



高レベル放射性廃棄物の
地層処分研究開発特集

地層科学研究

2. 中部事業所における調査試験研究

中部事業所 環境地質課

資料番号：85-16

Geosciences Research

2. Geoscientific Studies at the Chubu Works

(Waste Isolation Research Section, Chubu Works)

中部事業所における調査試験研究には以下の項目が含まれる。(a)岩盤の力学的特性に関する研究として坑道掘削の周辺岩盤への影響に関する研究。(b)深部地下水の流動に関する研究。(c)深部地下水の地球化学的特性に関する研究。(d)地質環境中での物質移行・固定に関する研究。

1. はじめに

中部事業所における地層科学に関する調査試験研究の大部分は東濃鉱山およびその周辺地域、すなわち東濃ウラン鉱床地域（以下、東濃地域と略称する）で実施されている。東濃ウラン鉱床は、わが国最大のウラン鉱床である。当地域は花崗岩（結晶質岩）とそれを覆う堆積岩から構成されている。

東濃ウラン鉱床地域の地質図と位置図を図1に示す。地層科学研究の場として本地域には下記の特長がある。

- ① 東濃ウラン鉱床の成因とされ、地層科学研究の主要課題の一つである、還元性の地質環境下での放射性元素の移行・固定現象を直接研究できる。
- ② 昭和30年代以来の詳細かつ系統的な地質データと岩石鉱物資料が利用できる。

表1に中部事業所における調査試験研究の現状を示す。このように、

- ① 深部地下水の流動に関する研究については、広域地下水流動モデルの構築とその検証に重点をおいている。
- ② 深部地下水の地球化学的特性に関する研究では、まず信頼性のあるデータを取得することを念頭に置き、そのデータを用いた広域的な地球化学的特性の変化の把握や水・岩石相互作用に基づく理論的な解析を進めている。
- ③ 地質環境中での物質移行・固定に関する研究

としては東濃ウラン鉱床という恰好のフィールドを利用して、天然放射性核種の挙動について、実際の天然の産状の研究と原位置での実験に基づく解析の両面から追求している。

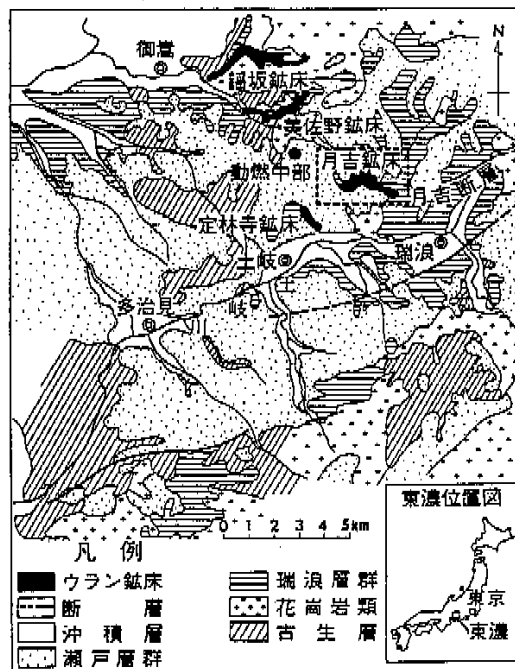


図1 東濃ウラン鉱床地域の地質図

表1 中部事業所における地層科学研究の現状

研究テーマ	目 標	成 果	今後の課題
(1) 岩盤の力学的・熱的特性に関する研究 (1) 掘削影響評価研究	—坑道掘削による周辺岩盤の影響に関する解析および評価手法の確立 —計測手法の確立	—影響を受けた領域は坑道周囲1m程度 —岩盤特性変化に関連する事象を抽出 —既存計測・解析手法の有効性と問題点を評価	—岩盤特性とこれに関連する事象の間の定量化 —計測・解析手法の改良・開発 —工法の比較
(2) 深部地下水の流動に関する研究	—1000m以深までの地下水の流動機構の解明 —調査手法の確立	—中部地帯(200km×300km)、東濃地方(8km×7km)、東濃鉱山周辺(300m×300m)において、地表から地下約1000mまでの水理特性の構築の解明 —堆積層を対象とした地下水流動解析手法の確立	—数100m～1000m以深のボーリング孔多数を用いた水理データの取得 —断層帯を対象とした地下水流動解析手法の開発 —広域地下水流動についての調査手法の開発
(3) 深部地下水の地球化学的特性に関する研究	—1000m以深の地下水の地球化学的特性の分布とその時間的変化の把握 —調査手法の確立	—東濃地区における、深度約150mまでの地下水の水質・年代・起源の解明 —深度500mの水質データ取得(1孔) —水・岩石相互反応についての基本モデルによる解析	—数100m～1000m以深ボーリング孔多数を用いた地下水データの取得 —地球化学モデルの検証 —調査手法の開発
(4) 地質環境中での物質移行・固定に関する研究	—天然類似現象の研究による、処分システムの安全性の確かさの向上	—東濃鉱床中のウラン、過去100万年間、ほとんど移動せず —ウランの鉱物への吸着現象、一部解明 —堆積物の吸着能力、一部評価	—天然類似の移動の定量化と吸着現象のモデル化 —現象の再現性を確認するための室内試験方法の確立

- ④ 岩盤の力学的・熱的特性に関する研究としては坑道掘削の周辺岩盤への影響に関する研究を中心に進めている。

2. 広域地下水流動に関する調査・研究

わが国における地下水の流れを明らかにするためには、日本全国の水理地質環境を把握し、広域地下水流動特性を適切に評価することが重要である。そのため、東濃地域を一例として、本地域を広域地下水流動に関する調査・評価手法の確立の場と位置づけた調査・研究を進めている^{1),2),3)}。

(1) 広域地下水流動調査・研究の概要

広域地下水流動調査・研究は、調査・試験によるデータの取得とそれに基づく地下水流動の把握およびその評価手法に関する研究を行っている。

調査・試験はその実施深度により区別し、①地表から地下へ浸透する水の量(涵養量)等の表層部における水理特性を明らかにするための表層水理調査、②地下深部の水理特性を把握するための中層・深層水理調査からなる。③これらの調査・試験から得られたデータを基に、対象領域全体の水理地質学的・地球化学的特性を妥当に評価できるような水理地質構造モデルの構築を行う。さらに、④このモデルを用いて、浸透流解析プログラムにより地下水流動解析を実施し、広域地下水流動の評価を行う。⑤以上の調査・評価手法は観測データによって検証を行う(図2)。

(2) 表層水理調査

表層部における水収支を把握するために、東濃鉱山周辺に河川流量計・土壌水分計・気象観測施設・

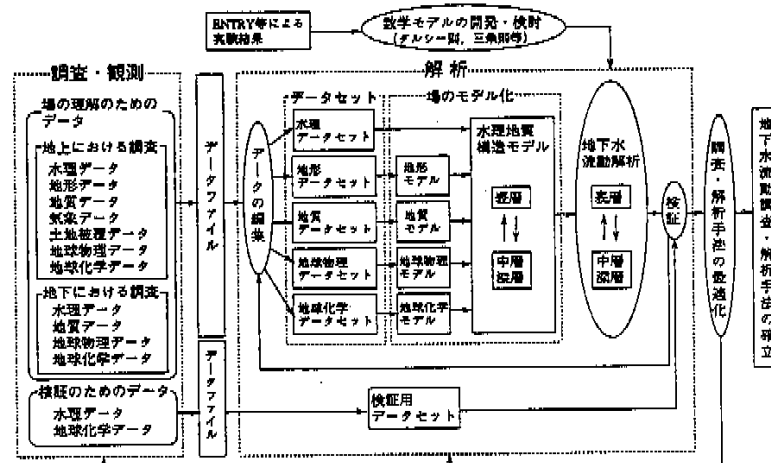


図2 地下水流動調査・評価工程図



図3 水理調査施設位置図

水位観測井を設置し、計測を行っている(図3)。

1989年5月から1990年4月にわたる1年間の観測結果から、本地域の涵養量は約0.5mm/日と算定できた⁴⁾。

また、表層部における水理地質学的特性を把握するため、リニアメント・植生・地形特性調査、地表水の流量測定・水質分析、地表踏査を行った。

衛星画像によるリニアメント(断層等を反映していると思われる直線的な地形)の解析から、その分布の差により地質構造区の区分が可能になったことが明らかとなった。航空写真による植生調査から、表層の水理地質と植生の間に調和的な相関を確認することができた。航空写真・地形図より作成した接峰面図・水系図等からは、本地域は一部に急峻な地形を含む丘陵状地形であることが明らかとなった。さらに地表における弾性波探査を実施し、断層等の地質構造の調査を行った。

渇水期の河川涵養源の多くは地下水であると考えられることから、渇水期の各流域の流出高(一日の総流出量をその流域の流域面積で除した値)はその流域の水理地質・地形条件を反映しているものと考えられる(図4)。地表水に関する調査の結果、流出高・水質および表層地質には密接な関係があることが分かり、特に表層の未固結層は水分貯留能力が高く、本地域の地下水流動を規制していることが明らかとなった⁴⁾。

(3) 中層・深層水理調査

調査地域の花崗岩とそれを不整合に覆う地積岩を対象として、試錐孔を利用した調査・試験を行っている。具体的には試錐孔を用いて原位置透水試験および物理検層、ボアホールテレビ・レーダー等によ

る調査(図3)を、また、採取した岩芯を用いて岩芯観察・室内透水試験および物性値(弾性波速度・密度・空隙率)の測定を行っている。

堆積岩類の透水係数分布からは、粗粒の部分ほど透水性が高く、中粒～粗粒砂岩の透水係数は約 10^{-6} cm/secオーダーであり、凝灰岩質砂岩や細粒～中粒砂岩の透水係数は約 10^{-8} cm/secオーダーであることが明らかとなった。

また、電気検層で得られた比抵抗値と透水係数との間には良好な相関が認められた⁵⁾。比抵抗値は比較的容易にそして連続的に求めることができるので、この関係を利用すると、透水係数を容易にかつ連続的に推定できる可能性がある。

花崗岩を対象とした透水試験結果からは、本地域の花崗岩は高透水性($10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/sec)の割れ目帯部分と、難透水性($10^{-8} \sim 10^{-9}$ cm/sec)の母岩および挟在物を含むと思われる割れ目帯部分とに区別できることが明らかとなった。また花崗岩より得られた割れ目の情報を用いて、各割れ目特性と透水係数との関係の多変量解析手法による評価や、地球統計学的手法による不連続性岩盤の性状の評価を試みている。

