



JP0650405

緩衝材の性能保証項目に関する評価ツールの現状

Status of Assessment Tools on the Performance Guarantee Contents
of Buffer Material

棚井 憲治 神徳 敬* 菊池 広人* 西村 蘭果
松本 一浩* 青柳 茂男* 油井 三和

Kenji TANAI, Takashi JINTOKU*, Hirohito KIKUCHI*, Mayuka NISHIMURA
Kazuhiro MATSUMOTO*, Shigeo AOYAGI* and Mikazu YUI

地層処分研究開発部門
ニアフィールド研究グループ

Near-Field Research Group
Geological Isolation Research and Development Directorate

June 2006

日本原子力研究開発機構

Japan Atomic Energy Agency

JAEA-Research

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つ
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 +81-29-282-5901

緩衝材の性能保証項目に関する評価ツールの現状

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

棚井 憲治, 神徳 敬^{*1}, 菊池 広人^{*2}, 西村 蘭果, 松本 一浩^{*2}, 青柳 茂男^{*3}, 油井 三和

(2006年3月3日受理)

国が策定する緩衝材に関する安全基準, 指針等に資するため, 廃棄体支持性, オーバーパックの保護, 放射性核種の移行抑制, 岩盤の保護という緩衝材の性能保証項目に対し, 現状の評価方法を確認し, ツールの整備状況として一覧表形式でまとめた。また, 一覧表に記載した評価ツール内容の具体例を示した。

示している内容は, 緩衝材の基本特性(緩衝材膨潤特性, 力学特性, 透水特性), 緩衝材の変形・変質の長期挙動に関する現象(クリープ現象, 緩衝材の流出, 岩盤への侵入, 緩衝材の変質に関する長期安定性), 緩衝材のガス透気回復挙動, コロイド影響評価, 岩盤の力学的変形挙動であり, それぞれの項目で確認する具体的な内容, 評価方法(実験による確認により評価がなされるもの, 実験式およびデータベースから推定されるもの, モデル計算より導出するもの)の種類, 研究の概要およびその最新の結果を示した。

核燃料サイクル工学研究所(駐在): 〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4-33

*1: 石川島播磨重工業株式会社

*2: 検査開発株式会社

*3: 前田建設工業株式会社

Status of Assessment Tools on the Performance Guarantee Contents of Buffer Material

Kenji TANAI, Takashi JINTOKU^{*1}, Hirohito KIKUCHI^{*2}, Mayuka NISHIMURA
Kazuhiro MATSUMOTO^{*2}, Shigeo AOYAGI^{*3} and Mikazu YUI

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

(Received March 3, 2006)

In order to contribute to the safety standards and guidelines which a regulator decides, a state-of-the-art assessment method is investigated and summarized in the table about performance guarantee contents of buffer material related to the mechanical support and protection of the overpack and rock matrix, and the retardation of radionuclide. In addition, examples of the assessment tool are described.

In this report, summary of (1) basic properties of buffer material, including swelling properties, mechanical properties and hydraulic properties, (2) long-term behavior of bentonite, including creep deformation, penetration into host rock, erosion and alteration, (3) gas permeability, (4) colloid filtration and (5) mechanical stability of the near-field is described.

Check points, assessment methods (based on the data obtained from the experimental results, the estimation value obtained from empirical equations and database, and the modeling calculations) and latest results of these R&D programs were also summarized.

Keywords: Assessment Tool, Safety Standard, Guideline, Performance Guarantee, Buffer Material, Bentonite

^{*1} : Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.

^{*2} : Inspection Development Corporation

^{*3} : Maeda Corporation

目 次

1.はじめに	1
2.目的	1
3.緩衝材の安全評価・基準に関する評価内容と評価ツール	1
3.1 緩衝材の力学的変形挙動	11
3.2 炭素鋼・代替オーバーパックの腐食挙動	12
3.3 微生物の影響評価	14
3.4 緩衝材の基本特性	17
3.5 緩衝材ガス透气回復挙動	18
3.6 緩衝材の流出・侵入挙動	19
3.7 コロイド影響評価	21
3.8 核種の収着・拡散現象に関する研究	21
3.9 間隙水水質モデル	22
3.10 人工バリアの変質・劣化挙動	25
3.11 岩盤の力学的変形挙動	27
4.おわりに	29
参考文献	30

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Objectives	1
3. Assessment tools and contents for safety assessment and criteria of buffer	1
3.1 Mechanical deformation behavior of buffer	11
3.2 Corrosion behavior of overpack materials	12
3.3 Influence of microorganisms	14
3.4 Fundamental properties of buffer	17
3.5 Gas migration behavior in buffer	18
3.6 Extrusion and erosion behavior of buffer	19
3.7 colloid filtration	21
3.8 Diffusion and sorption phenomenon of radionuclide	21
3.9 Porewater chemistry	22
3.10 Alteration phenomenon of engineered barrier materials	25
3.11 Mechanical deformation behavior of host rock	27
4. Conclusions	29
References	30

図 目 次

図 3・1	腐食膨張解析による破壊接近度コンター	12
図 3・2	緩衝材中での浸漬試験セルの模式図	13
図 3・3	孔食係数の平均腐食深さ依存性	14
図 3・4	微生物透過試験装置の概略図	15
図 3・5	試料の切り出し方法	16
図 3・6	ケイ砂混合クニゲル V1 ベントナイト系材料の微生物フィルトレーション効果	16
図 3・7	有効粘土密度と平衡膨潤応力の関係	18
図 3・8	有効粘土密度と破過圧力の関係（降水及び海水地下水条件下）	19
図 3・9	降水系および海水系地下水条件下における経過時間と侵入距離の関係	20
図 3・10	ベントナイト透過水量とコロイド濃度との関係	21
図 3・11	緩衝材中の間隙水化学組成導出フロー図	24
図 3・12	18,000 年後の交換性陽イオン濃度変化例	24
図 3・13	緩衝材の長期安定性フロー	25
図 3・14	コンクリート支保の厚さをパラメータとしたモンモリロナイトの溶解率に関する試算結果	26
図 3・15	緩衝材の応力状態	28
図 3・16	EDZ の分布結果	28

表 目 次

表 3・1	緩衝材の安全評価・基準に関する具体的な評価ツール(1/4)	3
表 3・2	緩衝材の安全評価・基準に関する具体的な評価ツール(2/4)	5
表 3・3	緩衝材の安全評価・基準に関する具体的な評価ツール(3/4)	7
表 3・4	緩衝材の安全評価・基準に関する具体的な評価ツール(4/4)	9
表 3・5	透過試験後のベントナイト系材料中での大腸菌の分布	17
表 3・6	岩盤の解析用物性値（幌延深度 450m）	28
表 3・7	処分孔の壁面変位結果	28

This is a blank page.

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全規制に係わる基本的考え方 「高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について(第1次報告)」(原子力安全委員会, 2000)において示され、ここでは今後安全審査、安全確認等に係る指針・技術基準を策定していくことが示されている。また、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」(通商産業省, 2000)では、国および関係機関が最終処分の安全規制・安全評価のために必要となる研究開発を積極的に進めしていくことを求めている。これら安全規制に係わる指針・基準を策定していくためには適宜最新の技術情報を整備しておく必要がある。

このような背景を受けて、「高レベル放射性廃棄物の地層処分における人工バリア等の性能保証に関する研究の進め方と反映先」(川上ほか, 2003)の検討(以下、「進め方と反映先報告書」とする)では、処分場の構成要素について長期安全性の観点から性能を保証すべき項目を抽出し、以下の観点で整理を行った。

- ・ 長期安全性能をどのように評価するのか
- ・ 評価に必要なデータベースは何か
- ・ 現状に照らして今後の課題は何か

また、「人工バリア等の性能保証に関する研究のサイクル機構における取り組み」(川上ほか, 2004)の検討では、「進め方と反映先報告書」で整理された各課題に対しての日本原子力研究開発機構(以下、「原子力機構」という。)における具体的な現在の取り組み状況、今後の取り組み予定をまとめた。

本書は、これらの整理をうけて緩衝材を対象に性能保証項目(案)を評価するツールとなるモデル、評価手法やデータベースなどを原子力機構がこれまでにとりおこなった研究成果から取りまとめた。

2. 目的

緩衝材についてこれまで、性能保証項目(案)・課題等の抽出・整理を、また各項目・課題に対して原子力機構における具体的取り組み状況の調査・整理を行っている。本検討では、これらの検討に引き続き、緩衝材に対する性能保証項目(案)を評価するツールとなるモデル、評価手法やデータベースなどについての現状を取りまとめた。

3. 緩衝材の安全評価・基準に関する評価内容と評価ツール

緩衝材は、オーバーパックおよび岩盤の保護機能と、放射性核種の移行抑制機能が要件として求められており、更にオーバーパック腐食寿命評価と同様に、その変質特性の把握も要求されている。

オーバーパックおよび岩盤の保護機能の観点として、熱伝導性(廃棄体の発熱を周辺岩盤に逃がす機能)、オーバーパック支持性、応力緩衝性(オーバーパックの腐食膨張や岩盤のクリープ変形を緩和する機能)が、放射性核種の移行抑制の観点として、自己シール性、低透水性(地下水の移動の抑制)、核種の収着性、コロイドの移動防止、化学的緩衝性(地下水環境の変動の緩和)が評価に必要な要件である(核燃料サイクル開発機構, 1999)。加えて経年変化の観点として、緩衝材変質後の特性把握が、さらされる環境条件次第で必要な要件となる(核燃料サイクル開発機構, 1999)。

これらの要件に対応させるべく、処分場構成要素のうち緩衝材性能保証のための具体的な評価ツールの検討を行った。検討結果は、緩衝材に関する評価ツールとして表3-1~表3-4にまとめた。

表中の評価内容や章番号でわかるように、ツールの整備方法はテーマ毎に独立に行われている研究(個別研究:ある1つの章で完結する内容のもの)と、緩衝材の物理化学特性の変化を反映させ行なわれている研究(環境条件の変化を想定した研究:複数の章にまたがる内容のもの)がある。例えば、透水係数、膨潤能力、分配係数の蒸留水条件やイオン強度をパラメータとした条件での試験など基礎データの取得やモデル化への取り組みは個別研究である。一方、安全評価で設

定された地下水・間隙水組成や支保工の設置による緩衝材の物理化学特性変化を考慮した研究は、環境条件の変化を想定した研究となる。これらの研究は同時に進められている。

なお、評価内容の評価方法（表3-1～表3-4における「モデルによる評価」、「実験による確認」において記載された内容）は、次の3種類のどれかに該当しており、3.1章以降の具体的な研究概要の本文中において、該当する評価方法を述べている。

- ・ 実験手法を整備（すなわち実験方法をマニュアル化）し、想定された条件でデータの取得を行うもの
- ・ 実験結果のデータベース集や実験式を整備し、想定された条件に対してデータの推定を行うもの（念のため実験で確認することを想定して実験に係る情報の提供も行う）
- ・ モデル（パラメータの取得も含む）を整備し、想定された条件に対して計算で導出するもの

表 3-1 緩衝材の安全評価・基準に関する具体的な評価ツール(1/4)

時期	何を性能保証するのか(基準案)		設計の要件	評価内容 (評価方法、データベース)	モデルによる評価		実験による確認	備考	章番号
	役割	基準のポイント			モデル	データベース			
廃棄体定置時～埋め戻し	廃棄体を支持する	廃棄体からの荷重に対して有意な影響を受けないこと	廃棄体の自重に対してせん断破壊しないこと	・乾燥状態から飽和状態までの過程において、廃棄体の自重によるせん断応力によるき裂の発生等の現象を、弾性(弾塑性)解析により把握する。 [1][2]。	飽和での確認が保守的と考えられるため、同条件での模型試験(DEFORM)結果を踏まえて、関口一太田、足立一岡モデルにより廃棄体の支持性能を確認する	1) 弾塑性パラメータ：膨潤指數、圧縮指數、ボアソン比、限界状態パラメータ 2) 粘性パラメータ：二次圧密係数、初期体積ひずみ速度など		[1]高治ほか、JNC TN8400 99-043 [2]平井ほか、JNC TN8400 2003-031	3.1
埋め戻し	廃棄体からの放射線を遮蔽する	廃棄体からの放射線に配慮されていること	遮蔽を考慮した埋め戻し材厚さを設定すること	・緩衝材、埋め戻し材(処分孔)の仕様に基づき、計算コードにより遮蔽計算を行い、埋め戻し工程において放射線の影響が無いことを確認する。					—
緩衝材膨潤中～膨潤後	オーバーパックが所定の寿命を達成できる環境を維持すること※1	顕著な不均一腐食を生じない環境を維持するとともに還元性環境を維持すること※1	緩衝材仕様設定において腐食に係る環境の維持を配慮した緩衝材組成、密度、厚さとすること	・地下水化学条件および緩衝材仕様に応じた緩衝材間隙水化学を評価する。 ・緩衝材仕様に対する炭素鋼の不動態化条件を実験的に評価する。 ・地下水の飽和した緩衝材中の酸素の拡散挙動を実験的に評価し、腐食への影響がないことを確認する	1) 腐食評価に用いるオーバーパック表面の間隙水組成のうち緩衝材飽和後の値を、粘土の表面特性データ[1],[2]を用いたボックス平衡反応モデル(PHREEQC)もしくは一次元輸送計算(TRACE)[3]により導出し、オーバーパック腐食シナリオ[4]に基づき腐食挙動への影響を確認する。なお、不飽和条件の間隙水化学の評価についてのモデルは開発中である※2。 2) 飽和した緩衝材中酸素拡散係数を求め[5]、拡散によるオーバーパック表面への酸素供給速度を腐食速度に換算する[6]。	1) 热力学データベース 地球化学元素・鉱物の熱力学データ[7] 2) ペントナイトの化学特性データ イオン交換選択性係数、表面錯形成定数、表面サイト密度、比表面積、CEC[1],[2],[8] 3) 緩衝材中の拡散係数[9]	設定された地下水条件においてケイ砂混合率、乾燥密度をパラメータとして電気化学測定を行い、不動態化条件を求める[10]。	[1]小田・柴田、JNC TN8400 99-032 [2]小田ほか、JNC TN8400 99-078 [3]柴田・陶山、JNC TN8400 2003-007 [4]谷口ほか、JNC TN8400 2005-002 [5]Manaka et al., Nuclear Technology, 130, p.206 [6]Honda et al., Proc. of International Symposium on Plant Aging and Life Prediction of Corroborate Structures, p.217 [7] Yui et al., JNC TN8400 99-070 [8]Kamei et al., Engineering Geology 54, pp.15-20 (1999) [9]Sato JNC TN 8410 98-097 [10]谷口ほか、JNC TN8400 2001-025	3.2, 3.9
				・緩衝材のすき間の存在がオーバーパックの腐食挙動に与える影響※3、 ※4を実験により確認する。 ・定位試験により、設定されたすき間寸法で緩衝材ブロックを施工可能であることを確認する。			すき間を模擬した腐食試験により、最大腐食速度(深さ)、孔食係数等のデータを取得し、すき間の存在の有無による腐食挙動への影響を確認する[1]。	[1]谷口ほか、JNC TN8400 2003-016	3.2
		微生物などによる顕著な腐食速度の増加が生じない環境を維持すること	緩衝材仕様設定において腐食に係る環境の維持を配慮した緩衝材組成、密度、厚さとすること	微生物のろ過効果や活性を実験等により確認する。			緩衝材に対し密度、ケイ砂混合率等の条件を変えて微生物の透過試験を実施する[1]。 硫酸塩還元菌など腐食に寄与する微生物について緩衝材中に増殖試験を行い、生菌数を測定する[2][3]。	[1]嶺ほか、サイクル技報No.6,2000,3. [2]西村ほか、JNC TN8400 99-077 [3]谷口ほか、JNC TN8400 2001-011	3.3
放射性核種の移行を抑制する	水みちが形成されず、緩衝材厚さが一定以上減少しないこと	廃棄体を支持するとともに緩衝材の顕著な厚みの減少を防止すること	廃棄体の自重で過大に沈下しないこと	・クリープモデルを用いて長期の挙動を評価する。	要素試験等に基づき解析パラメータを設定し、関口一太田、足立一岡モデルにより廃棄体の自重沈下の影響を確認する[1][2]。	1) 弾塑性パラメータ：膨潤指數、圧縮指數、ボアソン比、限界状態パラメータ 2) 粘性パラメータ：二次圧密係数、初期体積ひずみ速度など		[1]高治ほか、JNC TN8400 99-043 [2]平井ほか、JNC TN8400 2003-031	3.1
	十分な膨潤能力(応力、ひずみ)を有すること	緩衝材仕様設定において膨潤能力に配慮した緩衝材組成、密度、厚さとすること		・各種条件下における膨潤能力を、標準化された実験手法に基づいて定量化し、確認する。			温度や地下水組成を考慮した試験により、膨潤応力データを取得し、環境条件が緩衝材の膨潤能力に与える影響を確認する[1][2]。	[1]鈴木ほか、JNC TN8400 99-038 [2]菊池ほか、JNC TN8430 2004-005	3.4

