

地中レーダによる岩盤割れ目内の 塩水浸透モニタリング

升元 一彦^{1*}・松下智昭¹・竹内竜史²

¹鹿島建設株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1）

²日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター（〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64）

*E-mail: masumotk@kajima.com

岩盤内の坑道周辺に生じる割れ目群は地下水の透水経路として機能することから、放射性廃棄物地層処分
の安全評価において、割れ目の水みちとしての特性を把握しておくことが重要である。これに対し、筆
者らは地中レーダにより得られるデータから、割れ目の幾何学的な分布情報だけでなく割れ目内の地下水
の状態の評価可能性について検討を進めている。今回、地中レーダによる塩水の浸透状態の評価方法の原
位置での検証を目的に、瑞浪超深地層研究所の深度500m研究アクセス南坑道において検証試験を実施し
た。割れ目に塩水を注入し、その過程を複数の地中レーダでモニタリングすることにより、塩水の面的な
浸透状態を地中レーダの反射波形や卓越周波数の変化で評価できることを示すことができた。

Key Words : GPR, ground water monitoring, spectrum analysis, high level radioactive waste

1. はじめに

岩盤空洞掘削時において空洞周辺に生じる亀裂群は、
岩盤空洞の力学安定に関する問題を生じさせると共に地
下水の透水経路としての問題も生じさせる。特に、放射
性廃棄物地層処分における安全評価において、空洞周辺
に発達する掘削影響領域内の割れ目の透水経路としての
連続性や割れ目内の飽和・不飽和状態を把握しておくこ
とは重要である¹⁾。

割れ目の透水経路としての連続性等に係るボーリング
孔を利用した調査では、調査時に水理場が乱れる可能性
があり、また面的な評価に限界がある。このことから筆
者らは、坑道周辺の岩盤割れ目の地下水の状態の面的な
評価を非破壊で行う方法として、地中レーダを用いる手
法に着目している。坑道周辺の岩盤割れ目の調査への地
中レーダの適用については、これまで花崗岩中の割れ目
を対象として釜石鉱山の坑道壁面で適用された例²⁾があ
る他、海外の地下実験場で坑道底盤の掘削影響領域内の
水平割れ目の探査として活用している例^{3,4)}が報告されて
いる。このように坑道近傍の割れ目分布の評価に地中レ
ーダは有効な手法であるが、割れ目内の地下水の状態に
関する評価はなされていない。

これまで筆者らは、地中レーダにより得られるデータ
から、割れ目の幾何学的な分布情報だけでなくその割れ

目内の地下水の状態を評価する検討を進めており、模擬
割れ目等の試験で水や塩水の浸透に伴う反射波形、反射
強度の変化を地中レーダで測定することにより、割れ目
内の飽和状態やチャンネル状の浸透経路を把握できる可
能性を示した^{5,6)}。一方、本評価手法の実用化に向けて
は、実際の割れ目で適用性を確認することと複数の地中
レーダによる面的なモニタリングの可能性を示すことが
必要である。

本報では、地中レーダの反射波形や卓越周波数の変化
を測定することによる透水経路としての割れ目の連続性
や割れ目内の飽和・不飽和状態の評価可能性について原
位置で検証を行った結果について報告する。初めにパル
スレーダを用いた試験により本評価手法の実際の割れ目
への適用可能性について示し、次にネットワークアナライ
ザを利用したミニレーダシステム⁷⁾を用いた試験によ
り、複数のレーダによる割れ目内の透水経路の評価の可
能性について示す。

2. 地中レーダを用いた評価手法

地中レーダにより得られる電磁波の反射波に関して、
媒質1と媒質2の境界面が Z 軸に直交しているとき、媒質
1から媒質2へ Z 方向に垂直に入射した電磁波の境界面で

の反射係数 R は、角周波数 ω が十分大きく、媒体の導電率が低い場合、以下の式で近似される。

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \quad (1)$$

ここで、 ε_1 、 ε_2 ：各々媒質1、媒質2の誘電率(F/m)

