

東濃鉾山における調査試験研究  
年度報告書（2002年度）

（研究報告）

2003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

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute) 2003

## 東濃鉍山における調査試験研究 年度報告書（2002年度）

（研究報告）

笹尾英嗣<sup>1</sup>，中間茂雄<sup>1</sup>，竹内真司<sup>1</sup>，岩月輝希<sup>1</sup>

### 要 旨

東濃鉍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、「ウラン鉍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。2002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、地質環境の変遷がウラン鉍床の長期にわたる保存に及ぼした影響について、地質環境の変化を引き起こした可能性のある隆起・沈降の履歴と月吉断層の活動時期を推定した。また、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として、堆積岩中の水-岩石-微生物システムによる酸化還元緩衝能力を評価し、ウラン鉍床存在深度での還元状態の形成メカニズムを解明した。

「岩盤の力学的安定性に関する調査試験研究」においては、場の3次元応力分布を解析的に推定し、解析精度の検討を行うとともに、広範囲の応力レベルに適用可能なクリープ変形挙動を表す構成方程式を構築した。

「坑道周辺の地質環境に関する調査試験研究」においては、不飽和領域における岩盤の含水量計測のために開発した装置を用いて岩石コアの室内試験を実施するとともに、補完手法として連続波レーダーを用いた原位置試験を実施した。また、北延 NATM 坑道周辺の三次元的な間隙水圧観測を継続し、間隙水圧の変動傾向に変わりがないことを確認した。

---

1：地質環境研究グループ

Geoscientific Studies in the Tono Mine  
Annual Report 2002

Eiji Sasao<sup>1</sup>, Shigeo Nakama<sup>1</sup>, Shinji Takeuchi<sup>1</sup> and Teruki Iwatsuki<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 ore bodies 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 2002 financial year in three different tasks involved in the studies.

History of uplift and subsidence of the Tono uranium deposit, and activation of Tsukiyoshi Fault was evaluated as part of the study on long-term history of the geological environment. As part of studies on solute transport/retardation in the rock mass, redox buffer capacities of water-rock-microbe system related to long-term preservation of uranium deposit were evaluated. The process of formation of the reducing environment at the depth of the uranium orebody was estimated.

As part of the study on the mechanical stability of the rock mass, three dimensional stress distribution was estimated by numerical analyses. Analytical precision of those analyses was investigated. An equation to elucidate the rock creep behaviour applicable to wide range of stress level was constructed.

In the tunnel near-field geological environment, the application of TDR (Time Domain Reflectometry) to the unsaturated zone around the tunnel was applied to the core samples in the laboratory. The results of continuous wave-GPR (Ground Penetrative Rader) conducted in the site were combined with the results of TDR to characterize the unsaturated zone. The long-term measurement of pore water pressure was continued to understand the change of 3D distribution of the pressure around the tunnel.

---

1: Geoscience Research Group

## 目次

1	はじめに	1
2	2002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	2002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	5
3.1.3	今後の予定	9
3.2	岩盤の力学的安定性に関する調査試験研究	11
3.2.1	実施内容	11
3.2.2	おもな成果	11
3.2.3	今後の予定	14
3.3	坑道周辺の地質環境に関する調査試験研究	15
3.3.1	実施内容	15
3.3.2	おもな成果	15
3.3.3	今後の予定	17
	参考文献	18

## 図表目次

図 2.1	東濃鉍山における調査試験研究の実施領域	2
図 3.1	堆積岩中の塩素イオンと硫酸イオンの関係	6
図 3.2	塩素イオン濃度と地下水の年代および深度の関係	6
図 3.3	ウラン鉍化帯周辺で見られる酸化還元プロセス	7
図 3.4	月吉断層を挟んだ上・下盤での地層の厚さの比較	8
図 3.5	ウラン鉍化帯周辺の pH、Eh 条件における $UO_2(am)$ の溶解度	9
図 3.6	東濃鉍山 98SE-01 孔における実測値と解析値との比較	12
図 3.7	北延 NATM 坑道から採取した粗粒砂岩および田下凝灰岩のクリープ特性	13
図 3.8	孔壁崩壊試験孔 断面図	14
図 3.9	溶媒の真の比誘電率とパッカー式プローブによる測定値との関係	16
図 3.10	岩石コアの体積含水率と比誘電率の関係	16
図 3.11	ボアホールレーダーによる比誘電率計測法	16
図 3.12	原位置試験の結果	16
図 3.13	間隙水圧測定結果	17
表 3.1	東濃鉍山での各層の堆積時および不整合期における 隆起・沈降量の見積もり結果	7

## 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鉍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（「東濃鉍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。東濃鉍山における調査試験研究は、「東濃鉍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、ウラン鉍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

このうち、「ナチュラルアナログ研究」については、2001 年度までの「岩盤中の物質移動に関する調査試験研究」および「月吉断層に関する調査試験研究」を統合し、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現象や地質環境の変化に主眼を置いた調査研究として 2002 年度より開始したものである（サイクル機構，2002a）。

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についての国民の理解を得ていくために重要な意義をもつ。

本報告書は、「東濃鉍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「東濃鉍山における調査試験研究年度計画書（2002 年度）」（サイクル機構，2002a）に基づき、2002 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。

## 2 2002年度の調査試験研究の概要

2002年度は、東濃鉦山坑道ならびに鉦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、2002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。

