

高レベル放射性廃棄物処分場の埋戻し (シーリング)概念に関する検討

古市光昭¹・奥津一夫²・田中俊行³・棚井憲治⁴

¹正会員 鹿島建設 建設総事業本部 原子力室 (〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30)

²正会員 鹿島建設 建設総事業本部 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30)

³正会員 鹿島建設 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

⁴動力炉・核燃料開発事業団 東海事業所 (〒319-1112 茨城県那珂郡東海村村松 4-33)

高レベル放射性廃棄物処分場の建設はサイト決定後、サイト特性調査・設計・建設・操業・埋戻し(シーリング)のステップで進められる。シーリングの要素技術としては、埋戻し材、プラグ、グラウトが挙げられ、シーリングコンセプトの構築に当たってはこれらを合理的に組み合わせることが重要である。本論文ではシーリングにおける要素技術の性能を放射性核種の移行の観点から評価した。その結果、放射性核種の移行速度を大きくする岩盤緩み域、割れ目等に対し、プラグ及びグラウトが有効であることを示し、シーリングコンセプトの骨子を提案した。

Key Words : high level radioactive waste, geological disposal, sealing, performance assessment

1. はじめに

世界人口は開発途上国を中心に今後さらなる増加が予想され、2050年には100億人を超えると言われている。また東南アジアの経済成長も急ピッチであり、これらに伴い電力需要の急増が予測されている。一方、地球環境問題は深刻化しており炭酸ガスの排出の少ないエネルギーが求められている。このような状況下で原子力は大量のエネルギーを供給できること及びクリーンなエネルギーであることから今後のエネルギーの柱として重要な役割を担っており、さらなる原子力開発が望まれている。しかし、原子力開発における課題も山積しており、最重要課題の1つとして高レベル放射性廃棄物(以下高レベル廃棄物)処分が挙げられている。

我が国の高レベル廃棄物処分に関する研究開発は動力炉・核燃料開発事業団(以下動燃事業団)において継続的に実施されており、平成3年度に第1次技術レポートが発表され¹⁾、この中で日本における地層処分概念の骨格が示された。

高レベル廃棄物処分は処分地点の選定から処分場の完成までを考えると、作業段階を建設・操業・埋

戻し(以下シーリング)の3段階に大別することができる。このうち、シーリングとは処分場に廃棄体を定置した後、処分場の空間を埋戻し材及びプラグで充填し、処分場の安全性を長期にわたり担保することであるが、これまでのシーリング概念の研究においてシーリングの効果を具体的に議論したものは少ない。

本報告は高レベル廃棄物処分におけるシーリング概念を候補材料に対する実験的評価及びシーリング技術に対する解析的評価を基に提案するものである。

2. 高レベル放射性廃棄物処分の概要

(1) 放射性廃棄物と処分形態

日本においては、放射性廃棄物を発生源と廃棄物の特徴によって、高レベル放射性廃棄物とその他の低レベル放射性廃棄物(以下低レベル廃棄物)に分類している¹⁰⁾。

さらに、低レベル廃棄物はTRU核種を含む放射性廃棄物(以下TRU廃棄物)、発電所廃棄物(原

子力発電所の運転・解体によって発生する廃棄物)、ウラン廃棄物(ウラン燃料加工施設等から発生する廃棄物)、研究所等廃棄物及びR I 廃棄物に分類される。

高レベル廃棄物は使用済燃料を再処理したときに発生する高レベル廃液をホウケイ酸ガラスで固化したものである。日本においては原子力発電の使用済燃料は直接処分せず再処理する方針であり、高レベル廃棄物は、動燃 東海事業所での再処理、海外への再処理委託及び 2003 年に運開予定の下北・六ヶ所村の再処理施設から発生する。TRU 廃棄物は使用済燃料の再処理によって発生する高レベル廃棄物以外の長半減期のTRU核種を含む廃棄物である。

高レベル廃棄物及びTRU 廃棄物は深地層に処分される計画であり、その他の廃棄物は浅地層に処分される方向で検討が進められている。なお、発電所廃棄物のうち運転によって発生する廃棄物は現在建設・操作中の下北・六ヶ所村の低レベル廃棄物埋設施設に輸送されている。

(2) 高レベル放射性廃棄物の処分方法¹⁾

世界各国共、高レベル廃棄物は地下数百メートルの深地層に処分される方針であり、各国の地質状況に対応させてそれぞれの処分コンセプトが考えられている。

我が国の場合、対象岩盤として結晶質岩と堆積岩が考えられており、地質的特徴としては、

- ・断層・割れ目が多い
- ・地下水位が高い
- ・地形が急峻であり動水勾配が大きい

等が挙げられる。

我が国の高レベル廃棄物の処分場概念は動燃事業団の第1次技術レポート¹⁾に示されており、その概要を図-1、図-2に示す。

図-1は処分場のレイアウトを示したものであり、処分場を構成する主な部位は処分場へのアクセス立坑、高レベル廃棄物を処分するための処分坑道、処分坑道とアクセス立坑を接続するための坑道(主要・連絡)である。

高レベル廃棄物の定置方法については、坑道内定置(横置き)とピット内定置(縦置き)の2つのオプションが考えられている。図-2は横置き方式による廃棄体定置の概念を示したものである。ガラス固化した廃棄体をステンレス製のオーバーバックに封入し、処分坑道に一定の間隔をおいて定置し、坑道内は緩衝材(ベントナイト)で充填する。

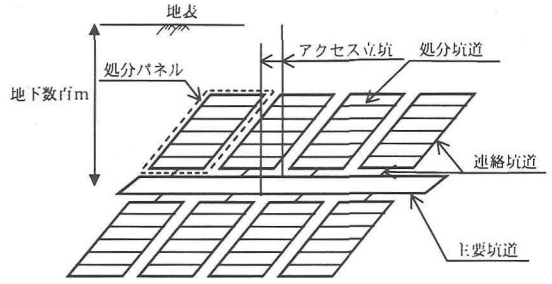


図-1 地層処分場概念図

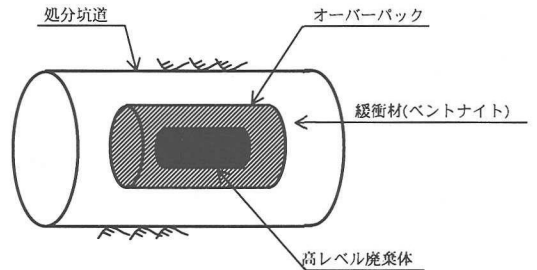


図-2 廃棄体定置の概念図(横置き方式)

3. シーリングシステムの概要と候補材料

(1) シーリングシステムの目的及び要求性能

シーリングシステムとは、廃棄体を人間界と隔離し、廃棄体より漏洩する放射性核種の人体への影響を十分低いレベルに抑え、長期的に処分場の安全性を担保できるように処分場をシーリングするためのシステムである。

