

処分環境や設計オプションに対応した 性能評価手法の構築（1）

A Study of Methodology and Its Applications for the Evaluation of Total System Performance which Considered the Site-information and the Design-information

稲垣 学 蛭名 貴憲*

Manabu INAGAKI and Takanori EBINA*

地層処分研究開発部門
システム性能研究グループ

Performance Assessment Research Group
Geological Isolation Research and Development Directorate

January 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っ
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

処分環境や設計オプションに対応した性能評価手法の構築（1）

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

（2008年1月16日受理）

高レベル放射性廃棄物の処分事業では、公募に応募された地区から選ばれた概要調査地区から精密調査地区を選択する等、事業を段階的に進めるアプローチが採用されている。精密調査地区の選定では、地質環境の長期安定性だけでなく破砕帯や地下水流動が処分施設へ悪影響をおよぼす恐れがすくないことが求められる。破砕帯や地下水流動が処分施設に及ぼす影響を評価するためには、これまで一般的な地質環境を前提として検討がなされてきた設計・施工での対応と概要調査における限られた情報を考慮し、処分施設の仕様や性能を含めたシステム全体の性能について検討する必要がある。この検討を進めるためには、既存の性能評価における情報を整理し、その一部が変更された場合に、変化する可能性のあるシナリオ及びモデル並びにパラメータを抽出し、それらの検討を行うことが合理的であると判断した。

本検討では、総合的な性能評価を実施するための最初のステップとして、具体的な地質調査結果や適用する設計オプションに基づき性能評価を実施するまでの一連の情報の流れを構造化するための方法論を検討し、既存情報についてこの方法論に基づき構造化を試みることにした。既存情報としては第2次取りまとめで取り扱われた設計条件及び性能評価についての情報を対象とした。また、構造化された情報をトレースすることにより、オーバーパックの性能を現実的に見込んだ場合の検討を行った。

A Study of Methodology and it's Applications for the Evaluation of Total System Performance which
Considered the Site-information and the Design-information

Manabu INAGAKI[※] and Takanori EBINA^{*}

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

(Received January 16, 2008)

The step-by-step approach which chooses detailed investigation area(s) from the preliminary investigations area(s) in the volunteer sites is adopted on the high-level radioactive waste disposal in JAPAN. It's requested at the stage of chooses detailed investigation area that there are few fears that surf zone and groundwater stream exert bad influence on disposal facility as well as stability of the geological environment. In order to evaluate influence of groundwater stream, it is necessary to evaluate of total performance of disposal system with limited information from preliminary investigations and several design options which have been assumed on the generic geological environment. For a rational procedure of total system evaluation, it is essential to arrange of known information of the former performance evaluation, and so, when same part of those information was changed, , we become able to pick a scenario, models ,parameters with a possibility which changes out by tracing these information.

.In this study, as a first step, we carried out make a methodology to structure a flow of a series of information from a geological survey result in detail and until performance evaluation. We tried to make a structuralization of known information by base on this methodology. And, we discussed realistic performance of over-pack by tracing this structured information.

Keywords: HLW Geological Disposal, Groundwater, Scenario, Design-option, Site

※ Collaborating Engineer

* NESI Incorporated

目 次

1. はじめに.....	1
2. 総合性能評価手法の構築.....	2
2.1 基礎となる考え方.....	2
2.2 基本概念の構築.....	3
2.3 第2次取りまとめ情報の整理.....	11
3. 適用の例示.....	33
3.1 現実的性能の把握.....	33
4. まとめ及び今後の課題.....	36
参考文献.....	37

Contents

1. Intorduction	1
2. Development methodology for total performance assessment	2
2.1 Base methodology.....	2
2.2 concept	3
2.3 Arrangement of information of H12 report.....	11
3. Exercise.....	33
3.1 Realistic case of over-pack performance.....	33
4. Conclusion.....	36
References.....	37

This is a blank page.

1. はじめに

本研究は、実際の地質環境条件や具体的な設計オプションの選択を踏まえた総合的な性能評価のアプローチの構築を目的とする。

高レベル放射性廃棄物の処分における概要調査地区選定段階では、主として地質環境の長期安定性に関する要件への適合性が評価されることとなるが、精密調査地区選定段階においては、地質環境の長期安定性の確認とともに、破碎帯や地下水流動の及ぼす処分施設への影響について評価することが求められることから（最終処分法の要件¹⁾、実際の地質環境に対する調査結果と地質環境に対応した設計オプションの選択に基づき処分システム全体の性能を評価する必要が生じる。処分システム全体の性能の評価は、調査段階の進展に伴い前段階の評価で用いられたシナリオや評価モデル及びデータの更新の繰り返しの行為となる(例えば、NUMO, 2007²⁾)ものと考えられる。この作業を合理的に進めるためには、前段階の評価における地質環境や設計条件の取り扱いに関する情報が整理されていることが必要と考える。すなわち、現段階での地質調査－設計－性能評価の処分システム全体を通じた情報の流れを明らかにし、地質環境情報の更新や設計オプションの変更・更新により生じうる前段階における設定の変更点（例えば、シナリオの変更、モデルの変更）を速やかに抽出可能な仕組みを構築しておくことが望ましいものと考えられる。ここでは、仕組みの構築と構築された仕組みを用い第2次取りまとめにおける成果の整理を行うこととした。

また、具体的な地質環境に対応する設計オプションの選択においては、技術的観点から設計オプション間の性能を比較することが求められる。しかしながら、第2次取りまとめでの安全評価のアプローチのように評価結果の保守性を重視するのみでは、設計オプション間の相違に鈍感であるため、最適な設計オプションを選択するためには、より現実的な条件における定量的な評価が求められることとなる。このためには、評価の保守性の観点から省略された「安全機能」の見直しや安全機能を定量化するためのモデルやデータの再考、設計値の余裕の程度の見直しが必要となる。より具体的には、「どのような前提でこのモデルやデータを採用したか？」等のエンジニアリング・ジャッジメントを含む情報が整理され、地質環境調査から性能評価までのトレーサビリティを確保することが重要と考える。

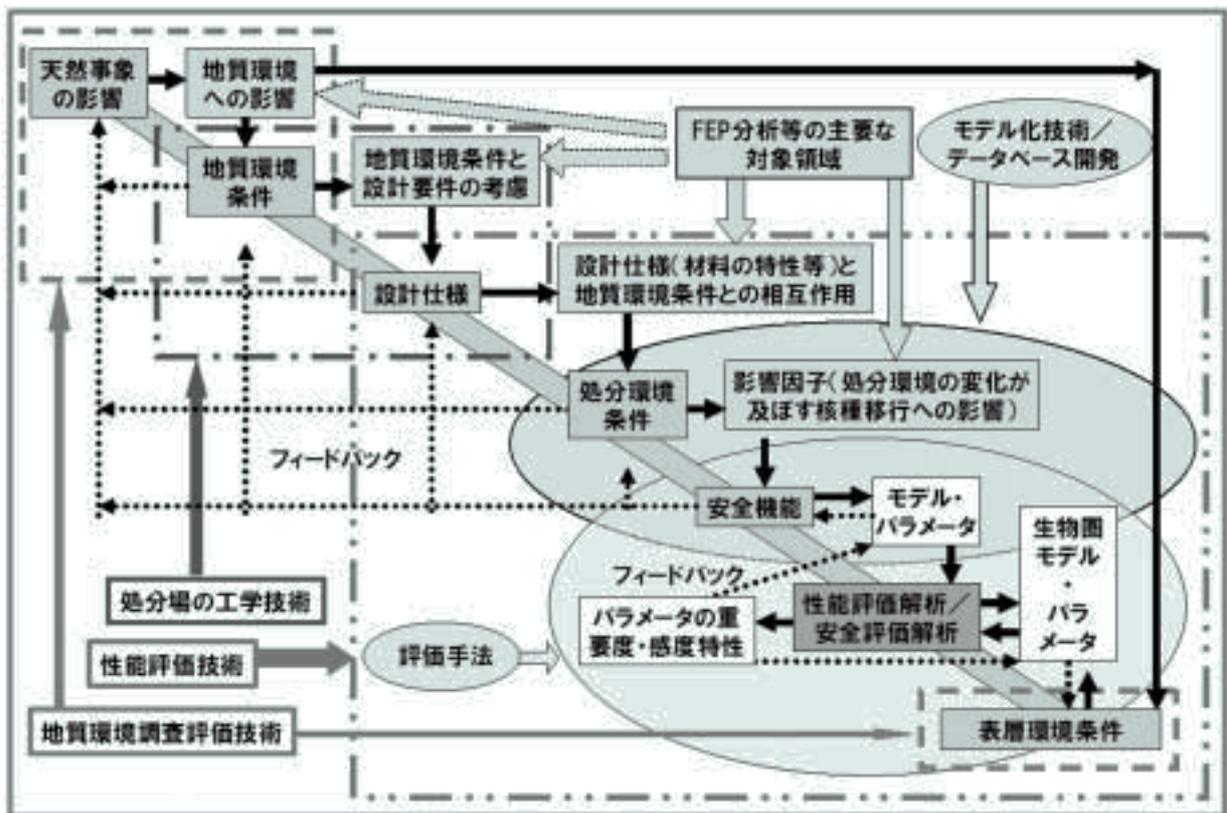
このような取り組みは、より大きな枠組みとして、日本原子力研究開発機構で体系的になされている研究（梅木他, 2006³⁾）の一部に反映されていくものと考えられ、本研究は、これらの研究に資するための一研究となるものとする。

2. 総合性能評価手法の構築

ここでは、地質調査－設計－性能評価の連携を踏まえた、総合性能評価の手法の検討を行うこととする。

2.1 基礎となる考え方

大井ら(大井他, 2006⁴)は、シナリオ分析手法の高度化を目的として、図 2-1 に示すように、多種多様な地質環境や設計オプションに対して適用可能な総合的な評価体系の概念の整備を実施している。この概念は、与条件としての地質環境や設計仕様が、処分環境を表すT (温度), H (水理), M (力学), C (化学, 放射線も含む), G (形状, 寸法, 構造) (以降, THMCGと略称を用いる) を介して、「安全機能」の評価に用いる設定を評価するための構成となっている。これに、擾乱因子や設計条件の変更を与え、基本条件 (初期条件) として想定する状態からの変化を抽出し、これをシナリオや解析ケースに反映させるものである。



(大井他, 2006)

図 2-1 シナリオ解析の枠組み

本研究においてもこの枠組みに従うこととする。また、本研究の目的はシナリオ解析よりも、地質環境と性能評価及び設計と性能評価のリンクを踏まえた総合的な評価手法の開発にあることから、図 2-1 示される各ボックスを幅広く解釈し、より具体的に定義することとした。

2.2 基本概念の構築

地質調査や設計及び性能評価の各分野間の連携による性能評価では、各分野の複数人の間での情報の共有が必要となる。しかしながら、地層処分に必要となる知識は幅広く、評価すべき特性や事象が複雑に関連することから、各分野間での連携が必ずしもスムーズに機能しているとはいえない。溝口(溝口, 2007⁵)は、従来の知識ベース(既存のエキスパートシステムなど)の問題点として以下を提起している。

- ・ 基本的な前提などが暗黙であり知識の再利用や共有を阻害している
- ・ 基盤となる共通の知識ベースが存在しないこと
- ・ 既存の知識ベースに知識を「積み上げる」技術がないこと

