

# ウラン鉱床を利用したナチュラルアナログ研究 (その1)

—ウラン系列核種の放射非平衡について—

1991年9月

野原 壯  
瀬尾 俊弘  
落合 洋治

**動力炉・核燃料事業団 中部事業所**

岐阜県土岐市泉町定林寺園戸959-31  
TEL0572-54-1271 FAX0572-54-8940

## 要 旨

岐阜県東濃地域にある月吉ウラン鉱床は第三紀に形成された砂岩型ウラン鉱床であり、この鉱床を利用してナチュラルアナログ研究を進めている。その一環として還元環境下の岩石中における天然ウラン系列核種(U-238, U-234, Th-230, Ra-226)の挙動を解明するため、放射平衡-非平衡の研究を実施した。

ウラン鉱化体の分布は東西方向の基盤の古河川構造によって規制されており、サンプルは鉱化体から6つのボーリングの岩芯と坑道を使って合計185個採取した。鉱化体は地下水水流系に沿って上流部、中流部、下流部、最下流部の4つに区分している。鉱化作用は中流部で最も顕著である。鉱床の形成は10Maに始まったと考えられる。化学分析と $\alpha$ 及び $\gamma$ スペクトル分析を行い、以下の結果が得られた。

$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ と $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ の放射能比(185サンプル)は0.8から1.2の間にある。地域的には、地下水流の中流部から下流部にかけて $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ の放射能比が1より小さいものが多い。このうち中流部では、ウラン含有量の比較的少ない部分で $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ の放射能比の値がほぼ1なのに対し、ウラン含有量の比較的多い岩石中ではこの値が1より小さい。

$^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$ の放射能比(185サンプル)は、0.6から5.1まで大きく変化する。

以上の結果と核種の化学的性質や半減期に基づいて考慮した結果、以下の結論が得られた。

- (1) 月吉鉱床では、ウランとトリウムは過去百万年間大きく移行していないと考えられる。
- (2) 中流部から下流部にかけて、ウランは過去数十万年以内に濃集した可能性がある。特に中流部では、鉱化の著しい部分で濃集が起きている傾向が観察される。
- (3) ラジウムは過去数千年以内に移行していると考えられる。

---

(\*) 本研究の一部は1990年10月に仙台で行われた原子学会秋の大会で報告した。

### Abstract

The Tsukiyosi uranium deposit, which is called Tertiary sandstone-type, can be regarded as a potentially useful analogue for geological isolation of radioactive wastes in Japan. In order to understand the geochemical behaviour of U-series nuclides (U-238, U-234, Th-230, Ra-226) under reducing condition, a study on radioactive disequilibrium of rocks was carried out.

A total of 185 rock specimens were collected from 6 boreholes and gallery in the uranium mineralized zone, which is situated in paleo-river system, in the direction of east-west. In the system of groundwater flow, the mineralized zone was divided into four: the upper, the middle, the lower, and the lowermost reaches from the west to the east. The initial mineralization were occurred at the period of 10 Ma. and mostly focused on the middle reaches. The following results are obtained by the chemical analysis and alpha and gamma spectrometry.

Activity ratios of U-234/U-238 and Th-230/U-234 (for 185 specimens) are mostly within the range of 1.2 and 0.8. In the middle reaches to lower reaches of groundwater flow, activity ratios of Th-230/U-234 are occasionally less than unity. In the middle reaches, the ratios of Th-230/U-234 are less than unity at particularly highly mineralized parts, while the ratios are nearly equal to unity at poorly mineralized parts.

Activity ratios of Ra-226/Th-230 (for 185 specimens) were a wide range between 0.6 and 5.1.

Combination of the result above-mentioned with chemical properties and decay constants of the nuclides leads to the following conclusions.

(1) Uranium and thorium have not migrated significantly during the last one million years. The magnitude of the uranium migration is probably within the range of several ten centimeter.

(2) Uranium at the middle to lower reaches has been concentrated during the past several hundred thousand years. It is noteworthy that uranium of severely mineralized parts at the middle reaches have highly redistributed.

(3) Radium has been probably migrated during the last ten thousand years.

## 目 次

1. はじめに .....	1
1. 1 月吉ウラン鉱床 .....	1
1. 2 放射平衡と放射非平衡 .....	3
1. 3 ウラン系列核種の化学的特性 .....	6
2. 研究方法 .....	7
2. 1 サンプルング .....	7
2. 2 分析方法 .....	7
3. 結果 .....	10
3. 1 月吉鉱床中の核種の挙動 .....	10
3. 2 地下水系と核種の挙動 .....	10
3. 3 ウラン含有量と核種の挙動 .....	10
4. 考察 .....	13
5. まとめ .....	13
6. 今後の予定 .....	13
7. 参考文献 .....	14

## 1. はじめに

動燃事業団中部事業所が位置する岐阜県東濃地域には、月吉鉱床をはじめ大小10余りのウラン鉱床が分布しており、我が国最大のウラン鉱床地域である。これらの鉱床は形成後現在まで保存されてきている。このことは、ある条件下において天然の地質環境には核種を超長期にわたって封じ込めておく能力があることの裏付けとなっている。従って、ウラン鉱床における天然のウラン系列核種の保存の状態やそのメカニズムを解明することは、地質環境の長期的な隔離性能を評価する上で極めて重要である。

このような観点から、現在中部事業所においては、ウラン鉱床を利用したナチュラルアナログ研究として、主として月吉鉱床を対象に、ウラン系列核種の挙動やその地質環境条件を解明するための調査・研究を行っている。

本研究はその一環として実施しているもので、天然ウラン系列核種の放射平衡—非平衡という現象に着目し、鉱床中におけるその空間的分布を把握することによって、同系列核種の挙動の解明を試みるものである。この研究成果の一部はすでにSato et al. (1987)やOchiai et al. (1988)が報告している。ここではその後得られたデータを加えて、鉱床全域に対する総合的な解析を行った。

次に研究の対象地域と研究方法の概念について説明する。

### 1. 1 月吉ウラン鉱床

東濃地域には、月吉鉱床をはじめ美佐野鉱床、定林寺鉱床、謡坂鉱床等の堆積型ウラン鉱床が分布している(図1. 1)。月吉鉱床はこれらの中で最大の鉱床で、長さ3.4km、幅300~700m、厚さ3~10mの規模を有する。

月吉鉱床におけるウランの鉱体は、基盤花崗岩(土岐花崗岩:約7千万年前)の直上に堆積した土岐夾炭累層(約2千万年前)の砂岩、泥岩及びレキ岩中に観察され(図1. 2)、その分布は基盤花崗岩上の古河川構造に規制されている(山本ほか, 1974)。鉱床直下には基盤花崗岩の風化帯が存在する。このような透水性の高い部分に沿って現在の地下水が流れており、その方向は西北西から東南東方向で(渡辺ほか, 1990)、古河川構造の方向及び鉱床の長さ方向と一致している(図1. 3)。鉱床の形成時期に関する情報は多くないが、月吉鉱床南西約2kmの地点にある定林寺鉱床で行われたフィッシュトラック法による年代測定では、約1千万年前という結果が得られており(Ochiai et al., 1988)、月吉鉱床の形成年代もほぼこの時期と考えられる。

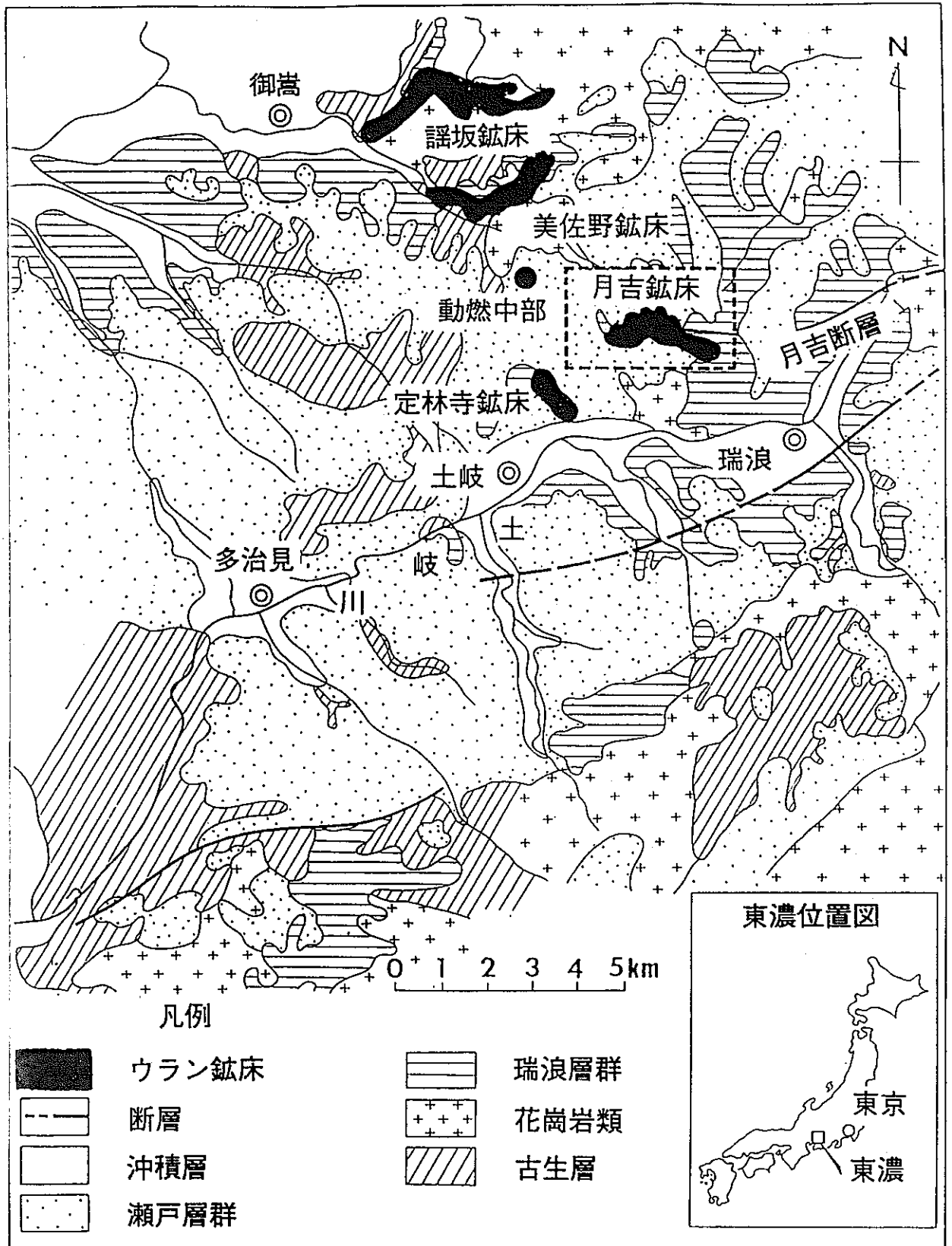


図2. 1 東濃地域の地質とウラン鉱床の分布

## 1. 2 放射平衡と放射非平衡

天然のウランにはいくつかの放射性同位体が存在しているが、その約99%が $^{238}\text{U}$ である。 $^{238}\text{U}$ は放射性壊変する元素であり(半減期44.7億年)、 $^{230}\text{Th}$ や $^{226}\text{Ra}$ 等の娘核種を経て、最終的に安定な $^{206}\text{Pb}$ に壊変する。この壊変系列はウラン系列と呼ばれる(図1.4)。

