

4. 熱 - 水 - 応力 - 化学連成モデルの整備

4.1 背景・目的

廃棄体を含む人工バリアとその近傍の岩盤で構成されるニアフィールドの環境状態の変遷は、処分場の設計条件やサイトの地質環境に応じて、熱、水理、応力及び化学といった多様な現象の相互作用によってもたらされる。特に、処分場閉鎖後の初期においては、ガラス固化体の発熱が比較的高く、周辺岩盤の地下水による再飽和、緩衝材の冠水・膨潤といった過渡的な現象が発生する。このような過渡的な現象の取り扱いについては、熱(Thermo)-水理(Hydro)-応力(Mechanical)-化学(Chemical) (以下、THMC) 連成現象の特徴を適切に考慮した評価が必要となる。この過渡的な状態を含む処分場閉鎖後のニアフィールド環境の長期変遷を把握するためには、閉鎖時及びその後の環境条件の変化に関する測定や監視結果に基づき、解析等の手法による予測を行うことが必要である。このような予測は、長期にわたるニアフィールド環境変遷が短期間の観察によって把握された挙動の単純な外挿とは異なる可能性のある点に特に留意して行うことが必要となる。

このような観点から、平成22年度の研究において、ニアフィールド環境長期変遷挙動の特徴である非線形性、初期条件や環境条件への依存性、不均質性、及び現象の多様性(マルチフィジックス/マルチスケール性)の4つに着目し、それぞれの概要及び安全規制上の意味について検討した。

処分場閉鎖後におけるニアフィールド環境条件の変遷は、熱、水理、応力及び化学といった多様な現象の相互作用によってもたらされるが、現象間の非線形のフィードバックのために、初期には微小なものであった特徴が時間とともに増幅されることにより、質的に異なる状態に至る可能性(非線形性によるシナリオ分岐)が想定される。また、これに加えて、処分場閉鎖前の建設・操業段階での状態変化の影響やその後の外部環境条件の影響による閉鎖後の環境変遷モードの相違(初期条件や環境条件への依存性)や、ニアフィールド母岩の空間的不均質性(不均質性)の影響、あるいは対象とする多岐にわたる現象間の相互作用(マルチフィジックス性)や複数の空間スケールにまたがる現象における巨視的挙動と微視的挙動の間の相関関係(マルチスケール性)の影響に留意する必要がある。

処分場閉鎖時点のニアフィールドは、高温、乾燥、酸化性、応力開放の状態にあるものと想定されるが、地層処分の安全性確保のためには、核種移行の開始時点及びそれ以降に、安全評価上前提としている、以下の状態に確実に到達することが重要な要件の一つになるものと考えられる。

- ・ 地温と同等程度の温度条件
- ・ 緩衝材が冠水し膨潤して圧縮場となり、止水性、応力緩衝性、化学緩衝性、コロイドろ過性、核種収着性等の期待される安全機能を発揮する
- ・ 処分場閉鎖時点で残留していた酸素が鉄等との反応によって消費され還元性環境となる

そこで、安全規制の観点からは、ニアフィールド環境が処分場閉鎖後、安全評価上前提としている上述した状態になることについての予測及びそれに基づく論証の正当性を検証することが重要となり、この際、上述したニアフィールド現象の特徴を考慮しつつ、以下の二つの目標を設定することが適切と考えられる。

目標1

ニアフィールド環境変遷についての長期予測が、ニアフィールドにおける連成現象の特徴である非線形性、初期条件や環境条件への依存性、不均質性、及びマルチフィジックス/マルチ

スケール性を的確に表現したものであり、かつ、残された不確実性の影響に対して頑健性を有する適切なものであることの確認

目標 2

上記の長期予測を通じて、安全評価上前提としているリファレンス状態に達する初期状態の範囲及び関連する環境条件等の制約条件が明確にされており、適切な品質管理及びサイト選定によって、閉鎖時点のニアフィールドの状態とその後の環境条件がこの範囲内にあると保証されていることの確認

ニアフィールド環境の長期変遷の予測と初期状態の品質保証の関係を図 4.1-1 に示す。

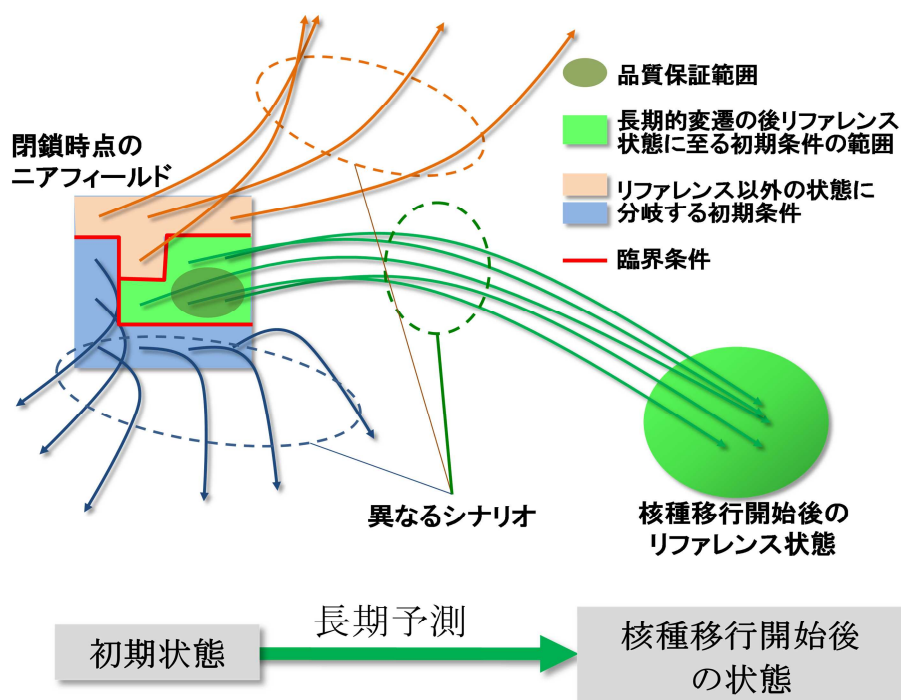


図 4.1-1 ニアフィールド環境長期変遷におけるシナリオ分岐に関する概念

上記の目標に対処するために、ニアフィールドにおける連成現象の特徴である非線形性、初期条件や環境条件への依存性、不均質性、及びマルチフィジックス/マルチスケール性に関する従来の方法論における潜在的な問題点として、

- ・従来の専門家の知見に基づくシナリオ解析における網羅性及び追跡性の不足
- ・個別モデルを用いた定量的解析（連成解析）における解析上の仮定の恣意性とその影響に着目した。そして、これらの二つの潜在的な問題点に対応するために、本研究で取り組むべき新たな技術課題として、

(1) 専門家の知見に基づくシナリオ解析を補完するシナリオシミュレーション技術の開発

(2) 特定のモデルオプションに依存しない包括的な連成解析技術の開発

を設定した。

これらの課題への対応を行うことにより、ニアフィールド環境の長期変遷について、数値解析技術を用いて適切に把握し、安全評価の信頼性向上を図ることを目的とするものである。シ

ナリオ解析からニアフィールド環境の定量的理解と不確実性の把握に到る、従来の方法論と、本研究で取り組む技術課題の関係を図 4.1-2 に示す。

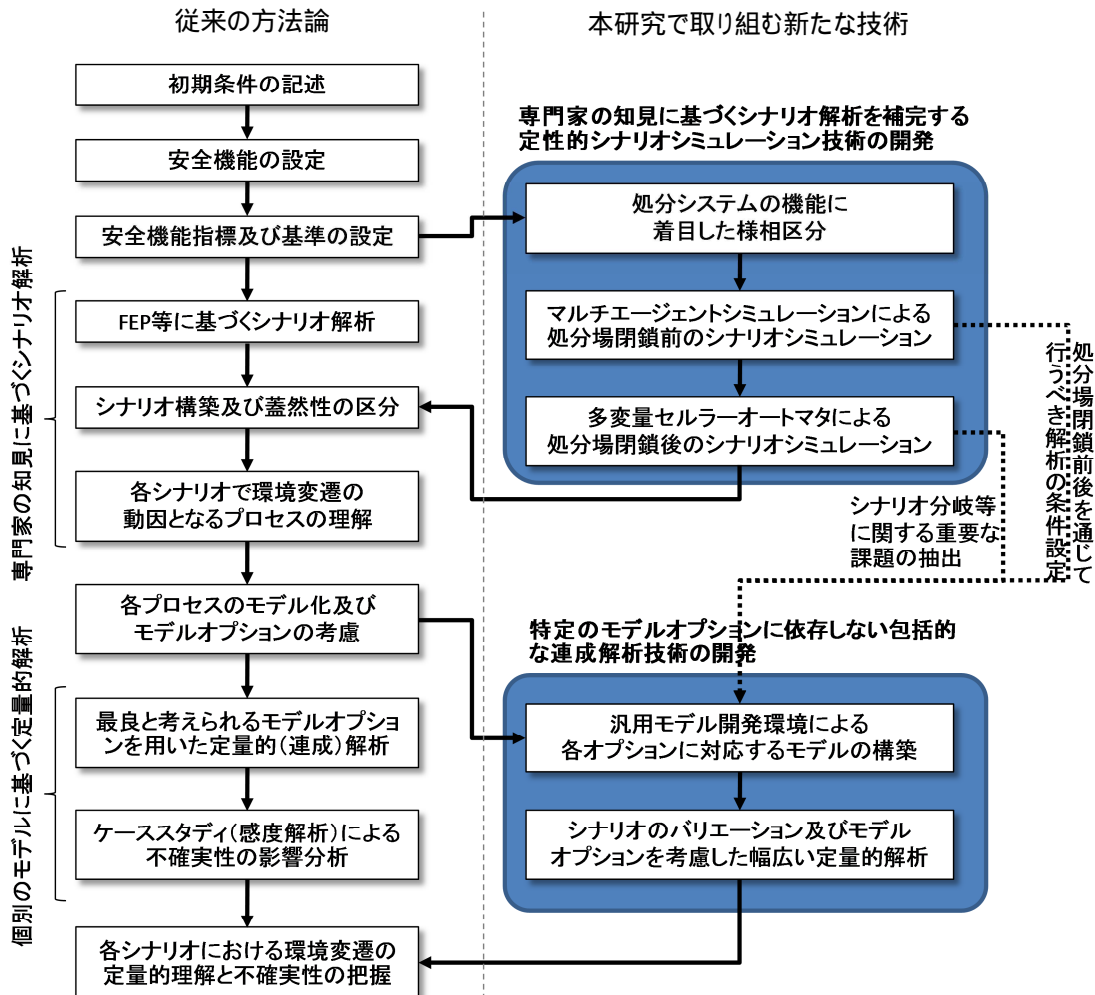


図 4.1-2 ニアフィールド環境の長期変遷を適切に把握するための体系的な方法論の構築

以下にこれら 2 つの技術課題について、説明する。

(1) 専門家の知見に基づくシナリオ解析を補完するシナリオシミュレーション技術の開発

(a) 目的

処分場の建設・操業・閉鎖及びこの間に定置される廃棄体や人工バリア材あるいは種々の機器や人工材料（仮設材を含む）をエージェントの挙動として表現して体系や形状の変化を伴う環境の動的変遷を、マルチエージェントシミュレーションにより把握することにより、このような複雑な問題においてどのような局面が時系列的に生起するのかについての全体像を把握することを可能にする。また、処分場閉鎖後のニアフィールドの構成を格子状のセルの配列で表現し、隣接するセル間での着目すべき THMC の状態変数の挙動及び異なる変数間での因果関係や相関をローカルルールとして表現することにより、セルラーオートマタによるシミュレシ

ョンを行う。この際、想定されるあるいは否定できない広範なルールのバリエーションを想定してケーススタディーを行うことによって「可能性のあるシナリオ」の派生を網羅的に抽出することをめざす。

(b) 本研究の他の開発要素との関係

本手法によって抽出された種々のシナリオ及びシナリオ間の分岐点にあたる臨界条件等について、より精緻な数値解析（連成解析）をそれぞれ実施することによって、シナリオシミュレーションの妥当性を確認するとともに、設計等における実務的な意思決定のニーズに応え得る定量的な情報を提供する。また、このような手順を経ることによって、計算負荷の大きい数値解析（連成解析）を実施すべき範囲を特定することができる。

(c) 開発上の留意点

定量的な数値シミュレーションではなく、多くの構成要素によってもたらされる複雑な系の動的変化の全体像を概略的に把握すること、及び「可能性のある挙動」についてのシナリオ解析をめざすことによって、体系の設定における柔軟性や計算効率が高く網羅的な検討が可能であるという長所を活かし、もう一つの技術要素である連成解析との差別化及び相互補完関係を明確にする。

(2) 特定のモデルオプションに依存しない包括的な連成解析技術

(a) 目的

想定する地質環境及び処分システムにおいて生ずる可能性のある具体的な現象について精緻な解析を行い、設計等における意思決定において求められる定量的な情報を提供する。また、汎用のモデル開発環境を用いて複数のモデルオプションを比較することを通じ、不確実性の影響に対して頑健な知見を得る。さらに、種々のスケールの室内試験や原位置試験あるいはナチュラルアナログ等との比較を通じてモデルの妥当性を確認し、本手法全体としての信頼性の向上を図る。

(b) 本研究の他の開発要素との関係

閉鎖前の処分場に対応した複雑な系の動的挙動に関してマルチエージェントシミュレーションによって抽出された個々の局面、あるいは多変量セルラーオートマタによって抽出された種々のシナリオ及びシナリオ間の分岐点にあたる臨界条件等に対して、必要に応じて優先順位をつけつつ精緻な数値解析（連成解析）を実施することによって、計算負荷が過度に大きくなることを避け、上記の目標を達成する。また、複雑な系の動的挙動に関してマルチエージェントシミュレーションによって抽出された個々の局面については、精緻な数値解析（連成解析）をそれぞれ実施することによって、設計等における実務的な意思決定のニーズにこたえ得る定量的な情報を提供する。

(c) 開発上の留意点

マルチエージェントシミュレーションや多変量セルラーオートマタによって精緻な解析が必須となる課題を特定することにより、解析ケース数の低減を図る。また、必要に応じて実験でモデルの妥当性を確認し得る等の長所を活かして実現象と数値モデルとの対応付けの明確化を図る。

これらの技術課題の設定を踏まえ、平成 24 年度の以下項目を実施した。

ニアフィールドにおける連成現象に関するシナリオシミュレーションシステムの整備

ニアフィールドにおける連成現象に関するシナリオシミュレーションの実施

THMC 連成解析ツールの整備

THMC 連成解析ツールを用いた解析の実施

課題及び留意点の抽出

次項以降では、これらの項目を中心としつつ、適宜前年度の成果の概要を取り込みながら、本手法の具体的な方法論及び例題解析とそれを通じて得られた重要と考えられる知見についてとりまとめる。

4.2 ニアフィールド環境変遷に関するシナリオシミュレーション技術の開発

4.2.1 ヒューリスティックの限界

従来のシナリオ解析の手法は、ニアフィールド環境がどのような現象によってどのように変遷し得るのか、そして、どのような変遷の影響が大きいあるいは可能性が高く、また、どのようなものの影響が小さいあるいは可能性が低いのかについて、関連する情報やデータを参照しつつ、主として、種々の研究分野の専門家が知識や経験に基づき判断することによるものである。このような「判断」は、認知心理学の分野でヒューリスティックと呼ばれている⁽¹⁾。認知心理学におけるヒューリスティックは、問題解決、判断、意思決定を行う際に、規範的でシステマティックな計算手順（アルゴリズム）によらず、暗黙のうちに簡便な解法や法則を用いて近似的な答えを得るための解決法を指す。ヒューリスティックを用いる場合、判断に至る時間は短い、それが常に正しいというわけではなく、判断結果に一定の偏り（認知バイアス）を含んでいる可能性がある。ヒューリスティックの利用に起因する認知バイアスについては、1970年代以降 Tversky と Kahneman によって研究されており、以下に示す例が良く知られている⁽²⁾。

I. 利用可能性（想起）ヒューリスティック（availability heuristic）

想起しやすい事柄や事項を優先して評価しやすい意思決定プロセスのことをいう。人は、ある事例を思い浮かべやすければ、その事例の生起確率が高いと判断する。一般に頻度が高い事例は低い事例よりも想起しやすい。しかし、思い浮かべやすさは、事例の頻度情報以外の影響をうけることがある。例えば、航空機の墜落事故が起きた直後は、その事故のイメージが鮮明に思い浮かぶため、類似の航空事故の生起確率が過大評価されやすい。

II. 代表性ヒューリスティック（representative heuristic）

人は、全ての出来事を知ることにも記憶することもできないため、限られた情報を用いて全体を判断しようとする。このため、ある事例が類似の事例を代表していると思うほど、「よくあること」と考え、起こりやすいと感じてしまう。例えば、ある航空機事故例が悪天候や整備ミスなどの典型的な特徴を多くもつ事故の場合には、その事故の代表性が高いため、航空機事故全体の生起確率が過大評価されるのに対して、パイロットの錯乱のような特異な特徴をもつ場合には、代表性が低いため、生起確率が過大評価されることは少ない。また、ある事象の結果、次の事象が起こる連言事象は、シナリオとしての記述が詳細（具体的）になる。したがって、リスク事象としてのもっともらしさ（代表性）が高まり、その連言事象の確率は、単独事象の確率よりも過大評価される傾向がある。特に、シナリオを構成して、頭の中で帰結を想像し、その起承転結のもっともらしさの程度に基づいて確率判断をすることをシミュレーションヒューリスティックという。

また、人は、2つ以上の事柄が関連して起きるものについて、あまり正確に判断することができない。客観的な確率では、「ある事柄 A が起きた結果、次の事柄 B が起きる」確率は、A が起こる確率と B が起こる確率をかけて算出される。しかし、人は、A が起こる確率（事前確率）を無視して、A から B が起こりやすいかどうか目をつけ、B の起こる確率によって判断する傾向がある。

III. 係留と調整 (anchoring and adjustment)

人は、最初に与えられた情報や直観的に判断した内容を手がかり(アンカー)にして、新しい情報を加えながら調整を行い判断する。ところが、このような調整は一般的に不十分で、初期の情報や考えにとられる傾向がある。

上述した認知バイアスは、いずれも、安全評価のためのシナリオ解析にも関連し得るものと考えられるが、特に、代表性ヒューリスティックにおける「人は、全ての出来事を知ること記憶することもできないため、限られた情報を用いて全体を判断しようとする。」及び「人は、2つ以上の事柄が関連して起きるものについて、あまり正確に判断することができない。」という一般的な傾向は、専門家の判断によるシナリオ解析において様々な誤謬につながる可能性があるものと考えられる。例えば、従来のシナリオ解析におけるストーリーボード等では、空間的広がりを持つ地層処分システムをいくつかのブロックに分割し、また、連続的に生ずる状態変遷をいくつかの期間に区切り、ある期間におけるあるブロック内の条件(T, H, M, C等)を時間・空間平均あるいは一つの代表例で示そうとしてきており、ここでは、空間分布の不均質性や時間変化は十分に分析されているとは言えない。このような例は、「限られた情報を用いて全体を判断しようとする」という一般的な傾向と通じる部分があるように思われる。また、従来のシナリオ解析においてインフルエンスダイアグラムがしばしば構築されてきており、この作業途中では、常に、二つのFEP間の相互作用に焦点が当てられるため、議論を進めることは比較的容易であるのに対して、できあがったインフルエンスダイアグラムの全体を見て、システムがどのように振る舞うのかを理解することには、通常、大きな困難が伴い、多くの場合、当の専門家達も作成後のインフルエンスダイアグラム全体は、非常に複雑なものと捉えることが多い。この例は、「2つ以上の事柄が関連して起きるものについて、あまり正確に判断することができない」という一般的な傾向を思い起こさせる。

地層処分安全評価のためのシナリオ解析においては、国際的FEPデータベースの利用やシナリオの相互比較あるいはピアレビューといった種々の品質保証手段が講じられており、上述した認知バイアスがある程度避けることができると考えられる。しかしながら、このような品質保証手段における問題解決、判断、意思決定においても多かれ少なかれヒューリスティックは用いられざるを得ないことから、上記の認知バイアスに関連した人間の判断の限界は、ヒューリスティックとは異なる他の手法によっても注意深く検討され、確認される必要があるものと考えられる。

4.2.2 シナリオシミュレーションのねらい

本研究におけるシナリオシミュレーション手法適用の基本的な考え方は、従来の手法(専門家のヒューリスティックを用いるもの)では取り扱いが困難な現象・プロセスによって、将来のニアフィールド環境条件が予想していなかったような変遷を辿り、地層処分の安全性が脅かされるかも知れないという懸念を考慮して、ヒューリスティックとは特徴が大きく異なる代替的な手法(マルチエージェントシミュレーション及び多変量セルラーオートマタ)が得意とするような問題についての検討を行うことである。また、このような検討を通じて、以下のような成果を得ることを眼目としている。

- ・上記のような懸念によって地層処分の安全性が脅かされることは考えにくいというコンセンサスに繋がるようなシステム挙動についての新たな知見を得る
- ・あるいは、地層処分の安全性が脅かされる可能性を指摘し、数値解析や実験等のより詳細で定量的な検討の課題を具体化する

(1) シナリオシミュレーション手法を適用すべき問題のタイプ

Dörner and Wearing⁽³⁾は、難定義問題の特徴として表 4.2 1 に示すものを挙げている。これらは、前項で述べたヒューリスティックの限界に呼応して認知バイアスの問題が顕在化しやすい領域を示すものとも考えられる。そこで、本研究では、このようなリストを参考にしつつ、従来の手法では難問とされるような領域のうちマルチエージェントシミュレーション及び多変量セルラーオートマタが得意とするような問題の抽出を試みることにした。

表 4.2-1 設定された問題に含まれる難点（障害）を分析する際の視点⁽³⁾

■	状況の不透明性 (Intransparency)
■	多目的性 (Polytely)
●	明確に定義されていない目的
●	相反する目的の存在
●	時間とともに変化する目的
■	複雑性 (Complexity)
●	多数の（多様な）要素
●	様々な関係性（階層関係、相互作用や交流、配分）
●	不均質性
■	ダイナミクス (Dynamics)
●	時間的制約
●	タイミングの感度
●	フェーズの効果（動的な変化の局面によって挙動が異なること）
●	予測不能性

表 4.2-1 に示した難定義問題の特徴の各項目に対応するニアフィールド現象での例を表 4.2-2～5 に示す。

表 4.2-2 ニアフィールド現象における状況の不透明性の例

■	状況の不透明性
●	今後決定される候補サイトの地質環境
●	試錐孔あるいは坑道から離れた位置での岩盤特性

表 4.2-3 ニアフィールド現象における多目的性の例

■	明確に定義されていない目的
●	性能評価結果のわかりやすい表現
■	相反する目的の存在
●	評価の保守性と合理性（現実性）
●	問題の3次元化・複雑化と計算の高速化
■	時間とともに変化する目的
●	State-of-the-art な性能評価
●	ステークホルダのニーズに即した性能評価

表 4.2-4 ニアフィールド現象における複雑性の例

<ul style="list-style-type: none"> ■ 多数の（多様な）要素 <ul style="list-style-type: none"> • 特性の異なる多数の廃棄体 • 多様な人工バリア材料 ■ 様々な関係性 <ul style="list-style-type: none"> • 階層関係（マルチスケール性など） <ul style="list-style-type: none"> 処分孔スケール／坑道スケール／パネルスケール／処分場スケール ナノスケール／ミクロスケール／メゾスケール／マクロスケールなど • 相互作用 <ul style="list-style-type: none"> 複数廃棄体・材料間の干渉 複数のプロセス・現象間の相互作用（連成効果） 建設・操業・閉鎖における各工程間の取り合い（時間的推移や隣接領域での異種作業の進行等） • 配分・配置 <ul style="list-style-type: none"> 特性の異なる廃棄体の不均質な母岩中での配置 ■ 不均質性 <ul style="list-style-type: none"> • 母岩特性の不均質性（透水性亀裂の分布等）
--

表 4.2-5 ニアフィールド現象におけるダイナミクスの例

<ul style="list-style-type: none"> ■ 時間的制約 <ul style="list-style-type: none"> • 処分場建設から閉鎖までの期間の制約（事業スケジュール，地下環境の擾乱低減等のため） ■ タイミングの感度 <ul style="list-style-type: none"> • 複数の廃棄体や人工バリアの定置あるいは坑道閉鎖の手順やタイミングによるその後のニアフィールド環境変遷挙動の変化 ■ フェーズの効果 <ul style="list-style-type: none"> • 建設以前，建設，操業，閉鎖，閉鎖後の地質環境特性の変化 • 廃棄体発熱期間とそれ以後の熱的プロセス及び温度依存性のある現象の変化 • 核種移行開始（オーバーバック開口）前後で考慮すべき環境条件の変化 • 人工バリア材料変質（セメント溶脱，緩衝材変質，鉄腐食，ガラス溶解等）の進行フェーズに応じた現象の変化 ■ 予測不能性 <ul style="list-style-type: none"> • 将来の人間活動及びその影響（人間侵入等） • 将来のテクトニクス的環境の変化あるいはそれによって引き起こされる天然事象の影響等
--

平成 23 年度までに調査し、例題に適用したマルチエージェントシミュレーションと多変量セルラーオートマタによるシナリオシミュレーションは、いずれも多様かつ多数の要素（エージェントあるいはセル）及びこれらの中の相互作用を同時に処理可能な点が特徴であり、この点が、「限られた情報を用いて全体を判断しようとする」と及び「2 つ以上の事柄が関連して起きるものについて、あまり正確に判断することができない」というヒューリスティックの限界と比較した場合の最も顕著な特徴である。そこで、本研究では、上記の難問題の特徴のうち、特に複雑性及びダイナミクスに関連するものに着目してより具体的な検討を行うこととした。

(2) シナリオシミュレーションによって対処すべき長期安全性についての課題

「シナリオシミュレーションが従来手法よりも高い適用性を有する可能性のある問題」として前項で抽出した複雑性とダイナミクスとは、長期安全性に関連するニアフィールド環境変遷の様々な局面で重要となり得るものと考えられる。本研究では、このような局面のうち、従来の検討では予想することが困難であった環境変遷による長期的安全性への懸念の具体例として、ニアフィールド環境条件に関する「勾配」及び複数の廃棄体や種々の材料間での「干渉」

に着目することとした。地層処分の長期安全性に影響を及ぼす可能性のある「勾配」と「干渉」の影響について、考慮すべきと考えられる具体的な現象を、それぞれ、表 4.2-6 及び表 4.2-7 に例示する。

表 4.2-6 種々のニアフィールド環境条件の「勾配」の影響

<ul style="list-style-type: none"> ■ 温度勾配の影響 <ul style="list-style-type: none"> • 熱応力による岩盤の割れ • 塩の濃縮 • 各種物性値の温度依存性 ■ pH 勾配の影響 <ul style="list-style-type: none"> • 鉱物溶解 / 沈殿フロントの形成と移動 • 上記フロントにおけるコロイド生成 ■ 水分飽和度の勾配の影響 <ul style="list-style-type: none"> • 水分の移動に伴う溶質の移動 • 水との接触表面積の違いによる鉱物溶解反応の違い • 各種物性値の水分飽和度依存性 ■ 酸化還元電位の勾配の影響 <ul style="list-style-type: none"> • 腐食生成物，鉄含有鉱物の変化（変質） • オーバーパックや鉄筋の腐食 ■ 圧力（水圧）勾配の影響 <ul style="list-style-type: none"> • 緩衝材中のパイピング・侵食 • 緩衝材偏膨潤によるオーバーパックの移動，せん断変形 ■ 重力による影響 <ul style="list-style-type: none"> • オーバーパックの沈降 ■ より高次の影響 <ul style="list-style-type: none"> • 上記の種々の勾配が様々な位置及び時間で生じた場合の複合的な効果
--

表 4.2-7 複数の廃棄体やバリア材間の「干渉」の影響

<ul style="list-style-type: none"> ■ 廃棄体等の熱的干渉の影響 <ul style="list-style-type: none"> • 隣接廃棄体の発熱による温度変化 • 廃棄体定置後の上部坑道の状態（解放・換気、埋め戻し）の違いによる熱的境界条件の違い ■ セメント系材料間の化学的干渉の影響 <ul style="list-style-type: none"> • セメント系材料の内部における化学成分の反応、移動による空間的な不均質性 • 隣接したセメント系材料からの化学成分（高アルカリ性溶液 等）の流入による、セメント系材料の劣化挙動の変化 ■ 異種材料間の化学的干渉の影響 <ul style="list-style-type: none"> • コンクリート支保等を起源としたアルカリブルームの緩衝材、オーバーパック腐食およびガラス固化体溶解への影響 • オーバーパック及び緩衝材の溶存シリカの吸脱着、緩衝材からの溶存シリカの溶出等のガラス固化体溶解への影響 • オーバーパックとして存在する鉄および鉄腐食生成物の緩衝材への影響 ■ 異種材料間の力学的干渉 <ul style="list-style-type: none"> • オーバーパックの腐食膨張による緩衝材の圧密 • 鉄筋腐食膨張によるコンクリートの割れ

4.2.3 シナリオシミュレーションシステムの整備

ここでは、シナリオシミュレーションの要素技術であるマルチエージェントシミュレーション及び多変量セルラーオートマタの概要についてまとめる。なお、各手法の具体的内容については、後節の例題を参照されたい。

(1) シナリオシミュレーション手法

(a) マルチエージェントシミュレーション

処分場建設、操業及び閉鎖を通じて一連のプロセスや事象が処分場内の様々な部位で生じることとなり、これらによって施設自体とその環境の動的な変遷が引き起こされることとなる。操業時の安全性と作業効率を確保するために、多様な材料や機材が処分場内に持ち込まれ、これらの一部は閉鎖後も残留することから、その影響が建設及び操業時の環境変化とともに、閉鎖後の長期的安全性に関する評価の前提条件に影響を及ぼす可能性がある。

このような影響を評価するためには、建設、操業そして閉鎖の各段階において逐次体系の変化する処分場二アフィールドを場として THMC の様々なプロセスによって影響された多種多様な機器、材料そしてバリアの振る舞いを理解することが必要である。そこで、本研究では、解析体系や場の形状そして構成要素の特性の変遷を柔軟に取り扱うことのできる可変な枠組みを持つ手法の一つとして、マルチエージェントシミュレーションを用いることとする。ここでいうエージェントとは、

- ・ 内部変数の表現（状態）
- ・ 外部環境や他のエージェントの影響に応じて内部変数が変化する規則（応答）
- ・ 外部環境や他のエージェントの状態を変化させる規則（行為）

を有するものとして定義される⁽⁴⁾。

例えば、処分場の建設・操業・閉鎖時における、トンネル掘削や止水工、廃棄体の輸送・定置、埋戻しなどの動的機器による作業を、エージェントとそのルールによって表現することができる。各々のエージェントは、外部環境、他のエージェントや自身の状態に応じて所定のルールに従い以下のような行動を取る。

- ・ エージェントは、位置情報の他にそれぞれ固有の状態変数を持つ。この状態変数は設定されたルールに従い変化し得る。すなわち、周囲のセル（外部環境）やエージェントとの位置関係やそれらの状態変数に影響を受けながら、エージェントの状態変数は変化する。
- ・ エージェントは、設定されたルールに従って、時には周囲のセル（外部環境）やエージェントに影響を受けながら、移動することができる。例えば、廃棄体輸送車両エージェントは坑道セルに沿って移動するなど。
- ・ エージェントは、自身のルールによって、周囲のセル（外部環境）のタイプや状態変数を変更することができる。例えば、トンネルボーリンマシン（TBM）エージェントによって岩石セルが坑道セルに変更されるなど。
- ・ エージェントは、自身のルールにより他のエージェントの状態変数を変更することができる。連立微分方程式を数値的に解くことによる連続的なシミュレーションとは異なり、マルチエージェントシミュレーションは、時系列的に設定された離散的な事象を介して多数のエージェントの相互作用としてシステムの振る舞いを表現する。

(b) 多変量セルラーオートマタ

従来のセルラーオートマタの基本概念は、図 4.21（左）に示すように空間をセルに分割し（図 4.21 の場合は 5×5 のセルに分割）個々のセルにおいて離散的な状態を規定するもので

ある(図 4.2.1 の白と黒と灰色)。このように各々の状態を保持する複数のセルに分割された空間をセルグループと呼ぶこととする。ある時刻におけるセルの状態は、前の時刻の自身及び隣接するセルの状態からローカルな規則(ローカルルール)に従って決定される。

これに対して、本研究において達成現象を表現することを目的として開発した多変量セルラーオートマタ(図 4.2.1(右))では、複数の状態変数間の相互作用を表現する必要があるため、各状態変数に対応した空間を仮定する。ある時刻におけるセルの状態は、上述した単一の状態変数に対するローカルルールに加え、影響が考えられる複数の状態変数間が相互に影響しあうローカルルールを規定し、それに基づき決定される。

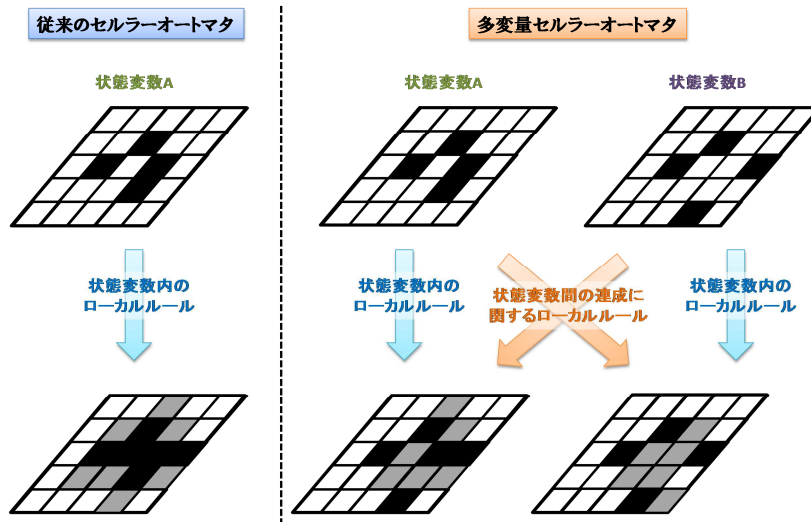


図 4.2-1 従来のセルラーオートマタ及び多変量セルラーオートマタの基本概念

セルラーオートマタの演算規則に含まれる恣意性を低減するためには、各現象やプロセスについてのローカルルールをそれぞれ個別に定義するというアドホックな進め方ではなく、解析対象とする現象を類型化し、各クラスに対応するローカルルール(及びそのバリエーション)を定義するというアプローチが好ましい。そこで、本研究では、単一の状態変数の自律的な変化についてのローカルルールのクラス、及び複数の状態変数間の達成についてのローカルルールのクラスを整理した。このうち、例えば、単一の変数の自律的な変化は、保存則に従うものと非保存的なものとに区分することができる。保存則に従うような挙動は、さらに、等方的なものと異方的なものに区分することが可能である。保存則に従う等方的な挙動は、拡散に代表されるプロセスであり、このような挙動は、局所平均を採るというローカルルール(A)によって表現できることが知られている。また、異方的な挙動は、移流に代表されるプロセスであり、シフトのローカルルール(S)によって表現することができる。また、これら二つの操作を組み合わせることにより(A・S)移流分散のようなプロセスを表現することができる。

多変量セルラーオートマタは、厳密な数値的な解析を行うことを目的としたものではない。多くの状態関数相互の因果関係について、ローカルルールとして多様なものを考えることによって、システムにどのような変化が起こりえるかを概略的に把握することが比較的容易に可能となる。

シナリオシミュレーションは、ユーザーが GUI で問題設定ファイルを作成することから始まる。ベースシステムは、作成された設定ファイルを読み込み、グリッドデータ・ルールデータを作成し、その後、ルールを MASON のルール実行スケジュールへ登録する。また、ベースシステムは、すべてのデータの準備（初期化）が完了した後、MASON にシミュレーションの実行を指示する。MASON は、シミュレーションの実行指示を受けて、1STEP 毎にルール実行スケジュールに従ってルールを実行し STEP の終了をベースシステムに通知する。ベースシステムは、STEP の終了を受けてベースシステムのグリッド情報から MASON のグリッド情報にデータ変換を行い、MASON フレームワークに変換したグリッド情報を受け渡す。また、設定ファイルで指定されている STEP に到達した時点で、シミュレーション結果ファイルを出力する。MASON フレームワークは、変換後のグリッド情報を受け取り、シミュレーション結果表示画面を更新する。また、シミュレーション結果画面の制御（3D 画面のローテーション等）は GUI によって行われる。図 4.2-3 に GUI の画面イメージを示す。なお、添付資料 -A に CAYMANS の具体的内容及び使用方法の概要を記載する。

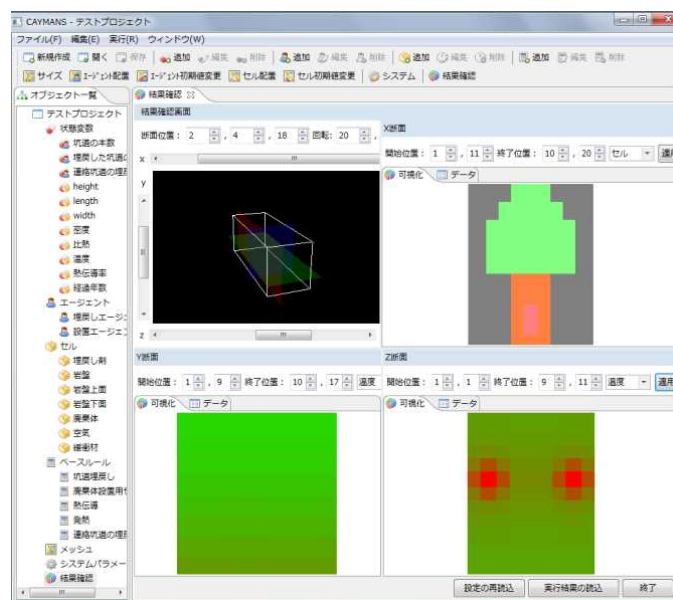


図 4.2-3 CAYMANS の GUI の画面イメージ

4.2.4 ニアフィールドにおける連成現象に関するシナリオシミュレーションの実施

これまでに述べた通り、ニアフィールド現象についての主としてヒューリスティックによる従来のシナリオ解析においては、ヒューリスティックの限界に起因する見落としや誤謬等が潜んでいる可能性が否定し難い。そこで、ヒューリスティックな判断を補完する手法として、シナリオシミュレーションの方法を適用して、より追跡性が高くかつ網羅的な検討を行うことを可能にすることを目指すものである。

本研究では、冒頭に述べたニアフィールド現象の特徴とこのようなヒューリスティックの限界の組み合わせを考慮し、前述した「勾配」と「干渉」に焦点をあてて、シナリオシミュレーションの例題解析を実施した。表 4.2-6 及び表 4.2-7 に示したように、対象とすべき問題は広い範囲に及ぶが、本研究では、安全確保上の重要性と未だ開発途上の手法の適用性という二つの

観点から優先順位を判断し、これらの一部の問題について検討を試みた。また、これらの例題解析を通じて、シナリオシミュレーションによって新たに指摘できた知見及びシナリオシミュレーションの適用に関する留意点や課題等を併せて整理することとした。

(1) 例題 1：現実的な廃棄体定置作業に対応した処分場内温度分布の変遷

(a) 問題の概要と背景

地層処分場に搬送・定置される高レベル放射性廃棄物は、燃焼度や再処理後の貯蔵期間等によって熱出力の異なる多様なものが想定される。このため、処分場内の温度分布は異なる特性の個々の廃棄物の定置位置によって決まるものと考えられる。しかしながら、「2つ以上の事柄が関連して起きるものについて、あまり正確に判断することができない」というヒューリスティックの限界及び熱解析の計算負荷のために、これまでの検討では、以下の仮定に基づき保守的なモデル化が行われてきた。

- ・ 最も熱出力の高い（あるいはレファレンスとして設定された）廃棄体 1 体で全体を代表する
- ・ 隣接した廃棄体間で断熱境界を適用する
- ・ 廃棄体は全て同時に定置され、その直後に上部坑道の閉鎖が行われて換気が停止する

このようなモデルは、最も熱出力が高い廃棄体を用いて解析が行われた場合には、閉鎖後の温度上昇の上限を与えるものであるため、その結果が緩衝材最高温度等の技術要件を満足するような十分な廃棄体離間距離が確保できるのであれば、安全規制上の観点からも、想定される範囲内のどの廃棄体をどの順番で定置し、また、どのようなタイミングで坑道閉鎖に推移しても良いということになる。

しかしながら、レファレンスとして設定された廃棄体を用いた解析の場合には、それを上回る熱出力の廃棄体が存在する場合には、それについて適切に評価を行う必要がある。さらに、実際の処分場設計においては、廃棄体離間距離に関する熱的制約を緩和して、処分場パネルをコンパクトに保つという現実的な要請が生ずることが考えられる。スウェーデン SKB の SR-Site⁽⁶⁾においても、現行の設計の考え方は有効であるとしながらも、廃棄体の発熱量に違いがあることや、廃棄体の定置順を適切に考慮することによって設計の前提条件に再検討の余地があることを指摘している。

平成 23 年度に実施した本例題の解析では、熱出力の異なる廃棄体を様々な配置、順序、そして時期で定置し、また種々のタイミングで坑道の埋め戻しを行った場合に、設計上の技術要件の一つである緩衝材の最高温度がどの程度変動するかについて検討した。この例では、シナリオシミュレーションを用いることにより、従来の方法では取り扱いが困難であった「多数の廃棄体間の熱的干渉」の問題に対して、ニアフィールド現象の複雑性（多数の多様な要素間の相互作用）及びダイナミクス（タイミングへの感度やフェーズの効果）に留意しつつ対応し得るか否かがポイントとなる。

(b) シナリオシミュレーションモデル

i) 解析対象

この例題では、81 体の高レベル放射性廃棄物を、9 本の水平坑道にそれぞれ定間隔で 9 個ずつ掘削された合計 81 個の処分孔に定置し、ある時点で上部坑道を閉鎖して換気・空調を停止した場合のその後の緩衝材中の温度変化を予測することとした。廃棄体発熱量は、第 2 次取りまとめ⁽⁷⁾の廃棄体発熱量時間変化をフィッティングした発熱量の式を設定した。

ii) マルチエージェントシミュレーション

本例題におけるエージェントとしては、廃棄体選定エージェント、廃棄体定置エージェント、及び上部坑道埋め戻しエージェントの3種類を考える。これらのエージェントの動作ルールは、下表（表 4.2-8）に示す通りである。

表 4.2-8 各エージェントの行動

エージェントの種類	行動	ルールの種類
廃棄体選定エージェント	処分孔のそれぞれに中間貯蔵期間30年あるいは50年のどちらを定置するかを決定する。	全ての廃棄体を貯蔵期間30年* 全ての廃棄体を貯蔵期間50年* パネルの半分(片側)を貯蔵期間30年の廃棄体とし、他の半分を50年とする 貯蔵期間30年と50年の廃棄体を交互に配置(市松状)
廃棄体定置エージェント	ルールに従った順番と時期に廃棄体及び緩衝材を処分孔のそれぞれに定置する。	全ての廃棄体を同時に定置する* 25年間にわたり一定時間間隔で定置を行う。定置ルールは1)左上から順番(左上)、2)中心から同心円状(中央)、3)既に置いた廃棄体の中間位置に定置(中間)(図4.2-4参照)の3パターン
埋戻しエージェント	ルールに従った順番と時期にそれぞれの処分孔上部の坑道の埋め戻しを行う。	全廃棄体同時定置直後に全て閉鎖* 埋め戻し無し(空洞)** 処分坑道一列にすべて廃棄体が定置された時点で埋め戻しを行う(坑道埋め戻し) 温度解析の結果から緩衝材温度が低下傾向に転じた時に、その廃棄体の上部坑道を埋め戻す(温度埋め戻し)。ただし、その場合、未だ埋め戻されていない上部坑道がアクセスできなくなるような場合には、そのような状況が解消されるまで埋め戻しを延期する

* 従来のモデルに対応(現実の操業とは異なる)

** 比較のための設定

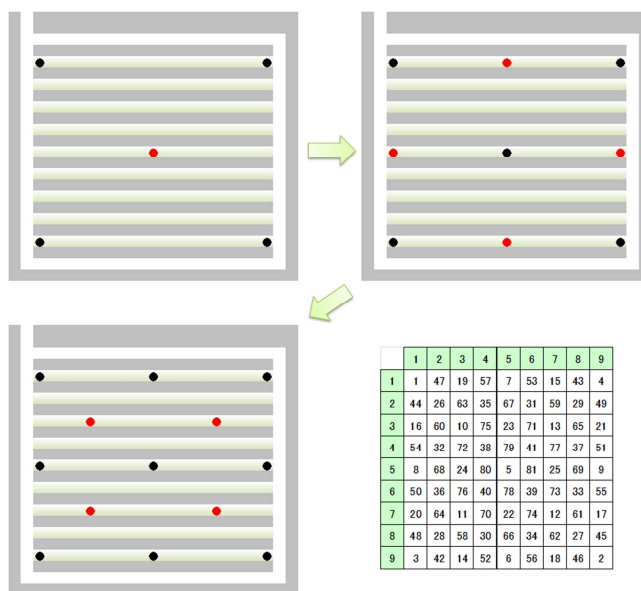


図 4.2-4 既に定置した廃棄体の中間に新たな廃棄体を定置するルールの概念

iii) 多変量セルラーオートマタ

本例題では、発熱及び熱伝導のみを対象とし、状態変数としては各セルの温度のみを考える。また、熱伝導は拡散ルールに従うものとして計算を行う。廃棄体一体あたりのセル分割を図 4.2-5 に示す。解析対象領域全体は、このユニットが水平方向に 9 x 9 個並んだ配置である。

人工バリア、埋め戻し材、岩盤等の物性値は第 2 次取りまとめの値を用いた。解析条件等の詳細は、平成 23 年度報告書を参照されたい。

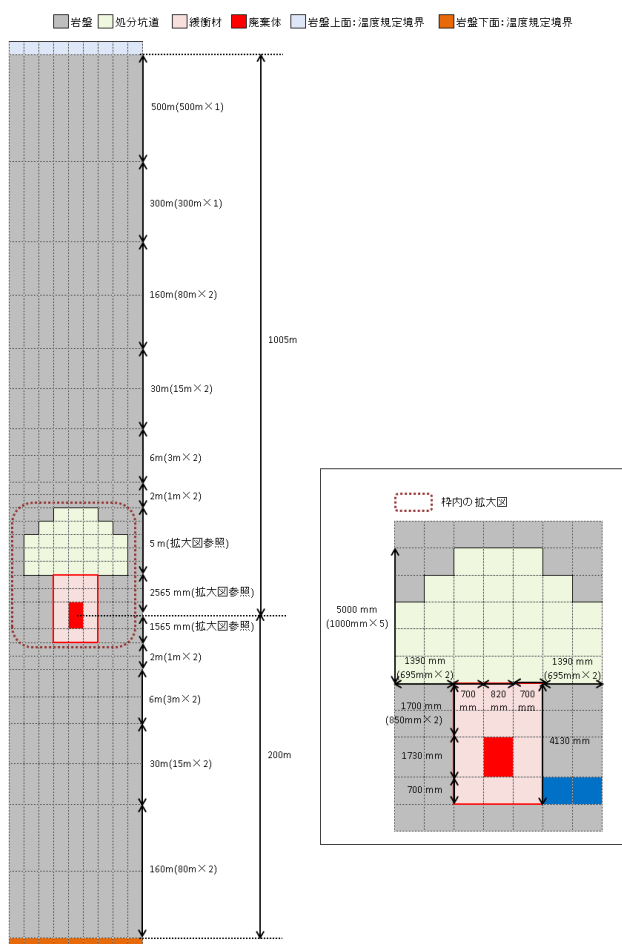


図 4.2-5 廃棄体 1 本のセルのジオメトリ（廃棄体を含む垂直断面）

(c) 結果

実施した 24 ケースの解析結果を表 4.2-9 に示す。表中の数値は、各廃棄体の緩衝材最高温度の中で最も高いものを示している。

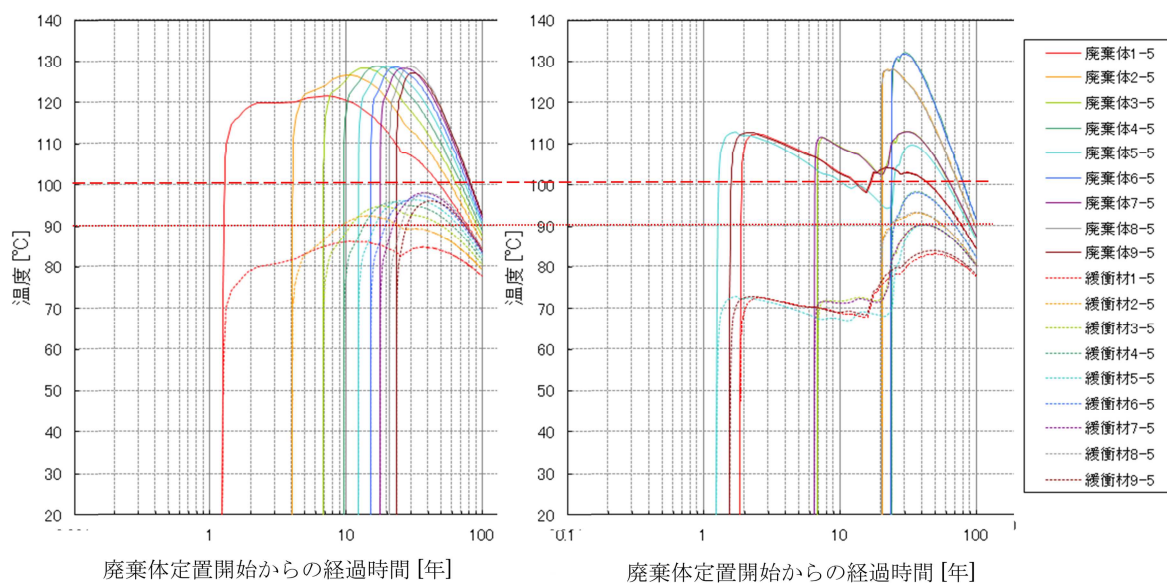
全廃棄体を全て一度に定置し、一度に埋め戻してしまうケース“全て、坑道埋め戻し”では、他に比べ高い温度となることがわかる（表 4.2-9 中の ）。時間をかけて埋設していく場合の、定置、埋め戻し方法による最高温度の差異は、中間貯蔵 30 年のケースでは、“左上、坑道埋め戻し”（図中 ）と“中央、温度埋め戻し”（図中 ）では 5 程度の差である。ただし、廃棄体毎の温度の時間変化には、大きな違いがある（図 4.2-6）。

ここで示した例のように、同じ時間をかけて、同じ本数の廃棄体を一つのパネルに定置し埋め戻すという作業でも、その方法によって廃棄体の温度分布とその時間変化は、ずいぶん異

なることが、今回のマルチエージェントシミュレーションとセルラーオートマタを連携させたシナリオシミュレーションから見て取ることが出来た。

表 4.2-9 各解析ケースにおける緩衝材セル最高温度

設置方法 埋め戻し方	全て		左上	中間	中間	中間	中央	中央	中央
	空洞	坑道埋め戻し	坑道埋め戻し	空洞	温度埋め戻し	坑道埋め戻し	空洞	温度埋め戻し	坑道埋め戻し
中間貯蔵期間 50年	75.3	84.9	78.2	71.3	77.9		67.1	75.1	
中間貯蔵期間 30年	94.0	105.1 ①	98.0 ②	91.2	98.3 ③		84.4	93.3 ④	
中間貯蔵期間 上5列:30年 下4列:50年		103.1			96.0	97.1		91.8	90.7
中間貯蔵期間 30年と50年を 交互(市松状)に 定置		98.6			86.4	87.2		87.4	86.2



左上, 坑道埋め戻し, ②

中間, 温度埋め戻し, ③

図 4.2-6 廃棄体と緩衝材の温度の時間変化 (中央位置の9本)

(d) 本解析結果の規制上の意義

シナリオシミュレーションは半定量的な手法ではあるが、本例題についての解析結果に基づき、廃棄体の発熱量の不均一性とその定置パターン、定置の順序と時期、及び上部坑道の埋め戻しを行うタイミングによって緩衝材中の最高温度は顕著に変化する可能性があるという結論は、一定以上の確度をもって主張することが可能と考えられる。また、前述したSKBの指摘のように、今後、廃棄体の発熱量の違いや、廃棄体の定置順を考慮した設計が試みられる場合には、そのような検討に対して、上記のケーススタディーのような解析から得られる各要因(廃

棄体の発熱量の不均一性とその定置パターン、定置の順序と時期、及び上部坑道の埋め戻しを行うタイミング)の感度についての理解と統合的なものであるか否かを確認するといったことに有用な参考情報となると期待される。

(e) 課題

シナリオシミュレーション結果をより定量的なものとするための手段として、本研究では、原則として、定量的な解析が行える汎用の連成解析ツールを用いることとしている。しかしながら、今回実施したような大規模な体系で定置や埋め戻しの順序等を考慮して、偏微分方程式を数値的に解くことは計算負荷の観点から現状では困難であり、この例題に関しては、今後、代替的な対策を検討することが必要と考えられる。

本例題のような熱解析は、典型的な線形拡散問題であることから、81体の廃棄体をパルス熱ソースとして3次元熱伝導方程式を解析的に(あるいはラプラス逆変換を数値複素積分で行うような半解析的手法で)解くことにより基本解を求めれば、81個の基本解を定置順序及び各処分孔の廃棄体の発熱量時間変化に応じて畳み込み積分で統合することにより、効率よく3次元温度分布の推定を行うことができる。ただし、坑道の埋め戻しによって内部境界条件及び熱伝導率等のパラメータ分布が時間とともに切り替わるため、上述した基本解の求解や畳み込み積分は定置・埋め戻しルールに対応してダイナミックに切り替えることが必要となる。このような煩雑な操作を行うためには、この問題に特化した専用の大規模熱解析シミュレータの開発が必要になるものと考えられる。

(2) 例題2：閉鎖後のニアフィールド THMC 条件の変遷

(a) 問題の概要と背景

ここでは、あらためて、シナリオ解析についての従来の方法論を確認し、シナリオシミュレーションとの相互補完的なあり方について検討を行う。

これまでに開発されているシナリオ解析手法では、安全評価の前提となる状態設定を行うことが中心的な作業の一つであり、例えば、原子力発電環境整備機構の2010年レポート⁽⁸⁾では状態設定の手順は以下の様に記述されている

地下水による放射性物質の浸出・移行に関連する地層処分システムの特長(以下、特長という)あるいは現象を抽出する。

抽出した特長と安全機能とを対応付け、各安全機能を地層処分システムのどの部位に期待するかを明らかにする。

特長に影響を与えるような地層処分システムの環境条件(以下、環境条件という)を抽出する。

環境条件の変遷に関与するような具体的な現象(以下、条件への影響因子という)を抽出する。

地質環境の特徴や処分施設・人工バリアの仕様を踏まえ、「条件への影響因子」によって生じる「環境条件」の変遷、環境条件の変遷に対応した「安全機能に寄与する特長」の振る舞いについて、当該時点で得られる最適の科学的知見を整理する(FEP カタログ)。また、科学的知見に含まれる不確実性要因を抽出する。

上述の整理を踏まえ、システムの状態設定を行う。

上記の手順において、～のステップは安全機能を軸としたトップダウン的な検討、及び影響因子の抽出に関する作業であり、専門家による判断は有効と考えられる。問題は、～

に到るステップと考えられる。 の「上述の整理を踏まえ、システムの状態設定を行う。」に対応する作業は、専門家が暗黙のうちに簡便な解法や法則を用いて近似的な答えを得ること、すなわちヒューリスティックを用いた判断を行うこととなると考えられる。また、この判断は、

において判断に資する情報として、FEP カタログ等にどのような記載がなされているか、あるいは不確実性の要因の連鎖などが、どのような方法でどこまで検討されているかといったことにも大きく依存する。2010 年レポートでは、 のプロダクトである状態設定の例として、表 4.2-10 を示している。これは、ニアフィールド環境変遷ストーリーボードとも呼ばれているものである⁽⁹⁾。

本例題の目的の一つは、ヒューリスティックによって処理されている可能性のある上記のステップ に対して、シナリオシミュレーションという半定量的な手法によって「規範的でシステムティックな計算手順(アルゴリズム)」を導入することにより、判断の透明性及び追跡性を高めることである。このために、具体的な例題への適用を通じて、上述した目的への適用性を検討することとした。

表 4.2-10 ニアフィールドにおける状態設定の例

		期間 I : 処分場閉鎖～1,000 年後	期間 II : 1,000 年後～1 万年後	期間 III : 1 万年後～10 万年後
システムの状態				
安全確保上の意義		廃棄体発熱および処分場建設・操業時に導入された空気の影響(不飽和領域形成および酸性化条件への推移)がなくなり核種の閉じ込めに適した地下深部本来の条件が回復する。 ベントナイトの膨潤により一様な圧縮応力場が形成され、緩衝材中および隣接したバリアとの間のギャップが閉塞することで、物質移動が拡散によって支配される場が確保される。	炭素鋼と緩衝材、緩衝材とコンクリート支保という異なる材料を配置した場合、熱力学的に安定ではないため、材料間の溶質移動と化学反応に伴い、環境に対してより整合的な二次鉱物の境界層が形成され、間隙が閉塞することで、地球化学的に定常となる。オーバーバックの水密性により、地球化学的に定常となるまで廃棄体中に核種が閉じ込められる。	オーバーバック開口後ガラス固化体が接液し溶解と核種の浸出が開始する。アクチニドなどの濃度は溶解度で制限され超過分は沈殿する。オーバーバックの外側では期間 II までに達成された定常的な場において拡散による核種移行が生じる。この際、核種は鉄腐食生成物や緩衝材(二次鉱物を含む)に取着され遅延される。
環境条件	T	廃棄体の発熱により温度が上昇するが緩衝材中の最高温度は 100℃以下である。放射能の減衰により数百年後には地温程度にまで低下。	期間 I の定常状態が継続する	
	H	坑道閉鎖後岩盤中の地下水の圧力水頭が回復し、緩衝材への浸透が生じる。岩盤透水係数が小さい場合には緩衝材冠水に数 10 年を要する。		
	M	緩衝材の膨潤によりギャップが閉塞し一様な圧縮場となる。岩盤中の応力条件が変化し、坑道のクリープ変形が生じる。	オーバーバックの腐食による強度低下および腐食膨張による緩衝材圧密によってオーバーバックが変形し開口に至る。ガラスの破砕が進む。	炭素鋼の腐食膨張が継続し緩衝材の圧密およびガラス固化体の破砕が継続する。
	C	閉鎖時に残留した酸素はオーバーバック、緩衝材中の鉄鉱物や微生物によって速やかに消費される。	Fe イオンによる変質(内側)および高 pH 条件での変質(外側)により緩衝材の境界部に変質層が形成され間隙が閉塞に向かう。	ガラス溶解により核種が浸出する。ガラス近傍での水の放射線分解によって生じる酸化剤は鉄腐食生成物によって消費されるために還元環境が維持される。

T : 熱的条件 H : 水理条件 M : 力学条件 C : 化学条件

(b) シナリオシミュレーションモデル

本例題では、閉鎖後のニアフィールド環境変遷に着目することとし、マルチエージェントシミュレーションは用いず、多変量セルラーオートマタによって THMC に関する種々のプロセス群とプロセス間の相互作用を表現することとした。解析の範囲として、2010 年レポート⁽⁸⁾においても議論されている安全機能、及び安全機能に影響を及ぼす環境条件や影響因子のうち、特に、前述した「勾配」や「干渉」に関連すると考えられるものを優先的に対象として選定した。

i) 解析体系

このような例題では、後述するように THMC の各領域について、複数のプロセスとそれらの間の相互作用をモデル化するため、例題 1 よりも計算負荷が顕著に大きくなることが予想される。そこで、解析体系としては、図 4.2-7 に示す 1.5 個分の廃棄体とその周囲の緩衝材及び岩盤を設定した。この体系は、必要に応じて 1 個の廃棄体及びその隣の 0.5 個分の廃棄体の特性を異なったものにするることによって隣接廃棄体間の干渉を検討することのできる最小の体系とすることができる。ただし、本例題では、単一廃棄体に着目することとした。

また、緩衝材と岩盤の間には、坑道支保としてコンクリートを配置した。さらに、岩盤中には透水性亀裂が存在し、廃棄体の中心と交差するように設定されており、開口幅は 1mm としている。ただし、亀裂の開口幅と同じ幅をセルサイズとすると、サイズが小さすぎて熱伝導の計算が不安定となるため、10 cm 幅の岩盤に開口幅 1mm の亀裂が含まれていることとし、透水量係数が等価となるように設定することとした。

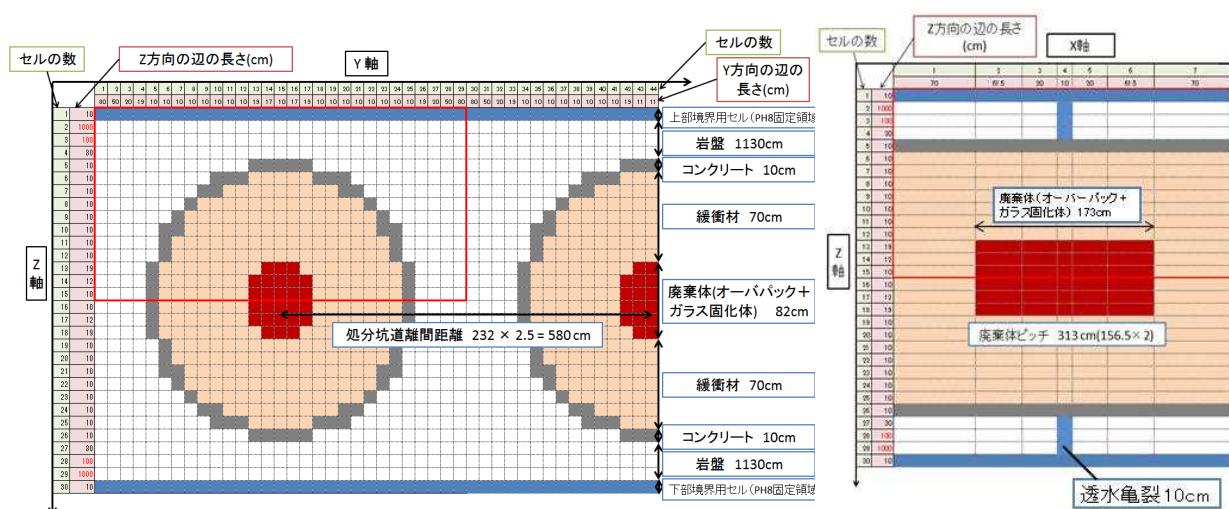


図 4.2-7 例題 2 における多変量セルラーオートマタの解析体系

ii) 主要な状態変数の自律的変遷に関する基本プロセスのモデル

THMC の各分野において、それぞれ、以下に示す主要プロセスをセルラーオートマタのローカルルールとしてモデル化した。なお、各ルールの具体的内容については、添付資料 -B を参照されたい。

熱に関する主要プロセス

熱に関する主要な状態変数は温度である。

廃棄体の発熱に従い、セルの温度が上昇する。この温度上昇は、ソース・シンク型ルールとして表現する。また、廃棄体からの熱は、熱伝導によって隣接した周囲のセル内に伝播し、これらのセルの温度が徐々に上昇することとなる。熱伝導は、例題 1 と同様、拡散型のルールによって表現される。

廃棄体の発熱量は例題 1 と同様、時間に関して単調減少の関数として与えられ、発熱量の低下に伴い、各セルの温度は徐々に低下する。

水理に関する主要プロセス

水理に関する主要な状態変数は緩衝材中の水分飽和度である。

周囲の水圧及び緩衝材のサクションによって、緩衝材の冠水が進展する。このプロセスは、緩衝材中の水分飽和度に対して拡散型のルールを適用することによって表現する。

力学に関する主要プロセス

力学に関する主要な状態変数は緩衝材の膨潤圧である。水分飽和に伴い、緩衝材は外側から徐々に膨潤し密度の低下が生ずる一方、内側の緩衝材は圧縮されて密度が上昇する。

緩衝材の膨潤は水分飽和に伴って生ずるプロセスであり、緩衝材水分飽和度によって規定される水分ポテンシャルの初期値からの増分として算出される。

化学に関する主要プロセス

化学に関する主要な状態変数は、以下の通りである。

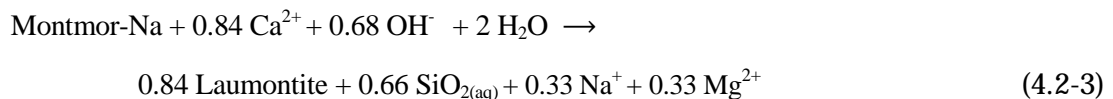
- ・ 緩衝材間隙水の pH あるいは OH 濃度
- ・ 同液相シリカ濃度及び SiO₂(aq) と HSiO₃⁻ の濃度
- ・ 緩衝材中モンモリロナイト濃度
- ・ 緩衝材中石英濃度
- ・ Laumontite 濃度 (緩衝材中のアルカリ変質二次鉱物濃度)
- ・ バーチェリン濃度 (緩衝材中の鉄との相互作用による二次鉱物濃度)

化学に関する主要プロセスは、溶質の移動、液相化学種の反応、及び鉱物の溶解・沈殿反応である。このうち、溶質の移動については、拡散に加えて緩衝材冠水時の間隙水の流動に対応する移流を含む拡散・移流プロセスを拡散型ルールとシフトルールを組み合わせることによって表現する。また、液相化学種の反応として、以下を考慮する。



鉱物の溶解・沈殿反応としては以下を考慮し、これらについては、いずれも簡易な速度論的モデルによって取り扱う。なお、鉄イオンとモンモリロナイトの反応によるバーチェリンの生成については、還元環境での鉄の腐食が律速仮定であると仮定する。

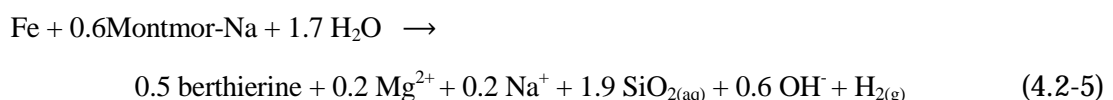
- ・ モンモリロナイトの溶解



- ・ 石英の溶解・沈殿



- ・ バーチェリンの生成



なお、主要なアルカリソースであるコンクリート支保については、Atkinson⁽¹⁰⁾に基づいて、pHの時間変化を設定した。交換水量と時間スケールの関係については、変更可能なパラメータとして取り扱うこととした。

緩衝材中の溶質の拡散係数及び鉱物の溶解・沈殿反応に有効な表面積は、水分飽和度に依存するものとし、本例題では、比例すると仮定した。

(c) THMC 主要状態変数間の相互作用

上述した基本プロセスによって各主要状態変数が時間的に変遷することに加えて、異なる状態変数間に相互作用が生ずることによってTHMCプロセス間の連成効果が生ずることとなる。本解析で設定したTHMCの主要状態変数間の相互作用をインフルエンスマトリックスとして表4.2-11に整理した。

本解析で取り扱う状態変数を左及び上の軸に配置し、それらの状態変数に関する基本プロセスを対角要素に配置した。非対角要素には、左の状態変数が上の状態変数に影響を及ぼすプロセスを配置した。なお、各相互作用の具体的な内容については添付資料 -B に記す。

表 4.2-11 例題 2 における基本プロセス及び相互作用に関するインフルエンスマトリックス

		熱	水理	力学	化学					
		温度	水分飽和度	膨潤圧	pH(OH-濃度)	液相シリカ濃度	モンモリロナイト濃度	石英濃度	Laumontite濃度	パーチェリン濃度
熱	温度	廃棄体発熱 熱伝導	温度勾配による 水分拡散		水解離反応の 温度依存性	シリカ分種化の温 度依存性	モンモリロナイト 溶解速度の温度 依存性	石英溶解・沈殿速 度の温度 依存性	モンモリロナイト 溶解速度の温度 依存性	
水理	水分飽和度	熱伝導率の水分 飽和度依存性	緩衝材冠水	膨潤圧の水分飽 和度依存性	拡散係数の水分 飽和度依存性	拡散係数の水分 飽和度依存性	反応表面積の水 分飽和度依存性	反応表面積の水 分飽和度依存性	反応表面積の水 分飽和度依存性	反応表面積の水 分飽和度依存性
力学	膨潤圧			緩衝材膨潤						
化学	pH(OH-濃度)				分散・移流 水の解離反応 コンクリート溶脱	シリカの分種化				
	液相シリカ濃度				シリカの分種化	分散・移流 シリカの分種化		石英溶解・沈殿		
	モンモリロナイト濃度				モンモリロナイト 溶解	モンモリロナイト 溶解	モンモリロナイト 溶解		モンモリロナイト 溶解	
	石英濃度				石英溶解・沈殿	石英溶解・沈殿		石英溶解・沈殿		
	Laumontite濃度				Laumontite生成	Laumontite生成			Laumontite生成	
	パーチェリン濃度				パーチェリン 生成	パーチェリン 生成				鉄腐食 / パーチェ リン生成

(d) 解析条件

上述したモデルによる解析のための入力パラメータ、初期条件及び解析条件を表 4.2-12 にまとめる。表中の状態変数に（初期値）とされているものは、他の状態変数等の関数として解析の中で計算されるものである。詳細は添付資料 -B に記す。

表 4.2-12 例題 2 の解析条件

	状態変数, 係数	単位	緩衝材	坑道支保	岩盤・亀裂	廃棄体
熱	温度(初期値)		45	45	45	45
	発熱率(初期値)	W	-	-	-	350
	熱伝導率(初期値)	W/mK	0.78	2.56	2.8	5.39
	含水比(初期値)	%	7	-	-	-
	比熱(初期値)	kJ/kg K	0.59	1.05	1	0.511
水理	水分飽和度(初期値)	-	0.28	1.0	1	-
	水分拡散係数(初期値)	m ² /s	1.1 × 10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	-
	温度による水分拡散係数(初期値)	m ² /s	7.0 × 10 ⁻¹²	7.0 × 10 ⁻¹²	-	-
	実流速	m/y	-	-	0.1(亀裂)	-
	体積含水率(初期値)	-	0.113	0.13	0.386	-
	空隙率(初期値)	-	0.403	0.13	0.386	-
	水分ポテンシャル(初期値)	MPa	-43	-	-	-
	膨潤圧(初期値)	MPa	0	-	-	-
化学	pH(初期値)	-	7.3	13	7.3	-
	OH ⁻ 濃度(初期値)	mol/dm ³	2 × 10 ⁻⁷	10 ⁻¹	2 × 10 ⁻⁷	-
	SiO ₂ (aq)濃度(初期値)	mol/dm ³	4.7 × 10 ⁻⁵	4.7 × 10 ⁻⁵	4.7 × 10 ⁻⁵	-
	HSiO ₃ ⁻ 濃度(初期値)	mol/dm ³	4.1 × 10 ⁻⁵	4.1 × 10 ⁻⁵	4.1 × 10 ⁻⁵	-
	実効拡散係数	m ² /s	5.4 × 10 ⁻¹⁰	5.4 × 10 ⁻¹²	5.4 × 10 ⁻¹⁰	-
	パーチェリン濃度(初期値)	mol/dm ³	0	-	-	-
	モンモリロナイト濃度(初期値)	mol/dm ³	1.5	-	-	-
	石英濃度(初期値)	mol/dm ³	10.3	3.9	10.8	-
	Laumontite 濃度(初期値)	mol/dm ³	0	-	-	-
	石英の溶解・沈殿速度	Mg/m ³ s	*1	*1	*1	-
	モンモリロナイトの溶解速度	mol/s	*2	-	-	-
システム	タイムステップ幅(TH)	day	10	10	10	10
	タイムステップ幅(TH MC)	min	30	30	30	30

(*1) $r = A \exp(\alpha T) \times \exp(-77500/RT) \cdot [\text{OH}^-] (1 - [\text{SiO}_2(\text{aq})]/K_{\text{eq}})$, A は石英の表面積(m²), α はパラメータ, T は温度(K), R は気体定数(J/K), K_{eq} は $\log K_{\text{eq}} = 1.881 - 0.002028T - 1560/T$ に従う。

(*2) $r = 3.5[\text{OH}^-]^{1.4} \times \exp(-51000/RT)$. R は気体定数(J/K), T は温度(K)

(e) シナリオシミュレーション結果を利用した状態設定のサポート

前述のように、従来の状態設定においては、特性やプロセス及びそれらの相関関係についての既存の知見の整理に基づいて、表 4.2-11 に示したストーリーボードのような表現形式を用いた状態設定が行われている。しかしながら、その間の判断がどのように行われているかについては、専門家によるヒューリスティックがアルゴリズム的に整理を行うことが難しいということもあり、あまり明確にされていない。

他方、本例題についてのシナリオシミュレーションモデルにおいては、前項に示す通り、半定量的ではあるものの表 4.2-11 に示す全てのプロセスや相関関係及びそれらの連成効果について「規範的でシステマティックな計算手順(アルゴリズム)」が定義されている。ここでは、シナリオシミュレーションモデルを用いることにより、従来の状態設定プロセスを改善し、シナリオ解析における種々の議論を支援するという観点から、シナリオシミュレーション結果から得られる THMC の環境条件の変化をストーリーボードに類似した形式で、時間区分に対応して表示し結果の検討を行う。

廃棄体の発熱による温度上昇が顕著な期間における熱、水理、及び力学についての主要な状態変数分布の変化及びこれらの状態変遷の要因となるプロセスについて整理した結果を表 4.2-13 に示す。また、化学に関する種々の状態変数分布の変化及びこれらと関連するプロセスについて、廃棄体の発熱による温度上昇が顕著な期間及びより長期について整理した結果をそれぞれ表 4.2-14 及び表 4.2-15 に示す。

本例題についてのシナリオシミュレーションモデルには、種々の仮定が含まれている。したがって、それらの仮定に基づいて得られたこれらの結果にもある程度の任意性が含まれざるを得ない。ただし、従来のヒューリスティックに基づき作成されたストーリーボードとは異なり、どのようなモデルや仮定によって得られた結果であるが明確であることから、説明をする上での透明性と追跡性については、顕著に改善されているとすることができる。さらに、仮定に基づくモデルやパラメータを変更したシミュレーションを複数実施することで、それらの任意性や不確実性がシステムの状態設定に及ぼす影響を客観的かつ比較的容易に確認することができる。

表 4.2-13 シナリオシミュレーション結果に基づき作成した THMC に関する状態の時間変化(1) (熱 / 水理 / 力学)

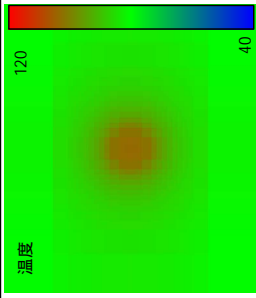
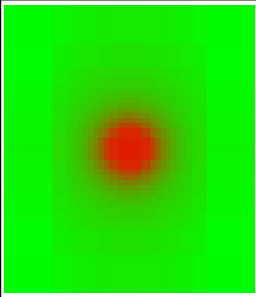
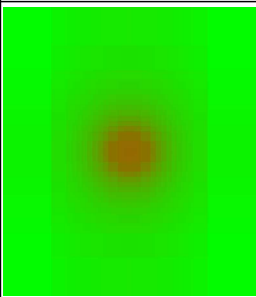
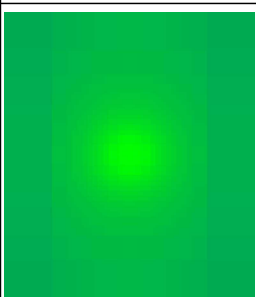
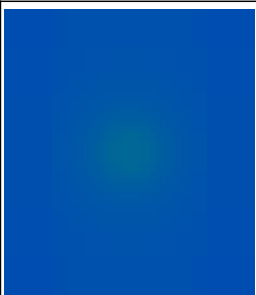
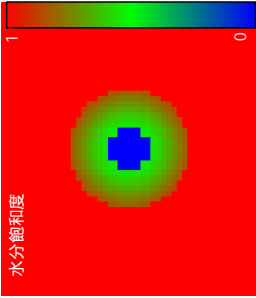
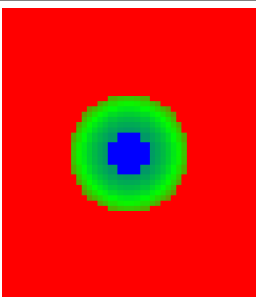
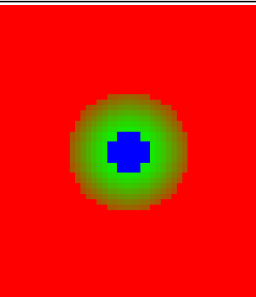
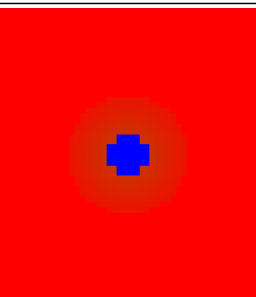
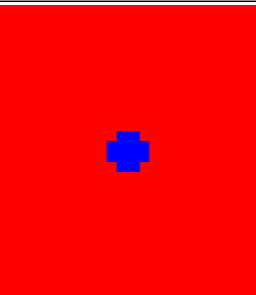
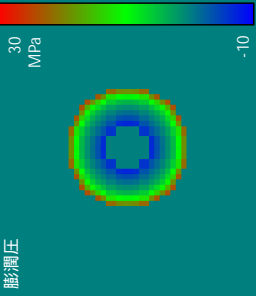
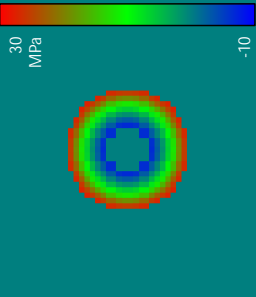
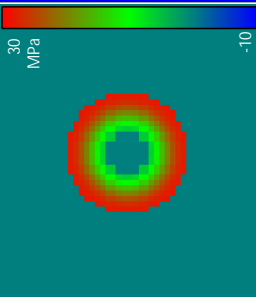
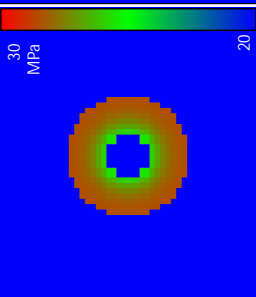
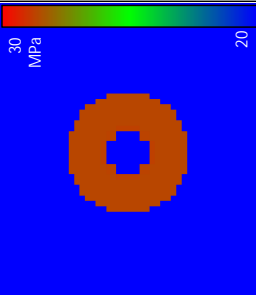
	間観後1年	3年	10年	30年	100年	
熱	 <p>温度</p>					<p>二アフィールド内の温度分布は、一様に本来の地温程度にまで復旧する</p>
水理	 <p>水分飽和度</p>					<p>オーバーバック直近の部分まで含め、緩衝材の全体がほぼ完全に水分飽和する</p>
力学	 <p>膨潤圧</p>					<p>緩衝材の全体がほぼ完全に膨潤し、緩衝材と岩盤及びオーバーバックの間のギャップも閉塞する</p>

表 4.2-14 シナリオシミュレーション結果に基づき作成した THMC に関する状態の時間変化(2) (化学：初期)

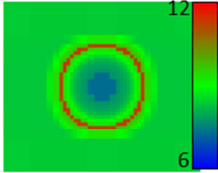
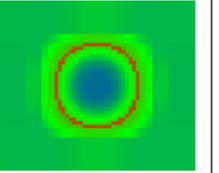
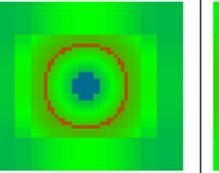
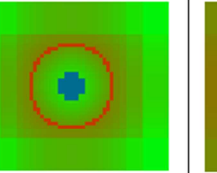
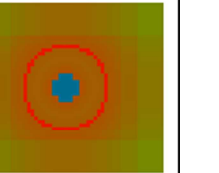
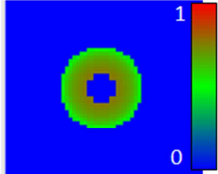
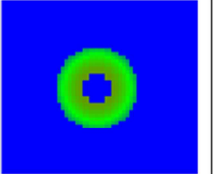
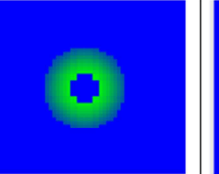
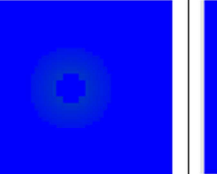
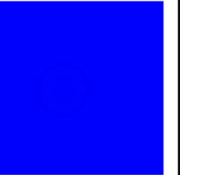
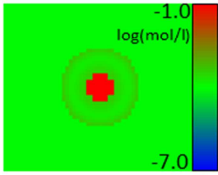
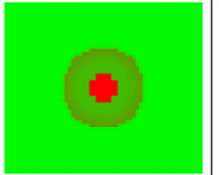
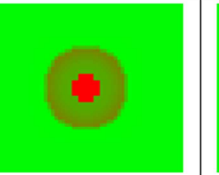
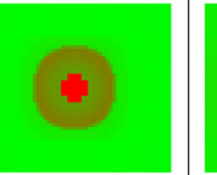
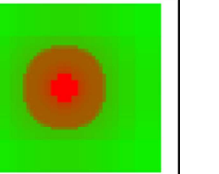
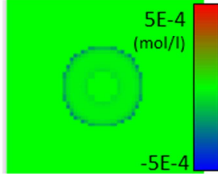
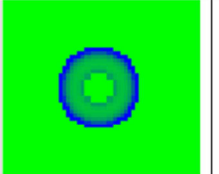
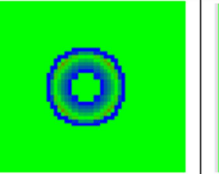
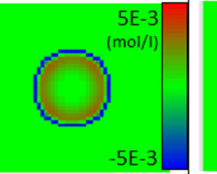
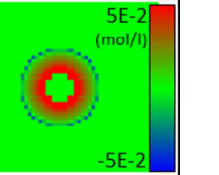
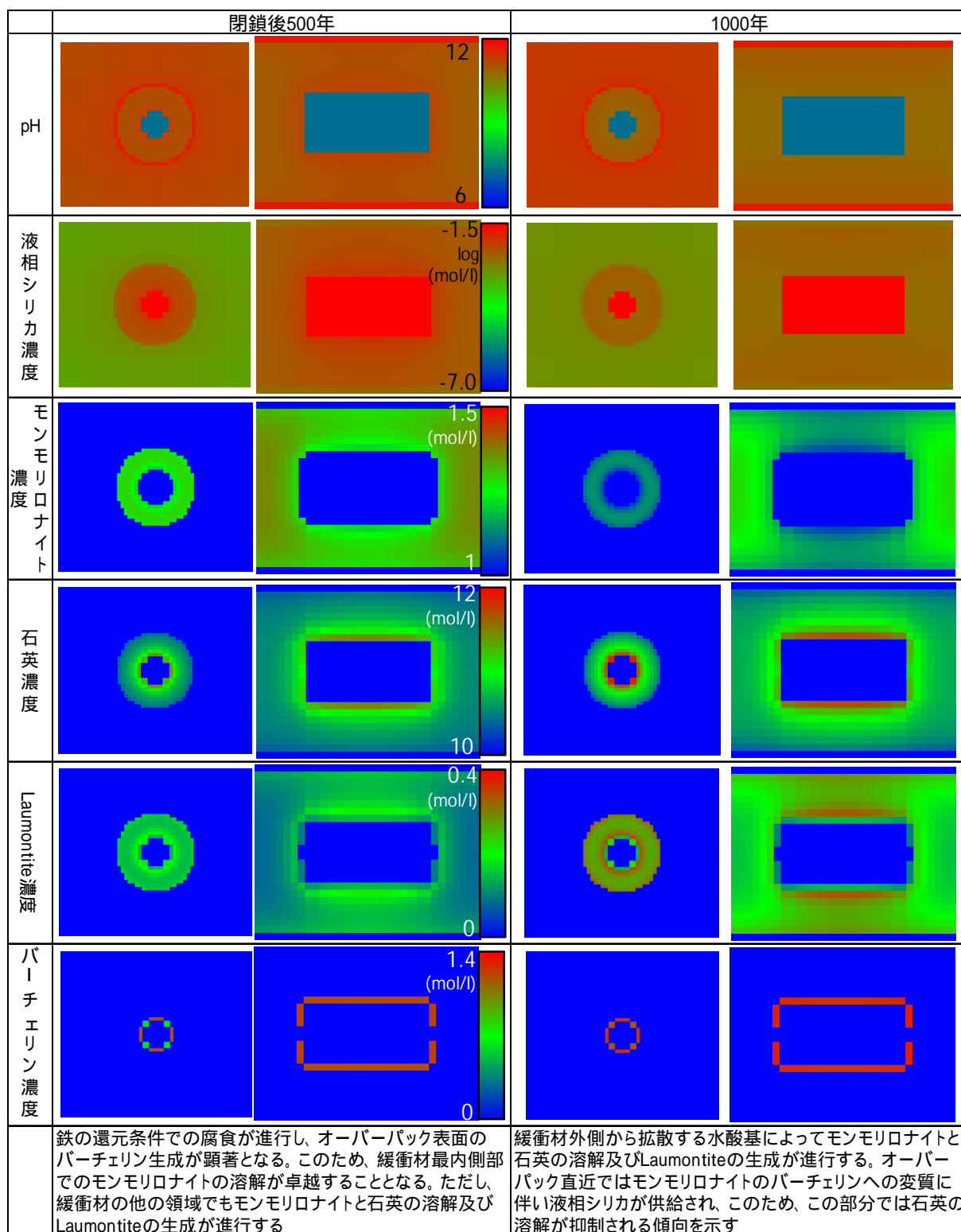
	閉鎖後1年	3年	10年	30年	100年
pH					
空気残留割合					
液相シリカ濃度					
石英溶解・沈殿量					
	冠水の開始した緩衝材外縁部に高pHの水が侵入を開始する。緩衝材のほとんどの領域で空気が残留しており酸化性環境にある	緩衝材外周部での高pHによる石英の溶解が始まる。温度勾配によって緩衝材の冠水が制限されるため、外周部以外では空気が残留し、酸化性状態が継続する	緩衝材の冠水が進展するのに伴い水酸基の内側への移動が顕著となり、外周部での石英溶解・液相シリカ濃度上昇が始まる。	外周部が高pH環境となり、石英溶解・液相シリカ濃度上昇が顕著となる。内側の水分飽和度も上昇しているため、溶解したシリカはpHが低い内側で石英として再沈殿。オーバーバック直近は空気が残留し酸化性状態	オーバーバック直近まで冠水し、酸素が鉄腐食等により速やかに消費されるため還元性状態に推移する。緩衝材中のpH勾配は平坦化し、オーバーバックの水素発生型腐食に伴うパーチェリン生成により内側でも水酸基が生成

表 4.2-15 シナリオシミュレーション結果に基づき作成した THMC に関する
状態の時間変化(3) (化学：長期)



(f) 長期安全性を脅かす可能性のある懸念事項の抽出

前項にて作成したシナリオシミュレーション結果に基づく THMC に関する種々の状態の時間変化を利用して、人工バリアの安全機能に対する影響についての検討を行うことで、個別の現象に着目した懸念事象の抽出になりがちであった従来のシナリオ解析に対し、より具体性と客観性を持って、総合的な議論を通じた「長期安全性を脅かす可能性のある懸念事項」の抽出を行い得るものと期待される。

以上の観点から、表 4.2-13 ~ 表 4.2-15 をオーバーパック腐食、緩衝材変質についての専門家に提示することにより、それぞれの安全機能という観点から懸念事項についての意見聴取を行った。また、抽出された懸念事項に対応して、シナリオシミュレーションの出力から関連するデータを抽出し、議論に適した形式で再整理することも可能である。これらの検討の結果を、以下にまとめる。

i) オーバーパックの安全機能についての懸念事項

金属材料の腐食は、環境条件に強く依存する。炭素鋼の腐食に影響を及ぼす環境条件の変遷という観点で表 4.2 -13 ~ 表 4.2 -15 を提示しつつ専門家の意見聴取を行った結果、オーバーパックが想定よりも早く閉じ込め機能を失う可能性に関する以下の懸念事項が抽出された。

- 不飽和状態（酸化性状態）かつ高 pH 環境での不動態破壊型化学種によるオーバーパックの局部腐食
- オーバーパック表面の水分飽和度が不均質である場合の溶存酸素濃度差を駆動力とするマクロセル腐食

不動態破壊型の局部腐食の可能性

谷口ら⁽¹¹⁾でも述べられているように、pH が約 10.5 以上の条件では炭素鋼が不動態化する可能性がある。また、不飽和状態のような酸化性環境で、塩化物イオンや硫酸イオンによって不動態が破壊された場合に局部腐食が進行する可能性がある。このような不動態破壊の生ずる条件として、経験的に、セメント系材料中で、 $[Cl^-]/[OH^-] = 0.6$ と報告されている⁽¹²⁾。

以上の知見に基づき、オーバーパック表面の環境条件の時間的変遷に関するシナリオシミュレーション結果を、水分飽和度（酸化還元状態の指標として）、pH（鉄不動態化の指標として）、 $[Cl^-]/[OH^-]$ （塩化物イオンによる不動態破壊条件の指標として）及び温度についてのレーダーチャートとして整理した。結果を図 4.2-8 に示す。ここで、水分飽和後の溶存酸素は鉄の腐食によって短期間（0.04 年程度）で消費されるため局部腐食の進展にはつながらないことが示されており⁽⁷⁾、酸化還元状態の指標として水分飽和度に着目することは妥当と考えられる。また、間隙水中の塩化物イオン濃度については、同じく第 2 次取りまとめに基づき 15 mmol/l 程度を想定することとした。ただし、本解析では可溶性塩の濃縮を取り扱っていないため、塩素イオン濃度については、この値よりも高くなる可能性があることを考慮する必要がある。

同図では、pH が約 10.5 以上という条件が成立するのは約 60 年後以降であり、また、この時点ではオーバーパックと接する緩衝材内側表面でもほぼ完全に水分飽和しているため、前述したように溶存酸素は鉄の腐食反応によって速やかに消費され、還元性環境に推移するため、局部腐食の進展には到らないものと考えられる。なお、今回の解析では、石英及びモンモリロナイト溶解が pH を低下する方向に寄与するため、これらの反応による pH 緩衝性の不確実性を考慮した議論が必要であるとともに、半定量的なシナリオシミュレーションの精度の限界も考慮して、より精緻な連成解析による検討が必要と考えられる。

不動態破壊の発生が懸念される $[Cl^-]/[OH^-] = 0.6$ の条件が成立するのは pH が低い初期に

限られており、仮に酸化性環境で不動態化が生じたとしても、その時点では、 $[Cl^-]/[OH^-]$ は十分に小さい数値にまで低下している。ただし、前述したように、この点については、再冠水過程での塩の濃縮等によりこれ以上に高い塩素イオン濃度が生ずる可能性も考慮する必要がある。なお、沿岸域等の塩水系地下水の地質環境を考える場合には、いずれにしても高い塩化物イオン濃度により pH11 以上でも $[Cl^-]/[OH^-] = 0.6$ の条件が成立する可能性がある。

以上の検討から、以下の課題が抽出される。

- ・石英及びモンモリロナイトの溶解による pH 緩衝性の不確実性及び水分飽和に要する時間についての不確実性を考慮しても不飽和状態での pH は不動態化領域を下回ることを確認するためのケーススタディー

