

# 緩衝材中の物質移動の拡散支配に関する検討

—様々な緩衝材条件におけるペクレ数の変動範囲の簡略的評価—

1998年 8月

動力炉・核燃料開発事業団  
東海事業所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村大字村松4-33

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所 技術開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to:Technology  
Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development  
Corporation, 4-33 0-aza-Muramatsu, Tokai-mura, Naka, Ibaraki-ken, 319-11, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development  
Corporation)1998

## 緩衝材中の物質移動の拡散支配に関する検討

### - 様々な緩衝材条件におけるペクレ数の変動範囲の簡略的評価 -

吉田 隆史\*, 大井 貴夫\*, 石黒 勝彦\*

## 要 旨

人工バリア材の一つである緩衝材には、核種の移行を抑制する機能として、地下水の流れを抑制し物質移動を拡散支配にすることが期待されている。この機能に影響をおよぼす要因としては、ベントナイトに対するケイ砂の混合割合、緩衝材の乾燥密度および温度等が考えられる。これらの要因は緩衝材の設計仕様の変更や緩衝材の物理的性質への変動要因（緩衝材の流出や温度環境の変化等）によって変化する。よって、これらの要因が緩衝材中での拡散支配にどのような影響をおよぼし得るかを把握しておくことは、設計研究および核種移行評価の両面から重要である。ここでは、ベントナイト（クニゲル V1）に対するケイ砂混合割合、乾燥密度および温度条件を変化させた場合について、緩衝材中の物質移動として拡散支配が担保される領域を、動水勾配、透水係数および実効拡散係数から求められるペクレ数（ $Pe$ ）を指標とした簡略的な手法を用いて検討した。

緩衝材に作用する動水勾配を過大に設定（1.0 [-]）し、かつケイ砂混合による実効拡散係数の増加効果を見捨て、現状で取得されている透水係数および実効拡散係数に対するケイ砂混合割合、乾燥密度および温度の依存性の知見に基づいてペクレ数を保守的に見積もったところ、ペクレ数は最大で約 0.1 [-] であった。これは、媒体中の物質移動が拡散支配と判定される条件である  $Pe < 1$  を満たしており、ここで設定したケイ砂混合割合（0.0～0.7 [-]）、乾燥密度（1.0～1.8 [ $g\ cm^{-3}$ ]）および温度（20～100 [ $^{\circ}C$ ]）の変動範囲内では、緩衝材中での拡散支配による物質移動が維持されることが示された。

---

\* 東海事業所 環境技術開発部 処分システム解析室

目 次

1. はじめに	-----	1
2. 検討方法	-----	3
2.1 透水係数の変動範囲	-----	4
2.2 実効拡散係数の変動範囲	-----	11
3. 緩衝材中の物質移動の拡散支配に関する検討	-----	19
4. まとめ	-----	32
5. 今後の課題	-----	33
6. 謝辞	-----	33
7. 参考文献	-----	34

## 図 表 目 次

図 2.1-1	緩衝材の固有透過度のケイ砂混合割合および緩衝材乾燥密度依存性	-----	8
図 2.1-2	水の動粘度の温度依存性	-----	9
図 2.1-3	緩衝材の透水係数のケイ砂混合割合, 緩衝材乾燥密度および温度依存性	-----	10
図 2.2-1	各化学種の実効拡散係数のベントナイト (クニゲル V1) 乾燥密度依存性	-----	16
図 2.2-2	自由水中の拡散係数の温度依存性	-----	17
図 2.2-3	実効拡散係数のベントナイト (クニゲル V1) 乾燥密度および温度依存性	-----	18
図 3-1	ペクレ数のケイ砂混合割合, 緩衝材乾燥密度および温度依存性		
	- 化学種: $H_2O$ , 動水勾配: 1.0 -	-----	24
図 3-2	ペクレ数のケイ砂混合割合, 緩衝材乾燥密度および温度依存性		
	- 化学種: $Cs^+$ , 動水勾配: 1.0 -	-----	25
図 3-3	ペクレ数のケイ砂混合割合, 緩衝材乾燥密度および温度依存性		
	- 化学種: $TcO_4^-$ , 動水勾配: 1.0 -	-----	26
図 3-4	ペクレ数のケイ砂混合割合, 緩衝材乾燥密度および温度依存性		
	- 化学種: $NpO_2(CO_3)^-$ , 動水勾配: 1.0 -	-----	27
図 3-5	ペクレ数のケイ砂混合割合, 緩衝材乾燥密度および温度依存性		
	- 化学種: $UO_2(CO_3)_3^{4-}$ , 動水勾配: 1.0 -	-----	28
図 3-6	ペクレ数のケイ砂混合割合, 緩衝材乾燥密度および温度依存性		
	- 化学種: $Cl^-$ , 動水勾配: 1.0 -	-----	29
図 3-7	ペクレ数に対する温度の影響	-----	30
図 3-8	ペクレ数のケイ砂混合割合および緩衝材乾燥密度依存性 (温度: 25℃)	-----	31

表 2-1	ペクレ数の算出のために設定した条件	4
表 2.2-1	各化学種の実効拡散係数のベントナイト（クニゲル V1）乾燥密度依存性	12
表 2.2-2	各化学種の実効拡散係数の最大値および最小値	15
表 3-1	各化学種およびケイ砂混合割合に対するペクレ数の最大値および最小値	20

## 1. はじめに

ガラス固化された高レベル放射性廃棄物は、オーバーパックおよび緩衝材からなる人工バリアを設け、深地層（天然バリア）中に埋設処分する方法（地層処分）が提案されている。人工バリア材の一つである緩衝材には、止水性、自己シール性、核種吸着による移行遅延性、熱伝導性、化学的緩衝性、オーバーパック支持性、応力緩衝性の機能が長期的に維持されることが主に要求されている<sup>1)</sup>。そのうちの止水性に関しては、核種移行の抑制の観点から、地下水の流れを抑制し物質移動を拡散支配にすることが期待されている。

緩衝材中の物質移動が移流支配あるいは拡散支配によるものかを判断するための指標としては（1-1）式に示されるペクレ数（ $Pe$ ）が用いられ、緩衝材中の物質移動が拡散支配となるには  $Pe < 1$  が条件となる<sup>2)</sup>。

$$Pe = \frac{v \cdot L}{De} \quad (1-1)$$

ここで、

$Pe$  : ペクレ数 [-]

$v$  : 緩衝材中の地下水流速 [ $m \cdot s^{-1}$ ]

$De$  : 緩衝材中の実効拡散係数 [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]

$L$  : 代表長さ [ $m$ ]

これまで動燃において行ってきた緩衝材中の物質移動が拡散支配であるかどうかに関する検討<sup>1) 3)</sup>では、人工バリアとその周辺岩体を含むニアフィールド領域を対象として、周辺岩体中の動水勾配と透水係数をパラメータとした地下水流動解析を実施し、緩衝材領域のペクレ数が1よりも十分に小さい、すなわち、緩衝材中の物質移動は拡散支配であるという結果を得ている。ただし、このときの検討では、緩衝材中の物質移動条件（透水係数、実効拡散係数）を固定して解析を行っている。

緩衝材中の物質移動条件は緩衝材の設計仕様によって変化する。これまで動燃では、緩衝材の仕様として乾燥密度  $1.8 [g \cdot cm^{-3}]$  のベントナイト（クニゲルV1）を中心に検討を進めてきた。現在、緩衝材には、熱伝導性、経済性およびオーバーパックの腐食膨張により発生する圧力の緩和等の観点から、ケイ砂の混合や乾燥密度の低減等の設計仕様の見直

しが検討されてきている。また、緩衝材中の物質移動条件は、周辺岩体亀裂への緩衝材の流出による乾燥密度の低下や周囲の温度変化によっても変わりうると考えられる。したがって、ベントナイトに対するケイ砂混合割合、乾燥密度および温度条件の変化が緩衝材中の拡散支配にどのような影響をおよぼし得るかを把握しておくことは、設計研究および核種移行評価の両面から重要である。

近年、ベントナイト（クニゲル V1）の透水係数に対するケイ砂混合割合、乾燥密度および温度依存性に関する実測結果<sup>4) 5) 6)</sup>、また、いくつかの化学種に対するベントナイト（クニゲル V1）中の実効拡散係数の乾燥密度依存性に関する実測結果<sup>7) 8)</sup>が報告されてきており、より現実的に上記条件の影響について検討することが可能となってきた。

本研究では、(1-1) 式中の緩衝材中の地下水流速についてダルシー則（透水性媒体中の地下水流速は、媒体自身の透水係数と媒体に作用する動水勾配の積によって決定される）が成立すると仮定し、緩衝材中の物質移動の拡散支配が担保される領域について検討した。具体的には、これまでに得られている緩衝材の透水係数および緩衝材中の実効拡散係数の実測結果に基づき、ベントナイト（クニゲル V1）に対するケイ砂混合割合、乾燥密度および温度をパラメータとしたペクレ数の変動範囲を(1-1)式に従って整理・把握した。



## 2. 検討方法

先に述べたように、緩衝材中の物質移動が移流支配あるいは拡散支配によるものかを判断するための指標としては(1-1)式に示されるペクレ数(Pe)が用いられる。ペクレ数は、移流効果と拡散効果の比で示される無次元数であり、移流効果が卓越すればペクレ数は1より大きくなり、拡散効果が卓越すればペクレ数は1より小さくなる。よって、ペクレ数が1より小さい場合には緩衝材中の物質移動が拡散支配であると判断される。

- ・緩衝材中の物質移動が拡散支配である条件

$$Pe < 1$$

(1-1)式の中に含まれる緩衝材中の地下水流速(v)についてダルシー則が成り立つと仮定すると、地下水流速は次式で表される。

$$v = K \cdot I \quad (2-1)$$

ここで、

K: 緩衝材の透水係数 [m s<sup>-1</sup>]

I: 緩衝材に作用する動水勾配 [-]

この仮定を適用し、(1-1)式に(2-1)式を代入して整理すると、ペクレ数は以下のよう表される。

$$Pe = I \cdot L \cdot \frac{K}{De} \quad (2-2)$$

緩衝材の設計仕様の変更(ベントナイトに対するケイ砂の混合および乾燥密度の低減等)や緩衝材の物理的性質に変化をおよぼす要因(緩衝材の流出や温度環境の変化等)を考慮した場合、(2-2)式で影響を受けるパラメータは緩衝材の透水係数(K)と緩衝材中の実効拡散係数(De)である。

本研究では、ベントナイトに対するケイ砂の混合、乾燥密度および温度の3つの条件を変化させた場合に対し、緩衝材中の物質移動が拡散支配ではなくなる場合があるかどうかについて検討することとした。検討方法としては、①3つの条件が変化した場合の透水係数と実効拡散係数の変動範囲を実測結果に基づいて（実測結果がない場合は、ペクレ数として大きく見積もられるような仮定をおいて）求め、②それらを(2-2)式に適用し、ペクレ数が1より大きくなる場合があるかどうかを調査することとした。

(2-2)式中の緩衝材に作用する動水勾配(I)については、日本の代表的地形をモデル化して実施した広域地下水流動解析から得られた動水勾配の上限値0.6[-]<sup>1)</sup>よりも大きい1.0[-]を設定した。本来、周辺岩体を含む領域を対象とした地下水流動解析を実施し、その結果から得られる緩衝材に作用する動水勾配を用いて（あるいは、直接得られた緩衝材中の地下水流速を用いて）ペクレ数を評価する方法がより現実的といえる。ただし、本研究では、より多くの異なる条件を対象にペクレ数についての検討を効率的に行うため、緩衝材に対して過大に動水勾配が作用すると仮定することで周辺岩体領域の地下水流動解析を省略し、簡略的かつ保守的にペクレ数を評価することとした。

代表長さ(L)については、これまで、オーバパックの直径が用いられている<sup>3)</sup>。本研究では、同様に、炭素鋼オーバパックの直径0.86[m]を採用することとした。

表 2-1 ペクレ数の算出のために設定した条件

緩衝材に作用する動水勾配 I [-]	1.0
代表長さ L [m]	0.86

## 2.1 透水係数の変動範囲

一般に、飽和均質多孔質媒体中を一定方向に流れる流体に対してダルシー則が成り立つ場合、流体のダルシー流速(v)は次式で与えられる<sup>9)</sup>。

$$v = -\kappa \frac{\rho_f \cdot g}{\eta} \frac{\partial h}{\partial s} \quad (2.1-1)$$

ここで,

$v$  : 流体のダルシー流速 [ $\text{m s}^{-1}$ ]

$\kappa$  : 媒体の固有透過度 [ $\text{m}^2$ ]

$\rho_f$  : 流体の密度 [ $\text{kg m}^{-3}$ ]

$\eta$  : 流体の粘性係数 [ $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ]

$g$  : 重力加速度 (9.80665 [ $\text{m s}^{-2}$ ])

$h$  : 圧力水頭 [ $\text{m}$ ]

$s$  : 流れ方向の距離 [ $\text{m}$ ]

一方, 媒体に作用する動水勾配 (I) は次式で定義される。

$$I = -\frac{\partial h}{\partial s} \quad (2.1-2)$$

(2.1-1) 式に (2-1) 式および (2.1-2) 式を代入して整理すると, 媒体の透水係数は (K) は次式で与えられる。

$$K = \kappa \frac{\rho_f \cdot g}{\eta} \quad (2.1-3)$$

また, 流体の動粘度 ( $\nu$ ) が次式で与えられる<sup>10)</sup>ことから,

$$\nu = \frac{\eta}{\rho_f} \quad (2.1-4)$$

媒体の透水係数 (K) は, ダルシー則が成り立つ場合, 最終的に次式で表すことができる。

$$K = g \frac{\kappa}{\nu} \quad (2.1-5)$$

緩衝材は、ベントナイト粉末（あるいはベントナイト粉末にケイ砂を混合したもの）を圧密充填した均質多孔質媒体と考えることができる。本検討では、緩衝材をダルシー則が成り立つ飽和均質多孔質媒体と仮定し、緩衝材の透水係数の算出には(2.1-5)式を適用することとした。

適用にあたっては、緩衝材の固有透過度( $\kappa$ )と緩衝材中を流れる流体の動粘度( $\nu$ )の値が必要である。緩衝材の固有透過度については松本ら<sup>9)</sup>の実験結果を採用することとした。松本らは、ベントナイト(クニゲル V1)に対し、ケイ砂混合割合、乾燥密度および温度依存性について純水を用いた透水試験を実施し、(2.1-5)式に従って試験結果を整理した。その結果、緩衝材の透水係数の温度依存性については水の動粘度の温度依存性で説明でき、かつ緩衝材の固有透過度は以下の実験式に従うという知見を得ている(図 2.1-1 参照)。

$$\log \kappa = -19.6124 + 1.082 \rho - (0.4294 + 0.7356 (1 - Sc)) \rho^2 \quad (2.1-6)$$

ここで、

$\kappa$  : 緩衝材の固有透過度 [ $\text{m}^2$ ]

$Sc$  : ケイ砂混合割合 [-]

(緩衝材に混合されたケイ砂の重量分率)

$\rho$  : 緩衝材の乾燥密度 [ $\text{g cm}^{-3}$ ]

適用範囲は、ケイ砂混合割合( $Sc$ )が0.0~0.7[-]、乾燥密度( $\rho$ )が1.0~1.8 [ $\text{g cm}^{-3}$ ]である。

また、水の動粘度の温度依存性は、JIS<sup>10)</sup>において液体の粘度測定のための標準液として採用されている蒸留水のデータを最小二乗法でフィッティングすることで以下の式が得られる(図 2.1-2 参照)。

$$\log \nu = 1.0491 - 3.7666\text{E-}02 T + 4.6584\text{E-}05 T^2 \quad (2.1-7)$$

ここで、

$\nu$  : 水の動粘度 [ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ]

T : 水の温度 [K]

適用範囲は、温度 (T) が 273.15～373.15 [K] (0～100 [°C]) である。

緩衝材中を流れる流体としては、処分環境を考えた場合、様々な溶質を含む地下水と考えられる。地下水の動粘度は溶解している溶質の種類や量によって異なるが、ここでは (2.1-7) 式で表される水の動粘度で代表させることとした。

以上より、(2.1-6) 式と (2.1-7) 式を (2.1-5) 式に代入することで緩衝材の透水係数の変動範囲を把握することとした。結果を図 2.1-3 に示す。

