

天然バリア中の核種移行に対する パラメータの影響特性の把握

1998年7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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :
Technology Management Section Tokai Works Power Reactor and
Nuclear Fuel Development Corporation Tokai 4-33, Muramatsu,
Tokai - mura, Naka - gun, Ibaraki - ken 319 - 1194, Japan

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

天然バリア中の核種移行に対するパラメータの影響特性の把握

石原 義尚*, 大井 貴夫*, 石黒 勝彦*

要 旨

地層処分システムの性能評価において、様々なシナリオ/地質条件に対するバリア性能を網羅的に評価するためには、核種移行に関連するパラメータの変動とその組合せを考慮して多数の解析を行う必要がある。このような多数の評価解析を行うにあたり、あらかじめ、バリア性能に対するパラメータの影響特性を把握することができれば、解析効率を向上させることができる。例えば、亀裂媒体において、岩体マトリクス中の拡散係数や分配係数、亀裂中の地下水流速や評価地点までの距離などが核種の移行率に及ぼす影響を把握することができれば、各パラメータの重要度を特定することができ、パラメータ範囲の設定や解析結果の解釈が容易になると考える。また、そのような情報は、シナリオの検討やバリア性能の向上に関する研究開発（例えば、データ取得等）に資する有益な情報になると考える。

そこで、本検討では、亀裂媒体の核種移行に対するバリア性能のパラメータ依存性を簡単に把握するためのモデルとして、1次元平行平板亀裂媒体中の移行特性パラメータおよびインベントリから、亀裂中の任意の地点における最大移行率を調べるための簡略化モデルを作成した。これにより、亀裂媒体のバリア性能を、概略的ではあるが簡便かつ広範囲に把握することが可能となり、今後のより詳細な感度解析の効率的な実施に役立つと考えられる。また、バリア性能に対する各パラメータの影響度が簡単に把握できるため、シナリオの検討やデータ取得等に資する情報を得ることができると考えられる。

* 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. 簡略化モデルの検討	2
2.1 亀裂媒体中の核種移行モデル	2
2.2 簡略化の方法	3
3. 簡略化モデルによるパラメータの影響特性	9
3.1 解析対象核種およびインベントリ	9
3.2 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性	9
3.3 亀裂媒体中の核種移行率に対するパラメータの影響特性	11
3.4 簡略化モデルによる最大移行率の比較	13
4. まとめ	22
<参考文献>	22
添付A 多孔質媒体における核種移行時間	23
添付B 人工バリアからの核種流入の継続時間	25
添付C 簡略化モデルによる最大移行率の確認	26
添付D 人工バリアからの非定常流入率に対する簡略化モデルの適用性	28
添付E 緩衝材外側からの定常放出率と緩衝材内側境界濃度（溶解度）の関係	31
添付図集	33

図 表 目 次

図2-1	1次元平行平板亀裂媒体中の核種移行モデルの概念図	2
図2-2	人工バリア中の核種移行の簡略化	5
図2-3	亀裂媒体中の核種移行の簡略化	6
図3-1	マトリクス拡散による遅延効果に対する拡散深さの影響	16
図3-2	マトリクス拡散による遅延効果に対する実効拡散係数の影響	17
図3-3	亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (Se-79)	18
図3-4	簡略化モデルによる亀裂媒体中の最大移行率の比較	19
表3-1	解析対象核種とインベントリ	15

1. はじめに

地層処分システムの性能評価において、様々なシナリオ/地質条件に対するバリア性能を網羅的に評価するためには、核種移行に関連するパラメータの変動とその組合せを考慮して多数の解析を行う必要がある。このような多数の評価解析を行うにあたり、あらかじめ、バリア性能に対するパラメータの影響特性を把握することができれば、解析効率を向上させることができる。例えば、亀裂媒体において、岩体マトリクス中の拡散係数や分配係数、亀裂中の地下水流速や評価地点までの距離などが核種の移行率に及ぼす影響を把握することができれば、各パラメータの重要度を特定することができ、パラメータ範囲の設定や解析結果の解釈が容易になると考える。また、そのような情報は、シナリオの検討やバリア性能の向上に関する研究開発（例えば、データ取得等）に資する有益な情報になると考える。

これまでの感度解析（畑中ほか、1992）から、天然バリア中の核種移行に係るパラメータの影響特性として、地質媒体の条件や核種の移行特性を表すパラメータ群に対して、核種移行の遅延効果が把握されている。しかし、この感度解析で得られた結果は、亀裂表面から半無限の岩体マトリクスを持つ亀裂媒体に対して、人工バリアからの核種の放出が無限に継続した場合の定常状態における遅延効果であり、核種移行遅延効果の上限に相当するものである。

ここで、岩体マトリクスへの拡散は、マトリクス内の空隙構造に起因して拡散距離が制限されるため、拡散距離により核種移行の遅延効果が変わることは明らかである。このため、亀裂媒体のバリア性能に対するパラメータ依存性を把握するためには、マトリクス拡散深さの制限を考慮する必要がある。また、亀裂媒体中の核種移行が定常に到達するかどうかは、人工バリアからの定常流入を仮定した場合、インベントリに依存する流入の継続時間と関係する。したがって、亀裂中の核種移行率とインベントリの関係を検討することは、亀裂媒体のバリア性能を把握する上で重要と考えられる。

そこで、本検討では、亀裂媒体のバリア性能に対するパラメータの影響特性を簡単に把握するためのモデルとして、マトリクス拡散深さの制限を含む移行特性パラメータの組合せ、およびインベントリから、亀裂中の任意の地点における最大移行率を調べるための簡略化モデルを作成し、これを用いてパラメータの影響特性を広範囲に検討した。

2. 簡略化モデルの検討

地質媒体は1次元の平行平板亀裂媒体とし、亀裂中の移流/分散による核種移行、ならびに岩体マトリクス中の拡散による核種移行および瞬時線型吸着を仮定した。なお、各パラメータの影響を核種毎に概略的に把握するため、単一核種での崩壊を考慮し、崩壊連鎖に伴う移行中の核種の生成は無視した。

2.1 亀裂媒体中の核種移行モデル

1次元平行平板亀裂媒体に対する核種移行（単核種）の基本方程式は、亀裂中の移流/分散と岩体マトリクス中の拡散を連立して、以下の式で表される。

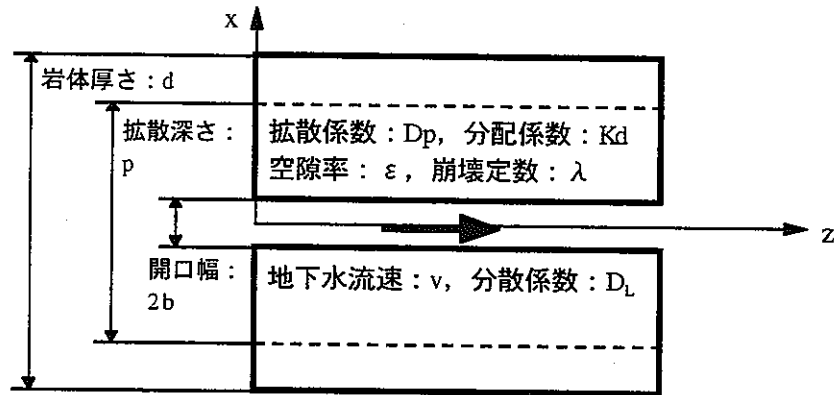


図 2-1 1次元平行平板亀裂媒体中の核種移行モデルの概念図

- ・ 亀裂中の核種移行（移流/分散）

$$Rf \frac{\partial C}{\partial t} = -v \frac{\partial C}{\partial z} + D_L \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \lambda Rf C + \frac{1}{b} \varepsilon D_p \frac{\partial C^m}{\partial x} \Big|_{x=b} \quad (1)$$

$$Rf = 1 + \frac{Ka}{b} \quad (2)$$

- ・ 岩体マトリクス中の核種移行（マトリクス拡散）

$$Rd \frac{\partial C^m}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 C^m}{\partial x^2} - \lambda R_d C^m \quad (3)$$

$$Rd = 1 + \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \rho Kd \quad (4)$$

ここで、

Rf：亀裂表面への吸着による遅延係数 [-]

Rd：岩体マトリクスへの吸着による遅延係数 [-]

C：亀裂内核種濃度 [M L⁻³]

C^m：岩体マトリクス中の空隙内核種濃度 [M L⁻³]

v：亀裂内地下水流速 [L T⁻¹]

D_L：亀裂内流れ方向の分散係数 [L² T⁻¹]

- D_p : 岩体マトリクス部の空隙中拡散係数 [$L^2 T^{-1}$]
 K_a : 亀裂表面への吸着に関する分配係数 [L]
 K_d : 岩体マトリクスにおける分配係数 [$L^3 M^{-1}$]
 λ : 崩壊定数 [T^{-1}]
 $2b$: 亀裂開口幅 [L]
 ε : 岩体マトリクスの空隙率 [-]
 ρ : 岩体マトリクスの真密度 [$M L^{-3}$]
 t : 時間 [T]
 z : 亀裂方向の距離 [L]
 x : 亀裂に垂直な方向 (岩体マトリクス内) の距離 [L]

以上の方程式系に対して、初期条件および境界条件は以下のように与えられる。

・初期条件

$$C(z, 0) = 0 \quad z > 0 \quad (5)$$

$$C^m(x, z, 0) = 0 \quad x > b, z > 0 \quad (6)$$

・境界条件

$$vC - D_v \frac{\partial C}{\partial z} = \phi_{in}(t) \quad z = 0, t > 0 \quad (7)$$

$$C(\infty, t) = 0 \quad t > 0 \quad (8)$$

$$C^m(b, z, t) = C(z, t) \quad t > 0 \quad (9)$$

$$\left. \frac{\partial C^m}{\partial x} \right|_{x=\frac{p}{2}} = 0 \quad t > 0 \quad (10)$$

ここで、(7)式の $\phi_{in}(t)$ は、亀裂入口での人工バリアからの核種流入率の時間変化を表す積分可能な関数である。また、(10)式の p は、拡散が生じ得るマトリクス方向の距離であり、岩体マトリクス全体が拡散に寄与する場合は、図2-1に示したように岩体厚さ (d) に等しくなる。

2.2 簡略化の方法

(1)式および(3)式で表される1次元平行平板亀裂媒体の核種移行モデルに対して、亀裂中の任意の地点における最大移行率を調べるための簡略化モデルを検討する。

亀裂媒体中の全核種量は定常状態で最大となり、その時の移行率が最大になると考えられるため、定常解析解を用いて核種の最大移行率を求めることとする。ここで、人工バリアからの核種の流入の継続時間はインベントリの制限を受けるため、亀裂媒体中の核種移行が必ずしも定常に到達するとは限らない。そこで、亀裂媒体中の核種移行が定常に到達する流入条件をインベントリから求め、定常到達と同時にインベントリが枯渇する(人工バリアからの核種の流入がなくなる)として、定常到達時の移行率(定常移行率)を最大移行率として

求めることとした。

(1) 定常解析解

人工バリアからの核種の流入が一定流入率 ϕ_{IN} の条件において、亀裂中の任意の地点における定常状態での核種移行率 ϕ_{OUT} は、以下の式で与えられる (Nagra, 1994)。

$$\frac{\phi_{OUT}}{\phi_{IN}} = \exp\left(\frac{Pe}{2} - \sqrt{\frac{Pe^2}{4} + Pe \times \lambda \times T}\right) \equiv \gamma \quad (11)$$

ここで、

$$Pe = \frac{v \times L}{D_L} \quad (12)$$

$$T = \frac{L}{v} \times R_{eff} = \frac{L}{v} \times \left[R_f + \frac{\varepsilon \times Rd}{b \times \alpha} \times \tanh\left(\alpha \times \frac{P}{2}\right) \right] \quad (13)$$

$$\alpha \equiv \sqrt{\frac{\lambda \times Rd}{D_p}} \quad (14)$$

L : 評価地点までの距離 [L]

この式から、定常状態における亀裂中の移行率 ϕ_{OUT} は、核種およびペクレ数 (Pe) が同一ならば、移行特性パラメータの組合せ (T) と定常流入率 ϕ_{IN} に依存することが分かる。ここで、移行特性パラメータの組合せ T を核種移行時間 (Transit Time) と定義する (Nagra, 1994)。この核種移行時間 T は、(13) 式のように、地下水の移行時間 (L/v) とそれ以外のパラメータを組み合わせた R_{eff} の積で与えられる。この R_{eff} は、多孔質媒体における遅延係数と等価なパラメータであり、マトリクス中での拡散および吸着による遅延効果を表したものとなる。(添付 A に示すように、多孔質媒体における核種移行時間は、地下水の移行時間 (L/v) と遅延係数の積で与えられる。)

この定常解析解には、1次元平行平板亀裂モデルに対する移行パラメータがすべて含まれている。したがって、定常解析解を用いることにより、亀裂中の任意の地点における定常移行率に対する移行パラメータの影響特性を調べることができる。

この定常解析解を利用して亀裂中の最大移行率を求めるためには、亀裂媒体中の核種移行が定常に到達する条件を調べる必要がある。そこで、人工バリアからの核種の流入の継続時間と亀裂媒体中の核種移行の定常到達時間を求めた。

(2) 人工バリアからの核種流入の継続時間

人工バリアからの核種の流入率 $\phi_{in}(t)$ は、実際には、人工バリア中の核種移行の解析結果を使用する。この流入率は、人工バリア中の移行特性パラメータ (例えば、溶解度や分配係数など) に依存して変化し、一般には複雑な関数形となり、継続時間は一意的には定まらない。ここでは、定常解析解が一定流入率の境界条件に対して得られていることから、

人工バリア中の核種移行を簡略化することにより、任意の流入率（一定）に対する継続時間をインベントリの関数として求めた。

人工バリア中での核種移行が瞬時に定常状態に到達すると仮定すると、人工バリアからの核種の流入率 $\phi_{in}(t)$ は、定常（一定）流入率 ϕ_{IN} で近似することができる。このとき、亀裂媒体への定常流入率、すなわち人工バリア外側からの定常放出率はガラス固化体からの定常放出率と等しくなり、かつ一定放出率 ϕ_{IN} として与えられる。

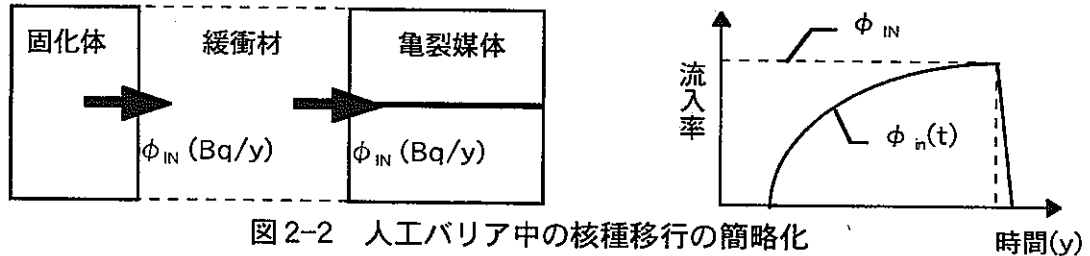


図 2-2 人工バリア中の核種移行の簡略化

そこで、ガラス固化体中の核種量を M [Bq]、定常流入率を ϕ_{IN} [Bq/y] とすると、ガラス固化体中の核種のマスバランスから次式が成り立つ。

$$\frac{dM}{dt} = -\lambda M - \phi_{IN} \quad (15)$$

これを解いて、ガラス固化体中の核種量 M がゼロになる時間、すなわち亀裂媒体への核種流入の継続時間 τ を求めると次式が得られる（添付B参照）。

$$\tau = -\frac{1}{\lambda} \times \ln \left(\frac{\phi_{IN}}{\lambda \times M_0 + \phi_{IN}} \right) \quad (16)$$

M_0 : ガラス固化体中の初期インベントリ [Bq]

ϕ_{IN} : ガラス固化体からの定常放出率（＝亀裂媒体への定常流入率）[Bq/y]

これから、任意の一定流入率に対して、亀裂媒体への流入の継続時間をインベントリから求めることができる。

(3) 亀裂媒体中の核種移行の定常到達時間

亀裂媒体中の核種移行の定常到達時間は、人工バリアからの一定流入率および亀裂媒体中の移行パラメータによって変化する。ここでは、定常状態における亀裂媒体中の全核種量を定常解析解を用いて算出し、定常到達時間を近似的に求めた。

人工バリアからの一定流入率を ϕ_{IN} 、亀裂中の任意の地点における移行率を ϕ_{OUT} とし、亀裂媒体中の全核種量（亀裂およびマトリクス中の核種量の総和）を W とすると、亀裂媒体中の核種のマスバランスから、次式が成り立つ。

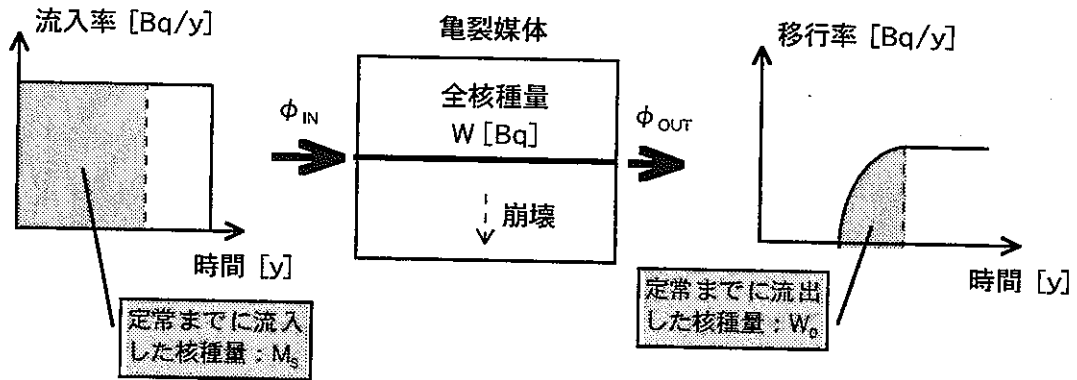


図 2-3 亀裂媒体中の核種移行の簡略化

$$\frac{dW}{dt} = -\lambda W + \phi_{IN} - \phi_{OUT} \quad (17)$$

定常状態では、 $dW/dt = 0$ となり、また、定常解析解(11)式から ϕ_{IN} と ϕ_{OUT} の関係は次式で与えられる。

$$\phi_{OUT} = \gamma \times \phi_{IN} \quad (18)$$

これを用いて、上記の微分方程式(17)を解くと、定常状態における核種量 W_s は次式で与えられる。

$$W_s = \left(\frac{1-\gamma}{\lambda} \right) \times \phi_{IN} \quad (19)$$

次に、亀裂媒体中の核種移行が定常に到達するまでに人工バリアから流入した核種量を M_s とし、定常に到達するまでに亀裂媒体から流出した核種量を W_0 とすると、以下の関係が成り立つ。

$$M_s = W_s + W_0 \quad (20)$$

ここで、定常に到達するまでに亀裂媒体から流出した核種量 W_0 が無視できると仮定すると、人工バリアから流入した核種量 M_s は、(19)式および(20)式から近似的に次式で表される。

$$M_s \approx W_s = \left(\frac{1-\gamma}{\lambda} \right) \times \phi_{IN} \quad (21)$$

また、亀裂媒体中の核種移行の定常到達時間を t_s とすると、定常到達までに亀裂媒体に流入した核種量 M_s は次式で表される。

$$M_s = \phi_{IN} \times t_s \quad (22)$$

(21)式と(22)式から、亀裂媒体中の核種移行の定常到達時間 t_s は、次式で表される。

$$t_s = \left(\frac{1-\gamma}{\lambda} \right) \quad (23)$$

したがって、定常到達時間は、定常解析解に相当する γ の関数となり、この γ は、(11)式より亀裂媒体中の移行パラメータの組合せから求めることができる。

(4) 亀裂媒体中の最大移行率

最後に、亀裂媒体中の核種移行が定常に到達するまで核種の流入が継続する一定流入率を求め、この一定流入率を定常解析解に代入することにより、亀裂媒体中の任意の地点における最大移行率を求めた。

緩衝材からの核種流入の継続時間 τ は(16)式で与えられ、一方、亀裂媒体中の核種移行の定常到達時間 t_s は(23)式で与えられる。これから、定常到達時間まで核種の流入が継続する一定流入率、すなわち $\tau=t_s$ となる一定流入率 ϕ_{IN}^s は、以下のように求めることができる。

$$\begin{aligned} \left(\frac{1-\gamma}{\lambda}\right) &= -\frac{1}{\lambda} \times \ln\left(\frac{\phi_{IN}^s}{\lambda \times M_0 + \phi_{IN}^s}\right) \\ \therefore \phi_{IN}^s &= \lambda \times M_0 \times \frac{\exp(\gamma-1)}{1-\exp(\gamma-1)} \end{aligned} \quad (24)$$

これは、初期インベントリ M_0 に対して、亀裂媒体中の核種移行が定常に到達すると同時に、人工バリアからの核種の流入がなくなる場合の流入率に相当する。すなわち、亀裂媒体中の核種移行が定常に到達するまで流入が継続する一定流入率の上限値を表すものである。したがって、緩衝材からの流入率が ϕ_{IN}^s よりも小さい場合は、継続時間が定常到達時間よりも長いため、亀裂媒体中の核種移行は定常に到達する。逆に流入率が ϕ_{IN}^s よりも大きくなると、定常に到達しなくなる。

この一定流入率に対する移行率は、定常解析解から以下のように求めることができ、この移行率は亀裂中の任意の地点における移行率の最大値を概略的に表している（添付C参照）。

$$\begin{aligned} \phi_{OUT}^{max} &= \gamma \times \phi_{IN}^s \\ &= \lambda \times M_0 \times \frac{\gamma \times \exp(\gamma-1)}{1-\exp(\gamma-1)} \end{aligned} \quad (25)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \gamma &= \exp\left(\frac{Pe}{2} - \sqrt{\frac{Pe^2}{4} + Pe \times \lambda \times T}\right) \\ Pe &= \frac{v \times L}{D_L} \\ T &= \frac{L}{v} \times \left[Rf + \frac{\epsilon \times Rd}{b \times \alpha} \times \tanh\left(\alpha \times \frac{p}{2}\right) \right] \\ \alpha &= \sqrt{\frac{\lambda \times Rd}{D_p}} \end{aligned}$$

以上のことから、(25)式を用いて、亀裂媒体中の任意の地点における移行率の最大値を、亀裂媒体中の移行パラメータの組合せ、およびインベントリから概略的に求めることができる。

なお、簡略化モデルの作成に際して、人工バリアからの核種流入の継続時間を求めるために、人工バリア中での核種移行が瞬時に定常状態に到達すると仮定した（前述の(2)項参照）。しかし、実際には、人工バリア中の核種移行が必ずしも定常に到達するとは限らず、人工バリアからの核種流入率は一定流入率にはならない場合がある。このような場合に、簡略化モデルが適用可能であるかどうかを数値計算により確認した（添付D参照）。この結果、人工バリア中の核種移行が定常に到達しない場合に対しても、簡略化モデルが適用できることが確認できた。

3. 簡略化モデルによるパラメータの影響特性

3.1 解析対象核種およびインベントリ

平成3年度に公開した地層処分研究開発の第1次取りまとめ報告書（以下、H3報告書；動燃事業団，1992）における周辺岩盤中の核種移行解析で用いられた核種およびインベントリを対象とした。ここで、崩壊系列の下位の核種の初期インベントリは、崩壊連鎖の影響（緩衝材移行中の核種の生成）を見積もるため、核種溶出開始（処分後1000年）時点でのガラス固化体中のインベントリから、崩壊連鎖の上位の核種のインベントリを加算して設定した。表3-1に対象核種とインベントリを示す。

3.2 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性

(25)式の簡略化モデルを用いて最大移行率を調べるにあたり、まず、マトリクス拡散による遅延効果に対する移行特性パラメータの影響について検討する。

岩体マトリクス中での拡散および吸着等による核種の遅延効果 R_{eff} は、(13)式に示したように次式で表され、以下のパラメータに依存する。

$$R_{eff} = R_f + \frac{\varepsilon \times R_d}{b \times \alpha} \times \tanh\left(\alpha \times \frac{p}{2}\right) \quad (26)$$

ただし、

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda \times R_d}{D_p}}$$

- ・ 亀裂表面遅延係数； R_f
- ・ 岩体マトリクス中の遅延係数（分配係数）； R_d
- ・ 岩体マトリクス中の拡散係数； D_p
- ・ 岩体マトリクス空隙率； ε
- ・ 拡散深さ； p
- ・ 亀裂開口幅； $2b$
- ・ 半減期； λ

ここで、亀裂表面への吸着は一般的な知見が十分ではないため、H3報告書（動燃事業団，1992）の解析と同様にその効果を見逃した。（すなわち、 $R_f = 1.0$ ）。

なお、マトリクス拡散による遅延効果 R_{eff} は、多孔質媒体における遅延係数と等価なパラメータであり、この値が大きいくほど遅延効果が大きくなる（添付A参照）。

(1) 分配係数および拡散深さの影響

岩体マトリクス空隙率、拡散係数、および亀裂開口幅を固定して、岩体マトリクス中の分配係数および拡散深さに対する遅延効果 R_{eff} の変化を、(26)式を用いて調べた。

一例として、Se-79（半減期： 6.5×10^4 年）の結果を図3-1に示す。図の縦軸はマトリク

ス拡散による遅延効果 R_{eff} の変化を、横軸は岩体マトリクス中の分配係数を表し、色分けされた線は拡散深さを表す。

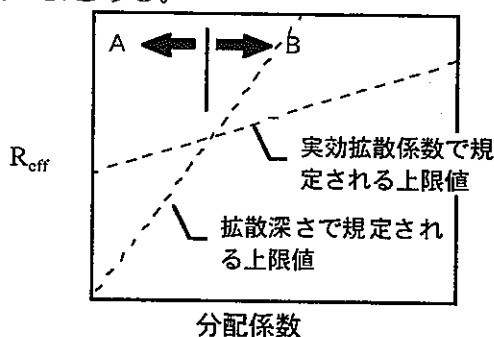
この図から、岩体マトリクス中の分配係数および拡散深さが増加すると遅延効果も増加し、最終的には一本の直線に収束して、拡散深さによる影響がなくなることが分かる。これは、(26)式に含まれる双曲線関数 (\tanh) がマトリクス拡散の制限を表した項であり、分配係数または拡散深さが大きくなると1に収束することから説明できる。この場合、マトリクス拡散は無遠方まで起こる（拡散制限がない）ことと等しくなり、遅延効果 R_{eff} は核種の半減期、亀裂開口幅、ならびに岩体マトリクス中の分配係数、空隙率および拡散係数に依存する。このときの遅延効果 R_{eff} を図中に点線で示した。

また、岩体マトリクス中の分配係数が $0.0001 \text{ [m}^3/\text{kg]}$ の場合は、拡散深さに対する感度が大きく、拡散深さが 10 [m] 以下のときは、マトリクス拡散の制限による影響が顕著に現れる。逆に、分配係数が $100 \text{ [m}^3/\text{kg]}$ の場合は、拡散深さが 0.01 [m] 以下になるまで拡散制限の影響を受けないことが分かる。

(2) 拡散係数の影響

岩体マトリクス中の拡散係数が小さくなると、マトリクス中での拡散が起こり難くなり、遅延効果 R_{eff} は小さくなる。そのため、空隙率および拡散深さを固定し、拡散係数 (D_p) を変化させて遅延効果 R_{eff} に対する影響を調べた。Se-79 に対する結果を図3-2に示す。この図から、実効拡散係数が小さくなると、マトリクス拡散が無遠方まで起こる（拡散制限がない）場合に相当する遅延効果 R_{eff} が小さくなる（図中に点線で示した）。また、拡散制限の影響を受ける範囲（分配係数が $0.001 \text{ [m}^3/\text{kg]}$ 以下）では、遅延効果 R_{eff} は等しくなり、実効拡散係数に依存しないことが分かる。

上記(1)の結果と合わせると、マトリクス拡散による遅延効果 R_{eff} は、下図のように拡散深さおよび実効拡散係数で規定される2つの直線（上限値）で表されることが分かる。なお、他の核種に関して、遅延効果 R_{eff} に対する拡散深さと拡散係数の影響を調べた結果を添付図集にまとめる。



- A : 分配係数が小さくなると、拡散深さで規定される上限値に収束する。
 B : 分配係数が大きくなると、実効拡散係数で規定される上限値に収束する。

(3) 空隙率の影響

岩体マトリクス空隙率は $\varepsilon < 0.1$ (H3 報告書では $0.005 \sim 0.03$) であることから、(26)式中の α は以下のように近似することができる。

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda}{Dp} \times \left(1 + \frac{(1-\varepsilon) \times \rho \times Kd}{\varepsilon}\right)}$$

$$\approx \sqrt{\frac{\lambda \times \rho \times Kd}{De}}$$

同様に、(26)式中の $\varepsilon \times Rd$ は以下のように近似できる。

$$\varepsilon \times Rd = \varepsilon \times \left(1 + \frac{(1-\varepsilon) \times \rho \times Kd}{\varepsilon}\right)$$

$$\approx \rho \times Kd$$

これより、(26)式は近似的に次式で表される。

$$R_{\text{eff}} \approx 1 + \frac{\rho \times Kd}{b \times \sqrt{\frac{\lambda \times \rho \times Kd}{De}}} \times \tanh\left(\frac{p}{2} \times \sqrt{\frac{\lambda \times \rho \times Kd}{De}}\right)$$

$$= 1 + \frac{1}{b} \times \sqrt{\frac{De \times \rho \times Kd}{\lambda}} \times \tanh\left(\frac{p}{2} \times \sqrt{\frac{\lambda \times \rho \times Kd}{De}}\right)$$
(27)