一方、導電率が高くなるとこの反射係数 R は、波数 k を用いて以下の式で表される⁹⁾。

$$R = \frac{\mu_1 k z_1 - \mu_2 k z_2}{\mu_1 k z_1 + \mu_2 k z_2} \quad (2)$$

ここで、

$$k z_1 = \omega \sqrt{\varepsilon_1 \mu_1} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_1}{\omega \varepsilon_1} \right)^2} + 1 \right)}$$

$$k z_2 = \omega \sqrt{\varepsilon_2 \mu_2} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_2}{\omega \varepsilon_2} \right)^2} + 1 \right)}$$

ω ：電磁波の角周波数

μ_1 、 μ_2 ：各々媒質1、媒質2の透磁率(H/m)

σ_1 、 σ_2 ：各々媒質1、媒質2の導電率(S/m)

この式から、導電率の差が大きいほど反射係数が大きくなる事が分かる。すなわち、高導電率の媒体が反射面となる場合、導電率が大きくなるほど振幅が大きくなることになる。また、この式から電磁波の周波数も反射係数に関与してくることが分かる。升元ら⁹⁾の理論的検討結果から、媒質2の導電率が低い時は反射係数の周波数依存性はないが、導電率が高くなるに従い低周波数での反射係数が高周波数に対し大きくなることを示している。すなわち、高導電率の媒体が反射境界になる場合、低周波数帯域に対して高周波数帯域の反射強度が相対的に小さくなることになり、反射波形の卓越周波数が低下することが予想される。

岩盤内の割れ目においては、岩盤が媒質1になり割れ目が媒質2となることから、割れ目内に地下水と異なる高導電率の媒体（例えば塩水）を流し、地中レーダにより反射波形をモニタリングし、その振幅や卓越周波数の変化に着目して割れ目内の導電率の変化を評価することで、水みちとしての割れ目の連続性や割れ目内の飽和・不飽和状態の評価が可能であると考えられる。

3. 検証試験方法

(1) 試験場所

本評価手法の検証試験を、日本原子力研究開発機構の瑞浪超深地層研究所の深度500m研究アクセス南坑道の西側側壁（図-1）において実施した。本坑道には後期白

亜紀の中～粗粒の黒雲母花崗岩である土岐花崗岩が分布する。電研式岩盤分類¹⁰⁾でCM～B級の硬質な岩盤からなり、坑道に直交する方向と低角度で交差する方向の2方向の走向を持つ高角度割れ目が発達している。坑道は3cm以上の厚さ吹付けコンクリートで覆われ、西側側壁下部は露岩している。岩盤分類評価におけるB級岩盤ではロックボルト打設は行っていない（図-2）。また、一部区間ではプレグラウトを実施している¹¹⁾。

