

神岡岩盤試験場におけるトレーサー試験について  
A Study on Hydraulic Properties of Rock Mass by Tracer Test in Kamioka  
Underground Laboratory

須藤 賢\*、鈴木健一郎\*、藤原紀夫\*、玉井昭雄\*\*  
Ken Sudo, Kenichirou Suzuki, Tosio Fujiwara and Akio Tamai

To evaluate hydraulic properties and hydraulic modeling of the fractured rock masses, we have carried out many kind of surveys and in situ tests such as joint survey with BTV, single-hole and cross-hole permeability test in our Kamioka underground rock laboratory. And we have already reported the results of them.

As next step, we performed NaCl and NaI tracer test at same field of cross-hole permeability test. The tracer injection length was 1m, and in each of three boreholes, we made three monitoring intervals using multi-packer system. We monitored the pore water pressure and electrical conductivity. Furthermore we injected nonradioactive colored water and checked the change in color of water. This paper describes the detail of trace test procedure and its results.

## 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物処分施設等の岩盤中の大規模地下空洞の設計・施工や安全評価を行う上で、岩盤の水理特性の評価・水理モデル化に関する研究開発はきわめて重要である。そこで、それらを検討する目的で、神岡鉱山内に開設された当社の岩盤試験場において研究を進めている<sup>1)2)3)</sup>。この岩盤試験場で、亀裂調査、BTV観察、単孔式透水試験およびクロスホール透水試験を実施し、試験結果については報告した<sup>4)5)</sup>。

今回、クロスホール透水試験<sup>6)</sup>で圧力応答の得られた観測区間を対象に、トレーサー試験を実施した。トレーサー注入孔は注入区間1mとし、観測孔は3孔、各観測孔は多段式パッカーにより観測区間1mの3区間を設け、間隙水圧およびトレーサー濃度を測定した。トレーサー材料としては主にNaClとNaIを使用し、一部、蛍光染料トレーサーを使用した。以下に、神岡岩盤試験場で実施したトレーサー試験方法およびトレーサー試験で得られた結果について述べる。

## 2. 調査・試験方法

調査・試験地点は当社が岐阜県神岡鉱山柄洞坑道内に保有した地下岩盤試験場で、標高約850m、土被り約175mの場所である。試験位置の岩種は、花崗岩質岩・片麻岩からなる伊西岩・空地鉱が現れている。試験位置・試験孔の位置は、クロスホール透水試験<sup>6)</sup>を実施した図-1に示す位置である。トレーサー試験用の試験孔はクロスホール透水試験で用いた径76mm・深度約13mの3本(H1、H2、H3)と今回追加した径86mm・深度約10mの1本(H4)の合計4本で、地下水位観測用として離れた位置に径86mm・深度約10mの観測孔(H5)を1本設けている。調査・試験は図-2に示す手順で行った。調査・試験は、まず、トレーサーの濃度を設定するため、試験坑道内と試験孔内および坑道内に敷設されている水道水について、水質試験を実施