したがって、岩体マトリクス空隙率の影響は、実効拡散係数 ($De = \varepsilon \times Dp$) の変化として近似的に表すことができ、図3-2で示した拡散係数 (Dp) についての結果と同様の傾向を示すことになる。

(4) 亀裂開口幅の影響

(26)式において、 $R_f = 1.0$ (亀裂表面への吸着無視) であり、また、

$$1 \ll \frac{\varepsilon \times Rd}{b \times \alpha} \times \tanh\left(\alpha \times \frac{p}{2}\right)$$

であるため、遅延効果 R_{eff} は亀裂開口半値幅 (b) に近似的に反比例することが分かる。

なお、H3 報告書 (動燃事業団, 1992) では、亀裂開口幅を三乗則に基づいて設定していた。三乗則を考慮した場合は、亀裂頻度に応じて、拡散深さ、亀裂開口幅、および亀裂内流速が同時に変化する。この場合の開口幅の影響については、核種移行時間 T ((13)式参照) に対する影響を検討し、3.4節にまとめた。

3.3 亀裂媒体中の核種移行率に対するパラメータの影響特性

天然バリアのバリア性能を把握するために、マトリクス拡散深さの制限を考慮して、移行パラメータならびに人工バリアからの流入率を変化させて、亀裂媒体中の核種移行率の変動について調べた。

亀裂媒体中の核種移行率は、核種およびペクレ数が同じならば、定常解析解(11)式で表されるように、核種移行時間 T のみに依存する。したがって、核種移行時間が等しければ、亀裂媒体中の核種の移行挙動は同一となる。この核種移行時間は、(13)式から、マトリクス拡散による遅延効果 R_{eff} と地下水の移行時間 (L/v) の積で与えられるパラメータである。

本検討では、地下水の移行時間を固定 ($L/v=0.01$ [y]) して、マトリクス拡散による遅延効果 R_{df} を変化 (具体的には分配係数を変化) させて、亀裂媒体中の 10 m 地点における核種移行率を数値計算コード (畑中ほか, 1992) で解析し、核種移行時間 T で整理した。また、この結果と(25)式の簡略化モデルで得られる移行率の最大値を比較した。ここで、人工バリアからの核種流入率は、(16)式に基づいて、一定流入率 ϕ_{in} 、継続時間 τ の矩形ソースを設定して入力した。なお、継続時間の最小値は1年とし、これを瞬時放出相当の流入率とした。

一例として、Se-79 に対する計算結果を図3-3に示し、他の核種に対する結果は添付図集にまとめた。図の縦軸は、緩衝材から 10 m 地点における亀裂媒体中の最大移行率、横軸は人工バリアからの核種流入率 (一定流入率 ϕ_{in}) を表している。図中の点線は、定常解析解(11)式から得られる人工バリアからの一定流入率と亀裂媒体中の定常移行率の関係を示し、白抜き○印は、数値計算コードで得られた人工バリアからの流入率と亀裂媒体中の最大移行率の関係を示し、塗りつぶした●印は、(25)式の簡略化モデルで得られる最大移行率を示している。

さらに、Se-79 単核種の線量当量率の目安として、H3 報告書 (動燃事業団, 1992) と同様の評価方法により、線量当量率が 1 [mSv/y] となる場合の廃棄体一本当たりの放出率 ϕ_{sv} を次式から求め、あわせて図示した。

$$\phi_{sv} = H_w \times DWC \times W \quad (28)$$

H_w : 線量当量率 (=1 [mSv/y])

DWC : 排水中の濃度限度 [(Bq/m³)/(mSv/y)] (表3-1参照)

W : 希釈水量 (=10⁴ [m³/y])

この図から、核種移行時間 T が 1.33×10^4 よりも小さい場合は、緩衝材からの放出率と亀裂媒体中の核種移行率はほぼ一致し、亀裂媒体の核種移行遅延効果が期待できないことが分かる。これは、核種移行時間が核種の半減期に比べて短いためであり (Nagra, 1994 ; Smith, P.A. et al., 1994) , 本検討結果からも $\lambda \times T < 0.1$ のときは、亀裂媒体での遅延効果はほとんど期待できない。

また、人工バリアからの核種流入率が大きくなっていくと、インベントリにより流入の継続時間が制限されるため、亀裂媒体中の移行率が変化しなくなることが分かる。さらに、(25)式で表される簡略化モデルが、亀裂媒体中の移行率の最大値を概略的に表していることが分かる。ただし、核種移行時間 T が非常に短い場合 ($T=1.39 \times 10^2$) には、数値計算の結果に対して、簡略化モデルで得られる移行率の最大値は、1~2倍程度小さい値となっている。

本検討では、人工バリアからの一定流入率をパラメータとして、任意の範囲で変動させている。しかしながら、人工バリア中の核種移行感度解析 (大井・仲島, 1997 ; Ohi and Nakajima, 1997) から、溶解度と緩衝材中の分配係数の関係により、緩衝材外側での放出率の最大値が求められている。ここでは、緩衝材中の吸着と崩壊を無視した定常解析解を用いて ϕ_{in} を

換算し、人工バリアからの一定流入率に対応する緩衝材内側境界濃度（溶解度）を求め、図 3-3 の横軸上に示した（添付E参照）。これより、緩衝材内側境界の溶解度と亀裂媒体中の最大移行率とを概略的に関係付けることができる。

なお、多孔質媒体における核種移行時間は、添付Aに示したように、次式で表される。

$$T = \frac{L}{v_d} \times (\epsilon \times Rd) = \frac{L}{v} \times Rd \quad (29)$$

v : 多孔質媒体中の空隙内流速 [$L T^{-1}$] ($=v_d / \epsilon$)

v_d : ダルシー流速 [$L T^{-1}$]

Rd : 多孔質媒体の遅延係数 [-]

ϵ : 多孔質媒体の空隙率 [-]

したがって、多孔質媒体においても、核種（半減期）とペクレ数が同じならば、核種の移行挙動は核種移行時間 T に依存する。これより、核種移行時間を(29)式から求めることにより、簡略化モデル(25)式および図 3-3 は、多孔質媒体に対してもそのまま適用可能である。

3.4 簡略化モデルによる最大移行率の比較

亀裂媒体において、実際に観測される水理データは、等価多孔質媒体と考えた場合の透水係数や動水勾配が一般的である。このため、H3 報告書（動燃事業団、1992）では、平行平板モデルに基づく三乗則を用いて、亀裂開口幅、亀裂内流速を求めていた。そこで、ここでも同様に、三乗則を用いて透水係数および動水勾配が最大移行率に与える影響を調べる。

亀裂開口幅（2b）および亀裂内流速（ v ）は、三乗則を用いると、等価透水係数、動水勾配、および亀裂頻度から次式で与えられる。

$$2b = \left(\frac{\rho g}{12\eta} \right)^{-1/3} \times \left(\frac{Ke}{n} \right)^{1/3} \quad (30)$$

$$v = \left(\frac{\rho g}{12\eta} \right)^{1/3} \times \left(\frac{Ke}{n} \right)^{2/3} \times \Delta H \quad (31)$$

ここで、

ρ : 水の密度 [$M L^{-3}$]

g : 重力加速度 [$L T^{-2}$]

η : 水の粘性係数 [$M L^{-1} T^{-1}$]

Ke : 等価透水係数 [$L T^{-1}$]

n : 亀裂頻度 [L^{-1}]

ΔH : 動水勾配 [-]

一方、核種移行時間 T は(13)式で示したように、次式で与えられる。

$$T = \frac{L}{v} \times \left[Rf + \frac{\epsilon \times Rd}{b \times \alpha} \times \tanh \left(\alpha \times \frac{p}{2} \right) \right]$$

ここで、亀裂表面への吸着を無視 ($R_f=1.0$) すると、次式のように近似できる。

$$T \approx \frac{L}{v \times b} \times \left[\frac{\varepsilon \times R_d}{\alpha} \times \tanh\left(\alpha \times \frac{p}{2}\right) \right] \quad (32)$$

これに、(30)式および(31)式を代入すると次式が得られる。

$$T = \frac{L \times 2n}{K_e \times \Delta H} \times \left[\frac{\varepsilon \times R_d}{\alpha} \times \tanh\left(\alpha \times \frac{p}{2}\right) \right] \quad (33)$$

ただし、拡散深さ p の最大値は、岩体マトリックスの厚さ (d) である (図 2-1 参照) ため、以下の条件を満たさなければならない。

$$p \leq d = \frac{1}{n} \quad (34)$$

したがって、(33)式から得られる核種移行時間を簡略化モデル(25)式に代入することにより、亀裂媒体中の最大移行率に対するパラメータの影響を調べることができる。

各核種毎に、透水係数、動水勾配、亀裂頻度、拡散深さ、実効拡散係数、および分配係数をそれぞれ変化させた場合の最大移行率を図 3-4 に示す。ここで、崩壊系列の下位の核種のインベントリは、崩壊連鎖の上位の核種のインベントリを加算して設定した (表 3-1 参照)。

図から、透水係数および動水勾配が小さくなる (CASE2, CASE3) と最大移行率は小さくなり、亀裂頻度が小さくなる (CASE4) と最大移行率は大きくなる。これは、(33)式からも明らかのように、核種移行時間が亀裂頻度に比例し、透水係数および動水勾配に反比例するためである。

また、拡散深さが大きくなる (CASE5) と、分配係数が小さい場合は最大移行率が小さくなるが、分配係数が大きい場合には最大移行率は変わらない。さらに、実効拡散係数が小さくなる (CASE6) と、分配係数が小さい場合は最大移行率は変わらないが、分配係数が大きい場合には最大移行率が大きくなる。これは、3.2 節で得られたマトリクス拡散による遅延効果 R_{eff} のパラメータ (分配係数、拡散深さ、実効拡散係数) の依存性の傾向が反映された結果となっている。

表3-1 解析対象核種とインベントリ

元素番号	対象核種	質量数	半減期(y)	濃度限度(Bq/m ³)	インベントリ(g/can)	上位核種加算(mol/can)	インベントリ(Bq/can)
34	Se-79	79	6.50E+04	4.0E+05	7.99E+00	—	2.06E+10
40	Zr-93	93	1.50E+06	2.0E+06	1.00E+03	—	9.29E+10
43	Tc-99	99	2.13E+05	3.0E+06	1.06E+03	—	6.62E+11
46	Pd-107	107	6.50E+06	3.0E+07	2.75E+02	—	5.23E+09
50	Sn-126	126	1.00E+05	2.0E+05	3.58E+01	—	3.76E+10
55	Cs-135	135	3.00E+06	5.0E+05	4.96E+02	—	1.62E+10
90	Th-230	230	7.54E+04	7.0E+03	5.44E-03	8.153E+00	1.40E+12
90	Th-232	232	1.41E+10	1.0E+03	1.25E-03	2.113E-01	1.99E+05
92	U-233	233	1.59E+05	1.0E+04	2.46E-01	3.757E+00	3.13E+11
92	U-234	234	2.45E+05	1.0E+04	2.35E+00	8.153E+00	4.41E+11
92	U-235	235	7.04E+08	2.0E+04	2.08E+01	6.705E-01	1.26E+07
92	U-236	236	2.34E+07	2.0E+04	1.29E+01	2.113E-01	1.19E+08
92	U-238	238	4.47E+09	2.0E+04	1.94E+03	—	2.41E+07
93	Np-237	237	2.14E+06	1.0E+03	8.36E+02	3.756E+00	2.32E+10
94	Pu-239	239	2.41E+04	1.0E+03	5.34E+01	5.820E-01	3.20E+11
94	Pu-240	240	6.54E+03	1.0E+03	3.76E+01	—	3.17E+11
95	Am-241	241	4.33E+02	1.0E+03	5.54E+01	—	7.03E+12
95	Am-243	243	7.38E+03	1.0E+03	8.71E+01	—	6.42E+11

(処分後1000年)

*) 崩壊連鎖系列

Am241 - Np237 - U233, Pu240 - U236 - Th232

Am243 - Pu239 - U235, U238 - U234 - Th230

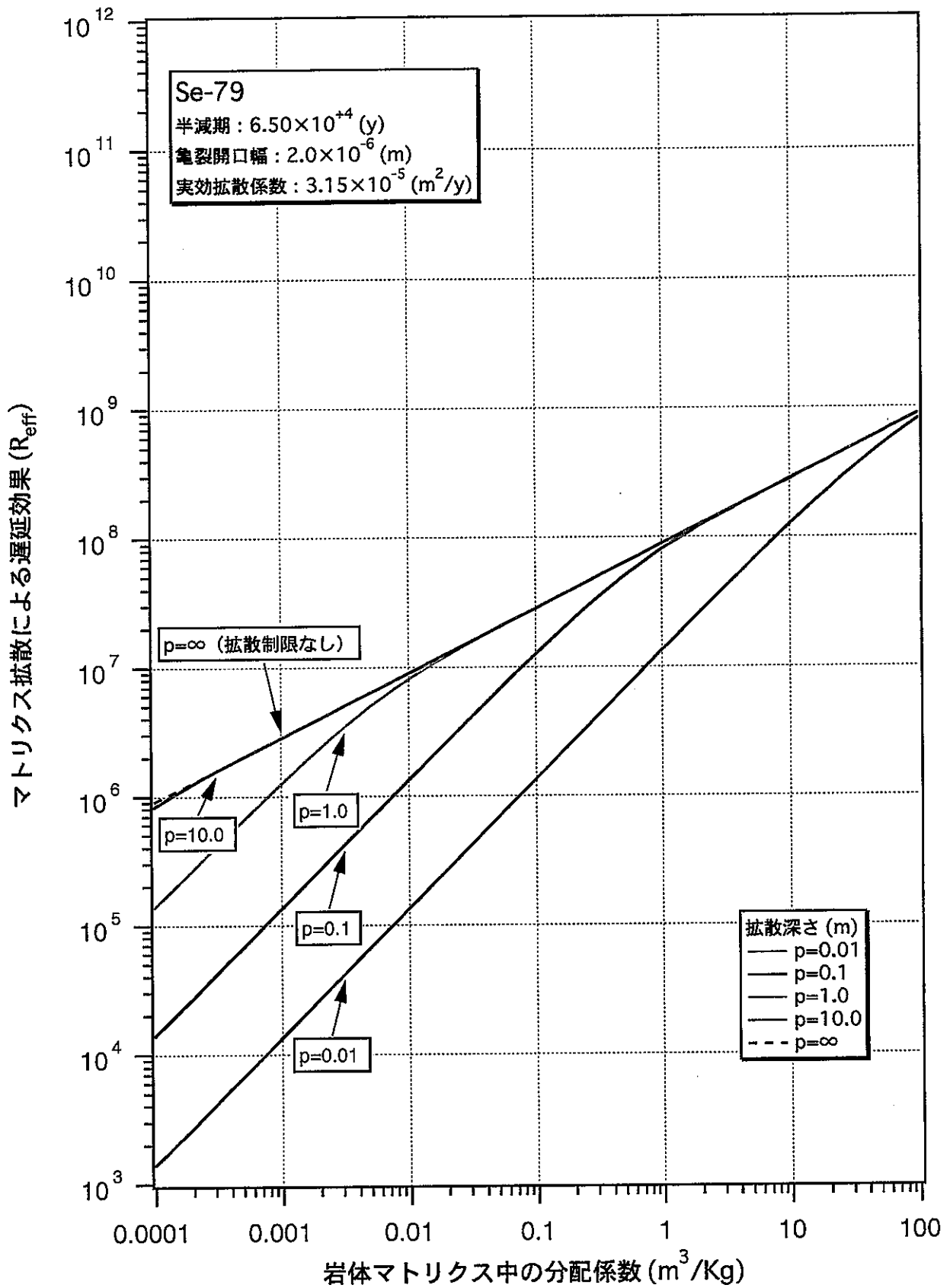


図 3-1 マトリクス拡散による遅延効果に対する拡散深さの影響

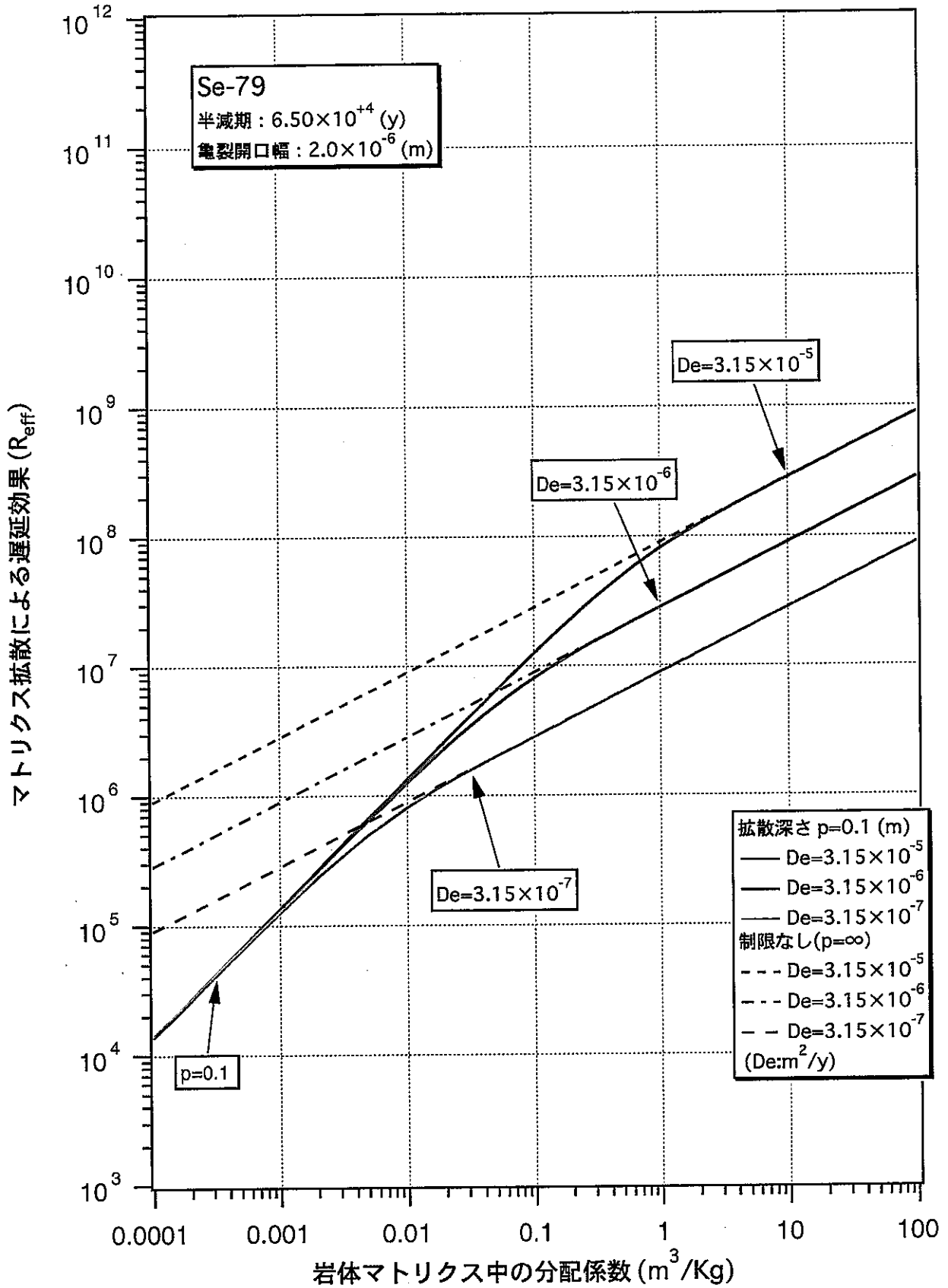


図3-2 マトリクス拡散による遅延効果に対する実効拡散係数の影響

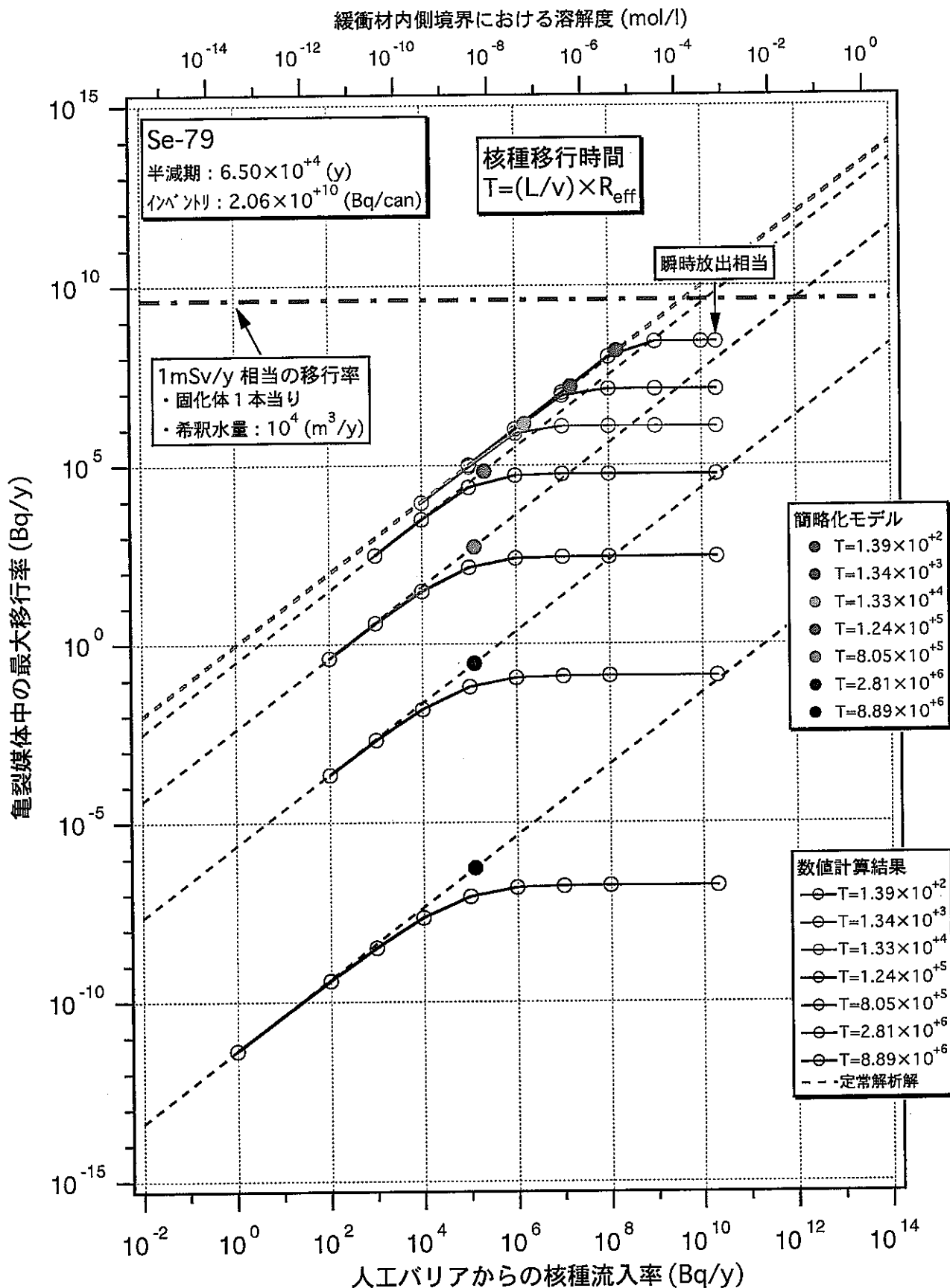


図3-3 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (Se-79)

	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5	CASE6
評価地点 (m)	100					
透水性係数 (m/s)	1.0E-08	1.0E-09				
動水勾配 (-)	0.05		0.01			
亀裂頻度 (本/m)	1.0			0.1		
拡散長さ (m)	0.1				1.0	
De (m ² /s)	1.0E-12					1.0E-13

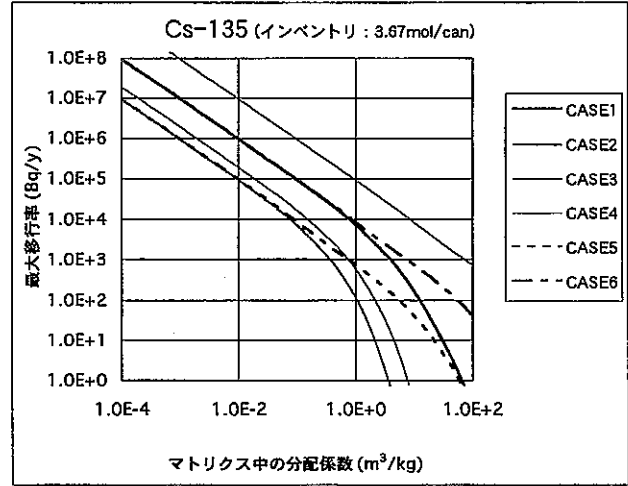
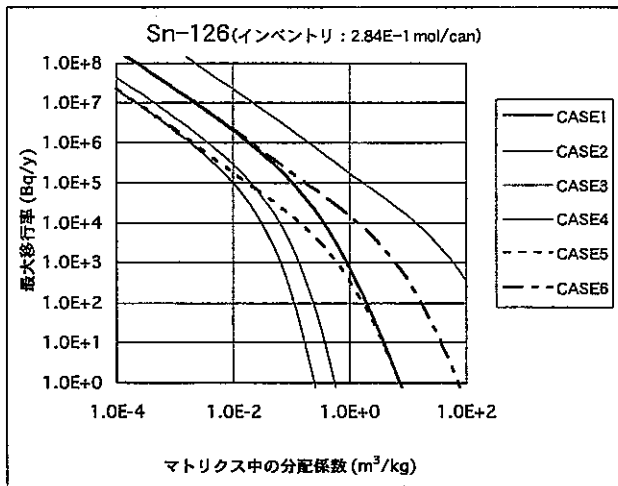
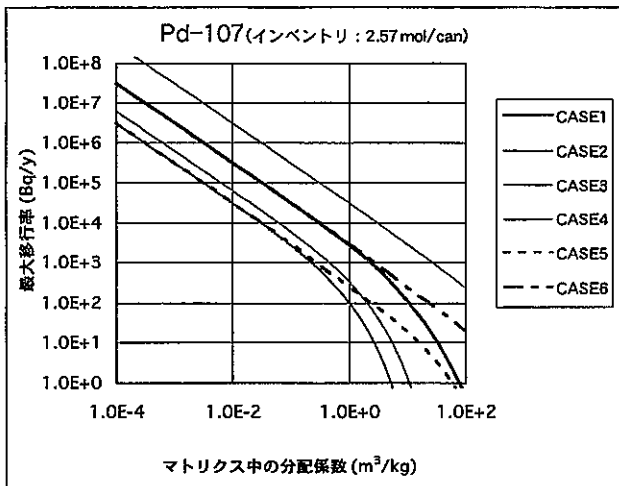
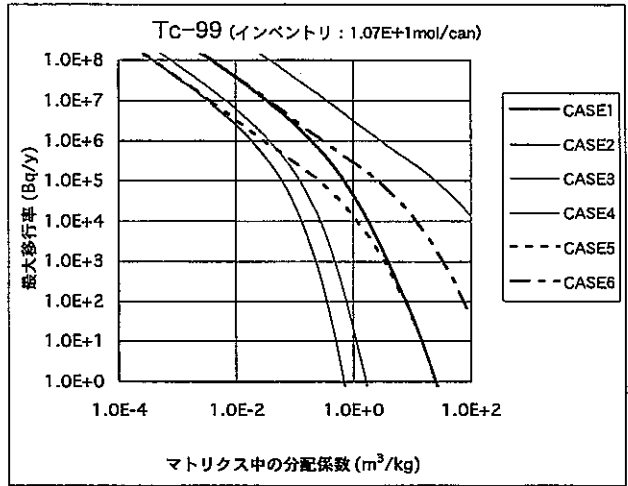
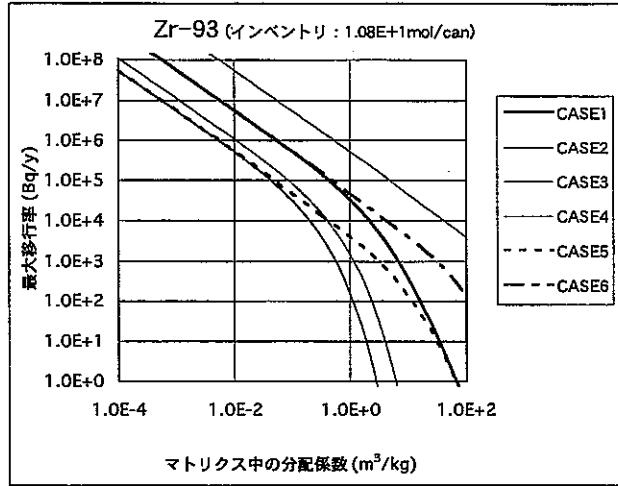
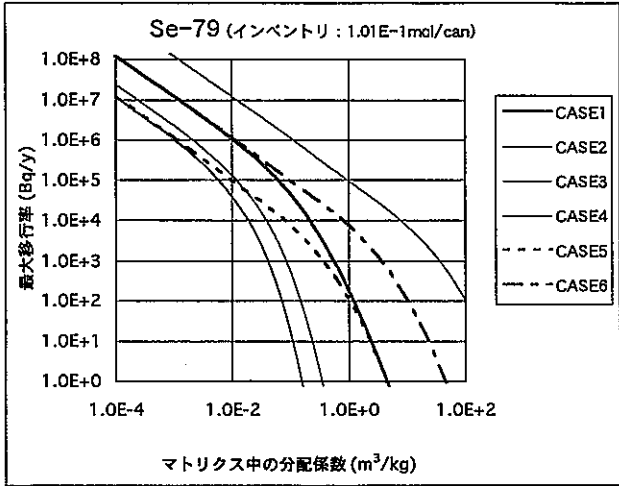


