

瑞浪超深地層研究所における 研究坑道掘削と施工対策技術の適用

見掛 信一郎^{1*}・山本 勝¹・池田 幸喜¹

¹独立行政法人日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター 施設建設課
(〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64)

*E-mail: mikake.shinnichiro@jaea.go.jp

日本原子力研究開発機構は、高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発の基盤となる深地層の科学的研究の一環として、岐阜県瑞浪市では、花崗岩を主な対象として超深地層研究所計画を進めており、深地層の研究施設である瑞浪超深地層研究所の建設を行っている。超深地層研究所計画では、「深部地質環境の調査・解析・評価技術の整備」及び「深地層における工学技術の基盤の整備」の2つを全体目標とし、研究坑道の掘削を進めている。研究坑道は2010年10月現在、深度約460mまで到達している。本報告では、研究坑道掘削の概要と、掘削に伴って発生する湧水を抑制する対策として実施したプレグラウチングや、立坑掘削面の自立性が低い領域において実施した地山安定化対策などについて述べる。

Key Words : Mizunami underground research laboratory, shaft, construction, countermeasure

1. はじめに

超深地層研究所計画では、「深部地質環境の調査・解析・評価技術の整備」及び「深地層における工学技術の基盤の整備」の2つを全体目標としている。後者は、①設計・施工計画技術の有効性の確認、②建設技術の有効性の確認、③施工対策技術の有効性の確認、④安全を確保する技術の確認、という4つの課題を設定している。本報告では、研究坑道掘削の概要と、施工対策技術として実施した湧水抑制対策（プレグラウチング）や、建設技術の補助工法として立坑掘削面の自立性が低い領域に対して実施した地山安定化対策（ボルト打設とシリカレジン注入）などから得られた知見について述べる。

地層処分技術における研究開発の観点では、例えば処分事業に適用するグラウチングの考え方として、セメント系の材料を用いたグラウチングを処分場建設時の止水対策とし、処分坑道周辺の掘削損傷領域の改良や長期耐久性などの目的に対しては、粘土系のグラウチングに効果を期待すると位置づけられている¹⁾。瑞浪超深地層研究所の研究坑道掘削工事において適用するグラウチングは、地下深部へアクセスするための坑道を掘削する際の湧水量を抑制することを目的とした「施工対策技術」として位置づけている。ここで得られた成果は、処分事業や安全規制の基盤的な技術や情報として活用されることを念頭においており、大深度地下の岩盤を対象としたプ

レグラウチング計画の策定手法の構築という観点でまとめることにより、情報提供、成果の反映が可能となる。

2. 研究坑道掘削の概要

瑞浪超深地層研究所では、主立坑（内径6.5m）及び換気立坑（内径4.5m）と深度100m毎に両立坑を連絡する水平坑道（予備ステージ）、ボーリング調査を行うための水平坑道（ボーリング横坑）、深度300m研究アクセス坑道等の研究坑道掘削工事を行っている（図-2.1）。

研究所周辺の地質は、基盤岩として白亜紀後期の土岐花崗岩が分布し、その上位を新第三紀中新世の堆積岩（瑞浪層群）が覆っている²⁾。土岐花崗岩体は、上部（堆積層との境界部深度約170m付近から数百メートルの領域）の低角度割れ目が卓越する上部割れ目帯と、その下位の割れ目頻度が低い下部割れ目低密度帯に区分されている。さらに、上部割れ目帯中には低角度割れ目の頻度が特に高い割れ目の集中帯（LAFZ : Low Angle Fractured Zone）の存在が確認されている³⁾。

研究坑道掘削工事は2003年7月に主立坑及び換気立坑の坑口の施工を着手し、現在、2010年10月の時点で、主立坑、換気立坑とも深度約460mまで到達している。立坑は発破により掘削し、掘削サイクルとして、1.3mの発破とズリ搬出を2回繰り返した後に2.6mの覆工コンクリートを打設するショートステップ工法を標準とした。

