

緩衝材長期安定性に関する概略的評価

－鉄－ベントナイトの相互作用に関わる影響評価－

Status of Assessment for the Long-Term Stability of Buffer Material

- Evaluation of the Effect by Iron-Bentonite Interactions -

上野 健一 笹本 広 陶山 忠宏

Kenichi UENO, Hiroshi SASAMOTO and Tadahiro SUYAMA

地層処分研究開発部門

核種移行研究グループ

Radionuclide Migration Research Group

Geological Isolation Research and Development Directorate

October 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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

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

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

緩衝材長期安定性に関する概略的評価

－鉄-ベントナイトの相互作用に関わる影響評価－

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

上野 健一, 笹本 広, 陶山 忠宏*

(2008年6月26日 受理)

第2次取りまとめや、柴田ほか(2004)によって行われた緩衝材の長期安定性評価では、鉄-ベントナイト相互作用に伴い緩衝材に顕著な変質・劣化は生じないと評価されてきた。しかし近年、100℃以下で鉄粉と混合したスメクタイトが非膨潤性粘土鉱物に変質するという実験結果が報じられ、緩衝材長期安定性に顕著な影響を与える可能性が示唆された。また、従来の処分概念よりも人工バリア中で使用される鉄の量が多い代替処分概念も検討されており、緩衝材の長期安定性に及ぼす鉄の影響が大きくなる可能性も出てきた。そこで、本報告書では柴田ほか(2004)による評価を基本とし、柴田ほか(2004)の評価以降の知見をふまえて緩衝材の長期安定性に関する概略的な再評価を行った。柴田ほか(2004)による評価以降の知見として、①層間の交換性陽イオンを変化(Fe³⁺型化)させた緩衝材の特性(透水)試験、②バッチ式の試験による鉱物学的変質が発生する条件の整理、③鉄と共存した圧縮ベントナイトの調査(～10年間)がある。これらをもとに、鉄-ベントナイト相互作用を対象に処分環境で発生する可能性のある現象として、層間の交換性陽イオンを変化させるイオン型の変化(Fe²⁺型化)、鉱物学的変質および腐食生成物によるセメンテーションについて再評価を行った。

以下に各現象に対する評価結果をまとめる。

- ・層間の交換性陽イオンをFe²⁺とするイオン型の変化(Fe²⁺型化)の影響に関しては、従来の考え方について変更が必要な知見は報告されず、高密度の圧縮成形体においては顕著な影響は生じないと判断した。新たな知見として①層間の交換性陽イオンの変化(Fe³⁺型化)に伴う緩衝材の特性変化(透水性)に関する知見(透水性の増加)が報じられたが、高密度の圧縮成形体では顕著な影響は生じておらず、従来の考え方を支持するものであった。
- ・鉱物学的変質については、100℃以下および比較的短期間で粘土鉱物が非膨潤性の粘土鉱物に変質すると報じられた。新たな知見として②非膨潤性鉱物への変質発生要因の整理がなされ、特に鉄/粘土重量(I/C)比が重要と考えられた。バッチ試験で顕著な変質が認められたようなI/C比の条件は、処分環境を想定した場合、鉄と緩衝材の境界付近に限られる。この変質が鉄と緩衝材の境界面付近でのみ発生するとの推定はPHREEQCとCrunchFlowを用いた解析からも支持された。一方、③10年程度経過した鉄と共存した圧縮ベントナイトについて調査の結果、鉱物学的変質は報じられていなかった。したがって圧縮ベントナイトを用いた緩衝材では顕著な変質が広範囲にわたり生ずることは考え難いことから、鉱物学的変質に伴う緩衝材の長期安定性に関して従来の評価と同様に顕著な影響は生じないと判断した。
- ・腐食生成物のセメンテーションに伴う緩衝材の長期安定性への影響に関しては、従来の考え方について変更が必要な知見は報告されず、基本的に従来の評価と同様に顕著な影響は生じないと判断した。しかし、セメンテーションについて、発生の要因や発生に伴う緩衝材性能への影響に関する知見が不足しており、知見の拡充が必要であることが分かった。

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

※ 技術開発協力員

Status of Assessment for the Long-Term Stability of Buffer Material
-Evaluation of the Effect by Iron-Bentonite Interactions-

Kenichi UENO, Hiroshi SASAMOTO and Tadahiro SUYAMA*

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

(Received June 26, 2008)

In the H12 report and Shibata et al. (2004), iron-bentonite interactions were assessed to have no significant effect for the long term stability of buffer material. Recently, however, smectite alteration to non-swelling minerals such as berthierin in an iron-rich environment under 100°C was reported. Additionally, further modification of large steel component, such as "handling shell" in the PEM(Prefabricated Engineering barrier Module) concept to the engineered barrier system, was discussed. Therefore iron-bentonite interactions could have a large effect on the stability of the buffer material. This report summarized a recent study and assesses the effect of iron-bentonite interactions on the long term stability of buffer materials. After Shibata et al. (2004) ①Interlayer ion-type changing from Na⁺ to Fe³⁺ effect for buffer properties, ②effect for the mineralogical alteration of the batch experimental condition, and ③alteration study of the compacted bentonite contacted with Iron were reported. In this report, three processes for buffer material were considered (i) bentonite interlayer ion-type changing from Na⁺ type to Fe²⁺ type, (ii) mineralogical alteration to non-swelling minerals and (iii) cementation caused by corrosion products. Results of re-assessment were summarized as below:

- There is no information reported to change the previous assessment for interlayer ion-type changing. Thus interlayer ion-type changing was assessed as no significant effect for the buffer properties. Interlayer Ion-type changing from Na⁺ to Fe³⁺ effect for bentonite properties was reported (①), but no significant changes between Na⁺ type and Fe³⁺ type bentonite was observed under high dry density. It supports previous estimation concept of Fe²⁺ bentonite properties.
- Mineralogical alterations (i.e. formation of non-swelling clay mineral) of smectite under 100°C and comparatively short term duration were reported. The effect of the batch experimental condition was reported (②), it was suggested that iron-clay mass ratio (I/C) was the most important factor for mineralogical alteration. High I/C observed significant alteration in the batch experiment was supposed to be limited in the iron-buffer interface in engineered barrier system. And also, no mineralogical alteration was observed in ten years experiment using compacted bentonite contacted iron coupon. It was also supported by calculation results using PHREEQC and CrunchFlow. And alteration study of the compacted bentonite contacted with Iron, no alteration observed (③). Thus, it was difficult to consider mineralogical alteration occurs extensively in the buffer, so that mineralogical alteration was assessed as no significant effect for the buffer properties, similar as previous assessment.
- There is no information reported to change the previous assessment for cementation caused by corrosion products and thus it was assessed as no significant effect for the bentonite buffer properties. It is further necessary to clarify the factor of cementation and its effect for buffer properties.

Keywords: Iron-Bentonite Interactions, Smectite, Bentonite Alteration

※ Collaborating Engineer

目 次

1. はじめに-----	1
2. 緩衝材長期安定性に与える鉄の影響-----	2
2.1 緩衝材に期待される機能と長期安定性に影響を与える要因-----	2
2.2 緩衝材の組成-----	2
2.3 緩衝材と鉄の相互作用によって発生する可能性のある現象-----	3
2.4 鉄-ベントナイト相互作用に関する評価例-----	4
3. 新たな課題の取り扱い-----	5
3.1 1:1 型非膨潤性粘土鉱物への変質-----	5
3.2 緩衝材の外側に配置される金属容器による緩衝材への影響-----	5
4. 緩衝材長期安定評価における鉄-ベントナイト相互作用の再評価-----	7
4.1 ベントナイト層間の交換性陽イオンの変化 (Fe ²⁺ 型化) -----	8
4.2 スメクタイトの鉱物学的変質 (緑泥石化, ノントロナイト化, サポナイト化, 1:1 型非膨潤性粘土鉱物化) -----	12
4.3 腐食生成物によるセメンテーション-----	17
5. おわりに-----	18
謝辞 -----	19
参考文献 -----	20
付録-I PEM に用いるハンドリングシェル重量の算出-----	24
付録-II 圧縮ベントナイトの乾燥密度から有効ベントナイト密度および 有効モンモリロナイト密度の換算-----	25

表リスト

表 1	ベントナイト（クニゲル V1）の化学特性，化学分析値および鉱物組成-----	3
表 2	オーバーパックおよびハンドリングシェル材料の腐食環境条件の整理-----	6
表 3	ベントナイトの Fe ²⁺ 型化に関する事例-----	9
表 4	鉄と圧縮ベントナイトを共存させた試験事例-----	10
表 5	バッチ式の試験における鉄と共存したスメクタイトの変質事例-----	13
表 6	圧縮ベントナイト中における鉄の挙動について解析した事例-----	16

図リスト

図 1	KBS-3H 概念図-----	2
図 2	PEM(Prefabricated Engineered Barrier Module)概念の一例-----	2
図 3	鉄と緩衝材の相互作用によって発生する可能性のある現象の模式図-----	4
図 4	オーバーパックおよびハンドリングシェル材料の腐食に伴い，緩衝材中に放出される鉄の概念図-----	6
図 5	緩衝材の長期安定性評価フロー-----	7
図 6	クニゲル V1，Ca 型クニゲル V1 および Fe ³⁺ 型モンモリロナイトの透水係数と有効ベントナイト密度の関係-----	11
図 7	鉄-ベントナイト相互作用に関する試験条件と生成物の整理-----	14
図 8	KBS-3H におけるモンモリロナイトの鉄の影響による変質解析例-----	15

This is a blank page.