図3-4(1/3) 簡略化モデルによる亀裂媒体中の最大移行率の比較

	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5	CASE6
評価地点 (m)	100					
透水係数 (m/s)	1.0E-08	1.0E-09				
動水勾配 (-)	0.05		0.01			
亀裂頻度 (本/m)	1.0			0.1		
拡散深さ (m)	0.1				1.0	
De (m ² /s)	1.0E-12					1.0E-13

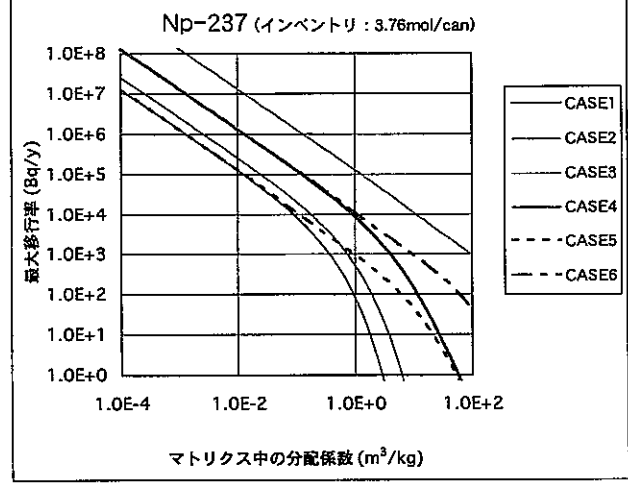
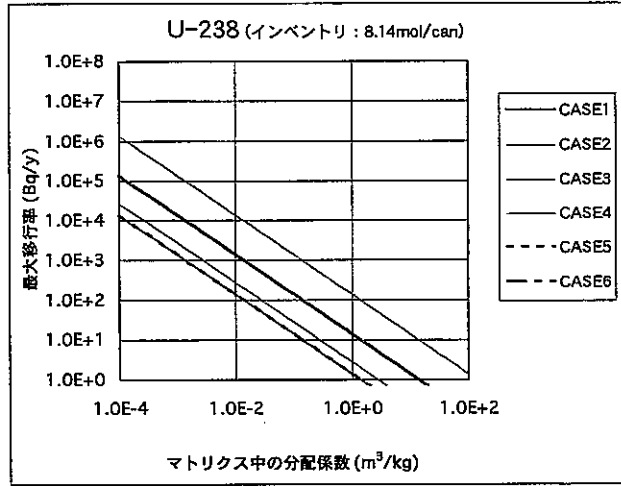
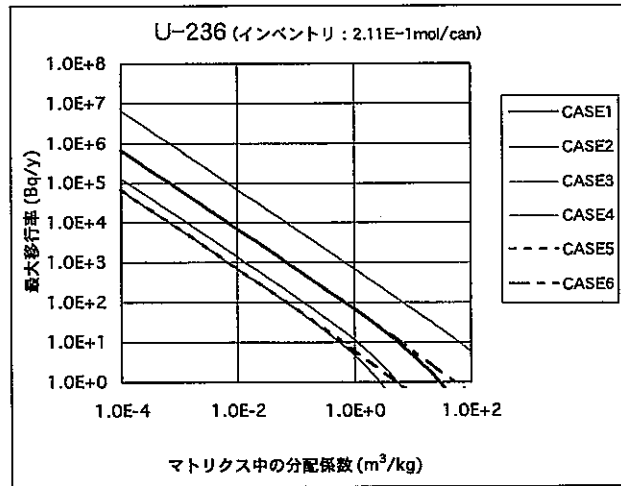
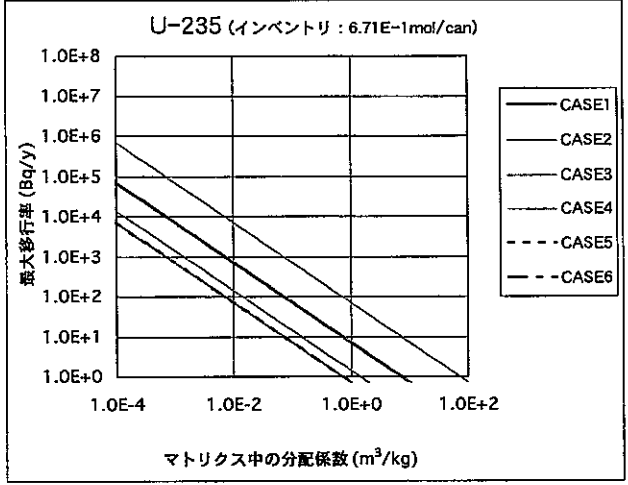
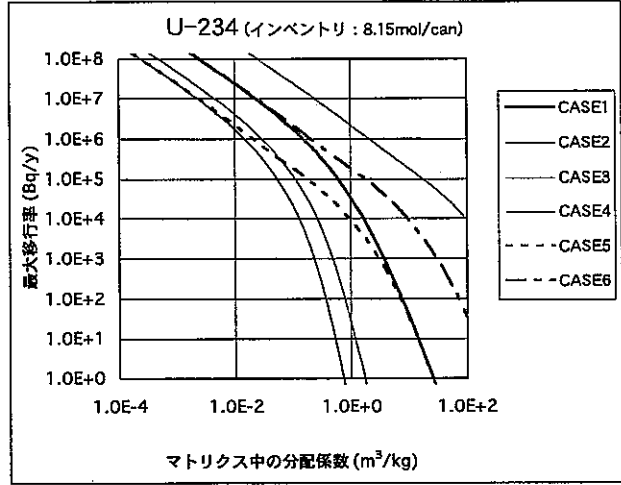
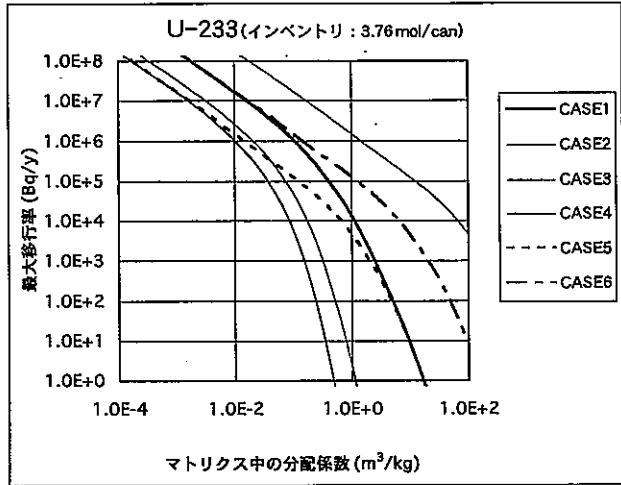


図3-4 (2/3) 簡略化モデルによる亀裂媒体中の最大移行率の比較

	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5	CASE6
評価地点 (m)	100					
透水係数 (m/s)	1.0E-08	1.0E-09				
動水勾配 (-)	0.05		0.01			
亀裂頻度 (本/m)	1.0			0.1		
亀裂深さ (m)	0.1				1.0	
De (m ² /s)	1.0E-12					1.0E-13

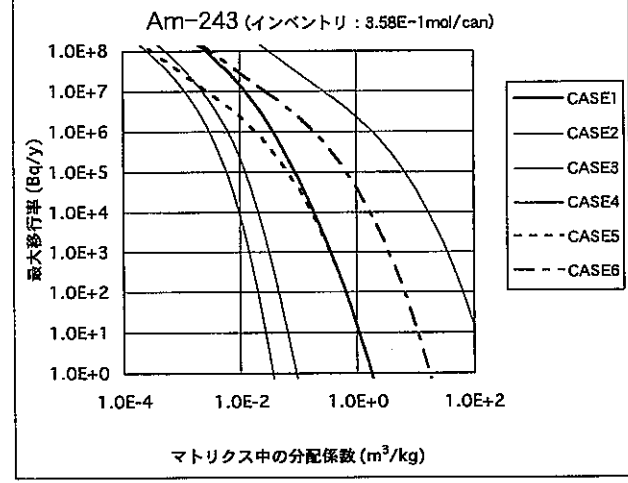
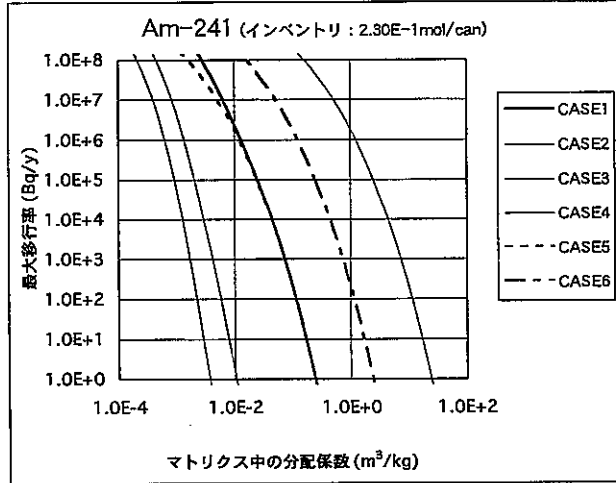
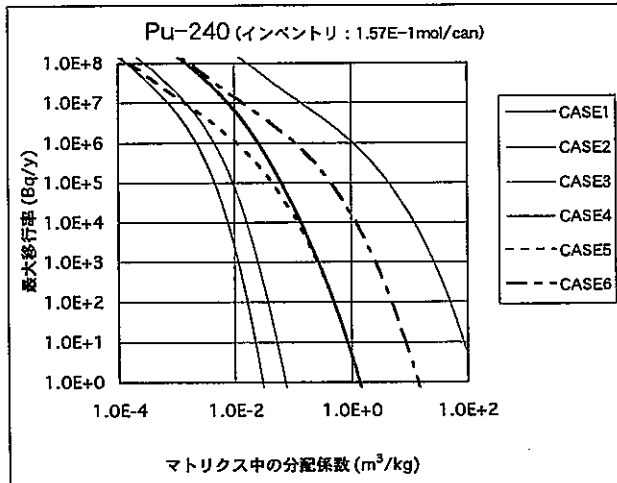
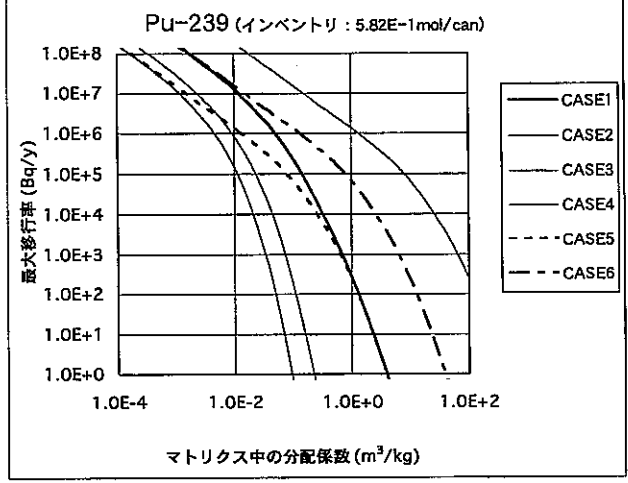
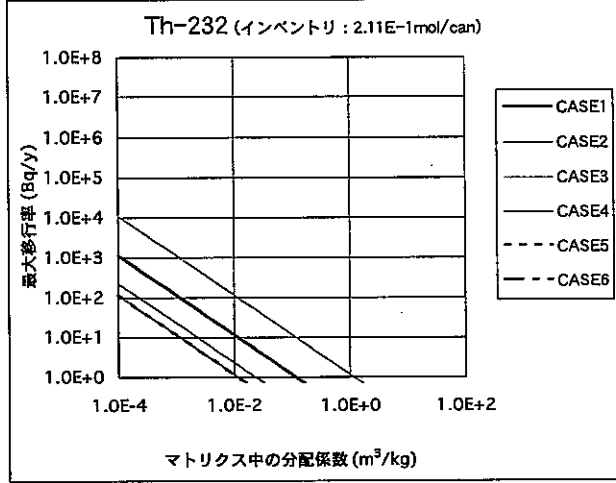
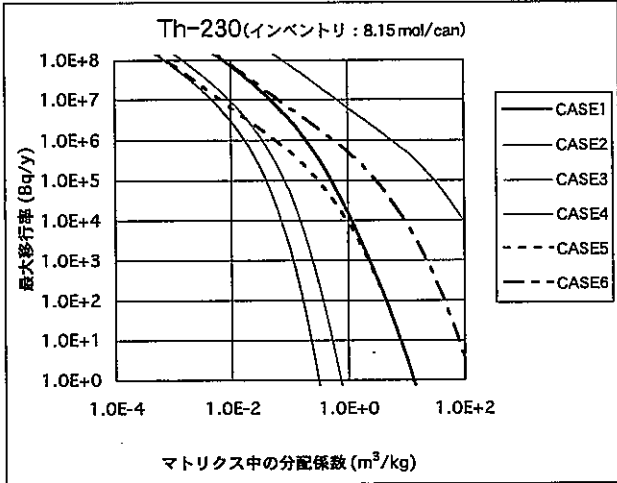


図3-4 (3/3) 簡略化モデルによる亀裂媒体中の最大移行率の比較

4. まとめ

亀裂媒体の核種移行に対するバリア性能のパラメータ依存性を簡単に把握するためのモデルとして、1次元平行平板亀裂媒体中の移行特性パラメータおよびインベントリから、亀裂中の任意の地点における最大移行率を調べるための簡略化モデルを作成した。これにより、亀裂媒体のバリア性能を、概略的ではあるが簡便かつ広範囲に把握することが可能となり、今後のより詳細な感度解析の効率的な実施に役立つと考えられる。また、バリア性能に対する各パラメータの影響度が簡単に把握できるため、シナリオの検討やバリア性能の向上に関する研究開発（例えば、データ取得等）に資する情報を得ることができると考えられる。

しかしながら、本検討では、単一核種（崩壊は考慮）のみを対象として検討しており、崩壊連鎖は無視している。このため、親核種の崩壊に伴う娘核種の移行中の生成については、今後さらに検討が必要である。

<参考文献>

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 ー平成3年度ー，PNC TN1410 92-081.

畑中耕一郎，梅木博之，石黒勝彦，内藤守正，仲島邦彦（1992）：天然バリア中の核種移行遅延効果に関する感度解析，PNC TN1410 92-086.

Nagra (1994) : Kristallin-I Safety Assessment Report, Nagra Technical Report 93-22.

大井貴夫，仲島邦彦（1997）：人工バリアからの核種放出に対する溶解度等の影響特性の把握，動燃技報，No.102，PNC TN1340 97-002，pp.5-13.

Ohi, T. and Nakajima, K. (1997) : Bounding Analysis for Solubility, Scientific Basis for Nuclear Waste Management X X, Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol. 465, pp.1091-1098.

Smith, P.A., Umeki, H., Neally, F. and McKinley, I.G. (1994) : Common Aspects of the PNC and Nagra Assessment of Deep Repositories for Vitriified HLW, Scientific Basis for Nuclear Waste Management X VIII Part 1, Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol. 353, pp.527-533.

添付 A 多孔質媒体における核種移行時間

1次元多孔質媒体に対する核種移行（単核種）の基本方程式は、媒体中の移流／分散、核種の線型吸着および放射性崩壊を考慮して、次式で表される。

$$\varepsilon R_d \frac{\partial C}{\partial t} = -v_d \frac{\partial C}{\partial z} + D_L \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \varepsilon R_d \lambda C \quad (\text{A-1})$$

$$R_d = 1 + \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon} \rho K_d \quad (\text{A-2})$$

ここで、

C : 多孔質媒体空隙水中の核種濃度 [M L^{-3}]

D_L : 多孔質媒体中の分散係数 [$\text{L}^2 \text{T}^{-1}$]

v_d : ダルシー流速 [L T^{-1}]

R_d : 多孔質媒体中の遅延係数 [-]

K_d : 多孔質媒体中の分配係数 [$\text{L}^3 \text{M}^{-1}$]

ε : 多孔質媒体空隙率 [-]

λ : 核種の崩壊定数 [T^{-1}]

ρ : 多孔質媒体の真密度 [M L^{-3}]

t : 時間 [T]

z : 距離 [L]

この方程式に対して、初期条件および境界条件を次のように与える。

$$C(z,0) = 0, \quad z > 0 \quad (\text{A-3})$$

$$v_d C - D_L \frac{\partial C}{\partial z} = \phi_{\text{IN}}, \quad z = 0, t > 0 \quad (\text{A-4})$$

$$C(\infty, t) = 0 \quad t > 0 \quad (\text{A-5})$$

ここで、人工バリアからの核種の流入は一定流入率 ϕ_{IN} とすると、多孔質媒体中の任意の地点における定常状態での核種移行率 ϕ_{OUT} は、次式で与えられる。

$$\frac{\phi_{\text{OUT}}}{\phi_{\text{IN}}} = \exp\left(\frac{\text{Pe}}{2} - \sqrt{\frac{\text{Pe}^2}{4} + \text{Pe} \times \lambda \times \frac{L}{v_d} \times \varepsilon R_d}\right) \quad (\text{A-6})$$

L : 評価地点までの距離

これより、多孔質媒体における核種移行時間は以下のように定義できる。

$$T = \frac{L}{v_d} \times \varepsilon R_d = \frac{L}{v} \times R_d \quad (\text{A-7})$$

v : 多孔質媒体中の空隙内流速 ($=v_d / \varepsilon$)

したがって、多孔質媒体においても、核種（崩壊定数）とペクレ数（ Pe ）が同じならば、定常移行率は核種移行時間 T と一定流入率 ϕ_{IN} に依存する。また、(A-7)式と本文中の(13)式を比較することにより、(13)式に含まれる R_{eff} は、多孔質媒体における遅延係数と等価なパラメータであることが分かる。これより、亀裂媒体における R_{eff} は、岩体マトリクス中の拡散および吸着による核種移行の遅延効果を表すパラメータとみなすことができる。

<参考文献>

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 ー平成3年度ー，PNC TN1410 92-081.

添付 B 人工バリアからの核種流入の継続時間

ここでは、本文(16)式で示した、人工バリアからの核種流入の継続時間 τ の導出について述べる。

本文2.2 (2)で述べたように、人工バリア中の核種移行が瞬時に定常状態に到達すると仮定すると、ガラス固化体中のマスバランスから次式が成り立つ。

$$\frac{dM}{dt} = -\lambda M - \phi \quad (\text{B-1})$$

ただし、

M : ガラス固化体中の核種量 [M]

λ : 核種の崩壊定数 [T^{-1}]

ϕ : 定常流入率 [$M T^{-1}$]

この微分方程式の一般解は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} M &= \exp(-\lambda t) \times \left[\int \exp(\lambda t) \times (-\phi) dt + c \right] \\ &= \exp(-\lambda t) \times \left[-\frac{\phi}{\lambda} \exp(\lambda t) + c \right] \end{aligned} \quad (\text{B-2})$$

初期インベントリを M_0 ($t=0$) とすると、

$$M_0 = -\frac{\phi}{\lambda} + c \quad (\text{B-3})$$

したがって、ガラス固化体中の核種量の時間変化は、次式で表される。

$$\begin{aligned} M &= \exp(-\lambda t) \times \left[-\frac{\phi}{\lambda} \exp(\lambda t) + M_0 + \frac{\phi}{\lambda} \right] \\ &= \left[M_0 + \frac{\phi}{\lambda} \right] \exp(-\lambda t) - \frac{\phi}{\lambda} \end{aligned} \quad (\text{B-4})$$

これから、任意の一定流入率 ϕ に対して、インベントリが枯渇する時間、すなわち核種放出の継続時間 τ は以下のように求めることができる。

$$\begin{aligned} 0 &= \left[M_0 + \frac{\phi}{\lambda} \right] \exp(-\lambda \tau) - \frac{\phi}{\lambda} \\ \therefore \tau &= -\frac{1}{\lambda} \times \ln \left(\frac{\phi}{\lambda M_0 + \phi} \right) \end{aligned} \quad (\text{B-5})$$

<参考文献>

御園生善尚, 吉野崇, 北野孝一, 竹元英夫 (1984) : 応用数学大要, 養賢堂発行.

添付 C 簡略化モデルによる最大移行率の確認

ここでは、本文 2.2 (4)で示した簡略化モデル（本文(25)式参照）で得られる移行率と数値計算コードによる解析結果とを比較し、簡略化モデルが最大移行率を表していることを確認する。

本解析では、核種は Se-79 を対象とし、亀裂媒体中のパラメータを以下の条件として、人工バリアからの一定流入率を変えて数値計算コードで解析を行い、得られた移行率と簡略化モデルで得られる移行率を比較した。

評価地点までの距離： $L = 10$ [m]

亀裂内地下水流速： $v = 1000$ [m/y]

亀裂内流れ方向の分散係数： $D_L = 1000$ [m²/y]

亀裂開口幅： $2b = 2 \times 10^6$ [m]

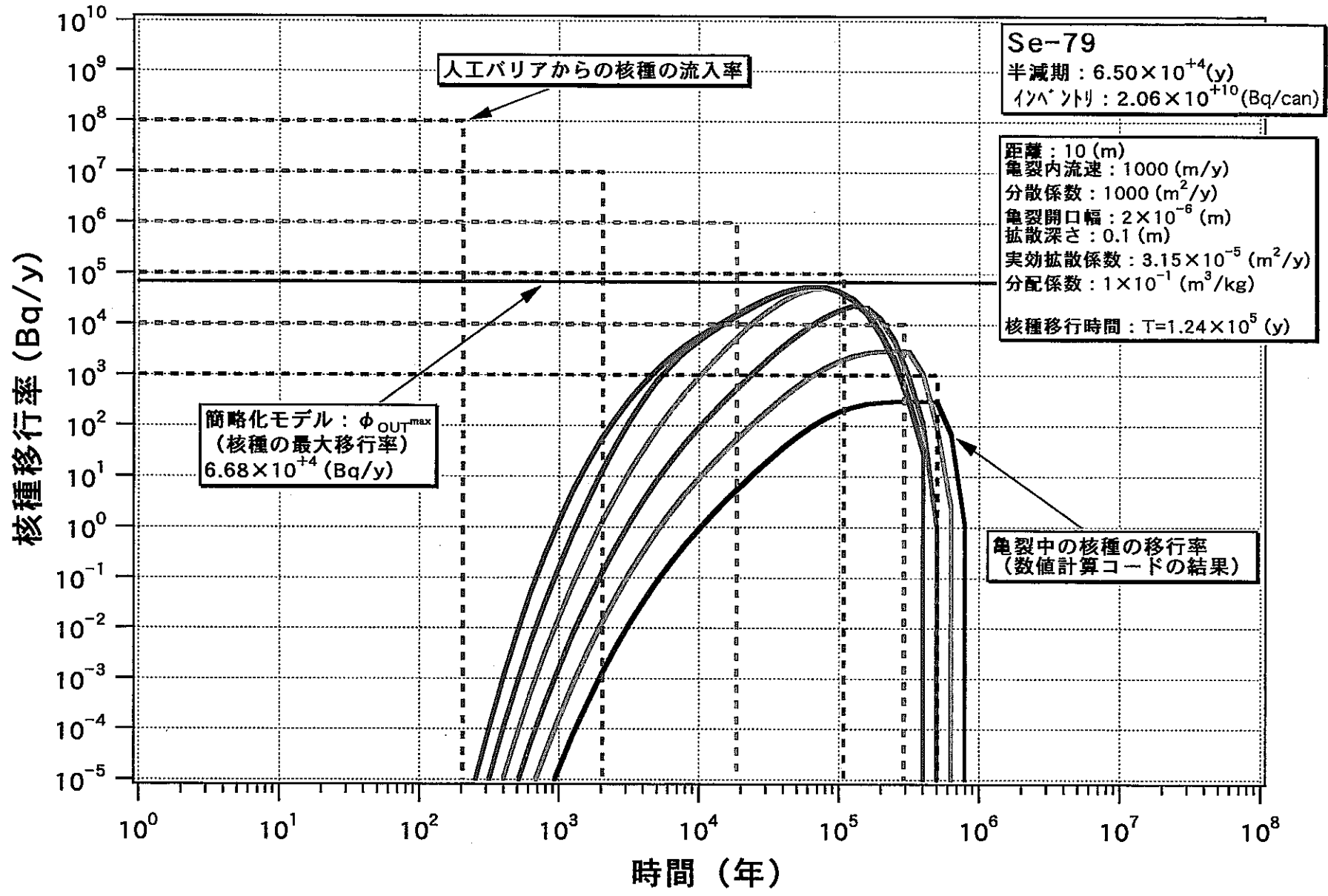
拡散深さ： $p = 0.1$ [m]

実効拡散係数： $De = 3.15 \times 10^5$ [m²/y]

岩体マトリクスにおける分配係数： $Kd = 0.1$ [m³/kg]

これらのパラメータから核種移行時間 T （本文(13)式参照）を求めると、 $T = 1.24 \times 10^5$ [y] となる。また、人工バリアからの一定流入率は $10^3 \sim 10^8$ [Bq/y] まで1桁毎に変化させ、それぞれの流入率に対する継続時間を本文(16)式から求めて、矩形ソースとして解析に使用した。なお、インベントリは本文中の表3-1の値を使用した。

解析結果を図 C-1 に示す。図には、人工バリアからの一定流入率（点線）とその流入率に対する解析結果（実線）を色分けして示している。図から、流入率が大きくなるにしたがって亀裂中の移行率も大きくなり、最終的にある最大値に収束することが分かる。ここで、亀裂媒体中の核種移行が定常に到達するまで流入が継続する流入率の上限値 ϕ_{IN}^s （本文(24)式参照）は、上記のパラメータとインベントリから 2.19×10^5 [Bq/y] となる。この流入率よりも定常流入率が大きい3つのケース（ $10^6 \sim 10^8$ ）では、亀裂媒体中の核種移行は非定常となり、このときの移行率が最大値となっている。この最大値と簡略化モデル（本文(25)式）で得られる移行率 ϕ_{OUT}^{max} を比較するとほぼ一致しており、簡略化モデルは核種移行率の最大値を概略的に表していることが確認できた。



図C-1 Se-79の核種移行率の経時変化

添付 D 人工バリアからの非定常流入率に対する簡略化モデルの適用性

ここでは、人工バリアからの核種流入が非定常である場合に対して、簡略化モデルの適用性について確認する。

本文 2.2 (2) 項で述べたように、簡略化モデル（本文(25)式参照）の作成に際して、人工バリア中での核種移行が瞬時に定常状態に到達すると仮定した。しかし、実際には、人工バリア中の核種移行が必ずしも定常に到達するとは限らず、この場合の核種の流入は一定流入率にはならない。このため、数値計算コードを用いて人工バリア中および天然バリア中の核種移行解析を行い、得られた亀裂中の移行率と簡略化モデルで得られる移行率を比較して、人工バリア中の核種移行が非定常の場合（流入率が一定ではない場合）における簡略化モデルの適用性を調べた。

本解析では、核種は Cs-135 を対象とし、まず、人工バリア中および亀裂媒体中のパラメータを以下の条件として、数値計算コードを用いて解析し、亀裂中の移行率を求めた。

1)人工バリア中の核種移行解析

・解析条件

緩衝材内径：0.52 [m]

緩衝材外径：1.5 [m]

緩衝材高さ：2.47 [m]

緩衝材密度： 2.7×10^3 [kg/m³]

緩衝材空隙率：0.33 [-]

拡散係数(Dp)： 2.84×10^2 [m²/y]

インベントリ：3.67 [mol] = 1.6×10^{10} [Bq]

ガラス溶解速度：888 [mol/y]

緩衝材中分配係数：0.01 [m³/kg]

・解析結果

解析結果を図 D-1 に示す。人工バリア中の核種移行は定常に到達しておらず、最大流入率は 2.14×10^7 [Bq/y] となった。

2)亀裂媒体中の核種移行解析

・解析条件

評価地点までの距離：L = 10 [m]

亀裂内地下水流速：v = 1000 [m/y]

亀裂内流れ方向の分散係数： $D_L = 1000$ [m²/y]

亀裂開口幅： $2b = 2 \times 10^{-6}$ [m]

拡散深さ：p = 0.1 [m]

実効拡散係数： $De = 3.15 \times 10^{-5}$ [m²/y]

