

平成 25 年度～平成 29 年度
高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する
技術開発事業

(岩盤中地下水移行評価確証技術開発)
-岩盤中物質移行特性評価技術の確証-

成 果 報 告 書

平成 30 年 3 月

一般財団法人 電力中央研究所

目 次

1. 研究概要	1-1
1.1 本研究の背景	1-1
1.2 目的	1-1
1.3 全体計画	1-2
1.3.1 研究の内容	1-2
1.3.2 研究工程	1-2
2. 適用性試験場の地質環境調査	2-1
2.1 はじめに	2-1
2.1.1 瑞浪超深地層研究所の研究施設の概要	2-1
2.1.2 深度 300m ボーリング横坑の概要	2-2
2.1.3 深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑の概要	2-3
2.2 深度 300m の地質環境調査	2-4
2.2.1 ボーリング掘削	2-4
2.2.2 各種検層	2-6
2.2.3 透水試験	2-7
2.2.4 高解像度 BTV 検層	2-9
2.2.5 ポイント希釈試験	2-12
2.2.6 音響トモグラフィ法	2-13
2.3 深度 500m の地質環境調査	2-16
2.3.1 ボーリング掘削	2-16
2.3.2 各種検層	2-17
2.3.3 透水試験	2-18
2.3.4 高解像度 BTV 検層	2-20
2.3.5 ポイント希釈試験	2-22
2.4 湧水割れ目の連続性	2-22
3. トレーサー試験に係わる室内試験	3-1
3.1 背景と目的	3-1
3.2 種々の試験方法および条件を適用した場合の分配係数の取りうる範囲	3-2
3.2.1 試験方法および条件の概要	3-2
3.2.2 試験結果例および考察	3-2
3.2.3 課題の抽出	3-5
3.2.4 まとめ	3-7
3.3 蛍光染料の分析や取り扱いについての検討	3-7
3.3.1 背景	3-7
3.3.2 検討の概要	3-7

3.3.3	蛍光染料の分析に影響を与える要因について.....	3-8
3.3.4	保管や蛍光染料の利用について.....	3-9
3.3.5	まとめ.....	3-9
3.4	割れ目充てん鉱物への核種の収着・脱離試験.....	3-10
3.4.1	背景.....	3-10
3.4.2	割れ目充てん鉱物の特定と試験の準備.....	3-10
3.4.3	収着試験.....	3-10
3.4.4	鉱物への収着・脱離試験.....	3-12
3.4.5	まとめ.....	3-12
3.5	収着バッチ試験による割れ目表面への吸着係数の評価.....	3-13
3.5.1	背景.....	3-13
3.5.2	試験方法.....	3-13
3.5.3	試験結果および考察.....	3-14
3.6	一次元モデルを用いた模擬トレーサー試験.....	3-16
3.6.1	背景.....	3-16
3.6.2	模擬単孔トレーサー試験.....	3-16
3.7	室内試験のまとめ.....	3-18
4.	原位置トレーサー試験.....	4-1
4.1	はじめに.....	4-1
4.2	トレーサー試験装置.....	4-1
4.2.1	トレーサー試験装置の全体構成.....	4-1
4.2.2	トレーサー試験装置の特徴.....	4-4
4.3	高割れ目密度の岩盤を対象としたトレーサー試験.....	4-9
4.3.1	試験対象割れ目.....	4-9
4.3.2	単孔トレーサー試験.....	4-11
4.3.3	孔間トレーサー試験.....	4-20
4.4	低割れ目密度の岩盤を対象としたトレーサー試験.....	4-24
4.4.1	試験対象割れ目.....	4-24
4.4.2	単孔トレーサー試験.....	4-27
4.4.3	孔間トレーサー試験.....	4-35
4.5	まとめ.....	4-39
4.5.1	原位置トレーサー試験装置の試作.....	4-39
4.5.2	単孔トレーサー試験.....	4-39
4.5.3	孔間トレーサー試験.....	4-40
5.	各種割れ目探査技術の開発.....	5-1
5.1	ラドン濃度計測による割れ目調査技術の開発.....	5-1
5.1.1	はじめに.....	5-1

5.1.2	ラドン濃度計測による割れ目幅の推定の概念.....	5-1
5.1.3	フェーズの実施概要.....	5-1
5.1.4	ラドンフラックスの測定.....	5-2
5.1.5	ラドン循環試験.....	5-3
5.1.6	瑞浪超深地層研究所全体のラドン濃度測定.....	5-7
5.1.7	まとめ.....	5-8
5.2	高粘性流体注入試験技術の開発.....	5-10
5.2.1	背景及び目的.....	5-10
5.2.2	試験結果.....	5-11
5.2.3	まとめ.....	5-14
5.3	割れ目の可視化技術の開発.....	5-15
5.3.1	はじめに.....	5-15
5.3.2	原位置レジンを注入試験の概要.....	5-15
5.3.3	レジンを充填確認用のボーリング孔の掘削.....	5-18
5.3.4	対象割れ目へのレジンを充填状況の確認.....	5-18
5.3.5	レジンを充填割れ目の可視化.....	5-19
5.3.6	まとめ.....	5-20
5.4	各種割れ目探査技術の室内比較試験.....	5-21
5.4.1	背景および目的.....	5-21
5.4.2	試験モデル.....	5-21
5.4.3	試験方法.....	5-21
5.4.4	試験結果およびまとめ.....	5-24
6.	天然トレーサーを利用した調査技術の開発.....	6-1
6.1	背景.....	6-1
6.2	研究項目.....	6-1
6.3	研究坑道における地下水調査.....	6-2
6.3.1	瑞浪における地下水調査.....	6-2
6.3.2	幌延における地下水調査.....	6-8
6.4	天然トレーサーの調査.....	6-14
6.4.1	サンプリング方法の調査.....	6-14
6.4.2	速い流れの指標となる物質.....	6-17
6.4.3	遅い流れの指標となる物質.....	6-19
6.5	調査結果のまとめ.....	6-22
7.	各種調査・試験技術の適用性評価と物質移行特性調査・評価フローの提案.....	7-1
7.1	各種調査・試験技術の割れ目開口幅推定に対する適用性評価.....	7-1
7.2	物質移行特性調査・評価フローの提案.....	7-3

8. まとめと今後の課題.....	8-1
8.1 適用性試験場の地質環境調査.....	8-1
8.2 トレーサー試験に係わる室内試験.....	8-2
8.3 原位置トレーサー試験.....	8-2
8.4 各種割れ目探査技術の開発.....	8-4
8.4.1 ラドン濃度計測による割れ目調査技術の開発.....	8-4
8.4.2 高粘性流体注入試験技術の開発.....	8-4
8.4.3 割れ目の可視化技術の開発.....	8-5
8.4.4 各種割れ目探査技術の室内比較試験.....	8-5
8.5 天然トレーサーを利用した調査技術の開発.....	8-6

目 次

－第 2 章－

図 2.1.1-1	岐阜県瑞浪市における瑞浪超深地層研究所の位置と地下研究施設概要	2-2
図 2.1.2-1	深度 300m ボーリング横坑構造図	2-3
図 2.1.3-1	深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑構造図	2-3
図 2.2.1-1	深度 300m ボーリング横坑ボーリング位置平面図	2-5
図 2.2.1-2	断層角礫岩（左）、割れ目面に付着する緑泥石（右）	2-5
図 2.2.2-1	13MI37 号孔のフローメーター検層の結果	2-6
図 2.2.3-1	透水試験装置の設置概念（左）と透水試験の作業フロー（右）	2-7
図 2.2.3-2	単孔式透水試験深度図（13MI37 号孔 22～24mabh 付近）	2-8
図 2.2.4-1	高解像度 BTV 検層装置（BIP-V）の設置概念図	2-9
図 2.2.4-2	詳細観察記録シート（13MI37 号孔：23.12mabh/N26W80E）	2-11
図 2.2.5-1	ポイント希釈試験装置の設置概念図（左）と試験手順（右）	2-12
図 2.2.6-1	音響トモグラフィ法の計測概念図	2-14
図 2.2.6-2	音響波形計測フロー（左）、データ解析フロー（右）	2-14
図 2.2.6-3	断面 1（発振周波数 20kHz）の速度分布図（左）、速度減衰率分布図（右）	2-15
図 2.3.1-1	深度 500m 南坑道研究アクセス 125m 計測横坑ボーリング位置平面図	2-17
図 2.3.1-2	花崗岩質ペグマタイト（左）、割れ目面に付着している緑泥石（右）	2-17
図 2.3.2-1	15MI53 号孔のフローメーター検層の結果	2-18
図 2.3.3-1	単孔式透水試験深度図（15MI53 号孔 14.90～15.57m 付近）	2-19
図 2.3.4-1	詳細観察記録シート（15MI53 号孔：14.67mabh/N14W87W）	2-21

－第 3 章－

図 3.2.1-1	花崗岩一次元モデルの外観（左）と試験系の概念図（右）	3-2
図 3.2.2-1	粉末状岩石に対するバッチ試験における経過時間と収着率の関係	3-3
図 3.2.2-2	一次元モデルを用いた模擬トレーサー試験におけるバックグラウンドイオン濃度の影響	3-3
図 3.2.2-3	岩石粉末を用いたカラム試験における流速依存性（Rb の場合）	3-4
図 3.2.2-4	Ba における分配係数の経時変化（粉末状と柱状岩石の比較）	3-5
図 3.5.3-1	粉体岩石に対する収着率の経時変化	3-15
図 3.5.3-2	粉体岩石の平均粒径の逆数と分配係数の関係	3-16
図 3.6.2-1	一次元モデルを用いた模擬単孔トレーサー試験結果	3-17
図 3.6.2-2	割れ目モデルを用いた 17S1 の評価結果	3-17
図 3.6.2-3	複合モデルを用いた評価解析結果	3-17

－第 4 章－

図 4.2.1-1	トレーサー試験装置の全体構成（2017 年度実施試験）	4-2
図 4.2.2-1	試験区間形成メッシュ部外観写真	4-4
図 4.2.2-2	ピストンパッカー 上：形状写真 下：構造図	4-4

図 4.2.2-3	六方バルブの設計図及び外観写真.....	4-6
図 4.2.2-4	六方バルブ実装の有無におけるトレーサー投入時の濃度比較.....	4-6
図 4.2.2-5	単孔トレーサー試験時の流路と試験手順（2016年度実施試験）.....	4-7
図 4.3.1-1	深度 300m ボーリング横坑のボーリング孔配置とトレーサー試験の対象割れ目..	4-10
図 4.3.1-2	13MI37 号孔掘削時の 12MI31 号孔の間隙水圧の応答.....	4-10
図 4.3.2-1	平成 26 年度単孔トレーサー試験結果（S0M3）.....	4-12
図 4.3.2-2	平成 26 年度単孔トレーサー試験結果（S1T4）.....	4-13
図 4.3.2-3	平成 26 年度単孔トレーサー試験結果（S1T5）.....	4-13
図 4.3.2-4	平成 27 年度単孔トレーサー試験結果（15S37T5）.....	4-16
図 4.3.2-5	平成 27 年度単孔トレーサー試験結果（15S37T6）.....	4-16
図 4.3.2-6	平成 27 年度単孔トレーサー試験結果（15S37M9）.....	4-17
図 4.3.2-7	平成 27 年度単孔トレーサー試験結果（15S37M10）.....	4-17
図 4.3.2-8	割れ目モデルにおける解析モデル.....	4-18
図 4.3.2-9	15S37M10 の評価解析結果.....	4-19
図 4.3.3-1	平成 27 年度の孔間トレーサー試験の破過曲線の例（W17_6 試験）.....	4-22
図 4.3.3-2	平成 27 年度の評価解析に使用した有限要素メッシュ.....	4-23
図 4.3.3-3	平成 27 年度の孔間トレーサー試験の評価解析結果の例（W17_6 試験）.....	4-23
図 4.4.1-1	研究アクセス南坑道 125m 計測横坑のボーリング孔配置とトレーサー試験の試験位置...	4-25
図 4.4.1-2	16MI59 号孔掘削時の 15MI52 号孔、15MI53 号孔の間隙水圧の応答.....	4-25
図 4.4.1-3	3 孔の試験対象区間の自然状態における水位差（平成 29 年度）.....	4-26
図 4.4.2-1	平成 28 年度単孔トレーサー試験結果（16S52T2）.....	4-28
図 4.4.2-2	平成 28 年度単孔トレーサー試験結果（16S52T3）.....	4-28
図 4.4.2-3	平成 28 年度単孔トレーサー試験結果（16S52T4）.....	4-29
図 4.4.2-4	平成 29 年度単孔トレーサー試験結果（17S59T13）.....	4-30
図 4.4.2-5	平成 29 年度単孔トレーサー試験結果（17S59T14）.....	4-31
図 4.4.2-6	平成 29 年度単孔トレーサー試験結果（17S59T15）.....	4-31
図 4.4.2-7	16S52T3 の評価解析結果.....	4-32
図 4.4.2-8	17S59T13 の評価解析結果.....	4-32
図 4.4.2-9	16S52T3 の評価解析結果（複合モデル）.....	4-34
図 4.4.3-1	孔間トレーサー試験の破過曲線の例（17W5259T13-15 試験）.....	4-37
図 4.4.3-2	孔間トレーサー試験の破過曲線の例（17W5259T13-15 試験）.....	4-38

－第 5 章－

図 5.1.3-1	ラドンによる割れ目幅計測の原理.....	5-2
図 5.1.4-1	ラドンフラックス測定のための浸漬試験.....	5-3
図 5.1.5-1	ラドン循環試験の概念図.....	5-3
図 5.1.5-2	深度 300m のボーリング横坑におけるラドン循環試験装置の設置状況.....	5-4
図 5.1.5-3	深度 300m ボーリング横坑におけるラドン循環試験対象割れ目と試験孔.....	5-5
図 5.1.5-4	深度 500m 研究アクセス南坑道におけるラドン循環試験対象割れ目と試験孔.....	5-6

図 5.1.5-5	深度 500m 研究アクセス坑道ボーリング横坑におけるラドン循環試験装置の設置状況	5-6
図 5.1.6-1	瑞浪超深地層研究所全体原位置ラドン濃度測定箇所と測定値	5-8
図 5.2.1-1	高粘性流体注入試験の評価方法概念図	5-10
図 5.2.2-1	深度 300 m ボーリング横坑高粘性流体注入試験結果 2 回目 (70 cp, 140 ml/min)	5-12
図 5.2.2-2	高粘性流体注入試験結果 2 回目 (32 cP, 40 ml/min)	5-13
図 5.2.2-3	深度 500m での想定された割れ目モデル	5-14
図 5.2.3-1	高粘性流体注入試験の手順	5-14
図 5.3.2-1	原位置レジン注入試験装置	5-16
図 5.3.3-1	対象割れ目上でのボーリング孔の交差位置	5-18
図 5.3.4-1	レジン注入孔周辺の割れ目分布の平面図 (左) と断面図 (右)	5-19
図 5.3.5-1	割れ目開口幅分布 (左: 17MI60 号孔/N28W76E、右: 12MI31 号孔/N29W88E)	5-20
図 5.4.2-1	一次元モデルの写真	5-21
図 5.4.3-1	一次元モデルでの透水試験の概念図	5-22
図 5.4.3-2	一次元モデルでの高粘性流体注入試験の概念図	5-22
図 5.4.3-3	トレーサー注入時の到達時間の概念図	5-23
図 5.4.3-4	ラドン濃度計測のための装置写真	5-23
図 5.4.3-5	ラドンフラックス計測の概念図	5-24