把握する際に実験式を用いることから、ケイ砂混合割合、乾燥密度および温度の各変動幅の設定には、外挿を避けて実験式の適用範囲内を用いることが望ましい。また、(2.1-6) 式に対するケイ砂混合割合および乾燥密度の適用範囲は、緩衝材の設計仕様や変動要因が不明確であることを考慮して広く設定してある。よって、ケイ砂混合割合および乾燥密度の変動幅については、適用範囲 (ケイ砂混合割合 : 0.0～0.7 [-] , 乾燥密度 : 1.0～1.8 [ $\text{g cm}^{-3}$ ]) をそのまま用いることとした。温度については、処分環境においてほとんど取りえないであろう低温領域を対象外とし、変動幅を 20～100 [°C] に設定した。

図 2.1-3 より、乾燥密度が小さくケイ砂混合割合および温度が高い条件ほど透水係数が大きくなり、その逆に乾燥密度が大きくケイ砂混合割合および温度が低い条件ほど透水係数が小さくなっていることが分かる。また、ケイ砂混合割合が増加するにしたがって透水係数に対する乾燥密度の影響が小さくなり、ケイ砂混合割合が 70% の場合では、温度の影響を含めた透水係数の変動範囲は 1 オーダー以内となっていることが分かる。今回検討した 3 つのパラメータの変動範囲の中では、緩衝材の透水係数の最大値と最小値は、それぞれ以下の通りであった。

最大値 :  $2.14\text{E-}12$  [ $\text{m s}^{-1}$ ] (( $S_c, \rho, T$ ) = (0.7 [-] , 1.0 [ $\text{g cm}^{-3}$ ] , 100 [°C] ))

最小値 :  $3.48\text{E-}15$  [ $\text{m s}^{-1}$ ] (( $S_c, \rho, T$ ) = (0.0 [-] , 1.8 [ $\text{g cm}^{-3}$ ] , 20 [°C] ))

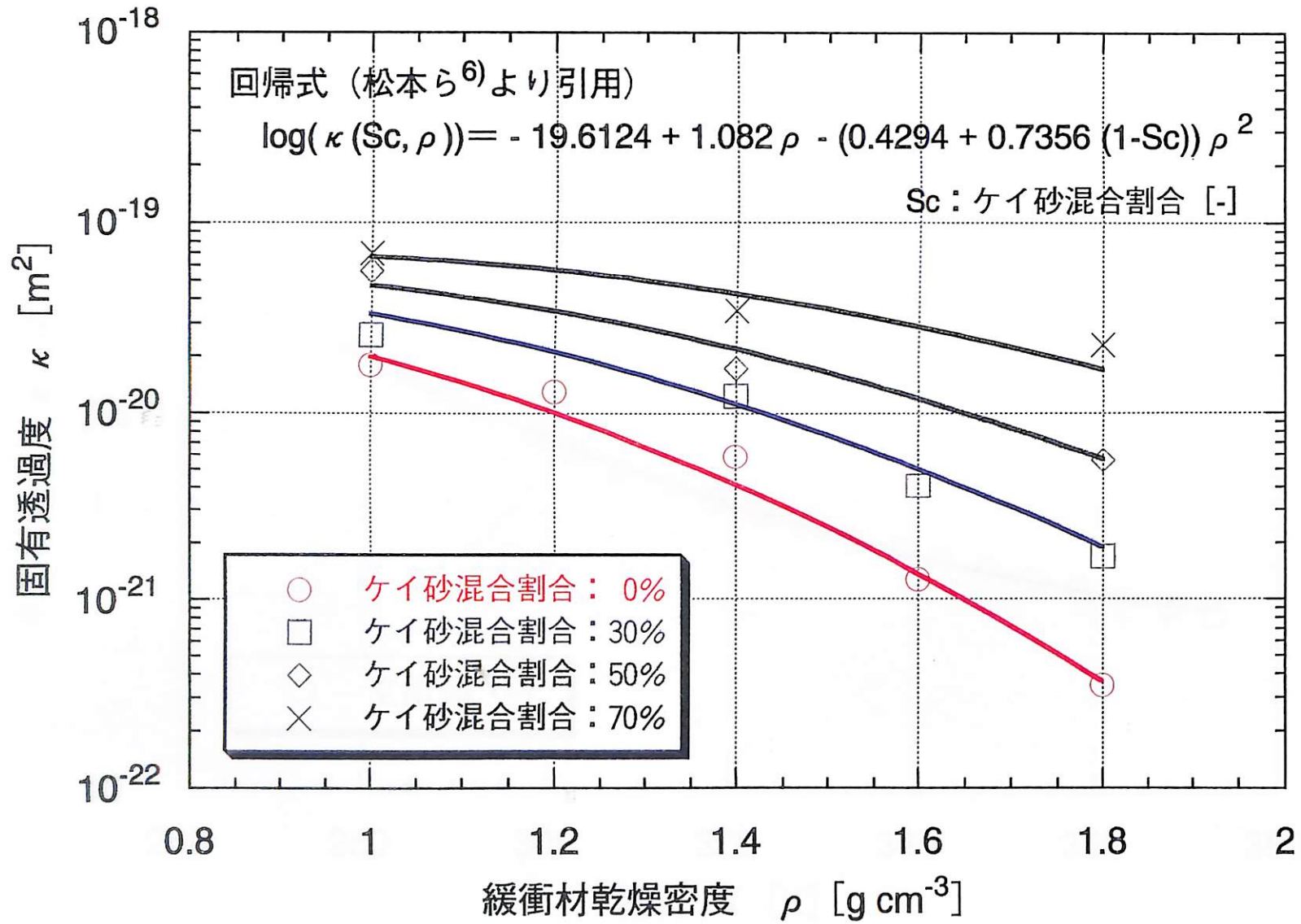


図2.1-1 緩衝材の固有透過度のケイ砂混合割合および緩衝材乾燥密度依存性  
(松本ら<sup>6)</sup>より引用)

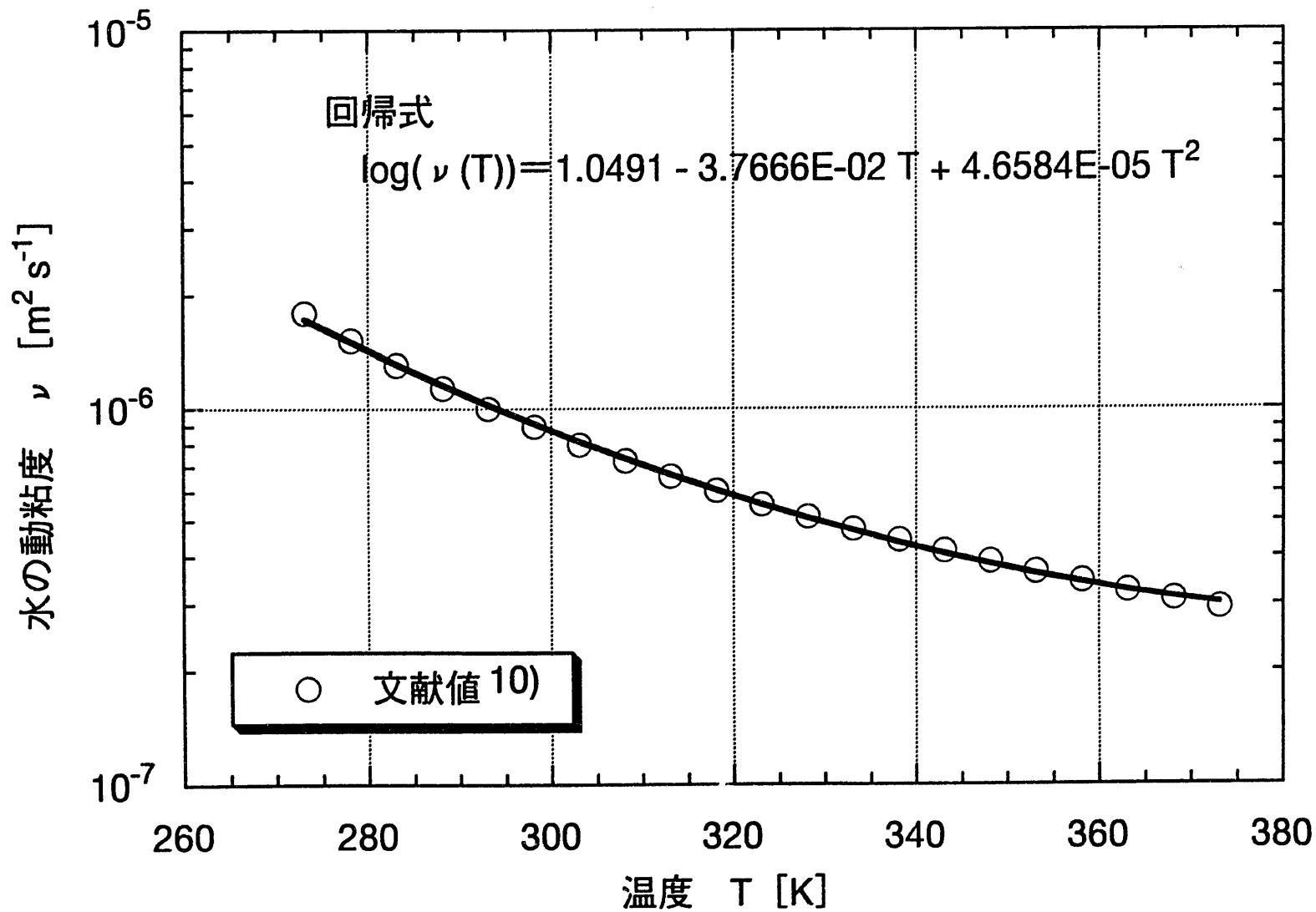


図2.1-2 水の動粘度の温度依存性

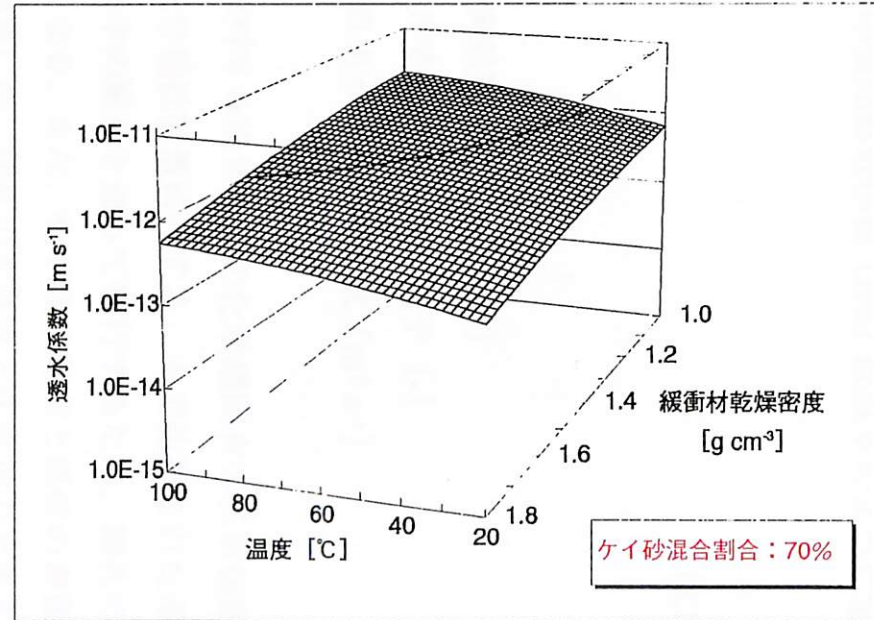
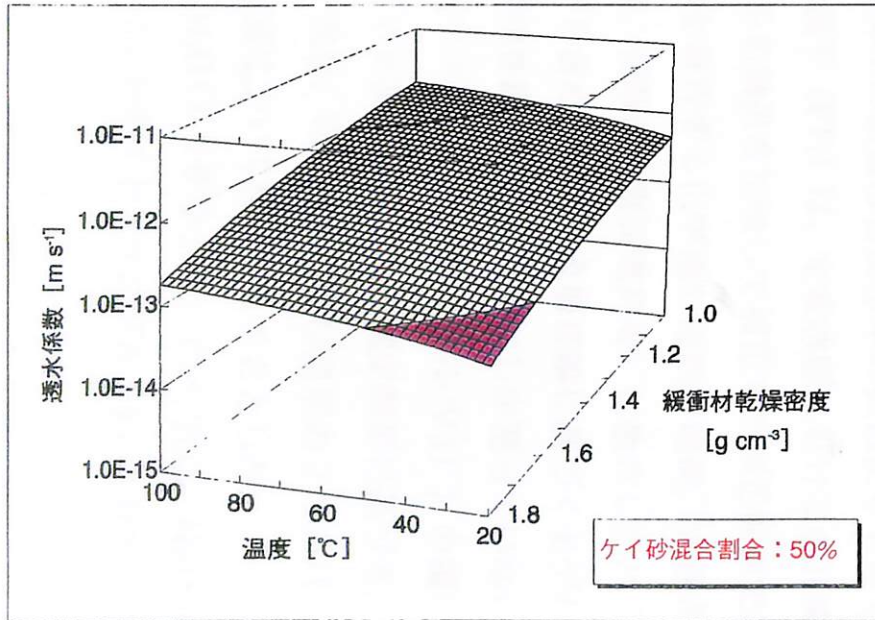
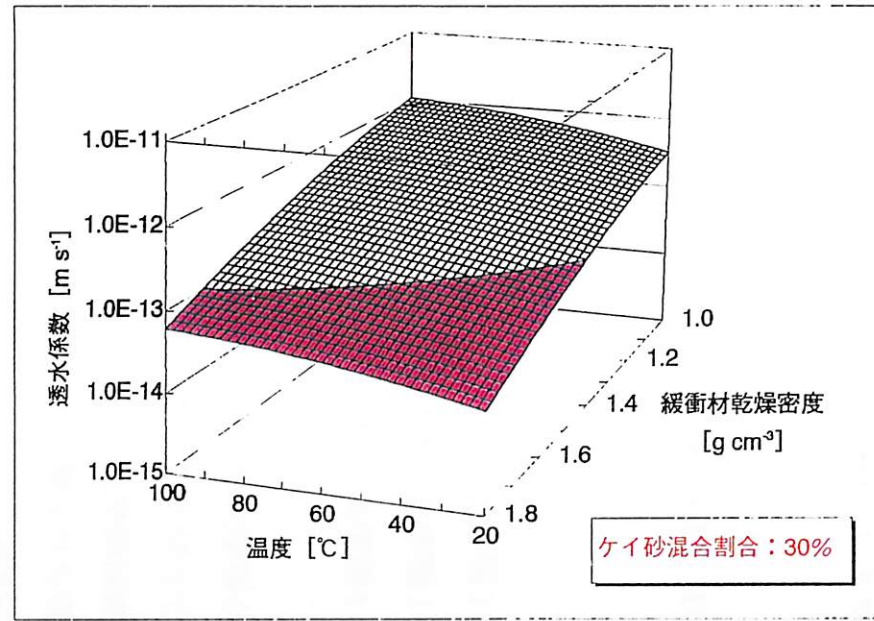
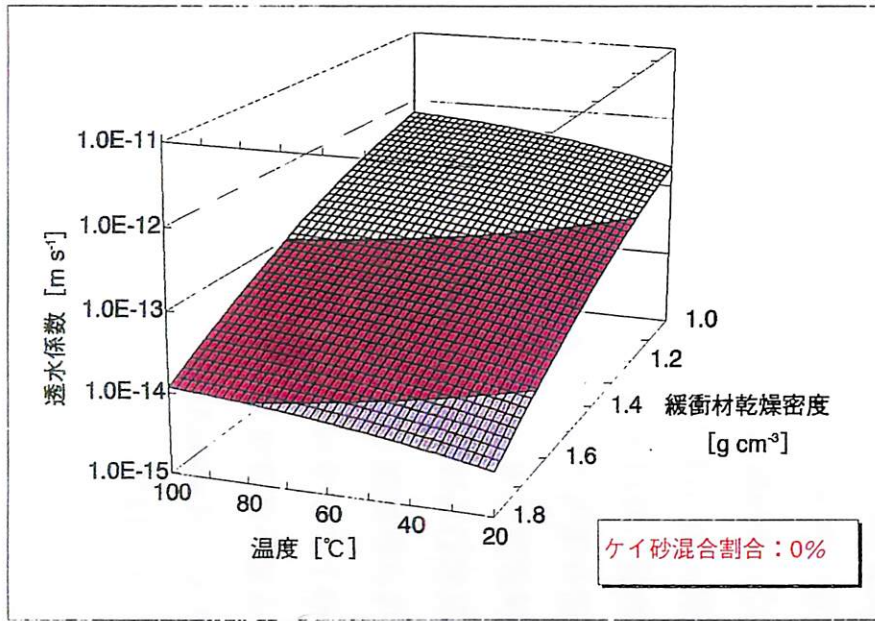


