

地下水人工かん養効果の判定手法の評価

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 独立行政法人農業工学研究所 公開日: 2024-02-13 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 石田, 聡, 今泉, 眞之, 土原, 健雄 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24514/0002000040

地下水人工かん養効果の判定手法の評価

石田 聡*・今泉眞之*・土原健雄*・森 一司**・轟木良則***

	目次	
I 緒言	-----	55
II 調査地区の概要	-----	56
1 地形・地質	-----	56
2 水理地質	-----	57
III 試験方法	-----	57
1 試験目的	-----	57
2 施設配置	-----	57
3 かん養条件	-----	58
4 トレーサー試験(平成12年度)	-----	58
5 体積含水率の測定(平成13年度)	-----	58
6 ラドン濃度の測定(平成13年度)	-----	58
IV 試験結果	-----	58
	1 トレーサー試験結果	----- 58
	2 体積含水率測定結果	----- 59
	3 ラドン濃度測定結果	----- 60
	V 考察	----- 60
	1 トレーサー試験	----- 60
	2 体積含水率測定	----- 61
	3 ラドン濃度	----- 62
	4 地下水人工かん養効果の判定手法について	----- 62
	5 問題点と今後の課題	----- 62
	VI 結言	----- 62
	参考文献	----- 63
	Summary	----- 64

I 緒言

地下水の人工かん養は地下水資源を保全するための有効な手法であり、諸外国では水質の浄化、安定的な水資源確保を目的に、既に数多くのプラントが稼働している。日本においても地盤沈下問題の対処法として、1950年代～70年代にかけて井戸法による深層地下水の人工かん養が盛んに試みられたが、目詰まり等の問題があり実施に移されたものはほとんどない。また、地下水資源の保全を目的とした払水法による人工かん養は、秋田県六郷町、山形県山形市、天童市などの自治体で実施されている。

払水法を用いた人工かん養についての研究としては、かん養施設の浸透能を評価した研究が比較的多いが(虫明, 1996)フィールドにおいて大規模な試験を実施し、不飽和帯の体積含水率の鉛直分布を測定してかん養水の浸透状況を考察した例は少ない。また、土壌中の飽和あるいは不飽和浸透については農学の分野に数多くの研究例があるが、水の深層への浸透、地下水かん養といった現象とのかかわりで捉えられている事例は少ないのが現

状である(岡, 1995)。

降雨が地表面から地下に浸透する場合、不飽和帯の水分量変化を伴いながら地下水面に至る。特に地表面に近い部分(深度1 m程度まで)においては降雨の浸潤およびその後の蒸発散によって水分量および土壌水のフラックスの時間変化が大きく、水分量と不飽和透水係数の間に顕著なヒステリシスが存在している(塩沢, 1997)。

一方、地表面に湛水がある場合、表面の境界条件は水の圧力(湛水深)で与えられ、浸入フラックスは土層の物理性と水分分布によって決まる。不飽和帯中の水分量が多く、不飽和透水係数の値が大きくなると、サクシオン勾配による水移動は重力による水移動に比べて無視できるほど小さくなる(岡, 1995)。地下水の人工かん養においては湛水が長時間継続されるため、上記の条件が当てはまる。人工かん養においては時間の経過と共に不飽和帯の水分量が上昇し、やがて定常状態に近くなるが、このような状態になってはじめてかん養の効果が地下水面に現れる。かん養量が比較的小さい場合、かん養効果は地下水水位の変化によっては判定し難い。不飽和帯から地下水面までに至る水の浸透過程の研究としては、不飽和帯の水分プロファイルを経時的に測定することによって降雨の地下浸透状況を追跡した例がある(Andersen and Sevel, 1974; 前田ら, 1986; 菊池ら, 1987)。

降雨による土壌水の降下浸透速度は、土壌水のトリチウム濃度分布によって推定され、これまでの研究ではいづれも不圧地下水の人工かん養速度は非常に小さいと推定さ

* 地域資源部地下水資源研究室

** 北陸農政局(現東北農政局)

*** 北陸農政局(現内閣府沖縄総合事務局)

平成14年12月10日受理

キーワード: 人工かん養・トレーサー・ラドン・中性子水分計・浸透

れている(今泉ら, 2000)。これに対して降雨に伴う地下水位の応答は日単位で現れることが多く, この相違を結びつけるメカニズムは未だ十分には解明されていない(田中, 1996)。地表に湛水された水が地下水面に到達するまでのタイムラグを推定する方法としては地下水中のラドン濃度を指標とした研究が報告されている(Hamada and Komae, 1994)。ラドン(^{222}Rn)は岩石や土粒子に極微量に含まれているラジウム(^{226}Ra)の崩壊によって発生する。地下水のラドン濃度は帯水層のラジウムの含有量, 粒子サイズ, 風化度, 間隙率を主因として規定されるラドン放出量から放射平衡濃度が決まり, 地層ごとに固有の濃度(泥岩: $10^0\sim 1$ ~ 花崗岩: $10^2\sim 3\text{Bq/l}$ のオーダー)を持つが, 地表水では供給が絶たれ濃度が非常に小さくなるため($10^{-2}\sim 0\text{Bq/l}$ のオーダー)浸透水のトレーサーとなりうる。

本論文では北陸農政局により新潟県長岡市において行われた地下水人工かん養試験地において, 地下水人工かん養効果の判定手法について検討するため, 蛍光染料を用いたトレーサー試験, 中性子水分計を用いた不飽和帯の体積含水率の繰り返し測定, 地下水のラドン濃度の測定を行い, 試験結果よりかん養水の鉛直浸透状況について考察するとともに, それぞれの手法の有効性について検討した。

本報告は北陸農政局農村計画部資源課よりの依頼研究および受託研究の一部である。また, 研究を進めるにあたっては関係各位のご指導, ご協力を頂いた。ここに, 感謝の意を表す。

