



東濃鉱山における調査試験研究  
年度報告書（2003年度）

(研究報告)

2004年4月

核燃料サイクル開発機構  
東濃地科学センター

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。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,

Japan

東濃鉱山における調査試験研究  
年度報告書（2003年度）  
(研究報告)

笛尾英嗣<sup>1</sup>, 中間茂雄<sup>1</sup>, 藤内聰<sup>1</sup>

### 要 旨

東濃鉱山とその周辺域においては、主として地表から深度約150mまでに分布する新第三紀堆積岩（瑞浪層群）を対象に、「ウラン鉱床を胚胎し断層などの地質学的特徴を有する堆積岩中における物質の移行・遅延特性を把握すること」および「坑道周辺部の地質環境や堆積岩中の断層などを総合的に調査・評価するための技術を開発すること」を目標とした3項目の調査試験研究を実施している。2003年度に得られたおもな成果の概要は以下のとおりである。

「ナチュラルアナログ研究」においては、ウラン鉱床の長期保存に及ぼした地質環境の影響の評価として、堆積岩中の地下水-岩石-微生物システムによる酸化還元緩衝能力を評価し、微生物による還元反応が地下の還元環境を形成・維持する重要要因であると考えられた。また、地質環境の変遷がウラン鉱床の長期保存に及ぼした影響を評価するために実施しているシステム解析手法によって、ウランの沈殿と保持に影響を及ぼす主要な環境要因を抽出した。

「岩盤の力学的安定性に関する調査試験研究」においては、長期変位計測によって時間の経過とともに変位が増加するクリープ変形が認められたが、その変位速度は時間の経過とともに小さくなっていること、変位が収束に向かっていることを確認した。また、水平ボーリング孔壁の崩壊が継続的に進行していることを確認するとともに、岩種によって破壊の様式が異なることが明らかになった。

「坑道周辺の地質環境に関する調査試験研究」においては、連続波レーダーによって得られた2次元的な電磁波速度構造に基づいて不飽和領域の評価を行うために、レーダートモグラフィと間隙水圧測定、コアの比誘電率測定を行い、不飽和領域の原位置計測手法としてこれらの調査の組み合わせによる評価が有効であることが示された。

---

1: 地質環境研究グループ

**Geoscientific Studies in the Tono Mine  
Annual Report 2003**

Eiji Sasao<sup>1</sup>, Shigeo Nakama<sup>1</sup>, Satoshi Yabuuchi<sup>1</sup>

**Abstract**

The current geoscientific studies in the Tono Mine have been carried out since 1998. The main aims of the studies are to assess solute transport/retardation in Tertiary sedimentary rocks that host uranium orebodies and to develop comprehensive techniques for the characterisation of faults, near-field geological environments around tunnels, *etc* in the sedimentary formation. A variety of results were obtained in the 2003 financial year in three different tasks involved in the studies.

Redox buffer capacities of water-rock-microbe system were evaluated, as part of the study on long-term history of the geological environment. The reducing reaction by microbe is thought to be an important factor to create and maintain the reducing environment at the depth of the uranium orebody. Some important factors for precipitation and preservation of uranium were selected by the System Analysis method.

As part of the long-term time-dependent behaviour of the rock mass, creep deformation has been continuously observed by long-term measurements around the No.2 Shaft and NATM drift. Because its displacement rate was decreasing with time, creep deformation tends to cease. Failures of horizontal drilling holes are progressed. The mode of failure is various, depending on rock types.

In the tunnel near-field geological environment, radar tomography, hydraulic pressure measurement and dielectric constant measurement of the drilling cores were performed to complement the 2D radar profile obtained by continuous wave-GPR (Ground Penetrating Rader). The combination of those investigations is effective to evaluate unsaturated zones developed around the tunnel.

---

1: Geoscience Research Group

## 目次

1	はじめに	1
2	2003 年度の調査試験研究の概要	2
2.1	ナチュラルアナログ研究	3
2.2	岩盤の力学的安定性に関する調査試験研究	3
2.3	坑道周辺の地質環境に関する調査試験研究	4
3	2003 年度の調査試験研究の実施内容および成果	5
3.1	ナチュラルアナログ研究	5
3.1.1	実施内容	5
3.1.2	おもな成果	6
3.1.3	今後の予定	8
3.2	岩盤の力学的安定性に関する調査試験研究	9
3.2.1	実施内容	9
3.2.2	おもな成果	9
3.2.3	今後の予定	12
3.3	坑道周辺の地質環境に関する調査試験研究	13
3.3.1	実施内容	13
3.3.2	おもな成果	13
3.3.3	今後の予定	16
	参考文献	17

## 図表目次

図 2.1	東濃鉱山における調査試験研究の実施領域	2
図 3.1	「水一岩石一微生物」反応試験の概要	7
図 3.2	「水一岩石一微生物」反応試験の結果	7
図 3.3	坑道周辺岩盤の変位速度	10
図 3.4	坑道周辺岩盤の変位計測結果と大久保モデル（コンプライアンス可変型構成式による解析結果との比較	10
図 3.5	崩壊岩塊の累計体積	11
図 3.6	孔壁崩壊現象（ $\phi 146\text{mm}$ の水平ボーリング孔の内部を撮影）	11
図 3.7	NATM 試験坑道壁面における地表レーダー計測結果	14
図 3.8	トモグラフィ解析結果および間隙水圧計測位置	14
図 3.9	03SI-18 孔における間隙水圧計測結果	15
図 3.10	長期間隙水圧観測結果	15
表 3.1	「水一岩石一微生物」実験に用いた各試料の概要	6

## 1 はじめに

核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）東濃地科学センターは、岐阜県土岐市に所有する東濃鉱山とその周辺において、主として地表から深度約150mまでに分布する新第三紀堆積岩を対象とした各種の調査・研究（「東濃鉱山における調査試験研究」）を地層科学研究の一環として進めてきている。東濃鉱山における調査試験研究は、「東濃鉱山における調査試験研究基本計画書」（サイクル機構、1999）に基づき、ウラン鉱床を胚胎し断層などの地質学的特徴を有する堆積岩中における物質の移行・遅延特性の把握、および地質環境を総合的に調査・評価するための技術・機器の開発を目標として実施しており、その調査試験研究の項目は以下のとおりである。

- ①ナチュラルアナログ研究
- ②岩盤の力学的安定性に関する調査試験研究
- ③坑道周辺の地質環境に関する調査試験研究

これらの調査試験研究計画において得られた成果は、地層処分研究開発の基盤として反映されるほか、地下深部についての学術的研究や地下空間利用などにも寄与するものである。さらに、ナチュラルアナログ研究の成果は、地層処分の長期的な安全性を示す上において重要な意義をもつ。

本報告書は、「東濃鉱山における調査試験研究基本計画書」（サイクル機構、1999）および「東濃鉱山における調査試験研究年度計画書（2003年度）」（サイクル機構、2003）に基づき、2003年度に実施した各調査試験研究の実施内容および成果を取りまとめたものである。