この課題については、後述する「シナリオ分岐の可能性」に関するシナリオシミュレーションのケーススタディーにおいて検討を加えることとした。

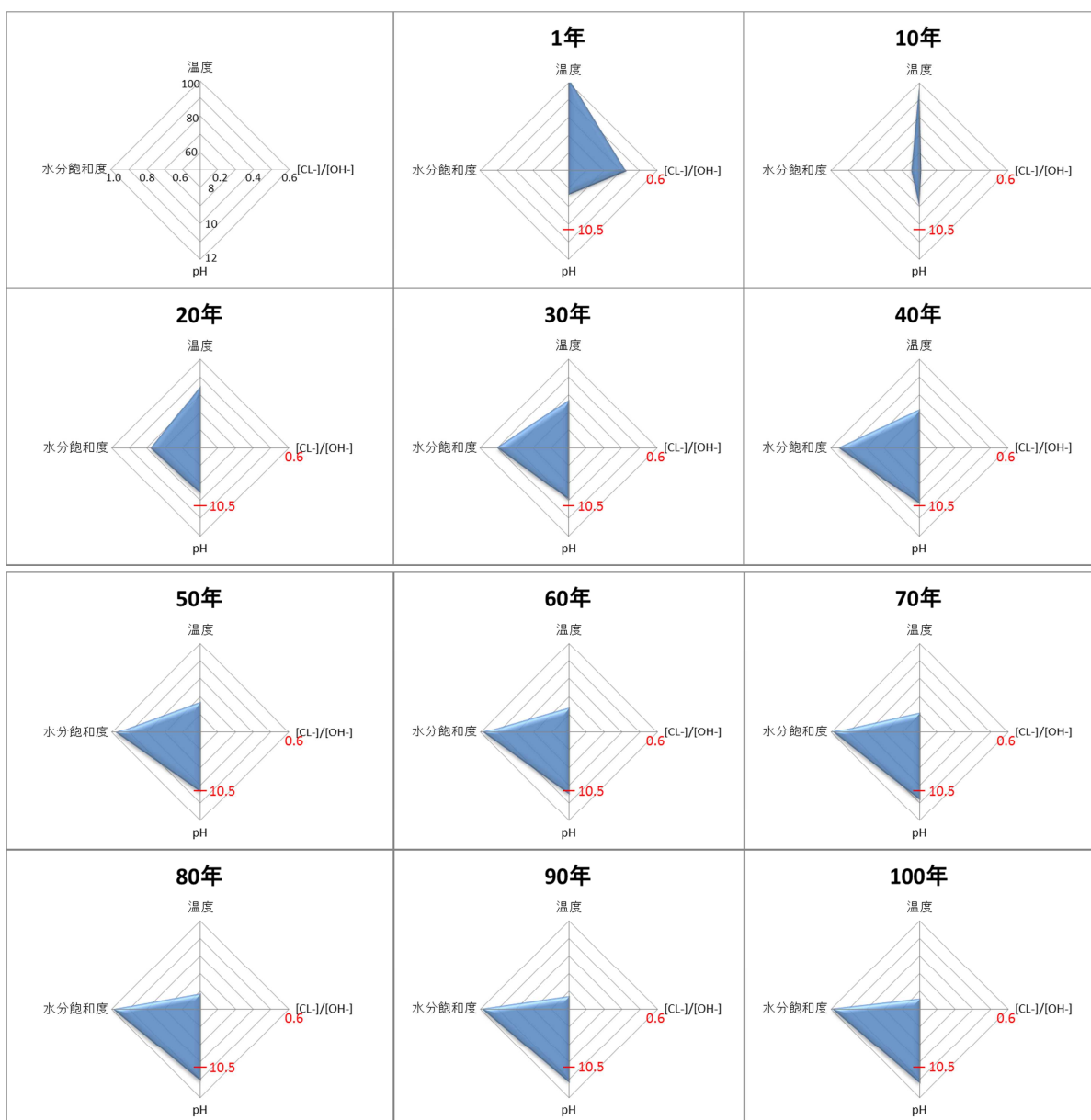


図 4.2-8 オーバーパックの不動態破壊型局部腐食の生起可能性に関するレーダーチャート

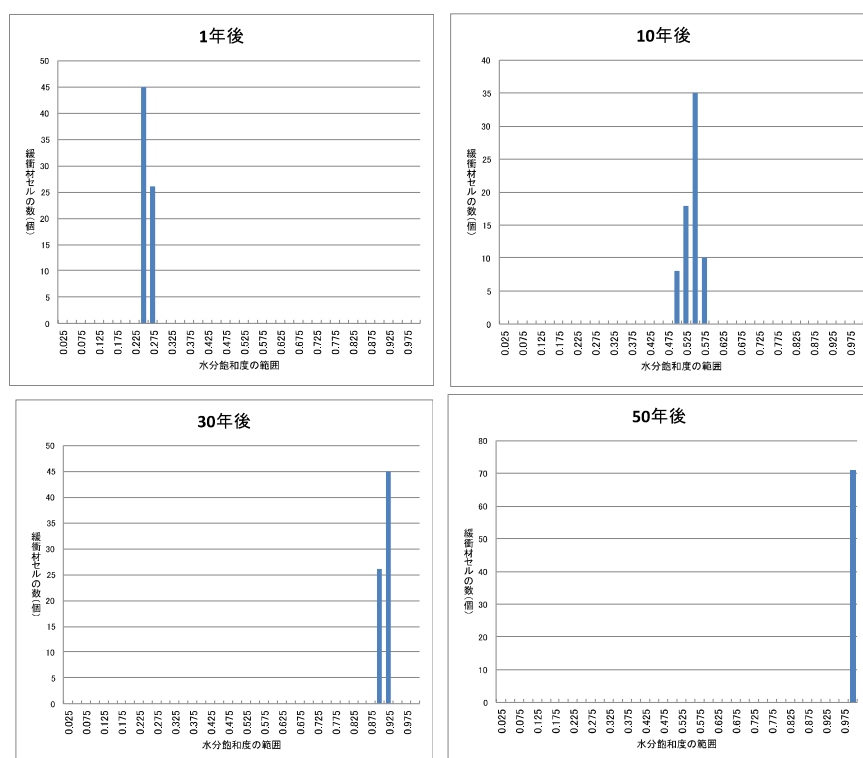
マクロセル腐食の可能性

シナリオシミュレーションにおいて、オーバーパックに接している緩衝材セルの水分飽和度が各時点でどの程度ばらつくかを整理した結果が図 4.2-9 である。図から明らかなように、10cm 立方のメッシュで平均化した水分飽和度のばらつきは各時点で小さく、特にオーバーパック表面が水分飽和に近づく時期でのばらつきが小さいため、10cm 以上のスケールで溶存酸素濃度差によるマクロセル腐食の生ずるような酸化性環境と還元性環境との共存の可能性は考えにくい。

上記の検討を踏まえ、マクロセル腐食に関する環境条件として今後取り組むべき課題としては、以下のものが挙げられる。

- ・ 緩衝材の再冠水に関するパラメータ（例えば、温度勾配による水分拡散係数）を変更したシナリオシミュレーションにおいて、上記の傾向が変化する可能性の検討
- ・ 10cm 以下のスケールで水分飽和部と不飽和部が共存する場合に酸化性環境と還元性環境との共存する可能性についての溶存酸素の酸化還元に着目した反応移動解析
- ・ 10cm 以下のスケールでの水分飽和度のばらつきが生ずるか否かを評価するための、より高い解像度での連成解析。例えば、緩衝材の不均質性や緩衝材ブロック間のギャップが存在する場合に、圧縮された空気がオーバーパック表面付近の特定の部位に残留する可能性についての二相流解析

これらのうち、再冠水に関するパラメータの影響の検討については、後述する「シナリオ分岐の可能性」に関するシナリオシミュレーションのケーススタディーにおいて検討を加えることとした。



縦軸は、オーバーパック表面に接する緩衝材セルのうち該当する水分飽和度のもの数を示す。

図 4.2-9 オーバーパック表面の水分飽和度のばらつきの時間変遷

ii) 緩衝材の安全機能についての懸念事項

緩衝材については、安全機能に影響を及ぼす可能性として、以下の懸念事項に対応して、関連するニアフィールド環境条件の変遷に関する整理を行った。

- ・モンモリロナイトの溶解と非膨潤性の二次鉱物の沈殿による緩衝材の膨潤特性変化及び止水性の低下
- ・石英の溶解と再沈殿に伴う緩衝材の膨潤特性変化及び止水性の低下

まず、アルカリ変質の二次鉱物として想定した Laumontite については、緩衝材中の各部での生成量の時間変化（図 4.2-10）の示す通り、初期の 100 年間に於ける生成量は限られており、初期の温度勾配が顕著で緩衝材が不飽和状態にある期間での進展は顕著ではない。この点についてのより詳細な連成解析による確認は今後必要であるものの、このシミュレーションの結果は、従来の飽和・定温状態を仮定したより定量的な地球化学解析⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾の設定の妥当性を指示するものと考えられる。

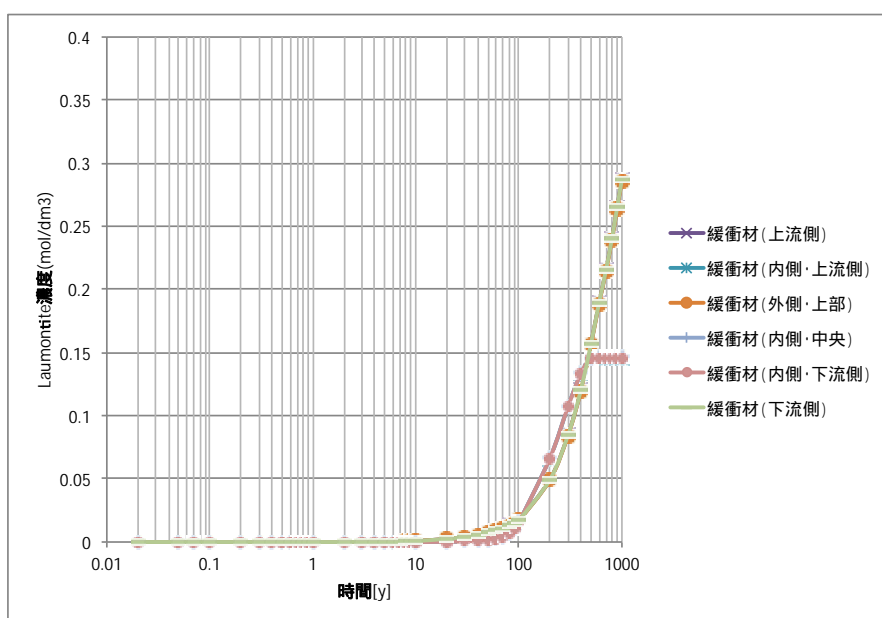


図 4.2-10 緩衝材中各部での Laumontite 生成量の時間変化

鉄腐食の影響で生ずるパーチェリンについては、本解析ではオーバーパックの腐食による鉄の供給により瞬時に沈殿するモデルとなっているため、オーバーパック表面近傍に局在化している。この現象は、飽和・定温状態を仮定した、化学と物質移行の連成解析⁽¹⁵⁾と整合していると言え、これについては、本解析でのモデルの簡略化が支持される。安全機能への影響という観点では、影響領域が限定的であることから緩衝材全体としての膨潤性低下及びこれにともなう安全機能低下が生ずる可能性は低いと考えられる。

石英については、初期の存在量が大いいために、溶解・沈殿した量を把握することがやや難しい。そこで、前出のシナリオシミュレーション結果に基づき、各時期での石英の累積溶解・沈殿量分布を整理した結果を図 4.2-11 に示す。この図から、初期の 50 年程度までの期間では、緩衝材中の温度が低下し水分飽和が進むにつれて、それまでに溶解したシリカ及び外側からの

pH の上昇に伴うモンモリロナイトと石英の溶解によって生じた液相シリカが内側に拡散したものの再沈殿が緩衝材内部で生じていることを示している。

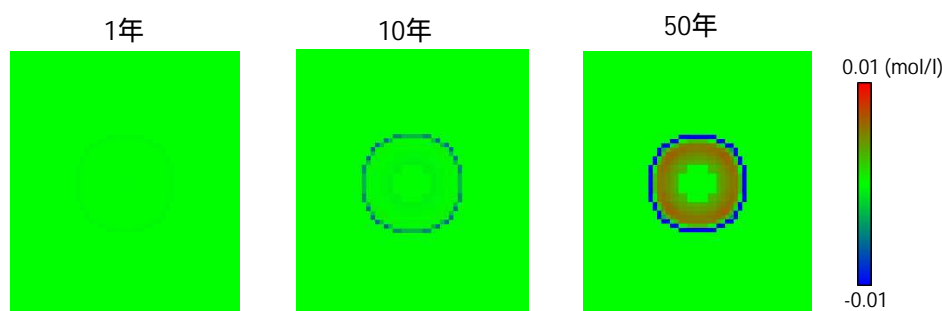


図 4.2-11 石英の累積溶解・沈殿量分布

(g) シナリオ分岐の可能性についてのケーススタディー

シナリオシミュレーションにおける種々のパラメータを変動させた場合に、前項でのシナリオシミュレーション結果とは異なる挙動が生じ、その結果として、安全機能に関する懸念事項の検討結果にも影響する可能性がある。このような可能性を調べるために、パラメータを変動させたケーススタディーを実施した。

懸念事象の検討対象は、前項で取り上げた、不飽和状態（酸化性状態）かつ高 pH 環境での不動態破壊型化学種によるオーバーパッキの局部腐食、オーバーパック表面の水分飽和度が不均質である場合の溶存酸素濃度差を駆動力とするマクロセル腐食、非膨潤性の二次鉱物である Laumontite やバーチェリンの沈殿による緩衝材の膨潤特性変化及び止水性の低下、及び石英の溶解と再沈殿に伴う緩衝材の膨潤特性変化及び止水性の低下とする。変動させるパラメータは、これらの懸念事項への影響の想定と、パラメータ自体の不確実性の双方を考慮して、以下のものとした。

- ・ 温度勾配による水分拡散係数
- ・ モンモリロナイト溶解速度

i) 温度勾配による水分拡散係数の変動の影響

温度勾配による水分拡散係数は、温度勾配によって緩衝材の再冠水が抑制される種々の効果を経験的に表現したパラメータであり、実験結果へのフィッティングにより決定されているが、その不確実性が大きいとされている⁽¹⁶⁾。そのため、この値を前項で実施したリファレンスケースに対し、の 1/10 及び 10 倍としたケースについて、それぞれ解析を行った。

結果を図 4.2-12 及び図 4.2-13 に示す。温度勾配による水分拡散係数はその値が大きいほど、高温側から低温側への水の移動が大きくなるため、地層処分システムの体系では、温度勾配による水分拡散係数が大きい方が、水分の浸入が抑制される。第 2 次取りまとめ⁽⁷⁾でも指摘されているように、温度勾配による冠水の抑制効果が強調された場合、緩衝材内側は乾燥状態が継続し、このため熱伝導率が低下することによって温度上昇が生じている。この点については、緩衝材中最高温度に関する設計要件を確保するという観点から、現状の知見に含まれる不確実性を低減するための努力が継続される必要があると考えられる。

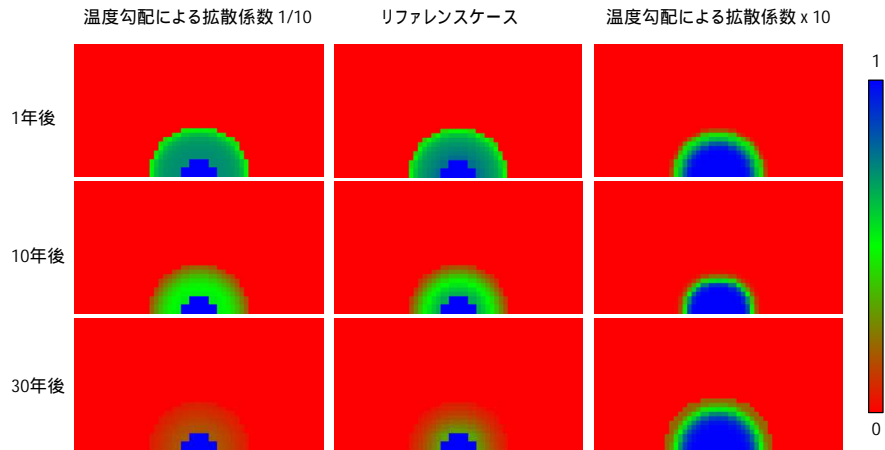


図 4.2-12 温度勾配による水分拡散係数の変動の影響（水分飽和度）

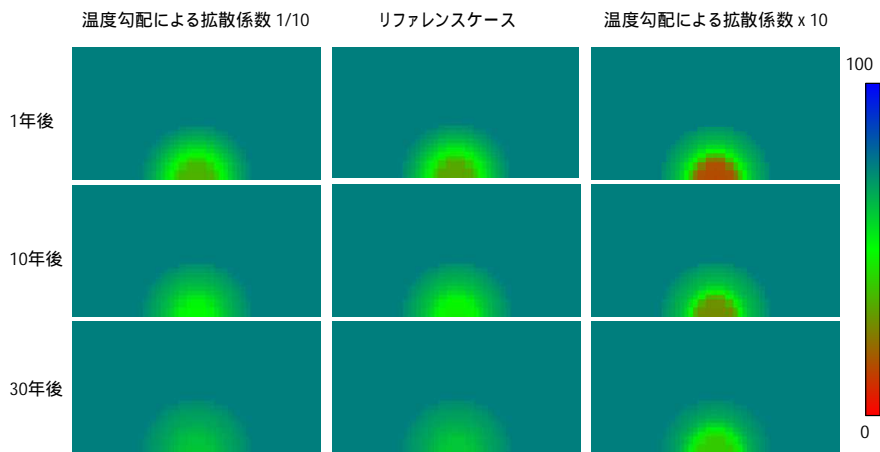


図 4.2-13 温度勾配による水分拡散係数の変動の影響（温度）

上述した懸念事項のうち、「オーバーパック表面の水分飽和度が不均質である場合の溶存酸素濃度差を駆動力とするマクロセル腐食」については、前項と同様に、解析結果に基づいてオーバーパック表面に接した緩衝材内側のメッシュにおける水分飽和度のばらつきを頻度分布として整理した。結果を図 4.2-14 に示す。ここでは、リファレンスケースの場合とは異なり、10cm 立方のメッシュで平均化した水分飽和度のヒストグラムは、大きく二つのグループに分かれていることがわかる。また、30 年後における水分飽和度の空間分布をリファレンスケースと比較した結果を図 4.2-15 に示す。温度勾配による水分拡散係数を 10 倍にした代替ケースでは、リファレンスケースよりも顕著に冠水が遅延されているとともに、温度勾配のより大きいオーバーパック側面（円筒の外周面）の水分飽和度が両端面よりも顕著に低いことがわかる（ヒストグラムの二つのグループにそれぞれ対応する）。

以上の結果は、THMC 連成解析における緩衝材冠水挙動に応じて、オーバーパックの腐食に関するシナリオが分岐する可能性があることを示唆するものと考えられる。緩衝材の再冠水時におけるオーバーパック表面での水分分布については、後段の連成解析においても、さらに検討を行うこととする。

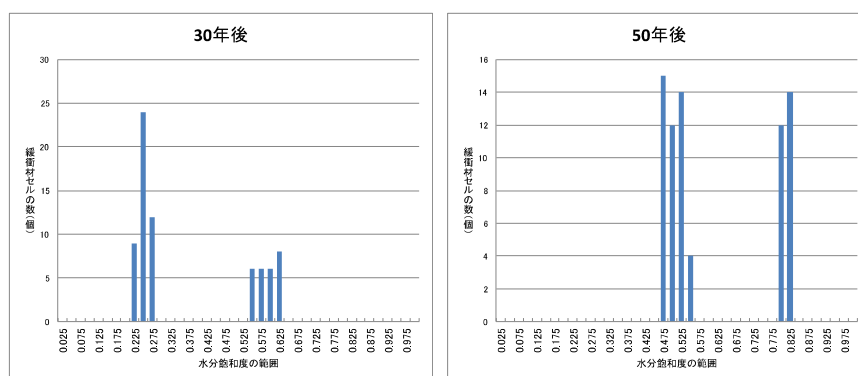


図 4.2-14 オーバパック表面水分飽和度ばらつきの時間変遷（温度勾配水分拡散係数 10 倍）

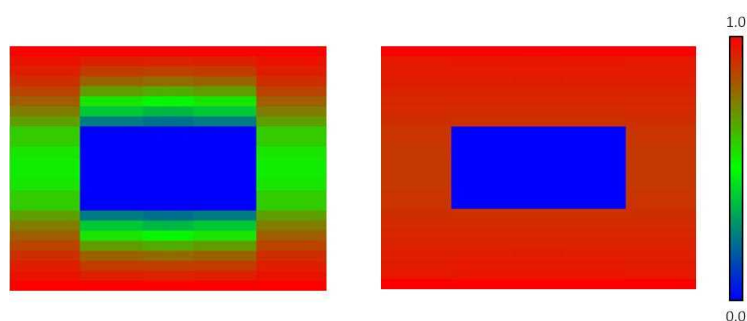


図 4.2-15 30 年後の水分飽和度分布(左:温度勾配水分拡散係数 10 倍,右:リファレンス)

なお、温度勾配による水分拡散係数の変動の影響は、温度勾配の影響が顕著な数十年程度に限られているため、それ以降に変遷が顕著となる化学環境条件に関連する懸念事項である「不飽和状態（酸化性状態）かつ高 pH 環境での不動態破壊型化学種によるオーバパックの局部腐食」、「非膨潤性の二次鉱物である Laumontite やバーチェリンの沈殿による緩衝材の膨潤特性変化及び止水性の低下」、「石英の溶解と再沈殿に伴う緩衝材の膨潤特性変化及び止水性の低下」に関しては、リファレンスケースからの挙動の差異は見られなかった。

ii) モンモロロナイト溶解速度

モンモロロナイト溶解速度をリファレンスケースの 1/10 及び 10 倍としたケースについて検討を行った。

まず、「不飽和状態（酸化性状態）かつ高 pH 環境での不動態破壊型化学種によるオーバパックの局部腐食」という懸念事項については、モンモロロナイト溶解速度をリファレンスケースの 1/10 としたケースについてのみ、緩衝材最内側部の飽和直前の pH が若干上昇して 11 を上回ることとなり、塩水系地下水あるいは再冠水過程での塩の濃縮の影響で不動態破壊の条件が成立した場合の局部腐食の可能性がリファレンスケースの場合よりも否定し難くなるものと考えられる（図 4.2-16）。この点についても、セメント溶脱及びベントナイト変質についての化学と物質移動の連成解析を実施し、より定量的に検討することとした。なお、溶解速度を 10 倍としたケースについては、リファレンスケースからの差異は見られなかった。

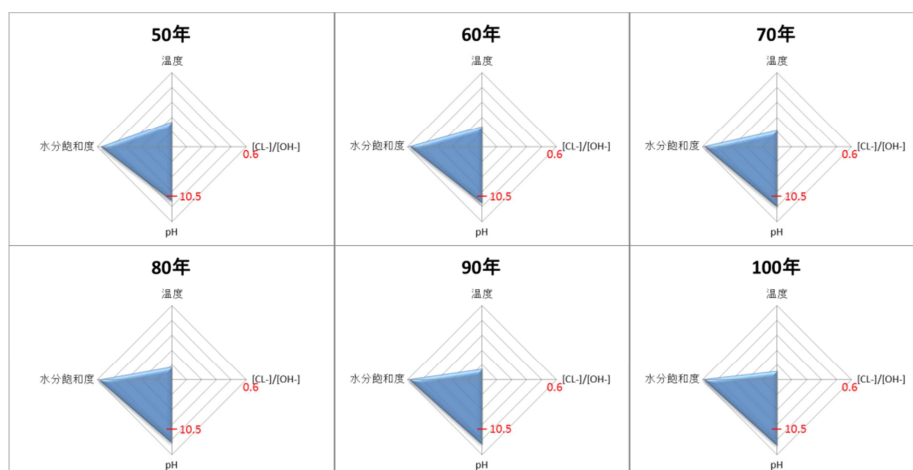


図 4.2-16 オーバーパックの不動態破壊型局部腐食の生起可能性に関するレーダーチャート（モンモリロナイト溶解速度 1/10 のケース）

リファレンスケース及びモンモリロナイト溶解速度に関する2つの代替ケースについての1000年後のpH、モンモリロナイト濃度及びLaumontite濃度の解析結果を比較した結果が図4.2-17である。本例題において、緩衝材のpH緩衝性は主としてモンモリロナイトの溶解によるものであるため、モンモリロナイトの溶解速度を変化させることで、緩衝材中のpH分布は顕著に変化することとなる。モンモリロナイトの溶解速度をリファレンスケースの10倍としたケースでは、モンモリロナイトのpH緩衝性が高いために、pHの高い領域はコンクリート支保の直近に限られており、緩衝材の内側は比較的低いpHに保たれている。このため、モンモリロナイトの溶解及びLaumontiteの生成個所も緩衝材外縁部とオーバーパック直近（バーチェリン生成によるpH上昇の影響）に限られている。他方、モンモリロナイトの溶解速度をリファレンスケースの1/10としたケースでは、モンモリロナイトのpH緩衝性が低いために、緩衝材中のpHはほぼ一様となっている。このため、モンモリロナイトの溶解及びLaumontiteの生成も緩衝材中でほぼ一様に生じている。このことは、セメンテーションによる影響がLaumontiteの生成が比較的少量でも生ずる場合には、モンモリロナイトの溶解速度が小さい場合にむしろ全域に広がる可能性があることを示唆しているとも言える。セメンテーションについては、二次鉱物の生成量のみならず、生成する領域の広さについても注意深く検討する必要がある。反応速度論的な検討が重要となる可能性が考えられる。この点についても、後述するセメント溶脱及びベントナイト変質についての連成モデルによって定量的に検討することとした。なお、石英の溶解・沈殿挙動に関してはケース間に顕著な差異は見られなかった。

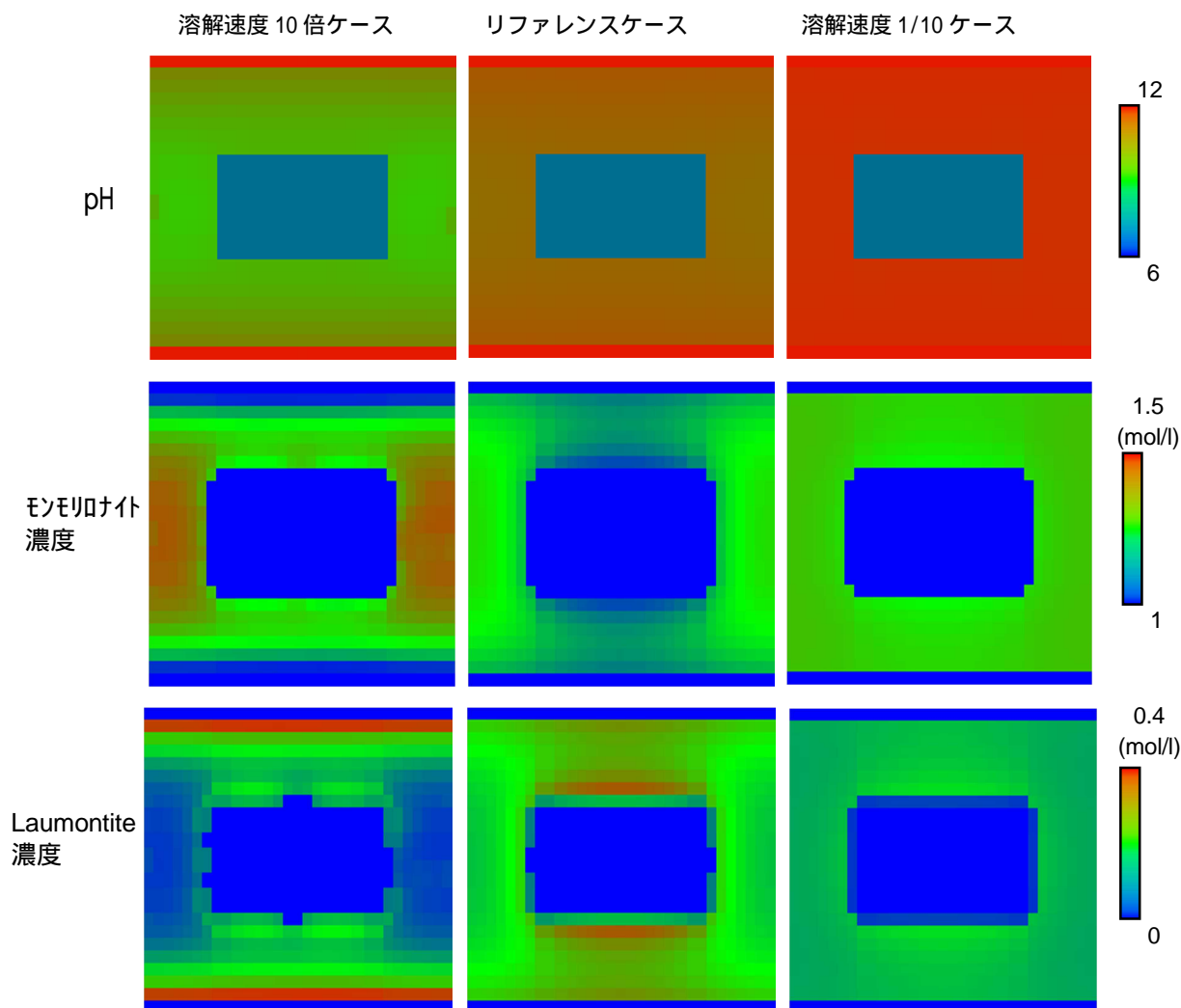


図 4.2-17 モンモリロナイト溶解速度の影響(廃棄体中央坑道方向鉛直断面 ,1000 年後)

4.2.5 シナリオシミュレーション手法に関するまとめ

本手法は、これまでに述べた通り、ニアフィールド現象の特徴に起因する長期予測の難しさのうち、特に、複雑性やダイナミクスについて、従来のシナリオ解析におけるヒューリスティックによる判断を補完する手法として、ツールとして開発するとともに、提案した手法の適用可能性、有効性の検討を進めてきた。本研究で開発したシナリオシミュレーション手法は、多様なプロセスやプロセス間の相互作用の定量的あるいは定性的な特徴を現状の知見レベルに応じて近似的に表現したモデルを速やかに構築し、例示的な解析を行うという意味で有用な技術と考えられる。また、ローカルルール処理に関する計算効率が高く、このため、原則的には、様々なケースについての解析を行い、シナリオ分岐の可能性を探索するという目的に適しているといえることができる。

例題 1 では、熱出力の異なる多数の廃棄体をパネル内に配置する際の熱解析という複雑な問題に対して、操業・閉鎖作業をエージェントの行為として、定置後の熱的プロセスをセルラーオートマタとして取り扱う手法により、従来の廃棄体単体についての精緻な熱解析では予想が困難であった「緩衝材中最高温度の定置順序や坑道閉鎖のタイミングへの依存性」といったダイナミックな挙動についての理解を改善することができた。

例題2では、シナリオの検討過程で行われるニアフィールドの状態変遷の検討において、従来、ヒューリスティックな思考過程が含まれることによる透明性や追跡性を低下、あるいは「多数の多様なものの相互作用を考えることの限界」に起因する種々のバイアスの介在する可能性があったことに対して、この段階の判断と思考をアルゴリズムとして「可視化」するための手段として多変量セルラーオートマタによる THMC の状態変遷の記述を試みた。さらに、その結果に基づいて、安全機能への影響の観点から結果を考察し、安全機能に関する懸念事象の抽出を行った。その上で、現象理解の不足による不確実性や、本手法におけるルールの簡略化等によりもたらされる不確実性が安全機能へ及ぼす影響について調べるために、パラメータを変動させてシナリオ分岐の可能性に関する検討を実施した。

これらの例題での試行を通じて、マルチエージェントシミュレーションや多変量セルラーオートマタを用いたシナリオシミュレーション手法は、従来の専門家によるヒューリスティックを補完する手法として有効に利用できる可能性を示せたものと考えられる。

なお、解析技術的な観点からは、設定するローカルルールは、基本的に陽解法的なものであるために、解の不安定性が生ずる場合やタイムステップに制約条件が生ずる場合がある。このような観点から、上述した例題への適用を通じて、本年度開発したシステムの計算効率や適用性をさらに高めるための課題として以下が挙げられた。

- ・可変タイムステップを用いることにより、上述した制約条件のためにタイムステップを短くせざるを得ない状況においてタイムステップを減少させるとともに、定常状態に近い期間にはタイムステップを拡大することによって計算効率を高める
- ・解の不安定性のために生ずる空間あるいは時間的振動がシナリオの表現という目的に照らして問題とならないものであると判断される場合に、空間あるいは時間的な移動平均をとる等の措置によって平坦化する
- ・種々の状態変数が最低限満足すべき制約条件（非負であること、所定の上下限の範囲内にあること、等）を容易に設定することの可能なルールクラスの設定
- ・各状態変数のみではなくそれらの勾配や時間変化分の表示等のシナリオの特徴をより明瞭なものとするための様々な出力形式の充実

4.3 ニアフィールド環境変遷に関する熱-水-応力-化学連成解析技術の開発

4.3.1 熱-水-応力-化学連成解析ツールの整備

本研究で対象とする熱-水-応力-化学（THMC）連成解析技術は、前節に述べたシナリオシミュレーションによって抽出された長期安全性に関する種々の懸念事項及びシナリオ間の分岐点にあたる臨界条件等に対して、必要に応じて優先順位をつけつつより定量的な解析を実施することによって、安全規制上の判断において求められる定量的な情報を提供することを目的とするものである。また、この際、不確実性の影響に対して頑健な知見を得るために、汎用のモデル開発環境を用いて複数のモデルオプションを比較することが重要となる。さらに、種々のスケールの室内試験や原位置試験あるいはナチュラルアナログ等との比較を通じてモデルの妥当性を検証し、本手法全体としての信頼性の向上を図ることも求められる。

以上を考慮して、本研究で開発する THMC 連成解析ツールは、シナリオシミュレーションによって抽出される様々な懸念事項やシナリオ分岐の可能性に対する「受け皿」として、多様な連成問題に適用可能な柔軟性をもつものでなければならない。また、モデル不確実性の影響を把握するためには、種々の競合するモデルオプションを実装し定量的な比較を行うことの容易

なものであることも必要である。さらに、モデルの妥当性の検証のためには、地層処分システムの体系や時間スケールのみならず、種々のスケールの室内試験や原位置試験あるいはナチュラルアナログにも適用可能なものであることが求められる。

以上を勘案して、本研究では汎用のマルチフィジックスモデル開発環境である QPAC⁽¹⁷⁾を用いて、汎用性のある THMC 連成解析ツールを開発することとした。

(1) マルチフィジックスモデル開発環境 QPAC

QPAC⁽¹⁷⁾は、非線形プロセスを含む多様な物理・化学的現象の連成問題を連立された偏微分方程式群や微分代数方程式群として定式化し、数値的に求解することの可能なモデル開発環境である。既存の一般的な THMC 連成解析ツールが、対象となる方程式群をモデル内に実装しており、方程式そのものを変更することは難しいのに対して、QPAC では、パラメータやオプションの設定だけでなく、偏微分方程式群や微分代数方程式群も入力ファイルに読み込むことができるため、新規のプロセスに対して柔軟に対応することが可能であり、シミュレーション中においても動的に変更することができる点が特徴である。

QPAC は、材質や特性の異なる複数のサブシステムから成る複合的なシステムにおけるマルチフィジックス問題に適用することが可能である。各サブシステムには、それぞれ別の方程式系を定義することができ、また、各サブシステムは複数のコンパートメント（コントロール・ボリュームとも呼ばれる）に分割される。

QPAC の取り扱う微分方程式群と代数方程式群から成る連立方程式系は、極めて一般的な形式のものであり、全ての変数を U と書くと、次のように表現することができる。

$$m(\dot{U}, U, t) = f(U, t). \quad (4.3-1)$$

ここで、 m は質量関数と呼ばれる行列であり、代数的変数に対応する m の行は 0 となり、 f の対応する要素によって表現される代数方程式となる（この形式は、特に、化学における質量作用式や種々のパラメータの他の状態変数への依存性を記述する際に頻繁に用いられる）。より具体的には、あるコンパートメント内のエネルギーや質量等の保存性の変数 u_c についての方程式は次のような形式で表現される。

$$\dot{u}_c = \sum_I (\pm) F_I(u, t) + S_C(u, t). \quad (4.3-2)$$

ここで $S_C(u, t)$ は、当該コンパートメント内のソースであり、 $F_I(u, t)$ は、このコンパートメントの各インターフェイスを通過するフラックスである。インターフェイスのフラックスには符号の規則があるため、 Σ 内の項はプラスかマイナスの符号を持つこととなる。以上のようなフレームワークを用いることによって、それぞれがコンパートメントに分割されるような複数のサブシステムから成る複合的なシステムであれば、QPAC はかなり一般的な連立微分方程式や連立代数方程式を解くことが可能となっている。

QPAC では、原則として、連立偏微分方程式を空間的に離散化する際に、有限体積（またはコントロール・ボリューム）法を用いる。有限体積法では、発散項を含む偏微分方程式の体積積分を発散定理（体積で平均した変数を用いることで元の偏微分方程式を常微分方程式に書き換える定理）を用いて、面積分に変換することができる。このアプローチの利点は、以下に挙げる通りである。

- ・ 構造グリッドが必要ではない
- ・ 不均質なジオメトリに関する問題に対応可能
- ・ あるボリュームに入るフラックスは隣のボリュームから出るフラックスと同一であるた

め、局所物理量が保存される

- ・ 境界条件の適用が容易

(2) QPAC Player を用いた熱-水-応力-化学連成解析ツールの開発

前節で述べたように、QPAC は汎用性の高いマルチフィジックスモデル開発環境であるが、モデル構築のためには、その都度 QPAC シンタックスと呼ばれる言語を用いた新たなプログラミングが必要となる。このため、THMC 連成解析に従事する幅広いユーザーが利用可能な形態とはなっていない。そこで、本研究では QPAC によって作成した具体的なモデルの実行形である QPAC Player の機能を用いて様々な解析体系、プロセス、及び各プロセスについてのモデルオプションをライブラリやケースファイルとして整備しておき、これらの中から必要なものを選択して組み合わせることにより、一定の汎用性とユーザビリティを両立させることのできるツールの開発を行った。

本研究では、後述するように、スウェーデンにおける原位置の連成試験である CRT (Canister Retrieval Test) 及び処分システムの例として第 2 次取りまとめの人工バリアシステムの体系を 2 次元及び 3 次元でモデル化しており、これら合計 4 種類の解析ジオメトリのケースファイルの中から選択できるようにしている。また、表 4.3-1 に示すプロセスモデル (流体移動についてはモデルオプションを含む) 及びパラメータ間の相関関係 (相互依存性) についてのモデルを、本研究でモデルライブラリとして整備しており、これらを組み合わせて連成解析を行うことが可能である。各プロセスモデルについての概要を以下に示す。個々の具体的な内容については、添付資料 -C を参照されたい。

表 4.3-1 本研究で整備した QPAC のプロセスモデル及びパラメータ間の相関関係

	熱	水理(流体)	力学	化学
熱	発熱 熱伝導(熱拡散モデル)	蒸発・凝固	熱膨張	
		粘性の温度異存性	粘性係数の温度依存性	反応速度定数温度依存性 平衡定数温度依存性 拡散係数温度依存性
水理 (流体)	対流による熱移動 蒸気による熱移動	流体移動(多相流モデル / Richardsモデル/ 非ダルシーモデル) 蒸気の輸送	ベントナイト膨潤	溶質の移流
	ベントナイト熱伝導率の 水分飽和度依存性		ベントナイト力学特性の 水分飽和度依存性	
力学	熱伝導率の密度依存性	密度・空隙率変化と 透水係数変化の相関関係	粘弾性変形モデル	密度・空隙率変化と 拡散係数の相関関係
				溶質の拡散 液相化学種の反応 鉱物の溶解・沈殿 イオン交換
化学		鉱物溶解・沈殿による 透水係数の変化	ベントナイト力学特性のイオン型 依存性	鉱物溶解・沈殿による 拡散係数の変化
	プロセス及びモデル		パラメータ間の相関関係	

(a) 熱に関するプロセス

廃棄体発熱量（あるいは温度）を時間に依存した関数として与える必要があり、これが熱移動に関する内部境界条件となる。また、熱移動プロセスとしては、熱伝導と対流を考慮しており、前者については拡散モデルとして表現している。なお、対流については、温度の異なる水の密度差に起因する流動は考慮しておらず、後述する流体移動モデルによって算出される水や水蒸気の移動に伴う熱の移動のみが考慮されている。

温度変化に伴う相変化（蒸発と凝固）が考慮可能であり、また、流体と固体の熱膨張も合わせてモデルに含めることができる。なお、緩衝材熱伝導率の水分飽和度依存性は、パラメータ間の相関関係を表現する代数方程式として定式化されている。

(b) 水理（流体）に関するプロセス

本研究で整備したモデルライブラリーには、水と蒸気の移動に関するモデルが含まれている。これらの流体移動は、多相流モデルあるいは単相不飽和の Richards モデルによって表現される。また、後述するように、CRT の試験で観察された飽和過程の遅延効果を再現するために導入された非ダルシーモデルのオプションについても合わせてモデルライブラリーに含まれている。現状では、水素ガス等の他の流体に特化したモデルはライブラリーに含めていないが、多相流モデルを一般的な形式で定式化しているため、将来、拡張を行うことは比較的容易である。

ベントナイト空隙水については、ベントナイト層間に位置する固定された水と、流動することの可能な外部空隙水とを区別して取り扱うことも可能である。

他のプロセスに含まれるパラメータとの相関関係としては、多孔質媒体の圧縮による空隙率の変化や化学的プロセスによって空隙率が変化した場合の透過特性の変化を考慮することが可能である。

(c) 力学に関するモデル

ベントナイトの力学的変形については、弾性的応答とクリープを考慮した粘弾性モデルを用いている。また、ベントナイトの膨潤については、ベントナイトの密度及び水分飽和度に応じて膨潤圧が規定される経験的なモデルを代数方程式として定式化している。

(d) 化学に関するモデル

化学に関しては、溶質の移流と拡散及び化学反応（液相化学種の分種化、鉱物の溶解・沈殿、及びベントナイトのイオン交換）をモデル化している。ここで、液相化学種の分種化とベントナイトのイオン交換については、瞬時平衡を仮定して代数方程式（質量作用式）として定式化しているのに対して、鉱物の溶解・沈殿は速度論モデルで表現しており、瞬時平衡を達成するような速い溶解・沈殿反応については速度定数を十分に大きく設定することによって近似的に平衡を成立させることとしている。

モデルライブラリーには、ベントナイト変質モデルとして、陽イオン交換のみを考慮したもの、及びセメント影響によるモンモリロナイトの溶解や二次鉱物の沈殿を含めたものの二種類が含まれている。ただし、現状では、後者の計算負荷が大きいものであるために、前述した熱-水-応力モデルと連成させることのできる化学モデルは前者（陽イオン交換のみを考慮したもの）に限られている。セメント影響によるモンモリロナイトの溶解や二次鉱物の沈殿を含めた化学モデルは、現状では、水分飽和状態の1次元問題に限られている（ただし、温度分布の時間変化をユーザーが規定して対応する化学的変遷をシミュレートすることは、関連する反応の速度定数や平衡定数の温度依存性が設定可能であれば、実施可能である）。

二次鉱物の沈殿によるベントナイトの空隙閉塞のために、透過係数（透水係数）や実効拡散係数が変化することは現状のモデルにおいても表現可能である。ただし、セメント影響によるモンモリロナイトの溶解や二次鉱物の沈殿を含めた化学モデルは1次元に限定されているため、流体移動における透過係数変化の利用価値は限定的なものとならざるを得ない。

本年度開発した THMC 連成解析ツールでは、ジオメトリについてのメニュー（原位置試験体系（CRT 試験）か処分場体系（第2次取りまとめ）及び2次元モデルか3次元モデル）を選択し、さらに、上表に相当するどのプロセスを考慮して解析を行うかを選択することによって、対応する QPAC player ファイルが選定され、その後、QPAC player の GUI 上で入力パラメータ値等の詳細を設定することにより解析を実施することができる。また、出力も QPAC player の GUI 上で表示される。本ツールの具体的内容についても、添付資料 -C を参照されたい。

4.3.2 熱-水-応力-化学連成解析ツールを用いた解析の実施

前項で整備した連成解析ツールを用いて、既往の解析事例と同一のモデル・パラメータを用いた再現による解析ツールの機能の検証に加え、現象理解等の不確実性に基づいた複数のモデルオプションの提案と解析の実施によるモデルオプション間の比較検討を目的とした、既往研究との比較解析を実施した。

はじめに、比較検討を行うための対象とする事例選定のために文献調査を行った。ここでは、緩衝材の再冠水挙動に着目することとし、実験と実験結果に対する解析結果が提示されている事例を選定した。さらに、前述したシナリオシミュレーションの結果から抽出されるシナリオ分岐またはその可能性がある現象について本ツールを用いた連成解析を実施した。

(1) 緩衝材の再冠水挙動に関する既往研究との比較解析

(a) 既往の研究事例の文献調査

調査対象とする事例選定のための文献調査は、以下の点に着目して実施した。

- ・緩衝材の再冠水と均一化過程における挙動についての実験的知見の概要
- ・各実験に付随して行われた THMC 連成解析の再現性等についての情報
- ・実験及び対応する解析を通じて得られた課題

対象とした研究事例は、カナダ、スイス、スウェーデン、及び中国の4つである。また、これらの事例では、小規模の室内試験と実規模の原位置試験を組み合わせ実施しており、前者では制御された条件下で個別現象についての実験を行い、後者ではこれらの現象を複合した場合の全体的な挙動を観察するとともに、施工時に生ずる不均質性についての知見を得ることも目的としている。

i) カナダの URL における研究事例

カナダの URL では、緩衝材（ケイ砂・ベントナイト混合体）の性能に対する再冠水及び加熱の影響を調査するために、2つの実規模原位置実験（すなわち Isothermal 試験（ITT）と Buffer/Container 実験）が行われている。

Isothermal 試験は、温度勾配の影響がない場合の緩衝材（ナトリウム型ベントナイトとケイ砂の混合物（混合比 50:50）、初期乾燥密度 $1,720\text{kg/m}^3$ 、初期飽和度 84%、初期空隙率 0.359）と岩盤間の水理学的相互作用を調査することを目的として、AECL の地下研究施設（URL）の 240m レベルでカナダ楕状地の花崗岩（亀裂の無い難透水性岩盤）中に掘削された直径 $1.24\text{m} \times$ 深さ 5m の試錐孔で行われたものである。試錐孔の上部には、厚さ 1.25m の HPC（早強ポルトランドセメント）のプラグがかぶせられ、このシステムが6年半にわたりモニターされた。周

辺岩盤から緩衝材への水流入率は、緩衝材の設置前に水流入を測定し、周辺岩盤の動水勾配をモニターすることによって評価された。試験後に緩衝材材料をサンプル採取し、含水率及び密度の変化が測定されている。

Buffer/Container 実験 (図 4.3-1) では、電熱器が緩衝材内に設置され、廃棄体からの熱出力をシミュレートするために使用された。加熱が約 896 日間 (約 2 年半) にわたり行われ、緩衝材及び周辺岩盤系の熱的・水理的・力学的応答をモニターした。

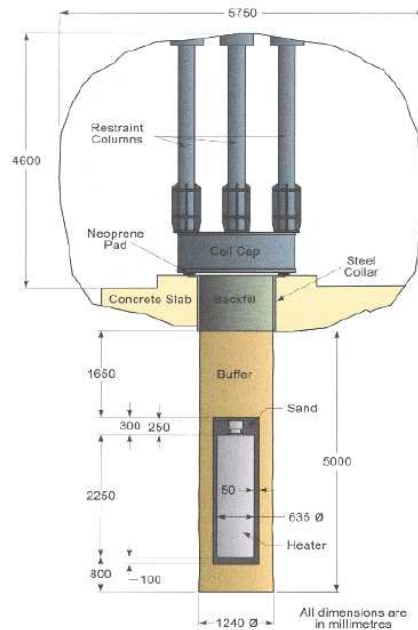


図 4.3-1 Buffer/Container 実験のジオメトリ⁽¹⁸⁾

実験において測定された項目は、緩衝材及び容器を定置する前の処分孔への水の流入量、処分孔周辺岩盤内の間隙水圧、緩衝材内のサクション (含水率)、岩盤に対して及び緩衝材内で作用する圧力、緩衝材と周辺岩盤における Buffer/Container 実験での温度の分布及び変遷、及び Buffer/Container 実験での容器の鉛直方向の変位、である。また、実験終了時に、緩衝材の含水率と密度を測定するために、広範なサンプル採取が行われた⁽¹⁹⁾。

実験結果で明らかになったところでは、数年間 (ITT で 6 年半) 注水しても、緩衝材は、その中心においても、また緩衝材と岩盤との界面の近くにおいても、依然として完全な飽和からはほど遠かった^{(18) (20)}。

各試験における緩衝材の水分飽和過程及び力学的応答をモデル化するために、数値シミュレーションが CODE_BRIGHT を用いて実施された。解析に用いる不飽和緩衝材の緩衝材含水率とサクションの関係は、3 つの異なるタイプの膨潤試験の結果から導き出されており⁽²¹⁾、この結果に基づき、表 4.3-2 に示す Van Genuchten タイプの水分飽和特性曲線が得られている。

表 4.3-2 緩衝材及び花崗岩のモデル化に用いられた水理パラメータ⁽¹⁷⁾

Material Parameters	Buffer	Granite Rock
Water retention curve (Pa)	$S_r = \left[1 + \left(\frac{S}{P_0} \right)^{1/(1-\beta_1)} \right]^{-\beta}$ $P_0 = 7.0; \beta_1 = 0.73$	$S_r = \left[1 + \left(\frac{S}{P_0} \right)^{1/(1-\beta_1)} \right]^{-\beta}$ $P_0 = 0.7; \beta_1 = 0.33$
Hydraulic conductivity (m/s)	$k = k_0 \cdot S_r^{1/2} (1 - (1 - S_r^{1/\beta})^\beta)^2$ $k_0 = 1 \times 10^{-12}; \beta = 0.3$	$k = k_0 \cdot S_r^{1/2} (1 - (1 - S_r^{1/\beta})^\beta)^2$ $k_0 = 4 \times 10^{-13}; \beta = 0.345$
Porosity	0.369	0.005
Dry density (Mg/m ³)	1.73	2.63
Initial saturation (%)	84.3	100

Buffer/Container 実験の試験終了時緩衝材内の水分布の測定結果と、間隙水圧モデルによる計算結果との比較を図 4.3-2 に示す。

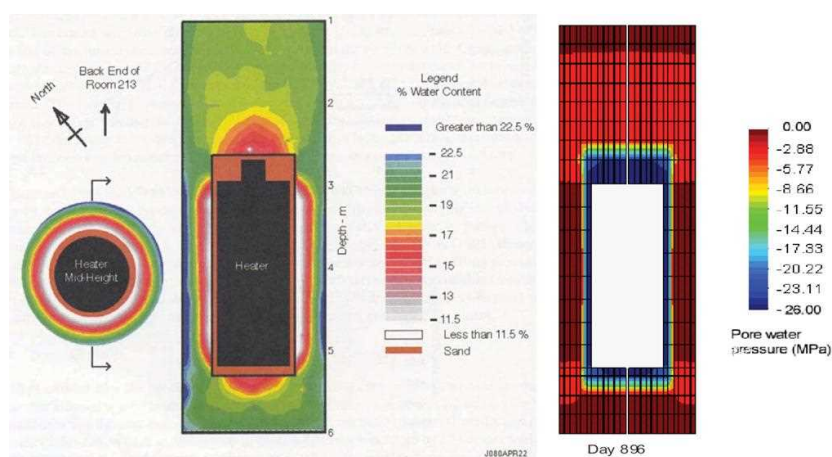


図 4.3-2 Buffer/Container 実験の試験終了時緩衝材内の水分布の測定結果(左: Graham et al.⁽²²⁾) と同等の間隙水圧モデルによる計算結果(右: Guo⁽¹⁸⁾)

Guo⁽¹⁸⁾によれば、Buffer/Container 実験においてヒーター付近の乾燥した領域で緩衝材が収縮する一方、含水した周辺部の膨張が生じている。また、適用された流体力学モデル、熱流体モデル及び熱流体力学モデルは、測定された温度データ及び水理学的データを適切に代表することができたとしている。

ii) FEBEX I 及び II 実験

実規模人工バリア実験(FEBEX = Full-Scale Engineering Barrier Experiment)は、結晶質母岩(スイスのグリムゼル地下研究施設: 花崗岩と花崗閃緑岩。透水係数は約 1×10^{-11} m/s)における「原位置」実規模試験、及びスペイン(CIEMAT)の地上施設において縮尺 1/4 で実施されたモックアップ試験、及び一連の関連実験試験とモデリング作業から成る、スペインの放射性廃棄物管理公社(Enresa)が主導した国際協力研究プロジェクトである。FEBEX プロジェクトは 1994 年に始まり、人工バリアシステムの取り扱いと建設の実現可能性の実証、並びにニアフィールドにおける THMC プロセスの研究を目的として 2 つの主要段階に分けて実施された⁽²³⁾。FEBEX

原位置試験の体系を図 4.3-3 に示す。

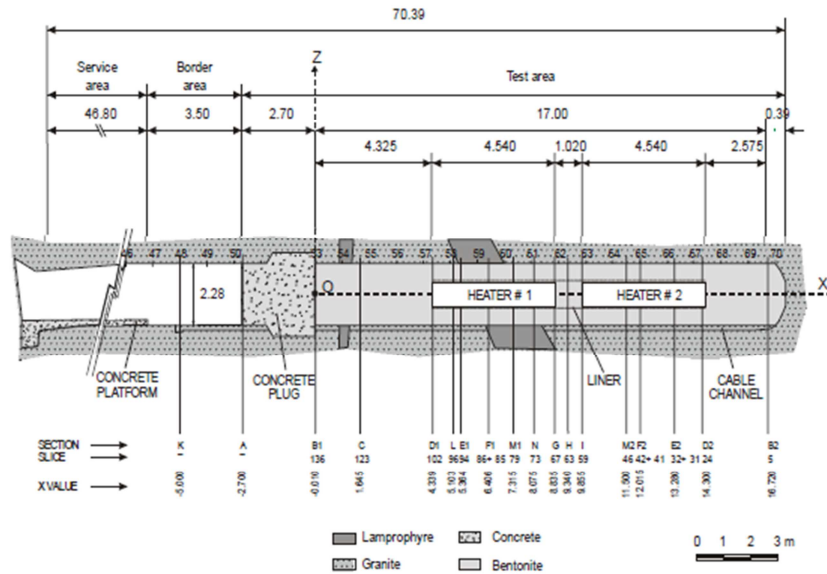


図 4.3-3 FEBEX 原位置試験の詳細レイアウト⁽²³⁾

FEBEX 試験で使用されたベントナイトは、スペインの天然ベントナイト鉱床から得たものであり、主な特性は以下のようなものである⁽²³⁾。

- ・モンモリロナイト含有率 (%) : 92±3
- ・初期乾燥密度最大 1,700Kg/m³ , 初期含水率は最大 14.3%の圧縮成形ブロック
- ・Na : Ca 比 = 約 1 : 1
- ・平均膨潤圧 : 5MPa (乾燥密度 1,600kg/m³)
- ・平均飽和透水係数 : 4×10⁻¹⁴m/s (乾燥密度 1,600kg/m³)

FEBEX モックアップ試験は、スペインの人工バリアシステムの構成を 1/4 スケールでシミュレートするために設計された。試験は地表で行われたため、天然の地下システムに関連する不均質性を回避することができた。冠水過程は完全に制御されており、境界条件は原位置試験の場合よりも適切に定義されていた。

粘土バリア及び周辺岩盤で発生する各種 THM プロセスを監視するために、主要 FEBEX 試験のそれぞれで 500 ~ 650 台のセンサーが設置された。測定された変数は温度、湿度、流体圧力、全圧、閉じ込め構造の変形、及び水圧であった。

FEBEX 原位置試験の初期運用段階の後に、以下の観測が行われた⁽²³⁾。加熱なしの場合、岩盤近くのベントナイトの含水率は約 17% から約 30% に上昇したが、加熱が行われた場合、電熱器近くのベントナイトの含水率はその初期値よりも低下している。このように、ヒーター付近で緩衝材の乾燥が生じたにもかかわらず、ベントナイトの膨潤により、緩衝材ブロックの間及び周囲に当初存在していた間隙が除去されたことがわかる。ベントナイトの含水率が上昇したところでは、膨潤により密度の低下が生じ、岩盤近くでは乾燥密度が初期値の 1,700kg/m³ から約 1,450kg/m³ まで低下した。

緩衝材の含水に伴って、ベントナイト中の微量の溶けやすい鉱物（硫酸塩、炭酸塩及び塩化物）の溶解、さらに溶解塩のヒーター方向への移動が生じた。そのような化学反応-物質輸送の影響は、加熱されていなかった領域よりも加熱されていた領域の方が急速であった。

THM 及び THC モデリングの 3 つの段階が、CODE-BRIGHT を用いて 2000 年までの期間に実施された。図 4.3-4 は、Enresa⁽²³⁾におけるモデリング結果の例を示しており、ヒーター付近の

緩衝材の乾燥と岩盤近くの緩衝材の飽和を示している。初年度に達成された飽和のレベルは、その後の4年間でほとんど変わらなかった。

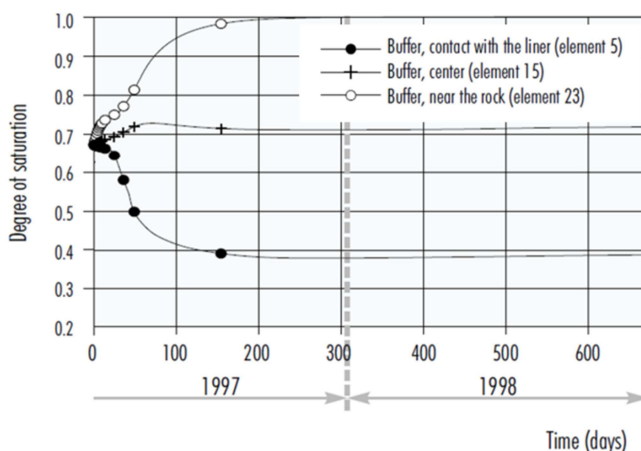


図 4.3-4 FEBEX 原位置試験の緩衝材中ベントナイト飽和過程のモデリング⁽²³⁾

THM モデリングの第三段階では、モニターしたデータと最もよく適合し、かつ使用されたパラメータの数値が実験室試験で得られた数値の範囲内にあることを証明することを目的としていた。このモデリングは、特に、緩衝材再冠水の数値及び期間がベントナイトの水分保持曲線に対して非常に敏感であることを示していた。Enresa⁽²³⁾によれば、このことは、これらの変数に関連して避けられない不確実性が常に存在する可能性があることを意味している。

FEBEX 原位置試験では、実験の初年度中に定常状態に達したように見えること、また、その後緩衝材の飽和状態に著しい変化がないことは注目に値する。緩衝材の外側部分は完全飽和に達しており、その領域における関連膨張は緩衝材中のベントナイトブロック間の隙間を埋めるのに十分であるが、緩衝材の内側部分の飽和度は最初に低下して、その後は低いままである。このことは、ベントナイト系緩衝材の内側部分の再飽和が極めて遅いことを示唆している。

iii) スウェーデンにおける CRT

CRT は、スウェーデンのエスボ硬岩研究所 (HRL) の深度 420m において SKB により 5 年間にわたって実施された実規模原位置試験であり、KBS-3 概念に従って設計されている。実験の概略図を図 4.3-5 に示す。

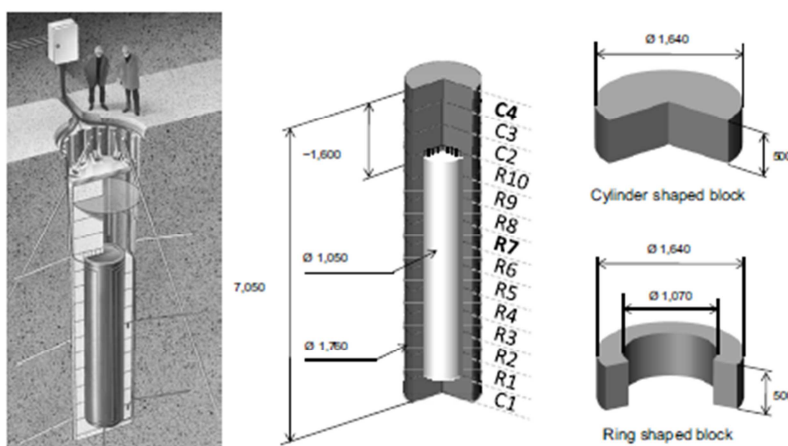


図 4.3-5 CRT の概略図⁽²⁴⁾

CRT の主な目的は、ベントナイト系緩衝材が完全に再冠水した後に、定置された廃棄物容器を回収するための技術を実証することと、試験中にベントナイト内での THM プロセスをモニターすることであった。

緩衝材湿潤プロセスを制御し、緩衝材再飽和速度を高めるために、多孔質のプラスチックフィルタ材料のストリップで構成されるフィルタが、隣接試験錐孔から地下水に接続され、試験錐孔壁の一部に取り付けられた。フィルタストリップは、緩衝材への給水を空間的にほぼ均質にしており、これによって実験結果の解釈が容易になったが、試験の境界条件がやや現実的ではなくなった。

緩衝材は、圧密ワイオミング・ベントナイト (Volclay MX-80) であり、円筒状及びリング状緩衝材ブロックが用いられている。また、緩衝材ブロックと試験錐孔壁の間のスロットは、ベントナイトペレットで埋められていた。

試験終了後の掘削時点における緩衝材の含水率、飽和度及び乾燥密度分布 (図 4.3-6) によると、緩衝材は、キャニスタの上方では飽和からほど遠かったが、キャニスタの両側では完全に飽和されていたことがわかる。このデータによれば、緩衝材乾燥密度の初期のばらつきは再冠水中に減少したが、完全にはなくならなかったこともわかる。

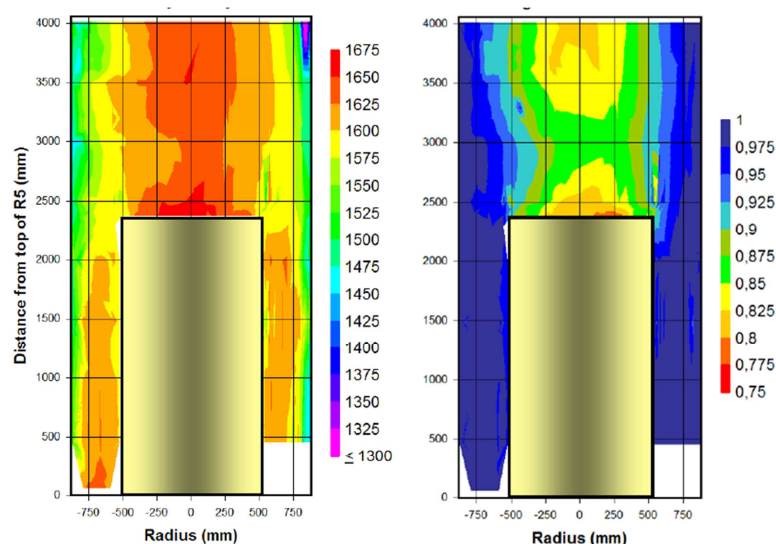


図 4.3-6 最大 5 年間の加熱・冠水の後に掘削したときの CRT での緩衝材の状態
乾燥密度 (kg/m^3) (左) と飽和度 (右) ⁽²⁴⁾

CRT の THM 挙動については、SKB が CODE_BRIGHT を用いてモデル化しており、このモデルが緩衝材特性及び均質化に関して行われた仮定に対して非常に敏感である。特に、以下に示すパラメータが飽和度の数値に依存しており有意な感度を示す。また、これらのパラメータの水分飽和度への依存に関するモデルはいずれも実験結果から経験的に求められたものであり、異なる条件への適用性に関しては不確実性が含まれると報告している。

- ・ サクション
- ・ 相対透過係数
- ・ 熱伝導率

実験結果の顕著な特徴は、水の流入が時間の経過とともに徐々に減少し、緩衝材の外側境界の水圧を上昇させなくては流入を継続することができなかったという点である。流入量の測定

結果は、境界で適用される水圧に対して明らかに敏感であるが、連成解析モデルはこのメカニズムを表現しておらず、むしろ再冠水がベントナイト内のサクションによってのみもたらされることを示している。

この結果を踏まえ、SKB⁽⁶⁾は、処分場での完全な再冠水は数千年間起こらない可能性があるとし唆している。特に、緩衝材が最も厚いまたは温度勾配の大きい場所では、緩衝材の外側部分の再冠水が内側部分の再冠水を制限または阻止する可能性がある。

同様に注目すべき点は、母岩中の水の動きが局所的であり、破碎中の流れによって支配されているような、より現実的な境界条件の場合、緩衝材再冠水挙動は、局所的な湿潤/膨潤及び連動的な化学的 - 水理学的変化が原因となって空間的にさらに複雑化する可能性があることである。

これらの点については、後述する解析及びモデルオプション間の比較において取り上げ、詳しく検討することとした。

iv) 中国でのモックアップ試験

中国では、ベントナイト系緩衝材材料に関して一連の室内試験のほか、さらに大規模な実験が実施されている⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾。これらの実験は、中国の処分場向けの緩衝材及び埋戻し材の候補とみなされている高廟子 (Gaomiaozi, GMZ) ベントナイトに焦点を置き、初期段階における圧密ベントナイト系緩衝材中の THMC プロセスの定量化を可能にし、数値モデリング及び詳細調査のための信頼できるデータベースを提供することを目的としている。この GMZ ベントナイトは、ナトリウムに富んだスメクタイト粘土であり、モンモリロナイト含有量は、MX-80 及び FEBEX ベントナイトのそれよりも少ないが、クニゲル V1 (Kunigel-V1) ベントナイトよりも多い。

実験装置は高さ最大 2m、直径 0.9m で、圧密 GMZ ベントナイトのブロック、内部温度を 90 に高めるために使用されるヒーター、及び (圧力約 0.5MPa、流量約 400 ~ 600g / 日) Beishan (北山) 地下水を注入するためのシステムを含んでいる。この実験装置は 2010 年に組み立てられており、少なくとも 4 年間運用する見込みである。

これまでのところ、わずかな予備的結果が発表されただけであるが、それらの実験データが示唆するところでは、圧密ベントナイトブロックの再冠水は複雑であり、ヒーター近くの高温によって誘発された乾燥のプロセスと外部境界での水供給によって生じた湿潤との間の競合によって強く影響を受けている。Wang et.al.⁽²⁸⁾の報告によると、ヒーターに近い領域には他の試験 (例えば FEBEX 原位置試験) で報告されたものと同様の乾燥現象の証拠がある。

モデリングに関しては、Chen et.al.⁽²⁶⁾と Wang et.al.⁽²⁸⁾が、ベントナイトの THM 挙動を予測するために LAGAMINE コードを開発し、適用している。このモデリングは、上述の他の大規模実験用に実行されたものと同様であり、CRT のような他の大規模試験で見られたタイプの挙動を再現している。

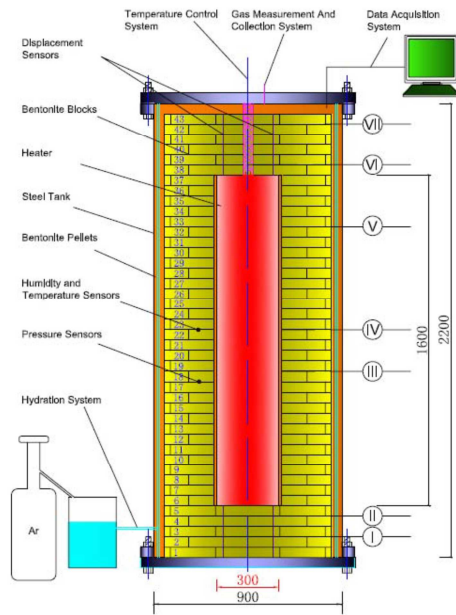


図 4.3-7 中国におけるモックアップ・テストの構成⁽²⁸⁾

Cui et.al.⁽²⁷⁾は、小規模実験室実験で圧密 GMZ ベントナイトの THM 挙動を調査し、温度制御されたセルの中に置かれたベントナイト資料のサクションについて、GMZ ベントナイトと他の代表的ベントナイト (MX-80、FEBEX、FoCa 及び Kunigel-V1) と比較している (図 4.3-8)。GMZ ベントナイトと MX-80 ベントナイトの膨潤能力が、FoCa、Kunigel-V1 及び FEBEX の各ベントナイトのものよりも高いことを示しており、Cui et.al.⁽²⁷⁾によれば、その理由は、GMZ 及び MX-80 ベントナイトのモンモリロナイト含有率の方が大きいこと、及びそれらがより多くのナトリウムを含有していることである。

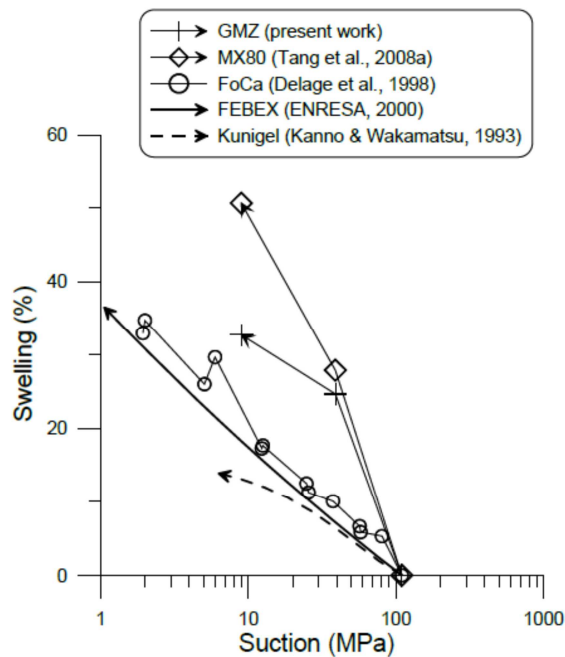


図 4.3-8 同一の初期サクションからの各種ベントナイトの膨潤挙動の比較⁽²⁷⁾

Pusch and Weston⁽²⁹⁾は、中国の GMZ ベントナイトを含めて、熱水処理した 3 つの膨潤性粘土の組成及び特性についての Xiaodong et.al.⁽³⁰⁾による最近の研究を考察し、処分場条件下での化学的変質にかかわるメカニズムを明らかにしたとしている（図 4.3-9）。この研究が示すところでは、混合層状粘土は熱水影響によって著しく変質することはなかったものの、スメクタイト GMZ 及び MX-80 ベントナイトは膨潤圧の相当部分を失い、透水係数と剛性の増大を示している。観察された最も顕著な化学的・鉱物学的変化は、最も低温の部分でのケイ酸の増加と最も熱せられた部分でのケイ酸塩鉱物、石膏及びカオリナイトの沈殿であり、後者が硬化の原因になったものと考えられる⁽³⁰⁾。この観察結果は、前述したシナリオシミュレーションにおいて指摘されたセメンテーションによる緩衝材安全機能低下の懸念に対応する知見の一つと考えられる。

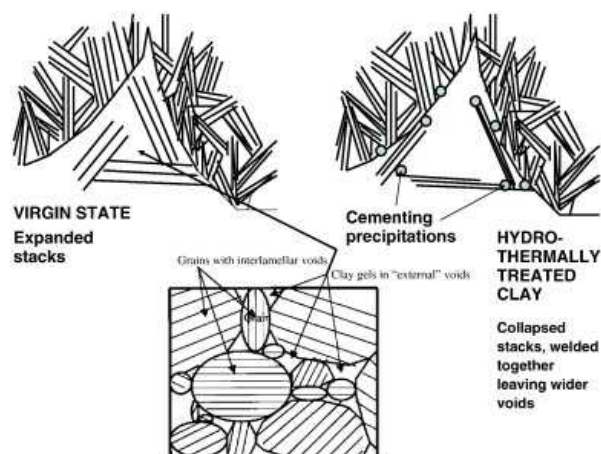


図 4.3-9 加熱による空隙の拡大に伴う透水係数の増大とケイ酸塩鉱物の沈殿に伴う剛性の増大を引き起こすと考えられるメカニズム

（挿入図は、水和とそれに関連する空隙中の粘土ゲルの成長による膨潤が生じる前の圧密粘土粒子を示す⁽³⁰⁾）

v) まとめ（現状のモデルの問題点）

前項までに述べたように、ベントナイト系緩衝材についていくつかの大規模実験がこれまでにに行われている。これらの実験は、廃棄体容器近傍での初期段階の乾燥、特に緩衝材の内側領域の水分飽和が遅延される可能性を明らかにしている。

これらの実験に対して行われたモデル化は、温度や相対湿度などについては適切と考えられるが、緩衝材中の水分飽和過程に関するモデルは、実験において見られた、初期の比較的速やかな冠水に引き続く緩衝材中の水分フロントの移動抑制については実験結果と整合的ではない。これまでに得られた実験的証拠は、緩衝材外部の再飽和が内部の飽和の進展を妨げるような一種の抑制効果を呈する可能性を指摘しているが、このような効果についてはこれまでのモデルの取り組みは十分とは言えない。また、この点について、ベントナイトの種類によって挙動は異なり、特に MX-80 ベントナイトは強いサクションと膨張能を示すため、モデル化の困難な材質と考えられる。

上記の「抑制効果」を考慮した場合、緩衝材周囲の吸水箇所が亀裂との交差部に限定される等の境界条件の不均質性の影響、及び実際の処分場で対象とすべき時間スケールでの THM 連成効果を通じて生ずる影響等についての評価が今後の課題になるものと考えられる。

(b) CRT 試験を対象とした比較解析

前項で述べた 4 つの研究事例の中から、以下の理由により比較解析の対象として、スウェーデンの CRT 試験を選定した。

- ・多くの実験データが公開されている
- ・SKB の許認可申請である SR-Site プロジェクトについての規制側 (SSM) のレビュー対象となっており、解析に関する仮定や入力データ等の情報がある程度示されている
- ・後述するようなモデリング上の問題点があり、次項で述べるモデルオプション間の比較のための格好の課題を含んでいる

CRT 試験については、前述したように、SKB によって連成解析モデル CODE_BRIGHT を用いた 1 次元解析が行われている。これに対して、SSM によるレビュー⁽³¹⁾の一環として、本研究において開発した連成解析ツールのベースである QPAC を用いた同じく 1 次元の解析が実施されている。CRT 試験に対応する 1 次元モデル体系を下図に示す。

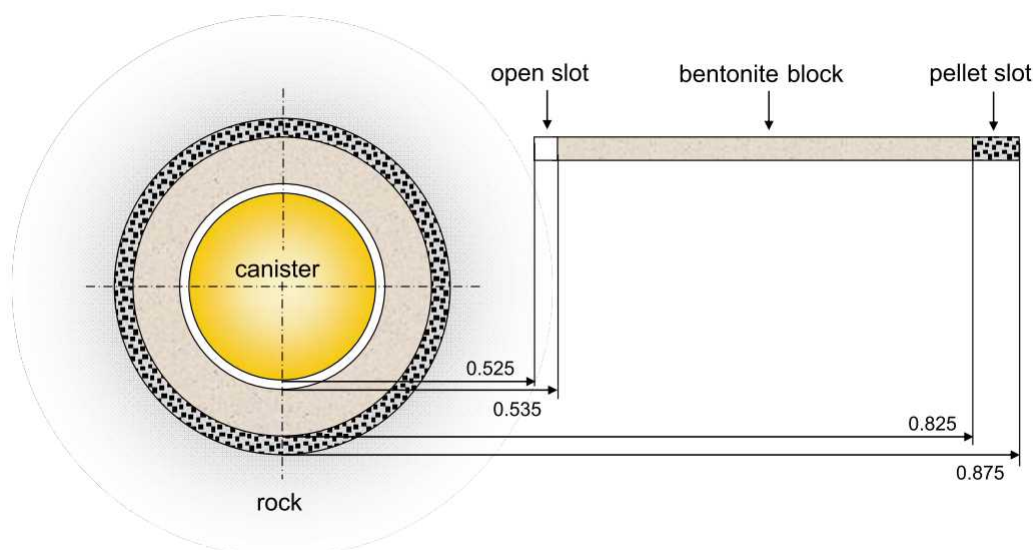
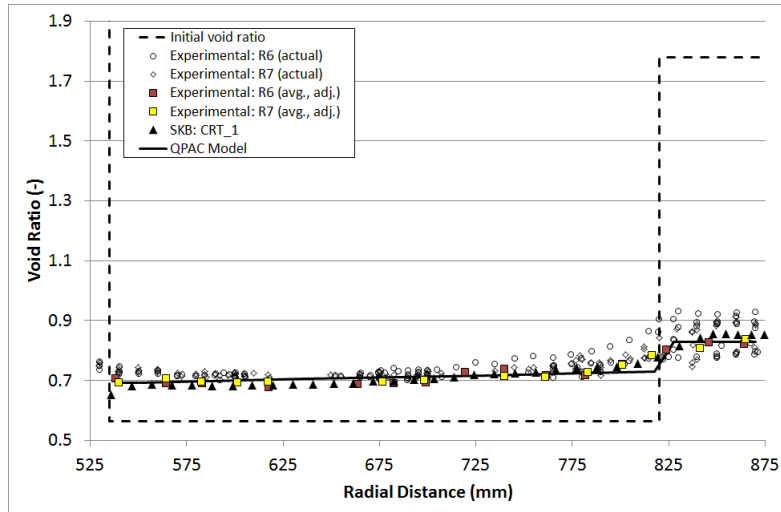
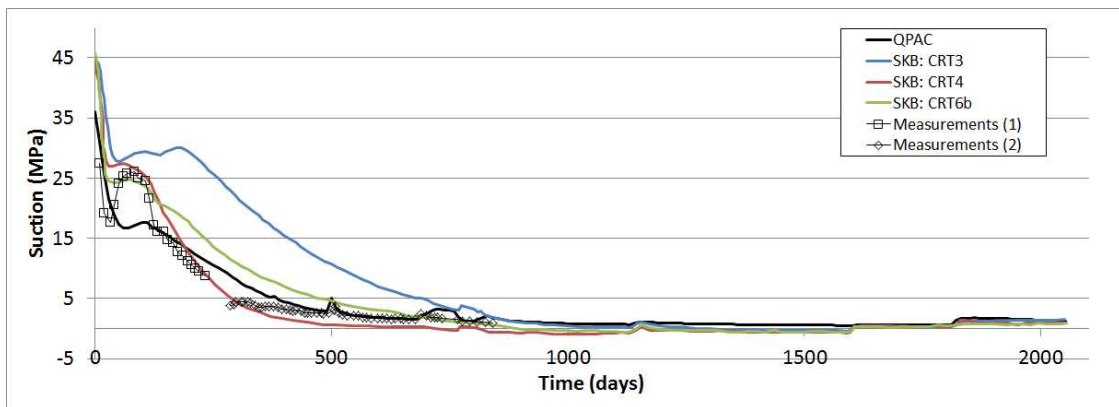


図 4.3-10 CRT 試験に対応する 1 次元モデル体系 (CODE_BRIGHT 及び QPAC 共通)

ポイド比とサクションについての CRT 試験の実験結果と CODE_BRIGHT 及び QPAC の解析結果の比較を図 4.3-11 に示す。ここで、Case 3 及び 4 は、それぞれ、絶対透過係数の小さいケースと大きいケースに対応しており、また、Case 6b は大きい絶対透過係数と想定される水分飽和度曲線の範囲内の低いものを組み合わせたケースである。SKB はこれらのうち Case 6b が実験結果に対する再現性が最も良いとしている。なお、下図に示す図中の QPAC による既往の解析例は、この Case 6b と対応するものである。これらのパラメータについては、実験結果及び二つの解析結果ともに比較的良い一致を示していると言することができる。また、緩衝材の再冠水挙動について、モデル間の比較を行った結果が図 4.3-12 である。緩衝材中の厚さ方向の中間点における水分飽和度の時間変化については、QPAC の解析結果 (黒い実線) 及び同じ条件の CODE_BRIGHT の解析結果 (THM 連成ケース: 緑色) とは良く一致していることがわかる。これは、力学的プロセスを考慮したモデルにおいては、冠水途上の緩衝材中の乾燥密度分布の変化 (外側の膨潤による密度低下と内側の圧縮による密度上昇) が表現されており、密度に依存するサクションの変化が再現されているためと考えられる。



ボイド比の空間分布



緩衝材内側表面付近のサクシオン時間変化

図 4.3-11 CRT 試験結果及び CODE_BRIGHT と QPAC 解析結果の比較

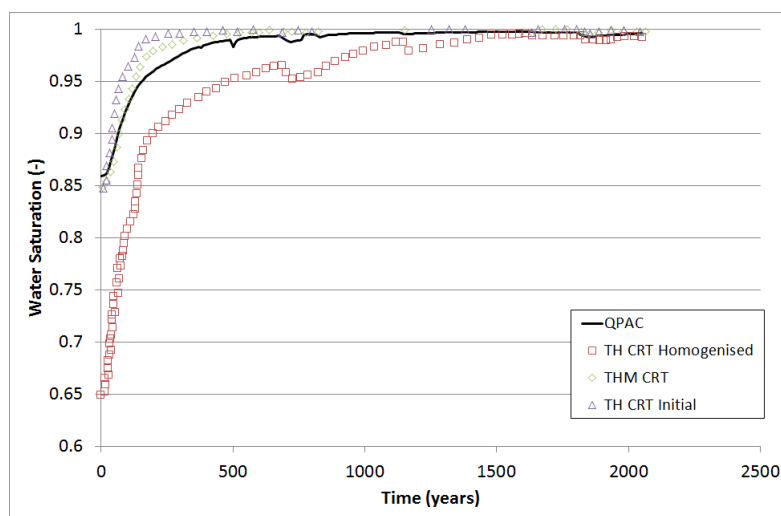


図 4.3-12 緩衝材中間点水分飽和度についての CODE_BRIGHT と QPAC 解析結果の比較

しかしながら、これらの解析結果と CRT 試験結果との間には顕著な不整合が見られる。図 4.3-13 は、緩衝材への水の累積流入量に関する試験結果と QPAC 解析結果を比較したものである。試験結果は、初期の水の流入後、一旦流入が鈍化する傾向を示すのに対して、解析結果では累積流入量が増大し続けている。また、試験においては、冠水を促進するために水圧を増大させており、この結果、水の流入が再開している（図 4.3-14）が、解析においてこのような水圧の履歴を反映したケース（黒い点線）における流入量の変化は微小である。試験結果に見られる冠水の抑制は、初期の冠水によって膨潤した緩衝材外縁部の透水性が低下することによるものと考えられるが、このような効果が CODE_BRIGHT 及び QPAC のいずれにおいても適切に表現されていないことがこのような顕著な不整合を生ずる原因になったものと考えられる。

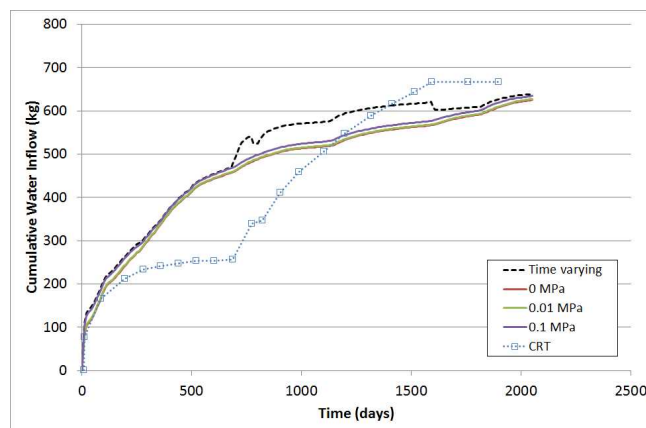


図 4.3-13 緩衝材への水の累積流入量についての試験結果（水色）と QPAC 解析結果の比較

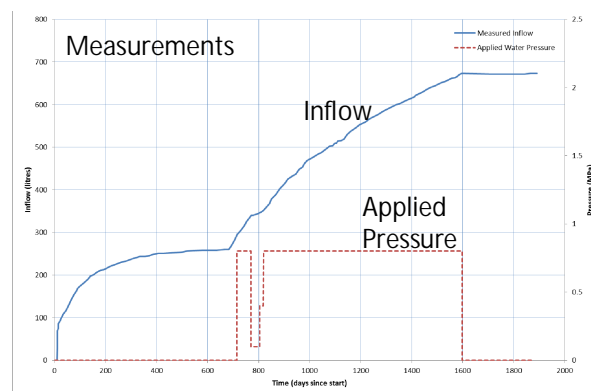


図 4.3-14 CRT 試験における外側境界条件（水圧）と累積流入量の関係

本研究の例題解析では、まず、SSM レビューの一環として行われたこれらの 1 次元モデルの解析を再現し、ベースとなった QPAC のモデルが本研究で開発したツールによって完全に再現できることを確認した。また、その後、同じモデルを用いて 2 次元及び 3 次元の解析を行うことにより、モデル構築の柔軟性等の観点から適用性の確認を行った。（結果については、後述するモデルオプションとの比較において示す）。

(c) モデルオプション間の比較

前項で述べたように、CODE_BRIGHT 及び QPAC の解析結果は、いずれも、CRT 試験において観察された緩衝材再冠水時の水の流入挙動（静水圧での流入の停滞及びその後の昇圧に伴う流入の再開）を再現できていない。そこで、ここでは、この点に着目して新たなモデルオプションを提案するとともに、対応する解析を実施した。

前出の FEBEX 試験において、冠水したベントナイト中の水の流れが動水勾配に非線形に依存していることに関する研究⁽³²⁾が行われている。

Sánchez et.al.⁽³²⁾は、動水勾配が小さい条件でのベントナイト中の地下水流動が線形のダルシー則に従わないことを水分飽和した試料についての透水試験を幅広い動水勾配の条件下で実施することにより示しており、その理由として、粘土の結晶層と水分子間の強い結合を挙げている。また、この非線形な効果を表現するモデルとして、Dixon et al.⁽³³⁾による流動開始のための動水勾配閾値を考慮したモデルを適用している（下図左）。このモデルでは、線形のダルシーモデル（下図左の細線）とは異なり、動水勾配が閾値 (J_0) 以下では流動は生じず、動水勾配が J_c 以下の条件では流量が動水勾配に比例しない非ダルシー的挙動を示すことを仮定している（動水勾配が J_c 以上の条件ではダルシー則が成立する）。このような概念に基づき、種々の乾燥密度の FEBEX ベントナイトについて測定可能な最小の動水勾配を測定した結果が図 4.3-15 の右である。また、動水勾配 1000 以下の条件で測定された透水係数のばらつきが大きいことから、この数値がほぼ J_c に相当するものと考えられている⁽³⁴⁾。

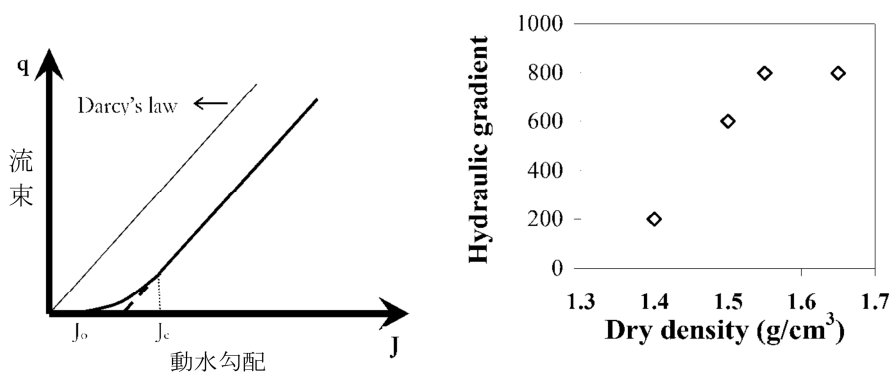


図 4.3-15 Dixon et al.⁽³³⁾による非線形流動モデルの概念（左）及び FEBEX ベントナイトを対象とした測定可能な流動開始の動水勾配についての試験結果（右）⁽³²⁾

上記の非線形モデル（動水勾配閾値モデル）を用いて、FEBEX における Thermo-hydraulic cell 試験における相対湿度の実験結果（シンボル）及び線形モデルによる解析結果（点線）と非線形モデルによる解析結果（実線）を図 4.3-16 に示す。非線形モデルを用いることにより、試験結果の挙動（初期の冠水以降流動が停止する状況）を再現することが可能と考えられている（図 4.3-16：左）。なお、同研究では、もう一つの代替モデルの候補として、初期の動水勾配が平坦化した後に thermo-osmosis の効果が顕在化することを仮定したモデルも検討しているが、非線形モデルに比べると実験結果の再現性が良くないとしている（図 4.3-16：右）。

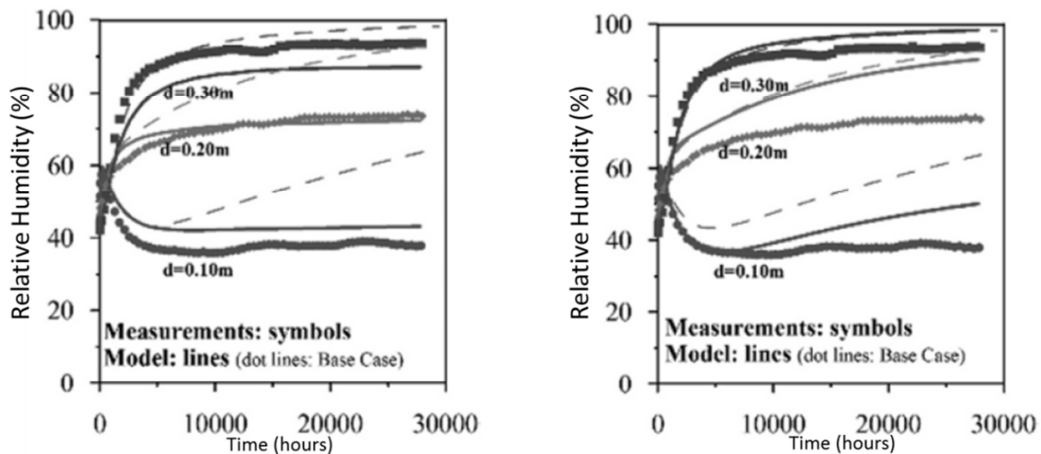


Fig. 6. Evolution of the relative humidity in the thermo-hydraulic cell (GT40): a) threshold hydraulic gradient model, b) thermo-osmosis flow model (d is the distance from the heater)

左：非線形モデル（動水勾配閾値），右：thermo-osmosisモデル

図 4.3-16 FEBEX の Thermo-hydraulic cell 試験における相対湿度の実験と解析結果の比較⁽³²⁾

以上の検討に基づき、本研究では、Sánchez et.al.⁽³²⁾による上記の非線形モデルオプション（動水勾配閾値モデル）を用いて前出の CRT 試験についての解析を行い、従来の線形モデルオプションとの比較を行った。ここで、CRT 試験に用いられた MX-80 については、 J_0 に該当する測定が行われていないため、FEBEX ベントナイトについての測定結果（図 4.3-15：右）を用いることとした。具体的には、乾燥密度が 1.4g/cm^3 以下の場合には動水勾配閾値 $J_0 = 200$ 、 1.65g/cm^3 より大きい場合は $J_0 = 800$ とし、その間を線形内挿して種々の密度のベントナイトの非線形挙動を表現することとした。その他の解析条件等を表 4.3-3 に示す。

