

JNC TN6440 2004-003

地下水中の核種移行解析に用いる
データのまとめ

2004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

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2004

2004年3月

地下水中の核種移行解析に用いるデータのまとめ

古賀 修¹⁾、長柄 収一¹⁾、松村 敏博¹⁾、竹内 章¹⁾、
山本 正博²⁾、武田伸二¹⁾、佐藤 和彦¹⁾、時澤 孝之¹⁾

要 旨

夜次露天採掘場跡地周辺（以下、「露天跡地」とする）及び夜次鉱さいたい積場周辺（以下、「鉱さいたい積場」とする）の精度の高い地下水流动解析及び核種移行解析を行うことを目的に、既往解析における課題を抽出するとともに、以下に示す対応方法の検討及び解析用物性値の整理を行った。

- ・ 放射性核種の連鎖崩壊を扱える3次元の地下水流动・物質移行解析コードについて調査し選定した。
- ・ 地下水流動・物質移行解析の対象となる解析領域の範囲を検討し、広域領域、露天跡地及び鉱さいたい積場、分水界で囲まれる範囲について解析モデル領域を選定した。
- ・ 花崗岩の透水係数について、変質帯及び破碎帯の影響を受けて透水性が高いと想定される値を除いて再評価した。風化花崗岩は岩相から強風化花崗岩と弱風化花崗岩に区分にした。前者の透水係数の幾何平均は 10^{-6} m/sオーダーで、後者は 10^{-8} m/sオーダーとなり、両者には2オーダーの差がある。
- ・ その他、解析用物性値、地下水位、降水量、核種濃度等について今年度までに得られたデータを整理しデータセットを作成した。

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

2) 人形峠原子力産業株式会社

March, 2004

Summary of the data which is used for radionuclide transport analysis in the groundwater

Osamu Koga¹⁾, Shuichi Nagara¹⁾, Toshihiro Matsumura¹⁾, Akira Takeuchi¹⁾, Masahiro Yamamoto²⁾, Shinji Takeda¹⁾, Kazuhiko Sato¹⁾, Takayuki Tokizawa¹⁾

Abstract

To analyze high precision in groundwater flow and radionuclide transport around Yotsugi open-pit mining place site and around Yotsugi mill tailing yard, besides the topic in past analysis is extracted, following it did examination of the corresponding method and arrangement of physical properties value.

- It investigated concerning the 3-dimensional flow and transport analysis code which can handle the chain-radionuclide selected.
- The range of the analytical area examined that become the object of groundwater flow and transport analysis, the wide area, Yotsugi open-pit mining place site and Yotsugi mill tailing yard selected the analytical model area, concerning the range which is surrounded with the divide.
- Receiving the influence of the alteration zone and the crush zone concerning the coefficient of permeability of the granite, it re-appraised excluding the value which is supposed that water permeability is high. The weathered granite from the lithofacies divided in the high weathered granite and the low weathered granite. As for the geometrical mean of coefficient of permeability of the former 10^{-6} m/s order, the latter 10^{-8} m/s order, there is a difference of 2 orders in both.
- In addition, the data which is obtained to this year concerning physical properties value for analysis, groundwater level, precipitation and radionuclide density etc. rearranged and data set drew up.

1) Environment planning section, Ningyo-toge Environmental Engineering Center,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
2) Ningyo-toge Nuclear Energy Industry, Inc.;

目 次

1. はじめに	1
2. これまでの調査・研究成果	2
2.1 露天跡地および周辺	2
2.2 鉱さいたい積場および周辺	6
2.3 これまでの課題	8
3. 課題に対する検討	10
4. 解析コード選定	12
5. 解析データの整理	16
5.1 解析モデル	16
5.2 解析物性値	22
5.2.1 物性値等の取得箇所	22
5.2.2 地下水流動解析物性値	27
5.2.3 物質移行解析物性値	42
6. 今後の課題	49
7. おわりに	52
参考文献	53
付録	
○解析コード仕様	54

図目次

図 3.1-1 地下水流動・物質移行解析フロー	11
図 5.1-1 露天跡地解析領域	17
図 5.1-2 人形峠環境技術センター周辺解析領域	18
図 5.1-3 鉱さいたい積場解析領域	19
図 5.1-4 人形峠地域地質図	21
図 5.2-1 露天跡地周辺における物性値取得箇所	25
図 5.2-2 鉱さいたい積場周辺における物性値取得箇所	26
図 5.2-3 露天跡地東西方向の地下水分布	28
図 5.2-4 露天跡地南北方向の地下水分布	28
図 5.2-5 露天跡地地下水モニタリング孔配置	30
図 5.2-6 露天跡地の標高水位と孔口標高の関係	31
図 5.2-7 鉱さいたい積場モニタリング孔配置	33
図 5.2-8 鉱さいダム周辺の地下水分布	34
図 5.2-9 鉱さいたい積場の標高水位と孔口標高の関係	35
図 5.2-10 不飽和特性	41
図 5.2-11 捨石及び鉱さい中のウラン系列核種の濃度計算の考え方	45
図 5.2-12 捨石及び鉱さい中のアクチニウム系列核種の濃度計算の考え方	46
図 5.2-13 捨石及び鉱さい中のトリウム系列核種の濃度計算の考え方	47

表目次

表 4.1-1 物質移行解析ソフトウェア内容等	15
表 5.1-1 解析モデルに用いる地質構成	21
表 5.2-1 露天跡地周辺の物性値等の取得箇所及び、取得データ	23
表 5.2-2 鉱さいたい積場周辺の物性値取得箇所及び、取得データ	24
表 5.2-3 露天跡地周辺の地下水位（地下水モニタリング）	29
表 5.2-4 測定頻度と標高水位の差	29
表 5.2-5 鉱さいたい積場周辺の地下水位	32
表 5.2-6 透水係数のまとめ	37
表 5.2-7 鉱さい、捨石の D_{20} 粒径と透水係数	38
表 5.2-8 年間降雨量（昭和 53 年～平成 15 年）	39
表 5.2-9 有効間隙率	40
表 5.2-10 飽和度と比透水係数	41
表 5.2-11 飽和度 Sr とサクション圧 Kr	41
表 5.2-12 各地質の U、Th、Ra 濃度	43
表 5.2-13 各地質の核種初期固相濃度	44
表 5.2-14 各地質に対する分配係数	47
参考表-1 プログラム構成	54
参考表-2 境界条件一覧	55
参考表-3 入力物性値一覧	56

1. はじめに

人形峠環境技術センター（以下、「センター」という）では、鉱山活動で発生したウラン等の放射性核種を含有する捨石を堆積した露天採掘場跡地（以下、「露天跡地」という）、鉱さいを堆積した夜次鉱さいたい積場（以下、「鉱さいたい積場」という）及び捨石たい積場等の鉱山施設の跡措置に係る調査・試験を進めている。露天跡地は昭和52年から昭和62年にかけて露天採掘法により採鉱したウラン鉱石を、ヒープリーチング試験後中和処理を施した後に埋め戻している。鉱さいたい積場は旧製錬所からの鉱さい及び中和沈殿物のたい積場として昭和40年から使用しており、昭和52年から平成2年にかけてヒープリーチング操業化試験及び捨石処理に伴う中和沈殿物を堆積させている。捨石たい積場は昭和31年から昭和41年にかけて人形峠地区及びその周辺地域での鉱業活動で発生した捨石を坑道入口付近の傾斜した斜面に堆積させている。

捨石及び鉱さいは長い半減期の放射性核種を含むことから、跡措置は長期間にわたる被ばく評価が必要である。この被ばく評価を行うために、露天跡地をケーススタディとして地下水流动解析及び物質移行解析を行っている。ただし、これまでの解析では地下水モニタリングの結果と定量的には整合的な結果を得ているが、実状とは合わない結果であるため、解析モデルの再構築や解析に用いる物性値の再評価等の課題がある。

今回、露天跡地等の地下水流动及び物質移行解析を進める上で、これまでの解析の課題の抽出及びその対処を検討した。課題の対処として、地下水流动及び物質移行解析コードを選定導入するとともに、この解析コードで精度の高い解析を実施するために、物性値等を再整理した。

2. これまでの調査・研究成果

露天跡地及び鉱さいたい積場の調査・研究は、堆積場の捨石及び鉱さいの周辺地域への安全性を確認することを目的として、地質構造、地下水理、地質及び地下水の化学特性の調査・研究を実施している。

これらの調査・研究結果から、地質の分布状況、分布する地層の岩相、透水性が得られている。

さらに、これらの結果及び文献から得られたデータ等の基礎資料を用いて、地下水水流動解析や物質移行解析を実施している。

これまで実施した調査・研究により取得した解析に用いる項目及び解析内容を以下にまとめる。

2.1 露天跡地及びその周辺

(1) 調査・研究概要

①地質分布・地下水分布データ

- ・地質図（地質：覆土、鉱さい、捨石、泥岩、礫岩、風化花崗岩、花崗岩）
- ・地質断面図
- ・地下水位（モニタリング孔）
- ・地下水流向・流速（モニタリング孔：捨石、礫岩、風化花崗岩）

②捨石及び周辺地質に関するデータ

- i) モニタリング孔内水の殿物、捨石、泥岩、礫岩、風化花崗岩、花崗岩、酸化鉱石、非酸化鉱石を対象
 - ・放射性核種濃度：U、Th、Ra-226
- ii) モニタリング孔内水対象
 - ・放射性核種濃度：U、Th、Ra-226
- iii) 捨石、泥岩、礫岩、風化花崗岩を対象
 - ・密度
- iv) 捨石、泥岩、礫岩、風化花崗岩、花崗岩を対象
 - ・透水係数
- v) 露天跡地表層（捨石、黒ボク、風化花崗岩）を対象
 - ・土質定数：密度、含水比、粒度

③核種の挙動に関するデータ

- i) バッチ式溶出試験（試料 50g に対して試験液 1000ml。室温で静的放置し、溶出量測定サンプリング時に攪拌）
(固相－捨石、ウラン鉱石（酸化鉱、非酸化鉱）が対象)

・濃度：U、Ra-226

(液相－蒸留水のpHを調整して使用)

・溶出率：U、Ra-226

・濃度：U、Th、Ra-226

ii) カラム式吸着溶離試験

(固相－捨石、泥岩、礫岩、風化花崗岩が対象)

・濃度：U、Th、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

・濃度：U、Th、Ra-226、I (Iはトレーサとして添加)

iii) 溶出試験(「土壤の汚染に係る環境基準について」(平3環境庁告示46号)

に準拠)、バッチ式分配係数測定試験

(固相－露天跡地表層が対象)

・濃度：U、Th、Ra-226

(液相－孔内水を使用)

・溶出率：U、Th、Ra-226

・濃度、分配係数：U、Th(イオン)、Th(コロイド+イオン)、Ra-226

(4) 解析概要

①解析コード：「UNISSF (Unified Normal and Inverse Sub-Surface Flow Analysis)」「UNSAF (UNsaturated-Saturated Analysis program by Finite element method)」

実施年度：昭和62年度

対象域：露天跡地周辺

浸透流解析コード「UNISSF」を用いた準3次元地下水流动解析を実施した。また、その結果から得られた主要な流动方向及び地形等から考慮した断面を使用して、飽和-不飽和浸透流解析コード「UNSAF」を用いた鉛直2次元地下水流动解析を実施した。

解析は降雨浸透量をパラメータとしたケーススタディを5ケース行い、解析結果の地下水分布が実測地下水に最も近いケースを求める手法を用いた。

解析の結果、降雨浸透量が3%に相当する67.6mm/yの場合に実測地下水位とよく一致する知見が得られた。この解析ケースによる結果をまとめると、露天跡地の地下水流动は、大局的に北及び南側の沢に向かう流れと、東側の両沢の合流点近傍に向かう流れに集約される。前者は露天跡地からの流路長が短く、後者は流路長が長いことから、核種の移行経路としての

地下水流动を考えたとき、露天跡地から周辺斜面の小さな沢を経由して北あるいは南側の沢へ向かう流れに注目する必要性を予見した。

この解析では坑道に関する情報が反映されていない、水理定数（透水係数、有効間隙率等）及び地下水位等の実測値が少ないなどの入力データの信頼性に問題が残った。

②解析コード：「Dtransu2D・EL」

実施年度：平成7年度

対象域：露天跡地

飽和・不飽和浸透流/物質移行解析コード「Dtransu2D・EL」による地下水流动の予備解析を行った。また、物質移行の予備解析としてウランとラジウムの一次元物質移行解析を行った。

地下水流动解析の結果として以下の知見が得られた。

- ・浅層部分の地下水水流速は $4\sim0.2\text{m/y}$ ($1\times10^{-7}\sim6\times10^{-9}\text{m/s}$)程度であること。
- ・斜面部の地表直下では流速は速いが、露天跡地中央部及びその下部では遅いこと。
- ・捨石層に接した地下水は近傍の地表へは流出しないこと。

また、地下水の流速が卓越した捨石層堆積部末端から評価点（100m下流）に至る流路におけるウランとラジウムの移行解析の結果、次の知見が得られた。ウランは50年で評価点に出現し、約1000年で飽和濃度に達し、その初期濃度に対する低下比は1である。ラジウムは崩壊による減衰が考慮できるため、約1000年で評価点に出現し、約1万年で飽和濃度に達するが、その濃度は1/100に低下する。

この予備解析に基づき、精度の高い解析結果及び安全で合理的な措置システムの安全評価に反映させるために、境界条件等の見直し、3次元解析の導入等の解析手法の高度化及び地層の物性値（特に透水係数と有効間隙率）や対象放射性核種の分配係数をさらに整備する必要があることが示唆された。

③解析コード：「Dtransu2D・EL」

実施年度：平成9年度

対象域：露天跡地

平成7年度に実施した地下水流动解析時の解析モデル及びデータを用いて鉛直2次元物質移行解析を行った。

解析の結果、基本的に露天跡地中央部が分水嶺となり、北及び南側の沢

方向への流れ場となっている。捨石層下限面から移流で運ばれるウランは地表に出ることなく地盤中を移行し、分散で移行したウランが沢部に流出すると考えられる。ラジウムは遅延係数がウランと比較して大きいこと、半減期が極めて短期なことから、他の地層区分にほとんど移行しなかった。

分散長は文献から設定した値であることから、原位置における試験（トレーサー試験）によって設定することが考えられた。また、有効間隙率はダルシーフlow速から実流速を求める際の大きなパラメータであり、この値によって実流速のオーダーが変わってくる。ウラン移行解析では特に実流速が速くなると移行形態が変わることが推定されることから、文献値から得ていた有効間隙率を室内試験等で把握する必要性が考えられた。

④解析コード：「GEOFLOWS-MCNP-V2」

実施年度：平成 10 年度

対象域：露天跡地

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 3 次元地下水移行解析を行った。解析は主に透水係数をパラメータとしたケーススタディを 9 ケース行い、解析結果の地下水分布が実測地下水に最も近いケースを求める手法を用いた。

解析の結果、以下の知見が得られた。

- ・各ケースとも露天跡地中央部から北西部にかけての解析地下水位は実測地下水位より 4~6m 高い。
- ・地下水流动状況では、風化花崗岩で $2.1 \times 10^{-3} \sim 2.7 \times 10^{-3}$ m/日 ($2.4 \times 10^{-8} \sim 3.1 \times 10^{-8}$ m/s) に達する水平流が卓越する。
- ・浅部地下水は露天跡地の北東側で浸出する傾向にある、新鮮な花崗岩には顕著な流动は認められない。
- ・露天跡地直下では流速が小さくこの領域で地下水が滞留している現象が発生している。

解析地下水位が実測地下水位より高い原因として、風化花崗岩と花崗岩の透水性区分や風化花崗岩の透水性評価が不十分なこと、露天跡地北西尾根部の水理地質データが不足していると考えられた。また、坑道跡及び掘削箇所が地下水流动に与える影響の評価、坑内排出流量と降雨量との応答調査の必要性がある。したがって、これらについて調査及び再評価を行い 3 次元モデルの再構築を行う必要性が考えられた。

⑤解析コード：「NESTOR (Natural and Engineered System Transport Of Radionuclides)」

実施年度：平成 13 年度

対象域：露天跡地

浅地中処分用核種移行計算コード「NESTOR」を用いた放射性核種の 1 次元移行解析を放出係数モデルで行った。解析モデルは地下水の流動方向、尾根線等により 7 領域に区分して作成した。

解析の結果、核種濃度の最大値は露天跡地南側領域の評価点において $8.57 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$ であった。濃度が最大となる核種は U-238 及び Po-210 であり、U-238 の濃度は 10^3Bq/m^3 オーダーであった。濃度が最大に達するまでの最短領域は露天跡地北東領域 (3.16×10^4 年) であった。逆に、最長領域は露天跡地南東領域 (1.58×10^5 年) であった。全般に、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。評価点における 15 年経過後（平成 13 年）の U-238、Ra-226 の解析結果と実測値を比較すると、前者の方が U-238 濃度は約 7 枠低く、Ra-226 濃度は約 6 枠低くなかった。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 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た。

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、以下が考えられた。

- ・露天跡地及び周辺地域の風化花崗岩について、強風化部と弱風化部の区分と分布確認を行い、解析へ反映させる。
- ・露天跡地への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、露天跡地坑からの排水量等から、現地の水収支計算を行う。

2.2 鉱さいたい積場及び周辺

(1) 調査・研究概要

①地質分布・地下水分布データ

- ・地質図（地質：鉱さい、堆積岩、風化花崗岩、花崗岩）
- ・地質断面図
- ・地下水位（モニタリング孔）

②鉱さい及び周辺地質に関するデータ

- i) 鉱さい、風化花崗岩、花崗岩を対象

- ・透水係数（鉱さいは室内試験）
- ii) 鉱さいを対象
 - ・土質定数：密度他
 - ・放射性核種濃度：U、Th、Ra-226
- iii) モニタリング孔内水対象
 - ・放射性核種濃度：U、Th、Ra-226

③核種の挙動に関するデータ

溶出試験

(固相－鉱さい)

- ・濃度：U、Th、Ra-226

(液相－蒸留水)

- ・溶出率：U、Th、Ra-226

- ・濃度：U、Th、Ra-226

分配係数測定試験

(固相－鉱さい)

- ・濃度：U、Th、Ra-226

(液相－モニタリング孔内水)

- ・分配係数：U、Th、Ra-226

- ・濃度：U、Th、Ra-226

(2) 解析内容

解析コード：「NESTOR」

実施年度：平成 13 年度

対象域：鉱さいたい積場（措置後の形状を想定）

解析は既存の鉱さい中の核種濃度データを基にした「放出係数モデル」

と「吸着平衡モデル」の 2 つの計算モデルで放射性核種移行の感度解析を行った（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）。

