

JNC TN6400 2004-005

# 夜次露天採掘場跡地の核種移行解析

2002年3月

核燃料サイクル開発機構  
人形峠環境技術センター

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ください。

〒708-0698 岡山県苫田郡上齋原村1550番地  
核燃料サイクル開発機構 人形峠環境技術センター  
環境保全技術開発部 管理課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Co-ordination Section, Environmental Research and Development Division,  
Ningyo-Toge Environmental Engineering Center,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute,  
1550 Kamisaibara-son, Tomada-gun, Okayama-ken, 708-0698,  
Japan

2002年3月

## 夜次露天採掘場跡地の核種移行解析

長柄 収一<sup>1)</sup>、松村 敏博<sup>1)</sup>、佐藤 和彦<sup>1)</sup>、時澤 孝之<sup>1)</sup>

### 要　　旨

夜次露天採掘場跡地及びその周辺の核種移行解析を目的として、解析のためのパラメータの収集・整理を行い、核種移行解析コード「NESTOR」による一次元解析を実施した。

解析に先立ち、夜次露天採掘場跡地の地下水水理特性及び廃棄物処分の情報を調査し、解析用のデータセットを作成した。また、解析に用いるモデルは、夜次露天採掘場跡地の地形的特徴を考慮して7ブロックに分割した簡易的なモデルを作成し、試錐孔を評価点と見なして核種移行解析に適用した。

解析の結果、評価点で最も高くなる核種濃度は、措置後から約1万年経過したPo-210の $8.57 \times 10^3 \text{Bq}/\text{m}^3$ である。一方、U-238濃度の最大値は、約 $1 \times 10^3 \text{Bq}/\text{m}^3$ オーダーである。参考として、この数値は、人形峠保安規程の坑水・廃水の排出基準値よりも1桁低く、岡山県環境協定の河川水管理目標値と同オーダーである。現在の地下水濃度と同時点で対応する解析結果と比較すると、後者の方がU-238濃度は約7桁低く、Ra-226濃度は約6桁低くなったが、この原因には、露天跡地周辺に存在するバックグラウンドの考慮や全体の水収支バランスが影響していると考えられる。

---

1) 核燃料サイクル開発機構 人形峠環境技術センター 環境保全技術開発部 環境計画課

March, 2003

## The Radionuclide Transport Analysis in the former Yotsugi open pit site

Shuichi Nagara<sup>1)</sup>, Toshihiro Matsumura<sup>1)</sup>,  
Kazuhiko Sato<sup>1)</sup>, Takayuki Tokizawa<sup>1)</sup>

### ABSTRACT

A one-dimensional numerical solute-transport analysis utilizing a simulation code named NESTOR, involving a literature survey on analytical parameters has been carried out for the purpose of an understanding radionuclide transport in groundwater and around the former Yotsugi open pit site at the Ningyo-Toge Environmental Engineering Center, JNC.

Prior to the analysis, data set was prepared referring to available documents on site characteristics and one on disposal of waste. A simplified model in which the site was divided into seven blocks according to its geographical-hydrological feature was applied on the analysis.

As a result, the highest concentrations of radionuclide is  $8.57 \times 10^3$  Bq/m<sup>3</sup> of Po-210 at assessment points. The highest concentration of U-238 is in the order of magnitude of  $10^3$  Bq/m<sup>3</sup>. This result is lower by 1 order than a standard value for mine- and waste-water on the safety rule of Ningyo-Toge mine and the same orders as surface-water on the agreement with Okayama prefecture, although there haven't been any adequate standards. Comparison between the present concentration in groundwater and the corresponding analysis result, the latter data indicate about 7 orders lower in U-238 concentrations and about 6 orders lower in Ra-226 concentrations. This suggests that U and Ra background concentrations can be considered in the former Yotsugi open pit site, and it effects on the water balance.

---

1) Environment planning section, Ningyo-toge Environmental Engineering Center,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute

## 目 次

1.はじめに	· · · · ·	1
2.露天跡地及びその周辺に関する調査	· · · · ·	2
2.1 露天跡地及びその周辺地域に関する調査・研究	· · · · ·	2
2.1.1 捨石及び周辺土壤に関するデータ	· · · · ·	2
2.1.2 地下水成分に関するデータ	· · · · ·	2
2.1.3 核種の挙動に関するデータ	· · · · ·	2
2.1.4 地下水流動解析	· · · · ·	3
2.1.5 核種移行解析	· · · · ·	3
2.2 これまでの課題	· · · · ·	3
3. 解析パラメータの収集・整理	· · · · ·	5
4. 核種移行解析	· · · · ·	6
4.1 解析対象範囲	· · · · ·	6
4.1.1 解析対象範囲	· · · · ·	6
4.1.2 地質	· · · · ·	6
4.1.3 地下水位	· · · · ·	6
4.2 解析モデル	· · · · ·	9
4.2.1 解析モデルの形状	· · · · ·	9
4.2.2 評価点の設定	· · · · ·	11
4.3 解析モデルの各パラメータ	· · · · ·	14
4.3.1 放射性核種濃度及び量	· · · · ·	14
4.3.2 降雨浸透量	· · · · ·	19
4.3.3 地層の透水性	· · · · ·	19
4.3.4 動水勾配	· · · · ·	19
4.3.5 地下水実流速	· · · · ·	20
4.3.6 地下水流入量	· · · · ·	20
4.3.7 分配係数	· · · · ·	21
4.4 計算方法	· · · · ·	21
4.5 核種移行解析結果	· · · · ·	23
4.6 解析結果と地下水モニタリング結果との比較	· · · · ·	32
5.まとめ	· · · · ·	33
6.今後の課題	· · · · ·	33
参考文献	· · · · ·	34

## 図 目 次

図 4.1-1 解析対象領域図	· · · · ·	7
図 4.1-2 露天跡地周辺の地質断面図（東-西）	· · · · ·	8
図 4.1-3 露天跡地周辺の地質断面図（南-北）	· · · · ·	8
図 4.2.1-1 露天跡地周辺のブロック分割図	· · · · ·	10
図 4.2.1-1 露天跡地の解析モデル	· · · · ·	11
図 4.2.2-1 露天跡地周辺のモニタリング孔位置図	· · · · ·	12
図 4.2.2-2 評価点の設定	· · · · ·	13
図 4.3.1-1 捨石中のウラン系列核種の濃度計算の考え方	· · · · ·	16
図 4.3.1-2 捨石中のアクチニウム系列核種の濃度計算の考え方	· · · · ·	17
図 4.3.1-3 捨石中のトリウム系列核種の濃度計算の考え方	· · · · ·	18
図 4.4-1 NESTOR 解析における 2 種類のモデル図	· · · · ·	22
図 4.5-1 N ブロックへの核種移行解析結果 (No.16 孔)	· · · · ·	24
図 4.5-2 N ブロックへの核種移行解析結果 (No.2 孔)	· · · · ·	24
図 4.5-3 N E ブロックへの核種移行解析結果 (No.9 孔)	· · · · ·	25
図 4.5-4 N E ブロックへの核種移行解析結果 (No.3 孔)	· · · · ·	25
図 4.5-5 E ブロックへの核種移行解析結果 (No.4, 13 孔)	· · · · ·	26
図 4.5-6 E ブロックへの核種移行解析結果 (No.20 孔)	· · · · ·	26
図 4.5-7 E ブロックへの核種移行解析結果 (No.21, 22 孔)	· · · · ·	27
図 4.5-8 S E ブロックへの核種移行解析結果 (No.12 孔)	· · · · ·	28
図 4.5-9 S E ブロックへの核種移行解析結果 (No.14, 15 孔)	· · · · ·	28
図 4.5-10 S E ブロックへの核種移行解析結果 (No.23 孔)	· · · · ·	29
図 4.5-11 S ブロックへの核種移行解析結果 (No.10 孔)	· · · · ·	30
図 4.5-12 S ブロックへの核種移行解析結果 (No.5 孔)	· · · · ·	30
図 4.5-13 S W ブロックへの核種移行解析結果 (No.17, 18 孔)	· · · · ·	31
図 4.5-14 S W ブロックへの核種移行解析結果 (No.7 孔)	· · · · ·	31

## 表 目 次

表 2.2-1 露天跡地を対象として実施した計算コード	· · · · ·	4
表 3-1 現在までに取得したパラメータ	· · · · ·	5
表 4.2.1-1 解析モデルの形状	· · · · ·	9
表 4.2.2-1 各ブロックの捨石層及び風化花崗岩層の 地下水移行距離	· · · · ·	12
表 4.3.1-1 各ブロックの初期核種濃度及び量	· · · · ·	15
表 4.3.3-1 捨石層及び風化花崗岩層のパラメータ設定値	· · · · ·	19
表 4.3.4-1 各ブロックの動水勾配	· · · · ·	19
表 4.3.5-1 各ブロックの地下水実流速	· · · · ·	20
表 4.3.6-1 各ブロックの地下水流入量	· · · · ·	20
表 4.3.7-1 捨石層及び風化花崗岩層の分配係数	· · · · ·	21
表 4.5-1 各モニタリング孔の核種濃度の最大値	· · · · ·	23
表 4.6-1 解析結果 (U-238、Ra-226) と地下水モニタリング 結果の比較	· · · · ·	32

## 1. はじめに

核燃料サイクル開発機構人形峠環境技術センターでは、夜次地区（現在の露天採掘場跡地）において、昭和 52 年から昭和 62 年にかけて低品位鉱の開発を目的とした露天採掘法及びヒープリーチング試験を行った。ヒープリーチング試験後の捨石は、中和処理した後に露天採掘場跡地（以下「露天跡地」という。）に埋め戻し、露天採掘終了後に、覆土と植栽による措置を行っている。

この露天跡地周辺では、昭和 59 年度より捨石の長期的な管理方法の確立やその安全性を確認するための安全評価システムの構築を目指し、試錐調査、原位置透水試験、地下水の流向・流速測定、岩石試料の化学成分分析、カラム吸着溶離試験等を実施している。また、安全性評価のために、露天跡地における 2 次元及び 3 次元解析のためのモデル構築及び地下水流动解析や核種移行解析を試みている。この他、露天採掘及び埋設した捨石等の周辺環境への影響を把握することを目的として、昭和 55 年度より地下水中のウラン、ラジウム等の放射性核種濃度測定を含む水質モニタリングを行っている。

現在、露天跡地に捨石が埋設されてから約 15 年間に渡る調査研究について、露天跡地全域を対象とした水理地質データの取りまとめが行われているところである。また、露天跡地及び周辺について水理解析は実施しているものの、核種移行解析は限られた部分に限定されている。このことから、本報告では今までの調査研究について核種移行解析を行うために必要な水理地質データを整理しており、そのデータを基に、露天跡地全域の核種移行解析を行った。核種移行解析は、放射性廃棄物の浅地中処分での手法を参考とし、東海事業所環境保全・研究センター処分研究部で開発された浅地中処分用核種移行計算コード「NESTOR (Natural and Engineered System Transport Of Radionuclides)」を用いた。また、核種移行解析結果について現在の水質モニタリング結果との比較を試みたので、その結果についても併せて報告する。

## 2. 露天跡地及びその周辺に関する解析調査

### 2.1 露天跡地及びその周辺に関する調査・研究

露天跡地及びその周辺の調査・研究は、露天跡地に埋設した捨石の周辺地域への安全性の確認を目的に、露天跡地周辺のボーリング調査、原位置における透水試験、地下水の流向・流速の測定、地下水や捨石・岩石試料の化学成分分析、溶離試験等を実施した結果、水理地質データ等の基礎データを取得し、さらにこれらデータを用いて、地下水の流動解析や核種移行解析を実施した。

以下に本報告に関係する調査・研究により取得したパラメータ項目及び解析内容を示す。

#### 2.1.1 捨石及び周辺土壤に関するデータ

##### (1) 捨石及び周辺土壤（表土、ローム、泥岩、礫岩、風化花崗岩、花崗岩を対象）

- ・ 鉱物組成
- ・ 透水係数（捨石、泥岩、礫岩、風化花崗岩、花崗岩を測定）
- ・ 主成分組成 ( $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、全 S、 $\text{SO}_3^{2-}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}(+)$ 、 $\text{H}_2\text{O}(-)$ )
- ・ U、Th、Ra-226
- ・ 全有機炭素 (TOC)
- ・ 水溶性硫化物及び塩化物
- ・ 交換性陽イオン (Na、K、Ca、Mg)
- ・ 陽イオン交換容量 (CEC)

#### 2.1.2 地下水成分に関するデータ

##### (1) 表流水、雨水、沢水、一部のモニタリング孔内水

- ・ 水温
- ・ pH
- ・ 酸化還元電位
- ・ 溶存酸素
- ・ 電気伝導度
- ・ 濁度（現地測定のみ）
- ・ 溶存成分 (Na、K、Ca、Mg、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{S}^{2-}$ 、 $\text{SO}_3^{2-}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、Si、 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 、Al、Mn、 $\text{NH}_4^+$ 、T- $\text{PO}_4$ 、 $\text{CO}_2$ 、U、Th、Ra-226)

##### (2) モニタリング孔内水（定期採水分）

- ・ 水温
- ・ pH
- ・ 酸化還元電位
- ・ 電気伝導度
- ・ 溶存酸素
- ・ 溶存成分 ( $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{F}^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_3^{2-}$ 、TC、IC、Si、T-Fe、 $\text{Fe}^{2+}$ 、Al、Mn、Th、Rb、Cd、Cu、As、Zn、Pb、U、Ra-226)

### 2.1.3 核種の挙動に関するデータ

#### (1) バッチ式溶出試験

(固相－捨石、ウラン鉱石（酸化鉱、非酸化鉱）が対象)

- ・ U、Ra-226

(液相－蒸留水の pH を変えて使用)

- ・ 溶出率 (U、Ra-226)

- ・ 水温

- ・ pH

- ・ 電気伝導度

- ・ 化学成分 (Na、K、Ca、Mg、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、S<sup>2-</sup>、SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Si、Fe<sup>2+</sup>、Fe<sup>3+</sup>、Al、Mn、T-Po<sub>4</sub>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、T-CO<sub>2</sub>)

- ・ U、Th、Ra-226

#### (2) カラム式吸着溶離試験

(固相－捨石、礫岩、風化花崗岩が対象)

- ・ U、Ra-226

(液相－現地雨水、孔内水を使用)

- ・ 溶出率及び分配係数 (U、Ra-226)

- ・ 水温

- ・ pH

- ・ 電気伝導度

- ・ 化学成分 (Na、K、Ca、Mg、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、S<sup>2-</sup>、SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Si、Fe<sup>2+</sup>、Fe<sup>3+</sup>、Al、Mn、T-Po<sub>4</sub>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、T-CO<sub>2</sub>)

- ・ U、Th、Ra-226、I (I はトレーサとして添加)

### 2.1.4 地下水流動解析

- ・ 地下水流動、熱輸送、塩分濃度移行及び核種物質の基本方程式からなる計算コード「SWIFT(Sandia Waste Isolation Flow Transport Code)」による評価手法の可能性検討
- ・ 広域地下水の浸透流解析コード「UNISSF (Unified Normal and Inverse Sub-Surface Flow Analysis)」を用いた露天跡地を対象とする準3次元地下水流动解析
- ・ 飽和-不飽和浸透流解析コード「UNSAF (Unsaturated Seepage Flow Analysis)」を用いた露天跡地を対象とした鉛直2次元解析
- ・ 飽和・不飽和浸透流/核種移行解析コード「Dtransu2D・EL」の飽和・不飽和浸透流解析部を用いた露天跡地を対象とした鉛直2次元地下水移行解析
- ・ 多成分多相3次元地殻流体系を扱う汎用型シミュレータ「GEOFLOWS-MCNP-V2」を用いた露天跡地を対象とした3次元地下水移行解析

### 2.1.5 核種移行解析

- ・ 地下水流動、熱輸送、塩分濃度移行及び核種物質の基本方程式からなる計算コード「SWIFT(Sandia Waste Isolation Flow Transport Code)」による評価手法の可能性検討

- ・ 有限要素法飽和・不飽和領域核種移行コード「FEGM・FERM(Finite Element Ground Water Movement・Finite Element Radioactive Waste Movement)」を用いた仮想の地質断面モデルを対象とした鉛直2次元核種移行解析
- ・ 飽和・不飽和浸透流/核種移行解析コード「Dtransu2D・EL」の飽和・不飽和浸透流解析による露天跡地対象とした鉛直2次元地下水移行解析の結果を基にした、ウラン、ラジウムの一次元移行方程式による核種移行解析
- ・ 飽和・不飽和浸透流/核種移行解析コード「Dtransu2D・EL」を用いた露天跡地対象とした鉛直2次元核種移行解析

## 2.2 これまでの課題

水理解析、物質移行解析及び安全評価に用いるパラメータは、値の代表値及びそのばらつきの観点から、今後検討する必要があるものの、概ね一通りのものが網羅されている。現在まで露天跡地を対象とした解析は、子孫核種、ラドンの1次元定状解析を除いて、地下水流动解析が中心である。表2.2-1に露天跡地を解析対象に実施した地下水流动解析及び核種移行解析の計算コードの一覧を示す。地下水流动解析では、露天跡地及びその周辺を準2次元または3次元にモデル化して、地質構造別に地下水流动方や流速等について解析している。現在までに実施した解析結果から、露天跡地及び周辺地域の風化花崗岩のなかの強風化花崗岩の水理学的な区別が判然としないことが課題となっている。

一方、核種移行解析は、地下水流动解析の結果を基に1次元方程式を用いたウラン及びラジウムの1次元核種移行解析や飽和・不飽和浸透流/核種移行解析コード「Dtransu2D・EL」による露天跡地南北方向のウラン及びラジウムの鉛直2次元核種移行解析を行っている。両方ともに、露天跡地の一部分の解析であり、露天跡地全域を対象とする核種移行解析を実施していないことから、今後は露天跡地全域の核種移行解析を実施する必要がある。