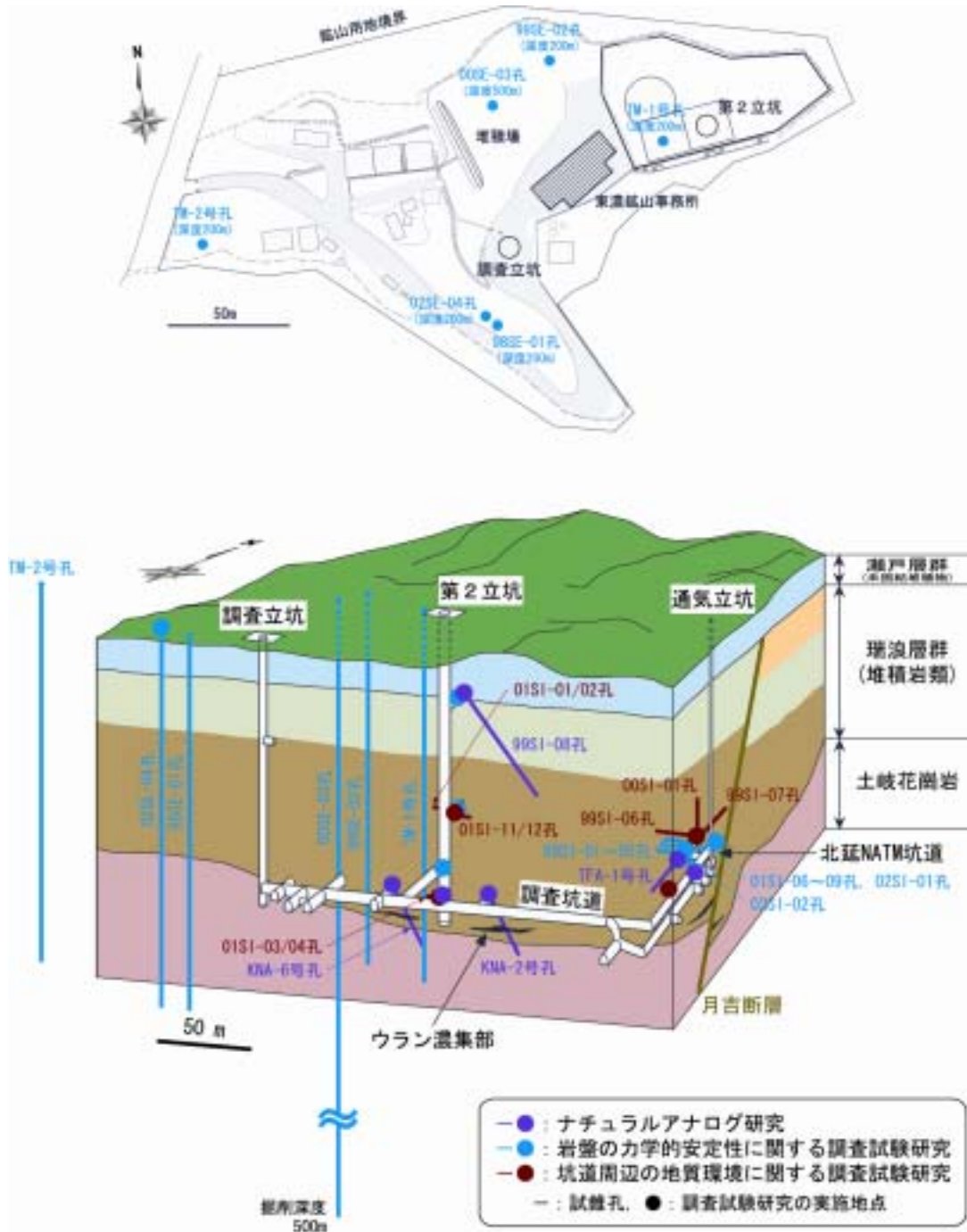


図2.1 東濃鉦山における調査試験研究の実施領域



## 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。これまでの「東濃鉱山における調査試験研究」では、「岩盤中の物質移動に関する調査試験研究」および「月吉断層に関する調査試験研究」を実施し、おもに現在の地質環境特性や物質の移行・遅延現象についての知見を得てきた（サイクル機構，2002b）。

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、定量的な情報を取得することも重要である。

2002年度は、これまで実施してきた「岩盤中の物質移動に関する調査試験研究」および「月吉断層に関する調査試験研究」を統合しナチュラルアナログ研究として、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－岩石－微生物システムについて、酸化剤となる地下水中の硫酸イオンが堆積岩上部の海成層から供給されており、堆積岩下部で豊富に存在する有機物を介して硫酸還元菌により還元されていると推察された。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継続する可能性があることが示された。
- ・有機物がウランの移行挙動に与える影響を予察的に解析した結果、実際の地下水と同程度の溶存有機物度条件では、ウランの溶解度は有機物を考慮しない場合よりも10倍程度増加する可能性があることが明らかになった。
- ・既存の試錐柱状図を用いた月吉断層を挟んだ両側の地層の層厚の比較により、瑞浪層群中部の堆積時から上部の堆積前にかけての正断層系の活動と瑞浪層群の堆積後から瀬戸層群堆積前にかけての逆断層系の活動が識別された。

## 2.2 岩盤の力学的安定性に関する調査試験研究

一般に岩盤内の応力状態は不均一性を有することが知られているが、応力状態の不均一性を考慮し、客観的に場の3次元応力分布を評価できる調査・解析技術は十分に確立されていない。また、坑道掘削によって力学的な塑性領域が生じるような場合における物性変化の程度やその範囲に関する知見も得られておらず、塑性領域内の物性変化という観点での既存の調査・研究事例もほとんどない。このような技術や知見は、一般的な3次元地下構造物の設計・施工および空洞の安定性を確保する上で必要不可欠であるとともに、その成果は幌延深地層研究計画などにおける坑道の物理的安定性に関する研究にも反映されるものである。さらに、空洞周辺岩盤の長期的な挙動

を定量的に予測するための解析手法が現存しない。その手法の開発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である。また、開発した評価手法は幌延深地層研究計画における調査・研究に直接反映される。

2002年度は、場の3次元応力分布の不均一性を客観的に評価する手法や堆積岩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。

- ・場の3次元応力分布を解析的に推定する手法として3種類の解析手法を用いて、不均一な岩盤モデルにおける解析結果の信頼性について検討し、不均一岩体ではその不均一性の程度に応じて応力の評価誤差が生じること、同一岩体で測定点を増やしても評価誤差はほとんど変わらないことが示された。
- ・北延 NATM 坑道から採取した粗粒砂岩のクリープ特性を把握し、この特性を大久保らが提案する構成方程式（大久保ほか，2002）で解析した結果、試験で得られたクリープ曲線をかなり良く再現できることが示された。
- ・低応力レベルでのクリープ現象を表す構成方程式と高応力レベル用構成方程式とを組み合わせた構成方程式を構築した。この方程式を用いた計算結果と約6年間にわたる田下凝灰岩の長期クリープ試験結果との比較により、構築した構成方程式が広範囲の応力レベルに適用可能であることを確認した。
- ・北延 NATM 孔壁劣化調査において、孔壁の崩壊形状を定量的に把握した。

## 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。

2002年度は、坑道周辺の水理特性調査として、坑道周辺の間隙水圧の観測に基づく三次元的な分布とその変化の程度の把握、および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。

- ・TDR（Time Domain Reflectometry）による岩石コア（瑞浪層群の泥質凝灰岩）の比誘電率を測定した。その結果、飽和近傍で比誘電率が急激に増加する傾向がみられ、土壌において適用されている混合モデルでは説明できないことがわかった。
- ・連続波レーダーを用いた坑道周辺岩盤の不飽和領域の原位置試験により、坑道周辺の水理特性を把握するとともに、坑道周辺の水理特性を2次元的に把握できる可能性が示された。
- ・北延 NATM 坑道における長期間隙水圧観測を継続し、坑道周辺の三次元的な間隙水圧分布をおおむね把握した。

### 3 2002年度の調査試験研究の実施内容および成果

2002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。

また、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ることがわかっている（岩月ほか，2002；村上ほか，2003）。そこで、このような地下水－岩石－微生物システムの安定性について長期的な評価を行うため、反応に関わる物質の供給速度や存在量に関わる調査を行った。