なお、「東濃鉱山における調査試験研究」は本報告書で述べるように、「東濃鉱山における調査試験研究基本計画書」（サイクル機構、1999）で設定された所期の目的を達成したことから、2003年度で終了する。本試験研究で得られた成果等は幌延深地層研究計画に反映されるほか、これまで開発してきた調査技術や評価手法は幌延深地層研究計画や瑞浪超深地層研究所計画において活用される。

## 2 2003年度の調査試験研究の概要

2003年度は、東濃鉱山坑道ならびに鉱山敷地とその周辺部において、地表から深度150m程度までの範囲に分布する堆積岩（瑞浪層群）を対象に、前述の3項目の調査試験研究を実施した（図2.1）。2.1～2.3に、2003年度における本調査試験研究の実施内容および成果の概要を示す。

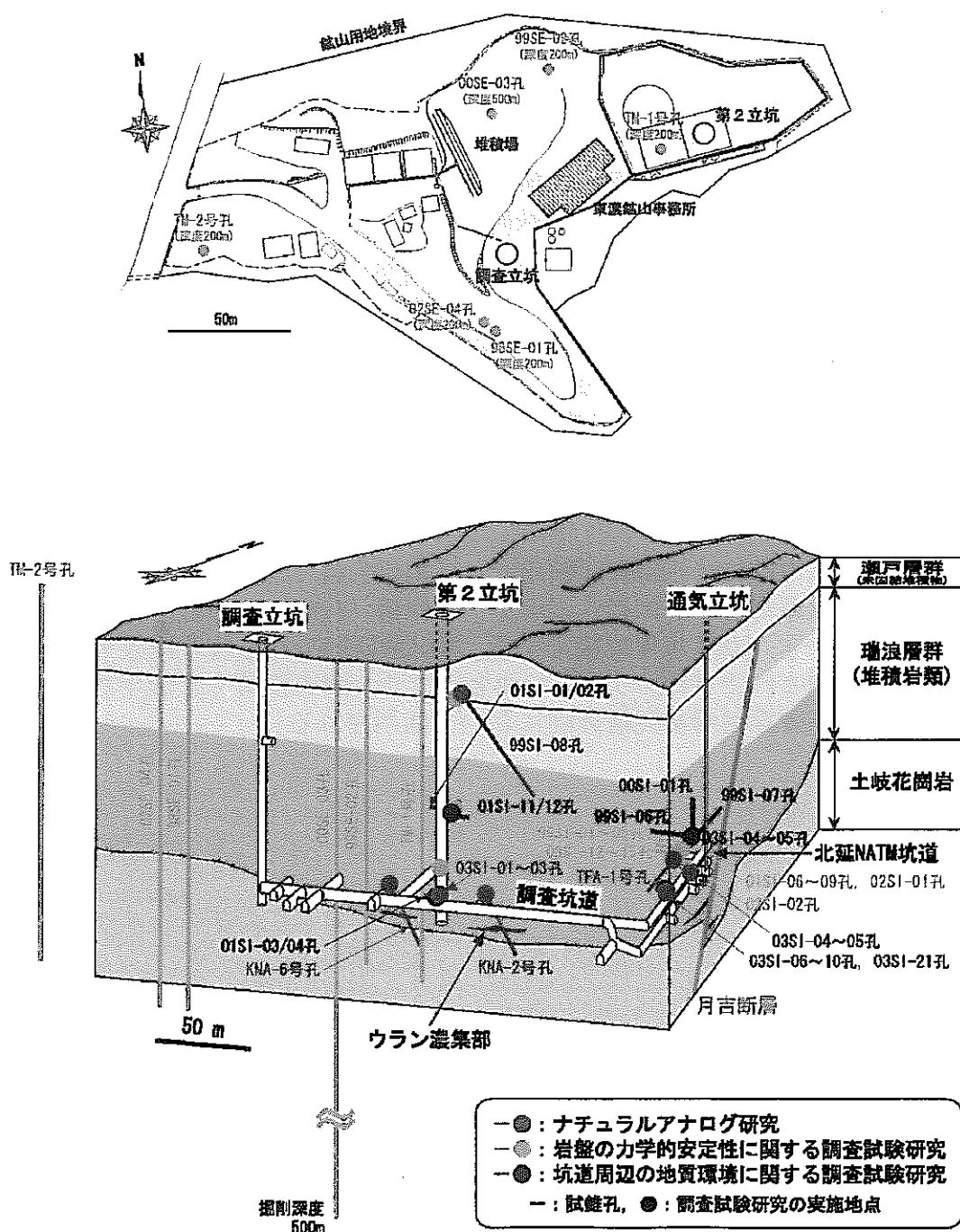


図 2.1 東濃鉱山における調査試験研究の実施領域

## 2.1 ナチュラルアナログ研究

東濃ウラン鉱床では、過去から現在にわたる長期的な地質環境の変化に伴うウランの移行や保持の記録が残されている。このため、東濃ウラン鉱床を事例研究の場として、地質環境下で実際に生じた現象とその場の特性を定量的に把握することにより、地質環境が本来有している、物質の移行を遅延させ長期的に保存する性能の評価が可能となる。

地層処分システムの長期的な安全評価の信頼性をさらに向上させるためには、これらの知見に加えて、1~10万年といった長期的な時間スケールで生じる地質学的事象や地質環境の変化に伴う物質の移行・遅延挙動についての知見を得ることが必要である。また、物質の移行・遅延挙動に影響を及ぼす要因を評価するとともに、定量的情報を取得することも重要である。

このような背景を踏まえて、2003年度には、地質環境の変遷がウラン鉱床の長期にわたる保存に及ぼした影響の評価ならびにモデル化、ウラン系列核種の移行・遅延特性の定量化および影響を及ぼす要因の評価および異なる地質環境にも適用できる体系的なナチュラルアナログ研究手法の整備を目的とした研究を実施し、以下の成果を得た。

- ・ウラン鉱床の存在する深度での還元状態の形成に重要な堆積岩中の水一岩石一微生物システムが、実際にどの程度の還元緩衝能力を有するかを定量的に評価するため、水と岩石、および微生物を気密性の維持できるバイアル瓶中で反応させ、酸化還元電位 (ORP) を測定する実験を行った。この実験の結果、地下水一岩石一有機物のみの反応では強還元環境は形成されず、ウランを保持する強還元環境の形成には、微生物との相互反応が必要である可能性が高まった。このことから、東濃ウラン鉱床では、地下水一岩石一(有機物-)微生物間の相互反応、特に微生物による還元反応が地下の還元環境を形成・維持する重要な因子として挙げられた。
- ・有機物がウランの移行挙動に与える影響を評価するために、地下水中の有機酸分析を実施し、乳酸と酢酸が検出された。また、地下水中的ウランと有機物との錯体形成係数を求めるための基礎資料として、分析手法の調査・検討を行い、地下環境を模擬する試験系を構築するとともに、この試験系でウランの模擬物質として鉄を用いて有機物と金属イオンの錯体形成係数を評価できることを把握した。
- ・長期の時間スケールで生じる地質環境の変遷が、東濃ウラン鉱床の長期保存に及ぼす影響を評価するために、性能評価研究に適用されるシステム解析手法を導入している。これまでに作成したシナリオに基づいた感度解析を行い、解析結果とウラン鉱床中の現在のウラン量との比較を行った。この結果からウランの沈殿と保持に影響を及ぼす主要な環境要因が抽出された。

