

瑞浪超深地層研究所における 地震時の湧水量変化と水圧応答について

堀内泰治^{1*}・見掛信一郎¹・佐藤稔紀¹

¹日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門（〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64）
*E-mail: horiuchi.yasuharu@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、超深地層研究所計画を進めている。本計画では、深地層の研究施設である瑞浪超深地層研究所を建設しているが、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震直後に、同研究所の研究坑道内で湧水量増加が確認され、研究所周辺において実施している地下水圧モニタリング孔では水圧変化が観測された。本報告では、湧水抑制対策として実施したプレグラウト工への地震に伴う湧水量増加の影響評価と、地震時の水圧モニタリング孔の水圧変化と地震特性との関係の検討により得られた知見を述べる。

Key Words : geological disposal, reducing water inflow, 2011 Tohoku earthquake, MIU

1. はじめに

日本原子力研究開発機構では、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、岐阜県瑞浪市において結晶質岩を主な対象とした超深地層研究所計画を実施しており、その中で深地層の研究施設である瑞浪超深地層研究所（以下、研究所）の建設を行っている。超深地層研究所計画は、「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」を全体目標としている。後者では、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つの個別研究課題を設定し研究開発を進めている¹⁾。

本報告では、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震（瑞浪市観測震度：3）に伴う研究坑道への湧水量増加についての検討と、東北地方太平洋沖地震を含む過去の地震に伴う地下水圧モニタリング孔の水圧変化についての検討により得られた知見を述べる。

2. 瑞浪超深地層研究所の概要

研究所では、図-1に示すように、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

査等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、深度500m研究アクセス北及び南坑道等の研究坑道掘削工事を行っている。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付けに着手し、主立坑は2011年7月に、換気立坑は同年4月にそれぞれ深度500mに到達し、現在は深度500mレベルでの水平坑道の掘削を行っている。

研究坑道からは、両立坑合せて約800m³/day（2013年8月時点）の湧水があり、汲み上げられた湧水は、地上の排水処理施設において適切な処理を行った後、研究所近傍の河川へ放流している。