表 4.3-3 解析体系と条件設定（CRT 試験）

項目	設定
処分概念	KBS-3
座標系	円筒座標系 (図 4.3-2 右下 Ring shaped bloc の形状 (厚さは単位厚さ))
緩衝材	内径 0.535m, 外径 0.82m 初期温度: 20 初期水分飽和度: 0.859 初期乾燥密度: 1.78Mg/m^3
注水方法	緩衝材外側全周に一樣に注水
圧力勾配(動水勾配)による水の移動	・線形モデル ・非線形モデル(動水勾配閾値モデル)
熱境界条件	CRT の測定データに基づく緩衝材内外表面の温度時間変化 (図 4.3-17 参照)

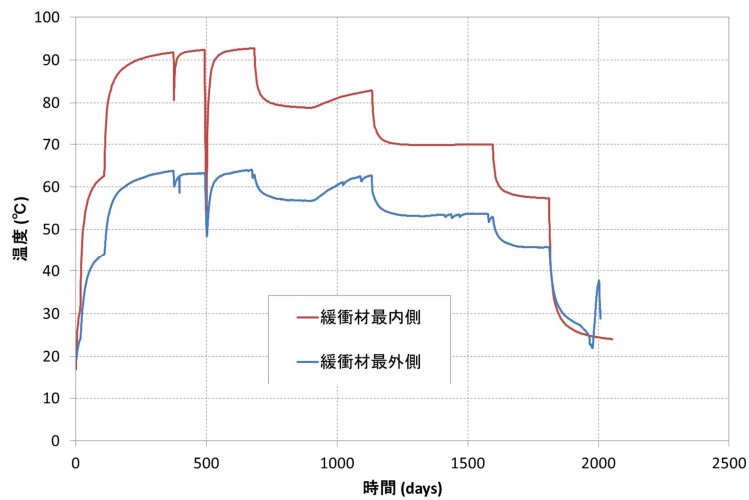


図 4.3-17 CRT 試験における緩衝材内外表面の温度時間変化

緩衝材水分飽和度分布の時間変化の解析結果を、線形モデルと非線形モデルを比較して、図 4.3-18 に示す。緩衝材外側メッシュにおける水分飽和度では差は見られないが、内側での冠水挙動は、非線形モデルの場合に若干制限されていることがわかる。

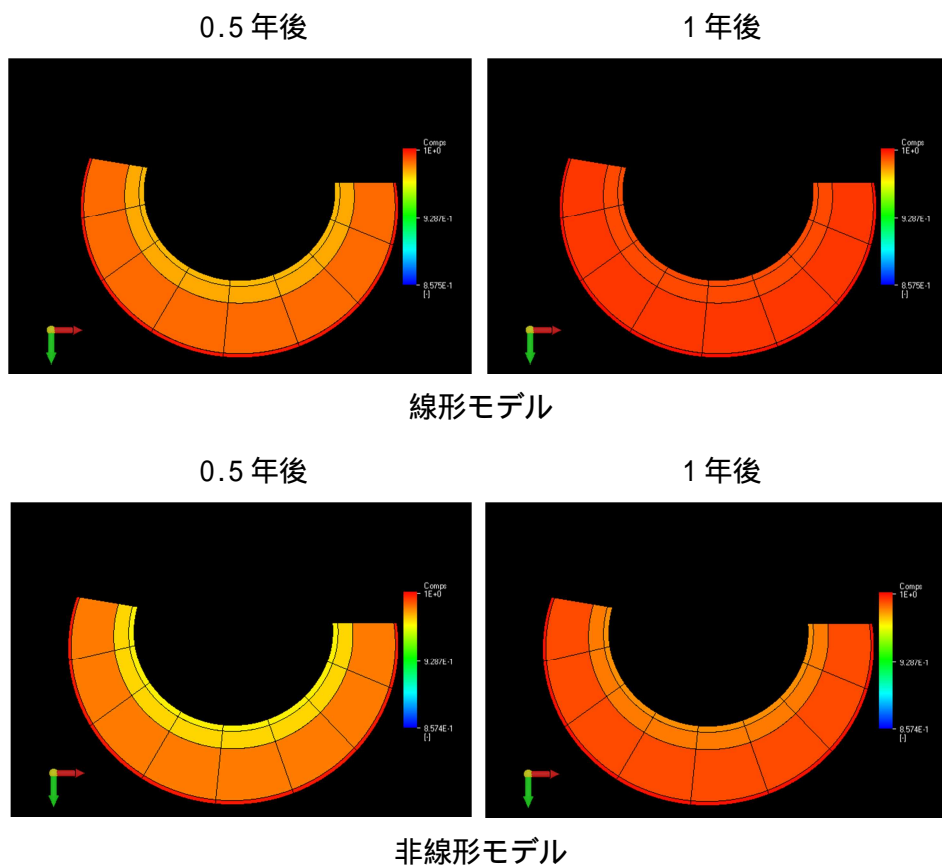


図 4.3-18 CRT 試験を対象とした水分飽和度解析結果

線形モデルと非線形モデルの差は、前掲した水の累積流入量においてはより顕著である。図 4.3-19 は、上述した Sánchez et.al.⁽³²⁾による非線形モデルオプションによって算出した累積流入量を実験結果と比較したものである。線形モデルと異なり、冠水初期の動水勾配が平坦化する過程で徐々に流入量が鈍化する傾向が再現されていることがわかる。その後の昇圧に伴う流入再開については必ずしも挙動が十分再現できていないが、同モデルの根拠となっている実験データが FEBEX ベントナイトについてのものであり、CRT 試験で使用している MX-80 の特性を反映したものではないことが理由とも考えられる。この点を改善するためには、この材料について FEBEX と同様の実験を行い、流動開始のための動水勾配閾値 (J_0) とベントナイト乾燥密度の相関に関する特性を把握することが必要と考えられる。

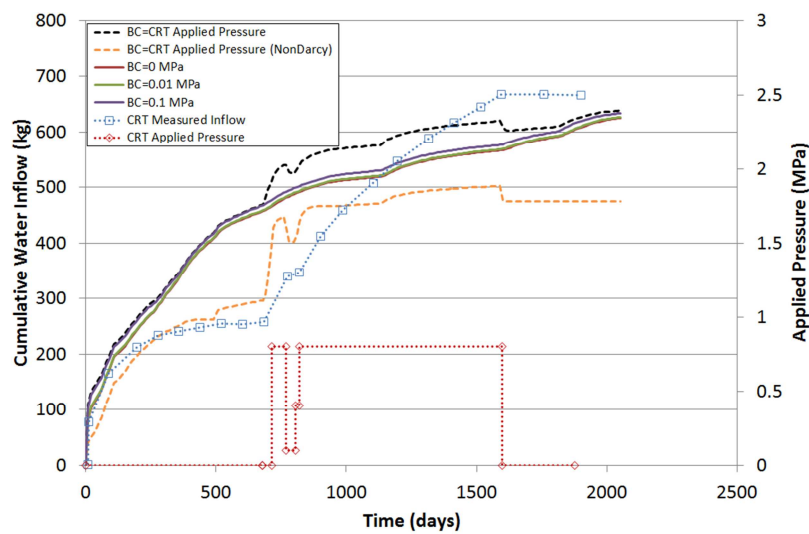


図 4.3-19 非線形モデルによる実験結果（累積流入量）の再現

(2) 処分場条件への適用

(a) 熱-水-応力連成解析

前節で述べた THM 連成解析モデルを処分場条件に適用した例題として、第 2 次取りまとめの人工バリア仕様を仮定した 2 次元及び 3 次元の解析を行った。解析体系は、亀裂と緩衝材の交差部のみから地下水が供給されることを想定している。また、亀裂開口幅には不均質性があり、チャネリングにより実際の坑道においても湧水箇所は交差円周上の一部に限られることが通常であることから、ここでも、一部においてのみ水圧を与え、緩衝材外側表面の他の部位は 0 フラックス境界とした。

解析条件は表 4.3-4 に示す通りである。

表 4.3-4 解析体系と条件設定

項目	設定
処分概念	水平坑道横置き
座標系	円筒座標系
緩衝材	内径 0.43m , 外径 1.11m
透水亀裂	・開口幅(厚さ)1mm の平面 ・ 方向に約 20cm の開口部(チャネル)
圧力勾配(動水勾配)による水の移動	・線形モデル ・非線形モデル(動水勾配閾値モデル)
熱境界条件	第 2 次取りまとめにおける熱解析結果に基づく緩衝材内外表面の温度時間変化(図 4.3-20 参照)
地下水圧	1MPa , 0.5MPa

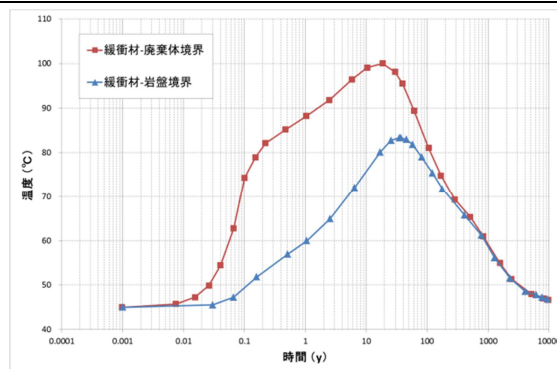


図 4.3-20 緩衝材内外表面の温度時間変化

2 次元の線形モデルによる解析結果の例を図 4.3-21 に示す。地下水は、亀裂内のチャネルとの交差部(上部の左右両端)のみから緩衝材中に流入し、その後も流入点近傍に水分飽和度の上昇している領域が偏在していることがわかる。ただし、温度勾配の上昇する 5 年後及び 10 年後には、半径方向への水の移動は抑制される一方、周方向への移動は進展していることがわかる。なお、このような緩衝材中の水分飽和の偏在化に対応して、初期(1 年後)における流入点近傍の緩衝材の膨潤による乾燥密度の低下及びこれに伴い圧縮された内側領域(特にオーバーパック直近)での密度上昇が顕著である。また、このような挙動は、周方向への水分飽和領域の拡大に伴い徐々に平坦化される傾向を示す。

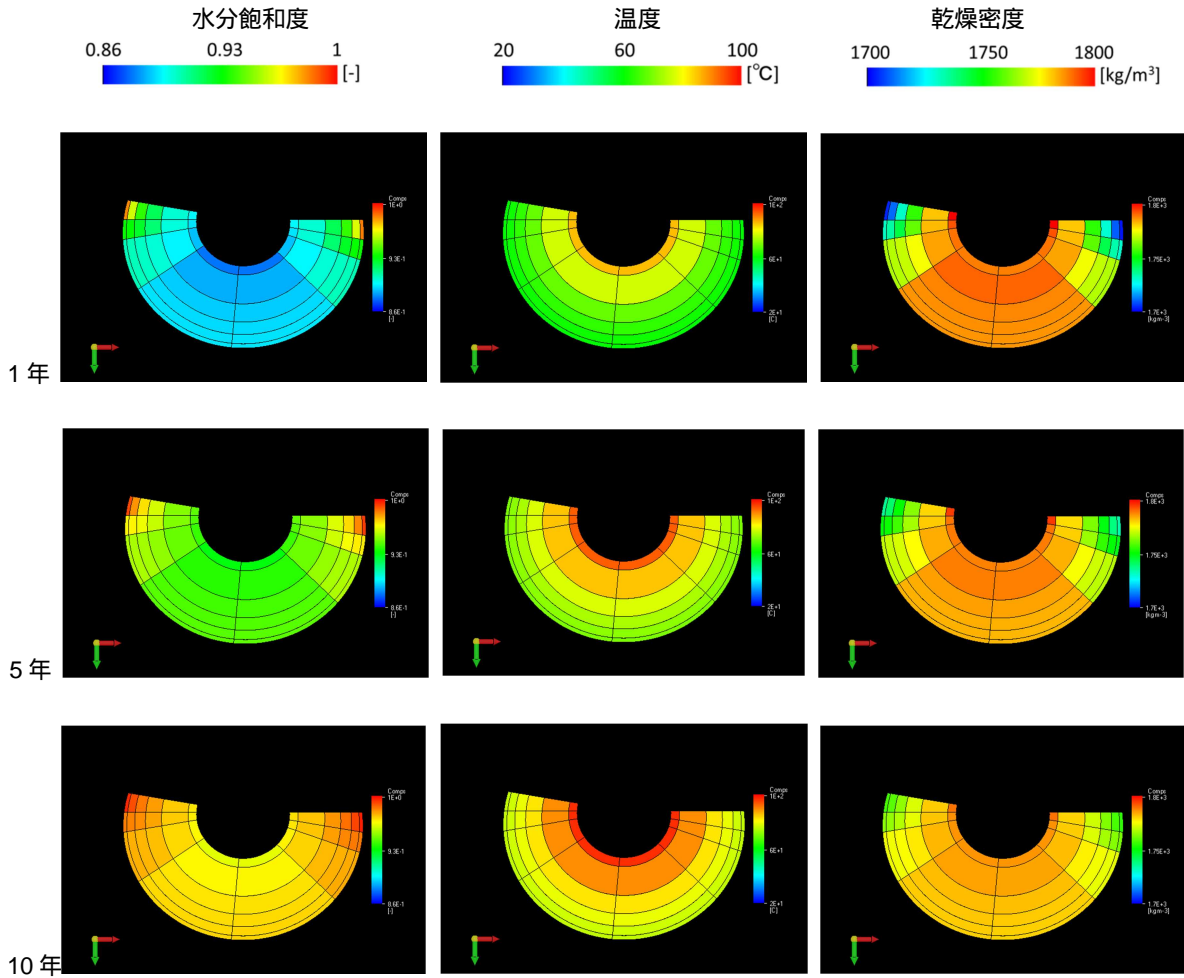


図 4.3-21 処分場条件での連成解析結果（線形モデル）

上記のような境界条件の影響は、前出の非線形モデルではさらに顕著である。図 4.3-22 に示すように、非線形モデルでは、全体としてダルシー流束が低下するのに加え、圧力勾配が小さい方向への水の移動が制限されることから、冠水過程が遅れるとともに、水分飽和度に不均質性が現れる結果となった。

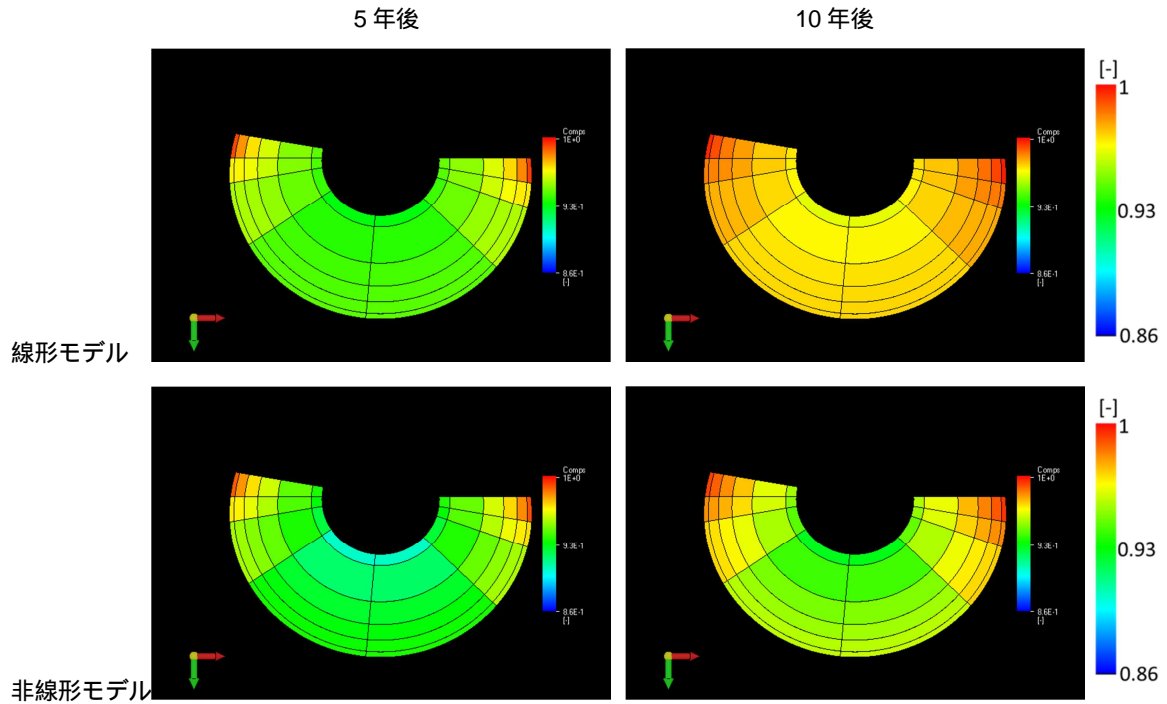


図 4.3-22 モデルオプションによる水分飽和度分布の差異

次に、同様の解析を、非線形モデルを用いて 3 次元体系で行った。解析の体系を図 4.3-23 に示す。

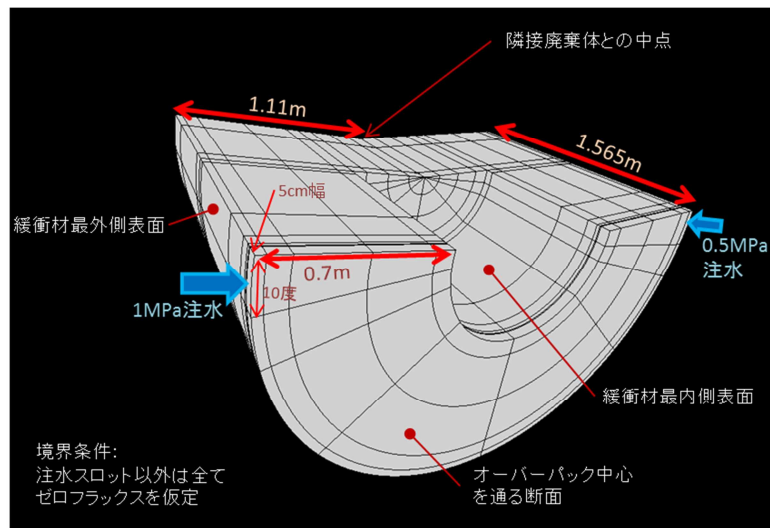


図 4.3-23 3次元モデルによる THM 連成解析の解析体系

図 4.3-24 に解析結果を示す。地下水が浸入する二つのメッシュ（手前断面の左右の上端）から、半径方向、周方向及び軸方向に水が浸潤するため、上述した冠水挙動の不均質性が見られる。また、廃棄体及び亀裂から最も離れた位置にある隅角部においても水分飽和度のやや高い領域が存在している。非線形モデルでは、圧力勾配の小さい状況での水分飽和過程が抑制され

る傾向にあるため、亀裂から離れた領域において温度勾配の影響が優り、高温側の水分が低温側に移動し最も温度の低い隅角部に移動していることが理由として考えられる。実際、当該メッシュの水収支を詳しく調べると、動水勾配によって水分飽和度の低い隣のメッシュに流出する水分量よりも、温度勾配によって隣接した高温のメッシュから水蒸気として流入する水分の量のほうが大きいことがわかる。ただし、今回の解析では、熱解析のための温度境界条件を、第2次取りまとめの結果に基づき設定しており、亀裂を考慮した設定ではないことから、境界条件の不整合性に起因する誤差が含まれている可能性は否定できない。この点を明らかにするためには、今後、処分場全体スケールの熱解析と連携した（境界上の温度及び熱フラックスを共有して並行して計算を行う）亀裂を含む人工バリアスケールの THM 連成解析を行うことが必要となる。

解析結果は、100年後の時点でも、緩衝材は完全には飽和していないことを示している。なお、図 4.3-25 及び図 4.3-26 に示すように、緩衝材の全周から地下水が侵入することを仮定した解析を、線形モデル及び非線形モデルのそれぞれを用いて別途行い、結果を比較した。線形モデルに比して非線形モデルの方が緩衝材内側の水分飽和度がやや低いものの、いずれのモデルを用いても 10 年後には緩衝材全域でほぼ完全に水分飽和しており、亀裂を考慮したケースにおいて給水点が限られることによる影響は顕著と考えられる。

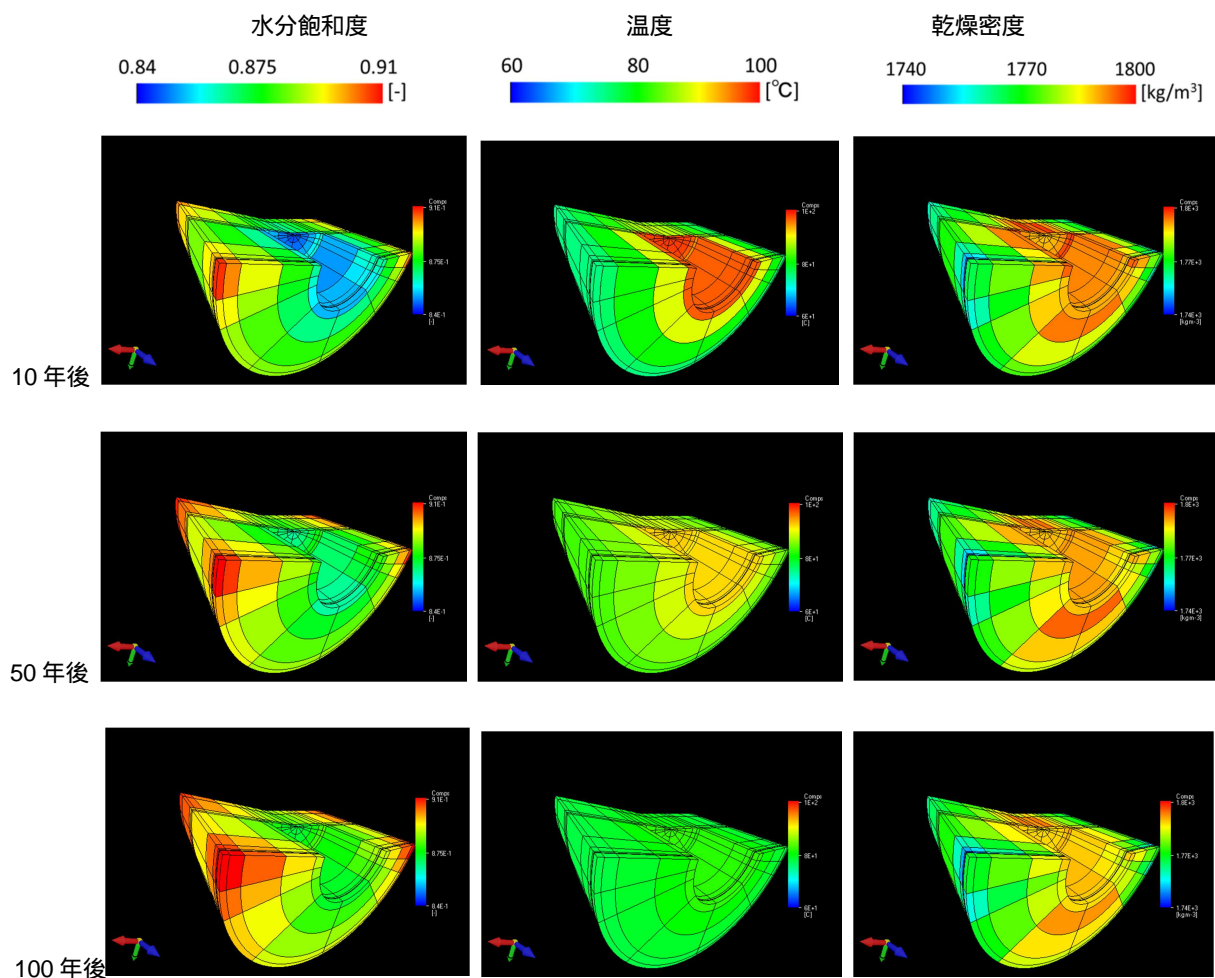


図 4.3-24 3次元モデルにおける水分飽和度，温度，乾燥密度分布の時間変化（非線形モデル）

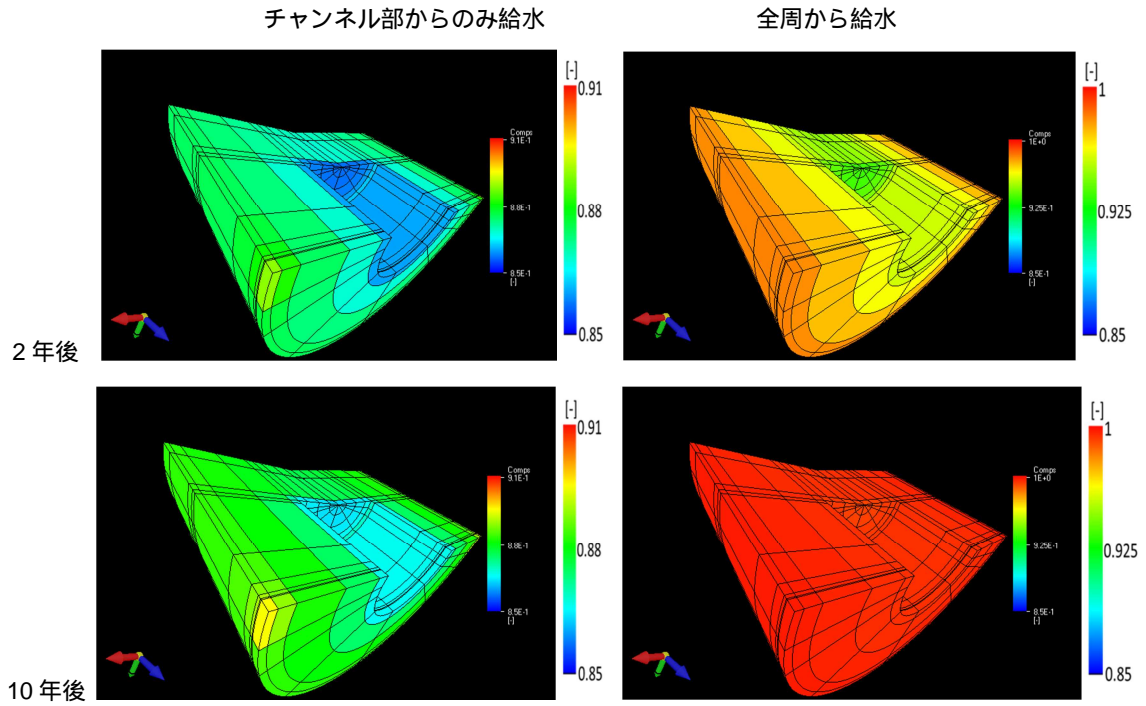


図 4.3-25 境界条件による冠水挙動の差異（線形モデル）

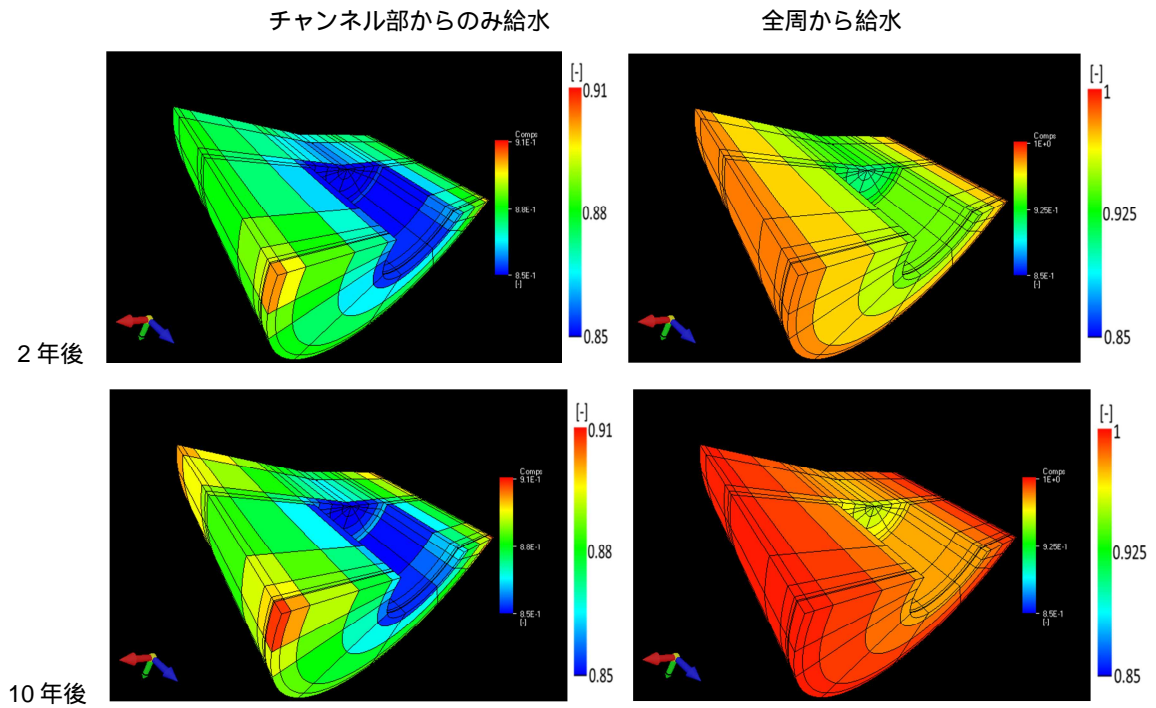


図 4.3-26 境界条件による冠水挙動の差異（非線形モデル）

図 4.3-24 に示した、3次元での THM 連成解析の結果を用いて、4.2.4 項(2)において、シナリオシミュレーション結果から抽出しされ懸念事項の検討を行う。ここでは、マクロセル腐食の観点から指摘をされた、緩衝材内側（オーバーパック表面）における水分飽和度不均質性の確認を行った。

線形モデルの場合には、温度勾配によって半径方向への水の移動は抑制される一方、周方向への移動は進展することにより、緩衝材内側に向けて不均質性は低減するという結果が得られた。非線形モデルの場合には、緩衝材内側における水分飽和度の不均質性はある程度あるものの、シナリオシミュレーションで懸念されたような明瞭に二つのピークを持つような分布とはなっていない。非線形モデルにおける、オーバーパックに接する緩衝材セルの水分飽和度の分布を図及びヒストグラムとして図 4.3-27 に示す。

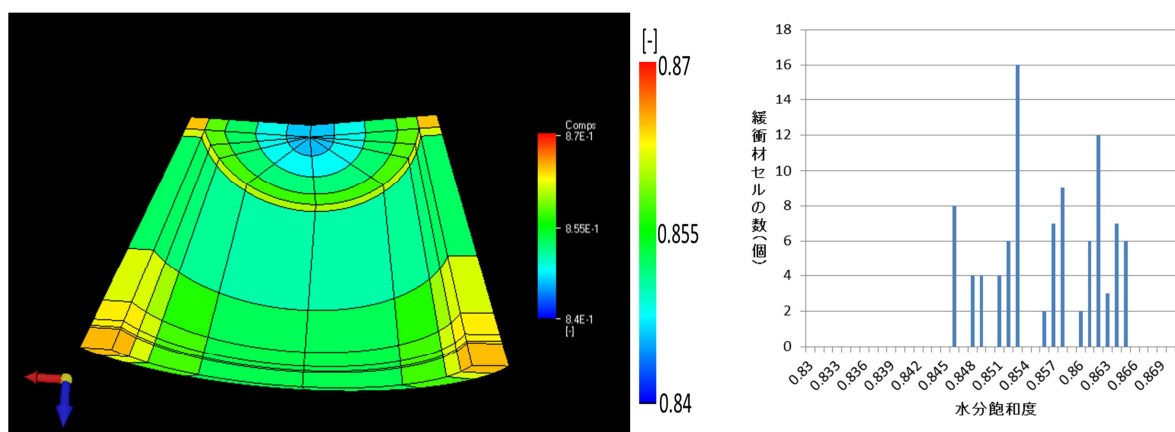


図 4.3-27 オーバーパックに接する緩衝材セルの水分飽和度の分布図（左）とヒストグラム（右）（非線形モデル，10年後）

以上の例題解析の結果は、亀裂等の岩盤不均質性及び水分飽和過程に関するモデルオプションの影響が、いずれも緩衝材の冠水挙動に顕著な影響を与えるものとなり得ることを示している。また、これらの二つを組み合わせた場合、即ち、亀裂の影響を考慮しつつ非線形モデルオプションを適用した場合が、従来のモデル（緩衝材の全周からの冠水についての線形モデル）との差異が最も顕著となる傾向を示した。今後の安全評価あるいは施設設計のための解析においては、実際のニアフィールド母岩の不均質性の特徴を踏まえ、緩衝材と亀裂交差部の有無や頻度等に応じて複数の境界条件のバリエーションについての解析を行うことが必要と考えられる。この際、特に熱解析においては、処分場スケールでの現象と人工バリアスケールでの現象が相互に影響を及ぼしあうようなマルチスケール性の考慮が重要となり、この点については、マクロスケールの熱解析と、ローカルスケールの THM 連成解析とを、境界上の温度と熱フラックスを共有しつつ並行して実施するような解析システムを準備することが必要と考えられる。また、前述したように、CRT 試験における緩衝材の水分飽和挙動については非線形モデルのほうが実験結果の再現性が高いことから、少なくとも、これをモデルオプションとして解析を行い、他のオプションとの間の差異をモデル不確実性として捉えつつ評価あるいは設計に関する意思決定に情報を提供することが必要と考えられる。

(b) 物質移行 化学連成解析

本研究で利用しているQPACには、化学反応と取り扱う機能も整備をされていることから、ここでは、4.2.4項(2)において、シナリオシミュレーション結果から抽出された懸念事項の検討のうち、“モンモリロナイトの溶解と非膨潤性の二次鉱物の沈殿による緩衝材の膨潤特性変化及び止水性の低下”について、より定量的な検討を進めることとした。ただし、本例題では、計算負荷及び種々の化学反応の温度依存性に関する熱力学及び速度論データが完備されていないことなどから、THM連成とは切り離して、完全飽和及び一定温度(25°C)の条件下で解析を行うこととした。ベントナイトのアルカリ変質による二次鉱物(Laumontite等)の生成といった現象は、緩衝材が飽和した後、長期にわたる反応であることから、初期の不飽和状態の寄与は大きくないと想定される。しかしながら、前項で実施したような、緩衝材への給水地点に限られるような条件での冠水挙動を見ると、閉鎖後100年時点においても緩衝材が飽和に到っておらず、このような、長期に不飽和状態が続く中で、高アルカリ性のセメント反応水が不均質に緩衝材を進展することの影響については、さらに検討が必要であると考えられる。

解析体系は、図4.3-28に示すような1次元とした。坑道支保に用いるセメント系材料は普通ポルトランドセメント(OPC)とし、セメントの溶脱モデル及びベントナイト変質(モンモリロナイト溶解速度モデル)は、第2次TRU報告書⁽³⁵⁾と同一のモデルを用いることとした。なお、生成する可能性のある二次鉱物については、同報告書における種々のケースのうち、局所的な熱力学な平衡が達成する場合を想定した“ケース7”(イライト、準安定沸石、安定相が溶液条件に応じて沈殿・溶解平衡に達するものと仮定する)を用いた。解析モデル及び条件の詳細については、添付資料-Dに記載した。

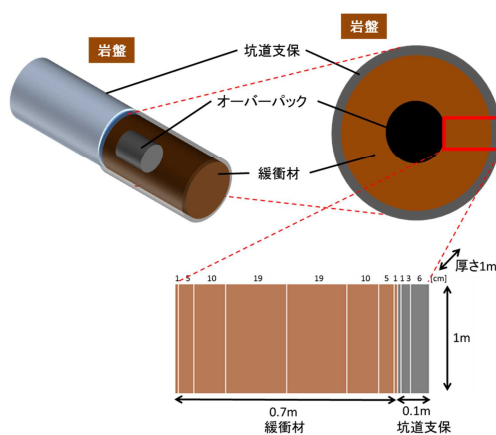


図 4.3-28 セメント-ベントナイト相互作用に関する解析体系

主要な解析結果を図4.3-29及び図4.3-30に示す。この解析で仮定している佐藤-Cama型のモンモリロナイト溶解速度モデル⁽³⁶⁾は、平衡に近づいた状況での溶解速度の低下挙動を取り入れた現実的な(しかしながら経験的な)ものである。鉱物組成とpHの変化を4.2.4項(2)におけるシナリオシミュレーションの結果と比較すると、モンモリロナイト溶解速度を遅くしたケースと類似し、モンモリロナイトの溶解によるpH緩衝性が低いため、高pHの溶液は緩衝材中を比較的速やかに伝播し、モンモリロナイトの溶解と二次鉱物(この解析ではHeulandite)の生成、わずかではあるが、緩衝材全体の広い領域で生じている。ただし、緩衝材中の全域で十分な量のモンモリロナイトが残留している結果となっている。

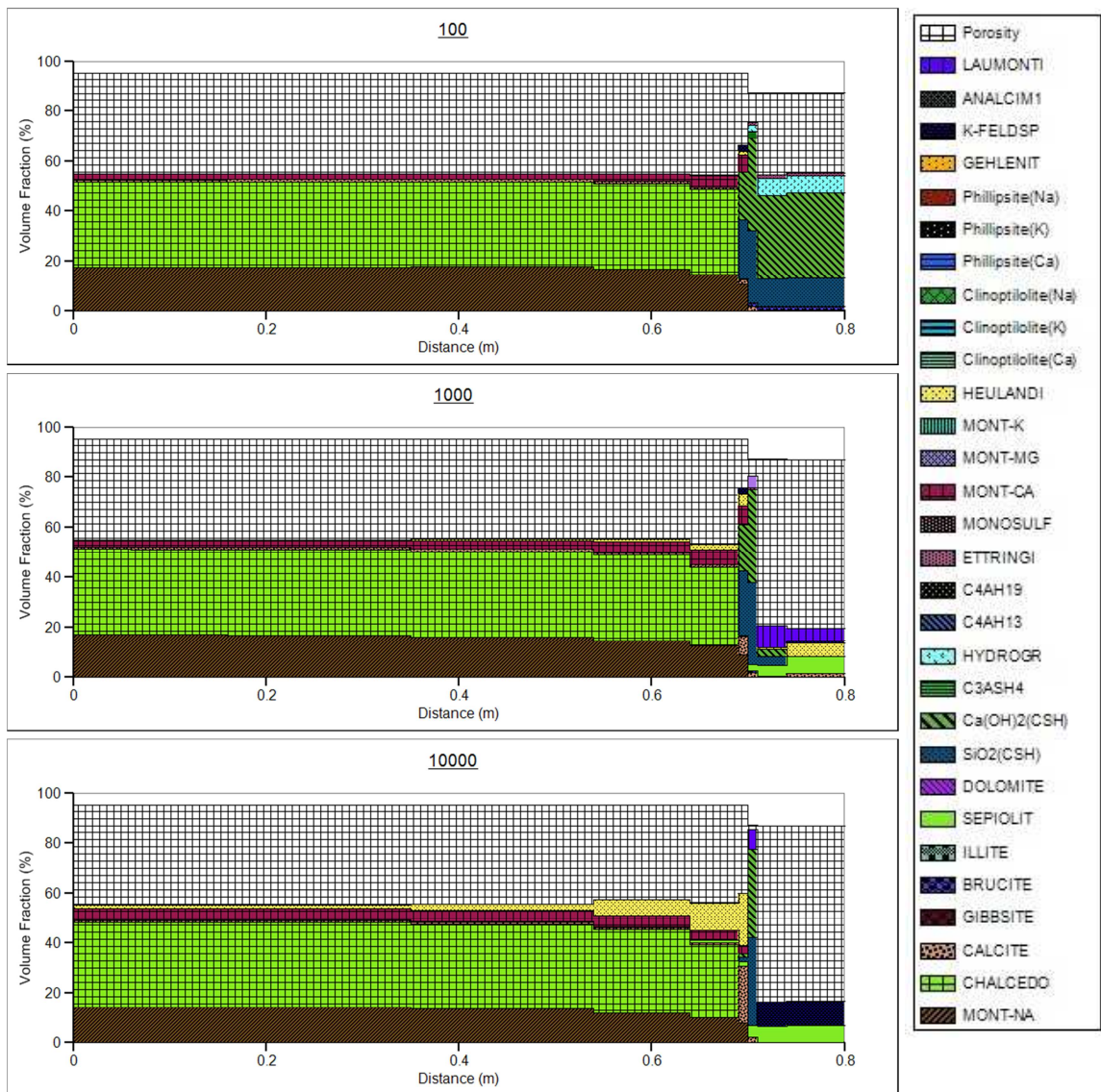


図 4.3-29 鉱物分布の時間変化

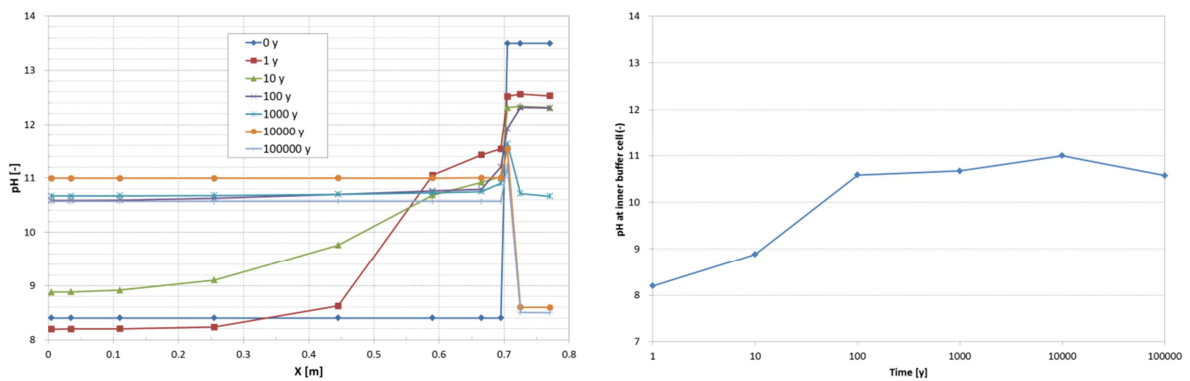


図 4.3-30 pH 分布の時間変化 (左) 及びオーバーパック近傍の pH の時間変化 (右)

本解析結果は、緩衝材に期待される性能を支配する主成分鉱物であるモンモリロナイトが保持されるという観点では好ましいものと考えられるが、二次鉱物の生成によるセメンテーションによってベントナイト空隙構造の等の変化等が、緩衝材性能に与える影響については、課題の存在を示唆していると言うことができ、実験的なアプローチを含めた今後の検討が重要と考える。

なお、4.2.4 項(2)において検討した、もう一つの懸念である、オーバーパック表面での pH 上昇による不動態化と局部腐食の可能性については、今回の解析が飽和を仮定しており、酸化還元の状態の変遷に関する情報が不足しているため、明確な判断は困難であるが、100 年後以降において、オーバーパック近傍の pH が、不動態化の目安となる pH である 10.5 を上回っている。したがって、今後、不飽和から飽和に到る過程での酸化還元条件の変遷と併せて、オーバーパックに接触する地下水の水質 (pH、塩化物イオン濃度等) の検討が重要である。

4.3.3 熱-水-応力-化学連成解析技術に関するまとめと課題

本検討では、前節に述べたシナリオシミュレーション等により抽出される懸念事象に対し、定量的な連成解析を実施するために THMC 連成解析ツールを整備し、さらに整備したツールを用いた事例解析を実施した。

整備した解析ツールは、汎用のモデル開発環境をベースとしたものであり、次のような長所を有する。

- 柔軟性
 - － ライブラリからのモデルオプションの選定
 - － GUI による容易なパラメータ入力
- 計算効率
 - － 可変次数 / 可変タイムステップの微分代数方程式の数値解 (BDF 法) の採用
 - － GUI によるモデル設定、出力等の処理時間の短縮
- 精度
 - － 微分方程式群と代数方程式群を一括して求解することによる精度の向上
 - － 有限体積法による流動解析及び物質移動解析の精度向上 (局所物理量の保存)
 - － GUI での単位の自動変換や引数への自動入力による人的過誤の回避

一方、これらの長所を有しつつも、現状では課題もある。これらの特徴のうち、柔軟性については、従来の個別のモデルを用いた定量的解析 (連成解析) における解析上の仮定の恣意性とその影響を評価するという安全規制上の目的に照らして、特に重要性が高いと考えられる。しかしながら、現状で容易に取り扱うことの可能な解析体系、材料、及びモデルオプションは、本年度の例題で対象としたものに限られており、柔軟性をさらに高めていくためには、今後、多様な解析体系、材料、及びモデルオプションの組み合わせについてのケースファイルを作成し、モデルライブラリを充実させていくことが重要と考えられる。また、この考え方をさらに発展させると、ユーザーが全く新たなモデルをプログラムレスで容易に構築することのできるような GUI の開発も課題となる。

また、連成解析で対象とする非線形問題の計算効率は、対象とする微分-代数方程式系の「硬さ」(数学的には、係数行列の固有値が極めて小さいものから大きいものまで幅広く存在していることを指し、物理的には、時間スケールが数オーダー異なるような異質な現象が同じモデルに含まれていることを意味する) に依存して異なるものとなる。そこで、例えば、あるパラメータが段階的に変化する時のステップ関数を滑らかな (微分可能な) 連続関数で近似するといった技巧がしばしば求められる。本年度開発したモデルは、ユーザーがこのような定式化の深

いレベルでのコントロールを行い得るものではないために、GUIにおいてこのような対応を可能とすることが望ましい。

一方、3次元の体系において、THMCの全てを取り込んだ連成問題を解くことは、計算負荷の観点から必ずしも現実的ではないことから、解析の対象とする現象に応じて、適切な次元を選択することや、対象とする現象に影響を及ぼすプロセスやパラメータの相関関係等を適切に抽出することが重要であることが改めて確認された。

解析事例として取り組んだ検討結果から、安全評価上の人工バリアへの影響の留意点として以下の点が抽出された。

緩衝材の再冠水挙動に関する連成解析の結果から、亀裂等の岩盤不均質性を考慮すると、従来の緩衝材の全周から地下水が均等に浸潤する評価と比べ、飽和に到るまでの緩衝材中の水分飽和度や乾燥密度に不均質な分布が認められるとともに、飽和に要する時間が著しく異なることが明らかとなった。また、この評価を実施するにあたっての調査・検討の中で、緩衝材への水の浸潤を記述するモデルには不確実性が存在することが明らかとなった。実験結果の再現性という観点からは、非線形モデルの方が好ましいとしたが、処分システムに対する予測解析の実施においては、複数のモデルオプションを認識し、モデルオプション間の差異をモデル不確実性として捉えつつ評価あるいは設計に関する意思決定に情報を提供することが重要であることを提言した。さらに、物質移行 化学連成解析として実施した、普通ポルトランドセメントを支保として用いた場合の緩衝材の変質及びオーバーパック近傍の化学環境の変遷に関する解析結果からは、二次鉱物の沈殿が緩衝材性能に及ぼす影響や、オーバーパック近傍の pH が上昇する際の酸化還元状態の把握に関する研究が引き続き課題であること指摘した。

4.4 まとめ

安全規制の観点からは、ニアフィールド環境が処分場閉鎖後、安全評価上前提としている状態になることについての予測及びそれに基づく論証の正当性を検証することが重要となると考えられ、そのためには、ニアフィールド環境の長期変遷における特徴である非線形性等を考慮した、多面的な検討に基づくシナリオの抽出と、シナリオ分岐の可能性についての検討が重要であるとして、本研究で取り組むべき技術課題として、

- ・ 専門家の知見に基づくシナリオ解析を補完するシナリオシミュレーション技術の開発
 - ・ 特定のモデルオプションに依存しない包括的な連成解析技術の開発
- を設定した。

「専門家の知見に基づくシナリオ解析を補完するシナリオシミュレーション技術の開発」については、ニアフィールド現象の特徴に起因する長期予測の難しさのうち、特に、複雑性やダイナミクスについては、従来のシナリオ解析におけるヒューリスティックによる判断に困難や限界があることから、従来の手法の弱点を補完するためのシナリオシミュレーション技術として、マルチエージェントシミュレーションと多変量セルラーオートマタを結合したツールを新たに開発するとともに、これらの手法によるシナリオシミュレーションがシナリオ解析への補完の観点から有効に機能し得ることを、以下のような例題を通じて示した。

例題1：熱出力の異なる多数の廃棄体をパネル内に配置する際の熱解析という複雑な問題に対して、操業・閉鎖作業をエージェントの行為として、定置後の熱的プロセスをセルラーオートマタとして取り扱う手法を構築した。また、この手法により、従来の廃棄体単体についての精緻な熱解析では予想が困難であった「緩衝材中最高温度の定置順序や坑道閉鎖のタイミング

への依存性」といったダイナミックな挙動についての理解を改善することができる。

例題 2：坑道閉鎖後の THMC の連成するニアフィールド環境の変遷に対して、THMC の主要な状態変数の変化や相関関係を個別現象の理解に基づいたルールとして設定し、多変量セルラーオートマタによって解析を行うことで、それらのルールを統合した場合のシステム全体の挙動を THMC の変化としてストーリーボードのような形式での記述することが可能であり、このことが、シナリオの検討過程で行われるニアフィールドの状態設定の作業における補完的な情報の提供として有効であることを示した。さらに、その結果に基づいて、安全機能への影響の観点から結果を考察し、安全機能に関する懸念事象の抽出を行うとともに、現象理解の不足による不確実性や、本手法におけるルールの簡略化等によりもたらされる不確実性が安全機能へ及ぼす影響について調べるために、パラメータを変動させてシナリオ分岐の可能性に関する検討を実施した。

「特定のモデルオプションに依存しない包括的な連成解析技術の開発」については、汎用性の高いマルチフィジックスモデル開発環境を準備するとともに、具体的なモデルの実行形である QPAC Player の機能を用いて複数の解析体系、プロセス、及び各プロセスについてのモデルオプションをライブラリやケースファイルとして整備を進めた。そして、この解析ツールを用いて、原位置の連成試験を対象とした解析によるモデル不確実性の検討及び、第 2 次取りまとめの人工バリアシステムの体系を対象とした、地質環境の不均質性が緩衝材の再冠水挙動に及ぼす影響等についての解析を実施し、安全評価上の人工バリアへの影響の留意点の抽出を行った。また、半定量的な解析であるシナリオシミュレーションにおいて抽出された懸念事項に対し、より定量的な連成解析によって懸念事項の詳細検討を行うという検討手順について例示を行った。

これらを通じて、4.1 項に述べた、提案した方法論の有効性を示す事が出来たものと考えられる。ただし、本研究のテーマに対応する幅広い問題領域に比して、これまでに本研究で実施した例題は限られたものであり、今後、検討範囲を拡大して行くことが必要と考えられる。また、現時点で認識している問題領域も未だ網羅的なものではなく、検討を重ねるにつれて新たな懸念や問題が追加されていくものと予想される。これらも含め、今後も継続的な検討を行う必要があるものと考えられる。

第4章の参考文献

- (1) 中島秀之, 高野陽太郎, 伊藤正雄, 『岩波講座 認知科学 8』10,112 ページ, 岩波書店 ISBN 4-00-010618-X, p.112, 1994.
- (2) 市川伸一, 『考えることの科学 推論の認知科学への招待』「第六章 第一節 不確かな状況におけるヒューリスティックス」, 中央公論新社 < 中公新書 >, ISBN 4-12-101345-X, pp.110-113, 1997.
- (3) Dörner, D., and Wearing, A., Complex problem solving: Toward a (computer - simulated) theory. In P. A. Frensch & J. Funke (Eds.), Complex problem solving: The European Perspective (pp.65 - 99). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 1995.
- (4) Parunak, H.V.D., Savit, R. and Riolo, R.L., “Agent-Based Modeling vs. Equation-Based Modeling: A Case Study and User’s Guide”, in J.S. Sichman, R. Conte and G.N. Gilbert (ed.); Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation, Lecture Notes in Computer Science 1534: 10-26, 1998.
- (5) <http://cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason/>, 2003.
- (6) SKB, Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project, SKB TR-11-01, Svensk Karnbranslehantering AB, Stockholm Sweden, 2011.
- (7) 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 地層処分研究開発第2次取りまとめ 分冊2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022, 1999.
- (8) 原子力発電環境整備機構, 地層処分事業の安全確保 - 確かな技術による安全な地層処分の実現のために - , NUMO-TR-11-01, 2011.
- (9) 原子力発電環境整備機構, 地層処分事業のための安全評価技術の開発 (I) - シナリオ構築技術の高度化 - , NUMO-TR-10-09, 2011.
- (10) Atkinson, A., The time dependence of pH within a repository for radioactive waste disposal. United Kingdom Atomic Energy Research Establishment Report AERE-R11777, United Kingdom Atomic Energy Research Establishment, Harwell, UK., 1985.
- (11) 谷口直樹, 川上進, 森田光男, “ベントナイト/ケイ砂混合体における炭素鋼の不動態化条件”, JNC TN8400 2001-025, 2002.
- (12) 腐食防食協会編, 腐食防食便覧, 日刊工業新聞社, p.289, 1986.
- (13) Gaucher, E., Blanc, P., Matray, J. M. and Michau, N., Modeling diffusion of an alkaline plume in a clay barrier. Applied Geochemistry 19: 1505-1515, 2004
- (14) Savage, D., Noy, D. J., and Mihara, M., Modelling the interaction of bentonite with hyperalkaline fluids. Applied Geochemistry 17: 207-223, 2002.
- (15) Savage, D., Watson, C., Benbow, S. and Wilson, J., Modelling iron-bentonite interactions. Applied Clay Science, 47: 91-98. 2010.
- (16) 千々松正和, 谷口航, 鈴木英明, 西垣誠, 熱-水-応力連成モデルを用いた高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるニアフィールド評価、土木学会論文集 No.687/III-56, 9-25, 2001.
- (17) Maul, P. R., Benbow, S. J., Bond, A. E., Robinson, P. C. and Watson, C. E., The Quintessa Multiphysics General-Purpose Code QPAC, Quintessa Report QRS-3000B-8 version 1.0, 2008.
- (18) Guo, R., EBS Task-Force Modelling Report: Modelling AECL’s Tests – Isothermal Test and Buffer/Container Experiment, Canadian Nuclear Waste Management Organization Report No. NWMO TR-2007-13., 2007.
- (19) Dixon, D., Chandler, N., Graham, J. and Gray, M.N., Two Large-Scale Sealing Tests Conducted at Atomic Energy of Canada’s Underground Research Laboratory: the Buffer-Container Experiment and the Isothermal Test, Can. Geotech. J., Vol 39, pp. 503-518, 2002.
- (20) Dixon, D.A., and Chandler, N.A., Physical properties of the materials recovered from the isothermal buffer-rock-concrete plug interaction test conducted at the URL. Ontario Power Generation, Used Fuel Disposal Program Supporting Technical Report No.

06819-REP-01300–10003-R00, Toronto, ON., 2000.

- (21) Wan, A.W.L., The Use of Thermocouple Psychrometers to Measure in situ Suctions and Water Contents in Compacted Clays. Ph.D thesis, The University of Manitoba, Department of Civil and Geological Engineering, Winnipeg, MB., 1996.
- (22) Graham, J., Chandler, N.A., Dixon, D.A., Roach, P.J., To, T. and Wan, A.W.L., The Buffer/Container Experiment: Results, synthesis, issues. Atomic Energy of Canada Limited Report, AECL-11746, COG-97-46-1. (Available from SDDO, Atomic Energy of Canada Limited, Chalk River Laboratories, Chalk River, Ontario K0J 1J0.),1997.
- (23) Enresa, FEBEX Project - Full-scale Engineered Barriers Experiment for a Deep Geological Repository for High Level Radioactive Waste in Crystalline Host Rock - Final Report, Enresa Technical Report 1/2000, Enresa, Madrid, Spain, 2000.
- (24) Johannesson, L.-E., Äspö Hard Rock Laboratory. Canister Retrieval Test. Dismantling and Sampling of the Buffer and Determination of Density and Water Ratio, SKB Report No. IPR-07-16, 2007.
- (25) Chen, B., Qian, L.X., Ye, W.M., Cui, Y.J. and Wang, J., Soil-Water Characteristic Curves of Gaomiaozi Bentonite. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, Vol. 25(4): pp. 788–793, 2006.
- (26) Chen, L., Wang, J., Liu, Y., Collin, F. and Xie, J., Numerical Thermo-Hydro-Mechanical Modeling of Compacted Bentonite in China-Mock-Up Test for Deep Geological Disposal, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol 4(2), pp. 183–192, 2012.
- (27) Cui, Y.-J., Tang, A.-M., Qian, L.-X., Ye, W.-M. and Chen, B., Thermal-Mechanical Behavior of Compacted GMZ Bentonite, Soils and Foundations Vol. 51 (6), pp. 1065-1074, 2011.
- (28) Wang, J., Liu, Y., Chen, L., and Cao, S., China-Mock-Up Status Annual Reports, Beijing Research Institute of Uranium Geology, CNNC, 2012.
- (29) Pusch, R. and Weston, R., Superior Techniques for Disposal of Highly Radioactive Waste (HLW), Progress in Nuclear Energy, Vol. 59, pp. 75-85, 2012.
- (30) Xiaodong, L., Prikryl, R., Pusch, R., THMC-Testing of Three Expandable Clays of Potential use in HLW Repositories. Applied Clay Science, Vol 52 (4), pp. 419-427, 2011.
- (31) Maul, P., Benbow, S., Bond, A. and Robinson, P., Modelling Coupled Processes in the Evolution of Repository Engineered Barrier Systems using QPAC-EBS, Research 2010:25, 2010.
- (32) Sanchez, M., Villar, M.V., Lloret, A. and Gens, A., Analysis of the Expansive Clay Hydration under Low Hydraulic Gradient, Springer Proceeding in Physics Volume 112, pp.309-318, 2007.
- (33) Dixon, D.A., Gray, M.N. and Hnatiw, D., Critical gradients and pressures in dense swelling clays, Can Geotech J 29:1113–1119, 1992.
- (34) Villar, M.V. and Gómez-Espina, R., Deliverable 3.2.9: Progress report on laboratory tests performed by CIEMAT (WP3.2 NF-PRO Report). Madrid, 47 pp., 2006.
- (35) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構，TRU 廃棄物処分技術検討書—第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ—，JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, 2005.
- (36) Sato, T., Kuroda, M., Yokoyama, K. and Nakayama, S., Effect of pH on smectite dissolution rates under alkaline conditions, Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement. ANDRA, Reims, France, pp. 11-12, 2002.

5. リスク論的考え方に基づく安全評価シナリオ設定手法の整備（地質・気候関連事象）

5.1 全体概要

HLW、および TRU 廃棄物の地層処分では、地震、火山、隆起・侵食、気候変動等の地質・気候関連事象による処分施設の破壊や著しい特性の変化の影響はサイト選定により回避され、あるいは、処分場レイアウトの検討や適切な施設設計により、このような地質・気候関連事象による処分システム内の特性変化の影響を極力抑えなければならない。そのため、地層処分の安全評価では、地質・気候関連事象の発生が処分システム領域の地質環境に与える影響を評価することは必要不可欠である。日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）は、地層処分の安全審査時に必要となる地質・気候関連事象を対象とした安全評価手法の整備を目的に、我が国を概観したジェネリックな地質・気候関連事象の発生が処分システムに与える熱、水理、力学、化学（以下、THMC）の影響により細分化した事象の整理を平成 19 年度に開始するとともに、適用可能な既存モデル（数式）を組合せ、これらの細分化した事象の影響を評価するためのデータの入出力関係を整理・統合した計算情報の整備を平成 21 年度に開始した。また、影響評価においては、地震・噴火等の起因事象の発生確率等の不確実性に配慮することが必要であることから、地質・気候関連事象の生起確率の推定方法に関する検討を平成 22 年度に開始した。以上の調査研究は、既存知見をベースとする FEP データベース整備と母岩の影響の計算情報（数式、データ、適用条件等；以下、モデル構造）をベースとする母岩の影響評価手法の整備の 2 つに分けられる。

平成 24 年度は、FEP データベース整備では、平成 22 年度に整備した細分化事象 177 のうち 126 事象に対して、数値解析を含む既往知見を基に母岩の THMC の影響の規模、継続性のパターンに係る情報を整理した（5.2 項 安全機能の観点から見た地質・気候関連事象の整理）。また、平成 23 年度に引き続いて、HLW を対象に、処分場閉鎖後に地質・気候関連事象が発生した場合を想定し、天然バリア、および人工バリアに対する THMC 特性変化と安全機能との関係を整理した（5.3 項 地質・気候関連事象の発生からバリア内の THMC の特性変化に至る影響の連鎖の整理）。

母岩の影響評価手法の整備では、母岩の影響量の不確実性の評価を進める上での基礎情報とするために、文献情報を基に各既存モデルを評価対象に適用する際の不確実性や適用上の課題について分析し整理した（5.4 項 母岩の影響量の不確実性の評価手法の検討）。さらに、地形・地質構造の変化から地下水流動の変化に至る水理、および力学的影響に係るモデル構造を用い、地震の発生に伴う母岩の水理学的影響の試解析を行うとともに、平成 23 年度に整備した地形・地質構造の変化量計算コードに対し、震源断層が予め特定しにくい地震（以下、位置が不特定な地震）等の不確実性として断層パラメータと平均活動間隔の分布幅が考慮できるように改良して地表における変位速度の確率分布の試解析を実施し、母岩の影響評価において配慮すべき要点と課題を予察した（5.5 項 母岩の影響の感度解析）。

5.2 安全機能の観点から見た地質・気候関連事象の整理

5.2.1 背景・目的

HLW および TRU 廃棄物の地層処分の安全評価においては、閉鎖後の廃棄体・人工バリア、天然バリアの超長期に亘る安全性の確保が求められている。処分システムの安全機能の基本設計を行う上においては、安全機能と地質・気候関連事象が処分システムに与える影響との関係を把握した上で安全機能が地質・気候関連事象から受ける時間的・空間的 THMC の影響幅を推定することが重要となる。しかし、すべての地質・気候関連事象による影響を複合事象として定量的に解析・評価することは困難である。このため、原子力機構では、地質・気候関連事象の発生から母岩領域に至るまでの THMC の影響の伝搬プロセス、影響の時間・空間的な特徴（影響の規模、影響の広がり、継続性）を把握し、とくに母岩領域に与える影響として考慮すべき重要な事象の抽出・整理を進めている。

平成 23 年度までには、「地質・気候関連事象の FEP データベースおよび、地質・気候関連事象の発生と天然バリアの安全機能との関連性の整理」の中で起因事象の特徴の整理と安全機能との関係について 177 事象を対象におおむね整理することができた。例えば、安全機能との関係の整理の中で、従来、FEP 相関関係図の中には熱的影響としては廃棄体から発生する熱からの影響しか想定されていなかったが、火山活動や熱水活動の発生による処分システムへの外部からの熱的な影響も FEP 相関関係図に追加する必要があること等を示した。

また、原子力発電環境整備機構 (2010)⁽¹⁾によれば、法定（特廃法）要件に従い“自然現象の著しい影響の回避”を確認したうえで、概要調査以降は、更新された地質環境モデルに基づいて閉鎖後の安全性を確保するための安全機能を考慮した処分場の基本設計を実施するとされている。このことから、平成 23 年度は、安全機能の観点から、まず地震活動や火山活動等のサイトへの直撃等の“回避”に係る事象と“隔離”“閉じ込め”に係る事象とを区別したうえで安全機能への影響について検討した。“閉じ込め”に影響を与える事象としては、①地質・気候関連事象発生に伴う処分場周辺の地下環境の変化であり、一方、“隔離”“閉じ込め”に影響を与える事象は、②侵食・堆積による相対的なサイトの対地深度の変化による母岩の THMC の変化がこれに該当する。前者は、母岩を含む“広域地下水流動領域”の THMC が変化するケースであり、後者は“広域地下水流動領域”の THMC は変化しないが、処分場の相対的な深度変化により THMC が変化するケースである。前者については、起因事象による広域地下水流動領域への影響であり、観測データに基づく過去から現在までの THMC の評価のための解析あるいは室内実験（せん断破壊による破壊面の透水性変化に関する実験）に基づく知見がある。一方、後者に関しては、現在の地下水観測・解析結果から推定される深度方向の THMC 分布に関する知見・データが活用でき、調査方法が異なる。

いずれの場合も影響の規模、広がり、持続性については地域性があり、一律には整理できない。しかし、例えば、隆起速度や侵食速度等が極端に大きい山岳地帯等を除き、数 10 万年程度の期間であれば、国内において幌延や東濃地域等の解析結果が 1 つの参考事例となる。幌延や瑞浪等は、地下深部の観測データに基づいて、地形・地質、地下水環境に関するさまざまな評価がなされており、感度解析によって長期的な地下環境の水理、水質等に与える影響についても評価されている。このため、地域特有の地形・地質や水理条件を踏まえつつ、事象特有の変動パターンの違いが母岩の THMC 変化の違いに及ぼす影響を整理することは、母岩領域に与える影響として考慮すべき事象を抽出する際に重要になると考えられる。今年度は、平成 23 年度までの事象の調査結果を踏まえて、地質・気候関連事象が母岩領域に与える影響の時間的・空間的变化を整理するため、既往の調査・解析事例から可能な限り母岩の安全機能に関わる地下水流速や水質、温度等の時間変化について整理することとした。ただ

し、起因事象については発生原因、変動パターン等が必ずしも明らかでないことから、時間的、空間的な変動パターンや変動の条件については既往の知見をもとに仮定（例えば隆起速度一定等発生条件を仮定）し、その条件下における派生事象の変化量、変化パターンを取りまとめることとした。堆積岩地域については、主に地質、地下水関連のデータが数多く存在する幌延地域、六ヶ所地域、房総半島等、結晶質岩地域は、瑞浪地域等を参照事例とした。ただし、事象によっては変動パラメータが存在しない場合があり、近傍の変動パラメータから類推することができない事象については対象から除外した。なお、今回の調査結果は数少ない事例に基づくものであり、事象発生に伴う影響の変化量の最大を示しているものではなく、既往の知見をもとに設定した地質環境条件下において過去に発生した最大値を表している。今回、影響のパターンや事象間の影響の比較は定性的なものに止め、将来的には事例を増やし、地質環境の多様性を考慮した母岩領域に与える影響として考慮すべき重要な事象の抽出・整理に反映していく予定である。

5.2.2 調査方法

昨年度までに収集・整理した影響解析関連に関わる下記の文献（表5.2-1）を中心に、関連する文献情報を追加しつつ、前述の①地質・気候関連事象発生に伴うサイト周辺の地下環境の変化、②侵食・堆積による相対的なサイトの対地深度の変化による母岩のTHMCの変化の2つの観点からの調査の流れを図5.2-1、図5.2-2に示す。ここでの対象期間は、解析事例が存在する将来数10万年程度までとし、対象とする深度は地下数100mとした。

表5.2-1 調査対象文献

雑誌、学会、委託報告書（機関名）	件数
日本地下水学会	7
日本地球惑星科学連合大会	5
原子力学会、和文論文集、バックエンド	6
日本原子力研究開発機構委託報告書、JAEAレポート、二次レポート、サイクル技報	5
産業技術総合研究所委託報告書	3
電力中央研究所報告	2
地盤工学会、資源と素材、土木学会	4
日本水文科学会	1
地学雑誌、地球	2
その他	3

①について、すでに起因事象による母岩の地下環境変化についての解析的評価がなされており、隆起速度等の主要なパラメータが揃っている場合は、図5.2-1に示す通り、既往文献で示されている解析が実施された環境条件の範囲で、流速、塩分濃度等の変化データを時系列で整理し、起因事象との関連性を取りまとめる。一方、解析事例がなく、必ずしも隆起速度等のパラメータと地下水流速等のパラメータとの関係が明らかになっていないが、事象発生前後の既往の観測事実や実験事例から地下水流速等のパラメータあるいは関連するパラメータ（熱水活動等の例）の変化傾向のみが報告されている場合は、参考データとして情報の提示に止めた（a-0）。解析事例がある場合、既往の解析範囲から対象とする領域を抽出し、その境界条件下における流速等のパラメータの整理を行う。また、海面変化や涵養量変化等複数の変化要因が含まれる場合、すなわち海面変化や降水量変化等複数の事象発生を想定した解析が実施されているものの、単一事象による母岩に与える影響（例えば海面変化）が支配

的と見なせる場合は、そのみによる影響と見なし (a-2-1)、単一事象を分離できない場合は参考データ (a-2-2) とすることとした。

また、将来数10万年間、対象領域 (例えば、涵養域、流出域の地表付近、地下100m～数100m、数100m以深) において地下水の平均流速、塩分濃度、温度変化等のデータが存在する場合はその値を読み取り (a-1-1)、時間変化を取りまとめた。一方、直接これらのパラメータが存在しない場合、例えば既往文献において水位変化データしか存在せず、特定区間の動水勾配から平均的な流速が推定できる場合はその値を採用 (a-1-2-1, a-2-1-1, a-2-1-2-1) することとし、困難な場合は参考データとして水位の経時変化を追記 (a-1-2-2, a2-1-2-2) することとした。その他、水理に関して透水係数の変化しかデータが無い場合は、同様に参考データとしてその値を示した。

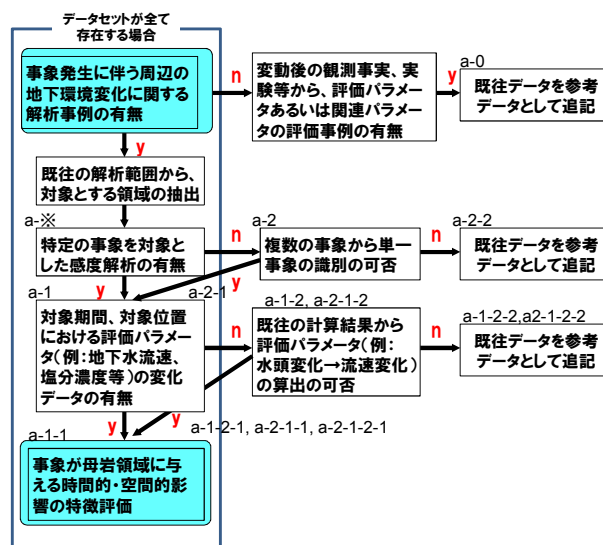


図5.2-1 “地質・気候関連事象発生に伴うサイト周辺の地下環境の変化”に関する影響解析事例のデータ整理方法 (y:yes, n:no)

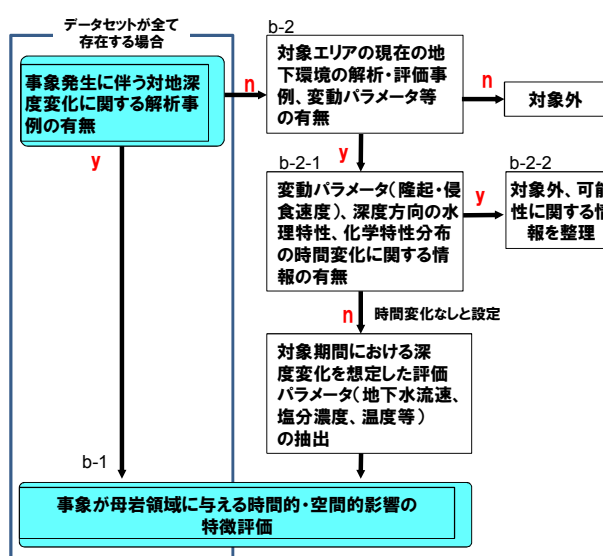


図5.2-2 “侵食・堆積による相対的なサイトの対地深度の変化による母岩のTHMCの変化”に関する影響解析事例のデータ整理方法 (y:yes, n:no)

②については、図5.2-2に示すように、侵食によって対地深度変化を解析した事例がある場合 (b-1) は、その事例を、ここでは採用することとした。事例がない場合は、瑞浪や幌延地域のように対象地点の隆起速度等のパラメータが既知で、処分深度における現在の地下水流動特性、地下水化学、温度等の評価がなされている事例 (b-2) を活用するものとする。将来、隆起・侵食が進めば地形変化や気候変化等に伴って地下環境も時間変化する可能性も否定できないが、多くの場合これに関する知見が存在しないため、ここでは、隆起・侵食速度等の変動に関わるデータ、深度方向の水理特性、化学環境特性が時間変化しないものとして設定した (b-2-1)。また、侵食速度は地域によっては地形解析によって独自に推定されていることもあるが、必ずしも隆起速度との関係は明らかではなく、また時間に対して一定である保証もない。したがって、侵食速度のデータが存在する場合は保守的な設定として対象エリアにおける最大値を与え、侵食速度が不明の場合、隆起速度＝侵食速度と仮定した。超長期 (例えば、数10万年超) に亘って隆起・侵食が進んだ場合、地質分布も変化するが、ここでは文献情報に基づく整理であるため、評価期間中はたとえ侵食が進んだとしても地質分布・地質構造に大きな変化が生じないものとした。したがって、現在の地質分布、水理特性分布、地下水化学、温度構造を保持したまま、隆起・侵食によって対象母岩の相対的な位置だけが鉛直方向に変化したとし、2点間の地下水流速、温度、水質等の差を文献値から読み取り、変化量とした。

5.2.3 調査結果

表5.2-2、表5.2-3に調査結果を示す。なお、作業プロセスの明確化のため、“地質・気候関連事象発生に伴うサイト周辺の地下環境の変化“に関する調査の場合は図5.2-1のa-0～a-2-1-2-1のいずれか、“侵食・堆積による相対的なサイトの対地深度の変化による母岩のTHMCの変化“に関する調査の場合は図5.2-2のb-1～b-2-2のいずれかと対応づけをしておき、表5.2-2、表5.2-3に作業番号を明示した。表中、地下水流速等のパラメータの変化は文献値からの読み取り値あるいは初期条件や隆起速度等のパラメータを仮定しているため、あくまで定性的な変動の例示である。

表5.2-2は、地震活動・隆起・侵食による数10万年後の母岩のTHMCの特性変化、表5.2-3は、気候変動による10万年～数10万年後の母岩のTHMCの変化に関する調査結果である。このうち、①“地質・気候関連事象発生に伴うサイト周辺の地下環境の変化“に該当する事象は、昨年度、整理した下記の10の細分化事象 (E3～C6：一部起因事象のタイプが異なるが母岩への影響が同じ細分化事象については安全性への影響の観点から共通事象とした) である。②“侵食・堆積による相対的なサイトの対地深度の変化による母岩のTHMCの変化“については、下記の3の細分化事象 (E2-3～C2-3) がある。

①地質・気候関連事象発生に伴うサイト周辺の地下環境の変化

E3: 地震活動、隆起・沈降に伴う地形変化による広域地下水流動領域のH (動水勾配、流速等) の変化

E4: 地震活動、隆起・沈降に伴う侵食・堆積の進展による地形変化 (起伏変化)、広域地下水流動領域のH (動水勾配、流速等) の変化

E5-1: 地震活動に伴い、断層の亀裂・間隙構造が変化、透水性が変化し、地表からの地下水の流入による広域地下水流動領域のH (動水勾配、流速等)、C (水質等) の変化

E5-2: 地震活動に伴い、周辺岩盤内の亀裂・間隙構造が変化し、広域の水理特性 (透水性) 変化による広域地下水流動領域、母岩内のH (動水勾配、流速等) の変化

E5-3: 地震活動に伴い、応力状態が変化、過剰間隙水圧発生による広域地下水流動領域のH（動水勾配、流速等）の変化

E6: 地震活動に伴い、熱水の流入による広域地下水流動領域のH（動水勾配、流速等）、C（水質等）、T（母岩の温度、水温等）の変化

C3: 海面変化による塩淡水境界の移動、塩水浸入等による広域地下水流動領域のH（動水勾配、流速等）、C（水質等）が変化

C4: 海面変化に伴う侵食・堆積による地形変化から、広域地下水流動領域のH（動水勾配、流速等）が変化

C5: 気候変動により降水量・蒸発散量の変化、周氷河現象により、涵養量変化が起り、広域地下水流動領域のH（動水勾配、流速等）、C（水質等）が変化

C6: 気候変動に伴い降水量が変化、周氷河現象等による侵食・堆積の進行により地形変化し、広域地下水流動領域のH（動水勾配、流速等）の変化

②侵食・堆積による相対的なサイトの対地深度の変化による母岩のTHMCの変化

E2-3: 地震活動、隆起・侵食等による対象母岩の地表接近、沈降の場合は沈降・堆積により対地深度の変化によるTHMCの変化

C1-3: 海面変化による地形変化、侵食、堆積による対地深度の変化による対象母岩のTHMCの変化

C2-3: 気候変動による降水量が変化し、侵食による対象母岩の対地深度の変化による対象母岩内のTHMCの変化

E3は、地震活動、隆起・沈降に伴う地形変化がサイト周辺の動水勾配を変化させる事象である。東濃地域の高地のような隆起速度が1m/千年の場合、隆起速度を一定と仮定した場合、地下水流速は単調に増加し、深度500mにおいて50万年後の地下水流速は1.3～1.8倍程度に増加する。隆起速度が1m/千年以下の場合、これより流速への影響は小さい。E4、C4およびC6はいずれも侵食・堆積に伴う地形変化であり、E4は、地震活動・隆起・沈降を起因事象とする侵食・堆積の場合であり、C4は海面変化を起因事象とする侵食・堆積のケースである。C6は、降水量変化、周氷河現象を起因事象とする侵食・堆積のケースである。E4は、表5.2-2に示すように隆起速度一定とした場合、100mの標高変化に対して侵食に伴う起伏量の変化は5m程度であり、50万年間の動水勾配の変化は10%程度であり、単調に増加する。C4の場合、海面変化に伴って海進期には難透水性の粘土層が堆積し、海退期には堆積した粘土層が侵食によって削剥された場合を想定しており、沿岸域における河川侵食、海岸侵食による地形変化による影響も含まれている。表5.2-3に示すように最初の5万年間はキャップロックの働きをしていた難透水層が削剥されるため、時間の経過とともに地下水流速は速くなり（最大2.4倍）、5万年以降難透水性の粘土層がすべて削剥された後は、河川侵食、海岸侵食に伴う地形変化のみの影響だけとなり、流速変化の程度は $t=0$ ～5万年の比べて小さくなる。C6は、平滑斜面における削剥量は12万年間に7～16m程度であり、起伏量変化はその1/10以下であることから、水理への影響は極めて小さく、知見も存在しないことから、ここではTHMCの変化を示していない。

E5-1は、地震活動に伴う断層の透水性の変化、E5-2は周辺岩盤の透水性が変化する場合である。E5-1の場合、地震発生直後（ $t=0$ 年）は断層の全水頭が低下するため、表5.2-2に示すように野島断層の例では、断層上盤側の動水勾配が約2倍増加する結果となっている。それとともに浅部からの地下水が流入し、pHが低下する結果となっている。E5-2は、深部（ここでは花崗岩新鮮部）の地下水流速は透水性増大の影響を受け、地震活動直後（ $t=0$ 年）に流速が

1桁増加する。E5-1、E5-2とも2～10年で透水性が元の値に回復とした場合、それに連動して流速、水質も元の値に戻る。E5-3は、地震活動に伴い、応力状態が変化し、過剰間隙水圧が発生するケースであり、十勝地震活動の例では、地下水流速は数%～10%増加し、変化後は指数関数的にもとの値に回復する結果となっている。E6は、地震活動に伴い、深部から熱水が流入するケースである。E6に関しては熱水の発生、上昇プロセスが不明であるため、ここでは解析データはなく、地表の活断層周辺の地震時の水質変化、水温変化の観測値を参照している (a-0)。表5.2-2に示すように地震時に活断層周辺における湧水の温度、水質変化から、地震活動直後に温度上昇、塩分濃度の増加があり、その後は時間とともに指数関数的に低減している。

C3は、海面変化による塩淡水境界の移動、塩水浸入等によるH (動水勾配、流速等)、C (水質等) の変化であり、ここでは海面変化がEL-120mまでは時間とともに直線的に低下した場合、地下水流動、水質に与える影響の大きい急峻地形の解析例を参照している (表5.2-3)。表は、海岸線から沖合4kmのケースを表しており、 $t=5.5$ 万年前後に離水する場所である。表のように離水後、淡水が浸入すると地下水流速が上昇し始め、海面が最も低下する $t=10$ 万年において地下水流速が最も大きくなっている ($t=5.5$ 万年に対して流速は2桁以上大)。一方、塩水→淡水への水質変化は、海岸線が沖合4kmを通過する $t=5.5$ 万年よりも遅れ、7.5万年ごろに塩分濃低下がはじまり、10万年後には、C (塩分濃度) =0となっている。同時に同地点の透水係数も水質変化に応じて $\Delta k/k_0$ (変動前後の透水係数比) = $1 \rightarrow 0.4$ へと変化している。

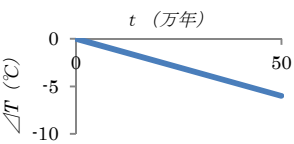
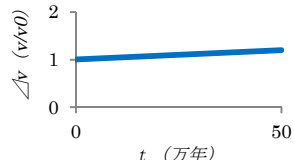
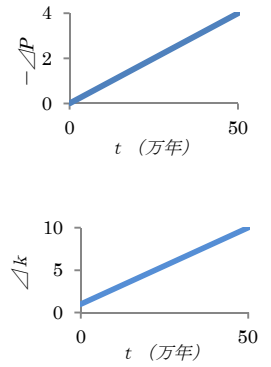
C5は、気候変動により降水量・蒸発散量の変化、氷河現象により、涵養量変化が起こることによるH (動水勾配、流速等)、C (水質等) の変化であり、ここでは海面変化による影響は含まれていない。表5.2-3に示すように東濃の例では、寒冷期の降水量低下による影響は、表層付近においては流速が3割程度低下するものの地下深部においてほとんど変化量は小さい。また、幌延における氷河による影響の事例では、5万年～10.5万年に発達していた永久凍土の融解による地下水涵養量の急激な増加が10.5万年に始まり、地下水流速は、約1万年かけて2桁以上増加する結果となっており、これに伴う地下水流速の増加は無視できない。

E2-3は、地震活動、隆起・侵食等による対象母岩の地表接近、沈降の場合は沈降・堆積により対地深度の変化によるTHMCの変化である。表5.2-2では、地震活動、非地震性の隆起による侵食のケースを示している。侵食速度は、保守的な観点から文献で示されている隆起速度と同じと仮定し、ここでは地表面が削剥され、サイトの対地深度の変化した場合のTHMCの変化を表している。T (母岩の温度、水温等) の変化については、幌延地域のモデルケースとして地温勾配を $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 、隆起速度を $0.3\text{m}/\text{千年}$ と仮定した場合、対地深度の変化による温度低下は50万年で 4.5°C となる。地熱地帯でない限り温度変化はこの程度であると考えられる。H (流速変化) については東濃の例で示すように50万年で数%～4割程度の変化である。一方、M (応力) に関しては、対地深度の変化量が50万年間で200mである場合、応力変化量は約4MPaとなり、もし、幌延の例のように亀裂を含む岩盤中、亀裂の法線方向に加わる圧力が減少した場合、透水係数は約1桁増加する可能性があり、地下水流速への影響も生じる。C (水質等) に関しては、Eh、pHの一般的な深度分布のうち最も深度変化が最も大きいケースを想定した場合であり、表に示すように仮に深度 $300\text{m} \rightarrow 100\text{m}$ に対地深度が変化した場合、Eh= $200\text{mV} \rightarrow 400\text{mV}$ 、pH= $9 \rightarrow 7.5$ に変化する結果となる。

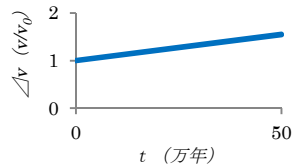
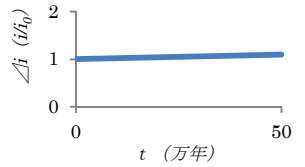
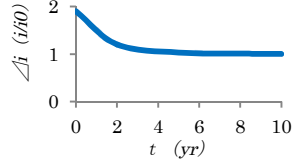
C1-3は、海面変化による地形変化、侵食、堆積による対地深度の変化による対象母岩のTHMCの変化である。表5.2-3に示すように沿岸域では、海面低下した場合は侵食基準面の位置が低下し、それに伴い河川侵食、海岸侵食が進むことによってサイトの対地深度が減少する。国内において海面低下による河川侵食深の最大は90mであり、ここでは保守的に深度90m

まで対象エリア全面が河川侵食によって削剥された場合を想定している。したがって、海面の最大低下時期である $t=10.5$ 万年の温度は、 $t=0$ 年に比べて 2.7°C 低下、地下水流速は $1.01\sim 1.2$ 倍増加、透水係数は 45% 増加（亀裂ありの岩盤の場合）、 E_h は 100mV 増加、 pH は 0.7 低下する。ただし、この数値はあくまで相対的なサイトの位置が地表に接近したことによる影響を示しており、サイトの位置が移動する間に地下環境が別の要因によって受けた影響は含まれていない。C2-3は、気候変動によって降水量が変化し、降水量変化に伴って侵食の程度が変化し、対象母岩の対地深度の変化した場合のTHMCの変化である。既往に文献によると、氷期に降水量が低下し、間氷期には降水量が増加するとされているが、侵食量と降水量との間には明瞭な相関性がないとする報告（表5.2-3）があり、よくわかっていないのが現状である。したがってここでは母岩へのTHMCの影響は他の要因のほうが大きいとし、表中には変化傾向は示さなかった。

表 5.2-2 地震活動・隆起・侵食による数 10 万年後の母岩の THMC の特性変化

事象	細分化事象 (GNo.)、影響を与える安全機能の種類	母岩の影響の種類 (空間的広がり、継続性)	地質・地下水環境特性の設定 (数字は文献)	母岩の THMC の変化の特徴、および経時変化の概念図	
起因事象→ (地質構造の変化) →侵食・堆積→ 対象母岩	E2-3: 地震活動、隆起・侵食等による対象母岩の地表接近、沈降の場合は沈降・堆積により対地深度の変化による THMC の変化 (G2-2,G-8,G-14,G-20,G-26) →隔離、閉じ込め	T (広領域、長期的)	<ul style="list-style-type: none"> 地温勾配を $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}^{(2)}$ とし、地下水流動による地温勾配への影響、地表付近の気温の影響はないものと仮定。侵食速度を隆起速度と同程度とし、隆起した分だけ地表が削剥。 幌延 URL 地域と同じ環境を想定した場合、地温勾配 $2\sim 3^{\circ}\text{C}/100\text{m}^{(3)}$、隆起速度の最大は $0.3\text{m}/\text{千年}^{(4)}$ 作業番号：b-2-1 	<ul style="list-style-type: none"> 50 万年経過後は、対象母岩は地表に 200m 接近し、温度(T)は約 6°C 低下する。 幌延の例では地温勾配を $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ とし、対地深度が 200m 変化した場合、50 万年で 4.5°C 低下する。 	
		H (広領域、長期的)	<ul style="list-style-type: none"> 東濃地域と同じ環境を想定 隆起速度は $0.4\text{m}/\text{千年}$ 前後 (期間中一定)⁽⁵⁾、侵食速度と隆起速度が同程度とする。 東濃地域の場合、標高 500-2000m における深度 1000m 以浅の花崗岩 (同一帯水層) 中のダルシー流速は $0.2\sim 0.54\text{m}/\text{yr}$、深度が 100m 増加するにつれ流速は $0.02\sim 0.07\text{m}/\text{yr}$ 減少する⁽⁵⁾。 作業番号：b-2-1 	<ul style="list-style-type: none"> 50 万年後、対象母岩の対地深度が深度 500m から 300m まで上昇した場合、地下水流速 (v) は $1.02\sim 1.4$ 倍に増加 (ただし、この中には岩盤の水理特性の深度変化に伴う影響は含まれていない。→M を参照。) なお、対地深度の変化に伴い、塩水 (化石塩水) 環境→淡水環境への変化する可能性もあるが、これによる流速変化への影響は小さい。 	
		M (広領域、長期的)	<ul style="list-style-type: none"> 幌延 URL 地域と同じ環境を想定 対象母岩の対地深度が変化し、応力状態の変化に伴い亀裂の透水性が変化する⁽⁶⁾ケースを想定 静岩圧 (堆積岩) の深度変化は約 $2\text{MPa}/100\text{m}$、隆起速度を $0.3\text{m}/\text{千年}$ (期間中一定)、侵食速度と隆起速度が同程度とする⁽⁶⁾。 幌延地域 (稚内層のうち亀裂性岩盤) の例のように透水性に深度依存性があり、$\Delta k=1$ 桁/100m 程度 (深度 100m ~ 1,000m はほぼ深度あるいは圧力と透水性との関係は線形) とする⁽⁷⁾。 作業番号：b-2-1 	<ul style="list-style-type: none"> 対象母岩の対地深度が 300m の場合、50 万年後、母岩は深度 100m まで移動するため、応力変化は $\Delta P=-4\text{MPa}$。応力低下に伴い、透水性係数 (k) が約 1 桁増加する可能性あり。 	

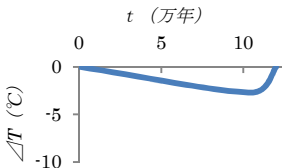
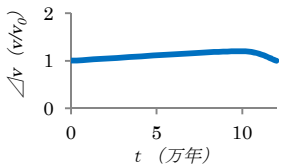
		<p>C (広領域、長期的)</p>	<p><地下水化学></p> <ul style="list-style-type: none"> ・隆起速度は幌延と同程度の 0.3m/千年を想定 (期間中一定)、侵食速度と隆起速度が同程度とする。 ・幌延の場合、深度 300m 以深の Eh は -220mV と安定。一方、pH は浅部に向かうにつれ 6.5→7.5 と増加⁽⁸⁾。 ・しかし、一般には、酸化還元電位(Eh)は、深度依存性があり、深度 800m 以浅は Eh-400mV→400mV (最大変化幅)、それ以深は 200-400mV で一定。ただし、堆積岩の場合と結晶質岩の場合とで異なり、堆積岩は地表近くまで還元的⁽⁹⁾。 ・pH は一般には、堆積岩地域 (表層風化なし) の場合 pH=6~8 で深度との相関は明瞭ではない⁽⁸⁾。花崗岩地帯では深部→浅部に向かうにつれ pH10→6 前後に変化⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ ・ここでは隆起速度を幌延と同じ場を設定し、Eh、pH、Cl 変化は保守的なケースを考えて上記の最大の変化幅のケースを仮定 <p>・作業番号 : b-2-1</p> <p><地下水化学→透水性></p> <ul style="list-style-type: none"> ・幌延 URL 地域と同じ環境を想定 ・対地深度の変化により、塩水 (化石塩水) →淡水へ対象母岩の地下水環境が変化した場合、周辺母岩が低透水性の泥岩の場合、塩分濃度変化が透水係数に影響を及ぼす実験例を参照⁽¹²⁾。 ・作業番号 : b-2-1 	<p><地下水化学></p> <ul style="list-style-type: none"> ・対象母岩の対地深度は深度 300m の場合、50 万年後は深度 100m まで上昇する。深度 300m→100m の場合、Eh200mV→Eh400mV に変化。 ・化石塩水→淡水の場合、最大、塩分濃度 (正規化) は C=1→C=0 へ変化 ・pH 変化は花崗岩の例とし、深度変化に応じて pH=9→pH7.5 前後に変化 <p><地下水化学→透水性></p> <ul style="list-style-type: none"> ・対地深度が変化し、地下水環境が塩水→淡水へ変化した場合、期間内に対象母岩内の透水係数 (k) が最大 0.4 倍 (Δk: 透水係数変化) に低下する可能性あり。透水係数の変曲点は塩淡水境界通過時期による (図は通過時期が 25 万年の場合)。 	<p>The figure consists of three vertically stacked line graphs sharing a common x-axis representing time (t) in 10,000 years, ranging from 0 to 50.</p> <ul style="list-style-type: none"> Top Graph: Shows Eh (mV) on the y-axis (0 to 400). The Eh value starts at approximately 200 mV at t=0 and increases linearly to approximately 400 mV at t=50. Middle Graph: Shows pH on the y-axis (7 to 10). The pH value starts at approximately 9.2 at t=0 and decreases linearly to approximately 7.5 at t=50. Bottom Graph: Shows the ratio of permeability coefficients $\Delta k (k/k_0)$ on the y-axis (0 to 2). The ratio starts at 1.0 at t=0, remains constant until about t=10, then drops sharply to approximately 0.4 by t=25, and remains constant at 0.4 until t=50.
--	--	--------------------	---	--	--