これらのことから、今年度は現在までに取得した露天跡地周辺の水理地質データを基に、核種移行解析を実施する。

以下に、第3章では解析パラメータの収集・整理、第4章ではNESTORを用いた核種移行解析を行った結果を示す。

表2.2-1 露天跡地を対象として実施した計算コード

解析コード名	次元	地下水移行	物質移行	崩壊及び減衰
1次元移行方程式	1次元	×	○	○
Dtransu 2D・EL	鉛直2次元	○	○	○
UNSAF	鉛直2次元	○	×	×
UNISSF	準3次元	○	×	×
GEOFLOW-MCNP-V2	3次元	○	×	×
(娘核種)	物質変化のみ	×	×	○
(ラドン) 1次元の定状解析	一次元	×	○	○

○：計算可能、×：計算不可

### 3. 解析パラメータの収集・整理

今年度実施する核種移行解析の精度を向上させることを目的として、核種移行解析に必要な既存の水理地質データを中心に地質別に整理した（表 3-1）。さらに整理したデータについて、室内試験＋現地調査により取得したデータを基本として、保守的な設定になるよう選定した。

表 3-1 現在までに取得したパラメータ

地層	パラメータ項目		単位	数値1	参照	数値2	参照	数値3	参照	選定値
捨石	核種濃度	U-238濃度	Bq/g	1.45	分析値					1.45
		Ra-226濃度	Bq/g	8.44	分析値					8.44
		Th濃度	$\mu\text{g/g}$	7	分析値	25	分析値	8	分析値	25
	空隙率	%		30.0	文献値	47.2	カラム試験			47.2
	真密度	$\text{g/cm}^3$		2.64	カラム試験					2.64
	透水係数	$\text{cm/s}$		$3.72 \times 10^{-4}$	実測値の対数平均	$6.75 \times 10^{-4}$	実測値の対数平均			$6.75 \times 10^{-4}$
	分配係数	U	$\text{ml/g}$	150	実測値	680	カラム試験			680
		Ra	$\text{ml/g}$	6,690	カラム試験	10,800	カラム試験			6,690
	空隙率	%		30.0	文献値	52.0	文献値			52.0
	真密度	$\text{g/cm}^3$		2.63	文献値					2.63
表層土壤	透水係数	$\text{cm/s}$		$1.00 \times 10^{-4}$	文献値					$1.00 \times 10^{-4}$
	空隙率	%		5.0	文献値	59.3	カラム試験			59.3
	真密度	$\text{g/cm}^3$		2.53	カラム試験					2.53
	透水係数	$\text{cm/s}$		$1.52 \times 10^{-5}$	実測値の対数平均					$1.52 \times 10^{-5}$
	分配係数	U	$\text{ml/g}$	976	カラム試験	1,063	カラム試験			976
		Ra	$\text{ml/g}$	2,120	カラム試験	5,860	カラム試験			2,120
礫岩	空隙率	%		15.0	文献値	55.5	カラム試験			55.5
	真密度	$\text{g/cm}^3$		2.62	カラム試験					2.62
	透水係数	$\text{cm/s}$		$2.96 \times 10^{-5}$	実測値の対数平均					$2.96 \times 10^{-5}$
	分配係数	U	$\text{ml/g}$	47	カラム試験	53	カラム試験			47
		Ra	$\text{ml/g}$	1,140	カラム試験	1,420	カラム試験			1,140
強風化花崗岩	透水係数	$\text{cm/s}$		$7.36 \times 10^{-5}$	実測値の対数平均					$7.36 \times 10^{-5}$
風化花崗岩	空隙率	%		10.0	文献値	45.1	カラム試験			45.1
	真密度	$\text{g/cm}^3$		2.70	カラム試験	2.60	文献値			2.70
	透水係数	$\text{cm/s}$		$1.27 \times 10^{-5}$	実測値の対数平均	$1.7 \times 10^{-5}$	実測値の幾何平均	$1.03 \times 10^{-5}$	実測値の幾何平均	$1.03 \times 10^{-5}$
	分配係数	U	$\text{ml/g}$	66	実験値	80	カラム試験			66
		Ra	$\text{ml/g}$	1,060	実験値	1,150	カラム試験			1,060
花崗岩	空隙率	%		0.5	文献値					0.5
	透水係数	$\text{cm/s}$		$8.55 \times 10^{-7}$	実測値の対数平均	$7.44 \times 10^{-7}$	実測値の幾何平均	$1.07 \times 10^{-6}$	実測値の幾何平均	$1.07 \times 10^{-6}$

## 4. 核種移行解析

### 4.1 解析対象範囲

#### 4.1.1 解析対象範囲

解析対象範囲は、現在までの検討結果を参考として、露天跡地及びその周辺の水文地質状況等を反映した図 4.1.1-1 に示す範囲とした。すなわち、露天跡地の北側と南側に沿って露天跡地の東側で合流する 2 本の沢、露天跡地西側の調整池及び両沢の上流部と調整池を結んだ線の範囲である。

#### 4.1.2 地質

露天跡地周辺の地質は、花崗岩を基盤岩として、その上部に風化花崗岩、礫岩、泥岩が分布し、露天跡地には捨石及び盛土が埋め戻されている。

基盤である花崗岩は、斑状角閃石黒雲母花崗岩で、斑結晶カリ長石巨晶や大型球状石英を伴うことが特徴である。花崗岩上部には、厚い所で 20m 以上に達する風化花崗岩が認められる。風化花崗岩は、風化の程度が異なる上層の強風化部と下層の風化部に分けられる。この風化花崗岩を不整合に覆って人形峠累層の泥岩が分布しており、基底部に礫岩を伴う。これらの堆積岩は、水平ないし東南東方向に緩傾斜している。また、花崗岩と風化花崗岩の境界面は、上方に凸で東南東方向にのびる舌状を呈し、大局的には地形面に調和した形態を成している。地表面付近には、表土及び大山起源の火山灰層が被覆するが、その層厚は薄い。

露天跡地には、ヒープリーチング試験後に消石灰による中和処理を施した捨石及び盛土が埋め戻されている。造成面の中央部には、標高 723m～717m までの範囲で鉱石の掘削、捨石及び表土の埋め戻しが実施されており、さらにその上に厚さ約 1.5m 前後のマサ土による覆土が施されている。

#### 4.1.3 地下水位

露天跡地及びその周辺地域における地下水位は、地形に調和して西側が高く、東側が低くなっている（図 4.1.3-1、図 4.1.3-2 参照）。露天跡地内部の地下水位は、捨石基底部近傍に認められる。その外側では、ほとんどが礫岩あるいは風化花崗岩中にあり、新鮮な花崗岩岩盤を不透水層として、単一の帶水層を形成しているものと考えられる。また、昭和 59 年度～平成 13 年度の地下水モニタリングの結果、地下水位は全体的に平均 1m 程度高くなる傾向にある（核燃料サイクル開発機構、2002）。

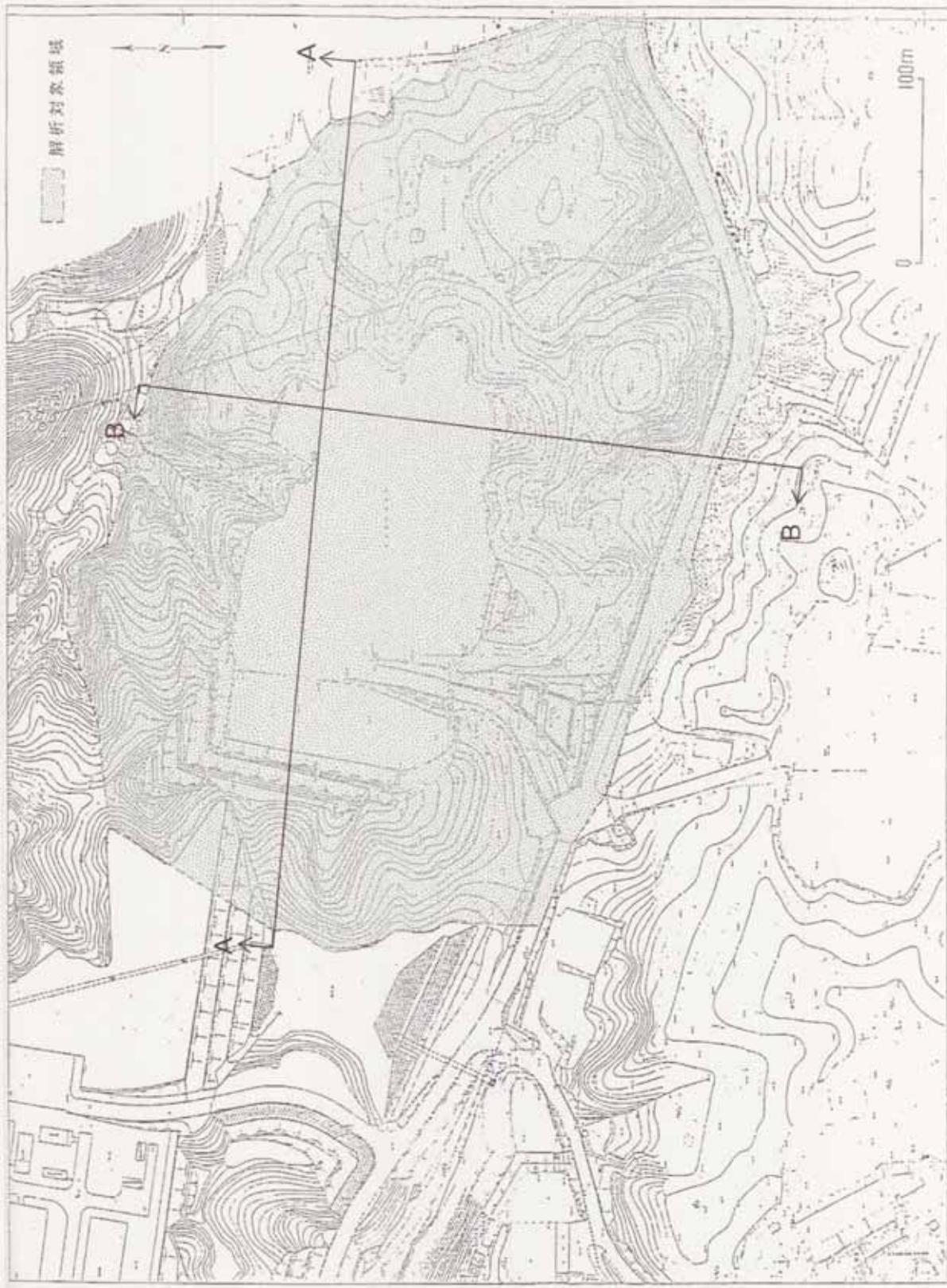


図 4.1.1-1 解析対象領域図

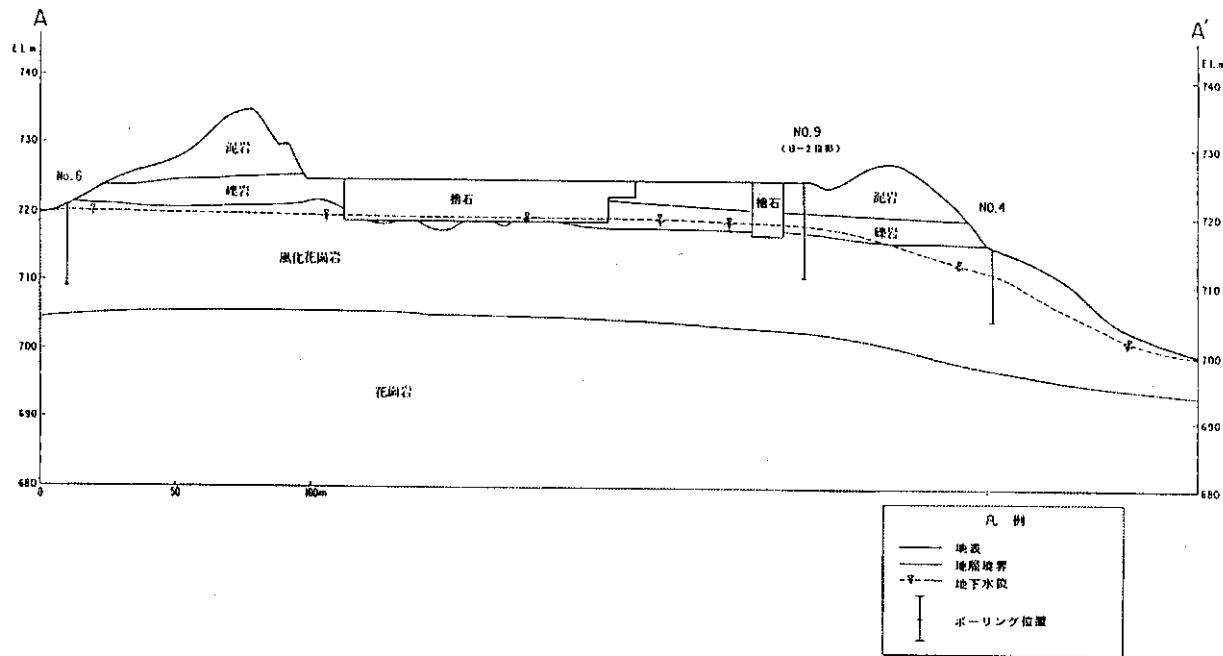


図 4.1.3-1 露天跡地周辺の地質断面図（東-西）

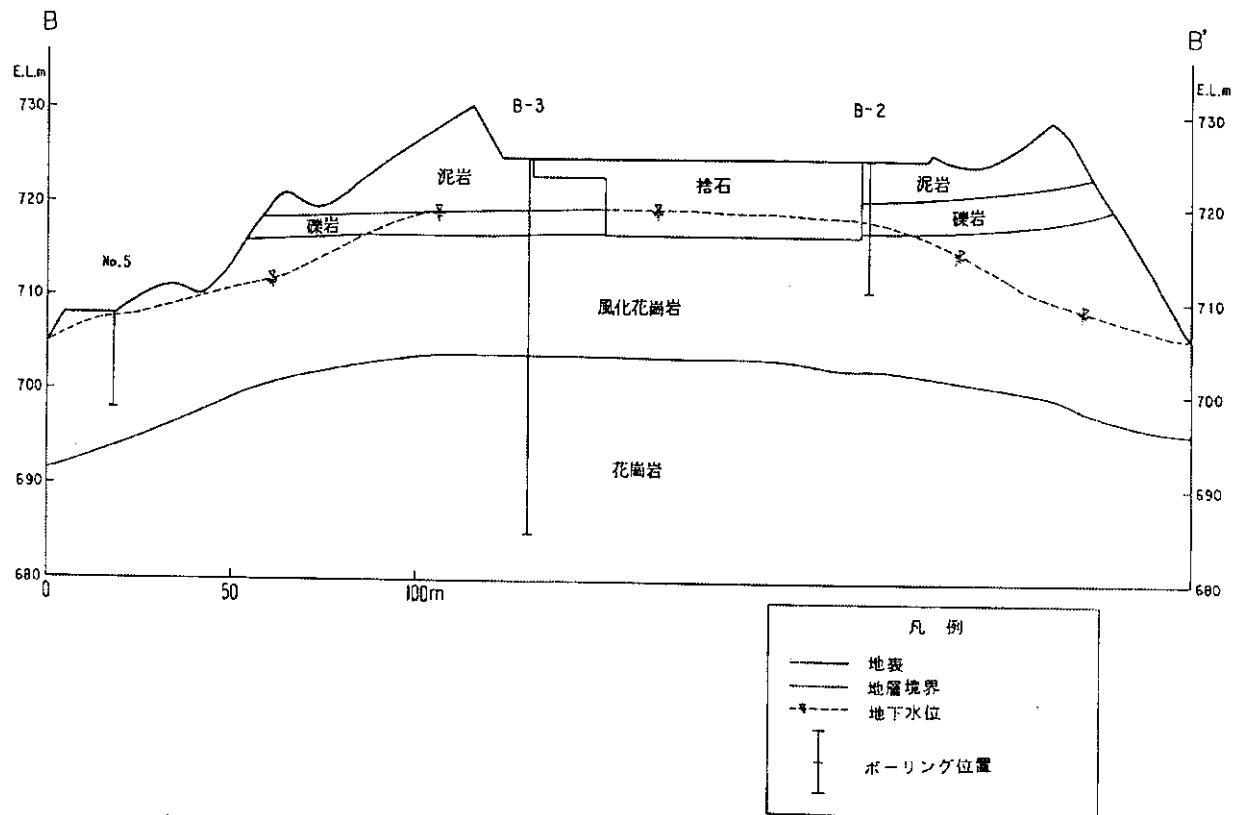


図 4.1.3-2 露天跡地周辺の地質断面図（南-北）

## 4.2 解析モデル

### 4.2.1 解析モデルの形状

解析対象地域は、地下水の流動方向（フラックスベクトル）を考慮して、尾根線等により対象範囲を7ブロックに区分した。特に、捨石を埋設している露天跡地中央部の平坦地については、それぞれのブロックへの寄与分を想定して区切った。図4.2.1-1にブロック分割図を示し、分割範囲が分かるように色分けした。これらの7ブロックを解析するために、次のようにモデル化した。

- ・ それぞれのブロックは、上流から下流に向かい、幅の等しい捨石層と風化花崗岩層（捨石層下、帯水層1～3）によって構成される。
- ・ ブロックの中で地形面の傾斜や地下水位の分布傾向が極端に変わる場合、風化花崗岩層を分割する（帯水層1～3）。
- ・ Wブロックでは、推定された地下水の流動方向から、最上部の捨石層からの地下水の流入はないと想定される（図4.2.1-1）。このため、Wブロックには捨石層を含めず、核種移行解析の対象外とする。
- ・ 雨水及び表流水は、捨石層からのみ浸透することとする（地表面：降雨浸透境界）。
- ・ 各ブロック間の地下水の流入・流出はない（側面境界：花崗岩による不透水境界）。
- ・ 各ブロックの形状は、南北の地下水の流向を考慮して、Cブロックを南北方向に2分割する。さらに各ブロックへの地下水の流向に従い、ブロックの境界線の幅の大きさを各ブロックへ移行する捨石の表面積とする。

