



高レベル放射性廃棄物の
地層処分研究開発特集

地層処分研究

4. 処分技術の研究開発

4-1 人工バリア技術の研究開発

東海事業所 環境技術開発部

資料番号85-13

Research on Geological Disposal

4. Research and Development of Disposal Technology

4-1 Research and Development of Engineered Barriers Technology

(Waste Technology Development Division, Tokai Works)

人工バリア技術の研究開発では、人工バリアに要求される性能を念頭に置き、候補材料の基本特性、構造強度、現状技術を活用した製作および施工法の検討を行った。オーバーバックについては、炭素鋼を第一に研究すべき材料として取り上げ、腐食性、耐圧強度、遮断性等の設計検討を行うとともに、実寸大オーバーバックの試作を行い、設計および製作技術の評価を実施した。

緩衝材については、ペントナイトを有力な材料として取り上げ、基本的な物性の試験評価を行うとともに、構造力学安定性の解析検討ならびに製作施工法の検討を行った。

1. はじめに

処分技術開発では、地層処分に必要な技術の評価し、工学的観点から地層処分概念の有効性を確かめるために、人工バリアの設計、製作および処分施設の設計、建設、操業、閉鎖等の要素技術の研究開発を進めている。人工バリアについては、各バリア材に期待される性能に基づき、各候補材料の基本的な特性の評価と人工バリアの設計解析、製作技術について検討評価を行っている。

本稿では、これらの人工バリア技術の研究開発の現状とこれまでに得られた主要な成果を述べる。

2. 人工バリアの概念検討

諸外国の例も参考にし、人工バリアの基本的な構成、機能を検討整理するとともに、人工バリアの具体的な定置方式の検討を行った。

(1) 人工バリアの構成

人工バリアは、基本的には図1に示すようにガラス固化体、オーバーバック、緩衝材から構成される。ガラス固化体は、地下水に溶けにくい特性を有し、放射性核種の地下水への溶出を抑制する機能を有している。

オーバーバックは、ガラス固化体を物理的に保護するとともに、ガラス固化体と地下水の接触を阻止

するものである。また、ガラス固化体からの放射線を遮蔽する役割も期待されている。

オーバーバックの外側に設置する緩衝材には、低い透水性を有し、地下水の浸入を抑制するとともに放射性核種を吸着して、その移行を遅延させる機能が期待されている。また、地下水に対する化学的緩衝性や外部応力に対する物理的緩衝性も期待されている。

人工バリアの概念は、これまで多くの国で検討されてきているが、いずれの概念も基本的には放射性物質を長期にわたり人工バリア内に封じ込めておくことを期待している。

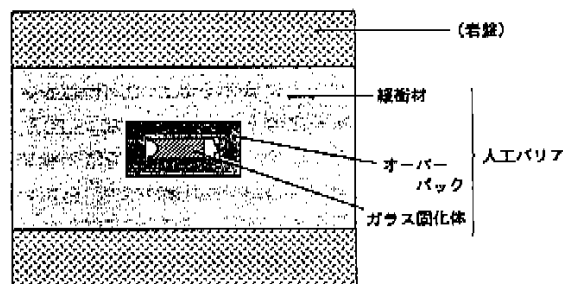


図1 人工バリアの概念図

表1 各国の人工バリアシステムの構成

国名	人工バリアシステムの構成		
	高レベル廃棄物	容器材料	緩衝材
スイス	ガラス固化体	炭素鋼	ベントナイト
ベルギー	ガラス固化体	チタン	ベントナイト
フランス	ガラス固化体	—	ベントナイト
スウェーデン	使用済燃料	鋼	ベントナイト
カナダ	使用済燃料	チタン	ベントナイト+砂混合
アメリカ	使用済燃料 ガラス固化体	ステンレス鋼	ベントナイト、ゼオライト、 シリカ混合材*

*現地産生材

表1に主な国の人工バリアシステムの構成を示す(1), (2), (3), (4), (5), (6)。

(2) 人工バリアの定置方式

諸外国の処分概念も参考にし、図2に示す5形態について、空洞の安定性・オーバーパックの沈下・オーバーパックの定置性・緩衝材の定置性及び換気的面から、それぞれの特徴をまとめ、定性的な比較検討を実施した。

その結果、A案(坑道横置方式)およびB案(処分孔縦置方式)が相対的に優れているという結果が得られた。ただし、廃棄物1本当りの必要面積、掘削量を考慮した場合には、他の案が有利となる可能性もある。

さらに、坑道横置方式と処分孔縦置方式の2形態の比較検討を行った。検討項目としては、空洞の安定性・ニアフィールドにおける温度分布状況・処分場面積・構造的な緩衝材の拘束性・隙間の充填性・オーバーパックの沈下・処分坑道/処分孔の掘削性・人工バリアの定置性・緩衝材の物理的緩衝機能・換気/湧水処理・掘削および埋戻し材/緩衝材の量を考慮した。

その結果、緩衝材の物理・化学的緩衝機能、空洞の安定性、掘削性の面から、坑道横置方式が処分孔縦置方式に比べて優れているという結果が得られた。ただし、熱的安定性・隙間の充填性・人工バリアの定置性・換気的面では処分孔縦置方式が好ましく、また、建設・操業・閉鎖に係わる費用は緩衝材の数量に大きく依存することから、緩衝材の数量が少ない処分孔縦置方式が有利となる可能性もある。

3. オーバーパックの開発

オーバーパックに期待される機能を検討整理するとともに、それらの機能を確保し得る候補材料の調査検討、および具体的な設計製作技術について検討を行った。

オーバーパックの基本的な機能は、ガラス固化体中の放射性核種が十分減衰するまでの期間、地下水

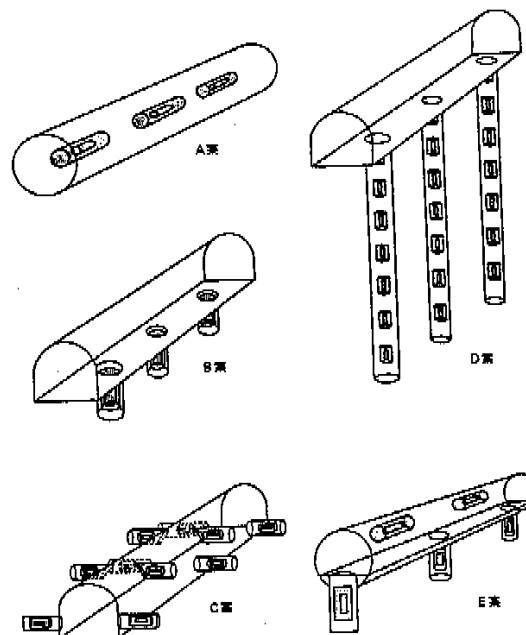


図2 廃棄体の定置方式

がガラス固化体と接触することを抑止し、放射性核種を物理的に閉じ込めることである。深部地下に定置されるオーバーパックは、初期には、その中に封入されているガラス固化体中の核種の崩壊熱や放射線の影響下に置かれる。地下水が人工バリアに浸入すれば、緩衝材の膨潤圧等の外力を徐々に受けながら、腐食が進行するものと考えられる。したがって、オーバーパックの核種の閉じ込め機能を満たすためには、以下の性能が必要となる。

- ① 深部地下環境における耐腐食性(耐食性)
- ② 膨潤圧や地圧等の外力に対する機械的強度(耐圧性)
- ③ 核種の崩壊熱、放射線に対する安定性(耐熱性、耐放射線性)

この他、定置のための移送等を容易にし、さらに、地下水の放射線分解の影響を避けるために放射線に対する遮蔽性および人工バリア周辺の化学環境を還元性雰囲気維持する還元環境維持性も期待されている。

なお、このような性能を持つオーバーパックを製作するためには、

- ④ 大型容器の製作・加工性、溶接性(製作性)
- という観点も満足することが求められる。

(1) 候補材料の調査検討

材料の種類としては、金属材料、金属以外の無機材料(セラミックス)および有機材料が挙げられ

る。しかし、有機材料は長期の化学的耐久性、耐熱性および耐放射線性等の点で不明な点が多いこと、また、セラミックスは化学的安定性は高いものの大型構造物の製作技術および封着技術が確立していないこと、脆性材料であることから、現在、オーバーバックの候補材料としては、世界的にも金属材料を候補として検討が行われている。

1) 各種金属材料の耐食性比較

海外でオーバーバックの主要候補材料とされている金属として、純銅、炭素鋼、ステンレス鋼（オーステナイト系）、ニッケル基合金（ハステロイ、インコネル等）、高ニッケル合金（インコイ等）、チタン（工業用純チタン、低合金チタンを併せて以下チタンと呼ぶ）が挙げられる。

これらの材料は準耐食性金属と高耐食性金属に分類される。準耐食性金属には純銅と炭素鋼が分類され、高耐食性金属にはステンレス鋼、高ニッケル基合金、チタンが分類される。

準耐食性金属の長所としては局部腐食を起こす傾向が小さいことが挙げられる。一方、準耐食性金属は、高耐食性金属と比較して全面腐食速度は大きい。これらのことから準耐食性金属については適当な腐食代を設定することにより長期の腐食寿命を担保することとなる。したがって、腐食の進展速度の把握が重要となる。

高耐食性金属は、不動態が維持されれば腐食速度は無視しうほど小さい。したがって局部腐食発生の際界条件の把握が重要となる。

上記の純銅、炭素鋼、チタン、ステンレス鋼、高ニッケル合金、ニッケル基合金の処分環境で想定されるpH領域での一般的耐食性を比較した一例を表2に示す⁷⁾。

2) 準耐食性金属の腐食

準耐食性金属のうち、銅は $\text{Cu} = \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^-$ 反応の平衡電位が水素発生反応 $\text{H}^+ + \text{e}^- = \frac{1}{2}\text{H}_2$ の平衡電位より貴であるため、水素発生型の腐食は起こらないという特徴があり、一般に大気、淡水、土壌および海水環境で良好な耐食性（0.002～0.005mm/y以下）を示す⁸⁾。また、考古学的出土品も多く⁸⁾、長期の腐食情報が得やすいという優れた点があり、適正な腐食代を設定することが可能と考えられる。炭素鋼は、これまでの使用実績が多く、その腐食挙動が比較的良く知られている。天然環境で腐食性の厳しい環境である海中では、炭素鋼の初期の腐食速度はかなり大きい（0.3mm/y程度）が、錆層が酸素の拡散障壁となりやがて平均腐食速度は0.1mm/y程度まで低下する⁹⁾。また、土壌腐食の分野では、日本ガス協会が9492箇所の管体（鋳鉄ガス本管）調査結