試錐孔での原位置透水試験の結果からは、深度が深くなるほど透水係数が小さくなる傾向や、本地域での間隙水圧が静水圧分布を示していることが明らかとなった。

また、全国を対象として地盤の透水性に関する文献調査を実施し、わが国における岩種による透水性の違いを検討した⁶⁾。

(4) 水理地質構造モデルの構築

対象領域内で行った地表踏査および岩芯観察に基

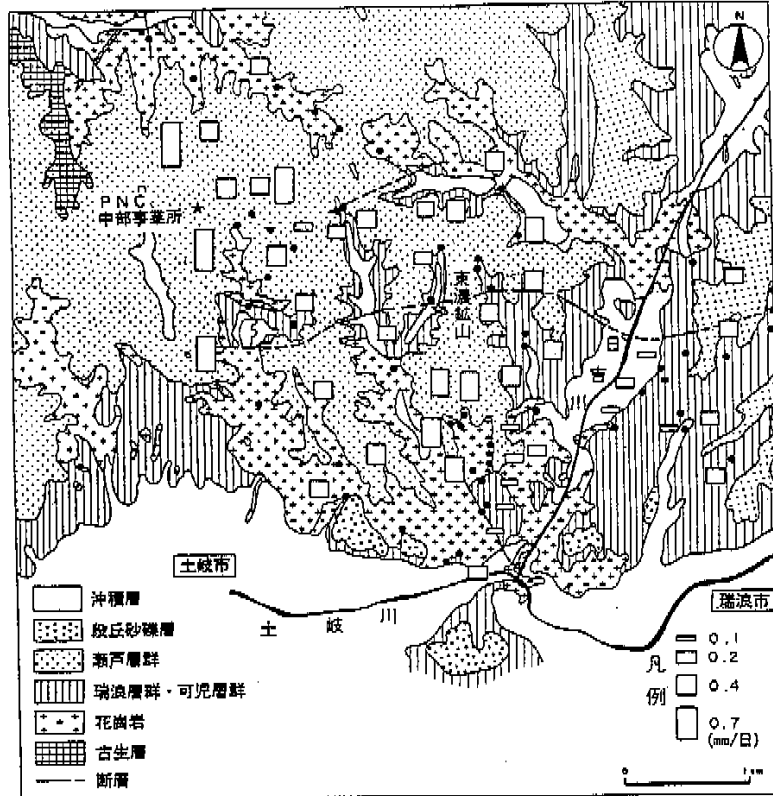


図4 湧水期流量の測定結果(流出高)

づき、本地域における岩相・粒度・固結度・風化の程度・割れ目等の地質学的特性を明らかにし、地質構造モデル(図5)を作成した。さらに表層水理調査および中・深層水理調査に基づく水理・水文学的特性を考慮して、本地域の水理地質構造モデルを構築した。ここでは7つの水理地質区分を設定した(図6、表2)。

また日本列島を大地形と大地質構造に区分し、既存の文献から調査した各地質体ごとの透水性を基にして、わが国における水理地質構造モデルを構築した。

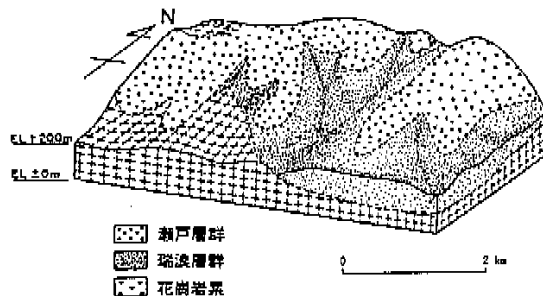


図5 東濃地域の地質構造モデル

(5) 地下水流動解析

広域地下水流動の特性を評価するために、例として本地域(8×7×深さ3km)および中部日本(300×500×深さ10km)を対象とした地下水流動解析を実施した⁷⁾。解析は、地盤を多孔質媒体と仮定した有限要素法による3次元非定常飽和不飽和浸透流解析

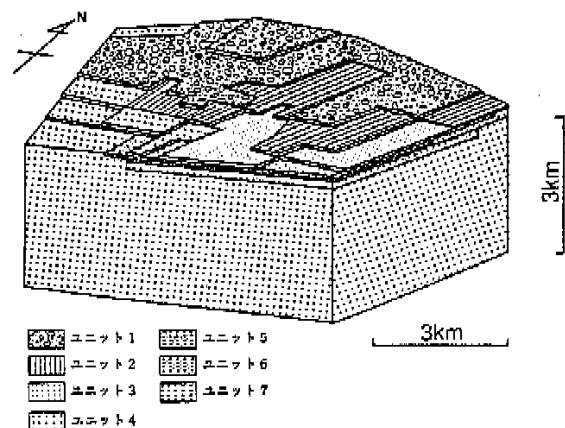


図6 東濃地域の水理地質構造モデル

表2 水理地質ユニットの区分

水理地質ユニット	透水係数(cm/sec)	岩 相
ユニット1	1.0×10^{-4}	未固結堆積物
ユニット2	1.9×10^{-6}	砂岩(中～粗粒)
ユニット3	5.4×10^{-8}	砂岩(凝灰質、細～中粒)
ユニット4	2.1×10^{-8}	礫岩(細～中粒)
ユニット5	6.6×10^{-8}	礫岩(中～粗粒)
ユニット6	2.4×10^{-8}	風化花崗岩
ユニット7	6.3×10^{-8}	花崗岩

プログラム(コード名:TAGSAC⁸⁾)によって行った。

その結果、次のことが明らかとなった。①東濃地域の解析では、表層付近の地下水流動は局所的な地形の起伏に規制される。また、深部の地下水流動は大局的な地形を反映する(図7)。②浅層部以外ではほぼ静水圧分布を示す。③深度500m以深での動水勾配は0.04未満である(図8)。④中部日本の解析では、標高-3000m以深の透水係数分布や不飽和

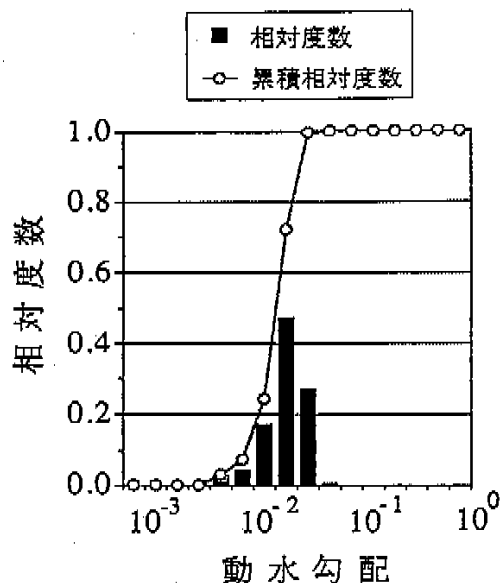


図8 東濃地域を対象とした解析例
【動水勾配の頻度分布】(深度500～1000m)

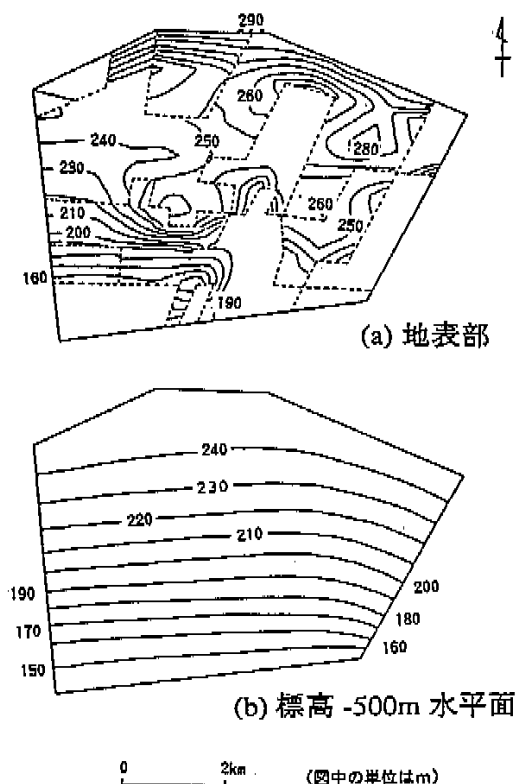


図7 東濃地域を対象とした解析例
【ピエゾ水頭分布】

特性および海岸部の側方境界条件を変えても、解析結果に大きな影響は現れない。

(6) 観測データによる検証

解析領域内に掘削した試錐孔において、間隙水圧の計測を実施している⁹⁾。これによると、地下1000m付近でも地下水圧はほぼ静水圧分布を示し(図9)、東濃地域を対象とした地下水流動解析の結果と調和的であり、本解析の妥当性を示すものと考えられる。

現在、本調査・評価手法の妥当性の検証を目的として、間隙水圧や河川流量等の長期にわたるモニタリングを継続実施している。

3. 地下水の地球化学的特性に関する調査研究

地下水の地球化学的特性は、地下深部の地質環境特性の主要な構成要素の一つである。また、地下水による物質の移行・固定現象を規定する主要因子として重要である。中部事業所では地層科学研究の一環として、東濃地域の堆積岩中に含まれる地下水の地球化学的特性の三次元的な分布を把握した。

(1) 地下水の水質

東濃鉱山第2立坑周辺に掘削した試錐孔を利用して、堆積岩層中の地下水を採取した。堆積岩層の各層準(上位より瑞浪層群生俵栗層、明世栗層、土岐突炭栗層)および花崗岩に対して採水ポイントを設定した(図10)。また、水平坑道内の試錐孔からの

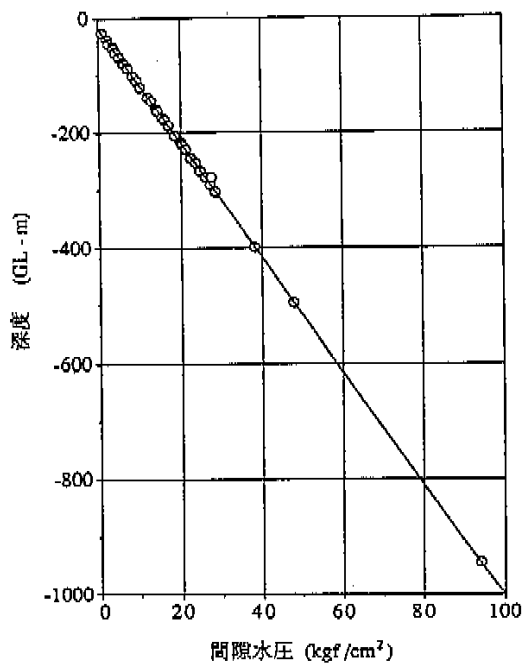


図9 試錐孔における間隙水圧測定結果

湧水、最上位の未固結層(瀬戸層群)から地表への湧水および降水も採取した。試錐孔からの地下水の採水には、Multiple Piezometer System(以下、MPシステムと略す) およびバッカー式地下水サンプラーを使用した。図10に示したすべての試錐孔には、MPシステムを設置してある。上記の手法で採取した地下水について、物理化学パラメータおよび主要な化学成分濃度を測定した。その結果、以下のことが明らかとなった¹⁰⁾¹¹⁾。

- ① 堆積岩中の地下水は深度が増加するにしたがって、中性から弱アルカリ性へと変化する。また、基盤をなす花崗岩中の地下水はほぼ中性である。
- ② 溶存酸素濃度はどの深度においても0.3ppm以下と非常に低い。
- ③ 堆積岩中の地下水の主要成分濃度の変化は層準には関係なく深度に依存している。そして、その変化の傾向は、深度が地表下約80-100m、標高では約200mを境に異なっている(図11)。すなわち、標高約200mより浅部においては、深度が増すほど $\text{Na}^+\text{HCO}_3^-$ は増加する傾向にあり、 Si 、 Ca^{2+} は減少傾向にある。また、標高約200mより深部では、 Na^+ 、 HCO_3^- 濃度に大きな変化は認められず、 Si 、 Ca^{2+} は低濃度であ

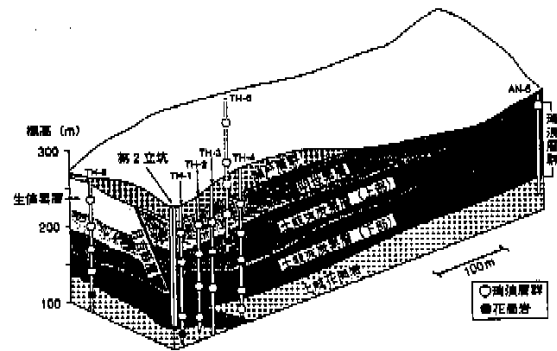


図10 地下水採水ポイント位置図

る。したがって、深度のより浅い層準の地下水は $\text{Na}^+-\text{Ca}^{2+}-\text{HCO}_3^-$ 型であり、より深い層準の地下水は $\text{Na}^+-\text{HCO}_3^-$ 型である。