シーリングシステムについては、高レベル廃棄物処分場の設計における主要項目として海外ではスウェーデンのSKB(スウェーデン原子燃料廃棄物管理会社)によるKBS-3¹¹⁾及び地層処分総合性能評価報告書(SK91)¹²⁾、カナダのAECL(カナダ原子力公社)によるカナダ核燃料廃棄物の処分概念に係る環境影響評価報告書¹³⁾、スイスのNAGRA(スイス放射性廃棄物管理共同組合)によるProject Gewähr¹⁴⁾及びkristallin-1¹⁵⁾などでその検討結果が述べられているが、いずれも概念を示しているにすぎず定量的な検討内容は報告されていない。日本においては動燃事業団による平成3年度第1次技術レポート¹⁾でシーリングシステムについて述べられているが、ここでも概念のみが示されている。

本論文では、高レベル廃棄体から漏洩した核種が地下水の移動に伴って地表に運ばれるシナリオに対してシーリングシステムの性能を解析的に検討した。なお、地殻変動等に対する安全性については取り扱わないこととした。

高レベル廃棄物を処分した場合、将来、廃棄体から核種が漏洩し、漏洩した核種は人工バリア中及び天然バリア(岩盤)中を

- ・地下水流による核種の移流・分散
- ・核種の溶解・沈澱
- ・核種のバリア材への吸着
- ・核種の崩壊・減衰

を繰り返しながら移行して地上に到達する。

廃棄体から漏洩した放射性核種の移行経路として卓越する部分は

- ① 岩盤中に元来存在する地下水の水みちとなる部分
 - ・破碎帯・割れ目
- ② 処分場建設に伴い、地下水の新たな水みちとなる可能性がある部分
 - ・坑道掘削に伴って生じる緩み域
 - ・岩盤と埋戻し材料の境界部分
- ③ 核種に対する分配係数(核種吸着効果)が小さい部分

等が想定され、これらが絡みあって核種の移行経路が決定される。特に日本のように地下水流れが大きい地域では、①や②が移行経路として支配的になると考えられる。

シーリングシステムに要求される性能は、「核種の移行遅延性」であり、この要求性能を満足させるためにはシーリング材料の選定と下記に示す3つの要素技術を合理的に組み合わせることが重要である。

- ① 埋戻し材によるアクセス立坑・処分坑道の充填
- ② 低透水性材料によるプラグの設置
- ③ グラウトによる周辺岩盤緩み域の透水性の改善

(2) シーリング候補材料

シーリングシステムが要求性能を満足するためには、シーリング材料の選定が極めて重要である。シーリング材料への要求性能としては、まず「核種移行遅延性」に直接的に関係する

- ① 長期健全性(物理的・化学的)
- ② 低透水性(自己シール性を含む)
- ③ 核種吸着性

が挙げられる。さらにシーリングシステムを設計するに当たっては、シーリング候補材料に対し以下の事項を評価し、設計に反映させる必要がある。

- ① 力学特性
- ② 熱伝導性(廃棄体近傍)
- ③ 化学的影響
- ④ 施工性等

シーリング材料としては世界的にセメント系材料とベントナイト系材料に絞られており、特に長期健全性の観点からベントナイト系材料を主要材料とし、補助的にセメント系材料を用いる傾向にある。

本報告でも長期健全性、化学的影響等の観点からベントナイト系材料を主要材料と考え、低透水性に関する基礎特性試験として実施した膨潤性(自己シール性)試験と透水試験の結果を示す。

膨潤性と透水性の試験で検討対象としたベントナイト系材料は以下の3種類である。

- ① ベントナイト(ベントナイト+水)
- ② 砂・ベントナイト混合土(砂+ベントナイト+水)
- ③ 礫・砂・ベントナイト混合土(礫+砂+ベントナイト+水)

a) 使用材料の配合条件

表-1に試験における使用材料を示す。ベントナイト(B)は、Na型ベントナイト(山形県産)、砂(S)は、珪砂(最大粒径約1mm)、礫(G)は、コンクリート用粗骨材(最大粒径20mm)を用いた。図-3に各材料の粒度分布を示す。

表-2に配合条件を示す。表中には、礫混入率 G_m (=礫の乾燥土重量(G)/全乾燥土重量(G+S+B)(%))、砂混入率 S_m (=砂の乾燥土重量(S)/(G+S+B)(%))、ベントナイト混入率 B_m (=ベントナイトの乾燥土重量(B)/(G+S+B)(%))、乾燥密度 ρ_d (t/m^3)、初期含水比 w (%)、供試体寸法を示す。 G_m は、礫を50~70%混入すれば、礫を混入しない場合と比較して高い締固め密度や低い透水係数が得られることから、 G_m を50%と一定とした²⁾。

表-2にベントナイト系材料の配合条件を示す。試験試料は、表-2に示すw状態に試料調整したものを所定の ρ_d になるように一軸圧縮試験機で静的に圧縮し、また、礫・砂・ベントナイトは最適含水比 w_{opt} 状態で1E cの締固めエネルギーで突き固めて作成した。

b) 試験方法

1) 締固め試験

試験はJIS A 1210(突き固めによる土の締固め試

表-1 使用材料

材 料	内 容	土粒子の密度 $\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$
ベントナイト(B)	Na型ベントナイト (山形県産)	2.70
砂(S)	珪砂	2.68
礫(C)	コンクリート用粗骨材 (砕石 2005)	2.66

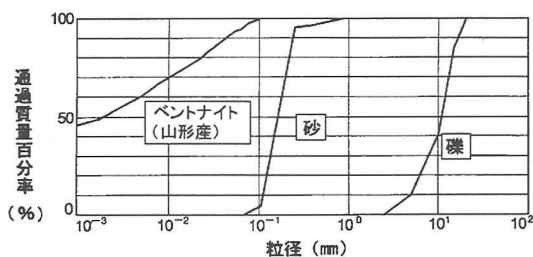


図-3 粒度分布

表-2 配合条件

候補材料	Cm(%)	Sm(%)	Bm(%)	$\rho_d(\text{t}/\text{m}^3)$	w(%)	供試体寸法
ベントナイト	0	0	100	1.10~1.84	5.8	$\phi 40 \times h20\text{mm}$
砂・ベントナイト	0	80~20	20~80	1.63~1.82	1.7~4.6	$\phi 40 \times h20\text{mm}$
礫・砂・ベントナイト	50	50~0	0~50	1.80~2.04	8.9~14.5	$\phi 100 \sim 150 \times h50 \sim 12.7\text{mm}$

