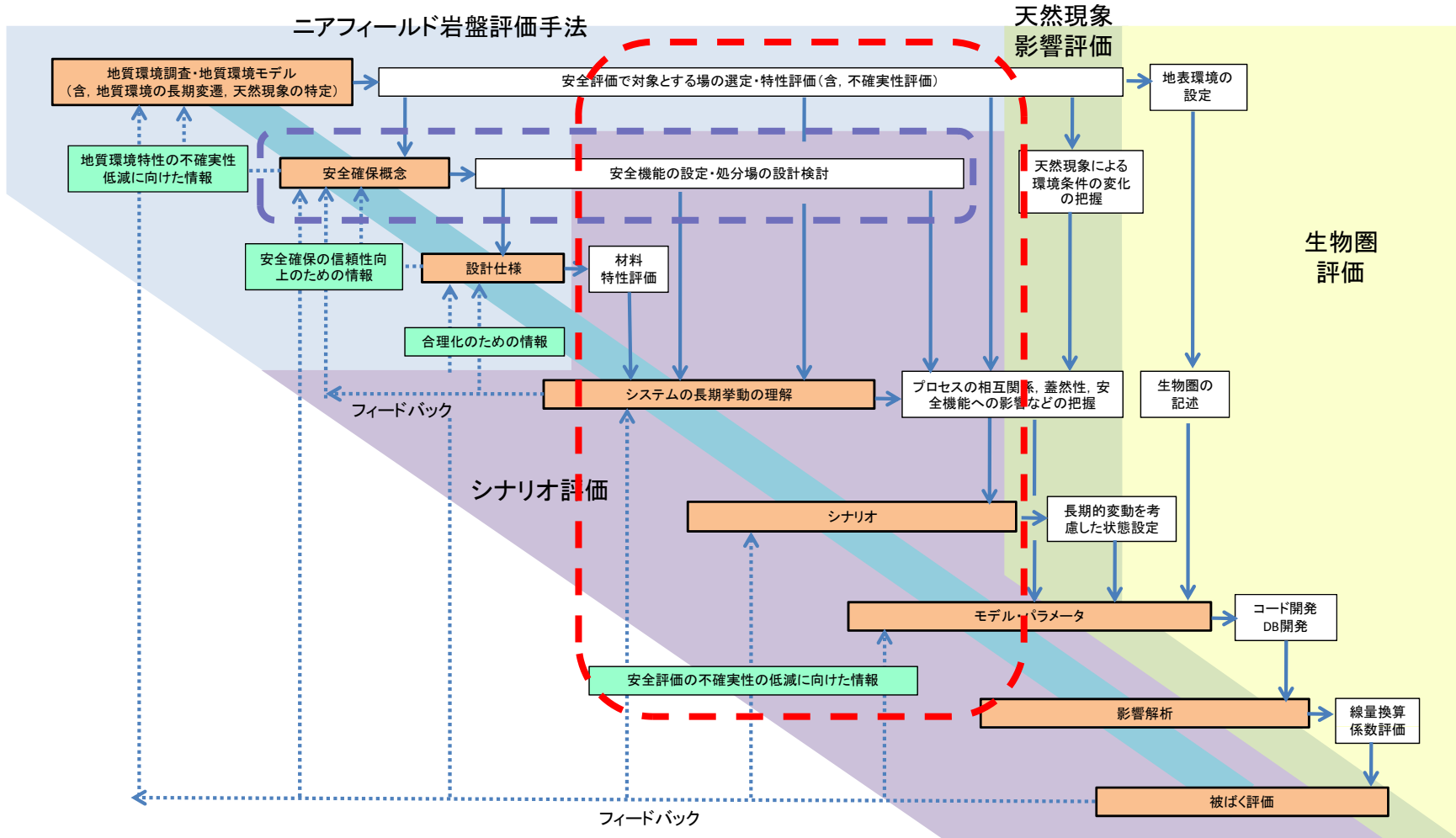


**実際の地質環境条件に適用するための  
性能評価手法  
—シナリオ評価手法—**

**平成22年8月5日**

**地層処分研究開発部門 システム性能研究グループ  
稲垣 学**

# 「基本シナリオ」を対象としたFEP情報に基づく シナリオの構築・評価技術の整備(基本フレーム)



**安全確保概念 = 安全機能として何を考えるのか → トップダウン的な視点を重視**

- ◆ (基本シナリオ:) 発生の可能性が高く、**通常起きるものと考えざるをえないようなシナリオ**に基づき、**確からしい状態設定のもとで、確からしいパラメータを用いた評価を行うものである**

- ・ **状態設定の考え方**

- 長期的変動事象及び埋設施設の状態の設定の考え方を示した上で、シナリオ設定の考え方を示す
  - 現状の知見に照らして**科学的に確からしいと予見される状態設定を基本設定とし、これに基づいて基本シナリオの策定を行う**
  - 変動の原因となる事象の不確かさの幅やその影響範囲を分析し、様々な不確かさの**影響を包絡できるような代表的シナリオ**→(変動シナリオ)

- ・ **期間区分**

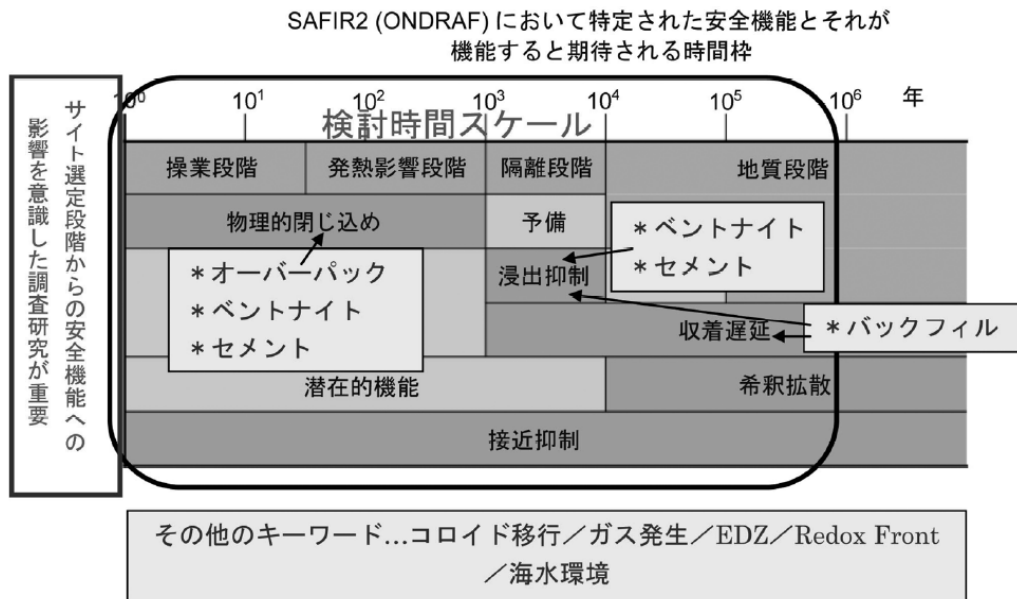
- ①過渡的な期間
- ②多重バリア機能に期待する期間
- ③主に天然バリア機能に期待する期間
- ④埋設施設が地表付近に近接することが想定される期間