###### (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。具体的には、無機化学的な熱力学解析により、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が地下水のpH、酸化還元電位、炭酸ガス分圧であることを求めていた（岩月ほか，2003b）。一方、実際の地下水中には溶存有機物が存在しており、ウランなどの金属元素は有機配位子と結合して有機錯体として移行する現象も想定される。そのため、一般的に地下水中に存在している有機物（酢酸、クエン酸、シュウ酸、腐食酸など）がウランの移行挙動に与える影響について予察的な解析を行った。

###### (3) 体系的なナチュラルアナログ研究手法の整備

長期の時間スケールで生じる地質学的現象など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本研究に導入した（Stenhouse et al., 2002）。

##### 3.1.2 おもな成果

###### (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

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与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，2002；村上ほか，2003）。

地下水－岩石－微生物システムの安定性について長期的な評価を行うため、反応に関わる物質の供給速度や存在量に関わる調査を行った。その結果、主要な酸化剤の一つである地下水中の硫酸イオンは塩素イオンと良い相関を示すことが明らかになった（図 3.1）。塩素イオンは深度とともに増加しており（図 3.2）、硫酸イオンと塩素イオンの相関性を考慮すると、それらの起源は堆積岩上部の海成層であると考えられた。岩石の比重や地下水／岩石比などを考慮すると、単位体積あたりの岩石中の総硫黄含有量は岩石から地下水への年間硫酸供給量（約  $5.9 \times 10^{-5}$  mmol/l/年）の約  $10^6 \sim 10^7$  倍と見積もられた。以上のことから、現在の水理環境が続き、現在と同じように硫酸が供給される場合、堆積岩中の水－岩石－微生物システム（図 3.3）は今後数百万年間にわたって継続する可能性があるかと推測され、ウラン鉱床周辺の岩盤が非常に大きな還元緩衝能力を有していることが明らかになった（岩月ほか，2003a）。この例では、水理環境が安定的に継続する仮定をしているが、地質環境は隆起・侵食などによって変化しうるので、今後、地質環境の変化を考慮に入れた地下水－岩石－微生物システムの評価を行っていく必要がある。

地質環境の変遷については、堆積岩の各層の厚さから隆起量と沈降量を推定する方法によって、東濃ウラン鉱床では3回の沈降と隆起のサイクルが認められ、隆起量としては約150万年前と推定される瀬戸層群の堆積後から現在までの期間で約350mと最も大きいことが明らかになった（表 3.1；笹尾，2003）。また、段丘面の高度分布など、複数のデータから個別に算定したこの期間の平均隆起速度は0.10～0.30mm/年であると考えられた（天野ほか，2003）。

また、月吉断層の活動履歴はこれまでの調査研究によって明らかになりつつある。2002年度は既存の試錐柱状図を用いて断層を挟んだ両側の地層の層厚の比較によって断層の活動時期の推定を行い、瑞浪層群中部の堆積時から上部の堆積前にかけての正断層系の運動と瑞浪層群上部の堆積後（もしくは堆積時）から瀬戸層群堆積前にかけての逆断層系の運動が識別された（図 3.4；新里，2003）。

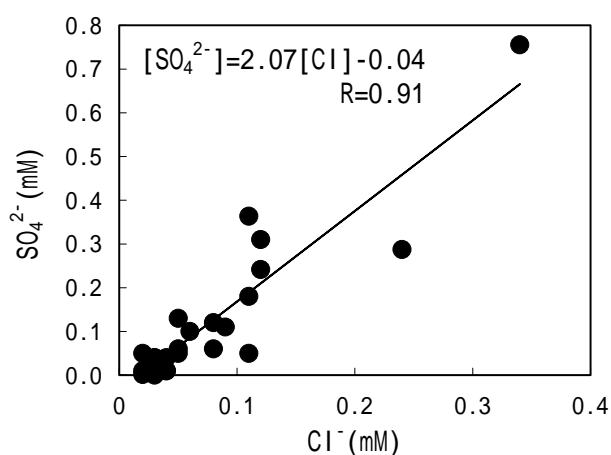


図 3.1 堆積岩中の塩素イオンと硫酸イオンの関係

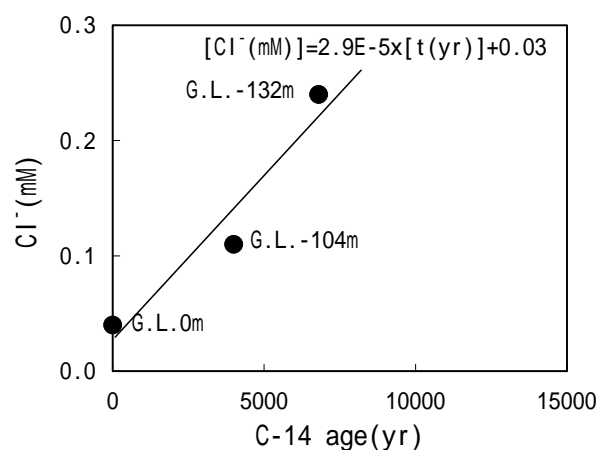


図 3.2 塩素イオン濃度と地下水の年代および深度の関係



図 3.3 ウラン鉱化帯周辺で見られる酸化還元プロセス

表 3.1 東濃鉱山での各層の堆積時および不整合期における隆起・沈降量の見積もり結果

	標高	隆起・沈降量
① 土岐花崗岩／瑞浪層群の不整合期	0m	
② 土岐夾炭累層堆積時	-40m	40m 沈降
③ 土岐夾炭／本郷累層の不整合期	-40m	
④ 本郷累層堆積時	-95m	55m 沈降
⑤ 明世累層堆積時	-240m	145m 沈降
⑥ 明世／生俵累層の不整合期	-140m	100m 隆起
⑦ 生俵累層堆積時	-380m	240m 沈降
⑧ 瑞浪層群／瀬戸層群の不整合期	-140m	240m 隆起
⑨ 瀬戸層群堆積時	-180m	40m 沈降
⑩ 瀬戸層群堆積後から現在まで	+170m	350m 隆起

(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

これまでの研究で、無機化学的な熱力学解析により、ウランの溶解度を規制する環境条件を求めたが、実際の地下水中には溶存有機物が存在しているため、一般的に地下水に存在している有機物（酢酸、クエン酸、シュウ酸、腐食酸など）がウランの移行挙動に与える影響について、東濃地域で観察される地下水組成に基づいた予察的な解析を行った。その結果、実際の地下水と同程度の溶存有機物濃度の条件では、