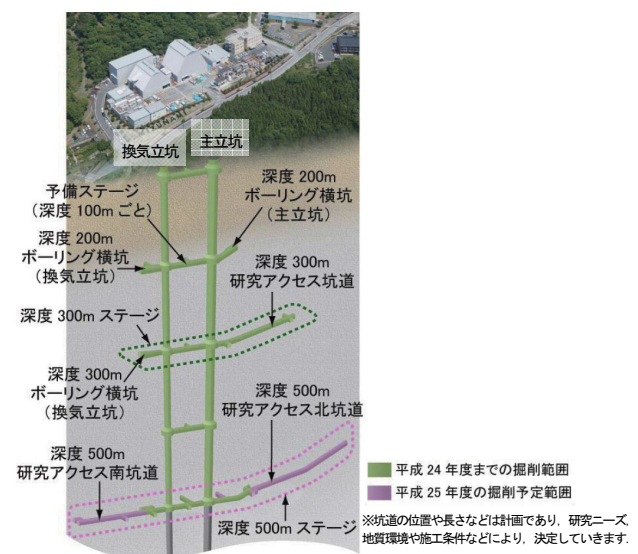


図-1 瑞浪超深地層研究所レイアウト

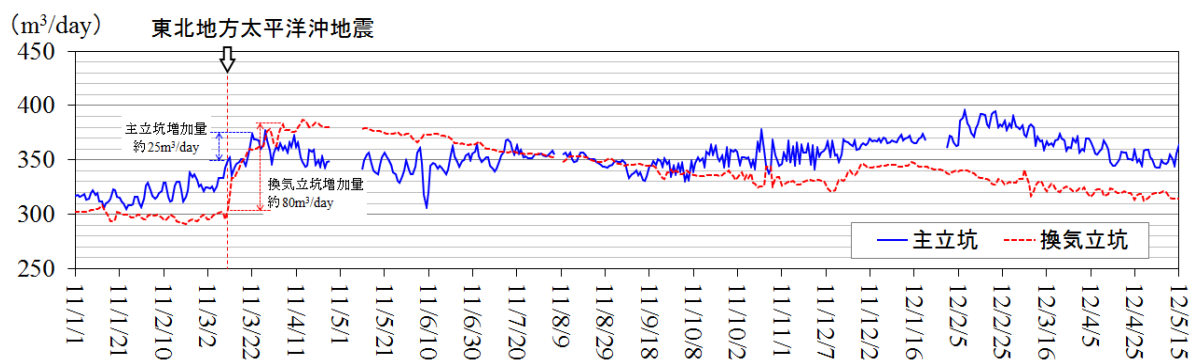


図-2 研究坑道からの湧水量

3. 地形・地質概要

研究所は岐阜県瑞浪市の標高 200m 程度の丘陵地にあり、用地内には普通河川の狭間川が流れている。

研究所周辺の地質は、深度 167m 付近を不整合面に、基盤として分布する結晶質岩（土岐花崗岩）の上位に新第三紀中新世の堆積岩（瑞浪層群）が分布している。主立坑と換気立坑の両立坑は同じ地層内にあるが、主立坑には掘削断面を縦断するようなほぼ垂直傾斜の断層が分布しており、主立坑の掘削領域において、地表から深度 500m 付近まで連続している。そのため、主立坑及びその近傍は脆弱な岩盤状況となっている。

4. 東北地方太平洋沖地震後の湧水量変化

研究所の研究坑道からの湧水量は、図-2 に示すように、東北地方太平洋沖地震前には、主立坑及び換気立坑合せて約 620m³/day であったが、地震後に増加し、その後時間とともに地震前の湧水量程度に減少した。その増加量は、主立坑が約 25m³/day、換気立坑が約 80m³/day であった。なお、主立坑側のボーリング横坑、深度 300m 研究アクセス坑道及び各深度の予備ステージの湧水は主立坑の湧水量に、換気立坑側のボーリング横坑の湧水は換気立坑の湧水量に含まれている。

(1) 主立坑の湧水量

両立坑内には、約 30m 間隔で集水リングが設置されており、それらの流量を集計することで 100m 区間毎の湧水量を算出している。主立坑の各深度区間の湧水量は、図-3 に示すように、深度 300m 研究アクセス坑道からの湧水が大部分を占めている。地震後に湧水量の変化が見られたのは、深度 100～200m 区間と深度 200～300m 区間であり、それぞれ約 20m³/day、約 5m³/day の増加であった。

(2) 換気立坑の湧水量

換気立坑の各深度区間の湧水量は、図-4 に示すように、深度 100m～200m 区間からの湧水が大部分を占めており、地震後に約 60m³/day 増加した。さらに、この深度区間の集水リング毎の湧水量をみると、図-5 に示すように、地震後に湧水量が大きく変化しているのは、深度 165.0m の集水リングであり、約 45m³/day の増加となっている。深度 131.2m 及び深度 191.0m の集水リングでは、地震後に約 5～10m³/day の湧水量の微増がみられた。

