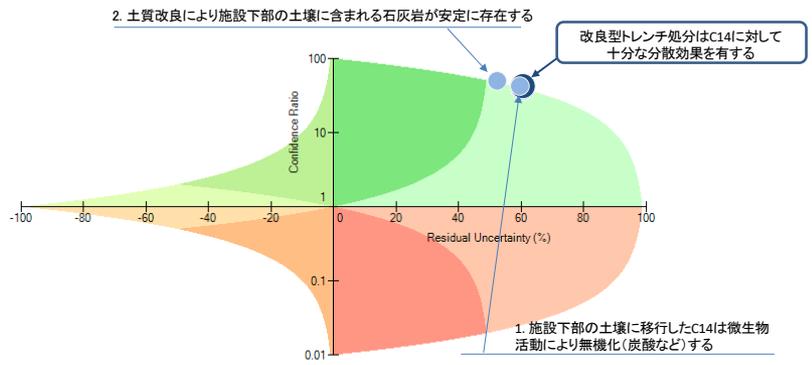
*Wang, C. et al. Soil pH is the primary factor driving the distribution and function of microorganisms in farmland soils in northeastern China. Annals of Microbiology. vol. 69, 2019, pp. 1-13.

(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分 V.リスク低減策の成立性・適用性評価

改良型トレンチ処分のC-14に対する分散効果についての信頼性評価

- 改良型トレンチ処分において土質改良を施した施設下部の土壤間隙水のpHが玄武岩のpH緩衝性によって中性～弱アルカリ性というC-14を無機化する微生物の活動及び移行遅延のために土壤に混入する石灰岩の安定性の両面で好ましい環境に保たれることに関して前出の反応輸送解析、好気性環境での微生物活動に関する専門家のコンセンサス及び浅地中処分サイトの岩石を用いた試験における酢酸の無機化といったエビデンスによって支持されている。
- このため、ESL評価結果は改良型トレンチ処分においてC-14に対する分散効果が担保されることを肯定する結果となっているが、未だ特定されていない処分サイトの土壤を用いたカラム試験によるpH緩衝性の確認や微生物活動による酢酸の無機化といった直接的なエビデンスは未入手であることから、現状では大きな不確実性が残されているという結果となった(左図参照)。
- 今後、こうした不確実性を低減していくためには「玄武岩及び石灰岩を含む土壤を用いた雨水のカラム通水試験」、「コンクリート層、玄武岩及び石灰岩を含む土壤を用いた雨水のカラム通水試験」、「処分サイトの土壤中での微生物活動によるC-14の無機化を実証する試験」等の直接的なエビデンスの蓄積が有用と考えられる(右図参照)。



- 2.1.2 玄武岩及び石灰岩を含む土壤を用いた雨水のカラム通水試験 (2)
- 2.2.2 コンクリート層及び玄武岩や石灰岩を含む土壤を用いた雨水のカラム通水試験 (2)
- 1.1.3 処分サイトの土壤中での微生物活動によるC14の無機化を実証する試験結果
- 2.1.1 玄武岩や石灰岩を含む土質改良部の土壤における反応輸送解析結果 (2)
- 2.2.1 コンクリート層及び玄武岩や石灰岩を含む土質改良部における反応輸送解析結果 (2)
- 1.1.1 微生物活動によるC14の無機化プロセスが明らかになっている
- 1.1.2 好気性環境中での微生物活動によるC14の無機化を実証する試験結果
- 1.2.3.2 予想される土壤間隙水質(中性～弱アルカリ性)でC14の無機化に有効な微生物が存在することを実証する試験
- 1.2.1.2 玄武岩や石灰岩を含む土質改良部の土壤を用いた雨水のカラム通水試験 (1)
- 1.2.1.1 玄武岩や石灰岩を含む土質改良部の土壤における反応輸送解析結果 (1)
- 1.1.1.1 コンクリート層及び玄武岩や石灰岩を含む土質改良部における反応輸送解析結果 (1)
- 1.2.3.1 予想される土壤間隙水質(中性～弱アルカリ性)で活動する既知の微生物の中にC14の無機化に有効なものがある
- 1.2.2.2 コンクリート層及び玄武岩や石灰岩を含む土壤を用いた雨水のカラム通水試験 (1)

明確に成立	Yesだが不確実性が大きい	Noだが不確実性が大きい	明確に不成立
Yes-No > 不確実性	0 < Yes-No < 不確実性	No-Yes > 不確実性	0 < No-Yes < 不確実性

(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分 V.リスク低減策の成立性・適用性評価

(補足) Ratio plotによる確からしさの評価

- Ratio plot(下図)は、以下の縦横軸に対して主命題はじめ各命題についての結果をプロットすることでESLモデルの評価結果を可視化する手法である。
 - 縦軸(対数スケール): (肯定の確率)/(否定の確率)
 - 横軸(リニアスケール): 不確実性
- Ratio plotは下図に示すような5つの領域に分割することが可能であり、それぞれ命題の成立性に関して異なる含意を持つ(下表参照)。



ESL評価結果のRatio plotの例(●は評価された命題を示す)

(3)改良後の処分概念の試行

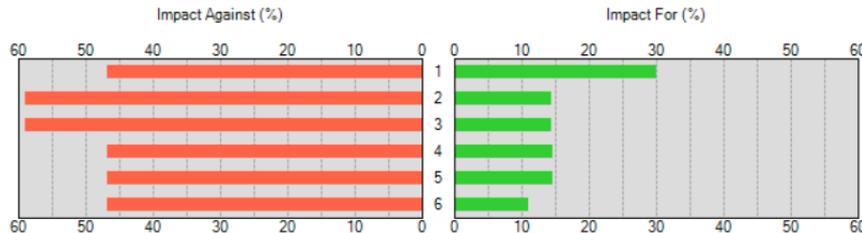
解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分 V.リスク低減策の成立性・適用性評価

(補足) Tornado plotによるエビデンスの重要度分類

- ESLモデルでは、入手されていないエビデンスについての入力は「保留(白が100%)」となるが、その場合でも、当該エビデンスから階層構造を遡上して主命題に至る経路に沿った「重み」の大きさによって、今後、そのエビデンスが得られた場合の感度を事前に評価することができる。
- Tornado plot(下図参照)は、未入手のエビデンスや品質の点で不十分なエビデンスのそれぞれについて支持(あるいは否定)の確からしさが1%増した場合に、それがツリー上を伝播して主命題の肯定(あるいは否定)の確からしさがどの程度増すかを計算して棒グラフで表示したものである。
- Tornado plotで上位に位置するエビデンスは今後のリスクマネジメントを行う上で優先順位の高いものと考えられる。

Tornado plotの例

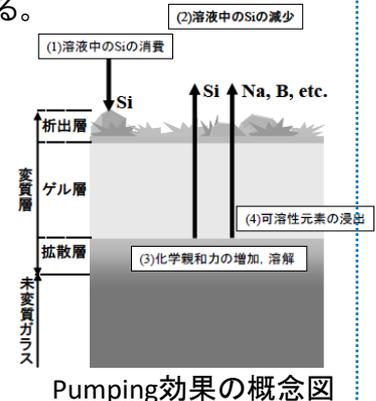
- 除染装置スラッジガラス固化体と鉄製容器の両立性に関するESLモデルを用いた感度解析結果は、鉄腐食生成物との相互作用によるガラス固化体の浸出促進(pumping効果。下右図参照)についての課題が重要となることを示している
- これらの課題はHLWガラス固化体地層処分にも共通のものであり、そこでの研究開発の成果を共有することが有用と考えられる



- 1: 1.1 固化技術に固有の特性(容器時に自由水が全て蒸発)
- 2: 3.1 鉄共存系でのガラス固化(体浸)試験
- 3: 3.2 鉄共存系でのガラス浸出に関する現象解析
- 4: 2.1 ガラスと鉄の接触試験
- 5: 2.2 鉄製容器内に長期間ガラス固化体を収納した事例
- 6: 1.2 実際の廃棄物の模擬固化体を使った水素発生量の評価

- 腐食生成物の影響として、液中の溶存ケイ酸濃度を低下させる現象が観察されているが、これは固相としてガラス固化体近傍に存在する腐食生成物表面への収着、もしくは溶存鉄イオン種との反応による鉄ケイ酸塩鉱物の析出などによるものと考えられている。

- 溶存ケイ酸が消費されると、水溶液中ではガラスが熱力学的な平衡に達し得ない、つまりいったん水に溶解したガラスは再びガラスとして析出できず、ケイ酸を含有する、より安定な鉱物の析出がガラスの溶解を支配する。鉱物の析出によって溶液中の溶存ケイ酸が消費されることで、ガラスの溶解に関する化学親和力が増大し、ガラスの溶解が進行する。これは pumping効果と呼ばれている。

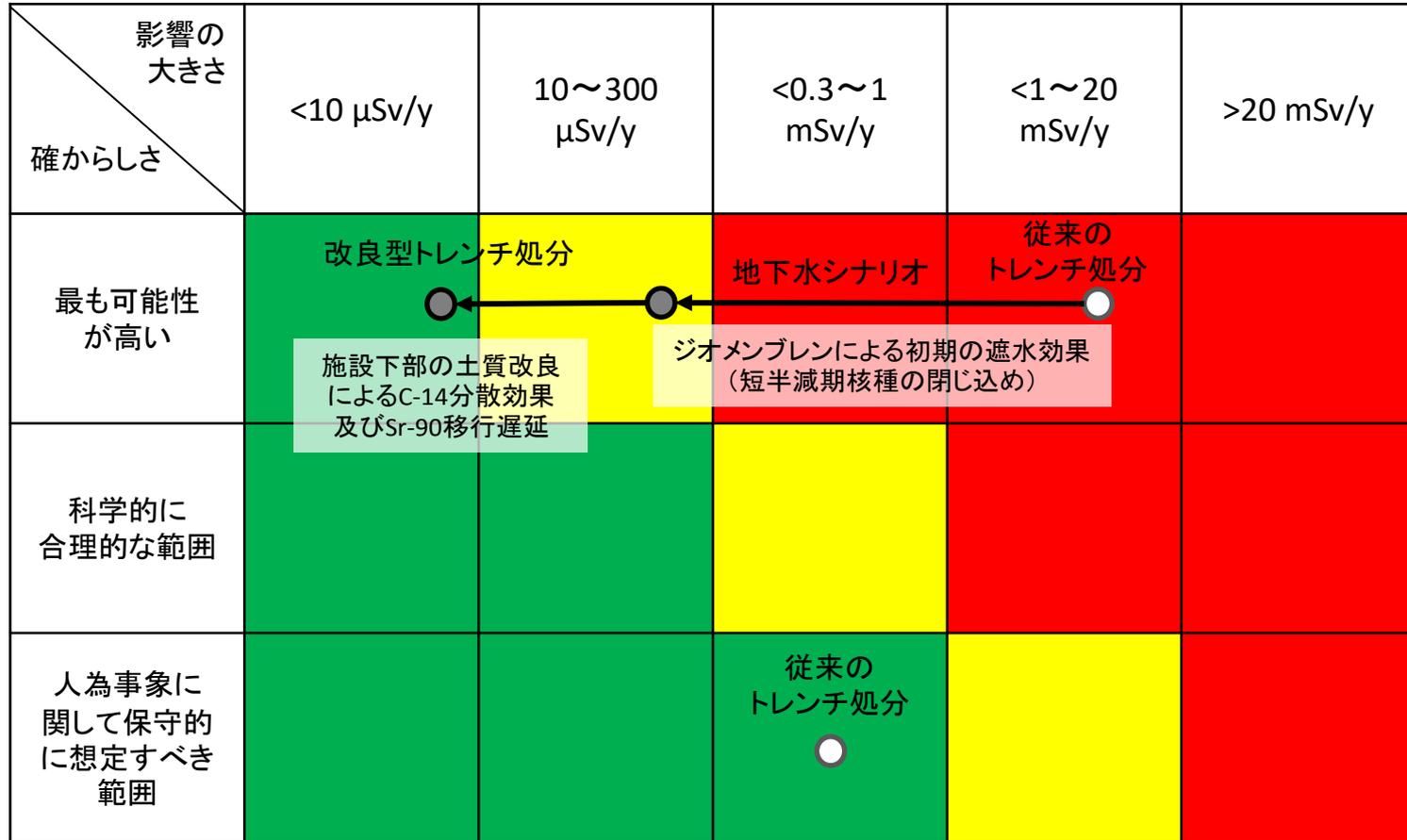


(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分 V.リスク低減効果の予備的安全評価

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)改良型トレンチ処分オプションのリスク低減効果

希釈水量 $2E7 \text{ m}^3/\text{y}$

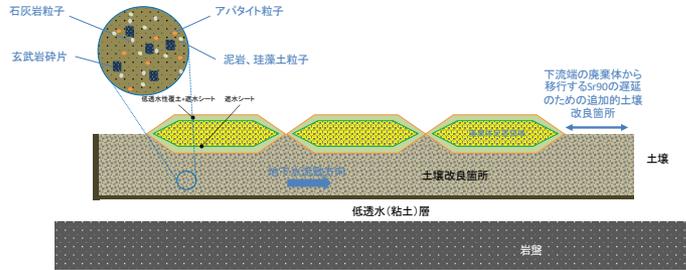


施設下部の土質改良によるC-14分散効果及びSr-90移行遅延

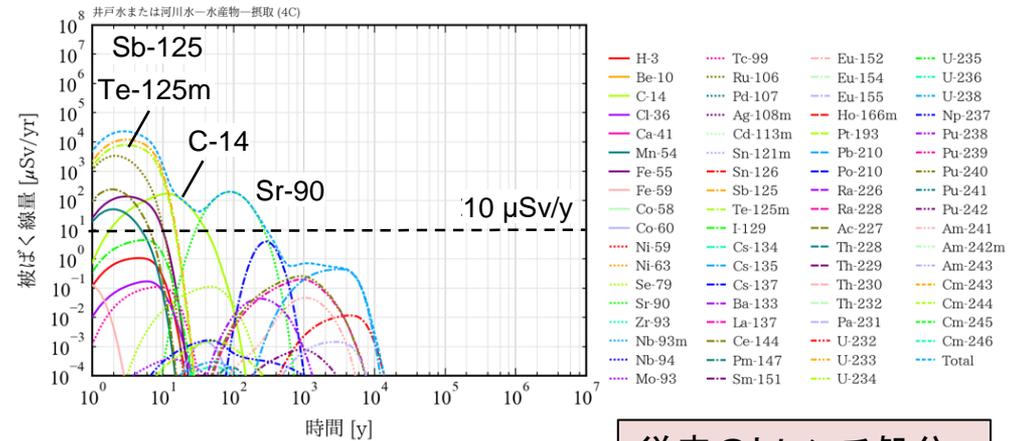
ジオメンブレンによる初期の遮水効果(短半減期核種の閉じ込め)

(3)改良後の処分概念の試行

解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)トレンチ処分 V.リスク低減効果の予備的安全評価

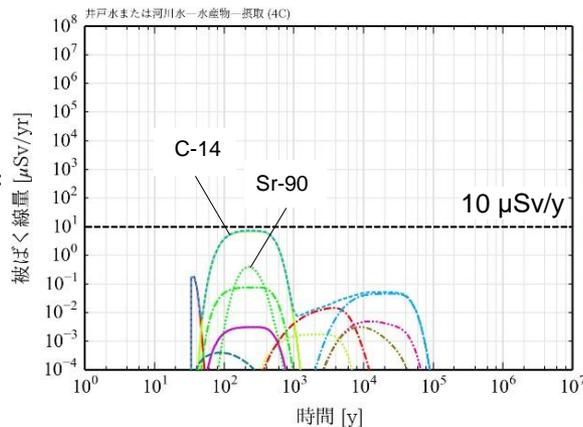


施設形状
600 m(流動方向)x600 m x4 m



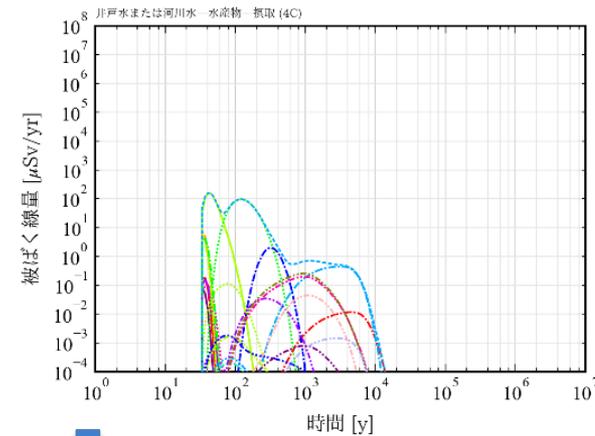
従来のトレンチ処分

追加的土質改良箇所_100 m
(K_d 濃度上限値評価2007)



施設形状
600 m(流動方向)x
600 m x4 m

ジオメンブレン+
施設下部の土質改良



ジオメンブレンによる
初期の遮水効果

(4)改良後の処分概念の試行 水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

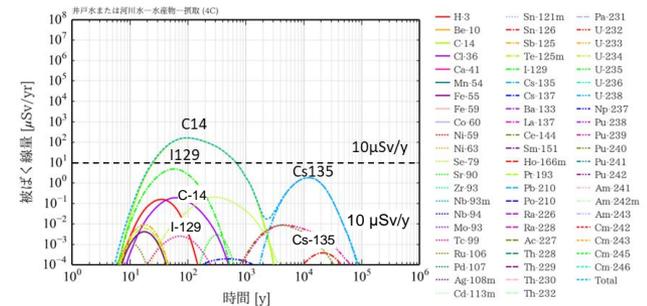
(4)改良後の処分概念の試行

水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

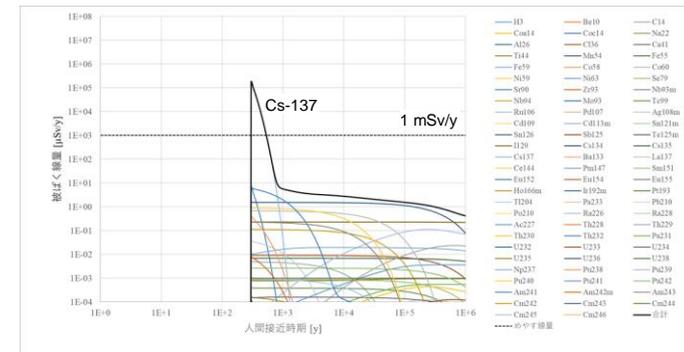
III. 問題点の分析及び処分概念改良の目標設定(低減すべきリスク要因の抽出)

水処理二次廃棄物をピット処分(従来型)した場合の問題点の分析

- 水処理二次廃棄物(KURION)を従来と同様の概念でピット処分することを想定した場合の地下水シナリオの最大被ばく線量は約 $160 \mu\text{Sv/y}$ となり、目安とする $10 \mu\text{Sv/y}$ を1桁以上上回る結果となった。
- 支配核種はC-14であり、KURIONにおけるインベントリがL2廃棄物とほぼ同等であること、及び1F事故廃棄物に対する先行事業の安全評価で候補となる地質環境の多様性を考慮して学会標準よりも保守的な施設通過地下水流量(約10倍)と河川水による希釈(約1/5)を想定していることが上記のようなピーク線量の上昇の要因と考えられる。
- 従来のピット処分の場合と同様、制度的管理期間を300年とし、この期間終了後に埋設地の大規模な掘削及び掘削後に非汚染土壌と混合された廃棄物の上での居住が生ずると仮定して被ばく線量を算出した。
- 大規模掘削の生ずる時期に応じて予想される線量は大きく異なり、管理期間終了直後(300年後)に生じた場合には、居住者(約 176mSv/y)に対する最大被ばく線量は目安とする 1mSv/y を2桁程度上回る結果となった。
- 支配的な影響を及ぼす核種はCs-137であり、KURIONにはピット処分の濃度上限値以上の濃度で同核種が含まれていることがL2廃棄物より顕著に高い被ばく線量の生じた要因と考えられる。ただし、大規模シナリオにおける影響が目安線量を上回るのは初期の600年程度であり、中深度処分で想定している接近シナリオ(10万年)とは時間スケールが大きく異なる。



地下水シナリオにおける被ばく線量経時変化
水産物摂取(淡水魚類摂取量: 30kg/y 、
河川希釈水量: $2\text{E}+7 \text{m}^3/\text{y}$)



大規模掘削シナリオによる最大被ばく線量と
発生時期の関係
(居住者)

(4)改良後の処分概念の試行

水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

III. 問題点の分析及び処分概念改良の目標設定(低減すべきリスク要因の抽出)

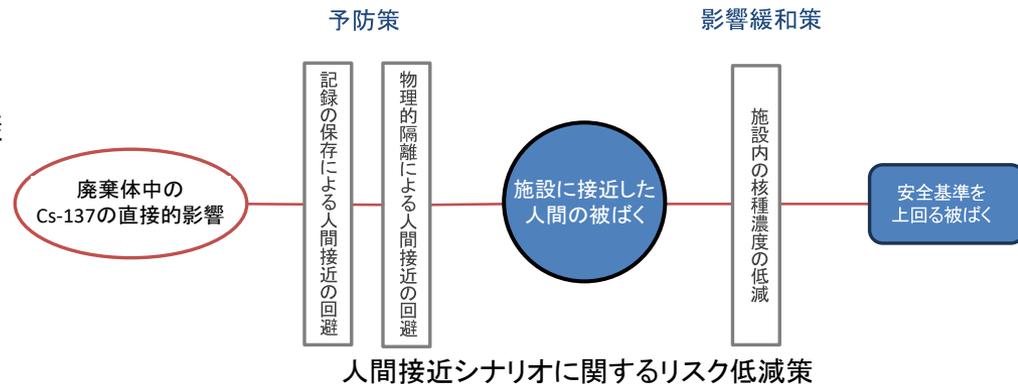
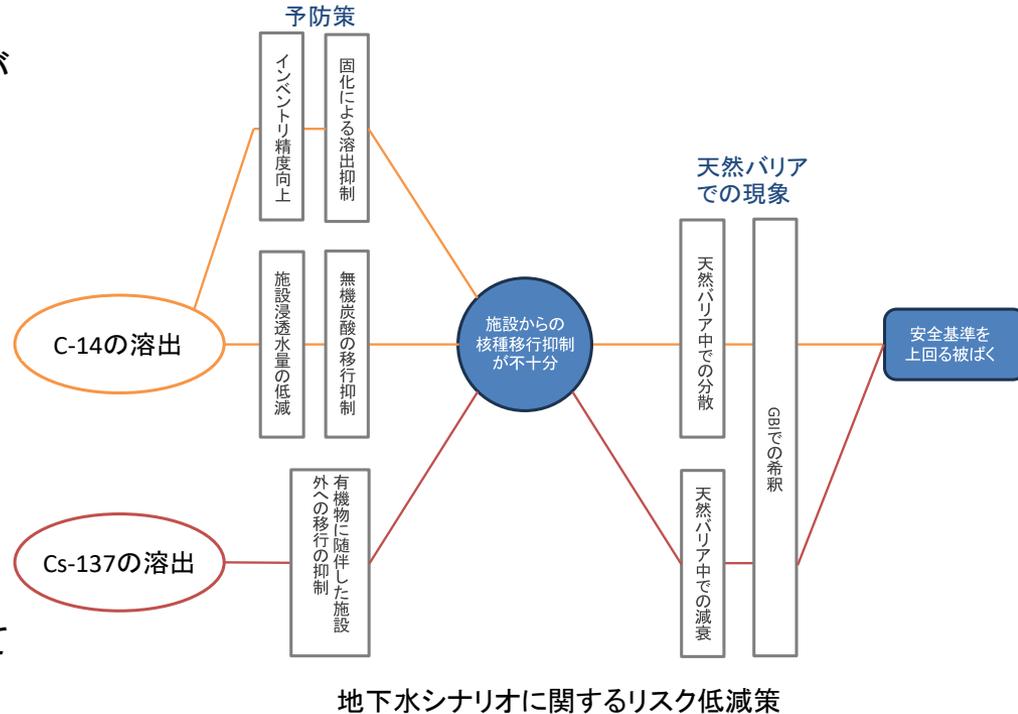
水処理二次廃棄物ピット処分におけるリスク低減に関するボウタイモデル

■ 地下水シナリオについては、支配的核種であるC-14による最大被ばく線量を一桁以上低減することが目標となる。このために、以下の方策が考えられる。

- 実測値の不足している現状で大きな保守性が見込まれているC-14インベントリ推定値の精度を向上し現実的な数値とする。
- 廃棄物を固化することで溶出を抑制する。
- 止水バリアにより施設に浸透する地下水流量を低減する。
- 施設内でC-14が無機形態となることを示し、コンクリートかとの反応によりCalciteとして沈殿することを示す。
- 天然バリア(下部岩盤)中の移行における時間的分散を促進する。

■ 人間接近については、初期の600年程度にわたって人間が施設内の廃棄体に接近することを避けること、あるいは接近した場合の影響緩和として以下の方策が考えられる。

- 制度的管理期間を延長して人間接近を回避する。
- 人工あるいは自然の物理的障壁を用いて人間接近を回避する。
- 施設内の核種濃度(平均濃度)の低減。



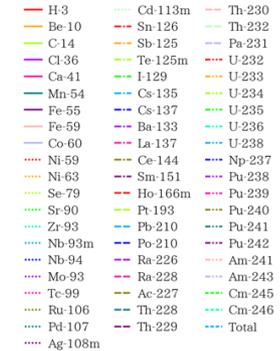
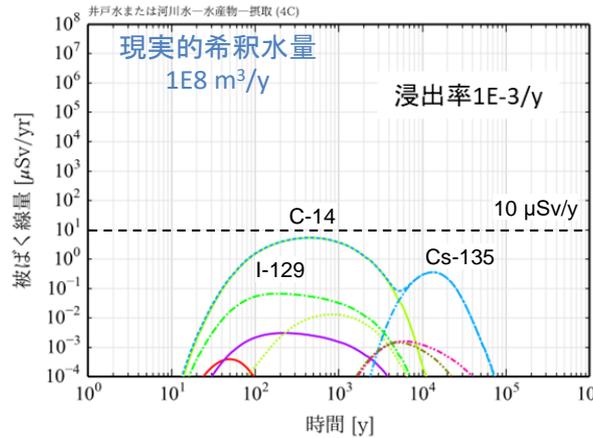
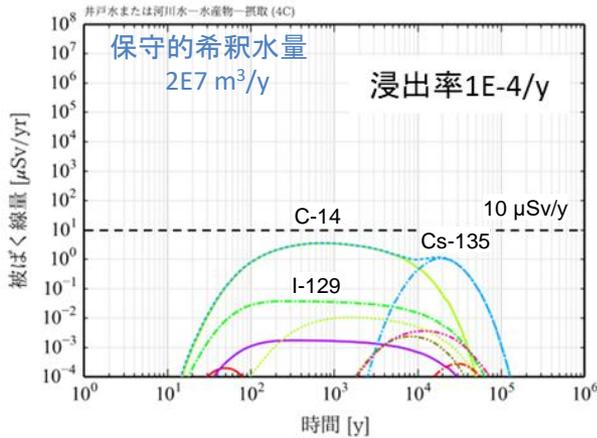
(4)改良後の処分概念の試行

水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

III. 問題点の分析及び処分概念改良の目標設定(低減すべきリスク要因の抽出)

■ 固化による溶出抑制の効果

- 実測値の不足している現状で大きな保守性が見込まれているC-14インベントリ推定値の精度を向上し現実的な数値とする。
- 核種浸出率が $1E-4/y$ 程度まで低下すると、保守的な河川水流量($2E7 \text{ m}^3/y$)においても最大被ばく線量(水産物摂取)は目安となる $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回る。
- 長期的な浸出率が $1E-3/y$ であることを想定する場合、保守的な希釈水量($2E7 \text{ m}^3/y$)の場合には目安となる $10 \mu\text{Sv/y}$ を上回るが、現実的な希釈水量($1E8 \text{ m}^3/y$)が該当するようなサイトの場合には $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回る。



■ 固化技術に関して留意すべき点

- 固化技術としてGeomelt等のガラス固化を選択した場合、C-14は気相側に移行する可能性が高いため、オフガス系で捕集した廃フィルター等を二次廃棄物として別途処分する必要がある。
- なお、NUMO-SC※において、“これらの元素は多様な化合物として存在しており、その中には高温でもガラス側に残存するものがある可能性が否定できないという保守側の仮定に基づき固化後のインベントリに含める”(NUMO-SC付属書2-3、P.5)としていることから、本試行でもこれらのインベントリを固化体に含めることとした。
- ガラス固化を選択した場合、熔融時の高温によって、廃棄物中の水が蒸発することから固化後の水素ガス発生の可能性は無視することができる。また、界面活性剤に由来する有機物についても、ガラス固化時に熱分解されるため、固化後の影響を無視することが可能である。

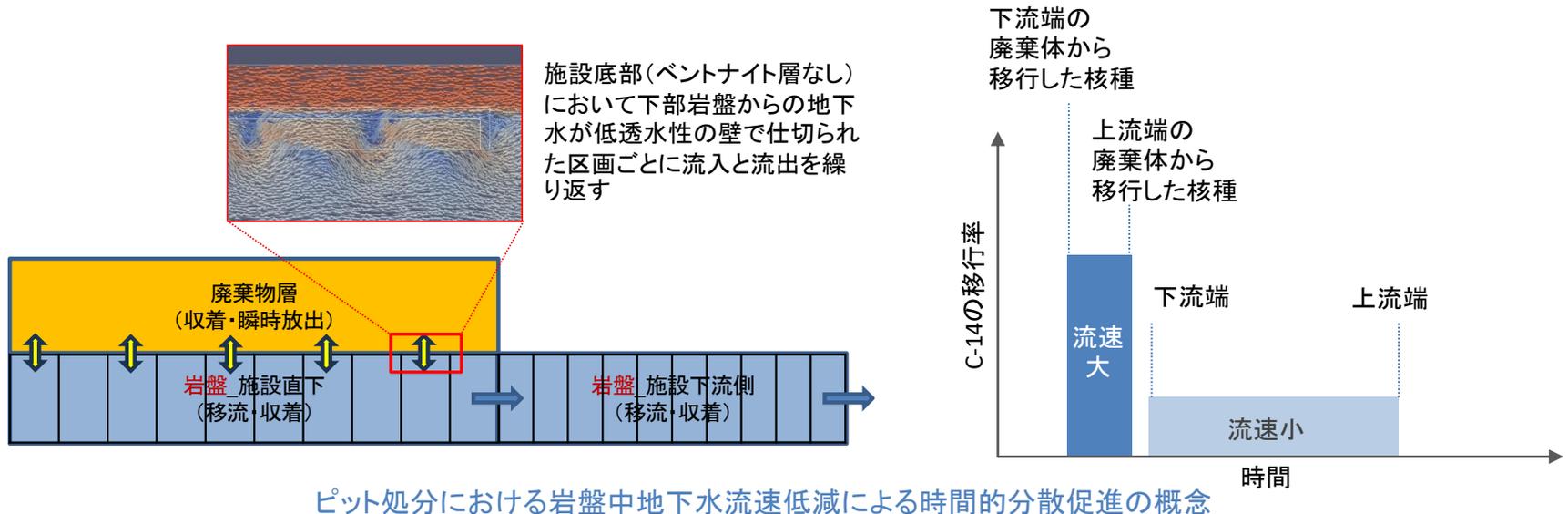
(4)改良後の処分概念の試行

水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

III. 問題点の分析及び処分概念改良の目標設定(低減すべきリスク要因の抽出)

施設直下の岩盤中地下水流速低減の効果(1/2)

- ピット処分の場合はベントナイト層の敷設されていない施設底部において下部岩盤から地下水が流入し、下流側の区画との間にある低透水性の仕切りの手前で流出するという挙動を繰り返す(下図参照)ため、施設内の廃棄体から溶出する核種のこの地下水流動に応じて当該区画の直下に移行し岩盤中を移行して下流側のGBIに至る(一部の核種は次の区画で施設内に再進入する可能性もある)。
- トレンチ処分の場合と同様、施設内の最上流側に位置する廃棄体と最下流側の廃棄体ではGBIに到達する時期にズレが生ずるためにC-14の時間的分散が生じ、核種移行率のピークはこの到達時期のズレに反比例して低下するものと考えられる。
- 従って、Hydraulic cage(スライド108)のような対策を講じて施設直下の岩盤中の地下水流速を低下させることによりC-14の被ばく線量を低下させることが可能と考えられる。
- 以上の背景から、施設直下の岩盤中の地下水流速を種々に変化させた核種移行・被ばく線量評価の感度解析を行った(次頁参照)。



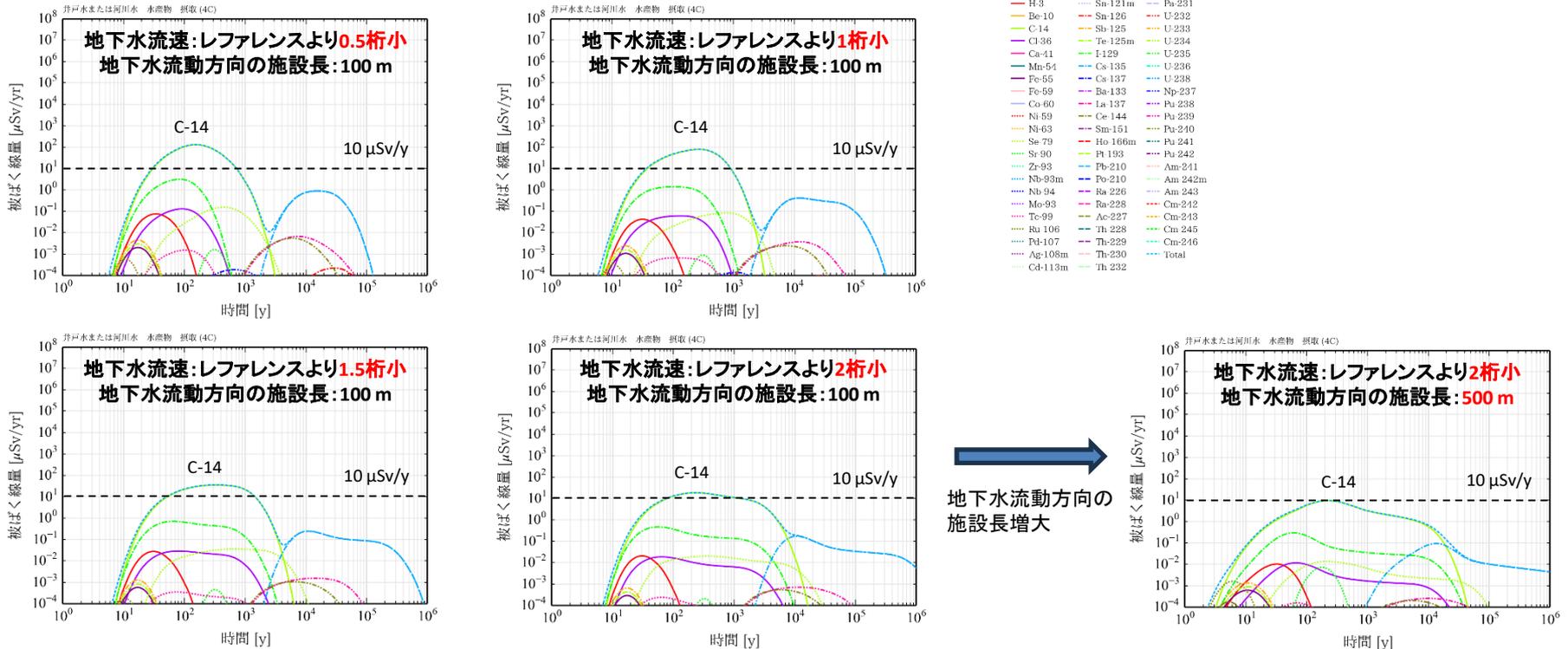
(4)改良後の処分概念の試行

水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

III. 問題点の分析及び処分概念改良の目標設定(低減すべきリスク要因の抽出)

施設直下の岩盤中地下水流速低減の効果(2/2)

- KURIONのピット処分で施設直下の地下水流速を0.5桁、1桁、1.5桁と小さくした場合の核種移行・被ばく線量評価を実施した。2桁小さくした場合で、最大被ばく線量は $18.6 \mu\text{Sv/y}$ (レファレンスの1/8倍程度)に低減されるがめやす線量は上回る(左側4枚の図参照)。
- 施設直下の地下水流速がレファレンスより2桁小さい場合、地下水流動方向の施設長を500 mにすることで、最大被ばく線量は $9.5 \mu\text{Sv/y}$ となり、めやす線量を下回るようになる(右側図参照)。



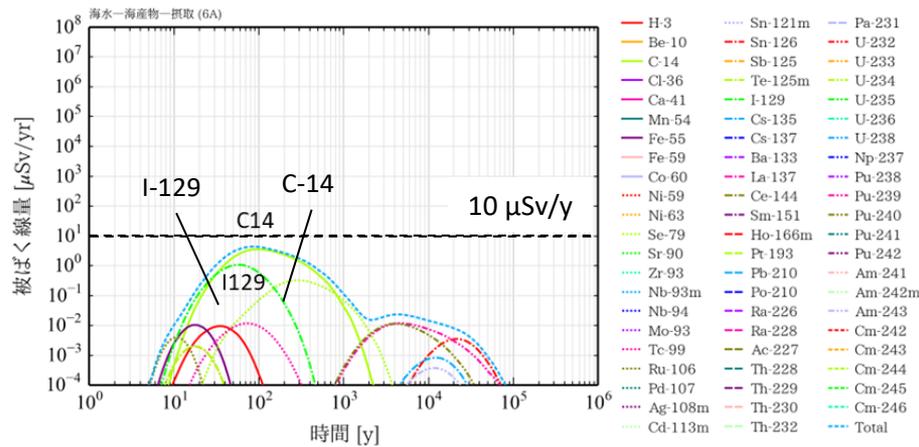
(4)改良後の処分概念の試行

水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

III. 問題点の分析及び処分概念改良の目標設定(低減すべきリスク要因の抽出)

GBIにおける希釈(沿岸部の場合)による線量低減効果

- GBIが沿海となった場合には、海水による希釈効果が顕著となるため、固化なしのままでも影響は低減し、最大被ばく線量は $4.4 \mu\text{Sv/y}$ と目安の $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回ることとなる。



海産物摂取による被ばく線量

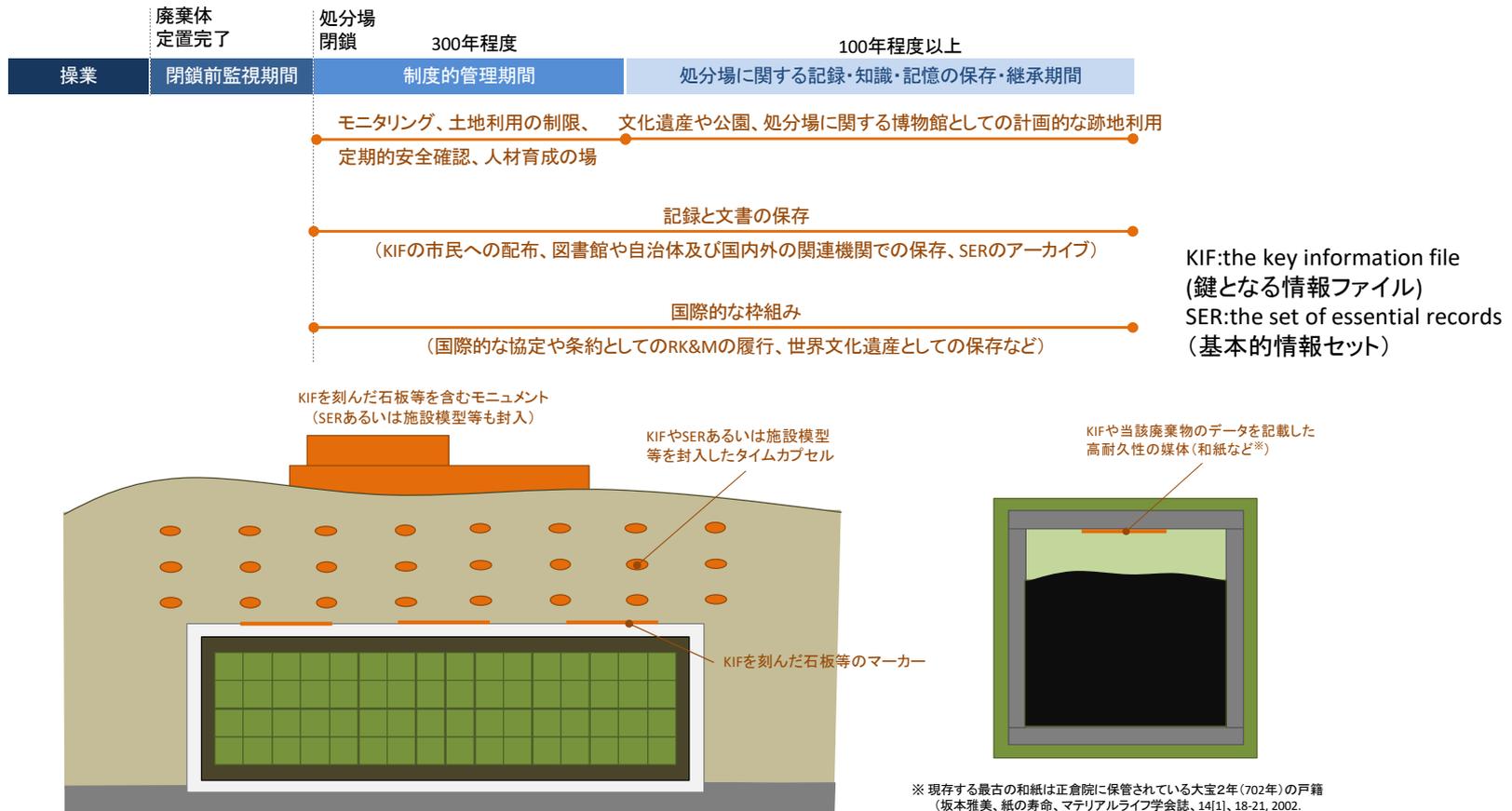
(4)改良後の処分概念の試行

水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

III. 問題点の分析及び処分概念改良の目標設定(低減すべきリスク要因の抽出)

記録保存と知識伝承に配慮したピット処分

- OECD/NEAにおける処分場の記録、知識及び記憶の保存と継承に関する国際共同プロジェクト(The Preservation of Records, Knowledge and Memory (RK&M) Initiatives[※])において提案されている概念。社会的な記録・知識・記憶が失われた場合でも、処分場に偶発的に接近した将来世代が下図に示すモニュメント、タイムカプセル、マーカーや廃棄物容器に封入した文書によって処分場の概要及び廃棄物のハザードについて認識可能とするよう配慮。



記録保存と知識伝承に配慮したピット処分概念

(4)改良後の処分概念の試行

水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

III. 問題点の分析及び処分概念改良の目標設定(低減すべきリスク要因の抽出)

ブレンドイング及び記録の保存のリスク低減効果

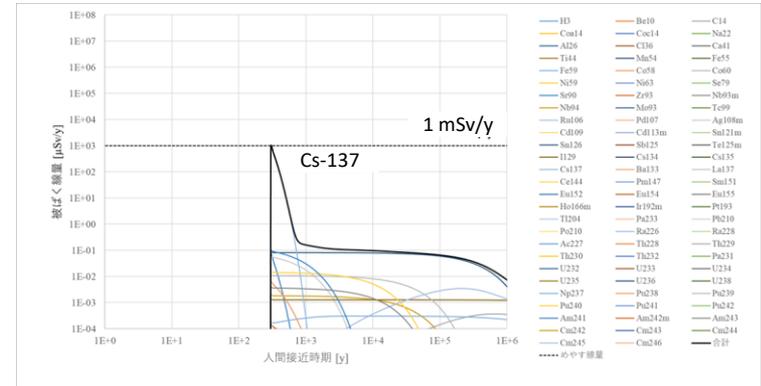
■ 放射能濃度の低いL2相当廃棄物との混合(ブレンドイング)によるリスク低減効果

- KURION廃吸着剤と建屋内コンクリート廃棄物(事故前非放射性)とを体積比1:200で混合しピット処分施設内の各区画に並置すると仮定して既存の処分概念の場合と同様、先行事業で想定する大規模掘削・居住シナリオに基づく安全評価を行った。
- Cs-137のピット内平均濃度は2桁程度低下するため、最大被ばく線量は、居住者について984 $\mu\text{Sv/y}$ に低下し、目安となる1 mSv/yを下回る結果となった。

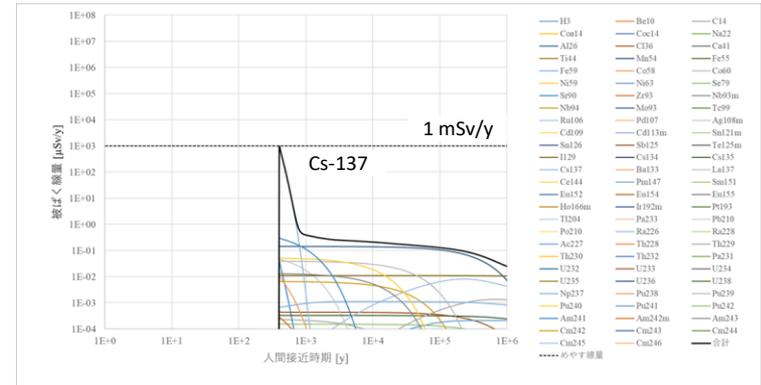
■ ブレンドイング(混合比1:20)と制度的管理後の記録と知識の保存で大規模掘削開始を400年後に遅延する複合的対策によるリスク低減効果

- KURION廃吸着剤と建屋内コンクリート廃棄物(事故前非放射性)とを体積比1:20で混合しピット処分施設内の各区画に並置すると仮定し、さらに、300年間の制度的管理後の記録と知識の保存により大規模掘削開始を400年後まで遅延するという複合的な対策について既存の処分概念の場合と同様、先行事業で想定する大規模掘削・居住シナリオに基づく安全評価を行った。
- ブレンドイング及び大規模掘削の遅延によってCs-137のピット内平均濃度は2桁程度低下するため、最大被ばく線量は、居住者について922 $\mu\text{Sv/y}$ に低下し、目安となる1 mSv/yを下回る結果となった。

居住者



居住者



(4)改良後の処分概念の試行

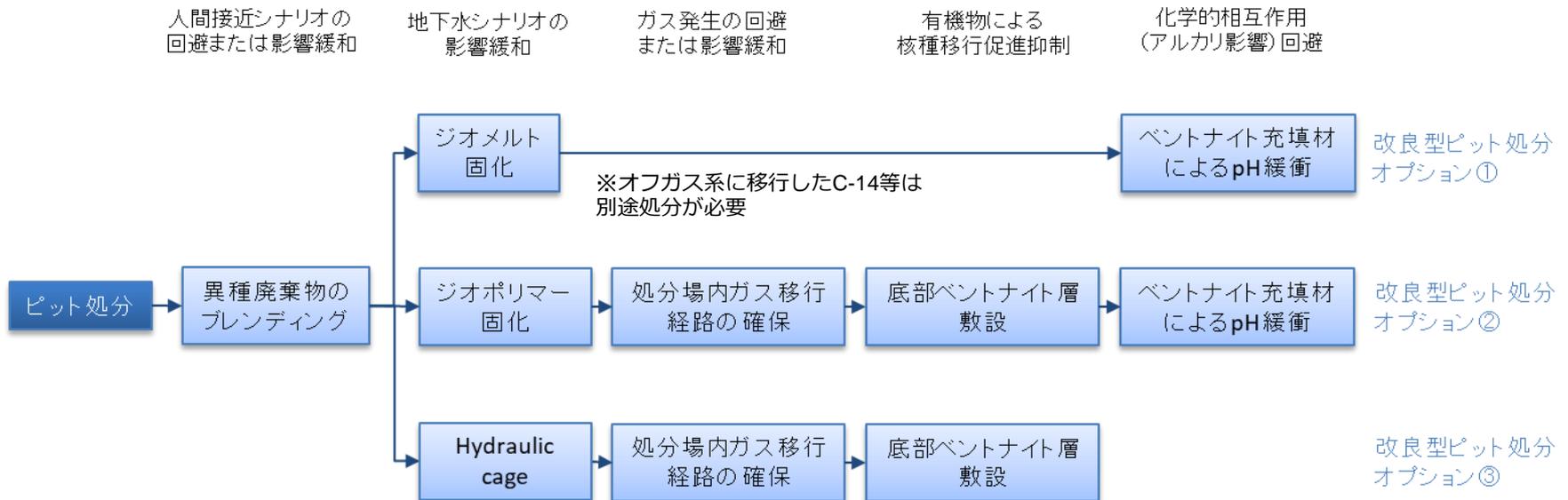
水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