### ◆ 目的

- 放射性廃棄物が長期にわたり人間とその生活環境に有意な影響を及ぼさないようにする

### ◆ 方法

- 放射性廃棄物を**閉じ込め**, 人間の生活環境から隔離することを基本とし, 対象廃棄物を安定な地下深部に埋設し, 人工バリアと天然バリアから構成される多重バリアシステムによってその機能を担保する(NUMO 2009)



(JAEA-Research 2009-055)より

- 埋施設は、廃棄体に内蔵される放射性物質が、処分空洞の外部にできるだけ漏出しないように設計される必要があり、この機能を有した部位を総称して、人工バリアとよぶ。**安全評価上は、人工バリアの構成部位が有する防護機能に着目する**

- 対象とするバリア毎に評価すべき時間スケールが異なる  
→**バリア毎の期間区分**

# 海外の規制におけるシナリオ分類

スウェーデン SKIFS 2008	フィンランド STUK YVL 8.4	スイス HSK-R21 1993
<p><b>メインシナリオ</b> 発生確率が高い＋発生確率が低いことを示すことができない事象を取り込む</p>	<p><b>基本シナリオ</b> 環境の変化を合理的に予測したシナリオ(実効線量0.1 mSv /a)</p>	<p><b>防護目的1</b> 適切に発生するプロセスやイベントを考慮(0.1mSv/a)</p>
<p><b>発生確率の低いシナリオ</b> メインシナリオとは異なる可能性を考慮, 人間活動によるバリア損傷等</p>	<p><b>変動シナリオ</b> バリアの性能劣化の影響を評価</p>	<p><b>防護目的2</b> 非現実なプロセスやイベントを考慮(リスク1/100万)</p>
<p><b>残余シナリオ</b> 処分場への人間侵入, 処分場の閉鎖前の放置等</p>	<p><b>擾乱シナリオ</b> 可能性の低い破壊的事象, 深井戸ボーリング, ボーリングの直撃, 大規模な岩盤の動きを考慮</p>	<p><b>防護目的3</b> 処分場の閉鎖後に対する対策(シール等)</p>

# シナリオ研究の目的とアプローチ

## ◆ 目的

- ・ シナリオ構築における透明性や追跡性，網羅性の担保
- ・ シナリオ全体が俯瞰できるシナリオの表現方法の検討
- ・ 既存の評価<sup>(\*)</sup>において設定されたシナリオをベースに，**シナリオの更新を柔軟**に進めるための方法論を構築

(\*) 本研究では，第2次取りまとめをベースとした

シナリオ：前提，環境条件，環境条件に基づく安全機能に対する評価モデル，パラメータ，評価結果までを含む全体

## ◆ アプローチ

### ① 既存の評価(第2次取りまとめレファレンス)を対象に

- 初期条件
- 処分環境条件(温度，水理，力学，化学，形状)
- 安全機能 の構造で整理(FepMatrixを利用)

### ② 処分オプションや地質環境条件の変更に伴い想定される懸念事象を発端とするPIDを(評価すべき安全機能を念頭に)作成，プロセス間の影響に関する判断や，重要なプロセスの抜け落ちのチェックを行い，処分環境条件への影響を抽出する。

### ③ 抽出された処分環境条件への影響を，その他の前提や処分環境条件の変化について総合的に判断し①の整理結果を変更する。

②③では，感度解析を用いることにより効率的な判断を行う

### ④ ③→②→③を繰り返す

ひな形

PID:

状態変化をもたらす物理的・化学的現象の抽出・整理→状態設定

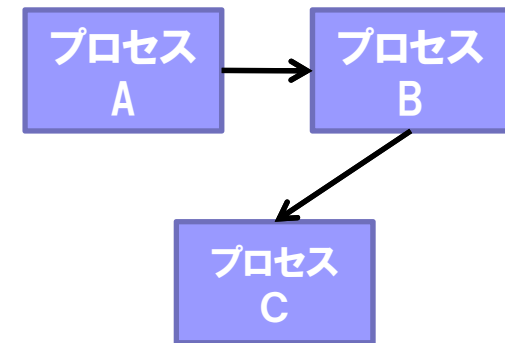
FepMatrix :

事象の相互の関連を踏まえた状態設定の評価方法のまとめり→シナリオ(新しいひな形)