表4.2.1-1に解析モデルの各ブロック（N～SW）の主な寸法（表面積、幅、長さ、厚さ、体積、境界面積）を示し、図4.2.1-2に露天跡地及び周辺地域の解析モデルを示す。

表4.2.1-1 解析モデルの形状

	分割ブロック						
	Nブロック	NEブロック	Eブロック	SEブロック	Sブロック	SWブロック	Wブロック
表面積(m <sup>2</sup> )	6,140	990	1,530	1,150	4,820	4,520	-
幅(m)	142.8	23.0	34.0	38.3	90.9	85.3	-
長さ(m)	43.0	43.0	45.0	30.0	53.0	53.0	-
厚さ(m)	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	-
体積(m <sup>3</sup> )	26,400	4,260	6,580	4,950	20,700	19,400	-
境界面積(m <sup>2</sup> )	614	99	146	165	391	367	

各寸法については、図4.2.1-2を参照。

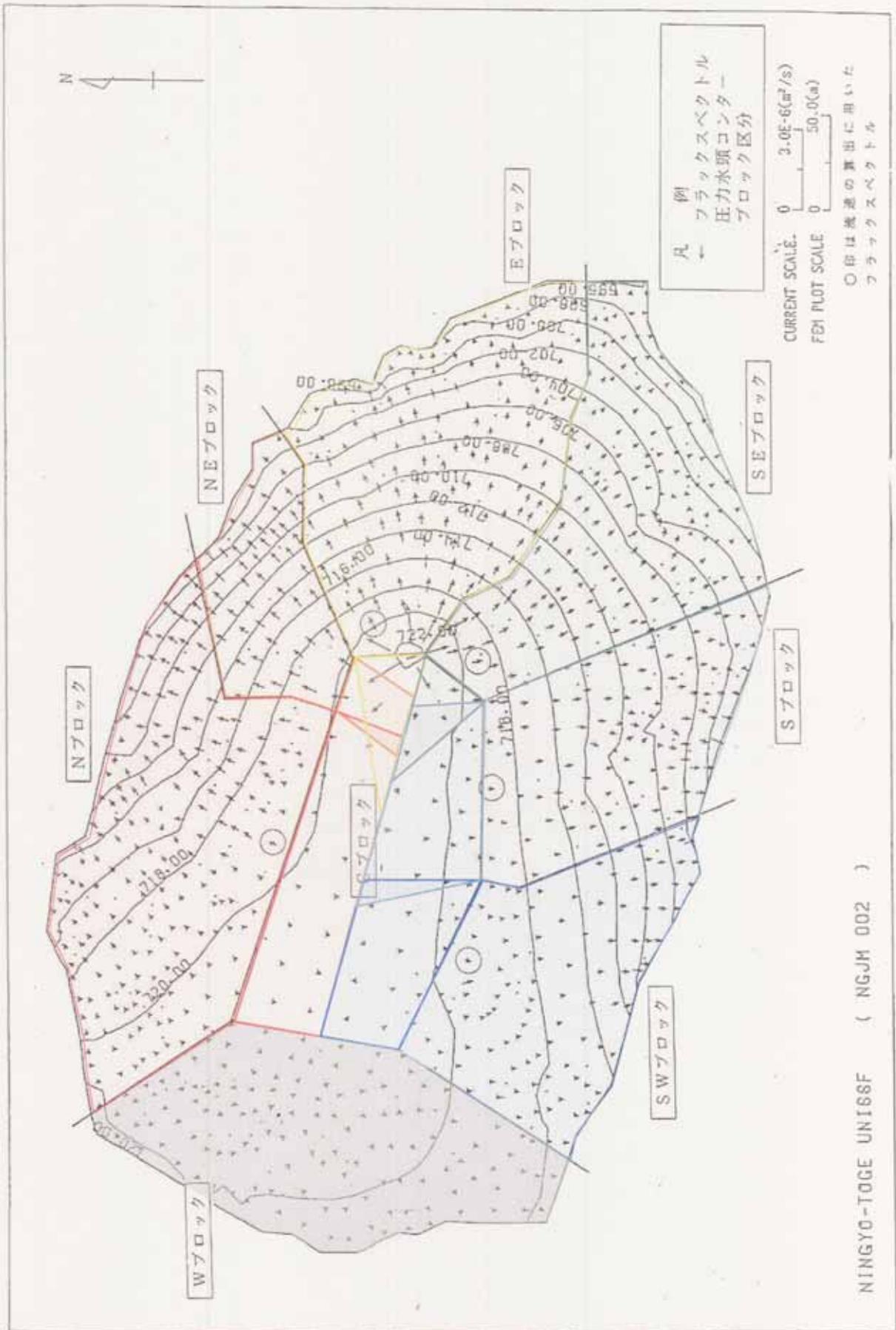


図 4.2-1 露天跡地周辺のプロック分割図

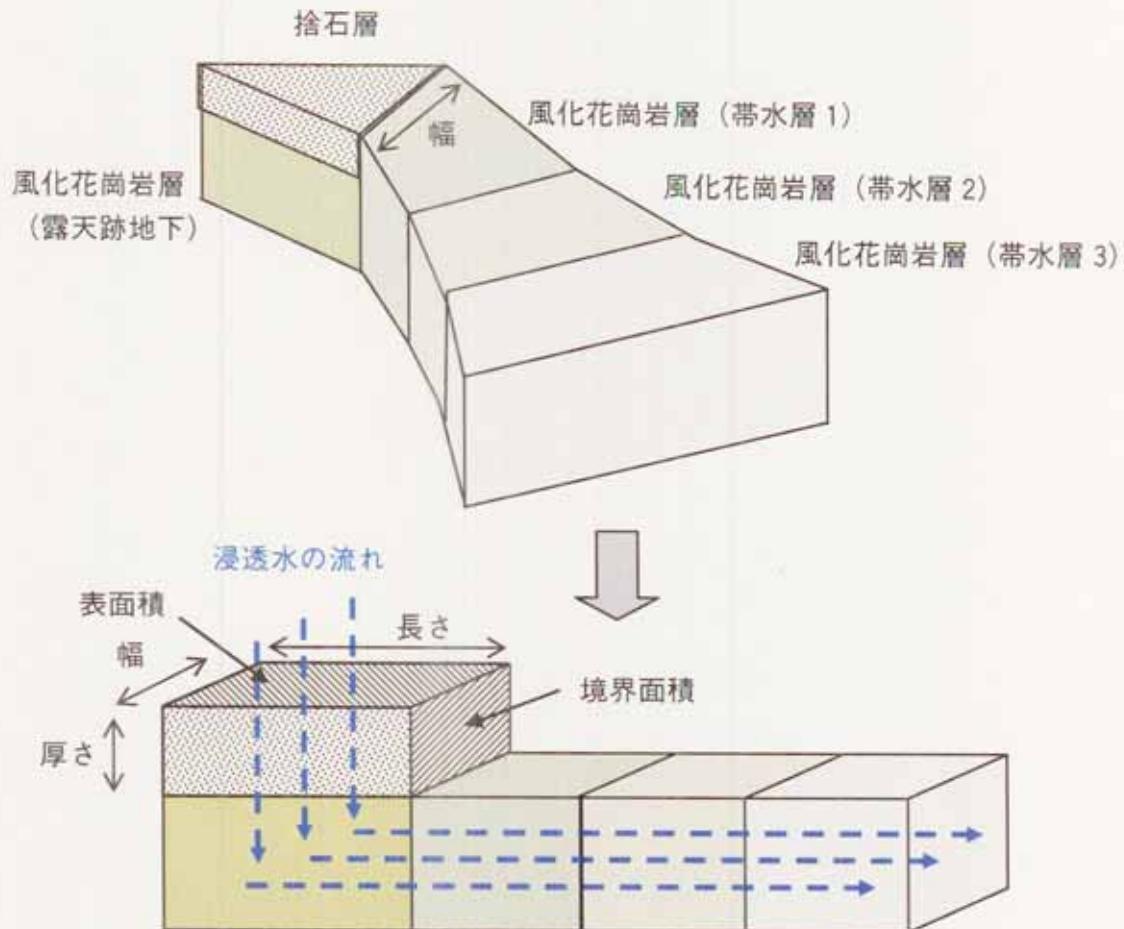


図 4.2.1-2 露天跡地の解析モデル

#### 4.2.2 評価点の設定

評価点は、地下水モニタリング結果が入手できるモニタリング孔とした（図4.2.2-1）。ただし、計算上ではブロック別の地下水の流動方向に沿って評価点を設定する必要があることから、実際のモニタリング孔とほぼ同じ地下水位となるようにした（図4.2.2-2）。このため、EブロックのNo.4とNo.13及びNo.21とNo.22、S EブロックのNo.14とNo.15、S WブロックのNo.17とNo.18については、実際のモニタリング孔位置は異なるものの、解析では同位置となる。なお、各ブロックでの評価点までの移行距離を表4.2.2-1に示す。

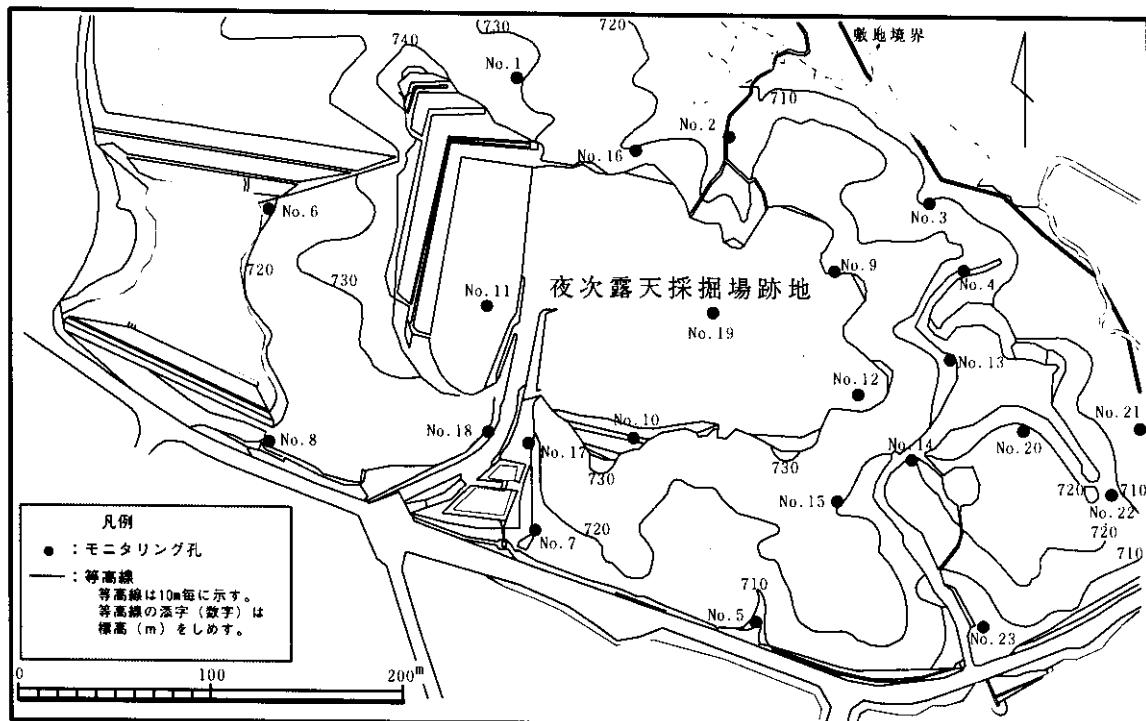


図 4.2.2-1 露天跡地周辺のモニタリング孔位置図

表 4.2.2-1 各ブロックの捨石層及び風化花崗岩層の地下水移行距離

	Nフ'ロック		NEフ'ロック		Eフ'ロック		SEフ'ロック		Sフ'ロック		SWフ'ロック	
	長さ(m)	評価点	長さ(m)	評価点	長さ(m)	評価点	長さ(m)	評価点	長さ(m)	評価点	長さ(m)	評価点
捨石層 (露天跡地)	43	—	43	—	45	—	30	—	53	—	53	—
風化花崗岩層 (帯水層1)	35	No.16	13	No.9	68	No.4,13	18	No.12	8	No.10	35	No.17,18
風化花崗岩層 (帯水層2)	25	No.2	60	No.3	23	No.20	35	No.14,15	100	No.5	45	No.7
風化花崗岩層 (帯水層3)					58	No.21,22	98	No.23				

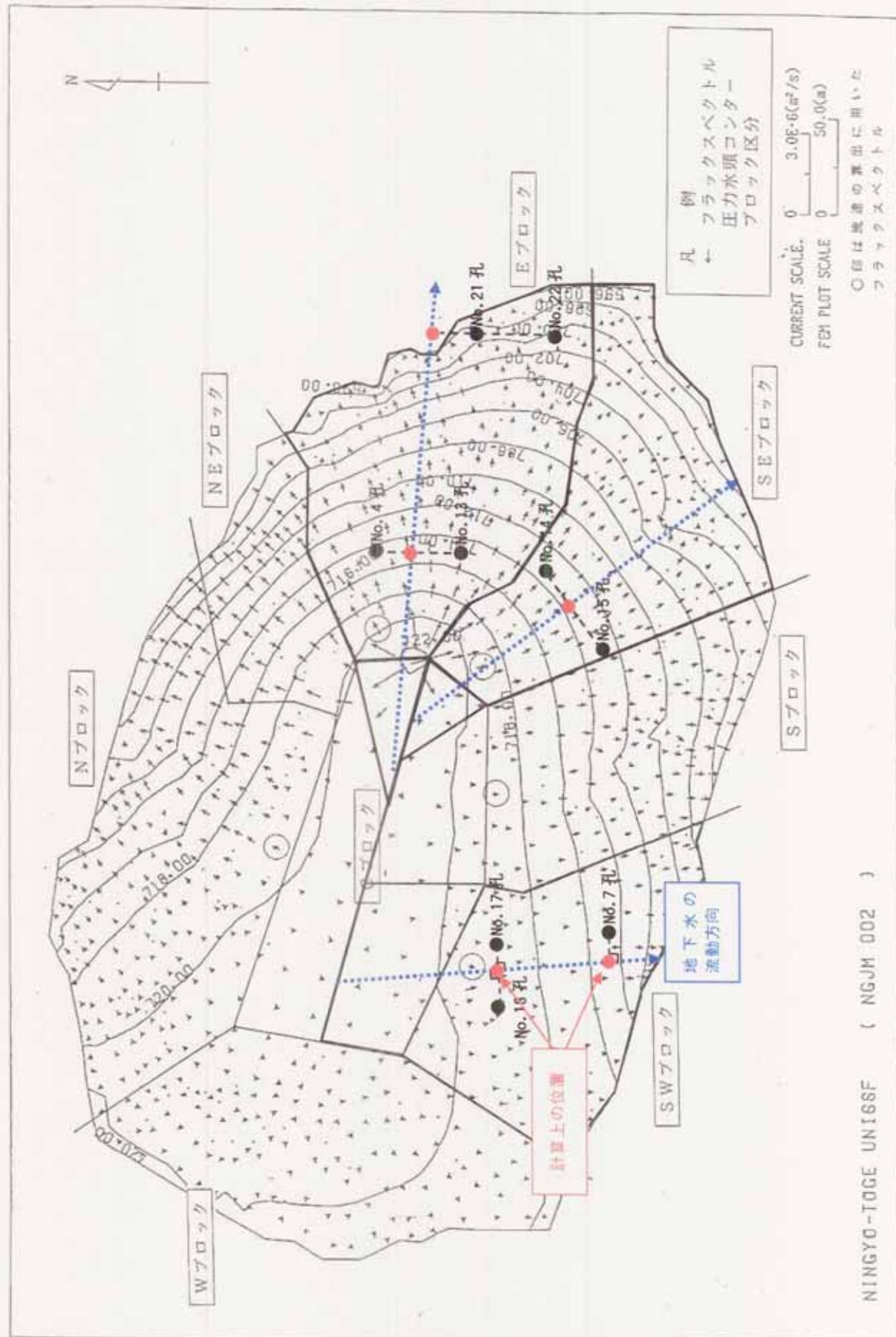


図 4.2.2-2 評価点の設定

NINGYO-TOGUE UNISSL ( NGJW 002 )

## 4.3 解析モデルの入力パラメータ

### 4.3.1 捨石層の放射性核種濃度及び量

露天跡地には、ヒープリーチング試験後に消石灰による中和処理を施した捨石を合計 58,900t (実績値) 埋設している (U-238 濃度: 1.436 Bq/g, Ra-226 濃度: 1.043 × 10<sup>1</sup> Bq/g, Th 濃度: 1.019 × 10<sup>-1</sup> Bq/g)。ここでは、全ての天然放射性核種を扱うこととし、ウラン、アクチニウム及びトリウム系列の放射性核種濃度（初期核種）と量は、以下のようにして仮定した。

#### (1) ウラン系列の初期核種濃度及び量 (図 3.3.1-1 参照)

ウラン系列の U-238 及び Ra-226 量は、捨石中の U-238 及び Ra-226 濃度と露天跡地における捨石たい積量を基に計算した。U-234 量は、U-238 量から天然ウラン中の U-234 存在比 (0.0055%) を基に算出し、その他の子孫核種 (Th-230, Pb-210, Po-210) は、捨石中に元の核種組成を保持し、Ra-226 の放射平衡状態にあると仮定した。