放出係数モデルでの解析の結果、概ね千年～1 万年後に放射性核種移行

率が最大となり、概ね 10 万年後以降は急速に低下する。吸着平衡モデル

では、概ね百年～千年後に移行率が最大となり、概ね 10 万年後以降は急

速に低下する。

2.3 これまでの成果の課題

地下水流动、物質移行解析及び被ばく評価に用いるパラメータは、原位置・室内試験から取得すると共に把握できてないものは文献値とした。

露天跡地では取得したパラメータを用いて地下水流动解析、物質移行解析を実施し、地質構造別に地下水の流向・流速、ウラン及びラジウムの放射性核種移行について解析している。

鉱さいたい積場では「NESTOR」による1次元核種移行解析だけである。今後、地下水流动・物質移行解析を行う上で、地下水の挙動を精度よく評価・把握するために、これまで実施した地質・水理調査の結果から解析用の3次元水理地質モデルを作成している。

ただし、以下にまとめる課題等から解析において不自然な結果や再現性の悪い結果が得られているため、パラメータの再検討を行うと共に、水理地質モデルの再評価が必要である。

(1) 露天跡地・鉱さいたい積場共通課題

- ・風化花崗岩は土砂状に強風化したマサ状のものから軟質化した岩塊状のものまでを包括している。また、風化花崗岩の透水係数は3オーダー($10^{-6} \sim 10^{-9}$ m/s)程度のばらつきがある。解析の精度向上のため、これらを再区分する必要がある。

- ・花崗岩(概ね新鮮かつ硬質な岩相)の透水係数は風化帯や脆弱帯の直下では高い傾向にある。風化や変質の影響を受けていない花崗岩本来の透水係数を再評価する必要がある。

- ・地下水位は現状では断続的な値(1~3測定/年)が得られているだけである。降水に伴う地下水位の変動は対象地盤の透水性や地下水の連続性を把握する上で有用かつ信頼性の高い情報となり、また流域の水収支を把握する上でも、地下水の連続データの取得が必要である。

- ・これまでの物質移行解析では放射性核種の連鎖崩壊の考慮が「NESTOR」による1次元解析のみである。1次元解析モデルであるため、実状に合った解析結果を得ることができていないことが想定された。3次元の解析モデルを作成し、解析を行うことが望ましい。

- ・有効間隙率はダルシ一流速から実流速を求める際の大きなパラメータであり、この値によって実流速のオーダーが変わってくる。物質移行解析では特に実流速が速くなると移行形態が変わることが推定されることから実測値を測定することが望ましい。

(2) 露天跡地の課題

- ・露天跡地への降雨浸透水量などの水収支を把握できていない。

- ・不飽和浸透流解析は降雨浸透率及び不飽和特性などの不確実な物性値を複数用いるため、既往解析結果が実状と合わないことが考えられる。

(3) 鉱さいたい積場の課題

・鉱さいたい積場周辺に分布する堆積岩は泥岩、砂岩、礫岩であるが、各層の分布状況及び水理的性状が明らかではないため、これらを把握する必要がある。

・鉱さいたい積場の右岸の F-1 孔で、風化花崗岩と花崗岩の間に熱水変質を被って割れ目が卓越しかつ脆弱化した花崗岩が確認された。F-1 孔の下流 20m の C-3 孔では脆弱花崗岩の分布深度と同等深度で安山岩の貫入岩（コア長 6m 程度）を確認しており、この貫入岩の影響が考えられる。貫入岩の直上部は変質しかつ風化が著しく（土砂状）、その上層は土砂状を主体とした風化層が連続する。この層の分布下限は比抵抗探査から推定される鉱さいたい積場側の花崗岩の上限深度より 20m 程度深い。また、花崗岩と比較して透水性が高いことが予見でき、分布状況によっては下流側への水みちとなりうる。したがって、脆弱部の落ち込みの分布を把握する必要がある。

・鉱さいたい積場の両岸にリニアメントがあるが、この性状が把握できていないため、地下水理に与える影響が判断できていない。左岸側は比抵抗探査から低比抵抗帯の深部への落ち込みが確認されており、かつ弾性波探査の低速度帯とも一致していることから、断層もしくは変質帯と考えられる。左岸上流部の C-1 孔では深度 11m 付近に層厚約 0.5m の砂質粘土状の破碎帯を確認していることから左岸側リニアメントは断層の可能性がある。このため、リニアメントの性状及び分布を把握する必要がある。

・たい積場の解析モデルである狭域モデルは尾根とたい積場の距離が短く、解析結果が与えた初期条件に依存する可能性がある。十分な広さを有する広域モデルで解析を実施し、その結果を狭域モデルに反映して境界条件を与えるなどの方法をとる必要がある。

3. 課題に対する検討

2. で抽出した課題に対し、本報告書で取り上げる対処を以下にまとめる。これらの課題の対処が地下水流动・物質移行解析のどの段階に相当しているか、図 3.1-1 の解析フローに示す。

①課題) 風化花崗岩は土砂状に強風化したマサ状のものから軟質化した岩塊状のものまでを包括している。また、風化花崗岩の透水係数は3オーダー(10^{-6} ~ 10^{-9} m/s)程度のばらつきがある。解析の精度向上のため、これらを再区分する必要がある。

対処案) 土砂状に強風化したマサ状のものを強風化花崗岩、軟質化した岩塊状のものを弱風化花崗岩と区分し、解析モデルに反映させる。

②課題) 花崗岩（概ね新鮮かつ硬質な岩相）の透水係数は風化帯や変質帯の直下では高い傾向にある。風化や変質の影響を受けていない花崗岩本来の透水係数を再評価する必要がある。

対処案) 花崗岩で実施した透水試験の区間、岩相等の見直しを行い、風化や変質による影響を受けたことが想定されるものは除外して代表値を算出する。

③課題) これまでの物質移行解析では放射性核種の連鎖崩壊の考慮が「NESTOR」による1次元解析のみである。1次元解析モデルであるため、実状に合った解析結果を得ることができていないことが想定された。3次元の解析モデルを作成し、解析を行うことが望ましい。

対処案) 地下水流動及び物質移行解析コードについて、放射性核種の連鎖崩壊が評価可能である3次元解析コードを調査し、今後の解析のために解析コードを導入する。

④課題) 鉱さいたい積場の解析モデルである狭域モデルは尾根とたい積場の距離が短く、解析結果が与えた初期条件に依存する可能性がある。十分な広さを有する広域モデルで解析を実施し、その結果を狭域モデルに反映して境界条件を与えるなどの方法をとる必要がある。

対処案) センターを分水界で囲む範囲について地下水流动解析を行うための解析モデルを作成する。

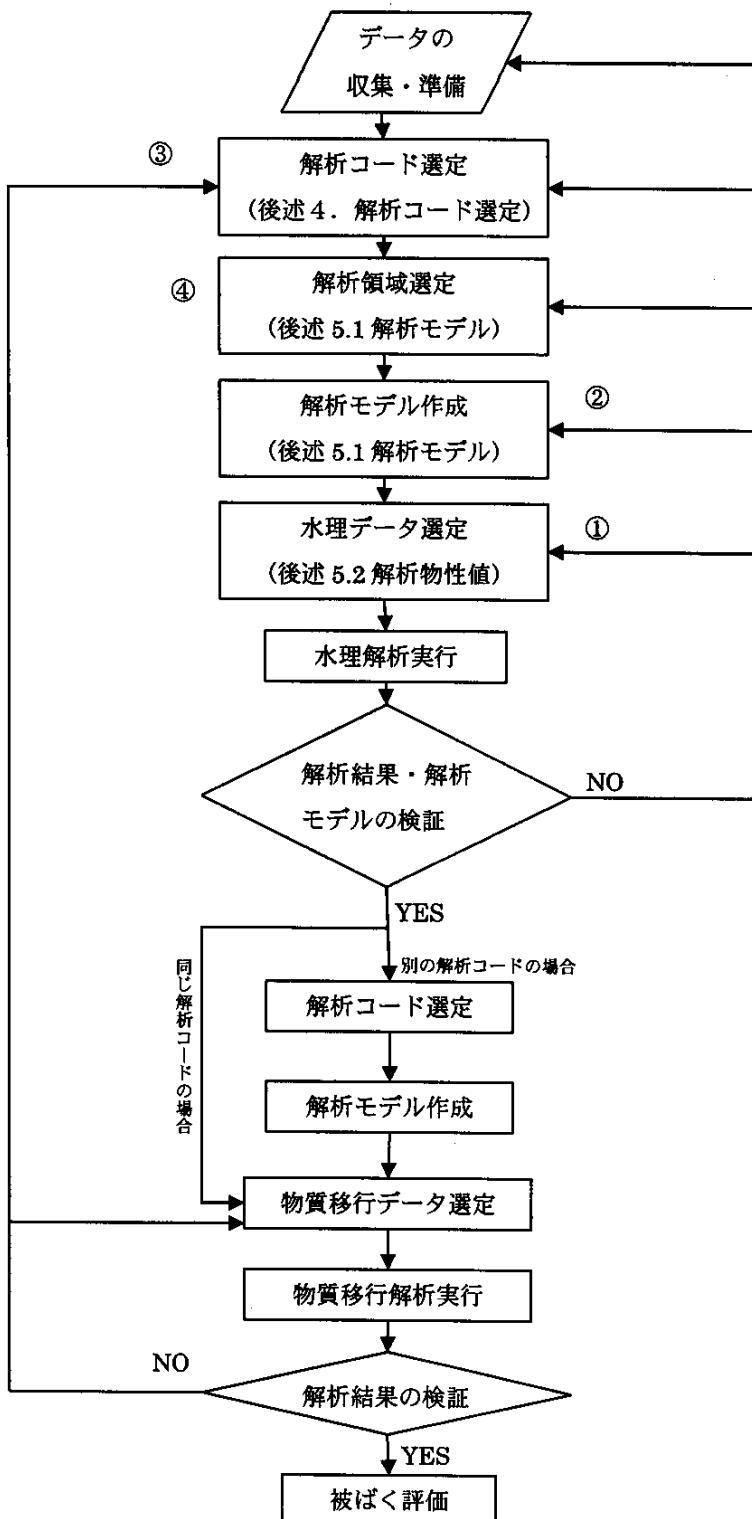


図 3.1-1 地下水流動・物質移行解析フロー

4. 解析コード選定

これまでの物質移行解析では放射性核種の連鎖崩壊を評価したものは「NESTOR」による1次元解析のみである。ただし、1次元解析モデルであるため、実状に合った解析結果を得ることができなかった。このため、今後の解析では多層、鉛直方向の評価ができる3次元解析コードによって解析を進めることを目的として、入手可能なソフトウェアを調査した。

なお、実際に地下水水流動解析、物質移行解析を行う上で、次に示す機能等が望まれる。

◎放射性核種の連鎖崩壊に対応すること。

- ・飽和・不飽和浸透流の解析が行えること。
- ・3次元解析が行えること。
- ・有限要素法解析が行えること。
- ・解析コード及び解析に関するサポートが得られること。

調査結果を以下にまとめる。

(1) 調査範囲

浅地中を対象とした3次元での物質移行解析コードのうち、国際的な標準として使われているもの、または国内で同等の解析ができるものを選定し、機能、入力パラメータ、ソフトウェアの構成、価格等を、文献（表4.1-1他）、カタログ、ホームページ及び聞き取りにより調査した。

(2) 調査結果

調査結果を表4.1-1に示す。以下、各コードの概要についてまとめる。

・G-TRAN/3D 3次元移流拡散解析ソフトウェア（株）地層科学研究所

解析機能としては、後述のDtransu3Dと同じ有限要素法プログラムであるが、モデルデータを作成するPreprocessor機能と解析結果を確認するPostprocessor機能を有する。浸透流解析プログラムはunsaf3Dであり、移流・分散解析に核種連鎖崩壊機能をオプションで有する。

・Dtransu3D・EL for Win（岡山大学、株）ダイヤコンサルタント、三菱マテリアル（株）

岡山大学西垣教授等により開発された有限要素法プログラムであり、国内における土壤汚染関連での使用例が多い。核種連鎖崩壊機能は有しておらず、機能製作には半年～1年ほどかかる。多相流解析はこのソフトでは不可能なため、新規

に制作が必要である。メッシュ作成及び図化機能を付加していないことから、FEMAP ver8.2（解析モデル作成及び後処理ソフトウェア、(株)エヌエスティ）等の図化ソフトが必要である。

- SUTRA Version 2D3D.1 (beta 版) (U S G S : 米国地質調査所)

国際的な標準となっている USGS で開発された水理解析プログラム MODFLOW に物質移行解析機能が付加された差分法プログラムである。この新しいバージョンはホームページ上まだ公開していない。SUTRA で計算した結果をモデルとして描かせるために、図化ソフト ARGUS ONE (Argus Holdings, Ltd.) が必要である。

- MT3D (E P A : 米国環境保護庁)

国際的によく使われている E P A で開発された差分法プログラムであるが、対応 OS は DOS のみである。センター表示させるためには SURFER 8 (3D surface plotting program, SSG 製：日本語版は(株)レックス) などの図化ソフトウェアが必要である。

- Cats FLOW (株)C R C ソリューションズ)

浸透流解析は 3 次元で行えるが物質移行解析は 2 次元である。物質移行解析の 3 次元化は平成 16~17 年の予定である。核種連鎖崩壊及び多相流解析機能は、別途での注文開発となる。

- SWIFT2002 (Sandia National Laboratory)

米国 Sandia 国立研究所で開発されたコード (1985 年以降、GeoTrans, Inc. が改良) である SWIFT の 3 次元解析が可能な改良版である。画像処理のために SURFER 8 等の図化ソフトが必要である。SWIFT は既往解析コード調査において、地下水流动と物質移行の解析コードとして検討している。検討結果では、SWIFT は地下水流动解析には適切ではないが、この解析を別途行い、その結果を SWIFT に与え物質移行の解析を行う手法を示している。

- Visual MODFLOW Pro 日本語版(株)レックス/Waterloo Hydrogeologic, Inc)

Waterloo Hydrogeologic, Inc が製作した解析ソフトの日本語版である。

Visual MODFLOW Ver2.82 (地下水流动、汚染物質拡散解析ソフト)、3D-Explorer (地下水流动、汚染物質拡散 3D 表示ソフト)、Win PEST (パラメータ微調整モジュール) の 3 ソフト構成。3D で汚染物質移行モデルを作成させ

るために、MT3D99（同社製作）が必要である。

- 3DFEMFAT (Scientific Software Group)

対応 OS は DOS、Unix である。詳細は不明である。

- GERM/FEGM ((財)電力中央研究所)

スウェーデンの高レベル放射性廃棄物地層処分場において、この地下水流动・核種移行解析コードの有効性を得ている。

六ヶ所村の低レベル放射性廃棄物埋設施設の事業許可申請支援等に用いた、総合安全評価システム（SYSA）を研究開発している。このシステムは地下水流动、核種移行解析コードを用いて統合化したものである。

- GETFLOWS (株地圈環境テクノロジー)

鉱山廃水の汚染に関する解析業務は行っているが、ウラン鉱山に関する実績は不明である。

(3) 検討結果

上記のように、現在想定している解析に要する機能としては、核種連鎖崩壊の取扱いを除いて大きな違いは認められなかった。各コードの内容（表 4.1-1）と上記を考慮した結果、導入する解析コードとして地下水流动解析機能を有し、かつ核種連鎖崩壊機能を有した「G-TRAN/3D」を選定した。添付資料に解析コードの仕様などをまとめる。

表 4.1-1 物質移行解析ソフトウェア内容等

〔「土壤・地下水汚染の調査・予測・対策」2002に引用加筆〕

5. 解析データ

5.1 解析モデル作成

(1) 解析モデル作成概要

露天跡地周辺及び鉱さいたい積場周辺の地下水理を把握及び物質移行解析を実施するための解析モデルを作成した。また、センター周辺の地下水理を把握し、鉱さいたい積場の解析時の境界条件を与えることを目的としてセンターを分水界で囲む範囲の広域の解析モデルを作成した。

(2) 解析モデル作成範囲

露天跡地は山状の地形であるため、遠方からの浸透流の影響はないと想定して、露天跡地が分水界で囲まれる範囲を解析モデル作成範囲とした。この範囲は解析コード「GEOFLOWS-MCNP-V2」での解析範囲と同等である。

鉱さいたい積場は谷部に位置すること、評価点（池河川）までの標高差（約50m）が大きいことから、遠方からの浸透流の影響を考慮する必要があるため、部分的メッシュ再分割法*を用いて解析を行う。浸透流の影響を鉱さいたい積場に与えると想定される十分に広い範囲はセンターが分水界で囲まれる範囲とし、狭い範囲は鉱さいたい積場が分水界で囲まれる範囲とした。

各モデル作成範囲を以下にまとめる。

① 露天跡地（図5.1-1）

露天跡地の北、東及び南側の2つの沢と、西側調整池、両沢の上流部と調整池を囲まれた範囲を解析対象境界とする。

② センター周辺（図5.1-2）

センター北～西側の高清水高原、西～南西側の池河川、東～南東側の赤和瀬川を囲まれた範囲を解析対象境界とする。

③ 鉱さいたい積場周辺（図5.1-3）

たい積場の東と南の2つの尾根の連なりと、北西側の尾根、西側の池河川に囲まれた範囲を解析対象境界とする。

* : 部分的メッシュ再分割法（TMR法）

広域的な地下水境界にたいしてあらい接点きざみをもった格子を設定し、広域シミュレーションを実施する。ついで、この計算結果をもちいて、より狭い地域にたいするモデルの境界条件を設定する。そして、このような手順を順々にくりかえす方法。（「地下水モデル」より引用）

