

## 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)

Construction of Performance Assessment Method which Correspond to  
Disposal Environment and Optional Designs (2)

稲垣 学 蛭名 貴憲\*

Manabu INAGAKI and Takanori EBINA\*

地層処分研究開発部門  
システム性能研究グループ

Performance Assessment Research Group  
Geological Isolation Research and Development Directorate

March 2009

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2009

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)

日本原子力研究開発機構  
地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット  
稲垣 学\*, 蛭名 貴憲\*

(2008年12月19日受理)

地層処分の閉鎖後安全性は、処分された放射性核種の挙動を評価することにより確認される。第2次取りまとめでは、一般的な地質環境や設計条件に基づき、処分システムの持つ頑健性や安全性を提示するための技術的な根拠やそれら根拠に対する考え方が提示された。今後、これらの方法論は、処分事業の進展に伴う調査や具体的な設計条件を踏まえた性能評価に適用することとなる。段階的に進められる性能評価及びその結果の信頼性を増すためには、前段階の処分システムに対する考え方に関する要点を整理し、これとの整合性を保つことが重要であると考えられる。

本研究は、設計や地質調査の情報を性能評価に反映するための方法論の適用性の確認と具体的に必要とされる作業内容の抽出を目的として、想定される事例に基づきシナリオ検討を実施したものである。第2次取りまとめにおける処分概念に関する整理結果を出発点として、具体例としてコンクリート支保（OPC）を使用する処分概念に変更する場合のシナリオ抽出に関して検討を行った。

性能評価の前提となる処分システムの整理において、安全機能に基づく性能評価の方法を考慮し FepMatrix やインフルエンスダイアグラムを用いた“総合性能評価の雛形”を構築し、これをシナリオの抽出に適用した。その結果、第2次取りまとめの処分概念に対して、処分条件等の変更内容を反映させることによりシナリオの抽出が容易となることが判った。このような条件の変更を摂動として取り扱う方法論は、既存の基本的な考え方を損なうことは無く、性能評価の段階的進展においても有効であると考えられる。以上のように、既存のシステムの情報の流れを調査設計－処分環境－安全機能の構造に従い FepMatrix により整理する手法を活用したシナリオ抽出は、段階的な情報の変化に柔軟に対応する性能評価手法の1つとして有効である。

Construction of Performance Assessment Method which Correspond to Disposal Environment and  
Optional Designs (2)

Manabu INAGAKI<sup>※</sup> and Takanori EBINA<sup>\*</sup>

Geological Isolation Research Unit  
Geological Isolation Research and Development Directorate  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 19, 2008)

Safety of geological disposal in the post-closure period is confirmed by assessments of disposed radionuclide behavior. "H12 Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan (H12 report)" presented technological grounds to present robustness, safety of disposal system and solution for these grounds which based on general geological environment and design condition. In future, these methodologies will be applied to the investigation which accompany with the progress of disposal project and the assessment which based on specific design concept. To increase reliability of the assessment which will be conducted by step-by-step manner in the progressed stage or for the alternative design concept, it is important that the basic concept and the point in the previous assessment are clearly understood and the new assessment keeps consistency with the previous one.

This paper illustrate the methodology that reflects new information obtained by geological investigations and new design concept in the total performance assessment, and scenarios based on a realistic design option were extracted. A site design using ordinary Portland cement as concrete support of disposal-tunnel was examined, and scenario extraction was conducted based on the information of H12 disposal concept.

In arrangement of the premise of the total performance assessment of the disposal system, the "reference total performance assessment concept" was build based on the safety function by using a scenario analysis support tool, namely FepMatrix, Then the scenario for an alternative design concept (i.e. use of OPC) was extracted by focusing the change of conditions from the "reference total performance assessment concept".

The methodology which treats change in the disposal condition as perturbation to the existence condition can keep the existence concepts, and is also effective in step-by-step development of evaluation. Therefore, the method to put a flow of information on an existence system in order by FepMatrix with the structure of "investigation/design - disposal condition - the safety function" is useful.

Keywords: Performance Assessment, HLW Disposal, H12 Report, Total Assessment Work Frame

---

※ Cooperative staff

\* NESI Incorporated

目 次

1. はじめに.....	1
2. アプローチ.....	2
2.1 基本的な枠組み.....	2
2.2 検討のステップ.....	5
3. レファレンスケースの構造の把握.....	8
3.1 レファレンスケースに対応するインフルエンスダイアグラム.....	8
3.2 既存情報の整理.....	8
4. OPC 利用により想定されるイベント.....	12
4.1 支保領域および掘削影響領域.....	12
4.2 緩衝材領域.....	15
4.3 母岩領域.....	17
4.4 イベントツリーの構成.....	19
5. OPC 利用による評価シナリオの抽出.....	20
5.1 シナリオ抽出.....	20
5.2 シナリオに関するまとめ.....	34
6. おわりに.....	35
参考文献.....	36

Contents

1. Introduction.....	1
2. Application of “Total Assessment Work Frame”.....	2
2.1 Total Assessment Work Frame.....	2
2.2 Approach.....	5
3. Description for reference case.....	8
3.1 Known information.....	8
3.2 Process influence diagram for reference case.....	8
4. Extraction of events for using OPC.....	12
4.1 support -concrete and EDZ region.....	12
4.2 Buffer region.....	15
4.3 Rock region.....	17
4.4 Events Tree.....	19
5. Extraction of scenarios under effect of OPC.....	20
5.1 Extraction of scenarios.....	20
5.2 List up of extracted scenarios.....	34
6. Conclusion.....	35
References.....	36

This is a blank page.



## 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分における性能評価では、総合的な性能評価の実施に含まれるシナリオの構築やモデル、パラメータの設定および核種移行解析に関わる全体モデルチェーンの設定作業を、柔軟性や信頼性を確保しつつ一貫して行うための性能評価体系の構築が求められる（資源エネルギー庁、2006）。性能評価は、調査段階の進展に応じて繰り返し実施されることから、一貫性をもちつつ合理的に性能評価を進めるためには、前段階の評価との整合性を取りながら評価を実施することが必要となる。通常、地質調査から設計、設計から性能評価への情報の受け渡しの手順で総合的な性能評価は実施される。しかしながら、性能評価の目的が処分場の時間的変遷を考慮した単なる線量予測ではなく、シナリオ、モデル、データなどの不確実性を包絡しつつ進められるため、処分場に想定される将来像は一通りでない。また、性能評価においては不確実性を低減するため保守性を重視した簡略なモデルが用いられることから、地質調査や設計、並びに、個別事象等の評価結果のみではなく、それらの評価の前提や不確実性を伴う結果に対する取り扱いに関する情報が的確に性能評価に反映される必要がある。

本研究では、設計や調査と性能評価の相互関連について、調査や設計及び個別事象研究において「どのような事象を取り扱い」処分環境（T:温度、H:水理、M:力学、C:化学、G:形状、以下 THMCG という）を決定したのか、また、それら処分環境を「どのように取り扱い」安全機能を定量化したのかとの2つの部分に分けることにより検討を実施した。そのため、“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性”（核燃料サイクル開発機構、1999、以下、第2次取りまとめという）における処分概念に関して上述の整理を行い、これに対してコンクリート（普通ポルトランドセメント、以下 OPC という）を使用する処分概念に変更する場合を例示としてシナリオ抽出の検討を行った。具体的なシナリオを導出するため重要と考えるポイントは以下のものである。

- ①検討の出発点となる既存評価における安全機能の発現の環境条件や核種移行に関するプロセスに対する取り扱いをどのようにまとめ、また、これをどのように引き出すのか？
- ②セメント（OPC）がどのように使用されるか具体的な想定を行い、OPCの利用が核種移行場へ与える影響を、①との関係をどのように具体化するか？

①においては第2次取りまとめで用いられているインフルエンスダイアグラムを改良するとともに第2次取りまとめの情報から、安全機能の発現を支える状態やプロセスを FepMatrix ツール(牧野ほか、2006)を用いてデータベースとしてまとめた。

②においては、OPC を用いることを前提とした処分システムに関する FEP 辞書や個別事象に関する研究結果から①で想定するシステムに影響を与えうる事象をフロー図として表現し、これを①への摂動として取り扱うこととした。

インフルエンスや影響を与えうる事象のフロー図、および、FepMatrix ツールで整備した情報を用い設計側と性能評価側での情報共有を図り、安全機能の発現の前提として考えていた条件に対して、影響しうる可能性のある項目を抽出し、これらをシナリオとして設計側や個別事象側へのフィードバックを行うための情報として抽出した。

## 2. アプローチ

### 2.1 基本的な枠組み

第2次取りまとめにおいては、処分システムの挙動をインフレンスダイアグラムの手法を用いて表現が行われた(図 2-1 参照)。これは、処分場で想定される包括的な特性 (Feature), イベント (Event), プロセス(Process)に関するリスト (以下, FEP リストという) と FEP 辞書の作成を出発点として, FEP 間の関連を考察しシナリオを構築する, ボトムアップ的なアプローチを用い作成されている。包括的な FEP リストを出発点とするため, 汎用的であり網羅性については十分に確保されているが, システムの安全性を評価する上で重視された安全機能が明確に表現できない欠点を持つ。

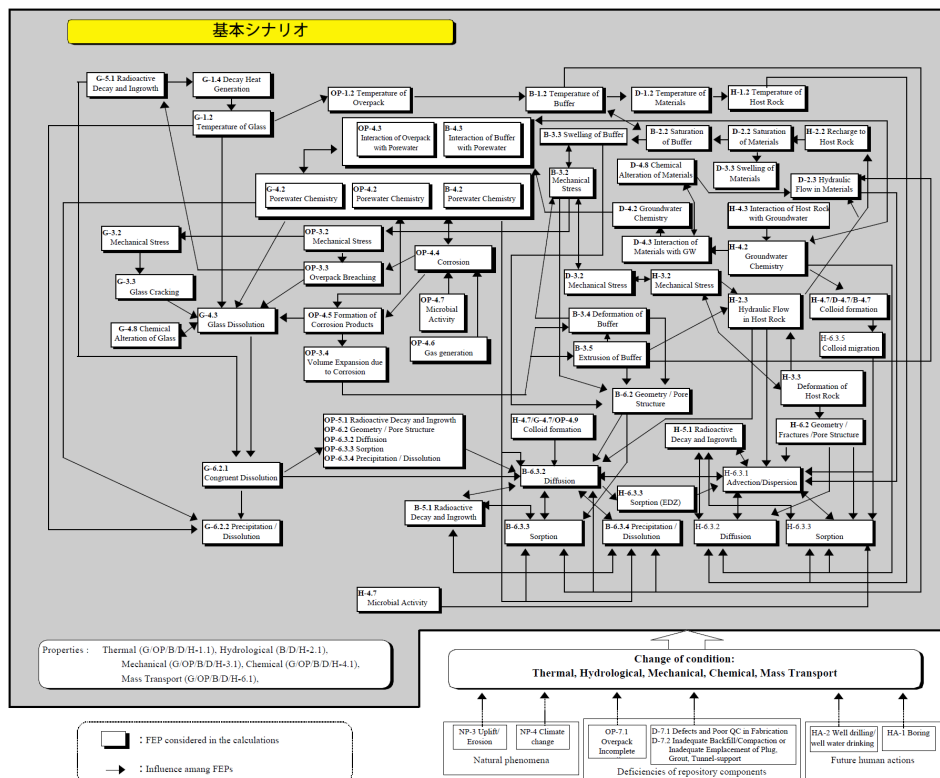


図 2-1 第2次取りまとめにおけるシステムの記述 (インフレンスダイアグラム)

本研究では, 表 2-1 に示す第2次取りまとめの「安全機能」を及び概念モデルを構築するための仮定に基づき, インフレンスダイアグラムの作成を試みた(図 2-2 参照)。「安全機能」を用いることの意味合いは, 安全性を評価する上で重視する機能を用い処分システムの評価概念を構築し, これに影響を与えうると考えられるプロセスやイベントを検討するとする, トップダウン的なアプローチである。この手法は, 何を評価しているかと言うことに関しては常に明確であることから評価対象とする事象やそれらに關与するモデル, パラメータが明確となる。しかしながら, 「安全機能」やこれを定量化するモデルを選択する段階において, 評価手法に関する評価者の判断がなされていることから, 本来, 考慮する重要な事象がないか検討する必要がある。



表 2-1 第2次取りまとめにおいて定義された安全機能

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	
オーバーパ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

A～D、①～⑨は後述の図 2-2、表 3-1 に対応

地質環境調査や設計から性能評価への情報の受け渡しの概念を示した総合評価作業フレーム（大井ほか、2006）では、地質調査と設計、処分環境、性能評価の3つのパートに分けたことに特徴がある。本研究においても、図 2-3 に示すように処分環境条件（THMCG）を中心として、上流側（赤枠部分）に関しては、主に設計における検討やFEP辞書に基づく「ボトムアップ的なアプローチ」による処分環境の同定を行うための検討情報を、下流側部分については、重視する安全機能の評価モデルに基づく「トップダウン的なアプローチ」による検討情報を配置することにより、地質調査や設計と性能・安全評価の融合を図るとともに、各アプローチの利点を利用することとした。前者においては、多様な処分条件が想定されることから、懸念される事象の網羅性を重視することが重要であり、後者については核種の閉じ込め性の評価を目標とすることから、トップダウン的なアプローチが有効であると考えたためである。

