

ニアフィールド水理／核種移行評価モデル の整備・統合化に関する研究

(核燃料サイクル開発機構 研究委託内容報告書)

1999年2月

株式会社 三菱総合研究所

ニアフィールド水理／核種移行評価モデルの整備・統合化に関する研究

株式会社 三菱総合研究所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,
Japan

©核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute) , 1999

ニアフィールド水理／核種移行評価モデルの整備・統合化に関する研究

(核燃料サイクル開発機構 研究委託内容報告書)

長坂和佳^{*}，中島研吾^{*}

要 旨

連続体モデルを用いたニアフィールド多孔質岩盤中の水理／核種移行評価は以下のような手順によって実施されている：

- ・三次元飽和・不飽和浸透流解析コード「TAGSAC」により三次元不均質多孔質岩盤中の地下水流れを解く
- ・核種移行経路抽出コード「TR3D」により流れ場の中から流線に沿った核種移行経路とその経路上の情報を抽出する
- ・一次元核種移行解析コード「CRYSTAL」により抽出した各経路での核種移行を解析する

本研究では、一連の核種移行評価体系を整備・統合化し、各解析コード間でのデータ受け渡しを自動化するとともに、不均質場や移行経路等の可視化のためのプリ・ポスト環境の整備を実施した。また、第2次取りまとめに向けた多孔質岩盤中の核種移行計算を実施した。

本報告書は株式会社三菱総合研究所が核燃料サイクル開発機構の委託により実施した研究成果に関するものである。

機構担当部課室：東海事業所環境保全センター 処分研究部 システム解析グループ

※ 株式会社 三菱総合研究所 原子力システム研究部

Development and Integration of Simulation Models for Nearfield Groundwater Flow and
Radionuclide Transport Computation

Kazuyoshi NAGASAKA and Kengo NAKAJIMA*

Abstract

Groundwater flow and radionuclide transport computations in nearfield heterogeneous porous media are carried out in the following way using continuum analysis model:

- "TAGSAC" solves three-dimensional saturated/unsaturated groundwater flow equation in nearfield heterogeneous porous media using finite element method (FEM).
- "TR3D" calculates streamlines by randomwalk particle tracking method according to potential distribution provided by TAGSAC
- These streamlines are introduced into one-dimensional radionuclide transport analysis code "CRYSTAL"

In this research, these processes were integrated into one system and all operation including data handling can be automatically done in this system. Pre-processing and post-processing procedure for modeling and visualization were also developed. Groundwater flow and radionuclide transport computations in nearfield heterogeneous porous media are carried out using this system.

This work was performed by Mitsubishi Research Institute, Inc. under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison : Waste Isolation Research Division, Tokai Works.

* Mitsubishi Research Institute, Inc.

目次

要旨

1. 概要	1
1.1 研究の目的	1
1.2 研究の範囲	1
1.3 研究の内容	2
2. ニアフィールド水理／核種移行計算モデルの整備	4
2.1 概要	4
2.2 使用法	6
2.3 入出力サンプル	15
3. ニアフィールド水理／核種移行計算モデルのポスト環境整備	20
4. 多孔質媒体中の性能評価計算	23
4.1 概要	23
4.2 解析対象	25
4.3 解析条件	26
4.4 解析結果	30
5. まとめ	155

参考文献

1. 概要

1.1 研究の目的

連続体モデルを用いたニアフィールド多孔質岩盤中の核種移行評価に関連する一連の解析コードの開発と検証によって、これらのコードを体系化したニアフィールド水理／核種移行評価手法として確立されている。すなわち、三次元飽和・不飽和浸透流解析コード「TAGSAC」により三次元不均質多孔質岩盤中の地下水流れを解き、核種移行経路抽出コード「TR3D」により流れ場の中から流線に沿った核種移行経路とその経路上の情報を抽出し、一次元核種移行解析コード「CRYSTAL」により抽出した各経路上での核種移行を解析することによってニアフィールド水理／核種移行を評価する手法が確立されている。

本研究では、一連の核種移行評価体系を整備・統合化し、各解析コード間でのデータ受け渡しを自動化するとともに、不均質場や移行経路等の可視化のためのプリ・ポスト環境の整備を行う。また、第2次取りまとめに向けた多孔質岩盤中の核種移行計算を実施する。

1.2 研究の範囲

本研究の研究範囲を以下に示す：

- (1) ニアフィールド水理／核種移行計算モデルの整備
- (2) ニアフィールド水理／核種移行計算モデルのポスト環境整備
- (3) 多孔質媒体中の性能評価計算

1.3 研究の内容

1.3.1 ニアフィールド水理／核種移行計算モデルの整備

一連の多孔質岩盤中のニアフィールド水理／核種移行評価体系における評価解析の精度を向上させるとともに、第2次取りまとめに向けた解析への実用性を向上させるために解析コード間でのファイル受け渡しを自動化した。具体的には、以下の項目を実施した：

- 不均質場発生プログラム「SGSIM」により発生させた差分メッシュ上の不均質場の情報を「TAGSAC」の有限要素メッシュ上の情報に受け渡すためのインタフェースを開発した。
- 既往の文献に基づき透水係数と空隙率の関係式を導き、その関係式に基づいて不均質場発生プログラムより得られた不均質透水係数場に空隙率を割り付けるためのプログラムを作成した。
- 複数の核種移行経路上での「CRYSTAL」解析結果の重ね合せを自動化した。

1.3.2 ニアフィールド水理／核種移行計算モデルのプリ・ポスト環境整備

パブリックドメインソフト「mpeg-viewer」を用いて三次元不均質場の構造と核種移行経路および核種移行経路上での核種の動きをアニメーションにより可視化した。

1.3.3 多孔質媒体中の性能評価計算

1.3.2の成果を踏まえたニアフィールド水理／核種移行評価手法を用いて第2次取りまとめに向けた多孔質岩盤中の核種移行評価計算を実施した。計算は以下の手順で実施した：

- 既往の文献に基づいて設定された我が国の岩盤における不均質構造の地質統計学パラメータ（SGSIM用）を用いて不均質場を構築した

- 同じパラメータに対して構築する不均質場のリアライゼーションの数は、複数のリアライゼーションに対して得られた計算結果を統計処理し、平均値の変動が顕著でなくなる数を同定して決定する方法を開発した。
- 不均質場における移流・分散現象を一次元モデルで表現する際に必要となる核種移行経路の本数と各移行経路への入力ソースへの配分率は、三次元移流・分散モデル「TR3D」との比較解析により同定した。

2章 ニアフィールド水理/核種移行計算の整備

2.1 概要

性能評価の計算をするためには、以下に示す三種類のコードを使用する必要がある。

① 「S_SURF3D」

有限要素法による三次元飽和水理解析コード。

地下水の流れ場を計算する。

② 「TR3D/info」

パーティクル・トラッキング法による流線情報の抽出コード。

流れ場の主要ルートを検索する。

③ 「CRYSTAL」

逆ラプラス法による一次元核種移行計算コード。

ある距離までの放射線量を計算する。

と、3つの計算コードを実行する必要がある。

それぞれに入力ファイルを作成しなければならないため、多くの手間を必要とした。

そこで計算手順を簡素化するため、UNIX上のシェル機能を利用して核種移行計算に用いている各ツール類の統合化を効率的な作業を実施することを可能となった。

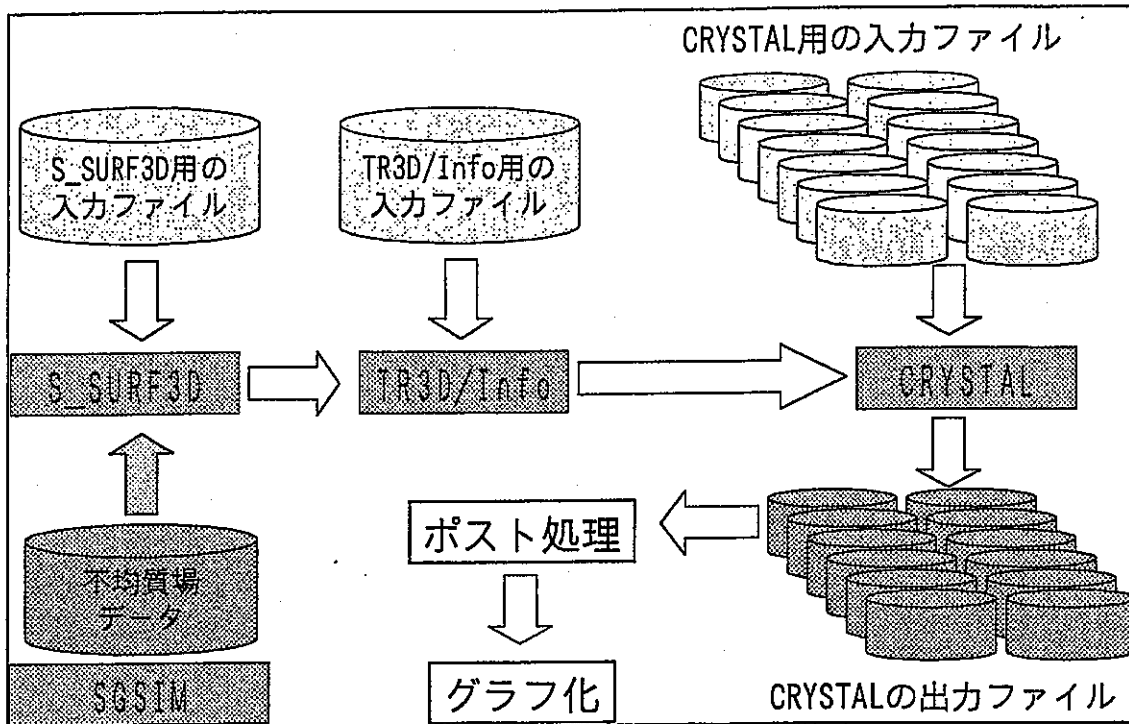
開発言語としてb-shを用い、UNIX上の基本的なコマンドをshスクリプトに統合化することによって本システムを起動する。

基本コマンドとして、

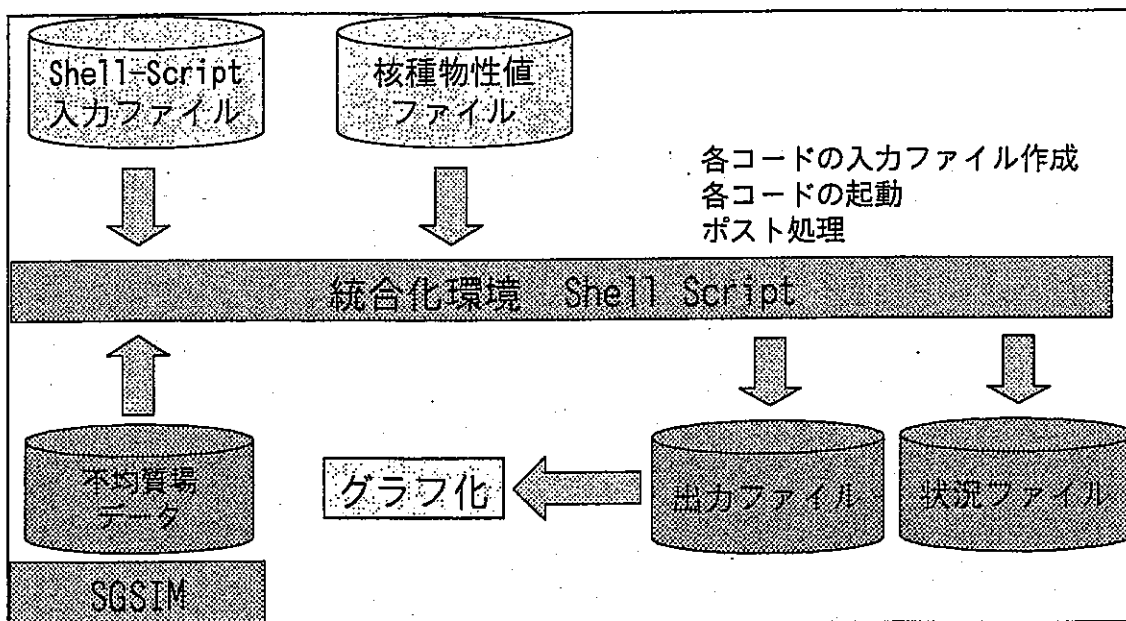
- ・ sed : 文字列置換のためのインタープリタ言語
- ・ awk : 文字列操作のためのインタープリタ言語
- ・ grep : 文字列検索のための命令

などのコマンドを使用した。

標準のUNIXシステムであれば、本システムを容易に動作することが可能である。図2.1-1に従来の性能評価計算の手順と統合化環境下での性能評価計算手順を示す。



従来の性能評価計算手順



統合化環境下での性能評価計算の手順

図 2.1-1 システム概要

2.2 使用法

ユーザーは以下の手順でシェルを起動する。

- ①シェルをコントロールするための「コントロール・ファイル」を作成する。
- ②計算に必要なファイル、「核種物性ファイル」などを準備する。
- ③シェルの起動を行う。(2.3.3実行方法を参照)

「シェル・スクリプト」は、ユーザーの作成した「コントロール・ファイル」の文法のチェックを行い必要な計算コードの入力ファイルを作成し、計算コードを起動させる。この「シェル・スクリプト」には以下の機能が実装されている。

- ①計算条件やエラー出力などの情報を「ステイタス・ファイル」に格納する。
- ②計算状況を確認するための「ログ・ファイル」の作成も行う。
- ③各計算コードの結果は、ケース名と同名のディレクトリを作成し、その中に保存をする。
- ④計算の終了したケースについては、ディレクトリごと圧縮をし保存することも可能である。

2.2.1 コントロールファイル・フォーマット

コントロールファイルの基本仕様を以下に記す。

ユーザーの作成する「コントロールファイル」はテキスト形式とする。

「コントロールファイル」には、ケース名や計算コードの起動制御、計算条件を入力する。

「コントロールファイル」は”*”から始まるコマンドと、コマンドに続くオプションより構成される。

また、各コマンドは、一部例外を覗き*BEGINから始まり、*ENDで終わる。

コマンドは以下の通りである：

(1)コマンド

*CASE

文法：*CASE OPTION

用途：ケース名の指定。

ケース名はユーザーが任意に設定できる。

*SSURF3D

文法：*SSURF3D OPTION[0/1]

用途：ポテンシャル解析コードS_SURF3Dの起動制御を行う。

OPTIONに1を指定するとコードを起動し、0を指定すると起動しない。

*TR3D

文法：*TR3D OPTION[0/1]

用途：流線情報抽出コードTR3D/Infoの起動制御を行う。

OPTIONに1を指定するとコードを起動し、0を指定すると起動しない。

*CRYSTAL

文法：*CRYSTAL OPTION[0/1]

用途：一次元核種移行解析コードCRYSTALの起動制御を行う。

OPTIONに1を指定するとコードを起動し、0を指定すると起動しない。

*BEGIN

文法：*BEGIN OPTION[SSURF3D/TR3D/CRYSTAL]

用途：各計算コードの計算条件の入力開始宣言。

OPTIONにSSURF3Dを指定するとS_SURF3Dの入力フィールドと判断する。

OPTIONにTR3Dを指定するとTR3D/Infoの入力フィールドと判断する。

OPTIONにCRYSTALを指定するとCRYSTALの入力フィールドと判断する。

*END

文法：*END OPTION[SSURF3D/TR3D/CRYSTAL]

用途：各計算コードの計算条件の入力終了宣言。

OPTIONにSSURF3Dを指定するとS_SURF3Dの入力フィールドと判断する。

OPTIONにTR3Dを指定するとTR3D/Infoの入力フィールドと判断する。

OPTIONにCRYSTALを指定するとCRYSTALの入力フィールドと判断する。

(2)カード

各計算コードの入力は、*BEGIN~*END に挟まれた、領域に"! "から始まるカードを用いて指定する。

コマンドは以下の通りである：

(A)三次元水理解析(*SSURF)

!GRID

文法：!GRID OPTION

用途：グリッドデータの指定。

!MATERIAL

文法：!MATERIAL OPTION

用途：透水係数データの指定。

!OUTPUT

文法：!OUTPUT OPTION

用途：出力ファイルの指定。

!SIGMA

文法：!SIGMA OPTION

用途：ソルバーパラメータの設定。

!EPS

文法：!EPS OPTION

用途：打ち切り誤差の設定の設定。

!ITERMAX

文法：!ITERMAX OPTION

用途：反復回数の設定。

!PARAM

文法：!PARAM OPTION

用途：ソルバーパラメータの設定。

!SOLVER

文法：!SOLVER OPTION

用途：ソルバーフラグ

(B)流線情報の抽出(*TR3D)

!GRID

文法：!GRID OPTION

用途：グリッドデータの指定

!FLOWFIL

文法：!FLOWFIL OPTION

用途：速度ベクトルファイル(S_SURFの結果)の指定。

!OUTPUT

文法：!OUTPUT OPTION

用途：出力ファイルの指定。

!DISPLACE

文法：!DISPLACE OPTION

用途：評価断面までの距離を指定。

!SPOINT

文法：!SPOINT OPTION1 OPTION2 OPTION3

用途：追跡粒子初期座標の始点の指定。

!EPOINT

文法：!EPOINT OPTION1 OPTION2 OPTION3

用途：追跡粒子初期座標の終点の指定。

!ICUT

文法：!ICUT OPTION1 OPTION2 OPTION3

用途：追跡粒子の X 方向、Y 方向、Z 方向の切り取り数の指定。

!MINTIME

文法：!MINTIME OPTION

用途：最小刻み時間の設定。

!MAXTIME

文法：!MAXTIME OPTION

用途：最大刻み時間の設定

!CFL

文法：!CFL OPTION

用途：クーラン条件の設定。

!SOLVER

文法：!SOLVER OPTION

用途：ソルバーの指定。

OPTION=1：時間前進

OPTION=2：時間後退

OPTION=3 : 時間前進および時間後退

(C)一次元核種移行計算

!VELOCITY

文法 : !VELOCITY OPTION

用途 : 速度データ (TR3D によって生成されたファイル) の指定。

!STREAM

文法 : !STREAM OPTION

用途 : 流線の数の指定。

!MINTIME

文法 : !MINTIME OPTION

用途 : 計算最小時間の設定。

!MAXTIME

文法 : !MAXTIME OPTION

用途 : 計算最大時間の設定。

!TIMESTEP

文法 : !TIMESPTep OPTION

用途 : 出力時間の設定。

!DISPLACE

文法 : !DISPLACE OPTION

用途 : 評価距離の指定。

!CRYFILE

文法 : !CRYFILE OPTION

用途 : 計算を行う核種物性ファイルの指定。

核種物性ファイルは別途作成する必要があります。

2.2.2 核種物性ファイルのフォーマット

核種物性ファイルの使用を以下に示す。

ユーザーの作成する「核種物性ファイル」はテキスト形式とする。

「核種物性ファイル」には、ソースタームのファイル名や崩壊系列など計算条件を入力する。

「核種物性ファイル」は”*”から始まるコマンドと、コマンドに続くオプションより構成される。

また、各コマンドは、一部例外を覗き*BEGINから始まり、*ENDで終わる。

コマンドは以下の通りである：

(1)コマンド

*LINE

文法：*CASE OPTION[:OPTIN:OPTIN...]

用途：計算を行う核種および崩壊系列の名前を指定する。

*BEGIN

文法：*BEGIN OPTION

用途：核種および崩壊系列の計算条件の入力開始宣言。

*END

文法：*END OPTION

用途：核種および崩壊系列の計算条件の入力終了宣言。

(2)カード

各計算コードの入力は、*BEGIN~*END に挟まれた、領域に"! "から始まるカードを用いて指定する。

コマンドは以下の通りである：

!NAME

文法：!NAME OPTION

用途：核種および崩壊系列の名前の指定。

複数の核種・系列を計算する場合は、": "で区切る。

!TIME

文法：!TIME OPTION

用途：半減期の指定。

複数の核種・系列を計算する場合は、": "で区切る。

!RATI

文法：!RATI OPTION

用途：遅延係数の指定。

複数の核種・系列を計算する場合は、": "で区切る。

!INPUT

文法：!INPUT OPTION

用途：ソースタームの指定。

!OUTPUT

文法：!OUTPUT OPTION

用途：出力ファイルの指定。

2.2.3 実行方法

SHELL は、プロンプト上から以下のコマンドを実行することによって起動する。

```
%jnc.sh -i コントロールファイル
```

SHELL には以下のオプションがある。

-i : コントロールファイルの指定

ユーザーの作成した「コントロール・ファイル」を指定する。

-g : デバッグモード

ユーザーの作成した「コントロール・ファイル」の文法をチェックする。

このモードでは、文法のみをチェックするため、「コントロール・ファイル」で指定している他のファイルのチェックは行わない。

-h : ヘルプファイルの表示

簡単なヘルプを表示する。

-v : バージョン情報の表示

バージョンのチェックを行う。

シェル・スクリプトをユーザーが書き直したときなど、スクリプト内のバージョン番号を変えておくと有効に利用できる。

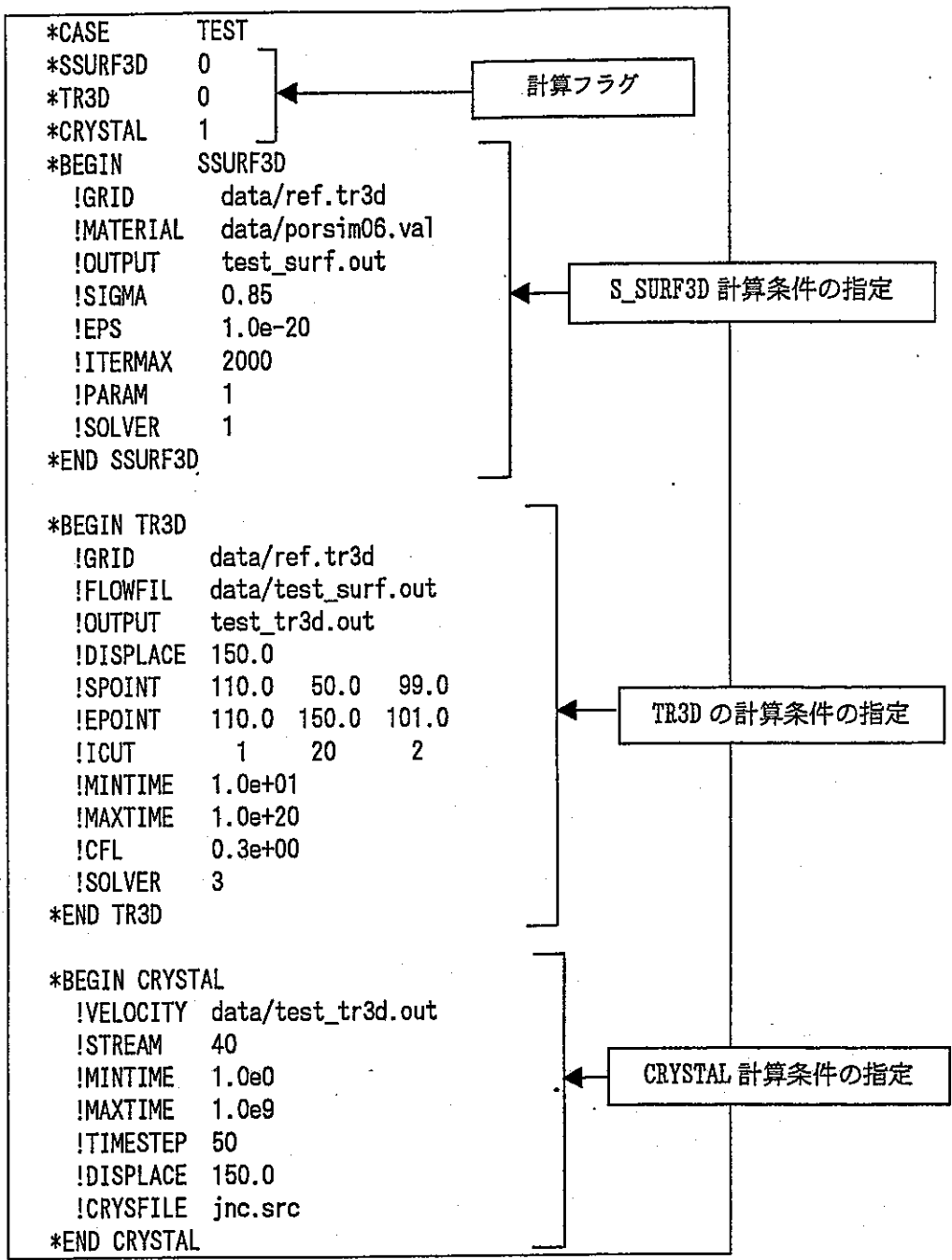
2.3 入出力サンプル

2.3.1 コントロールファイルサンプル

入力ファイルのサンプルとして、以下の条件での計算を行う「コントロール・ファイル」を示す。

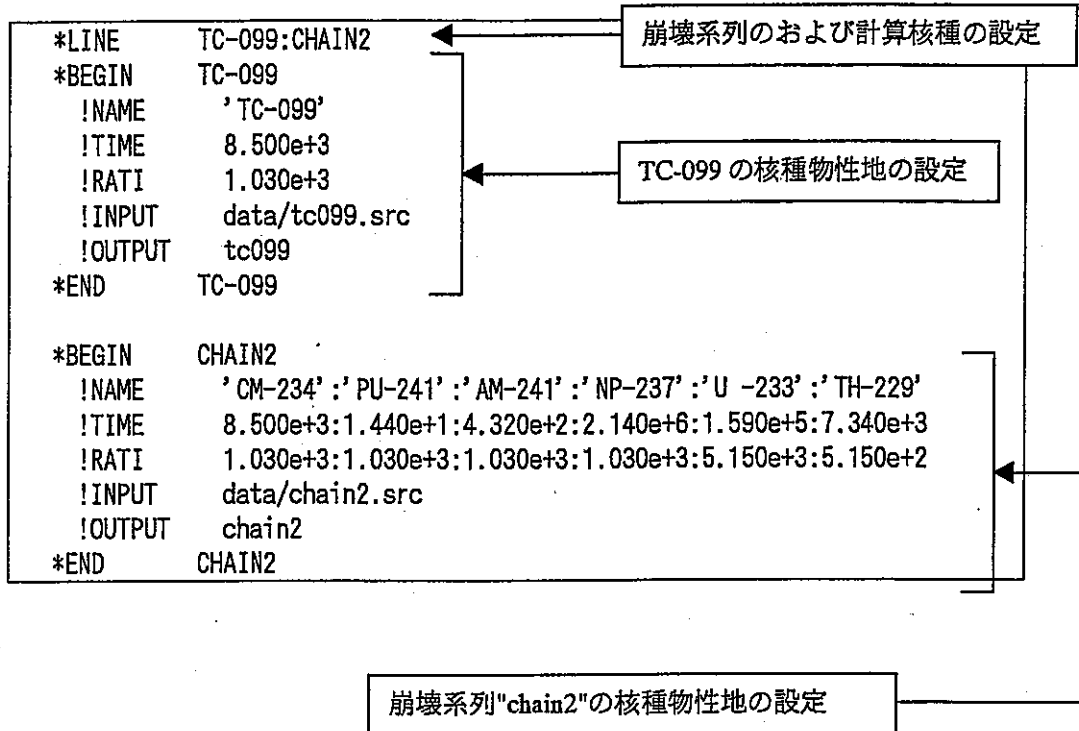
例に示すコントロール・ファイルは、三次元の水理解析および流線情報の抽出はすでに終了しているものとして、一次元核種移行計算コードである CRYSTAL のみの計算を実施するためのものである。

以下にコントロールファイルのサンプルを示す。



2.3.2 核種物性ファイル

以下に核種物性ファイルのサンプルを示す。



2.3.2 出力ファイル

出力ファイルとして、各計算コードによる出力ファイルの他、計算の実行条件を示す、

ステイタス・ファイルと計算の実行状態を示すログファイルを出力する。

以下に出力ファイルのサンプルを示す。

(ステイタス・ファイル)

```
Mon Dec 14 21:13:40 JST 1998
TEST

---- ECHO USER INPUT ----
*CASE      TEST

*SSURF3D   0
*TR3D      0
*CRYSTAL   1

*BEGIN     SSURF3D
!GRID      data/ref.tr3d
!MATERIAL   data/porsim06.val
!OUTPUT     test_surf.out
!SIGMA      0.85
!EPS        1.0e-20
!ITERMAX    2000
!PARAM      1
!SOLVER     1
*END SSURF3D

*BEGIN TR3D
!GRID      data/ref.tr3d
!FLOWFIL    data/test_surf.out
!OUTPUT     test_tr3d.out
!DISPLACE   150.0
!SPOINT     110.0  50.0  99.0
!EPOINT     110.0  150.0  101.0
!ICUT       1    20    2
!MINTIME    1.0e+01
!MAXTIME    1.0e+20
!CFL        0.3e+00
!SOLVER     3
*END TR3D

*BEGIN CRYSTAL
!VELOCITY   data/test_tr3d.out
!STREAM     40
!MINTIME    1.0e0
!MAXTIME    1.0e9
```

入力ファイルのエコー

```
!Timestep 50
!DISPLACE 150.0
!CRYSTFILE jnc.src
*END CRYSTAL
```

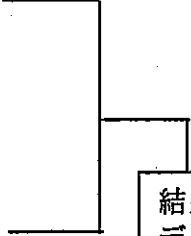
```
----- WORK DIRECTORY -----
DIRECTORY NAME : jnc.TEST.3411
S_SURF3D ..... jnc.TEST.3411/SURF
TR3D/info .... jnc.TEST.3411/TR3D
CRYSTAL ..... jnc.TEST.3411/CRTSTAL
```

```
----- SOLVER FLAG -----
S_SURF3D ..... NOT CALC
TR3D/info .... NOT CALC
CRYSTAL ..... CALC
```

```
----- SOLVER PARAMETER -----
```

```
* CRYSTAL
```

CARD	TYPE	INPUT
VELOCITY	(C)	data/test_tr3d.out
STREAM	(I)	40
MINTIME	(F)	1.0e0
MAXTIME	(F)	1.0e9
TIMESTEP	(I)	50
DISPLACE	(F)	150.0
CRYSTFILE	(C)	jnc.src



結果保存の
ディレクト
リー

3章 ニアフィールド水理／核種移行計算モデルのポスト環境整備

三次元可視化コード「FIELDVIEW」を使用して三次元不均質場の構造と核種移行経路及び核種の移動を表示した。「FIELDVIEW」の機能を使用して miff 形式のファイルを出力し、さらにパブリックドメインソフト「convert」によって mpeg 形式のファイルに変換した。

mpeg 形式のファイルはパブリックドメインソフト「mpeg viewer」によって PC 上でアニメーション表示が可能である。

以下に作図例を示す。

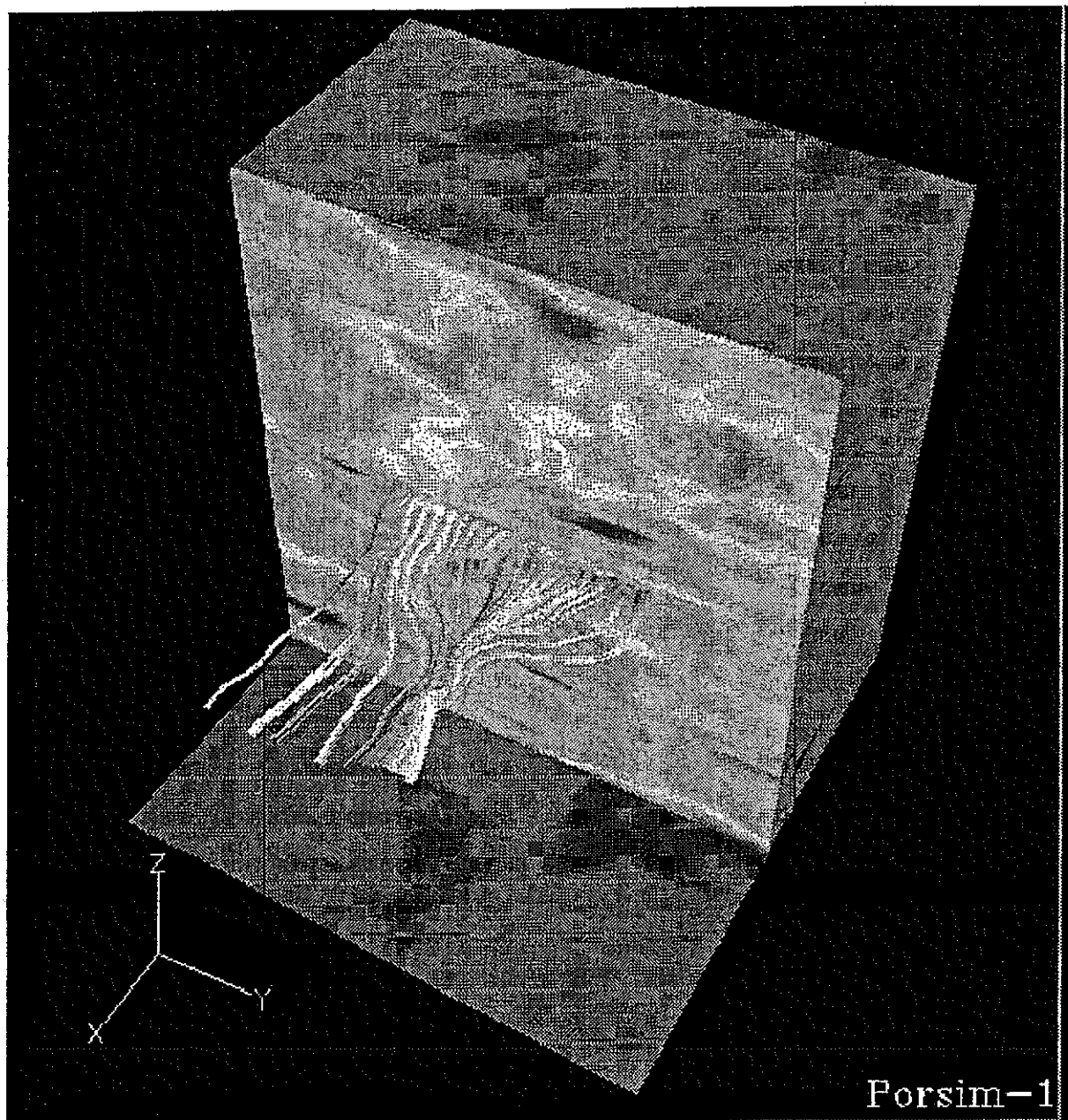


図 3.2-1 多孔質不均質場性能評価モデル（透水係数分布）と TR3D によって算出された流線（SGSIM アルゴリズム（Sequential Gaussian Simulation）によって算出された不均質場使用）

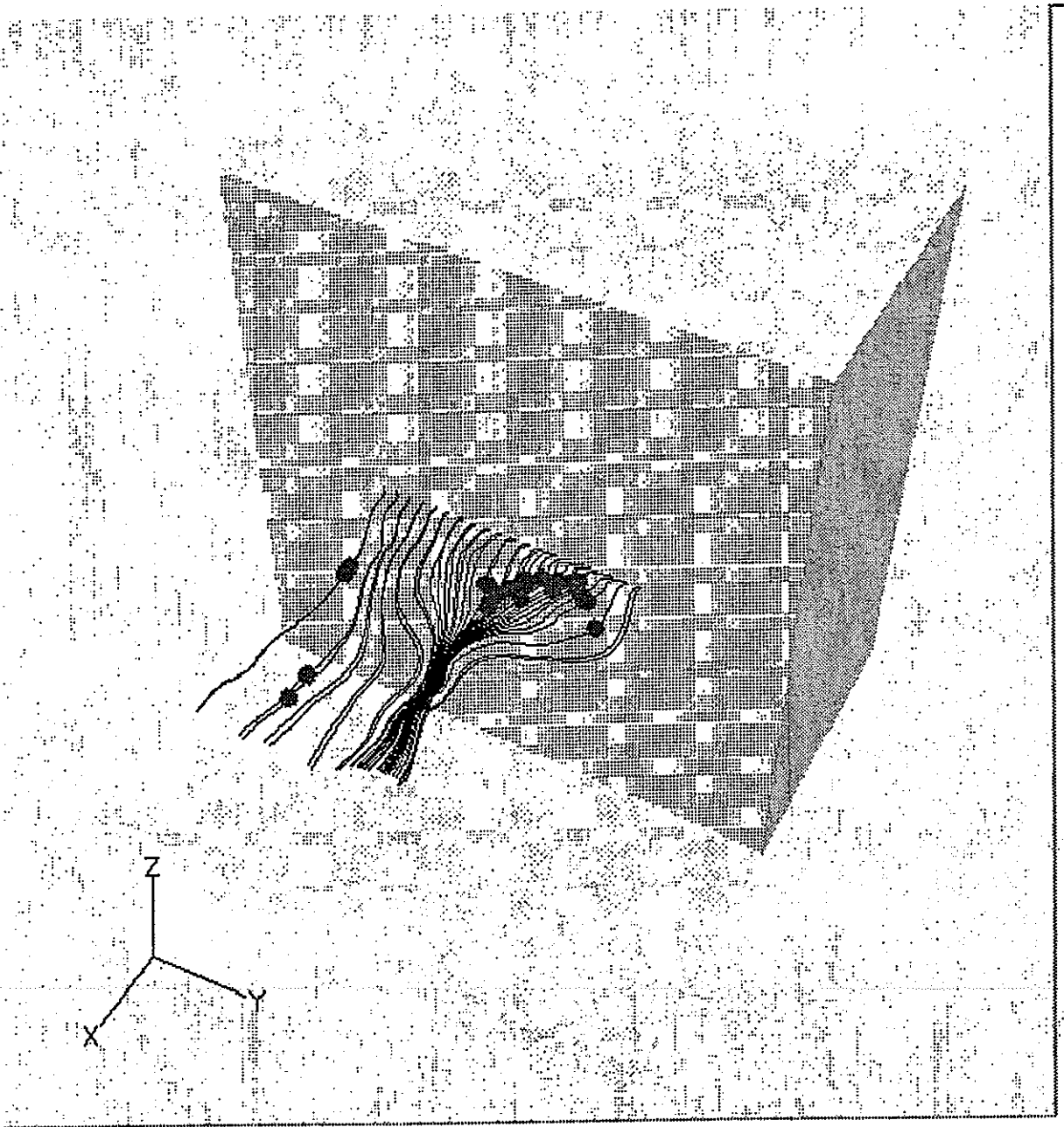


図 3.1-2 多孔質不均質場における TR3D によって算出された流線
(SGSIM (Sequential Gaussian Simulation) によって算出された不均質場使用)

4章 多孔質媒体中の性能評価計算

4.1 概要

地層内に収められたガラス固化体より流出した核種が地下水を媒体として断層へ至る経路を求め、核種の崩壊系列を考慮して断層での放射線量を予測することによって評価を行った。

ここでは、天然バリアとしての地層を多孔質媒体として取り扱いをした。

多孔質媒体中の性能評価計算は以下の手順で計算を行った。

① 三次元水理解析(S_SURF3D)

SGSIM アルゴリズム (Sequential Gaussian Simulation) によって算出された不均質場を用いて動水勾配を仮定することによって有限要素法により三次元の水理解析を行う。

その際、解析モデルの中央部には処分坑道および緩み域を模擬した領域を設る。処分坑道は地層領域に比べ透水係数を小さく仮定し、緩み域は地層領域に比べ透水係数を大きく仮定した。

② 流線情報の抽出(TR3D)

三次元水理解析によって求めた流れ場を用いて、追跡粒子を処分坑道の表面に配置し、パーティクルトラッキング法により地下水の流路を確定し流線毎に断層を仮定した面へ至る移行経路長および移行時間を求める。

③ 一次元核種移行計算(CRYSTAL)

求めた流線情報を使用して一次元の核種移行計算を行い、断層での放射線量を計算する。

図 4.1-1 に解析フローを示す。

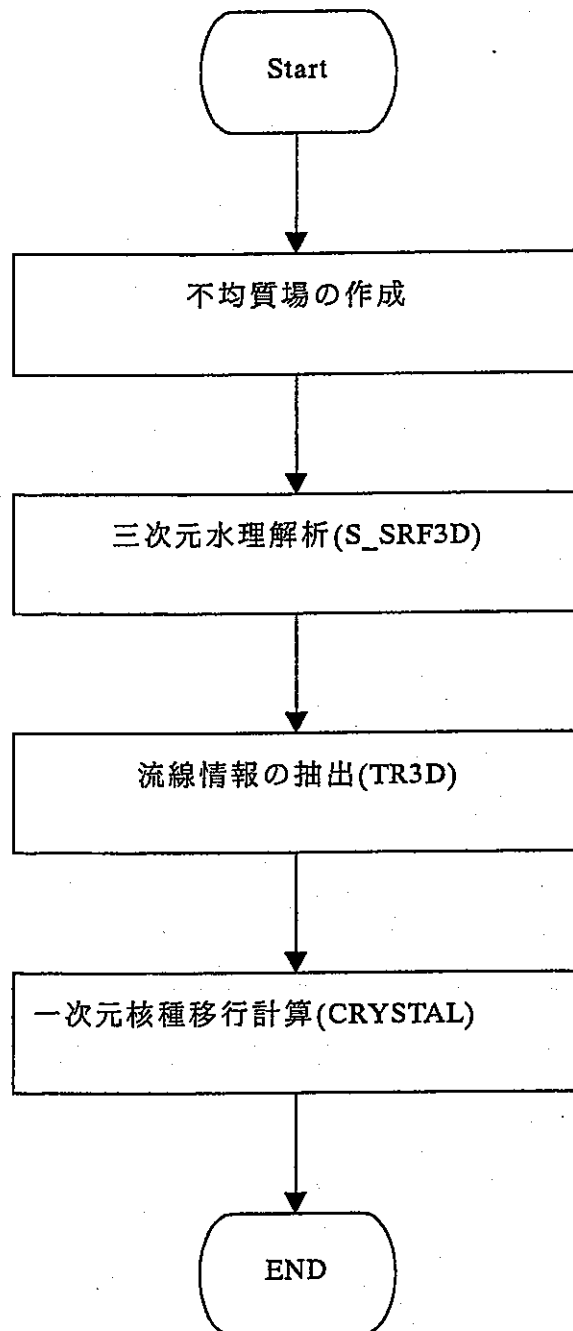


図 4.1-1 解析の流れ

4.2 解析対象

解析の対象として、200m 立法の流域を仮定した。

領域の中央部には処分坑道および緩み域を模擬した領域を仮定した。

処分坑道を模擬した領域では地層領域に比べ、透水係数を低く設定した(領域内で最も低い透水係数に対し 10^{-15} を掛けた値)。また、緩み域では地層領域に比べ透水係数を高く設定する(雰囲気の 100 倍の値)。

処分坑道および緩み域は、領域中央部に仮定し、Y 方向(処分坑道の伸びる方向)に 0~200m までを考慮した。

断層はモデル末端と仮定し、流線情報を抽出する際は、処分坑道表面から断層を仮定した面までに至る時間と距離を算出した。

処分坑道から断層を仮定した面までの距離は、およそ 100m となる。

解析モデルを図 4.2-1 に示す。

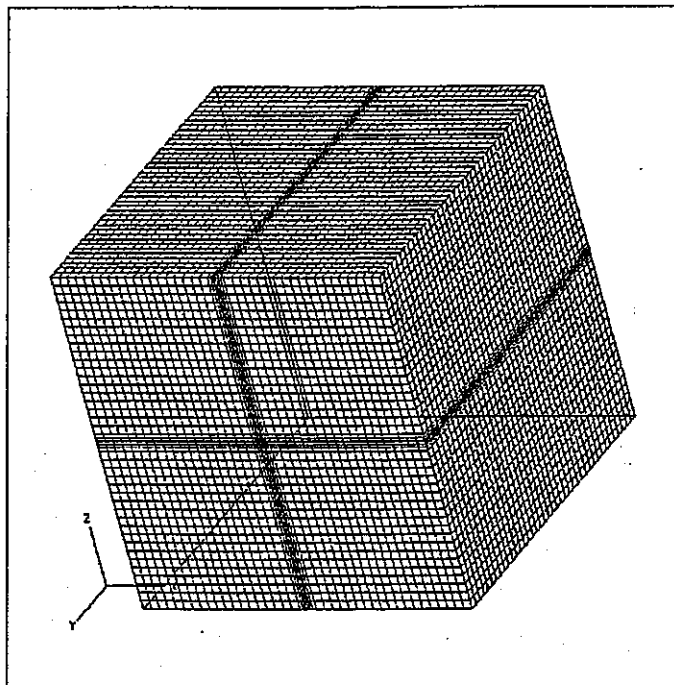


図 4.2-1 三次元水理解析および流線の抽出に使用する解析モデル

4.3 解析条件

①三次元水理解析

解析は、SGSIMアルゴリズムによって生成された透水係数場 30 ケース (Prosim No.1~Prosim No.30) に関して計算を実施した。

解析に使用した不均質透水係数場を図 4.3-1~図 4.3-30 に示す。

モデル中央部には、処分坑道および緩み域を模擬した領域を仮定した。

各物性および解析条件は以下のように仮定した。

- ・ EDZ 領域 (緩み域) は、雰囲気透水係数に 100 倍した値を使用した。
- ・ ガラス固化体は処分坑道の中央部に位置し、場における最も低い透水係数に 1.0×10^{-16} を掛けた値を使用した。
- ・ 動水勾配は 0.8% と仮定した。
- ・ 空隙率には透水係数から算出される値を使用した。

算出式は以下の通りである。:

$$\log K = 7.54 \times \log \varepsilon - 3.73$$

ここで、K および ε はそれぞれ透水係数 (m/sec)、空隙率を示す。

- ・ 算出された空隙率が 0.05 以下の場合には 0.05 を、また、0.5 以上の場合には 0.5 を用いた。

②流線情報の抽出

流線の情報は、処分坑道表面の 50m~150m の位置に 40 個の追跡粒子を配置し、断層を仮定した面である領域出口まで、パーティクルトラッキング法を用いて移行経路長さおよび移行時間を求めた。

代表的な流線の分布形状を図 4.3.31 から図 4.3.33 に示す。

③一次元核種移行計算

一次元核種移行計算は、TR3D によって算出された流線毎について計算を行った。考慮する核種および崩壊系列は表 4.3-1 に示す 12 種とした。

本計算に使用する各核種の物性値および計算条件を表 4.3-2 に示す。

また、一次元核種移行計算コード CRYSTAL によって出力される結果は [mol/year] で算出される。これを [Bq/year] に変換する必要があり、[Bq/year] で算出される核種移行率は最終的には線量当量率 [mSv/year] に変換する必要がある。

これらの変換式を以下に示す。

・ [mol/year] から [Bq/year] への変換

$$\phi \times F = \phi'$$

ここで、

ϕ : 核種移行率 [mol/year]

F : 変換ファクタ [Bq/mol]

ϕ' : 核種移行率 [Bq/year]

$$F = \frac{4.17 \times 10^{123}}{T_0}$$

ここで、 T_0 : 核種半減期 [sec]

・ [Bq/year] から [mSv/year] への変換

$$H_w = \sum \left[\frac{I_j}{DCW_j \times W} \right] \times D_s$$

ここで、

H_w : 評価地点における線量当量率 [mSv/year]

I_j : 評価地点に流入する核種 j の放射能 [Bq/year]

DCW_j : 排水中の濃度限度 [Bq/cm³]

W : 評価地点における水量 [m³/year]

D_s : 換算係数

表 4.2-1 崩壞系列

系列	
	Tc-99
	Sn-126
	Se-79
	Zr-93
	Cs-135
	Sm-151
	Nb-94
	Pd-197
4N0	Pu-240 → U-239 → Th-232
4N1	Cm-245 → Pu-241 → Am-241 → Np-237 → U-233 → Th-229
4N2	Cm-246 → Pu-242 → U-238 → Th-230 → Ra-226 → Pb-210
4N3	Am-243 → Pu-239 → U-235 → Pa-231 → Ac-227

表 4.3-2 核種物性値

核種名	許容濃度 (Bq/cm ³)	半減期 (year)	分配係数 (m ³ /kg)
Se-79	0.4	6.50E+04	0.001
Zr-93	2.0	1.53E+06	0.1
Tc-99	3.0	2.13E+05	1.0
Pd-107	30	6.50E+05	1.0
Sn-126	0.2	1.00E+05	1.0
Cs-135	0.5	2.30E+06	0.05
Nb-94	10	2.03E+04	0.1
Sm-151	0.7	9.00E+01	5.0
Pu-240	0.001	6.54E+03	1.0
U-236	0.02	2.34E+07	1.0
Th-232	0.001	1.41E+10	1.0
Cm-245	0.02	8.50E+03	5.0
Pu-241	0.001	1.44E+01	1.0
Am-241	0.001	4.32E+02	5.0
Np-237	0.05	2.14E+06	1.0
U-233	0.2	1.59E+05	1.0
Th-229	0.001	7.34E+03	1.0
Cm-246	0.001	4.73E+03	5.0
Pu-242	0.001	3.87E+05	1.0
U-238	0.02	4.47E+09	1.0
U-234	0.01	2.45E+05	1.0
Th-230	0.007	7.70E+04	1.0
Ra-226	0.003	1.60E+03	5.0
Pb-210	0.0007	2.23E+01	0.1
Am-243	0.001	7.38E+03	5.0
Pu-239	0.001	2.41E+04	1.0
U-235	0.02	7.04E+04	1.0
Pa-231	0.0004	3.28E+04	1.0
Ac-227	0.0003	2.18E+01	5.0

4.4 解析結果

三次元水理解析および流線の分布を図 4.4-1～図 4.4-30 に示す。

ガラス固化体一体としたケースおよび四万體としたケースでの一次元核種移行計算の結果を図 4.4-31～図 4.4-60 および図 4.4-64～図 4.4-90 に示す。

また、図 4.4-61 に代表的核種における各不均質場における計算結果の回数平均を取った線量当量率の値をプロットしたグラフを示す。

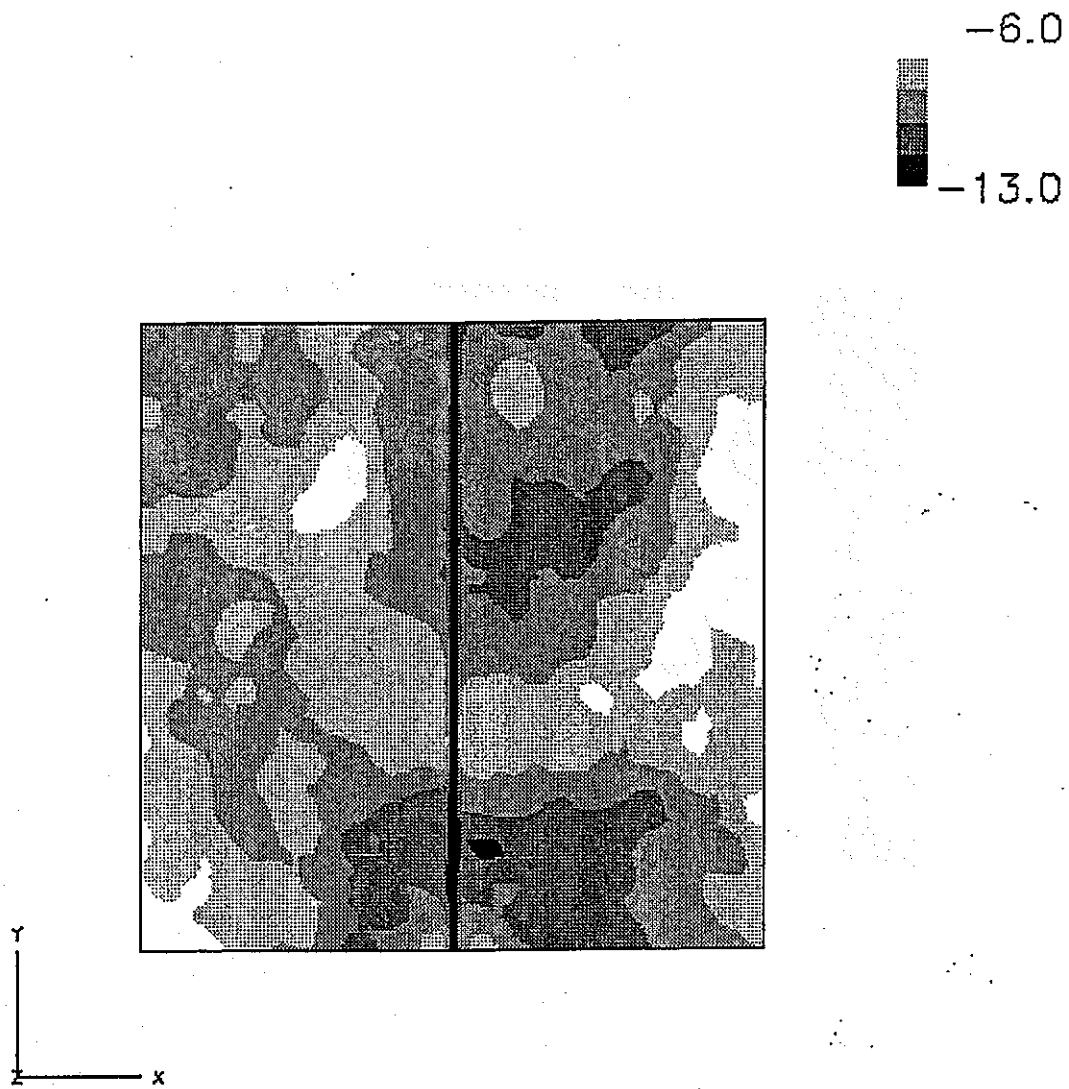


図 4.3-1 Porsim No.1 で使用する不均質透水係数分布 (Z=-100m 断面)
 ((Sequential Gaussian Simulation) によって算出された不均質場使用)

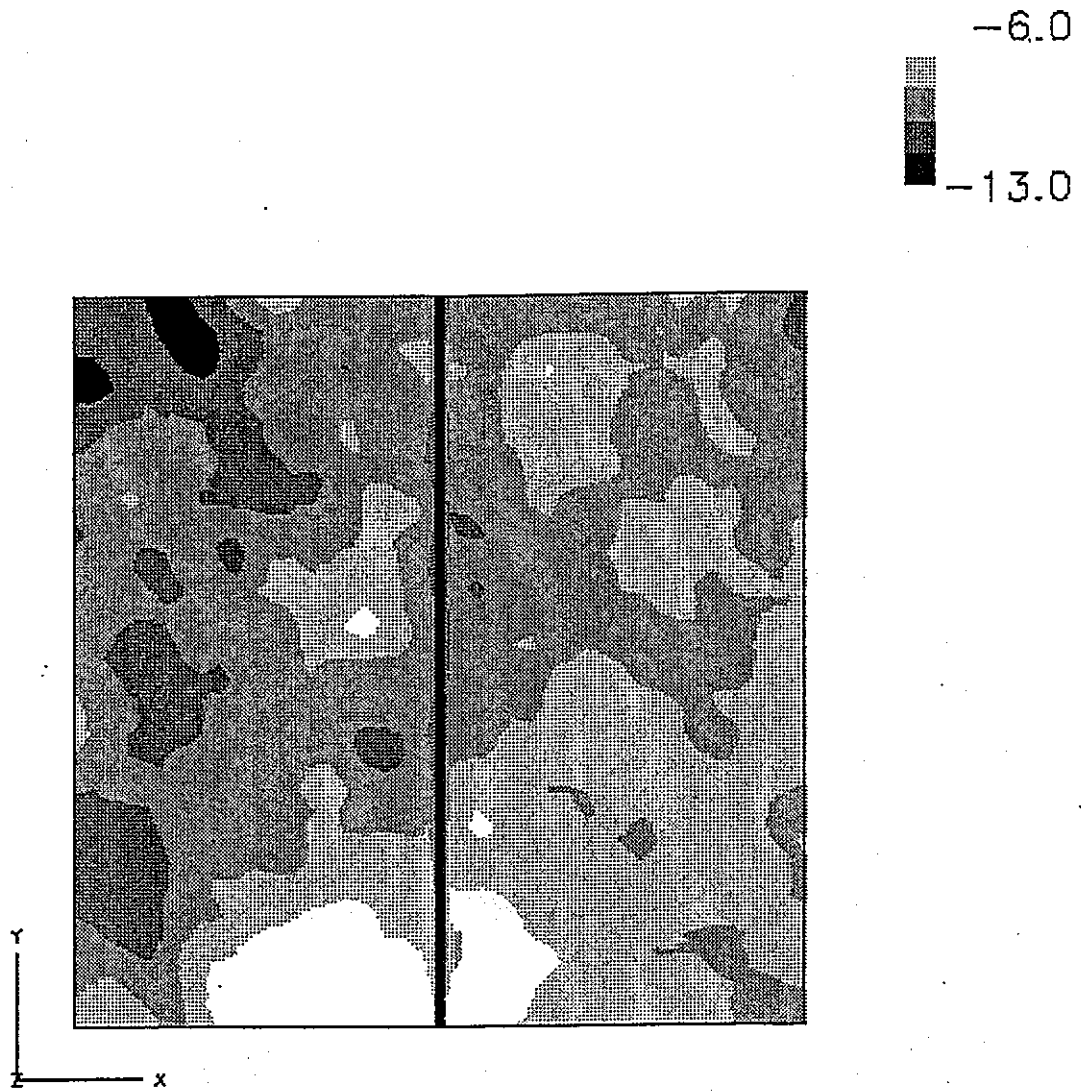


図 4.3-2 Porsim No.2 で使用する不均質透水係数分布 ($Z=-100\text{m}$ 断面)
 ((Sequential Gaussian Simulation) によって算出された不均質場使用)

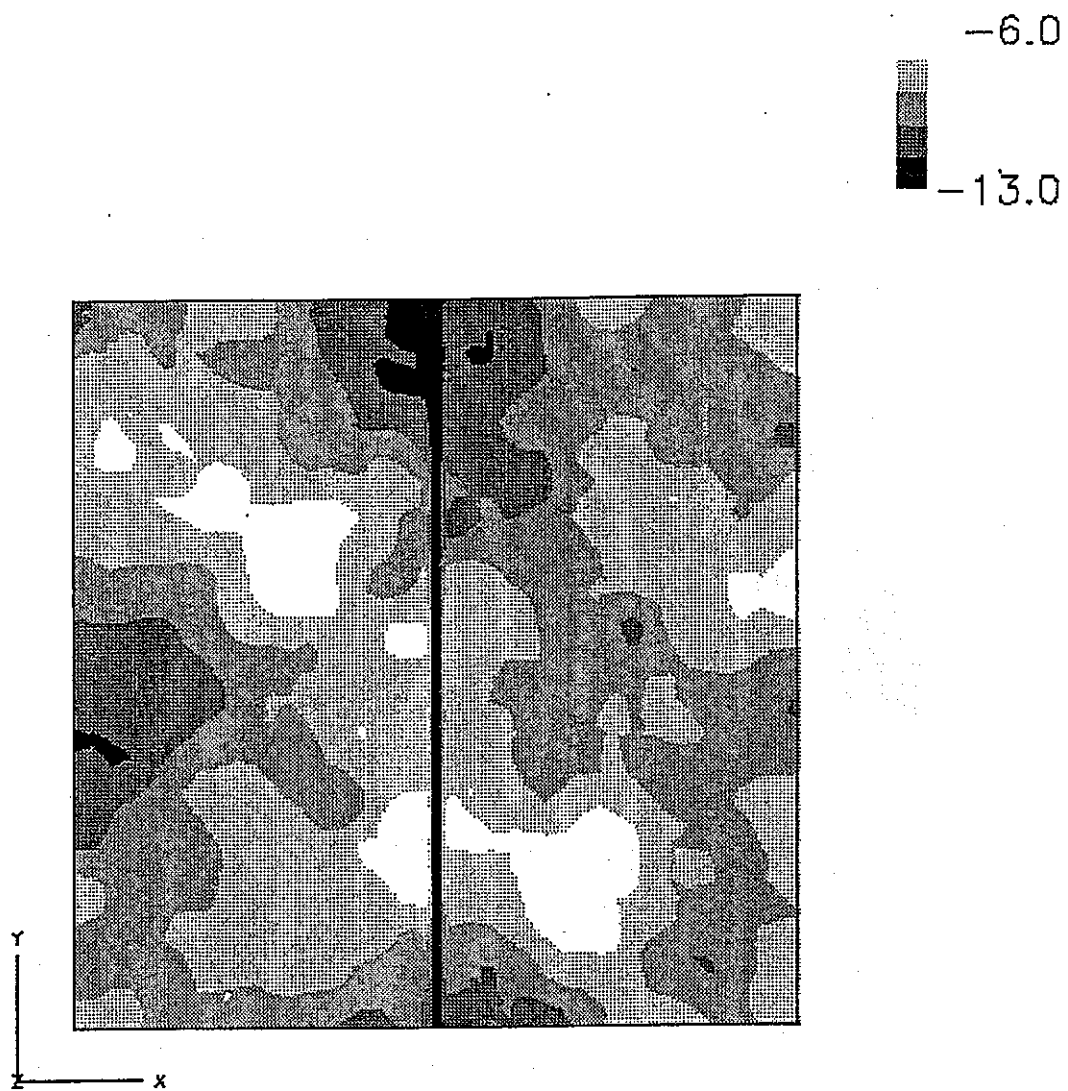


図 4.3-3 Porsim No.3 で使用する不均質透水係数分布 (Z=-100m 断面)
 ((Sequential Gaussian Simulation) によって算出された不均質場使用)

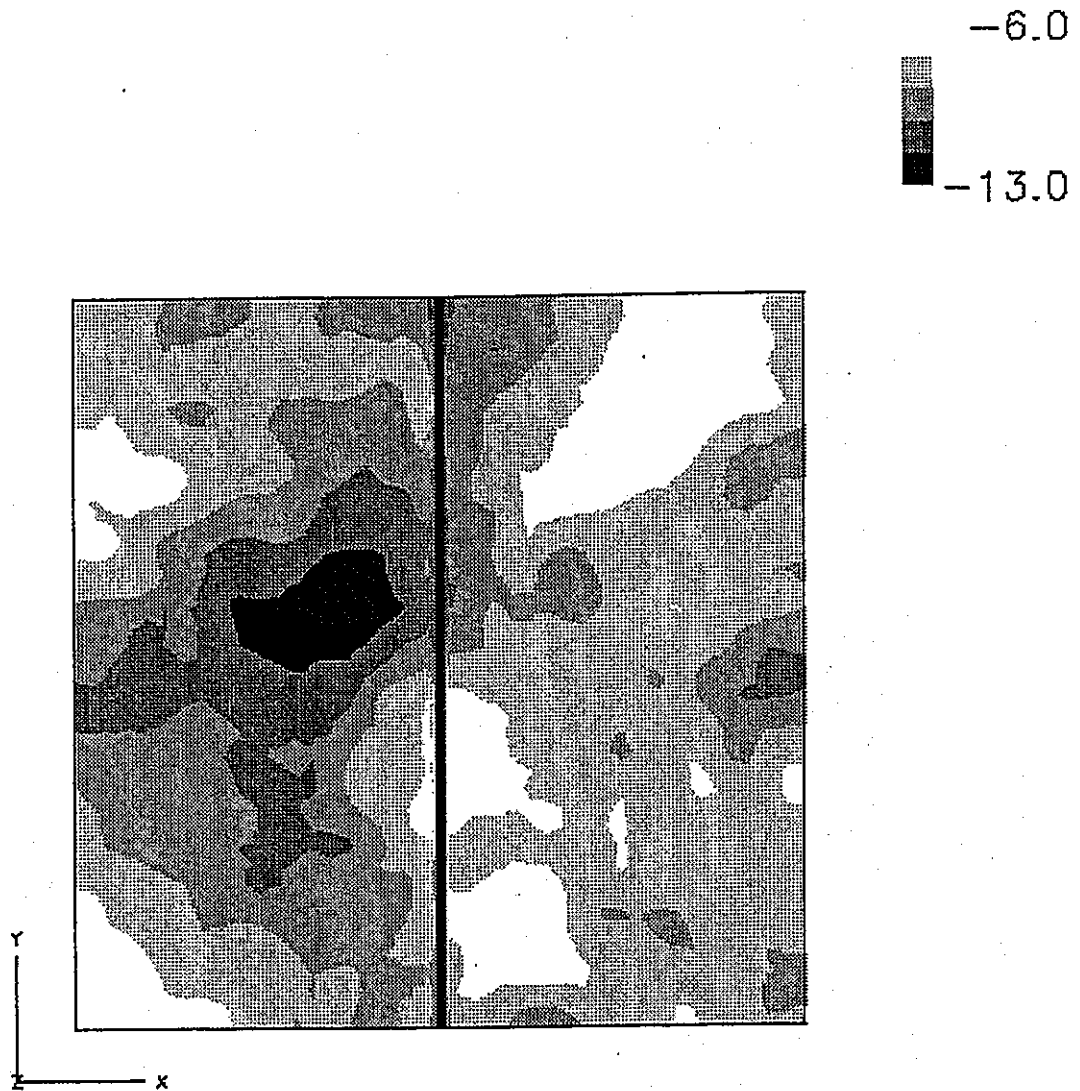


図 4.3-4 Porsim No.4 で使用する不均質透水係数分布 ($z=-100\text{m}$ 断面)
((Sequential Gaussian Simulation) によって算出された不均質場使用)