- ④ 上記の地下水組成データおよび堆積岩中の主要な構成鉱物のデータを用いた熱力学的解析から、地下水の水質は、おもに長石、ス멕タイト等の地層中の主要な鉱物との反応によって形成されたと考えられる(図12)。

(2) 地下水の起源

水素・酸素の安定同位体比の測定結果(δD ・ $\delta^{18}\text{O}$ 図)を図13に示す。この結果から以下のことが明らかとなった。

- ① 堆積岩・花崗岩中の地下水の δ 値は、中部地方南部の天水の範囲¹²⁾に入ることから、これらの地下水の起源は降水である。
- ② 堆積岩最下部層中の地下水の安定同位体組成は、現在の降水や瀬戸層群中の地下水のそれとは異なり、 $\delta^{18}\text{O}$ が約1%低い¹³⁾。このことは、現在の気象条件下では、年平均気温が約2-3℃低いことに相当する¹⁴⁾。

(3) 地下水の年代

トリチウム濃度の測定結果(図14)から以下のことが明らかとなった。

- ① 瀬戸層群中の地下水のトリチウム濃度は、現在の東濃地域の降水とほぼ等しい。
- ② 堆積岩・花崗岩中の地下水のトリチウム濃度は深度によらず非常に低い(3 TU以下)。

以上より、瀬戸層群中の地下水は現在の降水が涵養したものであり、堆積岩・花崗岩中の地下水は、少なくとも40年以上経過したものであることが考えられる¹²⁾。

地下水の ^{14}C 濃度測定値から年代を求める場合には、地下水が流動する間に岩石との反応によって供

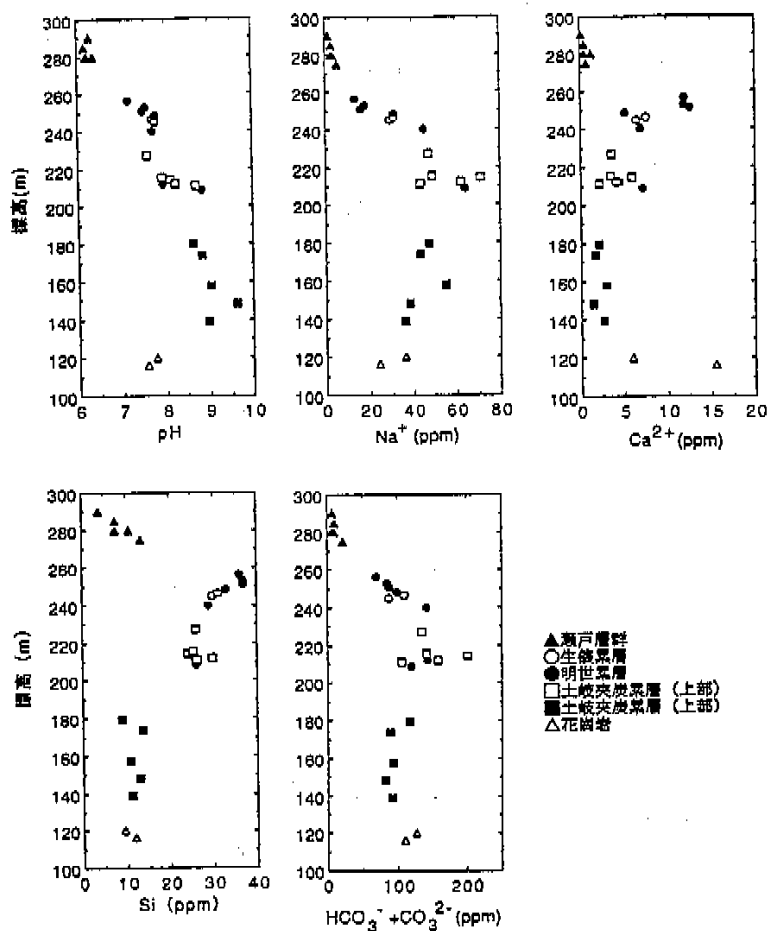


図11 東濃地域の地下水の化学組成と深度

給されるDead carbon (¹⁴Cを全く含まない炭素)を考慮する必要がある。そのために、本調査地域において考えられる以下の三つの反応によるDead carbonの供給を補正し、¹⁴C年代を求めた¹⁵⁾。

- ・帯水層中の堆積性有機物の酸化による二酸化炭素の供給。
- ・帯水層中の堆積性有機物のメタン酸酵による二酸化炭素の供給。
- ・貝化石の溶解による炭酸水素イオンの供給。

以上より、堆積岩最下部層中の地下水の¹⁴C年代として、一万数千年の値を得ることができた。この年代値は、ウルム氷期末期に相当し、当時は、現在よりも気温が低かったと考えられる。

以上の地下水の起源・年代に関して得られたデータから、堆積岩最下部層中の地下水は、一万数千年前の現在よりも寒い時期の降水に由来すると考えら

れる。

(4) 地下水の酸化還元電位

地下水の酸化還元電位は、物質の移行・固定を支配する要因の一つとして非常に重要である。しかしながら、酸化還元電位は測定に伴う様々な因子(大気、共存イオン、測定電極の種類、測定時間)によって影響を受ける可能性があるため、信頼性のある測定値を得ることが困難である。

上記の影響因子を把握するために、酸化還元電位を含めた物理化学パラメータ(電気伝導度(EC), pH, 溶存酸素濃度(DO), 水温)を大気に触れさせずに、かつ連続的に測定できるモニタリング装置を製作した。本装置は、酸化還元電位測定用に金属電極として金、白金の二種類、また、参照電極として甘こう電極を用いている。

東濃鉱山調査坑道内に掘削した試験孔からの湧水

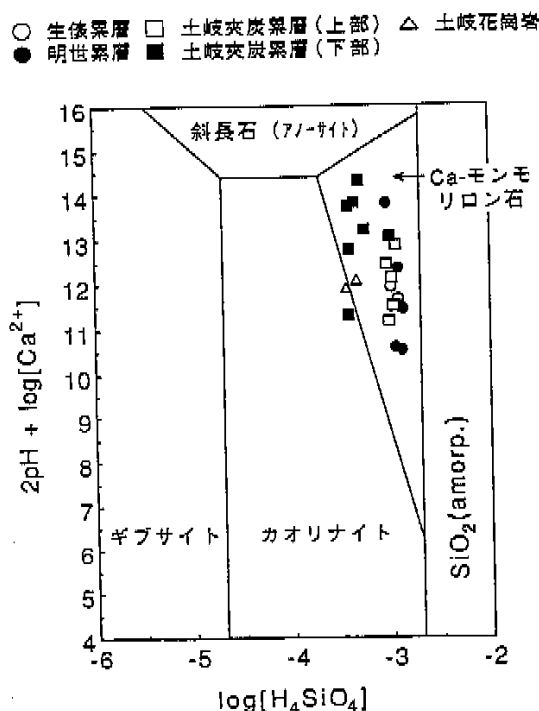


図12 東濃地域の地下水と鉱物との相平衡図

を対象として、約一年間上記の物理化学パラメータを連続計測した。その結果、上記の湧水の酸化還元

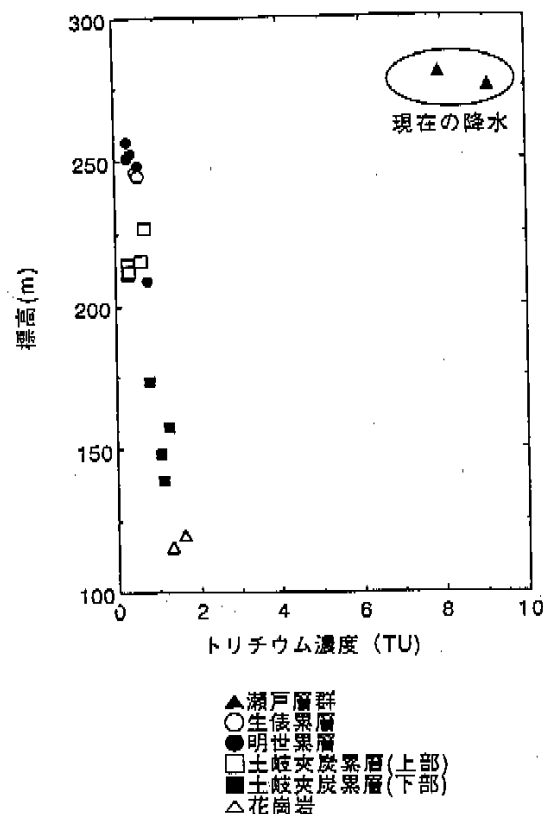


図14 東濃地域の地下水のトリチウム濃度と深度

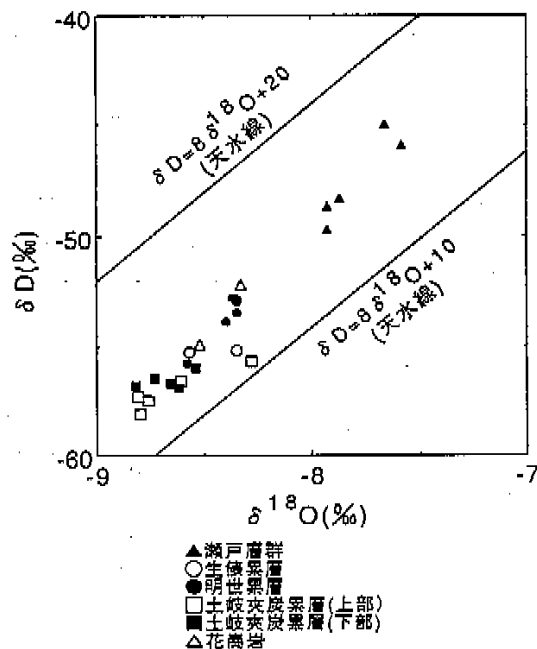


図13 東濃地域の地下水のδD-δ¹⁸O図

電位は約-300mVであることがわかった(図15)。

(5) モデルによる酸化還元電位の推定

東濃地域の地下水組成・鉱物のデータに基づき地球化学計算コードPHREEQEを用いて酸化還元電位を推定し、実測値と比較した。酸化還元電位推定の手順を以下に示す¹⁵⁾。

- ① 地球化学コードに地下水組成データを入力する。
- ② pH、酸化還元電位をパラメータとして化学種分配解析を行う。これにより、溶液中の化学種の濃度、活量および水-岩石反応に関与する鉱物の飽和指数が求められる。
- ③ 沈殿する可能性のある過飽和鉱物(飽和指数が1以上)を選定する。
- ④ ③で選定した鉱物のうち、酸化還元反応に寄与する可能性のある鉱物を選定する。
- ⑤ ④で選定した鉱物と実際に観察された鉱物を比較し、酸化還元反応に寄与している鉱物を抽出する。
- ⑥ 抽出した鉱物を対象として、Eh-pH線図を作成し、実測したpH値から酸化還元電位を推