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分における人工バリア構成要素である緩衝材には、膨潤性によりガラス固化体やオーバーパックを地下環境中で生じる応力などから保護する機能、低透水性により地下水の浸透や流れを抑制する機能、収着性により溶出した放射性核種の移行を遅延する機能が期待されている。しかし高レベル放射性廃棄物の地層処分においては評価期間が数万年を超える長期であり、この間に緩衝材が曝される環境によっては緩衝材に変化が生じ、期待される機能に影響を与える可能性がある。そこで処分環境下で発生可能性のある緩衝材変質シナリオを列挙し、既往の知見をもとに緩衝材の長期安定性に関する概略的な評価が行われた^{1,2)}。

緩衝材の長期安定性に影響を与える現象のうち、鉄と緩衝材の相互作用として第2次取りまとめでは、ベントナイトの層間陽イオンの変化(Fe型化)および緑泥石類似鉱物への転移、鉄スメクタイト化が考えられ、それぞれの影響について検討された。Fe型化に関しては緩衝材性能を測定したデータは存在しないが、イオン型の変化のみであればCa型と同程度の透水性、膨潤性の変化であり、Na型から顕著な緩衝材性能の劣化はなく、問題ないと評価している¹⁾。緑泥石類似鉱物への変質に関しては、変質発生に伴い性能の変化が定性的に考えられるが、ある量のスメクタイトが残存している限り、緩衝材性能が顕著に低下することはないと評価している¹⁾。その後行われた柴田ほか²⁾の評価においては、鉄により緩衝材長期安定性に影響を与える可能性のある現象として、Fe型化、鉱物学的変質および腐食生成物によるセメンテーションが検討された。この検討においても、鉄は緩衝材の長期安定性に顕著な影響を与えないと評価された。しかしオーバーパックに使用される鉄の腐食に伴い緩衝材中に鉄に富む環境がもたらされた場合、緩衝材中のスメクタイトが非膨潤性粘土鉱物に変化する可能性があり、非膨潤性粘土鉱物への変化が発生する条件を明らかにする必要性もあわせて指摘されている²⁾。

これらの評価^{1,2)}において、オーバーパックの腐食に伴い放出された鉄は緩衝材の長期安定性に顕著な影響を与えないと評価されたが、近年、鉄粉と共存した粘土鉱物(スメクタイト)が80℃において1:1型の非膨潤性粘土鉱物に変質するとの報告³⁾が新たになされた。処分環境において想定される温度領域である80℃にて、これまでの評価で想定していなかったこのような非膨潤性粘土鉱物への変質が発生した場合、低透水性や膨潤性などの緩衝材に期待される性能が低下し、緩衝材性能へ顕著な影響を与える可能性が懸念される。

また、スウェーデンのSKBにおけるKBS-3H(図1)⁴⁾や、NUMOのPEM(Prefabricated Engineering barrier Module)の例(図2)⁵⁾の様に、緩衝材領域の外側に操作性向上を目的とした鋼鉄製容器を使用する代替人工バリア概念も検討されている。このような処分概念では、従来の人工バリア概念に比べて緩衝材周辺に配置される鉄の量が増加するため、従来の評価の場合と比べて鉄と緩衝材の相互作用の大きさが大きくなることが想像され、これまで顕著な影響がないとされてきた鉄の影響がより大きくなることも想定される。

そこで本報告書では、既に行われた評価結果^{1,2)}に影響を与える可能性のある鉄-ベントナイト相互作用に着目し、柴田ほか²⁾での評価以降に公開された文献を中心に新たな知見を含めて、再度、緩衝材の長期安定性に関する概略的な評価を試みた。

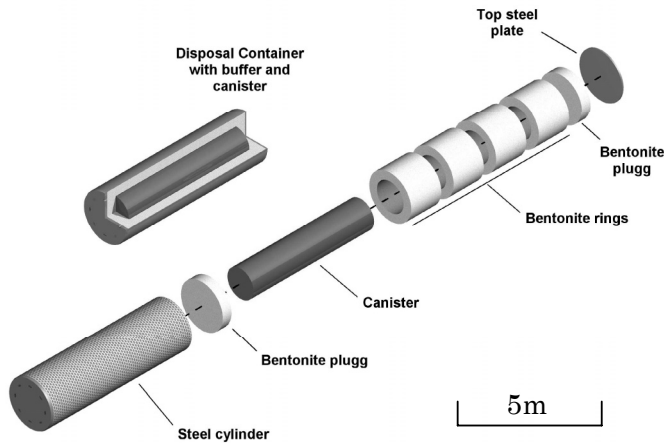


図 1 : KBS-3H 概念図 ⁴⁾

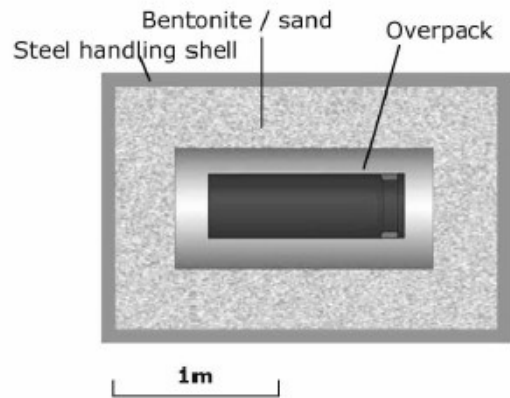


図 2 : PEM 概念の一例 ⁵⁾

2. 緩衝材長期安定性に与える鉄の影響

本報告書では柴田ほか ²⁾で行われた評価をもとに、新たな知見を含めて緩衝材の長期安定性に関する概略的な評価を行う。このため本章では柴田ほか ²⁾の評価の概要を示し、そこで示された課題についてまとめる。

2.1 緩衝材に期待される機能と長期安定性に影響を与える要因

緩衝材には止水性、自己シール性、オーバーパック支持性、化学的緩衝性、コロイドフィルトレーションなどの機能が期待されている ^{1,2,6)}。処分場が設置される環境については、岩種、処分深度、地下水の水理学的特性および地下水の地球化学的特性について考慮がなされ、緩衝材を含む人工バリアの仕様が検討された ¹⁾。

この緩衝材の存在する環境のうち緩衝材の長期安定性に影響を与える要因として「緩衝材が曝される温度条件」および「緩衝材が接するニアフィールド構成要素」に着目して評価が行われた ²⁾。緩衝材が曝される温度条件としては第2次取りまとめ ¹⁾と同様に 100℃以下の最高温度制限が存在する場合および第2次取りまとめでは考慮されなかった 100℃を超える場合の両方について検討され、ニアフィールド構成要素としては支保工材料であるセメントを考慮する場合（軟岩系岩盤）と考慮しない場合（硬岩系岩盤）について検討が行われた ²⁾。

2.2 緩衝材の組成

人工バリアを構成する緩衝材として、「ベントナイト（クニゲル V1 70%、ケイ砂 30%混合、乾燥密度 1.6Mg/m³」が想定されている ^{1,2)}。この緩衝材を構成するベントナイトであるクニゲル V1 には、およそ 50%のスメクタイトが含まれている（表 1）⁷⁾。このクニゲル V1 に含まれるスメクタイトは 2-八面体型スメクタイトでモンモリロナイトと呼ばれる鉱物が主要な成分である。モンモリロナイトは八面体シートを 2 枚の四面体シートにて挟み込んだ構造（2:1 型構造）を有した層状の鉱物種であるスメクタイト族に属する鉱物である。このモンモリロナイトは、その層間に交換性陽イオンと水分子を持っている。クニゲル V1 のモンモリロナイト層間に存在する陽イオンは、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺であり Na⁺を主要な層間陽イオンとする Na 型

のモンモリロナイトである⁷⁾。ベントナイトの膨潤性などの特性は、このベントナイト中に含まれるスメクタイト（モンモリロナイト）の層間陽イオンの種類によって影響を受ける。

表 1 : ベントナイト（クニゲル V1）
の化学特性、化学分析値および鉱物組成⁷⁾

試料名		クニゲル V1
陽イオン交換容量[meq/100g]		52.4
浸出陽イオン量 [meq/100g]	Na ⁺	54.6
	K ⁺	1.3
	Ca ²⁺	41.9
	Mg ²⁺	6.6
	Total	104.4
鉱物組成 [%]	スメクタイト	46～49
	石英	29～38
	斜長石	2.7～5.5
	方解石	2.1～2.6
	苦灰石	2.0～2.8
	方沸石	3.0～3.5
	黄鉄鉱	0.5～0.7

2.3 緩衝材と鉄の相互作用によって発生する可能性のある現象

処分場が閉鎖され外部から浸透してくる地下水によって緩衝材が飽和した後、緩衝材の内側にあるオーバーパック表面への酸素の供給量は非常に小さく、緩衝材とオーバーパック境界部には還元性環境がもたらされ、この還元性環境においてオーバーパックは水の還元をカソード反応として腐食すると考えられている⁸⁾。腐食生成物は間隙水水質に依存するが菱鉄鉱（FeCO₃）、水酸化第一鉄（Fe(OH)₂）、磁鉄鉱（Fe₃O₄）が代表的な生成物として想定される^{9,10)}。

このオーバーパックの腐食によって生成した腐食生成物や腐食に伴い放出された鉄と緩衝材の相互作用により、スメクタイトの層間陽イオンを Na⁺から Fe²⁺に置き換えるイオン型の変化（Fe²⁺型化）、スメクタイトの鉱物学的変質（緑泥石化、ノントロナイト化、鉄サポナイト化、1:1 型非膨潤性粘土鉱物化など）、粘土鉱物周囲に存在する腐食生成物によって水和の妨害などにより膨潤性の低下、低透水性の劣化が発生する（腐食生成物によるセメンテーション）が発生の可能性のある現象として想定された²⁾。図 3 に鉄と緩衝材の相互作用によって発生する可能性のあるについて、模式的に示す。