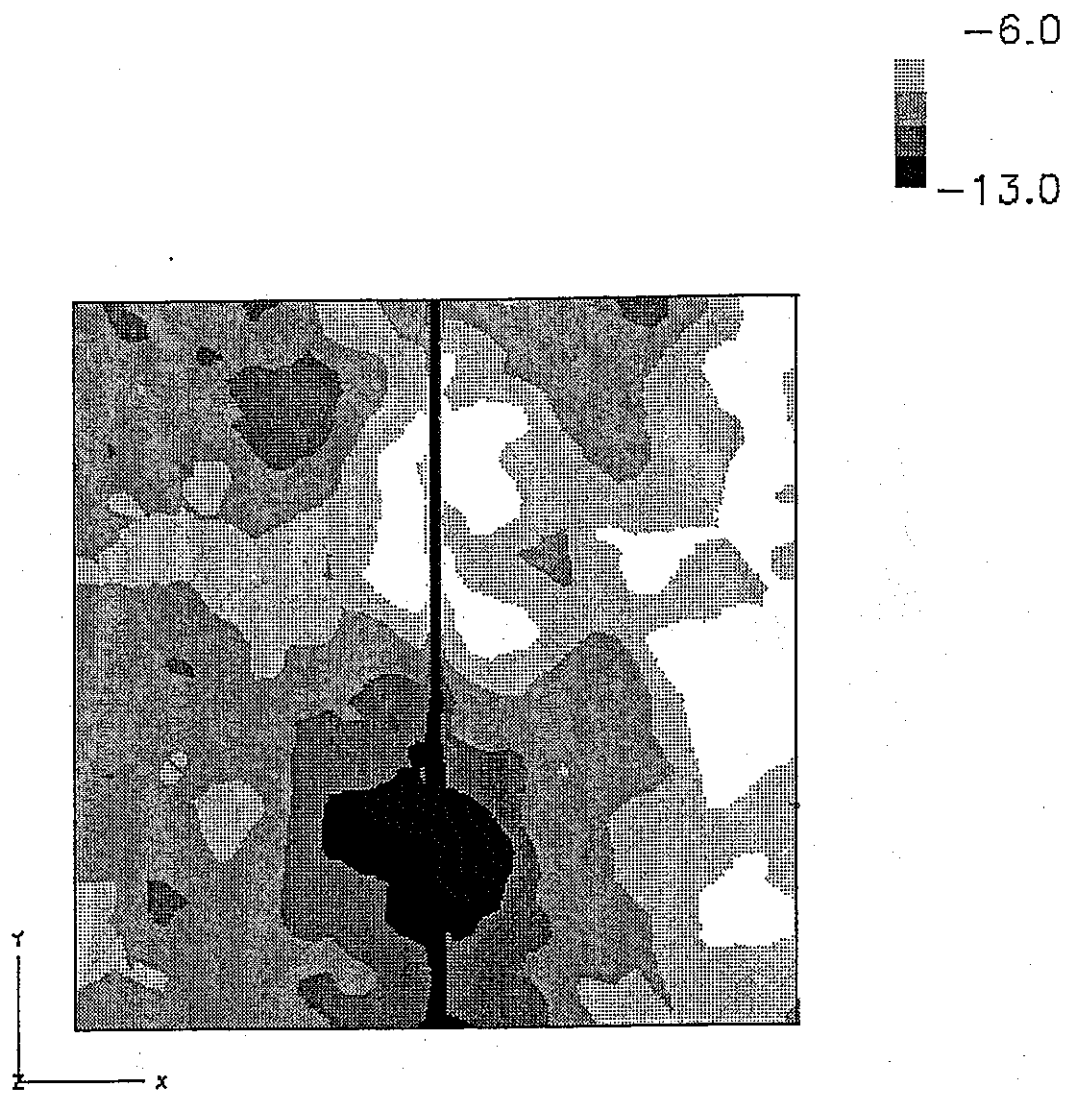


図 4.3-5 Porsim No.5 で使用する不均質透水係数分布 (Z=-100m 断面)
 ((Sequential Gaussian Simulation) によって算出された不均質場使用)

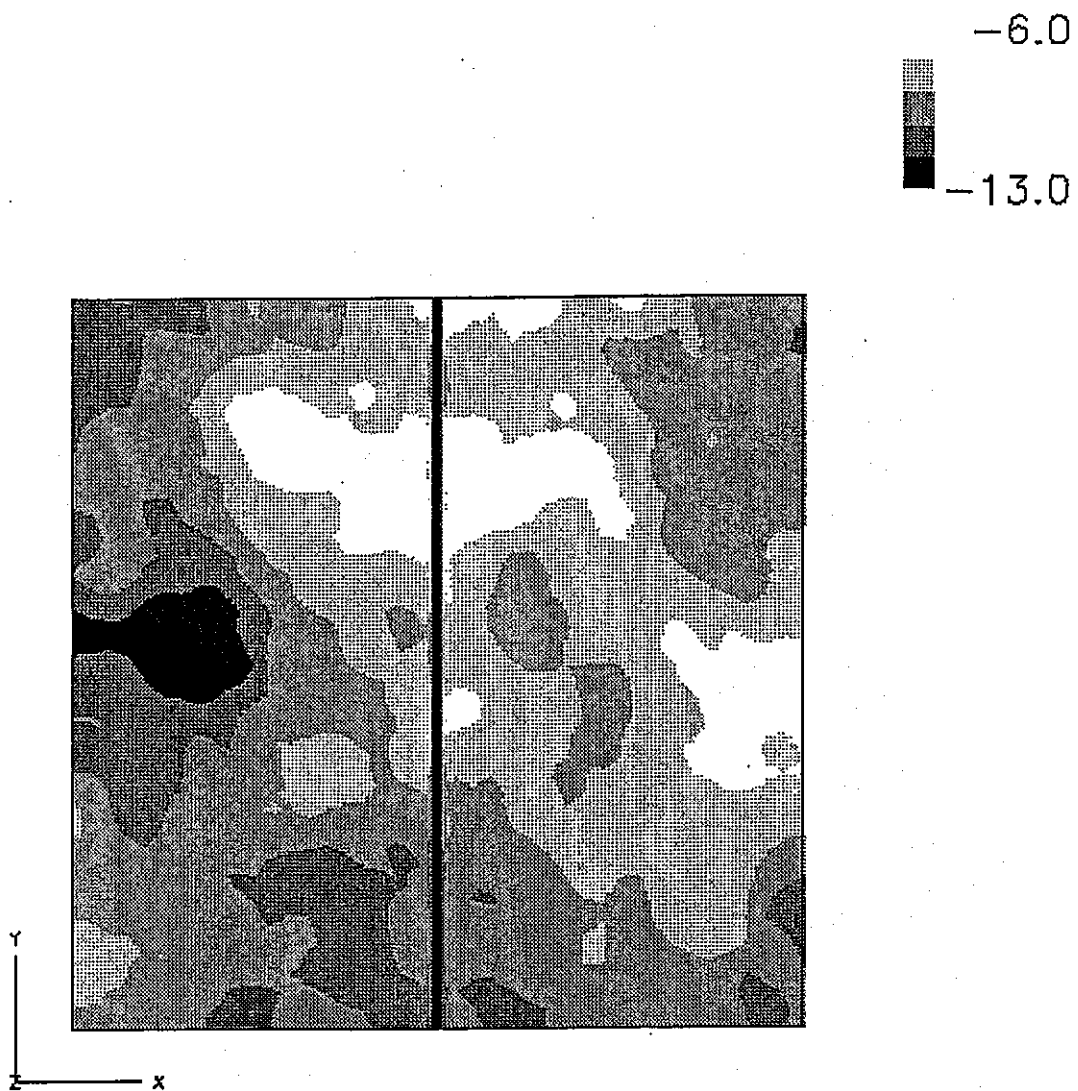


図 4.3-6 Porsim No.6 で使用する不均質透水係数分布 ($z=-100\text{m}$ 断面)
 ((Sequential Gaussian Simulation) によって算出された不均質場使用)

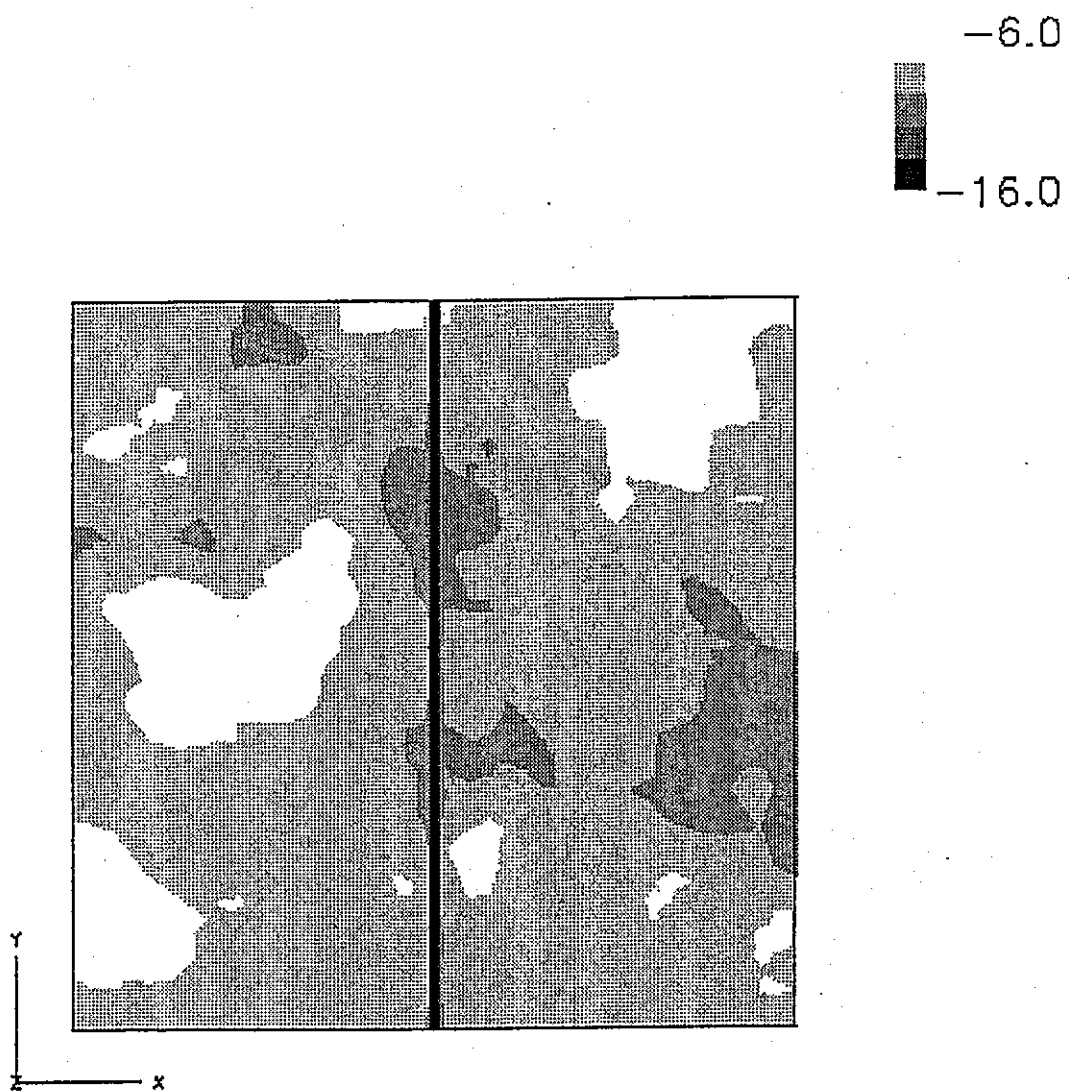


図 4.3-7 Porsim No.7 で使用する不均質透水係数分布 ($z=-100\text{m}$ 断面)
 ((Sequential Gaussian Simulation) によって算出された不均質場使用)

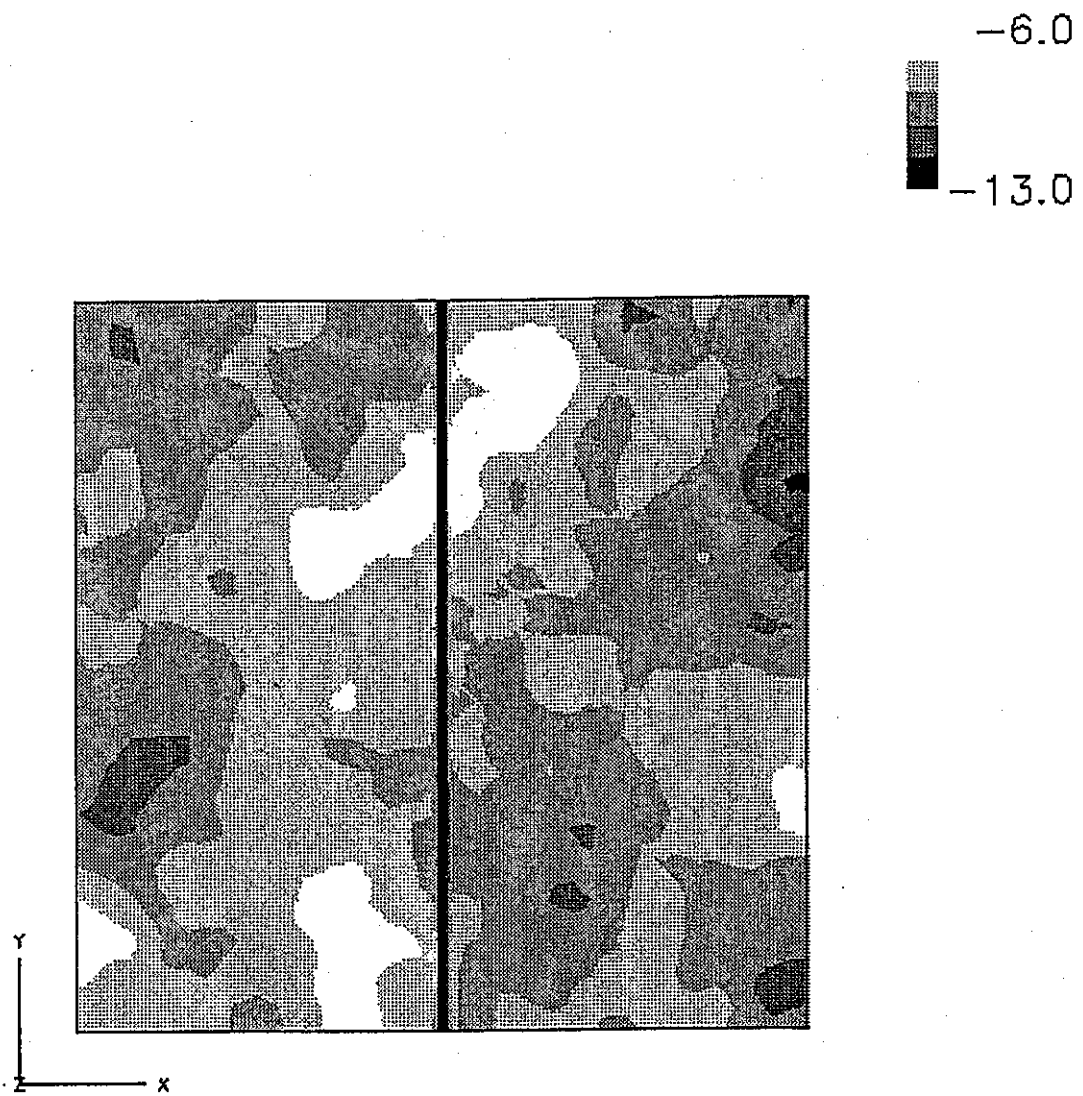


図 4.3-8 Porsim No.8 で使用する不均質透水係数分布 (Z=-100m 断面)
 ((Sequential Gaussian Simulation) によって算出された不均質場使用)

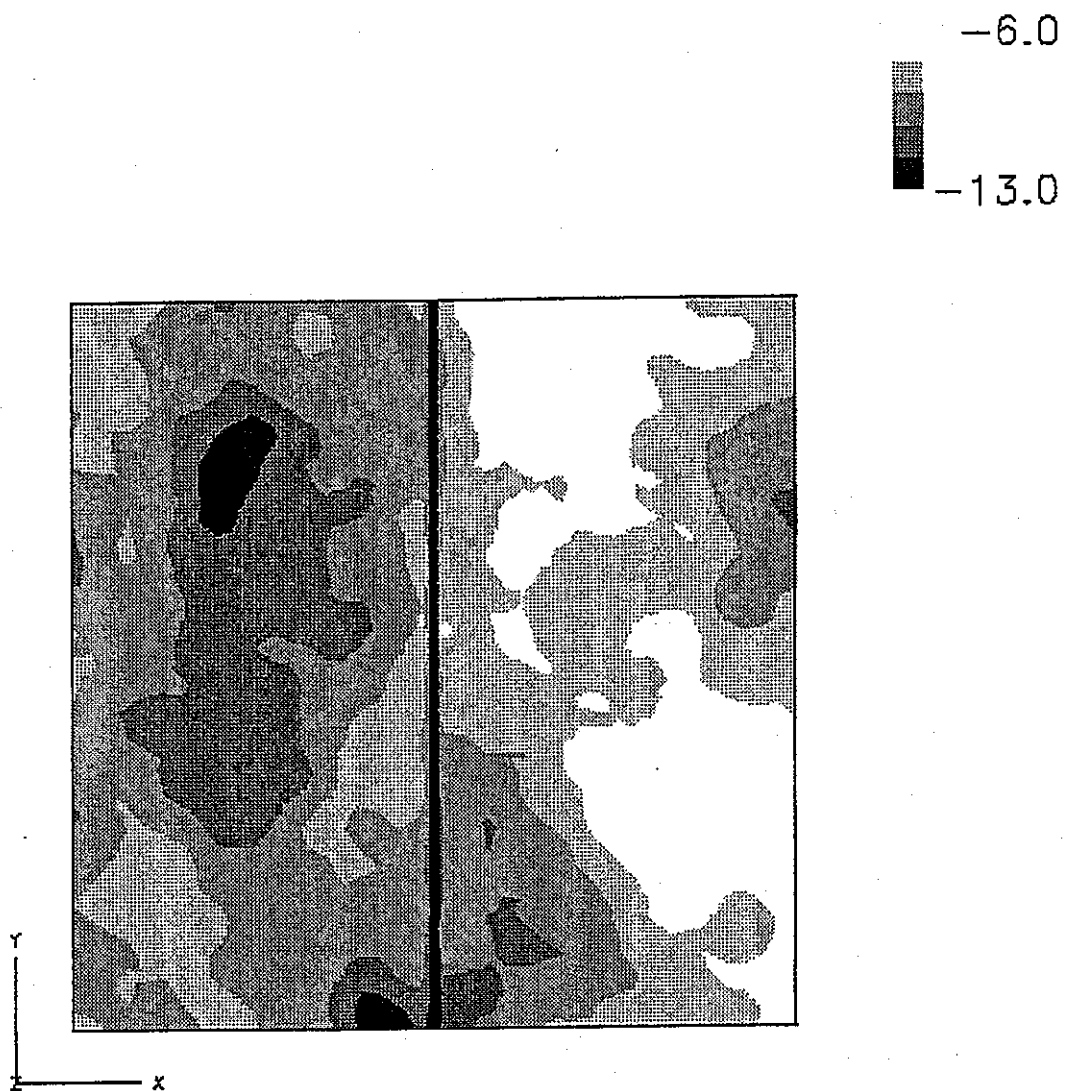


図 4.3-9 Porsim No.9 で使用する不均質透水係数分布 (Z=-100m 断面)
 ((Sequential Gaussian Simulation) によって算出された不均質場使用)

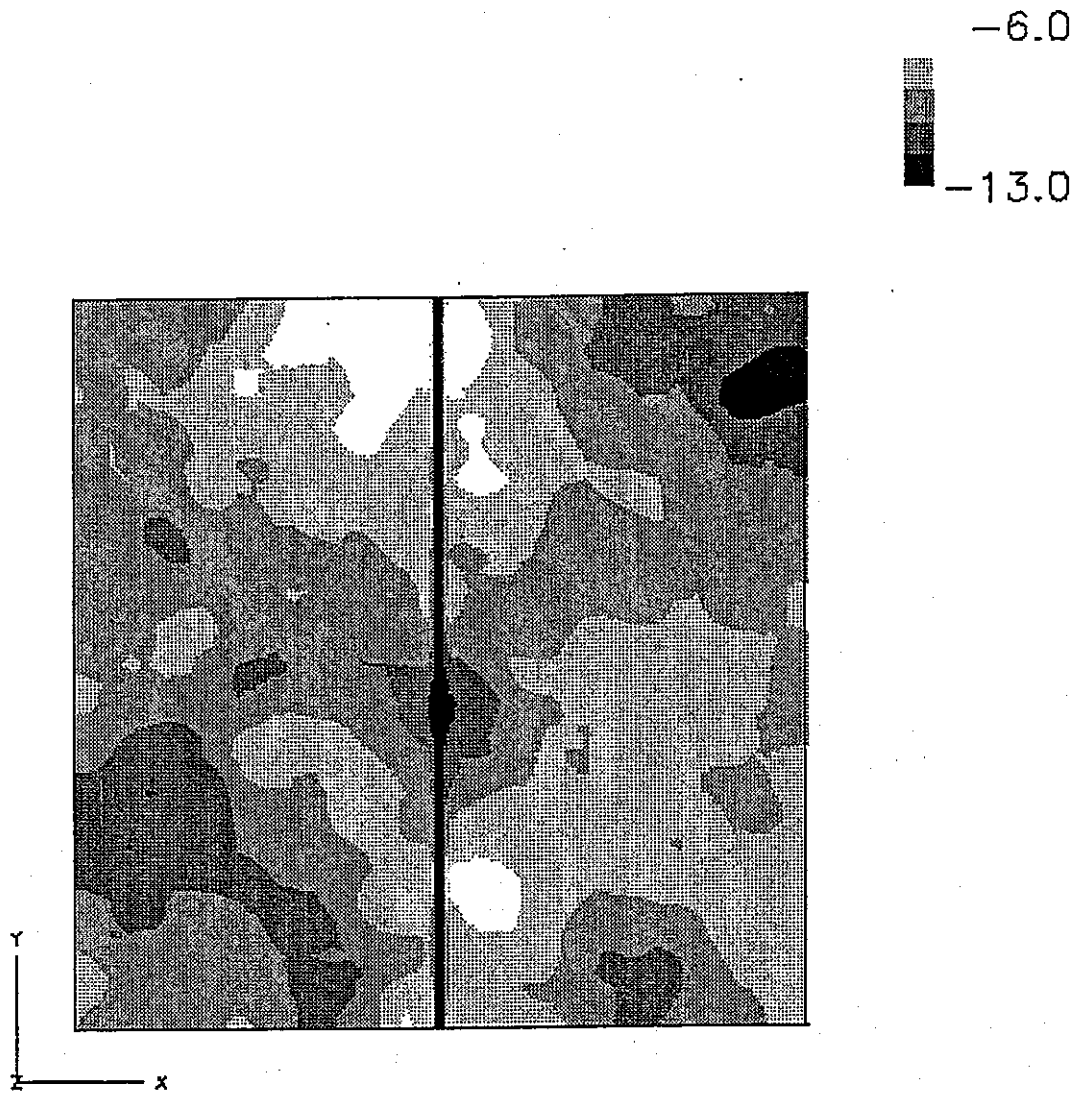


図 4.3-10 Porsim No.10 で使用する不均質透水係数分布 (Z=-100m 断面)
 ((Sequential Gaussian Simulation) によって算出された不均質場使用)

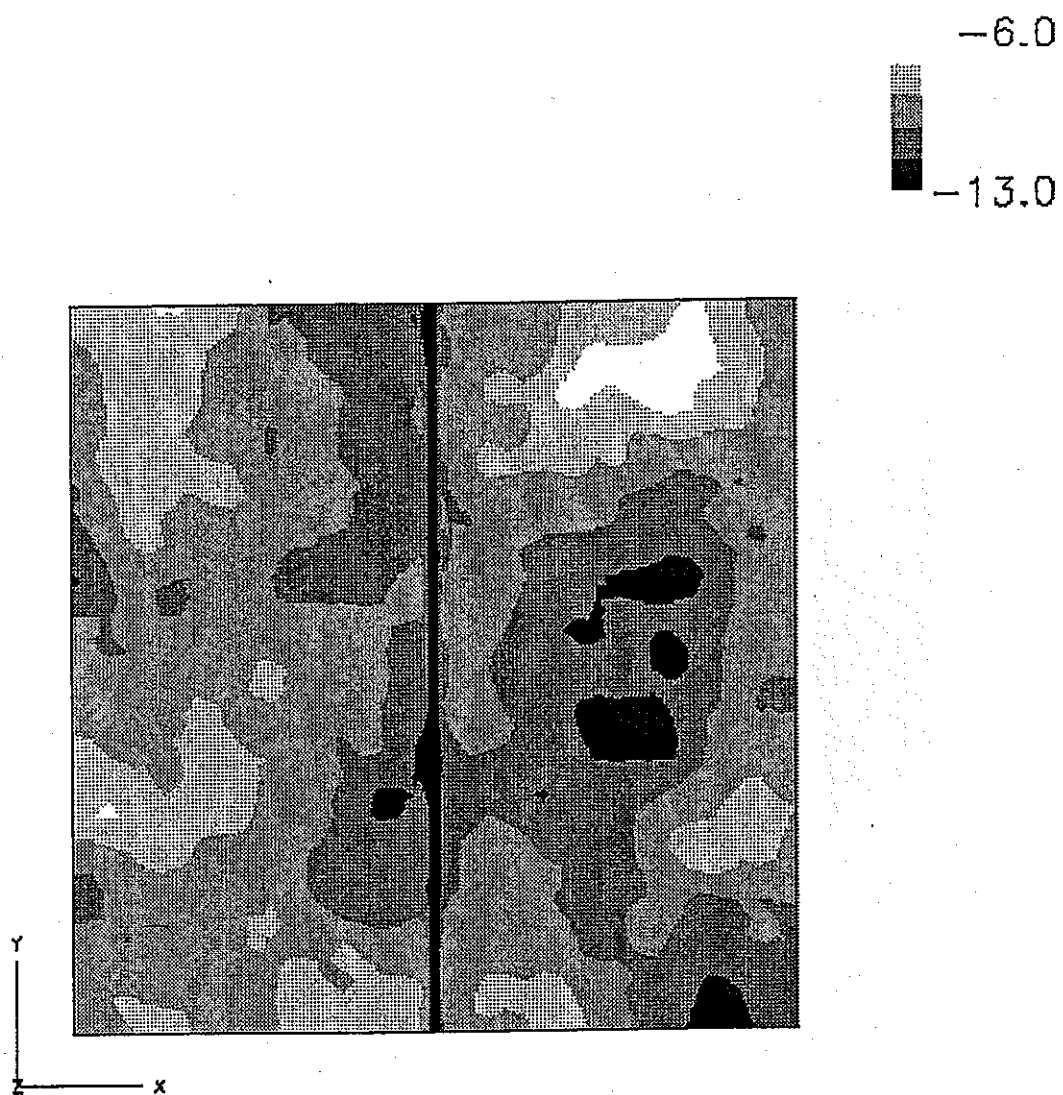


図 4.3-11 Porsim No.11 で使用する不均質透水係数分布 (Z=-100m 断面)
 ((Sequential Gaussian Simulation) によって算出された不均質場使用)

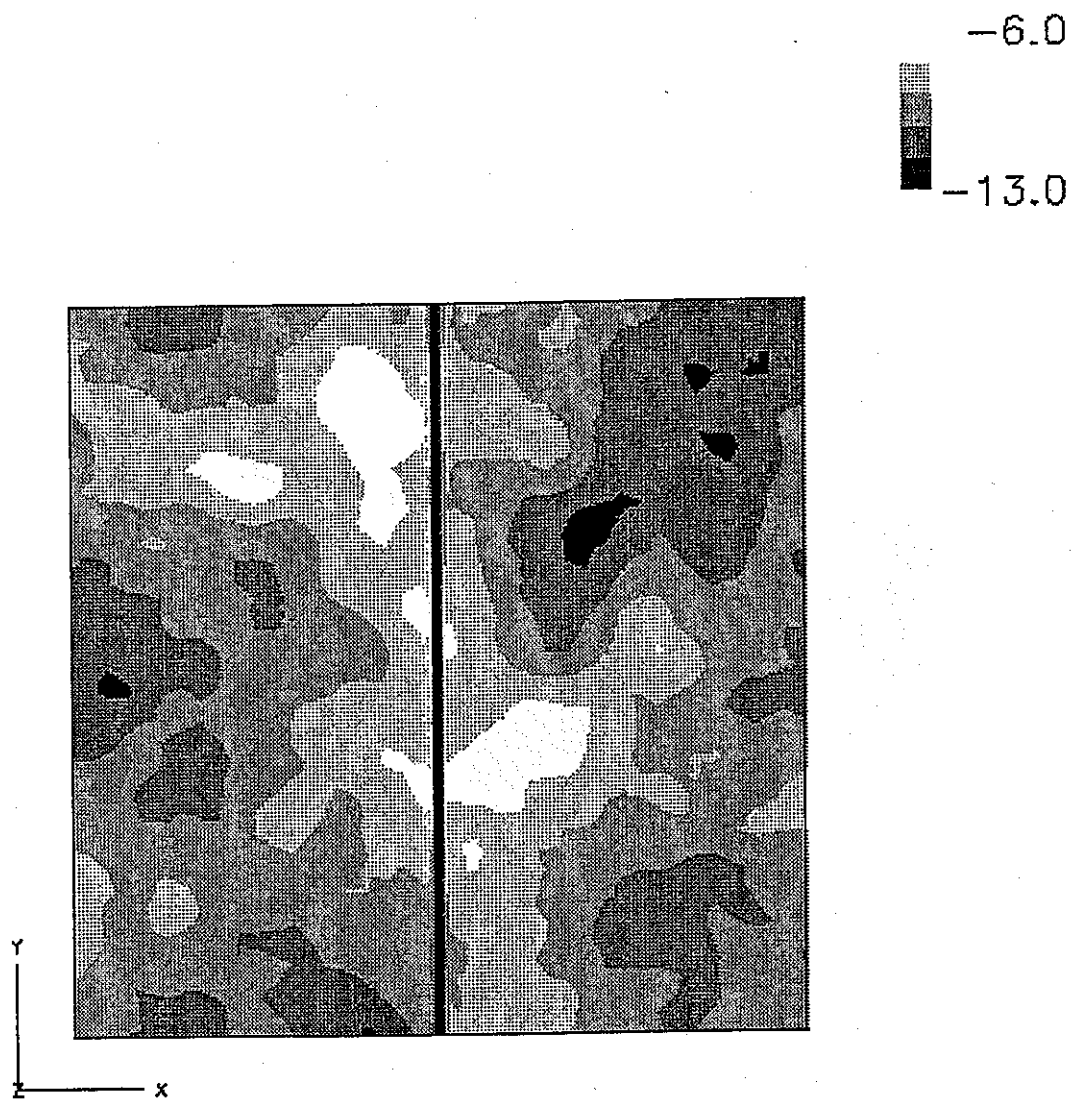


図 4.3-12 Porsim No.12 で使用する不均質透水係数分布 (Z=-100m 断面)
 ((Sequential Gaussian Simulation) によって算出された不均質場使用)

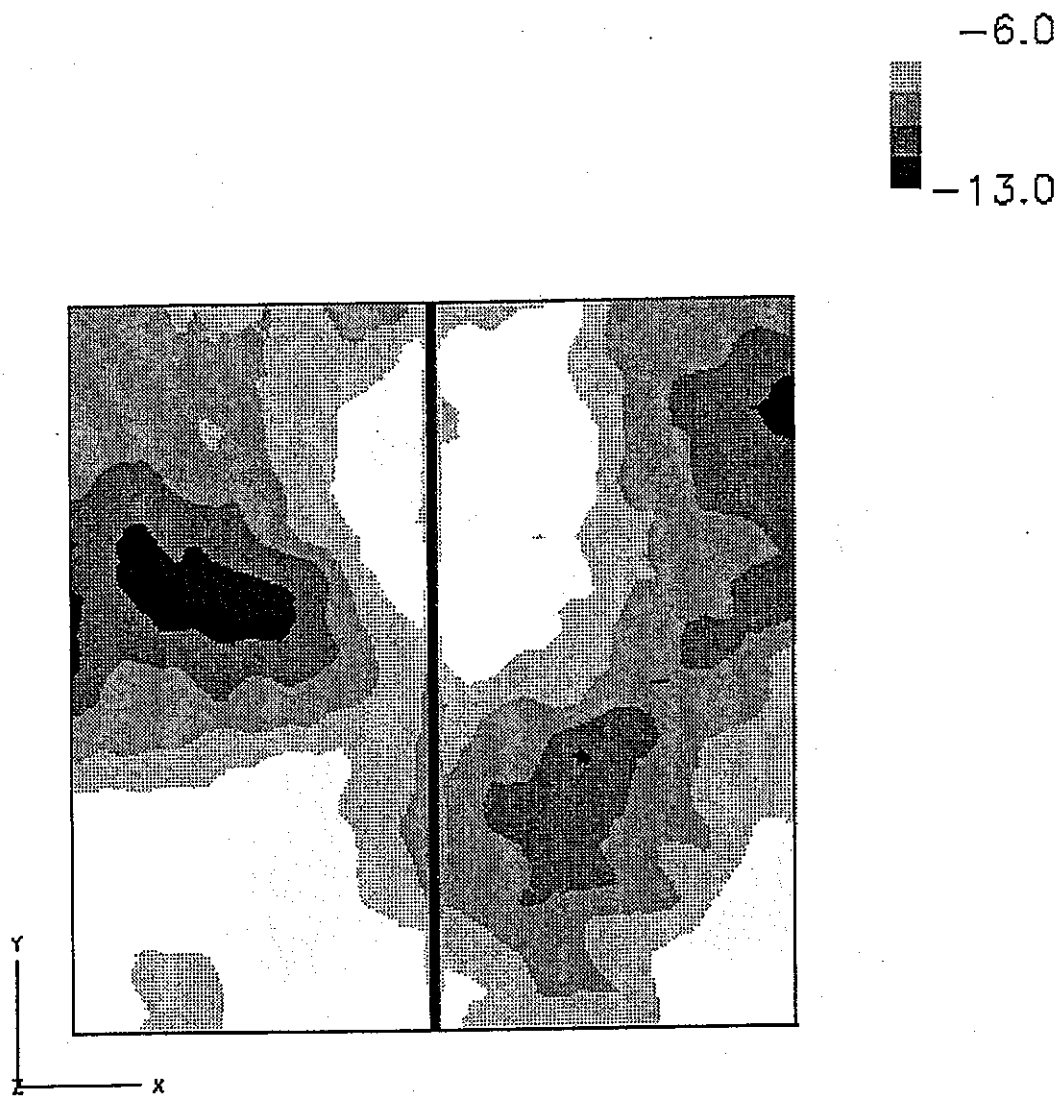


図 4.3-13 Porsim No.13 で使用する不均質透水係数分布 (Z=-100m 断面)
 ((Sequential Gaussian Simulation) によって算出された不均質場使用)

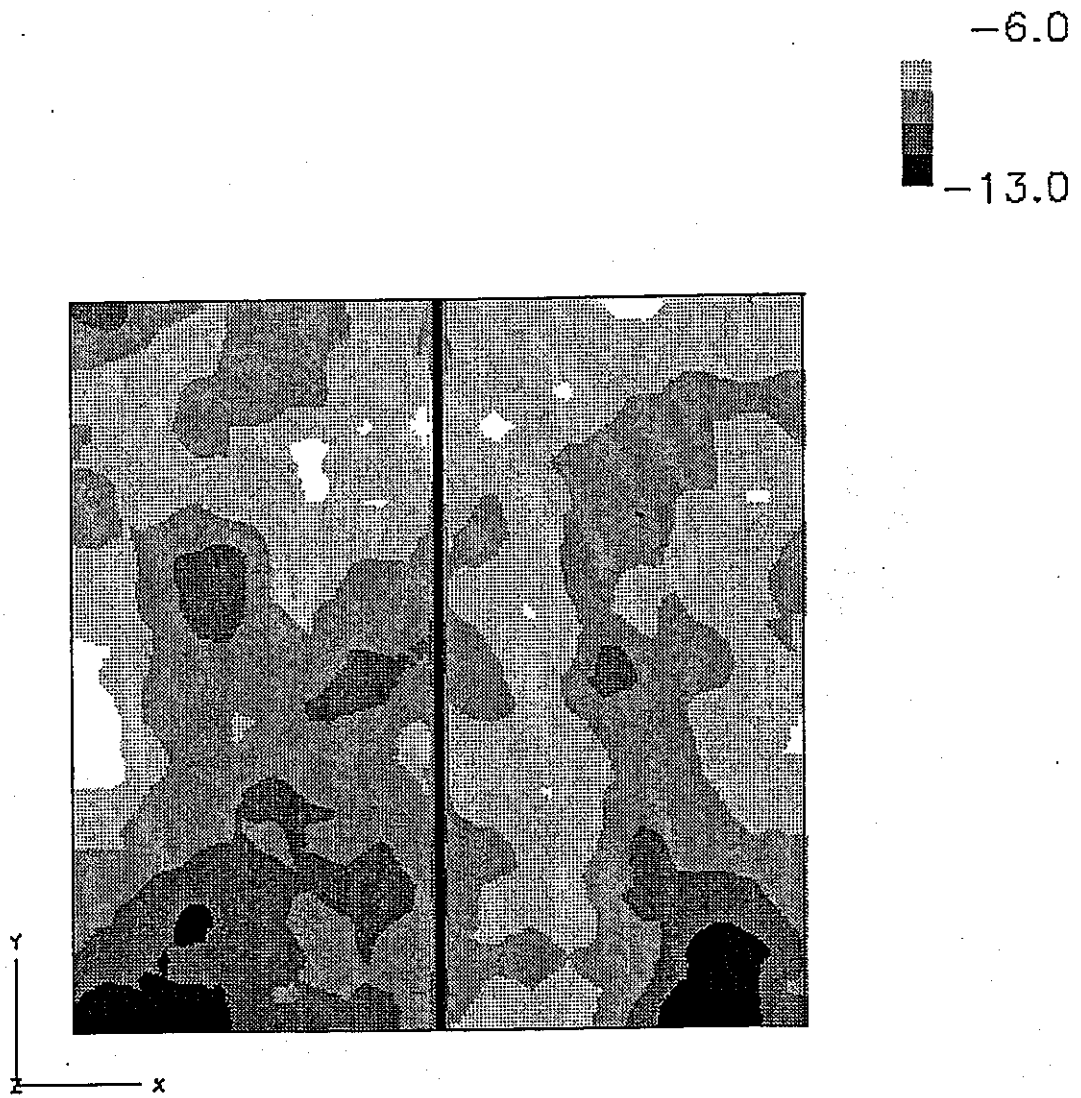


図 4.3-14 Porsim No.14 で使用する不均質透水係数分布 (Z=-100m 断面)
 ((Sequential Gaussian Simulation) によって算出された不均質場使用)

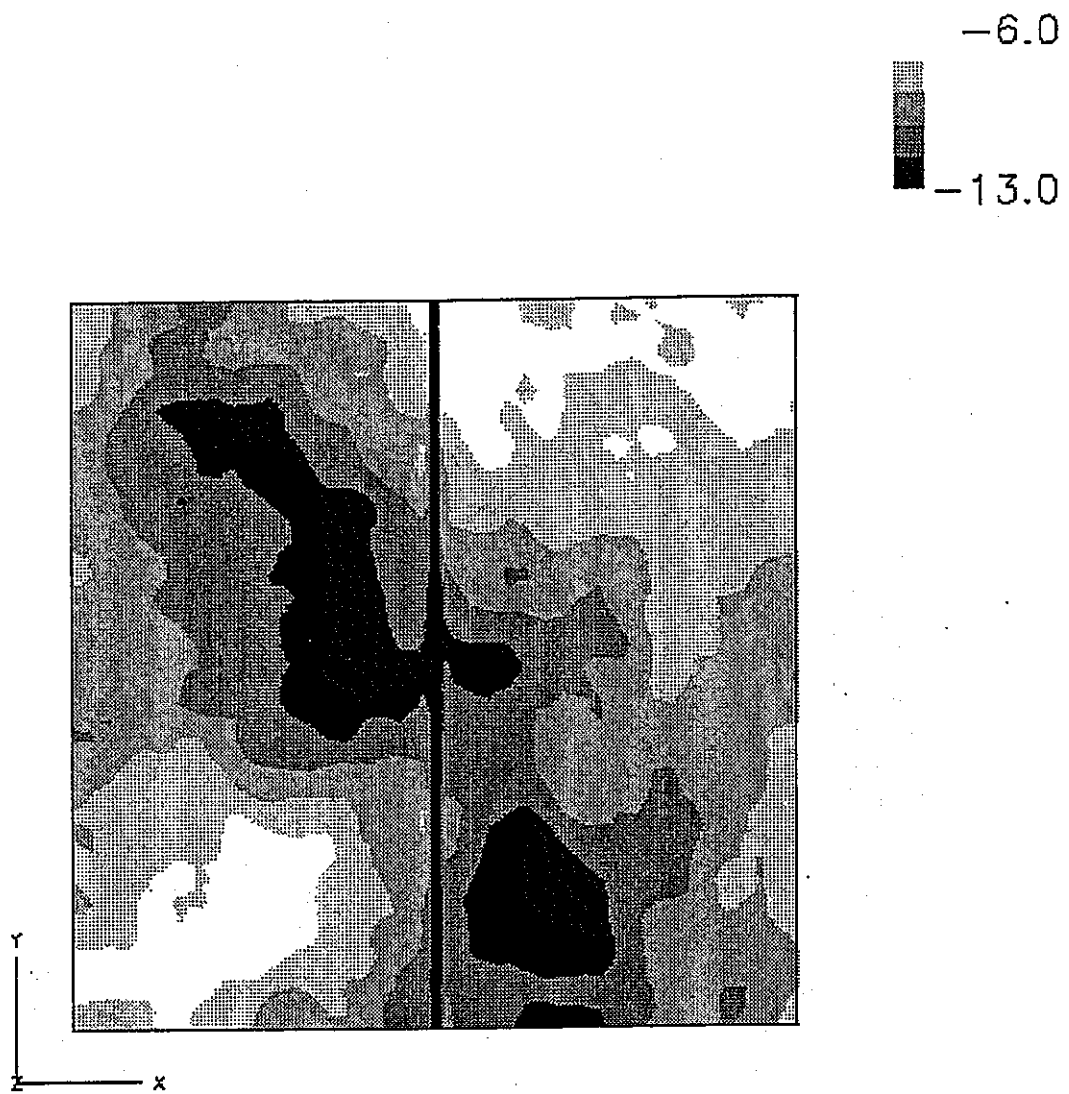


図 4.3-15 Porsim No.15 で使用する不均質透水係数分布 (Z=-100m 断面)
 ((Sequential Gaussian Simulation) によって算出された不均質場使用)

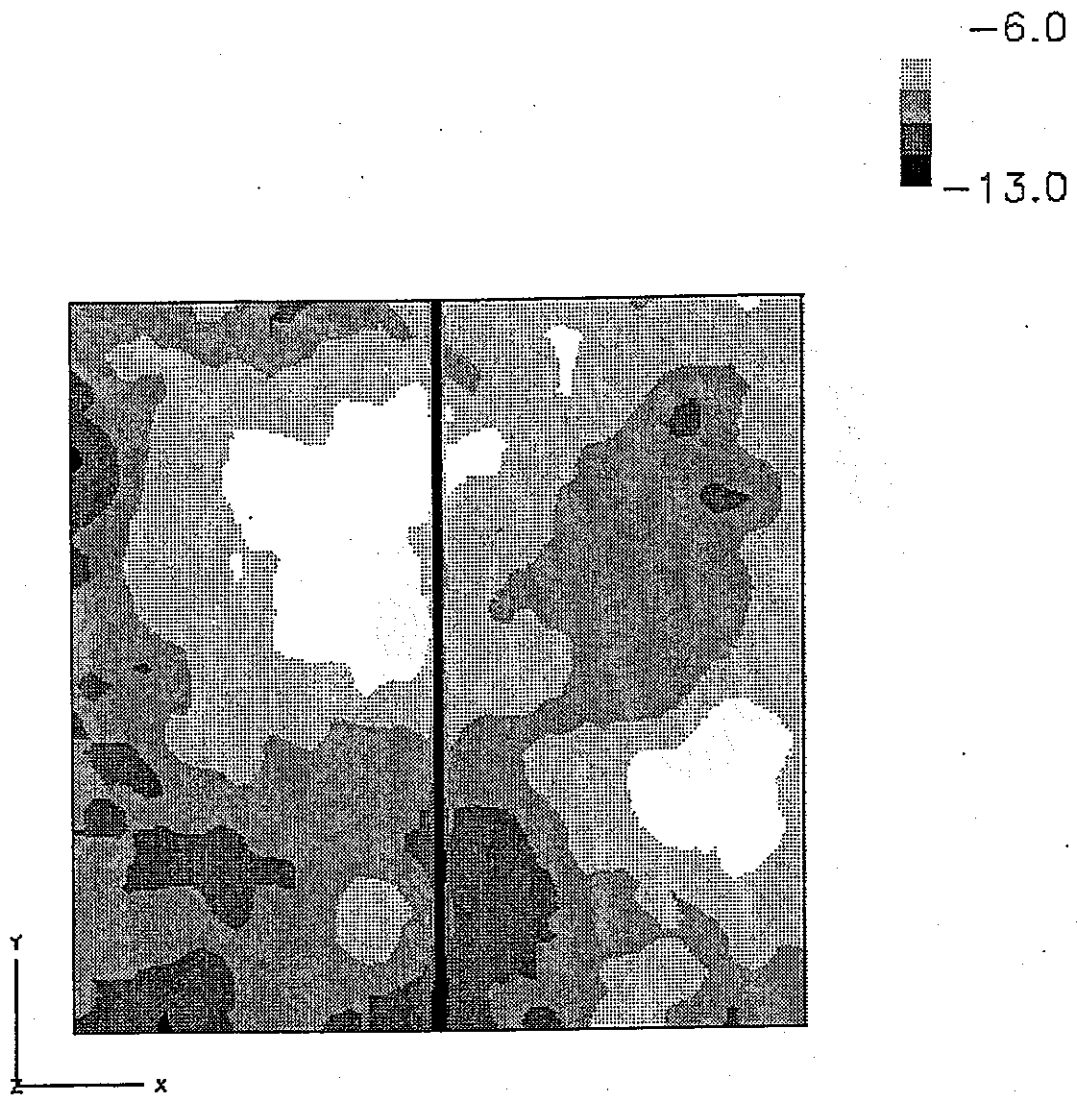


図 4.3-16 Porsim No.16 で使用する不均質透水係数分布 (Z=-100m 断面)
 ((Sequential Gaussian Simulation) によって算出された不均質場使用)

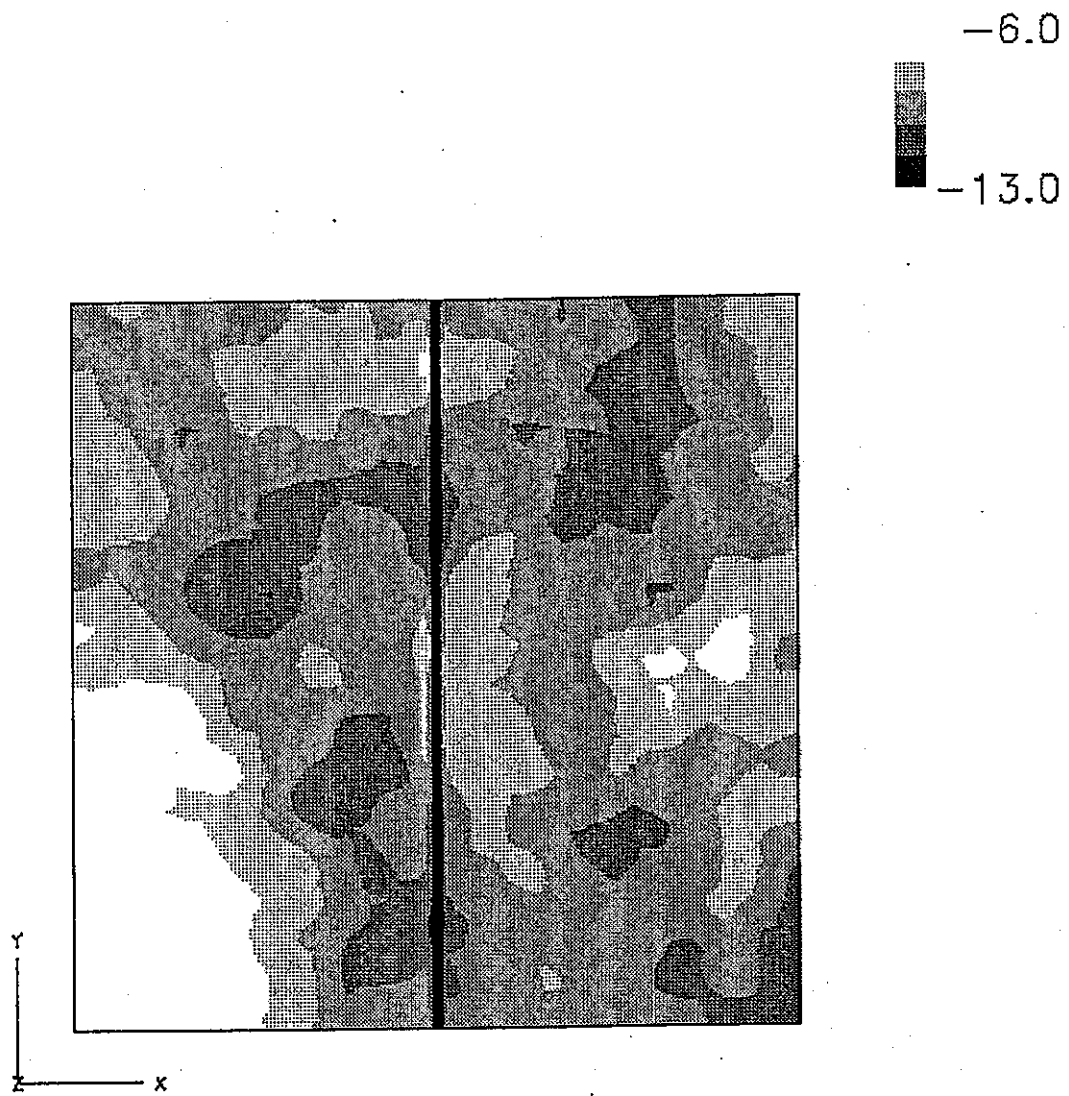


図 4.3-17 Porsim No.17 で使用する不均質透水係数分布 (Z=-100m 断面)
((Sequential Gaussian Simulation) によって算出された不均質場使用)

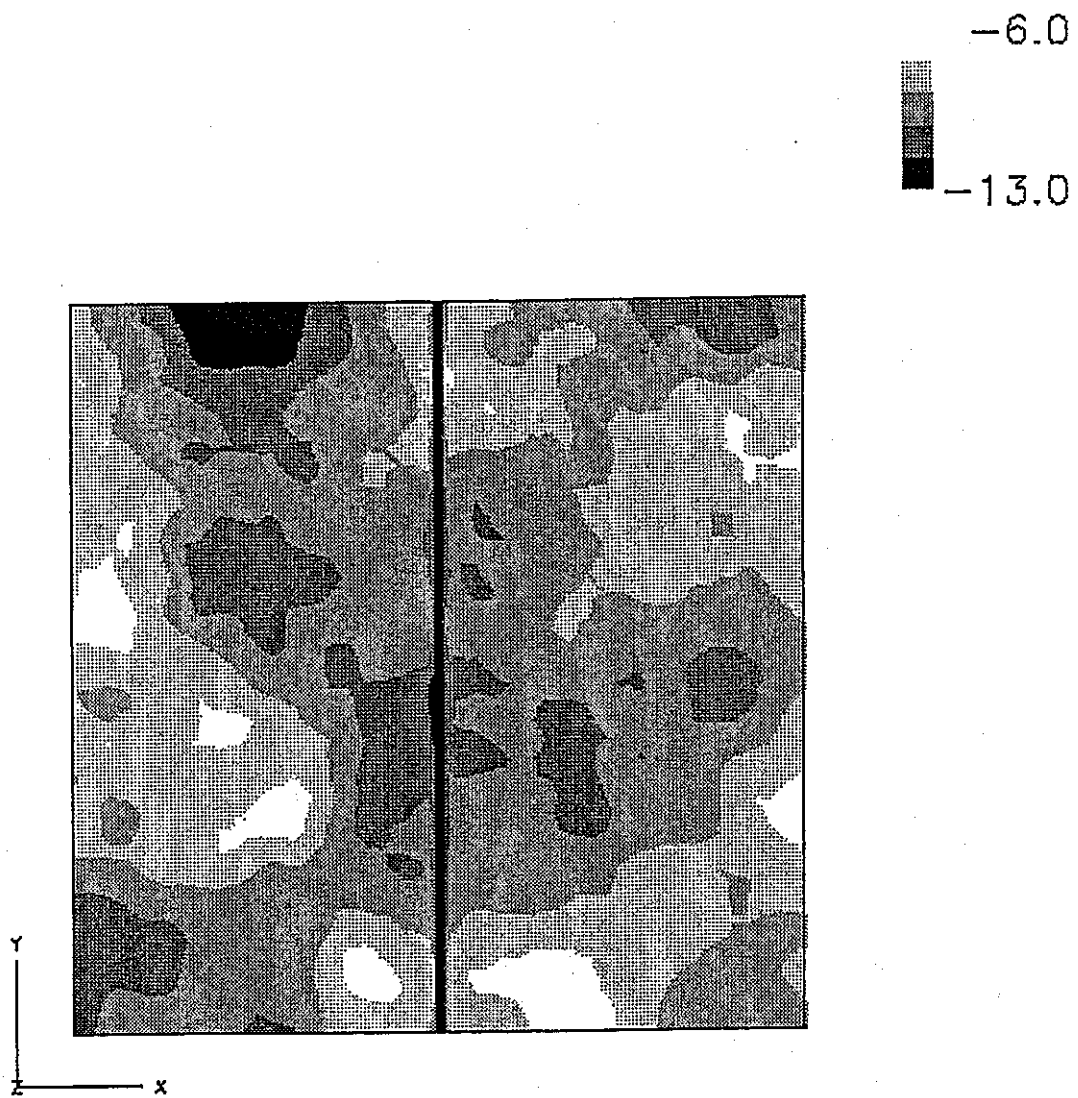


図 4.3-18 Porsim No.18 で使用する不均質透水係数分布 (Z=-100m 断面)
 ((Sequential Gaussian Simulation) によって算出された不均質場使用)

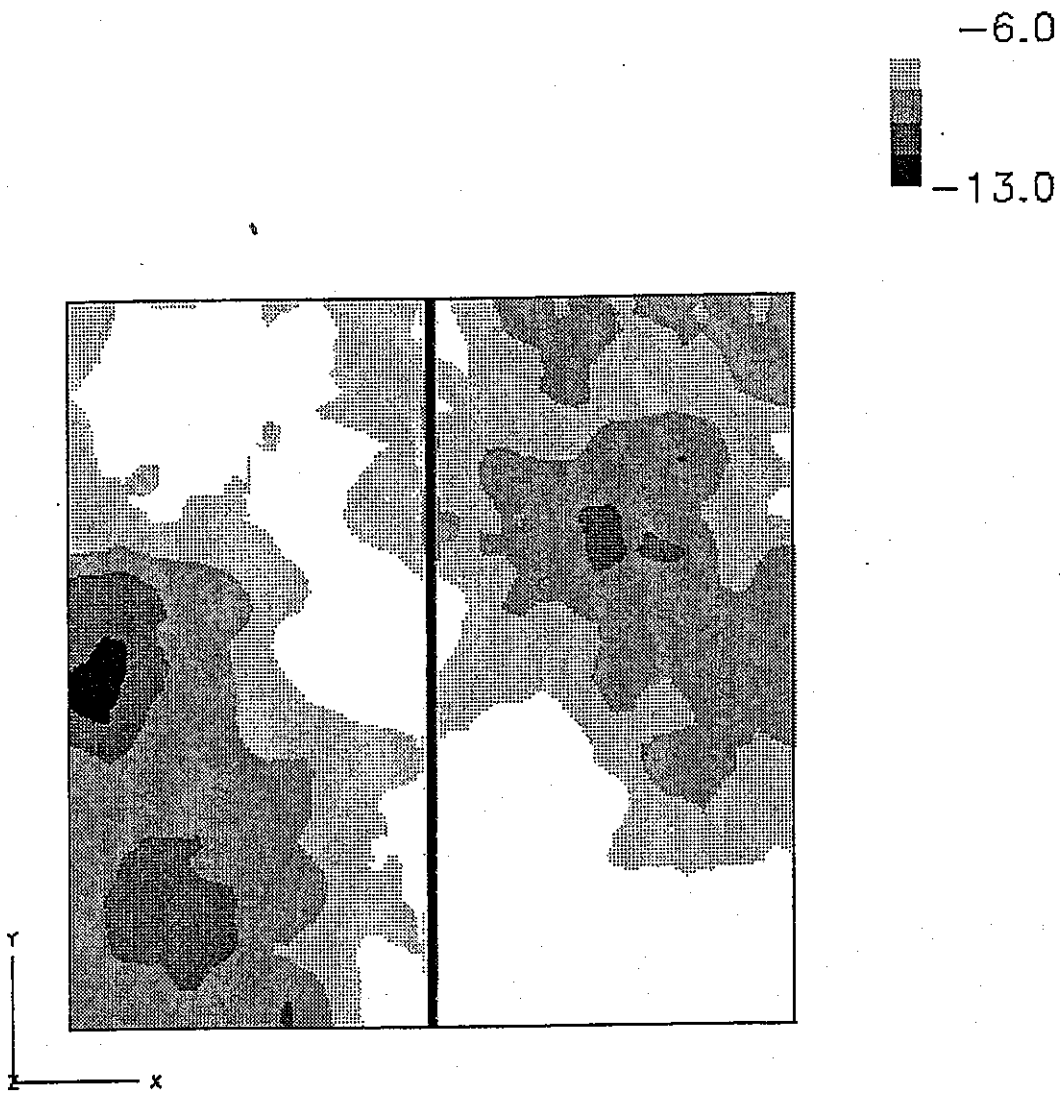


図 4.3-19 Porsim No.19 で使用する不均質透水係数分布 (Z=-100m 断面)
 ((Sequential Gaussian Simulation) によって算出された不均質場使用)

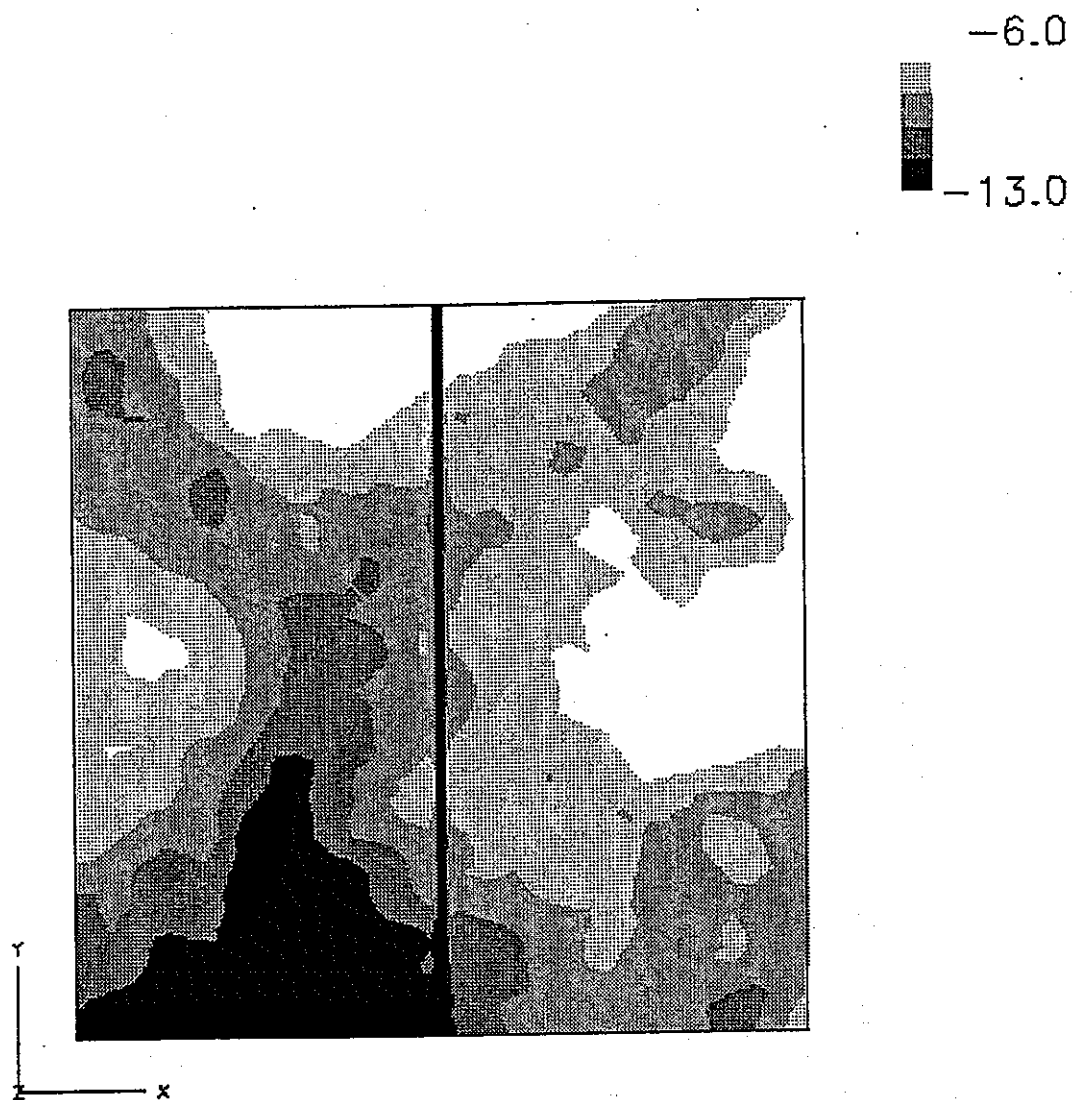


図 4.3-20 Porsim No.20 で使用する不均質透水係数分布 (Z=-100m 断面)
 ((Sequential Gaussian Simulation) によって算出された不均質場使用)

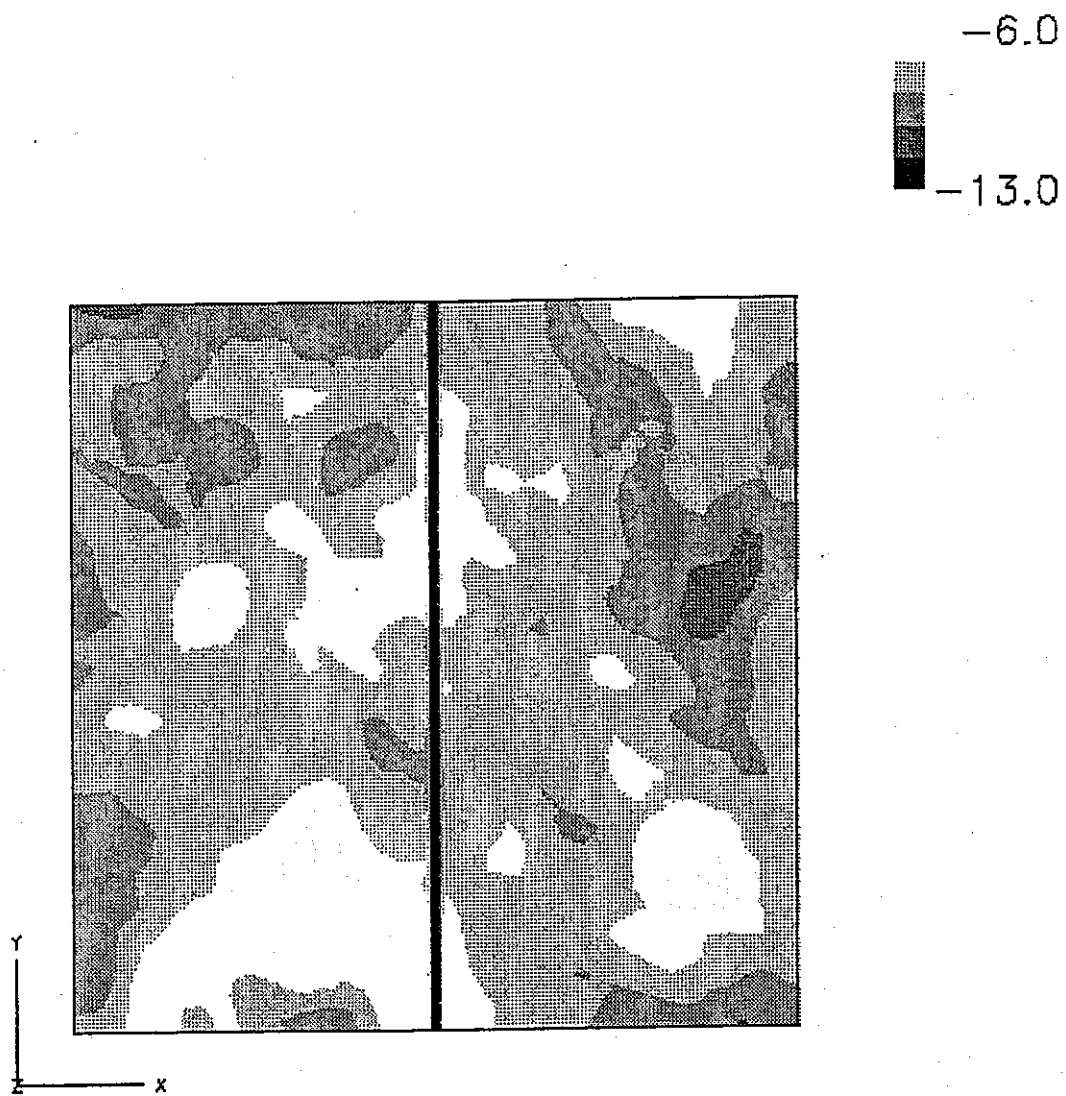


図 4.3-21 Porsim No.21 で使用する不均質透水係数分布 (Z=-100m 断面)
 ((Sequential Gaussian Simulation) によって算出された不均質場使用)

