

地層処分性能評価・システム設計に必要な
パラメータのリストアップと試験の今後の進め方

1988年1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。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 - 3 3

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 O-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)

地層処分性能評価・システム設計に必要なパラメータの リストアップと試験の今後の進め方

筆者氏名 佐々木 憲 明*
湯 佐 泰 久*
石 川 博 久*
出 光 一 哉*
新 井 隆 隆*

要 旨

地層処分の性能評価・システム設計を行うために必要となるパラメータをリストアップし、それらの使用法をまとめると共に、現在、取得されているデータの例を示す。

地下水浸出シナリオに基づき、簡易な性能評価コード RELEASE（緩衝材中の核種移行）、MG RAT 03（均質岩体中の核種移行）等のインプットに関連するパラメータを洗い出した。また既存のデータを用いて、簡易な性能評価計算を行い、いくつかのパラメータが被ばく線量に与える影響を示した。

リストアップしたパラメータを8項目（インベントリー、固化体、オーバーパック、緩衝材、岩体、地球化学、生物圏、水理）に分類した。簡易な性能評価の結果から、人工バリアから放出される核種を半減期の長短と放出機構（浸出率律速、溶解度律速）によって4種類に分類した。また、それぞれの核種に対する人工バリアの効果を明らかとした。

今後、特に重点的に取得すべきデータとしては、処分場周辺の化学的環境、水理及び各核種の化学的挙動に関するものが挙げられる。

* 東海事業所 環境工学開発部 廃棄物処分技術開発室

目 次

1.	はじめに	1
2.	地下水浸出シナリオについて	2
3.	簡易な性能評価法	4
3.1	再冠水	4
3.2	容器破損	4
3.3	人工バリア中核種移行（一次元）	5
3.4	天然バリア中核種移行	8
3.5	生物圏での核種移行，被ばく	9
4.	設計のための計算評価	11
4.1	熱計算	11
4.2	応力計算	11
4.3	水理計算	12
5.	パラメータリスト	13
6.	簡易な性能評価例	37
6.1	人工バリアからの核種放出	37
6.2	生物圏への核種放出	44
7.	今後の進め方	48
8.	出 典	49

1. はじめに

地層処分の性能評価、システム設計を行うためには、種々のパラメータについてのデータが必要となる。本報告書の目的は、性能評価、システム設計においてどのようなパラメータを必要とし、そのデータがどの程度有効であるかを示すことである。リストアップしたパラメータは、地層処分システムにおける各バリアの開発及び評価試験、地質環境調査等によって得るべきものであり、今後の試験・調査の目標を明確にするためのものである。なお、本報告書で挙げたパラメータは地下水浸出シナリオに基づくものであり、主に動燃が所有している簡易な性能評価コード RELEASE（緩衝材中の核種移行）、MGRAT 03（均質岩体中の核種移行）のインプットやインプットデータの算出に必要なパラメータを抽出したのである。

また、これらの計算コードを用いた簡易な性能評価、感度解析例についても示した。

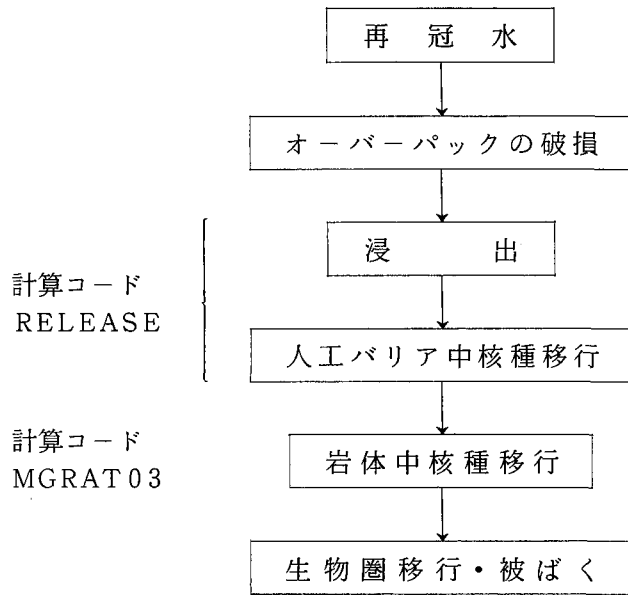
2. 地下水浸出シナリオについて

地層処分において、通常起こり得るシナリオとして主に評価されているのは地下水浸出シナリオである。このシナリオは、処分された廃棄物中の放射性核種が地下水によって生物圏へ運ばれ、被ばくを起こすというものである。

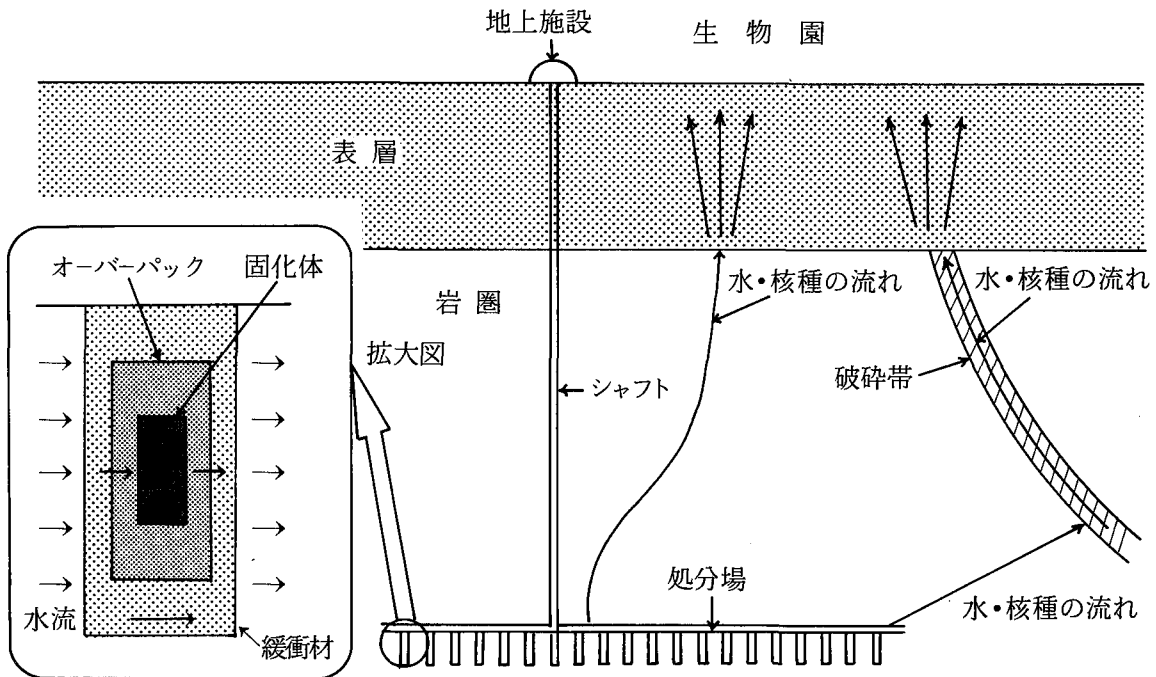
このシナリオには次のようなステップが考えられる（図2-1）。

- (1) 乾燥していた処分場が処分場閉鎖後、地下水によって湿潤・飽和する。（再冠水）
- (2) 容器（オーバーパック）が腐食や応力により破損し、その結果、固化体が地下水と接触する。
（オーバーパック破損、浸出）
- (3) 溶け出した放射性核種が人工バリア中（主に緩衝材中）を移行し、岩体に達する。（人工バリア中核種移行）
- (4) 放射性核種が岩体中の割れ目（脈）に沿って、地下水によって地表へ運ばれる。（岩体中核種移行）
- (5) 地表（河川、海洋も含む。）で放射性核種が移動し、飲料水や食物として人間に摂取され被ばくを生じる。（生物圏での核種移行・被ばく）

容器が破損し固化体と水が接触するまで、核種は固化体内に完全に閉じ込められる。（この期間は人工バリアの設計によって定められる。）放射性核種の浸出が始まった後、核種は媒体（人工バリア：オーバーパック、緩衝材 天然バリア：岩体）の環境条件によって化学形を変え、吸着、脱着を繰り返しながら地下水流あるいは拡散によって運ばれる。核種は岩体中を移行する間に拡がり（分散）、他の地下水流によって希釈される。地表付近では、更に希釈されると共に河川、湖沼、海などへ流出し、飲料水として直接、あるいは食物連鎖によって間接的に人間に摂取される。



(a) 地下水浸出シナリオのフロー図



(b) 核種の移行経路の概念図

図 2-1 地下水浸出シナリオ

3. 簡易な性能評価法

3.1 再冠水

処分場周囲を満たした地下水が緩衝材中に浸透し、容器（オーバーパック）表面に達する時間はダルシーの法則によって評価される。

$$Q = K I A \quad (3-1)$$

ここで、

- Q : 流量 (m^3/y)
- K : 透水系数 (m/y)
- I : 動水勾配 (-, $\%$)
- A : 流路断面積 (m^2)

上式から、初め乾燥していた緩衝材が湿潤してしまうまでの時間 t_1 は下式のように計算される。

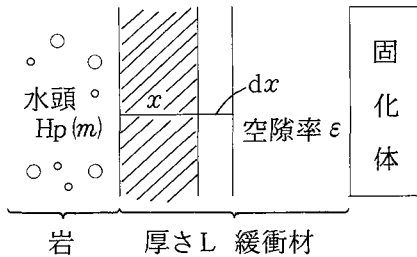


図3-1 緩衝材の含水モデル

厚さ dx 中に含まれる水量 dw

$$dw = \varepsilon A dx$$

(3-1) 式から

$$Q = \frac{dw}{dt} = \frac{\varepsilon A dx}{dt} = K \frac{H_p}{x} A$$

$$x dx = K \frac{H_p}{\varepsilon} dt$$

$$\int_0^L x dx = \int_0^{t_1} K \frac{H_p}{\varepsilon} dt$$

$$t_1 = \frac{\varepsilon L^2}{2 K H_p} \quad (3-2)$$

ここで、

- H_p : 水頭圧 (m)
- ε : 緩衝材の空隙率 (-)
- L : " の厚さ (m)

3.2 容器破損

緩衝材が湿潤した後、容器の腐食が始まり減肉していく。容器が減肉により周囲の応力に耐えられなくなった時点で、容器の破損が生じ固化体が水と接触する。腐食が始まり固化体が水と接触するまでの時間 t_2 は次のように計算される。

$$t_2 = \frac{(R - R_c)}{C} \quad (3-3)$$

R : 容器の肉厚 (m)

R_c : 容器が周囲の応力により破損する厚さ (m)

C : 均質腐食速度 (m/y)

※ R_cは、容器の形状、材質、周囲の応力状態によって決定される。

なお、ガラスの浸出は、人工バリア中の核種移行計算において境界条件として使用される。

3.3 人工バリア中核種移行(一次元)

固化体が水と接触した後、固化体から放射性核種が溶出し始める。溶出した放射性核種は、緩衝材中を拡散や移流によって移動し、緩衝材外へ流出する。この計算は、性能評価コード RELEASE によって行える。出力は、緩衝材中の核種濃度分布と放出率の時間変化である。

RELEASE の評価式

$$\left\{ \varepsilon + (1 - \varepsilon) \rho K_d \right\} \frac{\partial c}{\partial t} = \varepsilon D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \varepsilon V \frac{\partial c}{\partial x} - \left\{ \varepsilon + (1 - \varepsilon) \rho K_d \right\} \lambda C \quad (3-4)$$

ε : 緩衝材空隙率

D : 核散係数(非吸着物質)

ρ : 緩衝材真密度

x : 位置

K_d : 緩衝材の分配係数

V : 緩衝材中の水速度

c : 空隙水中の核種濃度

λ : 核種の崩壊定数

t : 時間

境界条件

RELEASE では図 3-2 に示されるように、内側、外側の 2 つの境界条件が設定されている。

◦ 外側境界

$$C = 0, \quad x = L, \quad L = \text{緩衝材厚さ}$$

この条件は、緩衝材外側すなわち岩体部分での地下水流が無限に大きく、緩衝材から放出された核種が無限希釈されることを意味しており、緩衝材からの核種放出流束が最大となるよう保守的に設定されている。

◦ 内側境界

$$\left. \frac{\partial c}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{1}{\varepsilon D} \left\{ (K + \varepsilon V) C - K C^* \right\}_{x=0} \quad (3-5)$$

K : 物質移行係数(ガラス→水) (K = L* / C*)

C* : 飽和溶解度

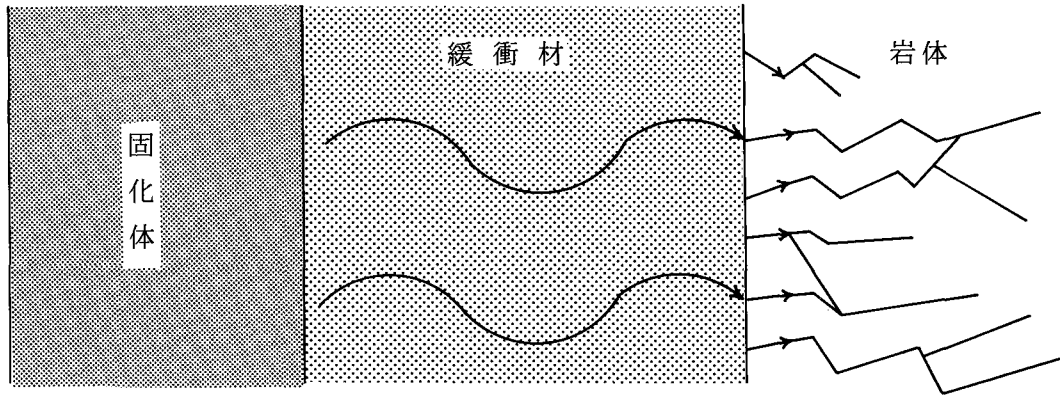
L* : 最大浸出率

この条件は、溶解度律速と浸出率律速を組み合わせたものとなっており、図3-2に示されるように空隙水中移行等価流速（緩衝材中を移行する核種の流れをすべて水流によるものとしたときの流速）が物質移行係数よりも大きい場合は浸出率律速、小さい場合は溶解度律速となる。これは、それぞれの律速条件を単独で用いたものよりも現実的なモデルとなっている。なお、浸出率と溶解度を保守的に設定することにより、保守性は確保される。

放出率

RELEASEの出力の1つである放出率は下式で算出される。

$$F = -\epsilon D \left. \frac{\partial c}{\partial x} \right|_{x=L} + \epsilon V C_{x=L} \quad (3-6)$$



内側境界条件

外側境界条件 $C = 0$



内側境界条件

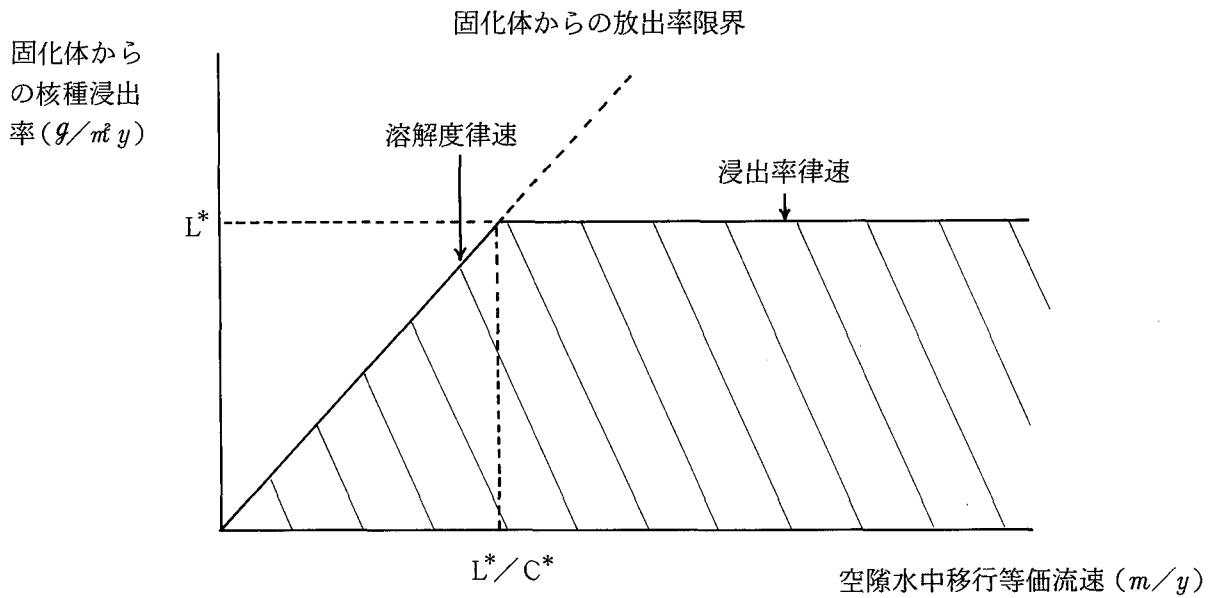


図3-2 RELEASE

緩衝材中の核種移行計算コード(1次元)