# シナリオ構築のための2つの情報整理方法

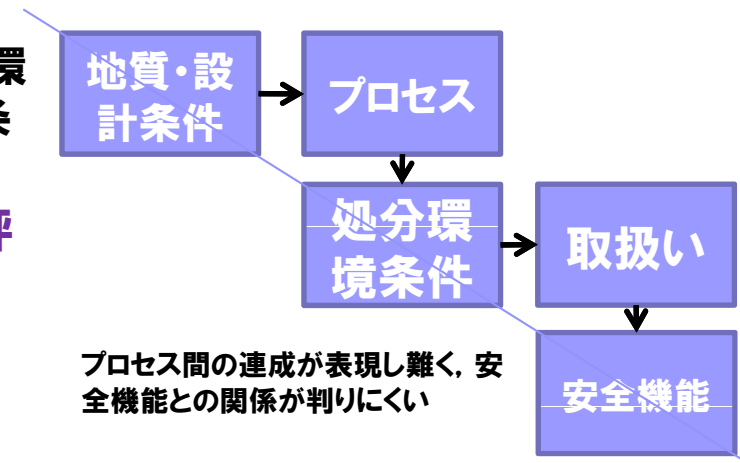
## PID を用いた方法

プロセスを配置して図示することにより、プロセス間の相互関係が判りやすく、期間区分に対応する表記も可能



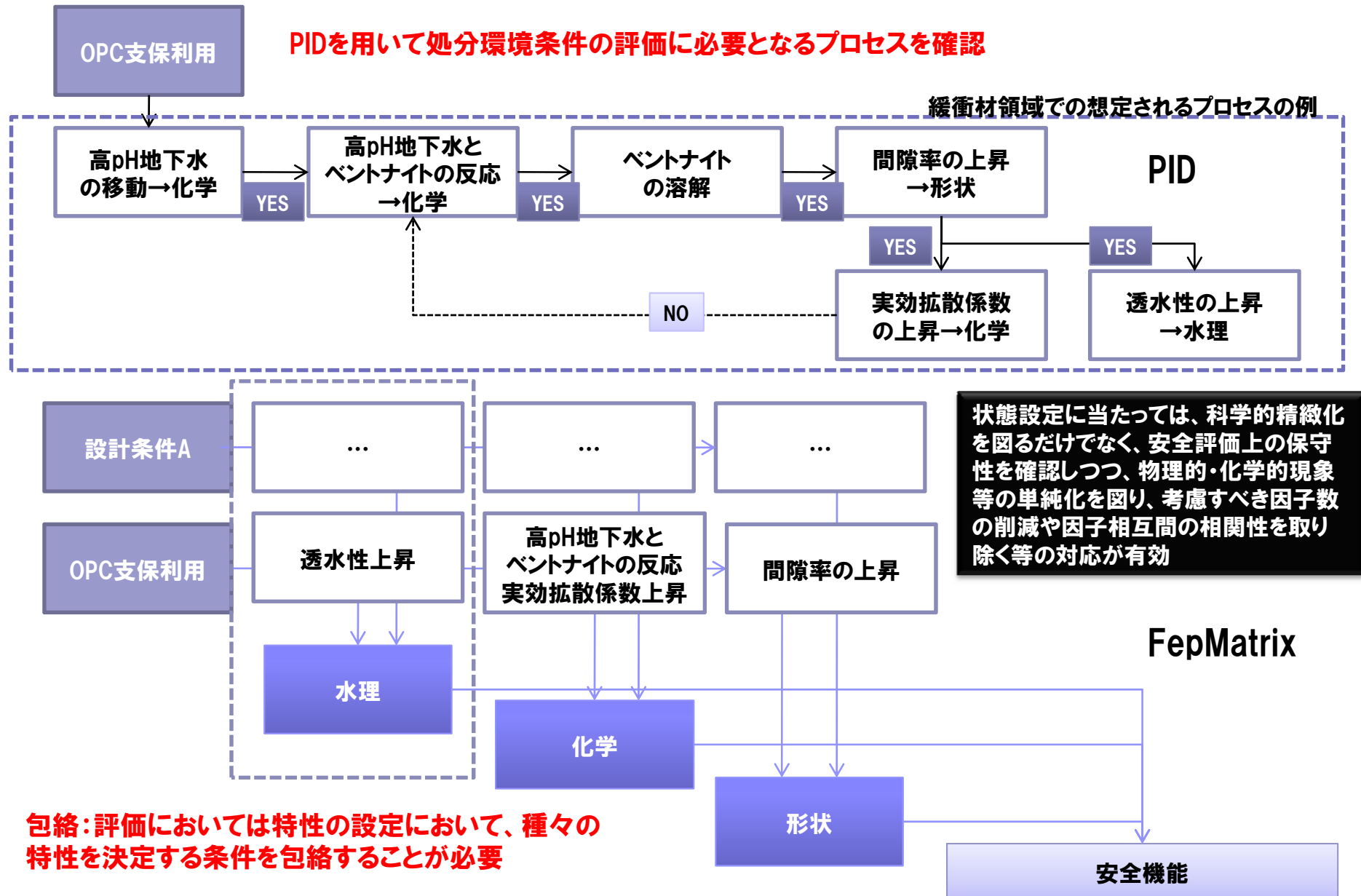
## 相関マトリクスを用いた方法 (FepMatrix)

処分環境条件と安全機能を対角要素に配置【処分環境条件 (THMCG) を決定する要因(地質環境条件, 設計条件)を上流に配置】, 安全機能の取り扱い, すなわち, 安全機能が「どの様な処分環境に基づきどの様に評価されるか」まとめ易い



プロセス間の連成が表現し難く、安全機能との関係が判りにくい

# PIDとFepMatrix形式の併用の利点



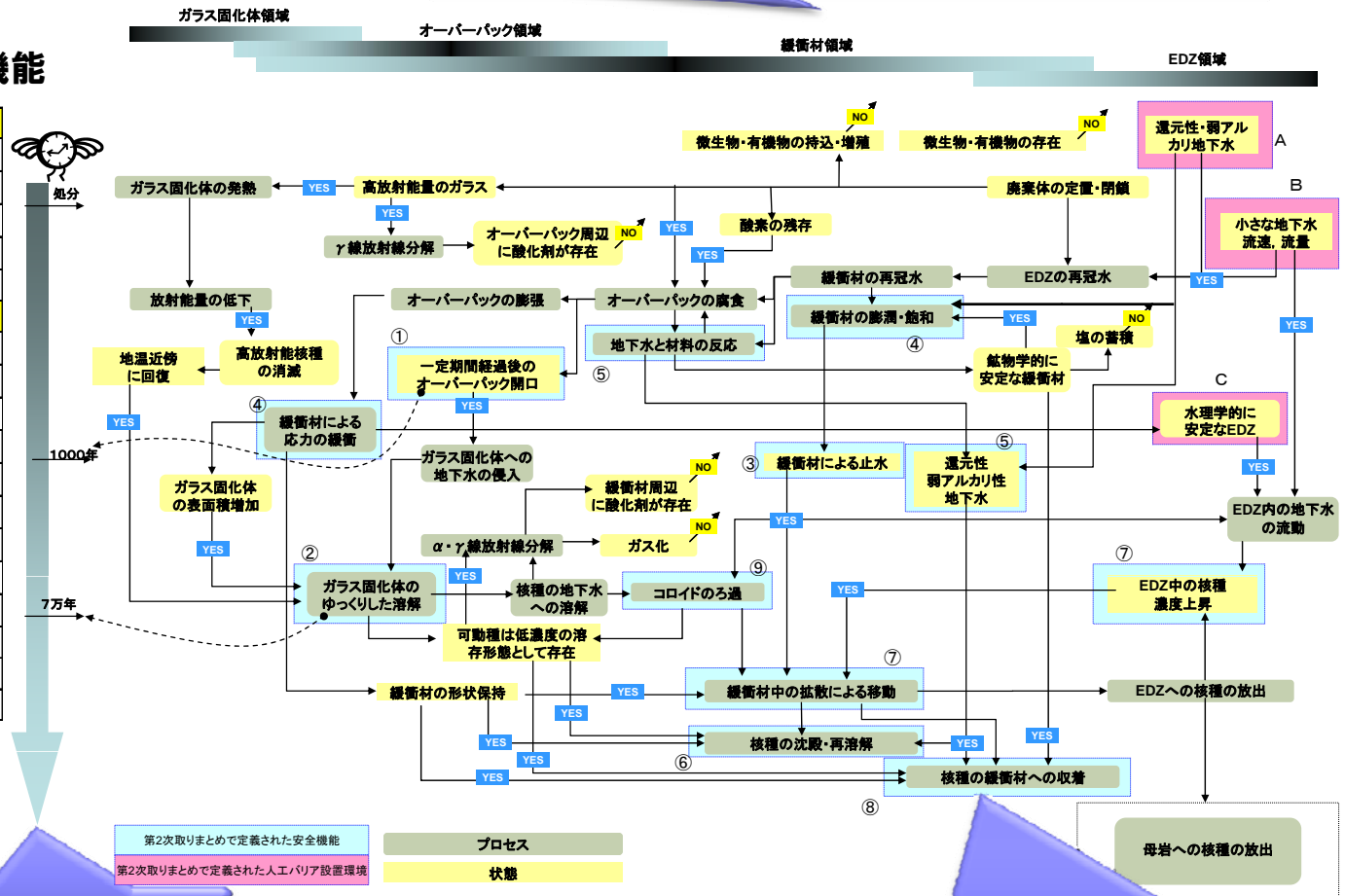


# ひな形の作成(アプローチ①, PIDで表現)

概略的にシステムで注目するプロセスが把握可能  
 →FepMatrixとの相互の構築により重要なプロセスの抜け落ちが防げる

## 第2次取りまとめにおける安全機能

人工バリアの設置環境	
好ましい地下水化学 (還元性など)	A
小さな地下水流束	B
力学的安定性	C
処分施設がバリア性能を損なわない	D
人間環境からの物理的障壁の存在	天然バリア
地層処分システムに期待する安全機能	
オーバーバックの核種閉じ込め	①
ガラス固化体が地下水への放射性核種の溶出を抑制	②
緩衝材の低透水性	③
緩衝材の膨潤性と可塑性	④
緩衝材の化学的緩衝性	⑤
緩衝材間隙中での低い溶解度 (溶解度制限)	⑥
緩衝材中での小さな物質移行速度 (拡散)	⑦
緩衝材中での核種移行遅延 (収着)	⑧
緩衝材中でのコロイド、微生物および有機物のろ過	⑨
母岩中での核種の移行抑制	天然バリア
母岩中での核種の希釈・分散	天然バリア
移行中の崩壊による核種の減衰	共通