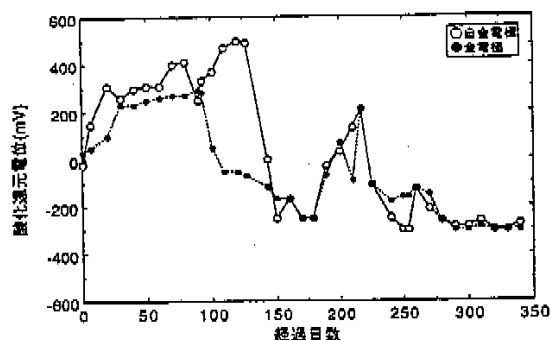


図15 酸化還元電位の測定結果

定する。今回の酸化還元電位推定に用いた地下水組成および鉱物組成をそれぞれ表3、4に示す。上記の①～⑥の手順で抽出された鉱物は黄鉄鉱である。この鉱物に関するEh-pH線図を図16に示す。黄鉄鉱が地下水と平衡であるとすれば、pH8.6付近では、酸化還元電位は-290mVである。この値は酸化還元電位実測値と一致している。

今後は酸化還元電位の实測値を取得し、上記に示した手法による検討を進める予定である。

4. 地質環境中での物質移行・固定機構に関する調査研究

地層中の物質移行・固定に関する天然類似現象として、ウラン鉱床を挙げることができる。ウラン鉱床を利用した研究により、地質環境の長期にわたる核種保持に関する重要な知見が得られるものと期待される¹⁷⁾。

中部事業所では、東濃ウラン鉱床を対象として、地質環境中での物質移行・固定に関する特性を把握するために、下記の調査・研究を行った。

- ① ウラン鉱床の生成・保存に係わる環境条件に関する研究
- ② 天然ウラン系列核種の移行・遅延に関する研究

(1) ウラン鉱床の生成・保存に係わる環境条件に関する研究

1) 東濃ウラン鉱床地域の古地形および古環境

東濃ウラン鉱床地域の地質は、基盤の白亜紀花崗岩と第三紀および第四紀の堆積岩層からなる。基盤

表3 東濃地域の堆積岩中の地下水組成

pH	HCO ₃ ⁻ (ppm)	Cl ⁻ (ppm)	SO ₄ ²⁻ (ppm)	F ⁻ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	Ca ²⁺ (ppm)	Mg ²⁺ (ppm)	全Fe (ppm)	U (ppb)
8.6	90	1	1	3	35	5	0.1	0.1	1

表4 東濃地域の堆積岩中で同定された鉱物

石英
斜長石
モンモリロン岩
方解石
石灰石
黄鉄鉱
石膏
黄鉄鉱
方沸石
斜プロチロ沸石

花崗岩は、古河川系を示すと考えられるチャンネル構造を形成する。その基盤岩上部に分布する第三紀の堆積岩は、花崗岩の巨礫を多く含む下位の礫岩層と、炭質物を多く含む上位の砂岩・泥岩層に分けられる。ウラン鉱床は、主にこの境界部付近から上部にかけて、幅数m規模で分布する。ウラン鉱床の分布する部分は、傾斜の緩いチャンネル構造をなし、堆積岩中に巨礫と炭質物を含むことから、川の氾濫原・沼沢地に類似した堆積環境であったことが推定される¹⁸⁾(図17)。

2) ウランの産状と地質学的・地球化学的環境

東濃ウラン鉱床の生成・保存に関する地質学的・地球化学的環境を把握するためには、ウランの産状を明らかにすることが重要である。

顕微鏡やX線マイクロアナライザー(EPMA)等に

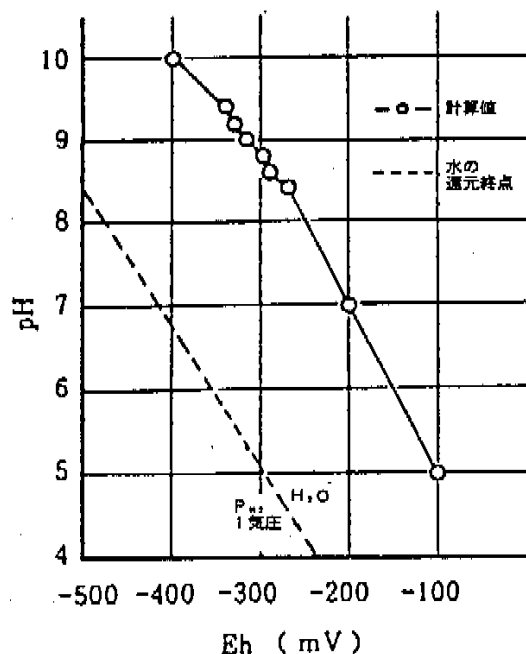


図16 黄鉄鉱のpH-Eh線図

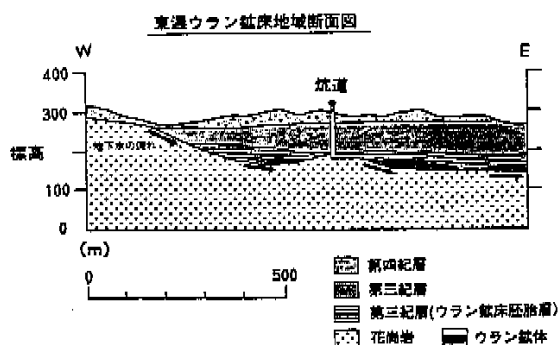


図17 東濃ウラン鉱床地域断面図

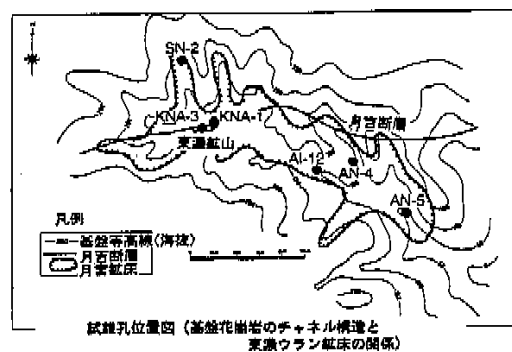


図18 試錐孔位置図

よる調査の結果、ウランは主に第三紀層中の細～粗粒砂岩中に濃集することが認められた。これらの砂岩中で、ウランは碎屑性鉱物である黒雲母や二次鉱物である黄鉄鉱等に伴って認められる(図18)。透過型電子顕微鏡やEPMAを用いて黒雲母について詳細な調査を行ったところ、一部がスメクタイト化し、 $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ の微細なウラン鉱物(コフィナイト・ピッチブレンド)を伴うことが見出された。このように黒雲母のスメクタイト化した変質部にコフィナイト等のウランの一次鉱物が見出されたことは、変質部にウランが吸着・濃集し、還元環境下で一次鉱物として固定された可能性を示す¹⁹⁾。

3) 鉱床の年代測定

東濃ウラン鉱床において、ウラン系列放射性核種の挙動を定量的に把握する場合、核種が地層中を移行し固定されてからの時間、すなわち鉱床ができてからの時間を正確に見積もる必要がある。そのため、鉱床生成の年代に関する情報が重要である。これまでに、その年代測定の試みの一つとして、フィッシュントラック法による測定を実施している。

フィッシュントラック法は、ジルコンの内部に含まれるウランの自発核分裂トラック数を測定することにより、生成年代を算出する方法である²⁰⁾。

したがって、そのジルコンがウラン鉱床内に存在する場合には、ジルコン周辺のウランからフィッシュンを受けることになる。今回は、このフィッシュンと周辺のウラン濃度を求めることにより、鉱床の年代測定を試みた。年代測定の試料は、地表に露出しているウラン露頭から採取した凝灰岩である。

測定の結果、鉱化年代として約9.15Maが示された。本鉱床の場合、地質学的証拠からその形成年代は約1000万年前後と推定されている²¹⁾。したがっ

て、このフィッシュントラックによる測定値は、この年代にほぼ対応する。なお、ジルコンの噴出年代(堆積年代)は $19.1 \pm 1.1 \text{ Ma}$ と見積もられた。

(2) 天然ウラン系列核種の移行・遅延に関する研究

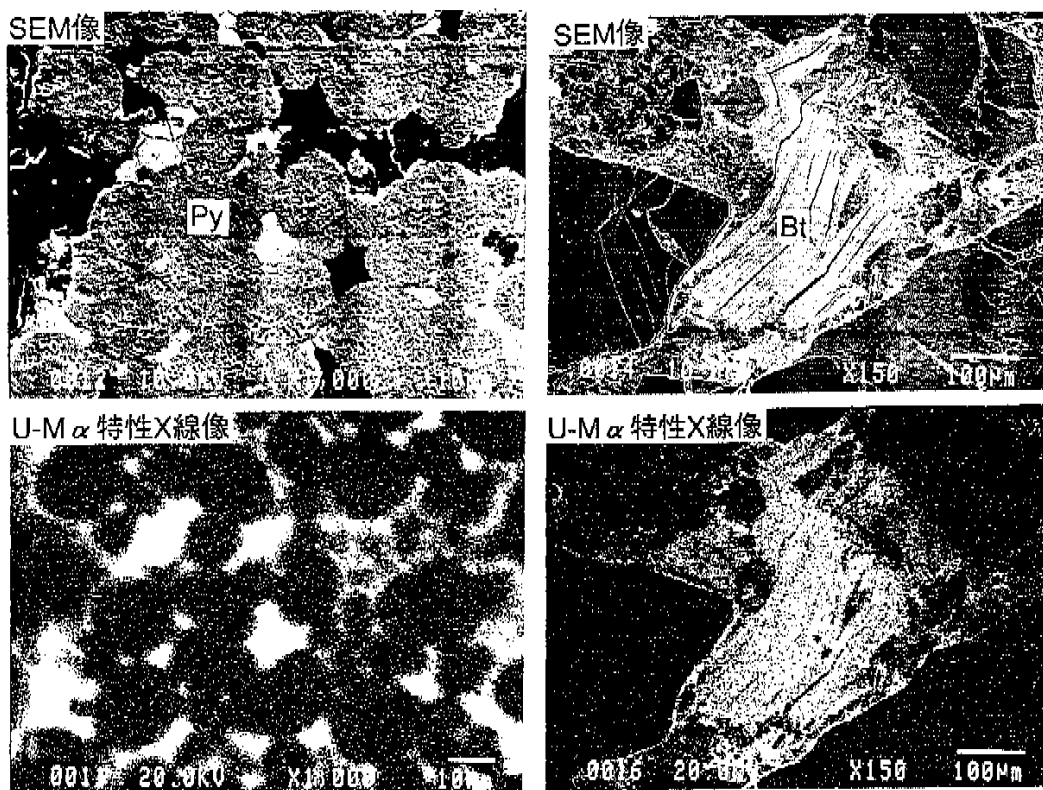
1) 放射平衡・非平衡調査

天然のウランに含まれる ^{238}U は約45億年という長い半減期を持ち、半減期24.8万年の ^{234}U 、8万年の ^{230}Th 、さらに最終的に19.4万年の ^{210}Pb に壊変する。これらの核種が、閉鎖系で長期間継続して存在すれば、これらの核種間に放射平衡が成立することが期待される。

東濃ウラン鉱床周辺の地下水は、地下水流動解析の結果、現在は北から南へ移動していると推察されている²²⁾。ウランの移動には、一般に地下水が関与すると考えられる。したがって、鉱床スケールでのウランの移動を調査するために、鉱床全体にわたっての試錐を行い、採取した岩石試料の放射平衡・非平衡調査を行った(図19)。分析のための岩石試料を鉱化部から計256個採取した。

そして、それぞれの試料について、ウラン系列核種である ^{238}U ・ ^{234}U ・ ^{230}Th ・ ^{226}Ra ・ ^{210}Pb の放射能測定を行った。