IV. 処分概念の改良案の提示

処分概念改良のための方策の具体化(リスク低減策など)

目的及び概要

- 目的
 - 各対策を実現するための具体的な技術オプションを抽出する。
 - 両立性に留意しつつ個別の技術オプションを組み合わせることで処分概念の改良案を示す。
- 概要
 - 前項で挙げた各対策に関連する各分野の技術情報の整理や専門家の知見のヒアリング等を通じて、それぞれの目標を実現するための具体的な技術オプションの候補を抽出する。
 - 個別の対策に関する技術的オプション間の両立性に留意しつつこれらを組み合わせ、また必要に応じて追加的な対策を講じて全体システムについての処分概念オプションを提案する。



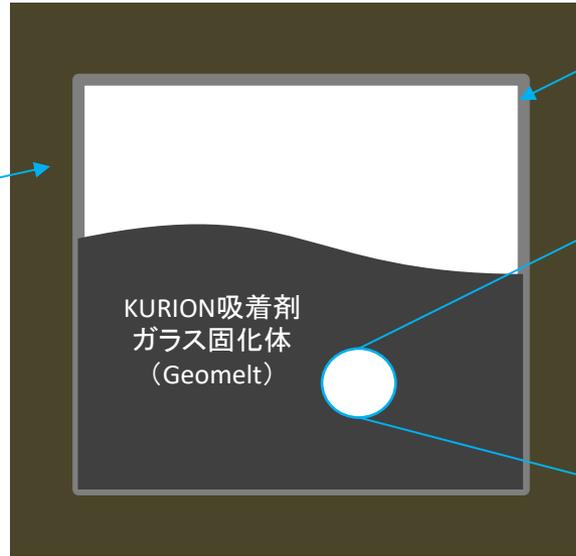
(4)改良後の処分概念の試行

水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

IV. 処分概念の改良案の提示

改良型ピット処分オプション①の概念(1/2) ガラス固化+ブレンディング

ベントナイト系充填材
 コンクリート影響によるpH上昇でガラス溶解が促進されることを避けるためにKURIONガラス固化体の周囲のみベントナイト系材料で充填(変質を考慮して十分な厚さ(10~20 cm程度)を確保する)。



鉄製容器(必要に応じて遮蔽材を含む)

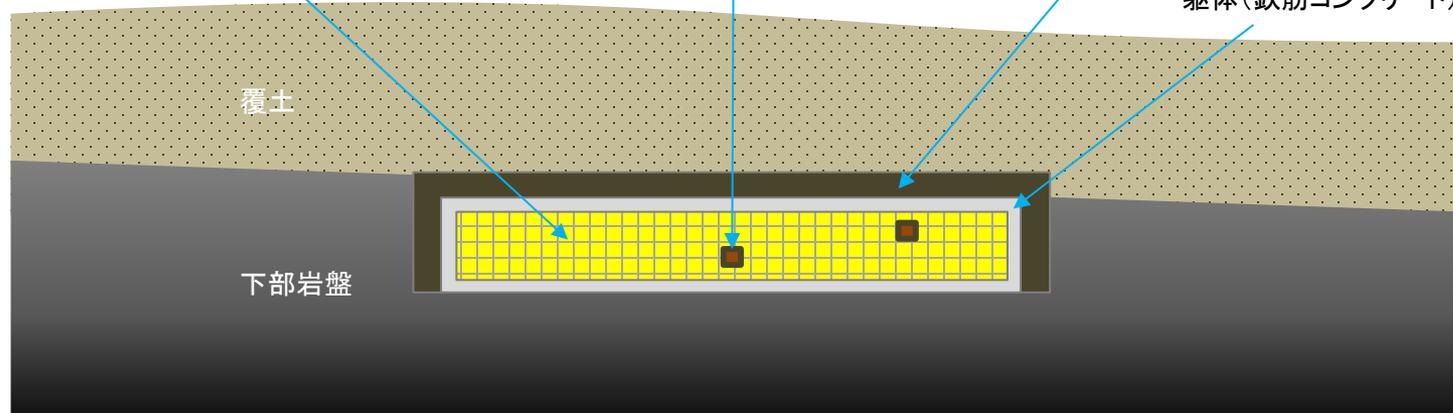
Geomeltガラス固化体のサンプル

建屋内コンクリート廃棄物
 (事故前非放射性・汚染水影響あり)

水処理廃棄物(KURION)

低透水層(ベントナイト層)

躯体(鉄筋コンクリート)



KURIONと低レベル廃コンクリートの混合比は1:200あるいは1:20で記録と知識伝承により400年間の人間接近回避を想定

(4)改良後の処分概念の試行

水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

IV. 処分概念の改良案の提示

改良型ピット処分オプション①の概念(2/2) ガラス固化+ブレンディング

■ ガラス固化(ジオメルト)に期待する機能

- 水処理二次廃棄物中に含まれるC-14インベントリについては、実測値のない状況での保守的な推定値であるため過大評価となっている可能性がある。このため、今後の分析・調査によって実際のインベントリが現在の推定値よりも1~2桁小さいことが示されればスライド92の感度解析結果に示した通り、最大被ばく線量は目安値を下回ることとなるため溶出制限を目的とした固化は不要となる。
- しかし、実際の廃棄物中のC-14分析が困難である等の理由で現状の保守的な推定値を想定せざるを得ない場合は、廃棄物をガラス固化し、溶融時に揮発するC-14をオフガス系のフィルターやスクラビングにより捕集することで現実的なインベントリを把握することが可能となる。
- もし顕著な量のC-14がオフガス系で捕集された場合には廃フィルター等を二次廃棄物として別途処分する必要がある。また、もしオフガス系に顕著な量のC-14が移行しなかった場合はそもそも水処理二次廃棄物中のC-14インベントリが(予想通り)小さかったか、もしくはNUMO-SC※(付属書2-3、P.5)に記述されているように“これらの元素は多様な化合物として存在しており、その中には高温でもガラス側に残存するものがある可能性が否定できない”という保守的な仮定のもとに現状のインベントリに対してガラス固化体の溶出制限機能による安全確保が期待できる(スライド92のケーススタディに示す通り)。
- 水処理二次廃棄物をガラス固化することにより、水の放射線分解による水素ガス発生抑制及び界面活性剤として含まれている可能性のある有機物の分解が期待できる(水素ガス及び有機物への対策は不要となる)。

■ ブレンディングによる平均核種濃度低減

- KURIONと低レベル廃コンクリート(解体廃棄物:建屋内コンクリート(事故前非放射性))1:100で混合するか、もしくは1:10で混合した上で制度的管理期間の延長や記録と知識伝承により400年間の人間接近を回避することによって人間接近(大規模掘削・居住)シナリオの影響を緩和する。

■ KURIONガラス固化体とコンクリートの化学的両立性の確保

- ガラス固化体は高pHにおいて溶解速度が顕著に上昇するため、コンクリート(並置される低レベルのコンクリート廃棄物及び構造躯体や充填モルタル等)によって生ずるアルカリ影響を回避する必要がある。
- そこで、KURIONガラス固化体の容器周辺をベントナイト系材料(ペレット)で充填することによってアルカリプルームの影響を抑制する(ベントナイト系充填材による化学的緩衝効果についての反応輸送解析の結果を参考までに次ページに示す)。

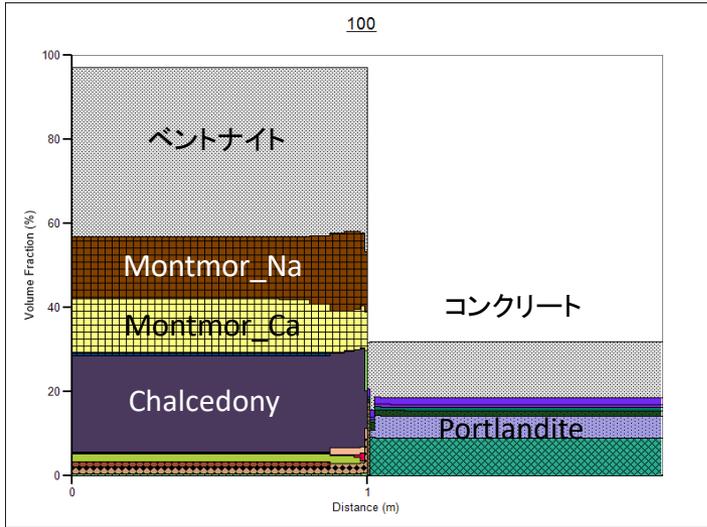
(4)改良後の処分概念の試行

水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

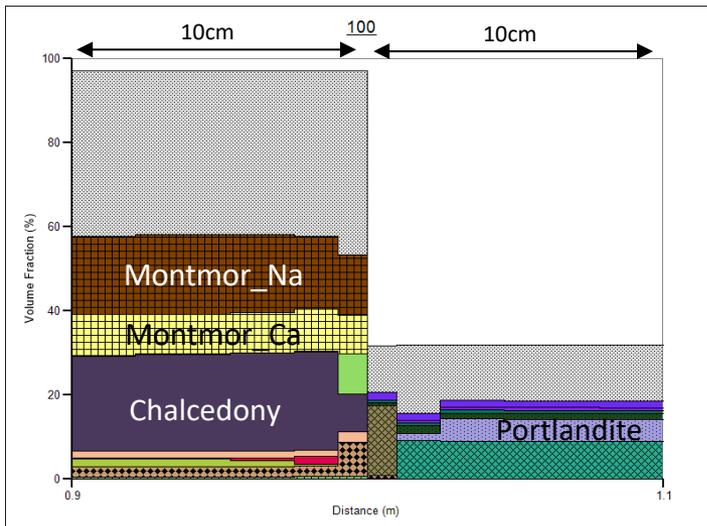
IV. 処分概念の改良案の提示

(補足)ベントナイト系充填材による化学的緩衝効果についての反応輸送解析

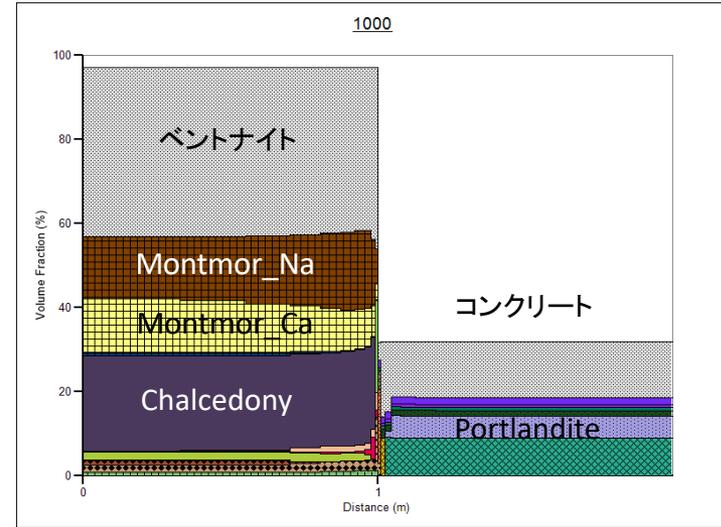
ベントナイト及びコンクリート中の鉱物組成(100年後)



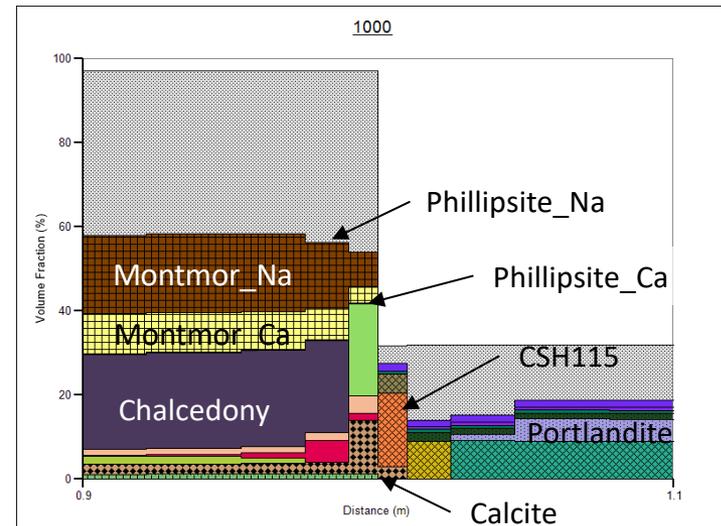
境界近傍の拡大図(100年後)



ベントナイト及びコンクリート中の鉱物組成(1000年後)



境界近傍の拡大図(1000年後)

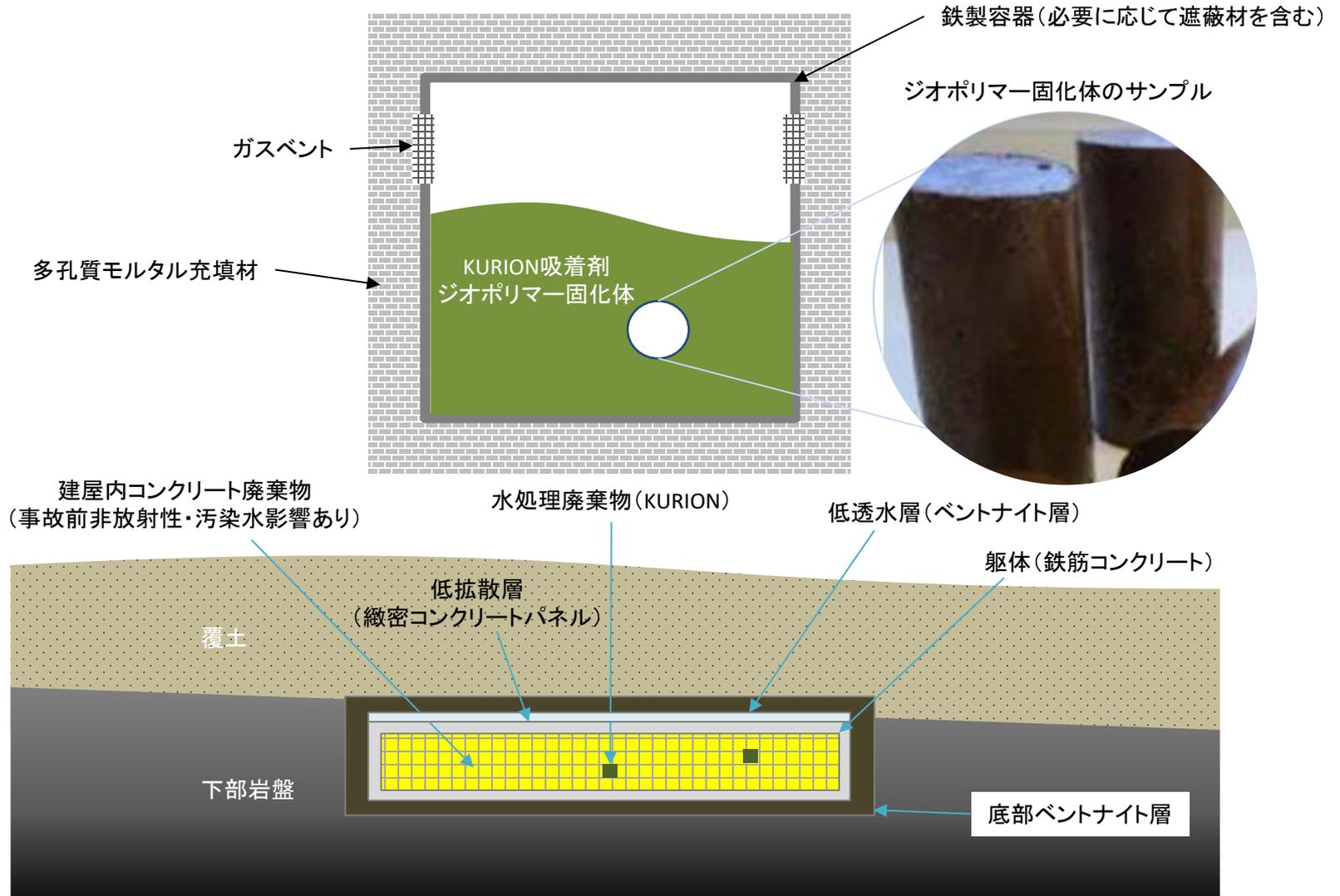


(4)改良後の処分概念の試行

水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

IV. 処分概念の改良案の提示

改良型ピット処分オプション②の概念(1/2) ジオポリマー固化+底部ベントナイト層+ブレンドイング



KURIONと低レベル廃コンクリートの混合比は1:200あるいは1:20で記録と知識伝承により400年間の人間接近回避を想定

(4)改良後の処分概念の試行

水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

IV. 処分概念の改良案の提示

改良型ピット処分オプション②の概念(2/2) 従来型ピット処分+ジオポリマー固化+底部ベントナイト層+ブレンディング

■ ジオポリマー固化体に期待する機能

- 前述の通り、水処理二次廃棄物中に含まれるC-14インベントリについては、実測値のない状況での保守的な推定値であるため過大評価となっている可能性がある。このため、今後の分析・調査によって実際のインベントリが現在の推定値よりも1~2桁小さいことが示されれば前出の感度解析結果に示した通り、最大被ばく線量は目安値を下回ることとなるため溶出制限を目的とした固化は不要となる。
- しかし、実際の廃棄物中のC-14分析が困難である等の理由で現状の保守的な推定値を想定せざるを得ない場合、ジオメルト固化し、溶出制限機能によってC-14の影響緩和を図る。

■ 水素ガスの移行経路

- ジオメルト固化体中の水の放射線分解により水素ガスが発生するため、施設内で蓄積して過剰な圧力に達することの無いよう、処分容器にガスベントを設置するとともに、周囲の充填材として多孔質のモルタル充填材を用いる。

■ 底部ベントナイト層による有機物影響の抑制

- 有機物に随伴した移行促進により大きな影響の生ずる可能性のある核種としてCs-137が考えられるが、Csはフミン酸の有機酸に電気化学的に引き寄せられているのみであり、イライト等の強い吸着サイトを持つ鉱物がわずかでも存在すれば容易に引き離されこれらの鉱物に収着されることが知られている。
- そこで、従来のピット処分と異なり、施設底部にもベントナイト層を設置し、Csの移行の有機物による促進を抑制する(この概念の成立性については、“V. 改良後の処分概念の成立性及び対策の有効性の評価”において詳述)。

■ 施設上部の低拡散層に期待する機能

- 底部にもベントナイト層を設置することによって施設内を通過する地下水流量が低減するため、施設上部から拡散によって上部覆土に至る核種の割合が相対的に増大する可能性がある。
- そこで、この影響を抑制するために、構造躯体(鉄筋コンクリート上部)に中深度処分における低拡散層と同様の緻密な無筋コンクリート板を設置する。なお、躯体コンクリート中の鉄筋の腐食膨張による変形の影響を受けることの無いよう、この低拡散パネルは躯体に固定せず載せた状態とする。

(4)改良後の処分概念の試行

水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

IV. 処分概念の改良案の提示

有機物による核種移行への影響メカニズム

- 廃棄体から溶出した核種は液相の有機物との間で錯体(有機錯体)あるいはコロイドを形成することによって、コンクリート等の人工バリアや岩石への収着性が低下する可能性が指摘されている。
- 例えば、有機物の分解によって生ずる代表的な有機酸であるISA(イソサッカリン酸)によってコンクリートに対する種々の元素の収着性が低下することがOchs et al., 2014^{*}によって示されている。

ISA影響によるSFR*の評価事例(Ochs et al., 2014)

*SFR:スウェーデン短寿命放射性廃棄物最終処分場

Table 3-1. Limiting no-effect concentrations and uptake reduction factors for ISA (realistic values). Radionuclides where information only applies by analogy are indicated in italics. Reduction factors apply to all radionuclide uptake values (i.e. best estimate and upper/lower limits, see SKB 2014a).

Radionuclide (oxidation state)	no-effect concentration for ISA	reduction factor for ISA*
Ag(I)	no effect expected for ISA (see Table 3-3 for conservative values)	1
¹⁴ C, carbonate species	isotope exchange, no effects expected	1
¹⁴ C, CH ₄ , simple organics	not relevant: K _d = 0 assumed	not applicable
Ca(II), radioactive isotopes	no effects expected	1
Cd(II)	reduction expected for [ISA] > 10 mM	10
Cl(-), I(-)	no effects expected	1
Cs(I)	no effects expected	1
Eu(III), Ac(III), Am(III), Cm(III), Ho(III), Pu(III), Sm(III)	reduction expected for [ISA] > 1 mM	10
Mo(VI), Se(VI), Tc(VII)	no effects expected	1
Nb(V)	no realistic value proposed for ISA, (conservative values: Table 3-3)	-
Ni(II), Co(II)	isotope exchange, no effects expected	1
Pb(II), Pd(II)	reduction expected for [ISA] > 0.05 mM	100, constant
Th(IV), Np(IV), Pu(IV), U(IV), Pa(IV), Tc(IV), Zr(IV), Sn(IV)	reduction expected for [ISA] > 0.1 mM	100
Np(V), Pu(V)	reduction expected for [ISA] > 1 mM	10
Pa(V)	reduction expected for [ISA] > 0.1 mM	100
Se(-II)	not relevant: K _d = 0 assumed	not applicable
Se(IV), Po(IV)	reduction expected for [ISA] > 0.1 mM	10
Sr(II), Ba(II), Ra(II)	reduction expected for [ISA] > 10 mM	10
U(VI), Pu(VI)	reduction expected for [ISA] > 0.5 mM	10

* The proposed reduction factors will increase by a factor of 10 with each 10-fold increase of [ISA] above the indicated no-effect level, except for Pb/Pd. I.e. with an indicated no-effect of 1 mM [ISA] and a reduction factor of 10, sorption values are expected to be reduced by a factor of 10 between > 1 mM to 10 mM [ISA], and by a factor of 100 between > 10 mM to 100 mM [ISA], etc.

Table 3-3. Additional, conservative limiting no-effect concentrations and uptake reduction factors. Radionuclides where information only applies by analogy are indicated in italics, ORG stands for any of the ligands indicated in Chapter 2. Reduction factors apply to all radionuclide uptake values (i.e. best estimate and upper/lower limits, see SKB 2014a).

Radionuclide (oxidation state)	no-effect concentration, conservative	reduction factor conservative*
Ag(I)	no effects for [EDTA, NTA] < [Ca(II)] no effects for other ligands < 10 mM	100 (constant) 10 (constant)
¹⁴ C, carbonate species	-	-
¹⁴ C, CH ₄ , organic acids	-	-
Ca(II), radioactive isotopes	-	-
Cd(II)	-	-
Cl(-), I(-)	-	-
Cs(I)	-	-
Eu(III), Ac(III), Am(III), Cm(III), Ho(III), Pu(III), Sm(III)	reduction expected for [UP2] > 0.1 mM	10 (no additional conservative factor given)
Mo(VI), Se(VI), Tc(VII)	-	-
Nb(V)	reduction expected for [ORG] > 0.1 mM	100
Ni(II), Co(II)	reduction expected for [ORG] > 5 mM	10 (constant)
Pb(II), Pd(II)	-	-
Th, Np(IV), Pu(IV), U(IV), Pa(IV), Tc(IV), Zr(IV), Sn(IV)	-	-
Np(V), Pu(V), Pa(V)	-	-
Se(-II)	-	-
Se(IV), Po(IV)	-	-
Sr(II), Ba(II), Ra(II)	-	-
U(VI), Pu(VI)	-	-

* The reduction factor for Nb will increase by a factor of 10 with each 10-fold increase of [ORG] above the indicated no-effect level.

ISA影響による
K_d低減係数

※Ochs, M., Colàs, D., Grivé, M. and Olmeda, J. (2014) Reduction of radionuclide uptake in hydrated cement systems by organic complexing agents: Selection of reduction factors and speciation calculations. SKB Report R-14-22. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, Stockholm, Sweden.

(4)改良後の処分概念の試行

水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

IV. 処分概念の改良案の提示

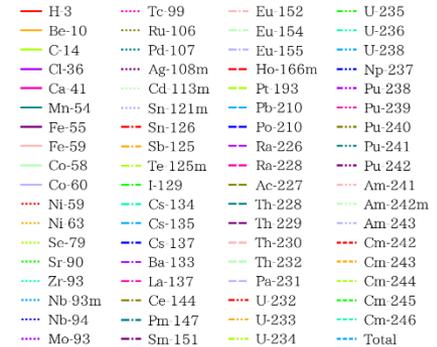
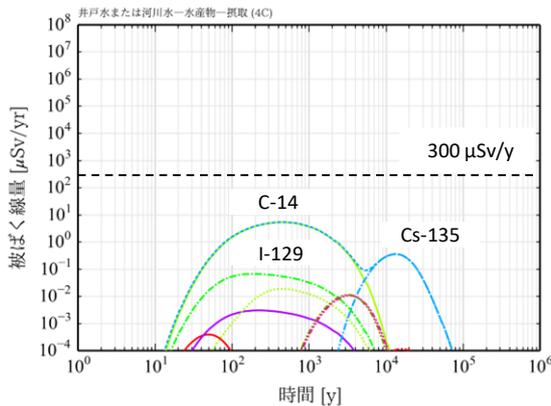
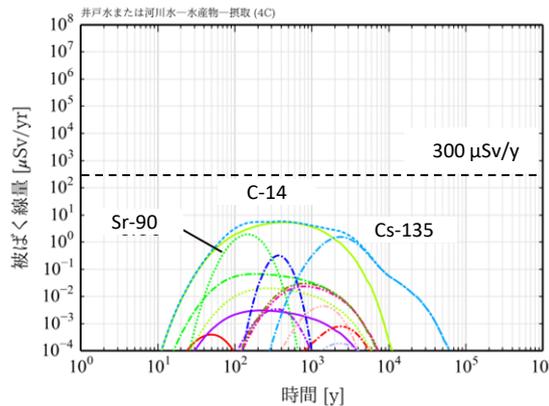
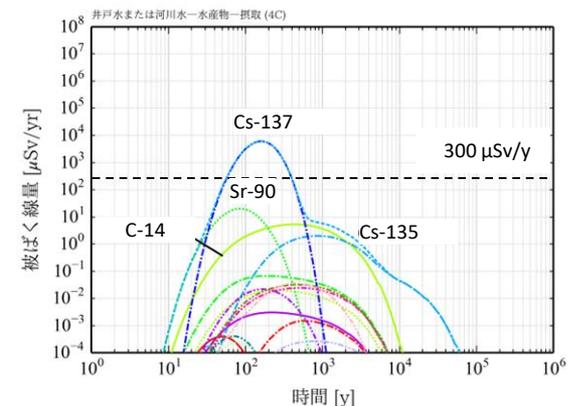
有機物影響によるリスクの上限の把握 (Bounding analysis)

■ 解析条件

- 改良型オプション②(浸出率 $1E-3/y$ 、希釈水量 $1E8 \text{ m}^3/y$ を想定)
- 人工バリア(コンクリート)に対して前ページに挙げた K_d 低減係数を使用
- 天然バリアについては影響なし、あるいは K_d をレファレンスの $1/10$ 、 $1/100$ と想定

■ 解析結果

- 基本シナリオにおいて支配的な影響を及ぼすC-14は有機物影響を考慮してもコンクリートに対する K_d が変わらず、また、天然バリアでの移行遅延もそもそも小さいために各ケース間で差異はない。
- コンクリートに対する K_d が低下し、同時に天然バリア中の移行遅延性能も低下すると、Sr-90やCs-137の影響が顕在化するようになる。特に、天然バリア中の K_d をレファレンスの $1/100$ まで低下したケースでは、Cs-137による最大被ばく線量のみが変動シナリオの目安である $300 \mu\text{Sv/y}$ を上回ることとなり許容できないものとなる。
- 以上から、有機物の影響によってCs-137の移行が促進される可能性についてより詳しい検討が必要と考えられる。


 天然バリア K_d :レファレンス

 天然バリア K_d :レファレンス x1/10

 天然バリア K_d :レファレンス x1/100


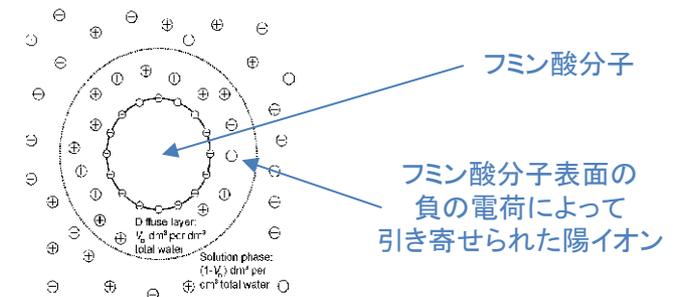
(4)改良後の処分概念の試行

水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

IV. 処分概念の改良案の提示

有機酸に随伴するCsの粘土層への収着による移行抑制

- Lofts et al. (2002)^{*}はフミン酸に伴われて移行するCs⁺イオンが錯形成ではなく、フミン酸分子表面の負の電荷によって静電的に引き寄せられていることを仮定したモデル(下図: Model V)を作成し、その妥当性を土壌から抽出したフミン酸へのCs-134のバッチ吸着試験及び透析-希釈による脱着試験によって示した。このモデルは、フミン酸に随伴するCs⁺イオンが24時間以内に完全に可逆に脱着することを示した既往の事例(Wauters et al., 1994)^{**}とも整合するものである。
- Loftsらのモデルによれば、フミン酸に随伴するCsは、イライト等の強い吸着サイトを有する粘土鉱物がごく僅かに存在するだけでも(<1%)、フミン酸分子表面の静電的な引力から離脱して粘土に吸着することとなる。また、このような挙動は実験事実とも整合するものである。
- Nakamaru et al.(2007)^{**}もまた土壌から抽出したフミン酸に随伴するCs⁺イオンが可逆的に脱着可能であり、また、有機酸の吸着容量が小さいことから、時間の経過とともにその大半は土壌中に存在する粘土鉱物のより強い吸着サイトへと移行することを示した(右表)。このため、事故によって環境中に放出されたCsの短期的な移行においては有機酸の影響が重要となるものの、時間の経過とともに粘土鉱物により吸着されることによって可動なCsの割合は低下するとしている。
- 以上から、処分の時間スケールにおいては、フミン酸等の有機酸に随伴する可動なCsは粘土鉱物等によって固相に吸着し固定化(移行遅延)されるものと考えられる。



フミン酸への陽イオンの随伴の概念 (Lofts et al., 2002)

有機酸と共存する土壌へのCs吸着割合 (Nakamaru et al., 2007)
 99%程度以上のCsが土壌中の粘土鉱物等に吸着していることを示す

Table 3
 The percentages of ¹³⁷Cs adsorbed to soil solid phase, SOM-bound Cs, K_ds and carbon contents of soils used in Experiment 2

Sample	Soil group	Adsorbed Cs ^a (%)	SOM-bound Cs ^b in soil solid phase (%)	K _d (L/kg)	Soil carbon content (%)
EFSD30	Andosol	99.7	3.7	3661	5.9
EFSD31	Andosol	99.2	3.0	1259	6.7
EFSD45	Andosol	97.3	17.2	360	7.6
EPDS37	Andosol	98.3	6.5	566	2.2
EFSD29	Cambisol	99.2	3.7	1311	2.9
EFSD38	Cambisol	99.8	4.6	4930	2.4
EFSD39	Cambisol	99.2	9.3	1337	4.4
EFSD34	Cambisol	98.0	3.3	497	2.4
EPDS36	Cambisol	98.6	9.1	680	2.3
EPDS31	Fluvisol	99.3	11.8	1502	1.7
EPDS28	Fluvisol	99.4	8.0	1702	2.3
EPDS29	Fluvisol	99.2	5.7	1336	4.4
EPDS30	Fluvisol	98.9	6.7	897	1.6
EPDS32	Fluvisol	99.0	13.3	1015	2.9
EPDS27	Fluvisol	99.1	7.6	1155	4.7
EFSD35	Fluvisol	99.7	6.7	3353	1.7

^a Percentage of ¹³⁷Cs adsorbed to soil solid phase.

^b Na₄P₂O₇ extractable Cs.

^{*}Lofts, S., Tipping, E.W., Sanches, A.L., Dodd, B.A., 2002. Modeling the role of humic acid in radiocaesium distribution in a British upland peat soil. Journal of Environmental Radioactivity 61, 133-147, 2002.

^{**}Wauters, J., Sweeck, L., Valcke, E., Elsen, A., & Cremers, A. (1994). Availability of radiocaesium in soils: a new methodology. The Science of the Total Environment, 157, 239-248.

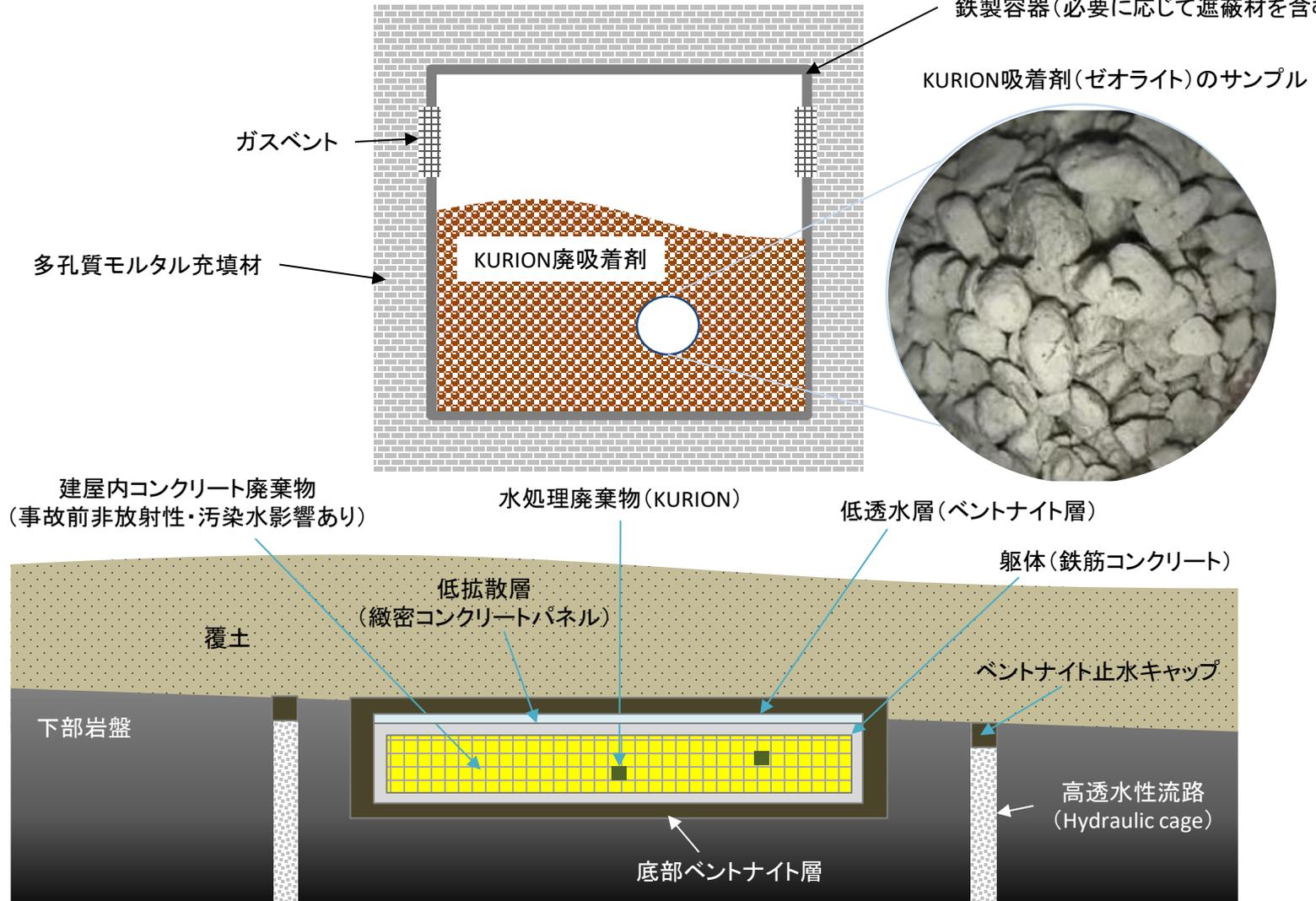
^{**}Nakamaru, Yasuo & Ishikawa, Nao & Tagami, Keiko & Uchida, Shigeo. Role of soil organic matter in the mobility of radiocesium in agricultural soils common in Japan. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 306. 111-117, 2007.

(4)改良後の処分概念の試行

水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

IV. 処分概念の改良案の提示

改良型ピット処分オプション③の概念(1/2) 固化なし+底部ベントナイト層+ブレンドイング+Hydraulic cage
 鉄製容器(必要に応じて遮蔽材を含む)



KURIONと低レベル廃コンクリートの混合比は1:200あるいは1:20で記録と知識伝承により400年間の人間接近回避を想定

(4)改良後の処分概念の試行

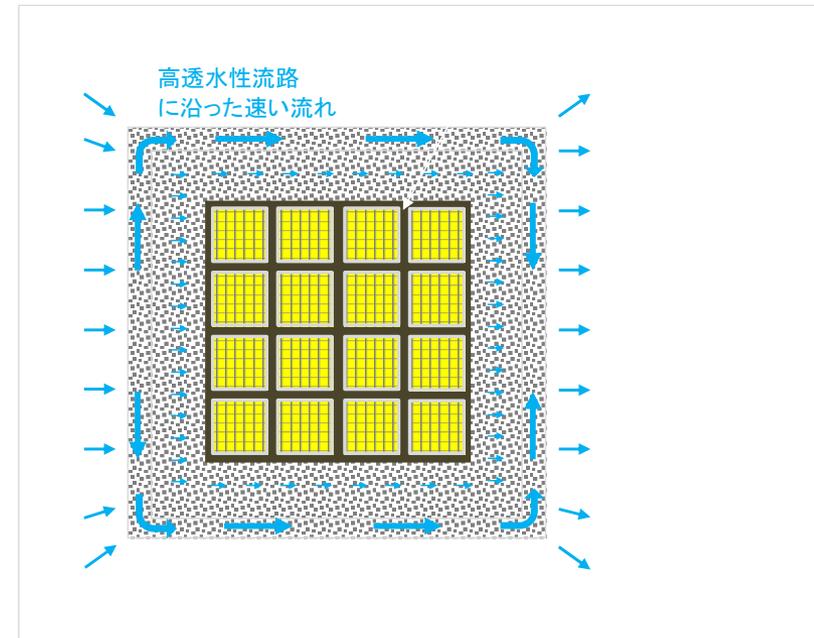
水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

IV. 処分概念の改良案の提示

改良型ピット処分オプション③の概念(2/2) 固化なし+底部ベントナイト層+ブレンディング+Hydraulic cage

- ピット処分施設の外周を掘削しズリ*等で埋め戻すことにより岩盤中を迂回する高透水性の流路(Hydraulic cage)を構築する。この場合、施設周辺の岩盤中の地下水流れはこのHydraulic cageに集中し施設を迂回して流れるため、その内部は動水勾配が小さく流速の小さい停滞域となる。
- 前述したように施設内の上流端に位置する廃棄体と下流端の廃棄体ではGBIへの到達時期にズレが生じ、このズレの期間の大きさに反比例してC-14の最大移行率が低下する(時間的分散効果)。Hydraulic cageによって施設直下の岩盤中の地下水流速を低下させることにより時間的分散効果を増大させるため、C-14の影響低減が期待できるものと考えられる。
- 水処理二次廃棄物の固化によってC-14を廃棄体中に安定に閉じ込めることが不確実である場合、このような代替的な手段によってC-14の影響を緩和する必要性が生ずる可能性がある。
- Hydraulic cageが機能するためには、ズリ*等で埋め戻した高透水性の流路が岩盤中の地下水を効率的に集め、迂回させる必要があるため、流量の大きい上部の覆土から地下水を引き込むことを避ける必要がある。そこで、覆土(あるいは土壌)の透水性に応じて、適宜、高透水性流路の上部をベントナイト等の低透水性のキャップで止水することとする。
- Hydraulic cageの有効性を把握するために右図に示す概念を想定した3次元水理・核種移行解析を行なった。結果を次頁に示す。

*ズリ:トンネル工事等で掘り出される岩石や土砂



Hydraulic cage による地下水の迂回

(4)改良後の処分概念の試行

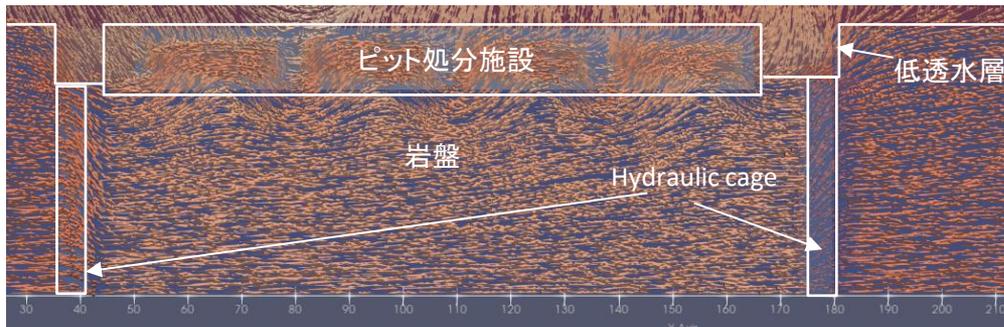
水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

IV. 処分概念の改良案の提示

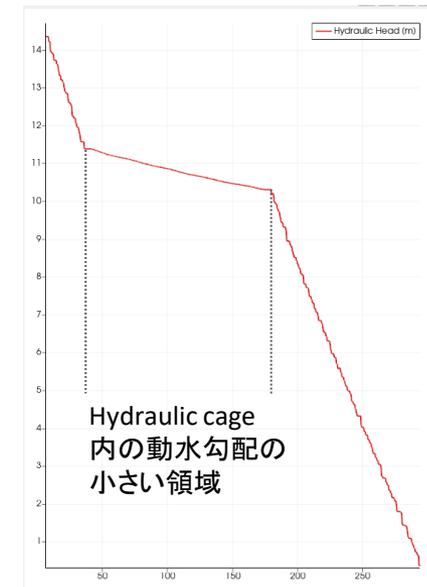
Hydraulic cageの有効性に関する3次元水理・核種移行解析(1/2)

- ピット処分施設の周囲をズリ*等の高透水性材料(透水係数=3E-5または6E-5 m/s)で構成されるHydraulic cageで囲い、さらに上部覆土への上昇流を避けるために低透水層(施設内と同じ透水係数=2E-9 m/s)で岩盤上部を覆った体系で水理解析を行った。
- Hydraulic cage内の動水勾配は周囲の1/10程度に低下し、底部から施設に入り再び流出して岩盤内を流れる地下水の流速もこれに応じて低下している。

※ 低透水層の要否やcageの透水係数等についてケーススタディを行い設計の合理化を今後図る余地があるものと考えられる。



地下水流動場



水頭分布

*ズリ:トンネル工事等で掘り出される岩石や土砂

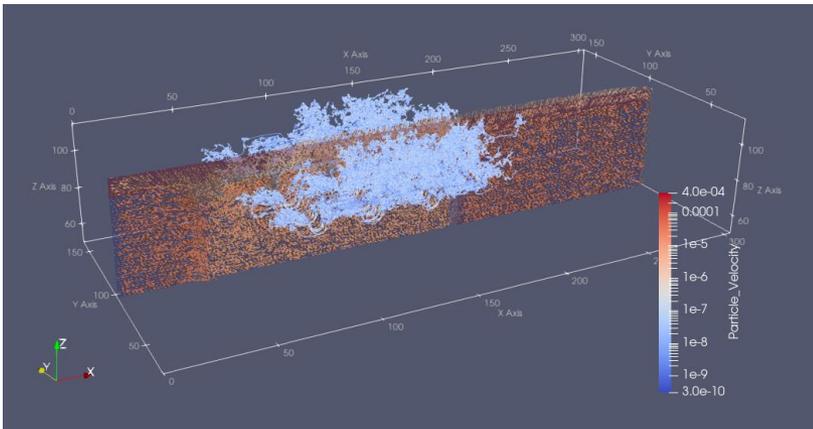
(4)改良後の処分概念の試行

水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

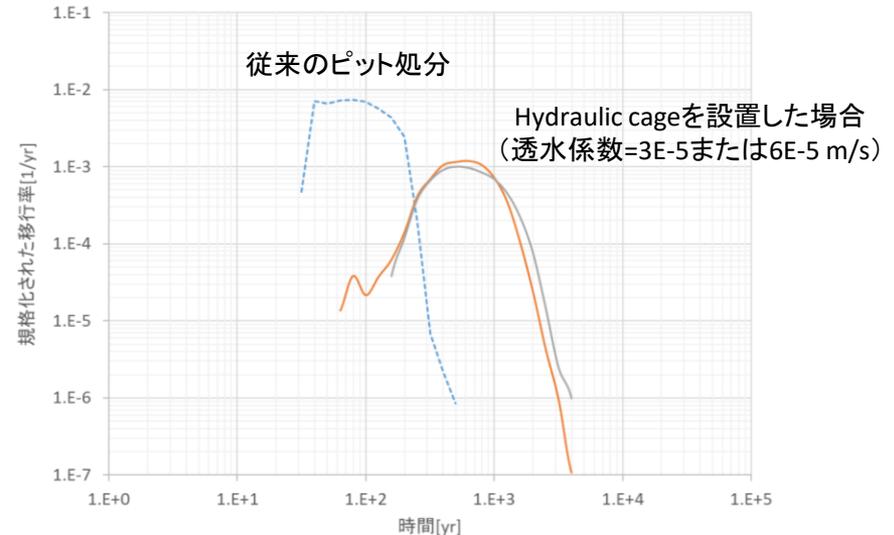
IV. 処分概念の改良案の提示

Hydraulic cageの有効性に関する3次元水理・核種移行解析(2/2)

- 3次元核種移行解析ツールPartridge (Particle tracking in deep geological environment: 三次元不均質場における地下水流動と物質移動を解析するためのソフトウェアパッケージ)を用いて施設内の廃棄体からC-14が瞬時放出されることを想定した粒子追跡法による物質移動解析を行った結果、Hydraulic cageを設置した場合にはケージ内の地下水流速が低下していることから従来のピット処分に比して時間的分散効果(施設内の上流端と下流端から出発した粒子の移行時期のズレによる)が生じることがわかった。
- 初期量によって規格化した核種移行率の計算結果(右図)は、Hydraulic cageを設置した場合この時間的分散効果によって従来のピット処分よりもピーク値が1桁程度低下することを示している。



物質移動解析結果
(少数の粒子軌跡の例)



物質移動解析結果
(下流端での移行率の時間変化)

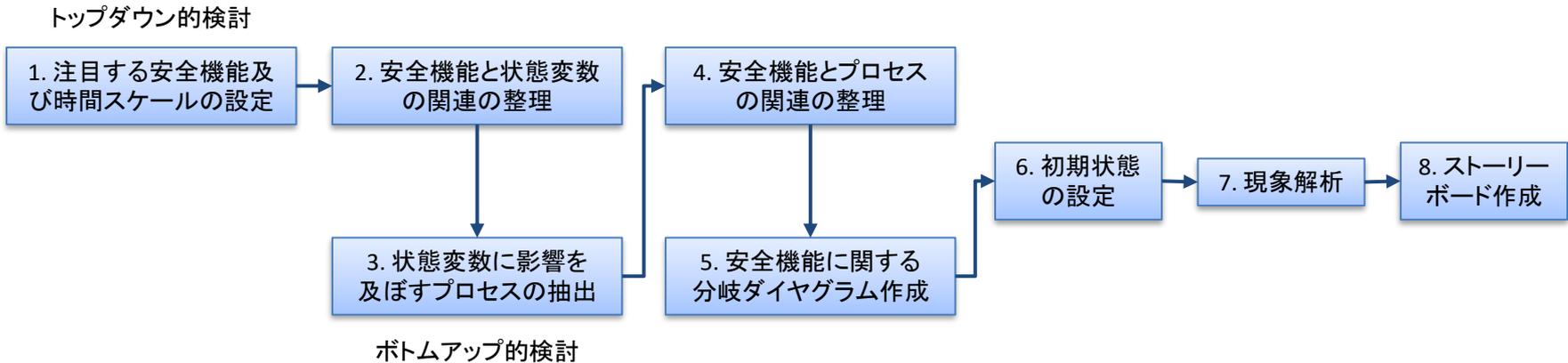
(4)改良後の処分概念の試行

水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

V.改良後の処分概念の成立性及び対策の有効性の評価:リスク低減策に着目したシナリオ解析

有機物・コロイドのろ過機能に着目した底部ベントナイト層の状態設定

- 施設内のフミン酸等の有機酸は底部ベントナイトを透過して施設外部に至る可能性は否定できないものの、有機物による移行促進の影響が問題となり得るCs-137については粘土鉱物等のより強い吸着サイトの存在によって有機酸から引き離され、ベントナイト中にとどまるものと考えられる。
- また、天然バリア中においてCsが有機酸に再度吸着した場合でも、岩盤中の粘土鉱物等に吸着されることによって顕著な移行促進が生ずることは極めて考えにくい。
- 以上を踏まえ、本試行では、水処理二次廃棄物についての改良型ピット処分オプション②を対象とし、有機酸に随伴するCsの分離及びその後の固相への収着に着目して底部ベントナイト層の状態変遷についての現象理解をシナリオとしてとりまとめ、その結果に基づき底部ベントナイト層の敷設による有機物の影響抑制の信頼性を評価する。