\* (株)大林組技術研究所、\*\* (株)大林組土木技術本部技術第二部

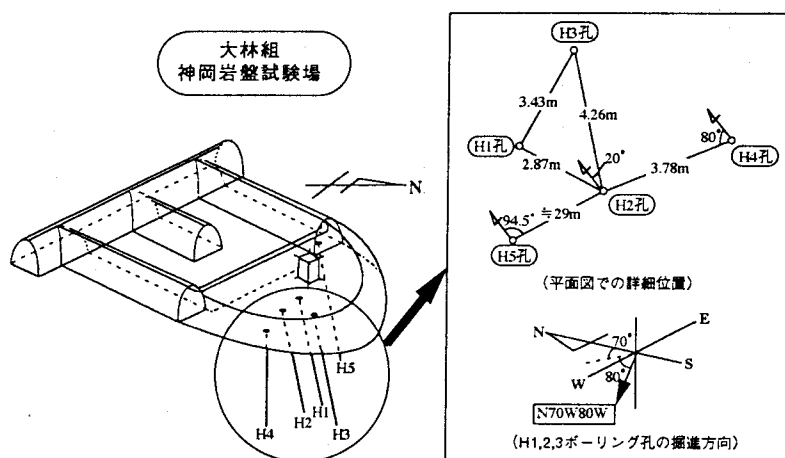


図-1 調査・試験位置

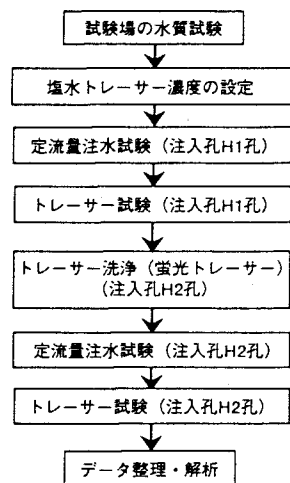


図-2 調査・試験フロー

した。その結果をもとに、トレーサー濃度を選定し、その測定方法を設定した。トレーサー試験は、注入孔をH1孔とした場合とH2孔とした場合の2種類の試験を実施した。また、トレーサー注入孔の変更時に、岩盤中に注入したトレーサーの洗浄を実施した。

図-3には定流量試験とトレーサー試験で使用した透水試験装置の概念を示す。トレーサー試験は、1孔をトレーサー注入孔、他の3孔を観測孔とし、注入孔ではダブルバックカーで注入区間を1mで区切り、観測孔では、多段式バックカーで3区間の観測区

間(1m)を設けている。なお、地下水位観測用のH5孔は、シングルバックカーを設置している。試験方法は、注入孔内の注入区間にまず水道水を定流量送水し、観測孔内に設置した圧力センサーによって各観測区間の圧力の経時変化を測定し、ほぼ定常状態に落ちついた時点で、注入区間の送水をトレーサー溶液に切り換えてトレーサー試験を開始した。なお、後述するが、注入区間での注水と観測区間での揚水による流動方向を規制した試験も実施した。試験孔の観測区間内の電気伝導度および圧力水頭はパソコンでモニターし、計測は自動計測とした。

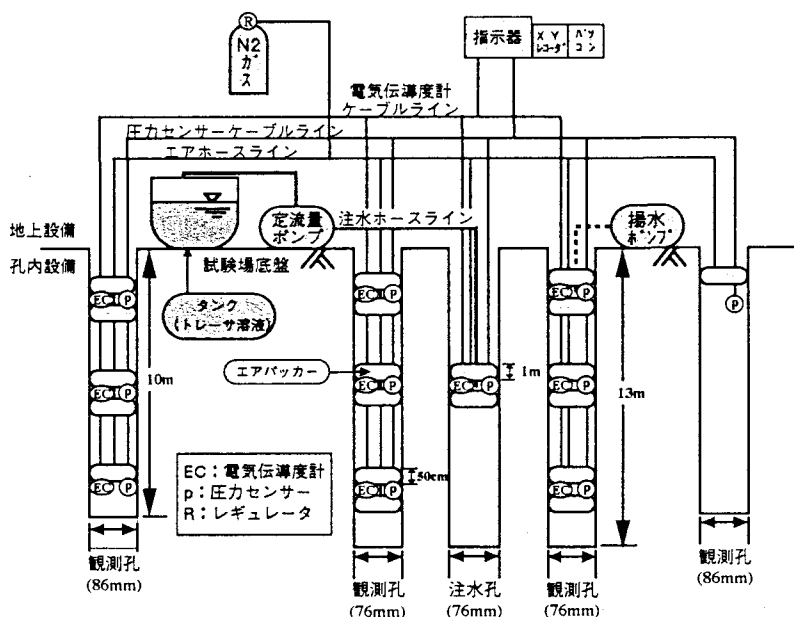


図-3 トレーサー試験装置概念図

### 3. 水質試験結果

調査対象の水は、トレーサー試験に係わるボーリング孔の孔内水およびトレーサー溶液に使用する試験坑

道内に敷設されている水道水とし、各ボーリング孔については、深度別の採水を実施して、深度方向の水質変化の有無を調査した。

現場測定した主な水質試験結果を図-4に示す。同図に示すように、現場で測定した試験坑道内の水温は約11℃で、また、pH、電気伝導度、アルカリ度の滴定結果から、H2孔の水がかなり特異な高pHを示している。これは、H2孔の直上の天端および底盤付近に