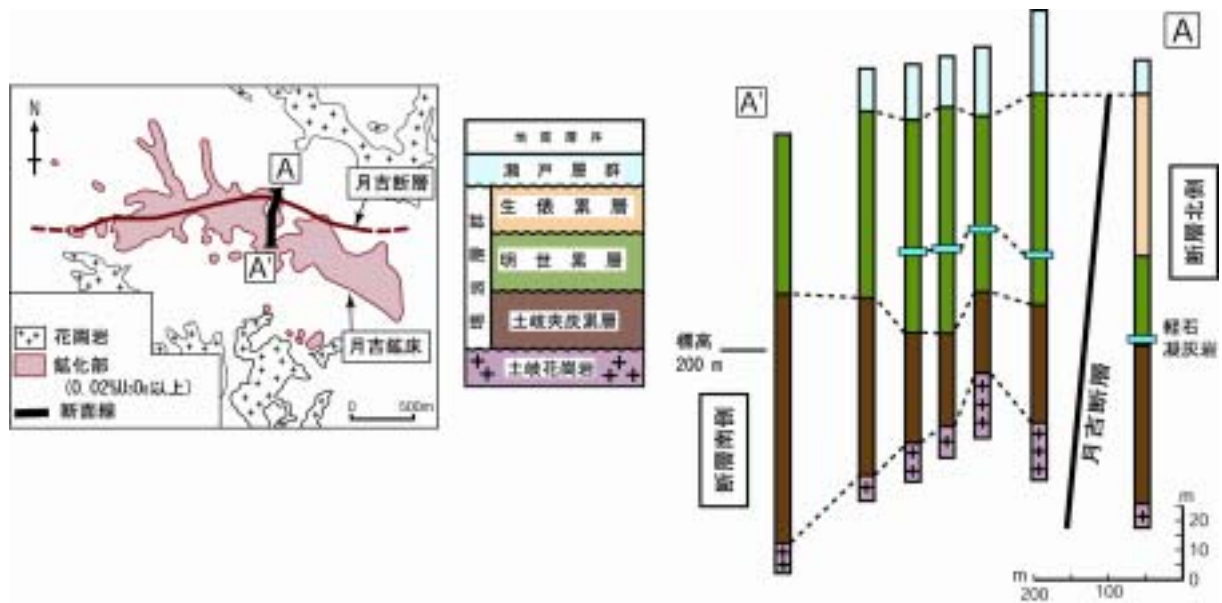


図 3.4 月吉断層を挟んだ上・下盤での地層の厚さの比較

月吉断層の直近では、土岐夾炭累層は地層の厚さに変化がないが、明世累層は断層南側で厚く、生俵累層は断層北側で厚い。このことから、月吉断層は、明世累層堆積中もしくは堆積後から生俵累層堆積前にかけて正断層運動、生俵累層堆積中もしくは堆積後から瀬戸層群堆積前にかけて逆断層運動を行ったことが示唆される。

pH-Eh 条件によっては、有機物の存在を考慮しない無機化学的な解析結果（サイクル機構, 2002c）よりもウランの溶解度を最大で 10 倍程度増加させる可能性があることがわかった（図 3.5）。しかしながら、現在、解析に用いることのできるウランと各有機物の錯体形成係数は 6 価のウランを使用した実験値のみであり、実際のウランが 4 価で存在していると考えられる還元環境における地下水中では、有機錯体として存在しているウラン量が不明である。そのため、今後、実際の地下水中の有機物データを取得した後に、影響の程度を詳細に把握する必要がある。また、処分システムで想定されるウラン以外の核種についても同様の予察的評価が必要である。

### (3) 体系的なナチュラルアナログ研究手法の整備

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）を抽出し、それらの関連性を記述するとともに、現時点で得られているデータに基づいて解析の前提となるシナリオの作成を行った。

モデル解析の基礎となるデータの管理や品質管理を行うために、地層処分システムの性能評価におけるシナリオ解析の品質管理を目的として開発されたデータベースを、東濃ウラン鉱床におけるナチュラルアナログ研究用に改良している。これまでに、サイトデータの種類区分、サイトデータとそれに基づく解析結果の関連性の定義などに品質管理ソフトウェアの基本的枠組みを決定するとともに、サイトデータ種別ごとに入力する個別データリストを作成した。

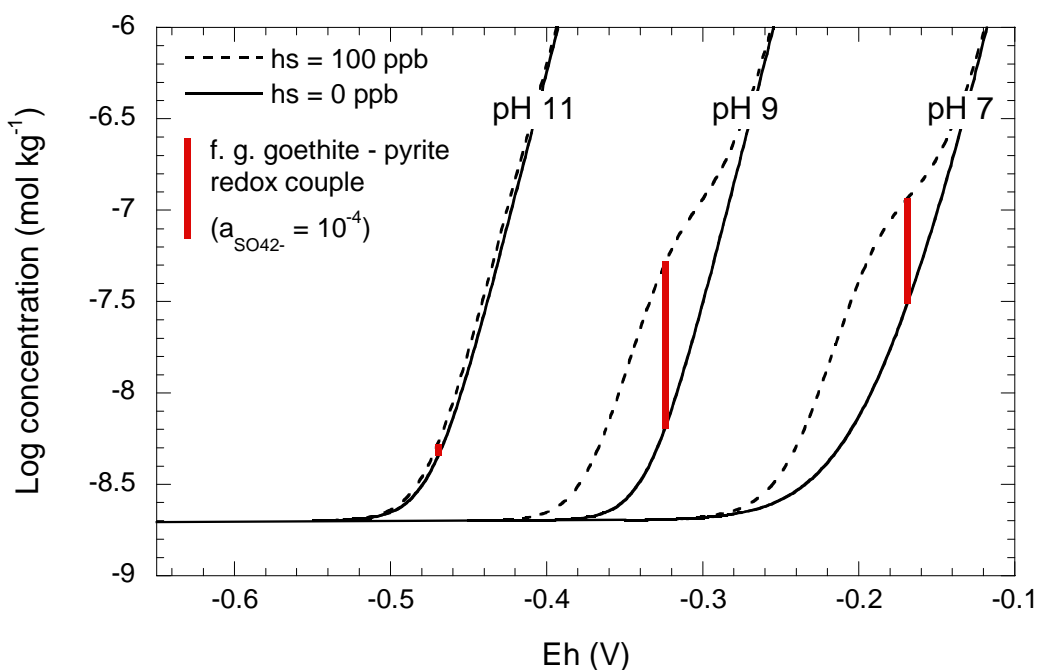


図 3.5 ウラン鉱化帯周辺の pH、Eh 条件における UO<sub>2</sub>(am) の溶解度

黒の実線は有機物を考慮しない場合の UO<sub>2</sub>(am) の溶解度変化を、黒の点線は有機物（腐食物質濃度 100ppb）を考慮した場合の UO<sub>2</sub>(am) の溶解度の変化を示す。ウラン鉱化帯周辺では、赤線で示した範囲の溶解度となる。