有機物・コロイドのろ過機能に着目した底部ベントナイト層の状態設定の手順

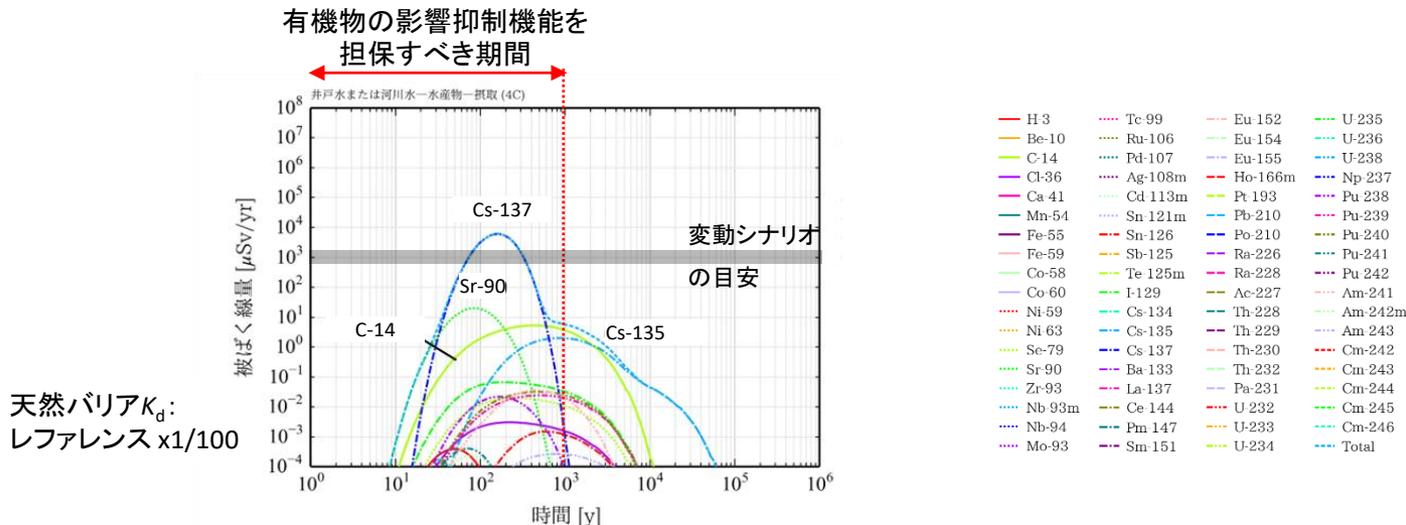
(4)改良後の処分概念の試行

水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

V.改良後の処分概念の成立性及び対策の有効性の評価:リスク低減策に着目したシナリオ解析

有機物・コロイドのろ過機能に着目した底部ベントナイト層の状態設定: 注目する安全機能及び時間スケールの設定

- 水処理二次廃棄物についての改良型ピット処分オプション②では、KURION廃吸着剤中の界面活性剤由来の有機物が残留する可能性があり、その影響により、天然バリア中の K_d の低減率によっては1 mSv/yを超える被ばく線量が生ずる可能性がある。
- 他方、溶存型の核種の移行については、固化体による浸出率抑制のために底部ベントナイト層が不在の場合でも移行率は十分に低く保たれることから、止水性や核種収着性といった底部ベントナイト層のその他の機能は必ずしも不可欠のものではない。
- 以上から、底部ベントナイト層の有機物に随伴したCs-137の移行抑制に注目して状態設定を行う。
- 有機物影響によって基本シナリオの最大被ばく線量を大きく上回る影響を生じる可能性がある核種はCs-137及びSr-90に限られることから、底部ベントナイト層の有機物の影響抑制機能が必須となる時間スケールはこれらの核種が減衰する1,000年間程度が目標となる。



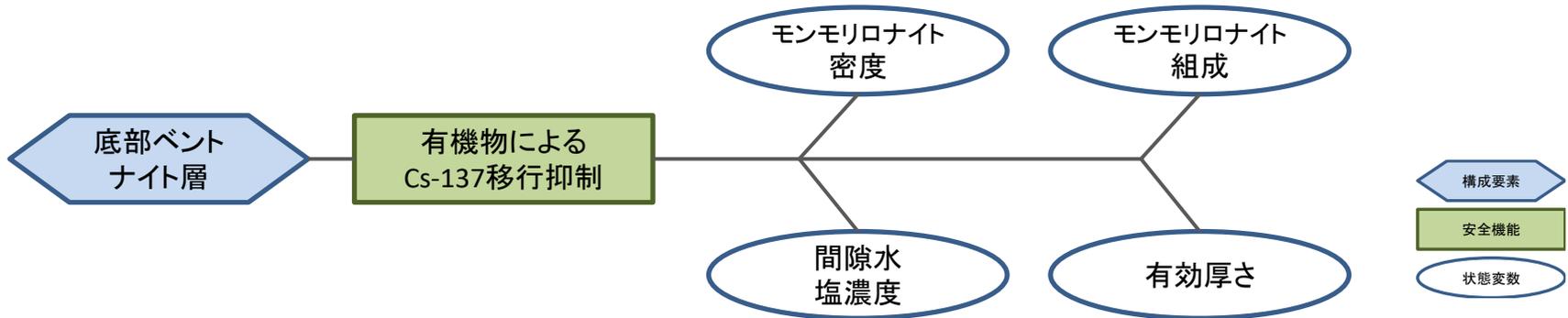
(4)改良後の処分概念の試行

水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

V.改良後の処分概念の成立性及び対策の有効性の評価:リスク低減策に着目したシナリオ解析

有機物・コロイドのろ過機能に着目した底部ベントナイト層の状態設定:安全機能と状態変数の関連の整理

- 圧密ベントナイト中の物質移動特性はモンモリロナイト密度によって規定される外部間隙の大きさ及びCsの収着挙動に影響を及ぼす間隙水の塩濃度にも依存するものと考えられる。
- これらに加えて、モンモリロナイトはイオン型によって膨潤性が異なることから、モンモリロナイト組成によっても影響を受ける可能性があるものと考えられる。
- さらに、有機物に引き寄せられたCs-137のほぼ全てを引き離し粘土鉱物に吸着させるためにはベントナイト層の有効厚さ(変質等が生ずる場合には未変質部等の初期の機能を保持した部位の厚さ)を担保することが必要と考えられる。



注目する安全機能及び関連する状態変数

(4)改良後の処分概念の試行

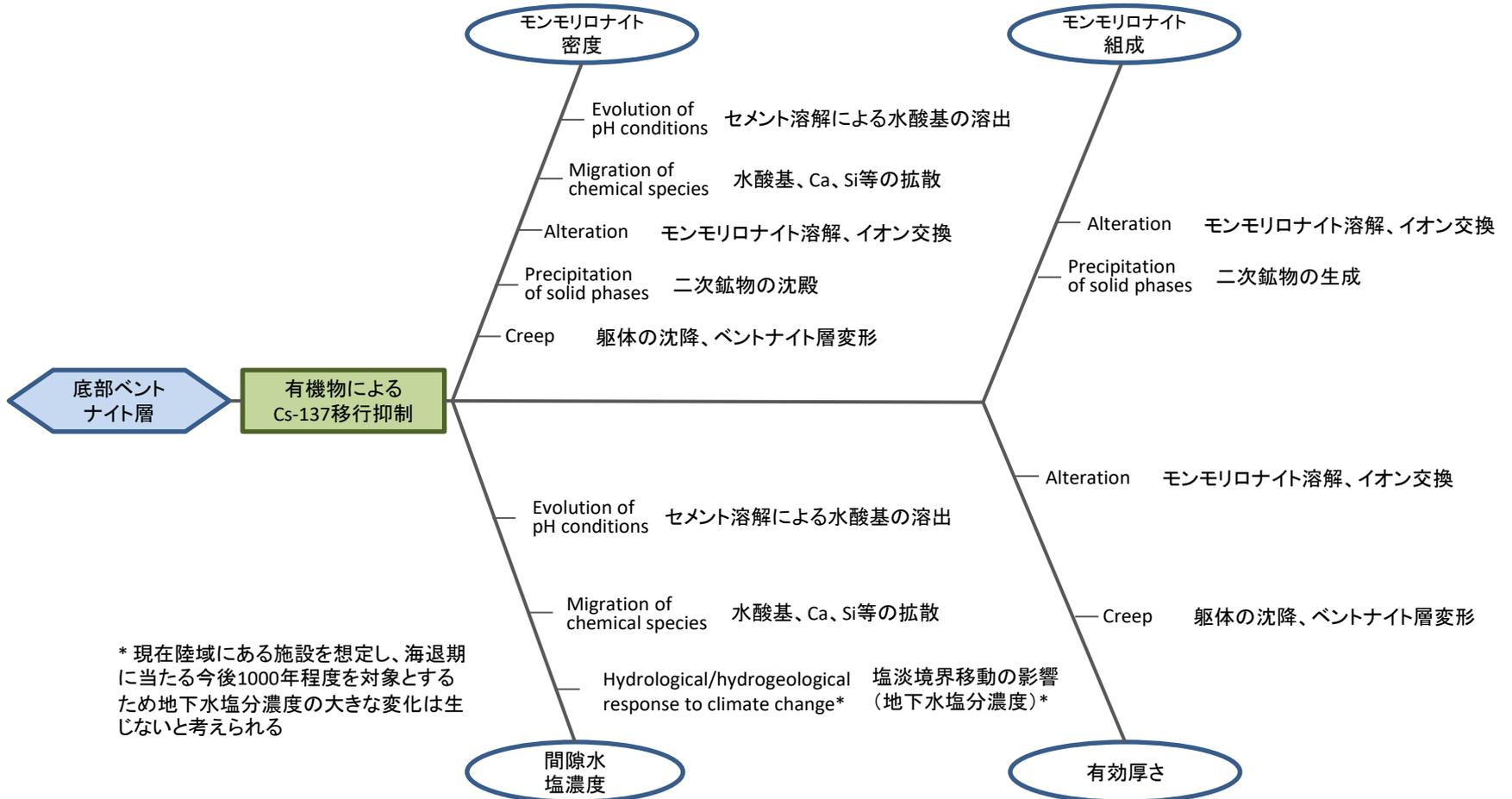
水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

V.改良後の処分概念の成立性及び対策の有効性の評価:リスク低減策に着目したシナリオ解析

有機物・コロイドのろ過機能に着目した底部ベントナイト層の状態設定:

状態変数に影響を及ぼすプロセスの抽出、安全機能とプロセスの関連の整理

スライド111の手順2.において整理した安全機能を規定する状態変数の時間的変遷に影響を及ぼす可能性のあるFEP(英字)をFEPデータベース(前出)から抽出し、鉄筋コンクリート製躯体の底部に敷設されたベントナイト層に該当する具体的な特徴やプロセスをマッピングした(邦字)。



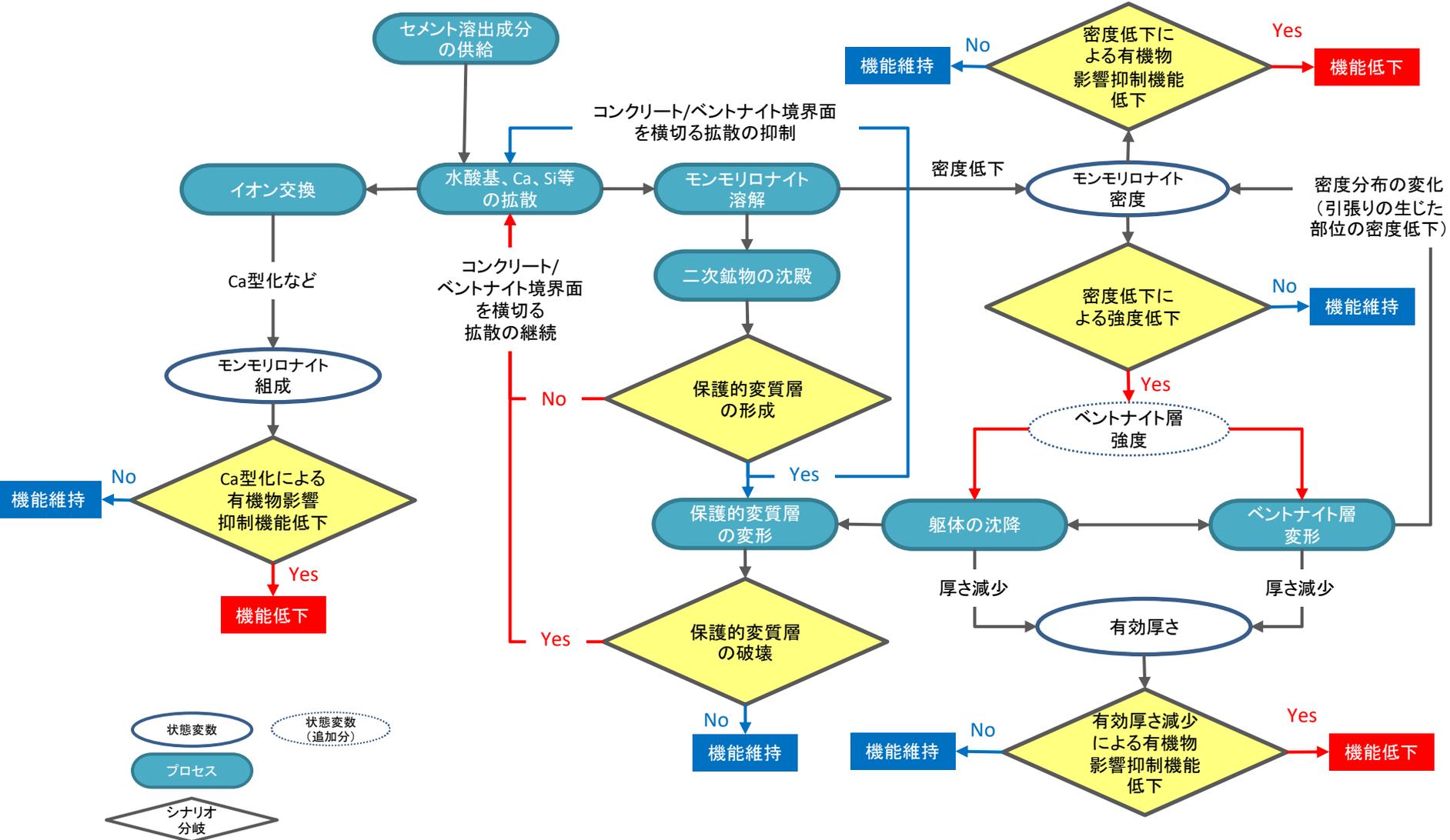
※NEA (2019), International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste Version 3.0, OECD Publishing, Paris

(4)改良後の処分概念の試行

水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

V.改良後の処分概念の成立性及び対策の有効性の評価:リスク低減策に着目したシナリオ解析

有機物・コロイドのろ過機能に着目した底部ベントナイト層の状態設定:安全機能に関する分岐ダイアグラム作成



(4)改良後の処分概念の試行

水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

116

V.改良後の処分概念の成立性及び対策の有効性の評価:リスク低減策に着目したシナリオ解析

有機物・コロイドのろ過機能に着目した底部ベントナイト層の状態設定:安全機能に関する分岐ダイアグラム作成

■ 底部ベントナイト層に関するシナリオ分岐のポイント

- i. コンクリートから溶出する水酸基等が底部ベントナイト層に主として拡散で進入し、pHが上昇することに伴いモンモリロナイトの溶解が生ずる際、同時に生成する二次鉱物(CSHゲル、Calcite、ゼオライト等)によってコンクリート躯体と底部ベントナイト層の境界に緻密な変質層が形成されてそれ以降のベントナイト変質が停止するか否か。
- ii. 上記の境界層形成による変質停止までに、溶解によってコロイドろ過性が低下する程度までモンモリロナイト密度が低下するか否か。
- iii. 上記の境界層形成による変質停止までに、溶解によってベントナイト層の強度が低下して躯体の沈降やベントナイト層の変形が生ずる程度までモンモリロナイト密度が低下するか否か。
- iv. 上記iii.において躯体の沈降やベントナイト層の変形が生ずる場合、i.で形成された緻密な境界変質層が破壊されコンクリートから溶出する水酸基等が再び底部ベントナイト層に進入することがあるか。
- v. ベントナイトのカルシウム化が進みコロイドろ過性が低下することがあるか。

■ 基本シナリオの設定に必要な検討

- **初期条件の設定:**有機物の影響抑制に十分なモンモリロナイト密度、厚さの底部ベントナイト層を均質性を担保しつつ敷設し得ることのエビデンスに基づく確認。
- **ベントナイト変質の予想:**上記i.～iii.及びv.に答えるための反応輸送解析及びエビデンスに基づく妥当性の評価。

(4)改良後の処分概念の試行

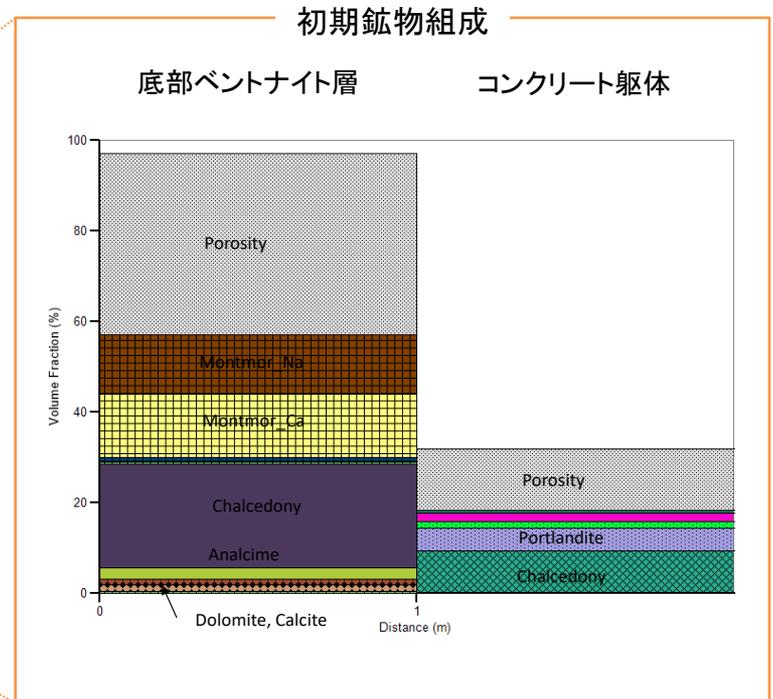
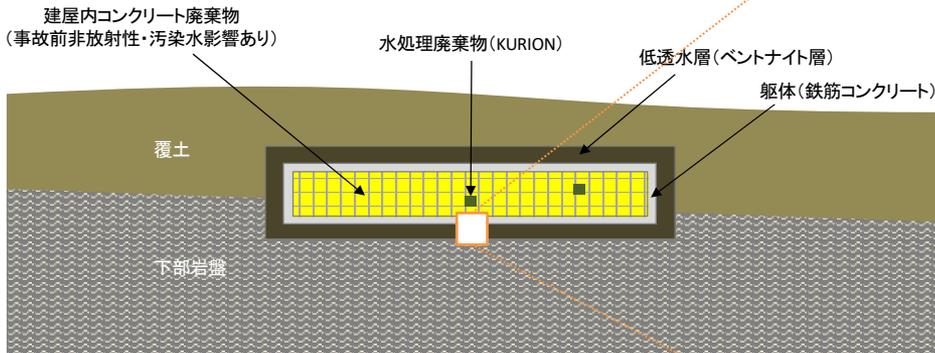
水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

V.改良後の処分概念の成立性及び対策の有効性の評価:リスク低減策に着目したシナリオ解析

117

有機物・コロイドのろ過機能に着目した底部ベントナイト層の状態設定: 初期状態の設定

- 底部ベントナイト層については、中深度処分施設の底部透水層の設計及び施工試験(次頁以降参照)に基づき、以下の仕様を想定する。
 - 厚さ 1 m
 - 施工・転圧後の乾燥密度 $1.6 \pm 0.1 \text{ Mg/m}^3$
 - モンモリロナイト含有量 平均51.5% (41.4~61.6%)
- 施工後のベントナイト層の特性は均質であり、層圧も一様であることが品質保証されており、また、乾燥時の強度が十分に高いことにより施設建設後の変形も十分に小さい。
- 後述する躯体コンクリート及びベントナイト層についての反応輸送解析の初期条件となる鉱物組成はそれぞれ下図の通り。



(4)改良後の処分概念の試行 水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

V.改良後の処分概念の成立性及び対策の有効性の評価:リスク低減策に着目したシナリオ解析

有機物・コロイドのろ過機能に着目した底部ベントナイト層の状態設定:初期状態の設定
(参考)底部ベントナイト層施工試験の実績(1/2)*

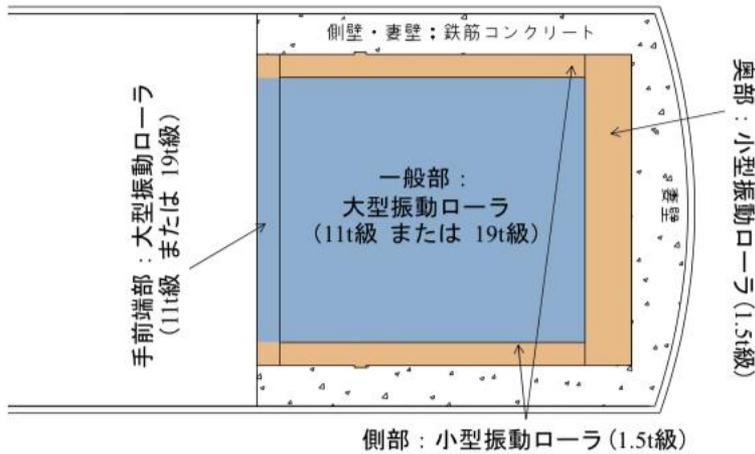


図-14 振動ローラの種類による施工箇所分け



写真4 小型振動ローラ (1.5t級)

- 締め固めによって高い乾燥密度を達成することの可能な粒状ベントナイトを材料とし、大型振動ローラ及び小型振動ローラ(側面付近や隅角部等)を用いて施設底部に施設の荷重に耐える十分な圧縮強度及び所定の低透水性を持つベントナイト層を敷設することが可能。
- 撒出しや敷均しの品質管理及びレーザーを用いた層圧の精度の確認等を通じて均一な施工を担保することができる。

振 幅	1.8 mm	1.8 mm
起 振 力	236 kN	343 kN
速 度	2 km/h	2 km/h
車 輪 幅	2130 mm	2150 mm
操 作	搭乗式	搭乗式

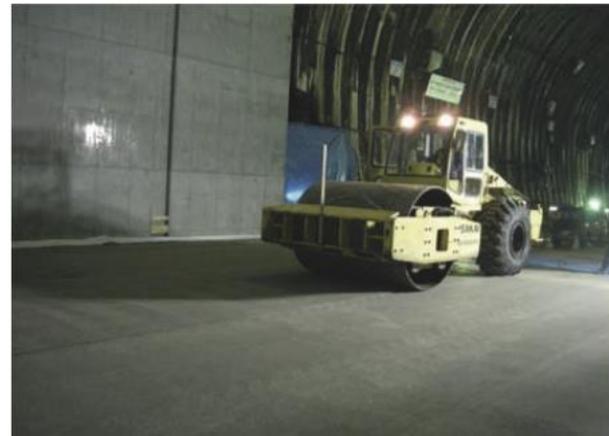


写真5 大型振動ローラによる底部低透水層の施工試験状況

(4)改良後の処分概念の試行

水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

V.改良後の処分概念の成立性及び対策の有効性の評価:リスク低減策に着目したシナリオ解析

有機物・コロイドのろ過機能に着目した底部ベントナイト層の状態設定:初期状態の設定

(参考)底部ベントナイト層施工試験の実績(2/2)*

- 施工後のベントナイト層から抽出したコアの乾燥密度にはばらつきがあるものの全数が管理目標である $1.6 \pm 0.1 \text{ Mg/m}^3$ の範囲内に収まっている。
- これらのサンプルの透水係数及び一軸圧縮強度も全て管理目標の範囲内にあることが確認された。

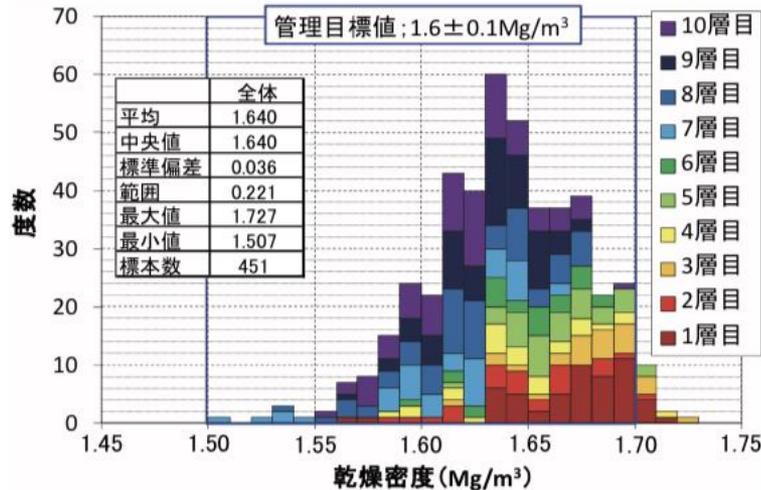


図-17 コアの乾燥密度のヒストグラム

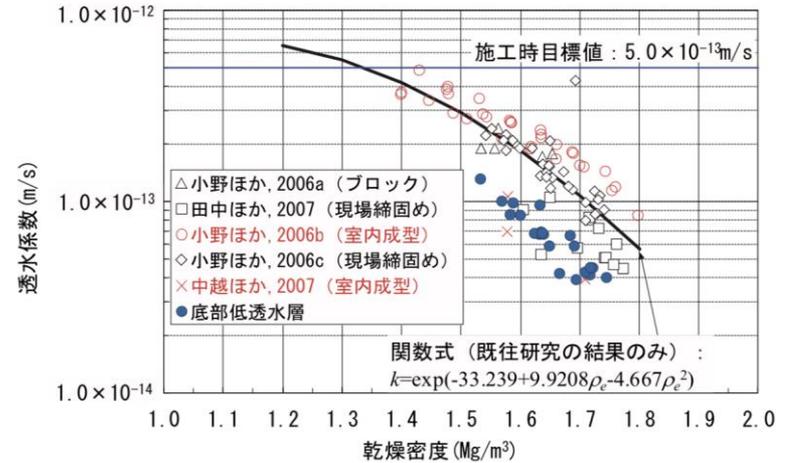


図-22 粒状ベントナイトの透水係数と乾燥密度の関係^{10)~14)}

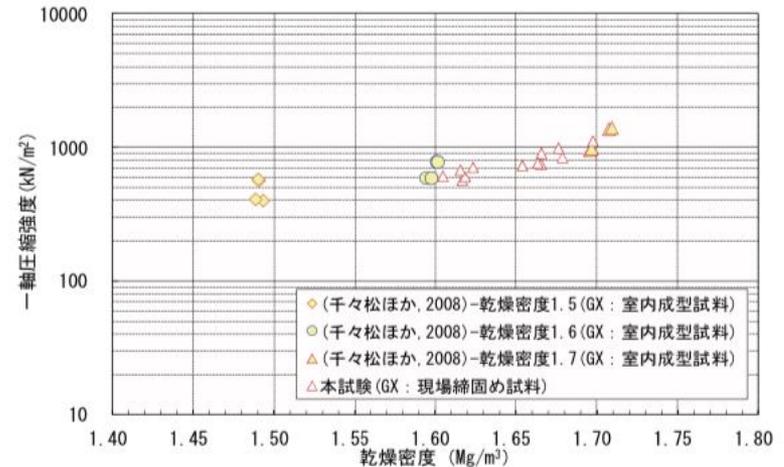


図-25 乾燥密度と一軸圧縮強さの関係

*山田ほか、放射性廃棄物の地下空洞型処分施設に用いる底部低透水層の転圧工法による施工品質の評価、土木学会論文集C(地圏工学)、Vol.71、No.3、147-162、2015。

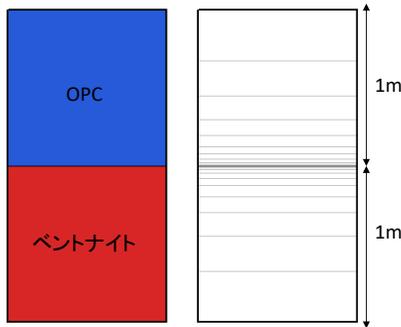
(4)改良後の処分概念の試行

水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

V.改良後の処分概念の成立性及び対策の有効性の評価:リスク低減策に着目したシナリオ解析

有機物・コロイドのろ過機能に着目した底部ベントナイト層の状態設定:現象解析(反応輸送解析)

- 反応輸送解析コードQPAC(GUIインタフェース版)を用いてセメントーベントナイト相互作用によるベントナイト変質を評価した。
- シナリオ分岐ポイントである材料境界部における二次鉱物の沈殿による間隙閉塞が生じて拡散による物質移行とベントナイト変質が抑制されるために、下表に示す実効拡散係数の間隙率依存性の式(NUMO包括的技術報告書[※]と同じもの)を用いた。熱力学データベースはJAEA-TDB GWB20v12.datを使用。



実効拡散係数の間隙率依存性

部材	拡散係数[m ² /s]	備考
コンクリート層	$De = D^* \times \varepsilon^{3.05}$	包括的技術報告書で使用
ベントナイト	$De = D^* \times \varepsilon^n$ $n = 2.22 \times fs^{0.13} + 1$ fs : モンモリロナイト含有率	包括的技術報告書で使用

ε は間隙率[-], θ は間隙率[%]を表す

初期間隙水組成

	地下水 (FRHP) [mol/kg]	ベントナイト間隙水 [mol/kg]	コンクリート層間隙水 [mol/kg]
pH	8.46	9.472	13.389
Al	3.43E-07	1.547e-06	1.617e-04
Ca	1.09E-04	1.887e-05	ポルトランタイト平衡
Cl	1.46E-05	1.460e-05	1.464e-05
C	3.54E-03	3.657e-03	3.667e-03
K	6.15E-05	6.151e-05	2.018e-01
Mg	5.00E-05	9.910e-07	6.022e-11
Na	3.55E-03	4.589e-03	1.779e-01
Si	3.39E-04	2.800e-04	1.214e-04
S	1.11E-04	1.110e-04	2.176e-03

- 初期間隙水組成は下記のように設定した。設定手順は以下の通り。

- 地下水をFRHP^{*1}と想定し、ベントナイトの各初期鉱物と平衡であると仮定し、組成をPHREEQC^{*2}で計算。
- 上記のベントナイト間隙水とコンクリート層の各鉱物が平衡であると仮定し、コンクリート層間隙水の組成をPHREEQCで計算。ただし、その組成をそのまま初期条件として使用するとMINARET^{*3}の初期条件計算が収束しなかったため、Caのみ改めてMINARET上でPortlandite平衡として計算。

^{*1}FRHP (Fresh-Reducing-High pH groundwater) : 降水系還元性高pH型地下水

^{*2}PHREEQC : 汎用地球化学コード

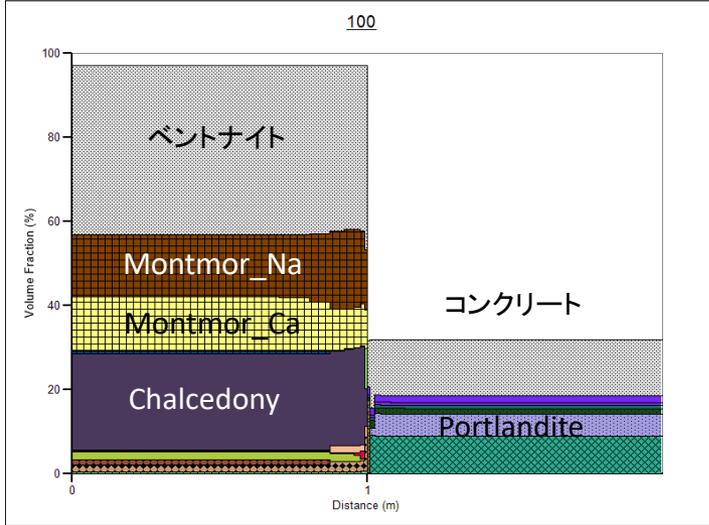
^{*3}MINARET (MINeral Alteration due to REactive Transport) : 地化学解析コード

(4)改良後の処分概念の試行 水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

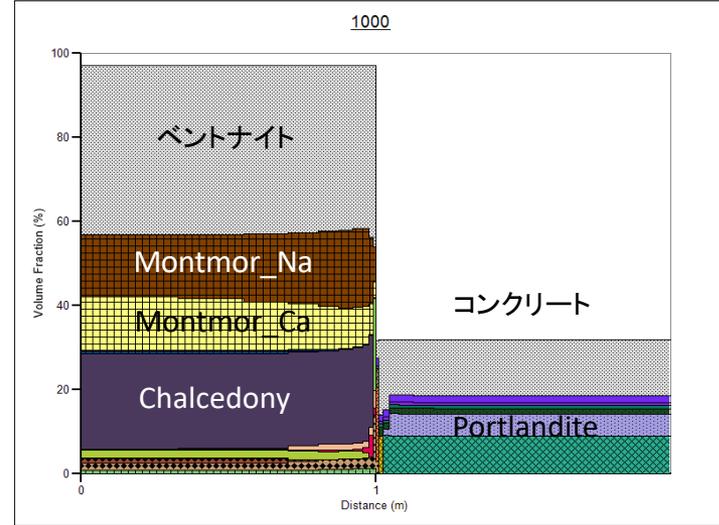
V.改良後の処分概念の成立性及び対策の有効性の評価:リスク低減策に着目したシナリオ解析

有機物・コロイドのろ過機能に着目した底部ベントナイト層の状態設定:現象解析(反応輸送解析)結果(鉱物組成の時間変化)

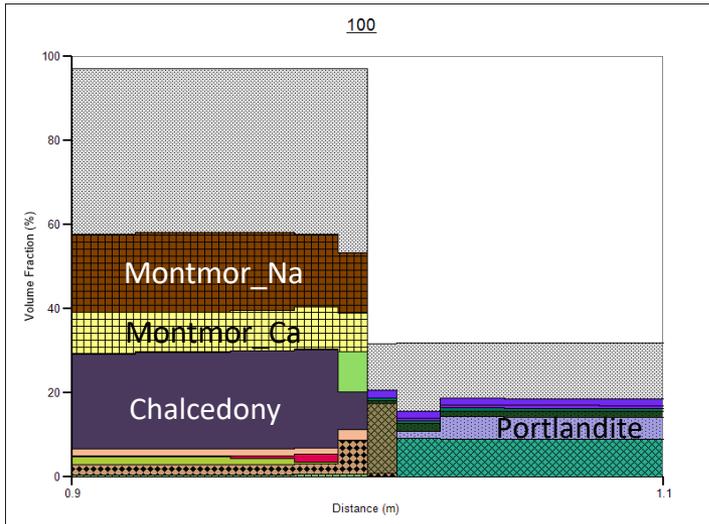
ベントナイト及びコンクリート中の鉱物組成(100年後)



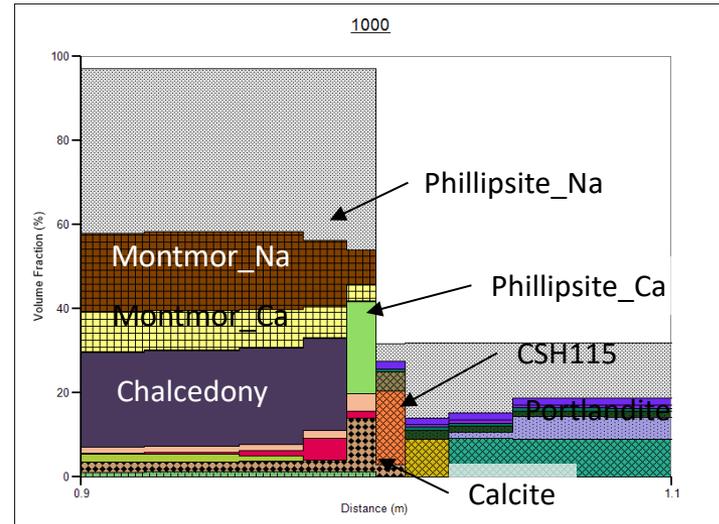
ベントナイト及びコンクリート中の鉱物組成(1000年後)



境界近傍の拡大図(100年後)



境界近傍の拡大図(1000年後)



(4)改良後の処分概念の試行

水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

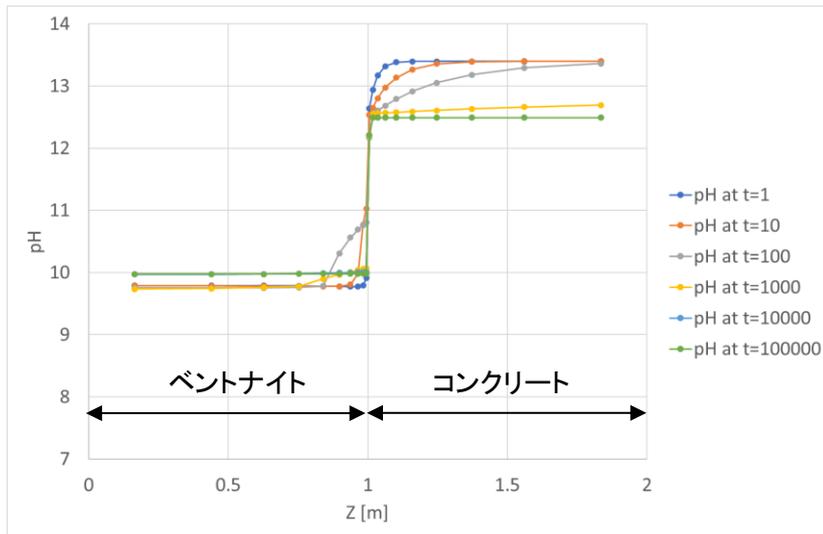
V.改良後の処分概念の成立性及び対策の有効性の評価:リスク低減策に着目したシナリオ解析

122

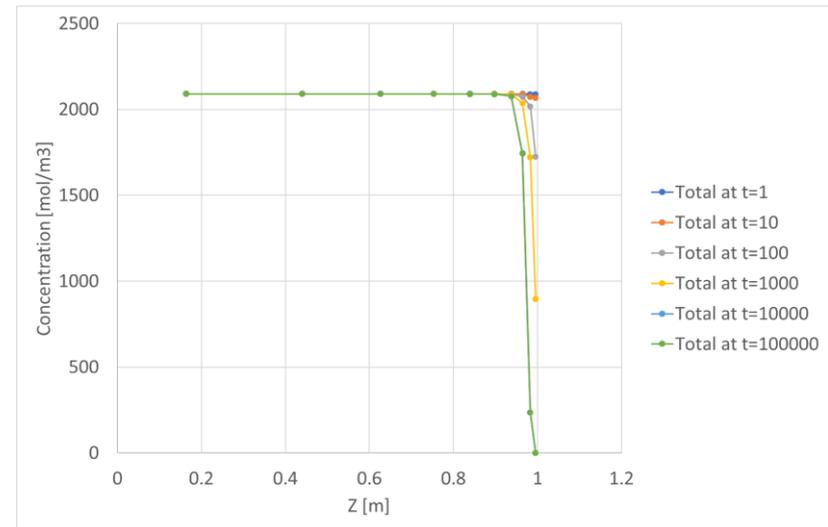
有機物・コロイドのろ過機能に着目した底部ベントナイト層の状態設定:現象解析(反応輸送解析)結果

(pH及びモンモリロナイト量の長期変遷(～10万年))

pH分布の時間変化



全モンモリロナイト濃度分布の時間変化



- コンクリートのpHは初期のNaやKに支配された13以上の状態から始まり、これらの成分の枯渇する1000年後以降はポルトランドの平衡に相当する12.5程度のレベルが10万年後まで継続。
- ベントナイト中のpHはコンクリート境界から徐々に上昇するが変化はわずかであり、10以下にとどまる。

- ベントナイト中に拡散する水酸基等によってモンモリロナイトの溶解が生じ、密度が低下するが、その範囲は10万年間で境界から5 cm程度にとどまる。
- 安全機能を期待する1000年の時点でのベントナイトと変質部(モンモリロナイト密度の低下が顕著な領域)は境界から1 cm程度。

(4)改良後の処分概念の試行

水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

V.改良後の処分概念の成立性及び対策の有効性の評価:リスク低減策に着目したシナリオ解析

123

有機物・コロイドのろ過機能に着目した底部ベントナイト層の状態設定:現象解析(反応輸送解析)による化学的状態変遷の概要

■ 鉱物組成の変化

- 1,000~10,000年程度でコンクリート層側の間隙が完全に閉塞(沈殿している鉱物はCSHやCalcite)。
- 間隙閉塞により境界面の実効拡散係数が低下し、10,000年以降は反応が抑制されており、鉱物組成はほとんど変化していない。
- ベントナイトの境界近傍部5 cm程度ではilliteやSepiolite、Calciteが沈殿(それぞれK、Mg、Caといったカチオンのシンクとなっている)。
- モンモリロナイトは、境界近傍部5 cm程度を除いて10万年までNa型とCa型がほとんど比率を変えずに残存。

■ 安全機能への影響:躯体コンクリート及びベントナイト層についての反応輸送解析の初期条件(スライド119-120)となる鉱物組成はそれぞれ以下の通り。

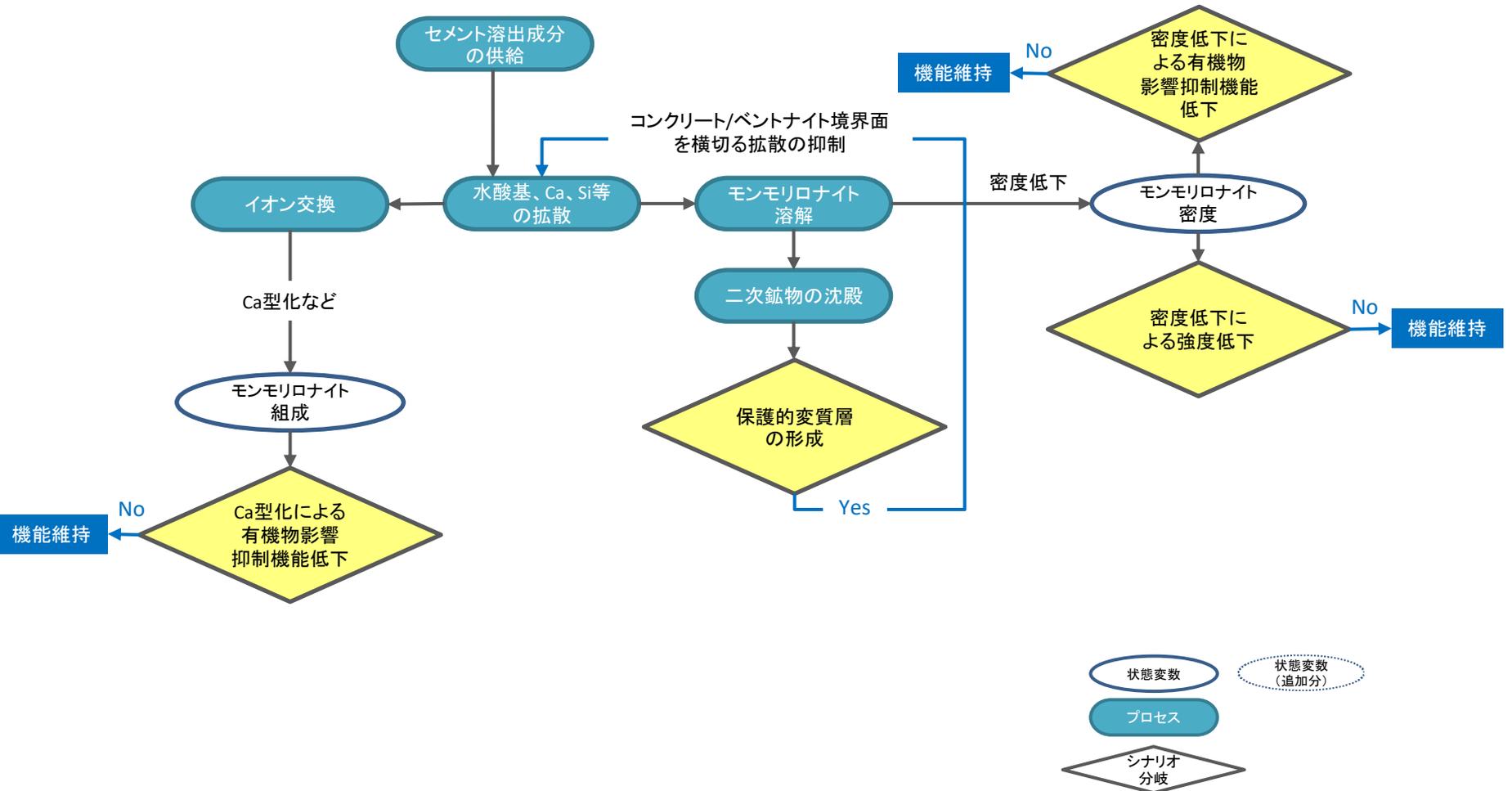
- ベントナイトーコンクリート境界において保護的変質層が形成されてコンクリートからベントナイトへの水酸基やCa等の移行が抑制されるため、モンモリロナイトの溶解は初期のうちに抑制され、1000年時点では境界部の1 cm程度を除きモンモリロナイト密度低下は生じず、有機物に随伴するCs-137の移行抑制機能は維持されると考えられる。
- 境界部の保護的変質層の物質移動抑制効果によってモンモリロナイトのイオン交換も進行せず、モンモリロナイトは全域にわたってNa型が保持される。このことから、イオン交換による有機物に随伴するCs-137の移行抑制機能への影響も無視できるものと考えられる。
- 1000年時点で境界部の1 cm程度を除きモンモリロナイト密度低下は生じず、変質部も二次鉱物の生成によって間隙率が低下していることから底部ベントナイト層の力学的強度が保たれるものと考えられる(力学解析による確認要)。

(4)改良後の処分概念の試行

水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

V.改良後の処分概念の成立性及び対策の有効性の評価:リスク低減策に着目したシナリオ解析

有機物・コロイドのろ過機能に着目した底部ベントナイト層の状態設定:現象解析(反応輸送解析)結果を踏まえた基本シナリオ進展

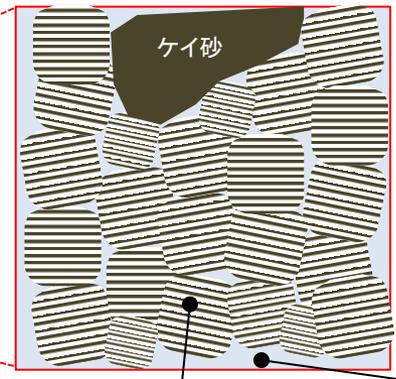
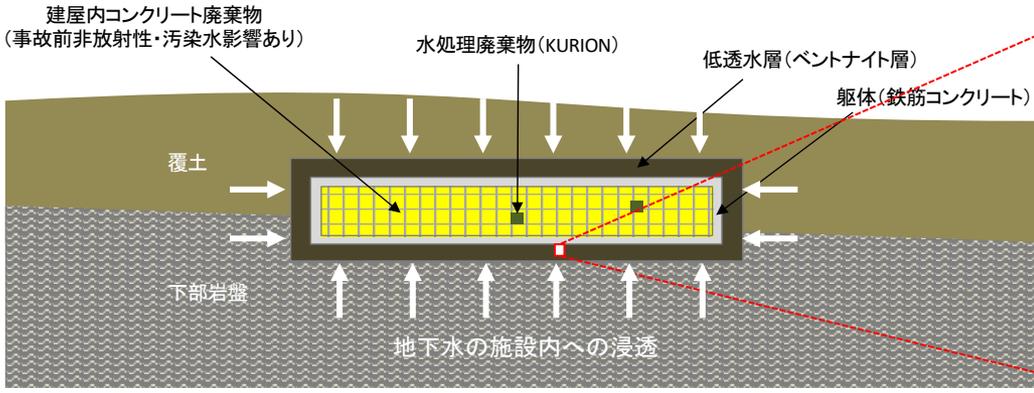