※1：施工上避けられないすき間などを除いて緩衝材の密度、ケイ砂混合率が均一であること。また、再冠水後はオーバーパックへの酸素の供給を抑制してオーバーパック近傍を還元性雰囲気に維持すること。更に、局部腐食防止の観点から不動態化を避けるのに十分な密度、ケイ砂混合率することが望ましい。

※2：腐食評価に用いるオーバーパック表面の間隙水組成のうち不飽和緩衝材中から飽和後に至る間隙水水質を、不飽和粘土中の水分移動が考慮可能で地球化学計算コードを含む熱水-応力-化学(THMC)連成モデル[1]により導出し、オーバーパック腐食シナリオ[2]に基づく腐食挙動への影響を確認する必要がある。現在は、そのモデル開発が進められている。また、モデル化に必要な緩衝材物性データ(固有透過程度[3]、水分ポテンシャル[3]、水分拡散係数[3]、熱伝導率[3]、比熱、弾性係数[3]、熱伝達率[4]、透水係数[5]、膨潤応力[3][5])は、実験により取得される。

※3：緩衝材施工時に生じた隙間や継ぎ目などの部分で地下水化学特性、酸素供給量など環境条件の不均一性によって不均一な腐食が生じる可能性がある。

※4：水分分布のマクロな不均一性によるマクロセル腐食の可能性については原位置試験など実機スケールで確認が必要。

[1]石原ほか、JNC TJ8400 2004-004

[2]谷口ほか、JNC TN8400 2005-002

[3]サイクル機構 JNC TN1400 99-022

[4]鈴木ほか、PNC TN 8410 92-057

[5]前田ほか、JNC TN8410 98-021

表 3-2 緩衝材の安全評価・基準に関する具体的な評価ツール(2/4)

時期	何を性能保証するのか(基準案)		設計の要件 (評価方法、データベース)	モデルによる評価		実験による確認	備考	章番号
	役割	基準のポイント		モデル	データベース			
緩衝材 膨潤中～膨潤後	放射性核種の移行を抑制する	膨潤能力、力学特性が劣化しないこと、あるいは劣化評価が可能なこと	環境による特性劣化評価が可能であり、顕著な劣化が見込まれる場合には、劣化を考慮した材料の仕様設定が行えること	1) 実際の地質環境条件を考慮したうえで、スメクタイトの層間陽イオンの変化(Ca型化、Fe型化)については、熱力学データに基づく物質移行-地球化学連成コードを用いた解析[2]により、その変化の程度を把握する。 2) 結晶化学的変化 ^{*1} のうち、イライト化については、地下水中のK濃度および温度[3,4]依存性の速度式から、膨潤性能が低下するスメクタイト-イライト規則型混合層の形成に至る時間を把握する。	1) 热力学データベース 地球化学元素・鉱物の熱力学データ[5] 2) ベントナイトの化学特性データ イオン交換選択性係数、表面錯形成定数、表面サイト密度、比表面積、CEC[6],[7],[8] 3) 緩衝材中の拡散係数[9] 4) イライト化率の反応速度定数[3,4]	温度や地下水組成を考慮した試験により、膨潤応力データを取得し、環境条件が緩衝材の膨潤能力に与える影響を確認する。	人工バリアの設計条件の変更が伴う場合、新たな検討項目 ^{*2, *3} が発生する。 [1]柴田ほか、JNC TN8400 2004-010 [2]柴田・陶山、JNCTN8400 2003-007 [3]石川ほか、粘土科学、34, pp.149-156 (1994) [4]Karnland et al., SKB TR-00-22(2000) [5]Yui et al., JNC TN8400 99-070 [6]小田ほか、JNC TN8400 99-032 [7]小田ほか、JNC TN8400 99-078 [8]Kamei et al., Engineering Geology 54, pp.15-20 (1999) [9]Sato JNC TN 8410 98-097	3.1, 3.4, 3.9
		水みちが形成されず、緩衝材厚さが一定以上減少しないこと	施工時のすき間を吸収すること	緩衝材の仕様設定において、すき間をシールする膨潤能力を有するように設定すること	・緩衝材がその膨潤性能により施工時のすき間をシールすることを実験により確認する。	地下水組成を考慮した試験により、すき間体積膨潤率などを取得し、イオン強度などによる自己シール性への影響を確認する[1][2][3]。	すき間充填(閉塞)の過程を大変形モデルにより評価することも今後検討される。 [1]杉田ほか、JNC TN8430 2002-003 [2]杉田ほか、JNC TN8430 2003-007 [3]菊池ほか、JNC TN8430 2004-005	3.4
		腐食膨張によるせん断応力で有意な影響を受けないこと	腐食膨張によるせん断破壊を生じない厚さであり、かつ緩衝材厚さが一定以上減少しないこと	腐食膨張率ならびに腐食生成物の物性を定量化するとともに、信頼性の高いクリープモデルを用いて評価する。	実際の地質環境条件を考慮しつつ、要素試験に基づき解析パラメータを設定し、関口一太田、足立一岡モデルにより腐食膨張による緩衝材への力学的影響を確認する[1][2]。	1) 弹塑性パラメータ：膨潤指數、圧縮指數、ポアソン比、限界状態パラメータ 2) 粘性パラメータ：二次圧密係数、初期体積ひずみ速度など	[1]高治ほか、JNC TN8400 99-043 [2]平井ほか、JNC TN8400 2003-031	3.1
		ガス発生により有意な影響を受けないこと	緩衝材の仕様設定においてガス発生の影響を定量的に評価すること	ガス発生によるニアフィールドの水理学的および力学的影響を実験および信頼性の高いガス移行モデルにより定量的に評価する。	実際の地質環境条件を考慮しつつ、緩衝材および岩盤のガス移行試験等に基づき解析パラメータを設定し、改良型TOUGH2モデルによりガス発生の影響を確認する ^{*4} [1][2][3]。	1) 改良型TOUGH2 相対浸透率、絶対浸透率、毛管圧力関数など	[1]棚井ほか、JNC TN8400 99-045 [2]棚井ほか、JNC TN8400 2003-024 [3]棚井ほか、JNC TN8400 2003-051 [4]A.R.Hoch et al., POSIVA 2004-02	3.5
		岩盤クリープで有意な影響を受けないこと	支保工強度喪失後の岩盤クリープによる圧縮およびせん断破壊を評価すること	緩衝材および岩盤のクリープを含む力学挙動をモデルの組み合わせにより総合的に解釈する。	岩盤をコンプライアンス可変型構成方程式、緩衝材及びオーバーパックを線形弾性体とし、長期的な岩盤の変形量と緩衝材の応力状態を評価する ^{*5} 。	(岩盤) n, m, 初期鉛直応力, 初期応力比, 内部摩擦角, 粘着力, 弹性係数, ポアソン比(オーバーパック及び緩衝材) 弾性係数, ポアソン比		3.11

* 1 : オーバーパックの腐食影響に伴うスメクタイトの結晶化学的変化については、現在その可能性についての検討が実施されており、今後影響の把握が求められる可能性がある。

* 2 : アルカリ変質については、低アルカリセメントにより回避されるものと仮定しており、現在Ca型化による評価がなされている。普通ポルトランドセメントが用いられる場合、スメクタイトの溶解速度、それに伴う2次鉱物の同定、緩衝材性能の変化の程度を把握し、緩衝材劣化評価を行う必要がある。

* 3 : 緩衝材に100度以上の条件が設定される場合、緩衝材中でのシリカの溶解・沈殿による層間のセメントーションについての評価が必要となる。

* 4 : 国際共同研究(GAMBIT Club)において開発を進めてきた、GAMBIT-GWSモデルについては、現在、整備中である。

* 5 : 岩盤と緩衝材の連成モデルに関しては、現在開発中である。

表 3-3 緩衝材の安全評価・基準に関する具体的な評価ツール(3/4)

時期	何を性能保証するのか(基準案)		設計の要件	評価内容 (評価方法、データベース)	モデルによる評価		実験による確認	備考	章番号
	役割	基準のポイント			モデル	データベース			
緩衝材 膨潤中 ～膨潤後	地下水 の移動 を抑制 すること	緩衝材の密度を十分な範囲に維持すること※1	緩衝材の仕様設定においては、緩衝材の処分孔外への流出量(はらみ出し、流出)、支保の劣化を考慮すること	・長期にわたる緩衝材のはらみ出し量、流出量、支保の劣化量を実験で確認するとともに、流出および支保工の劣化に関してはモデルにより評価する。	1)緩衝材の膨出 有限要素法による三次元弾性解析により、緩衝材の膨潤圧による体積膨張量を評価する。 2)緩衝材の侵入 降水系地下水条件※2を対象として、亀裂表面粗さ、温度及び静水圧などを考慮した試験に基づき物性データを取得し、拡散モデルにより侵入現象による影響を確認する。	1)緩衝材の膨出 乾燥密度、弾性係数、ポアソン比 2)粘性係数、固相拡散係数、亀裂内ガルの密度分布など	1)緩衝材の侵食 実際の地質環境条件(温度、地下水組成、亀裂表面粗さ、静水圧)を考慮した試験により亀裂内流速と侵食コロイド濃度の関係を整理する。(コロイド等の影響評価モデルの開発に反映)	[1]菅野ほか、PNC TN8410 97-313 [2]杉野ほか、JNC TN8400 99-040 [3]松本ほか、JNC TN8400 2003-006 [4]松本ほか、JNC TN8400 2003-035 [5]松本ほか、JNC TN8400 2004-026	3.6
		低透水性であること※1	透水係数が満足できる緩衝材仕様を設定すること	・緩衝材の透水特性を実験的に定量化する			地下水組成を考慮した試験により、水理特性データを取得するとともに関係式を一般化し、その定量化を図る。	[1]鈴木ほか、PNC TN8410 92-057 [2]松本ほか、PNC TN8410 97-296 [3]菊池ほか、JNC TN8430 2003-002 [4]菊池ほか、JNC TN8430 2004-005	3.4
		低透水性が著しく劣化しないことあるいは劣化評価が可能なこと※1	環境による透水性の劣化をあらかじめ余裕代に組み込むこと	・環境条件(地下水化学、温度等)や支保工(セメント)による材料の変化とそれに伴う水理特性の変化を、シナリオ[1]、モデル、データを用いて評価する。	1)実際の地質環境条件を考慮したうえで、スメクタイトの層間陽イオンの変化(Ca型化、Fe型化)については、熱力学データに基づく物質移行-地球化学連成コードを用いた解析[2]により、その変化の程度を把握する。 2)結晶化学的変化※3のうち、イライト化については、地下水中のK濃度および温度[3,4]依存性の速度式から、膨潤性能が低下するスメクタイト-イライト規則型混合層の形成に至る時間を把握する。	1)熱力学データベース 地球化学元素・鉱物の熱力学データ[5] 2)ペントナイトの化学特性データ イオン交換選択係数、表面錯形成定数、表面サイト密度、比表面積、CEC[6],[7],[8] 3)緩衝材中の拡散係数[9] 4)イライト化率の反応速度定数[3,4]	左記モデルに基づく解析より得られた地下水組成を考慮した試験により、水理特性データを取得するとともに関係式を一般化し、その定量化を図る。 また、左記モデルより層間陽イオンの変化が支配的な影響として示される場合、既存のCa(Fe)型ペントナイトの透水性に関するデータベースを用いて影響を確認する。	人工バリアの設計条件の変更が伴う場合、新たな検討項目※4、※5が発生する。 [1]柴田ほか、JNC TN8400 2004-010 [2]柴田・陶山、JNCTN8400 2003-007 [3]石川ほか、粘土科学、34, pp.149-156 (1994) [4]Karnland et al., SKB TR-00-22(2000) [5]Yui et al., JNC TN8400 99-070 [6]小田・柴田、JNC TN8400 99-032 [7]小田ほか、JNC TN8400 99-078 [8]Kamei et al., Engineering Geology 54, pp.15-20 (1999) [9]Sato JNC TN 8410 98-097	3.4, 3.9
	放射性 核種の 移行を 抑制す る	化学的緩衝性を有すること	緩衝材中の間隙水化学の変化を評価すること	・緩衝材中の地下水化学の変化を、シナリオ[1]、モデル、データを用いて評価する。	核種閉じこめ機能が喪失する処分後1000年移行を対象とした間隙水組成を、粘土の表面特性データ[2,3]を用いたボックス平衡反応モデル(PHREEQC)もしくは一次元輸送計算(TRACE)[4]により導出する。	1)熱力学データベース 地球化学元素・鉱物の熱力学データ[5] 2)ペントナイトの化学特性データ イオン交換選択係数、表面錯形成定数、表面サイト密度、比表面積、CEC[2],[3],[6] 3)緩衝材中の拡散係数[7]		[1]柴田ほか、JNC TN8400 2004-010 [2]小田・柴田、JNC TN8400 99-032 [3]小田ほか、JNC TN8400 99-078 [4]柴田・陶山、JNC TN8400 2003-007 [5]Yui et al., JNC TN8400 99-070 [6]Kamei et al., Engineering Geology 54, pp.15-20 (1999) [7]Sato JNC TN 8410 98-097	3.9
		特性が著しく劣化しないことあるいは劣化評価が可能なこと	緩衝材の化学的な変化による間隙水化学の変化を評価すること	・環境条件(地下水化学、温度等)や支保工(セメント)による材料の変化とそれに伴う間隙水化学の変化を評価する。	1)実際の地質環境条件を考慮したうえで、スメクタイトの層間陽イオンの変化(Ca型化、Fe型化)については、熱力学データに基づく物質移行-地球化学連成コードを用いた解析[2]により、その変化の程度を把握する。 2)結晶化学的変化※3に伴う変化の程度は小さい※6。	1)熱力学データベース 地球化学元素・鉱物の熱力学データ[3] 2)ペントナイトの化学特性データ イオン交換選択係数、表面錯形成定数、表面サイト密度、比表面積、CEC[4],[5],[6] 3)緩衝材中の拡散係数[7]		人工バリアの設計条件の変更が伴う場合、新たな検討項目※4、※5が発生する。 [1]柴田ほか、JNC TN8400 2004-010 [2]柴田・陶山、JNCTN8400 2003-007 [3]Yui et al., JNC TN8400 99-070 [4]小田・柴田、JNC TN8400 99-032 [5]小田ほか、JNC TN8400 99-078 [6]Kamei et al., Engineering Geology 54, pp.15-20 (1999) [7]Sato JNC TN 8410 98-097	3.9, 3.10