岩体マトリクスにおける分配係数 : $K_d = 0.01 \text{ [m}^3/\text{kg]}$

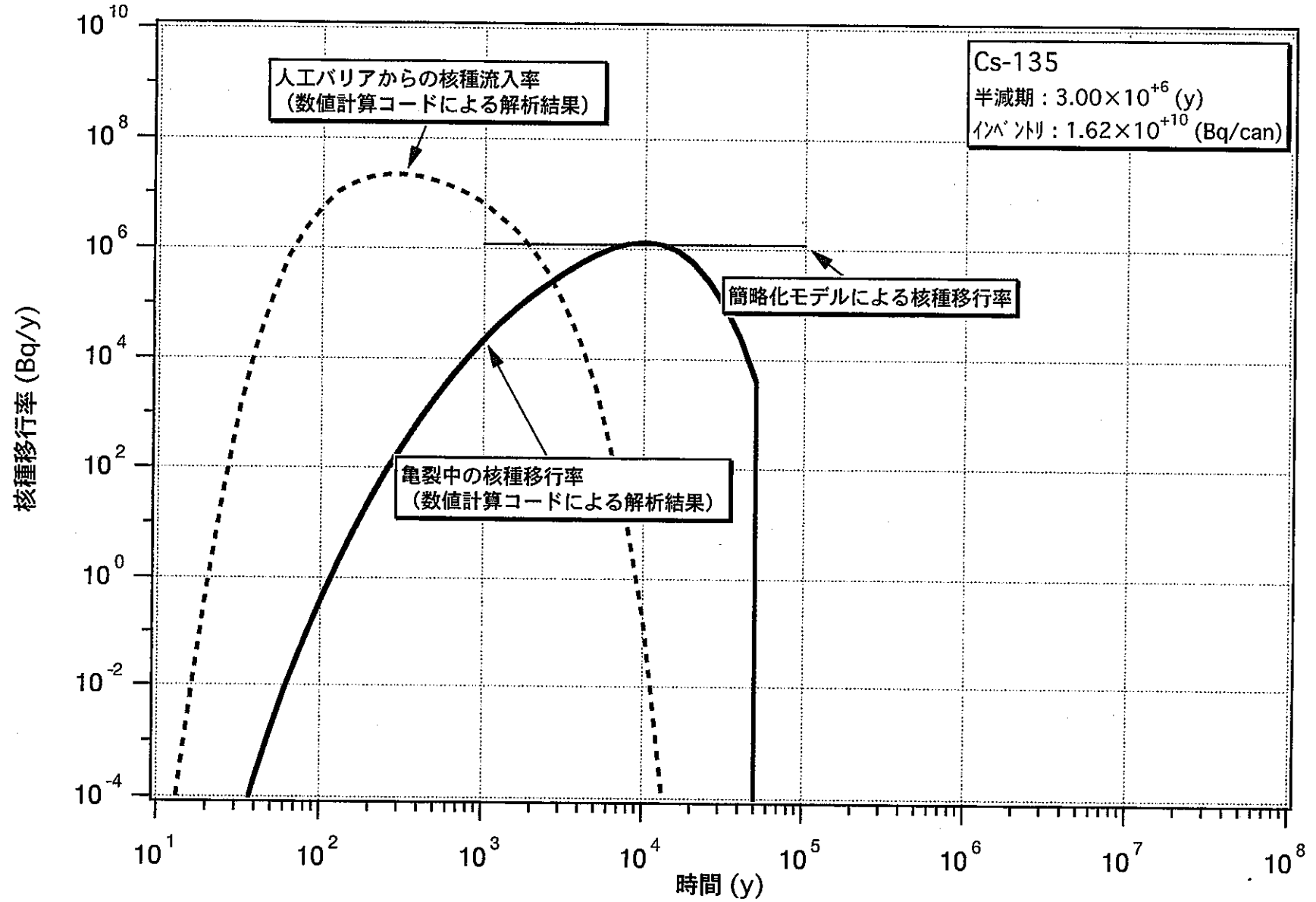
・解析結果

上記パラメータおよび人工バリアからの流入率を用いて、数値計算コードで解析した結果を図 D-1 に示す。評価地点における最大移行率は $1.03 \times 10^6 \text{ [Bq/y]}$ となった。

次に、簡略化モデルを用いて亀裂中の最大移行率を求めた。亀裂媒体中の移行解析に使用したパラメータから核種移行時間 T (本文(13)式参照) を求めると、 $T = 1.34 \times 10^4 \text{ [y]}$ となる。また、ペクレ数は $Pe = 10$ である。これらの値とインベントリから、簡略化モデル (本文(25)式) を用いて計算すると、最大移行率は $1.21 \times 10^6 \text{ [Bq/y]}$ となる。

図 D-1 に示したように、数値計算コードによる亀裂媒体中の移行率と簡略化モデルによる移行率を比較するとほぼ一致しており、人工バリアからの核種流入が非定常の場合に対しても、簡略化モデルが適用できることが確認できた。

これより、本文 3.3 節の図 3-3 (ならびに添付図集) に示した、亀裂媒体中の最大移行率と人工バリアからの流入率の関係は、人工バリアからの核種流入率が非定常の場合に対しても適用可能である。したがって、人工バリア中の核種移行の解析結果から核種流入率の最大値が得られていれば、図 3-3 (もしくは添付図集) から亀裂媒体中の最大移行率を調べることができる。



図D-1 人工バリアからの非定常流入に対する亀裂中の移行率
-数値解析の結果と簡略化モデルの比較-

添付 E 緩衝材外側からの定常放出率と緩衝材内側境界濃度（溶解度）の関係

拡散による緩衝材中での物質輸送と瞬時線形吸着を仮定した円筒座標系一次元の核種移行は以下の式で表される。ただし、核種の崩壊は無視している。

$$\varepsilon R_d \frac{\partial C}{\partial t} = D_e \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad (\text{E-1})$$

$$R_d = 1 + \frac{(1-\varepsilon)\rho K_d}{\varepsilon} \quad (\text{E-2})$$

ここで、

C：核種の液相濃度 [M L⁻³]

D_e：実効拡散係数 [L² T⁻¹]

ε：緩衝材の空隙率 [-]

R_d：核種の遅延係数 [-]

K_d：緩衝材に対する核種の分配係数 [L³M⁻¹]

ρ：緩衝材の真密度 [M L⁻³]

t：時間 [T]

r：ガラス固化体中心からの距離 [L]

このとき、緩衝材内側境界条件を溶解度制限、外側境界条件を濃度 0 とした場合、定常状態の緩衝材中の濃度分布は、次式で与えられる。

$$C = \frac{\ln(r/b)}{\ln(a/b)} C_0 \quad (\text{E-3})$$

ここで、

C₀：緩衝材の内側境界濃度（溶解度）[M L⁻³]

a：緩衝材の内側半径 [L]

b：緩衝材の外側半径 [L]

また、定常状態における緩衝材外側からの放出率は、以下のように与えられる。

$$\phi = -\frac{2\pi H D_e}{\ln(a/b)} C_0 \quad (\text{E-4})$$

ここで、

φ：緩衝材外側からの定常放出率 [M T⁻¹]

H：緩衝材の高さ [L]

したがって、(E-4)式から、緩衝材外側での核種放出率から緩衝材内側の境界濃度（溶解度）

を求めることができる。なお、本文中の図 3-3 および添付図集に示した溶解度は、次の値を使用して、核種放出率（流入率）から溶解度へ換算した値である。

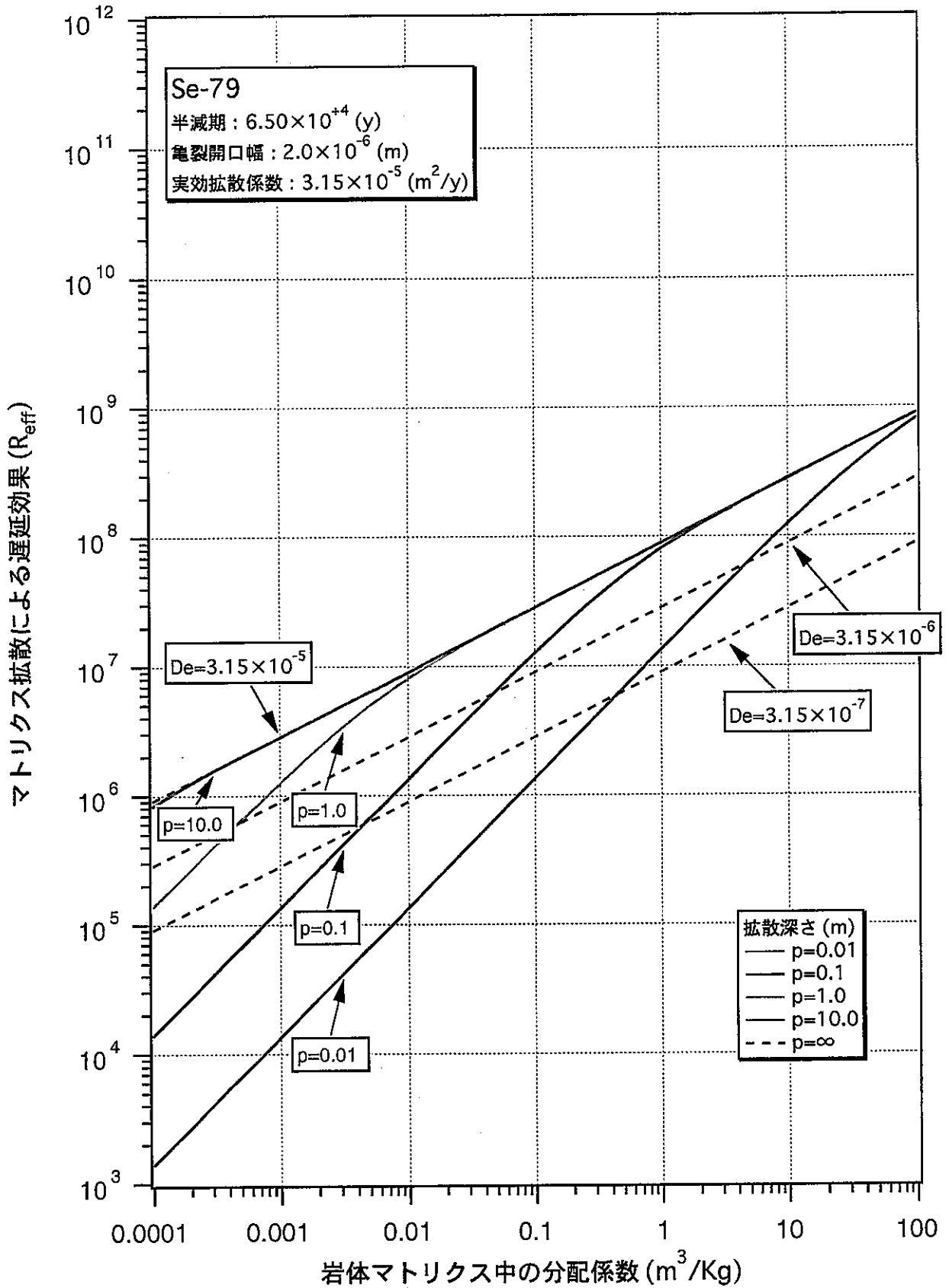
- ・緩衝材の内側半径： $a = 0.52$ [m]
- ・緩衝材の外側半径： $b = 1.50$ [m]
- ・緩衝材の高さ： $H = 2.47$ [m]
- ・緩衝材中の実効拡散係数： $De = 9.47 \times 10^{-3}$ [m²/y]

<参考文献>

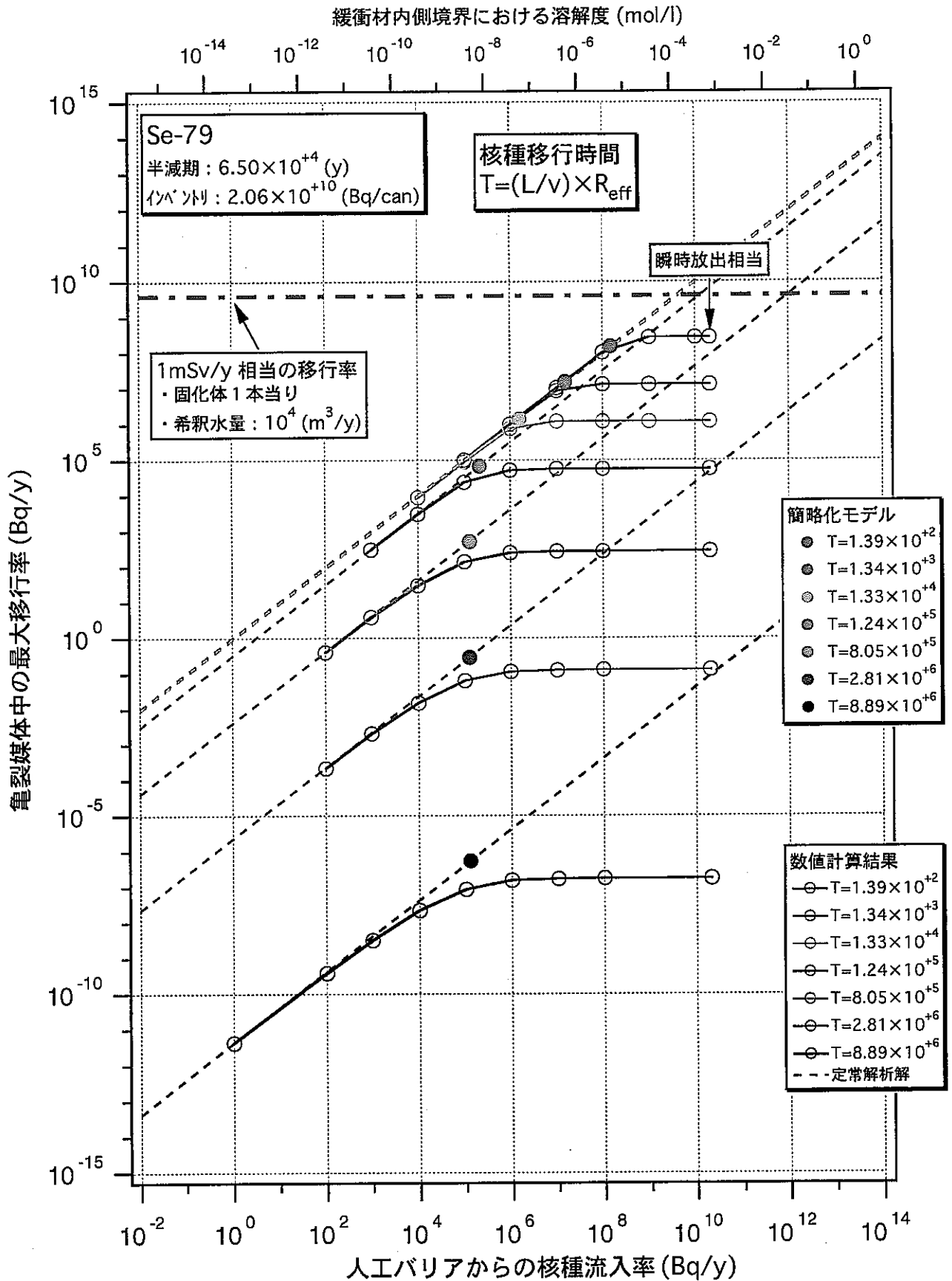
大井貴夫，仲島邦彦（1997）：人工バリアからの核種放出に対する溶解度等の影響特性の把握，動燃技報，No. 102，PNC TN1340 97-002，pp.5-13.

添付図集

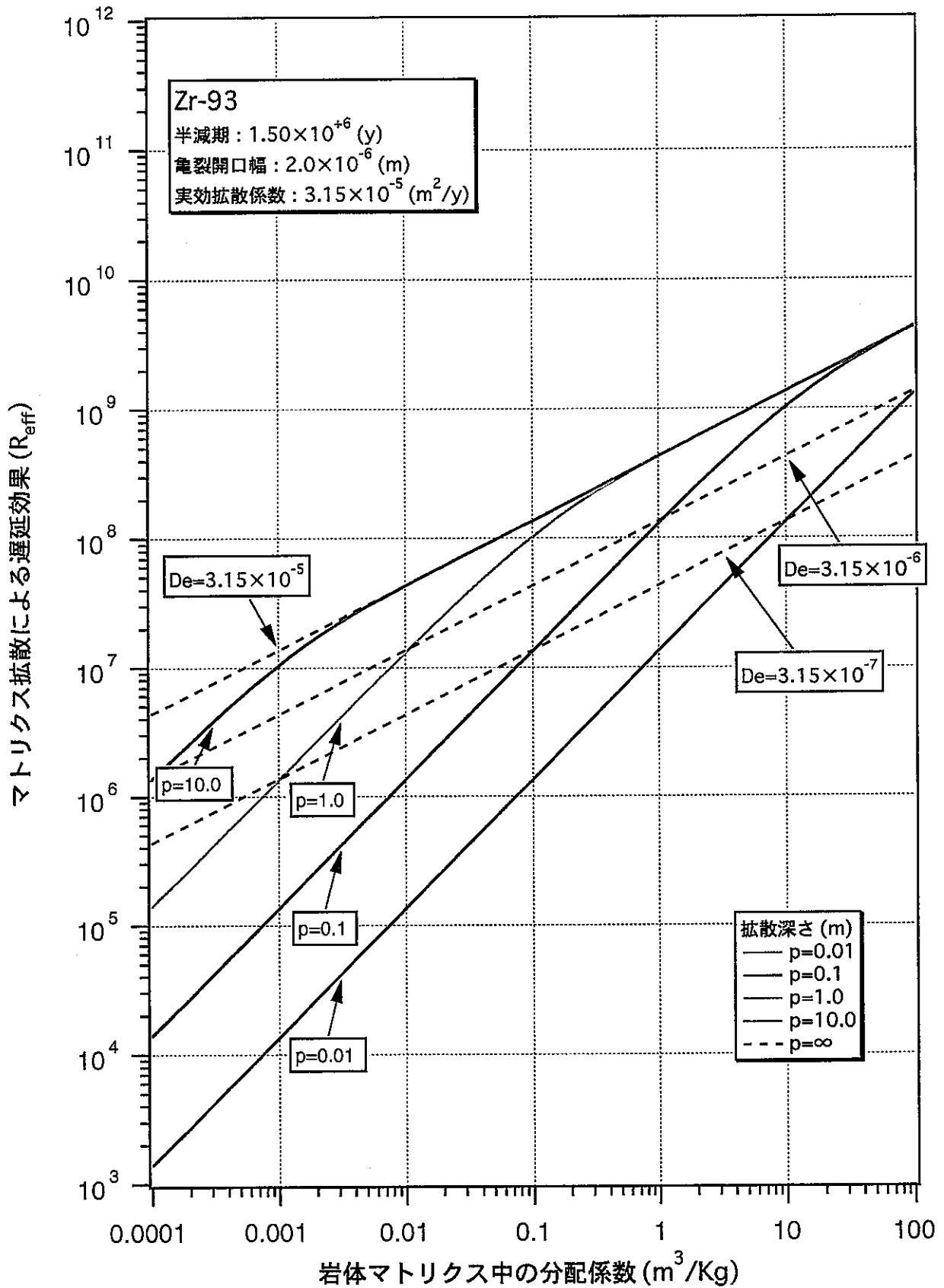
- 図添-1 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性 (Se-79)
- 図添-2 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (Se-79)
- 図添-3 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性 (Zr-93)
- 図添-4 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (Zr-93)
- 図添-5 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性 (Tc-99)
- 図添-6 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (Tc-99)
- 図添-7 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性 (Pd-107)
- 図添-8 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (Pd-107)
- 図添-9 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性 (Sn-126)
- 図添-10 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (Sn-126)
- 図添-11 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性 (Cs-135)
- 図添-12 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (Cs-135)
- 図添-13 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性 (Th-230)
- 図添-14 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (Th-230)
- 図添-15 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性 (Th-232)
- 図添-16 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (Th-232)
- 図添-17 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性 (U-233)
- 図添-18 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (U-233)
- 図添-19 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性 (U-234)
- 図添-20 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (U-234)
- 図添-21 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性 (U-235)
- 図添-22 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (U-235)
- 図添-23 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性 (U-236)
- 図添-24 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (U-236)
- 図添-25 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性 (U-238)
- 図添-26 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (U-238)
- 図添-27 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性 (Np-237)
- 図添-28 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (Np-237)
- 図添-29 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性 (Pu-239)
- 図添-30 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (Pu-239)
- 図添-31 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性 (Pu-240)
- 図添-32 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (Pu-240)
- 図添-33 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性 (Am-241)
- 図添-34 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (Am-241)
- 図添-35 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性 (Am-243)
- 図添-36 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (Am-243)



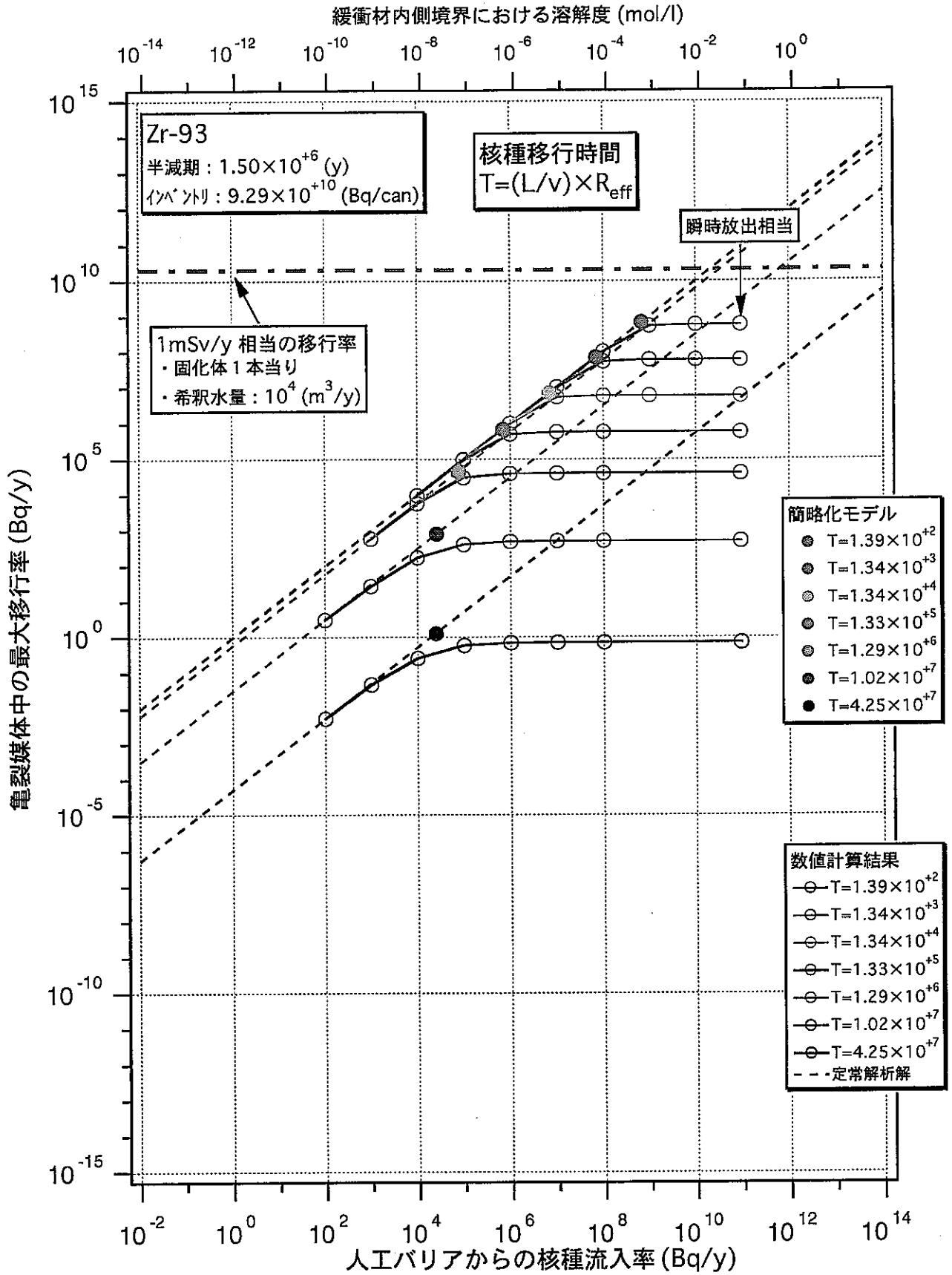
図添-1 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性 (Se-79)



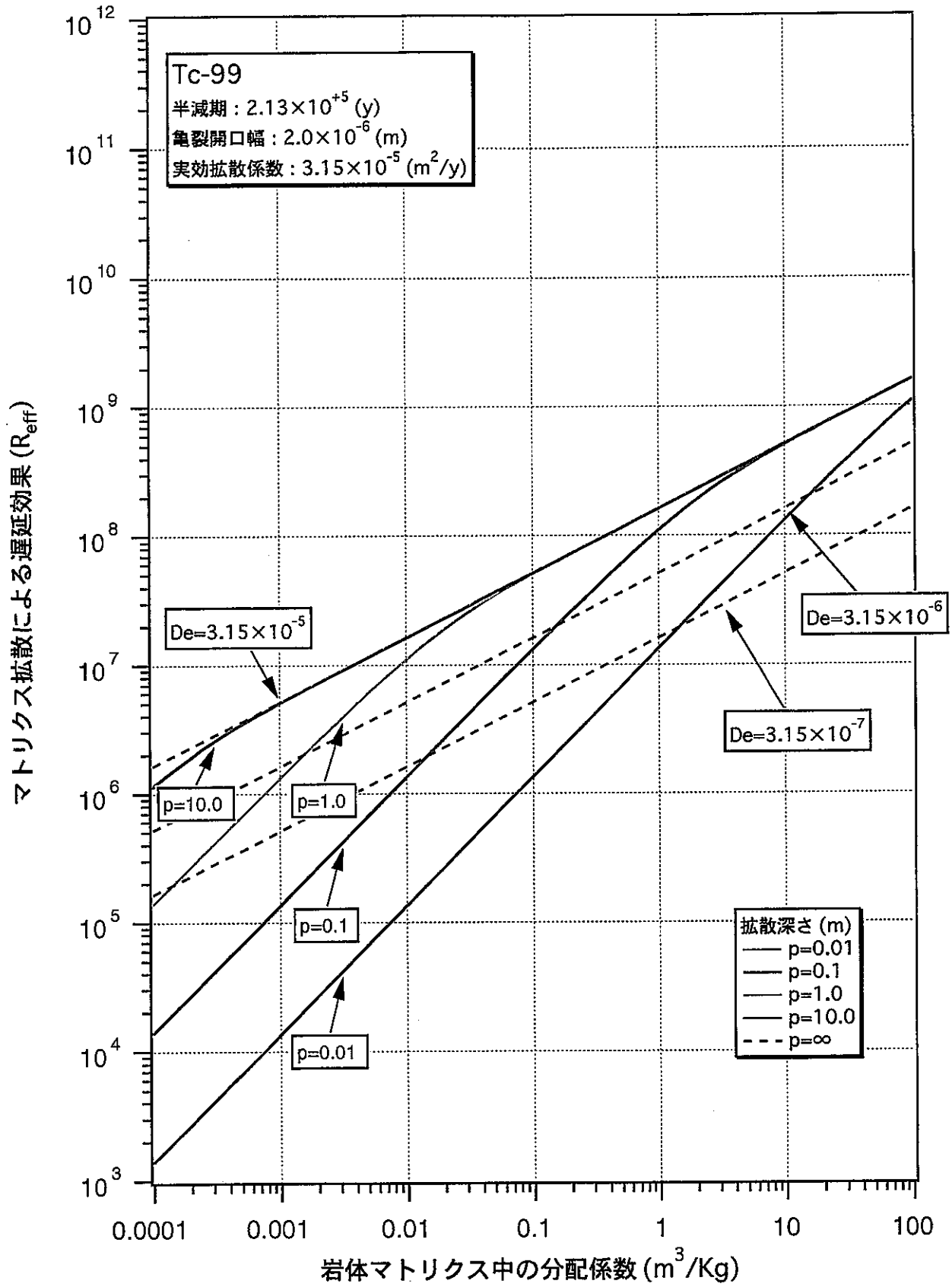
図添-2 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (Se-79)