## 2.2 岩盤の力学的安定性に関する調査試験研究

一般に岩石や岩盤などの天然材料にも一定応力下において変形が時間とともに増大するクリープ現象が存在することが知られている。このようなクリープ現象の解明は、掘削影響領域を含む空洞周辺岩盤の長期安定性を評価するために必要なもの

の、空洞周辺岩盤の長期的な挙動を定量的に予測可能な解析手法は存在しないばかりでなく、岩盤の長期にわたる計測データ自体がほとんど収集されていないのが現状である。

2003 年度は岩盤の長期挙動を評価する手法の開発を目的とした調査試験研究を実施し、以下の成果を得た。

- ・北延 NATM 坑道および第 2 立坑周辺の岩盤の長期変位計測を実施し、時間の経過とともに変位が増大するクリープ変形を確認した。ただし、その変位速度は時間の経過とともに小さくなり、変位は収束方向に向かっていることを確認した。
- ・北延 NATM 坑道を対象とした二次元粘弾性モデルによるクリープ変形解析を実施し、原位置での計測結果と比較した結果、変位の絶対量に差があったものの、変位の発生傾向（線図の傾き）は、比較的良好な一致がみられた。
- ・水平ボーリング孔における孔壁崩壊現象について、継続的に破壊が進行していることが確認された。また、崩壊現象は細粒砂岩からなるボーリング孔で顕著であるのに対し、粗粒砂岩では崩壊が発生していないことが確認された。

### 2.3 坑道周辺の地質環境に関する調査試験研究

坑道周辺岩盤を対象としたこれまでの調査試験研究により、力学的・水理学的・地球化学的な物性や現象などが個別に把握されてきた。しかし、岩盤物性の変化と坑道周辺岩盤中の地下水の水理学的、地球化学的な状態変化との関係は把握されておらず、坑道掘削によって生じると考えられる地質環境の力学－水理－地球化学連成現象やその発生メカニズムなどは十分に解明されていない。坑道周辺における地質環境の特性や状態変化に関する調査試験研究を行うことにより、坑道周辺の地質環境特性に関する総合的な概念モデルの構築が可能になる。また、開発した評価・モデル化手法は、瑞浪超深地層研究所計画や幌延深地層研究計画における坑道掘削を伴う調査・研究ならびに坑道を利用した調査・研究に直接反映される。

2003 年度は、2002 年度に引き続き、坑道周辺の不飽和領域の原位置計測手法の開発に関する調査研究を実施し、以下の成果を得た。

- ・2002 年度に実施した連続波レーダー計測結果から得られた坑道周辺岩盤における 2 次元的な電磁波速度構造を用いて不飽和領域を推定するために、同一の試験箇所でボーリング孔を利用したレーダートモグラフィならびに間隙水圧測定、およびコアを用いた比誘電率計測を実施した。これらの情報を相互補完的に用いた不飽和領域の評価を通じて、堆積岩における坑道周辺の不飽和領域の原位置計測手法として、これらの調査の組合せによる評価が有効であることが示された。

### 3 2003 年度の調査試験研究の実施内容および成果

2003 年度における本調査試験研究の項目ごとに、その実施内容ならびに成果の詳細を以下に示す。

#### 3.1 ナチュラルアナログ研究

##### 3.1.1 実施内容

###### (1) 東濃ウラン鉱床の長期保存に関わる地質環境に関する研究

地質環境の変遷がウラン鉱床の長期にわたる保存に及ぼした影響の評価ならびにモデル化を目標として、東濃ウラン鉱床における地質学的変遷とそれに伴う水理学的・地球化学的環境の変化を解明するための調査研究を実施した。

これまでの研究により、ウラン鉱床が存在する深度では地層中の有機物を介した硫酸還元菌による硫酸還元とそれに続く硫化鉱物の沈殿が還元状態の形成に関与する主要な酸化還元反応であり、現在の水理環境が続く場合、このシステムは今後数百万年間にわたって維持される可能性があると推測されている（岩月ほか、2003）。

そこで、地下水一岩石一微生物システムが実際にどの程度の還元緩衝能力を有するかを定量的に評価するため、水と岩石、および微生物を気密バイアル瓶中で反応させ、酸化還元電位（ORP）を測定する実験を行った。

###### (2) ウラン系列核種の移行・遅延に及ぼす環境因子に関する研究

ウラン系列核種の移行・遅延特性の定量化およびそれに影響を及ぼす要因の評価を目標として、化学的条件や有機物、微生物などがウランの移行・遅延に及ぼす影響に関する調査研究を実施した。

これまでの研究によって、東濃ウラン鉱床におけるウランの溶解度を規制する環境条件は、無機的には地下水の pH、酸化還元電位、炭酸ガス分圧であることを求めていたが、地下水中の有機物を考慮した解析により、実際の地下水と同程度の溶存有機物濃度では、pH-Eh 条件によっては、有機物の存在を考慮しない解析結果よりもウランの溶解度が増加する可能性のあることが示されている（Arthur et al., 2003）。このため、地下水中に存在している有機物がウランの移行挙動に与える影響を評価するために、地下水中の有機酸分析を実施した。また、地下水中のウランとの有機物の錯体形成係数を求めるための基礎資料として、分析手法の調査・検討を行い、地下環境を模擬する試験系を構築した。

###### (3) 体系的なナチュラルアナログ研究手法の整備

隆起・侵食や断層活動などの長期の時間スケールで生じる地質環境の変遷が、東濃ウラン鉱床の長期保存に及ぼす影響を評価するために、性能評価研究に適用されるシステム解析手法を導入している（Sasao et al., 2003）。これまでに抽出した東濃ウラン鉱床の長期保存に関わる FEP（特質、事象、プロセス）に基づいて解析の前提となるシナリオの作成を行ってきた（Metcalfe et al., 2003）。2003 年度はこのシナリオに基づき、地下水中のウラン濃度や pH、Eh などのパラメータを地質学的な変化

に基づいて時代毎に変化させた感度解析を行った。

### 3.1.2 おもな成果

#### (1) 東濃ウラン鉱床の長期保存に関する地質環境に関する研究

これまでの研究では、ウラン鉱床が存在する深度では地層中の有機物を介した硫酸還元菌による硫酸還元とそれに続く硫化鉱物の沈殿が還元状態の形成に関する主要な酸化還元反応であることがわかっている（岩月ほか, 2003）。