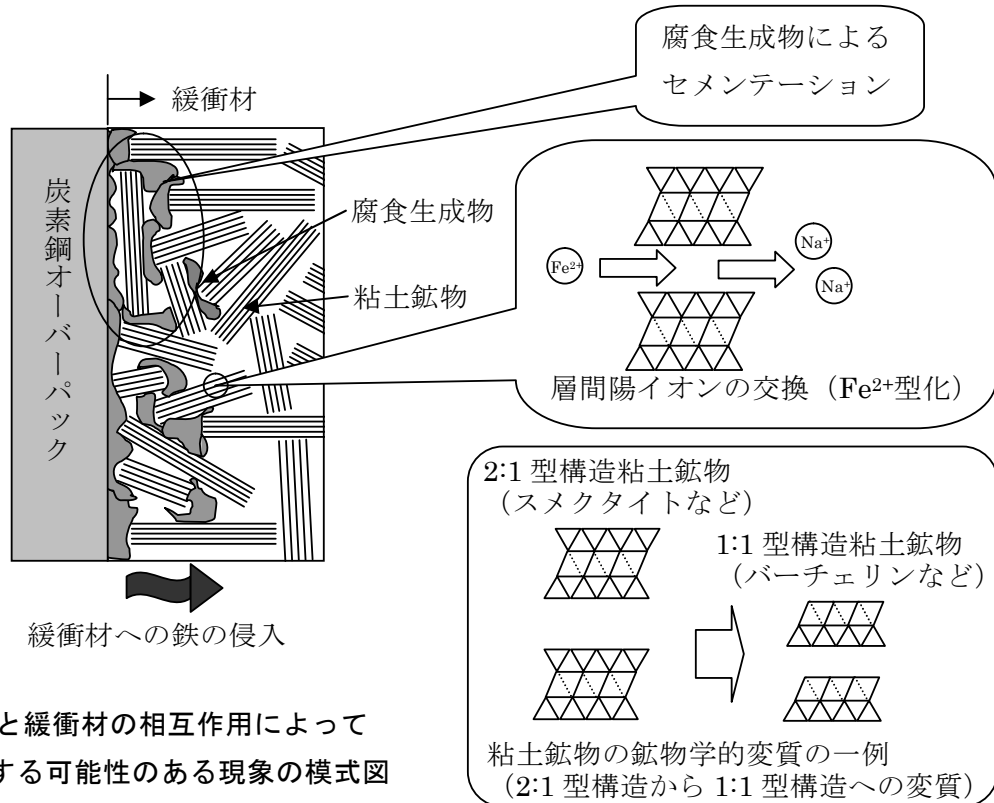


図3. 鉄と緩衝材の相互作用によって発生する可能性のある現象の模式図

2.4 鉄-ベントナイト相互作用に関する評価例

柴田ほか²⁾にて鉄-ベントナイト相互作用について、処分環境下で発生する可能性のあるこれらの現象（イオン型の変化，鉱物学的変質，腐食生成物によるセメンテーション）を列挙し，各々の現象に対する緩衝材性能への影響について評価が行われた。この結果，鉄-ベントナイト相互作用に関して緩衝材の長期安定性に影響を与える顕著な変質・劣化は生じないと評価された²⁾。しかし，オーバーパック材料である炭素鋼の腐食に伴い，鉄に富む環境が緩衝材中にもたらされた場合に緩衝材中の粘土鉱物が非膨潤性粘土鉱物に変化し，これによって緩衝材特性に影響を与える可能性が考えられた。このため，鉄に富む環境で粘土鉱物が非膨潤性の粘土鉱物に変化する条件について明らかにする必要性が指摘され²⁾，課題となっている。

3. 新たな課題の取り扱い

柴田ほか²⁾の評価において、緩衝材特性に顕著な影響を与える可能性があり、発生条件について明らかにする必要性が指摘されている現象としてスメクタイトの 1:1 型非膨潤性粘土鉱物への変質がある。さらに、緩衝材領域の外側に鋼鉄製容器を配置する代替人工バリア概念の検討がなされ、これまでの評価に比べて、鉄と緩衝材の相互作用がより重要になる可能性がある。本章では、これらの課題についての本報告書における取り扱いに関する考え方についてまとめる。

3.1 1:1 型非膨潤性粘土鉱物への変質

2.4 で述べた様に、鉄に富む環境中でベントナイトが非膨潤性粘土鉱物に変化する可能性があり、その発生条件について明らかにする必要性が指摘されている^{1,2)}。

さらに近年、低酸素濃度の環境において金属鉄粉と共存したスメクタイトが 1:1 型非膨潤性粘土鉱物に 80℃で変質するという報告もされている³⁾。そして、この 1:1 型非膨潤性粘土鉱物への変質は日本のベントナイトでも発生が確認されている^{11,12)}。変質発生メカニズムについては Latenois et al.(2005)³⁾によってモデルが提唱されているが完全に理解されてはならず、発生条件などについては不明な点も残っている。

しかし緩衝材において 1:1 型非膨潤性粘土鉱物への変質が発生した場合、緩衝材特性に影響を与える可能性がある。このため鉱物学的な変質という観点から、“スメクタイトの鉱物学的変質”の一部としてこの変質を考え、本報告書の 4.2 章において検討を行う。

3.2 緩衝材の外側に配置される金属容器による緩衝材への影響

現在、緩衝材の外側に金属容器が配置される PEM 概念が検討されている⁵⁾。この PEM 概念はオーバーパックのみの人工バリア概念に比べて、人工バリア中における鉄の使用量が増加する。例えば PEM 概念における緩衝材外側に配置される鋼鉄製のハンドリングシェルは現在の検討では炭素鋼 (SVG410)、厚さ 20mm 程度、外径 2260mm、長さ 3310mm¹³⁾とされ、この寸法から重量を計算すると約 4.9t である (算出方法については 付録-II を参照)。現在のところ、この PEM 概念は検討段階であり、ハンドリングシェルにどのような機能を持たせるかなど詳細な仕様は決まっていない。そのため、ハンドリングシェルの腐食が発生する時点において緩衝材が地下水で飽和しているかなどの条件が現時点では不明である。類似の概念として緩衝材外側に鋼鉄製有孔のスーパーコンテナを配置する KBS-3H の事例においては既に検討が進んでいる^{14,15)}。ここでは、研究が先行している KBS-3H の事例を参考に発生する可能性のある現象を考えることとする。

KBS-3H における検討では緩衝材の外側に位置するスーパーコンテナは、処分場閉鎖後から周辺の地下水と接触し腐食する。この腐食に伴い処分坑道中の酸素は消費され周辺の環境は 20～50 年で酸化性から還元性に変化する¹⁴⁾。この還元性環境における腐食生成物は、代表的に Fe₃O₄ が想定される¹⁰⁾。しかし地下水条件 (硫化物や炭酸塩の濃度) によっては、硫化鉄や菱鉄鉱の生成も考えられる^{14,15)}。そして、これら腐食生成物やオーバーパックから溶出した鉄が

緩衝材中に移行する。KBS-3H のスーパーコンテナの場合、表面積の 60%が開口部となっており、腐食発生時点において、緩衝材は完全に地下水で飽和していると考えられる。

PEM 概念においても緩衝材外側に鋼鉄製のハンドリングシェルが存在し、このハンドリングシェルが腐食することによって緩衝材周辺環境を還元性環境へと変化させると考えられる。ハンドリングシェルに期待される性能が不明なため、腐食発生時点で緩衝材が外部からの地下水によって飽和しているかは不明であるが、ここではハンドリングシェルには止水性がなく、KBS-3H と同様に地下水で飽和していると仮定する。このような還元性環境における腐食に伴い放出される鉄と飽和した緩衝材の相互作用は、オーバーパックの腐食に伴い放出される鉄と緩衝材の相互作用と同様な現象が発生していると想像される。そのため本報告書においてはハンドリングシェルと緩衝材の相互作用とオーバーパックと緩衝材の相互作用において発生の可能性のある現象は同等であると考え、これ以降区別して取り扱わない。オーバーパックとハンドリングシェル材料の腐食の伴い緩衝材中に放出される鉄の概念図を図 4 に示す。



図 4 : オーバーパックおよびハンドリングシェル材料の腐食に伴い、緩衝材中に放出される鉄の概念図

表 2 に、オーバーパックと緩衝材境界、ハンドリングシェルと緩衝材境界それぞれでの腐食環境条件についてまとめた。

表 2 : オーバーパックおよびハンドリングシェル材料の腐食環境条件の整理

	雰囲気	接触溶液	温度	検討する現象
オーバーパック- 緩衝材境界	処分場閉鎖後、 酸化性から 還元性雰囲気	緩衝材間隙水	最高温度 100℃以下 100℃を超える場合も 検討の対象	・イオン型の変化 ・鉱物学的変質 ・セメンテーション
ハンドリングシェル- 緩衝材境界 (PEM)	処分場閉鎖後、 酸化性から 還元性雰囲気	緩衝材間隙水と 周辺地下水	最高温度 100℃以下	・イオン型の変化 ・鉱物学的変質 ・セメンテーション

4. 緩衝材長期安定評価における鉄-ベントナイト相互作用の再評価

本章では、鉄-ベントナイト相互作用により発生する可能性のある現象(イオン型の変化(Fe²⁺型化)、スメクタイトの変質および腐食生成物によるセメンテーション)について近年報告された鉄-ベントナイト相互作用に関する最新の知見をもとに、3章で述べた取り扱い方法に基づき、処分環境における緩衝材性能への影響の観点から、評価フロー(図5)²⁾を用いて評価を行う。

このフローを用いた評価においては、柴田ほか²⁾で示された以下の考え方に従う。

- ① 処分環境で発生する可能性があると考えられる変質現象を抽出・列挙する。
- ② 各変質現象に対する現状での現象理解の整理と共に、当該現象の発生可能性について検討する。

この際に当該現象に対する現象理解が不十分であり、発生可能性について判断できない場合、

- ③ 当該現象の発生可能性に関する情報の整備が実施すべき課題となる。あるいは、発生可能性についての判断をせず、発生を仮定した際の緩衝材性能へのインパクトを評価する。
- また、②において明らかに発生の可能性が低いと判断される現象については、評価の対象とするシナリオから排除される(“シナリオの排除”へ)。一方、発生の可能性が高いと判断される現象については、④発生に伴う緩衝材性能への影響を検討する