ウラン系列の核種量計算について下記に示す。

$$\cdot \text{U-238 量 (Bq)} = 1.436 \text{ Bq/g (捨石中 U-238 濃度)} \times 58,900 \times 10^6 \text{ g (捨石量)} \cdots ①$$

$$\begin{aligned} \cdot \text{Ra-226 量 (Bq)} &= 1.043 \times 10^1 \text{ Bq/g (捨石中 Ra-226 濃度)} \\ &\quad \times 58,900 \times 10^6 \text{ g (捨石量)} \cdots ② \end{aligned}$$

$$\cdot \text{U-234 量 (Bq)}$$

$$\text{U-238 量 (g)} = ① \text{U-238 量 (Bq)} / 1.236 \times 10^4 \text{ Bq/g (U-238 比放射能)} \cdots ③$$

$$\text{U-234 量 (g)} = \frac{0.0055\% (\text{U-234 天然存在比}) \times ③ \text{U-238 量 (g)}}{99.2745\% (\text{U-238 天然存在比})} \cdots ④$$

$$\cdot \text{U-234 量 (Bq)} = ④ \text{U-234 量 (g)} \times 2.264 \times 10^8 \text{ Bq/g (U-234 比放射能)} \cdots ⑤$$

$$\cdot \text{Th-230 量 (Bq)}、\text{Pb-210 量 (Bq)} \text{ 及び Po-210 量 (Bq)}$$

$$\text{Th-230 量 (Bq)} = \text{Pb-210 量 (Bq)} = \text{Po-210 量 (Bq)} = ② \text{Ra-226 量 (Bq)}$$

#### (2) アクチニウム系列の初期濃度及び量 (図 3.3.1-2 参照)

U-235 量は、U-238 量と天然ウラン中の U-235 存在比 (0.7200%) を基に計算した。子孫核種 (Pa-231, Ac-227) については、Ra-226 より放射平衡と仮定した場合に想定される U-234 と天然ウラン核種の存在比から計算される U-235 と放射平衡にあると仮定した。

アクチニウム系列の核種量計算について下記に示す。

$$\cdot \text{U-235 量 (Bq)}$$

$$0.7200\% (\text{U-235 天然存在比}) \times ③ \text{U-238 量 (g)}$$

$$\text{U-235 量 (g)} = \frac{0.7200\% (\text{U-235 天然存在比}) \times ③ \text{U-238 量 (g)}}{99.2745\% (\text{U-238 天然存在比})} \cdots ⑥$$

$$\text{U-235 量 (Bq)} = ⑥ \text{U-235 量 (g)} \times 8.050 \times 10^4 \text{ Bq/g (U-235 比放射能)} \cdots ⑦$$

・ Pa-231 量 (Bq) 及び Ac-227 量 (Bq)

$$U-234 \text{ 濃度 (g)} = ②Ra-226 \text{ 量 (Bq)} / 2.264 \times 10^8 \text{ Bq/g (U-234 比放射能)} \cdot ⑧$$

$$U-235 \text{ 量 (g)} = \frac{0.7200\% \text{ (U-235 天然存在比)} \times ⑧U-234 \text{ 量 (g)}}{0.0055\% \text{ (U-234 天然存在比)}} \cdot ⑨$$

・ U-235 量 (Bq) = ⑨U-235 量 (g) ×  $8.050 \times 10^4 \text{ Bq/g (U-235 比放射能)}$  · · ⑩

・ Pa-231 量 (Bq) 及び Ac-227 量 (Bq)

$$Pa-231 \text{ 量 (Bq)} = Ac-227 \text{ 量 (Bq)} = ⑩U-235 \text{ 量 (Bq)}$$

### (3) トリウム系列の初期核種濃度及び量 (図 3.3.1-3 参照)

トリウム系列は、捨石中の Th 濃度を基に、全ての核種が放射平衡にあると仮定した。

トリウム系列の核種量計算について下記に示す。

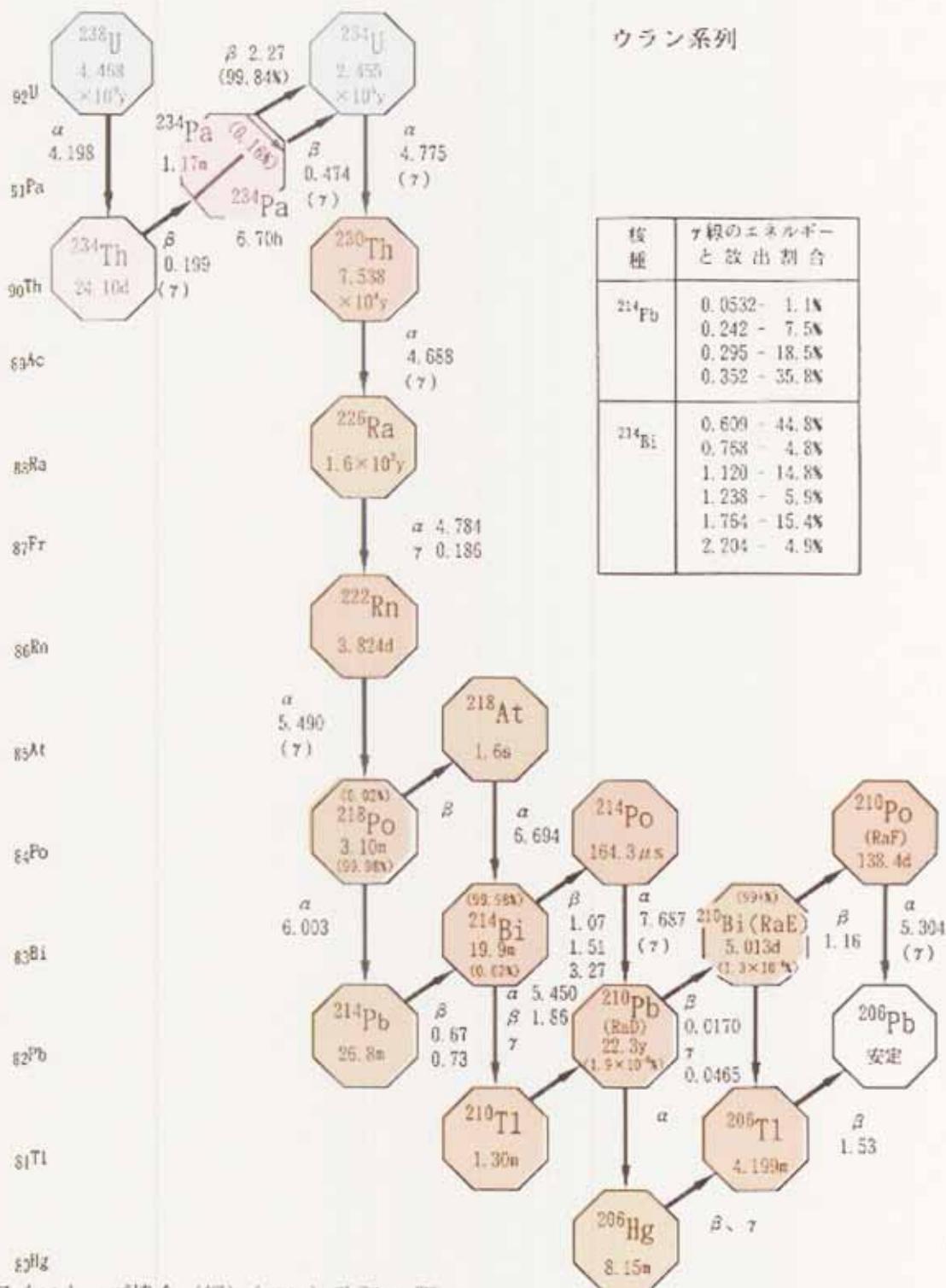
$$\begin{aligned} \cdot Th-232 \text{ 量 (Bq)} &= 1.019 \times 10^{-1} \text{ Bq/g (捨石中 Th 濃度)} \\ &\quad \times 58,900 \times 10^6 \text{ g (捨石量)} \quad \cdot \cdot ⑪ \\ \cdot Ra-228 \text{ 量 (Bq)} \text{ 及び Th-228 量 (Bq)} \\ Ra-228 \text{ 量 (Bq)} &= Th-228 \text{ 量 (Bq)} = ⑪Th-232 \text{ 量 (Bq)} \end{aligned}$$

以上のように設定した核種量は、表 4.2.1-1 の各ブロックの全体割合に従って、各ブロックに分配した (表 4.3.1-1)。

表 4.3.1-1 各ブロックの初期核種濃度及び量

核 種	全核種量 (Bq)	Nブロック		NEブロック		Eブロック		SEブロック		Sブロック		SWブロック	
		Bq	Bq/g	Bq	Bq/g	Bq	Bq/g	Bq	Bq/g	Bq	Bq/g	Bq	Bq/g
ウラン系列	U-238	$8.46 \times 10^{18}$	$3.08 \times 10^{10}$	$1.44 \times 10^4$	$4.98 \times 10^8$	$1.44 \times 10^6$	$7.66 \times 10^3$	$1.43 \times 10^6$	$5.74 \times 10^5$	$1.43 \times 10^6$	$2.41 \times 10^9$	$1.44 \times 10^9$	$2.26 \times 10^{10}$
	U-234	$7.80 \times 10^{18}$	$2.84 \times 10^{10}$	$1.32 \times 10^4$	$4.59 \times 10^8$	$1.32 \times 10^6$	$7.07 \times 10^3$	$1.32 \times 10^6$	$5.29 \times 10^5$	$1.32 \times 10^6$	$2.23 \times 10^9$	$1.33 \times 10^9$	$2.09 \times 10^{10}$
	Th-230	$6.15 \times 10^{11}$	$2.24 \times 10^{11}$	$1.04 \times 10^4$	$3.62 \times 10^{10}$	$1.04 \times 10^4$	$5.57 \times 10^{10}$	$1.04 \times 10^4$	$4.17 \times 10^{10}$	$1.04 \times 10^4$	$1.75 \times 10^{11}$	$1.04 \times 10^4$	$1.64 \times 10^{11}$
	Ra-226	$6.15 \times 10^{11}$	$2.24 \times 10^{11}$	$1.04 \times 10^4$	$3.62 \times 10^{10}$	$1.04 \times 10^4$	$5.57 \times 10^{10}$	$1.04 \times 10^4$	$4.17 \times 10^{10}$	$1.04 \times 10^4$	$1.75 \times 10^{11}$	$1.04 \times 10^4$	$1.64 \times 10^{11}$
	Pb-210	$6.15 \times 10^{11}$	$2.24 \times 10^{11}$	$1.04 \times 10^4$	$3.62 \times 10^{10}$	$1.04 \times 10^4$	$5.57 \times 10^{10}$	$1.04 \times 10^4$	$4.17 \times 10^{10}$	$1.04 \times 10^4$	$1.75 \times 10^{11}$	$1.04 \times 10^4$	$1.64 \times 10^{11}$
	Po-210	$6.15 \times 10^{11}$	$2.24 \times 10^{11}$	$1.04 \times 10^4$	$3.62 \times 10^{10}$	$1.04 \times 10^4$	$5.57 \times 10^{10}$	$1.04 \times 10^4$	$4.17 \times 10^{10}$	$1.04 \times 10^4$	$1.75 \times 10^{11}$	$1.04 \times 10^4$	$1.64 \times 10^{11}$
アクチニウム系列	U-235	$3.99 \times 10^5$	$1.45 \times 10^8$	$6.76 \times 10^2$	$2.35 \times 10^6$	$6.76 \times 10^2$	$3.62 \times 10^5$	$6.75 \times 10^2$	$2.71 \times 10^5$	$6.77 \times 10^2$	$1.14 \times 10^5$	$6.79 \times 10^2$	$1.07 \times 10^5$
	Pa-231	$3.15 \times 10^{10}$	$1.15 \times 10^{10}$	$5.36 \times 10^4$	$1.85 \times 10^8$	$5.32 \times 10^{-1}$	$2.85 \times 10^9$	$5.32 \times 10^3$	$2.14 \times 10^9$	$5.34 \times 10^3$	$8.99 \times 10^9$	$5.36 \times 10^3$	$8.43 \times 10^9$
	Ac-227	$3.15 \times 10^{10}$	$1.15 \times 10^{10}$	$5.36 \times 10^4$	$1.85 \times 10^8$	$5.32 \times 10^{-1}$	$2.85 \times 10^9$	$5.32 \times 10^3$	$2.14 \times 10^9$	$5.34 \times 10^3$	$8.99 \times 10^9$	$5.36 \times 10^3$	$8.43 \times 10^9$
トリウム系列	Th-232	$6.00 \times 10^3$	$2.19 \times 10^3$	$1.02 \times 10^4$	$3.53 \times 10^4$	$1.02 \times 10^4$	$5.44 \times 10^3$	$1.01 \times 10^4$	$4.07 \times 10^4$	$1.02 \times 10^4$	$1.71 \times 10^4$	$1.02 \times 10^4$	$1.61 \times 10^4$
	Ra-228	$6.00 \times 10^3$	$2.19 \times 10^3$	$1.02 \times 10^4$	$3.53 \times 10^4$	$1.02 \times 10^4$	$5.44 \times 10^3$	$1.01 \times 10^4$	$4.07 \times 10^4$	$1.02 \times 10^4$	$1.71 \times 10^4$	$1.02 \times 10^4$	$1.61 \times 10^4$
	Th-228	$6.00 \times 10^3$	$2.19 \times 10^3$	$1.02 \times 10^4$	$3.53 \times 10^4$	$1.02 \times 10^4$	$5.44 \times 10^3$	$1.01 \times 10^4$	$4.07 \times 10^4$	$1.02 \times 10^4$	$1.71 \times 10^4$	$1.02 \times 10^4$	$1.61 \times 10^4$

## ウラン系列



アイソトープ協会（編）(1984) 改訂3版

アイソトープ便覧 に加筆。

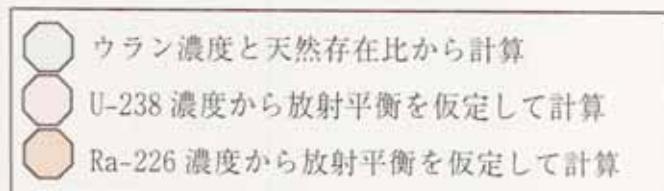
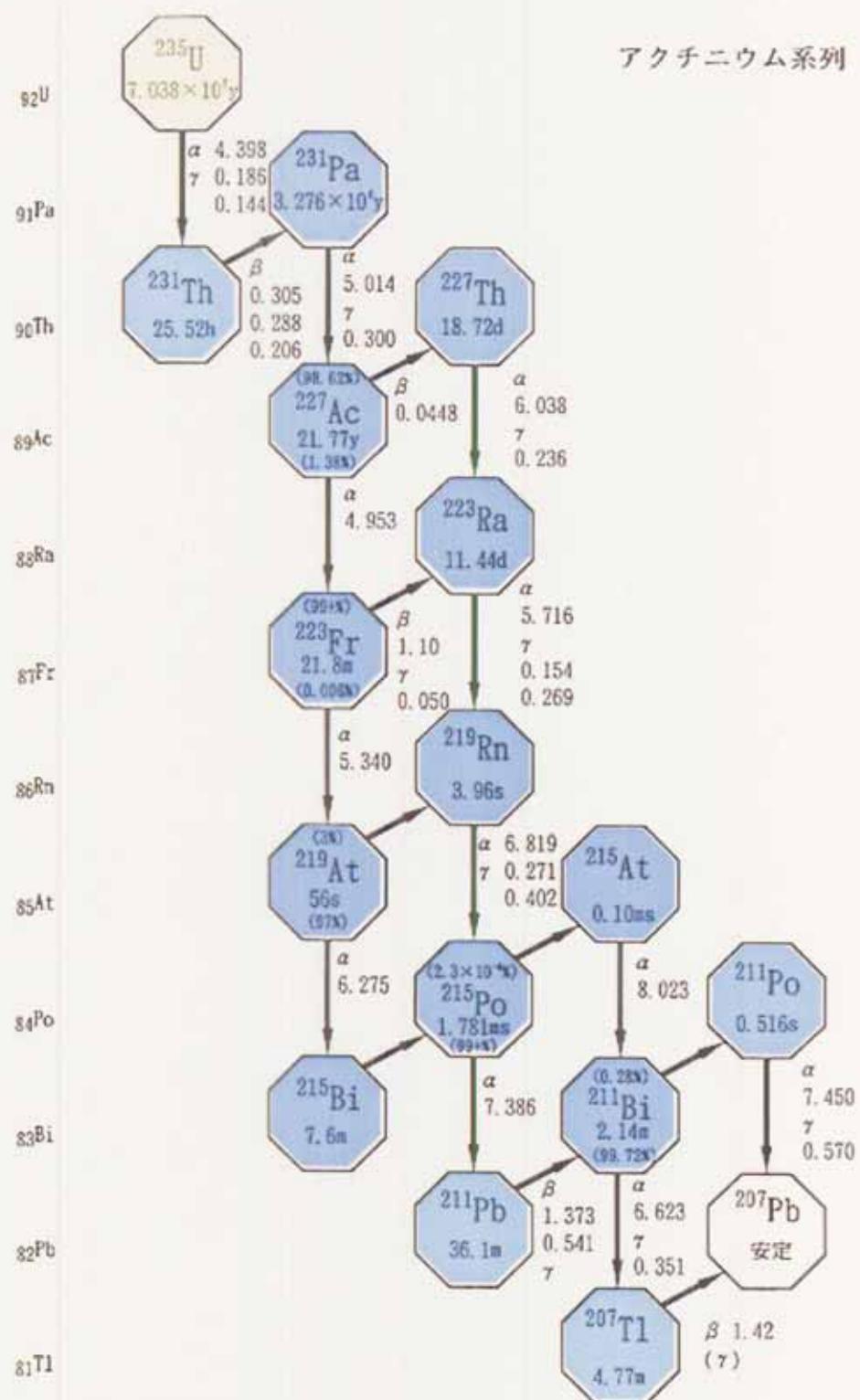


