JAEA-Research
2007-020

JP0750174

JAEA-Research

圧縮成型ベントナイトの透水係数に及ぼす $NaNO_3$ 濃度の影響

Effect of the Concentration of $NaNO_3$ Solution on Hydraulic Conductivity of Compacted Bentonite

三原 守弘　小林 一三*

Morihiro MIHARA and Ichizo KOBAYASHI*

地層処分研究開発部門
TRU廃棄物処分研究グループ

TRU Waste Disposal Research Group
Geological Isolation Research and Development Directorate

March 2007

Japan Atomic Energy Agency　日本原子力研究開発機構

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

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

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

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2007

JAEA-Research 2007-020

圧縮成型ベントナイトの透水係数に及ぼす $NaNO_3$ 濃度の影響

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
三原　守弘、小林　一三*

(2007年1月19日受理)

使用済み燃料の再処理の過程で発生するＴＲＵ廃棄物の中には、硝酸塩を多量に含む廃棄物も存在する。この廃棄物の地下深部への処分を想定した場合、処分施設の構成材料として、核種の漏洩を遅延させるために、低透水性の圧縮成型ベントナイトの使用が考えられる。廃棄物中の硝酸塩（主として硝酸ナトリウム）は、地下水に対して可溶性なため処分施設周辺の地下水が高イオン濃度となる可能性があり、硝酸ナトリウムの圧縮成型ベントナイトの透水係数に及ぼす影響を評価しておく必要がある。本研究では、圧縮成型ベントナイトの乾燥密度を $1.8Mg/m^3$ として通液の硝酸ナトリウムの濃度を変化させて測定し、硝酸ナトリウム濃度が透水係数に及ぼす影響について実験的に調査を行なった。

通液の硝酸ナトリウムの濃度が高くなるにともない圧縮成型ベントナイトの透水係数が大きくなった。透水係数の増加は、硝酸ナトリウム濃度が 0～2mol/L までは著しいが、2mol/L を超えてもほとんど変化しなかった。高塩濃度においても、処分施設内の地下水の移動を抑制するための透水係数の性能目標値 $10^{-11}m/s$ を下回った。乾燥密度を大きくすると、通液の塩濃度の影響を受けにくくなることが示された。硝酸ナトリウム水溶液の濃度がベントナイトの透水係数に及ぼす影響のうち、硝酸ナトリウム水溶液の粘性率の影響は小さいことが確認された。

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
*:鹿島建設株式会社　技術研究所

Effect of the Concentration of $NaNO_3$ Solution on Hydraulic Conductivity of Compacted Bentonite

Morihiro MIHARA and Ichizo KOBAYASHI*

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

(Recevied January 19, 2007)

One of the TRU waste generated from reprocessing process of spent nuclear fuel includes lots of nitrate. Considering deep under ground disposal of this waste, the compacted bentonite that has the very low hydraulic conductivity will be used as one of the engineered barrier to restrict the nuclide migration from the repository. Nitrates of the waste are soluble in groundwater and it might cause the high ionic condition around the repository. It is necessary to evaluate effect of nitrate on the hydraulic conductivity of compacted bentonite. In this study, the dependence of hydraulic conductivity of the compacted bentonite that was 1.8 Mg/m^3 of the dry density on sodium nitrate concentration was investigated experimentally.

The enhancement of hydraulic conductivity was observed using sodium nitrate solution of high concentration. The enhancement of 0 - 2mol/L of the nitrate concentration was significantly high. In the solution of > 2mol/L nitrate, the hydraulic conductivities were hardly changed. The hydraulic conductivities using the sodium nitrate solution of high concentration, >2mol/L, were less than 10^{-11}m/s which was required value in the repository to restrict the ground water flow. It was showed that the effect of nitrate concentration of solution on the hydraulic conductivity of the highly compacted bentonite was small. It was found that the effects of the viscosity of nitrate solution were small.

Keywords: $NaNO_3$ Solution, Hydraulic Conductivity, Compacted Bentonite, TRU Waste

*:Technical Research Institute, KAJIMA Corporation

目　次

1.　はじめに..... 1
2.　試験概要..... 2
2.1　使用材料と乾燥密度..... 2
2.2　通液組成..... 2
2.3　静的締固めによる供試体の作製方法..... 3
2.4　通水圧の設定..... 4
2.5　透水試験方法..... 5
3.　試験結果及び考察..... 7
3.1　各通液における圧縮成型ベントナイトの透水係数..... 7
3.2　水みちの有無の確認..... 13
3.3　圧縮成型ベントナイトの透水係数の硝酸ナトリウム濃度依存性..... 16
3.4　圧縮成型ベントナイトの固有透過度への硝酸ナトリウム濃度の影響..... 18
4.　まとめ..... 21
参考文献..... 22
付録..... 23

CONTENTS

1.　Introduction 1
2.　Experiments 2
2.1　Bentonite and compacted density 2
2.2　$NaNO_3$ concentration of solution 2
2.3　Preparation method of compacted bentonite 3
2.4　Pressure of hydraulic conductivity test 4
2.5　Method of hydraulic conductivity test 5
3.　Results and discussions 7
3.1　Hydraulic conductivities of compacted bentonite 7
3.2　Observation of solution flow path 13
3.3　Dependences of hydraulic conductivities on $NaNO_3$ concentration 16
3.4　Effects of $NaNO_3$ concentration on permeability 18
4.　Conclusion..... 21
Reference..... 22
Appendix..... 23

This is a blank page.

図 目 次

図－１　透水試験装置と通水飽和方法の概要図 3
図－２　透水試験供試体作製フロー 4
図－３　膨潤圧試験装置 5
図－４　膨潤圧試験結果（$NaNO_3$濃度 3mol/L） 5
図－５　透水試験実験手順 6
図－６　動水勾配の変化による透水係数の変化 8
図－７　透水係数の経時変化(0mol/L、蒸留水) 8
図－８　透水係数の経時変化(0.1mol/L) 9
図－９　透水係数の経時変化(0.3mol/L) 9
図－１０　透水係数の経時変化(0.6mol/L) 10
図－１１　透水係数の経時変化(2mol/L) 10
図－１２　透水係数の経時変化(3mol/L) 11
図－１３　透水係数の経時変化(6mol/L) 11
図－１４　水みち形成の有無の確認方法 15
図－１５　硝酸ナトリウムの濃度がベントナイトの透水係数に及ぼす影響 16
図－１６　各溶液がベントナイトの透水係数に及ぼす影響 17
図－１７　蒸留水の透水係数に対する比の塩濃度依存性 18
図－１８　硝酸ナトリウム水溶液の粘性率 19
図－１９　硝酸ナトリウム水溶液の濃度がベントナイトの固有透過度に及ぼす影響 20

表 目 次

表－１　クニゲル V1 の物性値一覧 2
表－２　硝酸ナトリウム濃度 3
表－３　膨潤圧試験の試験ケースと供試体の諸元 4
表－４　各硝酸ナトリウム濃度における透水係数 7
表－５　各硝酸ナトリウム濃度における固有透過度 19

写 真 目 次

写真－１　水みち形成の有無の確認状況　(3.0mol/L) 13

LISTS OF TABLE

Table－1 Properties of Kunigel V1 2
Table－2 Concentration of $NaNO_3$ 3
Table－3 Conditions of swelling pressure test and size of compacted bentonite . 4
Table－4 Hydraulic conductivities with each $NaNO_3$ concentration 7
Table－5 Permeability with each $NaNO_3$ concentration 19

LISTS OF FIGURE

Figure－1 Schematic view of hydraulic test and saturation method 3
Figure－2 Flow of preparation of compacted bentonite 4
Figure－3 Schematic view of swelling pressure test 5
Figure－4 Results of swelling test ($NaNO_3$ concentration 3mol/L) 5
Figure－5 Flow of hydraulic conductivity test 6
Figure－6 Effect of hydraulic gradients on hydraulic conductivity 8
Figure－7 Time dependency of hydraulic conductivity(0mol/L, Distilled water) . 8
Figure－8 Time dependency of hydraulic conductivity(0.1mol/L) 9
Figure－9 Time dependency of hydraulic conductivity(0.3mol/L) 9
Figure－10 Time dependency of hydraulic conductivity(0.6mol/L)..... 10
Figure－11 Time dependency of hydraulic conductivity(2mol/L) 10
Figure－12 Time dependency of hydraulic conductivity(3mol/L) 11
Figure－13 Time dependency of hydraulic conductivity(6mol/L) 11
Figure－14 Method of observation of water flow path 15
Figure－15 Effects of $NaNO_3$ concentration on hydraulic conductivity 16
Figure－16 Effects of various solution on hydraulic conductivity 17
Figure－17 Dependence of ratio for hydraulic conductivity with distilled on $NaNO_3$ concentration 18
Figure－18 Viscosity of $NaNO_3$ solution 19
Figure－19 Effects of $NaNO_3$ concentration on permeability 20

LISTS OF PHOTO

Photo－1 Observation of water flow path(3.0mol/L) 13

1. はじめに

使用済み燃料の再処理の過程で発生するＴＲＵ廃棄物の中には、硝酸塩を多量に含む廃棄物も存在する[1)]。この廃棄物の地下深部への処分を想定した場合、処分施設の構成材料として、核種の漏洩を遅延させるために、低透水性の圧縮成型ベントナイトの使用が考えられる。廃棄物中の硝酸塩（主として硝酸ナトリウム）は、地下水に対して可溶性なため処分施設周辺の地下水が高イオン濃度となる可能性があり、硝酸ナトリウムの圧縮成型ベントナイトの透水係数に及ぼす影響を評価しておく必要がある。

この影響を評価するために、硝酸ナトリウムを考慮した模擬地下水による圧縮成型ベントナイトへの影響に関する研究が実施されている[2, 3, 4)]。これらの研究においては、硝酸ナトリウム濃度が 1mol/L を超えるような高濃度になると圧縮成型ベントナイトの透水係数が 10^{-12}m/s から 10^{-10}m/s 以上と大きくなる可能性が指摘されている[3)]。現状、ＴＲＵ廃棄物の地層処分施設の設計において、処分施設内の地下水の移動を抑制するために圧縮成型ベントナイトの性能目標値として、透水係数 10^{-11}m/s 以下[1)]を設定している。高濃度の硝酸ナトリウムの影響を考慮した場合、地下水の移動を抑制できない可能性がある。このため、ベントナイトの成型密度などの仕様を変更させることにより処分施設の設計を行なう必要がある。

本研究では、既報の研究で対象にされた圧縮成型ベントナイトの乾燥密度より高い条件において、通液の硝酸ナトリウム濃度を変化させて、透水係数を測定し、硝酸ナトリウム濃度が透水係数に及ぼす影響について実験的に調査を行なった。

2. 試験概要

2.1 使用材料と乾燥密度

本研究で用いたベントナイトは、既報[2,3,4]で研究対象とされている国産のナトリウム型ベントナイト（商品名：クニゲルＶ１、クニミネ工業社製、山形県月布地方産）である。クニゲル V1 の物性値を表－１に示す。既報においては、このベントナイトにケイ砂を 30wt.%混合させ、乾燥密度 1.6Mg/m^3 としているが、より低い透水係数を得るために、ケイ砂を混合せずに、乾燥密度を 1.8Mg/m^3 とした。

表－１　クニゲル V1 の物性値一覧

物性値		数値	備考
土粒子密度		2.733Mg/m^3	【JGS0111-2000：地盤工学会基準　土の粒度試験方法】[5]に準拠
メチレンブルー吸着量		77mmol/100g	日本ベントナイト工業会標準試験法：　ベントナイト(粉状)のメチレンブルー吸着量測定方法、JBAS-107-91、1991に準拠 100%スメクタイト：140mmol/100g
液性限界		28.5%	【JGS0141-2000：地盤工学会基準　土の液性限界、塑性限界試験方法】[5]に準拠
塑性限界		474.7%	
塑性指数		446.3	
浸出陽イオン	Ca^{2+}	45.9meq/100g	【土壌環境分析法第Ｖ．７】[6]に準拠
	Mg^{2+}	3.6meq/100g	
	K^{+}	2.0meq/100g	
	Na^{+}	60.8meq/100g	
陽イオン交換容量		70.8 meq/100g	
粒度組成	最大粒径	0.075 mm	【JGS0131-2000：地盤工学会基準　土の粒度試験方法】[5]に準拠
	礫分(%)	0.0	
	砂分(%)	0.0	
	シルト分(%)	13.2	
	粘土分(%)	86.8	

2.2 通液組成

透水試験で使用した通液は、硝酸ナトリウムの濃度をパラメータとした水溶液とした。硝酸ナトリウムの飽和濃度を考慮して最大 6mol/L として、0～6mol/L の間で７点とした。設定した硝酸ナトリウムの濃度を表－２にまとめる。