表2 各種金属材料の耐食性の比較

材 料	腐 食 形 態	全面腐食		すきま腐食		孔食		粒界腐食		成分腐食		応力腐食割れ		水素脆化	
		環境の酸化性と還元性	酸化性	還元性	酸化性	還元性	酸化性	還元性	酸化性	還元性	酸化性	還元性	酸化性	還元性	酸化性
高耐食性金属	ステンレス鋼 (オーステナイト系)	○	○	×	△	△	○	△	△	○	○	×	△	○	○
	高ニッケル合金 (インコイ系合金)	○	○	△	○	△	○	△	△	○	○	○	○	○	○
	ニッケル基合金 (インコネル系合金) (ハステロイ系合金)	○	○	△	△	○	○	△	△	○	○	○	○	○	○
	チタン、低合金チタン	○	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△	△
準耐食性金属	炭素鋼、鋼鉄	△	△	△	△	○	○	○	△	△	△	△	△	○	○
	純 銅	△	○	△	△	○	○	○	○	○	○	△	○	○	○

凡例：○ 耐食性 良、△ 可能性あり、× 劣る

※腐食形態はFontanaの分類 (Fontana, 1975) にしたがった。エロージョン・コローションは地下水の流れは速く、低過水性の緩衝材に包まれていることから検討から除外した。またガルバニック腐食も異種金属接触のない構造とするため除外した。

※表中の○は従来の知見から耐食性が良好で処分の環境で問題とならないことを示す。

△は部分的に発生・進展の可能性を有することを示し、研究課題と位置づけられることを示す。×は従来の知見から殆ど処分環境で耐食性が期待出来ないことを示す。

果から統計的に解析して得られた結果が報告されている⁹⁾。この調査により得られた経験式 ($Y = 0.015X + 0.314$, Y : 腐食量 (mm), X : 経年数 (y)) から1000年間の侵食深さは約15.3mmとなる。溶存酸素濃度の低い条件では、腐食速度の小さい水素発生型の腐食が起こる。例えば、90℃の脱気海水中の腐食速度は0.01mm/y以下との報告があり¹⁰⁾、スイスNagraの研究でもほぼ同等の腐食速度が報告されている¹¹⁾。これは、酸素の乏しい条件下に置かれた埋設鉄製品の腐食速度が0.01mm/y以下のものが多いという報告とも一致している¹²⁾。

したがって、全面腐食的に腐食が進行すれば、深部地下の酸素の少ない環境では十分に腐食速度は小さいと予想されることから、適正な腐食代を設定することが可能と考えられる。さらに、腐食生成物により、周囲の還元性を維持する機能も期待される。

3) 各種金属材料の耐食性以外の性質

炭素鋼は耐圧強度の担保、放射線の遮蔽、周囲の環境の還元性の維持・製作加工性という機能を満足している。他の材料も外側の材料に耐食性を、内側の材料に耐圧強度、遮蔽性を期待するライニング構造とすることにより、これらの機能を満足すると考えられるが、ライニング構造とした場合、製作・加工性の点で検討課題を残している。また、オーバーバックをライニング構造とする場合にも、内側の材料としては炭素鋼が必要となるものと考えられる。以上のことから、現在、炭素鋼を第一に研究すべき材料としてオーバーバックの仕様の検討を行っている。なお、炭素鋼以外の準耐食性金属である銅は、

表3 炭素鋼オーバーバックの強度解析の結果¹³⁾

	側係数(→)	外圧 (MPa)	必要肉厚 (mm)
胴部	1	27.5	88
	1.5	41.2	138
	2	54.9	212
蓋部	1	27.5	124
	1.5	41.2	152
	2	54.9	178

*炭素鋼の許容応力は150℃のときの値である114MPa (降伏応力は183MPa)を用いた。

*強度計算にはASME CODE SECTION III Subsection NEを準用

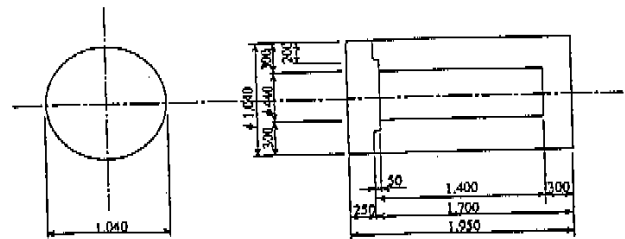


図3 炭素鋼オーバーバックの仕様例 (単位: mm)

耐食性の点では貴金属的な性質を有した優れた材料であり、考古学出土品等により長期の腐食情報が得やすいことから、また高耐食性金属の中では、チタンが耐食性に優れていることから、いずれも候補材料になり得る。チタンの水素脆化が問題となる場合には、ニッケル基合金、高ニッケル合金系の材料も候補材料となり得ると考えられる。

(2) オーバーバックの設計製作技術の開発

これまでに炭素鋼を例にとり、オーバーバックの設計検討、試作を行っている¹³⁾。

耐圧強度解析の結果を表3に示す。最も保守的な場合として、上述の(1)、(b)項で述べた腐食食50mmを考慮してオーバーバックの肉厚を300mmとした遮蔽解析の結果を表4に示す。本オーバーバックは、自己遮蔽性を有しているという結果を得ている。

以上の検討から、炭素鋼オーバーバックについて、健全性を期待する期間を1000年として、1000m程度の深度に対応した基本仕様の一例を図3に、試作例を写真1に示す。

蓋部の溶接方法に関しては、実験室規模であるが、200mm厚さの溶接が可能なが確認されている。今後、電子ビーム溶接の限界厚さをさらに拡大するための技術開発が必要である。

また、耐食性向上の観点から外面をチタンでコーティングする等の複合オーバーバックの開発を検討中である。

表4 厚さ30cmの炭素鋼オーバーバックの遮蔽解析の結果¹³⁾

	線量当量率(mSv/h)	
	側面	蓋面
表面	0.84	0.34
1 m	0.20	0.27

*中性子に対してANISNコード、

γ線に対してはQADコードを使用した。

*線量当量率は中間貯蔵期間30年の計算結果である。

4. 緩衝材の開発

緩衝材に期待される性能を検討整理するとともに、候補材料の特性評価、設計施工技術等の検討を行った。

オーバーバックと岩盤の間に充填される緩衝材には、止水性、吸着性の他に様々な物理的、化学的緩衝性が期待される。

緩衝材の主な機能としては以下のような項目が挙げられる。

- ①オーバーバックへの地下水の接触の遅延および地下水で飽和後の緩衝材中の地下水移動の抑制…(止水性)

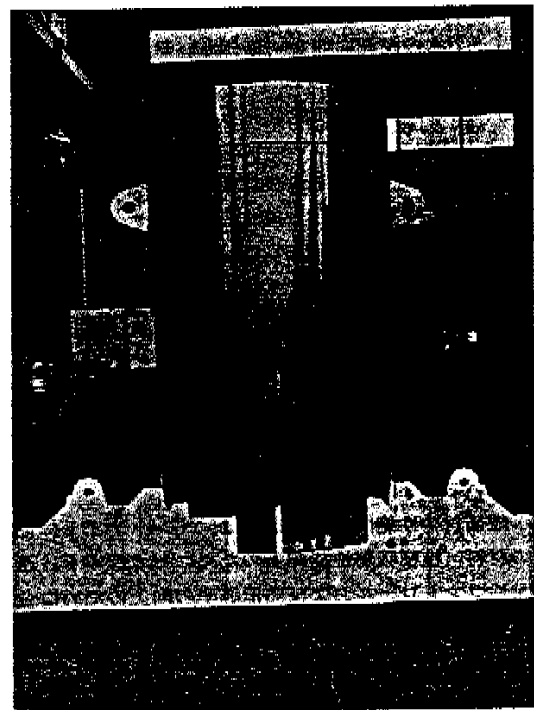


写真1 炭素鋼オーバーバックの試作例 (高さ1.95m、直径1.04m)

- ②周辺岩盤との間隙および亀裂開口部等の充填…
…(自己シール性)
- ③廃棄物から溶出する放射性核種移行の遅延……
(核種吸着遅延性)
- ④廃棄物からの放熱による人工バリアの温度上昇
の抑制……(熱伝導性)
- ⑤緩衝材の空隙水のpHおよび酸化還元電位の適
正な維持……(化学的緩衝性)
- ⑥オーバーバックの固定・保持……(オーバー
バック支持性)
- ⑦周囲岩盤の変形およびオーバーバック腐食生成
物等により生じる応力(歪)の緩和……(応力
緩衝性)

このような機能は、長期にわたり維持されることが必要である。この他、地下空洞に充填するための施工性、大量の使用が想定されることから材料入手の容易さ等も考慮する必要がある。

(1) 候補材料の特性評価

前述した機能を比較的良好に満足し得る材料として、天然に産する粘土が注目された^{14),15)}。これは、粘土が一般的に低透水性であり、吸着能を有すること、さらに、天然に産出するものであるため、処分を考えなければならない長期間の安定性が期待できることなどによる。なかでも、圧縮されたベントナイトは、①非常に低い透水性を示し、緩衝材中での水の動きを抑制する優れた性能を有している(止水性)、②水の浸潤に伴ない膨張し、緩衝材中の隙間や隣接する岩盤中の割れ目を充填する(自己シール性)、③陽イオン交換能を有し、陽イオン核種を吸着する能力を有している(核種吸着遅延性)、等の点で卓越しており、総合的に見て最も有力であると考えられる^{16),17)}。天然に産するベントナイトは交換性陽イオンの種類により、Na型とCa型に大別されるが、Na型の方が膨潤性能、止水性能に優れていることが知られており¹⁸⁾、Na型が緩衝材候補材料として期待されている。