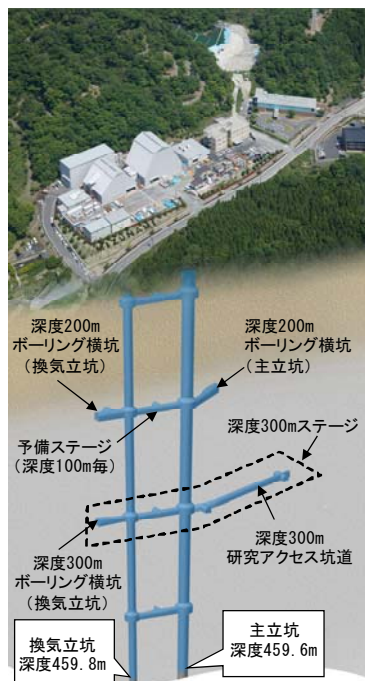


図-2.1 瑞浪超深地層研究所 研究坑道レイアウト

3. 地質環境の把握

効率的に掘削を進めていくためには、掘削に伴って遭遇すると予測される地質環境（地下水の水圧や透水性の分布、地質状況など）に関する情報を把握する必要がある。このため、パイロットボーリング調査を実施し、結果をもとに深度500m付近までの地質環境情報をまとめ、施工計画の策定、湧水量予測にもとづく排水処理設備の検討などを行った。

3.1 深度500m付近までの地質環境

研究所周辺のボーリング調査等のデータにより構築した水理地質構造モデルにもとづく地下水流動解析のひとつの結果として、立坑掘削に伴う湧水量は深度500mで約6,000m³/day、深度1,000mでは約10,000m³/dayと予測された（研究坑道掘削以前に実施した深度約1,300m及び約200mのボーリング調査により構築した水理地質構造モデルを用いた解析結果⁴⁾）。これは、排水処理設備の処理量を設定した時の湧水量予測を大幅に上回る値であったことから、排水処理設備や湧水抑制対策の計画策定にあたっては、「立坑掘削地点」で取得したデータにもとづくより高い精度の湧水量や水質予測が必要不可欠であると考えた。そこで約500m程度までの計画策定に必要な地質構造や地下水状況に関する情報を取得するために、両立坑の坑底（主立坑：深度180m、換気立坑：深度191m）からパイロットボーリング調査を実施した⁵⁾。掘削長は主立坑では348m（深度528m：06MI02号孔）、換気立坑で

は335m（深度526m：06MI03号孔）である。パイロットボーリングの配置と実施深度を図-3.1に示す。

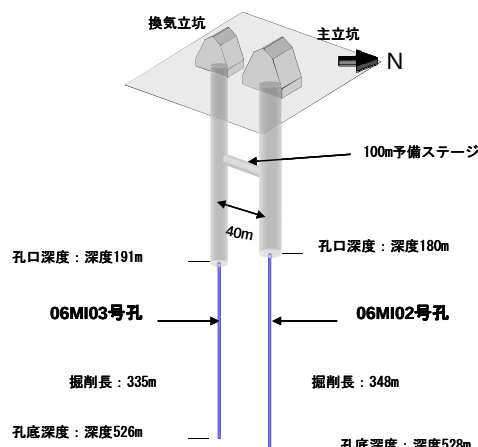


図-3.1 パイロットボーリング配置図

3.2 パイロットボーリング調査結果

パイロットボーリング調査では、岩芯観察、物理検層、ボアホールテレビ計測、流体検層などの調査を実施し、その結果をもとに地下水流動解析による湧水量予測を行った。調査の結果から、両立坑の深度200m以深に幅約60mで低角度の割れ目が集中するゾーン（LAFZ）が分布することが推定された。また、主立坑側は脆弱部（CL級、D級が主体）が広く分布するのに対し、換気立坑側は堅硬な岩盤（CH級が主体）が分布していることが確認された。深度500m付近までの地質環境を整理し以下に示す。

