

【目次】

1. はじめに	1
1.1 概要	1
1.2 目標	2
1.2.1 全体目標	2
1.2.2 「地表からの調査予測研究段階」の段階目標	2
2. 平成 12 年度の調査・研究の概要	3
3. 研究成果の統合化	8
4. 地質・地質構造に関する調査・研究	13
4.1 目標	13
4.2 実施内容	13
4.2.1 地上物理探査	13
4.2.2 試錐孔における地質・地質構造調査	14
4.2.3 モデルの構築	15
5. 地下水の水理に関する調査・研究	23
5.1 目標	23
5.2 実施内容	23
5.2.1 表層水理調査	23
5.2.2 深層水理調査	24
5.2.3 モデルの構築および地下水流動解析	26
6. 地下水の地球化学に関する調査・研究	37
6.1 目標	37
6.2 実施内容	37
6.2.1 地表水・降水を対象とした地球化学調査	37
6.2.2 地下水を対象とした地球化学調査	38
6.2.3 固相を対象とした地球化学調査	38
6.2.4 モデルの構築	38

7. 岩盤の力学特性に関する調査・研究	43
7.1 目標	43
7.2 実施内容	43
7.2.1 力学特性調査	43
7.2.2 モデルの構築および解析	44
8. 物質移動に関する調査・研究	54
8.1 目標	54
8.2 実施内容	54
8.2.1 室内調査・分析	54
8.2.2 天然放射性核種を利用した研究	55
9. 調査技術・調査機器の開発	57
9.1 目標	57
9.2 実施内容	57
9.2.1 地質構造調査技術開発	57
9.2.2 地下水の水理特性・地球化学特性調査技術開発	57
9.2.3 岩盤の力学特性調査技術開発	58
9.2.4 第2段階以降に必要となる調査技術・調査機器の開発	59
9.2.5 データベースの構築	60
9.2.6 地質環境データ解析・可視化システムの構築	61
9.2.7 情報提供技術の開発	61
10. 工学的技術	64
10.1 目標	64
10.2 実施内容	64
10.2.1 研究坑道において実施する調査・研究項目の検討	64
10.2.2 研究坑道掘削に必要な設備, 研究坑道の仕様決定および 施工計画の決定	65
11. まとめ	66
参考文献	68

1. はじめに

1.1 概要

原子力委員会は、平成6年6月に策定した「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画(以下、原子力長計)」(原子力委員会、1994)において、『地層処分研究開発の基盤となる深部地質環境の科学的研究を着実に進めること』との指針を示した。ここでいう深部地質環境の科学的研究を、核燃料サイクル開発機構(以下、サイクル機構)は地層科学研究として進めている。この原子力長計では、深地層の研究施設を以下のように位置づけている。

- ・『深地層の環境条件として考慮されるべき特性などの正確な把握や地層処分を行うシステムの性能を評価するモデルの信頼性向上など地層処分研究に共通の研究基盤となる施設であり、我が国の深地層についての学術的研究にも寄与できる総合的な研究の場として整備していくことが重要』、
- ・『我が国の地質の特性などを考慮して複数の設置が望まれる』、
- ・『深地層の計画は、研究開発の成果、とくに深部地質環境の科学的研究の成果を基盤として進めることが重要であり、その計画は処分場の計画とは明確に区別して進める』。

これを受け、サイクル機構では、日本に広く分布する結晶質岩のひとつである花崗岩を主たる研究対象として、瑞浪市明世町のサイクル機構用地に超深地層研究所を建設することとし、平成8年度より調査・研究を開始した。

超深地層研究所での研究は、その内容が異なる以下の3段階に分け、地下施設の建設前から地下施設の完成後まで約20年をかけて実施する。

第1段階: 地表からの調査予測研究段階

第2段階: 坑道の掘削を伴う研究段階

第3段階: 坑道を利用した研究段階

地表からの調査予測研究段階では、地質・地質構造、地下水の水理、地下水の地球化学、岩盤力学に関する研究が主体となる。この段階では地表からの物理探査や試錐調査によって、地質環境の概略を把握し、これにもとづいて地質構造などを簡明に示す地質構造モデルのほか、水理地質構造モデル、地球化学モデル、岩盤力学モデルを構築する。これらのモデルは、地下水流動解析や地下における研究坑道の設計などの基礎となる。また、取得される膨大な情報を効率よく管理し活用するために不可欠なデータ管理システムなどの構築を行う。これらの研究の結果にもとづき、深部地質環境の特徴、研究坑道の建設に伴う地下水の流動と水質の変化などを予測すると同時に、予測結果を評価する方法を決定しておく。また、研究坑道の詳細設計を行うとともに、引き続き実施する「坑道の掘削を伴う研究段階」の詳細な研究計画を決定する。

本報告書は、「超深地層研究所計画 年度計画書(平成12年度)」(サイクル機構、2000b)にもとづいて行った平成12年度の調査・研究の成果を取りまとめたものである。

1.2 目標

1.2.1 全体目標

超深地層研究所計画においては、全体目標として以下の3つが設定されている（動燃事業団，1996）。

- ① 地質環境の総合的な調査技術を確立すること。
- ② 深部の地質環境に関する情報を取得すること。
- ③ 深地層における工学的技術の基礎を開発すること。

1.2.2 「地表からの調査予測研究段階」の段階目標

段階目標として以下の3つが設定されている。

- ① 地表からの調査により地質環境データを取得し、地下の地質環境および地下施設建設に伴う地質環境の変化を予測すること。
地表からの調査により、研究対象である地層の地質環境データを取得するとともに、地質環境を簡明に表現する地質構造モデル、水理地質構造モデルおよび地下水の地球化学モデルを構築し、後続の研究段階で対象となる地質環境と地下施設の建設による影響を予測する。
- ② 予測結果の評価方法を決定すること。
上記で行う予測の結果を、坑道の掘削を伴う研究段階で取得される情報との比較により検証するため、評価基準を設定し具体的な評価方法を決定する。
- ③ 地下施設の詳細設計を行い、坑道の掘削を伴う研究段階の計画を決定すること。
本段階で取得される情報と予測結果にもとづき、地下施設の詳細設計を行うとともに、坑道の掘削を伴う研究段階の研究計画を決定する。

2. 平成12年度の調査・研究の概要

地表からの調査予測研究段階(第1段階)においては、『1.2.2「地表からの調査予測研究段階」の段階目標』で示した①と②を達成することにより、最終的に、地表からの地質環境の総合的な調査技術を確立すること(『1.2.1全体目標』の①に対応)が最も重要な研究課題である。そのためには、調査技術の段階的な運用・改良・確認を繰り返し行うことが不可欠であり、研究を第1フェーズ(平成8年度～平成11年度)と第2フェーズ(平成12年度以降)に分けて進めることとしている(サイクル機構, 1998)。

第2フェーズにおいては、第1フェーズの成果をもとに、段階目標の達成のための研究成果を取りまとめしていく一方、前述した目標達成の観点から、とくに地表からの調査に研究成果の統合化(調査・解析の統合化と調査・解析技術の体系化)に重点をおいて研究を進めていく。

第2フェーズの初年度にあたる平成12年度では、研究成果の統合化として、海外の調査・解析・評価の統合化の事例(Nagra, 1999)を参考に、第1フェーズの研究成果にもとづいた調査・解析・評価の統合化データフローを構築した。また、第2フェーズに残された課題(サイクル機構, 2000a,b)にもとづき、研究実施領域北東部における地質・地質構造を把握すること、高角度の割れ目(帯)に関するデータを取得することを目的としたMIU-4号孔の試錐調査(掘削長790 m, 北北東に下向き60°)を開始し、地質・地質構造、地下水の水理、地下水の地球化学、岩盤力学に関する情報収集を行っている。図1に試錐孔の位置を示す。MIU-4号孔の試錐調査は岩盤状況などのため、当初の計画より遅れて、平成13年度に終了予定である。そのため、既存の地質・地質構造モデルなどとMIU-4号孔の試錐調査結果との比較・評価は、平成13年度にかけて行うこととしている。さらに、第1フェーズで設定した地下水流動解析の解析領域(約4×6 km, 図2)において、リニアメント判読結果などをふまえ、月吉断層以外の断層を考慮した地質構造モデルにもとづき水理地質構造モデルを構築し、地下水流動解析を実施した。加えて、MIU-1～3号孔の試錐調査結果にもとづき岩盤力学的概念モデルを更新するとともに、研究坑道建設による施設周辺岩盤の変形挙動などの予備解析を行った。

一方、調査技術・調査機器の開発として、これまでに東濃地科学センターが開発してきたものを含めた既存の調査技術・調査機器の改良・高度化、坑道の掘削を伴う調査研究段階(第2段階)以降に必要な調査技術・調査機器の開発を行った。

本計画の平成12年度の調査・研究スケジュール(実績)を表1に示す。

図1 試錐孔位置図

図2 解析領域と研究実施領域

表1 平成12年度 調査・研究スケジュール 1/3

表1 平成12年度 調査・研究スケジュール 2/3

表1 平成12年度 調査・研究スケジュール 3/3

3. 研究成果の統合化

本計画では、「地質環境の総合的な調査技術を確立すること」を全体目標のひとつとしている。この全体目標を達成するためには、研究成果の反映先とその具体的な反映項目(アウトプット)を明確にし、研究を進める過程で、何のデータをどのような手法で取得・解釈し、分野間(地質・地質構造, 地下水の水理, 地下水の化学, 岩盤力学)の横断的な解釈やモデル化を、どのような考え方で進めれば地質環境をどこまで理解または予測でき、最終的なアウトプットに到達できるかを事例的に示したうえで、研究全体の戦略や戦術を事前に提示し、それを段階的に進めることが極めて重要である。このような事例の積み重ねが深部における地質環境の評価のための体系的な調査・解析評価技術の信頼性、さらには地層処分研究開発の基盤技術の信頼性を確かなものとしていく。

本計画では、上記の考え方を包含した研究の枠組みを「研究成果の統合化」と称して検討を進めている。平成12年度においては、海外の調査・解析・評価の統合化の事例(Nagra,1999)を参考にし、第1段階第1フェーズの研究成果にもとづいて、調査・解析・評価の統合化データフローを構築した(図3 (a)~(d))。これらの図は、これまでの研究成果をふまえ、現段階の調査・解析・評価の統合化の考え方を例示したものであり、今後の研究の進捗に応じて段階的に改善していく計画である。

図3(a) 統合化データフロー

図3(b) 統合化データフロー

図3(c) 統合化データフロー

図3(d) 統合化データフロー

4. 地質・地質構造に関する調査・研究

4.1 目標

第1段階第2フェーズでは、研究領域における地質・地質構造に関する情報を集約し、地質構造モデルを更新することを目標としている(サイクル機構, 2000a)。

平成12年度の目標は、平成11年度までに取得したデータ(試錐調査はMIU-1～3号孔)を用いて地質構造モデルを更新するとともに、新たにMIU-4号孔の試錐調査を行い、研究実施領域中央部から北東部にかけての地質・地質構造に関するデータを取得することである。また、MIU-4号孔には傾斜掘りを採用し、高角度の割れ目(帯)(以下、高角度割れ目(帯))に関するデータを取得することを目標としている(サイクル機構, 2000b)。

4.2 実施内容

平成12年度においては、これまでに調査していない研究実施領域北東部の地質・地質構造および高角度割れ目(帯)の頻度分布に関するデータを取得するため、MIU-4号孔の試錐調査(掘削長790 m, 北北東下向き60°)を開始した。既存の試錐孔および掘削中の試錐孔の位置を図1に示す。また、地質構造の連続性を推定するため、平成11年度までに実施した地上物理探査の解析を行った。さらに、地下水流動の解析領域(約4 km×6 km, 図2)において、リニアメント判読の結果(図4)などにもとづき、地質構造モデルを構築した。なお、平成11年度までに取得したデータ(試錐調査はMIU-1～3号孔)を用いた地質構造モデルの更新については、すでに平成11年度の年度報告書(サイクル機構, 2001b)で報告した。

4.2.1 地上物理探査

花崗岩内部の不均質性やその上に堆積する堆積岩の層序分布などを把握し、岩盤中の地下水流動を予測するうえで必要となる水理地質構造モデルの入力情報とするために、平成11年度に反射法弾性波探査を実施した(図5)。

平成12年度においては、本反射法弾性波探査、試錐調査(岩芯観察, 物理検層など)およびVSP(Vertical Seismic Profile)探査における結果の比較を行った(図6)。これらの比較により得られた反射記録断面の解釈図(図7)では、新第三紀堆積岩の堆積構造、花崗岩と堆積岩の不整合面の形状、断層を示唆する不連続部を抽出することができた。