(4)改良後の処分概念の試行 水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

V.改良後の処分概念の成立性及び対策の有効性の評価:リスク低減策に着目したシナリオ解析

有機物・コロイドのろ過機能に着目した底部ベントナイト層の状態設定: ストーリーボード作成 (埋め戻し後、再冠水時)

注目すべきプロセス



- ベントナイト層内部への地下水の浸透に伴いモンモリロナイトの層間(内部間隙)に水分子が取り込まれ粒子が膨潤。
- モンモリロナイト粒子の膨潤によって外部間隙は縮小し移行経路が狭隘となり低透水性が発現。

注目すべきベントナイトの状態変数(山田ほか(2015)※に一部加筆)

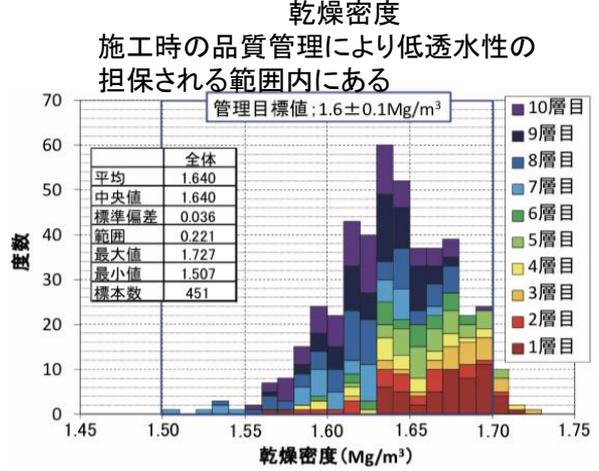


図-17 コアの乾燥密度のヒストグラム

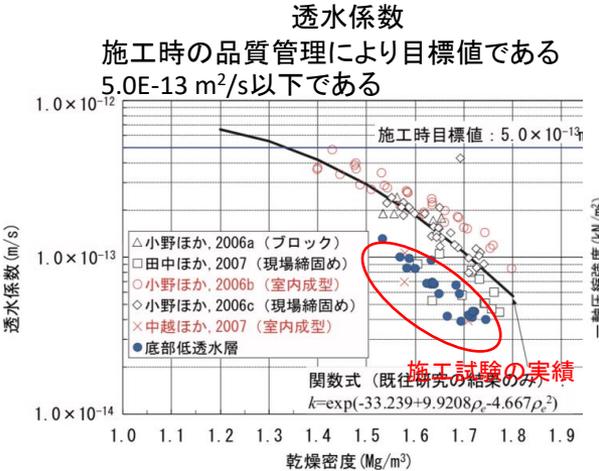


図-22 粒状ベントナイトの透水係数と乾燥密度の関係¹

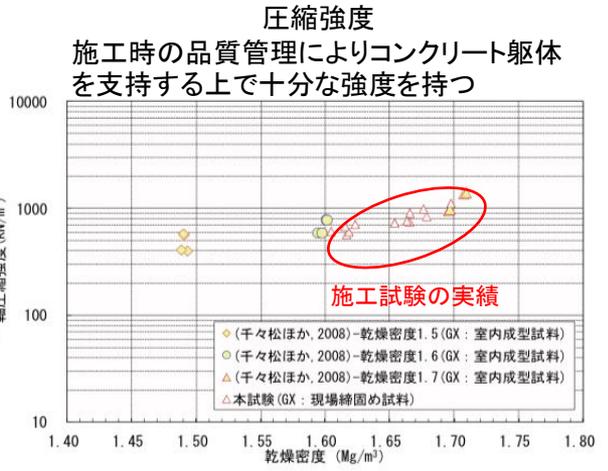


図-25 乾燥密度と一軸圧縮強さの関係

※山田ほか、放射性廃棄物の地下空洞型処分施設に用いる底部低透水路層の転圧工法による施工品質の評価、土木学会論文集C(地圏工学)、Vol.71、No.3、147-162、2015。

(4)改良後の処分概念の試行

水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

V.改良後の処分概念の成立性及び対策の有効性の評価:リスク低減策に着目したシナリオ解析

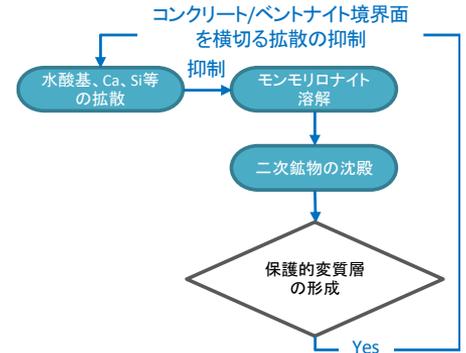
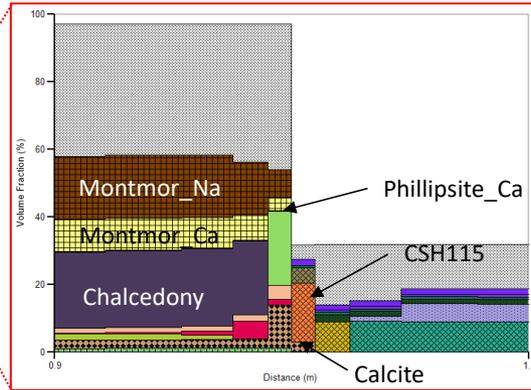
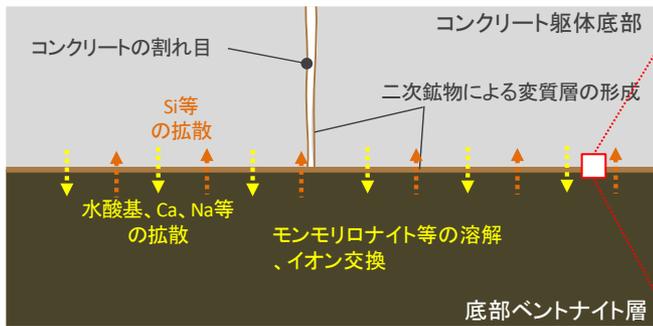
有機物・コロイドのろ過機能に着目した底部ベントナイト層の状態設定:ストーリーボード作成(1000年後)

注目すべきプロセス

セメントから溶出する水酸基やCaとモンモリロナイトの溶解によるSi等が双方向に拡散し、それぞれベントナイト層及びコンクリート表面で二次鉱物の沈殿を生ずる。

セメント表面に生成するCSHゲルやCalciteによって保護的な変質層が形成され、水酸基やCa等のベントナイトへの拡散が抑制される。

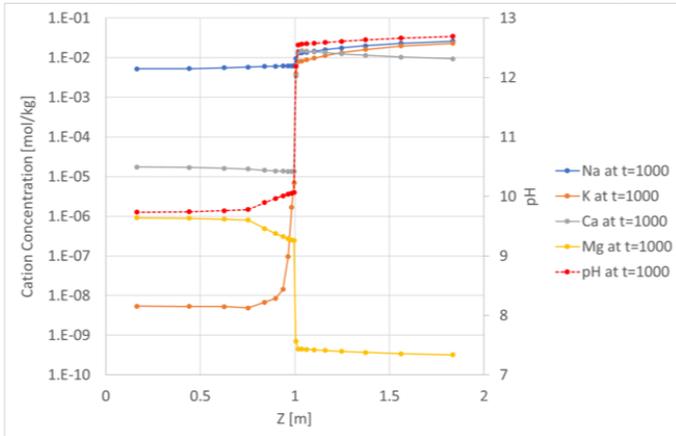
保護的な変質層によって負のフィードバックループが形成され、その後のベントナイトの変質が抑制される。



注目すべきベントナイトの状態変数

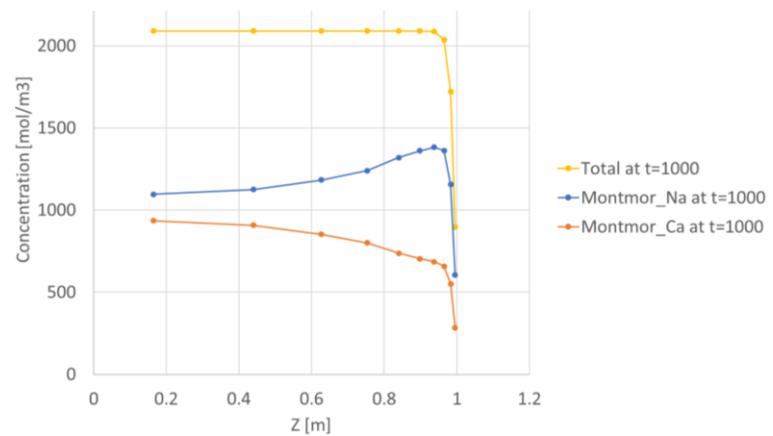
間隙水質

ベントナイト間隙水のpHは10以下であり、セメントの初期の溶解成分であるNaが支配的な陽イオンとなる。



モンモリロナイトの残存量及びイオン型

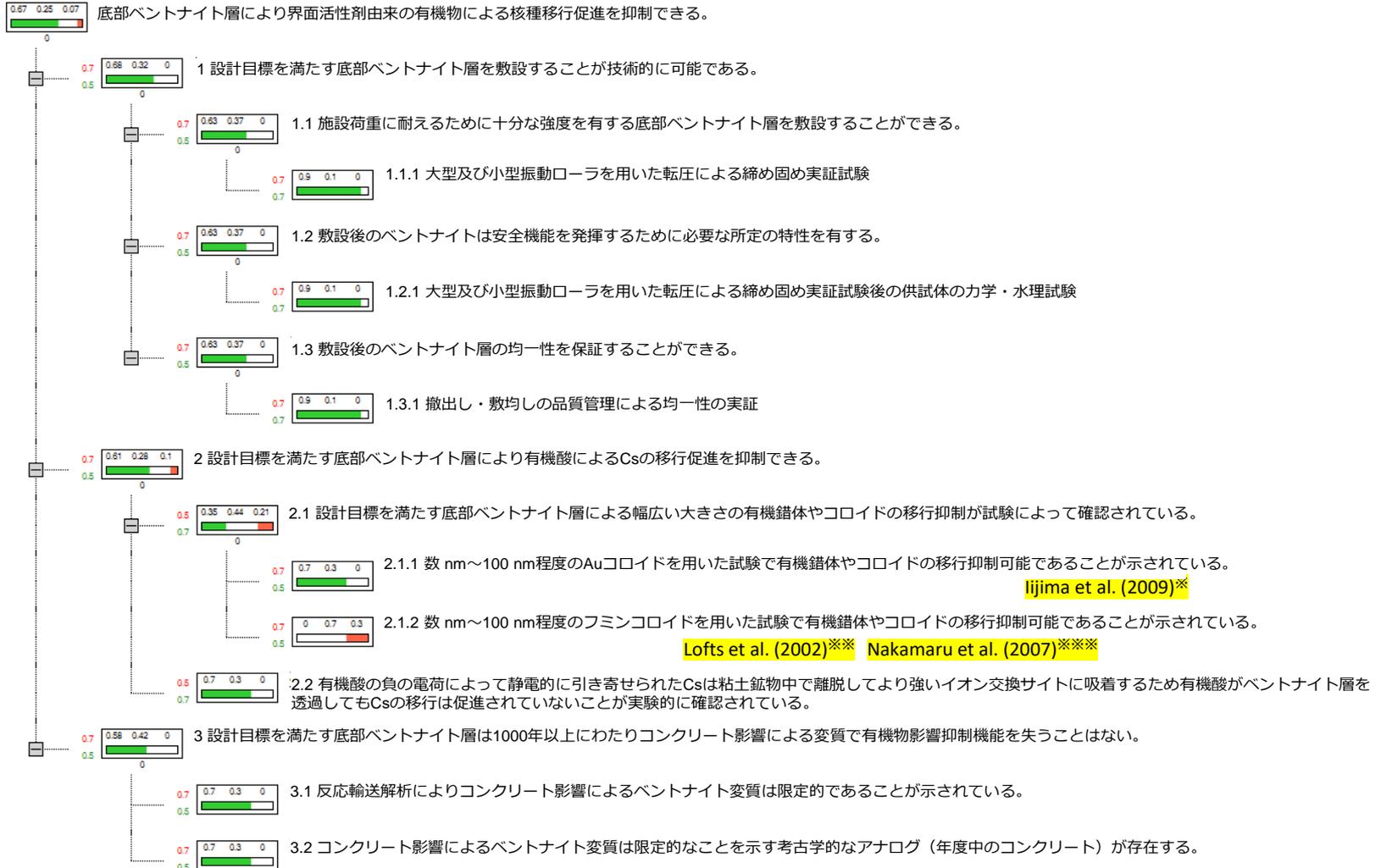
モンモリロナイト密度が低下するのはコンクリート境界から1 cm程度の範囲にとどまる。また、イオン交換によるCa型化は進まない。



(4)改良後の処分概念の試行 水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

V.改良後の処分概念の成立性及び対策の有効性の評価:リスク低減策の成立性・適用性評価

底部ベントナイト層敷設による有機物影響のリスク低減の信頼性評価(1/2)



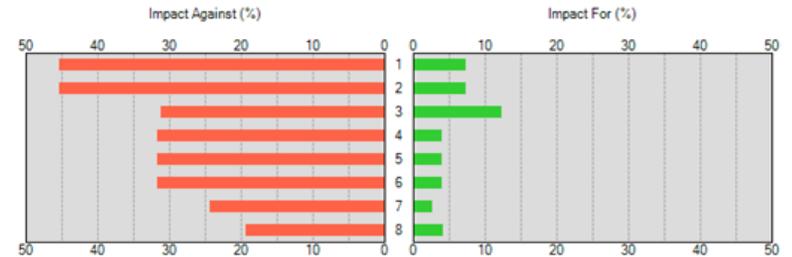
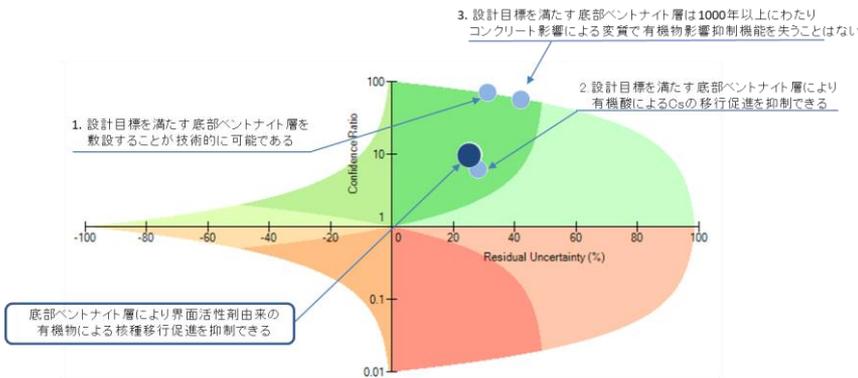
*Iijima K. et.al., Diffusion behavior of humic acid in compacted bentonite, Effect of ionic strength, dry density, and molecular weight of humic acid, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 1124, 263-270, 2009
 **Lofts, S., Tipping, E.W., Sanches, A.L., Dodd, B.A., 2002. Modeling the role of humic acid in radiocaesium distribution in a British upland peat soil. Journal of Environmental Radioactivity 61, 133-147, 2002
 ***Nakamaru, Yasuo & Ishikawa, Nao & Tagami, Keiko & Uchida, Shigeo. Role of soil organic matter in the mobility of radiocaesium in agricultural soils common in Japan. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 306. 111-117, 2007.

(4)改良後の処分概念の試行 水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

V.改良後の処分概念の成立性及び対策の有効性の評価:リスク低減策の成立性・適用性評価

底部ベントナイト層敷設による有機物影響のリスク低減の信頼性評価(2/2)

- “設計目標を満たす底部ベントナイト層を敷設することが技術的に可能である”という命題については中深度処分を対象として実施された施工試験や品質管理の試行結果をエビデンスとして十分な信頼性があると考えられる。
- 粒子の小さいフミンコロイドについては圧密ベントナイトを透過する可能性を示した試験結果が得られているが、これと随伴するCsは微量の粘土鉱物等の存在によって速やかに脱着し、これらの鉱物に吸着することで固定化(移行遅延)されると考えられることから、ここでも肯定的なエビデンスが支配的となっている。
- “設計目標を満たす底部ベントナイト層は1000年以上にわたりコンクリート影響による変質で有機物影響抑制機能を失うことはない”という命題についても、本試行で実施した反応輸送解析及び考古学的アナログやベントナイトコンクリート共存カラム試験といったエビデンスが支持しており、信頼性があると考えられる。否定的な材料は特に見当たらないが、モンモリロナイト溶解速度式の妥当性など確認が十分とはいえない仮定も含まれているため、一定の不確実性は残る。
- 以上から、Ratio plotに示すように、ESL評価結果は、底部ベントナイト層によって有機物影響によるCsの移行促進は抑制されることについて肯定的なエビデンスが支配的であり、残された不確実性を考慮してもこの主張の信頼性を示すものと考えられる。
- Tornado plot(右図)によれば、このリスク低減策の信頼性向上のために最も有効なエビデンス(最も大きな緑のグラフ)は、界面活性剤由来の有機物の特性を特定した上で、これに随伴するCsが粘土鉱物等の存在によって速やかに脱着することを示す試験結果を得ることと考えられる。



- 3.1 反応輸送解析によりコンクリート影響によるベントナイト変質は限定的であることが示されている
- 3.2 コンクリート影響によるベントナイト変質は限定的なことを示す考古学的アナログ(粘土層中のコンクリート)が存在する
- 2.2 有機物の負の電荷によって静電的に引き寄せられたCsは粘土鉱物中で離脱してより強いイオン交換サイトに吸着するため有機物がベントナイト層を透過してもCsの移行は促進されていないことが実験的に確認されている
- 1.1.1 大型及び小型振動ローラを用いた圧密による締め固め実証試験
- 1.2.1 大型及び小型振動ローラを用いた圧密による締め固め実証試験後の供試体の力学・水理試験
- 1.3.1 撤出し・敷均しの品質管理による均一性の実証
- 2.1.2 数nm~100nm程度のフミンコロイドを用いた試験で有機物体やコロイドの移行を抑制可能であることが示されている
- 2.1.1 数nm~100nm程度のAuコロイドを用いた試験で有機物体やコロイドの移行を抑制可能であることが示されている

明確に成立	Yesだが不確実性が大きい	Noだが不確実性が大きい	明確に不成立
Yes-No > 不確実性	0 < Yes-No < 不確実性	No-Yes > 不確実性	0 < No-Yes < 不確実性

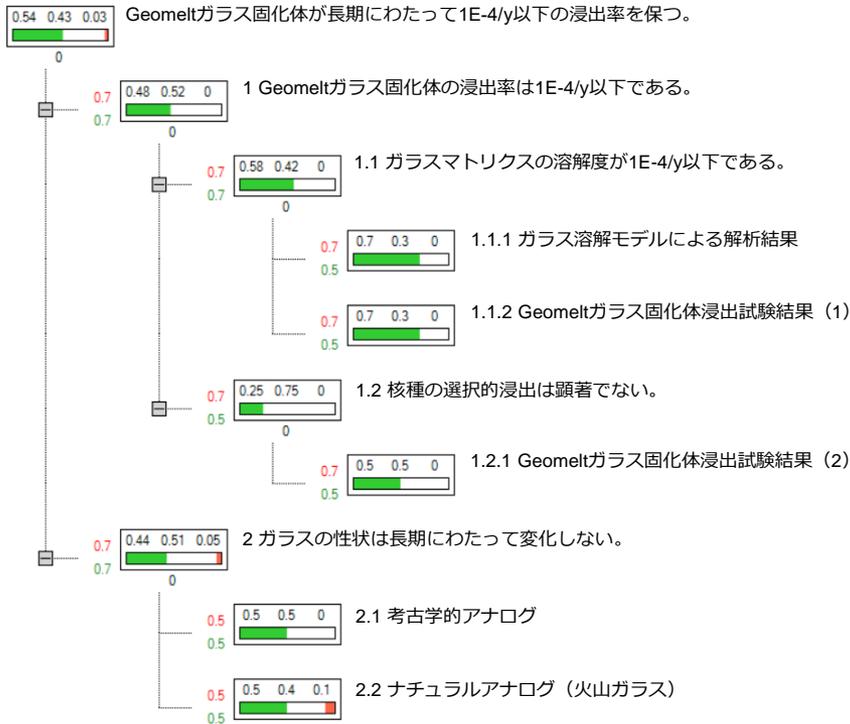
(4)改良後の処分概念の試行

水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

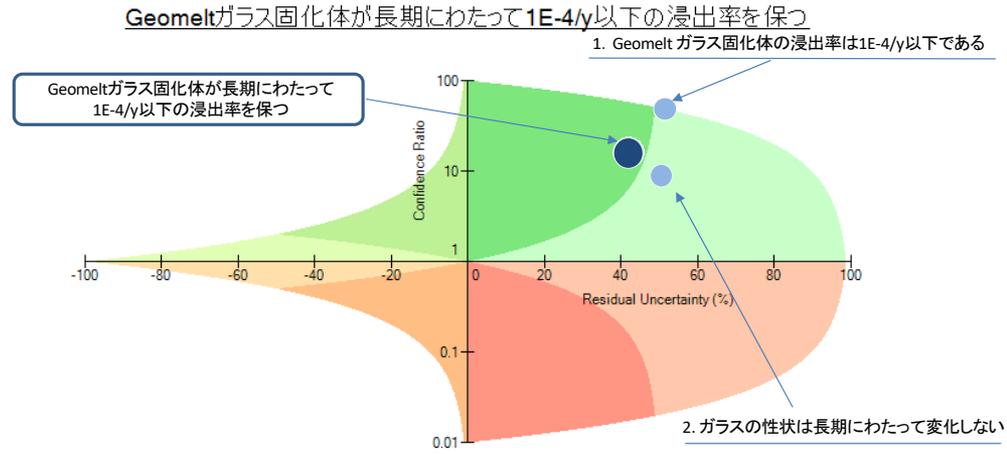
V.改良後の処分概念の成立性及び対策の有効性の評価:リスク低減策の成立性・適用性評価

Geomelt固化による浸出抑制に関する信頼性評価 (1/2)

■ Geomelt固化体の浸出特性については、ESL評価(左図)の結果、次頁に示す種々のエビデンスに基づき長期にわたって $1E-4/y$ 以下の浸出率が保持されることの信頼性が高い(不確実性を考慮しても成立すると言える)と判断した(Ratio plot(右図参照))。



Geomelt固化体の浸出率が長期にわたって $1E-4/y$ 以下であることについてのESL評価



明確に成立

Yesだが不確実性が大きい

Noだが不確実性が大きい

明確に不成立

-No>不確実性

0<Yes-No<不確実性

No-Yes>不確実性

0<No-Yes<不確実性

Ratio plot

(4)改良後の処分概念の試行

水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

V.改良後の処分概念の成立性及び対策の有効性の評価:リスク低減策の成立性・適用性評価

Geomelt固化による浸出抑制に関する信頼性評価 (2/2)

- 浸出試験結果(左図)※がP0798等のホウケイ酸ガラスと同等の浸出抑制機能を示している。
- 過去数十年間の研究開発を通じてガラス溶解についての現象理解が深化しモデルが開発されており、ガラス溶解がコングルメントに生じ核種の選択的浸出が顕著にはならないことや長期にわたって低い浸出率が保持されることが示されている。
- 古代のガラス製品等の考古学的アナログや火山ガラス等のナチュラルアナログ事例が上記の知見を裏付けるエビデンスとなっている。
- ガラスの溶解速度はアルカリ側で増大する傾向があることから、コンクリートを多く含むピット処分施設内でのpH緩衝を目的として廃棄体容器の周囲にベントナイト系の充填材を設置する(pH緩衝性の信頼性についてはスライド142以降の論証モデルによる検討において詳述)。

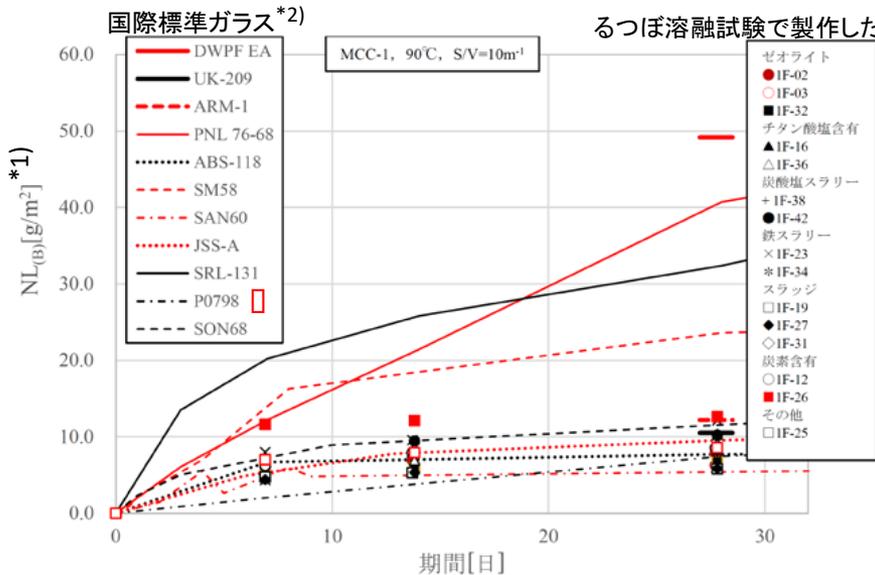
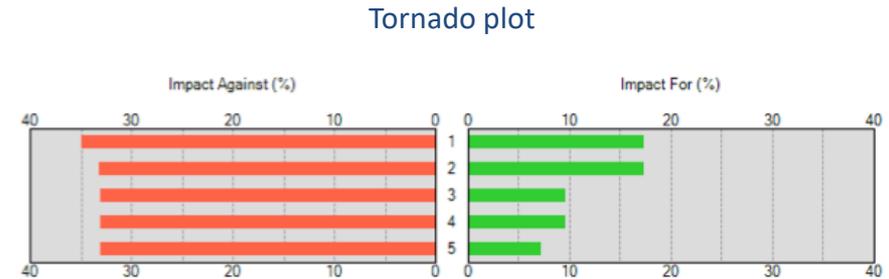


図1 るつぼ溶融試験で製作した固化体の溶出試験結果



- 1: 2.2 ナチュラルアナログ(火山ガラス)
- 2: 2.1 考古学的アナログ
- 3: 1.1.1 ガラス溶解モデルによる解析結果
- 4: 1.1.2 Geomeltガラス固化体浸出試験結果 (1)
- 5: 1.2.1 Geomeltガラス固化体浸出試験結果 (2)

Tornadoプロットの結果は、Geomelt固化体の組成に近い天然あるいは人工の類似事例に関するエビデンスの集積や、Geomelt固化体に特化したガラス溶解モデルのカスタマイズ等が今後信頼性のさらなる向上のために得るべきエビデンスとして優先順位が高いことを示唆している。

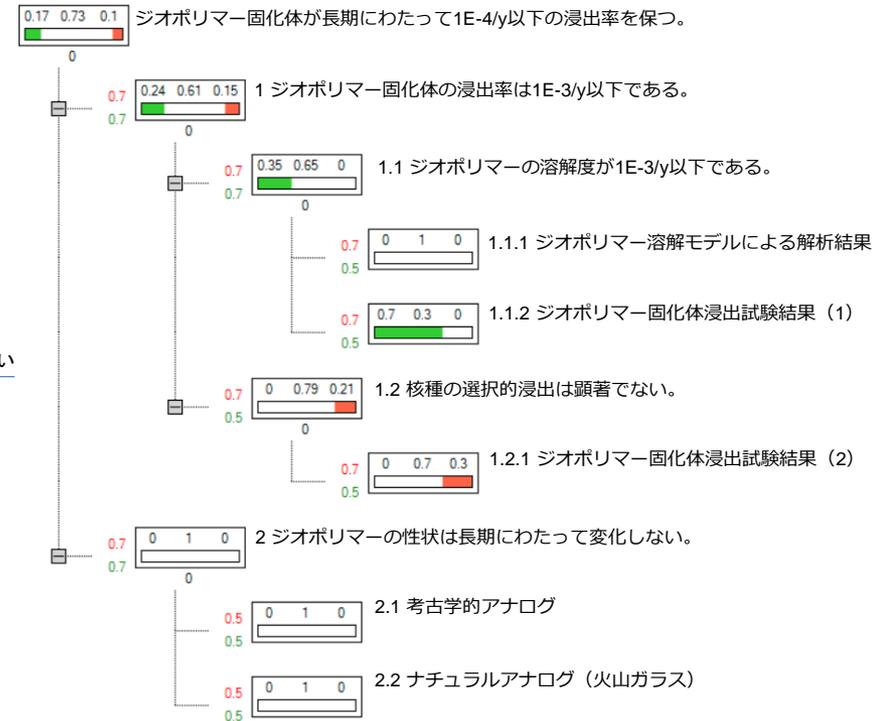
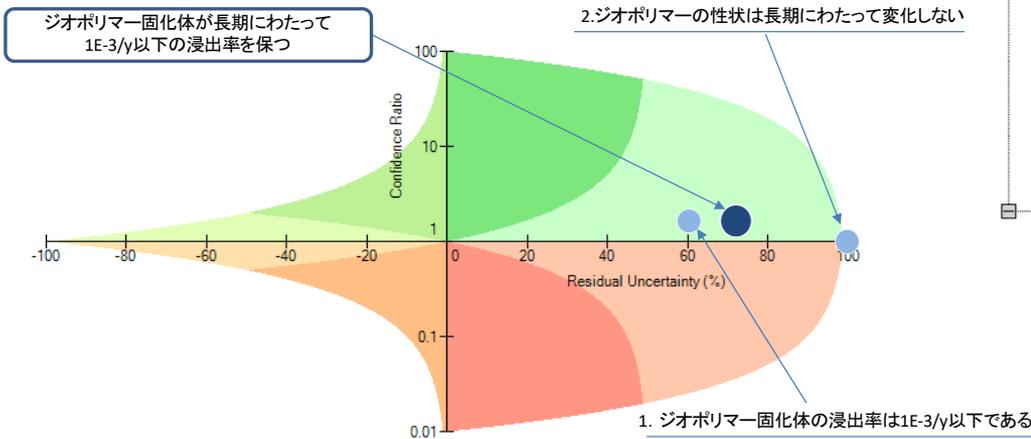
※国際廃炉研究開発機構 (IRID)「平成28年度補正予算廃炉・汚染水対策事業費補助金 固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発」、及び「平成29年度補正予算廃炉・汚染水対策事業費補助金 固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発 (先行的処理手法及び分析手法に関する研究開発)」(処理に係る検討)平成30年度実施分成果報告、令和元年7月、(2019).

(4)改良後の処分概念の試行 水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

V.改良後の処分概念の成立性及び対策の有効性の評価:リスク低減策の成立性・適用性評価

ジオポリマー固化による浸出抑制に関する信頼性評価 (1/2)

■ ジオポリマーの長期的な浸出速度について、溶出試験結果等から $1E-3/y$ を目安としてESLによる信頼性評価を行った(右図)。Ratio plot(下図)はこの命題を支持するエビデンスが優勢であるが、大きな不確実性が残されており確言できないものであることを示している(本試行では基本シナリオ: $1E-3/y$ 、変動シナリオ:瞬時放出と想定)。次頁に参考実施事例を掲載。



明確に成立

Yesだが不確実性が大きい

Noだが不確実性が大きい

明確に不成立

Yes-No > 不確実性

0 < Yes-No < 不確実性

No-Yes > 不確実性

0 < No-Yes < 不確実性

(4)改良後の処分概念の試行

水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

V.改良後の処分概念の成立性及び対策の有効性の評価:リスク低減策の成立性・適用性評価

ジオポリマー固化による浸出抑制に関する信頼性評価 (2/2)

参考実施例

- 非平衡溶出試験結果(図1)※における4週間後のSi溶出量は表面から0.5 mm以内で初期量の5%以下であり、1000年間の溶出が表面から300 mm程度であることを意味する(溶出速度の大きい初期の一週間も含んでいるため過大評価になっている可能性が高い)。
- 同試験においてジオポリマーの溶解挙動はコングルメントに近いとされているが、マトリクスに入らないNaの速い溶出が生じていること、マトリクス中に間隙が分布しており(図2)※その程度によって浸出速度に影響が生じる傾向が指摘されている。
- 新たなエビデンスによる信頼性向上についての感度解析結果(Tornado plot(右下図))は、今後、考古学的(インダストリアル)アナログ等の情報が集積されるとともに、長期の浸出試験による現象理解の深化が重要であることを示しており、今後これらの知見が得られることによって上記の基本シナリオ及び変動シナリオにおける浸出特性の想定は変化し得るものと考えられる。

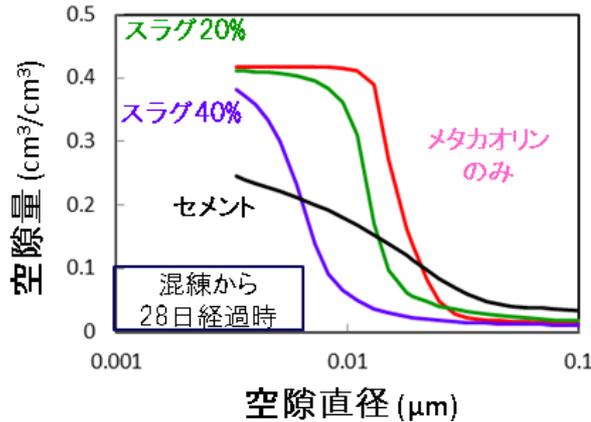


図2 混合比と空隙直径の関係

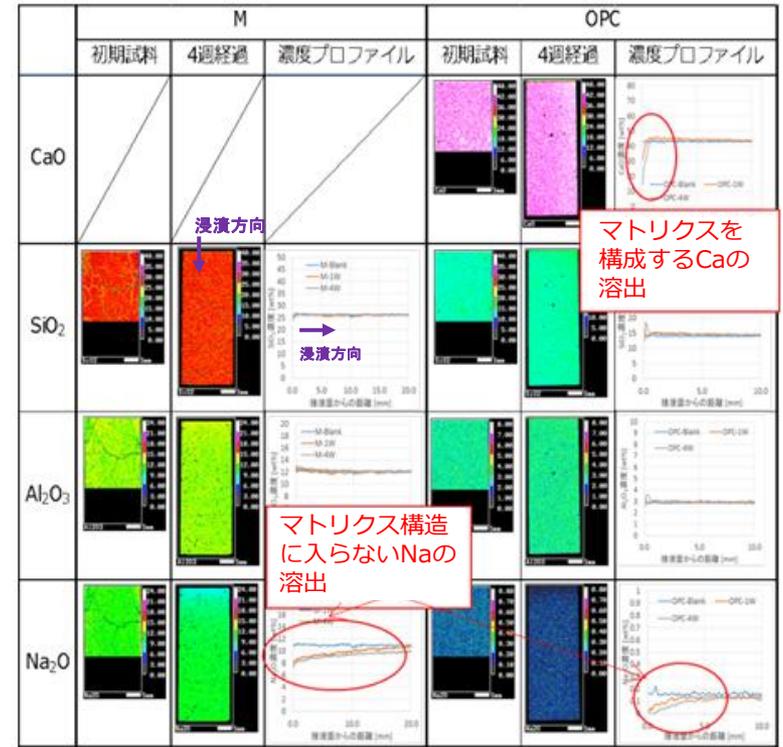
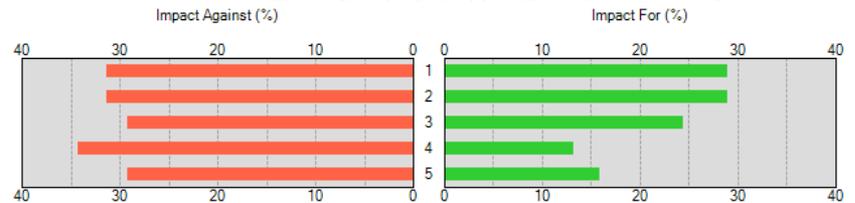


図1 溶出試験試料断面の元素組成分布



- 1: 2.1 考古学的アナログ
- 2: 2.2 ナチュラルアナログ(火山ガラス)
- 3: 1.1.2 ジオポリマー固化体浸出試験結果(1)
- 4: 1.2.1 ジオポリマー固化体浸出試験結果(2)
- 5: 1.1.1 ジオポリマー溶解モデルによる解析結果

※国際廃炉研究開発機構 (IRID)、「平成28年度補正予算廃炉・汚染水対策事業費補助金 固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発」、及び「平成29年度補正予算廃炉・汚染水対策事業費補助金 固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発 (先行的処理手法及び分析手法に関する研究開発)」(処理に係る検討)平成30年度実施分成果報告、令和元年7月、(2019)。

(4)改良後の処分概念の試行

水処理二次廃棄物(KURION)ピット処分

V.改良後の処分概念の成立性及び対策の有効性の評価:リスク低減効果の予備的安全評価

有機物影響に対する改良型ピット処分オプション②のリスク低減効果

希釈水量1E8 m³/y

影響の大きさ 確からしさ	<10 μSv/y	10~300 μSv/y	<0.3~1 mSv/y	<1~20 mSv/y	>20 mSv/y
最も可能性が高い	改良オプション②	既存のオプション 地下水シナリオ ジオポリマー固化体による浸出抑制効果			
科学的に合理的な範囲	改良オプション②	有機物シナリオ 仮に有機物が底部ベントナイトを透過した場合でもCs-137は速やかに脱着して粘土鉱物等によって固定化される。また、他の核種については有機物影響が顕在化してもインベントリの点でC-14による最大被ばく線量を上回るものとはならない			
人為事象に関して保守的に想定すべき範囲			改良オプション② ブレンドイングによるCs-137濃度低減効果		既存のオプション 人間接近シナリオ

許容される領域
 リスク低減策の検討が必要な領域(ALARP領域)
 リスク低減策の実施が必要な領域

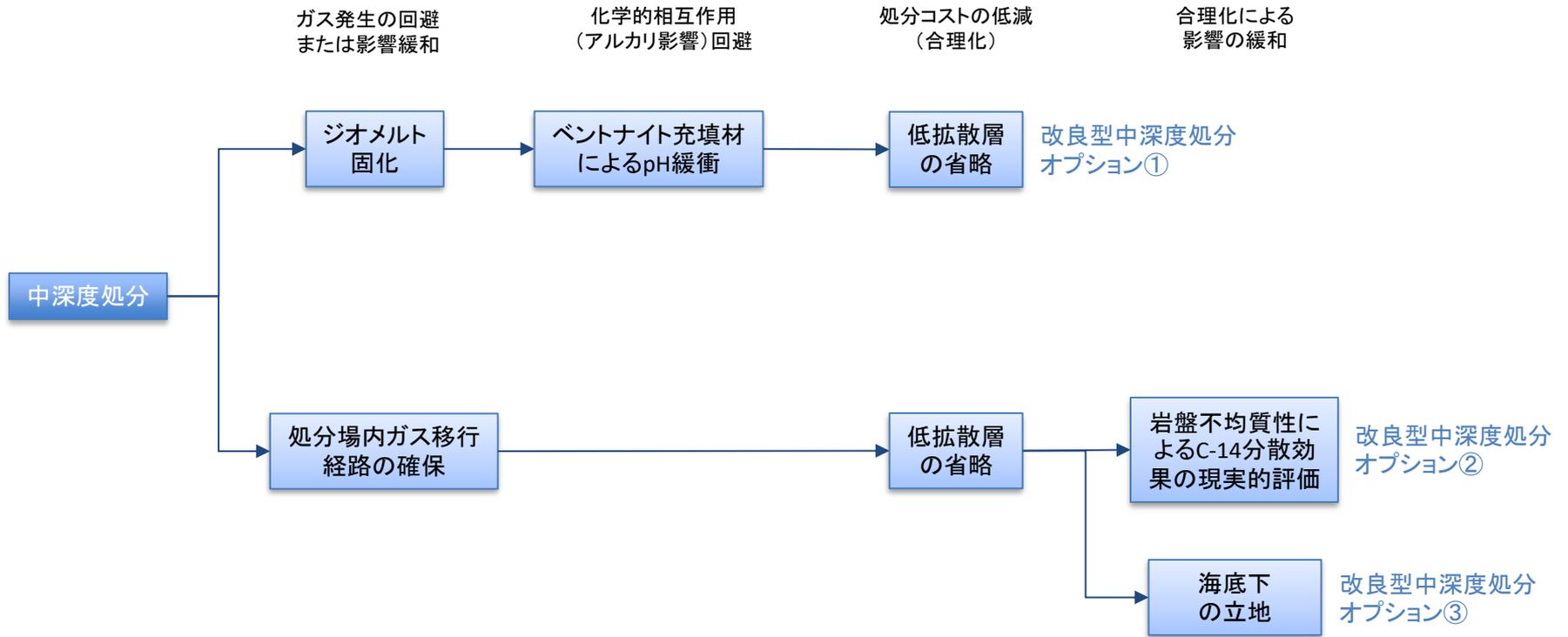
(5)改良後の処分概念の試行
水処理二次廃棄物(KURION)中深度処分

(5)改良後の処分概念の試行

水処理二次廃棄物(KURION)中深度処分

IV. 処分概念の改良案の提示

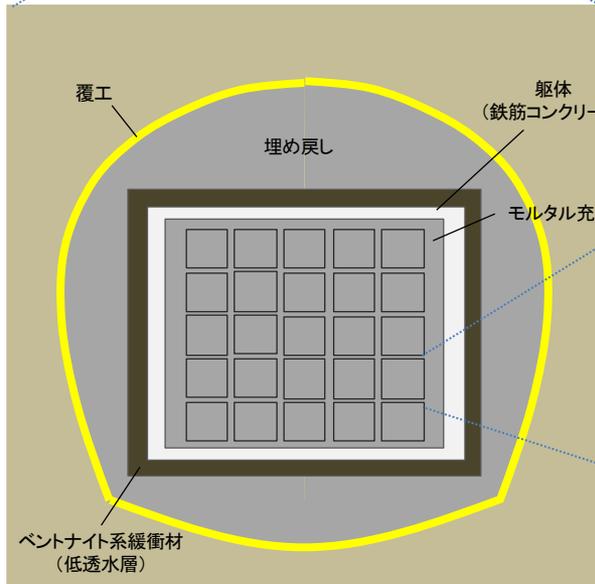
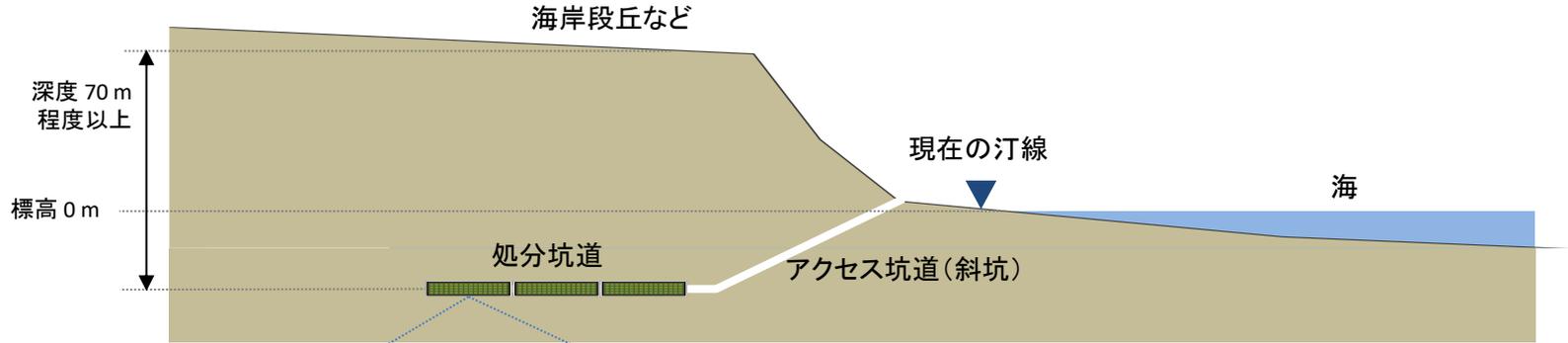
合理的処分概念の要件に即したオプションの改良: **中深度処分相当水処理二次廃棄物_中深度処分**



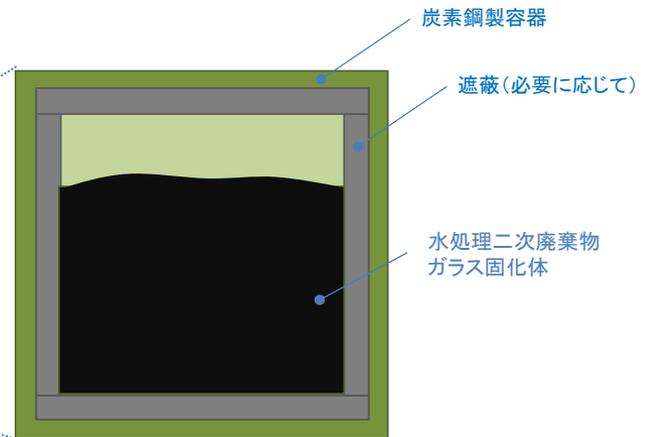
初期数千年間のC-14の影響を希釈により緩和

(5)水処理二次廃棄物(KURION)中深度処分 IV. 処分概念の改良案の提示

改良型中深度処分オプション①ガラス固化(低拡散層省略)



処分坑道断面



廃棄体

(5)水処理二次廃棄物(KURION)中深度処分

IV. 処分概念の改良案の提示

改良型中深度処分オプション①ガラス固化(低拡散層省略)

■ ガラス固化(Geomelt)に期待する機能

- 水処理二次廃棄物中に含まれるC-14インベントリについては、実測値のない状況での保守的な推定値であるため過大評価となっている可能性がある。このため、今後の分析・調査によって実際のインベントリが現在の推定値よりも1~2桁小さいことが示されれば、従来の中深度処分概念に含まれている低拡散層の機能によらず最大被ばく線量は目安値を下回ることとなる。
- しかし、実際の廃棄物中のC-14分析が困難である等の理由で現状の保守的な推定値を想定せざるを得ない場合は、廃棄物をガラス固化し、熔融時に揮発するC-14をオフガス系のフィルターやスクラビングにより捕集することで現実的なインベントリを把握することが可能となる。
- もし顕著な量のC-14がオフガス系で捕集された場合には廃フィルター等を二次廃棄物として別途処分する必要がある。また、もしオフガス系に顕著な量のC-14が移行しなかった場合はそもそも水処理二次廃棄物中のC-14インベントリが(予想通り)小さかったか、もしくはNUMO-SC※(付属書2-3、P.5)に記述されているように“これらの元素は多様な化合物として存在しており、その中には高温でもガラス側に残存するものがある可能性が否定できない”という保守的な仮定のもとに現状のインベントリに対してガラス固化体の溶出制限機能による安全確保が期待できるため、低拡散層を省略することができる。
- 水処理二次廃棄物をガラス固化することにより、水の放射線分解による水素ガス発生抑制及び界面活性剤として含まれている可能性のある有機物の分解が期待できる(水素ガス及び有機物への対策は不要となる)。

■ KURIONガラス固化体とコンクリートの化学的両立性の確保

- ガラス固化体は高pHにおいて溶解速度が顕著に上昇するため、コンクリート(構造躯体や充填モルタル等)によって生ずるアルカリ影響を回避する必要がある。
- そこで、KURIONガラス固化体の容器周辺をベントナイト系材料(ペレット)で充填することによってアルカリプルームの影響を抑制する(ベントナイト系充填材による化学的緩衝効果についての反応輸送解析の結果は前出のもの(スライド123参照)と同様のため省略)。