その結果、 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ および $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ の放射能比(A.R.:Activity Ratio)は0.8から1.2の間で、ほぼ放射平衡に達していることが示された(図20)。つまり、鉱床スケールで見ると、ウランとトリウムに関しては数十万年以内において、それらの核種に大きな移行はなかったと考えられる。一方、 $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ および $^{210}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ のA.R.は、両者の間でほぼ比例関係を保ちながら、0.4から4.5と大きく変化し(図21)、多く岩石試料中で放射非平衡の状態にある。東濃ウラン鉱床地域における地下水は、還元状態にあることが確認されており²³⁾、また $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$ のA.R.は放射平衡を示すことから、還元性地下水によって比

図19 黒雲母と黄鉄鉱へのウランの濃集（U-M α 特性X線像の白く光っている部分がウランの濃集部）

較的移动しやすい ^{226}Ra から選択的に移行したことが考えられる^{24),25)}。

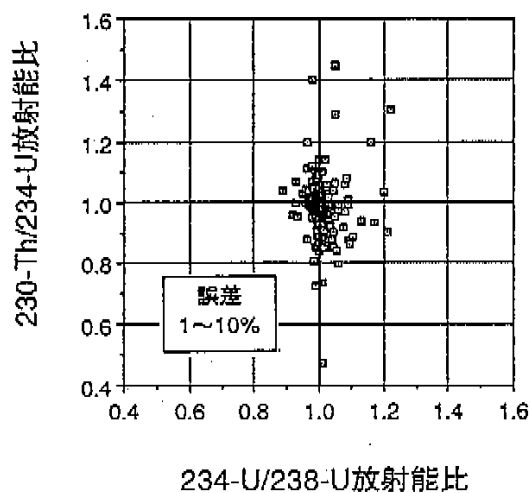
次に、数mスケールでの移動について調査するために、KNA-3号孔のボーリングコアの約3m区間から10cm～数10cm間隔で16個の試料を採取し、同じように放射能測定を行った。その結果、断層面や亀裂に沿った部分では、ウラン含有率が高いことが認められ、 $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ のA.R.が1より小さい値を示した。これは、数10cmオーダーのスケールで、過去数十万年以内においてウランが再移動し濃集した可能性を示す。さらに、 $^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$ のA.R.は、0.3から5.1までの幅をもち、過去数千年間でのラジウムが移行したことを示す。特に、断層面や亀裂に近い部分で、A.R.が1より大きい値を示しラジウムの濃集が考えられることから、断層やそれに伴う亀裂がウランの移行経路の一つとなっているものと考えられる²⁵⁾。

2) 収着試験

地質環境中でのウランの移行特性を規制する要因の一つとして、岩石の持つ核種収着能力が考えられる。その能力は、収着係数によって定量的に示すこ

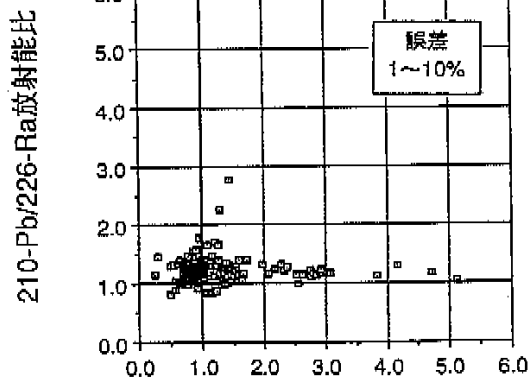
東濃ウラン鉱床

(256 サンプル)

図20 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ および $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ の放射能比

東濃ウラン鉱床

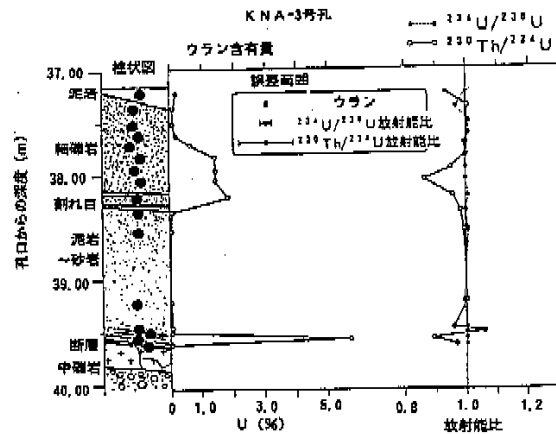
(256 サンプル)

図21 $^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$ および $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$ の放射能比

とができる。そのため、岩石の収着係数を求めるための ^{233}U を用いたバッチ式収着試験を行った。

この試験には、東濃ウラン鉱床のウランの高濃集と低濃集部の岩石（砂質凝灰岩）と現場から採取した地下水を用いた。試験は、酸素濃度が数10ppm以下の窒素雰囲気で行った。また、それと同時に岩石の空隙構造（ウランの移行経路）調査と、岩芯試料を用いた室内透水実験を行い、岩石の収着能力との関係を調べた。

その結果、 ^{233}U の収着係数は低濃集部で58.8～

図22 KNA-3号孔におけるウラン含有量と $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ および $^{230}\text{Th}/^{232}\text{U}$ の放射能比との関係

164.7ml/g、高濃集部で3.6～4.4ml/gとなる、低濃集の方が大きい値を示した（図22）。これは、低濃集部はさらにウランを濃集し得ることを示し、高濃集部はウランの収着サイトが少なくなっていることを示唆する。また、透水係数は、高濃集部が低濃集部より2～3オーダー高い値を示した（図23）。

α -オートラジオグラフや走査電顕(SEM)を用いた空隙構造調査から、高濃集部の岩石中の黒雲母や石英粒子中の割れ目、鉱物粒子間等の空隙にウランが濃集していることが認められた（図24）。つまり、ウランの移行経路および濃集場所としては、鉱物粒子中や粒子間の空隙が重要な役割を果たしたと考えられる^{26),27)}。これらのことから、ウランの移行・濃集には、岩石の持つ収着能力だけでなく、地下水

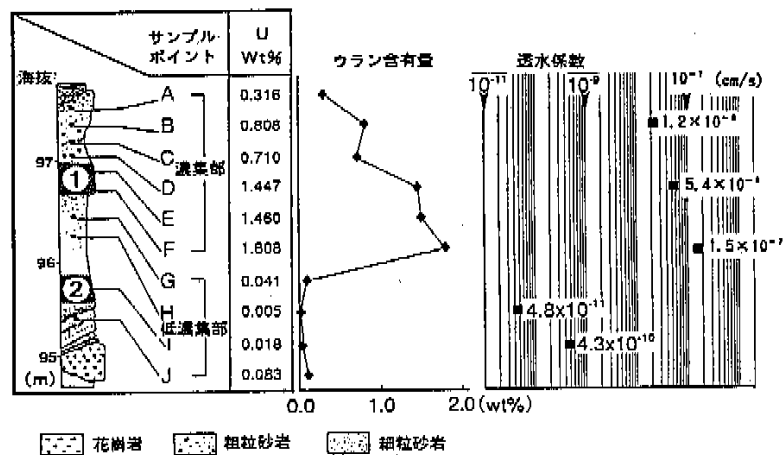
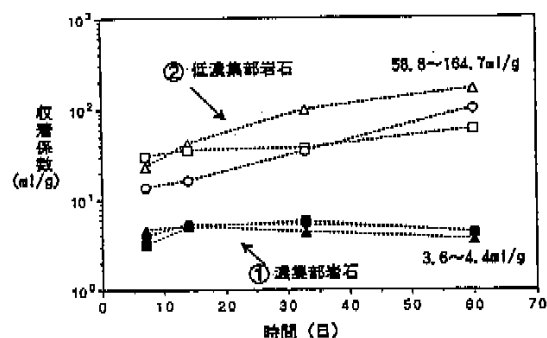


図23 ウラン含有量と透水性係数の関係

図24 ^{233}U 収着試験結果

が流れることのできる選択的な移行経路が存在するかどうかにも影響されると考えられる。

3) コロイド挙動に関する研究

地下水中には、種々のコロイド粒子が存在する可能性があり、地質環境中における核種の挙動に影響を及ぼすことが考えられる。すなわち、核種がコロイド粒子に吸着し、あるいはコロイド粒子の形態をとって地質環境を移行する可能性がある。このような観点から、天然におけるコロイドの性状とその挙動に関するデータの収集と評価を行うための調査研究を実施している。

天然におけるコロイドに関する研究は、OECD/NEAによる国際アリゲーターリバーアナログ研究 (ARAP) の一環として実施された。

ARAPは、1988年9月から1993年8月の5年間実施された5ヵ国、6機関によるナチュラアナログの国際共同研究である。研究内容は、地質環境中の核種移行現象の解明を目的に、オーストラリア北部準州のクンガラウラン鉱床を対象とした以下の6つのサブプロジェクトからなる。

- I: 放射性核種の移行モデリング
- II: 水理地質研究
- III: ウラン/トリウム系列非平衡の研究
- IV: 地下水/コロイド研究
- V: 核分裂生成物の研究
- VI: 超ウラン核種の研究

このうち動燃事業団は、オーストラリア原子力科学技術機構 (ANSTO) とともにサブプロジェクトIVにおいてコロイド研究を担当し、コロイド種の同定、地下水中のウラン・トリウムとコロイドとの関係の調査を行った^{28), 29), 30)}。

a. 鉱床の概要および地下水の化学的特徴

クンガラウラン鉱床は、石英緑泥石片岩を母岩とし、約16億年前に形成されたと考えられるウラン鉱床である³¹⁾。鉱床は、一次鉱化体と風化帯 (地表〜

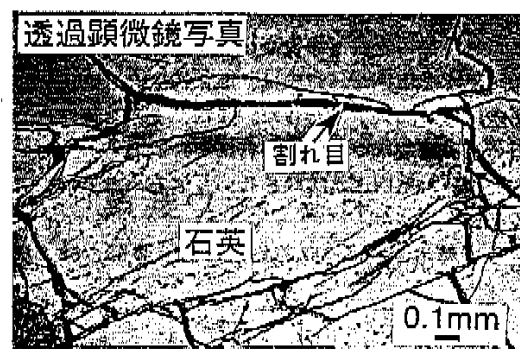
地表下約30m) において舌状に広がる二次鉱化体からなっているといわれている。

地下水は、pHが6.5~7.2、電気伝導度が最大で約300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、組成は $\text{Mg}^{2+}-\text{HCO}_3^-$ 型を示す。

b. コロイドのサンプリング、分析方法

試錐孔を利用して直接あるいはバッカーシステムを用いてポンプにより地下水を揚水した。揚水された地下水は、プレフィルター (5 μm と1 μm フィルター) を通過させ、コロイドサンプリングシステムに導いた。使用したシステムは、ホローファイバーメンブランフィルター (カットオフ10,000分画分子量) を用いたタンジェンシャルフロー式の限外ろ過装置とフラットメンブランフィルター (カットオフ30,000分画分子量) を用いたクロスフロー式の限外ろ過装置の2つである。なおこれらのシステムを用いたサンプリングは、不活性雰囲気下で行った。

これらのシステムを用いて得られたコロイド試料は、電子顕微鏡等を用い観察・分析を行った (図25)。またそれぞれのサイズのフィルターを通過した地下水も同時に採取し、ウラン、トリウムや主要元素の分析を行った。