ここで発生したとしても期待される緩衝材性能が十分に発揮されると判断される場合には、発生可能性を認めた上で、評価上考慮する必要はないと判断する(“OK”へ)。

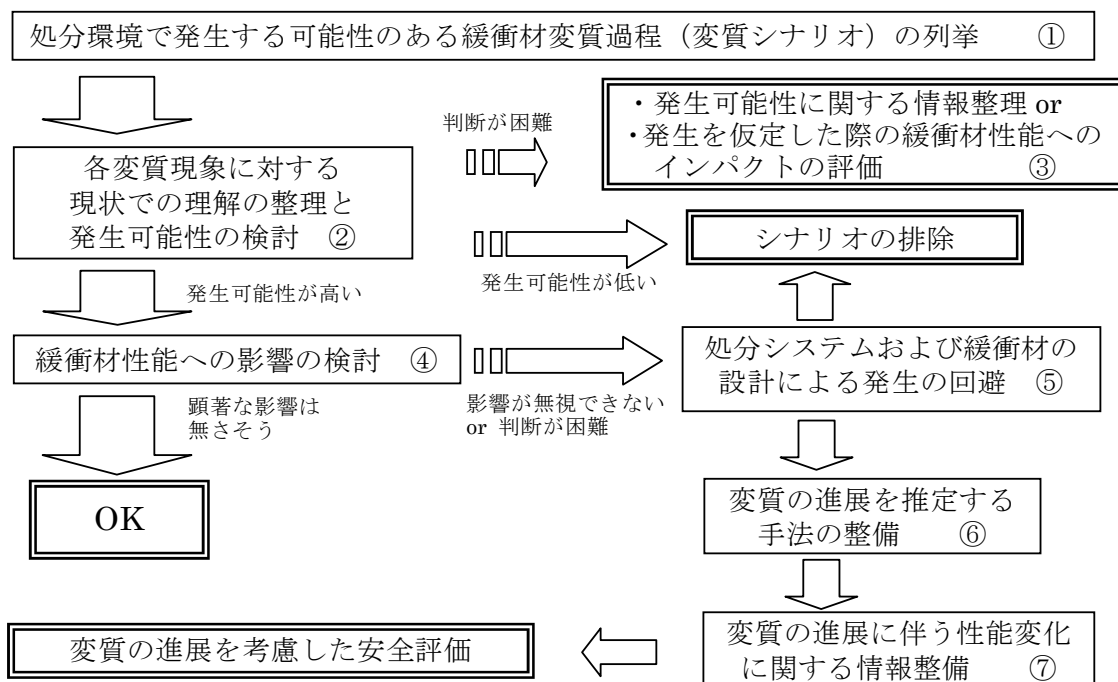


図5：緩衝材の長期安定性評価フロー(柴田ほか²⁾)

一方、緩衝材の変質による緩衝材性能への影響が無視できない、あるいは影響が判断できない場合、

⑤ 処分システムの設計などにより、緩衝材が設置される環境を変更し、当該現象発生の回避の可否について検討する。

回避可能な場合、評価対象となるシナリオから排除される（“シナリオの排除”へ）。回避不可能な場合、

⑥ 変質が進展してゆく程度を推定するための手法整備

⑦ 変質の進展に伴う緩衝材の性能変化に関する情報の整備を行い、緩衝材の変質に伴う性能の変化を考慮した性能評価に反映させる。

4.1 ベントナイト層間の交換性陽イオンの変化（Fe²⁺型化）

(1)発生の要因

人工バリアを構成するオーバーパックなどの腐食にともない放出された Fe²⁺と Na⁺型ベントナイト層間の交換性陽イオン（Na⁺）が交換することにより、Na⁺型ベントナイトが Fe²⁺型ベントナイトになる事（以下、Fe²⁺型化）が想定されている²⁾。この場合の Fe²⁺型ベントナイトとは層間陽イオンのうち Fe²⁺が他のイオンに比べて多いベントナイトになることを意味する。

このベントナイトの Fe²⁺型化は、主に実験室におけるバッチ式の反応試験にて確認されている。Fe²⁺型化の事例を表 3¹⁶⁻¹⁹⁾にまとめた。しかし実際の処分環境においては、ベントナイトを圧縮成型して緩衝材に用いることが想定されている。このため緩衝材の長期安定性を考える上では、圧縮ベントナイト中に鉄が存在する場合の Fe²⁺型化挙動の把握が重要である。そこで、圧縮ベントナイト中に鉄を共存させた試験に関する事例を表 4²⁰⁻²⁵⁾にまとめた。これらの試験においては、ほとんどの事例で Fe²⁺型化は確認されていない。これは、圧縮系ではバッチ式の試験と異なり反応に必要な Fe²⁺の供給が鉄の腐食速度、腐食生成物の溶解沈殿速度および緩衝材中における物質輸送の影響などを強く受けて少なく、そのため Fe²⁺型化の発生も確認されなかったと考えられる。しかし Fe²⁺型化していないものの、試験後試料の透水性が低下し、原因の一つとして層間陽イオンの Na⁺から Fe²⁺への置換が考えられている試験結果も存在する²²⁾。

(2)発生に伴う緩衝材性能への影響

Fe²⁺型化したベントナイトの特性は、Na⁺型ベントナイトに比べて何らかの変化が発生していると予想される。しかし、柴田ほか²⁾において指摘されているとおり、Fe²⁺型ベントナイトの透水係数や膨潤圧などの緩衝材特性を実測したデータは存在していない。このため緩衝材性能への Fe²⁺型化の影響は、以下の様に考え、評価されている。

Fe²⁺型化したモンモリロナイト（001）面の底面間隔の変化は、同じ 2 価の陽イオンを層間に持つ Ca²⁺型の底面間隔変化に類似していることが確認されている¹⁶⁾。クニゲル V1 より調整された Ca²⁺型ベントナイトの特性値は実験的に取得されており、有効ベントナイト密度 1.6Mg/m³を超えるような高密度の圧縮成型体では Na 型ベントナイト（クニゲル V1）と比較して最大膨潤圧、透水係数が劣ることはない²⁶⁾（図 6）。したがって、有効ベントナイト密度 1.6Mg/m³を超えるような高密度の圧縮成型体では Fe²⁺型化したベントナイトの最大膨潤圧および透水係数は Na 型ベントナイトと比較して劣ることがないと推定し、緩衝材性能への顕著な影響はないと判断した²⁾。しかし有効ベントナイト密度が 1.2Mg/m³以下に低下した場合、

表 3 : ベントナイトの Fe²⁺型化に関する事例

文献名	出発物質, 溶液条件など	Fe ²⁺ 型化の確認
1 Kozai et al. ¹⁶⁾	<p>出発物質: Na 型ベントナイト (クニピア F) Ar 雰囲気にて, 0.5M FeCl₂ 溶液と一昼夜接触を 3 回繰り返し, その後蒸留水を用いて Cl⁻が検出できなくなるまで洗浄した。</p>	<p>XRD にて d(001) 面間隔の相対湿度依存性 (40%, 100%) が Ca 型と類似していた。 生成物に CEC 相当分の Fe が存在することを確認。</p>
2 Kamei et al. ¹⁷⁾	<p>天然環境 (月布ベントナイト鉱山) において鉄支保と約 2,000 日間接触したベントナイトを採取した。 鉄支保と接触していたベントナイトは緑色に変色していた。</p>	<p>緑色に変色したベントナイトについて, XRD にて d(001) 面間隔の相対湿度依存性 (0%~100%) が Ca 型と類似することを確認。Fe 以外の層間陽イオン総量が減少, 化学分析において Fe の増加を確認。</p>
3 笹本 ¹⁸⁾	<p>出発物質: Na 型ベントナイト (クニゲル V1) 窒素雰囲気, 室温にて, 鉄粉とベントナイトを混合し反応させる。(6 年間) 鉄粉: ベントナイト: 蒸留水 = 1g : 1g : 10ml</p>	<p>XRD にて d(001) 面間隔の相対湿度依存性 (0%~100%) が Ca 型に近い振る舞いをすることを確認。 層間陽イオン分析から, Fe が主要な層間陽イオンであることを確認。</p>
4 Manjanna et al. ¹⁹⁾	<p>出発物質: Na 型ベントナイト (クニピア F) 大気下において, 鉄(II)-ニトリロトリアセテート(NTA)を用いて Fe²⁺型モンモロナイトを調整した。 Fe(II)-NTA 溶液: ベントナイト = 200ml : 1g</p>	<p>相対湿度 40% における d(001) 面間隔がこれまで報告されている Fe 型^{14,15)}と一致していることを確認。 層間陽イオン分析から, 層間陽イオンに CEC 相当分の Fe が存在することを確認。</p>

表 4：鉄と圧縮ベントナイトを共存させた試験事例

文献名	試験条件 (使用したベントナイト, 試験雰囲気, 共存鉄の種類, 温度, 期間)	Fe ²⁺ 型化	鉱物的 変質	腐食生成物による セメンテーション	備考
1 藤島(ほか) ²⁰⁾	クニゲル V1 (乾燥密度 1.8Mg/m ³) 低酸素雰囲気下 炭素鋼試験片 80°C, 4 年間	○ d(001)面の通度制御測定 でCa型に類似した挙動 (注 セメンテーション の可能性もある)	×	×	
2 Ishidera et al. ²¹⁾	クニゲル V1 (乾燥密度 0.8~1.8Mg/m ³) クニピア F (乾燥密度 1.2Mg/m ³) 低酸素雰囲気下 予め腐食させた炭素鋼試験片 80°C, 3~4 年間	×	×	×	
3 Carlson et al. ²²⁾	MX-80 (乾燥密度 2.0Mg/m ³) 還元性雰囲気下 炭素鋼試験片, 炭素鋼ワイヤー 30°C, 50°C, ~911 日	×	×	×	鉄に含む透水性の異なる部 分の存在が指摘されている。 (一部の Fe ²⁺ 型化または, セメンテーションの可能性)
4 陶山(ほか) ²³⁾ Isidera et al. ²⁴⁾	クニゲル V1 (乾燥密度 1.8Mg/m ³) 低酸素雰囲気下 炭素鋼試験片 80°C (一部 50°C), 10 年間	×	×	×	
5 Torres et al. ²⁵⁾	FEDEX ベントナイト ステンレスメッシュと共存した 鋼鉄製メッシュ 室温, 2 年間	-	×	-	