これらの問題点は地層処分の分野においても同様であり、かつ、設計や性能評価の各分野独自の暗黙の前提や分野内での意思決定(例えばモデルの選択、簡略化)が重畳し、分野間の連携を阻害する要因となっているものと考えられる。性能評価の分野では、1980年代から各国においてFEP、インフルエンズの取り扱い方法が検討されシナリオ開発が実施され、第2次取りまとめにおいても、性能評価の基盤情報として、包括的FEPリストが提示されシナリオ開発のベースとなっている。これらはシナリオ開発を論理的に進めるために重要な知識ベースであり、一定の評価を受けている。しかしながら、FEP辞書の内容のみでは、ある事象が「どの様に判断され」その結果が「どの様に性能評価に組み込まれたか」といった部分は、分厚い報告書に頼る必要がある。設計に関する状況も同様と考えられ、地質調査や設計及び性能評価の連携を図るためには、「地質調査や設計で提示されたデータがどの様な過程を辿り処理され性能評価に用いられたか」といったトレースが容易に可能で、全体を俯瞰できる構造とその構造に沿った情報の加工が必要となる。このような構造化された情報の利点は、処分オプションの変更や適用モデルの変更において、性能評価側または設計側に遡及し、途中でモデル選択の判断や簡略化の妥当性を再検討できることにあり、これによって、既存の評価体系を修正し新たな体系にする場合の課題や条件を抽出しやすくなることにあると考える。

これらのことから、本研究では、まず、地質調査及び設計並びに性能評価の各分野間で情報の共有が可能となるフレームを作成し、これに第2次取りまとめの情報を適用することからはじめることとした。また、情報の適用においては、解析モデルの選択、解析の単純化や簡素化等の判断に係る部分を特に注目することとした。以下に基本概念の構築に関する目標を示す。

- ・ 既存の評価体系を地質調査－設計－性能評価を連携したフレームで表現する。
- ・ 分野間を通したトレーサビリティを重視し、各分野での意思決定(モデルの選択、簡略化等のジャッジメント)内容の記述を行う。

また、実用の観点から、

- ・ 個人でハンドリングできる程度の情報量にまとめる。

ことも重要であると考え、全体の構造を検討することとした。

(1) 構造

基本とする構造は、2.1で示した包括的な構造と同様に地質環境—設計条件—安全機能と主軸とした構造とする。ここでは安全機能を「定量化が可能であるもの」とし、定量化するための簡略化や事象に関する判断は図 2-2に示す⑤で取り扱われる。処分システムの構造からTHMCG（図 2-2の④のライン）は、個別事象の評価に用いられたモデルやデータと判断/取り扱いが記述されるものとなる。地質環境及び設計条件並びに安全機能の主軸となる項目間の情報の受け渡しにおける簡略化やデータの保守的な取り扱い、モデルの選択等に関する判断は④と⑤に割り当てられる。また、⑦での安全機能からTHMCGには、処分環境として期待される条件が、⑥ではそれら望ましい環境を実現するための設計要件や地質環境要件が記述される。

これらの情報のやり取りに関する記述作業は、繰り返し実施され、全体の整合性が図られることとなる。次のステップでは一度整合の計られた情報のフローを出発点とし、これに関する変更や新たに想定する安全機能等を考慮し、フローの変更を実施すると共に、環境条件（THMCG）の再評価が必要となる部分の抽出、再評価が必要となる懸念事象、新たに必要とされるデータ項目の抽出が為されることとなる。

本研究では出発点のフローを第2次取りまとめとし、これを、まとめることとした。

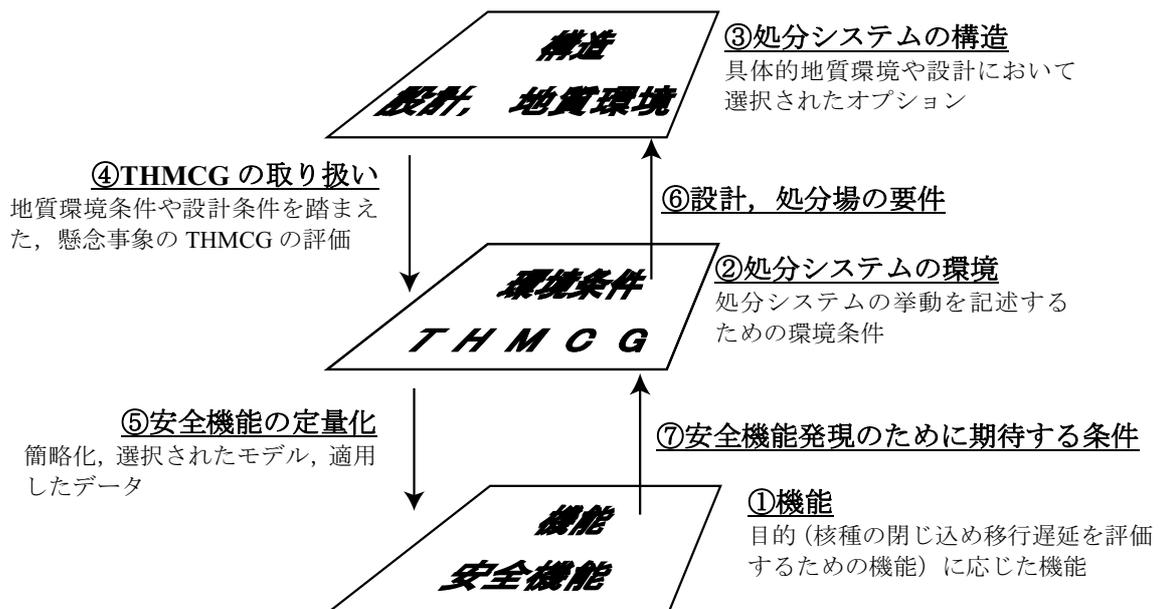


図 2-2 情報の受け渡しに関する概念図

(2) 処分システムの安全機能

第2次取りまとめでは、処分システムの安全機能として表 2-1 示す機能が定義されている。ここで、選択された安全機能は、第2次取りまとめにおいて、安全側の評価の実施を目的に不確実な機能を取り除き簡素化されたものである。したがって、より現実的な評価を目的とする本研究においては、今後評価に組み込まれる可能性のある安全機能についても明記しておくことが望ましい。そのため、「核種の閉じ込め性」に関する機能を中心に、核種が移動を表現する観点から分類し、網羅的に安全機能を抽出することとした。

核種の移動を制限するとする観点から、核種の移動プロセスに注目することとした。核種の移動プロセスは、概ね以下の3つの観点により表現できる（図 2-3 参照）。

- ・核種の存在形態
- ・核種の移動駆動力
- ・核種の通過領域の特性

核種の存在形態としては、核種が移動可能な形態か否かの2つに大きく分類できる。核種の閉じ込め性の観点からは、核種が非可動的な状態で存在することが望ましいことから、以下の安全機能が見込まれる。また、ガラス固化体を考える場合、ガラス固化体としての存在が、核種を固定するものであることから、ガラス固化体として長く存在すること（低溶解性）も安全機能の一つとなる。

- 領域内での核種の沈殿生成（低溶解性）
- 領域内での核種の媒体への高い吸着性
- ガラス固化体の低溶解性
- 小さな放射性ガスの発生量

次に、移動形態としてコロイドを考慮する場合には、可動性／非可動性の状態の分岐は、通過する媒体中の間隙特性及び化学特性に依存する可能性が高く、安全機能として以下の項目を付け加える。また、コロイドが安定しない地下水化学環境を安全機能に含めることも可能である。

- 領域でのコロイドろ過性
- 領域溶液中でのコロイドの不安定性

移動駆動力の側面からは、「核種が移動できない／移動し難い条件」として以下の安全機能が定義される。地下水による移流は、小さな動水ポテンシャルと媒体の低透水性に分けて考慮することが可能である。また、オーバーパックに関しては移流及び拡散がゼロであることから、完全閉じ込め性を意味し安全機能として付け加える。更に核種の移動量を考慮するならば、特に、ニアフィールドでは小さな流量や流速が安全機能となる。拡散は媒体の特性に依存するものであり、濃度勾配が移動の駆動力として考えられる。これと媒体の性質に依存する拡散による核種の動きは、媒体が透水性であるか否かにより異なり、透水性の媒体中では核種の拡散が遅いほうが安全性に寄与し、デットポアなどの地下水の流れない間隙中では、この中により多く拡散するほうが安全性に寄与する。

- 領域での小さな動水ポテンシャル
- 領域の小さな透水性
- ニアフィールドでの小さな地下水流量
- オーバーパックの完全閉じ込め性
- 領域溶液中での小さな拡散性
- 非透水性媒体への大きな拡散性

移動媒体の側面からは、媒体の特性や媒体中の間隙水の特性を通じて核種の移動形態や移動駆

動力とともに定量化される。時間的な観点からは媒体自身の長期的な安定性が核種の閉じ込め性能に寄与する。また、空間的な観点からは、核種の移動するバリアは距離として長いほうが移行に要する時間が長くなることから有利であると考えられる。更に、沈殿物や吸着物の安定性を期待するためには、還元環境等の地下水化学状態についても安全機能として考慮することができる。

- 媒体の長期安定性
- 媒体中の長い移行距離（長い移行時間）
- 媒体中の拡散性（移動駆動力の拡散性で代表させる）
- 沈殿、吸着に好ましい地下水化学環境
- 媒体の高い吸着性（核種の存在形態で代表させる）

これらの安全機能の表現は必ずしも固定されたものではなく、「領域における核種の移行抑制機能」といったより概念的でまとめられた表現で代表することや、これとは逆に、より詳細に記述すること、また「重複」して表現することも制限するものではない。安全機能として、機能全般が網羅的に記述されているかといった観点が重要であり、これにより重視すべき機能の選択に関する自由度が確保される。

表 2-2 に地下水移行シナリオに関してまとめた包括的な安全機能の素案を示す。これらは表 2-1 に示した第 2 次取りまとめで表記された安全機能と異なるものではなく、記述上の表現を変えたものとして捉えることができるものである。

表 2-1 第2次取りまとめにおける安全機能

人工バリアの設置環境
好ましい地下水化学（還元性など）
小さな地下水流束
力学的安定性
処分施設がバリア性能を損なわない
人間環境からの物理的障壁の存在
地層処分システムに期待する安全機能
オーバーパックの核種閉じ込め
ガラス固化体が地下水への放射性核種の溶出を抑制
緩衝材の低透水性
緩衝材の膨潤性と可塑性
緩衝材の化学的緩衝性
緩衝材間隙中での低い溶解度（溶解度制限）
緩衝材中での小さな物質移行速度（拡散）
緩衝材中での核種移行遅延（収着）
緩衝材中でのコロイド、微生物および有機物のろ過
母岩中での核種の移行抑制
母岩中での核種の希釈・分散
移行中の崩壊による核種の減衰
安全機能に対して影響を与える可能性のある要因
オーバーパックの腐食膨張
緩衝材の亀裂への流入
処分施設の変質
母岩中の有機物
コロイドの生成と母岩中でのコロイド移行
母岩の変形