※1：既報の技術資料(JNC TN8400 2002-026, JNC TN8400 2003-037)から記載内容が変更となった箇所。

※2：海水系地下水条件下での試験により、緩衝材の物理的安定性への影響がないと判断できるため。

※3：オーバーパックの腐食影響に伴うスメクタイトの結晶化学的変化については、現在その可能性についての検討が実施されており、今後影響の把握が求められる可能性がある。

※4：アルカリ変質については、低アルカリセメントにより回避されるものと仮定しており、現在Ca型化による評価がなされている。普通ポルトランドセメントが用いられる場合、スメクタイトの溶解速度、それに伴う2次鉱物の同定、緩衝材性能の変化の程度を把握し、緩衝材劣化評価を行う必要がある。その場合、高pH溶液によるスメクタイトの溶解に伴うpH緩衝性の程度を把握する必要はある。

※5：緩衝材に100度以上の条件が設定される場合、緩衝材中のシリカの溶解・沈殿による層間のセメントーションについての評価が必要となる。

※6：極端に低い／高いpH以外で起こる粘土鉱物の変質に伴う間隙水組成に与える影響はAl, Siの濃度の変化に帰着するため。

表 3-4 緩衝材の安全評価・基準に関する具体的な評価ツール(4/4)

時期	何を性能保証するのか(基準案)		設計の要件 (評価方法、データベース)	モデルによる評価		実験による確認	備考	章番号
	役割	基準のポイント		モデル	データベース			
緩衝材 膨潤中 ～膨潤後	核種のコロイドをろ過すること	緩衝材の仕様設定において、有効粘土密度をコロイドろ過に十分なものとすること	コロイドのろ過を実験的に確認する。			地下水組成を考慮したコロイドの拡散試験[1]により、コロイドろ過効果 ^{*1} を確認する。	[1]Kurosawa et al., Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 465, 963 (1997).	3.7
		緩衝材の化学的変化がコロイドのろ過性能に影響を与えないこと	変質した緩衝材を用いてコロイドのろ過を実験的に確認する。			地下水組成や緩衝材の変質影響を考慮したコロイドの拡散試験[1]により、コロイドろ過効果 ^{*1} を確認する。	[1]黒澤ほか、高アルカリ性条件でのベントナイト変質とコロイド濾過効果に及ぼす影響、日本原子力学会和文論文誌, Vol.1, No.2(2002).	3.7
	放射性核種の移行を抑制すること	収着性を有すること	収着性能をもつ粘土鉱物を含有すること	緩衝材の核種の収着性能を、データベース ^{*2} およびモデルにより評価する。		拡散試験結果[例えば、1]および実効拡散係数の現状の評価[2]から圧縮ペントナイト条件での分配係数を導出す。また、地下水組成や温度といったパラメータ変化の考慮は、バッチ収着試験データ(収着データベース[3]から抽出)や収着モデル[例えば、4] ^{*3} から、必要に応じて行う。	[1]Sato JNC TN8400 2001-018 [2]Sato JNC TN8410 98-097 [3]陶山、笹本 JNC TN8410 2003-018 [4]神徳ほか、JNC TN8400 2003-048	3.8
		溶解した核種の移行を遅延すること	特性が著しく劣化しないこと、あるいは劣化評価が可能なこと	環境条件(地下水化学、温度等)や支保工材料による特性劣化評価が可能なこと	1)実際の地質環境条件を考慮したうえで、スメクタイトの層間陽イオンの変化(Ca型化、Fe型化)については、熱力学データに基づく物質移行-地球化学連成コードを用いた解析[2]により、その変化の程度を把握する。 2)結晶化学的変化 ^{*4} が懸念され、変質による収着特性の著しい低下が想定される場合[1]、保守的に収着影響を無視する。	1)熱力学データベース 地球化学元素・鉱物の熱力学データ[3] 2)ペントナイトの化学特性データ イオン交換選択係数、表面錯形成定数、表面サイト密度、比表面積、CEC[4],[5],[6] 3)緩衝材中の拡散係数[7]	上記の基準のポイントであるセルの収着性の検討結果に、セメント系材料に対する核種の収着データベース[8]を加え、設定を行う。	人工バリアの設計条件の変更が伴う場合、新たな検討項目 ^{*5} 、 ^{*6} が発生する。 [1]柴田ほか、JNC TN8400 2004-010 [2]柴田・陶山、JNCTN8400 2003-007 [3]Yui et al., JNC TN8400 99-070 [4]小田・柴田、JNC TN8400 99-032 [5]小田ほか、JNC TN8400 99-078 [6]Karnei et al., Engineering Geology 54, pp.15-20 (1999) [7]Sato JNC TN 8410 98-097 [8]加藤ほか、JNC TN8400 2001-029
	岩盤を保護する	岩盤が破壊して水みちが形成されないこと	ニアフィールドの応力場を評価すること	オーバーパック腐食膨張を考慮した緩衝材反力をよりEDZが広がる範囲、程度及び岩盤が破壊しないことを定量化する。	岩盤をコンプライアンス可変型構成方程式、緩衝材及びオーバーパックを線形弾性体とし、長期的なEDZの広がりや岩盤のクリープ変形量を評価する ^{*7} 。	(岩盤) n, m, 初期鉛直応力、初期応力比、内部摩擦角、粘着力、弾性係数、ポアソン比(オーバーパック及び緩衝材) 弾性係数、ポアソン比		

*1 : 有機物の透過程評価のデータでは、地下水条件で、1.2Mg/m³の圧縮ペントナイトの濾過限界が分子量15,000～30,000の範囲にあることが示唆されている。(サイクル機構, 2004)

*2 : 標準化された手法を用いて得られたデータが望ましい。

*3 : 粘土の表面特性データ及び対象元素の収着メカニズムに関する基本定数を用いたバッチ収着試験のモデル化により分配係数の解釈を行い、実験結果の妥当性を補完する。

*4 : オーバーパックの腐食影響に伴うスメクタイトの結晶化学的変化については、現在その可能性についての検討が実施されており、今後影響の把握が求められる可能性がある。

*5 : アルカリ変質については、低アルカリセメントにより回避されるものと仮定しており、現在Ca型化による評価がなされている。普通ポルトランドセメントが用いられる場合、スメクタイトの溶解速度、それに伴う2次鉱物の同定、緩衝材性能の変化の程度を把握し、緩衝材劣化評価を行う必要がある。

*6 : 緩衝材に100度以上の条件が設定される場合、緩衝材中のシリカの溶解・沈殿による層間のセメントーションについての評価が必要となる。

*7 : 岩盤と緩衝材の連成モデルに関しては、現在開発中である。

3.1 緩衝材の力学的変形挙動

緩衝材には、定置された廃棄体を力学的に安定に支持すると同時に、オーバーパックの腐食膨張や周辺岩盤のクリープ変形による外力を緩和する機能が期待されている。この役割が機能しない場合には、廃棄体が過度に沈下して岩盤までの核種移行経路が短縮されたり、緩衝材に働く外力によってオーバーパックや岩盤が破壊されたりする可能性があり、廃棄体埋設後から長期間にわたって緩衝材の力学的変形挙動を把握して、緩衝材の健全性を適切に評価することは重要である。

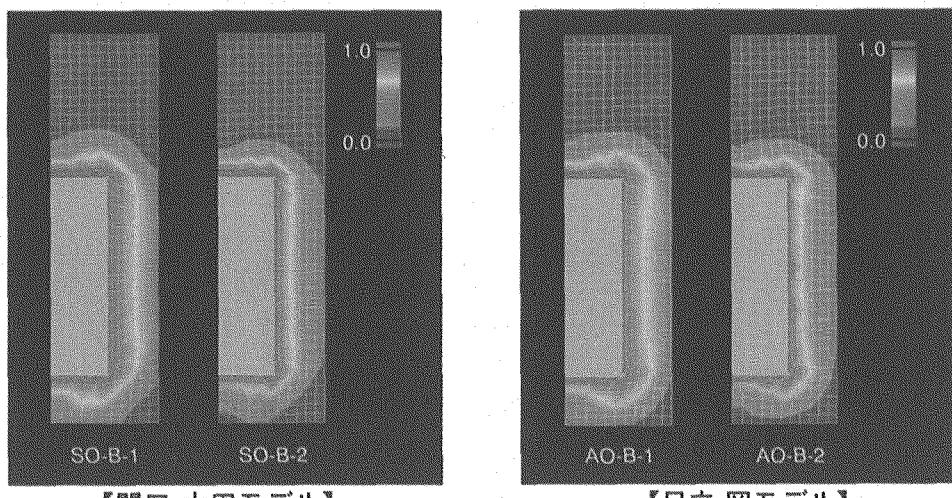
緩衝材の力学的変形挙動の評価方法は、モデル（モデルで用いるパラメータの取得も含む）を整備し、想定された条件に対して計算で求めるものに該当する。

緩衝材の力学的変形挙動を評価するための構成モデルの候補としては、その材料特性や高レベル放射性廃棄物の地層処分という緩衝材の置かれる環境を考慮し、「関口 - 太田モデル」(Sekiguchi et al., 1977) と「足立 - 岡モデル」(Adachi et al., 1982) が挙げられる。また、これらの 2 つのモデルで使用するパラメータの検討を行った結果、以下のように提案できる（重野ほか, 2003; 高治ほか, 2004）。

- ①弾塑性パラメータの膨潤指数の設定方法としては、一次元圧密試験の間隙比-応力の対数の関係において、再載荷時の傾き、または再載荷時の傾きと除荷時の傾きの平均値で設定するのが適切であるといえる。
- ②粘性パラメータの設定方法は、一意的に適切なパラメータを設定することが困難ではあるが、応力状態を評価する際にはひずみ速度の異なる CU 試験より設定したパラメータを、また、変形状態を評価する際には、長期圧密試験から設定したパラメータが適切である。

また、上記で示されたモデルならびにパラメータを用いてオーバーパックの自重沈下解析と腐食膨張解析を行った結果、以下のような知見を得ている（高治ほか, 2004）。

- ①オーバーパックの自重沈下解析を実施した結果、10,000 年後の沈下量の最大値は 34[mm]程度となり、第 2 次取りまとめで示した沈下量 5.1[mm]の 7 倍程度の結果となる。また、沈下量を最も保守的に見積もるパラメータの設定方法によって解析した結果、沈下量は 100[mm]前後となる。今後、沈下後の緩衝材全体の密度分布からコロイドろ過性や自己シール性を有しているか確認し、核種移行に与える影響の有無を調べる必要がある。
- ②オーバーパックの腐食膨張解析を実施した結果、オーバーパック周辺とオーバーパック隅角部で応力がほぼ限界状態にあるものの、いずれのケースでも腐食膨張によって緩衝材は全体的な破壊には至らない（図 3-1）。



【関口-太田モデル】

【足立-岡モデル】

※図中、SOは関口-太田モデルのパラメータを、AOは足立-岡モデルのパラメータを意味する。また、B-1及びB-2については、それぞれのモデルで用いている膨潤指数及びポアソン比の違いを意味しており、それぞれ以下の値を用いている。

- ・B-1：膨潤指数=0.069、ポアソン比=0.001
- ・B-2：膨潤指数=0.040、ポアソン比=0.166

図 3-1 腐食膨張解析による破壊接近度センター（凡例中，“1.0”は破壊を表す）

3.2 炭素鋼・代替オーバーパックの腐食挙動

オーバーパックの腐食影響評価を行うにあたり、解析で求められた緩衝材間隙水組成を参考として用いている。緩衝材には地下水環境の変動を緩和する化学的緩衝性が期待されており、腐食影響評価においても想定される地下水からその変動が緩和された条件で試験および評価を実施している。

本検討では環境条件による影響ならびに施工時のすき間の影響について検討が進められているが、ここでは施工時のすき間の影響についてまとめる。環境条件による影響については、3.9章の間隙水水質モデルにおいて記載する。

緩衝材には、定置された廃棄体の顕著な不均一腐食を生じない環境を維持することが期待されている。緩衝材の施工方法として、地上にて製作された緩衝材ブロックを現地において定置するブロック方式が採用される場合には、ブロック縫ぎ目に環境条件の不均一性が生じ、腐食の局在化に伴うオーバーパックの早期の閉じこめ機能を喪失する可能性がある。したがって、長期にわたる腐食局在化の程度を把握し、緩衝材の健全性を適切に評価することが重要である。

炭素鋼・代替オーバーパックの腐食挙動のうち、施工時のすき間影響の評価方法は実験手法を整備（すなわち実験方法をマニュアル化）し、想定された条件でデータの取得を行うものに該当する。

以下に、現状の実験手法（不飽和緩衝材中における炭素鋼の浸漬試験方法）とその最新の研究結果（谷口、2003）を示す。

試験に用いる試料は、オーバーパック材料と同じ材質の試験片、処分場の仕様で圧縮成型された緩衝材、処分場で想定される緩衝材近傍の地下水組成（支保工共存による影響も含む）とし、処分場環境の温度条件を想定する。なお、試験期間は長期が望ましい。

すき間腐食試験で用いる試験セルの模式図を図3-2に示す。セルの底部（テフロン製）には試験片加熱用のヒータを埋め込み、その上に炭素鋼試験片、緩衝材ブロックを置き、すき間を模擬するため緩衝材に5[mm]もしくは10[mm]のスリットを設けた上でテフロン性の断熱カバーで覆い、上部はテフロン製の蓋をする。さらに、緩衝材の膨潤圧に対して変形しないよう、上下をス

テンレス製の抑え板で挟む。緩衝材への試験溶液の注水は上蓋中央部の穴にチューブを接続しセル上部より行う。緩衝材が均質に浸潤するよう緩衝材上部にはろ紙を敷いている。上部注水孔からの緩衝材流出を防止するため、セラミック製およびチタン製の目板をはめ込んでいる。腐食状況以外に、緩衝材中の温度勾配や電位測定を行う場合には、注水孔近くに塩橋を配置し、側面にモニタリング用の孔を空け、熱電対もしくは電極を挿入し、試験期間中適宜測定する。