— 第 6 章 —

図 6.3.1-1	広域調査による瑞浪地域の地下水流動の概念図	6-2
図 6.3.1-2	採水地点位置図	6-4
図 6.3.1-3	地下水混合の概念モデル	6-4
図 6.3.1-4	前処理方法 (ガス化法と沈殿法) による ^{14}C 計測値の比較	6-4
図 6.3.1-5	ガス化法で求めた ^{14}C 濃度と δD (浅層水指標) の関係	6-5
図 6.3.1-6	^3He と ^4He の関係	6-6
図 6.3.1-7	希ガスから求めた涵養温度と酸素同位体比の関係	6-7
図 6.3.1-8	瑞浪における地下水流動概念図のまとめ	6-7
図 6.3.1-9	立坑掘削による新しい地下水の流入状況の解析値	6-8
図 6.3.2-1	幌延地区における地下水流動の概念図	6-9
図 6.3.2-2	幌延深地層研究センターの地下施設における採水地点	6-9
図 6.3.2-3	原位置での希ガス採水方法の概念図	6-9
図 6.3.2-4	幌延立坑での水質のヘキサダイアグラム	6-10
図 6.3.2-5	水素酸素同位体の関係	6-11
図 6.3.2-6	間隙率と平衡値の関係の計算値	6-12
図 6.3.2-7	^4He 濃度と Cl 濃度の相関	6-13
図 6.3.2-8	解析メッシュおよび西と東立坑断面での解析結果	6-14
図 6.4.2-1	^3H 濃度と ^{14}C 量の比較	6-18
図 6.4.3-1	地下水中の無機炭素濃度・ ^{14}C と沈殿法における値の関係	6-20
図 6.4.3-2	温度と希ガスの溶解度との関係	6-21

図 6.4.3-3 Through-Diffusion 拡散試験による分別係数の計測 6-22

－第7章－

図 7.2-1 物質移行特性調査・評価のフロー 7-4

表 目 次

第 1 章

表 1.3.2-1	研究工程.....	1-3
-----------	-----------	-----

第 2 章

表 2.2.1-1	各孔の調査項目.....	2-4
表 2.2.3-1	単孔式透水試験の結果（13MI37 号孔 22～24mabh 付近）.....	2-8
表 2.2.3-2	孔間透水試験の結果（13MI37 号孔 22.8～23.47mabh 区間）.....	2-8
表 2.2.4-1	深度 300m の全岩盤分離面、割れ目、開口割れ目の分布状況と主な卓越方向....	2-10
表 2.2.4-2	開口割れ目幅の計測結果.....	2-11
表 2.2.5-1	ポイント希釈試験の試験条件と結果.....	2-13
表 2.3.1-1	各孔の調査項目.....	2-16
表 2.3.3-1	単孔式透水試験の結果（15MI53 号孔 14.90～15.57m 付近）.....	2-19
表 2.3.3-2	孔間透水試験の結果（15MI53 号孔 14.90～15.57m 付近）.....	2-20
表 2.3.4-1	深度 500m の全岩盤分離面、割れ目、開口割れ目の分布状況と主な卓越方向....	2-21
表 2.3.4-2	開口割れ目幅の計測結果.....	2-22
表 2.3.5-1	ポイント希釈試験の試験条件と結果.....	2-22

第 3 章

表 3.2.3-1	分配係数のまとめ.....	3-6
表 3.3.3-1	蛍光染料の分析に影響を与える要因の抽出とその対策.....	3-8
表 3.4.3-1	試験に使用した鉱物と入手先.....	3-11
表 3.4.3-2	各鉱物に対する収着率と比表面積で規格化した収着率.....	3-11
表 3.4.4-1	Rb および Ba の脱離試験の結果.....	3-12

第 4 章

表 4.2.1-1	トレーサー試験装置の開発とその変遷.....	4-3
表 4.3.2-1	平成 26 年度の単孔トレーサー試験の試験条件（12MI30 号孔）.....	4-11
表 4.3.2-2	平成 26 年度の単孔トレーサー試験の試験条件（12MI31 号孔）.....	4-11
表 4.3.2-3	平成 27 年度の単孔トレーサー試験の試験条件（12MI31 号孔）.....	4-14
表 4.3.2-4	平成 27 年度の単孔トレーサー試験の試験条件（13MI37 号孔）.....	4-15
表 4.3.3-1	平成 26 年度の孔間トレーサー試験の試験条件とウラニンの回収率.....	4-21
表 4.3.3-2	平成 27 年度孔間トレーサー試験の試験条件とウラニンの回収率.....	4-22
表 4.4.2-1	平成 28 年度実施の単孔トレーサー試験条件（15MI52 号孔）.....	4-27
表 4.4.2-2	平成 28 年度実施の単孔トレーサー試験条件（15MI53 号孔）.....	4-27
表 4.4.2-3	平成 29 年度実施の単孔トレーサー試験条件（16MI59 号孔）：その 1.....	4-29
表 4.4.2-4	平成 29 年度実施の単孔トレーサー試験条件（16MI59 号孔）：その 2.....	4-29
表 4.4.2-5	平成 29 年度実施の単孔トレーサー試験条件（15MI52 号孔）.....	4-30

表 4.4.3-1	平成 28 年度の孔間トレーサー試験の試験条件とウラニンの回収率.....	4-36
表 4.4.3-2	平成 29 年度の孔間トレーサー試験の試験条件とウラニンの回収率.....	4-37

第 5 章

表 5.1.5-1	深度 300m ボーリング横坑道のラドン循環試験対象割れ目の特徴.....	5-5
表 5.1.5-2	深度 500m 研究アクセス南坑道のラドン循環試験対象割れ目の特徴.....	5-6
表 5.1.5-3	ラドン循環試験による開口幅と他の手法との比較.....	5-7
表 5.3.2-1	レジン特性試験の目的と結果.....	5-17
表 5.3.2-2	レジン注入区間.....	5-17
表 5.4.4-1	割れ目の評価方法と評価された割れ目幅.....	5-25

第 6 章

表 6.5-1	各地点および目的での地下水年代測定法の有効性.....	6-24
---------	-----------------------------	------

第 7 章

表 7.1-1	各調査・試験で取得される割れ目に関する情報.....	7-2
表 7.1-2	各調査・試験による深度 300m の試験対象割れ目の開口幅.....	7-2

1. 研究概要

1.1 本研究の背景

高レベル放射性廃棄物を地層処分する際の天然バリアの性能評価においては、人工バリアから漏出した放射性核種が地下水を輸送媒体として生物圏へ移動するといういわゆる「地下水シナリオ」が、重要なシナリオとなる。そのため、処分施設建設地点の岩盤における物質の移動特性を精度良く把握することが重要となる。

岩盤中での物質の移動特性を直接的に測定する手法として、トレーサー物質を含む溶液を岩盤に投入し、岩盤内でのトレーサーの移動量および移動速度を計測するトレーサー試験がある。わが国においては、従来非収着性のトレーサー物質を用いた試験研究はわずかながら行われている(池川ら、1996)。しかし、多くの放射性物質にみられるような収着性を有するトレーサー物質を使用したトレーサー試験が原位置の岩盤を対象として実施された例は、海外では若干あるものの、わが国ではほとんどない(例えば、Winberg et al., 2000: 核燃料サイクル開発機構、1999)。そのため、特に収着性物質の岩盤中での移動特性を精度良く把握するためのトレーサー試験技術およびその評価技術を開発しておく必要がある。

また、亀裂を有する岩盤においては、地下水は岩石基質部に比べて透水性の高い割れ目を主に選択的に流れていく。そのような岩盤中での物質の移動には、割れ目や岩石基質部の様々な幾何形状・化学特性が関与している。これらの特性値のうち、特に割れ目の幾何形状に関しては、トレーサー試験の結果を解釈する上で不可欠なものである。そこで、トレーサー試験を補完するために、割れ目の分布や開口幅、割れ目内での流動形態等を推定する技術の開発も必要である。

一方、岩盤中での物質の移動特性を測定する手法としては、前述のように人工的にトレーサーを投入する方法の他に天然に存在するトレーサーを利用する方法もある。天然トレーサーを用いた調査方法は、これまでに地下水年代測定技術として開発してきた(長谷川、2013)。この技術は精密調査段階における調査結果の確認や水みちの評価などにも有効と考えられるため、精密調査段階で適用できるように整備しておく必要がある。

1.2 目的

本研究においては、高レベル放射性廃棄物地層処分の天然バリア性能評価に資するため、岩盤中での特に割れ目を介した物質移動特性を高精度に調査・評価する技術の確立を図る。

1.3 全体計画

1.3.1 研究の内容

本研究においては、岩盤中での特に割れ目を介した溶質移行特性を高精度に調査・評価する以下の技術の開発・確立を行い、原位置試験により国内の地質環境に対する適用性を実証する。

(1) トレーサー試験技術

岩盤中での地下水溶質の移行特性を直接的に測定する手法として、原位置トレーサー試験技術を開発する。具体的には、放射性核種の多くは岩盤へ収着する性質を有するため、収着性トレーサーも使用可能な原位置試験装置の開発を行う。また、地下水溶質の移行には様々なパラメータが関与するため、トレーサー試験の結果から、それらのパラメータの値を同定する手法も併せて開発する。特に、これまで開発してきた孔間でのトレーサー試験技術に加えて単孔でのトレーサー試験技術についても開発する。

(2) 各種割れ目探査技術

トレーサー試験を補完する技術として、溶質の主な移行経路となる岩盤割れ目の幾何形状を推定するための割れ目探査技術についても併せて開発する。具体的には、溶存ラドン濃度計測による割れ目開口幅の調査技術、高粘性流体注入による割れ目内での流動形態に関する調査技術、レジジン（樹脂）注入による割れ目の可視化技術を開発する。

(3) 天然トレーサーによる調査技術

比較的狭いスケールでの調査となるトレーサー試験を補間するために、天然に存在する物質をトレーサーとみなした物質移行特性の評価技術の開発を行う。具体的には、立坑掘削時の地下水の水質・地下水年代などの変化、地下水と岩石の相互作用などから、物質移行パラメータを求める技術を開発する。

1.3.2 研究工程

平成 17～24 年度の前フェーズでは、トレーサー試験技術について、収着性トレーサーの使用も可能な原位置試験装置を試作するとともに、試験結果から割れ目の開口幅や分散長等の溶質移行パラメータを同定する評価手法を開発した。また、トレーサー試験を補完する割れ目探査技術として、割れ目内地下水の溶存ラドン濃度と岩石表面のラドンフラックスから割れ目開口幅を推定する技術、高粘性流体の注入により流れの次元や割れ目の開口幅を評価する技術、物理探査（音響トモグラフィ）により割れ目分布を調査する技術についても、原位置試験装置を試作するとともに、試験手法および試験結果の評価手法の基本的な整備を終了した。そして、割れ目の分布が比較的単純なスイスの Grimsel Test Site において適用性試験を実施し、これら試験・探査技術の有効性を示した。

現フェーズでは、研究期間を平成 25 年度から平成 29 年度の 5 ヶ年とし、1.3.1 に示した(1)トレー

サー試験技術、(2)各種割れ目探査技術、(3)天然トレーサー調査技術について開発・高度化を行うとともに、国内の試験場において原位置試験を行い、我が国の地質環境に対する適用性を実証する。

今フェーズの研究工程を表 1.3.2-1 に示す。

表 1.3.2-1 研究工程

事業項目	平成25年度	平成26年度	平成27年度	平成28年度	平成29年度
トレーサー試験技術の高度化	単孔式・孔間トレーサー試験技術				
割れ目探査技術の高度化	ラドン濃度計測試験技術				
	割れ目可視化技術				
国内の地下環境への適用	(深度300m) 試験場の地質環境調査 (深度500m)				
	単孔式・孔間トレーサー試験				
	トレーサー試験予測解析		トレーサー試験評価解析		
	ラドン濃度計測試験				
	高粘性流体注入試験 樹脂注入試験 各手法の適用性評価				
天然トレーサーを利用した調査技術の開発	採水方法の検討		幌延・瑞浪での採水		
	評価指標の調査		評価方法の検討		
	評価方法の提案				

※ 青線は机上検討を、赤線は室内・原位置試験を表す

参考文献

池川洋二郎, 志田原巧, 中川加明一郎, 日比野敏(1996): 液体トレーサーによる不連続性岩盤中の浸透経路評価, 電力中央研究所研究報告 U96006.

Winberg, A., Andersson, P., Hermanson, J., Byegård, J., Cvetkovic, V., and Birgersson, L. (2000): Äspö Hard Rock Laboratory. Final report of the first stage of the tracer retention understanding experiments, SKB Technical Report TR-00-07.

核燃料サイクル開発機構(1999): わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次とりまとめ—, 分冊1 わが国の地質環境, pp. IV-102-104.

長谷川琢磨(2012): 地下水年代測定技術の開発, 土木学会誌, Vo. 97, No. 2, pp. 34-35.