■ 地形を活かした処分場深度の確保

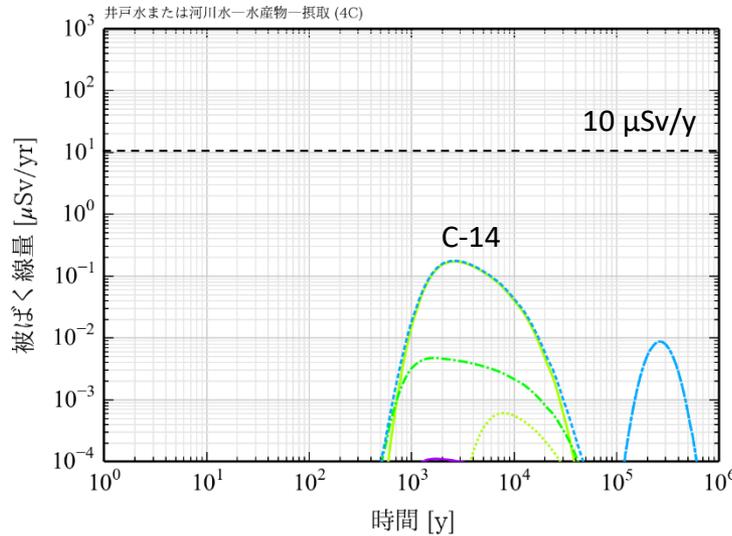
- 段丘等の含まれるサイトの場合には崖下からアクセス坑道を掘削することにより効率的に必要な処分場深度(>70 m)を確保することが可能と考えられる。

(5)水処理二次廃棄物(KURION)中深度処分

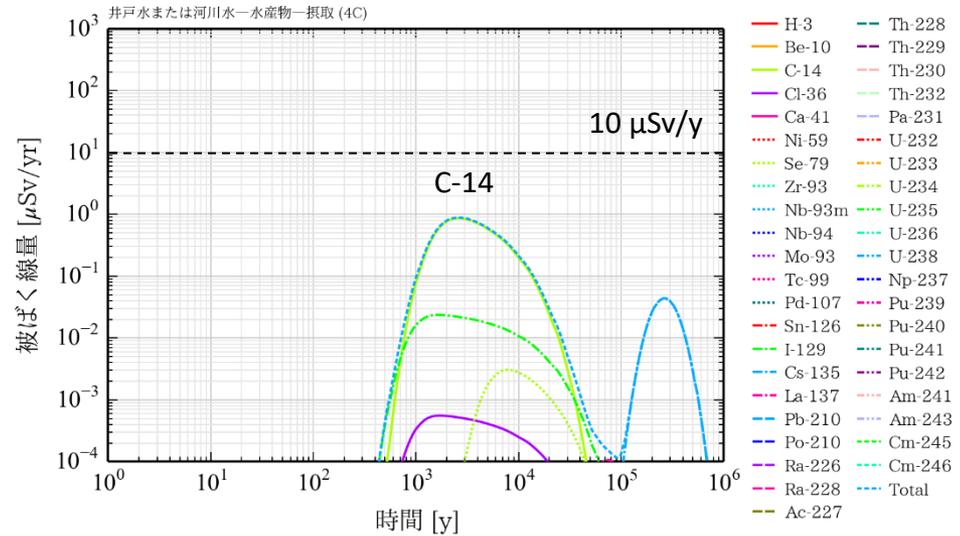
IV. 処分概念の改良案の提示

改良型中深度処分オプション①ガラス固化(低拡散層省略)

河川水-水産物摂取
(希釈水量現実的ケース)



河川水-水産物摂取
(希釈水量保守的ケース)



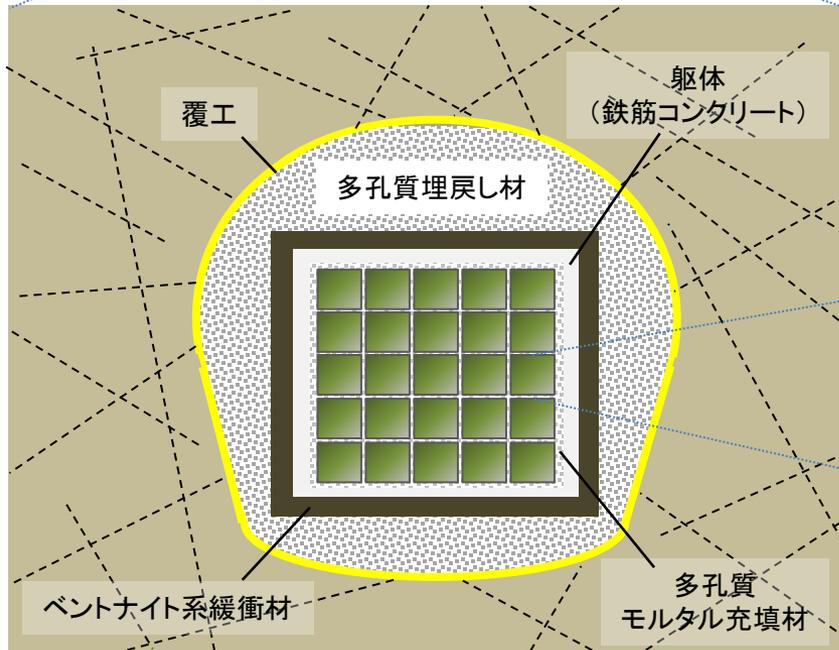
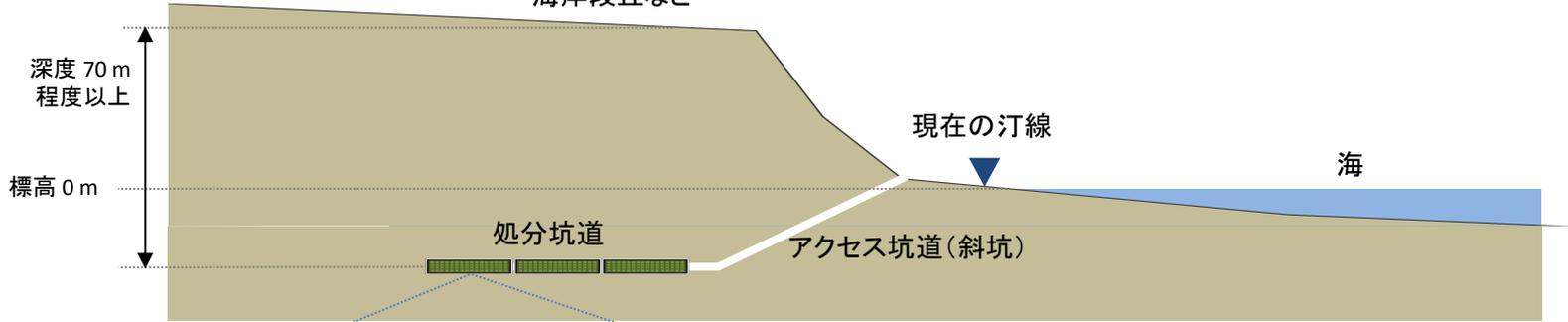
- KURIONガラス固化体に対して低拡散層を省略した中深度処分概念を適用した場合、先行事業における既往の検討※のレファレンスケースの設定に対して、希釈水量について現実的ケース(1E+8 m³/y)と保守的ケース(2E+7 m³/y)のいずれのケースにおいても、最大被ばく線量は1 μSv/yを下回る。

(5)水処理二次廃棄物(KURION)中深度処分

IV. 処分概念の改良案の提示

改良型中深度処分オプション②不均質岩盤の現実的評価(低拡散層省略)

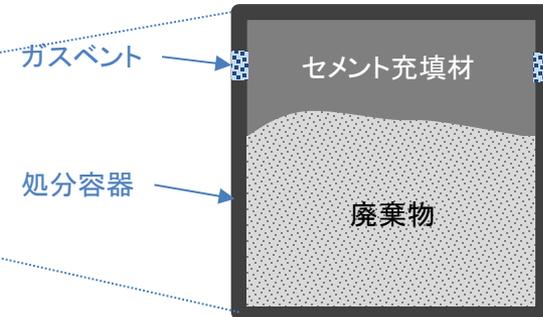
海岸段丘など



----- 岩盤割れ目

廃棄体の合理化

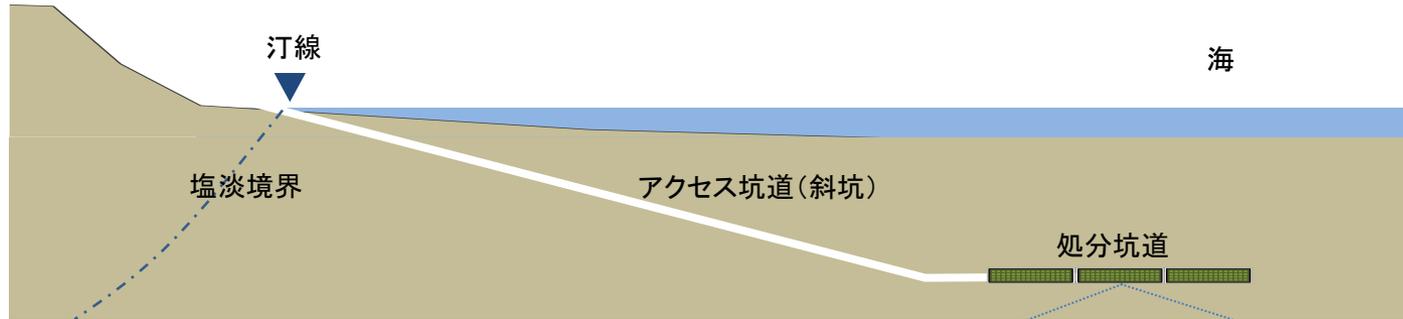
- 容器の水密性は担保しない(必要に応じてガスベントを設置)。
- 輸送・保管上必要最低限の処理(セメント固化あるいは容器内へのセメント充填による安定化等)を行い、核種閉じ込め性能は期待しない(核種溶出は瞬時に生ずると仮定)。



(5)水処理二次廃棄物(KURION)中深度処分

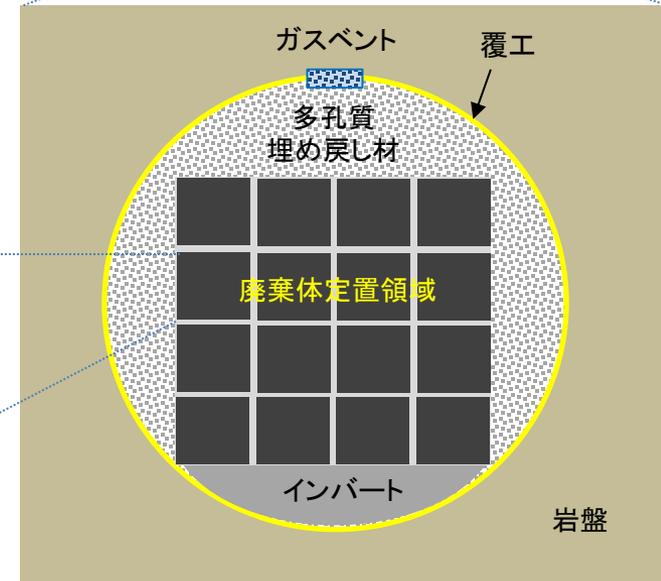
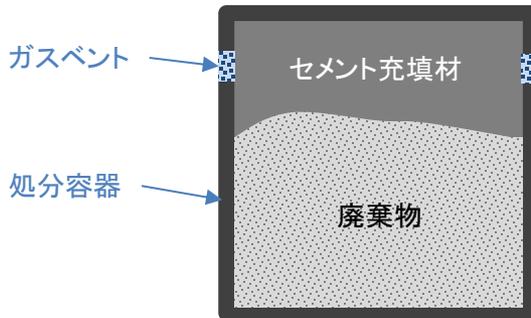
IV. 処分概念の改良案の提示

改良型中深度処分オプション③海底下の好ましい水理条件を利用した中深度処分



廃棄体の合理化

- 容器の水密性は担保しない(必要に応じてガスベントを設置)。
- 輸送・保管上必要最低限の処理(セメント固化あるいは容器内へのセメント充填による安定化等)を行い、核種閉じ込め性能は期待しない(核種溶出は瞬時に生ずると仮定)。



処分坑道断面

(6) 処分概念を構築するための要件案及びその要件案充足に必要な情報・知識

体系的な処分概念構築手法を効率的に適用するためのツールの開発

KURIONを対象とした改良型ピット処分概念のリスクマネジメントに関する論証モデルの構築

背景および目的

■ 背景

- 1F事故廃棄物処分事業の進展のためには、技術的な課題解決に加えて、多様なステークホルダーの合意形成とともに、これを基盤とした社会的なコンセンサスを得ることが必要不可欠である。
- そして、合意形成の中核となるものは、専門家のみならず興味を持つ非専門家もリテラシーに応じて理解し共有することの可能な、「エビデンスに基づく安全性のロジック」である。この意味から、今後の1F事故廃棄物処分事業において信頼性の高いセーフティケースを構築することの重要性は極めて高い。

■ 論証モデル構築の目的

- セーフティケースの論理構造を表現した論証モデルを構築し、様々なプレゼンテーションに含まれる文章表現等のレトリックや読者の解釈による曖昧さ等を避け、根源となるセーフティケースの本体を多くの専門分野及び異なる組織に属する多様な事業関係者が一様に整合的に理解可能とする。
- 既に得られている種々のエビデンス(研究成果や先行事例等)を論拠として対応付けることにより、各論証の充足度やセーフティケースの信頼性の評価を可能とする。
- セーフティケースの論証モデルにおける論証構造中の弱部(十分なエビデンスが存在しない等)を抽出し、それらに対する方策を検討する。

必要性と期待される成果

- 本研究で提案するセーフティケースの論証モデルは、様々なプレゼンテーションに含まれる文章表現等のレトリックや読者の解釈による曖昧さ等を避け、根源となるセーフティケースの本体を多くの専門分野及び異なる組織に属する多様な事業関係者が一様に統合的に理解することを保証するために必要なものである。
- 期待される成果
 - 本研究で期待される主要な成果は論証スキームを用いたセーフティケースの論証モデルである。
 - 論証スキームを用いることにより、セーフティケース構築のプロセスを品質管理することが可能となり、論理構造としての弱部(想定される「批判的質問」に答えるだけのエビデンスが現状では欠けている箇所など)を明確化することができる。
 - 論証における弱部の補強とそのためのエビデンスの拡充により信頼性向上の方策を示すことが可能となる。

(6) 処分概念を構築するための要件案及びその要件案充足に必要な情報・知識

討論モデルによるセーフティケースの構築手法及び適用事例

■ 討論モデルによるセーフティケースの構築手法

- Toulminの論証モデル、論証スキーム

■ 適用事例

- 例) HLW地層処分に関する第2次取りまとめ

- Toulminの論証モデルによると、論証とは異なる意見を持つ他者に対し主張を行い、それを支持する根拠や論拠といった関係性を提示することである。

- 論証の論理展開は主張・入手可能な根拠に応じて分類することができ、それらの論証パターンに応じてどのような論理展開をすべきかが整理(下表の論証スキームのリスト)されており、その各々について定義、前提、主張や批判的質問とその対応(どのような論拠を提示するか)がまとめられている。

セーフティケースに用いる論証スキームの例*



Toulminの論証モデルの概念

- 根拠とは事実のことであり、論拠は事実をどのように捉えたかを示す
- 根拠の捉え方は人によって異なるため、論拠を明示しておく必要がある

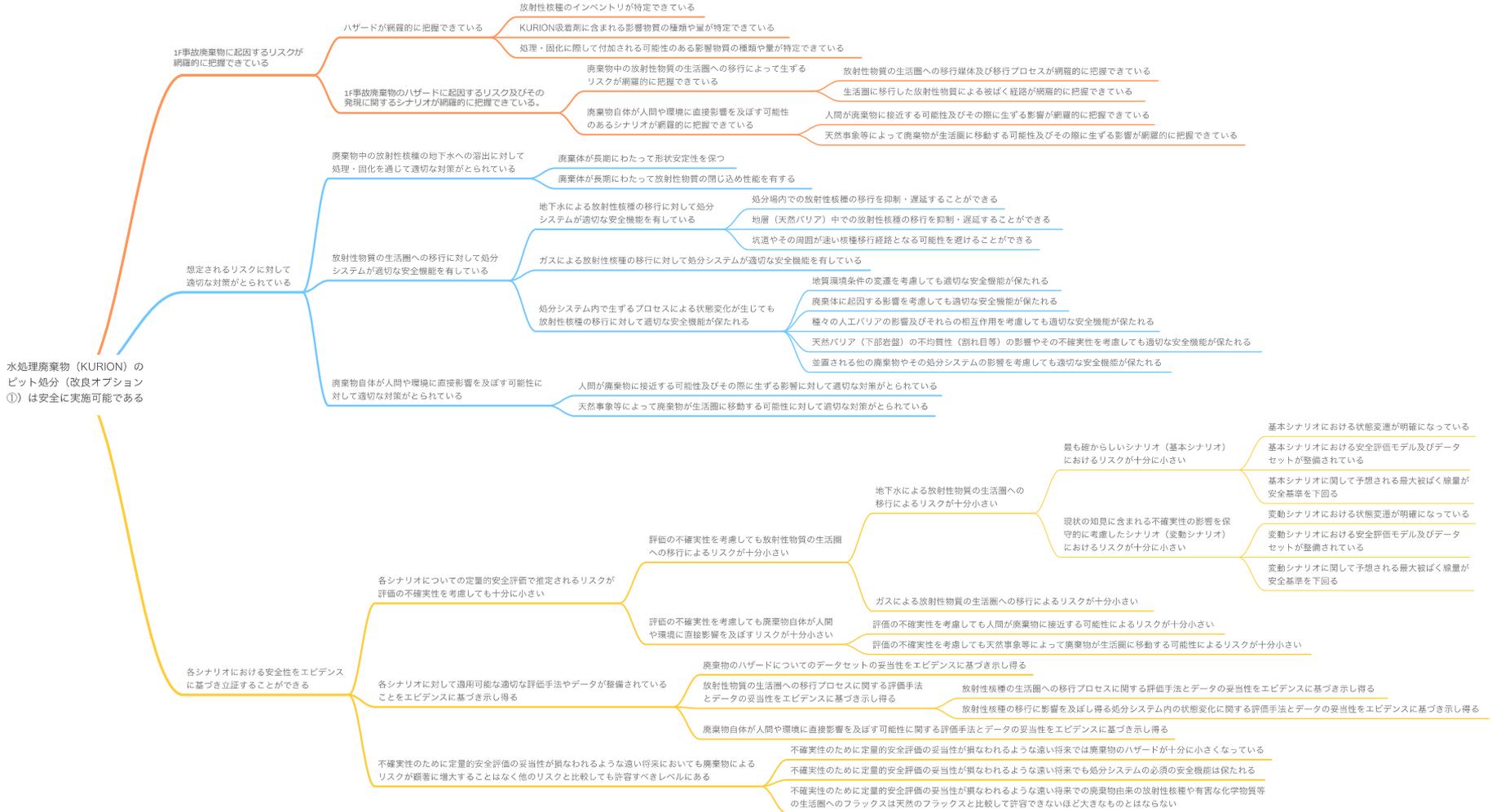
大分類	小分類
原理原則に基づく論証	科学における基本法則(fundamental laws)に基づく論証
	広く受け入れられている考え方(principle)に基づく論証
	除外基準に従う論証
科学的推論に基づく論証	実験データに基づく論証
	基礎的なモデルに基づく論証
	経験的モデルに基づく論証
	類似性に基づく論証
	内挿による論証
	外挿による論証
	専門家の判断による論証
安全論理に基づく論証	独立した情報との比較に基づく論証
	保守性に基づく論証
	完全性に関する論証
	頑健性に関する論証
工学的対策等に基づく論証	不確実性管理に基づく論証
	代替案との比較に基づく論証
	品質管理に基づく論証
	直接確認した事実に基づく論証
社会的規範に基づく論証	共通の理解に基づく論証
	先行事例に基づく論証
	倫理に基づく論証
	経済性に基づく論証
	社会的受容性に基づく論証
	法律等に基づく論証

*大澤英昭、安全性の論理構造を用いた地層処分分野の知識マネジメント手法の構築、日本情報経営学会誌、2010 Vol.31 No2、p.66-78、(2011)。

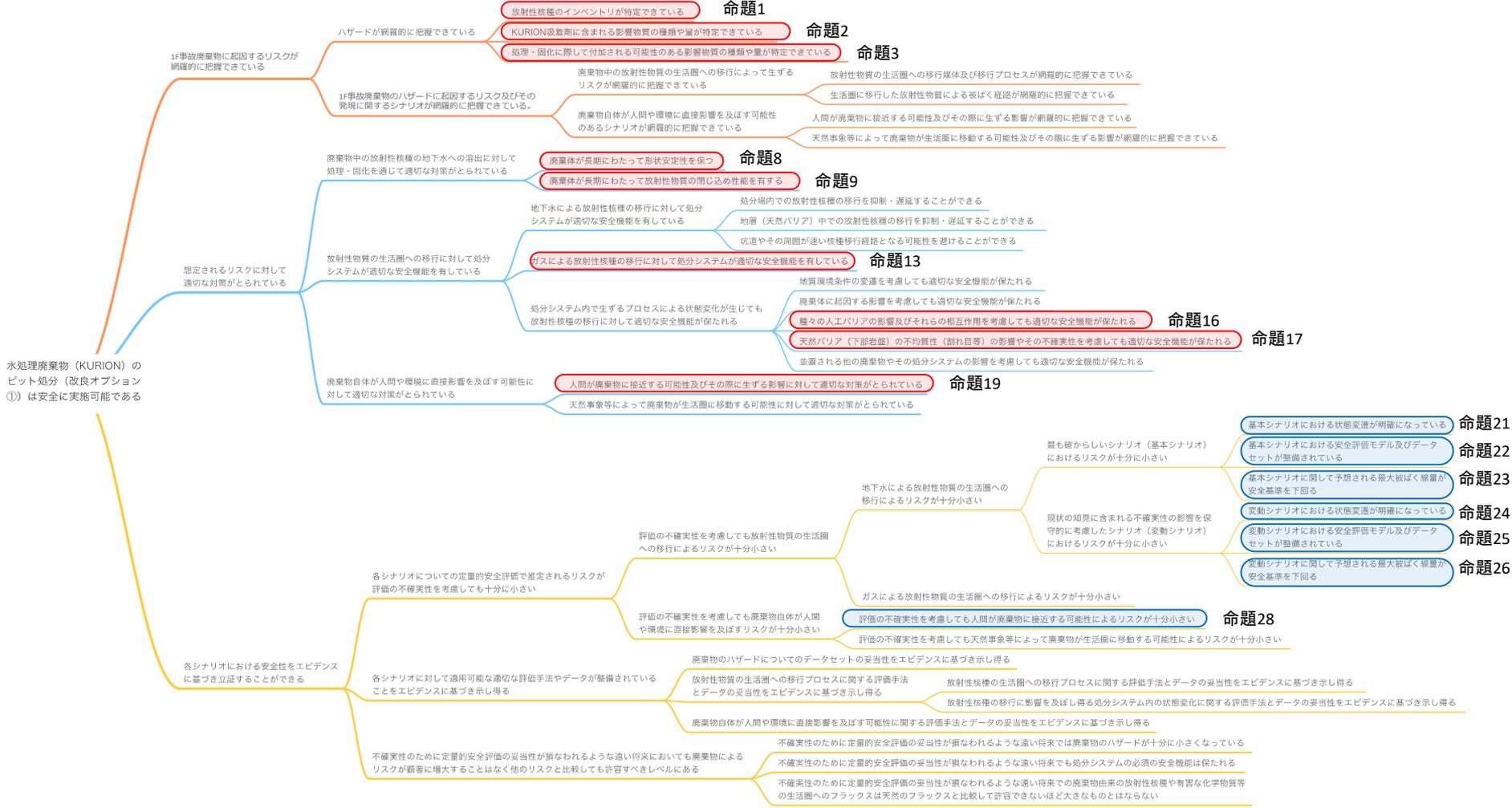
論証モデルの対象とした命題

- 対象とする命題:「水処理廃棄物(KURION)の改良型ピット処分オプション①は安全に実施が可能である。」
- ゴール
 - 水処理廃棄物(KURION)を対象とした改良型ピット処分オプション①が安全に実施可能であることを示すための論証モデル(論証構造)を作成する。
 - 上記の論証モデルの弱部を抽出し、課題として整理する。
- 実施手順
 - 上記の命題を複数の細かい命題に分割(→スライド146)。
 - 分割した細かい命題のうち、既往のピット処分概念との差異、特にKURIONのガラス固化体を使用する点や、処分場の地質環境に不確実性が大きい点等に着目した場合に特に検討が必要と考えられるものを「優先的に検討すべき論証項目」として選定し(→スライド147、148)、それらについて論証モデルを作成することにより、論証の弱部となるような部分を抽出する。
 - 上記の弱部を課題として整理する。
- 本資料の説明内容
 - 実際に作成した論証モデルのうち、数例を示して得られた課題等を説明する。

分割した命題



分割した命題: 優先して検討すべき各命題についてはスライド148~179に記載

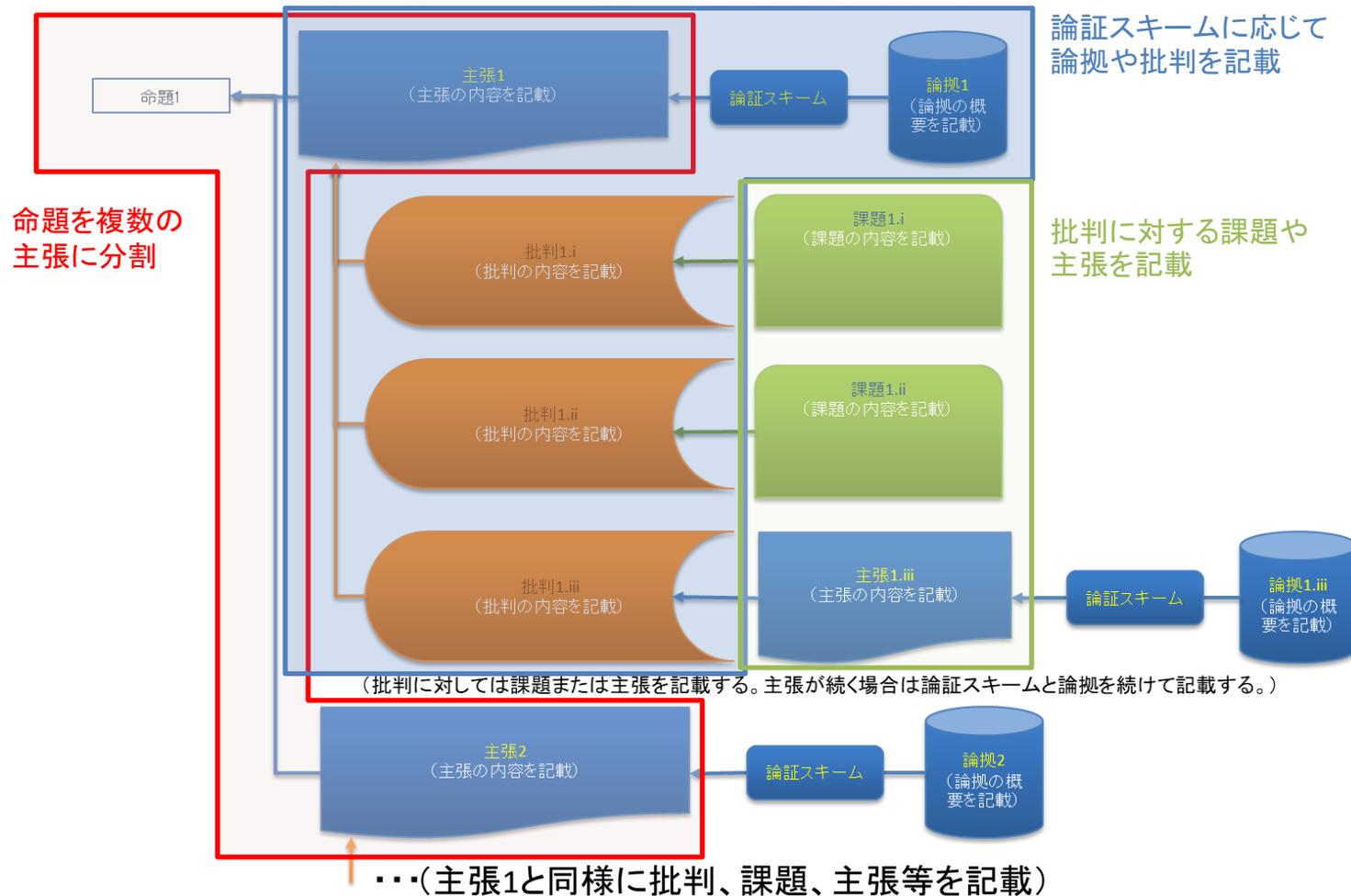


優先的に検討すべき論証項目

命題	
1	放射性核種のインベントリが特定できている
2	KURION吸着剤に含まれる影響物質の種類や量が特定できている
3	処理・固化に際して付加される可能性のある影響物質の種類や量が特定できている
8	廃棄体が長期にわたって形状安定性を保つ
9	廃棄体が長期にわたって放射性物質の閉じ込め性能を有する
13	ガスによる放射性核種の移行に対して処分システムが適切な安全機能を有している
16	種々の人工バリアの影響及びそれらの相互作用を考慮しても適切な安全機能が保たれる
17	天然バリア(下部岩盤)の不均質性(割れ目等)の影響やその不確実性を考慮しても適切な安全機能が保たれる
19	人間が廃棄物に接近する可能性及びその際に生ずる影響に対して適切な対策がとられている
21	基本シナリオにおける状態変遷が明確になっている
22	基本シナリオにおける安全評価モデル及びデータセットが整備されている
23	基本シナリオに関して予想される最大被ばく線量が安全基準を下回る
24	変動シナリオにおける状態変遷が明確になっている
25	変動シナリオにおける安全評価モデル及びデータセットが整備されている
26	変動シナリオに関して予想される最大被ばく線量が安全基準を下回る
28	評価の不確実性を考慮しても人間が廃棄物に接近する可能性によるリスクが十分小さい

論証構造のテンプレート

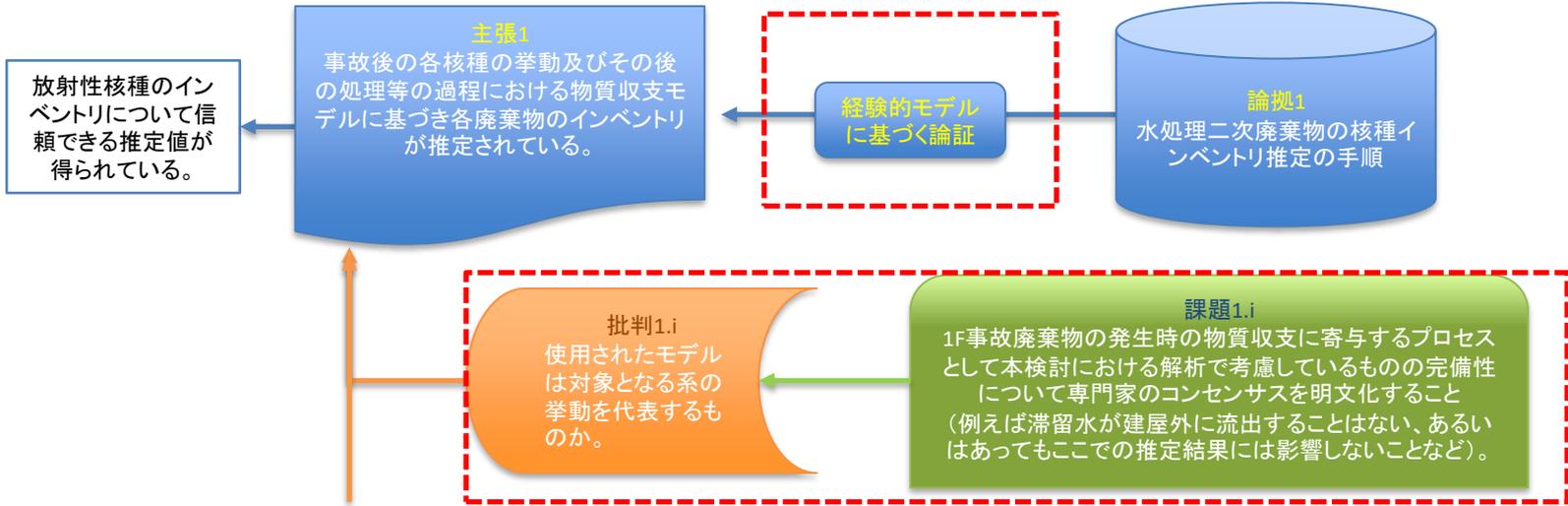
- 命題の論証構造の視認性向上を目的とし、下記のような論証構造のテンプレートを作成
- 基本的には論証スキームに応じて主張に対する論拠、批判を記載し、それに対応する課題や主張を追記していく。無暗に細かく分割するのではなく、課題として記載できる内容がまとまった時点で一連の記載を終了する。



(6) 処分概念を構築するための要件案及びその要件案充足に必要な情報・知識

論証モデルの例：命題1「放射性核種のインベントリが特定できている」その①

論証スキーム：論拠として用いる文献等で用いられている手法に応じ、適切なものを選択

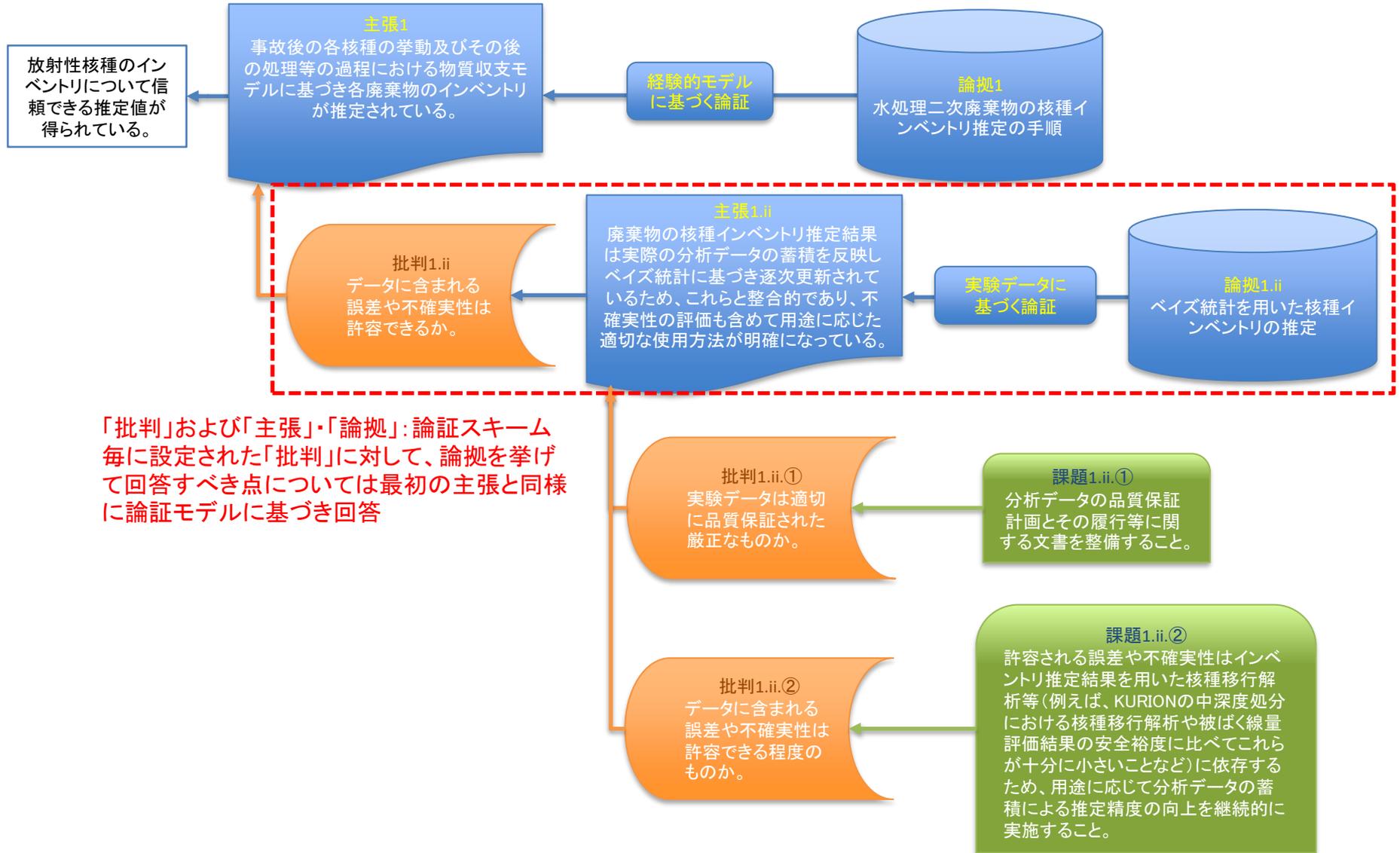


⋮
 「批判」および「課題」：論証スキーム毎に設定された「批判」に対して1つ1つ回答し、現時点では課題があると考えられる事項について記載

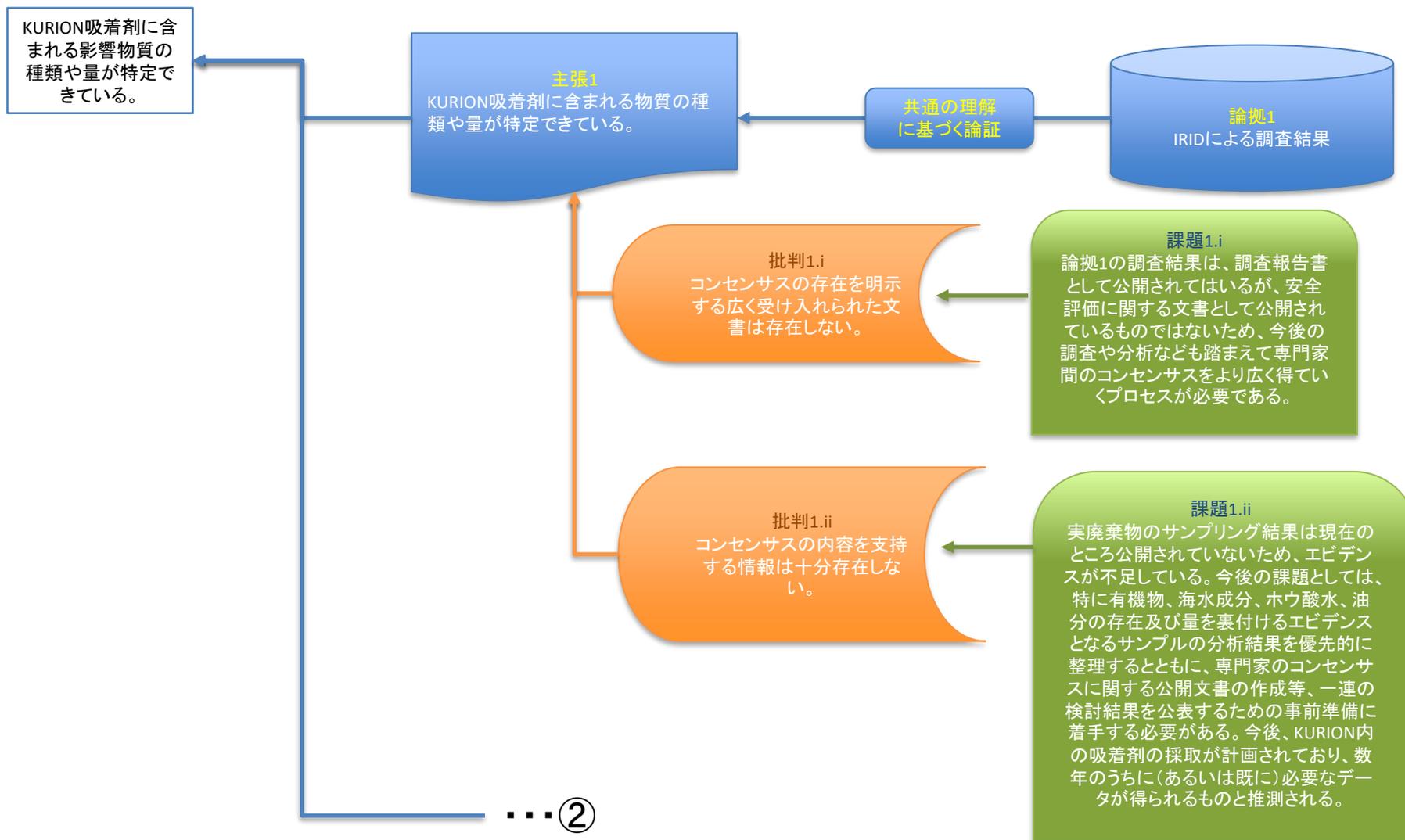
②

(6) 処分概念を構築するための要件案及びその要件案充足に必要な情報・知識

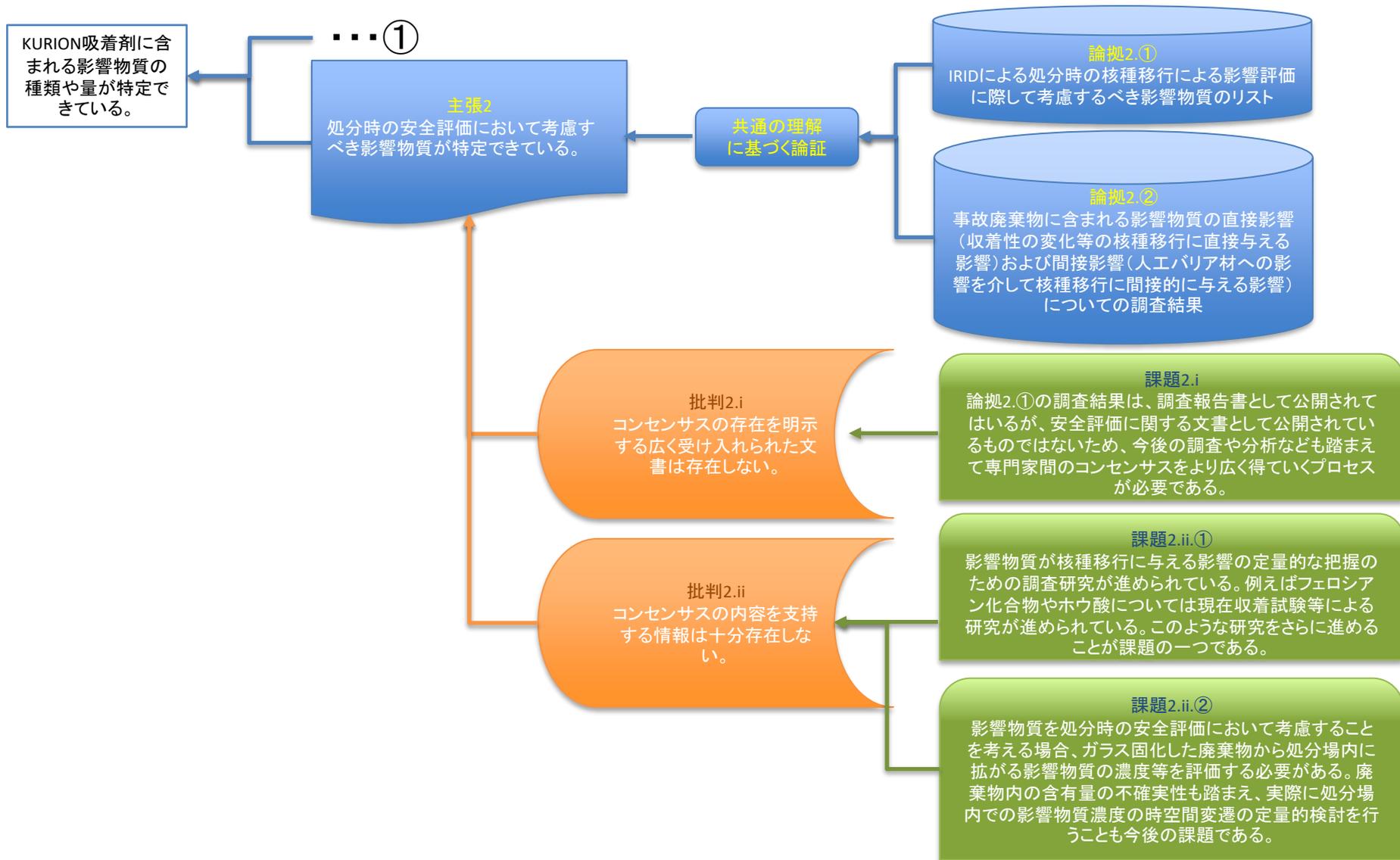
論証モデルの例: 命題1「放射性核種のインベントリが特定できている。」その②



論証モデルの例：命題2「KURION吸着剤に含まれる影響物質の種類や量が特定できている」その①

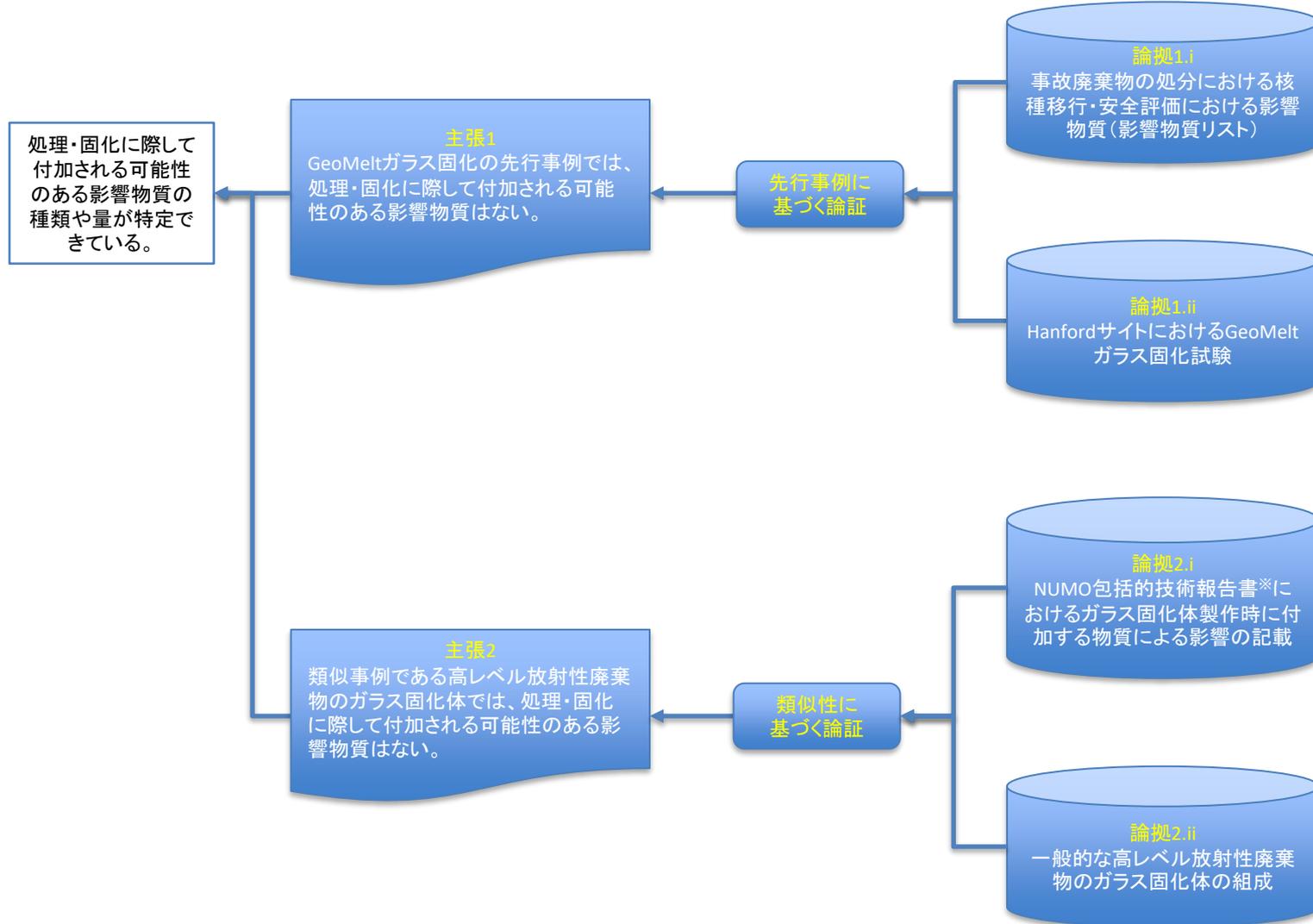


論証モデルの例：命題2「KURION吸着剤に含まれる影響物質の種類や量が特定できている」その②



(6) 処分概念を構築するための要件案及びその要件案充足に必要な情報・知識

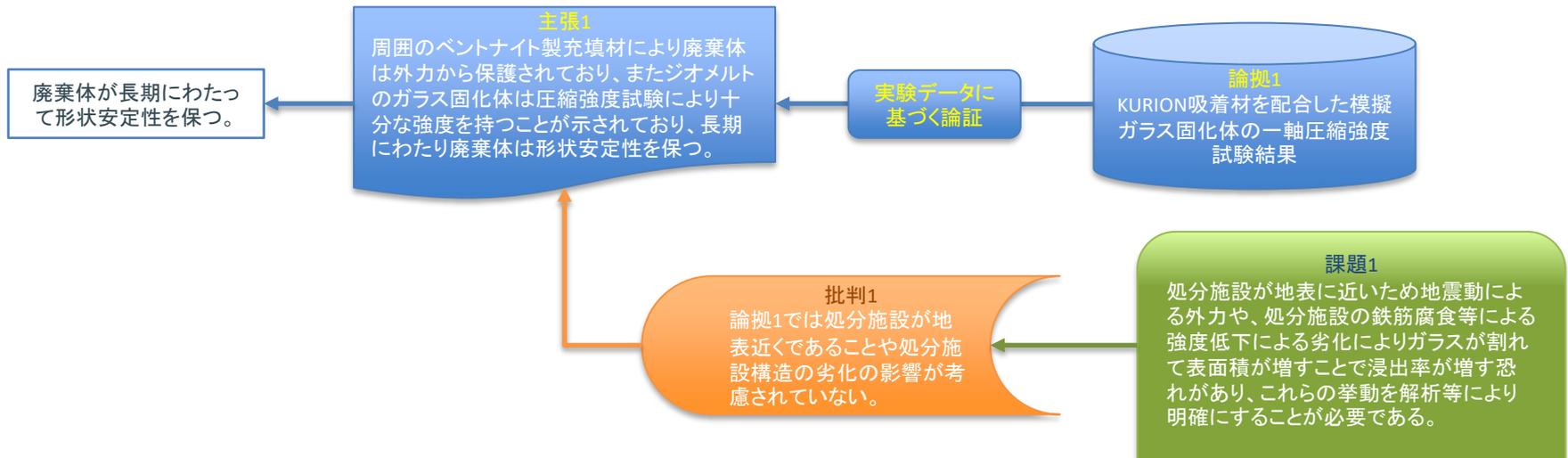
論証モデルの例: 命題3「処理・固化に際して付加される可能性のある影響物質の種類や量が特定できている」