験方法)に準拠し、締固めエネルギーは1 E c (=5.6 cm \cdot kg/cm 2 , 2.5kg ランマーで3層 25回で締固め)とした。試料の準備および試験方法は、非乾燥法で非繰返し法とした。

2) 膨潤圧試験

図-4に膨潤圧試験装置を示す。試験は、Puschの試験方法³⁾に従って以下の手順で行った。(a)突固めた供試体を固定枠にセットし、上下から真空度を徐々に高めていき、負圧を-0.1MPaの状態を24時間保持する。(b)負圧を保持したまま、水頭差約100cmで上下より吸水させたときに発生する膨潤圧をロードセルで測定する。(c)膨潤圧が一定になった後、7日間放置して試験を終了し、膨潤圧の最大値P maxを求めた。

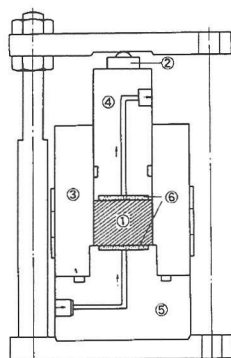


図-4 膨潤圧試験装置

3) 透水試験

透水係数は、圧縮固化したベントナイト中を流れる浸透水が Darcy(ダルシー)の法則に従うと仮定して、定水位透水試験によって式(1)を用いて算定した。

$$k_T = \frac{Q}{Ait} \quad (\text{m}/\text{sec}) \quad (1)$$

ここに、 k_T :測定時の温度 T $^{\circ}$ C に対する透水係数、Q:浸透流量、A:供試体の断面積、i:動水勾配(=H/L、H:水頭差、L:供試体寸法)、t:測定時間

c) 締固め特性

図-5にB mを0~50%に変化させたときの礫・砂・ベントナイト混合土の締固め曲線を示す。この図から、最大乾燥密度 ρ_{dmax} は、B mの増加に伴って増加しておりB m=15%のときに最大値をとり、B m=15%を越えると減少する傾向を示す。また、最適含水比 w_{opt} は一般土質材料と同様 ρ_{dmax} の増加に伴って乾燥側に移行し、B m=15%のときに最小値となる。

d) 膨潤特性

図-6に代表的な配合(①ベントナイト 100%、②砂 50%+ベントナイト 50%、③礫 50%+砂 0%+ベントナイト 50%)の膨潤圧と経過時間の関係を示す。この図から、膨潤圧は材料の種類によらず約100時間程度(約4日)で一定値を保持していた。

図-7に最大膨潤圧P maxとB mの関係を示す。この図から、P maxはB mの増加に伴って大きくなる。同じB mの比較で砂・ベントナイトと礫・砂・ベントナイトのP maxの値を比較すると、礫を混入した方がいずれのB mの場合でも大きく現れている。また、ベントナイト単体(B m=100%)では、表-2に示すように ρ_d が異なるためP maxの値は大きく異なっている。

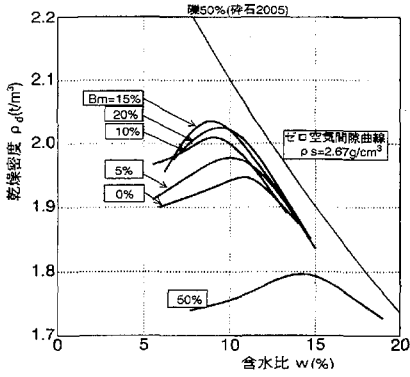


図-5 礫・砂・ベントナイトの締め固め曲線

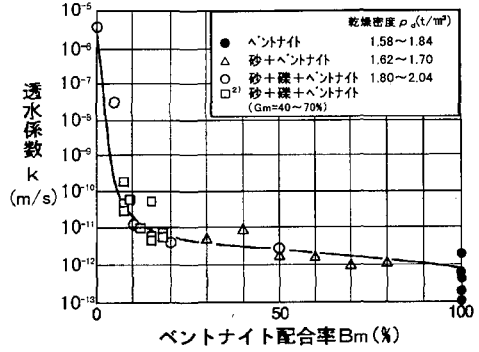


図-8 透水係数 k とベントナイト配合率 B_m の関係

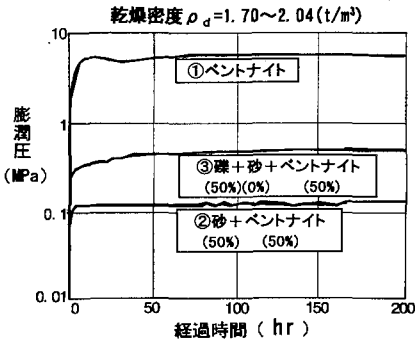


図-6 膨潤圧と経過時間の関係

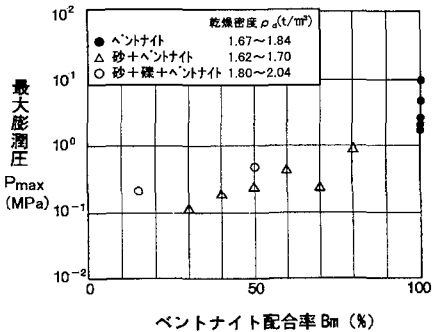


図-7 最大膨潤圧 P_{max} とベントナイト配合率 B_m の関係

e) 透水特性

図-8 に透水係数 k と B_m の関係を示す。通水圧は 0~0.7 (MPa) の範囲で透水試験を実施した。この図から、k は B_m の増加に伴って小さくなる傾向を示しており B_m=15% 以上で k=1×10⁻¹¹ m/sec 以下の難透水性を有している。また、k は B_m が 15% 以下では急激に大きくなっており、既往のベントナイト混合土^{4)~6)} に関する試験報告と同様の傾向が見られている。

f) シーリング材料の膨潤圧・透水係数の評価

シーリング材料の膨潤圧や透水係数はベントナイト混入率、礫混入率、乾燥密度、含水比によって変化するため、これらの要因を踏まえた指標を用いて統一的に評価する必要がある。これまで、砂・ベントナイトについて空隙中に占めるベントナイトの空隙比や密度によって評価する方法が提案されている^{6), 7)}。

そこで、今回礫と砂を除いたベントナイト部分の締め固め状態として式(2)に示す礫と砂を除いたベントナイトの乾燥密度 ρ_{dB} に関係していると考えて、以下の整理を行った。ρ_{dB} は、式(2)で表すことができる。

$$\rho_{dB} = \frac{W_B}{V_B + V_V} = \frac{B_m (\%) }{\frac{B_m (\%) }{G_B} + 100 \left(\frac{1}{\rho_d} - \frac{1}{G_s} \right)} \quad (2)$$