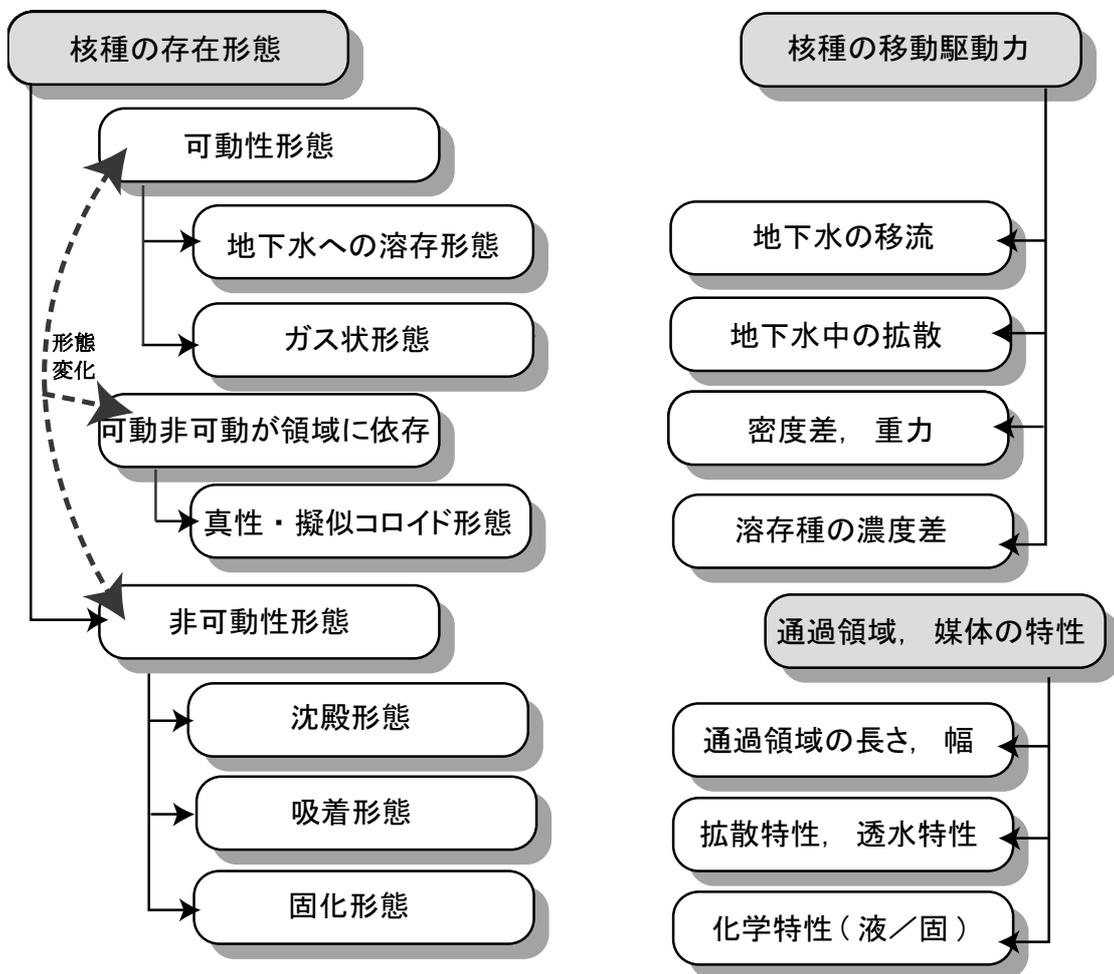


図 2-3 領域内で核種の移動プロセスを律する機構

表 2-2 地下水移行シナリオに関する包括的な安全機能の案

安全機能	領域				
	ガラス固化体	オーバーパック	緩衝材	掘削影響領域	母岩
領域内での核種の沈殿生成（低溶解性）	-	-	○	-	-
領域内での核種の媒体への吸着性	-	-	○	-	○
ガラス固化体の低溶解性	○				
小さな放射性ガスの発生量	○				
沈殿，吸着に好ましい地下水化学環境	-	○	○	○	○
領域でのコロイドろ過性	-	-	○	-	-
領域溶液中でのコロイドの不安定性	-	-	-	-	-
媒体へのコロイドの吸着性	-	-	-	-	-
領域での小さな動水ポテンシャル	-	-	○	○	○
領域の小さな透水性	-	-	○	-	○
ニアフィールドでの小さな地下水流量				○	
オーバーパックの完全閉じ込め性		○			
領域溶液中での小さな拡散性	-	-	○	-	○
非透水性媒体への大きな拡散性	-	-	-	-	○
媒体の長期安定性	○(時間依存)	○(時間依存)	○	○	○
媒体中の移行距離（移行時間）	-	-	○	-	○

○第2次取りまとめで定量化された安全機能

-安全機能として定義できるが、第2次取りまとめでは不確実性や保守性の観点から省略された機能

(3) 処分システムの環境条件

処分システムの環境条件は、単純に、評価すべき領域の温度 (T)、水理 (H)、力学 (M)、化学 (C)、形状 (G) と集約することができる。しかしながら、評価すべき対象 (安全機能、懸念事象) によって、空間的な大きさや時間スケール、評価の精度によって、評価方法や評価結果の整理方法が異なるものと考えられる。例えば、最も単純な温度設定においても、ガラス固化体の失透温度を評価するのか、核種の溶解度を評価するのか、母岩の変質を評価するのかといった、性能評価での具体的な対象が示されることにより、空間的及び時間的な温度環境の変遷が具体化される。そのため、処分環境を整理する場合には、安全機能を定量的に評価するために必要とされる情報であるモデル及びパラメータとそのパラメータの適用される空間範囲や時間範囲をあらかじめ明確化しておくことが重要となる。安全機能を定量的に評価するために必要とされる情報であるモデル及びパラメータについては、(2) で述べたように、核種の閉じ込め性に関する機能について性能評価側で重要と考えられる機能を選択しこれをモデル化する判断がなされることから、トップダウン的なアプローチがなされる。

これに対して、地質調査結果や設計条件から処分環境の評価は、安全機能を定量化するために必要とされた情報に対して、個別 (または連成し) に事象解析が実施される。ここでは、THMCG に関して個別にプロセスが評価されるとともに、FEP 辞書等で述べられる懸念事象についてもその取り扱いが検討される。

- ・安全機能を評価するために必要となるモデル・データへの対応 (図 2-2 の⑤に相当)
 目標 (核種の保持性能) を定量的に評価するためのトップダウンアプローチ
- ・処分システムの構造や懸念されるプロセスの評価におけるTHMCGへの影響 (図 2-2 の④に相当)
 FEP 辞書等に記載される懸念事象や個別現象評価のためのボトムアップアプローチ

のトップダウン及びボトムアップの双方向からのアプローチが合理的であると考えた。

2.3 第2次取りまとめ情報の整理

(1) 適用するツール

2.2で示した基本概念を具体的に展開するために、FepMatrix ツール（牧野仁史他，2007⁶）をベースとして、これを改良し用いることとした。

FepMatrix は、第2次取りまとめ以降のシナリオ解析の研究において、シナリオの作成、それに引き続くモデル化および解析ケースの選定までをシナリオ解析の対象として含め、そこでの個々の作業プロセスの効率化、および作業内容や判断根拠の追跡性と透明性の確保・向上を図ることに重点をおいたシナリオ解析ツールである。このツールの特徴を以下に示す。

開発要件1：100件を超える（場合によっては1,000件を超える）FEPの複雑な相関関係を、作業しやすくかつその結果を追跡しやすい形で整理・表現する仕組みとする。あわせて、合理的な十分性を達成しやすい仕組みとする。

開発要件2：FEPの相関関係の整理・表現を検討する段階から下流側の作業であるモデル化や解析ケースの選定につながりやすくすることに配慮する。

開発要件3：作業プロセスや内容および判断についても、その記録をマトリクスに集約することで追跡性を確保しやすい仕組みとする。

上記の3つの開発要件に対応するためのFEPの相関関係の整理手法として、

- ①相関関係のマトリクス形式での整理（上記のポイント1～3に対応）
- ②階層化（上記のポイント1と2に対応）

を採用し、システム構築がなされた。

本研究では、①の相関関係をマトリクス形式で整理するとする手法を採用するが、②の階層化に関しては、地質調査から設計及び性能評価までの一連の情報の加工過程を俯瞰できるような構造の構築を目的とすることから、1つの階層で全体を表現できるように配慮した。そのため、ひとつのボックスに複数の事項が定義できるように、各ボックスに簡易なデータベースをリンクし、多重の項目（事象の取り扱いや判断）が記述できるように改良を行った。

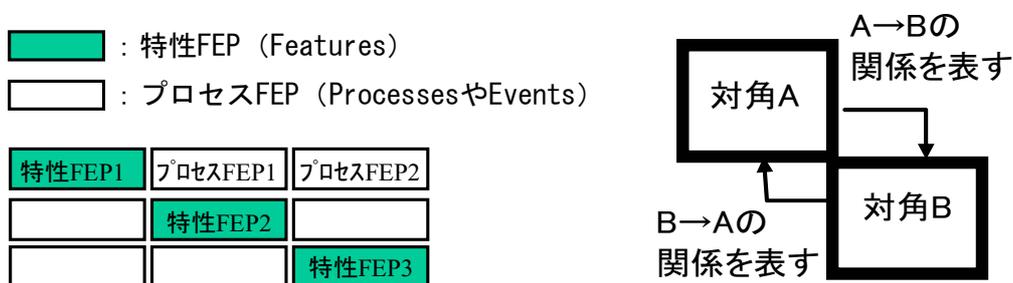


図 2-4 FepMatrixによるマトリクス上の表現（牧野仁史他，2007⁶より）

FEP分析ではマトリクス形式の対角要素に特性FEPを配置し、非対角要素にプロセスFEPを配置するとする（図 2-4 参照）厳密な構成に関してもここでの記述に適用せず、

FepMatrix の対角要素の上流側に

- ・地質環境調査結果，設計条件

下流に

- ・安全機能

を配置し，それらが環境条件（THMCG）を通じて情報の整理がなされる構造とした。地質環境調査結果や設計条件から環境条件（THMCG）への要素については，

- ・ 調査結果の不確実性の取り扱い方法
- ・ 懸念事象の取り扱い
- ・ 時間的な変動を含むプロセスの取り扱い

等，事象の取り扱いや判断を中心として配置するものとする。

環境条件（THMCG）から安全機能への要素については，安全機能を定量化するために選択されたモデルや，そのモデルを選択することによる「保守性の判断」，環境条件で示されたデータの取り扱いや簡略化における取り扱い等が記述されることとなる。

本研究では，第2次取りまとめにおいて用いられた性能評価における環境条件の取り扱いや安全機能に関する取り扱いを上述の体系に則しまとめることとした。これを始点とし，以下の評価を効率的に実施できるようにすることとする。

- ・ 新たな設計オプションや新たな地質環境調査を適用する場合に「再評価」すべき判断内容を抽出すること
- ・ 保守性を排除し現実的な性能評価を実施するために，「再評価」すべき判断内容の抽出と評価に含めるべき安全機能の抽出
- ・ 懸念事象の再評価や新たな懸念事象を評価する場合の「再評価」すべき判断内容の抽出と評価に含めるべき安全機能の抽出