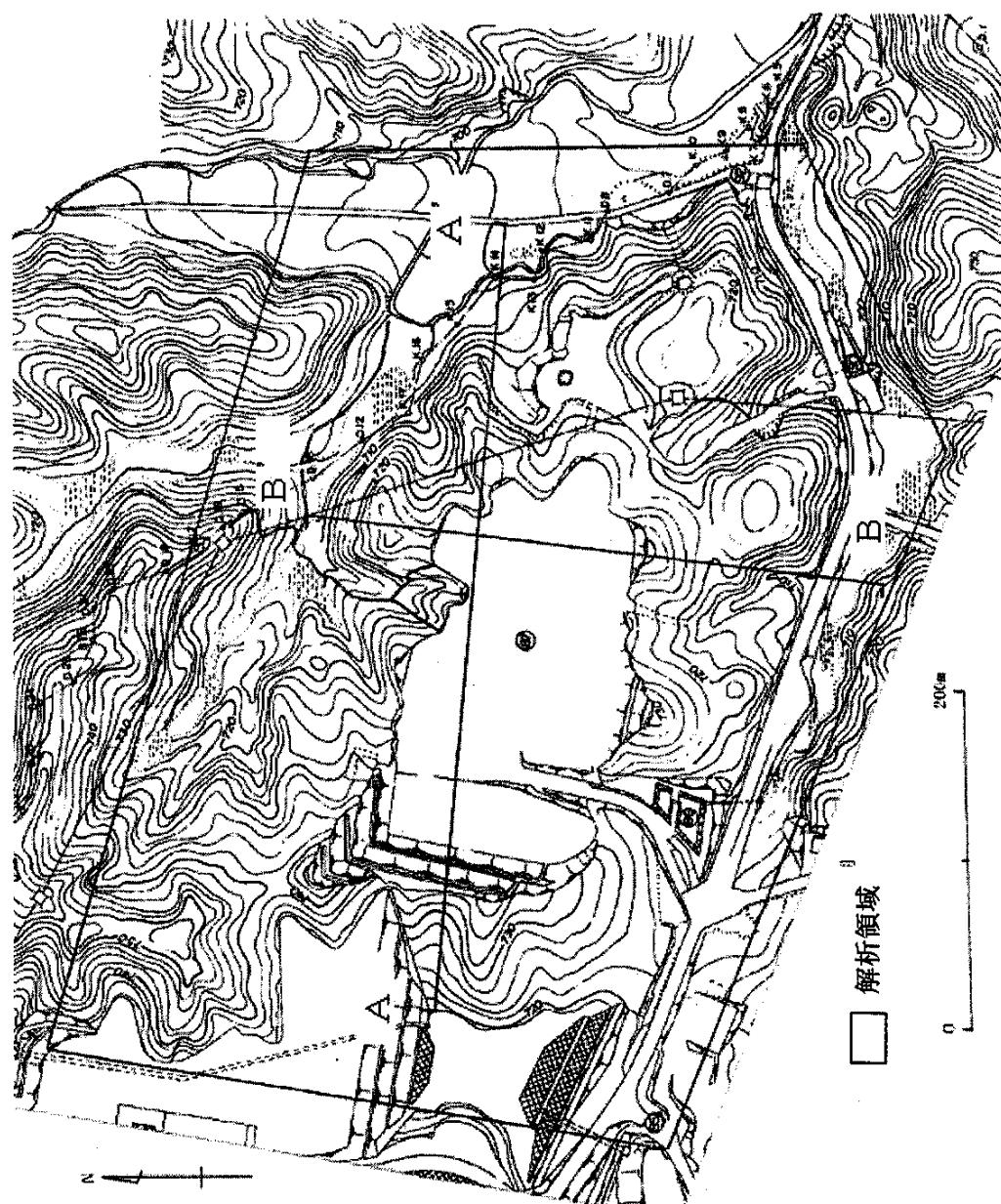


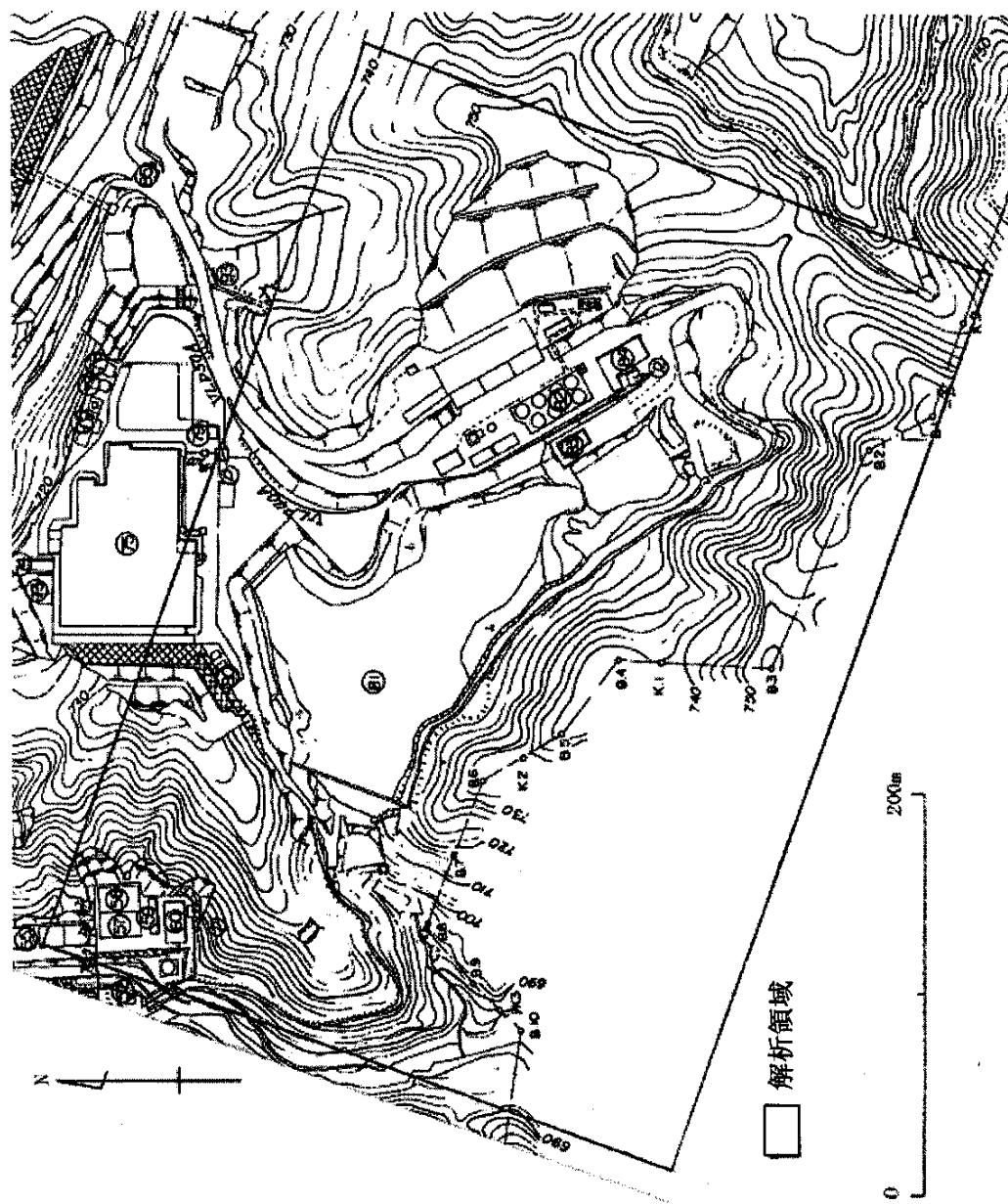
図 5.1-1 露天跡地解析領域



0 1km

□ 解析領域

図 5.1・2 人形峠環境技術センター周辺解析領域



(3) 対象地質

以下、人形峠環境技術センター周辺、露天跡地、鉱さいたい積場における地質概要をまとめる。表 5.1-1 に解析モデルに用いる対象地質を示す。

① 露天跡地

露天跡地周辺の地質は花崗岩を基盤岩とし、人形峠累層の堆積岩である礫岩、泥岩（砂岩互層を含む）及び表層堆積物である。鉱体部跡地には捨石と埋設土（表土）の埋め戻し土及びそれらを覆う覆土が分布する。

花崗岩は表層の厚い箇所で 20m 以上にわたって風化作用を受けており、風化部はマサ状の強風化層と、岩質の軟質化した風化層に分けられる。新鮮部と風化部の境界は概ね地形面と調和している。花崗岩を不整合に覆って泥岩と礫岩が分布し、これらは水平ないし東南東方向に緩傾斜している。地表面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。捨石は標高 717m～723m の範囲の鉱体部から掘削した鉱石を、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て埋め戻したものである。埋設土（表土）は表土で、露天採掘場全体を覆土している。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。

② 鉱さいたい積場

鉱さいたい積場周辺の地質は花崗岩を基盤岩とし、人形峠累層の堆積岩である礫岩、砂岩、泥岩及び表層堆積物である。鉱さいは、鉱石を粉碎後に硫酸で溶出分離により鉱石からウランを取り除いた後に残った砂・泥状の土砂（廃砂・廃泥）及び坑廃水処理施設で発生するろ過砂及び沈殿物であり、池河川支川の谷沿いにコンクリートかん止堤を設けていたり積している。

花崗岩は厚さ数 m～15m にわたって風化作用を受けており、風化部はマサ状の強風化層と、岩質の軟質化した弱風化層に分けられる。新鮮部と風化部の境界は概ね地形面と調和している。また、試錐調査によって、熱水変質を被った脆弱な花崗岩が新鮮部と風化部の間で認められ、新鮮部の分布深度が深くなっている。脆弱花崗岩の規模、連続性は不明であるが、鉱さいたい積場右岸に沿って分布するリニアメントはこの変質帯の可能性がある。花崗岩との境界付近には礫岩、砂岩が分布し、泥岩は花崗岩の分布域から離れた西側の高標高部を主体として分布する。

③ 人形峠環境技術センター周辺（図 5.1-4）

地質は白亜紀後期～古第三紀に貫入した花崗岩類を基盤とし、高清水高原から人形峠にかけて分布する新第三紀の堆積岩、高清水高原の尾根部周辺に分布する火山岩及びその火碎岩を主体とする。

花崗岩類は人形峠型花崗岩、高清水花崗岩である。前者は角閃石黒雲母花崗岩であり、組成的にはアダメロ岩と花崗閃緑岩との中間のものが多い。後者は優白質の黒雲母花崗岩である。

堆積岩はウラン鉱床の母岩の三朝層群人形峠累層であり、淡水成の礫岩、砂岩、

泥岩と降下火碎堆積物からなる。基盤岩である花崗岩類を不整合に覆う。

火山岩及びその火碎岩は三朝層群のアルカリ岩系の玄武岩、カルクアルカリ岩系の安山岩～デイサイト及びその火碎岩である。

表 5.1-1 解析モデルに用いる地質構成

地質区分	土・岩相	性状
覆土	礫混り土砂	マサ土。比較的よく締まった礫混り砂質シルト。
捨石	礫混り土砂	露天跡地の捨石と埋設土。
鉱さい	粘土、砂	鉱石からウランを取り除いた後に残った砂・泥状の土砂（廃砂・廃泥）及び坑廃水処理施設で発生するろ過砂及び沈殿物。
堆積岩	泥岩 砂岩 礫岩	センター構内では全般に軟質に風化。露天跡地では各岩を概ね区分しているが、鉱さいたい積場では未区分。
火山岩	安山岩 玄武岩 火碎岩	センター北側～北東側の山地周辺に分布。 アルカリ岩系の玄武岩。カルクアルカリ岩系の安山岩～デイサイト及びこれらの火碎岩。
風化 花崗岩	強風化花崗岩 弱風化花崗岩	土砂状に風化した花崗岩。 風化及び変質を受けやや軟質化した花崗岩。
花崗岩	新鮮花崗岩	概ね新鮮かつ硬質な花崗岩。

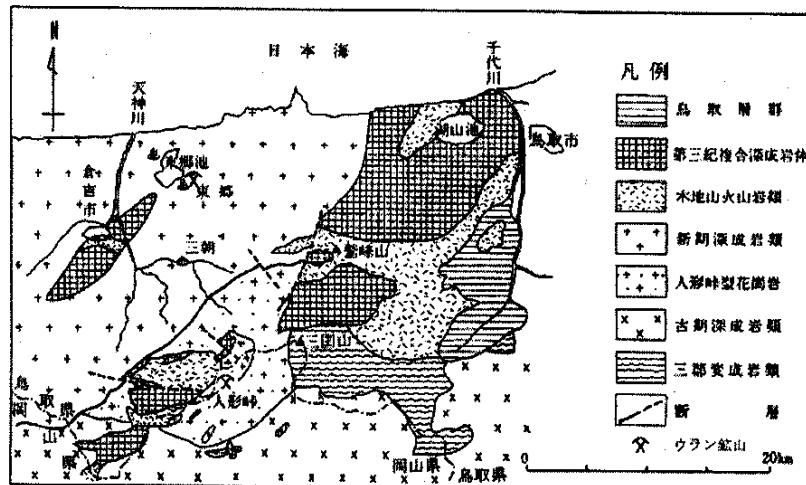


図 5.1-4 人形峠地域地質図
(人形峠環境技術センターにおける鉱山跡の措置に関する基本計画)

5.2 解析物性値

解析に用いる物性値は露天跡地周辺及び鉱さいたい積場周辺において、原位置試験及び採取した試料による室内試験等によって概ね取得しており（前述2.これまでの調査・研究成果）、その値をまとめると共に、これまでの課題で対処が必要なものは再整理を行った。また、解析に不足した物性値は文献値から引用した。なお、センタ一周辺に関しては調査を実施していないため、物性値はセンター内で取得した値と文献値を併用した。

以下、物性値等の取得箇所及び物性値を課題の対処に基づき整理した結果をまとめる。

5.2.1 物性値等の取得箇所

地質、物性値等の情報について、資料の有無及び物性値を取得した試料採取箇所を整理した。露天跡地周辺については表 5.2-1 に、鉱さいたい積場周辺は表 5.2-2 にまとめる。また、それぞれの採取箇所を前者は図 5.2-1、後者は図 5.2-2 のモニタリング孔（ポーリング孔）位置図に示す。

表 5.2-1 露天跡地周辺の物性値等の取得箇所及び、取得データ

○：データ取得、×：データなし

モニタリング孔 ^{*1} ボーリング孔 ^{*1} 露頭	柱状図 コア写真	透水試験データ ・流速試験	流向 ・流速試験	分配係数測定	各地質の透水係数、分配係数取得									
					捨石		泥岩		礫岩		強風化 花崗岩		弱風化 花崗岩	
					透水係数	分配係数	透水係数	分配係数	透水係数	分配係数	透水係数	分配係数	透水係数	分配係数
No.1(A-1)		○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
No.2(A-2)		○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
No.3(A-3)		○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
No.4(A-4)		○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
No.5(A-5)		○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
No.6(A-6)		○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
No.7(C-1)		○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	○	—	○
No.8(C-2)		○	○	—	—	—	—	—	—	—	○	—	○	—
No.9(D-6)		○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
No.10(D-7)		○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
No.11(E-1)		○	○	○	—	○	—	—	—	—	○	—	○	○
No.12(E-2)		○	○	—	○	—	○	○	○	○	—	—	○	○
No.13(F-1)	×	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
No.14(F-2)	×	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
No.15(F-3)	×	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
No.16(G-1)	×	—	—	○ ^{*2}	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
No.17(G-2)	×	—	—		—	—	—	○ ^{*2}	—	○ ^{*2}	—	—	—	—
No.18(G-3)	×	—	—		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
No.19(H-1)	○	○	—	—	○	—	—	—	—	—	○	—	○	○
No.20(A)	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	○	—	○	—
No.21(B)	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○
No.22(C)	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	○	—	—	○
No.23(D)	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	○	—	—	○
B-1	×	×	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○
B-2	×	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
B-3	×	×	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○
B-4	×	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C-3	○	○	—	—	—	—	—	—	○	—	○	—	○	—
D-1	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	○	—	○	—
D-3	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	○	—	—	—
D-5	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ア ^{*3}	—	—	—	—	—	—	—	○ ^{*2}	—	—	—	—	—	—
イ ^{*3}	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	—	—	—	—
ウ ^{*3}	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	—	—	—

* 1 : No.1～No.23 はモニタリング孔番、括弧内及び B-1～D-5 はボーリング孔番

* 2 : 試験試料に用いたボーリングコアが不明

* 3 : 露頭

表 5.2-2 鉱さいたい積場周辺の物性値取得箇所及び、取得データ

○：データ取得、△：測定中、×：データなし

モニタリング孔	柱状図 コア写真	透水試験データ 透水試験	流向・流速試験	分配係数測定	各地質の透水係数、分配係数取得											
					鉱さい		泥岩		礫岩		強風化 花崗岩		弱風化 花崗岩		花崗岩	
					透水係数	分配係数	透水係数	分配係数	透水係数	分配係数	透水係数	分配係数	透水係数	分配係数	透水係数	分配係数
A-1	×	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A-2	×	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A-3	×	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B-1	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B-2	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B-3	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C-1	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C-2	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C-3	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C-4	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E-1	○	○	-	-	○	-	-	-	-	-	○	-	-	-	○	-
F-1	○	○	-	△	-	-	-	-	-	-	○	△	○	△	○	△
ダム下	○*2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