図2.1-3 緩衝材の透水係数のケイ砂混合割合，緩衝材乾燥密度および温度依存性



## 2.2 実効拡散係数の変動範囲

多孔質媒体中の定常拡散における化学種  $i$  の実効拡散係数 ( $De_i$ ) は以下のように定義されている<sup>1)</sup>。

$$De_i = FF_i \cdot D_i^* \quad (2.2-1)$$

ここで、

$De_i$  : 化学種  $i$  の実効拡散係数 [ $m^2 s^{-1}$ ]

$FF_i$  : 化学種  $i$  に対する媒体の形状因子 [-]

$D_i^*$  : 化学種  $i$  の自由水中の拡散係数 [ $m^2 s^{-1}$ ]

媒体がなく、流れのない水中を化学種が移行する場合、その化学種固有の拡散係数、すなわち、自由水中の拡散係数にしたがって化学種は拡散移行する。水で飽和された多孔質媒体中を拡散移行する場合は、化学種は媒体中の細孔を通して移行するため、細孔の曲がりの影響を受けて自由水中の拡散よりも遅くなる。また、化学種の電荷と媒体の表面電荷の電気的相互作用（表面拡散やイオン排除効果）や、細孔の大きさと化学種の大きさの関係による分子ふるい効果によっても多孔質媒体中の拡散は自由水中の拡散よりも遅くなることが一般的に考えられている<sup>11) 12)</sup>。形状因子 ( $FF_i$ ) は、定常状態における多孔質媒体中の拡散と自由水中の拡散との違いを、これらの効果を加味して補正する補正係数である。

上述のように、形状因子 ( $FF_i$ ) は、媒体を移行する化学種の種類（電荷、大きさ等）と媒体の特性（粒径分布、粒子形状、屈曲度、空隙率、表面電荷等）に依存したパラメータである。実効拡散係数について、形状因子を含め、電気二重層理論に基づくモデル化の検討は試みられているものの、まだ定性的傾向を説明できる段階にしか至っていない<sup>7)</sup>。したがって、ここでは、化学種および媒体（ベントナイト（クニゲル V1））の種別のみに着目し、定常拡散実験により直接得られている実効拡散係数の測定結果に基づき、ベントナイト（クニゲル V1）に対するケイ砂の混合、乾燥密度および温度の3つのパラメータに対する緩衝材中の実効拡散係数の変動範囲について検討することとした。

佐藤ら<sup>7)</sup>は、Through-Diffusion法により、 $H_2O$ （トリチウム水）、 $Cs^+$ 、 $TcO_4^-$ 、 $NpO_2(CO_3)_2$ 、および  $UO_2(CO_3)_3^{4-}$  の5つの化学種についてベントナイト（クニゲル V1）に対する定常拡

散実験（温度条件：室温）を行い、それぞれの化学種について、様々なベントナイト乾燥密度での実効拡散係数を測定した。また Kato ら<sup>9)</sup>は、Cl<sup>-</sup>について同様の測定を行った。これらの測定結果、および測定結果をベントナイト乾燥密度について指数回帰した結果を図 2.2-1 に示す。また指数回帰により得た実験式を表 2.2-1 に示す。

表 2.2-1 各化学種の実効拡散係数のベントナイト（クニゲル V1）乾燥密度依存性

化学種	電荷	実験式（温度：室温で一定）	適用範囲
H <sub>2</sub> O	0	$De_i = 4.54 \times 10^{-9} \exp(-2.27\rho)$	$1.0 \leq \rho \leq 2.0$
Cs <sup>+</sup>	+1	$De_i = 3.90 \times 10^{-9} \exp(-1.99\rho)$	$0.4 \leq \rho \leq 2.0$
TcO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-1	$De_i = 7.51 \times 10^{-10} \exp(-2.73\rho)$	$0.4 \leq \rho \leq 2.0$
NpO <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sup>-</sup>	-1	$De_i = 2.99 \times 10^{-9} \exp(-3.77\rho)$	$0.8 \leq \rho \leq 1.8$
UO <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> <sup>4-</sup>	-4	$De_i = 4.85 \times 10^{-11} \exp(-1.21\rho)$	$0.4 \leq \rho \leq 2.0$
Cl <sup>-</sup>	-1	$De_i = 1.24 \times 10^{-9} \exp(-3.67\rho)$	$0.7 \leq \rho \leq 1.5$

$De_i$  : 化学種 i の実効拡散係数 [ $m^2 s^{-1}$ ]

$\rho$  : ベントナイト（クニゲル V1）乾燥密度 [ $g cm^{-3}$ ]

図 2.2-1 より、実効拡散係数はどの化学種についてもベントナイト乾燥密度に対して単調に減少する傾向にあることが分かる。また、陰イオン<中性分子<陽イオンの順に実効拡散係数が大きくなっているのが特徴的である。

これらの化学種の形態は、必ずしも処分環境における元素の支配化学種として予測されているものではない。ここでは、処分環境における元素の支配化学種が、ここで得られている 6 つの化学種についての実効拡散係数のベントナイト乾燥密度依存性のいずれかに類似した挙動を示すと仮定し、表 2.2-1 に示す各化学種に対する実効拡散係数のベントナイト乾燥密度依存性の実験式を適用することとした。

また、これらの実効拡散係数のベントナイト乾燥密度依存性は、ケイ砂の混合や温度変化によって変わりうるものが十分に考えられる。ただし、現時点では、これらを実験パラメータとして実効拡散係数を測定した結果は報告されていない。そこで、実効拡散係数に対するケイ砂の混合および温度変化については、以下のように取り扱うこととした。

ケイ砂の混合については、松本ら<sup>9)</sup>の実験による固有透過度の傾向（ケイ砂混合割合が

大きくなるにつれて固有透過度が大きくなる) から、実効拡散係数についてもケイ砂の混合によって大きくなることが予想される。ただし、(2.2) 式から分かるように、ペクレ数は実効拡散係数が小さいほうが大きく見積もられる。よって、ここではケイ砂混合の実効拡散係数への影響を保守的に無視することとした。

温度の影響については、自由水中の拡散係数の温度依存性について知見が得られている<sup>13) 14)</sup>。ここでは自由水中の拡散係数の温度変化の影響のみを実効拡散係数に反映させることとした。

化学便覧<sup>13)</sup>によると、自由水中の拡散係数 ( $D_i^*$ ) と温度との関係は次式で与えられる。

$$D_i^* = D_o \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2.2-2)$$

ここで、

$D_o$  : 頻度因子 [ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ]

$Q$  : 活性化エネルギー [ $\text{J mol}^{-1}$ ]

$R$  : 気体定数 ( $8.314$  [ $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ ])

$T$  : 温度 [K]

また、佐藤ら<sup>14)</sup>によると、水を媒体とする場合、活性化エネルギー ( $Q$ ) はどの化学種でもほぼ  $1.505\text{E}+04$  [ $\text{J mol}^{-1}$ ] であることが述べられている。よって、自由水中の拡散係数の温度依存性については、活性化エネルギーを化学種によらず一定とみなして (2.2-2) 式を用いることとした。

室温における実効拡散係数の乾燥密度依存性は、前述のように6つの化学種についてだけではあるが測定されており<sup>7) 8)</sup>、表 2.2-1 に示す実験式としてまとめることができる。室温を  $298.15$  [K] ( $25^\circ\text{C}$ ) とみなし、かつ実効拡散係数の温度変化は自由水中の拡散係数の温度変化によってのみ影響を受けると仮定すると、(2.2-1) 式より、実効拡散係数 ( $De_i(\rho, T)$ ) は以下のように表される。

$$De_i(\rho, T) = De_i(\rho, 298.15) \cdot \frac{D_i^*(T)}{D_i^*(298.15)} \quad (2.2-3)$$

(2.2-3) 式に (2.2-2) 式を代入すると、実効拡散係数の乾燥密度および温度依存性を表す式は以下のように整理される。

$$De_i(\rho, T) = De_i(\rho, 298.15) \cdot \exp\left(-\frac{Q}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298.15}\right)\right) \quad (2.2-4)$$

ここで、

Q : 活性化エネルギー (1.505E+04 [J mol<sup>-1</sup>]<sup>12)</sup>)

R : 気体定数 (8.314 [J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>])

T : 温度 [K]

$\rho$  : ベントナイト (クニゲル V1) の乾燥密度 [g cm<sup>-3</sup>]

すなわち、実効拡散係数に対する温度の寄与率は次式で表現される。

$$\frac{D_i^*(T)}{D_i^*(298.15)} = \exp\left(-\frac{Q}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298.15}\right)\right) \quad (2.2-5)$$

(2.2-5) 式にしたがい、実効拡散係数に対する温度の寄与率を 273.15 [K] (0°C) から 373.15 [K] (100°C) の範囲で表した結果を図 2.2-2 に示す。

図 2.2-2 より、寄与率は温度に対して単調に増加することが分かる。ただし、その変動幅は 1 オーダーの範囲内である。

(2.2-4) 式に表 2.2-1 の実験式を適用し、各化学種について実効拡散係数のベントナイト乾燥密度および温度依存性についてまとめた結果を図 2.2-3 に示す。乾燥密度と温度の変動幅は、2.1 章の緩衝材の透水係数に関する検討の際と同じ変動幅 (それぞれ、1.0~1.8 [g cm<sup>-3</sup>], 20~100 [°C]) に設定した。

表 2.2-2 に、ここで設定したベントナイト乾燥密度と温度の変動範囲における各化学種

の実効拡散係数の最大値と最小値をまとめて示す。

表 2.2-2 各化学種の実効拡散係数の最大値および最小値

化学種	最大値 [ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ]	最小値 [ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ]
$\text{H}_2\text{O}$	1.59E-09	6.88E-11
$\text{Cs}^+$	1.81E-09	9.78E-11
$\text{TcO}_4^-$	1.66E-10	4.97E-12
$\text{NpO}_2(\text{CO}_3)^-$	2.34E-10	3.05E-12
$\text{UO}_2(\text{CO}_3)^{4-}$	4.90E-11	4.95E-12
$\text{Cl}^-$	1.07E-10	1.51E-12