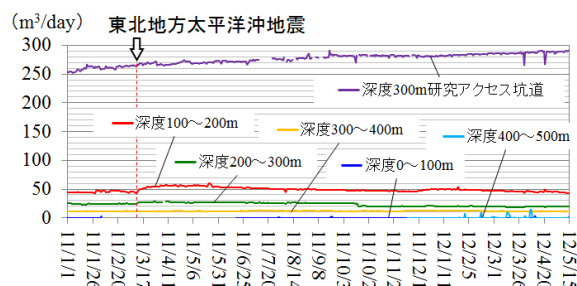


図-3 各深度区間の湧水量（主立坑）

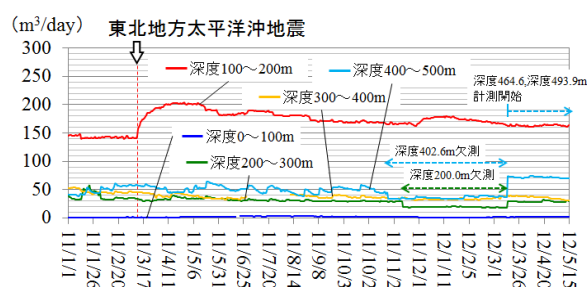


図-4 各深度区間の湧水量（換気立坑）

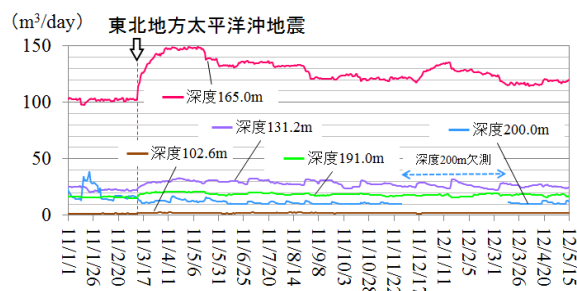


図-5 集水リング湧水量（換気立坑 深度 100～200m 区間）

5. 湧水抑制対策への地震の影響

研究所では、研究坑道掘削時に問題となるような大量湧水が想定される区間において、湧水抑制対策としてプレグラウト工を行っている。ここでいう大量湧水とは、地上の排水処理施設（処理能力：最大 1,700m³/day）に対して過度の負担となるような湧水量を指す。

過去にプレグラウト工を実施した区間とその区間のプレグラウト実施前の湧水量を表-1 に示す。なお、表中の湧水量は、坑道掘削前のパイロットボーリングあるいは探り削孔時に確認された最大の湧水量である²³⁾。

東北地方太平洋沖地震後に湧水量が増加した区間は、前章で述べたように、主立坑の深度 100～200m 区間及び深度 200～300m 区間、換気立坑の深度 100～200m 区間である。両立坑の区間毎の地震後の湧水増加量とプレグラウト工の実施状況を表-2 に示す。これを見ると、主立坑のプレグラウト実施区間（深度 300m 研究アクセス坑道）では地震後の湧水量増加はみられない。換気立坑のプレグラウト実施区間のひとつである深度 100～200m 区間では地震後に約 60m³/day の湧水量増加がみられる。しかし、この区間の湧水量の内訳をみると、表-3 に示すとおり、増加しているのはプレグラウト実施区間以外の集水リング（深度 131.2, 165.0, 191.0m）であり、プレグラウト実施区間内の集水リング（深度 200.0m）では湧水量増加はみられない。

このように、プレグラウトを実施していない区間において湧水量が増加する場合や増加しない場合があるなど、湧水量が変化する要因は明確になっていないが、少なくとも震度 3 程度の地震では、地震後にプレグラウト実施区間において有意な湧水量増加が確認されなかったことから、実施した湧水抑制対策の効果には影響がないものと考えられる。

6. 地震後の水圧変化と地震特性

(1) 水圧変化

研究所では、図-6 に示すように研究坑道周辺において複数箇所地下水位モニタリングを行っている。ここでは、これらのモニタリング孔のうち DH-2 号孔のモニタリングデータを用いて地震時の水圧変化と地震特性との関係について検討を行う。DH-2 号孔では、直接水圧計測方式でパッカーによる複数区間の間隙水圧を計測しており、地震時の他に、研究坑道内でのプレグラウト工やボーリング調査時の湧水の影響による水圧変化が明瞭に観測されている。

図-7 に、2009 年 1 月から 2012 年 5 月までの DH-2 号孔の水圧変化を示す。図中には、上記期間内の研究坑道内

でのイベントと、瑞浪市で震度 2 以上を観測した地震発生日時（表-4）を合わせて示した。なお、東北地方太平洋沖地震の余震と考えられる地震は省略した。また、DH-2 号孔の水圧は、水頭に換算してプロットしている。図-7 をみると、DH-2 号孔では、一部の地震後に水頭変化が確認され、それらの変化は全て上昇（約 0.2～15m）であった。なお、主立坑断層の北側や研究所用地から離れた地域のモニタリング孔においては、地震後に水頭の低下が観測されている⁴⁾。

表-1 プレグラウト工実施区間と湧水量

実施区間		湧水量 (m ³ /day)
主立坑	300m 研究アクセス坑道	2,400
換気立坑	191.6～220.8m	860
	417.1～428.4m	80
	442.1～453.4m	65

表-2 区間毎の湧水増加量とプレグラウト実施状況

区間		湧水量(m ³ /day)	プレグラウト
主立坑	0～100m	—	
	100～200m	+20	
	200～300m	+5	
	300m 研究アクセス坑道	—	○
	300～400m	—	
	400～500m	—	
換気立坑	0～100m	—	
	100～200m	+60	○
	200～300m	—	○
	300～400m	—	
	400～500m	—	○

—：湧水量変化なし，○：プレグラウト実施あり
／：プレグラウト実施なし

表-3 深度 100～200m 区間の集水リングの湧水増加量とプレグラウト実施状況

集水リング	湧水量 (m ³ /day)	プレグラウト
換気立坑	102.6m	—
	131.2m	+10
	165.0m	+45
	191.0m	+5
	200.0m	—