図25 石英粒子の割れ目へのウランの濃集 (α -オートラジオグラフ像は顕微鏡写真と同じ部分を撮影)

c. 結果

上記の観察・分析の結果は、以下のとおりである。

- ① 確認された主なコロイド粒子は、粘土鉱物（緑泥石、カオリナイト）、石英粒子および鉄に富む粒子であった。このうちカオリナイトは風化帯、緑泥石および石英粒子は非風化帯において顕著に認められた。また粘土粒子と石英粒子の個数はそれぞれ $10^5 \sim 10^8$ 個/ℓ、 10^7 個/ℓあった。その他のコロイド種としては、チタン、鉛、金、ウラン等それぞれに富む粒子が観察された。
- ② コロイド相に存在しているウランは、地下水中の全ウラン量の数%以下であり、ほとんどのウランは地下水中に溶存の状態が存在している。
- ③ トリウムは、かなりの量がコロイド相中に存在している場合もあるが、そのほとんどがコロイド粒子より大きい懸濁物相($>1\mu\text{m}$)中に認められた。また、予察的な結果として、地下水中のアクチニウム(^{227}Ac の娘核種である ^{227}Th が同定された)も、ほとんど懸濁物相中に存在している可能性が高いことが分かった。

以上のように、クンガラウラン鉱床の地下水においては、種々のコロイド粒子が認められた。また、ウランはほとんど溶解しており、ウランの地下水中の挙動に関して、コロイドはさほど重要でないことがわかった。しかし、地下水は酸性で、ウランが溶けやすい環境下である³¹⁾ので、今後還元的な環境において、データを取得する必要がある。一方、トリウムの地下水中の挙動に関しては、コロイド粒子やそれよりも大きな懸濁物質が重要であることが確認された。

5. 掘削による岩盤力学的・水理学的挙動に関する調査研究

地下に空洞を掘削することにより、空洞周囲の岩盤や周辺地域の地下水流動に変化が生じる。この空洞掘削に伴う影響を把握・評価するため、堆積岩を対象に既存の掘削・計測・評価技術を基本とした調査研究を実施した。

(1) 水平坑道における掘削影響試験³²⁾

東濃鉱山において、昭和62・63年度に発破工法により坑道を掘削し、掘削影響試験として各種の計測を行った(図26)。実施した試験・計測は、室内岩石試験、内空変位測定(坑道断面寸法の変化の測定)、ロックボルト軸力測定、岩盤内変位測定、弾性波速度測定、初期地圧測定、透水試験、間隙水圧測定である。また、岩盤の挙動を解析的に評価する

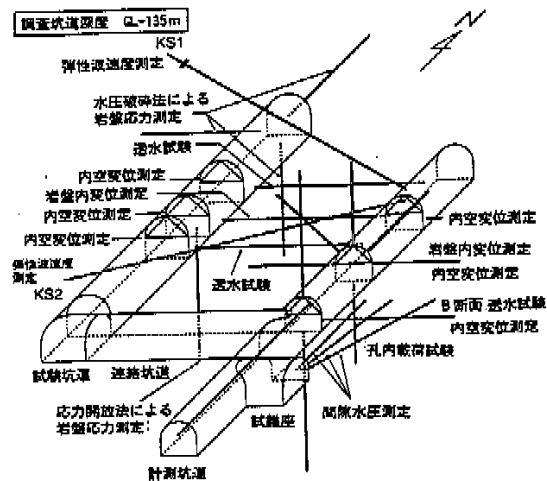


図26 調査坑道試験概要図

ため、岩石室内試験結果により決定した入力パラメータを用い、有限要素法による事前解析を行って計測結果と比較した。さらに、上記の各種測定結果を考慮して、事後解析を実施した。

水平坑道における掘削影響試験で得られた結果を以下に示す。

- ① 内空変位測定では、最終的な変位量は天盤が2～3mm、水平方向が約2mmであった。各変位とも、切羽離れ(坑道掘削面と計測面の距離)が2～3D(D=坑道径、今回は3m)でほぼ収束した。
- ② 岩盤内変位測定では、最終的には坑道壁面から1mの地点で1.5mmの変位量であった。また、坑道壁面から離れるにしたがい変位量は減少し、6mの地点ではほとんど変位が見られなかった。
- ③ 弾性波速度測定では、坑道周囲に厚さ0.8m程度の速度低下域が観測された³³⁾。
- ④ 2次元弾塑性有限要素法による事前解析では計測結果の約2倍の変位量が予測されたが、切羽進行に伴う変位量の増加傾向はほぼ一致し、概略的な岩盤の挙動予測ができたと考えられる。
- ⑤ 事後解析では、新たに初期応力測定結果および弾性波トモグラフィーの結果から推定された発破損傷領域(坑道周囲1m程度)を考慮した。解析により得られた岩盤の変位量や物性値は、ほぼ計測結果と一致した。したがって、初期応力と発破損傷領域を考慮することにより、定量的に岩盤の挙動を予測することが可能であると考えられる。

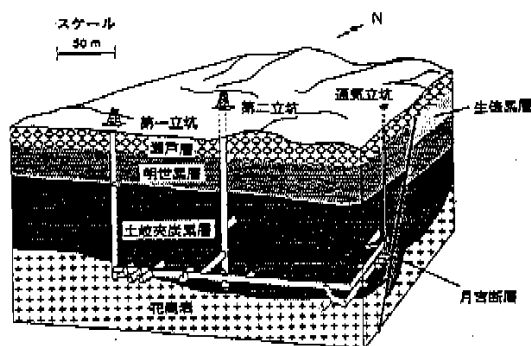


図27 試験地域の坑道配置および地質区分

以上の結果から、東濃鉱山の堆積岩盤の力学的な挙動を把握する上で、既存の解析・評価技術は、ある程度有効であることが明らかとなった。また、弾性波トモグラフィは、岩盤物性の変化した領域を把握する上で有効な手法となる可能性が示された。また、初期応力状態および岩盤の発破損傷領域を考慮することにより、定量的な岩盤の挙動予測が可能となるものと考えられる。

(2) 立坑における掘削影響試験³⁴⁾

水平坑道における掘削影響試験で得られた知見等を踏まえ、東濃鉱山内の堆積岩中の仕上がり内径6 m、深さ150 mの立坑を掘削し、立坑掘削影響試験を実施した(図27)。

掘削した立坑は、第二立坑と呼ばれ、計測や既設坑道との連絡のために4本の水平坑道が付随する。これらの水平坑道は第一、第二計測坑道および上盤、下盤連絡坑道と呼ばれている。立坑掘削工事は、平成2年1月に始まり平成3年9月に終了した。また、立坑掘削中の計測作業についても同時期にすべて終了した。その後、岩盤内に埋設された計器により岩盤挙動の長期的な観測を継続している。

この試験では、1) 立坑掘削に伴うゆるみ領域(岩盤の力学的・水理学的物性が変化した領域)の発生といった立坑周辺岩盤への影響、2) 立坑内への地下水の湧水による立坑周辺地域の地下水流動への影響を把握するために、以下の2つの調査研究を行った。

- ・立坑掘削に伴う立坑周辺岩盤の変形挙動および力学的・水理学的物性変化に関する調査研究
- ・立坑掘削に伴う立坑周辺地域の地下水流動への影響に関する調査研究

上記の調査研究はそれぞれ岩盤挙動調査、水理調査と呼ばれている。以下にこれらの調査の概要と結果および考察を述べる。

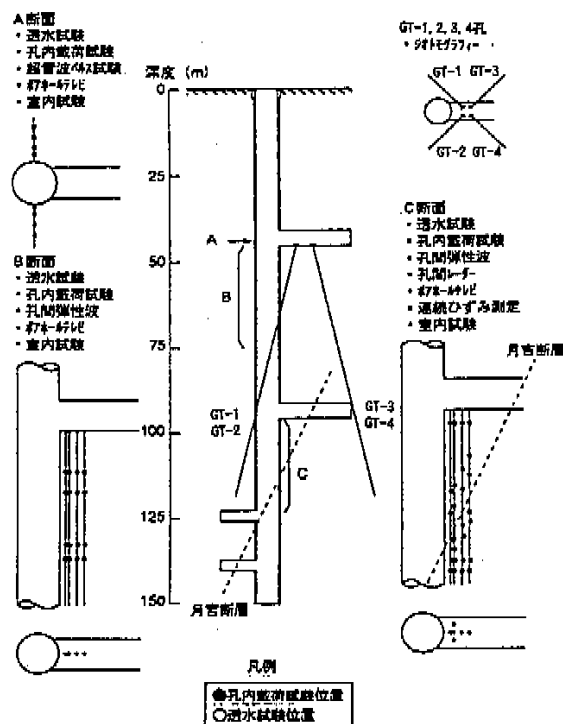


図28 力学的・水理学的特性変化に関する調査概念図

1) 岩盤挙動調査

岩盤挙動調査では、立坑周辺岩盤の力学的・水理学的特性変化に関する調査と立坑周辺岩盤の変形挙動に関する調査を実施した。

前者では、立坑周辺岩盤中にA, B, C断面と呼ばれる計測断面を設定し、各断面でボーリング孔を掘削してポアホールスキャナーによる孔壁観察、孔内載荷試験、透水試験等を実施した。この調査では、立坑掘削前後において同一ポイントでの計測を行い、掘削前後で測定された値を比較して力学的・水理学的特性の変化を評価した。その他、立坑周辺岩盤への影響や比較的広範囲の地質構造を捉えるために、孔間弾性波測定や弾性波トモグラフィを実施した(図28)。

後者では、立坑内にS, Mと呼ばれる計測断面を設け内空変位測定、岩盤内変位測定、掘削応力測定等を実施した。水平坑道には、K, SP, U, Lと呼ばれる計測断面を設け同様の計測を実施した。特にSP2, M3, M4断面では、この地域に存在する月吉断層と交差するように測線を設け、岩盤の変形挙動や物性変化に対する断層部の存在の影響を把握できるようにした(図29)。さらに掘削によって生じる応力再配分現象を計測するため岩盤中に多軸ひずみ

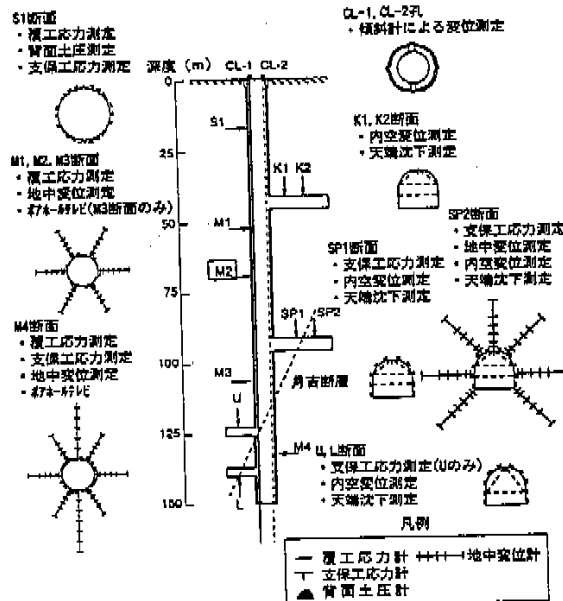


図29 支保工と周辺岩盤の変形挙動に関する調査概念図

計を設置し、立坑掘削中の連続的なひずみ変化を測定した。

岩盤中に埋設した計測機器については、データ処理用のコンピュータと接続しており、必要時にデータを取り込めるシステムになっている。

また、断層のような大きな不連続面が岩盤の変形挙動に及ぼす影響や立坑周辺のゆるみ領域の発生状況を解析するために、2次元の流動要素法³⁵⁾による弾塑性解析と3次元の有限要素法による弾性解析を実施した。3次元解析では、断層はジョイント要素としてモデル化した。解析の入力パラメータは室内試験および孔内載荷試験の結果を参考に決定した。