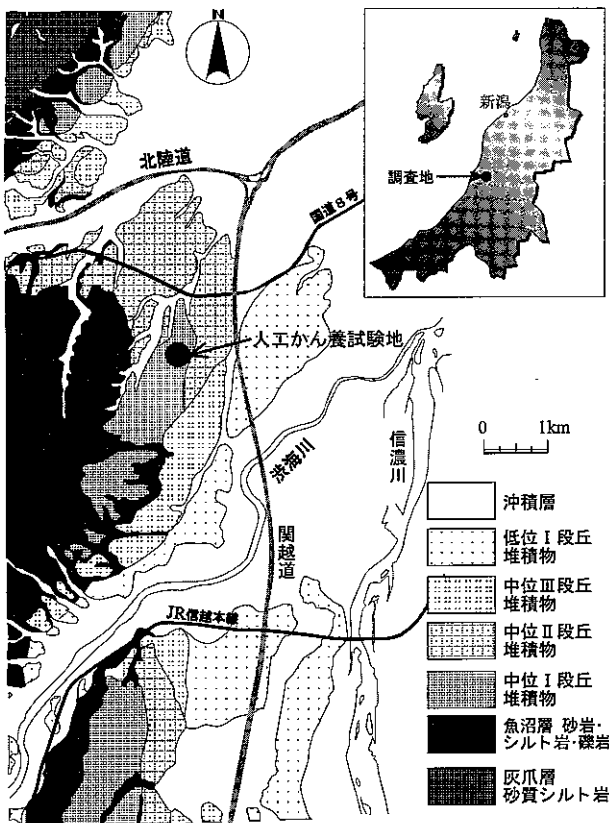


Fig.1 調査地周辺地質平面図
Geological map of study area.

II 調査地区の概要

1 地形・地質

調査地域は新潟県長岡市西部に位置しており, 東側約4kmには一級河川信濃川が流れ, その両岸には沖積平野が広がっている。信濃川左岸側は, 信濃川に並行する丘陵地が連なっており, その頂部の標高は最も高い八石山地で350mほどである。調査地は信濃川に最も近い丘陵地であり, 頂部は標高100~120mの段丘面である。頂部から西側にかけてはなだらかな緩斜面をなし, 東側は比高10m程の急崖から緩斜面となって沖積平野に続いている。丘陵地と沖積平野の境界域には河岸段丘が発達し, 長岡市周辺では高位より高寺面, 関原面(中位段丘), 上富岡面, 深沢面(低位段丘)の4面に区分されている(小林ら, 1991)。本地域周辺には, NNE-SSW方向のほぼ平行な褶曲軸が多数見られ, その多くは段丘も変形させている活褶曲である(小林ら, 1991)。

地下水人工かん養試験を行った施設はこの丘陵頂部(標高約100m)に位置しており, 最も高位な高寺面の分布域にあたる。本調査地域付近に分布する地質は下位より魚沼層, 第四紀更新世~完新世の段丘堆積物とローム層である(Fig.1)。

魚沼層は新第三紀鮮新世~第四紀更新世の堆積岩を主体とし, 砂岩, 礫岩, シルト岩よりなり, 本調査地域付近ではこのうち主に細粒砂岩が分布する。

段丘堆積物は厚さ5~15m以上で, その上部には中~後期更新世に堆積した風成の褐色風化火山灰層が分布

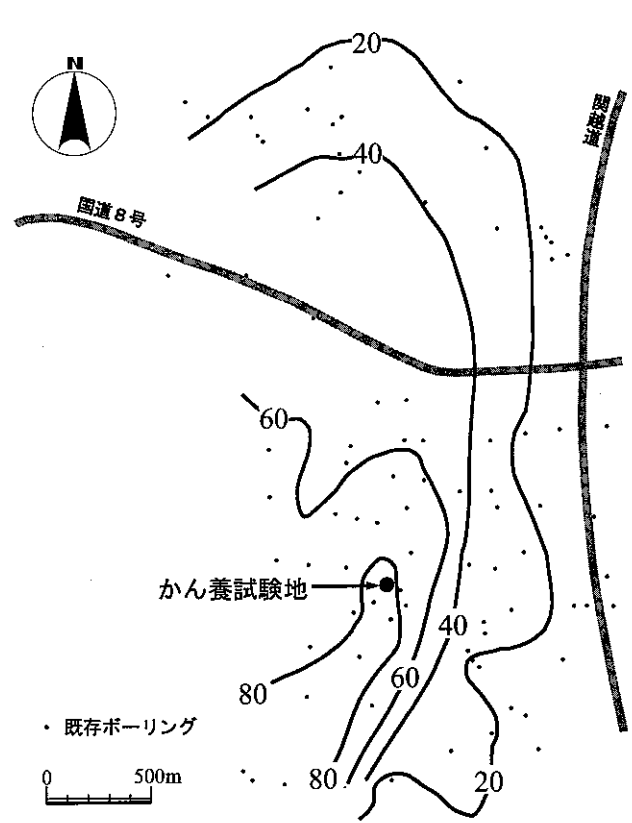


Fig.2 調査地周辺基盤等標高線図
Counter map of upper surface of basement.

する。この火山灰層は信濃川ローム層と呼ばれ、下位より谷上ローム層、米原ローム層、貝坂ローム層に区分されている。

2 水理地質

試験地における地質層序は上位から、表層のローム層（層厚約 2 m）、玉石混じり砂礫から成る段丘礫層（層厚約 10m）、シルトより成る魚沼層となっており、段丘礫層が不圧帯水層、魚沼層が基盤となっている。また段丘礫層中には深度 10m 付近に薄い砂質シルトが部分的に挟在する。

Fig.2 に調査地周辺の既存資料から作成した、魚沼層の上面等標高線図を示す。試験地は丘陵の頂部に位置しているが、水理地質的にも基盤の尾根部となっており、地下水位も周辺では最も高く EL.91m 程度である。

現場透水試験および粒度分析から求めた段丘礫層の透水係数は $2.7 \sim 9.4 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 、ローム層の透水係数は $4.0 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ であった（北陸農政局農村計画部資源課，2002）。