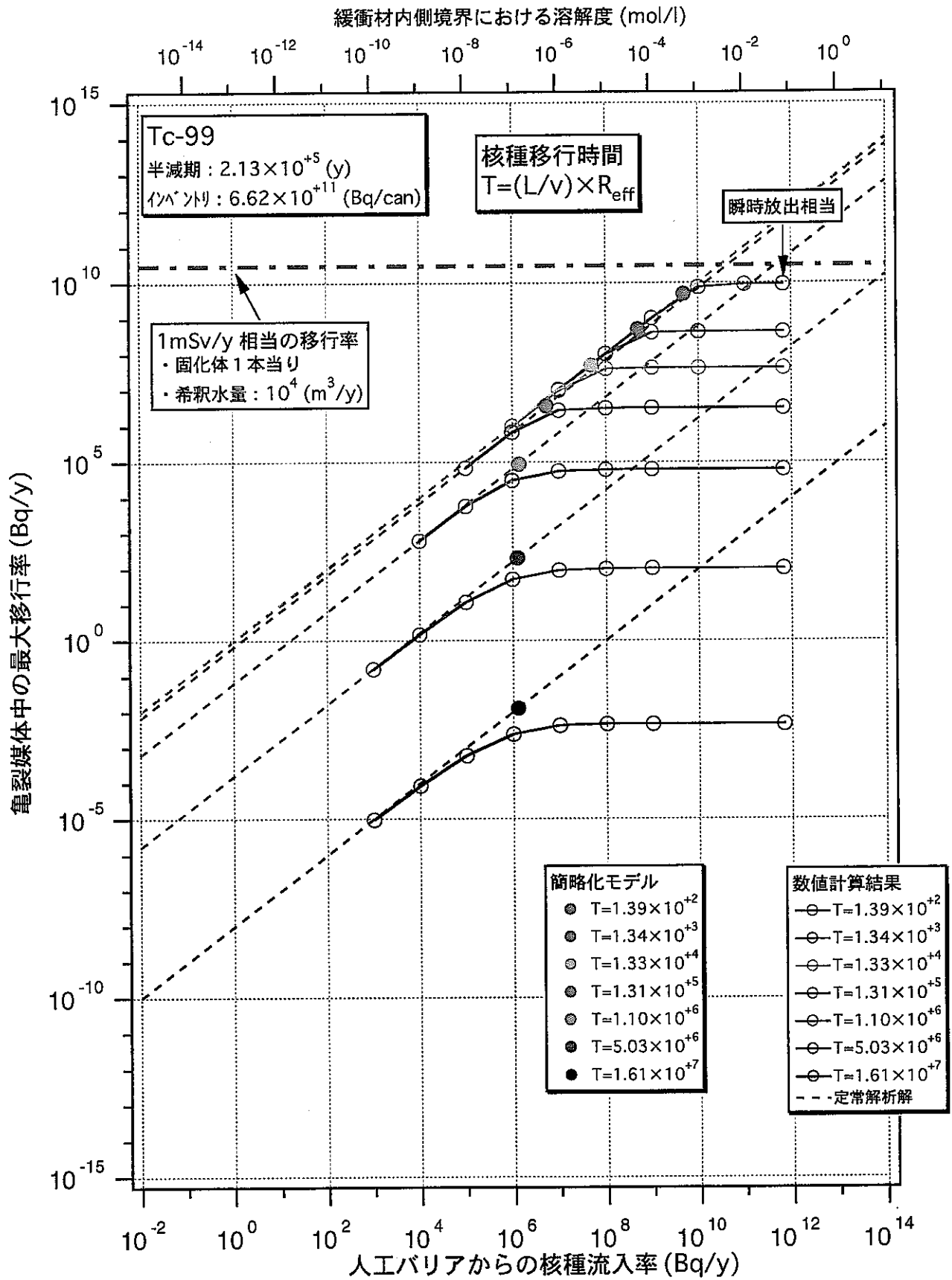
図添-3 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性 (Zr-93)



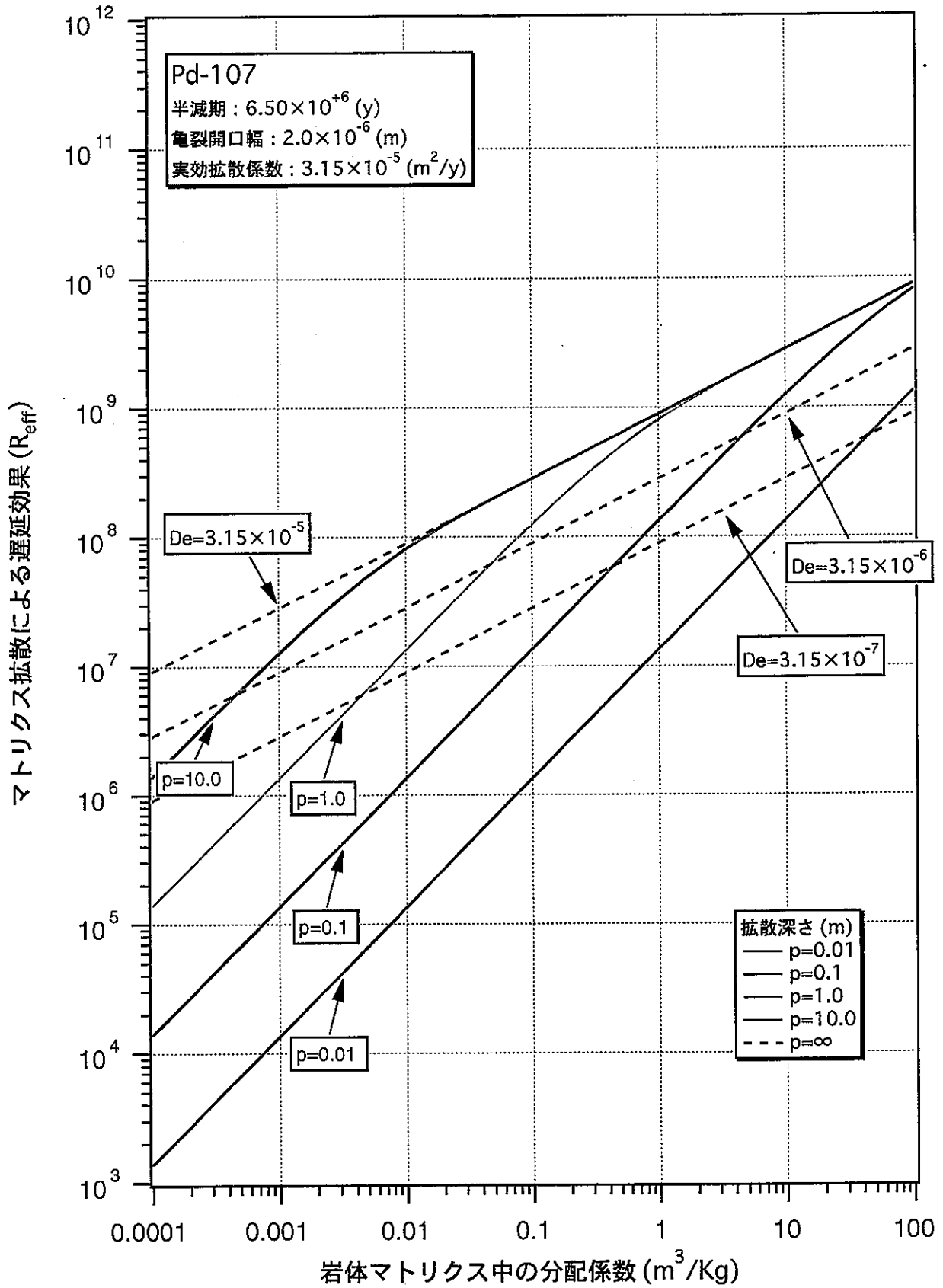
図添-4 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (Zr-93)



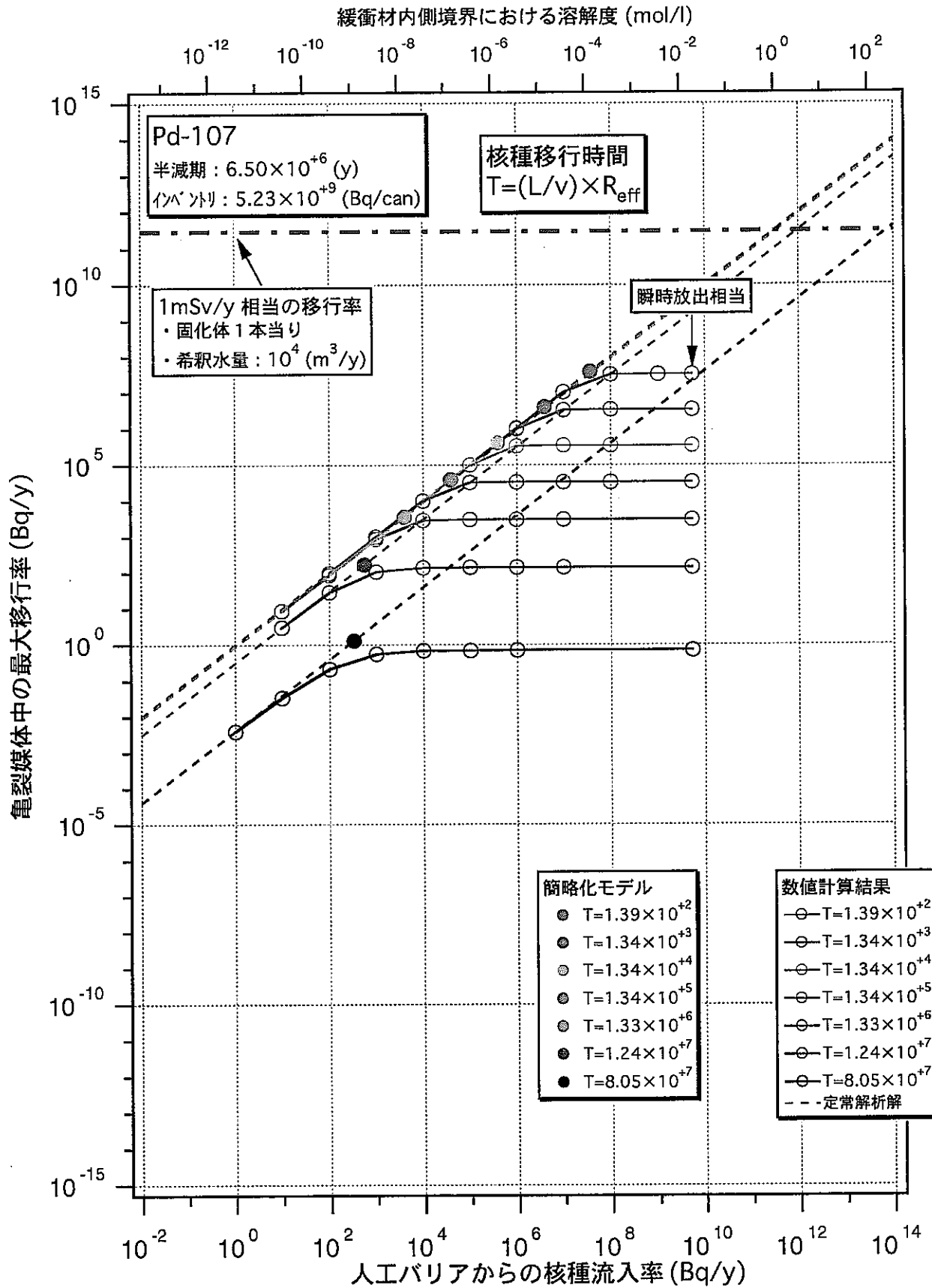
図添-5 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性 (Tc-99)



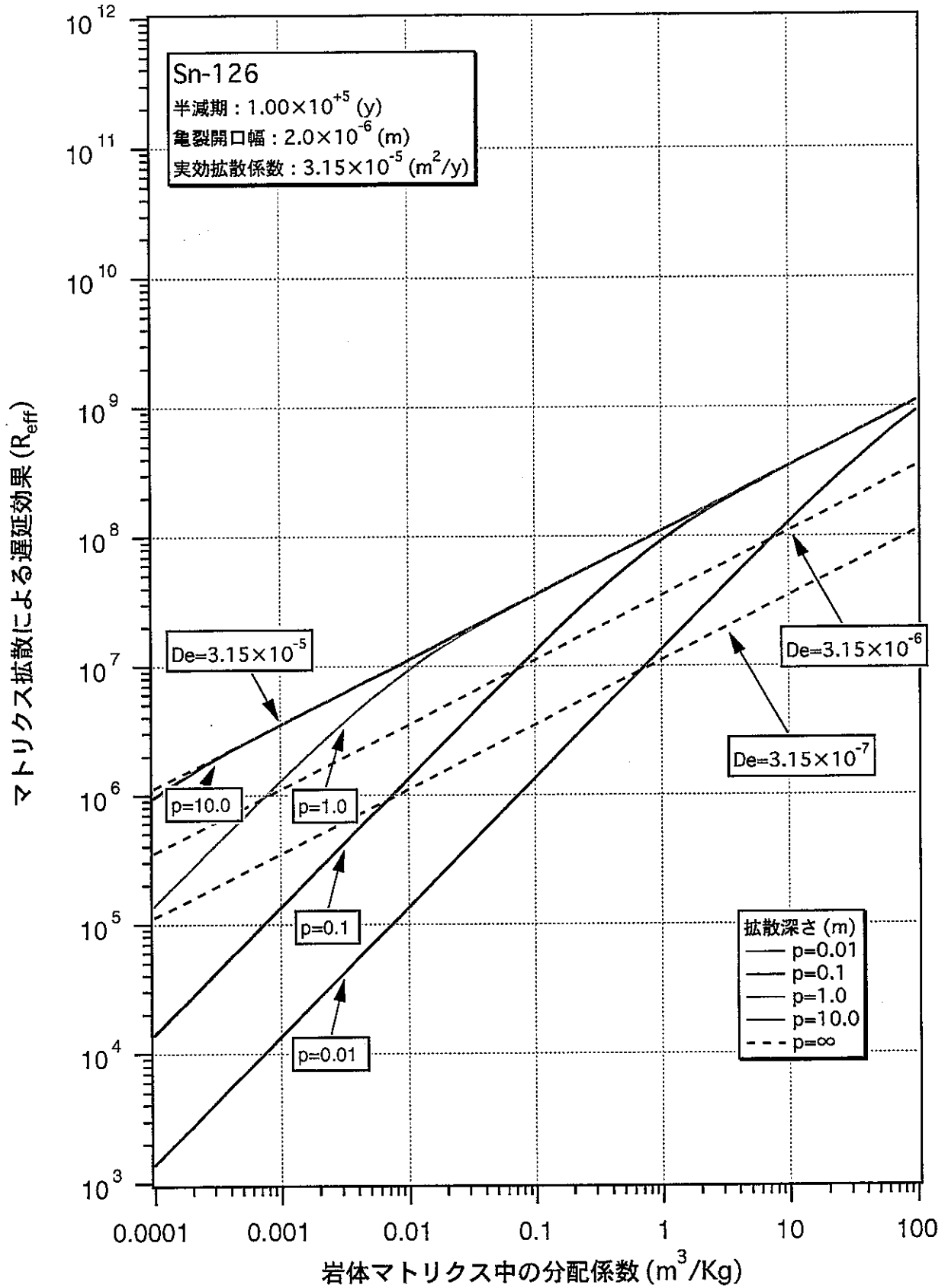
図添-6 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (Tc-99)



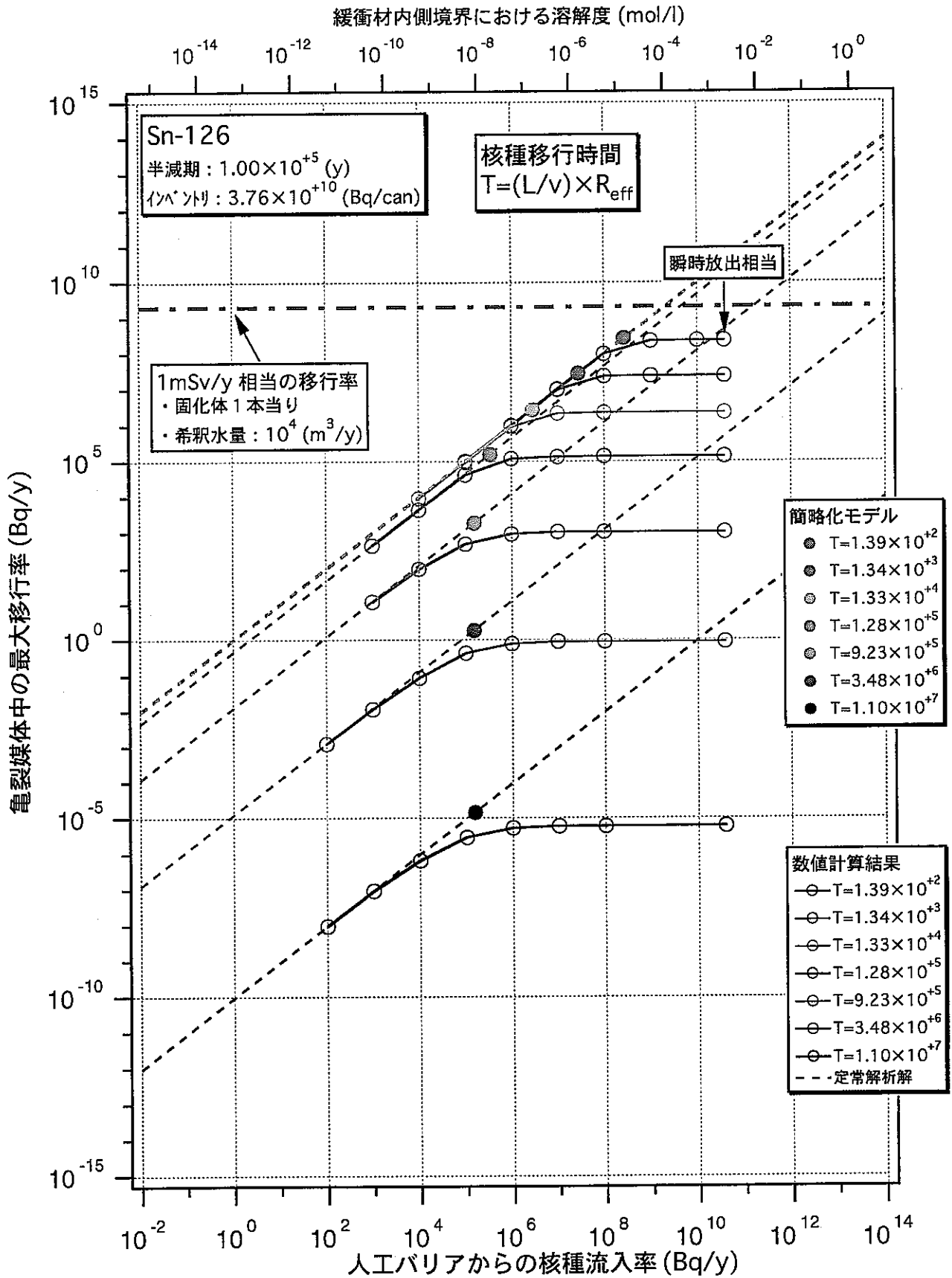
図添-7 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性 (Pd-107)



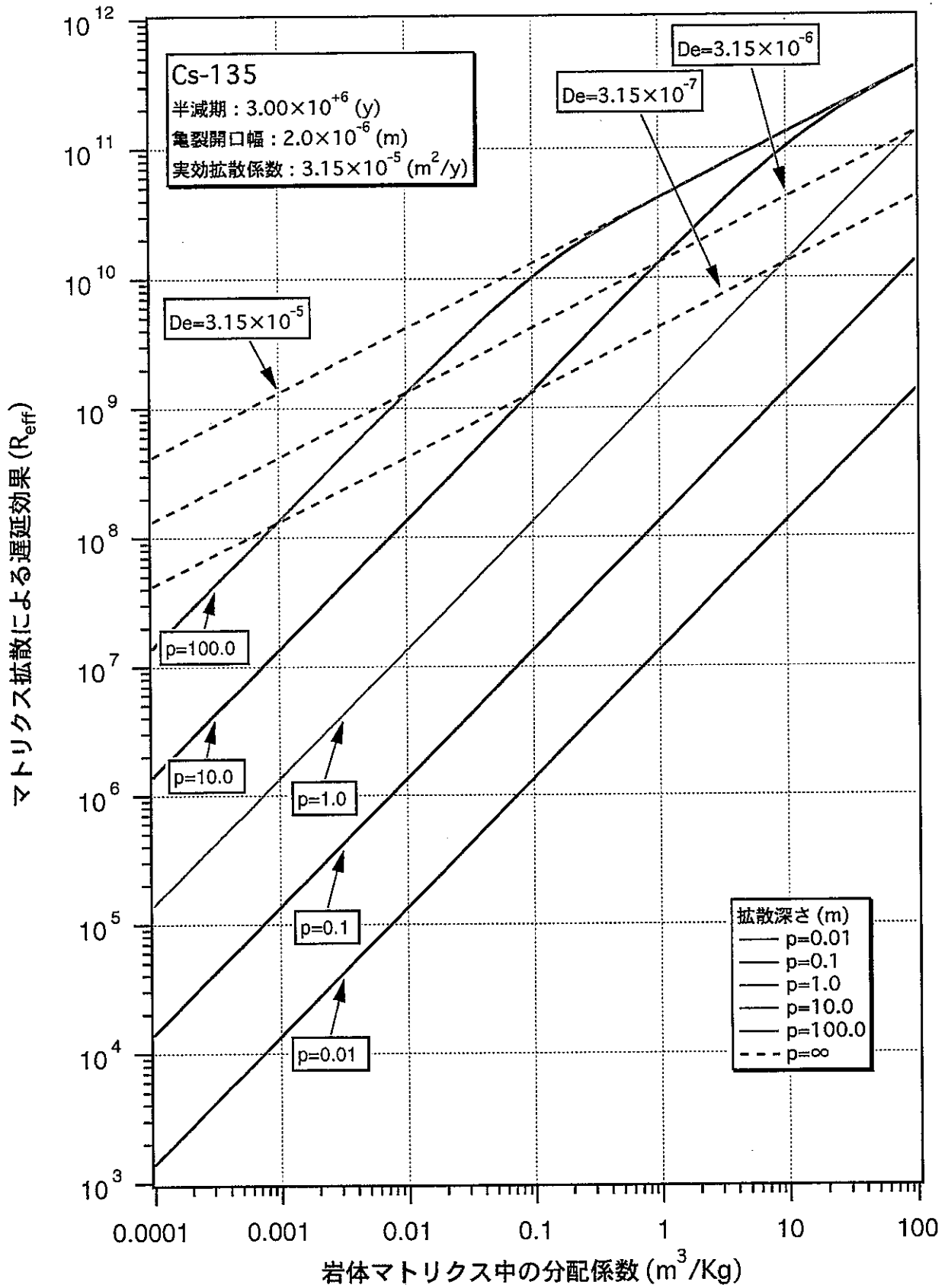
図添-8 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (Pd-107)



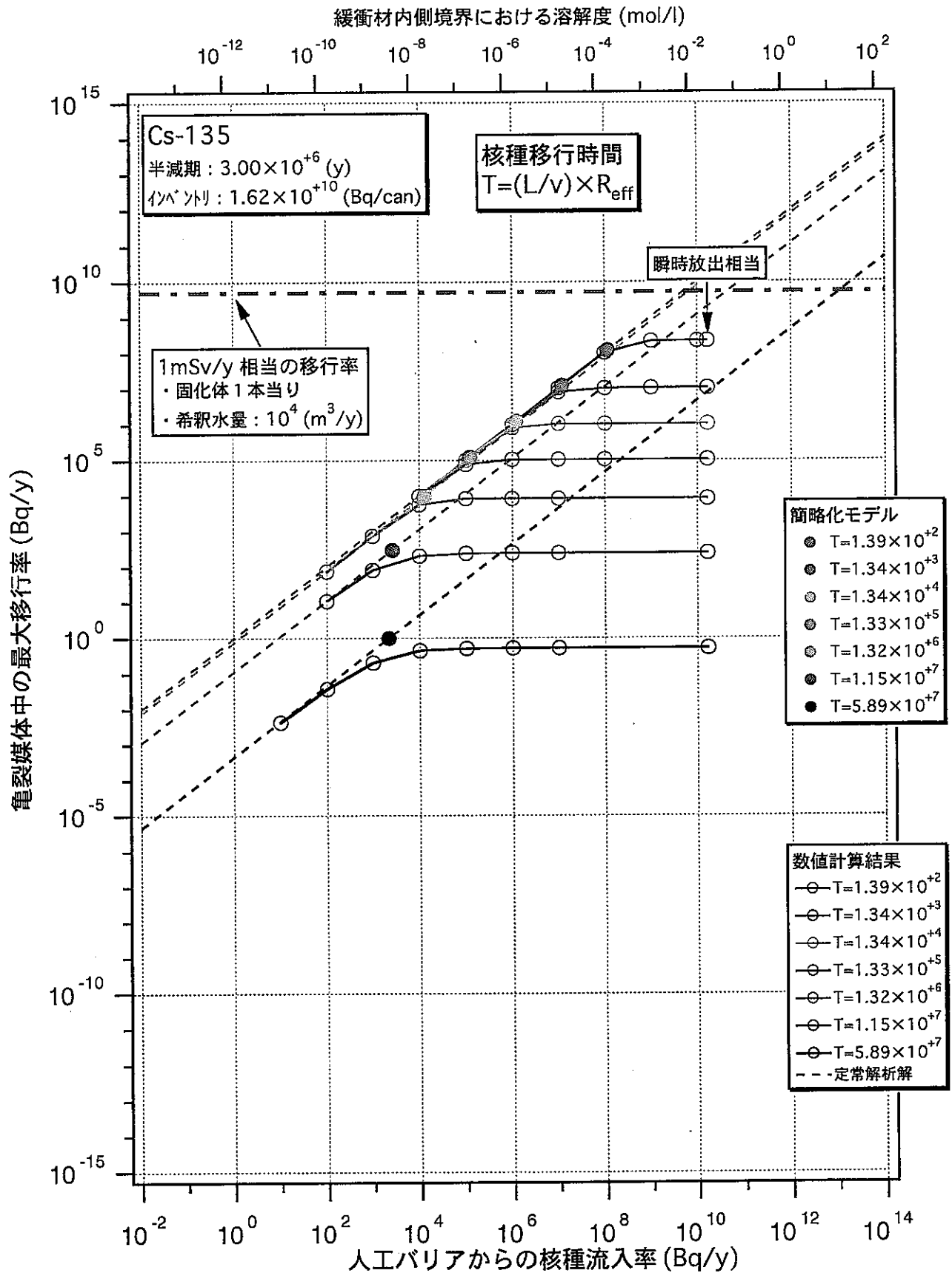
図添-9 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性 (Sn-126)



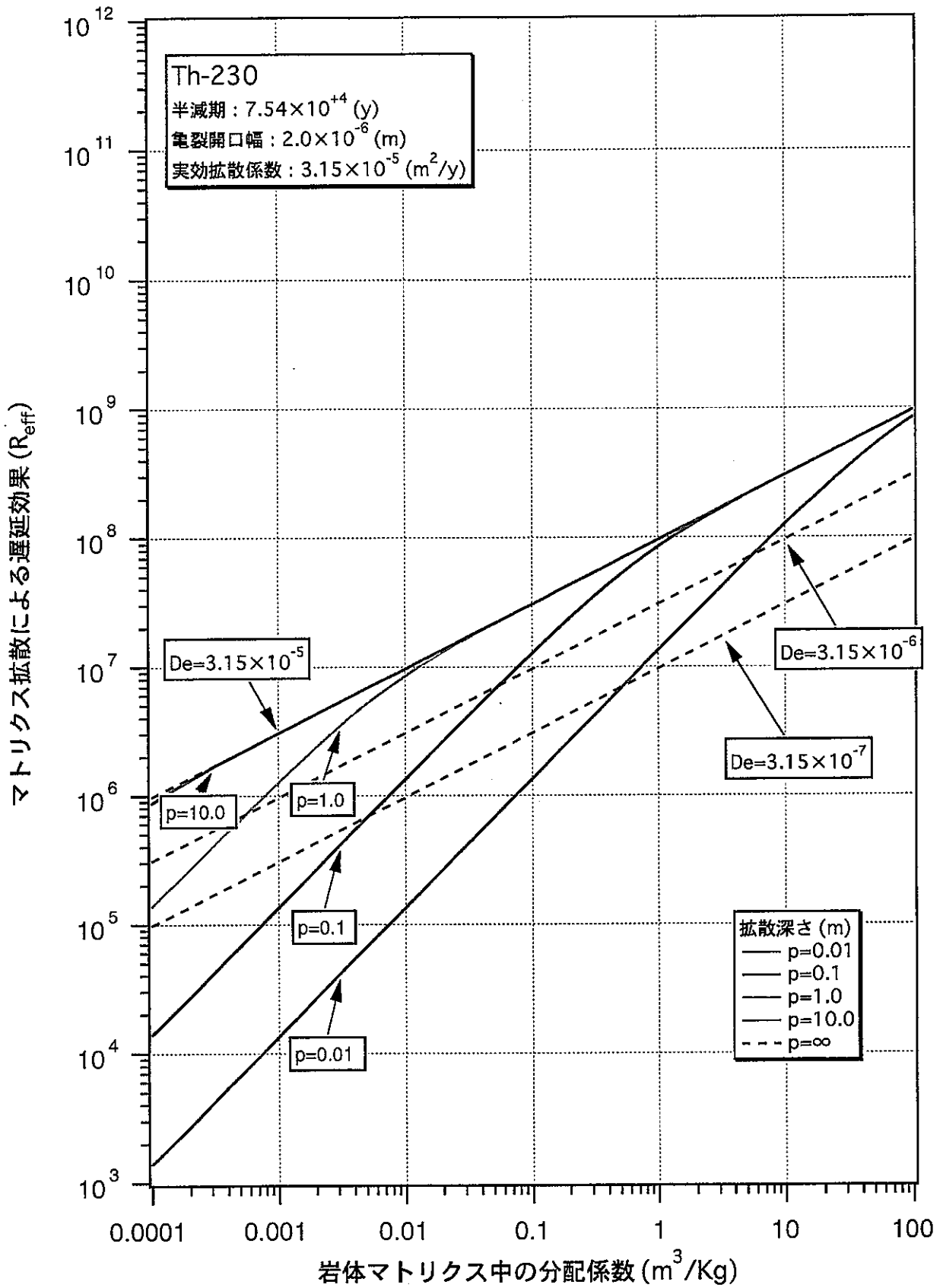
図添-10 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (Sn-126)