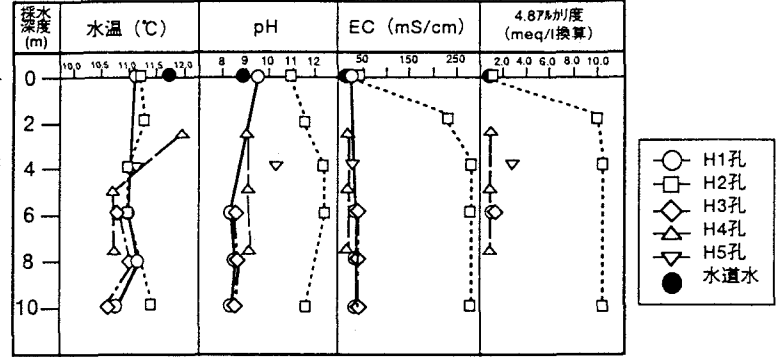


図-4 水質試験結果

他の試験で使用した静的破碎剤の残留物が残っており、これに接触した天端からの滴水や底盤の溜まり水がH2孔の孔口に供給されたため、トレーサー試験に影響しないように静的破碎剤の残留物を除去し、各試験孔の内はトレーサー試験開始約2カ月前に水道水で洗浄した。これらの試験結果を踏まえ、坑道内に敷設されている水道水を用いて、試薬のNaClを様々な濃度に溶かした溶液の電気伝導度の測定を行い、検量線を作成して、使用する塩水トレーサーはNaCl濃度0.2%とした。

#### 4. トレーサー試験結果

##### 4.1 注入孔H1孔②区間の塩水トレーサー試験

塩水トレーサー溶液の作製は、1m³のポリタンク内で水中ポンプによる攪拌を行いながら、NaCl原液濃度が0.2%になるように少量づつ添加して溶解させた。均質なトレーサー溶液が作成されていることを電気伝導度計をポリタンク内に挿入して確認し、その時の電気伝導度は、382ms/mである。

塩水トレーサー試験前に、注入孔H1②区間から定流量ポンプにより約70 cc/minを定流量注水し、観測孔H2②、④、⑥区間、H3②、③、④区間、H4①、③、④区間の圧力応答を確認する定流量透水試験を実施した。図-5には、各試験孔の観測区間の位置と注水孔H1孔②区間からの圧力応答パスを示している。図に示すように注水孔H1孔②区間からの圧力応答は各観測孔におけるすべての観測区間で認められた。しかし、地下水位観測用のH5孔においては圧力応答は認められなかった。

塩水トレーサー試験は定流量ポンプにより流量約45cc/minに設定した定流量注入で開始した。図-6には、塩水トレーサー試験で得られた各観測孔の内、H2孔の観測区間で測定された電気伝導度の経時変化を示す。図中、約820時間から1100時間の間はパソコンへの取り込みでデータを欠測したため、H2孔②区間はベンレーコーダに記録された値を示した。図に示すように、電気伝導度の上昇が認められるのはH2②区間のみで、経過時間約130時間でトレー

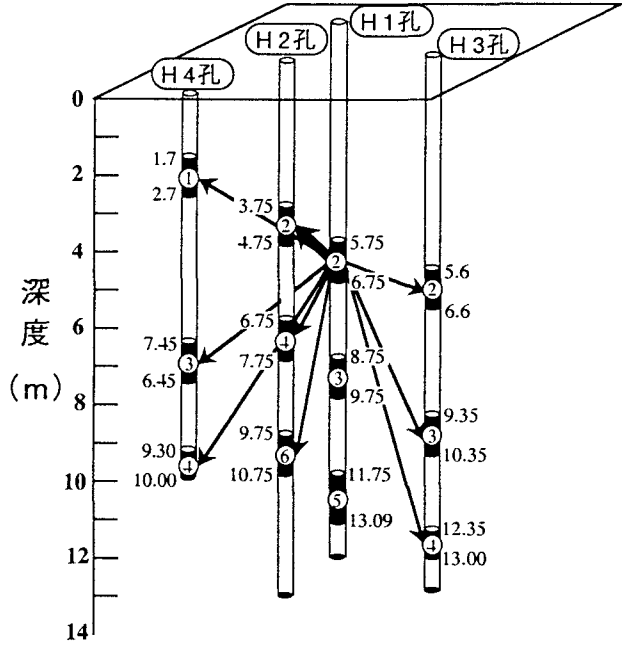
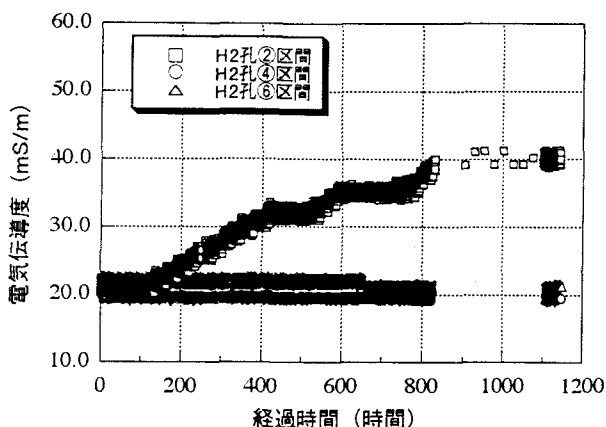