OUTPUT 緩衝材中の核種濃度分布, 緩衝材からの核種放出率

3.4 天然バリア中核種移行

人工バリアから放出された核種は、岩体中を地下水によって運ばれ吸着、脱着を繰り返しながら地表（河川、湖沼、海を含む）に流れ出る。

この計算は、多孔質媒体中の流れについてはMGRAT 03によって、亀裂媒体中の流れについてはROCKによって行える。出力は放出率（Hazard Index）の時間変化である。

(i) MGRAT 03 の評価式（多孔質媒体中、一次元 図3-3）

$$K_i \frac{\partial C_i}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} - V \frac{\partial C_i}{\partial x} - K_i \lambda_i C_i + K_{i-1} \lambda_{i-1} C_{i-1} \quad (3-7)$$

K_i : 遅延係数 $(1 + \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \rho K_{di})$

λ_{i-1} : 親核種の崩壊定数

C_{i-1} : 親核種の空隙水中濃度

境界条件

$$C = C_0 (x=0)$$

C_0 : インプットで与えるソース濃度

or

$$F = F_0 (x=0)$$

F_0 : インプットで与えるソースフラックス
 (RELEASEの出力から得られる)

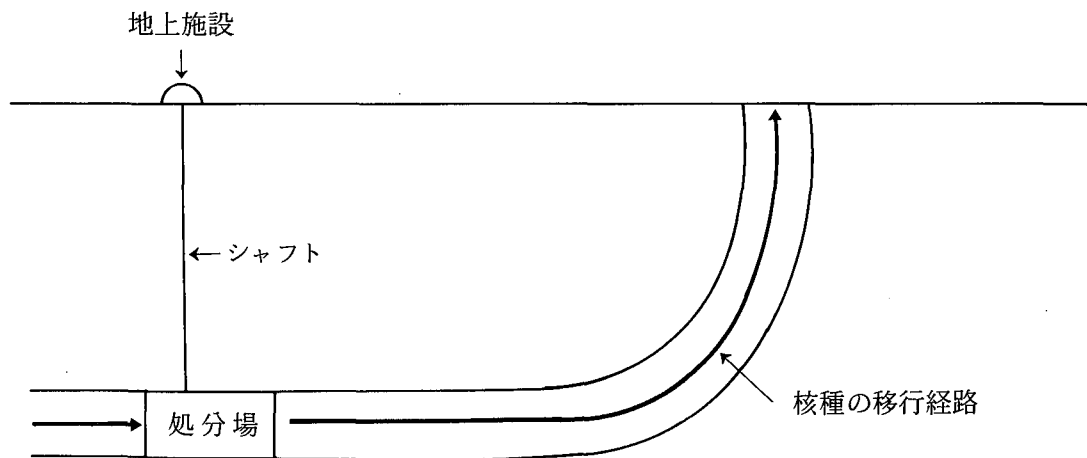


図3-3 MGRAT 03

均質岩体中の核種移行計算コード（1次元）

OUTPUT 岩体中の核種フラックス

(ii) ROCKの評価式（亀裂媒体中，2次元）

$$\frac{\partial Ni}{\partial t} = De \frac{\partial^2 Ni}{\partial z^2} - V \frac{\partial Ni}{\partial z} - \lambda_i Ni + \lambda_{i-1} Ni_{i-1} - \frac{2}{b} Ji \quad (3-8)$$

$$\frac{\partial Mi}{\partial t} = \frac{Di}{Ki} \frac{\partial^2 Mi}{\partial y^2} - \lambda_i Mi + \lambda_{i-1} \frac{Ki_{i-1}}{Ki} Mi_{i-1} \quad (3-9)$$

$$Ji = -\epsilon Di \frac{\partial Mi}{\partial y} \Big|_{y=0} \quad (3-10)$$

Ni : 割れ目中の核種濃度	Ji : 割れ目から多孔質へのフラックス
Mi : 多孔質層中の核種濃度	ϵ : 空隙率
z : 割れ目方向の距離	Di : 多孔質中の核種の拡散係数
y : 割れ目と垂直方向への距離	Ki : 多孔質中の核種の遅延係数
De : 割れ目中の核種の分散係数	$(Ki = 1 + \frac{1-\epsilon}{\epsilon} \rho Kdi)$
V : 割れ目中の地下水速度	Kdi : 多孔質中の核種 i の分配係数
b : 割れ目の巾	λ_i : 核種 i の崩壊定数

境界条件

$$Ni(t, 0) = Ni(t) \quad : \text{インベントリ}$$

$$Ni(t, z=l) = 0 \quad l : \text{帯水層までの距離}$$

$$Mi(t, z, y=0) = Ni(t, z)$$

$$\frac{\partial Mi}{\partial y} \Big|_{y=w} = 0 \quad w : y \text{ 方向の最大距離 (考慮する距離)}$$

or

$$Mi(t, z, w) = 0$$

3.5 生物圏での核種移行，被ばく

生物圏へ放出された核種は，飲料水として直接あるいは食物連鎖によって間接的に人に摂取され被ばくを起こす。核種は人に取り込まれるまでに，河川水などによる希釈や食物連鎖の媒体内での濃縮などを受ける。被ばく量は，人に達した時の核種の濃度（摂取量）とその核種の線量換算係数を用いて計算される。

詳細な計算を行う場合，生物圏における核種の流れを核種の沈澱，吸着などの反応や灌漑水，雨水などの経路を考慮して評価する必要がある。しかし，簡易な性能評価においては詳細な計算を行う代わりに地表での希釈水により希釈された後の核種濃度と ICRP Pub. 2 に示される最大許容濃度 MPC または ICRP Pub. 30 に示される年摂取限度 ALI とを比較することによって評価する。

ICRP では許容濃度（または年摂取限度）の水を飲用する場合の被ばくを 1.3 rem/3 月としている。ここでは，最大許容濃度の水の飲用による被ばくを 5 rem/年として評価を行う場合につい

での計算過程を示す。

(i) 線量換算係数 DCF

MPCの場合

$$DCF_i = \frac{5,000}{MPC_i \cdot MD \cdot 365} \quad (\text{mrem}/y / \text{Ci}/y) \quad (3-11)$$

MPC_i : 核種 i の最大許容濃度 (Ci/m^3)

MD : 飲料水摂取量 (m^3/day)

ALIの場合

$$DCF_i = \frac{5,000 \times 3.7 \times 10^{10}}{ALI_i} \quad (3-12)$$

ALI_i : 核種 i の年摂取限度 (Bq/y)

(ii) 希釈後濃度

摂取時の核種濃度 $C_{i, \text{intake}}$ (Ci/m^3)

$$C_{i, \text{intake}} = \frac{M_i}{W} \quad (3-13)$$

W : 希釈水量 (m^3/y)

M_i : 核種 i の放出率 (Ci/y)

(iii) 被ばく量 D (mrem/y)

MPCの場合

$$\begin{aligned} D &= \sum_i C_{i, \text{intake}} \times MD \times 365 \times DCF_i \\ &= \sum_i \frac{C_{i, \text{intake}}}{MPC_i} \times 5,000 \\ &= \frac{5,000}{W} \times \sum_i \frac{M_i}{MPC_i} \end{aligned} \quad (3-14)$$

(注) $\sum_i \frac{M_i}{MPC_i}$ は MGRAT 03 の出力 (Hazard Index) として得られる。

ALIの場合

$$\begin{aligned} D &= \sum_i C_{i, \text{intake}} \times MD \times 365 \times DCF_i \\ &= \sum_i \frac{C_{i, \text{intake}} \times MD \times 365 \times 3.7 \times 10^{10}}{ALI_i} \times 5,000 \\ &= \frac{5,000}{W} \times MD \times 365 \times 3.7 \times 10^{10} \times \sum_i \frac{M_i}{ALI_i} \end{aligned} \quad (3-15)$$

(注) $\sum_i \frac{M_i}{ALI_i}$ は MGRAT 03 の出力 (Hazard Index) として得られる。

4. 設計のための計算評価

処分システムの設計を行うため、主に以下の計算評価を行う必要がある。

- 処分場周辺の熱計算
- 処分場周辺の応力計算
- 処分場周辺の水理計算

熱計算は、処分ピット間隔、緩衝材厚さ、固化体の中間貯蔵の冷却期間を設定するために必要となる。応力計算は、処分トンネルの間隔、処分後のオーバパックにかかる応力、オーバパックの厚さ等を設定するために必要となる。水理計算は、処分場周辺の水頭分布、地下水流量を設定するために必要となる。

4.1 熱計算

評価式

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla K \cdot \nabla T + G \quad (3-16)$$

T : 温度 (°C)	K : 熱伝導度 (cal/cm・sec・°C)
ρ : 密度 (g/cm ³)	G : 発熱量 (cal/cm ³ ・sec)
C : 比熱 (cal/g・°C)	t : 時間 (sec)

境界条件

$r = \frac{P}{2}$, $\frac{dT}{dr} = 0$	P : r 方向のピット間隔
$z = H$, $T = T_0$	H : 地表の z 座標
$z = 0$, $T = T_g$, $G = G_g$	T_0 : 地表の温度
	T_g : 地熱源での温度
	G_g : 地熱源の発熱量

4.2 応力計算

評価式 (平面ひずみ, 2次元)

$$\begin{bmatrix} \sigma_z \\ \sigma_x \\ \tau_{xz} \end{bmatrix} = [D] \left[\begin{bmatrix} \varepsilon_z \\ \varepsilon_x \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \alpha \Delta T \\ \alpha \Delta T \\ 0 \end{bmatrix} \right] \quad (3-17)$$

$$D = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \quad (3-18)$$

σ : 垂直応力 (kgf/cm ²)	α : 熱膨張係数 (1/°C)
ε : 伸び歪 (-)	ΔT : 単位セル内での温度上昇
E : ヤング率 (kgf/cm ²)	τ : せん断応力 (kgf/cm ²)
ν : ポアソン比 (-)	γ : せん断歪 (-)

4.3 水理計算(2次元)

評価式

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) - Q - S \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (3-19)$$

H : 全水頭 (m)

K_i : i 方向の透水係数 (m/sec)

Q : 水の流入出量 (1/sec)

S : 貯留係数 (1/m)

5. パラメータリスト

3, 4章で示した性能評価, システム設計に必要なパラメータをリストアップし, 評価コード (RELEASE, MGRAT 03, ROCK, TRUMP 等) の入力に必要なパラメータとそれに関連するパラメータに分けて表 5-1 に示す。

表中の記号 R, M, Ro は, それぞれ RELEASE, MGRAT 03, ROCK のインプットを示す。

表5-1(1) パラメータリスト

項目	パラメータ	コメント	サンプルデータ	参考文献
インベントリー	<p>廃棄物中</p> <p>R・核種量 C_i (or同位体比) M</p> <p>R・元素量 mol (or 含有率)</p> <p>・発熱量 W</p> <p>・重量 g</p> <p>処分場</p> <p>M・固化体本数</p>	<p>経時変化も必要</p> <p>総インベントリー計算に必要</p>	<p>ORIGEN出力を利用</p> <p>例 燃焼度 28000 MWD/T 出力 35 MW/T 再処理 取出後 180日 固化 再処理後 5年</p>	(1)
固化体	<p>浸出率</p> <p>R・バルク $g/m^2 y$</p> <p>・元素毎 $g/m^2 y$</p> <p>R・有効表面積 m^2</p> <p>形状等</p> <p>・寸法 cm</p> <p>・重量 kg</p> <p>・密度 g/cm^3</p> <p>熱特性</p> <p>・発熱量 W/m^2</p> <p>・比熱 $cal/g^\circ C$</p> <p>・熱伝導率 $cal/cmsec^\circ C$</p>	<p>RELEASE ではソックスレー試験データを使用(物質移行係数として)</p> <p>RELEASE ではバルク浸出率×含有率</p> <p>クラックを考慮するべき</p> <p>処分場の設計に必要</p> <p>処分場の温度分布及び熱による地下水流動の解析に必要</p>	<p>547.5</p> <p>---</p> <p>1.337 (外表面のみ)</p> <p>h 134.5 ϕ 43.0 キャニスタ含む</p> <p>480.0 キャニスタ含む</p> <p>2.70 ガラスのみ</p> <p>図5-1</p> <p>0.2</p> <p>2.64×10^{-3}</p>	<p>(2)</p> <p>(1)</p> <p>(3)</p> <p>(4)</p> <p>(3)</p> <p>(3)</p>

R: RELEASEに必要 M: MGRAT03に必要 R0: ROCKに必要

表5-1(2) パラメータリスト

項目	パラメータ	コメント	サンプルデータ	参考文献	
オーバーパック	腐食速度	mm/y	0.15	(5)	
	材質	ニアフィールドの化学条件を考慮する際必要	铸鋼	(5)	
	形状等	処分孔の設計に必要			
	・寸法	cm	h 185.0 φ 94.0	(6)	
	・重量	kg	9000.	(6)	
	・密度	g/cm ³	7.85	(6)	
	熱特性	処分場の温度分布及び熱による地下水流動の解析に必要			
	・比熱	cal/g℃	表5-2	(7) (8)	
	・熱伝導率	cal/cm sec℃	表5-2	(7) (8)	
	力学特性				
	・引張強度	MPa	オーバーパック肉厚の設計に必要	表5-3	(9)
・耐力	MPa		表5-3	(9)	
・線膨張係数	1/℃	熱による応力の解析に必要	表5-4 図5-2	(10) (11)	
緩衝材	密度				
	R・真密度	g/cm ³	ρ	2.67	(12)
	・みかけ密度	g/cm ³	(1-ε) ρ	2.00	
	R空隙率		ε	0.25	
	R拡散率(非吸着性物質)	m ² /y		表5-5	(13)
	R分配係数	m ³ /kg	核種毎に必要(元素)	表5-5	(13)
	透水係数	m/s		~10 ⁻¹³ (図5-3)	(14)
	R水速度	m/s	透水係数×動水勾配	< 1 mm/y	
動水勾配	m/m	緩衝材にかかるもの	--		

R: RELEASEに必要 M: MGRAT03に必要 R0: ROCKに必要

表5-1(3) パラメータリスト

項目	パラメータ	コメント	サンプルデータ	参考文献	
緩衝材	材質	経済性、施工性等に必要	Na型ベントナイト	(15)	
	形状等	廻分孔の設計に必要			
	・寸法	cm	厚さ 30	(15)	
	熱特性	廻分場の温度分布及び熱による地下水流動の解析に必要			
	・比熱	cal/g℃	図5-4	(16)	
	・熱伝導率	cal/cmsec℃	図5-4	(16)	
	・安定上限温度	℃	100		
	力学特性				
	・粘着力 (C)	MPa	応力-安定性解析に必要?		
	・内部摩擦角 (ϕ)	°			
	・膨潤圧	MPa	応力の解析に必要	図5-5	(17)
	・弾性係数	MPa			
・ポアソン比					
・クリープ係数		長期オーバーバック支持力の検討に必要			
・線膨張係数	1/℃	熱による応力の解析に必要			
安定化学環境条件		特にセメントや高塩分濃度の地下水との関係			
岩体	密度				
	・真密度	g/cm ³	ρ	表5-6	(18)
	・みかけ密度	g/cm ³	$(1 - \epsilon) \rho$	表5-6	(18)
	空隙率		ϵ	表5-6	(18)
	M分散係数	m ² /s	水速度×分散度 (m/s) (m)		
	R0 (分散度)	m	水速度×水路	スウェーデンの例 5~20	(19)
(ペクレ数 Pe)	-	分散係数			