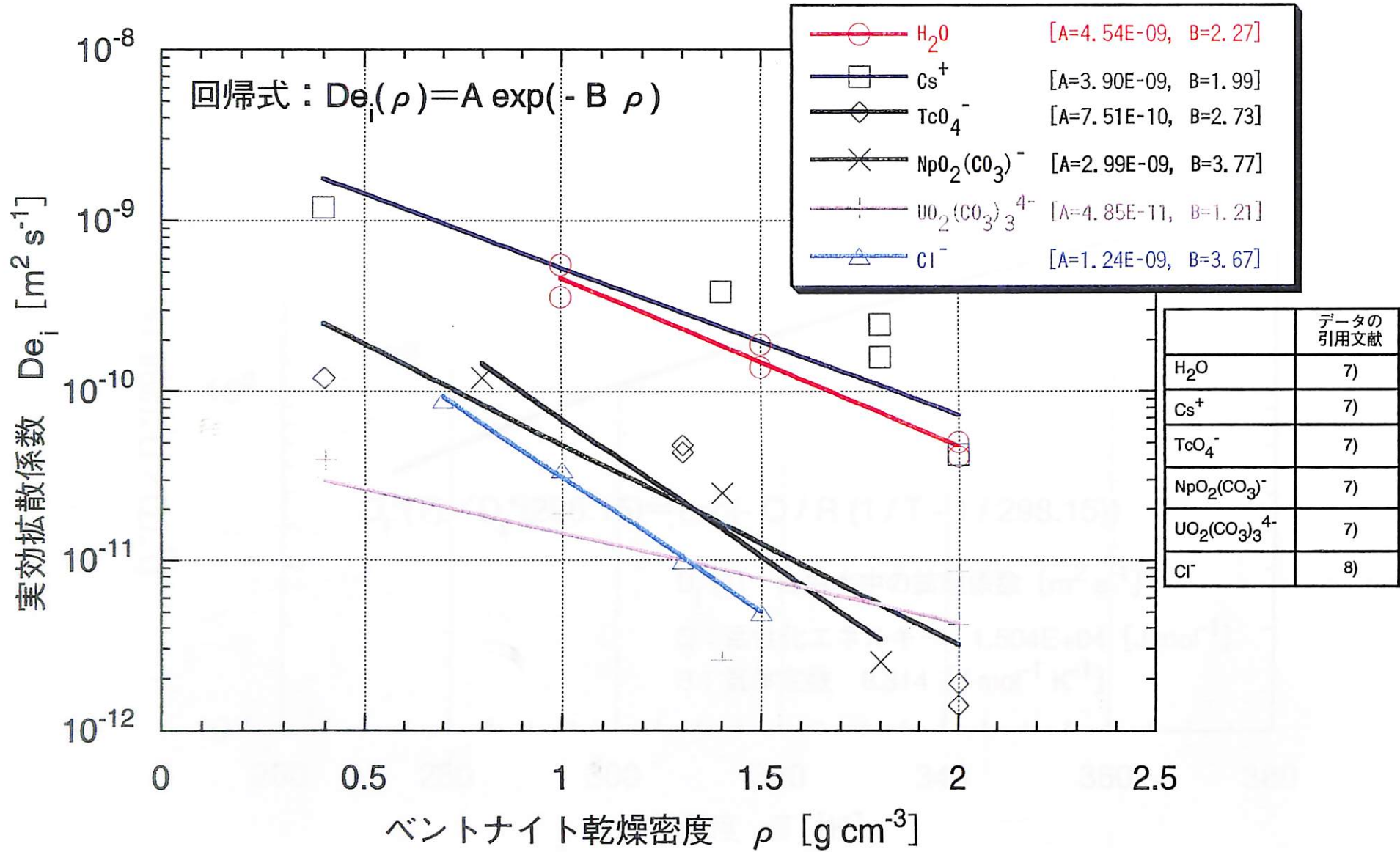


図2.2-1 各化学種の実効拡散係数のベントナイト（クニゲルV1）乾燥密度依存性

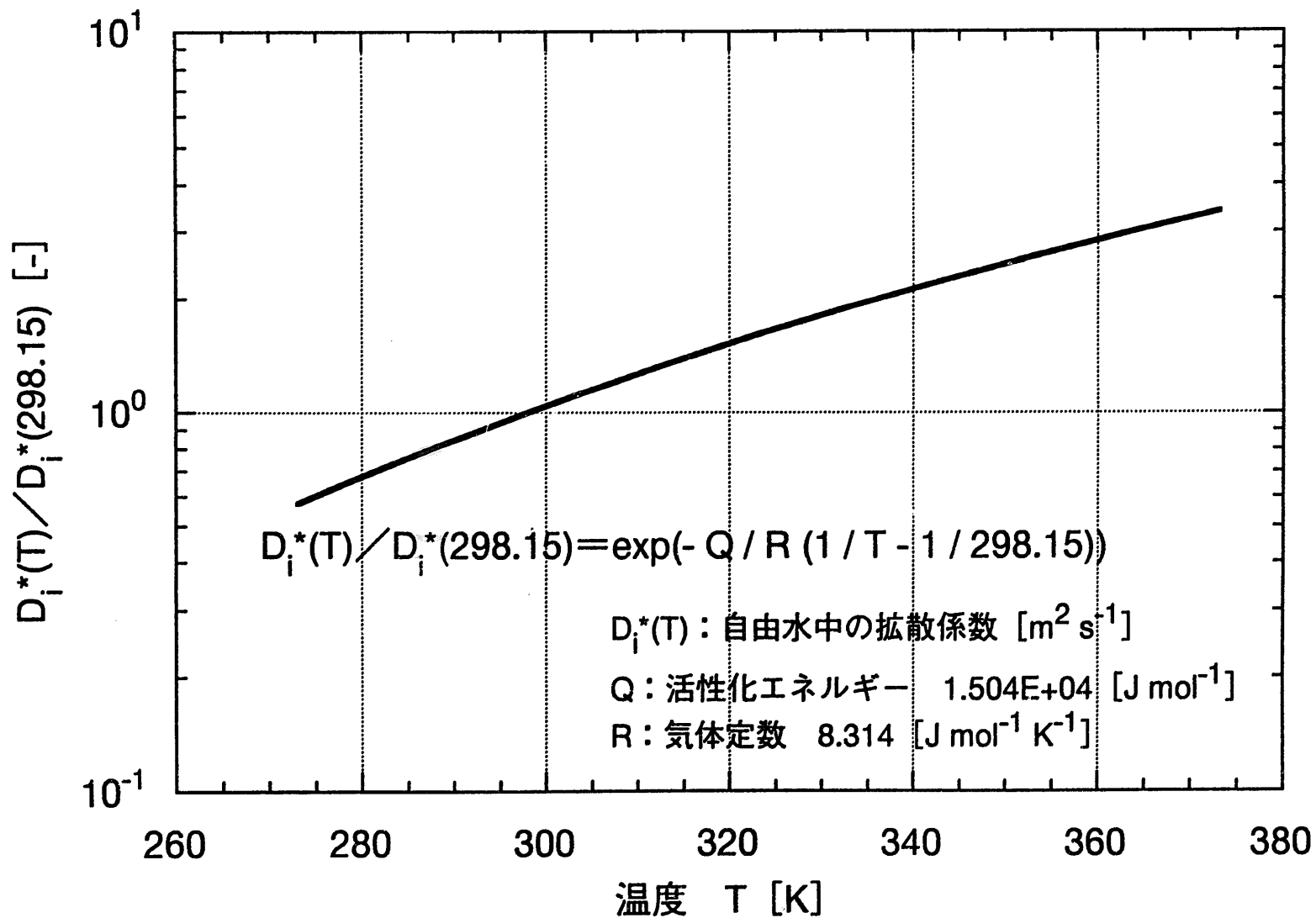


図2.2-2 自由水中の拡散係数の温度依存性

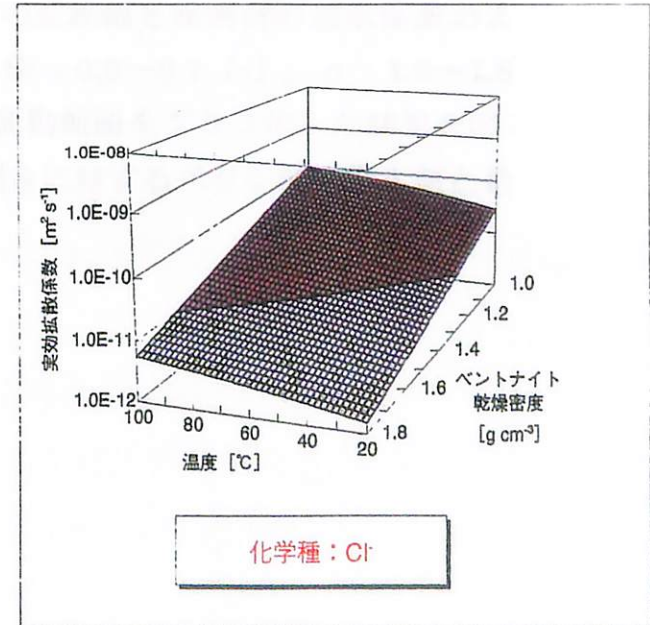
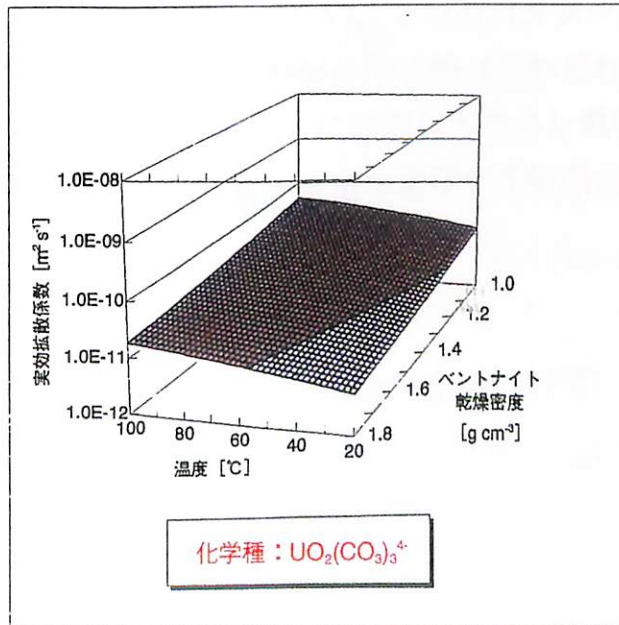
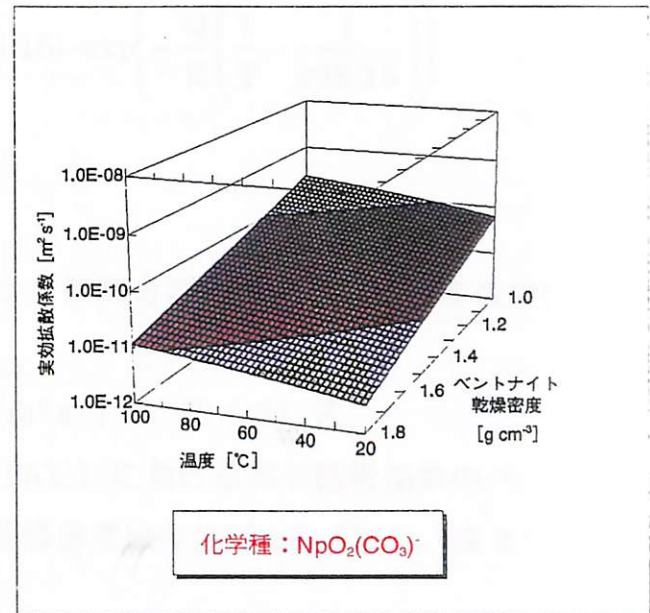
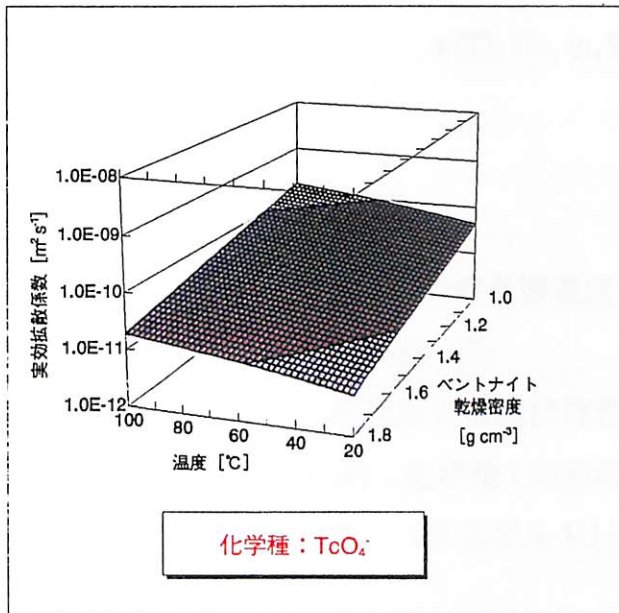
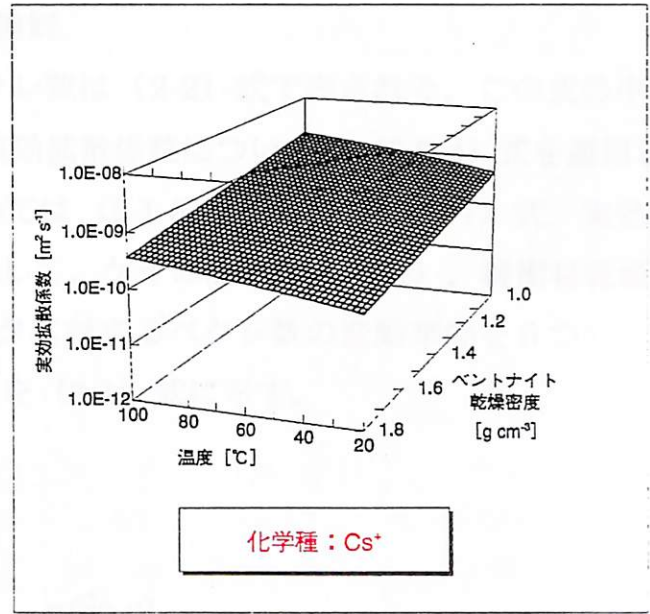
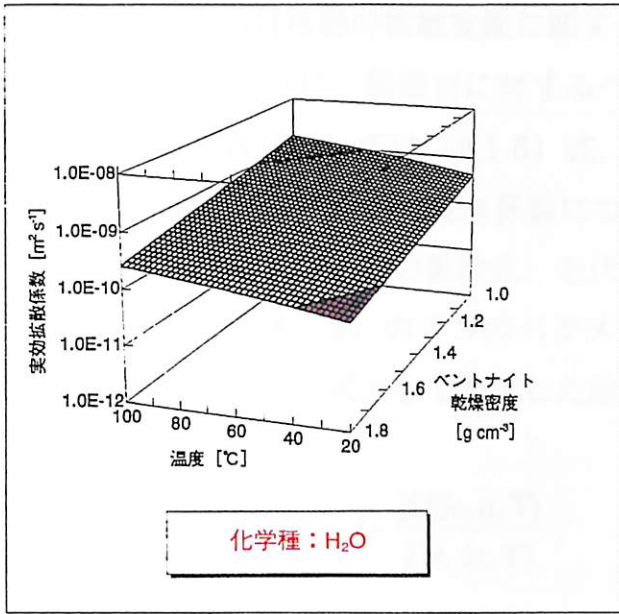


図2.2-3 実効拡散係数のベントナイト（クニゲルV1）乾燥密度および温度依存性



### 3. 緩衝材中の物質移動の拡散支配に関する検討

前章で示したように、緩衝材に対するペクレ数は(2-2)式で表される。この式の中の緩衝材の透水係数については(2.1-5)式、実効拡散係数については(2.2-4)式を適用し、それぞれに関する実験式(透水係数については(2.1-6)式および(2.1-7)式、実効拡散係数については表2.2-1の実験式)を代入して、ケイ砂混合割合( $Sc$ )、緩衝材乾燥密度( $\rho$ )および温度( $T$ )の3つのパラメータに対するペクレ数の変動挙動を6つの化学種について整理した。式として整理した結果を(3-1)式に示す。

$$\begin{aligned}
 Pe(Sc, \rho, T) &= I \cdot L \cdot \frac{K(Sc, \rho, T)}{De_i(\rho, T)} \\
 &= I \cdot L \cdot g \cdot \frac{\kappa(Sc, \rho)}{\nu(T) \cdot De_i(\rho, 298.15) \cdot \exp\left(-\frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298.15}\right)\right)}
 \end{aligned} \tag{3-1}$$

ここで、

$\kappa(Sc, \rho)$  : 緩衝材の固有透過度のケイ砂混合割合および乾燥密度依存性 [ $m^2$ ]  
(2.1-6) 式

$\nu(T)$  : 水の動粘度の温度依存性 [ $m^2 s^{-1}$ ] (2.1-7) 式

$De_i(\rho, 298.15)$  : 化学種  $i$  の室温 (25℃) における実効拡散係数のベントナイト  
(クニゲル V1) 乾燥密度依存性 [ $m^2 s^{-1}$ ] (表 2.2-1 参照)

(3-1) 式にしたがい、3つのパラメータの変動幅を緩衝材の透水係数および実効拡散係数に適用した変動幅と同じ幅(それぞれ、 $Sc$  : 0.0~0.7 [-],  $\rho$  : 1.0~1.8 [ $g\ cm^{-3}$ ],  $T$  : 20~100 [°C])に設定してペクレ数の変動範囲をグラフ化した結果を図3-1~図3-6に示す。また、各化学種およびケイ砂混合割合に対するペクレ数の最大値と最小値をまとめた結果を表3-1に示す。

表 3-1 各化学種およびケイ砂混合割合に対するペクレ数の最大値および最小値

	H <sub>2</sub> O		Cs <sup>+</sup>		TcO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	
	最大値	最小値	最大値	最小値	最大値	最小値
ケイ砂混合割合 0%	4.11E-04 (1.00, 50)	3.92E-05 (1.80, 100)	3.61E-04 (1.00, 50)	2.76E-05 (1.80, 100)	3.93E-03 (1.00, 50)	5.43E-04 (1.80, 100)
ケイ砂混合割合 30%	6.96E-04 (1.10, 50)	2.04E-04 (1.80, 100)	6.02E-04 (1.04, 50)	1.43E-04 (1.80, 100)	7.14E-03 (1.20, 50)	2.82E-03 (1.80, 100)
ケイ砂混合割合 50%	1.13E-03 (1.30, 50)	6.10E-04 (1.80, 100)	9.22E-04 (1.22, 50)	4.29E-04 (1.80, 100)	1.27E-02 (1.42, 50)	7.91E-03 (1.00, 100)
ケイ砂混合割合 70%	2.27E-03 (1.60, 50)	1.16E-03 (1.00, 100)	1.71E-03 (1.50, 50)	1.02E-03 (1.00, 100)	2.95E-02 (1.74, 50)	1.11E-02 (1.00, 100)
	NpO <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sup>-</sup>		UO <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> <sup>4-</sup>		Cl <sup>-</sup>	
	最大値	最小値	最大値	最小値	最大値	最小値
ケイ砂混合割合 0%	3.01E-03 (1.16, 50)	8.87E-04 (1.80, 100)	1.33E-02 (1.00, 50)	5.45E-04 (1.80, 100)	6.47E-03 (1.14, 50)	1.79E-03 (1.80, 100)
ケイ砂混合割合 30%	7.07E-03 (1.44, 50)	4.00E-03 (1.00, 100)	2.21E-02 (1.00, 50)	2.83E-03 (1.80, 100)	1.48E-02 (1.42, 50)	8.74E-03 (1.00, 100)
ケイ砂混合割合 50%	1.63E-02 (1.70, 50)	5.62E-03 (1.00, 100)	3.11E-02 (1.00, 50)	8.47E-03 (1.80, 100)	3.31E-02 (1.68, 50)	1.23E-02 (1.00, 100)
ケイ砂混合割合 70%	4.79E-02 (1.80, 50)	7.88E-03 (1.00, 100)	4.74E-02 (1.24, 50)	2.54E-02 (1.80, 100)	9.65E-02 (1.80, 50)	1.72E-02 (1.00, 100)

動水勾配  $I [-]$  : 1.0

代表長さ  $L [m]$  : 0.86 (オーバーバックの直径)

※ ( ) 内は、最大値または最小値に対する緩衝材乾燥密度  $\rho [g cm^{-3}]$  および温度  $T [^{\circ}C]$   
 $= (\rho, T)$

図 3-1～図 3-6 より、ペクレ数の変動挙動として以下の特徴的挙動が認められた。

- ① ペクレ数は、他のパラメータ（ケイ砂混合割合、乾燥密度、および化学種の違い）の変動に関係なく、温度にはほとんど依存しない傾向を示した。

(3-1) 式より、温度に関してはペクレ数に対して他のパラメータ（ケイ砂混合割合、乾燥密度、および化学種の違い）とは独立に影響することが分かる。

$$\begin{aligned}
 Pe(Sc, \rho, T) &= I \cdot L \cdot g \cdot \frac{\kappa(Sc, \rho)}{v(T) \cdot De_i(\rho, 298.15) \cdot \exp\left(-\frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298.15}\right)\right)} \\
 &= I \cdot L \cdot g \cdot \frac{\kappa(Sc, \rho)}{De_i(\rho, 298.15)} \cdot f(T)
 \end{aligned} \tag{3-2}$$

ただし,

$$f(T) = \frac{1}{v(T) \cdot \exp\left(-\frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298.15}\right)\right)} \tag{3-3}$$

(3-3) 式について、298.15 [K] (25 [°C]) を基準に  $f(T)$  の温度変化を示した結果を図 3-7 に示す。図からも分かるように、 $f(T)$  は、約 323.15 [K] (50 [°C]) にわずかなピークをもつものの、温度に対してほとんど変動しない傾向を示しており、その結果として、ペクレ数はほとんど温度に依存しない結果となった考えられる。

- ② ベントナイトにケイ砂を混合しない場合、ペクレ数は緩衝材乾燥密度に対して単調減少であったが、ケイ砂を混合していくにつれて全体的にペクレ数が上昇し、かつ緩衝材乾燥密度に対して緩やかではあるがピークをもつ傾向に変化する挙動を示した。また、化学種によっては、ケイ砂混合割合が大きい場合、緩衝材乾燥密度に対する傾向が逆転して単調増加傾向になる場合が認められた。

前述の通り、ペクレ数は温度に対してほとんど影響を受けない。よって、温度を 298.15 [K] (25 [°C]) に固定し、ケイ砂混合割合および乾燥密度に対するペクレ数の変動挙動を化学種毎に整理した。結果を図 3-8 に示す。

(3-2) 式より、ペクレ数は、緩衝材の固有透過度に比例して緩衝材中の実効拡散係数に反比例する。

よって、ケイ砂を混合していくにつれて全体的にペクレ数が上昇する傾向は、ケイ砂混合割合が緩衝材の固有透過度のみのパラメータであることから、ケイ砂混合割合に対する固有透過度の傾向 (図 2.1-1 参照) がそのまま反映されたものといえる。