不整合面の直下において、比較的振幅が強く現れている箇所が複数認められる。試錐孔内に受振器を配置して地震波を観測したVSP探査の結果でも同様な深度において反射イベントが確認されている。反射法弾性波探査で、比較的振幅が強く現れる箇所は標高約0～100 mまで(図7の青線部)であり、それより深部では振幅は強く現れていない。この反射法弾性波探査で比較的振幅が強く現れるゾーンは、岩芯観察やボアホールテレビ(BTV)調査結果などで低角度な割れ目が密に分布する上部割れ目帯と定義したゾーン(サイクル機構, 2001a,b)とほぼ一致する(松岡ほか, 2001)。

以上の結果は、反射法弾性波探査が、堆積岩の堆積構造や不整合面および断層などの不連続部などを把握するのに有効であること、試錐孔を利用した他の調査結果と比較す

ることで、花崗岩内部における割れ目帯分布などの不均質性に関する情報取得が可能であることを示している。

今後は、本解析結果を水理地質構造モデルの入力情報として用いる計画である。また、調査技術開発の一環として反射法地震探査結果と試錐調査およびVSP探査の結果を詳細に検討し、本計画用地を例として、地質構造をどの程度まで把握できるのかを評価していく。

4. 2. 2 試錐孔における地質・地質構造調査

平成12年度から開始したMIU-4号孔における試錐調査は、以下に示す6つのフェーズ(基本ケース)において実施している(JNC, 1999)。

- ① 第1フェーズ: 第四紀末固結堆積物および第三紀堆積岩(瑞浪層群明世累層)
- ② 第2フェーズ: 第三紀堆積岩(瑞浪層群)
- ③ 第3フェーズ: 花崗岩風化部および花崗岩健岩部
- ④ 第4フェーズ: 花崗岩中の断層上盤側
- ⑤ 第5フェーズ: 花崗岩中の断層部
- ⑥ 第6フェーズ: 花崗岩中の断層下盤側

平成12年度は、MIU-4号孔において掘削長約135 m(第3フェーズのうち花崗岩風化部)の試錐掘削が行われた。

本報告書では、おもに土岐花崗岩不整合直上部までの瑞浪層群(掘削長0～88.65 m)を対象にした岩芯記載および物理検層における調査結果の概要を示す。なお、試錐掘削状況についてはJNC(2001)に記述されている。

(1) MIU-4号孔における岩芯観察結果

MIU-4号孔の岩芯記載は、掘削長、岩相、岩石組織、斑晶の種類・粒径・形状、有色鉱物の含有量、風化、変質、岩盤等級、RQD、割れ目形態、割れ目の密度・位置・傾斜角・形状・幅、割れ目面上の構造、割れ目沿いの変質、割れ目充填物の特徴を対象として行っている。MIU-4号孔試錐孔における地質学的特徴を図8の地質柱状図に示す。また、掘削後に引き続き実施された物理検層結果を図9に示す。おもな特徴は以下のとおりである。

- ① 堆積岩に関しては、明世累層(地表～掘削長 50.07 m)と土岐夾炭累層(掘削長 50.07～88.68 m)が確認された。明世累層はおもに凝灰質砂岩、凝灰質シルト岩および礫岩から構成される。明世累層の下位に分布する土岐夾炭累層は、おもに凝灰質砂岩、凝灰質泥岩および礫岩で構成され、亜炭の薄層を挟在する。
- ② 土岐夾炭累層の最下部である基底礫岩は、花崗岩、泥岩、砂岩からなる中礫および巨礫(亜角～亜円)を含む。
- ③ 堆積岩(掘削長0～88.68 m)において278本の割れ目を確認した。割れ目密度(1 mあたりの割れ目本数)の平均は3.1本である。掘削長17.83～22.16 mで確認された割れ目帯では割れ目密度が大きく、粘着力に欠け、層理が強く乱されている。
- ④ 不整合面(明世累層と土岐夾炭累層の不整合面、土岐夾炭累層と土岐花崗岩の不整合面)の深度は、既存の地質構造モデル(JNC, 1999)にもとづいた推定深度と比較してそれぞれ約12 m, 23 mより深い位置に認められた。

岩芯記載から得られた岩相境界の深度と、既存の地質構造モデルによる予測深度を比較した結果、明世累層と土岐夾炭累層の不整合深度には約12 mのずれがみられた。この結果、この深度以深で出現する土岐夾炭累層と土岐花崗岩の不整合深度にもずれが生じると考えられたため、MIU-1号孔とMIU-4号孔の近くで掘削された浅層試錐孔(岐明-304, 動燃事業団(1994))のデータを加えて、堆積岩類と花崗岩の不整合深度を再予測した。

なお、第3フェーズ(花崗岩風化部および花崗岩健岩部)については、以下のような特徴が確認されている。

- ① 不整合(掘削長93.05 m)～掘削長130.81 mまでは風化花崗岩(掘進方向へ厚さ37.7 m, 堆積岩と花崗岩の境界(不整合)の直下に分布し、褐鉄鉱が認められるか、またはマサ状になっている部分)が存在する。
- ② 掘削長116～118 mには断層が分布し、断層ガウジや断層角礫岩を伴う。掘削長106～132 mは断層の影響による強い変質作用(緑れん石化作用など)が認められ、コアロスする部分が多く認められる。
- ③ 割れ目分布では、不整合～掘削長134 mにおいて低角度の割れ目が卓越する上部割れ目帯が認められる。

4. 2. 3 モデルの構築

(1) 地下水流動の解析領域(約4 km×6 km)におけるモデルの構築

地下水流動解析のために設定された解析領域(約4×6 km, 図2)において地下水流動場を評価するうえでは、大規模な不連続構造や岩質の違いによる透水性のコントラストなどが優先度の高い要因であると考えられる。そのため、平成12年度においては、地形の起伏に加え、解析領域における地質構造モデルに考慮すべき地質・地質構造として、① 断層および断層に伴う割れ目帯、② 固結度の低い新第三紀鮮新世の砂礫層(瀬戸層群)および新第三紀中新世の堆積岩(瑞浪層群)、③ 花崗岩風化部、④ 花崗岩内部のマクロなスケールの水理学的不均質性、の4つを抽出した。

① 断層および断層に伴う割れ目帯

地質構造モデルには解析領域に分布する既存の月吉断層のほか、リニアメントなどから推定される断層も考慮した。この際、領域内の断層およびリニアメントは、以下のランクにしたがい、整理・分類を行った。

分類1: 地表露頭でその存在が明瞭に観察される断層

分類2: 地表露頭では認められないが、試錐孔で捕捉される断層

分類3: 地質図に記載される断層のうち、地形に表れているもの

分類4: 地質図に記載される断層であるが、地形には顕著に表れないもの

分類5: LANDSAT, SPOT, 空中写真で判読され、かつ地形には明瞭に表れるリニアメント

分類6: LANDSAT, SPOT, 空中写真で判読されるが、地形には明瞭に表れないリニアメント

分類7: LANDSAT, SPOT, 空中写真のうち、2種類の画像もしくは写真で判読されるリニアメント

分類8: LANDSAT, SPOT, 空中写真のうち、どれか1種類の画像もしくは写真で判読されるリニアメント

上記のランク分類のうち、「分類7」以上の断層およびリニアメントで、トレース長が3 km以

上のものをモデルで考慮する断層とした。複数のリニアメントが直線的に配列し、1つの連続するリニアメントとみなせる場合、リニアメントのトレース長は、連続するリニアメントのトレース長を用いた。LANDSAT画像、SPOT画像および空中写真によるリニアメントとの抽出は、各画像特性にもとづく判読要素の違いや判読地形のスケール差が判読結果に影響を及ぼすと考えられる。したがって、2種類以上の画像で判読されたリニアメントは、単一画像のみで判読されたリニアメントに比べ、その存在に対する確実度が大きいと考えられることから、「分類7」以上の断層およびリニアメントを地質構造モデルで考慮すべき不連続構造として抽出した。また、トレース長3 km以上のリニアメントを対象としたのは、井上ほか(1992)による報告「SPOT画像で判読されるリニアメントのトレース長が3 km以上の場合、そのリニアメントが断層である確率は100 %である」という記述によるものである。これら判定の結果から、解析領域では図4に示す断層および推定断層を不連続構造要素として抽出した(図4の(1)～(5))。

なお、断層に伴う割れ目帯における断層破碎帯幅は、緒方(1976)によるリニアメントのトレース長と断層破碎帯幅の関係式から推定した。

② 固結度の低い新第三紀鮮新世の砂礫層(瀬戸層群)および新第三紀中新世の堆積岩(瑞浪層群)

堆積岩部では、粒度などの岩相の違いは透水性に関係があると考えられるため、瀬戸層群と瑞浪層群の2つに区分した。両者の3次元分布の推定については、地質図における地表地質境界および試錐調査により取得された地層境界深度を用いた。

堆積岩と花崗岩の不整合面の3次元分布については、地質図の地表地質境界および試錐調査により取得された地質境界深度、物理探査による物性の違いから推定された不整合面深度分布を用いて、その3次元分布を推定した。

③ 花崗岩風化部

花崗岩風化部では、水理試験結果や物理検層結果、割れ目密度から他の花崗岩部と比較して明らかに透水性が高いことが確認されている。その3次元分布については、試錐調査により取得された深度をもとに推定した。

④ 花崗岩内部の水理学的不均質性

基盤不整合面直下の花崗岩中には、水平割れ目(低角度割れ目)の卓越する上部割れ目帯が分布していることが確認されている(三枝・須山, 2000)。この上部割れ目帯は、一部で開口性の割れ目を伴い、水理試験結果では健岩部に比べ透水係数が数桁大きい高透水性ゾーンとなっている(図10)。

各試錐孔における上部割れ目帯の深度分布を把握するため、BTV調査から得られた割れ目の走向・傾斜データを検討した。上部割れ目帯の下端深度は、低角度の傾斜(0～30°)の割れ目累積本数の深度分布曲線変曲点の位置から求めた。

上部割れ目帯の形成には基盤不整合面の谷状構造の関与(谷部には割れ目が多い)(Lee et al., 1979)が推定されたため上部割れ目帯の層厚と、基盤不整合面の谷状構造を被覆する堆積岩(堆積構造に応じ凹部は厚く、凸部は薄く堆積)の層厚の相関関係を検討した。その結果、上部割れ目帯の層厚と、花崗岩を被覆する堆積岩の層厚には正の相関関係が認められた。今回、構築した地質構造モデルには、花崗岩の被覆層の層厚(y)およ

び上部割れ目帯の層厚(x)の相関式 $[y=1.25x+129.18]$ を暫定的に用い、被覆層の層厚の分布から、上部割れ目帯の層厚の3次元分布を推定した。

上述した断層および断層に伴う割れ目帯(図11)、瀬戸層群、瑞浪層群、花崗岩風化部、花崗岩上部割れ目帯、花崗岩健岩部の空間分布をそれぞれモデル化し(White et al., 1998, White and Olmo, 1996)、その位置関係や形成過程を考慮し、組み合わせることにより3次元地質構造モデルを構築した(図12)。

(2) 予測結果の評価方法

第1段階に予測する地質・地質構造の評価は、第2段階の研究坑道の掘削で遭遇する地質・地質構造との比較により行う。具体的には、構築した地質構造モデルにもとづき、研究坑道の掘削に伴い遭遇する地質・地質構造を予測し、それと研究坑道の掘削で行う坑壁観察などの結果と比較する。

平成12年度までに、予測手法や予測結果の評価手法についてのひとつの事例であるスウェーデンHRL (Hard Rock Laboratory)プロジェクトに関する文献調査(Stanfors et al., 1997)を行った。また、研究坑道の掘削に伴い遭遇する地質・地質構造の予測は、構築した地質構造モデルにもとづき行うこととなる。そのため、「研究成果の統合化」のなかで、地質構造モデルの構築にいたるまでのデータフローを、第1段階第1フェーズの研究成果にもとづき例示するとともに、地質構造モデルの構築に必要とされるデータセットの項目を概括的に整理した。

図4 リニアメント判読図

図5 調査測線位置

- 図6 試錐調査情報と反射法弾性波探査記録断面との比較
図7 反射記録断面の解釈

図8 MIU-4号孔における地質柱状図

図9 物理検層結果

図10 割れ目本数と透水性の関係

図11 3次元断層モデル

図12 3次元地質構造モデル

5. 地下水の水理に関する調査・研究

5.1 目標

第1段階第2フェーズでは、水理地質構造モデルを構築するとともに、長期揚水試験や長期水圧観測をとおして水理地質構造モデルの更新を行い、研究坑道掘削が地下水流動に与える影響を予測することを目標としている(サイクル機構, 2000a)。