R: RELEASEに必要 M: MGRAT03に必要 R0: ROCKに必要

表5-1(4) パラメータリスト

項目	パラメータ	コメント	サンプルデータ	参考文献	
岩体	透水係数	m/s		スウェーデンの例 図5-6	(20)
	M水速度 R0	m/s	透水係数×動水勾配		
	動水勾配	m/m	緩衝材にかかるもの	スウェーデンの例 図5-7	(21)
	M水流量	m ³ /y	速度×空隙率 (m/s) ×処分場面積 (m ²)		
	分配係数	m ³ /kg	化学種毎、岩種毎に必要	スウェーデンの例 表5-7	(22)
	M遅延係数 R0		$1 + \frac{(1 - \epsilon)}{\epsilon} \rho Kd$		
	R0岩体中の拡散率 (マトリックス拡散)	m ² /y			
	R0割れ目巾	m			
	形状		処分場レイアウトに必要		
	・分布規模				
	・断層等の不連続面の分布				
	熱特性		処分場の温度分布及び熱による地下水流動の解析に必要		
	・比熱	cal/g℃		図5-8	(23)
	・熱伝導率	cal/cm sec℃		図5-9	(24)
	・安定上限温度	℃		-----	
	・地温分布			図5-10	(25)
	力学特性				
・粘着力 (C)	MPa	応力-安定性解析に必要?	表5-8	(26)	
・内部摩擦角 (φ)	°		表5-8	(26)	
・弾性係数	MPa	応力の解析に必要	表5-8	(26)	
・ポアソン比			表5-9	(27)	

R : RELEASEに必要 M : MGRAT03に必要 R0 : ROCKに必要

表5-1(5) パラメータリスト

項目	パラメータ	コメント	サンプルデータ	参考文献
岩体	・クリープ係数	長期周辺岩盤の変形 透水性変化の検討に 必要		
	・線膨張係数 1/℃	熱による応力の解析 に必要	図5-11	(28)
	・初期地圧 MPa	処分場の応力-安定 性解析に必要	表5-10	(29)
地球化学	R 飽和溶解度 g/m ³	化学種毎に必要	例 表5-11	(30)
	<u>化学的条件</u>		図5-12	(31)
	・pH			
	・Eh			
・イオン濃度	錯体形成イオン (配位子) CO ₃ ²⁻ SO ₄ ²⁻ OH ⁻ 等	スウェーデンの 例 表5-12	(32)	
<u>熱力学データ</u>	化学種毎に必要			
・生成自由エネルギー				
・生成エントロピー 等				
生物圏	M 最大許容濃度 : MPC Ci/m ³	核種毎に必要		(33)
	線量換算係数 mrem/y (mSv/y)	核種毎に必要		(34)
	食物消費量 l or kg/y	水、肉、卵、魚、野 菜等		
	<u>食物連鎖係数</u>			
	・濃縮係数 -	魚、野菜、牧草等		
	・分配係数 d / l or kg	肉、卵、ミルク等		
	土壌の収着係数 m ³ /kg	核種毎に必要		
水理	<u>透水係数分布</u>			
	<u>水頭分布</u>			
	<u>地下水流量分布</u>			

R : RELEASE に必要 M : MGRAT03 に必要 R0 : ROCK に必要

表5-1(6) パラメータリスト

項 目	パ ラ メ ー タ	コ メ ン ト	サ ン プ ル デ ー タ	参 考 文 献
水理	希積率 — ・河川水流量 m^3/y ・湖沼水ターンオーバー率 $1/y$	被爆計算において特に重要（人に到達する時の濃度を決定） 希積率を定めるために必要 年間移行水量 m^3/y $\frac{\text{湖沼水量 } m^3}{\text{年}}$		

R : RELEASEに必要 M : MGRAT03に必要 RO : ROCKに必要

表5-2 オーバーパック材の熱特性

	熱 伝 導 率 ($cal/cm \cdot sec \cdot ^\circ C$)	比 熱 ($cal/g \cdot ^\circ C$)
SUS-316	0.0388	0.12
鉛	0.0838	0.0309
チ タ ン	0.036	0.129

(ステンレス鋼便覧)

(理化学辞典)

(")

表5-3 オーバーパック材料の力学特性

構造用高張力炭素鋼および低合金鋳鋼品

JIS 記号	化学成分(%)			降伏点(kgf/mm ²)		引張強さ(kgf/mm ²)		伸び(%)		絞り(%)	
	C	Mn	その他	A	B	A	B	A	B	A	B
SCC 3	0.30 ~0.40	0.50 ~0.80	0.30 ~0.40Si	> 28	> 40	> 56	> 65	> 15	> 15	> 20	> 20
SCC 5	0.40 ~0.50	0.50 ~0.80		> 30	> 45	> 63	> 70	> 10	> 10	> 15	> 15
SCMn 1	0.20 ~0.30	1.00 ~1.60		> 28	> 40	> 55	> 60	> 20	> 20	> 35	> 35
SCMn 2	0.25 ~0.35	1.00 ~1.60		> 35	> 45	> 60	> 65	> 18	> 18	> 35	> 35
SCMn 3	0.30 ~0.40	1.00 ~1.60		> 38	> 50	> 65	> 70	> 15	> 15	> 30	> 30
SCMn 5	0.40 ~0.50	1.00 ~1.60		> 40	> 55	> 70	> 75	> 10	> 10	> 20	> 20
SCSiMn 2	0.25 ~0.35	0.90 ~1.20	0.50 ~0.80Si	> 30	> 45	> 60	> 65	> 15	> 20	> 35	> 35
SCMnCr 2	0.25 ~0.35	1.20 ~1.60	0.40 ~0.80Cr	> 38	> 45	> 60	> 65	> 15	> 20	> 30	> 35
SCMnCr 3	0.30 ~0.40	1.20 ~1.60	0.40 ~0.80Cr	> 40	> 50	> 65	> 70	> 10	> 15	> 25	> 30
SCMnCr 4	0.35 ~0.45	1.20 ~1.60	0.40 ~0.80Cr	> 42	> 55	> 70	> 75	> 10	> 15	> 20	> 25
SCMnM 3	0.30 ~0.40	1.20 ~1.60	Cr<0.2, 0.15 ~0.35Mo	> 40	> 50	> 70	> 75	> 15	> 15	> 30	> 30
SCCrM 1	0.20 ~0.30	0.50 ~0.80	0.80 0.15 ~1.20Cr ~0.35Mo	> 40	> 50	> 65	> 70	> 15	> 15	> 30	> 30
SCCrM 3	0.30 ~0.40	0.50 ~0.80	0.80 0.15 ~1.20Cr ~0.35Mo	> 45	> 60	> 70	> 80	> 10	> 10	> 25	> 25
SCMnCrM 2	0.25 ~0.35	1.20 ~1.60	0.30 0.15 ~0.70Cr ~0.35Mo	> 45	> 55	> 70	> 75	> 15	> 15	> 30	> 30
SCMnCrM 3	0.30 ~0.40	1.20 ~1.60	0.30 0.15 ~0.70Cr ~0.35Mo	> 55	> 65	> 75	> 85	> 10	> 10	> 25	> 25
SCNCRM 2	0.25 ~0.35	0.90 ~1.50	1.60 0.30 0.15 ~2.00Ni ~0.90Cr ~0.35Mo	> 60	> 80	> 80	> 100	> 10	> 10	> 20	> 20

Si = 0.30~0.60, P, S ≤ 0.040, A: 850~950℃焼ならし, 550~650℃焼もどし, B: 850~950℃焼入れ, 550~650℃焼もどし。

おもなチタン合金

合金(数字は標準成分量の%)	引張性質*			形状**
	引張強さ [kgf/mm ²]	耐力 [kgf/mm ²]	伸び [%]	
99.7Ti	35	22	32	B, F, P, T, W, E
99.5Ti	42	33	30	B, F, P, T, W, E
99.3Ti	50	37	27	B, F, P, T, W, E
99.0Ti	67	56	23	B, F, P, T, W, E
Ti-2.5Cu	61	53	25	-
Ti-0.2Pd	39	32	25	T
Ti-5Al-2.5Sn	95	87	13	B, F, P, T, W, E
Ti-2Al-2Mn	73	60	22	B, F, P
Ti-4Al-4Mn	103(113)	93(98)	16(9)	B, F, P, T
Ti-4Al-3Mo-1V	93	86	11	P
Ti-5Al-3Mn	100	90	15	B, F
Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr	119	112	10	-
Ti-6Al-4V	94(119)	84(105)	11(7)	B, F, P, T, W, E
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	98(130)	91(117)	15(10)	-
Ti-6Al-6V-2Sn	116	109	12	F
Ti-8Al-1Mo-1V	98(103)	91(95)	13(16)	-
Ti-6Al-5Zr-0.5Mo-0.25Si	(105)	(93)	(9)	-
Ti-7Al-4Mo	112(133)	105(123)	15(12)	B, F, T, E
Ti-4Al-4Mo-2Sn-0.5Si	106(114)	93(101)	9(12)	-
Ti-4Al-4Mo-4Sn-0.5Si	(127)	(111)	(12)	-
Ti-4.5Sn-6Zr-11.5Mo	91(119)	84(116)	20(-)	-
Ti-11Sn-4Mo-2.25Al-0.2Si	(136)	(121)	12	-
Ti-11Sn-5Zr-2.25Al-1Mo-0.2Si	112(123)	100(108)	13(11)	-
Ti-8Mn	96	87	15	P
Ti-13V-11Cr-3Al	95(126)	91(119)	16(6)	B, F, P, T
Ti-3Al-15Mo-5Zr	(150)	(-)	(13)	-
Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	(126)	(119)	(8)	-
Ti-1Al-8V-5Fe	(145)	(140)	(6)	-

* 括弧内は、時効処理材、その他は焼なまし材についての代表的な数値を示す。チタン合金の焼なましは普通、純Tiおよびα型合金では590~730℃、(α+β)およびβ型では620~820℃で行われる。

** B: 棒, T: 鍛造品, P: 板, T: 管, W: 線, E: 押出し材

表 5 - 4 炭素鋼の平均線膨張係数 (焼なまし状態)

化学成分 [%]			平均線膨張係数 [$\times 10^{-6}/K$]			
C	Mn	Si	0 ~ 100 °C	0 ~ 300 °C	0 ~ 500 °C	0 ~ 700 °C
0.06	0.38	0.01	12.6	13.5	14.2	15.0
0.23	0.64	0.11	12.2	13.1	13.9	14.9
0.42	0.64	0.11	11.2	13.0	14.0	14.9
0.58	0.92	0.25	11.1	12.9	14.1	14.9
0.80	0.32	0.13	11.1	12.5	13.6	14.7
1.22	0.35	0.16	10.6	12.1	13.5	14.7

表5-5 測定した拡散係数と分配係数
Measured diffusivities and distribution coefficients

Element	log Ci ^{a)}	Time (d)	(Da) _{av} ×10 ¹⁴ (m ² /s)	(Da) _{max} ×10 ¹⁴ (m ² /s)	Kd ^{b)} (m ² /kg)	D _{av} ×10 ¹⁰ (m ² /s)	D _{max} ×10 ¹⁰ (m ² /s)
Sr	-11	50	180	1,200	2.9	100	670
Tc	-10	69	140	530	0.0	0.014	0.053
Tc ^{c)}	-10	70	140		0.002	0.070	
Tc ^{d)}	-10	70	140		0.002	0.070	
Tc ^{e)}	-10	225	6.6	23	0.002	0.0033	0.011
Tc ^{f)}	-10	70	30		0.05	0.30	
Tc ^{g)}	-10	218	17	48			
I	-11	157	3.2	12	0.001	0.0010	0.0035
I ^{h)}	-11	213	2.0	6.4			
I ⁱ⁾	-11	213	2.6	9.2	0.8	0.42	1.5
I ^{j)}	-11	213	3.02	14	0.6	0.36	1.7
Cs	-10	53	140	200	1.4	39	57
Th	-14	64	0.46	0.85	~6	~0.55	~1.0
Pa	-13	76	~57 ^{o)}	~60 ^{o)}	5.0	~55	~60
U	-8	62	58	82	0.093	1.1	1.5
U ^{k)}	-8	54	19	34	0.093	0.36	0.64
U ^{l)}	-8	62	57	94	0.093	1.1	1.8
U ^{e)}	-8	63	20	38	0.093	0.37	0.71
U ^{f)}	-8	53	4.5	11	5.0	4.5	11
U ^{l)}	-8	225		22			
Np	-9	69	22	37	0.12	0.52	0.88
Np ^{e)}	-9	212	0.86	3.4	0.12	0.021	0.082
Np ^{f)}	-9	322	0.45	1.6	5.0	0.45	1.6
Np ^{g)}	-9	322	0.80	2.4			
Pu	-9	316	0.32	0.86	3.5	0.22	0.60
Am	-9	524	0.20	0.73	6.6	0.26	0.96
Am ^{m)}	-9	68	0.40	1.4			
Am ⁿ⁾	-9	68	0.40	1.4			
Am ^{k)}	-9	350	0.28	0.95			

- | | |
|---|--|
| a) Number of moles initially added | 初期に加えたモル数 |
| b) For total nuclide concentration of 10 ⁻⁹ | 全核種濃度 10 ⁻⁹ M |
| c) 1% pyrite in the clay | 粘土中に1%黄鉄鉱 |
| d) 1% olivine in the clay | 粘土中に1%かんらん石 |
| e) 1% Fe ₃ (PO ₄) ₂ (s) in the clay | 粘土中に1% Fe ₃ (PO ₄) ₂ (s) |
| f) 0.5% Fe(s) in the clay | 粘土中に0.5% Fe(s) |
| g) 0.5% Fe in part of clay | 粘土の一部に0.5% Fe(s) |
| h) 1% chalcopyrite/pyrite | 1% 黄銅鉱/黄鉄鉱 |
| i) 1% cinnabar | 1% 辰砂 |
| j) 1% PbO | 1% PbO |
| k) 600 mg/l HCO ₃ ⁻ in the aqueous phase | 水相中にHCO ₃ ⁻ 600 mg/l |
| l) 10 mg/l humic acid in the aqueous phase | 水相中に腐植酸 10 mg/l |
| m) Added in 0.1M acetate solution | 0.1 Mの酢酸塩で加えた |
| n) Added as a colloid (at pH 12) | コロイドとして加えた (pH 12) |
| o) preliminary values | 予備値 |

表5-6 北海道の岩石の孔隙率測定結果

岩石の種類		みかけ比重 (平均)	真比重 (平均)	孔隙率(%)	
火 成 岩 類	花崗岩グループ	2.554~2.902 (2.654)	2.600~2.913 (2.745)	0.3 ~3	
	石英粗面岩グループ	1.365~2.706 (2.334)	2.384~2.752 (2.595)	1 ~5	
	安山岩グループ	2.02 ~2.745 (2.553)	2.539~2.859 (2.715)	1.33~9.54 (4.736)	
	玄武岩グループ	2.537~2.862 (2.733)	2.645~2.944 (2.817)	1.13~7.68 (2.902)	
変成岩類		2.363~2.988 (2.692)	2.634~3.036 (2.794)	1.3 ~1.88	
堆 積 岩 類	砂 岩	中生代	2.342~2.520 (2.411)	2.617~2.806 (2.699)	3.32~13.68 (8.064)
		新生代	2.204~2.518 (2.263)	2.410~2.823 (2.611)	3.04~21.36 (14.191)
	泥 岩	古生代	2.645~2.678 (2.662)	2.710~2.721 (2.716)	1.18~ 2.79 (1.986)
		中生代	2.226~2.581 (2.395)	2.641~2.718 (2.683)	4.65~15.71 (10.74)
		新生代	1.005~1.080 (1.040)	2.273~2.378 (2.318)	54.50~55.78 (55.11)
	凝灰岩	中生代	2.838	2.96	4.12
		新生代	1.273~2.363 (2.01)	2.250~2.686 (2.481)	3.14~43.42 (19.68)

* 新鮮な岩石の孔隙率一佐々木敏雄(1962)による。

表5-7 花崗岩中地下水条件での核種の分配係数

Distribution coefficients for radionuclides in granitic bedrock-groundwater systems. (Low salt content, reducing conditions.) Values for oxidizing conditions are given within parentheses for the redox-sensitive elements.