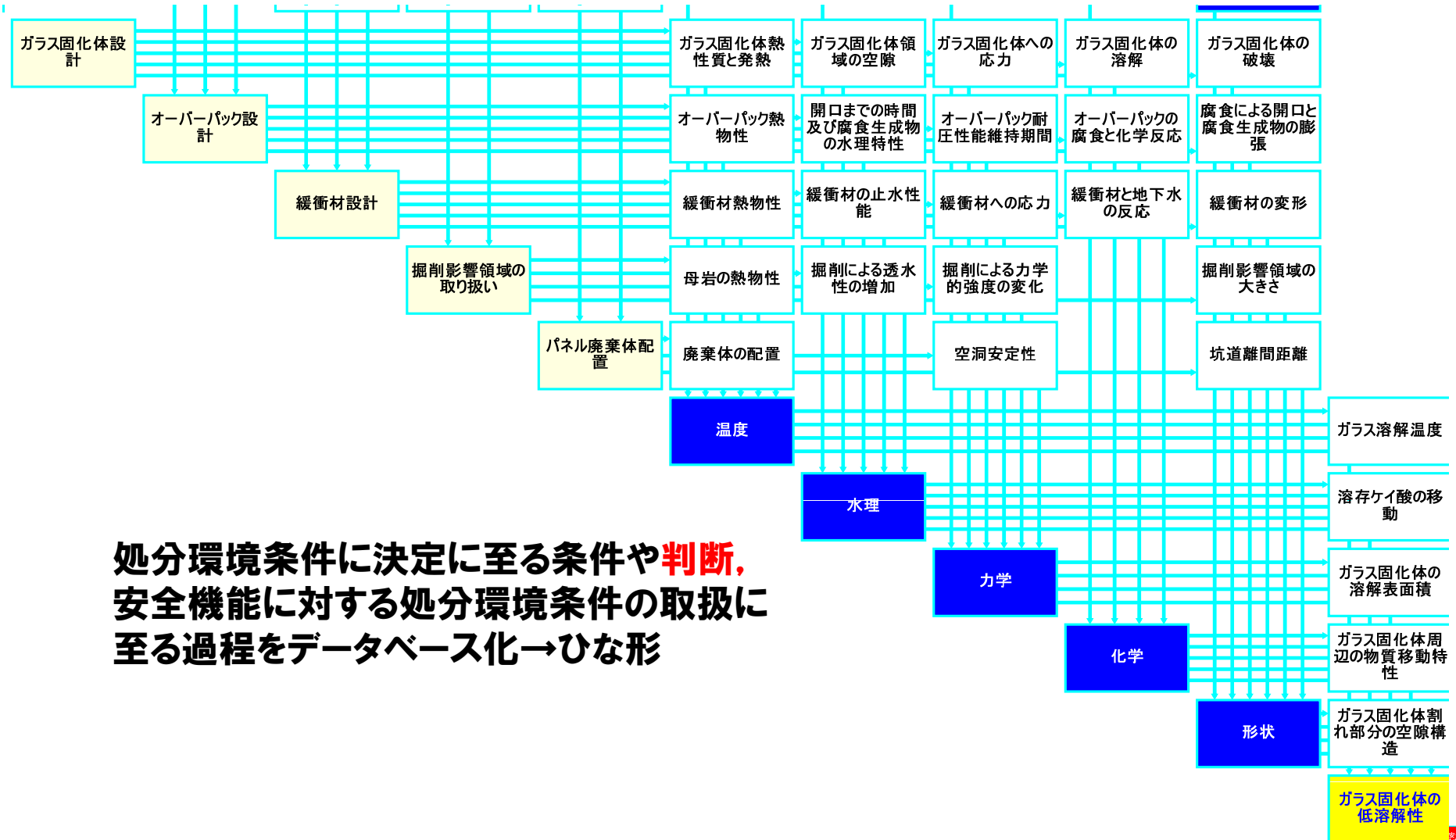


時間的な変遷を考慮し易い

安全機能に関するFEPを「括ったFEP」を用いることにより、表現することが容易となる

# ひな形の作成(アプローチ①, FepMatrixで表現)

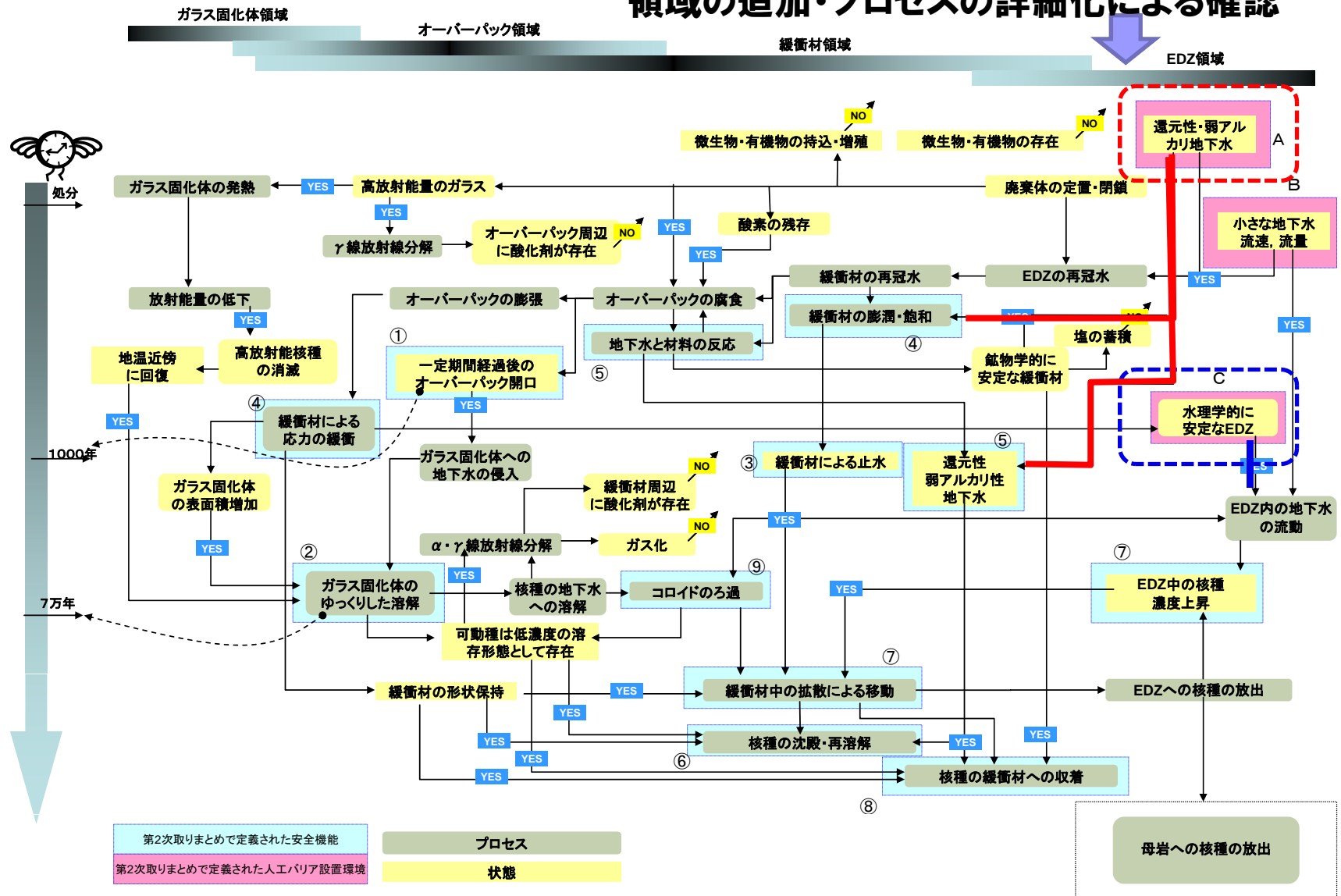
初期条件→処分環境条件→安全機能の構造で、第2次取りまとめを再整理