試験期間終了後、平均腐食深さは炭素鋼試験片の重量減少量より算出し、腐食深さ分布の測定は表面粗さ計を用いて行う。

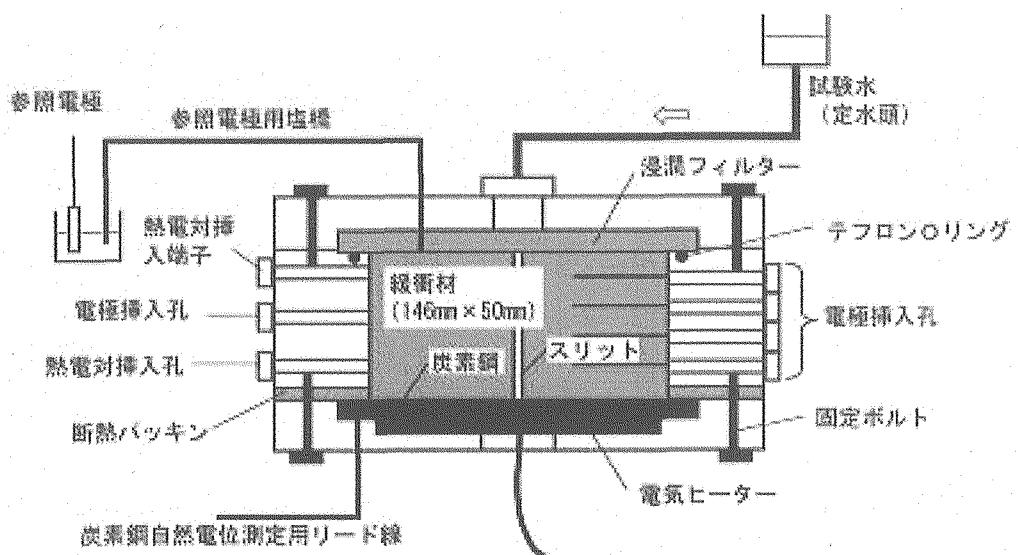


図 3-2 緩衝材中の浸漬試験セルの模式図

得られた測定結果から、平均腐食速度、最大腐食深さ、孔食係数を導出し、図 3-3 に示すグラフにプロットし、孔食係数が上限値より小さいことを確認する。上限値より大きい場合には、最大腐食深さ推定モデル（谷口ほか、2005）の修正を行う。

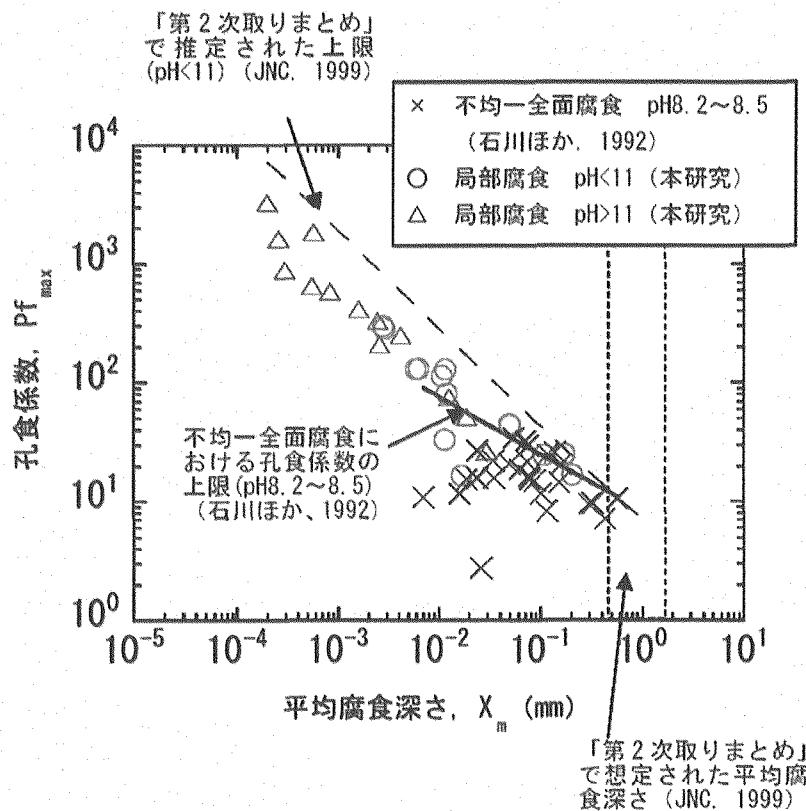


図 3-3 孔食係数の平均腐食深さ依存性

3.3 微生物の影響評価

緩衝材には、微生物影響による廃棄体の顕著な腐食速度の増加が生じない環境の維持が期待されている。また、緩衝材の微生物透過性および緩衝材中の微生物活性の維持の有無について確認し、緩衝材の健全性を適切に評価することも重要である。

微生物の影響評価方法は、実験結果のデータベース集や実験式を整備し、想定された条件に対してデータの推定を行うもの（念のため実験で確認することを想定して実験に係る情報の提供も行う）に該当する。

以下に、緩衝材の微生物透過性に該当する現状の実験手法と研究成果例を示す。

処分場における緩衝材の候補材であるケイ砂混合ベントナイト（以下、「ベントナイト系材料」という。）が有するfiltration効果により緩衝材内部への微生物の侵入が防げられるか否かを微生物の透過試験を実施することにより確認する。以下に試験装置および菌測定に資するベントナイト試料の採取方法例を記載する（嶺ほか, 2000）。

試験装置は、図 3-4 で示すようにステンレス製で、ベントナイト系材料をミリポアフィルタで挟み込んでいる。さらに、後述する加熱滅菌処理時に歪みが生じないように、パッキンを設置し、ベントナイト側面からの菌の回り込みを阻止できるようにしている。また、蓋部に O リングを用いることにより、雑菌の侵入を防止できるようにしている。ベントナイト系材料は粉末状態で紫外線により滅菌し、さらに 107[°C] 1 時間での加熱滅菌を 2 回実施する。所定の乾燥密度に成型した後、100[°C] で 1 時間加熱滅菌し、121[°C] で 30 分間加熱滅菌しておいたステンレス製試験装置に設置する。その後、ベントナイト系材料を設置した装置の滅菌（121[°C] の加圧蒸気により 20 分間）を 2 回実施する。

滅菌処理後、滅菌蒸留水をベントナイト系材料上部から添加し、ベントナイト系材料を膨潤させる。引き続き実施する菌透過試験では、アルミナ焼成フィルタ（目開き 10~100[μm]）が目詰まりする可能性があるため、膨潤処理終了後に目開きが大きい中空金網フィルタ（目開き 1[mm²]）

角)と交換する。

事前に準備しておいた大腸菌を含む菌液を試験装置上部から添加し、30[°C]程度の恒温槽内で菌透過処理を開始する。菌液は1週間ごとに交換し、大腸菌が試験期間を通じて常に生存できるようとする。また、処理中は菌液がベントナイト系材料上部から均等に透過するように中空網綱フィルタに直径3[mm]のガラス玉を入れて試験装置自体をロータリーシェーカ上で回転攪拌(85[rpm])する。菌透過処理期間については、培養液に含まれる色素(エオシンイエロー)がベントナイト系材料底部へ達する期間とする。ただし、ステンレス製試験装置では色素が透過する様子が見えないため、別途、アクリル製試験装置を使用し、培養液のみの透過処理を実施することによって、処理期間を決定する。

菌測定では、大腸菌がベントナイト系材料中を透過したか否かを判断するために、深さごとに切り出したベントナイト系材料を培養し、大腸菌のコロニーが形成されるか否かを調査する。試験容器から抜き出したベントナイト系材料の切り出しは図3-5に示すように、滅菌カッターを使用してベントナイト系材料底部から深さごとに一定量のサンプルを切り出す方法で実施する。

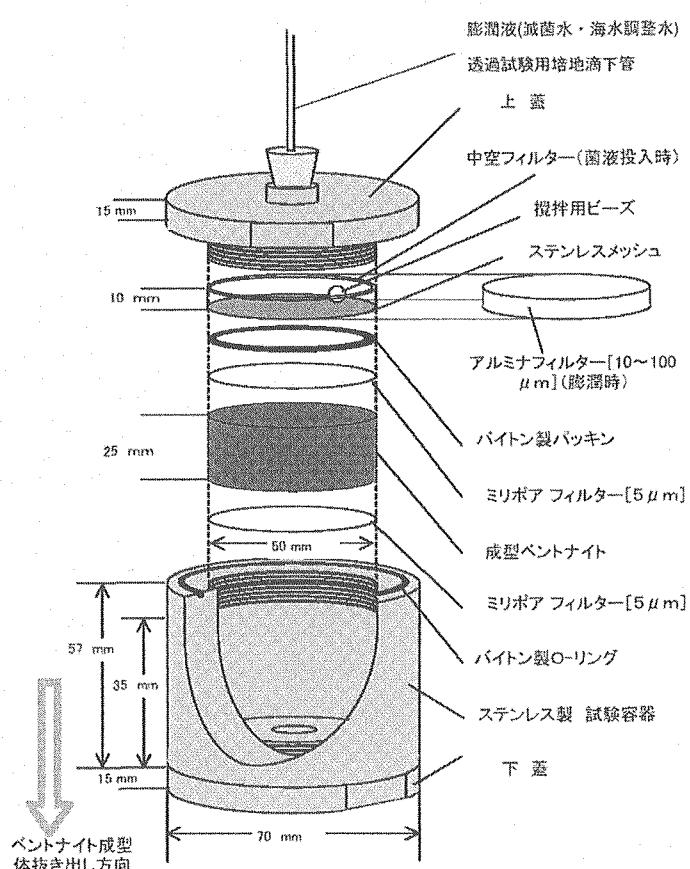


図3-4 微生物透過試験装置の概略図

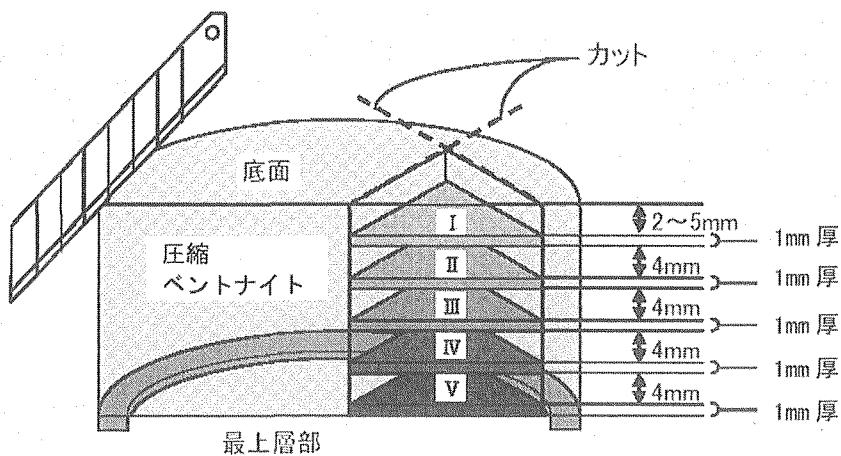


図 3-5 試料の切り出し方法

切り出したサンプルにベントナイトの塊などが含まれていた場合、後述するコロニーの計測において、誤差を生じさせる可能性があるため、サンプルに生理食塩水を添加し、ホモジナイザーで均一に懸濁させる。さらに、コロニーとベントナイト粒子との見分けがつきにくいことから、できる限りベントナイト粒子を懸濁液から取り除けるように、懸濁液は 20[μm] のナイロンメッシュ布を用いてろ過する。この懸濁液を平板計数法に準じて 100 倍に希釈し、シャーレに分注する。さらに、寒天培地をそれぞれのシャーレに加え、30~32[°C] で 2~5 日間培養し、寒天培地に形成されたコロニーを計測する。

試験では、微生物の中でも比較的小型であり、好気的、嫌気的条件であっても増殖が可能である大腸菌（大きさ 0.5~4.0[μm]）を使用している。その結果、緩衝材としてベントナイト系材料を使用する場合には、乾燥密度を $1.2 \times 10^3 [\text{kg m}^{-3}]$ 以上とし、ケイ砂を 50[wt%] 以下となるように混合すれば、緩衝材内部への微生物の侵入を抑制することができると考えることができる（図 3-6）。また、Ca 型化させたクニゲル V1 ベントナイト試料についても同内容の試験を実施し、ベントナイト系材料の微生物を透過させない機能が長期間維持できるか否かを検討している（表 3-5）（福永ほか、2002）。

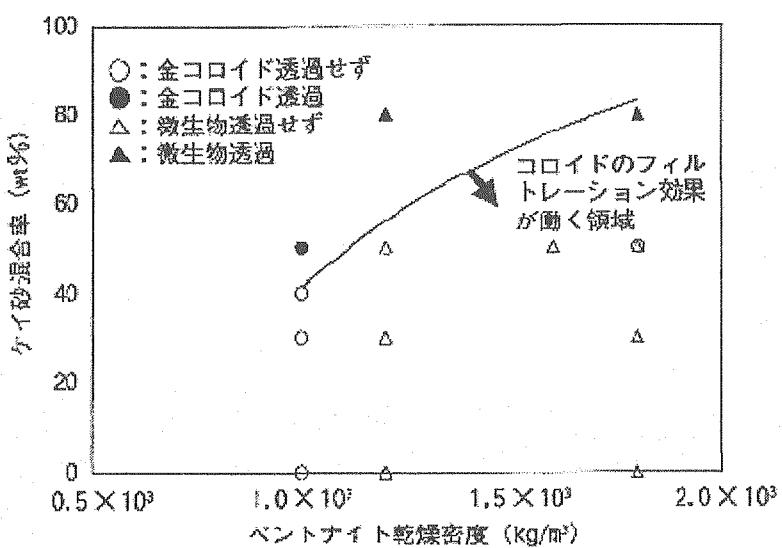


図 3-6 ケイ砂混合クニゲル V1 ベントナイト系材料の微生物フィルトレーション効果

表 3-5 透過試験後のベントナイト系材料中の大腸菌の分布

乾燥密度	1.8(g/cm ³)			1.6(g/cm ³)				1.6(g/cm ³)				1.2(g/cm ³)				
	Na			Ca				Na			Na					
ケイ砂混合率(wt%)	0	50	80	0	0 ^{*1}	30	30 ^{*2}	50	0	30	30 ^{*3}	50	0	30	50	80
ベントナイト層	底面	25mm	—	—	●	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	●
	I	20mm	○	○	●	○	○	○	▲	●	○	○	○	○	○	●
	II	15mm	○	○	●	○	○	▲	▲	●	○	○	○	○	○	●
	III	10mm	○	○	●	○	○	●	▲	●	○	○	○	○	○	●
	IV	5mm	○	▲	●	○	○	●	▲	●	○	○	▲	○	○	●
	V	0mm	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

● : 透過が認められたもの
 ○ : 透過が認められなかったもの
 ▲ : 一部に透過が認められたもの
 — : 壁面回り込み菌検出の懸念のため測定中止
 *1 : pH調整有り(pH=10)
 *2 : 長期透過(9週間)
 *3 : 海水系培地を用いた試験