2. 適用性試験場の地質環境調査

2.1 はじめに

本事業で開発した各種調査技術について、平成 20 年より比較的単純な割れ目分布をもつスイスの Grimsel Test Site に適用し、平成 24 年度までに技術の有効性を概ね確認することができた。次の目標は、日本国内の岩盤に対してもこれらの技術が適用できることを示すことである。日本国内の岩盤を対象とした調査として、平成 24 年度～平成 28 年度にかけて独立行政法人日本原子力研究開発機構（JAEA）瑞浪超深地層研究所の深度 300m ボーリング横坑、深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑で地質環境調査を実施した。本調査は、トレーサー試験等の適用性試験を実施する試験場の地質環境特性を把握すること、以下に示す割れ目条件に適合する場を選定することを目的に実施した。

- ・ 単一割れ目
- ・ 割れ目が 2～4m は連続していること
- ・ 割れ目の透水量係数が $1.0E-07 \text{ m}^2/\text{sec}$ オーダー程度
- ・ 坑道壁面からの深度で 30m 以内（最大 50m）

2.1.1 瑞浪超深地層研究所の研究施設の概要

瑞浪超深地層研究所は、JAEA により進められてきた結晶質岩と淡水系地下水を対象とした深地層の研究施設である。本研究所の研究坑道については、平成 20 年度に深度 300m ボーリング横坑が完成、平成 24 年度に立坑部は深度 500m まで到達、平成 25 年度に深度 500m ステージの水平坑道の掘削が完了している（JAEA 東濃地科学センターHP）。本研究所の位置と研究坑道の構造図を図 2.1.1-1 に示す。本研究所周辺の地質は、基盤をなす白亜紀後期～古第三紀前期の土岐花崗岩体を新第三紀中新世の堆積岩（瑞浪層群）と新第三紀中新世～第四紀更新世の砂礫層が不整合に覆っている（糸魚川, 1980）。本研究所の用地周辺における瑞浪層群の層厚は百数十 m であり、深度 300m ボーリング横坑および深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑は土岐花崗岩体中に建設されている。なお、本研究所およびその周辺の土岐花崗岩については JAEA が調査しており、低角度（ $0\sim 30^\circ$ ）傾斜の割れ目密度が深度によって異なることから、上部割れ目帯、下部割れ目低密度帯に分類されている（三枝・須山, 2000）。また、立坑掘削時の壁面観察等の結果では、深度 320m 以深から低角度割れ目の出現頻度が小さくなり、深度 460m 以深ではほとんど現れなくなることが確認されている（鶴田ほか, 2013）。

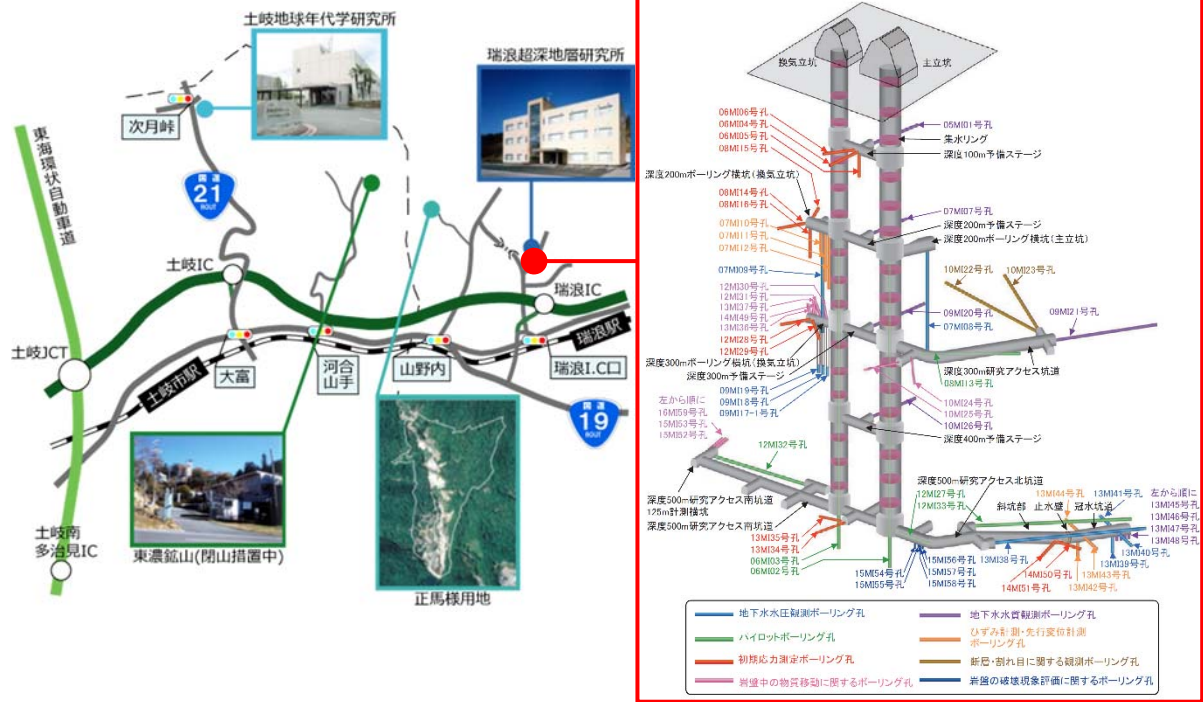


図 2.1.1-1 岐阜県瑞浪市における瑞浪超深地層研究所の位置と地下研究施設概要

(JAEA 東濃地科学センターHP、石橋ほか(2017)より引用、一部加筆)

2.1.2 深度 300m ボーリング横坑の概要

深度 300m ボーリング横坑は、換気立坑中心から南西方向へ約 20m 伸びており、坑道高さ約 3m、坑道幅約 4m の馬蹄型の坑道である。ボーリング横坑の突き当たりから換気立坑側へ向かって 5m 区間は坑道高さ 2.5m で、土岐花崗岩が観察できるように露出させている (図 2.1.2-1)。深度 300m ボーリング横坑は、主立坑断層 (S300_M_SHAFT) と SH300_13_2 断層が並行に走る間を掘削されており (石橋ほか, 2012)、比較的割れ目の多い上部割れ目帯に属する。坑道掘削時の壁面観察から概ね北西方向の走向を示す割れ目が卓越し、炭酸塩鉱物や緑泥石が充填する。緑泥石を挟在した割れ目は換気立坑側に近づくにつれて頻度が減少する傾向があり、炭酸塩鉱物と同様、低角度割れ目で確認される (鶴田ほか, 2010)。

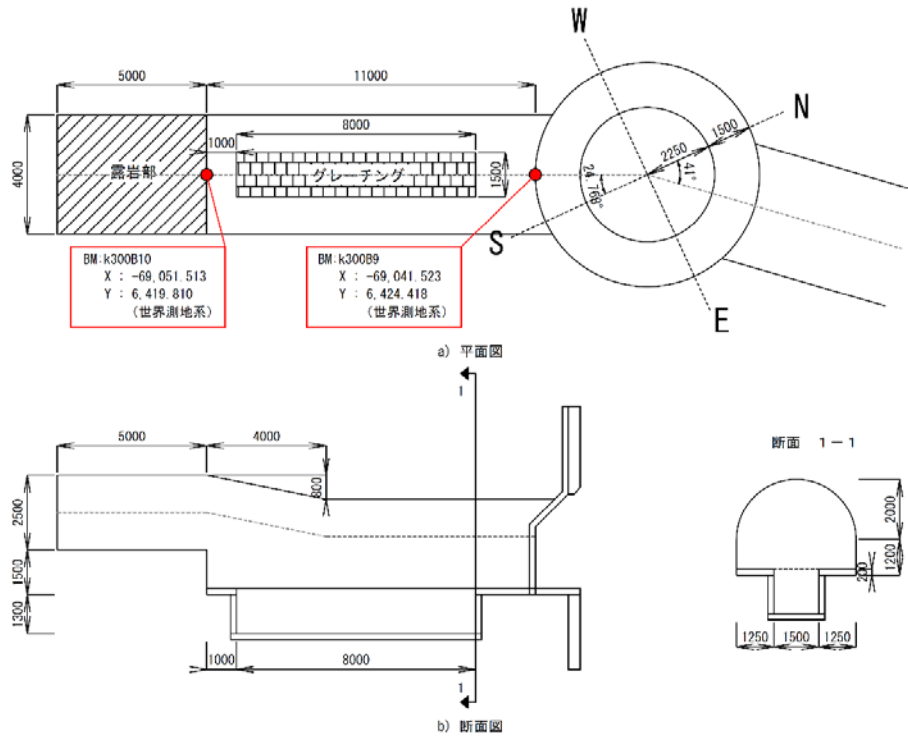


図 2.1.2-1 深度 300m ボーリング横坑構造図

2.1.3 深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑の概要

深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑は、坑道高さ約 3.5m、坑道幅約 4.5m、長さ約 15.5m の横坑であり、換気立坑中心から研究アクセス南坑道沿い 125m で直交している（図 2.1.3-1）。当サイトは割れ目密度の小さい下部割れ目低密度帯に属し、深度 500m 研究アクセス南坑道の壁面地質調査より、北東走向の高角度な割れ目が卓越する（川本ほか，2014a）。また、同坑道に分布する北西走向の断層（SH500_13_2 断層や S500_prove23~26 断層）と同様の北西走向の高角度な割れ目を伴う（鶴田ほか，2013）。

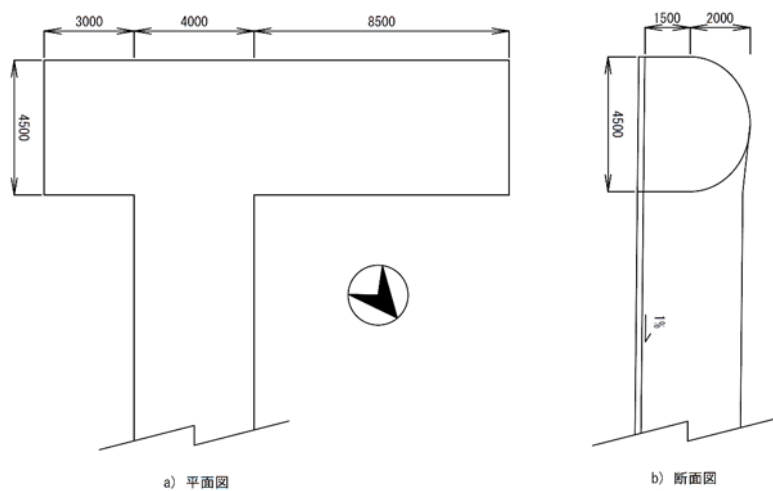


図 2.1.3-1 深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑構造図

2.2 深度 300m の地質環境調査

2.2.1 ボーリング掘削

前フェーズの平成 24 年度調査では、深度 300m ボーリング横坑で 2 孔（12MI30 号孔、12MI31 号孔）のボーリング掘削、各種検層、透水試験、間隙水圧モニタリングを実施し、適用性試験に適した湧水量の割れ目を確認できた。しかし、水理的に孔間で繋がる単一割れ目を特定できず、ネットワーク状に広がる割れ目を踏まえた試験計画の考案が課題として挙げられた。今フェーズの平成 25～26 年度調査では、卓越する NW 系の割れ目を捉えることを目的として、NW 系の割れ目に直交するような 3 孔（13MI36 号孔、13MI37 号孔、14MI49 号孔）のボーリング掘削、各種検層、透水試験、間隙水圧モニタリング、ポイント希釈試験、音響トモグラフィ（深度 300m のみ）を実施した（表 2.2.1-1）。

表 2.2.1-1 各孔の調査項目

調査項目	年度		2012 (H24) ^(※3)		2013 (H25)		2014 (H26)		
	調査サイト		深度300mボーリング横坑						
地質環境調査	孔番号		12MI30	12MI31	13MI36	13MI37	14MI49		
	ボーリング	孔口座標 ^(※1)	X座標(m)	-69045.037	-69045.787	-69048.731	-69047.447	-69048.140	
			Y座標(m)	6419.917	6418.855	6419.441	6420.034	6419.064	
			Z座標(m)	-99.100	-99.100	-99.100	-99.100	-99.100	
	掘削走向		S77W	S75W	S75W	S80W	S80W		
	掘削角度(°) ^(※2)		-33	-34	-33	-40	-30		
	掘削長(m)		27.5	26	22.55	27	22.47		
	孔径(mm)		86	86	86	86	86		
原位置試験、検層	キャリパー検層		○	○	○	○	○		
	孔曲がり検層		○	○	○	○	○		
	フローメーター検層		○	○	○	○	○		
	高解像度BTV検層		○	○	○	○	○		
	間隙水圧モニタリング		○	○	○	○	○		
	簡易水理試験	単孔(深度)	20	20	22	17	13		
		孔間(深度)	5	7	4	6	6		
	ポイント希釈試験(区間)		2 (H25) ^(※4)	5 (H25) ^(※4)	2	4 (H26) ^(※4)	3		
音響トモグラフィ法		2断面(30-31, 36-31) ^(※5) (H25) ^(※4)							

(※1) 孔口座標は、世界測地系で示している

(※2) 水平面から上向きを正としている

(※3) 平成24年度調査は前フェーズ(岩盤中地下水移行評価技術高度化開発)で実施

(※4) 試験の実施年度を示す

(※5) 12MI30発振孔-12MI31受信孔の断面、13MI36発振孔-12MI31受信孔の断面を示す

深度 300m ボーリング横坑で掘削したボーリング孔の位置を図 2.2.1-1 に示す。

ボーリング掘削で採取したコアは全て中粒黒雲母花崗岩（土岐花崗岩）であり、石英、長石類および黒雲母を主体として構成される（稀に角閃石を含む）。母岩全体には長石の白濁化が認められ、弱い変質を受けている。割れ目の充填鉱物として緑泥石や方解石が認められるが、断層岩や割れ目の集中する区間には、母岩を構成する鉱物やその破片、セリサイト、緑泥石、方解石および黄鉄鉱が認められ、一部未固結で粘土化した状態で存在する（図 2.2.1-2）。掘削中の湧水量については、浅部は数 L/min 程度であったが、15mabh 前後から 10L/min を超え、20mabh を過ぎると 20～60L/min 程度の湧水量が確認された。13MI37 号孔については、26mabh で 200L/min を超える大量湧水が確認された。

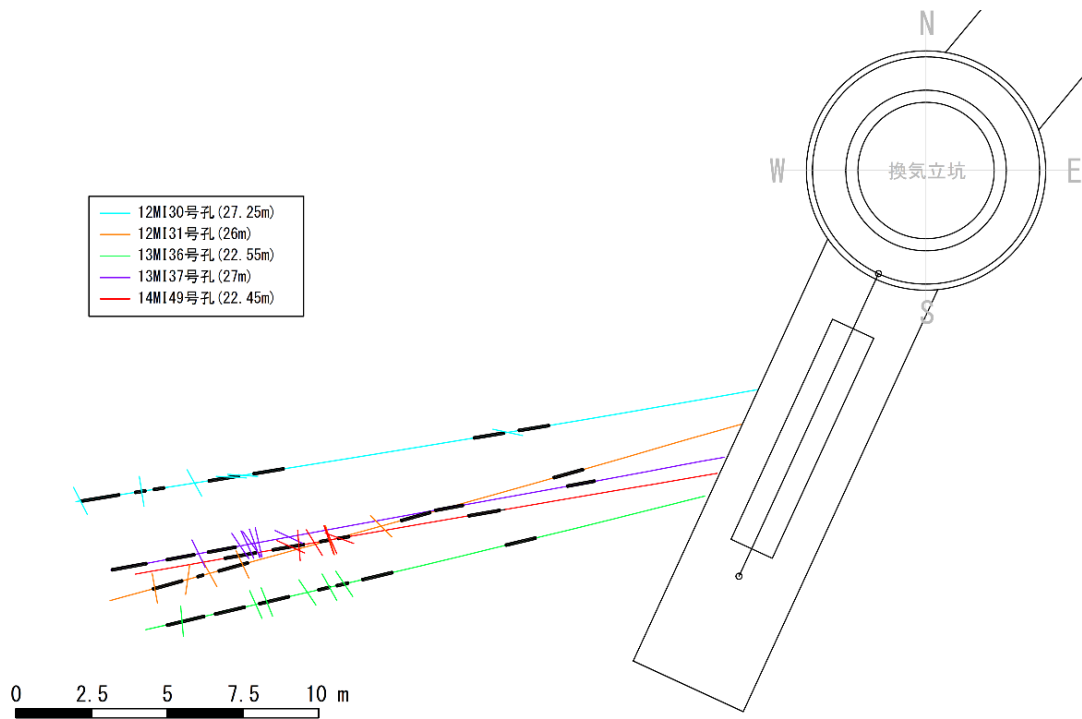


図 2.2.1-1 深度 300m ボーリング横坑ボーリング位置平面図



図 2.2.1-2 断層角礫岩 (左)、割れ目面に付着する緑泥石 (右)
 (左写真 ; 14MI49 号孔/8.0~8.1m 付近、右写真 ; 14MI49 号孔/14.85m 付近)