ウラン系列の娘核種の多くは、その半減期が数秒から数日と短い。比較的長い半減期を持つ娘核種としては $^{234}\text{U}$ (半減期24.5万年)、 $^{230}\text{Th}$ (同7.5万年)、 $^{226}\text{Ra}$ (同1600年)、 $^{210}\text{Pb}$ (同22.3年)があるが、最も長いものでも $^{238}\text{U}$ の半減期の1万分の1以下である。このように親核種である $^{238}\text{U}$ の半減期が娘核種に比べ著しく長い為、ウラン系列の壊変速度は $^{238}\text{U}$ のそれによって規制される。従って、すべてのウラン系列核種が地層中に長期間(最大約100万年以上)にわたって安定して存在している場合には、全ての娘核種の壊変速度はやがて親核種 $^{238}\text{U}$ のそれに等しくなる。このように同一の壊変系列にある核種の壊変速度が等しくなったとき、それらの核種の放射能の強さは等しくなり、放射平衡の状態にあるという。逆に放射平衡が崩れて核種の壊変速度が等しくなくなった状態を放射非平衡と呼ぶ。

放射非平衡になる原因には、核種の選択的な移行による溶脱や濃集が考えられる。これらの現象が地層中で起きている間は放射平衡が成り立たない。放射非平衡の程度は、親核種と娘核種の放射能比によって表され、例えば $^{234}\text{U}$ の放射能/ $^{238}\text{U}$ の放射能のように表す。このとき、親核種( $^{238}\text{U}$ )に対して娘核種( $^{234}\text{U}$ )が相対的に少ないと放射能比が1より小さく、多いと1より大きくなる。放射平衡のときは1になる。

放射非平衡状態の核種が地層中に固定され、閉鎖系として長い間この状態が続くと、徐々に放射平衡に近づいていく。放射平衡に達するために要する時間は、初めの放射非平衡の程度と娘核種の半減期によって異なる。放射非平衡の程度が最も激しい状態(例えば親核種だけが存在する状態)から放射平衡が成立するためには、娘核種の半減期の約4倍の時間が必要である(Ivanovich and Harmon, 1982)。例えば、半減期の一番長い $^{238}\text{U}$ だけが選択的に移行濃集し、娘核種の $^{234}\text{U}$ は最初存在しなかったとすると、放射平衡の状態になるためには約100万年(娘核種である $^{234}\text{U}$ の半減期24.5万年の約4倍)を要する。ウラン系列の他の核種の間ではこれよりも短い時間で放射平衡に達する。従って、ウラン系列核種の放射非平衡状態を調べることによって、約100万年以内における核種の相対的な挙動を把握することができる。

ウラン系列核種の多くは半減期が極めて短く、それらの核種は地層中で有意な移行を示す前に崩壊してしまう。従って地層中におけるウラン系列核種の挙動を把握するためには、比較的半減期の長い核種( $^{238}\text{U}$ 、 $^{234}\text{U}$ 、 $^{230}\text{Th}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{210}\text{Pb}$ )を調べる事が重要である。