* 1 : 室内透水試験

* 2 : コア写真なし

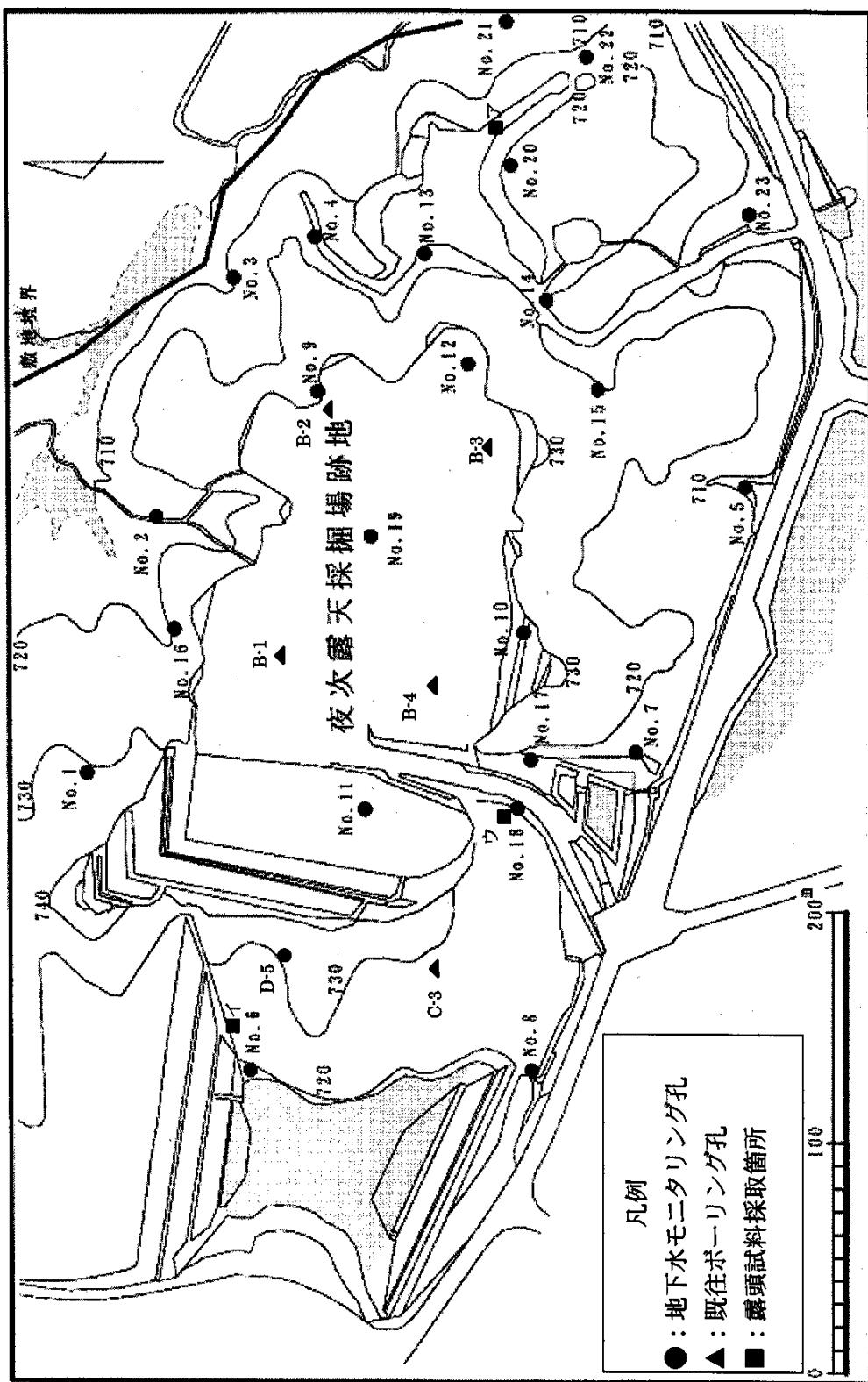


図 5.2-1 露天跡地周辺における物性値取得箇所

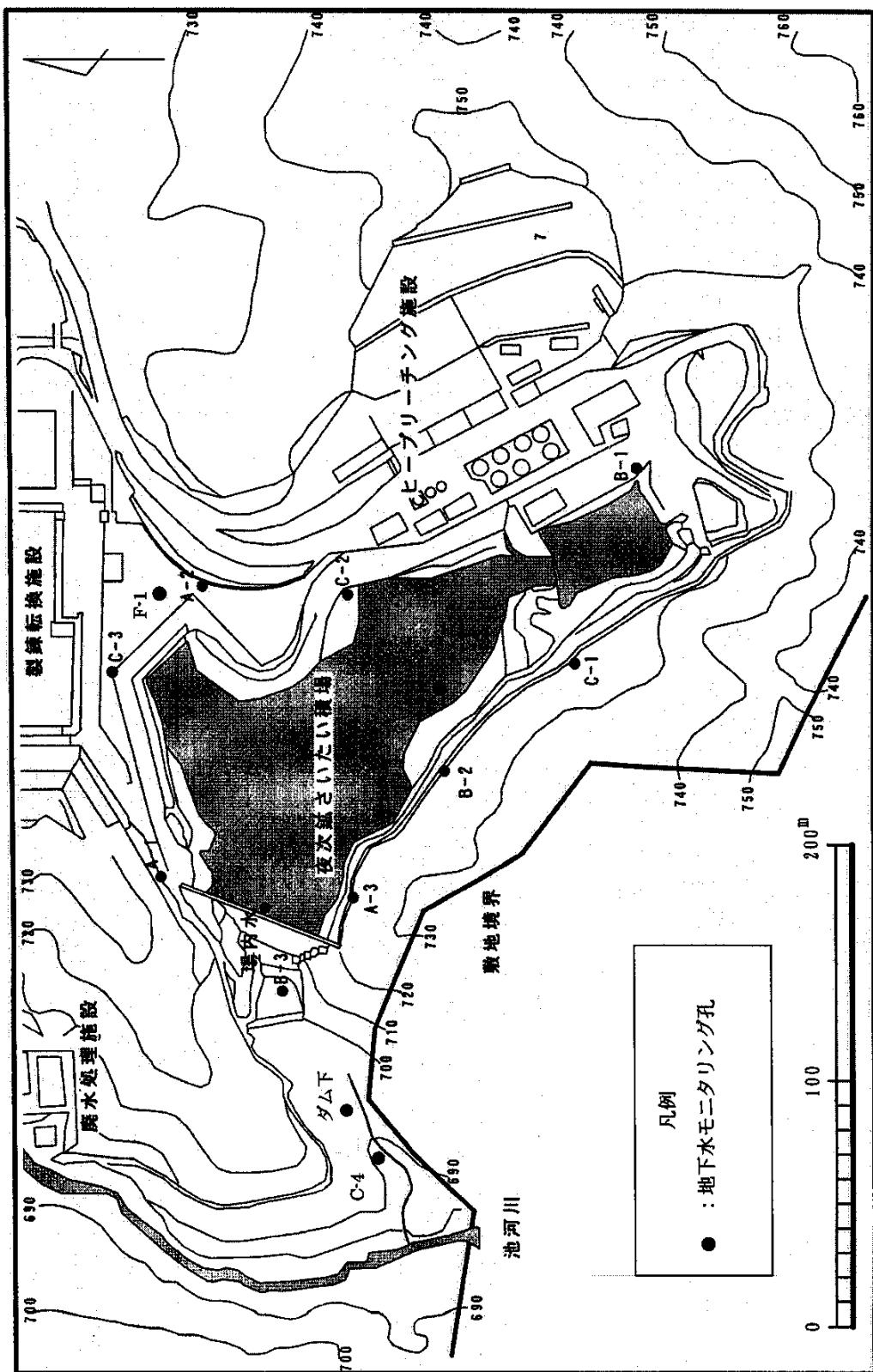


図 5.2-2 鮎さいたい積場周辺における物性値取得箇所

5.2.2 地下水流動解析物性値

(1) 地下水位

①露天跡地周辺

露天跡地周辺における地下水位は、尾根地形に調和して西側が高く、東側が低くなっている（図 5.2-3、図 5.2-4）。露天跡地下部の地下水位は捨石層の基底面付近に分布し、その周囲の地下水位は礫岩あるいは風化花崗岩中に分布する。既存の地下水流向・流速測定結果においても、礫岩及び風化花崗岩上部に北西から南東に向かう明瞭な流向が認められている。

今年度までの地下水モニタリングの結果、地下水位は全体的に 1~2m 程度の変動が認められる（表 5.2-3、図 5.2-5）。露天跡地東縁部から斜面部及び露天跡地西縁部からその南側斜面においてその変動が若干大きくなる。また、No.5、17、19、23 孔で自動計測した地下水位の日データ（平成 14 年～15 年）の最高・最低水位、変動幅を示すとともに、同孔における地下水モニタリングのそれらの値（測定は 1~3 回／年）を示す（表 5.2-4）。両者を比較すると、No.17 孔では概ね同じ値であるが、その他の孔では前者の変動幅は後者より 2 倍程度大きく、地下水モニタリングにおける水位観測だけでは露天跡地周辺の地下水位がどの程度変動しているか把握できていない。また、地下水位を自動計測したこれらの孔は露天跡地中心部及び露天跡地南側斜面末端部であるため、北、東、西側斜面についても地下水位の変動を経日的に観測し、地下水位の変動状況を把握することが望ましい。

モニタリング孔の標高水位（平成 15 年測定データ）と孔口標高の関係では No.22 孔を除き相関が認められた（図 5.2-6）。No.22 孔は他のモニタリング孔と比較して孔口標高に対する標高水位が低いが、これは同孔が急勾配の斜面の直上部に位置するため、地下水位が低いことが想定される。なお、他のモニタリング孔は平坦地または緩傾斜の斜面に位置している。

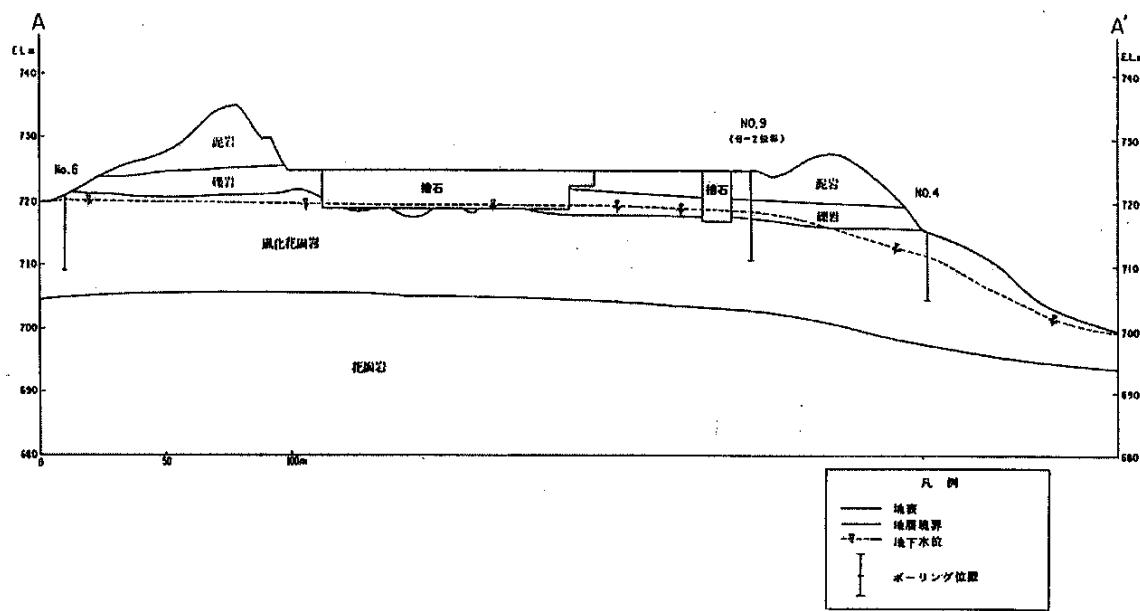


図 5.2-3 露天跡地東西方向の地下水分布

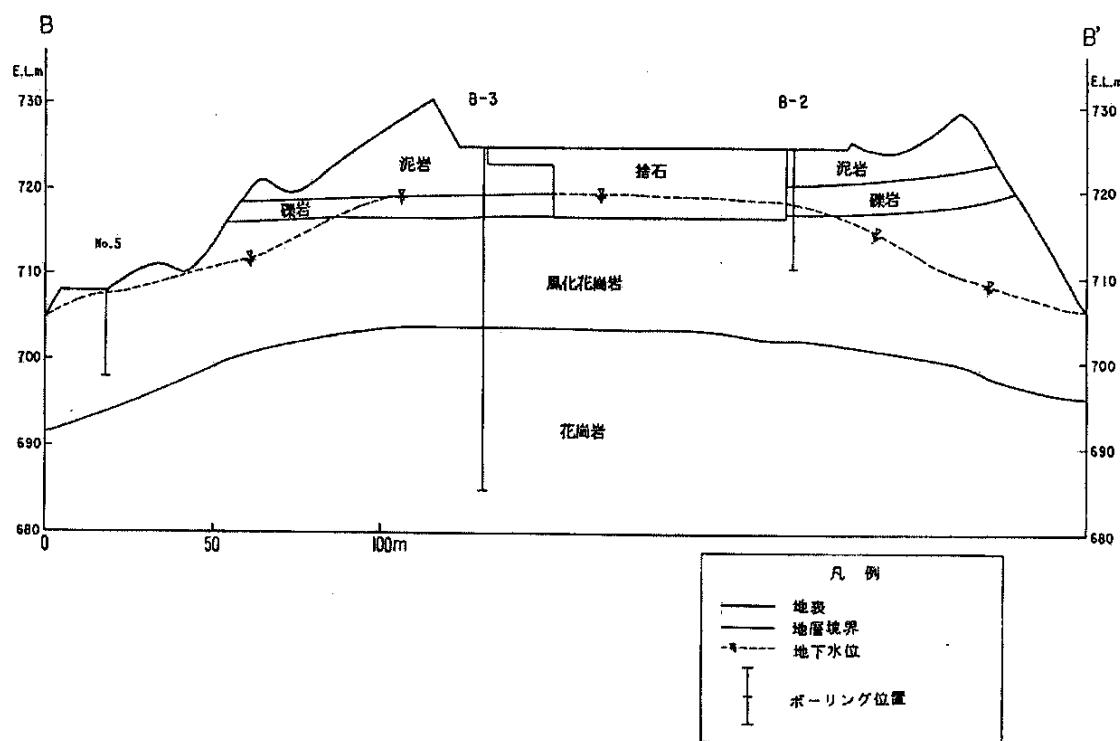


図 5.2-4 露天跡地南北方向の地下水分布

表 5.2-3 露天跡地周辺の地下水位（地下水モニタリング）

モニタ リング 孔	地下水位					モニタ リング 孔	地下水位					
	最高水位 ^{*1}		最低水位 ^{*1}		変動幅 m		最高水位 ^{*1}		最低水位 ^{*1}		変動幅 m	
	標高 m	深度 GL·m	標高 m	深度 GL·m			標高 m	深度 GL·m	標高 m	深度 GL·m		
No.1	721.14	9.59	720.80	9.93	0.34	No.13	713.77	3.06	711.46	5.37	2.31	
No.2	713.47	0.73	712.43	1.77	1.04	No.14	717.01	2.96	715.08	4.89	1.93	
No.3	708.24	1.12	707.02	2.34	1.22	No.15	717.99	2.87	716.94	3.92	1.05	
No.4	711.72	3.77	710.61	4.88	1.11	No.16	719.34	0.92	718.07	2.19	1.27	
No.5	707.99	0.82	707.40	1.41	0.59	No.17	718.83	0.38	716.93	2.28	1.90	
No.6	718.84	0.55	717.97	1.42	0.87	No.18	719.15	0.66	717.39	2.42	1.76	
No.7	712.98	2.34	712.55	2.77	0.43	No.19	717.88	6.07	717.28	6.67	0.60	
No.8	718.22	2.01	717.11	3.12	1.11	No.20	714.43	5.56	710.65	9.34	3.78	
No.9	720.04	4.85	717.52	7.37	2.52	No.21	695.85	0.47	694.57	1.75	1.28	
No.10	719.06	5.52	717.87	6.71	1.19	No.22	705.78	11.09	704.52	12.35	1.26	
No.11	720.24	5.24	718.02	7.46	2.22	No.23	701.88	1.58	700.76	2.70	1.12	
No.12	719.02	6.73	717.37	8.38	1.65							

* 1) No.1~No.18 : 平成 8 年～平成 15 年

No.19 : 平成 9 年～平成 15 年

No.20～No.23 : 平成 11 年～平成 15 年

表 5.2-4 測定頻度と標高水位の差

モニタ リング孔	測定頻度	標高水位		
		最高値 m	最低値 m	変動幅 m
No.5	1 データ／日 (自動測定 ¹⁾)	708.31	707.09	1.22
	1～3 データ／年 (地下水モニタリング ²⁾)	707.99	707.40	0.59
No.17	1 データ／日 (自動測定 ¹⁾)	718.72	716.92	1.80
	1～3 データ／年 (地下水モニタリング ²⁾)	718.83	716.93	1.90
No.19	1 データ／日 (自動測定 ¹⁾)	718.59	717.10	1.49
	1～3 データ／年 (地下水モニタリング ²⁾)	717.88	717.28	0.60
No.23	1 データ／日 (自動測定 ¹⁾)	702.40	700.10	2.30
	1～3 データ／年 (地下水モニタリング ²⁾)	701.88	700.76	1.26