III 試験方法

1 試験目的

本試験地における人工かん養試験は平成 11～13 年度

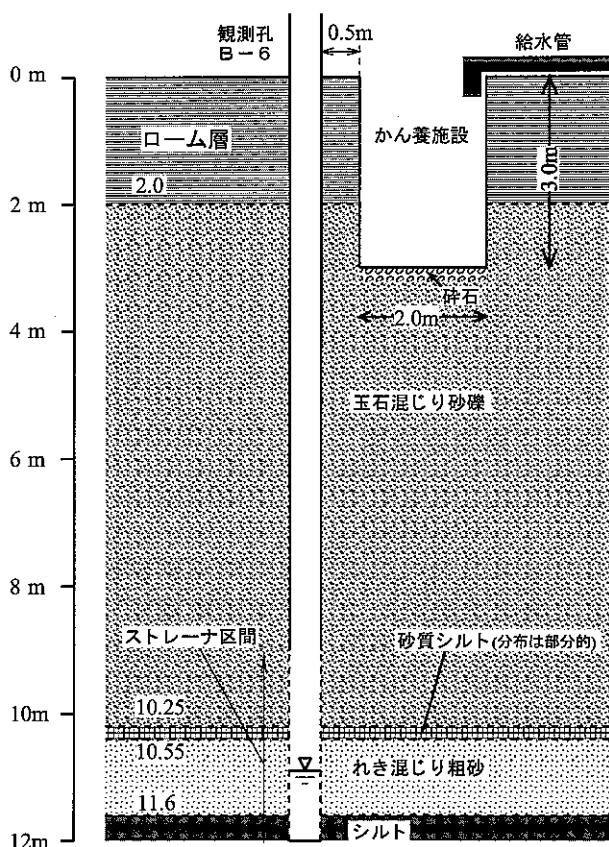


Fig.3 かん養施設断面図 (平成13年度)
Section around recharge pond in 2001.

に行われたが、本論文では平成 12 年度、平成 13 年度に実施された試験内容について報告する。研究目的および試験内容は以下の通りである。

平成 12 年度はかん養水の帯水層への到達速度を把握する事を目的とし、人工かん養試験現場にて蛍光染料を用いたトレーサー試験を実施した。平成 13 年度は不飽和帯中の水分移動を経時的に把握すること、ラドンのトレーサとしての有効性を判定することを目的とし、人工かん養試験中に中性子水分計による水分検層、地下水面付近のラドン濃度測定を実施した。

平成 12 年度と 13 年度では、施設配置、かん養条件等が若干異なるが、試験条件については主に平成 13 年度試験について記し、平成 12 年度試験条件については 13 年度試験との相違を記す。

2 施設配置

試験地は通常農地（畑）として利用されており、試験期間中は借り上げられて地下水人工かん養施設が設置された。Fig.3 に人工かん養試験地の施設断面図を、Fig.4 に平面図を示す。かん養施設は内径 2m、深さ 3.0m の円筒形であり、土留め壁にはライナープレートを使用している。底面は深 20cm は碎石で置換されている。

Table 1 に今回使用した地下水観測孔の諸元を示す。観測孔のストレーナは不圧帯水層の飽和帯に深に設置されており、それより上部は無孔管である。平成 12 年度試験においてはかん養施設の位置は平成 13 年度と同一であったが、形状は縦 2m × 横 2m の正方形、深さ 2.3m であり、底面は碎石に置き換えられていなかった。観測孔 B6 は平成 13 年度に掘孔されており、ストレーナ区間が平成 12 年度と異なっている。

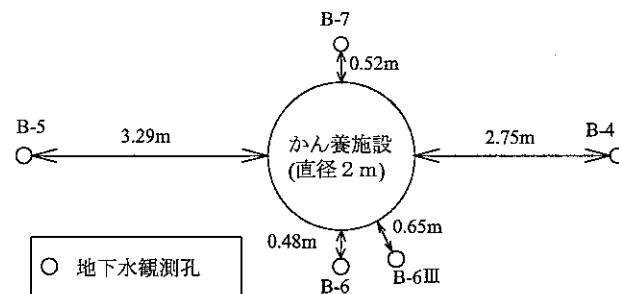


Fig.4 かん養施設平面図 (平成13年度)
Recharge pond and observation well in 2001.

Table 1 地下水観測孔諸元
Parameter of groundwater observation well.

項目 孔番号	地盤標高 (EL.m)	掘削深度 (m)	口径 mm	ストレーナ 区間 (GL.m)
B6	102.03	12.0	75	9.0 ~ 12.0 (HI2 は 10 ~ 11.5)
B6 III	102.03	13.0	50	10.0 ~ 13.0

給水は平成12年度、平成13年度ともに信濃川より揚水した水を貯留している近傍の貯水池から散水車で汲み上げ輸送する事によって行われ、現場に設置された水槽からかん養施設までは管が配され給水された。

3 かん養条件

かん養はかん養施設内にボールタップを設置し、湛水深が常に30cmに保たれるように設定され、原則として1日10時間行われた。本試験地においては複数回かん養試験が行われているが、ここでは本研究に関係のある部分について述べる。

トレーサー試験を行った平成12年度は、1日10時間のかん養を5日間行った。トレーサー試験はかん養初日に行ったが、実施日の平均かん養量は $3.4\text{m}^3/\text{h}$ であった。降水量は試験2日前・試験前日共に $10\text{mm}/\text{day}$ 、試験当日は $5\text{mm}/\text{day}$ であった。なお、日平均かん養量はかん養の継続と共に減少し、最終的には当初のかん養量の半分以下となった。

体積含水率およびラドン濃度の測定を密に行った平成13年度のかん養試験は10月19日から5日間行われた。試験前5日間の降雨は10月17日の $18\text{mm}/\text{day}$ のみ、試験中は10月22日の $5\text{mm}/\text{day}$ のみであった。Fig.5にこの時のかん養試験結果として、平均かん養量の日変化を示す。平均かん養量はかん養初日が $1.2\text{m}^3/\text{h}$ であったが、目詰まりによって徐々に低下し、最終的には当初の1/3程度となった。

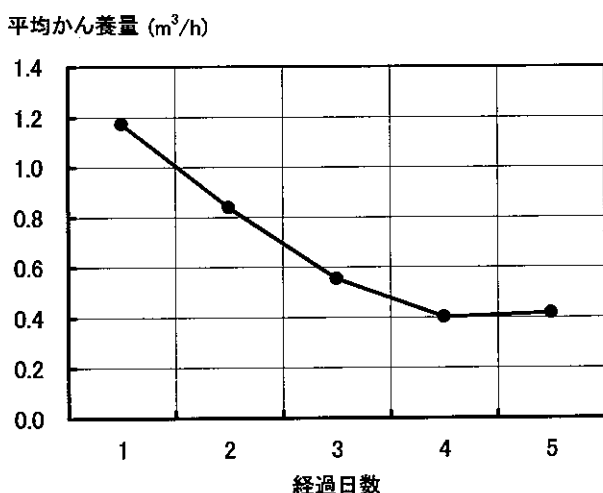


Fig.5 かん養試験結果 (平均かん養量)
Result of artificial recharge in 2001 (average recharge speed)