### 3.1.3 今後の予定

#### (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

隆起・浸食や断層活動など、東濃ウラン鉱床の地質的な変遷の把握を行うとともに、それらに伴う地質環境の変化を定量的に把握する。そして、長期の時間スケールで生じる地質学的事象がウラン系列核種の移行・保持に及ぼした影響を評価する。また、堆積岩中の水-岩石-微生物システムによる岩盤の還元緩衝能力を深度毎に見積もり、岩盤の還元緩衝能力を定量的に評価していく。

月吉断層の活動の影響の評価として、月吉断層沿いの物性などの諸特性とウラン鉱化の分布の関係などから、断層に沿う核種の移行・遅延のプロセスの解明を進める。

#### (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

実際の地下水中の有機物データを取得し、有機物がウランの移行挙動に与える影響を評価していく。特に、有機錯体形成に関わる低分子の有機物の種類や存在量について調査を行っていく。

#### (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するとともに、放射性核種の収着や拡散といった個別の現象を対象に、モデル解析結果と観察・調査結果との比較により、核種移行解析モデルを構成する個々のモデルの妥当性を確認していく。また、データの管理や品質管理を行うために構築しているデータベースに実際のデータセットを入力するとともに、システム全体の動作性を確認していく。



## 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

#### (1) 応力状態の調査研究

2000年度までに東濃鉱山用地内に掘削した5本の試錐孔(TM-1, TM-2, 98SE-01, 99SE-02, 00SE-03:図2.1)において実施した初期応力測定結果(サイクル機構, 2001)、ならびに東濃地域の地質構造および岩盤物性データ等(水田, 2002)に基づいて、3次元的な初期応力分布を解析的に推定するための手法に関する研究を実施した。2002年度は不均質な地質構造モデルを対象とした初期応力解析に関する検討を行うとともに、事例解析として、これまでに初期応力測定が実施された東濃鉱山および超深地層研究所正馬様用地を含む領域において初期応力解析を実施した。

#### (2) 長期挙動に関する試験研究

東濃鉱山から採取した岩石試料の一軸クリープ試験を実施し、長期変形挙動観測を実施している北延 NATM 坑道周辺岩盤のクリープ特性を把握するとともに構成方程式のパラメータを算出し、これらを用いたクリープ変形解析を実施した。また、田下凝灰岩の長期クリープ試験および油圧式多連クリープ試験装置等の開発を継続するとともに、広範囲の応力レベルに適用可能な構成方程式の開発を実施した。さらに、岩石中の微小割れ目の進展について、顕微鏡観察下での応力緩和試験・一軸載荷試験を行うとともに、強不連続解析を取り込んだ均質化法による解析についての検討を行った。一方、現場調査では、北延 NATM 坑道および第2立坑における変形挙動ならびに孔壁崩壊現象の長期観測を継続するとともに、孔壁崩壊の著しい試錐孔の崩壊形状の計測を行った。

### 3.2.2 おもな成果

#### (1) 応力状態に関する調査研究

3次元応力場を逆解析的に推定するにあたり、不均一な岩盤モデルにおける解析結果の信頼性について検討を行った(水田ほか, 2003)。その結果、不均一岩体では岩体の不均一性の程度に応じて評価誤差が生じること、同一の岩体の測定点を増やしても評価誤差はほとんど変わらないこと、評価誤差を小さくするには異なる岩体から測定点を選ぶ必要があることが示された(木村ほか, 2003)。解析の一例として、東濃鉱山と正馬様用地を含む地域における、有限要素法による広域応力場の推定結果を述べる。

解析では、東濃地域の10km×10km×約1kmの広範囲の領域を対象領域とした初期応力解析モデルを構築し、この領域の中心部に存在する東濃鉱山と正馬様用地を含む2km×2km×約1kmの地域を注目領域とした。解析にあたっては、対象領域を10×10×10の要素に分割し、それぞれの要素に最も多く含まれる岩石を、その要素の岩石とした。岩種は、①土岐花崗岩、②土岐夾炭累層、③明世累層(明世累層、生俵累層、瀬戸層群を一括して明世累層として取り扱う)の3種類に簡略化した。

測定点は土岐夾炭累層および明世累層からそれぞれ1点、土岐花崗岩から2点選び、それぞれ水平方向応力と鉛直方向応力の4データ、計16データを測定データとして

与えた広域応力場を推定した。東濃鉱山 98SE-01 孔における実測値と解析値を比較した結果を図 3.6 に示す。明世累層と土岐夾炭累層内の応力は比較的よく再現しているものの、土岐花崗岩については誤差が大きい結果となった。

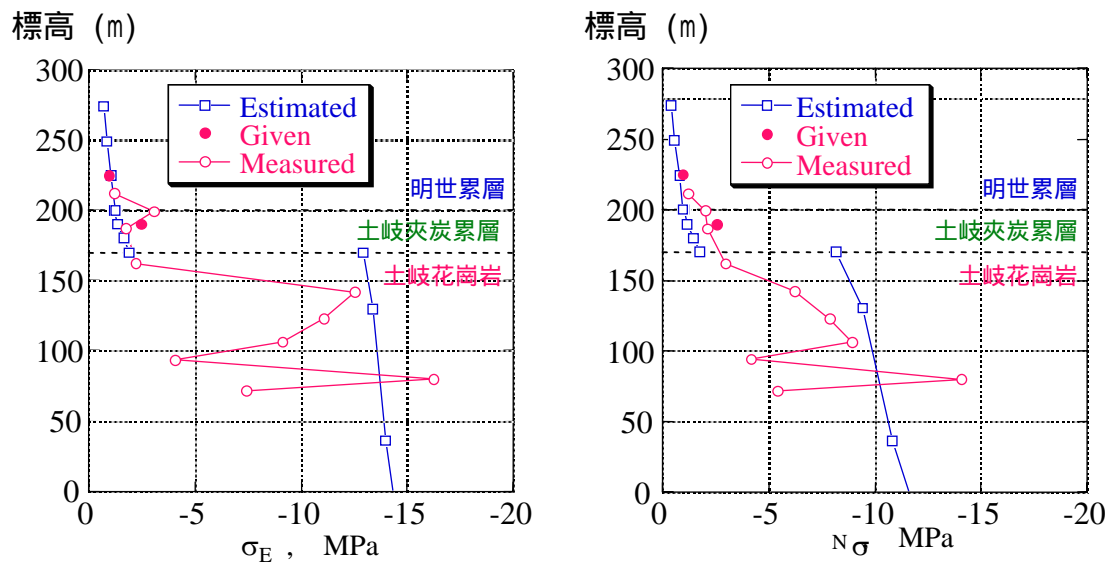


図 3.6 東濃鉱山 98SE-01 孔における実測値と解析値との比較

## (2) 長期挙動に関する研究

北延 NATM 坑道 02SI-02 孔から採取した粗粒砂岩（土岐夾炭累層）を用いたクリープ試験を実施した（高倉ほか，2003）。試験条件は湿潤状態で温度一定、試験期間は 30 日間とし、クリープ応力は一軸圧縮強度の 30%（1.76MPa）に設定した。試験の結果、粗粒砂岩は試験開始から 30 日経過した時点でも、ひずみが増加し続けるクリープ変形が認められた（図 3.7(a)）。一方、東濃鉱山の砂岩と同一条件下で継続的に実施している田下凝灰岩の長期クリープ試験は、試験開始から 2,000 日（約 6 年）が経過し、現在もなおクリープひずみの増加傾向が認められる（図 3.7(b)）。