1) 水位計による地下水位自動測定

2) 地下水モニタリング時の地下水位手動測定

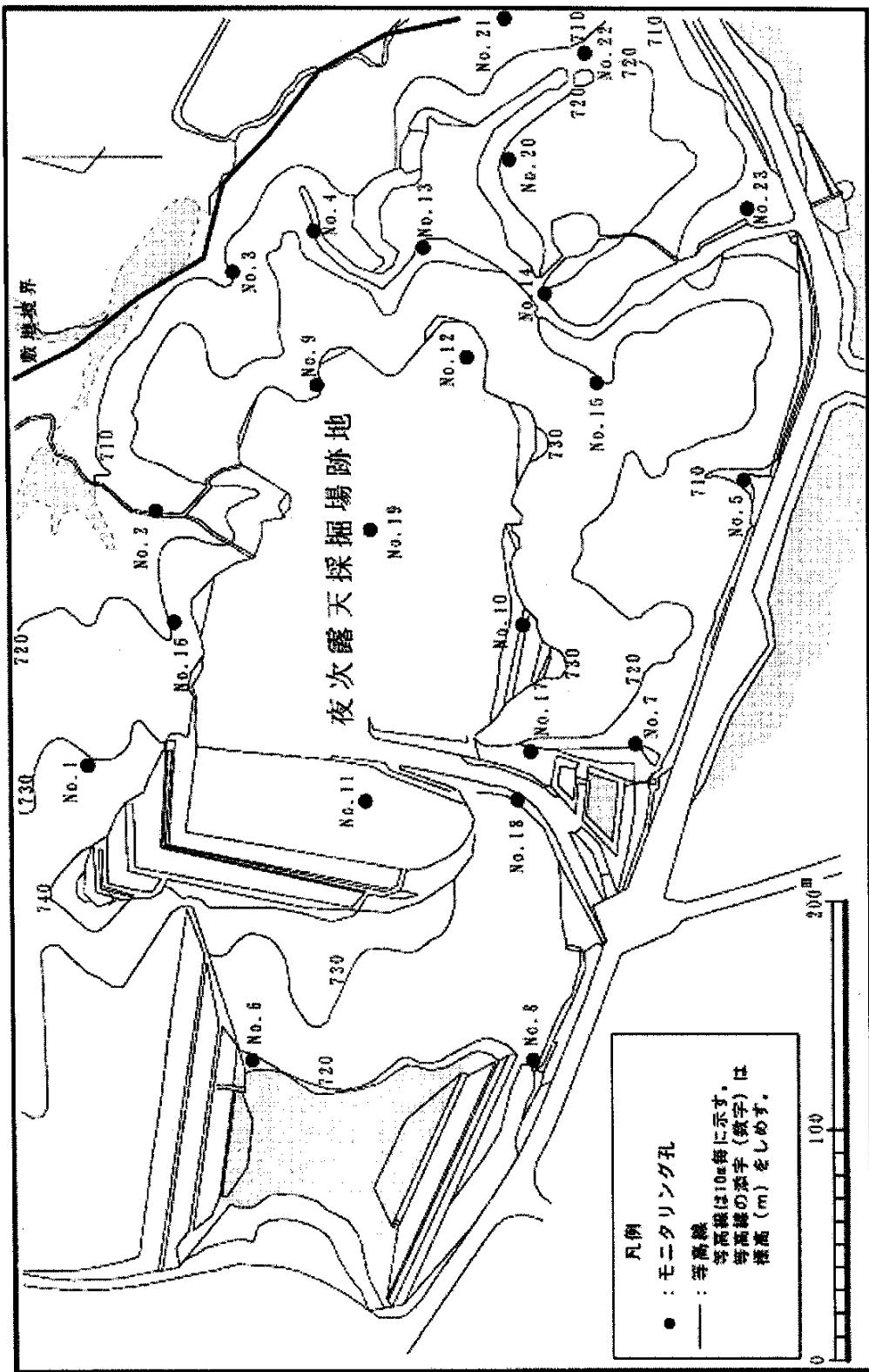


図 5.2-5 露天跡地モニタリング孔配置

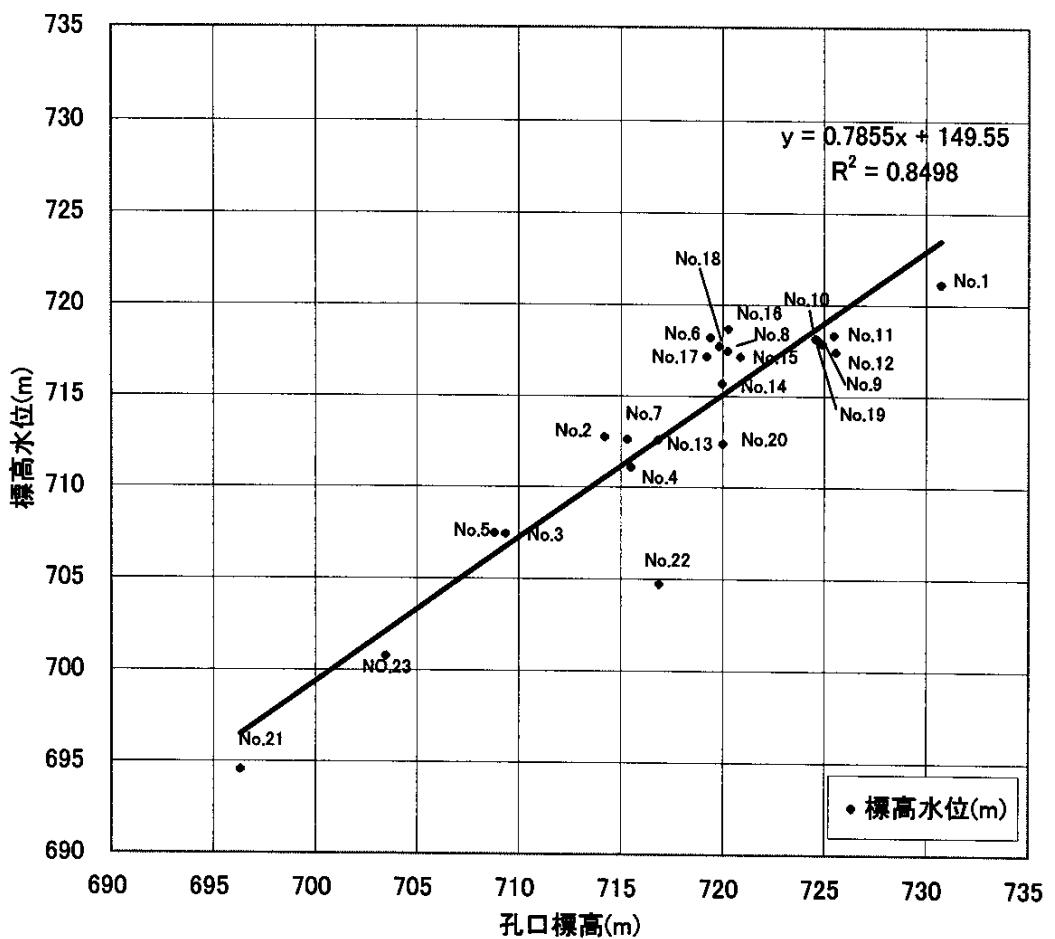


図 5.2-6 露天跡地の標高水位と孔口標高の関係

②鉱さいたい積場

鉱さいたい積場ではたい積場周囲及びたい積場下流の沢沿いのモニタリング孔で地下水を観測している(図5.2-7)。鉱さいたい積場周辺の地下水位はV字谷の上流から下流にかけて低下する。地下水位は、堰堤より上流では水位勾配が緩く、下流ではやや急になる傾向であり、地形と調和的である(図5.2-8)。周辺の山地の地下水位は把握できていない。

平成15年度までの地下水モニタリングの結果、地下水位は全体的に1~2m程度変動する傾向にある(表5.2-5)。

モニタリング孔の標高水位(平成15年測定データ)と孔口標高の関係では相関が認められ(図5.2-9)、地下水分布に異常がないと想定される。

表5.2-5 鉱さいたい積場周辺の地下水位

モニタ リング 孔	地下水位					モニタ リング 孔	地下水位					
	最高水位*1		最低水位*1		変動 幅		最高水位*1		最低水位*1		変動 幅	
	標高 m	深度 GL·m	標高 m	深度 GL·m			標高 m	深度 GL·m	標高 m	深度 GL·m		
A-1	715.51	6.93	715.03	7.41	0.48	C-1	718.78	1.62	717.62	2.78	1.16	
A-2	718.23	5.12	717.35	6.00	0.88	C-2	717.38	1.44	715.59	3.23	1.79	
A-3	717.43	0.86	715.47	2.82	1.96	C-4	687.84	1.59	686.17	3.26	1.67	
B-1	723.98	0.14	722.09	2.03	1.89	ダム下	692.42	2.13	690.80	3.75	1.62	
B-2	717.76	1.50	717.06	2.20	0.70	E-1	717.42	0	717.42	0	0	
B-3	705.43	1.05	703.85	2.63	1.58	F-1	714.50	5.50	714.22	5.78	0.28	

*1) A-1~3、B-1~3、ダム下：平成2年～平成15年

C-1、C-2、C-4：平成4年～平成15年

E-1：平成13年試錐時のみ

F-1：平成14年試錐調査時、平成15年

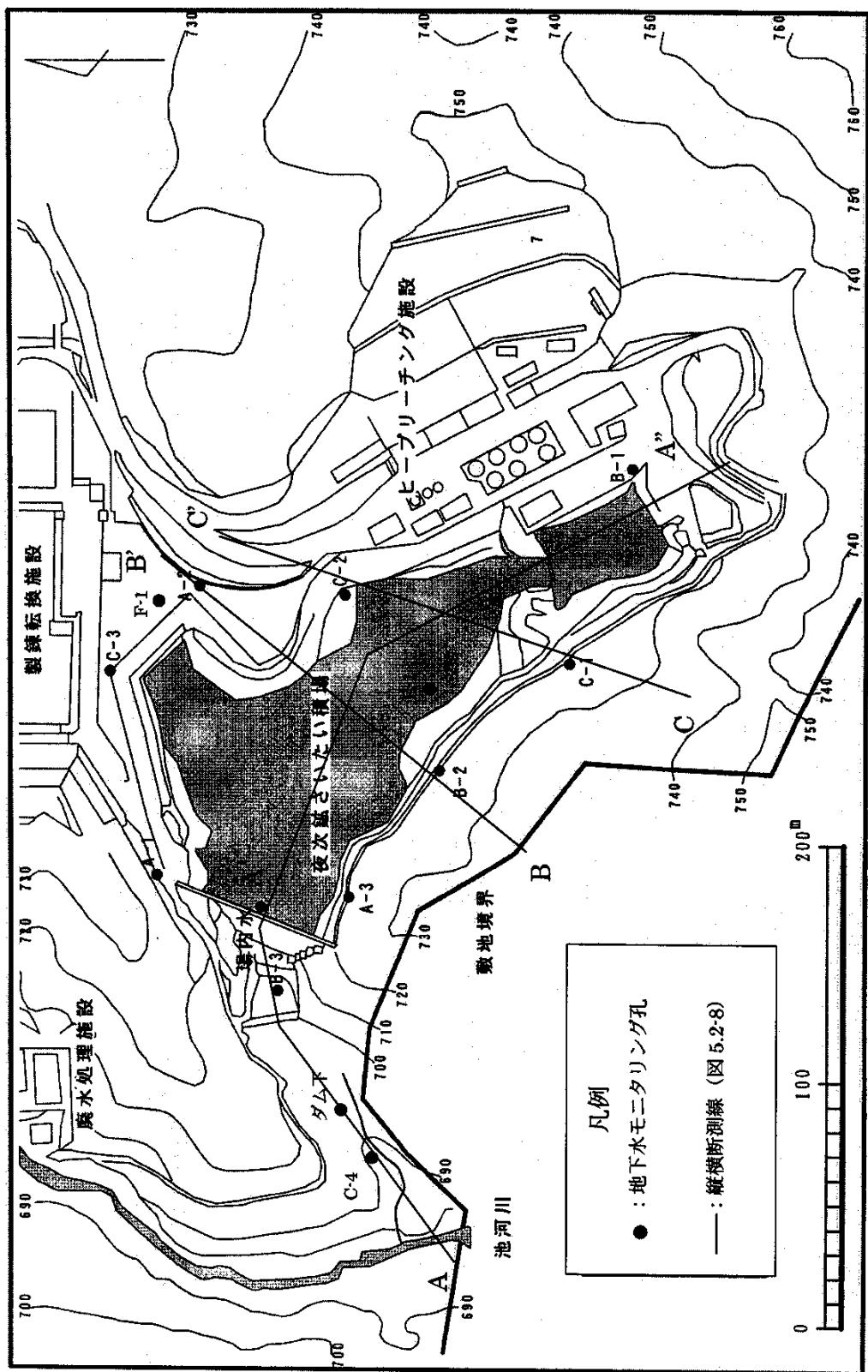


図 5.2-7 鉱さいたい積場モニタリング孔配置

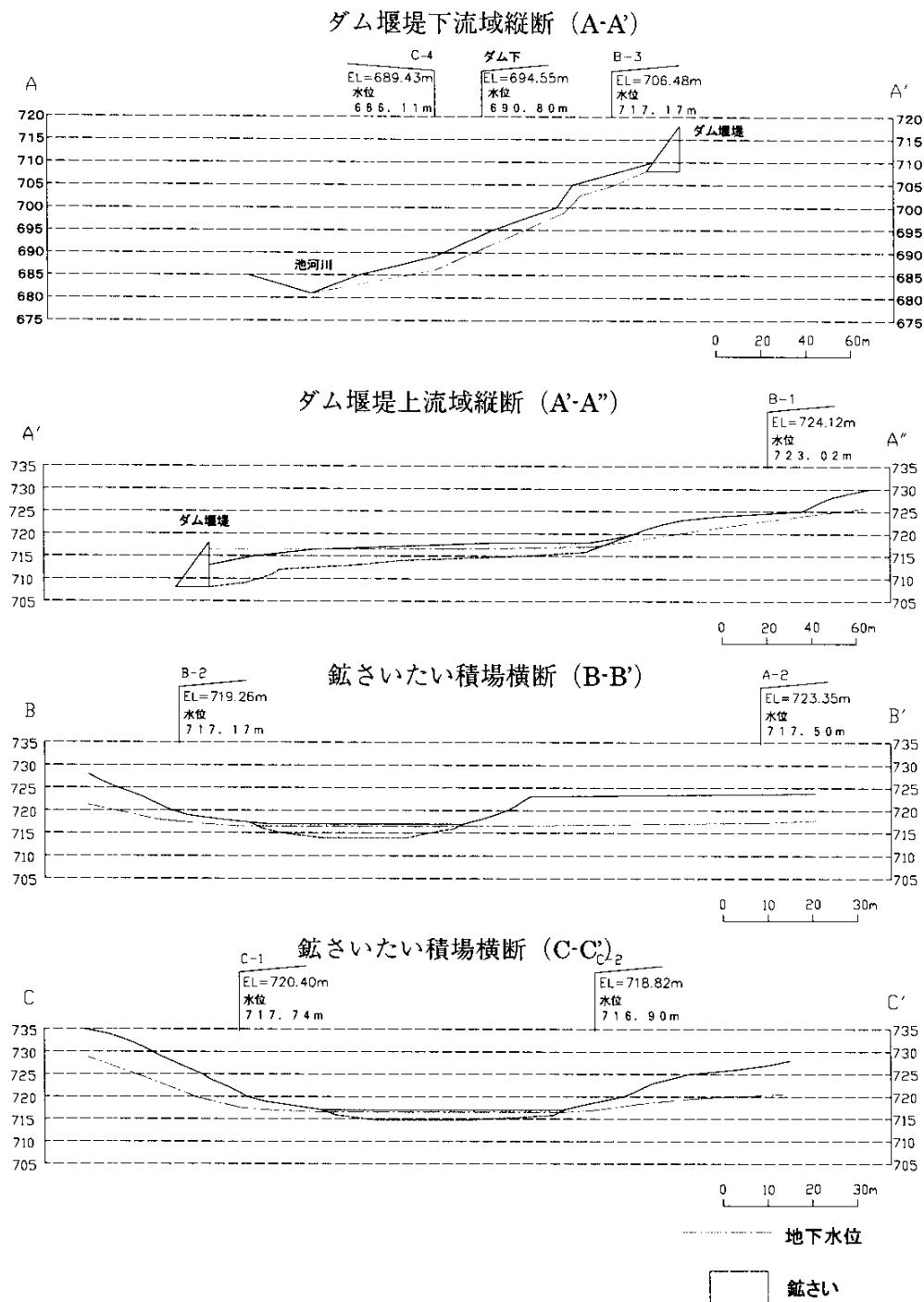


図 5.2-8 鉱さいたい積場周辺の地下水分布
(水位は平成 15 年測定データ)

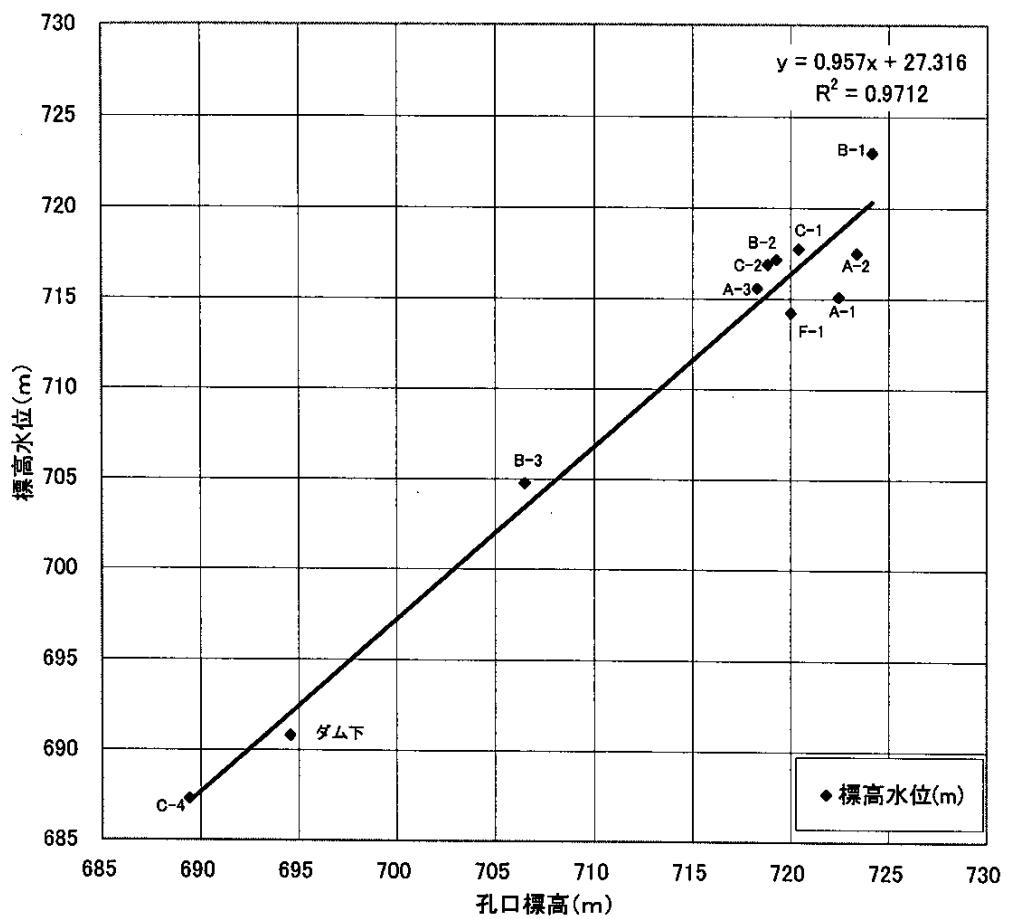


図 5.2-9 鉱さいたい積場の標高水位と孔口標高の関係

(2) 透水係数

透水係数は覆土と火山岩を除き、センター構内で実施した原位置透水試験及び室内透水試験から取得している。試験結果から得た透水係数を以下の内容で地質単元ごとに取捨選択し、それらの値の幾何平均値を解析に用いる値として選定した(表 5.2-6)。なお、覆土と火山岩は試験実績がないため、前者は既往解析に用いた値である $1.00 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ を選定し、後者は文献値(実務者のための地下水環境モデリング)の細粒高密火成岩(流紋岩、安山岩、玄武岩)の透水係数 $1.30 \times 10^{-3} \sim 6.10 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ の最大値と最低値の幾何平均 $2.82 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ を選定した。