- ・フローメータ検層の結果、換気立坑の深度210m付近の低角度を有する割れ目の集中帯（LAFZ）と深度約400～460m付近で顕著な水みちが存在するものと想定され、主要なプレグラウチング対象箇所として抽出した。
- ・主立坑では深度500m付近までほとんど湧水が確認されなかった。
- ・地下水圧測定の結果、著しく高い水圧の湧水に遭遇する可能性は低いことがわかった。
- ・上記の地質環境に関する情報を考慮した二次元軸対称モデル及び三次元モデルを用いた数値解析による深度500mまでの研究坑道掘削に伴う予測湧水量は、湧水抑制対策を実施しないケースで2,000～2,500m³/dayとなった。これにもとづいて深度500m程度までの排水処理量を設定した。これは、パイロットボーリングの情報がない時点で実施した三次元予測解析結果と比較すると1/3～2/5程度であった。
- ・なお、大量湧水の可能性のあるLAFZの透水性を湧水抑制対策により2Lu相当まで低減させた場合には、当該箇所の湧水を大幅に抑制することが可能と判断した。

4. 掘削に伴い発生する湧水への対応

トンネルなど地下に空洞を掘削する際には、湧水について適切な対策を講じ処理することは重要である。トンネル工事では、①トンネルを完全に防水構造としてトンネル内に湧水が発生しないような設計とする工法や、②トンネルを排水構造として水を抜き、覆工に地下水圧がかからないような構造として設計する工法、③トンネル掘削の周辺領域をグラウチングなどにより透水性を低下させたうえでトンネル掘削を行う工法などがある。①の防水構造は、都市部のトンネルを施工する場合このような構造とすることが多い⁶⁾。しかし、瑞浪超深地層研究所の研究坑道は計画深度が1,000mであるため、防水構造とした場合、地表付近から地下深部にわたり全水圧が覆工に作用することとなるため、覆工の力学的な安定性を保つことは容易ではない。

また、②トンネルを排水構造とする工法は湧水をすべて許容する場合には排水処理に要する費用が多量となる。瑞浪超深地層研究所の場合、掘削領域の地質構造や地下水状況を調査した結果、特定の深度で大量湧水が発生する可能性が高いことが予測されたことと⁵⁾、湧水の全量を対象として水質を環境基準に適合させる必要があるために排水処理に要する費用が多量となると想定された。

これらのことから、研究坑道掘削工事を効率的に進めるためには湧水量を抑制することが最も効果的であり、その方法として③に示すグラウチングを適用することを基本的な対策と位置づけた。グラウチングは透水性の高い掘削対象領域にグラウトを注入することにより透水性を低下させ、トンネル内への湧水量を減じ、注入ゾーンの内側で排水することによりトンネル覆工への水圧を低減することができる工法である。

5. 湧水抑制及び地山安定化対策

パイロットボーリング調査の結果を踏まえ、湧水量をできるだけ抑制したうえで排水処理を行っていくことが効率的であると考え、予想される湧水状況に応じて湧水抑制対策を講じることとした。

一方主立坑沿いには強変質を伴う花崗岩と貫入岩が分布し透水性は低く、主立坑掘削時の壁面からは滲水程度で顕著な湧水は認められず、掘削の進捗に伴う湧水量の増加はほとんど認められなかった。このため主立坑掘削では湧水抑制対策は講じなかったが、立坑掘削面の自立性が低い領域が存在したため、建設技術の補助工法として地山安定化対策（ボルト打設とシリカレジンを注入）を行うことにより安定性の改善を図りつつ掘削を行った⁷⁾。

5.1 湧水抑制対策

湧水は坑道内に設置した排水ポンプにより地上へ揚水し地上に設置する排水処理設備により処理を行っている。処理能力は、設備の規模や仕様、用地のスペース等の条件から対処できる能力に上限があるため、処理能力を上回る湧水が予測される場合には、湧水量を抑制するための対策を講じることにより掘削を進めていくこととした。

湧水抑制対策としては、プレグラウチングを実施した。プレグラウチングは坑道掘削に先立ち坑道掘削範囲周辺を対象に実施し、複数の箇所において適用した^{8),9),10)}。実施箇所は、換気立坑深度200m接続部～約220m付近、深度約420m～450m及び深度300m研究アクセス坑道を対象として実施した。これらのうち、深度300m研究アクセス坑道において実施した先行ボーリング、プレグラウチングと坑道掘削の事例を以下に示す。