図2. 2 月吉ウラン鉱床地域断面図

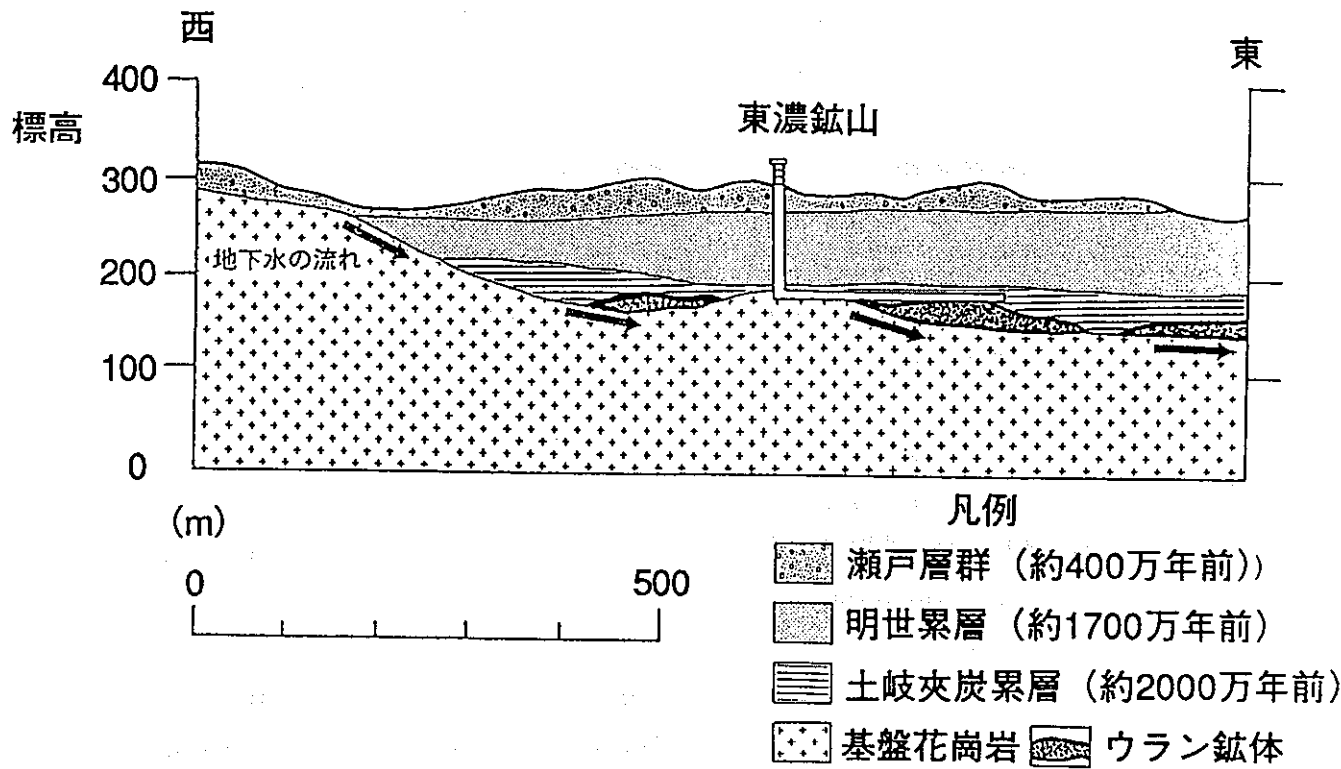


図2. 3 基盤花崗岩の古河川構造と月吉鉱床の分布

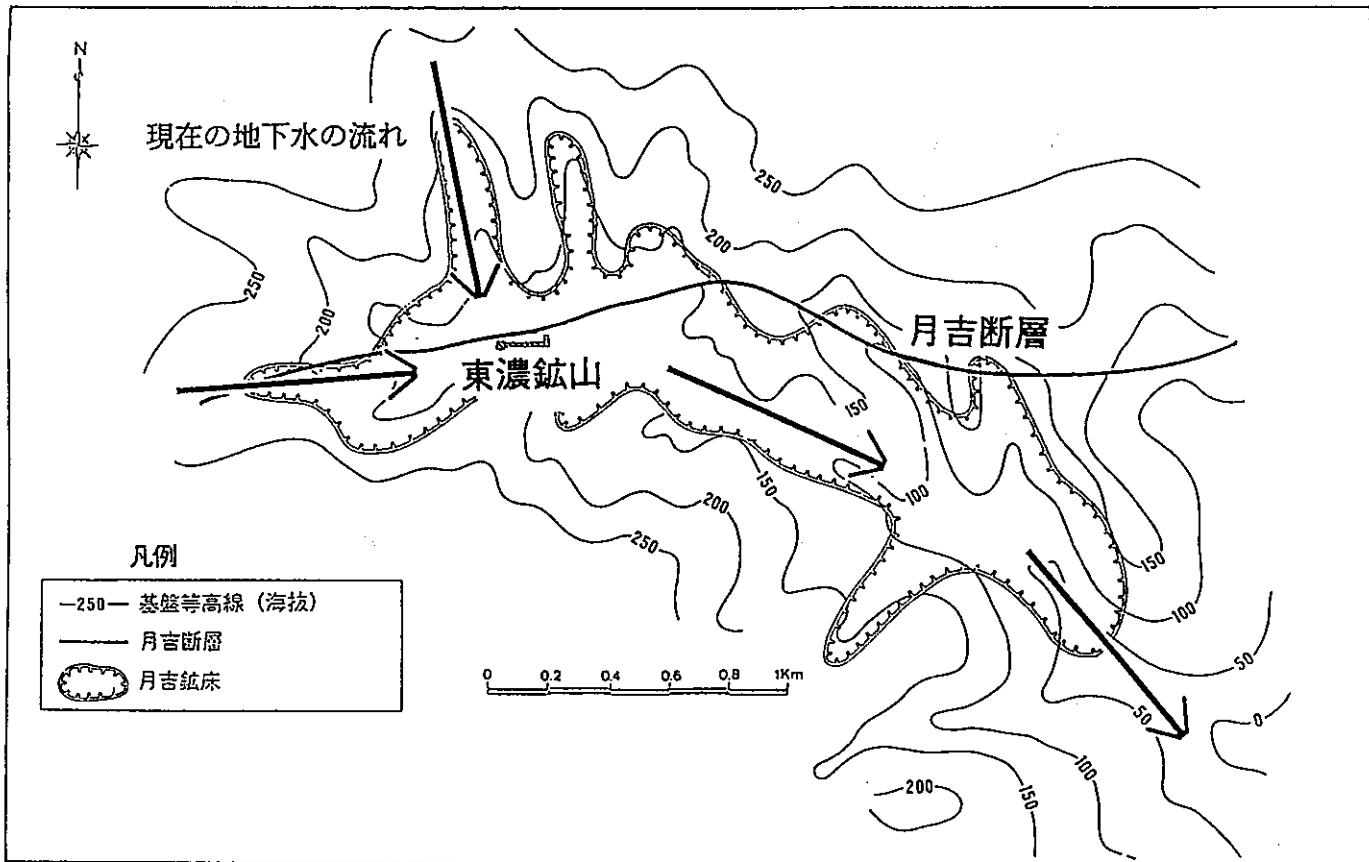




図3. 1 主要なウラン系列核種の半減期と核種間の放射平衡成立に必要な時間

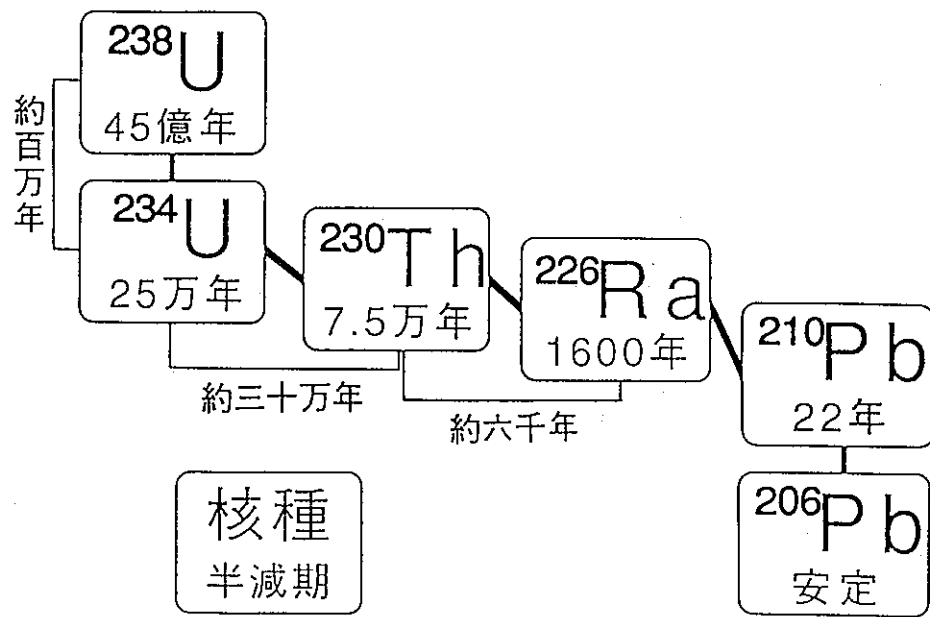
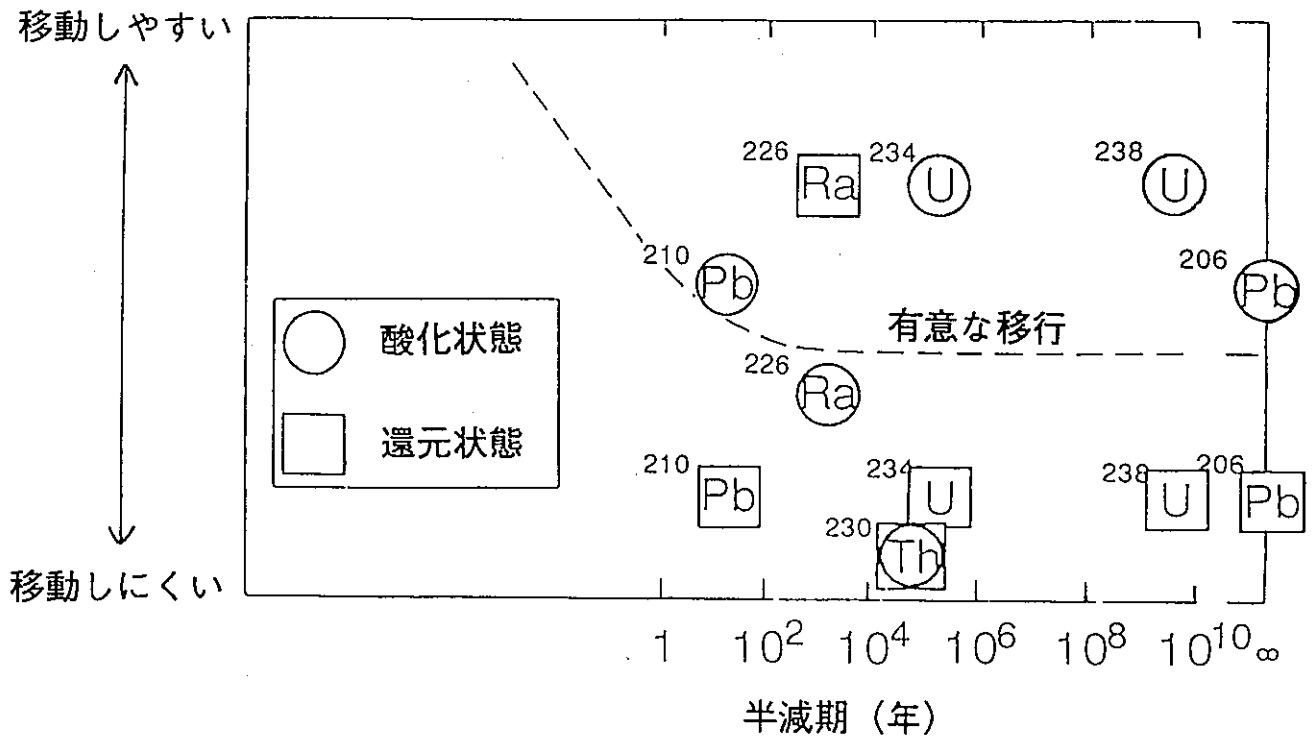


図4. 1 主要なウラン系列核種の地下水による移行特性



(Rose and Korner, 1979より)

### 1. 3 ウラン系列核種の化学的特性

ラドンガス以外のウラン系列核種の地層中での移行は、地下水によって起こると考えられる。核種の移行はその溶解度及び半減期のほか、地下水の流速及び化学的性質によって左右される。図1. 5は地下水の酸化-還元状態による核種の移行の程度を縦軸に、半減期を横軸に示したものである。破線は移行現象を結果として観察できるおおまかな境界で、破線より下の半減期の短い核種や地下水に溶けにくい核種は移行しないと考えられる。酸化状態のウランは地下水に溶けて移行しやすく、還元状態のウランや鉛は移行しにくい。トリウムは、地下水の酸化-還元状態に関係なく非常に溶けにくい元素で、地層中ではほとんど移行しないとされている。一方、 $^{230}\text{Th}$ 以外の主要核種の移行性は地質環境条件によって変化する。放射平衡に関する調査では $^{230}\text{Th}$ は移行しないと仮定することで、他の核種の移行の指標としてしばしば用いられ、それにより得られる核種の挙動から、地質環境条件を推定することが可能である。また、放射平衡が成立するまでの期間は、娘核種の半減期に依存しているため、放射平衡を崩すような挙動が起こった時期を、あるていど限定することができる。このように天然ウラン系列における主要核種間の放射平衡・非平衡の状態を調べることによって、各核種の選択的な挙動（濃集あるいは溶脱）とその生じた時期を知ることができる。

## 2. 研究方法

### 2. 1 サンプルング

研究に用いた試料は、月吉鉱床内のボーリングによって取得した岩芯試料、及び既存坑道（東濃鉱山）の壁面から採取した試料、合計185個である。サンプルングを行ったボーリング孔は、月吉鉱床の現在の地下水流における上流部（SN-2）、中流部（KNA-1、KNA-3）、下流部（AI-12、AN-4）最下流部（AN-5）の6孔である（図2. 1、図2. 2）。このうち中流部の2孔は坑道内から、他の4孔は地表から掘削を行っている。

ボーリングによる岩芯からのサンプルングは、鉱化部に重点を置いて岩相ごとに5～10cmの長さ（重量100～500g）で行った。採取した岩石試料は微粉碎して約50gを分析に使用した。坑道壁面（G-1）からのサンプルングは、ウラン富鉱部において一辺1mの立方体を切りだし、これを64個のグリッドサンプルに分割した。各グリッドサンプルは全量を微粉碎して均質化したのち、四分器にかけ50gを分析に使用した（Ochiai et al., 1988）。

### 2. 2 分析方法

粉末試料を分析用に前処理した後、 $\alpha$ 線スペクトル分析、 $\gamma$ 線スペクトル分析及びウラン分析を行った。分析項目は、 $^{238}\text{U}$ 、 $^{234}\text{U}$ 、 $^{230}\text{Th}$ （以上 $\alpha$ 線スペクトル分析による）、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{210}\text{Pb}$ （同、 $\gamma$ 線スペクトル分析）のそれぞれの放射能濃度とウラン含有量である。

$\alpha$ 線スペクトル分析の前処理としては、粉末試料約1gを陰イオン交換樹脂及び溶媒抽出法により分離精製したのち、ステンレス板に電着処理した（図2. 3）。また $\gamma$ 線スペクトル分析の前処理として、粉末試料20gを蓋付ポリ容器に封入後約1ヵ月放置した。これによって娘核種のうちゆいいつの気体であり、粉碎処理のさい散逸してしまう $^{222}\text{Rn}$ を $^{226}\text{Ra}$ に対して放射平衡状態にし、その娘核種の放射能濃度を測定するためである。ウラン含有量の分析は、ウラン含有量に応じて蛍光法（ $\text{U} > 0.01\%$ ）、吸光法（ $\text{U} \leq 0.01\%$ ）によって行った。