平成12年度の目標は、平成11年度までに取得したデータ(試錐調査はMIU-1～3号孔)を用いて、水理地質構造モデルを構築するとともに、MIU-4号孔の試錐調査により、研究実施領域中央部から北東部における岩盤および岩盤中の高角度割れ目(帯)の水理特性を把握することである(サイクル機構, 2000b)。さらに、水理的な連続性に関するデータを取得するため、MIU-4号孔試錐掘削に伴う周辺観測孔(AN-1号孔, AN-3号孔, MIU-1～3号孔)での水圧応答観測を行うとともに、長期揚水試験の予測のための地下水流動解析を実施することを目標としている。

5.2 実施内容

平成12年度においては、表層水理調査および深層水理調査(MIU-4号孔における試錐調査)により水理的データを取得するとともに、これまでに得られたデータを用いて、水理地質構造モデルの構築と地下水流動解析を行った。

5.2.1 表層水理調査

地下水流動解析の境界条件ならびに初期条件の設定のため、浅層(堆積岩)を対象にした試錐孔の掘削と水位計の拡充を行い、既存の地下水位計、土壌水分計、気象観測装置、河川流量計と組み合わせた表層水理観測システムを用いた表層水理の観測を継続した。平成10年度末に開始した正馬川モデル流域(図13)での水収支観測(河川流量、降水量などの気象観測)を引き続き実施しており、観測値が集積されている。おもな観測結果(補間・補正前の数値)は以下のとおりである。

(1) 気象観測

平成12年度の年間降水量は正馬川流域(正馬様雨雪量計)で1,522 mmであり、平成11年度(1,521 mm)と比較して同程度であった。正馬様雨雪量計による年間降水量の平均値は、平成2年度～平成12年度の11年間で1,554 mmであり、平成11年度以降、平均値より低い値となっている。正馬様モデル流域(図13)における降水量は1,513 mmで、正馬様雨雪量計の降水量とほぼ同じ値であった。同モデル流域に設置した気象観測装置から計算したペンマン法による蒸発散量は252 mmであり、降水量の17%である。

(2) 地下水位観測

本計画用地北東部の正馬川モデル流域において、瑞浪層群上部(第三紀堆積岩)および瀬戸層群基底(未固結層)の地下水位変動を把握するために、平成9年度より、観測試錐孔97MS-01号孔(瑞浪層群明世累層上部)、97MS-02号孔(瀬戸層群基底)において水位の自動観測を、平成10年度からは98MS-03号孔(瑞浪層群明世累層下部)と98MS-04号孔(瀬戸層群)、平成11年度からは99MS-05号孔(明世累層基底礫岩層)において水位の自動観測を行い、データの集積を行っている。97MS-01～04号孔の水位変動を図14にモデル流域の降水量とともに示す。

瀬戸層群の水位挙動は2つの試錐孔(97MS-02,04号孔)で調和的であり、モデル流域の降水量に反応して水位に上昇がみられる。97MS-01号孔の水位は平成11年8月以降、水位計以深に低下している。同じ瑞浪層群の観測孔である97MS-03号孔では、降雨の有無や季節にかかわらず水位が一定である。瀬戸層群に設置した水位計では降雨への反応や季節変動が明瞭である。

(3) 河川流量観測

平成12年度の正馬川河川流量計での河川流出高(流量を流域面積(正馬川流域; 0.535 km²)で割った値)は896 mmであり、平成11年度の河川流出高932 mmと比較すると減少した。

(4) 岩盤浸透量

平成12年度において取得した補間・補正前の降水量、蒸発散量、河川流量から水収支を計算した。その結果、岩盤浸透量は、正馬川流域で0.41 mm/日(11年間の平均値で0.24 mm)、正馬川モデル流域で2.44 mm/日であった。正馬川モデル流域の値は、昨年の1.14 mm/日より大きな値となっているが、これは、河川流量計の観測値に欠測が多く、流量が少なく計算されていることが原因と考えられる。

5. 2. 2 深層水理調査

岩盤、断層および割れ目などの水理学的特性に関するデータを取得するため、MIU-4号孔において透水性割れ目の検出を目的とした流体検層(フローメータ検層、温度検層)を実施した。流体検層によって抽出された水みちと考えられる割れ目の透水性を把握するための透水試験(パルス法、スラグ法による水理試験)、および岩盤の平均的な透水性を把握するための揚水試験を実施した。また、研究実施領域の岩盤の水理学的な連続性に関するデータを取得するために必要な間隙水圧の長期観測を継続した。

(1) MIU-4号孔における水理試験

平成12年度においては、MIU-4号孔の瑞浪層群(掘削長0 m～88.65 m)において水理試験を実施した。本報告書では、掘削長68.45～78.02 m(瑞浪層群土岐夾炭累層、岩相:細～中礫岩、礫質砂岩)、掘削長82.50 m～88.65 m(瑞浪層群土岐夾炭累層基底礫岩で土岐花崗岩の不整合面直上部分、岩相:細～中礫岩、礫質砂岩)の2区間で実施した水理試験(シングルパッカー方式)の結果について報告する。

① 水理試験の手順

水理試験で取得される岩盤の透水性に関するデータの品質を保証するためには、同一測定区間で異なる試験方法を繰り返し行うことにより、算出される透水(量)係数の再現性を確認することが必要である。また、岩盤の透水性に適した水理試験方法を選択することも、正確な透水性の評価および調査の効率化にとって重要である。このような観点からMIU-4号孔における水理試験では、図15に示す試験手順を採用した。この水理試験方法の特徴は、水理試験装置の設置後に行われるパルス法による水理試験によって試験区間の概略的な透水性を把握し、低透水性と高透水性の2つの場合に分け、透水性の程度に対応した透水試験方法を繰り返し行うことである。試験区間が高透水性(およそ 5×10^{-7} m/sec以上)の場合は、スラグ法による水理試験と揚水試験を実施する。一方、試験区間が低透水性(およそ 5×10^{-7} m/sec以下)の場合は、スラグ法による水理試験とパルス法による水理試験に区分される。試験時間が長くかかるような難透水性岩盤の場合には、パルス法による水理試験が行われる。水理試験の最後には、再びパルス法による水理試験が実施される。この測定方法と試験手順の最初に実施したパルス法による水理試験測定結果を比較することにより、測定期間中に生じた試験状態の変化の有無を確認できる。測定値が異なる場合は、パッカーの遮水状態や試験区間内の孔壁の崩壊などによる岩盤の透水性や埋没による試験区間長の変化などが予想されるため、装置の再設置や孔壁状態の確認などが必要となる。

② MIU-4号孔における水理試験の内容

水理試験を行った区間ごとに、水理試験の内容を示す。

a) 掘削長68.45～78.02 mにおける水理試験

パッカー拡張後の間隙水圧測定で、間隙水圧が安定な状態に回復したことを確認した後、パルス法による水理試験(図15(a))を行った。その結果、低透水性の岩盤であることが確認されたため、図15(b)に示す流れにそって、パルス法による水理試験(図15(c))とスラグ法による水理試験(図15(d))を行った。

b) 掘削長82.50～88.65 mにおける水理試験

パッカー拡張後の間隙水圧測定で、間隙水圧が安定な状態に回復したことを確認した後、パルス法による水理試験(図15(a))を行った。その結果、高透水性の岩盤であることが確認されたため、図15(e)に示す流れにそって、スラグ法による水理試験(図15(f))と定流量揚水試験(図15(g))を行った。その後、再度、スラグ法による水理試験を行った。

③ 水理試験の結果

掘削長68.45～78.02 m(瑞浪層群土岐夾炭累層, 岩相:細～中礫岩, 礫質砂岩), 掘削長82.50 m～88.65 m(瑞浪層群土岐夾炭累層基底礫岩で土岐花崗岩の不整合面直上部分, 岩相:細～中礫岩, 礫質砂岩)の2区間で実施した水理試験(シングルパッカー方式)における圧力変化を図16に、算出した水理パラメータを表2および表3に示す。水理試験結果の概要は以下のとおりである。

- a) 土岐夾炭累層基底礫岩部の透水量係数および透水係数は、MIU-1,2,3号孔における同層準の値に比べて低い値を示す。このことは、土岐夾炭累層基底礫岩部は、水理学的な不均質性を有する可能性が高いことを示している。
- b) 透水量係数および透水係数の算定に関して、アガバル直線法はボシュレフ法やクーパー法のような方法と比較して、より高い透水量係数および透水係数を示す。
- c) 掘削長82.50 m～88.65 mの区間で実施した2回のスラグ法による水理試験結果は、それぞれの水理試験間に定流量揚水試験を行ったため、最初の水頭値が異なるものの、透水量係数および透水係数はほぼ一致している(図16, 表3)。

(2) 地下水の長期観測

割れ目(帯)の水理学的な連続性を把握するために必要な情報を取得する目的で、これまでに既存の試錐孔に設置したMPシステムなど(AN-1,3号孔, MIU-1～3号孔, AI-4号孔, 99MS-05号孔)を用いてMIU-4号孔の試錐調査に伴い発生する地下水の圧力変化の観測を行った。

第1フェーズの調査を実施する前に、浅層試錐孔(99MS-05号孔, AI-4号孔)および深層試錐孔(AN-1,3号孔, MIU-1,2号孔)において間隙水圧測定の実施を開始した。MPシステムを設置した試錐孔においては1分ごとに間隙水圧を測定し、記録している。とくに、99MS-05号孔およびAI-4号孔では、土岐夾炭累層下部と花崗岩風化部における地下水位を計測している。また、MIU-1,2号孔およびAN-1,3号孔では、すべての計測区間では土岐花崗岩における水頭を観測している。これらの計測は、試錐孔間の水理学的な連続性を推定するデータとして用いられた。

モニタリングによる水理学的および気象学的パラメータの変化を図17に示す。モニタリングの結果およびその特徴は以下のとおりである。

- ① MIU-1,2号孔, AN-1,3号孔および99MS-05号孔において観測された水圧や地下水面の変化は、気圧の変化(例えば台風など)や潮汐の影響によるものと考えられる。MIU-4号孔の掘削の影響によるものと考えられる水圧変化は観測されなかった。
- ② 99MS-05号孔では地下水位に変化がみられたが、降水によって引き起こされたものと考えられる。

5. 2. 3 モデルの構築および地下水流動解析

地下水流動解析のために設定された解析領域(約4×6 km, 図2)において、地下水流動場を評価するうえでは、地下水流動場に影響を及ぼしていると考えられる重要な要因として、「不連続構造の水理特性」や「水理学的境界条件」があげられる。

平成12年度は、それらの要因が地下水流動解析結果に与える影響度について評価することを目的とし、水理地質構造モデルの構築および地下水流動解析を実施した。

(1) 水理地質構造モデルの構築および地下水流動解析

① 物性値の設定

地下水流動解析のために設定された解析領域(約4×6 km, 図2)において, 不連続構造を考慮して構築した地質構造モデル(図12)にもとづき水理地質構造モデルを構築した。水理地質構造モデルに与える物性値については, 地質構造モデルで考慮した地質・地質構造ごとに, その物性値を与えた。

各地質・地質構造の物性値については, 解析領域で物性値が均質と仮定し, 各地質・地質構造の平均的な透水係数を把握するために実施した試験結果(サイクル機構, 2000c, 2001a)の幾何平均値を設定した(表4)。花崗岩中の上部割れ目帯や健岩部, 月吉断層に伴う割れ目帯については, それら内部の流体検層での異常地点や掘削水の逸水地点などから特定した割れ目帯などのとくに透水性が高いと考えられる箇所を対象とした限定区間での水理試験結果ではなく, 比較的長い区間を対象とした揚水試験結果の幾何平均値を用いた。花崗岩風化部および上部割れ目帯の透水係数の幾何平均値や最大値, 最小値がほぼ同一であることから, 水理地質構造モデルにおいてはこれらを同一のユニットとして取り扱った。

月吉断層の透水性については, 月吉断層がその断層面に直交する方向に遮水的であり, 強い透水異方性を有していることや, 不均質性を有していること(竹内ほか, 2001, 山根ほか, 1996, 尾方ほか, 1996)は確認されているものの, 断層面に直交方向の透水性に関する物性値は取得されていない。したがって, 月吉断層の透水性は, 低透水性として設定し, さらに, 月吉断層の透水性が地下水流動場に与える影響を検討することを目的として 10^{-10} m/s, 10^{-11} m/s, 10^{-12} m/sの3ケースを設定した。