2.2.2 各種検層

ボーリング掘削後、各種検層（キャリパー検層、孔曲がり検層、フローメーター検層、高解像度 BTV 検層）を実施した。

・キャリパー検層

掘削したボーリング孔の孔径の把握を目的としてキャリパー検層を実施し、各孔とも計画した径で概ね掘削できていることを確認した。一部、数 mm 程度拡孔している箇所が認められており、その箇所で充填鉱物（粘土鉱物、方解石、セリサイト等）が充填した細脈群や細礫～粘土化した変質帯等が多くみられた。

・孔曲がり検層

掘削したボーリング孔の幾何学情報の取得を目的として孔曲がり検層を実施した。各孔とも計画した方向と角度で掘削した孔の孔跡と概ね一致していることを確認した。

・フローメーター検層

掘削したボーリング孔内の湧水割れ目について、各深度での流量変化の把握を目的としてフローメーター検層を実施した。ある深度で流量変化が認められた際、どの割れ目が湧水割れ目なのかを把握するため、電力中央研究所が開発した BTV 付フローメーター検層装置を用いた。フローメーターにより 13MI36 号孔で 8 深度、13MI37 号孔で 7 深度（図 2.2.2-1）、14MI49 号孔で 3 深度の流量変化が計測され、各深度で該当する湧水割れ目が BTV で確認された。

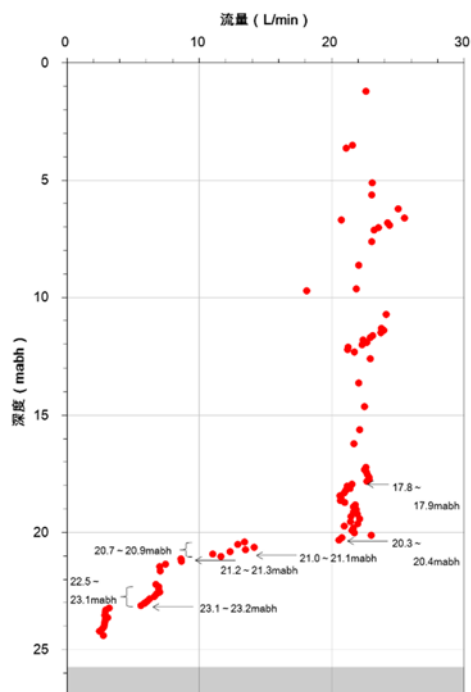


図 2.2.2-1 13MI37 号孔のフローメーター検層の結果

(掘削長 27.00mabh のうち、25.70mabh 以深はパッカーで止水しているため、測定対象外)

2.2.3 透水試験

透水試験で対象とする割れ目は、コア観察、フローメーター検層結果およびボーリング掘削時の湧水量の変化を参考にして選定した。単孔式透水試験は、透水性割れ目の深度、湧水量、透水量係数の概略および試験中の他孔への水圧応答の把握を目的に実施し、定圧揚水試験を基本とした。孔間透水試験は、単孔透水試験で得られた結果を基に水理的に連結性が認められる割れ目区間を選定し、透水量係数を求めることを目的に実施した。試験方法は定流量透水試験を基本とし、単孔式透水試験で求めた透水量係数が $1 \text{ E-}08 (\text{m}^2/\text{sec})$ 以下の場合には定流量透水試験が困難であると判断し、パルス試験を実施することとした。透水試験装置の設置概念と透水試験の作業フローを図 2.2.3-1 に示す。

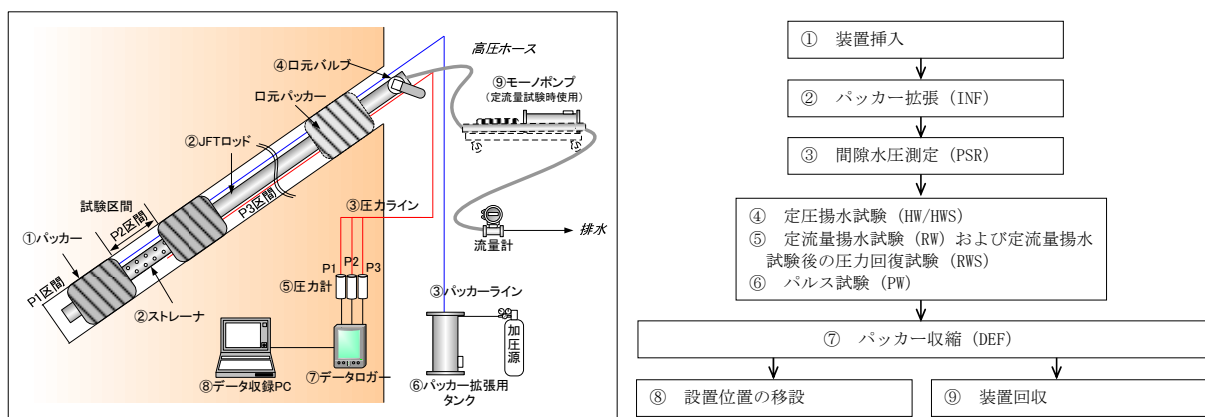


図 2.2.3-1 透水試験装置の設置概念 (左) と透水試験の作業フロー (右)

単孔式透水試験結果について、13MI37 号孔で実施した 17 試験のうち、22~24mabh 付近の透水性割れ目を対象とした 3 試験分を例に示す。図 2.2.3-2 に示すようなダブルパッカーで区切った区間から、一定圧力下で平均湧水量をそれぞれ計測し、その湧水量と水頭差から Hvorslev の定常式より各区間の透水量係数を求めた。表 2.2.3-1 に単孔式透水試験結果を示す。湧水量、透水量係数が適用性試験に適用できる数値であること、フローメーター検層の流量変化が 23.1~23.2m で確認される (図 2.2.2-1) ことを踏まえ、22.80~23.47m 区間で孔間透水試験を実施することとした。

孔間透水試験結果について、13MI37 号孔で実施した 6 試験のうち、22.80~23.47m 区間の試験を例に示す。図 2.2.3-2 に示すようなダブルパッカーで区切った区間から一定流量 (0.80L/min) で 90 分揚水し、その後揚水を止めて試験区間の圧力回復過程を計測した。揚水試験時の試験区間の水頭差は 16.24mH₂O であった。揚水過程の圧力データについては Jacob 法、圧力回復過程の圧力データについては Agarwal 法により解析を行い、それぞれについて透水量係数を求めた。表 2.2.3-2 に単孔式透水試験結果を示す。Jacob 法では透水量係数 $1.58\text{E-}05 (\text{m}^2/\text{sec})$ 、Agarwal 法では $1.39\text{E-}05 (\text{m}^2/\text{sec})$ の透水量係数が得られ、互いに近い値であることが確認された。ここでは、揚水過程における遠方の透水

性を表す Jacob 法で求めた透水量係数 $1.58E-05(m^2/sec)$ を採用した。孔間透水試験中、他孔への水圧応答が最も大きく表れたのは 12MI31 号孔 int1 (23.12~26.0mabh) であった。

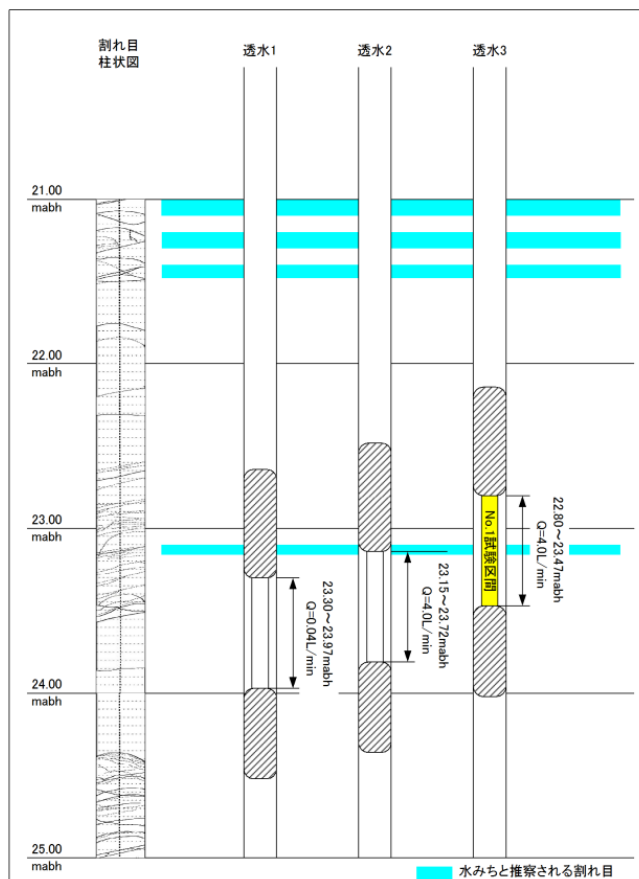


図 2.2.3-2 単孔式透水試験深度図 (13MI37 号孔 22~24mabh 付近)

表 2.2.3-1 単孔式透水試験の結果 (13MI37 号孔 22~24mabh 付近)

試験番号	試験深度		区間長 m	湧水量 L/min	水圧 mH ₂ O	透水量係数 m ² /sec
	上端 mabh	下端 mabh				
1	23.3	23.97	0.67	0.04	1.5027	1.94E-09
2	23.15	23.72		4		1.94E-07
3	22.8	23.47		4		1.94E-07

表 2.2.3-2 孔間透水試験の結果 (13MI37 号孔 22.8~23.47mabh 区間)

試験番号	試験深度		解析方法	透水量係数
	上端 mabh	下端 mabh		m ² /sec
1	22.8	23.47	Jacob法	1.58E-05
			Agarwal法	1.39E-05

他孔についても同様に透水試験を実施しており、湧水量、透水量係数の算出と試験中の他孔への水圧応答を計測している。深度 300m ボーリング横坑の場合では、15mabh 以深で湧水を伴う割れ目が多く確認されており、透水量係数は最大 $1E-05(m^2/sec)$ オーダーである。ただし、孔間透水試験中の水圧応答の結果より、水理的に複数の連続性は認められるが、独立した単一割れ目は確認できなかった。コア観察やフローメーター検層等から割れ目密度(/m)が大きく、深度 300m は上部割れ目帯に属していると考えられる。そのため、割れ目同士の切り切れ関係が複雑に交差し、ネットワーク状の構造を形成していると考えられる。

2.2.4 高解像度 BTV 検層

掘削したボーリング孔について、孔内の壁面を高解像度で全深度分展開画像化して割れ目観察を行うことを目的に高解像度 BTV 検層を実施した。高解像度 BTV 検層装置(株式会社レアックス製 BIP-V)は、展開画像記録装置(ODS)と詳細観察記録装置(DVS)で構成され、ODS はボーリング孔壁の全周を画像化、DVS は前方視カメラと側方視カメラを組み合わせて割れ目の詳細観察として用いている。高解像度 BTV 検層装置(BIP-V)の設置概念図を図 2.2.4-1 に示す。

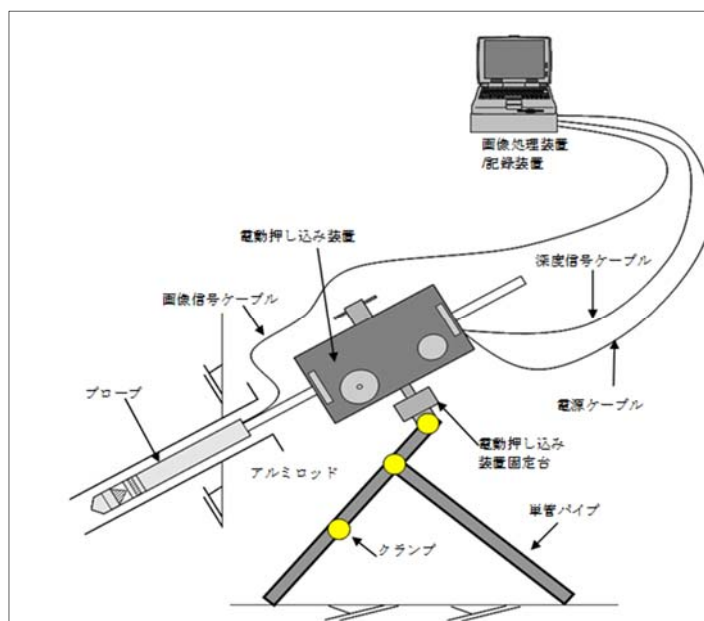


図 2.2.4-1 高解像度 BTV 検層装置 (BIP-V) の設置概念図

ODS で取得した展開画像記録に画像処理を施した後、全岩盤分離面を抽出した。全岩盤分離面の区分は開口しているものを開口割れ目、画像上 50%以上連続しているものを割れ目、鉱物が脈状に充填しているものを鉱物脈としており、岩盤分離面の走向傾斜は、記録画像に表示される全岩盤分離面の切合線とトレースライン(サインカーブ)をフィットさせることで求めた。

深度 300m のボーリング 5 孔について、全岩盤分離面の分布状況および主な卓越方向を表 2.2.4-1

に示す。岩盤分離面の分布密度は最大 7.86 条/m であり、深度 500m の最大 3.5 条/m (表 2.3.4-1) と比較すると分離面数が多いことが分かる。全岩盤分離面、割れ目、開口割れ目の第 1 卓越方向については、どの孔も NNW 走向が卓越する。これは、全岩盤分離面、割れ目、開口割れ目の第一卓越方向と掘削走向 (S75~80W) が直交するため、遭遇率が高くなったと考えられる。全岩盤分離面の傾斜は高傾斜 ($60 \leq \theta \leq 90$) が多く、次いで低傾斜 ($0 \leq \theta \leq 30$) のものが多い。掘削傾斜が -30W 前後 (水平面から時計回りを正) であるため、垂直や 10E 系統の傾斜分離面の遭遇率が高くなったと考えられる。また、数%の遭遇率で全岩盤分離面の第 2、3 卓越方向が示されている。深度 500m では低角度の岩盤分離面は殆ど確認されていない (表 2.3.4-1) ことから、深度 300m での低角度の岩盤分離面の存在は、上部岩盤の削剥による応力解放により岩石が膨張し、シーティング節理が形成されやすい場であると示唆される。

表 2.2.4-1 深度 300m の全岩盤分離面、割れ目、開口割れ目の分布状況と主な卓越方向

孔番号	12MI30 ^(※2)	12MI31 ^(※2)	13MI36	13MI37	14MI49
計測区間長(m)	22.5	21	17.53	22.62	17.51
全岩盤分離面	169	165	121	130	95
割れ目	162	158	112	127	95
開口割れ目	7	7	9	3	0
岩盤分離面の分布密度(/m)	7.51	7.86	6.9	5.75	5.43
全岩盤分離面の第1卓越方向 ^(※1)	N19W / 88E (31%)	N19W / 85E (38%)	N20W / 87E (28%)	N17W / 88E (29%)	N19W / 85E (33%)
割れ目の第1卓越方向 ^(※1)	N18W / 89E (31%)	N17W / 85E (39%)	N20W / 87E (28%)	N17W / 88E (29%)	N19W / 85E (33%)
開口割れ目の第1卓越方向 ^(※1)	N23W / 85E (42%)	N24W / 87E (42%)	N25W / 87E (24%)		
全岩盤分離面の第2,3卓越方向 ^(※1)	N47E / 77EW (3%) N5W / 19E (3%)	N45E / 73EW (3%) N45W / 15NE (3%)	N35E / 77EW (4%) N5W / 15E (4%)	N52W / 8NE (5%) N42E / 70SE (5%)	N43E / 72SE (5%) N51W / 9NE (9%)