4 トレーサー試験(平成12年度)

トレーサーは帯水層内で比較的吸着の少ない蛍光染料であるローダミン WT を用いた(今泉・小前, 1999)。トレーサーの使用量は1kgとした。

本試験はかん養水の地下水面への到達を直接的に測定する事を目的としているので、トレーサーをかん養施設

に直接投入した。投入はかん養開始直後に行い、一定量の水(3.12m^3)を給水した後給水を停止させ、トレーサー水が完全に浸透するのを待った。その後かん養を再開した。

また、トレーサーの濃度を測定するため、かん養施設直近のB6孔の地下水面付近の水を採水器で採取した。採水は原則として試験開始直後から1時間間隔で行い、採水量は概ね100mlとした。採取した試料は研究室に持ち帰り、分光蛍光光度計(島津製作所製 RF-5300PC)による蛍光染料分析を行い、ローダミン WT の濃度を測定した。

5 体積含水率の測定(平成13年度)

本研究ではアクセスチューブとしてかん養施設直近(距離50cm)の地下水観測孔が利用可能なことから、B6 III孔において、挿入型中性子水分計を用いて不飽和帯の体積含水率を測定した。測定は今泉の方法(今泉, 1996)を参考にしたが、新たに秒速1cmの低速で検層器を巻き上げる事ができる自動巻き上げ器とデータ収集ソフトを開発し、地下水面から地表面まで連続的にデータを収集した。時間間隔は概ね1時間毎とした。試験期間中の地下水位はGL.-11.14 ~ 11.42 mと低く、地下水深(地下水面から魚沼層上面までの深度)は1m未満であった。

6 ラドン濃度の測定(平成13年度)

かん養試験中、かん養した水が地下水面に到達しているかを判定するために、B6孔およびB6 III孔において地下水面付近の水を概ね1時間毎に500ml採取してラドン濃度を測定した。ラドン濃度の測定には、採取した地下水を、シンチレータを溶解させたトルエンで現場にて溶媒抽出し、研究室にて液体シンチレーション法で測定する方法を採った(濱田ら, 1997)。検出限界は約 $0.1\text{Bq}/\text{l}$ 、測定誤差は今回の調査では約3%であった。

また採水と同時にかん養試験中の地下水位を測定した。

IV 試験結果

1 トレーサー試験結果

Fig.6にB6孔におけるローダミン WT 濃度の経時変化およびかん養期間を示す。トレーサー濃度のピーク時には採水作業中、目視でローダミン WT の赤色が確認できた。

トレーサー濃度はかん養開始(投入)から投入後3.5時間まではほぼ0であったが、4.5時間から上昇を開始し、9.5時間に最も高い値179ppbを取った。その後濃度は急激に減少したが、濃度が70ppbを切った時点(投入後13.5時間)で緩やかな減少に転じ、ばらつきはあるものの漸減しながら最終的には10ppb未満まで減少した。

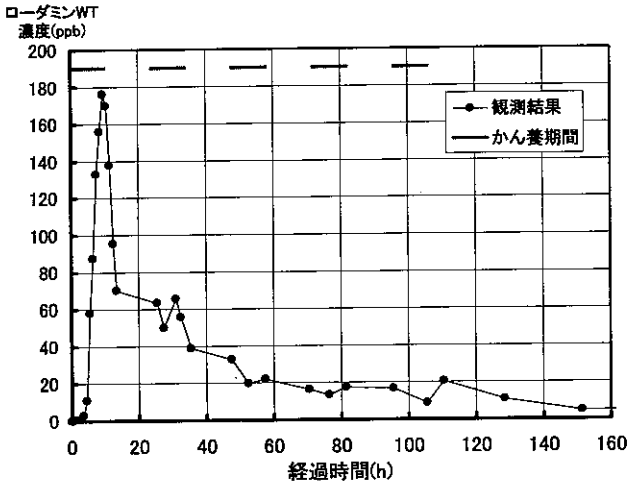


Fig.6 B6 孔におけるトレーサー濃度変化
Fluctuation of tracer concentration at B6.

2 体積含水率測定結果

Fig.7 に B6 皿孔によって測定されたかん養期間中の不飽和帯における体積含水率増加量経時変化を示す。期間中体積含水率は全域で増加あるいは横ばいを示し、減少する領域・時間帯はなかった。図中で黒く表示されている箇所が、当該時間帯における体積含水率の増分であり、黒い領域が太い場合、当該時間帯および深度における体積含水率の増加量が大きい事を示し、細い（あるいは黒い領域無しの場合、当該時間帯および深度において体

積含水率の増加量が少ない（あるいは横ばいである）ことを示している。

全体的には深度 3.0 ~ 3.5m の区間で体積含水率の変化が小さいが、浅層ではかん養水の横方向への拡散が少なく、かん養施設から 50cm 離れている観測孔周辺にかん養の影響が及ばなかった事によると考えられる。深度 9.5m 以深ではかん養前から体積含水率が高いが、これは観測孔周辺において当該深度付近で確認されている砂質シルトによるものと考えられる。

体積含水率の時間変化は以下のとおりである。かん養開始 1 時間後の計測では深度 3.5 ~ 4.5m の区間が最も大きな増加を示し、増加量は最大で 6.3 %であった。かん養開始 1 ~ 3 時間の間では前述の深度 3.5 ~ 4.5m の区間は依然として増加しているが、増加量は最大で 2.8 %であった。これに対して深度 4.5 ~ 6m での増加が顕著であり、最大で 3.7 %の増加を示した。かん養開始後 3 ~ 5 時間ではそれまで顕著だった深度 6m までの体積含水率の上昇が収まり、深度 9.5m 以深での増加が見られた。かん養開始後 5 ~ 7 時間では深度 9.5m 以深の増加率が最大となり、それ以浅の増加量はより小さくなった。かん養開始後 7 ~ 9 時間では全層を通じて体積含水率の上昇は殆ど見られなくなった。以上より、かん養試験中体積含水率が増加する領域が時間の経過と共に下方へと移動し、最終的には殆ど増加を示さなくなることが明らかになった。かん養期間全体（かん養開始~9 時間後まで）の体積含水率の変化は図の右端に示される。深度 3.5