情報の整理においては、FepMatrix ツールを用い第2次取りまとめにおける安全機能と想定される処分環境との整理を行った。これらの情報を用い、OPC を支保材料として用いた場合に想定される影響と、その影響を踏まえたシナリオの抽出を行うこととする。“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)”（稲垣ほか、2008）では、FepMatrix を用い、第2次取りまとめのレファレンスケースを対象として、地質調査に相当するわが国の地質の特徴の解釈結果や人工バリアの構成要素に対する設計上の処分環境条件に対する取り扱い、および、処分環境条件の安全機能への取り扱いが、

調査・設計—処分環境条件—安全機能の情報の流れに対応してまとめられた。本研究では、この情報と図 2-2 を、安全機能に基づく性能評価の方法を考慮した“総合性能評価の雛形”と位置付け、これをシナリオの変更や抽出のための基本情報とする。

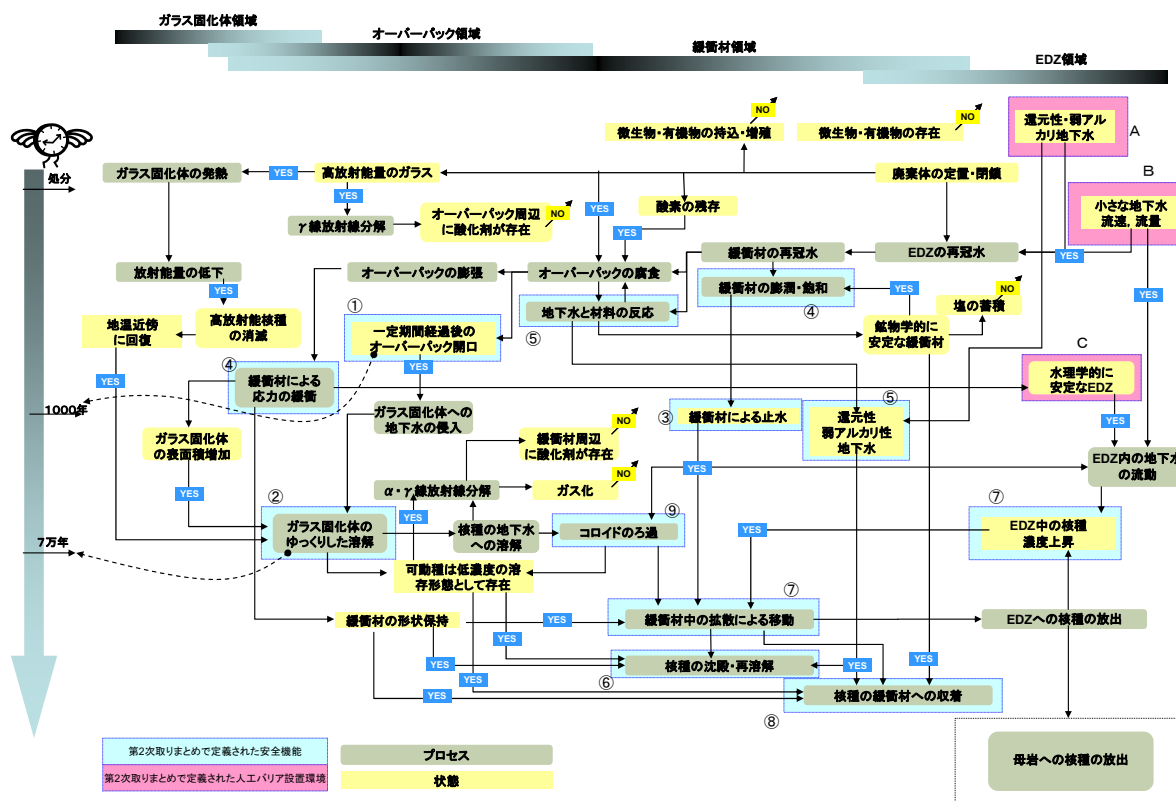


図 2-2 第2次取りまとめの安全機能と安全機能間の関連を示すインフルエンスタイプのダイアグラム

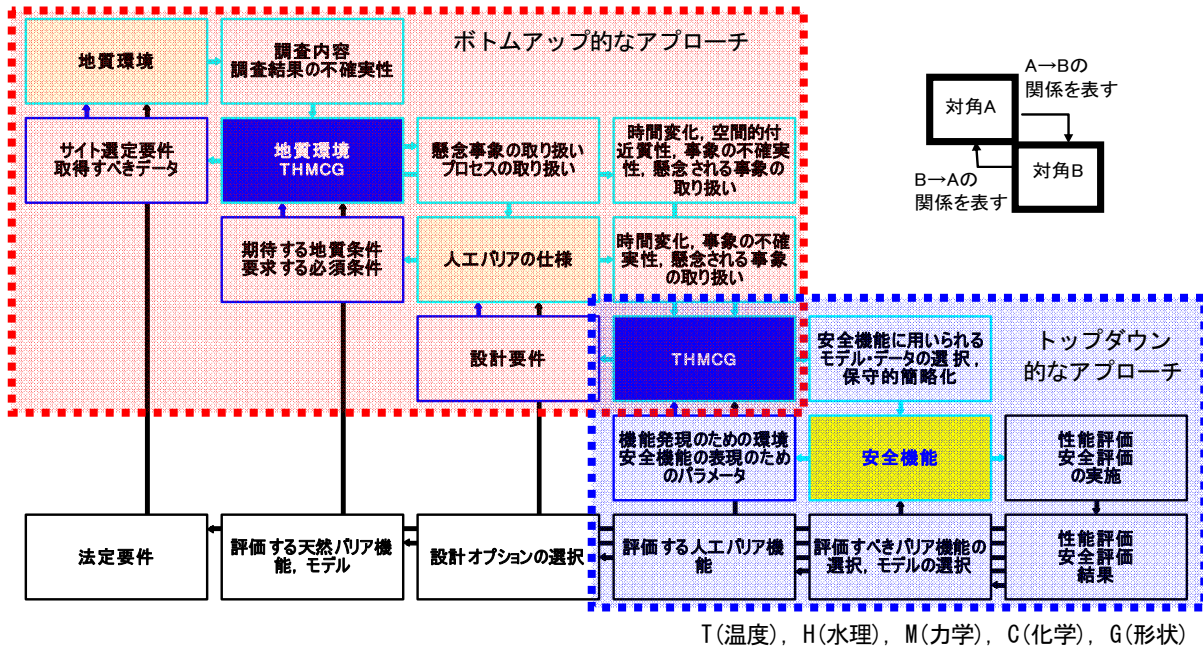


図 2-3 総合評価作業フレームの本研究における取り扱い

## 2.2 検討のステップ

検討は以下のステップを踏まえ実施することとする。

- 1) 既存情報の整理（第2次取りまとめにおける安全性の論拠の整理）
- 2) レファレンスケースでの安全機能の安全機能間の関係を考慮したプロセス間の影響の明示
- 3) 新たに対象とする処分オプションを使用する場合のFEPの収集
- 4) 新たに想定する処分オプションの特徴を整理と処分システムの挙動を変えうる可能性のリストアップ
- 5) 上述2)に対する4)の影響を与える、レファレンス内で生じる事象の連鎖に関する検討とシナリオの抽出

1), 2)については、第2次取りまとめにおけるレファレンスケースを対象として絞り込むことによって、安全機能間の関連や機能そのものが判りやすくなるように整理することとした。想定する処分概念は、横置き型の処分として、結晶質岩系の母岩の地下1000mに処分を想定する。なお、1)については、稲垣ら（稲垣ほか、2008）の整理結果を用いることとする。

本研究のアプローチの特徴は、2)のレファレンスケースで想定される安全機能に関与するプロセス間の相互影響の提示と、4)の処分オプションを使用する場合に想定されるイベントの抽出を分離し、前者についてはトップダウン的なアプローチを、後者についてはボトムアップ的なアプローチで分析を行い、これを並べて考えることにより、シナリオの変更や追加を行うことにある。表2-1に示した安全機能は、稲垣ら（稲垣ほか、2008）によって表2-2に示すように一般化がなされた。一般化の目的は、安全機能としては用いてはならないが、評価の仮定で安全機能として定義しうる可能性のあ

る領域や効果を明示しておくことにある。OPC 利用において、例えば、支保領域を明示的に領域に追加し評価に組み込む場合には、表に示す安全機能のどれかを選択し定量的なモデルを検討することになる。

表 2-2 一般化された安全機能とその対象領域

一般化された安全機能	領域または部位			
	ガラス固化体	オーバーパック	緩衝材	掘削影響領域
領域内での核種の沈殿生成 (低溶解性)	-	-	○	-
領域内での核種の媒体への収着性	-	-	○	-
ガラス固化体の低溶解性	○	\	\	\
放射性ガスの少ない発生量	○	\	\	\
沈殿, 収着に好ましい地下水化学環境	-	○	○	-
領域でのコロイドろ過性	-	-	○	-
領域溶液中でのコロイドの不安定性	-	-	-	-
媒体へのコロイドの収着性	-	-	-	-
領域での小さな動水ポテンシャル	-	-	○	○
領域の小さな透水性	-	-	○	-
ニアフィールドでの小さな地下水流量	\	\	\	○
オーバーパックの完全閉じ込め性	\	○	\	\
領域溶液中での小さな拡散性	-	-	○	-
非透水性媒体への大きな拡散性	-	-	-	-
媒体の長期安定性 (期待する安全機能の時間スケールに応じて)	○	○	○	○
媒体中の移行距離 (移行時間)	-	-	○	-

表内での○は第2次取りまとめで用いられた安全機能, - 定義されていない安全機能, \は該当しない領域

### 3. レファレンスケースの構造の把握

#### 3.1 レファレンスケースに対応するインフルエンスダイアグラム

本研究でのレファレンスケースに関するインフルエンスダイアグラムは前章の図 2-2 に示した。第 2 次取りまとめのレファレンスケースに対応するインフルエンスダイアグラムは、表 2-1 に示した安全機能と安全機能に關与するプロセスと場の状態により構成されるものとして作成されている。また、安全機能が保たれる時間スケールについて概略的に表示することとした。

安全機能を定量化するために用いられた概念モデルにおける仮定を表 3-1 に示す。安全機能を定量化するための考え方が概念モデルであり、安全機能の簡略化や省略といった判断も概念モデルの中に記述されていることから、安全機能に影響を与えるイベントが仮定された場合、概念モデルの構成の前提となっている考え方についても再検討する必要がある。これにより、評価のためのモデルやデータの更新の必要性が明確になるものと考えられる。例えば、「核種は緩衝材中を拡散により移行し、緩衝材に収着することにより遅延される。この際、収着反応としては瞬時／線形／可逆を仮定する」とした概念モデルは、基本的な前提として、核種の移動がゆっくりしたもので、低濃度の状態で移動することを前提としていることが読み取ることができる。これらの仮定は、「緩衝材への収着」プロセスの評価において、前提として畳み込まれていることを認識することが重要となる。

レファレンスケースを図 2-2 のように表現する手法は多様に存在するものと考えられ、図 2-2 が唯一の方法ではないものの、レファレンス全体を俯瞰するためにはこのような整理が不可避であり、また、情報共有の観点からも有用であると考えた。また、プロセスや状態の配置とこれらを結ぶ線に関して多様なバリエーションや意見があり、一意には定まらないことも明白である。しかしながら、性能評価で取り扱う事象をこのような簡素化された図で示すことが、設計や個別事象評価側との情報交換に役立つものとする。そのため、今後とも、これらの図を修正、変更していくことが望まれる。図 2-2 では、レファレンスで想定している大まかなプロセスの関連は読み取れるが、考慮の必要性に関する理由に関しては、FepMatrix で作成した情報等を適宜参照する必要がある。例えば、「オーバーパック周辺に酸化剤が存在→No」としている根拠は、表 3-2 に示すように、酸化剤の発生に関する設計側での判断や取り扱いがなされ、放射線分解の影響を防ぐ観点からオーバーパックの厚さが決定された。したがって、第 2 次取りまとめのレファレンスケースでは、放射線分解の影響を考慮する必要がないとしていることがわかる。

#### 3.2 既存情報の整理

安全評価上のレファレンスとする論理構造に関しては、FepMatrix ツールを用いることにより図 3-1 に示すように、THMCG (温度, 水理, 力学, 化学, 形状) を機軸として、その情報をデータベース化してまとめられている (稲垣ほか, 2008)。この検討では、第 2 次取りまとめのレファレンスケースを対象を限定することにより、

一方で、FepMatrix での情報の取扱いのようにマトリクス形式でまとめた情報は、系の時間的な変遷を把握するためには、何らかの工夫が必要であることが課題となっている。安全機能間の相互影響については、上述の FepMatrix でまとめられる情報を分析することにより達成されるが、安全機能の相互関連を俯瞰的に把握したい場合においては、図 2-2 で示したインフルエンスダイアグラムによる処分システムの表現が理解しやすい場合も多い。そのため、シナリオ抽出に至る過程では、レファレンスケースに関する両者の表現を併用することとした。