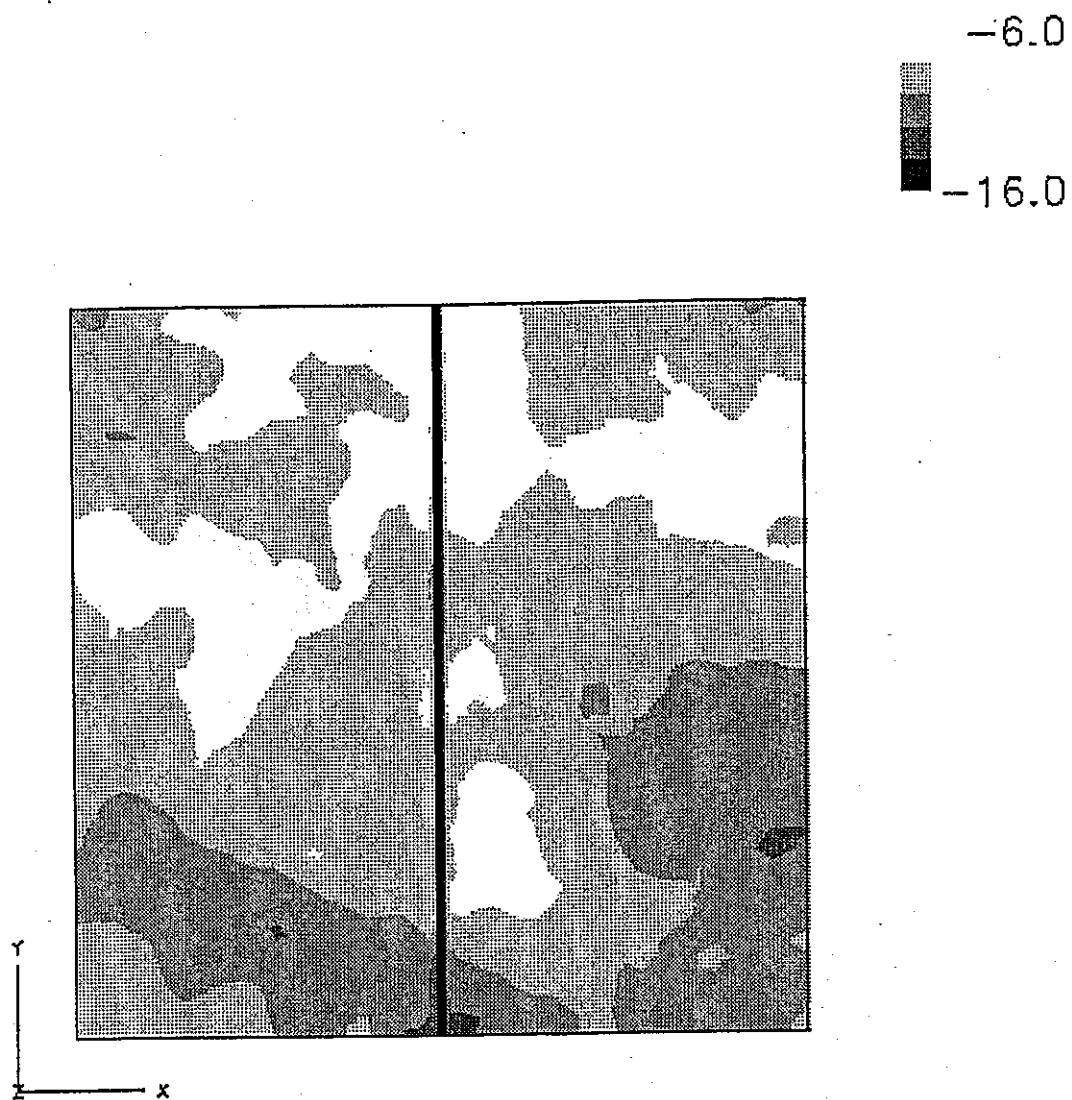


図 4.3-22 Porsim No.22 で使用する不均質透水係数分布 (Z=-100m 断面)
 ((Sequential Gaussian Simulation) によって算出された不均質場使用)

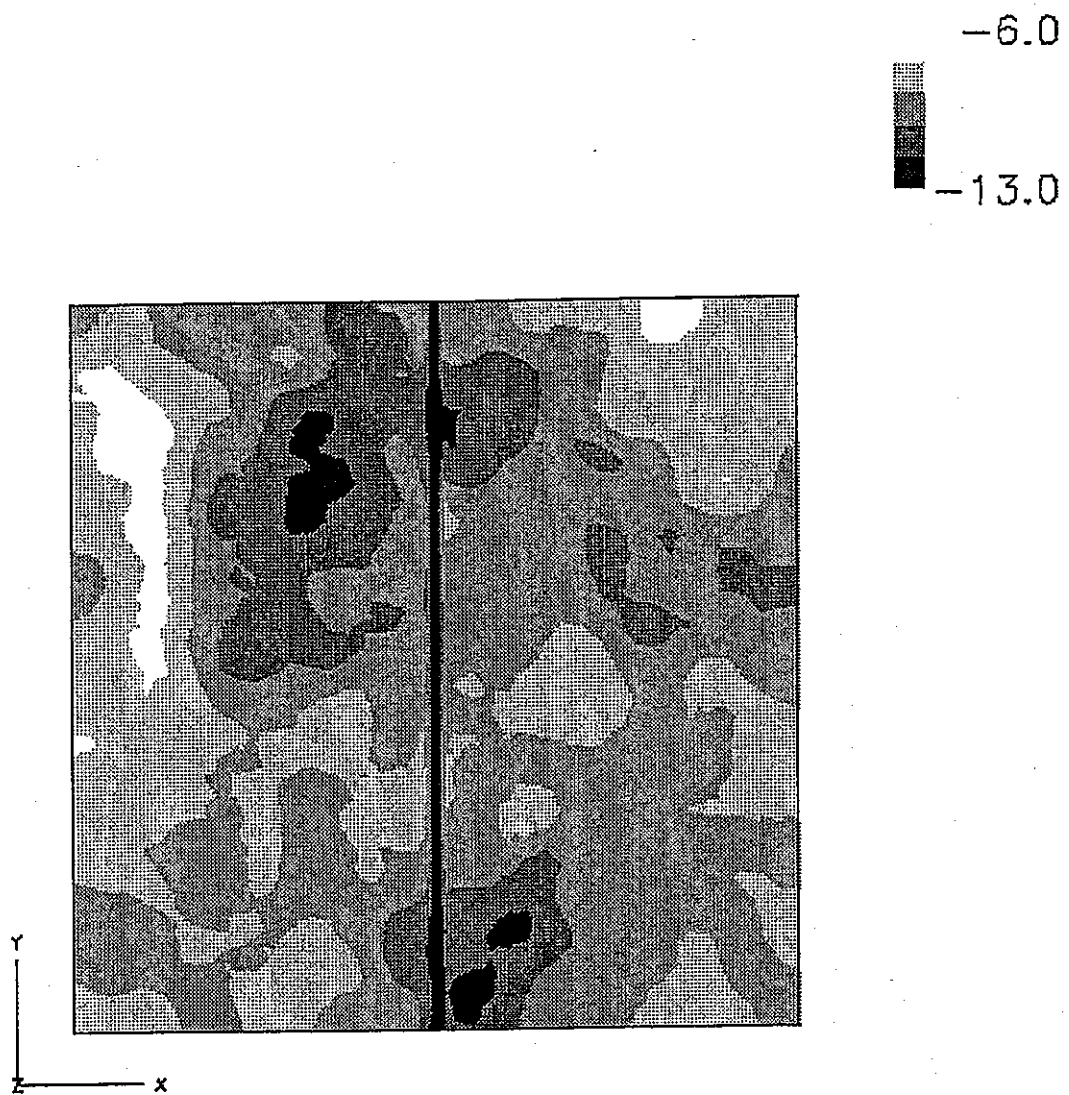


図 4.3-23 Porsim No.23 で使用する不均質透水係数分布 (Z=-100m 断面)
 ((Sequential Gaussian Simulation) によって算出された不均質場使用)

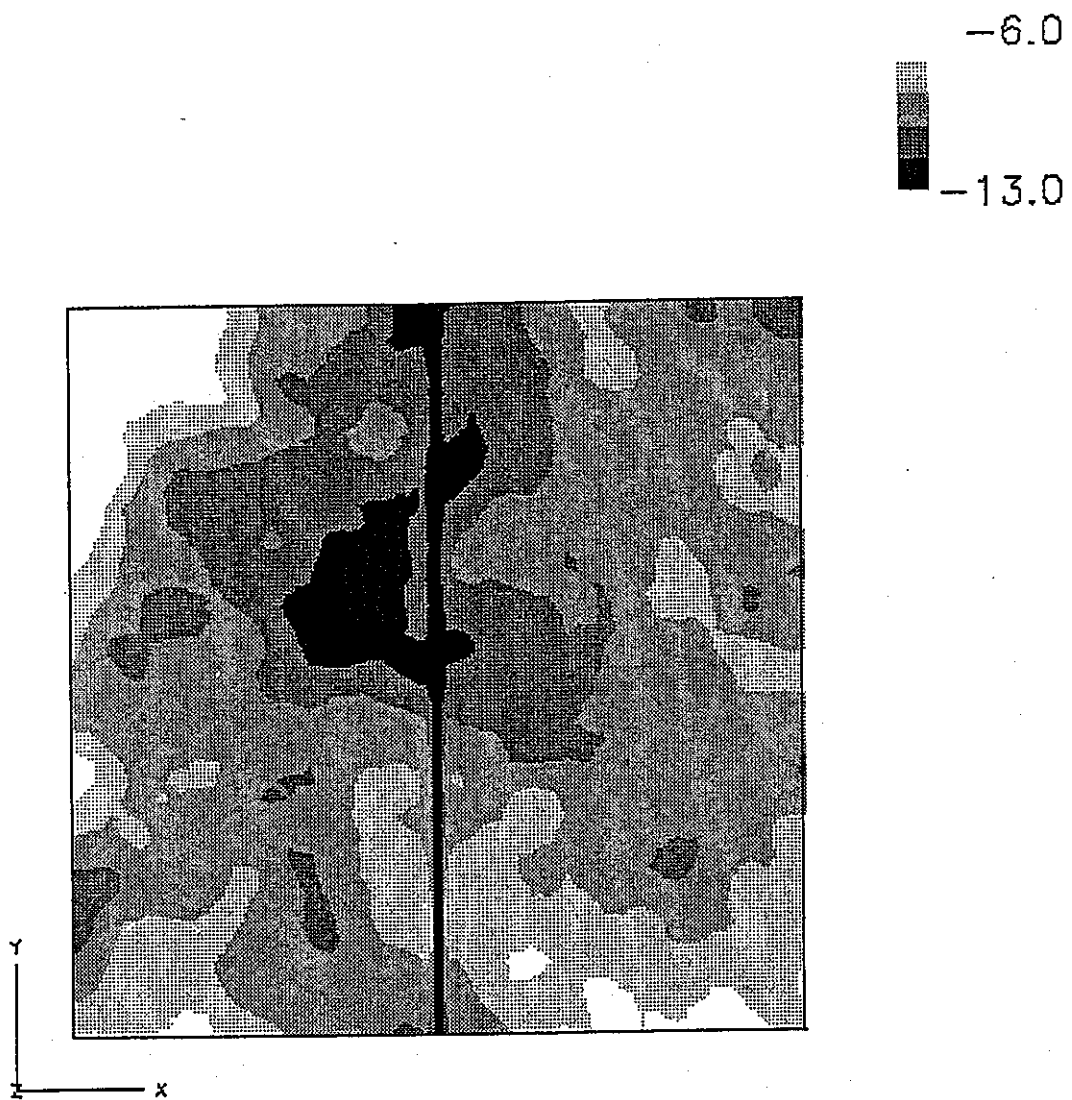


図 4.3-24 Porsim No.24 で使用する不均質透水係数分布 (Z=-100m 断面)
 ((Sequential Gaussian Simulation) によって算出された不均質場使用)

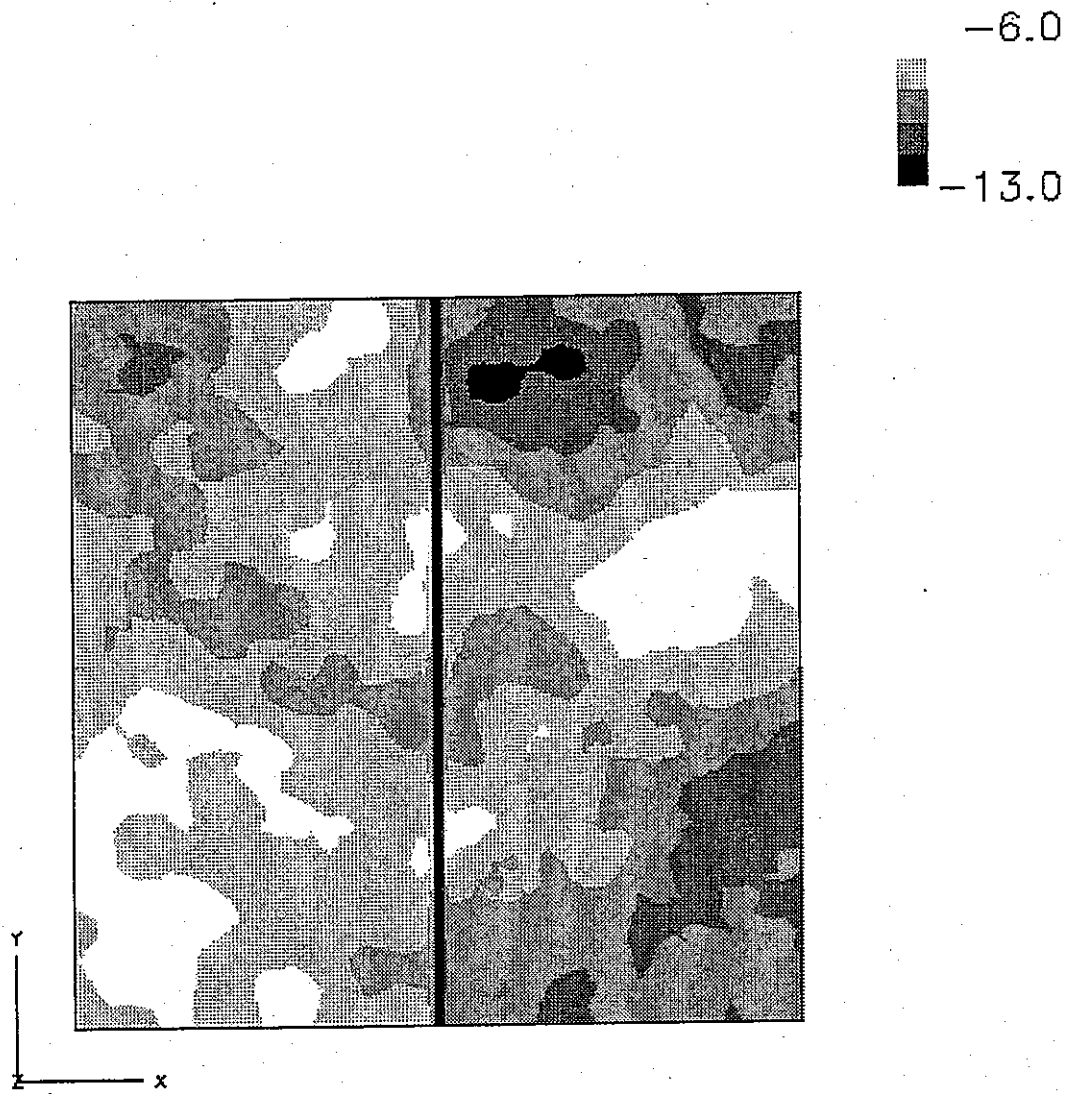


図 4.3-25 Porsim No.25 で使用する不均質透水係数分布 (Z=-100m 断面)
 ((Sequential Gaussian Simulation) によって算出された不均質場使用)

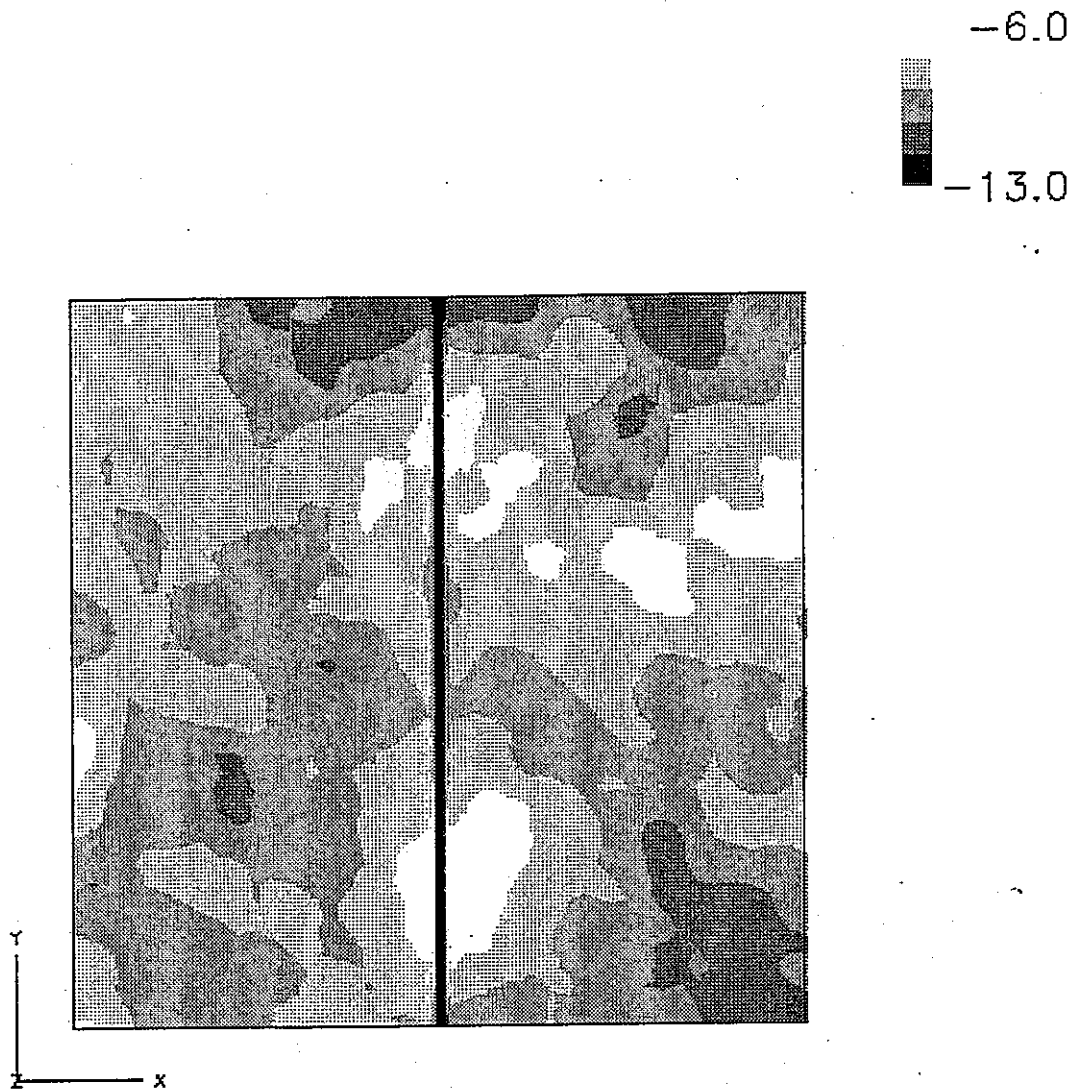


図 4.3-26 Porsim No.26 で使用する不均質透水係数分布 (Z=-100m 断面)
 ((Sequential Gaussian Simulation) によって算出された不均質場使用)

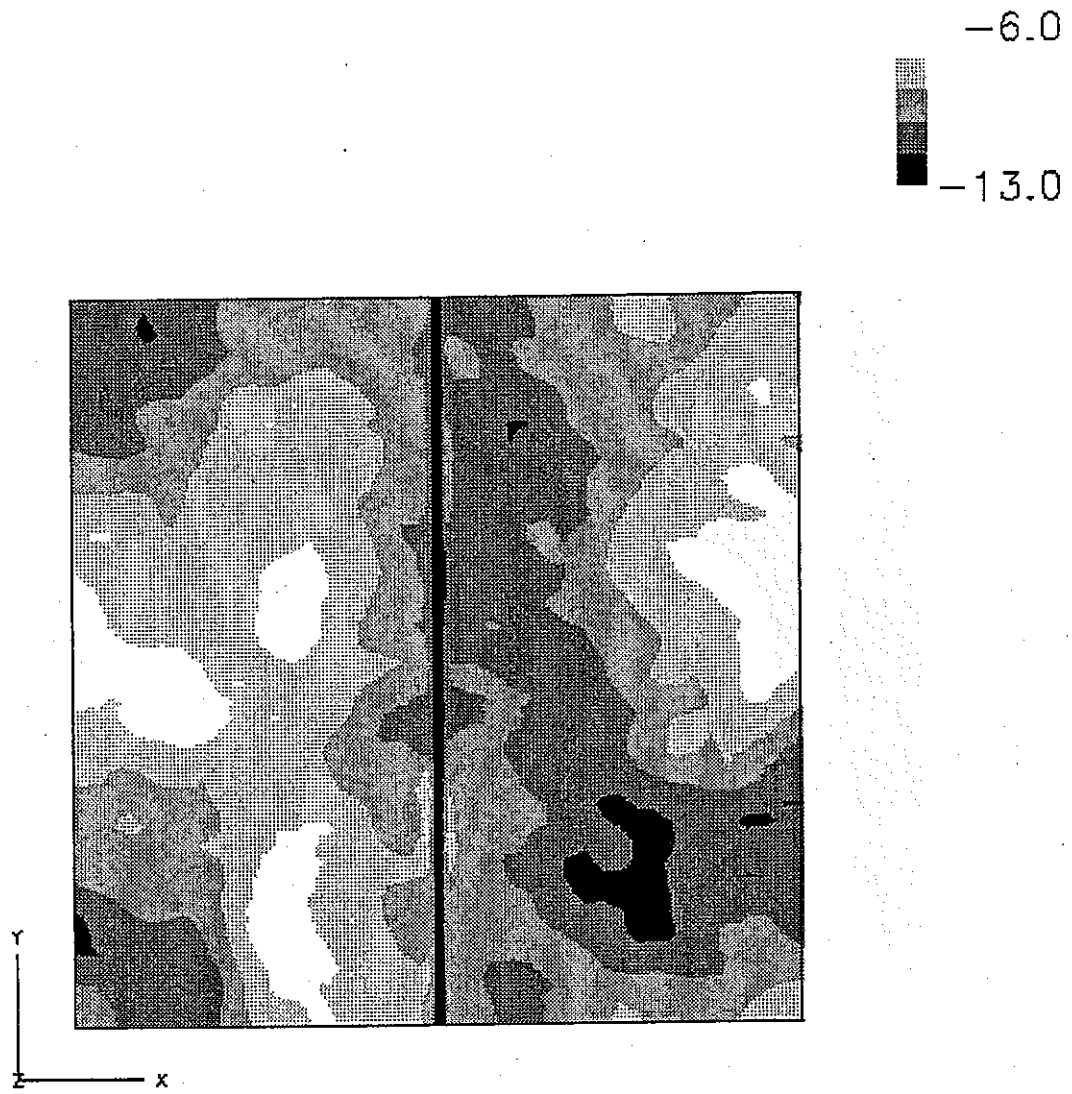


図 4.3-27 Porsim No.27 で使用する不均質透水係数分布 ($Z=-100\text{m}$ 断面)
 ((Sequential Gaussian Simulation) によって算出された不均質場使用)

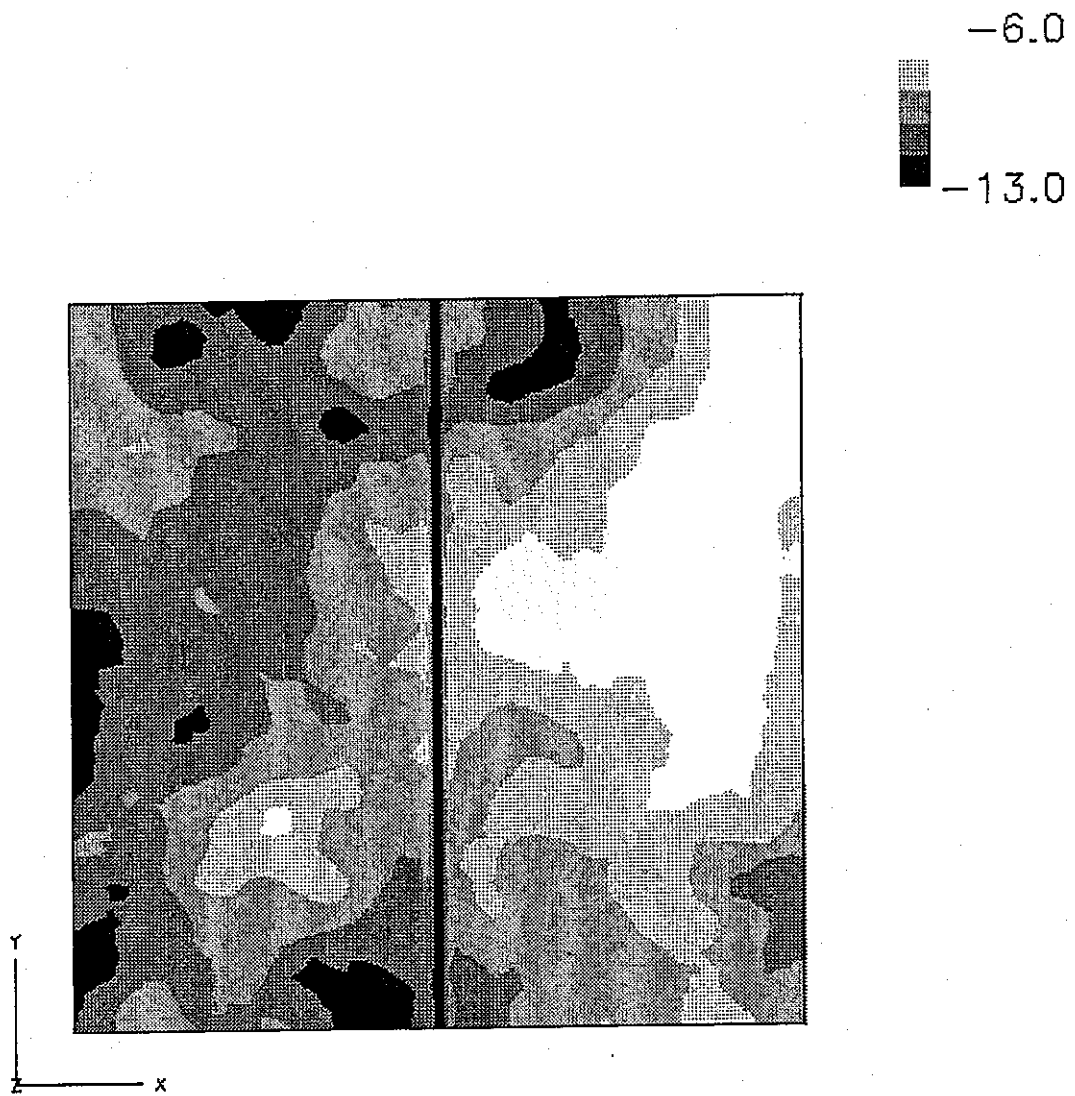


図 4.3-28 Porsim No.28 で使用する不均質透水係数分布 (Z=-100m 断面)
 ((Sequential Gaussian Simulation) によって算出された不均質場使用)

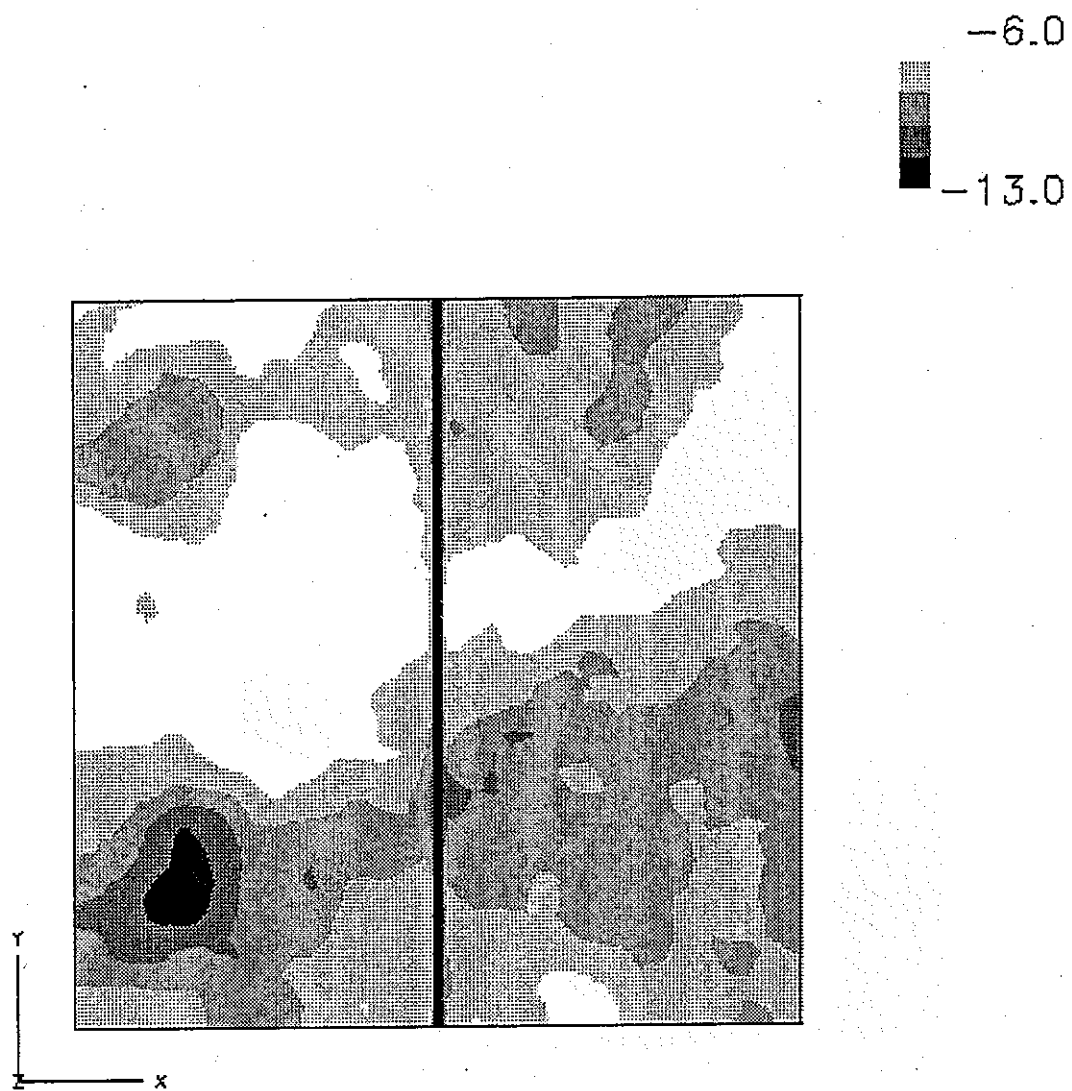


図 4.3-29 Porsim No.29 で使用する不均質透水係数分布 (Z=-100m 断面)
 ((Sequential Gaussian Simulation) によって算出された不均質場使用)

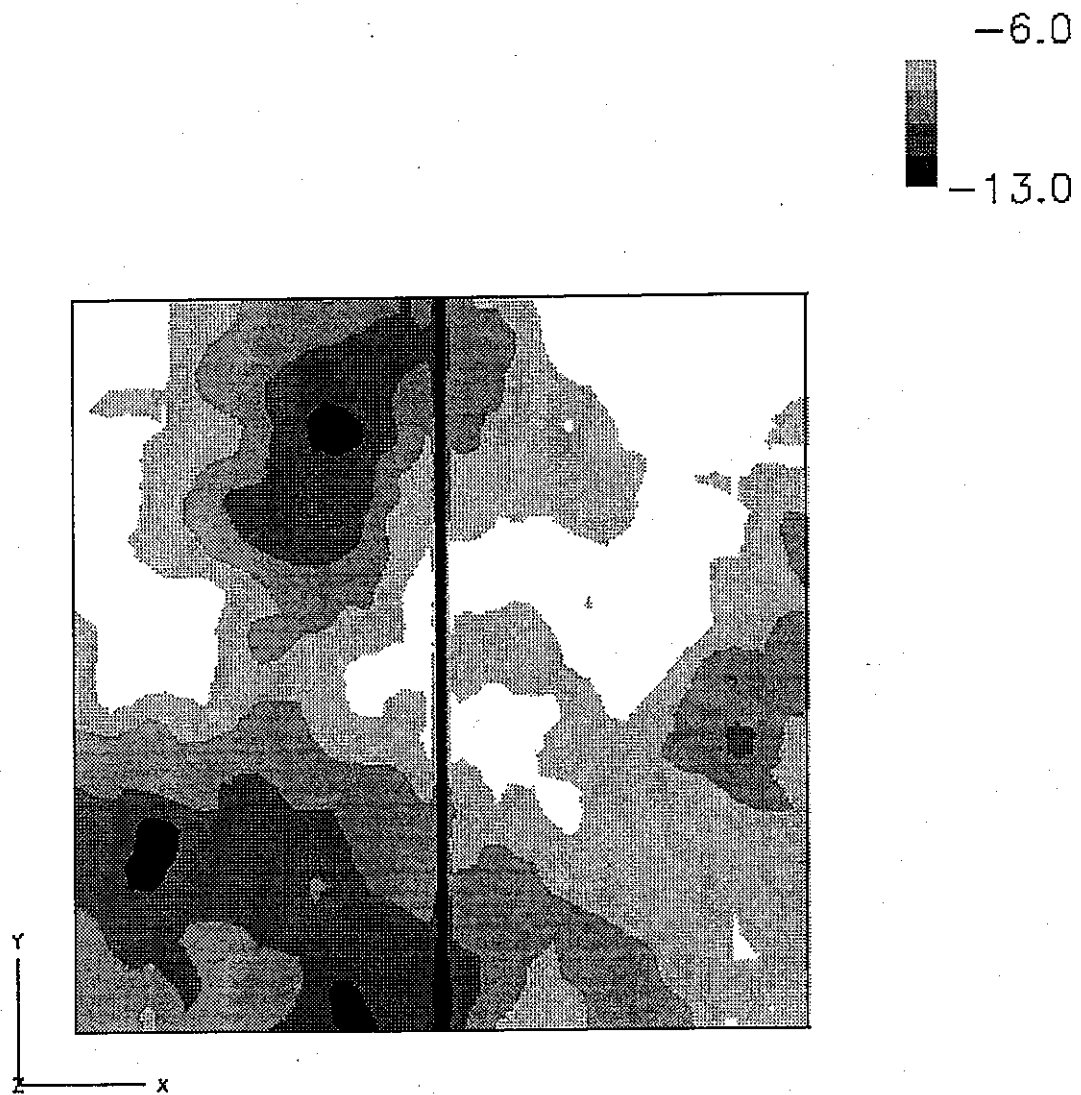
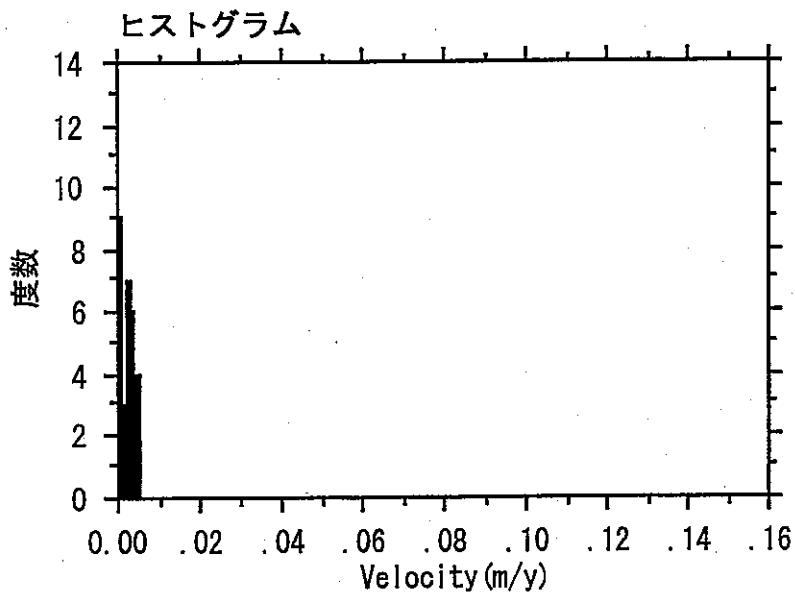


図 4.3-30 Porsim No. 30 で使用する不均質透水係数分布 (Z=-100m 断面)
 ((Sequential Gaussian Simulation) によって算出された不均質場使用)

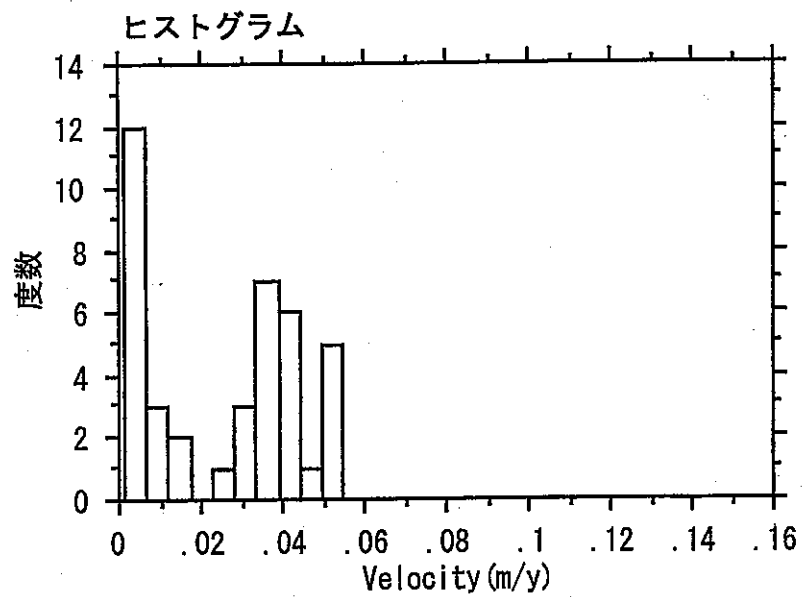


記述統計-連続変数

	Velocity (m/y)
平均	2.543E-3
標準偏差	1.513E-3
標準誤差	2.393E-4
例数	40
最小値	3.304E-4
最大値	5.413E-3
欠測値の数	0

図 4.3-31 代表的不均質場における流速の統計量

Porsim No.07 : 流速が遅いケース

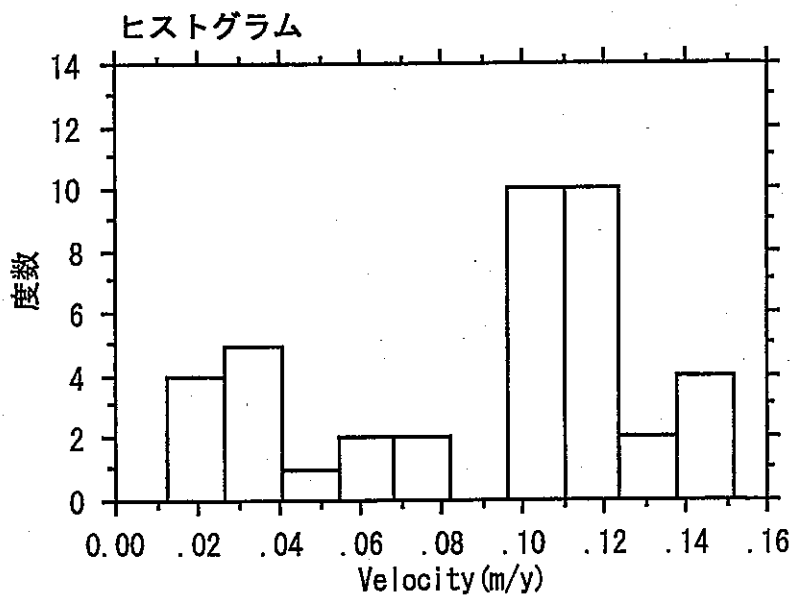


記述統計-連続変数

	Velocity (m/y)
平均	2.565E-2
標準偏差	1.809E-2
標準誤差	2.861E-3
例数	40
最小値	1.496E-3
最大値	5.501E-2
欠測値の数	0

図 4.3-32 代表的不均質場における流速の統計量

Porsim No.09 : 流速が平均的分布を示すケース



記述統計-連続変数

	Velocity (m/y)
平均	9.103E-2
標準偏差	4.154E-2
標準誤差	6.569E-3
例数	40
最小値	1.281E-2
最大値	1.518E-1
欠測値の数	0

図 4.3-33 代表的不均質場における流速の統計量
 Porsim No.02 : 流速の分布が広範囲にわたるケース

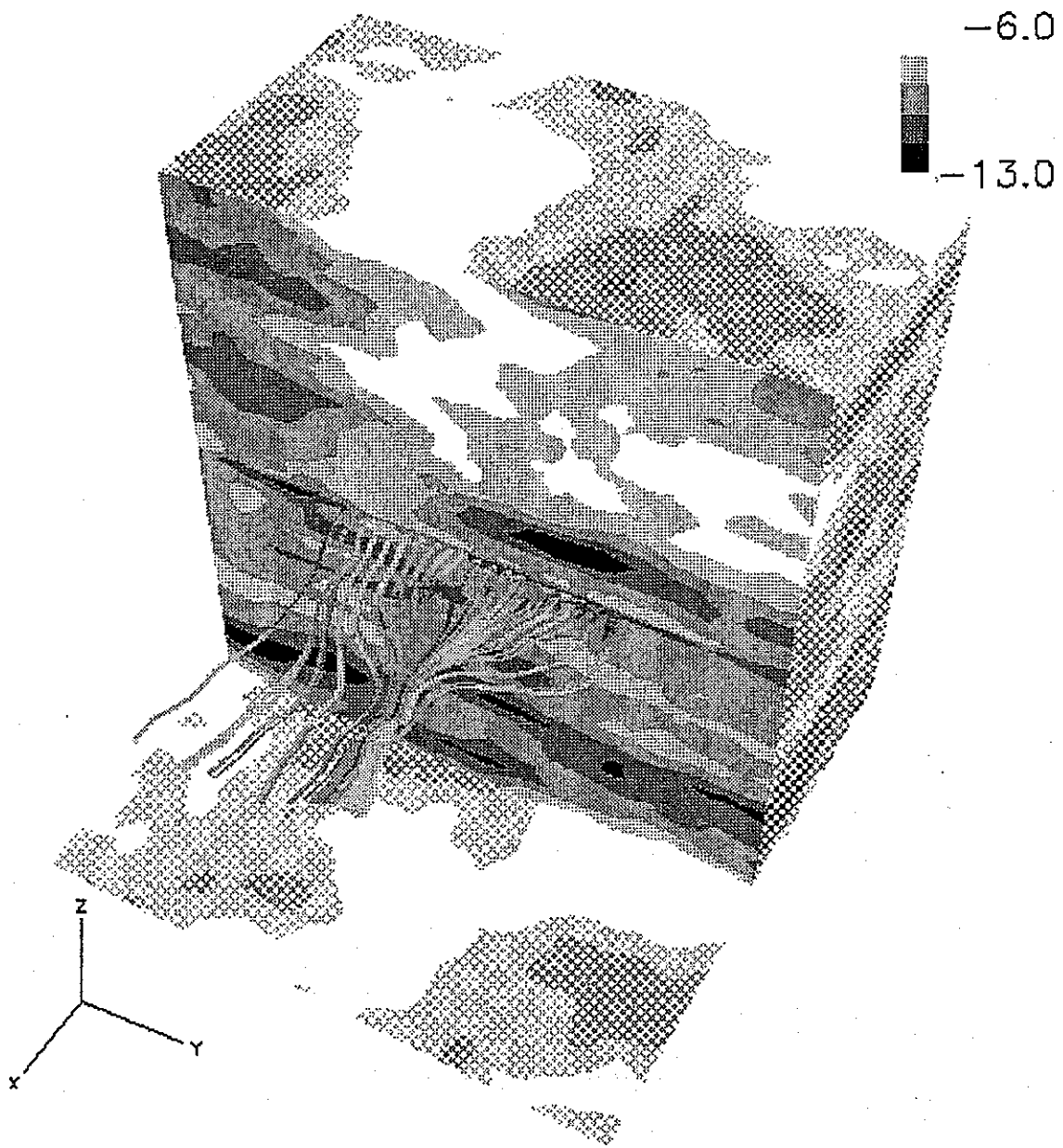


図 4.4-1 三次元水理解析結果及び流線 (Porsim No.1)

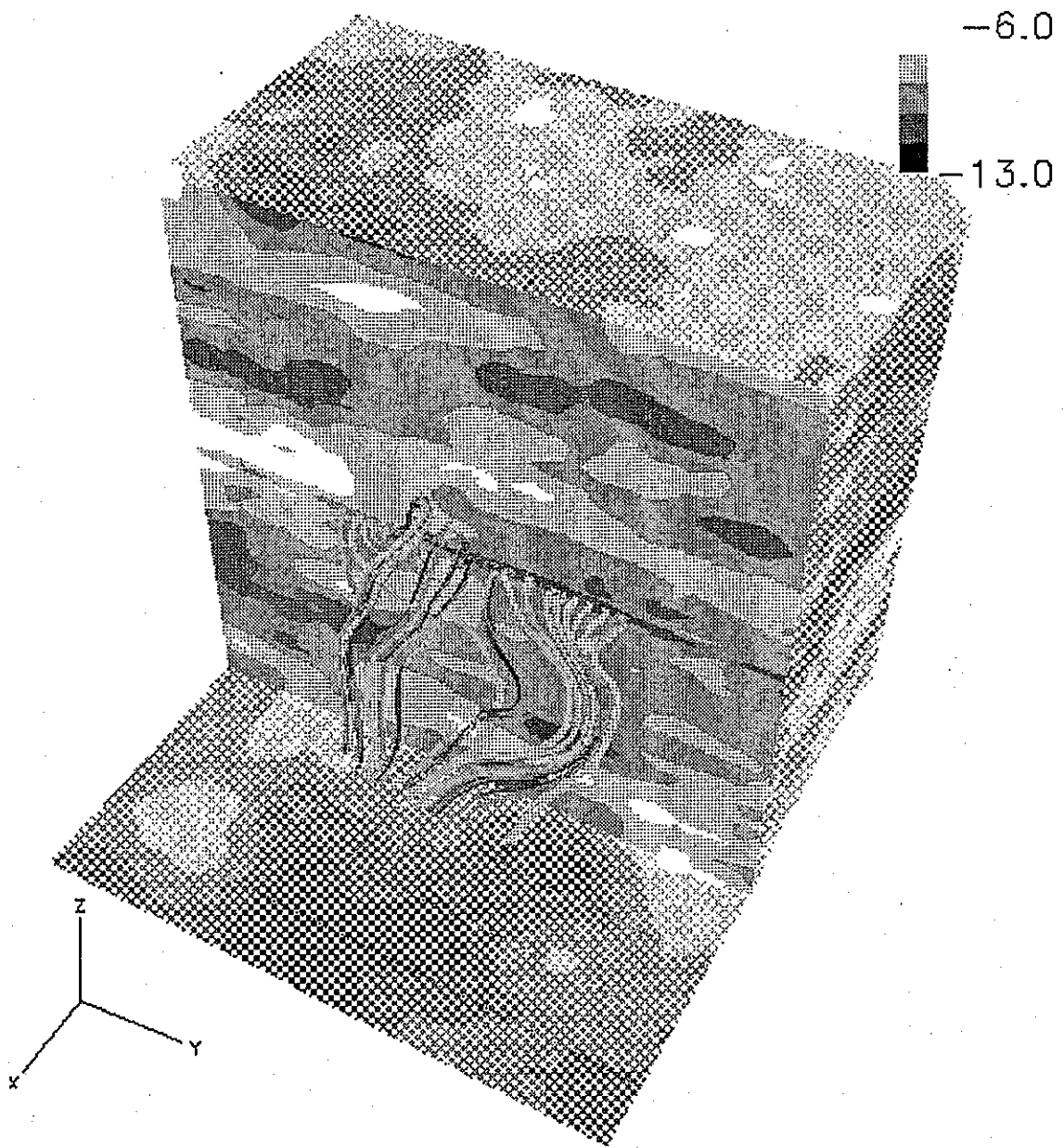


図 4.4-2 三次元水理解析結果及び流線 (Porsim No.2)

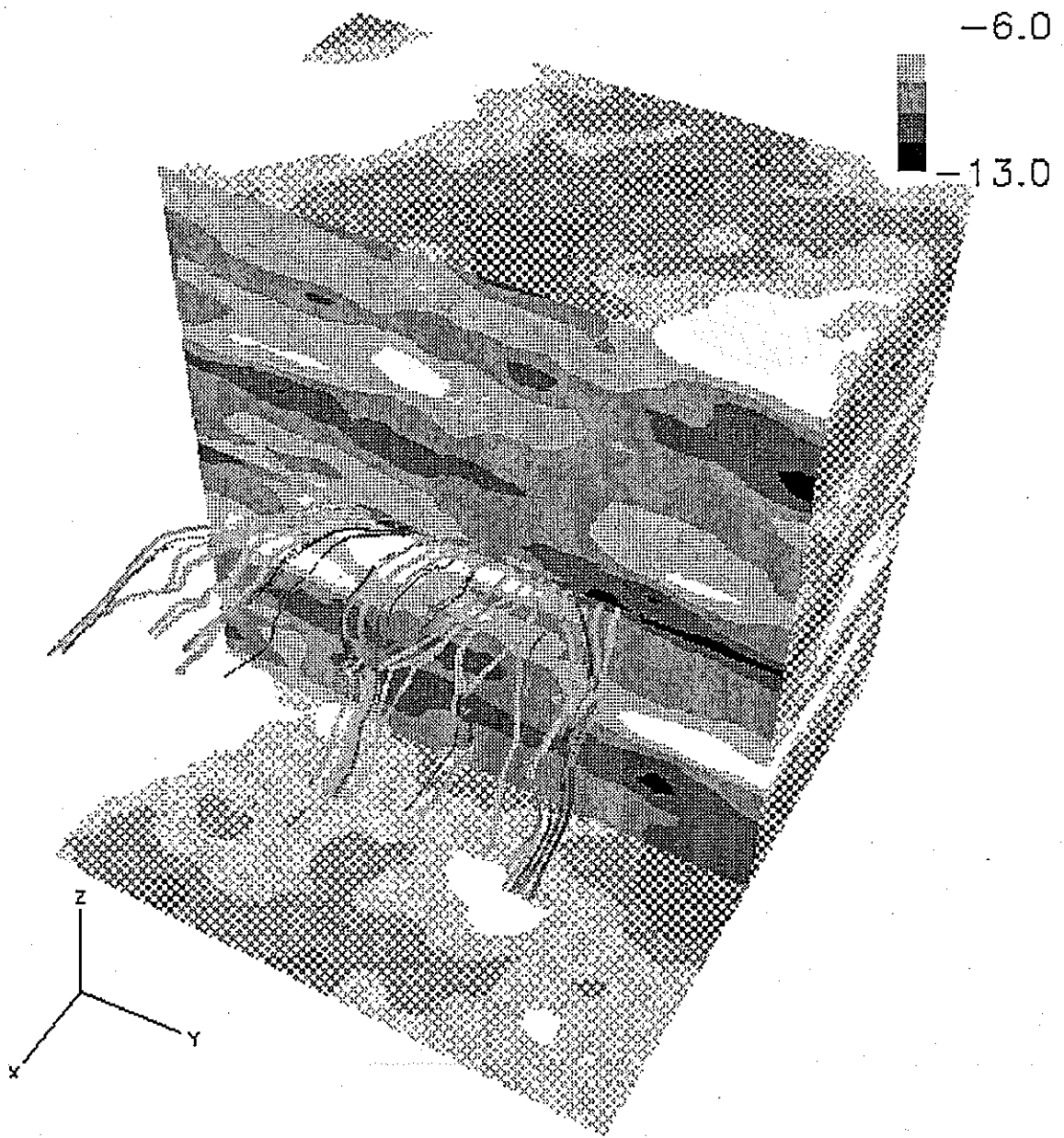


図 4.4-3 三次元水理解析結果及び流線 (Porsim No.3)

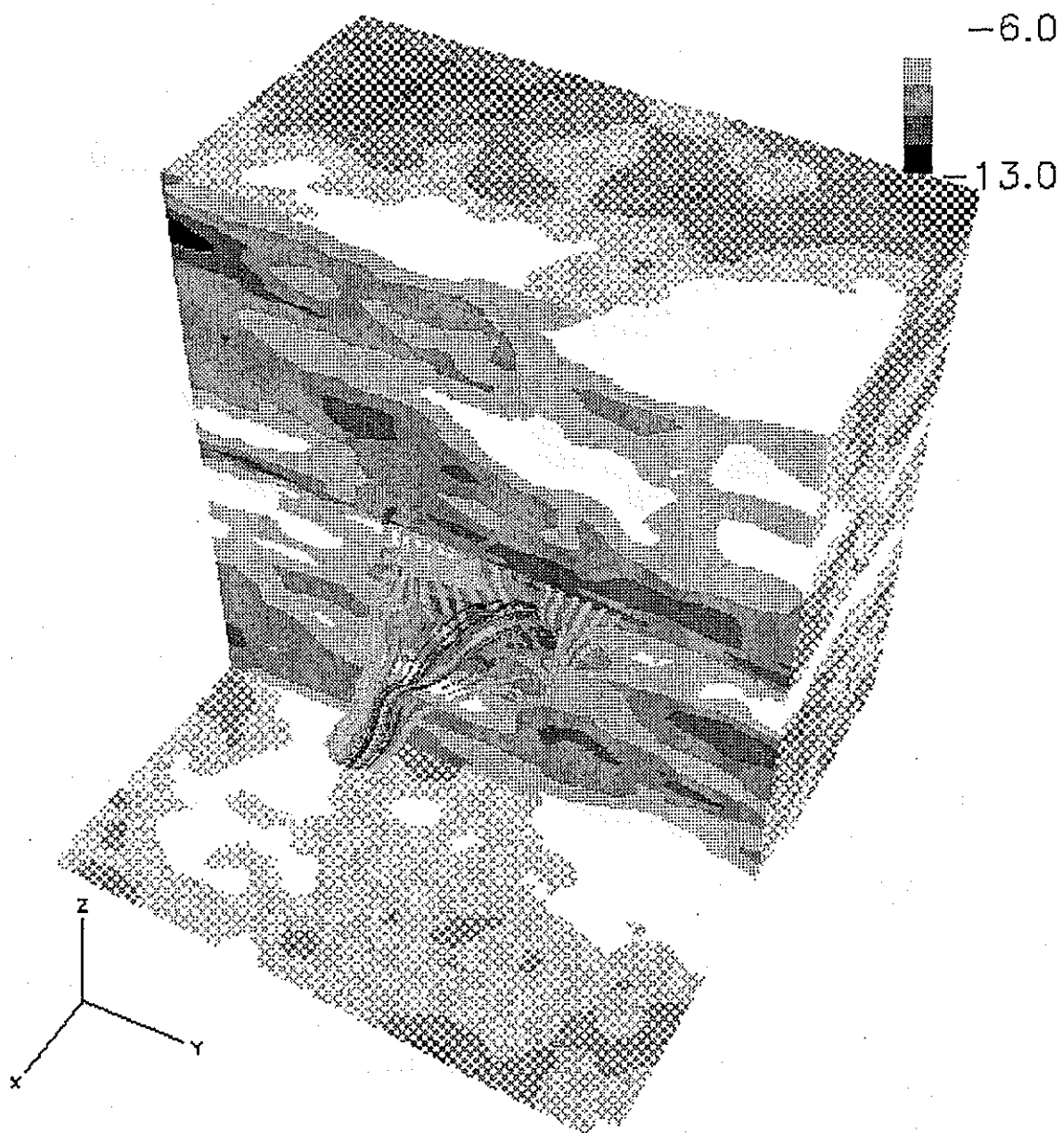


図 4.4-4 三次元水理解析結果及び流線 (Porsim No.4)

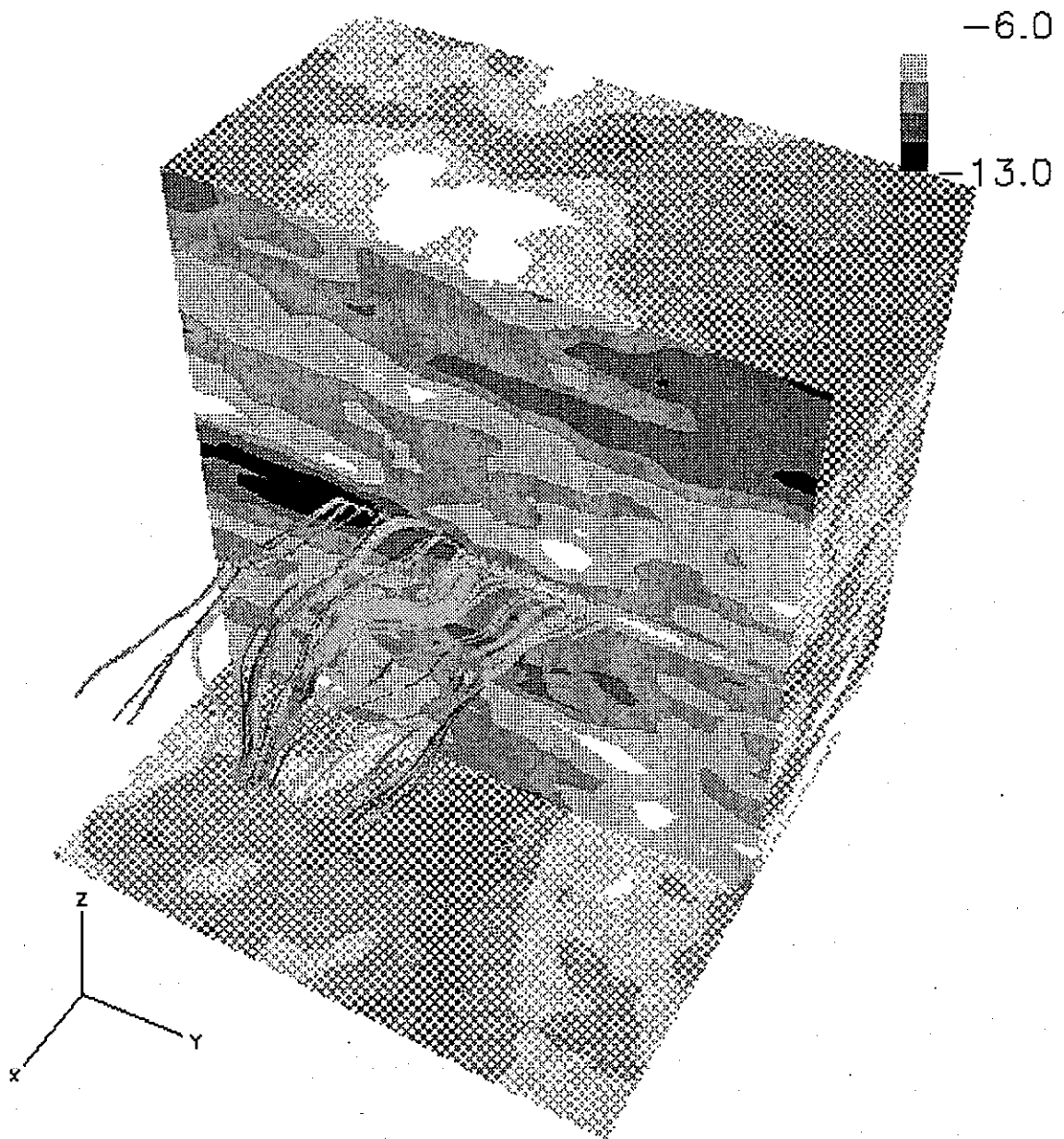


図 4.4-5 三次元水理解析結果及び流线 (Porsim No.5)

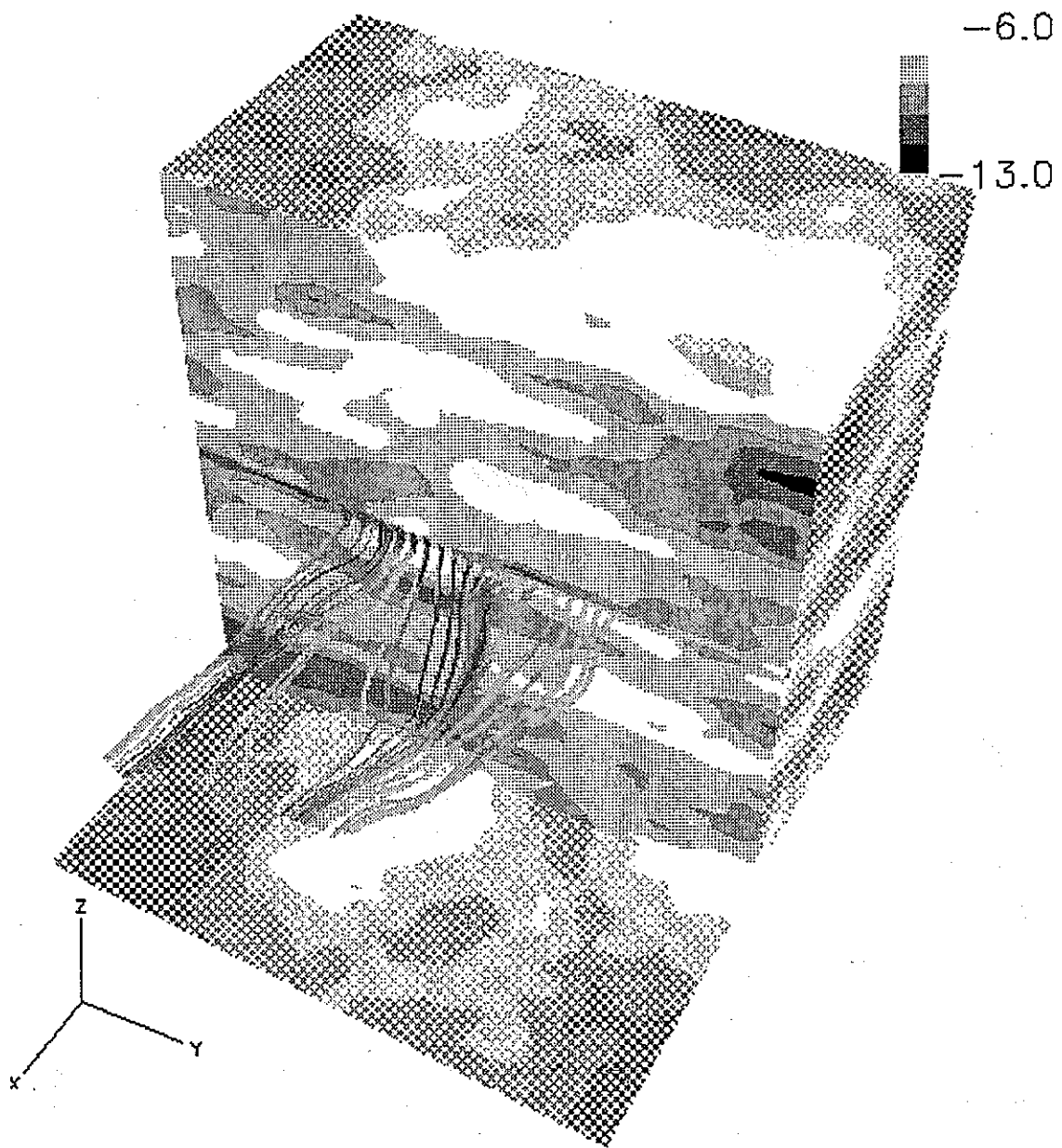


図 4.4-6 三次元水理解析結果及び流線 (Porsim No.6)