※原子力発電環境整備機構 (NUMO)、包括的技術報告書: わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—、2021年2月

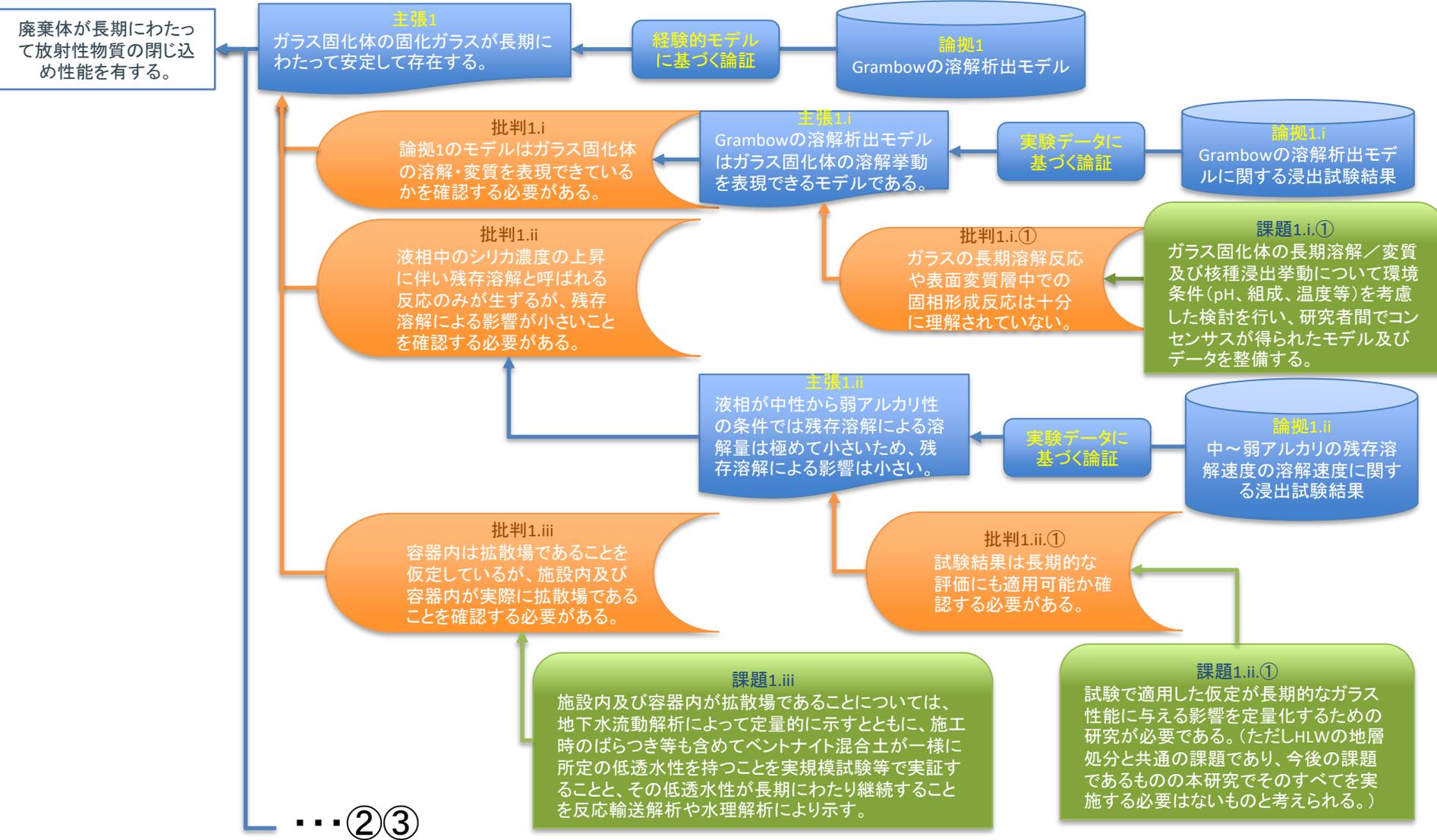
(6) 処分概念を構築するための要件案及びその要件案充足に必要な情報・知識

論証モデルの例: 命題8「廃棄体が長期にわたって形状安定性を保つ」

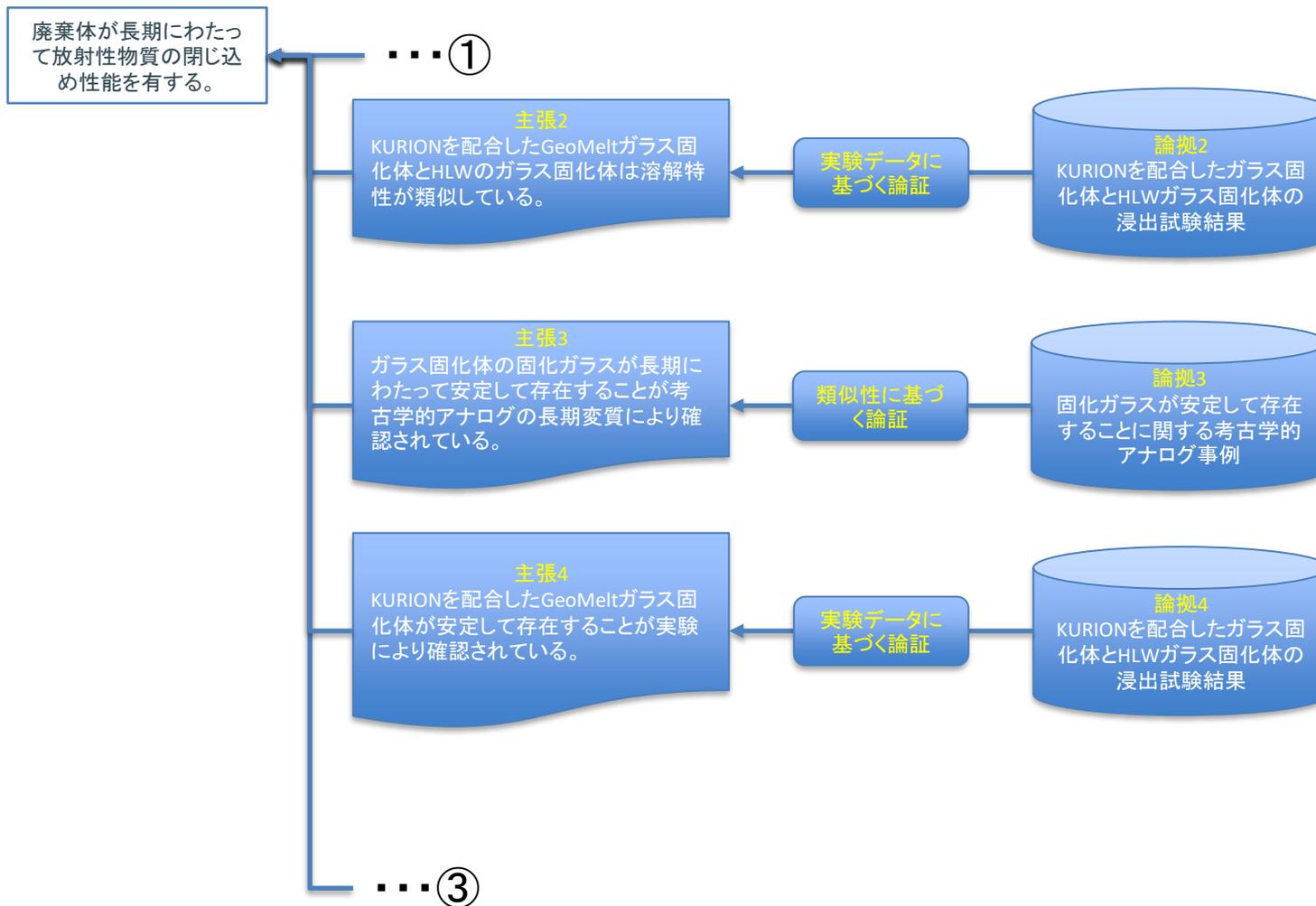


(6) 処分概念を構築するための要件案及びその要件案充足に必要な情報・知識

論証モデルの例: 命題9「廃棄体が長期にわたって放射性物質の閉じ込め性能を有する」その①

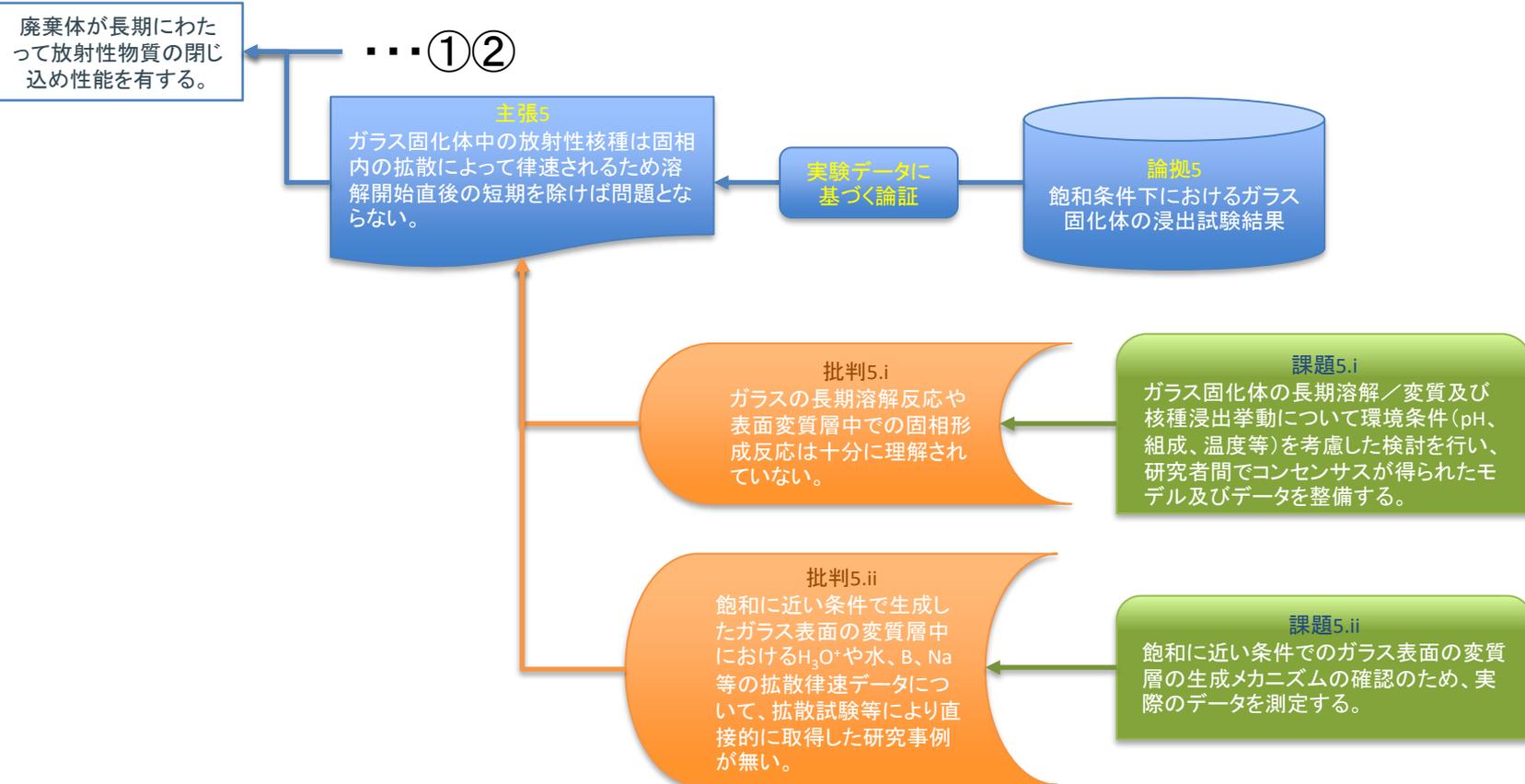


論証モデルの例: 命題9「廃棄体が長期にわたって放射性物質の閉じ込め性能を有する」その②

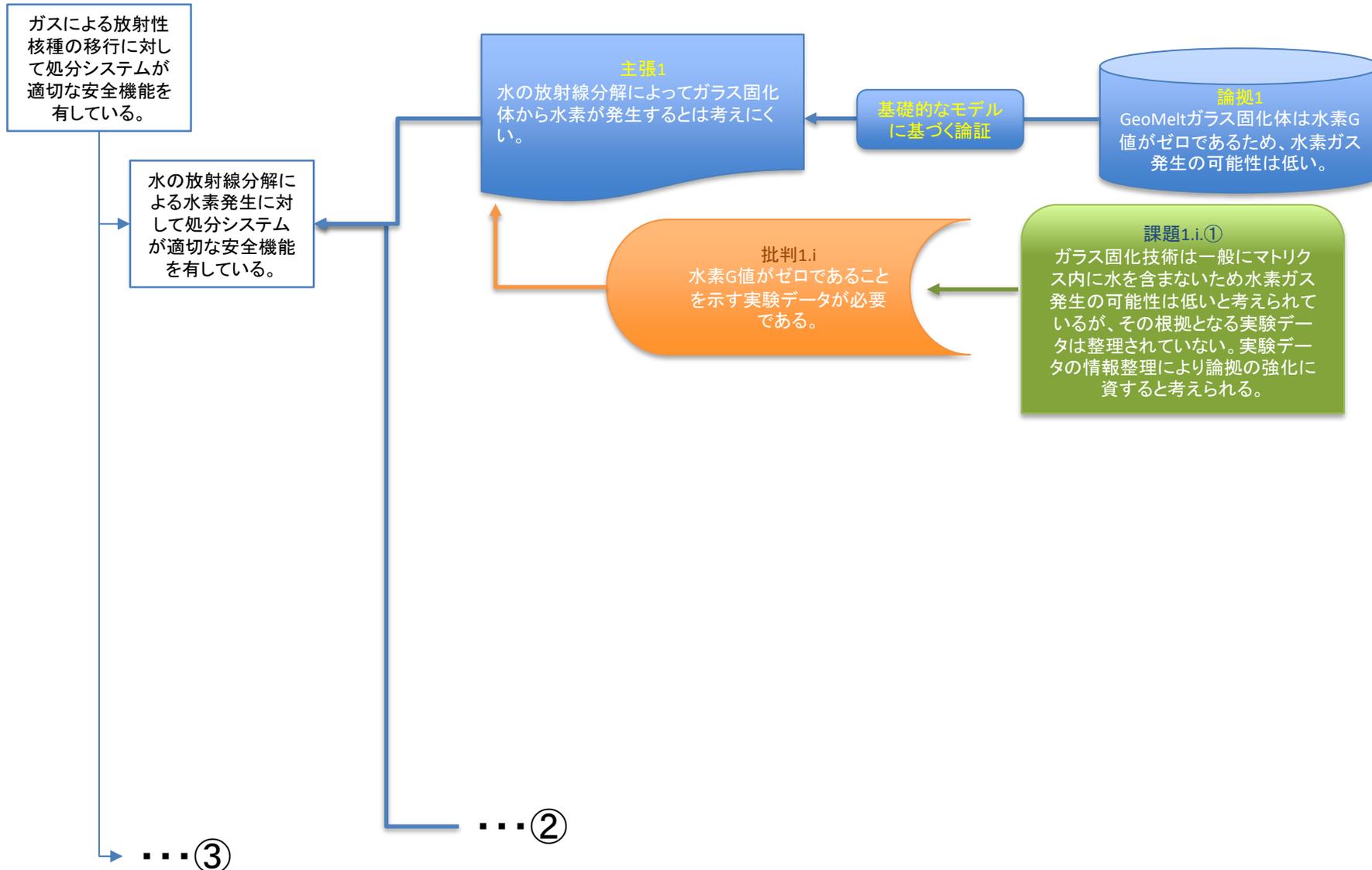


(6) 処分概念を構築するための要件案及びその要件案充足に必要な情報・知識

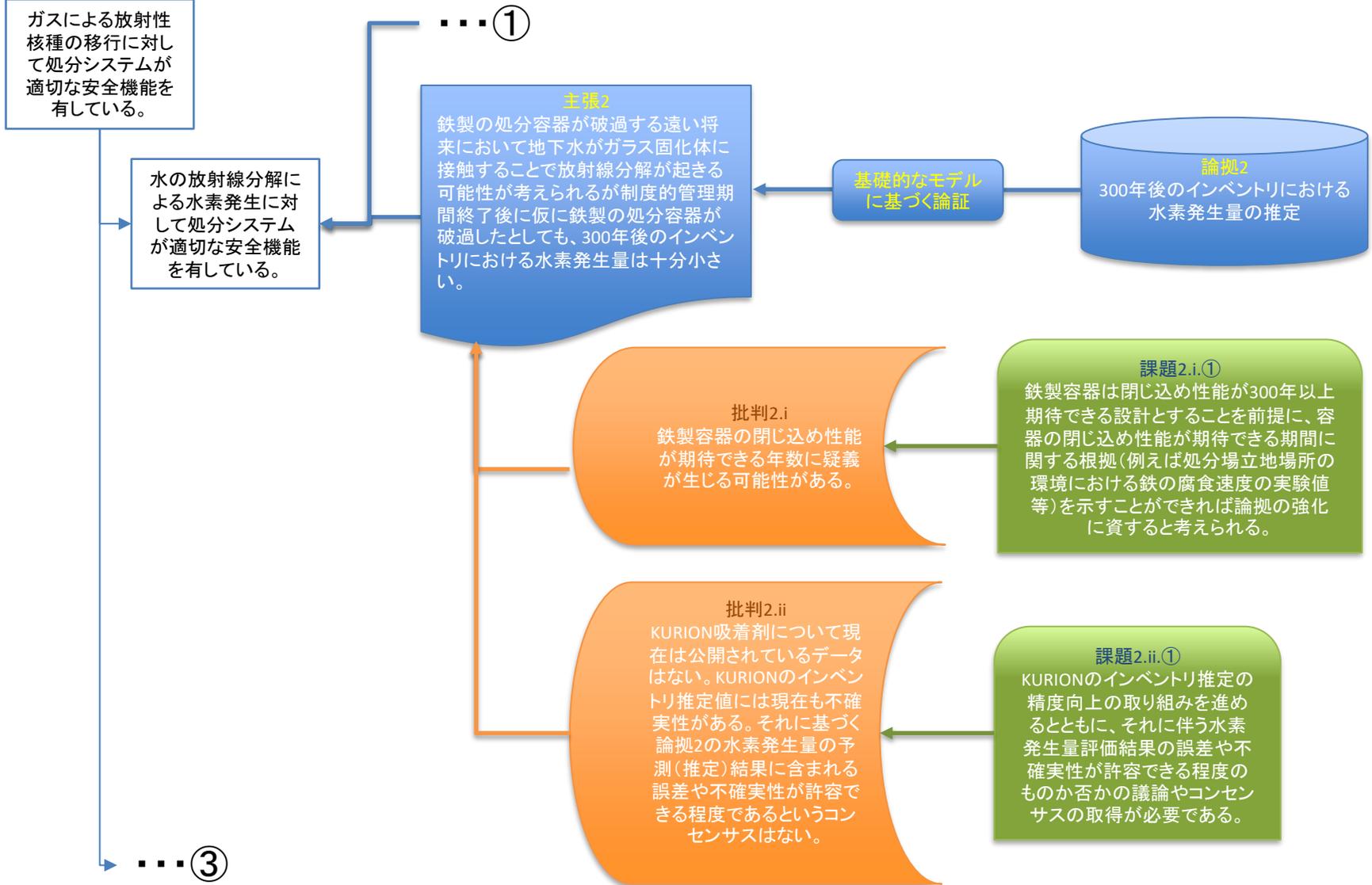
論証モデルの例: 命題9「廃棄体が長期にわたって放射性物質の閉じ込め性能を有する」その③



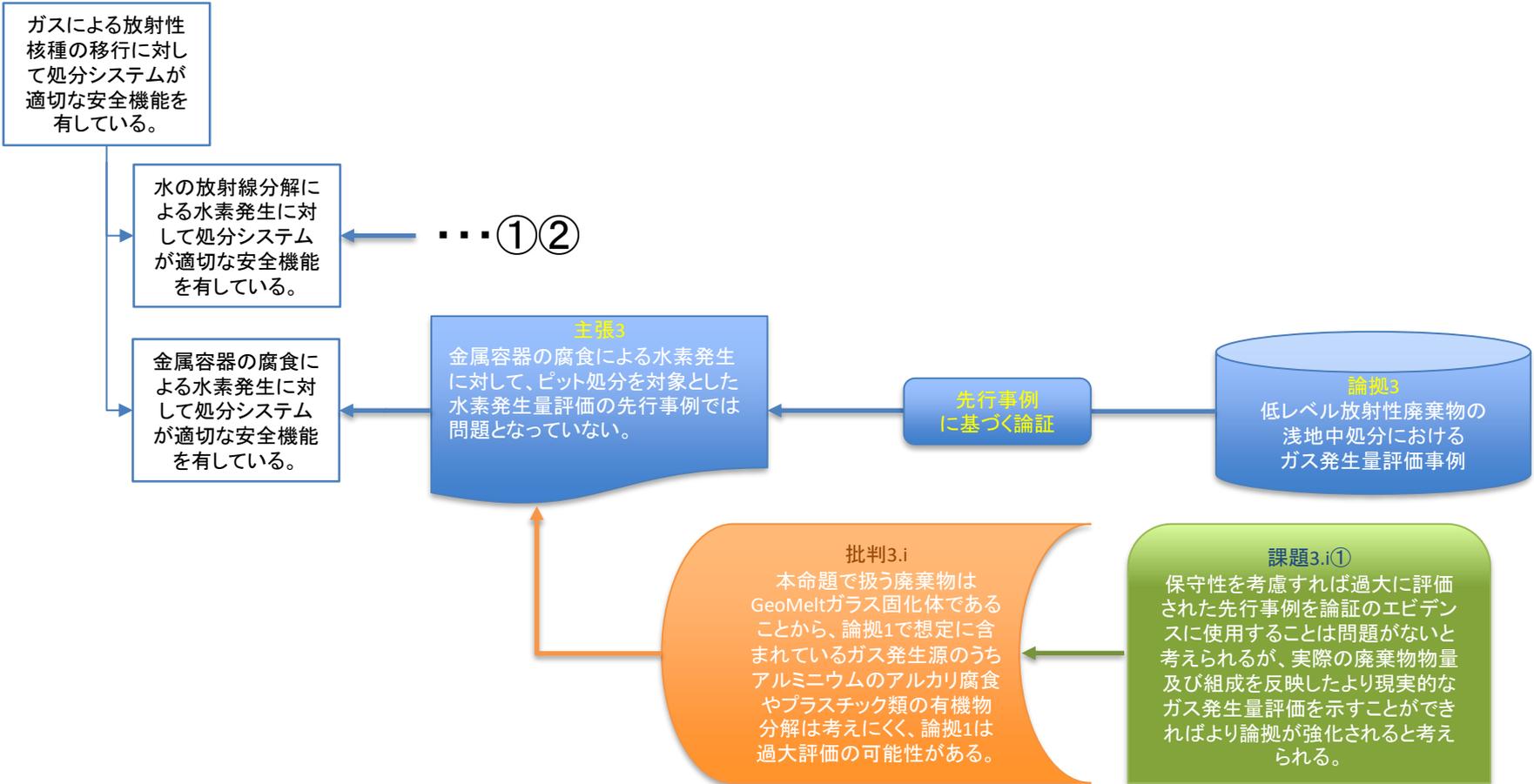
論証モデルの例: 命題13「ガスによる放射性核種の移行に対して処分システムが適切な安全機能を有している」その①



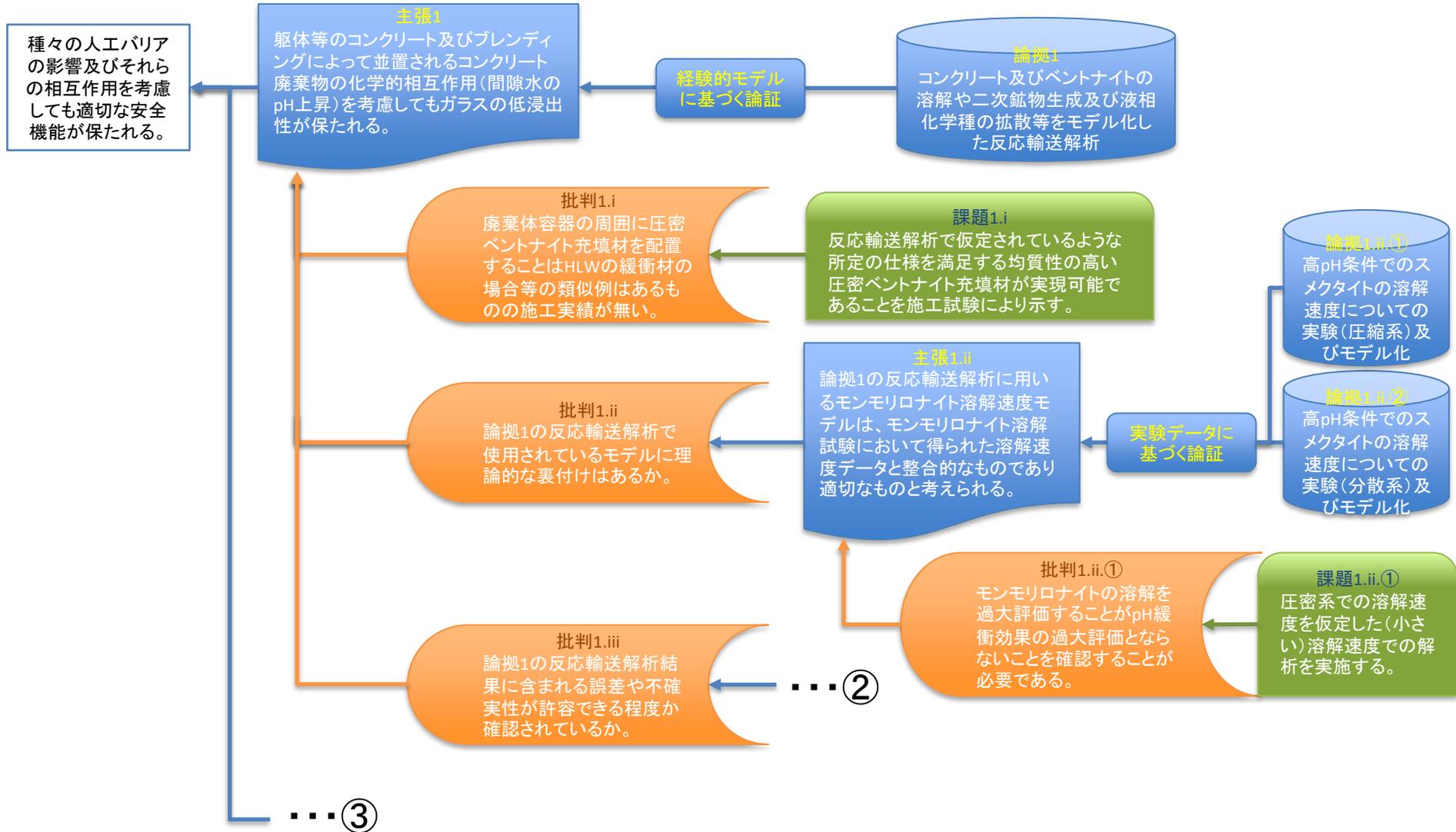
論証モデルの例：命題13「ガスによる放射性核種の移行に対して処分システムが適切な安全機能を有している」その②



論証モデルの例: 命題13「ガスによる放射性核種の移行に対して処分システムが適切な安全機能を有している」その③



論証モデルの例: 命題16「種々の人工バリアの影響及びそれらの相互作用を考慮しても適切な安全機能が保たれる」
その①



論証モデルの例: 命題16「種々の人工バリアの影響及びそれらの相互作用を考慮しても適切な安全機能が保たれる」
その②

種々の人工バリアの影響及びそれらの相互作用を考慮しても適切な安全機能が保たれる。

主張1
躯体等のコンクリート及びブレディングによって並置されるコンクリート廃棄物の化学的相互作用(間隙水のpH上昇)を考慮してもガラスの低浸出性が保たれる。

...①

批判1.iii
論拠1の反応輸送解析結果に含まれる誤差や不確実性が許容できる程度か確認されているか。

主張1.iii.①
論拠1の反応輸送解析においてpHの上昇及びベントナイトの変質が抑制される要因となっている材料境界での二次鉱物による変質層の形成及びその物質移行抑制効果が実験によって確認されている。

実験データに基づく論証

論拠1.iii.①
セメント-ベントナイト境界での二次鉱物沈殿に関する実験

批判1.iii.①.a
実験で生成した境界変質層が長期にわたって安定に存在することを仮定しているが、地震動等の影響で破壊される場合にも同様に仮定できることを確認する必要がある。

課題1.iii.①.a
地震動等の影響で境界変質層が破壊された場合にも初期と同様の反応によって自己シール(変質層が再形成される)ことを確認する試験を実施する。

主張1.iii.②
論拠1の反応輸送解析においてpHの上昇及びベントナイトの変質が抑制される要因となっている材料境界での二次鉱物による変質層の形成及びその物質移行抑制効果が考古学的アナログによって確認されている。

類似性に基づく論証

論拠1.iii.②
経年コンクリートの変質に関する歴史のアナログ

批判1.iii.②.a
ベントナイトと類似した軟岩系の岩盤中のコンクリート構造物の境界部についての調査事例は限られている。

課題1.iii.②.a
信頼性向上のために関連する調査事例を拡充することが有用である。

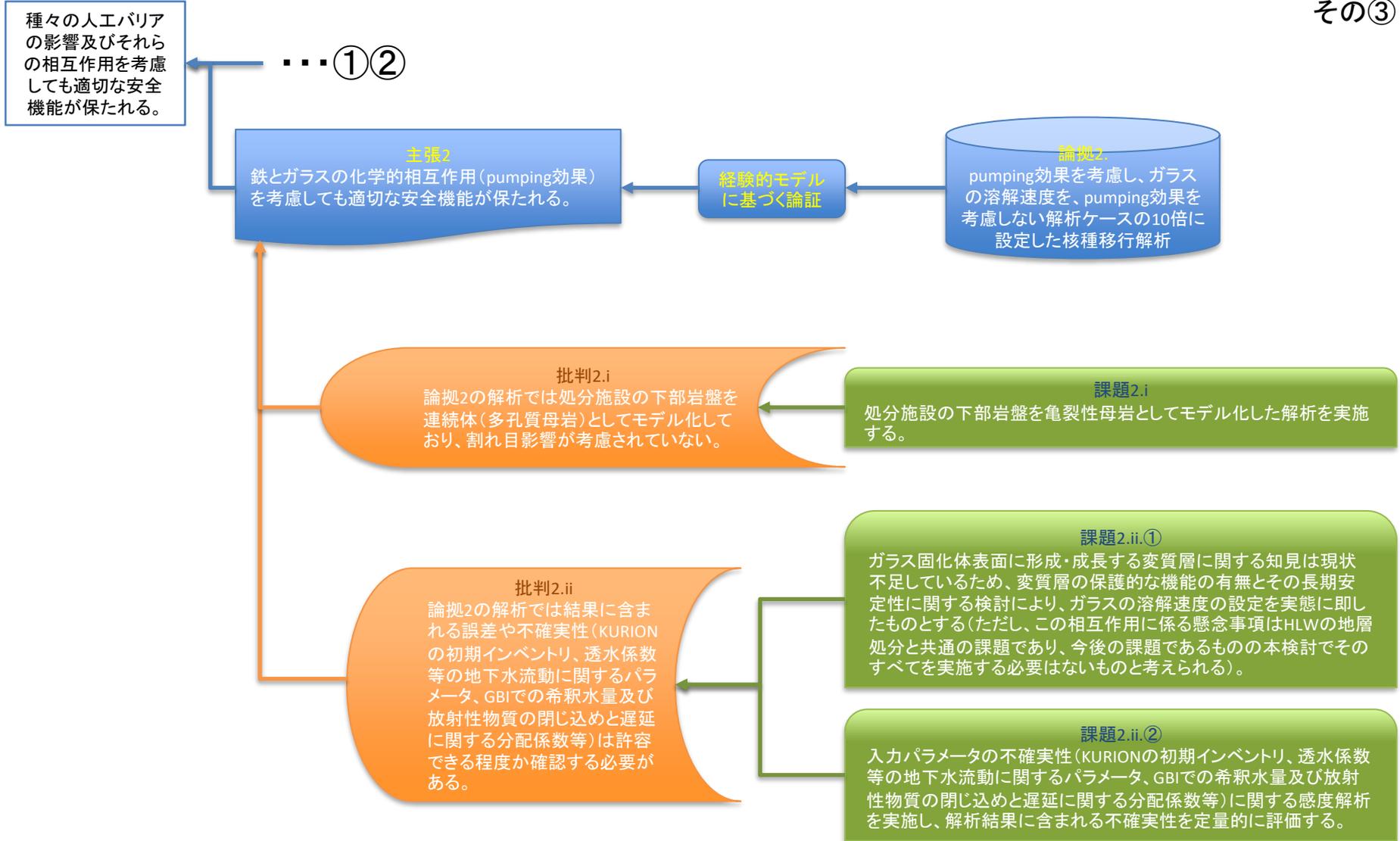
批判1.iii.②.b
類似性の判断に含まれる誤差や不確実性は許容できる程度か確認する必要がある。

課題1.iii.②.b
岩盤中のコンクリート構造物の境界部についての調査事例を拡充し、保護的な境界変質層が形成されていないものがあればその条件や特性の差異を明確にし、主張が成立する範囲を明確にしてベントナイト層がその範囲に該当することを示し、類似性の根拠とすることが必要である。

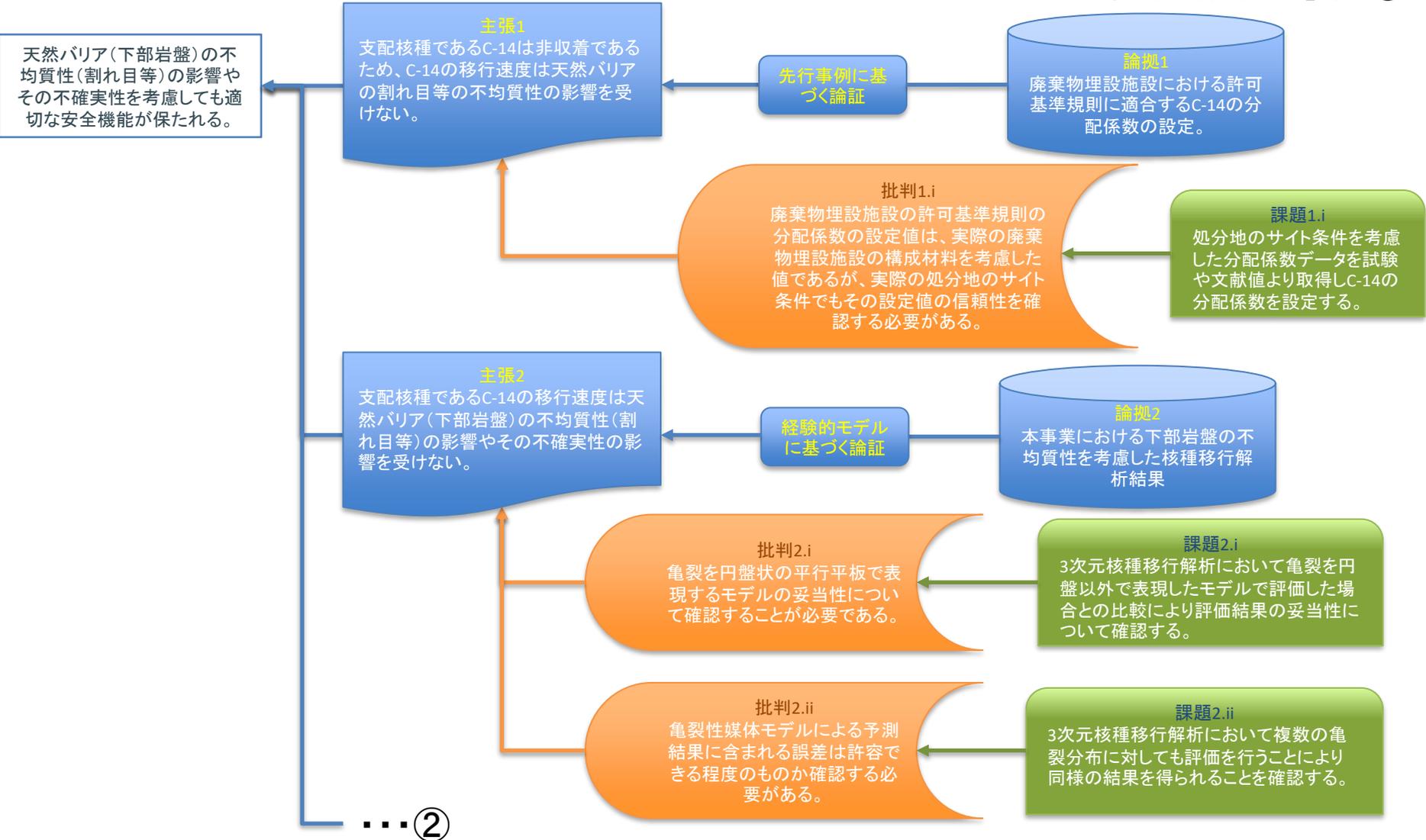
...③

(6) 処分概念を構築するための要件案及びその要件案充足に必要な情報・知識

論証モデルの例: 命題16「種々の人工バリアの影響及びそれらの相互作用を考慮しても適切な安全機能が保たれる」
その③

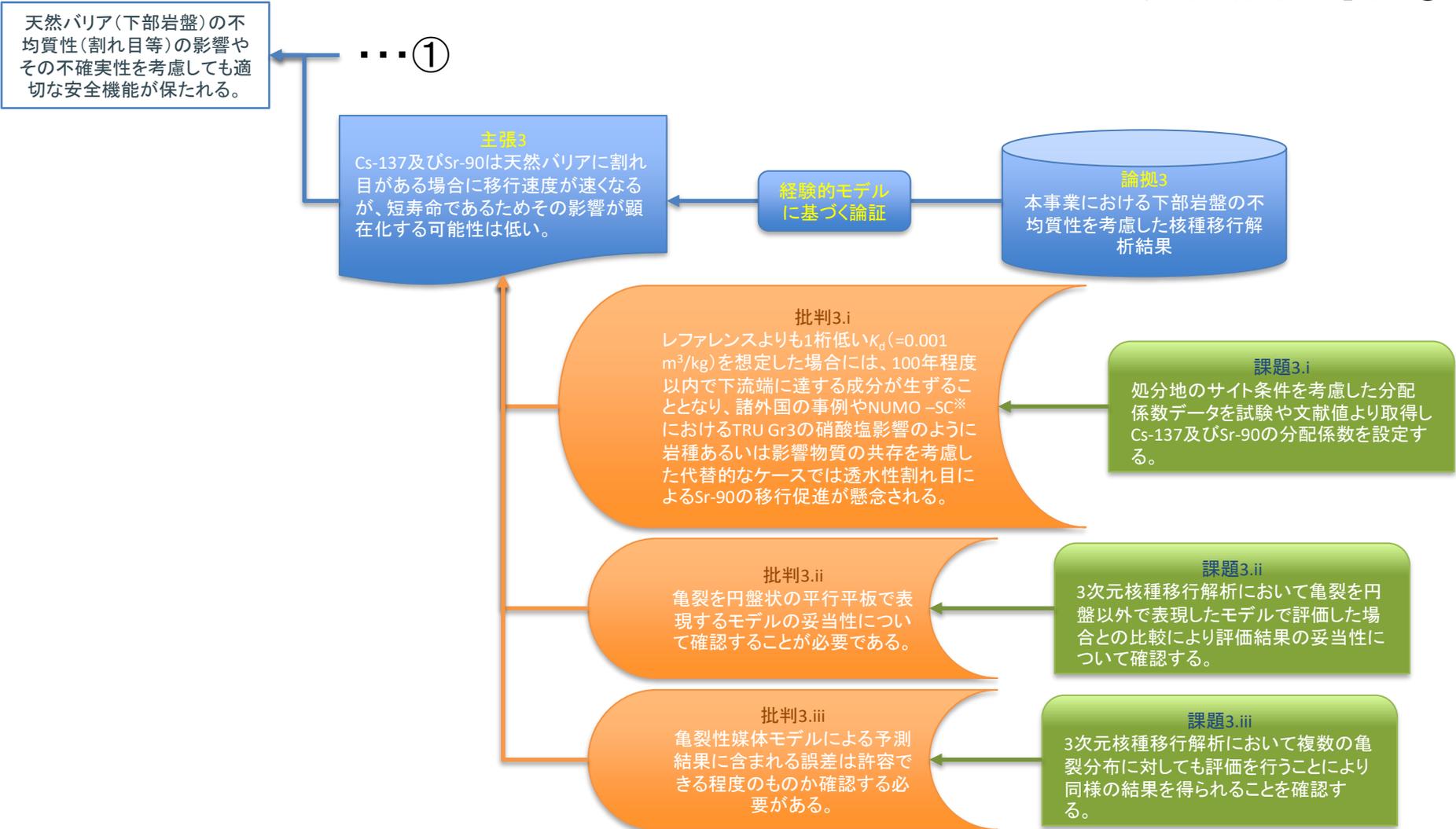


論証モデルの例: 命題17「天然バリア(下部岩盤)の不均質性(割れ目等)の影響やその不確実性を考慮しても適切な安全機能が保たれる」その①



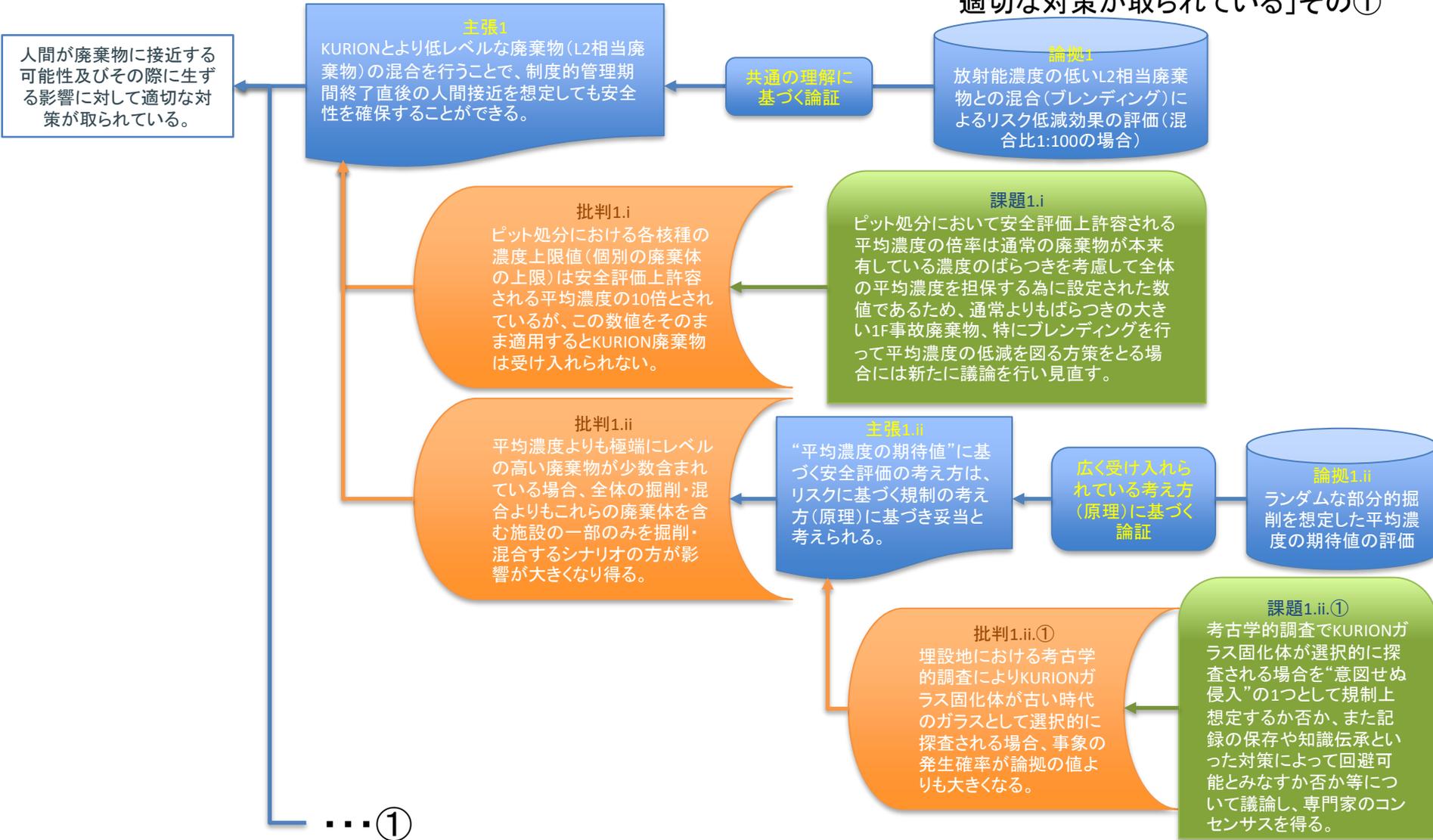
(6) 処分概念を構築するための要件案及びその要件案充足に必要な情報・知識

論証モデルの例: 命題17「天然バリア(下部岩盤)の不均質性(割れ目等)の影響やその不確実性を考慮しても適切な安全機能が保たれる」その②

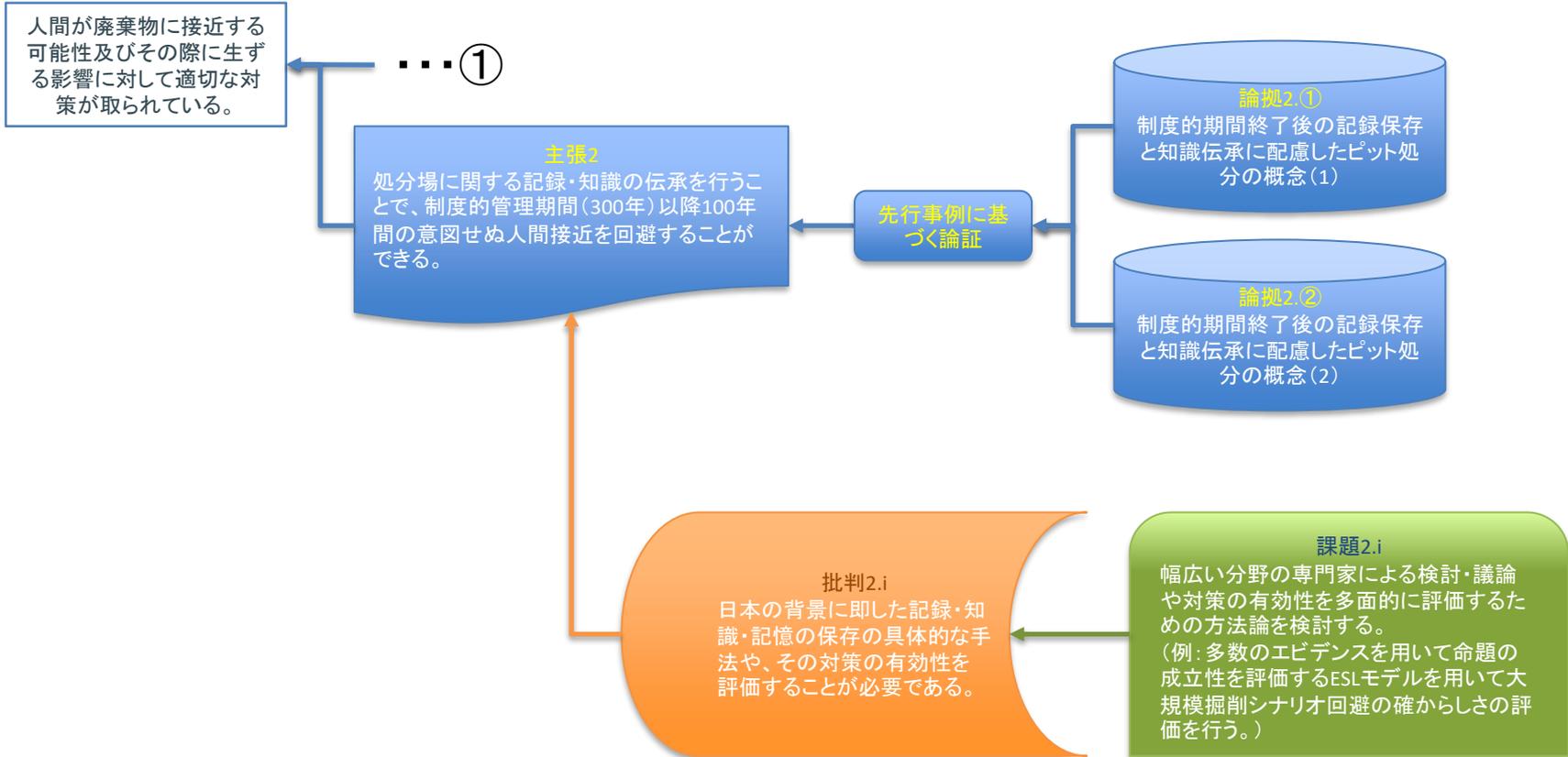


※原子力発電環境整備機構(NUMO)、包括的技術報告書:わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—、2021年2月