現在、海外の研究機関(スウェーデンSKB、スイスNagra、カナダAECL等)においても、Na-ベントナイトを緩衝材候補材料とした研究が進められている。

緩衝材の性能向上のためには、ベントナイトに他の材料(核種吸着性能向上のためにゼオライト、還元性コントロールおよび熱伝導率の向上のために金属、ケイ砂等)を添加材として混合するという報告¹⁹⁾もあるが、現在は、候補材料の基本となるベントナイトについて検討を行っている。

ベントナイトは、モンモリロナイトを主成分とする粘土であり、鋳鉄・鋳鋼用砂型粘結材、土木工事

用泥水、農業用造粒材等に工業用材料として広く利用されているものである。ベントナイトはわが国においても多く産出されていることから、国産製品に着目しクニゲルV1(クニミネ工業、山形県産)を用いて基本特性試験を行っている。

1) 不飽和ベントナイトへの水分拡散試験

不飽和ベントナイト中の水は水蒸気と液状水の二相で移動すると言われている²⁰⁾が、両者を分けて取扱うことが難しいことから、一般に両者を合わせた見かけの水分拡散係数を用いた拡散モデルで近似されている。不飽和ベントナイトの見かけの水分拡散係数を図4に示す。乾燥密度 1.8g/cm^3 の場合、みかけの水分拡散係数は $10^{-10}\text{m}^2/\text{s}$ のオーダーという小さい値を示す。

しかしながら、このような簡易モデルでは、熱や応力との連成現象を考察することに限界があるため、連成現象のモデル化においては、水蒸気と液状水の二相流の取扱いが必要である。ここでは不飽和圧縮ベントナイト中の水分拡散係数と水分量の相関に関して、その温度およびベントナイトの乾燥密度依存性を調べ、二層移動論²⁰⁾の適用性および水蒸気移動と液状水移動の寄与の度合いを検討した。

試験は拘束セル内で粉末ベントナイトを圧縮成型し(直径20mm、長さ20mm)、下部から水を浸潤させて行う(図5)。所定の浸潤時間経過後、試料を2mm毎に10分割し、各片の乾燥後の重量減少から含水比を測定し水分分布を求める。

求められた水分分布よりベントナイト中の水分拡散係数はグルシーの法則を適用して求められる²²⁾。こうして得られた水分拡散係数はある体積含水率に対して最小値をもつ谷型の分布を示す(図6)。またこの最小値は密度の増加とともに大きくなる傾向を示す。さらにグラフの体積含水率を飽和度に替き

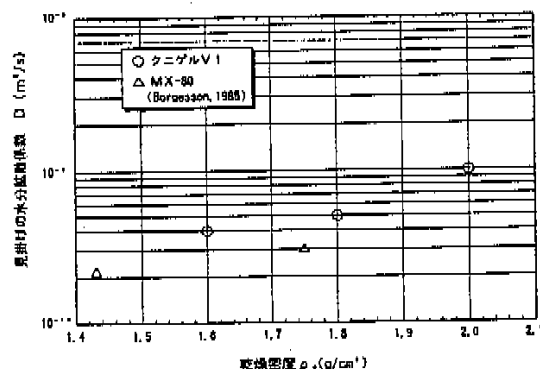
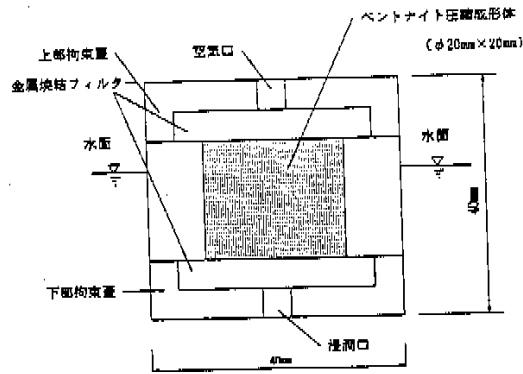


図4 圧縮ベントナイトの乾燥密度と見かけの水分拡散係数の関係²¹⁾

図5 水分拡散試験セル²¹⁾

換えると、水分拡散係数の最小値における飽和度の値は密度によらずほぼ一定値 (60~70%) を示す (図7)。一般に、水分拡散係数の最小値より低水分領域では水蒸気移動が卓越し、高水分領域では液状水移動が卓越すると考察される。これにしたがえば、不飽和圧縮ベントナイトへの水の浸潤は低水分領域では水蒸気移動が卓越し、水の浸潤にともなって飽和度が60~70%になると液状水移動が卓越すると推察できる。

次に、水分拡散係数の温度依存性を検討した結果を図8に示す。水分拡散係数の最小値とその体積含水率の値は、温度の上昇とともに大きくなる。これ

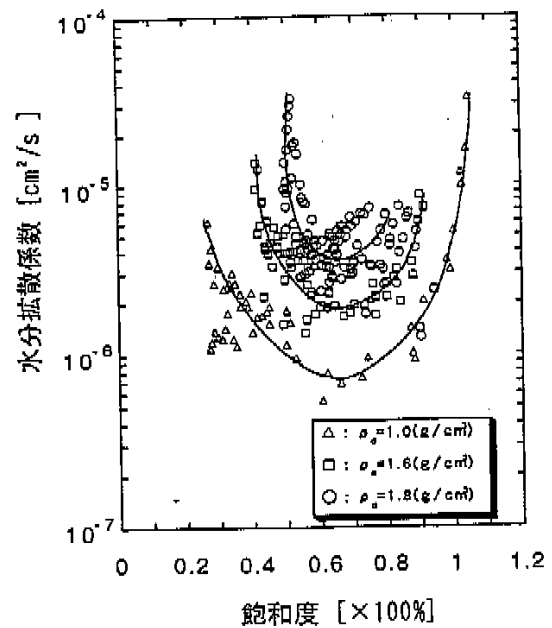
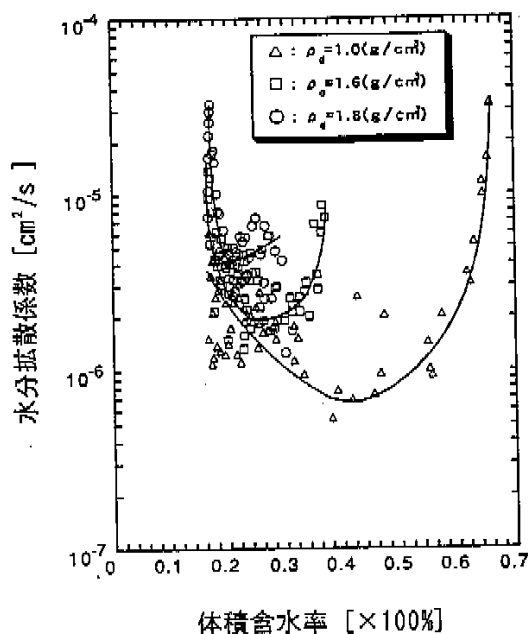
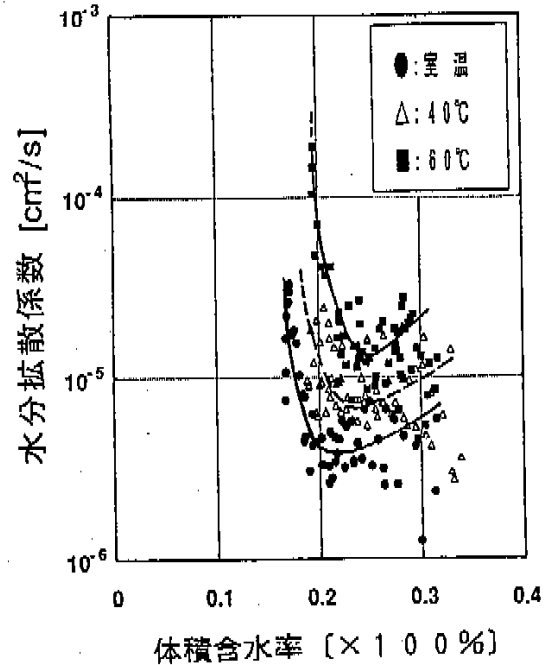
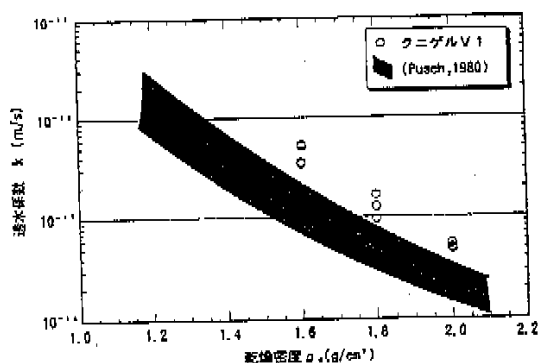


図7 飽和度の違いによる水分拡散係数

は温度の上昇に伴って、水分子の粘性が低下しその運動が活性化されたためと考えられる。現在水分拡散係数の密度依存性、温度依存性を定量的に説明す

図6 体積含水率の違いによる水分拡散係数²³⁾図8 水分拡散係数の温度依存性 (実測値)²³⁾

図9 圧縮ベントナイトの透水係数と乾燥密度の関係²⁴⁾

るために、ベントナイト中の間隙水の化学ポテンシャルの測定を行っている。

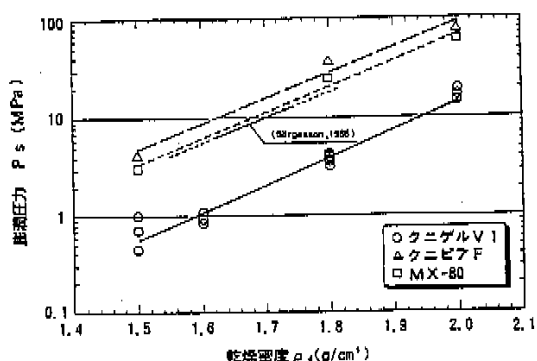
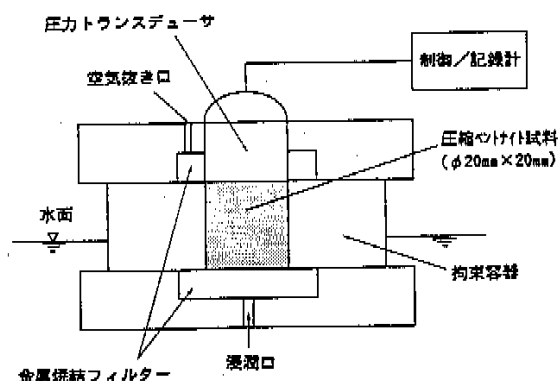
2) 飽和ベントナイトの透水試験