ここに、

- W_B : 混合土中のベントナイトの乾燥重量 (t)
- V_B : 混合土中のベントナイトの体積 (m³)
- V_V : 混合土中の空隙の体積 (m³)
- G_B : ベントナイトの土粒子の密度 (≒2.70 t/m³)
- G_s : 混合土の土粒子の密度 (t/m³)
- ρ_d : 混合土のみかけの乾燥密度 (t/m³)
- B_m : ベントナイト配合率 (%)

図-9 は、縦軸に P_{max} を横軸に ρ_{dB} をとって整理したものである。この図から今回の試験結果の範囲では log P_{max} と ρ_{dB} の関係は、式(3)に示すように良好な相関関係(相関関数 r=0.86)が得られており、P_{max} は G_m, B_m, W, ρ_d が変化しても ρ_{dB} を用いれば良好に整理できることが分かった。

$$P_{max} = 4.37 \times 10^{1.90} \rho_{dB}^{-1.0} \quad (3)$$

図-10 に同一の配合条件で求めたベントナイト混合材料の P_{max} と k の関係を示す。また、式(4)に両者の相関関係式を示す。

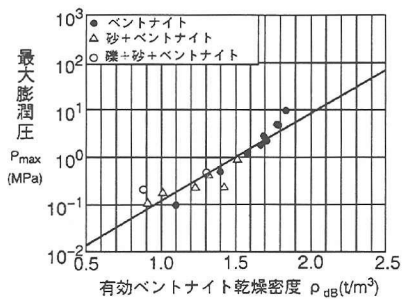


図-9 最大膨潤圧 P_{max} と有効ベントナイト乾燥密度 ρ_{dB} の関係

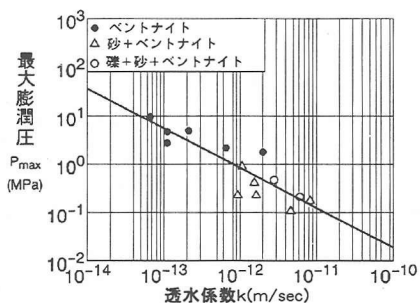


図-10 最大膨潤圧 P_{max} と透水係数 k の関係

$$P_{max} = 1.23 \times 10^{-10} k^{-0.82} \quad (4)$$

この図から、いずれの混合材料および配合条件であっても、 k は P_{max} の増加に伴って小さくなり、良好な相関関係が得られる。すなわち、高い P_{max} が発生するほど k は減少して遮水性は向上することから、 k も P_{max} と同様に礫と砂を除いたベントナイト部分の締固め状態に寄与していると考えられる。例えば、 P_{max} は $k = 1 \times 10^{-11} \text{ m/sec}$ のとき0.1MPa、 $1 \times 10^{-12} \text{ m/sec}$ のとき0.9MPa、 $1 \times 10^{-13} \text{ m/sec}$ のとき5.6MPa発生することが分かり、 P_{max} と k の関係を把握することができる。

したがって、シーリング候補材料(ベントナイト、砂・ベントナイト混合土、礫・砂・ベントナイト混合土)は、 B_m 、 ρ_d 、 G_B 、 G_S が分かれば、式(2)から ρ_{dB} を算出し、式(3)、(4)から膨潤圧や透水係数を予測できる。今後、これらからシーリングコンセプトを構築する上で、設計上の膨潤圧や透水係数に対する合理的な配合を設定できるものと考えられる。

(3) シーリングシステム

本報告で想定するシーリングシステムをアクセス立坑部(以下立坑部)を例として図-11に示す。シーリングシステムは、埋戻し材、プラグ、グラウトの3つの要素技術を組み合わせて構成される。

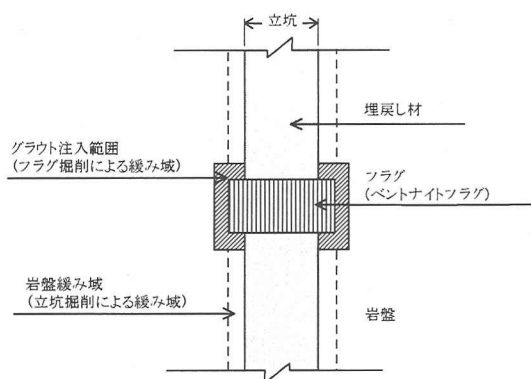


図-11 シーリングシステム概念図(立坑部)

a) 埋戻し材

埋戻し材は、掘削した空間のうち処分坑道に設置する廃棄体、緩衝材及びプラグ以外の空間を対象とし、候補材料としては低透水性を確保するためにベントナイト混合土を使用する。長期的に埋戻し部の低透水性を保持するためには、埋戻し材が所定の低透水性を保持すること及び埋戻し材と周辺岩盤部に隙間が極力生じないようにすることが重要である。

ベントナイト混合土におけるベントナイト配合率と透水係数の関係は図-8に示した通りである。本図に基づけば、ベントナイト配合率 $B_m = 15\%$ で 10^{-11} m/sec レベルの透水係数(試験室)が確保できることから、日本の平均的な岩盤の透水係数¹⁾と比較して性能評価の観点から求められる要求性能に十分応えられるものと予測できる。また、膨潤圧は図-7によると、 $B_m = 15\%$ で0.1MPa程度期待できることがわかる。

b) プラグ

プラグの主要目的は、以下の3項である。

- ① 掘削による岩盤緩み域や埋戻し材と周辺岩盤の境界部に沿って生じ得る水路の遮水
- ② 岩盤の破碎帯・割れ目と岩盤緩み域の水みちの連続性の遮水
- ③ シーリング完了部分の保護及びベントナイト混合土の膨潤によるはらみ出し防止(仮設的役割)

①、②については止水性能の確保が目的であるのでベントナイト系プラグ、③についてはプラグ自体が埋戻し材の膨潤圧に耐える強度が必要なことからコンクリート系プラグの採用が考えられる。①はシステムの基本となる事項であり、②は①の検討結果を基本としてサイト状況に対応して検討することになる。また③については仮設的役割である。以上より、本報告では①、②に着目して検討することとする。

り、本報告では①、②に着目して検討することとする。
①、②を換言すれば以下になる。

掘削によって発生が予想される岩盤緩み域に対してプラグを設置することにより緩み域における地下水流動の連続性を断ち、緩み域での核種移行遅延を期待する。

c) グラウト

グラウトの目的としては以下の①、②があげられるが、建設段階の工事対策(止水対策)の役割もあわせて考えると③が追加されることになる。

- ① プラグ周辺岩盤に生じ得る緩み域の低透水性の確保
- ② 予測しきれない破砕帯・割れ目及び弱部の透水性の改善
- ③ 建設段階の一時的な止水対策

①、②に対しては候補材料としてセメント系材料と粘土系材料があげられるが、天然材料であり、一般的地下環境下で万年オーダー以上の安定性が期待できる粘土系材料を採用することが適切であると考えられる。一方、③建設段階の止水対策に対してはセメント系材料の採用も十分考えられる。