Element	Distribution coefficient, m^2/kg	
	Values used	Best estimate
Co	0.2	
Ni	0.2	
Sr	0.004 ^a	
Zr	4	
Nb	4	
Tc	0.05 (0.0002)	
I	0	
Cs	0.05 ^a	
Lanthanides	5	
Ra	0.1 ^a	
Th	5	13 ^b
Pa	5	23
U	5 (0.01)	> 13 ^b (0.06) ^c
Np	5 (0.01)	> 13 ^b (0.03)
Pu	5 (3)	6 (4.3)
Am	5	6

- a Considerably higher values can be obtained for high-capacity minerals, and even lower values for some low-capacity minerals, e. g. quartz. The distribution coefficient can be assumed to decline in proportion to the concentration of competing positive ions in the water, which can give lower values in waters with high salt content (higher than 1,000 mg/l).
- b Pertains to tetravalent uranium and neptunium; the value for thorium has been postulated as the minimum value.
- c Pertains to hexavalent uranium: At very low uranium contents (below 10^{-10} M), values up to one order of magnitude higher can be obtained.

表 5-8 各岩盤等級から予想される物理定数の範囲

岩盤等級	岩盤の変形係数 (kg/cm ²)	岩盤の静弾性係数 (kg/cm ²)	岩盤の粘着力 (kg/cm ²)	岩盤の内部摩擦角 (°C)	岩盤の弾性波速度 (km/sec)	ロックテスト ハンマー 反発度	孔内数荷試験による		引き抜きの せん断強度 (kg/cm ²)
							変形係数 (kg/cm ²)	接線弾性係数 (kg/cm ²)	
A~B	50,000 以上	80,000 以上	40 以上	55 ~ 65	3.7 以上	36 以上	50,000 以上	100,000 以上	20 以上
C _H	50,000 ~ 20,000	80,000 ~ 40,000	40 ~ 20	40 ~ 55	3.7 ~ 3	36 ~ 27	60,000 ~ 15,000	150,000 ~ 60,000	
C _M	20,000 ~ 5,000	40,000 ~ 15,000	20 ~ 10	30 ~ 45	3 ~ 1.5	27 ~ 15	20,000 ~ 3,000	60,000 ~ 10,000	20 ~ 10
C _L	5,000 以下	15,000 以下	10 以下	15 ~ 38	1.5 以下	15 以下	6,000 以下	15,000 以下	10 ~ 5
D									5 以下

表 5-9 現地弾性波探査により求めたポアソン数
(H. Link, 1964)

岩石名	タイプ	ポアソン数
花崗岩	Quincy, Mass	3.0
花崗岩	Rockport, Mass	3.2
ノースライト	Sudbury, Canada	3.7
石灰岩	Northwest, Persia	3.0 ~ 3.5
石灰岩	South, Germany	2.6
石灰岩	" , "	3.1
砂岩	" , "	3.8
石灰岩(層状)	Kauner Valley, Tyrol	3.0
粘板岩	Osage County, OKl.	3.5
砂岩	Upper Bavaria	3.6 ~ 4.1
鉄鉱石	東フランス, 地下 200 m	3.0 ~ 3.9

表 5-10 日本各地の初期地区の例

地点名	TA	NI	KZ	TZ	NZ	OH	NB	OY	KD	HK	IK	MZ	TB	OT
水平成分 σ_{x0} (kg/cm ²)	90	48	12	158	41	110	66	77	81	89	7.9	17	74	120
鉛直成分 σ_{y0} (kg/cm ²)	70	62	12	114	30	-	57	74	94	73	7.2	17	71	-
$\sigma_{x0} / \sigma_{y0}$	1.3	0.77	1.0	1.4	1.4	-	1.2	1.0	0.86	1.2	1.1	1.0	1.0	-

表5-11 ニアフィールド中の溶解度データ

Near-field solubility data

Element	Logarithm of solubility (Moles/l)
a) Literature data	
Be	- 4
Cs	high
Ca	- 2
C	high
Ho	- 8
I	high
Pd	- 6
Mo	- 2
Ni	- 4
Nb	- 8
Pd	- 8
Ra	- 8
Rn	high
Sm	- 8
Se	- 8
Ag	- 4
Sr	- 4
Sn	- 9
Zr	- 9
b) Extrapolated from MINEQL / EIR data	
Tc	- 7.5
Ac*	- 2
Th	- 5.5
Pa	- 5.5
U	- 9
Np	- 8
Pu	- 6.5
Am*	- 2
Cm*	- 2

* Without taking account of the important carbonate solid phase

表 5 - 12 深部花崗岩中地下水の組成

Probable composition of deep non-saline granitic groundwaters (concentrations in mg/l).

	Expected intervals ^a	Simulated groundwaters ^b
Conductivity, mS/m	22-30	
pH	7-9	8.2
Eh, V	0 - (-0.45) > 0.25 ^c	
HCO ₃ ⁻	90-275	123
SO ₄ ²⁻	0.5-15	9.6
HPO ₄ ²⁻	0.01-0.2	
NO ₃ ⁻	0.01-0.5	
F ⁻	0.5-5	
Cl ⁻	4-15	70
HS ⁻	0-0.5	
Ca ²⁺	10-40	18
Mg ²⁺	1-10	4.3
Na ⁺	10-100	65
K ⁺	1-5	3.9
Fe ²⁺	0.02-5	
Fe (tot)	1-5	
Mn ²⁺	0.01-0.5	
Al ³⁺	0-0.02	
NH ⁺	0.05-0.2	
SiO ₂ (tot)	3-14	11
TOC ^d	1-8	

a Probable interval for the majority of non-saline waters.

Values outside the interval can be encountered locally. The composition of saline waters is given in table 7-5.

b Artificial groundwater used as a reference system in sorption and solubility measurements etc.

c Aerated systems.

d Total organic carbon.

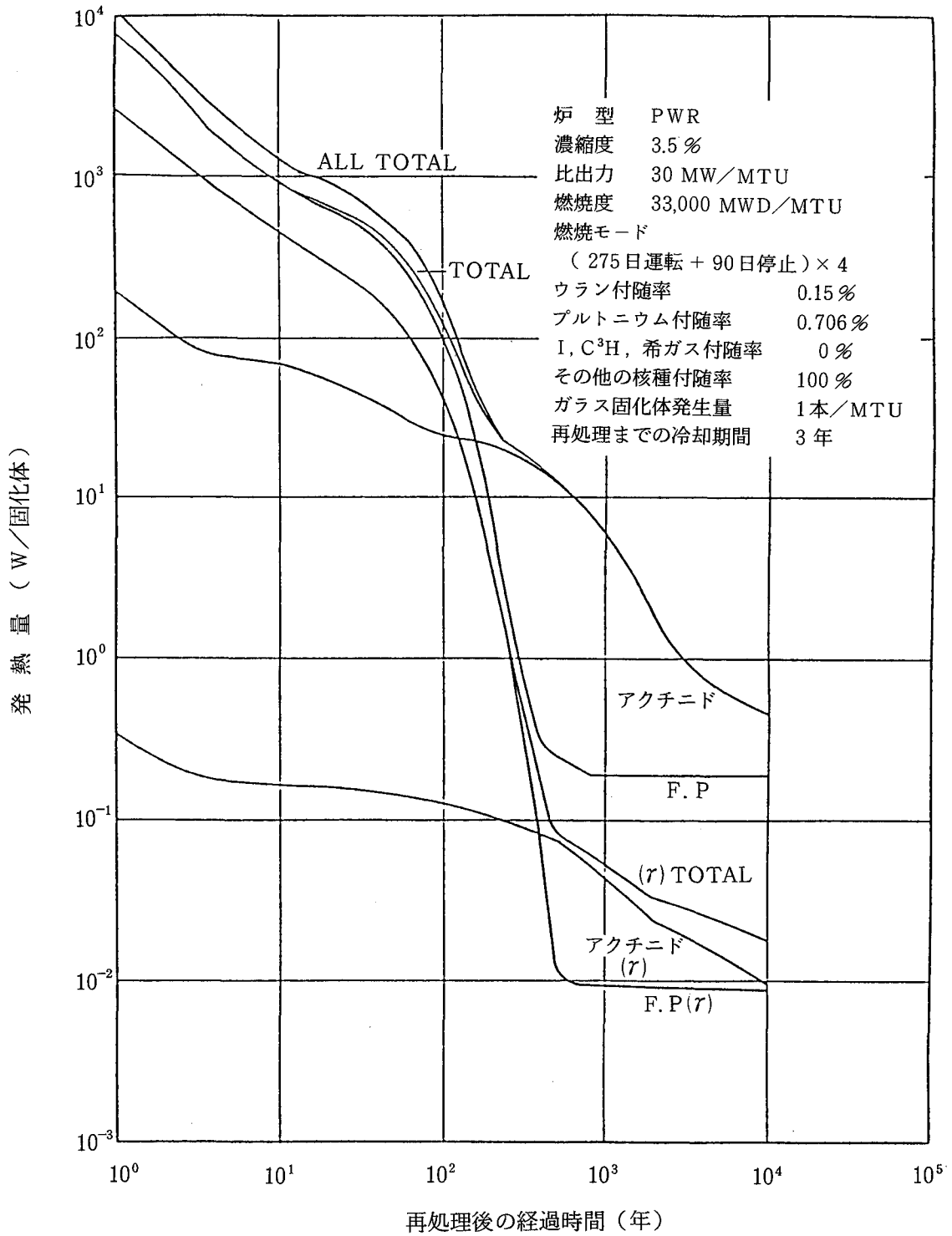


図 5 - 1 ガラス固化体の発熱量

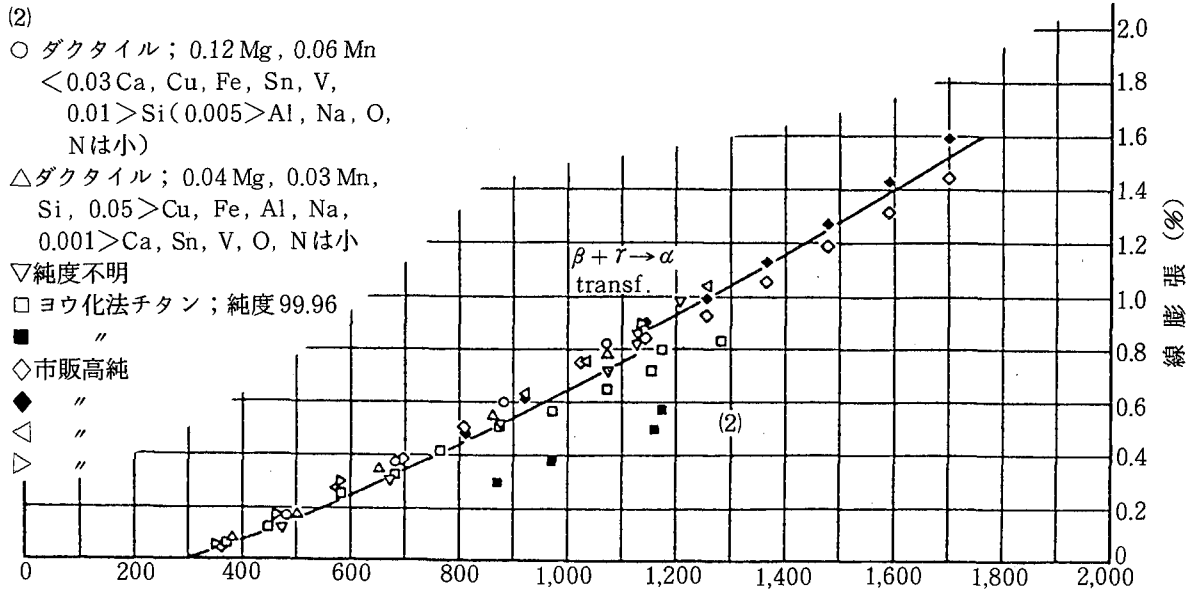


図 5 - 2 チタンの線膨張

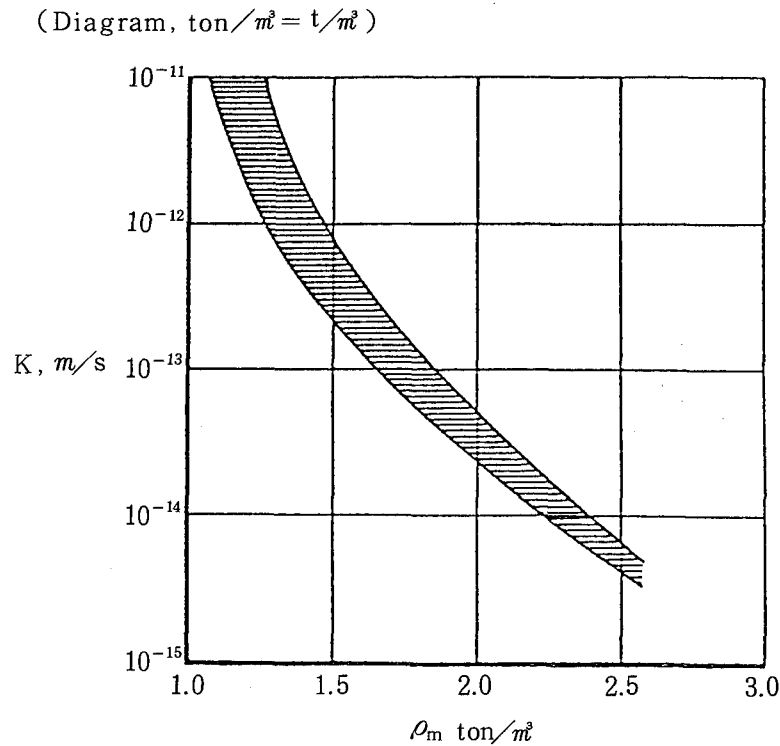


図 5 - 3 ベントナイトの透水係数

The graph illustrates the relationship between hydraulic conductivity (K) and bulk density (ρ_m) for water-saturated sodium bentonite at room temperature. The shaded area between the curves shows the range of variation due to the effects of varying salt content in the pore water and the scatter of experimental measurement data.