<p>起因事象→地質構造の変化→水文地質学的変化→対象母岩</p>	<p>E3: 地震活動、隆起・沈降に伴う地形変化による広域地下水流動領域のHの変化 G1,G7,G13,G19, G25 →閉じ込め</p>	<p>H (広領域、長期的)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 東濃地域 (MIU 周辺 (EL200-250m)) と同じ地質環境を想定 東濃地域の地下水流速は、過去 150 万年間の地下水流動解析結果⁽⁵⁾を参照 隆起速度は場所によって異なり低地部では 0.1m/千年、高地部では約 1m/千年⁽⁵⁾ 過去 110 万年～現在の地形勾配の変化が将来も継続するものと仮定 (地形勾配の時間変化率一定と仮定)。 作業番号 : a-1-1 	<ul style="list-style-type: none"> GL-500m における流速は、隆起前の約 1.3～1.8 倍 (Δv: 流速変化) となる (東濃地域の隆起速度=1m/千年の高地部をケース)。 	
<p>起因事象 (地震) →地質構造の変化→侵食と堆積→水文地質学的変化→対象母岩</p>	<p>E4: 地震活動、隆起・沈降に伴う侵食・堆積の進展による地形変化 (起伏変化)、広域地下水流動領域のHの変化 G2',G8', G-14',G-20',G-26' →閉じ込め</p>	<p>H (広領域、長期的)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 侵食のみによる地形変化を設定するため、高度分散量と侵食量との関係を利用⁽¹³⁾ 瑞浪サイトを例とし、50 万年間の隆起速度 0.2m/千年とした場合、標高変化は 300m→400m、これに対応する高度分散量の変化は 55m→60m⁽¹³⁾ 谷幅が変化しないとすれば、地形勾配の変化は初期地形に対して 1.1 倍 (ただし、この中には E3 のうちのテクトニックな傾動分も含まれているため実際はこれ以下) 作業番号 : a-2-2 	<ul style="list-style-type: none"> 地形勾配が 50 万年間で 1.1 倍とした場合、平均動水勾配 (i) は 1.1 倍となる (Δi: イベント前後の動水勾配変化量)。 	
<p>起因事象 (地震) →水文地質学的変化→対象母岩</p>	<p>E5-1: 地震活動に伴い、断層の亀裂・間隙構造が変化、透水性が変化し、地表からの地下水の流入による広域地下水流動領域のH,Cの変化 G5-1,G11-1,17-1, G23-1 →閉じ込め</p>	<p>H (狭領域、短期的)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 地震活動を想定し、地震時に断層の透水係数のみ 2 桁増加したとした場合の野島断層の解析事例を参照⁽¹⁴⁾。透水性の回復は E5-2 の知見から、2 年で 9 割まで回復、10 年で回復と仮定。 ここでは断層以外の岩盤の透水性、降雨条件等は変化しないと仮定。 作業番号 : a-1-2-2 	<ul style="list-style-type: none"> 断層上盤側 (断層から 1～2km 離れた地点) の EL-300m の動水勾配は一時的に約 1.0～1.9 倍に増加する (Δi: イベント前後の動水勾配変化量)。透水性が回復しない場合は、動水勾配は変化したままもとに戻らない (野島断層東側の丘陵部の例を参照)。 	

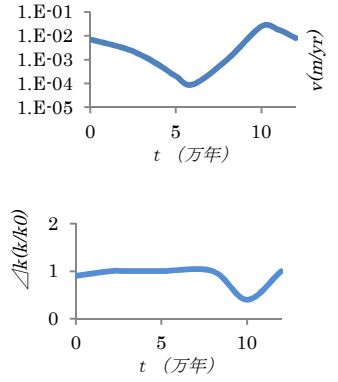
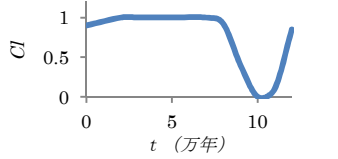
		<p>C (狭領域、短期的)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 地震 2 年後の調査ボーリングにおけるコア観察から地下水との反応鉱物の分析から酸化性的な地下水流入をについて言及した野島断層の事例を参照。 事例では深度 400m 前後までは地震後、新たに酸化鉱物ができているとし、周辺の流入地下水の pH が弱酸性から中性に変化したとしている⁽¹⁵⁾。 断層の透水性が 2 年後に回復する (E5-1 の H の知見) とし、酸化性的な地下水の流入が停止したと仮定。 作業番号: a-0 	<ul style="list-style-type: none"> 断層周辺 100~200m の深度 400m 前後の pH は地震直後は弱酸性 (一般的な地表付近の pH は 6 前後) であり、地震後時間の経過とともにもとの値に回復する。 ただし、深度 400m 以深については不明 	
<p>E5-2: 地震活動に伴い、周辺岩盤内の亀裂・間隙構造が変化し、広域の水利特性 (透水性) 変化による広域地下水流動領域、母岩内の H の変化 G5-2,G11-2,G17-2, G23-2 →閉じ込め</p>		<p>H (中~広領域、短期的)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 断層周辺岩盤の透水性が地震時に変化したとした解析事例を参照。(野島断層周辺の淡路島の解析事例) 表層 200-300m の風化部の透水係数が地震後 2 桁増加したものと設定 (現地の水位変化に関する観測事実を説明するために解析的に透水係数を最大 2 桁増大させる必要があるとの知見に基づく)⁽¹⁶⁾。 地下深部の新鮮岩の透水係数は最大 1 桁増加⁽¹⁶⁾。 断層および周辺の透水性は 10 年で地震前の状態に回復、2 年で 9 割程度まで回復 (地震活動後の水位回復事例から推定)⁽¹⁷⁾。 野島断層は平均 2000 年間隔 (1100~3400 年)⁽¹⁸⁾で活動を繰り返し、同じような岩盤の透水性変化が地震時に発生するものと設定。 作業番号: a-1-1 	<ul style="list-style-type: none"> EL-500m レベルの花崗岩新鮮部における流速 (v) は、断層から 1-2km 離れた地点において約 1 桁程度増加、EL-1000m レベルでは約 5 倍に増加 (右図は深度 500m の場合) 透水係数が数か月~2 年で元の値に回復した場合、変化した流速は 2 年前後で元の流速に回復 (上図: 短期の流速変化 (Δv), 下図: 長期の流速変化 (Δv)) 地震直後、時間とともに流速は減少。 	
<p>E5-3: 地震活動に伴い、応力状態が変化し、間隙水圧変化による広域地下水流動領域の H の変化 G5-3,G11-3,G17-3, G23-3 →閉じ込め</p>		<p>H (広領域、短期的)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 遠地震 (十勝地震の例) における水位変化を模擬した地下水流動解析事例を参照⁽¹⁹⁾。 十勝平野において水位変化 4m (周辺における最大値) とした場合 水位の回復は深度数 100m において数 10 日 (水位回復については十勝の指数関数的な水位変化例を参照。上記解析ではこれと整合的な結果となるように水理パラメータが設定されている⁽¹⁹⁾。ちなみに南海道地震の場合は 70-80 日 	<ul style="list-style-type: none"> 震源から約 100km 離れた地点の水位変化量 (最大 4m) に相当する流速変化率は地震前に比べて数%~10%程度変化 (EL-数 100m) 70 日程度で、もとの水位に回復 	

			<p>で水位が回復⁽²⁰⁾</p> <ul style="list-style-type: none"> 作業番号：a-1-1 		
<p>起回事象（地震） →熱水活動→水文地質学的変化 →対象母岩</p>	<p>E6: 地震活動に伴い、 熱水の流出入による広 域地下水流動領域の H,C,T の変化 G6,G12,G18,G24 →閉じ込め</p>	T（狭～中領 域、短期的）	<ul style="list-style-type: none"> 地震時に熱的影響範囲は活断層中心から外側 2-3km の範囲。ただし、震源断層から数 10km 離れた亀裂帯において温度変化あり（信濃褶曲帯の例）⁽²¹⁾。 これまで報告されている中で、地震断層、活断層沿いの深度 500m の熱水の最高温度は 200℃前後（野島断層）⁽²²⁾。ただし、地震前後の温度変化は、奥尻島の例で、地表付近で 20℃前後が報告されている⁽²³⁾。 地震後、信濃褶曲帯のケースでは温度の回復に 2～3 年を要しており⁽²¹⁾、ここでは回復に 3 年と設定。水温回復は、猪名川の水溫減衰曲線（指数関数に近似、地殻圧縮歪みの減少に伴う水みちとなる亀裂開口部の閉塞）を参照⁽²⁴⁾。 作業番号：a-0 	<ul style="list-style-type: none"> 震源から約 80 km 離れた地点の地震時、亀裂帯（地表部）の水溫変化 (ΔT) は 20℃（奥尻島の例を参照） 3 年で元の温度に回復した場合（信濃褶曲帯の例を参照）。 	
		H（狭～中領 域、短期的）	—	<ul style="list-style-type: none"> 地震時の水溫変化、水質変化から熱水流体が深部から上昇し、浅部地下水と混合・希釈したと推定。ただし、供給された熱水流体の流入の影響による周辺地下水の流向、流速変化については不明。 	—
		C（狭～中領 域、短期的）	<ul style="list-style-type: none"> 地震時に活断層周辺の地下水の水質変化の事例を参照（奥尻島、野島断層の例） 活断層中心から 1km 以内。 地震後、奥尻島の例を参考に地表部において最大 40%程度 の Na と Cl イオンの増加⁽²³⁾ 水質の回復は 1 年以上（3 年）水質回復パターンは水溫変化パターンと調和的とされていることから、指数関数的に低下したとした⁽²³⁾。 作業番号：a-0 	<ul style="list-style-type: none"> 震源から約 80 km 離れた地点において地震直後に断層、亀裂に沿って熱水が上昇、天水との混合比率が変化し、Na と Cl イオン濃度 (Cl) が 40%増加し、3 年で元の水質に戻（奥尻島の例を参照）。 地震後、硫酸イオンの増加が報告されている事例もあるが、変化する水質の種類は深部流体のソースによってもされており、ソースの起源・成因については不明。 	

表 5.2-3 気候変動による 10 万年～数 10 万年後の母岩の THMC の変化

事象	細分化事象 (GNo.)、影響を与える安全機能の種別	母岩の影響の種別 (空間的広がり、継続性)	地質・地下水環境特性の設定 (数字は文献)	母岩の THMC の変化の特徴、および経時変化の概念図	
海面変化→侵食・堆積→対象母岩	C1-3: 海面変化による地形変化、侵食、堆積による対地深度の変化による対象母岩の THMC の変化 G53-2 →隔離、閉じ込め	T (沿岸域、長期的)	<ul style="list-style-type: none"> 海面低下によって侵食基準面が変化するとサイトの対地深度も変化する。海面低下による河川の侵食深の最大は 90m であり⁽²⁵⁾、直下に沿岸サイトがあったとし、侵食による対地深度の変化を 1 サイクル 12 万年間で 90m と設定。 高海面期においては、氷期に侵食された領域の上に海面上昇分だけ堆積物が堆積し、再び対地深度がもとに戻ると設定。 地温勾配を既往の知見から、$3^{\circ}\text{C}/100\text{m}^{(2)}$ (E2-3H の設定に同じ) とし、地下水流動による地温勾配への影響、地表付近の気温・水温の影響はないものと仮定。 作業番号：b-2-1 	<ul style="list-style-type: none"> 対地深度が侵食によって最大 (ここでは保守的なケースを想定して全面侵食と仮定) となるのは、海面低下した氷期においては母岩の温度 (T) は、2.7°C 低下する。t=10.5 万年～12 万年は、再び海面上昇、堆積による対地深度の増加によって 2.7°C 上昇。 	
		H (沿岸域、長期的)	<ul style="list-style-type: none"> 侵食による対地深度の変化を 1 サイクル 12 万年間で 90m と設定 (設定は C1-3T に同じ)。 対象地点が沿岸域にあり、現在の塩淡水境界付近に位置する場合は、海岸侵食あるいは堆積による対地深度の変化により、塩水→淡水、あるいは淡水→塩水へ環境が変化する可能性もある。これについては塩淡水境界の移動による影響 (C3-H) で扱う。 ここでは対地深度変化による影響として、E2-3H の東濃と同じ環境条件の変化を仮定し、サイトの深度変化のみ削剥量、堆積量に対応する ±90m とした場合を想定。 作業番号：b-2-1 	<ul style="list-style-type: none"> 対地深度が 90m 減少した場合、地下水流速 (v) は約 1.01～1.2 倍増加 (図は 1.2 倍の場合) 	

		<p>M (沿岸域、長期的)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 対地深度変化による影響として、E2-3H の東濃と同じ環境条件を仮定し、対地深度の変化量は保守的に見て削剥量の最大 90m 変化した場合を想定 (設定は C1-3T に同じ)。 ・ 静岩圧 (堆積岩) の深度変化は約 2MPa/100m とし、E2-3H と同じ環境条件とする。 ・ 透水係数についても E2-3H と同じ環境条件の変化とし、深度変化量のみを削剥量、堆積量に対応する ±90m とした場合 ・ 作業番号 : b-2-1 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 対地深度が 90m 減少 (地表接近) した場合、応力解放の量は 1.8MPa 減少 (ΔP : 初期値に対する圧力変化)。 ・ 対地深度が 90m 減少 (地表接近) した場合、透水係数 (k) は 45% 程度増加する。 	
		<p>C (沿岸域、長期的)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 対地深度変化により、塩水→淡水、あるいは淡水→塩水へ環境が変化する可能性もある (塩淡水境界の移動による影響については C3-H に同じ)。対地深度の変化を想定した場合、環境条件は E2-3H と同じ設定とし、深度変化量のみを削剥量、堆積量に対応する ±90m とした (設定は C1-3T に同じ)。 ・ 作業番号 : b-2-1 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 対地深度が海面低下期に 90m 減少 (地表接近)、高海面期に 90m 増加とした場合、深度変化に応じて Eh は、200mV → 300mV → 200mV、pH は、9 → 8.3 → 9 に変化 (ここでは、淡水領域の場合) 	
<p>気候変動→侵食・堆積→対象母岩</p>	<p>C2-3: 気候変動による降水量が変化し、侵食による対象母岩の対地深度の変化による対象母岩内の THMC の変化 G55-2 →隔離、閉じ込め</p>	<p>THMC (広域、長期的)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 降水量と長期的な侵食量との間には相関性が低く⁽⁸⁾、観測事実から E2-3、C1-3 に比べると THMC の影響の程度は小さいと想定される。 		
<p>海面変化→水文地質学的変化→対象母岩</p>	<p>C3: 海面変化による塩淡水境界の移動、塩水浸入等による広域地下水流動領域の HC が変化</p>	<p>H (沿岸域、長期的)</p>	<p><地下水水理> ・ 海面変化によって EL-120m まで t=10 万年まで直線的に海水位が低下し、その後 t=12 万年まで上昇し、現在の位置に戻る設定。海面変化を考慮し</p>	<p><地下水水理> ・ 塩淡水境界が通過し、淡水化が急激に進んだ場合、急激に流速が速くなる。流速 (v) 変化は 2 桁以上変化する可能性あり。ただし、ここでは海岸線付近</p>	

<p>G52 →閉じ込め</p>		<p>た沿岸堆積岩（仮想モデル）における地下水流動解析事例を参照。塩淡水境界付近（ここでは海進時の海岸線から4km沖合、EL-500mにサイトがあるケースを想定）の塩水と淡水領域の地下水流速変化に関する計算結果のケースを参照⁽²⁶⁾。ちなみに、塩淡水境界が通過しない位置においては流速変化はなし。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・塩淡水境界移動中に、対象母岩の地下水環境が塩水→淡水、淡水→海水に変化したとしたケースを想定 ・ここでは海面変化に対して塩淡水境界が追随する保守的なケースを想定（海岸地形が急峻の場合塩淡水境界は動的平衡にあり、海面の昇降に追随するとされている⁽²⁶⁾） ・作業番号：a-1-1 <p><水質変化→岩盤水理></p> <ul style="list-style-type: none"> ・海水→淡水、淡水→塩水に水質を置き換えた場合の幌延における室内試験結果を参照⁽²⁷⁾。海面変化によりサイトの水質が塩水→淡水、淡水→塩水に変化した場合を想定。 ・透水係数の変化幅は塩分濃度の変化量に比例（塩分濃度の変化パターンはC3-Cを参照） ・作業番号：a-0 	<p>の地形が急峻の場合であり、地形がなだらかな場合は、塩淡水境界が追随しないため、急峻地形のケースより流速変化は小さい。</p> <p><水質変化→岩盤水理></p> <ul style="list-style-type: none"> ・海面低下により、海水→淡水の場合、透水係数は0.4倍程度まで低下し、一方、海面上昇により淡水→海水の場合、その後、約1.7倍に増加する可能性がある（図中Δkは海水→淡水→海水への地下水組成の変化に伴う透水係数変化量）。 	
	<p>C（沿岸域、長期的）</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・海面低下における塩淡水境界の移動についての解析事例を参照。 ・海面変化により海水→淡水→海水に地下環境が変化したケースを想定。淡水化の程度は海岸線からの距離に依存するが、ここでは現海岸線から4km沖合の地下を想定⁽²⁶⁾。 ・作業番号：a-1-1 	<ul style="list-style-type: none"> ・海域において塩淡水境界が移動し、海水→淡水→海水に地下水環境が変化した場合、塩分濃度はCI=1→CI=0→CI=1に変化 	

<p>海面変化→侵食・堆積→水文地質学的変化→対象母岩</p>	<p>C4: 海面変化に伴う侵食・堆積による地形・地質変化から、<u>広域地下水流動領域のHが変化</u> G53' →閉じ込め</p>	<p>H (沿岸域、長期的)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 海面低下 (低下速度一定) により海岸線付近に難透水性粘土 (ラグーン堆積物の一種) が削剥。幌延の解析例参照。 難透水性層の厚さは河口付近において数 10cm~3m であり、高海面期に堆積。将来 5 万年後までに粘土層が全面削剥されるものと仮定⁽²⁸⁾。 作業番号: a-1-1 	<ul style="list-style-type: none"> 現海岸線直下 EL-数 10~300m では、削剥後は削剥前に比べて水平方向の流速 (v) は 2.4 倍、鉛直方向は 0.4~0.16 倍程度に変化 (上向きから水平方向に流向が変化) する。ただし、この数値には陸域の隆起に伴う地形変化に伴う影響も含まれる。 5 万年以降は E3 に従い、地形変化のみによる流速変化が支配的であり、10 万年後の流速 (v) は計算結果によると 5 万年後の 1.1 倍程度まで増加する 	<table border="1"> <caption>Figure 1: Change in velocity ratio Δv (v/v₀) over time t (万年)</caption> <thead> <tr> <th>t (万年)</th> <th>Δv (v/v₀)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>1.0</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>~2.4</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>~2.6</td> </tr> </tbody> </table>	t (万年)	Δv (v/v₀)	0	1.0	5	~2.4	10	~2.6										
t (万年)	Δv (v/v₀)																						
0	1.0																						
5	~2.4																						
10	~2.6																						
<p>海面変化→局地的気候変動→水文地質学的変化→対象母岩</p>	<p>C5: 気候変動により降水量・蒸発散量の変化、周氷河現象により、<u>涵養量変化が起こり、広域地下水流動領域のH,Cが変化</u> G54-1,G54-2,G56 →閉じ込め</p>	<p>H (広域域、長期的)</p>	<p><降水変化></p> <ul style="list-style-type: none"> 海面の昇降なし。涵養量のみ変化させた場合の東濃の解析事例を参照。 東濃の事例を参照 (氷河なしのケース)⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾: 涵養量を間氷期 1.43mm/d→氷期: 1.12mm/d に低下させた場合の地下水流動への影響解析 作業番号: a-1-1 <p><永久凍土融解による影響></p> <ul style="list-style-type: none"> 幌延の解析例参照 (氷河ありのケース)。ここでは、氷期に丘陵部に 100m の厚さの山岳氷河が形成、後氷期に氷河が融解し地下水流動への影響を評価した解析であり、融氷時には氷河の厚さ分の水圧が地表面に付加されると設定している⁽³¹⁾。 0~6 万年まで涵養量減少、6 万年~10.5 万年までは氷河発生、永久凍土発達により涵養量=0 とし、10.5 万年以降は氷河、永久凍土融解に伴い地下水涵養が発生 (加圧涵養) するものと設定。 作業番号: a-1-1 	<p><降水変化></p> <ul style="list-style-type: none"> 東濃の例では、EL0m 以下の地下深部では、ほとんど流速は変化しない一方、EL+400~+600m の高標高部では間氷期→氷期 (t=10 万年) に、涵養量低下に伴って最大 0.38→0.28m/日 (0.73 倍) に流速 (v) が減少する。 <p><永久凍土融解による影響></p> <ul style="list-style-type: none"> 幌延の例では、10.5 万年以降 (後氷期) に氷河が融解した場合、丘陵部において EL-300m における全水頭は約 70m 急上昇し、一方、地下水流速 (v) は 10.5 万年以降に 2 桁以上増加し、これが 1 万年程度で元の水位、流速に回復する。なお、0~6 万年の流速低下は、涵養量の減少、融氷後の水位低下による影響、6 万年~10.5 万年は、永久凍土発達による涵養量 0 による影響。 	<table border="1"> <caption>Figure 2: Change in velocity ratio Δv (v/v₀) over time t (万年)</caption> <thead> <tr> <th>t (万年)</th> <th>Δv (v/v₀)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>1.0</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>~0.8</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>~0.73</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <caption>Figure 3: Change in velocity Δv (m/yr) over time t (万年)</caption> <thead> <tr> <th>t (万年)</th> <th>Δv (m/yr)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>~1.0E-02</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>~1.0E-03</td> </tr> <tr> <td>10.5</td> <td>~1.0E-01</td> </tr> <tr> <td>11</td> <td>~1.0E-02</td> </tr> </tbody> </table>	t (万年)	Δv (v/v₀)	0	1.0	5	~0.8	10	~0.73	t (万年)	Δv (m/yr)	0	~1.0E-02	5	~1.0E-03	10.5	~1.0E-01	11	~1.0E-02
t (万年)	Δv (v/v₀)																						
0	1.0																						
5	~0.8																						
10	~0.73																						
t (万年)	Δv (m/yr)																						
0	~1.0E-02																						
5	~1.0E-03																						
10.5	~1.0E-01																						
11	~1.0E-02																						

		C (広域域、長期的)	<ul style="list-style-type: none"> 解析例は C5-H (幌延の事例) と同じ。氷期に丘陵部に 100m の厚さの山岳氷河が形成。後氷期に氷河が融解。氷河発達中は、涵養量 0mm/d と設定 C=1 を初期値とする。 作業番号： a-1-1 	<ul style="list-style-type: none"> 地下水の水質への影響は主に氷期における永久凍土の発達、後氷期における凍土の融解による化石塩水の洗い出しに伴う塩分濃度変化。 丘陵部の EL-300m の地下水の正規化塩分濃度は 1.0→0.45 に低下するとされている (Cl: 正規化塩分濃度)。10.5 万年以降の急速な淡水化は融水による影響が現れている。淡水化の程度は対象深度によって異なる (深部ほど淡水化の程度は小さい)。 	<p>The graph plots normalized salt concentration (Cl) on the y-axis (ranging from 0 to 1) against time (t in 10,000 years) on the x-axis (ranging from 0 to 10). The concentration is constant at 1.0 until t=10, where it begins to drop, reaching approximately 0.45 at t=10.5 and continuing to decrease to about 0.4 at t=11.</p>
海面変化→局地的気候変動→侵食・堆積→水文地質学的変化→対象母岩	C6: 気候変動に伴い降水量が変化、周氷河現象等による侵食・堆積の進行により地形変化し、 <u>広域地下水流動領域のHの変化</u> G55',G56' →閉じ込め	H (広域域、長期的)	<ul style="list-style-type: none"> C2-3 に同じく地形変化による影響は小さい。1 サイクル (12 万年間) で平滑斜面の侵食量は幌延の場合、7m~16m 。地下深部の水理への影響は小さいと考えられる。 		

5.2.4 まとめ

平成23年度報告書において整備したFEPデータベースの事象のうち、地震・断層活動、隆起・沈降、気候変動に関する事象を対象に母岩領域に与える影響を安全機能のうち、「隔離」、「閉じ込め」に関わるTHMCの時間的、空間的变化の整理を行った。安全機能に与える影響の特徴の観点から、特に、「閉じ込め」のみに影響を及ぼす“地質・気候関連事象発生に伴うサイト周辺の地下環境の変化”と「閉じ込め」だけでなく、「隔離」にも影響を及ぼす“侵食・堆積による相対的なサイトの対地深度の変化による母岩のTHMCの変化”について対象領域における母岩への時間的影響について整理した。

平成24年度の母岩への影響の特徴に関する調査の結果、事象発生に伴うTHMCの時間的变化を整理すると下記の4ケースに整理される。ただし、影響の規模は本調査による事例に基づくデータを参考としており、その範囲内における最大規模を表している。影響大とは、事象発生前に比べて1桁程度の変化量を目安に便宜上、ここでは影響大としている。また、影響の継続性については、数千年～1万年以上同じ状態が継続する場合を継続性ありとし、数千年以下で影響が低減し、事象発生前の状態に戻る場合を継続性なし（短期的）とした。

Case-1：対象母岩への影響が大であり、かつ時間的にも継続性のある事象

Case-2：対象母岩への影響が大であるが、時間的継続性の無い（短期的な）事象

Case-3：対象母岩への影響が小であるが、時間的継続性のある事象

Case-4：対象母岩への影響が小であり、時間的継続性の無い（短期的な）事象

表5.2-4 母岩への影響の規模、継続性に関する特徴

ケース	影響の規模	継続性	事象 No.(THMC)	備考
Case-1	影響大	有	E2-3(M,C), C3(H, C), C5(H,C)	C5(H,C)：C5のうち、気候変動のうち、周氷河現象に関連する水理、化学への影響、C5(H)：気候変化のうち、降雨による水理への影響
Case-2		無	E5-1(C), E5-2(H), E6(T),	
Case-3	影響小	有	E2-3(T,H), E3(H),E4(H), C1-3(T,H,M,C), C3(H,△k), C4(H), C5(H), C5(C)	
Case-4		無	E5-1(H), E5-3(H), E6(C),	

表5.2-4に示す通り、Case-1とした影響の規模が大きく、継続性が大とした事象はE2-3、C3、C5であり、このうち、C5(H,C)は、周氷河現象を問題とする北海道や本州の高標高地域においては想定すべき地域限定の事象である。また、C3のような海面変化に伴う影響は、処分場が沿岸立地である場合多くの場所において考慮すべき重要な事象であり、またE2-3は侵食に伴う対地深度の変化に関する事象であり、侵食速度の大きい中～高地においては「隔離」「閉じ込め」の両方に影響を与える重要な事象として想定しておかなくてはならない。一方、Case-2はいずれも地震活動に伴う事象であり、短期的な現象ではあるが、とくに水理に関しては表5.2-2に示すように、仮に震源から数km離れた処分深度に相当する地下深部（地下300m以深）においても地下水流速が1桁程度増大する可能性があることから、「閉じ込め」に影響を与えるという観点から、E5-2（H）は考慮すべき重要な事象であると考えられる。また、処分場を含む地下環境は周辺の地形・地質条件等の境界条件にも左右されるため、処分サイトがある程度絞り込まれ評価シナリオが設定された段階において、海面変化速度、侵食速度、あるいは融氷による涵養速度、地震規模等のうちいずれが安全評価上重要項目となるかが推定されることになるものと考えられる。

今後の課題として、今回、解析事例をもとに地震・断層活動、隆起・沈降、気候変動を対象

に母岩へのTHMCの変化を整理したが、この整理結果は、あくまで既往の事例と地質、気候条件や境界条件が同じとした場合を想定している。例えば、対象地点が涵養域か流出域かによっても地震活動や隆起等の起因事象が地下水流速や流向の変化に与える影響が異なり、また地質構造に起因する透水性構造の違いによっても水圧変化や流速等の応答が異なる。また、ほとんどの解析事例では、幌延地域のように地下深部においてキャップロックの存在によって高い水圧が保持されているような閉塞性の地下水環境は想定されておらず、地形支配の連続的な水理場が前提となっている。今後は、処分候補地点、処分場のレイアウトがある程度絞り込まれ、サイトに近い地質環境、水理条件が明らかとなった場合、それらの境界条件を設定したうえで感度解析的検討を行うことによって、対象地区の母岩周辺のTHMCに影響を与える重要な事象を抽出することが可能であるものと考えられる。なお、火山活動やその他の事象については、母岩領域の影響の規模、継続性については未整理であり、同様な調査、整理を今後行っていく必要がある。

5.3 地質・気候関連事象の発生からバリア内の THMC の特性変化に至る影響の連鎖の整理

5.3.1 背景・目的

本事業では、処分システムへの影響の要因を3タイプに分類し、それぞれの要因に対するシナリオ設定手法の整備を行っている。それは、「人工バリアの変遷である内的条件に関連したシナリオ」、「処分の工学技術の適用に関連したシナリオ」、「地質・気候関連事象である外的条件に関連したシナリオ」である。

それらのシナリオは、人工バリアや周辺母岩の内的条件（ガラス固化体の崩壊熱、再冠水による緩衝材の膨潤や地下水の流入等）、外的条件（地震活動、隆起・沈降、気候変動、火山・マグマ活動等）、および、地層処分場の建設・操業・閉鎖段階で用いられる工学技術適用上のヒューマンエラー等の様々な条件を起因事象として、発生する可能性のある派生事象の連鎖を考慮して、構築されなければならない。それら起因事象とそれを受けて発生する派生事象の連鎖は、処分場閉鎖後の長期安全性に関係するものと考えられる。これら起因事象と派生事象の連鎖は、多岐に亘るため、地層処分の科学的知見に関する情報を体系的に整理し、シナリオ整備を進める必要がある。その方法として、原子力機構では、FEPに基づいたシナリオ設定手法の整備を進めている。これを受け、平成23年度までに「地質・気候関連事象である外的条件に関連したシナリオ」の整備では、FEPデータベースとして、地質・気候関連事象が広域地下水流動領域や処分システムに与える影響の種類や特徴に関する知見の整備を進めている。

地層処分の安全審査においては、閉鎖後の人工バリア、天然バリアの超長期に亘る安全性の確保が求められている。このため、地質環境の長期変遷が地層処分場の人工バリアや周辺母岩の安全機能の喪失・低下に至る影響の連鎖を把握し、地質・気候関連事象が発生した場合の人工バリアや周辺母岩の安全機能への影響を具体的に検討することが重要である。そこで、原子力機構では、地質・気候関連事象の発生を考慮した場合の人工バリアや周辺母岩への影響を明らかにするため、HLWのFEPデータベースに関連付けを進めている。

地質・気候関連事象の発生を考慮した場合の人工バリアや周辺母岩への影響を明らかにするため、平成23年度には、地質・気候関連46事象（細分化177事象）と安全機能（隔離、閉じ込め）との関係整理を行っており、母岩のTHMCへの影響の特徴がまとめられている。この結果、地震活動、隆起・沈降、気候変動、泥火山、火山・マグマ活動、深部流体について、原子力発電環境整備機構（2010）⁽¹⁾に示された文献調査段階での“自然現象の著しい影響の回避”の要件に該当する対象を除き、安全機能の観点から母岩への影響が共通するもの（例えば起因事象が異なるが母岩に与える影響の特徴が同じもの）を集約した。表5.3-1～表5.3-3にその集約した事象分類を示す。この結果を受け、集約した事象のうち、地震活動、隆起・沈降に関してHLWのFEPデータベースとの関係整理を行った。

平成24年度は、今まで地質・気候関連事象とHLWのFEPデータベースとの関係が整理されていなかった、気候変動、泥火山、火山・マグマ活動、深部流体を対象として、同様の関係整理を行った。これにより、既往のHLWの「安全性への影響の可能性」にこれら外的条件を起因事象として取り込むことで、人工バリアや周辺母岩への影響を明らかにすることができた。

表 5.3-1 安全機能の観点から見た事象分類（地震活動、隆起・沈降）

影響事象 No.	地震活動、隆起・沈降に関する事象の内容	母岩に与える影響の種類
E2-3	地震活動、隆起・侵食によるサイトの地表接近、沈降の場合は沈降・堆積により対地深度が変化	THMC
E3	地震活動、隆起・沈降に伴う地形変化	H
E4	地震活動、隆起・沈降に伴う侵食・堆積の進展による地形変化	H
E5-1	地震活動に伴い、断層の亀裂・間隙構造が変化し、地表との地下水の流出入	HC
E5-2	地震活動に伴い、周辺岩盤内の亀裂・間隙構造が変化し、地盤の水利特性が変化	H
E5-3	地震活動に伴い、応力状態が変化し、間隙水圧が変化	H
E6	地震活動に伴い、断層沿いに熱水が流入	HCT

表 5.3-2 安全機能の観点から見た事象分類（気候変動）

影響事象 No.	気候変動に関する事象の内容	母岩に与える影響の種類
C1-3	海面変化による地形変化、侵食によるサイトの対地深度が変化	THMC
C2-3	気候変動による降水量が変化し、侵食によるサイトの対地深度が変化	THMC
C3	海面変化による塩淡境界の移動に伴う塩水浸入等	HC
C4	海面変化に伴う侵食・堆積による地形・地質変化	H
C5	気候変動により降水量・蒸発散量の変化、周氷河現象による涵養量変化	HC
C6	気候変動に伴い降水量が変化、永久凍土の融解等、侵食・堆積の進行による地形変化	H

表 5.3-3 安全機能の観点から見た事象分類（泥火山、火山・マグマ活動、深部流体）

影響事象	泥火山、火山・マグマ活動、深部流体に関する事象の内容	母岩に与える影響の種類
V4-3	既存火山においてマグマ貫入等により地質構造が変形し、侵食等のマスムーブメントの発生に伴って、サイト周辺が削剥されることで対地深度が変化	THMC
M3	地震活動によって泥火山が活動、泥ダイアピルの地表噴出	THC
V8	既存火山の噴火が発生することによって、火砕流等の高温の火山性噴出物が地表を埋没	THMC
V9	既存火山でのマグマの貫入により、地形・地質構造が変化	H
V10	既存火山の活動により、地質構造の変形に伴うマスムーブメント（侵食）が発生することにより地形・地質構造が変化	H
V11	既存火山の活動によって熱水活動が発生し、熱水の流入	THC
V12	既存火山の巨大噴火が発生し、地表を大規模火砕流による地表の埋没、および巨大カルデラが形成	THMC
V13	新規に出現した火山の噴火が発生することによって、火砕流等の高温の火山性噴出物が地表を埋没	THMC
R1	天水起源ではない熱水活動が発生し、流体が流入	THC

5.3.2 HLW の「安全性への影響の可能性」との関係性整理の方法

表 5.3-4 に示す整理例に沿って、地質・気候関連事象と HLW の FEP データベースとの関連付けの整理の手順を以下に説明する。

表 5.3-4 地質・気候関連事象と HLW 人工バリア・天然バリアとの関係性の整理例

影響事象	HLW の FEP データベースの「安全性への影響の可能性」への対応付け
【E2-3】：地震活動、隆起・侵食等によるサイトの地表接近、沈降の場合は沈降・堆積により対地深度の変化	【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H1⑨：人工バリアから掘削影響領域に伝搬した熱、および、【E2-3】を要因とした温度変動が、掘削影響領域外部の母岩の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
起回事象→(地質構造の変化)→侵食・堆積→サイト	【母岩→掘削影響領域】 H1①：人工バリア材等の熱特性や地中温度に依存して伝搬した崩壊熱、および、H1⑨を要因とした母岩の温度変動が、掘削影響領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。

前項で述べた地質・気候関連事象と安全機能との関係整理では、地質・気候関連事象発生に伴う広域地下水流動領域までの地下環境の変化を整理しており、さらに、その地下環境の変化に伴った人工バリア周辺母岩の特性 (THMC) に与える影響の種類を示している (表 5.3-1～表 5.3-3)。これら表 5.3-1～表 5.3-3 に示された事象の連鎖の情報をもとに、HLW の FEP データベースとの関連付けを行った。

地質・気候関連事象発生に伴う地下環境の変化を要因として、母岩領域→掘削影響領域→緩衝材領域→オーバーパック領域→ガラス固化体領域へとその影響が天然バリアから人工バリアの内側へと伝搬していく。“自然現象の著しい影響の回避”に該当する地質・気候関連事象を除くと、母岩領域の特性変化を介さずに、直接的に人工バリアに影響を及ぼすことは無い。そのため、母岩領域は、地質・気候関連事象発生に伴う地下環境の変化が人工バリア内の特性に影響を及ぼす際の接続ポイントになるものと考えた。

表 5.3-4 は地震活動、隆起・侵食等によるサイトの地表接近、沈降・堆積による対地深度の変化が、人工バリア周辺母岩の温度変動に影響を及ぼすまでの事象の連鎖を示したものである。表 5.3-1 に示すように、影響事象 E2-3 による対地深度の変化は、母岩領域の温度を変化させる可能性がある。一方、既往の HLW の人工バリアの FEP データベースでは、H1⑨の安全性への影響の可能性で人工バリアから伝搬した熱による母岩領域の温度変化の可能性について記述されているが、H1⑨以外には何らかの要因による母岩領域の温度変化の可能性を示す安全性への影響の可能性は存在しない。そこで、H1⑨の安全性への影響の可能性に影響事象 E2-3 を起回事象の一つとして加えることとした。この安全性への影響の可能性を「地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント」と呼ぶことにした。

また、影響事象 E2-3 を要因とした母岩の温度変化を起回事象として、掘削影響領域の温度変化が生じる人工バリアの内側への熱伝搬が考えられる。しかし、掘削影響領域の安全性への影響の可能性には、人工バリアから掘削影響領域への熱伝搬について H1①に記載があるものの、母岩から掘削影響領域への熱伝搬について記載されている安全性への影響の可能性はない。したがって、H1①に母岩の温度変動を起回事象の一つとして加えることとした。既存の HLW の人工バリアの FEP には、熱伝搬に関して天然バリアから人工バリアの内側への事象の連鎖が表現されていないので、掘削影響領域→緩衝材→オーバーパック→ガラス固化体についても同様の整理を行った。一方、水理、力学、化学については、天然バリアから人工バリアの内側への事象の連鎖が既往の FEP に表現されているため、母岩領域までの事象の連鎖を表現することとした。

なお、母岩領域の温度変化によって母岩領域の THMC が変化する可能性があるが、その事象の連鎖については、既往の HLW の人工バリアの FEP データベースの「安全性への影響の可能性」に記載されており、地質・気候関連事象を起因事象とした場合においても、その事象が発生した場合の影響の程度は異なるものの、起因事象と派生事象の関連性については同様であると考えられるため、HLW の FEP データベースの「安全性への影響の可能性」をそのまま利用することができるものと判断した。

5.3.3 HLW の「安全性への影響の可能性」との関係性整理結果

(1) 海面変化によるサイトの地表接近、対地深度変化（影響事象 No. C1-3）

表 5.3-2 に示す影響事象のうち、C1-3 の海面変化によるサイトの地表接近、対地深度変化を起因事象として、THMC の派生事象に関する「安全性への影響の可能性」について示す。

1) 熱 (T) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

熱 (T) に関する知見によれば、国内では平均で 100m 深くなるごとに 3°C 高くなるとされており、非火山地域では同じく平均 1.6°C 高くなるとされている。こうした知見から、表 5.3-5 の HLW の「安全性への影響の可能性」への対応付けの欄の地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイントには、海面変化によるサイトの地表接近、対地深度変化による起因事象を加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H1⑨：人工バリアから掘削影響領域に伝搬した熱、および、【C1-3】の広域地下水流動領域の対地深度の変化を要因とした温度変動が、掘削影響領域外部の母岩の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。

2) 応力 (M) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

応力 (M) に関する知見では、対地深度が変化し、母岩の応力状態が変化すると、母岩の透水性が変化する可能性があるとされている。こうした知見から、海面変化によるサイトの地表接近、対地深度変化を起因事象として加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H3⑨：応力再配分に伴ったクリープ、掘削影響領域の亀裂の進展、および、【C1-3】の広域地下水流動領域の対地深度の変化を要因とした応力状態の変化が、母岩へ作用する外力や反力の状態を変化させる可能性。

3) 応力 (M) の変化に伴う水理 (H) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

応力 (M) の変化に伴う水理 (H) の知見では、室内透水試験の結果から、亀裂性の堆積軟岩の場合、5MPa の応力変化量（対地深度 300m→50m）に対する透水性の増加は、泥岩の場合 1～2 桁程度、結晶質岩や砂岩では 1 桁程度変化する場合があるとされている。こうした知見から、H3⑨に示した応力状態の変化に伴う母岩の間隙構造・間隙率の変化を起因事象として加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H2⑨：掘削影響領域の地下水流動現象、および、H3⑨に示した応力状態の変化に伴う母岩の間隙構造・間隙率の変化が、母岩の水理特性や地下水流動現象に影響を及ぼす可能性。

4) 化学 (C) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

化学 (C) に関する知見では、対地深度変化に伴う塩淡境界の相対的位置が変化した場合、水質が変化する可能性があるとしている。こうした知見から、海面変化によるサイトの地表接近、対地深度変化を起因事象として加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H4⑬ : H4⑫に示した掘削影響領域の地下水化学の変化、および、【C1-3】の広域地下水流動領域の対地深度の変化を要因とした塩淡境界の相対的位置変化が、母岩の地下水組成 (酸化性/還元性環境等) に影響を与え、母岩中の地下水と混じることにより、母岩領域の地下水化学を変化させる可能性。

5) 天然バリアから人工バリアの内側へ向けての事象の連鎖について

天然バリアから人工バリアの内側へ向けての事象の連鎖が、HLW の FEP データベースの「安全性への影響の可能性」に、記載されているかの確認を行った。その結果、熱については、ガラス固化体の崩壊熱を起因事象として、天然バリアの領域へと伝搬する事象の連鎖は記載されているものの、母岩領域の温度変動を起因とした人工バリアの内側への事象の連鎖が表現されていないことが分かった。しかし、水理、応力、化学については、母岩からの事象を起因として、人工バリアの内側の領域へと伝搬する事象の連鎖が記載されていることを確認した。そこで、熱については、崩壊熱を要因とした影響を表現している既存の「安全性への影響の可能性」に天然バリアからの熱による要因を追記した。

表 5.3-5 海面変化によるサイトの地表接近、対地深度変化で発生する事象の「安全性への影響の可能性」(影響事象 No. C1-3)

影響事象	HLW の FEP データベースの「安全性への影響の可能性」への対応付け*
【C1-3】 : 海面変化による地形変化、侵食による対地深度の変化 起因事象 → (海面変化) → 侵食・堆積 → サイト	【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H1⑨ : 人工バリアから掘削影響領域に伝搬した熱、および、【C1-3】の広域地下水流動領域の対地深度の変化を要因とした温度変動が、掘削影響領域外部の母岩の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。 H1⑨ → H1① → B1① → OP1① → G1①
	【母岩 → 掘削影響領域】 H1① : 人工バリア材等の熱特性や地中温度に依存して伝搬した崩壊熱、および、H1⑨を要因とした母岩の温度変動が、掘削影響領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【掘削影響領域 → 緩衝材】 B1① : H1①を要因とした掘削影響領域の温度変動、および、ガラス固化体の崩壊熱のオーバーバックや緩衝材への伝搬が、緩衝材領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【緩衝材 → オーバーバック】 OP1① : B1①を要因とした緩衝材領域の温度変動、および、ガラス固化体の崩壊熱のオーバーバックへの伝搬が、オーバーバック領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【オーバーバック → ガラス固化体】 G1① : OP1①を要因とした緩衝材領域の温度変動、および、ガラス固化体の崩壊熱が、ガラス固化体領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H3⑨ : 応力再配分に伴ったクリープ、掘削影響領域の亀裂の進展、および、【C1-3】の広域地下水流動領域の対地深度の変化を要因とした応力状態の変化が、母岩へ作用する外力や反力の状態を変化させる可能性。
	【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H2⑨ : 掘削影響領域の地下水流動現象、および、H3⑨に示した応力状態の変化に伴う母岩の間隙構造・間隙率の変化が、母岩の水理特性や地下水流動現象に影響を及ぼす可能性。

【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】

H4⑬：H4②に示した掘削影響領域の地下水化学の変化、および、【C1-3】の広域地下水流動領域の対地深度の変化を要因とした塩淡境界の相対的位置変化が、母岩の地下水組成（酸化性／還元性環境等）に影響を与え、母岩中の地下水と混じることにより、母岩領域の地下水化学を変化させる可能性。

※HLWのFEPデータベースの「安全性への影響の可能性」への対応付け：平成21年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査 報告書[添付資料編] Appendix-II HLW 及び TRU 廃棄物の地下水移行シナリオの整備 II-A ガラス固化体、オーバーバック、緩衝材、母岩における安全性への影響の可能性（HLW）に対応記号番号有り

(2) 気候変動による降水量の変化に伴うサイトの地表接近、対地深度変化（影響事象 No.C2-3）
表 5.3-2 に示す影響事象のうち、C2-3 の気候変動による降水量の変化に伴うサイトの地表接近、対地深度変化を起因事象として、THMC の派生事象に関する「安全性への影響の可能性」について示す。

1) 熱 (T) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

気候変動によるサイトの地表接近、対地深度変化を起因事象として加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H1⑨：人工バリアから掘削影響領域に伝搬した熱、および、【C2-3】の広域地下水流動領域の対地深度の変化を要因とした温度変動が、掘削影響領域外部の母岩の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。

2) 応力 (M) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

気候変動によるサイトの地表接近、対地深度変化を起因事象として加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H3⑨：応力再配分に伴ったクリープ、掘削影響領域の亀裂の進展、および、【C2-3】の要因による広域地下水流動領域の対地深度の変化を要因とした応力状態の変化が、母岩へ作用する外力や反力の状態を変化させる可能性。

3) 応力 (M) の変化に伴う水理 (H) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

H3⑨に示した応力状態の変化に伴う母岩の間隙構造・間隙率の変化を起因事象として加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H2⑨：掘削影響領域の地下水流動現象、および、H3⑨に示した応力状態の変化に伴う母岩の間隙構造・間隙率の変化が、母岩の水理特性や地下水流動現象に影響を及ぼす可能性。

4) 化学 (C) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

気候変動によるサイトの地表接近、対地深度変化を起因事象として加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H4⑬：H4②に示した掘削影響領域の地下水化学の変化、および、【C2-3】の広域地下水流動領域の対地深度の変化を要因とした塩淡境界の相対的位置変化が、母岩の地下水組成（酸化性／還元性環境等）に影響を与え、母岩中の地下水と混じることにより、母岩領域の地下水化学を変化させる可能性。

表 5.3-6 気候変動による降水量の変化に伴うサイトの地表接近、対地深度変化で発生する事象の「安全性への影響の可能性」(影響事象 No. C2-3)

影響事象	HLW の FEP データベースの「安全性への影響の可能性」への対応付け*
【C2-3】 ：気候変動による降水量が変化し、侵食によるサイトの対地深度の変化 気候変動→侵食・堆積→サイト	【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H1⑨：人工バリア材から掘削影響領域に伝搬した熱、および、【C2-3】の広域地下水流動領域の対地深度の変化を要因とした温度変動が、掘削影響領域外部の母岩の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。 H1⑨→H1①→B1①→OP1①→G1①
	【母岩→掘削影響領域】 H1①：人工バリア材等の熱特性や地中温度に依存して伝搬した崩壊熱、および、H1⑨を要因とした母岩の温度変動が、掘削影響領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【掘削影響領域→緩衝材】 B1①：H1①を要因とした掘削影響領域の温度変動、および、ガラス固化体の崩壊熱のオーバーバックや緩衝材への伝搬が、緩衝材領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【緩衝材→オーバーバック】 OP1①：B1①を要因とした緩衝材領域の温度変動、および、ガラス固化体の崩壊熱のオーバーバックへの伝搬が、オーバーバック領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【オーバーバック→ガラス固化体】 G1①：OP1①を要因とした緩衝材領域の温度変動、および、ガラス固化体の崩壊熱が、ガラス固化体領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H3⑨：応力再配分に伴ったクリープ、掘削影響領域の亀裂の進展、および、【C2-3】の要因による広域地下水流動領域の対地深度の変化を要因とした応力状態の変化が、母岩へ作用する外力や反力の状態を変化させる可能性。
	【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H2⑨：掘削影響領域の地下水流動現象、および、H3⑨に示した応力状態の変化に伴う母岩の間隙構造・間隙率の変化が、母岩の水理特性や地下水流動現象に影響を及ぼす可能性。
	【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H4⑬：H4②に示した掘削影響領域の地下水化学の変化、および、【C2-3】の広域地下水流動領域の対地深度の変化を要因とした塩淡境界の相対的位置変化が、母岩の地下水組成（酸性性/還元性環境等）に影響を与え、母岩中の地下水と混じることにより、母岩領域の地下水化学を変化させる可能性。

※HLW の FEP データベースの「安全性への影響の可能性」への対応付け：平成 21 年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査 報告書[添付資料編] Appendix-II HLW 及び TRU 廃棄物の地下水移行シナリオの整備 II-A ガラス固化体、オーバーバック、緩衝材、母岩における安全性への影響の可能性 (HLW) に対応記号番号有り

(3) 海面変化による塩淡境界の移動、塩水浸入 (影響事象 No.C3)

表 5.3-2 に示す影響事象のうち、C3 の海面変化による塩淡境界の移動、塩水浸入を起因事象として、HC の派生事象に関する「安全性への影響の可能性」について示す。

1) 水理 (H) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

水理 (H) に関する知見では、幌延を対象とした海面低下による地下水流動への影響解析事例では、丘陵部と沿岸陸域との間で動水勾配の増加が発生する可能性があるとしている。こうした知見から海面変化による塩淡境界の移動、海水浸入を起因事象として加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H2⑨：掘削影響領域の地下水流動現象、および、【C3】に示した塩淡境界の移動、海水浸入等による広域地下水流動領域の水理の変化が、母岩の水理特性や地下水流動現象に影響を及ぼす可能性。

2) 化学 (C) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

化学（C）に関する知見では、過去3サイクル（36万年間）の海面変化を模擬し、地下水の水質変化から塩淡境界の移動を解析的に検討した事例があり、海面が低下した場合、塩淡境界は沖合へ後退し、海面上昇後は現海岸線付近まで戻るとされている。こうした知見から海面変化による塩淡境界の移動、海水浸入を起因事象として加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H4⑬：H4②に示した掘削影響領域の地下水化学の変化、および、【C3】に示した塩淡境界の移動や海水浸入等の広域地下水流動領域の地下水組成（酸化性／還元性環境等）の影響を受けた地下水が、母岩中の地下水と混じることにより、母岩領域の地下水化学を変化させる可能性。

表 5.3-7 海面変化に伴う塩淡境界の移動、塩水浸入で発生する事象の「安全性への影響の可能性」（影響事象 No. C3）

影響事象	HLW の FEP データベースの「安全性への影響の可能性」への対応付け*
【C3】：海面変化による塩淡境界の移動、海水浸入等による広域地下水流動領域の HC の変化	【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H2⑨：掘削影響領域の地下水流動現象、および、【C3】に示した塩淡境界の移動、海水浸入等による広域地下水流動領域の水理の変化が、母岩の水理特性や地下水流動現象に影響を及ぼす可能性。
海面変化→水文地質学的変化→サイト	【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H4⑬：H4②に示した掘削影響領域の地下水化学の変化、および、【C3】に示した塩淡境界の移動や海水浸入等の広域地下水流動領域の地下水組成（酸化性／還元性環境等）の影響を受けた地下水が、母岩中の地下水と混じることにより、母岩領域の地下水化学を変化させる可能性。

※HLW の FEP データベースの「安全性への影響の可能性」への対応付け：平成 21 年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査 報告書[添付資料編] Appendix-II HLW 及び TRU 廃棄物の地下水移行シナリオの整備 II-A ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材、母岩における安全性への影響の可能性（HLW）に対応記号番号有り

（4）海面変化に伴う侵食・堆積による地形・地質変化（影響事象 No.C4）

表 5.3-2 に示す影響事象のうち、C4 の海面変化に伴う侵食・堆積による地形・地質変化を起因事象として、H の派生事象に関する「安全性への影響の可能性」について示す。

1）水理（H）の変化に関する「安全性への影響の可能性」

水理（H）に関する知見では、海面変化による海岸線の移動に起因して山地部の侵食、河口付近での堆積が進み H が変化する可能性が指摘されている。こうした知見から、海面変化による塩淡境界の移動、塩水浸入を起因事象として加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H2⑨：掘削影響領域の地下水流動現象、および、【C4】に示した広域地下水流動領域の水理特性や地下水流動現象の変化が、母岩の水理特性や地下水流動現象に影響を及ぼす可能性。

表 5.3-8 海面変化に伴う侵食・堆積による地形・地質変化で発生する事象の「安全性への影響の可能性」（影響事象 No. C4）

影響事象	HLW の FEP データベースの「安全性への影響の可能性」への対応付け*
【C4】：海面変化に伴う侵食・堆積による地形・地質変化から広域地下水流動領域の水理（H）の変化	【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H2⑨：掘削影響領域の地下水流動現象、および、【C4】に示した広域地下水流動領域の水理特性や地下水流動現象の変化が、母岩の水理特性や地下水流動現象に影響を及ぼす可能性。
海面変化→侵食・堆積→水文地質学的変化→サイト	

※HLW の FEP データベースの「安全性への影響の可能性」への対応付け：平成 21 年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査 報告書[添付資料編] Appendix-II HLW 及び TRU 廃棄物の地下水移行シナリオの整備 II-A ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材、母岩における安全性への影響の可能性（HLW）に対応記号番号有り

(5) 気候変動に伴った降水量・蒸発散量の変化、周氷河現象による涵養量変化(影響事象 No.C5)
 表 5.3-2 に示す影響事象のうち、C5 の海気候変動に伴った降水量・蒸発散量の変化、周氷河現象による涵養量変化を起因事象として、HC の派生事象に関する「安全性への影響の可能性」について示す。

1) 水理 (H) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

水理 (H) に関する知見では、複数の影響評価事例から、水理への影響は北海道に関しては降水量変化よりも永久凍土の発達、融解による影響の方が大きいとしている。こうした知見から、気候変動に伴った降水量・蒸発散量の変化、周氷河現象による涵養量変化を起因事象として加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H2⑨：掘削影響領域の地下水流動現象、および、【C5】に示した気候変動による蒸発散量の変化、涵養量の変化が、母岩の水理特性や地下水流動現象に影響を及ぼす可能性。

2) 化学 (C) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

化学 (C) に関する知見では、地下水化学への影響は、氷期における永久凍土の発達、後氷期における凍土の融解による化石海水の洗い出しに伴う水質変化が指摘されている。こうした知見から、気候変動に伴った降水量・蒸発散量の変化、周氷河現象による涵養量変化を起因事象として加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H4⑬：H4②に示した掘削影響領域の地下水化学の変化、および、【C5】に示した気候変動による蒸発散量の変化、涵養量の変化に伴う広域地下水流動領域の地下水組成（酸性性/還元性環境等）の影響を受けた地下水が、母岩中の地下水と混じることにより、母岩領域の地下水化学を変化させる可能性。

表 5.3-9 気候変動に伴った降水量・蒸発散量の変化、周氷河現象による涵養量変化で発生する事象の「安全性への影響の可能性」(影響事象 No. C3)

影響事象	HLW の FEP データベースの「安全性への影響の可能性」への対応付け*
【C5】：気候変動により降水量・蒸発散量の変化、周氷河現象により、涵養量変化が起こる	【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H2⑨：掘削影響領域の地下水流動現象、および、【C5】に示した気候変動による蒸発散量の変化、涵養量の変化が、母岩の水理特性や地下水流動現象に影響を及ぼす可能性。
海面変化→局地的気候変動→水文地質学的変化→サイト	【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H4⑬：H4②に示した掘削影響領域の地下水化学の変化、および、【C5】に示した気候変動による蒸発散量の変化、涵養量の変化に伴う広域地下水流動領域の地下水組成（酸性性/還元性環境等）の影響を受けた地下水が、母岩中の地下水と混じることにより、母岩領域の地下水化学を変化させる可能性。

※HLW の FEP データベースの「安全性への影響の可能性」への対応付け：平成 21 年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査 報告書[添付資料編] Appendix-II HLW 及び TRU 廃棄物の地下水移行シナリオの整備 II-A ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材、母岩における安全性への影響の可能性 (HLW) に対応記号番号有り

(6) 気候変動に伴った降水量の変化、周氷河現象による地形変化(影響事象 No.C6)

表 5.3-2 に示す影響事象のうち、C6 の気候変動に伴った降水量の変化、周氷河現象による侵食・堆積の進行による地形変化を起因事象として、H の派生事象に関する「安全性への影響の可能性」について示す。

1) 水理 (H) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

水理 (H) に関する知見では、降雨量変化による短期的な地形変化への影響は無視できないが、長期的な降水量と起伏量との間にはほとんど相関は見られないとしている。こうした知見

から、気候変動に伴った降水量の変化、周氷河現象による侵食・堆積の進行による地形変化に起因事象に加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H2⑨：掘削影響領域の地下水流動現象、【C6】に示した降水量の変化、周氷河現象等に起因した地形変化による広域地下水流動領域の水利特性や地下水流動現象の変化が、母岩の水利特性や地下水流動現象に影響を及ぼす可能性

表 5.3-10 気候変動に伴った降水量の変化、周氷河現象による地形変化で発生する事象の「安全性への影響の可能性」（影響事象 No.C6）

影響事象	HLW の FEP データベースの「安全性への影響の可能性」への対応付け*
<p>【C6】：気候変動に伴い降水量が変化、周氷河現象等による侵食・堆積の進行により地形変化し、広域地下水流動領域の水利 (H) の変化</p> <p>海面変化→局地的気候変動→侵食・堆積→水文地質学的変化→サイト</p>	<p>【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】</p> <p>H2⑨：掘削影響領域の地下水流動現象、【C6】に示した降水量の変化、周氷河現象等に起因した地形変化による広域地下水流動領域の水利特性や地下水流動現象の変化が、母岩の水利特性や地下水流動現象に影響を及ぼす可能性</p>

※HLW の FEP データベースの「安全性への影響の可能性」への対応付け：平成 21 年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査 報告書[添付資料編] Appendix-II HLW 及び TRU 廃棄物の地下水移行シナリオの整備 II-A ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材、母岩における安全性への影響の可能性 (HLW) に対応記号番号有り

(7) 既存火山のマグマ貫入による地質構造の変化に伴う対地深度の変化(影響事象 No.V4-3)

表 5.3-3 に示す影響事象のうち、V4-3 の既存火山においてマグマ貫入等により地質構造が変化し、侵食等のマスマーブメントの発生に伴って、サイト周辺が削剥されることで対地深度が変化することを起因事象として、THMC の派生事象に関する「安全性への影響の可能性」について示す。

1) 熱 (T) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

熱 (T) に関する知見によれば、サイトとの対地深度の変化によって温度が変化することが指摘されている。こうした知見から、既存火山においてマグマ貫入等により地質構造が変化し、侵食等のマスマーブメントの発生に伴って、サイト周辺が削剥されることで対地深度が変化することを起因事象に加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H1⑨：人工バリアから掘削影響領域に伝搬した熱、および、【V4-3】を要因とした対地深度の変化に伴う温度変動が、掘削影響領域外部の母岩の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。

2) 応力 (M) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

応力 (M) に関する知見では、対地深度が変化し、母岩の応力状態が変化すると、母岩の透水性が変化する可能性があるとして示されている。こうした知見から、既存火山においてマグマ貫入等により地質構造が変化し、侵食等のマスマーブメントの発生に伴って、サイト周辺が削剥されることで対地深度が変化することを起因事象に加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H3⑨：応力再配分に伴ったクリープ、掘削影響領域の亀裂の進展、および、【V4-3】に示した対地深度の変化が、母岩へ作用する外力や反力の状態を変化させる可能性。

3) 応力 (M) の変化に伴う水利 (H) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

応力 (M) の変化に伴う水利 (H) の知見では、サイトと地表位置との距離が変化することにより、水利ポテンシャルが変化し、また、マスマーブメントに伴う周辺地質の破壊・変状に

より透水性等の水理特性も変化する。こうした知見から、H3⑨に示した母岩に作用する応力状態の変化が、母岩の間隙率・間隙構造の変化を起因事象に加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H2⑨：掘削影響領域の地下水流動現象、および、H3⑨に示した母岩に作用する応力状態の変化が、母岩の間隙率・間隙構造を変化させ、母岩の水理特性や地下水流動現象に影響を及ぼす可能性。

4) 化学 (C) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

化学 (C) に関する知見では、対地深度変化により地下水混合系が変化する可能性、その変化に伴って、火山性の強酸性の地下水の流入度合いが変化する可能性について指摘されている。こうした知見から、既存火山においてマグマ貫入等により地質構造が変化し、侵食等のマスマーブメントの発生に伴って、サイト周辺が削剥されることで対地深度が変化することを起因事象に加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H4⑬：H4②に示した掘削影響領域の地下水化学の変化、および、【V4-3】に示した対地深度の変化に伴う広域地下水流動領域の地下水混合系の変化が、母岩中の地下水と混じることにより、母岩領域の地下水化学を変化させる可能性。

表 5.3-11 既存火山の活動による地質構造の変化に伴う対地深度の変化で発生する事象の「安全性への影響の可能性」(影響事象 No.V4-3)

影響事象	HLW の FEP データベースの「安全性への影響の可能性」への対応付け*
【V4-3】：既存火山においてマグマ貫入等により地質構造が変化し、侵食等のマスマーブメントの発生に伴って、サイト周辺が削剥されることで対地深度が変化する 火山・マグマ活動(既存火山)→地質構造の変化→侵食と堆積→サイト	【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H1⑨：人工バリアから掘削影響領域に伝搬した熱、および、【V4-3】を要因とした対地深度の変化に伴う温度変動が、掘削影響領域外部の母岩の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。 H1⑨→H1①→B1①→OP1①→G1①
	【母岩→掘削影響領域】 H1①：人工バリア材等の熱特性や地中温度に依存して伝搬した崩壊熱、および、H1⑨を要因とした母岩の温度変動が、掘削影響領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【掘削影響領域→緩衝材】 B1①：H1①を要因とした掘削影響領域の温度変動、および、ガラス固化体の崩壊熱のオーバーパックや緩衝材への伝搬が、緩衝材領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【緩衝材→オーバーパック】 OP1①：B1①を要因とした緩衝材領域の温度変動、および、ガラス固化体の崩壊熱のオーバーパックへの伝搬が、オーバーパック領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【オーバーパック→ガラス固化体】 G1①：OP1①を要因とした緩衝材領域の温度変動、および、ガラス固化体の崩壊熱が、ガラス固化体領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H3⑨：応力再配分に伴ったクリープ、掘削影響領域の亀裂の進展、および、【V4-3】に示した対地深度の変化が、母岩へ作用する外力や反力の状態を変化させる可能性。
	【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H2⑨：掘削影響領域の地下水流動現象、および、H3⑨に示した母岩に作用する応力状態の変化が、母岩の間隙率・間隙構造を変化させ、母岩の水理特性や地下水流動現象に影響を及ぼす可能性。
	【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H4⑬：H4②に示した掘削影響領域の地下水化学の変化、および、【V4-3】に示した対地深度の変化に伴う広域地下水流動領域の地下水混合系の変化が、母岩中の地下水と混じることにより、母岩領域の地下水化学を変化させる可能性。

※HLW の FEP データベースの「安全性への影響の可能性」への対応付け：平成 21 年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査 報告書[添付資料編] Appendix-II HLW 及び TRU 廃棄物の地下水移行シナリオの整備 II-A ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材、母岩における安全性への影響の可能性 (HLW) に対応記号番号有り

(8) 泥火山の活動による広域地下水流動領域の変化（影響事象 No.M3）

表 5.3-3 に示す影響事象のうち、M3 の地震活動が発生し、泥火山が活動することによって、広域地下水流動領域が変化することを起因事象として、THC の派生事象に関する「安全性への影響の可能性」について示す。

1) 熱 (T) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

熱 (T) に関する知見によれば、海底の泥火山では、泥火山およびその周辺部において、海底面下の温度の分布や変動を観測した事例が報告されており、泥火山下の地下温度勾配が周辺部よりも大きいことが指摘されている。こうした知見から、泥火山が活動することによって、広域地下水流動領域が変化することを起因事象に加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H1⑨：人工バリアから掘削影響領域に伝搬した熱、および、【M3】を要因とした温度変動が、掘削影響領域外部の母岩の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。

2) 水理 (H) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

水理 (H) の知見では、鍋立山トンネルの膨潤性地山では、ガスの異常突出や異常出水が見られ、これに伴う水理特性の変化が指摘されている。こうした知見から、泥火山が活動することによって、広域地下水流動領域が変化することを起因事象に加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H2⑨：掘削影響領域の地下水流動現象、および、【M3】に示した広域地下水流動領域の水理特性や地下水流動現象の変化が、母岩の水理特性や地下水流動現象に影響を及ぼす可能性。

3) 化学 (C) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

化学 (C) に関する知見では、ガス成分を含む熱水が岩石と反応することにより、地下水組成が変化することを指摘している。こうした知見から、こうした知見から、泥火山が活動することによって、広域地下水流動領域が変化することを起因事象に加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H4⑬：H4②に示した掘削影響領域の地下水化学の変化、および、【M3】に示した広域地下水流動領域の地下水組成の変化が、母岩中の地下水と混じることにより、母岩領域の地下水化学を変化させる可能性。

表 5.3-12 泥火山の活動で発生する事象の「安全性への影響の可能性」（影響事象 No.M3）

影響事象	HLW の FEP データベースの「安全性への影響の可能性」への対応付け*
【M3】：地震活動が発生し、泥火山が活動することによって、広域地下水流動領域の THC が変化する可能性	【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H1⑨：人工バリアから掘削影響領域に伝搬した熱、および、【M3】を要因とした温度変動が、掘削影響領域外部の母岩の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。 H1⑨→H1①→B1①→OP1①→G1①
地震活動→泥火山→水文地質学的変化→サイト	【母岩→掘削影響領域】 H1①：人工バリア材等の熱特性や地中温度に依存して伝搬した崩壊熱、および、H1⑨を要因とした母岩の温度変動が、掘削影響領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【掘削影響領域→緩衝材】 B1①：H1①を要因とした掘削影響領域の温度変動、および、ガラス固化体の崩壊熱のオーバーパックや緩衝材への伝搬が、緩衝材領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【緩衝材→オーバーパック】 OP1①：B1①を要因とした緩衝材領域の温度変動、および、ガラス固化体の崩壊熱のオーバーパックへの伝搬が、オーバーパック領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【オーバーパック→ガラス固化体】

	G1①：OP1①を要因とした緩衝材領域の温度変動、および、ガラス固化体の崩壊熱が、ガラス固化体領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H2⑨：掘削影響領域の地下水流動現象、および、【M3】に示した広域地下水流動領域の水理特性や地下水流動現象の変化が、母岩の水理特性や地下水流動現象に影響を及ぼす可能性。
	【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H4⑩：H4②に示した掘削影響領域の地下水化学の変化、および、【M3】に示した広域地下水流動領域の地下水組成の変化が、母岩中の地下水と混じることにより、母岩領域の地下水化学を変化させる可能性。

※HLWのFEPデータベースの「安全性への影響の可能性」への対応付け：平成21年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査 報告書[添付資料編] Appendix-II HLW及びTRU 廃棄物の地下水移行シナリオの整備 II-A ガラス固化体、オーバーバック、緩衝材、母岩における安全性への影響の可能性 (HLW) に対応記号番号有り

(9) 既存火山の噴火による広域地下水流動領域の変化（影響事象 No.V8）

表 5.3-3 に示す影響事象のうち、V8の既存火山の噴火が発生することによって、広域地下水流動領域が変化することを起因事象として、THMCの派生事象に関する「安全性への影響の可能性」について示す。

1) 熱 (T) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

熱 (T) に関する知見によれば、現実的には、火砕流の堆積によって地下数百 m の基盤岩中が被る熱的な影響は、火山から一定の距離を保てば、無視できる程度に非常に小さくなるものと考えられている。こうした知見から、既存火山の噴火が発生することによって、広域地下水流動領域が変化することを起因事象に加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H1⑨：人工バリアから掘削影響領域に伝搬した熱、および、【V8】を要因とした既存火山の噴火に伴う温度変動が、掘削影響領域外部の母岩の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。

2) 応力 (M) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

応力 (M) に関する知見では、火砕流堆積物の堆積厚さに伴い、地中にかかる荷重も大きくなるとされる。こうした知見から、既存火山の噴火が発生することによって、広域地下水流動領域が変化することを起因事象に加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H3⑨：応力再配分に伴ったクリープ、掘削影響領域の亀裂の進展、および、【V8】に示した既存火山の噴火に伴う広域地下水流動領域の応力状態の変化が、母岩へ作用する外力や反力の状態を変化させる可能性。

3) 水理 (H) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

水理 (H) の知見では、火山の噴火に伴い地下水位が変化した事例が確認されている。こうした知見から、こうした知見から、既存火山の噴火が発生することによって、広域地下水流動領域が変化することを起因事象に加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H2⑨：掘削影響領域の地下水流動現象、および、【V8】に示した広域地下水流動領域の水理特性や地下水流動現象の変化が、母岩の水理特性や地下水流動現象に影響を及ぼす可能性。

4) 化学 (C) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

化学 (C) に関する知見では、火山の高温流体や火山ガスにより、広域地下水流動領域の地下水組成に影響を及ぼす可能性が指摘されている。こうした知見から、既存火山の噴火が発生す

ることによって、広域地下水流動領域が変化することを起因事象に加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H4⑬：H4②に示した掘削影響領域の地下水化学の変化、および、【V8】に示した既存火山の噴火に伴う広域地下水流動領域の地下水化学組成の変化が、母岩中の地下水と混じることにより、母岩領域の地下水化学を変化させる可能性。

表 5.3-13 既存火山の噴火によって発生する事象の「安全性への影響の可能性」（影響事象 No.V8）

影響事象	HLW の FEP データベースの「安全性への影響の可能性」への対応付け*
【V8】 ：既存火山の噴火が発生することによって、広域地下水流動領域の THMC が変化 火山・マグマ活動（既存火山の噴火） →水文地質学的変化→サイト	【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H1⑨：人工バリアから掘削影響領域に伝搬した熱、および、【V8】を要因とした既存火山の噴火に伴う温度変動が、掘削影響領域外部の母岩の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。 H1⑨→H1①→B1①→OP1①→G1①
	【母岩→掘削影響領域】 H1①：人工バリア材等の熱特性や地中温度に依存して伝搬した崩壊熱、および、H1⑨を要因とした母岩の温度変動が、掘削影響領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【掘削影響領域→緩衝材】 B1①：H1①を要因とした掘削影響領域の温度変動、および、ガラス固化体の崩壊熱のオーバーバックや緩衝材への伝搬が、緩衝材領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【緩衝材→オーバーバック】 OP1①：B1①を要因とした緩衝材領域の温度変動、および、ガラス固化体の崩壊熱のオーバーバックへの伝搬が、オーバーバック領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【オーバーバック→ガラス固化体】 G1①：OP1①を要因とした緩衝材領域の温度変動、および、ガラス固化体の崩壊熱が、ガラス固化体領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H3⑨：応力再配分に伴ったクリープ、掘削影響領域の亀裂の進展、および、【V8】に示した既存火山の噴火に伴う広域地下水流動領域の応力状態の変化が、母岩へ作用する外力や反力の状態を変化させる可能性。
	【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H2⑨：掘削影響領域の地下水流動現象、および、【V8】に示した広域地下水流動領域の水理特性や地下水流動現象の変化が、母岩の水理特性や地下水流動現象に影響を及ぼす可能性。
	【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H4⑬：H4②に示した掘削影響領域の地下水化学の変化、および、【V8】に示した既存火山の噴火に伴う広域地下水流動領域の地下水化学組成の変化が、母岩中の地下水と混じることにより、母岩領域の地下水化学を変化させる可能性。

※HLW の FEP データベースの「安全性への影響の可能性」への対応付け：平成 21 年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査 報告書[添付資料編] Appendix-II HLW 及び TRU 廃棄物の地下水移行シナリオの整備 II-A ガラス固化体、オーバーバック、緩衝材、母岩における安全性への影響の可能性（HLW）に対応記号番号有り

（10）既存火山の活動に伴った地質構造の変化（影響事象 No.V9）

表 5.3-3 に示す影響事象のうち、V9 の既存火山の活動に伴った地質構造の変形により、広域地下水流動領域が変化することを起因事象として、H の派生事象に関する「安全性への影響の可能性」について示す。

1) 水理（H）の変化に関する「安全性への影響の可能性」

水理（H）の知見では、長期間にわたり、地質構造の変化が累積した場合、広い範囲で地質構造および地形が大きく変化することになり、水理特性に係る間隙構造等物理特性に変化が発生することが考えられ、地下水混合系にも変化が発生する可能性があることが指摘されている。

こうした知見から、既存火山の活動に伴った地質構造の変形により、広域地下水流動領域が変化することを起因事象に加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H2⑨：掘削影響領域の地下水流動現象、および、【V9】に示した広域地下水流動領域の水理特性や地下水流動現象の変化が、母岩の水理特性や地下水流動現象に影響を及ぼす可能性。

表 5.3-14 既存火山の活動に伴った地質構造の変化によって発生する事象の「安全性への影響の可能性」(影響事象 No.V9)

影響事象	HLW の FEP データベースの「安全性への影響の可能性」への対応付け※
<p>【V9】：既存火山の活動により、地質構造が変形し、広域地下水流動領域の H が変化する</p> <p>火山・マグマ活動(既存火山)→地質構造の変形→水文地質学的変化→サイト</p>	<p>【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】</p> <p>H2⑨：掘削影響領域の地下水流動現象、および、【V9】に示した広域地下水流動領域の水理特性や地下水流動現象の変化が、母岩の水理特性や地下水流動現象に影響を及ぼす可能性。</p>

※HLW の FEP データベースの「安全性への影響の可能性」への対応付け：平成 21 年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査 報告書[添付資料編] Appendix-II HLW 及び TRU 廃棄物の地下水移行シナリオの整備 II-A ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材、母岩における安全性への影響の可能性 (HLW) に対応記号番号有り

(1 1) 既存火山の活動に伴ったマスマーブメントによって発生する地形変化(影響事象 No.V10)

表 5.3-3 に示す影響事象のうち、V10 の既存火山の活動により、地質構造の変形に伴うマスマーブメントが発生することによる地形変化を起因事象として、H の派生事象に関する「安全性への影響の可能性」について示す。

1) 水理(H)の変化に関する「安全性への影響の可能性」

水理(H)の知見では、マスマーブメントにより地形が大きく変化し、それに伴い、地盤の亀裂構造が変化する可能性が指摘されている。こうした知見から、既存火山の活動に伴った地質構造の変形により、広域地下水流動領域が変化することを起因事象に加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H2⑨：掘削影響領域の地下水流動現象、および、【V10】に示した広域地下水流動領域の水理特性や地下水流動現象の変化が、母岩の水理特性や地下水流動現象に影響を及ぼす可能性。

表 5.3-15 既存火山の活動に伴ったマスマーブメントによって発生する事象の「安全性への影響の可能性」(影響事象 No.V10)

影響事象	HLW の FEP データベースの「安全性への影響の可能性」への対応付け※
<p>【V10】：既存火山の活動により、地質構造の変形に伴うマスマーブメント(侵食)が発生することにより、広域地下水流動領域の H が変化する。</p> <p>火山・マグマ活動(既存火山)→地質構造の変形→侵食と堆積→水文地質学的変化→サイト</p>	<p>【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】</p> <p>H2⑨：掘削影響領域の地下水流動現象、および、【V10】に示した広域地下水流動領域の水理特性や地下水流動現象の変化が、母岩の水理特性や地下水流動現象に影響を及ぼす可能性。</p>

※HLW の FEP データベースの「安全性への影響の可能性」への対応付け：平成 21 年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査 報告書[添付資料編] Appendix-II HLW 及び TRU 廃棄物の地下水移行シナリオの整備 II-A ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材、母岩における安全性への影響の可能性 (HLW) に対応記号番号有り

(12) 既存火山の活動に伴う熱水活動 (影響事象 No.V11)

表 5.3-3 に示す影響事象のうち、V11 の既存火山の活動によって熱水対流系形成等の熱水活動が発生し、広域地下水流動領域が変化することを起因事象として、THC の派生事象に関する「安全性への影響の可能性」について示す。

1) 熱 (T) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

熱 (T) に関する知見によれば、熱水系の温度は数十℃から数百℃とされている。こうした知見から、既存火山の活動によって熱水対流系形成等の熱水活動が発生し、広域地下水流動領域が変化することを起因事象に加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H1⑨：人工バリアから掘削影響領域に伝搬した熱、および、【V11】を要因とした熱水活動に伴う温度変動が、掘削影響領域外部の母岩の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。

2) 水理 (H) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

水理 (H) の知見では、地熱流体は地層の割れ目系に貯留され流動するものとされている。こうした知見から、既存火山の活動によって熱水対流系形成等の熱水活動が発生し、広域地下水流動領域が変化することを起因事象に加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H2⑨：掘削影響領域の地下水流動現象、および、【V11】に示した熱水活動に伴う広域地下水流動領域の水理特性や地下水流動現象の変化が、母岩の水理特性や地下水流動現象に影響を及ぼす可能性。

3) 化学 (C) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

化学 (C) に関する知見では、火山ガス成分である二酸化硫黄は水に溶けやすいため、地下水に溶解し、強酸性で高温の地熱流体ができる。この強酸性の熱水は、移動する間に通路の岩石と反応する。こうした知見から、既存火山の活動によって熱水対流系形成等の熱水活動が発生し、広域地下水流動領域が変化することを起因事象に加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H4⑬：H4②に示した掘削影響領域の地下水化学の変化、および、【V11】に示した熱水活動に伴う広域地下水流動領域の地下水化学組成の変化が、母岩中の地下水と混じることにより、母岩領域の地下水化学を変化させる可能性。

表 5.3-16 既存火山の活動に伴う熱水活動によって発生する事象の「安全性への影響の可能性」 (影響事象 No.V11)

影響事象	HLW の FEP データベースの「安全性への影響の可能性」への対応付け*
【V11】：既存火山の活動によって熱水対流系形成等の熱水活動が発生し、広域地下水流動領域の THC が変化	【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H1⑨：人工バリアから掘削影響領域に伝搬した熱、および、【V11】を要因とした熱水活動に伴う温度変動が、掘削影響領域外部の母岩の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
火山・マグマ活動 (既存火山) → 熱水活動 → 水文地質学的変化 → サイト	H1⑨ → H1① → B1① → OP1① → G1① 【母岩 → 掘削影響領域】 H1①：人工バリア材等の熱特性や地中温度に依存して伝搬した崩壊熱、および、H1⑨を要因とした母岩の温度変動が、掘削影響領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【掘削影響領域 → 緩衝材】 B1①：H1①を要因とした掘削影響領域の温度変動、および、ガラス固化体の崩壊熱のオーバーパックや緩衝材への伝搬が、緩衝材領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【緩衝材 → オーバーパック】

	OP1①：B1①を要因とした緩衝材領域の温度変動、および、ガラス固化体の崩壊熱のオーバーパックへの伝搬が、オーバーパック領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【オーバーパック→ガラス固化体】 G1①：OP1①を要因とした緩衝材領域の温度変動、および、ガラス固化体の崩壊熱が、ガラス固化体領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H2⑨：掘削影響領域の地下水流動現象、および、【V11】に示した熱水活動に伴う広域地下水流動領域の水理特性や地下水流動現象の変化が、母岩の水理特性や地下水流動現象に影響を及ぼす可能性。
	【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H4⑩：H4②に示した掘削影響領域の地下水化学の変化、および、【V11】に示した熱水活動に伴う広域地下水流動領域の地下水化学組成の変化が、母岩中の地下水と混じることにより、母岩領域の地下水化学を変化させる可能性。

※HLW の FEP データベースの「安全性への影響の可能性」への対応付け：平成 21 年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査 報告書[添付資料編] Appendix-II HLW 及び TRU 廃棄物の地下水移行シナリオの整備 II-A ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材、母岩における安全性への影響の可能性 (HLW) に対応記号番号有り

(13) 既存火山の巨大噴火発生に伴う火砕流堆積物による地表の埋没 (影響事象 No.V12)

表 5.3-3 に示す影響事象のうち、V12 の既存火山の巨大噴火が発生し、地表を大規模な火砕流堆積物が埋没することで、広域地下水流動領域に影響することを起因事象として、THMC の派生事象に関する「安全性への影響の可能性」について示す。

1) 熱 (T) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

熱 (T) に関する知見によれば、地表を覆う大規模火砕流堆積物が基盤岩に及ぼす熱的影響について、1次元熱伝導解析を行っている。その結果、火砕流堆積物の層厚が 100m、定置温度が 900°C の場合、基盤深度 100m の場所で、約 100°C の温度が継続する時間は 600 年間程度とされている。こうした知見から、既存火山の巨大噴火が発生し、地表を大規模な火砕流堆積物が埋没することで、広域地下水流動領域に影響することを起因事象に加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H1⑨：人工バリアから掘削影響領域に伝搬した熱、および、【V12】を要因とした大規模火山性堆積物による埋没に伴う温度変動が、掘削影響領域外部の母岩の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。

2) 応力 (M) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

既存火山の巨大噴火が発生し、地表を大規模な火砕流堆積物が埋没することで、広域地下水流動領域に影響することを起因事象に加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H3⑨：応力再配分に伴ったクリープ、掘削影響領域の亀裂の進展、および、【V12】に示した大規模火山性堆積物による埋没に伴う広域地下水流動領域の応力状態の変化が、母岩へ作用する外力や反力の状態を変化させる可能性。

3) 水理 (H) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

既存火山の巨大噴火が発生し、地表を大規模な火砕流堆積物が埋没することで、広域地下水流動領域に影響することを起因事象に加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H2⑨：掘削影響領域の地下水流動現象、および、【V12】に示した大規模火山性堆積物による埋没に伴う広域地下水流動領域の水理特性や地下水流動現象の変化が、母岩の水理特性や地下水流動現象に影響を及ぼす可能性。

4) 化学 (C) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

化学 (C) に関する知見では、表層水が大規模火砕流堆積物中を浸透することで反応し、地下水組成に影響を及ぼす可能性について指摘している。既存火山の巨大噴火が発生し、地表を大規模な火砕流堆積物が埋没することで、広域地下水流動領域に影響することを起因事象に加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H4⑬：H4②に示した掘削影響領域の地下水化学の変化、および、【V12】に示した大規模火山性堆積物の埋没に伴う広域地下水流動領域の地下水化学組成の変化が、母岩中の地下水と混じることにより、母岩領域の地下水化学を変化させる可能性。

表 5.3-17 巨大噴火に伴った火山性堆積物の埋没によって発生する事象の「安全性への影響の可能性」(影響事象 No.V12)

影響事象	HLW の FEP データベースの「安全性への影響の可能性」への対応付け※
【V12】：既存火山の巨大噴火が発生し、地表を大規模な火山性堆積物が埋没することで、広域地下水流動領域の THMC が変化 火山・マグマ活動(既存火山の巨大噴火) →水文地質学的変化→サイト	【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H1⑨：人工バリアから掘削影響領域に伝搬した熱、および、【V12】を要因とした大規模火山性堆積物による埋没に伴う温度変動が、掘削影響領域外部の母岩の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。 H1⑨→H1①→B1①→OP1①→G1①
	【母岩→掘削影響領域】 H1①：人工バリア材等の熱特性や地中温度に依存して伝搬した崩壊熱、および、H1⑨を要因とした母岩の温度変動が、掘削影響領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【掘削影響領域→緩衝材】 B1①：H1①を要因とした掘削影響領域の温度変動、および、ガラス固化体の崩壊熱のオーバーバックや緩衝材への伝搬が、緩衝材領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【緩衝材→オーバーバック】 OP1①：B1①を要因とした緩衝材領域の温度変動、および、ガラス固化体の崩壊熱のオーバーバックへの伝搬が、オーバーバック領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【オーバーバック→ガラス固化体】 G1①：OP1①を要因とした緩衝材領域の温度変動、および、ガラス固化体の崩壊熱が、ガラス固化体領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H3⑨：応力再配分に伴ったクリープ、掘削影響領域の亀裂の進展、および、【V12】に示した大規模火山性堆積物による埋没に伴う広域地下水流動領域の応力状態の変化が、母岩へ作用する外力や反力の状態を変化させる可能性。
	【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H2⑨：掘削影響領域の地下水流動現象、および、【V12】に示した大規模火山性堆積物による埋没に伴う広域地下水流動領域の水理特性や地下水流動現象の変化が、母岩の水理特性や地下水流動現象に影響を及ぼす可能性。
	【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H4⑬：H4②に示した掘削影響領域の地下水化学の変化、および、【V12】に示した大規模火山性堆積物の埋没に伴う広域地下水流動領域の地下水化学組成の変化が、母岩中の地下水と混じることにより、母岩領域の地下水化学を変化させる可能性。

※HLW の FEP データベースの「安全性への影響の可能性」への対応付け：平成 21 年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査 報告書[添付資料編] Appendix-II HLW 及び TRU 廃棄物の地下水移行シナリオの整備 II-A ガラス固化体、オーバーバック、緩衝材、母岩における安全性への影響の可能性 (HLW) に対応記号番号有り

(14) 新規火山の噴出の発生（影響事象 No.V13）

表 5.3-3 に示す影響事象のうち、V13 の新規に火山が出現し、噴火が発生することによって、広域地下水流動領域に影響することを起因事象として、THMC の派生事象に関する「安全性への影響の可能性」について示す。

1) 熱 (T) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

熱 (T) に関する知見によれば、新規火山での関連する調査事例はないが、既存火山での噴火に伴う溶岩、火砕流堆積物等の温度については、900～1200℃、800～950℃との報告がある。こうした知見から、新規に火山が出現し、噴火が発生することによって、広域地下水流動領域に影響することを起因事象に加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H1⑨：人工バリアから掘削影響領域に伝搬した熱、および、【V13】を要因とした新規火山の噴火に伴う温度変動が、掘削影響領域外部の母岩の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。

2) 応力 (M) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

応力 (M) に関する知見によれば、噴出物の厚さに依存して、地中にかかる荷重も大きくなるとされている。こうした知見から、新規に火山が出現し、噴火が発生することによって、広域地下水流動領域に影響することを起因事象に加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H3⑨：応力再配分に伴ったクリープ、掘削影響領域の亀裂の進展、および、【V13】に示した新規火山の噴火に伴う広域地下水流動領域の応力状態の変化が、母岩へ作用する外力や反力の状態を変化させる可能性。

3) 水理 (H) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

水理 (H) に関する知見によれば、新規火山に関する知見は無いが、火山噴火により水位が変動する観測事例がある。こうした知見から、新規に火山が出現し、噴火が発生することによって、広域地下水流動領域に影響することを起因事象に加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H2⑨：掘削影響領域の地下水流動現象、および、【V13】に示した新規火山の噴火に伴う広域地下水流動領域の水理特性や地下水流動現象の変化が、母岩の水理特性や地下水流動現象に影響を及ぼす可能性。

4) 化学 (C) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

化学 (C) に関する知見では、表層水が大規模火砕流堆積物中を浸透することで反応し、地下水組成に影響を及ぼす可能性について指摘している。こうした知見から、新規に火山が出現し、噴火が発生することによって、広域地下水流動領域に影響することを起因事象に加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H4⑬：H4②に示した掘削影響領域の地下水化学の変化、および、【V13】に示した新規火山の噴火に伴う広域地下水流動領域の地下水化学組成の変化が、母岩中の地下水と混じることにより、母岩領域の地下水化学を変化させる可能性。

表 5.3-18 新規火山の噴火によって発生する事象の「安全性への影響の可能性」（影響事象 No.V13）

影響事象	HLW の FEP データベースの「安全性への影響の可能性」への対応付け※
【V13】 ：新規に火山が出現し、噴火が発生することによって、広域地下水流動領域の THMC が変化 火山・マグマ活動（新規火山の噴火） →水文地質学的変化→サイト	【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H1⑨：人工バリアから掘削影響領域に伝搬した熱、および、 【V13】 を要因とした新規火山の噴火に伴う温度変動が、掘削影響領域外部の母岩の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。 H1⑨→H1①→B1①→OP1①→G1①
	【母岩→掘削影響領域】 H1①：人工バリア材等の熱特性や地中温度に依存して伝搬した崩壊熱、および、H1⑨を要因とした母岩の温度変動が、掘削影響領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【掘削影響領域→緩衝材】 B1①：H1①を要因とした掘削影響領域の温度変動、および、ガラス固化体の崩壊熱のオーバーパックや緩衝材への伝搬が、緩衝材領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【緩衝材→オーバーパック】 OP1①：B1①を要因とした緩衝材領域の温度変動、および、ガラス固化体の崩壊熱のオーバーパックへの伝搬が、オーバーパック領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【オーバーパック→ガラス固化体】 G1①：OP1①を要因とした緩衝材領域の温度変動、および、ガラス固化体の崩壊熱が、ガラス固化体領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H3⑨：応力再配分に伴ったクリープ、掘削影響領域の亀裂の進展、および、 【V13】 に示した新規火山の噴火に伴う広域地下水流動領域の応力状態の変化が、母岩へ作用する外力や反力の状態を変化させる可能性。
	【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H2⑨：掘削影響領域の地下水流動現象、および、 【V13】 に示した新規火山の噴火に伴う広域地下水流動領域の水利特性や地下水流動現象の変化が、母岩の水利特性や地下水流動現象に影響を及ぼす可能性。
	【地質・気候関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H4⑬：H4②に示した掘削影響領域の地下水化学の変化、および、 【V13】 に示した新規火山の噴火に伴う広域地下水流動領域の地下水化学組成の変化が、母岩中の地下水と混じることにより、母岩領域の地下水化学を変化させる可能性。

※HLW の FEP データベースの「安全性への影響の可能性」への対応付け：平成 21 年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査 報告書[添付資料編] Appendix-II HLW 及び TRU 廃棄物の地下水移行シナリオの整備 II-A ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材、母岩における安全性への影響の可能性（HLW）に対応記号番号有り

（15）深部流体の活動（影響事象 No.R1）

表 5.3-3 に示す影響事象のうち、R1 の天水、海水起源ではない流体（深部流体）の活動が発生することにより、広域地下水流動領域に影響することを起因事象として、THC の派生事象に関する「安全性への影響の可能性」について示す。

1) 熱（T）の変化に関する「安全性への影響の可能性」

熱（T）に関する知見によれば、深部流体の活動により広域地下水流動領域に熱的影響を与える可能性が指摘されている。こうした知見から、天水、海水起源ではない流体（深部流体）の活動が発生することにより、広域地下水流動領域に影響することを起因事象に加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H1⑨：人工バリアから掘削影響領域に伝搬した熱、および、**【R1】**を要因とした深部流体の活動に伴う温度変動が、掘削影響領域外部の母岩の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。