また、ペクレ数の緩衝材乾燥密度に対する変動傾向の変化は、各ケイ砂混合割合における固有透過度の乾燥密度に対する減少率、および各化学種における実効拡散係数の乾燥密度に対する減少率の両者の関係によって決まる（固有透過度の減少率が実効拡散係数の減少率より大きければペクレ数は減少傾向、逆ならば増加傾向になる）といえる。固有透過度については乾燥密度に対して単調減少であるが、上に凸の変曲をもち、ケイ砂混合割合が大きくなるにつれて減少率が小さくなる（図 2.1-1 参照）。また、実効拡散係数についても乾燥密度に対して単調減少であり、 $\text{NpO}_2(\text{CO}_3) \cdot > \text{Cl}^- > \text{TcO}_4^- > \text{H}_2\text{O} > \text{Cs}^+ > \text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$ の順に減少率が小さくなっている（図 2.2-1 参照）。乾燥密度  $1.0 \sim 1.8$  [ $\text{g cm}^{-3}$ ] の範囲内では、固有透過度はケイ砂混合割合 0% で約 1.7 オーダー減少し、ケイ砂混合割合 70% で約 0.6 オーダー減少している。同様の範囲内で、実効拡散係数は  $\text{NpO}_2(\text{CO}_3) \cdot$  で約 1.3 オーダー減少し、 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$  で約 0.4 オーダー減少している。よって、 $\text{NpO}_2(\text{CO}_3) \cdot$  では、緩衝材乾燥密度に対して上に凸の変曲を保ちながらもケイ砂混合割合が増加するにしたがってペクレ数の減少傾向が小さくなり、上に凸の変曲をもつが故に 30% のケイ砂の混合でピークをもつ傾向を示し、さらにケイ砂の混合が多くなると乾燥密度に対してペクレ数が増加傾向に転ずる挙動になっている（図 3-8 の  $\text{NpO}_2(\text{CO}_3) \cdot$  を参照）。また、 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$  では、70% までケイ砂を混合した場合で、乾燥密度が小さい（約  $1.24$  [ $\text{g cm}^{-3}$ ]）場合にわずかなピークをもつものの（上に凸の変曲に起因して局部的に減少率が逆転したため）、ほぼ乾燥密度に対するペクレ数の減少傾向が維持されている（図 3-8 の  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$  を参照）。したがって、乾燥密度に対する固有透過度と実効拡散係数の減少率の違いによって、このような傾向が認められたものと考えられる。

- ③ 陰イオンに対するペクレ数は、陽イオンおよび中性化学種のペクレ数よりも 1~2 オーダー大きくなる傾向を示した。

(3-2) 式より、ペクレ数が化学種の違いの影響を受けるのは実効拡散係数のみである。図 2.2-1 より、ベントナイト乾燥密度  $1.0 \sim 1.8$  [ $\text{g cm}^{-3}$ ] の範囲内で、陰イオンと陽イオンおよび中性化学種間の実効拡散係数の差が最も小さい場合は、乾燥密度  $1.0$  [ $\text{g cm}^{-3}$ ] での  $\text{NpO}_2(\text{CO}_3) \cdot$  と  $\text{H}_2\text{O}$  との差であり、約 0.8 オーダーの開きがある。また、差が最も大きい場合は、 $1.8$  [ $\text{g cm}^{-3}$ ] での  $\text{Cl}^-$  と  $\text{Cs}^+$  との差であり、その差は

約 1.8 オーダーである。化学種の違い、特に、陰イオンであるか、あるいは陽イオンおよび中性化学種であるかの違いによって、ペクレ数がオーダー的に異なる傾向を示したのはこの結果が反映されたためである。

表 3-1 より、各化学種におけるペクレ数の最大値はケイ砂の混合によって増加するが、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Cs}^+$ 、 $\text{TcO}_4^-$  および  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$  の化学種は、ケイ砂を 70% まで混合しても混合しない場合と比べて 4~8 倍増加する程度であった。 $\text{NpO}_2(\text{CO}_3)^-$  と  $\text{Cl}^-$  の場合は 15~16 倍の増加であり、化学種の違いによってペクレ数の変動挙動が大きく影響を受けている。これは、先にも述べたような、各ケイ砂混合割合における緩衝材の固有透過度の乾燥密度に対する減少率、および各化学種における緩衝材中の実効拡散係数の乾燥密度に対する減少率の大小関係が主な要因と考えられる。特に、ケイ砂混合割合 0.7 [-] では、固有透過度の減少率が小さいため、実効拡散係数の減少率の大きい  $\text{NpO}_2(\text{CO}_3)^-$  と  $\text{Cl}^-$  については、ペクレ数に対して大きな増加効果をもたらされる。このため  $\text{NpO}_2(\text{CO}_3)^-$  と  $\text{Cl}^-$  が他の化学種に比べて大きく増加したものと考えられる。

また、ペクレ数の最大値に関しては、今回緩衝材に対するペクレ数の変動挙動を検討した範囲では、ケイ砂混合割合 0.7 [-]、緩衝材乾燥密度  $1.8 [\text{g cm}^{-3}]$ 、温度  $50 [^\circ\text{C}]$ 、化学種  $\text{Cl}^-$  の場合で最大値  $9.65\text{E-}02 [-]$  が得られた（表 3-1 参照）。これは、緩衝材中の物質移動が拡散支配である条件である  $\text{Pe} < 1$  を満たしている。ここでの簡略的評価では、動水勾配の設定 ( $1.0 [-]$ ) やケイ砂混合による実効拡散係数の増加効果の無視というペクレ数が大きく見積もられるような仮定を設けて評価を行っている。このような保守的仮定のもとにおいても、本検討範囲内でケイ砂の混合、乾燥密度および温度の変化が生じた場合、緩衝材中での物質移動の拡散支配は保たれることが確認された。

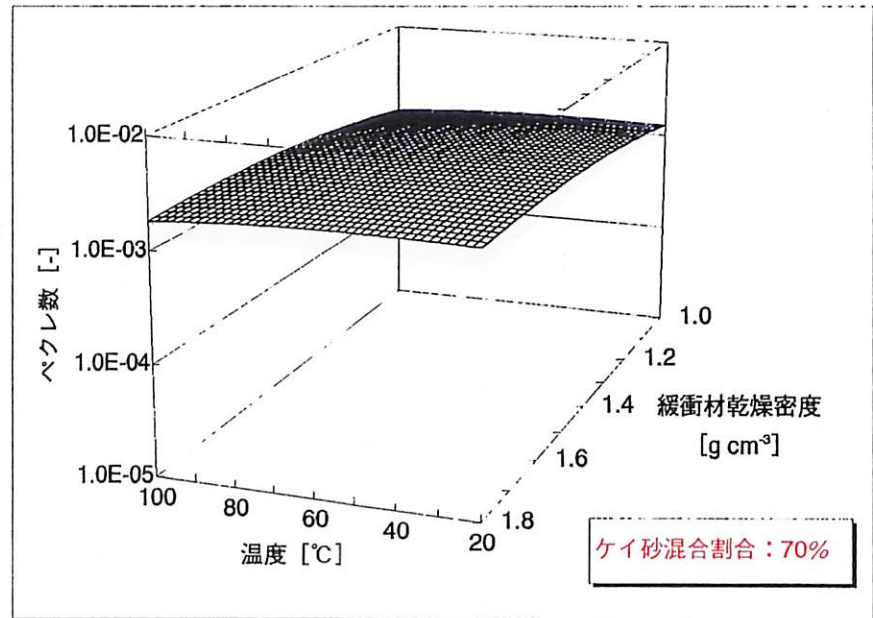
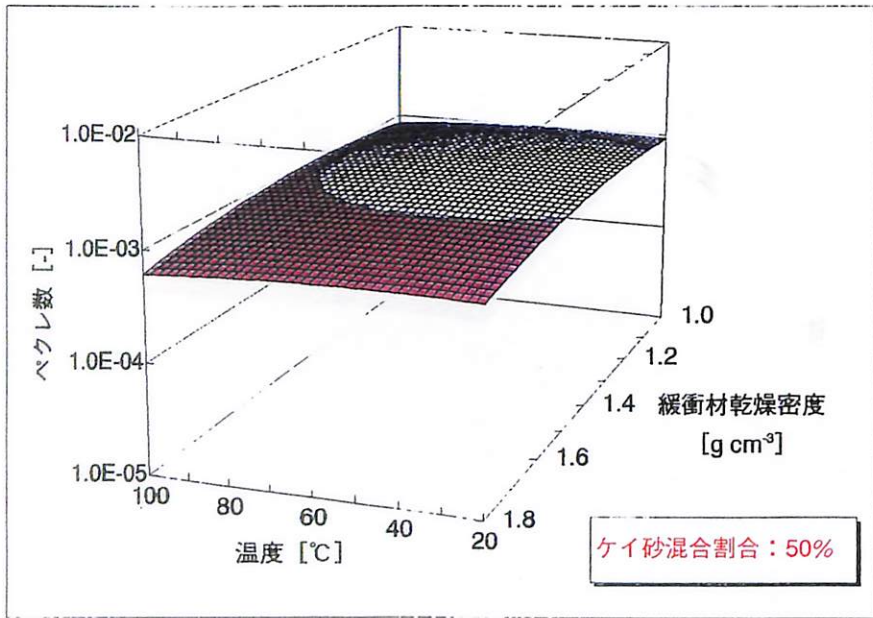
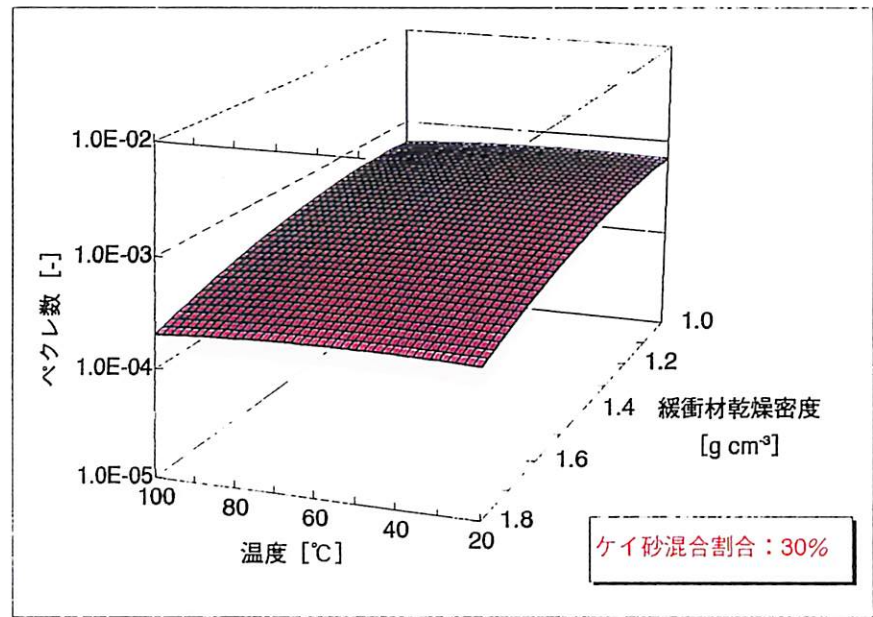
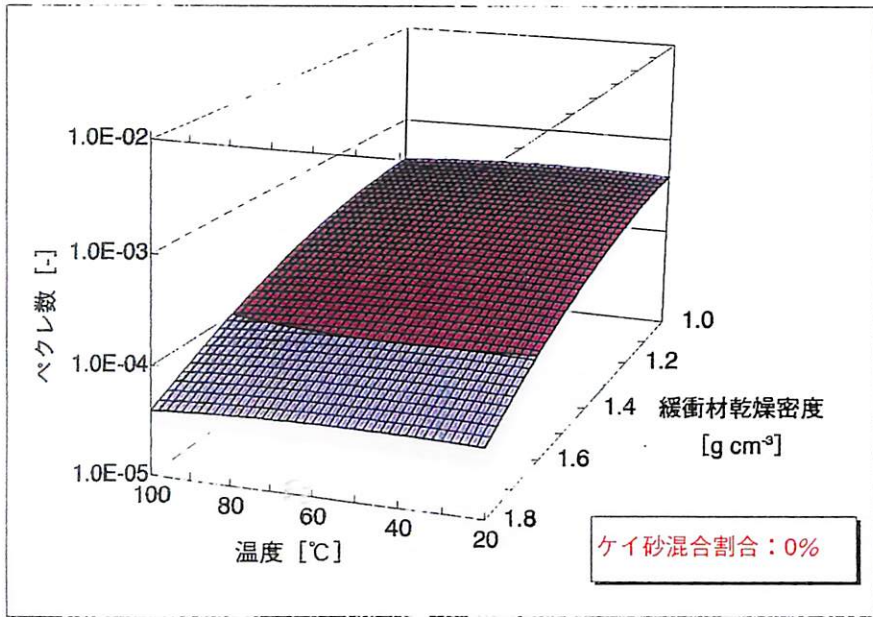


図3-1 ペクレ数のケイ砂混合割合，緩衝材乾燥密度および温度依存性  
- 化学種：H<sub>2</sub>O，動水勾配：1.0 -

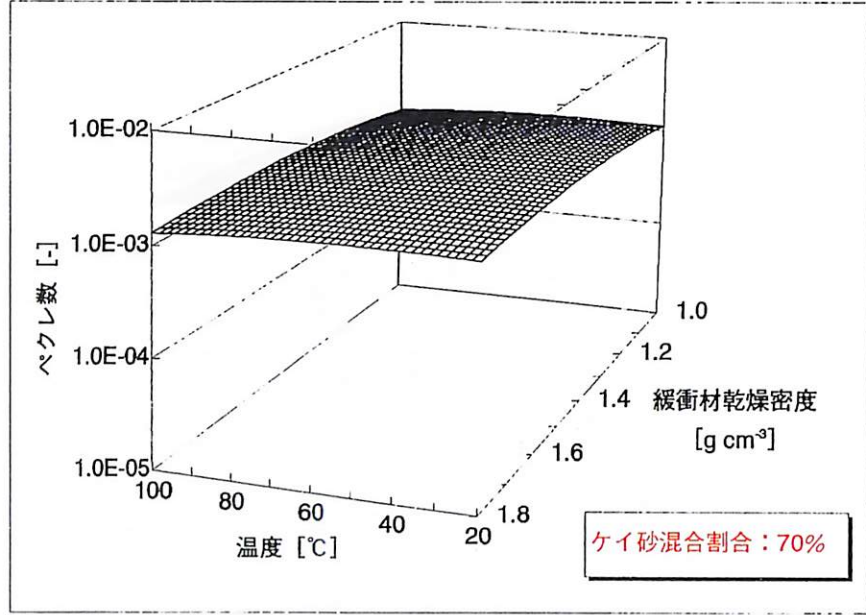
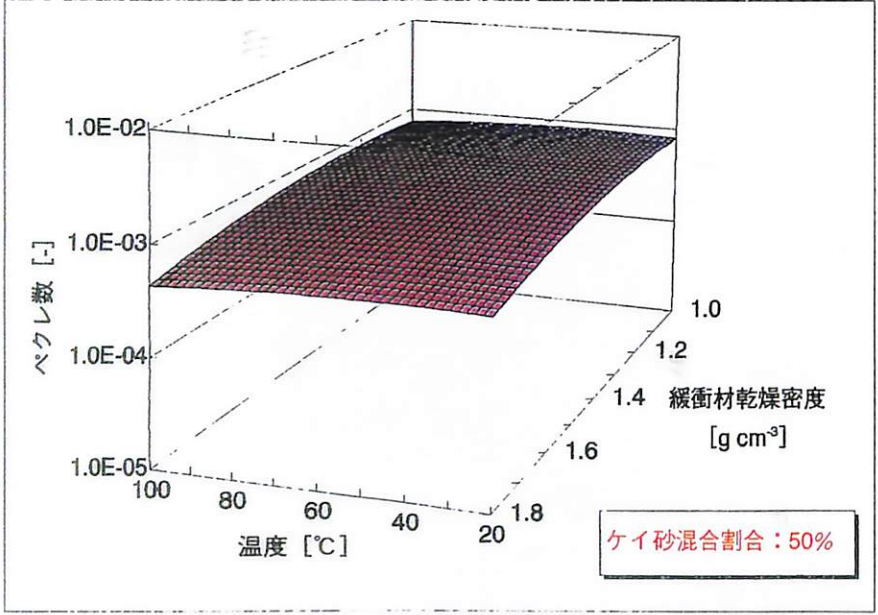
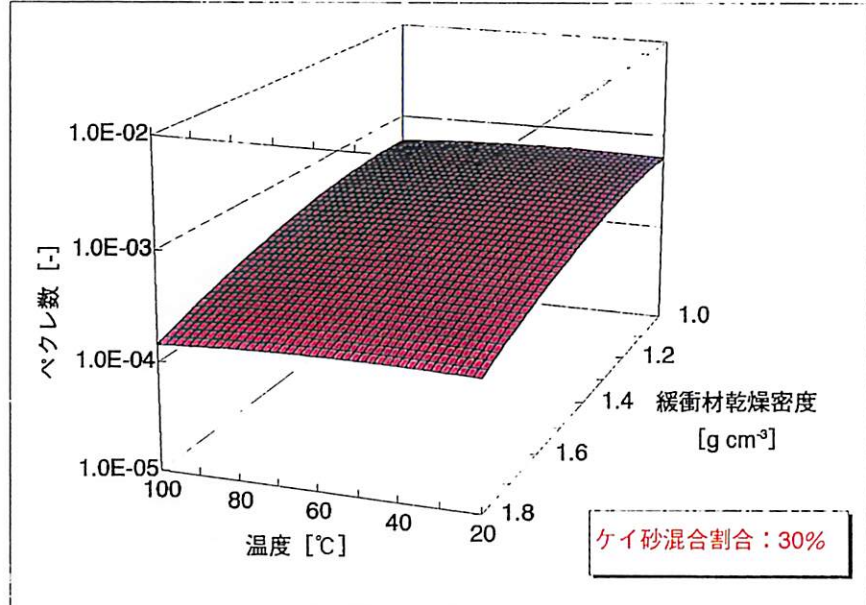
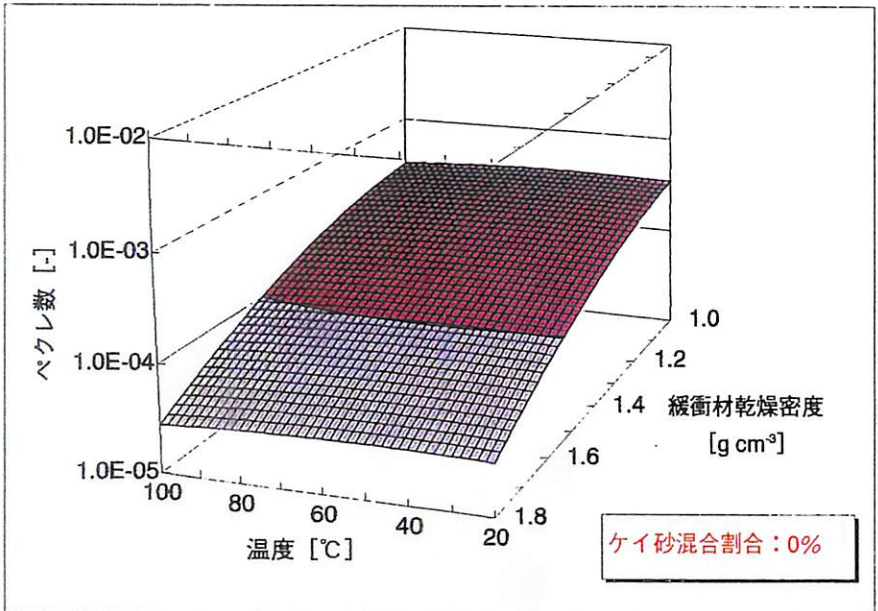