各測定に使用した機器は以下のとおりである。

- ① $\alpha$ 線スペクトル分析装置（SEIKO EG&G）  
検出器・・・ORTEC製 576A  $\alpha$ 線スペクトルメーター
- ② $\gamma$ 線スペクトル分析装置（日本原子力事業(株)）  
検出器・・・PGT社製 Ge検出器
- ③ウラン分析（吸光法）  
日本分光 UVIDEC-77 分光光度計
- ④ウラン分析（蛍光法）  
Aloka FM1-4B型 蛍光光度計

図5. 1 月吉鉱床内サンプリングポイント位置図

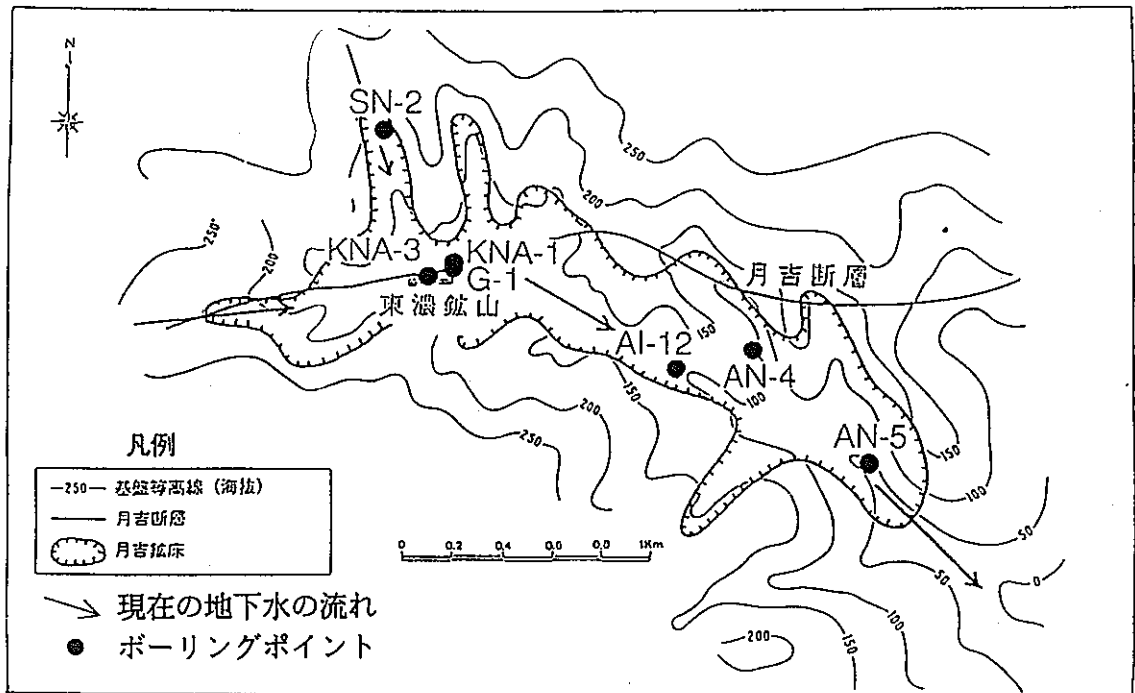


図5. 2 東濃ウラン鉱山坑道内サンプリングポイント位置図

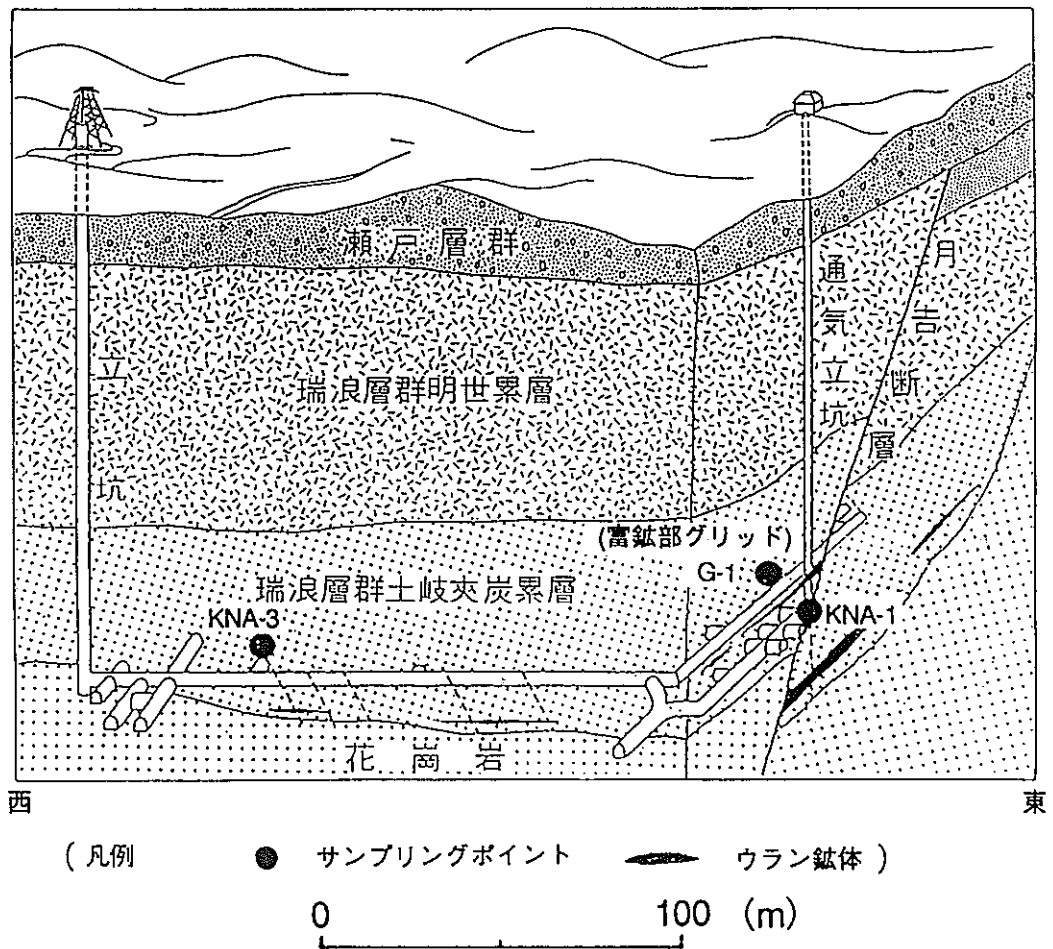
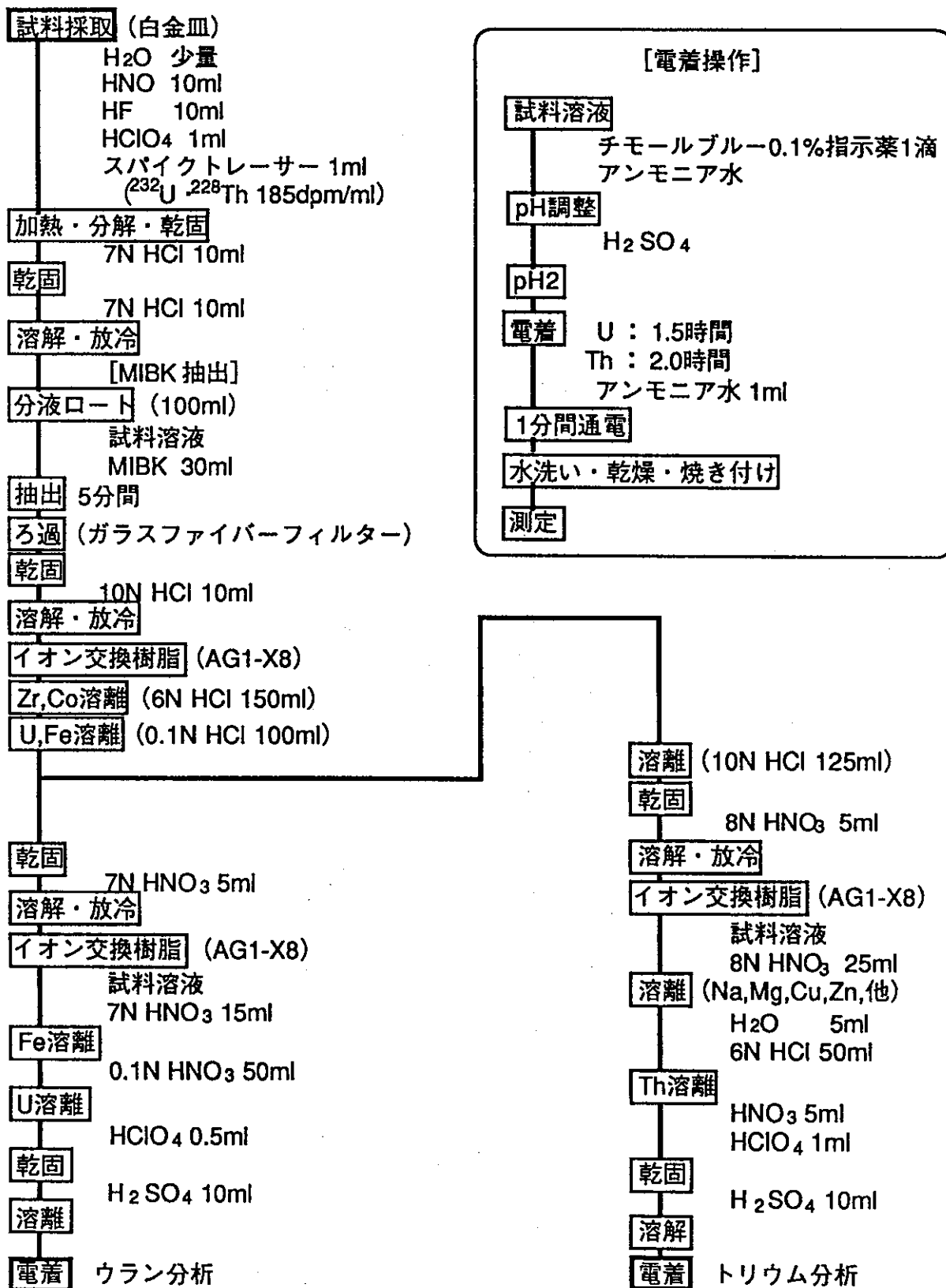


表5. 1  $\alpha$ 線スペクトル分析前処理法 (陰イオン交換樹脂分離法)  
(電着操作法)