(2) 試験方法

検証試験前に、西側側壁沿いに800MHzパルスレーダによるプロファイル測定を吹付けコンクリート上で実施し、明瞭な反射面の中から対象とする割れ目の選定を行

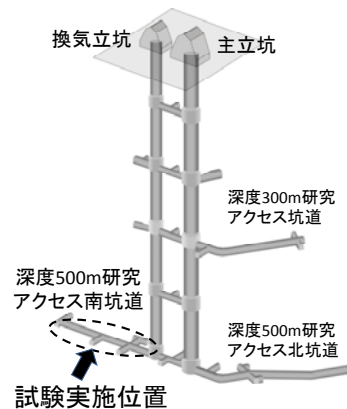


図-1 瑞浪超深地層研究所と試験位置

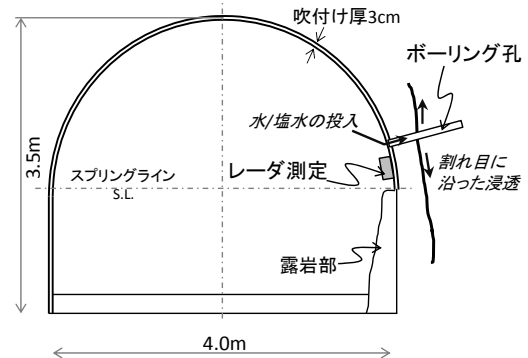


図-2 坑道断面と試験レイアウト

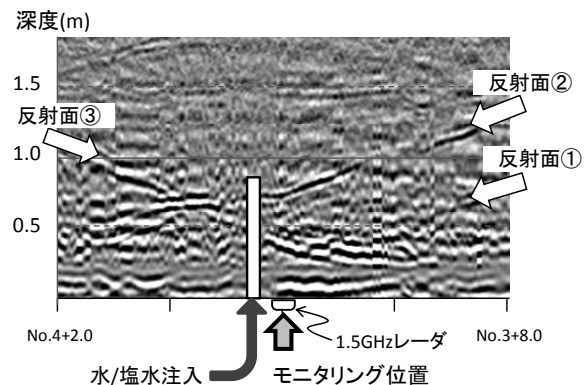


図-3 プロファイル測定結果とパルスレーダモニタリング位置

った⁹⁾。図-3にはプロファイル測定により得られた反射面①～③を示す。次にその反射面と交差するように長さ90cmのコアボーリングを実施した。ボーリング孔は孔径66mm、上向き10°で削孔した。この結果、吹付けコンクリートが8cm厚さで観察され、反射面①～③に相当する深度において割れ目が観察された。本試験では、これらの割れ目を対象とし、高伝導率の媒体の浸透に伴う反射波形の変化をモニタリングするため、Time-Lapse測定を実施した(図-2)。

a) 1.5GHzパルスレーダモニタリング

初めに、定点 Time-Lapse 測定として 1.5GHz パルスレーダを使用し、ボーリング孔から水平方向に 30cm 離れた吹付けコンクリート上でモニタリングを行った(図-

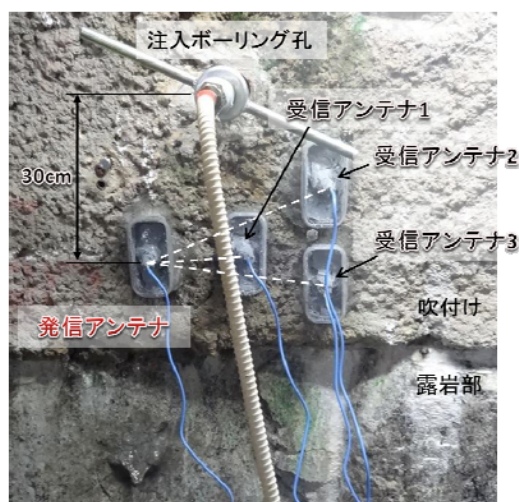
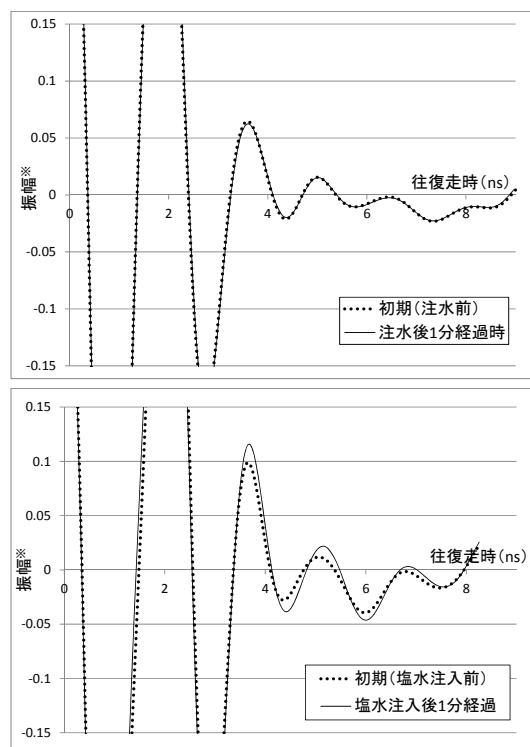


図-4 ミニレーダモニタリング位置



※ 振幅は直達波の振幅幅で正規化された値

図-5 水/塩水注入前後の反射波形の変化

3) . 測定時のサンプリング間隔は 0.0626 ns とした。ボーリング孔から割れ目に対し確実に注入が行われるようボーリング孔口付近に 7.5cm 長のメカニカルパッカーを設置し、市販のバスポンプを用いてパッカーの奥に水や塩水の注入を行った。注水に用いた水は坑道湧水进行处理した水を用いたため、坑道湧水の電気伝導度の測定結果が 86 mS/m に対し注水した水の電気伝導度は 110 mS/m と、周辺地下水とほぼ同じ電気伝導度であった。また、高伝導率の媒体として食塩を用いた。注水した塩水の電気伝導度は、周辺の地下水の 30 倍近い電気伝導度の 2.4 S/m とした。