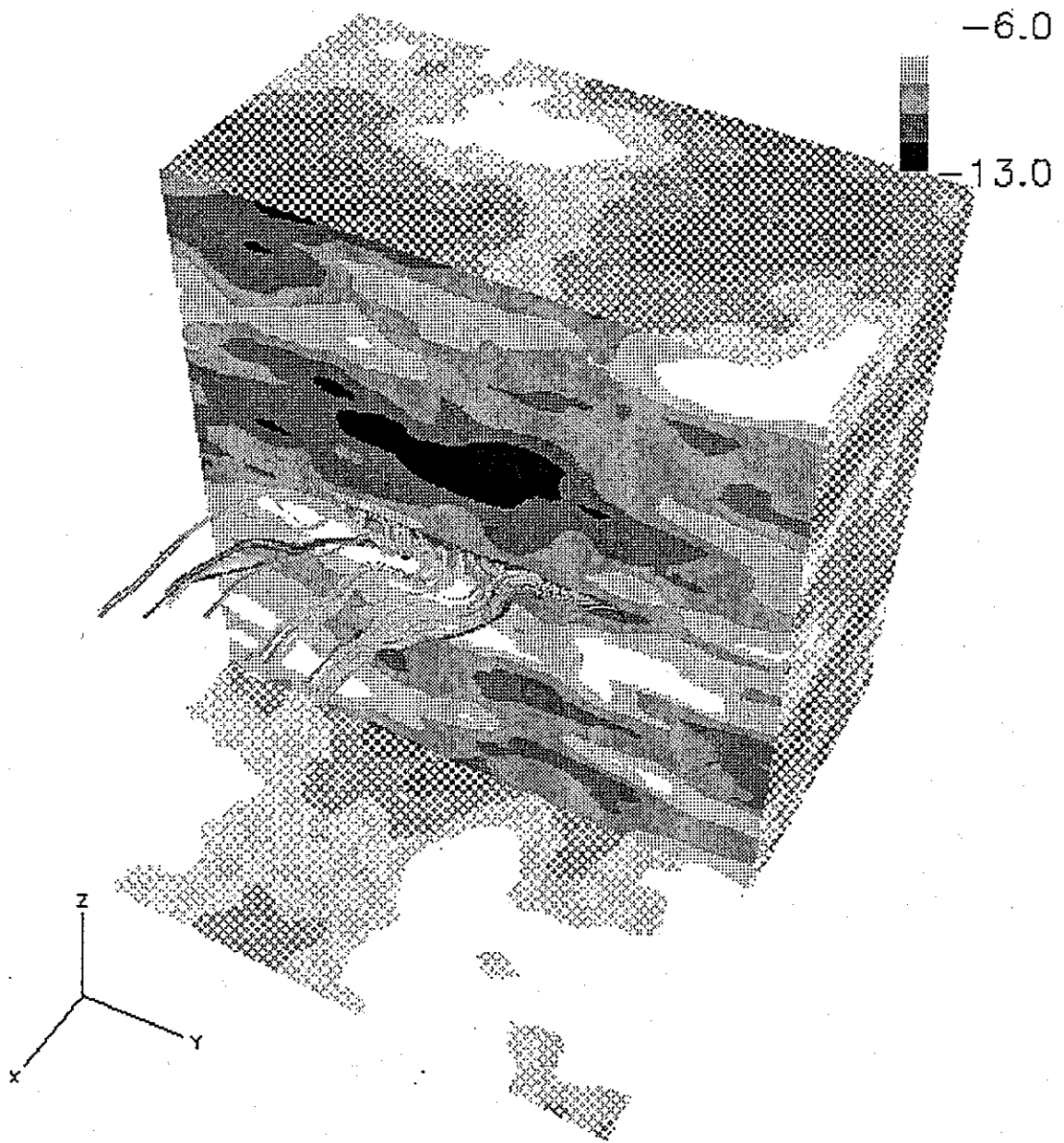


図 4.4-7 三次元水理解析結果及び流線 (Porsim No.7)

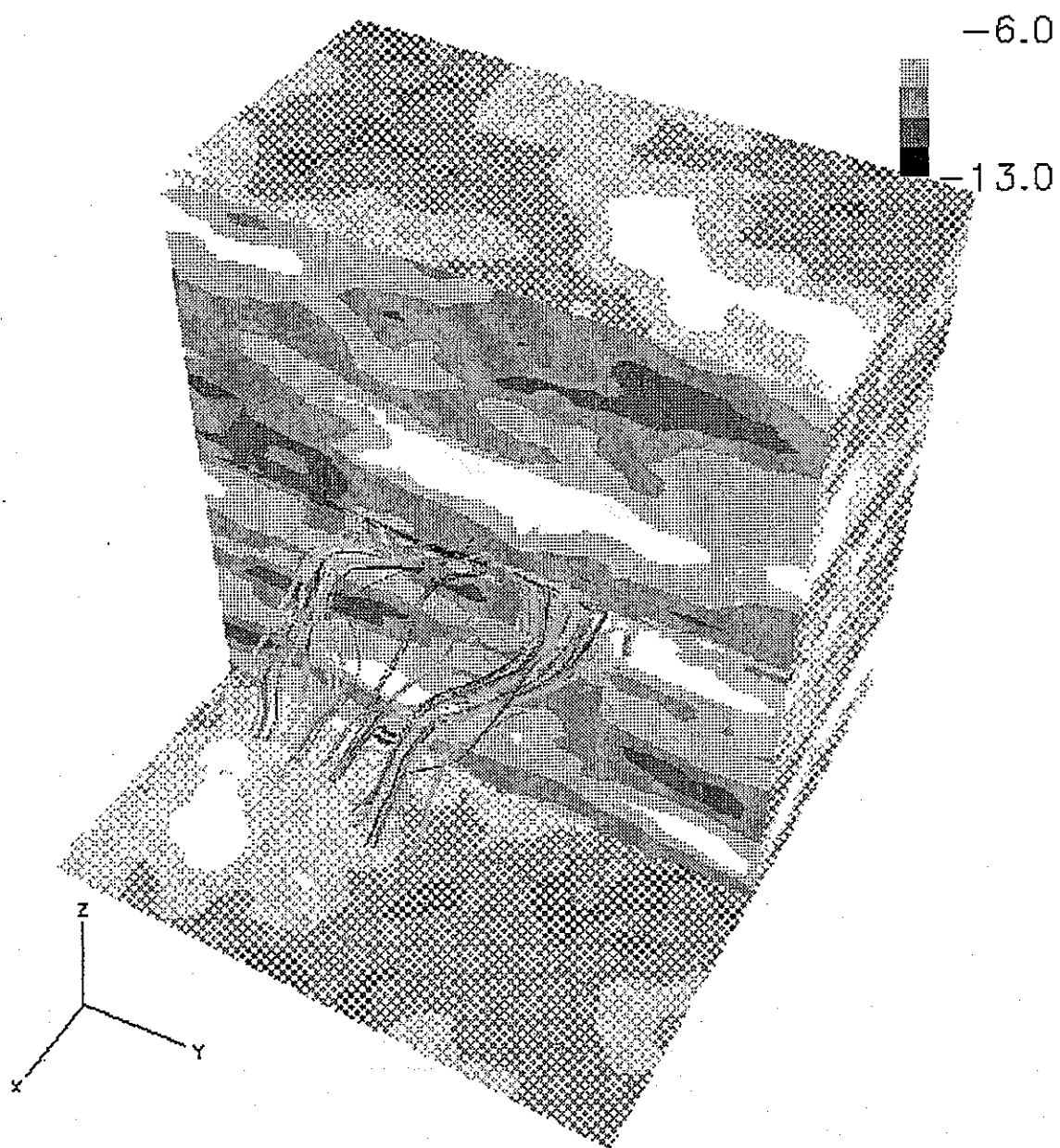


図 4.4-8 三次元水理解析結果及び流線 (Porsim No.8)

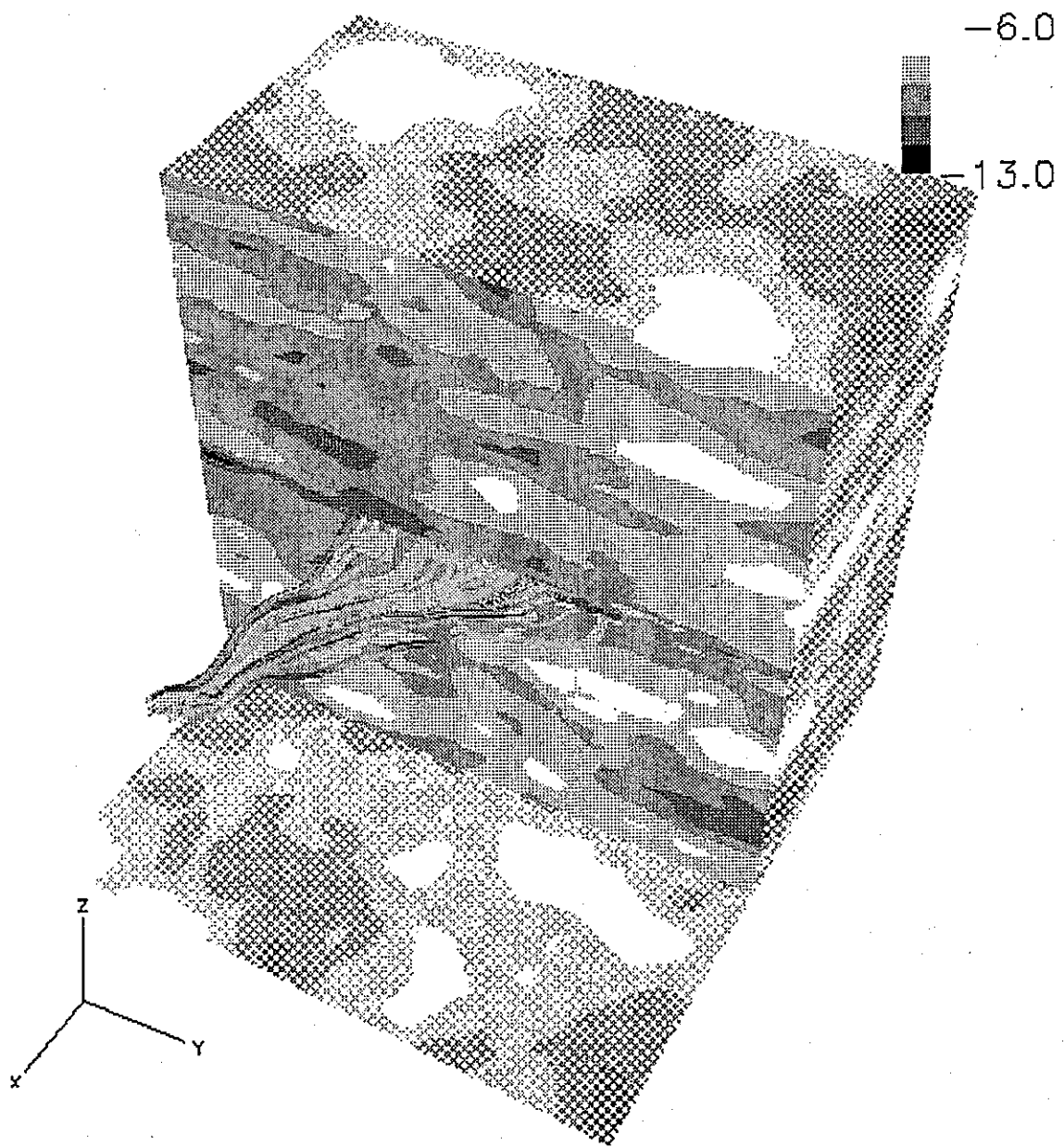


図 4.4-9 三次元水理解析結果及び流線 (Porsim No.9)

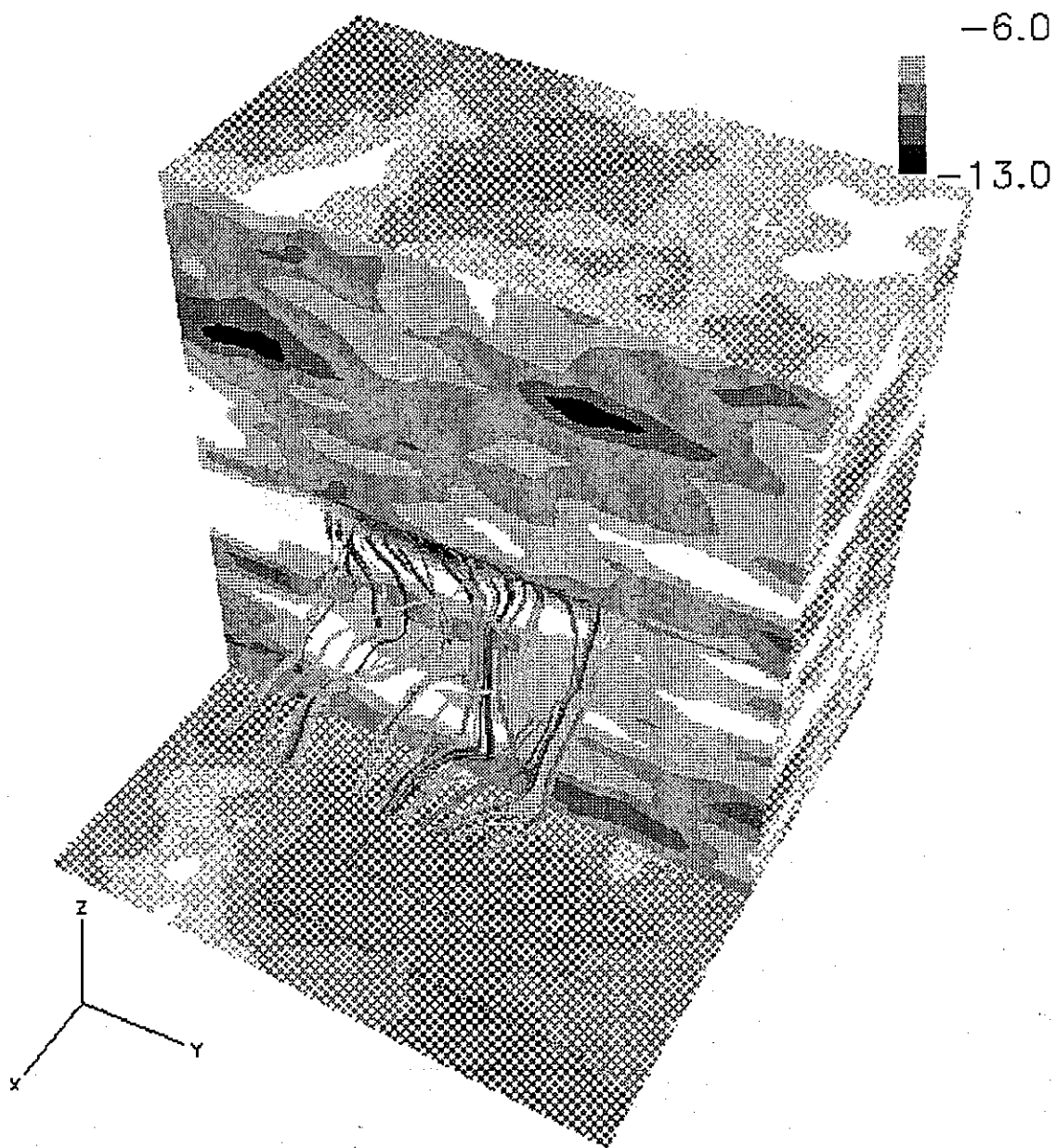


図 4.4-10 三次元水理解析結果及び流線 (Porsim No.10)

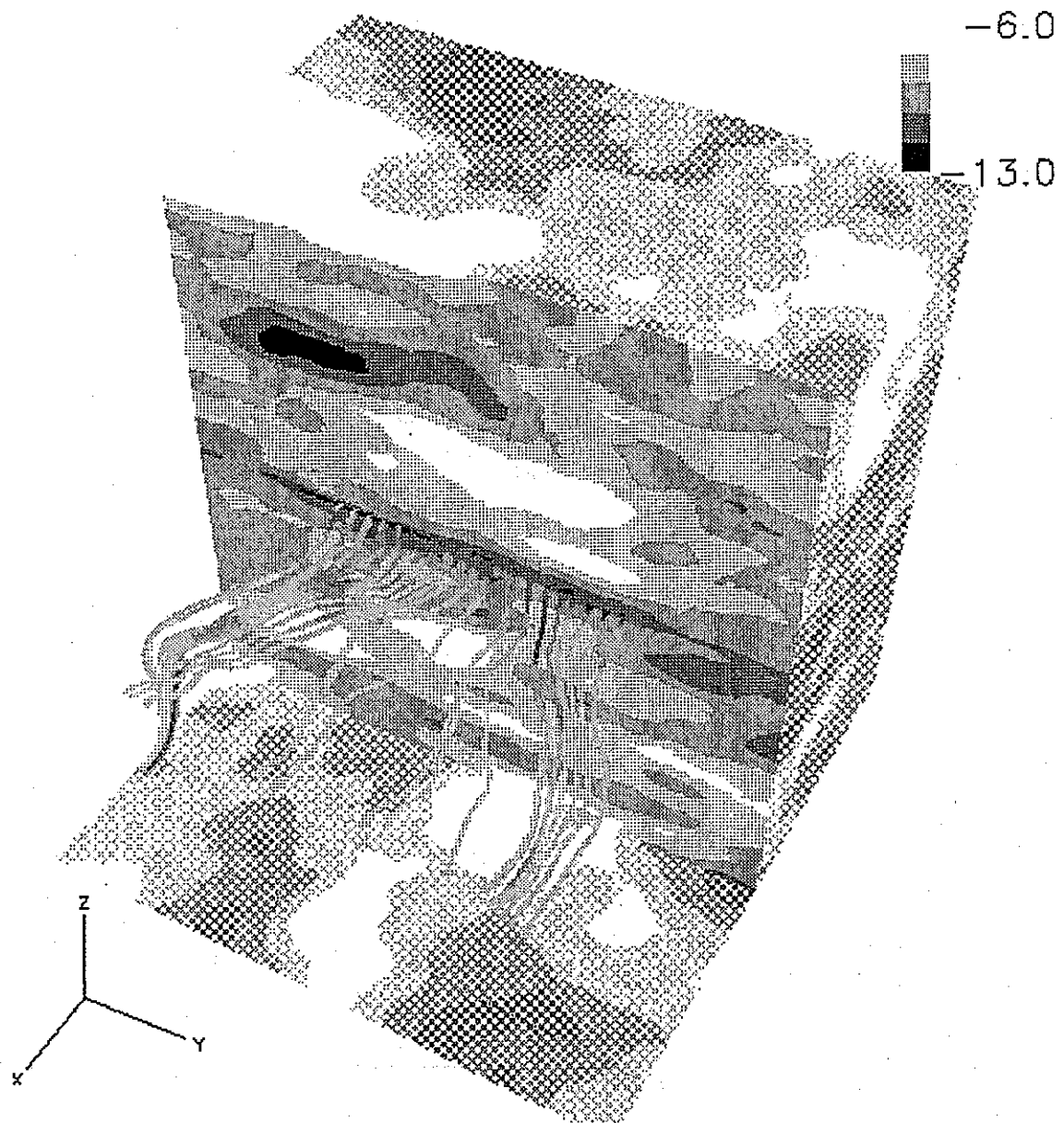


図 4.4-11 三次元水理解析結果及び流線 (Porsim No.11)

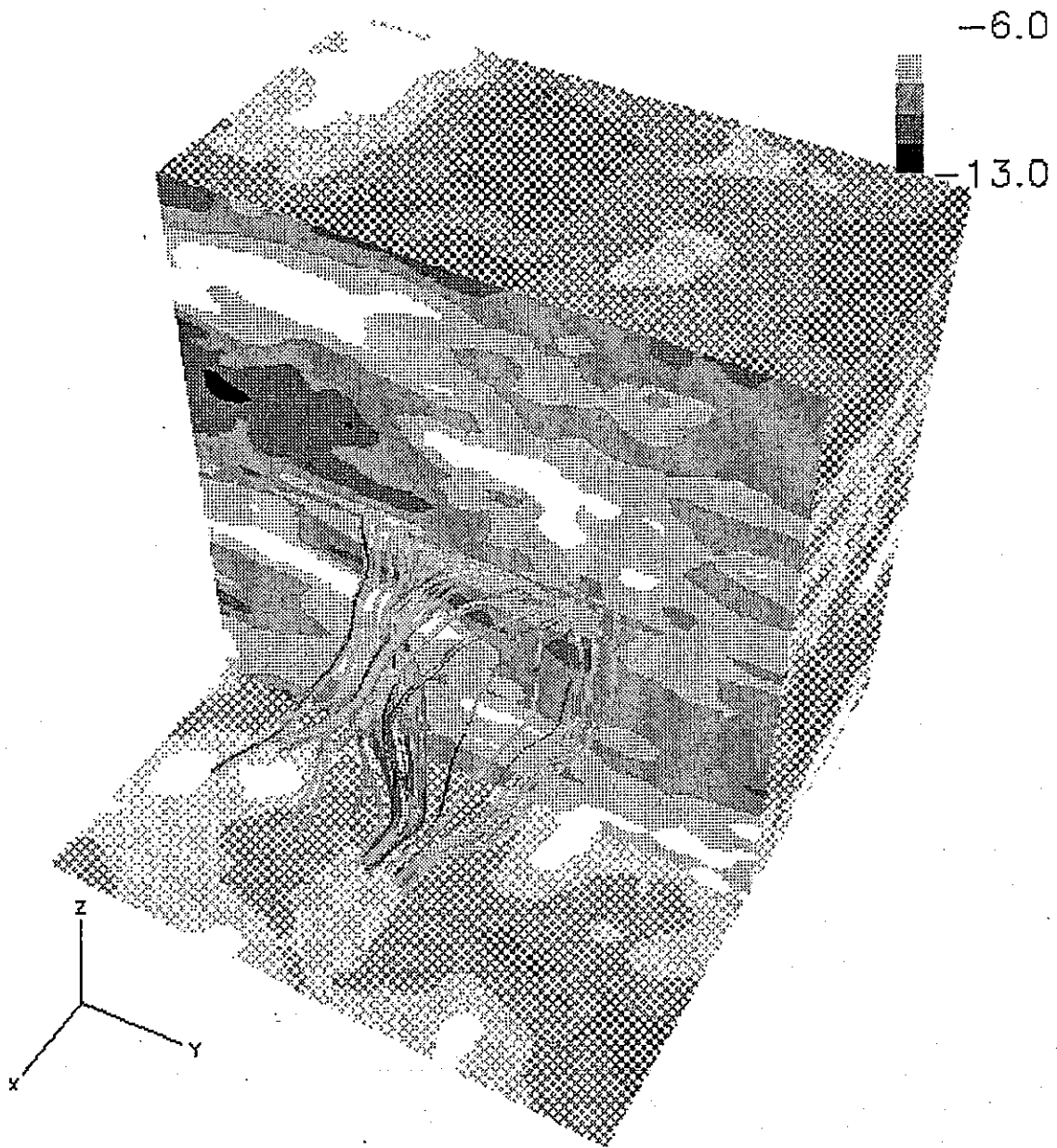


図 4.4-12 三次元水理解析結果及び流線 (Porsim No.12)

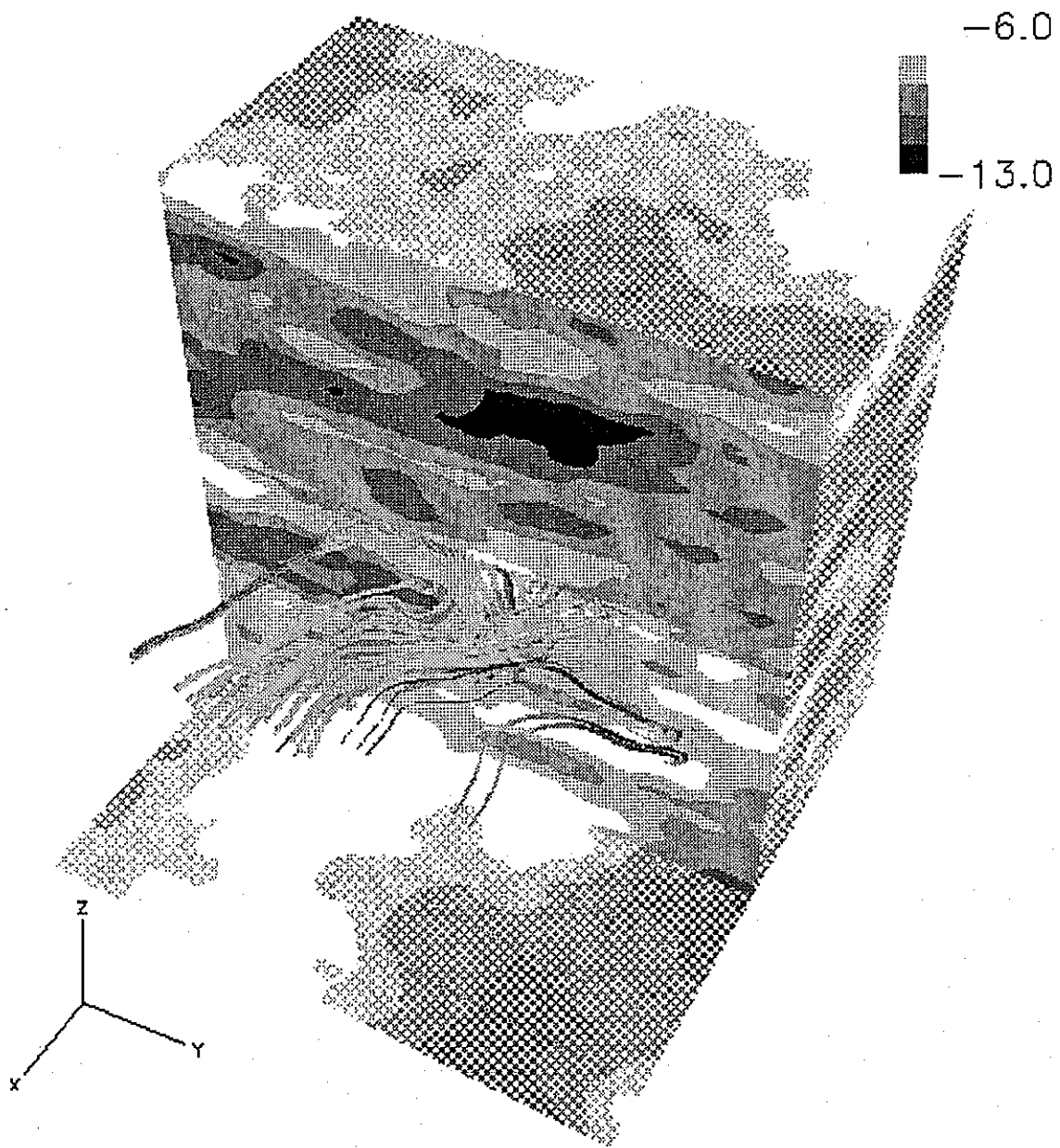


図 4.4-13 三次元水理解析結果及び流線 (Porsim No.13)

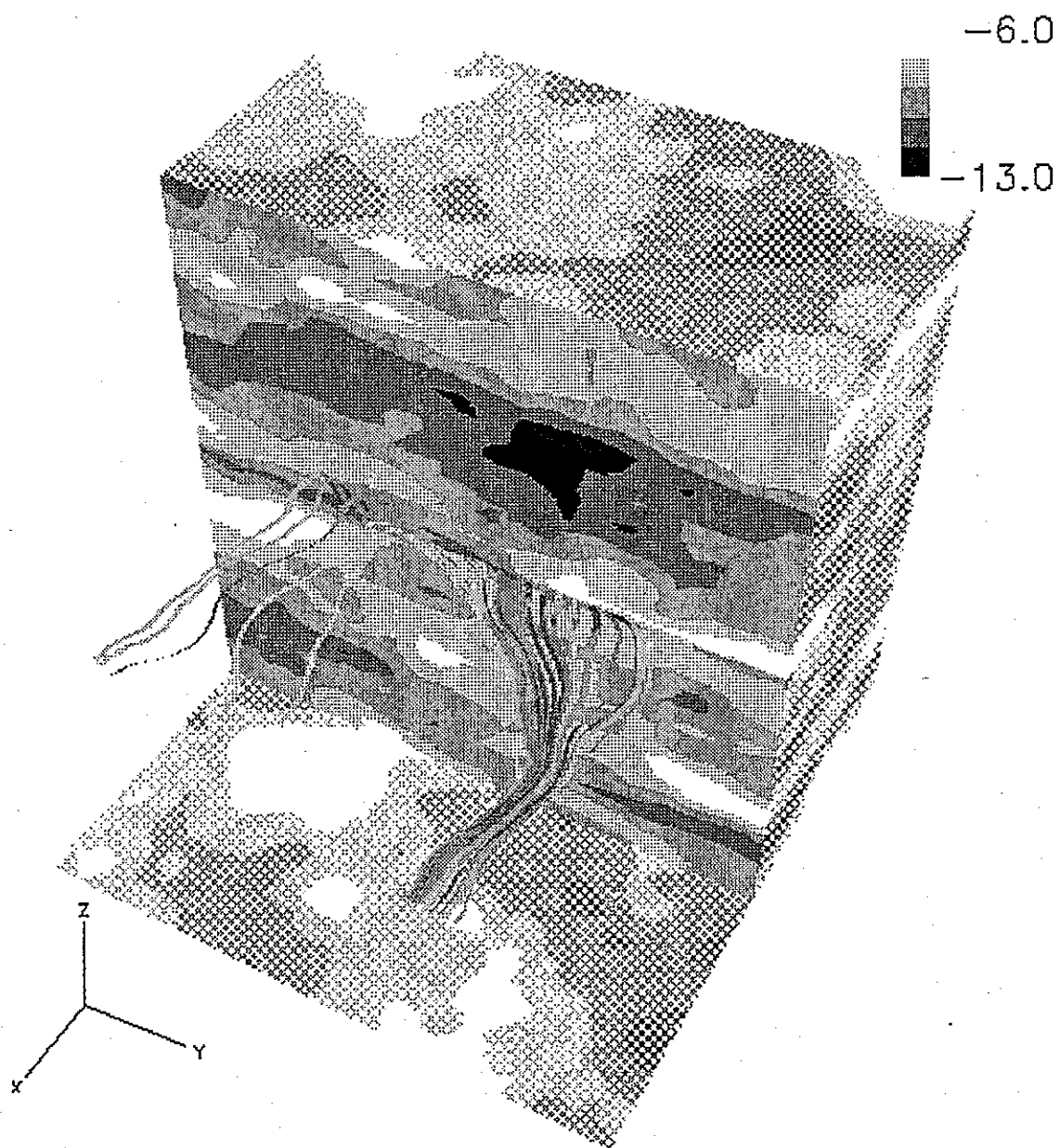


図 4.4-14 三次元水理解析結果及び流線 (Porsim No.14)

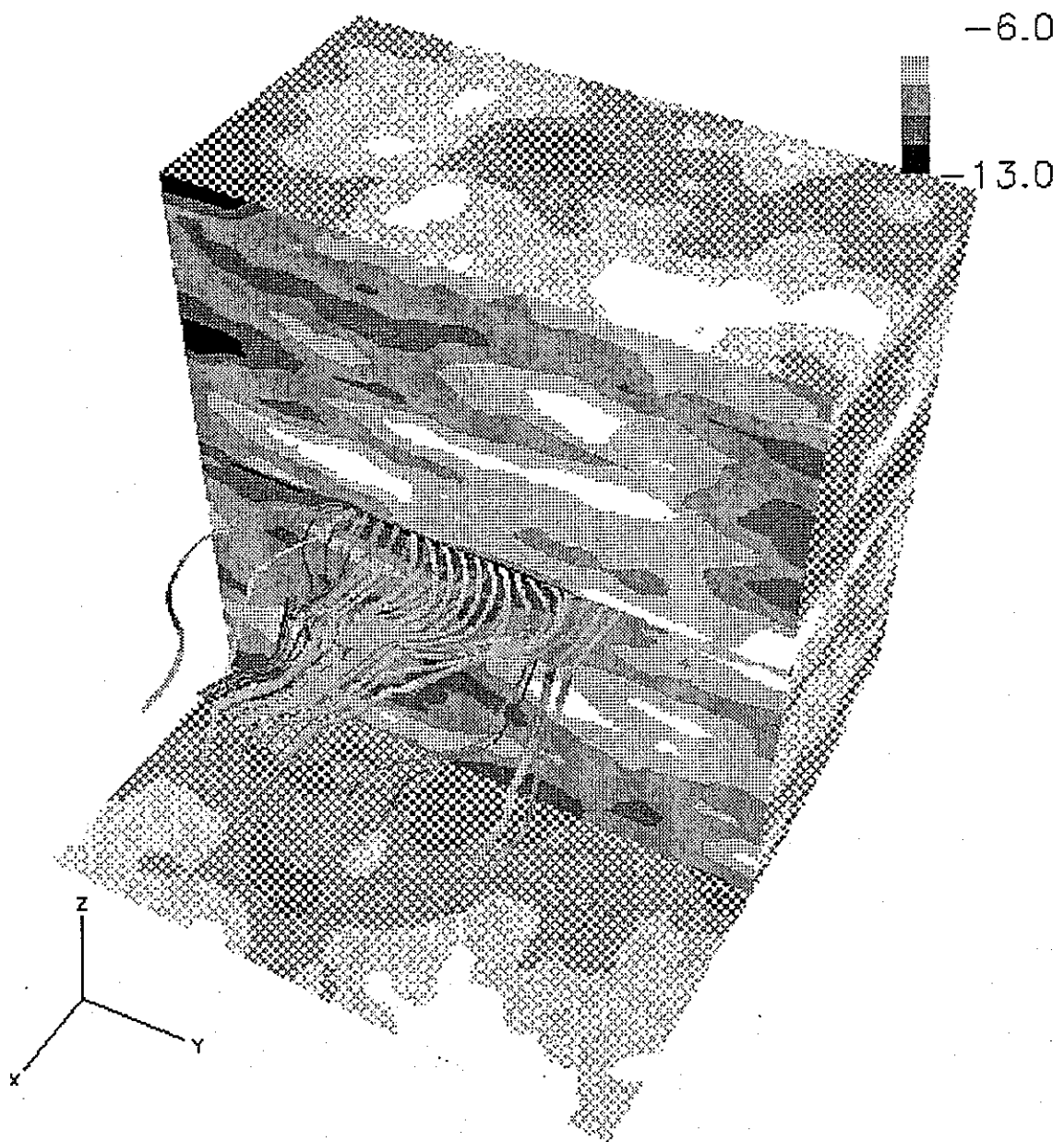


図 4.4-15 三次元水理解析結果及び流線 (Porsim No.15)

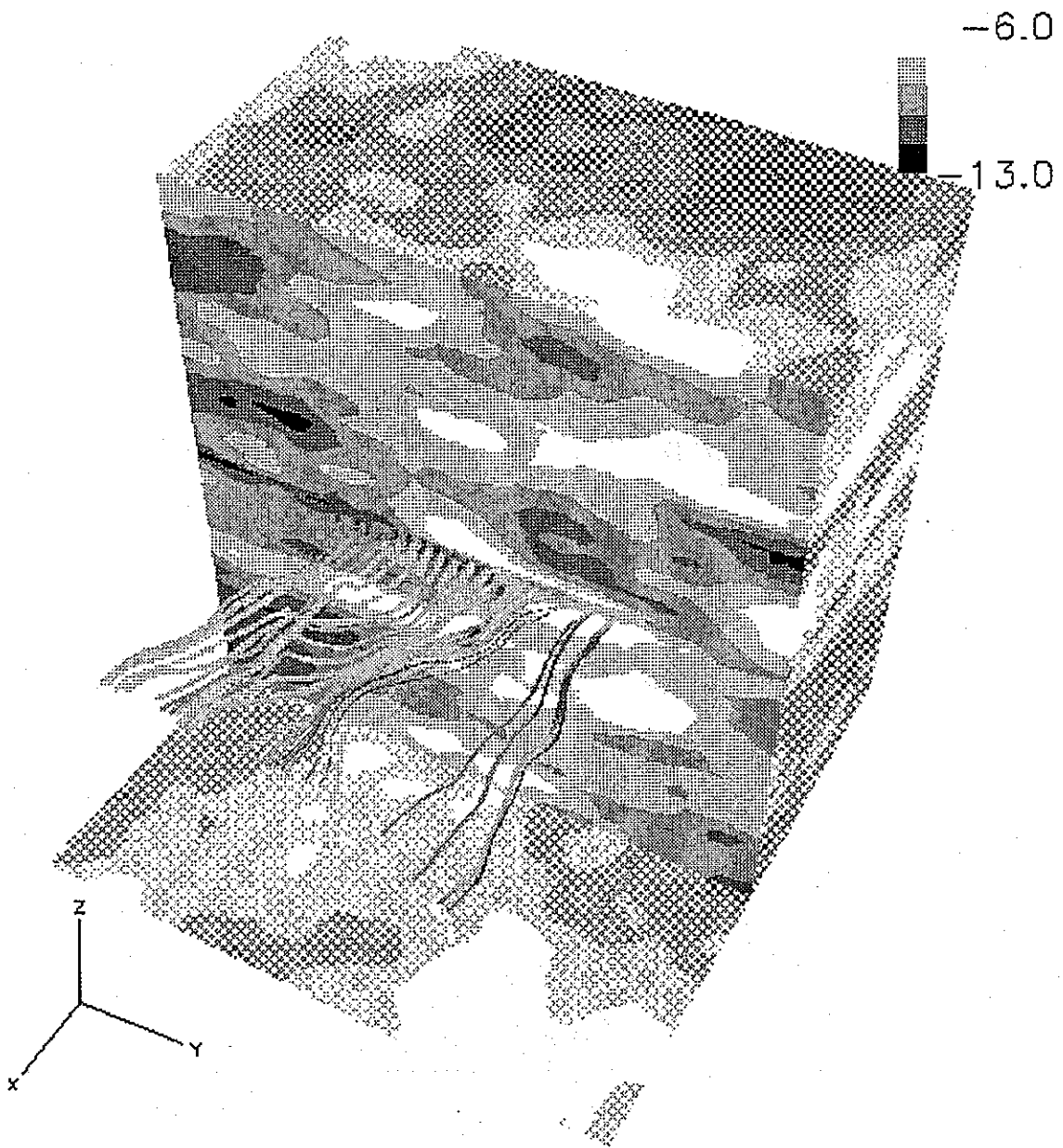


図 4.4-16 三次元水理解析結果及び流線 (Porsim No.16)

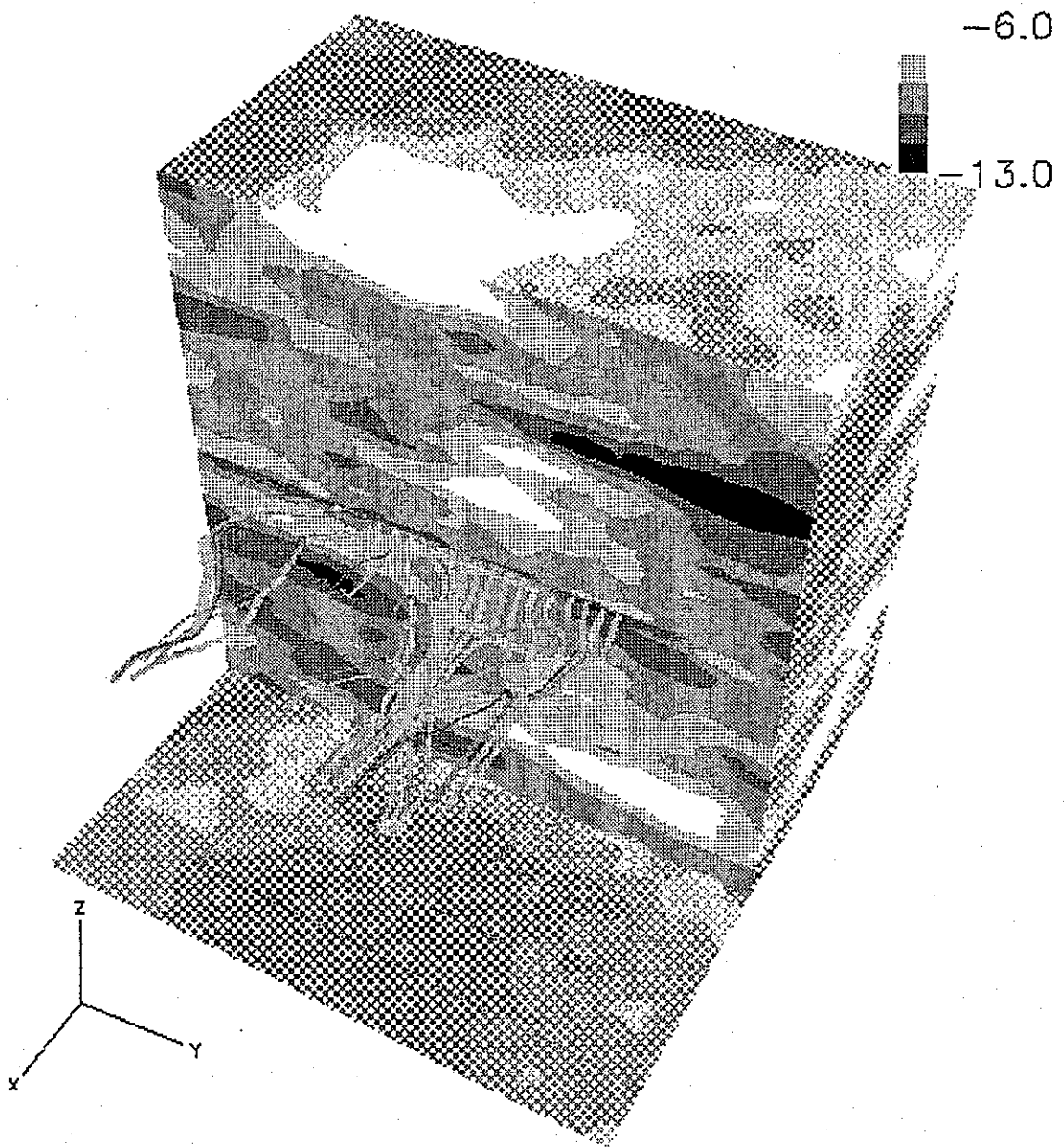


図 4.4-17 三次元水理解析結果及び流線 (Porsim No.17)

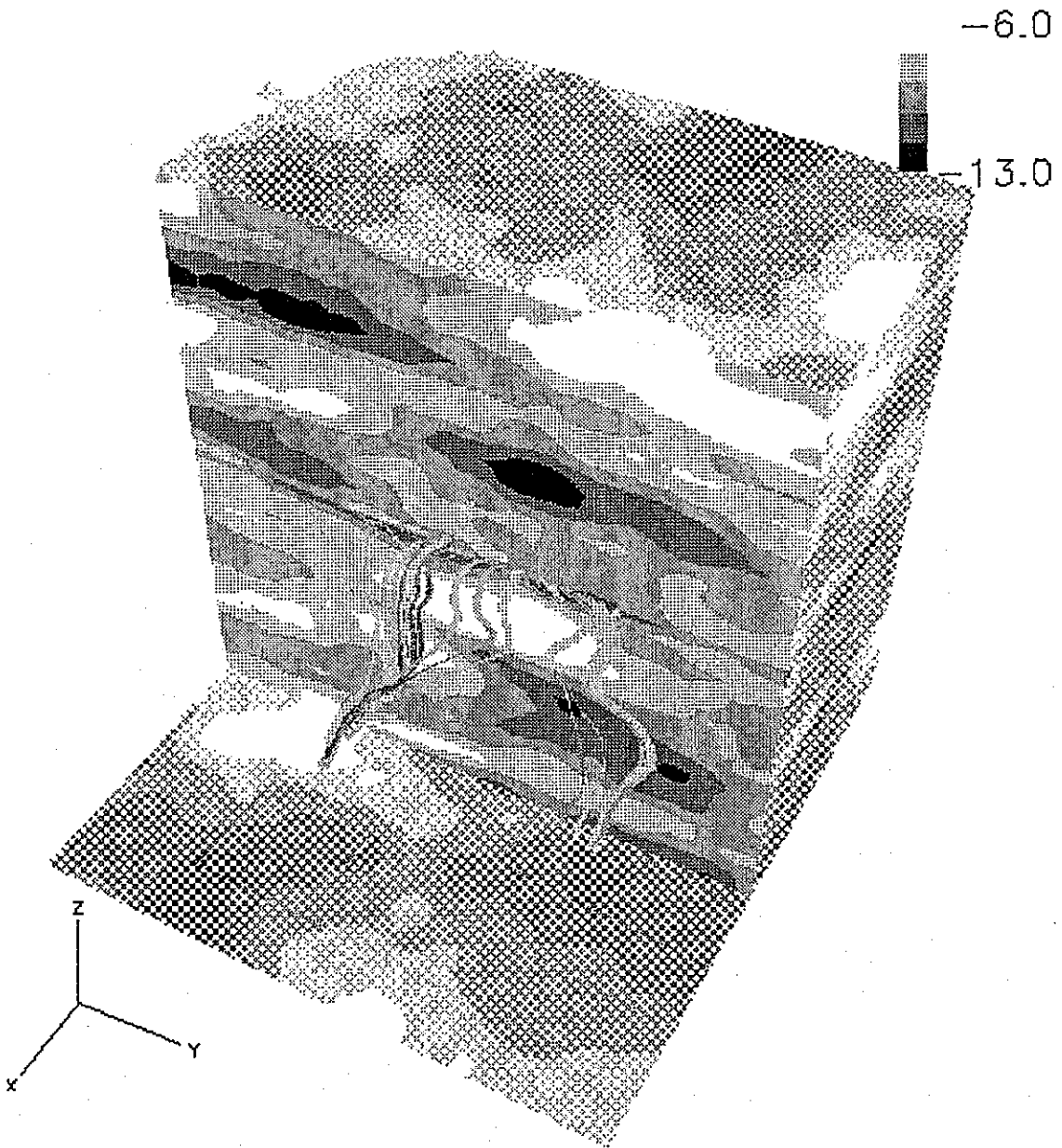


図 4.4-18 三次元水理解析結果及び流線 (Porsim No.18)

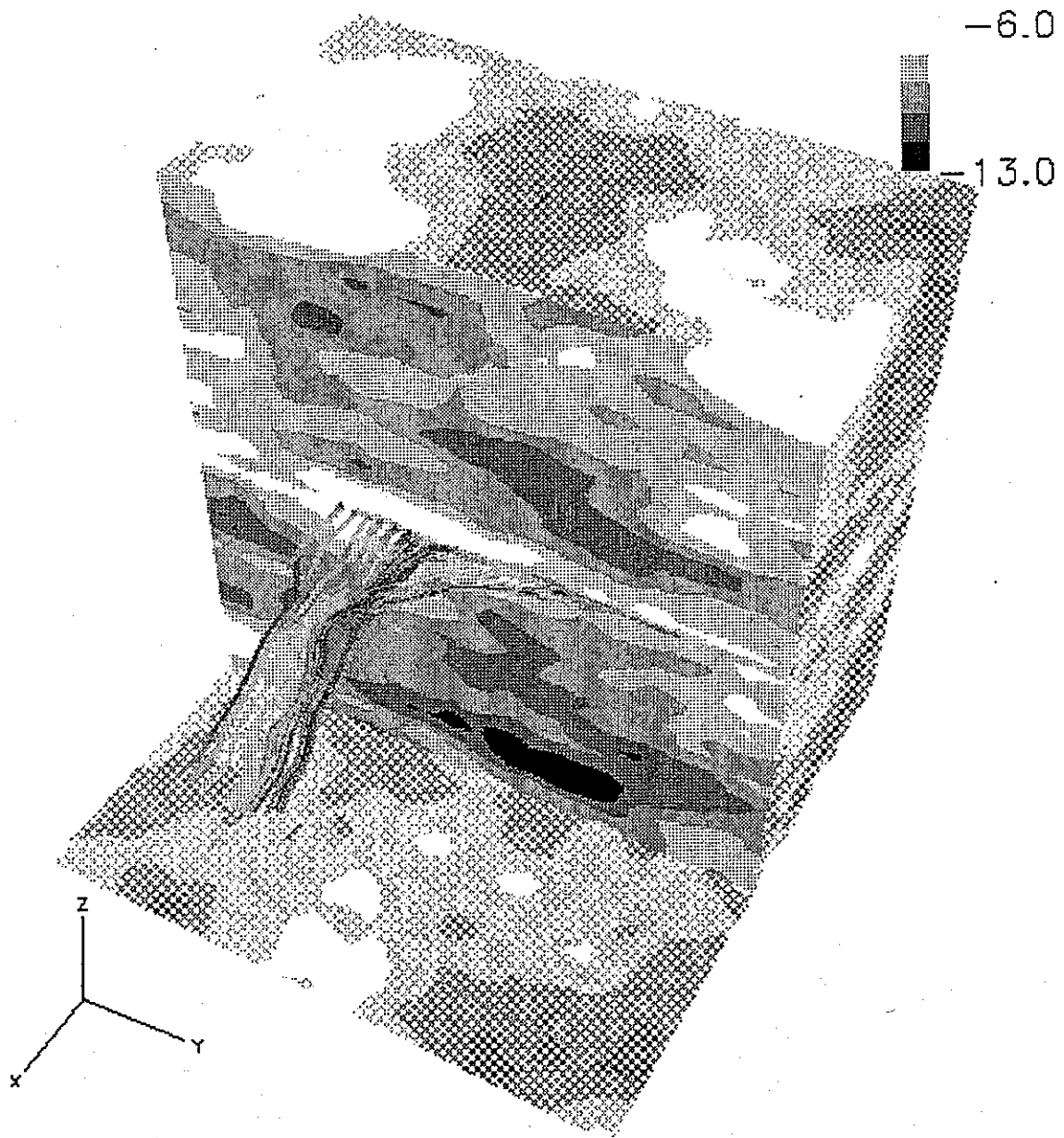


図 4.4-19 三次元水理解析結果及び流線 (Porsim No.19)

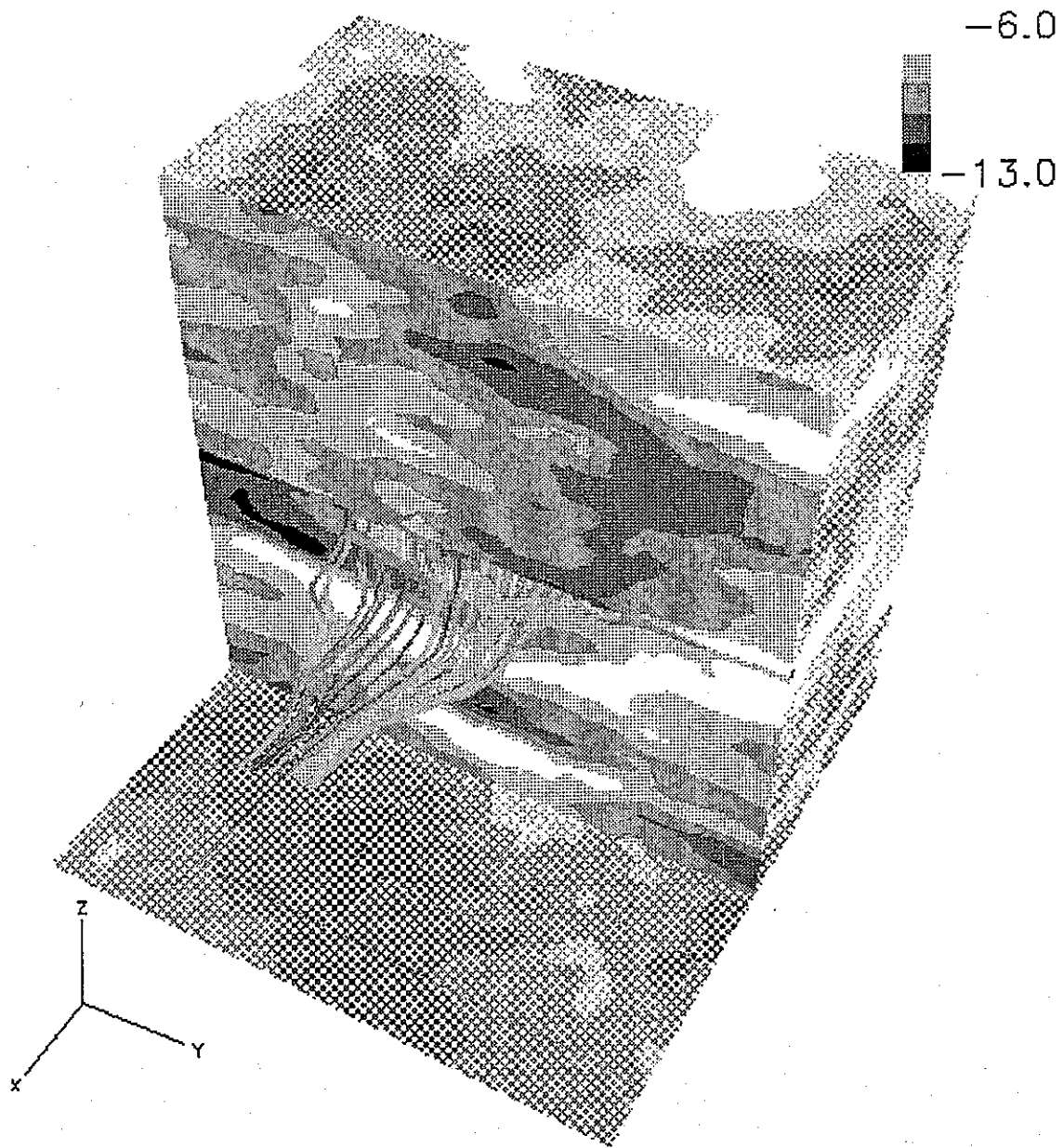


図 4.4- 三次元水理解析結果及び流線 (Porsim No.20)

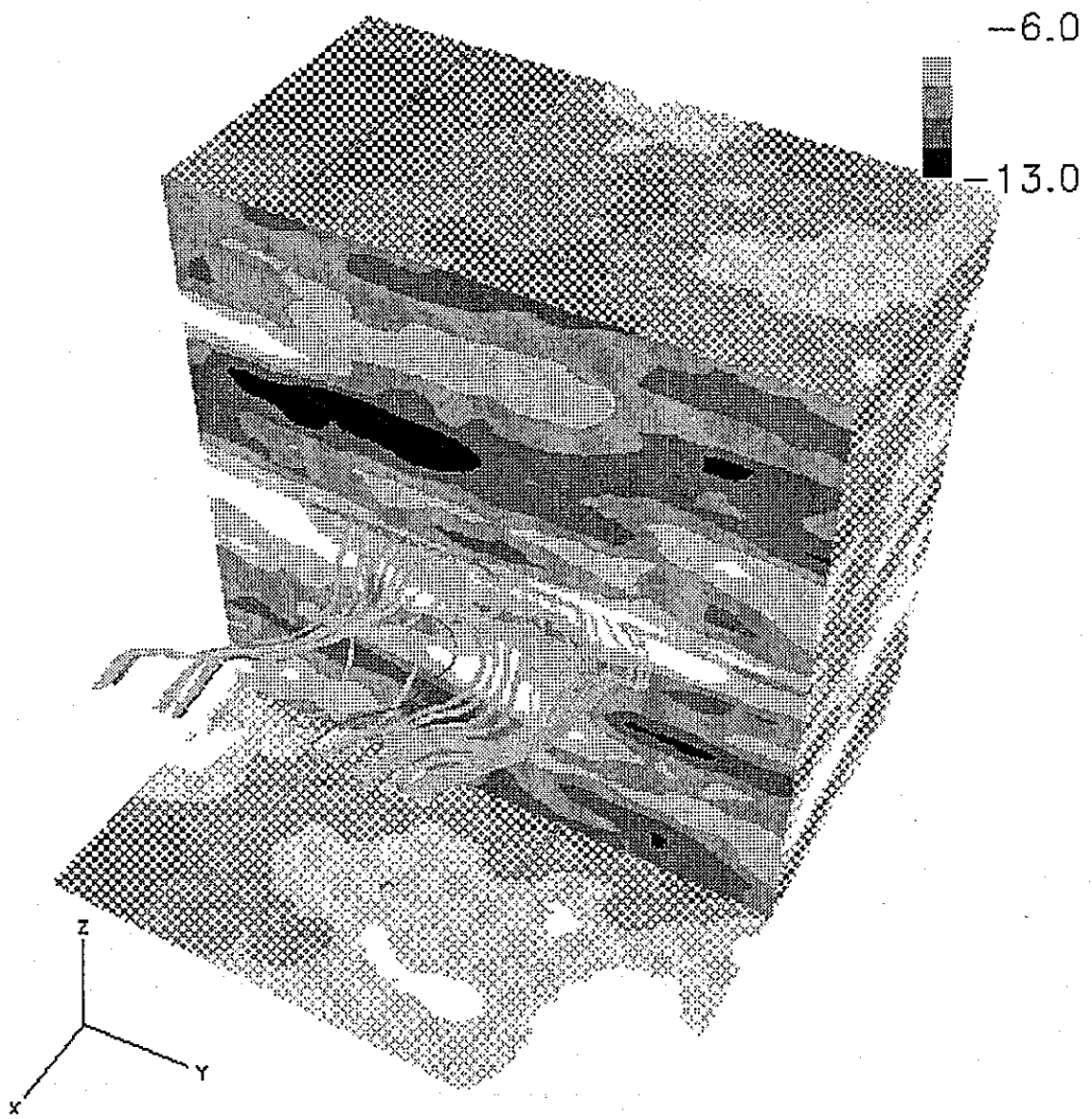


図 4.4-21 三次元水理解析結果及び流線 (Porsim No.21)

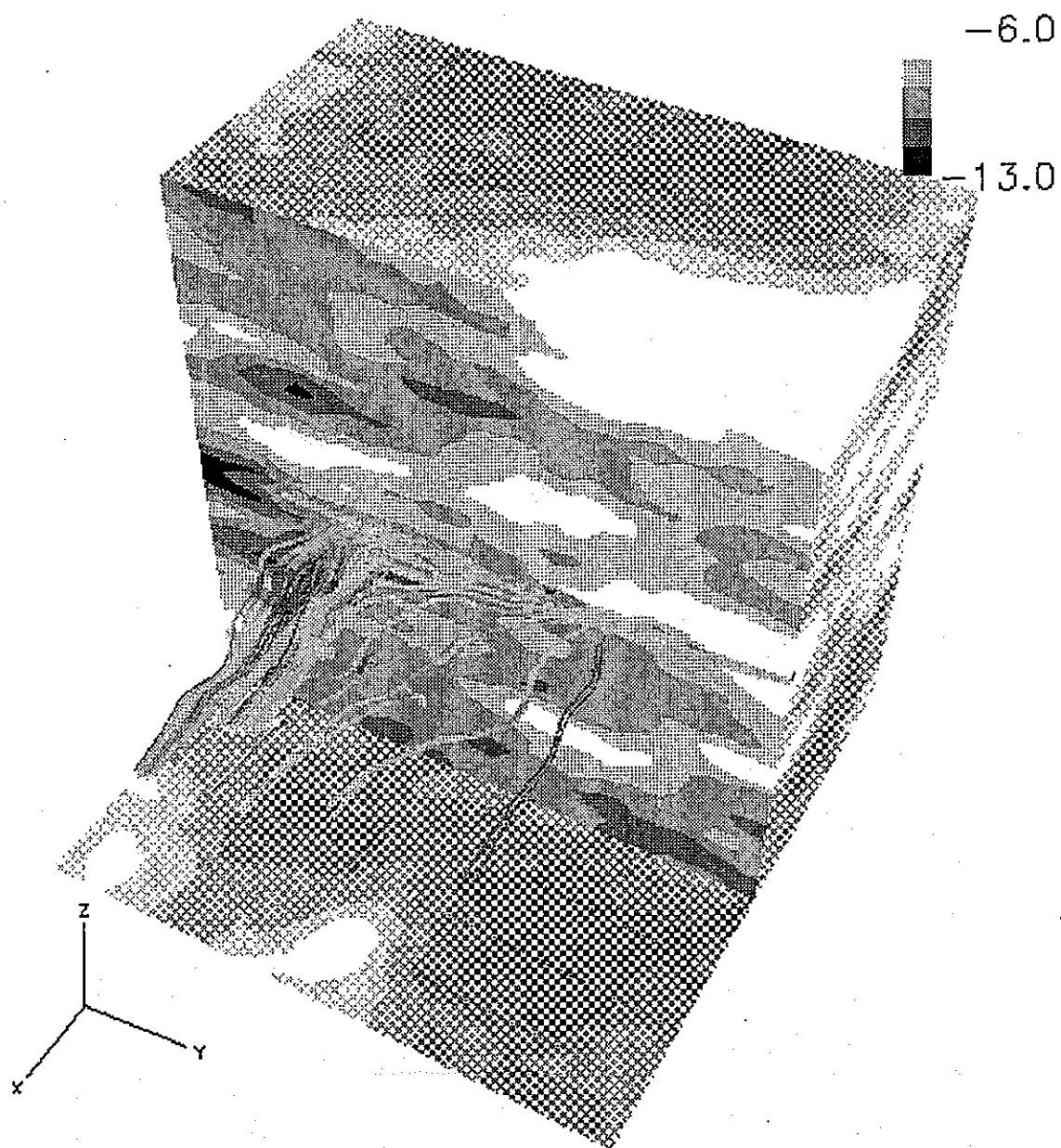


图 4.4-22 三次元水理解析結果及び流線 (Porsim No.22)

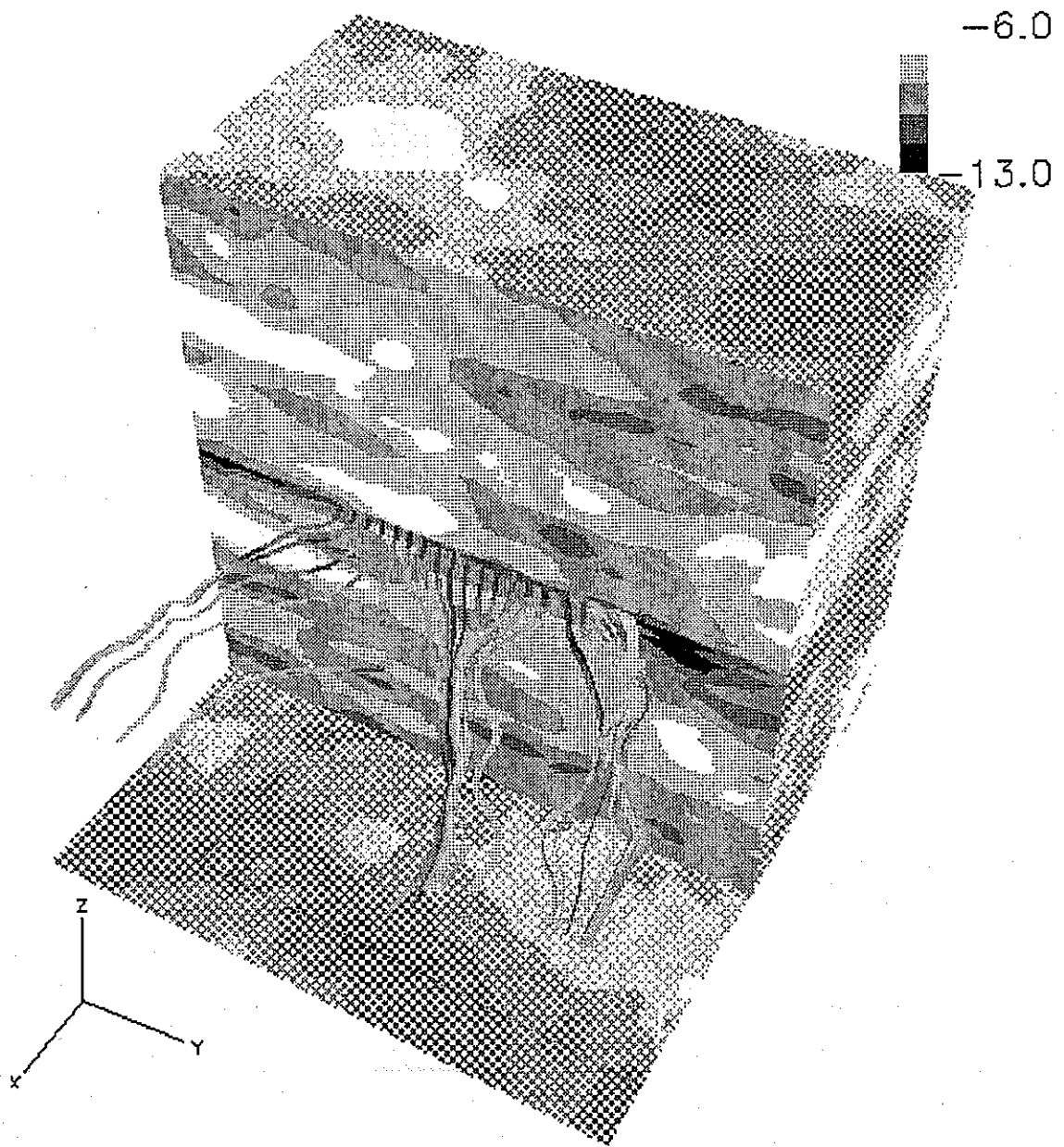


図 4.4-23 三次元水理解析結果及び流線 (Porsim No.23)