ベントナイトが地下水で飽和した後のベントナイト中の水の動きは、Darcy の法則にほぼしたがう。透水係数は、密度に依存する。圧縮ベントナイトの透水係数を図9に示す。乾燥密度 1.8g/cm^3 では、透水係数は約 10^{-13}m/s と極めて小さい値を示す。このような低透水性の圧縮ベントナイトは、核種の拡散律速条件を維持するのに十分な止水性を有している。

上記の透水係数のデータは、拘束セル内に粉末ベントナイトを圧縮成型し（直径50mm、長さ10mmおよび5mm）、透水圧力0.8MPaの条件下で行った透水試験によるものである。現在、温度依存性のデータ取得等を進めている。

3) 圧縮ベントナイトの膨潤圧測定試験

圧縮ベントナイトの膨潤性は以下の2つのメカニズムにより発生するものと考えられている²⁵⁾。

図10 圧縮ベントナイトの乾燥密度と膨潤圧力の関係²⁴⁾図11 膨潤圧測定セルによる膨潤圧力測定²⁴⁾

① 電荷を帯びた粒子が持つ電気二重層による粒子間の反発力

② 層状構造を持つモンモリロナイト結晶の層間陽イオンの水和、層状粘土結晶と水分子の分子間力等による層間の拡大

乾燥密度と膨潤圧力の関係を図10に示す。

ここで、クニピアFはクニゲルV1をモンモリロナイト含有量95%以上に精製したベントナイトであり、MX-80は、米国産でモンモリロナイト含有量約75%のベントナイトである。

これらの膨潤圧データは、拘束セル内に粉末ベントナイトを圧縮成型し（直径20mm、長さ20mm）、下部より水を浸潤させ、セルに取り付けた土圧計により膨潤圧を測定する試験（図11）によるものである。

ベントナイトの種類によらず、乾燥密度が大きい程、膨潤圧力は増加する。乾燥密度と膨潤圧力の対数には直線関係が認められ、ベントナイトの種類によらず同程度の傾きを持つ。

図12には、クニピアFにケイ砂を混合した場合のモンモリロナイト含有量と膨潤圧力の関係を示す。クニゲルV1およびMX-80の膨潤圧力もあわせて示す。膨潤圧力の対数は、モンモリロナイトの含有量にほぼ比例して増加していることがわかる。

乾燥密度 1.8g/cm^3 のクニゲルV1の膨潤圧力は、約3.7MPaであり、また、 1.6g/cm^3 でも約1.0MPaの膨潤圧を示すことから、人工バリア内の空隙や岩盤の亀裂等を自己シールできる膨潤性を有していると考えられる。

ベントナイトの膨潤圧については、現在その温度依存性や異方性等の試験研究を進めている。

4) 圧縮ベントナイトの熱物性測定試験

圧縮ベントナイトの熱伝導率は、乾燥密度、含水比等に依存し、密度が大きいほど、含水比が高いほど

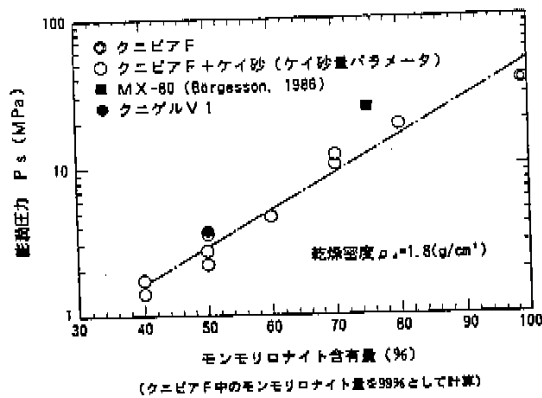


図12 圧縮ベントナイトの膨潤圧力とモンモリロナイト量の関係²⁴⁾

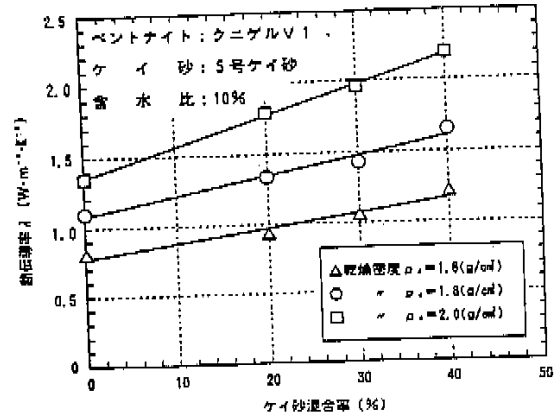


図14 圧縮ベントナイトの熱伝導率とケイ砂量の関係²⁴⁾

ど、熱伝導率は大きい(図13)。

乾燥密度1.8g/cm³の場合、初期含水比10%の乾燥状態においても熱伝導率は、約 $1.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ という値が得られている。ニアフィールドの熱解析評価は「4-2 処分施設の技術開発」に詳述するが、この程度の熱伝導性があれば、ニアフィールドの温度を十分低い温度に抑制することができる。

ケイ砂を混合すると、ケイ砂の混合割合が大きいほど、熱伝導率は大きくなる(図14)。

なお、これらの熱物性データは、迅速熱伝導率計を用いて測定したもので、試料は粉末ベントナイトを角柱状に圧縮成型(50mm×50mm×100mm)したものを用いている。

さらに、熱伝導率の温度依存性を調べるためにヒートプローブを用いて計測した結果を図15に示す。100℃以下では温度の熱伝導率への影響は小さ

い結果が得られている。

以上の結果から、熱伝導性を向上させるためには、乾燥密度を上げるほかにケイ砂を混合することが有効であると考えられる。現在は温度依存性のデータの取得評価を行っている。

5) 圧縮ベントナイトの力学特性試験

圧縮ベントナイトの一軸圧縮試験(JSF T 511-1990)により得られた一軸圧縮強度と乾燥密度の関係を図16に示す。一軸圧縮強度は乾燥密度とともに増加し、一軸圧縮強度と乾燥密度には直線関係が認められる。

また、非圧密、非排水条件下での三軸圧縮試験(JSF T 521-1990 UU)により得られた破壊包絡線および弾性係数の飽和度依存性を図17(a)、(b)、図18に示す。破壊包絡線および弾性係数とも飽和度に大きく依存する。