水の注入時には、注入前に定点で測定を行い、その後注水を開始した 1 分後において測定を行った。塩水の注入時には、水で注入を実施している状態を初期値として測定を行い、その後塩水に注入を切り替えて 1 分後、2 分後、3 分後、5 分後、8 分後、11 分後、15 分後において測定を行い、最長 15 分経過するまで測定を行った。

b) 複数のミニレーダモニタリング

次に、ネットワークアナライザを利用したミニレーダシステム⁷⁾を使用して、複数レーダによる多点 Time-Lapse 測定を実施した。測定時のサンプリング間隔は 0.325 ns とした。100MHz～1 GHz 対応の 4 つのアンテナを、図-4 に示すように吹付けコンクリート上に配置し、1 つを発信アンテナとし 3 つを受信アンテナとした。測定中は受信アンテナ 1～3 を 20 秒毎に切り替えて測定を行ったため各受信アンテナでは 1 分毎にモニタリングを行った。

ボーリング孔への水や塩水の注入方法は、パルスレーダモニタリングと同様、孔口付近にメカニカルパッカーを設置し、市販のバスポンプによる注入とした。初めに水を注入した状態を初期値として測定した後で塩水に注入を切り替えて 32 分間注入を実施し、その後、再度水に注入を切り替えて 9 分間注入を継続した。

4. 検証試験結果

(1) 1.5GHzパルスレーダ定点モニタリング結果

パルスレーダのモニタリング試験では、水の注入時に 1 分間で 2.5 L の水が浸透し、塩水の注入時に 15 分間で 2.8 L の塩水が浸透した。これらの注入の一部は、注水後しばらくして露岩している側壁の割れ目から湧出していることが確認された。

図-5 に水と塩水について注入開始前と注入後 1 分経過時の反射波形の測定結果を示す。水の注入前後で、反射波形にあまり変化は見られないが、塩水の注入後においては往復走時で 3.0 ns 以降の波形に変化が見られた。往復走時 3.0 ns は、電磁波伝搬速度を 0.12m/ns¹²⁾とすると

深度 18cm になり、これ以深の反射波形が変化することになる。これは反射面①に相当する割れ目からの反射波形が変化したことになり、塩水が反射面①に相当する割れ目に浸透したことによる影響を示していると考えられる。図-6 には塩水注入をその後 15 分まで継続した時の反射波形の測定結果を示す。初期に比べ 1 分経過時に往復走時で 3.8 ns 付近の波形の振幅が大きくなったが、2 分経過時点では同じ位置の振幅が小さくなると共に、波形の周波数に変化が見られた。また、2 分経過以降は波形に大きな変化がないことが分かる。このことは塩水注入後 2 分経過するまではレーダで測定した位置での反射面の状態が大きく変化したことが、それ以降は定常状態になっていることを示している。変化が割れ目への塩水の浸透による影響と考え、注入直後から 2 分経過時点までは割れ目の塩水の濃度が増加する過程を波形の変化として捉えており、2 分経過以降は破過した状態を捉えていることを示している。

図-7 に塩水注入前と注入後の反射波形に対し、往復走時 2.7~8.0 ns の範囲において窓関数をかけた FFT（高速フーリエ変換）によりスペクトル解析を実施した結果を示す。往復走時 2.7~8.0 ns の反射波は、電磁波伝搬速度を 0.12m/ns とすると深度 16.2cm~48.0cm の反射面からの反射波に相当する。塩水注入前の初期波形においては 750MHz の卓越周波数を示すが、注入開始後 2 分経過後から 500MHz 以上の高周波数の振幅スペクトル強度は 350MHz 以下の周波数に比べ大きく減少する。このため 3 分以降では 750MHz と 350MHz が同程度の振幅スペクトル強度となり、相対的に卓越周波数は注入前の 750MHz より小さくなる。これはレーダによる測定位置から深度 16.2cm 以深の割れ目に塩水が浸透することにより反射面が高導電体となり、高周波数成分が小さくなったことによると考えられ、反射面①に相当する割れ目への塩水の浸透状況を捉えられたことを示している。