(1) 先行ボーリング

深度300m研究アクセス坑道（坑道延長：主立坑中心から約100m）では、坑道掘削領域の地質環境情報がほとんどなく、坑道掘削時に湧水の発生が懸念されたため、立坑掘削と同様に地質構造や地下水状況に関する情報を得るためにボーリング（先行ボーリング：掘削長62.5m、**図-5.1**）を実施し、情報を取得した。先行ボーリングでは、掘削時に3箇所ですぐに1,000ℓ/minを超える湧水が発生した（最大湧水量1,690ℓ/min）。この結果から、坑道掘削に先行してプレグラウチングを行い、その後、坑道掘削を行うこととした。

(2) プレグラウチングと坑道掘削

まずプレグラウチングの注入孔の削孔長を約15mとし注入を行い、その後、この区間のうち約10m坑道を掘削した。この施工パターンを基本として**図-5.1**に示す6つの断面位置（A～F断面）から実施し深度300m研究アクセス坑道の掘削を完了した（**図-5.2**）。

プレグラウチングの仕様は、先行ボーリングの結果にもとづき坑道掘削時の湧水量予測を地下水浸透理論にもとづき算定し、プレグラウチングによる透水性の低減目標値と注入範囲等を以下のように設定した。

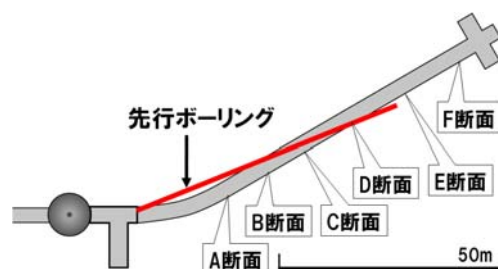


図-5.1 先行ボーリング

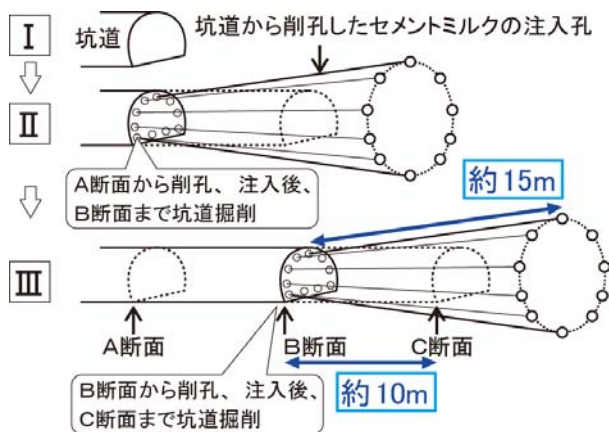


図-5.2 施工パターン

- ・プレグラウチングの実施による透水性の低減目標値：注入範囲の透水性を $2L_u$ 以下
- ・注入範囲：掘削面から3m以上を設定
- ・注入順序：注入孔は1次孔と2次孔を交互に配置し、先行して1次孔を削孔し注入。その後、1次孔の中間に2次孔を削孔し注入する中央内挿法を標準とする
- ・注入材料：普通ポルトランドセメント
- ・注入材料の配合：配合比（C:W）1:8～1:0.75

以上の施工計画にもとづきプレグラウチングを行い坑道を掘削した結果、許容範囲内の湧水量（坑道掘削後の湧水量は約 $150\text{m}^3/\text{day}$ ）で掘削することができた。このことから、先行ボーリングで $1,000\text{ l/min}$ を超えるような湧水箇所においても地下水浸透理論にもとづき設定した注入仕様により湧水量の抑制が達成可能であると評価できる。

5.2 地山安定化対策

主立坑沿いには強変質を伴う花崗岩と貫入岩が分布し、立坑掘削面の自立性が低い領域が存在しており、主立坑深度約150m付近では、掘削後に主立坑壁面からの花崗岩礫の崩落が発生した。この状態を放置すると、掘削工事の遅延や壁面観察時に災害を招く恐れがあることから、早急に対策を講ずることとした。なお、当該箇所は、速やかに覆工コンクリートを施工し更なる崩落の進展を防いだ。