- ・ 捨石、鉱さいは透水試験結果と Creager の方法*から得た推定値(表 5.2-7)の幾何平均値とした。
- ・ 堆積岩(泥岩、礫岩)は透水試験結果の幾何平均値とした。
- ・ 風化花崗岩はこれまでの解析課題を踏まえて、強風化花崗岩と弱風化花崗岩に区分した。前者は風化が著しく土砂状を呈したもの、後者は風化により軟質な岩塊状を呈したものであり、既往調査のボーリング柱状図及びコア写真を用いて地層区分を行い、透水試験結果をまとめた。なお、地層区分を行うためのデータがないものは除外した。強風化花崗岩の透水試験は回復法と注入法で実施しているが、透水係数は概ね同じ範疇($10^{-6} \sim 10^{-7} \text{ m/s}$ オーダー)にあることから、それらの結果の幾何平均値とした。弱風化花崗岩の透水試験は回復法、注入法及びパッカ法であるルジオン試験で実施しているが、各試験結果によって得た透水係数に大きな差異がないことから($10^{-7} \sim 10^{-9} \text{ m/s}$ オーダー)、これらの値をすべて用いて幾何平均値を算出した。
- ・ 花崗岩ではルジオン試験によって透水係数を取得している。なお、一部の孔において、パッカ法の JFT 試験、自然圧注水法、ルジオン試験を同一試験区間で行っているが、測定結果に 1~2 オーダーの違いがあるため、他と同じ試験であるルジオン試験の値を選択し、幾何平均を算出した。また、花崗岩の透水係数は破碎帶、変質帶及びそれらの近傍において得られた値($10^{-6} \sim 10^{-8} \text{ m/s}$ オーダー)は除いた。

各地質の透水係数は、捨石が $8.93 \times 10^{-5} \sim 6.39 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ (幾何平均 $4.74 \times 10^{-6} \text{ m/s}$)、鉱さいが $2.20 \times 10^{-4} \sim 3.00 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ (幾何平均 $2.61 \times 10^{-7} \text{ m/s}$)、堆積岩が $8.10 \times 10^{-7} \sim 1.08 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ (幾何平均 $2.37 \times 10^{-7} \text{ m/s}$)、 $7.30 \times 10^{-6} \sim 3.20 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ (幾何平均 $1.03 \times 10^{-6} \text{ m/s}$)、弱風化花崗岩は $1.70 \times 10^{-6} \sim 6.80 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ (幾何平均 $5.09 \times 10^{-8} \text{ m/s}$)、花崗岩が $3.42 \times 10^{-7} \sim 9.76 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ (幾何平均 $5.60 \times 10^{-9} \text{ m/s}$)である。

* Creager の方法：粒度試験から得られる加積通過率 20%に相当する粒径「 D_{20} 」を用いて透水係数の概略値を得る方法。

表 5.2-6 透水係数のまとめ

単位(m/s)

地質区分	透水係数							
	選定値	幾何平均	最大値	最小値	測定値			
覆土	1.00E-06							
捨石	4.74E-06	4.74E-06	8.93E-05	6.39E-07	4.04E-05	6.39E-07	6.06E-06	1.33E-05
					6.22E-07	5.27E-06	6.28E-06	8.93E-05
					1.77E-06	4.58E-06	5.38E-06	2.29E-06
					1.76E-06	4.32E-06	2.80E-06*	1.75E-05*
鉱さい	2.61E-07	2.61E-07	2.20E-04	3.00E-08	2.61E-07	2.45E-07	2.37E-07	1.07E-06
					9.01E-07	9.29E-07	1.05E-07*	3.00E-08*
					2.20E-04*	1.05E-07*	3.00E-08*	2.60E-05*
					3.00E-08*	2.60E-05*	1.05E-07*	1.05E-07*
					3.00E-08*	3.00E-08*	1.05E-07*	3.00E-08*
					3.00E-08*			
堆積岩	2.37E-07	2.37E-07	8.10E-07	1.08E-07	1.52E-07	1.08E-07	8.10E-07	
(泥岩)	1.52E-07	1.52E-07	1.52E-07	1.52E-07	1.52E-07			
(礫岩)	2.96E-07	2.96E-07	8.10E-07	1.08E-07	1.08E-07	8.10E-07		
火山岩	2.82E-05							
強風化 花崗岩	1.03E-06	1.03E-06	4.04E-05	3.20E-08	3.20E-08	1.40E-07	4.80E-06	7.30E-06
					6.73E-07	3.56E-07	1.46E-06	1.17E-06
					6.63E-07	2.82E-07	4.00E-06	4.40E-06
					7.38E-07	3.03E-06	5.70E-06	9.05E-07
					6.86E-07			
弱風化 花崗岩	5.09E-08	5.09E-08	1.70E-06	6.80E-09	1.70E-06	1.70E-07	2.80E-08	2.90E-08
					7.50E-09	7.10E-09	2.03E-08	1.68E-07
					5.32E-07	7.31E-07	6.80E-09	1.00E-07
					2.75E-08	2.75E-08	3.55E-07	8.40E-09
					7.65E-09	2.74E-08		
花崗岩	5.60E-09	5.60E-09	3.42E-07	9.76E-11	3.20E-09	6.70E-08	2.90E-08	7.80E-08
					4.60E-09	7.90E-10	1.80E-10	1.70E-08
					1.30E-08	1.15E-08	6.59E-08	5.50E-08
					1.66E-08	5.57E-09	3.42E-07	1.90E-09
					7.41E-10	3.08E-10	2.37E-10	9.76E-11

*: D20 粒径から透水係数を推定(表 5.1-4 参照)

表 5.2-7 鉱さい、捨石の D_{20} 粒径と透水係数

地質	D_{20} 粒径 (mm)	D_{20} 粒径に相当する 透水係数 (m/s)	備考
鉱さい	0.05	2.80E-06	E 孔
	0.1	1.75E-05	
捨石	0.01	1.05E-07	露天跡地 表層
	0.005	3.00E-08	
	0.3	2.20E-04	
	0.01	1.05E-07	C13 下部層
	0.005	3.00E-08	D12 下部層
	0.12	2.60E-05	F8 上部層
	0.005	3.00E-08	F14 下部層
	0.12	2.60E-05	F16 上部層
	0.01	1.05E-07	F16 下部層
	0.01	1.05E-07	J8 上部層
	0.005	3.00E-08	J8 下部層
	0.005	3.00E-08	N10 上部層
	0.01	1.05E-07	N8 下部層
	0.005	3.00E-08	P7 上部層
	0.005	3.00E-08	R7 上部層

(3) その他の物性値

①降雨量

表 5.2-8 にセンターで観測した降雨量（昭和 53 年～平成 15 年）をまとめた。年間降雨量の平均値は 2429.5mm である。

表 5.2-8 年間降雨量（昭和 53 年～平成 15 年）

単位 : mm

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年間	
昭和 53 年	1978	161.5	119.0	161.0	50.0	84.0	212.0	53.5	61.5	279.0	183.5	112.5	159.0	1636.5
昭和 54 年	1979	150.0	182.5	204.5	131.5	202.0	169.5	158.5	202.0	158.0	434.5	208.5	95.5	2297.0
昭和 55 年	1980	162.5	87.5	173.5	135.0	336.5	93.5	444.0	328.5	162.0	233.5	186.0	121.5	2464.0
昭和 56 年	1981	404.5	498.5	218.0	166.5	125.5	344.5	287.5	136.5	237.5	135.0	137.0	126.0	2817.0
昭和 57 年	1982	98.0	134.0	140.0	92.0	72.0	50.0	80.0	228.5	80.5	35.5	161.0	100.5	1272.0
昭和 58 年	1983	224.0	170.5	365.5	194.5	165.5	190.0	376.5	246.5	338.5	128.0	192.0	166.5	2758.0
昭和 59 年	1984	欠測	欠測	欠測	175.0	82.0	207.0	152.0	79.0	124.5	106.5	172.0	221.5	1319.5
昭和 60 年	1985	202.5	245.5	233.5	241.0	126.0	439.5	257.0	60.0	284.0	96.5	194.5	97.5	2477.5
昭和 61 年	1986	103.0	227.5	208.0	130.5	202.5	247.0	326.0	73.0	156.5	210.0	161.5	263.9	2309.4
昭和 62 年	1987	285.5	152.8	218.5	55.5	128.1	276.0	221.0	182.5	233.0	358.5	99.5	128.8	2339.7
昭和 63 年	1988	128.8	194.0	205.0	160.0	214.5	314.0	334.0	226.0	197.5	211.5	183.0	129.6	2497.9
平成元年	1989	267.7	300.0	235.0	94.5	173.0	147.5	169.5	277.5	438.0	209.0	276.5	158.5	2746.7
平成 2 年	1990	300.5	136.5	184.0	251.0	167.5	160.0	208.5	141.0	510.0	257.0	364.5	131.0	2811.5
平成 3 年	1991	262.5	323.0	223.5	170.5	104.5	255.0	277.0	78.0	195.5	331.5	159.5	237.0	2617.5
平成 4 年	1992	163.0	288.0	217.5	192.0	155.0	130.0	240.5	356.5	145.0	203.0	236.0	173.9	2500.4
平成 5 年	1993	238.0	287.5	179.5	68.0	136.0	308.0	512.0	352.0	328.5	89.5	149.5	211.0	2854.5
平成 6 年	1994	181.5	337.0	121.0	61.5	109.0	123.5	14.0	107.5	237.5	79.5	97.5	170.0	1699.5
平成 7 年	1995	318.0	227.0	206.0	119.5	331.5	110.0	457.0	88.5	98.0	75.5	149.5	279.5	2460.0
平成 8 年	1996	209.0	215.5	226.5	76.5	112.5	285.5	261.5	213.0	251.0	192.0	131.0	133.5	2307.5
平成 9 年	1997	152.0	249.0	134.5	112.5	256.0	222.0	704.5	203.5	447.0	49.0	183.0	151.0	2864.0
平成 10 年	1998	285.5	157.5	159.7	152.5	185.0	196.0	314.5	70.0	426.5	339.0	50.5	87.5	2424.2
平成 11 年	1999	160.0	289.0	192.0	172.0	177.0	359.0	120.0	154.5	327.5	186.5	190.5	148.5	2476.5
平成 12 年	2000	222.0	263.0	197.5	113.5	153.0	203.5	104.5	77.5	304.0	182.0	277.0	118.0	2215.5
平成 13 年	2001	270.0	216.5	285.0	44.5	151.5	297.0	176.5	254.5	437.5	274.5	159.0	198.0	2764.5
平成 14 年	2002	欠測	欠測	152.0	80.5	153.0	124.0	173.5	93.0	332.5	139.5	186.5	237.0	1671.5
平成 15 年	2003	308.5	171.0	292.5	211.0	165.0	153.5	347.5	367.0	223.0	45.0	212.5	261.0	2757.5
平均値		218.9	228.0	205.3	132.8	164.2	216.1	260.4	179.2	267.4	184.1	178.1	165.6	2429.5

年間降雨量の平均は欠測のある年は省く

②有効間隙率

表 5.2-9 に有効間隙率をまとめる。有効間隙率は原位置データを取得していないことから、既往解析で用いた文献値とし、鉱さい、堆積岩、火山岩は文献値等から新たに取得した。

鉱さいは細砂と泥粘質土層の値（改訂地下水ハンドブック）から、堆積岩は泥岩と礫岩の平均値、火山岩については玄武岩と安山岩（岩の調査と試験）の平均値とした。なお、強風化花崗岩と弱風化花崗岩は風化花崗岩の値とした。

表 5.2-7 有効間隙率

地層	有効間隙率 n_e (%)
覆土	30
捨石	30
鉱さい	15
堆積岩	10
(泥岩)	5
(礫岩)	15
強風化花崗岩	10
弱風化花崗岩	10
花崗岩	0.5
火成岩	11

③不飽和特性

不飽和特性は飽和度と比透水係数の関係及び飽和度とサクション圧の関係からなる。これらの関係値は原位置の値を取得していないことから既往解析に用いた値とした。図 5.2-10 にこれらの関係図を表 5.2-10、5.2-11 に測定値を示す。飽和度とサクション圧の関係は有効間隙率から設定している。なお、火山岩は花崗岩の物性値とした。

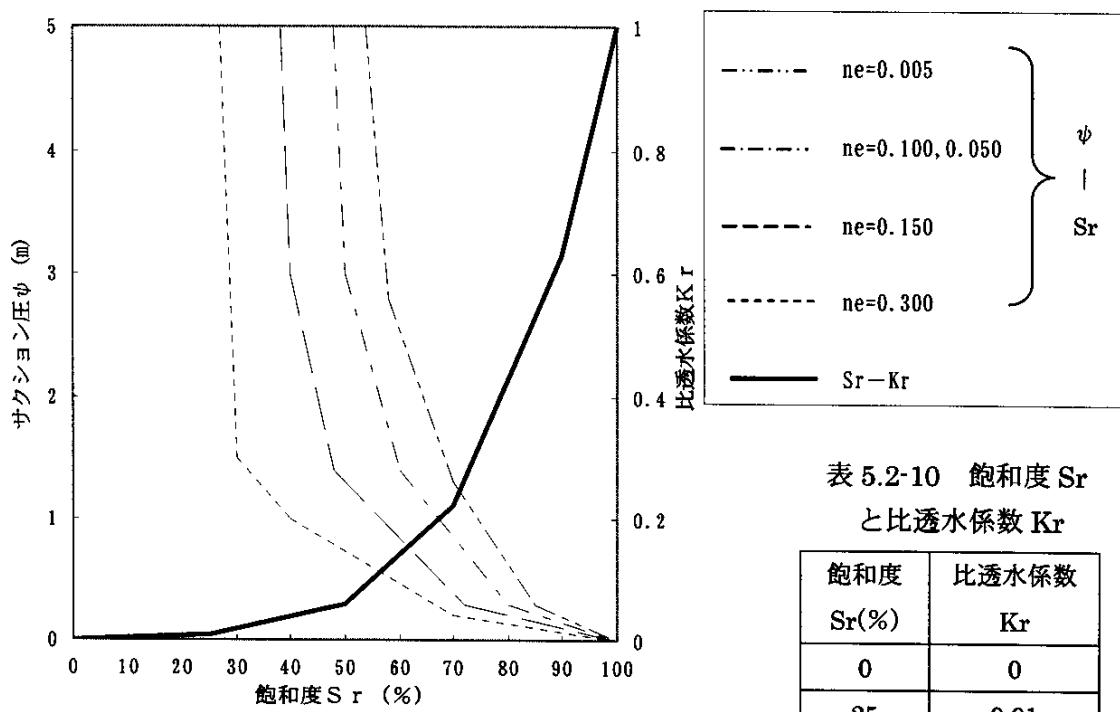


図 5.2-10 不飽和特性

表 5.2-10 飽和度 Sr
と比透水係数 Kr

飽和度 Sr(%)	比透水係数 Kr
0	0
25	0.01
50	0.06
70	0.22
90	0.63
100	1.00

表 5.2-11 飽和度とサクション圧

有効間隙率 n_e								
0.005 (花崗岩、火成岩)		0.100, 0.050 (堆積岩、泥岩、強 風化花崗岩、弱風 化花崗岩)		0.150 (鉱さい、礫岩)		0.300 (覆土、捨石)		
飽和度 Sr (%)	サクション圧 ψ (m)	飽和度 Sr (%)	サクション圧 ψ (m)	飽和度 Sr (%)	サクション圧 ψ (m)	飽和度 Sr (%)	サクション圧 ψ (m)	
54	5.0	48	5.0	38	5.0	27	5.0	
58	2.8	50	3.0	40	3.0	30	1.5	
70	1.3	60	1.4	48	1.4	40	1.0	
85	0.3	80	0.3	72	0.3	70	0.2	
100	0	100	0	100	0	100	0	

5.2.3 物質移行解析物性値

(1) 初期核種固相濃度

表 5.2-12 に既往の放射性核種濃度測定から取得した各地層の U-238、Th-222、Ra-226 の固相濃度をまとめる。同表中の固相濃度は安全性の評価を保守的に進める上で、濃度測定で取得した値の中で最も高い値を採用した。解析に用いる初期核種固相濃度は同表の濃度を基にして、ウラン、アクチニウム及びトリウム系列について子孫核種の濃度を以下に示す方法により仮定した。表 5.2-13 に各地層の初期濃度をまとめる。

①捨石及び鉱さい

露天跡地の捨石、鉱さいたい積場の鉱さいの両者はヒープリーチング処理によってウランを回収しているため、ウラン以外の放射性核種濃度分布は鉱石の放射平衡状態を保存し、ウランだけが減少していると仮定した。また、捨石及び鉱さいの現在の核種濃度分布は、鉱さい及びその他の沈殿物等の発生過程での核種濃度分布、露天跡地・鉱さいたい積場へのたい積以降に起きた地下水による核種の移行、並びにラドンガスの散逸によりばらつく可能性が考えられるが、安全性の評価を保守的に進める上で、考慮しないこととした。

ウラン系列のうち、U-238 及び Ra-226 濃度は測定値とした。U-234 濃度は U-238 天然のウラン核種の存在比 (0.0057%) から算出し、Th-234 及び Pa-234 濃度は U-238 濃度と放射平衡を仮定した。その他の子孫核種濃度は、Ra-226 と放射平衡状態にあるものと仮定した (図 5.2-11)。

アクチニウム系列のうち、U-235 濃度は、U-238 濃度と天然のウラン核種の存在比から算出した。子孫核種濃度は、元の鉱石中の Ra-226 濃度より放射平衡状態を仮定した場合に想定される U-234 濃度と天然のウラン核種の存在比から計算される U-235 濃度と放射平衡状態にあるものと仮定した (図 5.2-12)。

トリウム系列については、Th-232 濃度を用いて放射平衡状態にあるものと仮定した (図 5.2-13)。

②その他の地層

その他の地層の初期核種固相濃度は、U-238、Th-232、Ra-226 については測定した濃度とし、子孫核種は安全性の評価を保守的に進める上で、U-238、Th-232、Ra-226 の核種濃度のうち最も高い値と平衡状態にあると仮定した。