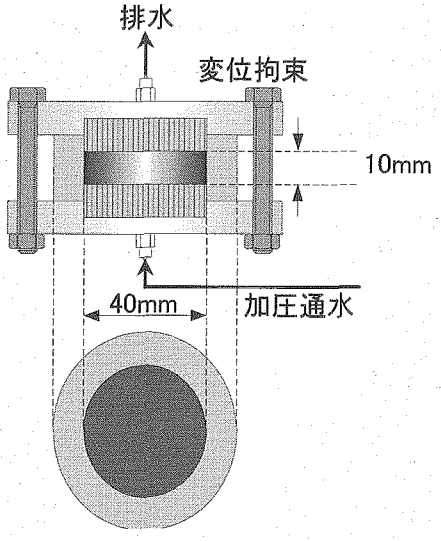
表－2　硝酸ナトリウム濃度

硝酸ナトリウム溶液　7濃度
0※、0.1、0.3、0.6、2.0、3.0、6.0mol/L

※蒸留水

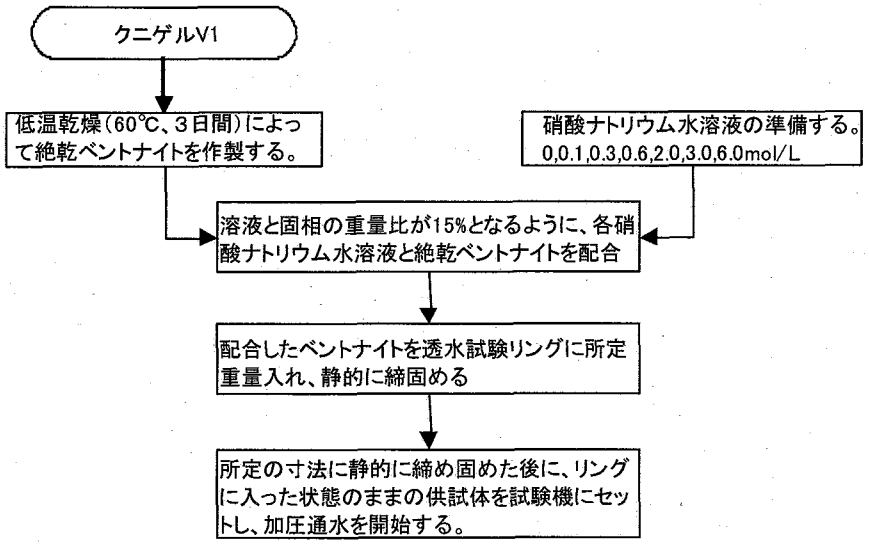
2.3　静的締固めによる供試体の作製方法

本研究で用いた透水試験装置はリング状であり、供試体の半径方向の変位を許容しない構造である。仮に供試体を試験装置リングの外部で作製し、これを改めて試験装置内に設置する場合、リングと供試体の摩擦によって供試体側部に乱れを与える可能性が高い。よって透水試験装置内に投入した試料を静的に締固めて供試体を作製し、図－1に示す方法で加圧通水させながら飽和させた。



図－1　透水試験装置と通水飽和方法の概要図

通常、静的締固めでは、試料を事前にある程度湿らせてから供試体を作製すると、試料の成型に要する荷重を低減できる。例えば、本試験の場合、乾燥密度を1.8Mg/m^{3}として、土粒子密度が2.733 Mg/m^{3}であるので、飽和含水比は約19%となる。そこで、事前に含水比として15%程度（飽和土 80%程度）となるように、硝酸ナトリウム溶液を加えてから静的締固めを行った。この際、事前に加える水溶液と透水試験で用いる通液の硝酸ナトリウムの濃度が一致するようにした。例えば、硝酸ナトリウム濃度が6.0mol/Lの試験に用いる供試体には、事前に6.0mol/Lの硝酸ナトリウム濃度の水溶液を重量比が 15%となるように加えて供試体作製のための静的締固めに供した。また、事前に水溶液を加える際には、自然含水比分の水の影響だけ、ベントナイト間隙水溶液の濃度が薄まってしまうため、事前に低温（60℃）で絶乾状態にしたベントナイトを使用した。以上の手順をまとめると図－2のようになる。



図－2　透水試験供試体作製フロー

2.4　通水圧の設定

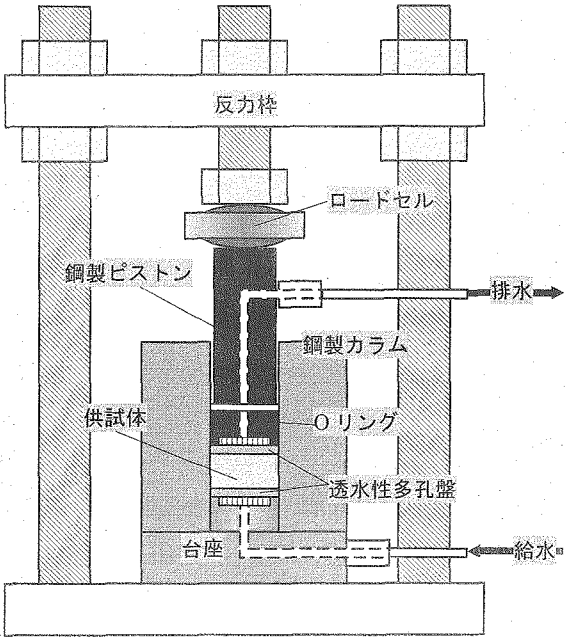
ベントナイトの透水試験を行う場合、その低透水性から試験時間が非常にかかる。少しでも速く試験を行うためには、通水圧を上げる、供試体の通水距離（高さ）を小さくするなどが考えられるが、いずれも水みちが形成されやすくなるという危険性を含んでいる。本研究では、供試体高さが 10mm と小さいため、剛な試験リングとベントナイトの界面に水みちが形成されやすいと考えられる。そこで、水みちの形成を防ぎ、仮に水みちが形成されたとしてもベントナイトの膨潤によって水みちが塞がれるようにするために、通水圧をベントナイトの膨潤圧以下にした。

このベントナイトの膨潤圧は、ベントナイトの乾燥密度や使用する液体のイオン強度などによって変化することが知られている [7]。乾燥密度 1.8Mg/m^3 のクニゲル V1 の膨潤圧試験を硝酸ナトリウム水溶液 3mol/L を用いて予備的に膨潤圧を測定した。供試体は、図－3に示す膨潤圧試験機の内部において、静的に締固めて作製した。供試体の作製方法は、2.3 で述べた静的締固めによる供試体の作製方法と同様である。膨潤圧試験の試験条件、および供試体の諸元をまとめると表－3のようになる。

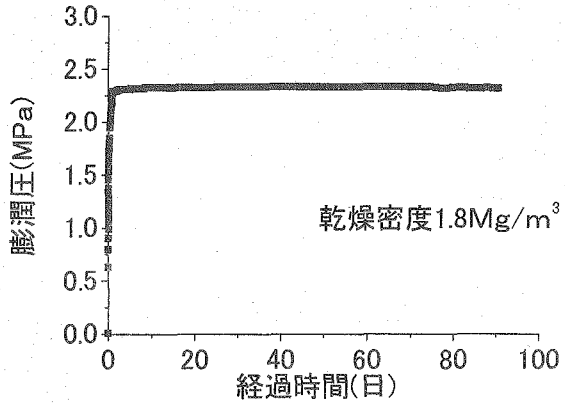
試験結果を図－4に示す。乾燥密度 1.8Mg/m^3 のクニゲル V1 で硝酸ナトリウム水溶液 3mol/L の場合の膨潤圧は 2.3MPa 程度であった。このことから通水圧は、この値の半分以下とし、1MPa とした

表－3　膨潤圧試験の試験ケースと供試体の諸元

ベントナイト	目標乾燥密度 (Mg/m^3)	通水液	直径 φ (mm)	高さ h (mm)
クニゲル V1	1.8	$NaNO_3$ 水溶液 3.0mol/L	40	20



図－3　膨潤圧試験装置



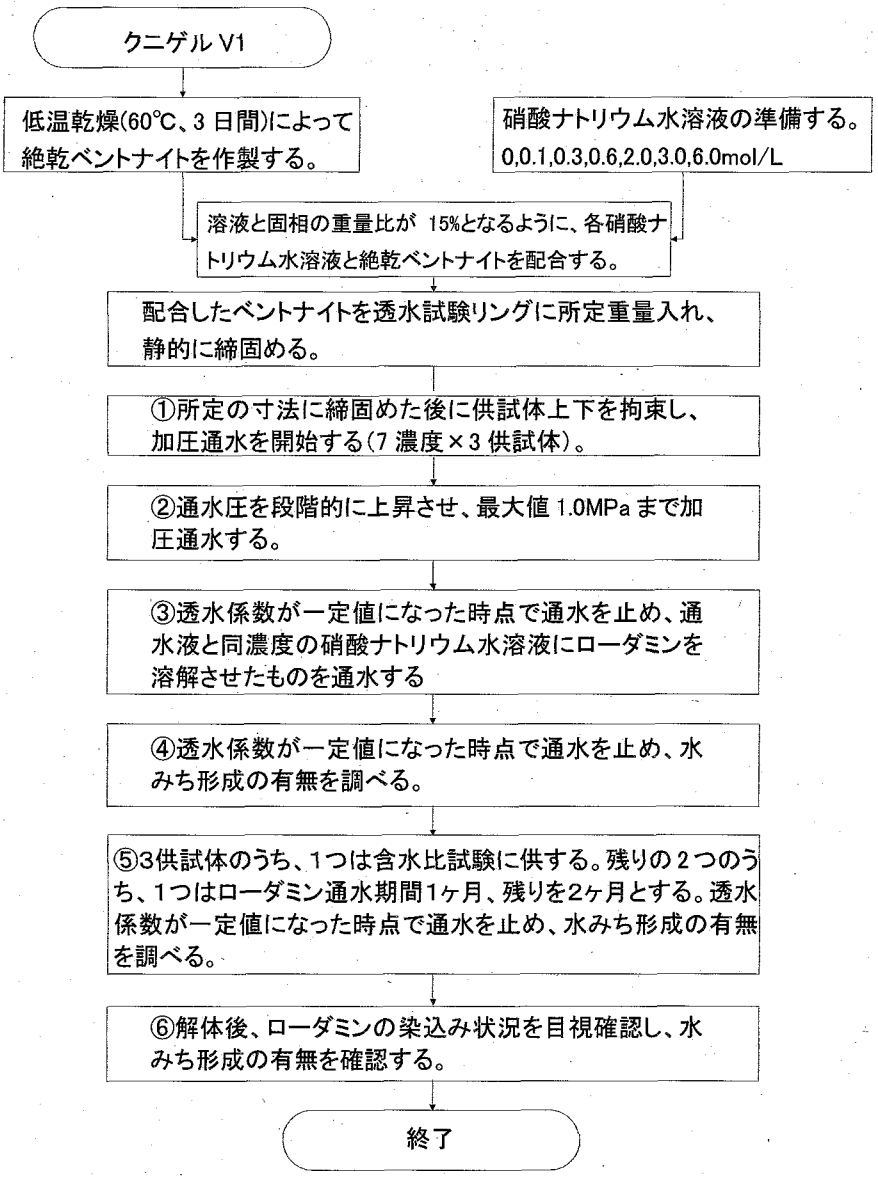
図－4　膨潤圧試験結果（$NaNO_3$濃度 3mol/L）

2.5　透水試験方法

試験は、既報[1,2]と同様に圧力法を用いた定水位透水試験方法によって実施した。試験実施にあたっては、試験温度を 20℃とした。通水圧を段階的に増加させ、設定通水圧 1.0MPa になるようにした。通水液は表－2に示したように蒸留水を含む7濃度であり、再現性の確認のために各濃度で3供試体とした。試験は透水係数が一定値になるまで実施した。

透水係数が一定値になった段階で、同濃度の 3 供試体の内、1 つで含水比を測定し、残りの2つで水みちの形成の有無を調べた。この水みち形成の有無の調査には、試験に使用した硝酸ナト

リウム水溶液に染料（ローダミン）を過飽和状態まで溶解させ、濾過したものを使用した。２供試体の内、１つはローダミンの通水期間が１ヶ月であり、残りの供試体は通水期間が２ヶ月である。所定の通水期間が経過したら、試験機を解体し、ローダミンが供試体と試験機の界面を流れていないかどうかを目視観察で調べた。これらの試験手順をまとめると図－５になる。



図－５　透水試験実験手順

3. 試験結果及び考察

3.1 各通液における圧縮成型ベントナイトの透水係数

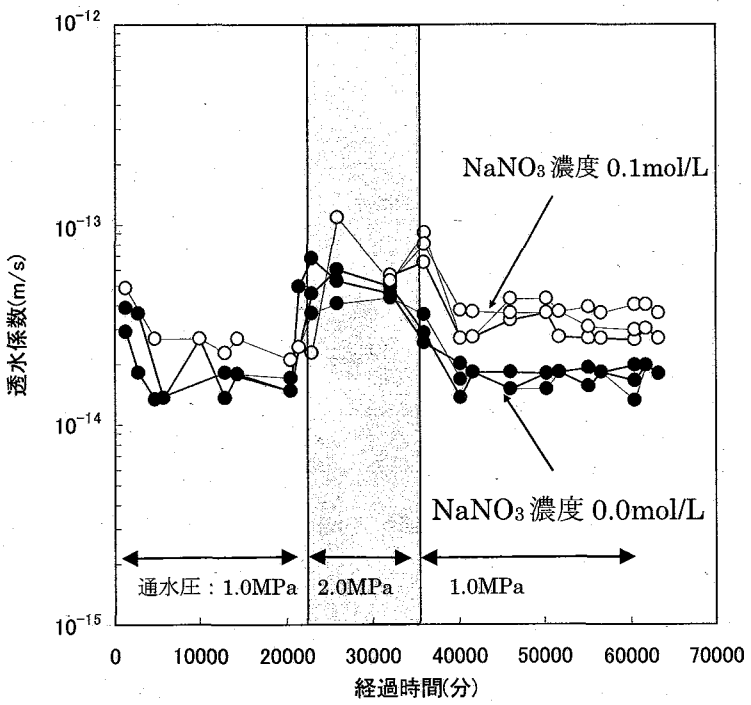
図－６に硝酸ナトリウム濃度が 0.1mol/L と蒸留水のケースの透水係数の経時変化を示す。横軸の時間は、供試体から有意な排水を確認した時点を 0 として示した。この図において、計測開始から 22940 分(約 16 日)～36385 分(約 25 日)までの約 10 日間は通水圧を 2.0MPa とした（図中網掛け部)。膨潤圧の大きいと考えられる 0.1mol/L と蒸留水のケースに関しては、試験を短時間で終了させるために、通水圧を途中から 2.0MPa としたが、図からも分かるように、通水圧が 2.0MPa の期間では透水係数が高めとなった。また通水圧を他のケースと同様に 1.0MPa に戻すと、透水係数は通水圧を 2.0MPa に増加させる前と同程度の数値に戻った。このことから、ベントナイトの透水係数は動水勾配に依存する可能性があることが分かった。この透水係数が動水勾配に依存する原因としては、通水圧による供試体の変形、膨潤圧と通水圧の関係、水みちの形成などが考えられる。そこで、通水圧を 2.0MPa にしたケースは、通水圧を 1.0MPa に戻し、他のケースと同じ動水勾配の条件で透水係数が一定値に落ち着くまで試験を行った。