図 4.3.1-1 捨石中のウラン系列核種の濃度計算の考え方

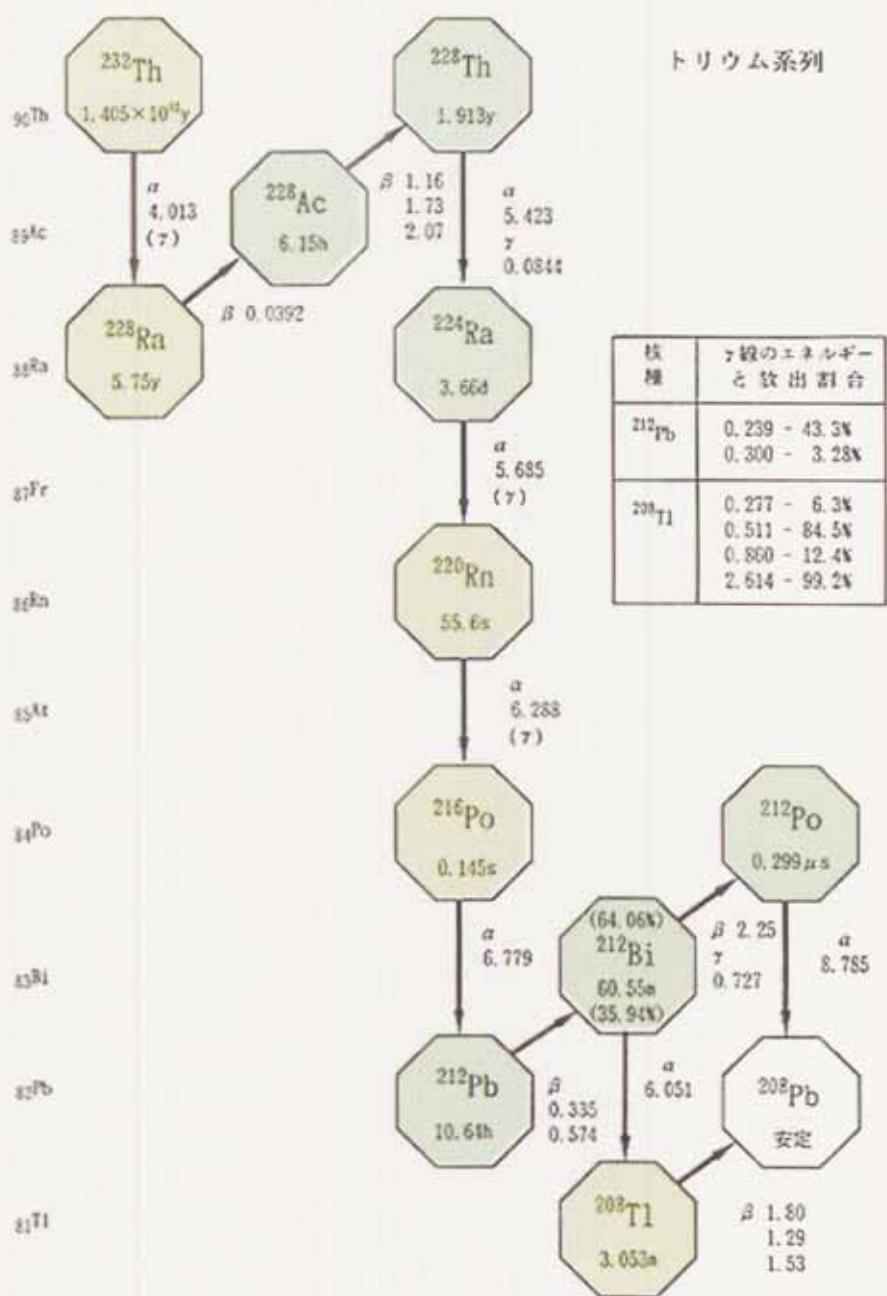
## アクチニウム系列



アイソトープ協会（福）（1984）改訂3版  
アイソトープ便覧 に加筆。

	ウラン濃度と天然存在比から計算
	U-235濃度から放射平衡を仮定して計算

図 4.3.1-2 捨石中のアクチニウム系列核種の濃度計算の考え方



アイソトープ協会（編）（1984）改訂3版  
アイソトープ便覧に加筆。

Th-232 濃度から放射平衡を仮定して計算

図4.3.1-3 捨石中のトリウム系列核種の濃度計算の考え方

#### 4.3.2 降雨浸透量

露天跡地では、露天跡地での降雨量に対する地下への浸透水量を調査することを目的として気象観測装置を設置した。降雨量及び蒸発散量は現在計測中であることから、本解析に用いる降雨浸透水量は一般的な値として降雨量の30%が地下へ浸透すると仮定した。なお、人形峠地域の1988～1998年の平均年間降雨量は2,530mm/yであることから、降雨浸透量は759mm/yとした。

#### 4.3.3 地層の透水性

露天跡地及び周辺地域のパラメータは、表4.3.3-1の現在までに取得したパラメータの核種移行解析に使用するときのパラメータ値を採用した。また、解析モデルの地層構成は、地下水流動解析結果から地下水の流動経路となる捨石層と風化花崗岩層の2層構造とした。

以下に設定したパラメータについて示す。

表4.3.3-1 捨石層及び風化花崗岩層のパラメータ設定値

パラメータ項目		単位	設定値	備考
捨石層	真密度	g/cm <sup>3</sup>	2.64	実験値
	空隙率	-	0.472	実験値
	透水係数	cm/s	6.75×10 <sup>-4</sup>	実測値の幾何平均
	縦方向の分散長	m	1	文献値（原子力安全委員会）
風化花崗岩層	真密度	g/cm <sup>3</sup>	2.70	実験値
	空隙率	-	0.451	実験値
	透水係数	cm/s	7.36×10 <sup>-5</sup>	実測値の幾何平均
	縦方向の分散長	m	1	文献値（原子力安全委員会）

#### 4.3.4 動水勾配

動水勾配は、平成13年度に測定した標高水位のデータから各ブロックの露天跡地及び帯水層ごとに求めた各ブロックの動水勾配を地層別に示す（表4.3.4-1）。

表4.3.4-1 各ブロックの動水勾配

	NWブロック	NEブロック	Eブロック	SEブロック	Sブロック	SWブロック
捨石層 (露天跡地)	0.00484	0.00559	0.00642	0.00642	0.00456	0.00456
風化花崗岩層 (帯水層1)	0.00484	0.00559	0.10283	0.00642	0.00456	0.02207
風化花崗岩層 (帯水層2)	0.11249	0.17394	0.07082	0.00824	0.09765	0.10536
風化花崗岩層 (帯水層3)	-	-	0.19422	0.12556	-	-

#### 4.3.5 地下水実流速

ダルシー則により、表 4.3.3-1 の各地層の空隙率 ( $\epsilon$ )、透水係数 ( $k$ )、及び表 4.3.4-1 の動水勾配 ( $i$ ) から、地下水実流速 ( $V_{pore}$ ) は下記式により設定した。

$$V_{pore} = k \times i / \epsilon$$

$$V_{pore} (\text{m/day}) = k (\text{m/s}) \times 1/100 \times 24 (\text{h/d}) \times 3,600 (\text{sec/d}) \times i (-) / \epsilon (-)$$

表 4.3.5-1 に示すように、捨石層は  $1 \times 10^{-3} \text{m/day}$  オーダー、帶水層は  $1 \times 10^{-2} \text{m/day} \sim 1 \times 10^{-4} \text{m/day}$  オーダーである。一方、実測による地下水流速は、捨石層で  $8.64 \times 10^{-3} \text{m/day}$ 、風化花崗岩上部で  $8.64 \times 10^{-4} \text{m/day} \sim 8.64 \times 10^{-3} \text{m/day}$  の数値を取得している。今回設定した数値は、実測値と比較して、捨石層は同オーダーであるが、帶水層は上記で計算した方が約 1 衍高くなっている。

表 4.3.5-1 各ブロックの地下水実流速

単位 : m/day

	Nフ'ロック	NEフ'ロック	Eフ'ロック	SEフ'ロック	Sフ'ロック	SWフ'ロック
捨石層 (露天跡地)	$5.98 \times 10^{-3}$	$6.91 \times 10^{-3}$	$7.93 \times 10^{-3}$	$7.93 \times 10^{-3}$	$5.63 \times 10^{-3}$	$5.63 \times 10^{-3}$
風化花崗岩層 (露天跡地)	$6.82 \times 10^{-4}$	$7.88 \times 10^{-4}$	$9.05 \times 10^{-4}$	$9.05 \times 10^{-4}$	$6.43 \times 10^{-4}$	$6.43 \times 10^{-4}$
風化花崗岩層 (帶水層 1)	$6.82 \times 10^{-4}$	$7.88 \times 10^{-4}$	$1.45 \times 10^{-2}$	$9.05 \times 10^{-4}$	$6.43 \times 10^{-4}$	$3.11 \times 10^{-3}$
風化花崗岩層 (帶水層 2)	$1.59 \times 10^{-2}$	$2.45 \times 10^{-2}$	$9.99 \times 10^{-3}$	$1.16 \times 10^{-3}$	$1.38 \times 10^{-2}$	$1.49 \times 10^{-2}$
風化花崗岩層 (帶水層 3)	-	-	$2.74 \times 10^{-2}$	$1.77 \times 10^{-2}$	-	-

#### 4.3.6 地下水流入量

各ブロックの地下水流量は、表 4.2.1-1 解析モデルの形状の境界面積 ( $\text{m}^2$ ) と表 4.3.5-1 の各ブロックの地下水流速 ( $\text{m/day}$ ) を用いて下記式により計算した。

$$\text{地下水流量} (\text{m}^3) = \text{境界面積} (\text{m}^2) \times \text{地下水流速} (\text{m/day}) \times 365 (\text{day})$$

※ なお、境界面積については、図 4.2.1-2 を参照。

表 4.3.6-1 にブロック別の地下水流入量を示す。地下水流量は、ブロック境界面積と地下水流速に左右されるため、N ブロックが他のブロックに比べて地下水流量が多くなっている。

表 4.3.6-1 各ブロックの地下水流入量

単位 :  $\text{m}^3/\text{year}$

	Nフ'ロック	NEフ'ロック	Eフ'ロック	SEフ'ロック	Sフ'ロック	SWフ'ロック
風化花崗岩層 (帶水層 1)	$1.53 \times 10^2$	$2.85 \times 10^1$	$7.74 \times 10^2$	$5.45 \times 10^1$	$9.18 \times 10^1$	$4.17 \times 10^2$

#### 4.3.7 分配係数

捨石層のU及びRa分配係数は、カラム試験から求めた分配係数を用いた。露天跡地周辺の地下水は、地下水流动解析によって、透水性の低い花崗岩層上面に沿い流动する傾向があることが分かっていることから、花崗岩上面の風化花崗岩の分配係数を採用した。また、U及びRa以外の放射性核種の分配係数は、サイクル機構(2002)の安全評価で用いた核種依存パラメータの分配係数を用いた。表4.3.7-1に捨石層及び風化花崗岩層の分配係数を示す。

表4.3.7-1 捨石層及び風化花崗岩層の分配係数

元素	捨石層 (露天跡地)	風化花崗岩層 (露天跡地周辺地域)
U	$6.80 \times 10^2$	$6.60 \times 10^1$
Pa	$5.00 \times 10^2$	$5.00 \times 10^2$
Th	$8.00 \times 10^2$	$8.00 \times 10^2$
Ac	$4.50 \times 10^2$	$4.50 \times 10^2$
Ra	$6.69 \times 10^3$	$1.06 \times 10^3$
Pb	$2.70 \times 10^2$	$2.70 \times 10^2$
Po	$1.00 \times 10^2$	$1.00 \times 10^2$

#### 4.4 計算方法

人形峠環境技術センターでは、鉱山跡の措置に関する基本計画を策定しており、鉱さい及び捨石の安全性の評価には、類似の浅地中処分を対象とした安全評価手法を参考としている。この安全性評価の地下水移行解析における感度解析では、原子力安全委員会のクリアランスレベルの検討等で適応されたモデルを扱うことのできる計算コードとして、東海事業所処分研究部が浅地中処分の対象となる廃棄物に対して開発した解析コード「NESTOR (Natural and Engineered System Transport Of Radionuclides)」を用いた(サイクル機構、2002)。今回の解析対象は、捨石たい積場や鉱さいたい積場同様に、浅地中処分であることから、今回の核種移行解析には NESTOR を使用する。

NESTOR は、人工バリアシステム(EBS)と天然バリアシステム(NBS)の2つの物理的領域からなり、放射性核種の移行は移流、分散/拡散を考慮して、これらの領域に運ばれていいく。これらのバリアシステムの特性は、時間に依存する。また、天然バリアシステムは、マトリクス拡散モデルを含む、単一で一次元のチャンネルとしてモデル化されている。

NESTOR では、処分施設内から周辺地層への移行について、下記の2種類のモデルで解析が可能である(図4.4-1 参照)。なお、露天跡地でみれば、「処分施設内は捨石層」、「周辺地層は風化花崗岩層」にあたる。

##### 1) 放出係数モデル

堆積場に存在するインベントリに放出係数と堆積場の体積を1とした場合に、年間に堆積場へ浸透する水量の割合を乗じて計算される。ここで放出係数は、単位時間当たりの堆積場に含まれる核種が、単位時間当たりの浸透水によって堆積場外に放出する割合を示すパラメータ( $(\text{Bq}/\text{y})/(\text{Bq}/\text{y})$ )で、堆積場の分配係数と真密度、空

隙率によって与えられる。

## 2) 吸着平衡モデル

堆積場内に浸出した核種が吸着により瞬時に分配平衡に達し、それによって形成される液相中の核種濃度に基づくモデルである。堆積場からの核種放出率は、吸着、沈殿、溶解などの分配平衡により計算された液相中の核種濃度を基に、移流、分散/拡散を考慮して与えられる。



図 4.4-1 NESTOR 解析における 2 種類のモデル図 (サイクル機構、2002)

今年度実施する核種移行解析では、原子力安全委員会の検討で適用されたモデルを基本として、概略的な露天跡地の捨石層及び風化花崗岩層の核種移行を把握するために「放出係数モデル」を選択して、解析を行うこととする。

#### 4.5 核種移行解析結果

ブロック別の核種移行解析結果を図 4.5-1~4.5-14 に示し、各モニタリング孔での核種濃度の最大値及びその時間と核種について表 4.5-1 示す。

核種移行解析の結果、核種濃度の最大値は S ブロック (No.10 孔) の  $8.57 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$  であった。濃度が最大値となる核種は、全ブロックが U-238 もしくは Po-210 であった。

U-238 の最大核種移行濃度は、 $10^3 \text{Bq/m}^3$  オーダーであった。この値は人形峠鉱山保安規程の坑水・廃水の排出基準の U-238 濃度： $2 \times 10^4 \text{Bq/m}^3$  と比較して約 1 衍低く、岡山県協定の河川水に係る U-238 管理目標値： $1.1 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$  と比較して同オーダーであった。

ブロック別の核種濃度の最大となる経過時間について、最も早いのは N E ブロック (No. 3 孔) の  $3.16 \times 10^4$  年であった。これは、N E ブロックの境界面積が一番小さいこと、地下水流入量が少ないこと、動水勾配が大きいことが原因と考えられる。逆に最も遅いのは S E ブロック (No.12 孔) の  $1.58 \times 10^5$  年で、これは帶水層中の地下水流速が最も遅いために核種濃度が最大となる時期が最も遅いと考えられる。全般的に核種濃度が最大値を示す時期は、措置後から約 1 万年～15 万年後であった。

表 4.5-1 各モニタリング孔の核種濃度の最大値

	モニタリング孔	核種	最大値の時期 (y)	最大値 ( $\text{Bq/m}^3$ )
N ブロック	No.16	U-238	$5.01 \times 10^4$	$4.80 \times 10^3$
	No.2	U-238	$5.01 \times 10^4$	$4.77 \times 10^3$
N E ブロック	No.9	Po-210	$1.26 \times 10^5$	$5.95 \times 10^3$
	No.3	U-238	$3.16 \times 10^4$	$5.06 \times 10^3$
E ブロック	No.4,13	Po-210	$5.01 \times 10^4$	$1.16 \times 10^3$
	No.20	Po-210	$7.08 \times 10^4$	$9.54 \times 10^2$
	No.21,22	Po-210	$8.91 \times 10^4$	$8.08 \times 10^2$
S E ブロック	No.12	Po-210	$1.58 \times 10^5$	$4.38 \times 10^3$
	No.14,15	U-238	$4.47 \times 10^4$	$3.80 \times 10^3$
	No.23	U-238	$4.47 \times 10^4$	$3.84 \times 10^3$
S ブロック	No.10	Po-210	$8.91 \times 10^4$	$8.57 \times 10^3$
	No.5	U-238	$3.98 \times 10^4$	$5.27 \times 10^3$
S W ブロック	No.17,18	Po-210	$1.00 \times 10^5$	$2.03 \times 10^3$
	No.7	Po-210	$1.26 \times 10^5$	$1.64 \times 10^3$