緩衝材のオーバーマックの支持力、応力緩衝性等

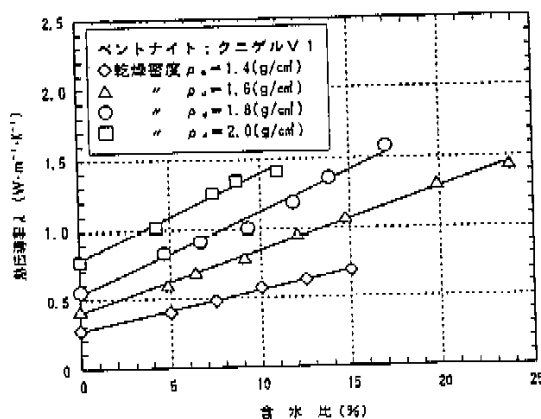


図13 圧縮ベントナイトの熱伝導率と含水比の関係²⁴⁾

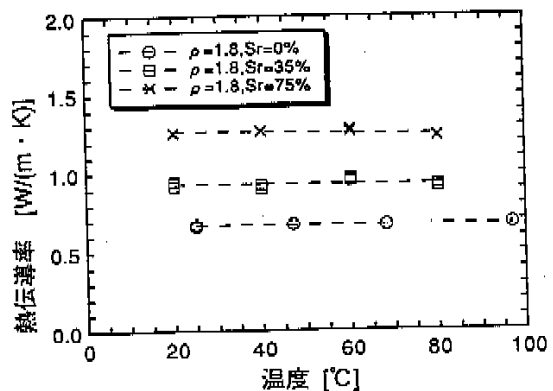


図15 熱伝導率の温度依存性²⁴⁾

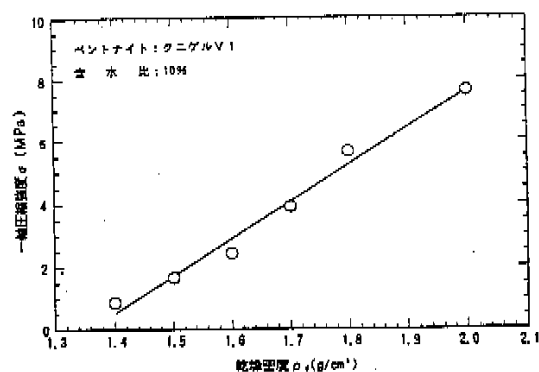


図16 圧縮ベントナイトの一軸圧縮強さと乾燥密度の関係²⁴⁾

の解析評価については3)で詳述するが、圧縮ベントナイトは、緩衝材として十分な機械的強度、可塑性を有している。

現在、より高側圧、圧密排水、圧密非排水条件下

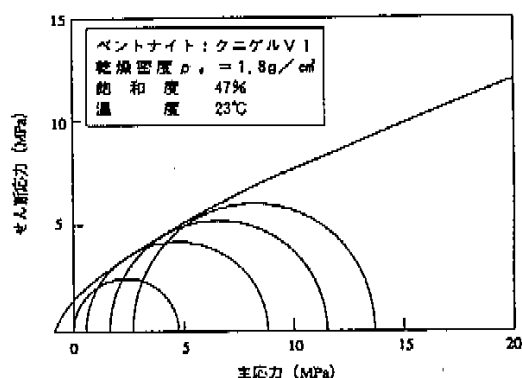


図17(a) 圧縮ベントナイト(飽和度47%)の三軸圧縮試験結果(モールの応力円と破壊包絡線)²⁷⁾

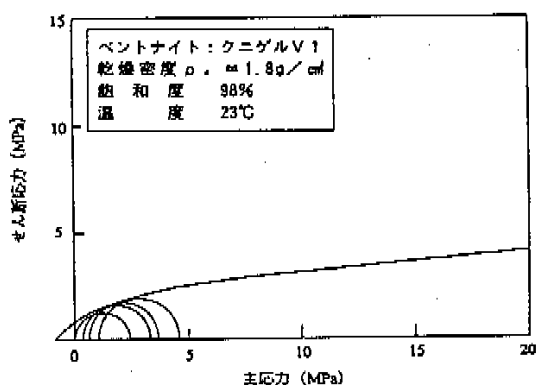


図17(b) 圧縮ベントナイト(飽和度98%)の三軸圧縮試験結果(モールの応力円と破壊包絡線)²⁷⁾

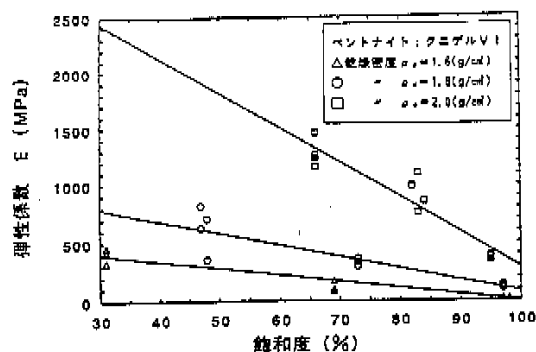


図18 圧縮ベントナイトの弾性係数と飽和度の関係²⁷⁾

での強度特性や圧密、クリープ特性およびそれらの温度依存性等のデータの取得、緩衝材の力学モデルの開発を進めている。

6) ベントナイトへの他材料添加の検討

緩衝材の性能向上研究として、核種吸着遅延性能に着目した吸着材料の添加を検討している。ベントナイトはCs等の陽イオンに対して優れた吸着特性を示すが、パーミキュライト、モルデナイト等へのCsの分配係数はベントナイトよりも数十倍～数千倍も高いことが示された(図19)。

また、モルデナイトをベントナイトに添加した場合に、緩衝材としての他性能に与える影響を調べた結果、モルデナイト添加率の増加に伴い、成型性が悪くなること、透水係数が上がる事等が確認された。

現在、陰イオン、中性核種に対する添加剤の検討を進めている。

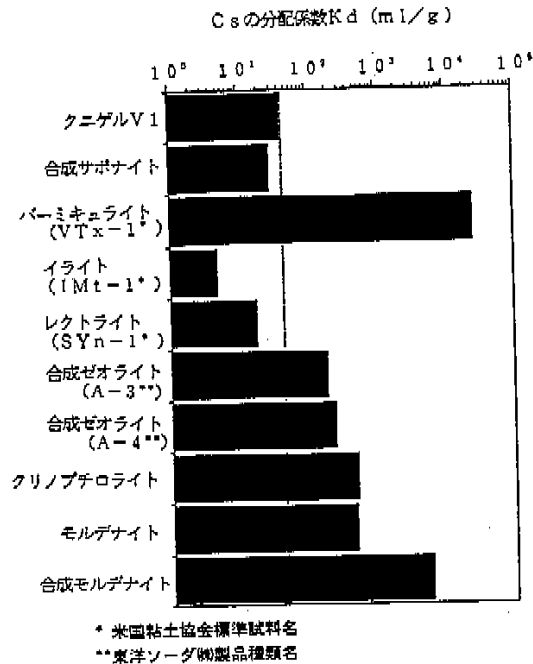
(2) 緩衝材の設計施工技術の開発

1) 緩衝材の製作施工方法の検討

緩衝材の吸着性、止水性、膨潤性等の性質は、ベントナイトの乾燥密度および含有されるモンモリロナイトの量に依存し、乾燥密度が大きくかつモンモリロナイト含有量が多い程優れた性能を示す。

一方、ベントナイトにケイ砂を混合することにより、圧縮成形性や熱伝導性は大きく向上する。熱伝導性については、人工バリアの温度上昇を抑制するために、 $1.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 程度の熱伝導率の確保が望まれ、この条件をベントナイト単体で満足するには 1.8 g/cm^3 程度の乾燥密度が必要となる。

図20にベントナイト単体の締め固め試験の結果を示す。本試験の結果から、ケイ砂を混合しなくても、適当な成形圧を与えることで、乾燥密度 1.8 g/cm^3 程度の圧縮成形体を作成することは可能であることがわかる。

図19 試料毎のCsの分配係数の比較²³⁾

しかし、製作施工性や熱伝導性等の面では、ケイ砂等の混合材が望ましいため、現在、混合材については施工法を含めた検討を進めている。

緩衝材の施工法については、大型のプレス機を用いてあらかじめベントナイトの圧縮成形体を製作し設置する方法と現場でベントナイトの粉末をタンパー等で直接締め固める方法がある。前者の方法については、緩衝材大型試験設備²⁹⁾で既に製作施工実績がある(写真2)。

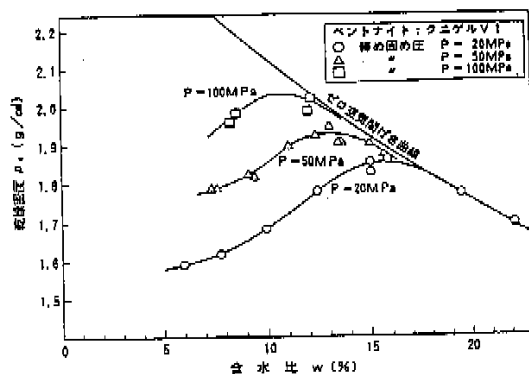
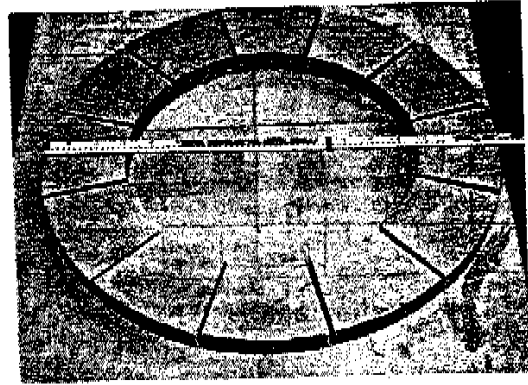
図20 ベントナイトの締め固め特性²⁴⁾

写真2 圧縮ベントナイトの成形体

2) 緩衝材の仕様検討

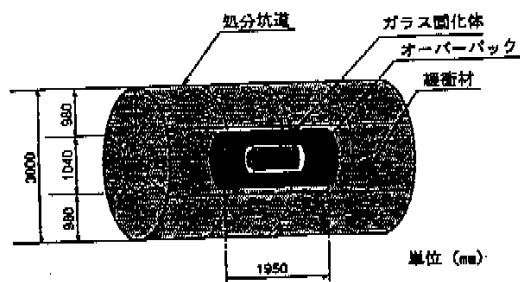
緩衝材の性能は、緩衝材の特性、圧縮密度、厚さ等に大きく依存するため、その仕様設定に当たっては、緩衝材だけの特性のみならず、核種の溶出移行の抑制およびその性能に影響を及ぼす可能性のある下記の事象やプロセス等を十分考慮する必要がある。

- ① 温度上昇や地下水との反応による緩衝材の変質、劣化……物理的、化学的緩衝性の低下
- ② 緩衝材の不均一浸潤と偏膨潤の発生……オーバーバックの移動、腐食の局在化
- ③ 周辺岩盤等の変形による緩衝材の外圧変化……緩衝材の密度、厚さの変化
- ④ 緩衝材の圧密、クリープ変形によるオーバーバックの沈下……緩衝材の密度、厚さの変化
- ⑤ 炭素鋼オーバーバックの腐食生成物による応力の発生……緩衝材の密度、厚さの変化
- ⑥ 炭素鋼オーバーバックの腐食による水素ガスの発生、移行……緩衝材の変形、水みちの形成
- ⑦ 周辺岩盤との空隙、亀裂開口部への緩衝材の侵入、流出……緩衝材の密度変化
- ⑧ 地震時のオーバーバックの移動等

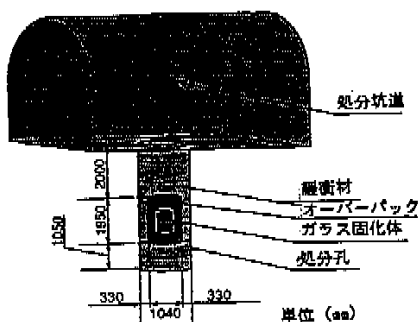
上記の現象は、相互に作用して、しかも長期にわたって緩慢に進行する現象であることから、人工バリアの性能評価の一環として研究を進めている。これまでの主として人工バリアの構造力学的挙動の検討結果によれば、緩衝材の望ましい仕様は、

- ① 吸着性、化学的緩衝性、止水性、熱伝導性、機械的強度等の面では、緩衝材はできる限り高密度のベントナイトを使用し、
- ② 十分な物理的、化学的緩衝性を期待するために、できる限り緩衝材の厚さを厚くすることである。

現在、緩衝材の圧縮密度については、人工バリア



(a) 坑道横置方式



(b) 処分孔縦置方式

図21 人工バリアの仕様例

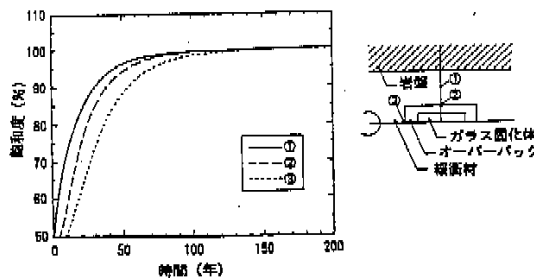
の温度上昇を抑制し、緩衝材の熱変質を避けるという考え方を基本として、 $1.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 程度の熱伝導率を確保するという条件から、 1.8 g/cm^3 (乾燥密度) 程度としている。緩衝材の形状・寸法については、廃棄体の設置方式や建設・操業性に依存する。坑道横置方式については、坑道の掘削技術と操業空間の確保を考慮して、内径3.0mの円形坑道としている。この場合には、緩衝材厚さは約1mとなる。また、処分孔縦置方式については、坑道内での処分孔の掘削性を考慮して、直径1.7mの円形断面としている。この場合には、緩衝材厚さは約30cmとなる。両方式の基本仕様の一例を図21に示す。