脆弱な岩盤の掘削にあたっては、道路や鉄道等のトンネルでは先受け工や地山補強が昨今広く採用されており、作業空間が狭隘な立坑工事では覆工打設長を短くする、金網を布設する、ロックボルト・吹付けコンクリートで支保するなどの掘削後の対策が一般的である。研究坑道掘削工事では、掘削に先立ち実施可能な効果的な解決策として、シリカレジン注入とボルト打設を用いた地山安定化対策を実施した。以下に施工概要を示す。

(1) 地山状況と想定された事象

深度147m付近の覆工打設前に高さ2.6mの立坑壁面から奥行き最大1.6m程度の花崗岩礫が、主立坑壁面の強変質部沿いの低固結砂質マトリックスの流出とともに崩落した（写真-5.1）。



写真-5.1 花崗岩礫の崩落箇所

この例に示されるように、主立坑壁面は自立性が低い領域が存在し、かつそれが深度方向に連続することから、既設覆工コンクリートの滑落等による安全性の低下、掘削量増加に伴う工程遅延と経済性低下、覆工コンクリートの極端な不等巻厚による応力集中や背面空洞の拡大等による覆工のひび割れや耐久性低下などに繋がる可能性が考えられる。さらに、研究坑道掘削では、すべての掘削サイクルにおいて壁面観察を行っており、毎掘削時には壁面の自立性が十分確保された状態のもとで調査研究実施しなければならない。これらのことから地山安定化対策を実施した。

(2) 対策工の選定

既存の対策工の中から地山安定化対策として主立坑に適用性があると考えられる表-5.1に示す4つの工法のうち、崩落抑制効果、経済性、施工性、安全性、壁面観察への影響度、立坑での施工実績等から総合的に判定した結果、案3の「地山補強注入工」を選定した。選定の理由は、立坑掘削に先立ち安定化対策を実施できること、注入材料（ウレタン系材料であるシリカレジン）は発泡による周辺地山の締め付け効果と短時間での固結性により早期に改善効果が得られ、立坑掘削直後の壁面の自立性の確保に優れている点である。実施した対策は、ボルト打設とその打設したボルトを用いたシリカレジン注入の組合せである。まず、立坑掘削に先立ち実施する鉛直斜め下方への先受け工を実施し、実施対象領域の掘削後に立坑壁面からの垂直方向への地山補強工を実施した。先受け工と地山補強工の標準仕様を以下に示す。

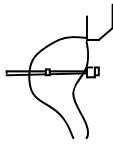
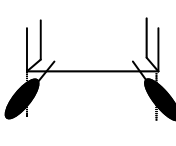
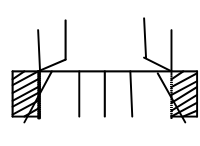
・先受け工

ボルト打設（長さ3m@60cm）、シリカレジン注入

・地山補強工

ボルト打設（長さ2m@100cm）、シリカレジン注入

表-5.1 地山安定化対策の比較^{11,12)}

対策工	案1「覆工スパン長の低減」	案2「NATM支保」	案3「地山補強注入工」	案4「止水&地山補強注入工」
概要図				
長所	・覆工スパン長を現行2.6mから1.3mに縮める ・掘削時間が短い分だけ崩落発生時間を遅延できる	・崩落箇所を吹付けコンクリートで充填し、滑落防止にロックボルトで縫い付ける ・掘削後速やかに施工するので崩落の進行を抑制できる	・掘削に先立ち下方の坑壁外周にウレタン系材料を限定注入して地山を改良する ・事前地山改良により崩落を抑制できる ・砂礫層での限定注入に適している	・掘削に先立ち下方の広範囲にセメント系材料を注入して地山を止水改良する ・事前地山改良により崩落を抑制できる ・同時に止水効果も期待できる
短所	・崩落の直接的な抑制効果は小さい ・既設覆工背面崩落箇所には後注入が必要	・湧水を伴う砂礫層では吹付けコンクリートの付着が困難 ・事後処理である	・注入材のリークによる排水ポンプの閉塞が懸念される ・止水効果は期待できない	・注入材のリークによる排水ポンプの閉塞が懸念される ・湧水量が少ない場合は過大となる
経済性	中	高	高	低
施工性	中	高	高	低
安全性	中	低	高	高
壁面観察への影響度	無	大	小	中
立坑での施工実績	有	無	有	有
総合判定	×	△	○	△