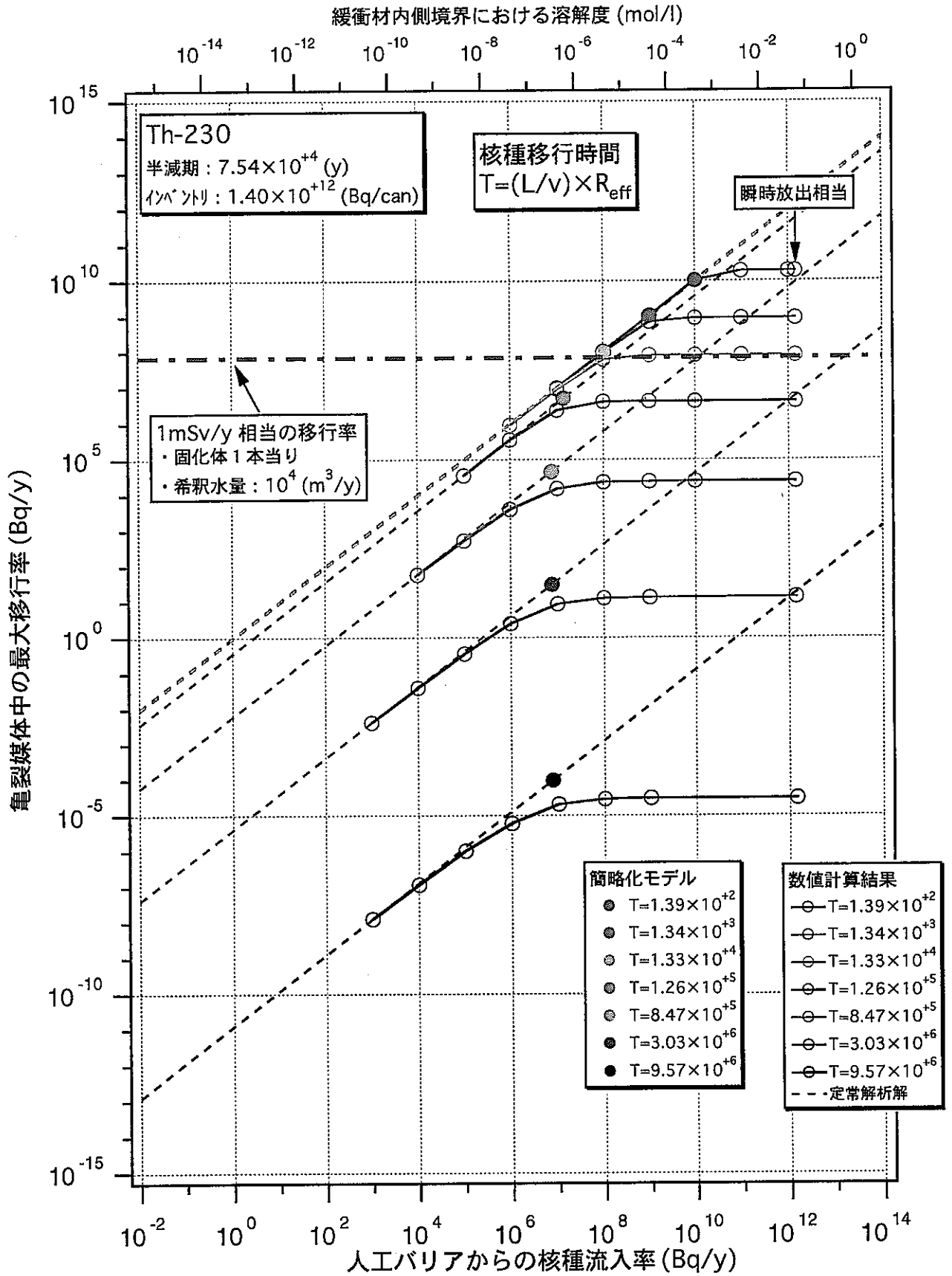
図添-11 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性 (Cs-135)



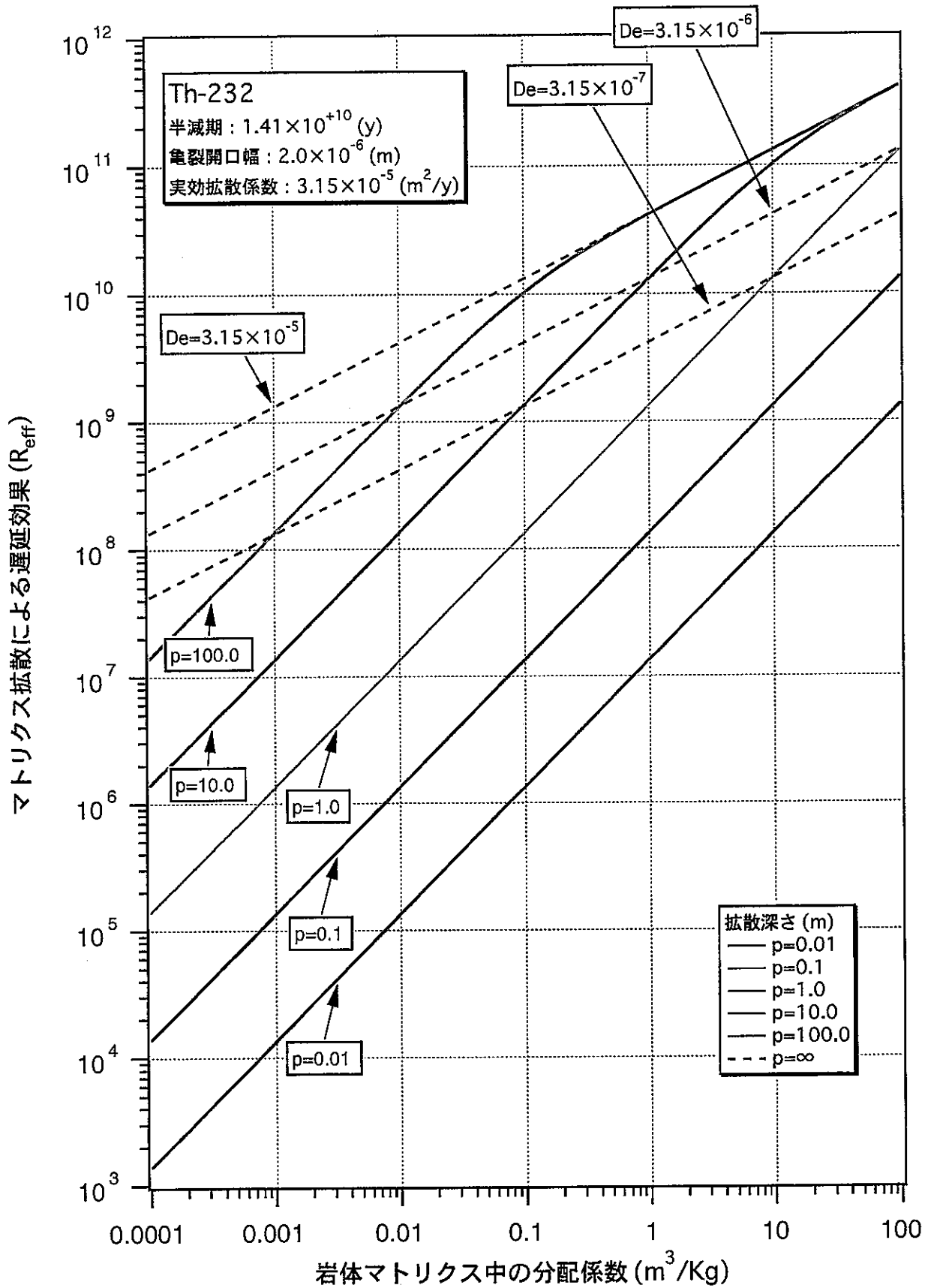
図添-12 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (Cs-135)



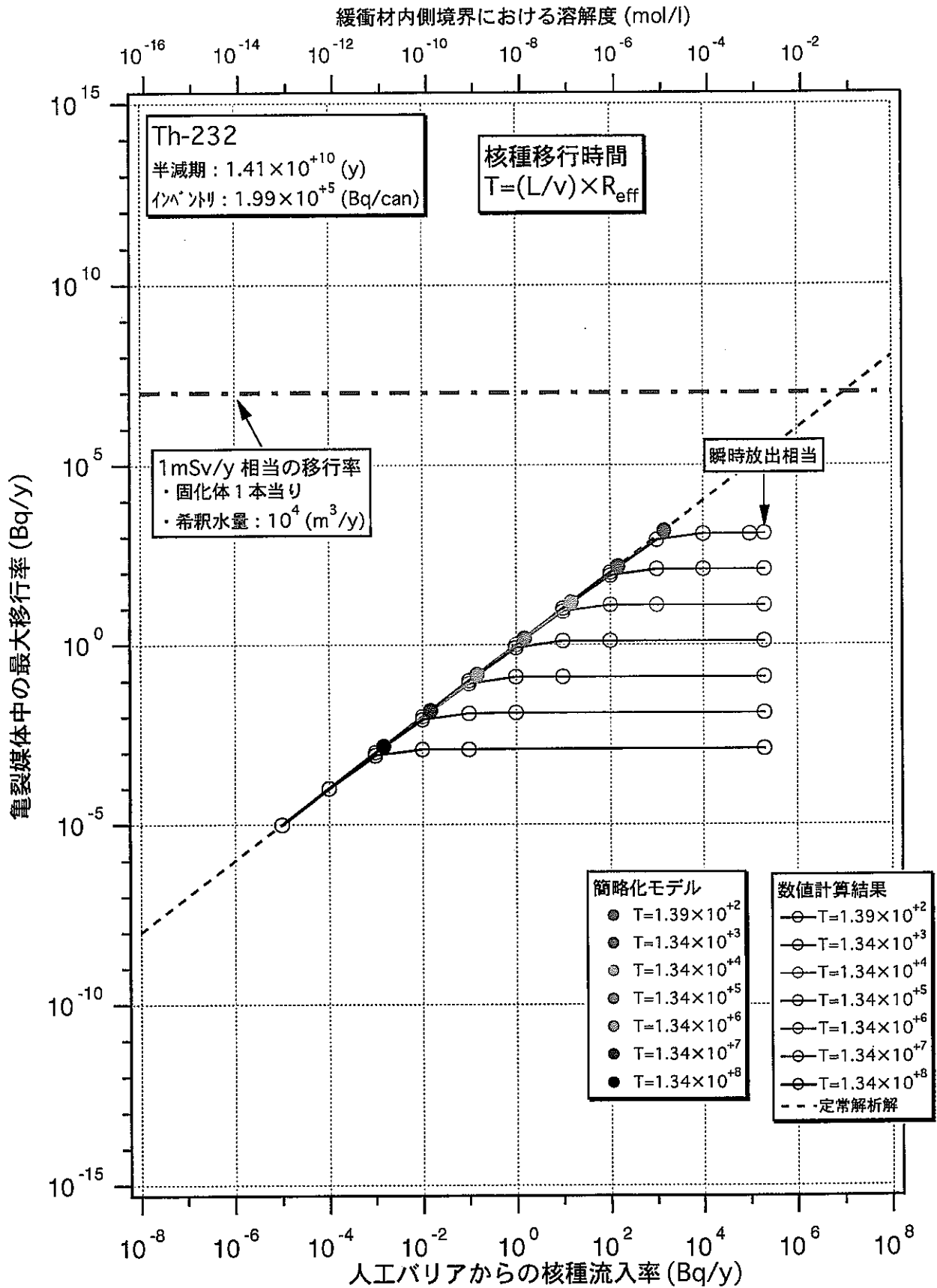
図添-13 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性 (Th-230)



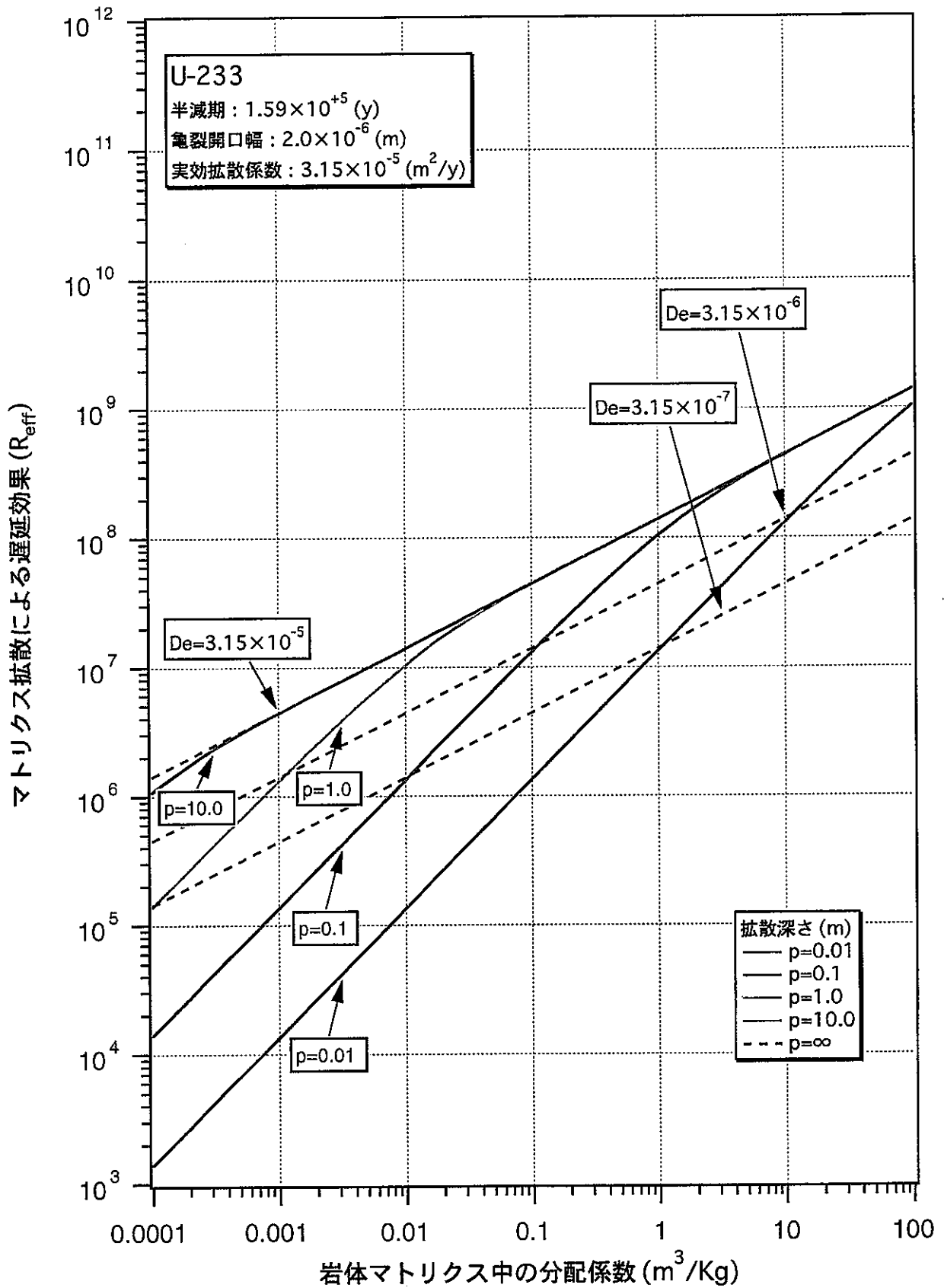
図添-14 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (Th-230)



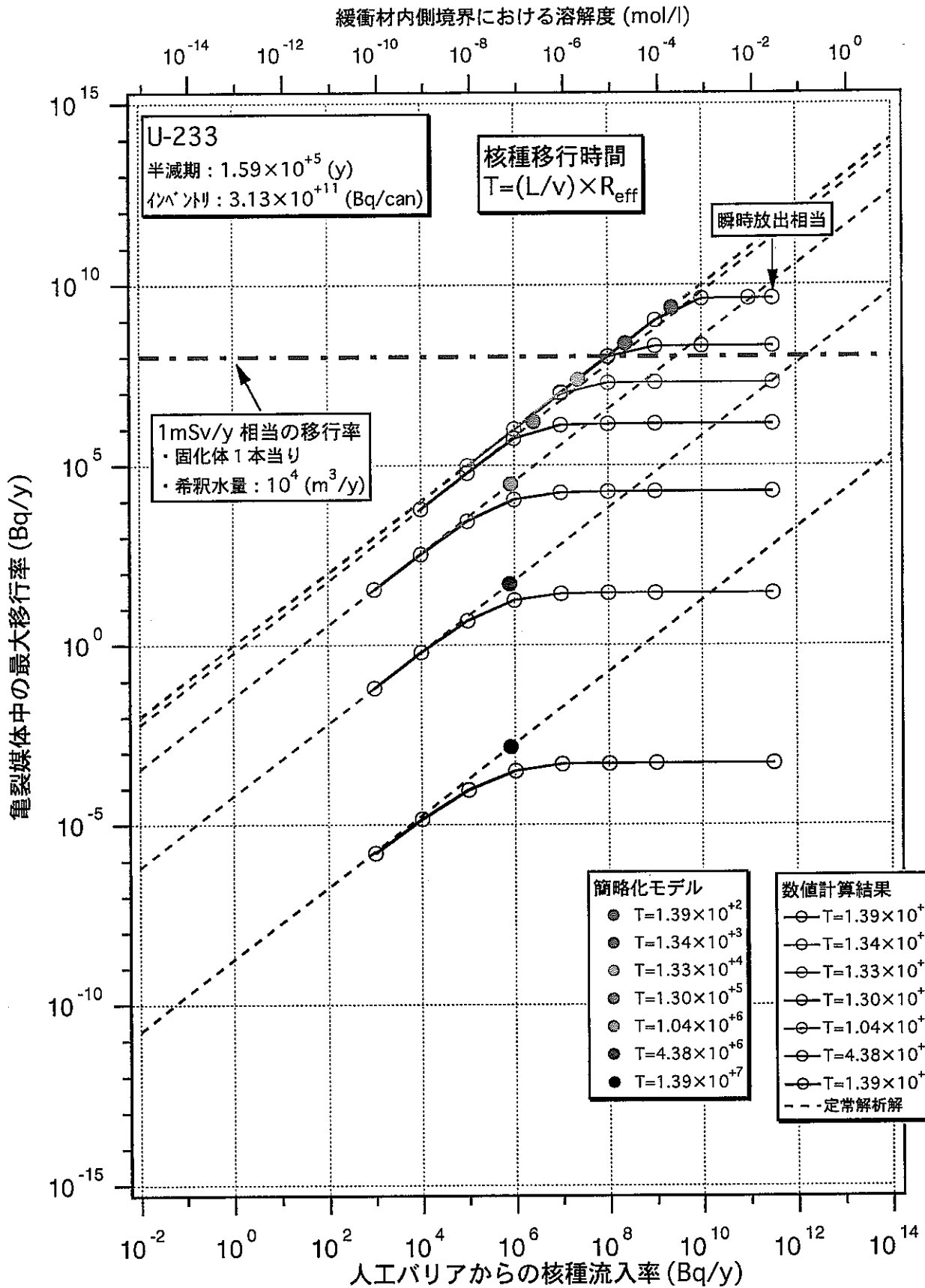
図添-15 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性 (Th-232)



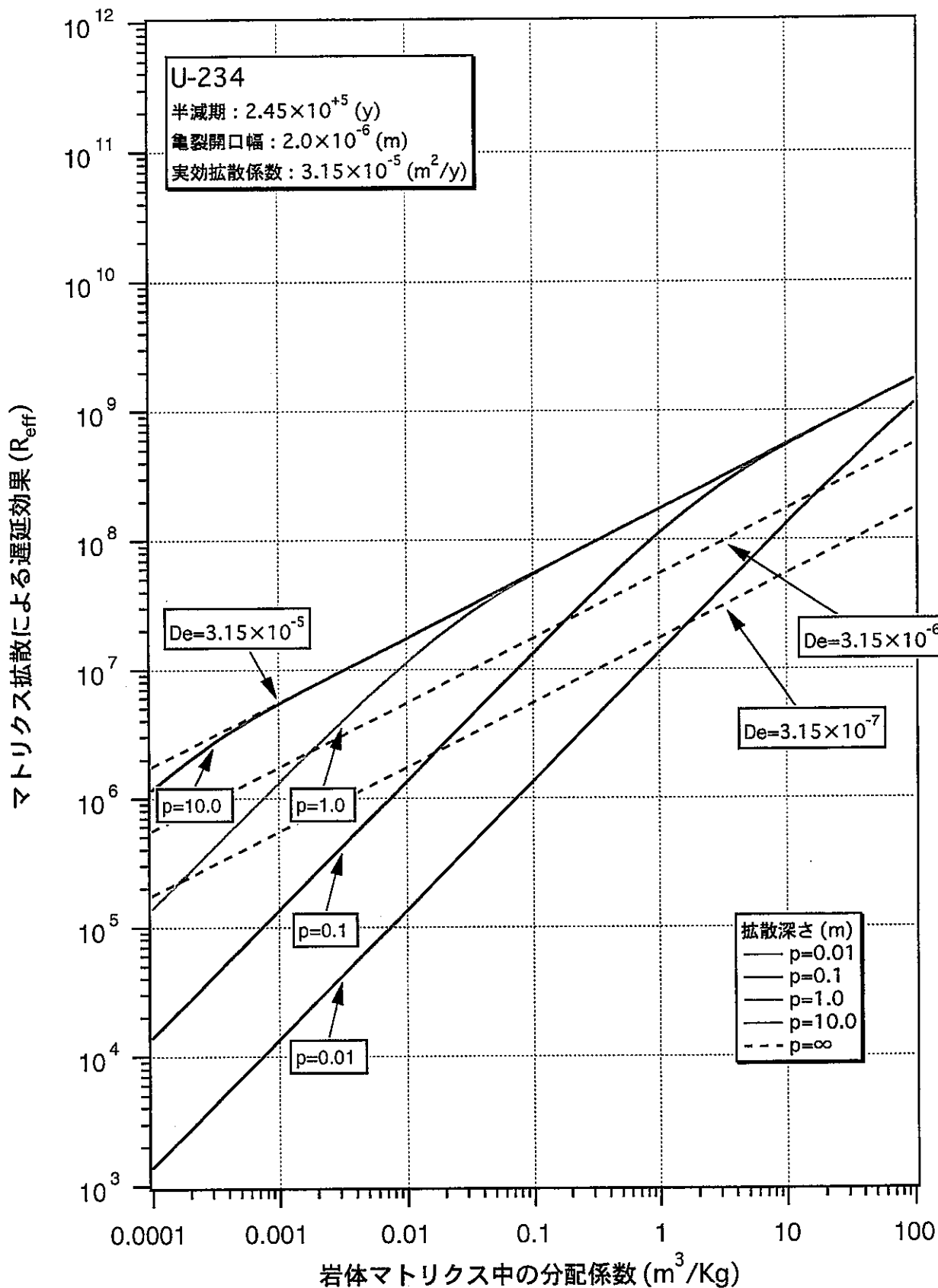
図添-16 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (Th-232)



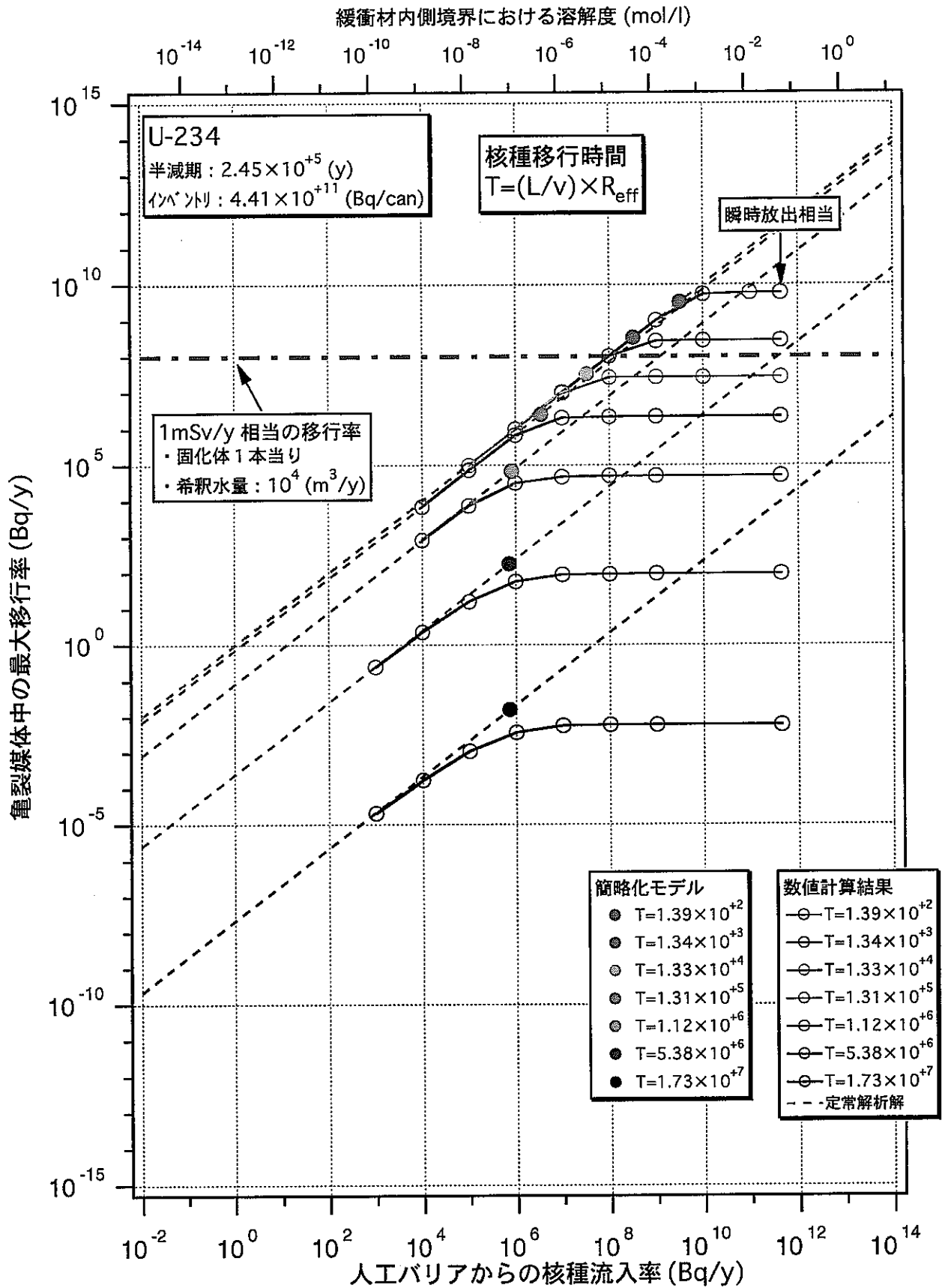
図添-17 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性 (U-233)



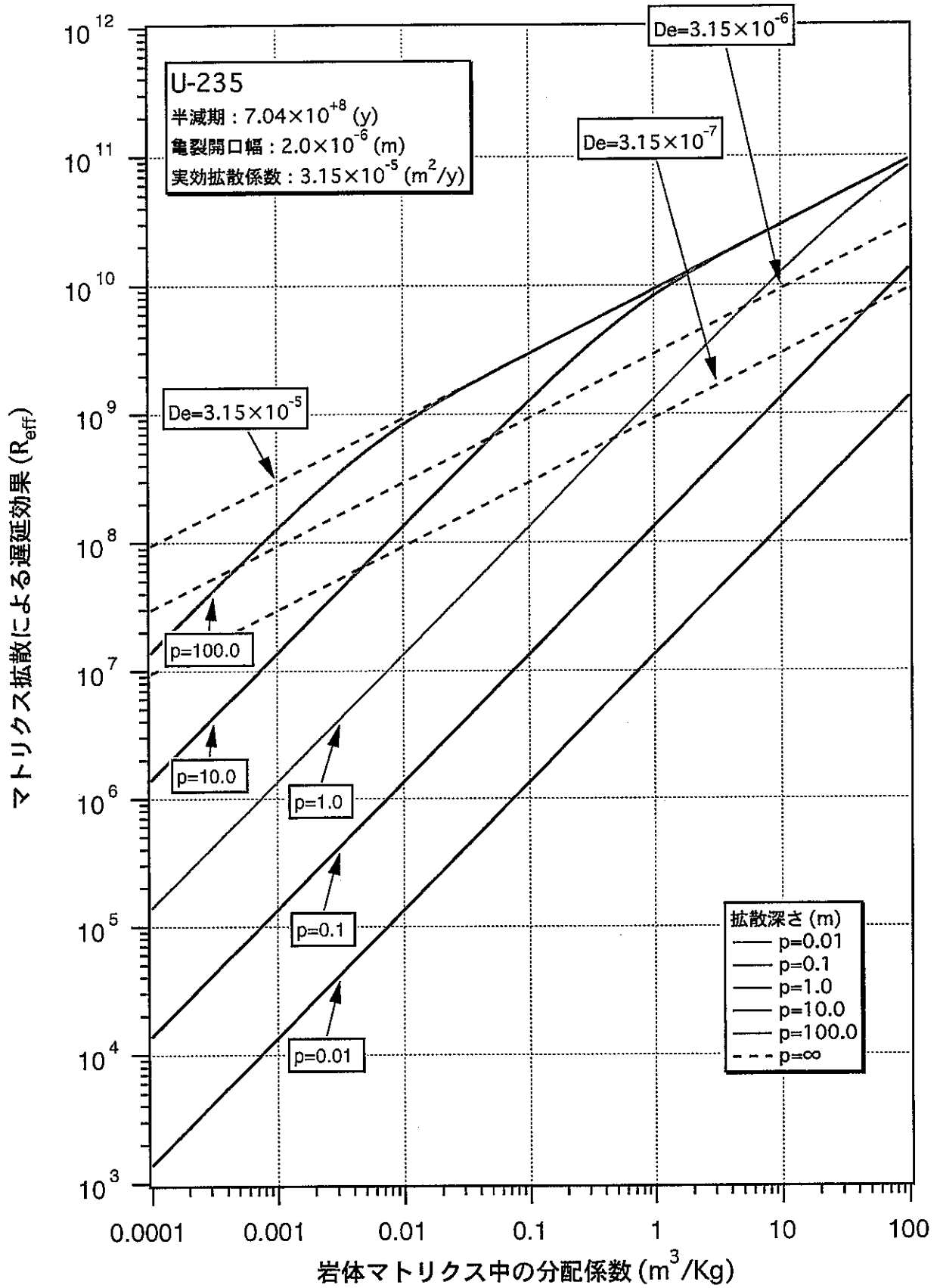
図添-18 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (U-233)