膨潤性能に影響が生ずる可能性があるとして、あわせて指摘されている²⁾。有効ベントナイト密度の算出方法については付録-IIにまとめた。

現状においても、圧縮ベントナイトを用いてFe²⁺型ベントナイトの特性を取得した事例はなく、本報告書においても柴田ほか²⁾の場合と同様な考え方に基づくものとする。

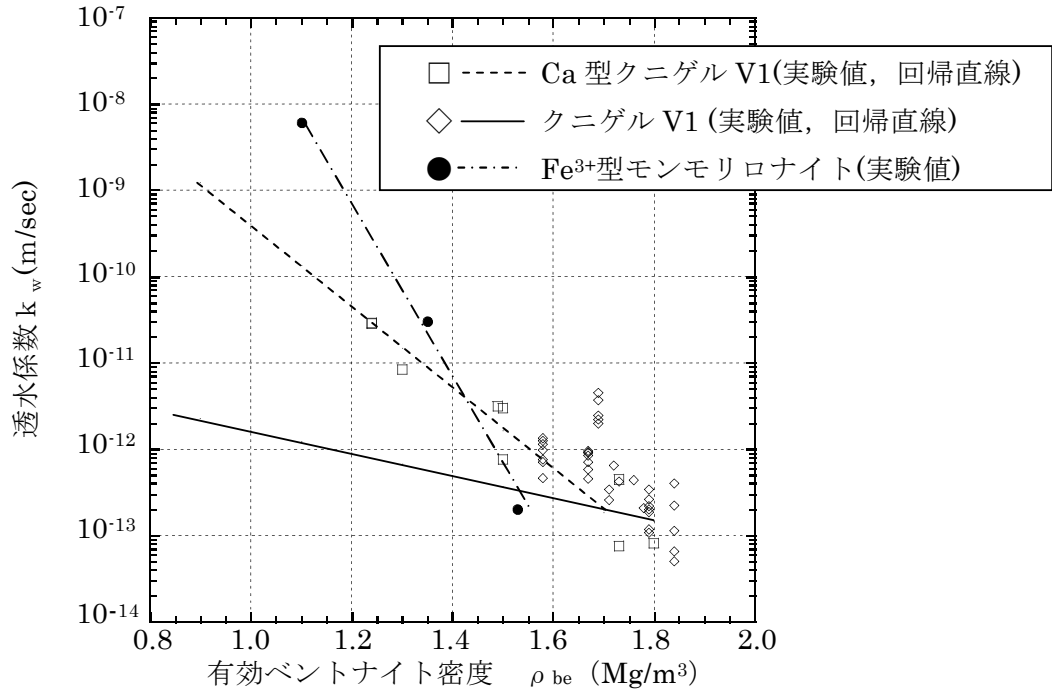


図6：クニゲルV1, Ca型クニゲルV1およびFe³⁺型モンモリロナイトの
 透水係数と有効ベントナイト密度の関係
 前田ほか²⁶⁾, 伊藤ほか²⁷⁾より作図

一方、Fe³⁺型のベントナイトを大気中で調整し透水係数を測定した事例が報告されている²⁷⁾。Fe³⁺型ベントナイトの透水係数は、低密度の圧縮成型体ではCa²⁺型と比較してさらに、Na⁺型との差が顕著であるが、高密度（有効ベントナイト密度 1.5 Mg/cm³以上）ではNa⁺型と顕著な差がなくなる（図6）。これはFe²⁺型の事例ではないが、層間陽イオンに2価や3価の陽イオンが存在したベントナイトでも、高密度の圧縮成型体ではNa⁺型と特性値に顕著な差がないとした柴田ほか²⁾の考え方を支持している。

(3) 緩衝材の長期安定性に関する評価

緩衝材においてFe²⁺型化による影響を図5の評価フローに基づいて考える。発生の可能性について考えるならば、バッチ式の試験においてFe²⁺型化の発生は確認されている。しかし圧縮成型体におけるFe²⁺型化は実験的には確認されておらず、詳細な発生条件やFe²⁺型化の進展については現状では不明である。しかしバッチ式の試験においてFe²⁺型化が発生することから、Fe²⁺型化は発生する可能性があると考えられる（図5, ②から④へ）。

発生に伴う影響については(2)で述べたように、有効ベントナイト密度が1.2Mg/m³以上であれば顕著な変化は生じないと考えられる（図5, ④から“OK”へ）。

ただし今後の課題として、柴田ほか²⁾においても指摘されている様に、“Fe²⁺型ベントナイト特性をCa²⁺型ベントナイトと同程度”とした仮定について実験的に検証する必要がある。

また、Fe²⁺型化により緩衝材に期待される性能が劣化する場合は、緩衝材中におけるFe²⁺型化の進展がどの程度かを把握することも重要である。

4.2 スメクタイトの鉱物学的変質（緑泥石化、ノントロナイト化、サポナイト化、1:1型非膨潤性粘土鉱物化）

(1) 発生の要因

オーバパックなどの腐食に伴い鉄に富む環境が緩衝材中にもたらされると、緩衝材中のスメクタイト（モンモリロナイト）がノントロナイト、サポナイト、緑泥石、1:1型非膨潤性粘土鉱物など鉱物学的に別の鉱物へと変質することが想定されている²⁾。これらの鉱物への変質について柴田ほか²⁾において発生の要因がすでに検討されている。

これらの変質現象の中で特に緑泥石や1:1型非膨潤性粘土鉱物への変質は、生成物が非膨潤性鉱物のため、緩衝材特性に与える影響が顕著であると考えられ、発生する条件を明らかにする必要性が指摘されている²⁾。そのため本報告書では以下に、緑泥石や1:1型非膨潤性粘土鉱物への変質について発生の要因を検討する。

緑泥石への変質については、柴田ほか²⁾において発生温度の整理がなされ、スメクタイト・緑泥石変換によるコレンサイト（スメクタイト・緑泥石の規則型混合層）の生成は100～120℃、緑泥石の生成は120℃程度と整理されている。

一方、1:1型非膨潤性粘土鉱物への変質についてはLatenois et al.(2005)³⁾によって発生モデルの提案がなされているが、変質発生の条件が完全に理解されているとはいえない。しかし近年、バッチ式試験についての知見^{3,11,12,28-30)}の整理がなされ³¹⁾以下の条件が提示されている。

温度 80℃～150℃, pH7～

2-八面体型スメクタイト→ 1:1型非膨潤性粘土鉱物（鉄/粘土重量比>1/2, 液固比>10）

2-八面体型スメクタイト→ Feに富む2-八面体スメクタイト（鉄/粘土重量<1/2, 液固比<10）

温度 150℃～

3-八面体型スメクタイト→ Feに富むサポナイト

→ 3-八面体緑泥石 + 長石 + ゼオライト（pH 中性付近）

2-八面体型スメクタイト→ Feに富むバーミュキュライト + モルデン沸石（高 pH）

また、既往のバッチ式の試験結果^{3,11,12,28-30,32-34)}を温度と鉄/粘土重量比で整理すると図7の様になる。それぞれの試験条件については、表^{5^{3,11,12,28-30,34)}}にまとめた。試験に用いた溶液、反応時間、出発物質であるスメクタイトの種類、共存物の違いなどにより生成物が異なるが、温度150℃または鉄/粘土重量比1/7.5より上で、何らかの変質が確認されている事がわかる。

表5：バッチ式の試験における鉄と共存したスメクタイトの変質事例

文献名	出発物質, 溶液条件, 共存物, 温度, 雰囲気, 試験期間	反応生成物
1 Lantenois et al. ³⁾	出発物質：スメクタイト (天然と合成 10 種類) 鉄粉, 蒸留水, 粘土：鉄粉：蒸留水 = 0.6g : 0.6g : 30ml pH = 6, 8, 10, 12, 低酸素雰囲気下, 80°C, ~90 日	1:1 型非膨潤性粘土鉱物に変質する。八面体中に含まれる Fe ³⁺ が多いほど変質する。pHの違いによる違いはない。
2 Wilson et al. ^{11,12)}	出発物質：クニピアーフ Series-I：鉄粉 (金属鉄, 磁鉄鉱), CaCO ₃ -NaCl 溶液, 250°C, 93~114 日 鉄/粘土重量比 = 0.57~0.78, 液/粘土比 = 66.7 試験後の溶液 pH は 25°C で 6.19~7.52 Series-II：鉄粉 (金属鉄), FeCl ₂ 溶液, 80, 150, 250°C, 90 日 鉄/粘土重量比 = 0.57, 液/粘土比 = 66.7, 試験後の溶液 pH は 25°C で 5.93~9.68	Series-I：金属鉄を主な共存物とした場合, モンモリロナイトが鉄に富むスメクタイトに変質 Series-II：250°Cにて顕著なスメクタイトの変質が確認される。
3 Guillaume et al. ²⁹⁾	出発物質：MX-80 模擬堆積層地下水 (NaCl, CaCl 溶液), 液/粘土比 = 10 鉄粉 (金属鉄：磁鉄鉱=1:1), 鉄粉/粘土比=1/10 一部試料には鉄片 (8×4×1mm) を追加 低酸素雰囲気下, 300°C, ~9ヶ月, 試験後の溶液 pH は 5.5~7.2	粉末鉄のみの試料ではサポナイト系の粘土鉱物, 鉄片を含んだ試料では 3-八面体型緑泥石が生成
4 Guillaume et al. ²⁸⁾	出発物質：MX-80 模擬堆積層地下水 (NaCl, CaCl 溶液), 液/粘土比 = 10 鉄粉 (磁鉄鉱 = 1:1), 鉄粉 / 粘土比 = 1/10 低酸素雰囲気下, 80°C, 300°C, ~9ヶ月, 試験後の溶液 pH は 6.4~8.2	300°C：鉄サポナイトが形成された。 80°C：モンモリロナイトの顕著な変質は検出されなかった。
5 Charpentiera et al. ³⁰⁾	出発物質：MX-80 アルカリ水 (NaCl, Ca(OH) ₂ , SiO ₂ , CaSO ₄ 溶液, pH12.35), 液/固比 = 10 鉄粉 (金属鉄：磁鉄鉱=1:1), 鉄粉/粘土比=1/10 一部試料には鉄片 (8×4×1mm) を追加 低酸素雰囲気下, 80°C, 150°C, 300°C, ~9ヶ月, 試験後の溶液 pH は 6.4~8.2	80°C, 150°Cではモンモリロナイトは主要な鉱物として存在していた。 300°Cでは, 鉄-バーミキュライトが主要な鉱物となる
6 Perronet et al. ³⁴⁾	出発物質：FoCa7 堆積層模擬地下水 (Evian), 液/粘土比 = 16.7 鉄粉 (金属鉄), 鉄/粘土重量比 = 0 ~ 1/3 低酸素雰囲気下, 80°C, 45 日, 試験後の溶液 pH は 7.4~9.4	鉄/粘土重量比が 1/15~においてスメクタイトの変質が始まり, 1/7.5~で 1:1 型非膨潤性粘土鉱物が形成され始める。

下し、緩衝材性能へ影響を与える可能性がある。このため、変質が発生する環境条件を明らかにする必要性が指摘されている（図 5, ②から③へ）²⁾。したがって、本報告書では以下に、スメクタイトが緑泥石や 1:1 型非膨潤性粘土鉱物に変質する場合について図 5 の評価フローに基づいて評価を行う。

バッチ式の試験において緑泥石や 1:1 型非膨潤性粘土鉱物への変質が発生する条件について整理が進んできているが、圧縮ベントナイトにおける鉱物的変質の発生の詳細な条件については現状において不明である。しかし、オーバーパックなどの近傍にて鉄/粘土重量比 1/7.5 以上の鉄に富む環境が形成され、これらの領域において変質が発生する可能性は存在すると考えられる（図 5, ②から④へ）。