### 3. 結果

#### 3. 1 月吉鉱床中の核種の挙動

月吉鉱床中の天然ウラン系列核種の挙動を大局的に把握するために、過去の調査結果も含めた185試料のデータ(付録)を解析した。その結果を図3. 1と3. 2に示す。

$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ の放射能比及び $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ の放射能比は、0.8から1.2の間に集中し、全体的にはほぼ放射平衡の状態にあり、これらの核種の大きな移行は認められない。放射能比のばらつきは、 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ が0.93から1.22、 $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ が0.47から1.30だが、大部分はそれぞれ0.96から1.10と0.85から1.10の間である。全体的に $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ の放射能比は1.0以下、 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ の放射能比は1.0以上の値をとる試料が多い。一方、 $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ の放射能比は正の相関を持って0.4から4.5まで大きく変化し、多くの岩石中で放射非平衡の状態にある。これよりウランに対してのラジウムの移行が認められる。また $^{210}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ の放射能比の値は、 $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ の放射能比の値とほぼ同じであるが、これは移行・吸着した $^{226}\text{Ra}$ がその場で $^{210}\text{Pb}$ に壊変し、そのあと大きく移行せず、 $^{226}\text{Ra}$ と $^{210}\text{Pb}$ の間ではほぼ放射平衡が成り立っているためと考えられる。

#### 3. 2 地下水系と核種の挙動

鉱床の分布を規制している基盤花崗岩の古河川構造に沿った地下水の流れが現在、存在している。図3. 3は、ウラン鉱床中の核種の局所的な挙動を把握するために、月吉鉱床内の核種( $^{238}\text{U}$ 、 $^{234}\text{U}$ 、 $^{230}\text{Th}$ )の放射能比の分布を、古河川構造における領域ごとに示した図である。小さな白丸は各サンプルのデータで、大きな黒丸はそれらの平均値である。古河川構造の上流部と最下流部では、これらの核種がほぼ放射平衡の状態にある。これに対し中流部と最下流部では $^{234}\text{U}$ の放射能 $>$  $^{230}\text{Th}$ の放射能の傾向が認められ、前記のように $^{230}\text{Th}$ はほとんど移行しないと仮定できるため、ウランの濃集が比較的最近(数十万年以内)にも起こっていると考えられる。なお、下流部では $^{234}\text{U}$ の放射能 $>$  $^{238}\text{U}$ の放射能の傾向が認められ、 $^{234}\text{U}$ が選択的に濃集している。

#### 3. 3 ウラン含有量と核種の挙動

ウラン含有量による核種( $^{238}\text{U}$ 、 $^{234}\text{U}$ 、 $^{230}\text{Th}$ )の挙動の違いを把握するために、古河川構造の中流部に位置する東濃鉱山坑内のKNA-3号孔(図2. 1)におけるウラン含有量と核種の放射能比の対比を行った。その結果を図3. 4に示す。左側の地質柱状図に示した黒丸は、サンプリングの位置を示している。ウラン含有量がそれほど高くない岩石中(1%(U)以下)では、 $^{234}\text{U}$ の放射能と $^{230}\text{Th}$ の放射能の比がほぼ1で、これらの核種の移行が認められないのに対して、ウラン含有量が高い岩石(1%(U)以上)中では、 $^{234}\text{U}$ の放射能 $>$  $^{230}\text{Th}$ の放射能の傾向が認められ、ウランの濃集は比較的最近(数十万年以内)にも起こっていると考えられる。

図6. 1 月吉鉱床における  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 放射能比と  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ 放射能比

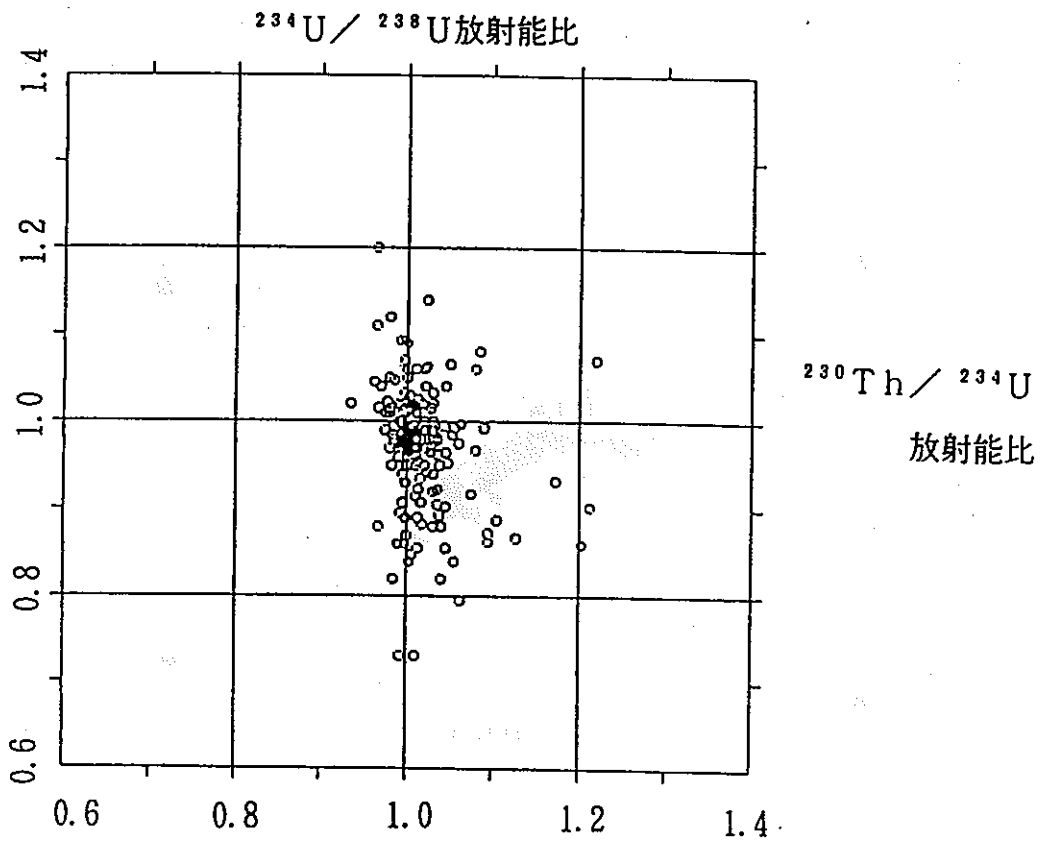


図6. 2 月吉鉱床における  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ 放射能比と  $^{210}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 放射能比

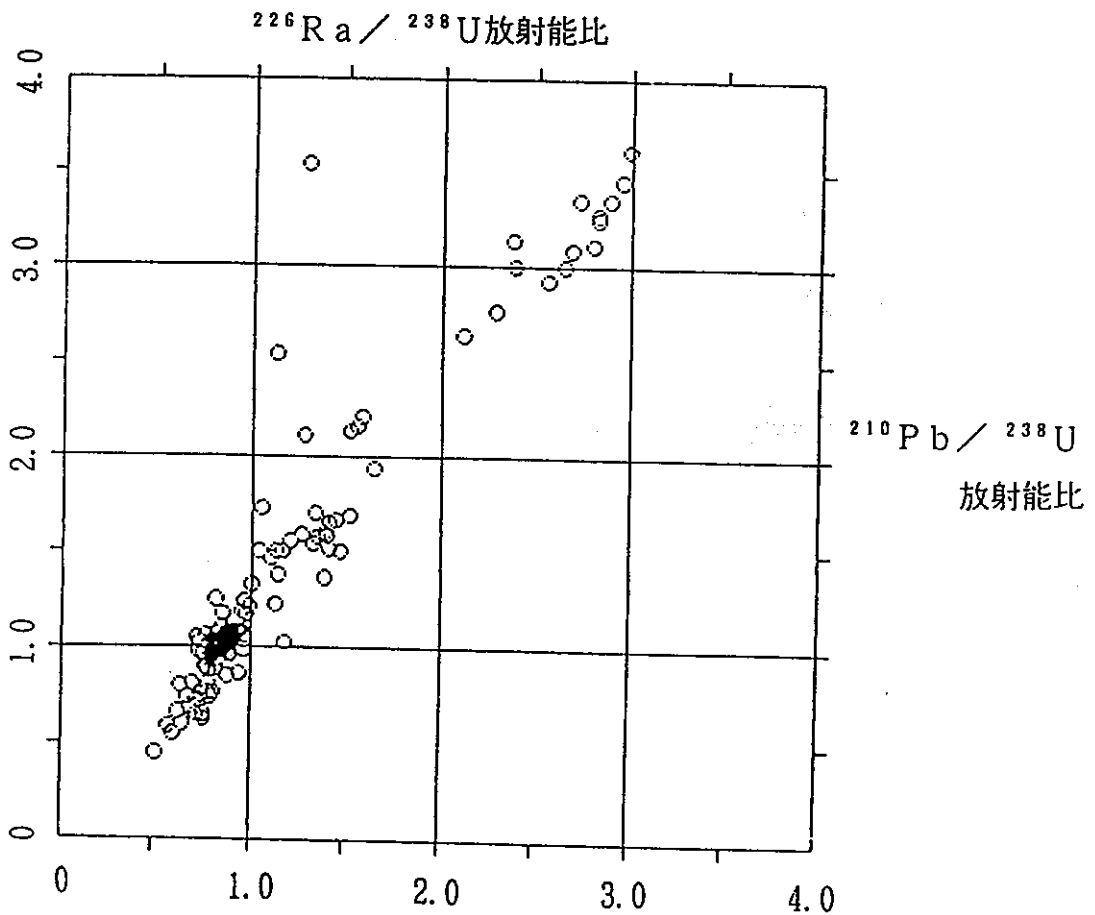


図6. 3 月吉鉱床中の  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 放射能比と  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ 放射能比の分布