岩盤挙動調査で得られた結果および考察を以下に示す。

- ① 周辺岩盤の力学的・水理学的特性の変化に関する調査³⁶⁾
 - ・ き裂の状況は、ボーリング孔の幾何学的配置や岩盤の強度により差が見られる。また、立坑掘削面（実際に掘削した岩盤の壁面）から0.9m地点まで掘削後に生じたり開口幅の変化したき裂が多い。
 - ・ 力学的な特性については、断層の影響が及ばないA、B断面では立坑掘削面から0.4m程度までゆるみ領域が発生している可能性が高い。ゆるみ領域の発生要因としては、掘削に伴って生じる応力再配分や発破損傷等が考えられる。0.9mの地点では、ゆるみ領域の発生の結果として

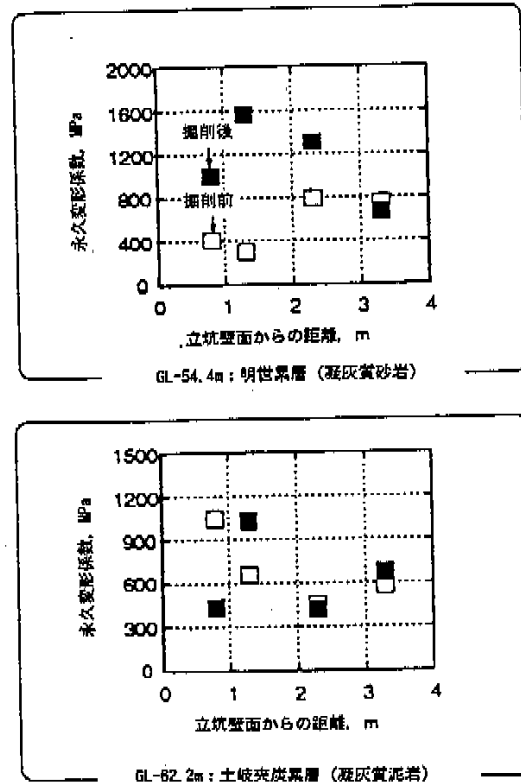


図30 B断面における孔内載荷試験結果の一例(B断面)

生じる応力集中により岩盤の非回復変形量が減少している可能性がある（図30）。一方、断層近辺での物性の変化は複雑であり、通常考えられるような掘削による応力再配分現象だけでは説明できない。このような変化を生じさせる要因としては局所的な岩相の違いや断層上下盤での応力再配分現象の違い等が考えられる。

- ・ 水理学的な特性の面では、主として透水係数の変化はき裂の影響を大きく受けており、その影響範囲は立坑壁面から0.4～0.9m程度であると考えられる。また、掘削面から1.9m以上離れた地点でも透水係数の変化が見られるが、これは掘削に伴う多重の応力集中帯の発生³⁷⁾や、掘削後の地下水面の低下による不飽和領域の発生等が影響要因として考えられる（図31）。
- ・ 上記の結果を総合すると、立坑掘削により周辺岩盤が力学的・水理学的に影響を受ける範囲（ゆるみ領域を含む）は、立坑掘削面から1.0m程度までと推定される。
- ・ 孔内弾性波測定の結果、立坑掘削面から1.0mの範囲で30～50%もの速度低下が認められた。この立坑壁面近傍の弾性波速度の変化は、き裂

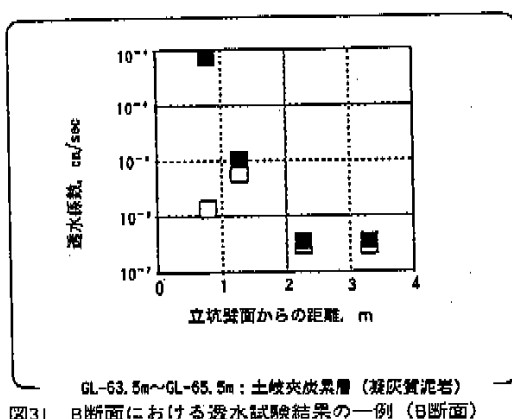
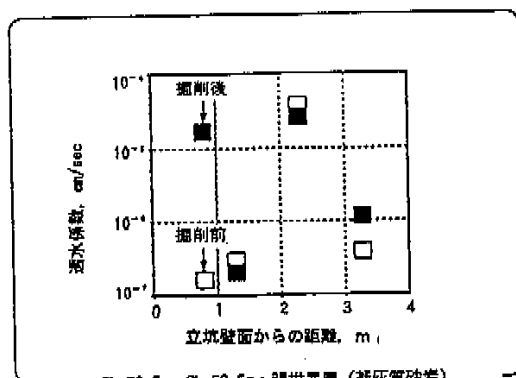


図31 B断面における透水試験結果の一例 (B断面)

の発生等により地下水面が低下し、岩盤の飽和度が低下したことが主要因であると考えられる。また、弾性波トモグラフィの結果、比較的広範囲の地質構造を概略的に把握することができた。しかし、今回のような測点配置では月吉断層のような低速度の薄い層や岩盤中に掘削された空洞を検出することは困難であることが明らかになった³⁸⁾。

② 周辺岩盤の変形挙動に関する調査³⁹⁾

- ・掘削によって生じる立坑周辺岩盤の変形挙動は地質によって異なり、特に断層が存在する所やき裂が多い部分では変位が大きい⁴⁰⁾。
- ・立坑掘削面から6~12m離れた所でも変位が生じているが、壁面近傍での変位と比較するとその量はわずかであり、相対的に立坑壁面より6m以深の地点は不動点と判断できる。
- ・2次元流動要素法による弾塑性解析の結果、掘削により生じた変形量では立坑周辺岩盤中に塑性域は生じないことがわかった。したがって、立坑周辺の岩盤には、塑性域の発生に伴って物性値が変化する領域は生じないと考えられる。
- ・3次元有限要素法による弾性解析の結果、変形

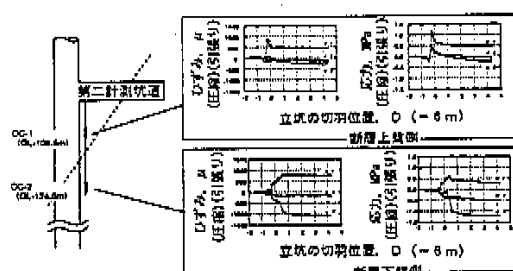


図32 連続ひずみ測定結果

挙動に及ぼす断層の影響は、3次元の有限要素法解析により、ほぼ表現できることがわかった。連続ひずみ計測結果から岩盤中に生じている再配分応力を推定した。その結果、立坑切羽がひずみ計測レベルに到達する以前から、半径方向の応力 σ_r は引張側へ、空洞接線方向の応力 σ_θ は圧縮側へと変化していることが分かった。再配分応力は切羽が1D離れるまでにほぼ収束している。また、計測結果から推定された再配分応力は、断層上下盤で異なった傾向を示した(図32)。この現象を理解するため、2次元軸対称有限要素法解析を実施した。特に、断層上下盤で再配分状況が異なることから、入力パラメータである弾性係数は、き裂傾度により室内試験および孔内載荷試験の結果を使い分けた。解析の結果、断層上盤側のき裂傾度が高い(き裂の間隔が狭い)場合は、孔内載荷試験により得られた物性値を用いることにより掘削による再配分応力のある程度推定できることがわかった。また、その収束状況は、断層上下盤によらず有限要素法解析の結果と一致し、応力再配分の過程は、連続体を仮定した解析で表現できることがわかった⁴¹⁾。

2) 水理調査⁴²⁾

水理調査では、立坑掘削に伴う地下水流動への影響を把握するため、①現状の把握、②水理地質構造モデルの構築、③地下水流動予測解析および④長期観測値との比較検証までの一連の評価システムを設定した。この評価システムに基づき、事前調査によって得られた各ボーリング孔におけるコア観察・検層・透水試験結果等から、立坑を含む300m×300mの領域内(図33)の水理地質構造モデルを構築した。この水理地質構造モデルは、12種類の水理学的な構造区分で構成されている広域地下水流動調査とは異なり、立坑掘削に伴う地下水流動への影響を予測するという観点から、解析する領域内の地質調

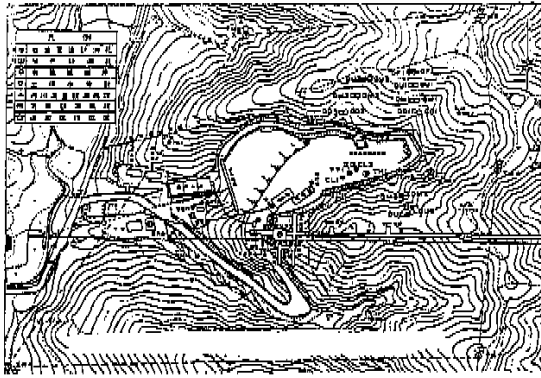


図33 試験および水理観測システム位置図

査、透水試験等を、より詳細に行い、対象領域内の岩相区分および各岩相のもつ透水性等を忠実に表現したモデルとなっている（図34、表5）。この水理地質構造モデルと有限要素法による3次元非定常飽和・不飽和浸透流解析コードの一つであるTAGSACを用い、立坑掘削に伴う地下水流動への影響を予測解析した⁴³⁾。地下水流動解析に必要な上部境界条件は、表層部での水理調査⁴⁴⁾（気象観測、河川流量観測等）の結果から、約0.5mm/dayと設定した。また、側方境界条件は解析対象領域の外側境界の部分で実施したMPシステムによる間隙水圧測定結果を用いた。

予測解析では、以下の結果が得られた。

- ・立坑内への地下水の湧水量は掘削が進むにつれて増加し掘削を中断すると減少する。また、掘削が断層を過ぎ、高透水性部分に達した時点から立坑内への流出量は急激に増加し、その最大

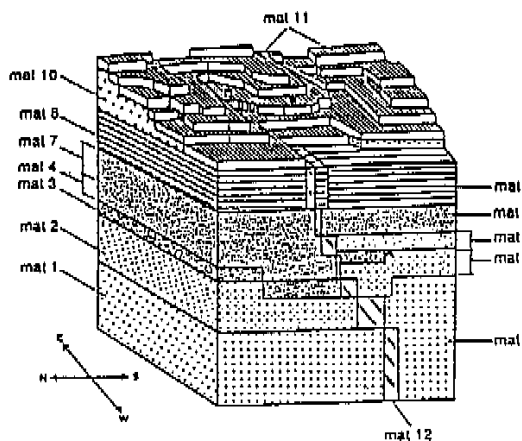


図34 水理地質構造モデル図

表5 水理地質構造モデル—水理特性値・地質対応表

区分	透水係数 (cm/sec)	間隙率	比貯留係数 (l/m)	地 質
mat 1	1.00×10^{-7}	0.02	1.00×10^{-4}	花崗岩
mat 2	5.00×10^{-8}	0.1	1.00×10^{-4}	風化花崗岩
mat 3	1.00×10^{-5}	0.3	1.00×10^{-4}	風化花崗岩・礫岩
mat 4	1.00×10^{-6}	0.3	1.00×10^{-4}	砂岩
mat 5	5.00×10^{-6}	0.3	1.00×10^{-4}	砂岩
mat 6	1.00×10^{-5}	0.3	1.00×10^{-4}	砂岩・凝灰岩
mat 7	1.00×10^{-6}	0.4	1.00×10^{-4}	凝灰岩
mat 8	5.00×10^{-6}	0.4	1.00×10^{-4}	砂岩・泥岩
mat 9	1.00×10^{-7}	0.4	1.00×10^{-4}	砂岩
mat 10	1.00×10^{-6}	0.4	1.00×10^{-4}	未固結層（湖戸層）
mat 11	1.00×10^{-4}	0.5	1.00×10^{-3}	粘土
mat 12	1.00×10^{-8}	0.3	1.00×10^{-4}	粘土を含む断層