変質が発生した場合には緩衝材性能へ影響を与えられとされる。しかし、圧縮ベントナイトを用いた試験では、試験期間中の変質は確認されていない。また、処分の評価期間を考えるならば、圧縮ベントナイト中における鉄の挙動について解析的に検討し、評価することも重要である。表 6^{14,15,37-39)}に圧縮ベントナイト中における鉄の挙動について解析した事例についてまとめた。鉄を含んだ鉱物の沈殿と粘土への収着を考慮するならば、鉄の緩衝材中への移行が遅延される評価結果が得られている^{14,15,38)}。さらに鉄と緩衝材の相互作用により変質の発生も考慮した解析では、緩衝材性能の劣化が発生しても評価期間（100 万年）の変質範囲はスーパーコンテナと緩衝材の境界部 10cm 以下と報告されている（図 8）³⁸⁾。この解析においては、鉄の供給源と緩衝材間の濃度勾配が低く押さえられていること、粘土表面での遅延、腐食生成物の沈殿による空隙閉塞に伴う物質移行の制限により、鉄の移行が遅延され、その結果として変質が緩衝材と鉄の境界面近傍でのみ発生したと考えられている³⁸⁾。

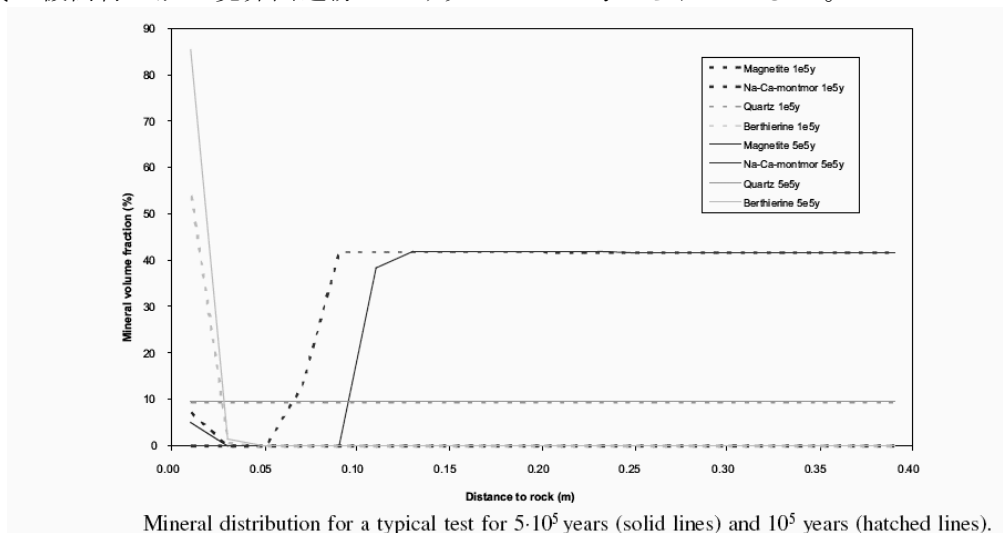


図 8 : KBS-3H におけるモンモリロナイトの鉄の影響による変質解析例³⁸⁾

この解析結果は、圧縮ベントナイトを用いた鉄との接触事例にて観察された結果と類似している。これらの知見から実際の緩衝材中においても、評価期間における変質は緩衝材とオーバーパックなどの境界近傍で発生するにとどまり、緩衝材性能への顕著な影響は及ぼさないと考えられる（図 5, ④から“OK”へ）。

表 6：圧縮ベントナイト中における鉄の挙動について解析した事例

文献名	解析の概要	計算コード	解析結果
1 柴田・陶山 ³⁷⁾	オーバーパックの腐食に伴い緩衝材中に放出された鉄により緩衝材の鉄型化に関する解析を行った。 陽イオン交換や黄鉄鉱の沈殿の影響を調べた。	TRACE	陽イオン交換を考慮すると Fe ²⁺ は支配的交換性陽イオンとはならないが層間に存在する。黄鉄鉱の沈殿を考慮すると Fe ²⁺ 型化は発生しない。 黄鉄鉱の沈殿は、Fe ²⁺ 型化に優先して発生する事がわかった。
2 Johnson et al. ¹⁴⁾ , Wersin et al. ¹⁵⁾	KBS-3H において、スーパーコンテナの腐食に伴い放出された鉄の挙動について、評価した。(評価期間 10 万年) 鉄の粘土表面への収着と腐食生成物としての沈殿を考慮して解析を実施した。	PHREEQC-2	収着を考慮すると、ほとんどの鉄は粘土に収着する。沈殿も考慮した場合、鉄はスーパーコンテナ近傍に沈殿物として存在し、緩衝材へ移行する鉄は少ない。 粘土への収着と沈殿により、評価期間中の鉄の緩衝材中への移行は少なく、移行は遅延される事がわかった。
3 Wersin et al. ³⁸⁾	KBS-3H において、腐食に伴い放出された鉄の移行をスメクタイトの変質も考慮して調べた。(評価期間 50 万年)	PHREEQC, CrunchFlow	放出された鉄との反応により緩衝材の一部で変質が発生する。鉄の移行が遅延されるため、変質範囲は 50 万年でスーパーコンテナと緩衝材境界部 10cm 程度であった。 評価期間中における変質の発生は、鉄の移行が遅延されることにより、境界部近傍のみで発生することがわかった。
4 Savage et al. ³⁹⁾	鉄と接触したベントナイトの鉱物組成の変遷についてオストワルド熟成を考慮して評価した。化学的な条件は Carlson et al. ²⁹⁾ の実験をもとにしている。	QPAC-EBS	時間に依存して鉱物表面積が変化する計算の場合、磁鉄鉱→クロノステダイト→パーチェリン→緑泥石の順に鉱物の変遷する。鉱物が時間の経過とともに変遷する事を計算上取り扱うことが可能であることが示された。

しかし現状の解析には、粘土鉱物の熱力学データなどに不確実性が存在すると指摘³⁸⁾されており、評価フローにおいて④から⑤に進むことも考えられる。処分概念において鋼鉄製オーバーパックの使用が考えられており、さらに鋼鉄製ハンドリングセルの使用についても検討されているので、設計において鉄の使用は不可避と考えて⑤から⑥、⑦に進む。

⑥の変質の進展を推定する手法の整備に関しては、地球化学計算コードを用いた解析が実施^{14,15,37-39)}されており手法は存在しているが、腐食生成物や粘土鉱物の熱力学データと反応速度データに関する不確実性の存在が指摘されている³⁸⁾。また、⑦の変質の進展にともなう性能変化に関する情報整備に関しては、変質が発生した場合の人工バリアの特性値（例えば、透水係数、膨潤特性）が取得されておらず知見が不足している。

このため⑤から⑥、⑦に進み「変質の進展を考慮した安全評価」を行うにあたっては、鉄と共存した圧縮ベントナイトにおける変質発生条件についての知見を集めると共に、解析に用いる腐食生成物や粘土鉱物の熱力学データと反応速度データの不確実性低減、変質にともなう緩衝材性能の変化に関する情報整備が必要である。

4.3 腐食生成物によるセメンテーション

(1) 発生の要因

オーバーパックなどの腐食にともない放出された鉄が、緩衝材中の間隙水化学に空間変化があるために緩衝材内部で沈殿する可能性がある。また腐食生成物の密度は鉄の密度に比べて小さいため、腐食に伴い腐食生成物が蓄積し、腐食生成物の体積が増加する。このため腐食生成物が緩衝材を押し出す方向への圧力が発生する。この圧力の影響で腐食生成物が緩衝材の微細な間隙に侵入し、間隙が閉塞される可能性がある。

これらの腐食生成物の沈殿によりベントナイト中の間隙が閉塞され、水分移動やベントナイトの膨潤を妨害し、ベントナイトの膨潤性が低下する事象を腐食生成物によるセメンテーションと考えてられている²⁾。

これらは柴田ほか²⁾において想定されているが、具体的なプロセスに関する知見が不足しているため、長期的な実験データに基づきプロセスを把握するとともに、その影響を定量的に把握する必要性が指摘されている。しかし、現在のところ腐食生成物によるセメンテーションに関しては、具体的な発生プロセスに関する新たな知見が存在しない。このため、発生メカニズムなどに関する現象理解が進んでおらず、発生の要因などが不明である。

(2) 発生に伴う緩衝材性能への影響

この腐食生成物によるセメンテーションが発生した場合、緩衝材に期待される膨潤特性が低下すると考えられる。

この腐食生成物によるセメンテーションが発生したと考えられる事例として、腐食生成物と共存した圧縮ベントナイト（クニゲル V1）中における拡散試験にて、ベントナイトが黒緑色に変色し、変色部は固く膨潤性を失っていたと報告された事例⁴⁰⁾が柴田ほか²⁾において紹介されている。また、圧縮ベントナイト中に鉄を共存させた試験の試験後ベントナイトに透水性の低下が観測された試料があり、試料中の鉄に富む粘土部分の透水性の低下が観測されている²²⁾。

この原因として層間陽イオンに Fe^{2+} が置換し透水性が低下した可能性が考えられている²²⁾が、腐食生成物によるセメンテーションが一部で発生していた可能性も考えられる。

柴田ほか²⁾において長期的な実験データに基づき緩衝材性能への影響を定量的な評価を把握する必要性が指摘されている²⁾が、緩衝材性能への具体的な影響に関する知見が少ない。また、天然にも適切な事例が存在していないと指摘³⁵⁾されており、現状では発生した場合の緩衝材性能への具体的な影響に関する知見が不足している。このため、現状においては腐食生成物によるセメンテーションが緩衝材性能へ与える影響について、定量的に示すことは困難である。

(3) 緩衝材の長期安定性に関する評価

オーバーパックなどの腐食に伴い放出された鉄が緩衝材間隙中において沈殿することによって、緩衝材中の腐食生成物によるセメンテーションが発生する可能性はあると考えられる。

しかし圧縮ベントナイト中に鉄を共存させた試験結果からは、セメンテーションと思われる現象が発生していると考えられる事例もあるが、知見が少ないため影響範囲や進展を予測することはできず、緩衝材性能へ与える影響について定量的に示すことは困難である。