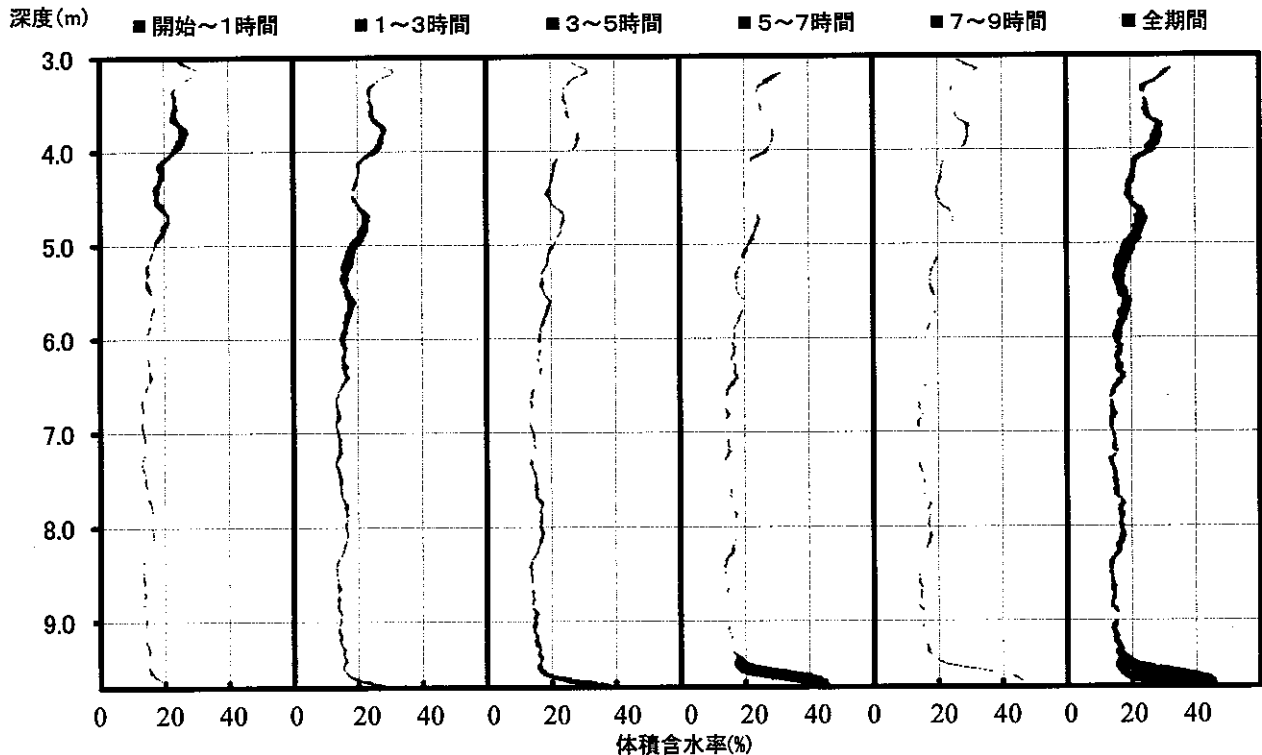


Fig.7 体積含水率増加量経時変化
Fluctuation of volume water contents.

～6.0mの体積含水率の上昇が、深度6.0～9.0mに比して大きい。これは地質条件の違いによるものと考えられる。深度3.5～6.0mの区間は深度6.0～9.0mの区間に比べて元々の体積含水率が大きいことから、細粒のシルト分を比較的多く含んでいる地層であると推定される。このため、深度6.0～9.0mの区間に比べて若干透水性が小さく、鉛直方向の流れを阻害して体積含水率の比較的大きな上昇を招いたと考えられる。B6孔の掘削時の記載によると、深度5.3～9.2mの区間では玉石の混入率が大きかったとあり、この推測と整合的である。深度9.7m付近では、挟在する砂質シルト層の透水係数が他と比べて若干小さいため、直上の体積含水率の増加量が比較的大きくなったと考えられる。体積含水率上昇部の前線が5～7時間で約7m下方へ移動したとして大凡の伝搬速度を計算すると、1.0～1.4m/hとなる。

3 ラドン濃度測定結果

人工かん養試験中のかん養水のラドン濃度はほぼ0

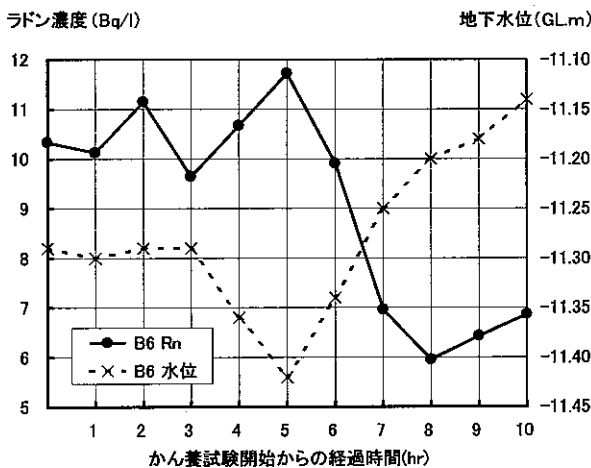


Fig.8 B6孔におけるラドン濃度変化
Fluctuation of Rn concentration at B6.

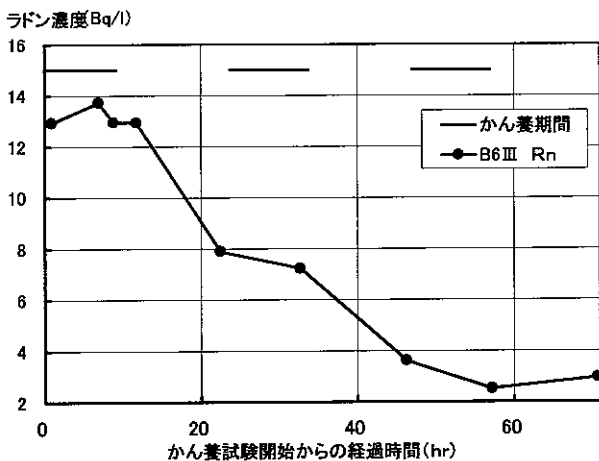


Fig.9 B6 III孔におけるラドン濃度変化
Fluctuation of Rn concentration at B6 III.