表 3-1 第2次取りまとめにおける概念モデルを構成するための仮定

●オーバーパックは、少なくとも1,000年間破損しないように設計され、腐食による強度の低下により、処分後1,000年以降核種閉じ込め機能を喪失する(①)。
●オーバーパック破損時には、ガラス固化体の発熱は無視できる程度になっており、処分場内の温度は周辺母岩中とほぼ同じになる。また、緩衝材は地下水によって完全に飽和し、オーバーパックまわりに均質な低透水性バリアを形成する(③, ④)。
●処分時のガラス固化体表面積については、冷却時の割れによるガラス固化体の表面積の増加を考慮し、幾何学的表面積より大きい値を設定する(②)。
●オーバーパック破損後、直ちに緩衝材間隙水がガラス固化体と接触し、長期的なガラス溶解速度に従ってガラスマトリクスの溶解が進む。核種は、ガラス固化体中で均質に混合されており、ガラス固化体中での核種存在比に応じてガラスから溶出する(調和溶解)(②)。
●オーバーパック破損後の、ガラス固化体の内部亀裂、ガラスの変質層、オーバーパックおよびその腐食生成物による核種移行遅延は保守的に無視する(安全機能の保守的な省略)。
●緩衝材間隙水は、地下水と緩衝材およびオーバーパックの腐食生成物との化学平衡により組成が決まり、還元性に維持される。溶解度はこの間隙水組成に基づいて設定する(A, D, ⑤)。
●ガラス固化体近傍あるいは緩衝材中での核種濃度は、同位体の存在比に応じて分配された溶解度により制限される。また、沈澱/溶解は瞬時/可逆とする。沈澱した固相が存在する場合、溶解度を維持するために再溶解が起こる。なお、溶解度の分配において考慮する同位体存在比はガラス固化体を起源とするもののみを考慮し、地下水や緩衝材を起源とする同位体の影響は考慮しない(⑥)。
●核種は緩衝材中を拡散により移行し、緩衝材に収着することにより遅延される。この際、収着反応としては瞬時/線形/可逆を仮定する(⑦, ⑧)。
●コロイドは緩衝材の微細な間隙構造によりろ過される。また、オーバーパックの腐食による水素の発生、放射線分解、微生物および有機物は核種の移行に影響を与えない(⑨)。
●緩衝材の外側に到達した核種は、掘削影響領域を通過する地下水と瞬時に混合し、その全量が母岩中の亀裂に流入するものと仮定する。なお、掘削影響領域中での核種移行においては、収着などの遅延効果を考慮しない(B, 安全機能の保守的な省略)。
●地下水の流れの上流側に位置するガラス固化体から溶出してきた核種が下流側のガラス固化体周辺に至り、緩衝材外側での核種濃度が上昇することによって、下流側の緩衝材中での濃度勾配がさらに緩やかになり核種移行率が低減するという効果は保守的に無視する(安全機能の保守的な省略)。

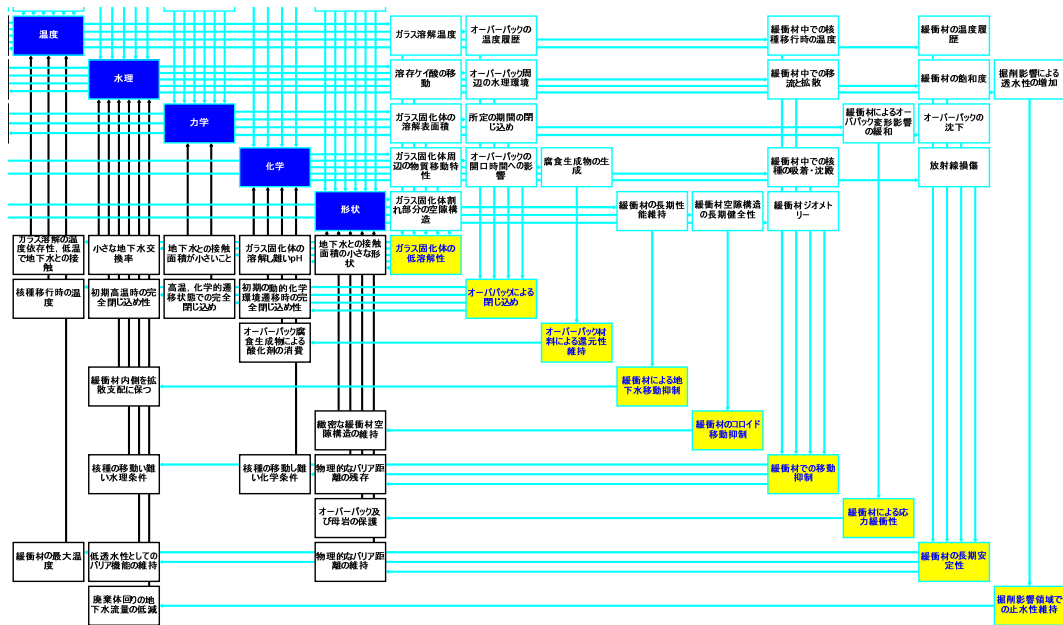
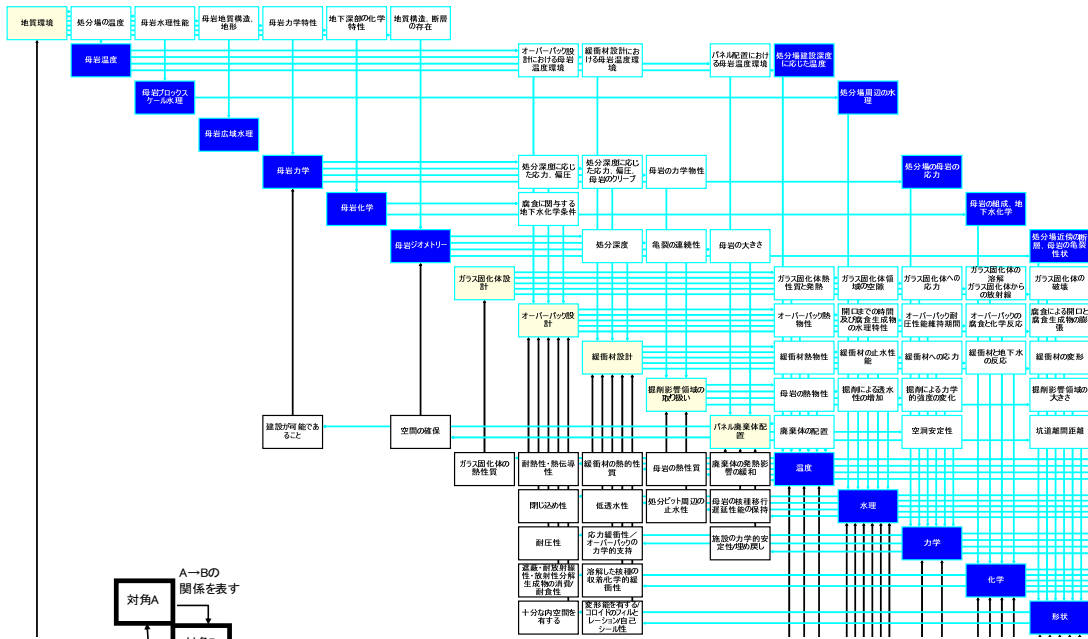
( ) 内の①～⑨及びA, B, Cは表 2-1で示した安全機能に対応する番号を示す

表 3-2 FepMatrix での酸化剤の存在の可能性に関する記述

設計	評価事象		処分環境	取り扱い
オーバーパック設計	遮蔽・耐放射線性・放射性分解生成物の消費/耐食性		化学	炭素鋼を用いることにより、腐食生成物の還元能力を期待し、地下水の還元性雰囲気維持の不確実性を減じている。
オーバーパック設計	遮蔽・耐放射線性・放射性分解生成物の消費/耐食性		放射線影響 化学	ガラス固化体からのγ線が全量酸化剤を生成するものとして、保守的に評価を行い、遮蔽圧 150 mm以上であれば、放射線分解による酸化剤の発生がオーバーパックの腐食に有意な影響を与えないもの判断された。オーバーパック表面の線量率は処分初期の放射線量で評価している。
オーバーパック設計	遮蔽・耐放射線性・放射性分解生成物の消費/耐食性		地下水化学環境 化学	多様な化学条件による浸漬試験を実施した結果、炭素鋼の腐食速度は炭酸水素イオン濃度、塩化物イオン濃度のいずれにも依存しないことがわかった。

処分環境	評価事象		安全機能	取り扱い
化学	オーバーパックの開口時間への影響	放射線分解, 放射線損傷	オーバーパックによる閉じ込め	放射線分解により発生し得る酸化剤と人工バリア中の還元物質（オーバーパック腐食生成物）の量の比較からは、酸化剤が生じたとしても十分な量の還元剤が存在する。仮にガラス固化体の近傍で酸化状態が生じ、溶解度などが増加したとしても、人工バリア内の還元剤（オーバーパックとその腐食生成物、緩衝材中の黄鉄鉱など）により酸化剤は、ガラス固化体近傍に留まると考えられる。したがって、緩衝材中においては還元条件での溶解度が期待されるため、核種移行に有意な影響を与えることはないと考えられる。
化学	緩衝材中での核種の収着・沈殿	放射性分解, 放射線損傷	緩衝材での移動抑制	放射線分解により発生し得る酸化剤と人工バリア中の還元物質（オーバーパック腐食生成物）の量の比較からは、酸化剤が生じたとしても十分な量の還元剤が存在する。仮にガラス固化体の近傍で酸化状態が生じ、溶解度などが増加したとしても、人工バリア内の還元剤（オーバーパックとその腐食生成物、緩衝材中の黄鉄鉱など）により酸化剤は、ガラス固化体近傍に留まると考えられる。したがって、緩衝材中においては還元条件での溶解度が期待されるため、核種移行に有意な影響を与えることはないと考えられる。

“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)” から抜粋



(稲垣ほか, 2008)

図 3-1 レファレンスケースに対する FepMatrix を用いた整理

## 4. OPC 利用により想定されるイベント

想定すべき事象の抽出の情報源としては、既存の FEP 辞書およびこれを用いた性能評価書を用いるものとする。地層処分においてコンクリート材料の使用を前提としている処分概念としては、TRU 廃棄物処分が代表的であり、2005 年に TRU 廃棄物処分技術検討書（電気事業連合会、核燃料サイクル開発機構、2005）として TRU 放射性廃棄物を対象とした性能評価書としてまとめられている。また、同検討書の根拠資料集として FEP 辞書（電気事業連合会、核燃料サイクル開発機構、2005）がまとめられている。

この FEP 辞書の内容には OPC の利用を前提とする支保に関する FEP の記述は含まれないが、これに含まれる構造躯体に用いられるコンクリート材料の時間変遷に関する情報は利用できるものと考えられる。また、支保に隣接する緩衝材や母岩への影響に関しては、同 FEP 辞書内に記載されている。

### 4.1 支保領域および掘削影響領域

TRU 廃棄物処分技術検討書では、OPC 等のコンクリート系材料に関して、長期的には変質し、その特性が変化することを前提としている。本検討においても、同様の材料から構成される支保領域に関しても、その特性に関する時間的な変遷を考慮することが重要となる。

支保コンクリートに関する考察を行うための前提としては、以下の状況を仮定する。

- ・第 2 次取りまとめでの横置き処分を前提とする
- ・支保は坑道壁面に一様の厚さをもって母岩表面に直接施工される
- ・支保の厚さは 10cm 程度と想定する
- ・普通ポルトランドセメント（OPC）を材料として用いる。コンクリートの組成としては、TRU 廃棄物処分技術検討書と同様とする。

支保領域での核種の遅延効果を安全機能として評価に取り込むことも可能であり、表 2-2 に示した核種移行遅延に係る安全機能として明示的に定義を行うことができる。しかしながら、支保領域に存在する鉍物や沈殿する鉍物に対する収着等の効果は、TRU 廃棄物処分技術検討書に述べられているように、鉍物組成が時間的に変遷し生成される鉍物が不確実性であることや、仮に鉍物組成が判ったとしても、それら鉍物に対する核種の収着特性に関するデータが不在であることを理由として、安全側に支保領域での収着や沈殿における遅延を考慮しないとする選択も可能である。これらの判断は、設計や個別事象研究の理解度に基づき性能評価側で結果に与える影響に基づき判断されるものであり、それらを安全機能として取り込む理由と根拠を記録しておくことが安全評価結果の妥当性を示すこととなると考える。

ここでは、本研究がそれらの判断そのものを取り扱うものではないことから、暫定的に、支保領域での収着や沈殿における遅延については「安全機能の保守的な省略」を前提として取り扱うものとし、空間的な領域としては掘削影響領域に付随する領域として取り扱うものとする。

表 4-1 に、OPC の利用を想定する場合のセメント利用領域に関与する FEP の記載内容を TRU 廃棄物処分技術検討書の構造躯体に関する FEP 辞書の記載内容を参考にまとめる。ただし、支保コンクリートと構造躯体で用いるコンクリートは、想定する厚さや鉄筋利用の有無等、異なる部分も存在するため、適宜、記述に関する取り扱いについては、上述の仮定に基づき判断することとした。

支保領域を物理的に配置することにより新しく生じる支保領域内での移動に伴う収着遅延の効果をもつ安全機能を省略するとしても、領域そのものの時間的な変遷に伴う透水性の上昇や領域から隣接する緩衝材及び母岩への影響は、隣接部位の THMCG に影響を与える。特に、セメント水和物の溶出