(※1) 表中の () 内は、ステレオネットのポイントカウンティングの集中度を示す。大きいほど集中度が高い。

(※2) 12MI30、12MI31は、前フェーズ(岩盤中地下水移行評価技術高度化開発)で実施

DVS を用いた詳細観察では、開口割れ目の幅を計測することを目的に実施した。詳細観察による幅の計測は、図 2.2.4-2 に示すように対象の開口割れ目 1 本に対して 36 度刻みに 10 箇所計測し、その平均値を割れ目幅としている。詳細観察する開口割れ目は、事前のコア観察や水理試験 (フローメーター検層、透水試験) によって透水性が相対的に大きく、湧水のある割れ目を参考に選定した。割れ目の開口幅の計測結果を表 2.2.4-2 に示す。開口割れ目は NNW 走向の高傾斜が占めているが、水平な開口割れ目や NE 走向の高傾斜も認められる。開口幅が 0.1mm 以下の割れ目は、孔壁面全体で連続して開口していることは稀で、部分的に鉱物充填や上下が密着した状態の割れ目形態が多く確認された。

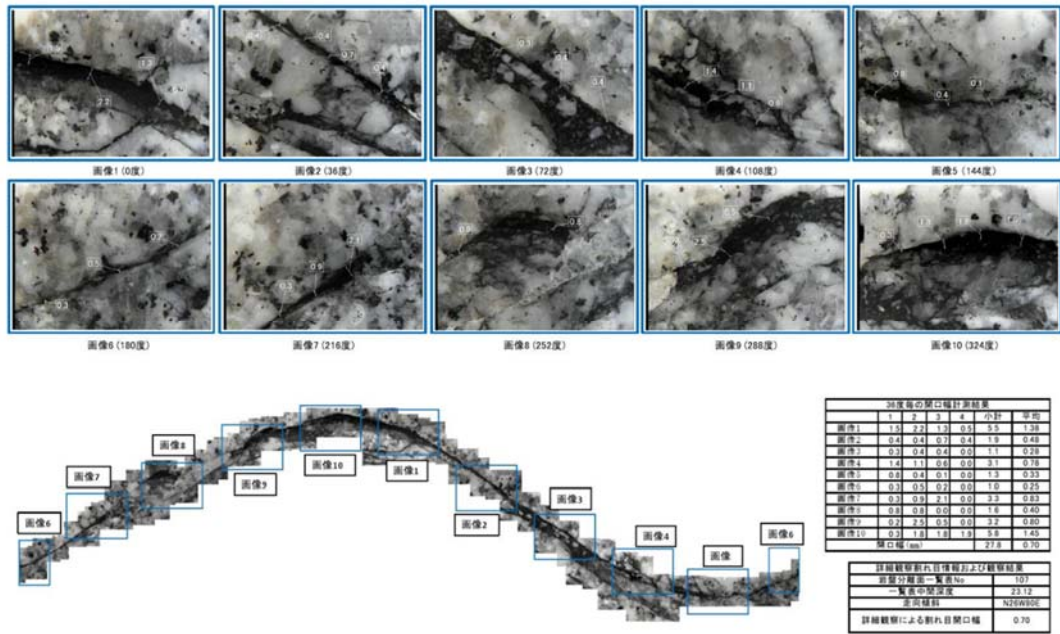


図 2.2.4-2 詳細観察記録シート (13MI37 号孔 : 23.12mabh/N26W80E)

表 2.2.4-2 開口割れ目幅の計測結果

孔番		開口割れ目 ①	開口割れ目 ②	開口割れ目 ③	開口割れ目 ④	開口割れ目 ⑤	開口割れ目 ⑥	開口割れ目 ⑦
12MI30 ^(※1)	深度	10.11m	20.66m	21.00m	22.53m	24.67m	27.08m	-
	走向傾斜	N78W/14N	N86W/73N	N87W/84N	N29W/86E	N9W/73E	N27W/80E	-
	開口幅	0.18mm	0.11mm	0.09mm	0.08mm	0.05mm	0.13mm	-
12MI31 ^(※1)	深度	14.88m	16.93m	20.59m	21.89m	22.74m	24.15m	-
	走向傾斜	N45W/83SW	N17W/88E	N25W/85E	N29W/88E	N8E/22E	N10W/83W	-
	開口幅	0.11mm	0.13mm	0.13mm	0.15mm	0.09mm	0.06mm	-
13MI36	深度	14.58m	15.15m	16.08m	17.78m	18.08m	21.11m	-
	走向傾斜	N23W/88W	N29W/83E	N34W/83SW	N22W/83E	N24W/89E	N5W/21E	-
	開口幅	0.32mm	0.03mm	0.46mm	0.30mm	0.38mm	0.02mm	-
13MI37	深度	19.14m	20.35m	20.74m	20.81m	21.01m	21.28m	23.12m
	走向傾斜	N65W/89N	N13W/17E	N20W/79E	N36W/85NE	N25W/82E	N34W/89NE	N26W/80E
	開口幅	0.03mm	0.29mm	0.33mm	0.31mm	0.62mm	0.19mm	0.70mm
14MI49	深度	14.55m	14.91m	14.98m	15.55m	16.15m	16.45m	22.37m付近
	走向傾斜	N70W/12N	N24W/84E	N19W/86E	N32W/88SW	N5W/5E	N66W/8N	-
	開口幅	0.08mm	0.44mm	0.56mm	0.38mm	0.03mm	0.09mm	0.52mm

(※1) 12MI30、12MI31は、前フェーズ(岩盤中地下水移行評価技術高度化開発)で実施

2.2.5 ポイント希釈試験

ポイント希釈試験は、試験区間内をトレーサー溶液で満たした後、自然の流速によりトレーサー溶液が希釈される過程を計測し、地下水の自然の流下速度を把握する試験である。平成24年度までに開発したトレーサー試験装置の地上設備とボーリング孔内に設置している間隙水圧モニタリング装置を使用し、地上からトレーサー溶液を観測区間内の配管に循環させて蛍光濃度センサーで測定した。ポイント希釈試験装置の設置概念図と試験手順を図2.2.5-1に示す。

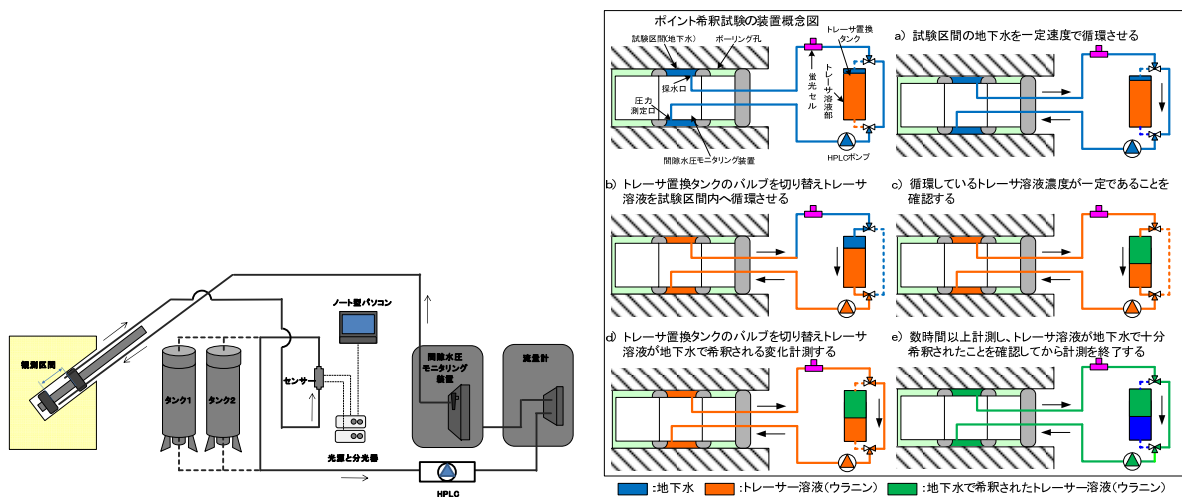


図 2.2.5-1 ポイント希釈試験装置の設置概念図（左）と試験手順（右）

試験前に原位置の地下水を用いた蛍光セル毎に蛍光濃度センサーのキャリブレーションを行い、蛍光強度からトレーサー濃度が求められるように検量線を作成した。トレーサー材はウラニウムを使用し、開始時のウラニウム濃度は原則 3mg/L 以下（H25 年度調査で、3mg/L よりも高い濃度ほど蛍光強度が減少して測定精度が落ちることを確認）とした。試験区間は事前のコア観察、フローメーター検層、掘削時の湧水量の変化、水理試験の結果等を参考に選定し、図 2.2.5-1 に示すような手順で試験を実施して地下水流量（自然流速）を求めた。各孔での試験条件と結果を表 2.2.5-1 に示す。地下水流量 Q_{bh} 、岩盤割れ目内の単位幅あたりに流れる地下水流量 q_r については、以下の式を用いて求めている。

$$Q_{bh} = V \cdot \frac{d \ln(C/C_0)}{dt}$$

Q_{bh} : 地下水流量 (mL/min)

V : 区間容量 (mL)

t : 時間 (min)

C : 時間 t における試験区間内のトレーサー濃度 (mg/L)

C_0 : 初期のトレーサー濃度 (mg/L)

$$q_f = \frac{Q_{bh}}{\alpha \cdot 2\gamma_w}$$

q_f : 岩盤割れ目内の単位幅あたりに流れる地下水流量 (mL/min/m)

Q_{bh} : 地下水流量 (mL/min) α : 集水効果を表す係数 (2.0 (m⁻¹)) γ_w : ボーリング孔半径 (m)

表 2.2.5-1 ポイント希釈試験の試験条件と結果

孔番号	12MI30		12MI31				13MI36		13MI37				14MI49			
対象区間	int2	int3	int2	int3	int4	int5	int6	int4	int7	int2	int3	int4	int5	int2	int3	int4
上端深度(mabh)	24.47	22.065	24.015	22.665	20.315	17.495	16.745	18.02	13.82	22.82	20.52	18.45	17.75	17.265	15.395	14.73
下端深度(mabh)	24.62	23.945	24.215	23.515	21.465	19.115	17.045	18.62	14.4	23.42	21.62	19.32	18.05	17.865	16.065	15.03
実施時間	19:53	20:04	14:21	42:13	23:45	14:40	17:41	17:10	17:56	16:00	4:20	21:46	16:05	66:44	17:50	14:15
ウラン(mg/L)	6	8	8.93	5.83	8	5.91	5.75	6.09	6	2.99	3.04	2.99	3.04	3.1	2.99	2.99
循環流量(mL/min)	85.83	165.42	97.29	179.76	83.38	100.02	99.45	96.16	96.19	77	503	300	104	43	217	212
地下水流量 Q_{bh} (mL/min)	1.9908	1.6032	2.0617	4.3489	1.5586	4.2775	2.7476	1.6157	3.529	0.93	51	1.3	0.77	-	1	17
地下水流量 q_f (mL/min/m)	11.06	8.91	11.45	24.16	8.66	23.76	15.26	8.98	19.61	5.43	299	7.41	4.47	-	58.6	97.3

各孔の対象区間における岩盤割れ目内の単位幅あたりに流れる地下水流量 q_f は、最大で約 300mL/min、最小で 5mL/min の流速が確認された。ただし、14MI49 号孔 int2 では、ウラン濃度が減少せず横ばいであったため、その区間での地下水の流入出は殆ど無い状態と考えられる。一部、割れ目内の充填鉱物等の影響で自然流速が小さい個所はあるが、全体に自然流速が数十～数百 mL/min と大きい場であることが分かった。

2.2.6 音響トモグラフィ法

音響トモグラフィは圧電式の孔内発振器（ピエゾ震源）と多連の受信器（ハイドロフォン，24ch，20cm ピッチ）を2つの計測孔に配置し、その断面間に存在する割れ目分布の可視化を目的に実施した。超音波と地震波の中間の周波数帯域をもつ音響波を利用した手法で、連続波の一種である疑似ランダム波を発振波形に用いる。疑似ランダム信号は、①周波数を任意に制御可能、②発振信号を数万倍まで増幅可能、③ノイズの影響を受けにくく遠方まで伝播する特長をもつ。これにより、出力の小さい孔内発振器でも数十～数百 m の計測を行うことが可能となる。音響トモグラフィにより、速度分布と速度減衰率分布の情報が得られ、速度分布からは岩盤の硬軟や地層境界、速度減衰率分布からは岩盤中の亀裂分布が推察される。

図 2.2.6-1 に音響トモグラフィ法の計測概念図、図 2.2.6-2 に音響波形計測フローおよびデータ解析フローを示す。受信器を受信孔内の所定深度に設置した後、発振器を発振孔の最深部へ設置して計測した。走査線が対象断面全体を切るようにするため、発振器を一定ピッチで移動させて各深度で計測した。受信器で受信した波形データから、センサー毎に到達時間とその振幅を読み取り、逆計算で速度分布と減衰率分布を求めた結果をトモグラムとして出力した。

計測概念図

音の波線が断面全体を横切るように発震器を移動する

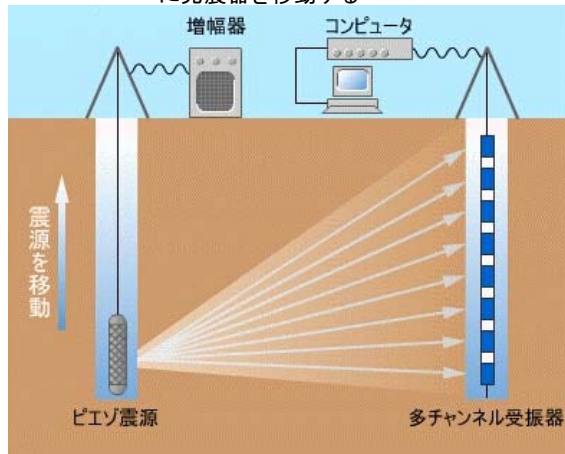


図 2.2.6-1 音響トモグラフィ法の計測概念図

計測フロー

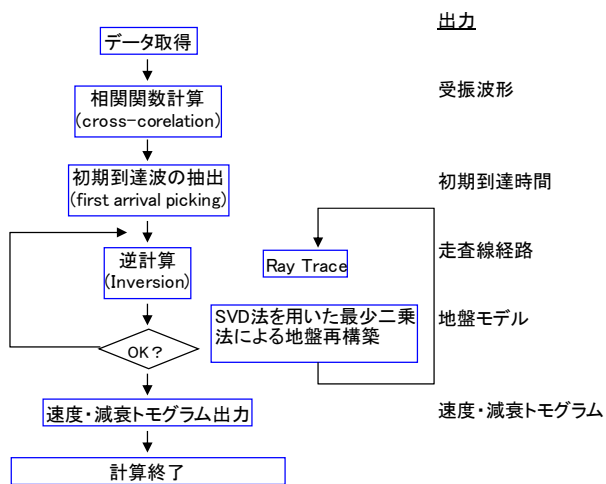
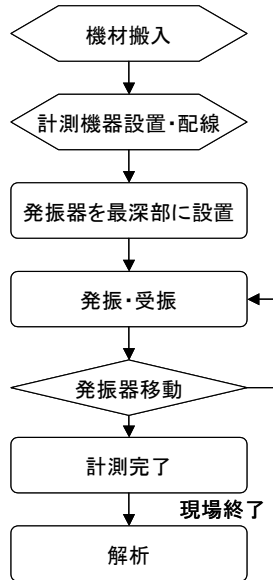