2) 水理 (H) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

水理 (H) に関する知見によれば、地熱流体は地層の割れ目系に貯留され流動するものとされている。こうした知見から、天水、海水起源ではない流体 (深部流体) の活動が発生することにより、広域地下水流動領域に影響することを起因事象に加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H2⑨：掘削影響領域の地下水流動現象、および、【R1】に示した深部流体の活動に伴う広域地下水流動領域の水理特性や地下水流動現象の変化が、母岩の水理特性や地下水流動現象に影響を及ぼす可能性。

3) 化学 (C) の変化に関する「安全性への影響の可能性」

化学 (C) に関する知見では、深部流体には、高温、高塩濃度、低 pH で多量の二酸化炭素を含む流体があり、地下水の反応性の変化に大きな影響を及ぼす可能性が指摘されている。こうした知見から、天水、海水起源ではない流体 (深部流体) の活動が発生することにより、広域地下水流動領域に影響することを起因事象に加えた。その内容を以下に示す。

- ・ H4⑬：H4②に示した掘削影響領域の地下水化学の変化、および、【R1】に示した深部流体の活動に伴う広域地下水流動領域の地下水化学組成の変化が、母岩中の地下水と混じることにより、母岩領域の地下水化学を変化させる可能性。

表 5.3-19 深部流体の活動によって発生する事象の「安全性への影響の可能性」(影響事象 No.R1)

影響事象	HLW の FEP データベースの「安全性への影響の可能性」への対応付け*
【R1】 ：天水、海水期限ではない流体 (深部流体) の活動が発生することにより、広域地下水流動領域の THC が変化 (深部流体) 熱水活動→水文地質学的変化→サイト	【地質・気象関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H1⑨：人工バリアから掘削影響領域に伝搬した熱、および、【R1】を要因とした深部流体の活動に伴う温度変動が、掘削影響領域外部の母岩の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。 H1⑨→H1①→B1①→OP1①→G1①
	【母岩→掘削影響領域】 H1①：人工バリア材等の熱特性や地中温度に依存して伝搬した崩壊熱、および、H1⑨を要因とした母岩の温度変動が、掘削影響領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【掘削影響領域→緩衝材】 B1①：H1①を要因とした掘削影響領域の温度変動、および、ガラス固化体の崩壊熱のオーバーバックや緩衝材への伝搬が、緩衝材領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【緩衝材→オーバーバック】 OP1①：B1①を要因とした緩衝材領域の温度変動、および、ガラス固化体の崩壊熱のオーバーバックへの伝搬が、オーバーバック領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【オーバーバック→ガラス固化体】 G1①：OP1①を要因とした緩衝材領域の温度変動、および、ガラス固化体の崩壊熱が、ガラス固化体領域の温度上昇や、時間的・空間的な温度変動をもたらす可能性。
	【地質・気象関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H2⑨：掘削影響領域の地下水流動現象、および、【R1】に示した深部流体の活動に伴う広域地下水流動領域の水理特性や地下水流動現象の変化が、母岩の水理特性や地下水流動現象に影響を及ぼす可能性。
	【地質・気象関連事象から母岩領域への接続ポイント】 H4⑬：H4②に示した掘削影響領域の地下水化学の変化、および、【R1】に示した深部流体の活動に伴う広域地下水流動領域の地下水化学組成の変化が、母岩中の地下水と混じることにより、母岩領域の地下水化学を変化させる可能性。

*HLW の FEP データベースの「安全性への影響の可能性」への対応付け：平成 21 年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査 報告書[添付資料編] Appendix-II HLW 及び TRU 廃棄物の地下水移行シナリオの整備 II-A ガラス固化体、オーバーバック、緩衝材、母岩における安全性への影響の可能性 (HLW) に対応記号番号有り

5.3.4 まとめ

地質・気候関連事象の発生から THMC の特性変化に至る影響の連鎖の整理は、母岩までを対象として進めていたが、人工バリアに与える影響の連鎖としての整理は未実施であった。そこで、地質・気候関連事象の発生による母岩までの特性変化が、人工バリアに与える影響の連鎖を明らかにするために、地質・気候関連事象発生から母岩の特性変化に至る影響の連鎖の整理結果と、既往の HLW の人工バリアの FEP データベースに収納されている安全性への影響の可能性の情報(ある起因事象とそれらを受けて発生する影響の連鎖を成文化したもの)を用いて、それらの関係を整理した。

なお、平成 23 年度には、地震活動、隆起・沈降に関して、HLW 処分システムへの影響を整理しているため、平成 24 年度は、気候変動、泥火山、火山・マグマ活動、深部流体を整理の対象とした。また、177 事象のうち“自然現象の著しい影響の回避”に該当する事象は、バリア内の特性変化に至る影響の連鎖の整理の対象から除いた。

地質・気候関連事象発生に伴う地下環境の変化を要因として、母岩領域→掘削影響領域→緩衝材領域→オーバーパック領域→ガラス固化体領域へとその影響が天然バリアから人工バリアの内側へと伝搬していく。“自然現象の著しい影響の回避”に該当する地質・気候関連事象を除くと、母岩領域の特性変化を介さずに、直接的に人工バリアに影響を及ぼすことは無い。そのため、母岩領域は、地質・気候関連事象発生に伴う地下環境の変化が人工バリア内の特性に影響を及ぼす際の接続ポイントになるものと考えた。

地質・気候関連事象の発生に伴う母岩領域に与える特性変化は、「温度変化」、「水理特性や地下水流動現象の変化」、「応力状態の変化」、「地下水組成の変化」の 4 つに集約される。そこで、これらの特性変化をキーワードとして、人工バリアの FEP データベースの母岩領域の「安全性への影響の可能性」に示された事象の連鎖から接続ポイントを特定した。特定した「安全性への影響の可能性」に起因事象の一つとして、それぞれの地質・気候関連事象発生に伴う地下環境の変化を追加した。さらに、地質・気候関連事象を起因事象とした人工バリア内の影響の連鎖が、既往の人工バリアの「安全性への影響の可能性」に示された影響の連鎖と同等に取り扱えるものかについての確認を行った。その結果、概ね既往の人工バリア内の影響の連鎖と同等に取り扱えることが確認できた。しかし、母岩領域に与える「温度変化」に対して、新たに母岩から人工バリアの内側への温度影響の連鎖を作る必要が分かり(図 5.3-1)、母岩領域からガラス固化体に向かう温度影響の安全性への影響の可能性を成文化した。

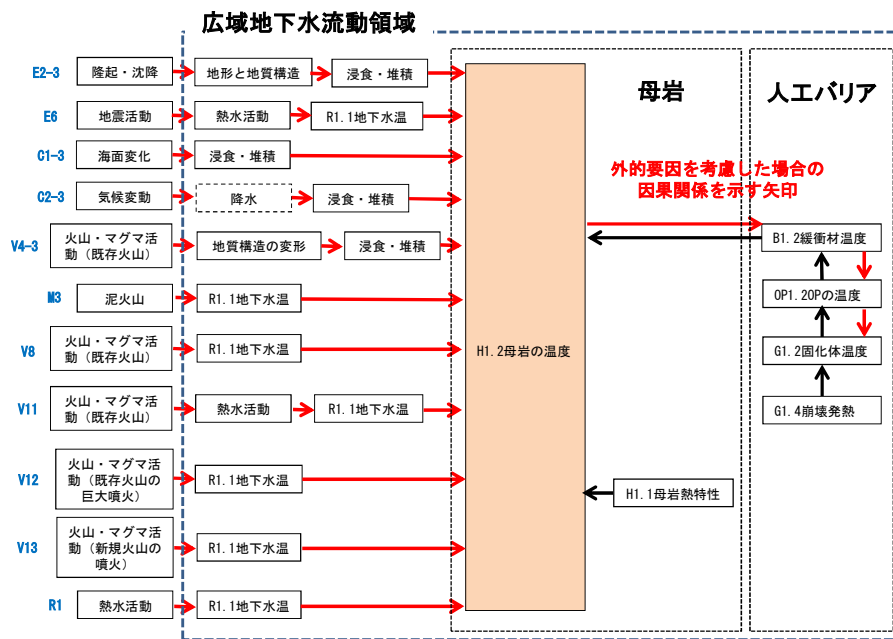


図 5.3-1 外的要因を考慮した場合の母岩の熱に関する相関関係図

5.4 母岩の影響量の不確実性の評価手法の検討

5.4.1 背景・目的

原子力安全委員会（2004）⁽¹⁾は、地質・気候関連事象による影響については、極めて評価期間が長いこと等から評価に付随する不確実性が避けられないとし、不確実性への対処として、諸外国の考え方を踏まえ、シナリオの可能性と影響を組合せたリスク論的考え方を示した。そのため、原子力機構は、地層処分の安全審査時に必要となる安全評価手法の整備の一環として、地質・気候関連事象に関して不確実性を評価するためのシナリオ・モデル整備を実施している。その基本方針は、環境要件を適用したとしてもその発生を完全に避けることのできない事象も評価すべき対象に含め、また、安全評価手法については、多様な地質環境の条件（ジェネリックな条件）に対し整備し、将来的にその手法をサイト・スペシフィックな条件に適用することである。処分サイトにおいて地質・気候関連事象の発生に伴う天然バリアとして機能する母岩への熱、水理、力学、化学（以下、THMC）の影響を評価することが必要となるため、まず、産業技術総合研究所（2007）⁽²⁾が示した46の地質・気候関連事象をTHMCの影響として細分化し、既往知見を基に地震等の起因事象から母岩のTHMCの影響に至るまでの変化量（FEP）の関係を177事象で表し、その内容と根拠をFEPデータベースに収録した^{(3)~(6)}。

177事象は、我が国の地質・気候関連事象を網羅するものであり、様々なサイト条件を念頭に置き、これらの全事象に対するTHMCに関する定量的な影響評価のための計算情報（データ・数式等；以下、モデル構造）が必要となる。このモデル構造の開発方針として、今後の安全規制における活用を念頭に置き、放射性廃棄物処分以外においてもすでに適用の実績がある解析解、数値解析コード、経験式等の既存の数式（以下、既存モデル）をベースに、それらの既存モデルを組み合わせたモデル構造の体系を整理することとした。また、地質・気候関連事象の発生やその発生に伴うTHMCの影響を評価するためのモデル・コード開発はさまざまな機関において現在進められており、それらの情報を今後入手しつつ母岩の影響評価のためのモデル構造に適宜反映し更新していくことを基本方針とした。

平成21年度は、事象ごとのモデル構造について検討し、モデル構造の情報の仕様、ならびに177事象全体を概観するモデル構造を構築するための方法について予備検討を実施した⁽⁵⁾。平成22年度は、THMCのうち水理、および力学的な母岩の影響に係る事象を対象に、既存モデルの組合せが成立するための条件（データの受け渡し等の確認）等のモデル構造の情報の詳細な仕様を定め、文献調査に基づいてモデル構造を整備した⁽⁷⁾。平成23年度は、モデル構造の範囲を熱、水理、および化学の特性変化に係る事象へと拡大し、文献調査に基づいて177事象のモデル構造を整備した⁽⁸⁾。また、モデル構造をデータベース化し、情報の記録・更新を管理するためのインターフェースを整備した。

平成24年度は、情報が不足していた不連続な構造である亀裂に関する既存モデル（地震と母岩の亀裂との関係、亀裂の力学的構造、亀裂の水理学的構造、および地震と水理特性の変化）の最新知見を収集し、新たにモデル構造の情報として整備した。また、モデル構造内に収録されている既存モデルによる影響評価を進めるにあたって、既存モデルを評価対象に適用する際のモデル、およびパラメータに関する不確実性や適用上の課題点を整理しておくことは、その影響量の不確実性を検討する際に有用になると考えられる。そこで、今後の既存モデルによる影響量の不確実性評価を進めるための基礎情報とするため、文献情報を基に、各既存モデルを評価対象に適用する際の不確実性や適用上の課題について分析・整理した。

5.4.2 母岩の影響評価手法の概要

(1) シナリオ整備における母岩の影響評価手法の位置づけと手順

地質・気候関連事象の発生に関連したシナリオ整備の流れを図 5.4-1 に示す。

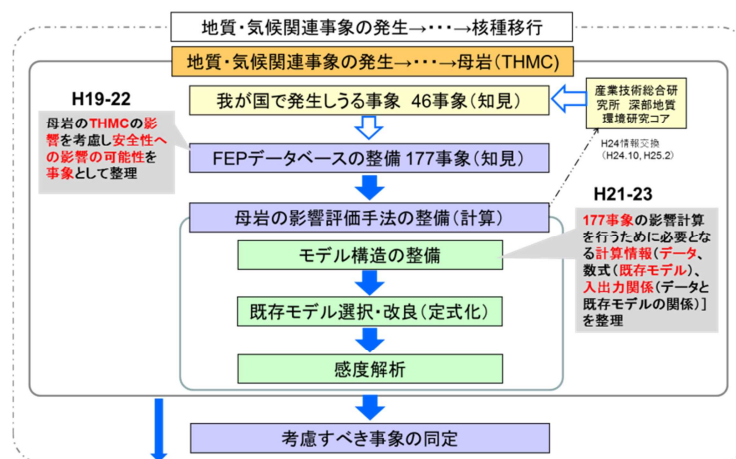


図 5.4-1 地質・気候関連事象の発生に関連したシナリオ整備の流れ

母岩の影響評価手法（以下、本手法）は、FEP データベースによって定めた 177 事象を受けて、その全てを対象として定量的な母岩の影響評価により核種移行評価で考慮すべき事象の同定を行うための手法である。177 事象の範囲は、起回事象の発生から母岩の THMC の影響までであり、この事象は、産業技術総合研究所が示した我が国において発生しうる 46 の事象を基に作成したものであり、サイト選定による回避の対象と考えられるものも現状含まれている。

本手法では、任意の事象の定量的な影響評価に対応するため以下の手順を設定した（図 5.4-1）。

- ① モデル構造の整備：177 事象の定量的な影響計算を行うために必要な計算情報（データ、数式、データ・数式の組合せ情報；モデル構造）の全てを予め整理する。
- ② 既存モデル選択・改良：事象に対し、モデル構造に基づいて該当する数式（既存モデル）の組合せ、既存モデル間のデータ・条件の整合性について最終チェックを行い、定式化する。
- ③ 感度解析：定式化された既存モデルを用いて影響の感度解析を実施し影響を評価する。

手順①については、平成 23 年度にモデル構造の整備が一通り完了しており、整備したモデル構造の概要を次項（2）に示す。手順②については、平成 24 年度に事象「地震が 1 回発生→地形・地質構造の変化→歪みの変化→透水係数・間隙水圧の変化→地下水流動の変化」に対して既存モデルを選択して定式化を行い、試解析を実施した（5.5.2 項）。

一方、事象は、起回事象の位置・規模・頻度（または平均活動間隔）を固定している。モデル構造は、事象に基づいているため、起回事象の位置・規模・頻度（または平均活動間隔）の不確実性（例えば、パラメータの分布幅）に対応するには、モデル構造の改良が必要である（手順②の改良）。そのため、事象「地震→地形の変化」に対して地震の不確実性を考慮するためにモデル構造を改良して定式化を行い、試解析を実施した（5.5.3 項）。

また、試解析を支えるモデル構造については、既存モデルの情報更新（5.4.3 項）、および母岩の影響量の不確実性の評価のために既存モデルのモデル不確実性を整理した（5.4.4 項）。

手順③以降の具体的内容については、以上の調査研究、ならびに FEP データベース整備の調査研究である 5.2 項、および 5.3 項の成果を踏まえ、次年度以降に検討を予定している。

(2) モデル構造の概要

モデル構造とは計算情報であり、その整備の目的は、地質・気候関連事象の母岩の影響計算に用いることである。モデル構造の適用範囲は 177 事象の全てであり、影響計算に提供すべき計算情報の仕様は以下のようにして定めた。

177 事象の任意の事象 E_i 「 $D_{i,1}$ が変化、次に $D_{i,2}$ が変化、 $D_{i,3}$ が変化・・・母岩 D_{i,N_i} が変化」は、「入力 $D_{i,1}$ と出力の $D_{i,2}$ の入出力関係、入力 $D_{i,2}$ と出力の $D_{i,3}$ の入出力関係、・・・入力 D_{i,N_i-1} と出力の母岩 D_{i,N_i} の入出力関係」を示している。既存の数式（以下、既存モデル） $F_{i,j}$ が「入力 $D_{i,j}$ と出力の $D_{i,j+1}$ の入出力関係」を満たすとき、数式 $F_{i,j}$ を計算式として採用する。既存モデルが不明なときは、便宜的に「現在は未知なモデル」とする。このとき、入出力関係は式(5-1)で整理される。式(5-1)により、事象 E_i の母岩の影響 D_{i,N_i} の計算式は式(5-2)のように示される。

$$D_{i,j+1} = F_{i,j}(D_{i,j}) \quad (5-1)$$

$$D_{i,N_i} = F_{i,N_i}(F_{i,N_i-1} \cdots (F_{i,1}(D_1)) \cdots) \quad (5-2)$$

177 事象の式(5-1)を求めれば、式(5-2)と同様に 177 事象の計算式が得られる。ただし、既存モデル $F_{i,j}$ は、入力データ $D_{i,j}$ 以外にデータ $D_{i,j}^c$ （以下、モデルパラメータ）を持ち、さらに数式の適用範囲等の条件が定められている。そのため、177 事象の影響計算のために必要な情報は、データ ($D_{i,j}$)、入出力関係（式(5-1)）、および既存モデル情報（モデルパラメータ $D_{i,j}^c$ 、数式、適用条件等）となる。

モデル構造では、これらの計算情報を図 5.4-2 に示すシステムで管理している。

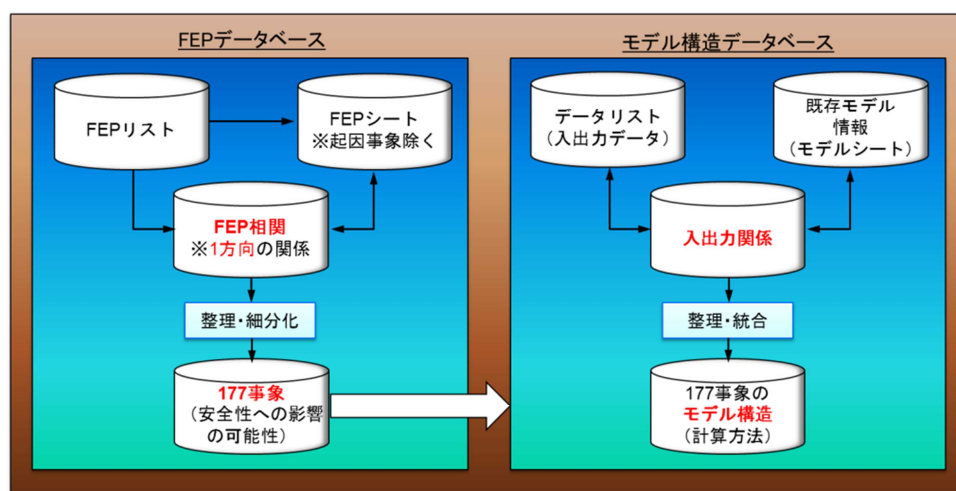


図 5.4-2 JAEA 地質・気候関連事象データベース・インターフェースシステム

データ $D_{i,j}$ は 42 あり、これらをデータリストと称する（表 5.4-1）。既存モデル $F_{i,j}$ の一覧は、表 5.4-2 に示す通りであり、その情報（データ、モデルパラメータ、数式、適用条件、入出力側に接続する他の既存モデル間のデータの受け渡しの確認等）はモデルシートに収録されている。入出力関係（式(5-1)）は、相関マトリクスで示すと表 5.4-3 のようになる。相関マトリクスでは、列と行にデータリストを配置し、列を入力データ、行を出力データ、その交点を入出力関係とみなして既存モデルが配置されている。相関マトリクスに示されている総数 63 の入出力関係が、177 事象の入出力関係である。

表 5.4-1 モデル構造の情報 1 (データリスト)

NO.	名称	NO.	名称
1	隆起等の構造運動	22	月平均気温変化
2	隆起量	23	蒸発散量の変化
3	地形勾配の分布等	24	凍土深度等の分布
4	水平方向の構造運動	25	流出高の変化
5	水平方向の変位	26	侵食量・堆積量
6	地震・断層運動	27	地形・地質構造の変化
7	断層変位	28	岩盤応力の変化
8	地震動	29	間隙構造の変化
9	泥火山噴出・貫入	30	解析要素の形状
10	泥火山噴出物堆積	31	一時的な地下水流動の変化
11	マグマ貫入	32	水理特性(物性値)の変化
12	貫入の性状	33	地下水ポテンシャル
13	火山噴火	34	涵養量等
14	火山灰等噴出特性	35	汀線位置
15	噴煙中柱の性状	36	地下水流動の変化
16	火山噴出物堆積	37	熱水活動
17	海面変化	38	熱水の流入
18	局地的気候変動	39	熱特性(境界条件)の変化
19	降水量の変化	40	化学特性(境界条件)の変化
20	豪雨時降水量変化	41	地下温度の変化
21	気温の変化	42	地下水の化学特性の変化

表 5.4-2 モデル構造の情報 2 (既存モデル 1/2)

No.	記号	既存モデルの名称	該当する既存モデル等の総称 (モデル・コード名)
1	E1	隆起の発生等(内陸)	内陸を対象とする隆起速度のデータベース(TT法)
2	E2	隆起の発生等(海岸)	海成段丘を対象とする隆起速度のデータベース(段丘の隆起速度等)
3	E3	地震発生と断層運動(プレート境界型)の性状	アスペリティモデル(地震発生サイクルのシミュレーション)
4	E4	地震発生と断層運動(内陸)の性状	平均活動間隔をもつ固有地震の繰り返しに係るモデル(活断層データベース等)
5	E6	地震による泥火山活動	地震と関連つけた泥火山の活動の観測結果等(新冠泥火山や松代群発地震等)
6	E7	降水量と侵食・マス・ムーブメントの関係	地すべり・大崩壊事例による経験則
7	E8	海面高さの変化	第四紀の海洋酸素同位体と海面変化量との関係等
8	E9	気候変動による降水量・気温等の変化	ベストモダンアナログ法
9	E10	周氷河現象による凍結融解・侵食	Aldrich式に基づく活動層の厚さ、松岡の式、赤石山地の表層砂礫移動速度、赤石山地での周氷河作用による斜面標高の経時変化
10	E11	プレート運動による水平方向の地殻変動	GPS観測データ、およびデータ分析に基づく経験式
11	U1	地震発生と断層運動(位置不特定)の性状	現在は不明なモデル
12	U2	火山噴火(既存)の噴出特性	現在は不明なモデル
13	U3	火山噴火(新規)の噴出特性	現在は不明なモデル
14	U4	マグマ貫入(既存)の性状	現在は不明なモデル
15	U5	マグマ貫入(新規)の性状	現在は不明なモデル
16	U6	地震による熱水流入	現在は不明なモデル
17	U8	構造運動による熱水流入	現在は不明なモデル
18	H1	地下水流動解析	地下水流動解析コード(3D-SEEP, Dtransu-3D・EL, GETFLOWS等)
19	H2	水収支式等による涵養量算定	水収支式、水頭観測による涵養量算定法
20	H3	地形から水収支を推定する方法	地形と河川流量の相関、分布型タンクモデル

表 5.4-3 モデル構造の情報 2 (既存モデル 2/2)

No.	記号	既存モデルの名称	該当する既存モデル等の総称 (モデル・コード名)
21	H5	泥火山による水圧上昇	泥火山の活動に伴う水理特性の変化の観測結果(松代群発地震の要因を泥火山の活動とみなした場合)
22	H6	年平均降水量と豪雨時の降水量の関係	観測結果に基づく年降水量と豪雨時降水量の関係の経験式等
23	H7	熱水の流入量	現在は不明なモデル(モデルシートはU6,U8参照)
24	HM1	地形・地質構造の経時変化の地下水流動解析モデル作成	SMS(連続的モデル化手法)、上部境界条件設定による方法
25	HM3	瞬時の応力変化に伴うイベント的な地下水流動変化	応力変化と間隙水圧変化の関係式(Roeloffsの式、徳永(2006)の式等)
26	HM5	応力-水理連成解析	応力-水理連成解析(圧密沈下解析を対象としたコードにDACSAR、ABAQUS等)
27	HG1	間隙率-透水係数・貯留係数の関係	間隙率と透水係数の関係、間隙率と比貯留係数の関係(圧密の場合)
28	Cm1	応力と透水係数の関係の総合	亀裂と間隙との構造の違いを考慮した応力の変化に伴う透水係数の変化の関係
29	Cm2	応力と間隙構造との関係	多孔質媒体の場合の応力の変化に伴う間隙構造の変化の関係
30	M1	弾性力学モデル	汎用の力学数値解析コード(ABAQUS、MSC NASTRAN、GEOFEM等)、鉛直載荷の理論解(Boussinesqの解)
31	M2	断層の食い違いモデル	食い違いモデル(Okada model, コードMICAP-G)
32	M3	断層変位と周囲のマクロ変形	食い違いモデル(Okada model, コードMICAP-G)、バランス断面法(2D Move・3D Move)
33	M4	マグマ等の貫入による変位・応力変化	食い違いモデル(Okada model, コードMICAP-G)または球状圧力源モデル(茂木モデル)
34	M5	噴煙柱モデル	噴煙柱のモデル(鈴木, 1985等)、噴煙柱中の粒度分布モデル
35	M6	火山灰の拡散・堆積	JMANHM(火山灰の気流による拡散と降灰予測に関する気象庁の非静力学モデル)、PUFFモデル(リアルタイム火山灰追跡モデル)
36	M7	地形シミュレーション、侵食量の経験的知見	地形シミュレーション、全国の侵食量分布図
37	M8	斜面安定解析	斜面安定解析(SSRFEM:コード名GA2D)、二次元動的弾塑性FEM
38	M9	地形に係る基本式	隆起、侵食量やマスマーブメントに伴う地表面変化量を地形変化量に換算するための経験式・判定等
39	M10	火山噴出物の堆積	溶岩流シミュレーションコード(LavaSIM)、火砕流流動・堆積シミュレーション手法(高橋らの方法等)
40	M11	泥火山の堆積	事例に基づく経験則
41	T1	年平均気温と月平均気温の関係	観測結果に基づく年平均気温と月平均気温の関係の経験式等
42	T2	泥火山貫入と熱特性の関係	E6に熱に関連する情報を追加したもの
43	T3	泥火山噴出物の堆積と熱特性の関係	M11に熱特性に係る情報を追加したもの
44	T4	マグマ貫入と熱特性の関係	現在は不明なモデル(モデルシートはU4,U5参照)
45	T5	火山噴出物と熱特性の関係	現在は不明なモデル(モデルシートはU2,U3参照)
46	T6	熱水の流入と熱特性の関係	現在は不明なモデル(モデルシートはU6,U8参照)
47	T7	気温の変化と熱特性の関係	E9に熱特性に係る情報を追加したもの
48	TH1	マグマ貫入による地下水温度の変化	熱-水理連成モデル(Magma2002)、一次元熱輸送モデル
49	TH2	熱-水理連成解析(高温・高圧に非対応)	三次元熱-水理連成解析コード(GETFLOWS、THAMES等)、一次元熱拡散モデル
50	TH3	気温と蒸発散の関係	ソーンズウェイト法、ペンマン法、マッキンク法
51	TH4	永久凍土の形成と分布	凍土層の厚さの推定モデル、永久凍土の厚さの経験式、永久凍土の分布高度の経験式
52	TH5	永久凍土の分布と涵養量の関係	凍土の範囲・地表被覆率と涵養量の関係の経験式、または凍土被覆率と温暖期涵養量の単純な乗算
53	C1	泥火山による地下水化学変化の観測結果等	泥火山による地下水化学変化の観測結果等(モデルシートTHC3参照)
54	C2	泥火山噴出物の堆積と化学特性の関係	M11に化学特性に係る情報を追加したもの
55	C3	マグマ貫入による地下水化学変化の観測結果等	マグマ貫入による地下水化学変化の観測結果等(モデルシートU7参照)
56	C4	噴火に伴う地下水化学変化の観測結果等	火山噴出物堆積地区における地下水化学特性に関する経験的知見(モデルシートTHC2参照)
57	C5	熱水の流入と化学特性の関係	現在は不明なモデル(モデルシートU6,U8参照)
58	C6	降水と化学特性の関係	E9に化学に関連する情報を追加したもの
59	THC1	熱力学解析-水理連成モデル	熱力学解析の地化学コード:PHREEQC(米国地質調査所開発)、GWB(Geochemist's Workbench; イリノイ大学開発)、TOUGHREACT(ローレンスバークレー国立研究所開発)等

次に、具体的に2つのデータ（入力、出力）と既存モデルを定めて、モデル構造の補足説明を行う。2つのデータと既存モデルの関係の模式図を図 5.4-3 に示す。



図 5.4-3 モデル構造を構成するデータリストと既存モデルの関係

図 5.4-3 では、入力 “7 断層変位（断層面でのすべり量）”、出力 “27 地形・地質構造の変化（地表・地中の変位）” とこの入出力関係に該当する既存モデルとして “M2（例では Okada model ; Okada, 1992⁹⁾” が示されている。このような入出力関係は、全てモデル構造で整理済みであるので、データリストから2つのデータを選択すれば、M2 という記号で管理されている既存モデルが割り当てられる。M2（図 5.4-3 の場合 Okada model）とは、半無限均質地盤を対象とした震源断層面上の食い違い（Dsilocation）による地表・地中の変位の解析解であり、このような既存モデルの概要、条件、入出力に関連するデータリスト、モデルパラメータ、数式、適用事例、および課題等の情報は、既存モデル別に用意したモデルシート（図 5.4-2）で管理されている。例えば、モデルシートには、データリストの “7 断層変位” は断層パラメータ、モデルパラメータがラメの定数（ λ 、 μ ）であることが記載されている。

最後に、モデル構造における起因事象の扱いを述べる。モデル構造では、既存モデルの計算用のデータとそれ以外の専門的な情報（起因事象のメカニズムに係るような知見等）を明確に区分し、これらの中に仮想的なモデルを配置した。例えば、地震については、専門的な情報に対して “6 地震・断層活動”、計算用のデータとして “7 断層変位”、その間に既存モデル（E3、E4、U1；表 5.4-2）を配置した。モデル構造を用いた計算では、“7 断層変位” に相当するデータを起因事象とみなし、“7 断層変位” に相当するデータの不確実性を起因事象の不確実性とみなすこととする。以上のモデル構造における起因事象の取り扱いの具体例については、5.5 項に示す。

5.4.3 モデルの最新知見の整理

(1) 調査の目的

平成23年度のモデル構造で採用した既存モデルのほとんどは連続した構造を仮定しており、亀裂や割れ目等の不連続な構造を対象とした既存モデル情報が不足していた。平成24年度は、既存モデルの情報不足に伴うモデル構造の不確実性の解消のために、亀裂や割れ目等の不連続な構造を対象とする最新のモデル情報を整理した。

(2) 調査方法

モデル構造のうち地震と母岩の亀裂との関係、亀裂の力学的構造、亀裂の水理的構造、および地震による水理特性の変化（透水係数や地下水位の変化等）との関係に係る既存モデルの最新情報を文献調査により収集して整理し、モデル構造のモデルシートを追加・更新した。本調査の範囲は、モデル構造上、表5.4-5、および図5.4-4に示す範囲となる。データリストは、入力のみで使用するデータ、あるモデルでは入力となりその他のモデルでは出力となるデータ、出力のみで使用するデータの3つに分けて示した。関係する既存モデルは、図5.4-4に示すモデル構造のうち、起因事象に関連する既存モデル（E3等）を省いた、以下のモデルである。

- ✓ M2 : 食い違いモデル
- ✓ HM1 : 地形・地質構造の経時変化を考慮した解析要素形状作成
- ✓ M1 : 弾性力学モデル
- ✓ HM3 : 応力-間隙水圧の変化の関係式
- ✓ HG1 : 間隙率-透水係数の変化の関係式
- ✓ Cm1 : 応力-透水係数の変化の関係式
- ✓ Cm2 : 応力-間隙構造の変化の関係式
- ✓ H1 : 地下水流動解析

表 5.4-5 モデルの最新知見の整理の範囲（データリスト）

NO.	名称	NO.	名称
1	隆起等の構造運動	22	月平均気温変化
2	隆起量	23	蒸発散量の変化
3	地形勾配の分布等	24	凍土深度等の分布
4	水平方向の構造運動	25	流出高の変化
5	水平方向の変位	26	侵食量・堆積量
6	地震・断層運動	27	地形・地質構造の変化
7	断層変位	28	岩盤応力の変化
8	地震動	29	間隙構造の変化
9	泥火山噴出・貫入	30	解析要素の形状
10	泥火山噴出物堆積	31	一時的な地下水流動の変化
11	マグマ貫入	32	水理特性(物性値)の変化
12	貫入の性状	33	地下水ポテンシャル
13	火山噴火	34	涵養量等
14	火山灰等噴出特性	35	汀線位置
15	噴煙中柱の性状	36	地下水流動の変化
16	火山噴出物堆積	37	熱水活動
17	海面変化	38	熱水の流入
18	局地的気候変動	39	熱特性(境界条件)の変化
19	降水量の変化	40	化学特性(境界条件)の変化
20	豪雨時降水量変化	41	地下温度の変化
21	気温の変化	42	地下水の化学特性の変化

○ : 入力で使用

○ : 入力と出力の双方で使用

○ : 出力で使用

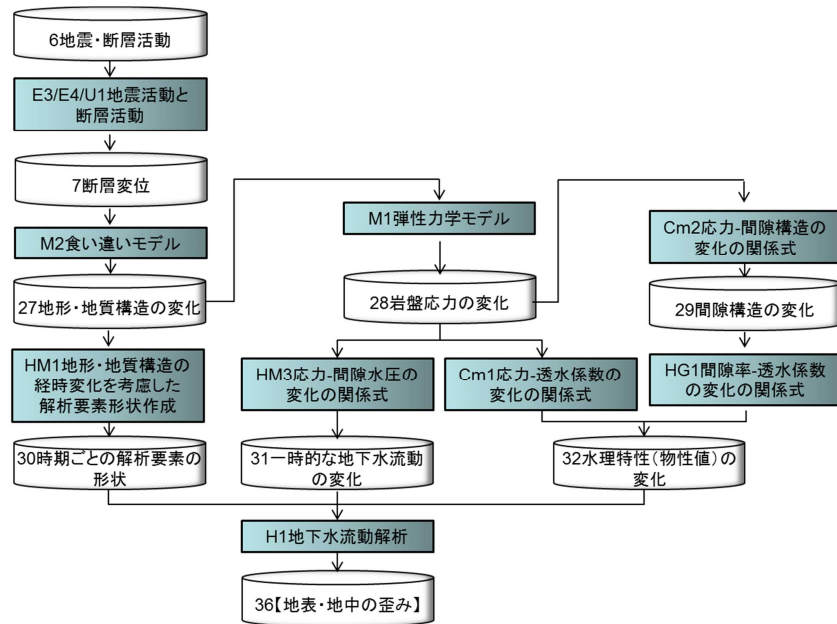


図 5.4-4 モデルの最新知見の整理の対象となるモデル構造

(3) 調査結果

調査で用いた文献の一覧を表 5.4-6 に示す。

M2 食い違いモデルと関連する①断層変位・地震動に伴う周辺の割れ目の変化については、SKB の事例 (Backblom et al., 2004)⁽¹⁰⁾があり、以下にその概要を示す。

SKB では、地震による変位が認められた断層とその周辺の坑壁破壊に関する情報整理、および数値解析を行うことにより、主断層変位による周辺割れ目への影響 (せん断変位) を検討している⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。地震によりトンネル坑壁に断層のずれが現れた 9 地区 (日本 4 地区、南アフリカ共和国 2 地区、台湾 1 地区、米国 2 地区) の調査結果によると、周辺の割れ目に変位が認められる範囲は主断層から数 m~10m 以内に限られた。ただし、ライニングでなく岩盤の坑壁を直接観察できたのは南アフリカ共和国の事例 (2 地区) のみである。この調査結果をサポートするために、主断層の変位・地震動に伴う主断層周辺の割れ目の変位について、弾性体モデルによる静的解析・動的解析が実施された (表 5.4-6)。この中で、境界要素法 (Boundary Element Method ; BEM) と変位不連続な多角形要素を併用する解析コード POLY3D による静的解析(#1) では、主断層の変位に伴う多数の周辺割れ目におけるせん断変位の計算を行い、最大の変位量が 21mm で、動的解析(#2~#4) よりも大きな割れ目変位量が算出された。Backblom et al., (2004)⁽¹⁰⁾は、解析#1 が割れ目の摩擦を考慮していないため、保守的な解析であると述べている。

これらの静的・動的解析手法をモデル構造へ適用する場合には、解析の簡便さ (パラメータの設定・仮定等) や残留変位が重要であることを考えると、まずは POLY3D 等による静的解析によって保守的なアプローチを行うことが現実的と考えられる。なお、当文献での解析は処分ピットにおけるせん断変位を評価するために実施されていたが、地下水流動の媒体としての割れ目を扱う場合には割れ目開口方向の変位 (透水性に影響が大きいと予想される) も重要と考えられる。

表 5.4-6 モデルの最新知見の整理の対象文献

項目	文献	主な内容	モデル
①断層変位・地震動に伴う周辺の割れ目の変化	Backblom et al.(2004) ⁽¹⁰⁾ Munier et al.(2004) ⁽¹¹⁾	主断層の変位・地震動に伴う周辺岩盤の割れ目変位の観察結果と周辺割れ目の変位に関する数値解析	M2
	橋本(2002) ⁽¹²⁾	ΔCFFを用いたプレート運動による日本列島の断層変位の可能性の評価	M2
	計算力学研究センター ⁽¹³⁾	断層変位に伴う力学解析のためのFEMによる数値モデル	M2
	Stephansson et al. (2008) ⁽¹⁴⁾ FRACOM Ltd. ⁽¹⁵⁾ Rinne et al. (2008) ⁽¹⁶⁾	コードFRACODを用いた坑道周辺(EDZ)の割れ目の伸展と透水係数の変化の解析	Cm2
	田中ほか(1999) ⁽¹⁷⁾	野島断層のコア観察結果による断層沿いの割れ目の分布	M2
②応力変化・変位による割れ目の透水係数等の変化	多田ほか(1994) ⁽¹⁸⁾	割れ目の透水係数と垂直応力に関する経験式	Cm1
	三谷ほか(2002) ⁽¹⁹⁾ 三谷ほか(2000) ⁽²⁰⁾ 郷家ほか(2003) ⁽²¹⁾	せん断変位に伴う透水係数の変化(低-高封圧下)、および軟岩基質部の透水性変化	Cm1
	谷川・嶋本(2007) ⁽²²⁾ Soh.et al.(1998) ⁽²³⁾	足柄層群泥質岩における荷重-間隙率-浸透率	Cm1 HG1
	石井ほか(2002) ⁽²⁴⁾ Stephansson et al. (2008) ⁽¹⁴⁾	単一割れ目から岩盤の透水性への統合	Cm1
③断層変位・地震動に伴う岩盤全体の透水性の変化	阿部・酒井(1999) ⁽²⁵⁾	兵庫県南部地震後の地下水位変化を説明するための岩盤の透水性変化のモデル解析による解釈	H1
	徳永(1999) ⁽²⁶⁾	兵庫県南部地震後の地下水位・湧水量変化を説明するための水理特性変化のモデル解析による解釈	HM3 H1
④断層変位・地震動に伴う岩盤の地下水流動の変化	Ge and Stover(2000) ⁽²⁷⁾	体積歪みに基づく地震時の水頭(地下水位)の変化、およびその観測値との比較	HM3
	日本原子力研究開発機構(2010) ⁽²⁸⁾	地震時の一時的間隙水圧上昇と水圧消散の広域地下水流動解析	(HM3) H1
	核燃料サイクル開発機構(2005) ⁽²⁹⁾ 日本原子力研究開発機構(2012) ⁽³⁰⁾ Niwa et al. (2012) ⁽³¹⁾	地震時の地下水位変化からみた水理地質メカニズムの推定	M2- HM3
⑤断層変位による地形・地質構造の長期変化に伴う地下水流動の変化	今井ほか(2009) ⁽³²⁾	超長期の地質構造変化を反映したモデルによる地下水流動変化の解析	HM1

表 5.4-7 主断層の変位に伴う周辺の割れ目の変位の解析⁽¹⁰⁾

解析	解析タイプ、コード	解析内容	結果
#1	POLY3D による静的解析 (BEM+変位不連続な多角形要素、弾性体)	鉛直断層の水平変位 (M6.1 相当) を与え、実測に基づく様々なサイズ・方向をもつ多数の割れ目について、せん断変位量を統計的に算出。割れ目の摩擦は考慮せず。	サイズの大きな割れ目ほど変位が大。最大 21mm。主断層から 2km にある半径 100m の割れ目で 15mm。
#2	WAVE と FLAC3D による動的解析 (有限差分法、弾性体)	WAVE により主断層での地震動による周辺域での振動(速度、歪み)を計算し、これを FLAC3D による計算領域の底面の境界条件として与え、割れ目の変位を計算。	振動の影響は現れるが、静的影響(残留変位)は生じない。
#3	WAVE による動的解析 (有限差分法、弾性体)	WAVE を用いて主断層の地震動による割れ目(摩擦を考慮)の変位を計算。割れ目の方向として断層に平行か直角のみが扱える。	断層からの距離に応じた静的影響(残留変位)が計算される。
#4	FLAC3D による動的解析 (有限差分法、弾性体)	主断層での応力・物性(摩擦)を考慮し、その連続的開放を与えることで断層のすべりを再現。周辺の 1 つの割れ目(摩擦を考慮)を対象に、動的な変位の変化を計算。	割れ目の摩擦が大きいと残留変位は抑制される。

表 5.4-6 の文献で得られた情報をモデル別に整理すると以下の通りである。

- ・ M2 (食い違いモデル)：弾性体モデルに割れ目変位を考慮して断層周辺の割れ目面でのせん断変位を予測した解析例がある。割れ目面の摩擦を考慮しない解析は、大きめのせん断変位が出力される保守的モデルとして扱われている。そのほか、野島断層の観察事例では、断層帯の活動部分は長期の間に集中することが示された。
- ・ M1 (载荷による弾性力学モデル)：対象となる新たな文献はなかった。
- ・ Cm1 (応力-透水係数)：室内実験の事例があるが、試料ごとの個別事例である。双曲線関数によって表された経験式等がある。割れ目に垂直な方向の応力・変位に加え、せん断方向の変位も透水性に関与する。応力変化に伴う個別割れ目の透水係数変化から、割れ目方向や分布密度・開口幅を考慮して岩盤の透水テンソルに統合する方法も検討されている。
- ・ Cm2 (応力-間隙構造)：圧密過程での間隙率変化のモデル (Athy 式) のほか、応力変化と歪みエネルギー解放の考え方に基づき周辺割れ目の生成・伸展をモデル化する手法(コード FRACOD)がある。
- ・ HG1 (間隙率-透水係数)：圧密過程での経験式がある。断層運動による水理特性変化にこれを直接利用することは難しいが、弾性変形の範囲では室内試験結果が利用できる。
- ・ HM1 (地形地質構造の経時変化を考慮した地下水解析モデル作成)：SMS (Sequential Modeling System of geo-environmental evolution impact on groundwater flow) (今井ほか,2010)⁽³³⁾の例のみで、断層運動を反映した経時変化モデルは示されていない。時間スケールの違いから、個々の断層運動による変化への利用は難しいと考えられる。
- ・ HM3 (瞬時応力変化-間隙水圧-水圧消散)：Parkfield 地震での適用例等から、この手法の有効性が示されている。食い違いモデルを用いた体積歪みの変化に基づく地下水位変化量が観測水位と整合するという事例は東濃等でも得られている。地震が地下水流動に与える長期的影響については十勝平野での検討例がある。

- ・ H1：割れ目の水理特性変化を直接反映した地下水流動解析の例は（広域スケールでは）得られなかった。

なお、割れ目伸展モデルは坑道周囲の掘削影響領域や水圧破碎のボーリング孔周辺に適用された事例はあるが、地震・断層変位により岩盤内部でどの程度の透水性変化が生じるかを解析した事例は得られなかった。

上述の整理内容に基づき、以下のモデルシートを更新した。

- ・ Cm1（割れ目から岩盤の透水係数を算出する方法の追記、せん断変位のコメントの追記）
- ・ Cm2（割れ目の生成・伸展のモデルの追記）
- ・ HM3（地震時の水圧上昇と水圧消散の広域解析の追記）
- ・ HG1（泥質岩での間隙率-浸透率の式の記載）
- ・ M2（数値解析による計算事例と食い違いの設定方法の追記）

更新の詳細は、添付資料編 Appendix IV-A に示す。

5.4.4 モデルの不確実性の整理

（1）調査の目的

モデル構造の内在的な不確実性としては、既存モデルを要因とする不確実性が想定される。そのため、既存モデルの適用条件等による不確実性（以下、モデル不確実性。例えば、空間的に不均一な構造を均一と扱う等）を要因に分けて整理するとともに、整理した不確実性の現状の扱いを知るために、モデルによる実測値の再現状況（以下、影響の再現性）を合わせて整理した。

（2）調査方法

本調査では、177 事象のモデル構造のうち、母岩の水理、および力学的影響に係る既存モデルに関し、モデル不確実性を整理した。本調査の範囲は、データリスト数 29、既存モデル数 29 である（表 5.4-8～5.4-10）。

表 5.4-8 モデルの不確実性の整理の範囲（データリスト）

NO.	名称	NO.	名称
1	隆起等の構造運動	22	月平均気温変化
2	隆起量	23	蒸発散量の変化
3	地形勾配の分布等	24	凍土深度等の分布
4	水平方向の構造運動	25	流出高の変化
5	水平方向の変位	26	侵食量・堆積量
6	地震・断層運動	27	地形・地質構造の変化
7	断層変位	28	岩盤応力の変化
8	地震動	29	間隙構造の変化
9	泥火山噴出・貫入	30	解析要素の形状
10	泥火山噴出物堆積	31	一時的な地下水流動の変化
11	マグマ貫入	32	水理特性(物性値)の変化
12	貫入の性状	33	地下水ポテンシャル
13	火山噴火	34	涵養量等
14	火山灰等噴出特性	35	汀線位置
15	噴煙中柱の性状	36	地下水流動の変化
16	火山噴出物堆積	37	熱水活動
17	海面変化	38	熱水の流入
18	局地的気候変動	39	熱特性(境界条件)の変化
19	降水量の変化	40	化学特性(境界条件)の変化
20	豪雨時降水量変化	41	地下温度の変化
21	気温の変化	42	地下水の化学特性の変化

○ : 入力で使用

○ : 入力と出力の双方で使用

○ : 出力で使用

表 5.4-10 に示す相関マトリクスでは、入力データの項目を列、出力データの項目を行、これらの交点を入出力関係とみなして既存モデルをあてはめている。本調査の範囲はハッチングした範囲であり、177 事象に対する割合を入出力関係の個数の割合で示すと 78%となる。

表 5.4-9 モデル不確実性の調査対象 (既存モデル)

記号	既存モデル等の名称	モデル・コード、関係式など
E6	地震による泥火山活動	地震と関連づけた泥火山の活動の観測結果等(新冠泥火山や松代群発地震等)
E7	降水量と侵食・マスムーブメントの関係	地すべり・大崩壊事例による経験則
E10	周水河現象による凍結融解・侵食	Aldrich式に基づく活動層の厚さ、松岡の式、赤石山地の表層砂礫移動速度、赤石山地での周水河作用による斜面標高の経時変化
T1	年平均気温と月平均気温の関係	観測結果に基づく年平均気温と月平均気温の関係の経験式等
TH3	気温と蒸発散の関係	ソーンスウェイト法、ベンマン法、マッキンク法
TH4	永久凍土の形成と分布	凍土層の厚さの推定モデル、永久凍土の厚さの経験式、永久凍土の分布高度の経験式
TH5	永久凍土の分布と涵養量の関係	凍土の範囲・地表被覆率と涵養量の関係の経験式、または凍土被覆率と温暖期涵養量の単純な乗算
H1	地下水流動解析	地下水流動解析コード(3D-SEEP, Dtransu-3D-EL, GETFLOWS等)
H2	水収支式等による涵養量算定	水収支式、水頭観測による涵養量算定法
H3	地形から水収支を推定する方法	地形と河川流量の相関、分布型タンクモデル
H5	泥火山による水圧上昇	泥火山の活動に伴う水理特性の変化の観測結果(松代群発地震の要因を泥火山の活動とみなした場合)
H6	年平均降水量と豪雨時の降水量の関係	観測結果に基づく年降水量と豪雨時降水量の関係の経験式等
HM1	地形・地質構造の経時変化の地下水流動解析モデル作成	SMS(連続的モデル化手法)、上部境界条件設定による方法
HM3	瞬時の応力変化に伴うイベント的な地下水流動変化	応力変化と間隙水圧変化の関係式(Roeloffsの式、徳永(2006)の式等)
HM5	応力・水連成解析	応力-水連成解析(圧密沈下解析を対象としたコードにDACSTAR、ABAQUS等)
Cm1	応力と透水係数の関係の総合	亀裂と間隙との構造の違いを考慮した応力の変化に伴う透水係数の変化の関係
Cm2	応力と間隙構造との関係	多孔質媒体の場合の応力の変化に伴う間隙構造の変化の関係
HG1	間隙率-透水係数・貯留係数の関係	間隙率と透水係数の関係、間隙率と比貯留係数の関係(圧密の場合)
M1	弾性力学モデル	汎用の力学数値解析コード(ABAQUS、MSC NASTRAN、GEOFEM等)、鉛直載荷の理論解(Boussinesqの解)
M2	断層の食い違いモデル	食い違いモデル(Okada Model, コードMICAP-G)
M3	断層変位と周囲のマクロ変形	食い違いモデル(Okada Model, コードMICAP-G)、バランス断面法(2DMove・3DMove)
M4	マグマ等の貫入による変位・応力変化	食い違いモデル(Okada Model, コードMICAP-G)または球状圧力源モデル(茂木モデル)
M5	噴煙柱モデル	噴煙柱のモデル(鈴木, 1985等)、噴煙柱中の粒度分布モデル
M6	火山灰の拡散・堆積	JMANHM(火山灰の気流による拡散と降灰予測に関する気象庁の非静力学モデル)、PUFFモデル(リアルタイム火山灰追跡モデル)
M7	地形シミュレーション、侵食量の経験的知見	地形シミュレーション、全国の侵食量分布図
M8	斜面安定解析	・斜面安定解析(SSRFEM:コード名GA2D)、二次元動的弾塑性FEM
M9	地形に係る基本式	隆起、侵食量やマスムーブメントに伴う地表面変化量を地形変化量に換算するための経験式・判定等
M10	火山噴出物の堆積	溶岩流シミュレーションコード(LavaSIM)、火砕流流動・堆積シミュレーション手法(高橋らの方法等)
M11	泥火山の堆積	事例に基づく経験則

表 5.4-10 モデル不確実性の調査対象 (相関マトリクス)

調査対象	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42									
入カテゴリー																																																			
出カテゴリー																																																			
1 隆起等の構造運動	-																																																		
2 隆起量	E1	-																																																	
3 地形勾配分布等	M9	-	M3																																																
4 水平方向の構造運動				-																																															
5 水平方向の変位				E11	-																																														
6 地震・断層運動						E3	-																																												
7 断層変位						E3	-																																												
8 地震動								E6	-																																										
9 泥火山噴出・貫入										M11	-																																								
10 泥火山噴出物堆積																																																			
11 マグマ貫入																																																			
12 貫入の性状																																																			
13 火山噴火																																																			
14 火山噴出物性状																																																			
15 噴煙中柱の性状																																																			
16 火山噴出物堆積																																																			
17 海面変化																																																			
18 局地的気候変動																																																			
19 降水量の変化																																																			
20 豪雨時降水量変化																																																			
21 気温の変化																																																			
22 月平均気温変化																																																			
23 蒸発散量の変化																																																			
24 凍土深度等の分布																																																			
25 流出高の変化																																																			
26 侵食量・堆積量																																																			
27 地形・地質構造の変化																																																			
28 岩盤応力の変化																																																			
29 間隙構造の変化																																																			
30 解析要素の形状																																																			
31 一時的な地下水流動の変化																																																			
32 水理特性(物性値)の変化																																																			
33 地下水ポテンシャル																																																			
34 湧水量等																																																			
35 汀線位置																																																			
36 地下水流動の変化																																																			
37 熱水活動																																																			
38 熱水の流入																																																			
39 熱特性(境界条件)の変化																																																			
40 化学特性(境界条件)の変化																																																			
41 地下温度の変化																																																			
42 地下水の化学特性の変化																																																			

本調査の調査対象とするモデルの不確実性は、入力データのばらつきや精度によって生じる不確実性ではなく、モデルそのものが有する不確実性である。不確実性の情報は表 5.4-11 に示す不確実性の要因別に整理した。要因は、モデルパラメータ、および空間的・時間的な外挿・内挿に関する不確実性の 5 種類とした。また、不確実性に加えて、モデルの検証（モデルによる実測値の再現性）についての現状と課題も記した。整理においては、参考としてモデルのタイプを次のように分類して示した。

- ・ T：解析解を用いたモデル
- ・ N：数値解析を用いたモデル
- ・ C：経験式を用いたモデル（理論式を一部に含むものもある）
- ・ U：入出力関係の理解が不十分なモデル（未知なモデル）
- ・ -：新たな変量の算出は行わず、計算のルールや仮定を示したもの

表 5.4-11 モデルの不確実性の種別

種 別	内 容
①パラメータの不確実性	モデルの入力値の中に、現時点で観察や観測で直接求めることのできないモデル固有のパラメータがあることに伴う不確実性（計算結果の値に関わる不確実性）
②空間軸上の外挿を要因とする不確実性	ある地域の影響の観察や観測を用いたモデルを、その他の地域に適用することに伴う不確実性（汎用性・空間的代表性に関する不確実性）
③空間軸上の内挿を要因とする不確実性	統計や数学的な取り扱いから、本来は不均一である空間の条件（地形の不陸、地盤の物性値等）を単純化したことに伴う不確実性（空間分解能・不均一性に関する不確実性）
④時間軸上の外挿を要因とする不確実性	短期間の影響の観察や観測を用いたモデルを長期間に外挿することに伴う不確実性（時間的な汎用性・発生時期に関する不確実性）
⑤時間軸上の内挿を要因とする不確実性	長期間において時間軸上の数点の影響差の観察や観測を用いたモデルから、その期間内の変化を一律として扱うことに伴う不確実性（時間分解能・変化の速さの不確実性）
影響の再現性（検証）	不確実性の程度は影響の実測値の再現計算により確かめられるとし、再現計算によるモデルの不確実性の現状と再現計算の阻害要因を記載。

（3）調査結果

不確実性の検討のために作成したシートの整理例を表 5.4-12～5.4-13、不確実性の整理結果を表 5.4-14 に示す。表 5.4-14 は、不確実性の検討のために作成したシートの中から不確実性、および検証上の課題のある部分を抽出してまとめたものである。なお、表 5.4-14 を作成するとき用いた個々のモデルの不確実性の一覧表については、添付資料編 Appendix IV-B に示した。

表 5.4-14 より、全体として見ると、パラメータや空間的外挿・内挿による不確実性が多く、時間的外挿・内挿による不確実性は比較的少ないことがわかる。モデルのタイプ別に見ると、N（数値解析を用いたモデル）のほとんどにパラメータの不確実性があることと、N のモデルでは空間軸上の外挿・内挿および時間軸上の外挿による不確実性も多いことが示されている。不確実性の種別が比較的多いモデルは E10（気温-凍結融解・侵食）と E6（地震動→泥火山）である。力学・構造に関するモデルのほとんど（M1～M6、M8～M11）は静的モデルまたは要求される出力が静的事象であるため、時間軸上の内挿による不確実性は生じないと考えられる。

表 5.4-12 既存モデルのモデル不確実性に関するシートの整理 (E6)

参考文献	<p>(1)産業技術総合研究所深部地質環境研究センター, 概要調査の調査・評価項目に関する技術資料 —長期変動と地質環境の科学的知見と調査の進め方—, 地質調査総合センター研究資料集, No.459, 2007.</p> <p>(2)千木良雅弘・中田英二, 堆積岩の続成作用(その1) —圧密・脱水と水理地質特性—, 電力中央研究所報告, U94026, 1994.</p> <p>(3)千木良雅弘・田中和広, 北海道南部の泥火山の構造的特徴と活動履歴, 地質学雑誌, Vol.103, pp.781-791, 1997.</p> <p>(4)田近淳ほか, 2003年十勝沖地震に伴う新冠泥火山の変動の記録, 北海道立地質研究所報告, 第80号, pp.147-156, 2009.</p>
既存モデル	E6 (地震-泥火山)
入力データ	地震の規模・震源距離 (震度)
出力データ	泥火山の噴出・貫入の位置[m; x,y,z], 噴出・貫入量[m ³] または貫入圧力[Pa]・貫入部の変位量[m]
モデル概要	<p>経験的な観察結果である。</p> <p>①地震の震度・頻度と泥火山の噴出・貫入位置の関係 泥火山は、異常に高い間隙水圧を持った泥が泥ダイアピルとして上昇し、地下水、ガス、時には石油とともに地表に噴出したもので、泥ダイアピルはプレート収束帯、堆積速度が大きい場所、流体の移動場所が妨げられやすい場所等、泥が多量に供給され、なおかつ異常に高い間隙水圧が形成されやすい場所に出現する可能性がある。我が国の泥火山は、北海道の新冠泥火山と新潟県の松代泥火山が報告されており、地震により泥火山の活動が誘発された例は新冠泥火山のみである⁽¹⁾。</p> <p>②地震の震度・頻度と泥火山の噴出量・貫入量・貫入圧力・変位量の関係 間隙水圧は地震時に瞬間的に変化することが想定され、これに応じて泥火山が新たに形成されたり活動を活発化させたりすることが考えられる⁽²⁾。新冠のいくつかの泥火山は震度5以上の地震時にほぼ例外なく泥水を噴出することが知られている⁽³⁾。新冠泥火山の丘状部の観察⁽⁴⁾によると、2008年十勝沖地震(新冠町での震度5弱)の際に噴泥と1m弱の隆起が、2003年十勝沖地震(新冠町での震度6弱)ではそれよりやや大きい隆起と約200m²の範囲に堆積した噴泥があった。ただし、噴泥の体積や隆起量分布の詳細な記述はない。</p>
入出力の 応答関係	<p>①地震の震度・頻度と泥火山の噴出・貫入位置の関係 上述のように、泥火山の活動場所は限定されており、震度分布や頻度により発生位置や範囲の推定(例えば震源を中心とした噴出確率のコンター表示)ができるわけではない。</p> <p>②地震の震度・頻度と泥火山の噴出量・貫入量・貫入圧力・変位量の関係 上記の観察結果から、ある程度以上の規模となると泥火山の活動が地表で見られることはわかるが、具体的な震度と噴出量との関係はわかっていない。このため、噴出量・変位量は震度の増加関数であると考えられるものの、単調増加か、しきい値をもった応答関係かは特定できない。</p>
モデルの 不確実性	<p>パラメータ：震源からの距離・規模と泥火山の噴出量等との関係はよくわかっておらず、パラメータを用いて表されていない。</p> <p>空間的外挿：地震時の泥の噴出が確認されているのは特定の泥火山(新冠)のみであり、その他の泥火山で地震と噴泥の関係は確認されていない。</p> <p>空間的内挿：・国内の1ヶ所(新冠)のみの噴出例であり、他の泥火山に適用する上では空間分解能は低い。</p> <p>空間的外挿：泥火山(新冠)の活動は、地震の確率以外に、地震との条件付き確率が必要となる。この条件付き確率が不明であるため、外挿が困難。</p> <p>空間的内挿：継続的な活動やその変化を想定していないので時間分解能の問題はないと思われる。</p>

	再現の現状：地震の位置・規模等と噴出量の関係を整理し一般化した観測記録はない。発生時期が地震時に限られ、いつどの程度の規模の噴泥が発生するかわからないため、観測が難しい。地下の圧力等の観測は噴泥よりさらに難しい。
--	--

表 5.4-13 既存モデルのモデル不確実性に関するシートの整理 (E10)

参考文献	(1) Matsuoka, N., The rate of bedrock weathering by frost action: field measurements and a predictive model, <i>Earth Surface Processes and Landforms</i> , 15, pp.73-90, 1990. (2) 松岡憲知, 凍結融解作用の機構からみた周氷河地形, <i>地理学評論</i> , 65A-2, pp.56-74, 1992. (3) 瀬戸真之, 高山地斜面における凍結・融解サイクルの頻度と表面岩温の低下量, <i>地球環境研究</i> , Vol.7, 2005.
既存モデル	E10 (周氷河作用における凍結融解・侵食)
入力データ	年平均気温[deg]
出力データ	凍結破砕速度(1年当りの破砕面積率)[1/y]
モデル概要	<p>気温と凍結破砕面積の関係について、Matsuoka(1990)⁽¹⁾ は、岩盤の室内試験による凍結破砕速度と赤石山脈の高山帯での野外観察により、下記の岩盤の1年当たりの破砕面積率として表される凍結破砕速度 R_S [1/y] を導いている。</p> $R_S = 1.5 \times 10^{-3} S_r^{16} N_e S_{ff}^{-2} \quad (1) \quad (1)(2)$ <p>S_r: 岩盤の水分飽和度 S_{ff}: 岩盤の引張強度(MPa) N_e: 岩盤表面での有効凍結融解サイクル数 (-2以下、+2°C以上となった気温の変化サイクル数) 岩盤の水分飽和度 S_r、岩盤の引張強度 S_{ff} は、公表されている土質試験・岩石試験データの平均値または実測値を使用し、岩盤表面での有効凍結融解サイクル数 N_e は、表面温度を実測して繰り返し回数を算出している⁽²⁾。この式では、年平均気温ではなく岩盤表面温度のサイクル数 N_e が変数となっているが、瀬戸(2005)⁽³⁾ は足尾山地において岩盤表面温度と凍結サイクルの測定を3年間行っており、その結果と年平均気温を比較することでサイクル数との関係が得られると考えられる。</p>
入出力の応答特性	有効凍結融解サイクル数は、-2~+2°Cを挟んだ気温変化の回数であり、気温が高すぎても低すぎてもサイクル数は少なくなる。このため、年平均気温に対してピークをもつ変化を示すと考えられる。式(1)より、凍結破砕速度は有効凍結融解サイクル数の増加関数である。よって、凍結破砕速度は年平均気温に対してピークをもつ変化を示す。
モデルの不確実性	<p>パラメータ：平均気温から凍結融解サイクル数への換算(換算式は未確認)。岩盤の水分飽和度(破砕速度の推定式において仮定)</p> <p>空間的外挿：特定地区(赤石山脈高山帯)において作成された推定式である。岩盤表面温度・凍結サイクル測定結果も特定地区に限られたものである。地盤の物性にも影響を受ける⁽²⁾。</p> <p>空間的内挿：データを取りまとめた特定地区における平均値的な扱いであると思われるので分解能は低いと考えられる。</p> <p>時間的外挿：気候が変化した時期の適用性は不明である。凍結破砕速度や物質移動速度には気温以外に種々の変数が関与するので気候変化によりどの変数が変化したか⁽²⁾を考慮する必要がある。</p> <p>時間的内挿：特定の期間の平均速度等を用いており、低いと思われる。</p> <p>再現の現状：静岡県井川地域・スピッツベルゲン島中部・南極セールロンダーネ山地における野外観測(後二者は永久凍土地域に属する)の結果、式(1)は有効であることがわかっている(スピッツベルゲンの一部や南極の大半における飽和度約50%以下の乾燥した岩盤を除く)⁽²⁾。再現性の確認は、同様の寒冷地域での調査が実施されることによって、限られた地域ではあるが、事例を追加することは可能である。</p>

表 5.4-14 既存モデルごとのモデル不確実性のまとめ

モデル (タイプ)	モデルパラメータ	空間軸上の外挿が要因	空間軸上の内挿が要因	時間軸上の外挿が要因	時間軸上の内挿が要因	モデル検証	再現
M1 荷重→応力変化	T					実規模の比較例なし 観測網未整備	A
M2 断層変位→応力変化	T	剛性率					○
M4 貫入→応力変化	T	剛性率 (Okada Model) 剛性率, 圧力 (MogiM)		半無限, 一様の仮定 貫入形状のモデル選択			○
HM3 応力変化→水圧消散	T			遠地地震での水頭変化の遅れ	遠地地震での水頭変化の遅れ		○
H1 地下水流動解析	N	比貯留係数 初期条件 (非定常解析)		パラメータや構造モデルによる 結果の違い			○
H3 地形→涵養量	N	タンクモデルの4パラメータ	適用する流域サイズ 地表と地下水の流域	流域の統合 地表地質の不均一性		適用例1地区, 誤差 涵養量の観測未整備	△
HM5 応力→水圧消散	N	(M1, H1に同じ)	未固結地盤の岩盤への拡張				△
Cm1 応力→透水係数変化	N	(孔)経験式の係数 (亀)割れ目の3係数	(孔)経験式は地区限定 (亀)マクロスケールへの拡張	(孔)(亀)調査での攪乱 (亀)せん断による変化			○
Cm2 応力→間隙特性変化	N	定数b, 流体密度	堆積岩のみ				○
M5 噴火→噴煙柱	N	噴出物総量や拡散に関する係数		噴出物粒度の不均質		検証例なし(観測難しい)	B
M6 噴煙柱→噴出物堆積	N	渦動粘性係数	上空風速等の設定 境界条件が要設定	高度別風速の分解能			○
M7 地形変化モデル	N	(シ)運搬等のパラメータ (経)隆起-侵食量関係	(シ)段丘等のない所での 精度				△
M8 豪雨→崩壊	N	すべり面位置		すべり面設定による解像 度の違い			△
M10 噴火→噴出物堆積	N	溶岩の粘性係数 火砕流移動の各係数					○
H2 水収支式	C	貯留量変化0の仮定 地下水流域面積	河川流域	流域内均一の仮定		涵養量実測方法なし 減算による誤差大	B
M3 断層変位→地形地質	C	地震以外の変形成分					△
TH3 気温→蒸発散量	C	蒸発散比				年間値の実測が難しい	B
E10 気温→凍結融解・侵食	C	岩盤の水分飽和度	特定地区の式 植被地区での適用	特定地区の平均的特性	特定期間の平均速度	特定期間の平均速度	○
T1 年平均→月別気温	C						△
TH4 気温→凍土分布	C			気温変化一定の範囲 熱拡散率の不均一性			△
TH5 凍土分布→涵養量	C	タリクの構造・位置		タリクの規模・位置		国内に観測適地少ない 観測網未整備	B
H6 年降水量→豪雨時	C	年降水量-温暖期降水量 の関係					△
HG1 間隙→透水性変化	C		スケール拡張 地区固有のφ-K関係				△
E6 地震動→泥火山活動	U	地震との関係の未解明	特定位置(1ヶ所)	特定位置(1ヶ所)	地震発生時期による	地震との関係が未整理 観測網は未整備	A
E7 豪雨時降水量→崩壊	U						△
M11 泥火山噴出→堆積	U						△
H5 泥火山貫入→水圧	-				間隙水圧の経時変化	観測事例なし(松代?) 観測網なし	B
HM1 SMS	-			解析スタブ間の水頭誤差			-
M9 堆積など→地形	-	パラメータなし					-

注) 最右列「再現」の凡例 ○: 再現例あり △: 再現可能 A: 再現難-A B: 再現難-B

Cm1 の補足説明: (多) は多孔質構造、(亀) は亀裂性構造を示す。

M7 の補足説明: (シ) は地形シミュレーション、(経) は経験式を示す。

モデル検証としての実測値の再現状況は、「再現例あり」、「再現可能」、「再現難」の3つに分けられ、このうち「再現難」を実測値取得の難しさのタイプによってさらにA, Bの2つに分けた(表5.4-14)。

- ・ 再現例あり：実測値との比較によりほぼ検証されているもの
- ・ 再現可能：現時点で実測値との比較がない、または不十分であるが、今後データの取得が可能で検証ができるもの
 - 例) T1 (海外の寒冷地の資料や観測実施により月別の気温データは入手可能)
 - TH4 (永久凍土の分布域内外の多地点で調査できれば取得可能)
- ・ 再現難-A：低頻度または緩慢な事象であるため、観測値がいつ得られるか不明なもの
 - 例) M1 (自然の侵食・除荷は極めて遅く、大規模崩壊が発生するか否かも不明)
 - E6 (規模の異なる泥火山の活動の有無や時期は不明)
- ・ 再現難-B：対象事象の測定が困難なもの
 - 例) TH3 (流域単位の実蒸発散量の連続測定は困難)
 - H2 (涵養量の実測は困難)
 - M5 (噴煙柱内の粒度測定や採取は困難)

5.4.5 まとめ

平成24年度は、情報が不足していた不連続な構造である亀裂に関する既存モデル(地震と母岩の亀裂との関係、亀裂の力学的構造、亀裂の水理学的構造、および地震と水理特性の変化)の最新知見を収集し、新たにモデル構造の情報として整備した。亀裂や割れ目等の不連続な構造を対象とした力学ならびに水理学的影響に関連する最新のモデル情報の調査の結果、5つの既存モデルの情報を更新した。Cm1(応力-透水係数の変化の関係式)については個別割れ目から岩盤の透水係数を算出する方法、Cm2(応力-間隙構造の変化の関係式)については割れ目の生成・伸展のモデル情報、HM3(応力-間隙水圧の変化の関係式)については地震時の水圧上昇と水圧消散の広域解析情報、HG1(間隙率-透水係数・貯留係数の関係)については泥質岩での間隙率-浸透率の式、およびM2(食い違いモデル)については数値解析による計算事例と食い違いの設定方法をそれぞれのモデルシート追記し情報を更新した。割れ目伸展モデルについては、地下水移行経路の評価において重要であると考えられるが、坑道周囲の掘削影響領域や水圧破碎のボーリング孔周辺に適用された事例しか得られていない。今後、地震・断層変位による割れ目進展モデルを移行経路の形成と結びつけるモデル検討が重要であると考えられる。

今後の既存モデルによる影響量の不確実性評価を進めるための基礎情報とするため、文献情報を基に、各既存モデルを評価対象に適用する際の不確実性や適用上の課題について分析・整理した。調査対象は、水理と力学に関連する29の既存モデルである。不確実性の要因としてモデルの入力パラメータ、空間的・時間的な外挿および内挿に関するモデルの不確実性の5種類を設定し、要因別に既存モデルの不確実性を整理した。さらに、既存モデル別にモデル検証としての実測値の再現状況を整理した。

既存モデルを影響評価に適用する際の不確実性の整理の結果は、以下のようにまとめられる。

- ✓ 既存モデルの全体を俯瞰すると、モデルパラメータや空間的外挿・内挿による不確実性が多く、時間的外挿・内挿による不確実性は比較的少ないことがわかった。
- ✓ 不確実性の種別が比較的多いモデルとしてはE6(地震動→泥火山)があげられた。
- ✓ モデル検証としての実測値の再現状況の整理の結果、既存モデル27個(既存モデル29個のうち2つは経験的なルール・仮定であるため再現状況の整理から省いた)に対し、「再現例あり」11個、「再現可能(再現が期待できるもの)」9個、「再現難A(低頻度ま

たは緩慢な事象であるため、観測値がいつ得られるか不明なもの」2個、「再現難B（対象事象の測定が困難なもの）」5個に分類された。

- ✓ 「再現難A」に属するものは、M1（弾性力学モデル：マスマーブメントによる自然の侵食・除荷は極めて遅く、大規模崩壊が発生するか否かも不明）、E6（地震による泥火山活動：規模の異なる泥火山の活動の有無や時期は不明）である。「再現難B」に属するものは、M5（噴煙柱モデル）、H2（水収支式等による涵養量算定）、TH3（気温と蒸発散の関係）、TH5（永久凍土の分布と涵養量の関係）、H5（泥火山による水圧上昇）である。

本検討では、それぞれの不確実性の重要度については評価できていない。そのために、モデル不確実性の重要度の設定方法が課題としてあげられる。

5.5 母岩の影響の感度解析

5.5.1 背景・目的

原子力安全委員会（2004）⁽¹⁾は、地質・気候関連事象による影響については、極めて評価期間が長いこと等から評価に付随する不確実性が避けられないとし、不確実性への対処として、諸外国の考え方を踏まえ、シナリオの可能性と影響を組合せたリスク論的考え方を示した。そのため、原子力機構は、地層処分の安全審査時に必要となる安全評価手法の整備の一環として、地質・気候関連事象に関して不確実性を評価するためのシナリオ・モデル整備を実施している。その基本方針は、環境要件を適用したとしてもその発生を完全に避けることのできない事象も評価すべき対象に含め、また、安全評価手法については、多様な地質環境の条件（ジェネリックな条件）に対し整備し、将来的にその手法をサイト・スペシフィックな条件に適用することである。処分サイトにおいて地質・気候関連事象の発生に伴う天然バリアとして機能する母岩への熱、水理、力学、化学（以下、THMC）の影響を評価することが必要となるため、まず、産業技術総合研究所（2007）⁽²⁾が示した46の地質・気候関連事象をTHMCの影響として細分化し、既往知見を基に地震等の起因事象から母岩のTHMCの影響に至るまでの変化量（FEP）の関係を177事象で表し、その内容と根拠をFEPデータベースに収録した^{(3)~(6)}。

177事象は、我が国の地質・気候関連事象を網羅するものであり、様々なサイト条件を念頭に置き、これらの全事象に対するTHMCに関する定量的な影響評価のための計算情報（データ・数式等；以下、モデル構造）が必要となる。このモデル構造の開発方針として、今後の安全規制における活用を念頭に置き、放射性廃棄物処分以外においてもすでに適用の実績がある解析解、数値解析コード、経験式等の既存の数式（以下、既存モデル）をベースに、それらの既存モデルを組み合わせたモデル構造の体系を整理することとした。また、地質・気候関連事象の発生やその発生に伴うTHMCの影響を評価するためのモデル・コード開発はさまざまな機関において現在進められており、それらの情報を今後入手しつつ母岩の影響評価のためのモデル構造に適宜反映し更新していくことを基本方針とした。

平成21年度は、事象ごとのモデル構造について検討し、モデル構造の情報の仕様、ならびに177事象全体を概観するモデル構造を構築するための方法について予備検討を実施した⁽⁵⁾。平成22年度は、THMCのうち水理、および力学的な母岩の影響に係る事象を対象に、既存モデルの組合せが成立するための条件（データの受け渡し等の確認）等のモデル構造の情報の詳細な仕様を定め、文献調査に基づいてモデル構造を整備した⁽⁷⁾。平成23年度は、モデル構造の範囲を熱、水理、および化学の特性変化に係る事象へと拡大し、文献調査に基づいて177事象のモデル構造を整備した⁽⁸⁾。また、モデル構造をデータベース化し、情報の記録・更新を管理するためのインターフェースを整備した。さらに、起因事象から地形・地質構造の変化に至るモデル構造に基づいて地形・地質構造の変化量計算コードを整備し、地震に伴う地形・地質構造の変化量の試解析を実施した。

平成24年度は、平成23年度のモデル構造の整備を踏まえて、これに基づいて母岩の影響の試解析を行い、ジェネリックな条件下で母岩の影響評価を行うための留意点と課題について予察した。具体的には、事象「地震が1回発生→地形・地質構造の変化→歪みの変化→透水係数・間隙水圧の変化→地下水流動の変化」に対して、モデル構造に基づいて既存モデルを選択してその定式化を行い、定式化した既存モデルによる個々の影響の計算結果の分析から、ジェネリックな条件下での母岩の影響評価に利用可能な方法とその課題を予察した。以下、本試解析を「試解析Ⅰ（地震に伴う地形変化等による母岩の水理学的影響の試解析）」と称し、解析条件ならびに結果の詳細を5.5.2項に示す。

一方、モデル構造には、モデル構造の内的要因（既存モデル情報の量と質）による不確実性（以下、モデル構造に内在する不確実性）、およびモデル構造の外的要因（地震・噴火等の起回事象のデータ）による不確実性（以下、起回事象の不確実性）が想定される。そのため、モデル構造を用いて母岩の影響の計算を行うときは、これらの不確実性を考慮する必要がある。モデル構造に内在する不確実性については、5.4 項で文献調査に基づく成果を報告した。残る起回事象の不確実性については、陸域の地形の変化の不確実性の試解析を行い、起回事象の不確実性を考慮するための方法とその課題を予察した。具体的には、ある地震に対して断層パラメータ・平均活動間隔の分布幅を仮定して 1000 以上の模擬地震を発生させ、モンテカルロ法により陸域の計算点の変位速度（＝地震による変位/平均活動間隔）の確率分布を求めた。計算では、モンテカルロ法に対応するために改良を加えた地形・地質構造の変化量計算コードを用いた。以下、本試解析を「試解析Ⅱ（地震に伴う地形変化の確率分布の試解析）」と称し、解析条件ならびに結果の詳細を 5.5.3 項に示す。

5.5.2 試解析Ⅰ（地震に伴う地形変化等による母岩の水理学的影響の試解析）

（1）試解析Ⅰの目的・概要

試解析Ⅰの目的は、起回事象の発生から母岩の影響に至る一連の影響の連鎖の試解析の結果から、ジェネリックな条件下での母岩の影響評価に利用可能な方法とその課題を予察することである。対象とする事象は、「地震が 1 回発生→地形・地質構造の変化（変位）→歪み変化→透水係数・間隙水圧変化→母岩の水理学的影響」である。試解析Ⅰで扱うデータリスト、およびモデル構造の範囲は、表 5.5-1、および図 5.5-1 の通りである。

モデル構造図では、煩雑さを避けるために、採用した既存モデル（【 】枠内）に対し、起回事象側から順に A～F の記号を振り分けた。試解析Ⅰでは、図 5.5-1 に示すように、A～F で区分したモデル構造に対し、モデル B とモデル C で同一の Okada model(Okada, 1992)⁽¹⁰⁾を用い、計 5 種類の既存モデルを使用した。モデル A～F の詳細は次項に示す。

表 5.5-1 試解析Ⅰの範囲（データリスト）

NO.	名称	NO.	名称
1	隆起等の構造運動	22	月平均気温変化
2	隆起量	23	蒸発散量の変化
3	地形勾配の分布等	24	凍土深度等の分布
4	水平方向の構造運動	25	流出高の変化
5	水平方向の変位	26	侵食量・堆積量
6	地震・断層運動	27	地形・地質構造の変化
7	断層変位	28	岩盤応力の変化
8	地震動	29	間隙構造の変化
9	泥火山噴出・貫入	30	解析要素の形状
10	泥火山噴出物堆積	31	一時的な地下水流動の変化
11	マグマ貫入	32	水理特性(物性値)の変化
12	貫入の性状	33	地下水ポテンシャル
13	火山噴火	34	涵養量等
14	火山灰等噴出特性	35	汀線位置
15	噴煙中柱の性状	36	地下水流動の変化
16	火山噴出物堆積	37	熱水活動
17	海面変化	38	熱水の流入
18	局地的気候変動	39	熱特性(境界条件)の変化
19	降水量の変化	40	化学特性(境界条件)の変化
20	豪雨時降水量変化	41	地下温度の変化
21	気温の変化	42	地下水の化学特性の変化

○ : 入力で使用
 ○ : 入力と出力の双方で使用
 ○ : 出力で使用

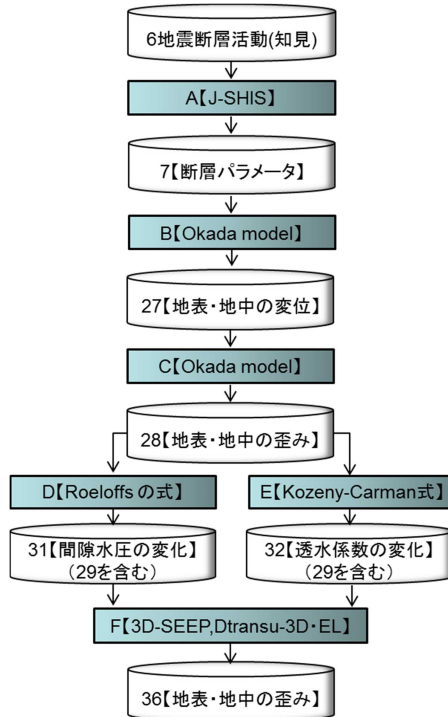


図 5.5-1 試解析 I のモデル構造図

(2) モデル構造の定式化 (試解析 I)

試解析 I で使用するモデル A～F の概要を以下に示す。

(a) モデル A : J-SHIS (地震ハザードステーション)

モデル A は、起因事象の知見とモデル構造による計算用のデータとを関連づけるモデルである。起因事象が地震のときは、地震学や地質学等による専門家等の知見・データに基づいて断層パラメータを設定するモデルとなり、これに該当するモデルとしては、我が国には防災科学技術研究所が管理する J-SHIS (地震ハザードステーション) (防災科学技術研究所, 2012) ⁽⁹⁾ がある。試解析 I では、公開されているデータのうち固有地震の静的断層パラメータ (以下、断層パラメータ ; 図 5.5-2 参照) を使用した。ここに、固有地震は、陸域の主要断層帯で発生する固有地震 (以下、陸域の地震)、海域の地震 (海溝型地震を除く)、および海溝型地震のうち断層パラメータが公開されている地震とする。試解析 I では、陸域の地震の規模の最頻値 (Mw6.8) に該当する固有地震の平均的な断層パラメータを使用した。

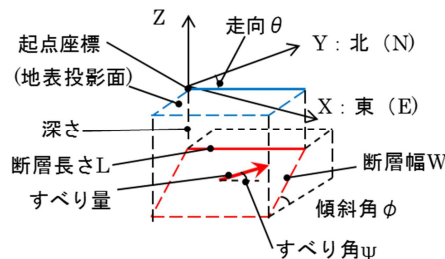


図 5.5-2 断層パラメータ (静的断層パラメータ) 説明図

(b) モデル B、C : Okada model

断層パラメータを入力し、地表・地中の変位、および歪みを計算するモデルである (既存モデルは、M2 食い違いモデル)。様々なタイプの地震 (逆断層型、横ずれ断層型、正断層型) や

マグマの貫入による変位等を統一的に求めることができる Okada model (Okada, 1992) ⁽¹⁰⁾ を選択した。Okada model は、半無限均質弾性地盤の食い違いモデル (Dislocation model) の解析解である。Okada model は、「地形・地質構造の変化量計算コード」(原子力機構, 2012) ⁽⁸⁾ に配備済みであるため、計算では本コードを使用する。平成 23 年度版のコードは、地中の変位、および地表と地中の歪みの計算を対象外とし、また、経度・緯度のみの座標しか扱えず FEM 等の X-Y-Z 座標系に対応できなかったため、これらに対応するようにコードを改良した。なお、本コードのモデル式は、5.5.3 項の試解析 II に示す。

(c) モデル D : Roeloffs の式

体積歪みを入力し間隙水圧の変化を計算するモデルである。多孔質弾性地盤 (連続体) の解析解である Roeloffs の式 (Roeloffs, 1996) ⁽¹¹⁾ を使用した。

$$P = -\frac{KB}{(1-\alpha)}(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) = -\frac{KB}{(1-\alpha)}\varepsilon_{vol} \quad (5-3)$$

ここに、

K	体積弾性率(Pa)
B	Skempton の B 値(-)
α	Biot-Willis 係数または有効応力係数(-)
ε_{vol}	体積歪み(-)

体積弾性率 K はヤング率 E (Pa) とポアソン比 ν (-) により次のように求められる。

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (5-4)$$

(d) モデル E : Kozeny-Carman の式

間隙率と透水係数の関係については、Kozeny-Carman の式 (Bear, 1974) ⁽¹²⁾ がよく用いられている。これは、間隙率を ϕ (-) として次式により表現される。

$$k = \frac{\gamma_w}{X_0 S^2 \mu_w} \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \quad (5-5)$$

ここに、

γ_w	水の単位体積重量(N/m ³)
μ_w	水の粘性係数(Pa・s)
S	土粒子の比表面積(1/m)
X_0	空隙の形状によって決まる材料固有の定数(-)

ここでは、間隙率が変化する前における透水係数は既知として考えることとし、次のような簡単な比例式を考える。

$$k = A \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \quad (5-6)$$

ここに、

A	材料固有の係数(m/s)
ϕ	変化前の間隙率(-)
k	変化前の透水係数(m/s)

同様に、変化後の透水係数 k は次式で与えられる。

$$k' = A \frac{\phi'^3}{(1 - \phi')^2} \quad (5-7)$$

ここに、

ϕ' 変化後の間隙率(-)

k' 変化後の透水係数(m/s)

式(5-4)および(5-5)により定数 A を消去すると、

$$k' = k \frac{\phi'^3(1 - \phi)^2}{(1 - \phi')^2\phi^3} \quad (5-8)$$

以上は、Kozeny-Carman の式を利用して、理論的に透水性の変化を求める式を導いたものであるが、実際に観測されている現象の解析によって検証されたものではない。

変形後の間隙率は、初期間隙率と体積歪み ε_{vol} (-)から次式により算定した。

$$\phi' = \phi + \varepsilon_{vol} \quad (5-9)$$

平成24年度はモデルEとして、Kozeny-Carman の式を利用して求めた式(5-8)および式(5-9)を用いた。

(e) モデルF：地下水流動解析

地下水流動解析コードは、原子力機構が開発する3D-SEEP、および比較検証用コードとしてDtransu-3D・ELを用いた。

(3) 試解析Iの解析方法

事象「地震が1回発生→地形・地質構造の変化(変位)→歪み変化→透水係数・間隙水圧変化→母岩の水理学的影響」に対するモデル構造(図5.5-1)を式(5-2)(5.4.2項参照)に適用し、それぞれの影響(変化量)を求めた。具体的には、モデルAの出力(断層パラメータ)、および水理・力学関連のパラメータ(既存モデルD~Fのモデルパラメータ)を入力して、モデルB~Fの出力によって事象(影響の連鎖)を定量化した。

(4) 試解析Iの解析条件

地震の発生に伴う母岩の水理学的影響が最大となるように、直下型逆断層を想定した条件とし、震源断層を水理・力学モデルに含めた(図5.5-3)。

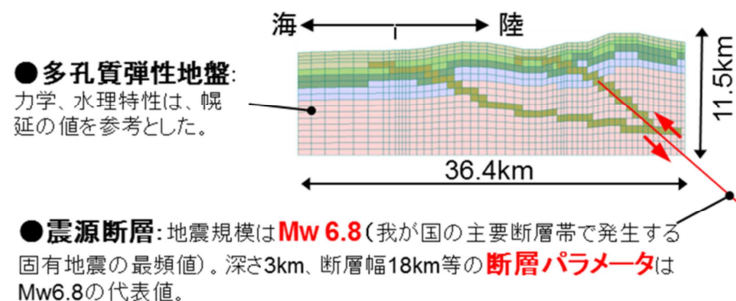


図 5.5-3 試解析 I の対象とした水理・力学モデルと震源断層

Mw6.8の断層パラメータを表 5.5-2 に示す。断層パラメータは、Mw6.8 に属する固有地震 (36 データ) の断層パラメータの統計量から設定した。起点座標と傾斜については、図 5.5-3 の地形・地質構造と整合するように設定した。

表 5.5-2 試解析 I の震源断層の断層パラメータ

矩形断層 上端深さ (km)	矩形断層 長さ(km)	矩形断層 幅(km)	走向角 (度)	傾斜角 (度)	すべり角 (度)	すべり量 (m)
3	34	18	0	41	90	1.12

注) モデル G の基本モデル (Mw6.8) の値を使用。ただし、傾斜角は図 5.5-3 の断層の形状により設定

図 5.5-3 の地形・地質構造は、バランス断面法によるツール (塩崎ほか, 2010) ⁽¹³⁾ を用いて実在する地形の起伏を 2.5 倍程度に拡大したものである (最大標高は+1.5km)。震源断層を水理構造に含めるために、メッシュの鉛直方向の寸法を 11.5km とした (底部標高-10km)。この 2 次元の地形・地質構造の断面 (x-z 平面) は、奥行き方向 (y 方向) 1km の幅 (-0.5 ≤ y ≤ 0.5km) 方向) をもつ構造とした。震源断層 (標高-3km) の上端部の中心 (長さの中心; 図 5.5-2 参照) は地形・地質構造の y 方向の中心 (y=0km) とした。なお、震源断層による変位は、y=±0.5km の変位が地形・地質構造に一樣に作用するとした。

使用した水理・力学パラメータを表 5.5-3 に示す。

表 5.5-3 試解析 I の水理・力学に関するパラメータ^{(14)~(17)}

	水理に関するパラメータ			力学に関するパラメータ			
	透水係数 (m/s)	間隙率(%)	比貯留係 数(1/m)	変形係数 (GPa)	ポアソン比 (-)	α (-)	B(-)
堆積層①	1.0E-09	60	1.0E-09	1	0.2	0.9	0.85
堆積層②	1.0E-09	60	1.0E-09	1	0.2	0.9	0.85
堆積層③	2.0E-09	40	1.0E-09	1	0.2	0.9	0.85
堆積層④	5.0E-10	30	1.0E-09	1	0.2	0.9	0.85
堆積層⑤	1.0E-11	20	1.0E-09	1	0.2	0.9	0.85
断層	1.0E-08	50	1.0E-09	1	0.2	0.9	0.85

表 5.5-3 の水理に関するパラメータは、今井ほか (2009) ⁽¹⁴⁾ が幌延地区を対象として実施している解析事例を参考として設定した。ただし、比貯留係数については、1995 年兵庫県南部地震での地下水位の観測結果と整合する阿部・酒井(1999) ⁽¹⁵⁾ が解析で採用した数値を参考に設定した。Roeloffs の式 (モデル D) のモデルパラメータ α、B については、宮澤ほか (2011) ⁽¹⁶⁾ の実験的研究を参照して平均的な値を設定した。これらの値については、試験事例に限られていることから、すべての地層で共通とした。変形係数 (弾性係数) およびポアソン比についても同様に、宮澤ほか (2011) ⁽¹⁶⁾ の研究や木山ほか (2006) ⁽¹⁷⁾ の研究結果に基づき、平均的な値として表 5.5-9 の数値を用いた。

水理境界条件については、以下の通りとした。

- ・ 陸域については、地表面に水位があると仮定
- ・ 海域については、海水準は標高=0 で一定
- ・ 側方境界および底部境界は、不透水

(5) 試解析 I の結果

計算で得られたモデル B~F の出力を図 5.5-4 に示す。モデル A の出力 断層パラメータをモデル B、C に入力すると断層上端に大きな体積歪みが発生した。体積歪みは±0.02%程度と小さく、この試解析例では破壊が生じていない。さらに体積歪みをモデル D とモデル E に入力し、それぞれ間隙水圧の変化、透水係数の変化が発生した。これらをモデル F の定常状態に入力して非定常の地下水流動解析を行うと、断層上端近傍の間隙水圧の変化が時間とともに消散していく現象が示された。間隙水圧の変化の経時変化を表すと図 5.5-5 のようになる。