論証モデルの例: 命題19「人間が廃棄物に接近する可能性及びその際に生ずる影響に対して適切な対策が取られている」その①

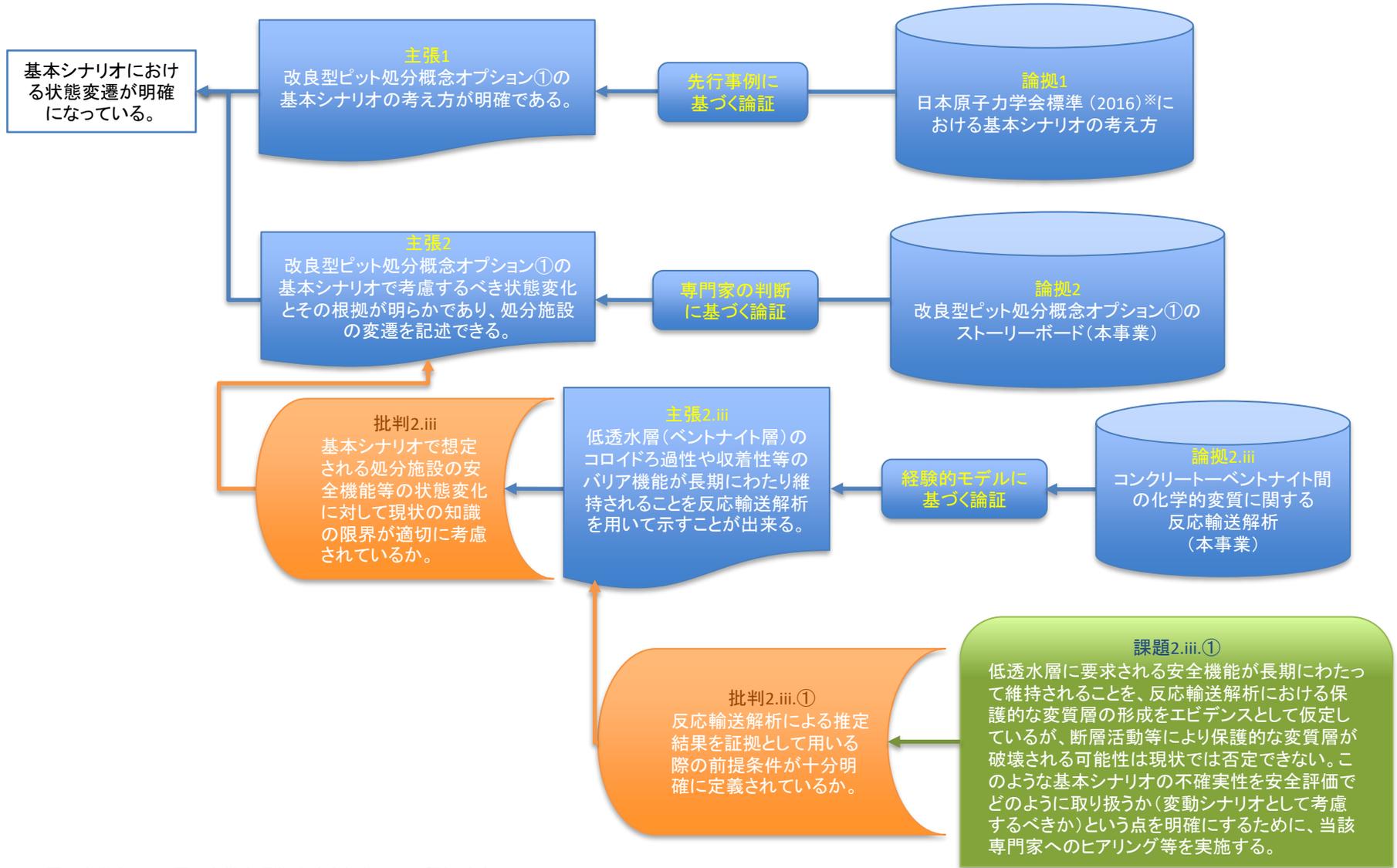


論証モデルの例: 命題19「人間が廃棄物に接近する可能性及びその際に生ずる影響に対して適切な対策が取られている」その②



(6) 処分概念を構築するための要件案及びその要件案充足に必要な情報・知識

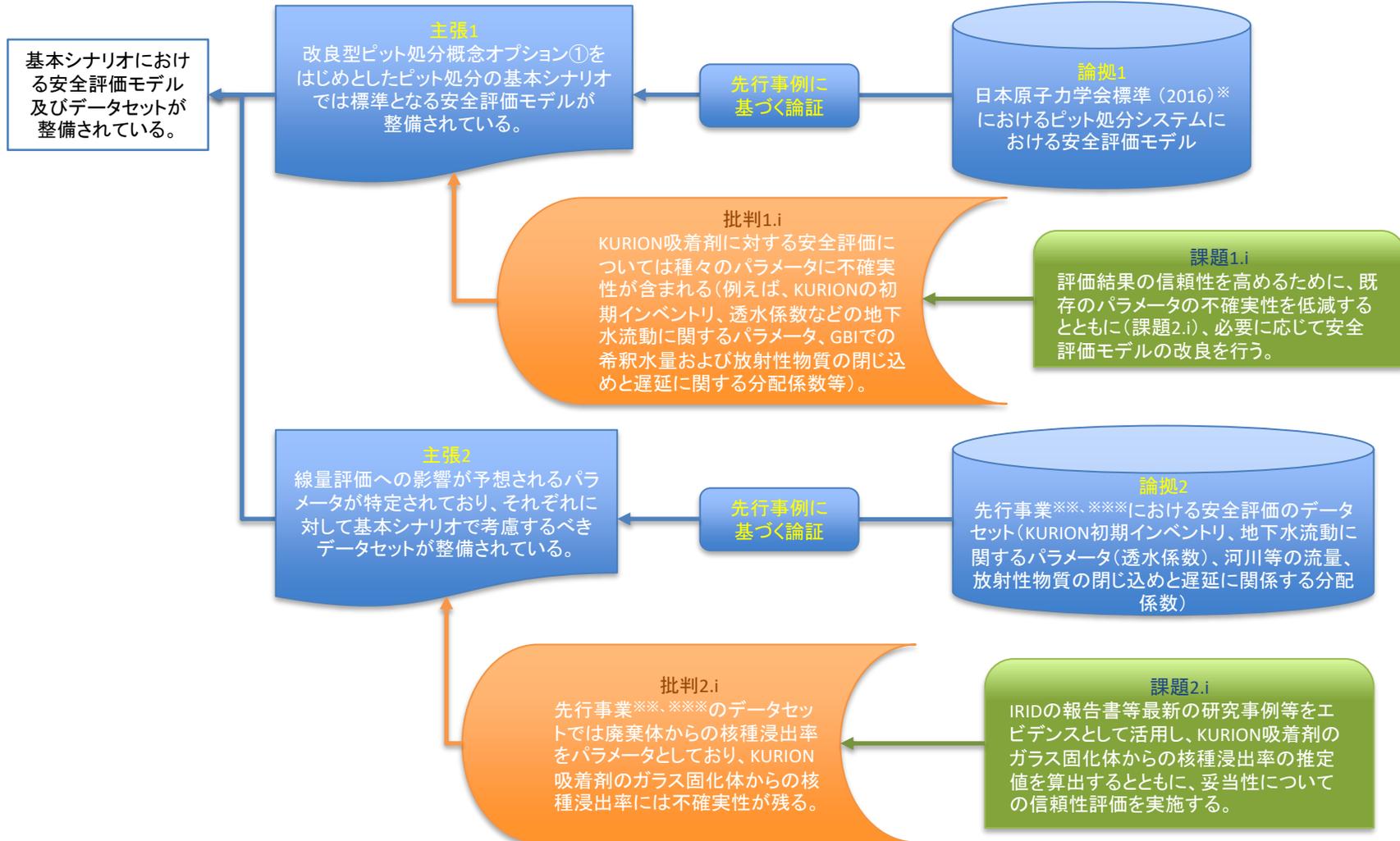
論証モデルの例：命題21「基本シナリオにおける状態変遷が明確になっている」



※日本原子力学会、日本原子力学会標準 浅地中処分の安全評価手法、2016、AESJ-SC-F026:2016.

(6) 処分概念を構築するための要件案及びその要件案充足に必要な情報・知識

論証モデルの例：命題22「基本シナリオにおける安全評価モデル及びデータセットが整備されている」

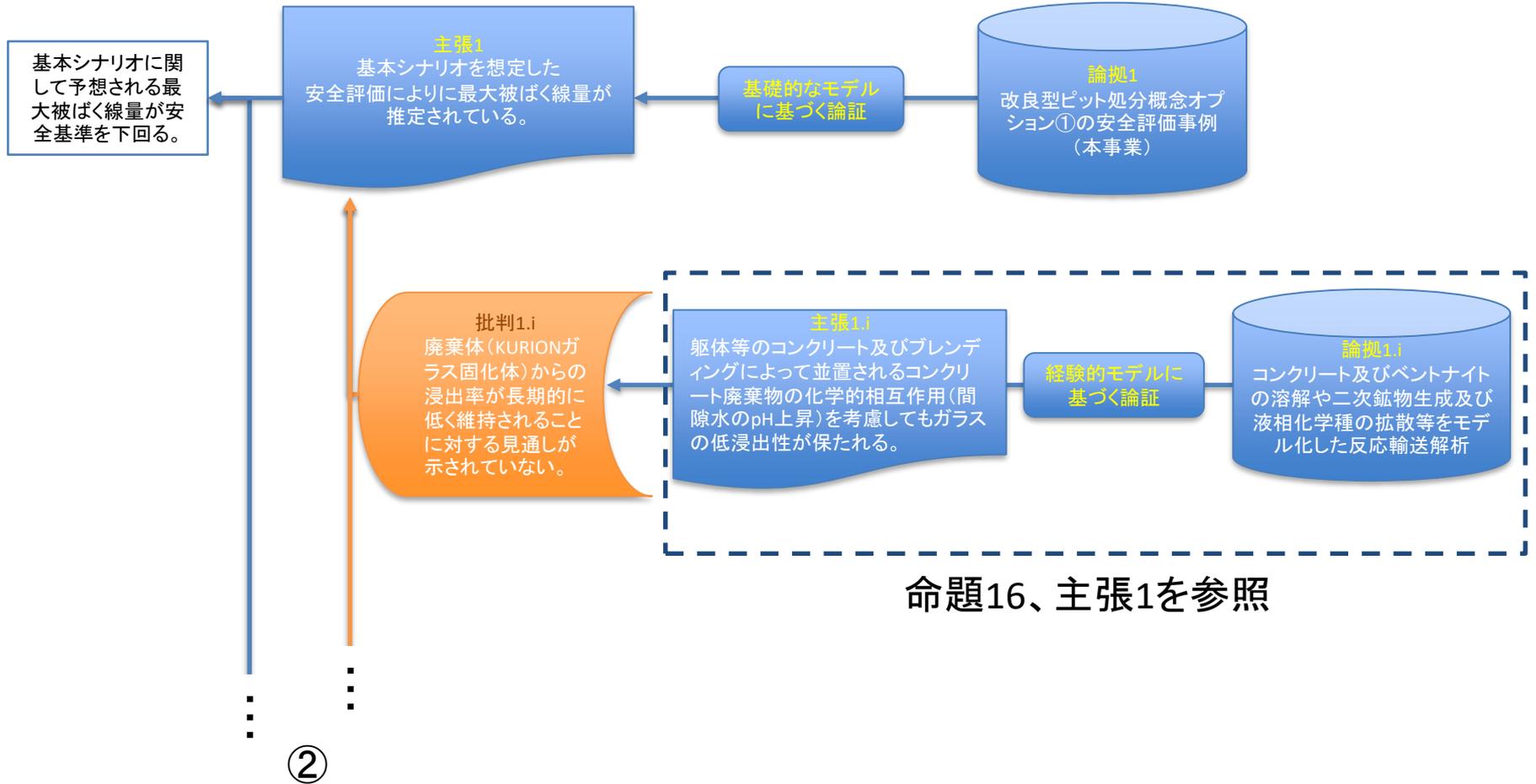


※日本原子力学会、日本原子力学会標準 浅地中処分の安全評価手法、2016、AESJ-SC-F026:2016.

※※国際廃炉研究開発機構(IRID)、平成30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金(固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発)」2020年度最終報告、令和3年10月、(2021).

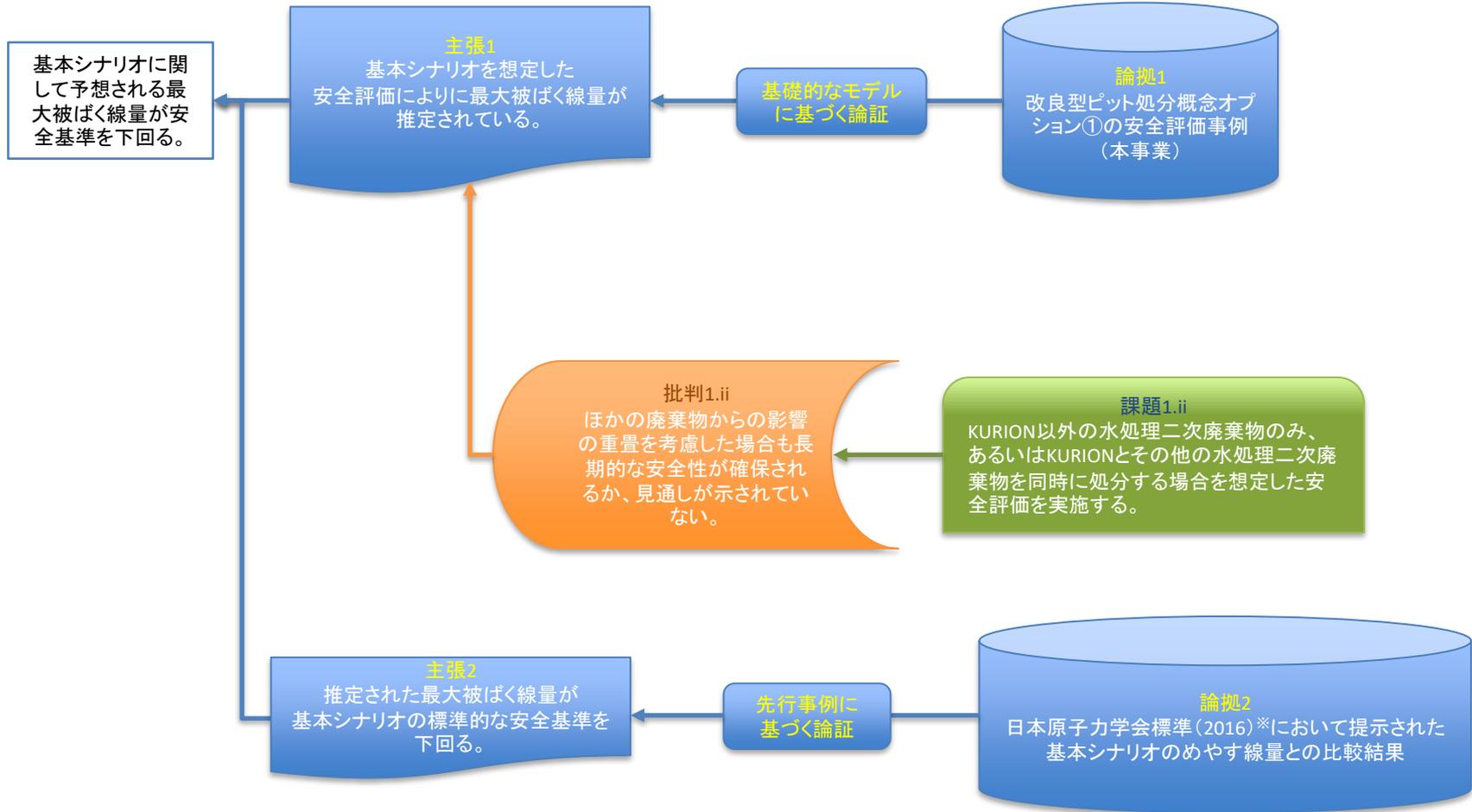
※※※国際廃炉研究開発機構(IRID)、令和3年度開始「廃炉・汚染水対策事業費補助金(固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発)」、2021年度最終報告、令和4年9月、(2022).

(6) 処分概念を構築するための要件案及びその要件案充足に必要な情報・知識

論証モデルの例: 命題23「基本シナリオに関して予想される最大被ばく線量が安全基準を下回る」その①


(6) 処分概念を構築するための要件案及びその要件案充足に必要な情報・知識

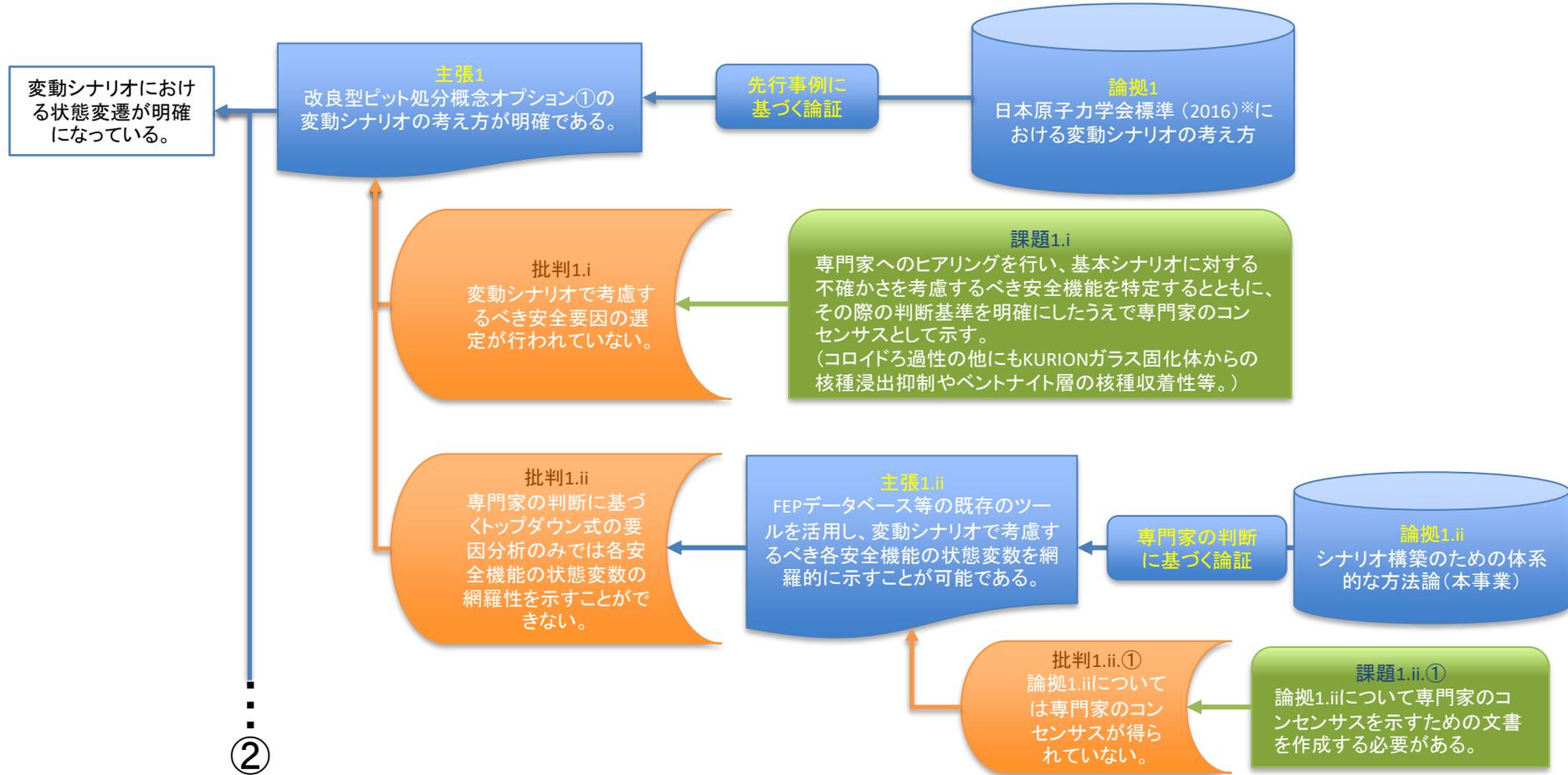
論証モデルの例：命題23「基本シナリオに関して予想される最大被ばく線量が安全基準を下回る」その②



※日本原子力学会、日本原子力学会標準 浅地中処分の安全評価手法、2016、AESJ-SC-F026:2016.

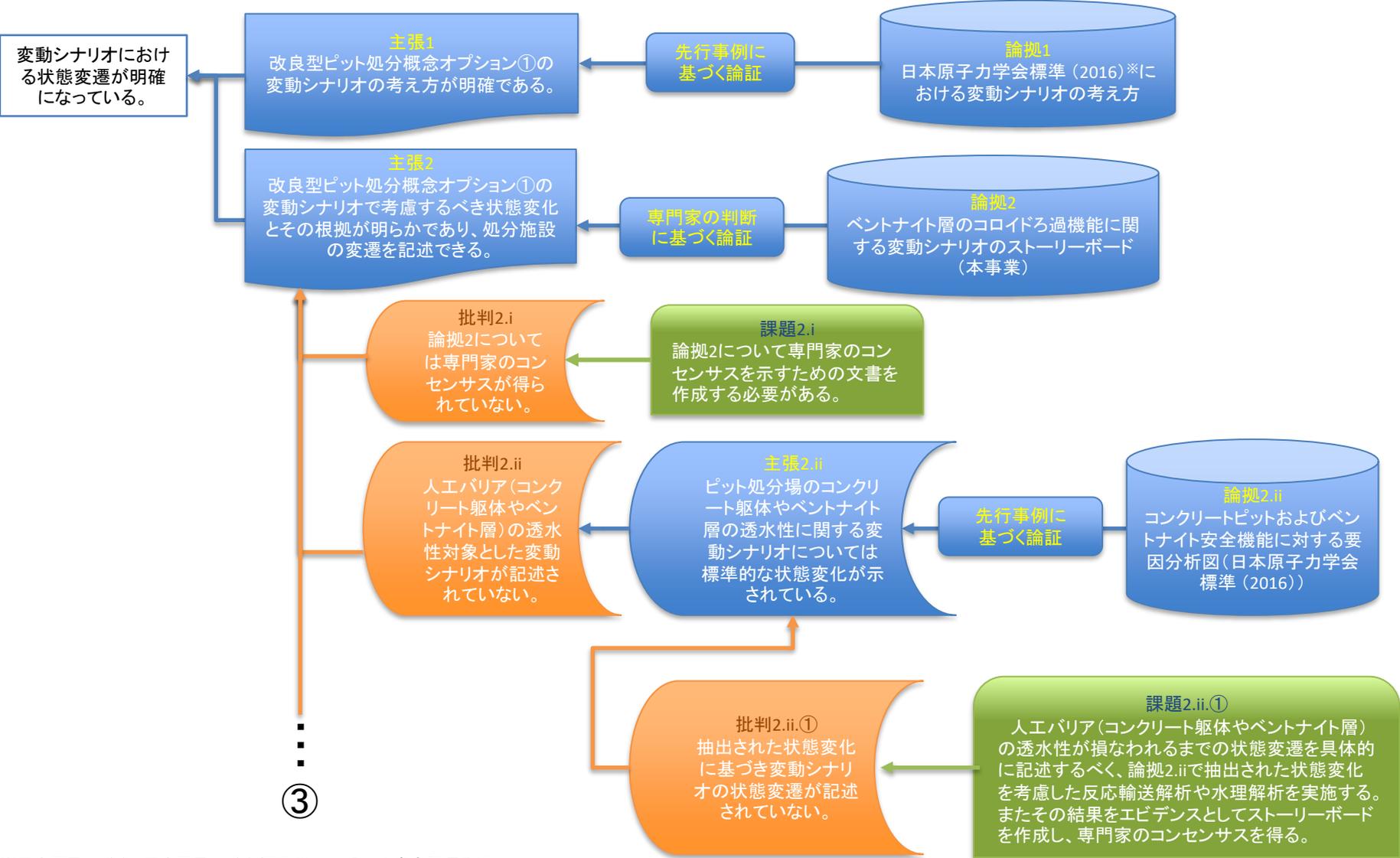
(6) 処分概念を構築するための要件案及びその要件案充足に必要な情報・知識

論証モデルの例：命題24「変動シナリオにおける状態変遷が明確になっている」その①



(6) 処分概念を構築するための要件案及びその要件案充足に必要な情報・知識

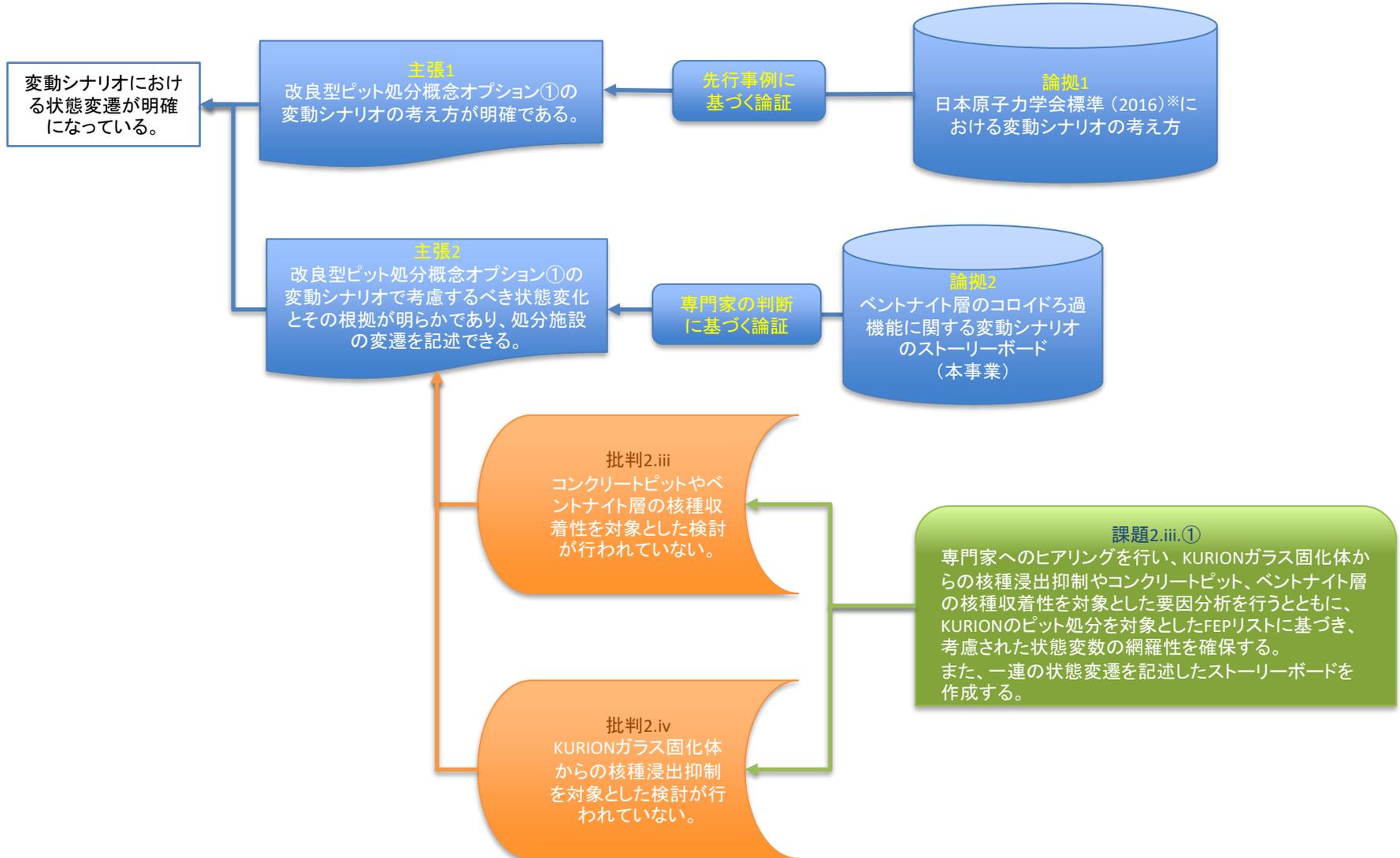
論証モデルの例: 命題24「変動シナリオにおける状態変遷が明確になっている」その②



※日本原子力学会、日本原子力学会標準 浅地中処分の安全評価手法、2016、AESJ-SC-F026:2016.

(6) 処分概念を構築するための要件案及びその要件案充足に必要な情報・知識

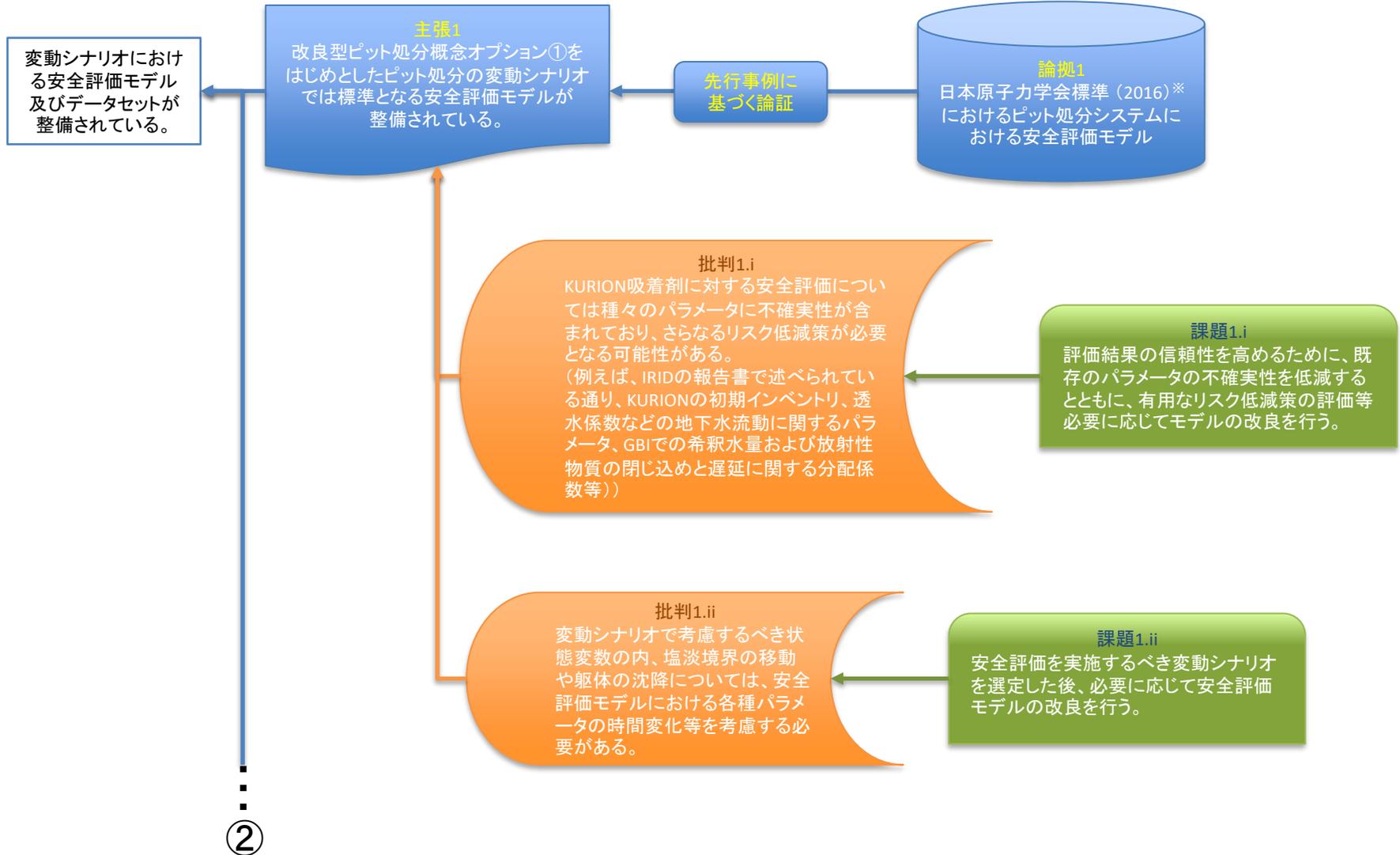
論証モデルの例: 命題24「変動シナリオにおける状態変遷が明確になっている」その③



※日本原子力学会、日本原子力学会標準 浅地中処分の安全評価手法、2016、AESJ-SC-F026:2016.

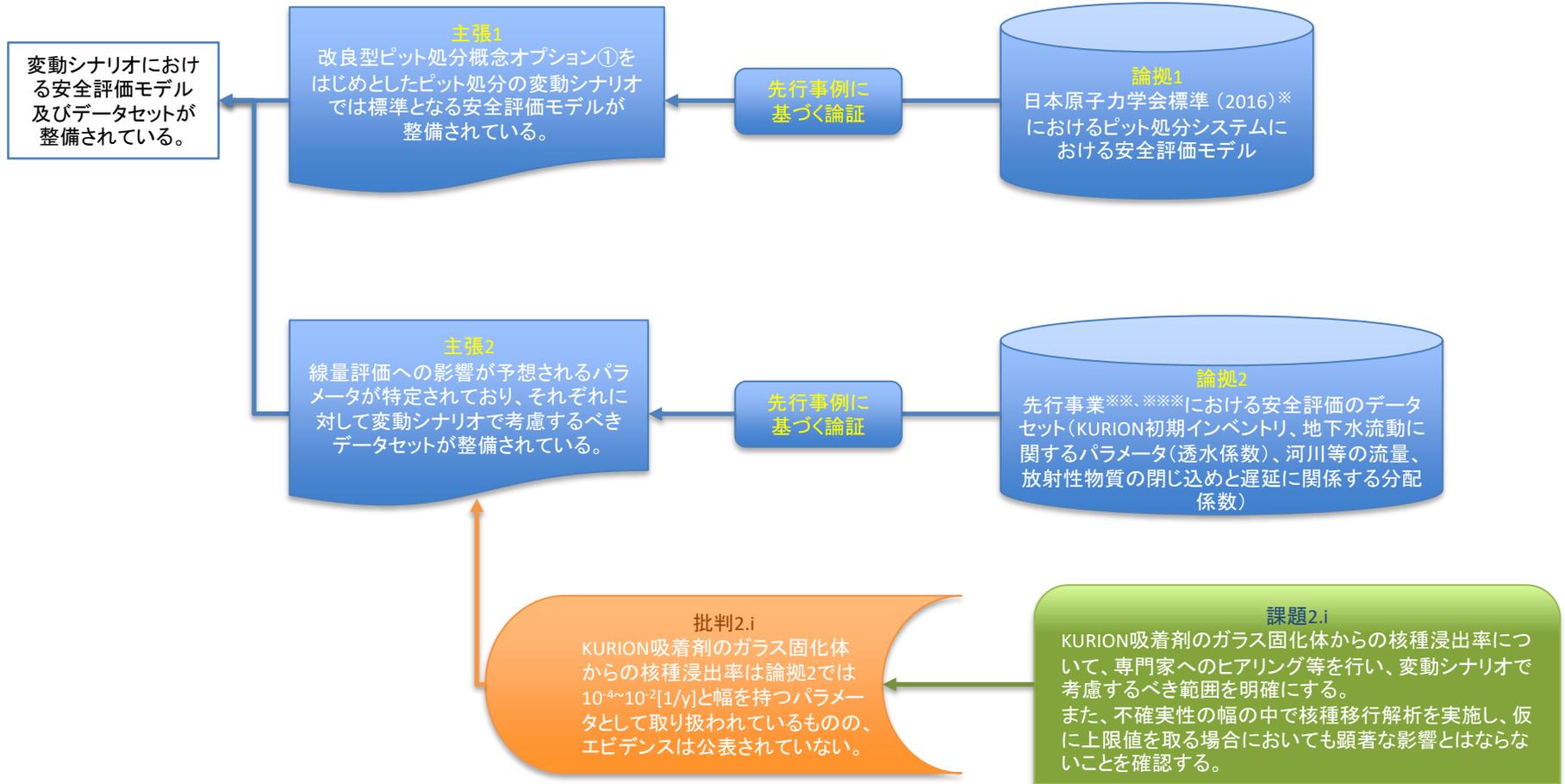
(6) 処分概念を構築するための要件案及びその要件案充足に必要な情報・知識

論証モデルの例：命題25「変動シナリオにおける安全評価モデル及びデータセットが整備されている」その①



(6) 処分概念を構築するための要件案及びその要件案充足に必要な情報・知識

論証モデルの例：命題25「変動シナリオにおける安全評価モデル及びデータセットが整備されている」その②



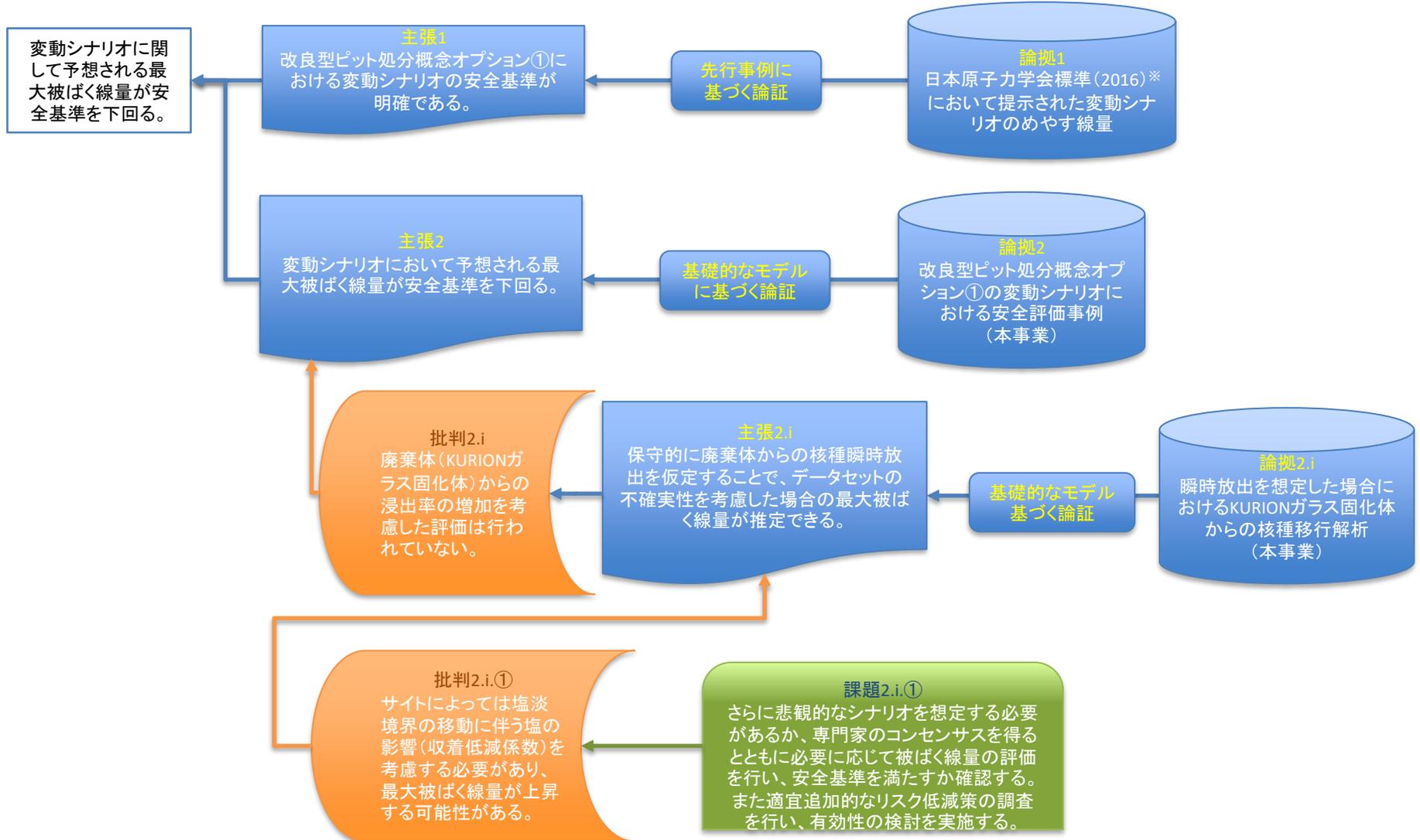
※日本原子力学会、日本原子力学会標準 浅地中処分の安全評価手法、2016、AESJ-SC-F026:2016.

※※国際廃炉研究開発機構(IRID)、平成30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金(固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発)」2020年度最終報告、令和3年10月、(2021).

※※※国際廃炉研究開発機構(IRID)、令和3年度開始「廃炉・汚染水対策事業費補助金(固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発)」、2021年度最終報告、令和4年9月、(2022).

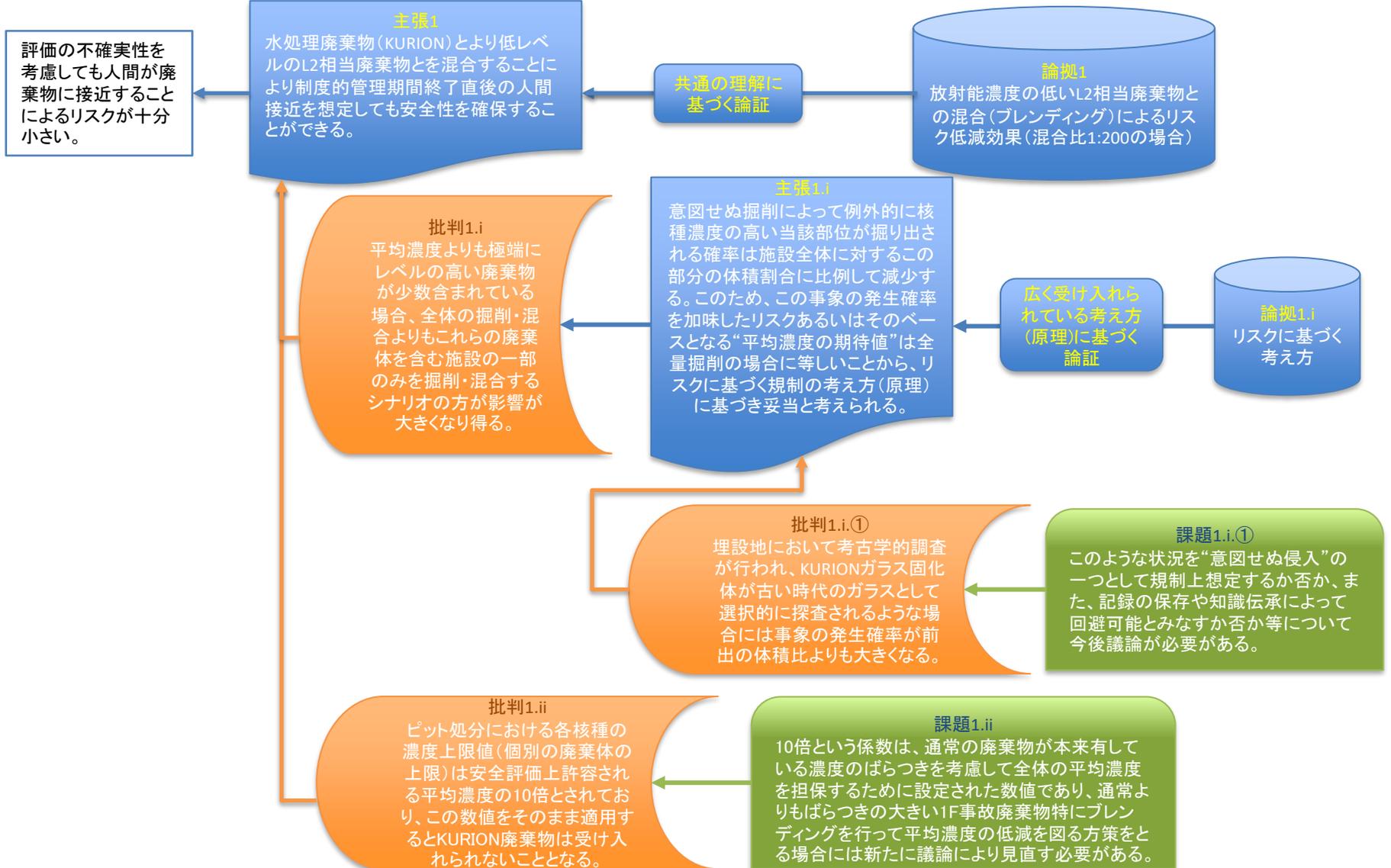
(6) 処分概念を構築するための要件案及びその要件案充足に必要な情報・知識

論証モデルの例: 命題26「変動シナリオに関して予想される最大被ばく線量が安全基準を下回る」



※日本原子力学会、日本原子力学会標準 浅地中処分の安全評価手法、2016、AESJ-SC-F026:2016.