図-5 各試験区間位置と注水孔H1孔②区間からの圧力応答パス

サーは到達し、その後上昇して約800時間程度で落ちついている。他の観測区間ではほぼ一定の値で推移し、電気伝導度の上昇は認められない。また、他の観測孔においても電気伝導度の上昇は認められなかった。したがって、トレーサー破過曲線が得られたのはH1孔②区間からH2孔②区間の間である。この区間は、クロスホール透水試験で得られた区間透水係数が約 $7.9 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ と他の観測区間への区間透水係数に比べて約1～2オーダー大きい区間であり、最も通りやすいパスである。他の観測区間への破過曲線を得るためにはさらに約10倍以上の時間がかかることが予想される。



図－6 観測孔H2孔の電気伝導度の経時変化

#### 4.2 岩盤へ注入した塩水トレーサーの洗浄

次の塩水トレーサー試験準備のため、前回岩盤へ注入した塩水トレーサーにより上昇した電気伝導度を低下させることを目的に洗浄を実施した。塩水トレーサーの洗浄方法として、H1孔②区間から水道水を注入すると、先に注入した塩水トレーサーがさらに拡散することが懸念されるため、塩水トレーサーを注入したH1孔からはシングルバックカーとして揚水量約30cc/min～60cc/minの揚水を行い、塩水トレーサーが認められたH2孔②区間から約3cc/min～20cc/minの水道水を注入した。洗浄途中で、塩水トレーサー洗浄が行われていることを確認するため、水道水中に電気伝導度に大きく影響しない蛍光染料トレーサーとしてウラニンを溶解（約100ppm溶液）した溶液が各試験孔に到達するかを次に述べる二つの方法で調査した。第一の方法として、H2孔②区間の蛍光染料トレーサーの注入量を3cc/minとし、H1孔の揚水量を約30cc/minで実施した。蛍光染料トレーサー注入から約2週間程度後に観察した結果、H1孔から揚水された水はウラニンで着色されていることが観察され、H4孔①区間で採水した試料にはウラニンが観察されなかった。これは、H1孔の揚水の影響でH2孔の注入水がH4孔へほとんど回らないことが原因と考え、第二の方法として、H1孔の揚水を停止して、H2孔の注水（3cc/min）だけとした洗浄を開始した。その結果、約2週間後H4孔から採水した試料にはウラニンで着色されていることが観察された。ただし、H3孔においてはウラニンの着色は観察されなかった。塩水トレーサーの洗浄はほぼ終了したと判断し、次に述べるトレーサー試験を実施した。

#### 4.3 注入孔H2孔②区間のトレーサー試験

注入孔と観測孔は、図－5に示す中で、注入区間をH2孔②区間とし、観測区間はH1孔、H3孔、H4孔の図－5に示す各区間である。

塩水トレーサー洗浄において、蛍光染料トレーサーがH1孔②区間とH4孔①区間で観察されたことから、H2孔②区間を注入孔（注入量3cc/min）とする塩水トレーサー試験を実施した。しかし、約1カ月経過しても各観測孔の観測区間で測定した電気伝導度の上昇が認められないため、次に述べる試験方法に変更した。

これまでの試験では塩水トレーサーの電気伝導度による濃度測定および蛍光染料トレーサーが使用されているため、この試験では、まだ使用されていない種類のトレーサーとして、現場においてイオンメータにより簡便な分析作業で計測可能なヨウ素(I)イオンを選定した。また、トレーサー試験後、比抵抗トモグラフィを予定していたので、ヨウ素イオントレーサーは塩水にヨウ化ナトリウム(NaI)を約0.02%溶解させ、ヨウ素イオン濃度を112.6ppmとした。