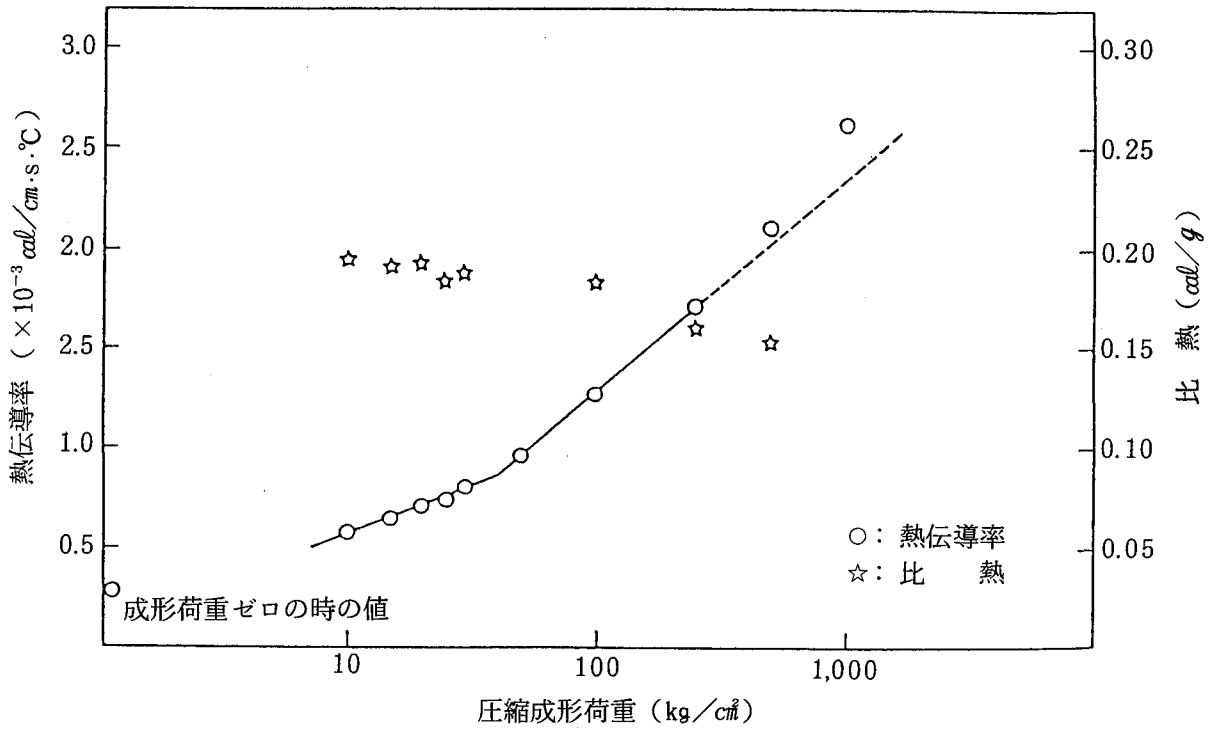


図5-4 ベントナインの圧縮成形荷重と熱伝導率及び比熱の関係

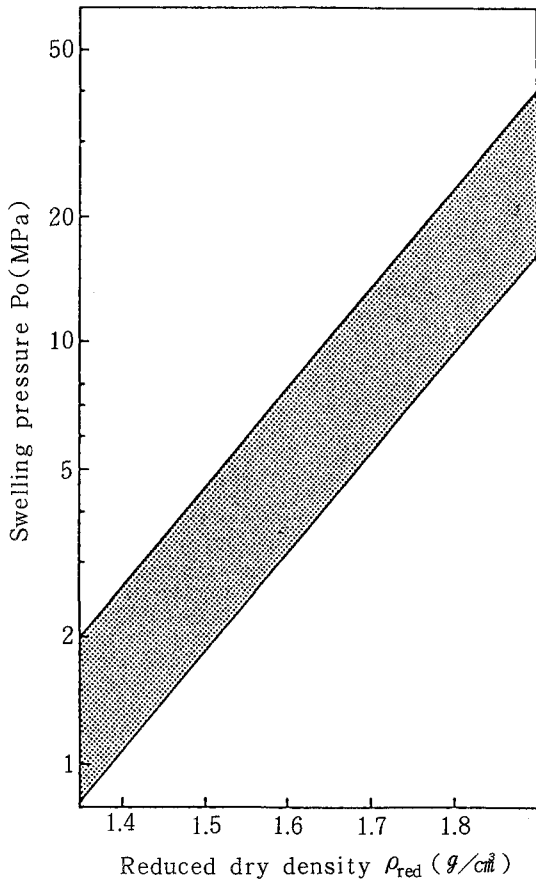


図5-5 ナトリウムベントナイトの膨潤圧

Swelling pressure of Na-bentonite MX-80 (hydrostatic pressure 0.1 MPa). The cross-hatched area shows the scatter determined by accuracy of measurement and fluctuations in exact composition and temperature.

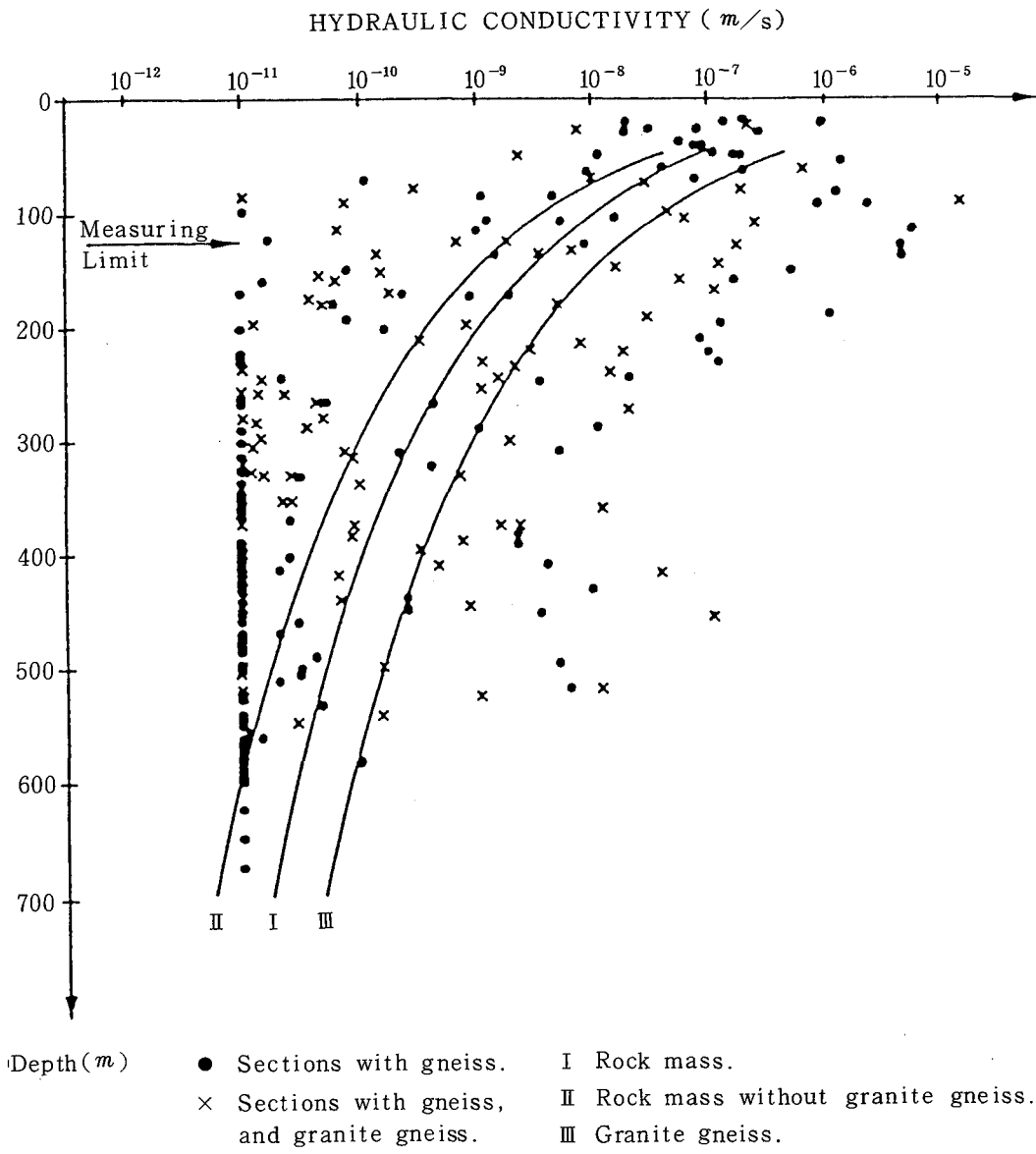


図5-6 岩体中の透水係数

Correlation between hydraulic conductivity and depth within the rock mass.

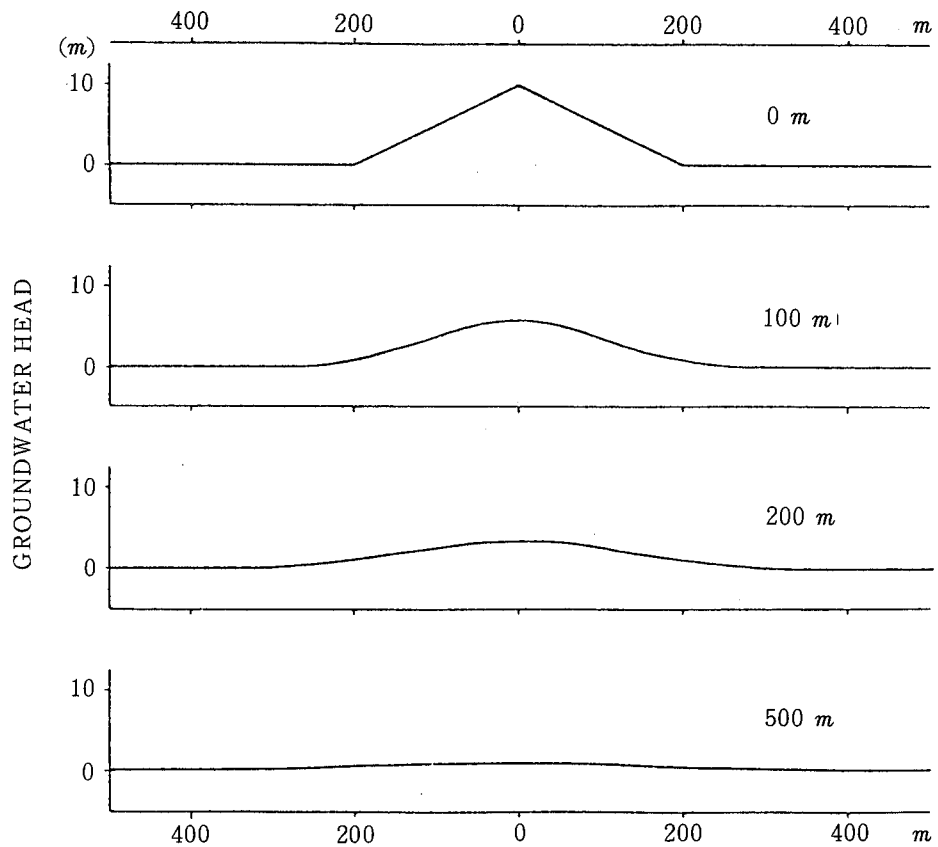


図5-7 動水勾配の変化

Levelling of the groundwater head with depth below a circular hill with a radius of 200 metres. The largest gradient in the horizontal direction at the ground surface is 5% and at a depth of 500 metres about 0.1% [6-10].