田下凝灰岩の長期クリープ試験結果に基づいて、低応力レベルでのクリープ現象を表す構成方程式を構築し、これと従来から検討されてきた高応力レベル用構成方程式とを組み合わせ、1 次クリープから 3 次クリープまでの挙動を再現できるかどうかを、これまで行ってきたクリープ試験結果を参照しながら検討した（大久保，2003）。その結果、測定結果と計算結果とはかなり良好な一致を示し、広範囲の応力レベルに適用可能であることを確認した。さらに東濃鉱山の粗粒砂岩のクリープ試験について、大久保らが提案する構成方程式（大久保ほか，2002）を適用したところ、試験で得られたクリープ曲線はかなり良く再現でき（図 3.7(a)）、堆積軟岩を対象とした低応力レベル下での長期挙動を評価できる手法のひとつとして有効であることが分かった（高倉ほか，2003）。

岩石中の微小割れ目の進展と岩石の長期挙動との関係を把握するために、稲田花崗

岩を用いた顕微鏡観察下での応力緩和試験・一軸載荷試験を行った（市川，2003）。その結果、石英と長石の粒界から進展した微小割れ目が長石中にも及び、載荷方向に微小割れ目が進展することが観察された。また、強不連続解析における有限要素により鉱物粒子を模擬した要素内で微小割れ目が進展する均質化解析を導入できることが明らかになった。

東濃鉱山第2立坑および北延 NATM 坑道において岩盤の長期変位計測を実施し、これまでに例のない10年間という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（中間ほか，2002）。計測の結果、東濃鉱山の坑道周辺岩盤は時間の経過とともに変位が増大し続けるクリープ変形が認められた。第2立坑周辺の地中変位計測に関しては、地中変位計測スキャナーボックスパソコンから構成される自動計測システムを採用している。そこで、本システムで計測された長期変位の信頼性を確認するために、計測機器の点検を行った。その結果、計測点の残存率は91%であり、機械的・電氣的に信頼できる計測がなされていることが確認された。

北延 NATM 坑道 99SI-01~05号孔における孔壁崩壊現象の長期観測では、大孔径試験錐孔において孔壁の崩壊現象が継続的に生じていることが確認された。また、水平孔用キャリパーゲージにより孔壁崩壊形状を計測し、崩壊形状の定量化を行った。その結果、孔壁崩壊は最大で試験錐孔径の2倍以上の崩壊が認められた（図3.8）。

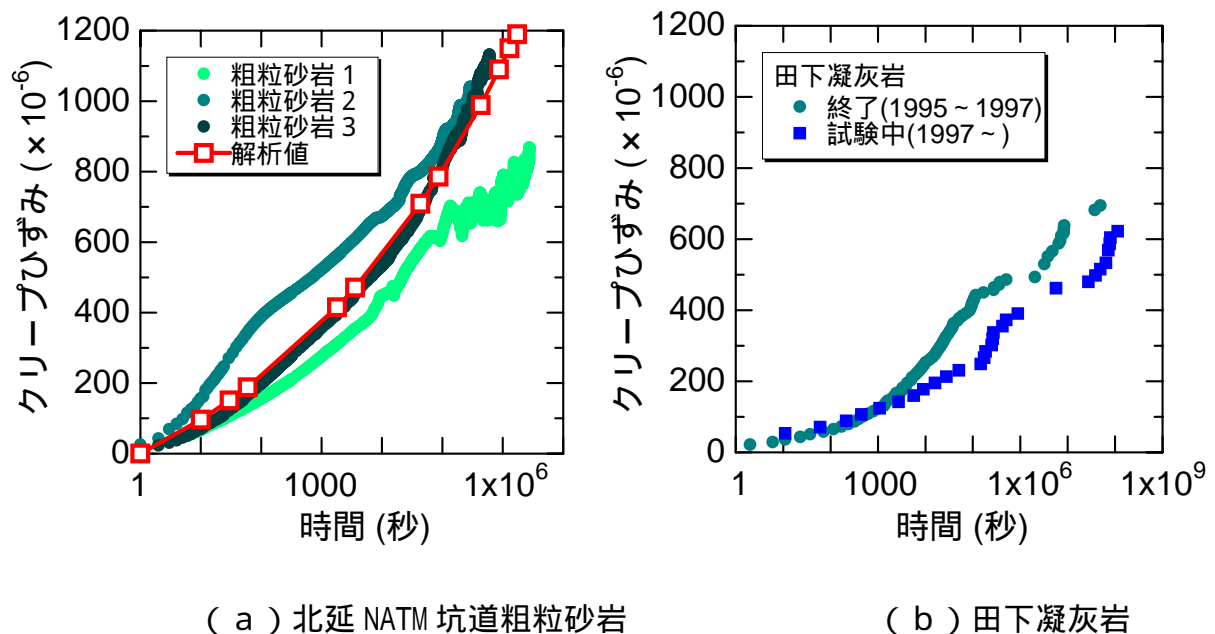


図 3.7 北延 NATM 坑道から採取した粗粒砂岩および田下凝灰岩のクリープ特性

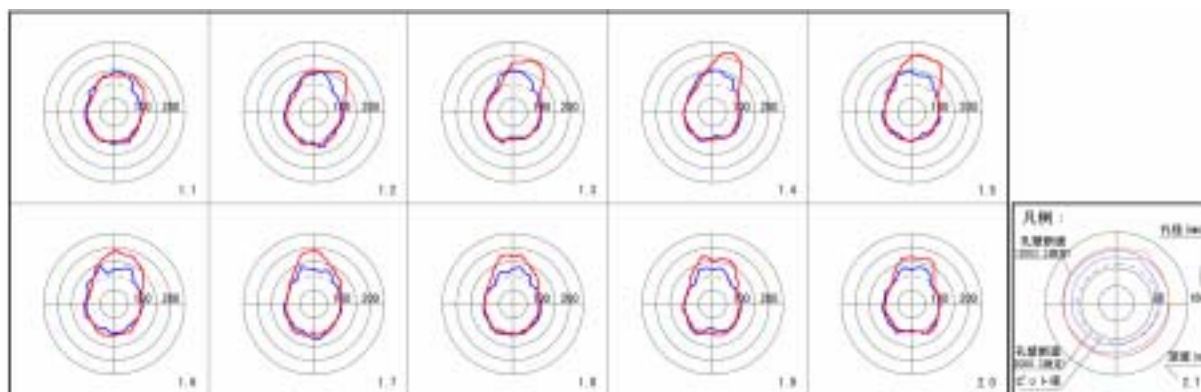


図 3.8 孔壁崩壊試錐孔 断面図 (99SI-01 孔 : 200mm , 深度 1.1 ~ 2.0m)