図－７～１３に試験開始から終了までの透水係数の経時変化を示す。これらの図の横軸の経過時間は、各供試体で排水を確認した時点をゼロとしたものである。いずれの試験ケースにおいても、透水係数は概ね 30000～50000 分(約 20～30 日)程度で一定値を示しており、定常状態になっていることが分かる。また、通水圧を 2.0MPa に設定したケースも、1.0MPa に低下させた後に 50000 分(30 日)程度で一定値になっている。

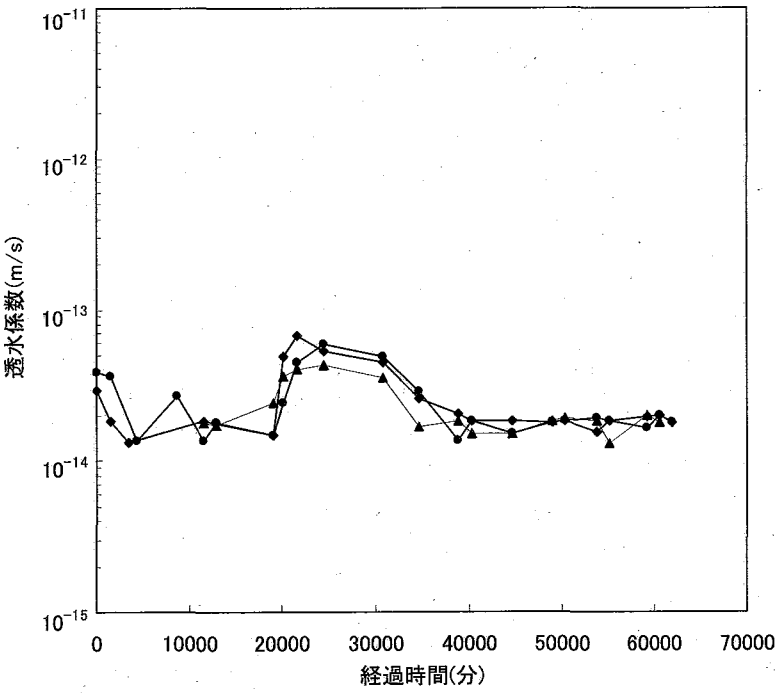
これらの透水試験結果を表－４にまとめる。硝酸ナトリウム濃度が 0mol/L についての乾燥密度 1.8Mg/m^3 のクニゲル V1 の透水係数は、既に松本らによって報告されている[8]。松本らの報告値[8]は、1.5～3.3×10^{-14}m^2/s であり、本研究の値とほぼ整合がとれる。硝酸ナトリウムの濃度が高くなるにともない透水係数が大きくなる傾向にあるが、2mol/L 以上において透水係数の増加は大きくはない。

表－４　各硝酸ナトリウム濃度における透水係数

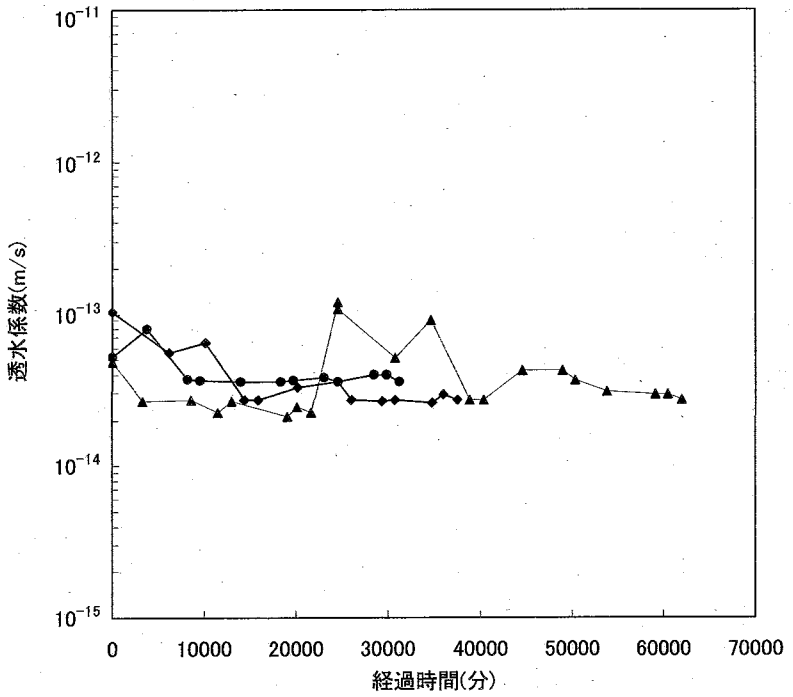
mol/L	透水係数(m/s)			平均値(m/s)
0	1.8×10^{-14}	1.8×10^{-14}	1.8×10^{-14}	1.8×10^{-14}
0.1	2.7×10^{-14}	3.1×10^{-14}	3.8×10^{-14}	3.2×10^{-14}
0.3	6.4×10^{-14}	4.6×10^{-14}	5.2×10^{-14}	5.4×10^{-14}
0.6	5.6×10^{-14}	8.1×10^{-14}	7.6×10^{-14}	7.1×10^{-14}
2	6.5×10^{-13}	4.3×10^{-13}	5.5×10^{-13}	5.4×10^{-13}
3	9.2×10^{-13}	6.9×10^{-13}	5.9×10^{-13}	7.3×10^{-13}
6	5.6×10^{-13}	4.9×10^{-13}	3.7×10^{-13}	4.8×10^{-13}



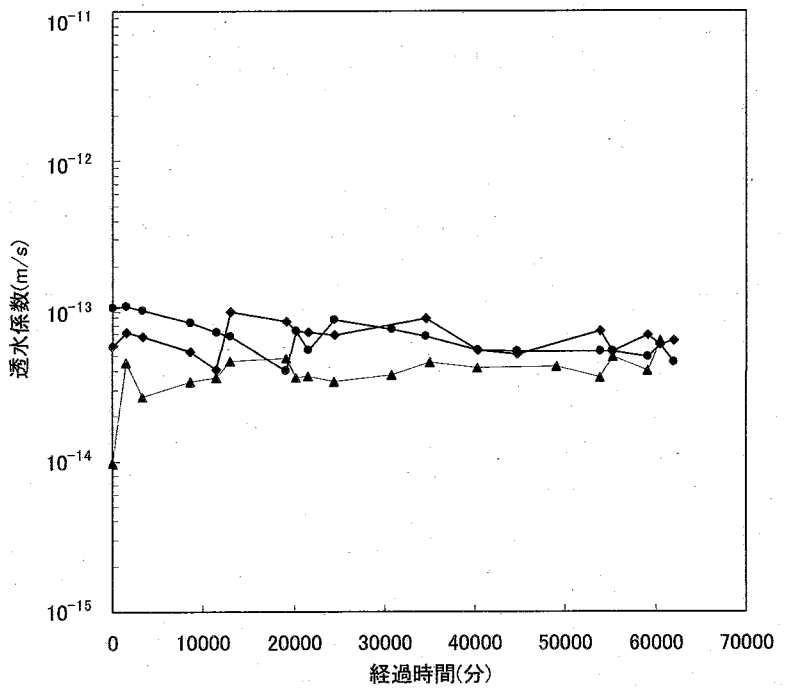
図－６　動水勾配の変化による透水係数の変化



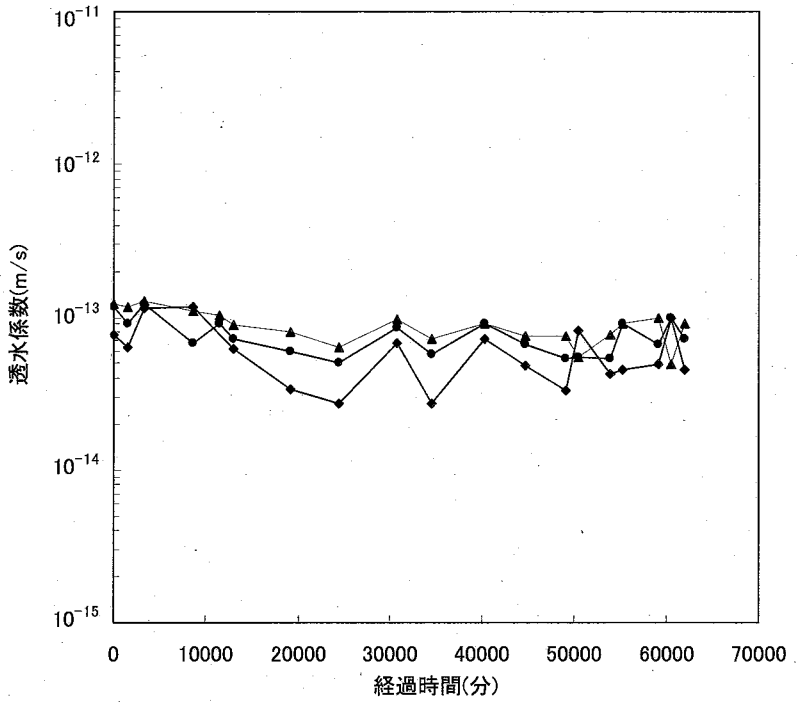
図－７　透水係数の経時変化(0mol/L、蒸留水)



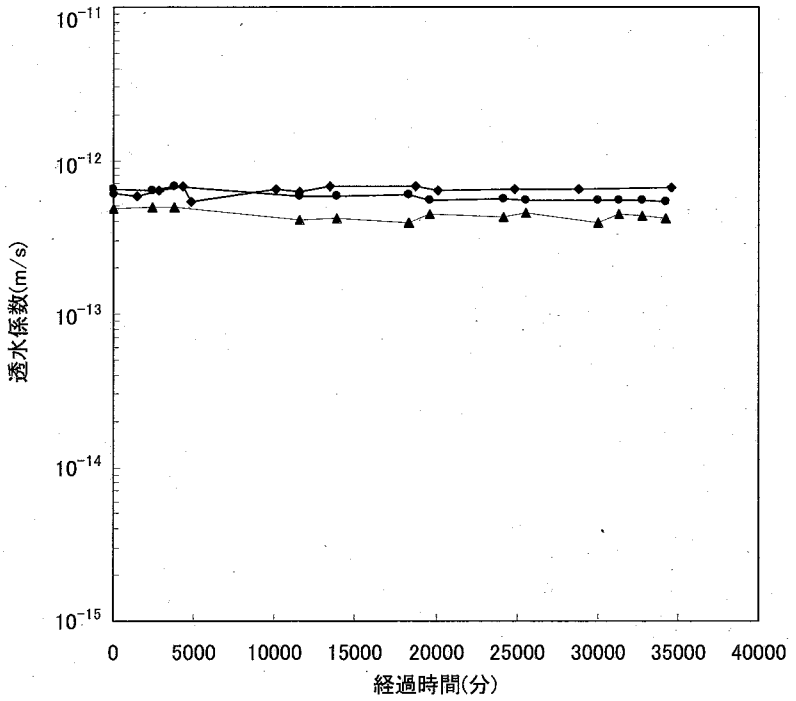
図－８　透水係数の経時変化(0.1mol/L)



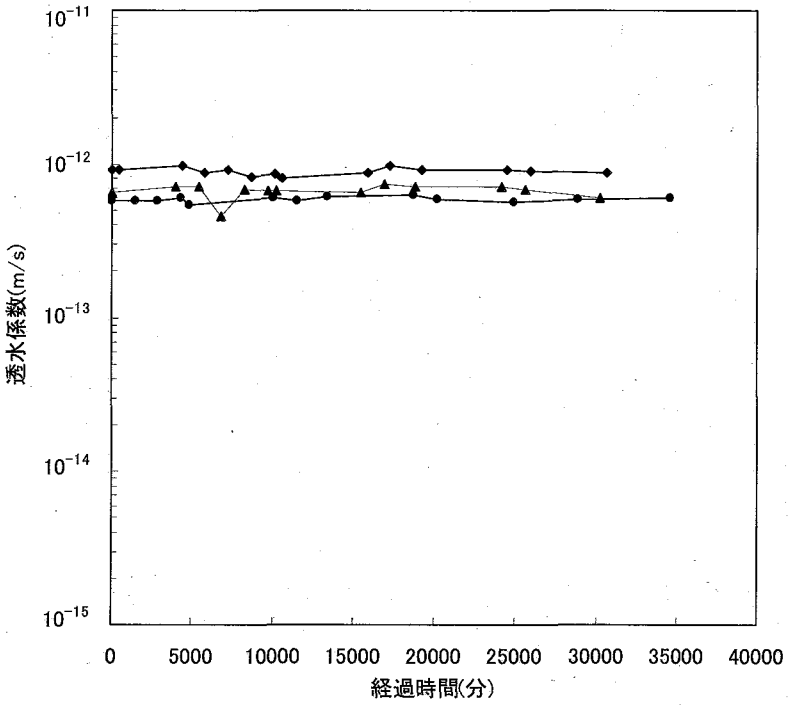
図－９　透水係数の経時変化(0.3mol/L)