と溶出液の隣接する部位への移動と移動部位での反応については FEP 辞書においても記載が多い。

支保の効果を含む掘削影響領域で想定される安全機能としては「領域内での小さな動水ポテンシャル」や「領域内の小さな透水性」及び「領域溶液中での小さな拡散性」, 「媒体の長期安定性」が評価対象となる。「媒体の長期安定性」については, セメント系材料を用いることによりここでは時間的な変遷を前提とすることとする。また, 動水ポテンシャルは, 周囲の部材の透水性との相互影響により決定されることから, 前提とする処分概念に hidroリックゲージ等の工学的な対処を想定していない場合, 積極的に安全機能として定義することはできず, 領域の「透水性」に依存し決定される。

安全機能である「領域内の小さな透水性」に影響を与えうる事象としては, 以下の事象が想定される。

- ・ セメントの再結晶化及び温度勾配の発生
- ・ 硬化速度の部分的な相違に伴うひび割れの発生
- ・ セメント水和物の溶出による透水性の上昇（間隙率の上昇を伴う）
- ・ セメント水和物の溶出による力学的強度低下によるひび割れの発生, 領域の破壊
- ・ 二次鉍物の沈殿による間隙の閉塞と透水性の低下
- ・ 二次鉍物の沈殿及び膨張によるひび割れの発生

これらの影響を考慮し, 安全機能の定量化に供されることとなる。

他方, 支保領域で生じる事象の他の領域への影響としては以下の効果が考えられる。

- ・ セメント水和物の隣接領域への移動
- ・ セメント水和物の溶出と力学的強度低下と隣接する領域の力学的なバランスの変化
- ・ 二次鉍物の沈殿及び膨張による外部への応力



表 4-1 セメント利用部位における FEP の概略的記述

(セメント利用領域として構造躯体の FEP を利用)	
温度	セメント系材料は、水が加えられた時点からセメントと水とが水和反応を生じ、発熱と各種水和物の生成を伴いながら、時間の経過とともに流動性を失い固結する。セメント系材料はこの水和反応に伴う発熱(水和熱)によって温度ひび割れが発生する可能性がある。温度ひび割れは、セメント系材料が硬化する過程において、先に冷却される表面部分とまだ温度が高い内部との温度差によって生じるひび割れと、硬化とともに温度が冷却される過程において、外部に接している部位が拘束され、発生するひび割れの2つのタイプがある(ST-05)。
水理	構造躯体にセメント系材料が用いられた場合、施工時の透水係数は使用されるセメント材料の種類と施工時のセメント系材料の水和条件によって決まる。セメント系材料の水理特性は長期的にはひび割れの発生、セメント鉱物の溶解及び間隙水中に溶存するイオン種との沈殿反応等による変質の影響を受ける。間隙水中に溶存するイオン種には、もともと溶存するイオン種の他に硝酸塩や硫酸塩などの廃棄物からの浸出イオンや緩衝材からの溶出イオンも含まれる。鉄筋の近傍のセメント系材料は、鉄筋の腐食による腐食生成物の生成や間隙水中の硫酸イオンとの反応によるエトリングタイトの生成によりひび割れを生じる可能性がある。また鉄筋の腐食はガスを発生する可能性がある(SH-01)。
力学	構造躯体には、廃棄体、充填材、緩衝材、境界領域との力学的な相互作用により応力が発生し、その応力に対応した変形が生じる。構造躯体の応力は、構造躯体の変質に起因する力学特性の変化、温度上昇に伴う熱膨張、ひび割れ発生、再冠水による水圧の作用、緩衝材の膨潤圧の作用、ガス蓄圧、鋼材・廃棄体の腐食膨張、その他外的応力の作用により変化する(SM-02)。
化学	構造躯体に鉄筋コンクリートが使用された場合には、地下水をアルカリ金属、 $Ca^{2+}$ に富む高 pH 地下水に変化させ、この地下水が緩衝材や母岩に移動することにより緩衝材の膨潤性、水理特性、分配係数および母岩の分配係数への影響要因となる可能性がある。またセメント系材料での変質および二次鉱物の生成により地下水組成が変化する可能性がある。また鉄筋では腐食により地下水中の溶存酸素が消費される可能性がある。構造躯体に鋼材が使用された場合には、鉄筋と同様に腐食により溶存酸素が消費される可能性がある。鉄筋および鋼材の腐食による溶存酸素の消費は、処分施設の操業時に一時的に還元性から酸化性に変化した地下水を再び還元性に変化させる可能性がある (SC-03)。 構造躯体に鉄筋コンクリートが使用された場合、地下水との反応で懸念される事項としては、 ① セメント水和物の溶解 ② 地下水との反応による二次鉱物の生成 ③ 昇温による水熱変成 ④ 長時間にわたる鉱物の変成 ⑤ 鉄筋の腐食とひび割れの発生 が考えられる (SC-04)。
形状	構造躯体には、廃棄体、充填材、緩衝材、境界領域との力学的な相互作用により応力が発生し、その応力に対応した変形が生じる。その応力が構造躯体の耐力を上回るとひび割れなどが発生する。また、構造躯体が鋼材の場合は鋼材の腐食による亀裂、セメント系材料の構造躯体の場合は施工時の水和熱による温度ひび割れや経時的変質又は鉄筋の腐食によるひび割れなどが発生する。ひび割れや亀裂によって構造躯体の透水性の増加、力学特性の低下などが生じると想定される(SM-04)。

( ) 内の ST-05, SH-01 等は, FEP 辞書内で定義された FEP 番号である。

TRU 廃棄物処分技術検討書からの引用。



## 4.2 緩衝材領域

緩衝材領域に対する支保利用の影響については、前節で述べた「セメント水和物の隣接領域への移動」について評価する必要が生じる。前節と同様にセメント材料と隣接する緩衝材で想定される事象の抽出のため、ここでも TRU 廃棄物処分技術検討書の FEP 辞書を用いることとした。表 4-2 に概略的に FEP の記述をまとめる。

第 2 次取りまとめのレファレンスケースを起点した安全機能への影響としては、以下を考慮する必要が生じる。

- ・ 領域内での核種の沈殿生成（低溶解性）
- ・ 領域内での核種の媒体への収着性
- ・ 沈殿，収着に好ましい地下水化学環境
- ・ 媒体の安全機能を期待する時間スケールに応じた長期安定性
- ・ 媒体中の移行距離（移行時間）

以上については、領域の鉱物組成の変遷と地下水化学条件及び密度変化の変遷に関しての評価を必要とする。

- ・ 領域でのコロイドろ過性
- ・ 領域溶液中での小さな拡散性

これらについては、領域の間隙特性や密度の変化に関しての評価を必要とする。

- ・ 領域の小さな透水性

これらについては、領域の鉱物組成の変遷と透水性の変化に関しての評価を必要とする。

緩衝材の内部に移行するセメント水和物の溶質成分は、拡散により緩衝材内部に侵入するものと考えられる。セメント水和物の溶出成分は高 pH であり、また、K, Na, Ca イオン濃度が高いと考えられる。これら成分による Na 型ベントナイトの Ca 化や、緩衝材中のカルサイトの溶解により緩衝材の密度や膨潤性は低下するとともに透水性が変化する可能性がある（これらは第 2 次取りまとめのレファレンスケースにおいても考慮されている）。また、モンモリロナイトとの反応によるモンモリロナイトの溶解やケイ酸塩鉱物の溶解、二次鉱物の沈殿により緩衝材中の間隙の増加、または、減少の可能性がある。ただし、TRU 廃棄物処分技術検討書では、セメント系材料とベントナイト緩衝材間の相互作用は、変質の促進あるいは抑制の正負のフィードバックを内包する非線形の連成現象であり、これらの事象を決定論的に評価することの困難性が述べられている。そのため、これらの影響の理解の限界に呼応してどのような保守性を取り込むかが重要となる。

緩衝材内部における地下水組成の変遷が、更に、他の領域に伝播する可能性もある。その場合、セメント水和物の溶出成分（特に高 pH 地下水の移動）は、オーバーパック表面に達することとなり、オーバーパックの腐食挙動に影響を与える可能性もある。

表 4-2 緩衝材における FEP の概略的記述

緩衝材領域	
温度	緩衝材の温度変化は隣接する構造躯体，支保工や埋戻材との熱のやりとりと緩衝材自身の熱物性によって決定される。また，緩衝材の熱による体積変化は，緩衝材に発生する温度と熱物性によって決定される。緩衝材の熱物性は，緩衝材に使用される材料の種類や緩衝材の温度及び長期的な化学的変質により変化すると考えられる(BT-01)。
水理	緩衝材中の地下水流動は，処分施設内の水理場とともに処分施設外の水理場の影響を受ける。緩衝材中の地下水流動は間隙水の流体特性や組成，モンモリロナイトのイオン交換反応，モンモリロナイトや随伴鉱物の溶解反応および二次鉱物の生成により水理特性が変化する可能性がある。また緩衝材の外側に径の大きな間隙が存在した場合には，緩衝材の間隙への侵入および緩衝材の流出が起きることにより水理特性が変化する可能性がある。緩衝材の透水係数が増加した場合，処分施設への地下水流入量の増加と処分施設内の地下水流速が増加する可能性がある (BH-03)。
力学	緩衝材は，粘弾性体として，岩盤側から構造躯体に働く可能性のある応力や変形を緩和し，逆に構造躯体等の金属腐食に伴う膨張による岩盤側への力学的影響を緩和する機能（応力緩衝性）を有する。緩衝材の応力は緩衝材の力学特性で決まり，その応力は，外的応力の作用，緩衝材自身の膨潤による内部応力の発生及び密度の変化などにより変わる。緩衝材の変形は，この応力と力学特性に対応して生じる(BM-02)。
化学	緩衝材は，短期的には間隙水中の陽イオンとのイオン交換反応，長期的には緩衝材中に含まれるモンモリロナイト，随伴鉱物などの緩衝材構成鉱物の溶解および二次鉱物の生成により変質する可能性がある。緩衝材の性能を劣化させるイオン種は，緩衝材より内側の構造躯体での溶質移動，および緩衝材の外側の埋戻材もしくはプラグや支保での溶質移動により供給される。緩衝材が変質した場合，緩衝材の物理的特徴である膨潤性が損なわれ，その結果緩衝材の水理特性に影響を受ける可能性がある。また緩衝材が変質することにより緩衝材中の収着サイトの表面状態が変化することにより，廃棄体からの放射性物質や人工バリア中のセメント系材料からの溶出イオンなどの緩衝材での収着分配係数に影響する可能性がある (BC-04)。 緩衝材間隙水中のイオンとの反応による緩衝材の変質に関しては，以下の変質が考えられる。 ① モンモリロナイトのイオン交換反応 ② 緩衝材構成鉱物の溶解／沈殿反応 ・ モンモリロナイトの溶解／沈殿反応 ・ 随伴鉱物の溶解／沈殿反応 セメント系材料，廃棄体からの浸出イオンが高濃度に供給される場合には，炭酸カルシウム，珪酸カルシウムなどの塩，鉱物が沈殿することによって間隙率の低下が生じ，緩衝材の水理特性，物質移行特性に影響する可能性がある (BC-04)。
形状	緩衝材の応力や変形の発生要因のうち，外的応力の作用としては，岩盤のクリープ変形，セメント系材料の強度低下，ガス発生による間隙圧力の上昇，金属の腐食膨張などによって，周辺部位（廃棄体，充填材，構造躯体，プラグ，支保，埋め戻し材，岩盤）を介して圧密又は膨潤状態となり，応力が変化することが考えられる。一方，内部応力の発生としては，緩衝材の温度や水分等の変化による応力発生とその応力の変化が考えられる。これら二つの要因は，相互に関連しながら，緩衝材の応力や変形に影響を及ぼす(BM-02)。

( ) 内の記号は，FEP 辞書内で定義された FEP 番号である。  
TRU 廃棄物処分技術検討書からの引用。

#### 4.3 母岩領域

表 4-3 に母岩に対する FEP の記載をまとめる。

母岩領域，特に支保に隣接する母岩の領域では，緩衝材での評価と同様にセメント系材料からの溶出成分と岩の反応により母岩の性能である，透水性やマトリクス拡散を生じる亀裂表面への影響を評価する必要が生じる。高レベル処分場の規模が大きいことから，使用される OPC 量は少なくはないが，処分密度の観点からは母岩の空間的体積に比較し支保体積が十分に小さいことを考えるならば，母岩に全領域において高 pH プルーム等のセメント水和物の影響は処分場の近傍に限られるものと考えられる。本検討に比較して，多量のセメント系材料の利用を前提とする TRU 処分技術検討書においても，アルカリ成分による周辺母岩への影響は施設に留まるものと予想しており，本検討においても，核種移行経路全体に影響が伝播する可能性は小さいものとして評価を行うこととした。