### 3.2.3 今後の予定

#### (1) 応力状態に関する調査研究

2003 年度より本研究は超深地層研究所計画にその重点を移すこととし、解析対象領域の 3 次元応力場に及ぼす地質構造の影響の評価ならびに地質構造を考慮した 3 次元応力場の同定手法について検討を継続する。また、事例解析として、東濃地域の初期応力データおよび地質構造データを用い、超深地層研究所用地における 3 次元応力場を逆解析的に推定する。

#### (2) 長期挙動に関する研究

2003 年度より本研究のうち結晶質岩を対象とした研究については、超深地層研究所計画にその重点を移すこととする。堆積岩を対象とした研究については、これまでの長期間の室内クリープ試験手法やモデル化手法を整備し、研究のとりまとめを行う。また、東濃鉾山における長期変形挙動データの取得を継続し、長期挙動に関する基礎情報を蓄積する。孔壁崩壊現象については、孔壁面の状態を継続的に観察するとともに、堆積軟岩中の孔壁崩壊のメカニズムに関する研究を行っていく。

### 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 (パッカー式プローブ) を開発し、東濃鉱山において適用試験を実施した (前村・徳丸, 2001; 前村・細野, 2002)。2002年度は、原位置で計測された比誘電率と、岩盤の水分量との関係を詳細に把握するための室内試験を実施するとともに、TDR による水分量の推定結果を補完するため、連続波レーダーによる坑道周辺を対象とした不飽和領域の原位置試験を行った。

##### (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た。

#### 3.3.2 おもな成果

##### (1) 不飽和計測手法に関する研究

比誘電率が既知の溶媒を用いたパッカー式プローブの性能確認試験の結果、本プローブで計測される比誘電率と溶媒の比誘電率とは一致し、本手法により比誘電率は正確に算定できることが確認された (図 3.9)。また、原位置で得られた岩石コア (泥質凝灰岩) の比誘電率を、ロッド式プローブを用いて、体積含水率を飽和状態から減少させながら計測した。その結果、飽和近傍で比誘電率が急激に増加する傾向や、含水率の変化と比較して比誘電率の変化が小さくなる現象がみられ、この部分においては、土壌において適用されている**多相混合物の誘電率が各相の誘電率との割合で表せるとする式(混合モデル)**をそのまま適合できないことがわかった (図 3.10)。その原因としては、試料とプローブとの隙間、水の不均質分布等が考えられるが今後更に検討の余地がある。

第2立坑第2計測坑道に掘削した 01SI-10 孔と 01SI-11 孔を利用し、孔間で連続波を用いたボアホールレーダー (以下、レーダーとする) の原位置試験 (図 3.11) を実施した。この結果から得られた 01SI-10 孔近傍の比誘電率分布と同孔で実施した TDR による計測結果を図 3.12 に示す。レーダーによる計測結果が TDR より大きく出ている理由は、レーダーで使用した周波数帯域が 1~80MHz であるのに対し、TDR では数 GHz と大きいことによるものと考えられる。両者の深度方向の分布に着目すれば、比誘電率が深度方向に 4m まで増加し、それ以深では減少するという傾向は一致している。このことから、レーダー計測によって TDR の計測結果を孔間で補間することが可能で、両者を併用することにより坑道周辺の 2 次元的な飽和状態を詳細に把握できると考えられる。

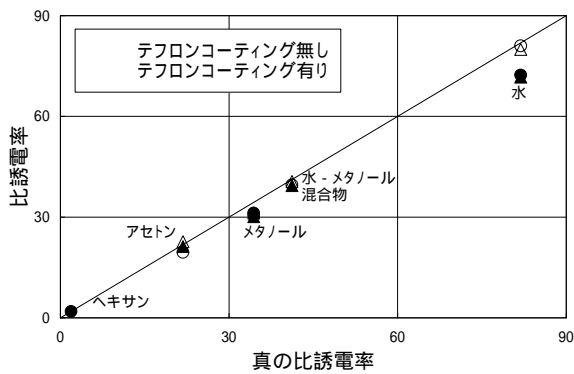


図 3.9 溶媒の真の比誘電率とパッカー式プローブによる測定値との関係 ( と は測定深度の違いを表す)

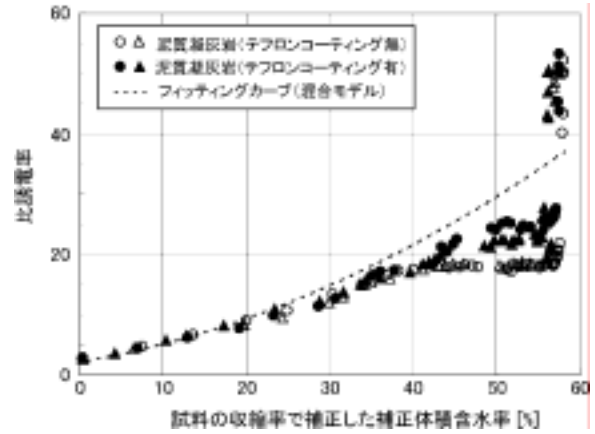


図 3.10 岩石コアの体積含水率と比誘電率の関係 ( と は測定深度の違いを表す)