表-3にグラウトに関する現状技術レベルと処分場に要求される性能すなわち開発目標を示す。

現在、土木工事で使われているグラウトは、セメント系材料の使用が一般的であり、粘土系材料はほとんど使用されていない。セメントグラウトによる岩盤の改良目標も透水係数で $k=10^{-7} \text{m/sec}$ 程度になっている。今後、処分場に粘土グラウトを適用するためには $k=10^{-8} \sim 10^{-9} \text{m/sec}$ 以下の岩盤の難透水性を確保できる技術開発が重要課題としてあげられる。

本研究の一環として実施した釜石鉱山における粘土系グラウトの原位置試験では $k=10^{-6} \sim 10^{-7} \text{m/sec}$ の岩盤の透水性を $k=10^{-8} \sim 10^{-9} \text{m/sec}$ まで改良可能との見通しが得られている⁸⁾。

4. 性能評価

(1) シーリングシステムと安全評価の関係

処分場の安全性は放射性核種の移行経路に支配され、シーリングシステムは放射性核種の人工バリア中及び岩盤中の移行経路に対応して考えることが重要である。地上への核種移行経路として卓越する部分は前述の通り次の2ルートが支配的になると考えられる。

表-3 グラウトの開発目標

項目	処分場に適用するための開発目標	現状技術レベル
透水係数	母岩と同程度 $10^{-8} \sim 10^{-9} \text{m/sec}$ 以下	セメントをベースにして 10^{-7}m/sec
強度	期待しない	設計のパラメータはない
熱伝導率	母岩(花崗岩・玄武岩)と同程度 $6 \times 10^{-3} \text{°C}$	コンクリートについては $6 \sim 20 \times 10^{-3} \text{°C}$ 他材料については未確定
弾性	クラックの発生を防ぐ	セメントベース:クラックが生じやすい 粘土ベース:クラックが生じにくい
長期耐久性	評価地点の核種濃度がピークになるまでの時間以上の耐久性が望ましい。 $10^5 \sim 10^6$ 年以上	100年以上のデータはない
化学的安定性	地下水の化学的性質に対して安定している	仮設的な扱いであれば問題は少ないが本設の場合、セメントの溶出・流れ出し等の課題は残されている
候補材料	長期耐久性の観点から粘土系材料が望ましい	セメント系材料が中心

- ① 岩盤中に元来存在する地下水の水みちとなる部分
 - ・破砕帯・割れ目
- ② 処分場建設に伴い、地下水の新たな水みちとなる可能性がある部分
 - ・坑道掘削に伴って生じる緩み域
 - ・岩盤と埋戻し材料の境界部分

処分場が破砕帯・割れ目のない地点に建設される場合、図-12に示すように放射性核種の移行経路は人工バリア中の透水性の大きい部分及び掘削に伴う岩盤の緩み部分となる。

一方、処分坑道周辺の岩盤中に地上まで到達する破砕帯・割れ目が存在する場合は、図-13に示すように処分坑道から立坑を通り破砕帯・割れ目に到達後直ちに地上へ漏洩する経路か、岩盤を通過後破砕帯に遭遇し直ちに地上へ漏洩する経路が考えられる。

日本の地質の特徴を考えた場合、破砕帯・割れ目の存在は避けられないものと判断され、破砕帯・割れ目を考慮したシーリングシステムを構築するのが現実的対応と考えられる。

本検討では、性能評価の観点からプラグ・グラウトの効果を評価し合理的なシーリングシステムを構築するための基礎検討を実施する。

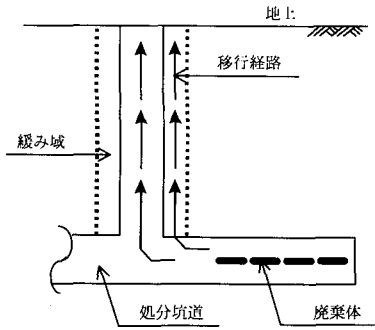


図-12 破砕帯・割れ目がない場合の核種移行経路

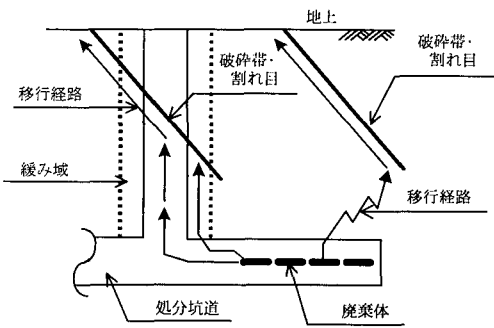


図-13 破砕帯・割れ目がある場合の核種移行経路

(2) 核種移行解析

核種の移行経路になると想定される立坑部について、プラグあるいはグラウトの効果を定量的に把握するために、移流効果、拡散効果、核種吸着効果及び核種自身の崩壊・減衰を考慮した核種移行解析を行い、評価点での核種濃度の時間変化について検討する。

a) 解析手法⁹⁾

解析は有限要素法による3次元・水理・核種移行解析コード FEMCOUP/MIGRATION を用いて実施した。以下にその概要を示す。

$$S \frac{\partial H}{\partial t} = \nabla(k \cdot \nabla)H + Q \quad (5)$$

$$U = -(k \cdot \nabla)H / \theta \quad (6)$$

ここに、 S : 貯留係数 [1/L]
 H : 全水頭 [L]
 k : 透水係数 [L/t]
 Q : 湧水及び給水割合 [L³/L³t]
 U : 地下水流速 [L/t]

θ : 間隙率 [-]

式(5)により水頭 H を求め、式(6)により地下水流速が求められる。

一方、核種移行の支配方程式は、移流拡散、核種自身の崩壊、親核種からの崩壊、浸出率を考慮に入れて、式(6)で得られた地下水流速を用いて、次式で表される。

$$\theta R_m \frac{\partial C_m}{\partial t} + \theta(U \cdot \nabla)C_m = \theta \nabla \cdot (D_L \nabla C_m) - \theta R_m \lambda_m C_m + \theta R_{m-1} \lambda_{m-1} C_{m-1} + F_m \quad (7)$$

ここに、 $R_m = 1 + K_{dm} \rho(1 - \theta) / \theta$ (8)

$$D_L = \alpha_L \cdot V_d + D \quad (9)$$

R_m : 第 m 番目の核種の遅延係数 [-]

R_{m-1} : 第 $m-1$ 番目の核種の遅延係数 [-]

K_{dm} : 第 m 番目の核種の分配係数 [L³/M]

C_m : 第 m 番目の核種濃度 [M/L³]

C_{m-1} : 第 $m-1$ 番目の核種濃度 [M/L³]