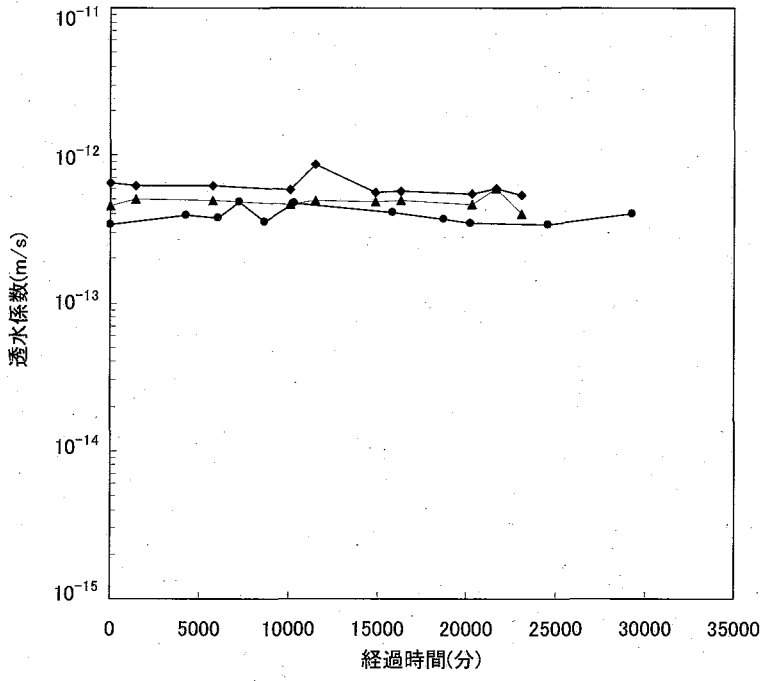
図－１０　透水係数の経時変化(0.6mol/L)



図－１１　透水係数の経時変化(2mol/L)



図－１２　透水係数の経時変化(3mol/L)



図－１３　透水係数の経時変化(6mol/L)

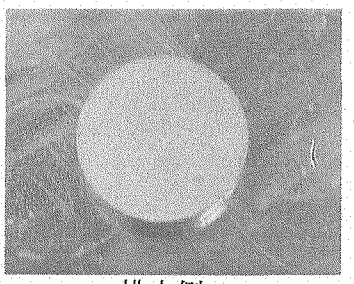
This is a blank page.

3.2　水みちの有無の確認

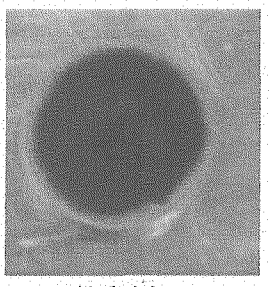
3.1 の試験の一部について通水圧の増加にともない透水係数の増加がみられ、水みちの形成の可能性を指摘した。透水試験終了後に、染料を通水し、水みちの形成の有無について確認を行なった。試験手順は、図－５に示した透水試験実験手順③、④、⑥に示したとおり透水試験終了後、各濃度３供試体のうち、２供試体を使用して行った。確認方法の詳細を図－１４に示す。

水みち形成の有無の確認は、透水試験で使用した硝酸ナトリウム水溶液と同濃度の水溶液を既報で使用されているものと同様にローダミンで着色したもの[3)]を使用した。図－１４に示すように、水みちの有無は目視による観察で行うため、通水液として、硝酸ナトリウム水溶液に過飽和状態までローダミンを投入し、十分に攪拌したものを濾過し用いた。

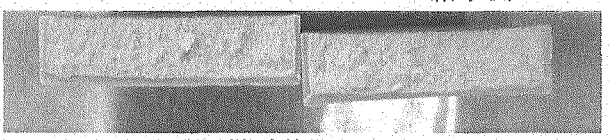
このローダミンで飽和した硝酸ナトリウム水溶液は、各濃度２供試体のうち、一方に１ヶ月間、他方に２ヶ月間通水することとした。所定の期間ローダミンで飽和した硝酸ナトリウム水溶液を通水した後に解体し、目視によって鋼性透水セルと供試体の境界などにローダミンによる着色（水みち）の有無を確認した。写真－１に確認状況を示す。全ての供試体でローダミンによる着色箇所は給水側の面のみであり、供試体側面には着色箇所はなかった。また、ローダミンによって着色された硝酸ナトリウム水溶液を１、２ヶ月通水しても、排水側から着色された硝酸ナトリウム水溶液は目視では観測されなかった。写真－１の断面ように、全ての供試体で分子量の大きなローダミンによる着色領域が通水方向に進展しておらず、これらの観察結果から、試験終了時の透水試験においては、水みちは形成されていないことが確認された。



排水側



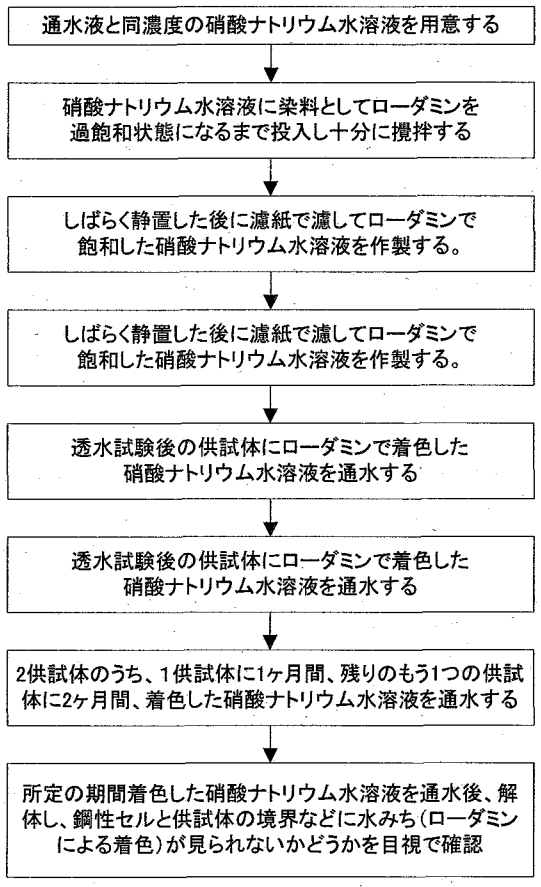
給水側



供試体断面

写真－１　水みち形成の有無の確認状況　(3.0mol/L)

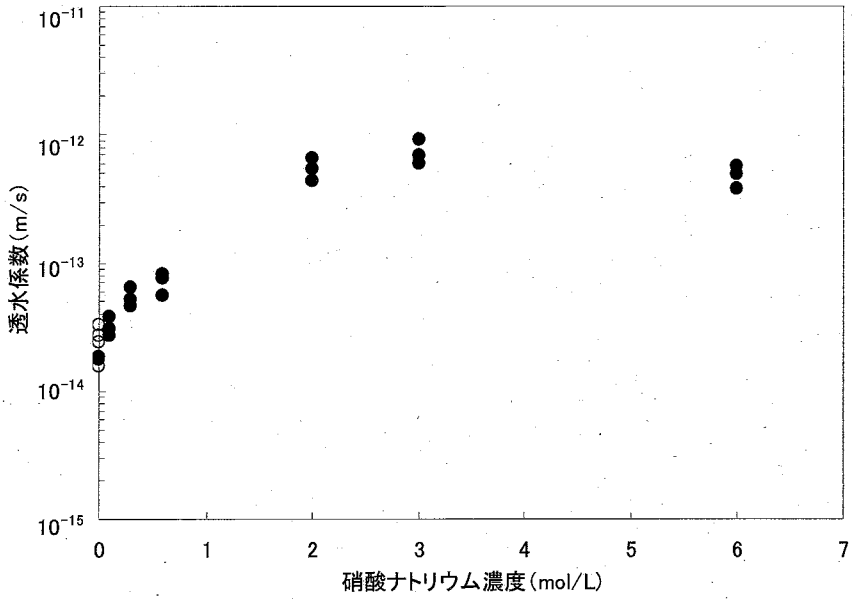
This is a blank page.



図－１４　水みち形成の有無の確認方法

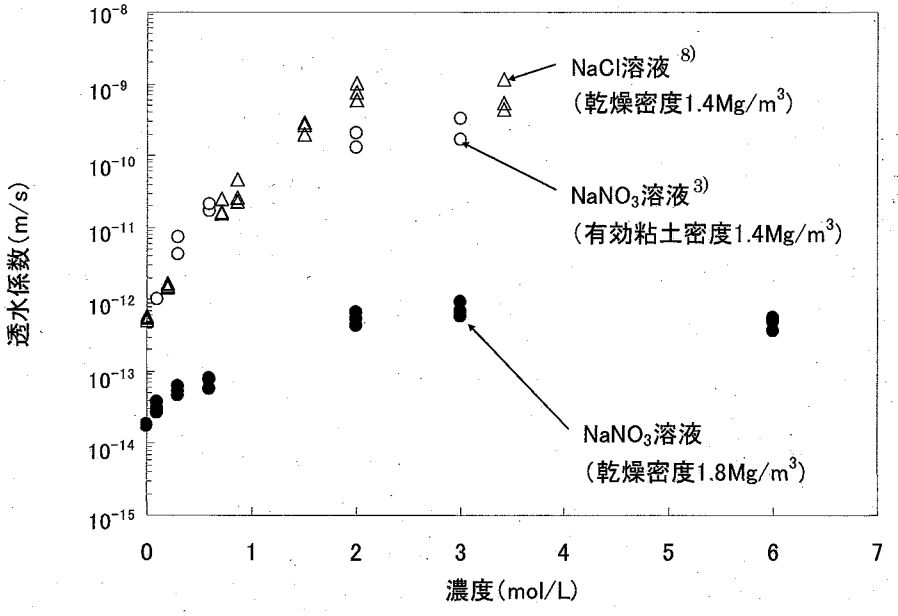
3.3 圧縮成型ベントナイトの透水係数の硝酸ナトリウム濃度依存性

表－３で示した結果を硝酸ナトリウム水溶液の濃度がベントナイトの透水係数に及ぼす影響をまとめ、図－１５に示した（●：本研究、○：松本ら[8]）。図に示すように、硝酸ナトリウム水溶液の mol 濃度が増加するに従ってベントナイトの透水係数は増加するが、2mol/L を超える濃度では透水係数はほとんど変化せず、10^{-12}m/s 程度とほぼ一定値を示した。このことから、硝酸ナトリウム水溶液濃度がベントナイトの透水係数に及ぼす影響は、本試験条件（乾燥密度 1.8Mg/m^3 のベントナイト）の場合、0～2mol/L までは著しいが、2mol/L を超えてもほとんど変化しないと考えられる。



図－１５　硝酸ナトリウムの濃度がベントナイトの透水係数に及ぼす影響

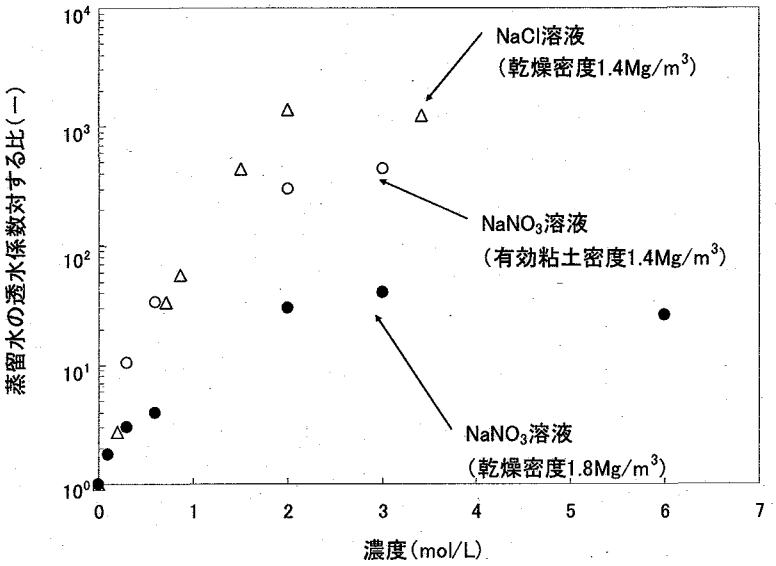
次に、新村らが報告する値[3]と塩化ナトリウム水溶液（NaCl 溶液）を用いた試験結果[8]をあわせて示す。新村らが実施した試験は、ケイ砂を混合した試験であるが、ケイ砂を混合したベントナイト試料についてもベントナイト部分の乾燥密度（以下、「有効粘土密度」）で透水係数を一元的に整理できることが知られている[8]。ケイ砂を混合していない試験においては、ベントナイトの乾燥密度がそのまま、有効粘土密度に相当することになる。新村らが報告した乾燥密度 1.6Mg/m^3 のケイ砂 30wt%混合したベントナイトの有効粘土密度は、ほぼ 1.4Mg/m^3 に相当する。また、塩化ナトリウム水溶液を用いた試験は、ベントナイト単体で乾燥密度 1.4Mg/m^3 のデータである。これらの結果を図－１６に示す。