このため実験データに基づき緩衝材性能への定量的な影響の把握が柴田ほか²⁾において課題となっているが、具体的な事例に関する知見が不足しているため、影響の把握ができていない。今後、腐食生成物によるセメンテーションによる緩衝材性能への影響を定量的に把握するためのデータ取得が必要である。(図 5 の②→③に相当)。

5. おわりに

本報告書では鉄-ベントナイト相互作用に関する最新の研究を踏まえ、鉄-ベントナイト相互作用の緩衝材長期安定性へ与える影響について再評価を行った。

Fe^{2+} 型化に関してはバッチ式の試験において発生が確認されている。この Fe^{2+} 型化が発生した場合について、 Fe^{2+} 型化したベントナイトの特性値は同じ 2 価型の Ca^{2+} 型ベントナイトと同程度と考えると、高密度の圧縮成型体では Na^{+} 型と特性値に顕著な差がなく、発生しても顕著な影響はないと評価された。しかし、 Fe^{2+} 型ベントナイト特性を Ca^{2+} 型ベントナイトと同程度とした仮定について実験的に検証する必要がある。

鉱物学的変質は、バッチ式の試験において発生する現象である。しかし緩衝材の長期安定性を評価する上では、圧縮ベントナイト中でこれらの現象が発生するかを評価する必要がある。

圧縮ベントナイトと鉄を共存させた試験では、試験期間中にはベントナイトの Fe^{2+} 型化や鉱物学的変質、腐食生成物によるセメンテーションは確認されていない。

地球化学計算コードを用いた長期安定性の評価解析において、鉄の腐食生成物としての沈殿と粘土への収着を考慮すると鉄の移行が遅延され、緩衝材と鉄の境界面近傍でのみ変質する解析結果が得られている。この解析結果は、試験において観察された結果と類似している。

これらの実験と解析の結果から考えるならば、オーバーパックなどの腐食に伴い放出された鉄は、腐食生成物としての沈殿や粘土への収着により緩衝材中の移行が遅延され、鉱物学的変質については鉄と緩衝材の境界面付近でのみ発生すると考えられる。

このため緩衝材性能に対する鉄による鉱物学的変質の影響については少ないと評価された。しかし 4.4 節で述べた様に、現状の知見において緩衝材中における鉱物学的変質の進展を正確に推定するには、腐食生成物や粘土鉱物の熱力学データの不確実性低減などの課題が存在している。また、変質の進展にともなう緩衝材性能の変化については、変質した緩衝材の特性値が取得されておらず、変質後の緩衝材特性に関する情報の整備が必要である。

鉄の影響のうち腐食生成物によるセメンテーションについては、緩衝材性能が低下したと考えられる試験結果も存在する。しかし腐食生成物によるセメンテーションについては、その発生の要因に関わる現象理解が進んでおらず、緩衝材性能に与える影響について定量的な評価ができていないのが現状である。今後は、セメンテーションを同定する手法の検討や、その発生の要因を明らかにするための実験データを拡充するとともに、緩衝材性能への影響についても評価できるようなデータ取得が必要である。

謝 辞

本報告書をまとめるに当たり、地層処分研究開発部門 幌延深地層研究ユニット 佐藤 治夫 SGL, 北海道大学 大学院工学研究科 佐藤 努准教授には、原稿の段階から有益なコメントなどを頂きました。また、財団法人 原子力安全研究協会内に設けられた核種移行調査専門委員会の皆様には、委員会の場において本報告書のドラフト段階で内容を紹介し、多くの貴重なご意見を賜りました。ここに記して感謝致します。

なお本報告書の中で図を引用するにあたり、SKB Anders Lindblom 氏, NAGRA(現 Gruner AG 所属) Paul Wersin 氏, ANDRA Catherine Bergdoll 女史, JAEA パリ事務所 桂 朝子女史, 地層処分研究開発部門 研究開発統括ユニット 川越 浩技術副主幹, 同 基盤研究開発ユニット 三ッ井 誠一郎 TL には手続きに関して大変お世話になりました。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) 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 -地層処分開発第2次取りまとめ 分冊3 地層処分システムの安全評価”，核燃料サイクル開発機構 技術資料 JNC TN 1400 99-023 (1999).
- 2) 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”, 核燃料サイクル開発機構 技術資料 JNC TN8400 2004-010 (2004).
- 3) Lantenois, S., Lanson, B., Muller, F., Bauer, A., Jullien, M. and Plançon, A.:“Experimental Study of Smectite Interaction with Metal Fe at Low Temperature: 1. Smectite Destabilization”, *Clays and Clay Minerals*, 53, 6, pp.597-612 (2005).
- 4) Thorsager, P. and Lindgren, E.:“KBS-3H Summary Report of Work Done During Basic Design”, SKB Technical Report R-04-42 (2004).
- 5) Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO):“Development of Repository Concepts for Volunteer Siting Environments”, NUMO-TR-04-03 (2004).
- 6) 動燃事業団: “高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書 -平成3年度-”, 動力炉・核燃料開発事業団 技術資料 PNC TN1410 92-081 (1992).
- 7) 伊藤雅和, 岡本真由美, 柴田雅博, 佐々木康雄, 壇原 徹, 鈴木啓三, 渡辺 隆:“ベントナイトの鉱物組成分析”, 動力炉・核燃料開発事業団 技術資料 PNC TN8430 93-003 (1993).
- 8) Garrels, R.M. and Christ, C.L.:“Solutions, Minerals, and Equilibria”, Jones and Barlett Publishers (1990).
- 9) 谷口直樹, 本田 明, 川崎 学, 舛形 剛, 建石 剛, 藤原和雄: “腐食生成物としてのマグネタイトによる炭素鋼オーバーパックの腐食への影響”, 核燃料サイクル開発機構 技術資料 JNC TN8400 2001-001 (2000).
- 10) Smart, N.R., Blackwood, D.J. and Werme, L.:“The Anaerobic Corrosion of Carbon Steel and Cast Iron in Artificial Groundwaters. ”。SKB Technical Report TR-01-22 (2001).
- 11) Wilson, J., Savage, D., Cuadros, J., Shibata, M. and Ragnarsdottir, K.V.:“The Effect of Iron on Montmorillonite Stability. (I) Background and Thermodynamic Considerations”, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, 2, pp.306-322 (2006).
- 12) Wilson, J., Cressey, G., Cressey, B., Cuadros, J., Ragnarsdottir, K.V., Savage, D. and Shibata, M.:“The Effect of Iron on Montmorillonite Stability. (II) Experimental Investigation”, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, 2, pp.323-336 (2006).
- 13) 岩田裕美子, 宮坂 郁, 神徳 敬, 川上 進, 納多 勝, 兵藤英明, 阪部 靖: “坑道定置方式の検討 その3 PEMを用いた操業システムの具体的展開と成立性の検討”, 日本原子力学会「2006年秋の大会」, B60 (2006).
- 14) Johnson, L., Marschall, P., Wersin, P. and Gribi, P.:“HMFCBG Processes Related to the Steel Components in the KBS-3H Disposal Concept.”。Posiva Working Report 2005-09 (2005).
- 15) Wersin, P., Johnson, L.H. and Snellman, M.:“Impact of Iron Released from Steel Components on the Performance of the Bentonite Buffer: A Preliminary Assessment

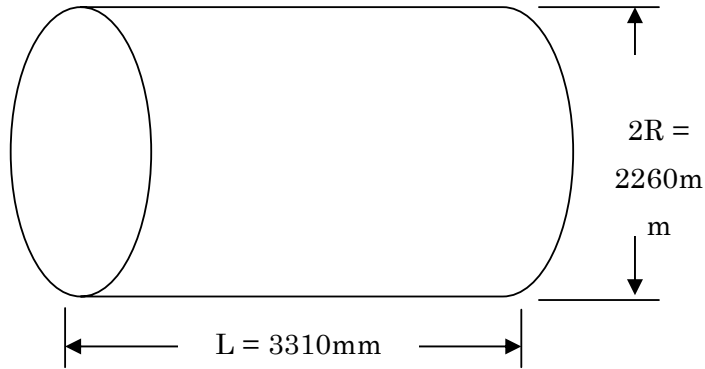
- within the Framework of the KBS-3H Disposal Concept”, Materials Research Society Symposium, Materials Research Society, 932, pp.95-102 (2006).
- 16) Kozai, N., Adachi, Y., Kawamura, S., Inada, K., Kozaki, T., Sato, S., Ohashi, H., Ohnuki, T. and Banba, T.:“Characterization of Fe-Montmorillonite: A Stimulant of Buffer Materials Accommodating Overpack Corrosion Product”, Nuclear Science and Technology, 38, 12, pp.1141-1143 (2001).
- 17) Kamei, G., Oda, C., Mitsui, S., Shibata, M. and Shinozaki, T.:“Fe(II)-Na Ion Exchange at Interlayers of Smectite: Adsorption-Desorption Experiments and a Natural Analogue”, Engineering Geology, 54, 1-2, pp.15-20 (1999).
- 18) 笹本 広, 陶山 忠宏, 柴田 雅博: “鉄粉-ベントナイト反応に関わる室内試験”, 核燃料サイクル開発機構 技術資料 JNC TN8400 2003-047 (2004).
- 19) Manjanna, J., Kozaki, T., Kozai, N. and Sato, S.:“A New Method for Fe(II)-Montmorillonite Preparation Using Fe(II)-Nitrilotriacetate Complex”, Journal of Nuclear Science and Technology, 44, pp.929-932 (2007).
- 20) 藤島 敦, 久保田満, 金善永, 根本一昭, 柴田雅博, 佐藤 努: “低酸素条件下で鉄と接触していたベントナイトの特性評価”, 第 44 回粘土科学討論会講演要旨, pp.68-69 (2000).
- 21) Ishidera, T., Xia, X., Idemitsu, K. and Kikuchi, Y.:“Corrosion Products from Carbon Steel Formed in Compacted Bentonite under Reducing Conditions”, Nuclear Science and Technology).
- 22) Carlson, L., Karnland, O., Oversby, V.M., Rance, A.P., Smart, N.R., Snellman, M., Vähänen, M. and Werme, L.O.:“Experimental Studies of the Interactions between Anaerobically Corroding Iron and Bentonite”, Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 32, 1-7, pp.334-345 (2007).
- 23) 陶山忠宏, 上野健一, 笹本 広: “炭素鋼と 10 年間接触していたベントナイトの変質挙動調査”, JAEA-Data/Code 2008-007 (2008).
- 24) Ishidera, T., Ueno, K., Kurosawa, S. and Suyama, T.:“Investigation of Montmorillonite Alteration and Form of Iron Corrosion Products in Compacted Bentonite Being in Contact with Carbon Steel for Ten Years.” Clays in Natural & Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, ANDRA, Lille, pp.269-270 (2007).
- 25) Torres, E., Turrero, M.J., Martín, P.L., Escribano, A. and Baldonado, J.L.:“TEM Characterization of the FEBEX Bentonite after Two-Years Contact with Iron Corrosion Products.” Clays in Natural & Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, ANDRA, Lille, pp.271-272 (2007).
- 26) 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-”, 動力炉・核燃料開発事業団 技術資料 PNC TN8410 98-021 (1998).
- 27) 伊藤弘志, Jayappa MANJANNA, 小崎 完, 佐藤正知: “Fe(II)型モンモリロナイトの透水特性に関する研究”, 日本原子力学会「2007 年秋の大会」, 北九州, J33 (2007).