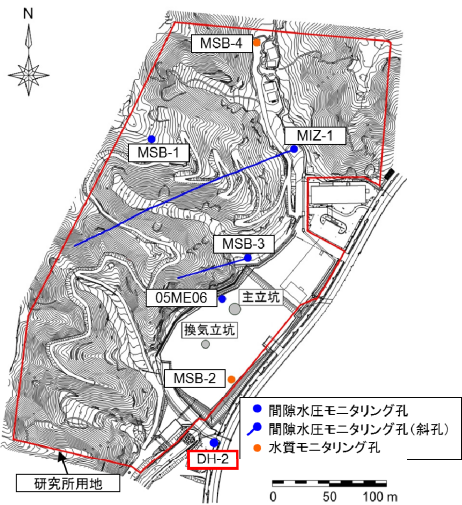


図-6 水圧モニタリング孔の位置図

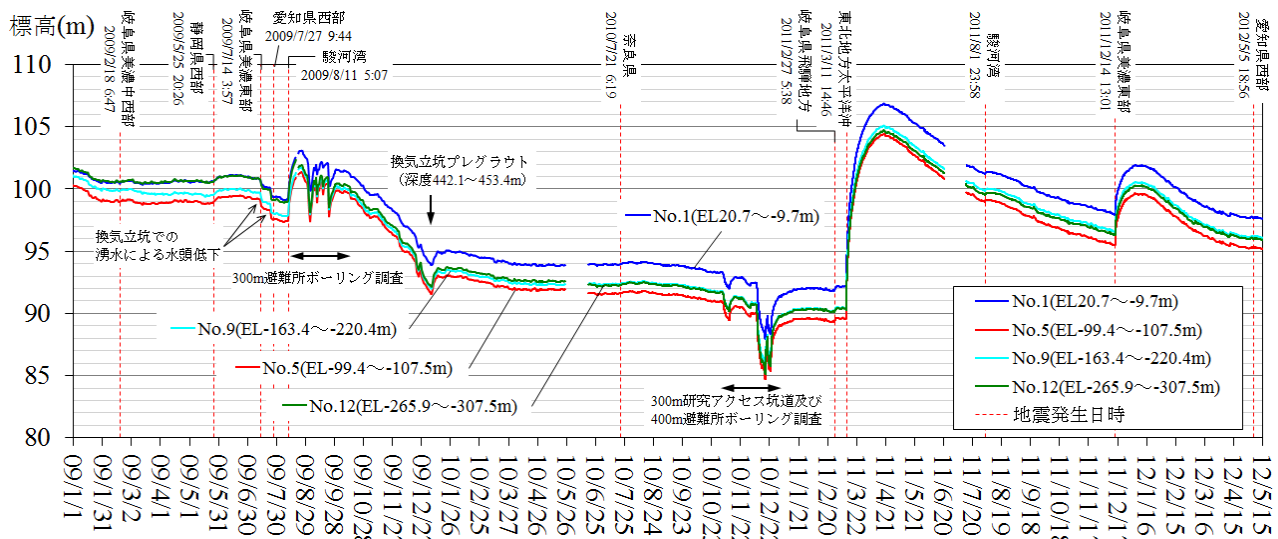


図-7 DH-2 号孔の水頭変化

表-4 2009/1~2012/5の地震(瑞浪震度2以上)

発生日	震源位置*	M	震源 深さ (km)	震央 距離 (km)	瑞浪 での 震度
2009/2/18	岐阜県美濃中西部	5.2	9	90	2
2009/5/25	静岡県西部	4.7	26	89	2
2009/7/14	岐阜県美濃東部	3.5	50	4	2
2009/7/27	愛知県西部	4.0	41	34	2
2009/8/11	駿河湾	6.5	23	132	3
2010/7/21	奈良県	5.1	58	192	2
2011/2/27	岐阜県飛騨地方	5.5	4	88	2
2011/3/11	東北地方太平洋沖	9.0	24	586	3
2011/8/1	駿河湾	6.2	23	141	2
2011/12/14	岐阜県美濃東部	5.1	49	3	3
2012/5/5	愛知県西部	4.3	45	22	2