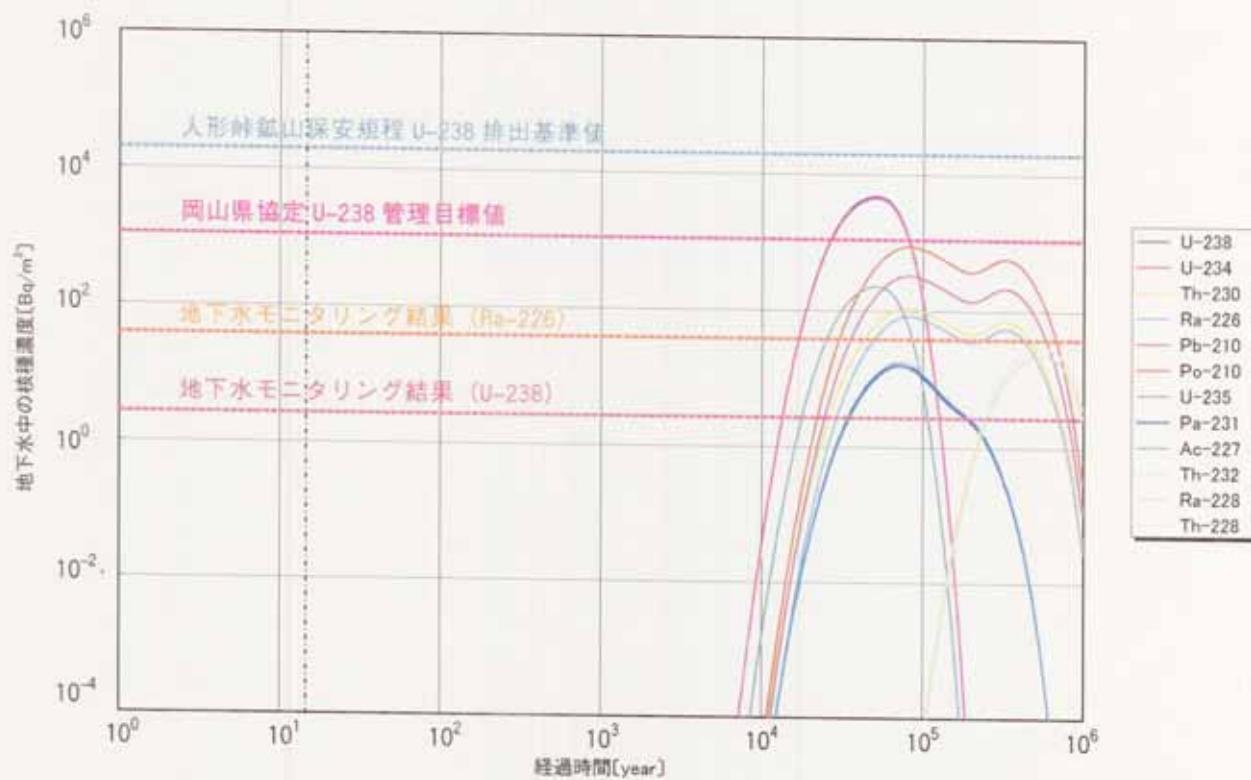


図 4.5-1 N ブロックへの核種移行解析結果 (No. 16 孔)

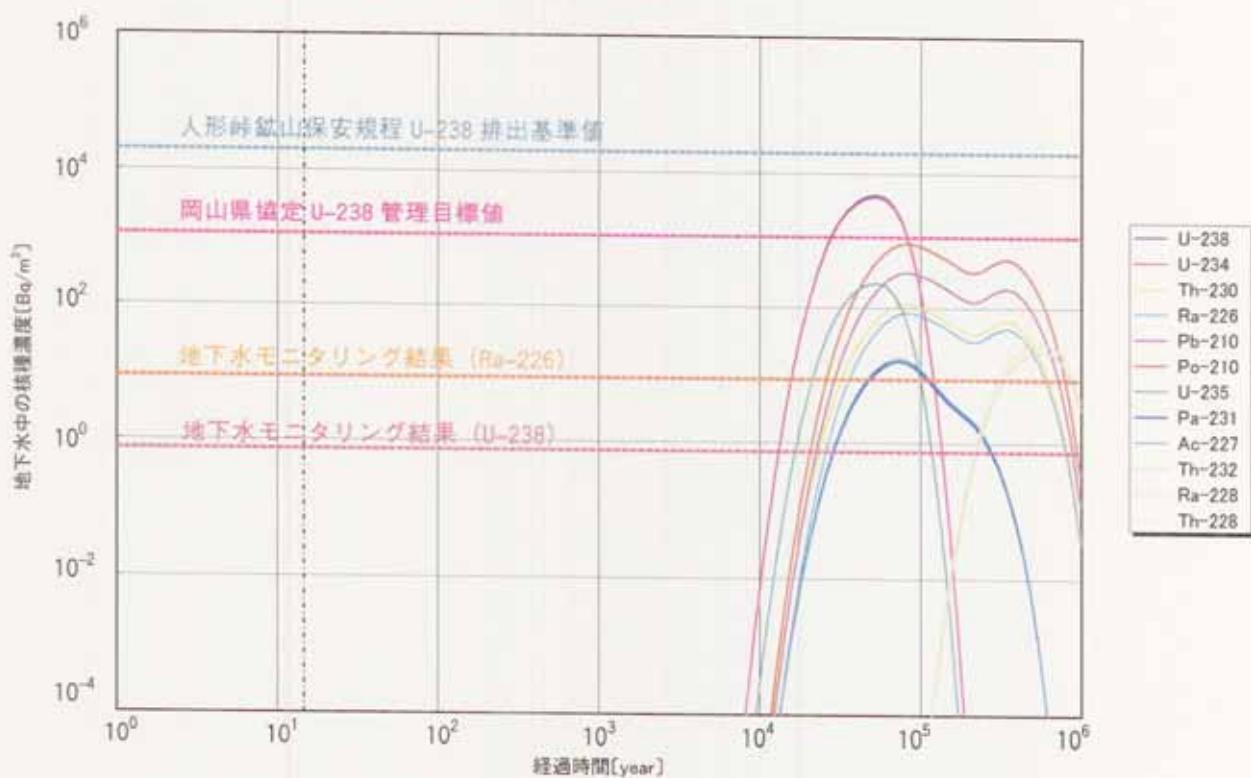


図 4.5-2 N ブロックへの核種移行解析結果 (No. 2 孔)

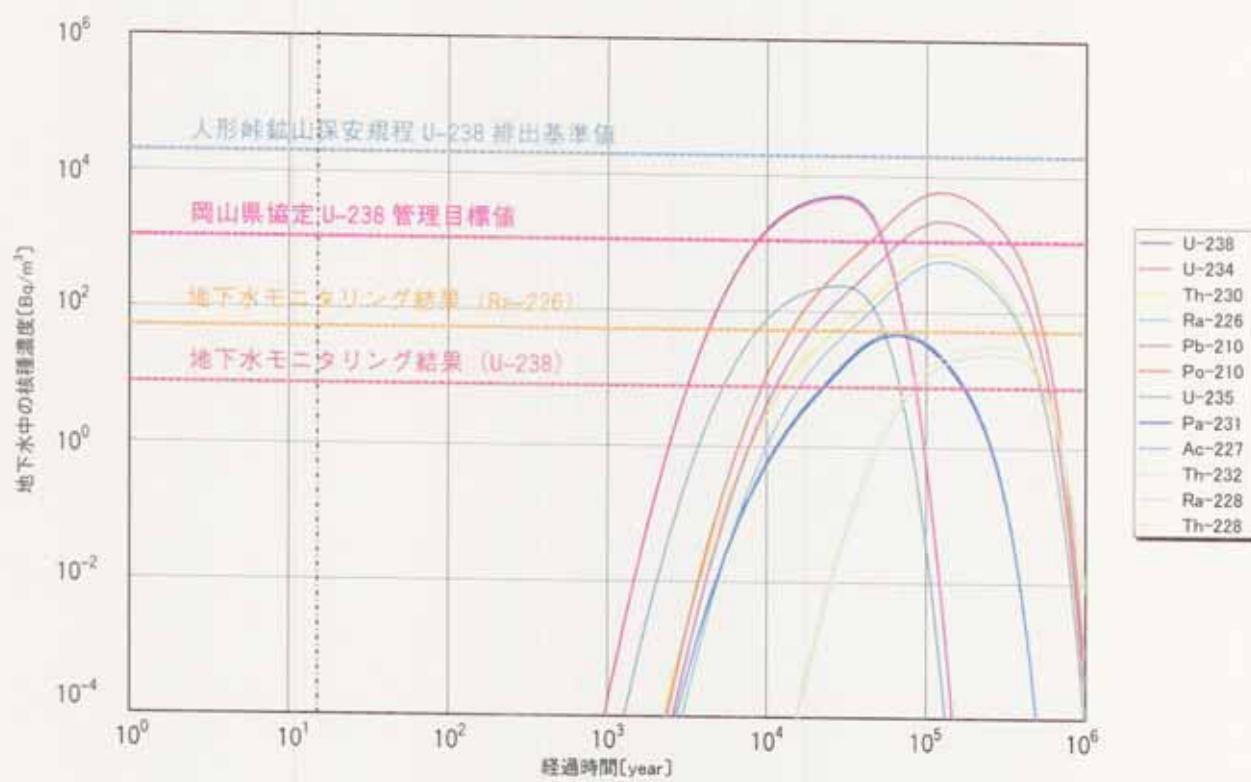


図 4.5-3 NE ブロックへの核種移行解析結果 (No. 9 孔)

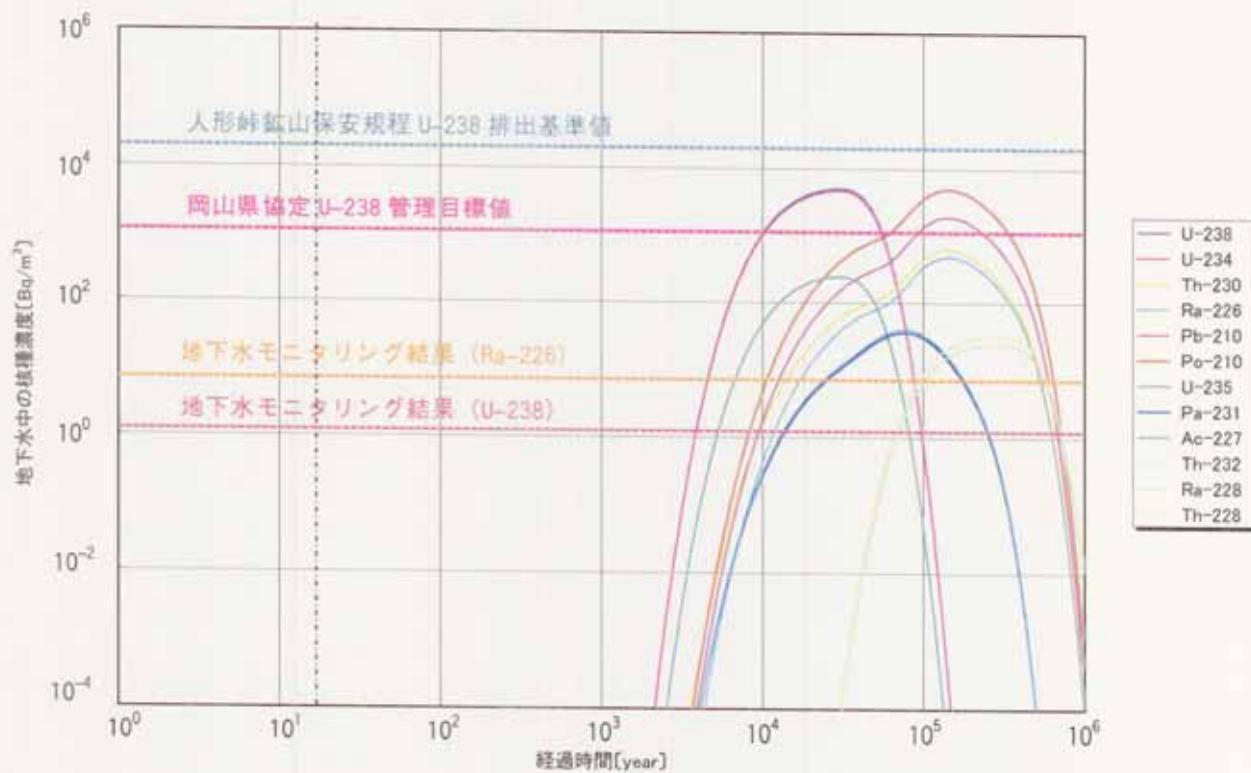


図 4.5-4 NE ブロックへの核種移行解析結果 (No. 3 孔)

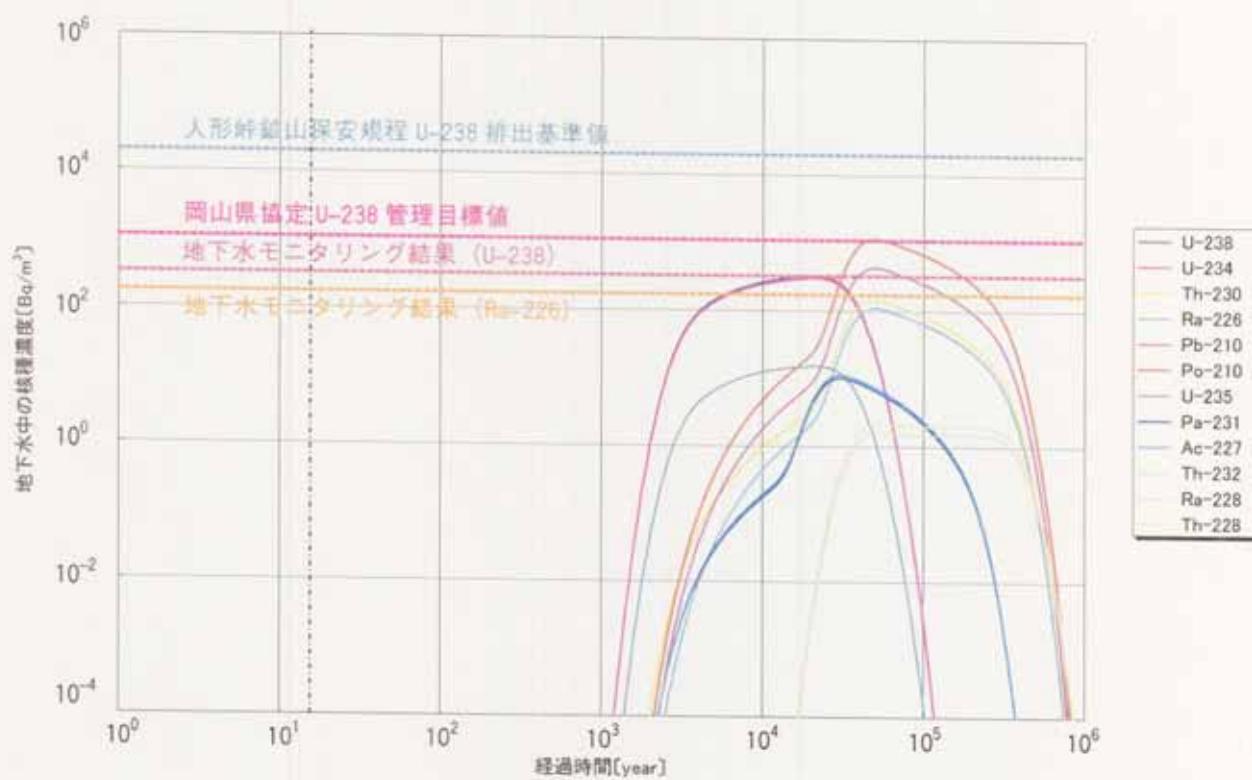


図 4.5-5 E ブロックへの核種移行解析結果 (No. 4, 13 孔)

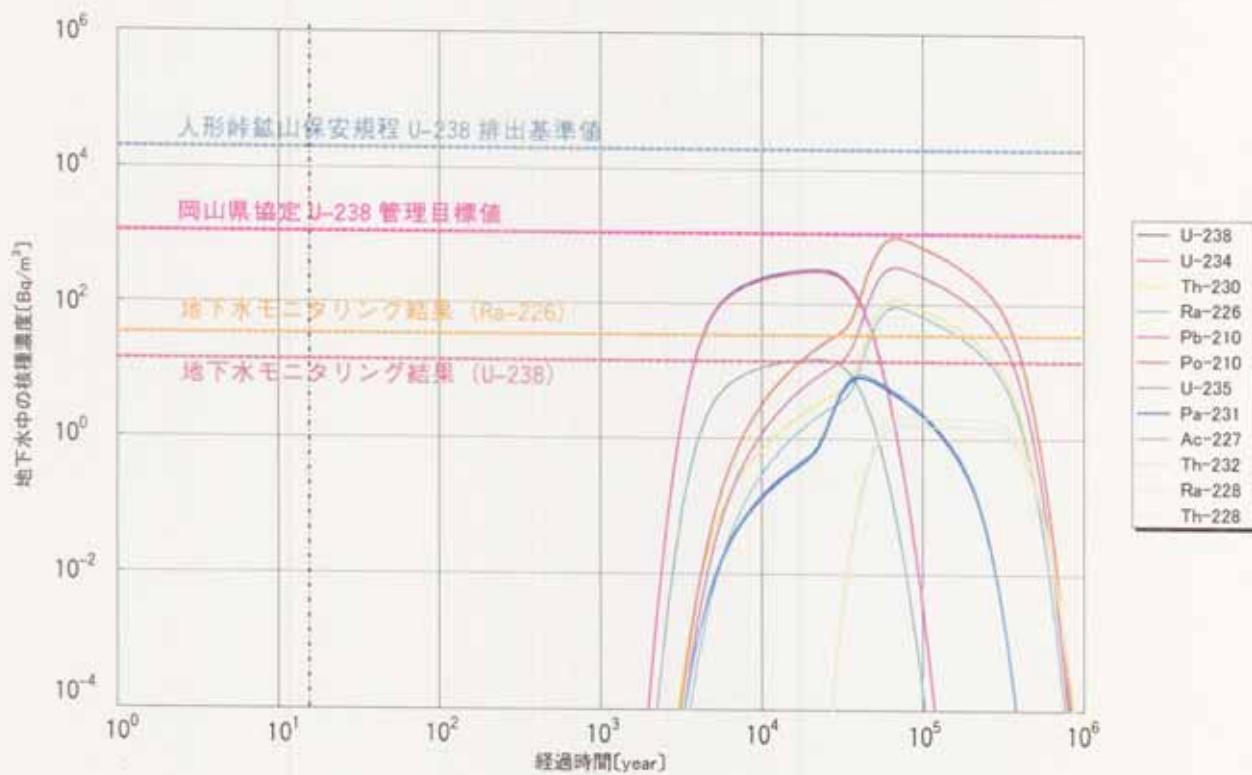


図 4.5-6 E ブロックへの核種移行解析結果 (No. 20 孔)