月吉断層以外の断層やそれらの断層に伴う割れ目帯の透水性については, 試錐調査による情報の取得がなされていない。したがって, 本研究では, 情報取得がなされていない断層については, 低透水性のケース, 高透水性のケース, 透水異方性を有するケース, 透水異方性がないケースをそれぞれに設定した。断層に伴う割れ目帯については, 前述の透水異方性を考慮した。各地質・地質構造の間隙率については, その情報取得がなされていないことから文献資料(建設産業調査会, 1998)を参考に設定した。

② 地下水面の設定

本解析は, 飽和状態による地下水流動解析であるため, 水理地質構造モデルの上部境界面は地下水面を与えた。地下水面の分布は, 解析領域およびその周辺で観測された情報をもとにその空間分布を推定した。具体的には, 地下水面標高と地下水面標高を計測した試錐孔での地表標高に良い相関が得られたため, その関係式を用いた(図18 (a))。東濃鉦山周辺では, 東濃鉦山の影響により地下水面の低下が観測されたことから, その地下水面低下を考慮した上部境界面とした(図18(b))。

③ 水理学的境界条件の設定

上部境界条件は, ②で設定した地下水面を上部境界面とし, その境界条件として固定水頭境界条件を与え, 同時に水の流入出がある自由浸出面とした。

南側の河川部を除いた側方境界条件は, 解析領域内における試錐孔での水頭分布が月吉断層を貫いているMIU-2号孔を除きほぼ静水圧状態であることから, 上部境界面より深度方向に一定の静水圧分布を仮定するケースおよびモデル化・解析対象領域が尾根

線で囲まれていることから水の流入出のない不透水境界を仮定するケースを設定した。河川の位置する南側の境界条件については、本解析領域を含む約30 km四方の地下水流動解析結果(三枝ほか, 1998)から地下水の分水界とみなすことができることから不透水境界条件を与えた。

下部境界条件は、水の流入出のない不透水境界とした。東濃鉦山部における境界条件としては、坑道からの排水量にもとづく固定フラックス境界とした。

④ 地下水流動解析ケースの設定

『4.2.3(1) 地下水流動の解析領域(約4×6 km)におけるモデルの構築』で抽出した5本の断層(図4(1)～(5))のうち、4本の断層については、試錐調査などによる水理学的特性の評価が実施されていないことから、これらの断層の水理学的特性に着目した感度解析を実施した。透水性については、低透水性のケース、高透水性のケース、透水異方性を有するケース、透水異方性がないケースをそれぞれに設定し、各断層の透水性が地下水流動場に与える影響度の把握を試みた。月吉断層についても低透水性の前述した3ケースを設定した。

水理学的境界条件は、地下水の流動方向や流速などに大きな影響を及ぼしていると考えられるものの、その設定に必要な情報の取得が容易でないことから、水理学的境界条件に関する感度解析を実施した。以上の感度解析ケースについて、表5にまとめる。

⑤ 地下水流動解析の実施

地下水流動解析では、差分法によるハイブリッドモデルであるFrac-Affinityを用いた飽和状態における3次元定常浸透流解析を実施し、地下水の移行経路や移行経路長、移行時間を検討した。

(a) 地下水の移行経路

全水頭分布およびパーティクルトラッキング法による地下水の移行経路を比較した。図19にパーティクルトラッキングの初期ポイント、図20に解析対象領域全体の全水頭分布、図21にパーティクルトラッキングによる地下水の移行経路を示す。以下に結果の概要を示す。

- a) 全てのケースにおいて、地下水の主な流動方向は、地形面に沿って北から南方向であることが明らかとなった。
- b) 地下水の主な流動方向に直交する月吉断層およびEW系断層部において、地下水の上昇流が認められた。また、地下水の主な流動方向に並行するNNW系およびNW系の断層に沿った移行経路の存在が認められた。これらの結果は、EW系の断層の透水性が低いケース、もしくはNNW系およびNW系断層の透水性が高いケースにおいて顕著である。
- c) 尾根部の側方境界条件を固定水頭境界としたケースと不透水境界としたケースを比較すると、境界条件の違いにより地下水の移行経路に大きな差が生じていることが明らかとなった。固定水頭境界の場合は、パーティクルが最終的に側方境界に到達するものが多いが、不透水境界の場合は、全てのパーティクルが地表境界に到達している。

(b) 地下水の移行経路長および移行時間

地下水の移行経路長および移行時間について、パーティクルトラッキング結果を比較した。移行経路長および移行時間は、パーティクルトラッキングの初期ポイントからモデル境界に到達するまでのものである。図22に地下水の移行経路長のバラツキ分布、図23に地下水の移行時間のバラツキ分布を示す。両図は、移行経路長および移行時間における基本ケースと各感度解析ケースの解析結果の差を示している。以下に結果の概要を示す。

- a) 地下水の主な流動方向に直交するEW系断層の透水性が低いケース(EW13), および主な流動方向に並行するNNW系断層およびNW系断層の透水性が高いケース(NNW6, NW6)は、移行経路長に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。これらのことは、基本ケースではEW系断層を通過し下流側境界へ移行しているパーティクルが、EW系断層の透水性が低いために断層を通過せずに側方境界へ移行していること、また、NNW系断層およびNW系断層の透水性が高いケースにおいては、基本ケースの主な流動方向に直交する断層部において地表方向へ上昇していたパーティクルが、高透水性の断層に沿って下流方向(南方向)へ移行していることが原因と考えられる。
- b) 地下水の移行時間については、地下水の移行経路長の場合と同様に地下水のおもな流動方向に直交するEW系断層の透水性が低いケース, および主な流動方向に並行するNNW系断層およびNW系断層の透水性が高いケースにおいて影響が大きいことが明らかとなった。基本ケースと比較してEW系断層の透水性が低い場合に移行時間が短くなることは、基本ケースでEW系断層を通過していたパーティクルが、EW系断層の透水性が低いことにより断層を通過せず、側方境界に移行したことが原因と考えられる。また、移行時間が長くなることは、基本ケースではEW系断層に沿って地表方向へ上昇していたパーティクルが、EW系断層の透水性が低くなったことによりEW系断層北側の水頭分布が変化し、このパーティクルがEW系断層に沿って東北東から西南西に水平方向に移行していることが原因であると考えられる。
- c) 側方境界条件が”no_flow”(図22,23)の場合、地下水の移行経路長および移行時間に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

(2) 予測結果の評価方法

第1段階に予測する地下水流動の評価は、第2段階の研究坑道の掘削で遭遇する岩盤の水理特性、および研究坑道の掘削に伴う地下水流動の変化との比較により行う。具体的には、構築した水理地質構造モデルにもとづき、研究坑道の掘削に伴い遭遇する岩盤の水理特性を予測するとともに、構築した水理地質構造モデルにもとづき地下水流動解析を行い、研究坑道の掘削に伴う地下水流動の変化(地下水圧の変化、研究坑道への湧水量など)を予測する。これらの予測結果と研究坑道の掘削に伴って行われる調査・試験、および研究坑道周辺の試錐孔に設置した試錐孔における地下水圧のモニタリングなどの結果と比較する。

平成12年度までに、予測手法や予測結果の評価手法についてのひとつの事例であるスウェーデンHRL (Hard Rock Laboratory)プロジェクトに関する文献調査(Rhén et al., 1997)を行った。また、研究坑道の掘削に伴い遭遇する岩盤の水理特性の予測および研究坑道掘削に伴う地下水流動の変化の予測は、構築された水理地質構造モデルおよびそのモデルを用いた地下水流動解析にもとづき行うこととなる。そのため、「研究成果の統合化」の中で、水理地質構造モデルの構築および地下水流動解析にいたるまでのデータフローを、第1段階第1フェーズの研究成果にもとづき例示するとともに、水理地質構造モデルの構築に必要とされるデータセットの項目を概括的に整理した。

図13 研究実施領域周辺におけるおもな地下水観測の位置

図14 正馬川モデル流域地下水位変動および林外降雨量

図15 水理試験の手順

図16 水理試験における圧力変化

表2 水理試験結果

表3 水理試験結果

図17 本計画用地における水理・気象パラメータの観測

表4 地下水流動解析に使用した水理物性

図18 地下水面と地表標高の関係

図19 初期位置

表5 地下水流動解析ケース

図20 解析領域の全水頭分布

図21 パーティクルトラッキングによる地下水の移行経路

図22 地下水の移行経路長のバラツキ分布

図23 地下水の移行時間のバラツキ分布

6. 地下水の地球化学に関する調査・研究

6.1 目標

第1段階第2フェーズでは、研究実施領域における深部地下水の地球化学特性の3次元の分布を把握し、水-岩石反応試験や理論解析などの結果とあわせて地球化学モデルを構築することを目標としている(サイクル機構, 2000a)。

平成12年の目標は、地表水および降水、MIU-4号孔における地下水、固相を対象とし、地球化学特性データを取得することである。また、これらのデータを用いて研究実施領域における深部地下水の地球化学特性の3次元の分布を推定したのちに、地球化学モデルを構築することを目標としている(サイクル機構, 2000b)。

6.2 実施内容

平成12年度においては、地表水および降水、MIU-4号孔における地下水、固相を対象とした地球化学特性データを取得した。

6.2.1 地表水・降水を対象とした地球化学調査

降水については、本計画用地内の気象観測地点(図24)に降水採取装置(嶋田・三條, 1987)を設置し、1か月間の降水を採取した。採取した降水については表6に示す項目の分析・測定を行った。観測期間は平成12年7月～平成13年3月である。河川水については本計画用地内の河川流量観測地点において1回/月の頻度で河川水を採取した。河川水の採取にあたっては、直近の降雨から2日以上経過することを条件とし、可能な限り降水の河川水水質への影響を排除した。分析項目、観測期間については降水と同様である。

① 降水

観測結果の例として、降水中のトリチウム濃度の測定値と降雨量を図25に示す。降水中のトリチウム濃度は観測期間中を通じて3.5 TU以下であり、降雨量とはおおむね負の相関を示している。

② 河川水

正馬川の河川水中のトリチウム濃度は、4～5.5 TUであり(図26)、河川流量との相関は認められなかった。降水中のトリチウム濃度と比較すると、計数誤差(0.2 TU)を考慮しても河川水中のトリチウム濃度が高い値を示している。このことは、瀬戸層群など表層の未固結層に一旦貯留された降水が、河川水となっていることを示すと考えられる。

6. 2. 2 地下水を対象とした地球化学調査

平成12年度は、MIU-4号孔において地下水の採水・分析を実施した。MIU-4号孔においては、水理試験(揚水試験)と地下水採水を組み合わせ実施したほか、試錐掘削水や地下水の化学分析を現場において実施するなどの改善を行った(JNC, 1999)。本報告書では、瑞浪層群/土岐花崗岩不整合直上部(掘削長82.50~88.65 m)を対象にした地下水採水および各種分析結果について報告する。

MIU-4号孔においては、掘削長88.65 mで試錐掘削を停止し、シングルパッカー式で試験区間を設定した。定流量揚水試験中には地上において、地下水の物理化学パラメータの連続測定を行った。また、定期的に地下水の化学分析も実施した。定流量揚水試験は地下水中の蛍光染料(Amino G acid:図27)濃度が、試錐掘削水中に添加した濃度に対して1 %以下になるまで継続した。定流量揚水試験の終了直前に、各種分析を行うための地下水採取を実施した。

掘削長82.50~88.65 m区間での地下水採水における結果は以下のとおりである。

- ① 定流量揚水試験においては蛍光染料濃度が揚水量の増加とともに徐々に減少し、定流量揚水試験の終了時には0.6 % (0.3 ppm)に減少した。
- ② pH,電気伝導度, 溶存酸素量, 温度などの物理化学パラメータは一定の値となった。しかし、酸化還元電位は揚水速度が小さい(300 ml/min)ために揚水試験終了直前においても低下する傾向が認められた(図28)。
- ③ 蛍光染料の濃度と主要な化学成分(とくに Na^+ , K^+ , Cl^- , F^- , アルカリ度)とは直線的な相関を示す(図29)。図29の直線の外挿による計算値と実測値はほぼ一致していた。
- ④ 地下水のタイプは Na^+ - HCO_3^- 型(表7)であり、これまでに東濃鉦山周辺で得られた知見(サイクル機構, 1999a)と矛盾がない。

6. 2. 3 固相を対象とした地球化学調査

地質・地質構造に関する調査研究で行う固相を対象とした岩石学的調査, 鉱物学的調査, 地球化学的調査, 年代測定の結果を基礎情報として地下水水質形成を支配する主要な水-岩石反応メカニズムの抽出, 地下水滞留時間の補正を行う。