坑道横置方式、処分孔縦置方式のどちらにすべきかは、今後の課題である。

3) 人工バリアの力学的安定性の検討

① 緩衝材の浸潤・膨潤変形挙動に関する解析

緩衝材の浸潤・膨潤変形挙動の評価は、人工バリアの安定性や性能評価のためのニアフィールド条件を明らかにする観点から重要な課題の一つである。ここでは、緩衝材の特性に弾塑性モデルを適用し、その有効性を検討するとともに、本モデルを用いて再冠水時の人工バリアシステムの浸潤・膨潤変形挙

図22 再冠水時の緩衝材の浸潤³⁰⁾

動の解析検討を行った結果について述べる。

緩衝材の候補材である高圧縮ベントナイトは、浸潤に伴い大きく膨潤し、拘束状態では大きな膨潤圧を発生する。ここでは高圧縮ベントナイトの浸潤特性を、みかけの水分拡散係数を一定とした水分拡散モデルで、また、浸潤に伴う膨潤変形特性には、適切な膨潤係数を設定することにより概略表現した。

これらのモデルを用いて、再冠水時の人工バリアシステムの浸潤・膨潤変形挙動を解析評価した。緩衝材の浸潤解析の結果、オーバーバック周りの緩衝材が飽和に達する再冠水時間は、およそ100年程度という結果となっている。(図22)。本解析では緩衝材の物性は均一なものとして取り扱ったが、緩衝材中に生じると考えられる締固め等による密度分布や特異点が存在する場合には、緩衝材への地下水の浸潤分布が複雑になることが予想される。また、廃棄体定置初期には、緩衝材内で温度勾配が発生するため、温度条件をパラメータとした緩衝材の特性を取得するとともに、緩衝材の施工条件も考慮した詳細な熱-水-応力の連成解析評価が、今後の課題である。

一方、緩衝材の膨潤変形解析の結果では、周辺岩盤の変形は小さく、緩衝材内は浸潤にともない膨潤圧力を発生し、最終的には人工バリア内部の応力は、緩衝材の飽和膨潤圧力にほぼ等しくなる(図23)。本解析では岩盤の長期クリープによる処分坑道の変形を考慮していないため、人工バリアにおける応力は、最終的には緩衝材の飽和膨潤圧力で一定となる。しかし岩盤の長期クリープ変形により処分坑道が徐々に圧縮変形すれば、人工バリアにおける応力は、この圧縮変形による圧密を受け地圧とバランスするまで上昇する。この場合、地圧30MPa相当の膨潤圧力を発生する緩衝材の乾燥密度は約 2.1 g/cm^3 であることから、クリープ変形の著しい軟岩の場合には、緩衝材は初期の乾燥密度 1.8 g/cm^3 に対して最大約15%程度の圧密を受けることが考えられる。

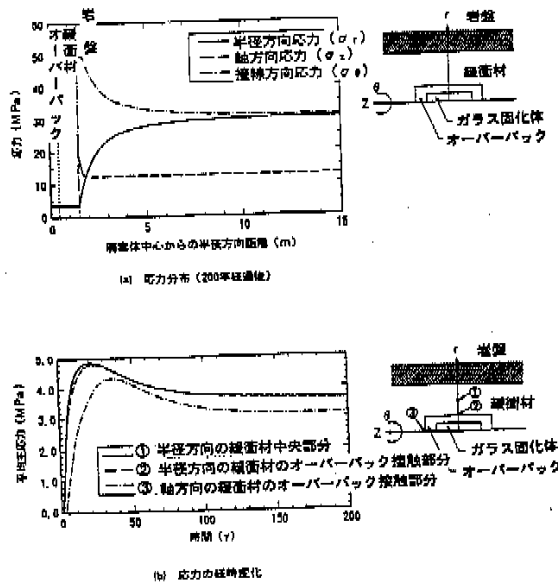


図23 再冠水時の応力分布(a)と応力の経時変化(b)³⁰⁾

よって今後さらに詳細な評価を行うためには、緩衝材の膨潤圧力の他に、岩盤のクリープ変形やオーバーバックの腐食生成物の蓄積による発生応力等を同時に考慮した解析評価が必要である。また、緩衝材の特性については温度条件に依存することから、これらを考慮した連成解析評価が今後の課題である。

② 緩衝材のオーバーバック支持力に関する解析

オーバーバック周囲に充填される緩衝材には、止水性、核種の吸着性等の地層処分システム性能を発揮するための種々の機能が期待されている。この機能を維持するために必要な条件の一つとして、緩衝材がオーバーバックを設置(埋設)時の位置に安定に保持していることが挙げられる。これは、緩衝材が可塑性の優れた材料であるという反面、その充填密度によっては緩衝材の圧密・粘弾塑性変形が発生して、オーバーバックの沈下等の移動を引き起し、岩盤と廃棄物との距離が接近することによって上述した機能を損なう場合が想定されるからである。この想定に関しては、緩衝材の充填密度についてこのようなオーバーバックの移動に対する考慮を払った評価を行う必要がある。

以上の観点から一例として、緩衝材中の間隙水の排水を考慮した圧密弾塑性モデルおよび非排水条件下の緩衝材の粘弾性モデルの2種類のモデルを用いて緩衝材が飽和した後の長期的なオーバーバックの沈下解析を実施した³⁰⁾。

緩衝材の圧密弾塑性モデルは、数多く提案されて

表5 オーバーバックの沈下解析に使用したデータ³⁰⁾

対 象		デ ー タ	
オーバーバック	密度 ρ	[kg/m ³]	7,240
	弾性係数 E	[MPa]	2.1×10^4
	ポアソン比 ν	[-]	0.3
岩	飽和密度 ρ_s	[kg/m ³]	2,000
	弾性係数 E	[MPa]	70
	ポアソン比 ν	[-]	0.4
緩衝材	初期間隙比 e_0	[-]	0.75
	圧縮指数 C_c	[-]	0.22
	膨潤指数 C_m	[-]	0.21
	critical state パラメータ M^*	[-]	0.37
	透水係数 k	[m/s]	1×10^{-13}
材*	規準時間 t_0	[s]	10,000
	規準軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_0$	[MPa]	0.75
	逆規準軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_1$	[MPa]	1.5
	規準時間のクリープせん断速度 $\dot{\gamma}_0$	[s ⁻¹]	4.4×10^{-8}
	定数 n	[-]	0.91
	定数 σ	[-]	4.15

*緩衝材については、MX-80の物性データを用いている。

いる土質材料の構成式の中から弾塑性体理論に立脚した基本的なものとして、Cam-Clayモデルによるひずみ増分の構成式³¹⁾を用いた。

また、緩衝材の粘弾性モデルは、多くの研究があり、種々のレオロジカルモデルが提案されているが、現状、ベントナイトに関しては研究例が限られている。したがって、ここではSinghとMitchellによる実験式³²⁾を用いた。

解析に使用したデータは、表5のとおりである。

なお、緩衝材の物性には、圧密・膨潤試験データ³³⁾および三軸圧縮試験データ^{34),35)}を用いた。

図24に圧密弾塑性解析、および図25に粘弾性解析によるオーバーバックの沈下量の経時変化を示す。オーバーバック沈下量は、緩衝材の飽和密度 2 g/cm³の条件下では、1,000年および1万年後でも1 mm程度以下となっており、緩衝材がオーバーバックの空間的な位置を保持する機能は十分あると考えられ

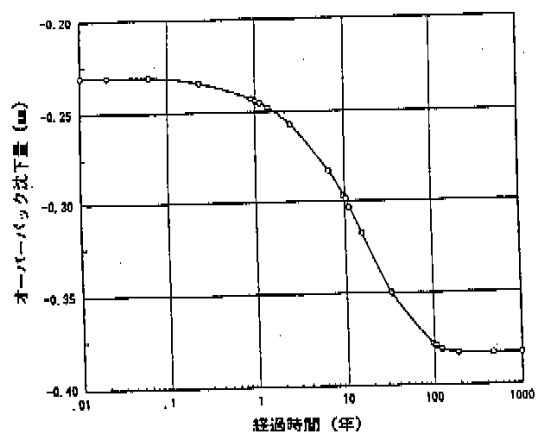
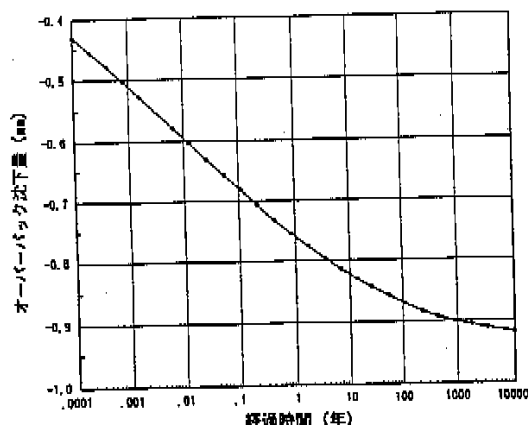


図24 圧密弾塑性解析によるオーバーバックの沈下量³⁰⁾

図25 粘弾塑性解析によるオーバーバックの沈下量³⁰⁾

る。

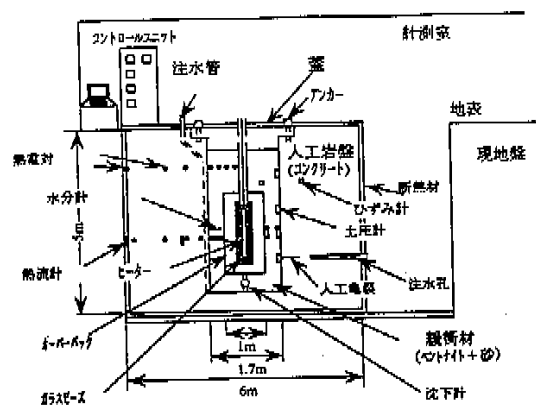
今回実施した解析では、ベントナイトの短期の圧密粘弾塑性および圧密データを用いている。このため、今後は、圧縮ベントナイトの長期圧密粘弾塑性データの取得とそれに基づく圧縮ベントナイトの長期変形モデルの開発が必要である。