- 28) Guillaume, D., Neaman, A., Cathelineau, M., Mosser-Ruck, R., Peiffert, C., Abdelmoula, M., Dubessy, J., Villieras, F., Baronnet, A. and Michau, N.: "Experimental Synthesis of Chlorite from Smectite at 300°C in the Presence of Metallic Fe", *Clay Minerals*, **38**, 3, pp.281-302 (2003).
- 29) Guillaume, D., Neaman, A., Cathelineau, M., Mosser-Ruck, R., Peiffert, C., Abdelmoula, M., Dubessy, J., Villieras, F. and Michau, N.: "Experimental Study of the Transformation of Smectite at 80 and 300°C in the Presence of Fe Oxides", *Clay Minerals*, **39**, 1, pp.17-34 (2004).
- 30) Charpentiera, D., Devineau, K., Mosser-Ruck, R., Cathelineau, M. and Villieras, F.: "Bentonite-Iron Interactions under Alkaline Condition: An Experimental Approach", *Applied Clay Science*, **32**, 1-2, pp.1-13 (2006).
- 31) Cathelineau, M., Mosser-Ruck, R., Rousset, D., Guillaume, D., Charpentier, D., Devineau, K., Villieras, F. and Michau, N.: "Effects of Temperature, pH, Iron/Clay Ratio and Liquid/Clay Ratio on the Conversion of Di-Octahedral Smectite into Iron-Rich Clays: A Review of Experimental Studies." *Clays in Natural & Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*, ANDRA, Lille, pp.103-104 (2007).
- 32) 陶山忠宏, 柴田雅博, 上野健一, 笹本 広: "低酸素雰囲気での高温条件下における Fe 型スメクタイトの変化の同定", 日本原子力学会「2007 年秋の大会」, 北九州, **I27** (2007).
- 33) 陶山忠宏, 柴田雅博, 笹本 広: "鉄型化ベントナイト水熱試験 -低酸素雰囲気での高温条件下における鉄型化ベントナイトの変化の同定-", JAEA-Research 2006-064 (2006).
- 34) Perronnet, M., Jullien, M., Villieras, F., Raynal, J., Bonnin, D. and Bruno, G.: "Evidence of a Critical Content in Fe(0) on FoCa7 Bentonite Reactivity at 80°C", *Applied Clay Science*, **38**, 3-4, pp.187-202 (2008).
- 35) Wersin, P. and Snellman, M.: "Impact of Iron on the Performance of Clay Barriers in Waste Disposal Systems. Report on the Status of Research and Development.", Posiva Working Report (in press).
- 36) Villar, M.V. and Rivas, P.: "Hydraulic Properties of Montmorillonite-Quartz and Saponite-Quartz Mixtures", *Applied Clay Science*, **9**, 1, pp.1-9 (1994).
- 37) 柴田雅博, 陶山忠宏: "緩衝材の鉄型化に関する予察解析", 核燃料サイクル開発機構 技術資料 JNC TN8400 2003-007 (2003).
- 38) Wersin, P., Birgersson, M. and Snellman, M.: "Impact of Iron on the Bentonite Buffer within the KBS-3H Disposal Concept: Results from Reactive Transport Modelling." *Clays in Natural & Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*, ANDRA, Lille, pp.107-108 (2007).
- 39) Savage, D., Watson, C., Benbow, S. and Wilson, J.: "Modelling Iron-Bentonite Interactions.", *Applied Clay Science* (in press).
- 40) 出光一哉: "鉄共存系緩衝材中でのウランの拡散挙動", 放射性廃棄物研究, **1**, 1, pp.43-52 (1994).

- 41) 中野政詩: “土の物質移動学”, 東京大学出版会 (1991).
- 42) 鈴木英明, 藤田朝雄: “緩衝材の膨潤特性”, 核燃料サイクル開発機構 技術資料 JNC TN8400 99-038 (1999).
- 43) 佐藤信二, 雨宮 清, 山形順二, 広瀬郁郎, 原 啓二, 石川博久, 湯佐泰久, 佐々木憲明: “緩衝材の熱-水-応力連成試験 -緩衝材大型試験設備の概要および加熱試験計画について-”, 動力炉・核燃料開発事業団 技術資料 PNC TN8410 90-060 (1990).

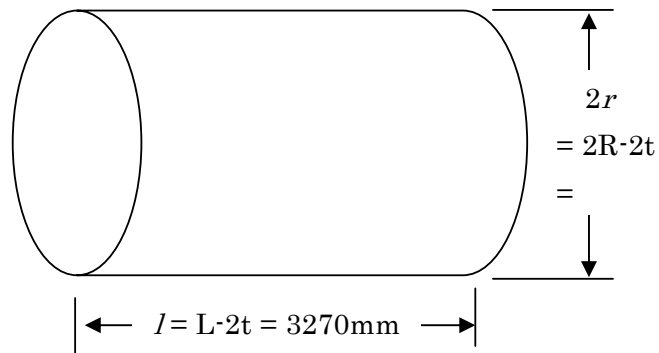
付録-I PEM に用いるハンドリングシェル重量の算出

PEM に用いるハンドリングシェルの重量は、以下の手順で計算した。
 現在の検討では、外径 2260mm、長さ 3310mm、厚さ 20mm 程度とされている¹³⁾。
 このため、ハンドリングシェルの円筒形の外寸を考えた。



この外側円筒の体積 V_{out} は、 $V_{out} = \pi R^2 \times L$ で表され、 $13.27m^3$ である。

次に厚さ (t) を 20mm と考えて以下の内部の空洞体積を考える。



この内側円筒の体積 V_{in} は、 $V_{in} = \pi r^2 \times l$ で表され、 $12.65m^3$ である。

PEM のハンドリングシェルの体積は、 $V = V_{out} - V_{in}$ で、 $0.62m^3$ と計算される。

炭素鋼の密度 (ρ_{iron}) を $7.86 (g/cm^3)$ とすると総重量(W)は、 $W = V \times \rho_{iron}$ と表され、 $W = 4.9 t$ となる。

付録-II 圧縮ベントナイトの乾燥密度から有効ベントナイト密度および
有効モンモリロナイト密度の換算

一般にベントナイト圧縮成形体は、固相・液相・気相で構成されると考えられる⁴¹⁾。このベントナイト圧縮成形体構成要素について、ベントナイト粒子およびケイ砂からなる固相と、間隙水からなる液相、および気相に分けて考えると、試体の乾燥密度 ρ_d [Mg/m³] は(1)式のようなになる。ここで、 ρ_s [Mg/m³] はベントナイト(または、ベントナイトとケイ砂)の土粒子密度である。

$$\text{乾燥密度：} \quad \rho_d = \frac{W_s}{V} \quad (1)$$

また、本報告書における有効ベントナイト(粘土)密度 ρ_b [Mg/m³]は、ケイ砂の体積を除いたベントナイト(クニゲル V1)の乾燥密度を表す指標であり、(2)式のように定義される。

ここで、 ρ_s [Mg/m³]はケイ砂の土粒子密度、 R_s [wt%]はケイ砂混合割合を表す。

$$\rho_b = \frac{\rho_d(100 - R_s)}{100 - \rho_d \frac{R_s}{\rho_s}} \quad (2)$$

ここで、ベントナイトの土粒子密度 2.70 Mg/m⁴²⁾、ケイ砂の土粒子密度は、3号・5号ケイ砂(重量比 1 : 1)で 2.64 Mg/m⁴³⁾をそれぞれ用いた。

さらに本報告書における有効モンモリロナイト密度 ρ_m [Mg/m³]は、ベントナイト中のモンモリロナイトの部分密度を表す指標であり、(3)式のように定義される。

$$\rho_m = \frac{\rho_b(100 - R_i)}{100 - \rho_b \frac{R_i}{\rho_i}} \quad (3)$$

ここで、 ρ_i [Mg/m³]はベントナイトに含まれる不純物の密度、 R_i [wt%]はベントナイト中のモンモリロナイト以外の不純物割合である。ここで、不純物の密度は不明であるため、ケイ砂と同じ値 2.64 Mg/m を用いた。

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	メートル毎メートル	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
(物質量の)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

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	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 ⁻² =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 ² ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg ² ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ² ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ² ・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s ² ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ² ・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 ² ・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	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg ² ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光束	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
照射度	ルクス	lx	lm/m ²	m ² ・m ⁻⁴ ・cd=m ⁻² ・cd
(放射性核種の)放射能	ベクレル	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 質量エネルギー分与, カーマ線量当量, 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	グレイ	Gy	J/kg	m ² ・s ⁻²
	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (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。組立単位を形作る際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
粘度	パスカル秒	Pa・s	m ⁻¹ ・kg ² ・s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg ² ・s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg ² ・s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ² ・m ⁻² ・s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m ² ・m ⁻² ・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 ² ・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 ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・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	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 ² ・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 ² ・s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m ² ・kg ² ・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 ² ・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s ² ・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 ² ・s ⁻² ・A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ² ・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 ² ・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 ² ・s ⁻³ =m ² ・kg ² ・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)	m ² ・m ⁻² ・kg ² ・s ⁻³ =kg ² ・s ⁻³

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	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
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	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(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	1 eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=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		1 海里=1852m
ノット		1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バール	b	1 b=100fm ² =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
ガル	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	1 X unit=1.002×10 ⁻¹¹ J
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		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
カロリ	cal	
マイクロン	μ	1 μ = 1μm=10 ⁻⁶ m