図－１６　各溶液がベントナイトの透水係数に及ぼす影響

塩化ナトリウム及び硝酸ナトリウム（$NaNO_3$）の溶液の種類に関わらず、各塩の濃度が高くなるにともない透水係数は増加しており、1.4Mg/m^{3}の値はほぼ同じである。このことから、NaCl 及び$NaNO_3$の透水係数に及ぼす影響は、ほぼ同等であると推定される。また、何れの条件においても、通水の塩濃度が 2mol/L 以上になると透水係数は、ほぼかわらない傾向にある。乾燥密度 1.8Mg/m^{3}とすると、高塩濃度においても、透水係数は 10^{-12}m/s を下回り、処分施設内の地下水の移動を抑制するための透水係数の性能目標値 10^{-11}m/s を満足している。

図－１６の各濃度の透水係数の平均値をとり、塩濃度が 0mol/L（蒸留水を使用）の場合の透水係数に対する比として示した結果を図－１７に示す。通液の塩濃度が 2mol/L を超えると乾燥密度 1.4Mg/m^{3}の場合は、1,000 倍程度大きくなるのに対し、乾燥密度 1.8Mg/m^{3}の場合は数十倍であり、乾燥密度を大きくすると、透水係数の絶対値が小さくなるとともに、通液の塩濃度の影響を受けにくくなることが分かる。



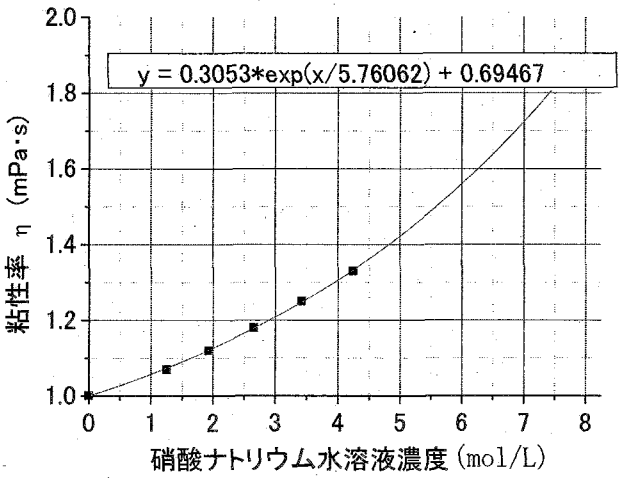
図－１７　蒸留水の透水係数に対する比の塩濃度依存性

3.4　圧縮成型ベントナイトの固有透過度への硝酸ナトリウム濃度の影響

透水係数は、圧縮成型ベントナイトの間隙率、その構造、通液の密度、粘性率に影響をうける。透水係数から通液の密度及び粘性率の効果を除去した指標の固有透過度を求め、$NaNO_3$濃度依存性について検討を行なった。固有透過度は、多孔質体の透水性を評価する際に用いられているもので、粒度分布、粒子の形状、粒子の配向、屈曲度、空隙率など多孔質体の構造特性に由来する透過抵抗を表し、次式によって表される。

$$K = \kappa \rho g / \eta \tag{1}$$

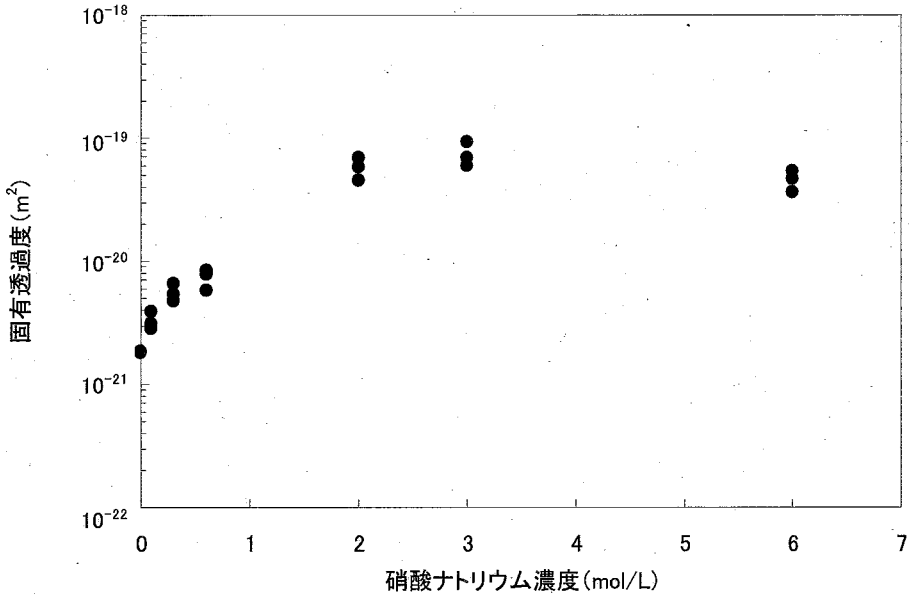
ただし、K:透水係数[m/s]、κ:固有透過度[m^2]、ρ:液体の密度[Mg/ m^3]、g :重力加速度[m/s^2]、η : 液体の粘性率[Pa･s]である。松本らは、圧縮成型ベントナイトの透水係数の温度依存性は、固有透過度で表現すると、その温度依存性は見られていないことから、通液の密度、粘性率の変化によるものと明快に示している [8)]。本研究においても、固有透過度で表現することで通液の密度、粘性率の影響について検討を行なった。$NaNO_3$の各濃度における溶液の粘性率を図－18 に示す。図中のプロットは化学便覧 [9)]より求め、図中の近似式で内挿・外挿して所定の mol 濃度の硝酸ナトリウム水溶液の粘性率を決定した。表－４に示した透水係数から式(1)を用いて計算した固有透過度をまとめたものを表－5 に示す。さらに、図－１９には硝酸ナトリウム水溶液の濃度がベントナイトの固有透過度に及ぼす影響を示す。図－１９と図－１５に示した硝酸ナトリウム溶液の濃度がベントナイトの透水係数に及ぼす影響と比較すると傾向はほぼ同じであり、硝酸ナトリウム水溶液の濃度非常に高い 6mol/L の場合でも、硝酸ナトリウム水溶液の粘性率の影響は小さいという結果となった。



図－１８　硝酸ナトリウム水溶液の粘性率

表－５　各硝酸ナトリウム濃度における固有透過度

mol/L	固有透過度(m^2)			平均値
0	1.9×10^{-21}	1.8×10^{-21}	1.9×10^{-21}	1.9×10^{-21}
0.1	2.8×10^{-21}	3.1×10^{-21}	3.9×10^{-21}	3.3×10^{-21}
0.3	6.5×10^{-21}	4.7×10^{-21}	5.4×10^{-21}	5.5×10^{-21}
0.6	5.8×10^{-21}	8.3×10^{-21}	7.8×10^{-21}	7.3×10^{-21}
2	6.9×10^{-20}	4.5×10^{-20}	5.7×10^{-20}	5.7×10^{-20}
3	9.2×10^{-20}	7.0×10^{-20}	6.0×10^{-20}	7.4×10^{-20}
6	5.4×10^{-20}	4.7×10^{-20}	3.6×10^{-20}	4.6×10^{-20}



図－１９　硝酸ナトリウム水溶液の濃度がベントナイトの固有透過度に及ぼす影響

4. まとめ

本研究では、圧縮成型ベントナイトの乾燥密度を1.8Mg/m^{3}として通液の硝酸ナトリウムの濃度を変化させて測定し、硝酸ナトリウム濃度が透水係数に及ぼす影響について実験的に調査を行なった。得られた結果をまとめると以下のようになる。

(1) 通液の硝酸ナトリウムの濃度が高くなるにともない圧縮成型ベントナイトの透水係数が大きくなった。この透水係数の増加は、試料における水みちの形成でないことを確認した。
(2) 透水係数の増加は、硝酸ナトリウム濃度が0～2mol/Lまでは著しいが、2mol/Lを超えてもほとんど変化しないと考えられる。
(3) ベントナイトの乾燥密度を1.8Mg/m^{3}とすると、高塩濃度においても、透水係数は10^{-12}m/sを下回り、処分施設内の地下水の移動を抑制するための透水係数の性能目標値10^{-11}m/sを満足する。乾燥密度を大きくすると、透水係数の絶対値が小さくなるとともに、通液の塩濃度の影響を受けにくくなる。
(4) 硝酸ナトリウム水溶液の濃度がベントナイトの固有透過度に及ぼす影響と、硝酸ナトリウム水溶液の濃度がベントナイトの透水係数に及ぼす影響と比較すると、傾向はほぼ同じであった。このことから、硝酸ナトリウム水溶液の濃度がベントナイトの透水係数に及ぼす影響のうち、硝酸ナトリウム水溶液の粘性率の影響は小さいことが確認された。

参考文献

1) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構、(2005)："TRU 廃棄物処分技術検討書－第２次ＴＲＵ廃棄物処分研究開発取りまとめ－" JNC TY1400 2005-013、 FEPC TRU-TR2 2005-02.

2) 田島孝敏、緒方浩基、久保博、三原守弘（2006）："高アルカリと硝酸塩の影響を受けたベントナイトの水理特性評価（その１）－セメント浸出液がベントナイトの透水特性に及ぼす影響－"、土木学会第 61 回年次学術講演会、CS05-064、pp. 333-334.

3) 新村亮、田島孝敏、久保博、三原守弘（2006）："高アルカリと硝酸塩の影響を受けたベントナイトの水理特性評価（その２）－硝酸塩溶液を用いたベントナイトの通水試験－"、土木学会第 61 回年次学術講演会、CS05-065、pp. 335-336.

4) 高橋真一、田島孝敏、鳥井原誠、三原守弘（2006）："高アルカリと硝酸塩の影響を受けたベントナイトの水理特性評価（その３）－アルカリ変質したベントナイトの圧密試験－"、土木学会第 61 回年次学術講演会、CS05-065、pp. 337-338.

5) （社）地盤工学会（2000）：土質試験の方法と解説－第一回改訂版－.

6) （社）日本土壌肥料学会監修　土壌環境分析法編集委員会編（1997）：土壌環境分析法、博友社、pp. 215-219.

7) 菊池広人、棚井憲治（2005）："幌延地下水を用いた緩衝材・埋め戻し材の基本特性試験"、JNC TN8430 2004-005.

8) 松本一浩、菅野毅、藤田朝雄、鈴木英明（1997）："緩衝材の飽和透水特性"、PNC TN8410 97-296.

9) 日本化学会編（1991）："化学便覧　基礎編　改訂３版"、丸善株式会社.

付　録

実験状況等写真

目　次

写真-A1　透水試験（試料投入）..... 25
写真-A2　透水試験（締固め状況）..... 25
写真-A3　透水試験（締固め後供試体）..... 25
写真-A4　透水試験（試験状況）..... 27
写真-A5　膨潤圧試験（試料投入後）..... 27
写真-A6　膨潤圧試験（締固め状況）..... 27
写真-A7　膨潤圧試験（試験状況）..... 29
写真-A8　膨潤圧試験供試体（膨潤圧試験後）..... 29
写真-A9　透水試験セルの解体状況（試験後）..... 31
写真-A10　透水試験セルの解体状況（ﾛｰﾀﾞﾐﾝ液通水後）..... 31
写真-A11　硝酸ナトリウム水溶液 6mol/L の透水試験供試体（透水試験後）..... 33
写真-A12　硝酸ナトリウム水溶液 6mol/L の透水試験供試体（ﾛｰﾀﾞﾐﾝ液１ヶ月通水後）..... 33
写真-A13　硝酸ナトリウム水溶液 6mol/L の透水試験供試体（ﾛｰﾀﾞﾐﾝ液２ヶ月通水後）..... 33
写真-A14　硝酸ナトリウム水溶液 3mol/L の透水試験供試体（透水試験後）..... 35
写真-A15　硝酸ナトリウム水溶液 3mol/L の透水試験供試体（ﾛｰﾀﾞﾐﾝ液１ヶ月通水後）..... 35
写真-A16　硝酸ナトリウム水溶液 3mol/L の透水試験供試体（ﾛｰﾀﾞﾐﾝ液２ヶ月通水後）..... 35
写真-A17　硝酸ナトリウム水溶液 2mol/L の透水試験供試体（透水試験後）..... 37
写真-A18　硝酸ナトリウム水溶液 2mol/L の透水試験供試体（ﾛｰﾀﾞﾐﾝ液１ヶ月通水後）..... 37
写真-A19　硝酸ナトリウム水溶液 2mol/L の透水試験供試体（ﾛｰﾀﾞﾐﾝ液２ヶ月通水後）..... 37
写真-A20　硝酸ナトリウム水溶液 0.6mol/L の透水試験供試体（透水試験後）..... 39
写真-A21　硝酸ナトリウム水溶液 0.6mol/L の透水試験供試体（ﾛｰﾀﾞﾐﾝ液１ヶ月通水後）.... 39
写真-A22　硝酸ナトリウム水溶液 0.6mol/L の透水試験供試体（ﾛｰﾀﾞﾐﾝ液２ヶ月通水後）.... 39
写真-A23　硝酸ナトリウム水溶液 0.3mol/L の透水試験供試体（透水試験後）..... 41
写真-A24　硝酸ナトリウム水溶液 0.3mol/L の透水試験供試体（ﾛｰﾀﾞﾐﾝ液１ヶ月通水後）.... 41
写真-A25　硝酸ナトリウム水溶液 0.3mol/L の透水試験供試体（ﾛｰﾀﾞﾐﾝ液２ヶ月通水後）.... 41
写真-A26　硝酸ナトリウム水溶液 0.3mol/L の透水試験供試体（透水試験後）..... 43
写真-A27　硝酸ナトリウム水溶液 0.3mol/L の透水試験供試体（ﾛｰﾀﾞﾐﾝ液１ヶ月通水後）.... 43
写真-A28　硝酸ナトリウム水溶液 0.3mol/L の透水試験供試体（ﾛｰﾀﾞﾐﾝ液２ヶ月通水後）.... 43
写真-A29　蒸留水を用いた透水試験供試体（透水試験後）..... 45
写真-A30　蒸留水を用いた透水試験供試体（ﾛｰﾀﾞﾐﾝ液１ヶ月通水後）..... 45
写真-A31　蒸留水を用いた透水試験供試体（ﾛｰﾀﾞﾐﾝ液２ヶ月通水後）..... 45

This is a blank page.