図3-2 ペクレ数のケイ砂混合割合，緩衝材乾燥密度および温度依存性  
 - 化学種：Cs<sup>+</sup>，動水勾配：1.0 -

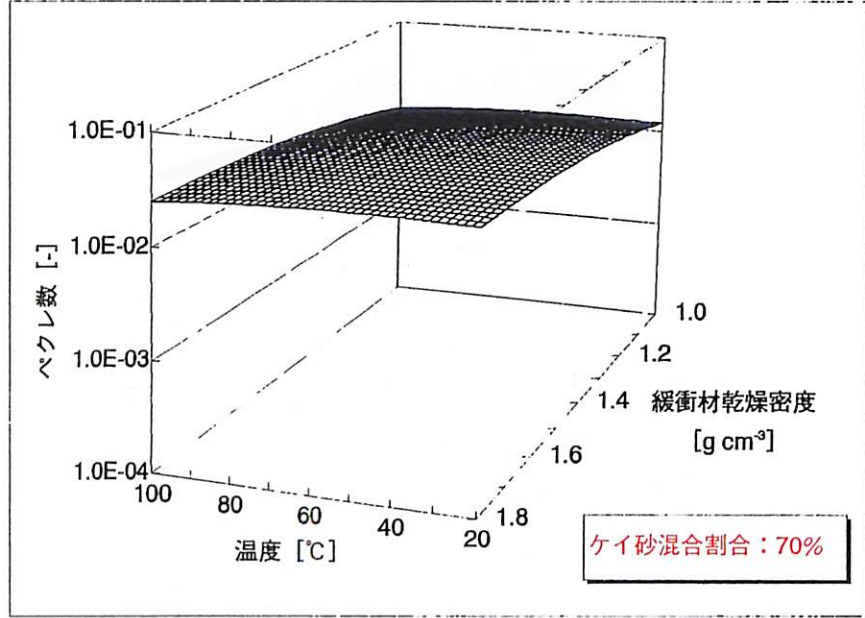
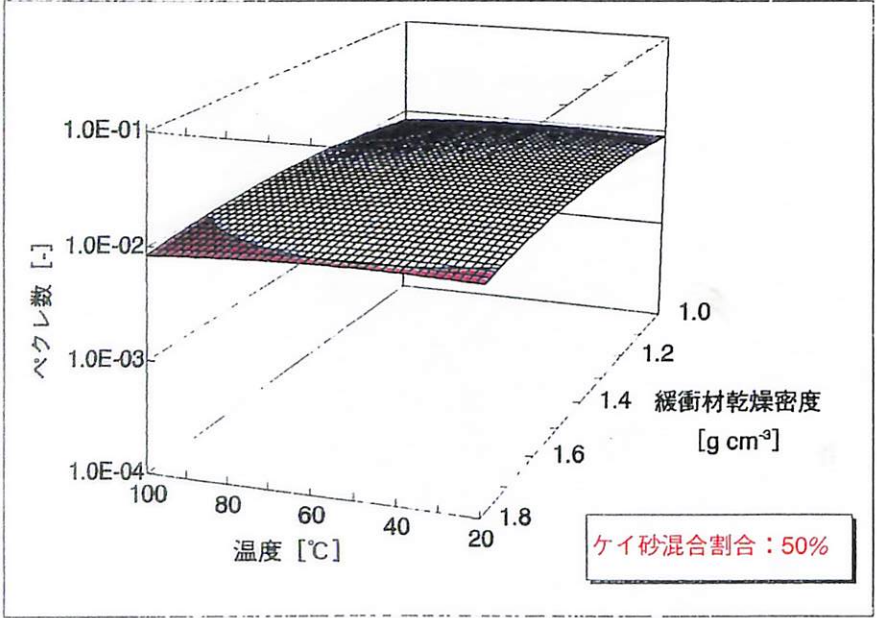
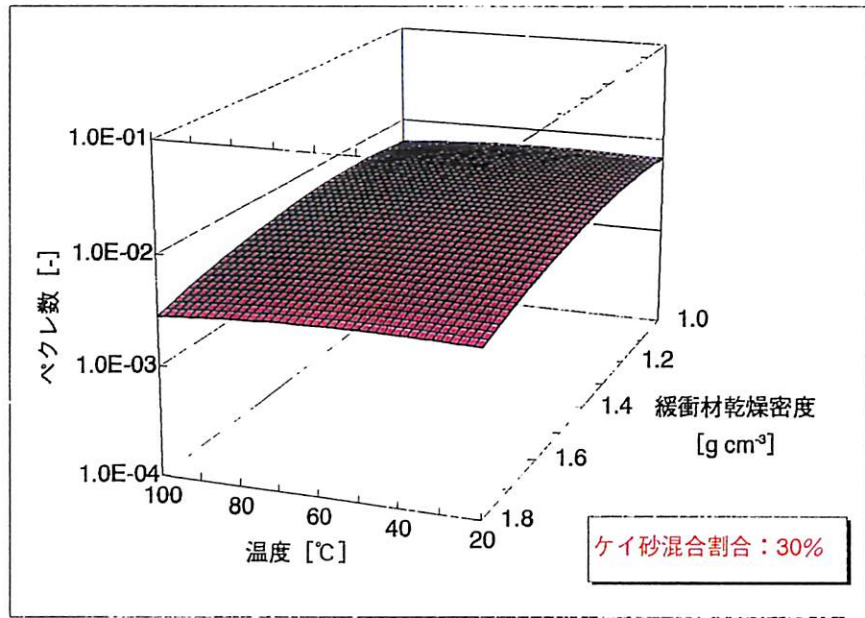
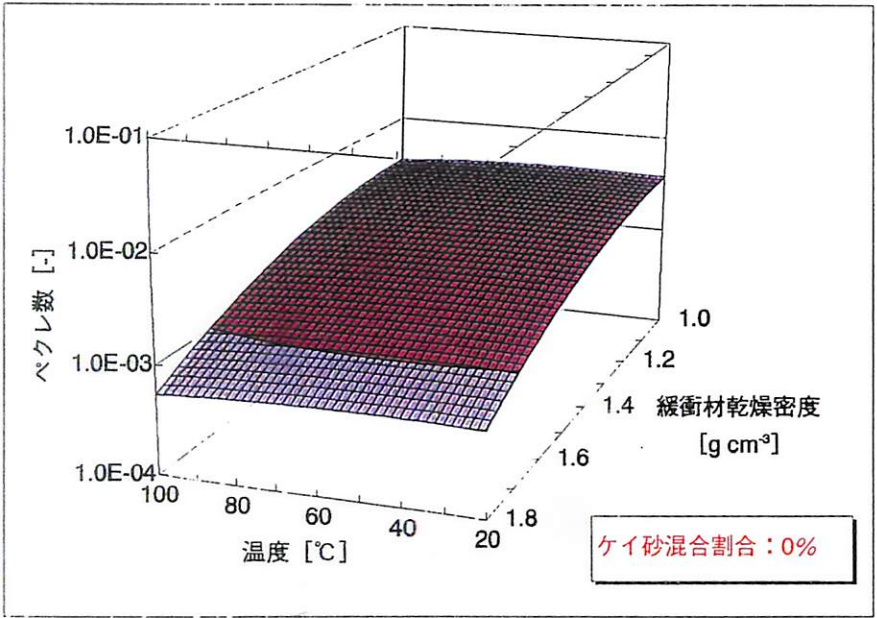


図3-3 ペクレ数のケイ砂混合割合，緩衝材乾燥密度および温度依存性  
- 化学種：TcO<sub>4</sub>，動水勾配：1.0 -



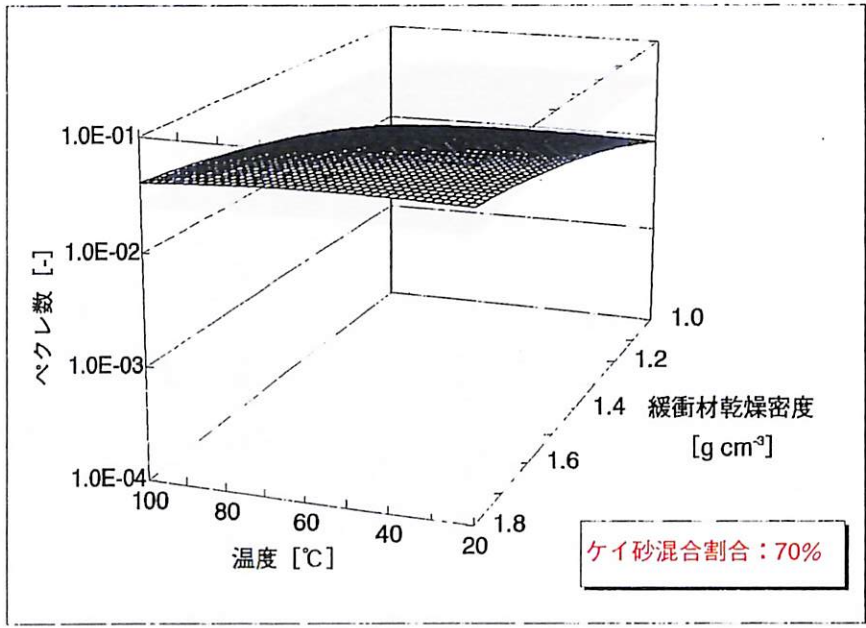
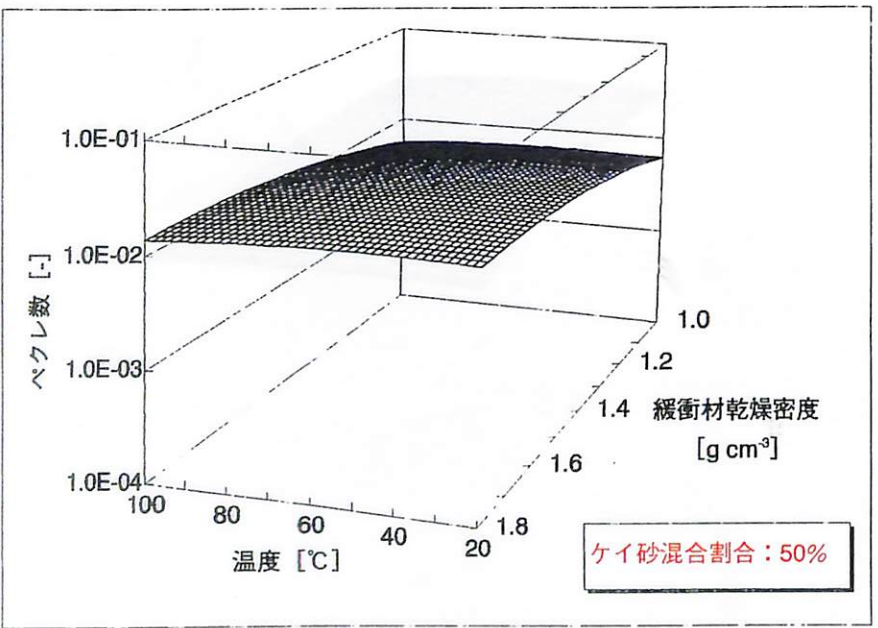
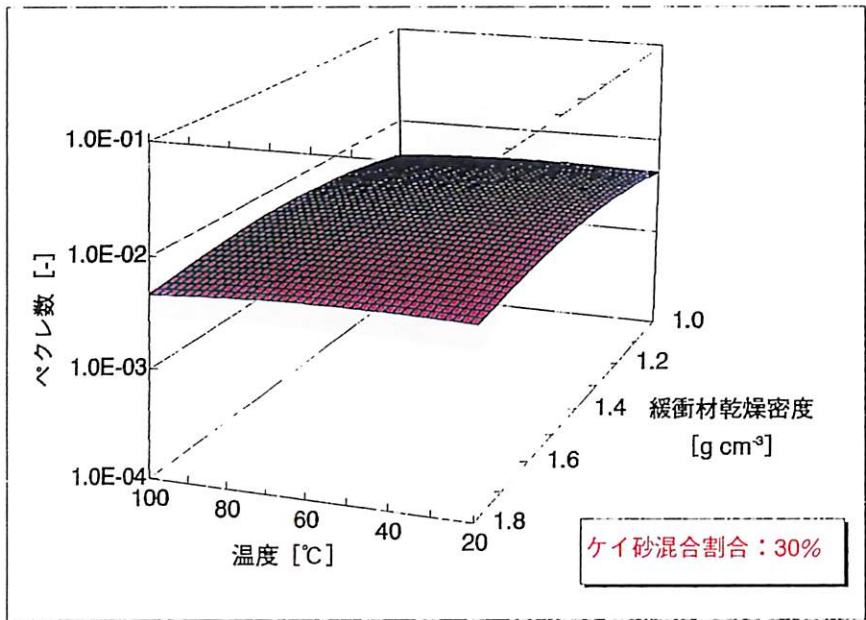
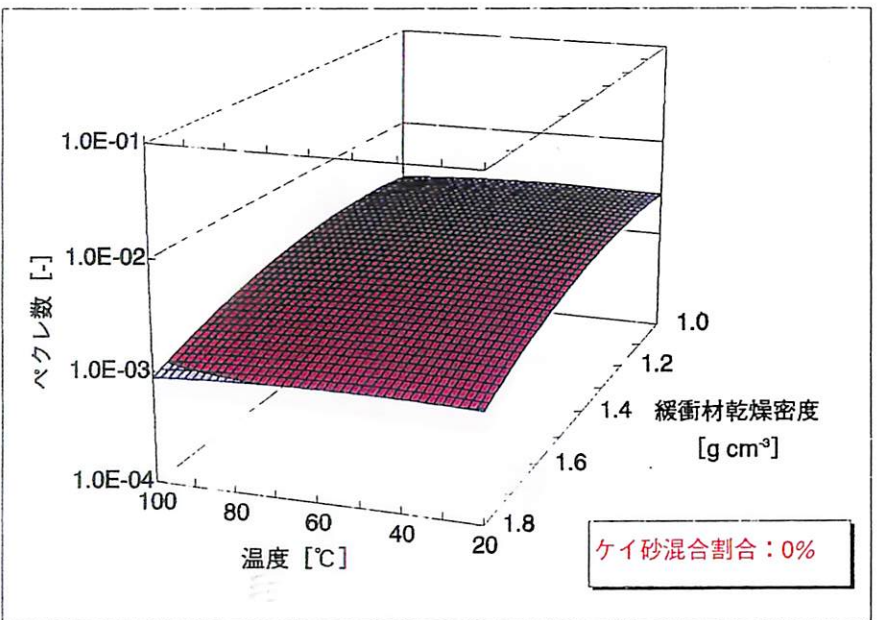