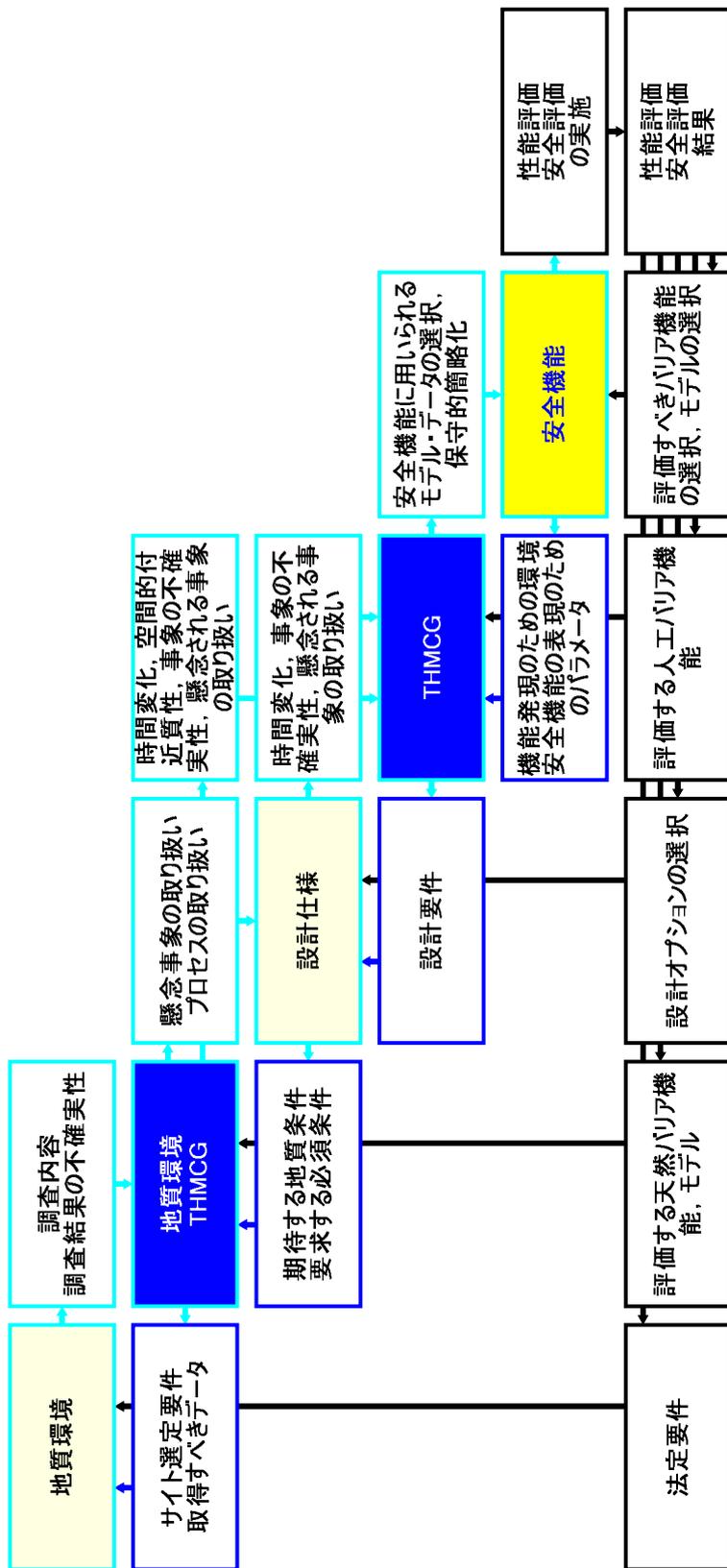


図 2-5 処分システムの情報の受け渡しに関する表現

(2) 第2次取りまとめ概念の整理

図 2-6 に FepMatrix で表記した、評価体系の全景を示す。図 2-6 に示すマトリクスは 40×40 のサイズであり A4 程度の紙面上で全体を現すことは難しい（ソフトウェア上では可能）。そのため、不要な部分をブラインドし適宜図表化を行うこととする。図 2-6 で示した全景は、支保領域やプラグの設計を含んでいること、また、それらに關与する安全機能（支保での核種移行遅延機能）を含んでいることからこれらを除き表記することとした。また、本研究における最終的な目標は、具体的な地質調査結果と設計条件並びに設計オプションの選択を反映させた性能評価を実施するための総合的な性能評価手法の構築にあるが、その端緒として、設計－性能評価における部分と中心としてまとめることとした。

a) 地質環境条件から環境条件（THMCG）への情報フローの作成

図 2-7 に地質環境から処分環境（THMCG）への表記を拡大し示す。第2次とりまとめにおけるレファレンスケースでは、地質環境を特定せず、わが国に広く分布する一般的な地質環境を想定することにより性能評価を実施している。地質環境のレファレンスケースとしては、酸性結晶質岩である花崗岩が選択され、一般的な処分環境を想定し評価に適用している。そのため、地質調査結果とその判断や解釈の結果ではなく、概要調査に関する法定要件に適合するサイトが選定されたものと仮定し、かつ、水理条件（亀裂の透水性等）は、処分場の選定がなされた時点でのデータ及び情報を用いているものと考えたこととした。レファレンスケースにおける地質環境に関する特徴としては、以下のものが挙げられる。

- ・ 硬岩（酸性岩、結晶質岩）での一般的力学特性の適用
- ・ 地下水は、亀裂特性が異なる亀裂が互いに連結した不均質なネットワーク構造内を選択的に流れるものと判断
- ・ 主要な亀裂や断層と分岐・派生した断層からなる亀裂や断層系は、1枚の亀裂として平行平板で取り扱うことと簡略化
- ・ 亀裂内の透水量係数や開口幅等のパラメータの不均質性は考慮しない（均質で保守的な条件で設定）
- ・ 地下水流が卓越する断層（または亀裂）まで、少なくとも 100m 離れた位置の処分パネルが建設される
- ・ 地下水化学環境は、降水系高 pH 型地下水（FRHP、第2次取りまとめ分冊3参照）

表 2-3 に地質環境調査から環境条件（THMCG）への展開に関するデータベース内容を示す。第2次取りまとめとでは、実際のサイト環境を適用していないことから、一般情報からの想定が主要内容となる。FepMatrix のソフトウェア上では、これに設定根拠となるデータ（報告書からの引用）が PDF としてリンクされる。表 2-3 に示される上部の5つの行は、法定要件等のサイト選定に係る要件であり、これらは処分場の性能を評価するための前提条件となり、特定のサイト環境を対象とする場合には地質調査による確認が必要となる。地質調査によるサイト環境の解釈の確実性は、別途、ESL（ ）等の手法を用いることにより評価されるべきであり、その結果は、FepMatrix に付随するデータベースに加えられていくこととなる。

b) 設計から環境条件（THMCG）への情報フローの作成

表 2-4～表 2-8 にガラス固化体設計、オーバーパック設計、緩衝材設計に基づき処分環境条件（THMCG）を評価するための情報の流れをまとめる。ここでは、以下について留意しデータベース

を構築することとした。

- 設計のための要件を処分環境（THMCG）で分類し記述する
これらは、FepMatrix 上では、対角要素の下側に配置される
- 人工バリア構築に用いられる材質、形状、サイズなどの設計条件を具体的に想定
ここでは、第2次取りまとめでレファレンスとした人工バリア概念と硬岩、横置き処分を想定、形状等の具体的なデータは、FepMatrix におけるデータベースとして整備される。
- 処分環境に関するプロセスの取り扱い、FEP の検討で抽出される懸念事象の取り扱いに関する記述が中心となる。これらは、対角要素の上側に配置される。