流出量は30ℓ/分である。

- ・既存の調査坑道への湧水量は、掘削終了近くから緩やかに減少する。また、掘削による水頭変化の範囲は、立坑より約100m以内と予測された。

以上の予測解析結果を立坑近傍で測定された間隙水圧変化および第二立坑、調査立坑・調査坑道で実施している湧水量観測結果と比較し、地下水流動評価システムの妥当性を検討した。その結果、

- ・湧水量を比較した結果、解析値は実測値のほぼ2倍程度の値を示しているが、定性的な傾向は比較的よく一致している（図35）。また、MPシステムによる間隙水圧モニタリングの結果、立坑掘削に伴う地下水流動の影響範囲は100m前後であると考えられ、予測解析の結果とほぼ一致した。

以上の結果から、東濃鉱山の堆積岩においては、この評価システムにより立坑掘削に伴う地下水流動への影響予測が可能であることがわかった。

3) まとめ

立坑掘削影響試験で取得した各種データを解析・

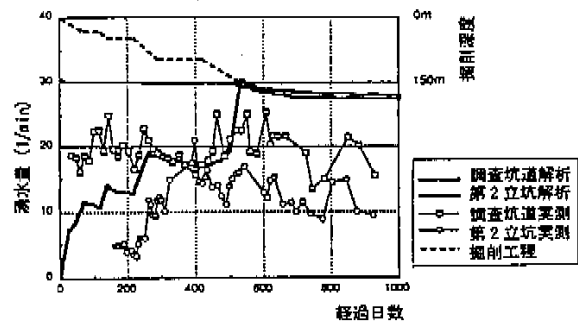


図35 湧水量の非定常変化の解析値と実測値の比較図

評価した結果を以下にまとめる。

① 岩盤挙動調査

- ・立坑周辺岩盤における力学的・水理学的影響範囲は、立坑掘削面から1.0m程度である。また、その発生要因としては、立坑掘削に伴う応力再配分、地下水面の低下等による不飽和領域の発生、発破掘削等によるき裂の発生や既存き裂の開閉といったことが考えられる。
- ・立坑周辺岩盤の変形挙動は、岩相やき裂頻度などに大きく影響される。特に断層は、岩盤の挙動に大きな影響を及ぼす。これらの影響については、き裂の影響を含む入力パラメータを用いることや3次元解析コードを用いることにより、岩盤を連続体と仮定した有限要素法を用いても解析・評価することが可能であると考えられる。

② 水理調査

- ・立坑掘削に伴う地下水流動への影響範囲は、立坑を中心とした半径100m程度までと推定される。また、その影響は、今回用いた評価システムにより予測可能であることがわかった。

以上のような成果が得られたが、立坑掘削に伴う影響をより定量的・客観的に評価するためには、以下のような研究課題が明らかとなった。

岩盤挙動調査に関しては、

- ・堆積岩において力学的・水理学的特性変化を引き起こす各種要因と物性変化との定量的な関係の把握。
- ・物性変化と岩盤の変形挙動との関係の把握。
- ・ゆるみ領域を含む岩盤のモデル化手法の確立。

水理調査に関しては、

- ・地質構造の推定手法および観測手法・システムの改良。

(中部事業所 環境地質課
湯佐泰久、柳澤幸一、杉原弘道、
吉田英一、濱 克宏)

参考文献

- 1) 柳澤幸一、広域地下水流動調査の現状について、PNC TN7410 90-021、(1989)。
- 2) 動機事項、高レベル放射性廃棄物地層処分開発の技術報告書、PNC TN1410 92-081 (1992)。
- 3) 柳澤幸一、今井 久、他、立坑掘削に伴う地下水流動影響調査研究—東濃ウラン鉱山試験立坑を例として—、応用地質、Vol.33、No.5、32-49、(1992)。
- 4) 中島 敏、中野勝志、他、瀬戸層群分布域における表層至固結層から下層泥岩・砂岩層への両側量の算定、日本地下水学会1991年度秋季講演会講演要旨集、100-103、(1991)。
- 5) 尾方伸久、大澤英昭、他、地層岩の地質学的特性および透水性、見かけ比抵抗相互の関係とその水理地質構造モデル化への適用、応用地質、Vol.32、No.6、p.321-332、(1992)。
- 6) 柳澤幸一、吉田英一、他、わが国における地盤の透水性に関する調査・研究(その1)、PNC TN7410 92-015、(1992)。
- 7) 柳澤幸一、今井 久、他、わが国を対象とした地下水流動解析、PNC TN7410 92-019、(1992)。
- 8) 今井 久、柳澤幸一、三次元飽和不飽和地層流解析プログラムTAGSACの概要、PNC TN 741090-020
- 9) 柳澤幸一、西川 敏、他、動機事項低水圧制御水理試験機(動機式JFT)の原理と運用例、地下水学会誌、Vol.30、No.3、p.127-137、(1988)。
- 10) 太田 久仁雄、瀬尾 俊弘、東濃地域における深部地下水の地球化学的研究(II)、日本原子力学会、1991年春の大会予稿集、528、(1991)。
- 11) 濱 克宏、瀬尾 俊弘、他、東濃地域における深部地下水の地球化学的研究(IV)日本原子力学会、1992年春の大会予稿集、114、(1992)。
- 12) 早稲田 恵、平井 信之、中部日本・東北日本における天然水の同位体組成、地球化学、Vol.17、p.83-91 (1983)。
- 13) 太田久仁雄、瀬尾俊弘、他、東濃地域における深部地下水の地球化学的研究(III)、日本原子力学会、1992年春の大会予稿集、113、(1992)。
- 14) Yurtsever, Y. Worldwide survey stable isotope in precipitation. Rep. sect. Isotope Hydrol., IAEA, November 1975. 40. (1975)。
- 15) 瀬尾俊弘、水谷義彦、他、岐阜県東濃地域における地下水の¹⁴C年代と起源について、日本地下水学会、1992年秋学術講演会講演要旨集、50-53、(1992)。
- 16) 根山敏史、榎本博之、他、実測された地下水Ehの地球化学モデルによる評価、日本原子力学会、1990年秋の大会予稿集、720、(1990)。
- 17) Come, B., Chapman, N.A. (ed), Nuclear Science and Technology, Final Meeting Report of CEC Natural Analogue Working Group, 3rd Meeting, Snowbird near Salt Lake City (USA), 15-17 June 1988, (1989)。
- 18) 山本 勇、塚田哲也、他、東濃地域のウラン鉱床の概観について、鉱山地質、24、157-168、(1974)。
- 19) 小笠光雄、山本正博、他、東濃地域月吉鉱床におけるウランの産状、鉱山地質学会第40回年會学術講演要旨集、(1990)。
- 20) Gladwin, A.J.W., Hurford, A.J., and Quail, R.D., Fission-track dating of zircon: Improved etching techniques, Earth and Planetary Science Letters, 33, 273-276, (1976)。
- 21) 小林幸男、岐阜県可児盆地の地質とウラン鉱化作用、鉱山地質、39(2)、79-84、(1989)。
- 22) 柳澤幸一、今井 久、他、わが国を対象とした地下水流動解析(その1 中部日本を対象とした地下水流動解析)、PNC TN7410 92-019、(1992)。
- 23) Seo, T. and Yoshida, H., Natural Analogue Studies of the Tono Uranium Deposit in Japan, Proceedings of CEC Natural Analogue Working Group, 5th Meeting, Toledo (Spain), 5-9 Oct. 1992, (in press), (1993)。
- 24) 金井 豊、坂巻孝雄、他、岐阜県東濃ウラン鉱床地域における地下水・地表水中のウラン系列核種(²³⁸U, ²³⁴U, ²³⁶Pa, ²³⁴Th)の挙動、地球化学、24、123-132、(1990)。
- 25) Nohara, T., Ochiai, et al., Uranium-Series Disequilibrium Studies in the Tono Uranium Deposit, Japan, Radiochim. Acta, (in press)。
- 26) Yoshida, H., Komuro, K., et al., Influence of micro path structure on nuclides migration in sedimentary rocks, Abstracts of 29th International geological congress, 24 Aug.-3 Sept. 1992, Kyoto (Japan), Vol.1, 226, (1992)。
- 27) 吉田英一、山本 智、他、堆積岩中の物質移行特性に関する研究—岐阜県東濃ウラン鉱床を例にした物質の移行挙動解析—、日本原子力学会、1992年秋の大会予稿集、334、(1992)。
- 28) Payne, T.E., Edis, R., et al., Radionuclide transport by groundwater colloids at the Koongarra uranium deposit. Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol.257, 481-486, (1991)。
- 29) Payne, T.E., Edis, R., et al., Alligator river analogue project-Groundwater chemistry. Final report, Vol. 7, in press, (1992)。
- 30) Seo, T., Payne, T.E., et al., A study of colloids in groundwaters at the Koongarra uranium deposit. Proc. CEC Naturalanalogue working group 5th meeting, in press, (1992)。
- 31) Snelling, A. A., Alligator river analogue project-Geological setting. Final report, Vol.7, in press, (1992)。
- 32) 杉原弘道、二宮康郎、堆積岩層中における掘削影響評価—掘削によるゆるみ領域の予測・評価手法の開発—、PNC TR/GE 89-07、(1990)。
- 33) 杉原弘道、伊藤克夫、他、ジオモグラフィによる地下制御掘削のゆるみ領域の評価について、第22回岩盤シンポジウム講演論文集、476-480、(1990)。
- 34) 杉原弘道、吉岡尚也、他、新第三系堆積岩における立坑掘削影響試験の概要、土木学会 地下空間利用シンポジウム講演要旨集、185-194、(1992)。
- 35) 木山英郎、藤村 尚、他、連続体の大変形解析のための流動要素法(FLEM)の提案、土木学会論文集 No.139/III-17、63-68、(1991)。
- 36) 松井嘉蔵、杉原弘道、他、地層岩地山における立坑掘削の力学的・水理学的特性を特性変化、PNC TR/TN 92-046、(1992)。
- 37) 石田 毅、金川 忠、他、立坑掘削時の応力再配分に着目した岩盤ゆるみ領域定定の提案、第23回岩盤シンポジウム講演論文集、227-231、(1991)。
- 38) 杉原弘道、山田隆三郎、他、弾性波トモグラフィによる地質構造調査—断層のある堆積岩層への適用例、第24回岩盤力学シンポジウム講演論文集、454-458、(1991)。
- 39) 佐藤隆紀、松井嘉蔵、他、立坑掘削影響試験—地中変位予測に基づく掘削影響評価—、TR/TN 92-051、(1992)。
- 40) 佐藤隆紀、杉原弘道、他、立坑掘削影響試験—多点変位計による岩盤の変位調査—、日本原子力学会1992年春の年會、93、(1992)。
- 41) 吉岡尚也、杉原弘道、立坑掘削に伴う応力再配分とその数値解析、第24回岩盤力学シンポジウム講演論文集、356-360、(1992)。
- 42) 柳澤幸一、今井 久、他、立坑掘削に伴う地下水流動影響調査研究—東濃ウラン鉱山を例として—、応用地質 Vol.33 No.5、32-49、(1992)。

43) 今井 久、柳澤孝一、他、立坑掘削の地下水流動予測解析、第23回岩盤力学シンポジウム講演論文集、317-321、(1991)。

44) 中島誠、斉藤孝、柳澤孝一、渡辺邦夫：岩盤浸透解析の信頼性の算定について、第23回岩盤力学シンポジウム講演論文集、pp.252-256、(1991)。