ただし，TRU 処分技術検討書でも述べられているように，亀裂媒体中の高 pH プルームの岩盤性能への影響に関しては，今後の課題として認識しておく必要がある。

表 4-3 母岩における FEP の概略的記述

母岩領域	
温度	母岩の温度は、直接的には隣接するプラグ／グラウト／支保／埋め戻し材および母岩の熱的な相互作用によって決定される。また、母岩は温度変化に伴い膨張・収縮変形を発生し、その変形が拘束されると母岩には温度応力が発生する。母岩の膨張・収縮変形は隣接するプラグ／グラウト／支保／埋め戻し材にも力学的な影響を与えると考えられる。(RT-02)
水理	母岩での地下水流動は、断層、割れ目などの地質学的特徴の間隙や母岩のマトリクス部の間隙で起きる。母岩での地下水流動は、地下水中の溶質や核種の移行方向および移行速度を変化させる可能性がある。このため、母岩での溶質移動（人工バリア性能に影響する溶存イオン種、処分施設内から浸出するセメント鉱物起源のセメント成分を含む高 pH 地下水の移動を含む）や核種の移流・分散現象に影響する。またガス移行に関しても液相の移動の観点から影響する可能性がある。更に母岩での地下水流動は、処分施設内へ浸入する地下水流量を変化させ、処分施設内での地下水流動に影響する可能性がある。(RH-03)。
力学	坑道掘削により、母岩の初期地圧が解放され応力の再分配が起こる。これにより母岩に変形が生じるとともに、ゆるみ領域（掘削影響領域）と呼ばれる領域が坑道周辺に生じる。操業中・閉鎖後もクリープ現象などによって、坑道周辺母岩の変形はさらに進む。また、ベントナイト材料の膨潤応力、廃棄体発熱による熱応力、坑道内部のガス発生による間隙圧力の上昇が母岩に作用し、応力場が変化する。(RM-02)。
化学	母岩中の地下水組成は、起源となった地下水と土壌や岩石との反応によって形成され、母岩の化学特性が影響する。また地下水の形成には有機物の存在と微生物活動が関与する可能性がある。更に TRU 処分施設の場合、廃棄物から浸出する硫酸塩、硝酸塩や処分施設内のセメント系材料から溶出するセメント成分を含む地下水が母岩中へ浸出し、その結果地下水組成が変化する可能性がある (RC-03)。 処分施設内に存在するセメント系材料から浸出するセメント成分の存在により高 pH プルームの影響を受ける。高 pH プルームの影響としては母岩中からシリカ分が溶出する可能性があり、これらの影響も地下水の pH、組成、イオン強度等の地下水の性状を変化させることにより核種の溶解度や分配係数に影響する (RC-03)。 処分施設からは充填材、構造躯体、吹付けコンクリートや覆工やセグメントやコンクリート製プラグなどのセメント系材料からの溶出イオン（アルカリ金属や $Ca^{+2}$ ）や廃棄物からの硫酸イオンや硝酸イオンを含む地下水が母岩中に放出される。風化作用や処分施設からの溶出イオンと母岩との反応により、母岩の変質が促進され、空隙構造が変化することが懸念される。母岩では空隙構造の変化により透水係数、拡散係数が変化する。また母岩が変質することにより母岩の力学特性が変化するとともに地下水中の溶質及び放射性核種の分配係数が変化する可能性がある (RC-04)。
形状	母岩は、人工バリアを外部からの物理的・化学的影響から保護し、廃棄体からの核種移行の遅延やコロイド移行の抑制などの物理的・化学的特性を発揮することが期待されている。岩盤の力学物性や応力状態に応じて、掘削後の操業期間及び閉鎖後において、時間経過に伴いひずみが増大するクリープ変形が生じる可能性がある。クリープ変形により、坑道内の人工バリアに力学的影響を与える可能性があるとともに、母岩の透水係数にも影響を及ぼすことが考えられる(RM-03)。

( ) 内の記号は、FEP 辞書内で定義された FEP 番号である。

TRU 廃棄物処分技術検討書からの引用。

#### 4.4 イベントツリーの構成

これまでに述べた、FEP 辞書等の情報に基づき、概略的なセメント利用による影響を以下に図化した。これらの情報を集約し図化する一般的な方法は無く、ここでは、FEP 辞書の情報の解釈及び TRU 処分技術検討書の内容を本研究内の判断に基づき作成した。なお、FEP 辞書は鉄筋等を用いる構造躯体に対するものであり、本研究で想定する条件に適合すると考えられる部分を判断し抽出した。そのため、図 2-2 における表記と同様に、必ずしも「厳密に正確」なものではないと考えられる。セメント影響に関する専門家の解釈も一通りではないことから、このような図は多様なバリエーションを取り得る可能性もある。

これらは、図 2-2 に示すインフルエンスダイアグラムへの摂動となる発端事象を表すことから、本研究では「イベントツリー」とよぶこととした。

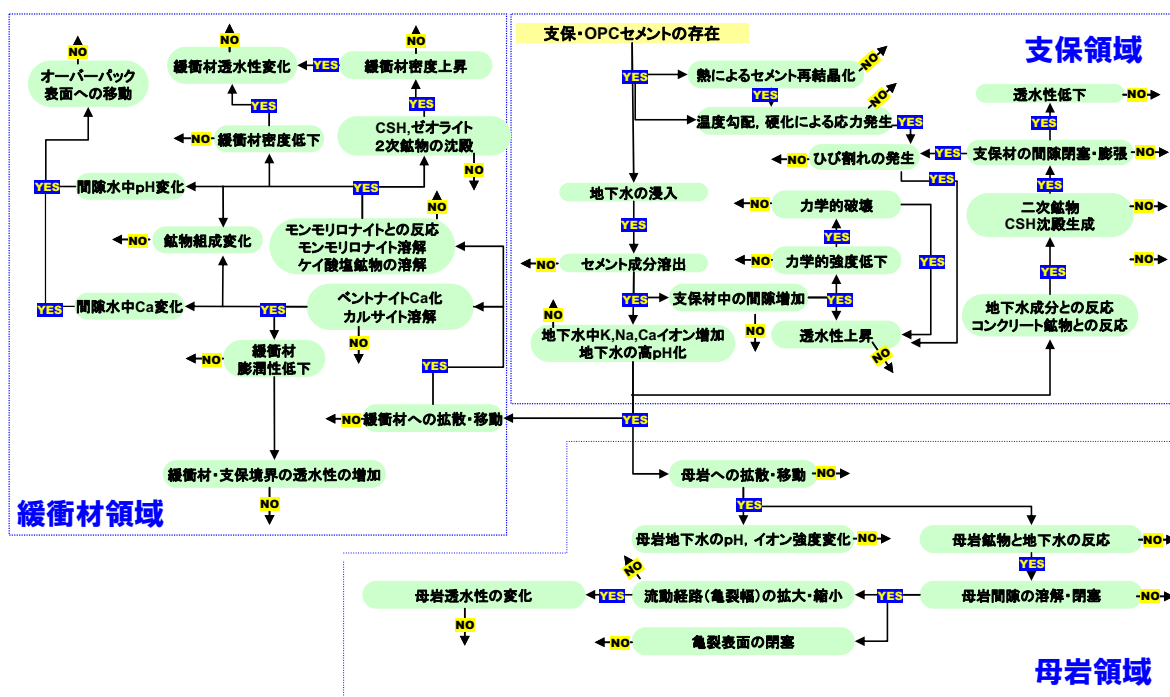


図 4-1 セメント系材料を用いる場合のイベントのまとめ



## 5. OPC 利用による評価シナリオの抽出

### 5.1 シナリオ抽出

#### (1) 支保領域の劣化影響

支保領域の性能の変遷を、第2次取りまとめのレファレンスケースを想定した既存の評価モデルに組み込むことを考える。レファレンスケースとした既存の評価モデルにおいては、支保の有する空間的領域を想定していないことから、ここでは、評価する領域を掘削影響領域と合わせて考えることとした。

OPC 材料を用いた支保を用いる場合に影響を考慮しなければならない可能性としては、4.において以下のものが取り上げられている。

- ・ 支保材料の劣化（水和成分の溶出や二次鉱物の沈殿）による、領域の透水性の上昇または低下
- ・ 支保領域の劣化（水和成分の溶出や二次鉱物の沈殿）による、力学的な変化
- ・ 支保領域からの水和成分の溶出と隣接する領域への移動

最後の項目に関しては、後述の緩衝材への溶出成分の影響シナリオとして別途考察することとし、個々では、透水性の変化及び力学的な変化を発端とするシナリオを考察することとする。

図 5-1 に OPC 支保を想定する場合の設計から安全機能へのデータの受け渡しのフローを既存評価で作成された FepMatrix に追加し示す。図中の赤線が変更および既存情報の見直しが必要となり、更に図の下流側に位置する安全機能の取り扱いを変更することとなる。

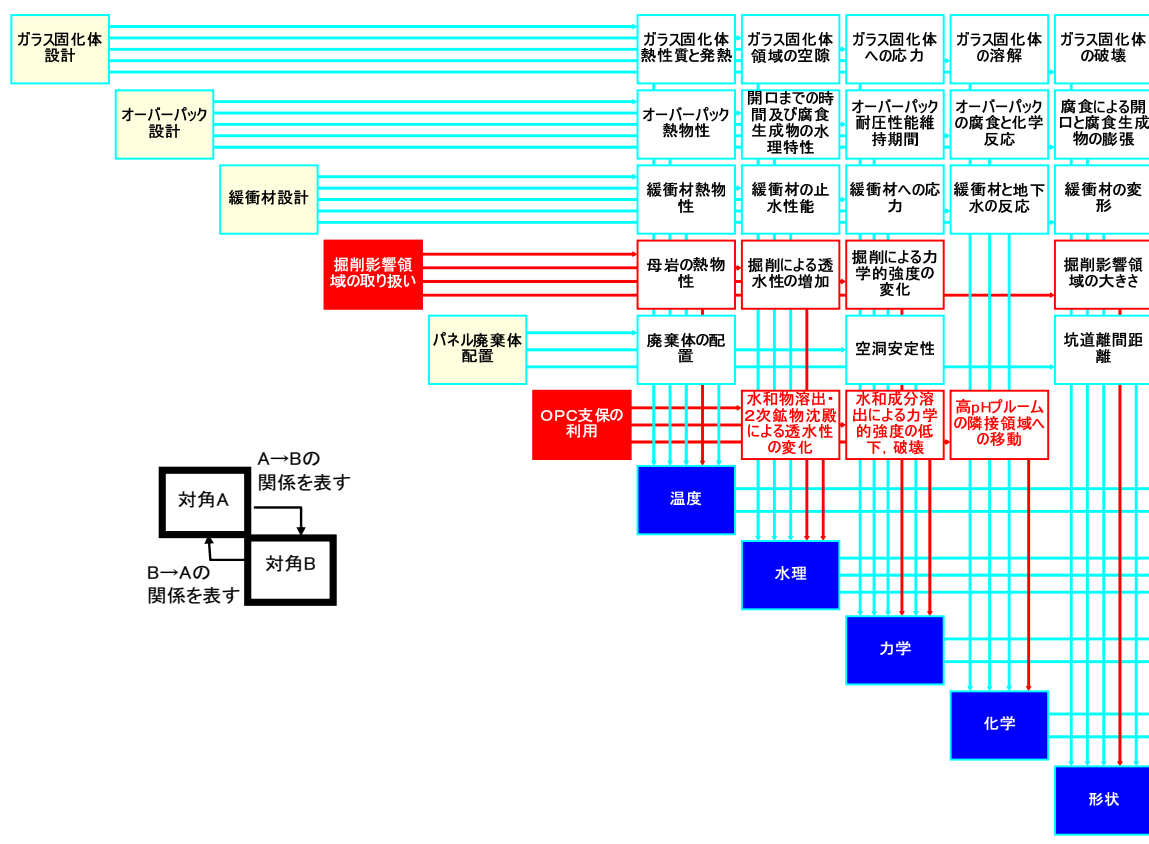


図 5-1 OPC 支保を想定する相互影響



レファレンスとした処分環境条件での考え方を表 5-1 にまとめる。これらは FepMatrix データベースから抽出され、下表においてマーキングされた部分が OPC 利用により影響を受けると考えられる部分である。これらの設計上の取り扱いの中で、支保を用いることにより、以下の事項に関しての再評価が必要となる。

- ・ OPC の熱物性を想定した温度環境の再考
- ・ 水理的な空間領域の取り扱いに対する再考
- ・ 力学的な変遷における取り扱いに対する再考

なお、TRU 廃棄物処分技術検討書では、OPC の再結晶化を防ぐための温度条件として 80°C が想定されている。また、既存の掘削影響領域で想定されたプラグや坑道配置に関しても再考する必要が生じる。

表 5-1 地質環境条件や設計における掘削影響領域の取り扱い

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。

注) マーキングされた部分が支保の利用により再考されると考えられる部分

表 5-2

設計等により考慮された処分環境条件から安全機能への取り扱いに関するレファレンスケースでの取り扱い内容を表 5-2にまとめる。これらのうち OPC を用いた支保の利用により取り扱いを変更しなくてはならない部分をマーキングで示した。例えば、掘削影響領域の水理的特性としては、0.5mの厚さを有し、内部に存在する亀裂の透水量係数は外部の透水量係数の10倍程度となるものとして評価している。これらのデータは、支保領域の透水性の時間的な変化と合わせ、取り扱いを変更する必要がある。