平成12年度においては、MIU-4号孔の試錐調査で得られた岩芯試料の採取, 前処理を実施した。岩石の地球化学調査などは平成13年度に実施する予定である。

6. 2. 4 モデルの構築

(1) 化学組成の推定および地下水の地球化学モデルの構築

研究実施領域においては、平成12年度から開始したMIU-4号孔における試錐調査において地下水の採水・分析を行うとともに、平成13年度に計画している長期揚水試験とあわせて、既存の試錐孔において採水・分析を行う計画である。

今後、研究実施領域における地下水の地球化学特性に関する情報の蓄積に応じて、地下水の地球化学データを用いた多変量解析による地下水の化学組成の分類を行うとともに、化学組成の分類結果から地下水の水質形成を支配する水-岩石反応メカニズムを考察し、固相を対象とした地球化学調査結果ともあわせて、研究実施領域における地下水の

地球化学特性の3次元分布を推定する計画である。また、これらのデータを取りまとめ、地下水の地球化学特性の3次元分布に、地質構造要素を加味した地球化学モデルを構築する。さらに、研究坑道の掘削に伴う地下水流動の変化の予測結果と地球化学モデルを利用して、地下水の地球化学特性の変化予測を行っていく予定である。

(2) 予測結果の評価方法

第1段階に予測する地下水の地球化学特性の評価は、第2段階の研究坑道の掘削で遭遇する地下水の地球化学特性、および研究坑道の掘削に伴う地下水の地球化学特性の変化との比較により行う。具体的には、構築した地下水の地球化学モデルにもとづき、研究坑道の掘削に伴い遭遇する地下水の地球化学特性を予測するとともに、構築した地下水の地球化学モデルにもとづき地下水の地球化学特性の予測および研究坑道の掘削に伴う地下水の地球化学特性の変化を予測する。これらの予測結果と研究坑道の掘削に伴って行われる調査・試験などの結果と比較する。

平成12年度までに、予測手法や予測結果の評価手法についてのひとつの事例であるスウェーデンHRL (Hard Rock Laboratory)プロジェクトに関する文献調査(Rhén et al., 1997)を行った。また、「研究成果の統合化」の中で、地下水の地球化学シミュレーションにいたるまでのデータフローを、第1段階第1フェーズの研究成果にもとづき例示するとともに、水理地質構造モデルの構築に必要とされるデータセットの項目を概括的に整理した。

図24 雨水・河川水採取地点
表6 分析項目および分析方法

- 図25 降水中のトリチウム濃度
- 図26 河川中のトリチウム濃度
- 図27 アミノGの構造式

図28 定流量揚水試験中の流出量における物理化学パラメータの測定

図29 蛍光染料と主化学成分の関係

表7 化学成分

7. 岩盤の力学特性に関する調査・研究

7.1 目標

第1段階第2フェーズでは、土岐花崗岩体を例として、結晶質岩中に掘削した空洞の短期・長期にわたる物理的安定性や地下深部における空洞掘削に伴う応力集中による坑道周辺岩盤の破壊現象など、岩盤の力学的挙動を予測・調査・評価する手法およびそれらを合理的かつ的確に研究坑道の設計・建設へ反映するための技術を構築することを目標としている(サイクル機構, 2000a)。

平成12年度の目標は、平成11年度までに取得したデータ(試錐調査はMIU-1～3号孔)を用いて、岩盤力学モデルを構築するとともに、MIU-4号孔の試錐調査により得られた新たなデータと、構築した岩盤力学モデルとの比較を随時行うことである(サイクル機構, 2000b)。また、MIU-2号孔までのデータを用いて構築した岩盤力学モデルにより、研究坑道掘削に伴う周辺岩盤の挙動などの予備的な検討を行うことを目標としている。

7.2 実施内容

平成12年度においては、MIU-4号孔の岩芯を用いた物性試験(物理試験, 力学試験)および初期応力測定(AE法)を行うとともに、花崗岩中(MIU-1～3号孔)の割れ目を対象としたジョイントせん断試験を行った。また、平成11年度までに取得したMIU-2,3号孔のデータを用い、月吉断層をはさむ断層上盤と下盤の岩盤内部の強度・変形や初期応力状態を表す岩盤力学的概念モデルを構築するとともに、研究坑道掘削による施設周辺における岩盤の変形挙動などの予備解析を実施した。

7.2.1 力学特性調査

MIU-4号孔の岩芯を用いた力学特性調査は現在、実施中であるため、本報告書では、MIU-1～3号孔の割れ目を対象に実施したジョイントせん断試験の結果について報告する。

土岐花崗岩のような硬岩では、岩盤中に内在する割れ目(ジョイント)が岩盤としての挙動を支配するため、その力学的特性を評価する必要がある。このため、本試験では、釜石原位置試験で実施したジョイントせん断試験結果で得られた知見、AN-1, MIU-1号孔およびMIU-2号孔の力学特性調査結果にもとづき構築した月吉断層上盤側の岩盤力学的概念モデルを参考とし、対象岩盤中に存在する割れ目をいくつかの観点から分類・整理し、それにしたがってジョイントのサンプリングおよび室内試験を実施した。具体的には、BTV調査で観察された割れ目を、割れ目の幾何学特性、形状、介在物の有無およびそれに採取深度などを加えた5つの観点から分類・整理した。なお、ジョイントの幾何学的性質を考慮する観点から、BTV調査結果にもとづき、その深度、方向を決定できるものをサンプリング対象とした。試験手順は図30に示すとおりで、ISRM指針に準拠した形で実施している。試験結果を図31に示す。特徴としては、せん断試験の結果、3つのタイプの荷重～変位曲線が得られ、とくに分類⑤(ジョイントの角度:高角度, 形状:Pタイプ, 充填物:あり)の場合はtype-2の荷重変位曲線となることなどの結果が得られた。また、本試験結果にもとづき、表

8に示すようなBarton-Bandisモデルのパラメータを決定した。今後は、さらに試験結果を詳細に分析するとともに、本試験結果から決定された割れ目の力学特性に関する情報を加味した形で、研究坑道掘削に伴う力学的影響に関する予測解析を実施していく予定である。

7. 2. 2 モデルの構築および解析

(1) 月吉断層上盤側岩体の岩盤力学的概念モデル

1) MIU-2号孔までの調査結果にもとづく概念モデル

MIU-2号孔においては、AN-1,MIU-1号孔と同様に、深度方向に一様でない物性値分布や応力状態が得られた。とくに、主応力方向の変化は複雑であり、これは断層に近づいたことによる影響と考えられる。また、変化点の深度も物性と応力状態や主応力方向の変化点がほぼ一致している。図32(b)にMIU-2号孔のBTV調査より得られた割れ目数の深度分布を示す。この結果においても、図32(a)と同様に深度400 mと700 mの地点で割れ目数が不連続的に変化しており、かつ割れ目数の変化の傾向はMIU-1号とほぼ同様であった。これらの結果は、MIU-2号孔地点の断層上盤側岩体の領域も3つの異なる力学特性を有するゾーンから構成されることを示しており、AN-1号孔およびMIU-1号孔の調査結果から想定したモデルと定性的には矛盾しないものと判断した。また、MIU-2号孔付近の応力状態が複雑であったことから、この結果を説明しうる可能性のあるモデルとして、図33に示す調査領域の断層上盤側の岩体モデル(サイクル機構, 2000d)を構築した。このモデルは、断層上盤側の岩体を構成する3つの力学物性の異なるゾーンが、広域的な応力場により月吉断層に押しつけられている変形モードを意味している。

2) MIU-3号までの調査結果にもとづく概念モデル

図32(c)にMIU-3号孔における割れ目数の深度変化を示す。図32(a),(b)と同様な傾向が認められるが、MIU-1, 2号孔ほど深度方向に割れ目数の疎密のコントラストがない。とくに、MIU-2号孔までは割れ目数が少ない深度300~700 m程度までの領域の割れ目数が増加している。しかし、試験点数は少ないものの、MIU-3号孔における物性値分布も深度300 mまでと深度300 m~断層部まででその変化の傾向が異なっており、その物性値分布の変化点は、MIU-3号孔における割れ目数の疎密が変化する深度とほぼ一致している。MIU-3号孔地点の応力状態も、MIU-2号孔と同様複雑な主応力の回転傾向を示している可能性がある。これらの結果は、図33に示すMIU-2号孔までの調査結果にもとづき構築した概念モデルと矛盾しないため、同モデルは月吉断層上盤側岩体の概念モデルとして妥当と判断した。

(2) 月吉断層下盤側岩体の岩盤力学的概念モデル

断層下盤側岩体に関する情報としては、MIU-2号孔の深度900 m以深、MIU-3号孔の深度700 m以深で取得されているのみであるため、東濃鉱山で実施した初期応力測定および本計画用地北側境界より約700 mの位置で行われたDH-9号孔(広域地下水流動研究において掘削された試錐孔)における試錐調査結果を追加した。図32(d)にDH-9号孔におけるBTV調査(サイクル機構, 1999b)により得られた割れ目数の分布を示す。断層上盤側に比べると、同一の精度で計測しているにもかかわらず、割れ目数は半分以下しか存在しない。図34は東濃鉱山における応力測定結果(サイクル機構, 1999c)を示したものであるが、土岐花崗岩部の測定結果をみると、月吉断層の上盤側から下盤側に向かうにつれ、明らかに応力値が減少する傾向を示す。これは、MIU-3号孔における初期応力測定結果で得られた断層上盤側と下盤側の応力状態の違いと同様の結果である。以上のことから、断層下盤側の岩体の応力値は、少なくとも調査対象領域北側境界付近では上盤側と比べかなり小さくなっている可能性が高い。岩石物性については、MIU-2,3号孔および東濃鉱山の室内試験結果から、ほぼ上盤側と同程度であることが推定されるが、割れ目数が少ないため、原位置岩盤の力学物性は上盤側よりも高いことが想定される。これらの結果から、現段階で想定される月吉断層下盤側岩体の力学的概念モデルを図35に示す。

(3) 研究坑道建設による施設周辺岩盤の変形挙動などの予備解析

研究坑道建設による施設周辺岩盤の変形挙動などの概略的な検討を目的として、境界要素法による3次元弾性解析を実施した。この解析は、「超深地層研究所 地下施設の設計研究(平成10年度)」(サイクル機構, 1999e)に示される坑道レイアウト(案)(図36)について、とくにスパイラル坑道などの複雑な坑道レイアウトが周辺岩盤の変形挙動に与える影響に着目している。使用した解析コードは「Examine3D (Rockscience社)」である。本コードは、等方弾性体のみを扱え、断層のような不連続構造や支保効果は考慮できないものの、汎用パソコンで解析が可能であり、かつCADソフトと同様のインターフェースにより複雑な坑道レイアウトを比較的簡単にモデル化できること、海外の同種の研究での適用実績(例えばSjoberg and Radberg, 1994)があることなどから本コードを用いた。

解析に必要な岩盤モデルおよび境界条件は、AN-1, MIU-1号孔およびMIU-2号孔における力学特性調査結果で得られた知見を反映し設定した。岩盤物性値は、原位置岩盤の力学物性(弾性係数, ポアソン比)が内在する不連続面の影響を受けていることを考慮し、原位置におけるP波速度検層結果などから決定したものの(図37, 表9)を用いた。また、応力境界条件は、3主応力方向を鉛直および水平面内とし、応力値を本計画用地南側境界付近に位置するAN-1号孔における測定結果を線形補間して与え、その作用方向は広域応力場の方向(NW方向)としている。さらに、最終的な研究坑道配置が今後の研究の進展に伴い変更されることも想定されたため、水平面内最大主応力方向(NW方向)に対して坑道展開方向を回転させた解析ケースも設定した(表10)。

図36に示す坑道レイアウトにもとづいて実施した解析結果によると、坑道壁面上での最大応力値は、主立坑部で90 MPa, 副ステージ研究坑道において50 MPa, スパイラル坑道および主要ステージ研究坑道で130 MPaである。一軸圧縮強度を120 MPaとすると、主立坑深部(GL-800 m以深)および主要ステージ研究坑道・スパイラル坑道の壁面上で地山強度比が1.0に近いつまり岩盤が破壊する可能性がある領域が広がっている(図38)。坑道壁

面上での最大変位量およびひずみは、主立坑深部で1.2 cm, 0.003と最も大きく副ステージおよび主要ステージ研究坑道で0.6 cm, 0.003となっている(図39)。研究坑道周辺の変位分布に関しては、大きな変位が生じる領域は最大主応力の作用方向(NW方向)とほぼ直交する方向に延びており、かつスパイラル坑道の影響により変位分布が不連続に大きくなっている。