表 5.2-12 各地質の U、Th、Ra 濃度

地質	核種	濃度		備考
		分析値	換算値*	
覆土 (マサ土)	U-238	2.4E-05 g/g	3.0E-01 Bq/g	昭和 62 年度 風化花崗岩分析値
	Th-232	2.2E-05 g/g	8.8E-02 Bq/g	
	Ra-226	6.61E-12 Ci/g	2.4E-01 Bq/g	
捨石	U-238	3E-04 g/g	4E+00 Bq/g	平成 13 年度分析値
	Th-232	2.5E-05 g/g	1.0E-01 Bq/g	昭和 62 年度分析値
	Ra-226	2.82E-10 Ci/g	1.0E+01 Bq/g	
鉱さい	U-238	1.800E-03 g/g	2.23E+01 Bq/g	平成 11 年度分析値
	Th-232	1.10E-04 g/g	4.40E-01 Bq/g	
	Ra-226	4.3E+01 Bq/g	4.3E+01 Bq/g	
泥岩	U-238	3.4E-06 g/g	4.2E-02 Bq/g	平成元年度分析値
	Th-232	1.54E-05 g/g	6.16E-02 Bq/g	
	Ra-226	6.38E-12 Ci/g	2.4E-01 Bq/g	
礫岩	U-238	3.28E-04 g/g	4.04E+00 Bq/g	昭和 63 年度分析値
	Th-232	1.0E-05 g/g	4.00E-02 Bq/g	
	Ra-226	9.5E-11 Ci/g	3.5E+00 Bq/g	
強風化 花崗岩	U-238	2.4E-05 g/g	3.0E-01 Bq/g	昭和 62 年度 風化花崗岩分析値
	Th-232	2.20E-05 g/g	8.80E-02 Bq/g	
	Ra-226	6.61E-12 Ci/g	2.4E-01 Bq/g	
弱風化 花崗岩	U-238	2.4E-05 g/g	3.0E-01 Bq/g	昭和 62 年度 風化花崗岩分析値
	Th-232	2.20E-05 g/g	8.80E-02 Bq/g	
	Ra-226	6.61E-12 Ci/g	2.4E-01 Bq/g	
花崗岩	U-238	8E-06 g/g	1E-01 Bq/g	昭和 62 年度分析値
	Th-232	8E-06 g/g	3E-02 Bq/g	
	Ra-226	2.19E-12 Ci/g	8.1E-02 Bq/g	

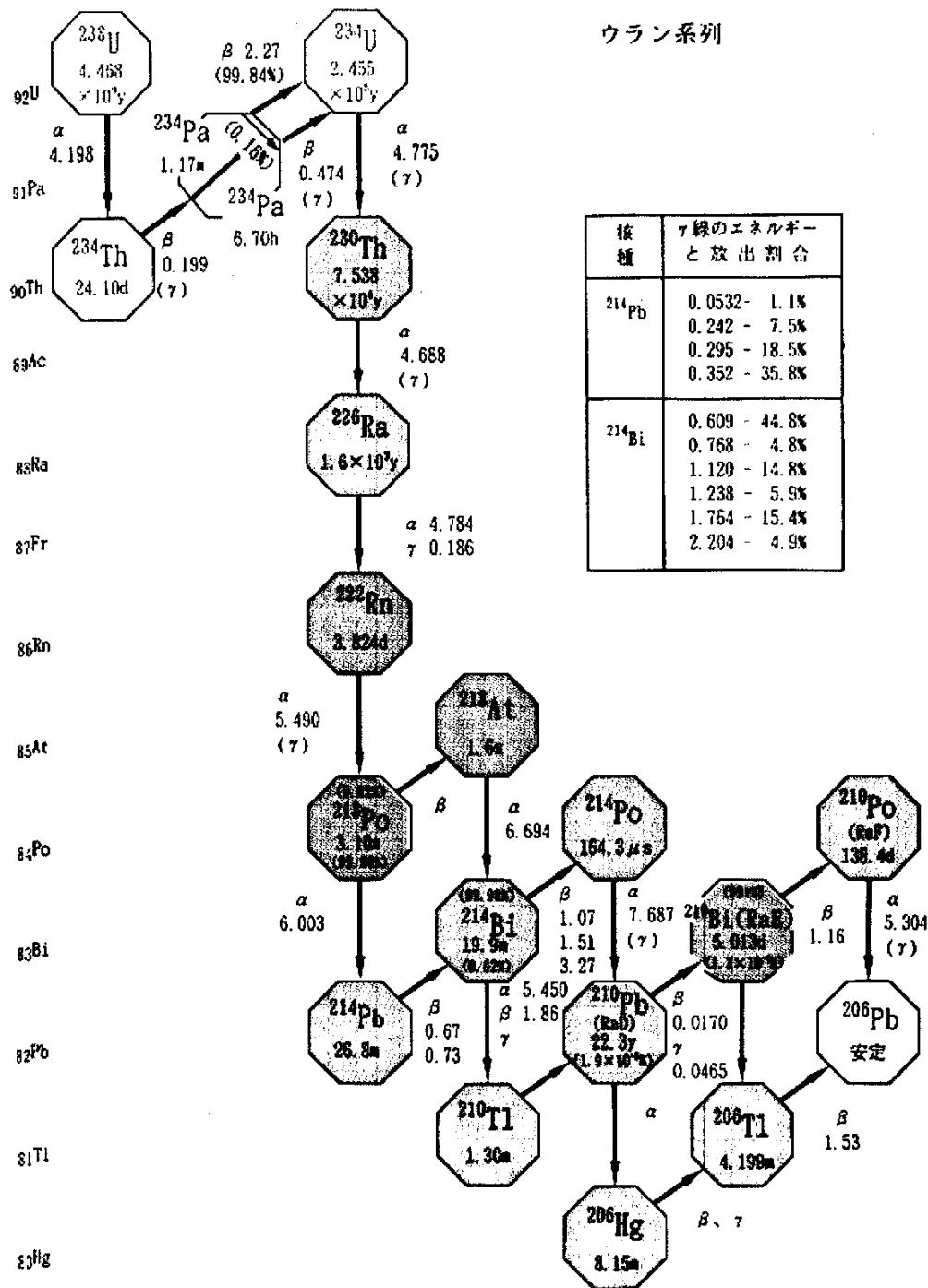
* : 比放射能値の換算値

U-238: 1.24×10^4 Bq/g, Th-232: 4.0×10^3 Bq/g, Ra-226: 3.7×10^{10} Bq/g

表 5.2-11 各地質の初期核種固相濃度

核種	初期濃度 (Bq/g)								
	覆土	捨石	鉱さい	泥岩	礫岩	強風化 花崗岩	弱風化 花崗岩	花崗岩	
ウラン系列	U-238	3.0E-01	4E+00	2.23E+01	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	Th-234	3.0E-01	4E+00	2.23E+01	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	Pa-234	3.0E-01	4E+00	2.23E+01	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	U-234	3.0E-01	4E+00	2.34E+01	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	Th-230	3.0E-01	1.0E+01	4.3E+01	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	Ra-226	3.0E-01	1.0E+01	4.3E+01	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	Rn-222	3.0E-01	1.0E+01	4.3E+01	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	Po-218	3.0E-01	1.0E+01	4.3E+01	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	Pb-214	3.0E-01	1.0E+01	4.3E+01	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	Bi-214	3.0E-01	1.0E+01	4.3E+01	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	Po-214	3.0E-01	1.0E+01	4.3E+01	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	Pb-210	3.0E-01	1.0E+01	4.3E+01	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	Bi-210	3.0E-01	1.0E+01	4.3E+01	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	Po-210	3.0E-01	1.0E+01	4.3E+01	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	Pb-206	3.0E-01	1.0E+01	4.3E+01	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
アクチニウム系列	U-235	3.0E-01	1.7E-01	1.0E+00	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	Th-231	3.0E-01	5.26E-01	2.19E+00	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	Pa-231	3.0E-01	5.26E-01	2.19E+00	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	Ac-227	3.0E-01	5.26E-01	2.19E+00	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	Th-227	3.0E-01	5.26E-01	2.19E+00	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	Ra-223	3.0E-01	5.26E-01	2.19E+00	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	Rn-219	3.0E-01	5.26E-01	2.19E+00	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	Po-215	3.0E-01	5.26E-01	2.19E+00	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	Pb-211	3.0E-01	5.26E-01	2.19E+00	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	Bi-211	3.0E-01	5.26E-01	2.19E+00	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	Tl-207	3.0E-01	5.26E-01	2.19E+00	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	Pb-207	3.0E-01	5.26E-01	2.19E+00	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
トリウム系列	Th-232	3.0E-01	1.00E-01	4.40E-01	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	Ra-228	3.0E-01	1.00E-01	4.40E-01	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	Ac-228	3.0E-01	1.00E-01	4.40E-01	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	Th-228	3.0E-01	1.00E-01	4.40E-01	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	Ra-224	3.0E-01	1.00E-01	4.40E-01	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	Rn-220	3.0E-01	1.00E-01	4.40E-01	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	Po-216	3.0E-01	1.00E-01	4.40E-01	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	Pb-212	3.0E-01	1.00E-01	4.40E-01	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	Bi-212	3.0E-01	1.00E-01	4.40E-01	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	Po-212	3.0E-01	1.00E-01	4.40E-01	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	Tl-208	3.0E-01	1.00E-01	4.40E-01	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01
	Pb-208	3.0E-01	1.00E-01	4.40E-01	2.4E-01	4.04E+00	3.0E-01	3.0E-01	1E-01

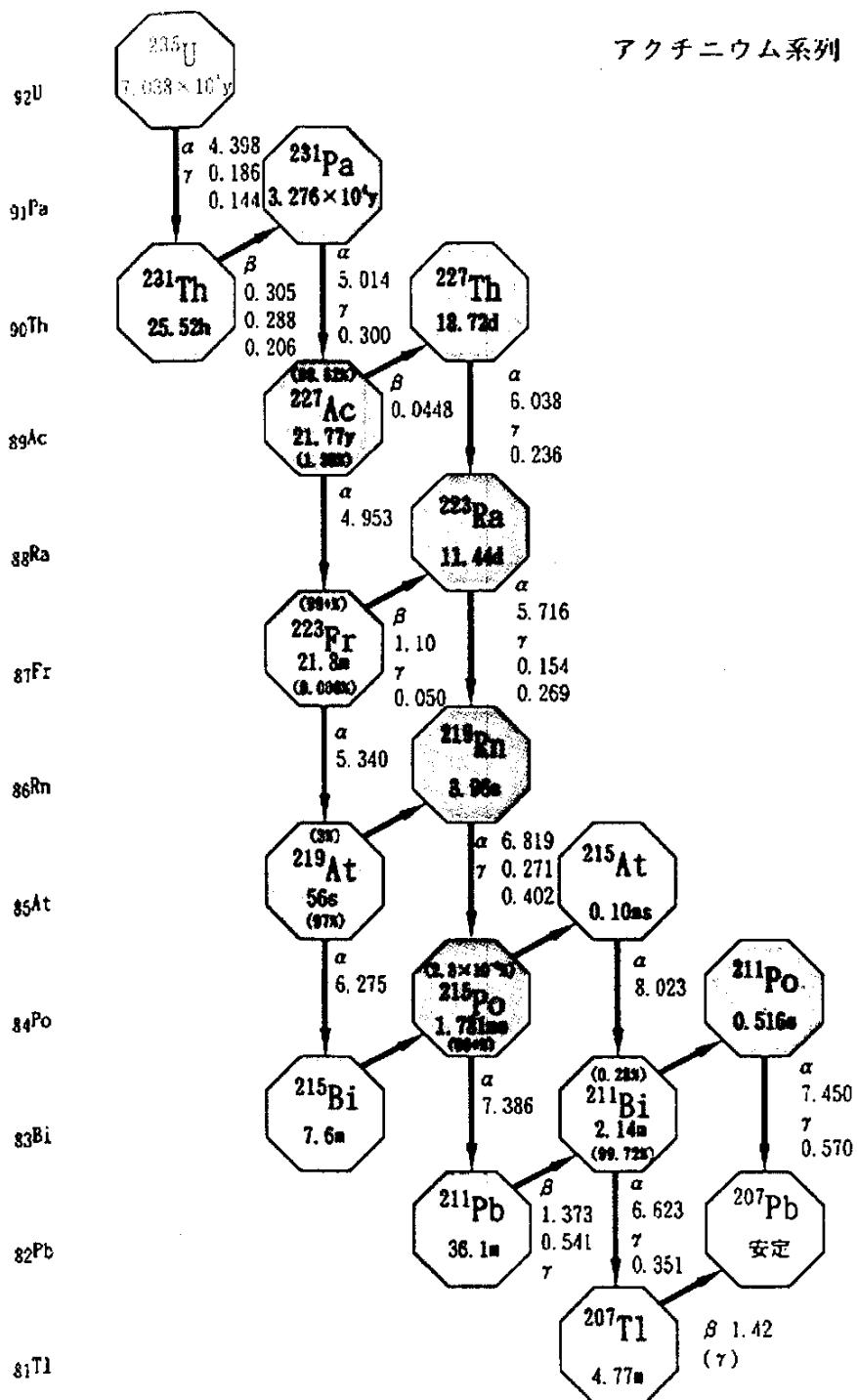
ウラン系列



	U-238 濃度と天然存在比から計算
	U-238 濃度から放射平衡を仮定して計算
	Ra-226 濃度から放射平衡を仮定して計算

図 5.2-11 捨石及び鉱さい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（編）（1984）改訂3版、
アイソトープ便覧 に加筆。

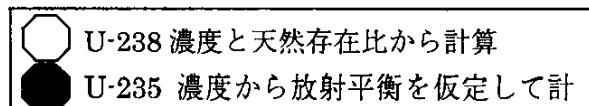
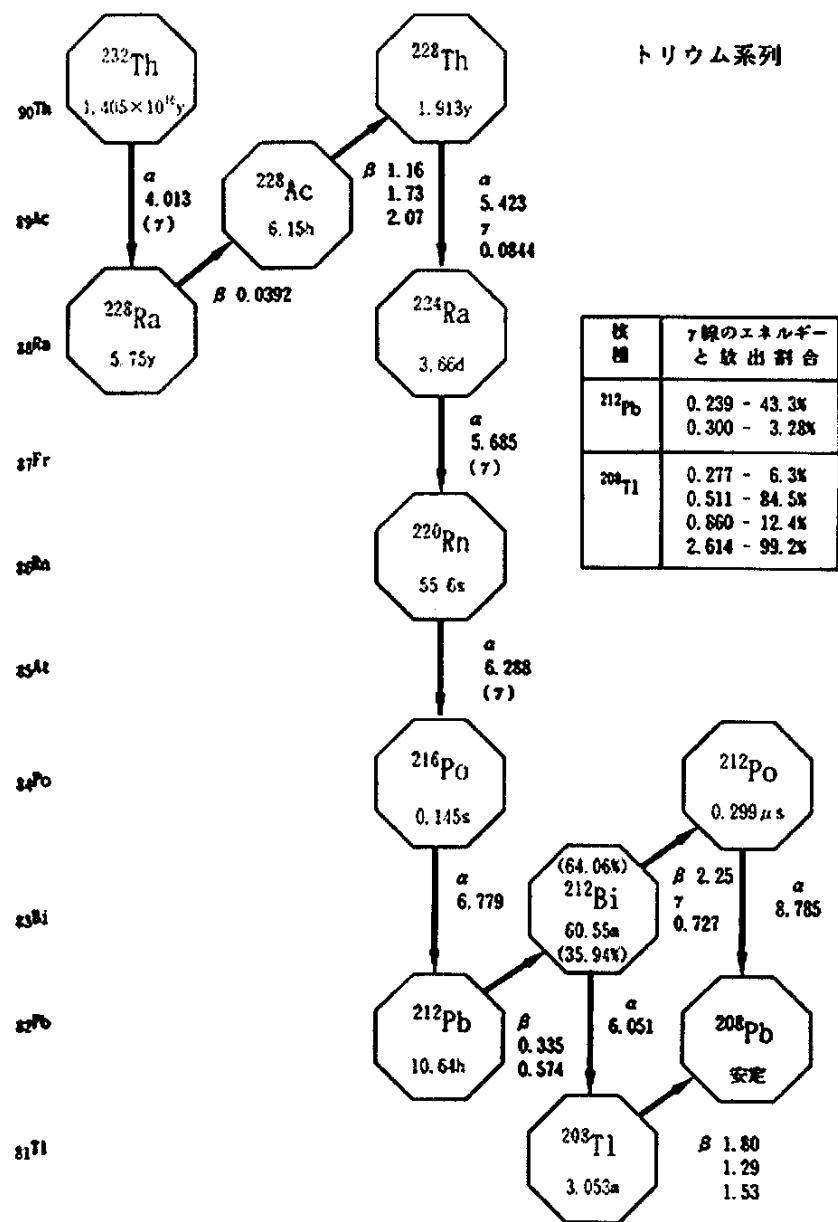


図 5.2-12 捨石及び鉱さい中のアクチニウム系列核種の濃度計算の考え方



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 5.2-13 捨石及び鉱さい中のトリウム系列核種の濃度計算の考え方

(2) 分配係数

表 5.2-14 に各地質の分配係数をまとめた。U、Ra（花崗岩を除く）及び捨石、鉱さいに対する Th の分配係数は室内試験から取得している。それ以外の分配係数は文献から取得した。なお、堆積岩の分配係数は礫岩の値とし、強風化花崗岩と風化花崗岩は同じ値とした。

表 5.2-14 各地質に対する分配係数

核種		分配係数 (m ³ /kg)								
		壤土 ^{*1}	捨石 ^{*2}	鉱さい ^{*2}	堆積岩 ^{*3}	礫岩 ^{*3}	泥岩 ^{*3}	強風化 花崗岩 ^{*3}	風化 花崗岩 ^{*3}	花崗岩 ^{*4}
ウラン 系列	U-238	3.30E-02	6.80E-01	7.00E-01	9.76E-01	9.76E-01	4.70E-02	6.60E-02	6.60E-02	1.00E+00
	Th-230	3.00E+00	2.40E+01	2.20E+01	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	8.00E-01	8.00E-01	1.00E-01
	Ra-226	4.90E-01	6.69E+00	2.90E+00	2.12E+00	2.12E+00	1.14E+00	1.06E+00	1.06E+00	5.00E-02
	Pb-210	2.70E-01	2.70E-01	2.70E-01	1.00E-01	1.00E-01	1.00E-01	2.70E-01	2.70E-01	1.00E-01
	Po-210	1.50E-01	1.50E-01	1.50E-01	1.00E-01	1.00E-01	1.00E-01	1.00E-01	1.00E-01	1.00E-01
アクチ ニウム 系列	U-235	3.30E-02	6.80E-01	7.00E-01	9.76E-01	9.76E-01	4.70E-02	6.60E-02	6.60E-02	1.00E-01
	Pa-231	5.40E-01	5.40E-01	5.40E-01	1.00E-01	1.00E-01	1.00E-01	5.00E-01	5.00E-01	1.00E-01
	Ac-227	4.50E-01	4.50E-01	4.50E-01	5.00E+00	5.00E+00	5.00E+00	4.50E-01	4.50E-01	5.00E-02
トリウム 系列	Th-232	3.00E+00	2.40E+01	2.20E+01	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	8.00E-01	8.00E-01	1.00E-01
	Ra-228	4.90E-01	6.69E+00	2.90E+00	2.12E+00	2.12E+00	1.14E+00	1.06E+00	1.06E+00	5.00E-02
	Th-228	3.00E+00	2.40E+01	2.20E+01	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	8.00E-01	8.00E-01	1.00E-01