(0.00～0.18Bq/l)であり、地下水における濃度(10Bq/l以上)とは明らかに異なっており、これよりラドン濃度がかん養水のトレーサーとなり得ると予想された。

Fig.8にかん養試験初日における人工かん養試験中のB6孔のラドン濃度の時間推移を示す。

B6孔におけるラドン濃度はかん養開始～6時間後までは9.5～11.5Bq/lの範囲で推移したが7時間後に低下し、以後6～7Bq/lの値を示した。これは人工かん養試験の影響によってラドン濃度が低下したと考えられる。

Fig.9にはかん養試験期間中におけるB6 III孔でのラドン濃度変化を示す。試験開始直前のラドン濃度は13.3Bq/lであった。B6と比べて初期濃度が約2Bq/l程高いのは、両孔のストレーナ位置の違いによるものと考えられる(Table.1参照)。ラドン濃度はかん養試験初日から低下し続け、かん養3日目には2.5Bq/lに達した。

V 考察

1 トレーサー試験

トレーサーの挙動は、トレーサーの分解、吸着が無視できるほど小さいとき、一次元の移流分散方程式によって計算することができる。しかし本試験の場合、不飽和帯において体積含水率によって透水係数が変化すること、地下水面に到達したかん養水は、それまでの鉛直下方の流れから水平方向に拡がる流れになること等の理由により、厳密には一次元の移流分散方程式を用いて解析するには不適當である。しかし分散の程度を概略的に把握する手法としては簡便なため、分散係数が深さ方向に変化しない一次元移流分散方程式が成り立っているものとして、トレーサーの流出曲線の形状を解析した。流出曲線はトレーサーのパルス幅、移流に対する分散の速さの比であるS値によって大きく異なるので、それぞれについて実験結果に合致するような値を、流出曲線を描

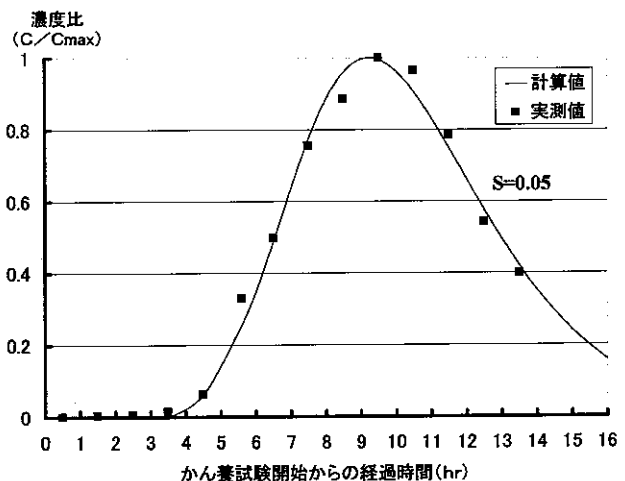


Fig.10 トレーサーの到達状況の解析
Analysis of tracer movement.

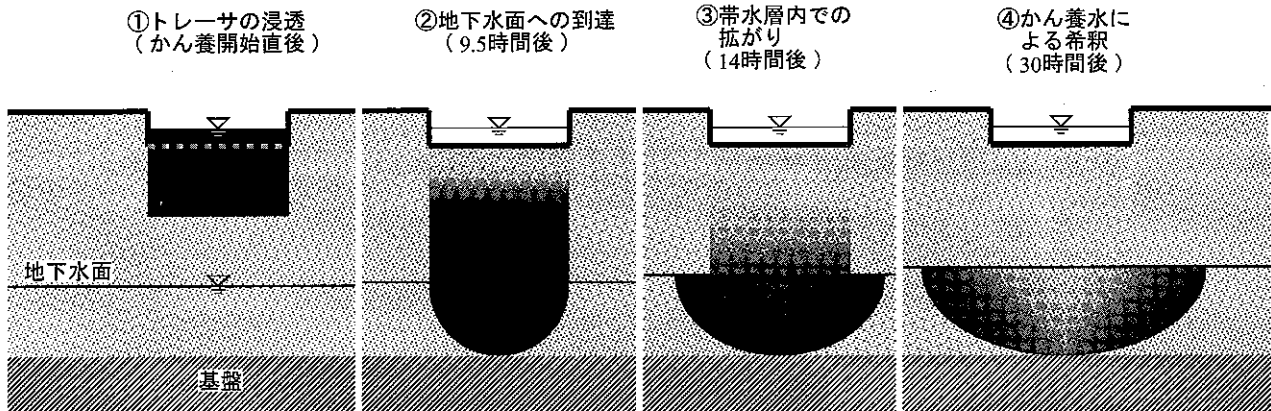


Fig.11 かん養試験中のトレーサーの挙動

Movement of tracer under examination of artificial recharge.

きながら求める。ここでは小前(1996)の方法を用いた。

トレーサーはかん養開始直後にかん養施設に投入され、一旦給水ポンプを停止させて地下に完全に浸透するまで待つ方法で投入されたが、この間 2.25 時間を要している。到達時間は濃度ピーク時の 9.5 時間とし、地下水流速が一定であると仮定すると、投入パルス幅(軸方向の移動距離に対するトレーサーの投入幅)は 0.24 となる。流下距離はかん養施設底面から地下水面までの 8.2m とし、平均流速を $8.2 \div 9.5 = 0.86\text{m/hr}$ として与えた。この条件でトレーサーの濃度変化を試算したところ、S 値に 0.05 を与えたときに最も実験値を満足する曲線が得られた。この数字は地下水の分散が比較的小さい事を示している。実験値に近似させた流出曲線の計算結果を Fig.10 に示す。横軸の時間軸はトレーサー投入後の経過時間、縦軸の濃度軸は計算上の最大濃度 (C_{max}) に対するそれぞれの経過時間における濃度 (C) の比 (C/C_{max}) を表している。

Fig.10 のトレーサー濃度ピークがシャープな形状を示していないのは、投入パルス幅が 2.25 時間と長いことによるものである。また実測値では Fig.6 に示すとおり、投入後概ね 13 時間を経過した時点でトレーサー濃度の減少割合は非常に緩やかになるが、計算値ではそうはならない。これは先に述べたとおり、地下水面に達したトレーサーの動きがそれまでとは異なるからである。Fig.11 にかん養試験中のトレーサーの挙動を模式的に示す。トレーサーを含むかん養水は、投入と同時にかん養施設から鉛直に浸透し(図中①)、やがて地下水面まで到達して周囲の地下水を置換する(図中②)。その後周囲に拡散し(図中③)、さらにトレーサーを含まないかん養水が地下水面に到達すると帯水層内で希釈され、濃度が漸減する(図中④)。人工かん養においてかん養水が地下水を置換しつつ拡がる動きは他の現場でも報告されている(Ishida ら, 1993)。かん養が終了するとトレーサーを含む地下水は分散しつつ動水勾配に従って帯水層内を移動するが、本試験地における水平方向の地下水流速は