表 5-2 掘削影響領域の安全機能における取り扱い

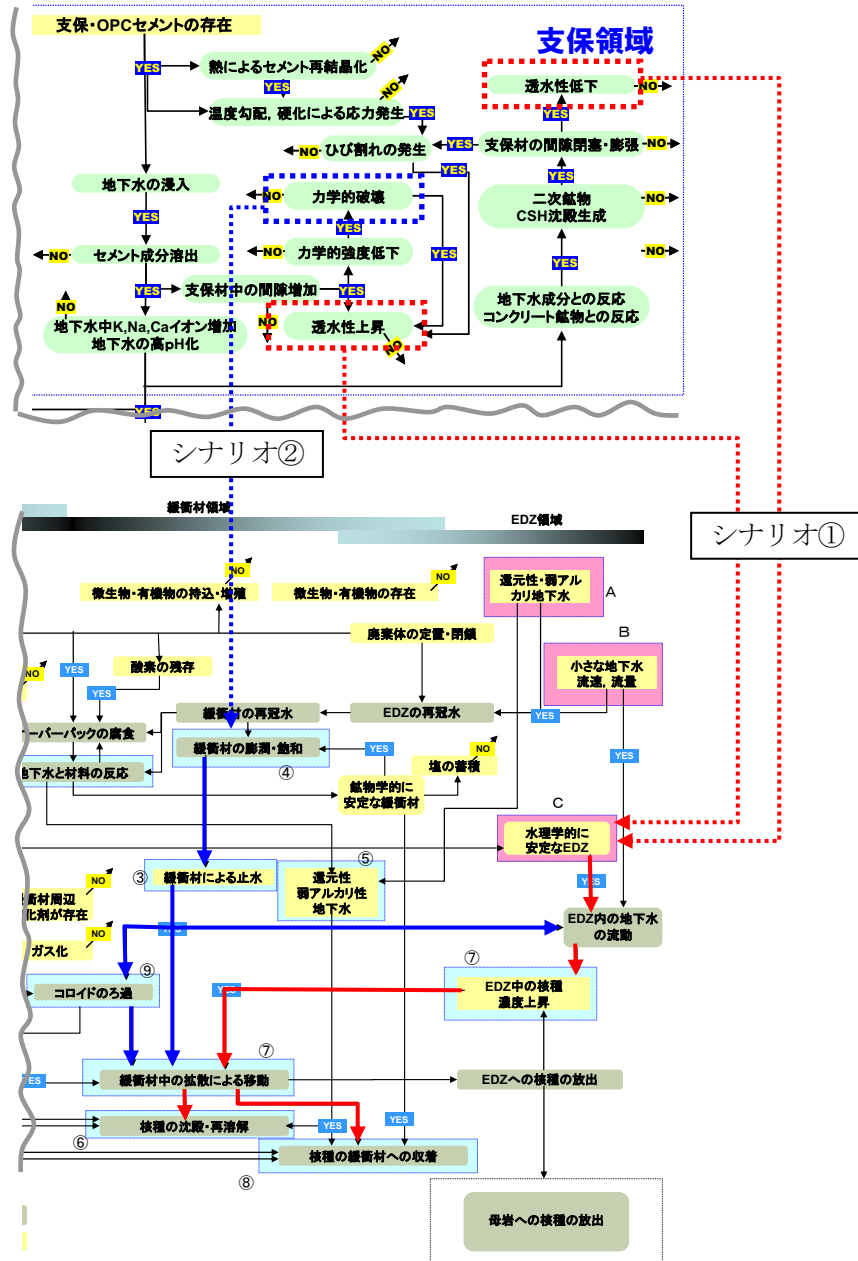
処分環境	考慮事項	安全機能	取り扱い
	掘削影響領域での低透水性維持		物理的な厚さを伴わない、瞬時に混合する仮想的なミキシングセルモデルを使用する。 人工バリアからの核種の移行は、ミキシングセルとの濃度勾配に支配される。
	掘削影響領域での低透水性維持		TBMの使用を想定し、0.5m幅の掘削影響領域が発生し、亀裂の透水性（透水量係数）は、健岩部の10倍となるものと仮定。これにより固化体あたりの地下水流量を0.001m <sup>3</sup> /yとする。
形状	形状の時間変化	掘削影響領域での低透水性維持	特に考慮されない
水理	掘削影響による透水性の増加	掘削影響領域での低透水性維持	硬岩系岩盤のデータを用い、亀裂ネットワークの評価から、掘削影響領域の流量を推定。0.001m <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。

注) マーキングされた部分が支保の利用により再考されると考えられる部分

図 5-2 にレファレンスケースで想定する処分システムの概念図（インフルエンスダイアグラム）と支保領域でのイベントを併記する。これにより、レファレンスケースで想定する処分システムに影響が与えられた場合（摂動）に、概略的に更に伝播する影響を辿ることが可能となる。

既存の処分システム（安全機能）への摂動として OPC 材料を用いた支保の影響を考えるならば、以下の2つのシナリオを考慮する必要がある。

- ① 掘削影響領域を通過する流量の時間的に変化するシナリオ
  - ①-1：支保のひび割れの発生に伴う掘削影響領域を通過する流量の増加シナリオ
  - ①-2：支保材料の溶出に伴う間隙率の増加及び掘削影響領域を通過する流量の増加シナリオ
  - ①-3：二次鉱物の沈殿に伴う間隙率の低下及び掘削影響領域を通過する流量の低下シナリオ
    - ①-3 については、間隙閉塞後のひび割れによる流量の増加及び低下の繰り返しの可能性もある。
  
- ② 水和成分の溶出・二次鉱物の沈殿に伴う力学的影響
  - ②-1：水和成分の溶出及び力学的強度の低下による破壊、体積減少に伴う緩衝材の膨潤シナリオ。（緩衝材が支保領域に膨潤することにより、緩衝材そのものの密度低下や密度低下に伴う、コロイドろ過性能の低下する可能性の可能性があるについては後述の緩衝材へのセメント溶出成分の影響でも同様な事象が取り扱われることから、次節で検討し、緩衝材で想定するシナリオに含めるものとする）。
  - ②-2：水和成分の溶出及び力学的強度の低下による破壊、体積減少に伴う掘削影響領域の流量増加シナリオ（①に含めるものとする）。



赤及び青の矢印が影響の伝播を示す。

- .....▶ 支保部分の透水性の低下に伴い取り扱いが変更される安全機能
- .....▶ 支保部分の力学的破壊に伴い取り扱いが変更される安全機能
- 初期に想定されていた安全機能間への影響の伝播

図 5-2 インフルエンシダイアグラム及びイベントフローから想定される影響伝播 (掘削影響領域)

## (2) 緩衝材へのセメント溶出成分の影響

表 5-3, 表 5-4 に第 2 次取りまとめでのレファレンスケースにおける緩衝材の設計や安全機能の取り扱いをまとめる。実際の処分坑では、緩衝材と母岩の間に OPC が用いられ、化学的、空間的に時間的に変化することから、解析におけるジオメトリーとして、それらの領域を含めなくとも、処分環境 (THMCG) の評価において (表 5-3 参照)、以下の事象に関しての評価・検討が必要となる。

- ・支保を配置することによる熱的效果
- ・支保領域の体積変動に伴う、緩衝材の変形
- ・支保領域の体積変動及び緩衝材の膨潤に伴う、水理特性の変化
- ・支保領域からの高 pH プルームや Ca イオン等による鉱物学的な変化

また、これらの変化は性能評価の前提となる以下の安全機能に関して影響を与える可能性がある (表 5-4 参照)。ただし、熱的效果については、坑道間距離や廃棄体定置間隔の変更で容易に検討できることから、ここでは、設計上の配慮がなされ、有意な影響は生じないものと仮定する。

- ・緩衝材の低透水性や密度の変化に伴う、コロイドろ過性能の変化
- ・緩衝材の低透水性能の変化
- ・緩衝材中の間隙水組成の変化に伴う、核種の溶解特性 (溶解度) の変化
- ・緩衝材中の間隙水組成、鉱物組成に伴う、核種の緩衝材への収着特性 (分配係数) の変化
- ・緩衝材の実効厚さの変化

これらは、コンクリート支保を用いると仮定する場合、直ちに全てが変化するものではなく、用いられる OPC の量等、詳細な設計条件等によっては、影響を考える必要のない事象も含まれる。そのため、これらの事象が影響しうるまでの過程をシナリオとして記述し、それらの過程に関して、その「実現度」を評価することにより、明示的な「シナリオ」として安全評価取り込むどうか判断されることとなる。

図 5-3 にレファレンスで想定する処分システムの概念図 (インフルエンスダイアグラム) と支保領域でのイベントを併記する。これにより、レファレンスで想定する処分システムに影響が与えられた場合 (摂動) に、緩衝材へのセメント溶出成分の影響がレファレンスケースに与える影響を俯瞰できる。

表 5-3 設計における緩衝材領域の取り扱い

設計条件	項目	処分環境	取り扱い
緩衝材設計	緩衝材熱物性	温度	未冠水の緩衝材の熱物性を用いる（含水比7%）
			緩衝材中の温度は、閉鎖後10年程度で最高温度（横置き、硬岩で97℃～117℃）となり、1000年後には、どの条件においても60℃を下回る。約10000年で環境温度の45℃に回復する。
			ガラス固化体とオーバーパック、オーバーパックと緩衝材、緩衝材と母岩の境界に、空気層の存在や粉末ベントナイトの存在を仮定する場合には、緩衝材中の最高温度が、制限温度とする100℃を超えるが、緩衝材への地下水の浸入や緩衝材の膨潤による間隙の閉鎖の可能性から、間隙の影響は小さいものと判断。
緩衝材設計	緩衝材への応力	力学	緩衝材の構成モデルとして修正Cam-Clayモデルを用いて、上記岩盤クリープ変形およびオーバーパックの腐食膨張による緩衝材の力学的な経時変化解析を実施した。10,000年後の緩衝材の応力比の最大値は0.60となり、限界状態（0.63）に近い値となったが、応力比が大きくなる範囲はオーバーパック周辺（とくに隅角部）に限られた。
緩衝材設計	緩衝材への応力（ガス移行）	力学	二相流解析の結果では、オーバーパックの腐食速度を10μm/yとする保守的な設定条件においても、ガス発生による人工バリアへの構造力学的影響、さらには間隙水の排水にもなる核種移行の促進に対する影響については、ほとんど問題ないと判断された
緩衝材設計	緩衝材への応力	力学	緩衝材の構成モデルとして修正Cam-Clayモデルを用いて、上記岩盤クリープ変形およびオーバーパックの腐食膨張による緩衝材の力学的な経時変化解析を実施した。10,000年後の緩衝材の応力比の最大値は0.60となり、限界状態（0.63）に近い値となったが、応力比が大きくなる範囲はオーバーパック周辺（とくに隅角部）に限られた。
緩衝材設計	緩衝材の変形	形状	オーバーパックの腐食膨張、オーバーパックの沈下、岩盤クリープの観点から評価される。処分システムの安全性に影響が及ぶ変化はないものと判断。
緩衝材設計	緩衝材の低透水性	水理	ペクレ数で0.01以下となることを確認。材質の長期安定性（流出や侵食の可能性が小さいこと）を前提としている。
緩衝材設計	緩衝材と地下水の反応	化学	陽イオン交換によるCa化、スメクタイトのイライト化、鉄との相互作用による擬クロライト化、鉄スメクタイト化の鉱物学的変化について考慮されている。Ca化による性能の低下による処分システムへの影響は小さいものと判断。鉱物学的変化については、ナチュラルアナログによる定性的判断から、変化の可能性は小さいものと判断された。



表 5-4 緩衝材領域の安全機能の取り扱い

処分環境	項目		安全機能	取り扱い
	緩衝材による地下水移動抑制			緩衝材は完全に飽和し、均質な低透水性のバリアとなる。緩衝材中の核種移行は、移流に比べて拡散が卓越する。
形状	緩衝材の長期性能維持		緩衝材による地下水移動抑制	緩衝材の低透水性やコロイドろ過効果が喪失するまでの劣化はないものと判断
形状	緩衝材空隙構造の長期健全性		緩衝材のコロイド移動抑制	再冠水した緩衝材は低透水性で緻密な空隙構造を有する。
形状	緩衝材空隙構造の長期健全性	有機物・微生物のろ過	緩衝材のコロイド移動抑制	分子量の大きな有機物は透過できないことが実験により確認されており、溶存している有機物のうち、分子量の小さな有機物のみが溶解度、拡散、収着に影響を及ぼす可能性がある。
温度	緩衝材中での温度		緩衝材での移動抑制	核種移行時の温度は60℃（1000年後）、10000年経過時では45℃まで低下（地温温度に低下）
化学	緩衝材中での核種の収着・沈殿		緩衝材での移動抑制	核種は、同位体間で分配された溶解度により制限される濃度を上限とした濃度勾配に従って緩衝材中を溶質として拡散移行する。
化学	緩衝材中での核種の収着・沈殿	有機物・微生物影響	緩衝材での移動抑制	放射性核種の移行挙動（沈殿／溶解、収着など）に影響を及ぼす可能性がある。また、微生物の活動に付随して起こる有機物の分解による、可溶性で可動性の有機物の増加、ガスの発生、さらに、微生物自身の移動の影響などが想定され得る。 有機物および微生物の核種移行挙動への影響に関する詳細な検討は、具体的な地質環境条件での今後の研究に依存するものとする。第2次取りまとめでは、これまでの知見から定性的に、地層処分システムへの影響は小さいものと判断した。
化学	緩衝材中での核種の収着・沈殿	放射性分解、放射線損傷	緩衝材での移動抑制	放射線分解により発生し得る酸化剤と人工バリア中の還元物質（オーバーパック腐食生成物）の量の比較からは、酸化剤が生じたとしても十分な量の還元剤が存在する。仮にガラス固化体の近傍で酸化状態が生じ、溶解度などが増加したとしても、人工バリア内の還元剤（オーバーパックとその腐食生成物、緩衝材中の黄鉄鉱など）により酸化剤は、ガラス固化体近傍に留まると考えられる。したがって、緩衝材中においては還元条件での溶解度が期待されるため、核種移行に有意な影響を与えることはないと考えられる。
化学	緩衝材中での核種の収着・沈殿	核種移行時の化学環境	緩衝材での移動抑制	1000年間のオーバーパックの水密性を想定することにより、地下水化学環境は、還元性雰囲気に戻ると判断。
水理	緩衝材中での移流と拡散		緩衝材での移動抑制	緩衝材内部は拡散支配となる。
水理	緩衝材中での拡散	モデル上の取り扱い	緩衝材での移動抑制	緩衝材中での核種濃度は、軸方向および周方向での勾配はなく、半径方向にのみ勾配を持つと仮定する。一次元モデルが適用可能となる。
形状	緩衝材ジオメトリー		緩衝材での移動抑制	腐食膨張による緩衝材の厚さの減少、緩衝材の亀裂への侵入による密度低下については、モデルの不確実性として考慮。
形状	緩衝材ジオメトリー		緩衝材での移動抑制	オーバーパックの沈下は、影響が小さいものと判断。