3.4 緩衝材の基本特性

緩衝材には、水を含んだ際の膨潤性により緩衝材やオーバーパックの据え付け時に必要なすき間を充填する自己シール性や間隙水の動きを遅くし物質移動を遅らせるとともに、ガラス固化体からの核種の溶解速度を抑える低透水性が要求されている。

自己シール性の評価方法は実験手法を整備（すなわち実験方法をマニュアル化）し、想定された条件でデータの取得を行うものに該当する。また、膨潤特性や透水特性等の評価方法は、実験結果のデータベース集や実験式を整備し、想定された条件に対してデータの推定を行うもの（念のため実験で確認することを想定して実験に係る情報の提供も行う）に該当する。

緩衝材の基本特性に関しては、第2次取りまとめまでに、主に降水系地下水条件下を模擬したデータが整備された。第2次取りまとめ以降、実際の地質環境条件を考慮するため、人工海水、幌延地下水および塩濃度をパラメータとして、海水系地下水条件下を模擬した緩衝材の飽和透水特性、膨潤特性、熱特性、力学特性データの整備を行っている。その結果、飽和透水特性、膨潤特性、力学特性データに関しては、塩濃度および有効粘土密度条件によるが、海水系地下水条件下において緩衝材の諸機能が低下する知見が得られた（菊池・棚井、2004）。その一例として、降水系および海水系地下水条件下における有効粘土密度と平衡膨潤応力の関係を図3-7に示す。これらの成果は、海水系地下水条件下における緩衝材の単独設計に反映でき、第2次取りまとめと同様に評価することが可能となった。また、飽和透水特性、膨潤特性、力学特性データから海水系地下水条件下における人工バリアの長期挙動および安全評価解析に資する関係式を一般化した（菊池・棚井、2003、2004；菊池ほか、2003）。

さらに、第2次取りまとめまでの知見および、平成15年度末までに取得した海水系地下水条件に関する各特性データをデータベースとして構築中である。

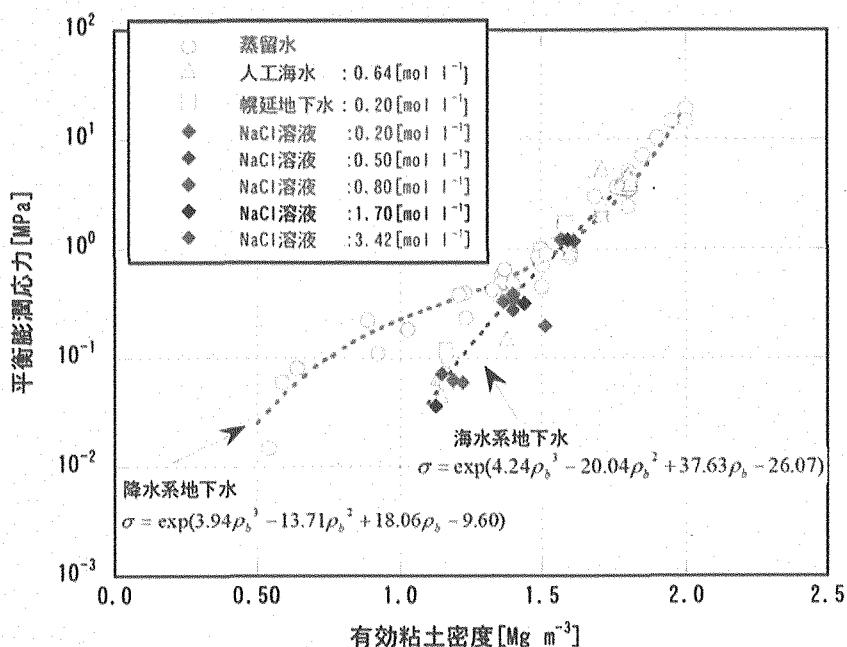


図 3-7 有効粘土密度と平衡膨潤応力の関係

3.5 緩衝材ガス透気回復挙動

地下深部の還元環境下において炭素鋼オーバーパックが腐食することで水素ガスが発生する。炭素鋼オーバーパックの腐食により発生する水素ガスは、緩衝材中の間隙水に溶存し拡散移行するか、気相として緩衝材中を移動することが考えられる。しかし、溶存水素の拡散により十分な量が放出されず、かつ、緩衝材自体の透気性が小さい場合、緩衝材とオーバーパック間に水素ガスが蓄積され、その圧力により緩衝材あるいは岩盤の構造力学的安定性に影響を及ぼす可能性がある。さらに、水素が気相として緩衝材中を移動する際に、緩衝材間隙水を排出しつつ移動すると考えられることから、それに伴って核種の移行が促進される可能性も懸念される。

したがって、これらの想定事象に対して実験的及び解析的検討を行い、ガス発生の影響を定量的に評価することが重要である。

緩衝材ガス透気回復挙動の評価方法は、モデル（モデルで用いるパラメータの取得も含む）を整備し、想定された条件に対して計算で求めるものに該当する。

緩衝材を対象としたガス移行試験に際しては、これまでの降水系地下水条件下に加え、海水系地下水を用いた試験を行いデータの拡充が行われている。海水系地下水条件での試験結果を降水系の結果と合わせて図 3-8 に示す。これまでの試験により得られた結果から、塩水による影響はほとんどなく降水系と同程度の破過圧力において透氣するものと推測される。

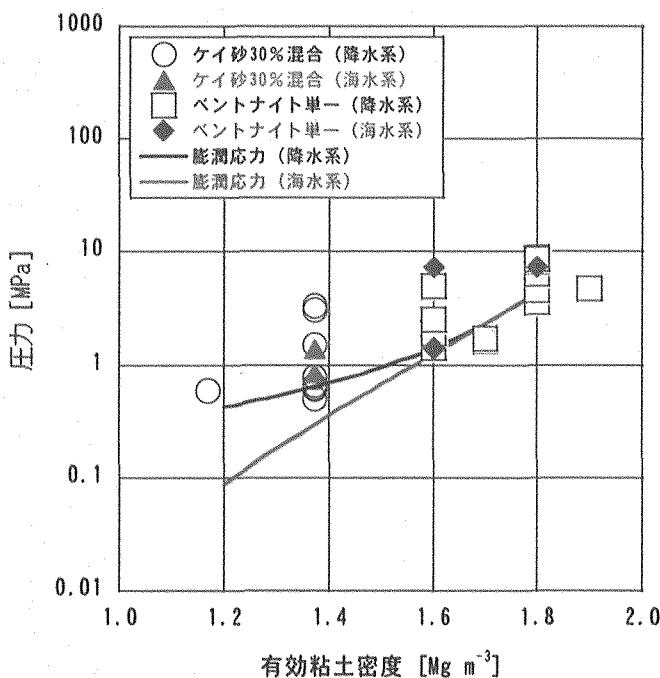


図 3-8 有効粘土密度と破過圧力の関係（降水及び海水地下水条件下）

また、これまでのガス移行試験結果をもとに改良型 TOUGH2 コードを用いたシミュレーションを行い、モデルの妥当性に関する検討を進めており (Tanai and Yamamoto, 2003)，ガス侵入、ブレイクスルー及びブレイクスルー後のフラックスの過渡的変化が連続媒体 2 相流モデルに比較して再現性が良いものの、間隙水排出量が多い試験結果に対しては排出量の計算値が試験結果と乖離する場合がある（棚井・山本, 2003）などの知見が得られている。

さらに、国際共同研究 GAMBIT-Clubにおいて開発を進めてきた GAMBIT-GWS モデル (Hoch et al., 2004) に関しては、試験結果との比較検討を進めている。

3.6 緩衝材の流出・侵入挙動

緩衝材には膨潤性によって緩衝材と周辺岩盤との隙間や周辺岩盤亀裂等を充填する自己シール性が期待されている。一方で、岩盤亀裂が大きい場合には、この膨潤性によってペントナイトの亀裂への侵入が止まらずに緩衝材の密度が低下し、緩衝材に要求されている諸機能に影響を及ぼすことが懸念される。また、亀裂へ侵入したペントナイトゲルが地下水によって浸食され、核種の移行を促進してしまうことも考えられる。

したがって、人工バリア埋設後における緩衝材の物理的安定性や核種移行評価を行う上で、これらの現象を定量的に評価することが重要である。

緩衝材の侵入現象に関する評価方法は、モデル（モデルで用いるパラメータの取得も含む）を整備し、想定された条件に対して計算で求めるものに該当する。一方、緩衝材の浸食現象に関しては、想定された条件下でのペントナイト起源コロイドの発生条件等に関するデータ取得を行うものに該当し、これらの成果は 3.7 章のコロイド影響評価に反映される。

(1) 侵入現象

降水系地下水（蒸留水）および海水系地下水（人工海水、幌延地下水）における亀裂侵入速度の指標である比例係数データを取得し、両者の挙動を比較評価した。その結果、海水系地下水では、ペントナイトの亀裂への侵入が降水系地下水と比較し、顕著に小さくなることを把握した（図 3-9）。また、試験に用いた水質をイオン強度で整理し、各水質における比例係数を比較した結果、ペントナイトの侵入挙動は、イオン強度が小さい水質ほど侵入し、逆にイオン強度が大きくなるほど、侵入が抑制されることが分かった（松本・棚井, 2005）。

これらの実験的な知見より、海水系地下水においては岩盤亀裂侵入による緩衝材の物理的安定性への影響が顕著でないと判断でき、安全評価において降水系地下水条件下で留意すべき事象であることが示された。

一方、侵入現象のモデル化においては、第2次取りまとめに用いた外挿、推定に基づいたモデル化におけるペントナイトの物性データについて、実測値を取得するなどしてデータの信頼性向上を図り、モデルに適用した。また、非破壊検査によって亀裂侵入密度分布を測定し、得られた結果を用いてモデルの妥当性を評価した。その結果、ペントナイトの物性データである低密度域の膨潤圧と透水係数におけるデータの精度向上、ならびに、これまで得られていなかったペントナイトの粘度に関する実測に基づいた評価を行い、モデルの信頼性が向上した。また、これらより、固相拡散係数を見直し、第2次取りまとめ時において十分でなかったモデルの妥当性評価を実施した結果、実験結果とのシミュレーション解析の結果は良く一致し、モデルにおける固相拡散係数の導出について妥当性が確認された（松本ほか、2005）。これら新しい知見を適時モデルへ反映することで、今後よりモデルの高度化が図られるものと考えられる。

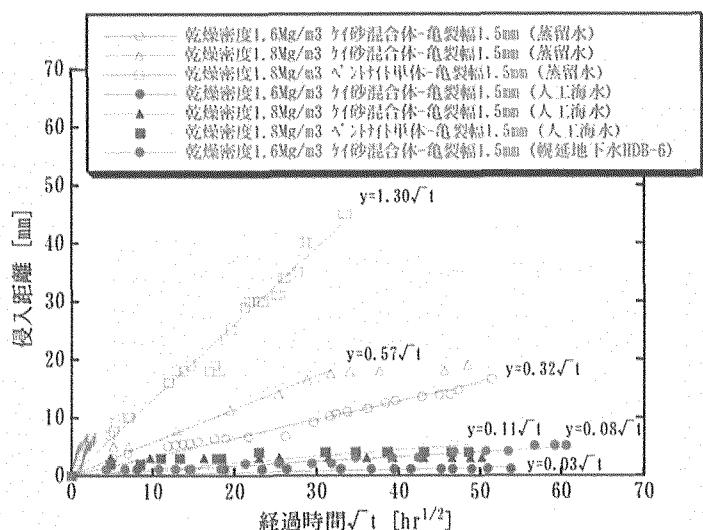


図 3-9 降水系および海水系地下水条件下における経過時間と侵入距離の関係

(2) 浸食現象

現象をより詳細に捉えるための手法の検討やデータの信頼性向上、ならびに、コロイド影響による核種移行評価への寄与という観点で、降水系地下水（蒸留水）および海水系地下水（NaCl溶液）を用いたデータの取得を行った。その結果、降水系地下水では、本実験系の平均流速 $2 \times 10^{-6} [\text{m s}^{-1}]$ において、浸食コロイドの生成が確認された。したがって、降水系地下水条件下において浸食現象が発生する臨界流速値は、これよりも小さい流速場である可能性が示唆された（松本・棚井、2004）。一方、海水系地下水では、本実験系の平均流速 $8 \times 10^{-6} [\text{m s}^{-1}]$ において、浸食コロイドの生成が認められないことから、浸食現象が発生する臨界流速値は、これよりも大きい流速場であることを概略的に把握した（松本・棚井、2005）。これら両者の知見より、浸食現象は、海水系地下水よりも降水系地下水環境において留意すべき事象であることを概略的に把握した。

現状では、データは十分ではなく、性能評価研究に反映するまでには至っていないが、今後データが充足されることで、水質や流速などの地質環境による浸食挙動に関して、コロイドが発生する臨界流速等の知見が得られるものと考えられる。

3.7 コロイド影響評価

緩衝材には、コロイド状の核種の移行を妨げるためのろ過機能が期待されている。この役割が機能しない場合には、ガラス固化体から調和溶解する核種が、溶解度に制限され緩衝材中を拡散する現状の核種移行評価の方法で取り扱えなくなり、核種がコロイドとして移行するというシナリオを排除できなくなるため重要である。

緩衝材のコロイド影響の評価方法は、実験手法を整備（すなわち実験方法をマニュアル化）し、想定された条件でデータの取得を行うものに該当する。3.9章の間隙水水質の設定による水質の変化および鉱物の変質による影響に対応する試験結果として、以下の知見が得られている。

健全な緩衝材、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ および高 pH 条件で変質させた緩衝材について金コロイド（1.5[nm]）を用いた移行試験が行われており、高 pH 条件で変質した緩衝材に対して、その機能の喪失が確認されている（黒澤ほか、2002）。

以下に、コロイド影響評価方法に関する現状の試験方法を示す。

ステンレス鋼製のセルに緩衝材を所定の乾燥密度で圧縮充填して実施される。所定の溶液を入れたビーカー中に浸漬させて、真空デシケータ内で減圧し所定の期間含水させる。緩衝材試料を変質させる場合には、次に、セルをテフロン製容器に入れ、所定の溶液を加え密封し、ステンレス鋼製の耐圧容器に入れ、耐圧容器ごと恒温槽に入れ、加温処理して試料を変質させる。コロイド移行試験は、上記の操作を行った試料に対して、8[kgf cm⁻²]の水圧をかけ、処分場環境の地下水を透水させ、透過水量、pH および液性 (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} の濃度) を測定する。これらの測定値が定常に達したのち、透水液にコロイド分散液を加えた溶液に切り替えてコロイドの移行試験を行う。試験に用いるコロイド分散液には、Ogino et al.,(1994)らの報告に基づいて作成した金コロイド分散液を用いる。

コロイドの移行評価は、試料透過液を採取し、分画分子量 10,000 の限外ろ過をおこなったものと行わないものとの両液中の Au の濃度差からその可否を評価する。スマクタイト浸漬条件の異なる試験結果の一例を図 3-10 に示す。