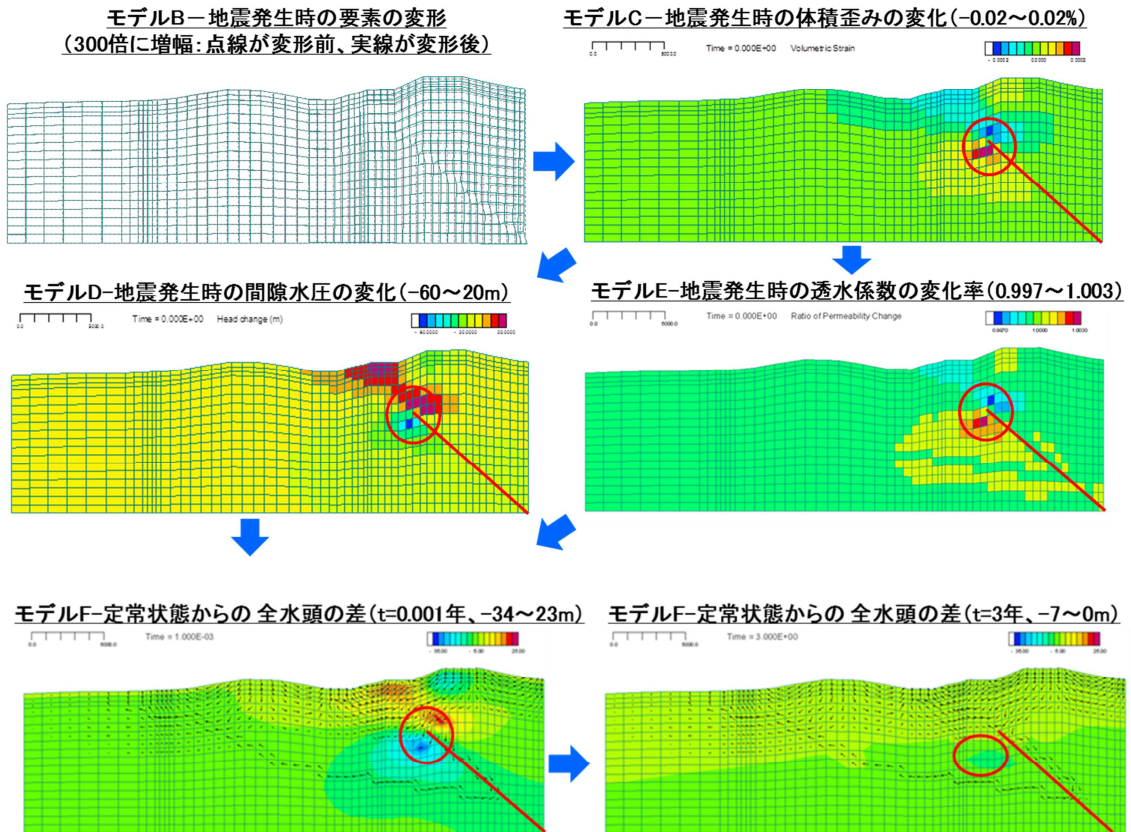


図 5.5-4 モデル B~F の計算による地震発生から母岩の水理学的影響に至る影響の連鎖

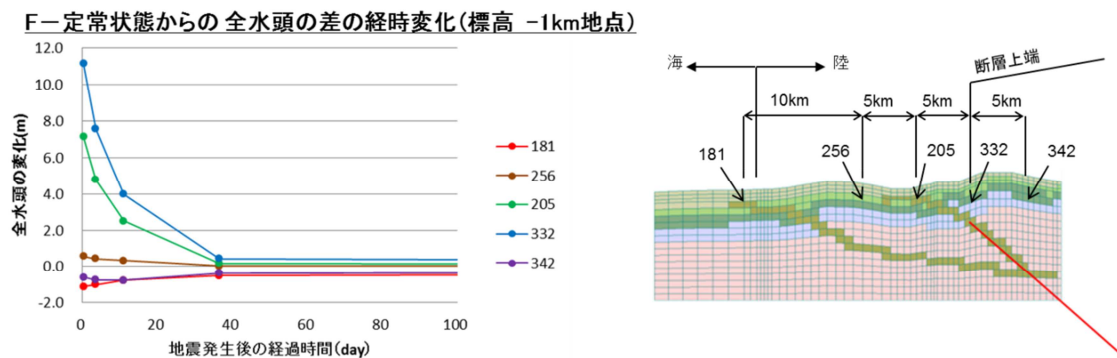


図 5.5-5 モデル F による間隙水圧の圧力消散の状況

図 5.5-5 の計算点は、標高-1kmにおいて断層上端（深さ 3km）の直上を基点（節点 No.332）とし、上盤側は 5km（No.342）、下盤側は 5km（No.205）、10km（No.256）、20km（No.181）に

配置した。地点の No. は節点 No. を示す。なお、このような間隙水圧の消散については、ほぼ同様のモデルを用いた例として、1994 年パークフィールド地震（米国）時の被圧耐水層の間隙水圧変化の観測値を再現した Ge & Stover（2000）⁽¹⁸⁾がある。

間隙水圧の消散に要する時間は、地下水流動解析の数式から、比貯留係数によって変化する（比貯留係数が大きいときは時間が短くなり、小さいときは時間が長くなる）。一方、断層上端の延長部（下盤側 5km）と上端の直上部で大きな間隙水圧が生ずる点是不変と考へた。その理由を以下に示す。

モデル D による間隙水圧の変化の空間分布は、モデル C の体積歪みの空間分布と一致している。したがって、モデル D のモデルパラメータの影響は小さい。モデル C（B）は、断層パラメータ以外に、ラメの定数（ λ 、 μ ）をもつが、これはポアソン固体の仮定（ $\lambda = \mu$ ； $\nu = 0.25$ ）により数式から消去できる。したがって、間隙水圧の変化の空間分布の要因は、モデル C（B）の入力値である断層パラメータとなる。

透水係数の変化については、間隙率の変化を体積歪みの変化とみなすことを仮定し、これを式（5-8）に代入して求めている。この仮定が成立する範囲では、透水係数は、間隙水圧とは体積歪みの応答特性が正負逆転しているものの、その空間分布の基本的な性質は同じである。したがって、透水係数の変化の空間分布の要因は、間隙水圧と同様に、モデル C（B）の入力値である断層パラメータとなる。

次に間隙水圧の値の変動幅について予察する。間隙水圧の変化量の変動要因として、モデル D のモデルパラメータ、 K （体積弾性率）、 α （Biot-Willis 係数）、 B （Skempton の B 値）が想定される（式（5-3））。 α 、 B は、宮澤ほか（2011）⁽¹⁵⁾によると幌延の試験結果から、 $B = 0.72 \sim 0.87$ 、 $\alpha = 0.46 \sim 0.95$ （実測値の中に 1.05 があるが、 $\alpha < 1$ なのでこれを除外した）であり、表 5.5-3 に示す採用値（ $B = 0.85$ 、 $\alpha = 0.9$ ）に対し、間隙水圧の変化の変動幅は多く見積もったとしても数倍程度と考えられる。一方、 K は、式（5-4）に示すように弾性係数に比例し、採用値 1GPa は、地震規模 M_w を算定するときの剛性率 μ から求めた 78GPa と比較すると 2 桁ほど小さい。間隙水圧の変化の大きな地点は、地震学的に 78GPa が適用可能な断層上端付近であり、間隙水圧は K に比例するため、間隙水圧の変化の最大は、試解析のおよそ 2 桁大きな値となる。したがって、本試解析における間隙水圧の変化の最大値の推定では、弾性係数に比例する K が重要なパラメータとなる。

間隙水圧の変化量が 2 桁上昇することについては、母岩の影響としては、さほど大きなものではないと考えられる。その理由は、この変化は水が新たに発生して生じたわけではないからである。この現象は、非排水の状況下で圧力変化が瞬時に生じたものであり、地下水の流れに伴って解消される一時的なものである。ただし、移動する地下水の量・移動距離は、一通り計算により確認することが必要である。

以上述べたように、本試解析で用いた事象の評価においては、既存モデル（数式）のモデルパラメータに対する影響の応答特性が各種の影響の変動要因の分析において重要であると考えられた。参考として、既存モデルの出力の応答特性を、5.4.4 項 モデルの不確実性の整理の成果（既存モデルのモデル不確実性に関するシート；表 5.4-12、および 5.4-13 参照）を基に整理した結果を添付資料編 Appendix IV-B に示す。177 事象には、本試解析と同様の事象（例えば、地震をマグマ貫入や泥火山に置き換えた事象等）があることから、このような事象の影響は、一般的な条件において応答特性により事前に整理することが可能であると考えられる。

なお、5.4.3 項に示すモデルの最新知見の整理の結果、試解析で用いた事象に関連する情報として、遠地地震において地下水ポテンシャルの変化を井戸で測定したとき、変化のピークの発生が地震発生直後しばらく時間を置いてから生ずる（例えば、原子力機構、2012a）⁽¹⁹⁾との知見

が得られた。このピークの遅れ現象は、Ge & Stover (2000) ⁽¹⁸⁾にも見られる。本モデルでは、このようなピークの遅れ現象には対応できないため、そのモデル対応が今後の課題としてあげられる。また、本試解析では、直下型の逆断層型の地震を対象としており、横ずれ断層や巨大な海溝型地震を対象としたときの試解析が必要である。

5.5.3 試解析Ⅱ（地震に伴う地形変化の確率分布の試解析）

（1）試解析Ⅱの目的・概要

試解析Ⅱの目的は、母岩の影響量をモデル構造で求めるときに、起因事象の不確実性を考慮した影響の計算方法を提案し、その方法の留意点と課題を予察することである。事象は「地震による地形の変化（以下、地表の変位）」とした。

試解析Ⅰで示すように1回の地震による地表の変位は断層パラメータを入力して求められることから、1回の地震による地表の変位の不確実性の要因は、断層パラメータの分布幅（最小値、最大値、分布形状）となる。地震の頻度(1/y)の不確実性は、その逆数である平均活動間隔(y)の分布幅で表される。断層パラメータと平均活動間隔の分布幅の影響を1つの数値で表す方法としては、変位速度（＝変位/平均活動間隔）を用いる方法がある。こうしたことから、試解析Ⅱでは、モンテカルロ法に基づいて、断層パラメータ・平均活動間隔の分布幅から模擬地震を発生させて地表の変位速度の確率分布を求める方法を提案し、その試解析を実施した。

本試解析では、断層パラメータ・平均活動間隔の分布幅と関連する条件（例えば、プレート境界面上で発生、地震の発生位置・規模が不明等）が地震によって異なることから、「陸域の地震（固有地震）」、「海溝型地震（固有地震）」、および「位置が不特定な地震（固有地震以外の地震）」の3タイプの地震を模擬できるモデルを整備した。具体的には、固有地震と固有地震以外の2つに分けてそれぞれの断層パラメータの分布幅を設定するモデル構造を考え、次に、固有地震については、海溝型地震と陸域の地震の2つに分けて分布幅の詳細な仕様を検討した。

試解析Ⅱで扱うデータリストを表5.5-4に示す。データリストには、地表の変位速度の定式化に必要な“4 水平方向の構造運動”、および“5 水平方向の変位”が含まれている。

試解析Ⅱのモデル構造は、モデルAの後に断層パラメータ・平均活動間隔の分布幅を設定するモデル（固有地震のときG、位置が不特定な地震のときH）が配置され、図5.5-6は固有地震の場合のモデル構造を示している。モデルHのモデル構造は、図5.5-7に示す通りである。変位速度の計算は、固有地震のときモデルA、G、B1を用い、位置が不特定な地震のときモデルA、H、B1を用いる。

表 5.5-4 試解析Ⅱの範囲（データリスト）

NO.	名称	NO.	名称
1	隆起等の構造運動	22	月平均気温変化
2	隆起量	23	蒸発散量の変化
3	地形勾配の分布等	24	凍土深度等の分布
4	水平方向の構造運動	25	流出高の変化
5	水平方向の変位	26	侵食量・堆積量
6	地震・断層運動	27	地形・地質構造の変化
7	断層変位	28	岩盤応力の変化
8	地震動	29	間隙構造の変化
9	泥火山噴出・貫入	30	解析要素の形状
10	泥火山噴出物堆積	31	一時的な地下水流動の変化
11	マグマ貫入	32	水理特性(物性値)の変化
12	貫入の性状	33	地下水ポテンシャル
13	火山噴火	34	涵養量等
14	火山灰等噴出特性	35	汀線位置
15	噴煙中柱の性状	36	地下水流動の変化
16	火山噴出物堆積	37	熱水活動
17	海面変化	38	熱水の流入
18	局地的気候変動	39	熱特性(境界条件)の変化
19	降水量の変化	40	化学特性(境界条件)の変化
20	豪雨時降水量変化	41	地下温度の変化
21	気温の変化	42	地下水の化学特性の変化

○ : 入力で使用
 ○ : 入力と出力の双方で使用
 ○ : 出力で使用

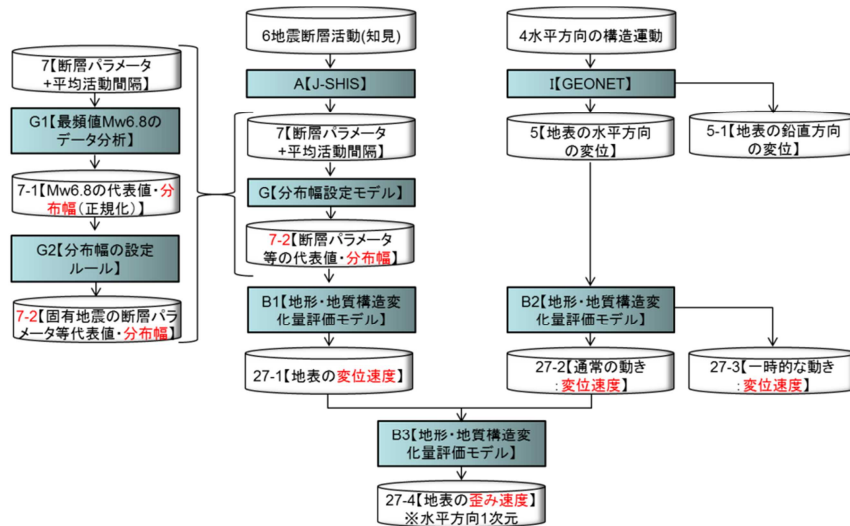


図 5.5-6 試解析 II のモデル構造図 (その 1 : 固有地震)

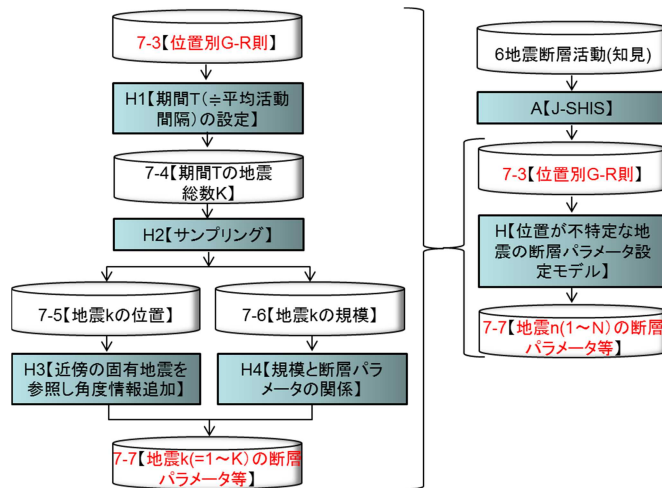


図 5.5-7 試解析 II のモデル構造図 (その 2 : 位置が不特定な地震) : 断層パラメータの分布幅設定までの範囲を示す。変位速度はデータ No.7-7 を図 5.5-6 の No.7-2 に置換えて計算。

(2) モデル構造の定式化 (試解析 II)

試解析 II では、モデル A、G、H、B1 を使用する。以下にその概要を示す。

(a) モデル A : J-SHIS (地震ハザードステーション)

試解析 I と同様に、J-SHIS (防災科学技術研究所, 2012)⁽⁹⁾ を使用した。海溝型地震の代表値については、国土地理院 (2011)⁽²⁰⁾ の断層パラメータを用いた。陸域の地震と海溝型地震のときは、断層パラメータ、および平均活動間隔を使用した。位置が不特定な地震のときは、陸域を網羅する領域 (一部の海域を含む) の頻度データを使用した。

(b) モデル G : 固有地震の断層パラメータの分布幅設定モデル

固有地震の断層パラメータの分布幅は固有地震の履歴データから推定することが理想であるが、データが不足している。そこで、試解析 II では、地震規模が同一であるときには断層パラメータの基本統計量は同一であると仮定して、J-SHIS に収録されている陸域の主要断層帯で発生する固有地震のうち最頻値となる規模 (Mw6.8 ; 以下、基本モデル) のデータを用いて断層パラメータ、および平均活動間隔の分布幅を推定し、さらに、この分布を基に各固有地震の断

層パラメータの分布幅を推定した（図 5.5-8）。Mw6.8 の断層パラメータおよび平均活動間隔の頻度分布図を図 5.5-9 に示す。図 5.5-9 のデータの統計分析に基づいて Mw6.8 の断層パラメータの分布幅を推定した結果を表 5.5-5 に示す。断層幅は、地殻の厚さによる制限があることから一定値とした。走向角、すべり角、および傾斜角については、経験的に設定した。

海溝型地震は、陸域の地震とは以下が異なっている。

- ・ プレート境界面上で発生するため、走向角、傾斜角についてはほぼ一定と考えられる
- ・ プレート間の相対的な運動は変わらないため、すべり角は小さいと考えられる
- ・ 陸域とは異なり地殻の厚さによる断層幅の制限がない

以上を踏まえ、海溝型地震については、走向角、傾斜角一定とし、すべり角については陸域の地震の分布幅の 1/3 とした。断層幅については、基本モデルの断層長さを正規化した値を参考に設定した。陸域の地震と海溝型地震の断層パラメータの分布幅を表 5.5-6～表 5.5-7 に示す。

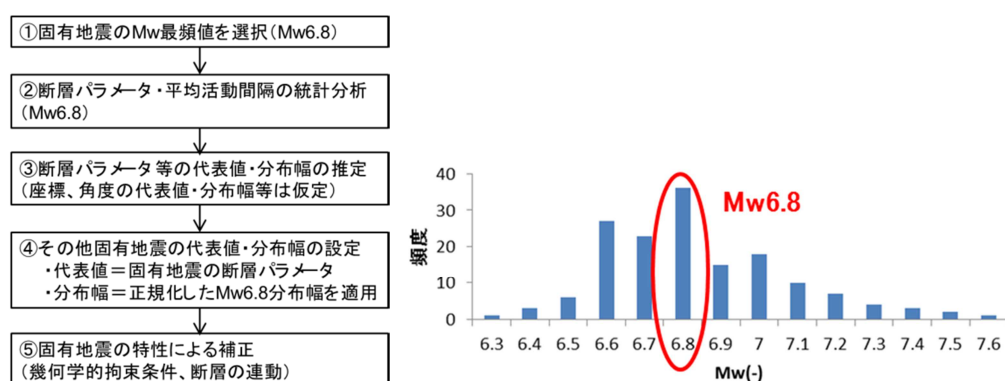


図 5.5-8 陸域の固有地震の規模の最頻値（Mw6.8）を用いた断層パラメータの分布幅設定手順

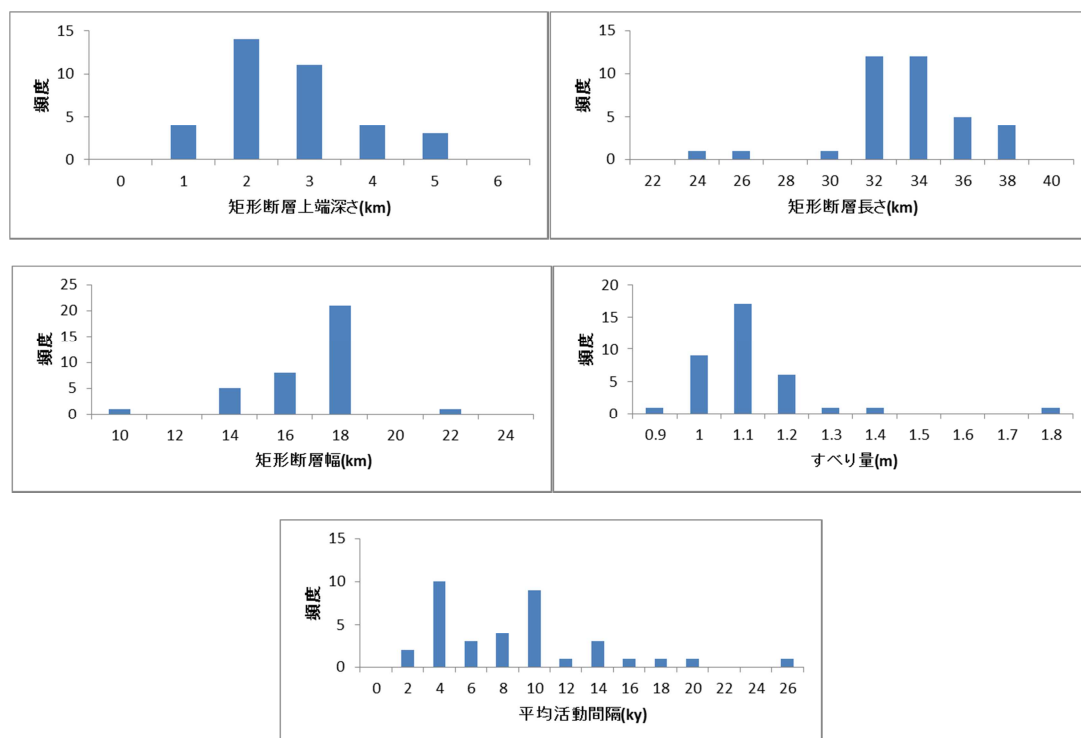


図 5.5-9 Mw6.8 の固有地震の断層パラメータおよび平均活動間隔の頻度分布

表 5.5-5 基本モデル (Mw6.8) の断層パラメータ等の分布幅

項目	最小値	最大値	平均値	中央値	標準偏差	代表値	分布形状	最小値	最大値
走向角(deg)	-	-	-	-	-	0	一様分布	-15	15
傾斜角(deg)	-	-	-	-	-	47.5	一様分布	30	65
すべり角(deg)	-	-	-	-	-	90	一様分布	60	120
すべり量(m)	0.90	1.80	1.12	1.10	0.1508	1.12	正規分布	0.67	1.57
平均活動間隔(千年)	1.450	25.00	7.957	7.750	5.307	8.000	対数一様分布	4.000	16.00
断層長さ(km)	24.00	38.00	33.44	34.00	2.932	34.00	正規分布	25.20	42.80
断層上端深さ(km)	1.00	5.00	2.67	2.50	1.095	3.00	正規分布	0	6
断層幅(km)	10.00	22.00	16.89	18.00	2.053	18.00	一定値	18.00	18.00
起点座標 x(km)	-	-	-	-	-	0.00	一様分布	-20.00	20.00
起点座標 y(km)	-	-	-	-	-	0.00	一様分布	-20.00	20.00

表 5.5-6 固有地震 (海溝型地震以外) の断層パラメータ等の分布幅

	パラメータ名	代表値	分布形状	最小値	最大値
1	走向角(deg)	Strike1	一様分布	Strike1-15	Strike1+15
2	傾斜角(deg)	Dip1	一様分布 ^{*1}	DIP1-17.5	DIP1+17.5
3	すべり角(deg)	Rake1	一様分布	Rake1-30	Rake1+30
4	すべり量(m)	D1	正規分布	$D1-3 \times \sigma_{D1}^{*1}$	$D1+3 \times \sigma_{D1}^{*1}$
5	平均活動間隔(千年)	T1	対数一様分布	T1/2	T1×2
6	断層長さ(km)	L1	正規分布	$L1-3 \times \sigma_{L1}^{*2}$	$L1+3 \times \sigma_{L1}^{*2}$
7	断層上端深さ(km)	Dep1	正規分布	0	6
8	断層幅(km)	W1	一定値	-	-
9	起点経度 x: 経度(deg)	Lon1	一様分布	Lon1-Lon(20km) ^{*3}	Lon1+Lon(20km) ^{*3}
10	起点緯度 y: 緯度(deg)	Lat1	一様分布	Lat1-Lat(20km) ^{*4}	lat1+Lat(20km) ^{*4}

表 5.5-7 固有地震 (海溝型地震) の断層パラメータ等の分布幅

	パラメータ名	代表値	分布形状	最小値	最大値
1	走向角(deg)	Strike1	一定値	-	-
2	傾斜角(deg)	Dip1	一定値	-	-
3	すべり角(deg)	Rake1	一様分布	Rake1-10	Rake1+10
4	すべり量(m)	D1	正規分布	$D1-3 \times \sigma_{D1}^{*1}$	$D1+3 \times \sigma_{D1}^{*1}$
5	平均活動間隔(千年)	T1	対数一様分布	T1/2	T1×2
6	断層長さ(km)	L1	正規分布	$L1-3 \times \sigma_{L1}^{*2}$	$L1+3 \times \sigma_{L1}^{*2}$
7	断層上端深さ(km)	Dep1	正規分布	Dep1-3	Dep1+3
8	断層幅(km)	W1	正規分布	$W1-3 \times \sigma_{W1}^{*5}$	$W1+3 \times \sigma_{W1}^{*5}$
9	起点経度 x: 経度(deg)	Lon1	一様分布	Lon1-Lon(20km) ^{*3}	Lon1+Lon(20km) ^{*3}
10	起点緯度 y: 緯度(deg)	Lat1	一様分布	Lat1-Lat(20km) ^{*4}	lat1+Lat(20km) ^{*4}

*1 $\sigma_{D1} = \sigma_{D0} / D0 * D1$ σ_{D0} : 基本モデルの単位変位量の標準偏差、D0: 基本モデルのすべり量の代表値

*2 $\sigma_{L1} = \sigma_{L0} / L0 * L1$ σ_{L0} : 基本モデルの断層長さの標準偏差、L0: 基本モデルの断層長さの代表値

*3 Lon(20km) ヒュベニ則を用いて計算した 20km に相当する経度差

*4 Lat(20km) ヒュベニ則を用いて計算した 20km に相当する緯度差。

*5 $\sigma_{W1} = \sigma_{w0} / W0 * W1$ σ_{w0} : 基本モデルの断層幅の標準偏差、W0: 基本モデルの断層幅の代表値

(c) モデル H : 位置が不特定な地震の断層パラメータ設定モデル

位置が不特定な地震（固有地震以外の地震）のデータは、モデル A の陸域で発生する地震のうち活断層が特定されていない場所で発生する地震⁽⁹⁾のデータを使用した。このデータには、陸域およびその周辺海域を 0.1 度間隔でメッシュ化し、G-R 則に基づいてメッシュごとの座標（経度・緯度）と年当たりの地震の頻度 N ($M \geq 5$) (M は気象庁マグニチュード) のデータが収録されている。メッシュ数（地点数）は計 8430 である。

位置が不特定な地震については、規模と位置に分けてサンプリングを行った後、それらを合体して断層パラメータを設定する（図 5.5-10）。地震数は、 $N(M \geq 6.8) = 1.26E-01(1/y)$ に期間 $t = 10,000(y)$ を乗じて 1,260 とした。したがって、サンプリングした各地震の平均活動間隔は、一定値 $10,000(y)$ となる。地震の位置は、各発生位置データの頻度に応じて均等に抽出するように、以下の手法を用いた。

- ① 8430 個の地震発生位置データの各頻度を頻度の総和を用いて正規化し、発生確率を算定
- ② 地震発生位置データを発生確率でソート
- ③ 発生確率の累積和が 0.02 となる領域を発生確率が低い方から順に 50 個設定
- ④ 発生確率が均等 (0.02) な 50 の領域に対して、サンプリング数として 25 もしくは 26 をランダムに設定。このときサンプリング数の総和が 1260 となるように調整。
- ⑤ 各領域内からサンプリング数分の地震発生位置データをランダムサンプリング。この際領域内での発生確率は同一と仮定。

断層パラメータについては、表 5.5-8 を基にサンプリングを行った後、規模ごとに予め設定した数値（表 5.5-9）を割り当てた。表 5.5-8～5.5-9 は、防災科学技術研究所（2009）⁽²¹⁾ に記載された数式に基づいた（添付資料編 Appendix IV-C 参照）。表 5.5-8～5.5-9 に示されている気象庁マグニチュードの範囲は、防災科学技術研究所（2009）⁽²¹⁾ を参考として、陸域の位置が不特定な地震の最大の気象庁マグニチュード M の下限値 6.8 と上限値 7.3 を用いた。また、G-R 則の b 値は日本周辺の平均的な値と考えられる 0.9 を使用した⁽²¹⁾。断層パラメータのうち表 5.5-9 に記載されていない走向角、傾斜角、およびすべり角については、最も近傍にある陸域および海域の固有地震の断層パラメータを採用し、断層上端深さについては一定値 3(km) とした。

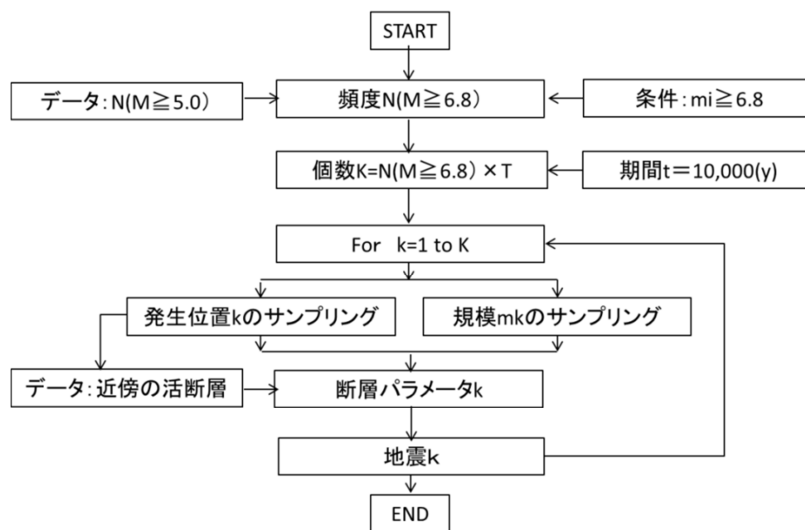


図 5.5-10 位置が不特定な地震（固有地震以外の地震）の断層パラメータ設定手順

表 5.5-8 位置が不特定な地震（固有地震以外の地震）の規模と確率の関係

マグニチュード	確率	積算確率
6.8	2.630E-01	2.630E-01
6.9	2.138E-01	4.768E-01
7.0	1.738E-01	6.506E-01
7.1	1.413E-01	7.918E-01
7.2	1.148E-01	9.067E-01
7.3	9.333E-02	1.000E-00

表 5.5-9 位置が不特定な地震（固有地震以外の地震）の規模別断層パラメータ

マグニチュード	断層幅[km]	断層長さ[km]	すべり量[m]
6.8	17.0	18.0	0.50
6.9	18.0	19.4	0.58
7.0	18.0	21.2	0.72
7.1	18.0	24.3	0.90
7.2	18.0	27.8	1.08
7.3	18.0	31.8	1.35

(d) モデル B1：地形・地質構造の変化量計算コード

モデル B1～B3 を総括する地形・地質構造の変化量計算コードのモデル式を以下に示す（原子力機構, 2012）⁽⁸⁾。[]は数値、**F** は関数 F、添え字 $i, 1$ 等は方向成分（1:鉛直成分、2:水平成分）を表している。平成 24 年度は、右辺第 2 項までを対象とした。

$$\begin{aligned}
 & \text{[地形・地質構造の変化量]}_i \\
 & = \text{【NormalV \{GPS_all, x\}】} \\
 & \quad + \sum_{\text{all}} \text{【Okada Model\{地震}_k, x\}】 / T_k \\
 & \quad + \sum_{\text{all}} \text{【Mogi Model\{貫入}_k, x\}】 / T_k \quad ; \text{貫入形状：球状} \\
 & \quad + \sum_{\text{all}} \text{【Okada Mode\{貫入}_k, x\}】 / T_k \quad ; \text{貫入形状：矩形}
 \end{aligned} \tag{5-8}$$

ここに、 x ：計算地点の位置ベクトル

GPS_all：列島の電子基準点の日々の座標値データ（F3 解）（国土地理院, 2012）⁽²²⁾

地震 k ： k 番目の地震の断層パラメータ

貫入 k ： k 番目の貫入の断層パラメータまたは球状圧力源の入力パラメータ

T_k ：事象 k の平均活動間隔(y)

【NormalV \{GPS_all, x\}】：プレート運動とすべり欠損の総和による陸域の変位速度。長澤ほか（2010）⁽²³⁾が示す方法により我が国の電子基準点の日々の座標値データ（F3 解）から求めた陸域の変位速度（m/y）。

【Okada Model\{地震}_k, x\}】：地震による変位量（m）。Okada（1992）⁽¹⁰⁾による矩形の断層（岩脈の貫入含む）の活動による変形等の半無限弾性地盤の解析解。

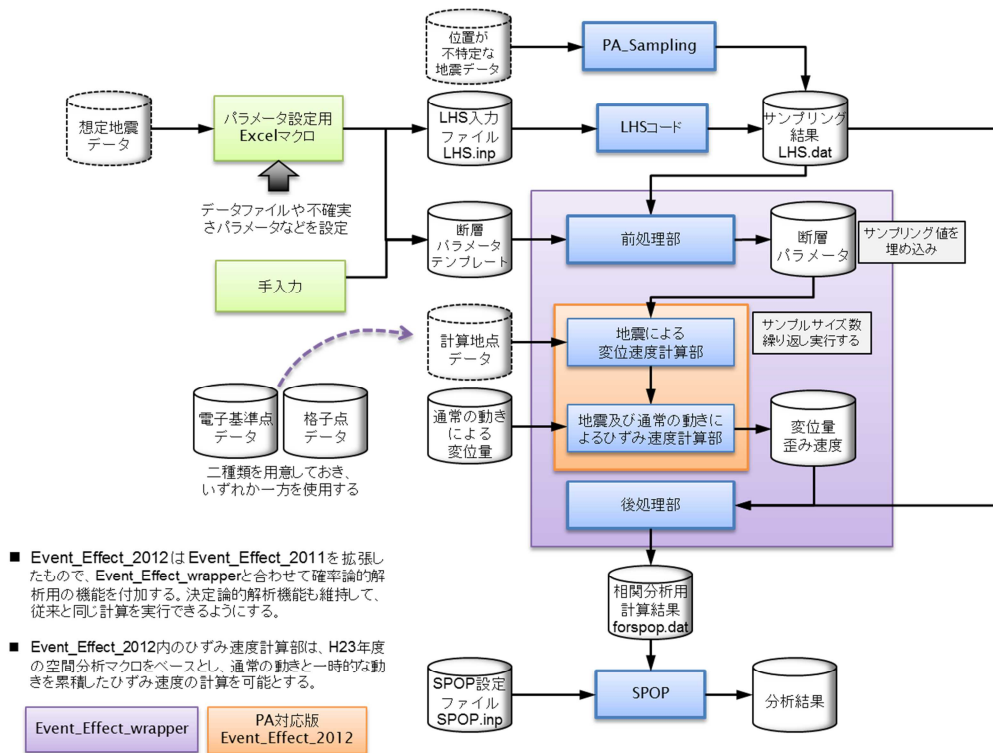
【Mogi Mode l\{貫入}_k, x\}】：貫入による変位量(m)。Mogi（1958）⁽²⁴⁾による球状圧力源の活動に伴う変形等の半無限弾性地盤の解析解。

平成 24 年度版のコードの概要を図 5.5-11 に示し、計算機能の改良点を以下に示す。なお、試解析 I に係る改良点は、5.5.3 項に示した。

モンテカルロ法に対応するため、以下を平成 24 年度版のコードに装備した。

- ✓ 断層パラメータの分布幅（最小、最大、分布形状）設定機能（モデル G、H の組み込み）
- ✓ 断層パラメータのサンプリング機能（LHS）
- ✓ 確率論的解析結果の統計分析機能（SPOP）

断層パラメータの設定機能とは、固有地震の断層パラメータと平均活動間隔の分布幅の入力を支援する機能である。断層パラメータ等のサンプリング機能として、Latin Hypercube Sampling (LHS) コード (Mckay & Beckman, 1979) ⁽²⁵⁾ を装備した。位置が不特定な地震に対しては、新規に作成した PA_Sampling によるパラメータサンプリング機能を装備した。サンプリングによる膨大な計算結果の統計処理のために、Statistical Post Processor (SPOP) コード (Saltelli & Homma, 1992) ⁽²⁶⁾ による統計解析機能を装備した。また、LHS コード、PA_Sampling コード、SPOP コードの整備に伴い、サンプリング結果から Event_Effect_2012 コードの入力ファイルを作成する前処理部、ならびに SPOP コード用のファイルを出力する後処理部を Fortran で実装した (Event_Effect_wrapper)。また、歪み速度を統計解析の従属変数とできるように、歪み速度計算機能を Event_Effect_2012 に組み込んだ。この機能は平成 23 年度に装備した空間分析マクロ CreateVB(VL)Chart2011 (原子力機構, 2012) ⁽⁸⁾ をベースとした。



※PA : Probabilistic Analyses, LHS : Latin Hypercube Sampling, SPOP : Statistical Post Processor

図 5.5-11 地形・地質構造の変化量計算コード (H24 版) の概要

(3) 試解析Ⅱの解析方法

試解析Ⅱの計算対象は、陸域の変位速度の確率分布である。変位速度の計算は、地形・地質構造の変化量計算コードを用い、モンテカルロ法により確率分布（最小値、最大値、中央値）を求める（最小値～最大値は 99.8%、中央値は 50%値）。固有地震のとき、サンプリング数（模擬地震数）が十分に多ければ、中央値は、代表値を入力して求めた決定論的な値（以下、決定

論) と一致する。これが試解析において満たすべき条件であるため、陸域の地震を対象にその確認を行うこととした。

陸域の地震は、モデル G の基本モデルを用い、計算点は上記の条件に対する分析を考慮して等間隔に配置した。陸域の地震の影響範囲は、余裕を見て断層幅の 10 倍を上回る断層上端から 200km とした。断層のタイプは以下に述べる海溝型地震と同一の逆断層とした。

固有地震のうち海溝型地震による変位速度の確率分布は、陸域の地震の参照用として用いた。地震は、GPS 観測結果と整合し、かつ最大規模・最新のデータである 2011 年東北地方太平洋沖地震とした。計算点は、東日本の電子基準点の中からランダムサンプリングした 10 点とした。

位置が不特定な地震については、平成 24 年度に考慮した地震の最大規模がモデル G の基本モデル相当であることから、位置が不特定な地震による陸域の変位速度の確率分布がそれほど大きいとは思われないが、地震のサンプリング機能の試行をかねて、陸域の地震の確率分布の数値との比較用として試解析を行った。

(4) 試解析 II の解析条件

試解析 II の解析条件を解析方法で述べた 3 つの地震別に示す。

(a) 陸域の地震の解析条件

- ・ 震源断層：基本モデル (Mw6.8)．逆断層型
- ・ 計算点：計算点は、震源断層の中心軸上の 41 点 (図 5.5-12)
- ・ 断層パラメータの分布幅：基本モデル (表 5.5-10)
- ・ サンプリング数 (模擬地震の数)：1000

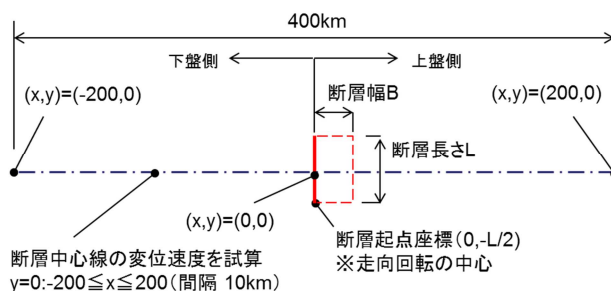


図 5.5-12 陸域の地震の震源断層および計算点の配置

表 5.5-10 陸域の地震の断層パラメータ等の代表値・分布幅

パラメータ名	分布形状	最小値	最大値	代表値
走向角(deg)	一様分布	-15	15	0
傾斜角(deg)	一様分布	30	65	47.5
すべり角(deg)	一様分布	60	120	90
すべり量(m)	正規分布	0.67	1.57	1.12
平均活動間隔(千年)	対数一様分布	4.00	16.00	8.00
断層長さ(km)	正規分布	25.20	42.80	34.00
断層上端深さ(km)	正規分布	0	6	3.00
断層幅(km)	一定値	18.00	18.00	18.00
起点座標 x(km)	一定値	-20.00	20.00	0.00
起点座標 y(km)	一定値	-20.00	20.00	0.00

陸域の地震の影響は、直下型地震のときが最大であると考えられることから、図 5.5-13 に示すように震源断層を横断する方向 (x 方向) に等間隔の計算点を配置した。x 座標の原点は、震源断層の上端とした。

(b) 海溝型地震の解析条件

- ・ 震源断層：2011 年東北地方太平洋沖地震に対する国土地理院 (2011) ⁽²⁰⁾ が示した断層 1 と断層 2 の 2 つの矩形断層からなる震源断層 (規模は合計 Mw8.8)。逆断層型
- ・ 震源断層と計算点の関係：計算点は、北緯 35~41.5(deg)、東経 138~145(deg) の範囲の電子基準点 (計 289 ; 図 5.5-13) からランダムに選択した 10 点 (表 5.5-11)
- ・ 断層パラメータの分布幅：代表値は国土地理院 (2011) ⁽²⁰⁾ を使用。平均活動間隔は、貞観地震 (869 年) と東北地方太平洋沖地震 (2011 年) との差 1,142 年を仮定。分布幅は表 5.5-12~5.5-13 とした。断層 1 と断層 2 は、連動を仮定。
- ・ サンプル数 (模擬地震の数)：断層 1 と断層 2 のそれぞれに対し 1000 (計 2000)

東北地方太平洋沖地震は、図 5.5-13、および表 5.5-12~5.5-13 に示すように断層 1 と断層 2 の 2 つの震源断層からなる地震である。双方の震源断層の連動が断層 1 の活動の度に必ず生ずるとは限らないが、試解析では変位速度の絶対値が大きくなるように連動を仮定した。連動のために、断層 2 の平均活動間隔は断層 1 のサンプリング値と同一とし、断層 2 の起点座標は、断層 1 の起点座標と断層長さに応じて隣接するように調整した。断層 1 と断層 2 はそれぞれ 1,000 個をサンプリングしているが、計算点の変位速度については、2 つの震源断層による数値を累積しているため、サンプリング数は、陸域の地震と同一の 1,000 個である。

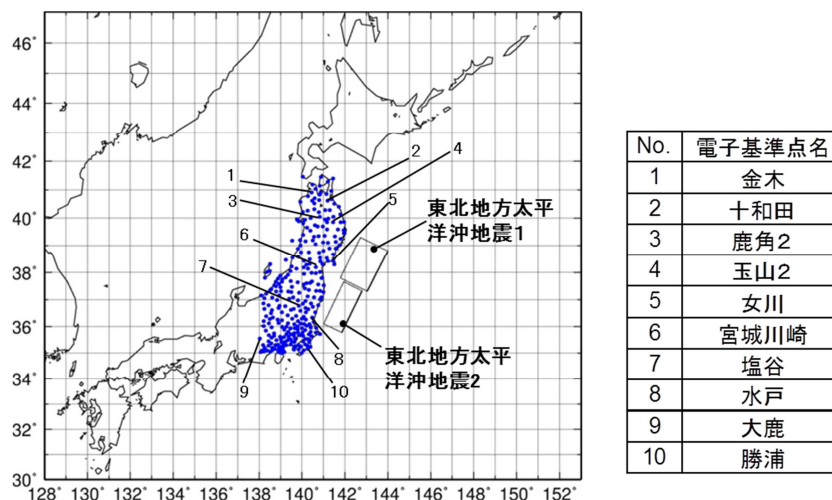


図 5.5-13 海溝型地震の震源断層および計算点の配置：青点は 289 の電子基準点を示す。変位速度の確率分布の計算点はこの中からランダムサンプリングで選択した 10 点。東北地方太平洋沖地震 1、東北地方太平洋沖地震 2 の矩形断層をそれぞれ断層 1、断層 2 とする。GMT (The Generic Mapping Tools ; SOEST, 2011) ⁽²⁷⁾ を用いて作図した。

表 5.5-11 海溝型地震に伴う変位速度の計算点の座標

No.	GPS 基準点名	緯度[deg]	経度[deg]
1	金木	40.910177838	140.451564138
2	十和田	40.625070368	141.197830689
3	鹿角2	40.044976994	140.822907040
4	玉山2	39.849018331	141.452591654
5	女川	38.449195943	141.441164826
6	宮城川崎	38.205743760	140.642847764
7	塩谷	36.776372281	139.854257334
8	水戸	36.344370311	140.476332897
9	大鹿	35.556130628	138.038316710
10	勝浦	35.165900736	140.268021879

表 5.5-12 海溝型地震（断層 1）の断層パラメータ等の代表値・分布幅

パラメータ名	分布形状	最小値	最大値	代表値
走向角(deg)	一定値	—	—	203
傾斜角(deg)	一定値	—	—	16
すべり角(deg)	一様分布	91	111	101
すべり量(m)	正規分布	14.72	34.68	24.7
平均活動間隔(千年)	対数一様分布	0.571	2.284	1.142
断層長さ(km)	正規分布	137.9	234.1	186
断層上端深さ(km)	正規分布	2.1	8.1	5.1
断層幅(km)	一定値	84.9	173.1	129
起点座標 x(deg)	一様分布	143.76977	144.23023	144
起点座標 y(deg)	一様分布	38.61984	38.98016	38.8

表 5.5-13 海溝型地震（断層 2）の断層パラメータ等の代表値・分布幅

パラメータ名	分布形状	最小値	最大値	代表値
走向角(deg)	一定値	—	—	203
傾斜角(deg)	一定値	—	—	15
すべり角(deg)	一様分布	73	93	83
すべり量(m)	正規分布	3.634	8.566	6.1
平均活動間隔(千年)	注1			1.142
断層長さ(km)	正規分布	143.8	244.2	194
断層上端深さ(km)	正規分布	14	20	17
断層幅(km)	正規分布	57.9	118.1	88
起点座標 x(deg)	注1			142.8
起点座標 y(deg)	注1			37.33

注1：断層 2 は、断層 1 との連動させるため、平均活動間隔は断層 1 と同一、断層起点座標は断層 1 に隣接するように調整

(c) 位置が不特定な地震の解析条件

- ・ 震源断層：気象庁マグニチュードの範囲 $6.8 \leq m \leq 7.3$ 、逆断層型・横ずれ断層型
- ・ 計算点：震源断層の位置は列島全域が対象（頻度データが列島全域を経度・緯度 0.1 度間隔で分けた 8430 エリア情報であるため）。計算点は海溝型地震と同一（図 5.5-13、表 5.5-11）。
- ・ 断層パラメータの分布幅：平均活動間隔は 10,000 年間（一定値）。断層パラメータは、位置と規模を個別にサンプリングした結果を使用。
- ・ サンプリング数（模擬地震の数）：1260（8430 エリアでサンプリング；10,000 年間）

図 5.5-14 はモデル H により、10,000 年間で想定した時の模擬地震（1260 個）をランダムサンプリングした結果である。個々の地震は、同時に発生しないと仮定し、平均活動間隔は 10,000 年で一定値扱いとした。

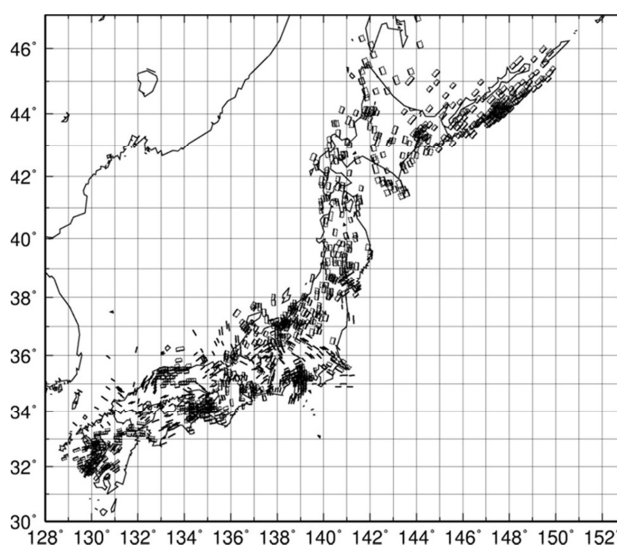


図 5.5-14 位置が不特定な地震 1260 個（10,000 年間）のサンプリング

位置が不特定な地震の走向角と傾斜角は、近傍の主要断層帯で発生する固有地震の値を参照しているため、固有地震の少ないエリアでは、類似した地震が発生した。また、逆断層型の地震以外に横ずれ断層型の地震が発生している。表 5.5-10 の断層パラメータは、断層のタイプに依存しない数式⁽²¹⁾に基づいていることから、横ずれ断層についても表 5.5-10 を適用した。

(5) 試解析 II の結果

(a) 陸域の地震

陸域の地震による計算点の変位速度（図 5.5-12 の x 方向 U_x 、z 方向（鉛直方向） U_z 、y 方向 U_y ）の算定結果を図 5.5-15 に示す。変位速度の確率分布は、最大値、最小値、中央値で表し、代表値を用いたときの変位速度は決定論として示した。

決定論（青）について分析する。変位速度 U_x 、 U_z とともに $x=0(\text{km})$ を境に正負が逆転しており、これは逆断層の食い違いによるものである。決定論の U_x の最大値は $2.1\text{E-}05(\text{m/y}) = 0.02(\text{mm/y})$ 、 U_z の最大値は $5.3\text{E-}05(\text{m/y}) = 0.05(\text{mm/y})$ となる。 U_z の最大値は、藤原ほか（2004）⁽²⁸⁾、および野上（2008）⁽²⁹⁾ から推定した平均的な隆起速度 $0.3 (\text{mm/y} : 10 \text{ 万年で } 30\text{m})$ （原子力機構, 2012）⁽⁸⁾ と比較すると、1 桁程度小さな値となる。

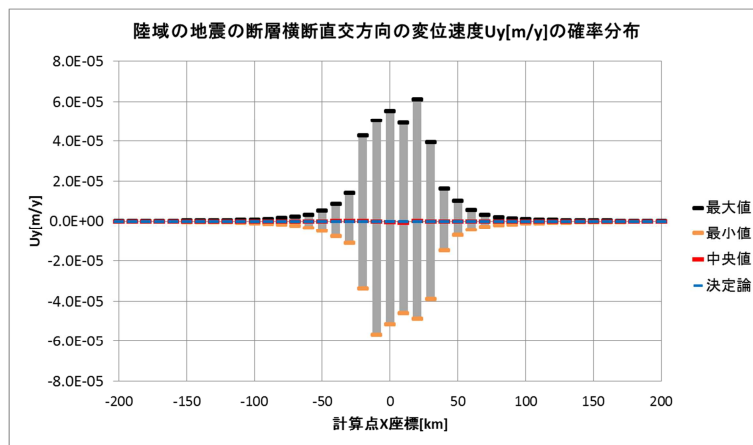
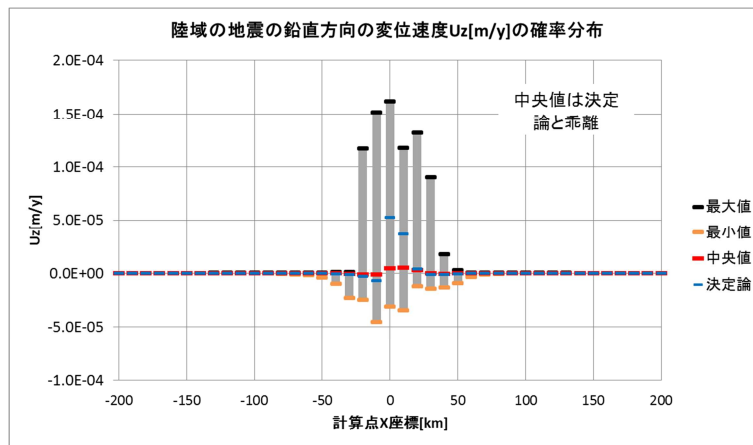
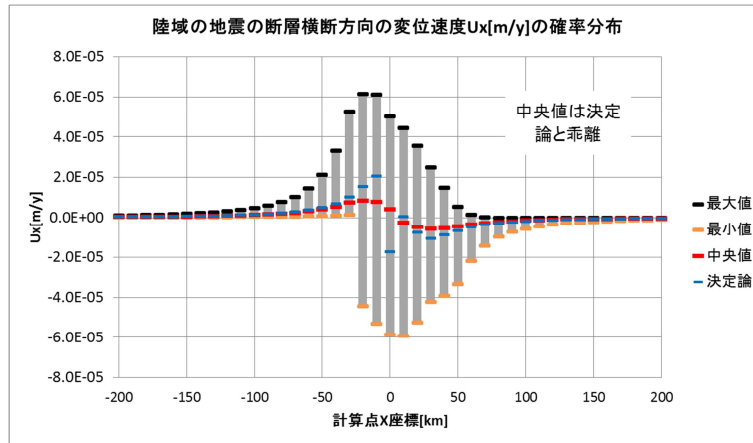


図 5.5-15 陸域の地震による地表の変位速度の確率分布

中央値 (赤) は、サンプル数を 1,000 としたにも関わらず、決定論 (青) と一致しない。また、変位速度の最大値は正、最小値は負となり、決定論の符号と整合しない。そのため、断層パラメータの全 10 項目の中から一定値とする項目を 1 つ、2 つ、3 つと増加させて、各々の中で中央値と決定論が一致する条件を確認した。その結果は以下の通りである。

- ✓ 一定値とする項目が 1 つの場合には、起点座標 (x 座標) を一定値としたとき中央値と決定論の差が最小となる (図 5.5-16)。ただし、最小値は負、最大値は正である。

- ✓ 一定値とする項目が2つの場合には、起点座標（x座標）と走向角を一定値としたとき中央値と決定論の差が最小となる（図5.5-17）。一部の計算点を除けば、最小値と最大値の符号が一致する。
 - ✓ 一定値とする項目が3つの場合には、起点座標（x,y座標）と走向角を一定値としたとき、中央値は決定論とほぼ一致する（図5.5-18）。最小値と最大値の符号は、ほぼ一致する。
- 以上から、モンテカルロ法を有効とするには、起点座標（xy座標）と走向角を一定値扱いとする条件が必要と考えられた。なお、これらの項目は、経験的に分布幅を設定した項目である。

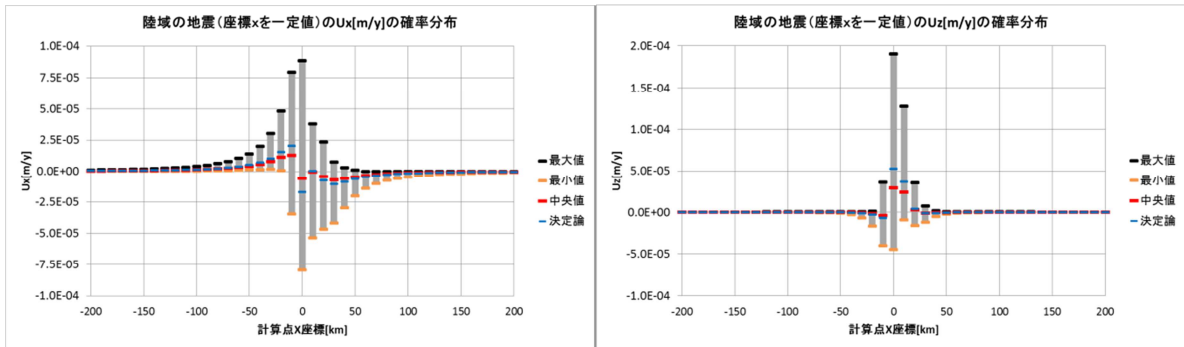


図 5.5-16 陸域の地震において起点座標（x座標）を一定値とした場合の地表の変位速度の確率分布

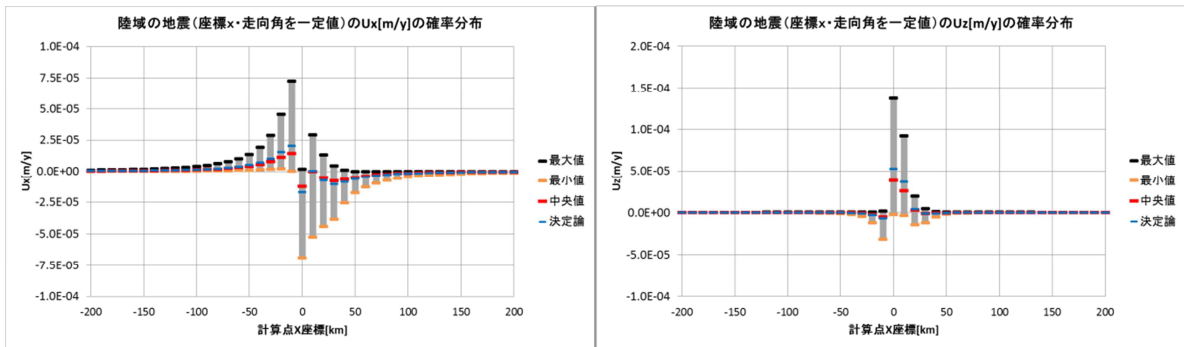


図 5.5-17 陸域の地震において起点座標（x座標）と走向角を一定値とした場合の地表の変位速度の確率分布

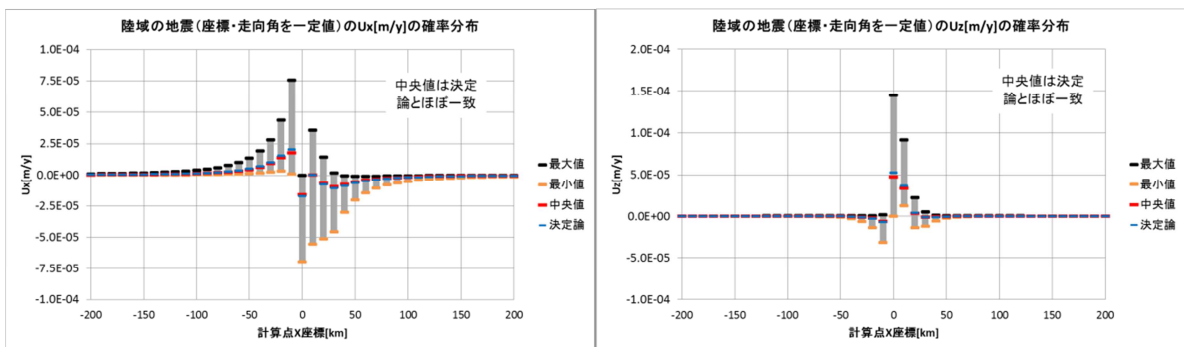


図 5.5-18 陸域の地震において起点座標（xy座標）と走向角を一定値とした場合の地表の変位速度の確率分布

(b) 海溝型地震

海溝型地震による陸域の10点の計算点の変位速度（経度方向 U_x 、緯度方向 U_y 、鉛直方向 U_z ; 経度は東が正、緯度は北が正、鉛直方向は隆起が正）の算定結果を図 5.5-19 に示す。図 5.5-19 では10個の計算点（横軸）を、左が北、右が南になるように配置した。陸域の地震と異なる点は、地震規模をエネルギー（地震モーメント）に換算すると1,000倍であること、計算点が上盤側に限定されること、および計算点が震源断層から数百 km 離れていることである。

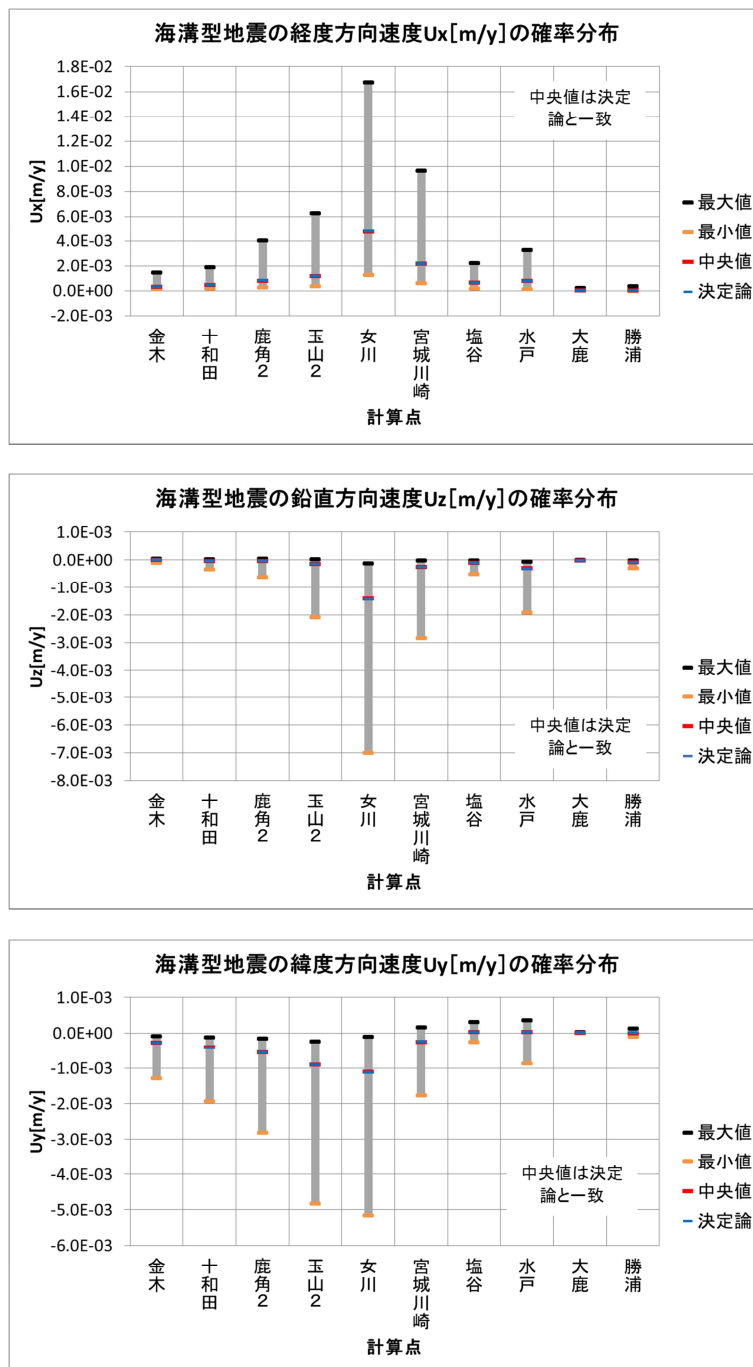


図 5.5-19 海溝型地震による地表の変位速度の確率分布

海溝型地震の場合には、陸域の地震の結果とは異なり、全ての計算点において中央値（赤）と決定論（青）が一致した。誤差は、 U_x で-5.4~0.8%、 U_y -47.2~90.3%、 U_z -19.2~0.8%である。 y 方向の変位速度 U_y は比較的誤差が大きい、誤差の大きい地点はほとんどゼロの地点である。

海溝型地震の分布幅は、プレート境界面で発生する等の理由から走向角を一定値とし、起点座標については陸域の地震と同一の分布幅を設定したため地震規模の違いから陸域の地震の分布幅より相対的に小さい。したがって、海溝型地震は、陸域の地震の中央値が決定論と一致する条件をほぼ満たしていると考えられる。

決定論および変動幅（最小値と最大値の範囲）は、女川をピークとして、北、南の両方に向かって減少する傾向がある。この理由は、震源断層との位置関係によるものである。塩谷と水戸間での傾向の違いについても、塩谷が水戸よりも内陸に位置していることから、震源断層との位置関係で説明できる。

海溝型地震の決定論は、陸域の地震の決定論よりオーダーが2桁程度大きい。 U_x については、海溝型地震のとき最大値が $4.8E-03(m/y)=4.8(mm/y)$ に対して陸域の地震のとき最大値 $2.1E-05(m/y)=0.02(mm/y)$ である。 U_z については絶対値で見ると、海溝型地震のとき $1.4E-03(m/y)=1.4(mm/y)$ に対し、陸域の地震のとき $5.3E-05(m/y)=0.05(mm/y)$ である。 U_z は、速度の絶対値の大きさからいえば、平均的な隆起速度の10倍に近い速さとなっている。変位速度の絶対値の最大は、 U_x については最大 $1.7E-02(m/y)=17(mm/y)$ 、 U_z については $-7.0E-03(m/y)=-7(mm/y)$ となる。このような速度に相当する運動としては、プレート運動（数10 mm/y）があげられる。

以上の検討の結果から、陸域の地震との変位速度の確率分布との比較、および海溝型地震による陸域の変位速度の大きさ等の推定に関しては、本試解析の範囲では10個のサンプリングでも十分に可能であると思われる。ただし、これは1度のサンプリングによる判断であるため、試行を繰り返す等の確認作業を要する。

（c）位置が不特定な地震

位置が不特定な地震による陸域の10点の計算点の変位速度（経度方向 U_x 、緯度方向 U_y 、鉛直方向 U_z ）の算定結果を図5.5-20に示す。なお、本計算では、陸域の地震の変位速度の確率分布（図5.5-18）を参照して、震源断層の起点座標から150km離れたときにはほぼゼロとみなすことができると考え、計算点から半径150km以内にある模擬地震の影響を計算することとした。

変位速度の中央値は、いずれの方向もほとんど0である。この理由は、1260個の模擬地震のうち大部分が半径150km以遠であるためである。南の2地点（大鹿と勝浦）で変動幅が大きい理由は、位置が不特定な地震の頻度の高い領域（伊豆半島周辺）に比較的近いためである。一方、宮城川崎では、震源断層が付近で発生したことから、大きな変動幅を示している。

変動幅が大きくなる要因として、地震頻度の高い領域に近いこと、および近傍で地震が発生することがあげられた。計算点近傍で地震が発生することは、確率として提示することは可能と考えられるが、計算点のサンプリング数10点では足りない。また、1260個の地震の選択は1度しか行っていないため、平均活動が一定値（10,000年）となり、その変動幅の分析ができていない。そのため、今後の課題としては、計算点のサンプリング数の設定方法、および模擬地震の試行回数増大による平均活動間隔の分布幅の推定方法のモデル化があげられる。

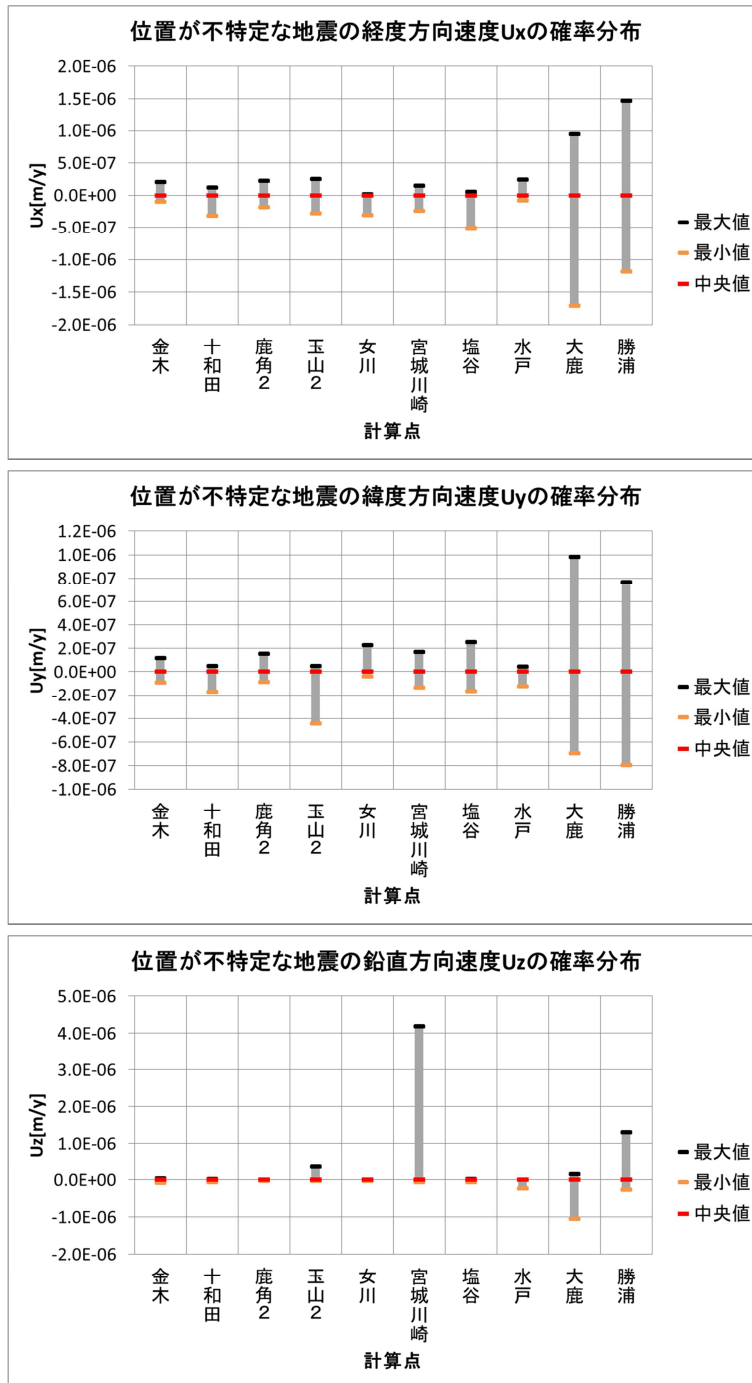


図 5.5-20 位置が不特定な地震による地表の変位速度の確率分布

5.5.4 まとめ

平成 24 年度は、平成 23 年度に整備したモデル構造に基づき、「地震発生により地形・地質構造が変化し、水理特性の変化から地下水流動の変化に至る影響の連鎖」を対象とした複数の既存モデルの組み合わせを用いて、影響量の試解析（試解析 I）を行った。また、地震発生による地形変化の事象を対象に、断層パラメータと地震の平均活動間隔に対するパラメータの不確実性が、水平および鉛直の変位速度に与える影響をモンテカルロ法による確率論的解析により検討した（試解析 II）。各試解析による成果を以下に示す。

（1）試解析 I（地震に伴う地形変化等による母岩の水理学的影響の試解析）

試解析 I では、逆断層型の陸域の地震（Mw6.8；陸域の固有地震の最頻値）が 1 回生じたときを想定し、モデル構造に基づいて 5 種類の既存モデルを選択してこれを定式化し、事象「地震の発生→地形・地質構造の変化（変位）→歪み変化→透水係数・間隙水圧変化→地下水流動の変化」の各々の影響量を試解析した。主な水理、および力学に関するパラメータは、我が国の地質環境条件を踏まえた現実的な条件を設定した。

本試解析の結果、間隙水圧の変化の大きな位置は、断層上端から、地表にかけての震源断層の延長線上にあり、この位置は地震による体積歪み量の変化の大きな位置と一致した。よって、体積歪みを計算する既存モデルの入力値である、断層パラメータが間隙水圧の変化の大きな位置を決定づけており、本現象の影響量の評価において、重要となるパラメータは断層パラメータと間隙水圧を決める既存モデルの入出力関係から体積弾性率と考えられる。なお、本試解析で対象とした間隙水圧の変化がもたらす母岩の影響は、新たな地下水の流入が発生したわけではなく、その水圧増加は時間とともに消散することが確かめられた。また、本事象の発生に伴う間隙水圧の変化は震源断層の周辺に限定されることから、処分サイトとの有効な距離が確保できれば人工バリアの隔離機能、核種移行経路の変動に与える影響は小さく抑えられる可能性があることが示唆された。なお、本試解析は、あくまで連続体を仮定した場合の解析であり、亀裂構造を仮定した場合の影響評価は別途必要になると考えられる。

（2）試解析 II（地震に伴う地形変化の確率分布の試解析）

試解析 II では、模擬した地震による地表の水平、および鉛直の変位速度を推定するモデル構造にモンテカルロ法を適用し、変位速度の確率分布（最小値、最大値、中央値）を試算した。本試解析では、地震は、断層パラメータと平均活動間隔により特徴づけられ、模擬地震は各パラメータの分布幅（最小値、最大値、分布形状）に基づいて発生させた。また、本解析では、各パラメータの分布幅と関連する条件（例えば、プレート境界面上で発生、位置が不明等）が地震で異なることを踏まえ、「陸域の地震」、「海溝型地震」、および「位置が不特定な地震」の 3 タイプの地震をそれぞれ模擬できるモデルを整備した。

モンテカルロ法により変位速度の確率分布を推定する場合、その期待値となる中央値は観測値と一致することにより、推定した変位速度の確からしい最小値・最大値を評価していると考えられる。そのため、確率分布における中央値と観測値との比較・分析が、変位速度の不確実性評価において重要となる。また、固有地震のときは、その断層パラメータ（以下、代表値）が既知であり、既存モデル（Okada model）による解析結果は GPS 観測値と整合していることから、代表値を既存モデルに入力して決定論的に解析した結果（以下、決定論）を観測値とした。一方、分布幅については、地震データの統計分析に基づいてモデル化した。その一部（断層の起点座標、すべり角、走向角、傾斜角）については、情報がないため経験的に設定している。

上述の条件「中央値が決定論と一致すること」の確認のため、陸域の地震を対象とした試解析を行った結果、中央値が決定論とは一致しないことがわかった。この要因を分析するために、断層パラメータの分布幅を設定した項目を一定値にした解析の結果、「起点座標と走向角を一定値とする場合」に中央値と決定論がほぼ一致した。また、海溝型地震の試解析では、走向角が一定値、起点座標は陸域の地震に比べて 1/10 程度小さい分布幅を設定しており、任意の評価地点（10 点）の全てで決定論と中央値が一致する結果となった。

以上から、変位速度の推定においてモンテカルロ法を適用するには、経験的に設定した分布幅のうち起点座標と走向角については一定値、または、これに準ずるように分布幅をかなり小さく設定する必要があると考えられた。起点座標等の分布幅の制限の理由については、変位速度の空間分布形状が $x=0$ （断層上端）を境に上盤側（ $x \geq 0$ ）と下盤側（ $x < 0$ ）において全く異なるからではないかと考えている。今後の課題としては、断層パラメータの分布幅の設定に関する詳細な条件を分析すること、および変位速度の確率分布を変位に換算して試解析 I のような地形・地質構造の変化を使用する感度解析に反映することがあげられる。

5.6 まとめ

本研究は、平成23年度まで整備してきたFEPや安全評価上重要なシナリオについての検討、および国内外のリスク論的扱いの方法論に関する情報等を踏まえ、リスク論的に評価すべき地質・気候関連事象とそれらが生じた場合の処分システム領域への影響に係る安全評価シナリオについて、事象生起確率等の観点で検討・整理を行うものである。本研究の当面の目標は、安全設計の基本的要件や安全評価の基本的考え方等の、安全審査に向けた基本的考え方を精密調査地区選定開始時期までに取りまとめることを見据え、サイト特性に依存しないリスク論的考え方に基づく安全評価シナリオ設定手法を整備することである。そのために、平成24年度は下記4項目について調査研究を実施した。

- ✓ 安全機能の観点から見た地質・気候関連事象の整理：177の事象を対象として、母岩に与える影響として考慮すべき重要な地質・気候関連事象の検討のために、モデル解析を含む既往知見を基に母岩のTHMCの影響の規模、継続性のパターンに係る情報を整理した。
- ✓ 地質・気候関連事象の発生からバリア内のTHMCの特性変化に至る影響の連鎖の整理：地質・気候関連事象の影響の連鎖の範囲を天然バリアおよび人工バリア内まで拡張するために、FEPデータベースの情報を基に、HLWを対象に、地質・気候関連事象の発生に伴うTHMCの特性変化と人工バリアおよび天然バリアの安全機能との関連性を整理した。
- ✓ 母岩の影響量の不確実性の評価手法の検討：情報が不足していた不連続な構造である亀裂に関する既存モデル（地震と母岩の亀裂との関係、亀裂の力学的構造、亀裂の水理学的構造、および地震と水理特性の変化）の最新知見を収集し、新たにモデル構造の情報として整備した。また、モデル構造内に収録されている既存モデルによる影響評価を進めるにあたって、既存モデルを評価対象に適用する際のモデルおよびパラメータに関する不確実性や適用上の課題点を整理しておくことは、その影響量の不確実性を検討する際に有用になると考えられる。そこで、今後の既存モデルによる影響量の不確実性評価を進めるための基礎情報とするため、文献情報を基に、各既存モデルを評価対象に適用する際の不確実性や適用上の課題について分析・整理した。
- ✓ 母岩の影響の感度解析：整備したモデル構造のうち、「地震発生により地形・地質構造が変化し、水理特性の変化から地下水流動の変化に至る影響の連鎖」を対象とした複数の既往モデルの組み合わせを用いて、影響量の試解析を行った。また、地震による変位速度の不確実性の定量化のために、モンテカルロ法による地表の変位速度の確率分布を推定するモデルを検討して、試解析を実施した。

以下、上記の項目別に、主な研究成果を示す。

(1) 安全機能の観点から見た地質・気候関連事象の整理

平成23年度報告書において整備したFEPデータベースの事象のうち、地震・断層活動、隆起・沈降、気候変動に関する事象を対象に母岩領域に与える影響を安全機能のうち、「隔離」、「閉じ込め」に関わるTHMCの時間的、空間的变化の整理を行った。安全機能に与える影響の特徴の観点から、特に、「閉じ込め」のみに影響を及ぼす“地質・気候関連事象発生に伴うサイト周辺の地下環境の変化”と「閉じ込め」だけでなく、「隔離」にも影響を及ぼす“侵食・堆積による相対的なサイトの対地深度の変化による母岩のTHMCの変化”について対象領域における母岩への時間的影響について整理した。

平成24年度の母岩への影響の特徴に関する調査の結果、事象発生に伴うTHMCの時間的变化を整理すると下記の4ケースに整理される。ただし、影響の規模は本調査による事例に基づ

くデータを参考としており、その範囲内における最大規模を表している。影響大とは、事象発生前に比べて1桁程度の変化量を目安に便宜上、ここでは影響大としている。また、影響の継続性については、数千年～1万年以上同じ状態が継続する場合を継続性ありとし、数千年以下で影響が低減し、事象発生前の状態に戻る場合を継続性なし（短期的）とした。

Case-1：対象母岩への影響が大であり、かつ時間的にも継続性のある事象

Case-2：対象母岩への影響が大であるが、時間的継続性の無い（短期的な）事象

Case-3：対象母岩への影響が小であるが、時間的継続性のある事象

Case-4：対象母岩への影響が小であり、時間的継続性の無い（短期的な）事象

表5.6-1 母岩への影響の規模、継続性に関する特徴

ケース	影響の規模	継続性	事象 No.(THMC)	備考
Case-1	影響大	有	E2-3(M,C), C3(H, C), C5(H,C)	C5(H,C)：C5のうち、気候変動のうち、周氷河現象に関連する水理、化学への影響、C5(H);気候変化のうち、降雨による水理への影響
Case-2		無	E5-1(C), E5-2(H), E6(T),	
Case-3	影響小	有	E2-3(T,H), E3(H),E4(H), C1-3(T,H,M,C), C3(H,△k), C4(H), C5(H), C5(C)	
Case-4		無	E5-1(H), E5-3(H), E6(C),	

表5.6-1に示す通り、Case-1とした影響の規模が大きく、継続性が大とした事象はE2-3、C3、C5であり、このうち、C5(H,C)は、周氷河現象を問題とする北海道や本州の高標高地域においては想定すべき地域限定の事象である。また、C3のような海面変化に伴う影響は、処分場が沿岸立地である場合多くの場所において考慮すべき重要な事象であり、またE2-3は侵食に伴う対地深度の変化に関する事象であり、侵食速度の大きい中～高地においては「隔離」「閉じ込め」の両方に影響を与える重要な事象として想定しておかなくてはならない。一方、Case-2はいずれも地震活動に伴う事象であり、短期的な現象ではあるが、とくに水理に関しては、仮に震源から数km離れた処分深度に相当する地下深部（地下300m以深）においても地下水流速が1桁程度増大する可能性があることから、「閉じ込め」に影響を与えるという観点から、E5-2（H）は考慮すべき重要な事象であると考えられる。また、処分場を含む地下環境は周辺の地形・地質条件等の境界条件にも左右されるため、処分サイトがある程度絞り込まれ評価シナリオが設定された段階において、海面変化速度、侵食速度、あるいは融氷による涵養速度、地震規模等のうちいずれが安全評価上重要項目となるかが推定されることになるものと考えられる。

今後の課題として、火山活動やその他の事象については、母岩領域の影響の規模、継続性については未整理であり、同様な調査、整理を今後行っていく必要がある。

（2）地質・気候関連事象の発生からバリア内の THMC の特性変化に至る影響の連鎖の整理

地質・気候関連事象の発生から THMC の特性変化に至る影響の連鎖の整理は、母岩までを対象として進めていたが、人工バリアに与える影響の連鎖としての整理は未実施であった。そこで、地質・気候関連事象の発生による母岩までの特性変化が、人工バリアに与える影響の連鎖を明らかにするために、地質・気候関連事象発生から母岩の特性変化に至る影響の連鎖の整理結果と、既往の HLW の人工バリアの FEP データベースに収納されている安全性への影響の可能性の情報(ある起因事象とそれらを受けて発生する影響の連鎖を成文化したもの)を用いて、それらの関係を整理した。

なお、平成 23 年度には、地震活動、隆起・沈降に関して、HLW 処分システムへの影響を整理しているため、平成 24 年度は、気候変動、泥火山、火山・マグマ活動、深部流体を整理の対象とした。また、177 事象のうち“自然現象の著しい影響の回避”に該当する事象は、バリア内の特性変化に至る影響の連鎖の整理の対象から除いた。

地質・気候関連事象発生に伴う地下環境の変化を要因として、母岩領域→掘削影響領域→緩衝材領域→オーバーパック領域→ガラス固化体領域へとその影響が天然バリアから人工バリアの内側へと伝搬していく。“自然現象の著しい影響の回避”に該当する地質・気候関連事象を除くと、母岩領域の特性変化を介さずに、直接的に人工バリアに影響を及ぼすことは無い。そのため、母岩領域は、地質・気候関連事象発生に伴う地下環境の変化が人工バリア内の特性に影響を及ぼす際の接続ポイントになるものと考えた。

地質・気候関連事象の発生に伴う母岩領域に与える特性変化は、「温度変化」、「水理特性や地下水流動現象の変化」、「応力状態の変化」、「地下水組成の変化」の 4 つに集約される。そこで、これらの特性変化をキーワードとして、人工バリアの FEP データベースの母岩領域の「安全性への影響の可能性」に示された事象の連鎖から接続ポイントを特定した。特定した「安全性への影響の可能性」に起因事象の一つとして、それぞれの地質・気候関連事象発生に伴う地下環境の変化を追加した。さらに、地質・気候関連事象を起因事象とした人工バリア内の影響の連鎖が、既往の人工バリアの「安全性への影響の可能性」に示された影響の連鎖と同等に取り扱えるものかについての確認を行った。その結果、概ね既往の人工バリア内の影響の連鎖と同等に取り扱えることが確認できた。しかし、母岩領域に与える「温度変化」に対して、新たに母岩から人工バリアの内側への温度影響の連鎖を作る必要が分かり、母岩領域からガラス固化体に向かう温度影響の安全性への影響の可能性を成文化した。

(3) 母岩の影響量の不確実性の評価手法の検討

平成 24 年度は、情報が不足していた不連続な構造である亀裂に関する既存モデル（地震と母岩の亀裂との関係、亀裂の力学的構造、亀裂の水理学的構造、および地震と水理特性の変化）の最新知見を収集し、新たにモデル構造の情報として整備した。亀裂や割れ目等の不連続な構造を対象とした力学ならびに水理学的影響に関連する最新のモデル情報の調査の結果、5 つの既存モデルの情報を更新した。Cm1（応力-透水係数の変化の関係式）については個別割れ目から岩盤の透水係数を算出する方法、Cm2（応力-間隙構造の変化の関係式）については割れ目の生成・伸展のモデル情報、HM3（応力-間隙水圧の変化の関係式）については地震時の水圧上昇と水圧消散の広域解析情報、HG1（間隙率-透水係数・貯留係数の関係）については泥質岩での間隙率-浸透率の式、および M2（食い違いモデル）については数値解析による計算事例と食い違いの設定方法をそれぞれのモデルシート追記し情報を更新した。割れ目伸展モデルについては、地下水移行経路の評価において重要であると考えられるが、坑道周囲の掘削影響領域や水圧破碎のボーリング孔周辺に適用された事例しか得られていない。今後、地震・断層変位による割れ目進展モデルを移行経路の形成と結びつけるモデル検討が重要であると考えられる。

既存モデルによる影響量の不確実性評価を進めるための基礎情報とするため、文献情報を基に、各既存モデルを評価対象に適用する際の不確実性や適用上の課題について分析・整理した。調査対象は、水理と力学に関連する 29 の既存モデルである。不確実性の要因としてモデルの入力パラメータ、空間的・時間的な外挿および内挿に関するモデルの不確実性の 5 種類を設定し、要因別に既存モデルの不確実性を整理した。さらに、既存モデル別にモデル検証としての実測値の再現状況を整理した。

既存モデルを影響評価に適用する際の不確実性の整理の結果は、以下のようにまとめられる。

- ✓ 既存モデルの全体を俯瞰すると、モデルパラメータや空間的外挿・内挿による不確実性が多く、時間的外挿・内挿による不確実性は比較的少ないことがわかった。
- ✓ 不確実性の種別が比較的多いモデルとしてはE6（地震動→泥火山）があげられた。
- ✓ モデル検証としての実測値の再現状況の整理の結果、既存モデル27個に対し、「再現例あり」11個、「再現可能（再現が期待できるもの）」9個、「再現難A（低頻度または緩慢な事象であるため、観測値がいつ得られるか不明なもの）」2個、「再現難B（対象事象の測定が困難なもの）」5個に分類された。
- ✓ 「再現難A」に属するものは、M1（弾性力学モデル：マスマーブメントによる自然の侵食・除荷は極めて遅く、大規模崩壊が発生するか否かも不明）、E6（地震による泥火山活動：規模の異なる泥火山の活動の有無や時期は不明）である。「再現難B」に属するものは、M5（噴煙柱モデル）、H2（水収支式等による涵養量算定）、TH3（気温と蒸発散の関係）、TH5（永久凍土の分布と涵養量の関係）、H5（泥火山による水圧上昇）である。

本検討では、それぞれの不確実性の重要度については評価できていない。そのために、モデル不確実性の重要度の設定方法が課題としてあげられる。

（4）母岩の影響の感度解析

平成24年度は、平成23年度に整備したモデル構造に基づき、「地震発生により地形・地質構造が変化し、水理特性の変化から地下水流動の変化に至る影響の連鎖」を対象とした複数の既存モデルの組み合わせを用いて、影響量の試解析（試解析I）を行った。また、地震発生による地形変化の事象を対象に、断層パラメータと地震の平均活動間隔に対するパラメータの不確実性が、水平および鉛直の変位速度に与える影響を、モンテカルロ法による確率論的解析により検討した（試解析II）。各試解析による成果を以下に示す。

（a）試解析I（地震に伴う地形変化等による母岩の水理学的影響の試解析）

試解析Iでは、逆断層型の陸域の地震（Mw6.8；陸域の固有地震の最頻値）が1回生じたときを想定し、モデル構造に基づいて5種類の既存モデルを選択してこれを定式化し、事象「地震の発生→地形・地質構造の変化（変位）→歪み変化→透水係数・間隙水圧変化→地下水流動の変化」の各々の影響量を試解析した。主な水理、および力学に関するパラメータは、我が国の地質環境条件を踏まえた現実的な条件を設定した。

本試解析の結果、間隙水圧の変化の大きな位置は、断層上端から、地表にかけての震源断層の延長線上にあり、この位置は地震による体積歪み量の変化の大きな位置と一致した。よって、体積歪みを計算する既存モデルの入力値である、断層パラメータが間隙水圧の変化の大きな位置を決定づけており、本現象の影響量の評価において、重要となるパラメータは断層パラメータと間隙水圧を決める既存モデルの入出力関係から体積弾性率と考えられる。なお、本試解析で対象とした間隙水圧の変化がもたらす母岩の影響は、新たな地下水の流入が発生したわけではなく、その水圧増加は時間とともに消散することが確かめられた。また、本事象の発生に伴う間隙水圧の変化は震源断層の周辺に限定されることから、処分サイトとの有効な距離が確保できれば人工バリアの隔離機能、核種移行経路の変動に与える影響は小さく抑えられる可能性があることが示唆された。なお、本試解析は、あくまで連続体を仮定した場合の解析であり、亀裂構造を仮定した場合の影響評価は別途必要になると考えられる。

(b) 試解析Ⅱ（地震に伴う地形変化の確率分布の試解析）

試解析Ⅱでは、模擬した地震による地表の水平、および鉛直の変位速度を推定するモデル構造にモンテカルロ法を適用し、変位速度の確率分布（最小値・最大値・中央値）を試算した。本試解析では、地震は、断層パラメータと平均活動間隔により特徴づけられ、模擬地震は各パラメータの分布幅（最小値、最大値、分布形状）に基づいて発生させた。また、本解析では、各パラメータの分布幅と関連する条件（例えば、プレート境界面上で発生、位置が不明等）が地震で異なることを踏まえ、「陸域の地震」、「海溝型地震」、および「位置が不特定な地震」の3タイプの地震をそれぞれ模擬できるモデルを整備した。

モンテカルロ法により変位速度の確率分布を推定する場合、その期待値となる中央値は観測値と一致することにより、推定した変位速度の確からしい最小値・最大値を評価していると考えられる。そのため、確率分布における中央値と観測値との比較・分析が、変位速度の不確実性評価において重要となる。また、固有地震のときは、その断層パラメータ（以下、代表値）が既知であり、既存モデル（Okada model）による解析結果はGPS観測値と整合していることから、代表値を既存モデルに入力して決定論的に解析した結果（以下、決定論）を観測値とした。一方、分布幅については、地震データの統計分析に基づいてモデル化した。その一部（断層の起点座標、すべり角、走向角、傾斜角）については、情報がないため経験的に設定している。

上述の条件「中央値が決定論と一致すること」の確認のため、陸域の地震を対象とした試解析を行った結果、中央値が決定論とは一致しないことがわかった。この要因を分析するために、断層パラメータの分布幅を設定した項目を一定値にした解析の結果、「起点座標と走向角を一定値とする場合」に中央値と決定論がほぼ一致した。また、海溝型地震の試解析では、走向角が一定値、起点座標は陸域の地震に比べて1/10程度小さい分布幅を設定しており、任意の評価地点（10点）の全てで決定論と中央値が一致する結果となった。

以上から、変位速度の推定においてモンテカルロ法を適用するには、経験的に設定した分布幅のうち起点座標と走向角については一定値、または、これに準ずるように分布幅をかなり小さく設定する必要があると考えられた。起点座標等の分布幅の制限の理由については、変位速度の空間分布形状が $x=0$ （断層上端）を境に上盤側（ $x \geq 0$ ）と下盤側（ $x < 0$ ）において全く異なるからではないかと考えている。今後の課題としては、断層パラメータの分布幅の設定に関する詳細な条件を分析すること、および変位速度の確率分布を変位に換算して試解析Ⅰのような地形・地質構造の変化を使用する感度解析に反映することがあげられる。

第5章の参考文献

5.2 の参考文献

- (1) 原子力発電環境整備機構, 地層処分事業の安全確保 2010 ～確かな技術による安全な地層処分の実現のために～, p1-1～p8-57, 2010.
- (2) 山川正・武田聖司・木村英雄・兵頭浩, 非火山地域における地温勾配の特徴, JAEA-Research 2007-040, 21p., 2007.
- (3) 日本原子力研究開発機構, 平成 22 年度地層処分に係る水文地質学的変化による影響に関する調査 報告書, 平成 23 年 3 月, 2010.
- (4) 太田久仁雄・阿部寛信・山口雄大・國丸貴紀・石井英一・繰上広志・戸村豪治・柴野一則・濱克宏・松井裕哉・新里忠志・高橋一晴・丹生屋純夫・大原英史・浅森浩一・森岡宏之・舟木泰智・茂田直孝・福島龍朗, 幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第1段階)研究成果報告書, 分冊「深地層の科学的研究」, JAEA-Research 2007-044, p1-355.
- (5) 尾上博則・笹尾英嗣・三枝博光・小坂寛, 過去から現在までの長期的な地形変化が地下水流動特性に与える影響の解析的評価の試み, 日本原子力学会和文論文誌, 8, 1, pp.40-53, 2009.
- (6) 末永弘・千木良雅弘, 割れ目を含んだ堆積岩の透水係数に対する拘束圧依存性について, 第 33 回地盤工学研究発表会, pp.1233-1234, 1998.
- (7) 産業技術総合研究所, 地層処分にかかる地質情報データの整備 平成 18 年度事業報告書, 169p., 2007.
- (8) 穂刈利之, 化学平衡論解析を用いた原位置深層地下水水質の推定, 清水建設研究報告, 87, pp.77-86, 2012.
- (9) 井岡聖一郎・岩月輝希・酒井利彰・石島洋二, 深層地下水の酸化還元状態－現状と今後の課題－, 日本水文科学会誌, 37, 4, pp.287-293, 2007.
- (10) 核燃料サイクル開発機構, 我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-地層処分研究開発第 2 次取りまとめ-分冊 1 我が国の地質環境, JNC TN1400, pp.99-021, 1999.
- (11) 彌榮英樹・岩月輝希・古江良治・水野崇, 超深地層研究所計画(第1段階)における地下水の地球化学特性調査, サイクル機構技報, 23, pp.41-49, 2004.
- (12) 日本原子力研究開発機構, 平成 21～22 年度地下水流動解析モデルの総合的検証手法の検討(幌延ボーリング調査)報告書, 平成 23 年 3 月, 2011.
- (13) 藤原治・三箇智二・大森博雄, 日本列島における侵食速度の分布, サイクル機構技報, 5, pp.85-93.1999.
- (14) 河口達也・草野友宏・野原壯・安江健一・鎌滝孝信, 3. 淡路島における概略的な淡塩境界と活断層を考慮した地下水流動解析, 日本地下水学会秋季講演要旨, pp.8-13, 2008.
- (15) 林愛明・田中菜摘・宇田進一・Satish-Kumar Madhusoodhan, 深部断層破碎帯の地震に伴う地表水の流入: 野島断層を例に, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, Sm-008, 2001.
- (16) 阿部寛信・酒井隆太郎, 地震・断層活動が水理環境に及ぼす影響, サイクル機構技報 No.5, pp77-83, 1999.
- (17) 北川有一・藤森邦夫・小泉尚嗣, 大地震発生後の断層帯の透水性の時間変化－繰り返し注水実験による測定－, 地質ニュース 596, pp.29-34, 2004.
- (18) 金折裕司, 1997, 1995 年兵庫県南部地震(M7.2)の発生と高槻－六甲－淡路構造線の活動, 土木学会論文集 No.568, III-39, 1-12.