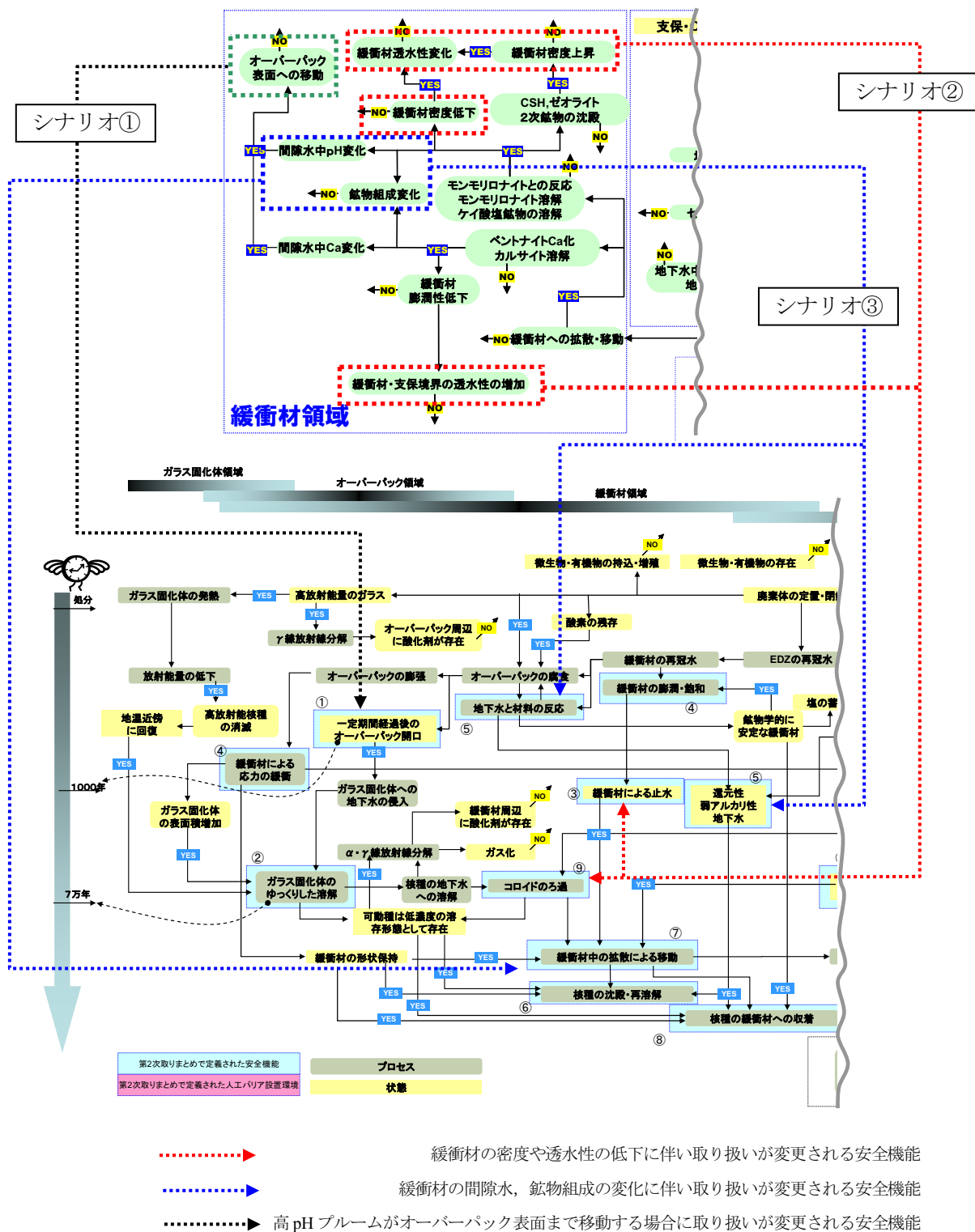


図 5-3 インフルエンスダイアグラム及びイベントフローから想定される影響伝播 (緩衝材)

### ① 緩衝材中の高 pH プルームの移動シナリオ

セメント系材料を通過した地下水は、その成分の溶解に伴い高 pH の水質となる。緩衝材中での高 pH プルームの挙動によっては、オーバーパック表面まで高 pH プルームが達する可能性が否定はできないため、可能性は小さいかも知れないが、オーバーパックの早期破損シナリオに発展する可能性がある。このシナリオが現実的であるか、または、仮想的であるかの判断には、オーバーパック表面までセメント反応水が移動するかどうかの評価が必要となる。

緩衝材が速やかに閉塞するとする場合の解析結果（TRU 廃棄物処分技術検討書）では、支保・緩衝材界面において、緩衝材側の界面近傍での間隙割合は増加し、支保側では低下すると予想されている（図 5-4 参照）。緩衝材中央部の pH は、長期間ほとんど変動していない。また、1 モル当たりの Na モンモリロナイトは、約 4.67 モルの OH<sup>-</sup>を消費する（原子力発電環境整備機構、2005）緩衝能力を有するものと予想され、1m<sup>3</sup>のセメント中の Ca(OH)<sub>2</sub>を約 900 モル、1m<sup>3</sup>の緩衝材中の Na モンモリロナイトを 2000 モル（何れも TRU 廃棄物処分技術検討書のコンクリートデータ、緩衝材データから概算）とすると、10cm の支保に含まれる OH<sup>-</sup>は、全量が反応したとしても 2cm 程度の緩衝材により緩衝される。これらの知見も基づくと、高 pH プルームはセメント反応水の高 pH 状態を保ったままオーバーパック表面まで到達する可能性は小さいものと予想できる。

しかしながら、セメント反応水の浸入は（横置き処分の場合）定置直後であり、再冠水の途上となる。緩衝材の施工方法（例えばブロック型緩衝材の利用）によっては、ブロック型緩衝材間の隙間をセメント反応水が移動することも考えられ、緩衝材間の隙間が膨潤によって閉塞しない可能性について検討する必要があるものと考えられる。上述の概略的な評価は、緩衝材が飽和状態にあり、セメントからの溶出成分は拡散により移動するが前提となっていることから、冠水中におけるセメント反応水の挙動、緩衝材施工を考慮した隙間の取り扱い（粉体状のベントナイトの空隙部への充填）については、不確実性として残ることとなる。

TRU 廃棄物処分技術検討書の解析結果（図 5-4）によれば、セメント反応水は緩衝材中で概ね pH11.5 程度まで低下する。pH13 以上の高 pH 地下水そのものがオーバーパックに到達する可能性が小さいとしても、pH11.5 程度（第 2 次取りまとめの pH は 8.9）の地下水がオーバーパックまで到達する可能性は否定できないものと考えられる。その場合、図 5-5 に示すように、ポルトランダイト平衡の地下水の pH12.5 及び緩衝材中に想定される pH 領域では、炭素鋼のオーバーパックは不動態化する可能性がある。オーバーパック表面の不動態化がそのまま局部腐食発生を意味するものではないが、閉鎖直後の冠水時の支保を通過した地下水の組成がどの様に変化するかの検討が重要となる。更には、緩衝材内部の pH 変動は、ガラス固化体の溶解性にも影響を与えられ、時間的及び空間的な化学状態の変遷を、使用されるセメント量、再冠水時の温度条件、セメント反応水と緩衝材の反応等を勘案し現実的に取り扱うことが必要と考える。

### ② 緩衝材の溶解に伴う密度低下シナリオ

緩衝材の密度低下の可能性としては、緩衝材中の鉱物の溶解に伴う「部分的な」密度及び透水係数の上昇と、「部分的な」密度低下に連動し緩衝材が膨潤、結果として緩衝材の全体の密度低下が生じるケースの 2 つ考えられる。また、密度低下の影響としては、緩衝材のコロイドろ過性能に影響を与える可能性もある。

①で述べたように、緩衝材が支保からの高 pH プルームにより 2cm 程度溶解すると仮定すれば、その分を緩衝材が膨潤すれば約 4%程度密度が低下する。仮に、支保部分（10cm とする）の領域まで、空隙上昇が生じ、その領域まで膨潤が及ぶとしても、26%程度の密度低下に留まる。黒澤（2005）の検討によれば、40%ほど低下するとコロイドが透過する領域となる可能性が示されている（図 5-6

参照)。したがって、通常の性能を発揮する緩衝材ではコロイドが透過するまでの密度低下に至ることはないと考えられる。また、オーバーパックの膨張による効果を考えるならば、更に、緩衝材の密度が大幅に低下するものとは考えにくい。

ここで考えられる不確実性としては、①と同様に、緩衝材ブロック間の隙間等への選択的な高 pH プルーフの進展である。予想としては、オーバーパック開口に至るまでの期間に緩衝材が均質化され処分初期に生じる選択的な密度低下領域は解消されるものと考えられる。

緩衝材全体の密度が低下する場合においては（乾燥密度  $1.6 \text{ Mg/m}^3$  が 30%低下し  $1.1 \text{ Mg/m}^3$  となる場合）、緩衝材の固有透過度の上昇は、1桁程度に留まるものと推定される（図 5-7 参照）ことから、緩衝材の低透水性が失われる可能性は小さいものと予想される。これに対して、緩衝材と支保との境界面近傍で局所的に密度が低下し、その状態が継続する場合には、境界での低透水性は低下することとなる。その場合には、支保領域の劣化影響で述べた掘削影響領域の流量増加シナリオと同様の取り扱いとなる。その際、緩衝材と支保境界の狭い領域での地下水流動は、緩衝材の浸食を生じる可能性もある。

現実的な緩衝材の溶解範囲（2 cm）程度の密度低下では、オーバーパックの沈下の可能性は小さいと考えられるが、どの程度の密度の低下まで許容できるか等の検討は有用であると考えられる。

①でのシナリオ抽出においては、オーバーパックの局部腐食の可能性を述べた。図 5-5 に示されるように、オーバーパックの不動態化する pH 領域は、緩衝材の密度にも依存する。そのため、支保領域の密度低下及び緩衝材部分の密度低下とオーバーパックの腐食膨張を組み合わせ、ジオメトリーに関する現実的な評価についても検討することが望ましい。

### ③ 間隙水、鉍物組成変化シナリオ

概ね①のシナリオ抽出部分と重複するが、緩衝材内部の鉍物学的変遷の可能性が小さいとしても、第 2 次取りまとめで想定した pH とは異なる状態が一定期間継続するものと考えられる。そのため、核種の溶解特性（溶解度）や緩衝材への収着特性（分配係数）については、新たなデータを準備することと、時間的な変遷を考慮する必要がある。