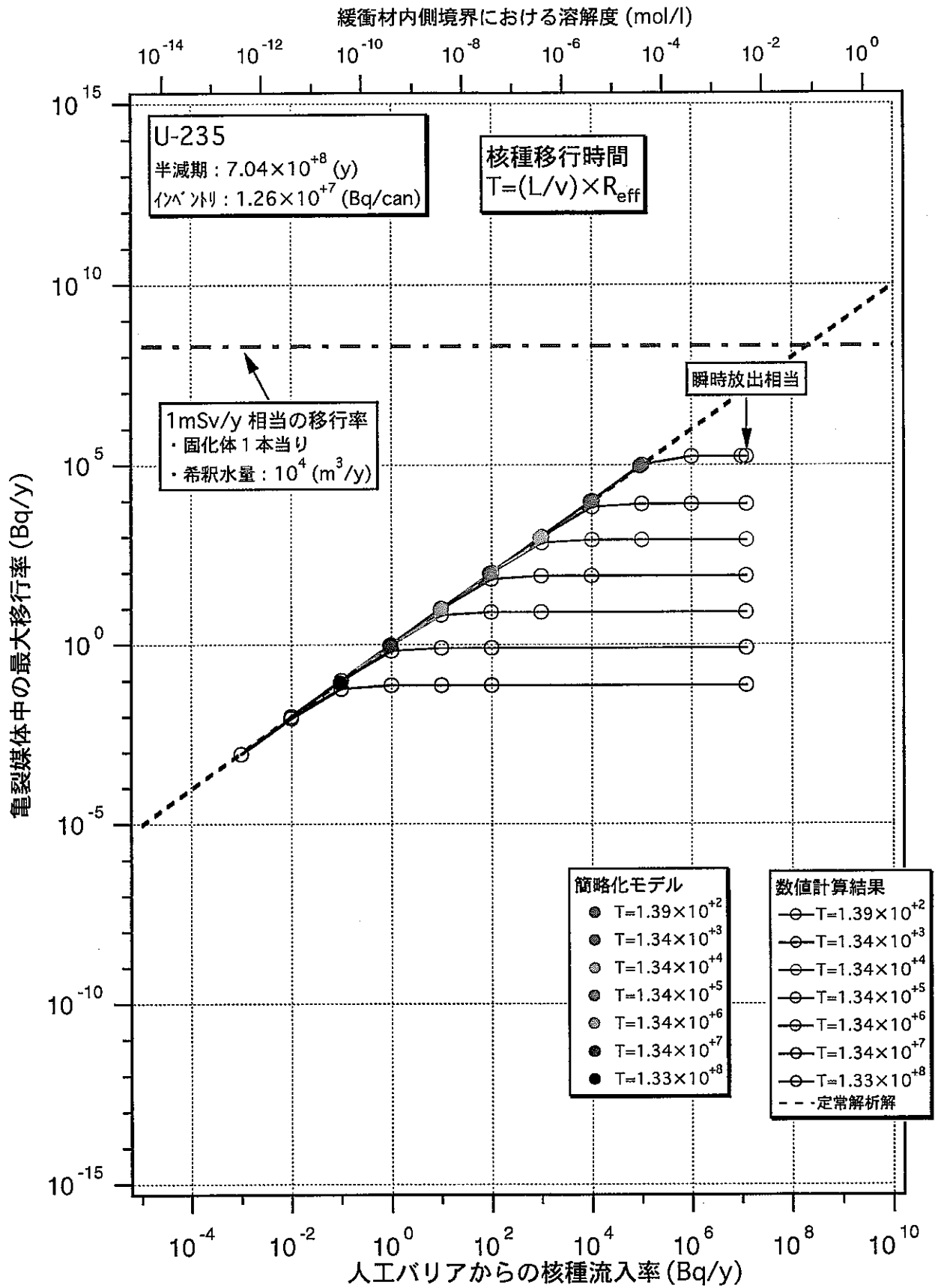
図添-19 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性 (U-234)



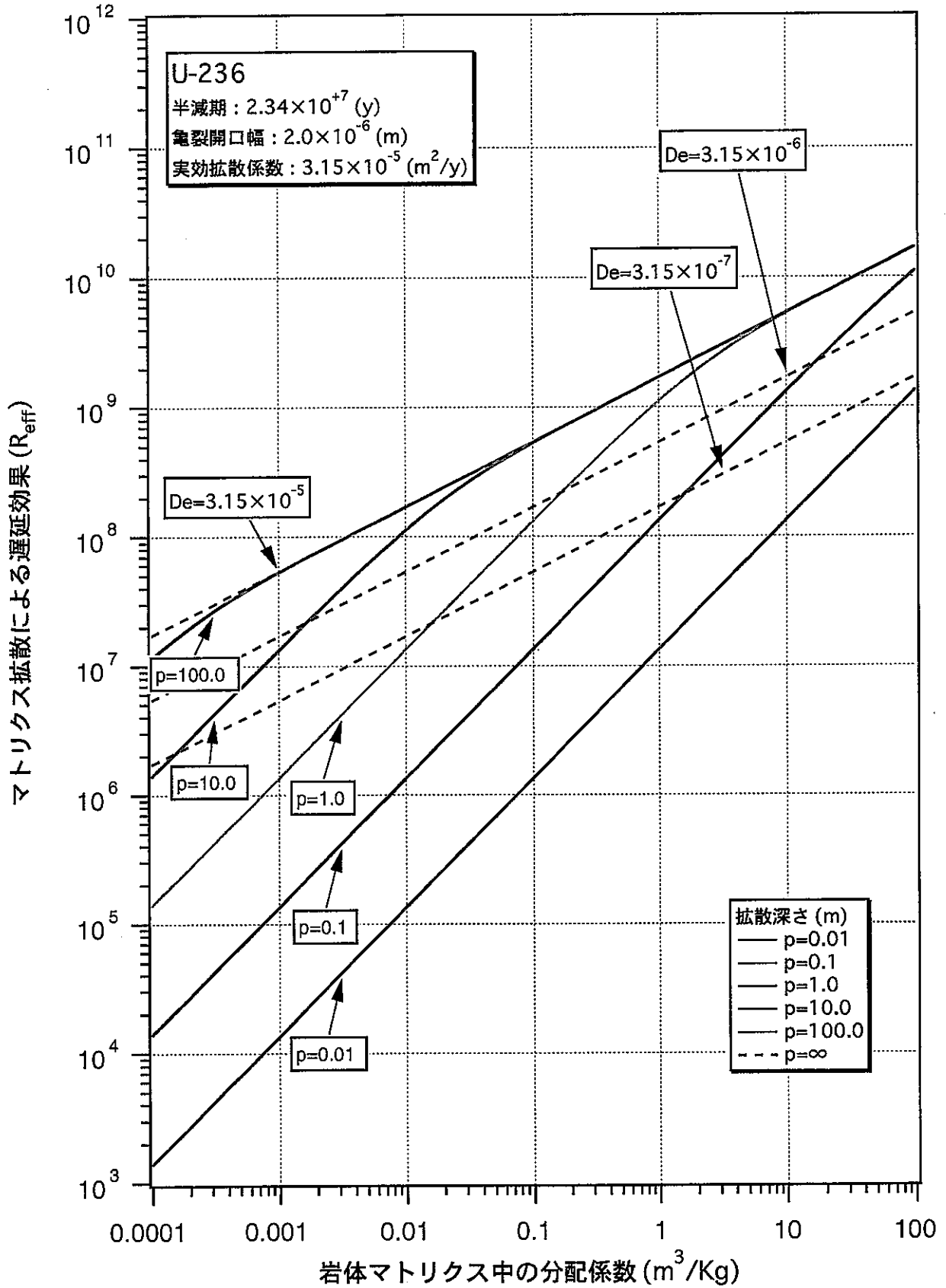
図添-20 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (U-234)



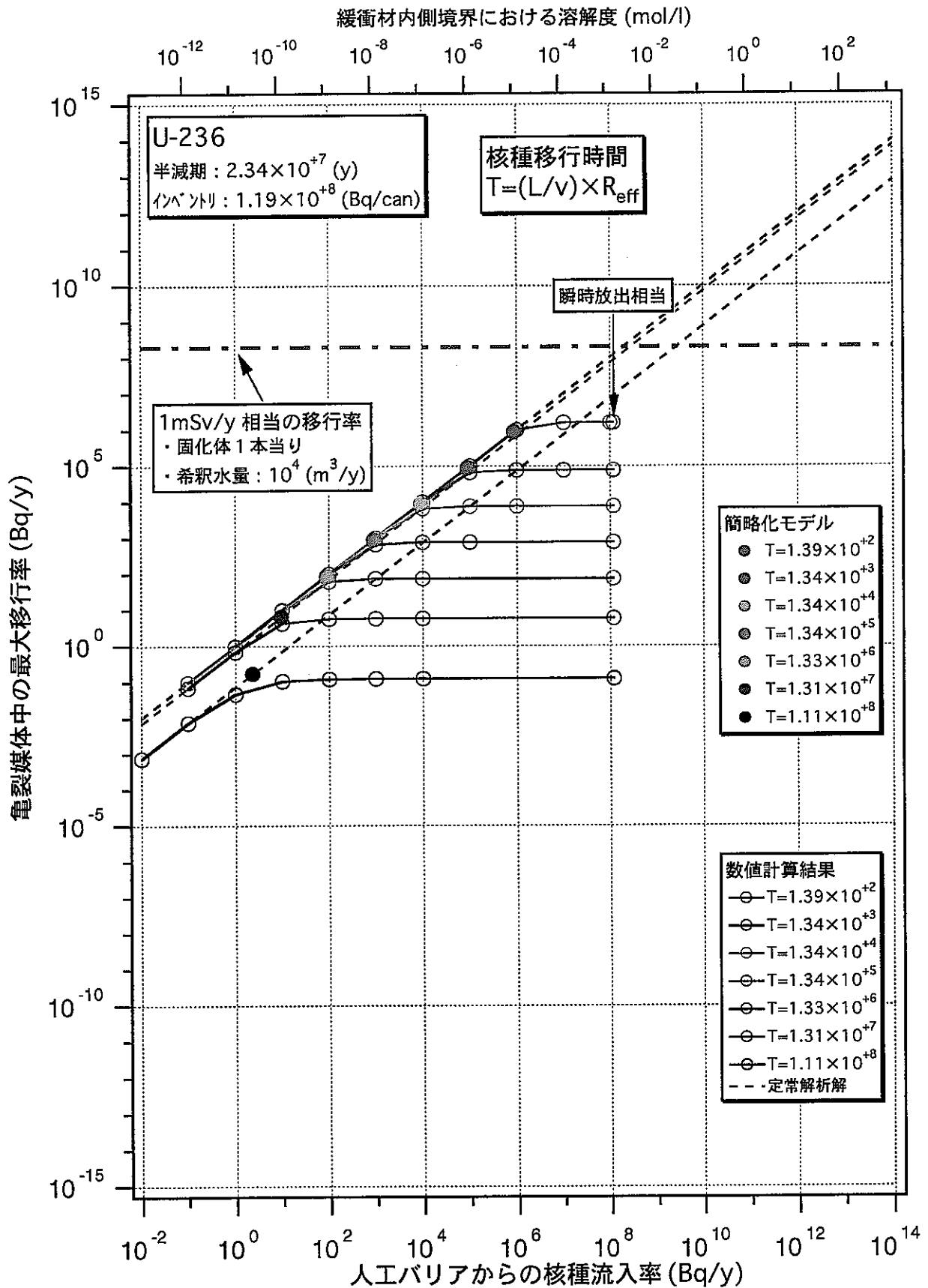
図添-21 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性 (U-235)



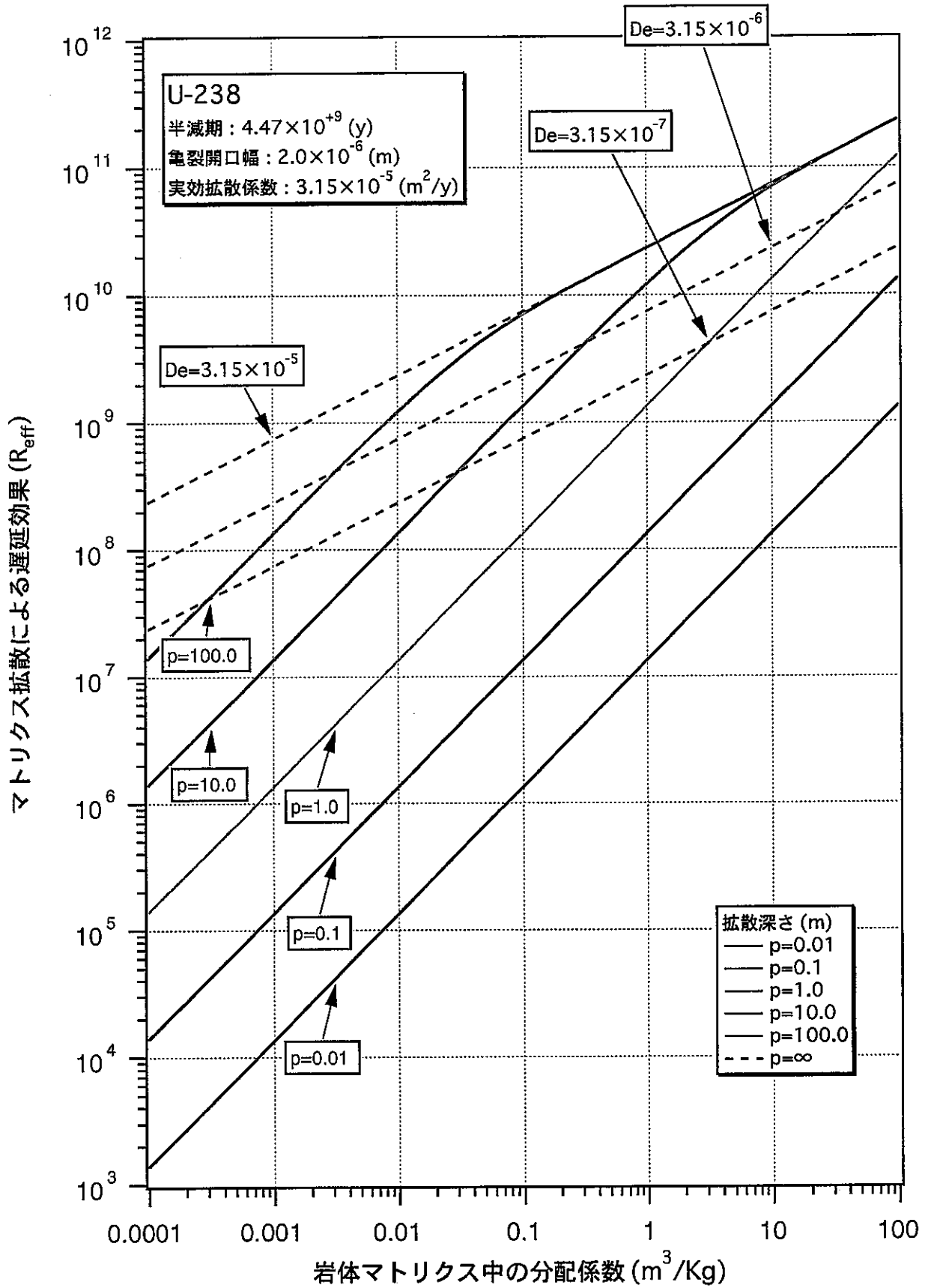
図添-22 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (U-235)



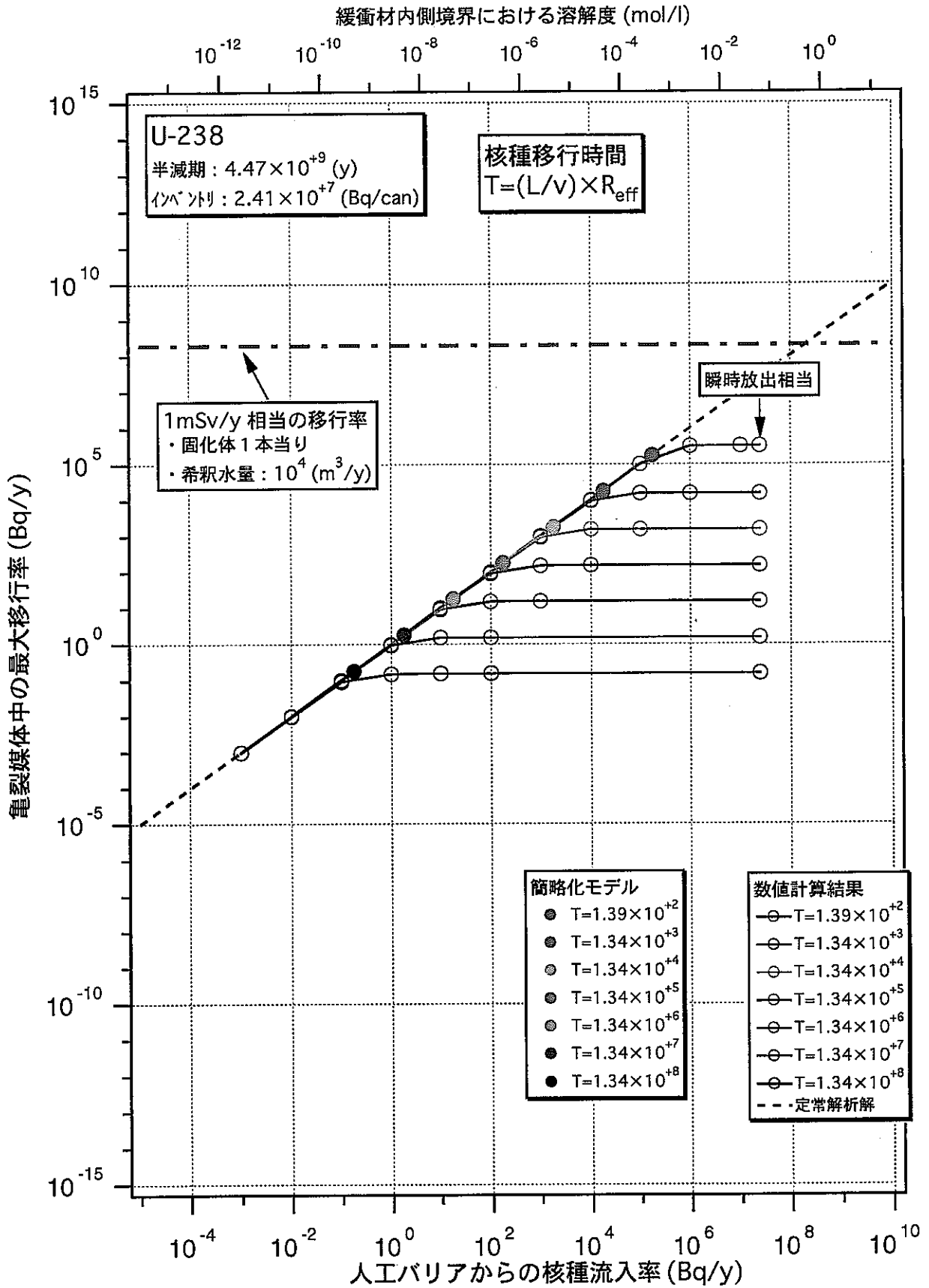
図添-23 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性 (U-236)



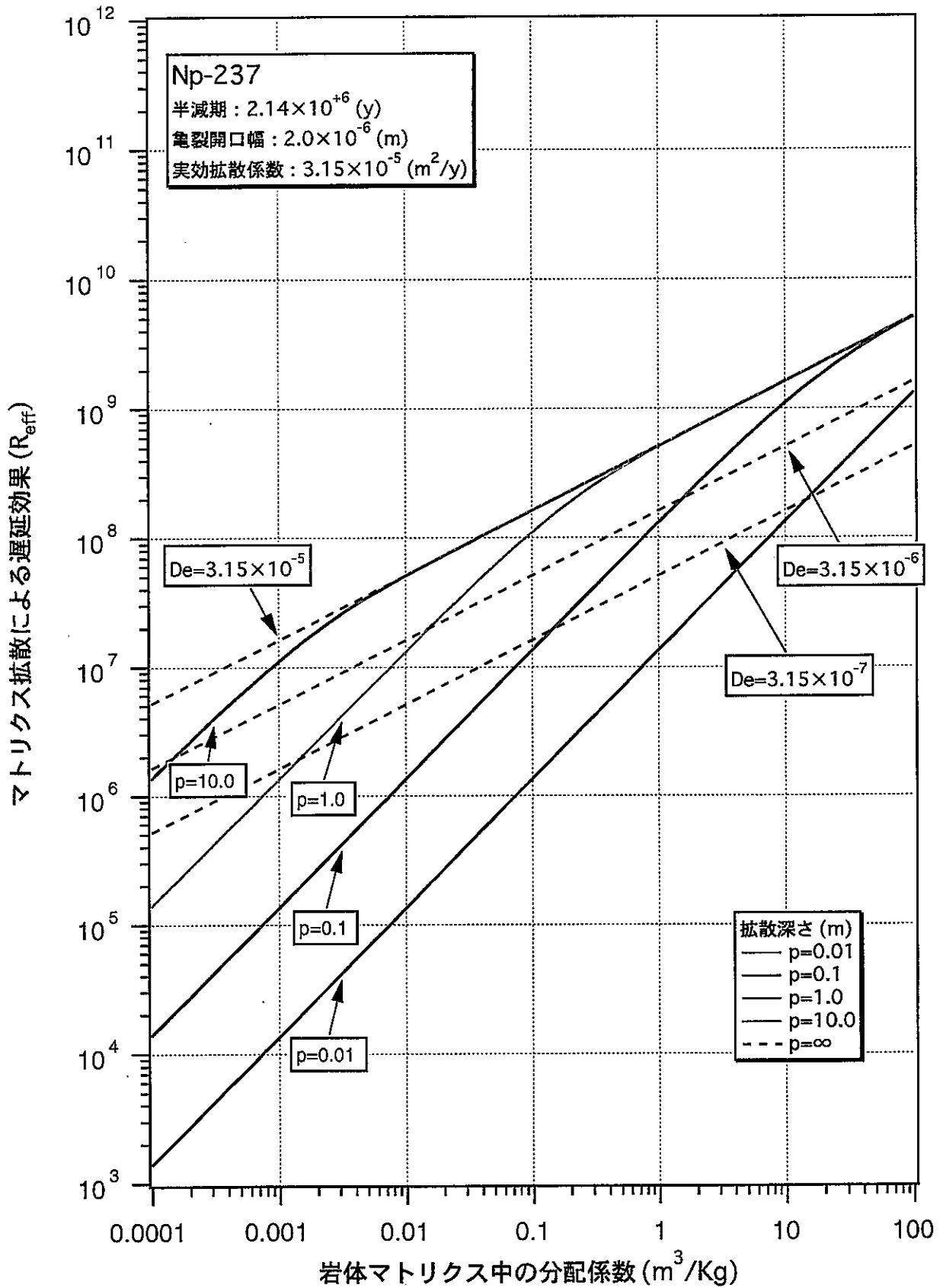
図添-24 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (U-236)



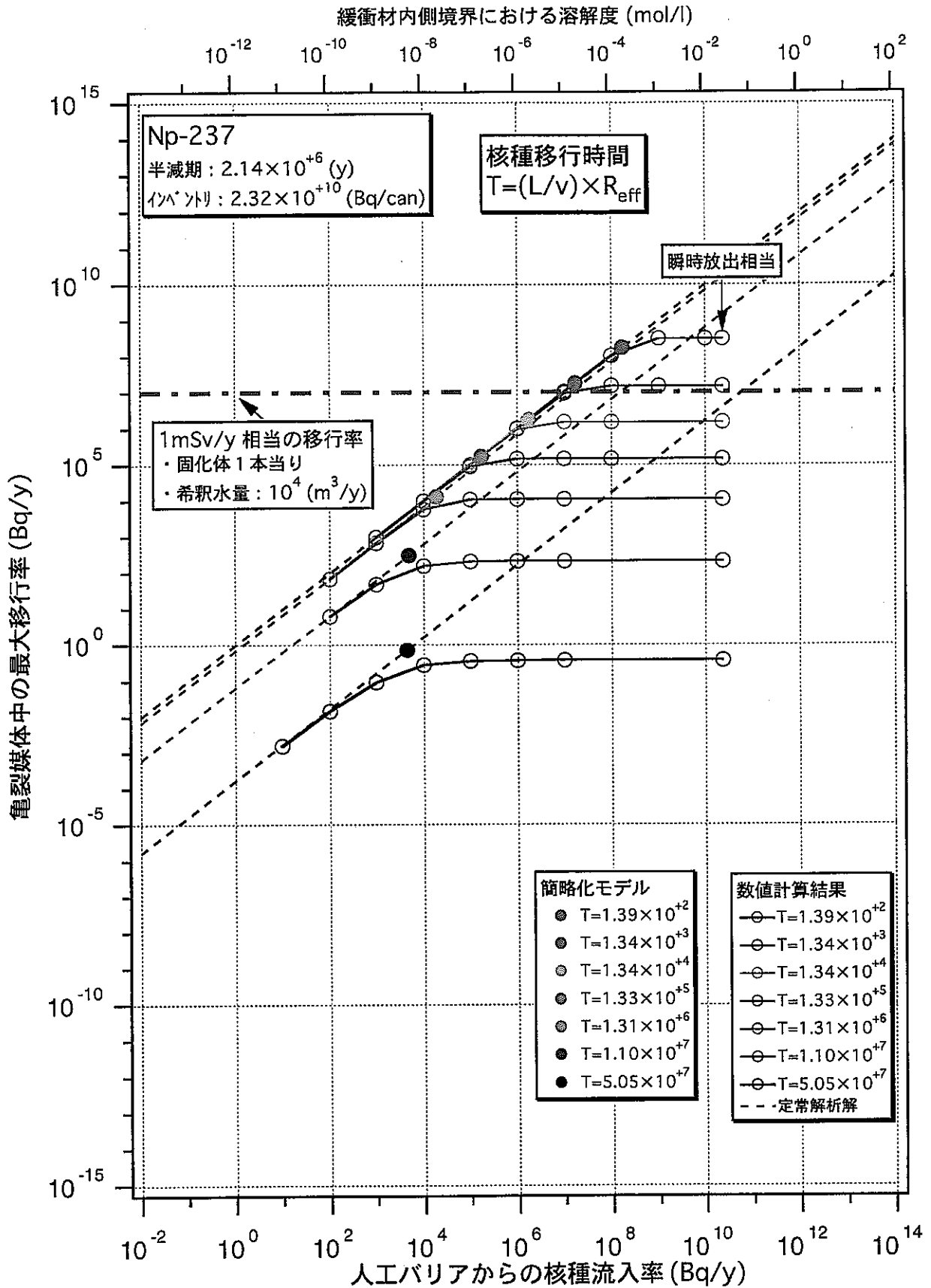
図添-25 マトリクス拡散による遅延効果に対する
 パラメータの影響特性 (U-238)