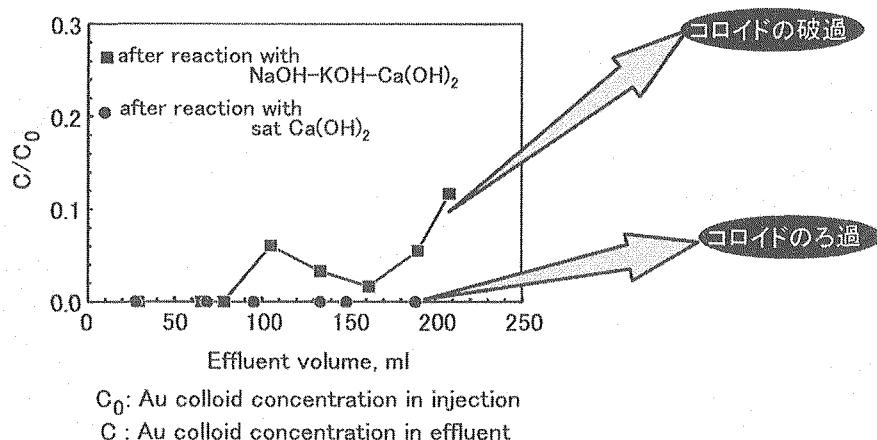


図 3-10 ベントナイト透過水量とコロイド濃度との関係

3.8 核種の収着・拡散現象に関する研究

緩衝材には溶解した核種の移行を遅延する核種の収着性能が期待されている。収着の効果（分配係数）が核種移行評価に与えるインパクトは、 $1/R_f$ （遅延係数の逆数）だけ拡散が遅延されると見なすことができ、その効果は非常に大きいためである。ベントナイトに対するその値を適切に評価することは非常に重要である。

遅延係数は、液相中の核種量に対する全相（液相+固相）中の核種量の比として以下のように記述される。

$$R_f = \frac{\varepsilon C + (1-\varepsilon)\rho_a q}{\varepsilon C} = 1 + \frac{(1-\varepsilon)\rho_a KdC}{\varepsilon C} = 1 + \frac{(1-\varepsilon)\rho_a Kd}{\varepsilon}$$

ここで、 R_f は遅延係数、 ε は間隙率、 C は液相中の核種の濃度、 ρ_a は固相の真密度、 q は単位重量固相当たりの核種の収着量、 Kd は分配係数である。なお対象収着核種の濃度が低い領域では、固相への吸脱着量の割合（分配係数）が濃度によらず一定、すなわち $q=KdC$ 、であると仮定している。

緩衝材の分配係数の評価方法は、実験結果のデータベース集や実験式を整備し、想定された条件に対してデータの推定を行うもの（なお、念のため実験で確認することを想定して実験に係る情報の提供も行う）に該当する。

緩衝材の核種の分配係数は、比較的短期間のバッチ収着試験から直接導出する方法と、圧縮ペントナイトを用いた拡散試験（非定常拡散試験と定常拡散試験）から得られた拡散係数（見かけの拡散係数と実効拡散係数）を用いて計算より導出する方法の2種類が存在する。高密度に圧縮したペントナイト中の間隙構造や間隙水の存在状態は希薄溶液のそれとは異なることと、圧縮ペントナイトの実測値を重視する観点から、ペントナイトについては後者の拡散試験結果に基づき分配係数の基本設定を行っている。分配係数を導出するための拡散係数の設定については Sato (1998) に詳述されている。しかしながら、拡散試験の実験条件と処分場環境とは一致しないため、様々な環境条件への対応については、拡散実験から求められる分配係数値を基本にしつつ、バッチ試験結果のイオン強度依存性、温度依存性等を収着データベースを用いて確認し、その影響を加味し、最終的に分配係数を決定している（柴田ほか, 1999）。

非定常拡散試験と定常拡散試験方法例は、佐藤・瀧谷（1994）らによって、試験結果の解析方法を含めまとめられている。

3.9 間隙水水質モデル

緩衝材には、オーバーパックの腐食に関わる環境を維持するため、および自身の膨潤能力、力学特性、透水特性、収着特性を精度良く評価するため、地下水化学の変動を緩和する機能が期待されている。

間隙水水質モデルの評価方法は、モデル（モデルで用いるパラメータの取得も含む）を整備し、想定された条件に対して計算で求めるものに該当する。

第2次取りまとめでは緩衝材中のモンモリロナイトを安定鉱物としてその溶解を認めない（すなわち緩衝材中のモンモリロナイトは変質しないと想定した）計算を行っている。その条件において、3.2章のオーバーパックの腐食挙動に対しては、腐食シナリオの前提条件となる炭素鋼オーバーパックがさらされる地下水環境条件および腐食生成物の熱力学平衡状態に関する情報を提供し、3.1, 3.4, 3.7章に対しては、モンモリロナイト中の層間陽イオンの変化情報を提供するために解析が行われる。

なお、モンモリロナイトの溶解を認める場合については、3.10章の人工バリアの変質・劣化挙動において記述する。

以下間隙水化学組成およびスメクタイトのイオン型の変化の評価方法について示す。

(1) 間隙水化学組成

評価方法については、モデル（モデルで用いるパラメータの取得も含む）を整備し、想定された条件に対して計算で求めるものに該当する。

緩衝材中の間隙水化学の評価は、スメクタイトの表面反応、随伴鉱物の溶解／沈殿反応、（小田・柴田, 1999）ならびに炭素鋼オーバーパック腐食生成物との熱力学平衡反応に基づいたモデル計算で行われる（図3-11参照）。間隙水組成は基本的に核種移行評価に用いるため、処分後1000年以後を対象とし、長期間経過後は緩衝材中の可溶性塩は拡散により全量逸脱すると仮定してい

る。なお、間隙水組成は、バッチ計算で導出され緩衝材領域において均質としている（小田ほか、1999）。

地下水組成については、実際の処分場で取得された地下水に対して評価が行われるが、サイトが決定していない現状では、降水系地下水、海水系地下水等について評価を行っている。モデル計算に用いたベントナイト化学モデル・パラメータはクニゲルV 1ベントナイトの実験データに基づき決定している。間隙水モデル構築のフロー図を図 3-11 に示す。

(2) スメクタイトのイオン型の変化 (Ca 型化, Fe 型化)

評価方法については、モデル（モデルで用いるパラメータの取得も含む）を整備し、想定された条件に対して計算で求めるものに該当する。

イオン型の変化により生じる緩衝材特性の変化は、処分場環境条件に影響を受けるものの発生可能性が高い Ca 型化については、発生に伴う緩衝材性能への影響が検討されており、膨潤性、透水性、一軸圧縮強度および弾性係数が前田ほか(1998)によって、低乾燥密度での膨潤性が三原ほか(1998)によって取得されている。また、Fe 型化は、現状 Ca 型ベントナイトと同等の特性として取り扱われている。

(3) 時空間分布の考慮

上記で述べたように、間隙水組成評価は均質な単一領域における平衡状態を計算している。しかし、現実には物質の拡散や化学反応の進行に伴う時空間分布が存在する。現実的な時空間分布を考慮した間隙水モデルの推定には、地球化学-物質移行連成コードを用いた解析が必要であり、例えば柴田・陶山(2003)により、オーバーパックから溶出した鉄イオンによる影響の予察解析が行われ、図 3-12 のようにモンモリロナイト層間陽イオンの空間変化が示されている。

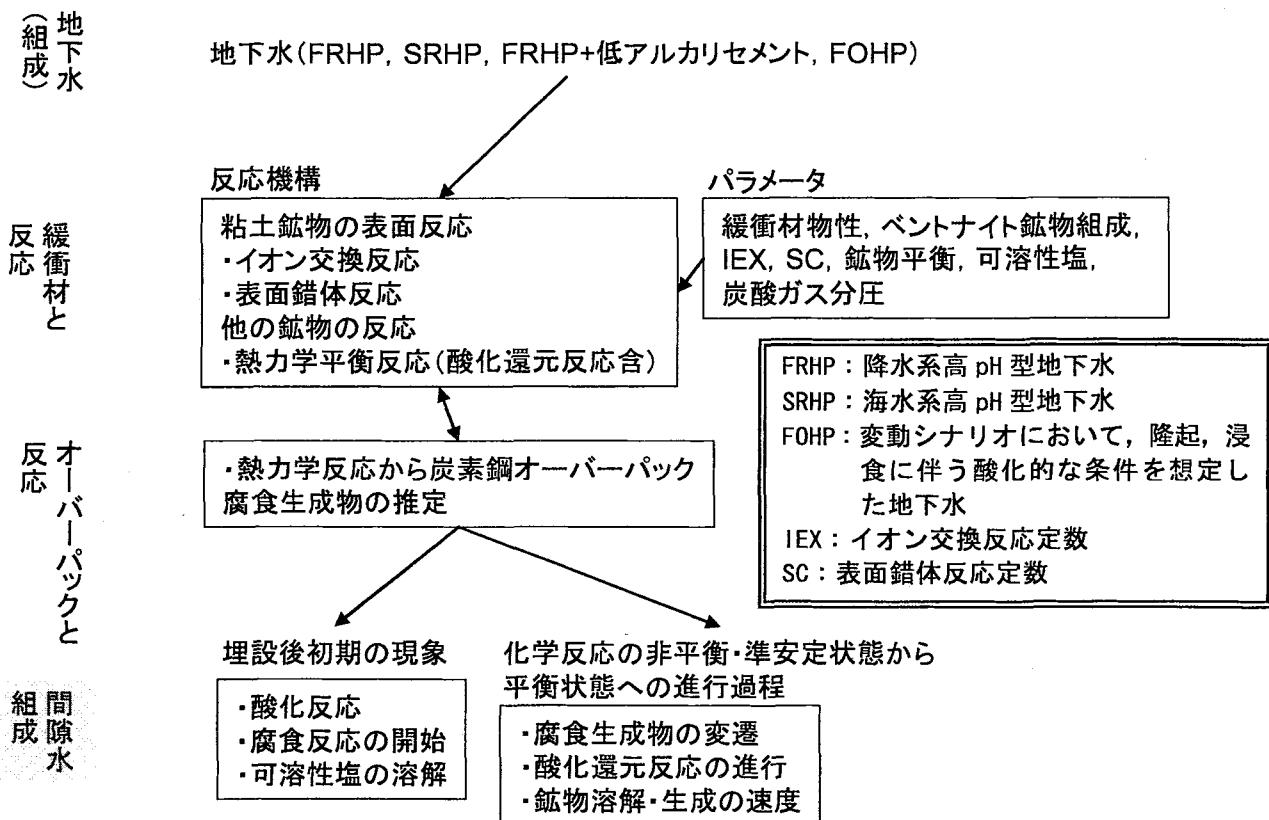


図 3-11 緩衝材中の間隙水化学組成導出フロー図

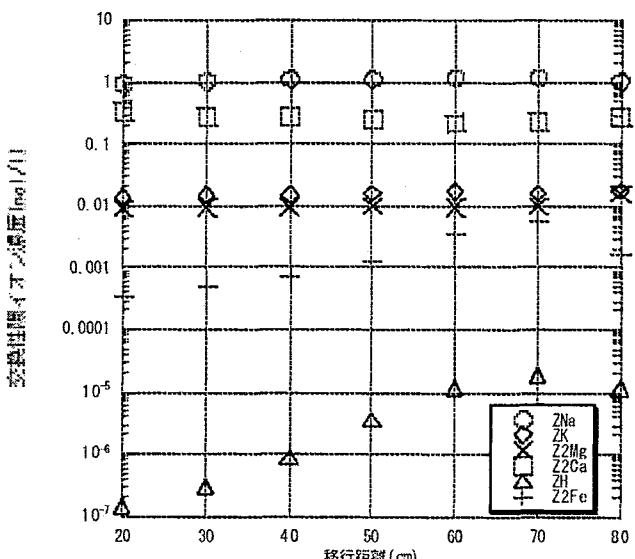


図 3-12 18,000 年後の交換性陽イオン濃度変化例

3.10 人工バリアの変質・劣化挙動

緩衝材は長期にわたり初期の性能が維持されることが期待されている。「第2次取りまとめ」における緩衝材の長期安定性評価では、緩衝材温度を100[°C]以下とすることおよびコンクリート材料として低アルカリ性セメントを利用し、高アルカリ環境を回避することにより、緩衝材の顕著な変質を避けることができるとしている。一方、オーバーパック腐食生成物との相互作用については長期の挙動を推定するデータが必ずしも十分でないことや、アルカリ性環境での緩衝材変質に関するデータの充実が必要であることを指摘している。

人工バリアの変質は、その現象が多岐にわたり、各々の研究の進展度合いが異なる。したがって、その評価方法述べる前に、処分環境条件で起こりうる変質現象の抽出方法について記載する。

人工バリア材料のうち緩衝材の変質・劣化挙動の抽出については、地下水、緩衝材内部最高温度、セメント支保工の利用の有無といった環境条件を設定した後、以下の図3-13の長期安定性評価フローを用いて、緩衝材性能の変質・劣化の有無を判断する。発生可能性が高く緩衝材性能への影響が無視できない場合、あるいは変質に伴う影響が判断できない場合で、処分システムの設計等により、現象発生の回避が不可能な場合、変質進展の程度を推定するための手法の整備、変質の進展に伴う緩衝材の性能変化に関する情報提供が要求され、すなわち必要な研究課題となる。

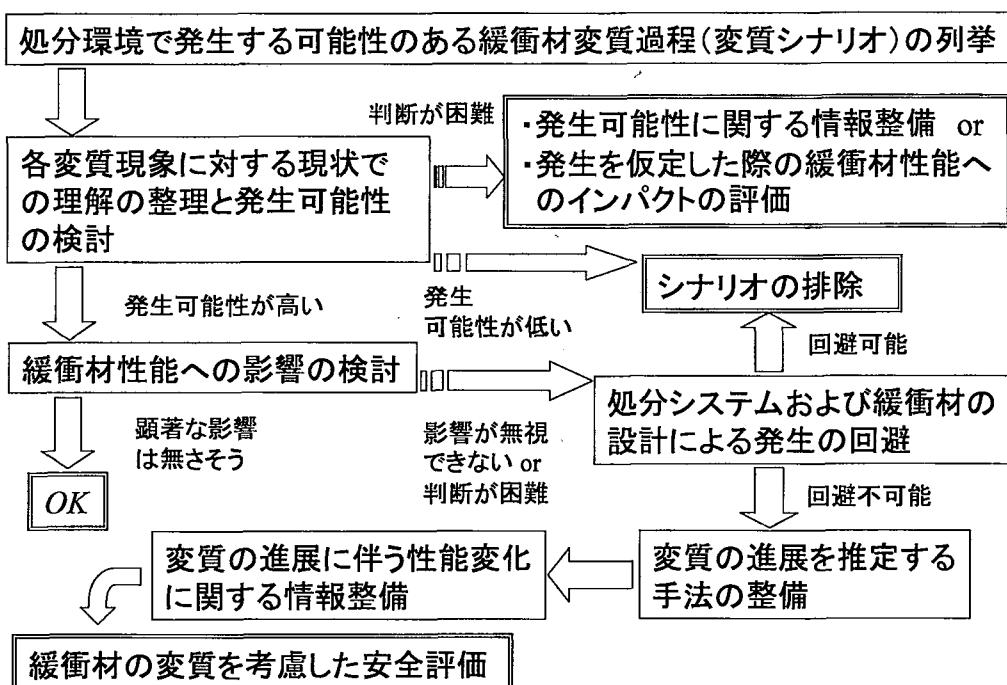


図3-13 緩衝材の長期安定性フロー

現在想定される環境条件（降水系もしくは海水系地下水、緩衝材温度100[°C]以下、セメント支保工の利用は考慮する）では、主に岩盤（支保工）と接触する側で、スメクタイトのイオン型の変化（Ca型化）、セメント溶液によるスメクタイトの溶解、溶解に伴う二次鉱物の沈殿が、主にオーバーパックと接触する側で、塩や鉱物の溶解・沈殿、スメクタイトのイオン型の変化（Fe型化）、スメクタイトの変質、腐食生成物によるセメンテーションが図3-13の検討フローから課題が抽出されている。以下に課題の概要を示す。