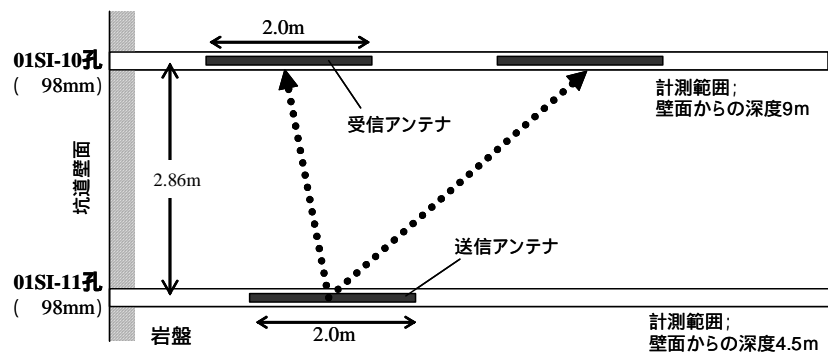


図 3.11 ボアホールレーダーによる比誘電率計測法

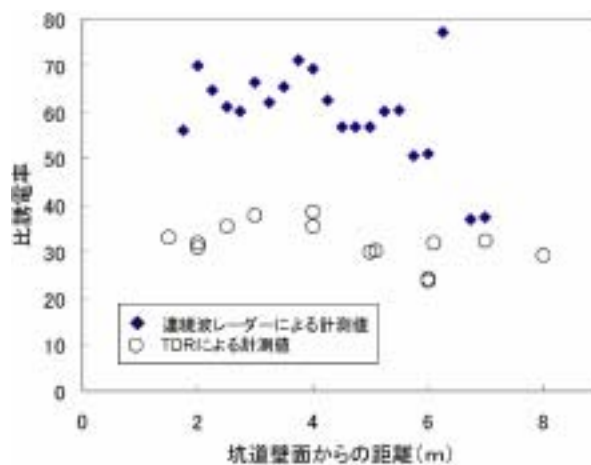


図 3.12 原位置試験の結果

## (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ること、観測値の変動は一定の範囲内に収まっていることが確認され（図 3.13）、昨年度までと同様の傾向が継続していることが確認された。

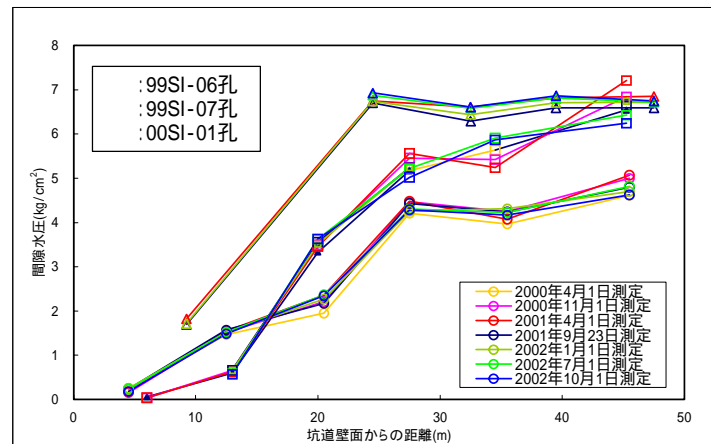


図 3.13 間隙水圧測定結果

### 3.3.3 今後の予定

#### (1) 坑道周辺水理特性調査

##### ① 不飽和計測手法に関する研究

坑道周辺の地質環境情報が豊富な東濃鉦山 NATM 坑道において 2002 年度と同様な試験を実施し、坑道周辺における総合的な地質環境特性評価手法を構築する。

##### ② 長期間隙水圧観測

北延 NATM 坑道における間隙水圧観測を継続し、既存の地質学的・水理学的情報などを利用することにより、北延 NATM 坑道周辺における水理学的状態変化についての検討を行う。

## 参考文献

天野健治, 笹尾英嗣, 太田久仁雄 (2003) : 東濃ウラン鉱床におけるナチュラルアナログ研究—ウラン鉱床分布域における隆起現象について—. 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集.

市川康明 (2003) : 長期岩盤挙動評価のための微視的観点による基礎的研究. サイクル機構技術資料 (研究委託報告書: 名古屋大学), 印刷中.

岩月輝希, 村上由記, 長沼 毅, 濱 克宏 (2002) : 天然環境の水—鉱物—微生物システムの予察研究—ウラン鉱床の長期的保存に関わる岩盤の酸化還元緩衝能力について—. 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会要旨集 CD-ROM.

岩月輝希, 村上由記, 長沼 毅, 濱 克宏 (2003a) : 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.

岩月輝希, 濱 克宏, 太田久仁雄, ランディ・アーサー (2003b) : 東濃ウラン鉱床におけるナチュラルアナログ研究—ウランの長期的な溶解度変動幅の解析—. 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集.

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 (2001) : 東濃鉱山における調査試験研究年度報告書 (2000 年度). サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2001-010.

核燃料サイクル開発機構 (2002a) : 東濃鉱山における調査試験研究年度計画書 (2002 年度). サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2002-001.

核燃料サイクル開発機構 (2002b) : 東濃鉱山における調査試験研究年度報告書 (2001 年度). サイクル機構技術資料, JNC TN7400 2002-003.

核燃料サイクル開発機構 (2002c) : 平成 14 年度地層科学研究情報・意見交換会—要旨集—. サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2002-006.

木村直樹, 松木浩二, 坂口清敏, 中間茂雄, 佐藤稔紀 (2003) : 不均一岩体の広域応力場評価法に関する研究. 資源・素材学会春季大会講演集 (I) 資源編, pp. 93-94.

前村庸之, 得丸昌則 (2001) : 不飽和領域の原位置計測手法の研究. サイクル機構技術資料 (研究委託報告書: 株式会社ダイヤコンサルタント), JNC TJ7400 2001-001.

前村庸之, 細野高康 (2002) : 不飽和領域の原位置計測手法の研究. サイクル機構技



術資料（研究委託報告書；株式会社ダイヤコンサルタント），JNC TJ7400 2001-014.

水田義明（2002）：3次元応力場の同定手法に関する研究．サイクル機構技術資料（研究委託報告書：社団法人資源・素材学会），JNC TJ7400 2001-012.

水田義明，金子勝比古，松木浩二，菅原勝彦，須藤茂韶（2003）：3次元応力場の同定手法に関する研究（その2）．サイクル機構技術資料（研究委託報告書：社団法人資源・素材学会），印刷中.

村上由記，岩月輝希，Mandernack, K.，長沼 毅（2003）：東濃地域の地下水における硫酸還元菌の活性と電子供与体利用能．地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会要旨集 CD-ROM.

中間茂雄，高倉 望，松井裕哉（2002）：東濃鉍山における坑道周辺岩盤の長期変位計測．サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2002-002.

新里忠史（2003）：東濃ウラン鉍床におけるナチュラルアナログ研究－ウラン鉍床分布域における月吉断層の活動履歴－．地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会要旨集 CD-ROM.

大久保誠介（2003）：長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による基礎的研究．サイクル機構技術資料（研究委託報告書：東京大学），JNC TJ7400 2002-011.

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，Vol. 118, pp. 737-744.

笹尾英嗣（2003）：東濃ウラン鉍床におけるナチュラルアナログ研究－ウラン鉍床の隆起・沈降量の見積もり－．地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会要旨集 CD-ROM.

Stenhouse, M. J. , Arthur, R. , Ota, K. , Iwatsuki, T. , Metcalfe, R. and Takase, H. (2002) : Application of the Systems analysis approach to a natural analogue project. Sci. Basis Nucl. Waste Manag. XXV.

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，投稿中.