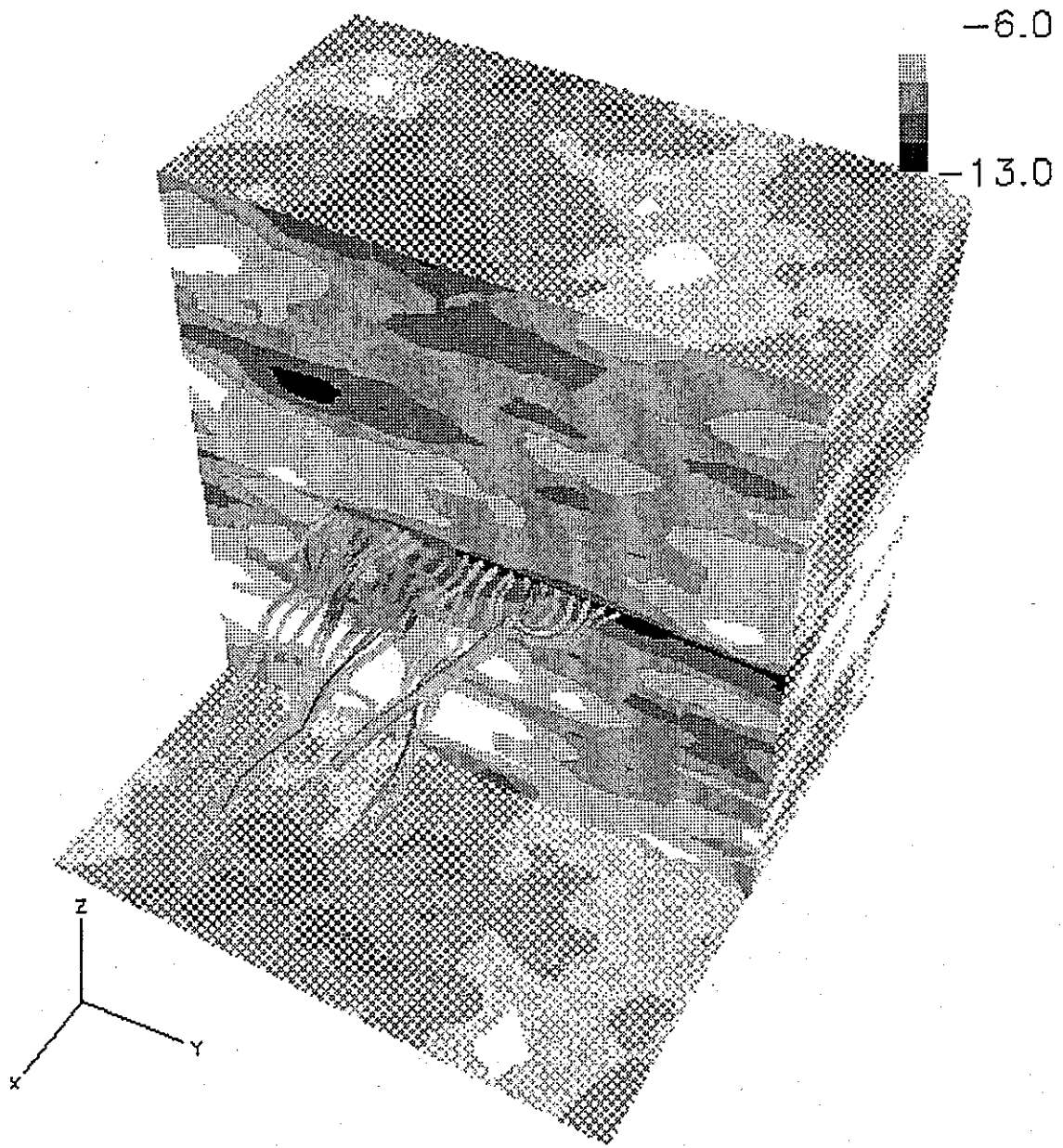


図 4.4-24 三次元水理解析結果及び流線 (Porsim No.24)

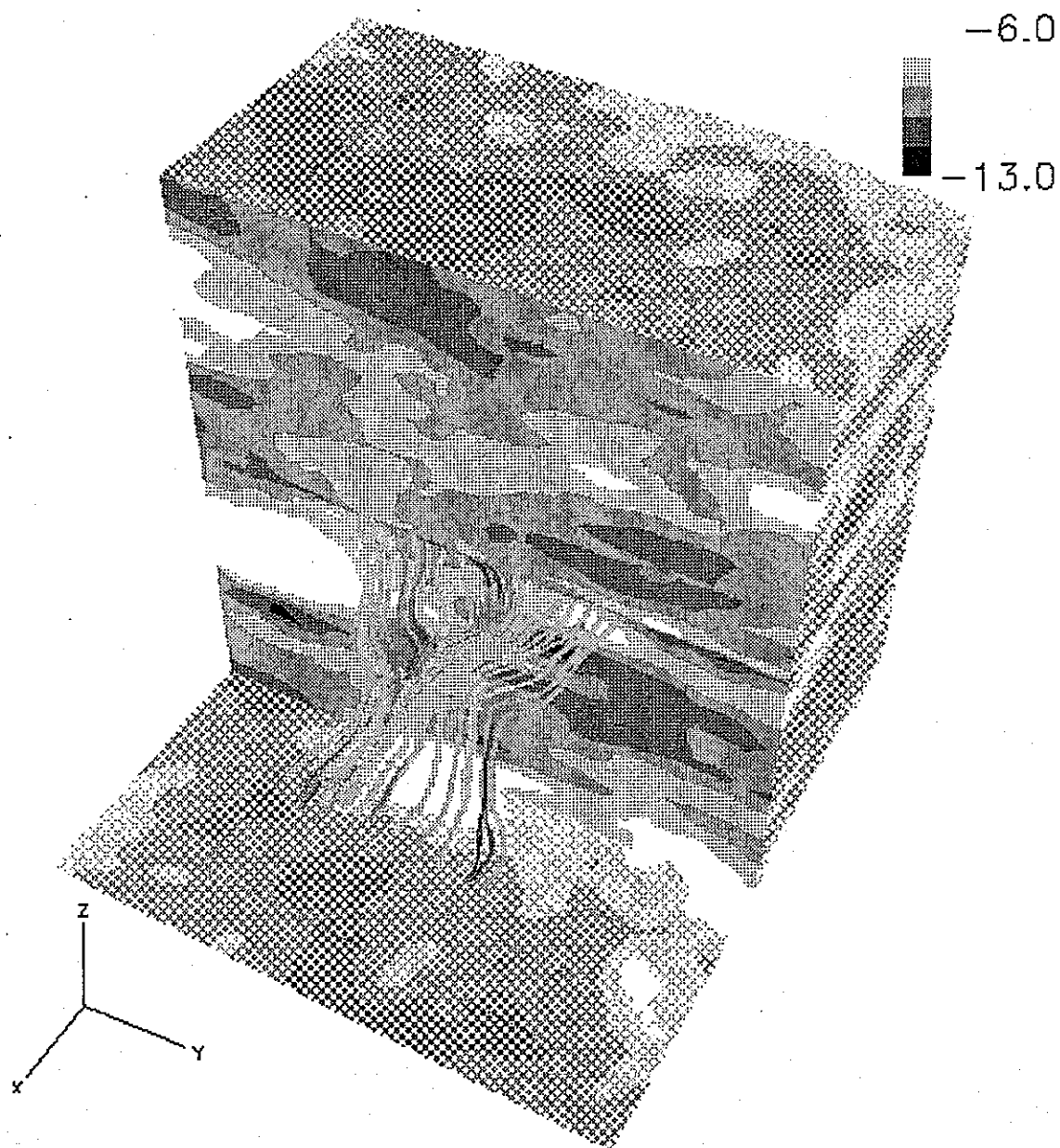


図 4.4-25 三次元水理解析結果及び流线 (Porsim No.25)

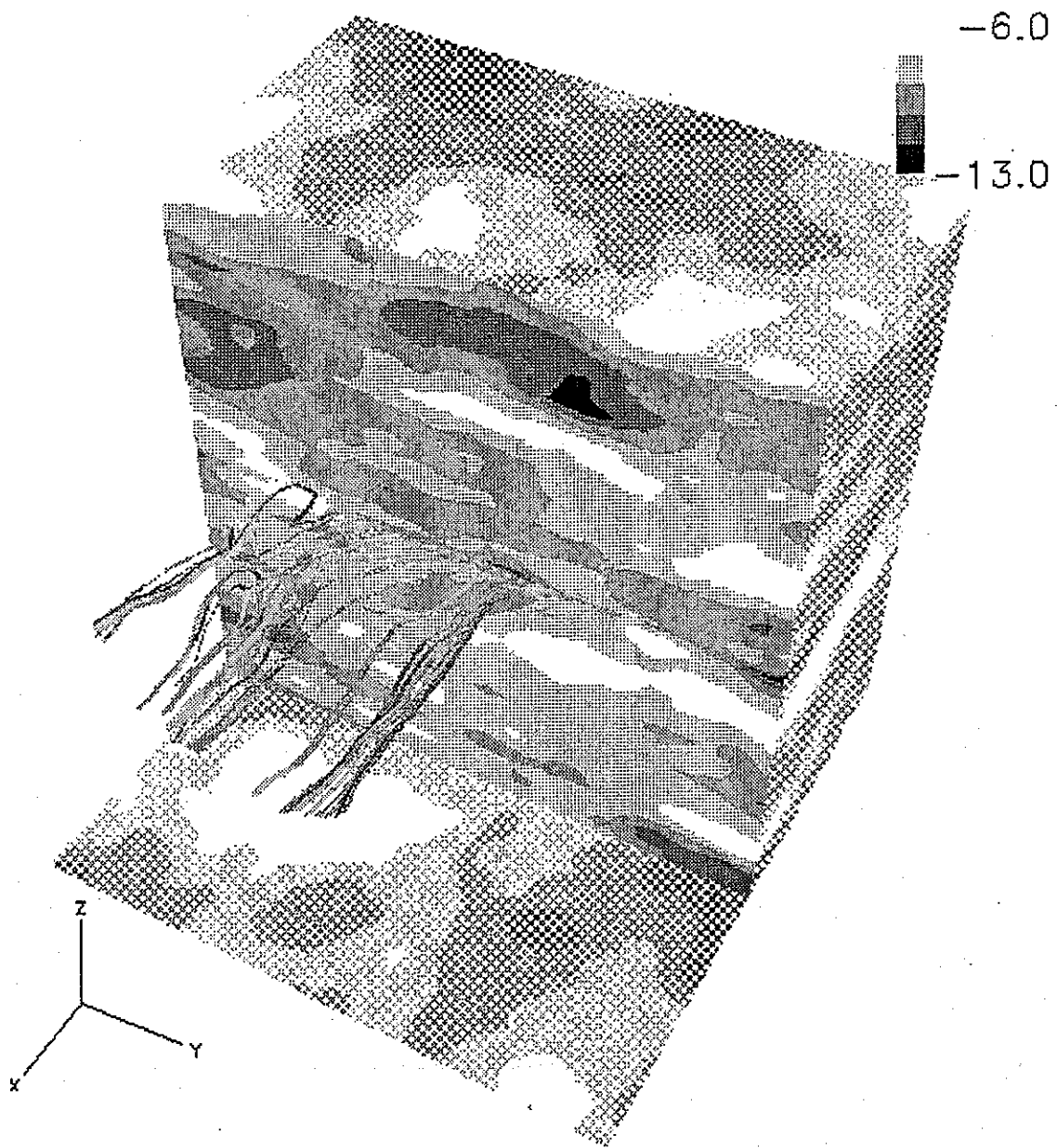


図 4.4-26 三次元水理解析結果及び流線 (Porsim No.26)

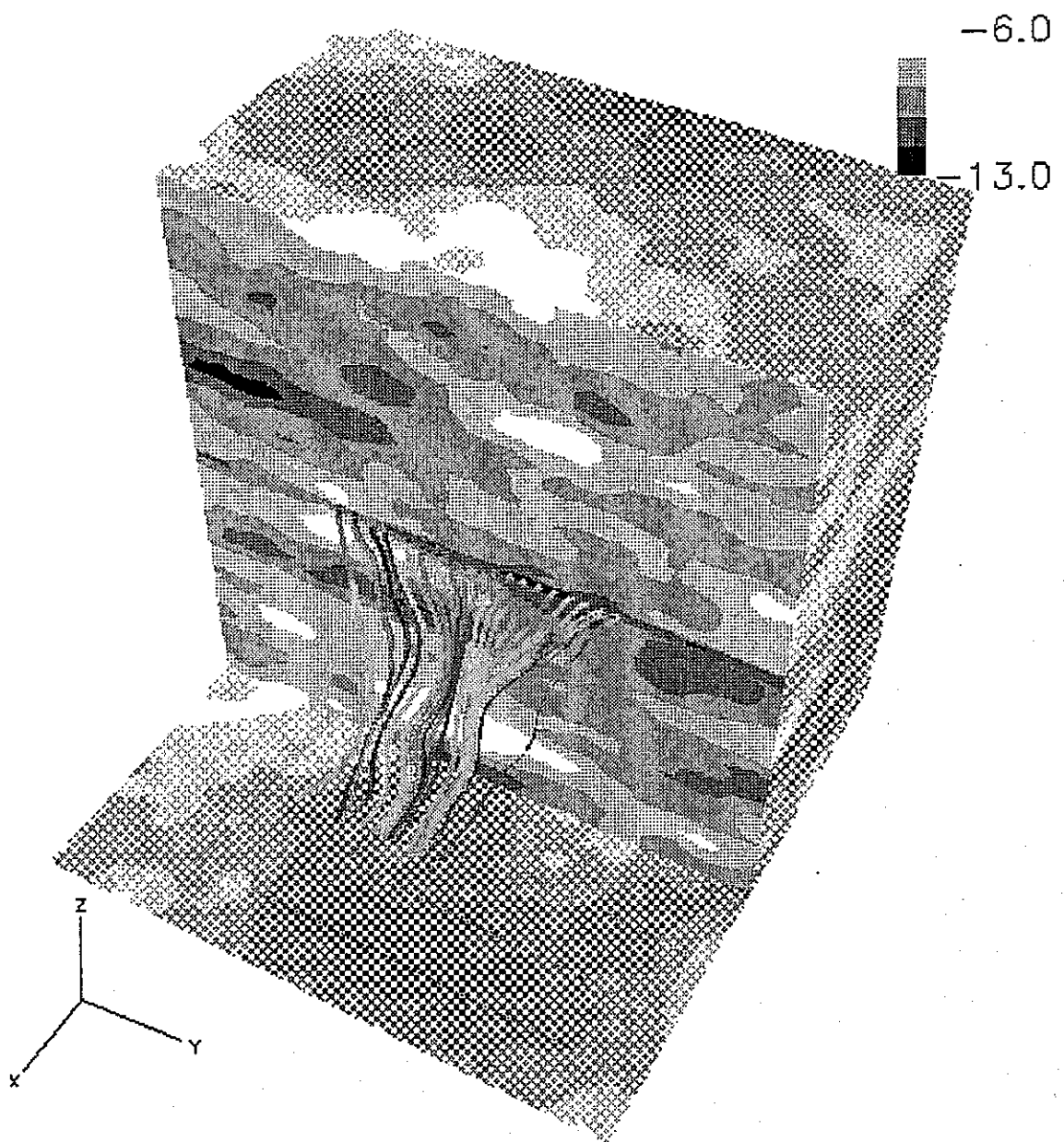


図 4.4-27 三次元水理解析結果及び流線 (Porsim No.27)

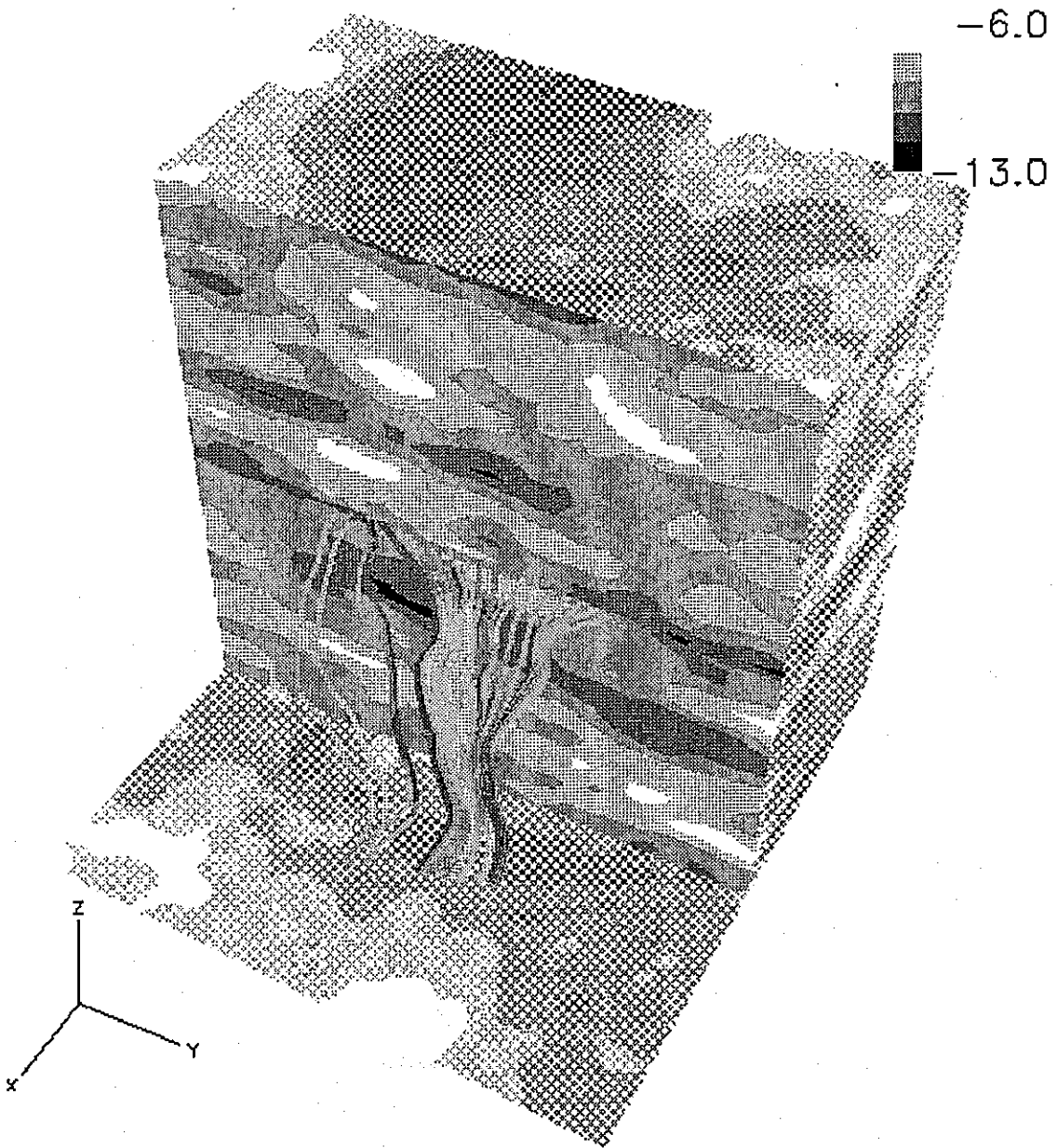


図 4.4-28 三次元水理解析結果及び流線 (Porsim No.28)

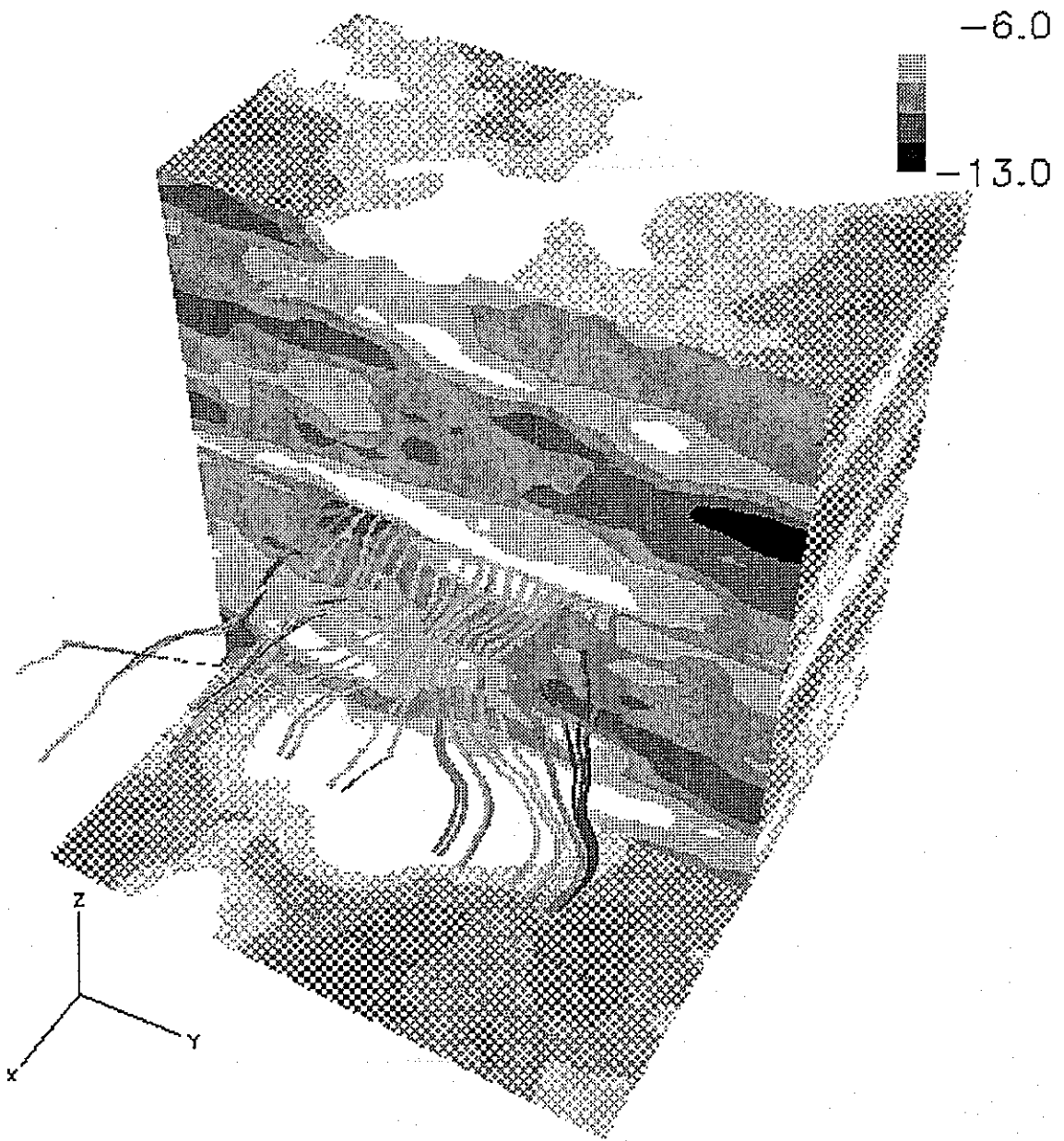


图 4.4-29 三次元水理解析結果及び流線 (Porsim No.29)

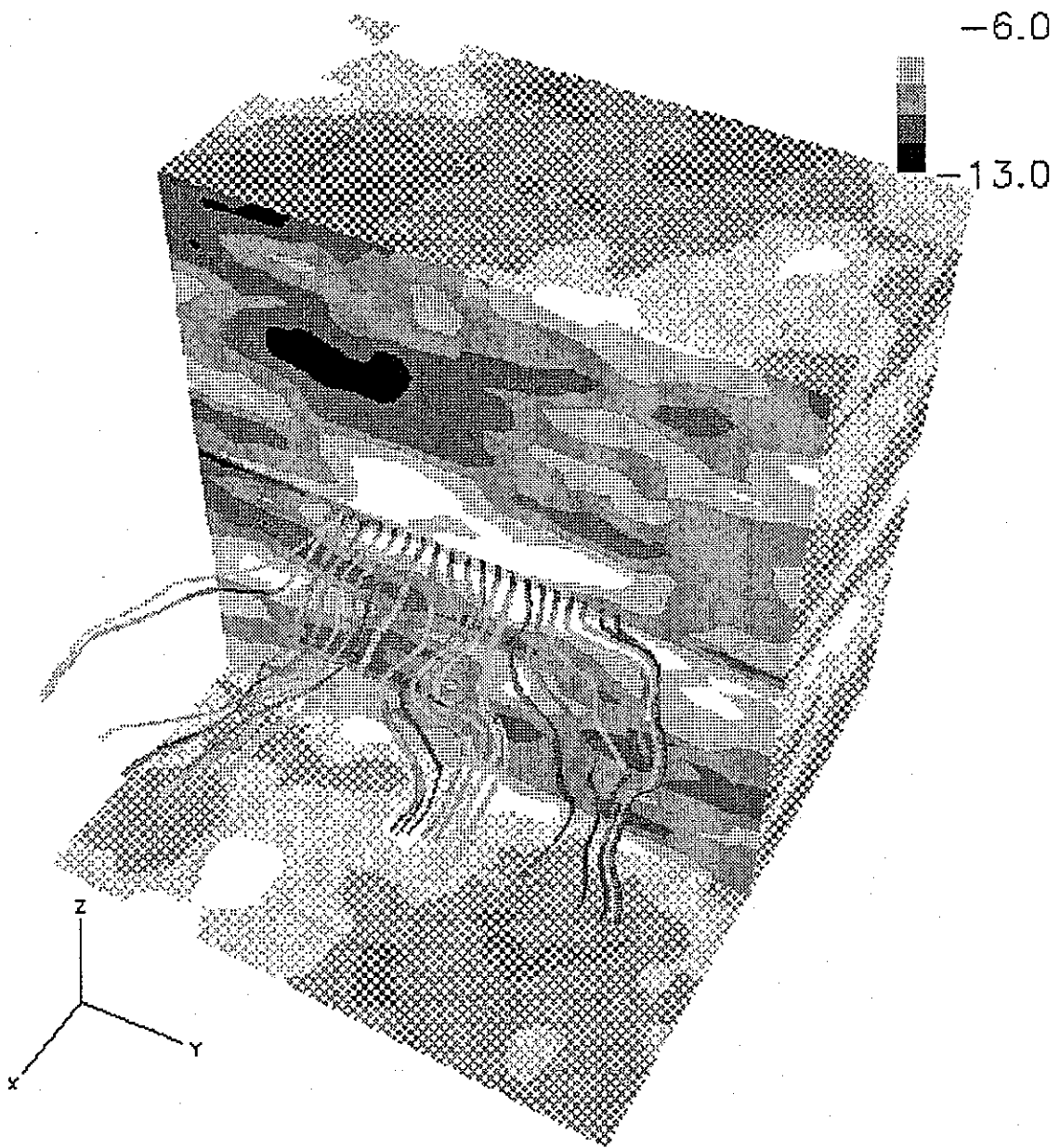


図 4.4-30 三次元水理解析結果及び流線 (Porsim No.30)

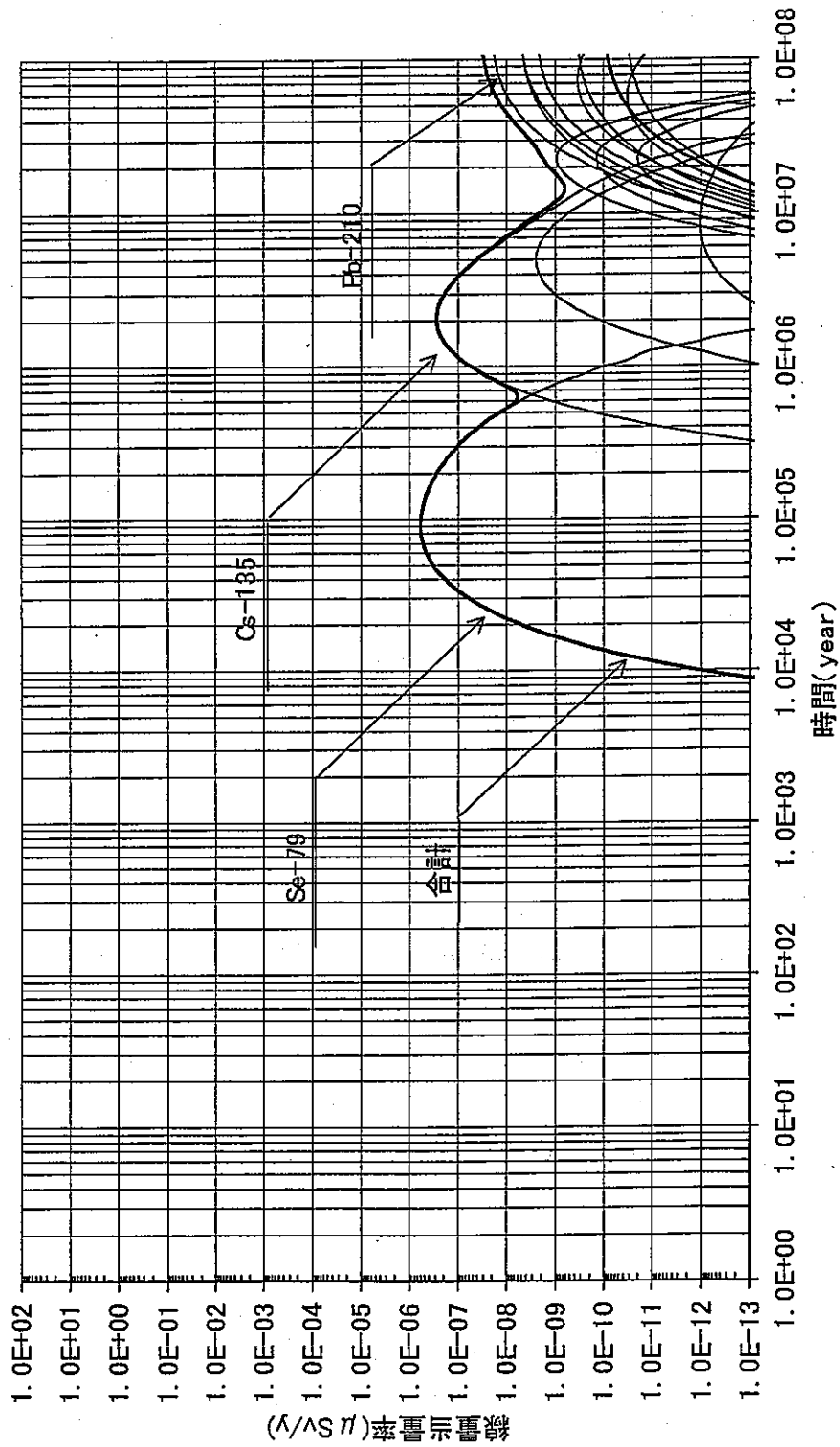


図4.4-31 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No.1 : ガラス固化体一本)

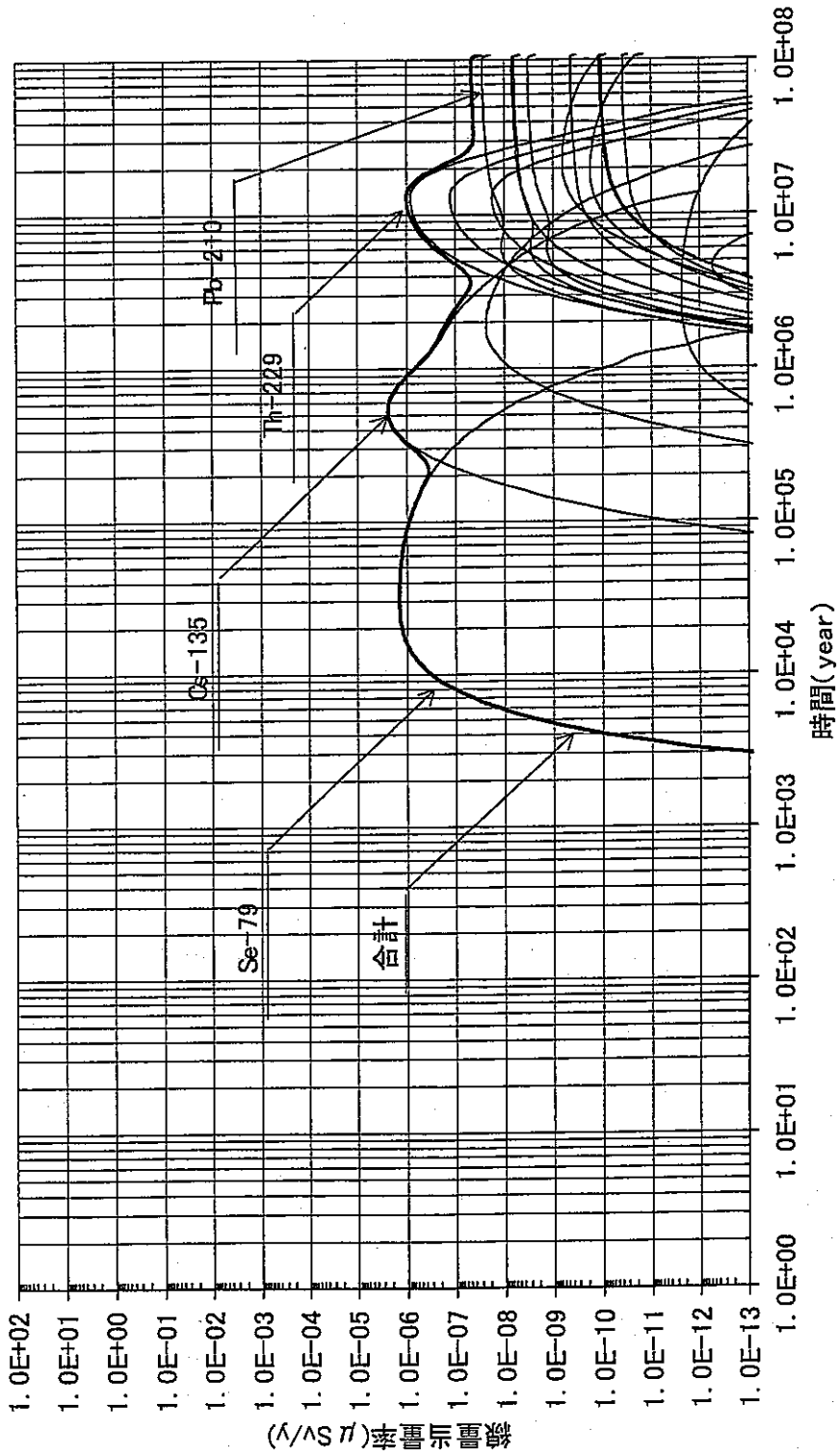


図4.4-32 評価距離100mにおける線量当量率履歴
(Porsim No.2: ガラス固化体一本)

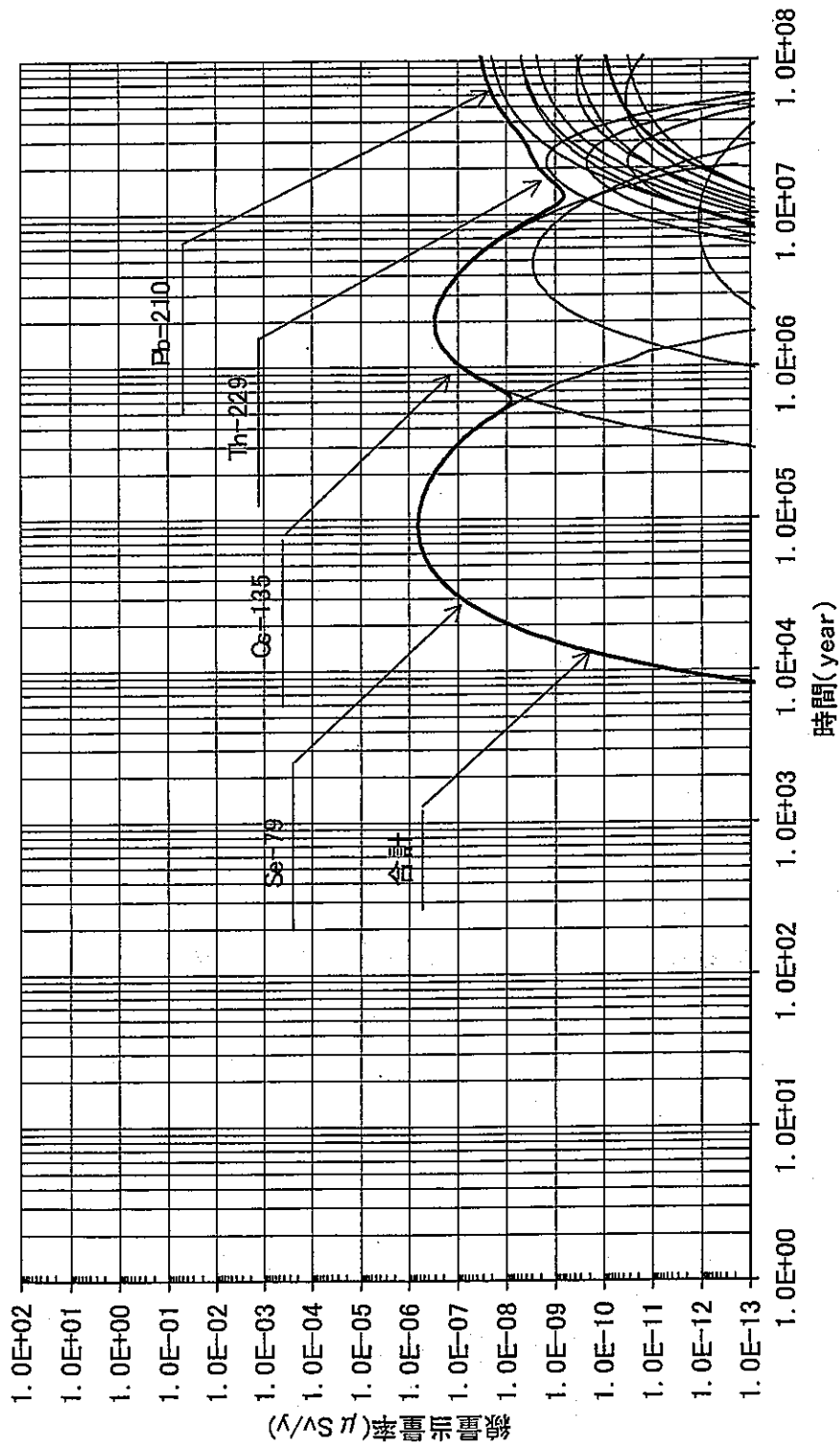


図4.4-33 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No. 3: ガラス固化体一本)

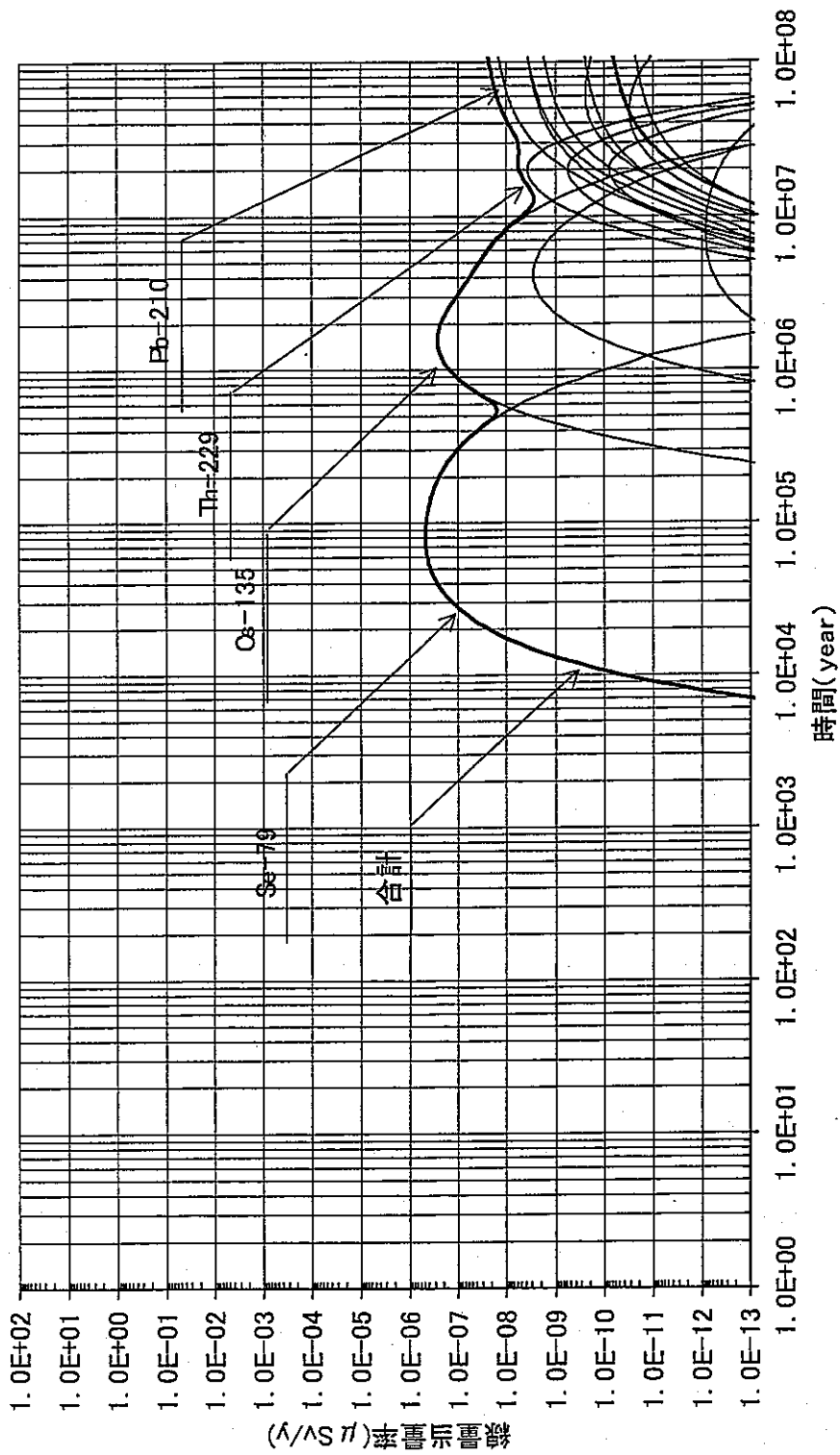


図4.4-34 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No. 4: ガラス固化体一本)

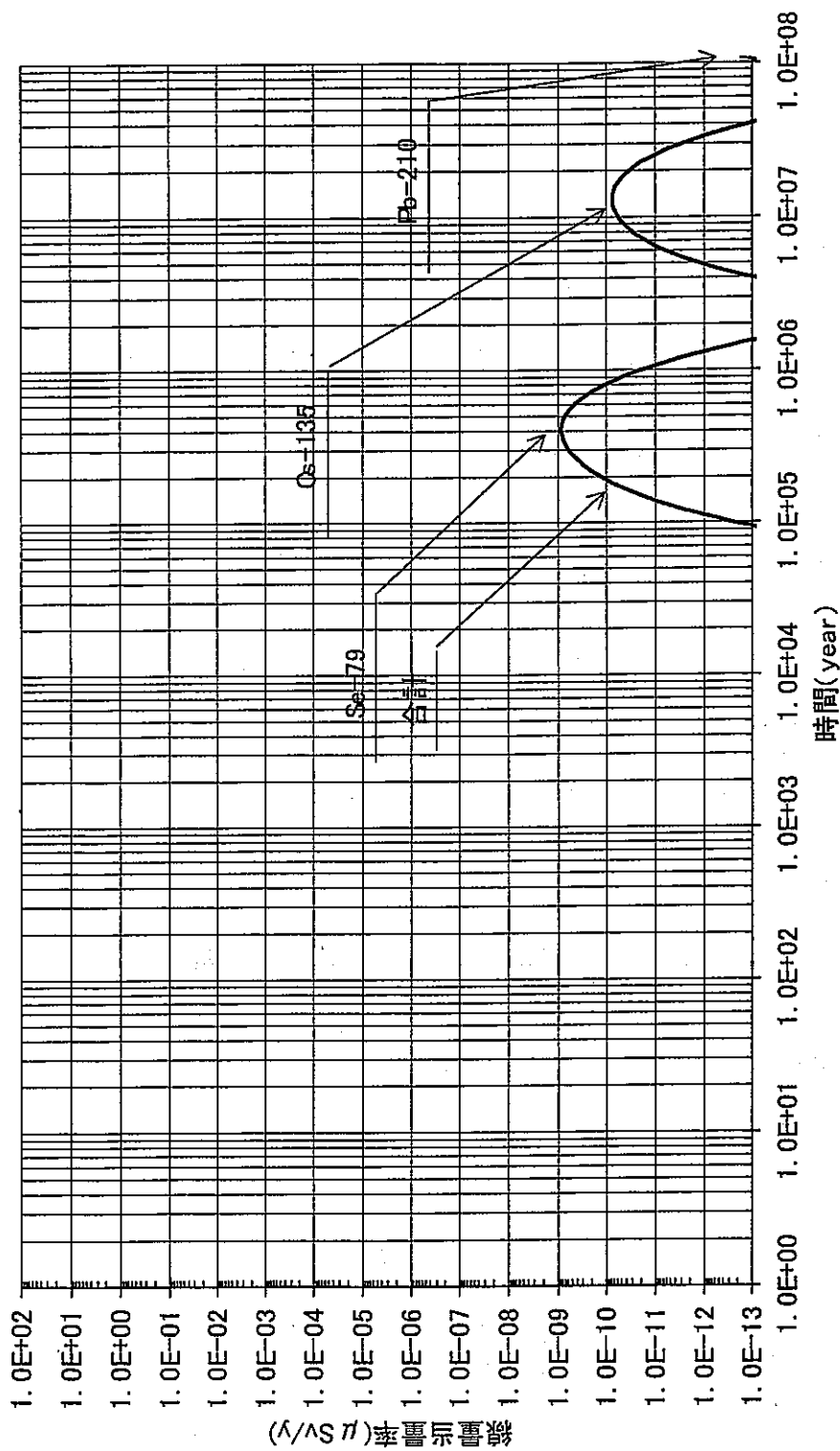


図4.4-35 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No.5: ガラス固化体一本)

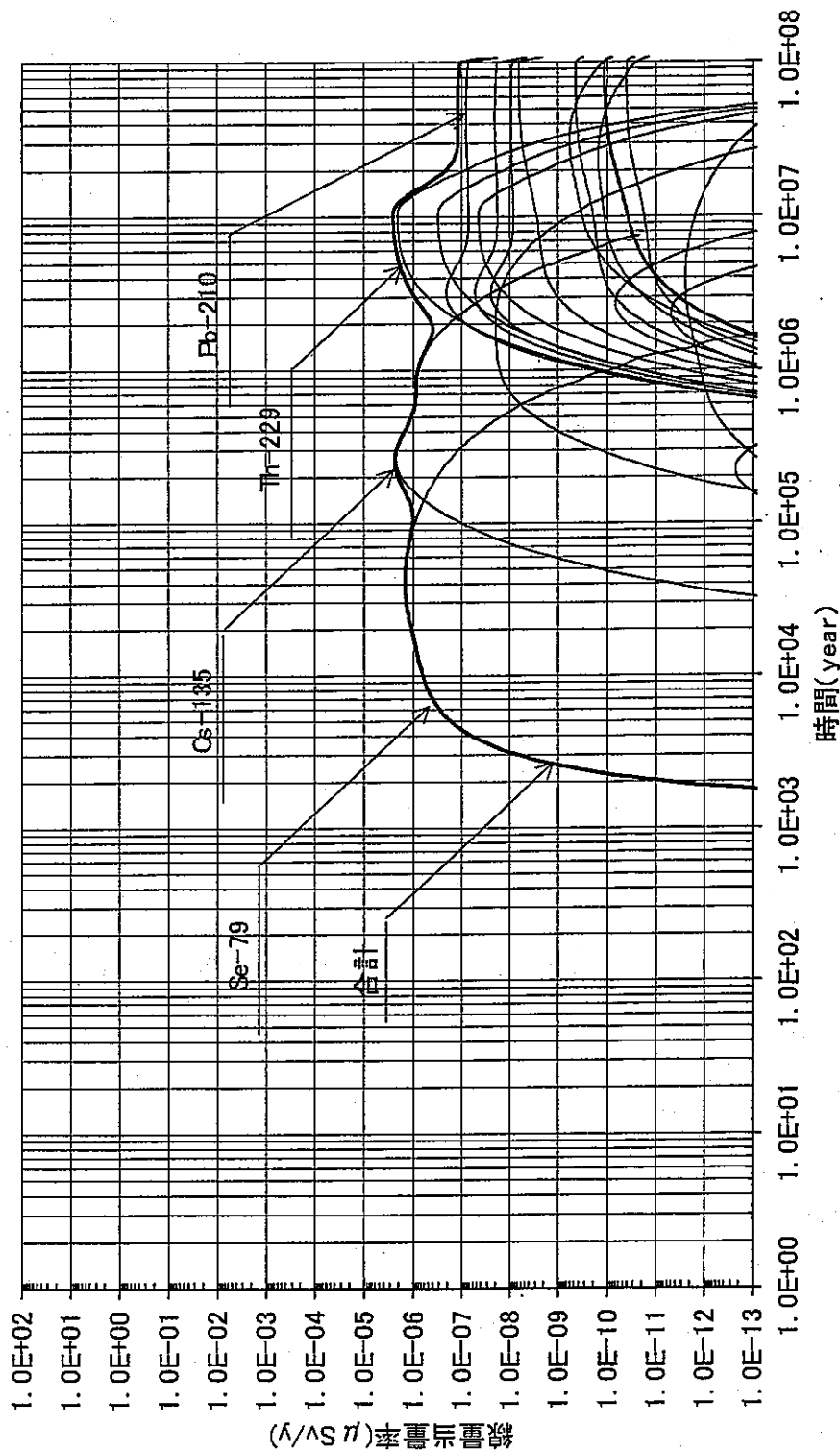


図4.4-36 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No.6: ガラス固化体一本)

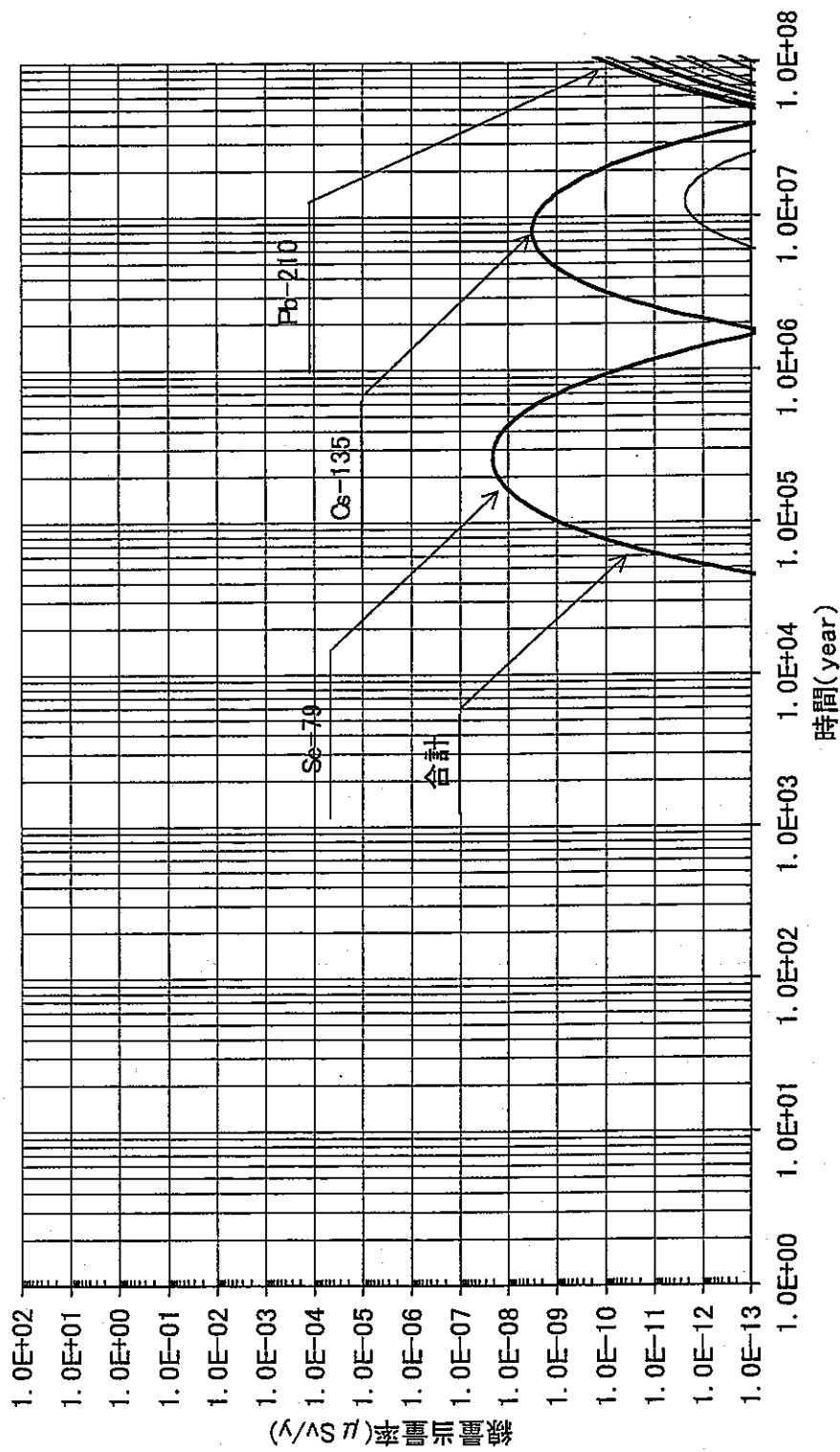


図4.4-37 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No.7: ガラス固化体一本)

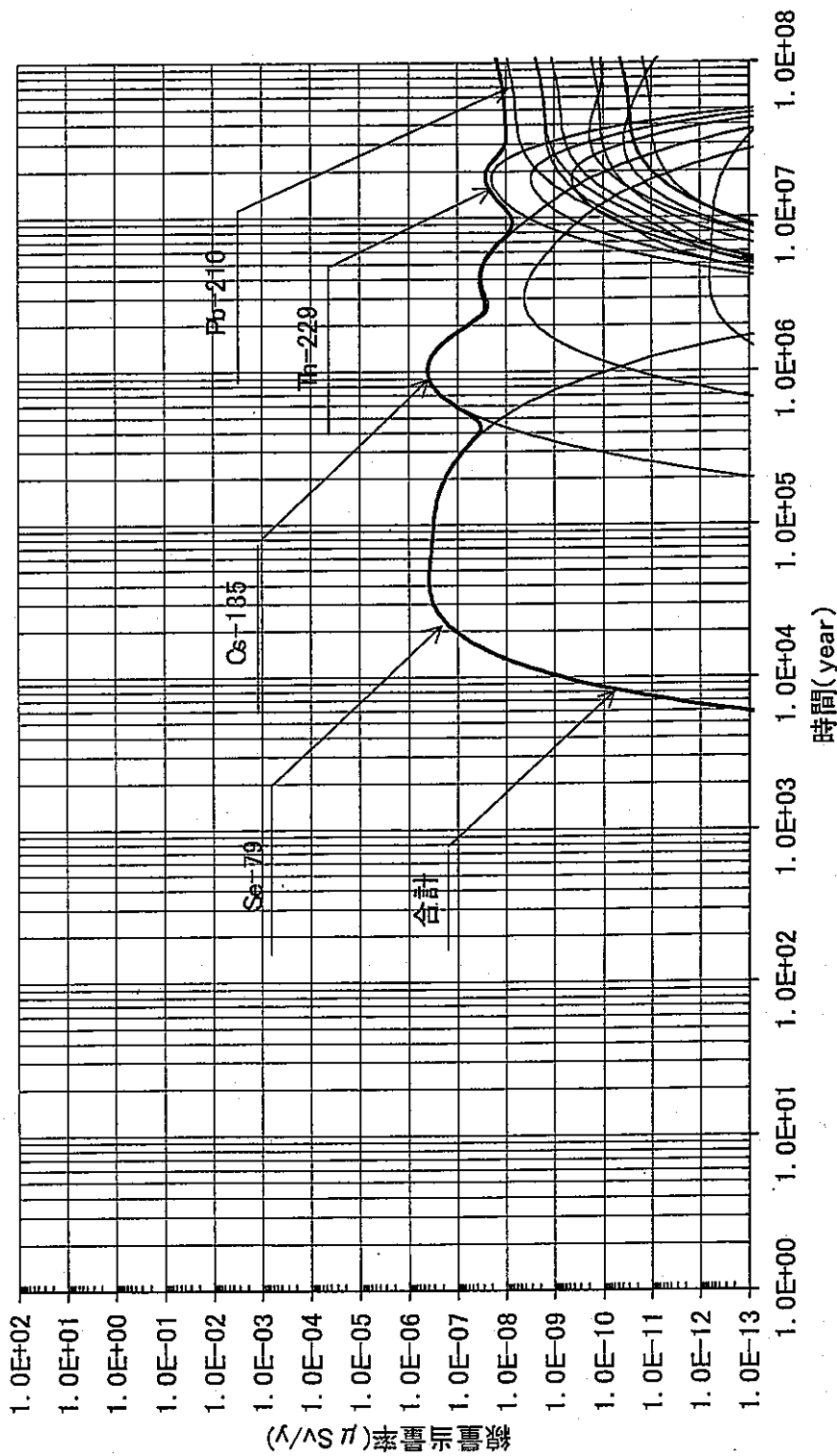


図4.4-38 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No.8: ガラス固化体一本)

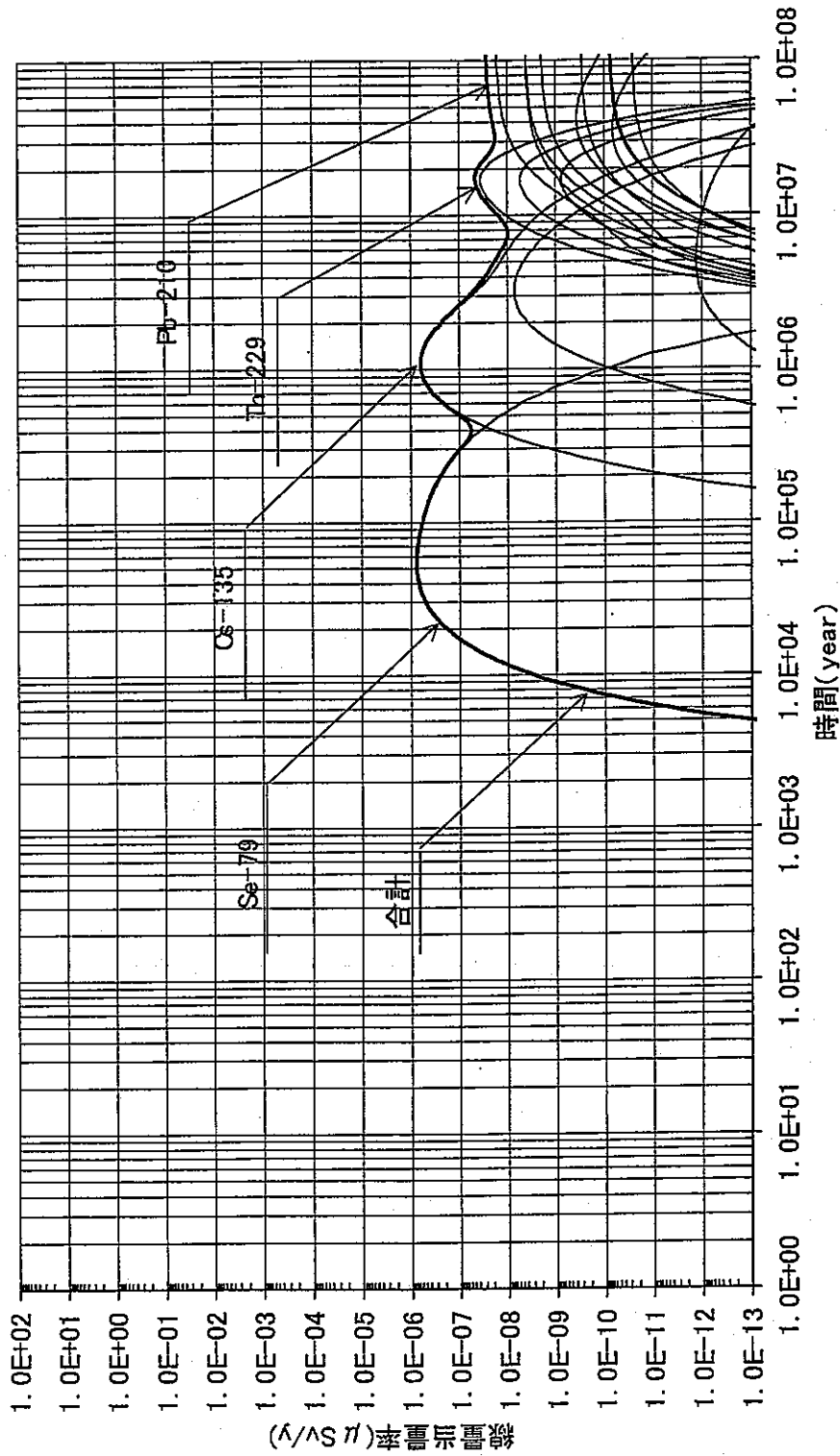


図4.4-39 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No. 9: ガラス固化体一本)

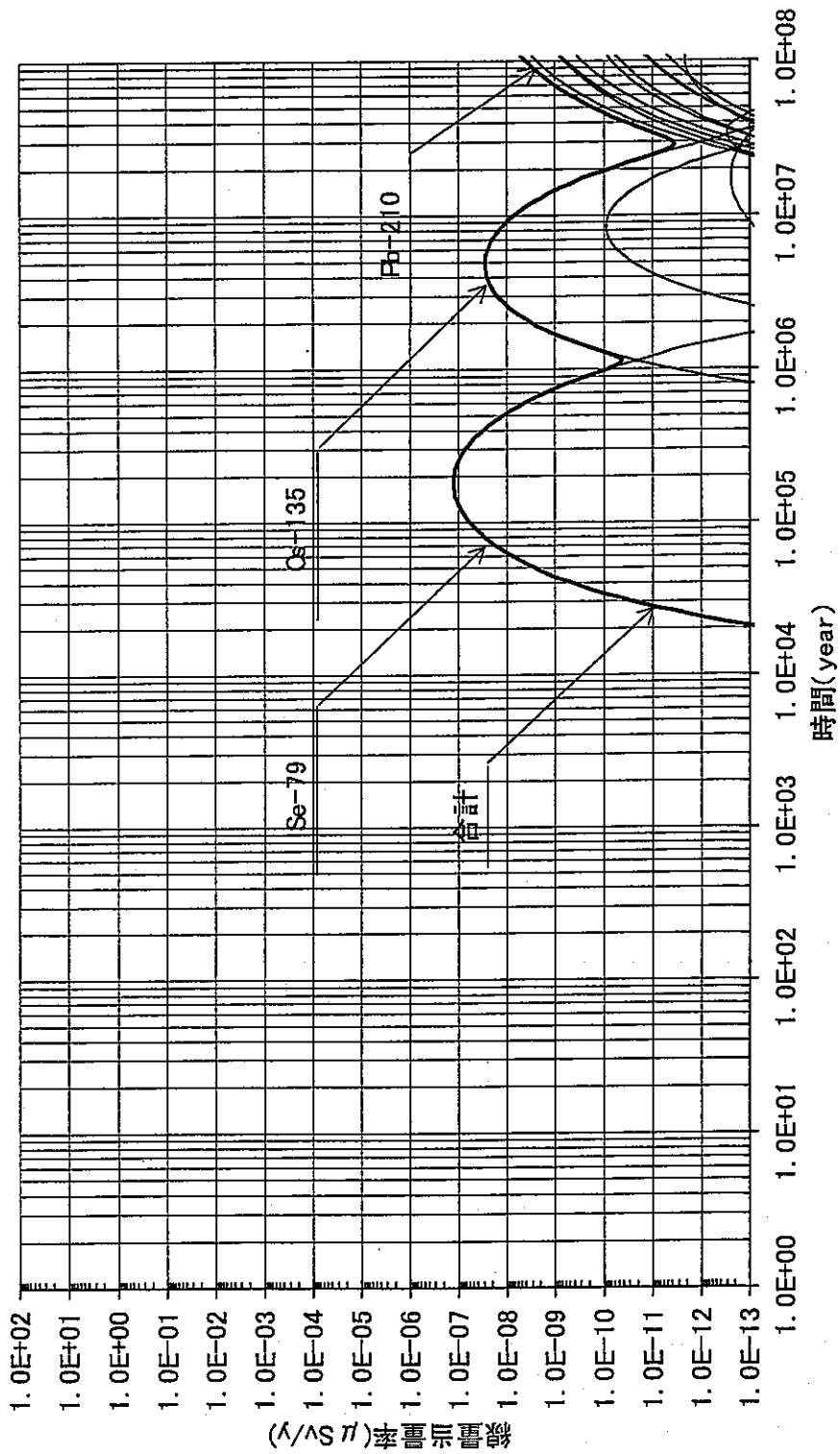


図4.4-40 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No. 40: ガラス固化体一本)