図 2.2.6-2 音響波形計測フロー（左）、データ解析フロー（右）

12MI30 号孔(発振)-12MI31 号孔(受信)間を断面 1、13MI36 号孔(発振)-12MI31 号孔(受信)間を断面 2 とし、発振周波数 10kHz、20kHz、39kHz で計測をした。ただし、互いの計測孔はねじれの関係にある上、孔曲がり計測結果より孔跡の軸も多少のずれが生じている。孔間断面（二次元）での解析となるため、座標変換によるねじれ補正を事前に施している。断面 1 の発振周波数 20kHz を事例に挙げ、図 2.2.6-3 に速度分布および速度減衰率分布を示す。

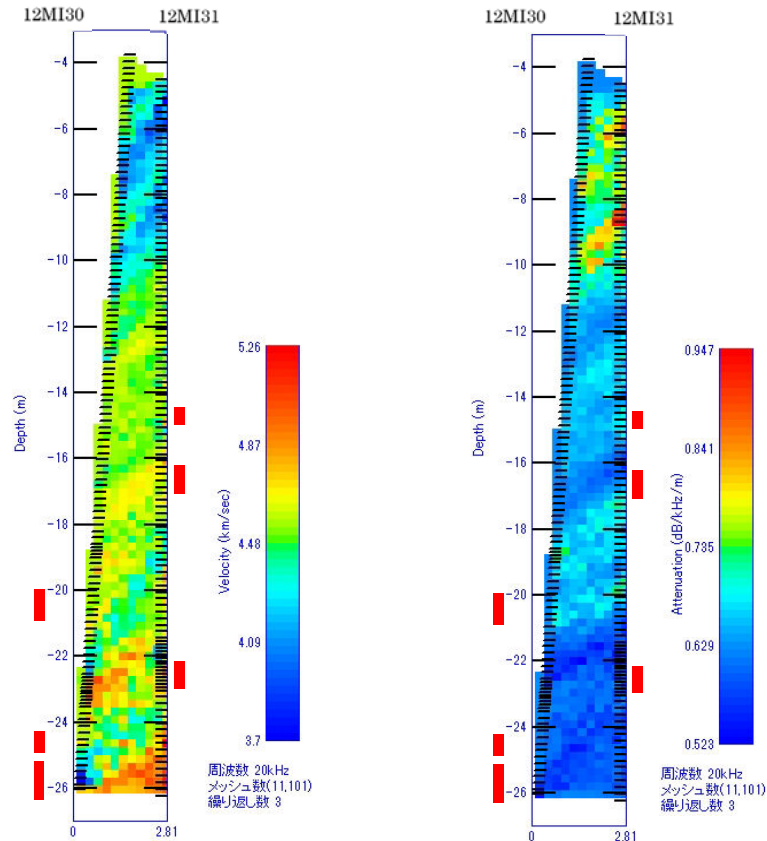


図 2.2.6-3 断面 1（発振周波数 20kHz）の速度分布図（左）、速度減衰率分布図（右）
 （深度軸の赤色バーは、高透水性区間（ $10E-6m^2/sec$ 以上）を示す）

速度分布図、速度減衰率分布図は、下記のように解釈される。

- ①高速度・高減衰パターン：硬質の岩石が分布、密着性の悪い割れ目が多い帯域
- ②高速度・低減衰パターン：硬質の岩石が分布、割れ目が少ないもしくは密着性の良い割れ目帯域
- ③低速度・低減衰パターン：軟質の岩石が分布、割れ目が少ないもしくは密着性の良い割れ目帯域
- ④低速度・高減衰パターン：軟質の岩石が分布、充填鉱物を含む密着性の悪い割れ目が多い帯域

孔口から深度 10m 付近は低速度で高減衰率傾向がみられる。これは、掘削で生じた岩盤の緩みによる岩盤強度低下や岩盤損傷領域に含まれる割れ目の存在が原因と考えられる。深度 20m 付近では、周辺と比較して若干ではあるが高減衰率傾向な帯域がみられる。速度分布には大きな変化はないことから、岩盤の緩みがないが密着性の悪い割れ目が多いことが示唆される。またその周辺では、ボーリングコアで断層岩が確認されている。

透水試験で求めた高透水性区間（ $10E-6m^2/sec$ 以上）と速度分布、速度減衰率分布を対比したところ、速度分布では関連性は不明瞭である。一方速度減衰率分布では、12MI30 号孔深度 20m 付近－12MI31 号孔深度 17m 付近で連続性があるように見える箇所もあるが、全体としては孔間の連続性は不明瞭である。

2.3 深度 500m の地質環境調査

2.3.1 ボーリング掘削

平成 27～28 年度では、深度 300m と比較して割れ目が少ない（割れ目密度が小さい）と想定される深度 500m を調査対象とした。ボーリング掘削位置については、研究アクセス南坑道建設のための先行ボーリング 12MI32 号孔のデータ（川本ほか，2014b）を参考に、①卓越する NE 系の割れ目と掘削孔跡が交わること、②掘削中の大量湧水リスクが低いことを考慮し、深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑の西側とした。卓越する NE 系の割れ目を捉えることを目的にボーリング 3 孔（15MI52 号孔、15MI53 号孔、16MI59 号孔）を掘削し、その後各種検層、透水試験、間隙モニタリング、ポイント希釈試験（16MI59 号孔は未実施）を実施した（表 2.3.1-1）。

表 2.3.1-1 各孔の調査項目

調査項目	年度		2015	2016	
	調査サイト		(H27)	(H28)	
地質環境調査	調査サイト		深度500m研究アクセス南坑道125m計測横坑		
ボーリング	孔番号		15MI52	15MI53	15MI59
	孔口座標 ^(※1)	X座標(m)	-69128.358	-69129.989	-69131.545
		Y座標(m)	6337.315	6337.608	6339.343
		Z座標(m)	-498.487	-498.692	-498.818
	掘削走向		N75W	N75W	N75W
	掘削角度(°) ^(※2)		-30	-30	-30
	掘削長(m)		30	30	30
	孔径(mm)		86	86	86
原位置試験、検層	キャリバー検層		○	○	○
	孔曲がり検層		○	○	○
	フローメーター検層		○	○	○
	高解像度BTV検層		○	○	○
	間隙水圧モニタリング		○	○	○
	簡易水理試験	単孔(深度)	18	16	14
		孔間(深度)	4	4	4
	ポイント希釈試験(区間)		3	3	

(※1) 孔口座標は、世界測地系で示している

(※2) 水平面から上向きを正としている

深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑で掘削したボーリング孔の位置を図 2.3.1-1 に示す。ボーリング掘削で採取したコアは、主に等粒状の粗粒～中粒の黒雲母花崗岩（土岐花崗岩）であり、石英、長石類および黒雲母を主体とし、ごく微細な角閃石を含んでいる。母岩全体は長石の白濁化が認められ、弱い変質を受けている。小規模な黒雲母等の有色鉱物の濃集体、花崗岩質ペグマタイト（図 2.3.1-2）、石英脈や方解石脈は局所的に確認されるが、アプライト脈は認められない。割れ目の充填鉱物として方解石や緑泥石が多くみられ、充填鉱物が割れ目面にフィルム状に付着もしくは全体をコーティングする状態が確認される（図 2.3.1-2）。その他、緑灰色や明灰色を帯びた粘土鉱物が割れ目内を充填しているのが確認され、スメクタイト等の熱水変質作用に伴う粘土鉱物と考えられる。また、一部の割れ目面にはごく少量の黄鉄鉱の付着が認められる。掘削中の湧水量については、全体的に湧水量が少なく、掘削中の湧水量は最大で 15MI59 号孔の約 8L/min であった。

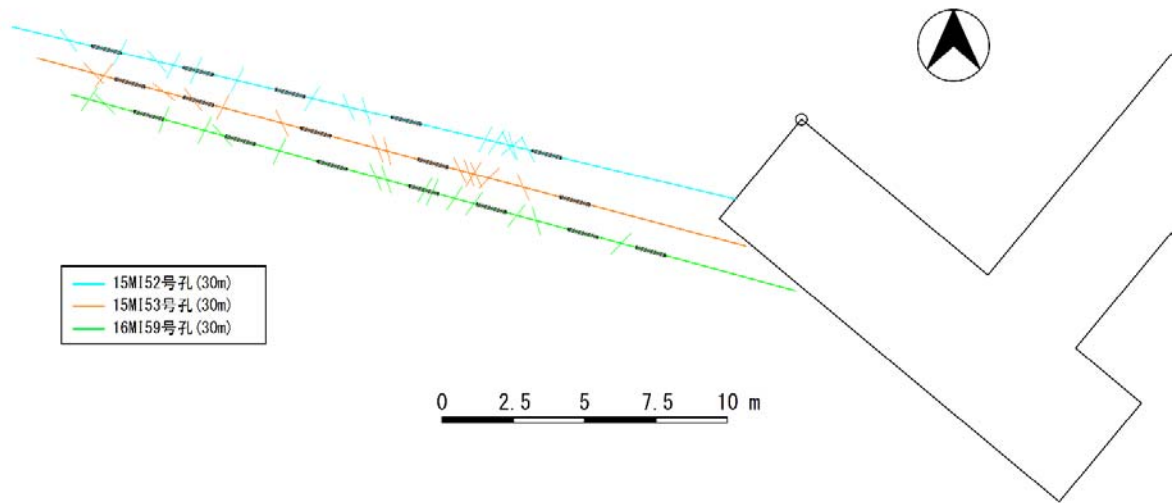


図 2.3.1-1 深度 500m 南坑道研究アクセス 125m 計測横坑ボーリング位置平面図



図 2.3.1-2 花崗岩質ペグマタイト (左)、割れ目面に付着している緑泥石 (右)
(左写真 ; 15MI52 号孔/28.44~28.56m 付近、右写真 ; 16MI59 号孔/11.60m 付近)

2.3.2 各種検層

ボーリング掘削後、各種検層（キャリパー検層、孔曲がり検層、フローメーター検層、高解像度 BTV 検層）を実施した。

・キャリパー検層

掘削したボーリング孔の孔径の把握を目的としてキャリパー検層を実施し、各孔とも計画した径で概ね掘削できていることを確認した。

・孔曲がり検層

掘削したボーリング孔の幾何学情報の取得を目的として孔曲がり検層を実施した。各孔とも計画した方向と角度で掘削した孔の孔跡と概ね一致していることを確認した。

・フローメーター検層

ある深度で流量変化が認められた際、どの割れ目が湧水割れ目なのかを把握するため、電力中央研究所が開発した BTV 付フローメーター検層装置を用いた。フローメーターにより 15MI52 号孔で 4 深度、15MI53 号孔で 3 深度 (図 2.3.2-1)、16MI59 号孔で 5 深度の流量変化が計測され、各深度で該当する湧水割れ目が BTV で確認された。

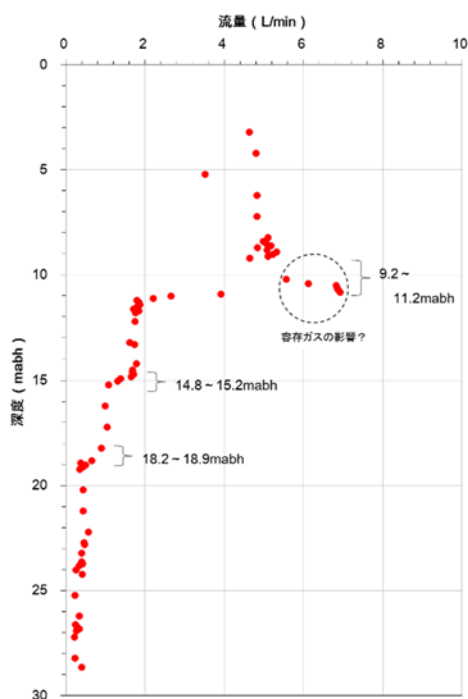


図 2.3.2-1 15MI53 号孔のフローメーター検層の結果

2.3.3 透水試験

透水試験で対象とする割れ目は、コア観察、フローメーター検層結果およびボーリング掘削時の湧水量の変化を参考にして選定した。深度 300m での透水試験と同様、透水性割れ目の深度、湧水量、透水量係数の概略および試験中の他孔への水圧応答の把握を目的として単孔式透水試験を実施した。単孔式透水試験結果について、15MI53 号孔で実施した 16 試験のうち、14.23~15.87mabh 付近の透水性割れ目を対象とした 3 試験分を例に示す。表 2.3.3-1 に単孔式透水試験結果を示す。透水量係数は Hvorslev の定常式で求めている。湧水量、透水量係数が適用性試験に適用できる数値であること、フローメーター検層の流量変化が 14.8~15.2m で確認される (図 2.3.2-1) ことを踏まえ 14.90~15.57m 区間で孔間透水試験を実施することとした。

孔間透水試験結果について、15MI53 号孔で実施した 4 試験のうち、14.90~15.57m 区間の試験を例に示す。図 2.3.3-1 に示すようなダブルパッカーで区切った区間から一定流量 (0.077L/min) で 90 分揚水し、その後揚水を止めて試験区間の圧力回復過程を計測した。揚水試験時の試験区間の水頭差

は 16.24mH₂O であった。揚水過程の圧力データについては Jacob 法、圧力回復過程の圧力データについては Agarwal 法により解析を行い、それぞれについて透水量係数を求めた。表 2.3.3-2 に単孔式透水試験結果を示す。Jacob 法では透水量係数 1.51E-07(m²/sec)、Agarwal 法では 1.67E-07(m²/sec)の透水量係数が得られ、互いに近い値であることが確認された。ここでは、回復過程における遠方の透水性を表す Agarwal 法で求めた透水量係数 1.67E-07(m²/sec)を採用した。孔間透水試験中、他孔への水圧応答が最も大きく表れたのは 15MI52 号孔 int4 (14.30~17.90mabh) であった。