D_L : 分散係数 [L²/t]

α_L : 分散長(漏洩点と評価点との距離の10%を想定) [L]

V_d : ダルシー流速 [L²/t]

D : 拡散係数 [L²/t]

λ_m : 第 m 番目の核種の崩壊定数 [1/t]

F_m : 核種放出率 [M/L³t]

m : 核種番号 ($m=1, 2, 3, 4, 5$) [-]

ρ : 真の密度 [M/L³]

なお、ここでの F_m :核種放出率とは、いわゆるガラス固化体の溶解速度や核種の溶解度によって規定するものではなく、解析上の仮定として、人工バリアから溶出した核種が核種漏洩点(図-14参照)において立坑へ流出する割合を想定したものである。また、本解析においては崩壊連鎖を考慮しないため、式(7)中の $\theta R_{m-1} \lambda_{m-1} C_{m-1}$ の項は無視される。

以上の水理に関する支配方程式と核種移行に関する支配方程式を有限要素法を用いて解析し(ただし、本報告では親核種からの崩壊は考慮しない)、地下水流速と核種濃度分布を求める。

b) 解析用物性値

1) 解析に用いた核種

地層処分システムの性能評価において重要とされている核種のうち、比較的半減期の長い代表的な核種である Np-237(半減期 2,140,000 年)を用いて例示的に評価した。

2) 解析用物性値

表-4に解析に使用した物性値を整理する。

解析上重要なパラメータとなる岩盤部透水係数は

表-4 解析用物性値

	透水係数 (m/s)	真の密度 (t/m ³)	間隙率	分配係数 (m ² /kg)	拡散係数 (m ² /sec)
岩盤 (健全部)	10 ⁻⁸	2.7	0.01	0.001	5 × 10 ⁻¹⁰
岩盤 (緩み領域)	10 ⁻⁶	2.7	0.05	0.001	5 × 10 ⁻¹⁰
岩盤 (グラウト部)	10 ⁻⁷	2.7	0.05	0.001	5 × 10 ⁻¹⁰
プラグ	10 ⁻¹¹	2.0	0.4	0.16	5 × 10 ⁻¹¹
埋戻し材	10 ⁻⁹	2.0	0.3	0.16	5 × 10 ⁻¹¹

日本の標準的な岩盤を想定し、10⁻⁸ m/sec オーダーとした¹⁾。また、掘削による緩み領域部は健全な岩盤より透水係数が2オーダー大きくなり、さらにグラウトで改良することにより1オーダー透水係数が小さくなるものと仮定した。また埋戻し材の透水係数はベントナイト配合率 Bm=15%のベントナイト混合土を想定し、k=10⁻⁹ m/sec とした。また、プラグについては100%ベントナイトとし、k=10⁻¹¹ m/sec と設定した。

その他の物性値は参考文献1)を準用している。

c) 解析モデル

解析上の核種漏洩点は埋戻し部下端、岩盤緩み域下端、岩盤健全部下端の3点が考えられる。透水性の観点から岩盤緩み域の下端から漏洩した場合がクリティカルパスになると予測されることから、図-14に示す通り核種漏洩点を岩盤緩み域下端に設定した。また、解析上は核種漏洩点から以下の理由より図-15に示すように一定量の核種を永続的に浸出させた。

- ① 解析の目的が施設の安全評価ではなく、埋戻し・プラグ・グラウトからなるシーリングシステムの有効性を確認することである。
- ② ガラス固化体からの核種の浸出は長期間にわたる。
- ③ 処分場には万本オーダーの廃棄体が処分され、それぞれの廃棄体から漏洩した核種が立坑下端の漏洩点に到達するには時間差が生じる。

モデルは軸対称モデルとした。また、解析領域はケースに応じて異なるが核種漏洩点と評価点(破碎帯)との距離(L₁)と横方向の距離(L₂)の比が2:1~1:1の範囲とした(図-14参照)。

d) 解析ケース

核種の漏洩点はそれぞれ立坑の最下点とし、立坑の長さは割れ目・破碎帯が立坑を横切るように存在

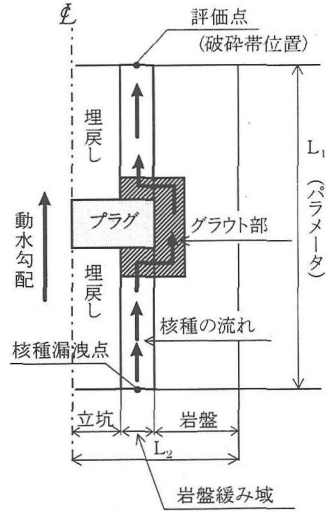


図-14 核種漏洩点と核種の流れ

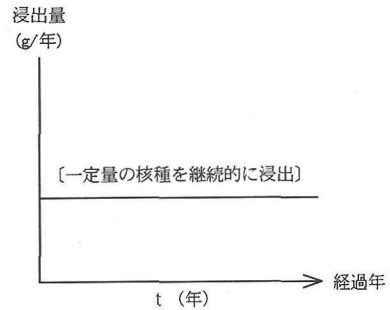


図-15 核種漏洩点からの核種浸出量

すると仮定した上で核種漏洩点と割れ目・破碎帯間の距離をパラメータ*とした。プラグの効果を確認するために、立坑にプラグがある場合とプラグがない場合についての解析を、またグラウトの効果を確認するためにグラウト部の透水係数を k=10⁻⁷ m/sec の場合と k=10⁻⁸ m/sec の場合について解析を実施した。

* 処分場建設地点は大きな割れ目・破碎帯が存在しないような地点を選定すると考えられるが、地下1,000 mまですべて均質であり割れ目・破碎帯もないとは考えにくい。図-13に示したように、立坑を割れ目・破碎帯が横切った場合、核種は割れ目・破碎帯を通じて直ちに地上に到達するという考え方に基づいている。

表-5 見掛けの透水係数

廃棄体と割れ目・破砕帯距離	見掛けの透水係数 K_0 (m/s)	緩み域の透水係数 K_n (m/s)	グラウト部の透水係数 K_g (m/s)
50 m	0.52×10^{-6}	10^{-6}	10^{-7}
1000 m	0.96×10^{-6}	10^{-6}	10^{-7}

e) 解析結果と考察

図-16~19は廃棄体と評価点(割れ目・破砕帯)との距離をパラメータとした場合の評価点での核種濃度の経時変化を示す。本研究は、プラグの効果を考察するためのものであり、核種を定常に浸出させて、プラグの効果がなくなる時期を求めようとして、結果的に500万年程度計算した。縦軸は核種濃度に相当し、500万年後の濃度で規格化している。これらの結果をもとに、シーリングコンセプトについて考察する。