- (19) 日本原子力研究開発機構, 平成 21 年度地層処分に係る水文地質学的変化による影響に関する調査 報告書, 2009.
- (20) C.H.シュルツ, 地震と断層の力学, 古今書院, 506p., 1993.
- (21) Xu H and Oki Y., Expulsion of a geopressed hydrothermal system associated with destructive earthquakes and buried active faults in the Shinanogawa seismic belt, Japan, The Island Arc, 13, pp.333-345, 2004.
- (22) 田上高広・長谷部徳子・蒲原秀典・竹村恵二, 500m コアのフィッシュトラック熱年代学から見出された野島断層近傍の温度異常, 月刊地球「断層解剖計画」(号外), 21, pp.175-179, 1998.
- (23) 都築俊文・内野栄治・上田祥久・今泉晴夫・北山正治・佐藤洋子, 北海道南西沖地震前後における奥尻島温泉水の変化, 道衛研所報, 44, pp.87-89, 1994.
- (24) 佃為成, 深部流体上昇仮説とその検証方法, 月間地球, 28, 12, pp.813-822, 2006.
- (25) 鳥越祐司・幡谷竜太・柳田誠・佐藤賢, 海水準変動 1 サイクルの沿岸域における最大侵食評価, 地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会予稿集, Q02.2-P007, 2003.
- (26) 長谷川琢磨・五十嵐敏文・田中靖治・土宏之・小野文彦, 沿岸海底下の地下水流動状況に関する数値解析的検討, 地下水学雑誌, 43, 4, pp.289-300, 2001.
- (27) 日本原子力研究開発機構, 平成 21~22 年度地下水流動解析モデルの総合的検証手法の検討(幌延ボーリング調査) 報告書, 平成 23 年 3 月, 2011.
- (28) 酒井隆太郎・宗像雅弘・木村英雄, 広域を対象とした長期地下水流動に関する研究(その 1) -海面変化による難透水性層の削剥に関する流動への影響-, 第 26 回バックエンド夏期セミナー資料集, ポスター17, 2010.
- (29) 河口達也・三枝博光・丹羽正和・島田耕史・安江健一・黒澤英樹・鎌滝孝信・登坂博行, 9. 岐阜県東濃地域における地殻変動および気候変動を考慮した広域地下水流動解析, 日本地下水学会春季講演会講演要旨, pp.36-41, 2007.
- (30) 草野友宏・安江健一・小坂寛・三枝博光・竹内竜史・尾上博則・塩見哲也, 地形変化及び気候変動による地下水流動特性の長期的変化の推定-東濃地域を事例とした研究-, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集(CD-ROM), HSC018-P02, 2010.
- (31) 淵脇博孝・宗像雅広・木村英雄・今井久・塩崎功・山下亮, 広域を対象とした長期的地下水流動に関する研究(2) -寒冷期の到来等の気候変動を考慮した地下水流動評価の試み-, 第 26 回バックエンド夏期セミナー資料集, ポスター18, 2010.

5.3 の参考文献

- (1) 原子力発電環境整備機構, 地層処分事業の安全評価確保 2010~確かな技術による安全な地層処分の実現のために~, NUMO-TR-11-01, 2010.

5.4 の参考文献

- (1) 原子力安全委員会, 放射性廃棄物の安全規制における共通的な重要事項について, 原子力安全委員会, 2004
- (2) 産業技術総合研究所, 概要調査の調査・評価項目に関する技術資料-長期変動と地質環境の科学的知見と調査の進め方-, p1-197, 2007
- (3) 日本原子力研究開発機構, 平成 19 年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査 報告書, 2008

- (4)日本原子力研究開発機構, 平成 20 年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査 報告書, 2009
- (5)日本原子力研究開発機構, 平成 21 年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査 報告書, 2010
- (6)酒井隆太郎・武田聖司・木村英雄・松葉久, 地震・気候関連事象に関する FEP データベースの整備, 一隆起・沈降・地震活動・気候変動一, JAEA-Data/Code, 2011-005, 2011
- (7)日本原子力研究開発機構, 平成 22 年度 地層処分の安全審査に向けた評価手法等の整備 報告書, 2011
- (8)日本原子力研究開発機構, 平成 23 年度 地層処分の安全審査に向けた評価手法等の整備 報告書, 2012
- (9)Okada, Y., Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull. Seism. Soc. Am., 82, pp.1018-1040, 1992
- (10) Backblom, G. et al., Earthquake data and modelling to study the effects of future earthquake on a final repository of spent nuclear fuel in Sweden. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1- 6, 2004, Paper No. 3238, 2004.
- (11) Munier, R., Kärnbränslehantering, S., Hökmark, H., Respect distance—Rationale and means of computation, SKB, R-04-17, 2004.
- (12) 橋本学, 断層間の力学的相互作用を考慮した地震活動のシミュレーション, 地学雑誌, Vol.111, No.2, pp.298-307, 2002.
- (13) 計算力学研究センター, 地殻変動解析ソフトウェア.
<http://www.rccm.co.jp/development/tecton/> (2012.12)
- (14) Stephansson, O., Shen, B., Rinne, M., Amemiya, K., Yamashita, R., Toguri, S., FRACOD Modeling of Rock Fracturing and Permeability Change in Excavation Damaged Zones, The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG) 1-6 October, 2008.
- (15) FRACOM Ltd., Fracod2D Help. <http://www.fracom.fi/Help/Fracod2DHelp.htm> (2012.12)
- (16) Rinne, M., Shen, B., Hee-Suk, L., Äspö Pillar Stability Experiment—Modelling of fracture stability by FRACOD Preliminary results, SKB, IPR-03-05, 2003.
- (17)田中秀実・樋口孝幸・富田直人・藤本光一郎・大谷具幸・伊藤久男, 野島断層地質調査所コアにおける断層岩区分および破碎-変質様式, 地質学雑誌, Vol.105, No.1, pp.72-85, 1999.
- (18)多田浩幸・木下直人・若林成樹, 岩盤割れ目の透水係数と応力の関係を用いた空洞周辺岩盤の透水性変化の予測手法, 第 9 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.139-144, 1994.
- (19)三谷泰浩・江崎哲郎・中島祐一・郷家光男・石井卓・木下直人, 岩盤不連続面の透水異方性に関する実験的研究, 第 11 回岩の力学国内シンポジウム, G04, 2002.
- (20)三谷泰浩・江崎哲郎・田中誠一郎・和田圭仙, 新しいせん断—透水同時実験装置の開発と GIS による不連続面内流れのシミュレーションに関する研究, 第 30 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.15-21, 2000.
- (21) 郷家光男・石井卓・木下直人・舟山潤一, せん断変形下における軟岩基質部の透水特性の変化, 第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.167-172, 2003.
- (22) 谷川亘・嶋本利彦, 室内実験による地下深部の浸透率構造の推定—足柄層群を例として—, 地質学雑誌, Vol.113, No.1, pp.27-32, 2007.
- (23) Soh, W., Nakayama, K., Kimura, T., Arc-arc collision in the Izu collision zone, central Japan, deduced from the Ashigara Basin and adjacent Tanzawa Mountains, Island Arc, 7, pp.330-341, 1998.

- (24)石井卓・郷家光男・桜井英行・里優・木下直人・菅原健太郎, 仮想割れ目モデルによる空洞周辺岩盤の透水性変化予測手法. 土木学会論文集, No.715, III-60, pp.237-250, 2002.
- (25) 阿部寛信・酒井隆太郎, 地震・断層活動が水理環境に及ぼす影響, サイクル機構技報, No.5, pp.77-84, 1999.
- (26) 徳永朋祥, 地震時の地下水変動から推定される淡路島北部地域の水理特性, 応用地質, Vol.40, No.2, pp.99-106, 1999.
- (27) Ge, S., Stover, S.C., Hydrodynamic response to strike- and dip-slip faulting in a half-space, Journal of Geophysical Research, Vol.105, No.B11, pp.25513-25524, 2000.
- (28) 日本原子力研究開発機構, 平成 21 年度地層処分に係る水文地質学的変化による影響に関する調査報告書, 2010.
- (29) 核燃料サイクル開発機構, 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成 17 年取りまとめ—分冊 1 深地層の科学的研究, JNC TN1400 2005-014, 2005.
- (30) 日本原子力研究開発機構, 長期予測・影響評価モデルの開発—H23年度の成果およびH24年度の計画—,地質環境の長期安定性研究検討委員会 第10回 資料5, 2012.
- (31) Niwa, M., Takeuchi, R., Onoe, H., Tsuyuguchi, K., Asamori, K., Umeda, K., Sugihara, K., Groundwater pressure changes in Central Japan induced by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Geochemistry, Geophysics, Geosystems, Vol.13, Issue 5, 2012.
- (32) 今井久・山下亮・塩崎功・浦野和彦・笠博義・丸山能生・新里忠史・前川恵輔, 地下水流動に対する地質環境の長期的変遷の影響に関する研究, JAEA-Research 2009-001, 2009.

5.5 の参考文献

- (1)原子力安全委員会, 放射性廃棄物の安全規制における共通的な重要事項について, 原子力安全委員会, 2004
- (2) 産業技術総合研究所, 概要調査の調査・評価項目に関する技術資料—長期変動と地質環境の科学的知見と調査の進め方—, p1-197, 2007
- (3)日本原子力研究開発機構, 平成 19 年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査 報告書, 2008
- (4)日本原子力研究開発機構, 平成 20 年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査 報告書, 2009
- (5)日本原子力研究開発機構, 平成 21 年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査 報告書, 2010
- (6)酒井隆太郎・武田聖司・木村英雄・松葉久, 地震・気候関連事象に関する FEP データベースの整備, —隆起・沈降・地震活動・気候変動—, JAEA-Data/Code, 2011-005, 2011
- (7)日本原子力研究開発機構, 平成 22 年度 地層処分の安全審査に向けた評価手法等の整備 報告書, 2011
- (8)日本原子力研究開発機構, 平成 23 年度 地層処分の安全審査に向けた評価手法等の整備 報告書, 2012
- (9)防災科学技術研究所, J-SHIS 地震ハザードステーション,
<http://www.j-shis.bosai.go.jp/map/>, 2012
- (10)Okada, Y., Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull. Seism. Soc. Am., 82, pp.1018-1040, 1992
- (11)Roeloffs, E.A., Poroeleastic techniques in the study of earthquake-related hydrologic phenomena, Adv. Geophys., 37, pp.135-195, 1996

- (12) Bear, J., Dynamic of Fluids in Porous Media, 1974.
- (13) 塩崎功・今井久・山下亮・イセンコ エフゲーニー・豊田守, バランス断面法による地質構造変遷の推定ツール, 日本応用地質学会平成 22 年度研究発表会講演論文集, pp.191-192, 2010
- (14) 今井久・山下亮・塩崎功・浦野和彦・笠博義・丸山能生・新里忠史・前川恵輔, 地下水流動に対する地質環境の長期的変遷の影響に関する研究, JAEA-Research 2009-001, 2009.
- (15) 阿部寛信・酒井隆太郎, 地震・断層活動が水理環境に及ぼす影響, サイクル機構技法, No.5, 1999
- (16) 宮澤大輔・真田祐幸・木山保・杉田裕・石島洋二, 幌延地域に分布する珪質岩を対象とした間隙弾性パラメータの取得と室内試験法の提案, 資源・素材学会, Vol.127, No.3, pp.132 - 138, 2011
- (17) 木山 保・松井 裕哉・J. C. ROEGIERS・熊倉 聡・小玉 齊明・石島 洋二, 間隙弾性論に基づく幌延の珪質岩を用いた室内試験, 土木学会第 35 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.297-298, 2006
- (18) Ge, S., Stover, S.C., Hydrodynamic response to strike- and dip-slip faulting in a half-space, Journal of Geophysical Research, Vol.105, No.B11, pp.25513-25524, 2000
- (19) 日本原子力研究開発機構, 長期予測・影響評価モデルの開発－H23 年度の成果および H24 年度の計画－, 地質環境の長期安定性研究検討委員会 第 10 回 資料 5, 2012a
- (20) 国土地理院, 電子基準点 (GPS 連続観測点) データ解析による地殻変動と震源断層モデル, 国土地理院 HP, <http://www.gsi.go.jp/cais/topic110422-index.html>, 2011
- (21) 防災科学技術研究所, 「全国地震動予測地図」作成手法の検討, 防災科学技術研究所資料, No.336, 2009
- (22) 国土地理院, 電子基準点提供サービス, 国土地理院 HP, <http://terras.gsi.go.jp/ja/index.html>, 2012
- (23) 長澤寛和・武田聖司・木村英雄, 地殻変動の累積量推定モデルの整備, JAEA-Research, 2010-023, 2010
- (24) Mogi, K., Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them, Bulletin of the Earthquake Research Institute of the University of Tokyo, 36, pp.99-134, 1958
- (25) M. D. McKay, R. J. Beckman : A comparison of three methods of selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code, Technometrics, 21, p.239-245, 1979
- (26) A. Saltelli, T. Homma: LISA PACKAGE USER GUIDE Part III, SPOP (Statistical Post Processor) Uncertainty and Sensitivity Analysis for Model Output. Program Description and User Guide, EUR 13924 EN, 1992
- (27) SOEST, SOEST HP, maintained by Wessel P., The Generic Mapping Tools, <http://gmt.soest.hawaii.edu/>, 2011
- (28) 藤原治・柳田誠・三箇智二・日本列島の最近約 10 万年間の隆起速度の分布, 月刊地球, Vol.26, No. 7, pp. 442-447, 2004
- (29) 野上道男, 山地の勾配と隆起速度, 地形, Vol.29, No. 1, pp. 17-26, 2008

6. リスク論的考え方に基づく安全評価シナリオ設定手法の整備 (バリア材長期変遷事象)

6.1 全体概要

原子力発電所の使用済燃料の再処理によって発生する高レベル放射性廃棄物（以下、「HLW」という）や、再処理施設ならびにウラン-プルトニウム混合酸化物（MOX）加工施設から発生する長半減期低発熱放射性廃棄物（以下、「TRU 廃棄物」という）の処分方法として、地層処分が検討されている。この地層処分の事業許可申請に際して、核原料物質・核燃料物質および原子炉の規制に関する法律（以下、「炉規法」という）に基づいて、国が安全審査を実施する場合は、事業者が行う安全評価の妥当性について判断する必要がある。原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会は、炉規法に基づいて、安全審査を実施する場合に必要となる、安全評価コード、安全評価データの整備、安全審査に向けた基本的な考え方の整理や判断指標を策定してゆくこととしている⁽¹⁾⁽²⁾。日本原子力研究機構安全研究センターでは、安全審査における安全評価手法の整備を進めており、本章では、安全審査における安全評価手法の整備の一環として、リスク論的考え方に基づく人工バリア材の長期変遷事象を対象としたシナリオ設定手法の整備の成果について述べる。我が国におけるリスク論的考え方は、原子力安全委員会（2004）⁽³⁾が示しており、極めて評価期間が長いこと等による不確実性の評価として、諸外国の考え方を踏まえ、シナリオの可能性と影響を組合せたリスク論的考え方が示されている。HLW 等の地層処分に対しても、同様にシナリオの可能性と影響を考慮した安全評価手法が必要と考えられる。

事業者が地層処分の安全評価を実施する際には、地層処分システムの処分場閉鎖後の状態を基にして、長期間にわたる人工バリア、天然バリアの状態を変化させる可能性がある一連の事象を想定し、これらを組み合わせた地層処分システムにおける放射性核種の長期挙動を描いたシナリオを使用することで、地層処分システムからの放射性廃棄物移行に対する安全性の影響評価を行うこととしている。このことから、安全評価結果の妥当性を判断するためには、その安全評価結果に対して、安全規制の観点から処分場の安全性に関して確認する必要があるポイントを把握できるようにシナリオ設定手法の整備が求められている。その手法整備の一環として、FEP データベースを整備している。

平成 24 年度は、人工バリアの長期変遷事象（オーバーパックの早期破損、緩衝材の地下水流動抑制機能の喪失、緩衝材の核種移行遅延性能の変化など）のシナリオ設定手法の検討のため、諸外国におけるこれらの長期変遷事象と核種移行に関するリスク論的取り扱いの最新事例など、その方法論に資する情報を収集・分析した。

6.2 人工バリア材の長期変遷事象に係るシナリオ設定手法整備

6.2.1 背景・目的

原子力安全・保安院では、炉規法に基づいて、安全審査を実施する場合に必要となる、安全評価手法および安全評価データの整備、安全審査に向けた基本的な考え方の整理や判断指標を策定してゆくこととしている⁽¹⁾⁽²⁾。放射性廃棄物の HLW や TRU 廃棄物の処分方法として、地層処分が検討されている。核燃料サイクル機構と電気事業者は、HLW に関しては、平成 11 年 11 月「我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－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ」⁽⁴⁾（以下、「第 2 次取りまとめ」という）、TRU 廃棄物に関しては、平成 17 年 9 月「TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ」⁽⁵⁾（以下、「TRU2 次レポート」という）において、それぞれ地層処分技術の成立性とその安全性の見通しについて取りまとめられた。平成 19 年には、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（以下、「最終処分法」という）が改正され、TRU 廃棄物の一部も、地層処分の対象となった。平成 18 年には、廃棄物安全小委員会が取りまとめた「放射性廃棄物の地層処分にかかわる安

全規制制度のあり方について」(総合資源エネルギー調査会)⁽⁶⁾にてサイト選定段階における規制機関の役割や地層処分事業の各段階における安全規制の法的枠組みが検討され、平成 19 年には、この報告書を基に、炉規法が改正され、地層処分事業の段階的進展を踏まえた安全規制の法的枠組みが整備されてきている。地層処分の事業主体である原子力発電環境整備機構(以下、「NUMO」という)は、こうした法的整備状況を踏まえ、今後の立地・広報活動における地層処分の安全性に関する説明の技術的な拠り所を示すため、「地層処分事業の安全確保(2010年度版) -確かな技術による安全な地層処分の実現のために-」⁽⁷⁾(以下、「NUMO-TR-11-01」という)が平成 23 年に公開されている。

上記のような我が国の HLW、TRU 廃棄物の地層処分に係る法的整備状況や処分技術に関する進展に応じて、今後、規制機関として地層処分の事業許可申請の安全審査を実施するためには、炉規法等に基づき、事業者が行う安全評価の妥当性について、最新の知見に基づいて判断してゆく必要がある。安全評価の妥当性を判断するために、安全評価手法および安全評価データを整備すると共に、安全審査に向けた基本的な考え方の整備、シナリオ設定手法の整備や判断指標を策定してゆくこととしている。

事業者は安全評価を実施する際に、地層処分システムの処分場閉鎖後の状態を基にして、長期間にわたる人工バリア、天然バリアの状態を変化させる可能性がある一連の現象を想定し、これらを組み合わせた地層処分システムにおける放射性核種の長期挙動を描いたシナリオを使用することで、地層処分システムからの放射性廃棄物移行に対する安全性の影響評価を行っている。このことから、安全評価結果の妥当性を判断するためには、その安全評価結果に対して、安全規制の観点から処分場の安全性に関して確認する必要があるポイントを把握できるようにシナリオ設定手法の整備が求められると考えられる。これまで、シナリオ設定手法の整備については、平成 23 年度までに、以下の内容を実施している。

<平成 21 年度実施内容>⁽⁸⁾⁽⁹⁾

- ・ HLW の地下水移行に関する FEP データベース整備(一連の微生物影響に関する相関の判定の検討、諸外国安全評価書における判断の現状の整理)
- ・ TRU 廃棄物の地下水移行に関する FEP データベース整備、「安全性への影響の可能性」の全体整理および「相関の判定」の作成
- ・ 併置処分を想定した場合の HLW/TRU 廃棄物の「安全性への影響の可能性」の整理

<平成 22 年度実施内容>⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾

- ・ 諸外国および我が国における安全機能の活用状況に関する調査
- ・ HLW の「安全性への影響の可能性」と「安全機能」との関係整理

<平成 23 年度実施内容>⁽¹²⁾⁽¹³⁾

- ・ HLW の地下水移行に関する FEP データベース整備(最新知見の取り込みによる FEP 更新)
- ・ TRU 廃棄物の地下水移行に関する FEP データベース整備(最新知見の取り込みによる FEP 更新)
- ・ TRU 廃棄物の「安全性への影響の可能性」と「安全機能」との関係整理

過年度までに FEP データベースとして、処分システム内における、熱、水理、応力、化学、放射線、核種移行/物質移動の現象や特性などが FEP としてリスト化され、それら起因事象とそれらを受けて発生する派生事象の関係を可能な限り網羅的に、「安全性への影響の可能性」とし

て整理している。一方、我が国や諸外国の研究機関による地層処分に関する実験的・解析的知見の拡充に伴い、処分システム内における現象や特性の理解が進んできている。これらの処分システムにおける現象や特性の理解の進展に伴い、FEP データベースに収録された「安全性への影響の可能性」および「関連の判定」を適宜、修正し、現象や影響に対する判断を更新していく必要がある。平成 23 年度は、FEP データベースに最新知見の取り込みを行った。FEP データベースは、地層処分の最新の研究動向を踏まえたシナリオ設定手法の妥当性を判断することを目的としている。FEP データベースを更新することで、事業者の実施する安全評価に対して、よりの確な妥当性の判断を示すことが可能となる。

図 6.2-1 に HLW および TRU 廃棄物の FEP データベースの構成を示す。①FEP リスト、②相関関係図（関連性のある FEP 間の因果関係を図化したもの）、③FEP シート（当該 FEP に関する既往の実験的・解析的な研究から得られる知見情報、他の FEP との関係、参考文献などを収録したもの）、④「安全性への影響の可能性・理解の現状・関連の判定」、「安全機能」の影響フローの 5 つの項目で構成されている。

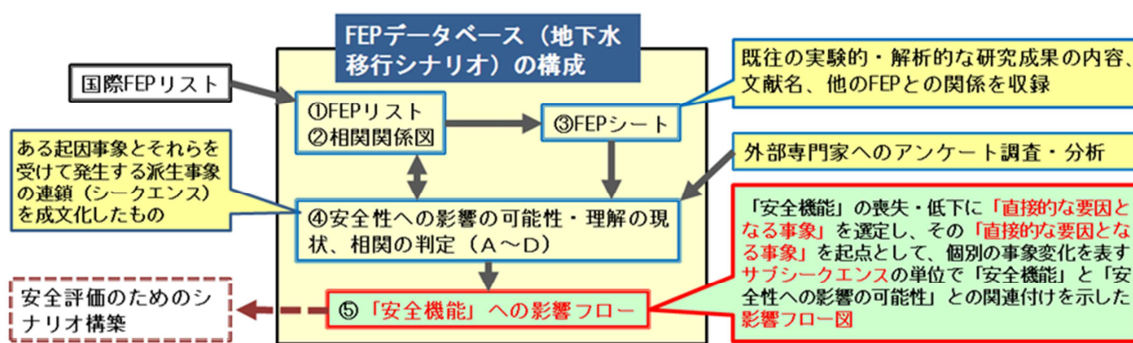


図 6.2-1 FEP データベースの構成

平成 24 年度は、発生した場合の影響が大きく、安全評価上重要となる長期変遷事象（オーバーパックの早期破損、緩衝材の地下水流動抑制機能の喪失、緩衝材の核種移行遅延性能の変化など）のシナリオ設定手法の検討のため、諸外国におけるこれらの長期変遷事象と核種移行に関するリスク論的取り扱いの最新事例など、その方法論に資する情報を収集・分析した。

6.2.2 諸外国における長期変遷事象のリスク論的扱いに関する調査

諸外国の各実施主体によって行われている安全評価では、発生した場合の影響が大きい長期変遷事象（オーバーパックの早期破損、緩衝材の地下水流動抑制機能の喪失、緩衝材の核種移行遅延性能の変化など）について、リスク論的手法（事象の発生の可能性と発生した場合の影響の大きさを踏まえた評価手法）を用いたシナリオ開発が進められている。こうした状況から、安全規制の観点からシナリオ設定の妥当性を判断する上で、長期変遷事象のリスク論的評価手法を把握しておくことは重要である。そこで、諸外国における長期変遷事象のリスク論的評価手法について情報を収集・分析した。

具体的には諸外国の実施主体の安全評価レポート等を対象として、各長期変遷事象のシナリオ上の取り扱い、各長期変遷事象の評価手法についての情報を収集・分析した。調査対象国は、米国、英国、スウェーデン、スイス、フィンランド、フランスとした。それぞれの調査結果を以下に示す。

(1) 米国⁽¹⁴⁾

ユッカマウンテン処分場に対しては、処分システム全体の起こりうる条件での長期性能を、サイトデータや材料試験データ、また物理や化学の原理に基づいた計算モデルを使用して定量的に推定する計算方法であるトータルシステム性能評価 (TSPA) を用いて安全評価を行っている。TSPA では人工および天然バリアシステムのプロセスの解析モデルを処分場および周辺環境の全体的な計算モデルに整理し、処分場全体の性能を評価している。この TSPA モデルを使用することで、一定範囲の条件での処分場から放出される放射性核種の量および、人の被曝量を推定することができる。

ユッカマウンテン処分場のシナリオ設定手法は以下の手順で行われる。

1) FEP の特定

次の手順で、関連する可能性のある FEP をリストアップする。

方法 1 : 国際 FEP を使用し、これにサイト特有の情報を補足。

方法 2 : ブレーンストーミングー技術的なワークショップやレビューなどで専門家によってプロジェクト特有の FEP の一部を作成。

方法 3 : トップダウンによる導出ー標準的な流動、テクトニクスプロセス、火成活動、人工バリアシステムの劣化モードなどについてイベントツリーを作成し、FEP 特定の基礎とする。

方法 4 : 混合手法ー国際 FEP の改良、再分類を行い、プロジェクトに適合したものにする。

2) FEP のスクリーニング

リストアップした FEP について分析して、性能評価に含むべきもの、除外するべきものを判断する。判断基準には低確率基準と低影響基準がある。

- ・ 低確率基準

起こる頻度が 10^{-5} /年を超える初期事象だけが FEP に含まれている。

- ・ 低影響基準

処分後の 1 万年間に最大に被ばくすると合理的に考えられる個人への放射線被ばくや、アクセスできる環境への放射性核種の放出の大きさや期間に有意な変化がもたらされる場合には、その FEP は評価しなければならない。

3) 事象およびシナリオの分類

抽出された事象の中から、それらの発生確率に基づいて性能評価に含める事象として、地震、火成活動、早期破損が選ばれている。

これら事象と、これらが起こらない通常状態とを合わせた 4 つを二つずつ組み合わせて、処分場の将来について 8 つのシナリオが設定され、それらのシナリオについて、事象の発生確率、その事象により生じる人工バリアへの損傷の相対的大きさに関する理解、事象の発生する事象間のタイミングなどに基づいて、絞り込みが行われた。最終的に次の 4 つのシナリオが選定されている。

- ・ 早期破損シナリオ : 早期破損事象 (廃棄物パッケージやドリップシールドの早期破損) を一つ以上含むもの
- ・ 火成活動シナリオ : 火成事象を一つ以上含むもの
- ・ 地震シナリオ : 地震事象を一つ以上含むもの
- ・ 通常シナリオ : 標準的な特質、プロセスを含むもの

4) シナリオおよび事象のスクリーニング

性能評価から除外できるシナリオ、事象の検討が、それらの確率、影響、規制との整合性に基づいておこなわれる。

前記の通常、早期破損、火成活動、地震シナリオは、1 万年間に起こる確率が 1/1 万以上の起因事象に基づくものであり、性能評価に含める。通常、早期破損、地震シナリオは、1 万年間に起こる確率が 10^5 /年以上の起因事象に基づくものであり、適合性の評価を示すための性能評価に含める。

(a) 廃棄体収納容器の早期破損

ユッカマウンテンでの早期破損とは、廃棄物パッケージ製造時および取扱時の欠陥により、欠陥がないものについてメカニスティックな劣化モデルで予測されるより早い時期に廃棄物パッケージやドリップシールドに貫通孔ができることと定義されている。早期破損解析の目的は、廃棄物パッケージやドリップシールドに生じる可能性があり、早期破損につながる可能性のある欠陥のタイプを評価することと、それぞれの発生確率を推定することである。対象は廃棄物パッケージの外側バリア (Alloy 22) だけである。廃棄物パッケージ内側容器の構造物 (ステンレス鋼) には耐食性能が期待されていないので、解析は行われぬ。

処分施設の性能に関係する可能性があるとして挙げられた FEP のうち、早期破損シナリオで取り上げられているのは、下記のプロセスなどに関係したものである。

- ・ 廃棄体パッケージの微生物腐食
- ・ 廃棄体パッケージおよびドリップシールドの欠陥による早期破損
- ・ 廃棄体パッケージおよびドリップシールドの物理的形状
- ・ 廃棄体パッケージの応力腐食割れ
- ・ 廃棄体パッケージの局部腐食

文献調査などをもとに、上記の廃棄体パッケージおよびドリップシールドの欠陥による早期破損させるメカニズムとして 13 個の瑕疵やプロセスが挙げられ、そのうち廃棄物パッケージの外側腐食バリアにとって重要になると考えられるものとして、次の 6 つが挙げられている。

- ・ 外部腐食バリアの不適切な熱処理
- ・ 外部腐食バリアの蓋の不適切な熱処理
- ・ 外部腐食バリアの蓋の不適切な応力除去 (低塑性琢磨)
- ・ 廃棄物パッケージ取扱ミス
- ・ 不適切な母材の選定
- ・ 不適切な溶加材

上記項目についてそれぞれ、米国原子力産業の過去における欠陥発生に関するデータなどを用いて、発生確率をもとめ、さらに、これらの要素のいずれかが原因で廃棄体パッケージやドリップシールドが早期破損する確率を求めている。

(b) 母岩中の核種移行経路、移行速度の長期変遷

米国では、気候変動の影響を評価することが規制によって求められている。気候変動の地表の地形、土壌への影響は、TSPA では閉鎖後の最初の 10,000 年に対する三つの気候条件、すなわち、現在の気候(処分場閉鎖から 600 年後まで)、モンスーン気候 (600 年後から 2000 年後まで)、氷河への移行 2000 年後から 1 万年後まで)、のそれぞれについて、浸透シナリオを設定し

て評価している。

(2) 英国⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾

英国の安全評価の流れは、以下のようになっている。

1) 安全の考え方の整理

安全の考え方は以下の三つに分けて整理する。

・ 設計及びサイト選定

安全を検討する時間枠、受動安全性の重要性、地層処分システムの様々なバリア要素とその安全機能などの概念を整理する。

・ 評価

認可要件ガイド（GRA）に示された以下の要件にどのように取り組むかを検討する。

- ✓ 環境許可が維持されている期間の公衆への放射線被曝
- ✓ 環境許可が維持されている期間以降の公衆への放射線被曝
- ✓ 環境許可が維持されている期間以降の地層処分場への不注意による人間侵入による影響の可能性
- ✓ 放射性核種の放出による人間環境への放射線影響
- ✓ 非放射性ハザード
- ✓ 地層処分システムの個々のバリアや構成要素がシステム全体の安全性に貢献する際の役割
- ✓ 臨界安全など、その他の評価課題

・ 管理

GRA で規定されている環境安全カルチャー及び管理システムへの取り組みをどのように進めるかを検討する。

2) 評価の基本条件の整理

廃棄物インベントリー及び不確実性、廃棄物パッケージング化、地層処分環境、人工バリアの種類、地層処分場の配置などの安全評価の基本条件を整理する。また、安全評価を支える科学的、技術的情報や理解を整理する。されに処分システムの理解を進め、定量化するために使用するモデルやモデル化について整理する。

3) 定量的解析

設定したインベントリー、解析モデルなどを用いて予想される放射線リスクを計算し、机上で行ってきたサイト選定で予想される結果の指標とすると共に、検討されている廃棄物のパッケージ化を評価するための定量的な基準を示す。また、廃棄物容器や地質バリアの性能が放射線リスクにどの程度効くのかを調べるために、感度解析を行う。

4) 不確実性の管理

概括的評価に伴う不確実性を明確にする。

- ・ サイトが決まっていないために評価すべき地質環境が明確になっていない。
- ・ 実際に処分するインベントリーが不明確
- ・ 廃棄体形状が不明確
- ・ 回収可能性に関する社会の考え方が不明
- ・ 放射能に関係しないハザード、人による影響の評価などに関する規制上の扱いに関する不確実性

(a) 廃棄体収納容器の早期破損

英国では、廃棄体容器の性能が全体性能にどのように影響するかについて感度解析を行って評価している。感度解析は、容器の閉じ込め期間を0年、1万年、50万年として、リスク（年間実効線量にリスク係数 0.06/Sv をかけた値）の最大値と最大となる閉鎖後の経過時間の比較が行われている。

(b) 緩衝材の地下水流動抑制機能の喪失、核種移行遅延機能の喪失

英国での安全評価は概括的なものであり緩衝材の地下水流動抑制機能の喪失、核種移行遅延機能の喪失についての具体的な定義はないが、この機能の喪失により放射性物質の地表への到達時間が短くなることから、感度解析の中で「地層処分場から地表への地下水の移行時間」を変化させた評価が、その評価に相当すると考えられる。

感度解析は、「地層処分場から地表への地下水の移行時間」のパラメータを1万年、10万年、100万年として、リスクの最大値と最大となる閉鎖後の経過時間の比較が行われている。

(c) 母岩中の核種移行経路、移行速度の長期変遷

英国での安全評価は概括的なものであり母岩中の核種移行経路、移行速度の長期変遷についての具体的な定義はないが、母岩中の核種移行経路や移行速度の変化は、母岩を通過する放出速度、地層処分場から地表への地下水の移行時間などのパラメータを変化させた評価が、これらの長期変遷の評価に相当すると考えられる。これらパラメータを変化させ、リスクの最大値と最大となる閉鎖後の経過時間の比較が行われている。

(3) スウェーデン⁽¹⁹⁾

SR-site の安全評価は、以下の11のステップから構成される。

1) FEP 処理

解析に含める必要のある全ての要素を特定する。以前行われた安全評価の経験や長期安全性に影響する関連する FEP に関する KBS-3 および国際的なデータベースに基づいてリストアップする。SKB FEP データベースは、大部分が初期状態 FEP、内部プロセス FEP、外部 FEP に分類されている。

2) 初期状態の記述

システムの初期状態を、処分場サイトの地質環境モデル、KBS-3 処分場設計、この設計を適用したサイトレイアウトに基づいて記述する。

3) 外部条件の記述

外部条件に関係する要素は、気候に関連したもの、大規模な地質プロセスおよび影響、将来の人間進入に分けて記述される。

4) プロセスの記述

処分場の長期変遷および安全に重要なプロセスを特定し、どのように取り扱うかを記述する。

5) 安全機能、安全機能指標、安全機能指標基準の明確化

SR-site の評価手法の中核となるのが、処分場システムが理想的には長期間にわたって果たす

べき一連の安全機能を明確にすることである。ここでは、大まかな安全機能である閉じ込めと遅延を、キャニスタ、緩衝材、定置坑道埋め戻し材、母岩について、更に細かく区別して示す。また、安全機能を長期間にわたって評価するために、安全機能に対して、対象とする処分場構成要素の測定可能、あるいは計算可能な特性を安全機能指標として設定する。また、いくつかの安全機能については、対象とする安全機能が維持されているかどうかを判断するための判断基準として安全機能指標基準を定める。

6) データのとりまとめ

処分場の変遷の定量化および被ばく線量計算で使用するデータを構造的なプロセスで選定する。

7) 基本的変遷の解析

3)で設定した基本的な外部条件からの処分場システムの基本的変遷を明確にし、解析する。システムの閉じ込め能力に着目して、次の二つのケースについて解析する。

- ・ 基本ケース。氷河サイクルの最初の 120,000 の間の外部条件が最も新しいサイクルであるウルム氷河期のもと同様と想定する。
- ・ 地球温暖化ケース。将来の気候、すなわち外部条件が人による温室効果ガスの排出に大きく影響されると想定する。

8) シナリオの選定

処分場システムの将来の変遷における不確実性を管理するために、代表的なシナリオを選定することによって解析する変遷の数を減らす。シナリオ選定は、基本的な変遷の結果、FEP 解析、安全機能に基づいて、以下の五つのステップに分けて行われる。

- ・ 主要シナリオの明確化
- ・ 安全機能の喪失の可能性に基づいた追加シナリオの選定
- ・ 将来の人間進入に関係したシナリオ
- ・ その他の残余シナリオ
- ・ シナリオの組み合わせ

9) 選定したシナリオの解析

選定したシナリオの解析は、閉じ込め性の解析と遅延性の解析の二つに分けられる。

10) 追加解析およびその裏付け根拠

安全評価を完全なものにするために以下に示す必要な追加解析を行う。

- ・ 人間進入シナリオの選定と解析（選定の手法の説明を含む）
- ・ 最適化および利用できる最良技術の使用を実証するために必要な解析
- ・ 評価の前の段階で除外された FEP が最終的なシナリオおよびリスク解析で無視できることの検証
- ・ 100 万年以降の期間についての簡単な考察
- ・ ナチュラルアナログ

11) 結論

様々なシナリオ解析の結果を統合する。

(a) 廃棄体収納容器の早期破損

スウェーデンでは、キャニスタの早期破損は安全機能の喪失の可能性について、検討することで評価される。

キャニスタの安全機能には次の3つが設定されている。

- ・ 腐食に対するバリア
- ・ 等圧負荷に耐える
- ・ せん断力に耐える。

上記の安全機能が喪失するケースについて、キャニスタ破損に影響する因子を列挙し、キャニスタ破損が発生する可能性について検討している。また、これら3つのキャニスタの損傷は緩衝材の損傷と密接に関係しているため、緩衝材の移流、凍結、変質と組み合わせた評価が行われている。

1) 腐食によるキャニスタの破損

[初期条件]

- ・ 銅キャニスタの最小肉厚
- ・ 定置孔の不合格基準
- ・ 緩衝材及び埋め戻し材中の腐食成分

[プロセス及び岩盤条件]

- ・ 銅の腐食
- ・ 腐食成分の緩衝材中の拡散移行
- ・ 緩衝材が侵食された定置孔での移流
- ・ 地下水流れ
- ・ 地下水中の硫化物濃度
- ・ 酸素が侵入する可能性

[外部条件]

- ・ 地下水の流れを早めるような氷河の状態
- ・ 地下水組成（酸素、硫化物）を変化させるような氷河の状態

上記の因子は、緩衝材の状態により大きく変化する。緩衝材の様々な移流状態を想定した感度解析により、埋設後100万年間に腐食で破損するキャニスタの数を求めることで、キャニスタ破損が発生する可能性について検討している。

2) 等圧負荷によるキャニスタの破損

[初期条件]

- ・ キャニスタの強度
- ・ 緩衝材の密度
- ・ 処分場深さ

[プロセス及び岩盤条件]

- ・ 緩衝材の膨潤
- ・ 緩衝材の化学的変化と密度の喪失
- ・ 定置孔の収縮

[外部条件]

- ・ 氷床の厚さ

埋設後のキャニスタに作用する圧力は、氷床のある状態での地圧（約 4.5MPa）、氷床が最大になったときの地下水圧（最大 30MPa）、緩衝材の膨潤圧などであり、全体で約 46.5MPa となる。これに対して、キャニスタは 90MPa 以下では内部構造が完全につぶれることがなく、45MPa 以下では十分な余裕を持って部分的につぶれることもない。また、極端な負荷条件でも静的な負荷によるキャニスタの破損を防ぐのに十分な余裕があるとされている。

3) せん断負荷によるキャニスタの破損

[初期条件]

- ・ 内部構造物の強度と欠陥の発生（鑄込みの品質）
- ・ 銅製外筒の力学特性
- ・ 緩衝材密度
- ・ 緩衝材物性
- ・ 亀裂ネットワーク特性
- ・ 定置孔不合格の実施効率

[プロセス及び岩盤条件]

- ・ キャニスタ：銅キャニスタの変形；クリープ
- ・ キャニスタ：鑄鉄製内部構造物の変形
- ・ 緩衝材：膨潤/質量の再分布
- ・ 緩衝材の変質
- ・ 地圏：地震による亀裂の再活性化

[外部条件]

- ・ 地震

銅キャニスタは、 $2,050\text{kg/m}^3$ の Ca-ベントナイトのある状態で岩盤のせん断運動（1m/s で 5cm）があっても健全性を維持していることが実験によって確認されている。悲観的な想定をしてもこのような破損の確率は低いとしている。

(b) 緩衝材の地下水流動抑制機能の喪失、核種移行遅延機能の喪失

地下水流動抑制機能や核種移行遅延機能など緩衝材の損傷は、安全機能の喪失の可能性について検討することで評価される。

緩衝材の安全機能の喪失としては、以下が挙げられている。

- ・ 緩衝材が移流状態となる
- ・ 緩衝材が凍結する
- ・ 緩衝材が変質する

上記の安全機能が喪失するケースについて、緩衝材の機能喪失に影響する因子を列挙し、緩衝材の機能喪失が発生する可能性について検討している。

1) 移流状態の緩衝材

[初期条件]

- ・ 緩衝材密度（定置した乾燥質量）
- ・ 埋め戻し材密度（定置孔の上に置いた乾燥質量）
- ・ 使用した緩衝材の種類

[プロセス]

- ・ 初期段階におけるパイピング/侵食

- ・ 埋め戻し材への膨潤/膨張
- ・ 緩衝材の侵食/コロイドの放出

一定の密度に対して、透水係数と膨潤圧は以下のプロセスに並びにモンモリロナイトの変質より決まる。

- ・ イオン交換
- ・ 浸透現象

[外部条件]

- ・ 地下水のイオン強度を非常に高くしたり低くしたりする地圏条件
- ・ 流量を増やす地圏条件

実験的や解析的手法によって、上記のそれぞれの因子が原因で緩衝材が移流状態となる可能性について検討している。例えば、緩衝材が移流状態になるのに必要な緩衝材の流出量などの感度解析を行っている。また、基本的な想定に基づいて、移流状態となる緩衝材の数を検討している。その結果、6,000 個の定置孔のうち、0.6 個が 10 万年後に、100 万年後には 20 個が移流状態となるとしている。

影響の大きさについては、腐食によるキャニスタの損傷、せん断負荷によるキャニスタの損傷と緩衝材の移流状態を組み合わせる被ばく線量の評価を行っている。

2) 緩衝材の凍結

[初期条件]

- ・ 基盤岩の熱伝導度
- ・ 基盤岩の熱容量
- ・ 地熱流
- ・ 基盤岩の透水係数
- ・ 地下水の塩度
- ・ 基盤岩の空隙率
- ・ 使用済み燃料の発熱率とその減衰

[プロセス]

- ・ 基盤岩の熱伝導
- ・ 緩衝材中の熱伝導
- ・ 緩衝材の凍結

[外部条件]

- ・ 地表の温度を下げる周氷期の気候
- ・ 地表を覆う土壌
- ・ 地表を覆う植生
- ・ 地表を覆う雪
- ・ 地表の温度を変化させる氷河気候
- ・ 地表の温度を変化させる水中条件

上記の因子を踏まえ、緩衝材の凍結が発生する可能性について検討している。その結果、緩衝材が凍結するためには、-4℃以下になる必要があるが、厳しい条件での氷土凍結ケースでも、処分場の深さでは地下水が凍結することはないとしている。

3) 緩衝材の変質

緩衝材の変質に影響する因子として以下の項目を挙げている

- ・ 温度
- ・ pH
- ・ 温度勾配
- ・ 金属イオンとの相互作用

上記の因子を踏まえ、緩衝材の変質が発生する可能性について検討している。その結果、緩衝材の温度は 100°C を超えず、地下水の pH は 11 を超えないとしている。しかし、高温状態の緩衝材の長期性能に及ぼす影響について、不確実性が残っているため、緩衝材が変質する可能性について否定できないとしている。

(c) 母岩中の核種移行経路、移行速度の長期変遷

気候変動の影響については、基本的な氷河サイクル以上に他に処分場の安全性に大きな影響を及ぼす可能性のある気候、温暖期、氷河期、周氷期の気候についても変動ケースとして検討が行われている。

温暖化気候は最大で 12 万年続くとされ、この期間が降雨による地下水形成の最も長い期間隣、緩衝材が侵食され、移流状態になる状態の評価を大きく関係している。

周氷期の気候では、永久凍土が最も長く続き、最も深くまで凍結する期間で。緩衝材の凍結の評価と大きく関係している。

これらを踏まえ、気候変動の影響に関する検討を行っている。その結果、非常に悲観的な気候条件を想定しても、緩衝材の凍結、静的負荷によるキャニスタの破損は発生しないものとしている。また、酸素の母岩への浸透については起こる可能性がほとんどなく、起こったとしてもその影響は小さいとしている。

(4) スイス⁽²⁰⁾⁽²¹⁾

スイスでは以下の手順で安全評価を行っている。

- ① 多重バリアシステムがどのようにそれらの性能を発揮し、構成要素が放射性核種の閉じ込め、保持、遅延、分散にどのように寄与するかの明確な説明。

安全評価に関係する可能性のある FEPs の包括的データベースを開発し、国際 FEP と比較することで網羅性を確保している。

- ② 長期安全性に影響する可能性のある FEP およびセーフティケースで考慮する必要のある FEP の特定。
- ③ 取り組みの必要な不確実性の特定と感度解析および確率論的解析によるこれらの不確実性の重要性の判断
- ④ システムの予想される変遷および不確実性を考慮したシナリオおよび解析ケースの設定と解析

a) レファレンスシナリオ

システムがおおむね予想通りの変化をすると仮定したシナリオである。非常に透水性の低い均質な粘土バリアシステムを通して、地下水中に溶存した核種が放出される特徴を有する評価ケースで構成される。

b) 代替シナリオ

システムがレファレンスシナリオとは基本的に異なる挙動を示す特徴を有しており、拡散された核種の粘土バリアを通した非常に緩慢な放出が突如として大きく変化するという、発生が考えがたいものの可能性がある様なシステムの変遷を含む。

c) “what if?” ケース

処分システムの頑健性を試験するために設定される評価ケースであり、科学的な証拠により裏づけされる可能性の範囲外にある特定の仮定あるいはパラメータ値が採用される。

- ⑤ 処分システムと構成要素の定量的なモデル化を実施し、安全の指標として規制要件と比較のために放射線被曝量の定量的見積り

(a) 廃棄体収納容器の早期破損

キャニスタが 1,000 年以前に早期破損する可能性について、FEP で検討が行われ、専門家判断により、キャニスタが 1,000 年以前に早期破損する可能性は低いものとされている。また、腐食に伴った水素の発生および溶接の残留応力が炭素鋼の力学特性に及ぼす影響、並びに硫化物による炭素鋼の腐食に関する研究等が行われており、局部腐食、全面腐食の発生の条件を明確にすることを目標としている。さらに、キャニスタの破損時期を埋設後 100 年から 10 万年まで変化させた感度解析が行われており、そのときの最大被ばく線量の変化に関する評価が行われている。

なお、レファレンスシナリオでは、埋設後 10,000 年に炭素鋼のキャニスタが瞬時に破損することとして、代替シナリオでは埋設後 1,000 年で瞬時に破損することとして評価している。

また、代替案である鋼製内容器と銅製外容器からなるキャニスタでの評価では、100,000 年後にすべてのキャニスタが瞬時に破損することとしている。その変動ケースとして、キャニスタが 1,000 本に 1 本の割合で初期貫通欠陥がある場合を想定して評価がなされている。

(b) 緩衝材の地下水流動抑制機能の喪失、核種移行遅延機能の喪失

緩衝材が移流状態となる原因として緩衝材の変質が考えられており、緩衝材変質の温度依存性に関する研究、Fe とベントナイトの相互作用に関する研究およびベントナイトとセメントの相互作用に関する研究が行われている。

なお、レファレンスシナリオでは、ベントナイトが熱変質するケースの評価が行われている。熱変質により放射性核種の拡散が大きくなることとしているが、移流状態になるところまでの評価は行われていない。

代替シナリオでは揮発性核種のガス放出に伴い移行経路が形成され、それに沿って放射性核種が放出されるケースについて評価が行われている。

(c) 母岩中の核種移行経路、移行速度の長期変遷

現在の氷河期－間氷期のサイクルは、今後 100 万年間は継続するものと考えているが、気候変動の不確実性を考慮して、感度解析として、湿潤気候、乾燥気候、周氷期気候のケースについて評価が行われている。評価の結果、線量が最も高くなるのは乾燥気候であり、現在の気候の約 3 倍となる。その原因は、生物圏での希釈が大きく下がるためである。

(5) フィンランド⁽²²⁾⁽²³⁾

フィンランドでは以下の手順で安全評価を行っている。

1) FEP 解析

- ・ FEP の特定と文書化
- ・ 安全機能に寄与する主要なバリアの重要 FEP の特定
- ・ 悪影響を及ぼす可能性のある FEP の特定
- ・ 網羅性のチェック

2) シナリオの定義と策定

安全評価で使用されるシナリオは以下のように分類される。

- ✓ 気候シナリオ：処分システム（人工バリア、そのまわりの基盤岩、その上の地表環境）の内部的な変遷の枠組みを与えるもの。
- ✓ 基本シナリオ：放射性核種を放出させない処分システムのあらゆる変遷を含む。人工バリアの性能目標が達成され、母岩の目標特性が満たされている場合。
- ✓ 評価シナリオ：放射性核種の放出を伴い、人や他の生物の電離放射線による被曝に繋がる処分システムの一連の変遷を含む。これは、更に以下のように分類される。
 - ・ 処分場評価シナリオ：前述の FEP に不確実性がある結果として放射性核種の放出に至る処分場の初期状態および変遷に対して設定するもの。
 - ・ 線量評価シナリオ：人の放射能被ばくは放射性核種が放出される地表環境の場所の分布に依存する。このシナリオは、地表環境で放射性核種がどのような運命を辿るかを示すもので、定量的評価期間の間の基本シナリオの一部でもある地表環境の変遷、人や他の生物がどのように生活し、地表環境を利用するかを示したもの。
 - ・ 人間侵入シナリオ：処分場閉鎖後に生じる、人による処分場への意図的でない擾乱や処分場への侵入の評価。

3) シナリオの解析

シナリオに基づく処分システムの変遷と放射性核種の挙動をモデルとデータを用いて解析する。

(a) 廃棄体収納容器の早期破損

フィンランドでは、FEP 解析で安全機能に寄与する主要バリアに重要な FEP を特定している。キャニスタの破損に関しては、機械的強度と耐食性を重要な FEP として特定している。次に、主要バリアにとって悪影響を及ぼす可能性のある FEP を特定している。キャニスタに関しては、以下の FEP を特定している。

- ・ 早期破損につながる可能性のある貫通欠陥、非貫通欠陥およびその他の欠陥
- ・ 銅製キャニスタの腐食を生じさせる可能性のある緩衝材の損傷などにつながるプロセス
- ・ 銅製キャニスタの腐食を生じさせる可能性のある緩衝材／岩石境界面のじょう乱につながるプロセス
- ・ キャニスタ内部での気体発生
- ・ 地殻均衡荷重に起因するキャニスタの破損、岩石せん断に伴って生じるキャニスタの破損

キャニスタの早期破損については、以下の欠陥キャニスタシナリオおよび主要バリアにとって悪影響を及ぼす可能性のある FEP の発生と発生時期に不確実性があるため追加したシナリオで評価が行われている。

「欠陥キャニスタシナリオ」

DCS- I : キャニスタに初期欠陥はなく、放射性核種の放出は、処分場閉鎖後 10,000 年間は起こらない

DCS- II : キャニスタには検査で見つからなかった貫通欠陥が最初からあり、放射性核種の放出が処分場閉鎖直後から始まる。

「追加シナリオ」

AD-I : 廃棄体を設置した孔を横切る亀裂に沿って岩盤が突然移動し、それによって一つあるいは複数のキャニスタが破損する。

AD-II : 緩衝材の設置時あるいは設置後時間がたってから、外部事象によって緩衝材のじょう乱が起こり、それによってキャニスタ腐食速度が大きくなる。

DCS-IIでは、貫通欠陥の大きさ1mm、4mm、100mmと3種類に設定し、それぞれ2種類の地下水水質、地下水流量に対して核種の放出量がどのように変化するかを評価している。

AD-Iでは、破断時期を1,000年後、10,000年後、70,000年後と設定して、それぞれ2種類の地下水水質、地下水流量に対して核種の放出量がどのように変化するかを評価している。

AD-IIでは、当初あった直径1mmの欠陥が10万年後に400mmまで大きくなり、核種の輸送に対する抵抗性を失うケースで、それぞれ2種類の地下水水質、地下水流量に対して核種の放出量がどのように変化するかを評価している。

欠陥の大きさ、キャニスタが破損する時期の設定根拠は、これまでの知見から以下のように設定されている。

「欠陥の大きさ」

1mm：非破壊検査で見逃される可能性のある欠陥の最大値

4mm：非破壊検査で信頼をもって検出でき、品質検査を通過できると思われぬ大きさ。
現実的にはあり得ないが、欠陥の大きさの影響を調べるために設定したもの。

100mm：上記と同じ。また、拡散を唯一の輸送メカニズムと考える場合には輸送抵抗が無視できる大きさ。

「キャニスタ破損の時期」

1,000年：処分場が再飽和する時期

10,000年：現在の気候が継続する期間

70,000年：次の氷河期が来る時期

(b) 緩衝材の地下水流動抑制機能の喪失、核種移行遅延機能の喪失

フィンランドでは、FEP解析で安全機能に寄与する主要バリアに重要なFEPを特定している。緩衝材に関しては、低透水性と化学的緩衝性を重要なFEPとして特定している。次に、主要バリアにとって悪影響を及ぼす可能性のあるFEPを特定している。緩衝材に関しては、以下のFEPを特定している。

- ・ 銅製キャニスタの腐食を生じさせる可能性のある緩衝材の損傷などにつながるプロセス
- ・ 銅製キャニスタの腐食を生じさせる可能性のある緩衝材／岩石境界面のじょう乱につながるプロセス
- ・ 緩衝材の凍結
- ・ 氷河融氷水にさらされることで生じる緩衝材の喪失

キャニスタの破損は緩衝材の移流状態と密接に関係しており、前述のキャニスタの破損に関係したシナリオで、同時に緩衝材の性能低下についての評価も行っている。

緩衝材の安全機能が発揮されるには、緩衝材密度が重要である。緩衝材密度の目標が満たされない原因として定置不良が考えられており、緩衝材定置の実証試験がONKALOで2010年から行われている。

(c) 母岩中の核種移行経路、移行速度の長期変遷

気候変動として検討されているのは「現在の気候」と「温暖化気候」である。しかし、線量評価の基本シナリオは「現在の気候」が基本となっており、「温暖化気候」についての評価はまだ行われていない。

また、岩石せん断／地震シナリオ（AD-I）で大規模な地震によって処分坑道を横切るせん断運動が生じ、キャニスタが破損し、母岩中に放射性核種の移行経路が形成されることを想定している。破損時期を1000年、10,000年後、70,000年後と設定して評価を行っている。なお、大規模な地震は、将来の退氷期が起きる時点で発生する可能性が高いものとしている。

(5) フランス⁽²⁴⁾

フランスにおける処分場閉鎖後の安全評価は以下の手順で行われている。

1) 安全機能の明確化

処分場の設計は、処分場に期待される安全機能を明確化し、その安全機能を達成するための対応策を具体化することによって行われる。ここで、処分場に期待される主要な長期安全機能として以下が挙げられている。

- ・ 地表の現象や人間進入からの廃棄物の隔離
- ・ 処分場記録の保存
- ・ 有害な物質（放射性核種、有害化学物質）の放出からの人と環境の防護

有害な物質（放射性核種、有害化学物質）の放出から人と環境の防護ことを目的とした安全機能として、更に以下の様に細分されている。

- ・ 水の循環の制限
- ・ 放射性核種の放出の制限と処分場内でのそれらの不動化
- ・ 放射性核種の移行の遅延と低減

また、これらの機能を達成するための処分場システムの仕様を明確化する。

2) データの入手

廃棄物パッケージ、処分場構造物、地質媒体とその環境の変遷に関するデータを入手する。

3) 基本的変遷の明確化と記述

処分場システムが時間と共にどのように変遷するかを記述する。その際、処分場は、いくつかの主要な現象が構成部材の変遷を支配する空間、時間に対応した状態に細分する。そして、熱、水理、機械、化学、放射線に関する現象を記述する。これに基づいて基本シナリオを設定し、そのシナリオに基づいた処分場の性能評価を行う。

4) 不確実性解析

不確実性の特定とその影響を評価し、基本変遷の範囲を明確化するとともに、基本変遷に含まれていない状態を明確にする。このような基本的な変遷から外れた状況を現象論的に解析し、その変動変遷状態を概念化して、変動シナリオを設定し、それによって処分場システムの頑健性を示す。

(a) 廃棄体収納容器の早期破損

オーバーパックの早期破損については、標準シナリオおよび変動シナリオ「廃棄体パッケージ損傷シナリオ」で取り扱っている。

1) 標準シナリオ

C型廃棄物セルの粘土プラグについて欠陥プラグがある場合について、また、廃棄体パッケージについては、3つのC型廃棄体パッケージに欠陥がある場合について評価が行われている。

2) 変動シナリオ「廃棄体パッケージ損傷シナリオ」

品質管理の失敗により1ヶ月間、溶接欠陥が発生したものと仮定し、12～50の欠陥パッケージ（ガラス固化体の種類によって異なる）が生じたケース、すべての廃棄体パッケージが最初から損傷している極端なケースについて評価が行われている。

「欠陥パッケージの数」

C型廃棄体パッケージで溶接欠陥が発生する確率は、オーバーパックの製造プロセスで導入される可能性のある検査法や、パッケージのデザインが比較的単純なことから、処分場に定置した後、直ぐにシール性が損なわれるような欠陥が生じる可能性は低いと考えられる。産業界での一般的な経験では、この種の欠陥が出る確率は1万～10万に一回程度である。実際の廃棄物パッケージの数は5万程度と考えられ、これに対して同じ割合とすると欠陥が出るのは数パッケージと考えられる。

「オーバーパックの寿命」

地層媒体中の化学条件の局所的な不均質性（硫化物の局所的な存在など）を想定した保守的なモデルで、オーバーパックの耐食性について評価が行われている。その結果、欠陥の無いC型廃棄体パッケージの寿命は、ガラス固化体を収納するパッケージで4,000年、使用済燃料を収納するパッケージで10,000年という結果が得られ、これをシナリオのパラメータとして用いることとしている。

なお、欠陥のあるパッケージについては埋設直後に破損する設定としている。

(b) 緩衝材の地下水流動抑制機能の喪失、核種移行遅延機能の喪失

フランスの処分概念では、様々な処分場の構成要素（立坑、坑道、処分場パネルの隔離）やセルプラグでシール材が使用されている。これらのシール材が何らかの原因で損傷してそれらの機能を発揮できなくなった場合を変動シナリオ「シール損傷シナリオ」として評価している。このシナリオでは以下の状況が想定されている。

- ・ 岩盤と膨潤粘土との接触が不十分、或いはEDZが広がりすぎて母岩に一部、短絡経路が出来る。その結果、放射性核種が坑道や立て坑を選択的に通って地表へ、拡散ではなく移流で移行する。
- ・ セル内の化学状態がその安全機能を満たすことが出来る範囲を以上に変化して、放射性核種の放出の制限・処分場内への閉じ込めるという機能を果たせなくなる
- ・ シールの透水性が全般に低下する（ほとんどあり得ないが）

(c) 母岩中の核種移行経路、移行速度の長期変遷

気候変動に関しては、外部事象に係わる不確実性の一つとして検討されている。氷河期と間氷期は約10万年の周期で繰り返されていることが過去40万年についての研究から示されている。

氷河期で大きく変わるのは永久凍土の出現である。これにより、地下の土壌の力学特性が変化し、地下水が地表に循環するようになり、そのために処分場から人の生活環境への放射性核種の移行が生じることが考えられる。

極端な氷河が上部の帯水層に及ぼす可能性のある影響として次の三つが考えられる。

- ・ 岩盤や帯水層隔離シールへの力学的影響（たとえば、水の凍結による亀裂などの）。この事象はベントナイトなどの粘土では可逆性があり、ほとんど影響がないが、石灰岩層には局所的な損傷を起こす可能性がある。
- ・ 水の状態と塩度（凍結で押し出された塩）の変化と関係した化学的影響の可能性。これらは多孔質レベルに到達する可能性がある。
- ・ 上部の周辺岩盤での水の循環が地表の凍結によって部分的に妨げられ、水の涵養を妨げる。

氷河期には、これらはいずれも土壌中での水の循環を遅くするものであり、放射性核種の生物圏への移行を制限する上で好都合である。解凍が起こったときには、溜まった汚染物質が一度に出てくるという恐れもあるが、その効果は顕著ではないことが解析で示されている。

間氷期には、基本ケースで考えられているより温暖で、期間も長いが、これらが構造や母岩に及ぼす影響は小さいとしている。

6.2.3 まとめ

バリア材長期変遷事象に関する安全評価シナリオ設定手法の整理では、過年度までに HLW および TRU 廃棄物を対象とした FEP データベースとして、処分システム内における、熱、水理、応力、化学、放射線、核種移行/物質移動の現象や特性などを FEP としてリスト化し、それら起因事象とそれらを受けて発生する派生事象の関係を可能な限り網羅的に、「安全性への影響の可能性」として整理している。さらに、我が国や諸外国の研究機関による地層処分に関する実験的・解析的知見の拡充に伴い、FEP データベースの更新を行っている。加えて、「安全機能」と「安全性への影響の可能性」の関係整理を行い、その情報を FEP データベースに収録した。これらにより、処分場閉鎖後の安全機能に影響を与える可能性のある事象の連鎖を定性的に示すことができた。しかし、その事象の連鎖は多岐にわたり、かつ、非常に発生の可能性が小さい事象の連鎖も含まれており、その連鎖を全て安全評価シナリオに取り込み評価することは現実的ではない。したがって、安全機能に影響を及ぼす可能性のある事象の連鎖が発生した場合の影響の大小やその事象の連鎖の発生確率をできるだけ定量的に確認する手法を確立することが重要であると考えられる。そのためには、安全評価上重要となる長期変遷事象（オーバーパットの早期破損、緩衝材の地下水流動抑制機能の喪失、緩衝材の核種移行遅延機能の変化）に対する具体的なリスク論的取り扱いについての方法論について、諸外国の安全評価事例を収集・分析することが必要であると考えた。

そこで平成 24 年度は、諸外国の実施主体の安全評価レポートを対象として、各国のシナリオ設定手法や各長期変遷事象の評価手法についての情報を収集・分析した。調査対象国は、米国、英国、スウェーデン、スイス、フィンランド、フランスとした。以下に長期変遷事象のうち、オーバーパットの早期破損および緩衝材の地下水流動抑制機能の喪失における、諸外国の安全評価事例について説明する。

(1) オーバーパットの早期破損

米国のユッカマウンテンでの早期破損とは、廃棄体パッケージ製造時および取扱時の欠陥により、欠陥がないものについてメカニスティックな劣化モデルで予測されるより早い時期に廃

棄物パッケージやドリップシールドに貫通孔ができることと定義されている。網羅的に整備されている FEP の中から早期破損に係る FEP について、それぞれ早期破損させるプロセスを整理し、既往知見を用いて、発生確率または影響の程度を定量的に算出し、FEP のスクリーニングを行う。その判断基準には低確率基準と低影響基準が用いられている。その結果、微生物腐食、初期欠陥、応力腐食割れ、局部腐食などが性能評価に含める事象として選定されている。これら事象を含めたものを早期破損（廃棄体パッケージやドリップシールドの早期破損）シナリオとして分類している。

英国での安全評価では、廃棄体容器の性能が全体性能にどのように影響するかについて感度解析を行って評価している。感度解析は、容器の閉じ込め期間を 0 年、1 万年、50 万年として、リスク（年間実効線量にリスク係数 0.06/Sv をかけた値）の最大値と最大となる閉鎖後の経過時間の比較が行われている。

スウェーデンの SR-site では、キャニスタの安全機能が喪失するケースとして、腐食による破損、等圧負荷による破損、せん断による破損を取り上げ、それぞれの破損に影響する因子を列挙しキャニスタ破損が発生する可能性について検討している。例えば、等圧負荷による破損については、埋設後キャニスタに作用する圧力を算出し、キャニスタの耐圧性能と比較することで破損する可能性を検討している。これら 3 つのキャニスタの安全機能が喪失するケースと緩衝材の安全機能が低下するケースを組み合わせ得られるシナリオの解析結果を示し、発生確率が低いシナリオ（リスク解析に含めることが必要なシナリオ）と残余シナリオ（仮想的なケースとして評価されるもの）に区分している。

スイスでは、キャニスタが 1,000 年以前に早期破損する可能性について、FEP で検討が行われている。専門家判断によりその可能性は低いものとされている。レファレンスシナリオでは埋設後 10,000 年にキャニスタが瞬時に破損することとして、代替シナリオでは埋設後 1,000 年で瞬時に破損するとして評価している。

フィンランドでは安全機能の観点からキャニスタにとって悪影響を及ぼす可能性のある FEP を複数特定している。それら FEP を欠陥キャニスタシナリオと追加シナリオに区分して評価が行われている。欠陥キャニスタシナリオは、貫通欠陥が閉鎖前から存在していることを想定したケースであり、貫通欠陥の大きさを 1mm、4mm、100mm と 3 種類に設定し評価している。追加シナリオはキャニスタが破損する時期に不確実性があることを想定したケースであり、破損時期を 1,000 年後、10,000 年後、70,000 年後と設定して評価している。

オーバーパックの早期破損については、標準シナリオおよび変動シナリオ「廃棄体パッケージ損傷シナリオ」で取り扱っている。産業界の一般的な経験から溶接欠陥が発生する確率を求め、標準シナリオでは、3 つの廃棄体パッケージに欠陥があるものとして、評価が行われている。オーバーパックの寿命に関しては、地層媒体中の化学条件の局所的な不均質性（硫化物の局所的な存在など）を想定した保守的なモデルで、オーバーパックの耐食性について評価が行われ、ガラス固化体を収納するパッケージで 4,000 年、使用済燃料を収納するパッケージで 10,000 年という結果が得られ、これをシナリオのパラメータとして用いることとしている。なお、欠陥のあるパッケージについては埋設直後に破損する設定としている。

（2）緩衝材の地下水流動抑制機能の喪失

英国の安全評価では、緩衝材の性能が全体性能にどのように影響するかについて感度解析を行って評価している。感度解析の中で、地層処分場から地表への地下水の移行時間のパラメータを 1 万年、10 万年、100 万年として変化させることで、リスクの最大値と最大となる閉鎖後の経過時間の比較が行われている。

スウェーデンの SR-site では、緩衝材の安全機能が低下するケースとして、移流状態の緩衝材、緩衝材の変質、緩衝材の凍結を取り上げ、それぞれのケースに影響する因子を列挙し、緩衝材の安全機能が低下する可能性について検討している。例えば、緩衝材が移流状態になるのに必要な緩衝材の流出量などの感度解析を行うことや、緩衝材の変質に寄与する緩衝材の温度および間隙水の pH などを解析により求めることにより、それぞれの安全機能が低下するケースが発生する可能性について検討している。さらに、キャニスタの安全機能が喪失するケースと緩衝材の安全機能が低下するケースを組み合わせ得られるシナリオの解析結果を示し、発生確率が低いシナリオ（リスク解析に含めることが必要なシナリオ）と残余シナリオ（仮想的なケースとして評価されるもの）に区分している。

スイスでは、レファレンスシナリオの一つとしてベントナイトの内側半分が使用済み燃料からの熱のため変質し、放射性核種の拡散が大きくなることを想定したケースの評価が行われている。しかし、このケースは移流になるところまでは想定していない。なお、緩衝材が移流状態になる原因として緩衝材の変質が考えられており、緩衝材変質の温度依存性に関する研究、Fe とベントナイトの相互作用に関する研究およびベントナイトとセメントの相互作用に関する研究が行われている。

フィンランドでは、キャニスタの破損は緩衝材の移流状態と密接に関係しているため、緩衝材の拡散係数の変動および緩衝材の移流状態が形成し、地下水中の硫化物とキャニスタの反応による腐食に及ぼす影響が検討されている。その結果、キャニスタの寿命は、緩衝材が移流状態になっている場合でしか、10 万年以下にならないことが指摘されている。前述のキャニスタの破損に関係したシナリオで、同時に緩衝材の性能低下についての評価も行っている。

フランスでは、ベントナイトが用いられるシール材の損傷に関しては、シール材が何らかの原因で損傷してそれらの機能を発揮できなくなった場合を変動シナリオ「シール損傷シナリオ」として評価している。このシナリオでは、岩盤とシール材の密着が不十分であり放射性核種がこの部分を選択的に通って移流により移行するケース、セル内の化学状態が変化し放射性核種の放出が発生するケース、シールの透水性が全体的に低下するケースを想定している。

（3）緩衝材の核種移行遅延機能の変化

スウェーデンの SR-site では、緩衝材の安全機能が低下するケースとして、移流状態の緩衝材、緩衝材の変質、緩衝材の凍結を取り上げている。これら、緩衝材の安全機能が低下するケースのうち、緩衝材が変質することで放射性核種の緩衝材への収着性が変化し、核種移行遅延機能に影響するものと考えられる。緩衝材の変質に影響する因子を列挙する。その要因について、判断指標（pH、温度など）と処分環境で想定される極端な条件と比較することで、安全機能が喪失する可能性を判断している。

スイスではレファレンスシナリオの一つとしてベントナイトの内側半分が使用済み燃料からの熱のため変質し、放射性核種の拡散が大きくなることを想定したケースの評価が行われている。しかし、ベントナイトの熱変質により、収着特性は熱による影響を受けないと仮定している。

フィンランドでは、主要バリアにとって悪影響を及ぼす可能性のある FEP の一つとして、緩衝材／岩石境界面のじょう乱につながるプロセスを挙げている。このプロセスは、掘削影響領域が形成し、掘削の緩みまたは崩壊熱による岩石の剥離現象が生じ、さらに、緩衝材とセメント浸出液との相互作用が生じることを示している。緩衝材／岩石境界面にじょう乱が生じた場合と生じていない場合の初期欠陥を有したキャニスタからの放射性核種の放出率を評価した結果、緩衝材／岩石境界面のじょう乱によるキャニスタの腐食に及ぼす影響は小さいとしている。

フランスでは、ベントナイトが用いられるシーリング材の核種の収着性については、レファレンスシナリオで、シーリング材の温度上昇が 20°Cを上回る場合には 10Be、41Ca、135Cs の分配係数に 0.1 をかけ、分配係数の温度依存性を考慮した線量評価を行っている。

(4) 母岩中の核種移行経路の長期変遷

米国のユッカマウンテンの処分概念では、気候変動は降水量を増加させ、その結果水の移行速度を上昇させることで上部天然バリアの有効性を低減し得る潜在的な有害なプロセスであるとしている。ユッカマウンテンで予想される 3つの気候（現在の気候、モンスーン気候および間氷期の気候）について浸透シナリオを設定して評価している。また、処分場の下部不飽和層では、気候変動による地下水面の上昇が予想され、その場合の核種移行への影響が評価されている。

英国では、母岩を通過するダルシー速度、地層処分場から地表への地下水の移行時間などのパラメータを変化させた感度解析により、母岩中の移行速度の変化による放射線リスクを評価している。

スウェーデンの SR-site では、母岩中の放射性核種移行に影響を与える要因について検討した結果、氷期サイクルにおける氷河荷重の変化により発生する地震に伴った母岩のせん断、坑道建設中に発生した掘削影響領域、処分孔壁面の熱負荷による岩盤の剥離現象を挙げている。これら母岩の応力状態が変化することによる亀裂の進展に関してモデル化が行われ、亀裂の進展に伴う透水係数の変化を推定するのに用いられた。その結果、掘削影響領域を除けば、亀裂の透水係数はごくわずかな上昇しか引き起こさないことが分かった。

スイスでは、現在の氷河期-間氷期のサイクルは、今後 100 万年間は継続するものと考えている。10 回の周期的な氷河作用がおこると仮定する。氷河期-間氷期のサイクルの繰り返しにより、天然バリアの周期的な圧縮/排水と弾性反発が起こり、天然バリア内のダルシー流速に変化が生じる。しかし、天然バリアには新規の亀裂（破碎）は生じないものと仮定する。このような仮定のもとにダルシー流速を設定し、放射線量の評価を行う。

フィンランドでは、岩石せん断/地震シナリオ（AD- I）で大規模な地震によって処分坑道を横切るせん断運動が生じ、キャニスタが破損し、母岩中に放射性核種の移行経路が形成されることを想定している。破損時期を 1,000 年、10,000 年後、70,000 年後と設定して、欠陥が生じたキャニスタ 1 本あたりの放射性核種の放出量についての評価を行っている。なお、大規模地震は将来の退氷期が起きる時点で発生する可能性が高いことを踏まえ、キャニスタの破損時期を設定している。

フランスでは、レファレンスシナリオでは保守的に放射性ヨウ素の分配係数をゼロとして放射線量の評価を行っている。しかし、放射性ヨウ素の母岩への収着の効果を検討するために分配係数を変化させた感度解析を行っている。また、気候変動を要因とした核種移行経路の形成として、永久凍土を挙げている。永久凍土によって地下の力学特性が変化し、地下水の循環と地上への湧出が促進されることにより、処分場からの放射性核種の移行が促進されることを想定している。しかし、放射性核種の高い濃度の地下水が地上に上昇することを想定した解析により、最も放射性核種の放出が大きいケースでもその増加率は 30%にとどまることが示されており、その影響は小さいとされる。

(5) まとめ

以上の調査結果により、長期変遷事象について諸外国の安全評価書における方法論の要点を以下に述べる。

「オーバーパックの早期破損」

- ・ 早期破損の発生確率または影響の程度を定量的に算出し、基準と比較することで性能評価に含める事象と含めない事象に区分する方法（米国）
- ・ 廃棄体容器が破損する時期を変化させた感度解析により、それぞれの影響の大きさについて比較する方法（英国、スイス、フィンランド）
- ・ 廃棄体容器の安全機能が喪失するケースとして腐食、等圧負荷、せん断を取り上げ、各ケースによる廃棄体容器の破損に影響する因子を列挙する。等圧負荷およびせん断については、各ケースの判断指標と、処分環境で想定される極端な条件を比較することで、安全機能が喪失する可能性を判断する方法。一方、腐食については緩衝材が移流状態になることが前提条件であるため、様々な移流状態での廃棄体容器の寿命評価を行い腐食による廃棄体容器の早期破損（主要シナリオでは最初の10万年間は廃棄体容器損傷の発生はないと想定している）の発生確率を求める方法（スウェーデン）
- ・ 廃棄体容器が製造段階で欠陥が発生する確率、欠陥のない廃棄体容器の寿命について定量的に評価し、その結果を用いて線量の評価を行う方法（フランス）

「緩衝材の地下水流動抑制機能の喪失」

- ・ 緩衝材が移流状態となった場合を想定した感度解析により、それぞれの影響の大きさについて比較する方法（英国、フィンランド、フランス）
- ・ 緩衝材の安全機能が喪失するケースとして、緩衝材の移流、凍結、変質を取り上げ、各ケースによる緩衝材の安全機能喪失に影響する因子を列挙する。変質、凍結については、各ケースの判断指標（pH、温度など）と処分環境で想定される極端な条件を比較することで、安全機能が喪失する可能性を判断する方法。一方、移流については、移流状態となる緩衝材の流出量を既往知見から求め、緩衝材の流出量に対する感度解析から緩衝材が移流状態となる定置孔の発生確率を求める方法（スウェーデン）

「緩衝材の核種移行遅延機能の変化」

- ・ 感度解析によりパラメータを変化させることで、それぞれの影響の大きさについて比較する方法（フィンランド、フランス）
- ・ 緩衝材が変質することで放射性核種の緩衝材への収着性が変化し、核種移行遅延機能に影響することを想定している。緩衝材の変質に影響する因子を列挙し、その要因について、判断指標（pH、温度など）と処分環境で想定される極端な条件と比較することで、安全機能が喪失する可能性を判断する方法（スウェーデン）

「母岩中の核種移行経路の長期変遷」

- ・ 母岩中の核種移行経路形成に係わる有害なプロセスを選定し、それが顕在化した場合を想定した影響評価を行う方法（米国）
- ・ 核種移行経路や移行速度に係わるパラメータを変化させることで、それぞれの影響の大きさについて比較する方法（英国、スイス、フィンランド、フランス）
- ・ 母岩中の放射性核種移行に影響を与える要因を列挙する。その結果、母岩の応力状態が変化することによる亀裂の進展が核種移行に影響する要因として挙げられた。この母岩の亀裂の進展を想定した場合のモデル化が行われ、解析により亀裂の進展に伴う透水係数の変化を推定する方法（スウェーデン）

本事業において、オーバーパックの早期破損については、腐食寿命の評価モデルにより破損時期の頻度を算出する手法の開発を進めており、米国、フランスの方法論に近いものである。緩衝材の地下水流動抑制機能の喪失に対しては、本事業では緩衝材の変質現象をモデル化し、

機能低下を定量的に取り扱った評価手法を整備しているが、各国とも現象論の評価に基づいた高度化された手法ではなかった。一方、オーバーパックの早期破損や緩衝材の地下水流動抑制機能の喪失に至る要因を包括的に検討する場合には、スウェーデンが行っている「安全機能喪失に至る要因を分析し、安全機能の喪失につながる判断指標を用いて、シナリオの区分を行い、加えて安全機能が喪失する発生数量の解析結果を踏まえた線量評価」の方法の検討も今後必要と考えられる。

第6章参考文献

- (1) 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会, 放射性廃棄物処理・処分に係る規制支援研究(平成22年度～平成26年度)について, 2009.
- (2) 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会, 「放射性廃棄物処理・処分に係る規制支援研究計画(平成22年度～平成26年度)」について, 2009.
- (3) 原子力安全委員会, 放射性廃棄物の安全規制における共通的な重要事項について, 2004.
- (4) 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—地層処分研究開発第2次取りまとめ—総論レポート, JNC TN1400 99-020, 1999.
- (5) 核燃料サイクル開発機構・電気事業連合会, TRU 廃棄物処分技術検討書—第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ—, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, 2005.
- (6) 廃棄物安全小委員会, 放射性廃棄物の地層処分にかかわる安全規制制度のあり方について, 2006.
- (7) 原子力発電環境整備機構, 地層処分事業の安全確保(2010年度版)—確かな技術による安全な地層処分の実現のために—, NUMO-TR-11-01, 2011.
- (8) 日本原子力研究開発機構, 平成21年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査 報告書, 2010.
- (9) 日本原子力研究開発機構, 平成21年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査 報告書[添付資料編], 2010.
- (10) 日本原子力研究開発機構, 平成22年度 地層処分の安全審査に向けた評価手法等の整備報告書, 2011.
- (11) 日本原子力研究開発機構, 平成22年度 地層処分の安全審査に向けた評価手法等の整備報告書[添付資料編], 2011.
- (12) 日本原子力研究開発機構, 平成23年度 地層処分の安全審査に向けた評価手法等の整備報告書, 2012.
- (13) 日本原子力研究開発機構, 平成23年度 地層処分の安全審査に向けた評価手法等の整備報告書[添付資料編], 2012.
- (14) DOE, Yucca Mountain Repository License Application - SAFETY ANALYSIS REPORT -, DOE/RW-0573, Rev.0, 2008.
- (15) NDA, Geological Disposal- Generic Post-closure Safety Assessment, NDA/RWMD/021, 2010.
- (16) NDA, Geological Disposal- Generic Environmental Safety Case – Main report, NDA/RWMD/021, 2010.
- (17) NDA, Geological Disposal- Package- evolution- status- report, NDA/RWMD/031, 2010.
- (18) NDA, Geological Disposal- Research and Development Programme Overview , NDA/RWMD/073, 2011.
- (19) SKB, Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project, TR-11-01, 2011.
- (20) NAGRA, Project Opalinus Clay: Safety Report. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste, NTB 02-05, 2002.
- (21) NAGRA, The Nagra Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the Disposal of Radioactive Waste in Switzerland, NTB 09-06, 2009.
- (22) POSIVA, Interim Summary Report of the Safety Case 2009. POSIVA 2010-02, 2010.
- (23) POSIVA, Radionuclides Release and Transport – RNT-2008. POSIVA 2008-06, 2008.

(24) ANDRA, Dossier 2005 Argille, Safety evaluation of a geological repository, 2005.