処分環境条件に決定に至る条件や判断、安全機能に対する処分環境条件の取扱いに至る過程をデータベース化→ひな形

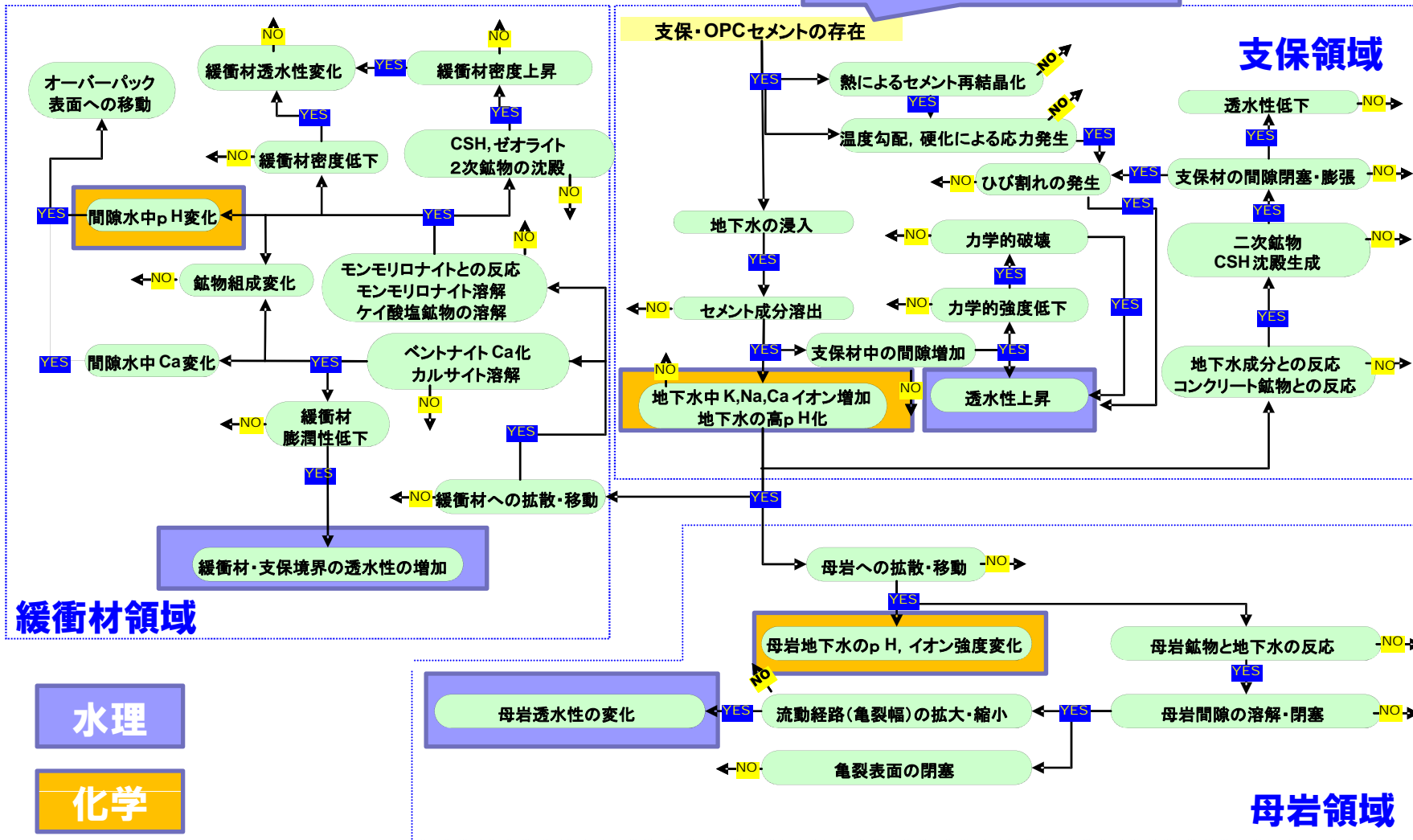
# 処分環境条件の変更に伴うプロセスの抽出の例示 (アプローチ②)

## 領域の追加・プロセスの詳細化による確認



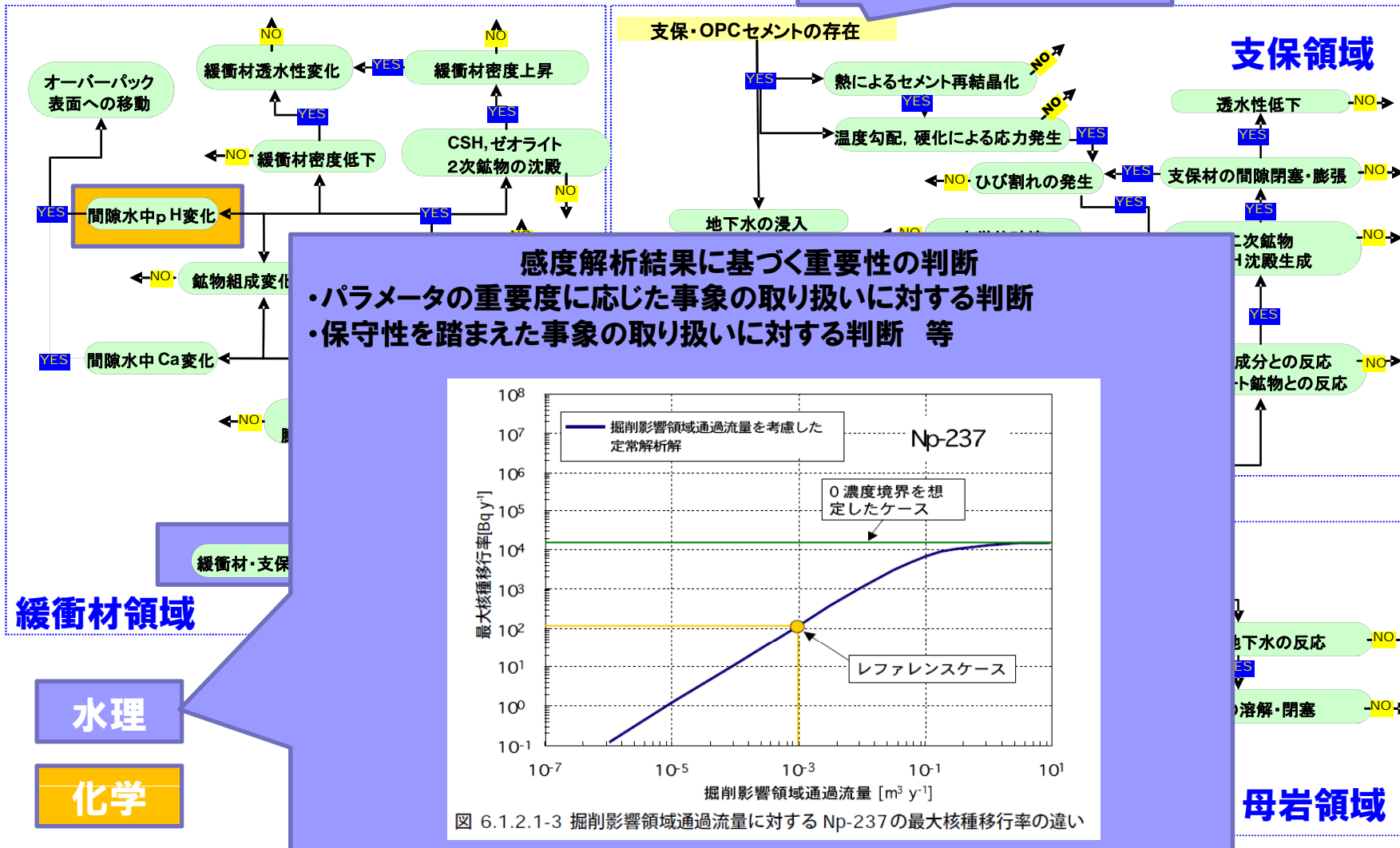
# 設計条件の変更に伴うプロセスの抽出と処分環境条件への影響( OPC支保利用による例示, アプローチ②)