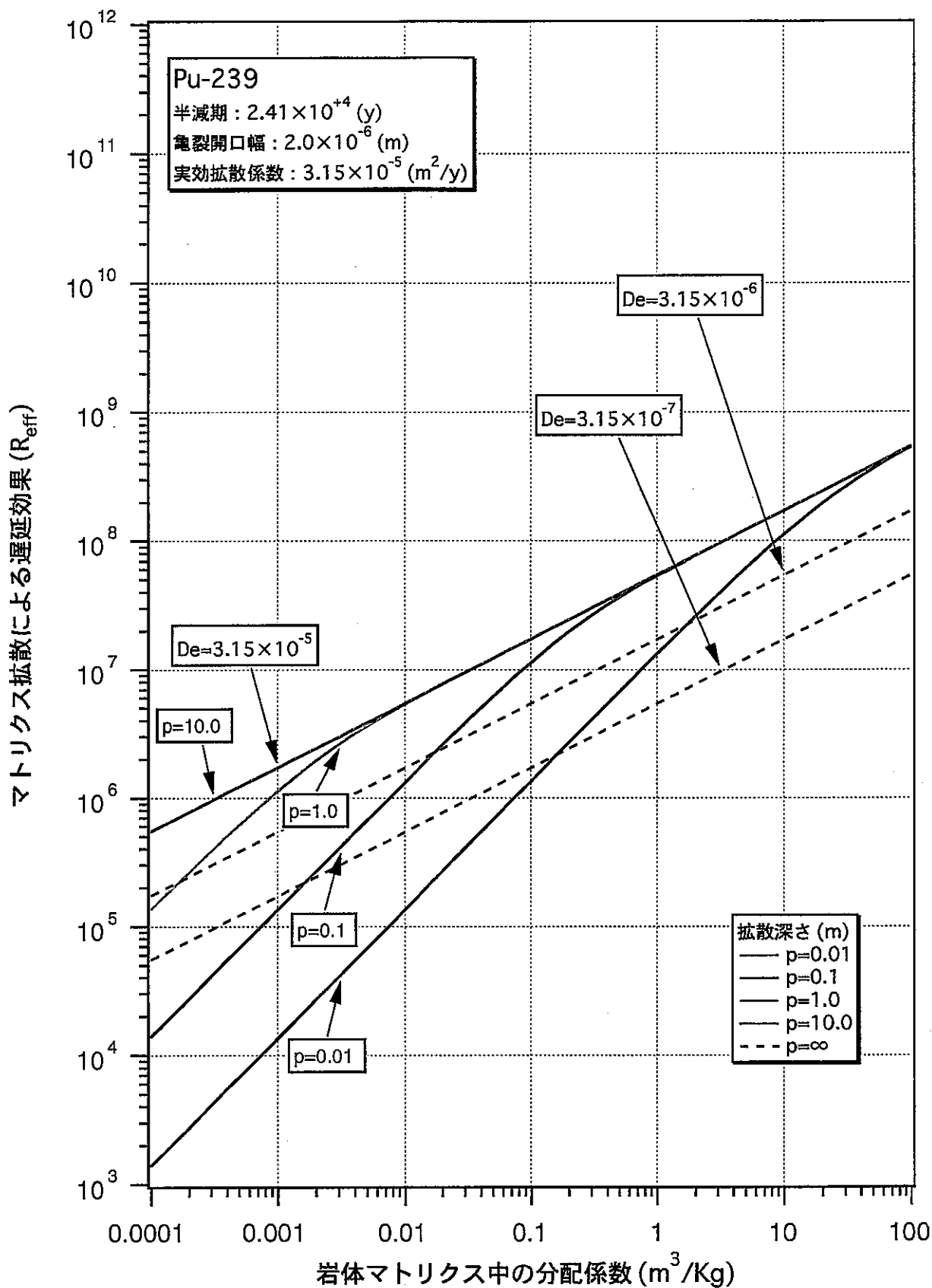
図添-26 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (U-238)



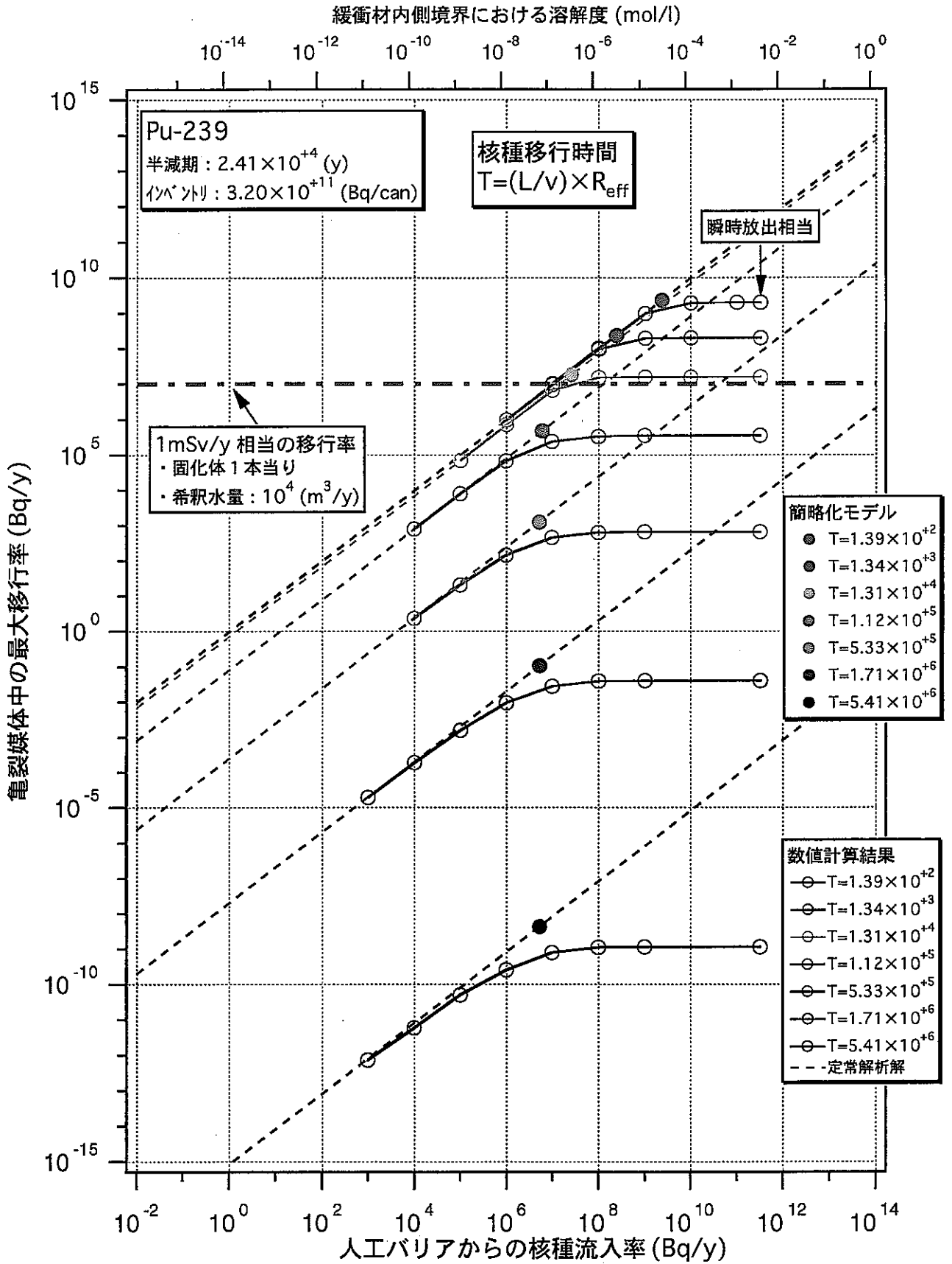
図添-27 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性 (Np-237)



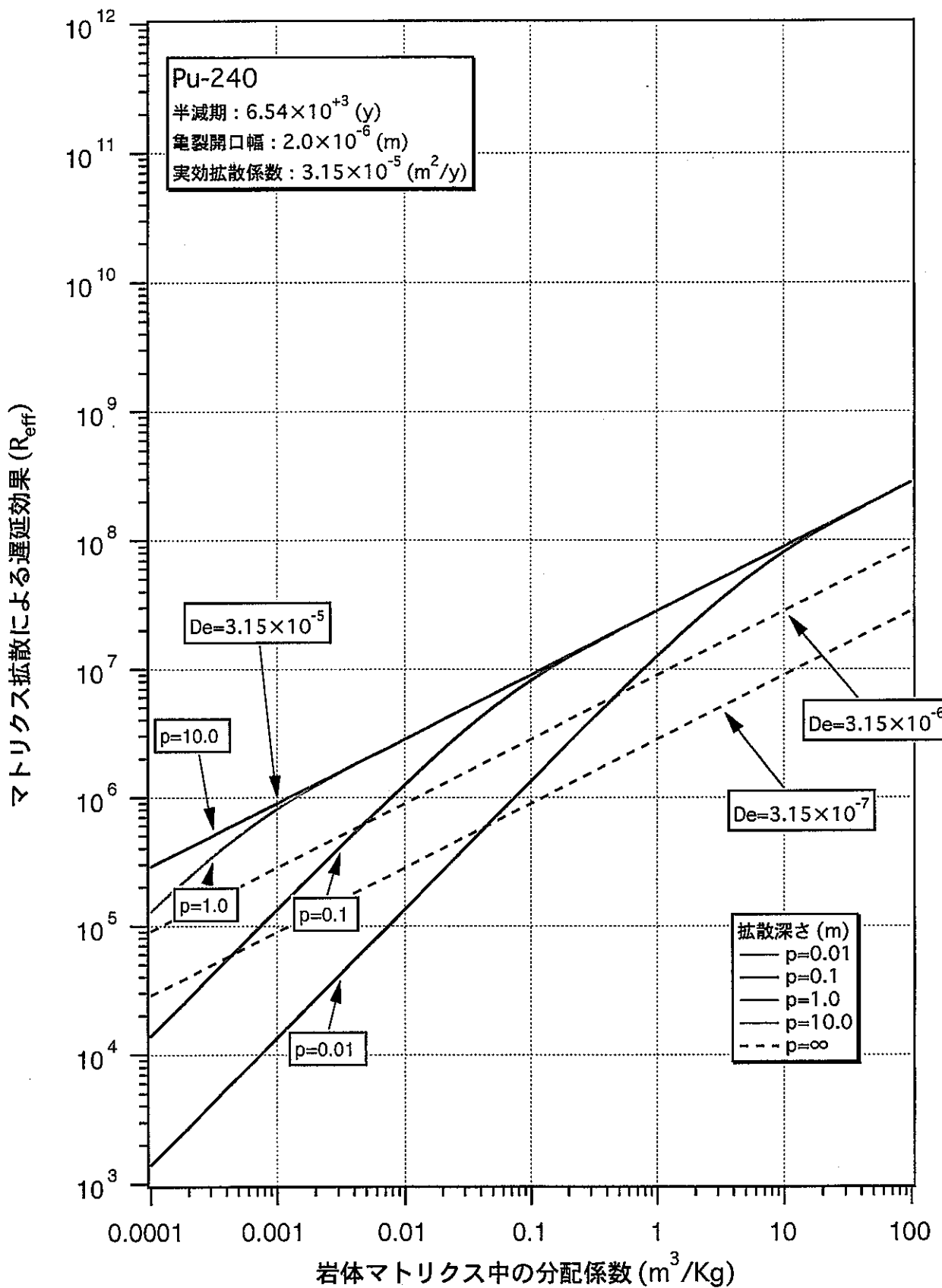
図添-28 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (Np-237)



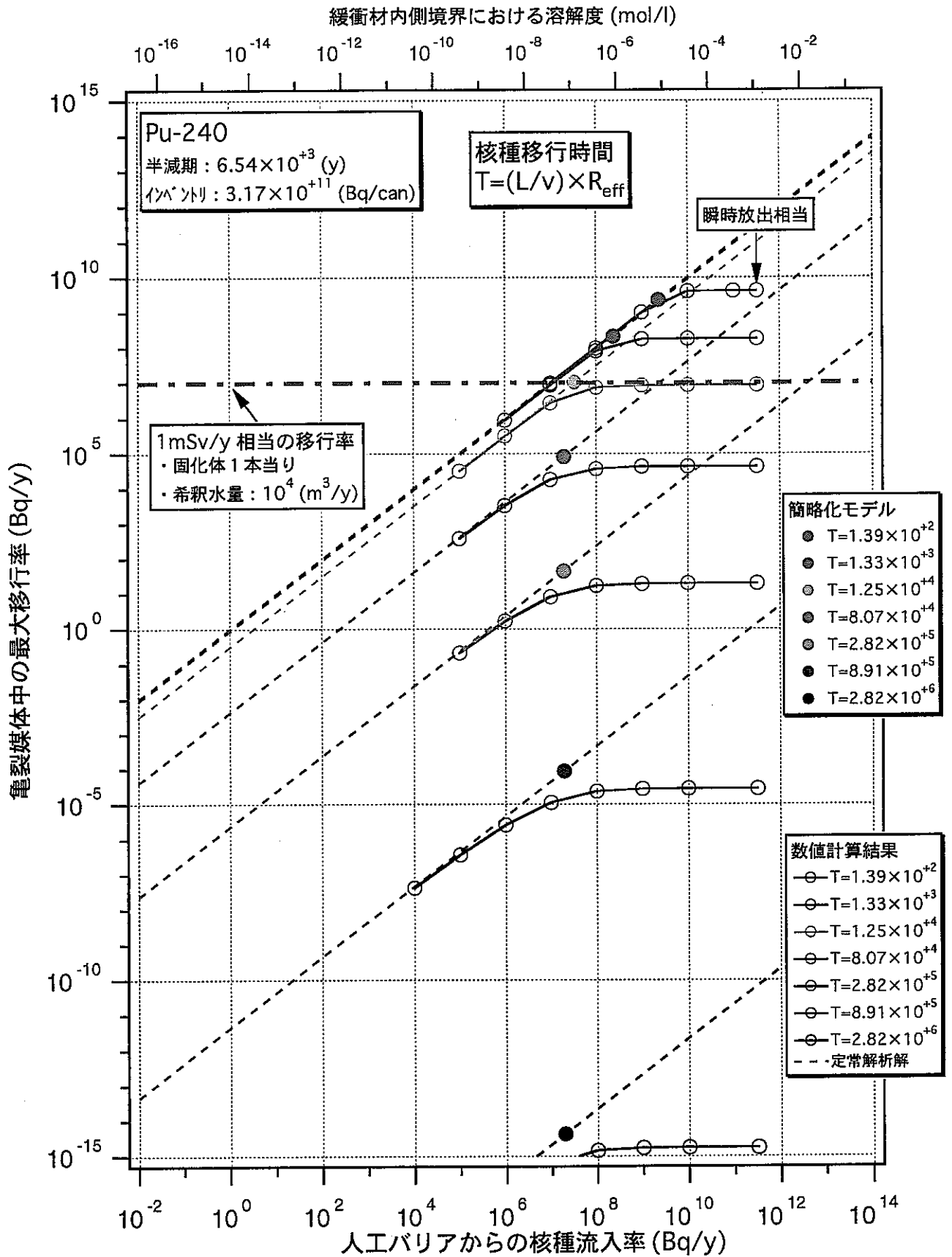
図添-29 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性 (Pu-239)



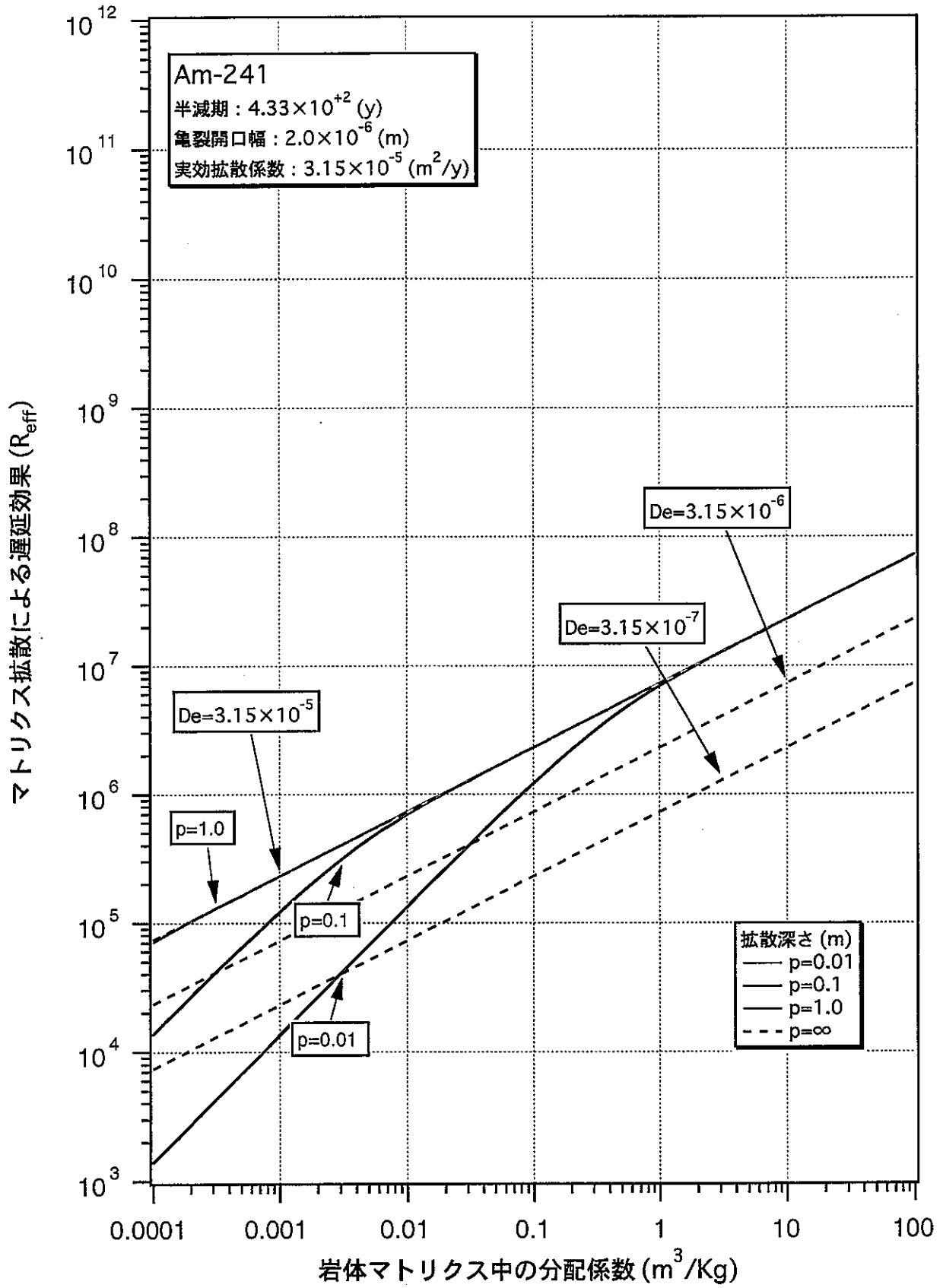
図添-30 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (Pu-239)



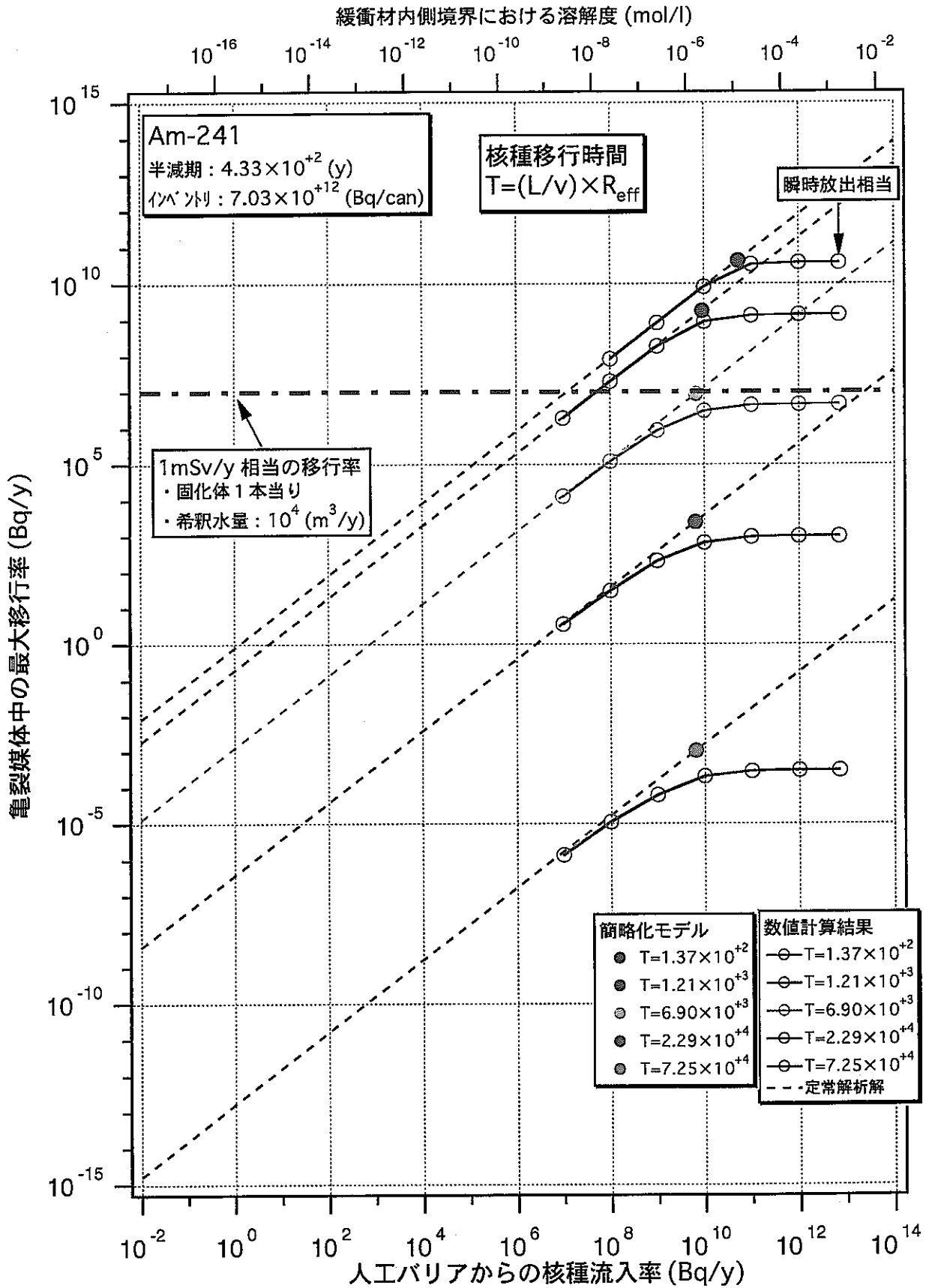
図添-31 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性 (Pu-240)



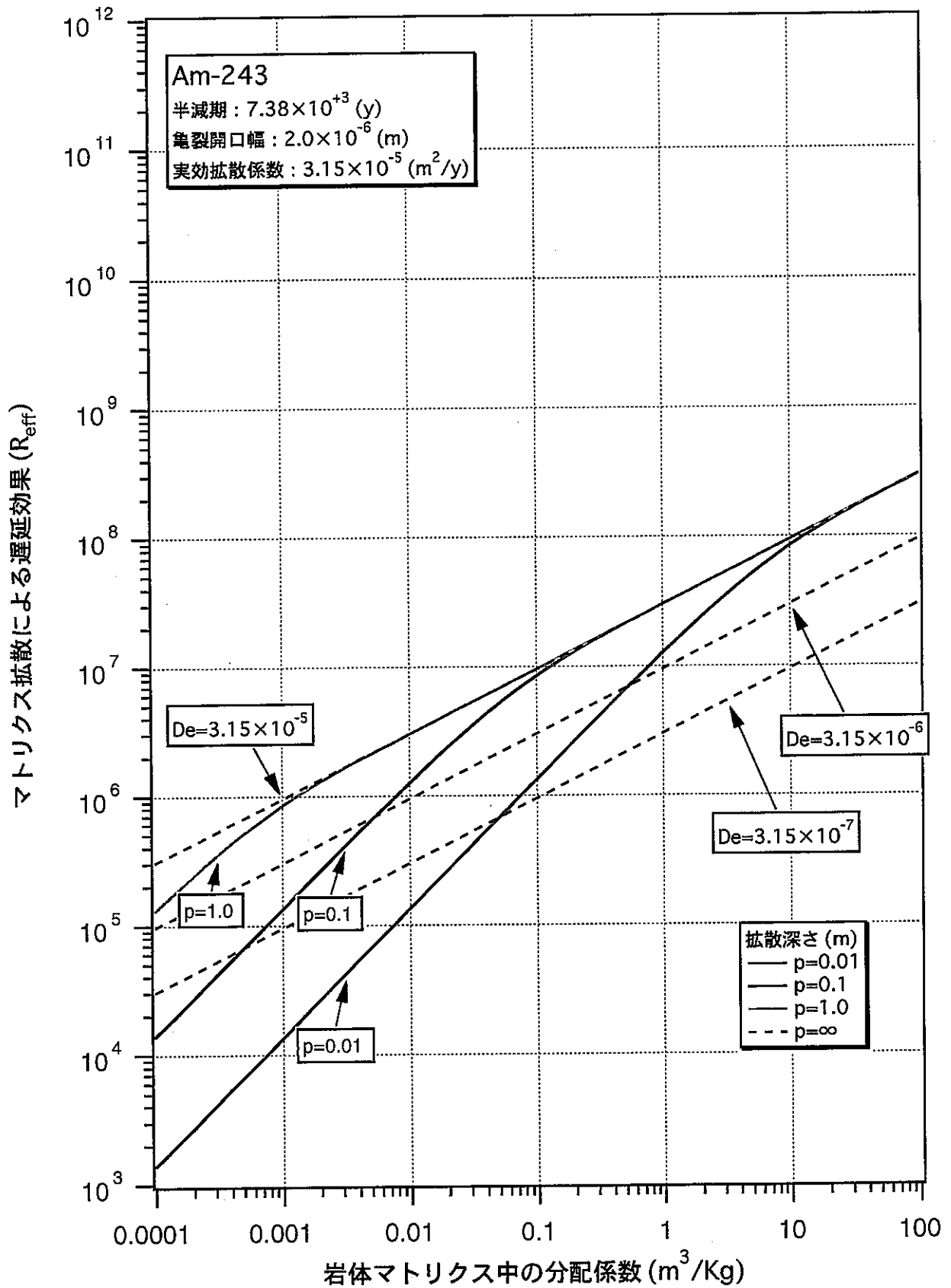
図添-32 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (Pu-240)



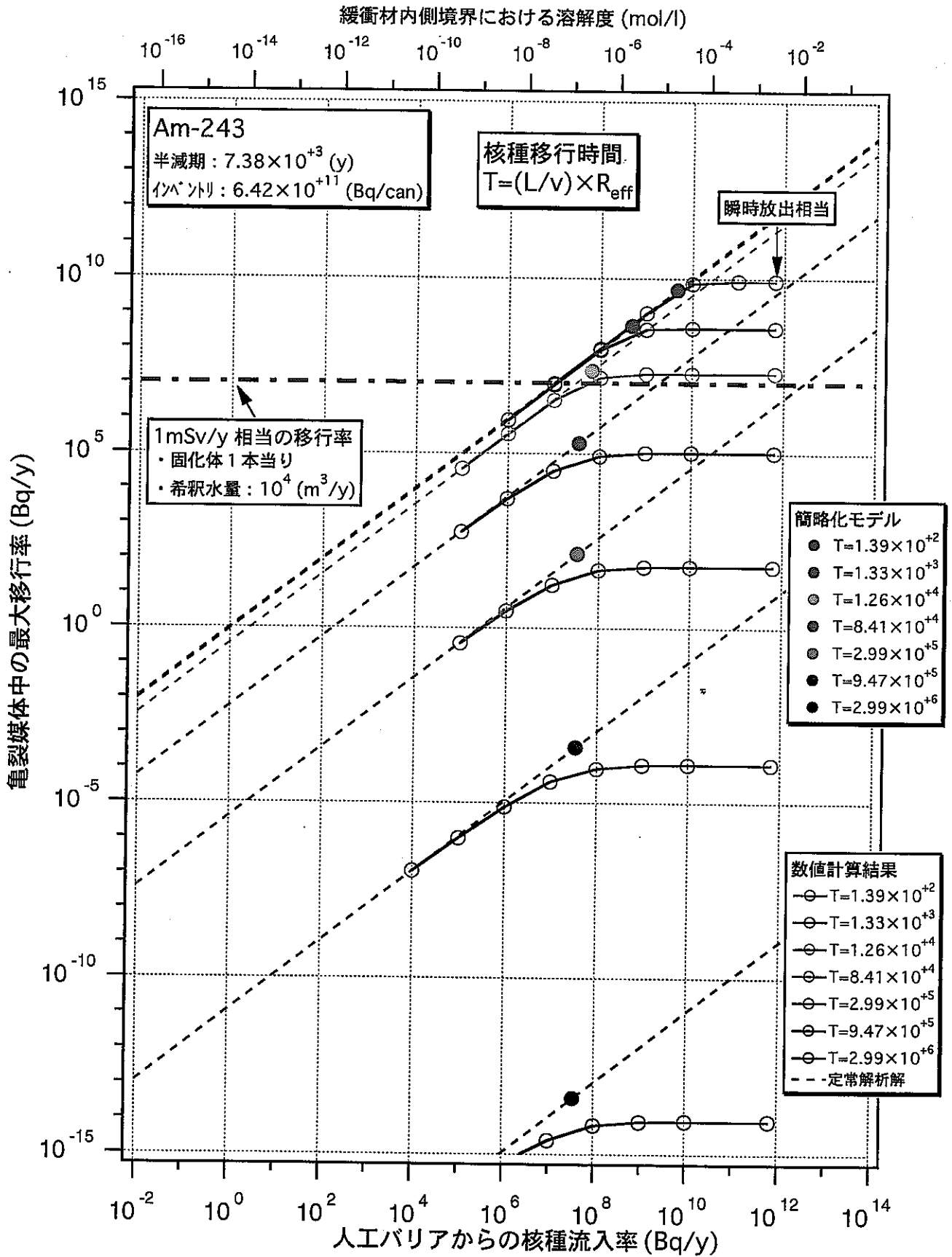
図添-33 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性 (Am-241)



図添-34 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (Am-241)



図添-35 マトリクス拡散による遅延効果に対するパラメータの影響特性 (Am-243)



図添-36 亀裂媒体中の最大移行率に対する人工バリアからの流入率と核種移行時間の関係 (Am-243)