7. 核種移行データの取得とパラメータ設定手法の整備

7.1 背景および目的

地層処分の安全評価では、放射性物質を長期間にわたって閉じ込める機能を評価するために、人工バリアや天然バリア中での収着分配係数（Kd）や拡散係数などの物質移行に関するパラメータを定量的に示す必要がある。特に数千年以上の長期間を対象とした場合には、バリア材の変質や地下水組成の変化に伴い核種の挙動が変動する可能性があるため、処分環境の変化、つまり、地質媒体や地下水組成の時間的・空間的な変遷を考慮してパラメータの変動を評価することが重要である。このようなパラメータの変動要因・変動幅を明らかにするために、これまで核種移行データベース（DB）の拡充とパラメータ変動要因の検討を行い、不足するデータについては実験的に取得してきた。特に、収着データにおいては、既往の高レベル放射性廃棄物地層処分の安全評価で線量を支配する Se、Cs、および Th 等のアクチニド元素に着目し、地下水環境の変動として塩濃度、pH および炭酸濃度、地質媒体の変動として岩石の鉱物組成をパラメータとした実験的研究を実施してきた。

平成 24 年度は、平成 23 年度に引き続き DB を拡充し、パラメータ変動要因の検討を実施する。また、核種移行データを取得し、DB への拡充を図る。特に平成 24 年度は、花崗岩中で支配的に Se を収着する鉱物である黒雲母⁽¹⁾を対象とした Se のバッチ式収着試験を実施し、塩水影響下での Kd の変動幅を取得するとともに、モデルにより収着現象の解明を行う。

さらに、核燃料物質であるアクチニドの Pu と岩石を用い、バッチ式収着試験を実施する。処分場サイトの地下水環境下では、一般的に酸化還元電位（Eh）が低く、アクチニドは+IV 価の酸化数で安定であると考えられる。特に+IV 価のアクチニドについては、溶解度が低いことから収着データを取得するのが困難である。そこで²³⁸Pu の高い比放射能を利用して、誤差の少ない+IV 価の収着分配係数（Kd）を取得してモデル化し、他の Th、U、Np といったアクチニドにも適用することを目標としている。

Pu を安定的に溶解して収着試験を実施するためには、岩石への吸着量と測定装置の検出限界を考慮しつつ、初期濃度を小さくするか、または、Pu が安定的な溶存化学種でより多く溶けるような溶液条件で試験を実施するといった方法が必要である。なお Pu の化学種は、処分場の還元的な環境下における地下水中では+IV 価の Pu(OH)₄(s) が安定な固相であると考えられる。この Pu(OH)₄(s) の溶解度が大きく、安定的に溶存する条件として、処分場サイトの地下水環境下で存在する重炭酸イオンに着目し、収着試験を計画する。以下の反応式により、Pu がより安定的に溶存できると考えられる



また、平成 24 年度は、平成 23 年度に整理した Kd 設定の考え方にに基づき、地層処分の安全評価において線量評価に大きく影響を与える Cs および Se を対象に、処分環境における Kd 設定を試みる。

7.2 データベースの拡充

7.2.1 文献の検索方法および検索結果

平成 23 年度は、HLW および TRU 廃棄物に含まれる主要元素（表 7.2-1）の、人工バリア（ベントナイト系緩衝材、セメント系材料）および岩石（鉱物）に対する Kd データが記載された 2006 ～ 2011 年の発行公開文献のうち、これまでに DB に取り込んでいないデータを収集し、付帯情報（測定条件など）とともにその実測値を入力した。平成 24 年度は、同様の条件で 2000

～ 2005 年および 2011 ～ 2012 年の発行公開文献を対象に調査する。なお、Kd の数値が文献中に示されていないが、グラフ等により図化して示されており、文献の著者が調査・研究の結論として示したデータの場合には、その数値を読み取り、データとして取り扱うこととする。

表 7.2-1 パラメータ調査対象元素

No.	対象元素	HLW	TRU	No.	対象元素	HLW	TRU
1	C		○	14	Cs	○	○
2	Cl		○	15	Sm	○	○
3	Co		○	16	Pb	○	○
4	Ni		○	17	Po	○	○
5	Se	○	○	18	Ra	○	○
6	Sr		○	19	Ac	○	○
7	Zr	○	○	20	Th	○	○
8	Nb	○	○	21	Pa	○	○
9	Mo		○	22	U	○	○
10	Tc	○	○	23	Np	○	○
11	Pd	○	○	24	Pu	○	○
12	Sn	○	○	25	Am	○	○
13	I		○	26	Cm	○	○

検索にあたっては、国際原子力情報システム (INIS) および日本原子力研究開発機構の研究開発成果検索・閲覧システム (JOPSS) を用いた。該当文献の中からオリジナルデータベースに未登録且つ、アブストラクト情報から調査すべきと考えられる文献を選定し、調査対象文献とする。各文献検索システムでの検索対象は、Kd に関するキーワードおよび固相に関するキーワードの両方を記載している文献を検索する。INIS のサーチエンジンが、平成 23 年 9 月 1 日に Google ベースに改良され、従来よりも多くの検索結果が得られるようになったことから、過年度の再検索として平成 23 年度は 2006 ～ 2011 年を対象に実施し、平成 24 年度は、2000 ～ 2005 年と 2011 ～ 2012 年を検索対象とした。

検索条件を表 7.2-2 (INIS) および表 7.2-3 (JOPSS) に、検索結果を表 7.2-4 に示す。表 7.2-2 については、キーワード①、②、③および④を、表 7.2-3 については、キーワード①と②を AND 結合とした。

表 7.2-2 文献検索条件 (INIS)

対象	ベントナイト系緩衝材	岩石 (鉱物)	セメント系材料
検索年	2000 ~ 2005 年、2011 ~ 2012 年		
キーワード①	"distribution coefficient"		
キーワード②	sorption or desorption or adsorption or Kd		
キーワード③	bentonite or kunigel or kunipia or MX-80 ^{※1} or MX80 ^{※1} or montmorillonite or smectite or buffer	rock or sedimentary or volcanic or crystal or tuff or ashes or clay or basalt or sand or granite or granodiorite or mudstone or mylonite or andesite or plagioclase or lime or limestone or chert or dolomite or lignite or marl or silica or quartz	cement or concrete or cementitious or mortar
キーワード④	English or Japanese		

表 7.2-3 文献検索条件 (JOPSS)

対象	ベントナイト系緩衝材	岩石	セメント系材料
検索年	2000 ~ 2005 年、2011 ~ 2012 年		
キーワード①	収着 or 分配係数		
キーワード②	ベントナイト	岩	セメント

表 7.2-4 文献検索結果

検索システム/対象	ベントナイト系緩衝材	岩石 (鉱物)	セメント系材料
INIS (2000 ~ 2005)	150 件	230 件	128 件
INIS (2011 ~ 2012)	8 件	18 件	7 件
JOPSS (2000 ~ 2005)	39 件	43 件	13 件
JOPSS (2011 ~ 2012)	4 件	8 件	1 件

7.2.2 調査対象文献および文献調査結果

前項で検索された文献のうち、既に調査された文献、タイトルやアブストラクト情報から調査対象から除くことが可能な文献、会議録などを調査対象から除いた。さらに、原典を参照した結果、実測値として登録されていないものを除き、現時点でDBに登録されていない以下に示す16件を調査対象とした。

表 7.2-5 にある文献から取得した Kd (実測値) および付帯情報 (測定条件など) を追加登録した。Kd の数値がグラフ等により図示されている場合は、数値を読み取ったデジタル値を入力した。固相別の登録データ数を調査した結果を表 7.2-6 に示す。

表 7.2-5 データベースに収録する文献

	タイトル	レポート No. 等	著者	発行年
1	Iodide Sorption to Subsurface Sediments and Illitic Minerals	Environmental Science & Technology	Daniel I. Kaplan, R. Jeff Serne, Kent E. Parker, Igor V. Kutnyakov	2000
2	Radionuclide Adsorption Distribution Coefficients Measured in Hanford Sediments for the Low Level Waste Performance Assessment Project	PNNL-11485, UC-721	D. I. Kaplan, J. Conca, R. J. Serne, T. W. Wietsma, A. T. Owen, T. L. Gervais	1996
3	FEBOX project full-scale engineered barriers experiment for a deep geological repository for high level radioactive waste in crystalline host rock, FINAL REPORT	ENRESA, publicación técnica 1/2000	J.L. Fuentes-Cantillana, J.L. García-Siñeriz, J.J. Franco, J. Obis, A. Pérez, F. Jullien, J. Alberdi, J. M. Barcala, R. Campos, J. Cuevas, A. M. Fernández, E. Gamero, M. García, P. Gómez, A. Hernández, A. Illera, P.L. Martín, A. M. Melón, T. Missana, F. Ortuna, J. Pardillo, P. Rvas, M.J. Turrero, M.V. Villar, M. Mingarro, M. Pelayo, E. Caballero, J. Cuadros, F. Huertas, F.J. Huertas, C. Jiménez de Cisneros, J. Linares, B. Bazargan-Sabet, M. Ghoreychi, N. Jockwer, K. Wiczorek, W. Kickmaier, P. Marschall, M.A. Martínez, P. Carretero, Z. Dai, J. Delgado, R. Juncosa, J. Malinero, A. Ruiz, J. Samper, A. Vázquez E. Alonso, J. Carrera, A. Gens, A.J. García-Malina, J. Guimera, L. de N. Guimaraes, A.Lloret, L. Martínez, S. Olivella, X. Pintado, M. Sánchez, F.J. Elorzo, J.L. Borregón, I. Canamon, R. Rodríguez Pons-Esparver	2000
4	Åspö Hard Rock Laboratory Final report of the first stage of the tracer retention understanding experiments	SKB TR-00-07	Anders Winberg, Peter Andersson, Jan Hermanson, Johan Byegård, Vladimir Cvetkovic, Lars Birgersson	2000
5	THE EXTRAPOLATION OF SHORT TERM OBSERVATION TO TIME PERIODS FOR ISOLATION OF LONG LIVED RADIOACTIVE WASTES (INDIA)	IAEA-TECDOC-1177, Annex	P.K. WATTAL, R.K. MATHUR, P.K. DE, V.N. SASTRY, J.N. MATHUR	2000
6	Åspö Hard Rock Laboratory, Annual Report 1999	SKB TR-00-10	SKB	2000
7	Diffusion of organic colloids in compacted bentonite, The influence of ionic strength on molecular size and transport capacity of the colloids	SKB TR-00-19	Susanna Wold, Trygve E. Eriksen	2000

	タイトル	レポート No. 等	著者	発行年
8	Selection of backfill materials for the near surface disposal of low level radioactive waste	IAEA-TECDOC-1255, Appendix 6	Z. Xin, Z. Yingjie, G. Yuan, K. Lingqin, W. Liansheng, L. Zhangji, W. Dexi	2001
9	TREATMENT OPTIONS OF LOW LEVEL LIQUID WASTE OF ETP ORIGIN BY SYNTHETIC ZEOLITES	BARC/2001/E/014	I.J. Singh, Savita Jain, N. Sathi Sasidharan, D.S. Deshingkar	2001
10	Final report of the TRUE Block Scale project, 1. Characterisation and model development	SKB TR-02-13	Peter Andersson, Johan Byegård, Bill Dershowitz, Thomas Doe, Jan Hermanson, Peter Meier, Eva-Lena Tullborg, Anders Winberg (ed)	2002
11	Combined methods for liquid radioactive waste treatment, Final report of a co-ordinated research project 1997-2001	IAEA-TECDOC-1336	IAEA	2003
12	Diffusion of Radionuclides in Bentonite Clay - Laboratory and in situ Studies	ISRN KTH/KKE-02/2-SE, ISSN 00349-6465, TRITA-KKE-0202	Mats Jansson	2002
13	Data Acquisition on Migration of Radionuclides under Deep Geological Environments	JAERI-Conf 2005-007	Yoshihisa IIDA, Hiroshi TAKI, Tetsuji YAMAGUCHI, Tadao TANAKA, Kumi NEGISHI, Shinichi NAKAYAMA	2005
14	JOINT PROJECT: INTERACTION AND TRANSPORT OF ACTINIDES IN NATURAL CLAY ROCK WITH CONSIDERATION OF HUMIC SUBSTANCES AND CLAY ORGANICS	HZDR-017	Katja Schmeide, Claudia Joseph, Susanne Sachs, Robin Steudtner, Bianca Raditzky, Alix Günther, Gert Bernhard	2011
15	地層処分における微生物影響の評価研究(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)	JNC TJ8400 2002-036	石川島播磨重工業株式会社	2002
16	地層処分における微生物影響の評価研究(II)(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)	JNC TJ8400 2003-069	石川島播磨重工業株式会社	2003

表 7.2-6 Kd の登録データ数

固相		分配係数 DB 登録データ数	
		H23 まで	H24 追加
ベントナイト系緩衝材		5277	147
結晶質岩	酸性岩	3992	21
	塩基性岩	2085	0
堆積岩	凝灰質岩	2424	0
	泥質岩	1315	1
	砂質岩	1259	0
鉱物 ※1	鉱物試料	291	28
	粘土鉱物	366	182
その他	鉱物	8745	※1
	土壌等	5079	0
	堆積物	1072	0
	有機物	672	0
	混合相	749	129

固相	分配係数 DB 登録データ数	
	H23 まで	H24 追加
その他	340	0
セメント系材料	4218	0

※1 平成 22 年度から固相分類 1(2)「鉍物」が固相分類(1)「鉍物」となった

7.3 核種移行データの取得

7.3.1 黒雲母を対象とした Se のバッチ式収着試験

(1) 試験法

収着試験の諸条件は、日本原子力学会がまとめた「深地層処分のバリア材を対象とした Kd の測定方法の基本手順」⁽²⁾を参考に設定した。収着試験に先立ち、Se 母液を調整した。試験には放射性同位元素である ⁷⁵Se を用いた。雰囲気制御グローブボックス内で、市販の ⁷⁵Se 溶液 (4 MBq/mL、担体濃度 Na₂SeO₃ : 100 μg/mL、Eckert & Ziegler Isotope Products, Inc. 製) 0.5 mL に 98 % ヒドラジン溶液 (20 M) 0.5 mL を添加し、溶液中の Se を還元した⁽¹⁾。7 日間静置した後、イオン交換水で希釈して全量を 10 mL とした。分画分子量 10,000 のフィルター (アドバンテック東洋製) でろ過して不溶残渣を取り除き、Se 母液 (200 kBq/mL、Na₂SeO₃ : 6×10⁻⁵ M) を調整した。0.01、0.1 および 1 M の塩化ナトリウム (NaCl) 溶液 500 mL に、濃度が 0.01 M になるように 98 % ヒドラジン溶液を 0.25 mL 添加後、Se 母液を 0.1 mL 添加し、0.45 μm のフィルターにてろ過して試験液とした (Se 濃度 : 1×10⁻⁸ M)。調整後の試験液 1 mL を分取し、Ge 半導体検出器 (セイコー・イージーアンドジー製 LOAX-51370/20-P) を用いた放射能分析により Se 初期濃度を測定した。収着試験に用いた黒雲母 (K(Mg, Fe^{II})₃(Al, Fe^{III})Si₃O₁₀(OH, F)₂) 試薬 (ニチカ製) の比表面積を BET 比表面積・細孔分布測定装置 (Quantachrome 製 NOVA 1200e) にて測定した (4.6 m²/g)。黒雲母試薬 1 g をポリプロピレン容器に量りとり、試験液 10 mL を添加し、HCl または NaOH 溶液によって試験液の pH を 8 ~ 12 に調整して収着試験を開始した。2 週間後、試験液の pH を電極により測定した (ThermoSCIENTIFIC 製 Orion 8172BNWP)。試験液 2 mL をサンプリングして分画分子量 10,000 のフィルターでろ過し、ろ液を 1 mL 分取して Se 濃度を放射能分析により測定した。

(2) 試験結果

収着試験結果を表 7.3-1 に示す。Kd (m³/kg) および収着率 R_s (%) は以下の式により算出した。

$$K_d = \frac{(C_{ini} - C_{eq})}{C_{eq}} \frac{V_{ini}}{M} \quad (7.3-1)$$

$$R_s = \frac{C_{ini} - C_{eq}}{C_{ini}} \times 100 \quad (7.3-2)$$

ここで、C_{ini} は試験液中の初期 Se 濃度 (M)、C_{eq} は収着平衡時の試験液中 Se 濃度 (M)、V_{ini} は試験液の初期体積 (m³)、M は固相試料の乾燥質量 (kg) である。得られた Kd は 0.002 ~ 0.09 m³/kg であり、塩濃度依存性は顕著ではなく、pH の上昇にともない低下した (図 7.3-1)。図 7.3-2 に本試験結果と既往の Kd データとの比較を示す。本実験で取得した黒雲

母に対するHSe⁻のKdは、澁谷ら⁽³⁾およびTicknorら⁽⁴⁾が取得した黒雲母に対するSeO₃²⁻のKdより高い値であった(図 7.3-2)。また、平成21年度に実施した、還元環境における黒雲母へのSeの収着試験結果⁽¹⁾と同程度の値であった。本試験におけるHSe⁻の黒雲母への収着は、塩濃度依存性が顕著でなく、pHに対し負の依存性を持つことから、鉱物の表面水酸基への表面錯体生成によるものであると推定される。黒雲母は、2枚のSiO₂四面体シートが1枚のAl₂O₃八面体シートをはさんで組み合わせることによって構造層を形成し、層間物質と共に構造層が積み重なることによって結晶構造を形成している⁽⁵⁾。そのため、構造層の破断面(結晶端面)には、≡SiOH基および≡AlOH基を含んでいる。さらに黒雲母はFeを含んでいるため、岩石の風化により表面に≡FeOH基が生成している可能性がある⁽³⁾。これらの表面水酸基のうち、SiOH基は零電荷点(pzc)が2以下と低いが、≡AlOH基および≡FeOH基はpzcが7以上⁽³⁾と高い。≡AlOH基および≡FeOH基では、試験のpH領域においても正電荷のサイトが比較的多く存在するため、陰イオンであるHSe⁻の収着に寄与していたと考えられる。

表 7.3-1 収着試験における液相条件と分配係数および収着率

0.01M			0.1M			1M		
pH	Kd (m ³ kg ⁻¹)	Rs (%)	pH	Kd (m ³ kg ⁻¹)	Rs (%)	pH	Kd (m ³ kg ⁻¹)	Rs (%)
8.12	3.7E-02	80	8.15	4.2E-02	81	8.42	4.0E-02	80
8.20	5.4E-02	85	8.19	3.9E-02	79	8.46	7.0E-02	87
8.57	5.3E-02	84	8.59	7.9E-02	89	8.47	4.5E-02	82
8.60	5.6E-02	85	8.62	4.7E-02	82	8.48	4.5E-02	82
8.70	3.1E-02	77	8.74	3.6E-02	78	8.73	8.2E-02	89
8.72	6.9E-02	88	8.75	3.9E-02	80	8.91	3.6E-02	78
8.78	5.9E-02	86	8.91	8.8E-02	90	9.01	2.8E-02	74
8.82	6.1E-02	86	9.08	3.7E-02	79	9.17	6.7E-02	87
8.95	5.1E-02	84	9.09	4.2E-02	81	9.35	5.9E-02	86
9.02	3.8E-02	79	9.31	4.2E-02	81	9.53	7.8E-02	88
9.09	3.1E-02	77	9.43	2.9E-02	74	9.57	3.0E-02	75
9.23	5.5E-02	84	9.48	3.3E-02	77	9.61	5.0E-02	83
9.27	6.2E-02	87	9.54	4.5E-02	82	9.67	5.3E-02	84
9.35	5.1E-02	84	9.79	4.4E-02	81	10.53	2.3E-02	70
9.44	4.0E-02	80	9.81	3.5E-02	78	10.66	2.2E-02	69
9.45	5.2E-02	84	9.93	2.8E-02	74	10.99	1.1E-02	53
9.67	3.8E-02	79	9.96	5.7E-02	85	11.26	7.4E-03	42
9.88	2.9E-02	76	10.41	2.4E-02	71	11.85	8.2E-03	44
10.21	2.2E-02	70	10.49	3.7E-02	79	11.86	4.0E-03	28
10.46	1.9E-02	68	11.14	1.4E-02	58	11.89	6.7E-03	40
10.72	1.6E-02	62	11.14	1.0E-02	50	12.33	4.3E-03	30
10.75	3.2E-02	76	12.06	4.7E-03	31	12.33	4.9E-03	33
10.82	2.0E-02	66	12.07	2.8E-03	22			
10.90	2.1E-02	67	12.50	2.3E-03	19			
10.97	2.2E-02	70	12.50	5.6E-03	35			
12.09	3.2E-03	24						
12.22	2.7E-03	21						
12.26	5.8E-03	43						
12.51	6.1E-03	37						
12.63	3.8E-03	27						

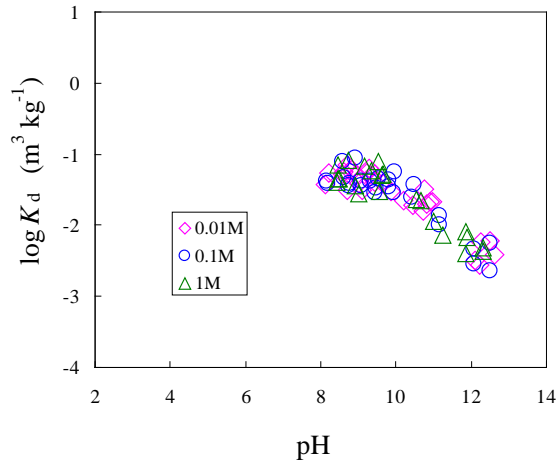


図 7.3-1 本試験における黒雲母への Se 収着データ

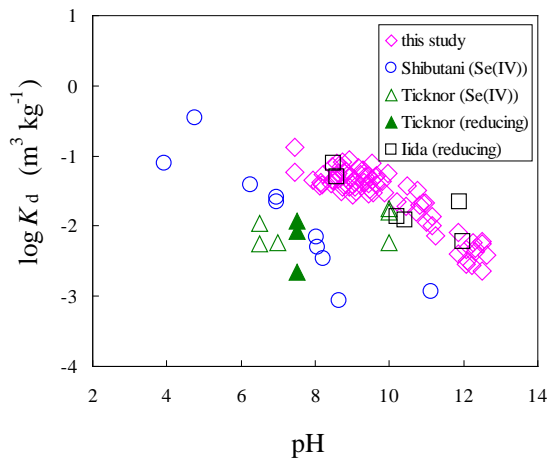


図 7.3-2 本試験結果と既往データの比較

(3) 収着モデルによる収着挙動の解明

黒雲母への収着挙動を解析するモデルには、電気三重層モデルを用いた⁽⁶⁾。本モデルにおいて、鉱物表面に 0 面、β 面および d 面の 3 つの面を仮定する (図 7.3-3)。各面の表面電荷密度 (σ_0 、 σ_β 、 σ_d (C/m²)) の関係は以下の式で表される。

$$\sigma_0 + \sigma_\beta + \sigma_d = 0 \quad (7.3-3)$$

また、各面での表面電位 (ψ_0 、 ψ_β 、 ψ_d (V)) の関係は以下の式で表される。

$$\psi_0 - \psi_\beta = \frac{\sigma_0}{C_1} \quad (7.3-4)$$

$$\psi_\beta - \psi_d = \frac{-\sigma_d}{C_2} \quad (7.3-5)$$

ここで、 C_1 は内層の静電容量 (F/m^2)、 C_2 は外層の静電容量 (F/m^2) である。表面水酸基 ($\equiv\text{SOH}$) は、pHによって以下のように解離する。



ここで、0面に存在する水素イオン濃度 ($[\text{H}^+]_0$ (M)) は、0面の電荷 (ψ_0) の影響により、バルク水中の水素イオン濃度 ($[\text{H}^+]_b$) と以下の関係にある。

$$[\text{H}^+]_0 = [\text{H}^+]_b \exp\left(\frac{-F\psi_0}{RT}\right) \quad (7.3-8)$$

そのため、式(7.3-6)および式(7.3-7)の固有平衡定数 (intrinsic equilibrium constant、 K_{a1}^{int} および K_{a2}^{int}) は、

$$K_{a1}^{\text{int}} = \frac{[\equiv\text{SOH}_2^+]}{[\equiv\text{SOH}][\text{H}^+]_0} = \frac{[\equiv\text{SOH}_2^+]}{[\equiv\text{SOH}][\text{H}^+]_b} \exp\left(\frac{F\psi_0}{RT}\right) \quad (7.3-9)$$

$$K_{a2}^{\text{int}} = \frac{[\equiv\text{SO}^-][\text{H}^+]_0}{[\equiv\text{SOH}]} = \frac{[\equiv\text{SO}^-][\text{H}^+]_b}{[\equiv\text{SOH}]} \exp\left(\frac{-F\psi_0}{RT}\right) \quad (7.3-10)$$

と表される。溶液中に存在する Na^+ イオン、 Cl^- イオンおよび HSe^- イオンはいずれも β 面に外圏型錯体を形成して収着すると仮定すると考えられており⁽⁷⁾、収着反応はそれぞれ以下の式で示される。



ここで β 面の電荷 (ψ_β) の影響により、 β 面に存在するイオンの濃度 ($[\text{M}]_\beta$) は、バルク水中のイオン濃度 ($[\text{M}]_b$) と以下の関係にある。

$$[\text{Na}^+]_\beta = [\text{Na}^+]_b \exp\left(\frac{-F\psi_\beta}{RT}\right) \quad (7.3-14)$$

$$[\text{Cl}^-]_\beta = [\text{Cl}^-]_b \exp\left(\frac{F\psi_\beta}{RT}\right) \quad (7.3-15)$$

$$[\text{HSe}^-]_\beta = [\text{HSe}^-]_b \exp\left(\frac{F\psi_\beta}{RT}\right) \quad (7.3-16)$$

式(7.3-14)~(7.3-16)の固有平衡定数 (K_M^{int}) は以下の式で表される。

$$K_{\text{Na}}^{\text{int}} = \frac{[\equiv \text{SO}^- \text{Na}^+][\text{H}^+]_b}{[\equiv \text{SOH}][\text{Na}^+]_b} \exp\left(\frac{-F(\psi_0 - \psi_\beta)}{RT}\right) \quad (7.3-17)$$

$$K_{\text{Cl}}^{\text{int}} = \frac{[\equiv \text{SOH}_2^+ \text{Cl}^-]}{[\equiv \text{SOH}][\text{Cl}^-]_b[\text{H}^+]_b} \exp\left(\frac{-F(\psi_\beta - \psi_0)}{RT}\right) \quad (7.3-18)$$

$$K_{\text{HSe}}^{\text{int}} = \frac{[\equiv \text{SOH}_2^+ \text{HSe}^-]}{[\equiv \text{SOH}][\text{HSe}^-]_b[\text{H}^+]_b} \exp\left(\frac{-F(\psi_\beta - \psi_0)}{RT}\right) \quad (7.3-19)$$

これらの収着種が平衡状態にあれば、表面サイト密度 N_s (C/m^2) および各面での表面電荷密度 σ (C/m^2) は以下のように表される。

$$N_s = \frac{FV}{SW} ([\equiv \text{SOH}_2^+] + [\equiv \text{SOH}] + [\equiv \text{SO}^-] + [\equiv \text{SO}^- \text{Na}^+] + [\equiv \text{SOH}_2^+ \text{Cl}^-] + [\equiv \text{SOH}_2^+ \text{HSe}^-]) \quad (7.3-20)$$

$$\sigma_0 = \frac{FV}{SW} ([\equiv \text{SOH}_2^+] + [\equiv \text{SOH}_2^+ \text{Cl}^-] + [\equiv \text{SOH}_2^+ \text{HSe}^-] - [\equiv \text{SO}^-] - [\equiv \text{SO}^- \text{Na}^+]) \quad (7.3-21)$$

$$\sigma_\beta = \frac{FV}{SW} ([\equiv \text{SO}^- \text{Na}^+] - [\equiv \text{SOH}_2^+ \text{Cl}^-] - [\equiv \text{SOH}_2^+ \text{HSe}^-]) \quad (7.3-22)$$

$$\sigma_d = -\sqrt{8RT\varepsilon\varepsilon_0 I_c} \times 10^3 \sinh \frac{FZ\psi_d}{2RT} \quad (7.3-23)$$

ここで S は比表面積 (m^2/g)、 V は溶液の体積 (dm^3)、 W は固相重量 (g)、 F はファラデー定数 ($96485 \text{ C}/\text{mol}$)、 I_c はイオン強度 (M)、 ψ_d は d 面の電位 (V)、 ε は水の比誘電率 ($78.5^{(8)}$) および ε_0 は真空の誘電率 ($8.854 \times 10^{-12} \text{ C}/\text{Vm}$) である。以上の関係から、 $[\equiv \text{SOH}_2^+ \text{HSe}^-]$ および $[\text{HSe}^-]_b$ を計算コードvisual minteqにより解析した。モデル解析に使用したパラメータ値を表 7.3-2 に示す。式(7.3-13)に示すSeの収着に関するパラメータ $\log K_{\text{HSe}}$ は、実験結果のフィッティングにより求めた。Seの分配係数 K_d (m^3/kg) は以下の式より算出した。

$$K_d = \frac{[\equiv \text{SOH}_2^+ \text{HSe}^-]}{[\text{HSe}^-]_b} \cdot \frac{V}{M} \quad (7.3-24)$$

モデル解析値と実験データの比較を図 7.3-4 に示す。モデル解析結果は実験結果を概ね再現できており、黒雲母に対する Se の収着挙動は表面錯形成により説明できることが確認された。

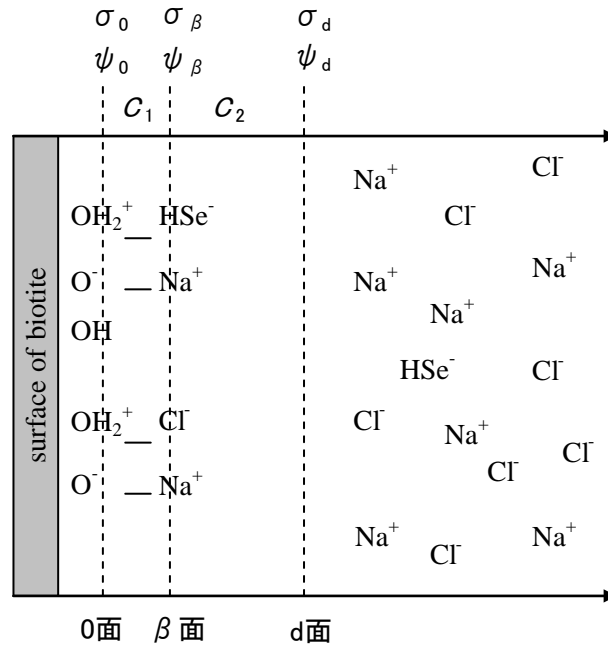


図 7.3-3 電気三重層モデルの概要

表 7.3-2 モデル解析に使用したパラメータ値

比表面積	S	$\text{m}^2 \text{g}^{-1}$	4.6
サイト密度	N_s	sites nm^{-2}	2.0
静電容量	C_1	F m^{-2}	1.1
	C_2	F m^{-2}	0.2
平衡定数	$\log K_{a1}$	—	8.3
	$\log K_{a2}$	—	-9.7
	$\log K_{Na}$	—	-6.9
	$\log K_{Cl}$	—	8.4
	$\log K_{HSe}$	—	12.1

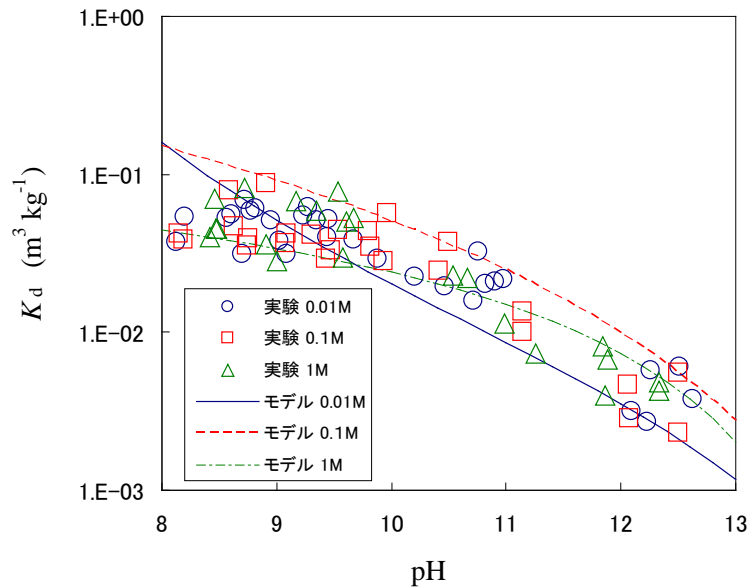


図 7.3-4 収着試験結果とモデル解析結果の比較

7.3.2 砂岩を対象とした Pu のバッチ式収着試験

(1) 実験法

K_dは、Puが安定に溶けている状態を確認してから、固相へ収着させる方法で取得する。これは水溶液に溶解しているPuが、例えば、加水分解種から酸化物への溶存化学種の時間的な変化により沈殿等が起こるといった可能性があることから、Yamaguchiら⁽⁹⁾の手法を参考にする。このため、2つのポリプロピレン (PP) 製容器を用意し、一方にはPuが入った試験溶液、他方には固相のみを入れる。Puの溶存確認後に試験溶液を固相のPP製容器へ移し、収着試験を開始する。

重炭酸イオン濃度と炭酸イオン濃度の比 (表 7.3-3) が所定の割合になるように、それぞれ 0.5 MのNaHCO₃溶液、Na₂CO₃溶液、NaCl溶液を用いて、イオン強度 0.5 M、25 mLに調整し、30 mLのPP製容器に用意した。これらに²³⁸Puの1 N HNO₃溶液 (母液) を10 μL加え試験溶液とし、低酸素雰囲気 (Ar) 制御型グローブボックス内 (20°C) で試験を開始した。このとき、Puの濃度は、 3.65×10^{-11} Mとなる。

固相は、平成 17 年度に深度 229 ~ 230 m から採取した砂岩とし、粒径を 250 ~ 500 μm に分級したものを 0.5 g 秤取り、試験溶液とは別の 30 mL の PP 製容器に用意した。

表 7.3-3 重炭酸イオン濃度と炭酸イオン濃度の比

[HCO ₃ ⁻]のみ (M)				
[HCO ₃ ⁻]	0.05	0.1	0.3	0.5
[CO ₃ ²⁻]	0	0	0	0
[HCO ₃ ⁻]:[CO ₃ ²⁻] = 10:1 (M)				
[HCO ₃ ⁻]	0.05	0.1	0.3	0.375
[CO ₃ ²⁻]	0.005	0.01	0.03	0.0375
[HCO ₃ ⁻]:[CO ₃ ²⁻] = 2:1 (M)				
[HCO ₃ ⁻]	0.01	0.05	0.1	0.2
[CO ₃ ²⁻]	0.005	0.025	0.05	0.1
[HCO ₃ ⁻]:[CO ₃ ²⁻] = 1:1 (M)				
[HCO ₃ ⁻]	0.01	0.05	0.1	0.175
[CO ₃ ²⁻]	0.01	0.05	0.1	0.175

サンプリングは母液投入直後、24 時間後、48 時間後、試験溶液を固相の容器へ移して（収着を開始して）から 1 時間後、24 時間後、48 時間後の計 6 回実施し、1 日 1 回、試験容器を手で 1 分間振とうした。サンプリング時には 0.45 μm のフィルター（MILLIPORE 製 Millex-HA）を用い、フィルターのコンディショニングとして溶液の上澄みの 0.4 mL、放射能測定分としての上澄みを 1.3 mL、合計 1.7 mL を毎回分取した。そこから 1 mL を分取したものをカクテル（BECKMAN 製 ReadyValue）3 mL と混合し、液体シンチレーションカウンタ（BECKMAN 製 LS 6500）にて α 線の放射能測定（測定領域：0 ~ 2,000 keV）を実施した。測定時間は、1 サンプルに対し、180 分間とした。

最後のサンプリング後に液相の pH（ThermoSCIENTIFIC 製 Orion 8172BNWP）および Eh（ThermoSCIENTIFIC 製 Orion 9678BNWP）を測定した。また、二酸化炭素電極（ThermoSCIENTIFIC 製 Orion 9502BNWP）にて試験終了後における溶存二酸化炭素を測定した。

壁面への吸着量を測定するために、試験終了後の容器を空にした後、超純水ですすいで捨て、10 N HNO₃ 溶液を 3 mL 加え、1 分間振とうした。そこから 1 mL 分取後、同様に放射能測定を実施した。

(2) 結果および考察

²³⁸Pu の母液を試験溶液に投入直後、24 時間後、48 時間後の放射能測定結果において、濃度の大きな変動が見られず（詳細な結果は Appendix VI-A に示す）、母液を試験溶液に投入してから 48 時間は安定に溶解していた。²³⁸Pu の母液を試験溶液へ投入してから 48 時間後（収着開始直前）と収着を開始してから 48 時間後の放射能濃度および試験終了後の pH (pH_end) と Eh を表 7.3-4 に示す。放射能濃度の誤差は、95% 信頼限界 (2σ) とした。

また、試験終了後の溶存二酸化炭素の測定により、所定の重炭酸イオンと炭酸イオンが試験溶液に存在していることを確認した。壁面への吸着については、放射能測定の結果がバックグラウンドと同等であったことから、考慮しなくて良いものと考えられる。

表 7.3-4 収着試験結果

	[HCO ₃ ⁻]/[CO ₃ ²⁻]	収着開始直前 濃度 (cpm)	収着開始48時間後 濃度 (cpm)	pH_end	Eh (V)
[HCO ₃ ⁻]のみ	0.05 M / 0 M	320.2±2.9	3.1±1.3	8.3	0.4
	0.1 M / 0 M	320.6±2.9	24.3±1.4	8.4	0.4
	0.3 M / 0 M	330.0±2.9	140.1±2.1	8.5	0.4
	0.5 M / 0 M	328.5±2.9	208.4±2.5	8.5	0.3
[HCO ₃ ⁻]:[CO ₃ ²⁻] = 10:1	0.05 M / 0.005 M	372.5±2.8	12.6±1.4	8.7	0.1
	0.1 M / 0.01 M	333.5±3.0	56.8±1.7	8.8	0.1
	0.3 M / 0.03 M	334.9±3.0	216.5±2.5	8.9	0.2
	0.375 M / 0.0375 M	334.1±3.0	249.8±2.6	8.9	0.2
[HCO ₃ ⁻]:[CO ₃ ²⁻] = 2:1	0.01 M / 0.005 M	317.9±2.9	2.3±1.3	9.2	0.2
	0.05 M / 0.025 M	335.3±3.0	89.8±1.9	9.4	0.2
	0.1 M / 0.05 M	329.8±2.9	189.9±2.4	9.4	0.2
	0.2 M / 0.1 M	333.0±3.0	270.9±2.7	9.5	0.3
[HCO ₃ ⁻]:[CO ₃ ²⁻] = 1:1	0.01 M / 0.01 M	332.5±3.0	10.6±1.3	9.6	0.3
	0.05 M / 0.05 M	328.9±2.9	164.0±2.2	9.7	0.3
	0.1 M / 0.1 M	328.8±2.9	250.2±2.6	9.8	0.3
	0.125 M / 0.125 M	330.5±2.9	269.1±2.7	9.8	0.3

表 7.3-4 に示した収着開始直前の濃度を初期濃度 C_0 とし、収着開始 48 時間後の濃度を収着平衡濃度 C_{eq} とする。また、収着を開始してから 1 時間後および 24 時間後をそれぞれ C_1 、 C_2 とし、収着開始時の試験溶液の体積を V_0 (19.91 mL)、1 回あたりのサンプリング量を V_s (1.7 mL)、固相の重量を M (0.5 g) とする。このときの収着分配係数 K_d は、式(7.3-25)で示される。

$$K_d = \frac{(C_0 - C_{eq}) \cdot V_0 - (C_1 + C_2 - 2C_{eq}) \cdot V_s}{C_{eq} \cdot M} \quad (7.3-25)$$

収着分配係数の誤差 σ_{Kd} については、放射能濃度の誤差のみを考慮し、誤差伝播の式から式(7.3-26)に示される。

$$\sigma_{K_d} = \left[\left(\frac{\partial K_d}{\partial C_0} \right)^2 \cdot \sigma_{C_0}^2 + \left(\frac{\partial K_d}{\partial C_1} \right)^2 \cdot \sigma_{C_1}^2 + \left(\frac{\partial K_d}{\partial C_2} \right)^2 \cdot \sigma_{C_2}^2 + \left(\frac{\partial K_d}{\partial C_{eq}} \right)^2 \cdot \sigma_{C_{eq}}^2 \right]^{1/2} \quad (7.3-26)$$

$$= \frac{1}{C_{eq} \cdot M} \left[V_0^2 \cdot \sigma_{C_0}^2 + V_S^2 \cdot (\sigma_{C_1}^2 + \sigma_{C_2}^2) + \{-C_0 \cdot V_0 + V_S \cdot (C_1 + C_2)\}^2 \cdot \frac{\sigma_{C_{eq}}^2}{C_{eq}^2} \right]^{1/2}$$

pH_endと酸解離定数（式(7.3-27)および式(7.3-28)）から収着平衡時の重炭酸イオン濃度（[HCO₃⁻]_{end}）と炭酸イオン濃度（[CO₃²⁻]_{end}）を求める。式(7.3-27)中のH₂CO₃^{*}は、水に溶解したH₂CO₃とCO₂の和である。



表 7.3-4 に示した結果をもとにまとめたものを表 7.3-5 に、[CO₃²⁻]_{end}とKdの関係を両対数グラフにプロットしたものを図 7.3-5 に示す。

表 7.3-5 収着平衡時の重炭酸および炭酸イオン濃度と Kd

	[HCO ₃ ⁻]/[CO ₃ ²⁻]	[HCO ₃ ⁻] _{end} (M)	[CO ₃ ²⁻] _{end} (M)	Kd (m ³ /kg)
[HCO ₃ ⁻] _{のみ}	0.05 M / 0 M	0.049	0.000	(4.1 ± 1.7)E+00
	0.1 M / 0 M	0.098	0.001	(4.9 ± 0.3)E-01
	0.3 M / 0 M	0.294	0.004	(5.6 ± 0.2)E-02
	0.5 M / 0 M	0.489	0.007	(2.4 ± 0.1)E-02
[HCO ₃ ⁻]:[CO ₃ ²⁻] = 10:1	0.05 M / 0.005 M	0.053	0.001	(1.0 ± 0.1)E+00
	0.1 M / 0.01 M	0.107	0.003	(1.9 ± 0.1)E-01
	0.3 M / 0.03 M	0.318	0.011	(2.2 ± 0.1)E-02
	0.375 M / 0.0375 M	0.397	0.014	(1.4 ± 0.1)E-02
[HCO ₃ ⁻]:[CO ₃ ²⁻] = 2:1	0.01 M / 0.005 M	0.014	0.001	(5.5 ± 3.1)E+00
	0.05 M / 0.025 M	0.067	0.008	(1.1 ± 0.0)E-01
	0.1 M / 0.05 M	0.132	0.017	(2.9 ± 0.1)E-02
	0.2 M / 0.1 M	0.260	0.040	(8.9 ± 0.6)E-03
[HCO ₃ ⁻]:[CO ₃ ²⁻] = 1:1	0.01 M / 0.01 M	0.017	0.003	(1.2 ± 0.2)E+00
	0.05 M / 0.05 M	0.080	0.020	(3.9 ± 0.1)E-02
	0.1 M / 0.1 M	0.155	0.045	(1.2 ± 0.1)E-02
	0.125 M / 0.125 M	0.191	0.058	(8.6 ± 0.6)E-03

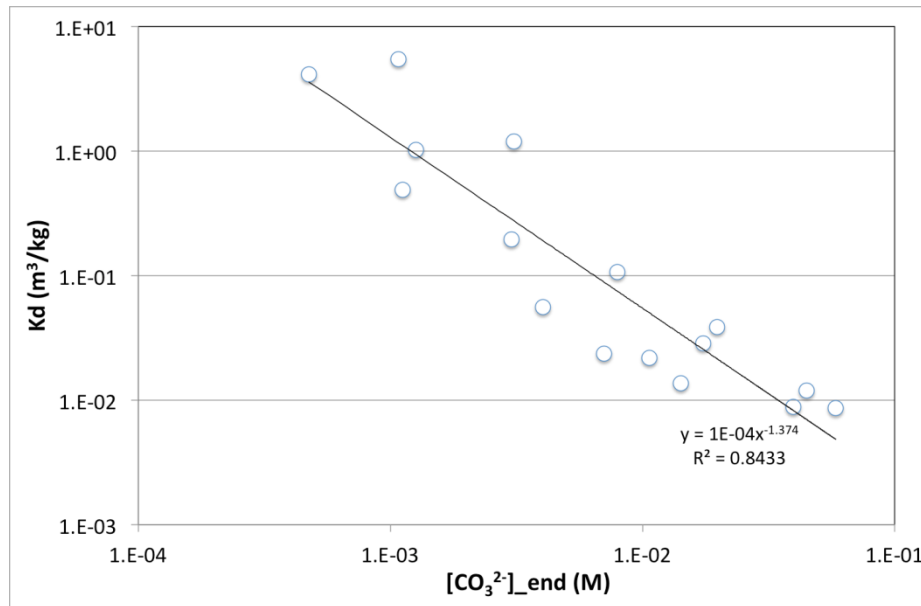


図 7.3-5 炭酸イオン濃度と Kd の関係

Kdは $[\text{CO}_3^{2-}]_{\text{end}}$ が高くなるにつれて直線的に減少した。これは $\text{pH}_{\text{end}} = 8.3 \sim 9.8$ でPuの炭酸錯体が支配的に存在し、負に帯電した岩石表面に収着しにくくなるためであると考えられる。この結果を7.2 項で拡充したDBを用いて既往のPuと岩石のKdについて比較する。

既往の研究では、収着平衡時のpHとその時の(重)炭酸イオン濃度について言及した文献が無いことから、試験溶液の情報と pH_{end} からある種の推定を元に $[\text{CO}_3^{2-}]_{\text{end}}$ を求めることにした。具体的には、DBから抽出する条件は、収着平衡時のpHが記されていること、かつ、何らかの(重)炭酸イオン濃度の情報があること、である。また、常温域外であることが明らかなもの、および、収着平衡時のPu濃度が検出限界以下のデータについては除外した。これらの条件により、5つの文献を抽出した。推定の方法と $[\text{CO}_3^{2-}]_{\text{end}}$ の算出結果の詳細については、Appendix VI-Bに示す。Kdと $[\text{CO}_3^{2-}]_{\text{end}}$ を取りまとめたものを表 7.3-6に示し、図 7.3-6にプロットする。

表 7.3-6 DB から抽出した結果

石灰岩(Relyea, 1979) ⁽¹⁰⁾		玄武岩(Ames, 1981) ⁽¹¹⁾		凝灰岩(Barney, 1982) ⁽¹²⁾	
[CO ₃ ²⁻] _{end} (M)	Kd(m ³ /kg)	[CO ₃ ²⁻] _{end} (M)	Kd(m ³ /kg)	[CO ₃ ²⁻] _{end} (M)	Kd(m ³ /kg)
4.9.E-06	1.0.E+00	6.0.E-04	1.8.E-02	2.4.E-05	3.7.E-01
2.0.E-05	2.0.E-01	6.5.E-04	1.8.E-02	9.5.E-05	5.6.E-01
9.9.E-06	1.1.E+00	6.0.E-04	2.4.E-02	7.6.E-05	5.9.E-01
2.2.E-08	1.3.E+00	6.5.E-04	2.0.E-02	3.9.E-05	9.4.E-01
1.2.E-07	2.8.E-01			7.4.E-05	3.2.E+00
1.2.E-07	2.6.E-01			2.4.E-05	4.1.E-01
		砂岩(Barney, 1982) ⁽¹²⁾		3.1.E-05	7.6.E-01
		[CO ₃ ²⁻] _{end} (M)	Kd(m ³ /kg)	5.9.E-05	6.1.E-01
		2.4.E-05	1.8.E-01	3.1.E-05	4.9.E-01
		4.8.E-04	3.0.E+00	1.9.E-05	7.3.E-01
		1.8.E-04	4.2.E-01	6.1.E-05	5.6.E-01
		7.6.E-05	5.5.E-01	3.1.E-05	4.5.E-01
		2.0.E-04	5.2.E-01	1.9.E-05	1.5.E+00
		3.1.E-05	2.0.E-01	6.1.E-05	3.7.E-01
		1.4.E-04	3.6.E-01	2.4.E-05	1.0.E+00
		1.4.E-04	2.8.E-01		
		3.8.E-05	1.4.E+00		
		1.9.E-05	1.4.E+00		
		1.5.E-04	4.4.E-01		
		5.9.E-05	2.2.E-01		
		2.2.E-04	6.2.E-01		
		3.8.E-05	4.2.E-01		
				砂岩(Baston, 1995) ⁽¹³⁾	
				[CO ₃ ²⁻] _{end} (M)	Kd(m ³ /kg)
				3.1.E-06	1.1.E+02
				2.4.E-06	2.3.E+02
				凝灰岩(Baston, 1995) ⁽¹³⁾	
				[CO ₃ ²⁻] _{end} (M)	Kd(m ³ /kg)
				2.4.E-06	4.7.E+02
				1.9.E-06	1.7.E+02
				風化凝灰岩(Senoo, 1988) ⁽¹⁴⁾	
				[CO ₃ ²⁻] _{end} (M)	Kd(m ³ /kg)
				8.2.E-09	3.7.E+00
				1.2.E-08	3.6.E+00

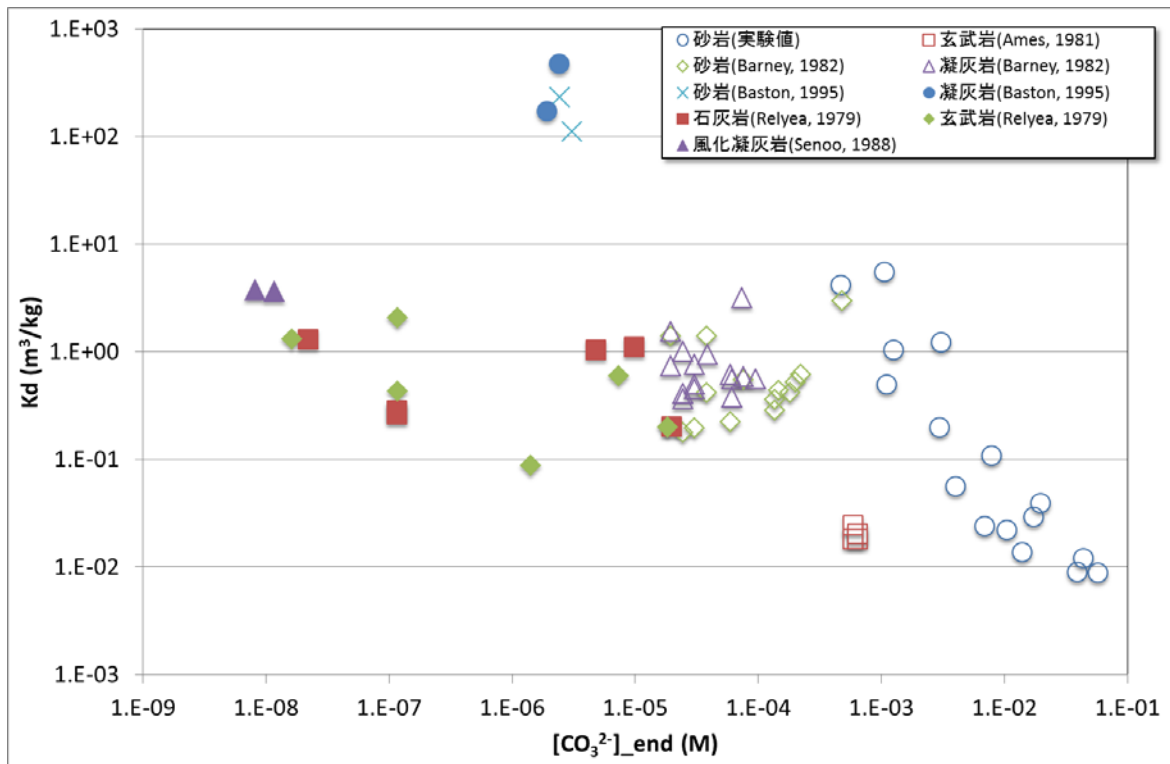


図 7.3-6 実験値と既往値の比較

既往の文献値は、 $[\text{CO}_3^{2-}]_{\text{end}} = 1.E-03 \text{ M}$ 以下の領域においてKdが取得されていた。Baston(1995)⁽¹³⁾の値は、実験値の傾向と比較すると直線の延長上にあるものの、ほかのデータに比べ2桁程度高いことから、沈殿の影響が疑われた。それらの値を除くと、堆積岩である砂岩や凝灰岩、結晶質岩である玄武岩に対するPuのKdは、岩種に依存しないと考えられるが、念のため次年度以降に結晶質岩を対象とした同様の収着試験を実施し、堆積岩（砂岩）との結果を比較検討する予定である。

その他のKdは $[\text{CO}_3^{2-}]_{\text{end}} = 1.E-03 \text{ M}$ 以下の領域において濃度依存性が無く、ほぼ一定の値 ($1 \text{ m}^3/\text{kg}$) であった。これは、Puの溶存化学種について、 $[\text{CO}_3^{2-}]_{\text{end}} = 1.E-03 \text{ M}$ 以上の領域で炭酸錯体が支配的であったのが、 $[\text{CO}_3^{2-}]$ の減少により水酸化物錯体が支配的になったため、炭酸濃度の影響がなくなったものと推定された。

7.4 安全評価に用いる Kd の設定

7.4.1 Kd 設定の基本的考え方

地層処分のような数千年以上に及ぶ長期間を対象とした場合、安全評価に用いる Kd を設定するためには、地質媒体や地下水組成の時間的・空間的な変遷を考慮する必要がある。このような Kd の設定のために、従来から様々な核種-固相系で多くの Kd データが取得されている。日本原子力研究開発機構では、国内外の文献調査およびデータ取得を実施し、これまで安全評価上重要な核種を中心として Kd のデータベース (DB) を整備し、パラメータ設定値およびその変動幅を整理してきた。しかしながら、既往の Kd データの中には科学的信頼性の低いものも存在すること、長期的な処分環境の変動に対し、全ての核種を対象として網羅的に Kd データを取得・整備することは不可能であることから、既往データのみからの Kd 設定は非常に困難である。その

ため、平成 23 年度に、既往の Kd データ、機構論的収着モデル計算および処分サイト試料を用いて取得された Kd データを複合的に考慮した Kd 設定の基本的考え方を構築した。具体的な Kd の設定手順は以下の通りである。

- ① Kd の取得方法、品質確認の基準を決定。
- ② サイトや処分場設計を踏まえて想定される、環境条件の範囲で取得された既往の Kd データの中から①の基準を満たすデータを抽出し、その分布を把握。
- ③ Kd データの分布に応じて、基本的なシナリオおよび環境変動に対応する確からしい値と変動要因を決定。
- ④ Kd の変動に対し、機構論（イオン交換、表面錯形成）的に説明可能なものについては、機構論的説明を付与。
- ⑤ サイトの試料を用いて測定されたデータと②の分布を比較し、含まれていれば③で設定した確からしい値を Kd として設定し、外れていれば原因を解明して保守的な値を設定する。

今年度は、Kd 設定の例として、安全評価上の重要核種である Cs の泥岩に対する Kd および Se の花崗岩に対する Kd を設定し、Kd 設定手法の妥当性を確認する。現状では処分サイトは決まっていないため、平成 17 年度に取得した泥岩に対する Cs の収着データおよび平成 21 年度に取得した花崗閃緑岩に対する Se の収着データを、原位置試料を用いて取得したデータの代わりとして用いることとした。

7.4.2 Kd 設定の例

(1) 泥岩に対する Cs の Kd 設定

(a) 既往データからの評価

DBに収録された、泥岩系の岩石に対するCsのKdのデータ数（ $Kd > 0 \text{ m}^3/\text{kg}$ のもの）は 240 件である。地層処分環境におけるCsのKdに対する主要な変動要因としては、pH、溶存イオン濃度およびCs初期濃度が想定された⁽¹⁵⁾。その理由として、pHは収着媒体の表面電位を変化させるパラメータであることから、収着機構の1つである表面錯体反応はpHに強く依存した反応と考えられており、Kdに影響を与える可能性があるからである。また溶存イオン濃度については、収着機構の1つであるイオン交換反応の際、溶存イオンの一部はCs収着の競合元素となる可能性がある。さらに、Cs初期濃度については、収着サイトには限りがあるため、極端に高い濃度で実験をした場合、非常に低いKd値が取得される傾向がある。一方、極端に低い濃度で実験した場合、数少ない高収着性のサイトの寄与が高くなり、非常に高いKdが取得されることがあるためである。例えば、平成 23 年度に整理した花崗岩に対するCsのKdデータにおいては、Cs初期濃度が 10^{-3} M 以上の条件で取得されたデータは、他の条件で取得されたデータに比べ有意に低かった（図 7.4-1）。一方、 10^{-8} M 以下の条件で取得されたデータは、他の条件で取得されたデータに比べ有意に高く、この理由として、数少ない石英の強収着サイトの影響があると考えられた（図 7.4-2）⁽¹⁶⁾。泥岩系データに関しても、これら 3 つの変動要因に着目し、全データを図 7.4-3 にプロットした。

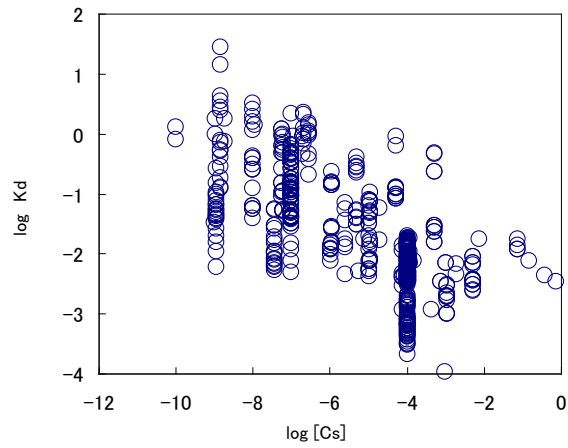


図 7.4-1 花崗岩に対する Cs の Kd データの Cs 濃度依存性

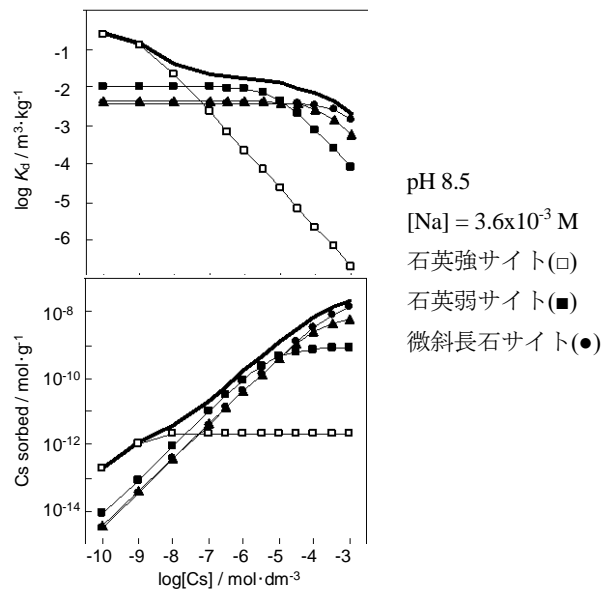


図 7.4-2 花崗岩構成鉱物に対するCsの収着に関するモデル解析（平成 18 年度報告書⁽¹⁶⁾より引用）

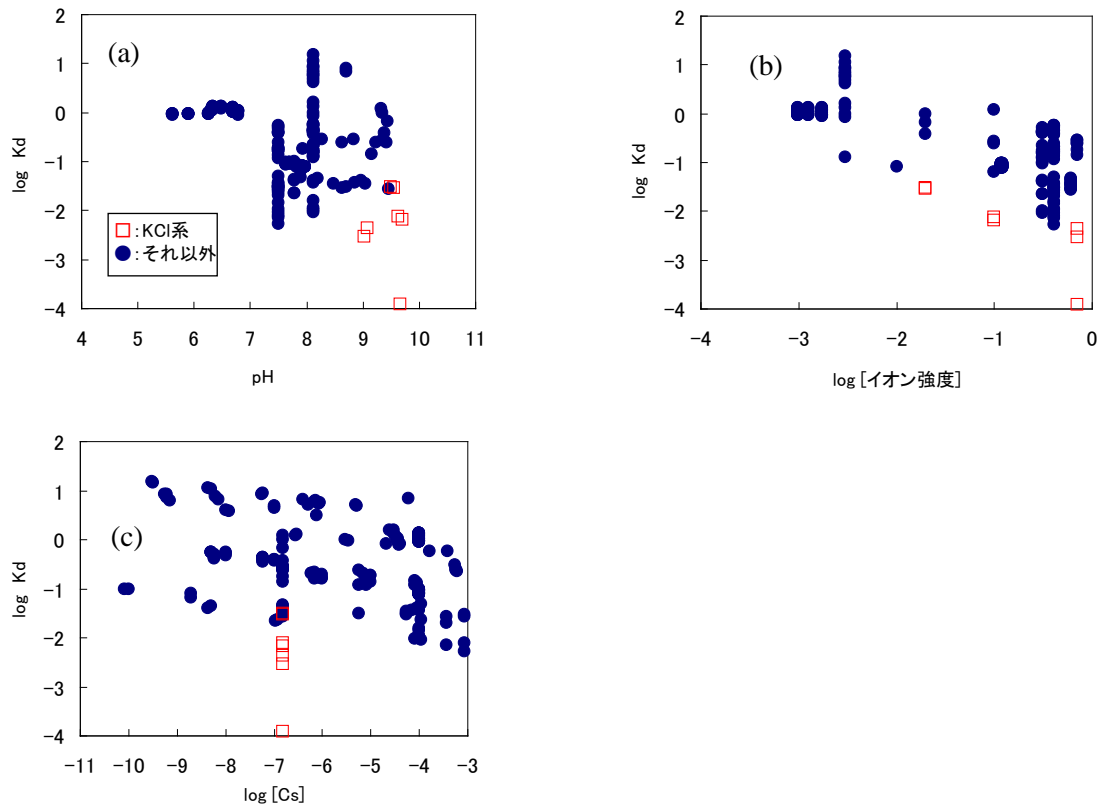


図 7.4-3 Cs の全 Kd データ ((a) pH 依存性、(b) イオン強度依存性、(c) 初期 Cs 濃度依存性)

全データから、以下の手順によりデータを抽出した。

- ① pH：平成 15 年度に実施した地下水水質に関する調査⁽¹⁷⁾において推定された、地下深部（地表面下 100 m 以深）の地下水の「pH 範囲：5 ～ 10」を、地層処分環境において想定される岩石中間隙水の pH 範囲として設定した。収集データは全て pH が同範囲内であった。
- ② 溶存イオン濃度：収集したデータの中には実験水として純水、蒸留水、脱イオン水のみを用いて取得されたものが散見されるが、地下水中の溶存イオン濃度（イオン強度）は Kd の主要な影響因子であるため、これら純水等を用いて取得されたデータは、処分環境中において想定し得ない非常に低いイオン強度条件で取得されたデータとして除外した。一方、海水の 10 倍以上の極端に高い塩濃度（NaCl 濃度：5 M 程度）で取得されたデータも除外の対象としたが、収集したデータには 1 M 以上の条件で取得されたデータは存在しなかった。また、極端に Kd の低いデータが存在したため原著論文⁽¹⁸⁾にさかのぼって調査したところ、溶液組成として KCl 系で取得されたものであった。K は Cs に比べ吸着力が高いため、溶液中に共存することにより Cs の Kd が低くなる⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。天然地下水においては、このような高濃度で K が存在することは考えにくいため、これらのデータを除外することとした。
- ③ 核種濃度：核種初期濃度が極端に高いもの（0.001 M 以上）を除外した。平成 23 年度に実施した花崗岩に対する Cs の Kd 設定の際には、数少ない石英の吸着サイトの影響により Kd を過大評価する恐れがあるとして、 1×10^{-8} M 以下の条件で取得されたデータを除外した（図 7.4-1 および図 7.4-2 参照）。しかしながら泥岩においては、

Cs濃度が低い条件においても顕著なKdの差が見られなかったため、低い濃度で取得されたデータも評価対象に含めることとした。

240 件の泥岩データのうち、抽出されたデータは 195 件であった。Kd データの pH 依存性、イオン強度依存性、核種初期濃度依存性を図 7.4-4 に示す。このうち、依存性が顕著なものはイオン強度であり、負の依存性を確認した。そのため、イオン強度を指標として、降水系データ (0.1 M 未満) および海水系データ (0.1 M 以上) に分類した。

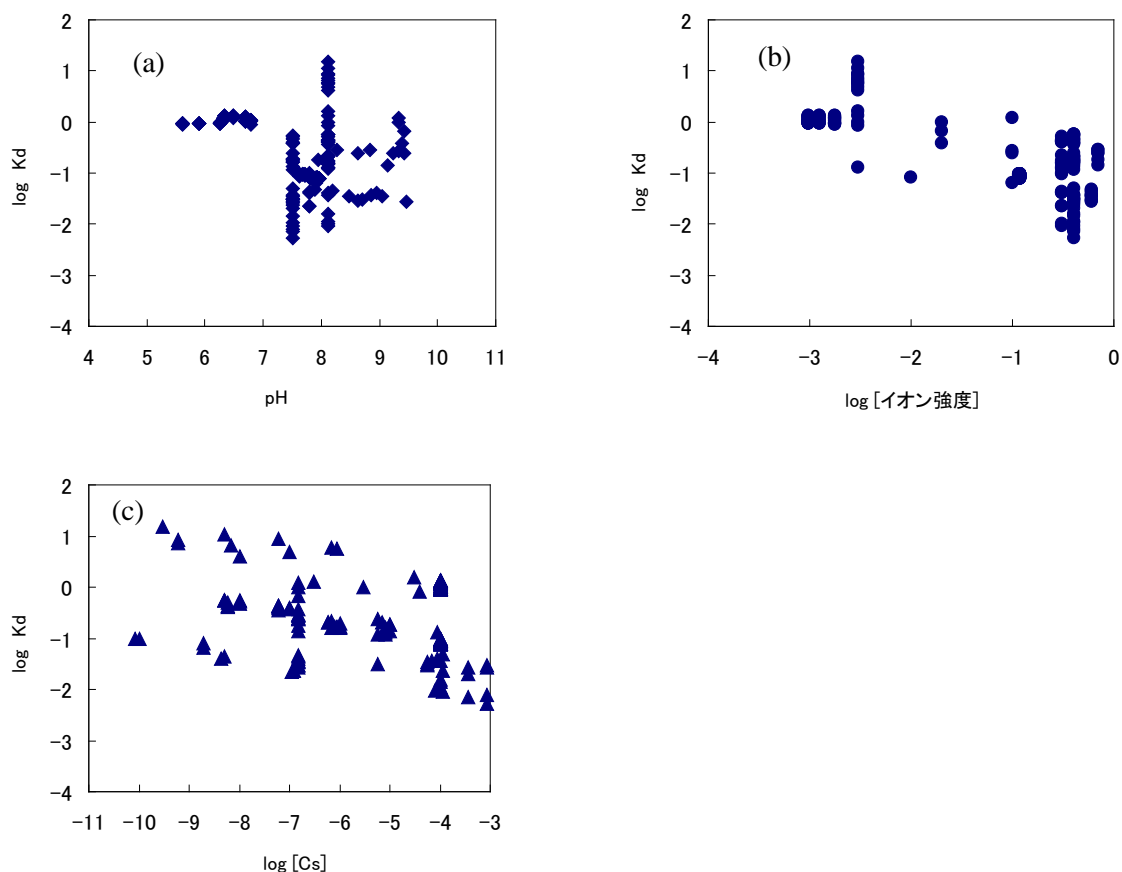


図 7.4-4 抽出した Cs の Kd データ ((a) pH 依存性、(b) イオン強度依存性、(c) 初期 Cs 濃度依存性)

降水系データは、データ数 64 件であり、対数平均値： $1.3 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、最頻値： $1 \sim 3 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、最小値： $0.08 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、最大値： $15 \text{ m}^3/\text{kg}$ であった。海水系データは、データ数 131 件であり、対数平均値： $0.08 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、最頻値： $0.03 \sim 0.1 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、最小値： $0.005 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、最大値： $1.2 \text{ m}^3/\text{kg}$ と、降水系データに比べ約 1 桁低い値であった。降水系データの分布を図 7.4-5、海水系データの分布を図 7.4-6 に示す。

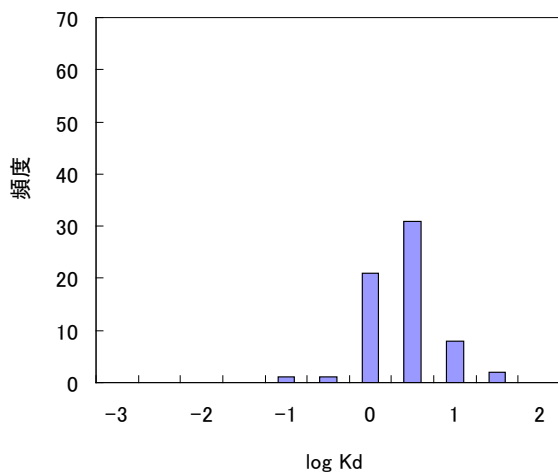


図 7.4-5 降水系データの分布

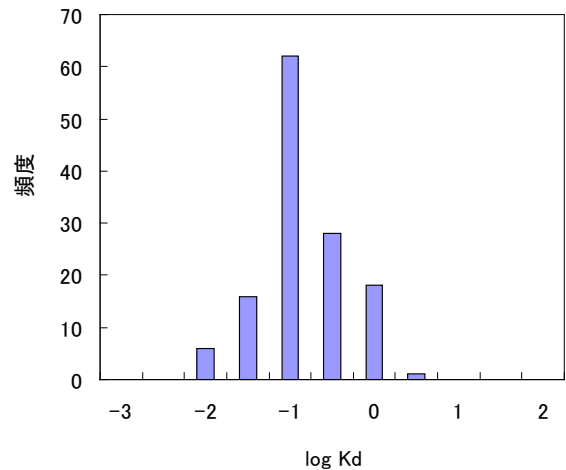


図 7.4-6 海水系データの分布

(b) 収着モデルによる検討

泥岩において、Csを支配的に収着する鉱物は粘土鉱物であることがわかっている⁽¹⁵⁾⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。特にイライト等の雲母類では、末端破壊部（FES: frayed-edge sites）が極めて強固にCsを収着する⁽²⁰⁾。FESの概要を図 7.4-7 に示す。パーミキュライトやスメクタイト（2:1 型層状ケイ酸塩鉱物）も、負の固定電荷を有する層間にセシウムが強固に収着されると考えられているが、本評価では泥岩におけるCsの支配的な収着鉱物をイライトのみとし、イライトに対するKd (m³/kg) および泥岩のイライト含有率 (-) から、泥岩に対するKdを算出した。

$$Kd(\text{泥岩}) = Kd(\text{イライト}) \times [\text{泥岩中のイライト含有率}] \quad (7.4-1)$$

泥岩への収着モデルは、イオン交換モデル⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾⁽²¹⁾を使用した。北村らはイオン交換モデルにおいて、3種類の収着サイト（親和力が強くサイト容量が小さい「FES」、実験結果をより正確に説明するための「Type-IIサイト」および親和力が弱くサイト容量が大きい「planar site」）を仮定している。また、イオン交換反応としてNa⁺よりもK⁺の影響が大きいことを指摘しているが、本評価では簡便化のために1サイト（FES）およびNa⁺との交換を仮定したモデルにより評価することとした。収着サイトをSとすると、イオン交換反応は以下の式で表される。



総サイト濃度を[S_(tot)] (M) とすると、Cs濃度がNa濃度に比べ充分低い ([Cs]/[Na] << 10⁻⁷) 条件では、[S-Cs] << [S-Na] = [S_(tot)]となるためKd (m³/kg) は

$$Kd = \frac{[S - Cs]V}{[Cs^+]M} = K \cdot \frac{[S_{(tot)}]V}{[Na^+]M} \quad (7.4-3)$$

と表される。ここで、

[Cs⁺], [Na⁺] : Cs⁺, Na⁺の濃度 (M)

V : 水溶液の体積 (m³)

W : 固相の重量 (kg)

である。イライトの収着サイト（FES）濃度は、5×10⁻⁴ mol/kg⁽¹⁸⁾とした。泥岩中のイライト含有率を1%として泥岩へのKdを評価した結果を図 7.4-8 に示す。Kdの値はNa濃度

の上昇に伴い減少し、Na濃度が 0.01 Mでは $K_d = 5 \text{ m}^3/\text{kg}$ をとり、0.5 M程度の塩水環境では1～2桁低い値 ($0.1 \text{ m}^3/\text{kg}$) 程度であると示された。この結果は、上記に示した既往の K_d データからの推定結果と概ね一致する。以上から、泥岩に対するCsの K_d は、支配的な収着鉱物であるイライト含有量に比例し、地下水中塩濃度の上昇による K_d の低下は1～2桁程度と考えられる。なお、本評価では無視しているが、一般に泥岩中に存在するスメクタイト系の粘土鉱物もCs収着に対する寄与が高い⁽¹⁹⁾ため、イライト含有量が低い岩石でも K_d が極端に低くなることはないと考えられる。また、 K^+ の選択係数 ($\log K$) はNaに比べ2～3桁高い⁽¹⁸⁾ため、 K^+ に富む地下水環境においては、 K_d はより低い値となる可能性があることに注意が必要である。

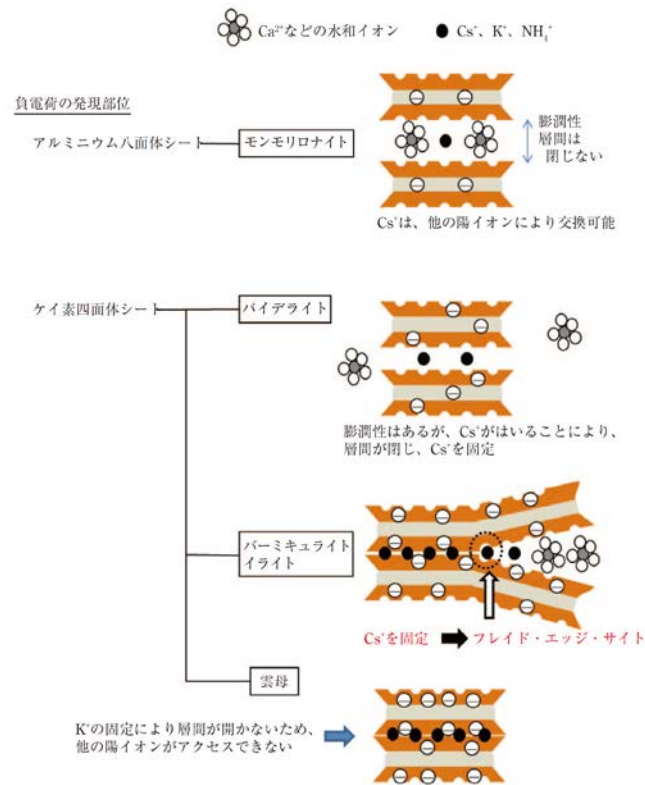


図 7.4-7 末端破壊部（フレイドエッジサイト）の概要（山口ら(2012)⁽²²⁾より引用

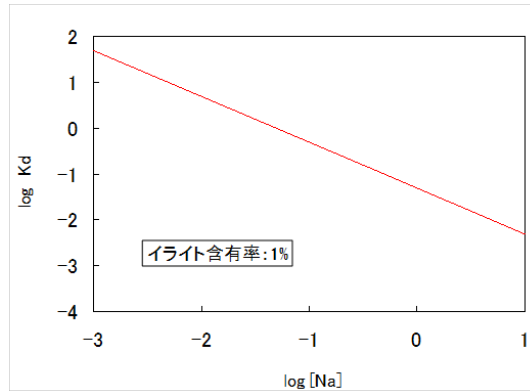


図 7.4-8 モデル解析の結果 (Kd の塩濃度依存性)

(c) 原位置試料を用いた Kd の取得

試験の詳細は、文献⁽²²⁾に示す。地下の環境を極力損なわずに採取した地層試料を用い、原子力学会で定めたKd取得の標準的手法を用いてKdを取得した。結果を表 7.4-1 に示す。得られたKdは、既往のKdデータの分布の範囲内であった。イライト含有率 1%としてモデル解析した結果をあわせて図 7.4-9 に示す。モデル解析値は実験値と良い整合を見せた。

表 7.4-1 泥岩に対するCsの収着実験結果 (平成 17 年度報告書⁽²²⁾より引用)

Run No	NaNO ₃ [mol dm ⁻³]	NaCl [mol dm ⁻³]	Kd [m ³ /kg]
TB01	0.05	0.10	0.048 ±0.018
TB02	0.50	0.10	0.026 ±0.006
TB03	5.00	0.10	0.006 ±0.001
TB00	0.00	0.10	0.072 ±0.040
TB11	0.00	0.50	0.031 ±0.008
TB12	0.00	5.00	0.010 ±0.001

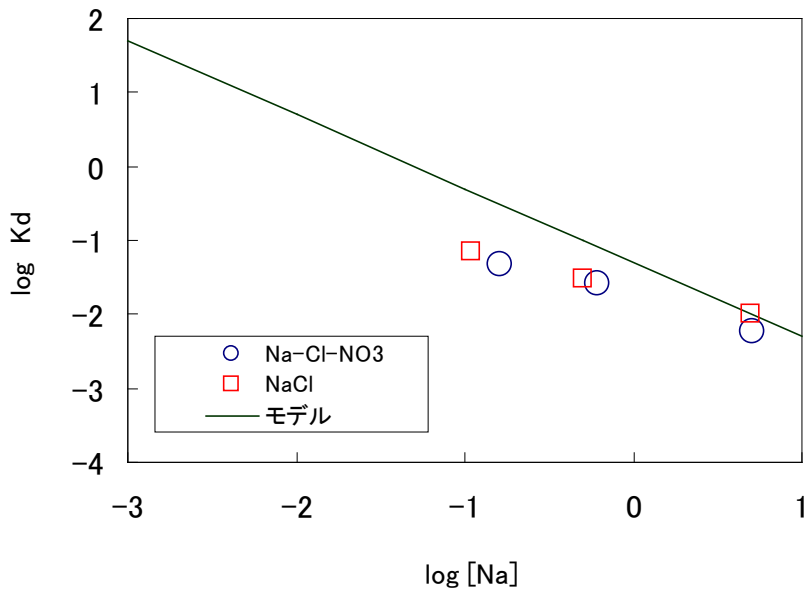


図 7.4-9 地層試料を用いて取得した Kd 実験値とモデル解析値

(d) Kd の設定

既往の降水系Kdデータの対数平均値は $1.3 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、最頻値は $1 \sim 3 \text{ m}^3/\text{kg}$ であった。モデル計算からもKdは $5 \text{ m}^3/\text{kg}$ 程度と見積もられている。また、地層試料を用いた実験結果では、 $0.05 \text{ m}^3/\text{kg}$ 程度であり、既往データの分布の範囲内であるものの、既往データの平均値より若干低い値であった。これは、地下水のイオン強度が高い (0.1 M 程度) ためである。現状では実際の地下環境条件が定まっていないため、Kdを既往データの平均値である $1 \text{ m}^3/\text{kg}$ と設定することとした。既往の海水系Kdデータの対数平均値は $0.08 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、最頻値は $0.03 \sim 0.1 \text{ m}^3/\text{kg}$ であった。モデル計算からもKdは $0.1 \text{ m}^3/\text{kg}$ 程度と見積もられている。さらに、地下試料を用いた実験結果からも $0.03 \text{ m}^3/\text{kg}$ 程度であると示されている。これらの結果は整合しており、Kdを $0.05 \text{ m}^3/\text{kg}$ と設定することとした。これらの設定値は、保守的に設定された既往の設定値 (降水系 : $0.1 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、海水系 : $0.01 \text{ m}^3/\text{kg}$)⁽²³⁾に比べやや高いものの同程度の値である。

以上より、既往の Kd データ、収着モデル計算値および地層試料を用いた実測値はほぼ整合しており、本手法により妥当な Kd 値を設定できることを確認した。なお、本評価では Na に富む地下水を仮定して Kd を設定したが、K に富む環境においてはより低い値となることに注意が必要である。

(2) 花崗岩に対する Se の Kd 設定

(a) 既往データからの評価

DBに収録された、花崗岩系の岩石に対するSeのKdのデータ数 (Kd > $0 \text{ m}^3/\text{kg}$ のもの) は 81 件である。地層処分環境におけるSeのKdに対する主要な変動要因としては、Csと同様、pH、溶存イオン濃度およびSe初期濃度が想定された。これらに加え、Seは酸化還元条件によって-II価、+IV価、+VI価の異なる酸化数を取り、それぞれの酸化数で溶存化学形が異なるため、酸化還元条件によってKdが大きく異なる可能性がある。そのため、既往データを還元性条件と酸化性条件に分類し、pH、溶存イオン濃度およびSe初期濃度の変動

要因に着目して全データを図 7.4-10 にプロットした。

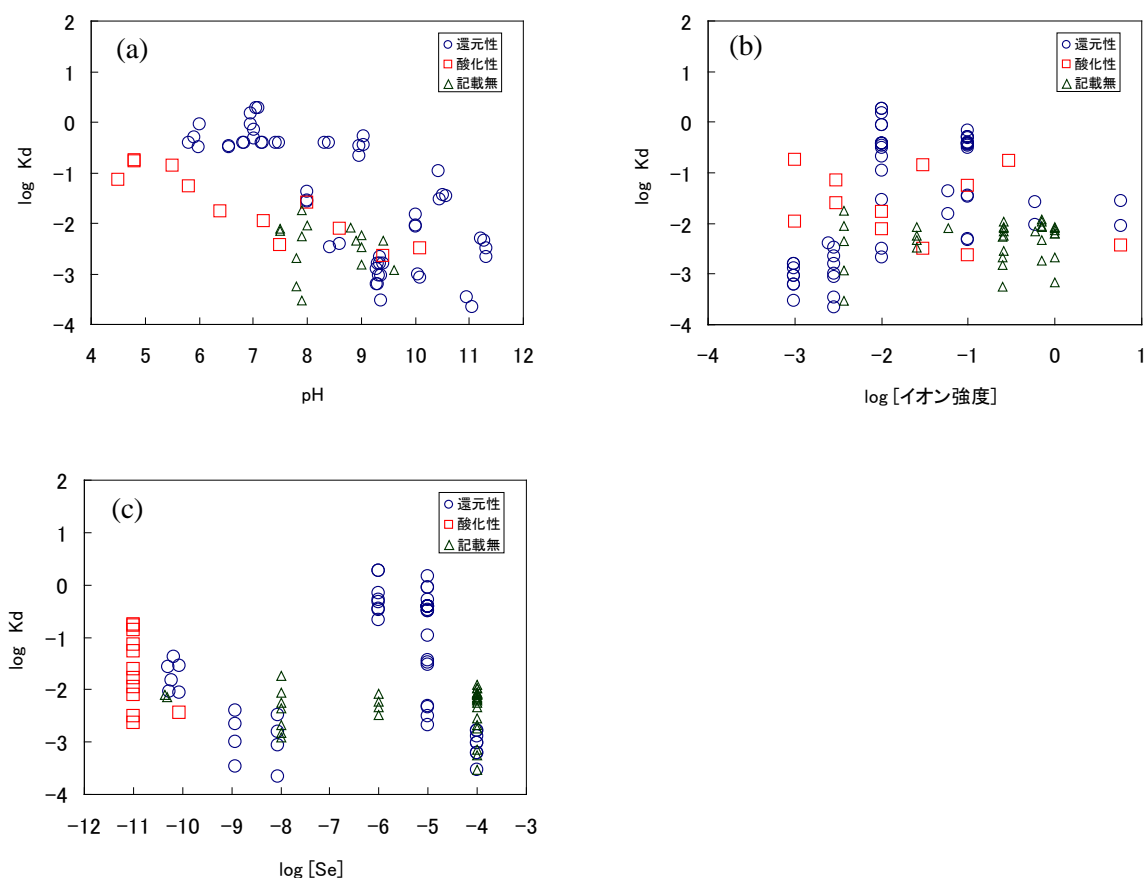


図 7.4-10 Se の全 Kd データ ((a) pH 依存性、(b) イオン強度依存性、(c) 初期 Se 濃度依存性)

全データから、以下の手順によりデータを抽出した。

- ① pH：地層処分環境において想定される岩石中間隙水の pH 範囲として 5 ～ 10 を設定した。
- ② 溶存イオン濃度：純水等を用いて取得されたデータ、および 5 M 以上で取得されたデータを除外した。
- ③ 核種濃度：図 7.4-10(c)において、還元条件で取得されたデータのうち、Se濃度が 10^{-8} M以下のデータに比べ 10^{-6} M以上で取得されたデータは高いKd値を示している。この原因として、還元条件ではSeの溶解度が低いために沈殿を生じ、Kdとして大きな値となった可能性がある。そのため、還元性で取得された 10^{-6} M以上のデータを除外することとした。

81 件のデータのうち、抽出されたデータは 32 件であった。Kd データの pH 依存性、イオン強度依存性、核種初期濃度依存性を図 7.4-11 に示す。いずれの変動要因の影響も顕著ではなかった。また、酸化還元条件の影響も顕著ではないため、全データを統合して Kd を評価することとした。

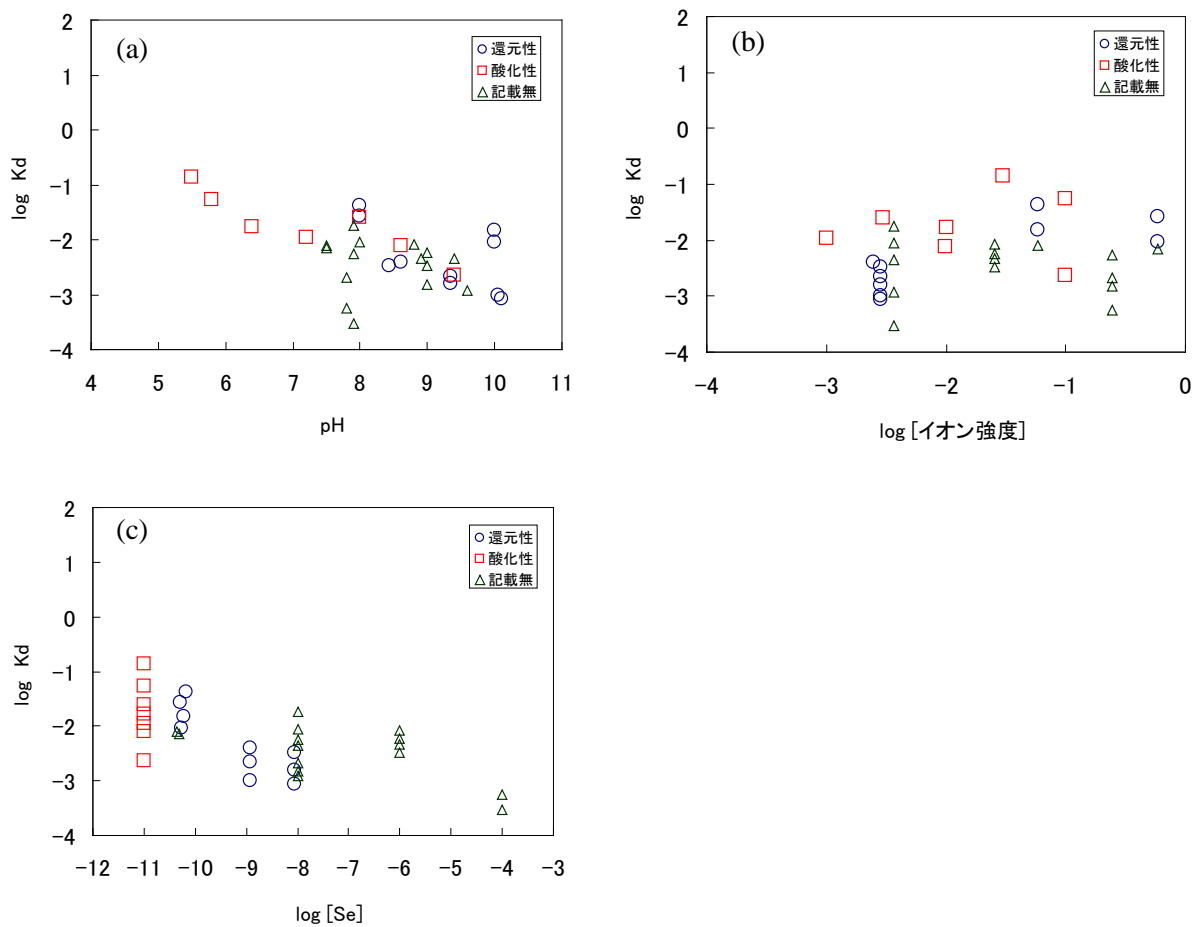


図 7.4-11 抽出した Se の K_d データ ((a) pH 依存性、(b) イオン強度依存性、(c) 初期 Se 濃度依存性)

32 件の K_d データについては、対数平均値： $0.005 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、最頻値： $0.003 \sim 0.01 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、最小値： $0.0003 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、最大値： $0.14 \text{ m}^3/\text{kg}$ であった。データの分布を図 7.4-12 に示す。

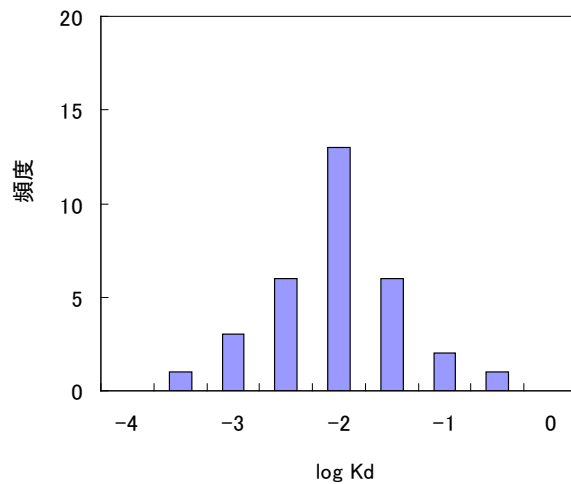


図 7.4-12 Se データの分布

(b) 収着モデルによる検討

花崗岩において、Seを支配的に収着する鉱物は黒雲母であることがわかっている⁽¹⁾。黒雲母に対するKdおよび花崗岩の黒雲母含有率から、花崗岩に対するKdを算出した。

$$Kd(\text{花崗岩}) = Kd(\text{黒雲母}) \times [\text{花崗岩中の黒雲母含有率}] \quad (7.4-4)$$

黒雲母に対するSeのKdは7.3節にて示したモデルにより算出した。一般に、花崗岩中の黒雲母含有率は数%程度であるため、含有率1%および5%としてモデル計算を実施した。結果を図7.4-13に示す。Kd値は中性付近のpHで $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ m}^3/\text{kg}$ 程度であり、pHの上昇に伴い低下し、pH=12では $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ 程度の値となった。この結果は、既往のKdデータの分布と概ね一致する。

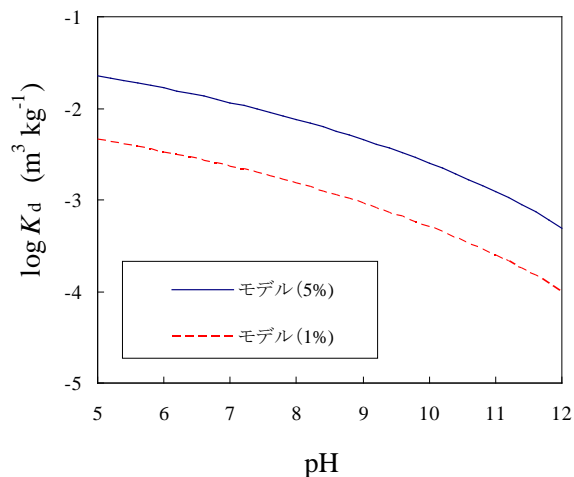


図 7.4-13 モデル解析の結果 (Kd の pH 依存性。黒雲母含有率を 1% および 5% として解析した。)

(c) 原位置試料を用いた K_d の取得

花崗閃緑岩に対するSeの K_d を平成21年度に取得している⁽²⁴⁾。地下の環境を極力損なわずに採取した地層試料を用い、原子力学会で定めた K_d 取得の標準的手法⁽²⁾を用いてバッチ式収着試験を実施した。結果を表7.4-2に示す。得られた K_d 値は中性付近のpHで $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ m}^3/\text{kg}$ 程度であり、pHの上昇に伴い低下し、pH=12では $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ 程度の値となった。黒雲母含有率を1および5%としてモデル解析した結果をあわせて図7.4-14に示す。実験値は既往データの分布の範囲内であり、モデル解析値と良い整合を見せた。

表 7.4-2 花崗閃緑岩に対するSeの収着試験結果⁽²⁴⁾

初期Se濃度 (mol dm^{-3})	pH	K_d ($\text{m}^3 \text{ kg}^{-1}$)
1.2E-09	8.61	3.8E-03
	9.35	8.6E-04
	10.05	9.2E-04
	10.96	3.6E-04
8.9E-09	8.43	1.9E-03
	9.34	1.3E-03
	10.10	8.1E-04
	11.06	3.1E-04

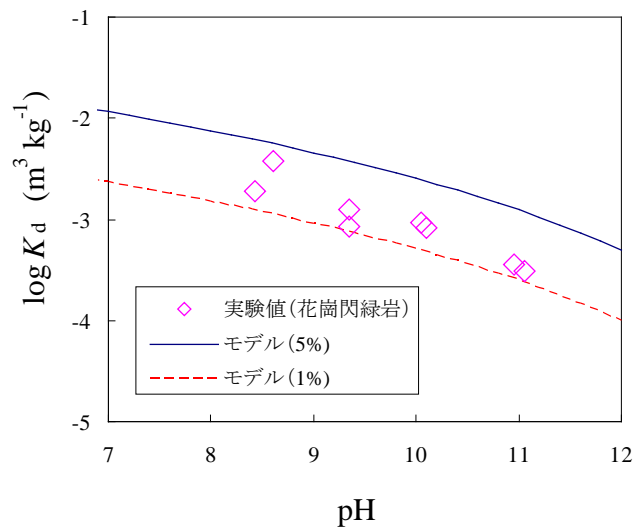


図 7.4-14 地層試料を用いて取得した K_d 実験値とモデル解析値（黒雲母含有率を1%および5%として解析）

(d) Kd の設定

既往のKdデータの対数平均値は $0.005 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、最頻値は $0.003 \sim 0.01 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、最小値： $0.0003 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ 、最大値： $0.14 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ であった。モデル計算からもKdは $10^{-4} \sim 0.01 \text{ m}^3/\text{kg}$ 程度と見積もられており、既往のKdデータ分布と整合している。また、地層試料を用いた実験結果は $0.0003 \sim 0.004 \text{ m}^3/\text{kg}$ であり、既往データの分布の範囲内であるものの、既往データの平均値より若干低い値であった。これは、pH範囲が比較的高い条件(8 ~ 11)で実験をしているためである。現状では実際の地下環境条件が定まっていないため、Kdを既往データの平均値である $0.005 \text{ m}^3/\text{kg}$ と設定することとした。

以上より、既往のKdデータ、収着モデル計算値および地層試料を用いた実測値はほぼ整合しており、本手法により妥当なKd値を設定できることを確認した。なお、本設定値は既往の設定値 ($0.01 \text{ m}^3/\text{kg}$)⁽²³⁾より若干低いものの同程度の値である。

第7章参考文献

- (1) Y. Iida, T. Tanaka, T. Yamaguchi, S. Nakayama, "Sorption behavior of selenium(-II) on rocks under reducing conditions," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **48**[2], 279–291, 2011.
- (2) 日本原子力学会, "収着分配係数の測定方法—深地層処分のバリア材を対象とした測定の基本手順: 2006", AESJ-SC-F008:2006, 2006.
- (3) 澁谷朝紀, 西川義朗, 乾真一, 内館信幸, 油井三和, "Se の岩石および鉱物に対する吸着挙動に関する研究", PNC TN8410 94-395, 1994.
- (4) K. V. Ticknor, D. R. Harris, T. T. Vandergraaf, *Sorption/Desorption Studies of Selenium on Fracture-Filling Minerals under Aerobic and Anaerobic Conditions*, AECL TR-453, Atomic Energy of Canada Limited, 1988.
- (5) 白水晴雄, 粘土鉱物学 —粘土科学の基礎—, 朝倉書店, 1988.
- (6) D. A. Dzombak, F. M. M. Morel, *Surface complexation modeling: Hydrous ferric oxide*, Wiley, New York, 1990.
- (7) M. Ochs, S. Kunze, Y. Saito, A. Kitamura, Y. Tachi, M. Yui, "Application of the sorption database to Kd-setting for Horonobe rocks", JAEA-Research 2008-017, 2008.
- (8) W. Stumm, J. J. Morgan, *Aquatic Chemistry*, 3rd edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1996.
- (9) T. Yamaguchi, S. Nakayama, T. Yoshida, "Interactions between anionic complex species of actinides and negatively charged mineral surfaces", *Radiochim. Acta* **92**, 677-682, 2004.
- (10) J. F. Relyea, R. J. Serne, "Waste Isolation Safety Assessment Program - Controlled Sample Program Publication Number 2: Interlaboratory Comparison of Batch KD Values", PNL-2872, 1979.
- (11) L. L. Ames, J. E. McGarrah, B. A. Walker, "Basalt-Radionuclide Reactions: FY-1981 Annual Report", RHO-BW-CR-127P/PNL-3992, 1981.
- (12) G. S. Barney, "Radionuclide Sorption on Basalt-Interbed Materials - FY 1981 Annual Report", RHO-BW-ST-35P, 1982.
- (13) G. M. N. Baston, J. A. Berry, M. Brownsword, T. G. Heath, C. J. Tweed, S. J. Williams, "Sorption of Plutonium and Americium on Repository, Backfill and Geological Materials Relevant to the JNFL Low-Level Radioactive Waste Repository at Rokkasho-Mura", *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **353**, 957-964, 1995.
- (14) 妹尾宗明, 白橋浩一, 坂本義昭, 小西正郎, 森山昇, "浅地層土壌と合成地下水系におけるプルトニウムの分配係数の測定", JAERI-M 88-038, 1988.
- (15) 日本原子力研究開発機構, "平成 23 年度地層処分の安全審査に向けた評価手法等の整備報告書", 2012.
- (16) 日本原子力研究開発機構, "平成 18 年度放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査報告書(1/2) [確率論的アプローチによる長期的評価手法の調査]", 2007.
- (17) 日本原子力研究開発機構, "平成 15 年度放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査報告書(1/2) [確率論的アプローチによる長期的評価手法の調査]", 2004.
- (18) 北村暁, 戸村努, 佐藤治夫, 中山雅, "海水系地下水系におけるベントナイト及び堆積岩に対するセシウムの収着挙動", JAEA-Research 2008-004, 2008.
- (19) 土井玲祐, 夏暁彬, 柴田雅博, 北村暁, 吉川英樹, "幌延堆積岩への Cs 収着挙動に対するイオン交換反応に基づくモデルの適用性検討", JAEA-Research 2007-007, 2007.
- (20) 山口紀子, 高田裕介, 林健太郎, 石川覚, 倉俣正人, 江口定夫, 吉川省子, 坂口敦, 朝田景, 和穎朗太, 牧野知之, 赤羽幾子, 平館俊太郎, "土壌-植物系における放射性セシウムの挙動とその変動要因", 農環研報, **31**, 75-129, 2012.
- (21) M. H. Bradbury, B. Baeyens, "A Generalised sorption model for the concentration dependent uptake of caesium by argillaceous rocks", *J. Cont. Hydrol.*, **42**, 141-163, 2000.
- (22) 日本原子力研究開発機構, "平成 17 年度放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査報告書(1/2) [確率論的アプローチによる長期的評価手法の調査]", 2006.

-
- (23) 渋谷朝紀, 陶山忠弘, 柴田雅博, “性能評価で用いる岩石に対する核種の分配係数”, JNC TN8410 99-051, 1999.
- (24) 日本原子力研究開発機構, “平成 21 年度放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査報告書”, 2010.