また、図-8 に塩水注入前の初期波形の振幅スペクトル強度に対する、注入後の各経過時間における波形の振幅スペクトル強度の比率をプロットしたものを示す。1 分経過後では比率 1.0~1.2 と周波数に対して大きな変化はないが、2 分経過以降では高周波数帯域の比率が大きく低下していることが分かる。(2)式に基づく、媒質の導電率が高くなるほど、低周波数に対して高周波数の反射強度が小さくなるというように、媒質の導電率により周波数依存性が異なっていることから、この比率低下の違いを用いて反射面に浸透した塩水の濃度を定量的に評価できる可能性がある。図-8 では、2 分から 8 分経過後の比率低下に比べ、11 分、15 分経過後の比率低下の方が大きい。このことは、時間の経過と共に浸透した媒質の導電率が増加したことを反映している可能性を示している。

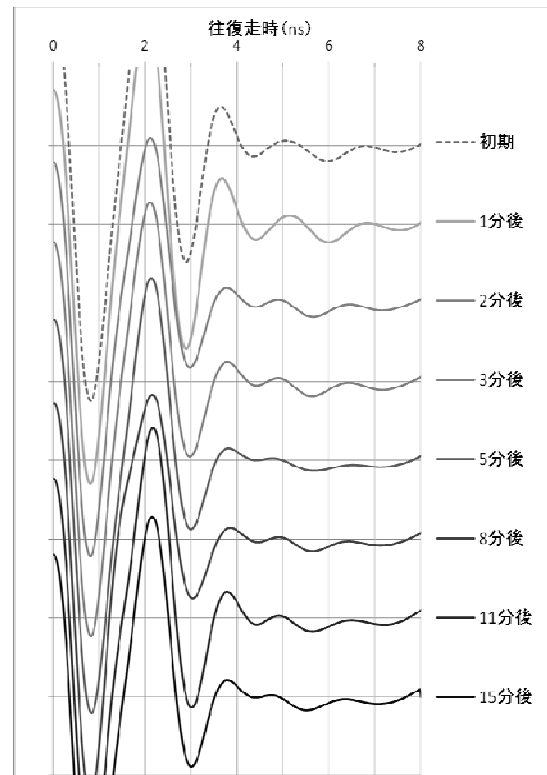


図-6 塩水注入後の反射波形変化の経時変化

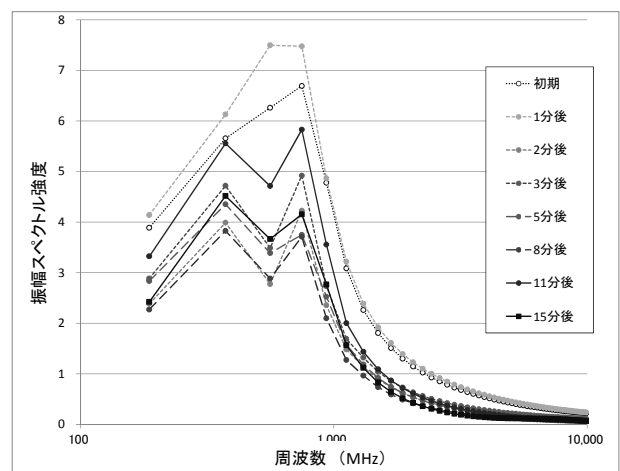


図-7 塩水注入前後の反射波形のスペクトル解析結果

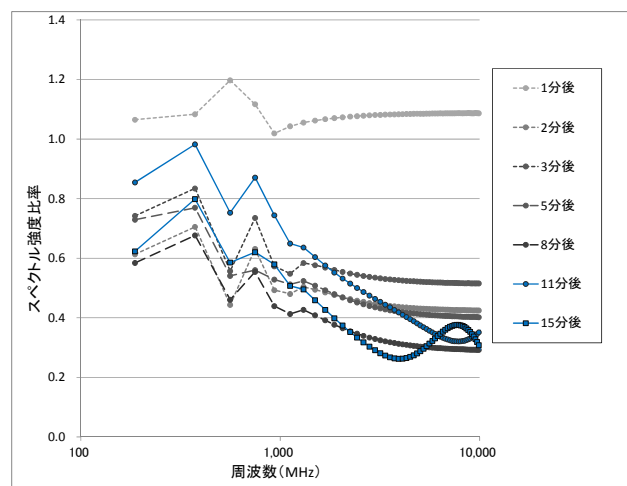


図-8 塩水注入前後の反射波形のスペクトル強度比率

(2) 複数ミニレーダ多点モニタリング結果

ミニレーダのモニタリング試験では、塩水の注入時に32分間で3.2Lの塩水が浸透し、その後の水の注入時に9分間で2.2Lの水が浸透した。これらの注入の一部は、パルスレーダモニタリング時と同様、露岩している側壁の割れ目から湧出していることが確認された。その湧出水の電気伝導度を測定した結果を図-9に示す。ボーリング孔への塩水注入から20分程度遅れて側壁からの湧水の電気伝導度が上昇し始め、水の注入に切り替えた後もしばらくは浸透した電気伝導度の高い塩水が側壁から湧出していたことが分かる。