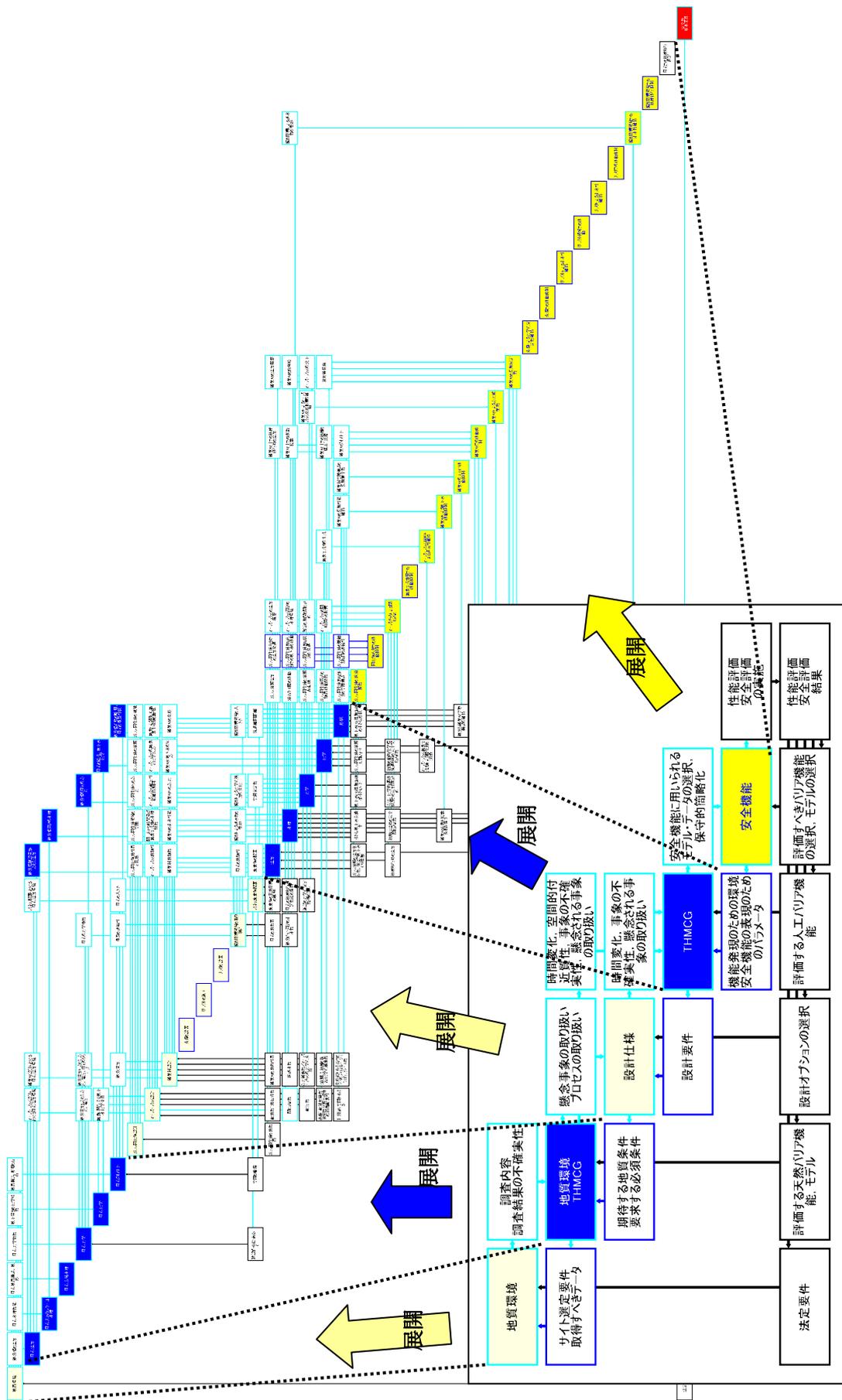


図 2-6 第 2 次とりまとめ評価体系の FepMatrix による展開

表 2-3 地質環境を始点及び終点とする情報

始点	This_FEP	This_FEP1	This_FEP2	終点	取り扱い
地質環境					
法定要件				地質環境	概要調査区域の選定における法定要件として、火山、地震断層、隆起浸食、未固結岩の取り扱いが提示されている。
法定要件	地震・断層		除外FEP	地質環境	陸域では空中写真判読等、海域では海上音波探査等に基づいて全国的に調査された文献に示されている活断層がある場所を含めないようにされる。
法定要件	噴火		除外FEP	地質環境	繰り返し活動し、変位の規模が大きい活断層等について、次の事項に該当すると明確に判断される場所、範囲は含まれない。(概要調査地区を選定要件)
法定要件	隆起			地質環境	将来数万年にわたるマグマの活動範囲の拡がりの可能性を考慮し、第四紀火山の中心から半径15kmの円の範囲内にある地域は含めないように選定される(概要調査地区を選定要件)
法定要件	岩種			地質環境	過去10万年間の隆起の総量が300mを超えていることが明らかな地域は含めないようにされる(概要調査地区を選定要件)
母岩力学特性				母岩力学	最終処分を行おうとする地層が、第四紀の未固結堆積物である地域は含めないように選定(概要調査地区を選定要件)
母岩地質構造、地形	母岩			母岩広域水理	結晶質岩(酸性岩)を対象とした一般的な岩の力学特性を想定
母岩地質構造、地形	地形			母岩広域水理	結晶質岩(酸性岩)の母岩を想定
母岩水理性能	飽和・不飽和			母岩ブロックスケール水理	平野の一般的な動水勾配を想定
母岩水理性能	主要流動経路			母岩ブロックスケール水理	母岩は地下水に飽和されているものと想定
母岩水理性能	流量、流速評価			母岩ブロックスケール水理	地下水の主要流動経路は母岩中の亀裂であり、釜石等で取得された亀裂統計に基づき亀裂ネットワークによる地下水流動を想定(不均質性の取り扱い)
地質構造、断層の存在、母岩の変形	地質構造			母岩ジオメトリー	分岐や派生による亀裂帯は1本の平行平板亀裂で簡略化
地質構造、断層の存在、母岩の変形	断層の存在			母岩ジオメトリー	亀裂の透水量係数の深度依存性を考慮
地質構造、断層の存在、母岩の変形	ニアファイナルド 母岩のクリープ			母岩ジオメトリー	結晶質岩(酸性岩)が広く分布しているものと想定
地下深部の化学特性				母岩化学	処分パナネルから最近傍の地表への主要流動経路となる断層まで100mの距離を想定
人間環境からの物理的障壁の存在				形状	処分パナネルから最近傍の断層まで100mの距離を想定
処分場建設深度に応じた温度				母岩温度	還元性雰囲気、中～弱アルカリ環境を想定(降水系地下水を想定) 処分深度として1000mの深さを想定
				母岩温度	地表温度(平均15℃)、温度勾配3℃/100m、硬岩(花崗岩)の熱物性値を用いる。処分深度を1000mとして、環境温度は45℃と想定

表 2-4 ガラス固化体設計から処分環境条件

始点	This_FEP	This_FEP1	This_FEP2	終点	取り扱い
温度 ガラス固化体 設計	ガラス固化体設計 ガラス固化体の熱性質 ガラス固化体領域の空 隙			ガラス固化体設計 水理	ガラス固化体の相転移温度400~500°Cを超えないこと。 水理上特に考慮されない。
ガラス固化体 設計	ガラス固化体熱性質と発 熱		温度評価結果	温度	ガラス固化体とオーバーパック、オーバーバックと緩衝材、緩衝材と母岩の境界 に、空気層の存在や粉末ベントナイトの存在を仮定して温度評価における不確実 性を検討した。固化体中央部の温度は、閉鎖後10年程度で最高温度(横置き、硬 岩で115°C~170°C)となり、1000年後には、どの条件においても60°Cを下回る。約 10000年で環境温度の45°Cに回復するものと推定
ガラス固化体 設計	ガラス固化体熱性質と発 熱	ガラス固化体中 のインベントリ	データ	温度	安全評価で用いるモデルガラス固化体の仕様を、JNFL 固化体を参考にして設 定。安定同位体も含め検討する。再処理までの冷却期間によっては処分時のイン ベントリが変動するが、オーバーバック開口までの1000年を考慮することにより、 安全評価への影響は小さいものと判断している。
ガラス固化体 設計	ガラス固化体への応力			力学	オーバーバック健全期間では、ガラス固化体への応力によりガラス固化体の破壊 が生じないような設計がなされる。オーバーバック健全期間以降については、特に 考慮はされていない。
ガラス固化体 設計	ガラス固化体の溶解 線			化学	化学的な条件として、設計では特に考慮されていない。実規模試験などにより、溶 解速度を推定している ガラス固化体からのγ線放射線量は、再処理使用を踏まえ評価され、オーバー バックの厚さの検討に反映される
ガラス固化体 設計	ガラス固化体の破壊			形状	初期熱応力によるガラスの割れは、ガラス固化体初期表面積の10倍を戻込む。 オーバーバック健全時のガラスへの応力は考慮された設計がなされる。オーバー バックの腐食代が消費された後の腐食の増加による応力は特に評価されていな い。

表 2-5 オーバーバック設計から処分環境条件 (1/2)

始点	This_FEP	This_FEP1	This_FEP2	終点	取り扱い
	オーバーバック設計				腐食代(40mm,設置酸素による腐食10.1+還元腐食20mm)+Max(耐圧しろ41mm,遮蔽厚150m)で厚さを190mmとした。偏圧条件としてK=1の極端な条件下で190mmを評価し影響のないことを確認
水理	閉じ込め性		要件	オーバーバック設計	操業時に放射性物質の外部環境への漏出を防ぐこと/廃棄体埋設後、地下水の侵入を防ぐこと。
母岩化学	腐食に関与する地下水化学条件	溶存酸素濃度		オーバーバック設計	既存研究(H3)の結果に基づき、健全性維持期間の目標値を1000年として設計。母岩中は還元性の地下水化学環境を想定。坑道の掘削及び操業における酸素の侵入を考慮。
母岩化学	腐食に関与する地下水化学条件	地下水組成		オーバーバック設計	降水系高pH型地下水、海水系高pH地下水の2種類の地下水が考慮された。
温度	耐熱性・熱伝導性	耐熱性	要件	オーバーバック設計	ガラス固化体からの発熱に対し、閉じ込め性、耐食性および耐圧性が有意な影響を受けないこと。
力学	耐圧性			オーバーバック設計	廃棄体埋設後、所定の期間、腐食によって閉じ込め性が損なわれないこと。
母岩力学	処分深度に応じた応力、偏圧			オーバーバック設計	地下水静水圧(9.8MPa)を考慮。
形状	十分な内空間を有する		要件	オーバーバック設計	オーバーバックの変形やガラス固化体の熱膨張により、ガラス固化体が機械的に破壊しないこと。 ガラス固化体の寸法に基づき設計
化学	遮蔽・耐放射線性・放射性分解生成物の消費/耐食性	遮蔽・耐放射線性	要件	オーバーバック設計	ガラス固化体からの放射線による水の放射線分解にももって生成される酸化性化学種により、腐食が促進されないこと ガラス固化体からの放射線によって、緩衝材の材料特性が変化しないこと。
化学	遮蔽・耐放射線性・放射性分解生成物の消費/耐食性	化学的緩衝性	要件	オーバーバック設計	周囲の地下水を腐食生成物によって還元性環境に緩和すること
化学	遮蔽・耐放射線性・放射性分解生成物の消費/耐食性	耐食性	要件	オーバーバック設計	廃棄体埋設後、所定の期間、腐食によって閉じ込め性が損なわれないこと
母岩温度	オーバーバック設計における母岩温度環境			オーバーバック設計	処分深度1000m,地温勾配3°C/100m,地表面平均気温15°C,45°Cとして評価。

表 2-6 オーバーパック設計から処分環境条件 (2/2)

始点	This_FEP	This_FEP1	This_FEP2	終点	取り扱い
オーバーパック設計	腐食による開口と腐食生成物の膨張			形状	1000年間の健全性維持期間を想定し設計がなされる。腐食生成物の影響は、応力場の変遷として考慮されている。腐食生成物層の形状や時間的な変遷に関しては、保守的な腐食速度と腐食生成物が金属鉄の1/3の密度となる仮定に基づいている。
オーバーパック設計	腐食による開口と腐食生成物の膨張	オーバーパックへの偏圧		形状	腐食生成物の存在は、物理的マリアとしては考慮しない。 地下水静水圧及び腐食生成物膨潤圧による緩衝材の圧密偏力(10.7MPa)から、蓋部100.1mm,胴部45.2mmと算定。
オーバーパック設計	遮蔽・耐放射線性・放射性分解生成物の消費/耐食性			化学	炭素鋼を用いることにより、腐食生成物の還元能力を期待し、地下水の還元性雰囲気維持に関する不確実性を減じている。
オーバーパック設計	遮蔽・耐放射線性・放射性分解生成物の消費/耐食性	放射線影響		化学	ガラス固化体からのγ線が全量酸化剤を生成するものとして、保守的に評価を行い、遮蔽圧150mm以上であれば、オーバーパックの腐食に有意な影響を与えないもの判断された。オーバーパック表面の線量率は処分初期の放射線量で評価している。
オーバーパック設計	遮蔽・耐放射線性・放射性分解生成物の消費/耐食性	地下水化学環境		化学	降水系高pH型地下水、海水系高pH地下水の2種類の地下水が考慮された。脱気した水溶液中(80℃)において炭酸水素イオン濃度(0.001~0.1mol/l-1)、炭酸イオン濃度(0.001~0.1mol/l-1)、塩化物イオン濃度(0.0028~0.28mol/l-1)を変えて1年間の浸漬試験を実施した。その結果、炭素鋼の腐食速度は炭酸水素イオン濃度、塩化物イオン濃度のいずれにも依存しないことがわかった。
オーバーパック設計	開口までの時間及び腐食生成物の水理特性	健全性維持期間		水理	1000年の健全性維持期間を設定する。地下水の放射線分解に伴う腐食速度の不確実性を遮蔽厚さで考慮し、190mmの厚さを設定。
オーバーパック設計	開口までの時間及び腐食生成物の水理特性	腐食生成物中の水理		水理	止水性に関する機能は考慮しない。
オーバーパック設計	開口までの時間及び腐食生成物の水理特性	建設時の侵入酸素による腐食		水理	酸素による腐食しらは、横置きで4.4mm、縦置きで10.1mmと推定。
オーバーパック設計	開口までの時間及び腐食生成物の水理特性	還元環境での腐食量		水理	環境条件にともなう不確実性を考慮して10μm y-1の平均腐食速度を仮定した。したがって、1,000年間の平均腐食深さは10mmと評価。実験データの極値統計解析結果から、平均腐食深さが10mm程度の場合の最大腐食深さは平均腐食深さの2倍以下であることから、ここでは1,000年間の最大腐食深さを平均腐食深さの2倍の20mmと評価した。
オーバーパック設計	開口までの時間及び腐食生成物の水理特性	還元環境での腐食速度		水理	試験的では炭素鋼の平均腐食速度は試験片の重量減少から0.4~2.4 μm y-1と評価。
オーバーパック設計	開口までの時間及び腐食生成物の水理特性	孔食、応力腐食割れ		水理	孔食およびすきま腐食の進展を仮定しても、酸素による腐食深さ評価は十分保守的であると判断。
オーバーパック設計	オーバーパック熱物性		温度評価結果	温度	オーバーパックの温度は、閉鎖後10年程度で最高温度(横置き、硬岩で100℃~160℃)となり、1000年後には、どの条件においても60℃を下回る。約10000年で環境温度の45℃に回復する。
オーバーパック設計	オーバーパック耐圧性能維持期間			力学	腐食代(40mm) + Max(耐圧しろ、遮蔽厚)150mmが採用されている。
オーバーパック設計	オーバーパック耐圧性能維持期間	耐圧性		力学	地下水静水圧及び腐食生成物膨潤圧による緩衝材の圧密偏力(10.7MPa)から、蓋部100.1mm,胴部45.2mmと算定。