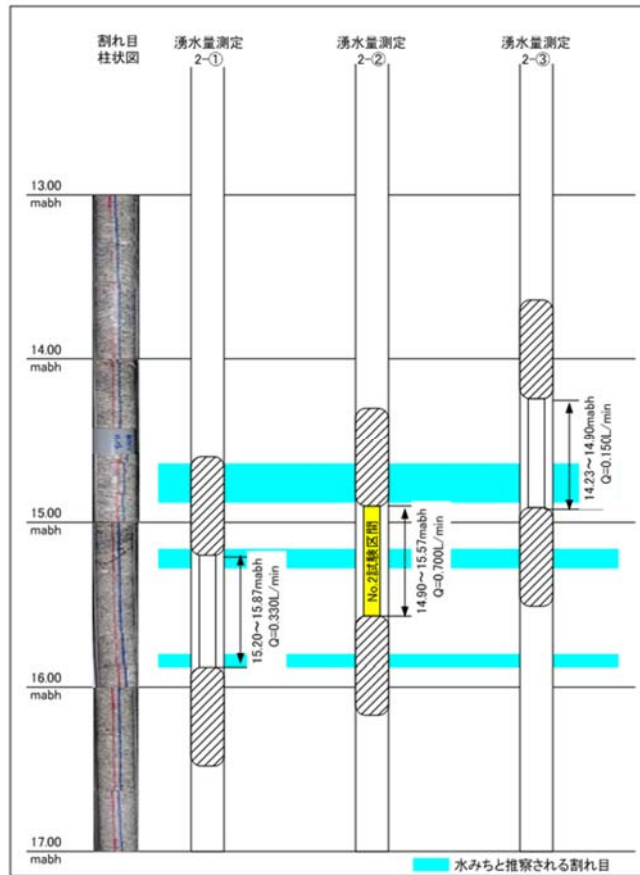


図 2.3.3-1 単孔式透水試験深度図 (15MI53 号孔 14.90~15.57m 付近)

表 2.3.3-1 単孔式透水試験の結果 (15MI53 号孔 14.90~15.57m 付近)

試験番号	試験深度		区間長 m	湧水量 L/min	水圧 mH ₂ O	透水量係数 m ² /sec
	上端 mabh	下端 mabh				
1	14.23	14.9		0.15		6.70E-09
2	14.9	15.57	0.67	0.7	3.45493	1.42E-08
3	15.2	15.87		0.33		1.94E-07

表 2.3.3-2 孔間透水試験の結果（15MI53 号孔 14.90～15.57m 付近）

試験番号	試験深度		解析方法	透水量係数
	上端 mabh	下端 mabh		m ² /sec
1	14.9	15.57	Jacob法	1.51E-07
			Agarwal法	1.67E-07

他孔についても同様に透水試験を実施しており、湧水量、透水量係数の算出と試験中の他孔への水圧応答を計測している。深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑の割れ目の場では、深度 300m ボーリング横坑と比べて全体的に湧水量、透水量係数は小さい傾向があり、透水量係数は最大 1.0E-07 (m²/sec) オーダーである。また、コア観察やフローメーター検層等より割れ目密度 (/m) が小さいことから、下部割れ目低密度帯に属していると考えられる。ただし、深度 300m と比べて高角度割れ目が卓越しており、割れ目形態もシンプルである。事例では挙げていないが、平成 28 年度の 16MI59 号孔掘削後、深度 10mabh (NW 走向、W 傾斜と E 傾斜が混在)、13.5mabh、17mabh (NW 走向、W 傾斜)、28.5abh (NW 走向、SW 傾斜と SE 傾斜が混在) 付近で水理試験を実施している。いずれの深度も 15MI52 号孔、15MI53 号孔の同深度付近で水圧応答が確認され、中でも深度 10mabh、13mabh、17mabh については独立した水圧応答が確認され、単一の水みちであることが示唆された。また、後述する高解像度 BTV 検層から、概ね同走向、同傾斜の割れ目であることが確認されており、連続性のある単一割れ目であると考えられる。

2.3.4 高解像度 BTV 検層

掘削したボーリング孔について、孔内の壁面を高解像度で全深度分展開画像化して割れ目観察を行うことを目的に高解像度 BTV 検層を実施した。実施方法は深度 300m と同様である。深度 500m のボーリング 3 孔について、全岩盤分離面の分布状況および主な卓越方向を表 2.3.4-1 に示す。岩盤分離面の分布密度は最大 3.5 条/m であり、深度 300m の最大 7.86 条/m (表 2.2.4-1) と比較して分離面数が少ない。全岩盤分離面、割れ目、開口割れ目の第 1 卓越方向については、15MI53 号孔の開口割れ目を除いてどの孔も NE 走向が卓越する。これは、全岩盤分離面、割れ目、開口割れ目の第一卓越方向と掘削走向 (N75W) が概ね直交するため、遭遇率が高くなったと考えられる。一方、深度 300m で確認されていた低角度の岩盤分離面は、深度 500m では殆ど確認されていない (表 2.2.4-1)。深度 300m と比べて上載圧 (静岩圧) が大きく、低角度割れ目が形成されにくい場であることを示している。

表 2.3.4-1 深度 500m の全岩盤分離面、割れ目、開口割れ目の分布状況と主な卓越方向

孔番号	15MI52	15MI53	16MI59
計測区間長(m)	27.65	27.73	27.96
全岩盤分離面	75	97	72
割れ目	63	87	65
開口割れ目	4	1	7
岩盤分離面の分布密度(/m)	2.71	3.5	2.58
全岩盤分離面の第1卓越方向 ^(※1)	N30E86SE (29%)	N30E87SE (35%)	N30E89SE (26%)
割れ目の第1卓越方向 ^(※1)	N30E88SE (25%)	N30E87SE (33%)	N30E V (26%)
開口割れ目の第1卓越方向 ^(※1)	N29E83E (75%)	N24W89E (100%)	N25E89E (57%)
全岩盤分離面の第2,3卓越方向 ^(※1)			

(※1) 表中の()内は、ステレオネットのポイントカウンティングの集中度を示す。大きいほど集中度が高い。

DVS を用いた詳細観察では、開口割れ目の幅を計測することを目的に実施した。詳細観察する開口割れ目の選定および幅の計測については、深度 300m で実施した方針と同様である。割れ目の開口幅の計測結果を表 2.3.4-2 に示す。開口割れ目は NW 走向の高傾斜が占めているが、NE 走向の高傾斜も認められる。NW 走向の割れ目は、水理試験結果や観察中の割れ目からの気泡確認により水みちと判断された割れ目（湧水割れ目）が多い。また、割れ目周辺の母岩は大きく変質していない。一方 NE 走向の割れ目は、詳細観察画像よりシャープな分離面が壁面全体にわたって均一に開口し、母岩の変質が認められる特徴があるが、コア観察では充填鉱物により充填されている場合が多い。これより、詳細画像では開口割れ目と判断されるが、実際は開口しておらず、掘削時の水流やロッドの入れ替え等で充填鉱物が洗い流された可能性が示唆される。

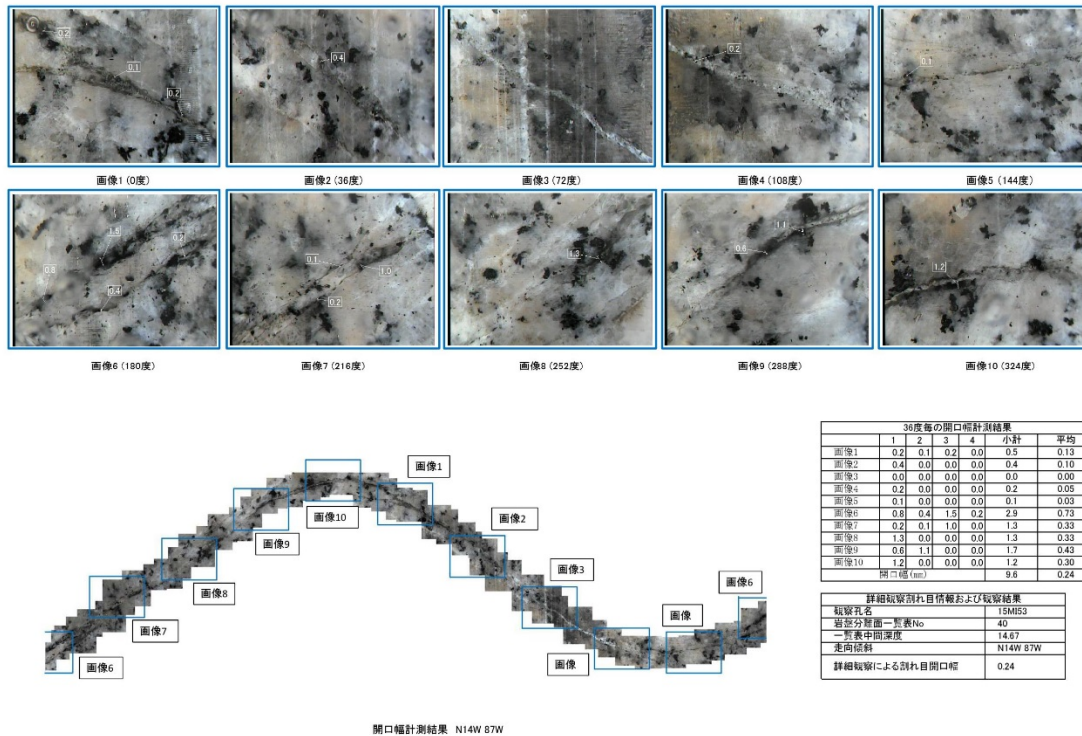


図 2.3.4-1 詳細観察記録シート (15MI53 号孔 : 14.67mabh/N14W87W)

表 2.3.4-2 開口割れ目幅の計測結果

孔番		開口割れ目 ①	開口割れ目 ②	開口割れ目 ③	開口割れ目 ④	開口割れ目 ⑤	開口割れ目 ⑥	開口割れ目 ⑦	開口割れ目 ⑧	開口割れ目 ⑨
15MI52	深度	8.66m	9.30m	9.47m	9.98m	16.09m	17.59m	27.67m	-	-
	走向傾斜	N28W/82E	N17W/76W	N26W/81W	N34E/87SE	N23W/78W	N32E/89NW	N36W/82SW	-	-
	開口幅	0.18mm	0.39mm	0.18mm	0.20mm	0.22mm	0.64mm	0.47mm	-	-
15MI53	深度	9.11m	11.14m	11.33m	14.67m	15.07m	18.97m	22.61m	23.81m	26.69m
	走向傾斜	N24W/80W	N32E/84SE	N20W/69W	N14W/87W	N22W/79W	N25W/74W	N38W/88NE	N52W/82NE	N44W/85SW
	開口幅	0.09mm	0.20mm	0.28mm	0.24mm	0.40mm	0.14mm	0.10mm	0.03mm	0.05mm
16MI59	深度	8.66m	9.3m	9.47m	9.98m	16.09m	17.59m	-	-	-
	走向傾斜	N28W/82E	N17W/76W	N26W/81W	N34E/87SE	N23W/78W	N32E/89NW	-	-	-
	開口幅	0.65mm	0.63mm	0.27mm	0.36mm	0.22mm	0.19mm	-	-	-

2.3.5 ポイント希釈試験

試験区間周辺の地下水の自然の流下速度を把握するため、ポイント希釈試験を実施した。平成 27 年度に設置した間隙水圧モニタリング装置とトレーサー試験装置の地上設備を使用し、地上からトレーサー溶液を観測区間内の配管に循環させて蛍光濃度センサーで測定した。試験手順は深度 300m と同様である。

各孔での試験条件と結果を表 2.3.5-1 に示す。各孔の対象区間における岩盤割れ目内の単位幅あたりに流れる地下水流量 q_f は最大で約 0.132mL/min、最小で 0.002mL/min のであり、自然流速の非常に小さい場であった。

表 2.3.5-1 ポイント希釈試験の試験条件と結果

孔番号	15MI52			15MI53		
対象区間	int1	int4	int5	int2	int4	int5
上端深度(mabh)	26.7	14.3	8.5	23	13.4	7.6
下端深度(mabh)	30	17.9	13.1	24.6	17	12.2
実施時間	21:58	19:20	17:10	16:30	17:11	17:05
ウラン(mg/L)	2.04	2.15	2.1	2.01	2.1	1.93
循環流量(mL/min)	120	120	120	120	120	120
地下水流量 Q_{bh} (mL/min)	2.469	3.08	2.744	0.042	3.93	3.073
地下水流量 q_f (mL/min/m)	0.106	0.132	0.118	0.002	0.16	0.132

2.4 湧水割れ目の連続性

深度 300m ボーリング横坑と深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑の場で、ボーリングコア観察や BTV 観察による割れ目の性状、透水試験中に計測した孔間の水圧応答や透水量係数等から湧水割れ目の特定とそれらの連続性を検討してきた。

深度 300m では、NNW 系の高傾斜の割れ目が卓越し、15mabh 以深から湧水を伴う割れ目が徐々に増える傾向がみられた。各孔の湧水量は数 10~100L/min と多く、深度 500m に比べて自然流速は速い。

5 孔間の透水試験により複数区間への水圧応答があり、複数の水理的な連続性が確認されたが、独立

した単一割れ目は見つかっていない。NNW系の割れ目に次いでNE系の割れ目も確認されていることから、ネットワーク状に割れ目が入っており、複雑な水みちを形成していると考えられる。

深度500mでは、NE系の高傾斜の割れ目が卓越し、割れ目数は深度300mと比べて少ない。3孔の湧水量は数L程度と少なく、自然流速も深度300mより1~2オーダー程度遅い。高解像度BTV検層より、開口割れ目はNE走向とNW走向が認められ、水理試験結果との対比により、NW走向の多くが湧水割れ目と判断された。また、3孔間の透水試験により単一の水圧応答が3箇所を確認された。

<参考文献>

国立研究行政法人 日本原子力研究開発機構（東濃地科学センターHP）

参照先：<https://www.jaea.go.jp/04/tono/miu/miu.html>

石橋正祐紀、濱克宏、岩月輝希、松井裕哉、竹内竜史、池田幸喜、見掛信一郎、弥富洋介、笹尾英嗣、小出馨(2017)：超深地層研究所計画 年度計画書(2017年度)、JAEA-Review、独立行政法人日本原子力研究開発機構

石橋正祐紀、栗原新、松岡稔幸、笹尾英嗣(2012)：超深地層研究所計画におけるサイトスケール地質構造モデルの構築—第2段階における Shaft180 から Stage300 地質構造モデルへの更新—、JAEA-Research、独立行政法人日本原子力研究開発機構

糸魚川淳二(1980)：瑞浪地域の地質、瑞浪市化石博物館専報、第1号、pp.1-50

川本康司、窪島光志、村上裕晃、石橋正祐紀、笹尾英嗣(2014a)：超深地層研究所計画 地質・地質構造に関する調査研究—深度500mステージの地質・地質構造—、JAEA-Research、独立行政法人日本原子力研究開発機構

川本康司、黒岩弘、山田信人、大貫賢二、大森一秋、竹内竜史、尾方伸久、大森将樹、渡辺和彦(2014b)：深度500m研究アクセス南坑道における先行ボーリング調査報告書(12MI32号孔)、JAEA-Technology、独立行政法人日本原子力研究開発機構

鶴田忠彦、松岡稔幸、程塚保行、田上雅彦、石田英明、早野明、栗原新、湯口貴史(2010)：超深地層研究所計画 地質・地質構造に関する調査研究(2008年度)報告書、JAEA-Research、独立行政法人日本原子力研究開発機構

鶴田忠彦、笹尾英嗣、川本康司、窪島光志、石橋正祐紀(2013)：超深地層研究所計画 地質・地質構造に関する調査研究—深度300mから500mまでの地質・地質構造—、JAEA-Research、独立行政法人日本原子力研究開発機構