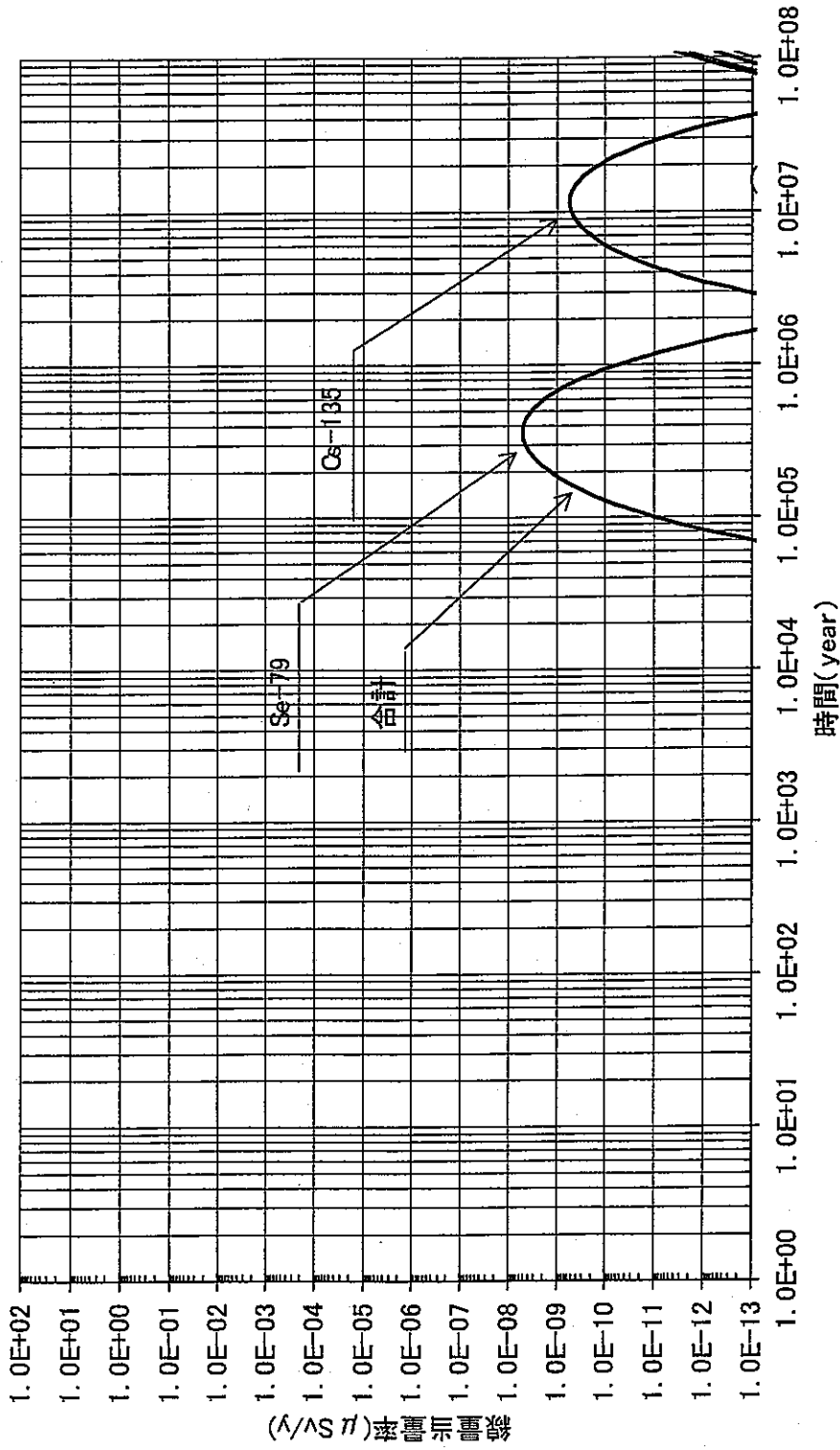


図4.4-41 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No. 11: ガラス固化体一本)

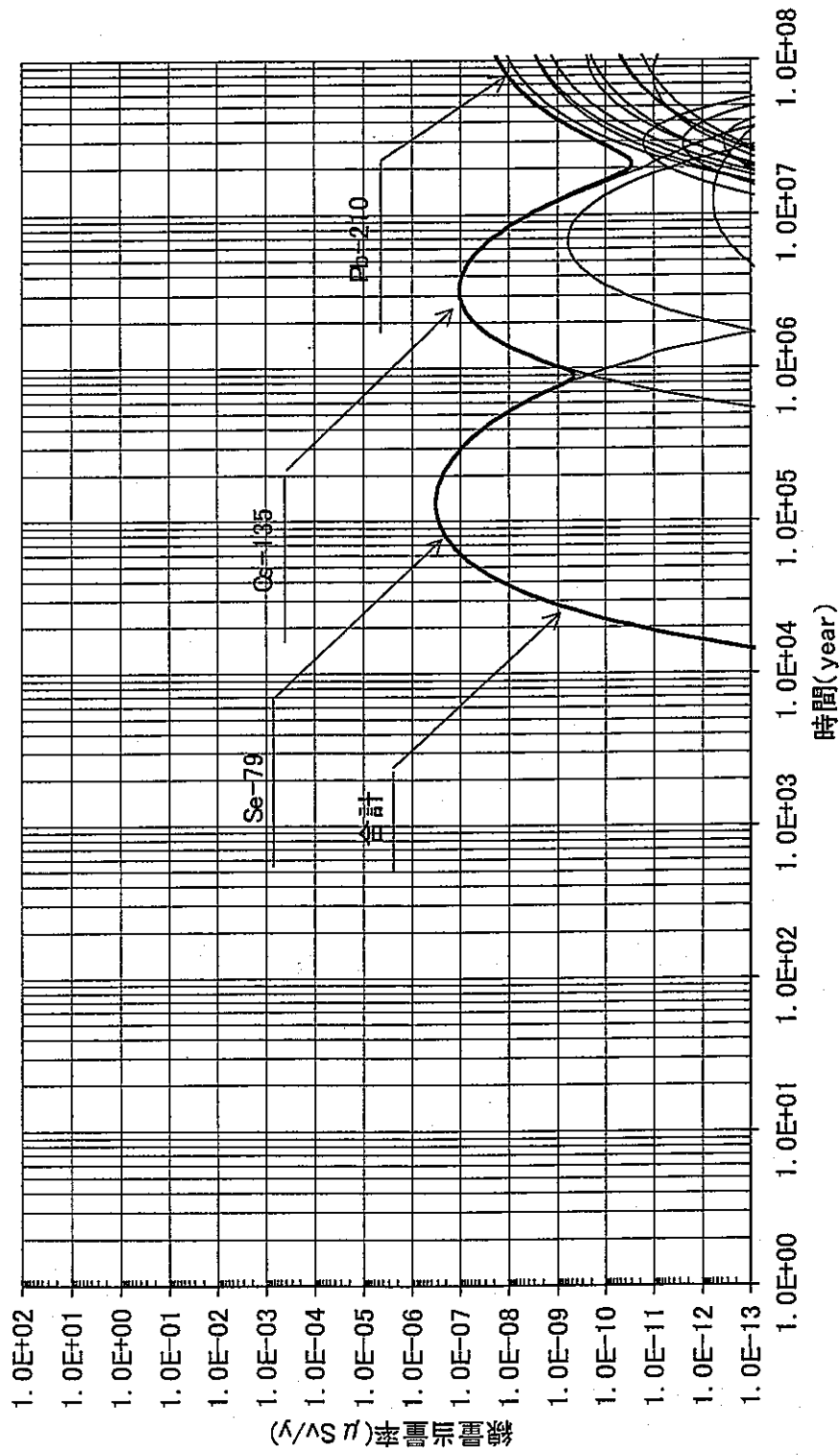


図4.4-42 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No.12: ガラス固化体一本)

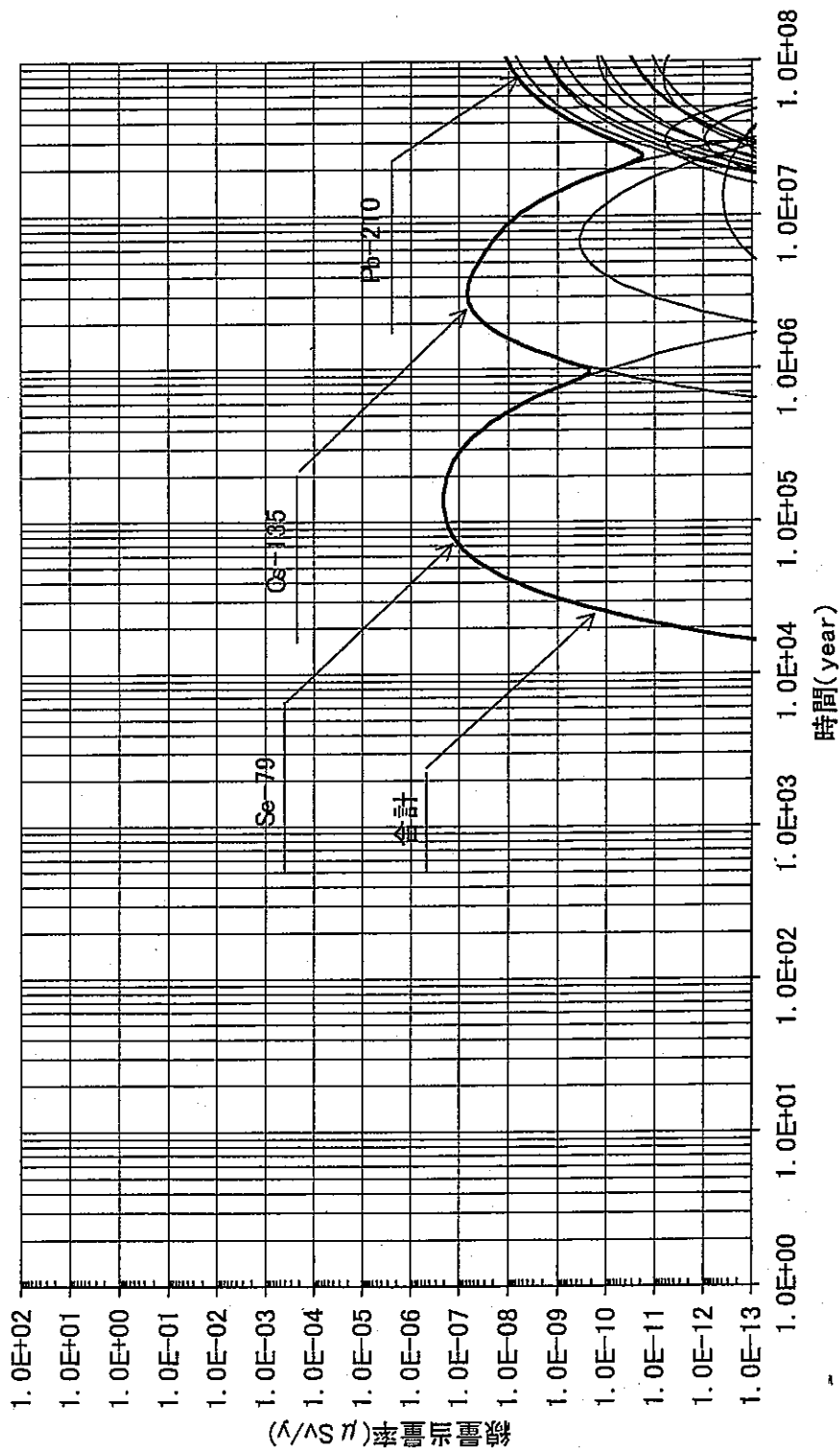


図4.4-43 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No. 13: ガラス固化体一本)

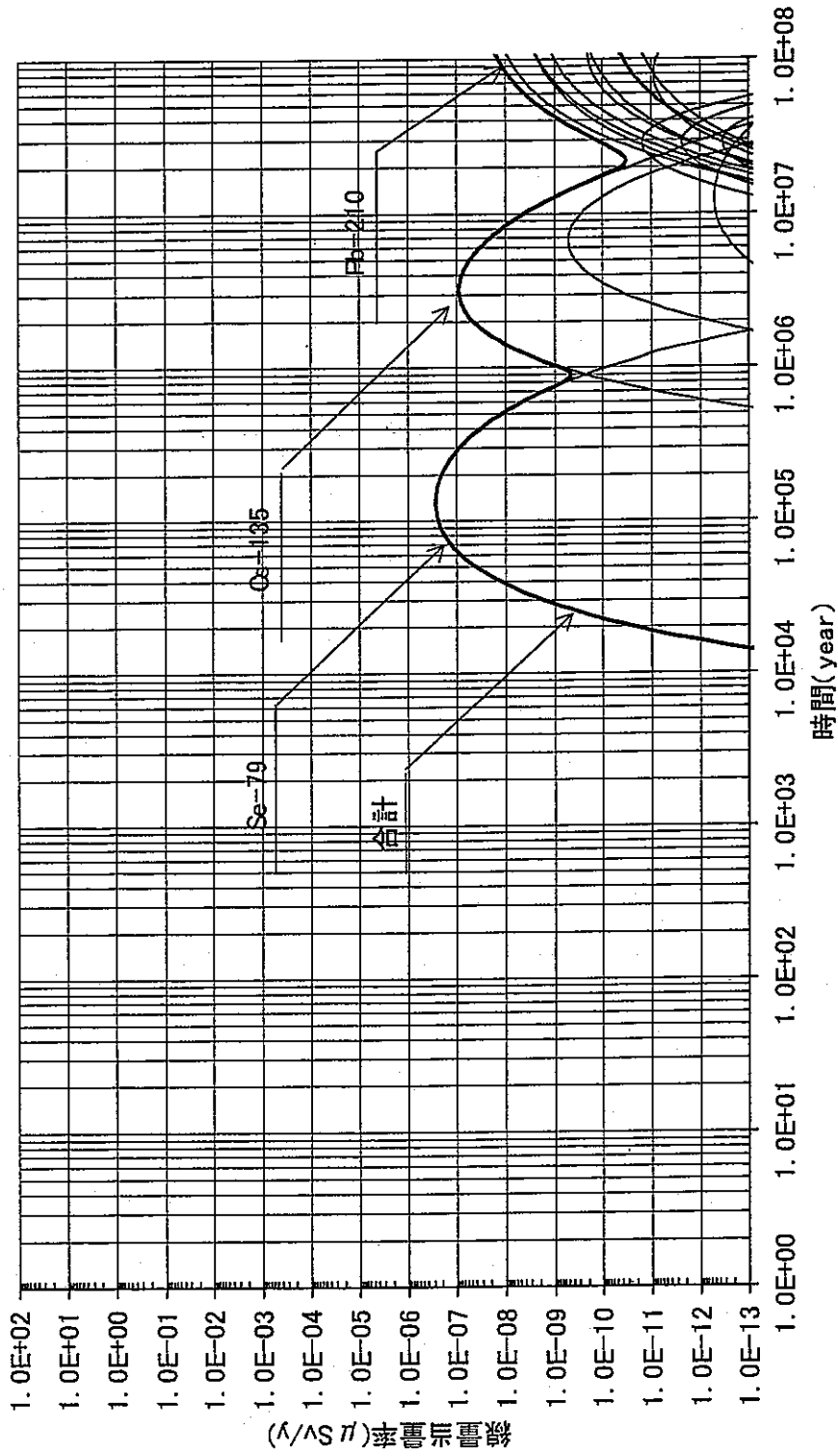


図4.4-44 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No. 14: ガラス固化体一本)

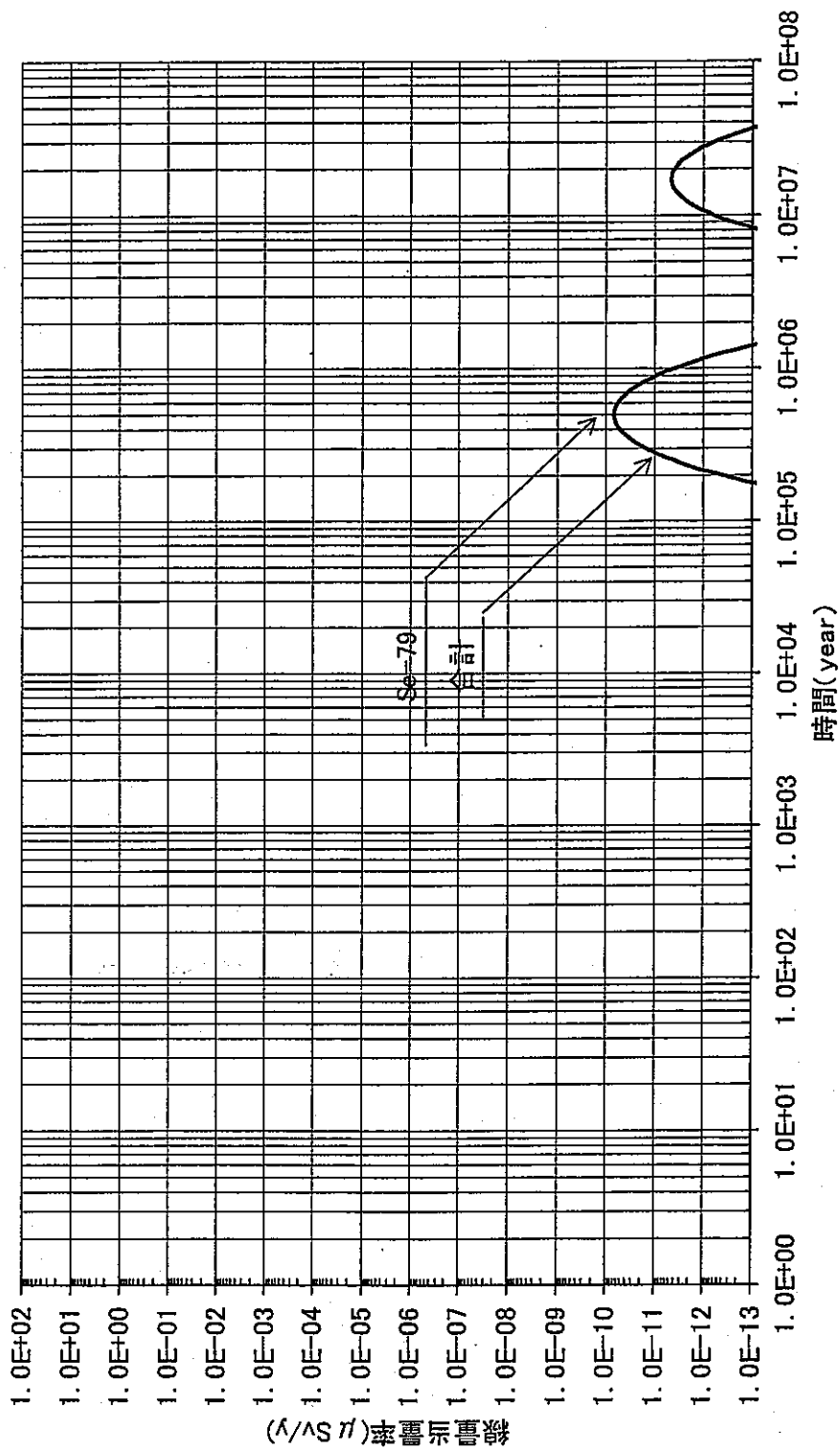


図4. 4-45 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No. 15: ガラス固化体一本)

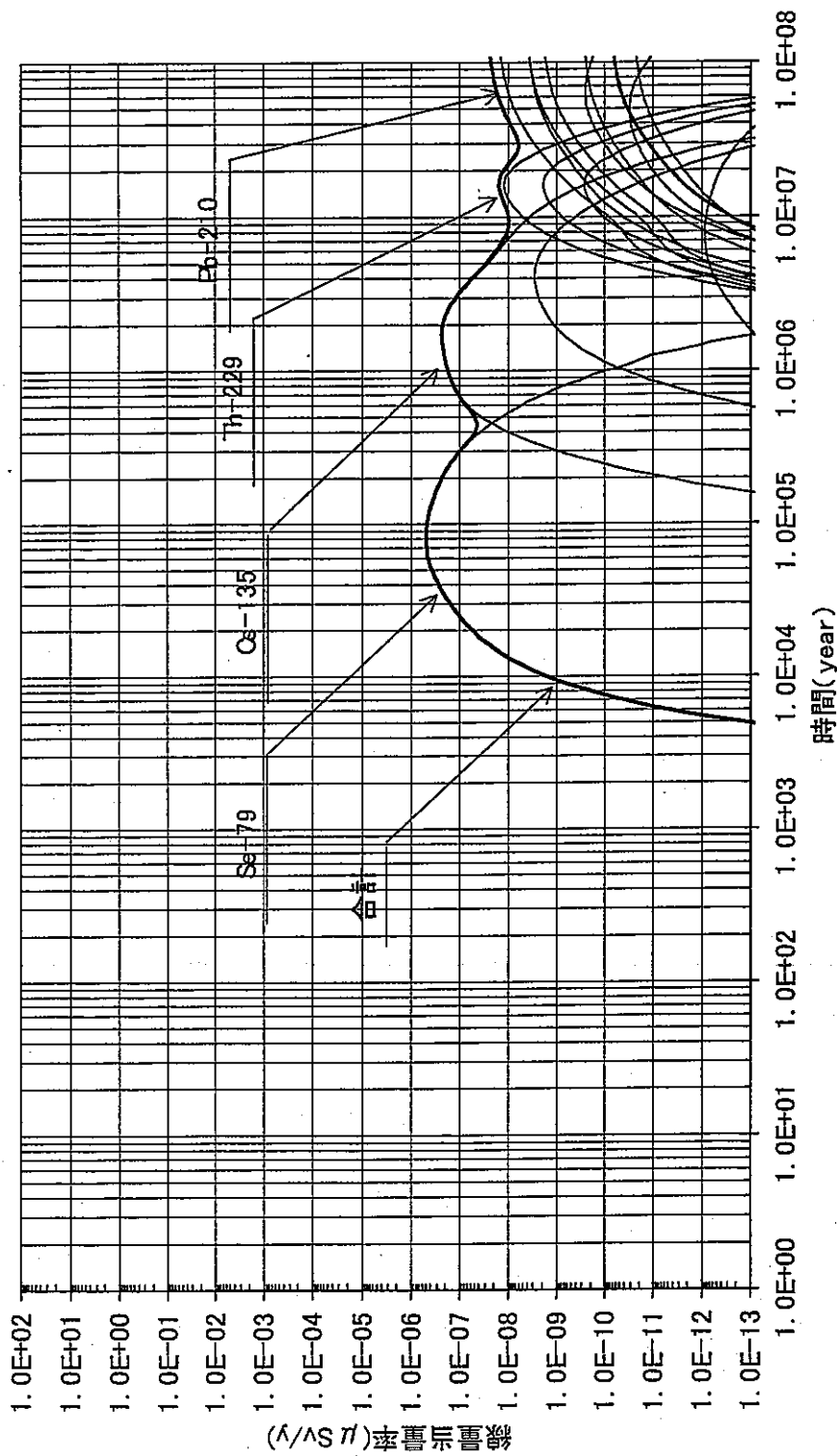


図4.4-46 評価距離100mにおける線量当量率履歴
(Porsim No. 16: ガラス固化体一本)

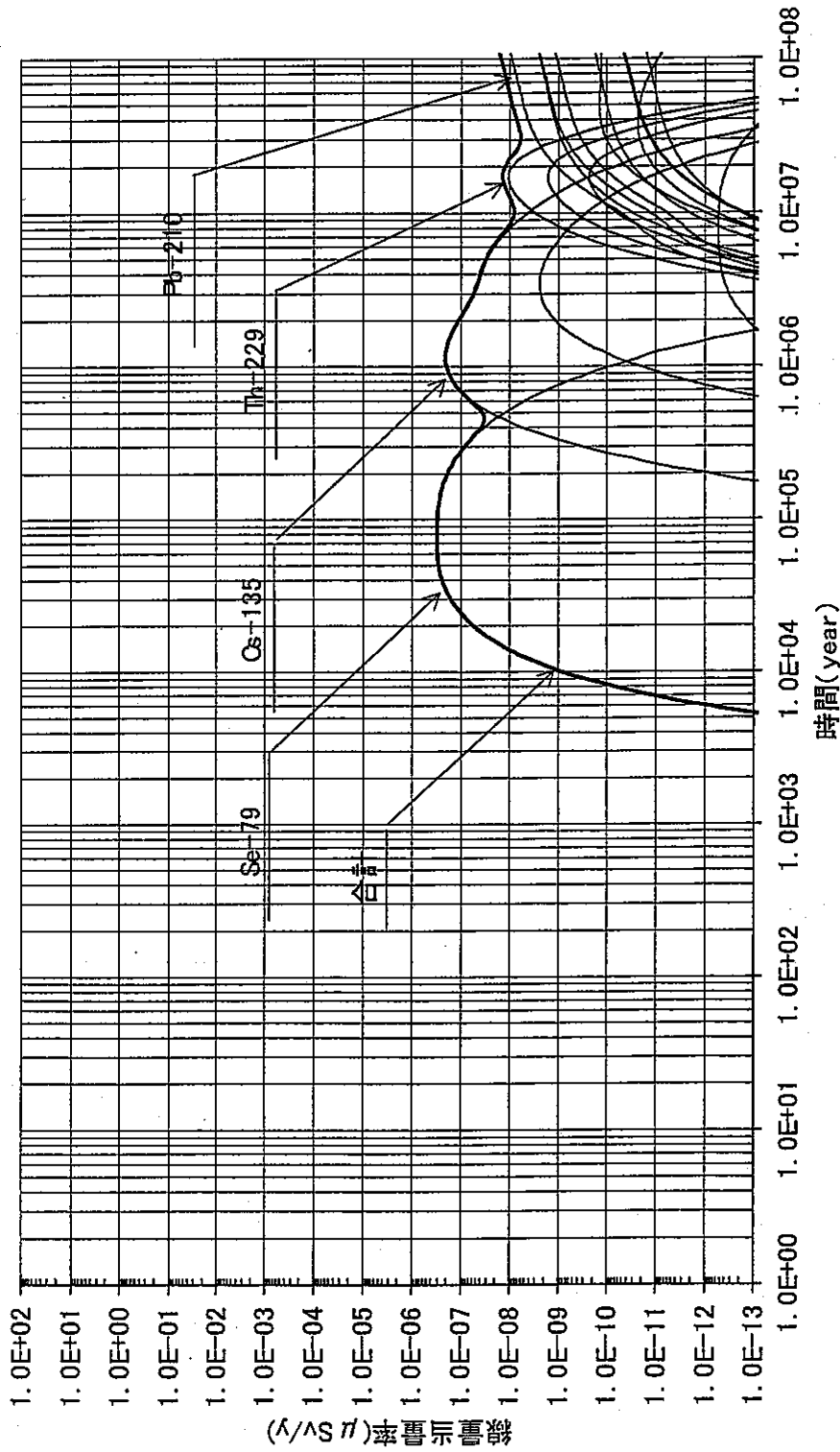


図4. 4-47 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No. 17: ガラス固化体一本)

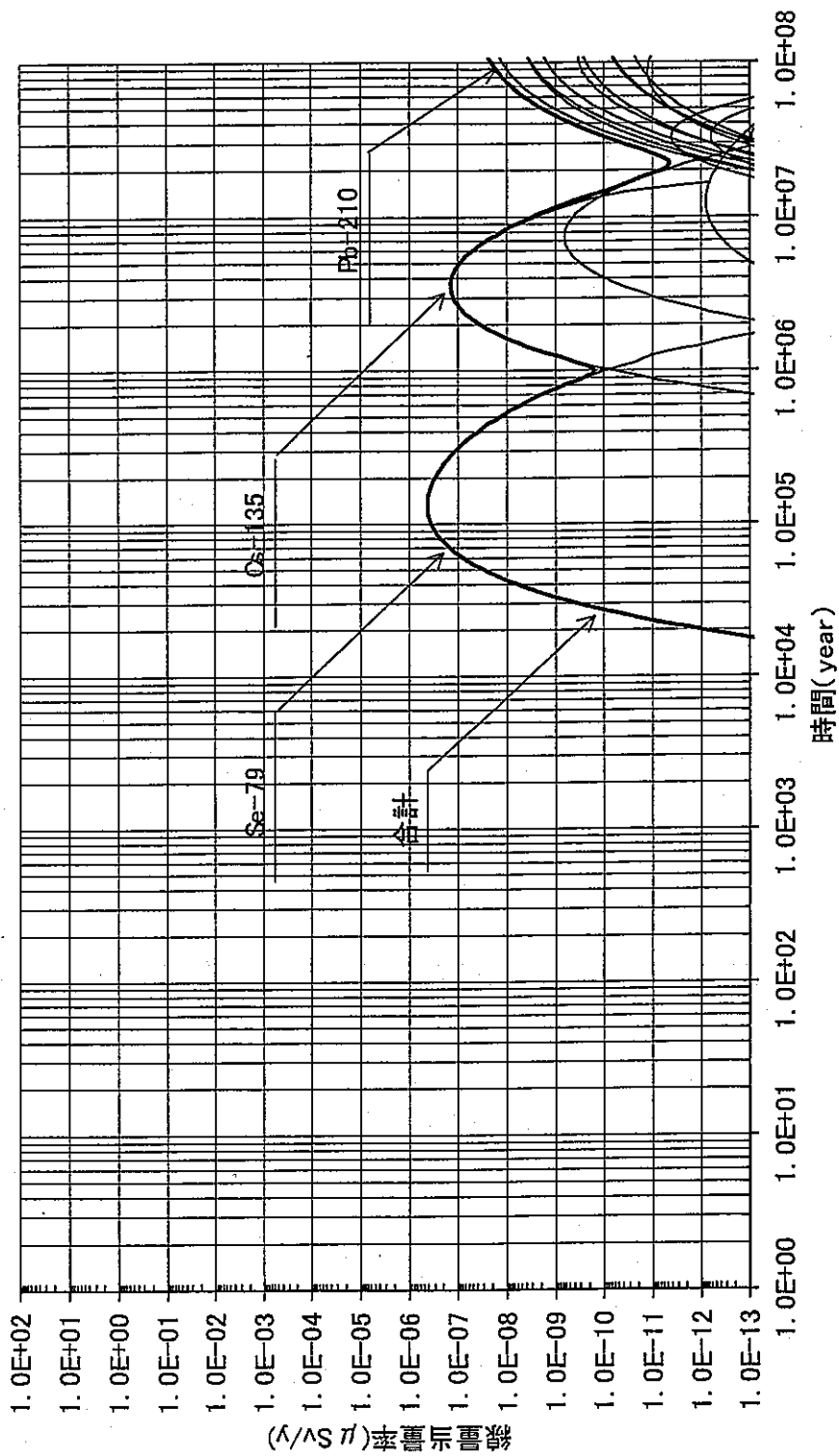


図4.4-48 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No. 18: ガラス固化体一本)

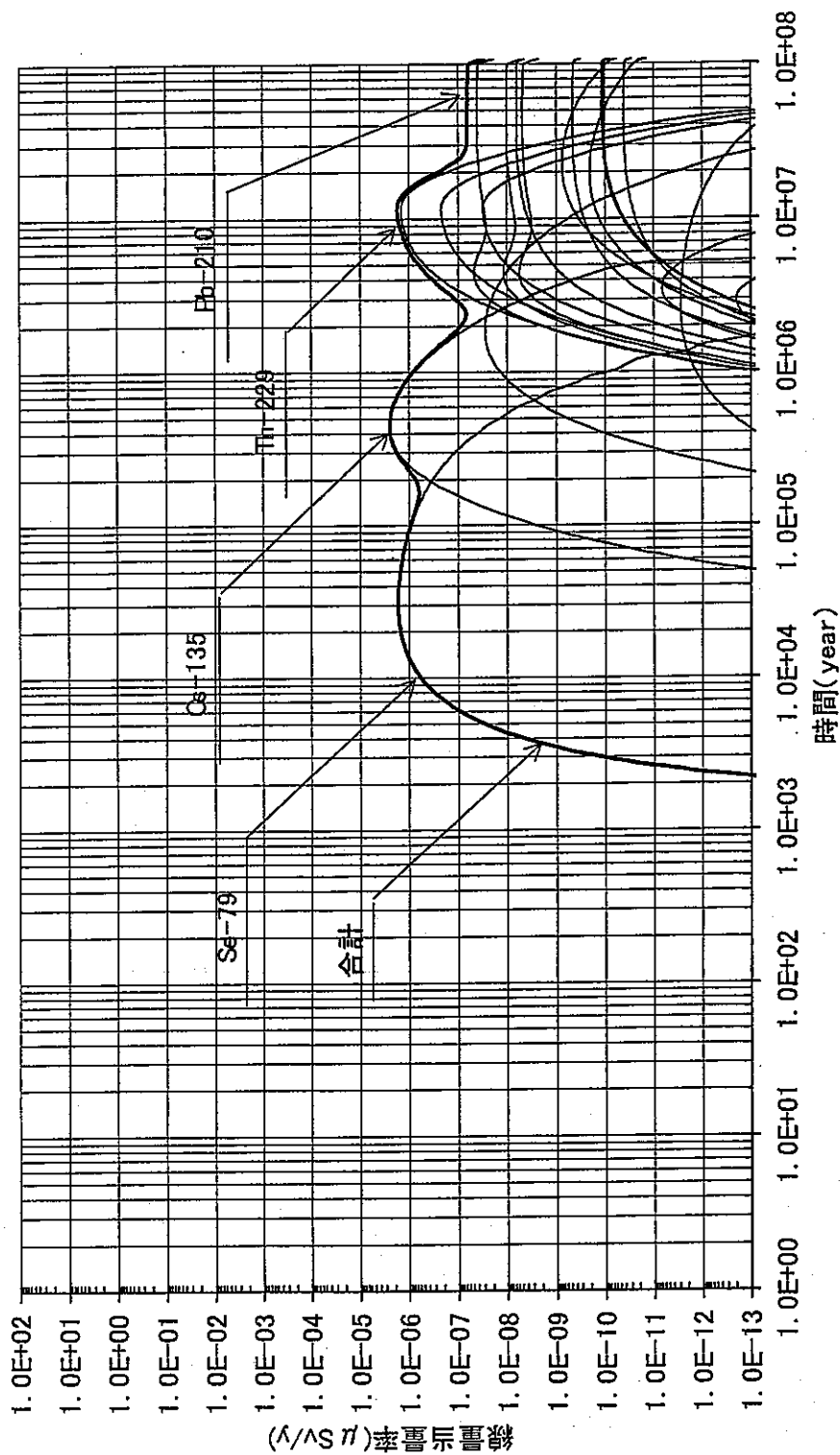


図4.4-49 評価距離100mにおける線量当量率履歴
(Porsim No. 19: ガラス固化体一本)

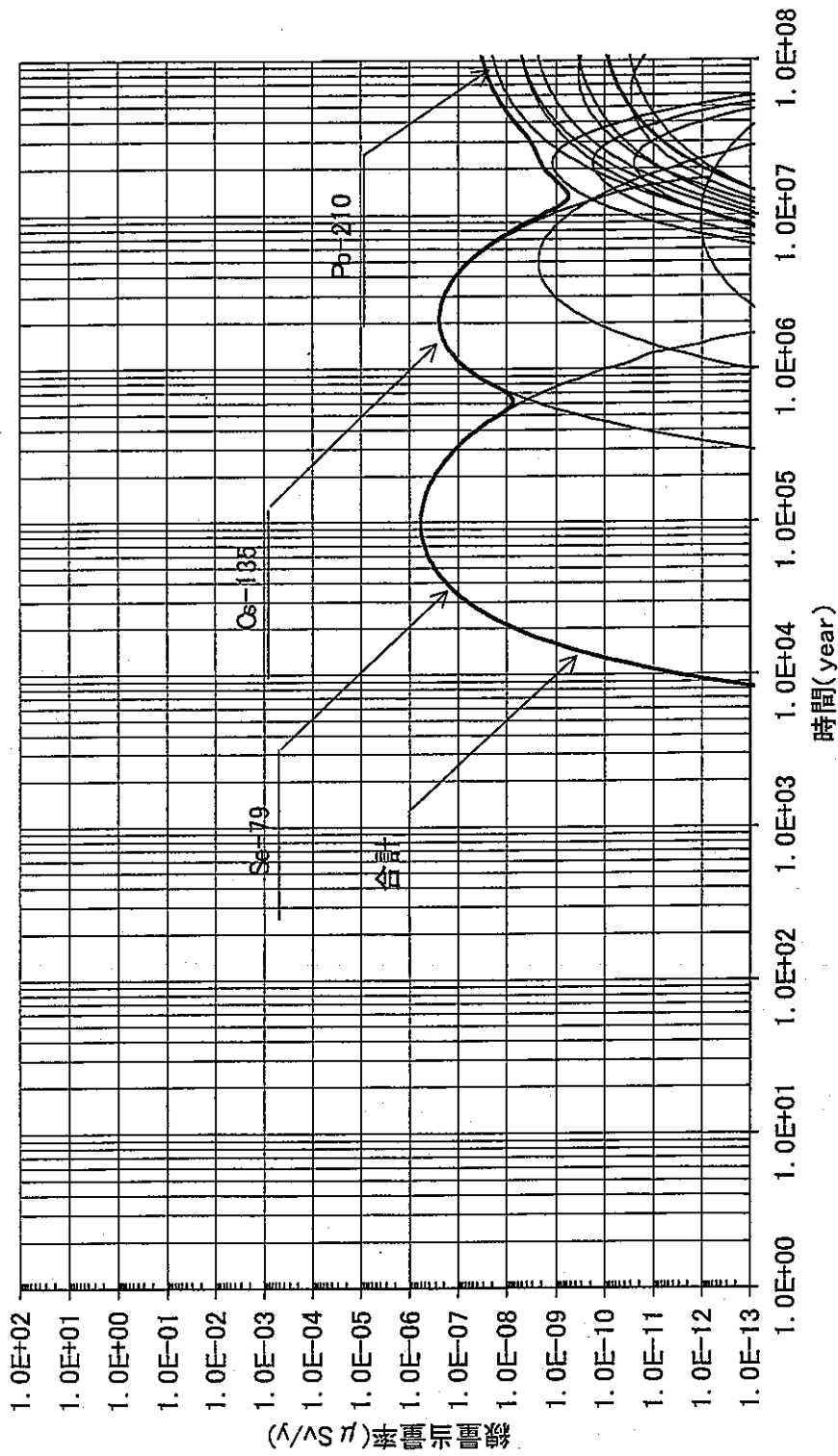


図4.4-50 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No. 20: ガラス固化体一本)

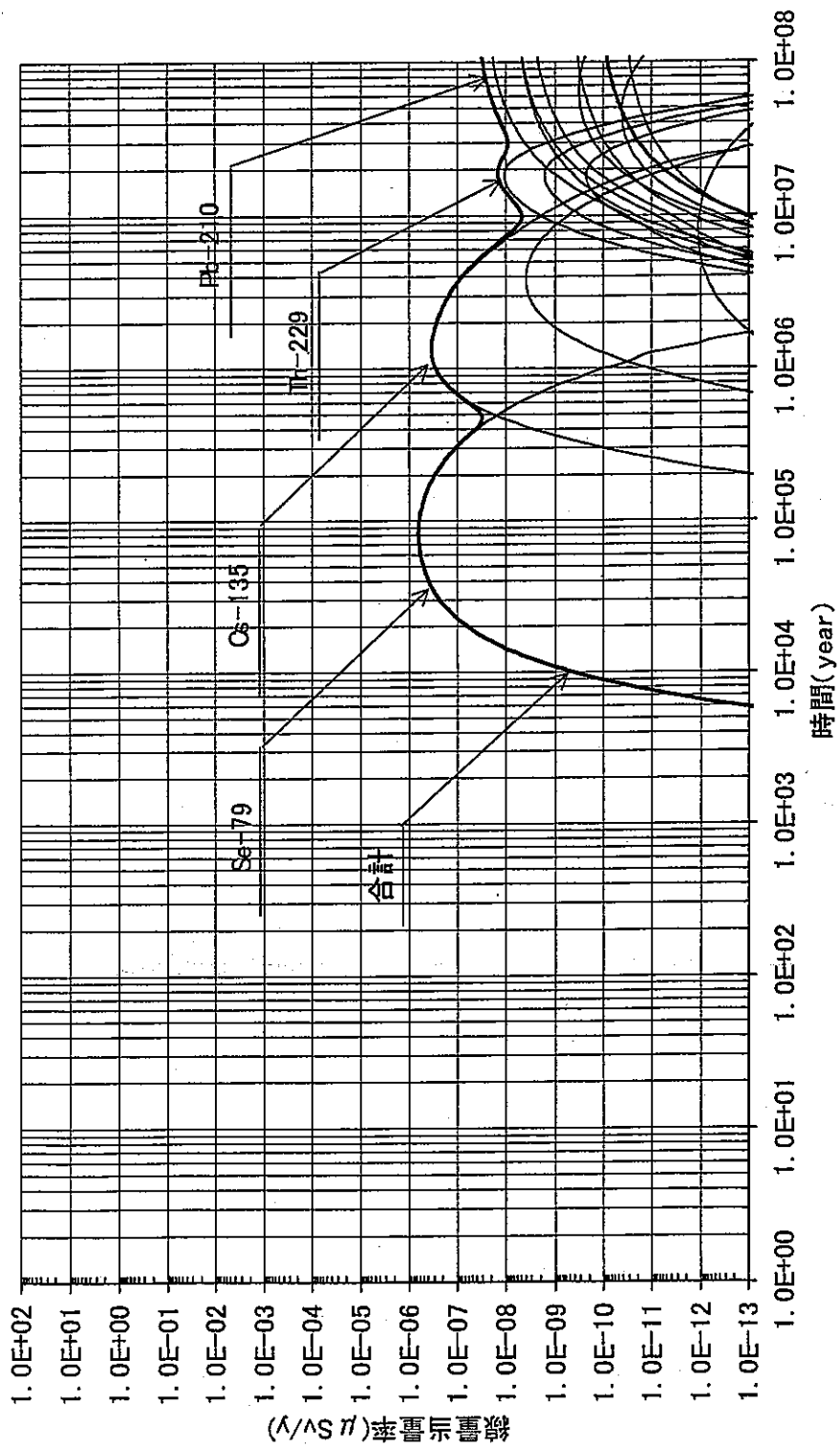


図4.4-51 評価距離100mにおける線量当量率
 (Porsim No. 21: ガラス固化体一本)

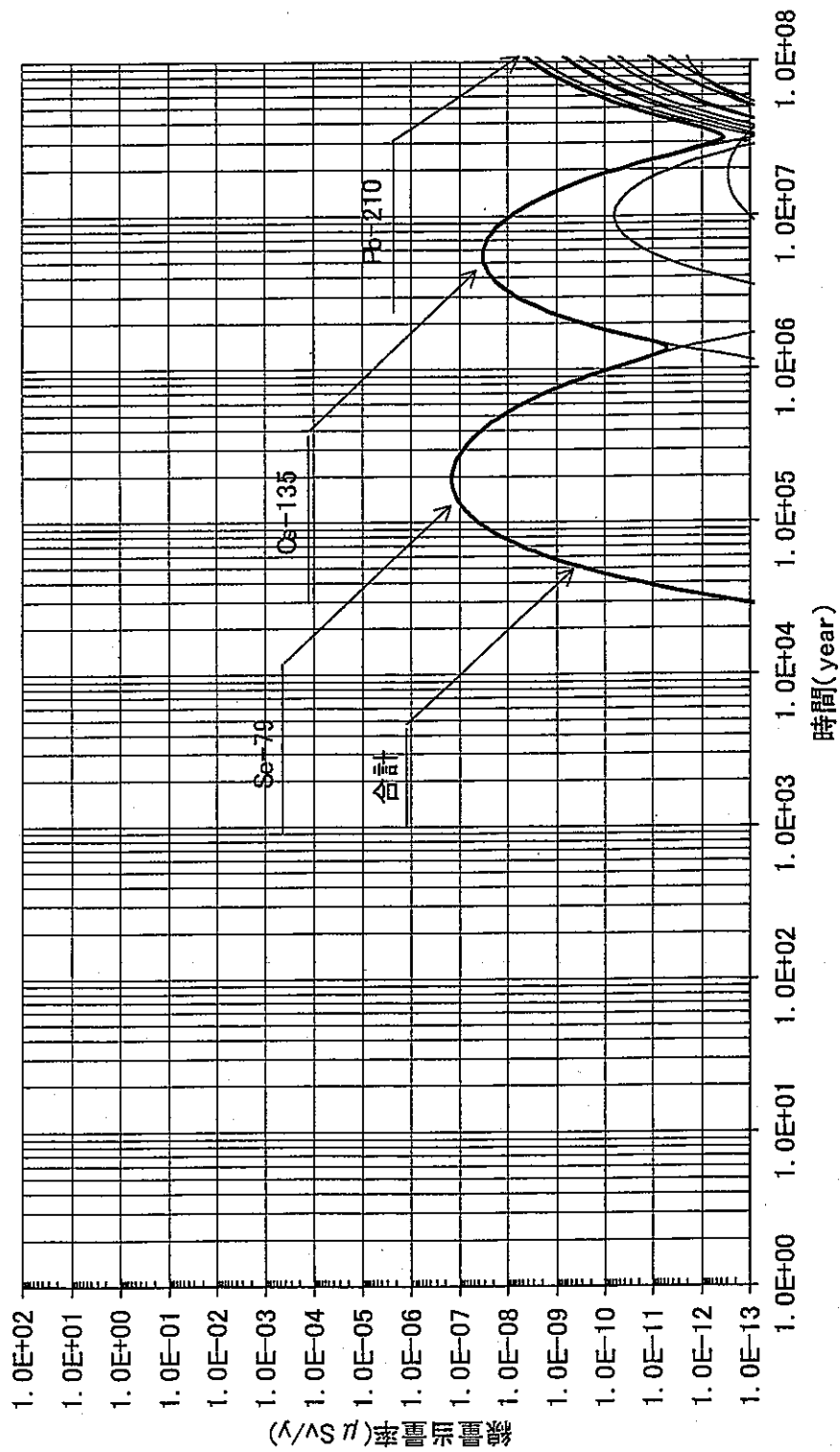


図4. 4-52 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No. 22: ガラス固化体一本)

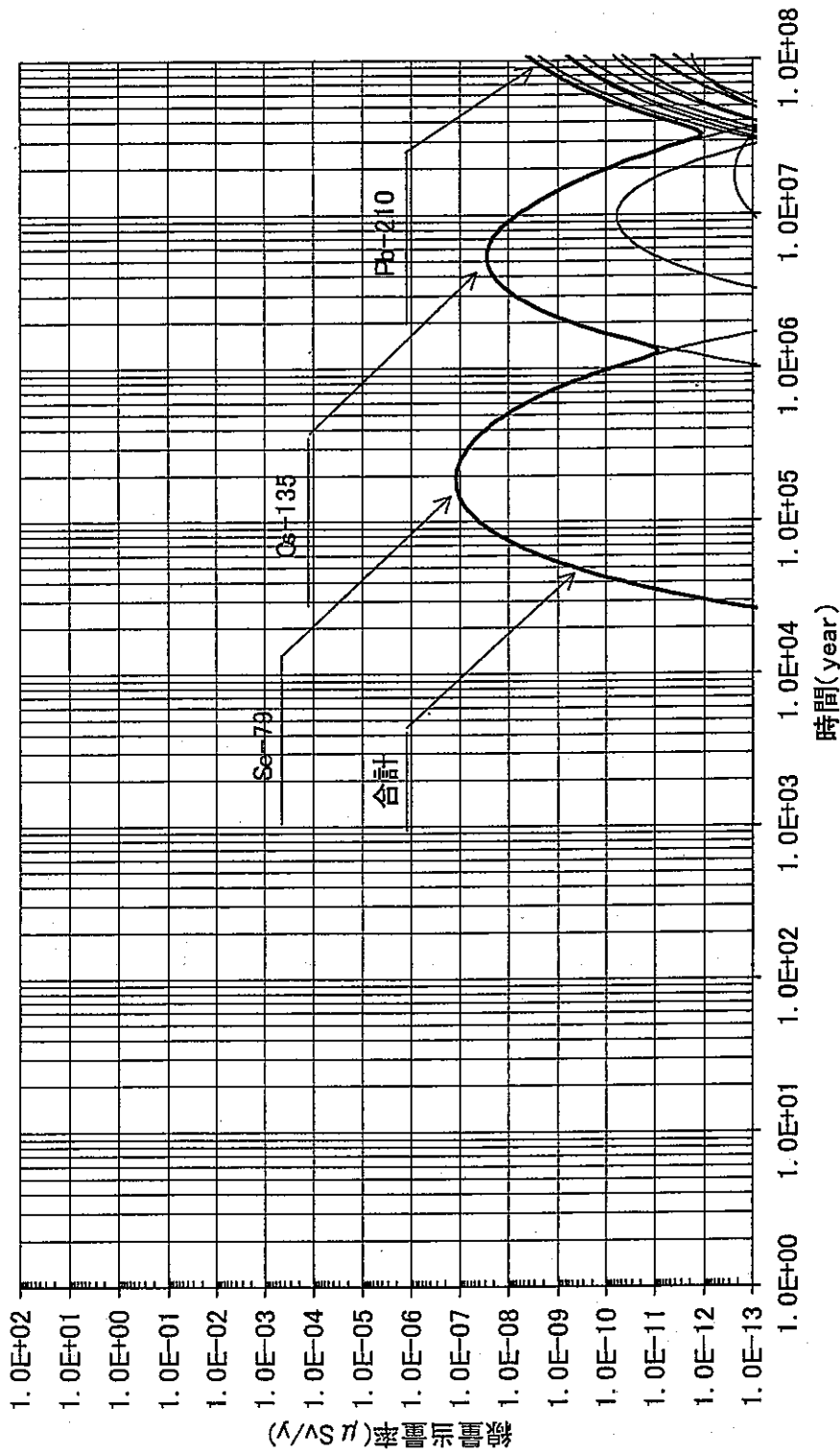


図4. 4-53 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No. 23: ガラス固化体一本)

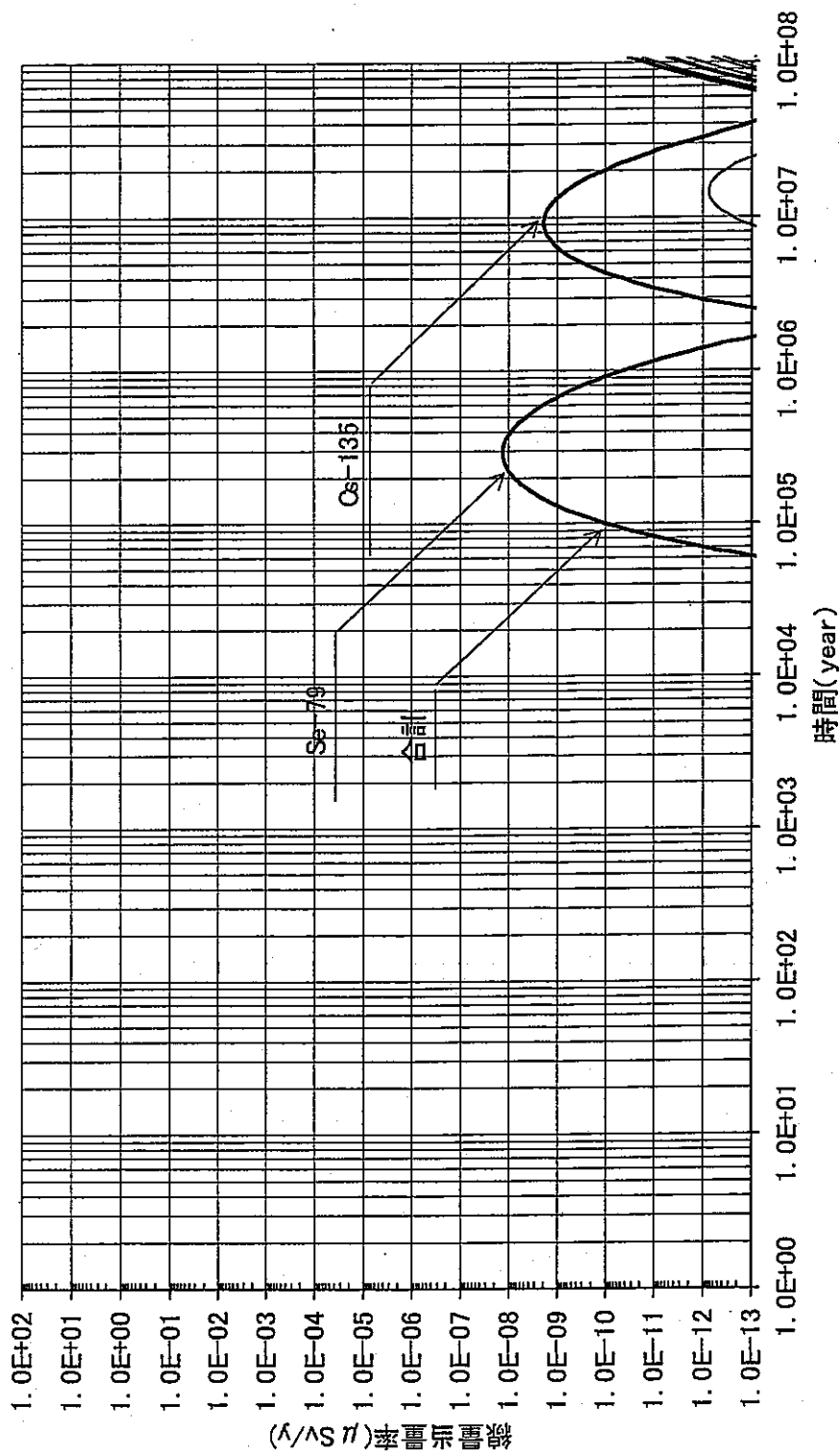


図4.4-54 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No. 54: ガラス固化体一本)

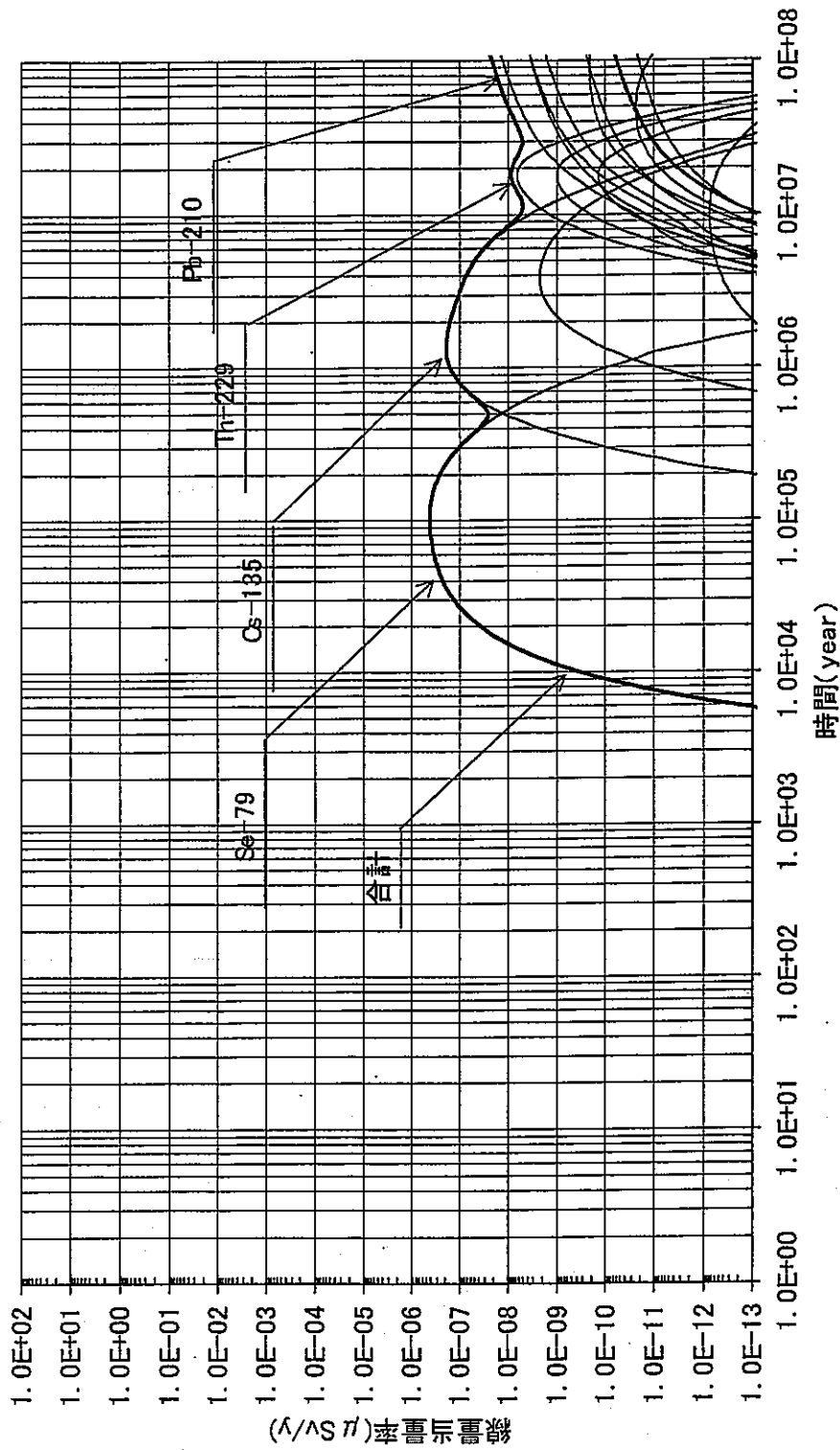


図4.4-55 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No. 25: ガラス固化体一本)

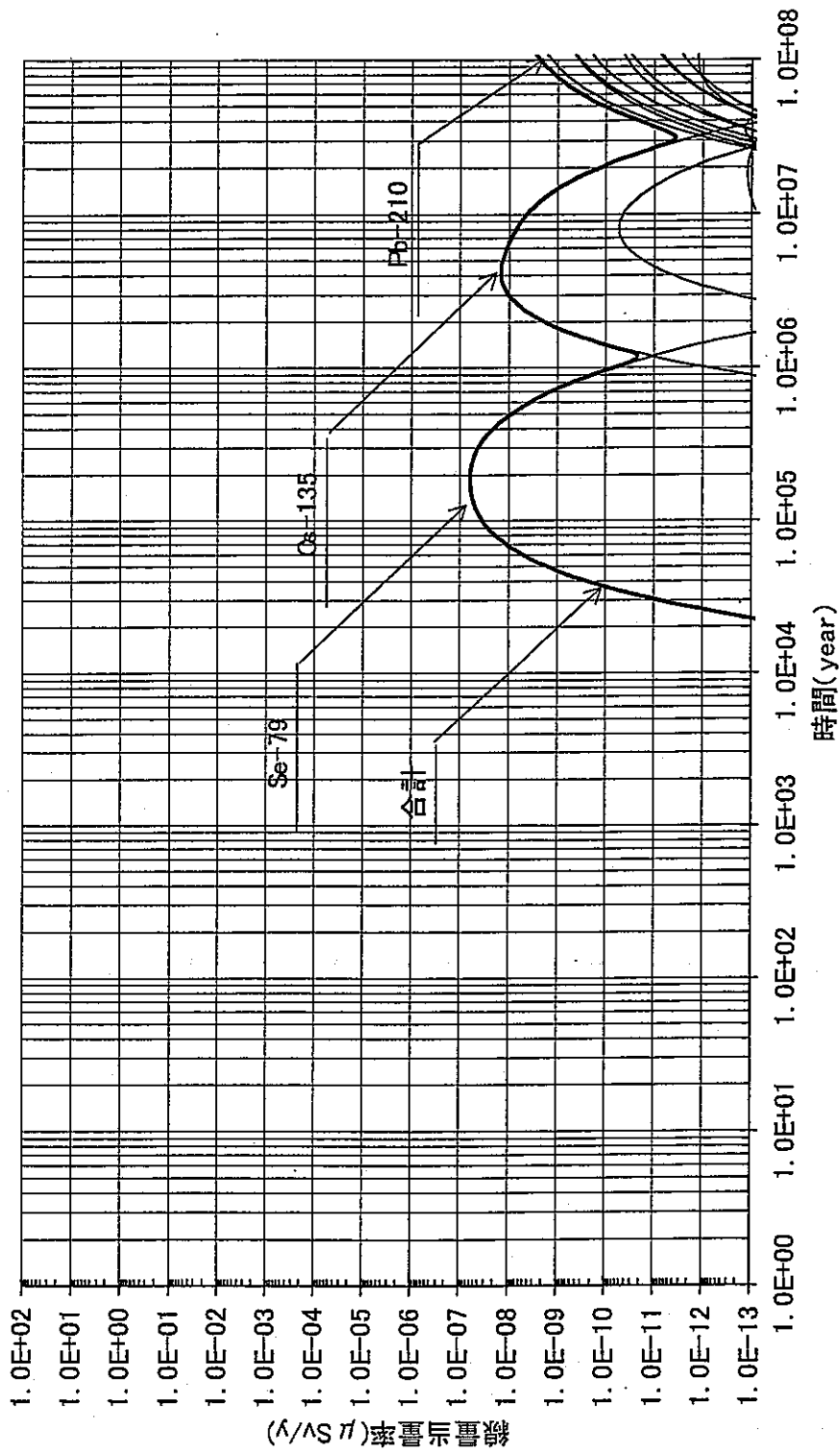


図4. 4-56 評価距離100mにおける線量当量率
(Porsim No. 56: ガラス固化体一本)

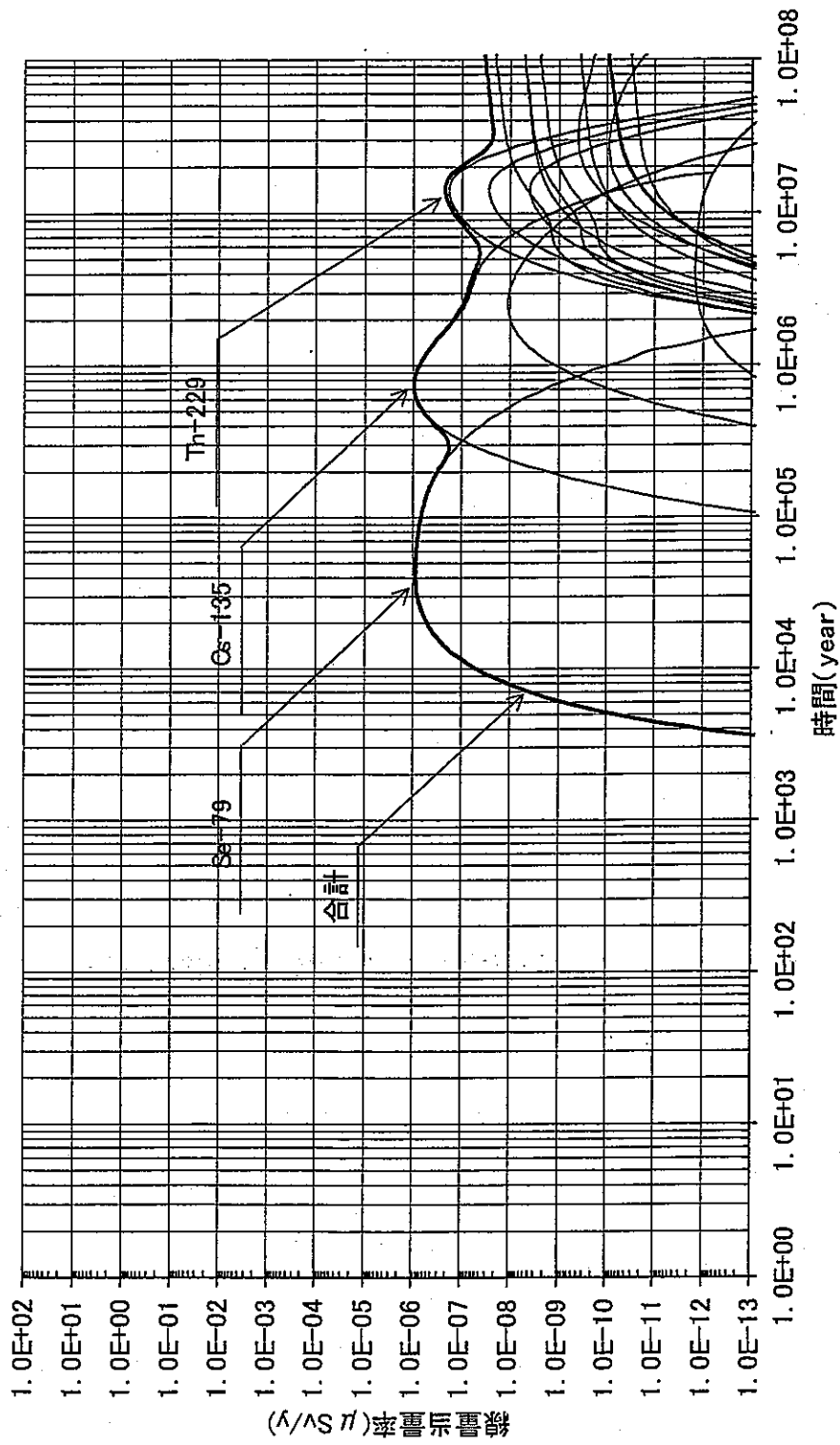


図4.4-57 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No. 27: ガラス固化体一本)