## 発端となる条件変更



# 設計条件の変更に伴うプロセスの抽出と処分環境条件への影響( OPC支保利用による例示, アプローチ②)

発端となる条件変更



水理

化学

緩衝材領域

支保領域

母岩領域

緩衝材・支保

支保・OPCセメントの存在

# FepMatrixの整理結果に対する変更(アプローチ③)

## ●設計オプションや設計変更に伴う実用性を踏まえたシナリオの開発手法

### 特徴

- 初期条件, 処分環境条件と安全機能の関係を表している
- 構造的に整理された情報について「変更点」をリストアップすることにより, シナリオの更新や解析ケースの追加・変更

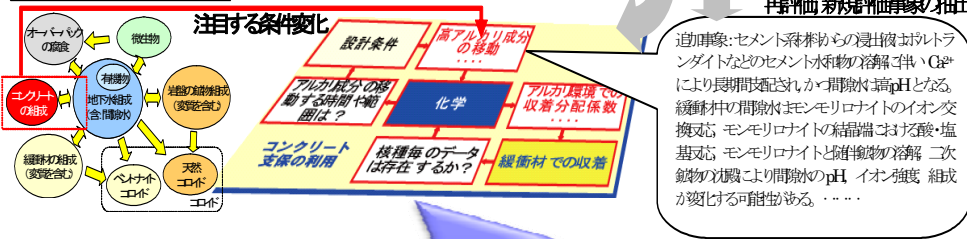
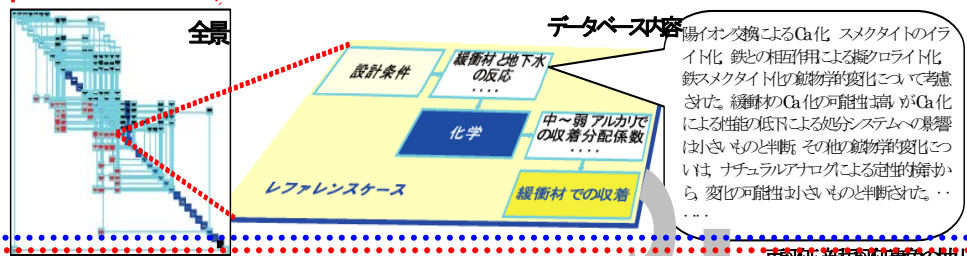
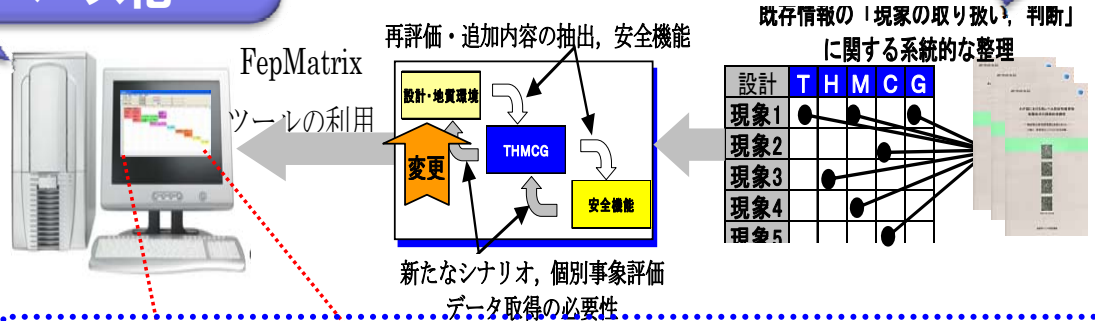
- アプローチの繰り返しによるシナリオ抽出

処分環境条件の更新とそれに伴う安全機能の取り扱いに対する更新

処分環境条件と安全機能との関係を整理しデータベース化

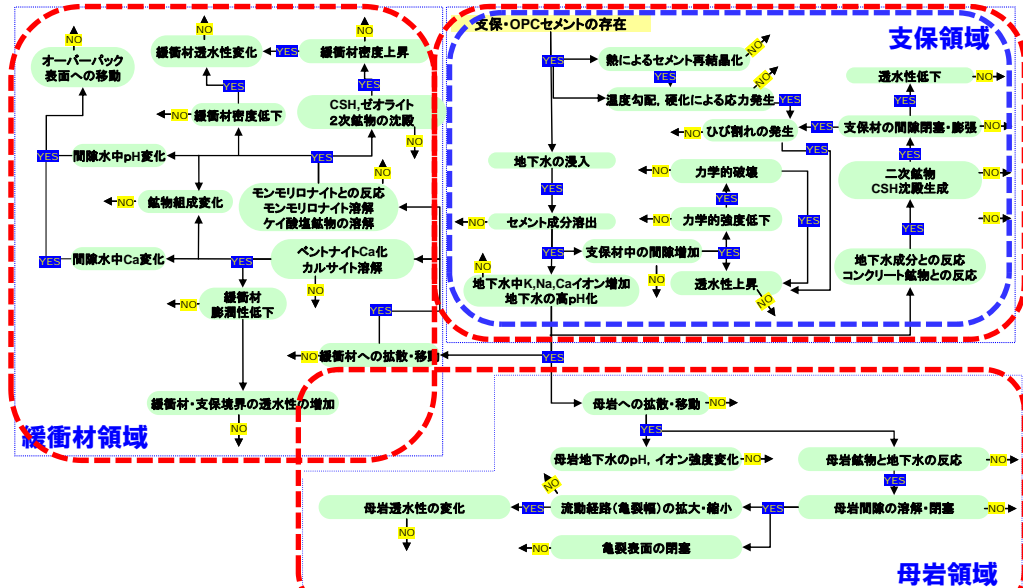
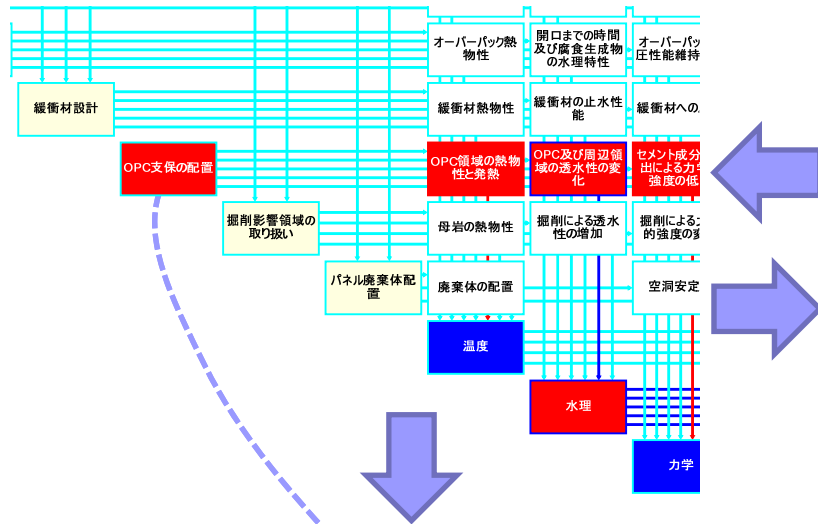
処分環境条件の整理