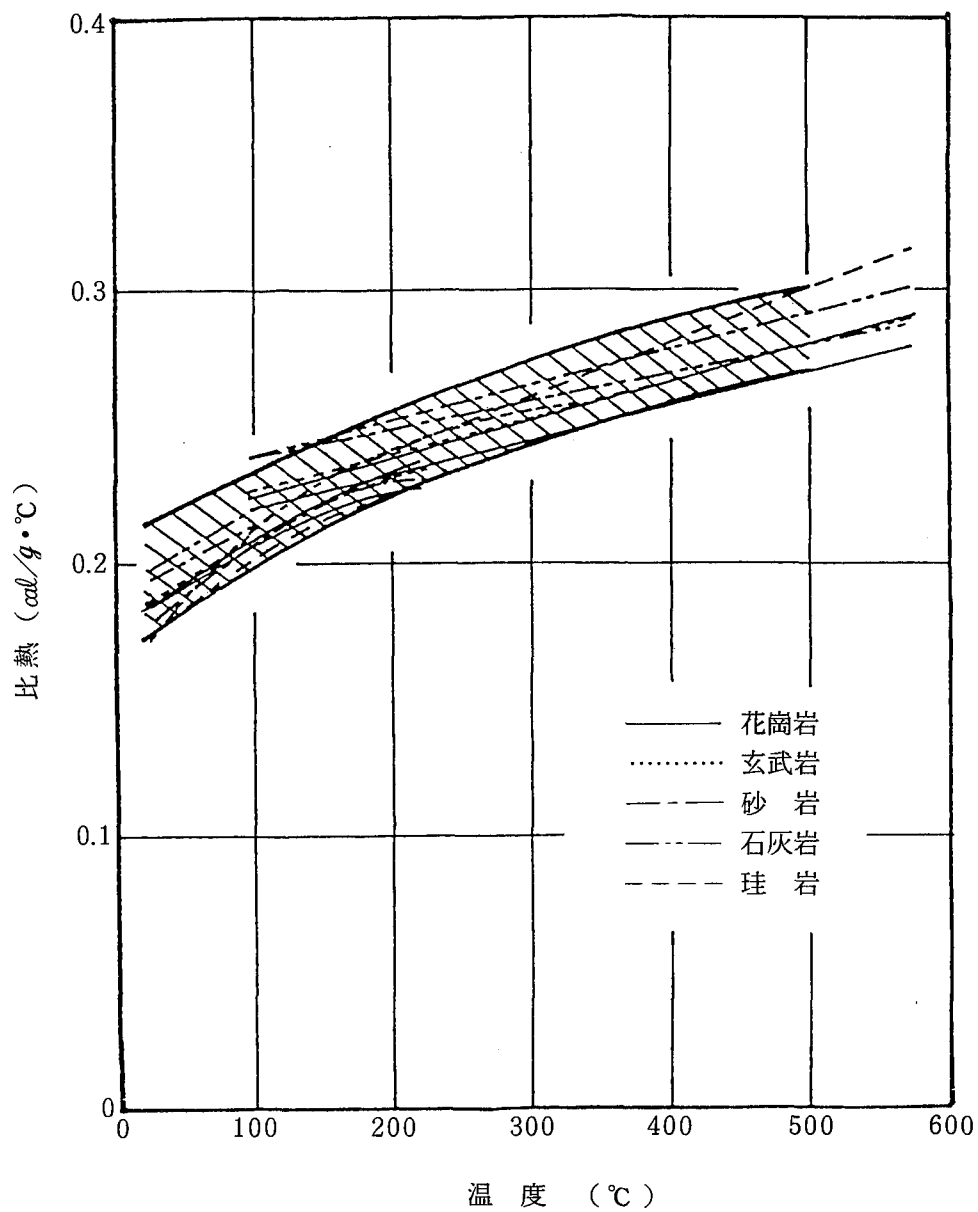


図5-8 岩石の比熱と温度の関係

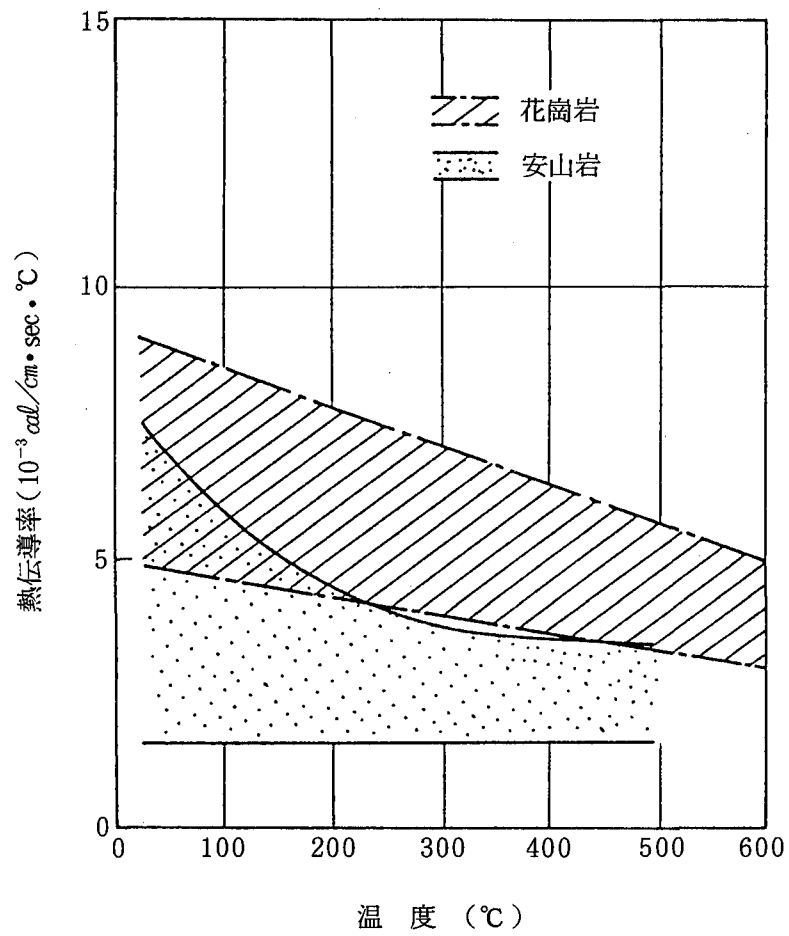


図5-9 火成岩における熱伝導率と温度の関係

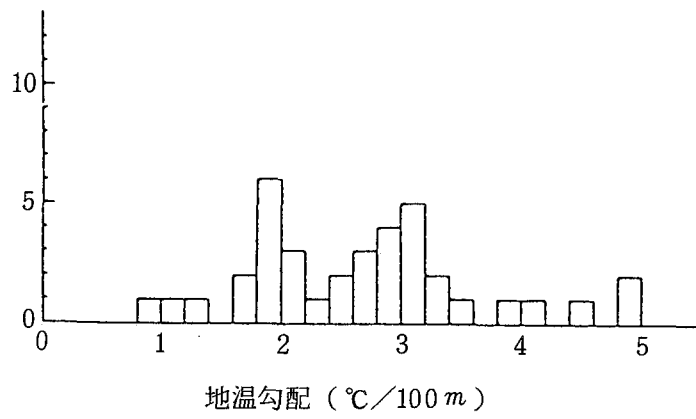


図5-10 日本各地の地温勾配

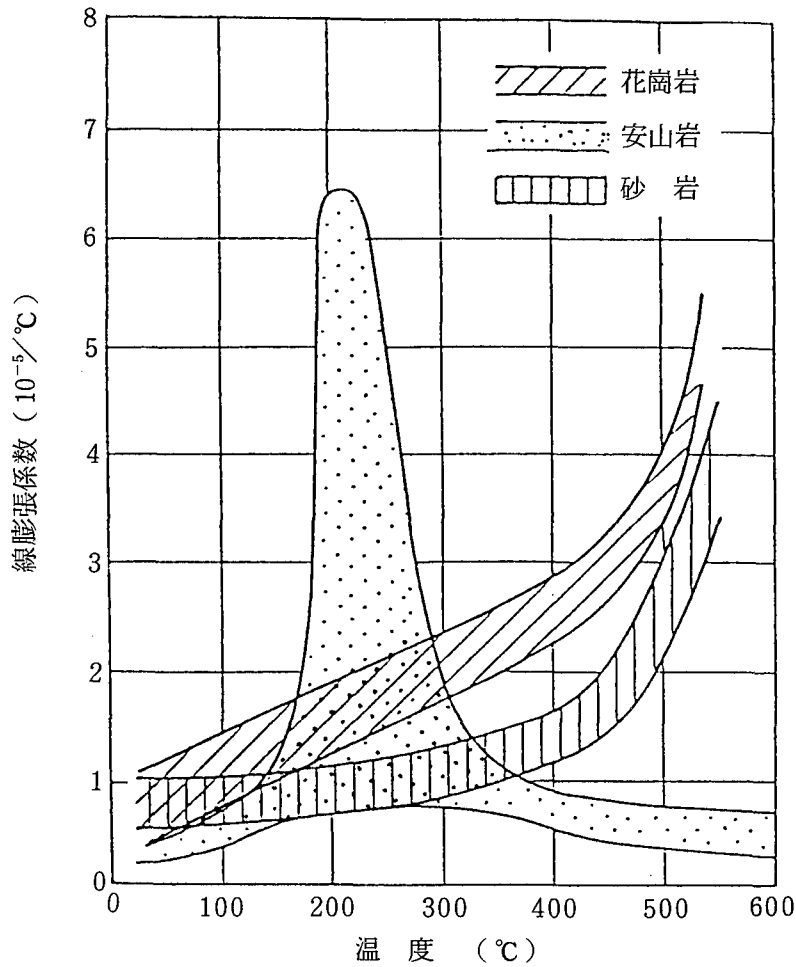


図5-11 各岩石の線膨張係数と温度の関係

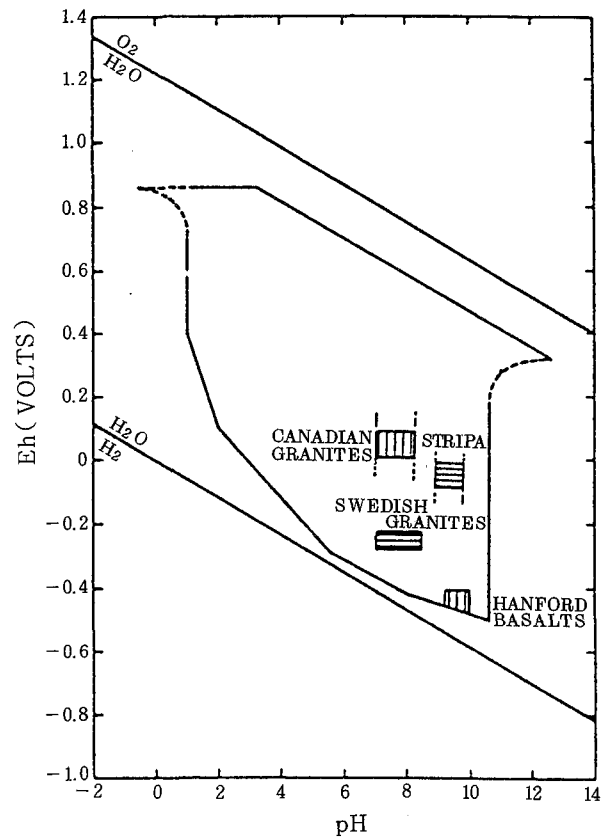
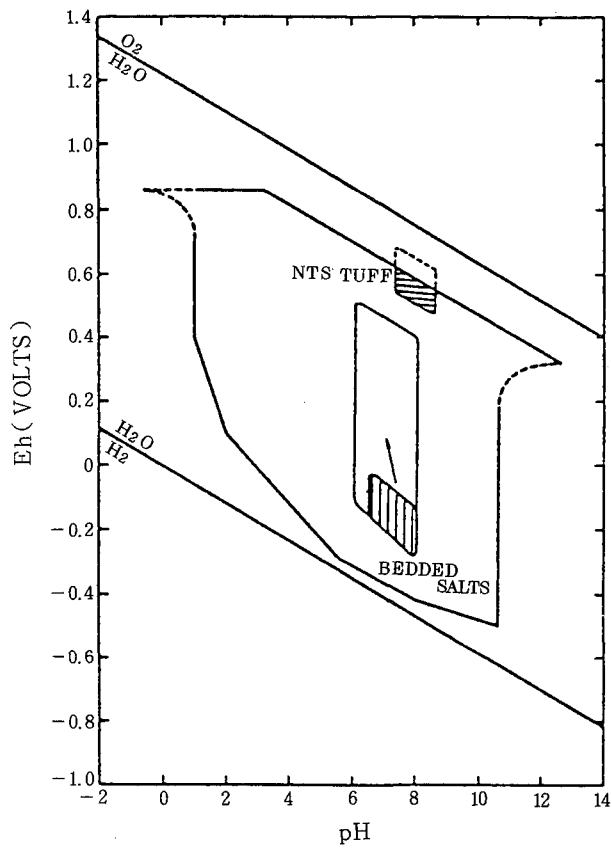


図5-12 様々な処分試験サイトで予想される Eh-pH 領域：
 閉じた部分は天然水に期待される最大範囲を示す (Bass-Becking による)

6. 簡易な性能評価例

既に述べてきた、性能評価コードRELEASEとMGRAT03を用いて簡単な性能評価計算と感度解析を行った。

6.1 人工バリアからの核種放出

計算には表6-1に示すデータを用いた。分配係数、浸出率、溶解度及び放出開始時期を数桁上下に変化させて結果への影響を調べた。

対象とした核種はSr（短半減期，溶解度高）とU（長半減期，溶解度低）とPu（比較的短半減期，溶解度低）である。

計算結果を図6-1～6-3に示す。

Sr

まずSrについては、溶解度が高いため浸出率律速となる。図6-1(1)には浸出率を変動させた場合の放出率の変動が示されている。浸出率は放出率に対し線形の影響を持っている。すなわち、浸出率が1桁小さくなると放出率の最大値が1桁下がる。ただし、最大値となる時間は変わらない。

図6-1(2)には浸出が始まる時間（オーバーパックが破損し、ガラスが地下水と接触するまでの時間）を変動させた場合の影響を示した。Sr-90は半減期が28年と短いため、1,000年以上の隔離によって浸出開始前に減衰することが示されている。

U

次にUについては、溶解度が低いため溶解度律速となる。図6-2(1)に溶解度を変動させた場合の影響を示した。Srの放出率に対する浸出率と同様、溶解度はUの放出率に線形の影響を与える。ここで、特徴的なことはUの半減期が非常に長いため、定常状態に達した後の放出率（最大値）が長く続くことである。

図6-2(2)には浸出開始時間の影響を示した。図のように、Uのような半減期の長い核種に対しては完全閉じ込めによる減衰は期待できない。ただし、放出率が最大になるまでの時間は閉じ込め期間に応じて遅くすることができる。（図の横軸は浸出が始まってからの時間である。）

図6-2(3)には分配係数の影響を示した。分配係数の変動は、定常状態（最大放出率）に達するまでの時間には影響を与えるが、放出率の値には影響しない。

Uのような長半減期、低溶解度の核種については、溶解度の大きさのみが放出率に影響を与える。隔離期間と分配係数は最大放出率に達する時期を遅らせるのみである。

Pu

Uよりも半減期の短いPuについては、Uと同様な傾向を示すものの、その半減期によりUとは

異なる放出パターンを示す。

図6-3(1)には溶解度の影響を示す。これはUと同様、線形の影響を示しているが定常状態に達する前に減衰し、放出パターンはピークを持つ。

図6-3(2)には浸出開始時間の影響を示した。半減期以上の隔離期間が達成されれば、減衰により放出率を下げる事が可能となる。

図6-3(3)には分配係数の影響を示した。分配係数の値によって最大放出率となる時間が変化し、減衰の効果が表われている。

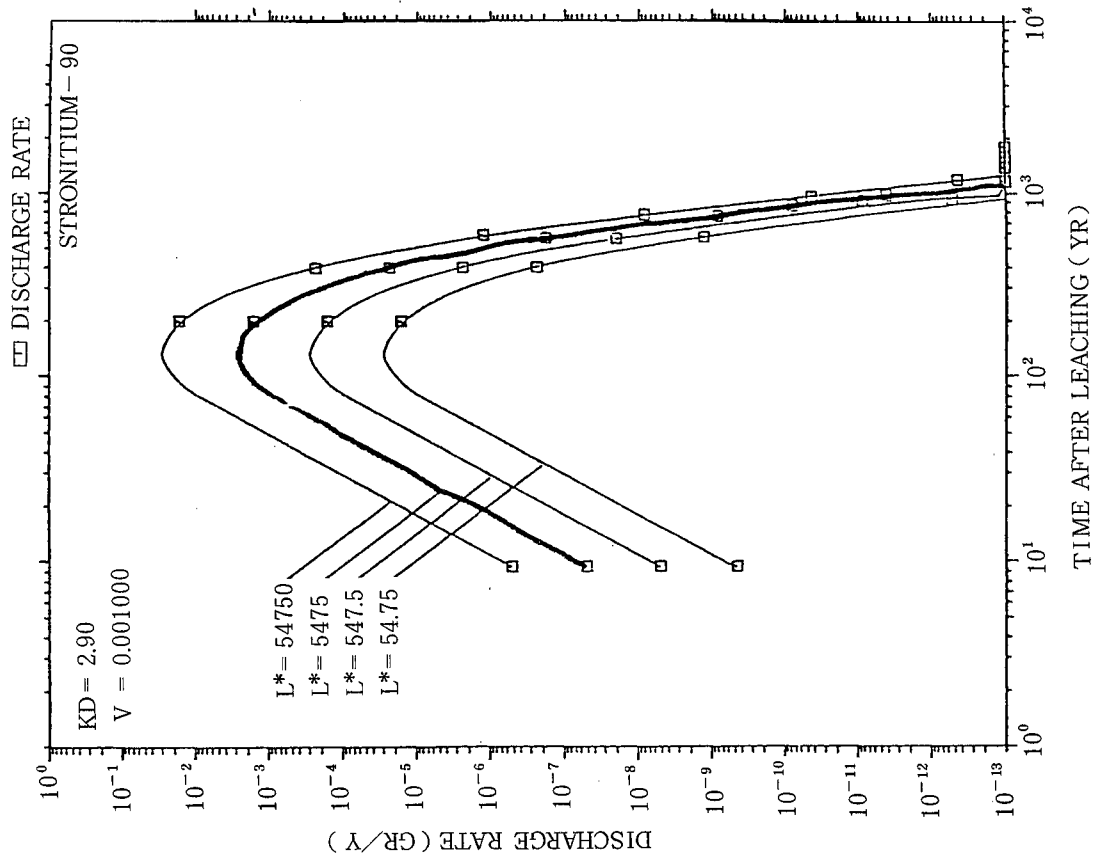
P_u のようにUに比べ半減期がかなり短く、溶解度の低い核種についてはUと同様に溶解度が放出率に影響を与えるのに加え、隔離期間と分配係数も放出時期を遅らせることによって、放出率を下げる影響を与える。

表6-1 人工バリアからの核種放出率関連データ (RELEASEのインプット)

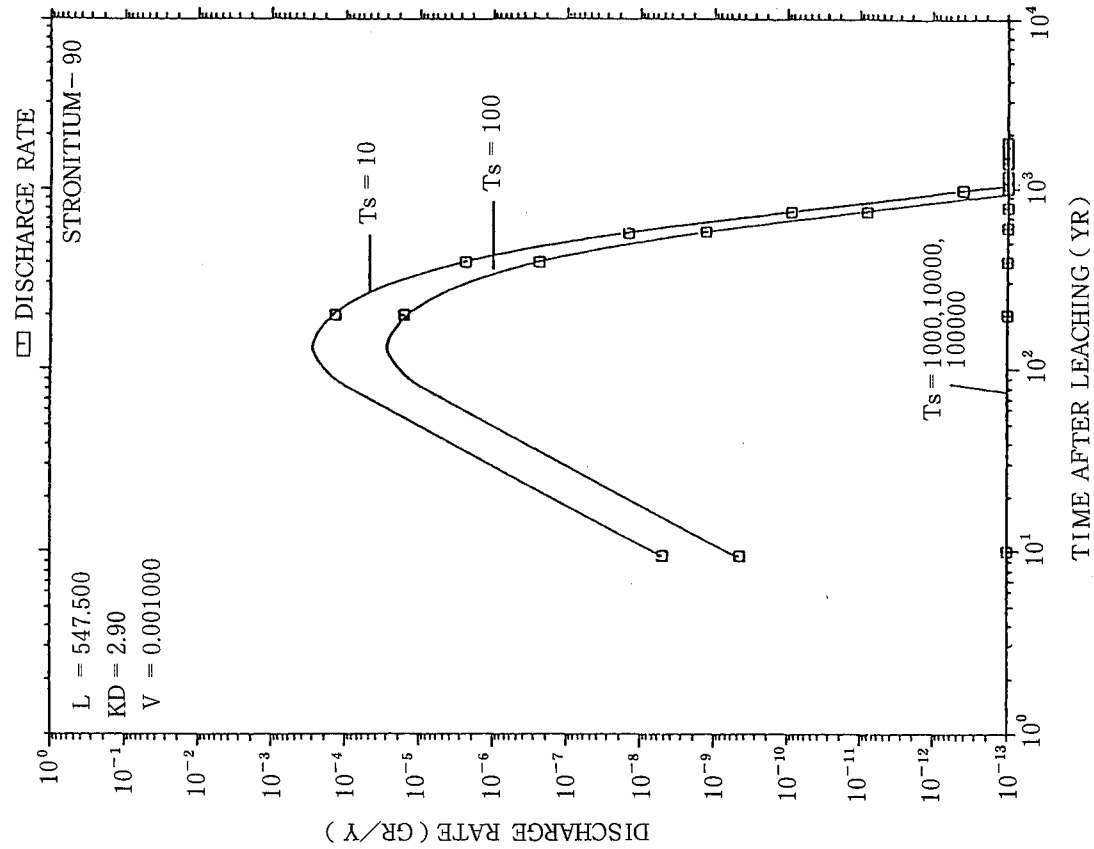
核 元 素	種 同 位 体	同位体存在比		半 減 期 (Y)	拡 散 係 数 (m^2/Y)	分 配 係 数 ^{*1} (m^3/kg)	固 化 体 中 含 有 率	飽 和 溶 解 度 (g/m^3)	固 化 体 浸 出 率 (g/m^2Y)	充 填 材 厚 (m)	地 下 水 度 速 度 (mm/Y)
U	234	1.5×10^{-3}		2.5×10^5	4.7×10^{-3}	0.093	4.81×10^{-3}	0.19			
		1.3×10^{-2}		7.1×10^8							
	9.8×10^{-1}		4.4×10^9								
Pu	239	5.9×10^{-1}		2.4×10^4	6.6×10^{-3}	3.5	2.41×10^{-4}	1.2×10^{-6}	547.5	0.3	1.0
		3.8×10^{-1}		6.6×10^3							
Sr	90	0.16×10^{-9}		28	2.1	2.9	3.9×10^{-14}	—			