このような地下水—岩石—微生物システムが実際にどの程度の還元緩衝能力を有するかを定量的に評価するため、水と岩石、および微生物を気密バイアル瓶中で反応させ、酸化還元電位（ORP）を測定する実験を行った（表3.1、図3.1）。

この実験の結果、地下水と有機質な岩石を約28日間反応させた結果、Pt電極を用いたORP計で測定した酸化還元電位は+100mV程度であったが、微生物を添加後、約12日間で酸化還元電位は約-350mVまで急速に低下した（図3.2）。この実験の結果、地下水—岩石—有機物のみの反応では強還元環境は形成されず、ウランを保持する強還元環境の形成には、微生物との相互反応が必要である可能性が高まった。

これまでに、微生物の種組成、同位体データ等などから、地層中の有機物を介した硫酸還元菌による硫酸還元反応が還元環境の形成に関する主要反応であると推察されている。本実験においても、開始から約40日後には硫化水素臭が観察され、硫酸還元菌による硫酸還元反応により強還元環境が形成されたと考えられ、この実験により従来の仮説が裏付けられた。

この実験の結果から、東濃ウラン鉱床では、地下水—岩石—（有機物—）微生物間の相互反応、特に微生物による還元反応が地下の還元環境を形成・維持する重要な因子として挙げられた。

#### (2) ウラン系列核種の移行・遅延に及ぼす環境因子に関する研究

地下水中に存在している有機物がウランの移行挙動に与える影響を評価するため、地下水中の有機酸分析を実施した結果、乳酸と酢酸が検出された。また、地下水中のウランとの有機物の錯体形成係数を求めるための基礎資料として、分析手法の調査・検討を行い、地下環境を模擬する試験系を構築した。さらに、この試験系が低い酸化還元環境を実現できる性能を有することを確認するとともに、ウランの模擬物質として鉄を用いて有機物と金属イオンの錯体形成係数を評価できることを把握した。

表3.1 「水—岩石—微生物」実験に用いた各試料の概要

水	イオン交換、蒸留水 (121°C, 30分オートクレーブ滅菌済み)
岩石	MIU-3号孔リグナイト含有層から採取した堆積岩の粉碎物 (サイズ: 63-125 μm, 121°C, 30分オートクレーブ滅菌済み)
微生物	MSB-2号孔 深度 79-130.5 m (土岐夾炭層上部) の地下水中に存在したもの

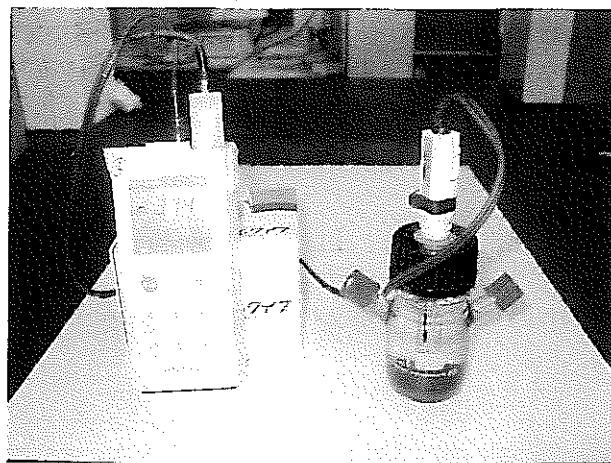


図 3.1 「水一岩石一微生物」反応試験の概要  
(気密バイアル瓶に電極を差し込み、酸化還元電位を測定)

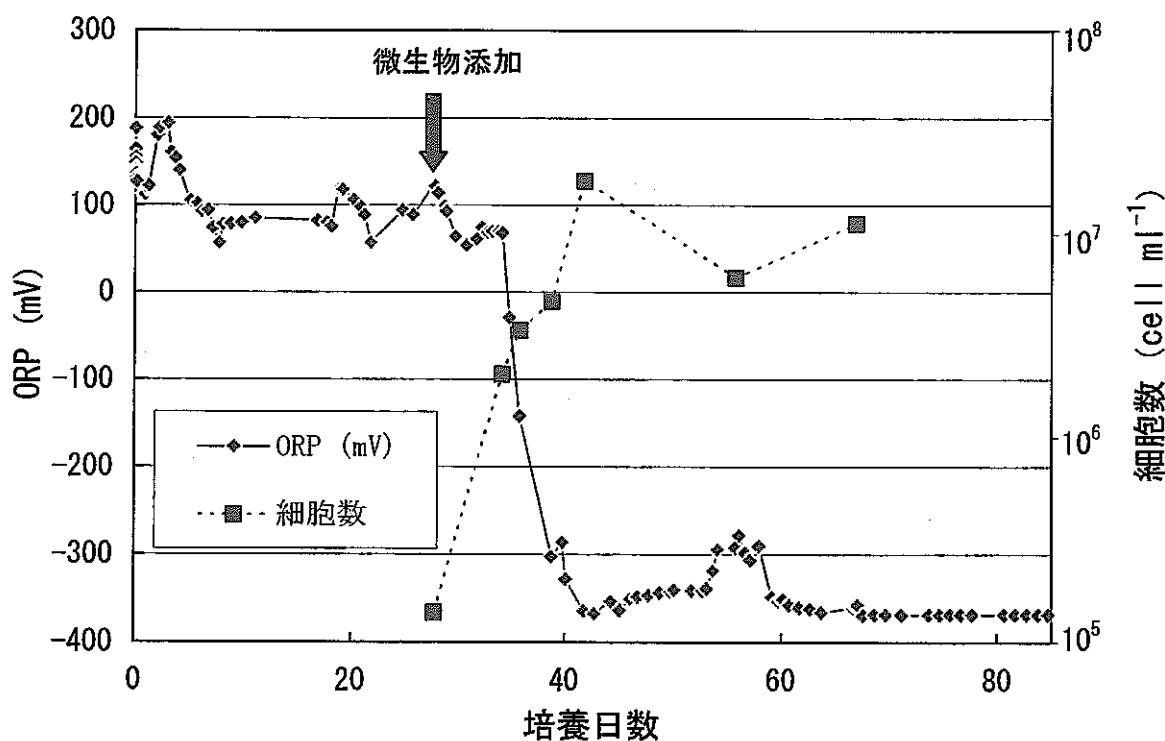


図 3.2 「水一岩石一微生物」反応試験の結果

### (3) 体系的なナチュラルアナログ研究手法の整備

隆起・侵食や断層活動などの長期の時間スケールで生じる地質環境の変遷が、東濃ウラン鉱床の長期保存に及ぼす影響を評価するために、性能評価研究に適用されるシステム解析手法を導入している (Sasao et al., 2003)。これまでに抽出した東濃ウ

ラン鉱床の長期保存に関わる FEP (特質, 事象, プロセス) に基づいて解析の前提となるシナリオの作成を行ってきた (Metcalfe et al., 2003)。平成 15 年度はこのシナリオに基づき、地下水中のウラン濃度や pH, Eh などのパラメータを地質学的な変化に基づいて時代毎に変化させた感度解析を行い、解析結果とウラン鉱床中の現在のウラン量との比較を行った。