論証モデルの例: 命題28「評価の不確実性を考慮しても人間が廃棄物に接近する可能性によるリスクが十分小さい」



(6) 処分概念を構築するための要件案及びその要件案充足に必要な情報・知識

得られた課題①(事故廃棄物処分において重要と考えられる課題)

■ 優先的に検討すべき論証項目とした命題の論証モデルで抽出した論証の弱部について、課題として整理した。

命題	課題
1 放射性核種のインベントリが特定できている	1F事故廃棄物の発生時の物質収支に寄与するプロセスとして本検討における解析で考慮しているものの完備性について専門家のコンセンサスを明文化すること。 核種インベントリに関する分析データの品質保証計画とその履行等に関する文書を整備すること。 核種インベントリに関する分析データの蓄積による推定精度の向上の取り組みを今後継続的に行うこと。
2 KURION吸着剤に含まれる影響物質の種類や量が特定できている	影響物質の種類や量、その核種移行への影響についての調査結果について、今後の調査や分析なども踏まえて専門家間のコンセンサスをより広く得ていくプロセスが必要。 特に有機物、海水成分、ホウ酸水、油分の存在及び量を裏付けるエビデンスとなるサンプルの分析結果を優先的に整理するとともに、専門家のコンセンサスに関する公開文書の作成等、一連の検討結果を公表するための事前準備に着手する。 影響物質が核種移行に与える影響の定量的な把握のための調査研究を引き続き進めること。 廃棄物内の含有量の不確実性も踏まえ、実際に処分場内での影響物質濃度の時空間変遷の定量的検討を行う。
13 ガスによる放射性核種の移行に対して処分システムが適切な安全機能を有している	水素発生量評価の観点から、KURIONのインベントリ推定の精度向上の取り組みが必要。 既往の低レベル放射性廃棄物の浅地中処分におけるガス発生量評価をエビデンスとして用いたが、この評価は水素発生量を過大評価すると考えられるため、より現実的なガス発生量評価が必要になった場合は、実際の処分環境や廃棄物物量・組成等を反映した評価が必要。
16 種々の人工バリアの影響及びそれらの相互作用を考慮しても適切な安全機能が保たれる	入力パラメータの不確実性(KURIONの初期インベントリ、透水係数等の地下水流動に関するパラメータ、GBIでの希釈水量及び放射性物質の閉じ込めと遅延に関する分配係数等)に関する感度解析を実施し、解析結果に含まれる不確実性を定量的に評価する。
17 天然バリア(下部岩盤)の不均質性(割れ目等)の影響やその不確実性を考慮しても適切な安全機能が保たれる	処分地のサイト条件を考慮した分配係数データを試験や文献値より取得し、C-14やCs-137、Sr-90といった核種の分配係数を設定する。

得られた課題②(改良型ピット処分概念オプション①に特有)

命題		課題
21	基本シナリオにおける状態変遷が明確になっている	改良型ピット処分概念オプション①の安全評価について、関連する専門家によるレビューを実施し適宜内容の修正を行うとともに、専門家のコンセンサスを示す文書を作成する。 低透水層に要求される安全機能が長期にわたって維持されることを、反応輸送解析における保護的な変質層の形成をエビデンスとして仮定しているが、断層活動等により保護的な変質層が破壊される可能性は現状では否定できない。このような基本シナリオの不確実性を安全評価でどのように取り扱うか(変動シナリオとして考慮すべきか)という点を明確にするために、を当該専門家へのヒアリング等を実施する。
22	基本シナリオにおける安全評価モデル及びデータセットが整備されている	基本シナリオの評価結果の信頼性を高めるために、既存のパラメータの不確実性を低減するとともに、必要に応じて安全評価モデルの改良を行う。 IRIDの報告書等最新の研究事例等をエビデンスとして活用し、KURION吸着剤のガラス固化体からの核種浸出率の推定値を算出するとともに、妥当性についての信頼性評価を実施する。
23	基本シナリオに関して予想される最大被ばく線量が安全基準を下回る	KURION以外の水処理二次廃棄物のみ、あるいはKURIONとその他の水処理二次廃棄物を同時に処分する場合を想定した安全評価を実施する。
24	変動シナリオにおける状態変遷が明確になっている	専門家へのヒアリングを行い、基本シナリオに対する不確かさを考慮すべき安全機能を特定するとともに、その際の判断基準を明確にしたうえで専門家のコンセンサスとして示す。(コロイド過性の他にもKURIONガラス固化体からの核種浸出抑制やベントナイト層の核種収着性等) 本業務で構築した、シナリオ構築のための体系的な方法論について専門家のコンセンサスを示すための文書を作成する必要がある。 本業務で作成した、ベントナイト層のコロイド過機能に関する変動シナリオのストーリーボードについて専門家のコンセンサスを示すための文書を作成する必要がある。 人工バリア(コンクリート躯体やベントナイト層)の透水性が損なわれるまでの状態変遷を具体的に記述するべく、論拠2.iiで抽出された状態変化を考慮した反応輸送解析や水理解析等を実施する。またその結果をエビデンスとしてストーリーボードを作成し、専門家のコンセンサスを得る。
25	変動シナリオにおける安全評価モデル及びデータセットが整備されている	変動シナリオの評価結果の信頼性を高めるために、既存のパラメータの不確実性を低減するとともに、有用なリスク低減策の評価等必要に応じてモデルの改良を行う。 安全評価を実施すべき変動シナリオを選定した後、必要に応じて安全評価モデルの改良を行う。 KURION吸着剤のガラス固化体からの核種浸出率について、専門家へのヒアリング等を行い、変動シナリオで考慮すべき範囲を明確にする。また、不確実性の幅の中で核種移行解析を実施し、仮に上限値を取る場合においても顕著な影響とはならないことを確認する。
26	変動シナリオに関して予想される最大被ばく線量が安全基準を下回る	瞬時放出シナリオよりもさらに悲観的なシナリオを想定する必要があるか、専門家のコンセンサスを得るとともに必要に応じて被ばく線量の評価を行い、安全基準を満たすか確認する。また適宜追加的なリスク低減策の調査を行い、有効性の検討を実施する。
28	評価の不確実性を考慮しても人間が廃棄物に接近する可能性によるリスクが十分小さい	埋設地において考古学的調査が行われ、KURIONガラス固化体が古い時代のガラスとして選択的に探査されるような場合を“意図せぬ侵入”の一つとして規制上想定するか否か、また、記録の保存や知識伝承によって回避可能とみなすか否か等について今後議論が必要である ピット処分における各核種の濃度上限値(個別の廃棄体の上限)は安全評価上許容される平均濃度の10倍とされているが、この10倍という係数は、通常の廃棄物が本来有している濃度のばらつきを考慮して全体の平均濃度を担保するために設定された数値であり、通常よりもばらつきの大きい1F事故廃棄物、特にブレンディングを行って平均濃度の低減を図る方策をとる場合には新たに議論により見直す必要がある。

■ 体系的な処分概念構築手法の開発

- 既往の処分概念を起点とし、種々の1F事故廃棄物に適用した場合の問題点を抽出した。それに基づき、変更や改良を施すことにより合理的な処分概念を具体化し、上流側で取り組むべき課題を抽出するための手法開発を実施した。
- 廃棄物の多様性への対応、作業の効率性、処分概念の合理化、不確実性及び事業の長期性への対応等に留意した。

■ 種々の1F事故廃棄物に対する手法の適用

- 上記の手法を1F事故廃棄物に適用した。
- 特に、KURION及び解体廃棄物(建屋内コンクリート:事故前非放射性)については、改良後の処分概念の成立性及び対策の有効性の評価まで含め上記の手法を一貫して適用した。具体的には、物量の大きいこれらの廃棄物に対して廃棄物の固化、異種廃棄物とのブレンディング、トレンチ処分における施設底部の土質改良等の処分概念の変更により従来の区分に比してより合理的な処分区分とし得ること及びその成立性を示す上での課題を抽出した。さらに、妥当性論証に必要な情報を整理した。

4.2.2 安全評価手法開発の試行

4.2.2.1 ストーリーボードのプロトタイプ検討

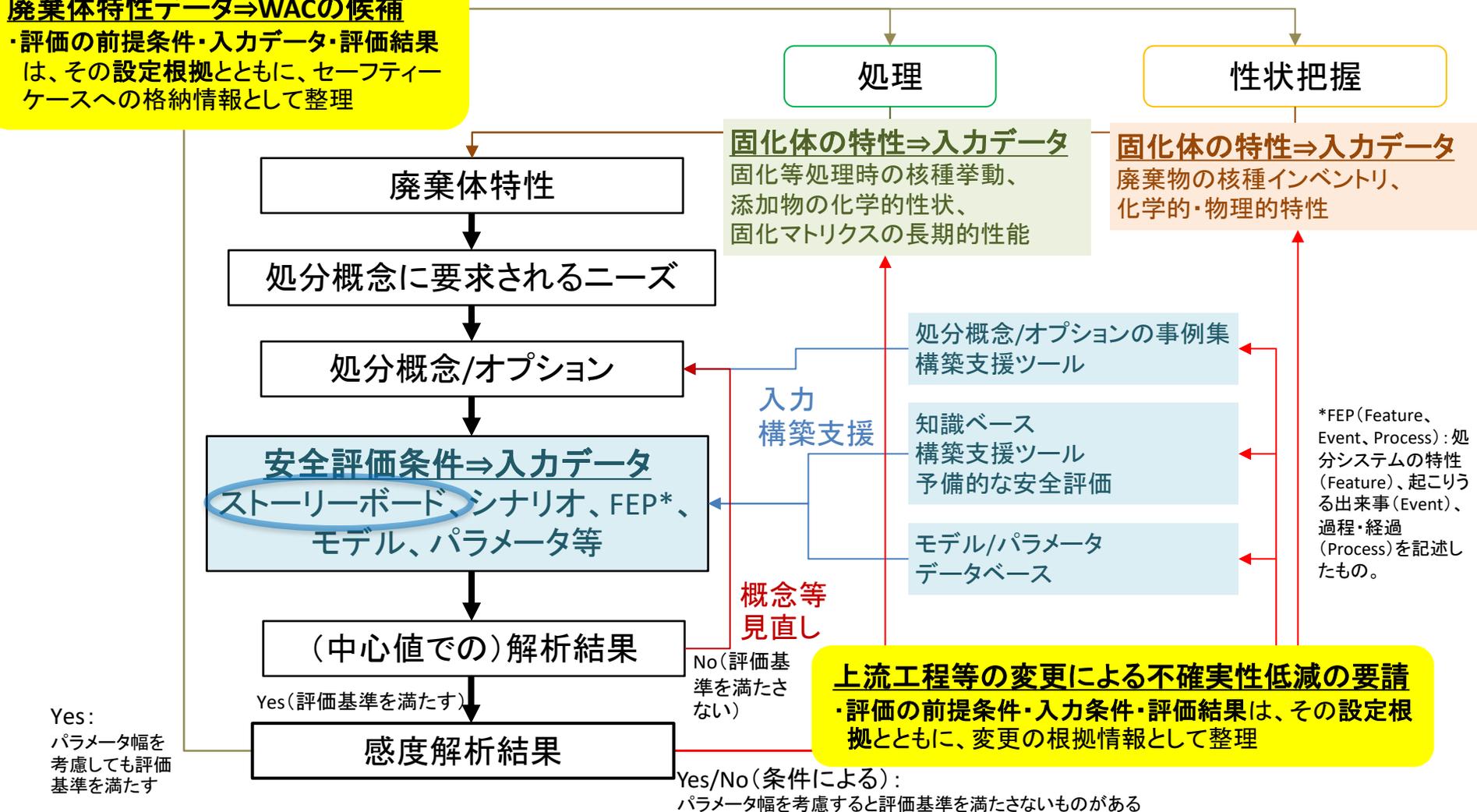
4.2 処分概念の提示及び安全評価手法の開発

廃棄物ストリーム合理化に向けた処分安全評価を中心とする情報の流れと本項目の範囲

- 廃棄物ストリームの合理化における情報の流れを処分概念構築とそれに対応した安全評価解析を実施することを中心に据えて整理
- 固化処理技術や性状把握等の基礎研究に基づいた入力データを用いて、構築した処分概念オプション案の成立性を種々のツールを用いて評価し、検討結果に応じて基礎研究の実施内容にフィードバックをかけることを表現

廃棄体特性データ⇒WACの候補

・評価の前提条件・入力データ・評価結果は、その設定根拠とともに、セーフティーケースへの格納情報として整理



Yes:
パラメータ幅を考慮しても評価基準を満たす

Yes (評価基準を満たす)

No (評価基準を満たさない)

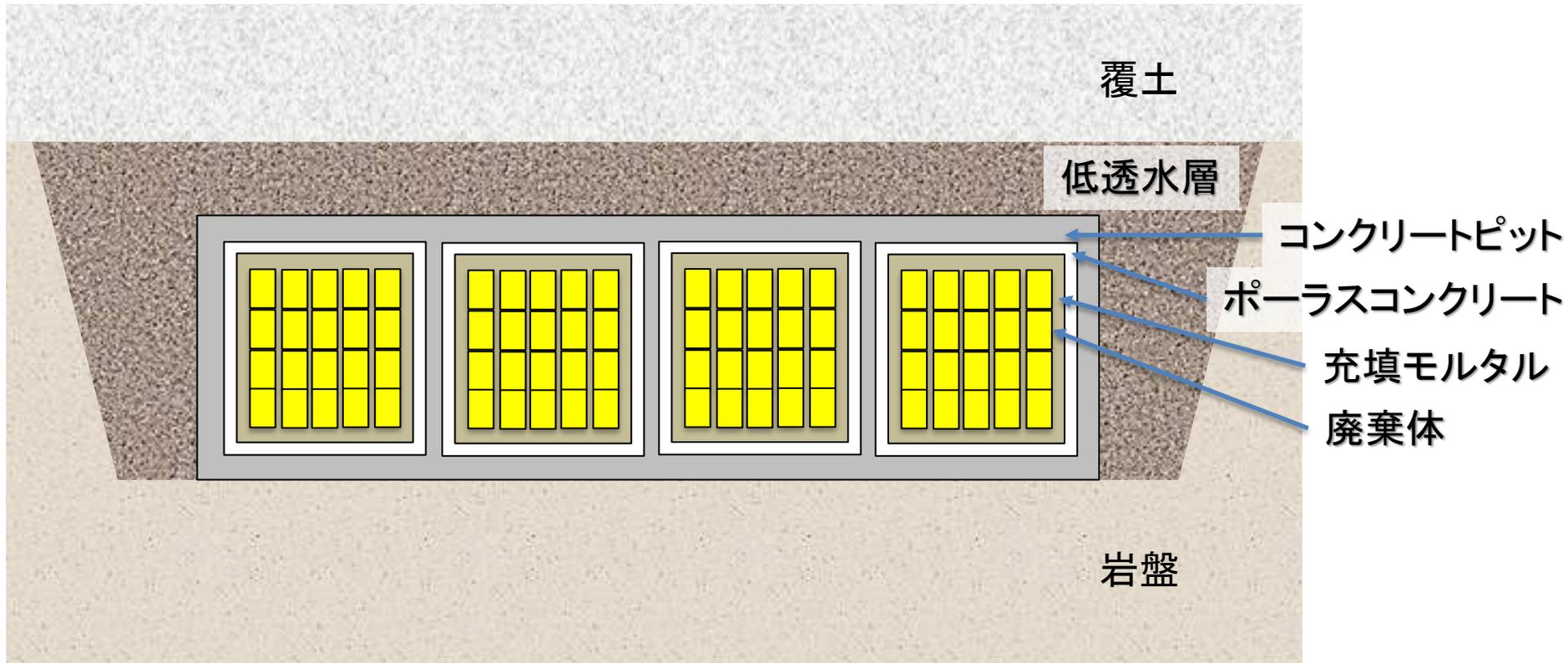
Yes/No (条件による):
パラメータ幅を考慮すると評価基準を満たさないものがある

4.2.2 安全評価手法開発の試行

4.2.2.1 ストーリーボードのプロトタイプ検討

処分施設の状態変化(改良型ピット処分概念オプション①基本シナリオ)

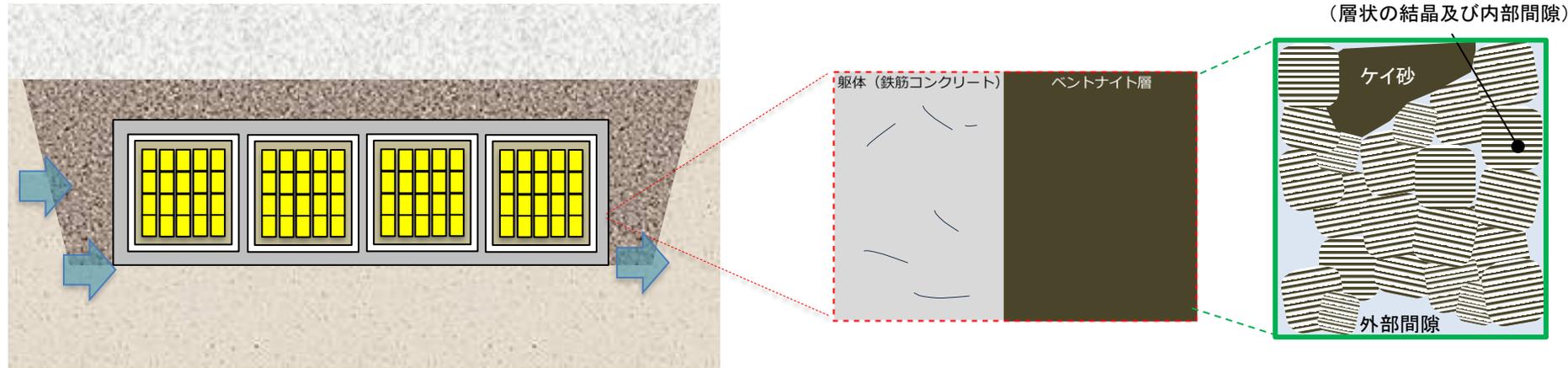
- 改良型ピット処分概念オプション①の基本シナリオについて、人工バリアの状態変遷の観点から以下3つの期間に対して、それぞれにおける処分施設の状態変化を記述した。
 - 期間I: 処分施設を閉鎖・埋戻し、再冠水が進行する期間
 - 期間II: 再冠水が平衡になり、人工バリアが徐々に変質しつつも、安全機能が期待される期間
 - 期間III: 安全機能が徐々に失われる期間



4.2.2 安全評価手法開発の試行

4.2.2.1 ストーリーボードのプロトタイプ検討

処分施設の状態変化(改良型ピット処分概念オプション①基本シナリオ)



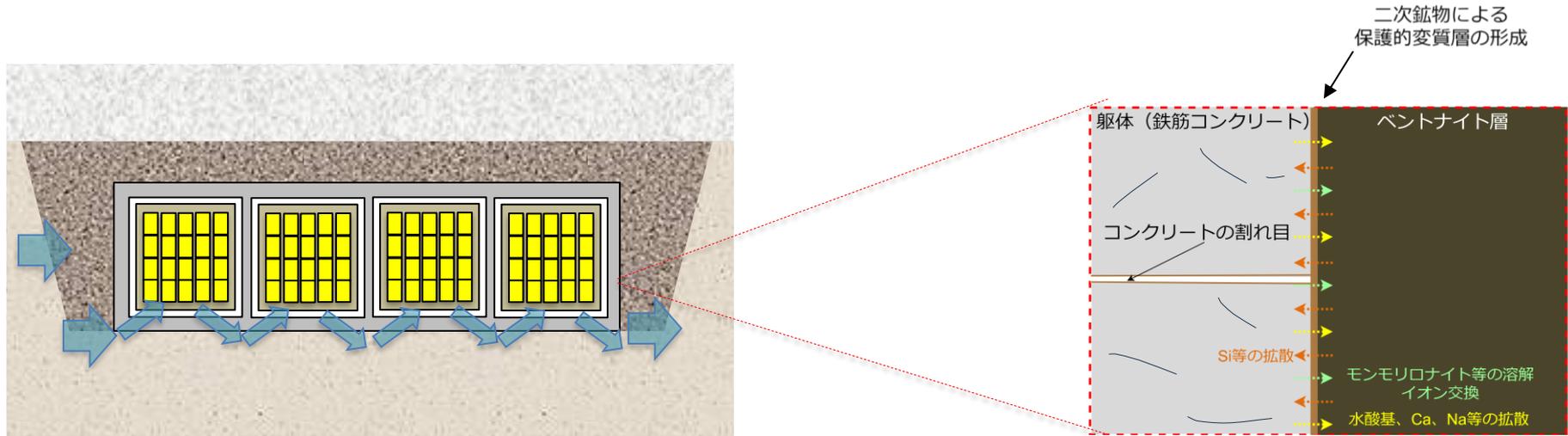
期間I: 処分施設を閉鎖・埋戻し、再冠水が進行する期間

- 低透水層と覆土で埋め戻されたコンクリートピット施設は、周辺の岩層から徐々に地下水が冠水し、飽和状態になる。低透水層内は徐々に還元環境になり、ベントナイト系材料の膨潤によるコロイドろ過性も発現する。コンクリートピットと接している**低透水層の化学変質**が始まるが、安全機能(核種収着性、透水性等)への影響は限定的である。
- コンクリートピットのセメント系材料と地下水が反応することにより、ピット周辺岩層の地下水のpHは局所的に高いものとなる。これにより周辺岩層の変質がわずかに生じる。
- 廃棄体パッケージ容器では、地下水のpHが上昇し、鉄が不動態化することによって腐食速度は極めて小さくなるものの、孔食による腐食が生ずる可能性がある。
- 還元環境における鉄の腐食により、水素ガスが発生し、地下水に溶存、あるいは、過剰なものは気相を形成する。

4.2.2 安全評価手法開発の試行

4.2.2.1 ストーリーボードのプロトタイプ検討

処分施設の状態変化(改良型ピット処分概念オプション①基本シナリオ)



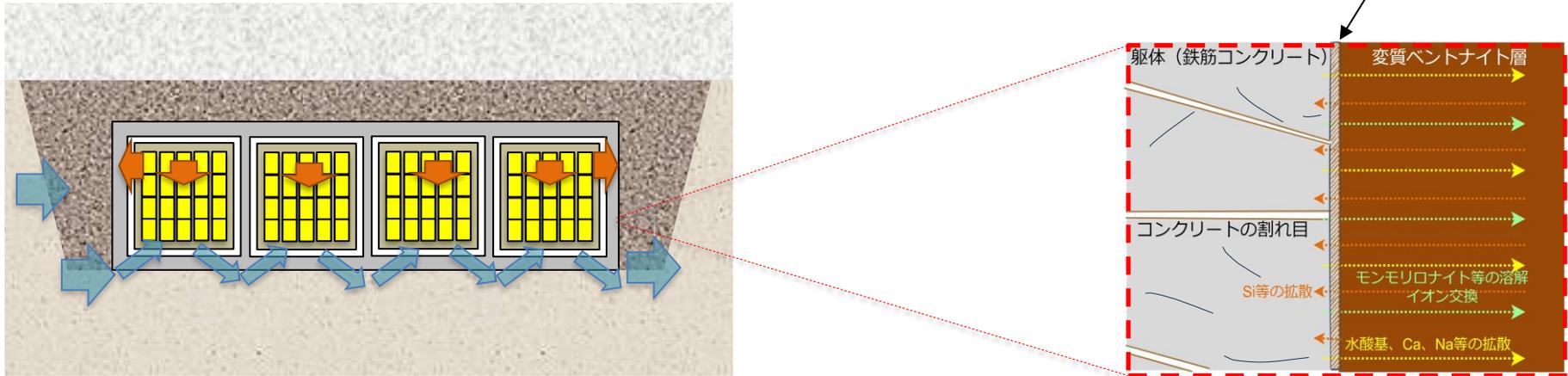
期間II: 再冠水が平衡になり、人工バリアが徐々に変質しつつも、安全機能が期待される期間

- 低透水層とコンクリートピットの境界では、コンクリートからの**CaやNaイオンの拡散**が起こり、**低透水層**に含まれるモンモリロナイトの**イオン型の変化**や、二次鉱物による**保護的変質層の形成**が起こる。低透水層中での地下水の移流はほとんど起こらない。
- 地下水は、コンクリートピット/岩層境界など流れやすい部分を通る。そのため、底部コンクリートピットからの成分溶出が進む。それにつれて、コンクリートピットに徐々にクラックが生じる。それらがピット内外で連結すると、地下水がポーラスコンクリート層に侵入し、地下水で満たされる。
- 充てんモルタルに地下水が接触すると、地下水による変質が始まり、徐々に微細なクラックが生じる。また、金属製の廃棄体容器の腐食膨張により、充填モルタルにクラックが生じる。
- 廃棄体から地下水中に溶出した放射性核種、共存物質、セメント含有物質が、クラックを通る地下水流れによって、下流側に移行する。その際、廃棄体マトリクス、充填モルタル、コンクリートピットに収着される。

4.2.2 安全評価手法開発の試行

4.2.2.1 ストリーボードのプロトタイプ検討

処分施設の状態変化(改良型ピット処分概念オプション①基本シナリオ)



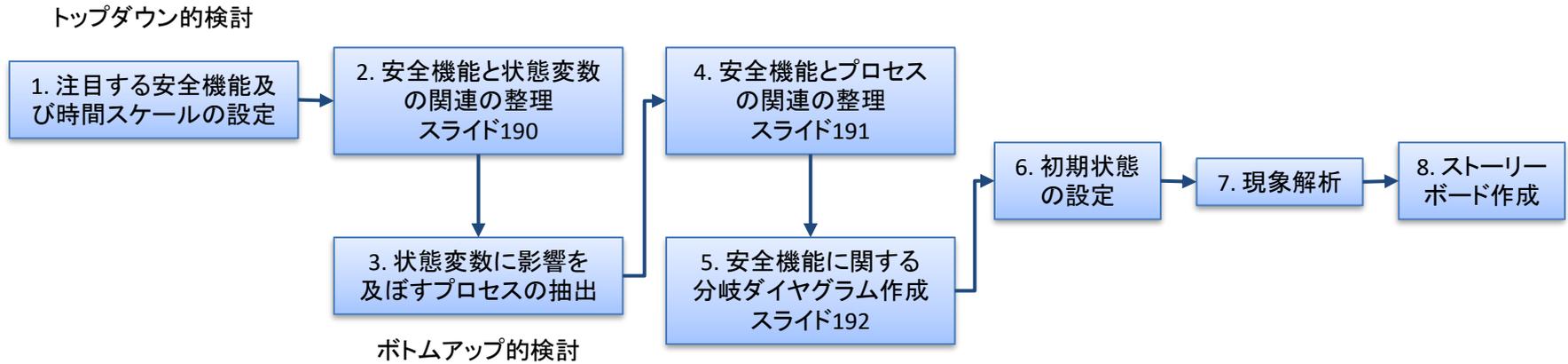
期間III: 安全機能が徐々に失われる期間

- 低透水層**のコンクリートピット境界付近では、モンモリロナイトの**イオン型の変化**や、二次鉱物による**保護的変質層の形成**が進む。コンクリートピットの変質が進み、地下水の特性が変化すると、**保護的変質層の再溶解**も起こる。低透水層中での地下水の移流はほとんど起こらない。
- 底部コンクリートピットからの成分溶出が進み、コンクリートピットのクラック発生が継続する。
- 充てんモルタルからの成分溶出が進み、充填モルタルのクラック発生が継続する。
- 金属製の廃棄体容器の横方向への腐食膨張および廃棄体空隙・クラック部の陥没が起こる。最大限に起こった場合、コンクリートピットの一部(上部隅)の破断や陥没が起こるが、**低透水層の破断は起こらない**。
- 廃棄体から地下水中に溶出した放射性核種、共存物質、セメント含有物質が、クラックを通る地下水流れによって、下流側に移行する。その際、廃棄体マトリクス、充填モルタル、コンクリートピット中の変質した鉱物に収着される。

4.2.2 安全評価手法開発の試行

4.2.2.1 ストーリーボードのプロトタイプ検討

低透水層(ベントナイト層)の状態設定



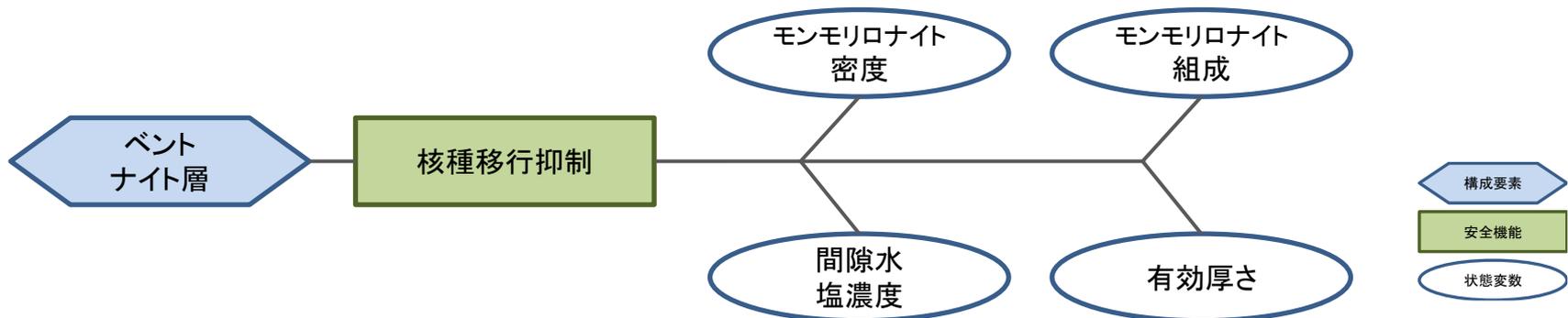
低透水層(ベントナイト層)の状態設定の手順

4.2.2 安全評価手法開発の試行

4.2.2.1 ストーリーボードのプロトタイプ検討 低透水層(ベントナイト層)の状態設定

安全機能と状態変数の関連の整理

- 圧密ベントナイト中の物質移動特性はモンモリロナイト密度によって規定される外部間隙の大きさ及びCsの収着挙動に影響を及ぼす間隙水の塩濃度にも依存するものと考えられる。
- これらに加えて、モンモリロナイトはイオン型によって膨潤性が異なることから、モンモリロナイト組成によっても影響を受ける可能性があるものと考えられる。
- さらに、有機物と錯形成している核種を解離させ、粘土鉱物に吸着させるためには、ベントナイト層の有効厚さ(変質等が生ずる場合には未変質部等の初期の機能を保持した部位の厚さ)を担保することが必要と考えられる。



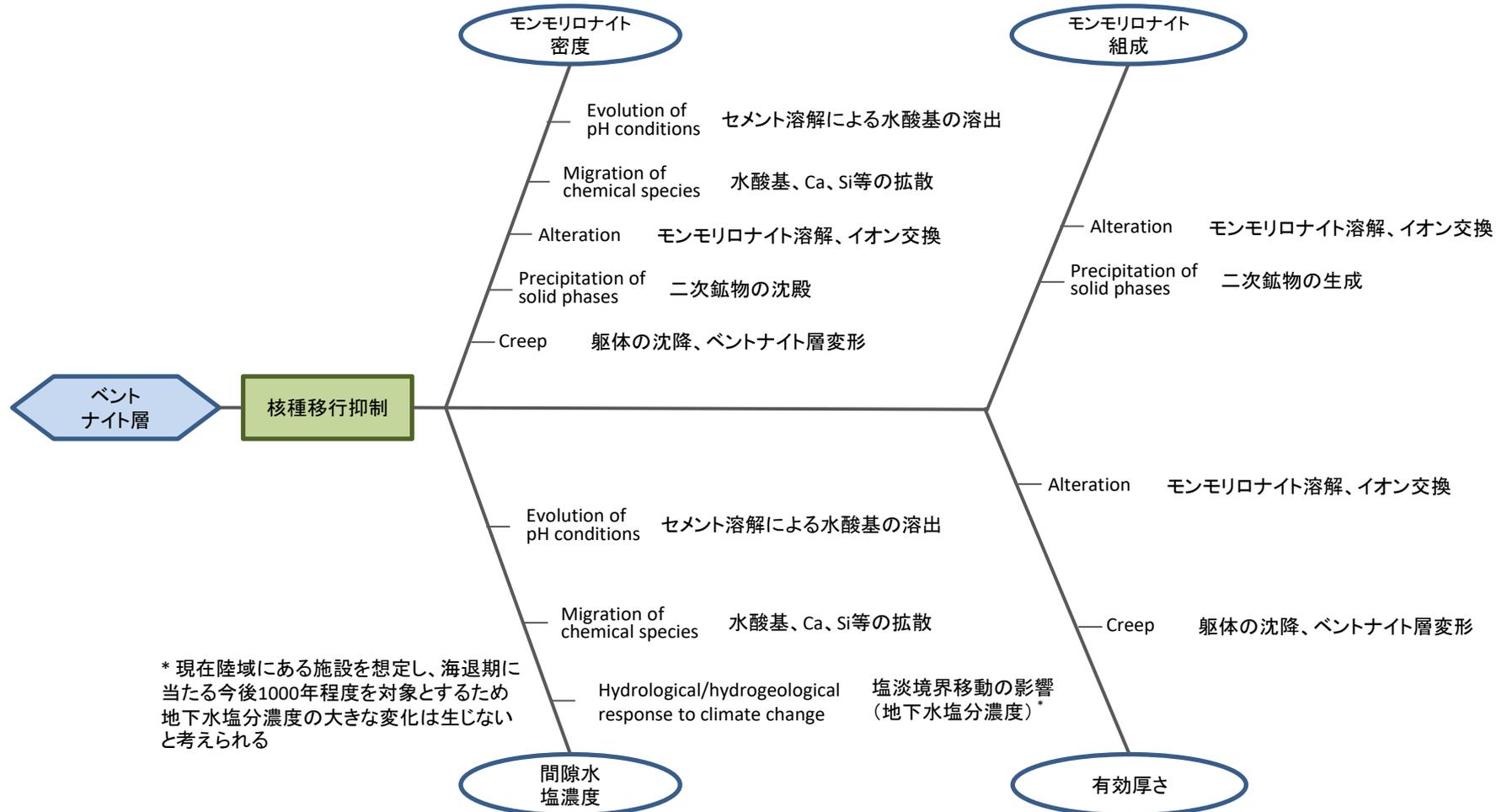
注目する安全機能及び関連する状態変数

4.2.2 安全評価手法開発の試行

4.2.2.1 ストーリーボードのプロトタイプ検討 低透水層(ベントナイト層)の状態設定

安全機能とプロセスの関連の整理

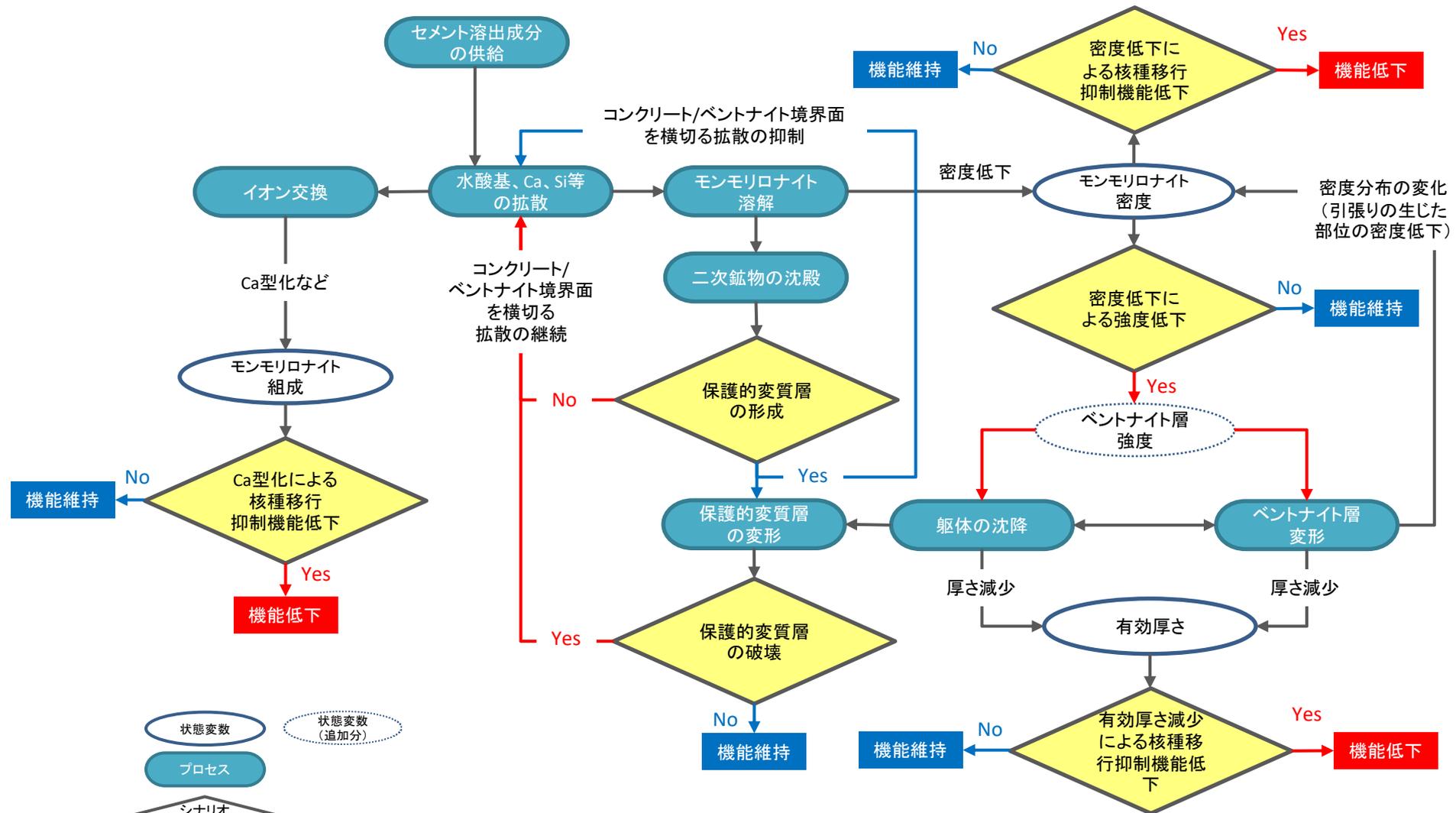
安全機能を規定する状態変数の時間的変遷に影響を及ぼす可能性のあるFEP(英字)をFEPデータベース※から抽出し、鉄筋コンクリート製躯体に接触する形で敷設されたベントナイト層について、該当する具体的な特徴やプロセスをマッピングした(邦字)。



4.2.2 安全評価手法開発の試行

4.2.2.1 ストーリーボードのプロトタイプ検討 低透水層(ベントナイト層)の状態設定

安全機能に関する分岐ダイアグラム作成



4.2.2 安全評価手法開発の試行

4.2.2.1 ストーリーボードのプロトタイプ検討 低透水層(ベントナイト層)の状態設定

- ベントナイト層に関するシナリオ分岐のポイント
 - i. コンクリートから溶出する水酸基等がベントナイト層に主として拡散で進入し、pHが上昇することに伴いモンモリロナイトの溶解が生ずる際、同時に生成する二次鉱物(CSHゲル、Calcite、ゼオライト等)によってコンクリート躯体とベントナイト層の境界に緻密な変質層が形成されてそれ以降のベントナイト変質が停止するか否か。
 - ii. 上記の境界層形成による変質停止までに、溶解によって移行抑制機能が低下する程度までモンモリロナイト密度が低下するか否か。
 - iii. 上記の境界層形成による変質停止までに、溶解によってベントナイト層の強度が低下して躯体の沈降やベントナイト層の変形が生ずる程度までモンモリロナイト密度が低下するか否か。
 - iv. 上記iii.において躯体の沈降やベントナイト層の変形が生ずる場合、i.で形成された緻密な境界変質層が破壊されコンクリートから溶出する水酸基等が再び底部ベントナイト層に進入することがあるか。
 - v. ベントナイトのカルシウム化が進み移行抑制機能が低下することがあるか。
- 基本シナリオの設定に必要な検討
 - **初期条件の設定:** 移行抑制に十分なモンモリロナイト密度、厚さのベントナイト層を均質性を担保しつつ敷設し得ることのエビデンスに基づく確認
 - **ベントナイト変質の予想:** 上記i.～iii.及びv.に答えるための反応輸送解析及びエビデンスに基づく妥当性の評価

4.2.2 安全評価手法開発の試行

4.2.2.1 ストーリーボードのプロトタイプ検討 低透水層(ベントナイト層)の状態設定

■ 鉱物組成の変化

- 1,000~10,000年程度でコンクリート層側の間隙が完全に閉塞(沈殿している鉱物はCSHやCalcite)。
- 間隙閉塞により境界面の実効拡散係数が低下し、10,000年以降は反応が抑制されており、鉱物組成はほとんど変化していない。
- ベントナイトの境界近傍部5 cm程度ではilliteやSepiolite、Calciteが沈殿(それぞれK、Mg、Caといったカチオンのシンクとなっている)。
- モンモリロナイトは、境界近傍部5 cm程度を除いて10万年までNa型とCa型がほとんど比率を変えずに残存。

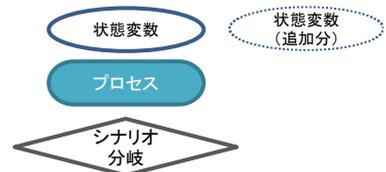
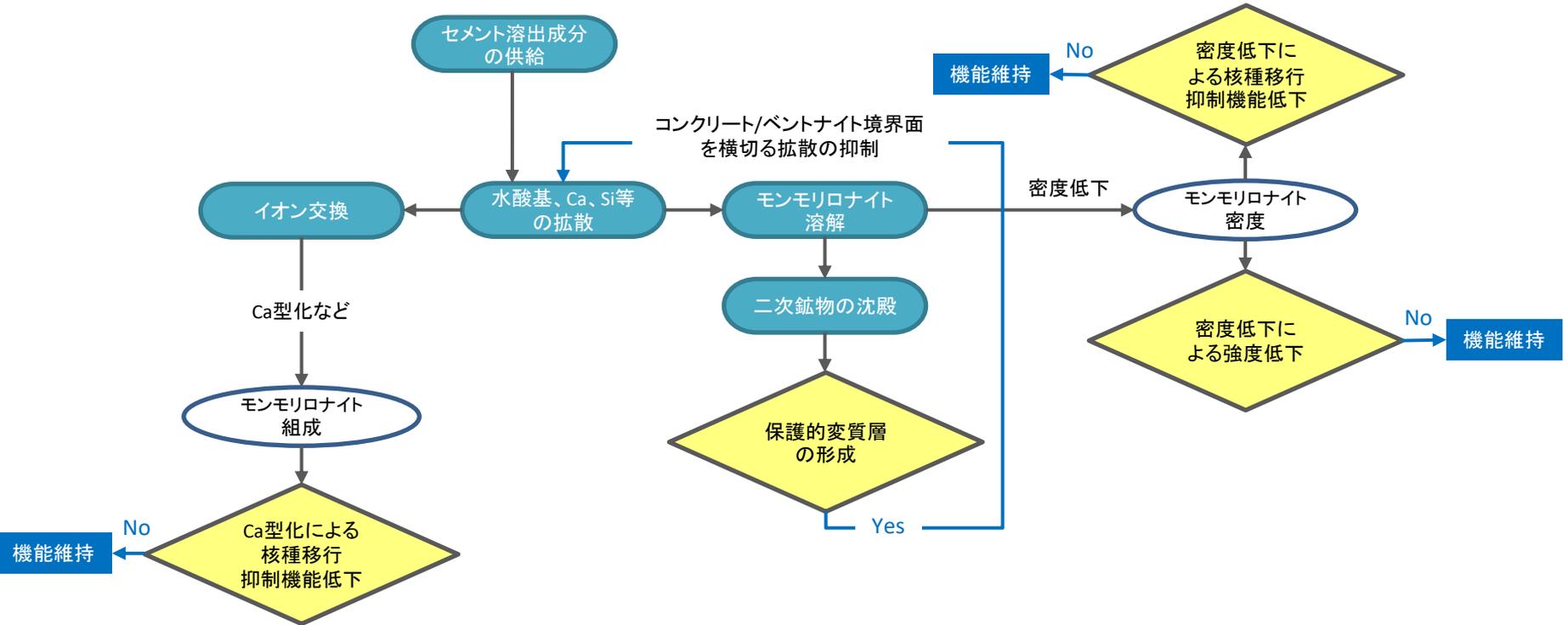
■ 安全機能への影響

- ベントナイトーコンクリート境界において保護的変質層が形成されてコンクリートからベントナイトへの水酸基やCa等の移行が抑制されるため、モンモリロナイトの溶解は初期のうちに抑制され、1000年時点では境界部の1 cm程度を除きモンモリロナイト密度低下は生じず、移行抑制機能は維持されると考えられる。
- 境界部の保護的変質層の物質移動抑制効果によってモンモリロナイトのイオン交換も進行せず、モンモリロナイトは全域にわたってNa型が保持される。このことから、イオン交換による移行抑制機能への影響も無視できるものと考えられる。
- 1000年時点で境界部の1 cm程度を除きモンモリロナイト密度低下は生じず、変質部も二次鉱物の生成によって間隙率が低下していることからベントナイト層の力学的強度が保たれるものと考えられる(力学解析による確認要)。

4.2.2 安全評価手法開発の試行

4.2.2.1 ストーリーボードのプロトタイプ検討

低透水層(ベントナイト層)の状態設定



4.2.2 安全評価手法開発の試行

4.2.2.1 ストーリーボードのプロトタイプ検討

まとめ

■ ストーリーボードのプロトタイプ構築

- 改良型ピット処分概念オプション①について、人工バリアの状態変遷の観点から3つの期間(スライド185参照)に対して、それぞれにおける処分施設の状態変化を記述した。
- カギとなる状態変化のうち、低透水層の状態変化について、科学的根拠を整理した。今後、その他の状態変化について、同様の手法によって科学的根拠を整理していく。

主要概念の定義および参考文献

主要概念	定義	参考文献
基本シナリオ	過去及び現在の状況から、廃棄物埋設地及びその周辺の地質環境、被ばく経路の特定に基づき将来起こる可能性が最も高いと予見されるシナリオ。	日本原子力学会、日本原子力学会標準 浅地中処分の安全評価手法、2016、AESJ-SC-F026:2016.P6 表1
変動シナリオ	基本シナリオに対する不確かさを網羅的に考慮した状態設定の下で、科学的に合理的と考えられる範囲で最も厳しい想定を行ったシナリオ。	日本原子力学会、日本原子力学会標準 浅地中処分の安全評価手法、2016、AESJ-SC-F026:2016.P6 表1
接近シナリオ	基本シナリオ、変動シナリオ及びその他のシナリオの各枠組み内で、特に生活環境に近い浅地中処分において廃棄物埋設地全体を掘削し、人間が接近するシナリオ。特に本案件では、大開発土地利用等を目的とした大規模な掘削後に掘削土壌の上で居住者が被ばくすることを想定し、接近シナリオとしてその他のシナリオに含まれる「廃棄物埋設地掘削シナリオ」を参照している。	日本原子力学会、日本原子力学会標準 浅地中処分の安全評価手法、2016、AESJ-SC-F026:2016.P6 表1、P2本文、P6 表2、P18
ストーリーボード	地層処分システム全体の時間的・空間的な振る舞いを俯瞰できるように、空間スケールと時間スケールごとに、処分場の状態や核種の移行に関係するプロセスを、概念図や記述を用いて描写したもの。	NUMO-SC本編6章P23 NUMO-SC用語集
セーフティケース	処分施設の安全を裏付ける科学的、技術的、経営管理上の論拠ならびに証拠を体系的に集めたものであり、サイトの適合性ならびに施設の設計、建設および操業、放射線リスクの評価、そして処分施設と関連するあらゆる安全関連作業の適切性と品質の保証を包含する総合的な文章として事業者が作成するもの。	NUMO-SC本編1章P10 NUMO-SC用語集
リスク	ISO(国際標準化機構International Organization for Standardization)やIRGC(国際リスクガバナンス協議会; International Risk Governance Council)をはじめとする国際機関が制定した体系的かつ組織的なリスクマネジメントおよびリスクガバナンスの規格で使用されている概念的なリスク。	ISO, Risk management — Risk assessment techniques (ISO31010), 2009. IRGC, INTRODUCTION TO THE IRGC RISK GOVERNANCE FRAMEWORK, 2017