*1 Torstenfelt によるNa-ベントナイトに対する保守的数値

*2 溶解度限界なし

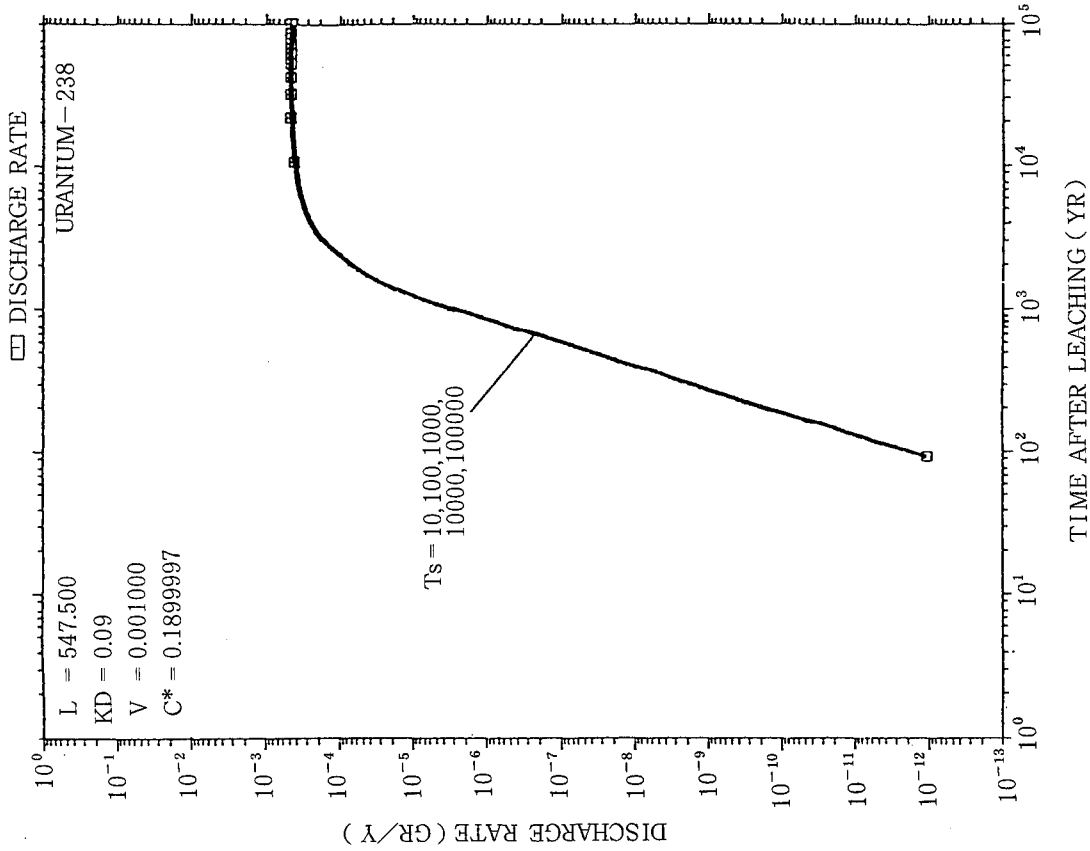


(1) 浸出率依存性

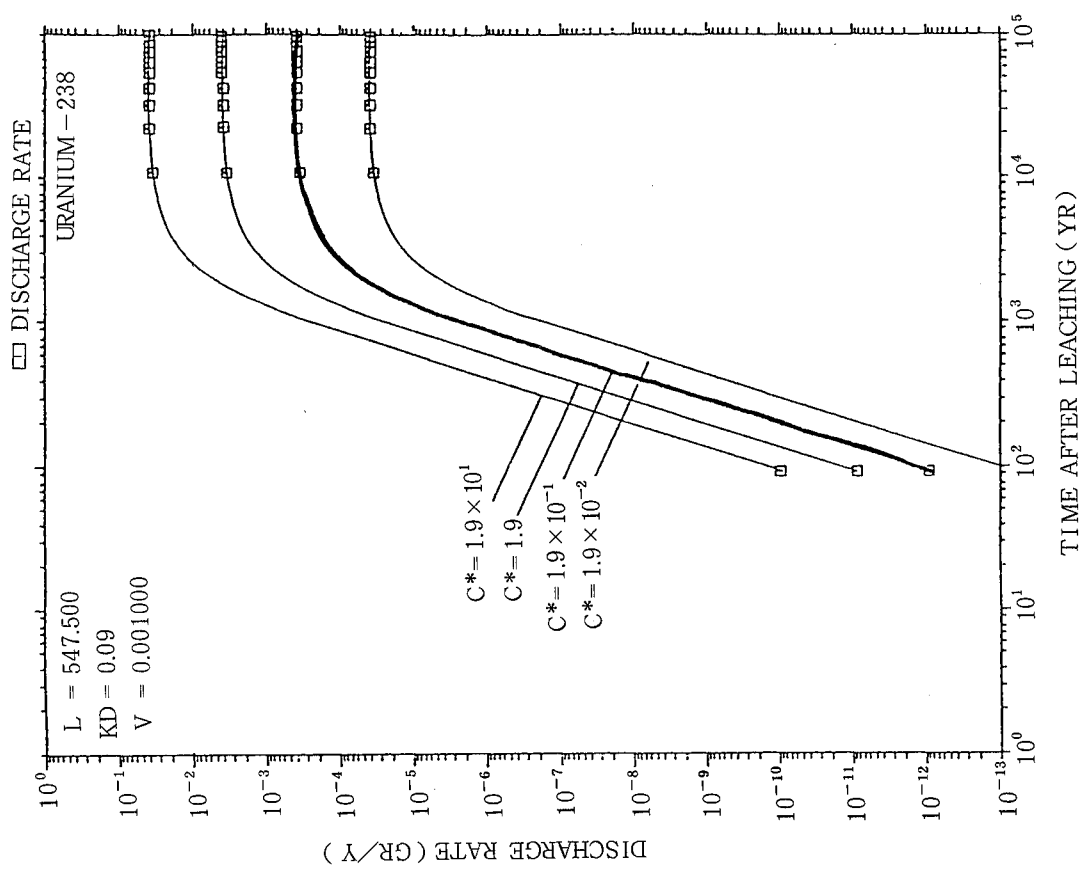


(2) 浸出開始時間依存性

図6-1 Sr の放出率

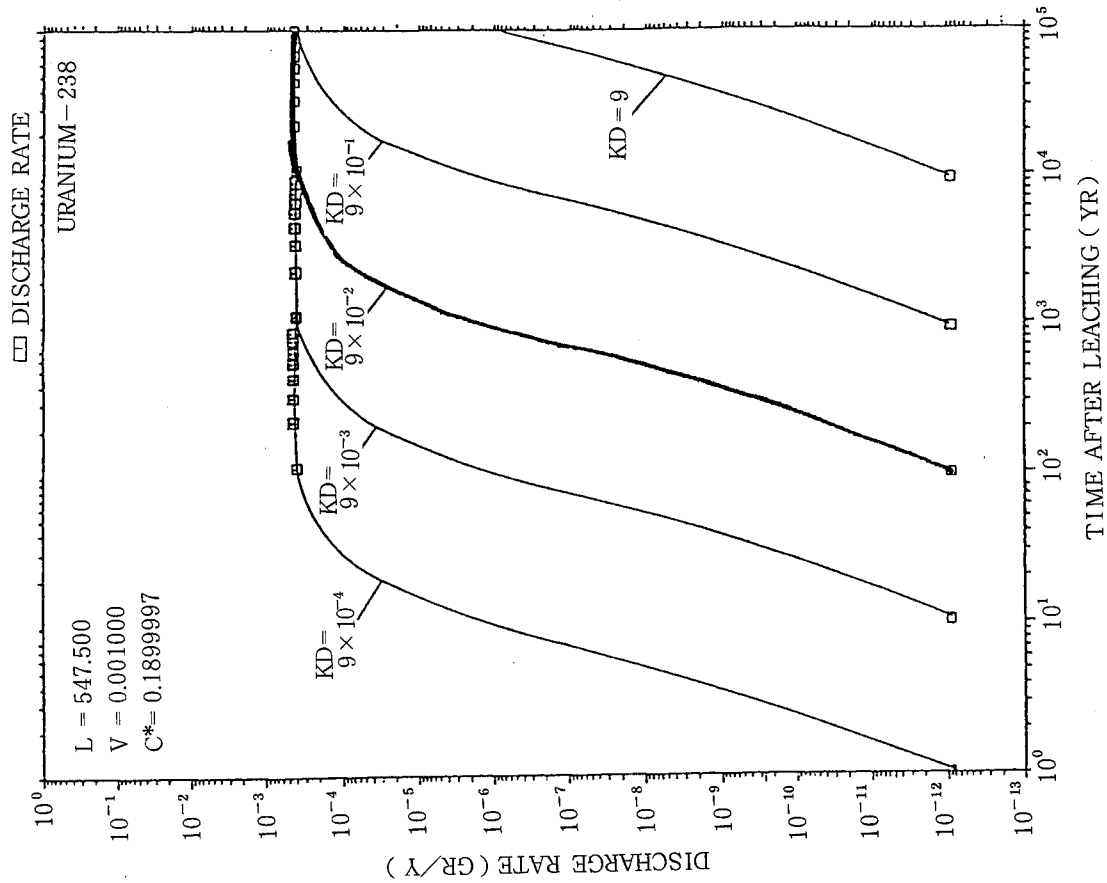


(2) 浸出開始時間依存性



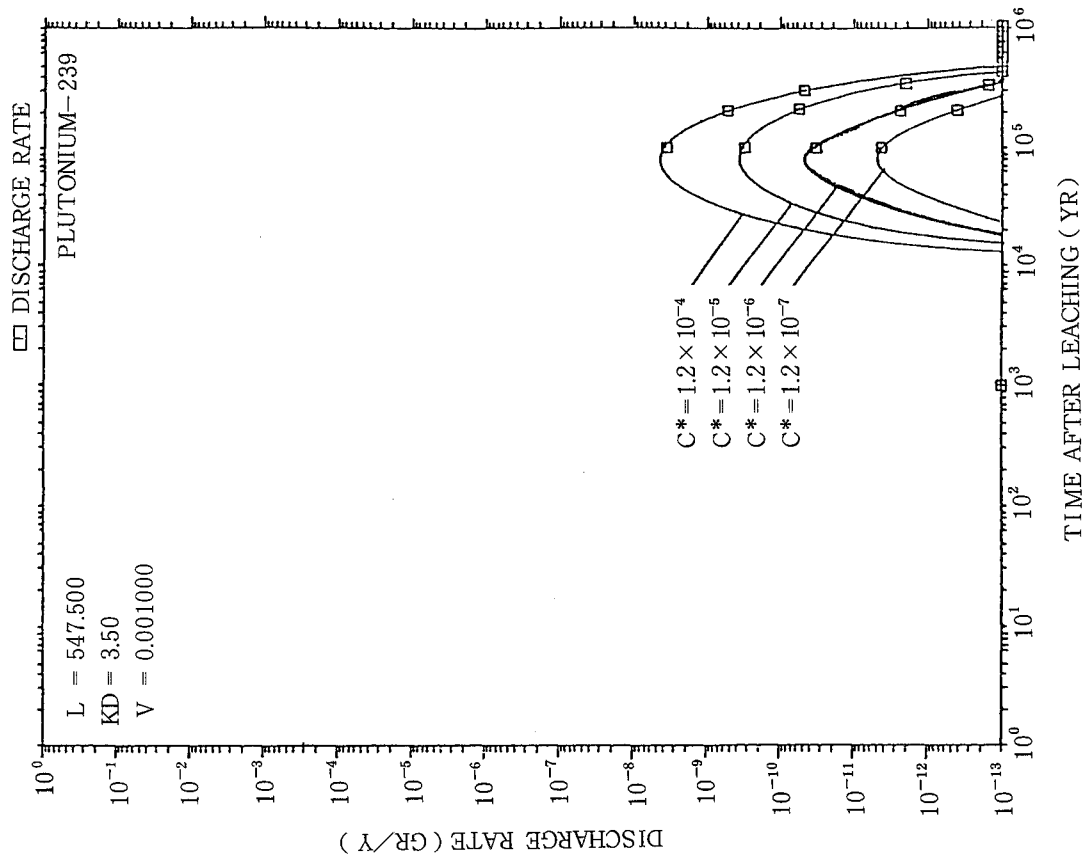
(1) 溶解度依存性

図 6-2(1) U の 放 出 率



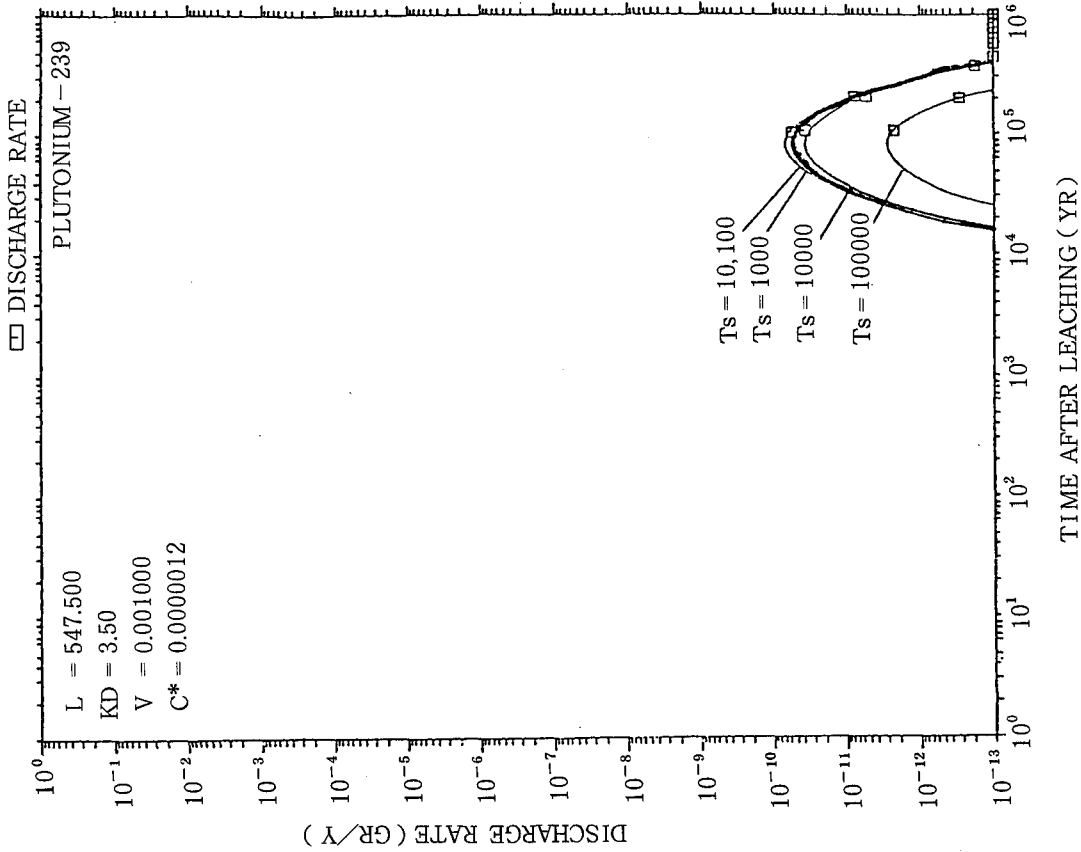
(3) 分配係数依存性

図 6 - 2 (2) U の 放 出 率

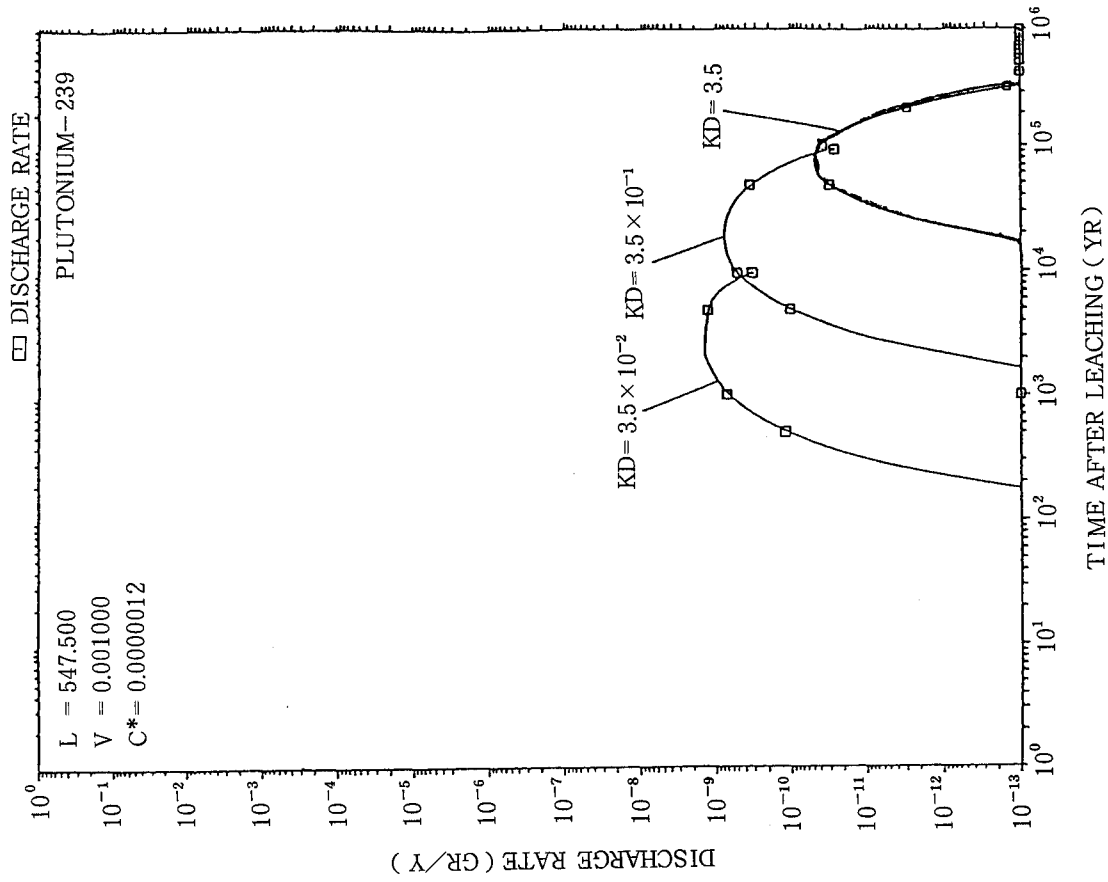


(1) 溶解度依存性

図 6 - 3 (1) Pu の 放 出 率



(2) 浸出開始時間依存性



(3) 分配係数依存性

図6-3(2) Puの放出率

以上をまとめると、表6-2のように核種を4つのグループに分類することができる。

溶解度律速の核種については溶解度、浸出率律速の核種については浸出率が排他的に支配的パラメータとなる。半減期の短い核種については、それに加えて閉じ込め期間と分配係数が支配的パラメータとなる。第4グループに属する核種は少なく、したがって溶解度や分配係数が支配的となる核種が多い。より詳細な評価を行うためには、処分環境、特に化学的環境を押えることが重要となる。

表6-2 人工バリア性能評価計算結果のまとめ

	代表核種	特 徴	支配的因子
第一グループ	^{137}Cs ^{90}Sr	比較的短半減期のFP 溶解度限界が適用されない	容器による完全閉じ込め 浸出率, 分配係数
第二グループ	^{238}U ^{237}Np	長半減期のアクチニド 溶解度限界に従う	溶解度
第三グループ	^{239}Pu ^{241}Am	比較的短半減期のアクチニド 溶解度限界に従う	溶解度, 分配係数
第四グループ	^{129}I ($^{99}\text{Tc}^*$)	長半減期のFP 溶解度限界が適用されない	浸出率

* 酸化条件の場合

6.2 生物圏への核種放出

計算には表6-3に示すデータを用いた。放出開始時間（浸出開始時期）、放出時間（放出率の逆数）、地下水移行時間（移行距離／地下水流速）を変動させて感度解析を行った。

また、MGRAT 03の出力であるHazard Indexから、4.(5)の計算法に基づいて被ばく線量を算出した。算出に際し、希釈水量Wとして

$$W = 10^8 \text{ m}^3 / \text{y}$$

を用いた。

表 6-3 生物圏への核種放出関連データ
(MGRAT 03 インプット)

インベントリ-	燃 焼 条 件 (表 5-1) 固 化 後 30 年 で 処 分 固 化 体 本 数 20,000 本
放 出 開 始 時 間 (T_s)	10^2 , <u>10^3</u> , 10^5 y
放 出 時 間 (T_L) (放出率 ⁻¹)	10^3 , <u>10^5</u> , 10^7 y
地 下 水 移 行 時 間 (Z/V)	10 , <u>10^3</u> , 10^5 y
遅 延 係 数	表 5-6
分 散 係 数	$100 \text{ m}^2/y$

— 線は標準値

標準値での計算結果を図 6-4 に、感度解析結果を表 6-4 に示す。図 6-4 には、Hazard Index の大きいもののみをプロットしてある。Hazard Index の大きなものは Tc-99 と Np-237 であり、ピークの被ばく線量は $0.1 \text{ mrem}/y$ 程度となる。ただし、希釈水量によって大きく変化する。感度解析の結果については、放出開始期間は Tc-99, Np-237 の半減期よりも短いため特に影響はなく、放出時間も影響は少ない。地下水の移行時間は線量に大きな影響を持っている。

表6-4 岩体からの核種放出の感度解析結果

	危険側 ←	標準値	→ 安全側
放出開始時間 T_s	$10^2 y$	$10^3 y$	$10^5 y$ (NAGRA 銅オーバーパック)
	$2.185 E 3 m^2$ ($8 E 5 y$) $0.11 \text{ mrem}/y$	$2.185 E 3 m^2$ ($8 E 5 y$) $0.11 \text{ mrem}/y$	$2.124 E 3 m^2$ ($9 E 5 y$) $0.11 \text{ mrem}/y$
放出時間 T_L	$10^3 y$ 緩衝材劣化	$10^5 y$	$10^7 y$ (40°C or $E_h = 0.16 \text{ V}$)
	$2.241 E 3 m^2$ ($7 E 5 y$) $0.11 \text{ mrem}/y$	$2.185 E 3 m^2$ ($8 E 5 y$) $0.11 \text{ mrem}/y$	$1.465 E 2 m^2$ ($1.6 E 6 y$) $0.007 \text{ mrem}/y$
地下水移行時間 Z/V	$10 y$ 地下水流 速い	$10^3 y$	$10^5 y$ 地下水流 遅い
	$3.605 E 4 m^2$ ($1 E 5 y$) $1.8 \text{ mrem}/y$	$2.185 E 3 m^2$ ($8 E 5 y$) $0.11 \text{ mrem}/y$	$3.753 m^2$ ($2.2 E 6 y$) $0.0002 \text{ mrem}/y$

毒性指数の最大値

()内は最大値の現れる時期

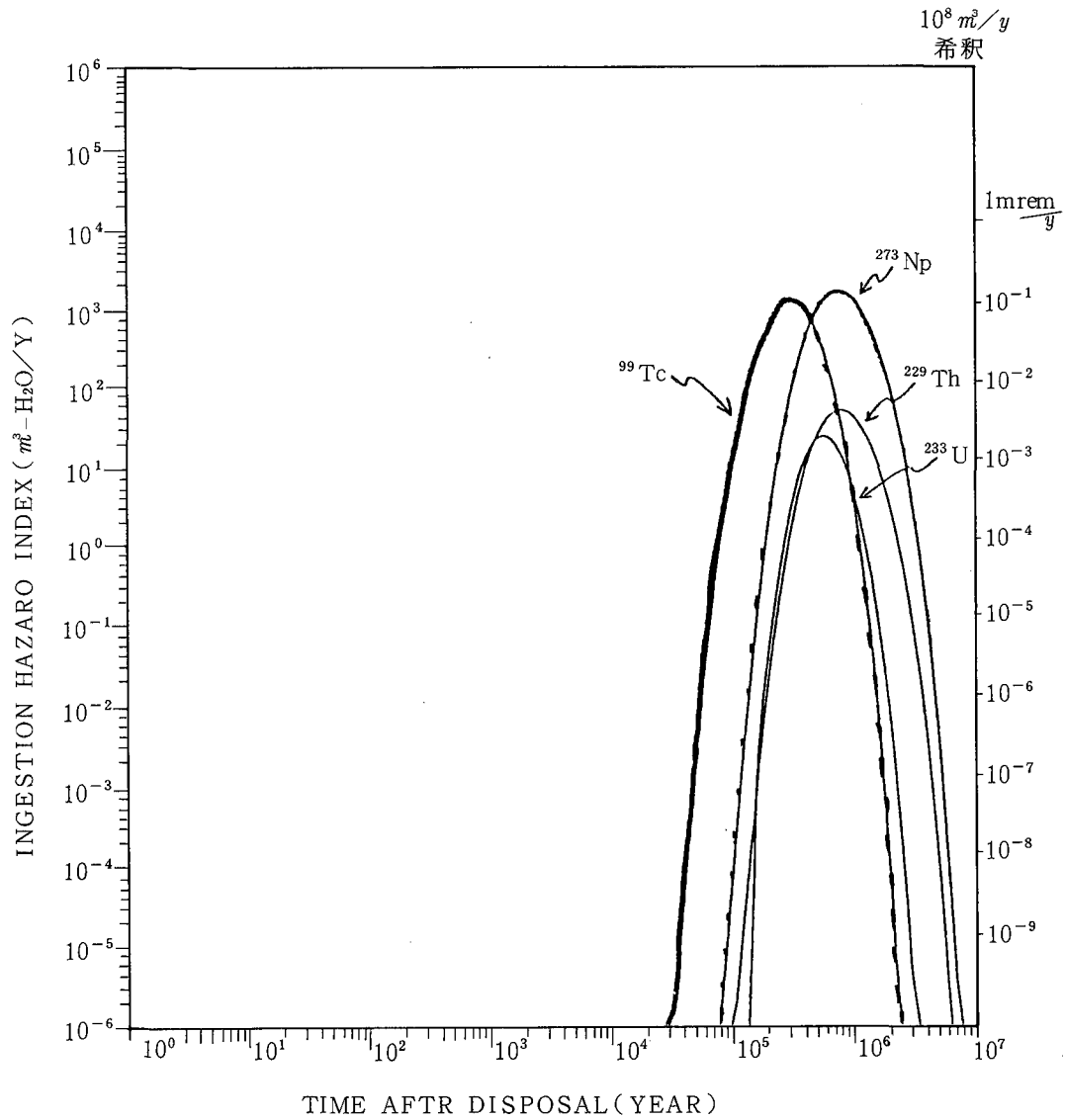


図6-4 生物圏へ放出される核種の Hazard Index と評価線量

7. 今後の進め方