図3-4 ペクレ数のケイ砂混合割合，緩衝材乾燥密度および温度依存性  
 - 化学種：NpO<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>，動水勾配：1.0 -

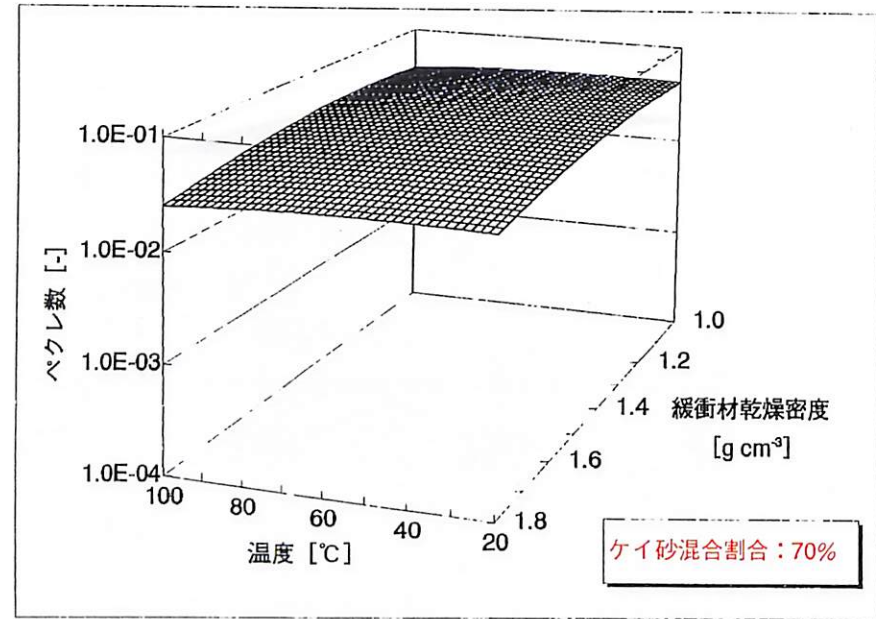
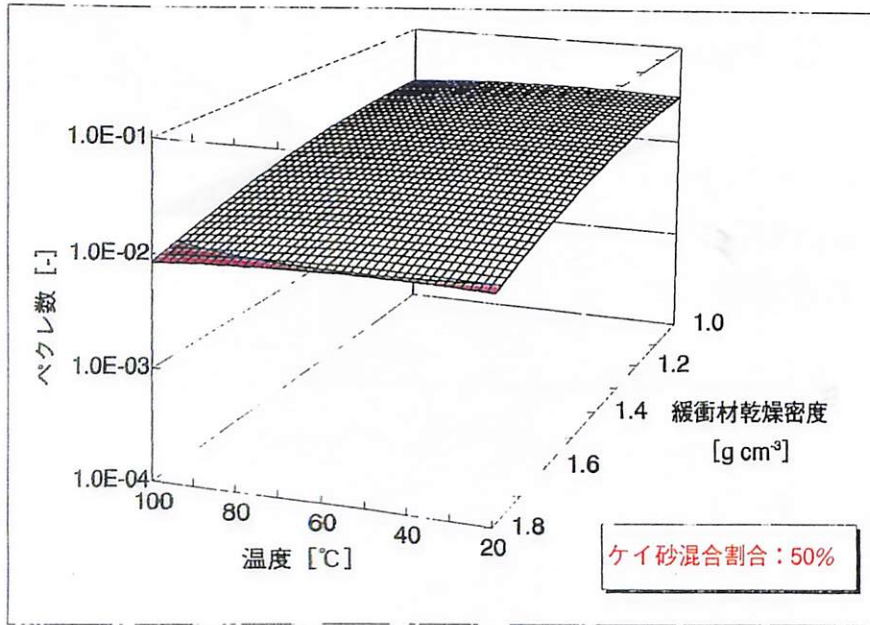
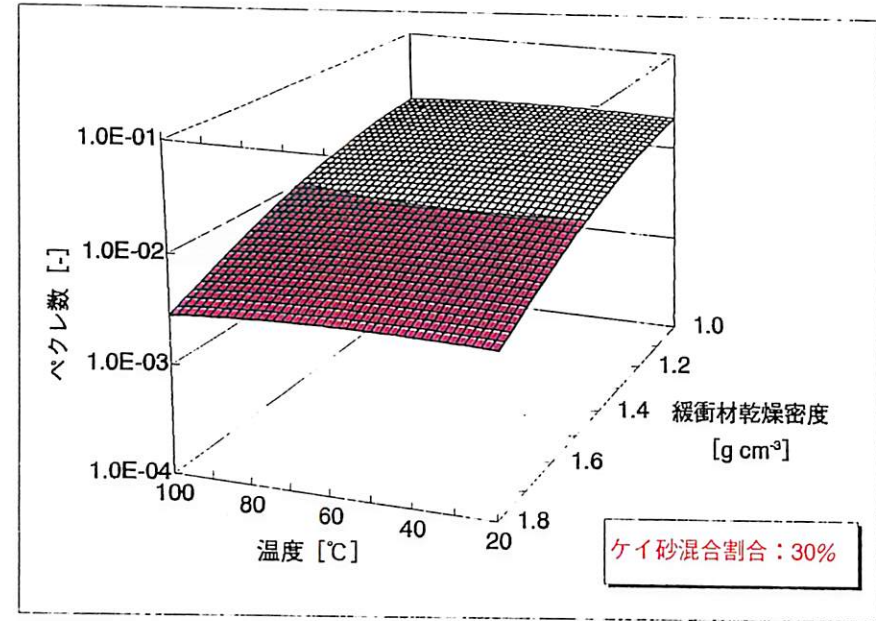
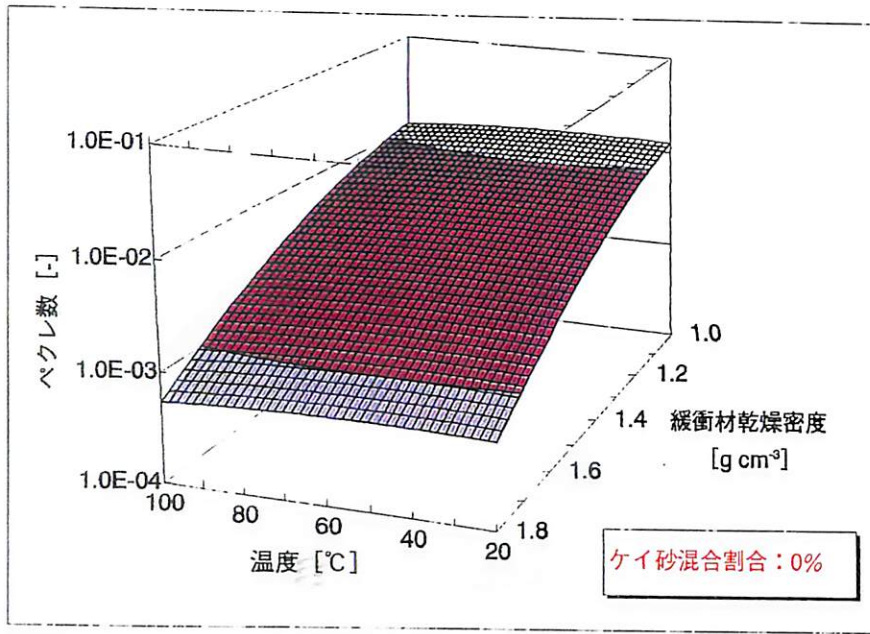


図3-5 ペクレ数のケイ砂混合割合，緩衝材乾燥密度および温度依存性  
 - 化学種：UO<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub><sup>4-</sup>，動水勾配：1.0 -

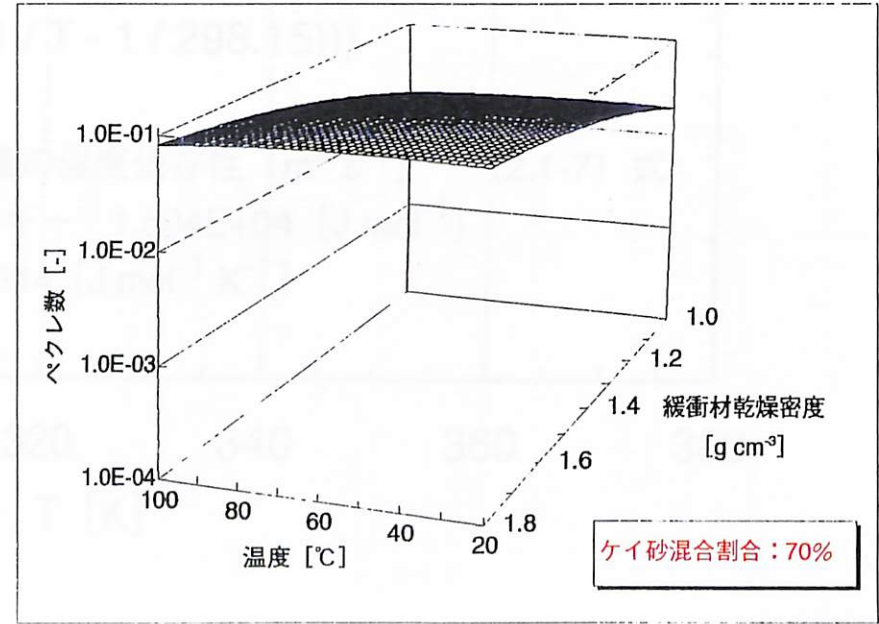
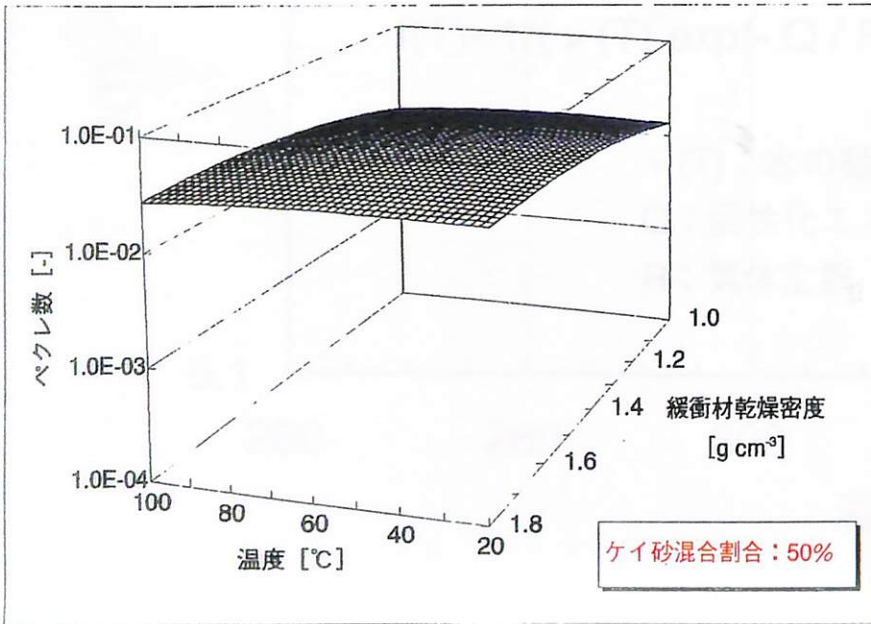
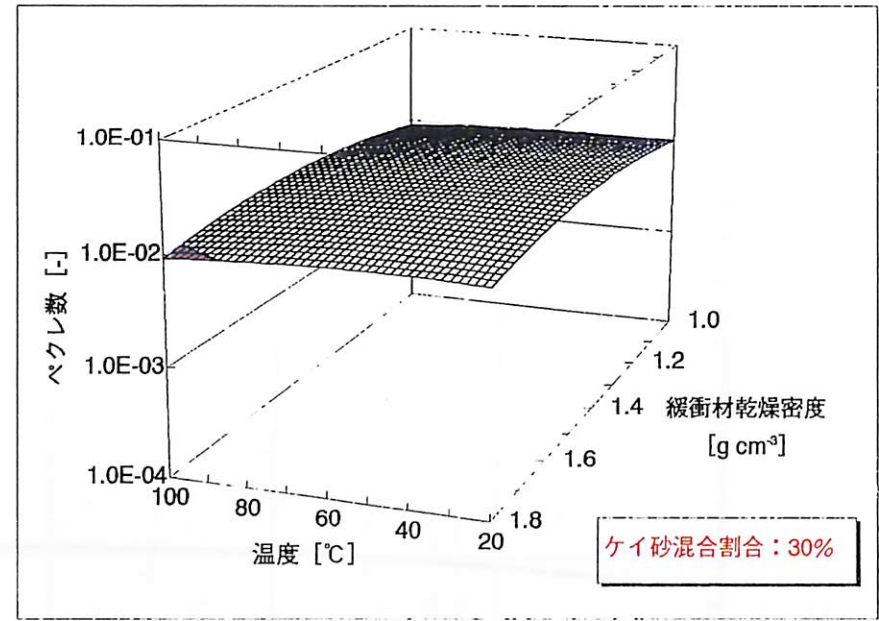
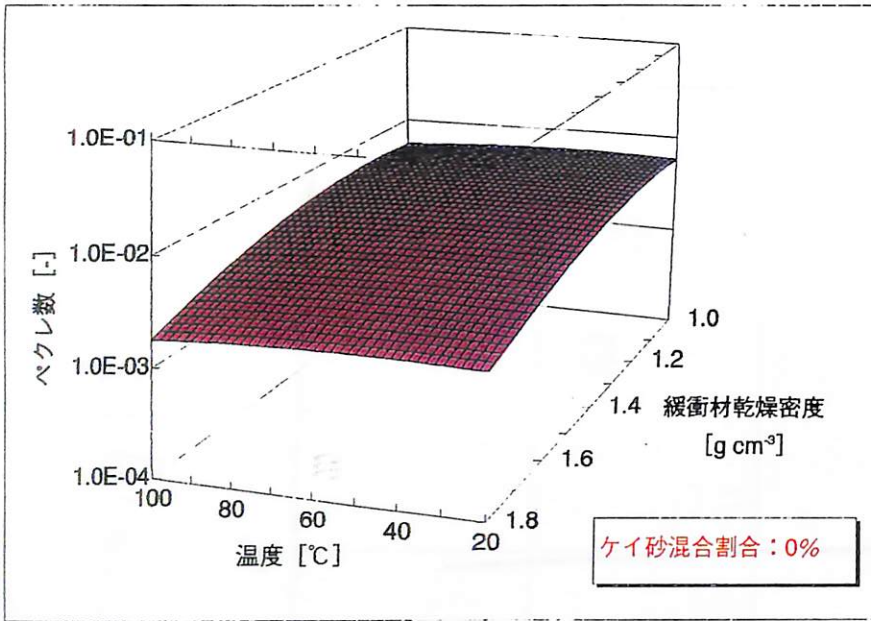