(1) スメクタイトのイオン型の変化 (Ca型化, Fe型化)

スメクタイトの層間陽イオンの変化については、3.9章を参照。

(2) 塩や鉱物の沈殿による蓄積

長期的には溶解するため影響はないと予想されている（柴田ほか, 2004）。

(3) セメント浸出液によるスメクタイトの溶解

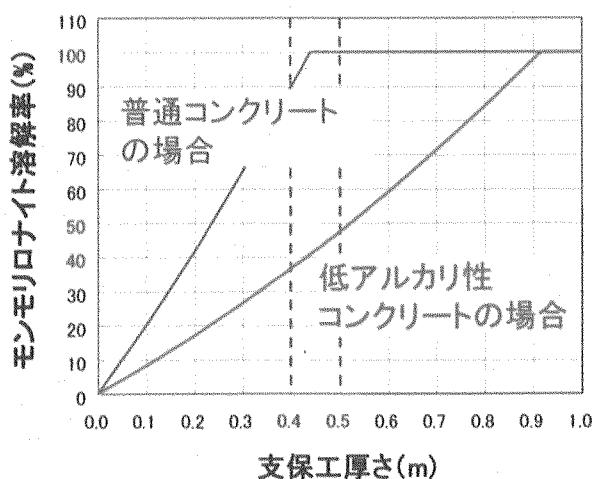
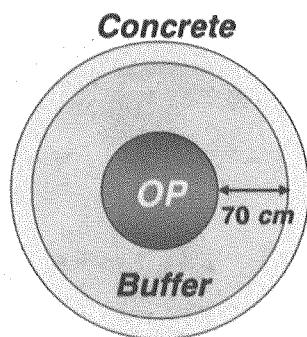
評価方法については、実験結果のデータベース集や実験式を整備し、想定された条件に対してデータの推定を行うもの（なお、念のため実験で確認することを想定して実験に係る情報の提供も行う）に該当するものである。しかし、溶解速度の実験式導出のため、スメクタイト溶解速度試験やAFMによる正確な反応表面積の導出の検討が行われている段階である（柴田ほか, 2004）。

なお、3.8章の内容である核種の収着性のうち、変質したベントナイトに該当するものについては嶺ほか(1999)によってまとめられている。使用において実験条件の確認は必要であるが、変質劣化条件におけるデータとして利用可能である。また、今後は変質後安定な鉱物の特定が行われた後、当該条件における3.8章の研究が必要となる。

(a) マスバランス計算

図3-13の「処分システムおよび緩衝材の設計による発生の回避の可否」の観点から、セメント由来の水酸化物イオンがすべて粘土との反応に消費に関わるマスバランス計算が行われている。横置き方式（第2次取りまとめの支保工厚さ）の結果では、溶解は保守的に見積もっても20%程度である（図3-14）。

ベントナイトとコンクリート支保の断面面積比が1.1になるとベントナイト中のスメクタイトが全量溶解すると仮定



普通コンクリートの場合

→支保工の厚さが40~50cmで、ベントナイト中のスメクタイトが全量溶解

低アルカリ性コンクリートの場合

→普通セメント(OPC)の量が120kg/cm³と普通コンクリートの半分以下。

スメクタイトの溶解率も普通コンクリートの場合に比べて、半分程度。

図3-14 コンクリート支保の厚さをパラメータとした
モンモリロナイトの溶解率に関する試算結果

(b) 溶解速度計算

スメクタイトの溶解と2次鉱物の沈殿を考慮する場合、評価方法はモデル（モデルで用いるパラメータの取得も含む）を整備し、想定された条件に対して計算で求めるものに該当する。物質移行と地球化学反応とをカップリングさせた1次元解析コード（PRECIP）を用いた緩衝材の変

質進展に関する解析を行っている。今後はより精緻なスメクタイトの溶解速度データの取得、緩衝材の圧縮状態を考慮した溶解速度式の導出、二次鉱物選定の妥当性確認や二次鉱物の沈殿による緩衝材性能への影響データの取得が必要である（柴田ほか, 2004）。

例えば、既往の室内実験の結果に基づけば、 $pH > 12.5$ の Ca 濃度に富む溶液で、100[°C]以下の条件において、C-S-H ゲルや C-A-S-H ゲルの生成が認められている。今後は長期間経過後どのような鉱物が安定に存在するかを把握する必要がある。

(4) スメクタイトの変質

オーバーパックから溶出した鉄イオンによるスメクタイトの変質については、発生の可能性の確認を行っている段階であるため、現在評価方法の検討まで進んでいない。腐食生成物によるセメントーションが生じる可能性はあると考えられているが、出光ほか(1994)による報告はあるが、現時点では評価方法を決定するまでのデータは取得されておらず、実験データに基づく定量的な把握が必要である（柴田ほか, 2004）。

3.11 岩盤の力学的変形挙動

地下深部に空洞を掘削すると、地質条件によっては空洞周辺岩盤が破壊し時間経過とともにその領域（EDZ）が拡がり、水みちが形成される懸念がある。さらには、長期的な空洞壁面の変位による緩衝材の厚さ減少、圧縮破壊、せん断破壊が生じる懸念がある。よって、ニアフィールドの応力場を適切に評価し、長期における EDZ の拡がりや空洞壁面の変位量を予測する必要がある。

岩盤の力学的変形挙動の評価方法は、モデル（モデルで用いるパラメータの取得も含む）を整備し、想定された条件に対して計算で求めるものに該当する。

ニアフィールド岩盤の長期力学挙動予測評価の一例として、幌延地区の深度 450[m]（稚内層硬質頁岩）（表 3-6）（山本ほか, 2003, 2004）における堅置き式処分孔周辺岩盤を対象とした、定置から 1 万年後のクリープ変形量（表 3-7）、緩衝材の応力状態（図 3-15）、EDZ の拡がり（図 3-16）に関する解析結果を示す。本解析では、岩盤の挙動はコンプライアンス可変型構成方程式と Mohr-Coulomb の破壊基準に基づくものとし、緩衝材、オーバーパックは線形弾性体とし、2 次元 FEM コード（野本ほか, 2003）を用いて計算した。岩盤に関する解析用物性値を表-1 に示す。なお、緩衝材（線形弾性体）は、幌延地下水仕様とし、幌延地下水を用いた室内試験結果（菊池・棚井, 2005）より、ヤング率 18.31[MPa]、ポアソン比 0.4、オーバーパックは（線形弾性体）、「第 2 次取りまとめ」と同様、ヤング率 210,000[MPa]、ポアソン比 0.2 とし、人工バリアは掘削後直ちに定置することとした。解析結果より、幌延地区の深度 450[m] の地質環境条件では、異方圧の影響で EDZ は主応力と直交する方向（点 A）に卓越し、およそ 0.5d（d：処分孔内径）の領域まで拡がることが予測された。処分孔の壁面変位についても点 A が顕著であるが、緩衝材の応力状態は、1 万年後まで弾性領域（破壊接近度=1 以下）にあり、健全性が保たれることが予測された。

本検討では、以下のニアフィールドに生じる実挙動を再現していない。

- ① 緩衝材の膨潤
- ② 緩衝材のクリープ挙動
- ③ オーバーパックの腐食膨張
- ④ オーバーパックの沈下

これらは、緩衝材の応力状態をより複雑にするとともに、①、③は岩盤に対して内圧として作用し EDZ の拡がりや壁面変位を抑制する作用がある。よって、ニアフィールドの長期力学挙動予測の信頼性をより向上するため、①～④の影響を考慮した、岩盤-緩衝材の連成モデル開発が望まれる。

表 3-6 岩盤の解析用物性値（幌延深度 450m）

初期ヤング率 : E [MPa]	2,500
初期ポアソン比 : ν	0.186
粘着力 : C [MPa]	5.2
内部摩擦角 : ϕ [°]	25.0
定数 : n,m	30,20
初期鉛直応力 : σ_v [MPa]	7.21
初期応力比 (鉛直:水平最大:水平最小)	1:1.3:0.9

表 3-7 処分孔の壁面変位結果

経過時間 [年]	1	1,000	10,000
点 A の変位 [mm]	8.6	13.5	17.0
点 B の変位 [mm]	2.9	4.8	5.8

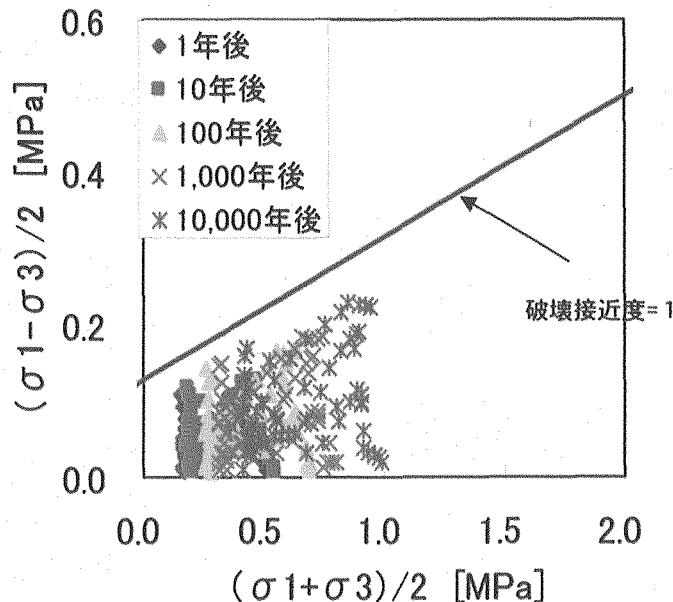


図 3-15 緩衝材の応力状態

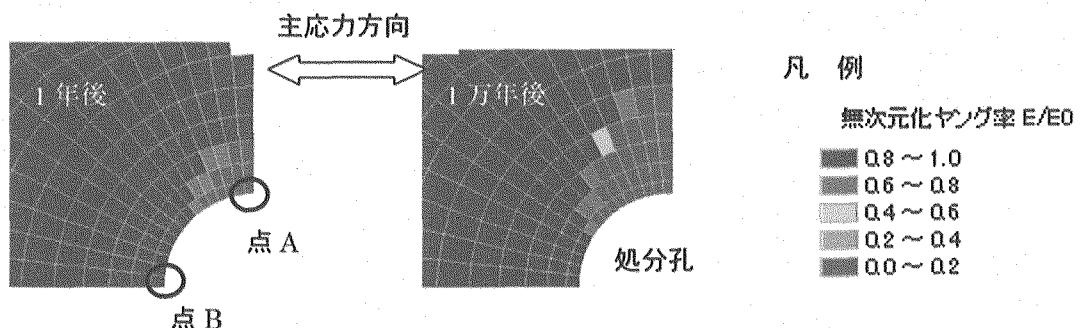


図 3-16 EDZ の分布結果

4. おわりに

緩衝材に関する安全基準・安全規制の策定に資することを目的として、緩衝材に期待される役割を廃棄体支持性、オーバーパックの保護、核種の移行抑制、岩盤の保護の観点から、緩衝材の具体的な評価ツールの現状を表3-1～3-4に網羅的に示した。ツールの評価方法については以下の結果が得られた。

- ・ 「実験手法を整備（すなわち実験方法をマニュアル化）し、想定された条件でデータの取得を行うもの」については、すき間寸法を満足した現位置での施工の確認以外は、整備は行われていた。しかしながら、実際の処分場環境を想定したより合理的な実験手法の提示が必要と考えられる
- ・ 「実験結果のデータベース集や実験式を整備し、想定された条件に対してデータの推定を行うもの（念のため実験で確認することを想定して実験に係る情報の提供も行う）」については、整備は行われていた。今後は、実験式やデータベースが実際の処分場環境を想定した場合、それらの影響の度合い・改良の必要性の程度を確認しておくことが必要と考えられる
- ・ 「モデル（パラメータの取得も含む）を整備し、想定された条件に対して計算で導出するもの」については、スメクタイトの変質ならびに岩盤の力学的変形挙動を除く項目については、保守性を考慮したモデル化は可能であった。しかし、例えば不飽和・飽和条件下での熱・水・応力・化学連性モデルの構築等、モデルの改良・統合およびモデルに必要となるパラメータの取得は引き続き実施する必要はあると考えられる

研究の優先順位では、一般的なポルトランドセメントを処分場で大量に利用する場合、高アルカリ浸出液によるスメクタイトの溶解影響を考慮するモデル化が必要なため、最も優先順位の高い項目と考えられる。他の項目については、今後実験手法の改良、モデルの高度化の優先順位を検討する必要がある。その観点として例えば、処分場における性能評価への影響度合いの大きいものから優先順位を決定するといった検討が必要である。