その結果、800 以上の解析のうち、71 解析で解析結果が現在のウラン量の 1/2~2 倍となり、ウランの沈殿に影響を及ぼす主要な要因として、有機物の酸化速度や地下水水流動の変化、地下水中のウラン濃度などが挙げられた。

### 3.1.3 今後の予定

ナチュラルアナログ研究については、2004 年度から長期安定性研究の事例研究の一環として月吉鉱床を対象とした広い領域で行うこととしている。

#### (1) 東濃ウラン鉱床の長期保存に関わる地質環境に関する研究

地質環境の変遷がウラン鉱床の長期にわたる保存に及ぼした影響の評価ならびにモデル化を目標として、東濃ウラン鉱床における地質学的変遷とそれに伴う水理学的・地球化学的環境の変化を解明するための調査研究を実施する。

具体的には、月吉断層の活動がウラン鉱床の保存に与えた影響の評価、および地下水－岩石－微生物システムによる還元反応の定量的な評価を進める。

#### (2) ウラン系列核種の移行・遅延に及ぼす環境因子に関する研究

ウラン系列核種の移行・遅延特性の定量化およびそれに影響を及ぼす要因の評価を目標として、有機物の存在がウランの移行・遅延に及ぼす影響に関する調査研究を実施する。

#### (3) 体系的なナチュラルアナログ研究手法の整備

上記の(1)と(2)で取得されたデータを用いて、東濃ウラン鉱床の変遷をシステム解析手法により体系的に記述し、数式化にあたっての概念モデルを構築し、感度解析によって、ウラン鉱床の長期保存に影響を及ぼした要因が抽出されている。今後、抽出された要因がウラン鉱床の長期保存にどの程度の影響を及ぼしたかを検討していく。

## 3.2 岩盤の力学的安定性に関する調査試験研究

### 3.2.1 実施内容

北延 NATM 坑道および第 2 立坑周辺の岩盤の長期変形特性を把握するため、岩盤の長期変位計測を実施した。また、堆積岩の長期挙動を表現できる解析手法の開発を目的として、2002 年度に算出したコンプライアンス可変型構成式のパラメータを用い、その構成式を組み込んだ二次元粘弾性有限要素法による北延 NATM 坑道を対象としたクリープ変形解析を実施した。さらに、大孔径ボーリング孔における孔壁崩壊現象の支配要因を把握するために、北延 NATM 坑道での孔壁崩壊調査を継続するとともに、小孔径のボーリング孔の拡孔、大孔径ボーリング孔の掘削および孔径検層、孔壁崩壊時の電位・AE 計測などを実施した。

### 3.2.2 おもな成果

#### (1) 堆積岩の長期挙動に関する研究

北延 NATM 坑道および第 2 立坑周辺の岩盤の長期変位計測を実施し、これまでに例のない 10 年以上の長期間にわたるデータを取得し、岩盤の長期挙動を評価した。その結果、2002 年度までの結果に引き続き、時間の経過とともに変位が増大するクリープ変形が認められ、坑道が縮小する方向の変位の増加傾向が確認された。図 3.3 に北延 NATM 坑道において計測された地中変位の時間経過に伴う変位速度の変化を示す。変位速度は時間の経過とともに低下しており、坑道周辺岩盤でみられるクリープ変形は継続しているものの、収束する方向に向かっているものと考えられる。

また、2002 年度までに、これらの原位置での長期変位計測結果の解釈に必要な基礎データを取得するために、空圧式長期クリープ試験装置により、坑道周辺で取得された岩石コアを用いた長期クリープ試験を実施してきた（高倉ほか；2003）。これらの試験結果をもとに粗粒砂岩および細粒砂岩のコンプライアンス可変型構成方程式のパラメータを設定し、これを組み込んだ有限要素法による解析を実施し、東濃鉱山北延 NATM 坑道の掘削および時間経過に伴う岩盤挙動を解析的に評価した。この解析結果と先に示した原位置における長期挙動計測結果を比較すると図 3.4 のようになる。解析結果と計測結果とでは、絶対量としては差異があるものの、変位の発生傾向（線図の傾き）としては比較的良好な一致がみられた。

#### (2) 孔壁崩壊現象に関する研究

北延 NATM 坑道における水平ボーリング孔の孔壁崩壊現象について、月 1 回の定期観察を実施し、孔壁崩壊現象が継続的に進行していることを確認した（中島ほか、2003；図 3.5）。また、水平ボーリング孔周辺の堆積岩試料を用いた物性試験では、変形強度特性は含水比に大きく依存する傾向がみられ、特に細粒砂岩からなる試料では、載荷や除荷および岩石破壊の際に AE (Acoustic Emission) の発生や、電位および電気抵抗応答に大きな変動が確認された。さらに、原位置における計測では、AE 計測の結果と観察写真（図 3.6）等により、主に細粒砂岩からなるボーリング孔では、現在も孔壁の崩壊は進行中であり、細粒の岩質部に亀裂がより発達し易い傾向が認められた。しかしながら、主に粗粒砂岩からなるボーリング孔では孔壁の崩壊が発生し