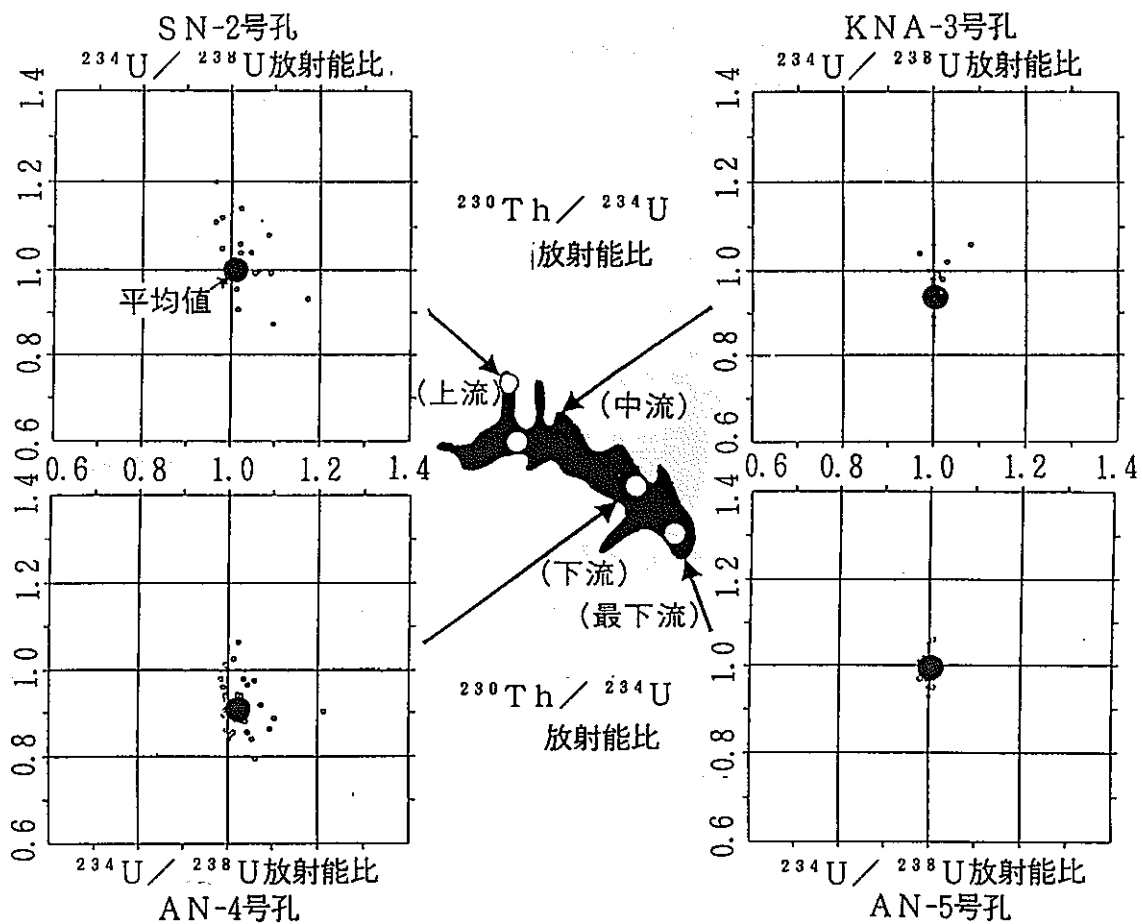
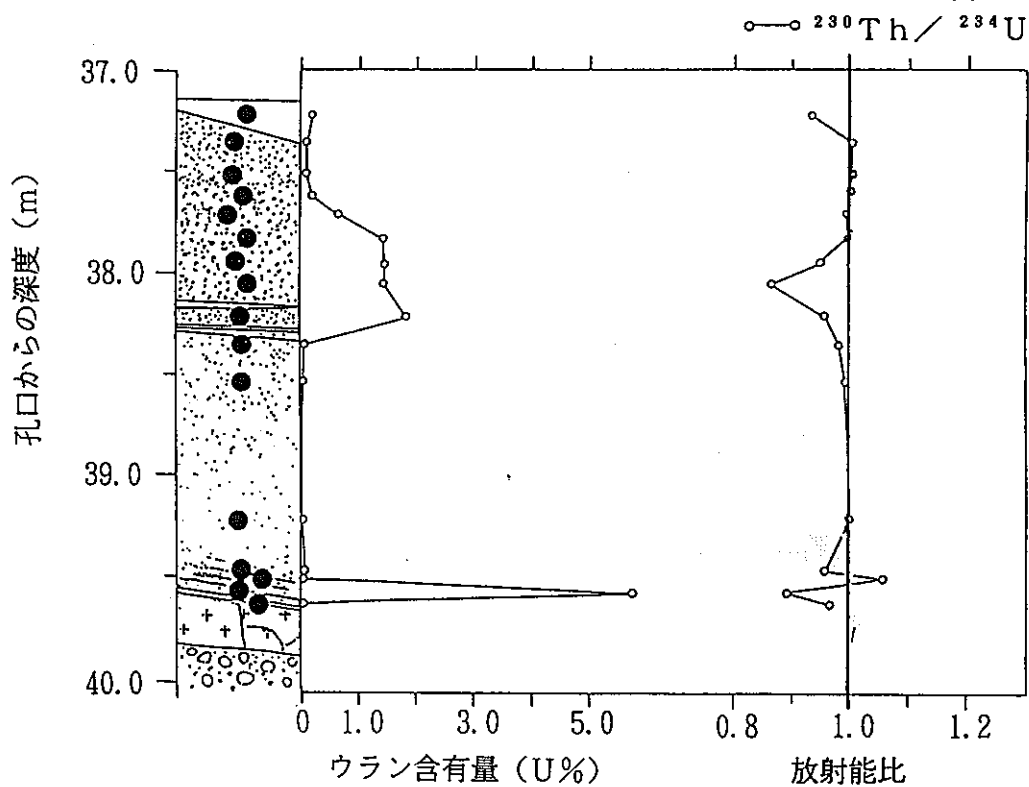


図6. 4 富鉱部におけるウラン含有量と  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ 放射能比の分布 (KNA-3号孔)





#### 4. 考察

月吉鉱床では、 $^{238}\text{U}$ 、 $^{234}\text{U}$ 及び $^{230}\text{Th}$ は、ほぼ放射平衡の状態にある。半減期の長いこれらの核種が放射平衡に達するためには、数十万年から百万年程度の期間を必要とするため、その間これらの核種に大きな移行はなかったと考えられる。

一方 $^{226}\text{Ra}$ は、親核種である $^{230}\text{Th}$ と放射非平衡の状態にあり、鉱床内で移行していることがわかった。鉱床付近を流れる地下水は溶存酸素が検出限界以下で、酸化還元電位が約 $-300\text{mV}$ であることが、坑内ボーリング孔の水質連続モニタリングによって明らかにされている (Sato et al., 1987)。このような還元状態にある地下水中で $^{226}\text{Ra}$ が選択的に溶脱、移行したと考えられる。この $^{226}\text{Ra}$ の挙動は、その半減期から約数千年以内に起こったと考えられる。

月吉鉱床全体でみると、最近約百万年以内におけるウランの大きな移行は確認されないが、鉱床内のウランと $^{230}\text{Th}$ の放射能比の分布を基盤花崗岩の古河川構造と対比させてみると、その中流部と下流部で若干放射非平衡が認められる。そこでは $^{230}\text{Th}$ に対する $^{234}\text{U}$ の放射能比が大きいことから、過去数十万年以内にウランの濃集が起きていると考えられる。また、下流部では $^{238}\text{U}$ に対する $^{234}\text{U}$ の放射能比が大きいことから、ウランの濃集は $^{234}\text{U}$ について優先的に起こったと考えられる。

数十万年以内のウランの濃集が示唆される中流部のボーリング孔 (KNA-3号孔) では、ウラン含有量が高くない岩石中の $^{234}\text{U}$ の $^{230}\text{Th}$ に対する放射能比はほぼ1で濃集が認められないのに対し、ウラン含有量が特に高い部分でこの放射能比が高くなっており、これらの岩石中でウランの鉱化作用が現在、あるいは数十万年以内の最近まで継続していたと考えられる。この中流部では今までのところウランが溶脱された証拠が見出されていないことを合わせて考えると、鉱床の中央部では現在までにウランが不可逆的に濃集している可能性があることを否定できない。

このように鉱床中、特に富鉱部においてウランの濃集が最近も起こっているとすると、鉱床を含む地質環境は、地下水から岩石へのウランの収着・保持が岩石から地下水へのウランの溶脱よりも卓越する条件にあると考えられる。

#### 5. まとめ

以上、月吉鉱床における放射非平衡の研究から今までに得られた結果をまとめると、次のようになる。

- ①月吉鉱床全体でみると、最近約百万年以内のウランの大きな移行は認められない。しかし、 $^{226}\text{Ra}$ は数千年以内に移行している。
- ②月吉鉱床内における古河川構造の中流部と下流部では、過去数十万年以内にウランの濃集が起こっている。
- ③ウラン濃集が認められる中流部を詳しくみると、ウランの濃集はウラン含有量と相関があり、ウラン含有量の多い岩石中で濃集が顕著である。

#### 6. 今後の予定

今後は、これらの調査結果を踏まえて、地質環境条件とウラン系列核種の挙動の関係を明らかにするため、以下の調査を進めて行く。

1. ウラン系列核種の放射能比の空間的分布を把握し、ウラン系列核種の挙動のスケー

ルを解明する。

2. ウラン系列核種の放射能比とウラン含有量及び岩相、ウランの産状、鉱物との関係を把握し、ウラン系列核種の挙動を微視的に解明する。
3. 以上の結果を総合的に解析し、核種の収着・保持・移行に係わる地質環境条件およびメカニズムを解明する。

## 9. 参考文献

- Ivanovich, M. and R. S. Harmon (1982): Uranium Series Disequilibrium ; Applications to Environmental Problems. Clarendon press. Oxford.
- Ochiai, Y., S. Takeda, K. Yanagizawa and N. Nakatsuka (1988): Natural Analogue Study on Uranium Deposit in Japan, Nuclear science and technology, CEC Natural Analogue Working group. 126~138.
- Rose, A. W. and L. A. Korner (1979): Radon in natural waters and a guide to uranium deposits in Pennsylvania. Golden Symposium Volume. 65~76.
- Rose, A. W., H. E. Hawkes and J. S. Webb (1979): Geochemistry in mineral exploration. Academic press. London.
- Sato, C., Y. Ochiai and S. Takeda (1987): Natural Analogue Study on Uranium Deposit in Japan. 2nd CEC Symposium Natural Analogue in Radioactive Waste Disposal. 462~472.
- Seo, T., Y. Ochiai, S. Takeda and N. Nakatsuka (1989): Natural Analogue Study on Tono Sandstone-type Uranium Deposit in Japan. CEC Natural Analogue Working group. 126~138.
- 渡辺邦夫・藍沢稔幸・柳沢孝一 (1990): 岩盤浸透流の3次元解析の考えと多孔体モデルによる広域解析例. 土木学会第45回年次学術講演会. 816~817.
- 山本勇・塩田哲也・原島文雄・藤本順吉・鯉沼稔・広野修一郎 (1974): 東濃地域ウラン鉱床の探鉱について. 鉱山地質. 24. 157~168.