図-10に各受信アンテナにおける塩水注入前の初期、塩水注入後30分経過時、水の注入に切り替えた後の41分経過時の反射波形を示す。各受信アンテナで、往復走時4.5～5.0 nsに見られるのが割れ目からの反射波で、6.0 ns付近で見られる大きな振幅はミニレーダのアンテナ特性によるリンギングと考えられる。電磁波伝搬速度を0.12m/nsとし、送受信アンテナの離隔距離を考慮すると、受信アンテナ1の往復走時4.8 nsにピークのある反射波は深度27cm、受信アンテナ2の往復走時3.3 nsの反射波は深度10cm、往復走時5.0 nsの反射波は深度24cmの反射面からの反射波と推定できる。受信アンテナ3の往復走時4.5 nsにも波形の偏極が見られるがリンギングの影響が大きく明瞭ではない。受信アンテナ2の往復走時3.3 nsの反射波は、推定深度から吹付けコンクリートと岩盤との境界面の反射と考えられる。割れ目からの反射波と考えられる受信アンテナ1の往復走時4.8 nsと受信アンテナ2の往復走時5.0 nsの反射波に着目すると、初期に対して注入後30分経過時に振幅が増加していることが分かる。また、41分経過時には受信アンテナ1では明瞭ではないが、受信アンテナ2においては30分経過時に比べ減少していることが分かる。このことは反射面①に相当する割れ目への塩水の浸透とその後の水の浸透を、受信アンテナ1や3では明瞭ではないものの、受信アンテナ2では反射波形にその変化で捉えられたものと考えられる。

受信アンテナ2の振幅の経時変化を図-11に示す。10分経過時から振幅が増加し始めていることと図-9に示すよ

うに側壁からの湧出水の電気伝導度が20分経過時から上昇し始めていることは、ボーリング孔に注入した塩水が10分後に受信アンテナ2と送信アンテナを結ぶラインに到達し、20分後に側壁の割れ目に到達するという浸透過程を反映していると考えられる。さらに34分経過時から振幅が減少していることは、これ以降、アンテナ付近の割れ目内が塩水から水に置換されたことを表している。一方、受信アンテナ1や3では振幅の変化が明瞭でないことは、塩水の浸透経路の不均質性を反映していると考えられる。これらの結果は、送受信アンテナのレイアウトを工夫することにより、塩水の浸透範囲を平面的に捉えることが可能であることを示している。