③ 緩衝材の応力緩衝性に関する解析

膨潤した緩衝材にはオーバーバックの保持能力以外に、オーバーバックの腐食に伴う体積膨張および岩盤の変形に対しての可塑性および応力緩衝性も期待されている。

オーバーバックの腐食が徐々に進行するのに伴い、磁鉄鉱（マグネタイト）等の腐食生成物が緩衝材内側に蓄積する場合は想定される。この際、生成される腐食生成物の真密度は、赤鉄鉱（ヘマタイト）の場合 5.3g/cm^3 、磁鉄鉱の場合 5.2g/cm^3 であり、元々の材料である炭素鋼（真密度 7.8g/cm^3 ）の約半分近くとなる。その結果、緩衝材内側において体積膨張が発生することにより応力が発生し、周辺岩盤に対して応力影響を生じさせる可能性がある。この発生する応力に関する概略な評価を行った例を以下に示す。

この評価の前提として、炭素鋼が腐食によって、すべて磁鉄鉱に変わると想定している。したがって、膨潤した緩衝材の内側において腐食生成物の占める体積は、約 3m^3 となり、元々のオーバーバックの体積 1.45m^3 より約2倍となるような体積膨張が徐々に進行することになる。解析評価においては、緩衝材内側におけるオーバーバックの2倍の体積膨張を仮定し、その際の緩衝材の変形係数を保守側に設定した。解析には有限要素法による汎用弾塑性コードを使用した。この解析結果によれば、緩衝材の厚さを

図26 緩衝材大型試験設備²⁹⁾

100cmに設定した場合には、腐食生成物の生成に伴い発生する応力は緩衝材によって緩和され、周辺岩盤への応力影響が緩衝されるということが示された²⁹⁾。

(3) 大型緩衝材試験

緩衝材中では、廃棄物からの発熱、岩盤から浸入した地下水、地圧や緩衝材の膨潤によって発生した応力等が相互に関連し複雑な現象が生じることが予想される。したがって、緩衝材を含むニアフィールドの環境条件を評価するためには、このような熱-水-応力の連成現象に関する試験とモデルの開発および検証が必要となる。

そのため、緩衝材の施工技術の確認を含めて、実規模大の緩衝材大型試験設備を製作し、同設備を用いた連成試験を進めている。本試験設備は、図26に示すように垂直処分孔を模擬したもので、主な設備の仕様は表6に示すとおりである。

1) 大型緩衝材試験設備の運転試験

これまでに、図27に示すように加熱試験と部分注水試験をすでに実施し、圧縮成型したベントナイトブロック設置方式による緩衝材の施工性、ヒーターによる加熱による人工バリアの伝熱特性、温度勾配下の緩衝材中での水分移動に関するデータを取得し

表6 緩衝材大型試験設備の主な仕様

	概 要
人 工 岩 盤	・コンクリート製： $\phi 6\text{m} \times \text{H} 5\text{m}$ ・処分孔： $\phi 1.74\text{m} \times \text{H} 4.5\text{m}$
オーバーバック	炭素鋼： $\phi 1.04\text{m} \times \text{H} 1.94\text{m}$ 、肉厚 0.3m
電 気 ヒ ー タ	200V、出力4kw
注 水 設 置	注水管、人工亀裂
緩 衝 材	Na-ベントナイト/珪砂=7/3
計 測 装 置	温度・膨潤圧・水分・応力

工 種	平成2年				平成3年			
	月	9	10	3	4	9	10	3
加熱試験、 部分注水試験		加熱	加熱	加熱	加熱	加熱	加熱	加熱
		含水比測定			含水比測定			
全面注水試験							加熱	加熱
							注水開始	
まとめ								

工 種	平成4年				平成5年			
	4	9	10	3	4	9	10	3
加熱試験、 部分注水試験								
全面注水試験		加熱、注水	加熱、注水			加熱、注水	加熱、注水	
		含水比測定	含水比測定			含水比測定	含水比測定	
まとめ								

図27 緩衝材大型試験工程表

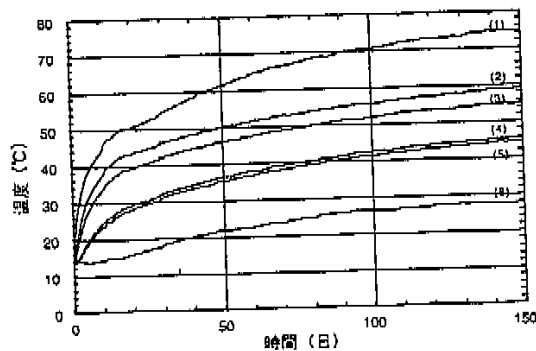
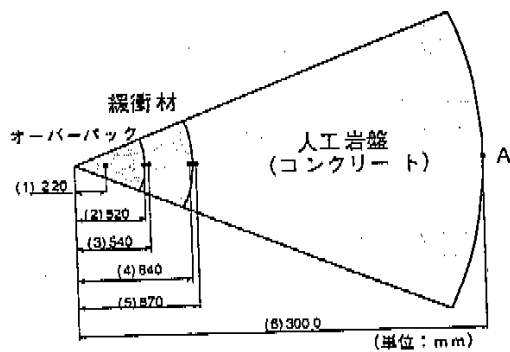


図28 温度の経時変化

た。

現在実施中の全面注水試験は、原位置締固めによる緩衝材の施工方法の可能性を確認するとともに、温度勾配下での緩衝材中の水分移動、膨潤圧の発生挙動等を明らかにするものである。

試験は、平成4年3～4月に原位置締固めによる緩衝材の充填、センサーおよび装置の改造等を行い、平成4年4月27日より加熱・注水を開始し、人工バリア内の温度分布、緩衝材中での水分移動と膨潤圧の発生等に関して計測を実施した。

試験開始から5ヶ月後までの温度の経時変化を図28に示す。測点はヒーターの中心を通る水平面上にあり、蓋下3m深さである。

5ヶ月経過後に加熱・注水を中断し、ボーリングによるサンプリングを実施して得られた含水比分布を図29に示す。緩衝材の初期含水比16.5%、飽和含水比26.0%に対してオーバーバック側では乾燥し、人工岩盤側では飽和状態となっていることがわかる。

また、試験開始から5ヶ月後までの膨潤圧の経時変化を図30に示す。測定機器は緩衝材と人工岩盤の境界の人工岩盤側に取付けてあり、深さ方向一列に測定機器が設置してある。これによると、ヒーター中心付近で膨潤圧は大きく、計測方向により値が違ってくることがわかる。

2) 熱-水-応力連成モデルの開発

緩衝材大型試験設備において得られた緩衝材中の連成現象を評価するためには、温度勾配による水分

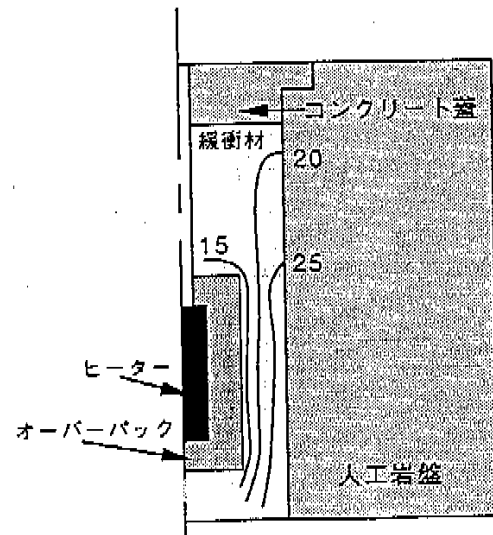


図29 5ヶ月後の緩衝材中の含水比分布

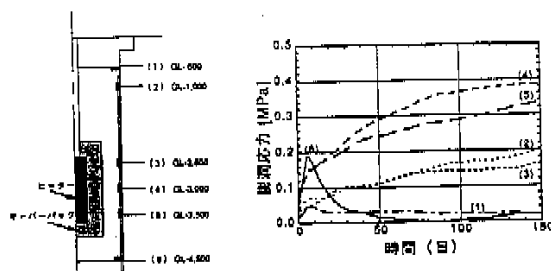


図30 緩衝材中の膨潤圧の経時変化

移動のメカニズムを考慮した熱-水-応力連成モデルの開発が必要である。このため、緩衝材中での液状水・水蒸気の移動のメカニズムおよびそのモデル化の検討を行うとともに、飽和・不飽和媒体中での熱-水-応力連成解析コードTHAMESの改良検討を行い、現在実施中の緩衝材大型試験の全面注水試験の解析検討を実施した。

熱-水-応力連成モデルでは、ビオの圧密方程式にフックの法則のデュアメル-ノイマン形式を用いたものとエネルギー平衡式を用いている。その支配方程式は、水の流れ、力学的挙動、熱的挙動の3つが完全に連成したものである。

図31に示すとおり、解析には2次元軸対称モデルを用いた。また、解析に用いた諸物性値を表7に示す。

図32に緩衝材中の水分の移動に関する熱-水-応力連成解析の結果を示す。各測定点はヒーターの中心を通る水平断面上にある。解析結果は実測値を十分表現できていない。これについては、緩衝材の施工方法による密度の不均一性や、注水方法、特定の水みちの存在等、さまざまな要因が考えられるが現在、緩衝材の基本特性の追試等を含めて見直し検討中である。

また、熱-水-応力連成モデルの開発・検証を

表7 解析に用いた諸物性値

パラメータ	人工岩盤 コンクリート	緩衝材	オーバーバック	ガラスビーズ	間隙
ヤング率 $[E/cm]$	$2.50E+08$	$2.00E+06$	$2.00E+09$	$8.20E+08$	—
ポアソン比 $[-]$	$1.67E-01$	$3.00E-01$	$3.00E-01$	$3.00E-01$	—
密度 $[cm/sec]$	$2.30E+00$	$1.87E+00$	$7.80E+00$	$1.60E+00$	$1.00E-03$
透水係数 $[cm/sec]$	$1.00E-12$	$4.00E-11$	—	—	—
比熱 $[kJ/kg/^\circ C]$	$7.50E-01$	$0.2 \rho_d + \theta$	$4.60E-01$	$8.40E-01$	$1.00E-00$
熱伝導率 $[W/m^\circ C]$	$1.88E-00$	$0.33+3.1\theta$	$5.30E+01$	$2.55E-01$	$7.29E-02$
熱膨張係数 $[1/^\circ C]$	$1.00E-05$	$1.00E-05$	$1.64E-06$	$1.00E-05$	$3.60E-03$