表 2-7 緩衝材設計から処分環境条件 (1/2)

始点	This_FEP	This_FEP1	This_FEP2	終点	取り扱い
緩衝材設計	緩衝材設計				ケイ砂30wt%、ペントナイト70wt%、乾燥密度1.6Mg/m ³ 、厚さ70cmとすることにより、各要件に対応。炭素鋼オーバーパックの腐食量を4cmとすること、圧力反圧を考慮して緩衝材厚さを70cmとしている。コロイドフィルトレーションと膨潤性については上述の条件で性能を確認。
化学	溶解した核種の収着/化学的緩衝性	化学的緩衝性	要件	緩衝材設計	地下水のpHや還元性等を化学的に緩衝することにより地下水の化学的條件を好ましいものとする
化学	溶解した核種の収着/化学的緩衝性	収着性	要件	緩衝材設計	ガラス固化体から放射性核種が溶解した場合、それを収着することによって放射性核種の移動を抑制すること
形状	変形能を有する/コロイドのフィルトレーション/自己シール性	変形能	要件	緩衝材設計	廃棄体埋設後、オーバーパックの機能が維持される期間、緩衝材が変形能を有することにより、オーバーパックの腐食膨張と岩盤のクリープ変形を力学的に緩和できること
形状	変形能を有する/コロイドのフィルトレーション/自己シール性	コロイドフィルトレーション	要件	緩衝材設計	放射性核種がコロイドとして移動することを妨げること
形状	変形能を有する/コロイドのフィルトレーション/自己シール性	自己シール性	要件	緩衝材設計	コロイドフィルトレーションと製作可能性の観点からケイ砂混合率と乾燥密度の組み合わせ可能な範囲を決定
形状	変形能を有する/コロイドのフィルトレーション/自己シール性	ケイ砂混合割合		緩衝材設計	水を含んだ際の膨潤性により、定置時の周辺岩盤との隙間や緩衝材内に生じた隙間を充填できること (厚さ等設定後の性能確認)
形状	変形能を有する/コロイドのフィルトレーション/自己シール性	厚さ		緩衝材設計	コロイドフィルトレーションと製作可能性の観点からケイ砂混合率と乾燥密度の組み合わせ可能な範囲からペントナイト70wt%、ケイ砂30wt%として設計条件を固定。
形状	変形能を有する/コロイドのフィルトレーション/自己シール性	厚さ		緩衝材設計	設計においては、まず応力緩衝性に着目して緩衝材の厚さを設定し、その設定値に対して自己シール性、熱伝導性、製作性などのその他の設計要件も満足されていることを確認することとする。
水理	低透水性		要件	緩衝材設計	低透水性を有することにより緩衝材中の地下水の動きを遅くして、結果的に緩衝材中の物質の移動が遅くなるようにするとともに、ガラス固化体の溶解速度や核種の溶出を抑制すること
母岩力学	処分深度に応じた応力、偏圧、母岩のクリープ			緩衝材設計	対象とする結晶質岩では、考慮の必要性はない。
母岩温度	処分深度			緩衝材設計	硬岩、深度1000mを想定。
母岩温度	緩衝材設計における母岩温度環境			緩衝材設計	
温度	緩衝材の熱的性質		要件	緩衝材設計	良好な熱伝導性を有することにより、ガラス固化体の発熱を外部に伝え、ガラス固化体の安定な形態を損なうような熱による変質を生じさせないことと人工バリアの性能にかかわる熱移動、水分移動、核種移行、応力緩和などに関する性質に有意な影響を及ぼすような緩衝材の熱的な変質が生じないこと (厚さ等設定後の性能確認)
温度	緩衝材の熱的性質	最高温度		緩衝材設計	100℃近傍でのイライト化の可能性は小さいものと判断されたが、溶出シリアの沈殿に伴う、セメンテーションの可能性を考慮し、緩衝材の劣化を排除することを目的として100℃を上限とする。
力学	応力緩衝性/オーバーパックの力学的支持	応力干渉性	要件	緩衝材設計	廃棄体埋設後、オーバーパックの機能が維持される期間、緩衝材が変形能を有することにより、オーバーパックの腐食膨張と岩盤のクリープ変形を力学的に緩和できること
力学	応力緩衝性/オーバーパックの力学的支持	応力干渉性		緩衝材設計	緩衝材厚さの決定に用いる。

表 2-8 緩衝材設計から処分環境条件 (2/2)

始点	This_FEP	This_FEP1	This_FEP2	終点	取り扱い
緩衝材設計	緩衝材熱物性			温度	未冠水の緩衝材の熱物性を用いる(含水比7%) 緩衝材中の温度は、閉鎖後10年程度で最高温度(横置き、硬岩で97°C~117°C)となり、1000年後には、どの条件においても60°Cを下回る。約10000年で環境温度の45°Cに回復する。 ガラス固化体とオーバーパック、オーバーバックと緩衝材、緩衝材と母岩の境界に、空気層の存在や粉末ベントナイトの存在を仮定する場合には、緩衝材中の最高温度が、制限温度とする100°Cを超えるが、緩衝材への地下水の浸入や緩衝材の膨潤による間隙の閉鎖の可能性から、間隙の温度への影響は小さいものとの判断された。
緩衝材設計	緩衝材への応力			力学	緩衝材の構成モデルとして修正Cam-Clayモデルを用いて、上記岩盤クリーブ変形およびオーバーパックの腐食膨張による緩衝材の力学的な経時変化解析を実施した。10,000年後の緩衝材の応力比の最大値は0.60となり、限界状態(0.63)に近い値となったが、応力比が大きくなる範囲はオーバーバック周辺(とくに隅角部)に限られ、オーバーパックの腐食膨張に伴う緩衝材の破壊の可能性は小さいものと判断された。
緩衝材設計	緩衝材への応力	ガス移行		力学	二層流解析の結果では、オーバーパックの腐食速度を10 μ m/yとする保守的な設定条件においても、ガス発生による人工バリアへの構造力学的影響、さらには間隙水の排水にもなう核種移行の促進に対する影響については、ほとんど問題ないと判断された。
緩衝材設計	緩衝材への応力			力学	緩衝材の構成モデルとして修正Cam-Clayモデルを用いて、上記岩盤クリーブ変形およびオーバーパックの腐食膨張による緩衝材の力学的な経時変化解析を実施した。10,000年後の緩衝材の応力比の最大値は0.60となり、限界状態(0.63)に近い値となったが、応力比が大きくなる範囲はオーバーバック周辺(とくに隅角部)に限られ、緩衝材による応力緩衝性により、オーバーバックや母岩が破壊されることはいないものと判断
緩衝材設計	緩衝材の変形			形状	オーバーパックの腐食膨張、オーバーバックの沈下、岩盤クリーブの観点から評価される。処分システムの安全性に影響が及ぶ変化はないものと判断された
緩衝材設計	緩衝材の止水性能			水理	ペクレ数で0.01以下となることを確認。材質の長期安定性を前提とし、長期的に止水性が保たれるものと判断された
緩衝材設計	緩衝材と地下水の反応			化学	陽イオン交換によるCa化、スメクタイトのイライト化、鉄との相互作用による擬クロナイト化、鉄スメクタイト化の鉱物学的変化について考慮されている。Ca化による性能の低下による処分システムへの影響は小さいものと判断。鉱物学的変化については、ナチュラルアナログによる定性的判断から、変化の可能性は小さく長期的に鉱物組成が安定であると判断された

c) 処分環境条件から安全機能への情報フローの作成

表 2-2において、包括的な安全機能を示した。安全機能としての候補は、概ね領域の数に比例し増加することから、FepMatrixを用いた展開数（行列数）が膨大となり、全体を俯瞰が困難となることが予想される。そのため、安全機能の表記を簡略化し第2次取りまとめで用いられた安全機能を参考に、表 2-9に示した機能でまとめることとした。2.1 での記述のように、安全機能の表記は固定されてものではなく、目的によって表記を変更することとする。

ここでの安全機能は、核種の移動に関して定量的に表現できるものと考え、処分環境条件を安全機能に反映するための、モデルの選択やデータの取り扱いに関する判断を経由し定義される。これを効率的に実施するために、戦略的に重視する安全機能を各バリアにおける核種の保持性能の観点から整理し、これを定量化するための数学モデル及びパラメータを念頭に、処分環境条件で示される具体的環境条件を解析パラメータに反映させていくこととなる。これらの作業を繰り返し実施することにより、設計-性能評価の連携が具体化されるものとする。

図 2-8に処分環境条件から安全機能へのリンク状態を示す。安全機能には、解析モデル（概念モデル及び数学モデル、パラメータ）が記述され、処分環境の THMCG の各条件に関する取り扱いが非対角要素（対角要素の上側ボックス）に記される。

表 2-10～表 2-17に各安全機能に関する情報を、第2次取りまとめを参考としてまとめた。

表 2-9 FepMatrix における安全機能の暫定的な表記

包括的安全機能	領域			
	ガラス固化体	オーバーパック	緩衝材	掘削影響領域
領域内での核種の沈殿生成（低溶解性）	-	-	緩衝材での核種移動抑制	-
領域内での核種の媒体への吸着性	-	-	緩衝材での核種移動抑制	-
ガラス固化体の低溶解性	ガラス固化体の低溶解性			
小さな放射性ガスの発生量	ガラス固化体の低溶解性			
沈殿，吸着に好ましい地下水化学環境	-	オーバーパック材料による還元性維持	緩衝材の長期安定性／緩衝材の化学・応力緩衝性	(母岩の地下水化学)
領域でのコロイドろ過性	-	-	緩衝材によるコロイド移動抑制	-
領域溶液中でのコロイドの不安定性	-	-	-	-
媒体へのコロイドの吸着性	-	-	-	-
領域での小さな動水ポテンシャル	-	-	緩衝材による地下水移動抑制	掘削影響領域での止水性維持
領域の小さな透水性	-	-	緩衝材による地下水移動抑制	-
ニアフィールドでの小さな地下水流量				掘削影響領域での止水性維持
オーバーパックの完全閉じ込め性		オーバーパックによる閉じ込め性		
領域溶液中での小さな拡散性	-	-	緩衝材での核種移動抑制	-
非透水性媒体への大きな拡散性	-	-	-	-
媒体の長期安定性	ガラス固化体の低溶解性	オーバーパックによる閉じ込め性	緩衝材の長期安定性／緩衝材の化学・応力緩衝性	掘削影響領域での止水性維持
媒体中の移行距離（移行時間）	-	-	緩衝材での核種移動抑制	-