表6. 1 a 岩芯試料のウラン含有量と放射能比 (SN-2号孔)

	Bolling No.	depth	U (%)	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$	$^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$
1	SN-2	89.45	0.0003	1.022	1.140	1.110
2	SN-2	89.55	0.0003	1.046	1.040	1.000
3	SN-2	90.35	0.0006	1.095	0.872	0.796
4	SN-2	90.45	0.0007	1.085	1.080	0.995
5	SN-2	90.65	0.0014	1.023	1.040	1.010
6	SN-2	90.85	0.0013	1.091	0.993	0.910
7	SN-2	91.05	0.0013	0.994	0.971	0.977
8	SN-2	91.25	0.0011	1.013	0.955	0.942
9	SN-2	91.35	0.0022	1.016	0.908	0.893
10	SN-2	91.55	0.0016	1.172	0.933	0.796
11	SN-2	92.15	0.0039	0.981	1.120	1.140
12	SN-2	92.25	0.0034	1.022	0.989	0.968
13	SN-2	92.45	0.0070	0.999	1.020	1.021
14	SN-2	92.55	0.0050	1.020	1.040	1.020
15	SN-2	92.65	0.0034	0.992	1.000	1.010
16	SN-2	92.75	0.0050	1.063	0.997	0.938
17	SN-2	92.85	0.0040	1.003	1.030	1.030
18	SN-2	93.05	0.0040	1.007	1.020	1.010
19	SN-2	93.35	0.0011	1.055	0.992	0.940
20	SN-2	93.45	0.0110	1.021	1.060	1.040
21	SN-2	93.55	0.0070	1.010	0.989	0.979
22	SN-2	93.80	0.0040	1.010	0.470	0.960
23	SN-2	93.90	0.0030	0.981	1.050	1.070
24	SN-2	94.00	0.0050	0.965	1.110	1.150
25	SN-2	94.10	0.0027	0.965	1.200	1.240

表6. 1b 岩芯試料のウラン含有量と放射能比 (KNA-3号孔)

	Bolling No.	depth	U (%)	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$	$^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$	$^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$
1	KNA-3	37.20m	0.207	1.00	0.93	1.71	1.39
2	KNA-3	37.36m	0.116	0.97	1.04	1.37	1.16
3	KNA-3	37.50m	0.108	1.08	1.06	1.22	1.13
4	KNA-3	37.70m	0.212	1.03	1.02	1.34	1.07
5	KNA-3	37.73m	0.710	1.02	0.98	1.47	1.02
6	KNA-3	37.76m	1.447	1.00	1.00	1.27	1.66
7	KNA-3	37.79m	1.460	1.00	0.95	0.85	1.55
8	KNA-3	37.81m	1.447	1.00	0.87	1.29	2.26
9	KNA-3	38.20m	1.808	1.01	0.96	1.21	0.87
10	KNA-3	38.30m	0.041	1.00	0.98	5.11	1.04
11	KNA-3	38.55m	0.005	1.01	0.99	1.52	1.11
12	KNA-3	39.20m	0.018	0.99	1.00	1.58	1.38
13	KNA-3	39.47m	0.083	1.00	0.96	1.59	1.40
14	KNA-3	39.57m	0.055	1.00	1.06	4.17	1.29
15	KNA-3	39.60m	5.738	1.00	0.89	1.44	2.76
16	KNA-3	39.65m	0.049	1.00	0.97	2.18	1.25

表6. 1c 東濃鉍山坑内富鉍部グリッド岩石試料のウラン含有量と放射能比（その1）

	Bolling No.	depth	U (%)	234U/238U	230Th/234U	226Ra/230Th	210Pb/226Ra
1	G-1	A-1-1	0.010	1.03	0.98	0.93	1.07
2	G-1	A-1-2	0.030	1.00	0.99	0.75	0.91
3	G-1	A-1-3	0.029	0.99	1.09	0.90	1.03
4	G-1	A-1-4	0.024	1.05	1.07	0.93	1.08
5	G-1	A-2-1	0.016	1.00	0.96	0.95	1.09
6	G-1	A-2-2	0.023	1.00	1.00	0.90	1.05
7	G-1	A-2-3	0.029	1.01	0.96	0.93	1.08
8	G-1	A-2-4	0.023	1.03	0.97	0.90	1.06
9	G-1	A-3-1	0.015	1.01	1.02	0.91	1.06
10	G-1	A-3-2	0.026	0.97	0.99	0.93	1.08
11	G-1	A-3-3	0.029	1.00	1.09	0.91	1.06
12	G-1	A-3-4	0.030	0.99	0.97	0.91	1.06
13	G-1	A-4-1	0.046	1.01	0.96	0.89	1.01
14	G-1	A-4-2	0.024	0.98	0.99	0.84	1.11
15	G-1	A-4-3	0.021	1.03	0.97	0.82	1.04
16	G-1	A-4-4	0.023	1.00	1.00	0.76	1.06
17	G-1	B-1-1	0.019	1.00	0.98	0.85	0.99
18	G-1	B-1-2	0.021	1.00	0.97	0.86	1.01
19	G-1	B-1-3	0.022	0.98	1.02	0.89	1.06
20	G-1	B-1-4	0.016	1.02	0.94	0.89	1.06
21	G-1	B-2-1	0.019	0.99	0.99	0.87	1.00
22	G-1	B-2-2	0.020	1.03	1.01	0.88	0.96
23	G-1	B-2-3	0.022	1.00	1.03	0.87	0.98
24	G-1	B-2-4	0.019	0.99	1.02	0.90	1.02
25	G-1	B-3-1	0.018	1.01	1.00	0.83	1.02
26	G-1	B-3-2	0.013	1.03	0.87	0.87	0.98
27	G-1	B-3-3	0.011	1.08	0.97	0.87	1.06
28	G-1	B-3-4	0.018	1.03	0.96	0.81	1.03
29	G-1	B-4-1	0.011	1.01	0.98	0.87	0.99
30	G-1	B-4-2	0.011	1.03	0.97	0.84	1.01
31	G-1	B-4-3	0.012	1.03	1.03	0.83	0.97
32	G-1	B-4-4	0.011	1.02	1.02	0.87	1.01
33	G-1	C-1-1	0.019	0.97	1.02	0.80	0.97
34	G-1	C-1-2	0.041	0.98	0.98	0.82	0.99
35	G-1	C-1-3	0.039	0.99	1.00	0.83	1.03
36	G-1	C-1-4	0.026	1.04	1.00	0.81	0.99
37	G-1	C-2-1	0.045	1.00	1.09	0.73	1.02
38	G-1	C-2-2	0.018	1.05	0.95	0.94	0.86
39	G-1	C-2-3	0.018	1.01	0.98	0.89	1.07
40	G-1	C-2-4	0.022	1.02	0.95	0.85	1.02
41	G-1	C-3-1	0.011	1.01	0.99	0.83	0.97
42	G-1	C-3-2	0.020	0.96	1.05	0.89	1.02
43	G-1	C-3-3	0.012	0.99	1.05	0.76	0.94
44	G-1	C-3-4	0.021	1.00	1.02	0.86	1.01
45	G-1	C-4-1	0.010	1.04	0.98	0.87	0.99
46	G-1	C-4-2	0.017	1.05	0.99	0.87	1.07
47	G-1	C-4-3	0.013	1.01	0.96	0.84	1.00
48	G-1	C-4-4	0.021	1.03	0.99	0.82	1.01
49	G-1	D-1-1	0.049	1.00	0.97	0.80	0.98
50	G-1	D-1-2	0.048	1.02	0.98	0.82	1.02
51	G-1	D-1-3	0.037	1.00	0.99	0.81	1.01
52	G-1	D-1-4	0.034	1.00	0.98	0.81	0.99

表6. 1c 東濃鉍山坑内富鉍部グリッド岩石試料のウラン含有量と放射比（その2）

	Bolling No.	depth	U (%)	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$	$^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$	$^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$
53	G-1	D-2-1	0.046	1.01	0.98	0.72	0.97
54	G-1	D-2-2	0.041	1.00	0.98	0.80	0.98
55	G-1	D-2-3	0.035	1.00	0.99	0.73	0.97
56	G-1	D-2-4	0.031	0.98	0.95	0.82	1.00
57	G-1	D-3-1	0.023	1.01	1.01	0.83	1.03
58	G-1	D-3-2	0.018	1.01	1.02	0.75	0.97
59	G-1	D-3-3	0.024	0.98	1.01	0.82	0.99
60	G-1	D-3-4	0.025	1.00	0.97	0.79	1.04
61	G-1	D-4-1	0.015	0.99	0.99	0.79	0.98
62	G-1	D-4-2	0.018	1.00	1.07	0.82	1.07
63	G-1	D-4-3	0.022	1.01	1.02	0.72	0.98
64	G-1	D-4-4	0.023	1.00	0.97	0.87	1.09

表6. 1 d 岩芯試料のウラン含有量と放射能比 (KNA-1号孔)