ρ_d : 乾燥密度、 ρ_l : 湿潤密度、 θ : 体積含水率

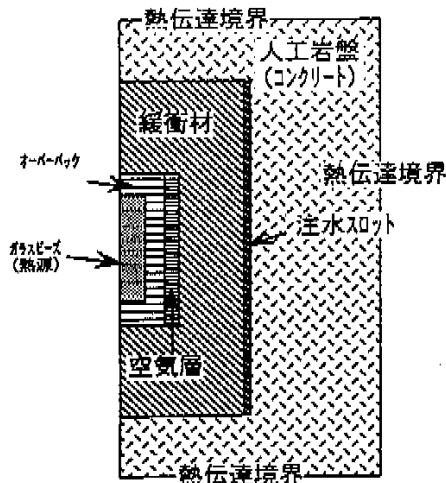
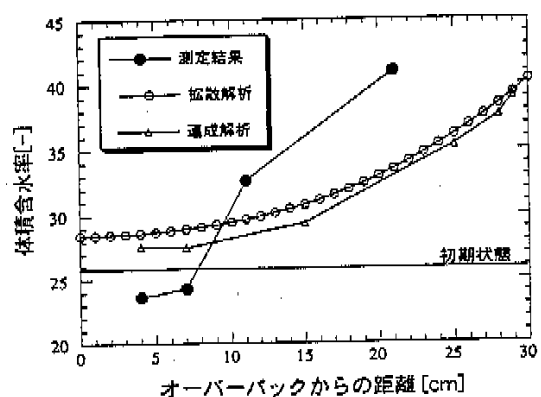


図31 熱-水-応力連成解析に用いたモデル

目的とした国際共同研究の「DECOVALEX」プロジェクトに参画し、現在、各種の連成モデル/コードの比較検証作業等を進めているところである。

5. まとめ

ガラス固化体、オーバーバック、緩衝材から構成される人工バリアシステムを基本として、オーバーバックについては、炭素鋼を第一候補材とした概略の設計解析評価を行い、仕様例を示すと同時に、予備的試作を行い、技術的見通しを示した。緩衝材については、ベントナイトを有力な候補材として、物理的、化学的特性を概略評価し、適切な密度に圧縮したベントナイトが緩衝材に期待される性能を確保し得る見通しを示した。

図32 緩衝材中の水分移動に関する実測結果と解析結果の比較図³⁷⁾

今後、地下深部環境を考慮した条件下での人工バリア材の物理的・化学的特性の評価と仕様の詳細検討およびより詳細な製作施工技術の検討を行い、人工バリア技術の信頼性の向上に資するための研究開発を進める。

(東海事業所 環境技術開発部 地層処分開発室
原 啓二、五月女敦、藤田朝雄、本田 明、
柴田雅博、竹内真司、茂呂吉司)

参考文献

- 1) SKB (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.): Final Storage of Spent Nuclear Fuel, KBS-3 (1983).
- 2) Nagra: Project Cewadh 1985, NGB 85-09 (1985b).
- 3) AECL: Second Interim Assessment of the Canadian Concept for Nuclear Fuel Waste Disposal, AECL-8373 (1985).
- 4) U.S. Department of Energy: Site Characterization Plan, Overview Yucca Mountain Site, Nevada Research and Development Area, Nevada (1988).
- 5) Plas, Y., Jorda, M., Atabek, R., Robinet, J.C., Hoorebeke, J.N. and Bellet, J.: What will be Engineered Barriers for Deep Disposal of High Level Radioactive Wastes in the Future. Proc. of the third Int. Conf., Las Vegas, USA, Apr., ANS, ASCE (1990).
- 6) Bruyn, D.de, Fonteyne, P., Marivoet, J., Mouscours, M., Noynaert, L., Put, M., Volckaert, G.: Near Field Concepts for Disposal of Radioactive Waste in Clay Formation, SCK/CEN (1992).
- 7) 石川博久、本田明、鶴田裕二、井上邦博、小畑政直、佐々木憲明: オーバーバック被覆材料選定と炭素鋼オーバーバックの寿命評価、PNC TN8410 92-199 (1992b).
- 8) 伊藤昌郎: 改訂腐食科学と防食技術、コロナ社、259pp. (1979).
- 9) 腐食防食協会編: 腐食技術便覧、日刊工業新聞社、185, 190, 411 pp. (1986).
- 10) Marsh, G.P., Bland, I.W., Desport, J.A., Naish, C., Westcott, C. and Taylor, K.J.: Corrosion Assessment of Metal Overpack for Radioactive Waste Disposal, European Appl. Res. Rept. Nucl. Sci. Technol. 5 (2), pp.223-252 (1983).
- 11) Simpson, J.P. and Vallotton, P.H.: Experiments on Container Materials for Swiss High-level Waste Disposal Projects. Part III, Nagra, NTR 86-25 (1986).
- 12) Grauer, R.: Behältermaterialien für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle: Korrosionsschematische Aspekte, Nagra, NTB 84-19 (1984).
- 13) 本田明、野田昌之、鶴田裕二、井上邦博、石川博久、佐々木憲明: 炭素鋼オーバーバックの製作、PNC TN1410 92-059 (1992).
- 14) Oscarson, D.W. and Cheung, S.C.H.: Evaluation of Phyllosilicate as a Buffer Component in the Disposal of Nuclear Fuel Waste, AECL-7812 (1983).
- 15) Pusch, R.: Use of Clays as Buffers in Radioactive Repositories, KBS TR 83-46 (1983b).
- 16) Pusch, R.: Required Physical and Mechanical Properties of Buffer Masses, KBS TR-33 (1977).
- 17) Pusch, R.: Highly Compacted Na-Bentonite as Buffer Substance, KBS TR-74 (1978).
- 18) Westgate, J.H., Bray, L.A., Hodge, F.N. and Wheelwright, E.J.: Permeability, Swelling, and Radionuclide-retardation Properties of Candidate Backfill Materials, Pacific Northwest Laboratory, PNL-SA-9645 (1981).
- 19) Monk, D.P.: Waste Package Materials Screening and Selection, Battelle Mem. Inst. Report ONWI-312 (1981).
- 20) 中野政時、原啓二、藤井克己、石田明晴、石井明俊: 拘束された不飽和粘土の浸潤と膨潤、農土論集、112, pp.55-66 (1984).
- 21) 山形順二、鈴木英明、柴田雅博: 緩衝材の特性試験 (II)、動燃技術資料、PNC TN8410 92-169 (1992).
- 22) 中野政時、原啓二、藤井克己、石田明晴、石井祐二: 不飽和粘土の浸潤と膨潤、農土論集、100, pp.8-16 (1991).
- 23) 竹内真司、原啓二、鈴木英明、中野政時: 圧縮ベントナイトの水分拡散係数と水分特性について、農畜土木学会講演要旨、(1993).
- 24) 鈴木英明、原田雅博、山形順二、広瀬部郎、寺門一馬: 緩衝材の特性試験 (I)、動燃技術資料、PNC TN8410 92-057 (1992).
- 25) Pusch, R., Karnland, O. and Hokmark, H.: The Nature of Expanding Clays as Exemplified by the Multifaceted Smectite Mineral Montmorillonite. Preprint of Contribution to The Workshop on Stress Partitioning in Engineering Clay Barriers, (1991).
- 26) 藤田朝雄、杉田裕、納多勝、機世徳広: 緩衝材の熱物性試験、動燃技術資料、PNC TN1410 92-052 (1992).
- 27) 藤田朝雄、五月女敦、原啓二: 緩衝材の力学試験、動燃技術資料、PNC TN8410 92-170 (1992).
- 28) 小田裕恵、柴田雅博、鈴木英明、石川博久: 緩衝材の核種収着性態向上を目的とした、ベントナイトへの他材料添加の予察的検討、原子力学会「1993年の年会」要旨集、p.426 (1993).
- 29) Sato, S., Kobayashi, A., Hara, K., Ishikawa, H. and Sasaki, N.: Full Scale Test on Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Process in Engineered Barrier System, '91 Joint International Waste Management Conference, ASME, Seoul, Korea, Oct. (1991).
- 30) 藤田朝雄、五月女敦、原啓二、納多勝: 人工バリアの構造力学的検討、動燃技術資料、PNC TN1410 92-053 (1992).
- 31) Schofield, A. and Wroth, P.: Critical state soil mechanics, McGraw-Hill, London (1968).
- 32) Singh, A. and Mitchell, J.: General Stress-Strain-Time Function for Soils, ASCE Proceedings, vol.94 (1968).
- 33) Börgesson, L.: Interim Report on the Laboratory and Theoretical Work in Modeling the Drained and Undrained Behaviour of Buffer Material, SKB TR 90-45 (1990).
- 34) Börgesson, L., Hökmark, H. and Karnland, O.: Rheological Properties of Sodium Smectite Clay, SKB-TR 88-04 (1988).
- 35) Börgesson, L.: Laboratory Testing and Computer Simulation of Clay Barrier Behaviour, Proc. 9th International Clay Conference Strasbourg, Sci. Geol. Mem., 87, Vol.III, pp.117-128 (1989).
- 36) Saotome, A., Hara, K., Fujita, T. and Sasaki, N.: Study on Mechanical Stability of Engineered Barrier System for Geological Disposal of HLW, 11th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Tokyo, Japan, Aug. (1991).
- 37) Fujita, T., Moro, Y., Hara, K., Kobayashi, A., Ohnishi, Y.: FULL-SCALE TEST ON THERMO-HYDRO-MECHANICAL PROCES IN ENGINEERED BARRIER SYSTEM, DECOVALEX WORKSHOP, (1993).