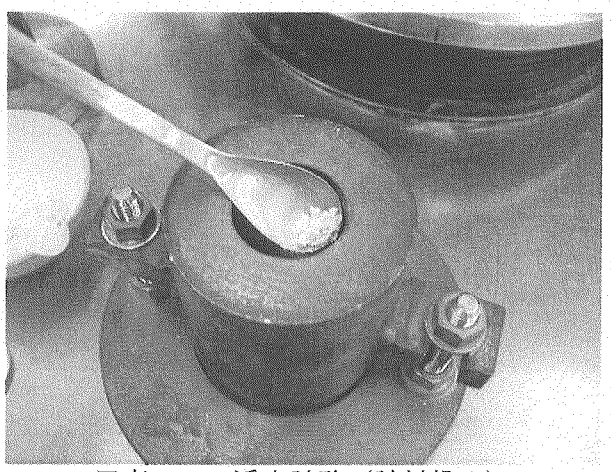


写真-A1　透水試験（試料投入）

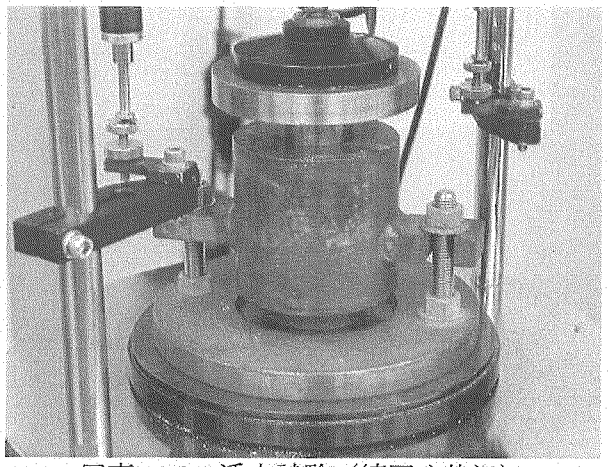


写真-A2　透水試験（締固め状況）

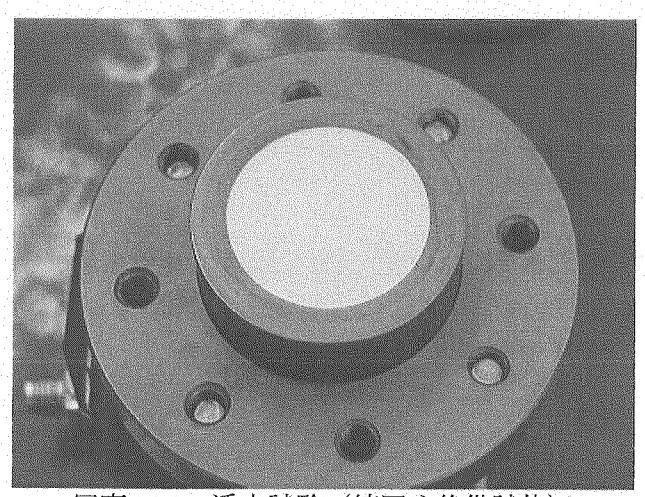


写真-A3　透水試験（締固め後供試体）

This is a blank page.

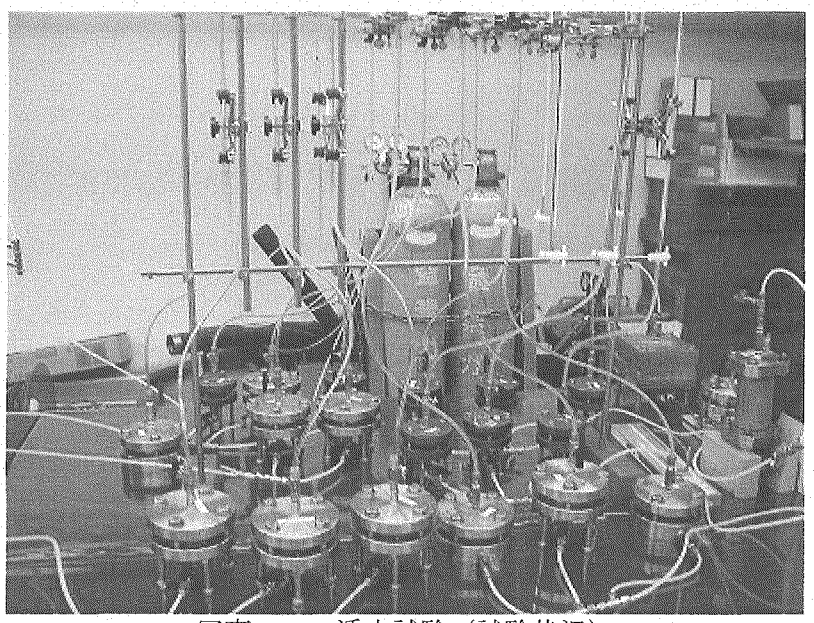


写真-A4　透水試験（試験状況）

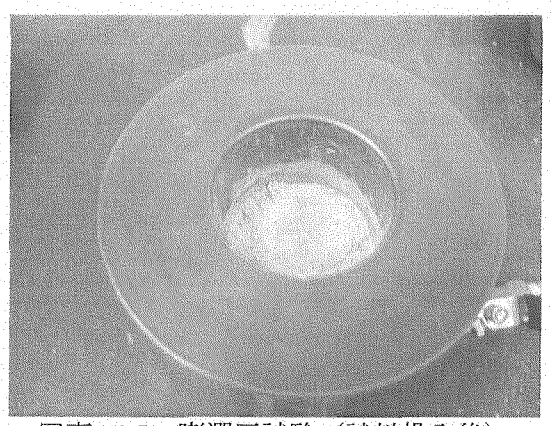


写真-A5　膨潤圧試験（試料投入後）

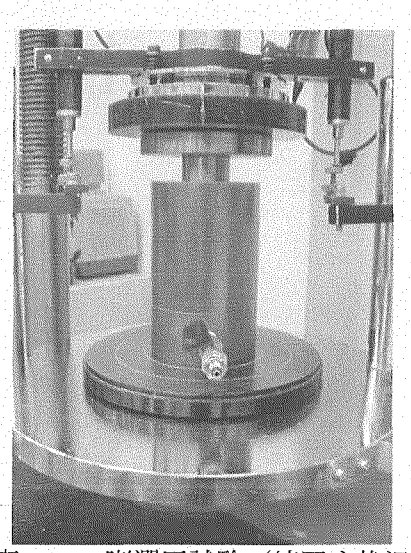


写真-A6　膨潤圧試験（締固め状況）

This is a blank page.

写真-A7　膨潤圧試験（試験状況）

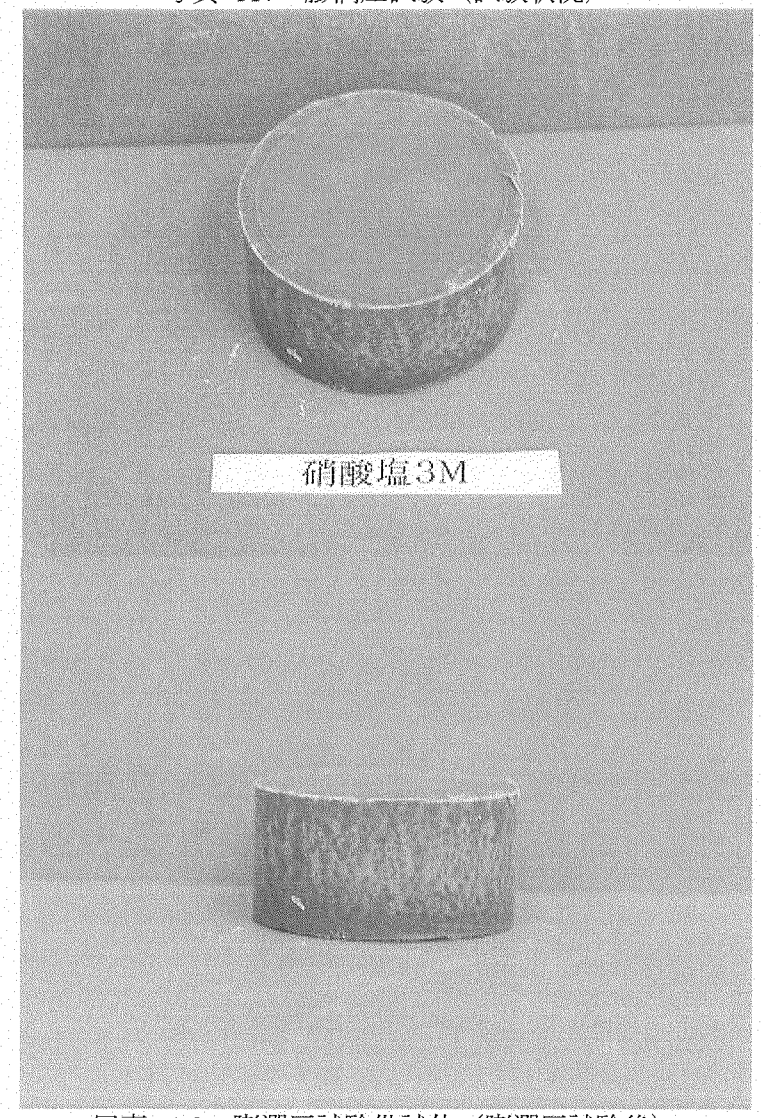


写真-A8　膨潤圧試験供試体（膨潤圧試験後）

This is a blank page.

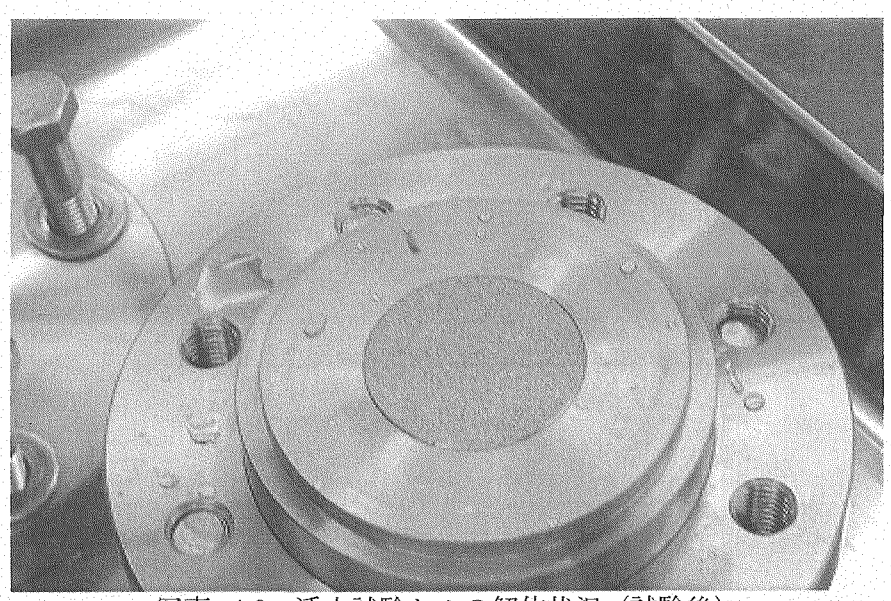


写真-A9　透水試験セルの解体状況（試験後）

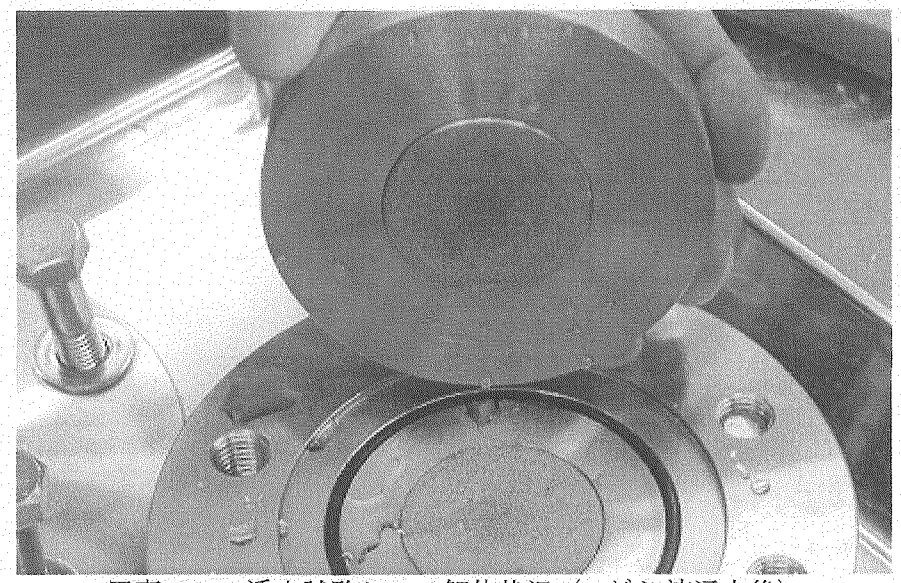


写真-A10　透水試験セルの解体状況（ﾛｰﾀﾞﾐﾝ液通水後）

This is a blank page.