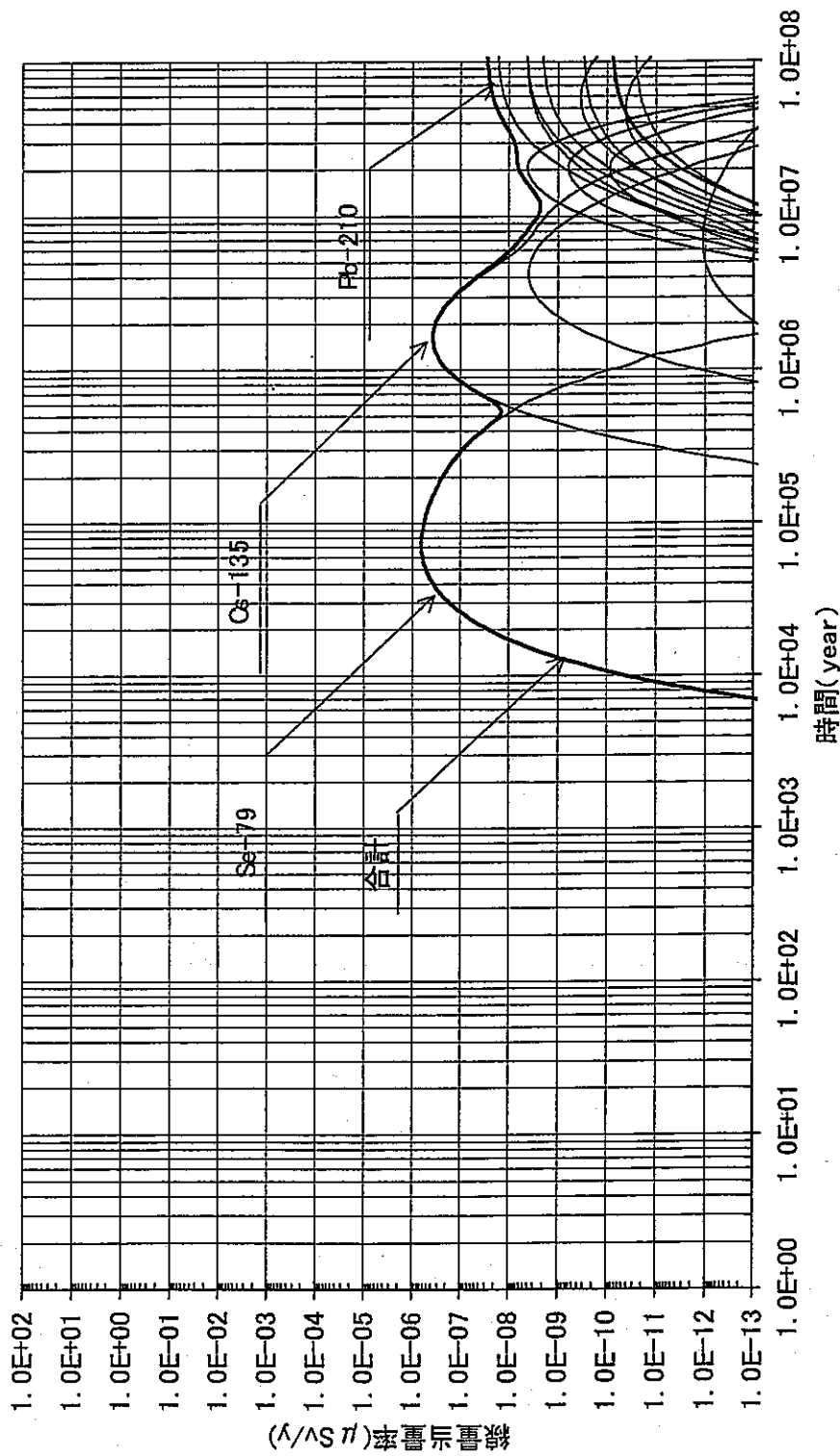


図4.4-58 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No. 28: ガラス固化体一本)

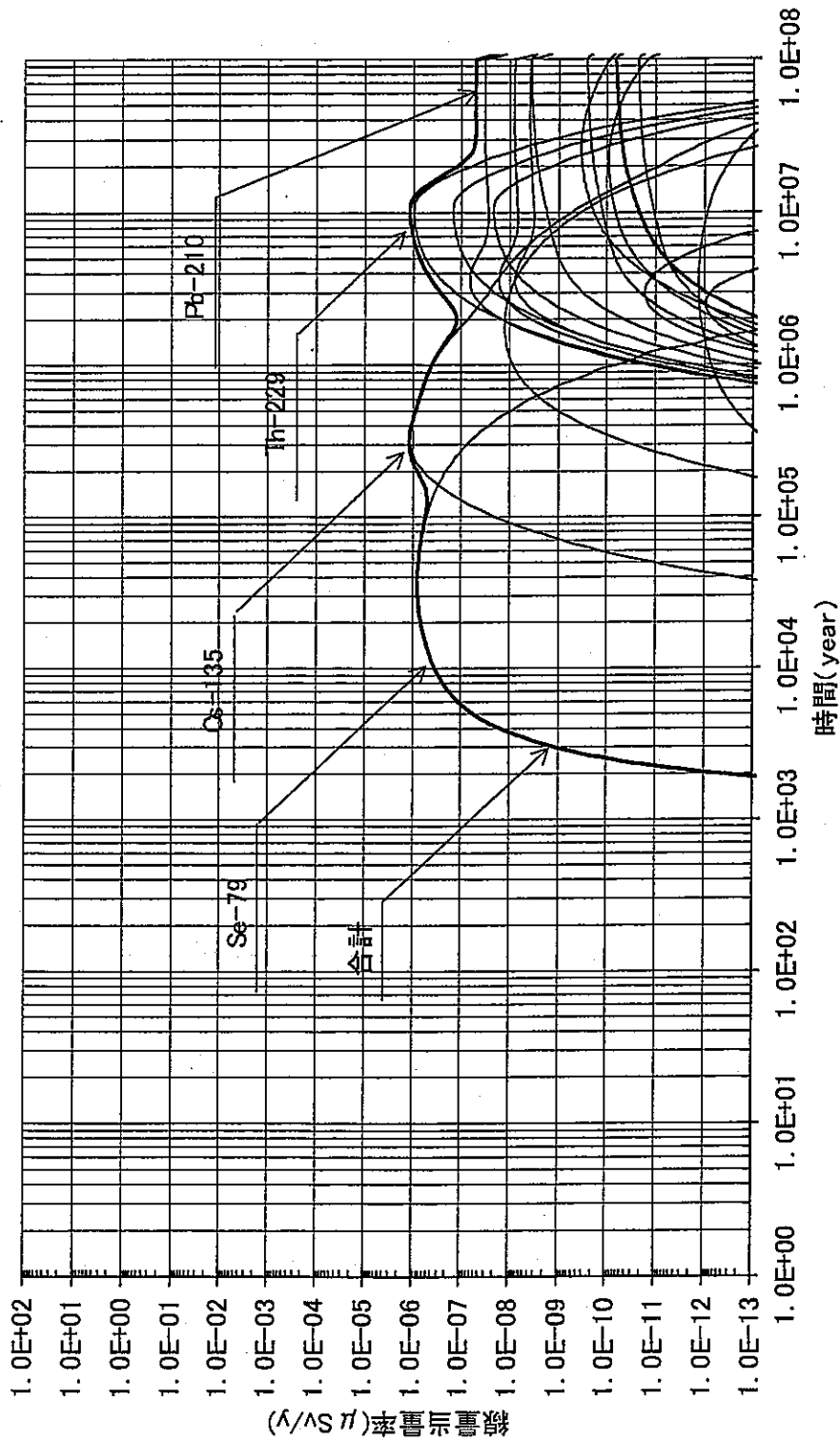


図4.4-59 評価距離100mにおける線量当量率
 (Porsim No. 29: ガラス固化体一本)

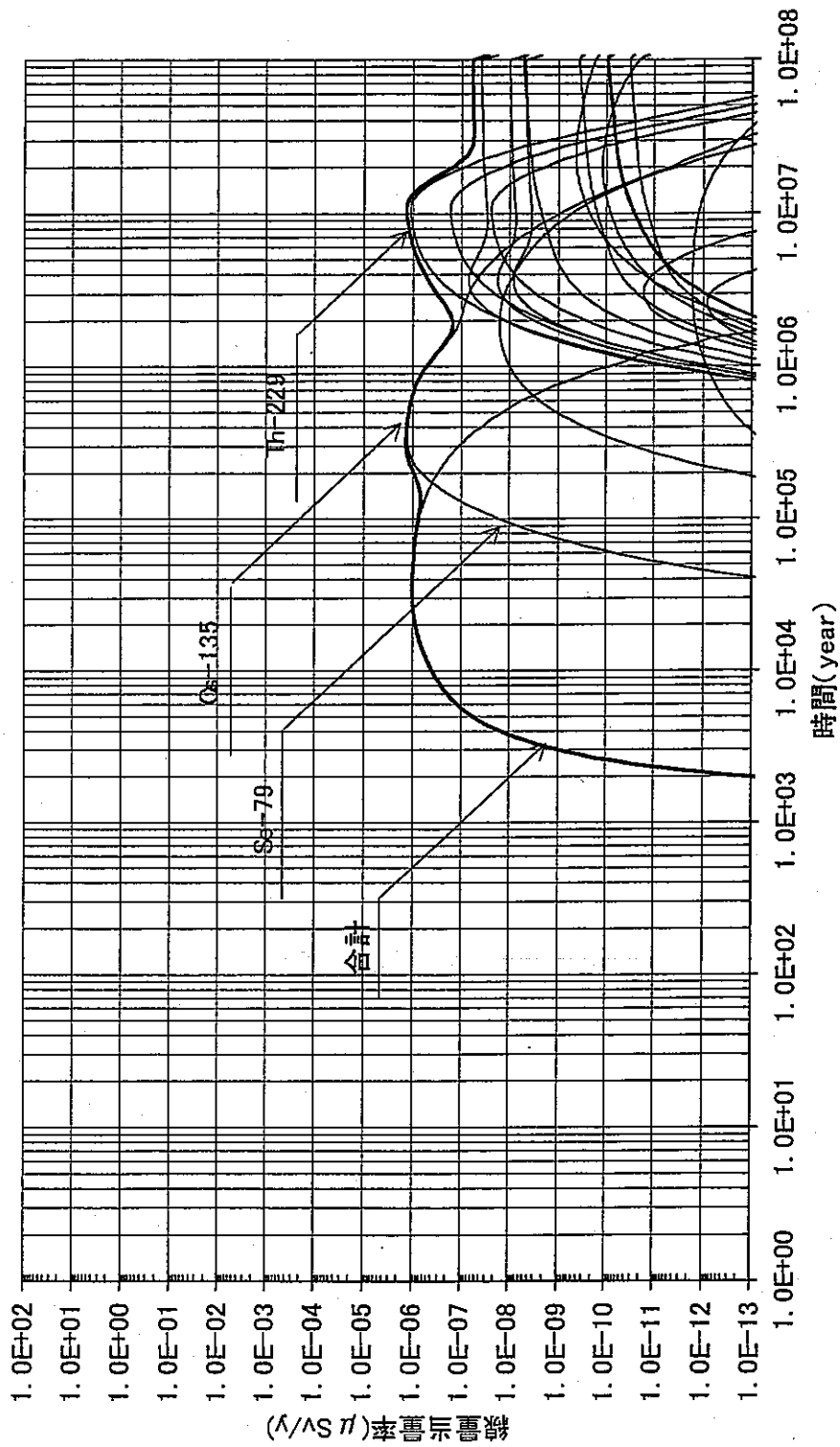


図4.4-90 評価距離100mにおける線量当量率履歴
(Por sim No.30: ガラス固化体四万本)

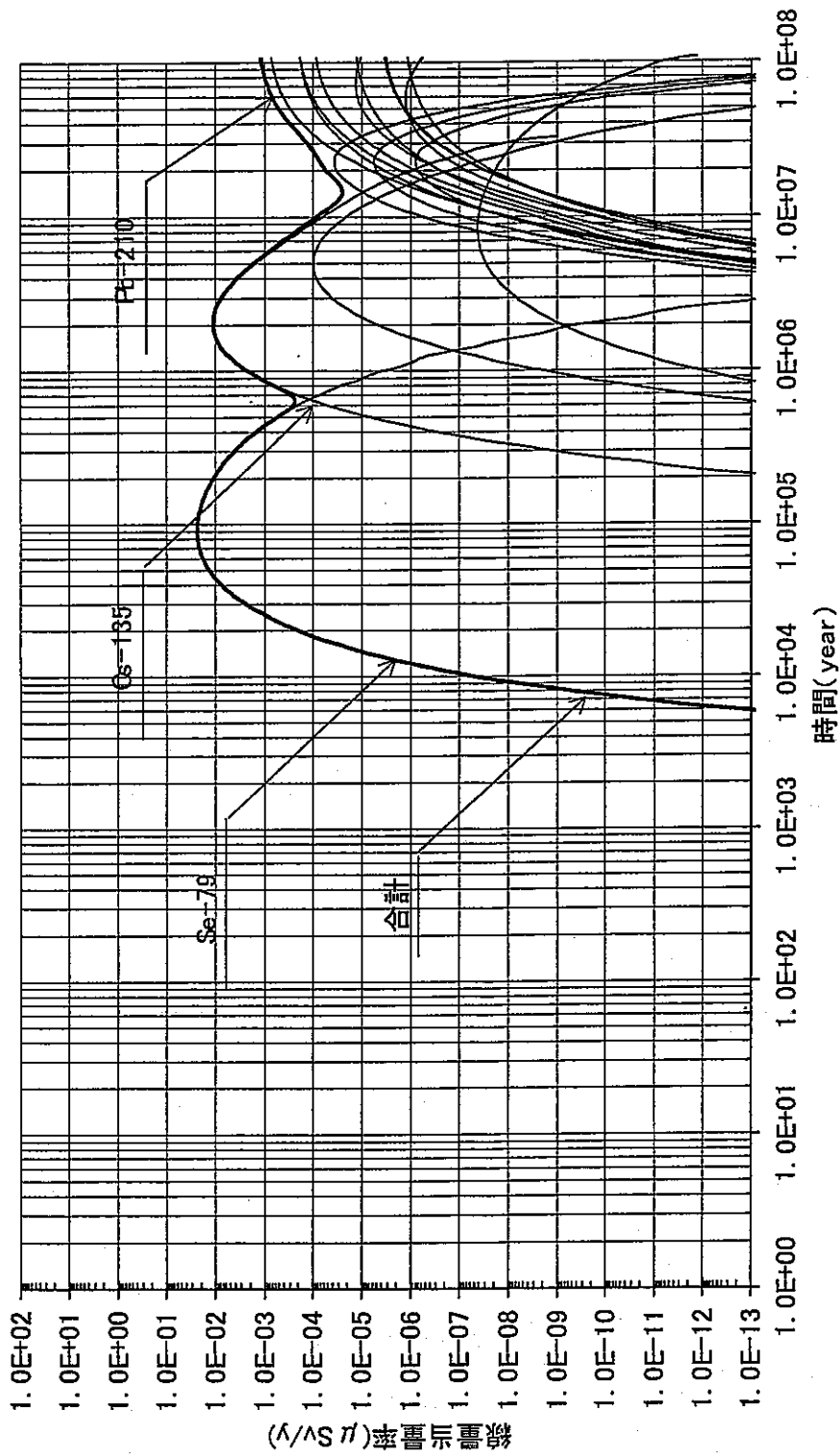


図4.4-61 評価距離100mにおける線量当量率履歴
(Porsim No.1: ガラス固化体四万本)

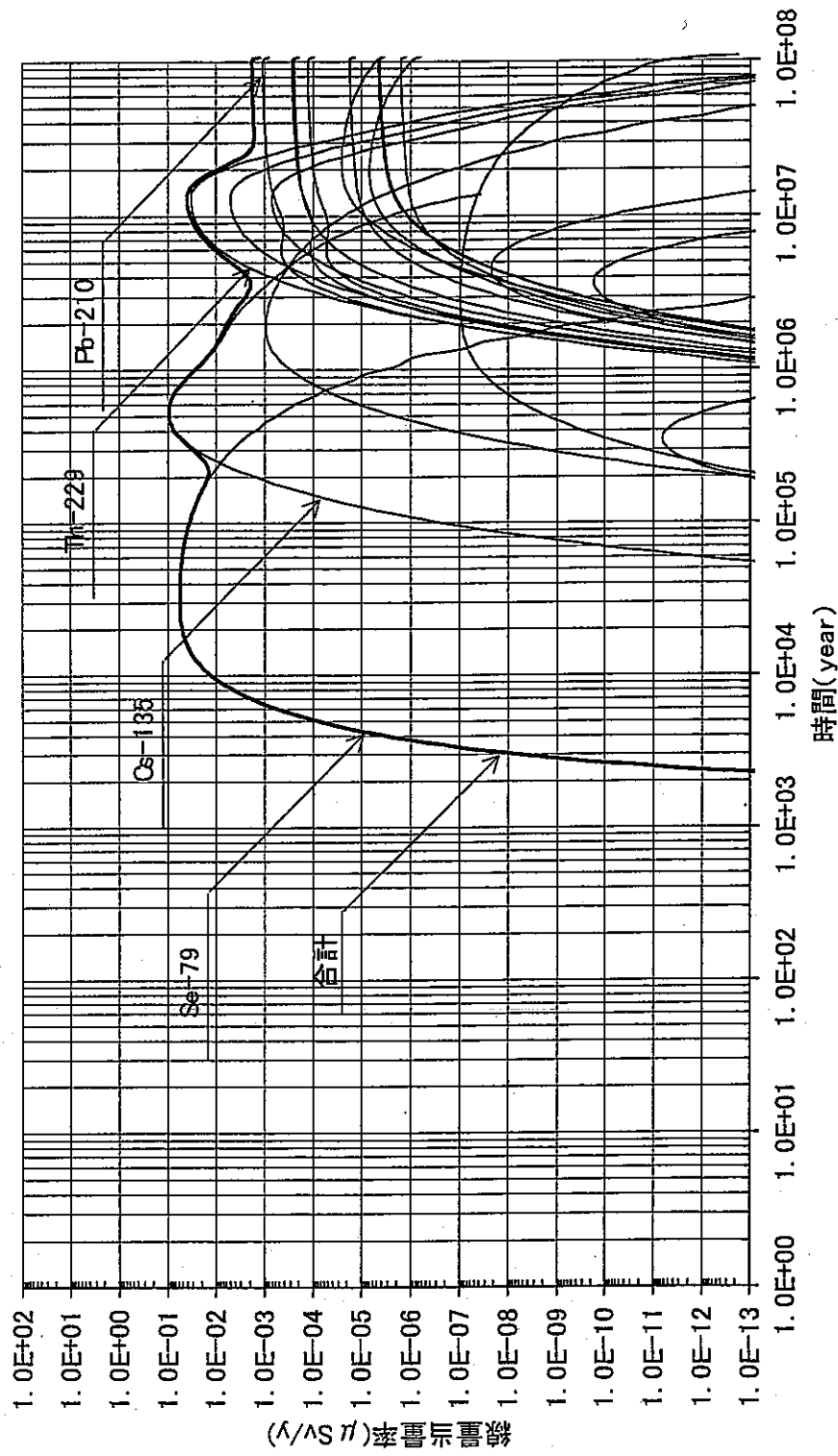


図4.4-62 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No. 2: ガラス固化体四万本)

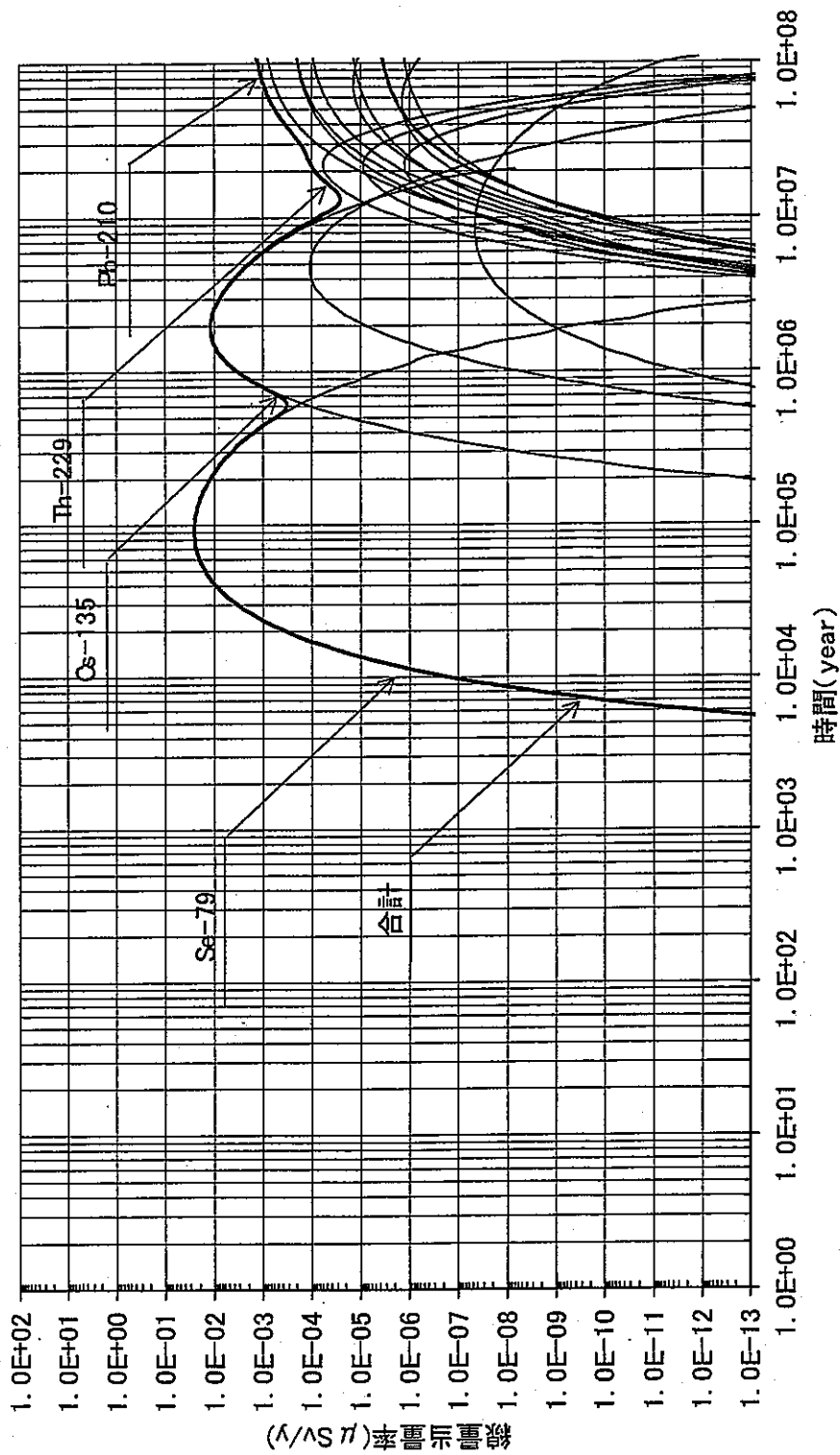


図4.4-63 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No. 3: ガラス固化体四万本)

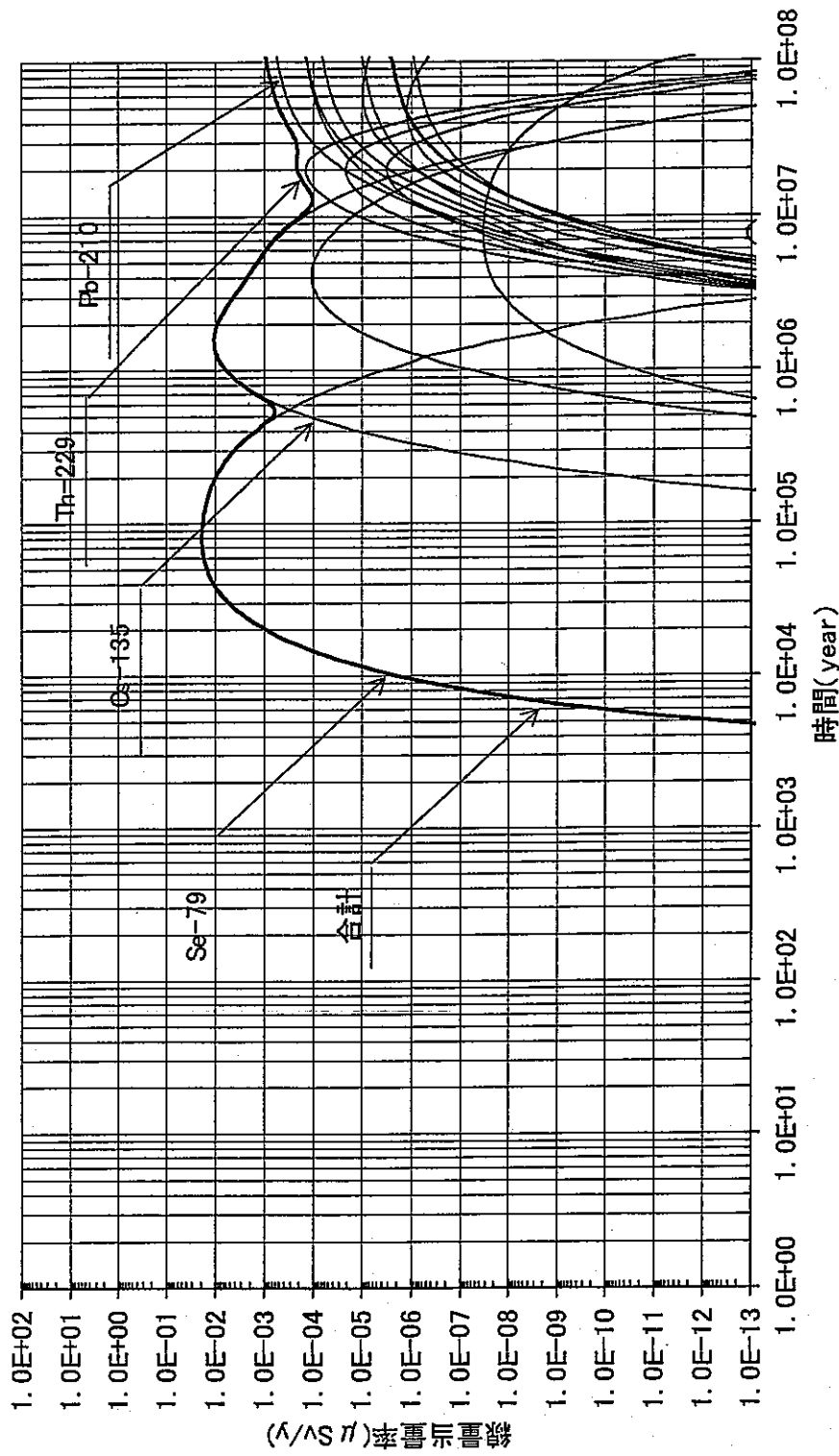


図4.4-64 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No. 4: ガラス固化体四万本)

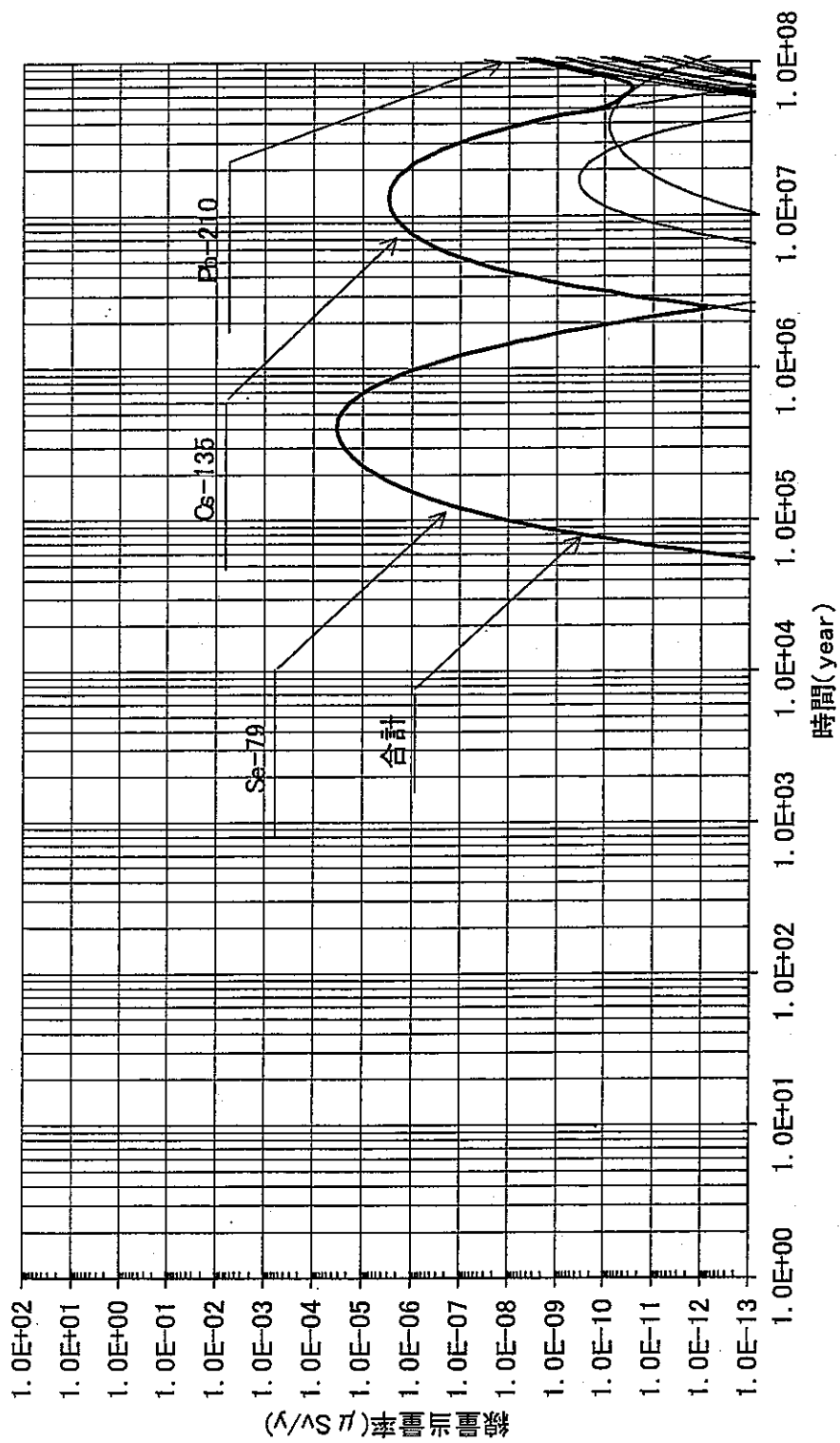


図4.4-65 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No.5: ガラス固化体四万本)

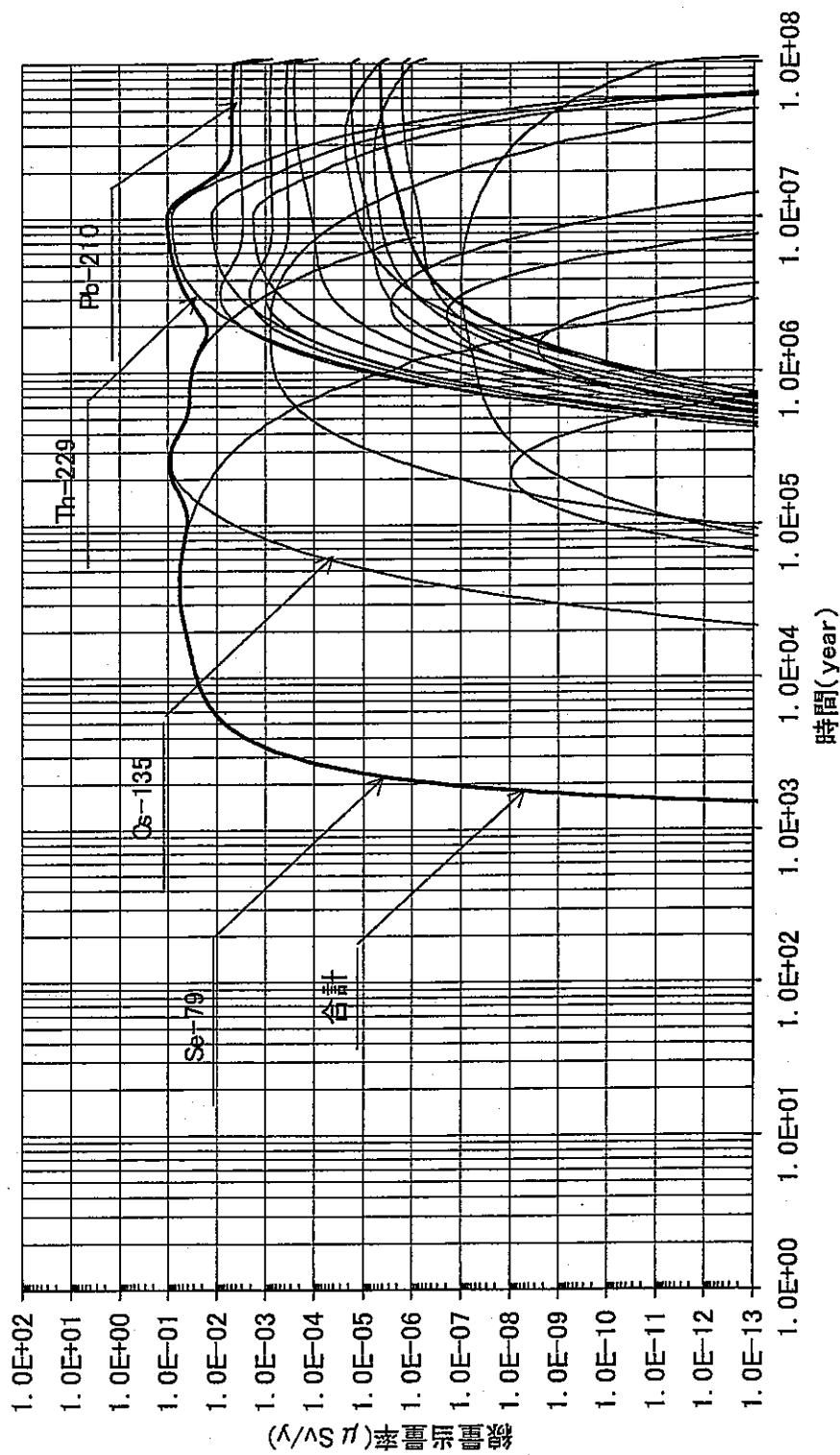


図4.4-66 評価距離100mにおける線量当量率
(Porsim No.6: ガラス固化体四万本)

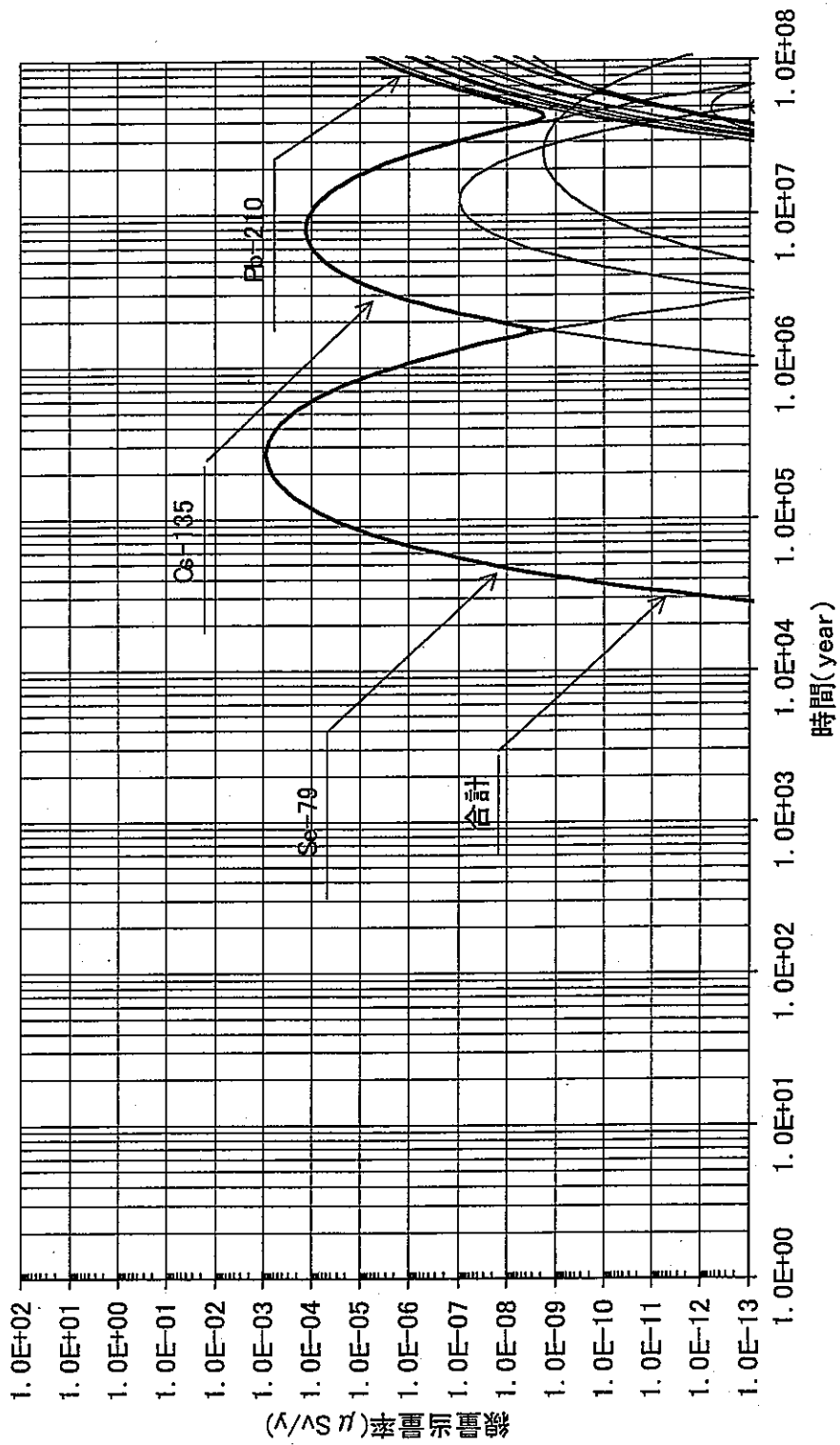


図4.4-67 評価距離100mにおける線量当量率歴史
(Porsim No. 7: ガラス固化体四万本)

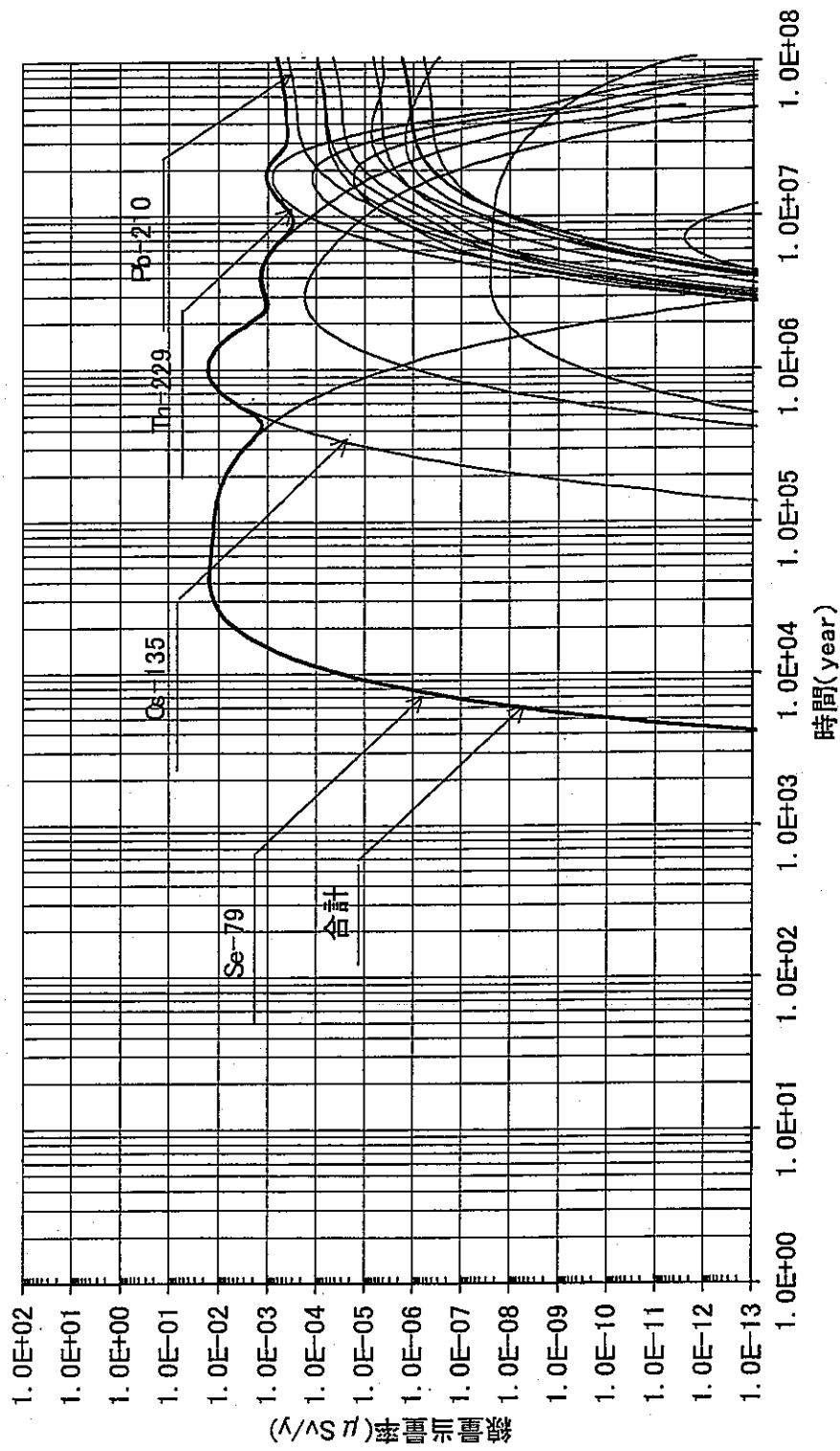


図4.4-68 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No. 8: ガラス固化体四万本)

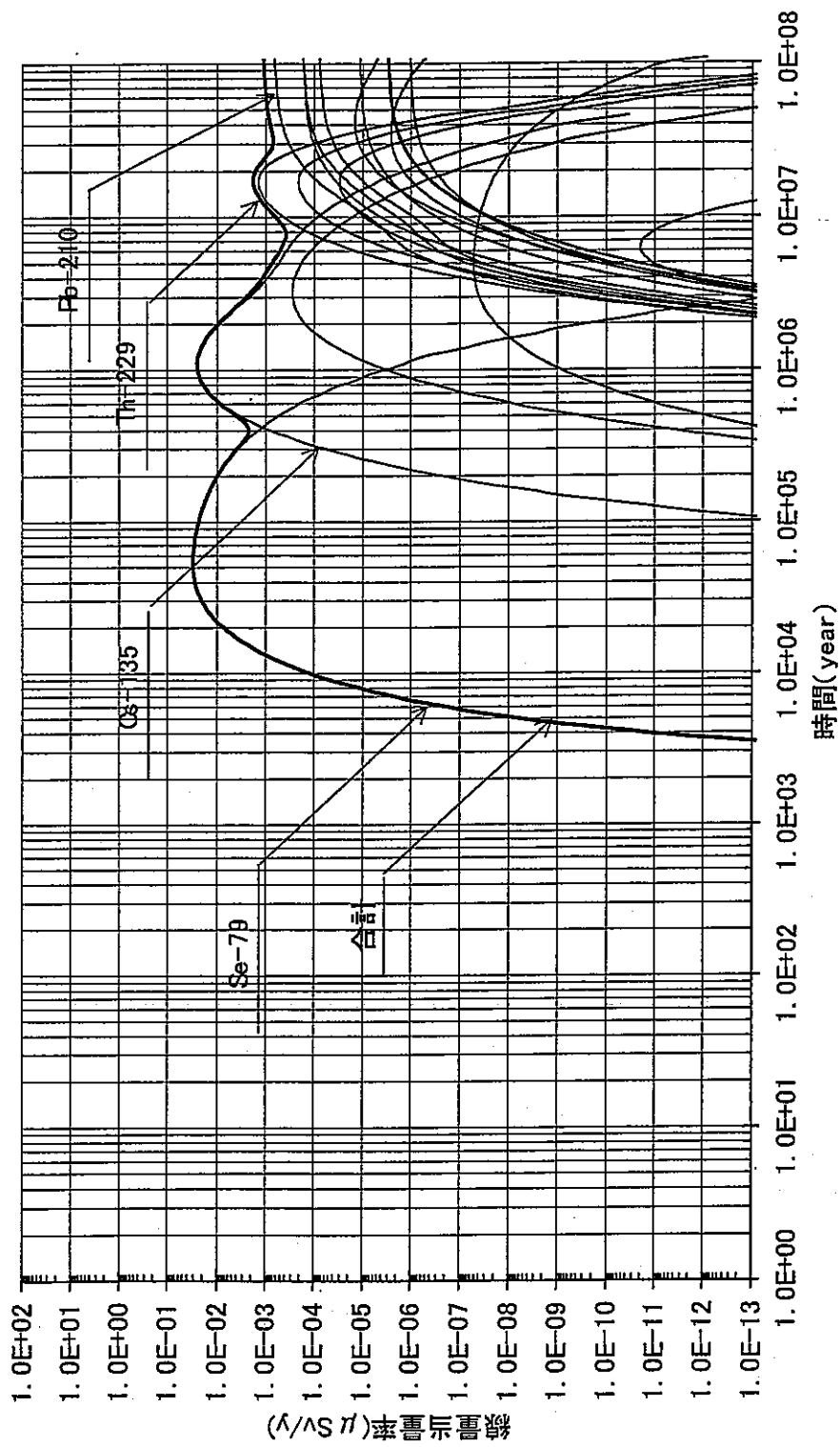


図4.4-69 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No.9: ガラス固化体四万本)

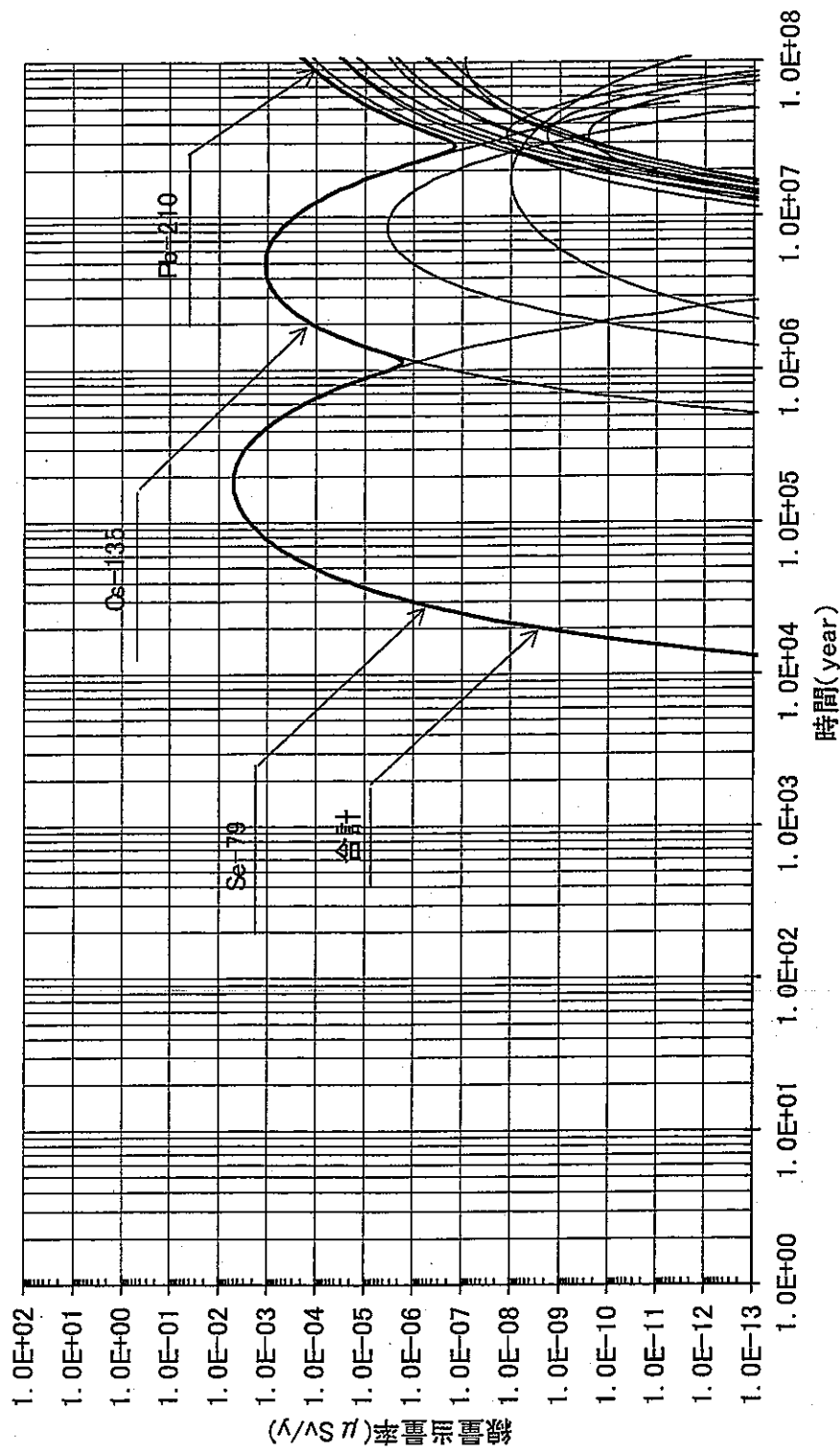


図4.4-70 評価距離100mにおける線量当量率歴史
(Parsi m No. 10: ガラス固化体四万本)

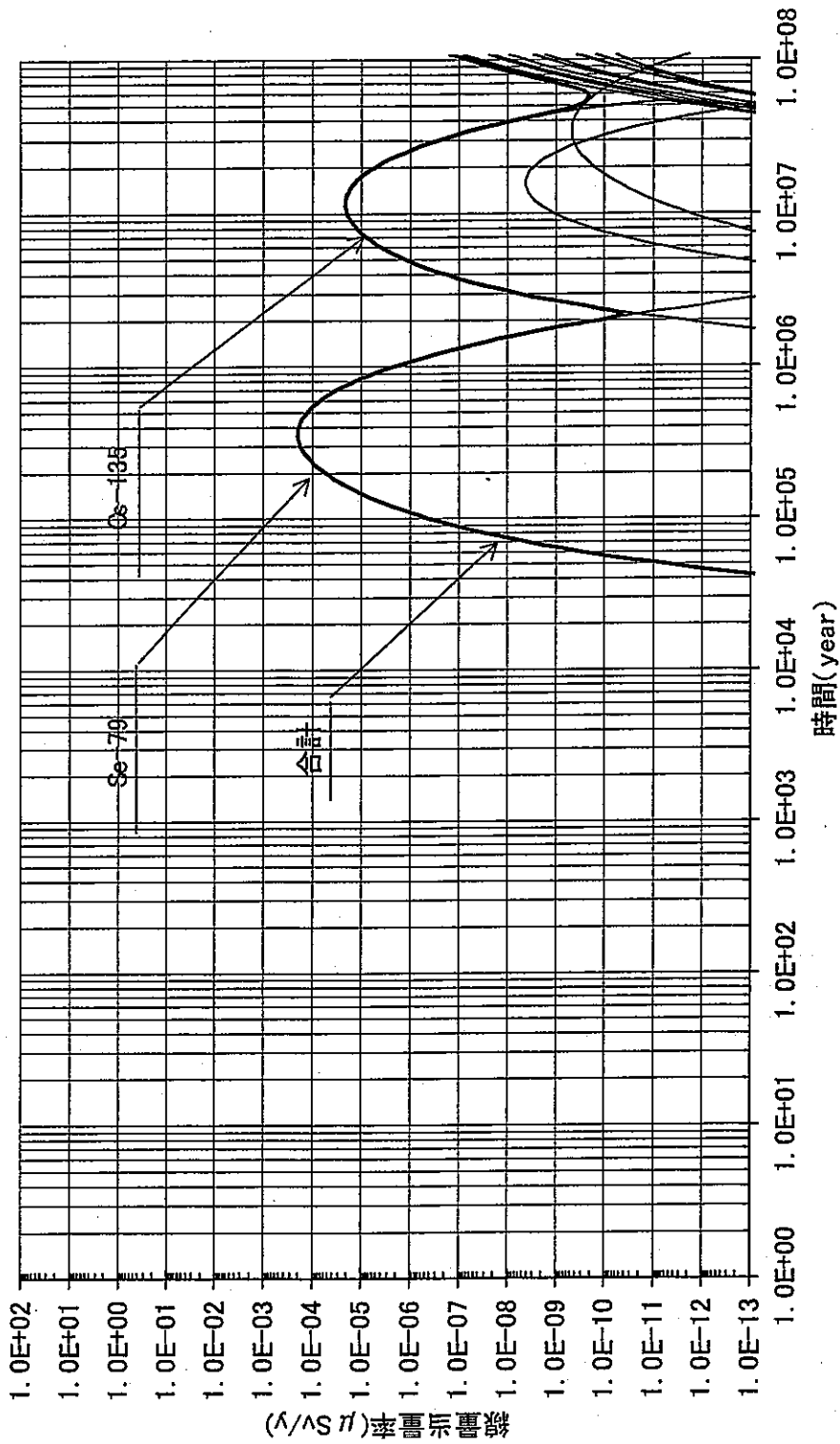


図4.4-71 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No.11: ガラス固化体四万本)

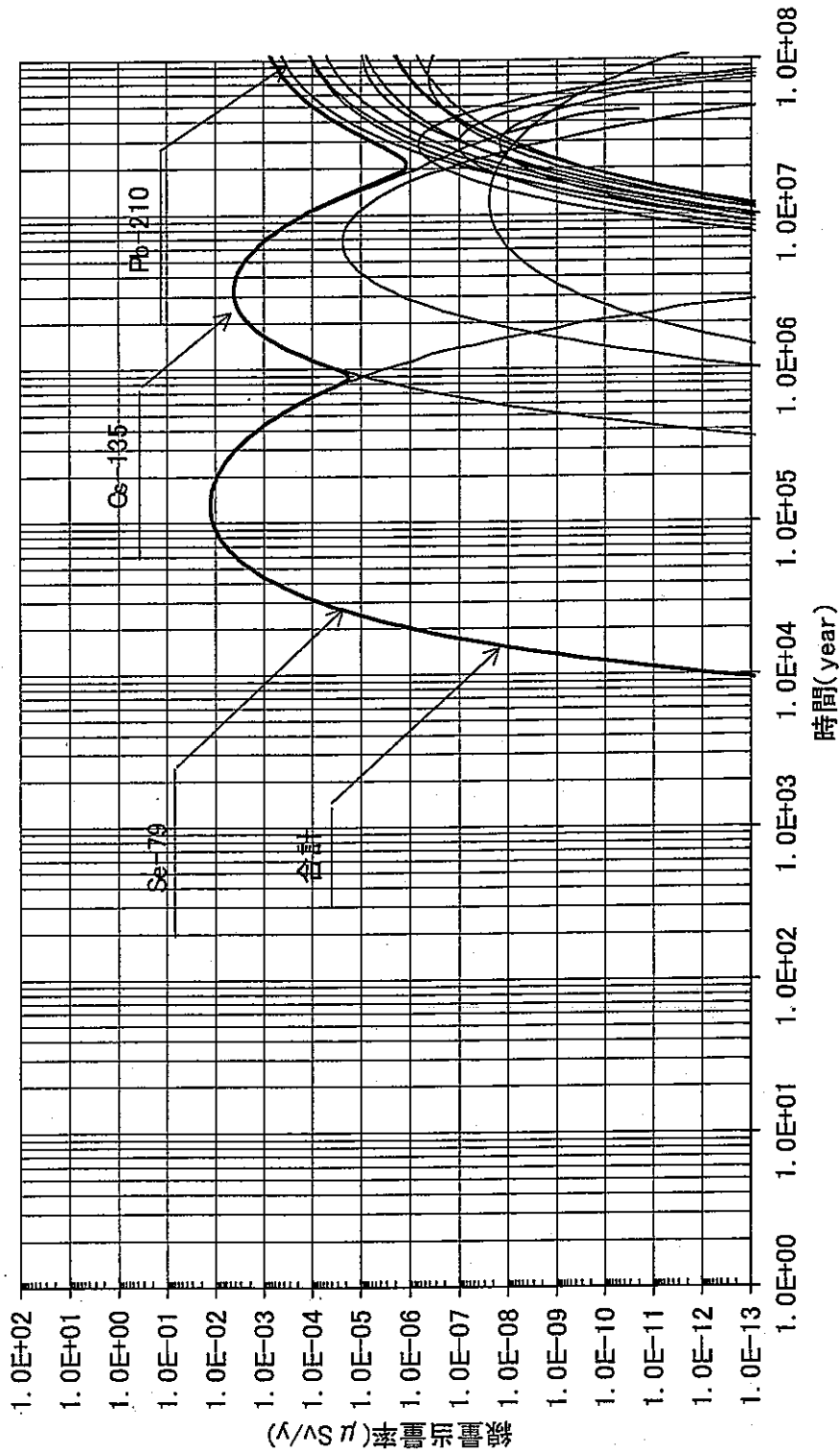


図4.4-72 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No. 12: ガラス固化体四万本)

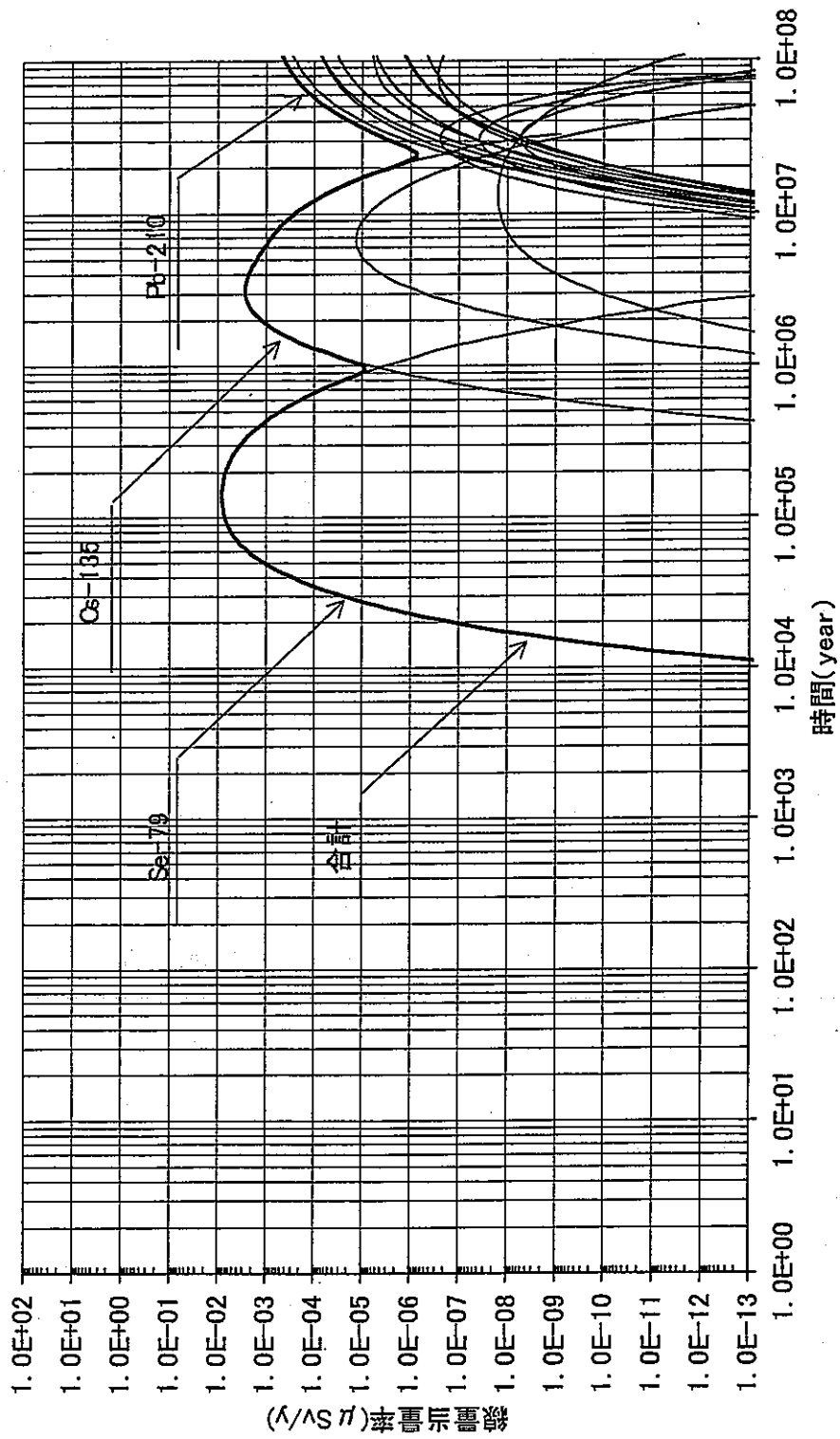


図4.4-73 評価距離100mにおける線量当量率履歴
(Porsim No.13: ガラス固化体四万本)

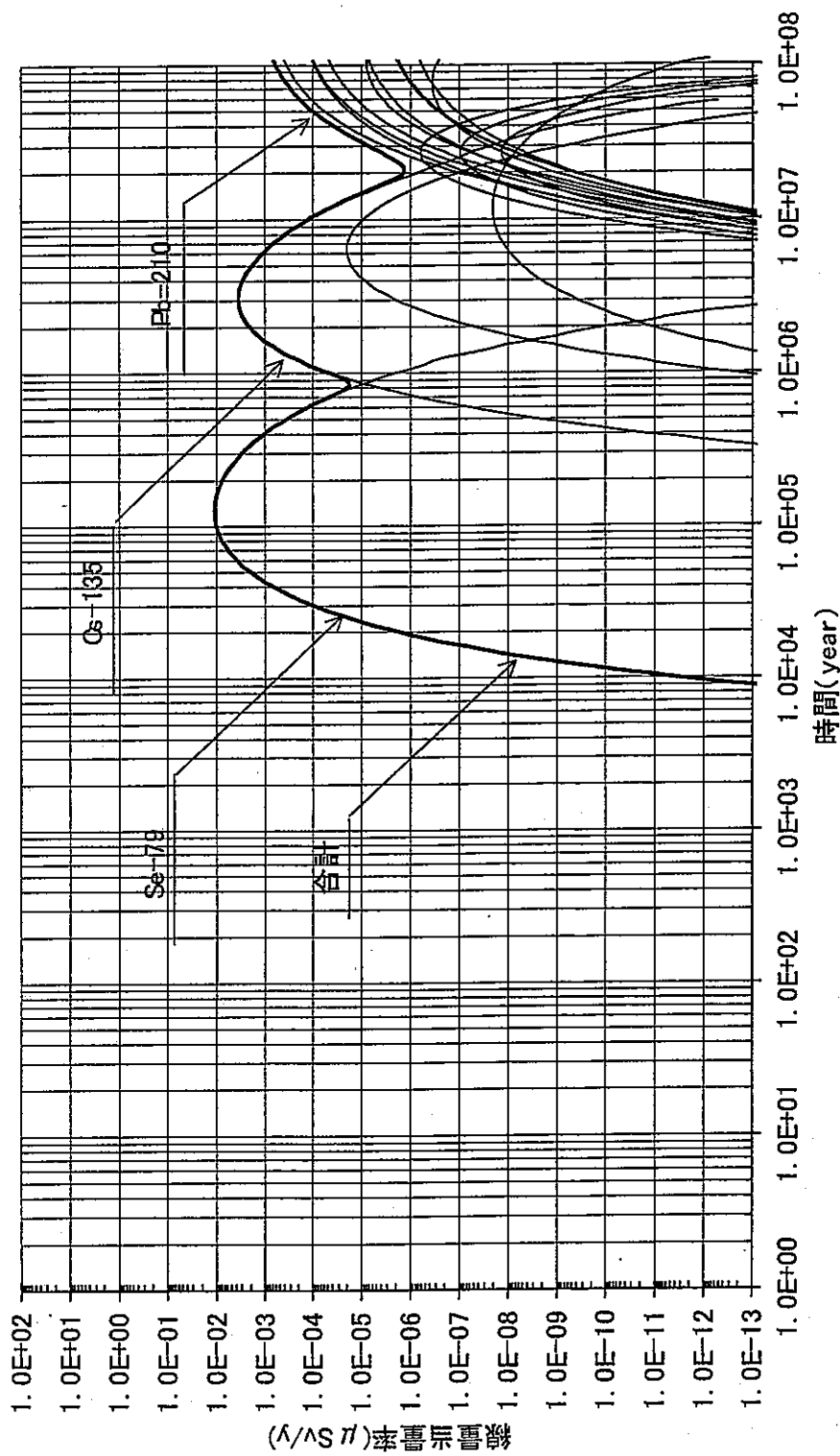


図4.4-74 評価距離100mにおける線量当量率歴史
(Porsim No. 14: ガラス固化体四万本)

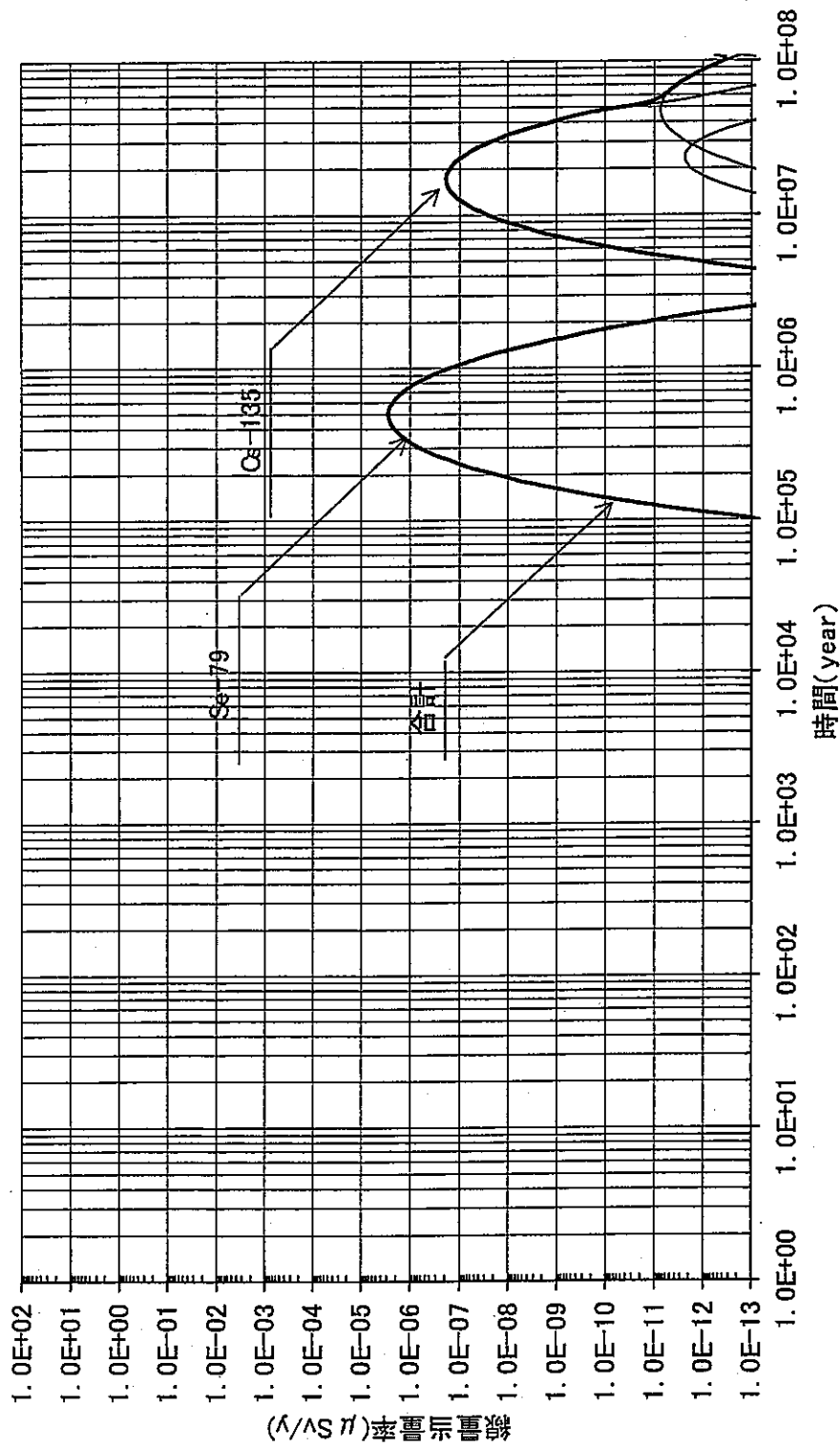


図4.4-75 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No. 15: ガラス固化体四万本)