### FepMatrixによる情報整理の概念



変更を踏まえた更新されたデータベース

# FepMatrixの整理結果に対する変更(アプローチ③)



母岩条件	考慮事項	設計	取り扱い
母岩力学	母岩の力学物性	掘削影響領域の取り扱い	母岩（結晶質岩力学特性を使用）。
温度	母岩の熱性質	掘削影響領域の取り扱い	母岩熱物性を使用。
水理	処分坑周辺の低透水性	掘削影響領域の取り扱い	硬岩系岩盤では、TBMでの掘削による既存データから、坑道壁から0.5mの範囲で水理的掘削影響領域が発生するものと仮定。
母岩ジオメトリー	空間領域	掘削影響領域の取り扱い	硬岩系岩盤では、TBMでの掘削による既存データから、坑道壁から0.5mの範囲を想定。

設計条件	考慮事項	処分環境条件	
掘削影響領域の取り扱い	母岩の熱物性	温度	周辺母岩の温度は、閉鎖後10年程度で最高温度（横置き、硬岩で81°C~97°C）となり、1000年後には、どの条件においても60°Cを下回る。約10000年で環境温度の45°Cに回復する。
掘削影響領域の取り扱い	掘削影響領域の大きさ	形状	掘削影響領域の発生は定性的に考慮され、坑道の配置方向やプラグの施工等の配置の基本的な考え方の検討に用いられている。
掘削影響領域の取り扱い	掘削による力学的強度の変化	力学	力学的に特に考慮されていない。
掘削影響領域の取り扱い	掘削による透水性の増加	水理	掘削影響領域が潜在的に卓越した水みちとなる可能性を低くするために坑道と流向を直角に配置することを検討。設計過程では、掘削影響領域として、岩盤の低透水性が低下することが前提とされ、定性的配慮された。

処分環境	考慮事項	安全機能	取り扱い
	掘削影響領域での低透水性維持		物理的な厚さを伴わない、瞬時に混合する仮想的なミキシングセルモデルを使用する。 人工バリアからの核種の移行は、ミキシングセルとの濃度勾配に支配される。
	掘削影響領域での低透水性維持		TBMの使用を想定し、0.5m幅の掘削影響領域が発生し、亀裂の透水性（透水量係数）は、健全部の10倍となるものと仮定。これにより固化体あたりの地下水流量を0.00lm <sup>3</sup> /yとする。
形状	形状の時間変化	掘削影響領域での低透水性維持	特に考慮されない
水理	掘削影響による透水性の増加	掘削影響領域での低透水性維持	硬岩系岩盤のデータを用い、亀裂ネットワークの詳細から、掘削影響領域の流量を推定。0.00lm <sup>3</sup> /yの算出値を採用。
水理	掘削影響による透水性の増加（緩衝材の侵入）	掘削影響領域での低透水性維持	緩衝材の侵入による透水性の変化は特に考慮していない。
水理	掘削影響による透水性の増加（亀裂不均質性の取り扱い）	掘削影響領域での低透水性維持	母岩の全領域に亀裂が不均質に分布しているものと仮定している。
水理	掘削影響による透水性の増加（掘削による透水性の上昇）	掘削影響領域での低透水性維持	硬岩系岩盤では、TBMでの掘削による既存データから、坑道壁から0.5mの範囲で掘削影響領域が発生するものと仮定。
水理	掘削影響による透水性の増加（ガス影響）	掘削影響領域での低透水性維持	特に考慮されていない。
力学	オーバーバック膨張等による密度変化	掘削影響領域での低透水性維持	特に考慮されていない。

PIDによるコンクリート利用におけるプロセスの表示(全体のPIDを一部詳細化)

# 処分環境条件の変更に伴う安全機能の取り扱いの更新 (アプローチ④)

ガラス固化体設計

母岩条件

母岩力学

考慮

母岩の力学

処分環境	考慮事項	安全機能	取り扱い
	掘削影響領域での低透水性維持		物理的な厚さを伴わない、瞬時に混合する仮想的なミキシングセルモデルを使用する。 人工バリアからの核種の移行は、ミキシングセルとの濃度勾配に支配される。
	掘削影響領域での低透水性維持		<p>コンクリート厚さ1mの支保を用いる。支保部分と透水係数は、支保の劣化に伴い1万年で<math>1 \times 10^{-5}</math> m/sに上昇。EDZ全体の流量は約5倍に上昇。30/yの流量で評価する。</p> <p>特に考慮されない</p>
	掘削影響による透水性の増加	掘削影響領域での低透水性維持	<p>亀裂ネットワークモデルと等価の多重円筒解から30/yとする。</p>
	掘削影響による透水性の増加 (緩衝材の侵入)	掘削影響領域での低透水性維持	緩衝材の侵入による透水性の変化は特に考慮していない。
	掘削影響による透水性の増加 (亀裂不均質性の取り扱い)	掘削影響領域での低透水性維持	母岩の全領域に亀裂が不均質に分布しているものと仮定している。
	掘削影響による透水性の増加 (掘削による透水性の上昇)	掘削影響領域での低透水性維持	<p>OPC製の支保(1m)とEDZ厚さ(0.5m)部分の支保劣化後(1万年)の透水係数は平均で<math>1 \times 10^{-5}</math> m/s</p>
	掘削影響による透水性の増加 (ガス影響)	掘削影響領域での低透水性維持	特に考慮されていない。
	掘削影響による透水性の増加 (オーバーパック膨張等による密度変化)	掘削影響領域での低透水性維持	特に考慮されていない。

領域	半径, m	$r1 \sim r4$	透水係数, m/s	$k1 \sim k4$	各領域での流量, m <sup>3</sup> /y/m
1	0	0.41	4.00E-06		6.565E-11
2	0.41	7.41	1.00E-12		8.171E-06
3	7.41	8.91	1.00E-05		1.116E-03
4	8.91	10	1.00E-10		7.499E-06
5	10	∞	1.00E-10		Total 1.131E-03

動水勾配, - h      (注) 流量は上下半面の加算値(2倍)