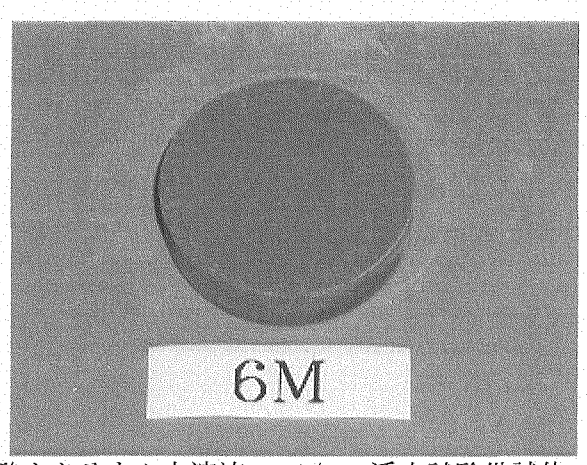


写真-A11　硝酸ナトリウム水溶液 6mol/L の透水試験供試体（透水試験後）

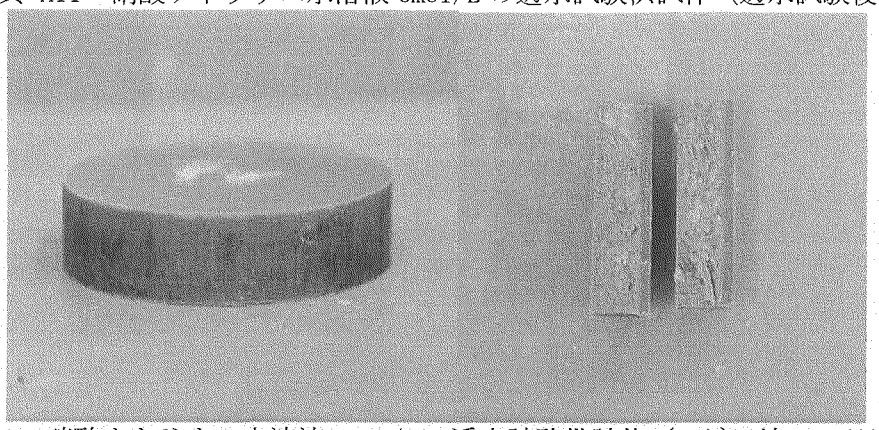


写真-A12　硝酸ナトリウム水溶液 6mol/L の透水試験供試体（ﾛｰﾀﾞﾐﾝ液１ヶ月通水後）

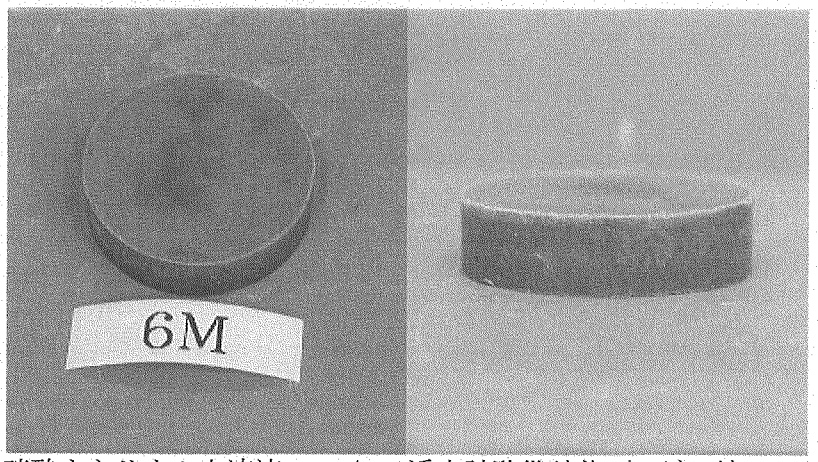


写真-A13 硝酸ナトリウム水溶液 6mol/L の透水試験供試体（ﾛｰﾀﾞﾐﾝ液２ヶ月通水後）

This is a blank page.

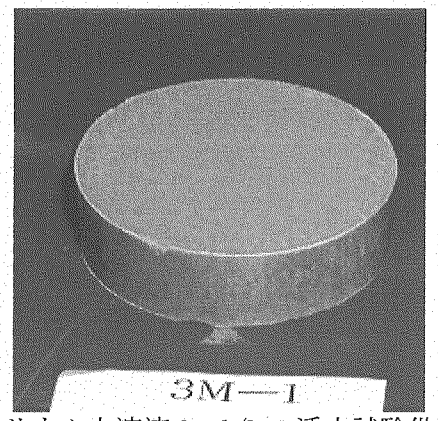


写真-A14　硝酸ナトリウム水溶液 3mol/L の透水試験供試体（透水試験後）

写真-A15　硝酸ナトリウム水溶液 3mol/L の透水試験供試体（ﾛｰﾀﾞﾐﾝ液１ヶ月通水後）

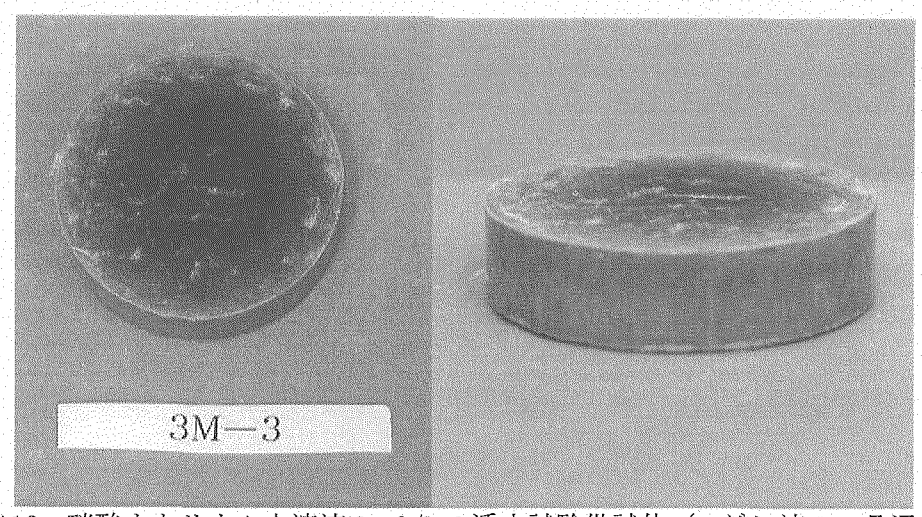


写真-A16　硝酸ナトリウム水溶液 3mol/L の透水試験供試体（ﾛｰﾀﾞﾐﾝ液２ヶ月通水後）

This is a blank page.

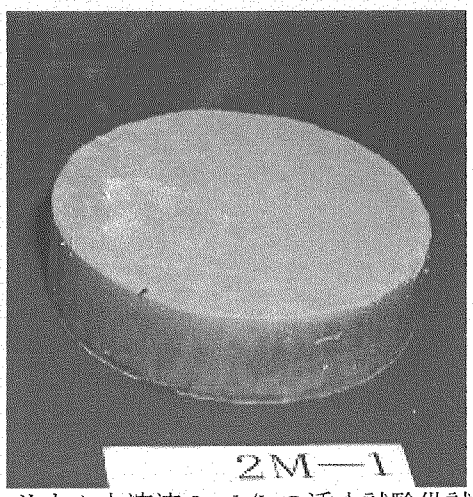


写真-A17　硝酸ナトリウム水溶液 2mol/L の透水試験供試体（透水試験後）

写真-A18　硝酸ナトリウム水溶液 2mol/L の透水試験供試体（ﾛｰﾀﾞﾐﾝ液１ヶ月通水後）

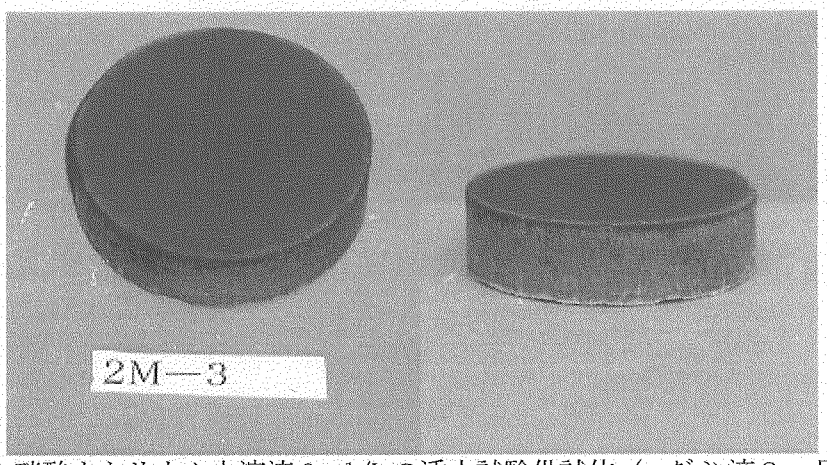


写真-A19　硝酸ナトリウム水溶液 2mol/L の透水試験供試体（ﾛｰﾀﾞﾐﾝ液２ヶ月通水後）

This is a blank page.

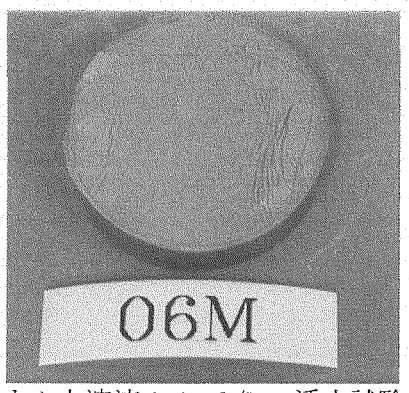


写真-A20　硝酸ナトリウム水溶液 0.6mol/L の透水試験供試体（透水試験後）

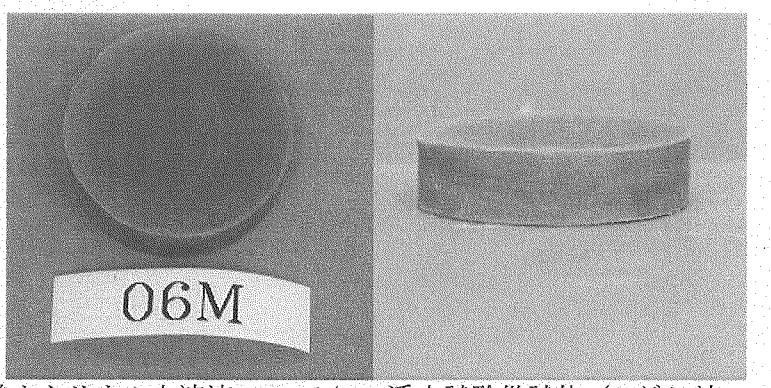


写真-A21 硝酸ナトリウム水溶液 0.6mol/L の透水試験供試体（ﾛｰﾀﾞﾐﾝ液１ヶ月通水後）

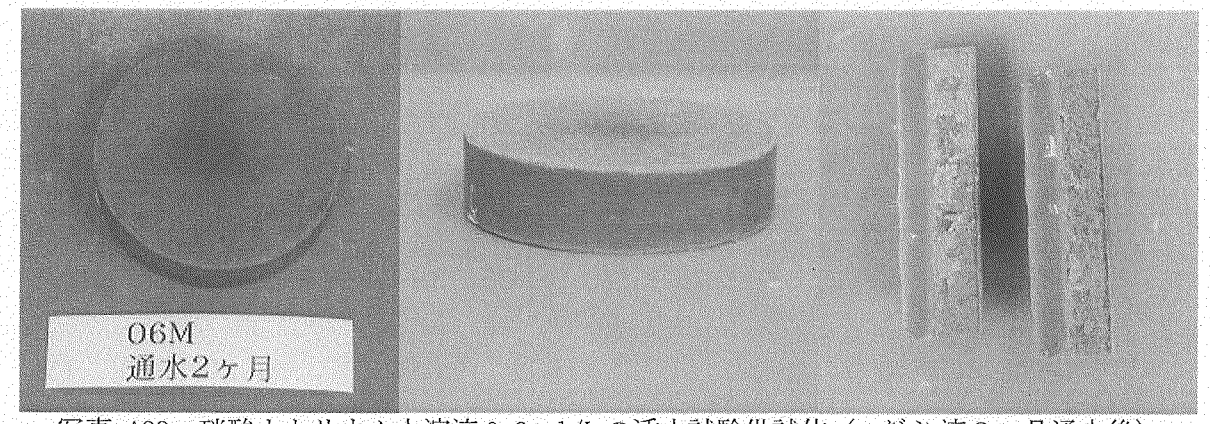


写真-A22　硝酸ナトリウム水溶液 0.6mol/L の透水試験供試体（ﾛｰﾀﾞﾐﾝ液２ヶ月通水後）

This is a blank page.