本報告書に記載した簡易な性能評価を行うにしても、表5-1に示したパラメータについてデータを持つ必要がある。パラメータによっては他の国での測定結果等を使用できる場合があるかもしれないが、基本的には日本で行う処分の方式に合わせたデータを取得しておくべきである。この中でも、特に重要であり、他国のデータを使用し難いものは以下に示すパラメータである。

① 処分場周辺の化学環境

これは、核種の溶解度、分配係数とオーバーパックの腐食速度、ガラスの浸出率を決定するために必要である。

② 処分場周辺の水理

これは、核種の移行速度や被ばく計算を行う上で重要である。特に、希釈水量については、線量の結果に直接数桁の差を引き起こすことを考慮しておく必要がある。

③ 各核種の化学挙動

これは核種（元素）毎の溶解度や分配係数等のパラメータのことである。これらについては、処分場の化学環境によって化学種が変化することも考慮しておく必要がある。また、化学条件等からこれらのパラメータを計算するための計算コード（地球化学計算コード）の整備や基本的な化学（熱力学）データの取得（文献値でも可）が必要不可欠である。

また、日本における地層処分の第2段階の目標がサイトの選定であることから、これに向けたデータ取得を進める必要がある。すなわち、選定されたサイトにおいて安全に処分できるという設計、評価を行うためのデータが必要となる。これは、安全審査を念頭においた保守性の証明を行うことであると考えられる。

具体的には、評価に用いたパラメータ値の保守性の証明が要求されるであろう。例えば、溶解度を設定した場合にその値以上にならないという証明や、地下水の移行距離を100 mとした場合には処分場から100 m以内に地表へ通じる破碎帯がないことの証明などであろう。

同様に、設計を行うための仕様を定めることを目的としたデータ取得も必要となる。例えば、地下水に含まれる塩素濃度の上限を定めるための腐食試験、浸出試験、核種移行試験等が考えられる。

以上のような視点から、試験計画の

- (1) 今後どのようなデータを取得していくか
- (2) データ取得の優先順位をどう決めるか
- (3) データを取得していくためにどのような試験を行っていくか

というステップにおいて、以下のことに留意すべきである。

- (1) そのパラメータが評価結果にどの程度影響を与えるか
- (2) 評価に使用すべきパラメータの数値とその妥当性をいかにして得るか
- (3) パラメータ値の妥当性を証明するために、他のどのパラメータが決まっている必要があるか

8. 出 典

- (1) 許認可試料 (TVF)
- (2) 'Chemical Durability and Related properties of Solidified High-Level Waste Forms', IAEA Technical Report Series No 257, 1985, p. 89.
- (3) PNC-SJ 4469 87-001 「堆積岩中における高レベル放射性廃棄物地層処分に要する費用の検討」, p. 4, p.11.
- (4) PNC-SJ 126 84-01 (2) 「地層処分性能評価研究 (N)」, p. 7-30.
- (5) PNC-SJ 5211 86-002 (2) 「人工バリアシステムの設計研究 (I)」, p. 2-51.
- (6) PNC-SJ 126 84-01 (2) 「地層処分性能評価研究 (N)」, p. 2-53, 56.
- (7) ステンレス鋼便覧, 金属データブック, 日本金属学会編, 丸善。
- (8) 理化学辞典, 岩波。
- (9) 金属データブック, 日本金属学会編, 丸善, p. 142, 182.
- (10) 金属データブック, 日本金属学会編, 丸善, p. 116.
- (11) 金属データブック, 日本金属学会編, 丸善, p. 34.
- (12) PNC-SJ 199 86-12 「地層処分における緩衝材に関する研究 (N)」, p. 36.
- (13) KBS TR83-34 'Radioactive nuclide diffusion and mobilities in compacted bentonite', p. 14.
- (14) KBS-3 p. 9-7.
- (15) PNS-SJ 5211 86-002 (2) 「人工バリアシステムの設計研究 (I)」, p. 2-58.
- (16) JEARI-M 87-164 「原位置緩衝材試験 (I)」, p. 7.
- (17) NAGRA PROJECT REPORT NGB 85-09, p. 9-22.
- (18) 大久保雅弘, 黒田吉益 編, 「実験地学ハンドブック」, p. 203, 築地書館, 1968.
- (19) KBS-3 14章。
- (20) KBS-3 p. 18-26.
- (21) KBS-3 p. 6-9.
- (22) KBS-3 p. 12-23.
- (23) PNC-SJ 4060 87-007 (2) 「硬質岩における地層処分施設の設計体系の開発」, p. 46
- (24) PNC-SJ 4060 87-007 (2) 「硬質岩における地層処分施設の設計体系の開発」, p. 45
- (25) PNC-SJ 4060 87-007 (2) 「硬質岩における地層処分施設の設計体系の開発」, p. 53
- (26) PNC-SJ 4060 87-007 (2) 「硬質岩における地層処分施設の設計体系の開発」, p. 42
- (27) 岩の工学的性質と設計・施工への応用。
- (28) PNC-SJ 4060 87-007 (2) 「硬質岩における地層処分施設の設計体系の開発」, p. 47
- (29) PNC-SJ 4060 87-007 (2) 「硬質岩における地層処分施設の設計体系の開発」, p. 53

- (30) Projekt Gewähr 85-09 p.10-25.
- (31) 天沼 , 村野 徹 訳, 「放射性廃棄物の地層処分に関する地球化学プロセス」, p.126,
㈱テクノプロジェクト, 1987.
- (32) KBS-3 p.7-17.
- (33) ICRP Pub. 2.
- (34) ICRP Pub. 26.