かん養中の鉛直方向の流速と比べて非常に小さく、長時間かん養試験地に留まっていた。このため地下水中のトレーサーは流れ去らずに、かん養水による希釈を受けつつその濃度を徐々に減少させていったと推定される。いずれにせよトレーサー試験により、かん養後数時間の内に、かん養した水そのものが地下水面に到達している事が明らかになった。この速度は土壤水のトリチウム濃度分布によって推定された、降雨による土壤水の降下浸透速度と比べて遙かに大きく、現場条件の差はあれ、人工かん養の場合はより速い流れを生ずる浸透機構が存在することが明らかになった。

2 体積含水率測定

体積含水率の測定結果(Fig.7)より、人工かん養によって不飽和帯の含水率の上昇が浅層から始まり、徐々に深層に移行する様子が捉えられた。この結果は降水を対象とした場合の既往の研究結果(Andersen and Sevel, 1974; 今泉ら, 2000)と同様であるが、かん養中は排水による体積含水率の減少は見られず、体積含水率は単調増加を示した。このため、体積含水率の増加部が下降していく現象は、不飽和帯中の水分の見かけの降下と言うよりは、濡れ前線あるいは飽和前線の降下を表していると考えられる。

また、体積含水率の増加が深度 9m 以深まで達した後、体積含水率の変化がなくなる現象も観察されたが、これは人工かん養による浸透流が定常状態に近づいたためと解釈される。

地下水面付近の体積含水率の上昇はかん養開始後数時間で見られており、体積含水率上昇帯の伝搬速度も 1m/h 以上と非常に早いことから、前述のトレーサー試験結果同様比較的速い流れが発生していると推定される。

本試験結果により、10 時間のかん養試験の末期は定常状態に近いことが明らかになった。この状態が飽和状態であるかは明かでないが、一応飽和状態であると仮定し、かん養試験の最後の 1 時間の浸透量を用いて本試験

地の段丘砂礫層の飽和透水係数を雨水貯留浸透技術協会(1995)の方法によって求めると、 $3.75 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ と、現場透水試験から求めた段丘礫層の透水係数より若干大きな値となった(北陸農政局農村計画部資源課, 2002)。一般的に現場透水試験によって得られた透水係数は揚水試験によるものより小さくなる。試験空間のスケールから本試験において算出された透水係数は揚水試験結果により近いはずなので、この値は妥当な範囲内にあると考えられる。

3 ラドン濃度

体積含水率測定結果(Fig.7)とラドン濃度測定結果(Fig.8)を併せ見ると、体積含水率が増加を示さなくなったかん養開始7時間後から、ラドン濃度の顕著な下降が見られた。Fig.8には人工かん養試験中の地下水位の変化を併せて示しているが、地下水位もまたかん養開始7時間後になって初めてかん養前のレベル(GL.11.29m)を越えている。

これらの調査結果から、試験開始当初、かん養水は専ら不飽和帯中の含水率増加に寄与し、含水率の上昇が地下深部まで達した時点で、地下水かん養効果が現れると言える。

ただし、かん養開始7時間後以降のラドン濃度は減少したとは言え、6Bq/l程度とかん養水と比べて非常に高い。これはかん養水の浸透量が少ないため、地下水面で採取した水はかん養水と従前の地下水が混合されたものであったと推定されるが、一方で不飽和帯中に含まれる水のラドン濃度は空気と水の分圧の関係で飽和している場合に比べて低くなる(濱田ら, 1997)ので、かん養当初のラドン濃度の低下は、それまで不飽和帯の中にトラップされていた水が、かん養水の浸透によって押し出されたために起こったと可能性もある。濱田らの研究では対象が粘土層であったが、本研究の試験地は砂礫層で浸透速度も大きいためこの可能性は低いと考えられるが、本試験結果のみからはこの時点でかん養水が地下水面に到達したとは断言出来ない。いずれにせよかん養の効果が地下水面に及んでいる事は確かであり、ラドンのトレーサーとしての有効性を示唆するものである。

かん養試験期間中のラドン濃度変化(Fig.9)によると、かん養開始3日後にラドン濃度が極小値を取った。その濃度が小さいことから、この時点ではかん養水が地下水面に到達していると考えられる。

4 人工かん養効果の判定手法について

一般的に拡散法による地下水の人工かん養は、透水性が高く有効間隙率が大きい不圧帯水層を対象とするため、かん養量が大きくないと、地下水位の測定によってかん養効果を評価することが難しい。これは水田の地下水涵養機能を評価する場合も同様である。かん養量が小さい場合、不飽和帯の体積含水率の上昇を招くだけで地

下水のかん養に寄与していない可能性もあり、かん養施設からの浸透量が即地下水涵養量に直結するとは言えない。本研究では蛍光染料によるトレーサー試験、中性子水分計による不飽和帯の体積含水率の繰り返し測定、地下水面付近のラドン濃度の測定を行った。蛍光染料によるトレーサー試験では直接的にかん養水の到達が確認できるため、効果判定手法としては最も有効であるが、無害であるとはいえ地下水をトレーサーで着色するので、利用できる現場に限られる。中性子水分計による不飽和帯の体積含水率の繰り返し測定は体積含水率の上昇域が経時的に下降する状態が確認出来るので不飽和帯の監視という点では有効である。ただし、体積含水率の上昇が、より上位の不飽和帯の中にトラップされていた水がかん養水の浸透によって押し出された事によるものであるのか、かん養水が当該深度に直接到達した事によるものであるのかを判別する事は出来ない。地下水面付近のラドン濃度の測定では蛍光染料を用いたトレーサー試験ほど明瞭にかん養水の到達時間を判定する事は出来ないが、本質的にかん養水と地下水のラドン濃度が大きく異なることからかん養水の到達を把握出来、かつ地下水汚染を招かないという特徴を持っている。