坑道展開方向を変えた場合の解析結果(表11)によると、研究坑道掘削時の坑道壁面およびその周辺の応力状態が最も高くなるのは、最大主応力方向とほぼ直交する方向に水平坑道を延長した場合である(初期応力を45°回転したケース)。このような場合には、坑道掘削に伴う周辺岩盤中の力学的影響の程度や範囲が最大になることが想定される。

本解析は、現在把握されている力学的に重要な要素(月吉断層、割れ目の幾何学特性に依存する原位置岩盤の力学的物性の異方性)を考慮できていないため、平成13年度以降に実施する研究坑道掘削に伴う周辺岩盤中の力学的影響に関する予測解析では、それらの要素を考慮するモデルを用いた解析を実施する予定である。

(4) 予測結果の評価方法

第1段階に予測する岩盤の力学特性の評価は、第2段階の研究坑道の掘削で遭遇する岩盤の力学特性、および研究坑道の掘削に伴う岩盤の力学特性の変化との比較により行う。具体的には、構築した岩盤力学モデルにもとづき、研究坑道の掘削に伴い遭遇する岩盤の力学特性を予測するとともに、構築した岩盤力学モデルにもとづき予測解析を行い、研究坑道の掘削に伴う岩盤の力学特性の変化(応力分布、変位など)を予測する。これらの予測結果と研究坑道の掘削に伴って行われる調査・試験などの結果と比較する。

研究坑道の掘削に伴い遭遇する岩盤の力学特性の予測および研究坑道掘削に伴う岩盤の力学特性の変化予測は、構築された岩盤力学モデルおよびそのモデルを用いた予測解析にもとづき行うこととなる。そのため、平成12年度、「研究成果の統合化」の中で、岩盤力学モデルの構築および予測解析にいたるまでのデータフローを、第1段階第1フェーズの研究成果にもとづき例示するとともに、岩盤力学モデルの構築に必要なとされるデータセットの項目を概括的に整理した。

図30 試験フロー
表8 パラメータ

図31 垂直剛性

図32 BTVにより検出された50 m区間長ごとの割れ目数
図33 月吉断層上盤側の岩盤力学的概念モデル

- 図34 東濃鉦山における水圧破碎法による初期応力測定結果
図35 調査対象領域近傍の断層下盤側岩体モデル

図36 超深地層研究所坑道レイアウト

図37 P波速度とS波速度の関係

表9 解析に用いる岩盤物性値

表10 側圧係数

図38 地山強度比2.0以下の領域の発生位置
図39 0.002以上の最大ひずみが生じる領域

表11 各坑道展開方向の坑道周辺の変位分布

8. 物質移動に関する調査・研究

8.1 目標

第1段階第2フェーズでは、土岐花崗岩体を例として、結晶質岩中における物質の移行・遅延特性の把握およびそれらを合理的かつ的確に評価する調査・解析技術を構築することを目標としている(サイクル機構, 2000a)。

平成12年度の目標は、岩芯試料を用いて、物質移行特性に関する基礎情報(鉱物学的特性、空隙特性、収着・拡散特性など)を取得し、データセットとして整備することである(サイクル機構, 2000b)。

8.2 実施内容

平成12年度は、MIU-4号孔を対象に予定している物質移行特性に関する基礎情報の取得について、品質管理されたデータセットの構築を行うために、試料調整に関する基礎実験および透水性割れ目の同定・分類に関する基礎調査を行った。

8.2.1 室内調査・分析

試料調整に関する基礎実験

物質移行特性、とくに鉱物学的特性や地球化学的特性を取得するためには、分析手法に応じて岩芯試料の粉碎を行う必要がある。しかし、粉碎機器によっては、材質の汚染が認められる場合があり、原物質の化学組成が2次的に変化してしまう可能性がある。そこで、粉碎に使用される代表的な3種類の粉碎器(タングステンカーバイド製ボールミル、ステンレス製乳鉢、メノウ乳鉢)を用いて、化学組成濃度の汚染評価に関する基礎実験を行った。サイクル機構および広島大学で実施した蛍光X線分析結果および湿式分析の結果を表12に示す。本分析の結果、メノウ乳鉢を除き、粉碎器の材質が原因と思われる汚染および汚染の程度が明らかになり、以下の理由により、本研究の実施においては、タングステンカーバイド製ボールミル(もしくは乳鉢)の使用が最も適切であると結論づけられた。

- a) メノウ乳鉢は、ほとんどの元素について材質の汚染が無視できるが、本研究の対象となる花崗岩のような硬質な岩石では破損の恐れがある。
- b) ステンレス製乳鉢は、評価上重要な元素である鉄の汚染が認められる。

透水性割れ目の同定・分類に関する基礎調査

物質移行特性を適切に評価するためには、透水性割れ目を同定し、透水性に関連した分類手法を確立する必要がある。本基礎調査においては、MIU-4号孔における適用を目指し、MIU-1,2,3号孔における物理検層およびBTV調査の結果を用い、以下の予察的調査を行うことにより、透水性割れ目の同定・分類手法の構築に向け、その実施可能性を検討した。

- a) 流体検層により同定された高透水性区間の同定およびその区間における物理検層値との比較
- b) BTV調査結果を用いた割れ目頻度、および割れ目の開口量の解析

以上の予察的調査の結果、流体検層により同定された高透水性区間(透水係数: 10^{-6} m/secオーダー)においては、自然放射線(ガンマ線)検層、中性子検層、密度検層および孔径(キャリパー)検層も同様に変化し、割れ目の開口量が著しく増加している関係が明らかとなった。このような結果から、上記の2つの手法を統計学的に解析することにより、流体検層において反応がない区間、すなわち 10^{-7} m/secオーダー以上の透水性割れ目を同定・分類することが可能であることが推察された。

8. 2. 2 天然放射性核種を利用した研究

平成12年度の実施計画書においては、長期間にわたる物質の移行・遅延特性を把握する目的で天然放射性核種や希土類元素の分布調査などに関する地球化学的調査の実施を予定していた。しかし、MIU-4号孔における試錐調査の遅れなどにより、これらの試験・研究は平成13年度に透水性割れ目およびその近傍岩盤におけるマトリックス拡散のデータ取得を目的として実施する計画である。

表11 蛍光X線分析および湿式分析結果

9. 調査技術・調査機器の開発

9.1 目標

第1段階第2フェーズでは、清水を用いた試錐技術、深度約1,000 mまでの地質環境を対象とした地下水調査技術、割れ目の分布や掘削影響領域を(非破壊で)把握するための物理探査技術の開発と改良をおもな目標として、各研究分野で必要とされる調査技術・調査機器を開発することとしている(サイクル機構, 2000a)。また、開発された個々の調査・解析・評価技術の汎用性について検討し、適用条件や適用範囲を明確にすることを目標としている。

平成12年度の目標は、平成11年度までに開発の終了していない調査・解析・評価技術および調査機器の開発を行うことである(サイクル機構, 2000b)。また、開発された個々の調査・解析・評価技術および調査機器については、その汎用性について検討し、適用条件や適用範囲を明確にすることを目標としている。

9.2 実施内容

平成12年度は、東濃地科学センターがこれまで開発してきた調査技術・調査機器を含めた既存の調査技術・調査機器を適用し、データの精度や調査機器の信頼性などが各研究分野の要求に達しない場合、それらの改良・高度化を図った。また、坑道の掘削を伴う研究段階以降に必要となる調査手法の開発を行った。

9.2.1 地質構造調査技術開発

これまでに実施した反射法弾性波探査の再解析結果など、地質構造の空間的な広がりを把握するために適用した手法の予備的な評価と取りまとめを行うとともに、MIU-4号孔における試錐調査における岩芯観察結果、BTV調査結果および物理検層結果などの新たな調査の結果を順次吟味し、それらの相互比較と組み合わせの検討をとおして、水みちなどの特定、割れ目の分布とその幾何学的特性などを把握するための調査技術の適用条件や適用範囲を整理した。

9.2.2 地下水の水理特性・地球化学特性調査技術開発

(1) 1,000 m対応水理試験装置, 1,000 m対応地下水の地球化学特性調査機器の改良・高度化

これまでに、地表から地下深部までの水理特性・地球化学特性に関する信頼性の高いデータを取得するため、1,000 m対応および高温(70度)対応の水理試験装置,地球化学特性調査機器を開発した。また、屈曲孔に対応させるための改良を行うとともに、水理試験装置には、試験区間の密封性を確認するために、ダブルパッカーの上下の水圧を試験中に測定できるよう改良した。

平成12年度は、遮水性向上のために検層ユニットの水回路と水理試験装置光ケーブルコネクタを改良した。また、MIU-4号孔では、この斜孔対応の水理試験装置を用いて、挿

入・回収時の衝撃から装置を保護するとともに、試験区間の密封性を担保した信頼性の高い水理データを取得した。

(2) 1,000 m対応揚水試験装置の改良・高度化

これまでに、試錐孔周辺の広範囲における水理特性に関するデータを取得するための揚水試験装置を開発し、改良した。

平成12年度は、揚水ポンプの直上にパッカー機能を新たに付加し、井戸貯留の影響を小さくし、揚水試験時間の短縮化を目指すとともに、試験方法と取得データの評価を行った。

(3) 水理試験データの解析手法の高度化

これまでに、単孔式水理試験の解析手法高度化の一環として、これまでおもに水位低下量や揚水流量の非定常挙動に関する理論解析解の誘導をもとに、高精度な水理特性の評価を可能とする解析手法の開発を実施してきた。

平成12年度は、これまでの成果の現場試験への適用を行った。具体的には、取得データの品質保証の観点から適切な試験手法の選択、効率的な試験条件・手順の設定、適切なデータ解析などを組み合わせた一連のプロセスをMIU-4号孔の試錐調査に適用し、その実用性を検討した。MIU-4号孔の試錐調査に採用した水理試験の手順(図15)では、水理特性評価に最適な試験データの識別および取得をするうえで、観測データの時間微分プロットが有効であることを確認した。

9. 2. 3 岩盤の力学特性調査技術開発

1,000 m対応初期応力測定装置の開発に関して、岩盤の初期応力は地質環境のデータのひとつであるとともに、超深地層研究所計画における地下施設の設計の最適化や安定性の評価あるいは坑道掘削による影響を数値解析で評価する際の境界条件として不可欠である。

一般に用いられている初期応力測定手法は、水圧破碎法や応力解放法などの試錐孔を利用する方法と、AE法やDRA法などのコアを利用する方法がある。それぞれの手法は、実用段階から研究開発段階までの様々なレベルにあるとともに、測定・解析するうえでの制約条件があること、さらには適用深度についても制限がある。このため、深度1,000 mにおける3次元初期応力を求めることができる信頼性の高い方法は現状では存在しない。

これまでに、深度1,000 mを対象とした3次元初期応力を測定する手法を確立することを目的とし、国内外の研究事例を対象とした文献調査、調査結果にもとづく手法の選定、装置の概念設計および技術的な課題について検討した(佐藤・加藤, 1998)。その検討結果にもとづき、装置の設計および装置のうちのひずみゲージセル(SIセル)と耐压容器を製作した。

平成12年度は、これまでに製作していた装置の残りの部分を製作し、装置のプロトタイプを完成させるとともに、装置の機能確認試験を実施した。大深度3次元応力測定装置に関して製作した残りの装置は、レコーダー、方位・傾斜測定装置およびひずみゲージを孔壁に接着するためのグリューカプセルである。レコーダー部は、SIセルの方位・傾斜(2成分)・温度およびオーバーコアリング時のSIセルで測定されるひずみ時間変化(8成分)、測定時

刻を記録するメモリー部である。また、SIセルについても、前年度製作したものに再度検討を加え改良を施した。

機能確認試験は、平成12年度までに製作したパーツを組み上げ、大深度対応3次元応力測定装置のプロトタイプを製作し、同装置が正常に機能するか(おもにレコーダー部)を室内実験にて確認することを目的として実施した。方位・傾斜計については個別に野外にて精度確認試験を実施した。10 t 載荷途中のSIセルのひずみ変化などをデータロガーおよびアップパーセルを用いて記録した結果を図40に示す。両図を比較すると、各ひずみゲージのピーク値は両者とも同じ値であり、アップパーセルは正常に動作していることがわかる。また、オーバーコアリング時のひずみ変化を前述と同様にデータロガーおよびアップパーセルを用いて記録した結果を図41に示す。この図より、Ch7の動きがやや異なっているが、試験供試体やSIセルが異なることを考慮するとアップパーセルはデータロガーとほぼ同等の性能を有するといえる。オーバーコアリングにより取り出したコアの切断面を図42に示す。これより、セルと供試体は完全に接着していることがわかる。平成13年度は平成12年度までに製作した装置を用いた原位置での性能試験を実施する。