地下水流速, m/y

X=0での地下水流速, m/y

中心からの距離

流速、流量評価面

流速、X成分

円筒半径、

動水勾配 h

各領域での流速(ダルシー流速, m/y, 図の点線上下の境界流速)				各領域外側面積を通過する流量	
境界	内側流速	外側流速	内側平均流速	領域通過流量	平均流速
領域1/2	8.21E-11	1.93E-12	8.01E-11	6.57E-11	5.10E-11
領域2/3	4.09E-11	4.07E-04	5.84E-07	8.17E-06	3.51E-07
領域3/4	3.46E-04	2.15E-07	3.72E-04	1.12E-03	4.02E-05
領域4/5	6.40E-06	6.60E-06	3.44E-06	1.13E-03	3.60E-05
下流(20m)	2.53E-05		(表面積を使った流速)		
下流(∞)	3.15E-05		2.50E-03 <- 固化体あたり流量		

掘削影響領域の取り扱い

掘削による増加

水理

力学

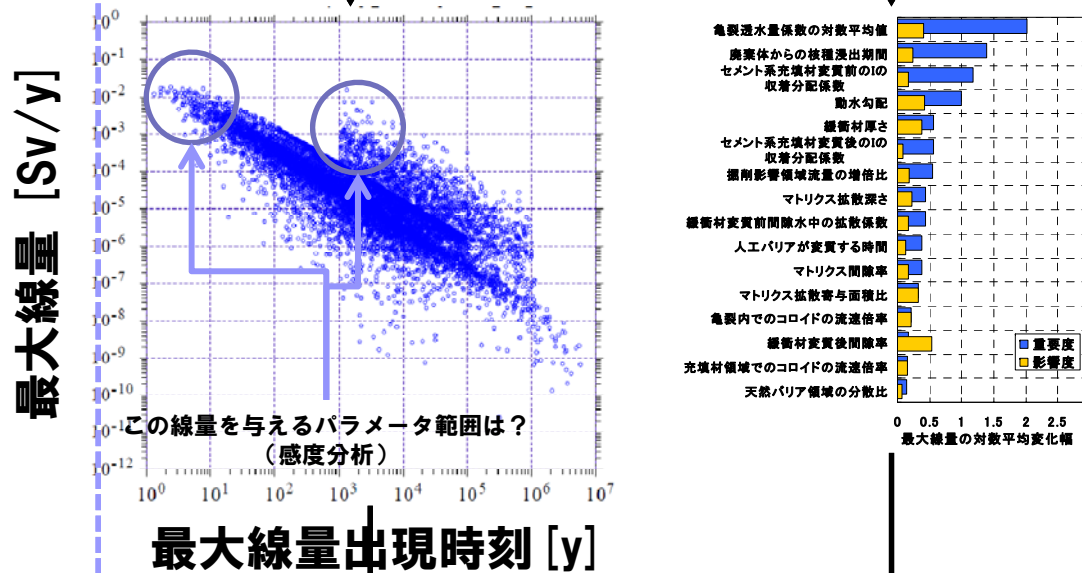


地下水移行シナリオで想定される  
システムモデルの構築

システム性能全体を評価する  
ためには、評価すべき事象の  
重要性を判断することが重要

パラメータ範囲

不確実性の範囲



一般統計に基づく  
統計的分析やこれ  
まで開発を行って  
きたMoving Band法、  
SI法、等を用いパ  
ラメータの感度分  
析を実施

変更したパラメータの重要性の判断  
パラメータ範囲に適合するシナリオの検討  
安全機能に要求する性能の抽出

変動シナリオ  
↓  
代表ケース

- **区分されているシナリオにどの様に対応するのか**
  - 対応:人工バリアについてはPIDを構築する等の手法により確からしさを表現可能と考えられるが、「確からしさ・蓋然性が高い」の定義に関しては、共通の認識が必要。
  
- **どのように期間を区分し状態設定を対応づけるか**
- **どのようにシナリオ区分と状態設定を対応づけるのか**
  - 各バリアの安全機能の特徴を踏まえ、期間区分について高レベル廃棄物の特徴を踏まえ、期間区分を考察する必要
  - 対応:期間区分毎に、「確からしさ」をPIDで表現し、FepMatrixで関連する事象の包絡性を確認する手法は、適用可能
  - また、状態設定と防護(安全)機能との関係が既に構造的に整理されていることから、「安全機能」が大きく変更されない限り、安全機能の期間区分について考慮することにより、現在のひな形から拡張可能

- ◆ 期間区分の枠組みに対応した「ひな形」となるシナリオの作成
  - ◆ 最新の知見に基づく防護(安全)機能の整理
    - ◆ 最新の現象解析結果, データベース等に基づく知見の整理(安全機能の定量化を前提とするトップダウン的整理), PIDの作成
    - ◆ 各安全機能と期間区分の関係を整理
    - ◆ 実地層を前提とする場合の状態設定を考慮
    - ◆ 蓋然性のレベルの検討
- ◆ 上記ひな形となるシナリオに対する変動要因の抽出
  - ◆ 実際の処分環境を想定した処分オプションや懸念される事象を整理し, ひな形を用いたシナリオ更新例を試行

牧野仁史, 川村淳, 若杉圭一郎, 大久保博生, 高瀬博康: “高レベル放射性廃棄物地層処分安全評価のシナリオ解析のための計算機支援ツールの開発”, JAEA-Data/Code 2007-005 (2007).

大井貴夫宮原要, 牧野仁史, 三原守弘, 梅木博之, 高瀬博康: “原子力の持続的発展を支えるための廃棄物処分システムの開発(2)統合性能評価の方法論の開発”, 日本原子力学会2008年秋の大会 予稿集 p.649 (2008)

稲垣学, 蛭名貴憲: “設計条件や地質調査を踏まえた安全評価体系の検討”, 2008年バックエンド夏期セミナー(ポスター発表), (2008)

江橋健, 小尾繁, 大井貴夫: “人工バリアと天然バリアのパラメータに関する感度解析—高レベル放射性廃棄物の地層処分性能評価への包括的感度解析手法の適用—”, JAEA-Research 2008-019 (2008).

T. Ebashi, Y.-S. Hwang, Y.-M. Lee, T. Ohi and S. Koo: “Application of the comprehensive sensitivity analysis method to a Korean geological disposal concept”, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.45, No.11, pp.1138-1149 (2008).

稲垣学, 蛭名貴憲: “処分環境や設計オプションに対応した性能評価手法の構築(1)”, JAEA-Research 2008-022(2008).

大井貴夫, 稲垣学, 川村淳: “シナリオの重要度をわかりやすく提示可能なシナリオ解析手法の整備”, JAEA-Research 2008-023 (2008).

江橋健, 小尾繁, 大井貴夫: “高レベル放射性廃棄物地層処分における性能評価パラメータの安全裕度評価方法の例示”, 原子力バックエンド研究Vol.15 No.2, pp.99-115 (2009).

大井貴夫, 稲垣学, 川村淳, 江橋健: “放射性廃棄物の地層処分の安全性に影響を与える懸念事象の相対的重要度把握のための体系的評価手法の有用性の例示”, JAEA-Research 2008-111 (2009).

T. Ohi, M. Inagaki, M. Kawamura and T. Ebashi: “A Systematic Approach to Evaluate the Importance of Concerns Affecting the Geological Disposal of Radioactive Wastes”, Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXII, Mat. Res. Soc. Sym. Proc., Vol.1124, pp.407-412 (2009).

稲垣学, 蛭名貴憲: “処分環境や設計オプションに対応した性能評価手法の構築(2)”, JAEA-Research 2008-114(2009).