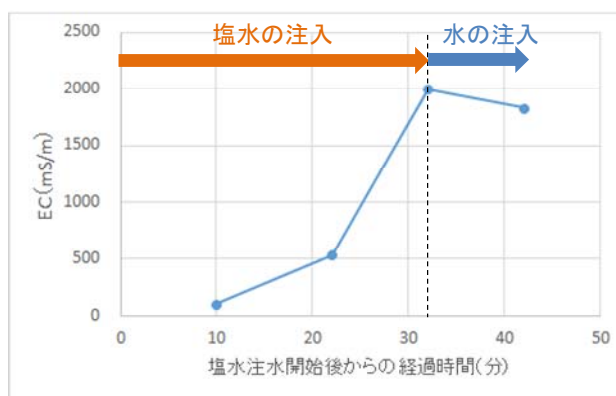
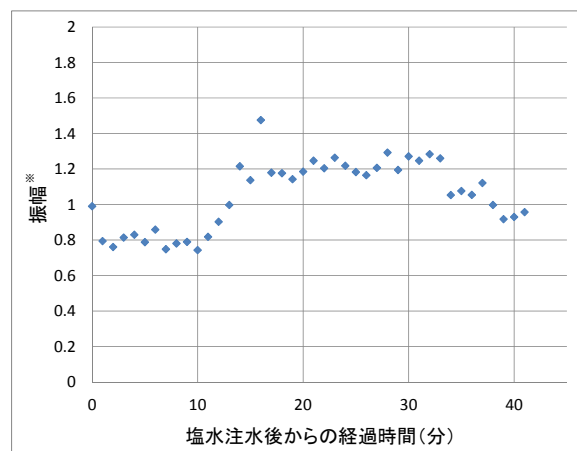
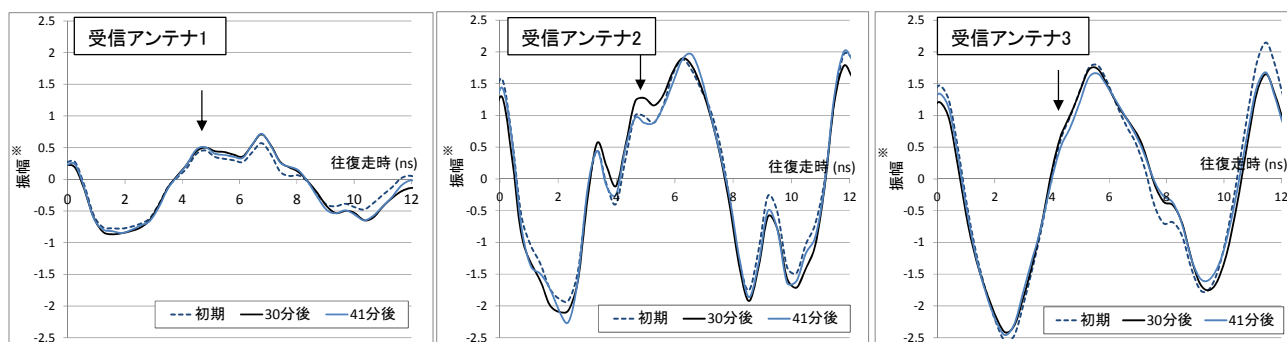


図-9 側壁の割れ目からの湧出水の電気伝導度



※ 振幅は直達波の振幅幅で正規化された値

図-11 受信アンテナ2の振幅の経時変化



※ 振幅は直達波の振幅幅で正規化された値

図-10 ミニレーダの各受信アンテナの反射波形変化

5. おわりに

地中レーダにより岩盤中の地下水の流動経路や割れ目内の地下水浸透状況を評価する方法の検証を目的として、深度 500m 研究アクセス南坑道において検証試験を行った。花崗岩が分布する西側側壁に低角度で交差する割れ目群に対して水や塩水の注入を行い、1.5GHz パルスレーダを用いた定点における Time-Lapse 測定とミニレーダシステムを用いた複数レーダによる多点 Time-Lapse 測定を実施した。その結果、以下の知見が得られた。

(1) 定点 Time-Lapse 測定によるモニタリングの結果、割れ目へ塩水の浸透に伴う経時的な反射波形の変化が確認できた。さらに反射波形の周波数特性の変化をスペクトル解析により評価した結果、塩水の浸透に伴い反射波形の高周波数成分が減少していることが捉えられた。このことから、実際の割れ目において地下水とは異なる高伝導率の媒体を浸透させ、地中レーダから得られる反射波形や卓越周波数の変化に着目することにより割れ目内の高伝導率媒体の浸透状況や濃度変化を非破壊的に把握できる可能性を示せた。