	Bolling No.	depth	U (%)	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$	$^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$	$^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$
1	KNA-1	0.4-0.6	0.026	1.02	1.02	1.55	1.22
2	KNA-1	5-5.2	0.002	1.05	1.45	1.27	1.40
3	KNA-1	5.2-5.4	0.0016	1.02	1.04	1.22	0.93
4	KNA-1	5.4-5.5	0.0015	1.16	1.20	1.08	0.83
5	KNA-1	5.5-5.6	0.0001	0.99	1.09	1.64	1.13
6	KNA-1	5.6-5.8	0.0003	0.98	1.40	1.55	1.27
7	KNA-1	5.8-6.0	0.0004	1.05	1.29	1.17	0.84
8	KNA-1	24.0-24.1	0.100	1.01	0.95	1.64	1.04
9	KNA-1	24.1-24.25	0.091	1.02	0.98	1.09	1.41
10	KNA-1	24.25-24.4	0.029	1.03	0.99	1.42	1.12
11	KNA-1	24.4-24.5	0.025	1.00	1.00	1.37	1.31
12	KNA-1	24.5-24.7	0.032	1.01	1.10	1.01	1.40
13	KNA-1	24.7-24.8	0.027	0.92	0.96	1.33	1.24
14	KNA-1	24.8-25.0	0.045	1.00	1.00	1.14	1.36
15	KNA-1	25.5-25.7	0.088	0.98	0.96	1.20	1.71
16	KNA-1	28.5-28.6	0.032	1.00	0.96	0.51	1.30
17	KNA-1	28.8-29.0	0.090	1.01	0.98	1.52	1.30
18	KNA-1	29.0-29.1	0.065	0.99	0.99	1.96	1.31
19	KNA-1	29.1-29.2	0.035	1.09	0.88	3.83	1.13
20	KNA-1	33.8-33.9	0.013	0.98	1.07	2.54	0.99
21	KNA-1	33.9-34.1	0.005	1.00	0.98	0.26	1.15
22	KNA-1	34.1-34.3	0.0039	0.96	1.03	1.29	1.17
23	KNA-1	34.3-34.5	0.0031	0.95	1.03	1.13	1.11
24	KNA-1	34.5-34.7	0.0024	1.09	1.01	1.35	1.24
25	KNA-1	34.7-34.9	0.0041	1.13	0.94	1.39	1.36

表6. 1 e 岩芯試料のウラン含有量と放射能比 (A I -12 号孔)

	Bolling No.	depth	U (%)	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$	$^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$	$^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$
1	AI-12	83.05	0.032	0.97	0.85	0.80	0.89
2	AI-12	83.15	0.035	0.94	0.96	0.73	0.82
3	AI-12	83.25	0.016	1.01	0.74	0.87	0.95
4	AI-12	83.35	0.042	1.02		0.79	0.91
5	AI-12	83.45	0.0125	1.03	1.03	0.96	1.06
6	AI-12	83.55	0.095	0.97	0.98	0.79	0.93
7	AI-12	83.65	0.042	0.99	0.72	0.68	0.88
8	AI-12	83.75	0.067	1.00	0.89	1.09	1.28
9	AI-12	83.85	0.043	1.03	0.95	0.78	1.02
10	AI-12	83.95	0.039	1.04	0.85	0.89	1.06
11	AI-12	84.05	0.041	0.98	0.81	0.72	0.92
12	AI-12	84.15	0.0248	1.00	0.97	1.01	1.24
13	AI-12	84.25	0.029	0.99	0.85	0.74	0.93
14	AI-12	84.35	0.033	0.96		0.81	1.00
15	AI-12	84.45	0.004	1.04	0.99	0.79	0.87
16	AI-12	84.55	0.004	1.01	0.98	0.81	0.96
17	AI-12	84.65	0.008	1.02	0.99	0.90	0.99
18	AI-12	84.75	0.0013	1.20	1.03	1.54	1.39
19	AI-12	84.85	0.019	1.01	0.90		
20	AI-12	84.95	0.0007	1.22	1.31		



表6. 1 f 岩芯試料のウラン含有量と放射能比 (AN-4号孔)

	Bolling No.	depth	U(%)	234U/238U	230Th/234U	226Ra/230Th	210Pb/226Ra
1	AN-4	50	0.001	1.03	0.94	0.88	1.14
2	AN-4	50.7	0.039	1.07	0.92	0.78	0.99
3	AN-4	51	0.018	1.01	1.03	0.94	1.21
4	AN-4	52.8	0.034	1.04	0.98	0.81	1.08
5	AN-4	61.8	0.01	1.04	0.93	0.92	1.16
6	AN-4	62	0.103	1.01	0.92	0.98	1.21
7	AN-4	62.1	0.024	1.06	0.98	0.65	1.03
8	AN-4	62.4	0.084	1.05	0.97	0.77	1.12
9	AN-4	62.6	0.013	1.01	0.92	0.78	1.06
10	AN-4	62.8	0.028	1.04	0.92	1.09	1.65
11	AN-4	63	0.033	1.10	0.86	0.92	1.17
12	AN-4	63.2	0.033	1.10	0.89	0.85	1.22
13	AN-4	63.4	0.024	1.05	0.90	0.81	1.18
14	AN-4	63.6	0.069	0.99	0.90	1.16	1.45
15	AN-4	63.8	0.056	1.00	0.84	0.74	1.08
16	AN-4	64	0.032	1.04	0.98	0.71	1.01
17	AN-4	65	0.036	1.02	0.91	0.88	1.18
18	AN-4	66	0.008	1.03	0.88	0.89	1.19
19	AN-4	67	0.02	1.06	0.84	0.88	1.04
20	AN-4	68	0.02	1.05	0.85	1.08	1.29
21	AN-4	69	0.014	1.04	0.89	0.90	1.13
22	AN-4	70.05	0.037	1.00	0.97	0.91	1.09
23	AN-4	71.45	0.037	1.04	0.90	0.94	1.14
24	AN-4	72.05	0.028	1.02	0.94	0.91	1.15
25	AN-4	73.25	0.041	1.06	0.80	1.00	1.31
26	AN-4	74.15	0.056	0.99	0.91	0.94	1.22
27	AN-4	75.55	0.054	0.99	0.94	0.94	1.19
28	AN-4	76.45	0.086	1.00	0.86	0.99	1.37
29	AN-4	77.05	0.02	1.02	1.06	1.04	1.09
30	AN-4	78.05	0.007	1.00	1.01	1.14	1.20
31	AN-4	79	0.015	1.00	0.93	1.07	1.33
32	AN-4	80.05	0.019	0.99	0.96	1.00	1.25
33	AN-4	81.45	0.035	1.02	0.88	0.79	1.47
34	AN-4	82.05	0.01	0.99	0.98	0.59	1.04
35	AN-4	83.05	0.009	1.04	0.88	0.75	1.18
36	AN-4	84.55	0.013	1.01	0.85	0.77	1.10
37	AN-4	85.55	0.006	1.21	0.90	1.01	1.33
38	AN-4	86.45	0.032	1.00	0.85	0.74	1.00

表6. 1 g 岩芯試料のウラン含有量と放射能比 (AN-5号孔)

	Bolling No.	depth	U (%)	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$	$^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$	$^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$
1	AN-5	73.90m	0.044	0.99	1.02	1.12	1.33
2	AN-5	74.10m	0.025	1.01	0.95	1.31	1.26
3	AN-5	74.75m	0.028	1.01	0.97	1.22	1.30
4	AN-5	74.80m	0.046	0.98	0.97	1.47	1.14
5	AN-5	75.30m	0.012	1.03	1.00	1.35	0.98
6	AN-5	75.80m	0.046	1.01	1.06	1.35	1.15
7	AN-5	76.10m	0.056	1.01	0.98	2.92	1.16
8	AN-5	76.25m	0.005	0.98	1.01	1.67	1.17
9	AN-5	76.45m	0.076	1.01	1.01	2.51	1.14
10	AN-5	77.10m	0.119	1.00	1.05	2.26	1.32
11	AN-5	77.15m	0.139	1.01	1.00	2.36	1.26
12	AN-5	77.20m	0.105	1.03	0.99	1.31	1.27
13	AN-5	77.98m	0.050	0.99	1.00	2.31	1.21
14	AN-5	80.60m	0.026	1.02	1.00	2.93	1.21
15	AN-5	81.18m	0.068	1.00	0.96	3.07	1.17
16	AN-5	81.62m	0.056	1.00	1.02	2.63	1.15
17	AN-5	81.80m	0.062	1.00	0.93	1.52	1.17
18	AN-5	81.85m	0.058	1.01	0.98	2.86	1.15
19	AN-5	81.90m	0.031	0.99	1.00	1.17	1.29
20	AN-5	82.25m	0.064	0.99	0.97	2.76	1.13
21	AN-5	82.60m	0.068	1.00	0.98	2.86	1.11
22	AN-5	82.65m	0.057	1.01	1.00	2.80	1.16
23	AN-5	82.75m	0.028	1.00	0.95	1.42	1.17
24	AN-5	83.40m	0.062	1.00	0.99	2.75	1.23

— 技術レポートリスト —

- TR/GE 89-01 清水和彦：地質環境データベースシステムの開発研究（基本設計），  
PNC TN7410 89-029
- TR/GE 89-02 仙波毅・尾方伸久・坪田浩二：ボアホールレーダの我が国における  
花崗岩岩盤への適用試験，PNC TN7410 90-003
- TR/GE 89-03 武田精悦（訳）：国際ストリパプロジェクト，PNC TN7410 90-004
- TR/GE 89-04 尾方伸久・大沢英昭：地下水特性調査技術開発の現状，検層技術(1)，  
PNC TN7410 90-005
- TR/GE 89-05 尾方伸久・大沢英昭：地下水特性調査技術開発の現状，検層技術(2)，  
PNC TN7410 90-006
- TR/GE 89-06 大沢英昭・吉田英一：深部花崗岩中の割れ目解析  
—花崗岩岩盤における割れ目特性および  
その分布特性に関する研究—  
PNC TN7410 90-007
- TR/GE 89-07 杉原弘造・二宮康郎：堆積岩盤中における掘削影響評価  
—掘削による緩み領域の計測・評価手法の研究開発—  
PNC TN7410 90-009
- TR/GE 89-08 柳澤孝一：広域地下水流動調査の現状について  
PNC TN7410 90-021
- TR/GE 89-09 吉田英一：粘土質岩中における核種移行試験・研究  
—ベルギー・モル原子力研究所との共同研究（その1）—  
PNC TN7410 90-019

TR/GE 90-01 今井久・柳澤孝一：3次元飽和不飽和浸透流解析プログラム

TAGSACの概要

PNC TN7410 90-026

TR/GE 90-03 吉田英一：粘土質岩中における核種移行試験研究

—ベルギー・モル原子力研究所との共同研究（その2）—

PNC TN7410 91-017

TR/GE 90-04 柳澤孝一・今井久・斎藤章・大澤英昭・中島誠：

立坑掘削影響試験における地下水流動影響予測解析

PNC TN7410 91-013