※：表中の太文字は、DH-2号孔の水頭上昇が確認された地震

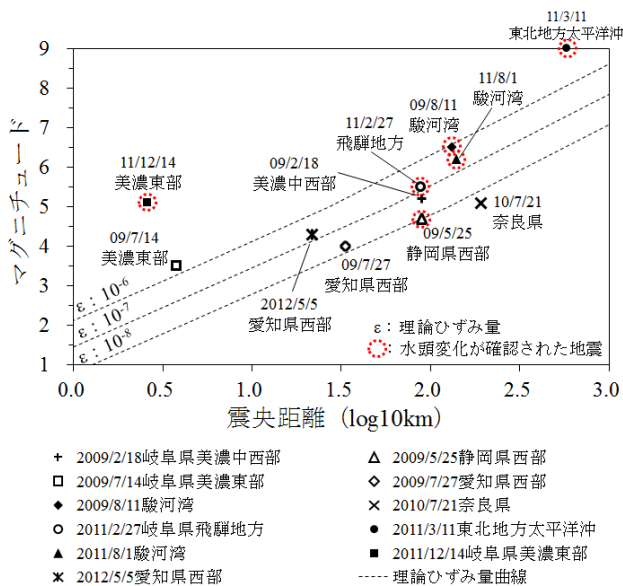


図-8 理論ひずみ量・震央距離とマグニチュードの関係

(2) 理論ひずみ量との比較

表-4 に示した地震について、Dobrovolsky による理論ひずみ量曲線³⁾とマグニチュード・震央距離との関係及び DH-2 号孔の水頭変化の有無を検討する。なお、地震後の DH-2 号孔の水頭に 0.1m 以上の上昇が確認された場合を変化ありとした。

図-8 に、各地震のマグニチュードと震央距離の関係及び理論ひずみ量曲線を示す。これをみると、DH-2 号孔においては、マグニチュード 4.5 以上の地震で理論ひずみ量が 10^8 を超えると水頭が変化する事例が出始め、 10^7 を超えると全ての地震で水頭が変化していることがわかる。

(3) 地震動計測結果との比較

研究所では、深度 100m 接続部（換気立坑）、深度 300m 接続部（主立坑、換気立坑）及び深度 500m 接続部（換気立坑）の 4 箇所において、地震動計測を行っている。ここでは、DH-2 号孔において水頭変化が確認された 6 件の地震について、その地震動計測結果と DH-2 号孔の水頭上昇量との関係について検討を行う。

図-9 に、地震動計測により得られたそれぞれの地震の加速度、速度、変位の最大値と DH-2 号孔の水頭上昇量との比較を示す。なお、加速度、速度、変位の最大値は、いずれも深度 100m 接続部での計測値であった。