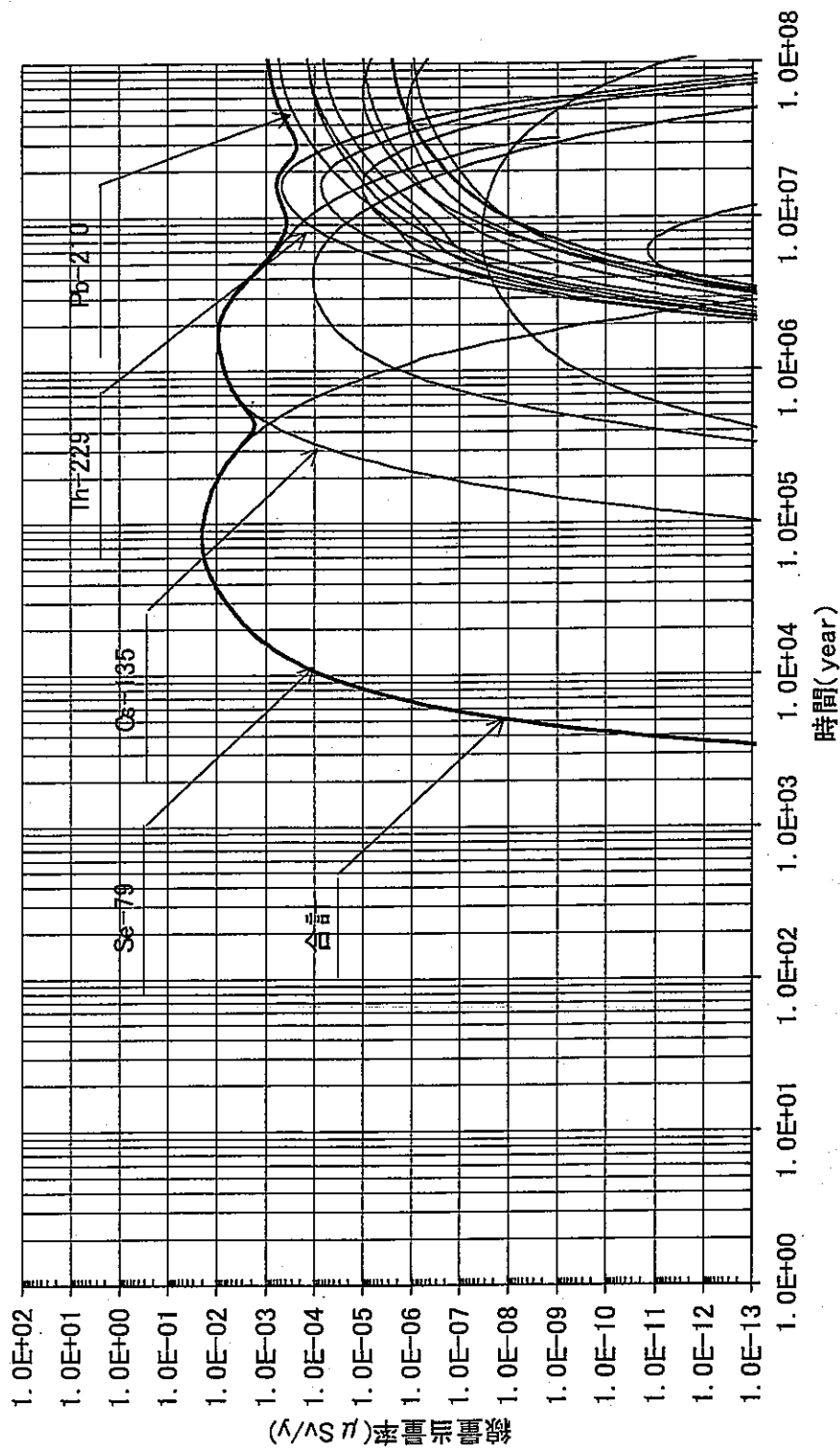


図4.4-76 評価距離100mにおける線量当量率歴史
(Porsim No.16: ガラス固化体四万本)

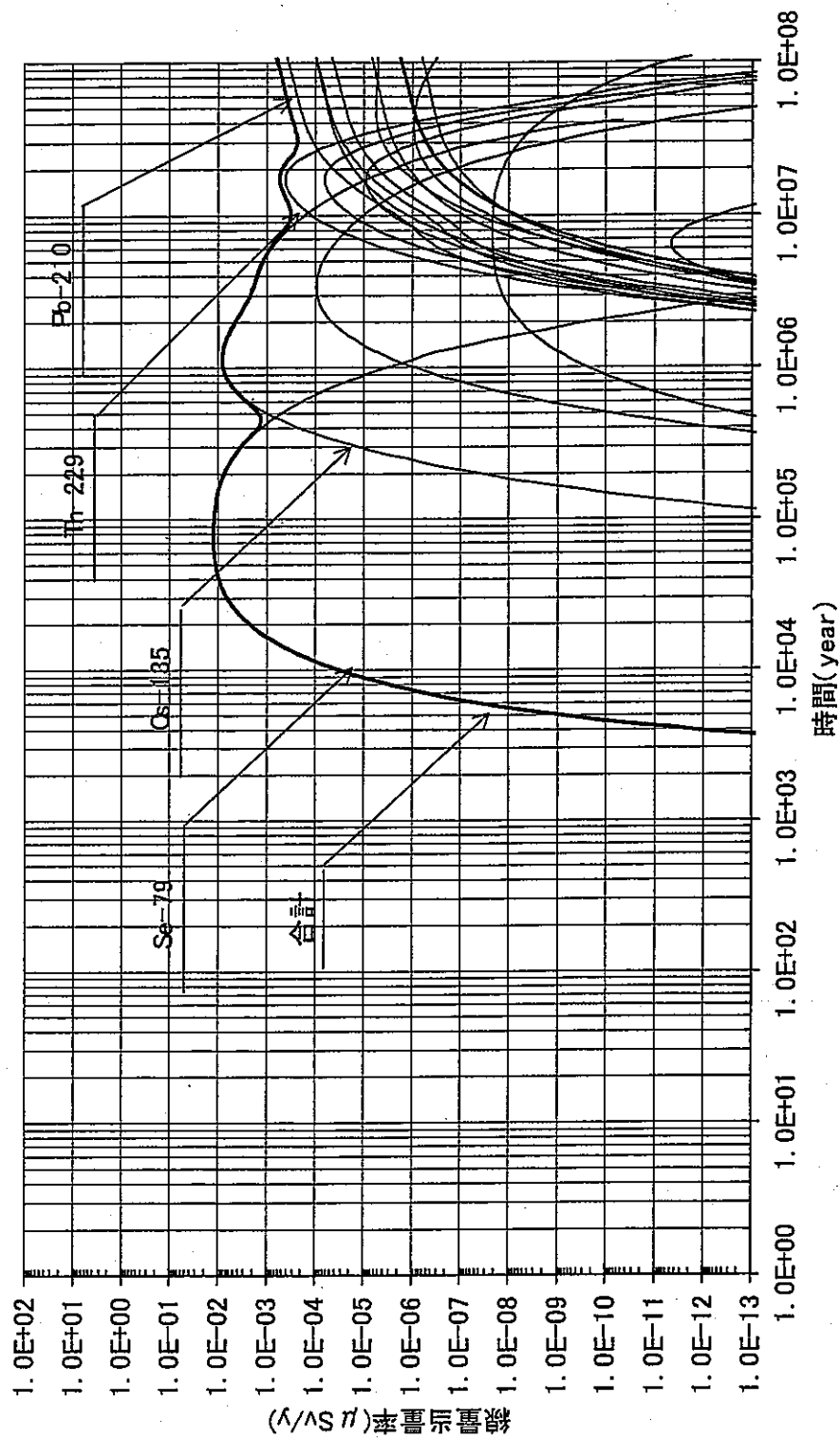


図4.4-77 評価距離100mにおける線量当量率歴史
(Porsim No. 17: ガラス固化体四万本)

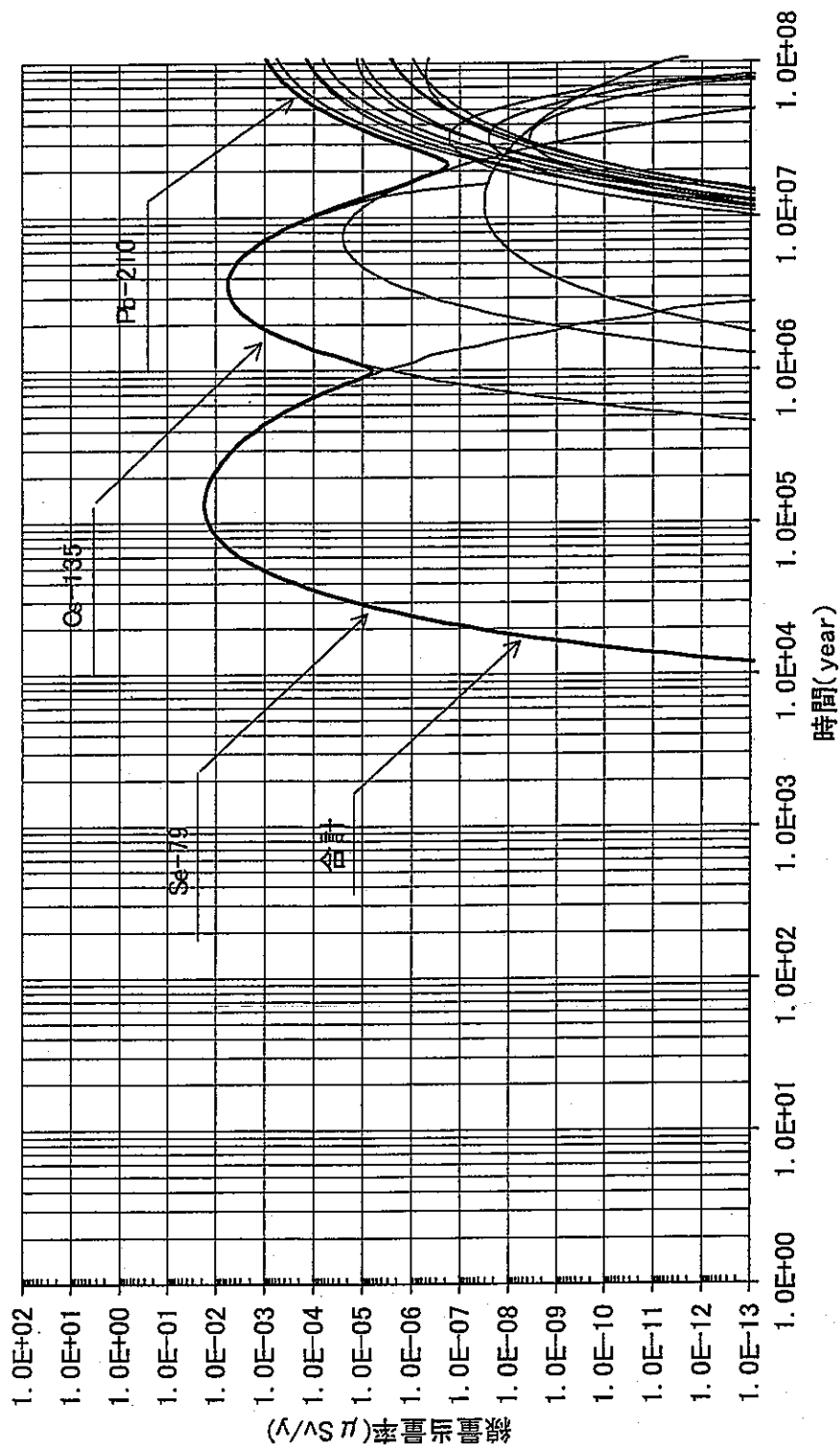


図4.4-78 評価距離100mにおける線量当量率歴史
 (Porsim No. 18: ガラス固化体四万本)

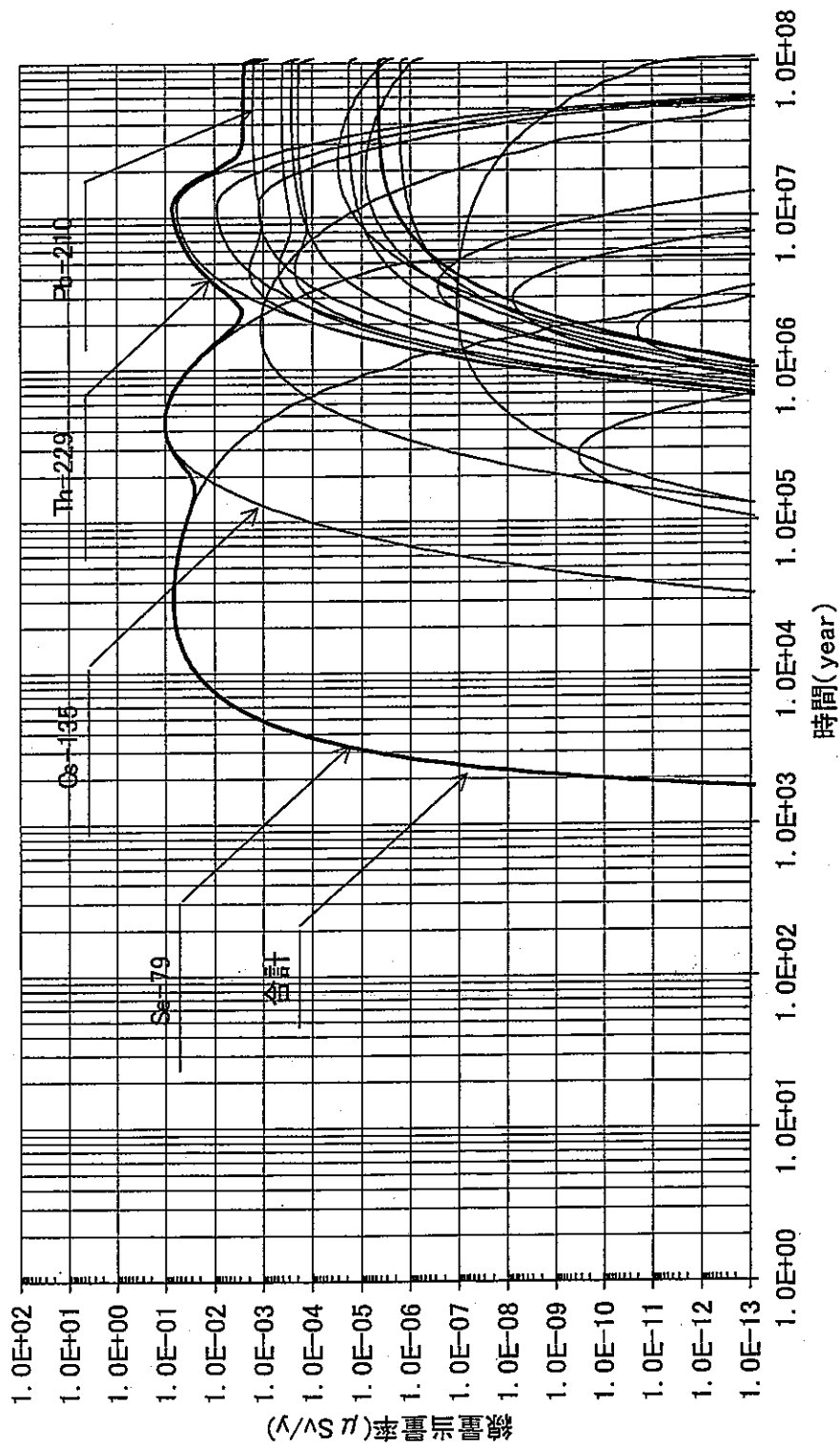


図4.4-79 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No. 19: ガラス固化体四万本)

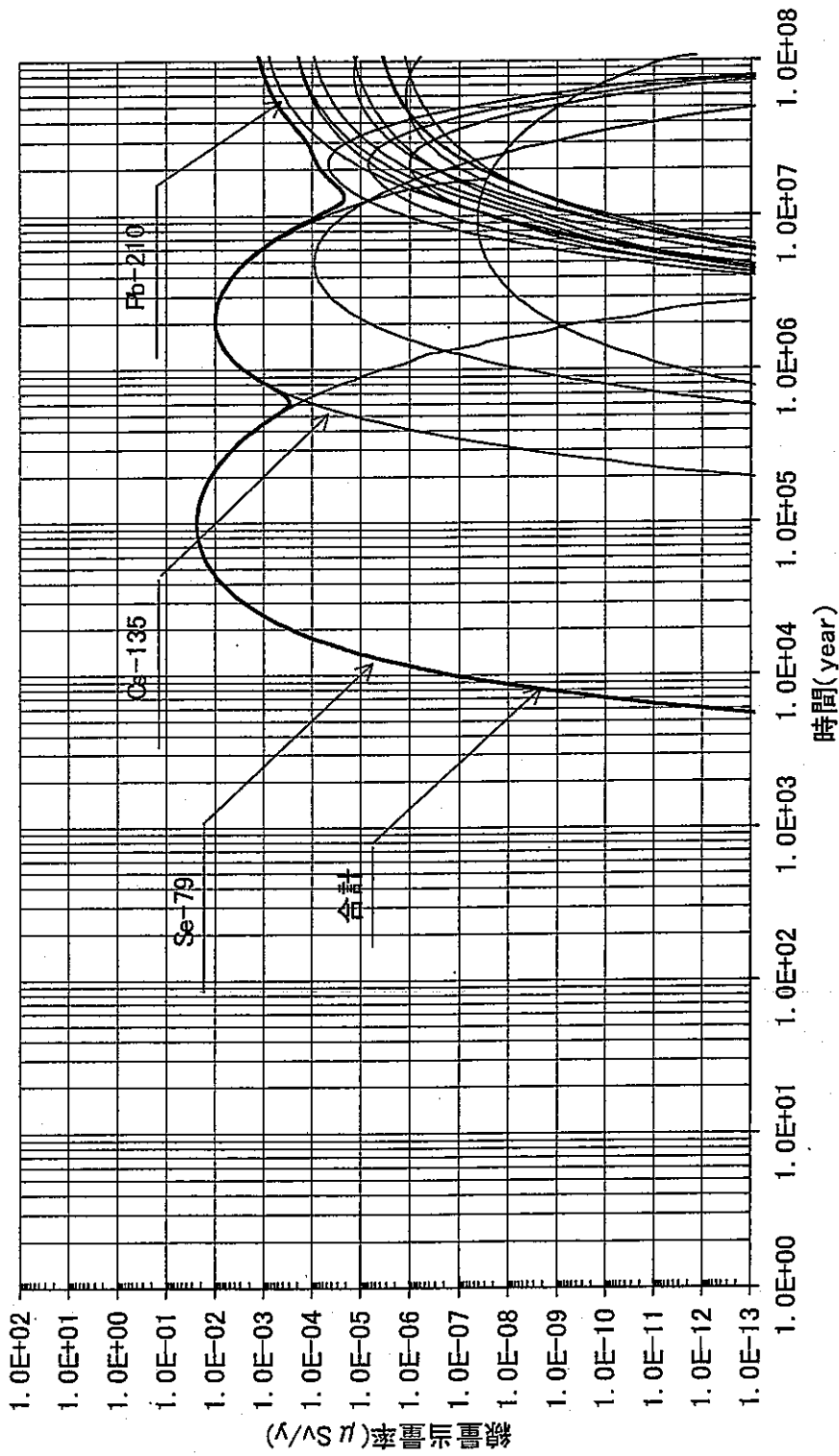


図4.4-80 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Por-sim No.20: ガラス固化体四万本)

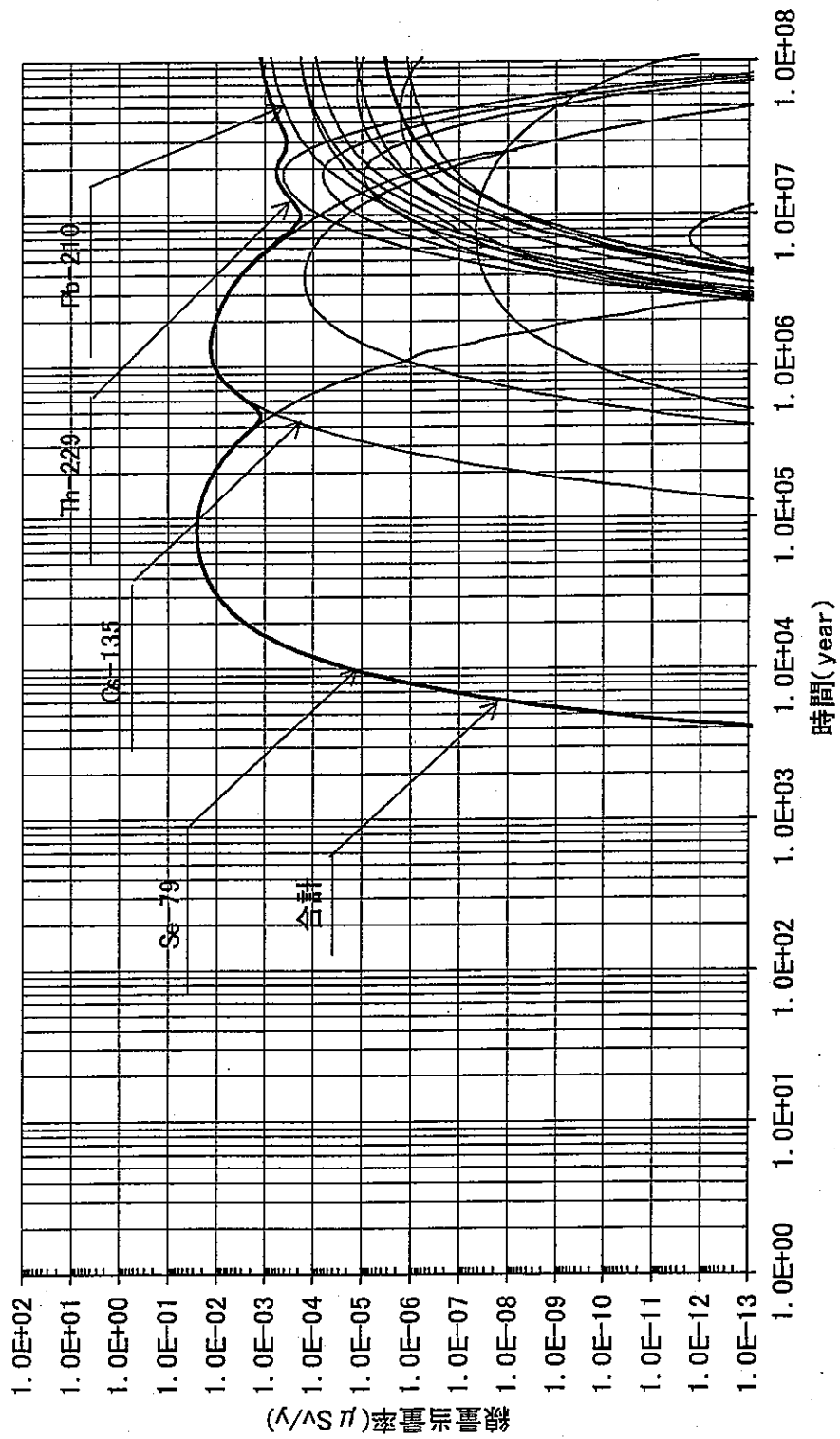


図4.4-81 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No. 21: ガラス固化体四万本)

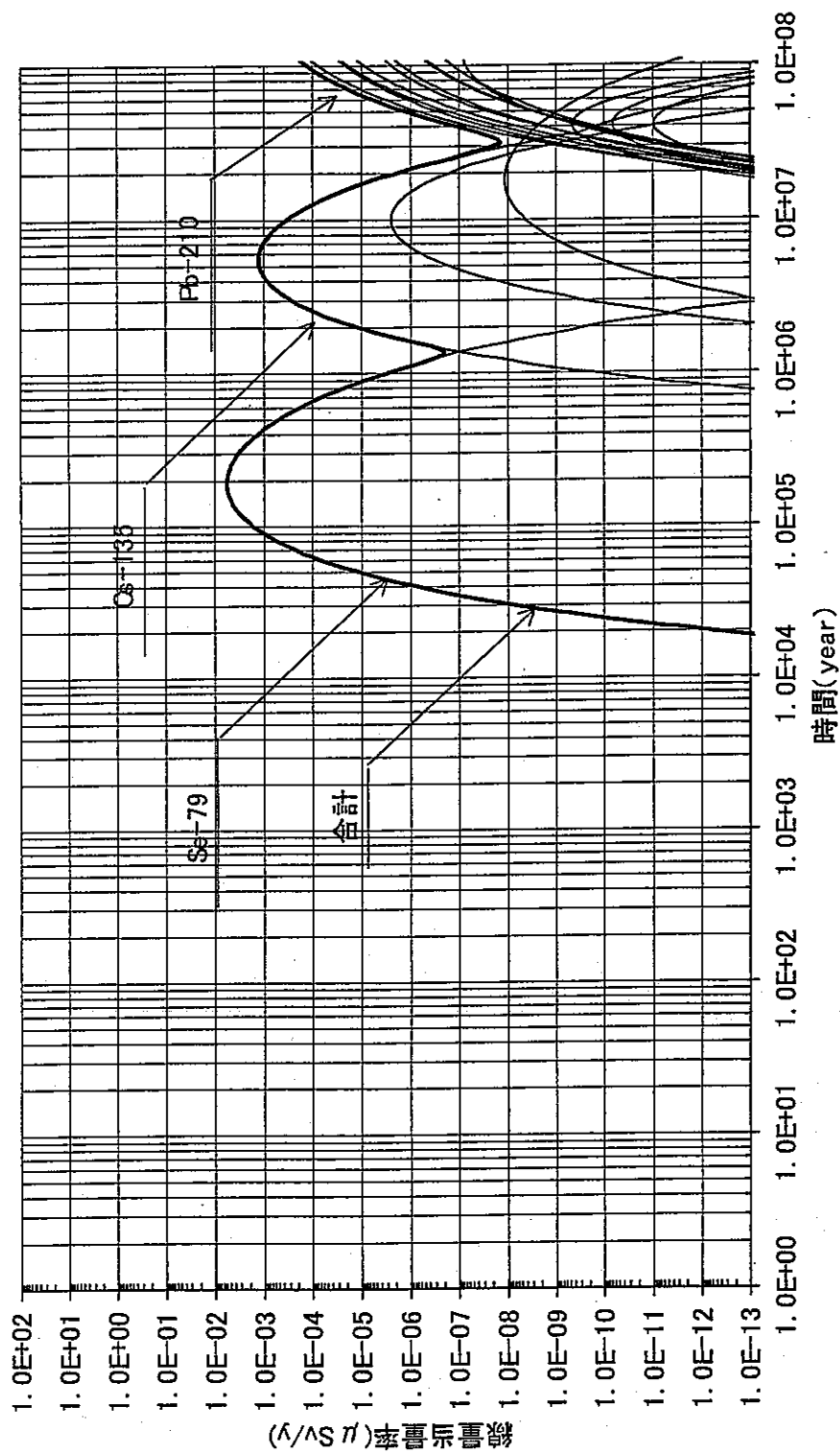


図4.4-82 評価距離100mにおける線量当量率履歴
(Porsim No.22: ガラス固化体四万本)

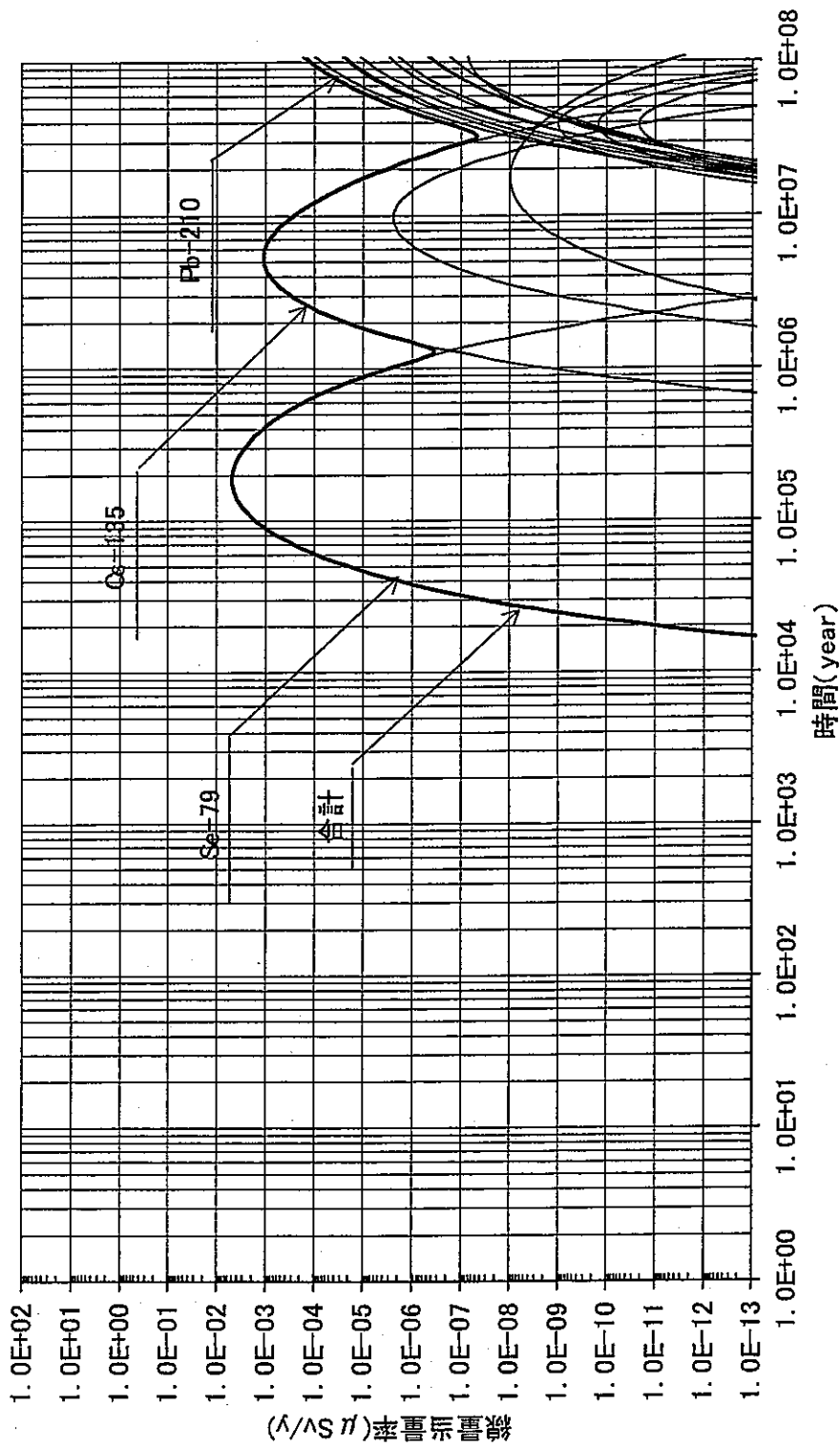


図4.4-83 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No. 23: ガラス固化体四万本)

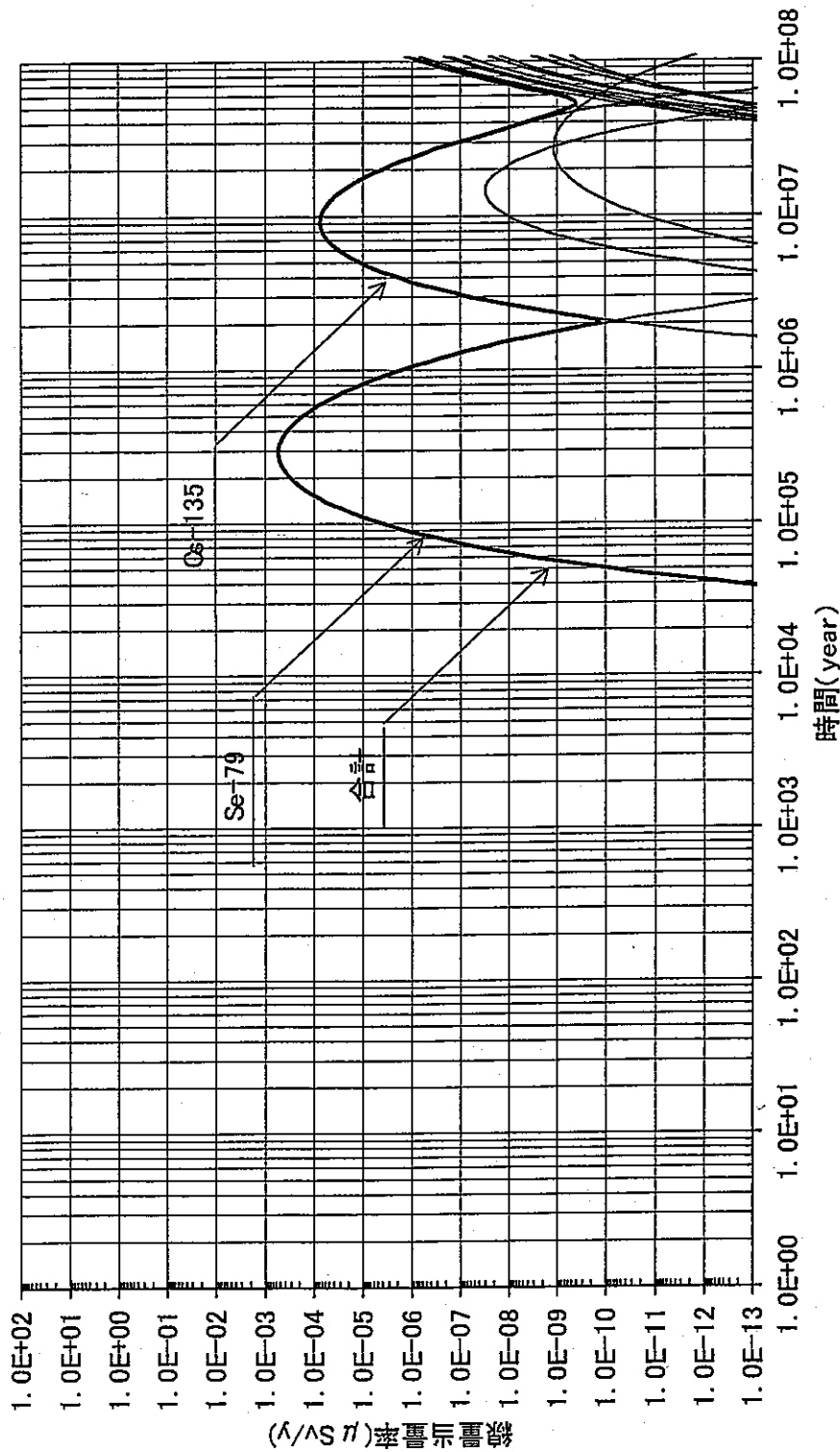


図4.4-84 評価距離100mにおける線量当量率
(Porsim No.24: ガラス固化体四万本)

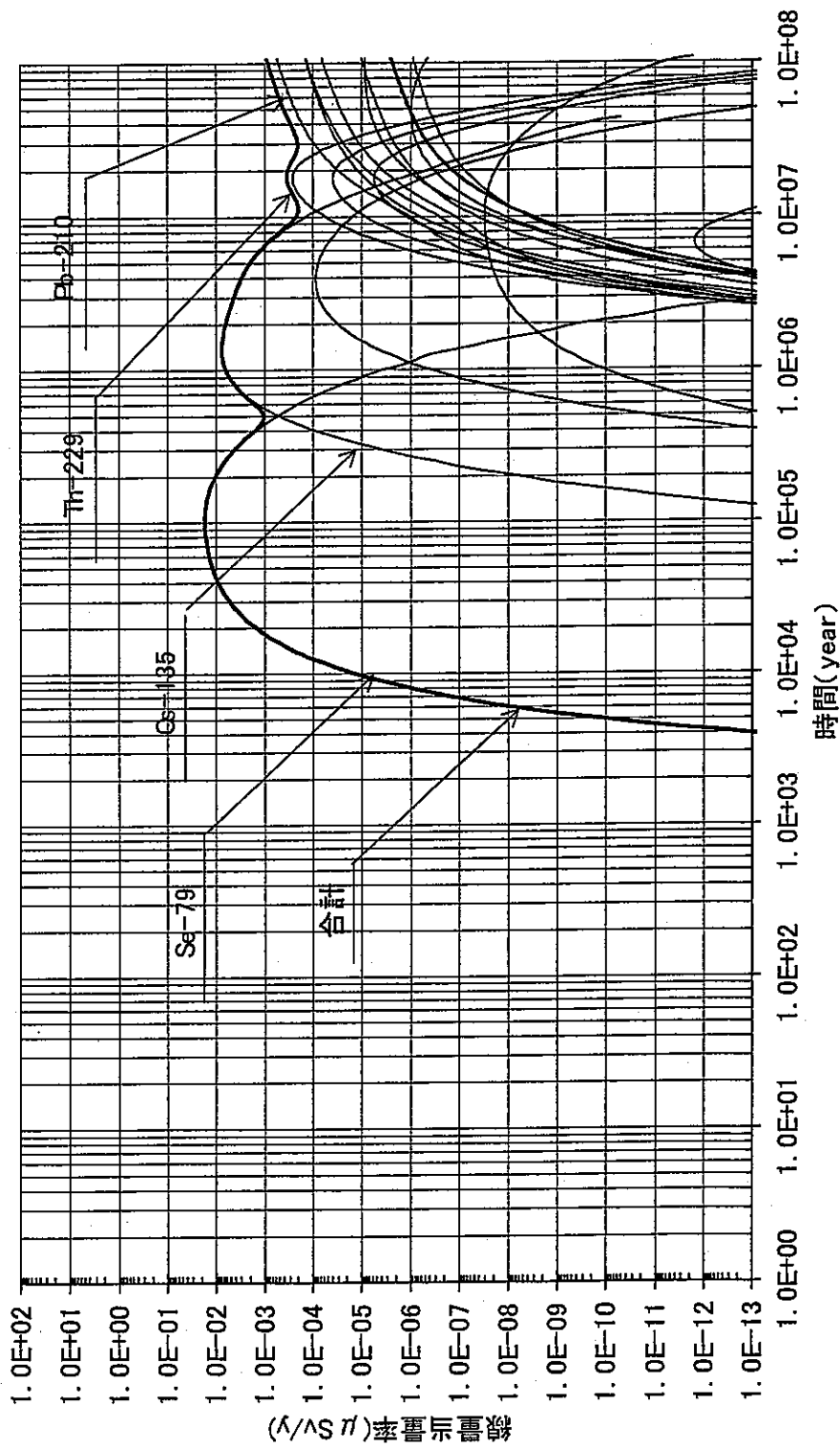


図4.4-85 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No. 25: ガラス固化体四万本)

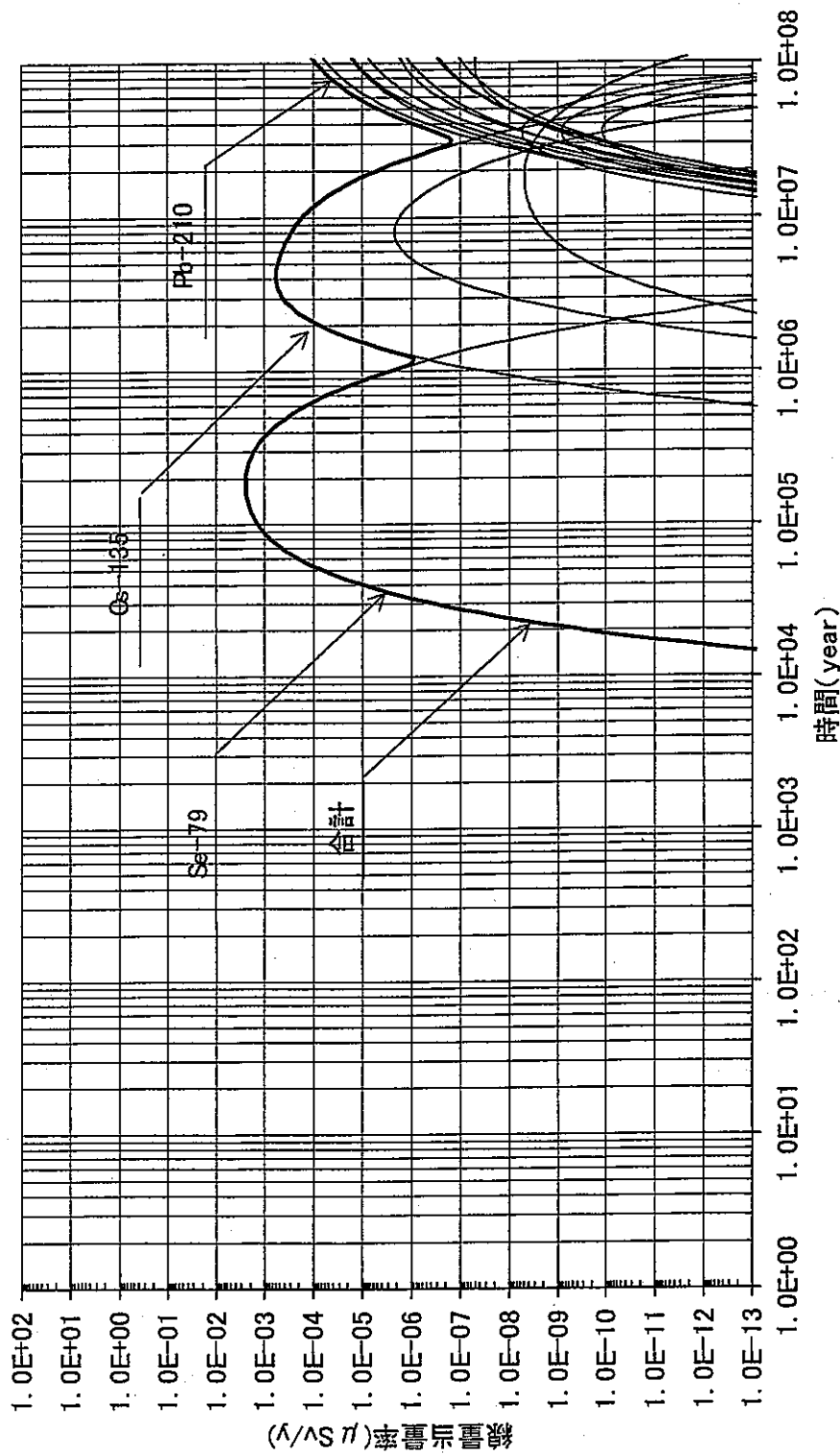


図4.4-86 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No.26: ガラス固化体四万本)

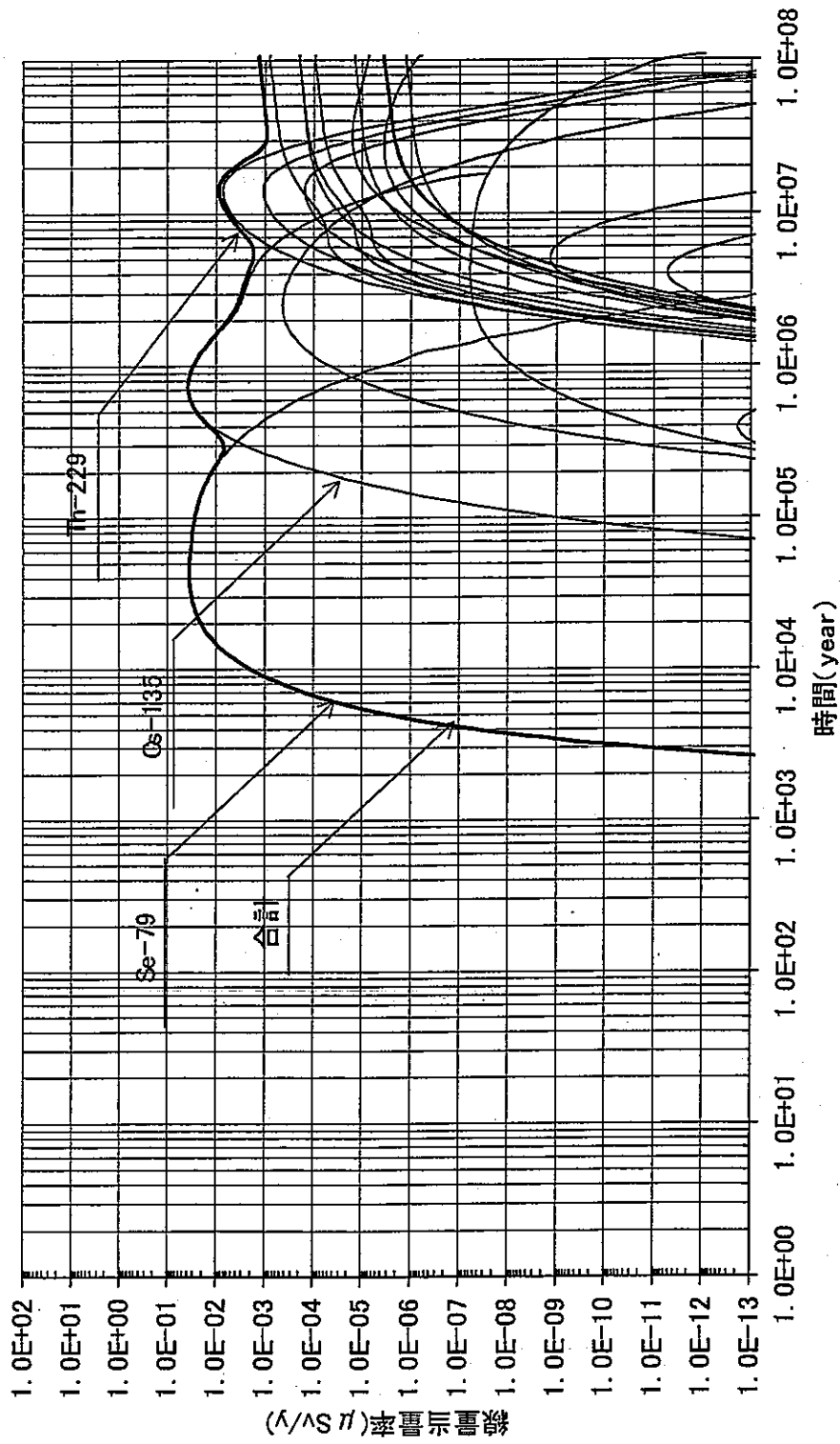


図4.4-87 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No. 27: ガラス固化体四万本)

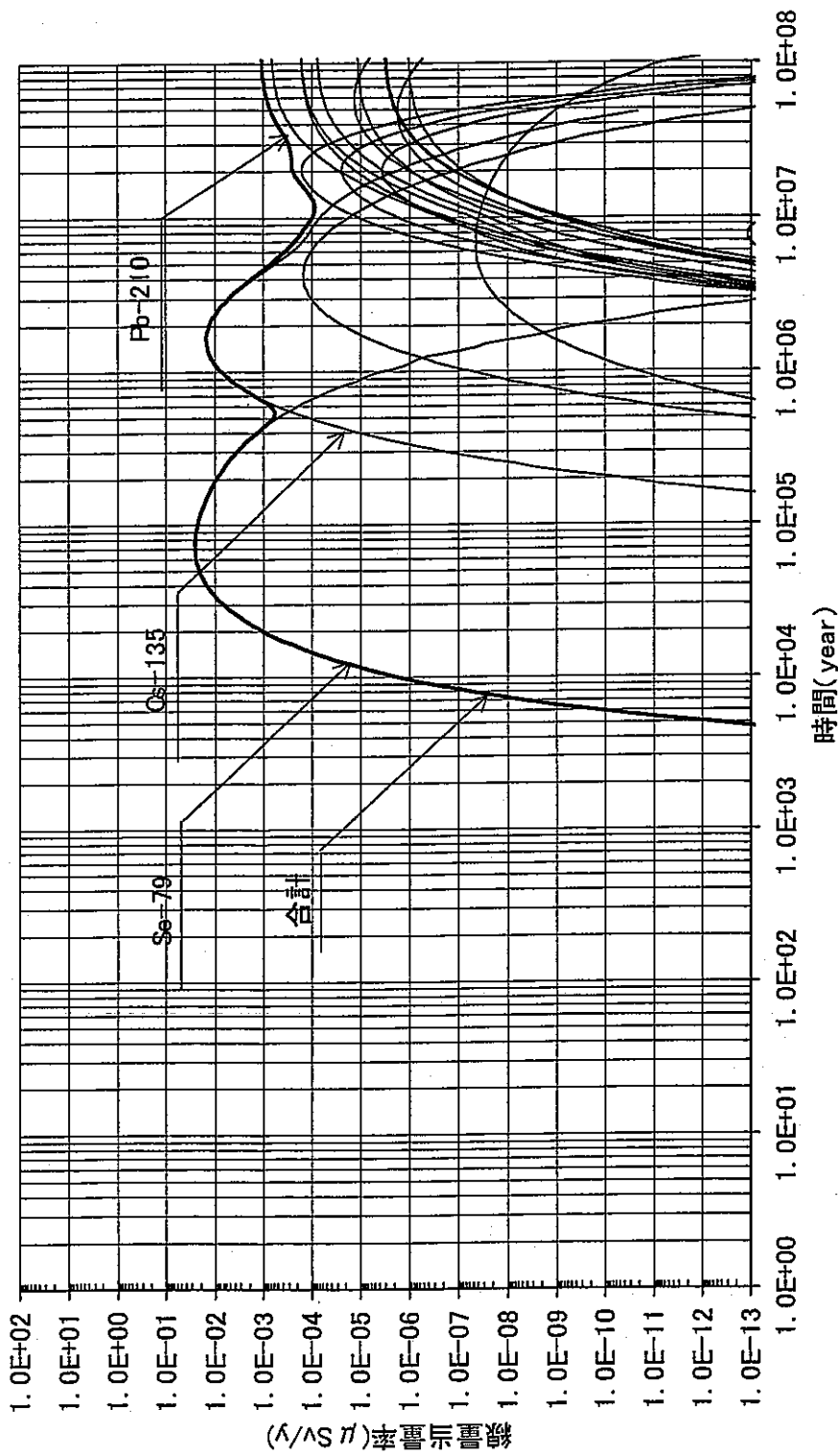


図4.4-88 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Porsim No.28: ガラス固化体四万本)

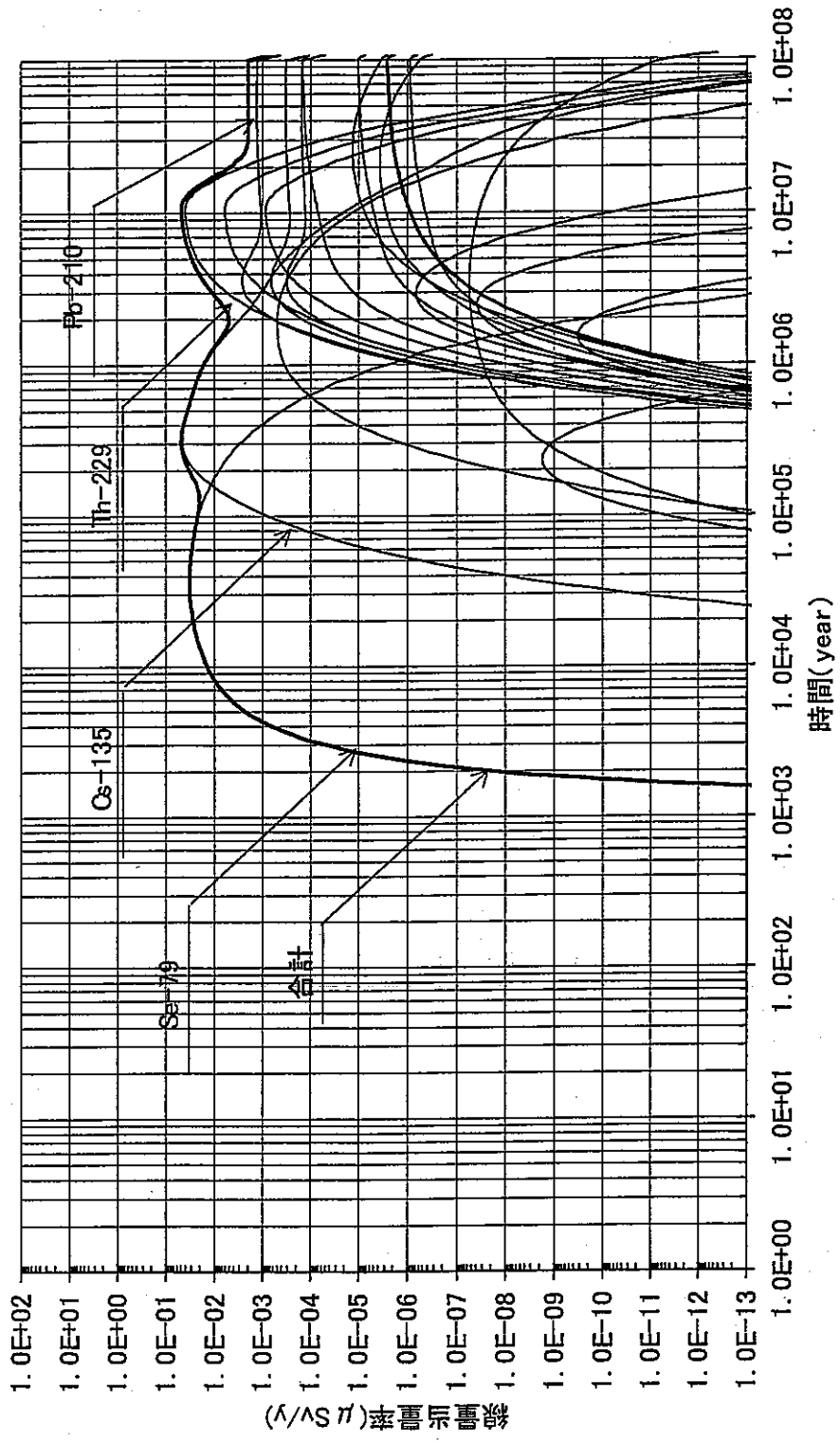


図4.4-89 評価距離100mにおける線量当量率歴
(Forsim No. 29: ガラス固化体四万本)

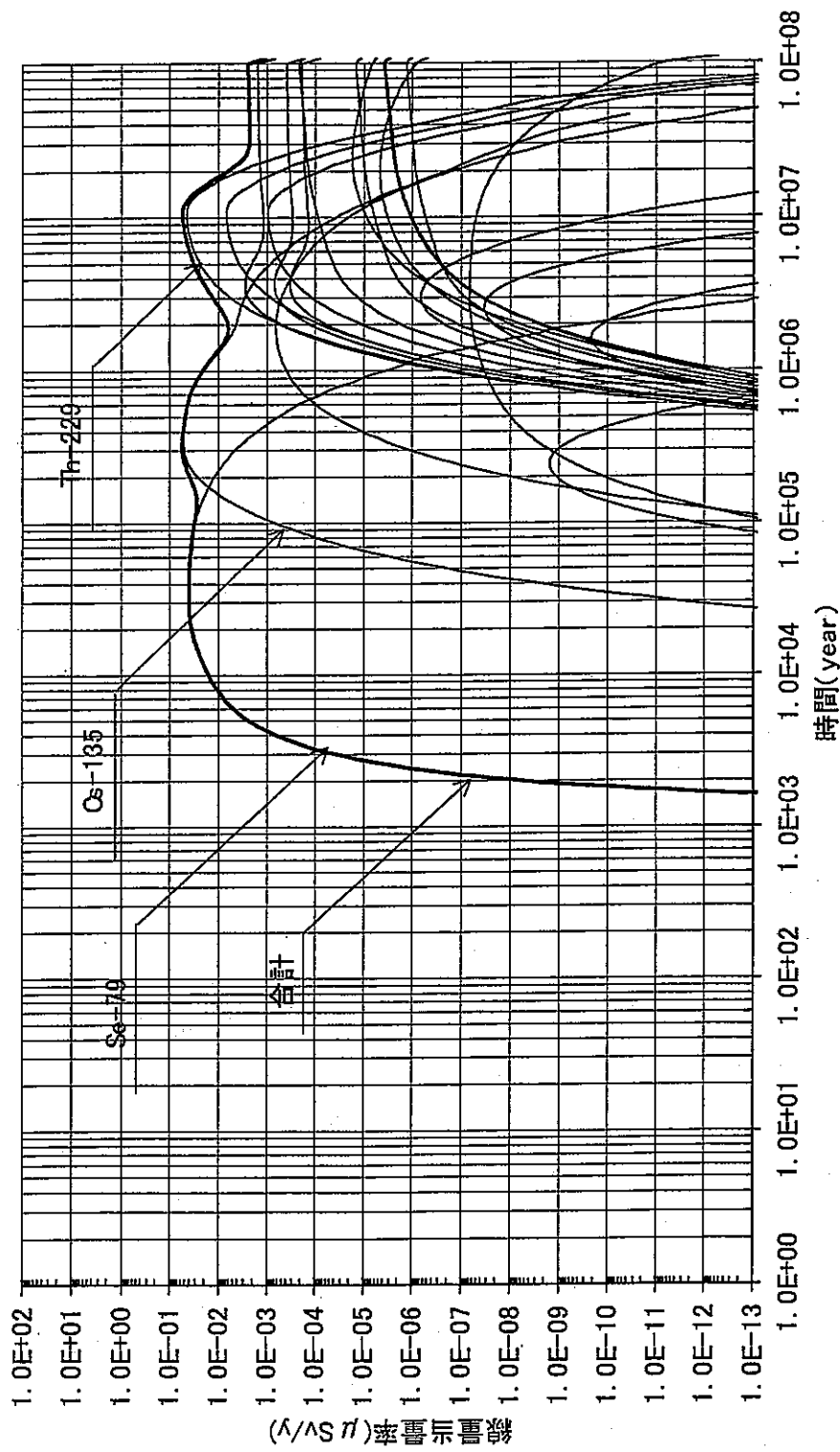


図4. 4-60 評価距離100mにおける線量当量率履歴
(Porsim No. 60: ガラス固化体一本)

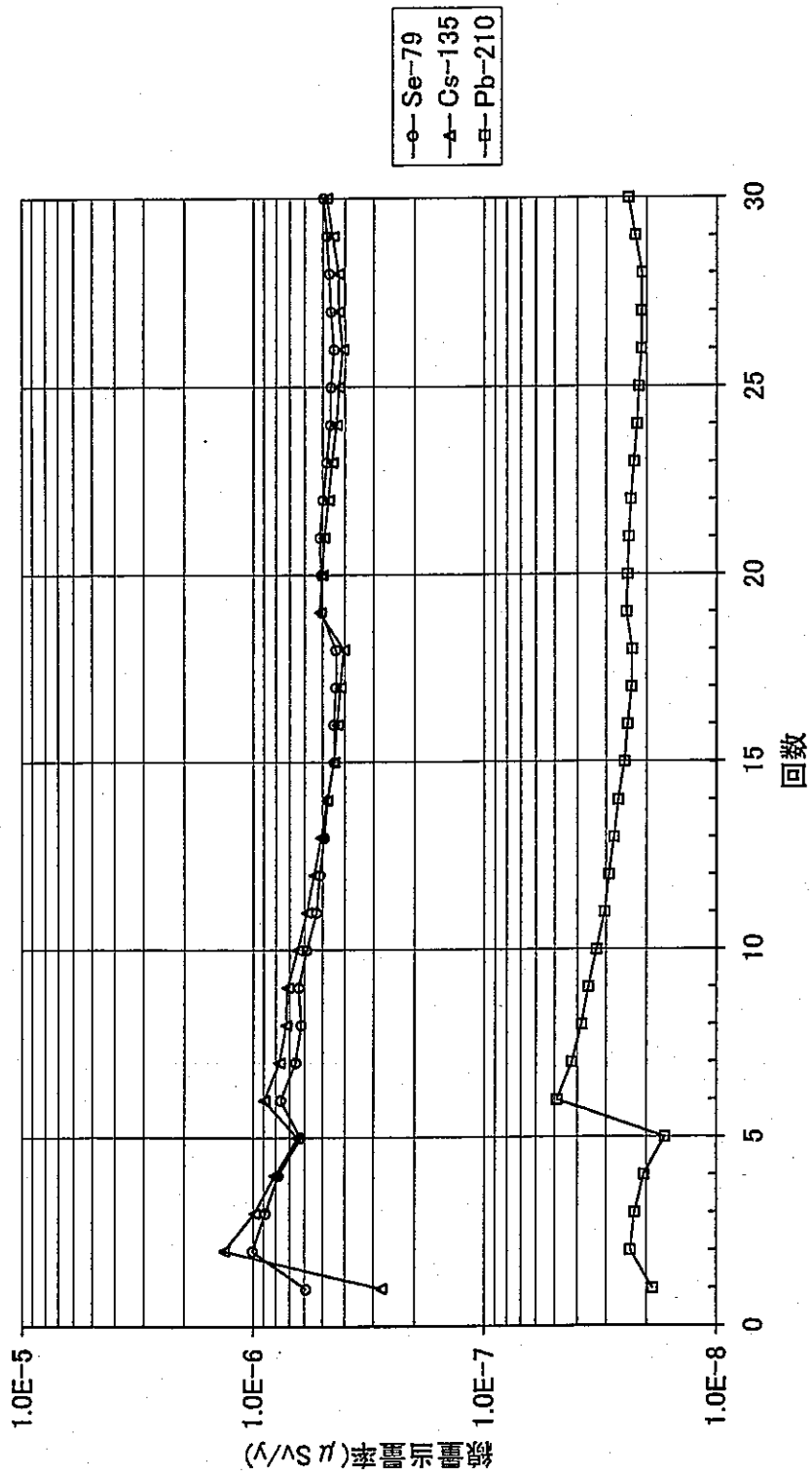


図4.4-6 代表的核種の回数平均による線量当量率

5. まとめ

連続体モデルを用いたニアフィールド多孔質岩盤中の水理／核種移行評価は以下のような手順によって実施されている：

- 三次元飽和・不飽和浸透流解析コード「TAGSAC」により三次元不均質多孔質岩盤中の地下水流れを解く
- 核種移行経路抽出コード「TR3D」により流れ場の中から流線に沿った核種移行経路とその経路上の情報を抽出する
- 一次元核種移行解析コード「CRYSTAL」により抽出した各経路での核種移行を解析する

本研究では、一連の核種移行評価体系を整備・統合化し、各解析コード間でのデータ受け渡しを自動化するとともに、不均質場や移行経路等の可視化のためのプリ・ポスト環境の整備を実施した。また、第2次取りまとめに向けた多孔質岩盤中の核種移行計算を実施した。

GSLIBに含まれるSGSIM法を使用して30ケースの不均質透水係数場を発生させ、それぞれについて核種移行計算を実施した。不均質場は透水係数に関して：

- 平均値
- 対数正規分布の標準偏差

については同じものを使用しているが、透水係数の空間的分布によって流線の：

- 長さ
- 移動時間

は大きな影響を受けるため結果の評価にあたっては注意が必要である。今回実施した 30 ケースに関して：

- ・ピーク線量
- ・ピーク線量到達時間

に関して、平均値をとったところ、ケース数を増加させることによって一定値に近づいていくことがわかった。したがって今回実施した 30 ケースは解析対象の不均質場のランダム性を考慮するために十分なケース数であると考えられる。

参 考 文 献

[1] K.Worgan and P.Robinson, "CRYSTAL: A Model of Contaminant Transport in a Densely Fissured Geosphere 9105-1 Version 1", Intera Environmental Division, 1992.

[2] C. V. Deutch and A. G. Journel, "GSLIB : Geostatistical Software Library and User's Guide 2nd Edition", Oxford, 1998.

[3] 島崎, 新藤, 吉田編「放射性廃棄物と地質科学」, 東京大学出版会, 1995.

[4] 砂原, 石井, 植原, 林「プロフェッショナル・シェル・プログラミング」, アスキー出版局, 1996.