9. 2. 4 第2段階以降に必要となる調査技術・調査機器の開発

(1) 連続波レーダー調査技術開発

既存のレーダートモグラフィ調査が適用されるスケールは、一般に数10 m 程度が限界であるが、信号に連続波を採用することにより探査距離を飛躍的に拡大できる可能性がある。これまでに、連続波レーダー実験機を試作し、アンテナ特性の取得など基礎試験を実施した(サイクル機構, 1999d, 2000e)。

平成12年度は、探査距離の拡大と空間分解能の向上の両立をはかるため、合成開口処理や存否セプストラム解析の適用研究を実施するとともに、通常地下レーダーの卓越周波数より低く距離減衰の少ないサブメガヘルツ帯域用の、時間区間蓄積型汎用データロガーの開発を行った。

(2) 正弦波水理試験システムの開発

平成11年度までに、2孔間および3孔間での試験装置の製作を終了し、釜石鉱山における原位置試験研究に活用した(竹内ほか, 2000)。

平成12年度においては、孔間の不均質場を推定するための解析手法の開発の基礎的な研究として、孔間試験(正弦波水理試験)を模擬した数値実験を行った。その結果、発信孔から方向をかえた2本以上の観測孔を設置することにより、孔間に存在している不均質部分の特性を把握できることが示唆された。

(3) トモグラフィデータの解析手法の高度化

弾性波トモグラフィ調査において、現在実用化され広く用いられている調査方法は、弾性波の伝播時間を観測量として調査対象領域の弾性波速度分布を再構成する初動走時トモグラフィである。初動走時トモグラフィの分解能は波長の平方根に比例する第1フレネルゾーン(通常は波長よりやや大きい)の大きさ程度といわれており(土屋, 1997), 平成10年度(AN-1,3号孔)および11年度(MIU-1,2号孔)に実施した孔内スパーカー振源の適用試験の実績から、土岐花崗岩を対象としてスパーカー振源を用いた場合のトモグラフィ調査の分解能は5 m程度であると考えられる。

第2段階以降に実施される弾性波トモグラフィ調査についてはさらに高い分解能が求められるため、調査(解析)手法として弾性波の受振波形全体を観測量として解析を行うフルウェーブインバージョン解析の研究を実施している。これまでにフルウェーブインバージョン解析法を用いて実データの解析を行い、本解析法が実データへ適用できる可能性が得られているが、解析結果の信頼性などさらなる検討が必要であることがわかった。平成12年度は、フルウェーブインバージョン解析コードおよび実データ解析断面の設定方法について見直しを行い、一部修正を加えて実データの再解析を行った。

フルウェーブインバージョン解析コードについては、速度構造を反復解法により逐次修正する式に一部改良を加えて、安定した計算の収束が得られるようにした。また、実データの解析断面(2次元断面)の設定については、ボーリング孔の座標データ(孔口の高低差や孔曲がり情報)を可能な限り正確に反映するようにした。AN-1,3号孔で取得されたデータの再解析の結果において、それほど大きな速度コントラストは認められないが、AN-1号孔の深度92 m~104 mからAN-3号孔の深度114 m~130 mにかけて低速度帯が認められる。本構造は、これまでに実施された各種地質構造調査の結果と調和的であり、最初の解析(平成11年度に実施)では明瞭に認められなかったものであることから、今回の解析方法を一部見直した成果が現れたものと考えられる。

9. 2. 5 データベースの構築

平成12年度は、調査データ用データベースシステムの開発として、データベースに最終的に登録する前の入力データの品質を担保するためのマニュアルおよび体制について、基本的な考え方を取りまとめるとともに、あわせて、効果的な運用を図るための運用方法の改良を行った。平成12年度までの開発行為により当初計画した基本的な機能を包含したシステムが完成し、今後は運用を進めるうえで改善を図る。また、新たな開発課題が抽出された場合は再度開発を行うこととする。

平成14年度以降に行われる予定である、地表における地盤の開削工事や研究坑道掘削工事の工程管理・記録用データベースについては、第2段階に取得する地質環境の変化に関する情報の解釈に重要である。そのため、工程管理用データベースシステムの開発については、今後、予定されている地盤の開削や研究坑道掘削工事と第2段階に取得する地質環境の変化に関する情報の解釈を想定し、データベースシステムの開発計画を策定していく。

9.2.6 地質環境データ解析・可視化システムの構築

本計画によりもたらされる地質環境に関するデータにもとづいて地質構造をモデル化し、さらに、地質構造や地下水の流動現象などの地質環境データを解析し、その結果を3次元的に可視化できる計算機システムを開発することは、分野の異なる研究者間の認識の共有化を図ることのみならず、専門家以外への情報提供にも重要な手段となる。平成9年度に開発に着手した地質環境データ解析・可視化システムは、各種データの解析を支援する「Land Mark」、地質構造モデルの構築を支援する「Earth Vision」、地下水流動解析を行う「Frac-Affinity」からなる。

地質環境データ解析・可視化システムを平成10年度より、これらの地質環境データ解析および可視化システムは本計画および広域地下水流動研究における各地質環境モデル構築に利用されている。なかでも、地下水流動解析コードにおいては、解析対象を多孔質媒体と亀裂性媒体の両者を兼ね備えたハイブリッドとして評価することが可能であり、平成11年度には、評価対象を飽和地下水流動解析から不飽和地下水流動解析へと拡張するとともに、立坑掘削影響解析を行うための内部境界条件設定機能を追加し、本計画への対応を図った。一方、本計画における各種データの取得やモデルの構築にともない、この地域の地下水流動を評価するうえで重要と考えられる水理学的特性に関するデータが取得されたことや、コードの仕様を通じてさらなる機能性の向上の必要性が認識されたことにより、解析コードの高度化を平成12年度に実施した。

平成12年度は、① 透水異方性を考慮するための機能の導入、② 亀裂分布推定機能の追加、③ 亀裂情報の出力機能の導入、④ 亀裂交差部の透水性設定機能の追加、⑤ 不均質透水係数場の設定機能の追加、の5項目を中心にコードを高度化し、本計画におけるモデルの構築および地下水流動解析に対して本システムの適用性を高めた。また、これらの機能を確認するための試解析として、個別の機能を確認するための比較的単純な解析と、超深地層研究所計画用地を中心とした場(サイトスケール:約4×6 km)を対象に、追加された機能を総合的に取り入れた飽和定常地下水流動解析を行い、解析コードの適用性を確認するとともに、サイトスケールの定常地下水流動解析としてひとつのモデル計算を実施した。

以上の開発過程を経て当初計画したシステムの基本的な機能が全て満たされた。今後の運用過程で抽出された課題については、適宜改善を図る計画とする。

9.2.7 情報公開技術の開発

VR(バーチャル・リアリティ)システムの構築では、超深地層研究所計画において実施している地層科学研究に対して、一般の方々の理解を得るため、平成9年度よりVRシステムを当計画の情報提供活動の手段として適用を開始し、平成11年度までに、当計画および研究所紹介のためのデスクトップパソコン用の「超深地層研究所の仮想体験」ソフトウェアの製作と改良、およびアミューズメント性を加えたソフトウェアの追加や研究成果を紹介するソフトウェアの製作を実施した。

平成12年度は、研究計画の進捗に伴い具体化した地上施設や地下研究坑道のレイアウト案を反映させる改良を実施するとともに、仮想体験ソフトの整理を行い、計画紹介部分とアミューズメント性を持たせたソフト部分を分離し、選択して体験できるように改良を行った。

また、これまでに開発した「超深地層研究所の仮想体験システム」を多くの方々に利用していただくために東濃鉱山でも体験できるように、コンピュータシステムの追加を行った。さらに、より現実に近い仮想体験を行うために視覚を活用した音響VR技術についての検討を行い、東濃鉱山の地下坑道を利用した音響調査を実施した。

図38 時間-ひずみ

図39 -ひずみ

10. 工学的技術

10.1 目標

第1段階における工学的技術の研究項目は、研究坑道の設計や施工計画構築に関わる技術である。従来の地下施設の設計施工技術と異なり、深地層における地層科学研究を合理的かつ効率的に行うために研究坑道の設計を行い、それと並行して第2段階および第3段階における調査研究の計画を策定する必要がある。第1段階第2フェーズでは、第1フェーズに策定した研究計画(案)について、第1段階第1フェーズで取得されたデータにもとづき詳細に検討を加えることにより、研究計画を見直した結果をもとに研究坑道のレイアウトを具体化し、設計に反映させることを目標としている(サイクル機構, 2000a)。

平成12年度の目標は、坑道の掘削を伴う研究段階および坑道を利用する研究段階に実施する調査・研究項目を明確にし、研究坑道のレイアウトおよび建設スケジュールを策定することである(サイクル機構, 2000b)。また、研究坑道掘削に必要な設備、研究坑道の仕様について決定し、施工計画を具体化することを目標としている。

10.2 実施内容

10.2.1 研究坑道において実施する調査・研究項目の検討

平成12年度は前年度までに抽出した「坑道の掘削を伴う研究段階」および「坑道を利用する研究段階」に実施する調査・研究項目について、それぞれの目的および内容を検討し、超深地層研究所計画において実施する内容を明確にした。

(1) 大深度地質環境下における工学的技術に関する研究

① 研究坑道の設計・施工計画構築技術の研究

設計手法、設計体系の整備および研究の品質を確保する目的で、「坑道の掘削を伴う研究段階」および「坑道を利用する研究段階」に実施される調査・研究の内容を勘案して研究坑道のレイアウトの設定や施工技術の選定を行うことなどにより、研究坑道を設計し、施工計画を構築する。さらに、建設時の調査・計測結果にもとづき設計を見直す考え方を構築する。

② 研究坑道の建設技術の研究

掘削技術・支保工の適用、開発、施工管理システムの開発および前方予知技術の開発を目的に、大深度地下の掘削工法についてショートステップ工法とNATM工法などの適用の比較検討、支保工の選定・開発、前方予知探査手法の適用性について検討する。

③ 施工対策技術の研究

遭遇事象の予測技術開発(湧水、山はねなど)、対策工の開発および地質環境への対策工の影響評価を目的に、坑道掘削に際して遭遇する湧水、山はね現象などの事前予知のための調査・計測項目、その対策工について整理しその適用性の確認、地

質環境への影響を評価する。

④ 安全性を確保する技術の研究

長期にわたる維持補修技術の適用性の確認、管理体系の構築および坑内環境保全システムの適用性の確認を目的に、研究坑道の安全性を確保、管理するための総合的なシステムを構築する(換気システム、防災計画などを含む)。

(2) 処分技術開発の基盤となる工学的技術に関する研究

① 掘削影響の修復・軽減技術の研究

掘削影響修復技術(グラウト後の岩盤挙動研究)、坑道修復技術(埋め戻し後の岩盤挙動研究)および熱-水-応力連成挙動の研究を実施することにより、掘削影響領域や空洞を修復した後の人工材料を含めた岩盤の挙動を評価する。また熱による岩盤の特性の変化など、熱-水-応力連成挙動を評価する。

② 人工材料の岩盤への長期影響評価試験

セメント系材料の岩盤への影響試験、ベントナイト系材料の岩盤への影響試験およびベントナイト-地下水相互作用調査を行うことにより、掘削影響の修復や軽減に用いた人工材料が、坑道周辺の岩盤に与える長期的な影響を把握する。

10. 2. 2 研究坑道掘削に必要な設備、研究坑道の仕様決定および施工計画の決定

「地表からの調査予測研究段階」において取得したMIU-3号孔までのデータにもとづき、研究坑道の支保の設計に適用される解析パラメータを整理し、用地の地質環境条件に適した設計方法選定の考え方についてまとめた。設計方法としては、経験的な設計方法(既存の岩盤分類にもとづく岩盤等級に対応した標準支保パターンを用いる方法と、設計条件が類似した施工実績を参考に支保工の仕様を定める方法)と、解析にもとづく設計方法(理論解にもとづく方法と、数値解析にもとづく方法)を選定した。