これをみると、加速度と水頭上昇量には相関がみられないが、速度や変位が大きいと水頭上昇量は大きい傾向があり、変位と水頭上昇量には弱い相関がみられる。

これより、地震による水頭変化の有無とその変化量は、地震動の変位に起因する可能性が示唆される。

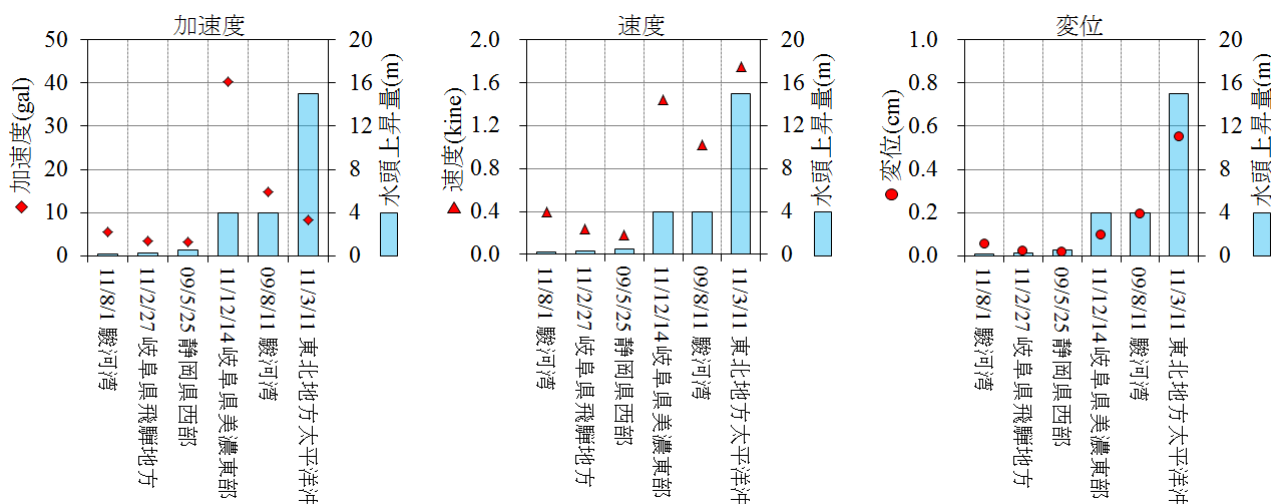


図-9 地震動計測結果と DH-2 号孔の水頭上昇量

7. まとめと今後の課題

本報告では、研究所における東北地方太平洋沖地震時の湧水量変化について検討を行った。その結果、湧水抑制対策（プレグラウト工）を実施した区間において、東北地方太平洋沖地震直後に有意な湧水量増加が確認されなかったことから、震度 3 程度の地震では、実施した湧水抑制対策の効果には影響がないことが確認された。

また、研究所周辺の水圧モニタリング孔における地震時の水圧変化と地震特性との関係を検討した。その結果、水圧変化の有無と理論ひずみ量との関係や、水圧上昇量と地震動計測結果との相関など、地震時に水圧変化を生じさせるような地震特性に関する知見を得た。

今後は、2009 年以前の地震や瑞浪市で震度 2 以下の地震及び遠方地震（十勝沖地震など）に関して、DH-2 号孔以外のモニタリング孔のデータを含めた地震時の水圧変化の検討、地震動計測結果の収集整理及び検証データの蓄積を行い、地震発生による水圧変化のメカニズム解明に資する情報の取得を目指す。

参考文献

- 1) 日本原子力研究開発機構 東濃地科学ユニット：超深地層研究所地層科学研究基本計画, JAEA-Review 2010-016, 2010.
- 2) 見掛信一郎, 山本 勝, 池田幸喜, 杉原弘造, 竹内真司, 早野 明, 佐藤稔紀, 武田信一, 石井洋司, 石田英明, 浅井秀明, 原 雅人, 久慈雅榮, 南出賢司, 黒田英高, 松井裕哉, 鶴田忠彦, 竹内竜史, 三枝博光, 松岡稔幸, 水野 崇, 大山卓也：結晶質岩を対象とした坑道掘削における湧水抑制対策の計画策定と施工結果に関する考察, JAEA-Technology 2010-026, 2010.
- 3) 石井洋司, 渡辺和彦, 神谷 晃, 早野 明, 見掛信一郎, 竹内真司, 池田幸喜, 山本 勝, 杉原弘造：深度 400m 以深の換気立坑掘削において実施したプレグラウト工の施工結果と考察, JAEA-Technology 2010-044, 2010.
- 4) Niwa, M., Takeuchi, R., Onoe, H., Tsuyuguchi, K., Asamori, K., Umeda, K., Sugihara, K.: Seismicity-induced groundwater level changes in boreholes around Mizunami Underground Research Laboratory (MIU), Japan; Effect of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, VOL.13, doi:10.1029/2011JG005020_1-15, 2012.
- 5) Dobrovolsky, I.P., Zubkov, S. I. and Miachkin, V. I. : *Estimation of the size of earthquake preparation zones*, *Pageoph*, 117, pp.1025-1044, 1979.

CHANGES IN WATER INFLOW AND WATER PRESSURE RESPONSE AFTER EARTHQUAKES IN MIZUNAMI UNDERGROUND RESEARCH LABORATORY

Yasuharu HORIUCHI, Shinichiro MIKAKE and Toshinori SATO

Japan Atomic Energy Agency is pursuing an underground research project, called the Mizunami Underground Research Laboratory (MIU) Project focused on crystalline rock environment, in order to establish scientific and technological basis for geological disposal of High-level Radioactive Wastes. After the 2011 Great East Japan Earthquake, increased water inflow in the MIU and changes in groundwater pressure in the monitoring boreholes around the MIU have been observed. This report describes knowledge obtained through effect assessment of the pre-excavation grouting performed to reduce water inflow and observation of changes in water pressure response after the earthquakes.