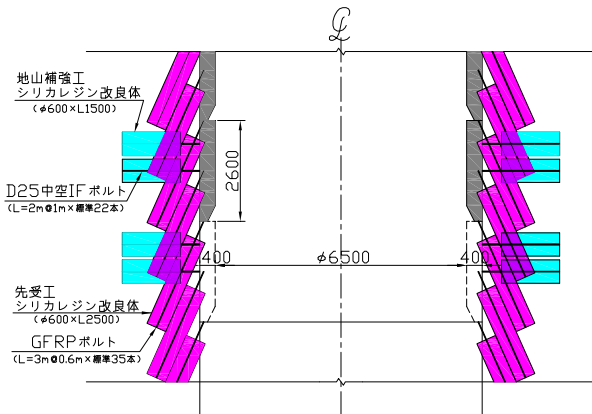


図-5.3 地山安定化対策の概念図

(3) 施工結果

深度151.8～154.4mにおける施工結果を以下に示す。

- ・全体的には設計量の60～70%程度の注入量であり、注入材がほとんど入らないほど良質部もあるが、強変質部周辺には設計注入量の最大約180%が注入された。
- ・強変質部周辺では立坑壁面の小規模な肌落ちが一部認められたが、壁面の自立性は十分確保されていた。
- ・注入箇所の余巻率（（打設した覆工コンクリート量－設計覆工コンクリート量）／設計覆工コンクリート量）は無対策の崩落部の35～50%程度まで低減した。

(4) 地山安定化対策の効果

地山安定化対策により壁面は小規模な肌落ち以外に崩落は無く、自立性の改善が図られたため、壁面観察等の時間を十分に確保でき、立坑掘削に伴う調査研究を効率的かつ安全に行うことができた。この要因は、先受け工及び地山補強工におけるシリカレジン注入による周辺地山の締め付け効果、ボルト打設による土留め効果及びせん断抵抗と縫付け効果と考えられる（写真-5.2）。

主立坑の地山状況は、強変質部が含まれる領域が現在の掘削深度約460mまで続いている。掘削対象領域において、立坑掘削時の壁面が自立性に劣る場合には、まず地山補強工を実施し、それ以深の掘削対象領域に掘削に先立ち先受け工を実施する手順とした。それ以後は、立坑掘削時の壁面観察結果や地山状況をもとにこの手順を繰り返し実施した（実施箇所：深度151.8～318.2m, 394.4～415.6m）。その結果、深度150m以深の掘削において花崗岩礫の崩落はなく、地山の安定性の改善が図られており、建設技術の補助工法として効果的と考えられる。

なお、余巻率の深度変化をみると、対策を実施した深度150m以浅では最大150%を超過するほどであった。余巻率が顕著に多い礫岩層に関しては、無対策区間の余巻率は平均145%であったのに対し、深度150m以深の対策実施区間では平均100%程度まで低減することができた。



茶色：シリカレジンの固結状況

写真-5.2 主立坑壁面における先受けボルトとシリカレジンの固結状況

6. 結論

湧水抑制対策の計画策定では、掘削地点でのボーリング調査で得られた地質や地下水状況をもとに、地下水浸透理論を用いて坑道周辺の透水性を低下させる割合や注入範囲を設定し、湧水量の抑制目標を定めた。この計画にもとづきプレグラウチング、坑道掘削の施工パターンを実施した結果、目標として設定した許容範囲内の湧水量で掘削することができた。

地山安定化対策においては、先受け工及び地山補強工におけるシリカレジンを注入により、地山の安定性の改善が図られている。このメカニズムは、周辺地山の締め付け効果、ボルト打設による土留め効果及びせん断抵抗と縫付け効果と考えられ、状況に応じ実施することにより、建設技術の補助工法として効果的であると考えられる。