参考文献

- A.R. Hoch, K.A. Cliffe, B.T. Swift and W.R. Rodwell : "Modelling gas migration in compacted bentonite", GAMBIT Club Phase 3 Final Report, POSIVA 2004-02 (2004).
- T. Adachi et al. : "Constitutive equations for normally consolidated clay based on elasto-viscoplasticity", Soil and Foundation, Vol.22, No.4, pp.55-70 (1982).
- 原子力安全委員会：“高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について（第1次報告）”，原子力安全委員会，平成12年11月6日（2000）。
- 福永栄, 中山衛, 神徳敬, 菅野毅, 工藤章：“地層処分における微生物影響の評価研究”, JNC TJ8400 2002-036, (2002).
- 平井卓, 棚井憲治, 菊池広人, 高治一彦, 大沼敏：“緩衝材のオーバーパック支持力性能に関する検討”, JNC TN8400 2003-031 (2004).
- A. Honda, N. Taniguchi, H. Ishikawa, A.R. Hoch, F.M. Porter and S.M. Sharland : "A Modelling Study for Long-Term Life Prediction of Carbon Steel Overpack for Geological Isolation of High-Level Radioactive Waste", Proceedings of International Symposium on Plant Aging and Life Predictions of Corrode Structures, pp.217-227 (1995).
- 石川博久, 柴田雅弘, 藤田朝雄：“放射性廃棄物地層処分における緩衝材の変質シミュレーション”, 粘土科学, Vol.34, No.3, pp.149-156 (1994).
- 石原義尚, 伊藤貴司, 小林茂樹, 根山敦史：“処分技術・安全評価分野についての技術情報統合システムの製作”, JNC TJ8440 2004-005 (2004).
- 神徳敬, 柴田雅博, 吉田泰, 陶山忠宏：“岩石およびベントナイトに対する核種の収着モデルの検討 (OECD/NEASorption Project)”, JNC TN8400 2003-048 (2003).
- G. Kamei, C. Oda, S. Mitsui, M. Shibata and T. Shinozaki : "Fe(II)-Na ion exchange at interlayers of smectite: adsorption-desorption experiments and a natural analogue", Engineering Geology, pp.15-20 (1999).
- 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).
- 菅野毅, 松本一浩：“ベントナイト緩衝材の流出特性の評価 (I)”, PNC TN8410 97-313 (1997).
- O. Karnland, T. Sanden and L. E. Johannesson : "Long Term Test of Buffer Material, Final Report on the pilot parcels", SKB Technical Report Tr-00-22 (2000).
- 加藤大生, 三原守弘, 本田明, 大井貴夫, 嶺達也：“セメント系材料に対する核種の収着データベースの整備”, JNC TN8400 2001-029 (2002).
- 川上進, 杉田裕, 栗原雄二, 神徳敬, 谷口直樹, 油井三和, 棚井憲治, 柴田雅博, 本間信之：“高レベル放射性廃棄物の地層処分における人工バリア等の性能保証に関わる研究の進め方と反映先”, JNC TN8400 2002-026 (2003).
- 川上進, 油井三和, 栗原雄二, 神徳敬, 杉田裕：“人工バリア等の性能保証に関わる研究のサイクル機構における取り組み”, JNC TN8400 2003-037 (2004).
- 菊池広人, 棚井憲治：“緩衝材の熱物性測定試験 (III)”, JNC TN8430 2003-009 (2003).
- 菊池広人, 棚井憲治, 松本一浩, 佐藤治夫, 上野健一, 鐵剛志：“緩衝材の透水特性-II”, JNC TN8430 2003-002 (2003).
- 菊池広人, 棚井憲治：“幌延地下水を用いた緩衝材・埋め戻し材の基本特性試験”, JNC TN8430 2004-005 (2004).
- S. Kurosawa, M. Yui, and H. Yoshikawa : "Experimental Study of Colloid Filtration by Compacted Bentonite", Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol.465, pp.963-970 (1997).
- 黒澤進, 柴田雅博, 上田真三, 市毛悟, 林賢一, 油井三和：“高アルカリ性条件でのベントナイトの変質とコロイド過効果に及ぼす影響”, 日本原子力学会和文論文誌, Vol.1, No.2, pp.244-248 (2002).
- 前田宗弘, 棚井憲治, 伊藤勝, 三原守弘, 田中益弘：“カルシウム型化およびカルシウム型ベントナイトの基本特性－膨潤圧, 透水係数, 一軸圧縮強度および弾性係数－”, PNC TN8410 98-021 (1998).

- M. Manaka, M. Kawasaki, A. Honda : "Measurements of the Effective Diffusion Coefficient of Dissolved Oxygen and Oxidation Rate of Pyrite by Dissolved Oxygen in Compacted Sodium Bentonite", Nuclear Technology, Vol. 130, pp. 206-217 (2000).
- 松本一浩, 棚井憲治：“ベントナイト緩衝材の流出特性の評価（II）”, JNC TN8400 2003-006 (2003).
- 松本一浩, 棚井憲治：“緩衝材の流出/侵入特性”, JNC TN8400 2003-035 (2004).
- 松本一浩, 棚井憲治：“緩衝材の流出/侵入特性（II） - 峴延の地下水（HDB-6 孔）を用いた緩衝材の侵入特性評価 - ”, JNC TN8400 2004-026 (2005).
- 松本一浩, 棚井憲治, 菅野毅, 岩田裕美子：“拡散モデルを用いた侵入現象による緩衝材密度変化の事例解析”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8400 2005-009 (2005).
- 三原守弘, 青柳孝義, 田中益弘, 山本博之：“Na 型ベントナイトの Ca 化による最大膨潤率の変化”, 日本原子力学会 1998 年秋の大会予稿集, p.849 (1998).
- 嶺達也, 三原守弘, 大井貴夫：“微生物の緩衝材中の移行評価研究”, サイクル技報, No.6, pp.53-60 (2000).
- 嶺達也, 三原守弘, 加藤大生：“セメント系材料の影響を受けた環境条件での圧縮成型ベントナイトに対する核種の分配係数”, JNC TN8430 99-012 (1999).
- 野本康介, 宮野前俊一, 松井幹雄, 梨本裕, 大久保誠介：“コンプライアンス可変型構成方程式を用いた増分法 FEM 解析手法の開発”, 土木学会第 58 回年次学術講演概要集, III-523 (2003).
- K. Ogino, M. Ohta and J. Matsui: "Application of Colloidal Gold to Cosmetics", 18th Int. I.F.S.C. Congr., Italy, B109/2.62 (1994).
- 小田治恵, 柴田雅博, 油井三和：“地層処分研究開発第 2 次とりまとめにおける緩衝材間隙水化学の評価”, JNC TN8400 99-078 (1999).
- 小田治恵, 柴田雅博：“ベントナイト-水相互作用の実験とモデル化”, JNC TN8400 99-032 (1999).
- H. Sato : "Data Setting for Effective Diffusion Coefficients (De) of Nuclides in the Buffer for Reference Case in Performance Assessment of the Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste (I)", PNC TN8410 98-097 (1998).
- H. Sato, and S. Miyamoto,: "A Study on Diffusion and Migration of Lead in Compacted Bentonite -The Effects of Dry Density, Silica Sand Content and Temperature on Diffusion and Migration of Pb-210 in Sodium Bentonite-", JNC TN8400 2001-018 (2001).
- 佐藤治夫, 濵谷朝紀：“緩衝材および岩石への核種の吸着・拡散メカニズム”, PNC TN8410 94-284 (1994).
- H. Sekiguchi et al. : "Induced anisotropy and time dependency in clays", Proc.9th ICSMFE, special session9,pp.229-237 (1977).
- 柴田雅博, 佐藤治夫, 小田治恵, 油井三和：“地層処分研究開発第 2 次とりまとめにおける緩衝材への放射性元素の分配係数の設定 “, JNC TN8400 99-072 (1999).
- 柴田雅博, 陶山忠宏：“緩衝材の鉄型化に関する予察解析”, JNC TN8400 2003-007 (2003).
- 柴田雅博, 笹本広, 神徳敬, 油井三和：“緩衝材の長期安定性評価技術の現状”, JNC TN8400 2004-010 (2004).
- 重野喜政, 並河努, 高治一彦：“緩衝材長期力学挙動構成モデルの検討(II)”, JNC TJ 8440 2003-002 (2003).
- 杉野弘幸, 菅野毅：拡散モデルを用いた緩衝材の流出挙動の解析的予測, JNC TN8400 99-040 (1999).
- 杉田裕, 菊池広人：“人工バリアにおける緩衝材の隙間膨潤挙動に関する基礎研究”, JNC TN8430 2002-003 (2002).
- 杉田裕, 菊池広人, 棚井憲治：“人工バリアにおける緩衝材の隙間膨潤挙動に関する基礎研究(II)”, JNC TN8430 2003-007 (2003).
- 陶山忠宏, 笹本広：“JNC 収着データベース (JNC-SDB) の更新：1998 年～2003 年までに公開された文献データの追加”, JNC TN8410 2003-018 (2004).
- 鈴木英明, 藤田朝雄：“緩衝材の膨潤特性”, JNC TN8400 99-038 (1999).
- 鈴木英明, 柴田雅博, 山形順二, 広瀬郁郎, 寺門一馬：“緩衝材の特性試験 (I)”, PNC8410 92-057

- (1992).
- 高治一彦, 杉野弘幸：“ニアフィールドの長期構造安定性評価”, JNC TN8400 99-043 (1999).
高治一彦, 重野喜政, 下河内隆文, 白武寿和, 田村博邦：“緩衝材長期力学挙動構成モデルの検討(III)”, JNC TJ8440 2004-007 (2004).
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).
谷口直樹, 川崎学, 川上進, 鈴木治雄：“弱アルカリ性およびアルカリ性環境における炭素鋼オーバーパックの局部腐食進展挙動”, JNC TN8400 2003-016 (2003).
谷口直樹, 川崎学, 藤原和雄：“ベントナイト中における硫酸塩還元菌の活性と硫化水素によるオーバーパック材料の腐食への影響”, JNC TN8400 2001-011 (2001).
谷口直樹, 川上進, 神徳敬, 油井三和：“炭素鋼オーバーパックの性能保証に関わる腐食挙動評価ツールの現状”, JNC TN8400 2005-002 (2005).
K. Tanai, and M. Yamamoto: "Experimental and modeling studies on gas migration in Kunigel V1 bentonite", JNC TN8400 2003-024 (2003).
棚井憲治, 山本幹彦：“ガス移行挙動評価モデルに関する検討”, JNC TN8400 2003-051 (2003).
谷口直樹, 川上進, 神徳敬, 油井三和：“炭素鋼オーバーパックの性能保証に関わる腐食挙動評価ツールの現状”, JNC TN8400 2005-002 (2005).
棚井憲治, 佐藤治夫, 村上文啓, 井上雅弘：“地層処分場におけるガスの拡散・移行に関する検討”, JNC TN8400 99-045 (1999).
M. Yui, et al.: "JNC Thermodynamic Database for Performance Assessment of High-level Radioactive Waste Disposal System", JNC Technical Report, JNC TN 8400 99-070 (1999).
通商産業省：“特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針”, 通商産業省告示 591 号, 平成 12 年 10 月 2 日 (2000).
山本卓也, 下茂道人, 藤原靖, 服部弘通, 名合牧人, 田所照夫, 久慈雅栄：“幌延深地層研究計画における試錐調査 (HDB-3 孔)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ5420 2004-003 (2003).
山本卓也, 下茂道人, 藤原靖, 服部弘通, 名合牧人, 田所照夫, 中垣真一：“幌延深地層研究計画における試錐調査 (HDB-6, 7, 8 孔) のうち HDB-6 孔”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ5400 2005-004 (2004).

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
立体角	立体度メートル	m^3
速度	速度メートル毎秒	m/s
加速度	度メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	メートル毎秒	Hz
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)	立法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	アンペア毎メートル	A/m
(物質量)濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率	(数の)1	1

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	$\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$ ^(b)	$\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$ ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ ^(b)	$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}	s^{-1}
圧力	ニュートン	N	N/m^2	$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$
エネルギー、仕事、熱量	パスカル	Pa	$\text{N} \cdot \text{m}$	$\text{N} \cdot \text{m}$
功率、放熱	ワット	W	J/s	J/s
電荷、電気量	クーロン	C	W/A	W/A
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	C/V	C/V
静電容量	フアード	F	V/A	V/A
電気抵抗	オーム	Ω	A/V	A/V
コンダクタンス	シemens	S	$\text{V} \cdot \text{s}$	$\text{V} \cdot \text{s}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリイ	H	Wb/A	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	$^\circ\text{C}$	$\text{cd} \cdot \text{sr}^{(c)}$	$\text{cd} \cdot \text{sr}^{(c)}$
光束度	ルーメン	lm	$1\text{m}/\text{m}^2$	$1\text{m}/\text{m}^2$
(放射性核種の)放射能吸収線量、質量エネルギー	ベクレル	Bq	J/kg	J/kg
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	J/kg

(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る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の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 $^\circ\text{C}$ 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
粘度	パスカル秒	Pa · s	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N · m	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^2$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	$\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
熱容量、エンタルピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)、質量エネルギー	ジュール毎キログラム	J/(kg · K)	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	$\text{m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	$\text{m}^{-2} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$
誘電率	ファラード毎メートル	F/m	$\text{m}^{-3} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{A}^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{mol}^{-1}$
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol · K)	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	$\text{kg}^{-1} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} = \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
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)	$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} = \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$

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}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	p
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}	アトト	a
10^2	ヘクト	h	10^{-21}	ゼット	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

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	1 d=24 h=86400 s
度	°	$1^\circ=(\pi/180) \text{ rad}$
分	'	$1'=(1/60)^\circ=(\pi/10800) \text{ rad}$
秒	"	$1''=(1/60)'=(\pi/648000) \text{ rad}$
リットル	L	$1\text{L}=1 \text{dm}^3=10^{-3}\text{m}^3$
トン	t	$1\text{t}=10^9 \text{ kg}$
ネーベル	Np	$1\text{Np}=1$
ベル	B	$1\text{B}=(1/2)\ln 10 (\text{Np})$

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない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	$1\text{eV}=1.60217733(49) \times 10^{-19}\text{J}$
統一原子質量単位	u	$1\text{u}=1.6605402(10) \times 10^{-27}\text{kg}$
天文単位	ua	$1\text{ua}=1.49597870691(30) \times 10^{11}\text{m}$

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	里	1海里=1852m
ノット	ト	1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	$1\text{a}=1 \text{dam}^2=10^2\text{m}^2$
ヘクタール	ha	$1\text{ha}=1 \text{hm}^2=10^4\text{m}^2$
バール	bar	$1\text{bar}=0.1 \text{MPa}=100\text{kPa}=10^5\text{Pa}$
オングストローム	Å	$1\text{\AA}=0.1\text{nm}=10^{-10}\text{m}$
バーン	b	$1\text{b}=100\text{fm}^2=10^{-28}\text{m}^2$

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	$1\text{erg}=10^{-7}\text{J}$
ダイナ	dyn	$1\text{dyn}=10^{-5}\text{N}$
ボアズ	P	$1\text{P}=1 \text{dyn} \cdot \text{cm}^2=0.1\text{Pa} \cdot \text{s}$
ストークス	St	$1\text{St}=1\text{cm}^2/\text{s}=10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$
ガウス	G	$1\text{G}=10^{-4}\text{T}$
エルステップ	Oe	$1\text{Oe}=(1000/4\pi)\text{A}/\text{m}$
マクスウェル	Mx	$1\text{Mx}=10^{-8}\text{Wb}$
スチルズ	sb	$1\text{sb}=1\text{cd}/\text{cm}^2=10^4\text{cd}/\text{m}^2$
ホル	ph	$1\text{ph}=10^4\text{l x}$
ガル	Gal	$1\text{Gal}=1\text{cm}/\text{s}^2=10^{-2}\text{m}/\text{s}^2$

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	Ci	$1\text{Ci}=3.7 \times 10^{10}\text{Bq}$
レントゲン	R	$1\text{R}=2.58 \times 10^{-4}\text{C/kg}$
ラド	rad	$1\text{rad}=1\text{Gy}=10^{-2}\text{Gy}$
レム	rem	$1\text{rem}=1\text{Sv}=10^{-2}\text{Sv}$
X線単位	X	$1\text{X unit}=1.002 \times 10^{-4}\text{nm}$
ガンマ	γ	$1\gamma=1\text{nT}=10^{-9}\text{T}$
ジャニスキー	Jy	$1\text{Jy}=10^{-26}\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$
フェルミ	fm	$1\text{fermi}=1\text{fm}=10^{-15}\text{m}$
メートル系カラット	metric carat	$=200\text{ mg}=2 \times 10^{-7}\text{kg}$
トル	Torr	$1\text{Torr}=(101.325/760)\text{ Pa}$
標準大気圧	atm	$1\text{atm}=101.325\text{ Pa}$
力コリ	cal	$1\text{cal}=1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$
ミクロ	μ	$1\mu=1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$