ていないことが確認された。

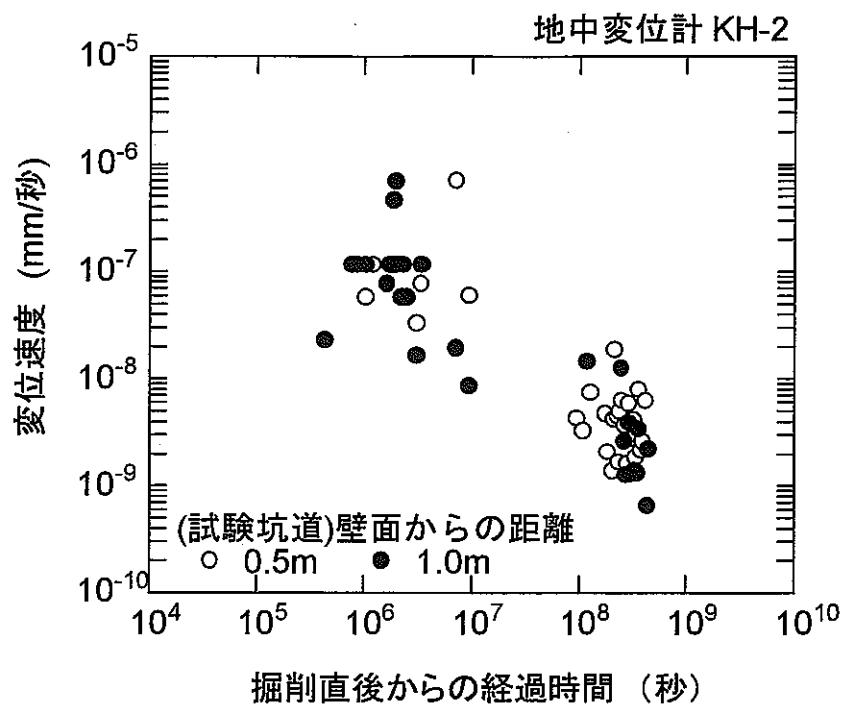


図 3.3 坑道周辺岩盤の変位速度

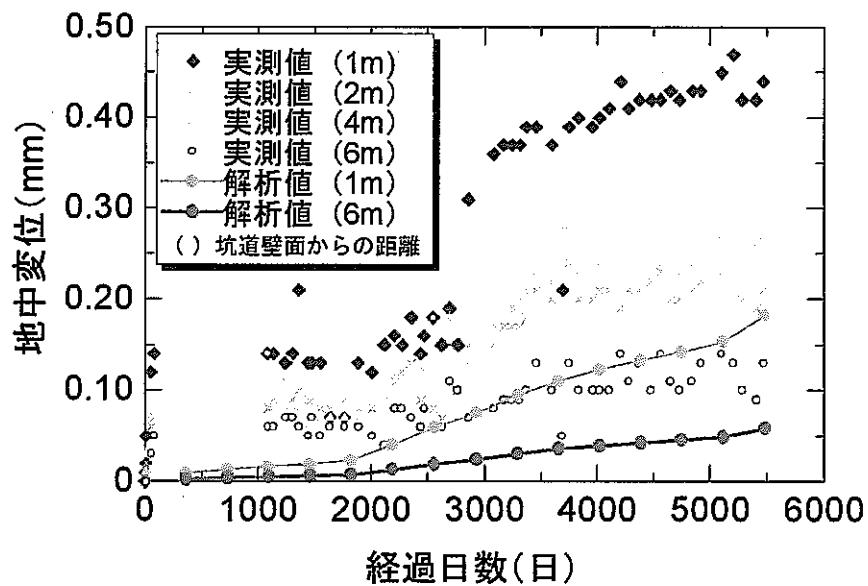


図 3.4 坑道周辺岩盤の変位計測結果と大久保モデル（コンプライアンス可変型構成方程式；大久保ほか, 2002）による解析結果との比較

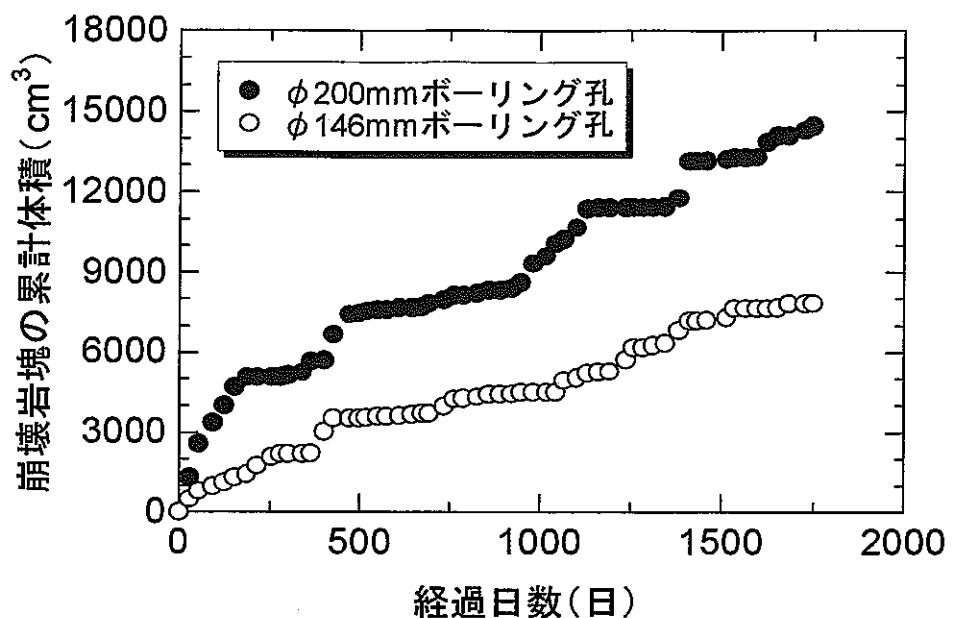


図 3.5 崩壊岩塊の累計体積



図 3.6 孔壁崩壊現象 ( $\phi 146\text{mm}$  水平ボーリング孔の内部を撮影)  
掘削後 5 年経過してもなお破壊は進行している。下部は崩壊岩塊および岩塊用受け皿

孔壁崩壊現象がみられる水平ボーリング孔周辺を対象とした応力・変形解析では、最大主応力が空洞の天端と孔底に集中し破壊を発生させることが予想された。また、応力・変形解析に加えて水分量拡散を考慮に入れた解析では、岩盤内の水分量減少に伴って空洞が拡大するような変形挙動が予測され、細粒砂岩の空洞の変位は粗粒砂岩の約6倍となった。これらの結果より、応力の経時的变化は応力緩和現象に類似していることを確認し、ボーリング孔での孔壁崩壊現象が遅れて発生することを説明することが可能であることを示した。

### 3.2.3 今後の予定

今年度までに実施した岩盤の力学的安定性に関する試験研究により、堆積岩を対象とした長期挙動計測手法、長期岩石クリープ試験手法ならびにモデル化手法を整備した。今後、これらの成果は幌延深地層研究計画に反映していく。

### 3.3 坑道周辺の地質環境に関する調査試験研究

#### 3.3.1 実施内容

##### (1) 不飽和計測手法に関する研究

坑道周辺の水理特性調査として、2001年度までに、TDR (Time Domain Reflectometry)による岩盤の不飽和領域における含水量の計測装置(パッカーハイドロプローブ)を開発し、東濃鉱山において適用試験を実施した(片岡ほか、2003；前村ほか、2003)。また、2002年度にはNATM試験坑道壁面において地表レーダー計測を実施し、得られた電磁波反射面の形状および電磁波速度構造(図3.7)とパッカーハイドロプローブによる原位置計測結果を組み合わせて、坑道周辺岩盤に生じている不飽和領域の評価を試みた(升元ほか、2003)。

2003年度は、2002年度に引き続きNATM試験坑道周辺の不飽和領域を詳細に評価するため、コアを用いた比誘電率計測(室内試験)、2本のボーリング孔を用いた孔間連続波レーダートモグラフィ計測ならびにボーリング孔に複数のパッカーハイドロプローブを設置した間隙水圧計測を実施した(升元ほか、2004)。

##### (2) 長期間隙水圧観測

北延NATM坑道に掘削した水平試錐孔(99SI-06及び99SI-07孔)、及び鉛直試錐孔(00SI-01孔)において、多点式パッカーシステムによる間隙水圧観測を継続し、2004年3月をもって観測を終了した。