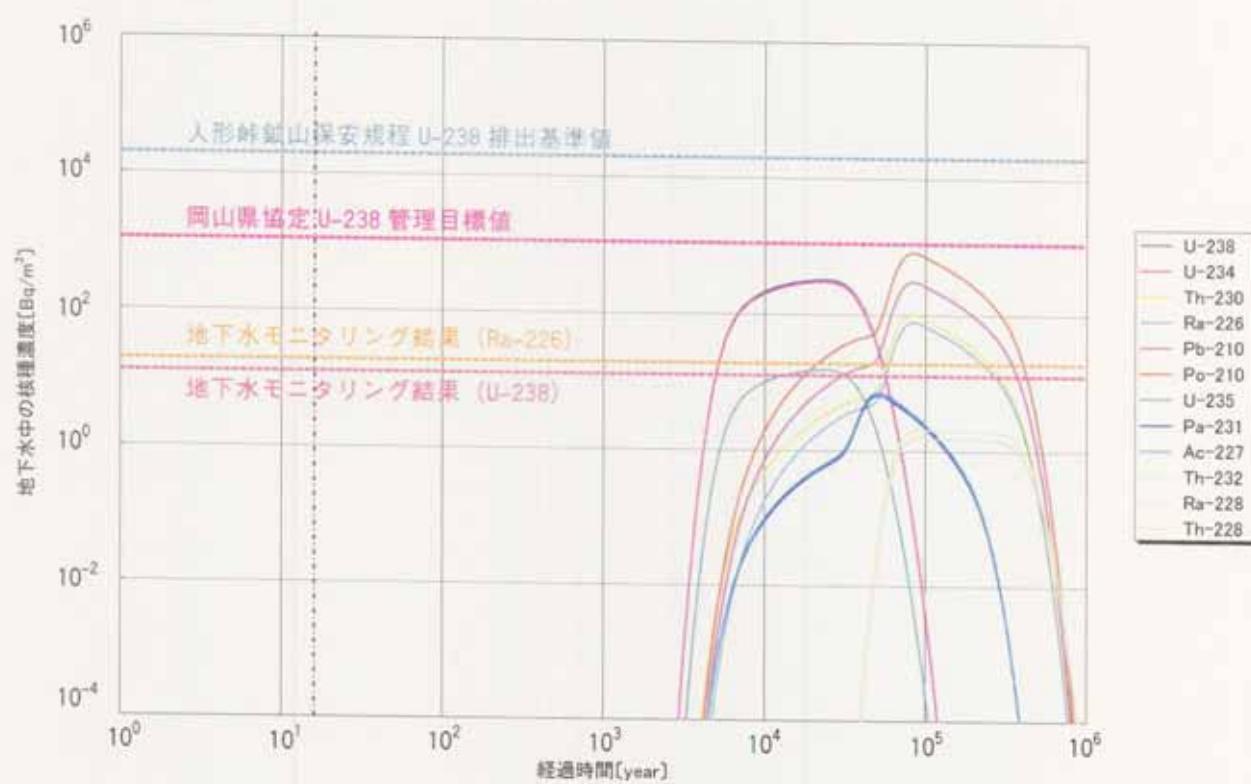


図 4.5-7 E ブロックへの核種移行解析結果 (No. 21, 22 孔)

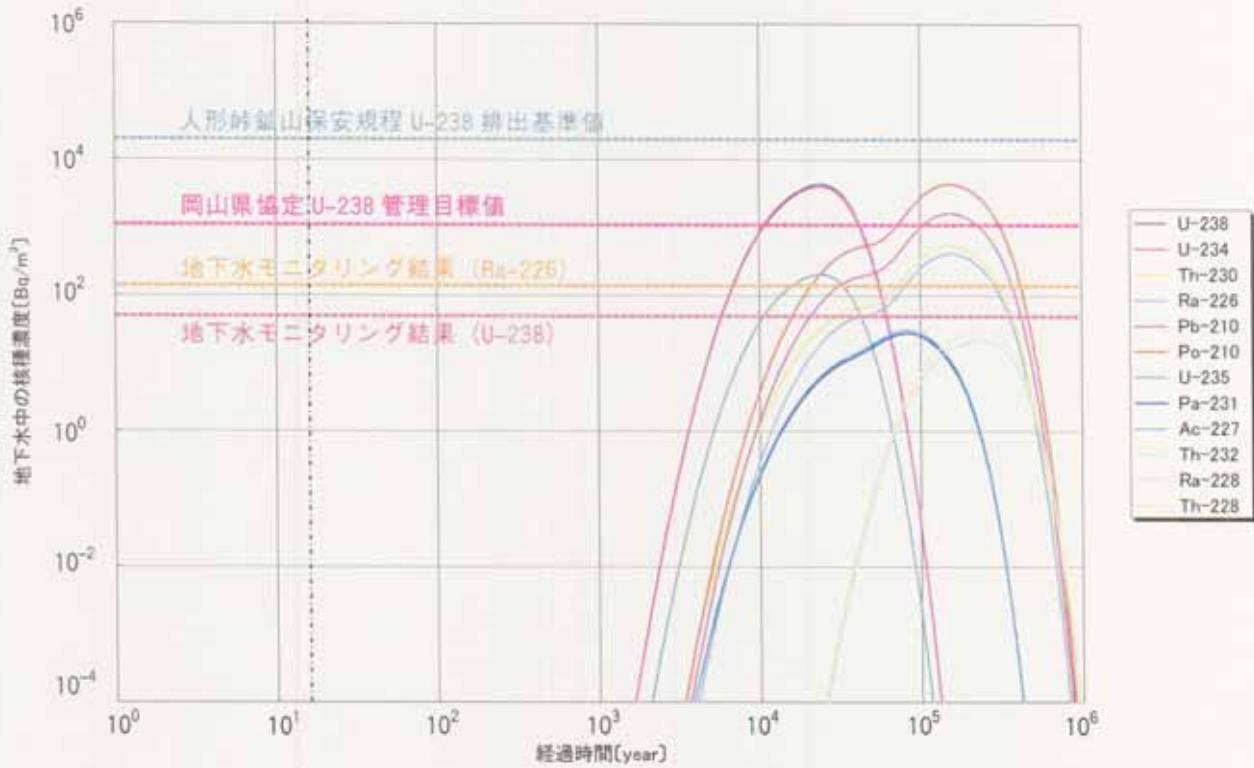


図 4.5-8 SE ブロックへの核種移行解析結果 (No. 12 孔)

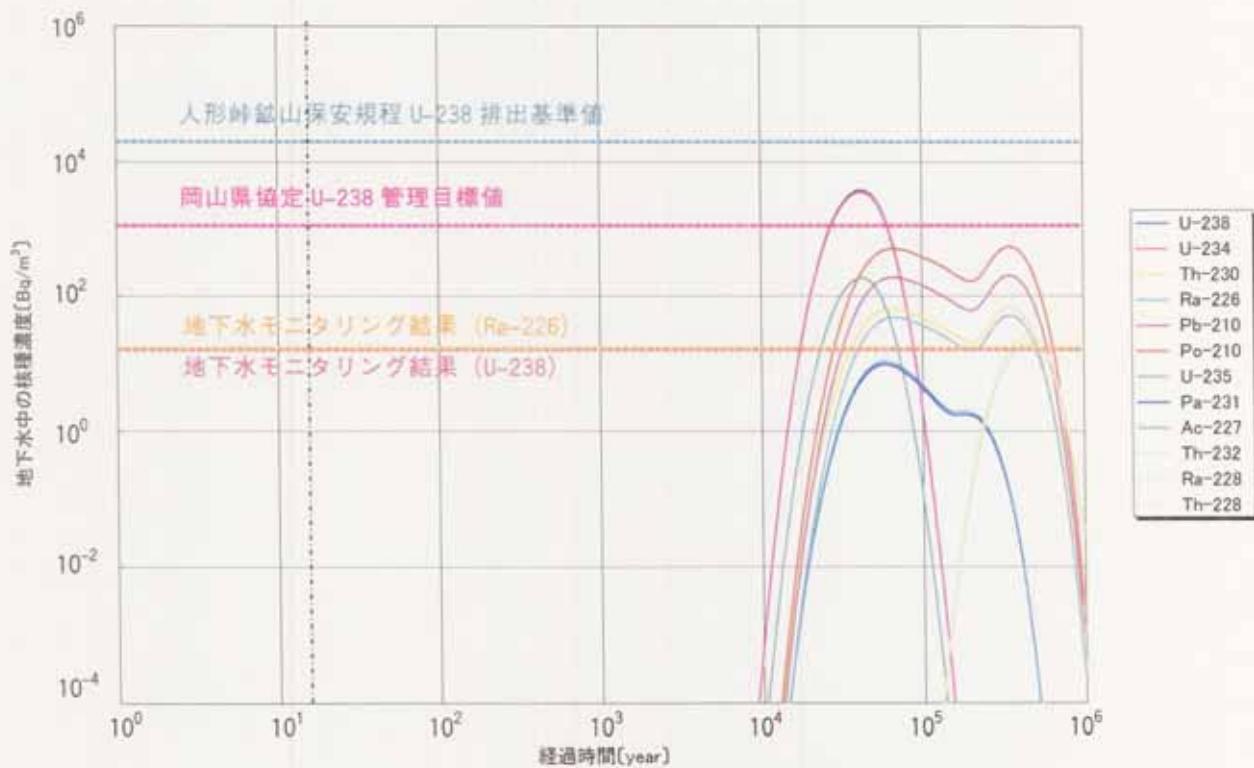


図 4.5-9 SE ブロックへの核種移行解析結果 (No. 14, 15 孔)

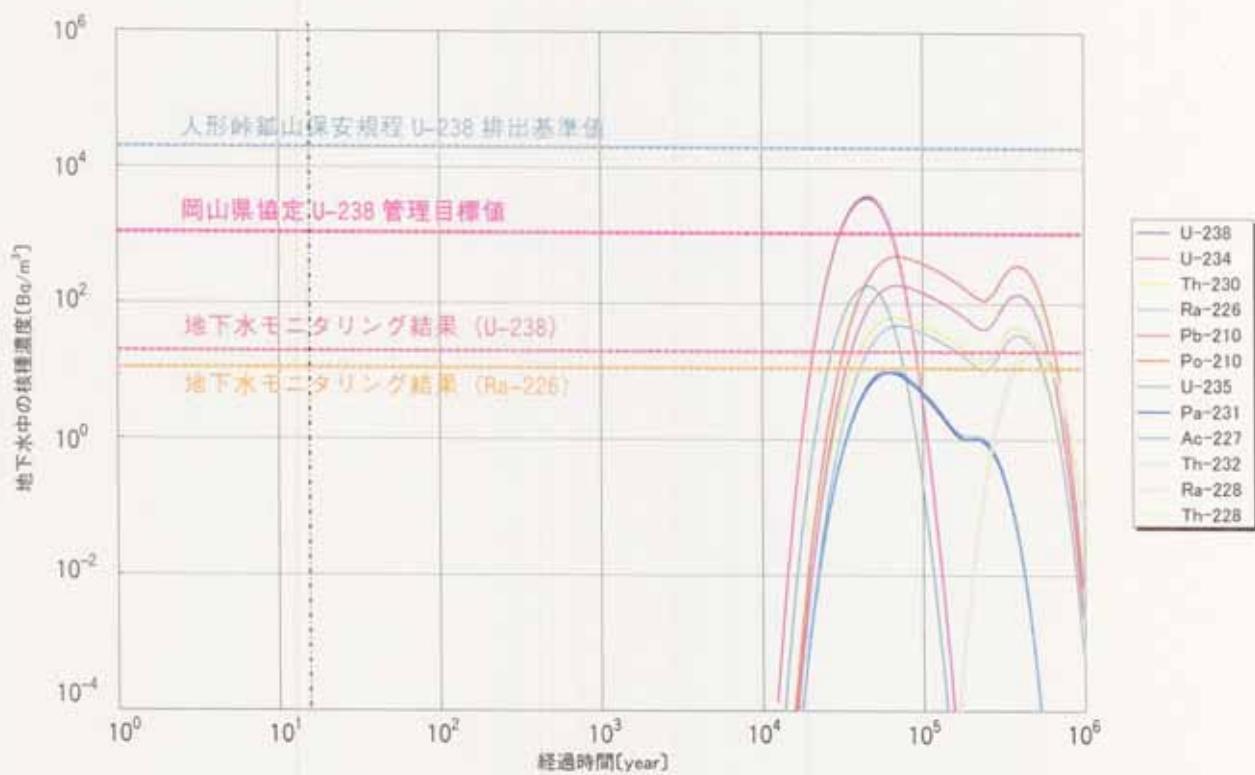


図 4.5-10 S E ブロックへの核種移行解析結果 (No. 23 孔)

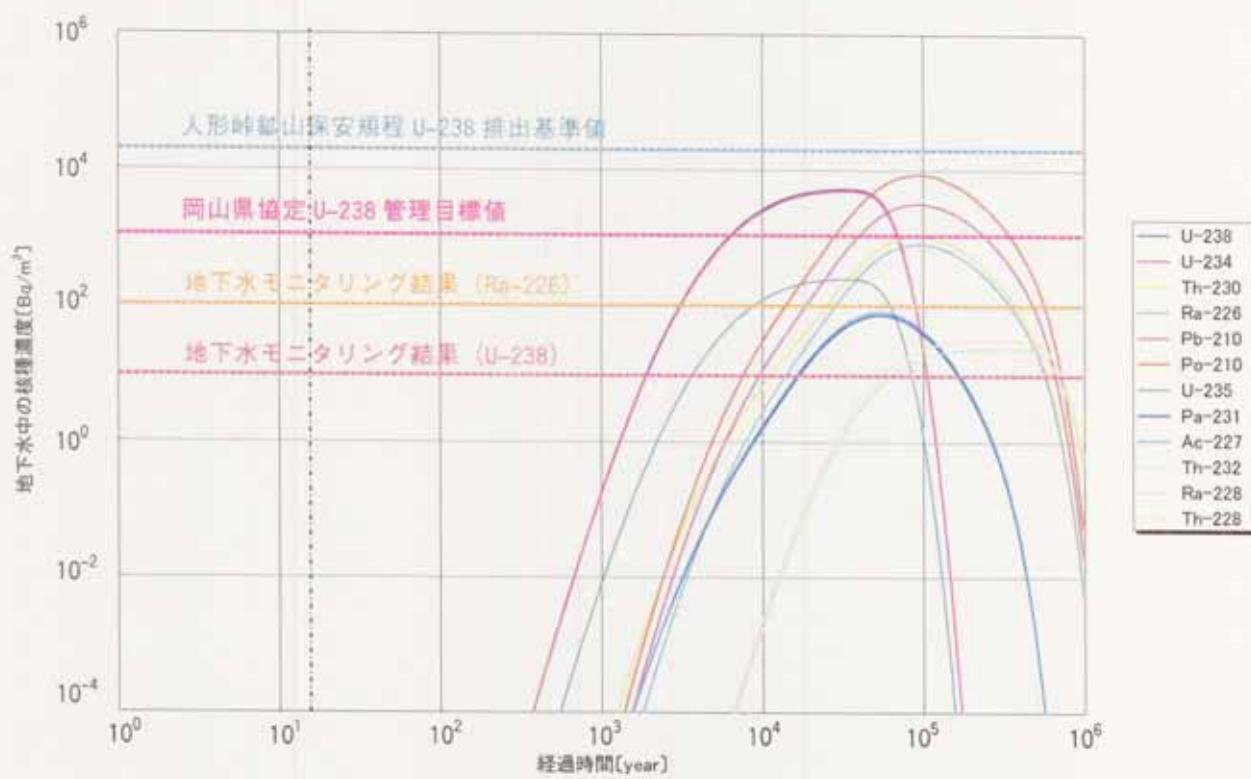


図 4.5-11 S ブロックへの核種移行解析結果 (No. 10 孔)

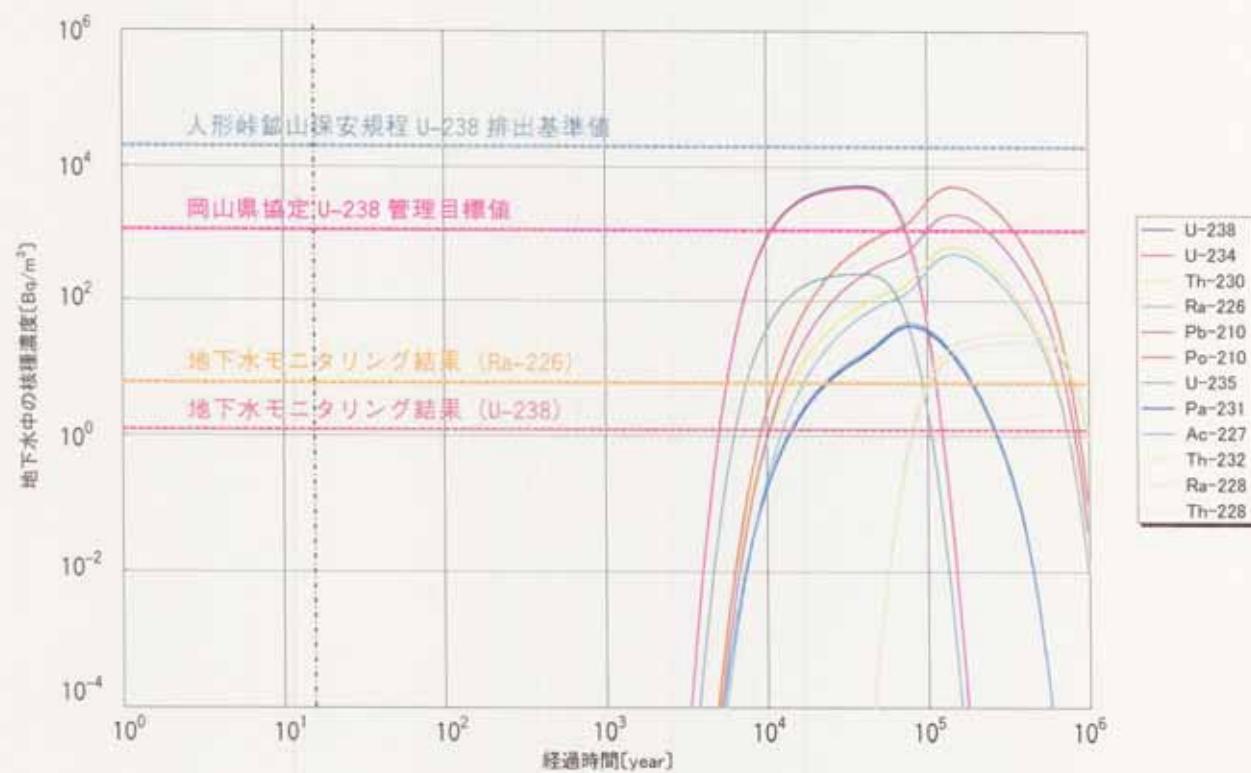


図 4.5-12 S ブロックへの核種移行解析結果 (No. 5 孔)