注入孔H2孔②区間のヨウ素イオントレーサー試験は、H2孔②区間からヨウ素イオントレーサーの注入量

を6cc/minに増量するとともにH1孔②区間から約8.5cc/minの定量揚水をして、流動方向をH2孔②区間からH1孔②区間の方向に制限する試験を実施した。

H1孔②区間から揚水している水のサンプリングは、一日において、朝、昼、夕と夜間中に揚水された水をタンクにためて朝にタンクの中央深度から採水する合計4回とした。

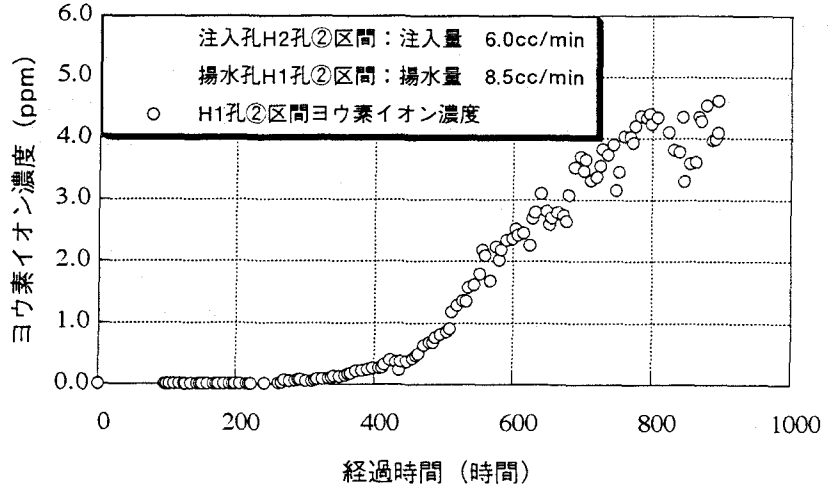


図-7 観測孔H1孔②区間のヨウ素イオン濃度

測定項目としては、揚水量、圧力水頭とH1孔②区間から揚水した試料のヨウ素イオン濃度を主として、塩素イオン、電気伝導度についても測定した。ここでは、H1孔②区間で揚水したヨウ素イオン濃度の経時変化について、図-7に示す。同図に示すように、トレーサー試験開始から約250時間後にH2孔②区間から注入したヨウ素イオンはH1孔②区間へ到達し、時間経過とともに濃度は増加して、約800時間でピークに到達している。

以上のように、クロスホール透水試験の圧力応答が認められた位置にトレーサー試験の注入孔と観測孔の観測区間を設け、試験を実施した。その結果、トレーサー破過曲線が得られたのは、観測区間中、注入区間と観測区間の距離が近く、クロスホール透水試験で得られた区間透水係数の大きいH1孔②区間とH2孔②区間の経路であった。また、洗浄中に蛍光着色トレーサーが観察されたH2孔②区間とH4孔①区間を結ぶ経路については、定量的な結果は得られなかった。これは、注入した塩水トレーサーの注入量に対してH4孔①区間位置の透水係数が $10^{-3}$ cm/sオーダーと大きいため、到達した塩水トレーサーへの希釈効果が大きかったものと推定される。

## 5. おわりに

クロスホール透水試験で圧力応答が得られた観測区間に対して、トレーサー試験を実施した。圧力応答が得られた9カ所の観測区間の内、クロスホール透水試験で得られた区間透水係数の大きい観測区間の1区間について、トレーサー破過曲線が得られた。今後、既存の調査試験結果を踏まえて、このトレーサー試験で得られた結果をもとに、トレーサー移行特性について水理モデル化とシミュレーションにより検討して行くつもりである。最後に、調査・試験に協力してくれた(株)大林組の土原久哉氏、玉野達氏、丹生屋純夫氏、(株)ダイヤコンサルタントの小俣明氏、二口克人氏、細谷真一氏、木村仁氏、また、調査・試験にいろいろと便宜をはかっていただいた神岡鉱業(株)藤井伸一郎室長、他関係者に感謝します。

## 【参考文献】

- 1) 須藤ほか：低透水性岩盤の亀裂特性と原位置透水試験・透気試験結果について、第49回年次学術講演会、PP142～143、1994
- 2) 鈴木ほか：地下岩盤試験場の水理特性に関する検討（その1）岩盤亀裂調査による等価透水テンソルの推定、第50回年次学術講演会、1995
- 3) 須藤ほか：地下岩盤試験場の水理特性に関する検討（その2）原位置岩盤のクロスホール透水試験結果について、第50回年次学術講演会、1995
- 4) 須藤ほか：神岡岩盤試験場でのクロスホール透水試験による水理特性の検討、第27回岩盤力学に関するシンポジウム、PP191～195、1996
- 5) 須藤ほか：神岡岩盤試験場におけるクロスホール透水試験による3次元岩盤水理特性について、大林組技術研究所報No.53、PP191～195、1996.6