#### 3.3.2 おもな成果

##### (1) 不飽和計測手法に関する研究

NATM試験坑道の壁面から水平方向に掘削された03SI-18孔から採取したコア(粗粒砂岩)を用いて供試体を複数個製作し、飽和度を変化させながら供試体の比誘電率を測定した。本測定において、飽和度100%で比誘電率が40程度の値を示す結果が得られたことから、原位置の岩石において比誘電率が40以下の場合は不飽和になっていると考えられる。一方、電磁波速度と比誘電率の関係から比誘電率が40以下の岩石は0.047m/nsec以上の電磁波速度を示す。このことから、図3.7で0.05m/nsec以上の電磁波速度を示す坑壁から約2m以浅の領域は不飽和領域であると推定できる。

図3.8に示す03SI-19孔と03SI-20孔を用いて連続波レーダートモグラフィ計測を実施した。地表レーダー計測から得られる電磁波速度は坑壁からの奥行き方向の速度が求められるのに対し、今回の孔間トモグラフィでは坑道方向の速度が求められる傾向がある。同図に逆解析により得られた電磁波速度分布を示す。坑壁から2m以浅において電磁波速度が0.05m/nsec以上の領域が認められたことから、地表レーダー計測から得られた電磁波速度構造と整合する結果が得られたとともに、この部分に不飽和領域が分布していると考えられる。

さらに、図3.8に示す03SI-18孔にパッカーハイドロプローブを設置し、P1からP6までの6つの区間ににおいて間隙水圧計測を実施した。P2からP6までの各観測区間長は0.2mであり、最も奥に位置するP1のみ約3mの観測区間長である。図3.9に間隙水圧計測結果を示す。これは各区間に注水を行い、各区間の間隙水圧を約0.1MPaに上昇させ注水を止

めた後の計測値である。P3 から P6 までの間隙水圧は計測開始直後からほぼゼロに近い値を示したのに対し、P1 および P2 は定常状態の水圧に向かってゆるやかな低下を示したことから飽和状態にあると考えられた。この結果は、飽和と不飽和の境界が P2 と P3 の間（深度 2.3～2.5m）にあることを示していると考えられ、先に記したコアの比誘電率計測結果に基づく不飽和領域の評価と概ね整合する結果が得られた。

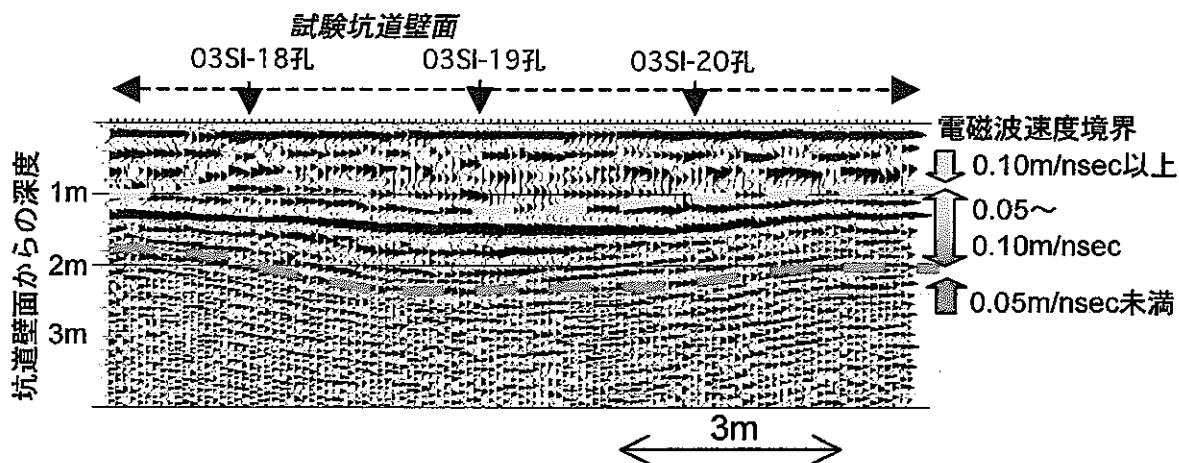


図 3.7 NATM 試験坑道壁面における地表レーダー計測結果

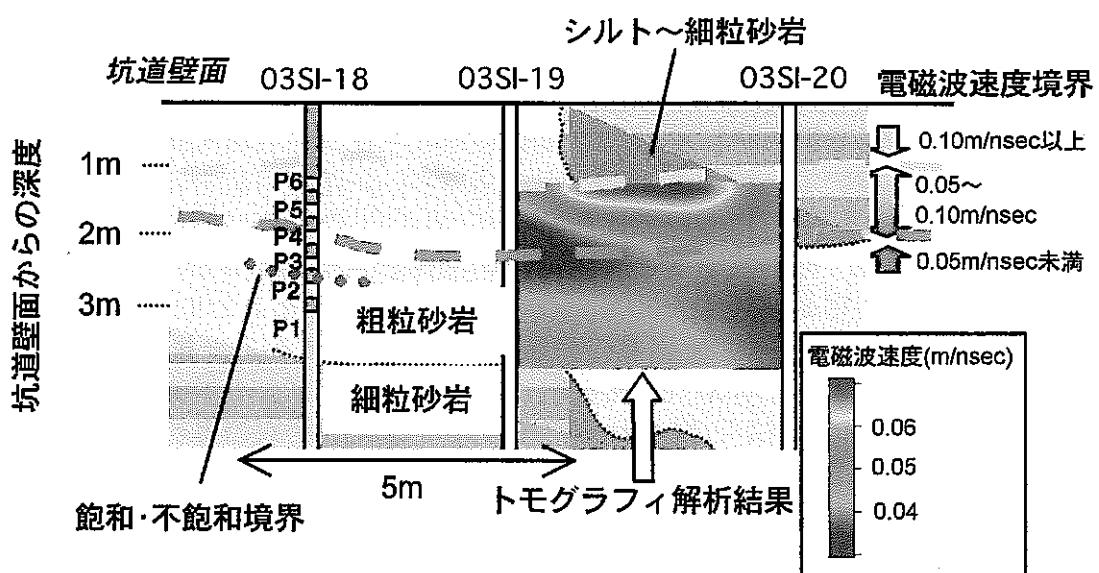


図 3.8 トモグラフィ解析結果および間隙水圧計測位置

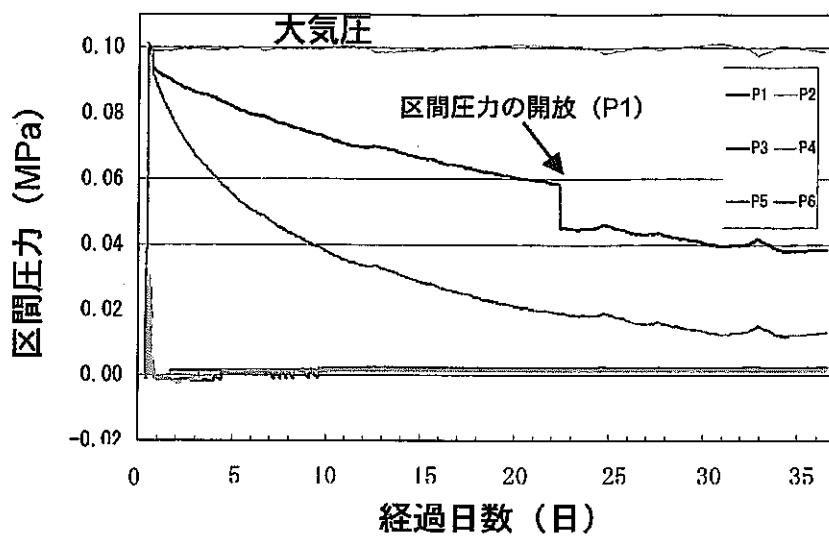


図 3.9 03SI-18 孔における間隙水圧計測結果

## (2) 長期間隙水圧観測

北延 NATM 坑道に掘削した水平試錐孔（99SI-06 及び 99SI-07 孔），及び鉛直試錐孔（00SI-01 孔）において間隙水圧観測を継続した結果，堆積岩中の間隙水圧は坑道壁面から離れるにしたがって高くなる傾向があり，昨年度までの観測結果と同様の傾向が継続していることが確認された（図 3.10）。