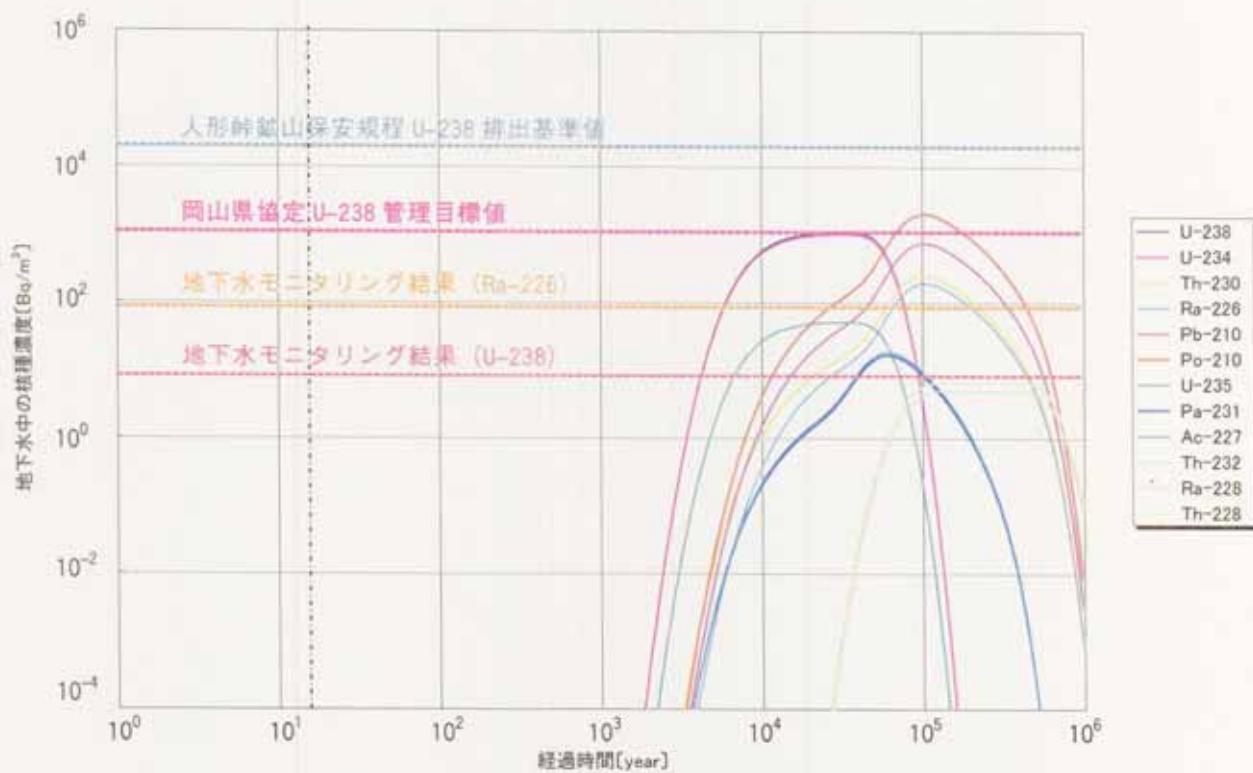


図 4.5-13 SW ブロックへの核種移行解析結果 (No. 17, 18 孔)

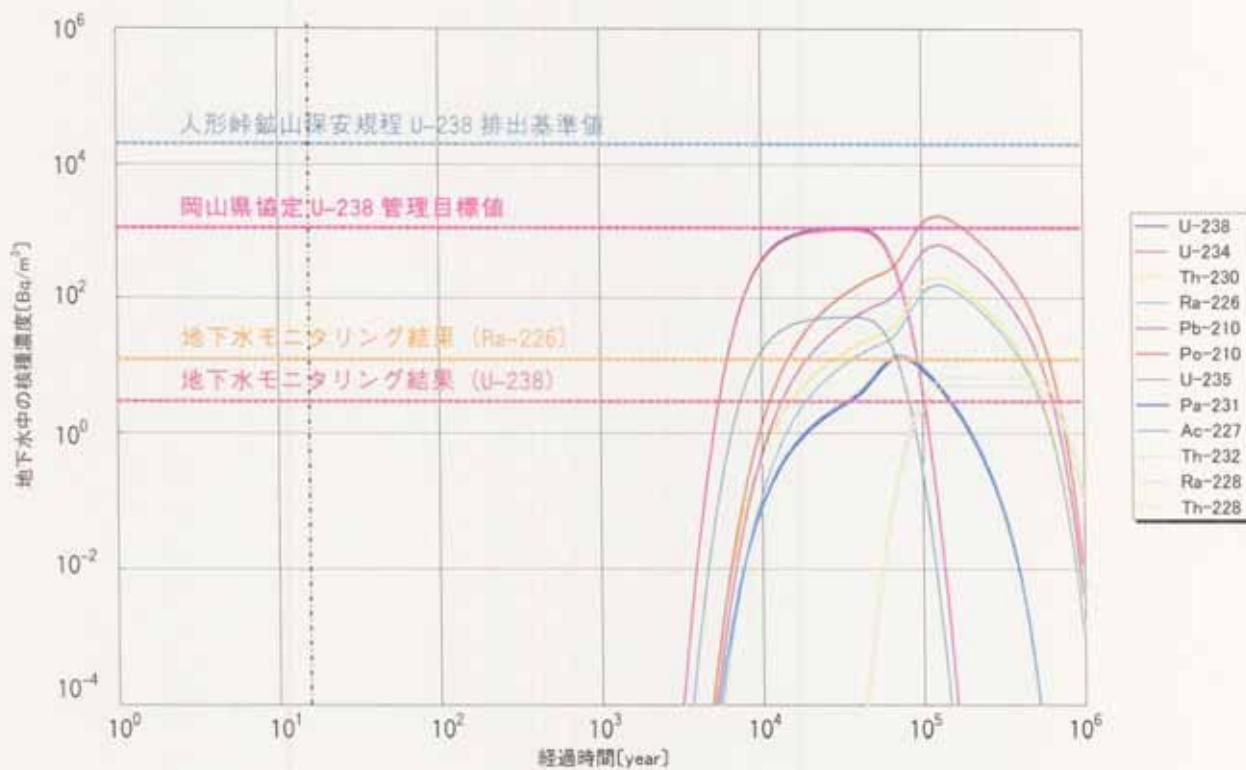


図 4.5-14 SW ブロックへの核種移行解析結果 (No. 7 孔)

#### 4.6 解析結果と地下水モニタリング結果との比較

露天跡地は、捨石を埋設して約 15 年経過している。このことから、NESTOR による措置後 15 年経過時の解析結果と平成 13 年 8 月実施分の地下水モニタリング結果（核燃料サイクル開発機構、2002）を比較した（表 4.6-1）。図 4.5-1～4.5-14 に地下水モニタリング結果（U-238 及び Ra-226 濃度）及び措置後 15 年経過時（黒点線）を示す。

図より各評価点ともに 15 年経過後の U-238、Ra-226 の解析結果と地下水モニタリング結果を比較すると、前者の方が U-238 濃度は約 7 衍低く、Ra-226 濃度は約 6 衍低くなつた。これは、露天跡地に捨石を措置する以前からその地域に存在する地下水中には U 及び Ra 等の天然放射性核種が含まれており、これら地下水の濃度が解析のなかで考慮できていないためと考えられるが、逆にこれらをバックグラウンドと考えると捨石からの影響は将来にわたりその範囲を大きく超えるものではないと言える。

今後は、水収支を加えて詳細化するとともに解析の方法を検討し、露天跡地周辺からの影響も評価に加えていくことが必要である。

表 4.6-1 解析結果（U-238、Ra-226）と地下水モニタリング結果の比較

ブロック	評価点	U-238			Ra-226		
		15年経過後の 解析結果 ※ (Bq/m <sup>3</sup> )	解析結果 最大値 (Bq/m <sup>3</sup> )	モニタリング結果 最大値 (Bq/m <sup>3</sup> )	15年経過後の 解析結果 ※ (Bq/m <sup>3</sup> )	解析結果 最大値 (Bq/m <sup>3</sup> )	モニタリング結果 最大値 (Bq/m <sup>3</sup> )
Nプロック	No.16	<1.00×10 <sup>-4</sup>	4.80×10 <sup>3</sup>	2.73×10 <sup>0</sup>	<1.00×10 <sup>-4</sup>	8.36×10 <sup>1</sup>	3.83×10 <sup>1</sup>
	No.2	<1.00×10 <sup>-4</sup>	4.77×10 <sup>3</sup>	7.44×10 <sup>-1</sup>	<1.00×10 <sup>-4</sup>	8.33×10 <sup>1</sup>	8.60×10 <sup>0</sup>
NEプロック	No.9	<1.00×10 <sup>-4</sup>	5.08×10 <sup>3</sup>	7.69×10 <sup>0</sup>	<1.00×10 <sup>-4</sup>	5.62×10 <sup>2</sup>	5.26×10 <sup>1</sup>
	No.3	<1.00×10 <sup>-4</sup>	5.06×10 <sup>3</sup>	1.24×10 <sup>0</sup>	<1.00×10 <sup>-4</sup>	4.71×10 <sup>2</sup>	7.12×10 <sup>0</sup>
Eプロック	No.4,13	<1.00×10 <sup>-4</sup>	3.21×10 <sup>2</sup>	3.25×10 <sup>2</sup>	<1.00×10 <sup>-4</sup>	1.10×10 <sup>2</sup>	1.72×10 <sup>2</sup>
	No.20	<1.00×10 <sup>-4</sup>	3.21×10 <sup>2</sup>	1.41×10 <sup>1</sup>	<1.00×10 <sup>-4</sup>	9.02×10 <sup>1</sup>	3.41×10 <sup>1</sup>
	No.21,22	<1.00×10 <sup>-4</sup>	3.20×10 <sup>2</sup>	1.26×10 <sup>1</sup>	<1.00×10 <sup>-4</sup>	7.64×10 <sup>1</sup>	1.89×10 <sup>1</sup>
SEプロック	No.12	<1.00×10 <sup>-4</sup>	4.32×10 <sup>3</sup>	4.95×10 <sup>1</sup>	<1.00×10 <sup>-4</sup>	4.14×10 <sup>2</sup>	1.40×10 <sup>2</sup>
	No.14,15	<1.00×10 <sup>-4</sup>	3.80×10 <sup>3</sup>	1.61×10 <sup>1</sup>	<1.00×10 <sup>-4</sup>	5.08×10 <sup>1</sup>	1.68×10 <sup>1</sup>
	No.23	<1.00×10 <sup>-4</sup>	3.84×10 <sup>3</sup>	1.98×10 <sup>1</sup>	<1.00×10 <sup>-4</sup>	4.75×10 <sup>1</sup>	1.13×10 <sup>1</sup>
Sプロック	No.10	<1.00×10 <sup>-4</sup>	5.27×10 <sup>3</sup>	9.55×10 <sup>0</sup>	<1.00×10 <sup>-4</sup>	8.10×10 <sup>2</sup>	1.02×10 <sup>2</sup>
	No.5	<1.00×10 <sup>-4</sup>	5.27×10 <sup>3</sup>	1.24×10 <sup>0</sup>	<1.00×10 <sup>-4</sup>	4.86×10 <sup>2</sup>	6.01×10 <sup>0</sup>
SWプロック	No.17,18	<1.00×10 <sup>-4</sup>	1.09×10 <sup>3</sup>	8.31×10 <sup>0</sup>	<1.00×10 <sup>-4</sup>	1.92×10 <sup>2</sup>	8.60×10 <sup>1</sup>
	No.7	<1.00×10 <sup>-4</sup>	1.09×10 <sup>3</sup>	2.98×10 <sup>0</sup>	<1.00×10 <sup>-4</sup>	1.55×10 <sup>2</sup>	1.24×10 <sup>1</sup>

※15年経過後のU-238及びRa-226の解析結果は、全て検出できない濃度のため、1.00×10<sup>-4</sup>Bq/m<sup>3</sup>以下とした。

## 5. まとめ

現在までに取得している露天跡地の地質データ、水理地質データ等の収集・整理を実施し、核種移行解析に用いるパラメータ値を設定した。また、このパラメータ値を基に核種移行解析コード NESTOR を用いて露天跡地及び周辺の核種移行解析を実施した。以下に解析結果を示す。

- 露天跡地及び周辺地域を 7 ブロックに区分し、核種移行解析を実施した結果、U-238 濃度は約 1 万年後に最大となり、その濃度は  $1 \times 10^3 \text{Bq}/\text{m}^3$  オーダーであった。この値は、人形峠鉱山保安規程の敷地境界における坑水・廃水の排出基準値の U-238 濃度： $2 \times 10^4 \text{Bq}/\text{m}^3$  より 1 衡低く、岡山県との環境協定の敷地境界における U-238 管理目標値： $1.1 \times 10^3 \text{Bq}/\text{m}^3$  と同オーダーであった。濃度が最大となる核種は、全ブロックで U-238 もしくは Po-210 で、最大値を示す時期は措置後から約 1 万年～15 万年経過時となる。
- 措置後 15 年経過時の解析結果と平成 13 年 8 月実施分の地下水モニタリング結果の U-238 濃度及び Ra-226 濃度を比較したところ、解析結果は両核種ともに検出できない値となった。

今回実施した NESTOR による解析結果は、地下水濃度との濃度差が認められたが、露天跡地周辺のバックグラウンド濃度が解析に反映されていないことが原因と考えられる。

## 6. 今後の課題

本年度の解析結果を踏まえて、今後の解析精度を高めるための調査・課題項目として、下記が考えられる。

- 露天跡地及び周辺地域の風化花崗岩について、強風化部と風化部の区分と分布確認を行い、解析へ反映させる。
- 降雨量の水収支（浸透水、蒸発散水及び地表水）を把握するとともに、浸透水量などの水収支を把握するため、露天跡地内に設置した気象観測システムの降雨量、蒸発散量等の気象データを活用するとともに、露天跡地地表水の流量、ポンプ小屋へ排出される露天跡地坑内の排水量等から、現地の水収支計算を行う。
- 露天跡地周辺からの影響について、核種移行解析のなかで考慮できるよう検討する。上記の課題を解決して、得られたデータを反映して、改良した水理地質モデルによるより精度の高い核種移行解析を目指す。

## 〔参考文献〕

- 核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次とりまとめ”，分冊3 地層処分システムの安全評価，JNC TN1400 99-023(1999)
- 松村敏博, 他：“夜次露天採掘場跡地及びその周辺のモニタリング”，JNC TN6400 99-006(1999)
- 竹内章, 他：“夜次露天採掘場跡地及びその周辺のモニタリング(II)”, JNC TN6400 2001-003(2001)
- 竹内章, 他：“夜次露天採掘場跡地周辺及び夜次鉱さいたい積場のモニタリング”，(2003)  
印刷中
- 核燃料サイクル開発機構：“人形峠環境技術センターにおける鉱山跡の措置に関する基本計画”，JNC TN6410 2002-001(2002)
- 原子力安全委員会：“主な原子炉施設におけるクリアランスレベルについて”，放射性廃棄物安全基準専門部会(1999)
- 原子力委員会 放射性安全専門部会：“低レベル放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準値について（第3次中間報告）”，平成12年6月(2000)
- 原子力委員会 バックエンド対策専門部会：“ウラン廃棄物処理処分の基本的考え方について（案）”，資料20(2000)
- 原子力安全委員会 放射性廃棄物安全基準専門部会：“核燃料使用施設 RI 法対象施設等におけるクリアランスレベルについて（検討状況-その1）”，第32回放射性廃棄物安全基準専門部会 平成12年3月，資料第32-2(2000)
- IAEA：“Generic Models and Parameters for Assessing the Environmental Transfer of Radionuclides from Routine Release”，Safety Series, No.57(1982)
- IAEA：“The Application of the Principles for Limiting Releases of Radioactive Effluents in the Case of the Mining and Milling of Radioactive Ores”，Safety Series, No.90(1989)
- IAEA：“Current Practices and Options for Confinement of Uranium Mill Tailings”，Technical Reports Series, No.209(1981)
- IAEA：“Current Practices for the Management and Confinement of Uranium Mill Tailings”，Technical Reports Series, No.335(1992)
- IAEA：“Decommissioning of Facilities for Mining and Milling of Radioactive Ores and Closeout of Residues”，Technical Reports Series, No.362(1994)