① 動水勾配とプラグ効果の関係

図-16は廃棄体と割れ目・破砕帯との距離(L_1)が100mであり、その間にプラグが2個設置された場合の解析結果である。図には、水理場の動水勾配(i)が $i=10^{-2}$ 、 $i=10^{-5}$ の場合を示している。動水勾配が小さい場合、水理場は拡散場となるため核種移行における移流効果は相対的に小さくなり、プラグによる核種移行遅延効果は少ない。すなわちプラグは動水勾配の大きい場合に効果的といえる。

② 廃棄体と割れ目・破砕帯との距離

図-17は廃棄体と割れ目・破砕帯との距離が50mの場合、図-18は1,000mの場合の解析結果である。両図を比較すると50mの方がプラグを設置することによる核種移行の遅延効果が大きいことが判る。核種の移行経路となる緩み域の見掛けの透水係数は概略、

$$K_0 = \frac{L}{K_g X_n + K_n X_g} \cdot K_g K_n \quad (10)$$

で表現できる。(ここに、 K_0 ；見掛けの透水係数、 K_g ；グラウト部の透水係数、 X_g ；グラウト部の長さ、 X_n ；緩み領域の長さ、 L ；核種漏洩点と割れ目・破砕帯との距離 [$L = X_g + X_n$])

前述した動水勾配とプラグ効果の関係によれば、プラグは水理場が移流場の方が効果が大きく、移流場であれば透水係数の影響が相対的に大きくなる。式(10)によればプラグ個数1個の場合、評価距離50m、1000mでは見掛けの透水係数は表-5になる。

表-5によれば、1000mの場合、見掛けの透水係数は緩み域の透水係数とほぼ同程度であり、

50mの場合ほどプラグ設置の効果は著しくない。一方、核種の移行そのものは、当然、廃棄体と割れ目・破砕帯との距離が長い方が抑制される。それは図-16と図-17を比較すると明らかのように評価距離が1000mの場合、漏洩開始後、長期間経過しないと評価点には核種は浸出していないことがわかる。すなわち、シーリングコンセプトを考える上では、廃棄体と割れ目・破砕帯との距離が短い場合にはプラグの存在が重要になり、一方、長い場合には立坑・坑道が適当な品質で埋戻しさえすればプラグの個数が少なくても要求品質に対応できると想定される。

③ グラウト効果

プラグを設置するために立坑の一部を拡幅するが、拡幅によって生じ得る岩盤緩み域に対するグラウトの効果も考察する。図-19は廃棄体と割れ目・破砕帯の距離が100mであり、その間にプラグが1個設置される場合である。この図より、例えば核種濃度が 10^{-4} になる年数はプラグがない場合で2,000年、プラグがあり周囲の緩み域のグラウト部の透水係数が 10^{-7} m/secの場合が6,000年、 10^{-8} m/secの場合が8,000年となっている。①で述べたように核種移行を遅延させるためには地下水流速の低減が効果的であり、プラグ周辺のグラウトは確実に実施する必要があると言える。

④ プラグ設置密度

廃棄体と破砕帯との間に設置されるプラグの個数について、廃棄体と破砕帯の距離100mの場合を対象として考察する。

図-20によれば、例えば核種濃度が 10^{-4} になる時間に注目すると、プラグのない場合で2,000年、プラグが1個設置された場合が6,000年、プラグが2個設置された場合が8,000年になる。プラグが設置されることにより遅延効果は認められるが、核種移行遅延効果はプラグ個数の増加に比例した向上は望めない。プラグ設置による核種移行遅延効果は、

- ・地下水流速が小さくなり分散係数が小さくなること

- ・ベントナイトプラグに核種が吸着することにより現れる。2個目のプラグを設置しても1個目ほど顕著に遅延しないのはプラグ設置による見掛けの透水係数の減少量は式(10)に示したように線形関係にはならないことによる。すなわち、見掛けの透水係数とプラグ個数は反比例の関係になりプラグ個数が増加するにつれてその効果は漸減すると言える。しかし、当然なこ

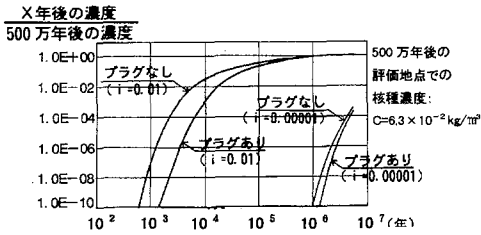


図-16 核種濃度変化図 (1) $L_1=100\text{m}$, $i=10^{-2}$, $i=10^{-5}$ (プラグ2個)

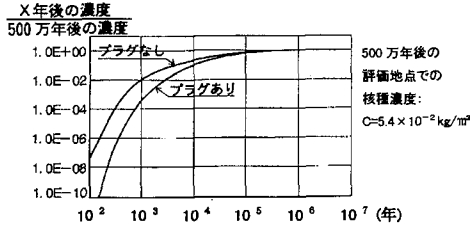


図-17 核種濃度変化図 (2) $L_1=50\text{m}$, $i=10^{-2}$ (プラグ1個)

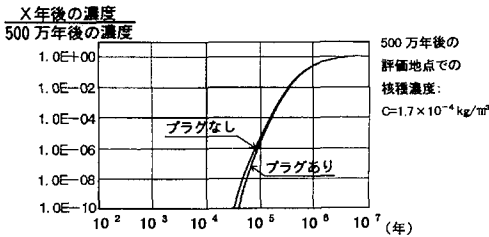


図-18 核種濃度変化図 (3) $L_1=1,000\text{m}$, $i=10^{-2}$ (プラグ1個)

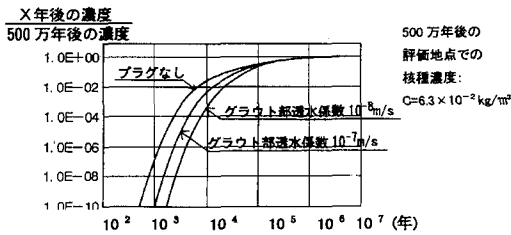


図-19 核種濃度変化図 (4) $L_1=100\text{m}$, $i=10^{-2}$ (プラグ1個)

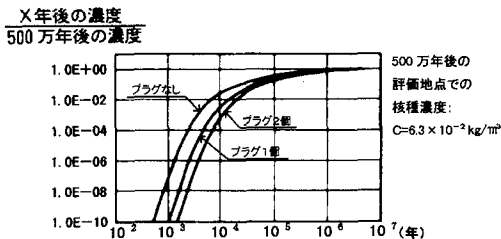


図-20 核種濃度変化図 (5) $L_1=100\text{m}$, $i=10^{-2}$ (プラグ1個及び2個)