なお，本間隙水圧観測は 2004 年 3 月をもって観測を終了した。

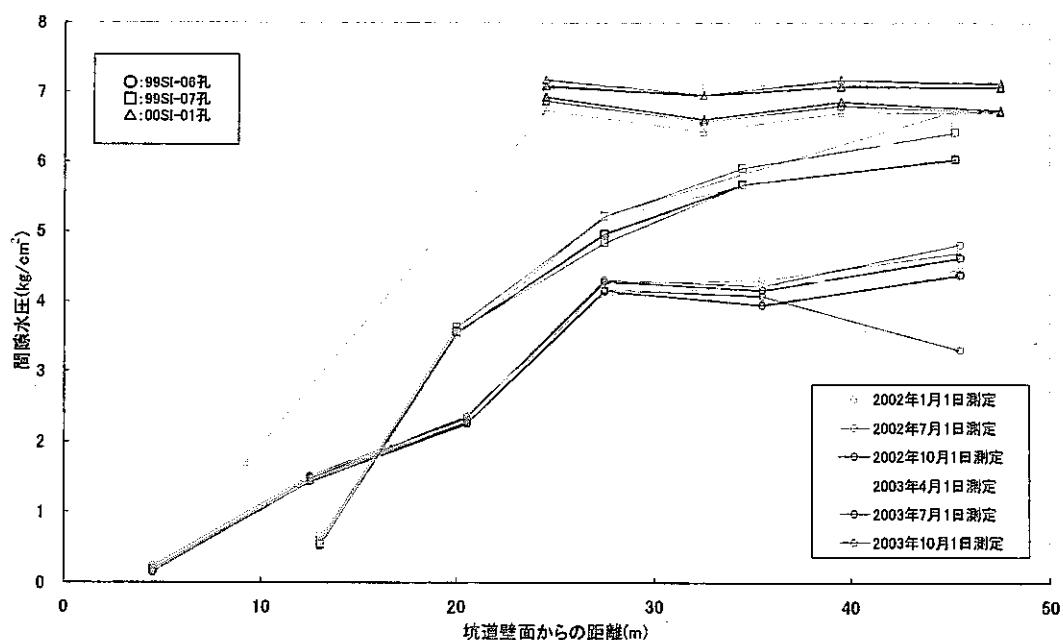


図 3.10 長期間隙水圧観測結果

### 3.3.3 今後の予定

堆積岩における坑道周辺の不飽和領域の計測手法を確立することを目標に研究をすすめてきた結果、坑壁からのボーリング孔および採取コアを用いた原位置／室内試験で得られる比誘電率や飽和度に基づき地表レーダーやトモグラフィ計測から得られる面的な電磁波速度構造を解釈する手法が有効であることが示された。

今後は、瑞浪超深地層研究所の研究坑道においてこれらの計測手法を適用し、花崗岩を対象にした不飽和領域の計測を実施する予定である。

## 参考文献

- Arthur, R., Iwatsuki, T., Murakami, Y., Metcalfe, R., Sasao, E., MacKenzie, A. B., Berke, M., McKibben, M. and Ota, K. (2003) : The Tono Natural Analogue Project: Geochemical constraints on uranium mobility within the Tono uranium deposit, Japan, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 67, A24.
- 岩月輝希・村上由記・長沼 豊・濱 克宏 (2003) : ウラン鉱床の長期保存に関わる岩盤の酸化還元緩衝能力—東濃地域における天然環境の水—鉱物—微生物システムの研究例. 地球化学, 37, 71-82.
- 核燃料サイクル開発機構 (1999) : 東濃鉱山における調査試験研究基本計画書. サイクル機構技術資料, JNC TN7410 99-006.
- 核燃料サイクル開発機構 (2003) : 東濃鉱山における調査試験研究年度計画書 (2003 年度). サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2003-003.
- 片岡達彦・前村庸之・竹内真司・松井裕哉・向井 圭 (2003) : 坑道周辺における不飽和領域の原位置計測手法の研究. サイクル機構技報, no. 19, 41-50.
- 前村庸之, 細野高康, 片岡達彦 (2003) : TDR による岩盤の水分飽和度の原位置計測. 日本地下水学会 2003 年秋季講演会講演要旨, 10-13.
- 升元一彦・片岡達彦・竹内真司 (2003) : 連続波レーダーと TDR を用いた坑道周辺の不飽和領域の評価. 平成 15 年度応用地質学会研究発表会講演論文集, pp191-194.
- 升元一彦・竹内真司・藪内 聰・渥美博行・名児耶薰 (2004) : 堆積岩中の坑道周辺の不飽和領域を対象とした連続波レーダー調査結果の評価. 土木学会第 59 回年次学術講演会講演論文集, 印刷中.
- Metcalfe, R., Takase, H., Sasao, E., Ota, K., Iwatsuki, T., Arthur, R.C., Stenhouse, M., Zhou, W. and MacKenzie, A.B. (2003) : The Tono Natural Analogue Project: A system model for the origin and evolution of the Tono uranium deposit, Japan, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 67, A288.
- 中島貴弘・中間茂雄・林 叔民・アイダンオメル (2003) : 堆積軟岩における水平試錐孔の孔壁崩壊現象の計測, 資源・素材 2003 (宇部) 企画発表・一般発表(A)(B) 資料, pp. 77-78.
- 大久保誠介・福井勝則・羽柴公博 (2002) : コンプライアンス可変型構成方程式の拡張とクリープ試験結果による検討, 資源と素材, 118, 737-744.

Sasao, E., Ota, K., Iwatsuki, T., Arthur, R.C., Stenhouse, M., Zhou, W., Metcalfe, R., Takase, H. and MacKenzie, A.B. (2003) : The Tono Natural Analogue Project: An overview, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **67**, A413.

高倉 望・中間茂雄・大久保誠介 (2003) : 堆積軟岩を対象とした低応力レベルにおけるクリープ解析, 第58回土木学会年次学術講演会 CD-ROM, pp. 391-392.