(2) 多点 Time-Lapse 測定によるモニタリングの結果、送受信アンテナのレイアウトにより、割れ目へ塩水や水の浸透に伴う反射波形の振幅の変化が明瞭に確認できるものと確認できないものが認められた。このことは割れ目内の浸透経路の不均質性を反映したものと考えられ、高伝導率媒体を割れ目内に浸透させ、複数のレーダによりその状況を測定することで、割れ目内の 2 次元的な浸透範囲を評価できる可能性を示せた。

本試験のミニレーダによる多点モニタリング結果に対しても FFT によるスペクトル解析を実施したが、サンプリング間隔が大きすぎたため塩水の注入前後で有意な周波数特性の違いを捉えることができなかった。データ取得に関する課題としてミニレーダシステムの改良を進める。また、塩水等電気特性の異なる流体の割れ目への浸透状態を非破壊で把握できるということは、トレーサ試験における 2 次元の破過過程のモニタリングや、グラ

ウト注入時のグラウト浸透範囲のモニタリングへの展開が可能であることを示している。このことから、本評価手法の実適用に向けたモニタリングの定量化に関する開発を進めて行く予定である。

参考文献

- 1) 原子力発電環境整備機構：地層処分事業の安全確保-確かな技術による安全な地層処分の実現のために-，NUMO-TR-11-01，2011。
- 2) 利岡徹馬・竹中久：地中レーダーによる花崗岩中の割れ目調査，第 8 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.79-84，1990。
- 3) Chandler, N., Wan, A., and Roach, P.: The Buffer/Container Experiment Design and Construction Report, AECL-11792 COG-97-186-I, 1998。
- 4) Ericsson, L. O., Christiansson, R., Butron, C., Hansson, K. and Lehtimäki, T.: Characterization of the Excavation Damaged Zone by means of Geological, Geophysical and Hydrogeological Co-interpretation, 8th Asian Rock Mechanics Symposium, RW2-3, Sapporo, Japan, 2014。
- 5) 升元一彦・栗原啓丞：模擬亀裂を用いた地中レーダによる亀裂性岩盤の地下水浸透状況調査に関する検討，応用地質，No.55, Vol.1, pp.17-27, 2014。
- 6) Masumoto, K. and Kurihara, K.: Evaluation of Groundwater Permeation in Fractures around Rock Cavern using Ground Penetrating Radar, 10th Asian Regional Conference of IAEG, TP4-P02, 2015。
- 7) 升元一彦・栗原啓丞：ミニボアホールレーダを用いた多点計測による 3 次元水理挙動の評価，平成 27 年度応用地質研究発表会講演論文集，pp.99-100, 2015。
- 8) 安達三郎：電磁波工学，電子情報通信学会（編），コロナ社，p.206, 1983。
- 9) 升元一彦・竹内竜史：地中レーダを用いた坑道近傍の岩盤内の水みちとしての割れ目の評価，応用地質，Vol.57, No.4, pp.154-161, 2016。
- 10) 地盤工学会：新規制定地盤工学会基準・同解説 岩盤の工学的分類法（JGS3811-2004），地盤工学会，pp.54-56, 2004。
- 11) 辻正邦・小林伸司・佐藤稔紀・見掛信一郎：瑞浪超深地層研究所における大深度下でのグラウト設計と施工実績および改良効果の評価，第 43 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp.7-12, 2015。
- 12) 栗原啓丞・升元一彦・竹内竜史：地中レーダを用いた坑道近傍の水みちとなる岩盤内割れ目の評価，土木学会第 71 回年次学術講演会，III-160, 2016。

MONITORING OF INFILTRATION OF SALINE WATER IN FRACTURES USING GROUND PENETRATING RADAR

Kazuhiko MASUMOTO, Tomoaki MATSUSHITA and Ryuji TAKEUCHI

The monitoring of groundwater condition in fractures around the rock cavern is important for safety assessment for high level radioactive waste. The GPR (Ground Penetrating Radar) method is unique technique to survey the water condition in fractures, indirectly, and with no disturbance of original groundwater condition. The authors conducted the GPR monitoring of infiltration of saline water on the side wall of the 500m access tunnel of Mizunami Underground Research Laboratory. The results showed that the difference of saline concentration in fractures caused the change of the reflection wave form and the intense of spectrum due to the results of spectrum analysis of reflection wave.