図3-6 ペクレ数のケイ砂混合割合，緩衝材乾燥密度および温度依存性  
 - 化学種：Cl，動水勾配：1.0 -

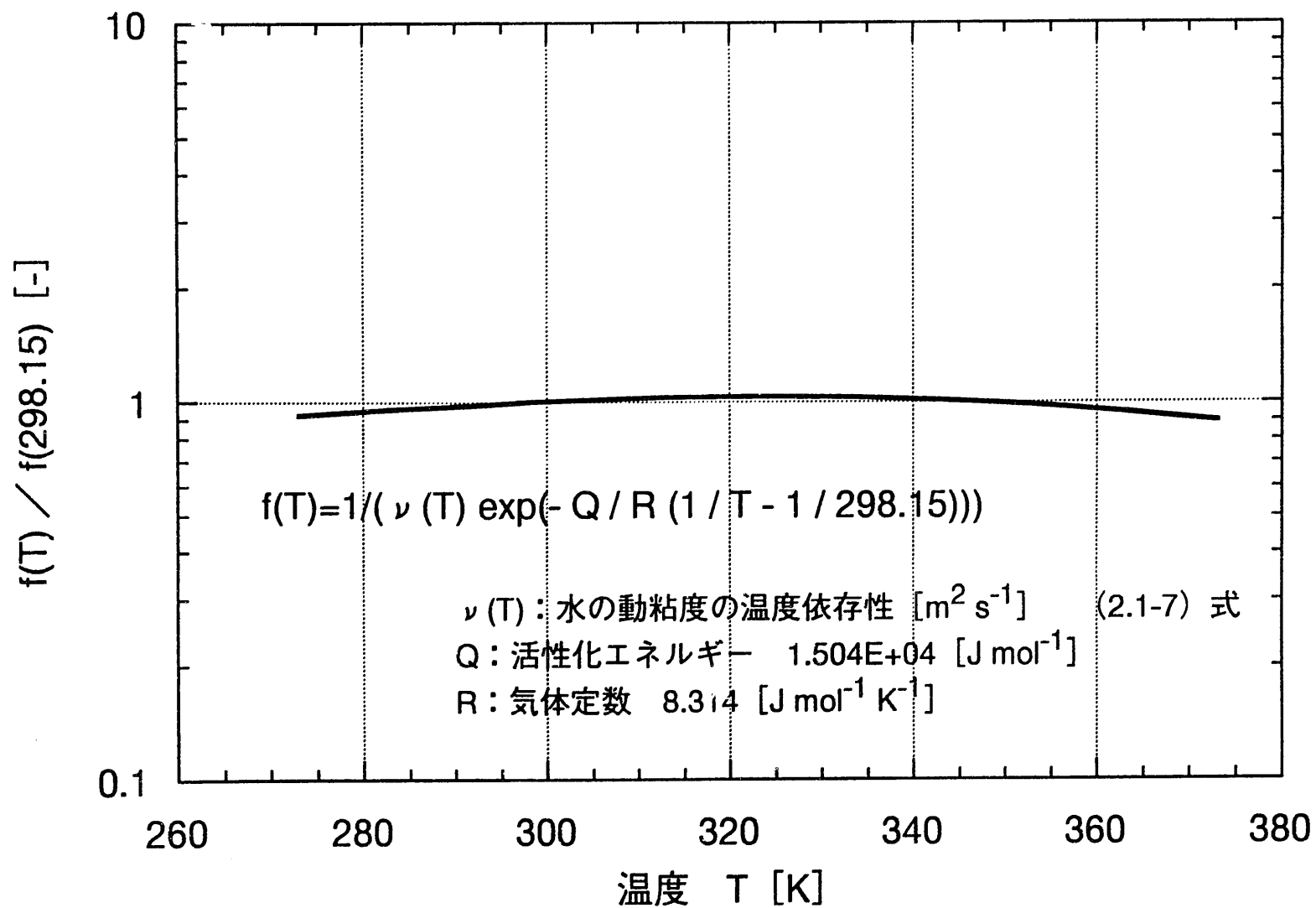


図3-7 ペクレ数に対する温度の影響

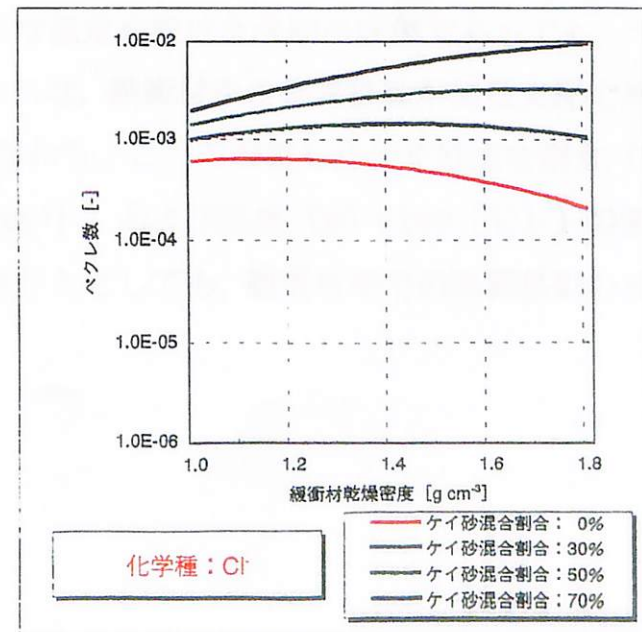
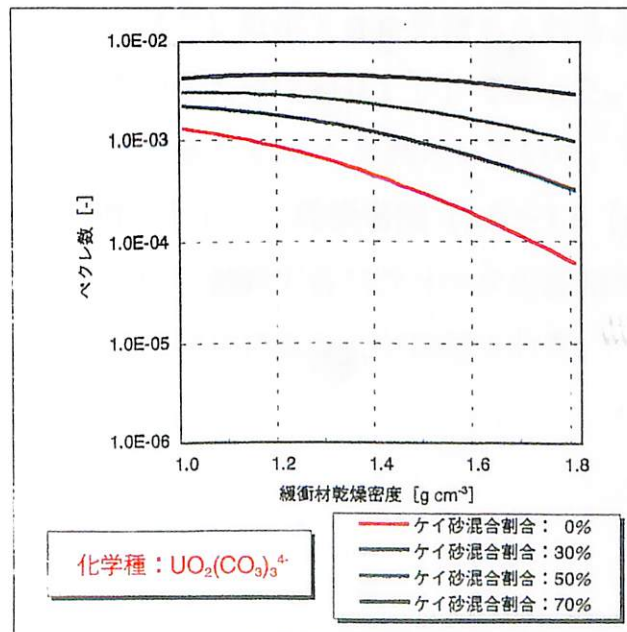
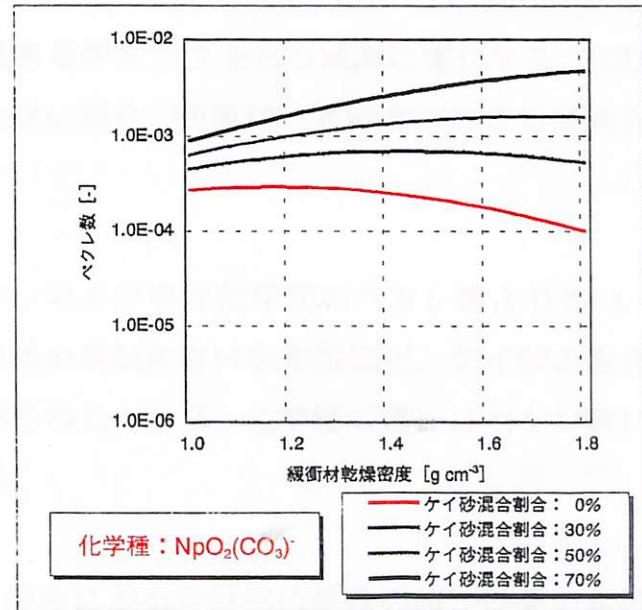
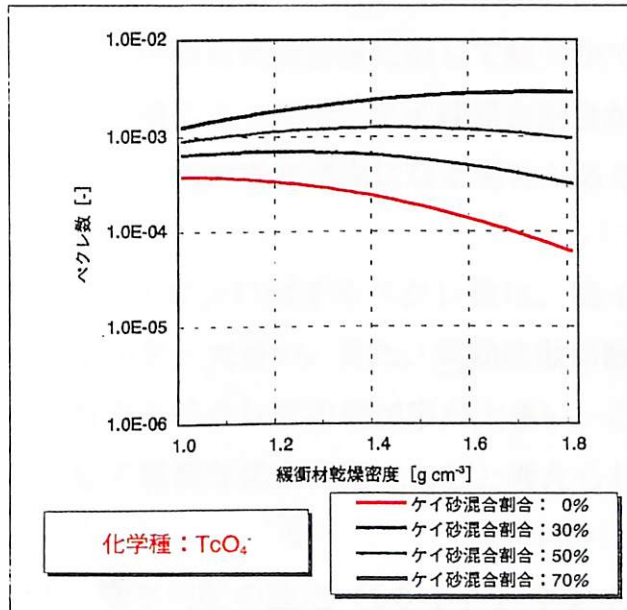
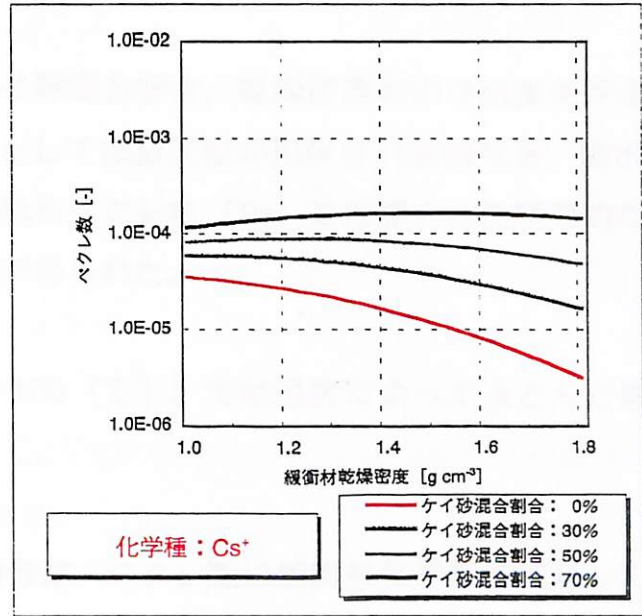
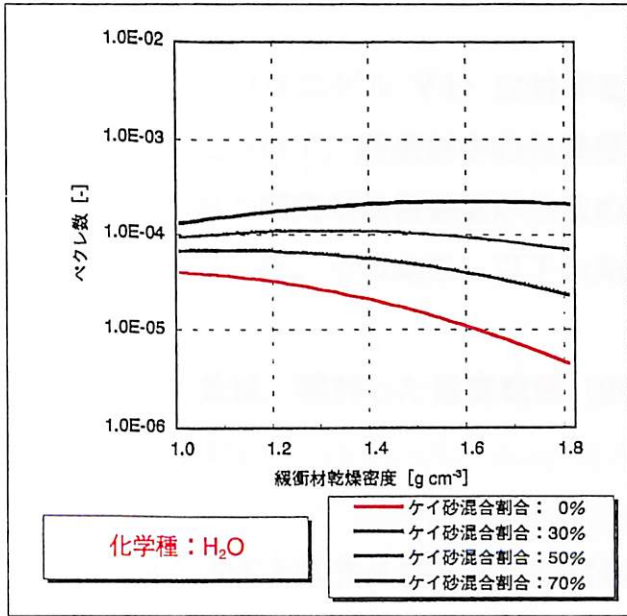


図3-8 ペクレ数のケイ砂混合割合および緩衝材乾燥密度依存性 (温度: 25℃)

#### 4. まとめ

ベントナイト（クニゲル V1）に対するケイ砂混合割合，乾燥密度および温度条件を変化させた場合について，緩衝材中の物質移動として拡散支配が担保される領域を，動水勾配，透水係数および実効拡散係数から求められるペクレ数（ $Pe$ ）を指標とした簡略的な手法を用いて検討した。その結果，以下の知見が得られた。

- ① ペクレ数は，検討した温度範囲（20～100 [°C]）では温度によってほとんど影響を受けない。
- ② ベントナイトにケイ砂を混合しない場合は，ペクレ数は緩衝材乾燥密度に対して単調減少である。しかし，ケイ砂を混合していくにつれて全体的にペクレ数が上昇し，かつ緩衝材乾燥密度に対して緩やかではあるがピークをもつ傾向に変化する。また，化学種によっては，ケイ砂混合割合が大きい場合，緩衝材乾燥密度に対する傾向が逆転して単調増加傾向になる場合がある。
- ③ 陰イオンに対するペクレ数は，陽イオンおよび中性化学種のペクレ数よりも 1～2 オーダー大きい。また，実効拡散係数の減少率が大きい化学種ほど，ケイ砂の混合に対するペクレ数の増加率が大きい。これらのことから，化学種の違いはペクレ数に対して重要な変動要因であると考えられる。
- ④ 動水勾配の設定（1.0 [-]）やケイ砂混合による実効拡散係数の増加効果の無視というペクレ数が大きく見積もられるような仮定を設けた今回の評価であっても，ペクレ数の最大値は約 0.1 [-] であった。これは，緩衝材中の物質移動が拡散支配である条件である  $Pe < 1$  を満たしている。すなわち，ここで設定したケイ砂混合割合（0.0～0.7 [-]），乾燥密度（1.0～1.8 [ $g\ cm^{-3}$ ]）および温度（20～100 [°C]）の変動範囲内において各パラメータの変動が生じたとしても，緩衝材中での物質移動の拡散支配は保たれることが確認された。

## 5. 今後の課題

本研究では、緩衝材に作用する動水勾配として過大に 1.0 [-] を設定し、緩衝材の透水係数との積を緩衝材中の地下水流速とみなしてペクレ数を算出した。今後は、緩衝材周辺岩体や緩衝材の形状（円筒）を考慮した地下水流動解析を実施し、より現実的な動水勾配を用いてペクレ数を評価していくことが望まれる。

## 6. 謝辞

本報告書をまとめることができたことは、関係各位の御協力の結果であり、ここに感謝の意を表します。特に、緩衝材の透水性能に関する情報提供および有益な御助言をいただいた東海事業所環境技術開発部地層処分開発室の松本一浩氏、また、緩衝材の実効拡散係数に関して同じく情報提供および有益な御助言をいただいた同室の佐藤治夫氏に感謝いたします。さらに、本報告書をまとめるにあたり、貴重なコメント、御助言をいただいた東海事業所環境技術開発部処分システム解析室の石原義尚氏および牧野仁史氏に感謝の意を表します。

## 7. 参考文献

- 1) 動燃事業団 (1992) : 高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書 - 平成3年度 -, 動燃事業団技術資料, PNC TN1410 92-082.
- 2) Fried, J.J. and Combaranous, M.A. (1979) : Dispersion in porous media, *Advanced Hydroscience*, pp.169 - 282.
- 3) 仲島邦彦, 畑中耕一郎, 梅木博之, 佐々木憲明, 石川博久 (1992) : 処分場近傍における地下水流動解析, 動燃事業団技術資料, PNC TN8410 92-068.
- 4) 動燃事業団 (1994) : 地層処分研究開発の現状 (平成5年度), 動燃事業団技術資料, PNC TN1410 94-094.
- 5) 動燃事業団 (1996) : 地層処分研究開発の現状 (平成8年度), 動燃事業団技術資料, PNC TN1410 96-071.
- 6) 松本一浩, 菅野毅, 藤田朝雄, 鈴木英明, 石黒勝彦, 石川博久 (1998) : 緩衝材の飽和透水特性, 動燃事業団技術資料, PNC TN (作成中)
- 7) 佐藤治夫, 澁谷朝紀 (1994) : 緩衝材および岩石への核種の吸着・拡散メカニズム, 動燃技報 No.91, PNC TN8410 94-284, pp.71 - 89.
- 8) Kato, H., Muroi, M., Yamada, N., Ishida, H., and Sato, H. (1995) : Estimation of Effective Diffusivity in Compacted Bentonite, *Scientific Basis for Nuclear Waste Management XVIII*, edited by Murakami, T. and Ewing, R.C. (*Mater. Res. Soc. Proc.* 353, Kyoto, 1994) , pp.277 - 184.
- 9) 宇野尚雄, 杉井俊夫, 神谷浩二 (1993) : 比表面積測定に基づく土粒子物性と透気性・透水性の考察, *土木学会論文集*, No.469, III-23, pp.25 - 34.
- 10) JIS Z 8803 (1991) .
- 11) 例えば表面拡散については, Muurinen, A., Rantanen, J., et al., *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* Vol.50, pp.617 - 624 (1985) .
- 12) 例えばイオン排除, 分子ふるいについては, Mackinley, I.G. and Hadermann, J. *NAGRA Technical Report NTB 84-40* (1984) .
- 13) 化学便覧, 基礎編Ⅱ, 改訂2版 (1975) .
- 14) 佐藤治夫, 芦田敬, 小原幸利, 油井三和, 梅木博之, 石黒勝彦 (1992) : ベントナイト及び岩石中での核種の実効拡散係数, 動燃事業団技術資料, PNC TN8410 92-164.