表 2-10 ガラス固化体の低溶解性

始点	This_FEP	This_FEP1	This_FEP2	終点	取り扱い
	ガラス固化体の低溶解性		モデル		<ul style="list-style-type: none"> 処分時のガラス固化体表面積については、冷却時の割れによるガラス固化体の表面積の増加を考慮し、幾何学的表面積より大きい値を設定する。 オーバーパック破損後、直ちに緩衝材間隙水がガラス固化体と接触し、長期的なガラス溶解速度に従ってガラスマトリクスの溶解が進む。核種は、ガラス固化体中で均質に混合されており、ガラス固化体中の核種存在比に応じてガラスから溶出する(調和溶解)。 オーバーパック破損後の、ガラス固化体の内部亀裂、ガラスの変質層、オーバーバックおよびその腐食生成物による核種移行遅延は保守的に無視する。
水理	溶存ケイ酸の移動			ガラス固化体の低溶解性	拡散による移動を想定。溶性ケイ酸濃度が飽和に達するような長期の浸出試験で取得されている各種ガラス固化体の溶解速度をもとにガラス溶解速度を決定。
温度	ガラス溶解温度	オーバーバック開口後温度		ガラス固化体の低溶解性	オーバーバックは、少なくとも1,000年間破損しないように設計され、腐食による強度の低下により、処分後1,000年以降核種閉じ込め機能を喪失する。オーバーバックの開口時期を一律に1,000年とし、保守的にガラスの溶解温度を一律に60℃と簡略化。
化学	ガラス固化体周辺の物質移動特性			ガラス固化体の低溶解性	ガラスマトリクスの溶解反応が抑制されるような溶性ケイ酸に富む条件においては、ガラスマトリクスの水和変質が卓越し、これがアルカリ金属元素などの可溶性元素の溶出を律速しうる。最近の研究により報告されている。このガラスマトリクスの水和変質による溶出量や水和層厚さの時間変化は時間の平方根に比例すると考えられている。十分な測定データが得られていないことから、溶解速度の設定においてはこれを保守的に無視する。
形状	ガラス固化体割れ部分の空隙構造			ガラス固化体の低溶解性	ガラス固化体内部に存在する製造時の冷却によって生じた割れのうち溶解量の増加に寄与するのはその一部であることが、大型ガラス固化体の浸出試験によって確認されており溶解量から推定した溶解に寄与する表面積の現実的な増加は4から5倍程度と見積もることができる。ガラス固化体の幾何学的表面積(1.7m ²)の10倍(17m ²)を溶解に寄与するガラス固化体の表面積とすることにより、割れによる溶解量の増加を考慮。
力学	ガラス固化体の溶解表面積			ガラス固化体の低溶解性	製造時の冷却によって生じた割れによるガラス固化体の溶解・変質の促進は、表面積が4から5倍増加することに相当する程度であることから、ガラス固化体の幾何学的表面積(1.7m ²)の10倍(17m ²)を溶解に寄与するガラス固化体の表面積とすることにより、割れによる溶解量の増加を考慮。

表 2-1-1 オーバーパックの閉じ込め

始点	This_FEP	This_FEP1	This_FEP2	終点	取り扱い
	オーバーパックによる閉じ込め				1000年後には、全廃棄体が開口するもの仮定する。腐食しろや耐圧性能について保守的な仮定に基づき、設計される。
	オーバーパックによる閉じ込め		モデル		オーバーパックの開口は、腐食が腐食代を上回った時点で開口するものとし、処分された全廃棄体が同時に開口するものとモデル化を行う。
	オーバーパックによる閉じ込め	オーバーパック開口時の温度			60℃まで低下し、10000年後には約45℃となる。
	オーバーパックによる閉じ込め	オーバーパック開口時の水理			1000年度には緩衝材は冠水し、飽和状態に回帰するものと判断される。腐食性生成物の水理特性は考慮しない。
	オーバーパックによる閉じ込め	オーバーパック開口時の力学			腐食膨張の影響は、緩衝材の変形や母岩の破壊に及ばないものと判断。
	オーバーパックによる閉じ込め	オーバーパック開口時の化学			地質環境で想定される地下水環境に回帰する。
力学	所定の期間の閉じ込め			オーバーパックによる閉じ込め	保守的な腐食速度や耐圧代に基づき1000年間の水密性期間が設計において採用される。
水理	オーバーパック周辺の水理環境			オーバーパックによる閉じ込め	1000年度には緩衝材は冠水し、飽和状態に回帰するものと判断される。
化学	オーバーパックの開口時間への影響			オーバーパックによる閉じ込め	1000年後には還元性雰囲気に戻ると判断された。
化学	オーバーパックの開口時間への影響	有機物微生物影響	不確実性	オーバーパックによる閉じ込め	有機物、微生物の腐食に関する詳細影響は、具体的地質環境下での今後の研究が必要と考えられるが、これまでの知見から定性的に処分システムへの影響は小さいものと判断された。
化学	オーバーパックの開口時間への影響	放射線分解、放射線損傷	不確実性	オーバーパックによる閉じ込め	放射線分解により発生し得る酸化剤と人工バリア中の還元物質(オーバーパック腐食生成物)の量の比較からは、酸化剤が生じたとしても十分量の還元剤が存在する。仮にガラス固化体の近傍で酸化状態が生じ、溶解度などが増加したとしても、人工バリア内の還元剤(オーバーパックとその腐食生成物、緩衝材中の黄鉄鉱など)により酸化剤は、ガラス固化体近傍に留まると考えられる。したがって、緩衝材中においては還元条件での溶解度が期待されるため、核種移行に有意な影響を与えないと考えられる。
温度	オーバーパックの温度履歴			オーバーパックによる閉じ込め	閉鎖後10年程度で最高温度(横置き、硬岩で100℃~160℃)となり、1000年後には、どの条件においても60℃を下回る。約10000年で環境温度の45℃に回復する。

表 2-1-2 オーバーパックによる還元性維持機能

始点	This_FEP	This_FEP1	This_FEP2	終点	取り扱い
	オーバーパック材料による還元性維持				緩衝材間隙水は、地下水と緩衝材およびオーバーパックの腐食生成物との化学平衡により組成が決まり、還元性に維持される。溶解度はこの間隙水組成に基づいて設定する。
化学	腐食生成物の生成			オーバーパック材料による還元性維持	オーバーパック材料として炭素鋼を想定。腐食生成物であるマグネサイトは還元能力を有する。
オーバーパック材料による還元性維持	オーバーパック腐食生成物による酸化剤の消費			化学	安全機能維持のための考慮事項

表 2-1-3 緩衝材による地下水移動抑制機能

始点	This_FEP	This_FEP1	This_FEP2	終点	取り扱い
	緩衝材による地下水移動抑制				・緩衝材は完全に飽和し、均質な低透水性のバリアとなる。緩衝材中の核種移行は、移流に比べて拡散が卓越する。
形状	緩衝材の長期性能維持			緩衝材による地下水移動抑制	緩衝材の止水性やコロイドフィルトレーション効果が喪失するまでの劣化はないものと判断
化学	緩衝材とアルカリブルームの反応			緩衝材による地下水移動抑制	
緩衝材による地下水移動抑制	緩衝材内側を拡散支配に保つ			水理	安全機能維持のための考慮事項

表 2-1-4 緩衝材での核種移動抑制機能

始 点	This_FEP	This_FEP1	This_FEP2	終 点	取 り 扱 い
	緩衝材での移動抑制				拡散による移行の過程で、核種は緩衝材の構成鉱物の吸着により遅延される。吸着は、線形/瞬時/可逆を仮定する。
温度	緩衝材中での核種移行時の温度			緩衝材での移動抑制	核種移行時の温度は60℃(1000年後)、10000年経過時では45℃まで低下(地温温度に低下)
化学	緩衝材中での核種の吸着・沈殿			緩衝材での移動抑制	・核種は、同位体間で分配された溶解度により制限される濃度を上限とした濃度勾配に従って緩衝材中を溶質として拡散移行する。
化学	緩衝材中での核種の吸着・沈殿	有機物・微生物影響	不確実性	緩衝材での移動抑制	放射性核種の移行挙動(沈殿/溶解/吸着など)に影響を及ぼす可能性がある。また、微生物の活動に付随して起こる有機物の分解による、可溶性で可動性の有機物の増加、ガスの発生、さらに、微生物自身の移動の影響などが想定され得る。
化学	緩衝材中での核種の吸着・沈殿	放射性分解、放射線損傷		緩衝材での移動抑制	有機物および微生物の核種移行挙動への影響に関する詳細な検討は、具体的な地質環境条件での今後の研究に依存するものと考えられる。H12では、これまでの知見から定性的に、地層処分システムへの影響は小さいものと判断した。
化学	緩衝材中での核種の吸着・沈殿			緩衝材での移動抑制	放射線分解により発生し得る酸化剤と人工バリア中の還元物質(オーバーパッキング腐食生成物)の量の比較からは、酸化剤が生じたとしても十分な量の還元剤が存在する。仮にガラス固化体の近傍で酸化状態が生じ、溶解度などが増加したとしても、人工バリア内の還元剤(オーバーパッキングとその腐食生成物、緩衝材中の黄鉄鉱など)により酸化剤は、ガラス固化体近傍に留まると考えられる。したがって、緩衝材中においては還元条件での溶解度が期待されるため、核種移行に有意な影響を与えることはないと考えられる。
化学	緩衝材中での核種の吸着・沈殿	核種移行時の化学環境		緩衝材での移動抑制	1000年間のオーバーパッキングの水密性を想定することにより、地下水化学環境は、還元性雰囲気に戻ると判断。
水理	緩衝材中での移流と拡散			緩衝材での移動抑制	緩衝材内部は拡散支配となる。
水理	緩衝材中での移流と拡散		モデル	緩衝材での移動抑制	緩衝材中での核種濃度は、軸方向および周方向での勾配はなく、半径方向にのみ勾配を持つと仮定する。一次元モデルが適用可能となる。
形状	緩衝材ジオメトリー		不確実性	緩衝材での移動抑制	腐食膨張による緩衝材の厚さの減少、緩衝材の亀裂への侵入による密度低下については、モデルの不確実性として考慮。
形状	緩衝材ジオメトリー			緩衝材での移動抑制	オーバーパッキングの沈下は、影響が小さいものと判断。
緩衝材での移動抑制	物理的なバリア距離の残存			形状	安全機能維持のための考慮事項
緩衝材での移動抑制	核種の移動し難い化学条件			化学	安全機能維持のための考慮事項
緩衝材での移動抑制	核種の移動し難い水理条件			水理	安全機能維持のための考慮事項

表 2-15 緩衝材による応力緩衝性

始点	This_FEP	This_FEP1	This_FEP2	終点	取り扱い
	緩衝材による応力緩衝性				腐食膨張は設計において考慮されており、人工バリアに期待される安全機能を損なうことはない。
力学	緩衝材によるオーバーパッキング変形影響の緩和			緩衝材による応力緩衝性	
緩衝材による応力緩衝性	オーバーパッキング及び母岩の保護			形状	安全機能維持のための考慮事項