とながら水理場の状況や核種のベントナイトに対する分配係数の値によっては、複数のプラグが必要になる可能性は十分にあると言える。

5. 合理的なシーリングシステムの提案

高レベル廃棄物が数百m以深の深地層に処分された場合、シーリングシステムは廃棄体から核種移行速度が急激に大きくなる破砕帯・割れ目までの距離(換言すれば評価点までの距離)に対応させて検討することが重要である。

① 廃棄体と評価点までの距離が長い場合

処分場周辺の岩盤が極めて健全で処分坑道付近から地上に通ずる透水性の大きい破砕帯・割れ目が存在しない場合(図-21 参照)、核種の移行経路はシーリング部が卓越すると考えられる。この場合には、廃棄体と地表の距離が数百m以上あり、前節②の議論よりプラグの設置効果は小さくなる傾向にある。そこで、立坑シーリング部(図-21 中■の部分)は

- ・立坑部掘削時に機械掘削等を利用し岩盤の緩みを極力抑制すること
- ・埋戻し材料の透水係数を母岩程度まで小さくすること
- ・埋戻し材料として膨潤特性を有し、埋戻し部と周辺岩盤部の隙間を充填できる材料を選定すること

により、プラグを設置しなくても核種移行遅延性は確保されると判断できる。また、立坑部は埋戻し材料の自重で締め固まる傾向にあるので埋戻し材料が変質しなければ核種移行遅延性は長期的にも維持できると考えられる。

② 廃棄体と評価点までの距離が短い場合

処分坑道周辺岩盤中に核種移行速度を急激に大きくするような破砕帯・割れ目が存在する場合には、廃棄体から破砕帯・割れ目までの距離(例えば100m:図-22のボカシ部分)で処分場の長期安全性を担保するというケースもある。この場合、核種の移行経路となりうる岩盤の緩み域の発生を極力抑制することが重要であるが、それでも発生する緩み域に対しては低透水性(拡散効果が移流効果より卓越)を確保するために、図-22 ■の部分に対してプラグの設置やグラウトを確実に実施し、健全岩盤部と同等の核種移行遅延性を持たせることが重要となる。

今後、さらに廃棄体中の重要核種に対し、図-22のボカシ部外縁部までの移行時間と放射能濃度を評価することによってシーリングコンセプトの有効性

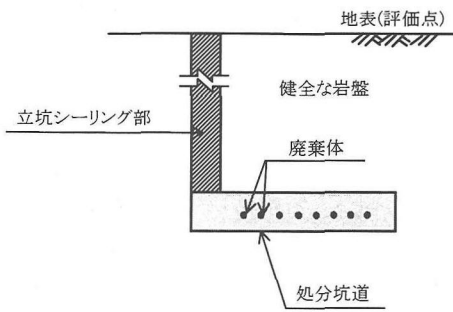


図-21 シーリング概念(その1) [岩盤が極めて健全で廃棄体と評価点までの距離が長い場合]

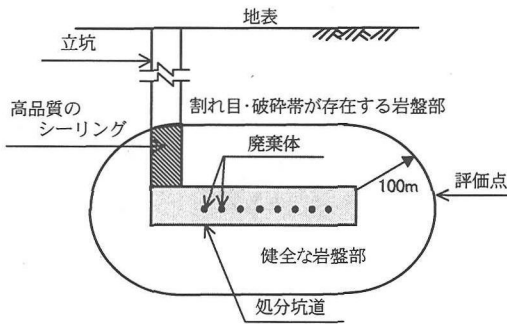


図-22 シーリング概念(その2) [割れ目・破砕帯が存在し、廃棄体と評価点までの距離が短い場合]

を評価していく予定である。

本研究は動力炉・核燃料開発事業団からの受託研究として実施したものであり、御指導頂いた関係各位に深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) 動力炉・核燃料開発事業団：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—, 平成4年9月
- 2) 田中俊行, 深沢栄造, 平和男, 須山泰宏：人工地盤構築材料の開発(その3), 鹿島技術研究所年報, Vol. 43, 1995. 12.

- 3) Pusch, R. :Swelling pressure of highly compacted bentonite, SKBF/KBS Technical report 80-30, 1980.
- 4) Kenney, T. C. , van Veen, W. A. , Swallow, N. A. and Sungaila, M. A. :Hydraulic conductivity of compacted bentonite-sand mixtures, Can. Geotech. J. , 29(3), 1992.
- 5) 谷澤房郎, 今村聡, 阿部聡, 古賀善雄, 後藤聡：ベントナイト, 砂混合土の透水特性, 土木学会第48回年次講演会, 1993. 9.
- 6) 緒方信英, 小峯秀雄：ベントナイト-砂混合材料の透水係数に関する一考察, 第29回地盤工学研究発表会, 1994. 6.
- 7) Graham, J. , Sun, B. , Gray, M. N. and Dixon, D. A. :Strength and Volume Change Characteristics of a Sand-Bentonite Buffer, Proc. 2nd Conf. on Radioactive Waste Management, Canadian Nuclear Society, 1986.
- 8) 杉田裕, 藤田朝雄：原位置における粘土グラウト試験, 第27回岩盤力学に関するシンポジウム, 1996. 4
- 9) Saotome, A. , Hara, K. and Okamoto, J. : Study of the Performance of Sealing Systems for Access Shafts in a HighLevel Waste Repository, Materials Research Society Symp. Proc. Vol. 294, 1993.
- 10) 原子力委員会：原子力の研究, 開発及び利用に関する長期計画, 1994. 6.
- 11) SKB :Final Storage of Spent Nuclear Fuel, KBS3, 1983.
- 12) SKB :Final Disposal of Spent Nuclear Fuel, Importance of the Bedrock for Safety, SKB Technical Report 92-20 (SKB91), 1992.
- 13) AECL :Environmental Impact Statement on the Concept for Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste, 1994. 9.
- 14) NAGRA :Project Gewähr, 1985.
- 15) NAGRA :Safety Assessment Report (kristallin-1), Technical Report 93-22, 1994.

(1997. 4. 1 受付)

A STUDY OF THE SEALING CONCEPT OF HIGH LEVEL RADIOACTIVE WASTE REPOSITORY

Mitsuaki FURUICHI, Kazuo OKUTSU, Toshiyuki TANAKA
and Kenji TANAI

The construction of a high level radioactive waste repository is commenced, by the steps of site characterization survey, design, construction, operation and sealing after the disposal site is selected. The required technologies of sealing are backfill, plugging and grouting. Upon composing of the sealing concept, it is important to rationally combine these technologies. This report made an evaluation on the performance of the element technologies for sealing from the view point of radioactive nuclide migration. As the result, we indicated that the plugging and grouting are effective for sealing against the disturbed zone, cracks, etc., of rockbed which increase the migration speed of the radioactive nuclide, and we proposed the main points of the sealing concept.