写真-A23　硝酸ナトリウム水溶液 0.3mol/L の透水試験供試体（透水試験後）

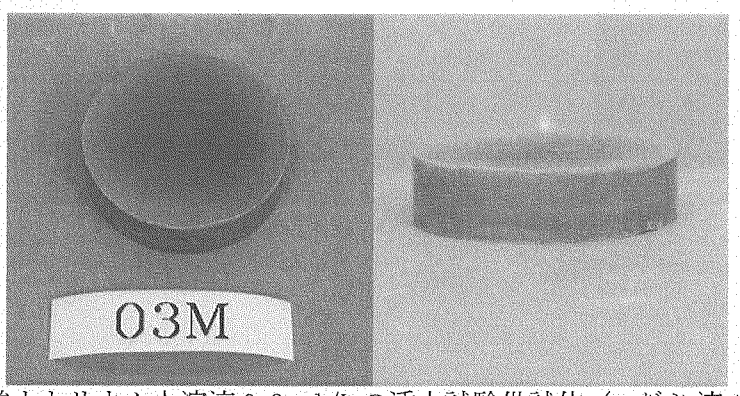


写真-A24　硝酸ナトリウム水溶液 0.3mol/L の透水試験供試体（ﾛｰﾀﾞﾐﾝ液１ヶ月通水後）

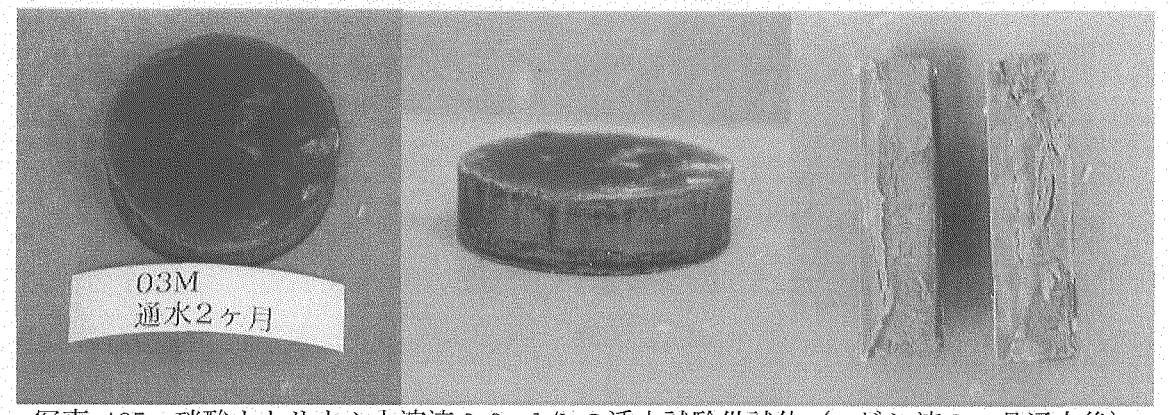


写真-A25　硝酸ナトリウム水溶液 0.3mol/L の透水試験供試体（ﾛｰﾀﾞﾐﾝ液２ヶ月通水後）

This is a blank page.

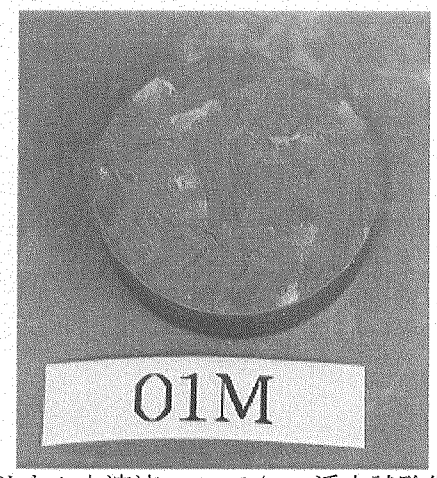
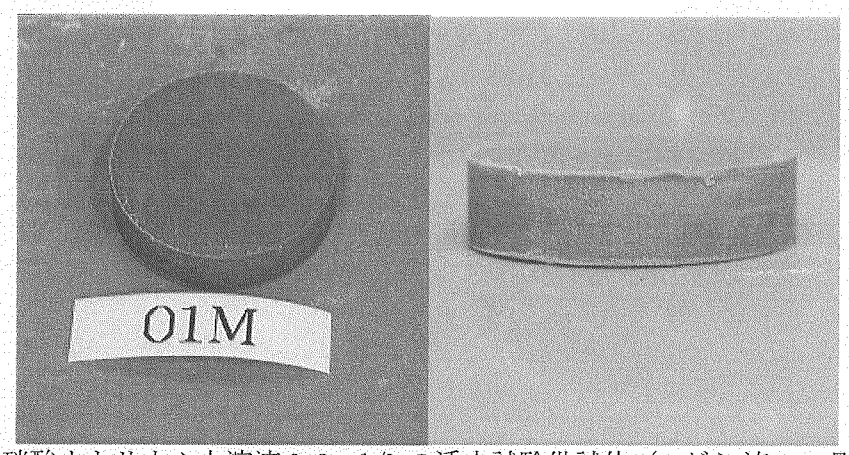


写真-A26　硝酸ナトリウム水溶液 0.3mol/L の透水試験供試体（透水試験後）



写-A27　硝酸ナトリウム水溶液 0.3mol/L の透水試験供試体（ﾛｰﾀﾞﾐﾝ液１ヶ月通水後）

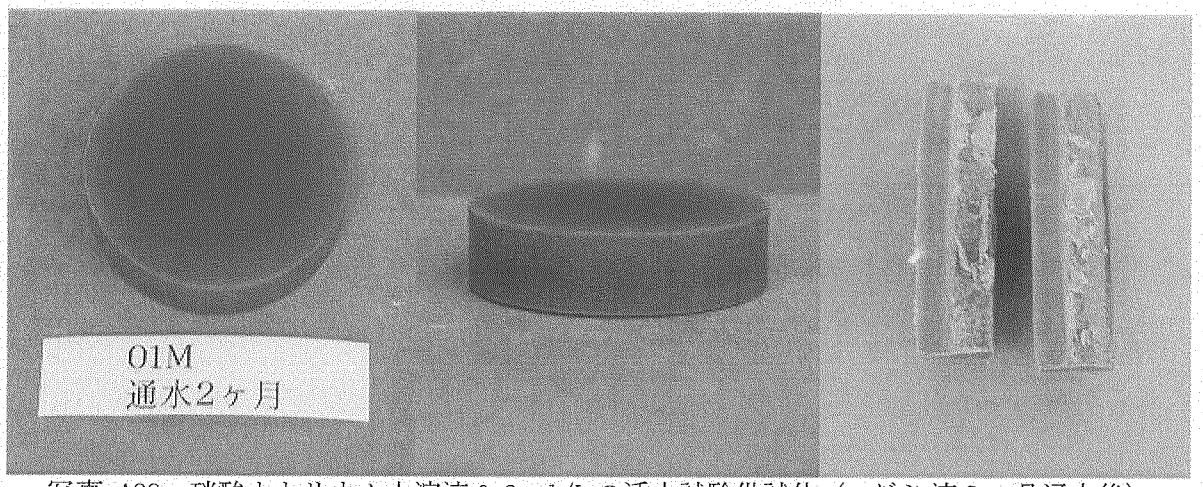


写真-A28　硝酸ナトリウム水溶液 0.3mol/L の透水試験供試体（ﾛｰﾀﾞﾐﾝ液２ヶ月通水後）

This is a blank page.

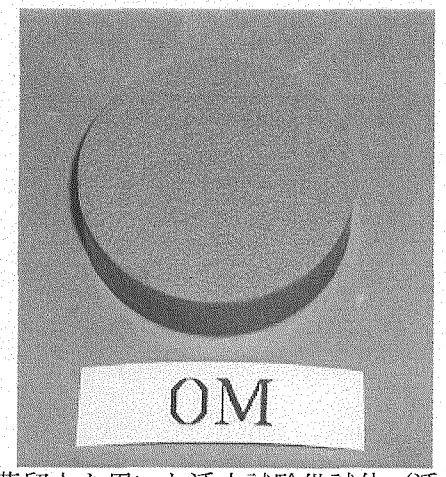


写真-A29　蒸留水を用いた透水試験供試体（透水試験後）

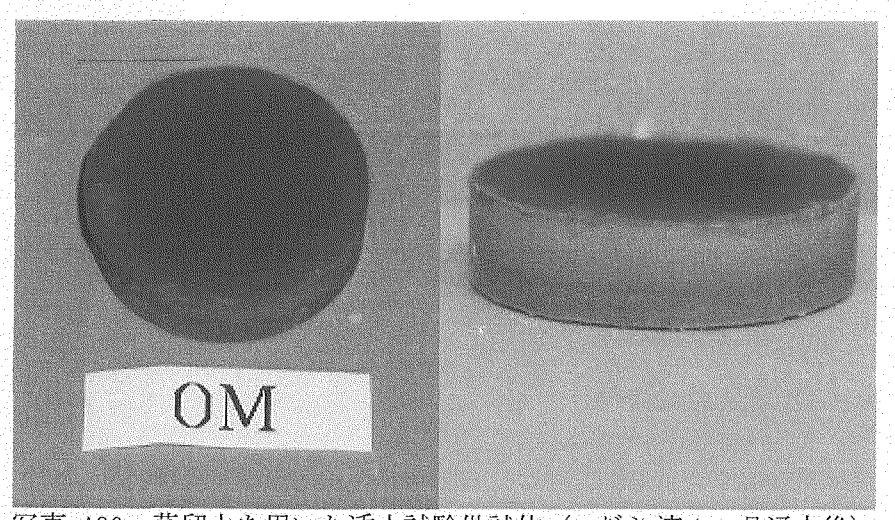


写真-A30　蒸留水を用いた透水試験供試体（ﾛｰﾀﾞﾐﾝ液１ヶ月通水後）

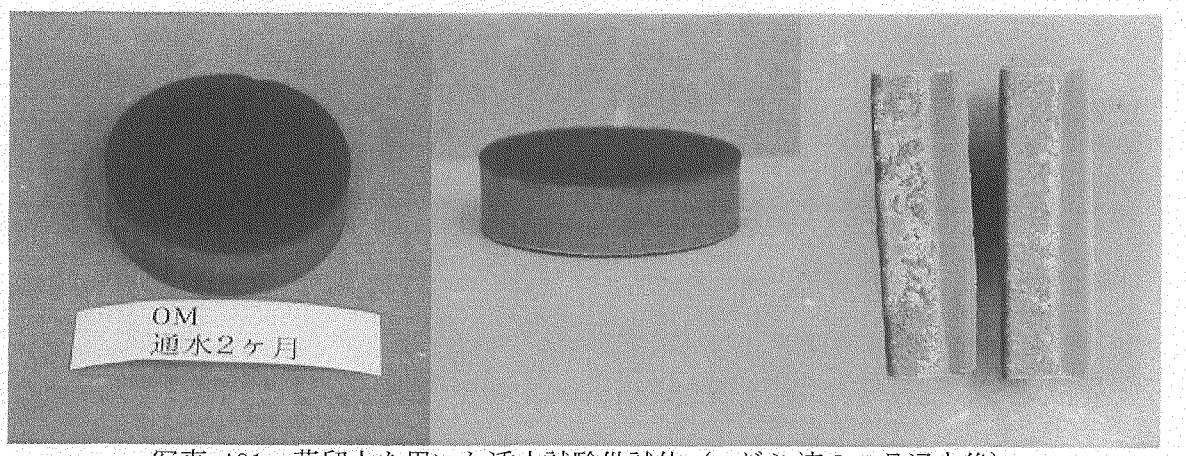


写真-A31　蒸留水を用いた透水試験供試体（ﾛｰﾀﾞﾐﾝ液２ヶ月通水後）

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	立法メートル	m^3
速さ，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	毎メートル	m^{-1}
密度（質量密度）	キログラム毎立法メートル	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	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		$m \cdot m^{-1}=1$[(b)]
立体角	ステラジアン[(a)]	sr[(c)]		$m^2 \cdot m^{-2}=1$[(b)]
周波数	ヘルツ	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	$N \cdot m$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
電荷，電気量	クーロン	C		$s \cdot A$
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	$V \cdot s$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度[(d)]	℃		K
光束	ルーメン	lm	$cd \cdot sr$[(c)]	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd=cd$
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd=m^{-2} \cdot cd$
（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	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$
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	シーベルト	Sv	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$

(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。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表４に示されている。
(b)実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“１”は明示されない。
(c)測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
(d)この単位は、例としてミリセルシウス度m℃のようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表６．国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1° =(π/180) rad
分	’	1’ =(1/60)° =(π/10800) rad
秒	”	1” =(1/60)’ =(π/648000) rad
リットル	l、L	$1l=1\ dm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3$ kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2)ln10(Np)

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

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.60217733(49)\times10^{-19}J$
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10)\times10^{-27}kg$
天文単位	ua	$1ua=1.49597870691(30)\times10^{11}m$

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	$1a=1\ dam^2=10^2m^2$
ヘクタール	ha	$1ha=1\ hm^2=10^4m^2$
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10^5Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10^{-10}m
バーン	b	$1b=100fm^2=10^{-28}m^2$

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

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	$1\ P=1\ dyn \cdot s/cm^2=0.1Pa \cdot s$
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	$1\ sb=1cd/cm^2=10^4cd/m^2$
ホト	ph	$1\ ph=10^4lx$
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	$1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1\ R=2.58\times10^{-4}C/kg$
ラド	rad	$1\ rad=1cGy=10^{-2}Gy$
レム	rem	$1\ rem=1\ cSv=10^{-2}Sv$
X線単位		$1X\ unit=1.002\times10^{-4}nm$
ガンマ	γ	$1\gamma=1\ nT=10^{-9}T$
ジャンスキー	Jy	$1\ Jy=10^{-26}W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$
フェルミ		$1\ fermi=1\ fm=10^{-15}m$
メートル系カラット		$1\ metric\ carat=200\ mg=2\times10^{-4}kg$
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	
ミクロン	μ	$1\ \mu=1\mu m=10^{-6}m$

（第７版，1998年改訂）