建設スケジュールについては、原子力安全委員会(2000)によって報告された高レベル放射性廃棄物の処分にかかわる安全基準・指針などに関するスケジュールをもとに検討し、2009年度までに、換気立坑に設置する昇降設備を利用して見学者が最深ステージ付近まで入坑可能となるスケジュールとした。したがって、2008年度までに、立坑はスパイラル坑道を掘削する深度であるGL-900 m程度までの掘削が完了し、換気立坑は最終到達深度であるGL-950 m程度までの掘削を完了する計画とした。また、2009年度までに、中間ステージは180 m程度、スパイラル坑道は360 m程度の掘削を完了し、深度100 mごとに予備ステージを設け、以前の計画では連絡していなかった立坑と換気立坑について、予備ステージにおいては、両者を連絡するレイアウトに変更した。さらに、施工条件としては、立坑および換気立坑はショートステップ工法により施工し、地表から立坑と換気立坑を同時に掘削開始とする計画とした。

11. まとめ

第2フェーズの初年度にあたる平成12年度は、研究成果の統合化として、第1フェーズの研究成果にもとづいた調査・解析・評価の統合化データフローを構築した。また、MIU-4号孔における試錐調査を実施し、地質・地質構造、地下水の水理、地下水の地球化学および岩盤力学のデータを取得するとともに、地質構造モデル、水理地質構造モデルの構築および地下水流動解析、岩盤力学的概念モデルの構築および研究坑道建設による施設周辺岩盤の変形挙動などの予備解析を実施した。さらに、既存の調査技術・調査機器の改良・高度化を図るとともに、坑道の掘削を伴う調査研究段階(第2段階)以降に必要な調査技術・調査機器の開発を行った。

平成12年度のおもな研究成果は、以下のとおりである。

(1) 地質・地質構造

MIU-4号孔の試錐調査を開始し、本計画用地の研究実施領域北東部における地質・地質構造(明世累層、土岐夾炭累層の分布)および高角度割れ目(帯)の頻度分布(割れ目本数など)に関するデータを取得した。地質構造の連続性を推定するため、平成11年度までに実施した地上物理探査の解析を実施し、新第三紀堆積岩の堆積構造、花崗岩と堆積岩の不整合面の形状、断層を示唆する不連続部を抽出した。地下水流動の解析領域(4 km × 6 km)においては、地形の起伏に加えて、解析領域においてとくに考慮すべき地質・地質構造として、リニアメント判読結果から抽出した断層などを不連続構造要素として取り扱い、モデル化を行った。

(2) 地下水の水理

表層水理調査においては、地下水流動解析の境界条件および初期条件の設定に必要なデータを集積した。深層水理調査においては、MIU-4号孔における水理試験を実施し、水理学的データを取得するとともに、既存試錐孔(99MS-05, AI-4, AN-1,3, MIU-1,2号孔)において、MIU-4号孔の試錐調査に伴う地下水の水圧変化を観測した。その結果、MIU-4号孔試錐調査の掘削影響による既存の試錐孔の水圧変化は観測されないことが明らかとなった。水理地質構造モデルは、Frac-Affinity解析コードにより、地質構造モデルで考慮した地質・地質構造(月吉断層以外の断層を含む)ごとに与えた物性値を用いて構築した。水理地質構造モデルについては、水理学的境界条件および断層の物性値などをパラメータとした解析ケースを複数設定し、感度解析を行った。その結果、地下水の主な流動方向に直交方向および並行方向の不連続構造や水理学的境界条件、地下水面の位置や形状が地下水流動解析結果に与える影響度の高い要因であることが明らかとなった。

(3) 地下水の地球化学

地表水および降水、MIU-4号孔における地下水、固相を対象とした地球化学特性データを取得した。河川水については瀬戸層群など表層の未固結層に一旦貯留された降水が、その起源と考えられる。MIU-4号孔における採水については、掘削水のコンタミネーションを0.6%に抑えることができた。また、研究実施領域においても土岐夾炭累層基底礫岩部における地下水は $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$ 型であることが確認された。

(4) 岩盤の力学特性

MIU-4号孔の岩芯を用いた物性試験(物理試験, 力学試験)および初期応力測定(AE法)を行うとともに, 花崗岩中(MIU-1~3号孔)の割れ目を対象としたジョイントせん断試験を行った。またMIU-2,3号孔のデータを用い, 月吉断層をはさむ断層上盤と下盤の岩盤内部の強度・変形や初期応力状態を表す岩盤力学的概念モデルを構築し, モデルの妥当性を検証した。研究坑道掘削による施設周辺における岩盤の変形挙動などの予備解析では, 坑道レイアウトにもとづいて解析を実施し, 大きな変位が生じる領域は, 最大主応力の作用方向とほぼ直交する方向にのびることが明らかとなった。

(5) 物質移動

物質移動に関する基礎情報の取得について, 品質管理されたデータセットの構築を行うために, 試料調整に関する基礎実験および透水性割れ目の同定・分類に関する基礎調査を行った。その結果, 試料調整に関してはタングステンカーバイド製ボールミルの使用が適していることが明らかとなった。透水性割れ目の同定・分類に関する基礎調査では, 流体検層結果やBTV調査結果を統計学的に解析することにより, 10^{-7} m/secオーダー以上の透水性割れ目を同定・分類することが可能であることが明らかとなった。

(6) 調査技術・調査機器

東濃地科学センターがこれまで開発してきた調査技術・調査機器を含めた既存の調査技術・調査機器を適用し, 改良・高度化を図った。改良および高度化が行われた1,000 m対応水理試験装置を用いて, 試験区間の密封性を担保した信頼性の高い水理データを取得した。また, 坑道の掘削を伴う研究段階以降に必要な調査手法として, 連続波レーダー調査, 正弦波水理試験システムを開発し, トモグラフィデータの解析手法の高度化を実施した。

(7) 工学的技術

「坑道の掘削を伴う研究段階」および「坑道を利用する研究段階」に実施する調査・研究項目について, それぞれの目的および内容を検討した。また, 研究坑道掘削に必要な設備, 研究坑道の仕様に関する検討を行うとともに, 施工計画の策定を行った。

参考文献

動力炉・核燃料開発事業団(1994):日本のウラン資源, 動燃事業団技術資料, PNC TN7420 94-006.

動力炉・核燃料開発事業団(1996):超深地層研究所地層科学研究基本計画, 動燃事業団技術資料, PNC TN7070 96-002.

原子力安全委員会(2000):高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について(第1次報告).

原子力委員会 (1994):21世紀の扉を拓く原子力—原子力の研究, 開発及び利用に関する長期計画—.

井上大栄, 水落幸広, 桜田裕之(1992):リニアメントの断裂系としての特性とその評価, 応用地質, Vol.33, No.3, pp.147-156.

糸魚川淳二(1980):瑞浪地域の地質, 瑞浪市化学博物館専報, No.1, pp.1-50.

Japan Nuclear Cycle Development Institute(1999): Working Programme for MIU-4 Borehole Investigation, サイクル機構技術資料, JNC TN7410 99-007.

Japan Nuclear Cycle Development Institute(2001):An overview of the MIU-4 Borehole Investigations during Phases I and II, サイクル機構技術資料, JNC TN7400 2001-002.

核燃料サイクル開発機構(1998):超深地層研究所—地表からの調査予測研究段階計画—平成10年度, 11年度研究計画書, サイクル機構技術資料, JNC TN7410 99-004.

核燃料サイクル開発機構(1999a):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 分冊1, JNC TN1400 99-021.

核燃料サイクル開発機構(1999b):広域地下水流動研究における試錐調査(その2)(DH-9号孔), サイクル機構契約業務報告書, JNC TJ7440 98-002.

核燃料サイクル開発機構(1999c): 99SE-02孔における水圧破砕法による初期応力測定, サイクル機構契約業務報告書, JNC TJ7430 2000-001.

核燃料サイクル開発機構(1999d):連続波を用いた電磁波調査機器の実験機の製作, サイクル機構契約業務報告書, JNC TJ7410 99-001.

核燃料サイクル開発機構(1999e):超深地層研究所地下施設的设计研究(平成10年度), サイクル機構技術資料, JNC TN1400 99-001.

核燃料サイクル開発機構(2000a):超深地層研究所計画年度計画ー地表からの調査予測研究段階計画ー平成12～14年度計画書, サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2000-001.

核燃料サイクル開発機構(2000b):超深地層研究所計画年度計画書(平成12年度), サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2000-005.

核燃料サイクル開発機構(2000c):広域地下水流動研究の現状ー平成8年度～11年度ー, サイクル機構技術資料, JNC TN7400 2000-014.

核燃料サイクル開発機構(2000d):MIU-2号孔における力学特性調査結果及び月吉断層上盤側岩体の岩盤力学的概念モデル, サイクル機構技術資料, JNC TN7420 2000-001.

核燃料サイクル開発機構(2000e):「連続波レーダー実験機を用いた基礎実験データの取得作業」, サイクル機構契約業務報告書, JNC TJ7420 2000-007.

核燃料サイクル開発機構(2001a):超深地層研究所計画の現状ー平成8年度～11年度ー, サイクル機構技術資料, JNC TN7400 2001-001.

核燃料サイクル開発機構(2001b):超深地層研究所計画年度報告書(平成11年度), サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2001-003.

建設産業調査会(1998):改訂地下水ハンドブック, pp.69-70.

Lee, F.T, Miller, D.R et al.(1979):The relation of stresses in granite and gneiss near Mount Waldo Maine, to strucyure, topograpy and rockbursts: in Gray, K.E. ed., Proceedings 20th U.S. Symposium on Rock Mechanics, Austin, Texas, University of Texas Press, pp.663-673.

松岡稔幸, 武田祐啓ほか(2001):花崗岩分布地域における反射法地震探査の適用例, 日本原子力学会2001年(第39回)春の年会要旨集, p 620.

Nagra(1999):Synthesis of the geological investigations at Wellenberg, Nagra Bulletin, No 32.

緒方正虔(1976):基盤地域における断層の活動性評価—破碎幅および破碎物質の性質—, 応用地質, Vol.17, No.3, pp.30-33.

尾方伸久, 山根正樹ほか(1996):間隙水圧の長期観測による立坑掘削影響の把握について, 地下水学会1996年秋季講演会講演会要旨, pp.34-39.

Rhén, I. et al.(1997): Äspö HRL -Geoscientific evaluation 1997/4. Results from pre-investigations and detailed site characterization. Comparison of predictions and observations. Geohydrology, groundwater chemistry and transport of solutes, SKB Technical Report 97-05.

三枝博光, 稲葉秀雄ほか(1998):東濃地域を対象とした広域地下水流動解析, 動燃事業団技術資料, PNC TN7410 98-004.

三枝博光, 須山泰宏(2000):超深地層研究所計画における地質構造モデルの構築および地下水流動解析, サイクル機構技報, No.9, pp.89-101.

佐藤稔紀, 加藤春實(1998):1,000 m対応の応力解放法による測定装置開発の現状, 資源・素材 '98(北九州), 企画発表・一般発表 (A) 資料, pp.41-44.

嶋田 純, 三條和博 (1987):降水中の安定同位体測定用採取装置について, 第1回日本水文科学会秋季学術大会要旨集. p 30.

Sjoberg, J. and Radberg, G.(1994):Three dimensional numerical analysis of stresses and displacements at the ZEDEX test area, SKB Progress Report 25-94-31.

Stanfors, R. et al.(1997):Äspö HRL -Geoscientific evaluation 1997/3. Results from pre-investigations and detailed site characterization, Comparison of predictions and observations, Geology and Mechanical stability, SKB Technical Report 97-04.

竹内竜司, 仙波 毅ほか(2000):「孔間水理試験装置の開発」, サイクル機構技報No.8, JNC TN1340 2000-003, pp.49-56.

竹内真司, 下茂道人ほか(2001):1000 mボーリング孔を用いた圧力干渉試験による断層近傍の透水性調査, 第31回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.296-300.

土屋輝光(1997):フルウェーブ・トモグラフィの数値実験(1) - V_p/V_s 分布の高精度推定-, 物理探査, 第50巻, 第5号, pp.460-476.

White, M. J. and Olmo, C. del.(1996):The Application of Geological Computer Modelling Systems to the Characterisation and Assessment of Radioactive Waste Repositories, Proc. the International Conference on Deep Geological Disposal of Radioactive Waste, Canadian Nuclear Society, pp.3-235-3-244.

White, M. J., Humm, J. P. et al.(1998):GEOMASS: Geological Modelling Analysis and Simulation Software for the Characterisation of Fractured Hard Rock Environments, Proc. the third Äspö International Seminar, Oskarshamn, June 10-12 1998, SKB TR-98-10, pp.233-242.

山根正樹, 中野勝志ほか(1996):立坑掘削に伴う間隙水圧の長期観測, 土と基礎, Vol.44, No.11, pp.24-26.