* 1 : 土壌などの分配係数データ（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）

* 2 : U、Ra、Th 以外、土壌などの分配係数データ（”）

* 3 : U、Ra 以外、花崗岩に対する放射性元素の分配係数（”）

* 4 : 花崗岩に対する放射性元素の分配係数（”）

6. 今後の課題

本報告書では、既往の地下水流动、物質移行解析によって得られた課題について抽出し、現況で対処可能な内容に関してその対処を検討した。また、地形モデルの作成及び解析に用いる物性値等の整理を行った。以下、未対処の課題及び解析データをまとめる上で考えられた課題とそれらの対処策について地質、地下水理及び解析ごとに、優先順位が高いものから順にまとめる。

(1) 地質

- ・課題) 鉱さいたい積場周辺に分布する堆積岩は泥岩、砂岩及び礫岩であるが、各層の分布状況が明らかではないため、これを把握する必要がある。
対処案) 解析モデル範囲及びその周辺の既往地表踏査資料を用いると共に、露頭状況の再確認（各層の分布、走向・傾斜等）を行い、解析モデルに各層の区分を行う。砂岩は実測の解析物性値を得ていないため、露頭性状及びセンター内のボーリング調査で確認した砂岩の性状から文献値を選定する。
- ・課題) 鉱さいたい積場の右岸のF-1孔で、風化花崗岩と花崗岩の間に熱水変質を被って割れ目が卓越しかつ脆弱化した花崗岩が確認された。F-1孔の下流約20mのC-3孔では脆弱花崗岩の分布深度と同等深度で安山岩の貫入岩（コア長6m程度）を確認しており、この貫入岩の影響が考えられる。貫入岩の直上部は変質かつ風化が著しく（土砂状）、その上層は土砂状を主体とした風化層が連続する。この層の分布下限は比抵抗探査から推定される鉱さいたい積場側の花崗岩の上限深度より20m程度深い。また、花崗岩と比較して透水性が高いことが予見でき、分布状況によっては下流側への水みちとなりうる。したがって、脆弱帶の落ち込みの分布を把握する必要がある。
対処案) 脆弱帶の分布域を把握するために鉱さいたい積場右岸における比抵抗探査が考えられる。ただし、この分布域に隣接した施設があるため、解析結果に影響を与えることが考えられるため探査域を十分に検討する必要がある。
- ・課題) F-1孔の脆弱帶以深7m（孔底まで）の花崗岩の透水係数は $10^{-6} \sim 10^{-7}$ m/sのオーダーで、弱風化花崗岩の幾何平均（ 10^{-8} m/s）よりも高い。このため、脆弱帶周囲の花崗岩の透水性が高い可能性がある。この花崗岩は地下水理の面から個別に地層区分すると共に、この透水性が高い領域を把握することが望ましい。なお、この高透水性はパッカ一周辺の側面流またはバイパス経路が影響して生じている可能性があるため、この対策が必要である。
対処案) 前述の比抵抗探査でこの領域を把握する。比抵抗探査によってこの領域が把握できない場合、ボーリングの実施かつ透水試験により花崗岩の高透水領

域を把握する。透水試験では有効長の長いパッカーを使用するなどの側面流またはバイパス経路対策を行うことが望ましい。

・課題) 鉱さいたい積場の両岸にリニアメントがあるが、この性状が把握できていないため、地下水理に与える影響が判断できていない。左岸側は比抵抗探査から低比抵抗帯の深部への落ち込みが確認されており、かつ弾性波探査の低速度帯とも一致していることから、断層もしくは変質帯と考えられる。左岸上流部のC-1孔では深度11m付近に層厚約0.5mの砂質粘土状の破碎帯を確認していることから左岸側リニアメントは断層の可能性がある。このため、リニアメントの性状及び分布を把握する必要がある。

対処案) 右岸側リニアメントは前述の脆弱帯(変質帯)の可能性があるため、比抵抗探査による脆弱帯の連続性から確認する。左岸側リニアメントについてはボーリングによる性状及び地下水理に与える影響を確認する。

(2) 地下水理

・課題) センター周辺における解析モデル作成範囲の地下水理及び表層水理が把握できていない。

対処案) センター周辺が山地部であることから、地下水の露頭である湧水の分布を調べることにより、地下水の分布を推定することが可能と考えられる。センター周辺の解析モデル作成範囲とその周囲で湧水調査のための地表踏査を行うことが望ましい。また、湧水調査と並行して表流水の調査を行い、表層水理を把握する。地表踏査には2週間程度必要である。

・課題) 地下水位は露天跡地周辺のラドン測定孔を除き、断続的な値(1~3測定/年)のみを測定している。降水に伴う地下水位の変動は対象地盤の透水性や地下水の連続性を把握する上で有用かつ信頼性の高い情報となり、また流域の水収支を把握する上でも、地下水の連続データの取得が必要である。

対処案) 露天跡地周辺ではラドン測定は平成15年度までであり、また測定孔は露天跡地中央の1箇所と露天跡地南側沢沿いの3箇所である。露天跡地周辺の全体的な地下水位の挙動を把握するために、露天跡地北、東及び西側の沢沿いのモニタリング孔でも観測することが望ましい。鉱さいたい積場ではこの周囲の沢末端部に位置するモニタリング孔及び鉱さいたい積場下流のモニタリング孔で地下水位の挙動を把握することが望ましい。また、水位変動が大きいなどの特異な箇所での測定も望まれる。水位は年ごとの降雨量等によって変わるため、経年の水位変動を捉えるためにも数年以上測定する必要が考えられる。

- ・課題) 露天跡地への降雨浸透水量などの水収支を把握できていない。
対処案) 露天跡地内に設置した気象観測システムの降雨量等の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。

(3) 解析

- ・課題) 不飽和浸透流解析は降雨浸透率及び不飽和特性などの不確実な物性値を複数用いるため、既往解析結果が実状と合わないことが考えられる。
対処案) 露天跡地はモニタリング孔が多いことから、モニタリングデータの半数の実測地下水位を上部境界とした飽和浸透流解析を行い、残りの半数を検証用データに用いる方法が考えられる。
- ・課題) 有効間隙率はダルシー流速から実流速を求める際の大きなパラメータであり、この値によって実流速のオーダーが変わってくる。物質移行解析では特に実流速が速くなると移行形態が変わることが推定されることから実測値を測定することが望ましい。
対処案) 文献値から得ていた有効間隙率を室内試験で把握する

7. おわりに

本報告書では、これまでの露天跡地及び鉱さいたい積場における調査・研究成果をもとに、今後の地下水流动解析・物質移行解析から精度のよい結果を得るために、既往解析における課題を抽出し、その対処として解析コードの選定、解析モデルに用いる地質区分の再定義、解析に用いる物性値の収集かつ既往データの再評価を行った内容についてまとめた。

今後実施する解析では、今回行った対処を反映させていくと共に、未対処の課題についても解析結果を踏まえて対処を行う。

[謝辞]

核燃料サイクル開発機構 東濃地化学センター 瑞浪超深地層研究所 超深地層研究グループの竹内真司氏、三枝博光氏、稻葉薰氏には地下水流动解析に関する有益なご助言を賜りました。ここに、謝意を表します。

参考文献

- ・ (社)日本アイソトープ協会：アイソトープ便覧、改訂3版、丸善（1984）
- ・ 岩の試験・調査規格・基準検討委員会：岩の試験・調査方法の基準解説書、(社)地盤工学会（2003）
- ・ 岩の調査と試験編集委員会：岩の調査と試験、(社) 土質工学会、p. 385(1989)
- ・ (財)国土開発技術研究センター：地下水調査および観測指針（案）、3版、(株)山海堂(1996)
- ・ 改訂地下水ハンドブック編集委員会：改訂地下水ハンドブック、建設産業調査会、p.70（1998）
- ・ 地盤工学会土壤・地下水汚染の調査・予測・対策編集委員会：土壤・地下水汚染の調査・予測・対策、地盤工学・実務シリーズ 15、(社) 地盤工学会、pp.80～81（2002）
- ・ 地下水問題研究会：地下水汚染論－その基礎と応用－、共立出版(株)、p.87（1991）
- ・ 日本の地質『中国地方』編集委員会：中国地方、日本の地質 7、共立出版(株)、pp89～90、p.158（1987）
- ・ Karlheinz Spitz and Joanna Moreno、岡山地下水研究会訳：実務者のための地下水環境モデリング、技報堂出版(株)、p.297（2003）
- ・ Marry P. Anderson and Willam W. Woessner、藤繩克之監訳：地下水モデル、共立出版(株)(1994)
- ・ 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)
- ・ 核燃料サイクル開発機構人形環境技術センター：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、p. I -20、JNC TN6410 2002-001(2002)
- ・ 三菱マテリアル株： “鉱さいたい積場の措置に係る安全性評価” JNC TJ6410 2003-010(2002)
- ・ 三菱マテリアル株： “鉱さい等の安全評価パラメータ測定”、JNC TJ6420 2003-002（2003）

付録

○解析コード仕様 (G-TRAN/3D マニュアル及びガイドブックより引用加筆)

G-TRAN/3D は飽和-不飽和浸透流解析ソルバーと移流拡散解析ソルバーを使用した連成解析システムであり、モデルデータを作成する PreProcessor 機能と解析結果を確認する PostProcessor 機能を有する。

(1) 構成プログラム

G-TRAN/3D は主に参考表-1 のプログラムにより構成される。

参考表-1 プログラム構成

プログラム名	説明
GTRAN3D	Pre/PostProcessing プログラム
UNSAF3D	3 次元飽和不飽和浸透流解析プログラム
TRAN3D	3 次元移流拡散解析プログラム

※ GTRAN3D は Softbrain 社が開発した 3D-Flow 用 Pre/Postprogram を元に(株)地層科学研究所が独自に開発したもの。

※ UNSAF3D は岡山大学 西垣誠教授の開発されたプログラムを元に(株)地層科学研究所がメンテナンスを行っているプログラム。

(2) 境界条件と物性値

参考表-2, 3 に解析に用いる境界条件と物性値をまとめた。

参表-2 境界条件一覧

境界条件	説明	単位
浸透流解析	固定水頭境界 地下水のポテンシャルを扱う境界。水頭の固定値や時間変化を設定。	L
	変動水頭境界	
	固定流量境界 接点での流量を表す境界。流量の固定値や時間変化を設定。	L^3/T
	変動流量境界	
	浸出面 圧力水頭が0より大きい場合に圧力水頭が0となる境界。	—
	降雨条件 降雨の影響を考慮。	L^3/T
移流拡散解析	液相濃度境界 液相の濃度を設定する境界。固定濃度や時間変化を設定。	M_k/L^3
	溶・抽出物質量境界 接点からの溶・抽出を設定する境界。固定値や時間変化を設定。	M_k/T
	定常的な流入出量境界 注入井、揚水井となる接点での地下水の流入出量を設定。	L^3
	液相・固相の初期濃度 液相または固相の初期濃度を設定。	M_k/L^3 (液相濃度) M_k/M (固相濃度)

* L : 長さ、 T : 時間、 M_k : 物質量、 M : 質量

参考表-3 入力物性値一覧

物性値	説明	単位
浸透流解析	透水係数 一定圧力で供試体に加えた水の流入量と流出量が等しくなった時の浸透流量を測定し、単位面積、単位時間当たりで表した値。	L/T
	飽和体積含水率 有効間隙率。	-
	比貯留係数 飽和状態において、水頭変化に対しての流入・流出量	1/L
	最小容水量 乾いた状態でも毛管作用でわずかに残る土中の水分量。	-
	Kr-θ関係 比透水係数 Kr と体積含水率 θ の関係。	-
移流拡散解析	φ-θ関係 サクション圧 φ と体積含水率 θ の関係。	-
	分子拡散係数 分子運動による拡散を表す係数。	L ² /T
	吸着・平衡設定 物質の吸着・脱着特性を設定。	-
	液相濃度-分配係数関係 局所平衡時の液相濃度と分配係数の関係。	L ³ /M _k (分配係数)
	分散長 d _L 縦方向分散長。流線方向の分散係数 D _L を決定する係数。 D _L = d _L · v, v : 流速	L
	分散長 d _T 横方向分散長。流線方向の分散係数 D _T を決定する係数。 D _T = d _T · v, v : 流速	L
	屈曲率 τ 屈曲度とも呼ばれ、幾何学的な流路の曲折比を表す。実際の流路長さ L _e に対する直線流路長 L の比で表され、1以下の値。 τ = (L/L _e) ²	-
	有効間隙率 外部の気相や液相と置き換えることのできる間隙の占める容積の、全体の容積に対する比率。	-
	密度 地盤の真密度。	M/L ³
	壊変崩壊定数 λ 一個の原子核が単位時間に壊変（崩壊）する確率。 λ = ln2/t, t : 半減期	1/T

* L : 長さ、 T : 時間、 M_k : 物質量、 M : 質量

(3) 地下水流動支配方程式

地下水流れにおける水の収支を示す方程式(質量保存則)は次のように表される。

$$-\frac{\partial \rho V_i}{\partial x_i} - \rho q = \frac{\partial}{\partial t} (\rho S_w \phi) \quad (1)$$

運動を表す式として Darcy 則を用い水頭を導入すると、

$$V_i = -K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} = -K_{ij} \left(\frac{\partial \psi}{\partial x_j} + \delta_{j3} \right) = -K_{ij} \frac{\partial \psi}{\partial x_j} - K_{i3} \quad (2)$$

ここで $h = \psi + z$ である。

時間微分項も水頭により表すと、

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho S_w \phi) = \rho (\beta S_s + c) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (3)$$

また、透水係数 K は飽和透水係数(地盤依存) K^s と相対透水係数(飽和度依存) K_r の積で表し($K = K_r K^s$)、地下水密度は一定であるとすると、

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ K_r \left(K_{ij}^s \frac{\partial \psi}{\partial z} + K_{i3}^s \right) \right\} - q = (\beta S_s + c) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (4)$$

ここに

ρ	: 地下水の密度 (kg/m ³)	V_i	: 地下水流速 (m/sec)
S_w	: 飽和度 (-)	ϕ	: 間隙率 (-)
K_{ij}	: 透水係数 (m/s)	h	: 全水頭 (m)
ψ	: 圧力水頭 (m)	z	: 位置水頭 (m)
β	: 飽和 : 1、不飽和 : 0	S_s	: 比貯留係数
c	: 圧力水頭 - 飽和度の勾配 (= $\partial \theta / \partial \psi$)	q	: シンク/ソース項(生成項)

(4) 物質移行支配方程式

多孔質体中の単相流れにおける物質(放射性核種)の物質輸送を示す方程式は次のように表される。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\phi D_{ij} \frac{\partial C_k^w}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (V_i C_k^w) - \frac{\partial}{\partial t} (\phi C_k^w) - \phi \lambda C_k^w + \sum_{m=1}^M \phi \xi_{km} \lambda_m C_m^w - R = 0 \quad (1)$$

$$-1(1-\phi)\rho_s \frac{\partial F_k}{\partial t} - (1-\phi)\lambda F_k + \sum_{m=1}^M (1-\phi) \xi_{km} \lambda_m F_m + R = 0 \quad (2)$$

ここに

D_{ij} : 分散係数 (cm²/sec)

F_k : k 種の固相単位重量あたりの物質量 (g/g, g/kg)

V_i : 流速 (cm/sec)

ρ_s : 固相の真密度

C_k^w : k 種の液層濃度 (g/ml, μ Bq/ml)

ξ_{km} : 「子孫」成分 k へと壊変する「親」成分 m の割合

ϕ : 間隙率

M : 成分 k へと壊変する親成分の数

λ_k : k 種の放射性壊変崩壊定数 (1/sec)

R : 相間移動する物質の量 (g, mg)

(1) 式は液相に関する支配方程式、(2) 式は固相に関する支配方程式となる。(1) 式の第 1 項は拡散による物質移行、第 2 項は移流による物質移行、第 3 項は物質の時間的变化、第 4 項は放射性壊変による物質の減少、第 5 項は「親」成分から壊変してくる物質の増大、第 6 項は固相から、または固相への移動（吸着・脱着）する物質の量を表している。

計算では時間的に変化するみかけの局所的平衡（みかけの分配係数）を用いて計算を行う。よって、(1) 式、(2) 式より次式のようになる。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\phi D_{ij} \frac{\partial C_k^w}{\partial x_j} \right) - (V_i C_k^w) - \frac{\partial}{\partial t} (\phi R_k C_k^w) - \phi \lambda_k R_k C_k^w + \sum_{m=1}^M \phi R_{km} \xi_{km} \lambda_m C_m^w = 0 \quad (3)$$

ここに

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\phi D_{ij} \frac{\partial C_k^w}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (V_i C_k^w) - \frac{\partial}{\partial t} (\phi R_k C_k^w) - \phi \lambda_k R_k C_k^w + \sum_{m=1}^M \phi R_{km} \xi_{km} \lambda_m C_m^w = 0$$

$$R_k : \text{見かけの遅延係数} \quad \left(= \frac{1-\phi}{\phi} \rho_s k_{dk} + 1 \right)$$

$$k_{dk} : \text{見かけの分配係数} \quad \left(= \frac{F_k}{C_k^w} \right)$$

3次元直交座標の分散係数 D_{ij} は、流速依存型の分散と分子拡散の和で次式のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \phi D_{xx} &= \frac{1}{V} (d_L V_x^2 + d_T (V_y^2 + V_z^2)) + \phi D_d \tau \\ \phi D_{yy} &= \frac{1}{V} (d_L V_y^2 + d_T (V_x^2 + V_z^2)) + \phi D_d \tau \\ \phi D_{zz} &= \frac{1}{V} (d_L V_z^2 + d_T (V_x^2 + V_y^2)) + \phi D_d \tau \\ \phi D_{xy} &= \frac{1}{V} (d_L - d_T) V_x V_y = \phi D_{yx} \\ \phi D_{yz} &= \frac{1}{V} (d_L - d_T) V_y V_z = \phi D_{zy} \\ \phi D_{xz} &= \frac{1}{V} (d_L - d_T) V_x V_z = \phi D_{zx} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここに

V : 流速 $= \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$

D_d : 分子拡散

τ : 屈曲率

d_L : 分散係数 (流線方向)

d_T : 分散係数 (流線直角方向)