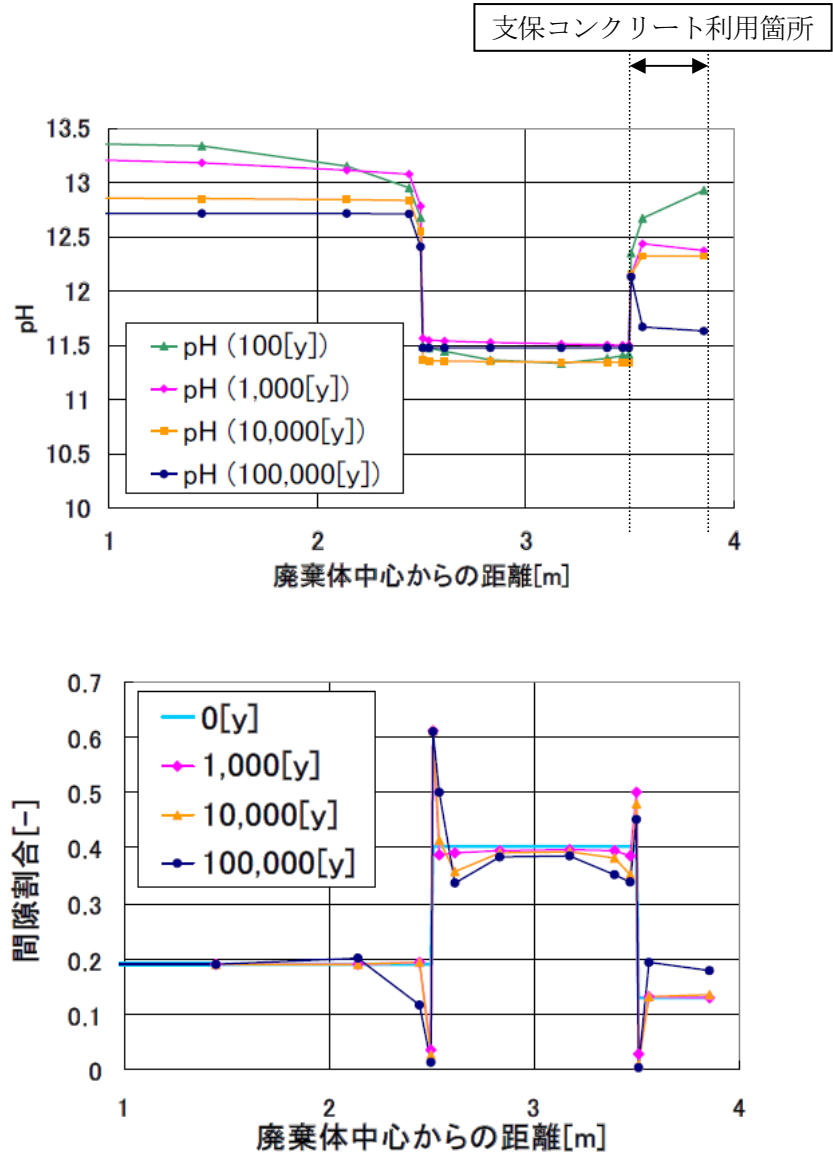
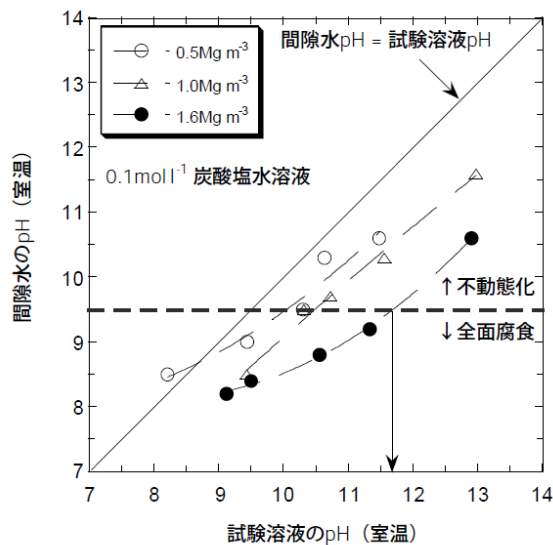
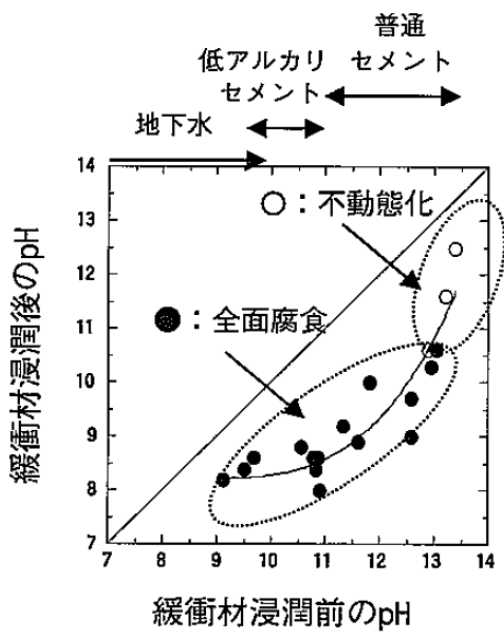


図 5-4 緩衝材及び支保領域の pH, 間隙割合の解析例 (TRU 廃棄物処分技術検討書より)



(第2次取りまとめより)



(核燃料サイクル機構, 2002)

図 5-5 炭素鋼の腐食挙動と pH の関係



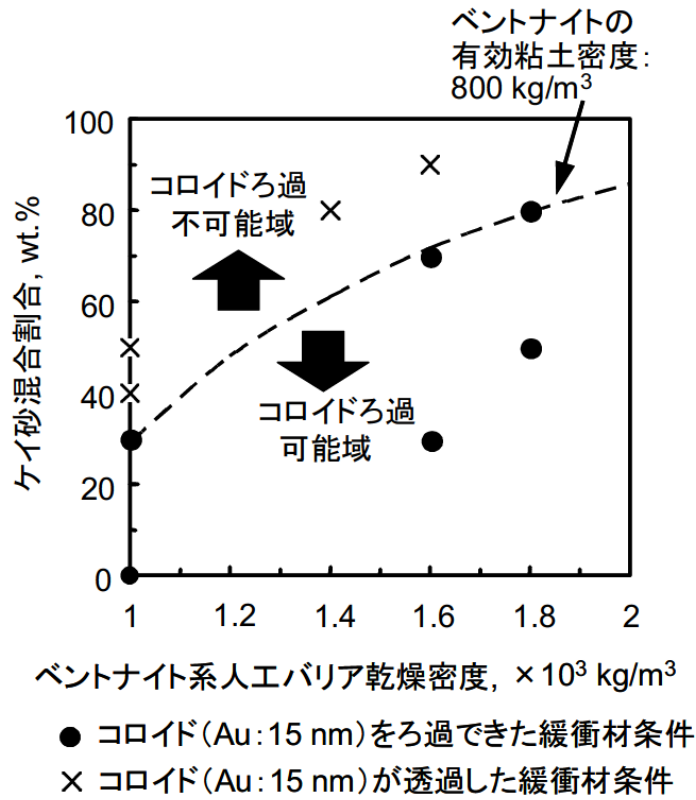


図 5-6 コロイドろ過試験結果 (黒澤, 2005)

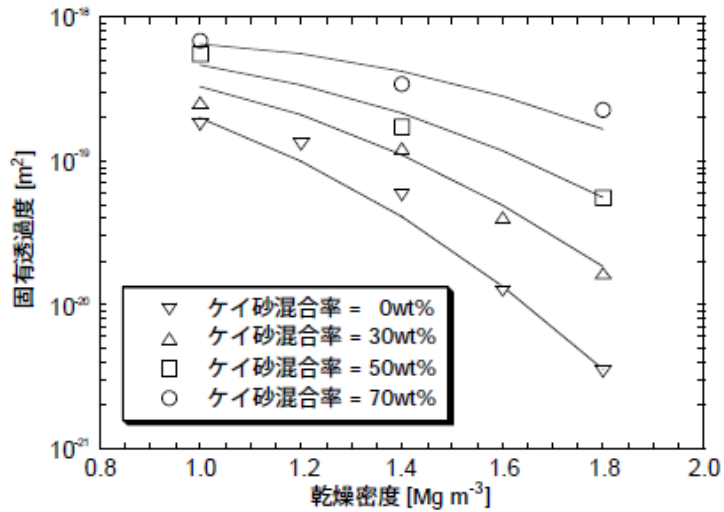


図 5-7 乾燥密度と固有透過度の関係 (第2次取りまとめ, 分冊2)

## 5.2 シナリオに関するまとめ

下表に、抽出したシナリオをまとめる。

表 5-5 シナリオ抽出結果のまとめ

シナリオ	派生する影響
(1)-① 掘削領域を通過する流量の変化シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・流量の増加による母岩への核種移行率の増加</li> <li>・流量の低下による母岩への核種移行率の低下</li> <li>・増加と低下の繰り返し</li> </ul>
(2)-① 高 pH プルーフ移動シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・オーバーパックの不動態化（早期開口）</li> <li>・ガラス溶解速度の増加</li> <li>・ガラス溶解速度の時間的变化</li> <li>・緩衝材・支保境界での選択的移行経路の発生</li> </ul>
(2)-② 緩衝材の密度低下シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・掘削影響領域の流量増加（(1)-①と同じ）</li> <li>・緩衝材と支保境界での緩衝材の侵食</li> <li>・コロイドの透過</li> <li>・コロイドの選択的な移行経路の通過</li> <li>・オーバーパックの沈下</li> <li>・オーバーパックの不動態化の促進</li> </ul>
(2)-③ 緩衝材中の間隙水、鋳物組成変化シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・核種溶解度の時間的な変遷</li> <li>・緩衝材への収着（分配係数）変化</li> <li>・分配係数の時間的、空間的な変化</li> </ul>

これら抽出されたシナリオ及び派生する影響に関しては、現状それらの全てが評価できるわけではなく、保守的な取り扱いを行う等の対処が必要となる。また、これらのシナリオの排除を目的として処分概念として、例えば、低 pH セメントの利用やチタン製オーバーパック等の代替概念を適用する判断も可能である。

ただし、OPC を用いる場合には、長期的な安全性に関する信頼性の観点から、処分初期、特にセメント反応水が緩衝材を通過し、緩衝材が飽和するまでの期間の評価が重要となることがわかった。

## 6. おわりに

横置き処分において、OPCを用いた支保を使用する場合のシナリオ分析を例示した。既に評価概念が確立された処分システムに対する総合的な性能評価について、FEP等で想定される事象を前提とした環境条件（温度、水理、力学、化学、形状）に対する設計での取り扱いと、安全機能を前提としたこれら環境条件の取り扱いに関する整理結果に基づき、レファレンスとする総合的な性能評価手法をまとめ、これらレファレンスとしたシステムとは異なる条件（ここではOPC支保の利用）で想定されるイベントの整理結果をこれへの摂動として取り扱うことによりシナリオ抽出を行った。

その結果、性能評価の前提となる処分システムの整理において、安全機能に基づく性能評価の方法を考慮した“総合性能評価の雛形”を構築し、これに対して、処分条件等の変更内容を反映させることによりシナリオの抽出が容易となることが判った。このような条件の変更を摂動として取り扱う方法論は、既存の基本的な考え方を損なうことは無く、評価の段階的進展においても有効であると考えられる。そのため、既存のシステムの情報の流れを本研究でこれまで構築してきた情報整理の方法論を踏まえ調査設計－処分環境－安全機能の構造に従い FepMatrix 等により既存情報を整理する手法は有益であり、段階的な情報の変化に応じたシナリオ抽出の実施に見通しが得られた。

今後、これらの適用例を増やすとともに、不確かな情報の取り扱い（地質環境調査結果の取り扱い：イベントフロー部分に相当ものとする）と安全機能の関係に関しても、この手法の適用性を検討していくものとする。

参考文献

- 1) 資源エネルギー庁；“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画”，資源エネルギー庁，2006.
- 2) 牧野 仁史・川村 淳・若杉 圭一郎・大久保 博生・高瀬 博康（2007）：“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”，日本原子力研究開発機構，JAEA-Data/Code 2007-005, 2007.
- 3) 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.
- 4) 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）”，日本原子力研究開発機構，JAEA-Research 2008-022, 2008.
- 5) 核燃料サイクル開発機構，“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性” 分冊 1, JNC TN1400 99-021, 1999. 分冊 2, JNC TN1400 99-022, 1999. 分冊 3, JNC TN1400 99-023, 1999.
- 6) 電気事業連合会，核燃料サイクル機構；”TRU 廃棄物処分技術検討書”，JNC TY1400 2005-002, 2005.
- 7) 電気事業連合会，核燃料サイクル機構；”TRU 廃棄物処分技術検討書 根拠資料集 4-1 別添”，JNC TY1400 2005-001, 2005.
- 8) 原子力発電環境整備機構；“Proceedings of the International Workshop on Bentonite-Cement Interaction in Repository Environments”，NUMO-TR-04-05, 2005.
- 9) 核燃料サイクル機構；“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発 平成 13 年度報告”，JNC TN1400 2002-003, 2002.
- 10) 黒澤 進；“高レベル放射性廃棄物地層処分システムにおける核種移行評価に及ぼすコロイド影響に関する研究”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN8400 2005-007, 2005.

# 国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の) 1	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。  
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光照度	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
放射線量の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		lm/m <sup>2</sup>
放射線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。  
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。  
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。  
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で "radioactivity" と記される。  
 (g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘り度	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> = s <sup>-1</sup>
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> = s <sup>-2</sup>
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>-3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>4</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
放射線輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>24</sup>	エクソ	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min = 60 s
時	h	1 h = 60 min = 3600 s
日	d	1 d = 24 h = 86 400 s
度	°	1° = (π/180) rad
分	'	1' = (1/60)° = (π/10800) rad
秒	"	1" = (1/60)' = (π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha = 1 hm <sup>2</sup> = 10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L = 1 dm <sup>3</sup> = 10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> = 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t = 10 <sup>3</sup> kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV = 1.602 176 53(14) × 10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da = 1.660 538 86(28) × 10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1 u = 1 Da
天文単位	ua	1 ua = 1.495 978 706 91(6) × 10 <sup>11</sup> m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar = 0.1 MPa = 100 kPa = 10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg = 133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å = 0.1 nm = 100 pm = 10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M = 1852 m
バイン	b	1 b = 100 fm <sup>2</sup> = (10 <sup>-12</sup> cm) <sup>2</sup> = 10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn = (1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数関数の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg = 10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn = 10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P = 1 dyn s cm <sup>-2</sup> = 0.1 Pa s
ストークス	St	1 St = 1 cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> = 10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb = 1 cd cm <sup>-2</sup> = 10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フォト	ph	1 ph = 1 cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal = 1 cm s <sup>-2</sup> = 10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx = 1 G cm <sup>2</sup> = 10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G = 1 Mx cm <sup>-2</sup> = 10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe ≈ (10 <sup>3</sup> /4π) A m <sup>-1</sup>

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci = 3.7 × 10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58 × 10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad = 1 cGy = 10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem = 1 cSv = 10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ = 1 nT = 10 <sup>-9</sup> T
フェルミ		1 フェルミ = 1 fm = 10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1 メートル系カラット = 200 mg = 2 × 10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal = 4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ = 1 μm = 10 <sup>-6</sup> m