表 2-16 緩衝材の長期安定性

始点	This_FEP	This_FEP1	This_FEP2	終点	取り扱い
	緩衝材の長期安定性				化学的な変質や力学的変化を考慮し、処分システムに影響を及ぼすほどの変化はないものと判断。
化学	放射線損傷 緩衝材の溶解			緩衝材の長期安定性	地層処分システムの安全性への影響が小さいと考えられるため、安全評価の解析では考慮しない。
水理	緩衝材の飽和度			緩衝材の長期安定性	熱-水-応力練成解析では、緩衝材が飽和するまでに50年程度の時間が見込まれるものと推定している。ただし、冠水における不確実性の観点からシリカセメンテーションの可能性は埋設初期から緩衝材が飽和しているものと仮定。核種移行が開始される1000年度には、緩衝材は飽和されているものと想定している。
温度	緩衝材の温度履歴			緩衝材の長期安定性	緩衝材の最高温度は100℃を超えないように設計がなされる。
力学	オーバーパッキングの沈下			緩衝材の長期安定性	地層処分システムの安全性への影響が小さいと考えられるため、安全評価の解析では考慮しない。
緩衝材の長期安定性	物理的なバリア距離の維持			形状	安全機能維持のための考慮事項
緩衝材の長期安定性	低透水性としてのバリア機能の維持			水理	安全機能維持のための考慮事項
緩衝材の長期安定性	緩衝材の最大温度			温度	安全機能維持のための考慮事項

表 2-17 掘削影響領域での止水性

始点	This_FEP	This_FEP1	This_FEP2	終点	取り扱い
	掘削影響領域での止水 性維持		モデル		物理的な厚さを伴わない、仮想的なミキシングセルモデルを使用する。掘削影響領域は連続しているものと仮定され、母岩の不均質性を考慮し算出された平均的な流量が、ミキシングセル流量とされる。
	掘削影響領域での止水 性維持		データ		人工バリアからの核種の移行は、ミキシングセルとの濃度勾配に支配される。
形状	形状の時間変化			掘削影響領域での止水 性維持	特に考慮されない
水理	掘削影響による透水性 の増加			掘削影響領域での止水 性維持	硬岩系岩盤のデータを用い、亀裂ネットワークの評価から、掘削影響領域の流量を推定。0.001m ³ /yの算出値を採用。
水理	掘削影響による透水性 の増加	緩衝材の侵入		掘削影響領域での止水 性維持	緩衝材の侵入による透水性の変化は特に考慮していない。
水理	掘削影響による透水性 の増加	亀裂不均質性 の取り扱い		掘削影響領域での止水 性維持	母岩の全領域に亀裂が均質に分布しているものと仮定している。
水理	掘削影響による透水性 の増加	掘削による透水性の上昇		掘削影響領域での止水 性維持	廃棄体スケールでの、不均質性は考慮していない。
水理	掘削影響による透水性 の増加	掘削による透水性の上昇 ガス影響による 流量変化		掘削影響領域での止水 性維持	硬岩系岩盤では、TBMでの掘削による既存データから、坑道壁から0.5mの範囲で掘削影響領域が発生するものと仮定。
力学	オーバーバック膨張等による密度変化			掘削影響領域での止水 性維持	特に考慮されていない。
掘削影響領域での止水性維持	廃棄体回りの地下水流量の低減			掘削影響領域での止水 性維持	特に考慮されていない。
				水理	安全機能維持のための考慮事項

3. 適用の例示

3.1 現実的性能の把握

第2次取りまとめでは、設計条件を踏まえた処分環境条件の評価、処分環境条件に基づく安全機能の評価の各ステップにおいて、時間的、空間的な不確実性や不均質性を考慮し安全性の下限を見積もるために、評価モデルの保守性やデータを保守的に取り扱っている。このような取り扱いは、各バリアの性能の下限を探るためには効果的である。一方で、実際の地質環境に適合した設計オプションを選択するためには、各バリアの性能をオプション毎に比較する必要がある。この際、保守的な下限の性能の評価結果は、バリアの詳細な性能に関して鈍感であり、オプション間の比較が有意とはならない可能性がある。また、保守性を重視した評価結果がバリア性能の下限であるとのメッセージが評価結果を公開していくためにも重要と考えられる。

そのためには、保守性を取り除き、より現実的な評価を実施することによりシステムのバリア性能を表現することが重要となる。

ここでは、例示としてオーバーパックの現実的な開口時間を検討し、オーバーパックの現実的な開口時間の変化に伴う、その他の安全機能への影響の抽出を試みる。

(1) 評価対象とする安全機能

「オーバーパックによる閉じ込め」に関しては、「オーバーパックの厚さに算定された腐食しるをオーバーパックの腐食量が上回った時点で開口する」とするモデルが適用され、保守的に見積もられた腐食しるや耐圧しるに基づき、1000年後に全廃棄体のオーバーパックが開口するとしている。(表 2-11 参照)。

オーバーパックの厚さは、腐食代を40mm【**縦置き構造で想定される酸素量による腐食(10.1mm) + 還元性雰囲気での腐食量(20mm)**】とし、耐圧代を41mmとするが、 γ 線放射線分解生成物が腐食に影響しない遮蔽厚として、150mmを力学的な耐圧代の変わりに設定している。偏圧における影響については、腐食代と耐圧代の合計値190mmにおける厚さで、極端な偏圧にも耐えうるものと評価している。

(2) 保守性の所在

保守性の所在としては、モデルやデータの何れにも存在するものと考えられる。

モデルにおける保守性としては、以下のことが考えられる。

- ① 全廃棄体が同時に開口すること
- ② 腐食量が耐圧代に及んだ時点で開口とみなすこと
- ③ オーバーパック腐食生成物の存在は、止水性の観点からは無視されている(表 2-6 参照)。

データ設定における保守性としては、以下のことが考えられる。

- ④ 還元腐食の速度について試験的には $0.4\sim 2.4\ \mu\text{m/y}$ との値が取得されているが、評価における腐食速度は $10\ \mu\text{m/y}$ を採用(表 2-6 参照)
- ⑤ 酸素腐食量を縦置きと横置きの両オプションの不利な方を選択(表 2-6 参照)
- ⑥ ガラス固化体からの γ 線の全量が酸化剤の生成に用いられるものと仮定(表 2-6 参照)、なお緩衝材共存化では、生成された酸化剤が緩衝材空隙内で消費される可能性も示されている(文献)。

(3) 保守性の再評価

上述の①，②については，統計論的なデータを用いオーバーパック開口時期に関する代替モデルの適用も可能と考えられる。また，③については，腐食生成物層における拡散移行を安全機能として新たに加えることも可能となる。

統計論的なデータを用いる場合には，処分環境下での腐食速度のばらつきを適切に評価することが課題となる。また，腐食生成物層における拡散移行をモデル化する場合には，腐食したオーバーパックの間隙構造を特定する必要がある。

④については，腐食速度を実験値に合わせることも可能であり，その際 10mm の還元性腐食が進行するための時間は，4000～25000 年と大きく変動する。⑤については，処分概念を横置きに限定すれば，5mmの腐食代が増加し（局所安全率 2 倍を見込み 2.5mm），腐食代を消費するための時間は，5000～約 30000 と変動する。

また， γ 線による放射線の影響が小さいものと判断できるならば，100mm（放射線遮蔽代一耐圧代）程度の余裕代が生じる。その場合，オーバーパックが開口するまでの時間は，更に 5 倍程度の延びることとなる。

これらのデータを用いる際には，

- ・ 極値統計に基づく安全率
- ・ 偏圧に関する再評価
- ・ 放射線分解影響の再評価

が必要となるものの，保守的条件で設計されたオーバーパックの性能は，現有の性能の 20 倍程度まで見込まれる可能性がある。

(4) 他の安全機能への影響

オーバーパックの開口時刻が伸びる効果は，処分環境条件を通じて，他の安全機能にも影響を及ぼす。図 3-1 に示すように，評価の変更点（この場合はオーバーパックによる閉じ込め）を起点にそれらに記述されていく条件を再評価していくこととなる。

単純にオーバーパックの開口までの時間を変えただけでも，以下の変更点が容易に抽出される。

- ・ 核種移行時の温度条件（60℃で必要なパラメータを評価→地温条件 45℃）として，
 - ・ ガラス溶解速度に対する温度条件の変化
 - ・ 拡散係数に対する温度条件の変化
 - ・ 溶解度設定における温度の見直し（ただし H12 では 25℃で評価）
 - ・ 吸着設定における温度の見直し

について，再評価が可能となる。

4. まとめ及び今後の課題

地質環境調査及び設計から性能評価までの一連の情報の流れを、改良した FepMatrix のソフトウェアを用いまとめ、処分システム全体を俯瞰できかつトレーサビリティの高い概念を構築した。

これに、例示的に第2次取りまとめにおける設計から性能評価に至る情報を入力した。これにより、性能評価モデルやデータの保守性に関して再評価する場合に、設計や地質環境まで遡り情報の処理過程を速やかに抽出できることが確認された。

今後の予定を以下に示す。

- 記述内容の精緻化
例示的に入力された情報は、地質調査側及び設計側との連携を図り、更に具体化する必要がある。
- 具体例の追加
設計オプションの整理を行い、それらを適用した場合の具体例を増やすことにより、概念の修正やデータベースの修正を実施する。
- 第2次取りまとめ以降の情報による内容のリバイス
H17レポートなど、第2次取りまとめ以降の情報を用いたデータベース内容のリバイスや幌延や瑞浪でまとめられた地上からの調査段階での地質環境調査結果に基づく、地質環境調査に係る部分の展開を実施する。

参考文献

- 1 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（平成十二年六月七日法律第百十七号）
- 2 原子力発電環境整備機構(2007)：段階的な事業推進におけるアプローチと要件管理，原子力発電環境整備機構，NUMO-TR-07-01
- 3 梅木博之，大澤英昭，内藤守正，中野勝志，牧野仁史："地層処分技術に関する知識管理システムの基本的概念"，日本原子力研究開発機構，JAEA-Research 2006-078.
- 4 大井 貴夫，稲垣 学，川村 淳：シナリオの重要度をわかりやすく提示可能なシナリオ解析手法の整備，JAEA-Research 2008-023.
- 5 溝口理一郎：オントロジー工学，オーム社，2007
- 6 牧野 仁史・川村 淳・若杉 圭一郎・大久保 博生・高瀬 博康（2007）：高レベル放射性廃棄物地層処分安全評価のシナリオ解析のための計算機支援ツールの開発，日本原子力研究開発機構，JAEA-Data/Code 2007-005.

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

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

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	メートル ⁻¹	m ⁻¹
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積 (比体積)	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ (物質の濃度)	アンペア毎メートル	A/m
輝度	モル毎立方メートル	mol/m ³
屈折率	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
	(数の) 1	1

表5. SI 接頭語

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

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m ² ・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s ¹ ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束密度	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束	テスラ	T	Wb/m ²	kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光照射度	ルクス	lx	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
(放射性核種の) 放射能吸収線量, 質量エネルギー当量	グレイ	Gy	J/kg	m ² ・m ⁻⁴ ・cd=m ⁻² ・cd
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	シーベルト	Sv	J/kg	s ⁻¹

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときにいくつかの用例は表4に示されている。
 (b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。
 (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
 (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

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

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1d=24 h=86400 s
角度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	l, L	1l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2) ln10 (Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	海里	1海里=1852m
ノット	ノット	1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バール	b	1b=100fm=10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G ≐ 10 ⁻⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe ≐ (1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ≐ 10 ⁻⁸ Wb
スチルブ	sb	1 sb = 1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal = 1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	X unit	1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット	carat	1 metric carat = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カリ	cal	
マイクロン	μ	1 μ = 1μm=10 ⁻⁶ m