5 問題点と今後の課題

本研究ではかん養施設から50cmの距離にある地下水観測孔を用いて体積含水率の測定および地下水の採取を行っている。今回用いた挿入型中性子水分計は、探査範囲が数十cm程度あるので、浅層の部分を除いて大きな問題とはならなかったが、採水箇所としてはやはりかん養施設直下の地下水面とする事が望ましい。特に既往の人工かん養試験の結果では、かん養水は地下水面に達した後、帯水層中を下方へと移動し、基盤に到達した時点で初めて横方向に拡がるという報告がある(Ishidaら, 1993)。このため、本研究によって得られたトレーサー濃度、ラドン濃度はかん養施設直下の地下水のそれとは若干異なる可能性は否定できない。地下水観測孔を斜孔とすれば、この問題は解決できるので今後の課題としたい。

VI 結 言

本研究では新潟県長岡市西部の段丘礫層が分布する丘陵地をフィールドとして地下水人工かん養試験を実施し、かん養中の不飽和帯における体積含水率の経時変化を測定した。また、かん養水到達の指標として蛍光染料を用いたトレーサー試験および地下水のラドン濃度の継続測定を実施した。

体積含水率の測定から、不飽和帯中の体積含水率が増加する部分の深度は、時間と共に下方に移動していくこと、体積含水率の増加が地下深部まで及ぶと、それ以後は変化しなくなることが明らかになった。

トレーサー試験からは、平均かん養量 3.4m³/h でのかん養時、かん養施設底面からの深度約 8m の地下水面上において、トレーサー投入 9.5 時間後に濃度ピークが現れ、かん養水が地下水面に達するまでの時間が比較的短いことが明らかになった。

ラドン濃度測定からは、不飽和帯の体積含水率が変化しなくなった時点で地下水中のラドン濃度が低下すること、ラドン濃度の変化は地下水位の変化と調和的であることが明らかになり、人工かん養効果の判定に有効であると判断された。

以上より、蛍光染料によるトレーサー試験、中性子水分計による不飽和帯の体積含水率の繰り返し測定、地下水水面付近のラドン濃度の測定は、それぞれ特徴を持っており、目的によって選択して使用すれば人工かん養による浸透流のモニタリング手法として有効であると言える。

参考文献

- 1) Andersen, L.J. and T. Sevel (1974) : Six years' environmental tritium profile in the unsaturated and saturated zones, *Grohoj Denmark, Isotope Technique in Groundwater Hydrology Vol.1, IAEA*, 3-20
- 2) 濱田浩正・今泉眞之・小前隆美 (1997) : ラドン濃度を指標とした地下水調査・解析法, *農業工学研究所報告*, 36, 17-50
- 3) Hamada H. and Komae T. (1994) : Analysis of recharge by paddy field irrigation using ²²²Rn concentration in groundwater as an indicator, *Journal of Hydrology*, 205, 92-100
- 4) 北陸農政局農村計画部資源課 (2002) : 地下水調査地下水強化手法検討型魚沼段丘地区報告書
- 5) 今泉眞之 (1996) : 中性子水分検層による第三紀層泥岩地すべり地のすべり面の判定方法, *地すべり*, 32(4), 9-18
- 6) 今泉眞之・小前隆美 (1999) : トレーサ法の基本原理と適用例, *農土誌*, 67(11), 41-48
- 7) 今泉眞之・小前隆美・二平 聡 (2000) : 東京都における被圧地下水の涵養機能—長期間のトリチウム濃度変化による涵養機能評価—, *応用地質*, 41(2), 87-102
- 8) Ishida S.・Inamoto A.・Kobayashi I.・Nakagawa K.・Fujinawa K. and Yokoyama T. (1993) : ARTIFICIAL RECHARGE OF GROUNDWATER IN DUNE SAND FOR USE OF THERMAL ENERGY, *International Association of Hydrogeologists*, 1993 Volume4, 205-213
- 9) 菊池良介・井原邦明・依光春実 (1987) : 阿蘇西麓台地における散水実験について, *地下水学会誌*, 29(1), 9-18
- 10) 小林巖雄・立石雅昭・吉岡敏和・島津光夫 (1991) : 長岡地域の地質, *地質調査所*
- 11) 小前隆美 (1996) : Sc-CyDTA トレーサによる地下水流動調査法に関する研究, *農工研報*, 35, 39-110
- 12) 前田 真・嶋田 純・田中 正・樫根 勇 (1986) : 豪雨時における関東ローム層の水収支, *日本水文科学会誌*, 16, 1-8
- 13) 虫明功臣 (1996) : 「雨水浸透と地下水涵養」雨水浸透促進技術, *地下水学会誌*, 38(4), 339-348
- 14) 岡 泰道 (1995) : 「雨水浸透と地下水涵養」雨水浸透, *地下水学会誌*, 37(4), 309-316
- 15) 塩沢 昌 (1997) : 「降雨浸透」畑地における降雨浸透, *日本水文科学会誌*, 27(2), 117-124
- 16) 田中 正 (1996) : 「雨水浸透と地下水涵養」自然涵養のプロセス, *地下水学会誌*, 38(3), 195-204
- 17) (社)雨水貯留浸透技術協会 (1995) : 雨水浸透施設技術指針 (案)調査計画編, 施設の形状と湛水深による計算図表

Method of Detecting Effect of Artificial Recharge of Groundwater

ISHIDA Satoshi, IMAIZUMI Masayuki, TSUCHIHARA Takeo,
MORI Kazushi and TODOROKI Yoshinori

Summary

River water that was pumped up was recharged artificially for five days from a drain pit of 200 cm (diameter)×300 cm(depth) to the aquifer(sand and gravel) in order to estimate method of detecting effect of artificial recharge of groundwater. During the experiment, for the clarification of groundwater flow velocity in unsaturated zone tracer test was done and ^{222}Rn concentration of groundwater and volume water contents by neutron moisture logging was monitored at every one hour. The result of tracer test shows that the highest concentration of the tracer flow reached the groundwater table which is 8.2m deeper than the bottom in recharge facility 9.5 hours later from injection. Another results show that the increasing point of water contents in unsaturated zone reached the groundwater table after 7 hours from the start of recharge. ^{222}Rn concentration of groundwater decreased after 7 hours. Therefore, tracer test, measurement of the ^{222}Rn concentration and measurement of volume water contents by neutron moisture logging are effective techniques for detecting the effect of artificial recharge of groundwater.

Keywords: Artificial recharge, Infiltration, Radon, Water content, Neutron