これらの技術の整備は地層処分への技術基盤の提供という観点において重要な成果であり、今後、より深部における坑道掘削への適用性を確認していく予定である。

謝辞：研究坑道掘削工事の施工者（大林・大成・間JV、清水・鹿島・前田JV）の関係各位には多大な協力を頂いた。ここに記して謝辞といたします。

参考文献

- 1) 小早川博亮, 伊藤洋：高レベル放射性廃棄物処分へ適用するベントナイトグラウトの配合条件, 土木学会論文集F, Vol. 63, No. 1, pp. 53-65, 2007.
- 2) 糸魚川淳二：瑞浪地域の地質, 瑞浪市化石博物館専報, 1号, pp. 1-50, 1980.
- 3) 三枝博光, 瀬野康弘, 中間茂雄, 鶴田忠彦, 岩月輝希, 天野健治, 竹内竜史, 松岡稔幸, 尾上博則, 水野崇, 大山卓也, 濱克宏, 佐藤稔紀, 久慈雅栄, 黒田英高, 仙波毅, 内田雅大, 杉原弘造, 坂巻昌工：超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階（第1段階）研究成果報告書, JAEA-Research 2007-043, 2007.
- 4) 尾上博則, 三枝博光, 大山卓也, 遠藤令誕：繰り返しアプローチに基づくサイトスケールの水理地質構造のモデル化・地下水流動解析（ステップ4）, JAEA-Research 2007-034, 2007.
- 5) 鶴田忠彦, 竹内真司, 竹内竜史, 水野崇, 大山卓也：瑞浪超深地層研究所における立坑内からのパイロットボーリング調査報告書, JAEA-Research 2008-098, 2008.
- 6) 地盤工学会：入門シリーズ 地下水を知る, 地下水を知る編集委員会, 丸善, 2008.
- 7) 秋好賢治, 見掛信一郎, 金田勉, 野田正利：超大深度立坑における不良地山掘削時の坑壁崩落対策, 土木学会トンネル工学委員会, トンネル工学報告集, vol. 17, pp. 105-111, 2007.
- 8) 竹内真司, 原雅人, 見掛信一郎, 鶴田忠彦, 池田幸喜, 山本勝：超深地層研究所計画における研究坑道掘削中の湧水抑制対策について, 第12回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 189-196, 2009.
- 9) 原雅人, 木下晴信, 池田幸喜, 山本勝, 延藤遵：瑞浪超深地層研究所換気立坑建設工事におけるプレグラウチの現状, 土木学会トンネル工学委員会, トンネル工学報告集, vol. 18, pp. 23-30, 2008.
- 10) 見掛信一郎, 山本勝, 池田幸喜, 石田英明, 西垣誠：超深地層研究所計画における研究坑道掘削と湧水抑制対策の適用, 地盤工学会, 第54回地盤工学シンポジウム論文集, pp. 39-46, 2009.
- 11) 梅田和敏, 山田敏之, 松本卓也：国際文化公園都市付近管路新設工事の設計と施工状況, 電力土木, No. 297, pp. 95-99, 2002.
- 12) 土木学会：山岳トンネルの立坑と斜坑, トンネルライブラリー第7号, pp. 114-119, 1994.

APPLICABILITY OF COUNTERMEASURES DURING EXCAVATION AND CONSTRUCTION OF THE MIZUNAMI UNDERGROUND RESEARCH LABORATORY

Shinichiro MIKAKE, Masaru YAMAMOTO and Koki IKEDA

Japan Atomic Energy Agency (JAEA)'s task is to provide the scientific and technical basis for safe geological disposal of high-level radioactive waste. This involves researches on development and improvement of techniques for characterization of the deep geological environment and a wide range of engineering for deep underground application in crystalline rock at "Mizunami Underground Research Laboratory (MIU)". MIU is currently being constructed. The Main and Ventilation Shafts had reached GL-460m. This report describes the summary of construction, and pre-excavation grouting, supplementary excavation method.