三枝博光、須山泰宏(2000)：深地層研究所計画における地質構造モデルの構築及び地下水流動解析、サイクル機構技報、no.9、pp.89-101

3. トレーサー試験に係わる室内試験

3.1 背景と目的

高レベル放射性廃棄物処分の安全評価では、核種が地下水に溶解し地下水流動とともに移動する「地下水シナリオ」が主要な評価対象である。地下水シナリオにおいては、核種の移行は岩石との相互作用によって遅延されることが期待されている。このため、処分場候補地点の岩盤が持つ核種の遅延能力を評価することが必要とされている。室内試験で取得された分配係数は岩石が持つ核種の遅延能力の有用な指標であるが、割れ目を流れる地下水においては粉末状などの試料で取得した分配係数を現場の岩石に拡張するための考えが必要とされる。一方、原位置で実施するトレーサー試験は、実際の割れ目を使うため、処分の安全評価にそのまま適用可能な遅延係数が得られる可能性がある。さらに、割れ目充てん鉱物や二次鉱物の影響を評価することも可能であると考えられる。しかし、原位置では制御することが難しい試験条件も存在するため、実際の処分環境とは大きく異なる条件で試験を実施しなくてはならない場合もある。

上記のような状況をうけ、室内試験では以下に示すことを目的として、検討を実施した；

- (1) 原位置で実施するトレーサー試験をより有効なものとするために適切な試験条件等を検討する
- (2) 原位置トレーサー試験で得られた結果を実際の安全評価と結び付けるため、試験の条件依存性や分配係数の取りうる範囲などの情報を取得する
- (3) 原位置試験の結果から抽出された課題を解決するための試験を実施する

具体的には、下記の4つの項目について実施した；

- ① 種々の条件や試験方法で花崗岩への分配係数を取得し、分配係数の取りうる範囲や条件への依存性を明らかにした。この結果から、トレーサー試験の実施条件やトレーサー試験で取得した分配係数について考察した (3.2)。
- ② 現場試験では「非吸着性トレーサー」として使用している蛍光染料の濃度が、予想に反する値を示すことがあった。この原因と対策について検討するため、蛍光染料の強度に与える影響について室内試験によって検討した (3.3)。
- ③ 割れ目充てん鉱物の核種遅延への影響を明らかにするために、割れ目充てん鉱物に対する吸着・脱離試験を実施した (3.4)。
- ④ トレーサー試験や①の試験の結果から、トレーサー試験の結果を実際の安全評価に反映させるには、表面への吸着と吸収などの効果を分離して評価することが必要であることが明らかになったため、これらの効果を分離して評価する方法について検討した (3.5)。

3.2 種々の試験方法および条件を適用した場合の分配係数の取りうる範囲

3.2.1 試験方法および条件の概要

室内試験で分配係数を評価する方法として、バッチ試験とカラム試験の2種類の方法を採用した。また、サンプルの形状としてサンプルを2mm以下の粉末状にした場合、円柱状（ ϕ 15mm、高さ70mmの柱状岩石）にした場合、さらに柱状（100×100×1200mm）にしてその1面を利用する場合（一次元モデル）、の3つの場合を実施した。試験には、瑞浪地域の立坑深度500mで得られた岩石コアの健岩部を用いた。柱状岩石については、瑞浪地域と近いところから得られた「蛭川花崗岩」を加工して試験に供した。図3.2.1-1には、一次元モデルの花崗岩の外観と試験系の概念図を示した。

試験条件については主に、溶液のイオン濃度および試験時間（バッチ試験の場合は岩石と溶液との接触時間、カラム試験の場合は流速）をパラメーターとして、設定した。試験に用いた収着性トレーサーは実際のトレーサー試験と同じRbとBaとし、RbおよびBaの初期濃度についてもトレーサー試験と同じRb:2mg/l、Ba:1mg/lとした。

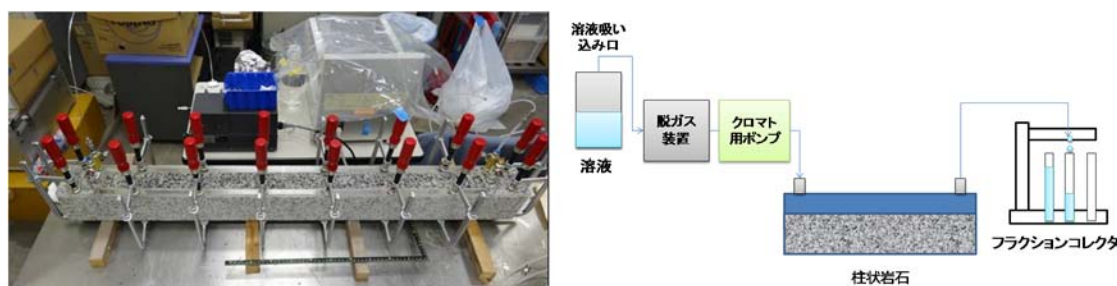


図 3.2.1-1 花崗岩一次元モデルの外観（左）と試験系の概念図（右）

3.2.2 試験結果例および考察

(1) バックグラウンドイオン濃度への依存性

粉末状の岩石に対するバッチ試験で得られた、吸着率と経過時間の関係を図3.2.2-1に示した。図からわかるように、バックグラウンドのイオン濃度によって吸着率は大きな影響を受けることが分かる。また、図3.2.2-2では、柱状花崗岩におけるバックグラウンドイオン濃度が異なる場合の試験結果を比較した。図からわかるように、ナトリウムイオンの濃度を海水と同程度まで高くすると、RbやBaは非収着性のトレーサーに対してほとんど遅延することなく移行した。このように、バックグラウンドとなるイオンの濃度はトレーサー試験の結果に大きな影響を与えるため、トレーサー試験においてトレーサー溶液を添加する場合には、バックグラウンドのイオン濃度が極力変化しないように留意することが重要である。このため、純水や水道水などでトレーサー溶液を調製して添加するよりも、原位置の地下水で溶液を調製し、使用するのが望ましいと考えられる。このとき、地下水と大気が接触して沈殿ができるなどの現象には留意する必要がある。

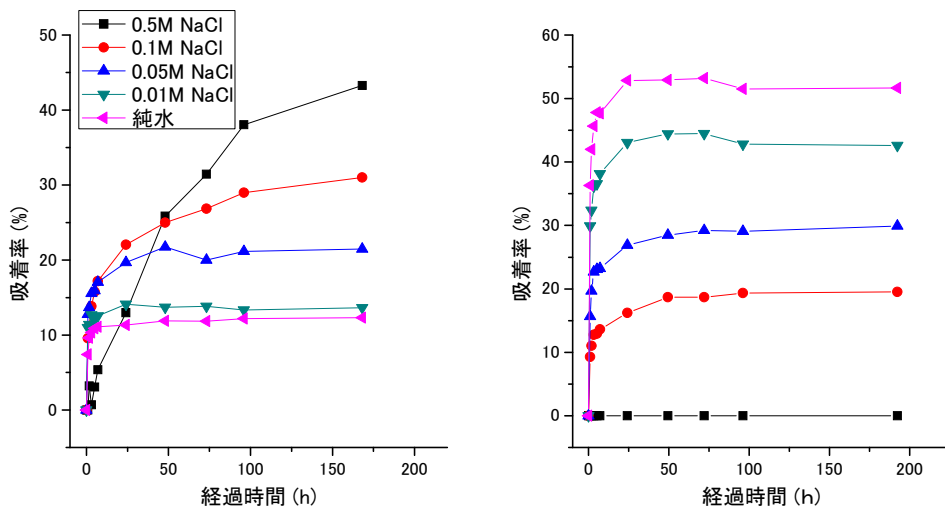


図 3.2.2-1 粉末状岩石に対するバッチ試験における経過時間と収着率の関係

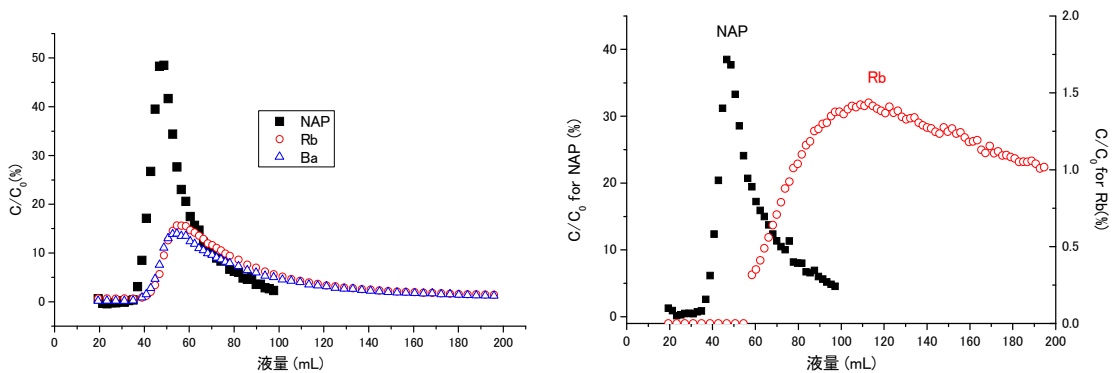


図 3.2.2-2 一次元モデルを用いた模擬トレーサー試験におけるバックグラウンドイオン濃度の影響
左図：NaCl 濃度 0.1M の場合、右図：NaCl 濃度 0.01M の場合

(2) 接触時間や流速への依存性

図 3.2.2-1 に示したように、バッチ試験における Rb や Ba の収着率は時間と共に変化する。(3)にて後述するように、特に岩石が柱状の場合には、分配係数の変化がなくなるまでに Ba の場合で 1000 時間程度を要することが分かった。Rb においては、短い接触時間ではイオン濃度が高い試料は低い吸着率を示したが、時間の経過とともに吸着量が増大する様子が観察された。この現象の原因について今までのところ不明であるが、バックグラウンドイオン濃度と関連していることから、例えば岩石内部の微小な空隙への拡散によるものである可能性も考えられる。

さらに図 3.2.2-3 には、岩石粉末を用いたカラム試験における Rb のピークの流速依存性を示した。図に示したように、カラムに流す流速が 1.0mL/min と 0.1mL/min の場合とで、Rb のピーク形状が大きく異なり、遅延係数が変化している様子が観察された。

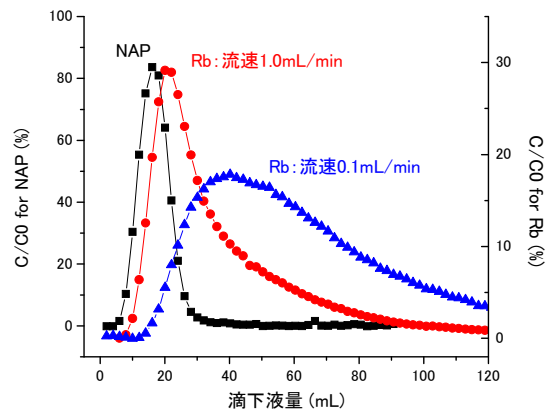


図 3.2.2-3 岩石粉末を用いたカラム試験における流速依存性 (Rb の場合)

上記のように岩石との接触時間（カラム試験における流速）によって、核種の岩石への収着量だけでなく、収着メカニズムも変化する可能性がある。このため、原位置トレーサー試験の流速も可能な限り実際の処分環境に近づけることが望ましいと考えられる。しかし、バックグラウンドの地下水流れや工期の関係から、極めて遅い流速で試験を実施することが困難であるケースも想定される。このような場合、実際の処分環境に比べて遅延係数をかなり小さく評価している可能性があることを認識して、データを安全評価に適用する必要がある。また、試験で示されたように、流速を遅くして遅延係数が増大すると、収着性トレーサーのピークは極めて微小なものになる。この場合、トレーサーの分析が困難となるケースも考えられる。このため原位置のトレーサーテストでは、試験の目的を考慮して、目的を達成するために必要な試験条件・分析法を設定するなど、「適切な試験のデザイン」が極めて重要になる。現地の試験をデザインするために、室内試験でのデータ取得は有効である。

(3) 岩石サンプル形状

粉体と柱状岩石で得られた分配係数の経時変化を図 3.2.2-4 に示した。図からわかるように、粉状と柱状の岩石では分配係数の経時変化の様子が異なっており、1000 時間（約 42 日）後の分配係数も大きく異なっていた。過去の研究においては、粉体の岩石に対して多くの分配係数が取得されており、特に割れ目が地下水の主要な移行経路となる岩盤では、これを実際の処分環境でどのように適用していくかが大きな課題となる。形状の異なる岩石での試験結果と、原位置トレーサー試験の結果等を比較することによって、実験室内において粉体等で得られた結果を安全評価の対象となるサイトにどのように適用していくかの大きな情報となりうる可能性がある。

原位置トレーサー試験は、実際の岩盤の割れ目に対して適用されるため、粉体よりも柱状の岩石に近い挙動を示す可能性が高い。図に示した試験結果では、柱状岩石では平衡が達成されるのに 1000 時間程度を要しているため、原位置の岩石の収着・遅延能力を正確に評価するためには上述の 1000 時間で試験を実施することが必要であると考えられる。しかし、数時間や数日間で実施したトレーサ

一試験が、おもに速い収着の効果だけを観察している可能性を考慮し、岩石内部に核種が移動する「吸収」などの効果をなにかしらのモデルを使って反映させることができれば、早い時間で実施したトレーサー試験から、ある程度現実的な分配係数を予想することが可能であると考えられる。

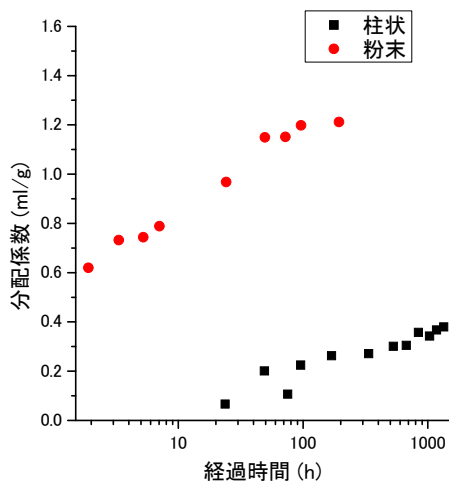


図 3.2.2-4 Ba における分配係数の経時変化 (粉末状と柱状岩石の比較)

(4) 分配係数の分布

各試験で得られた Rb と Ba の分配係数を表 3.2.3-1 にまとめた。表にまとめたように、以下のような傾向が確認された。

- ①バックグラウンドのイオン濃度依存性：Rb の長時間経過後の結果を除き、一般的にバックグラウンドのイオン濃度が高い方が、分配係数が低くなる。
- ②経時変化：特に柱状サンプルのバッチ試験において影響が顕著であり、24 時間と 1300 時間とで最大 3~4 倍程度の差が確認された。
- ③試験方法：岩石と地下水を比較した場合の分配係数が最も高く、室内試験で得られたデータはそれより低かった。バッチ試験とカラム試験で得られたデータはバッチ試験の方がやや大きな値を示したが、概ね同程度の値を示した。
- ④カラム試験における流速：流速の影響は顕著であり、今回試験した流速の範囲で 3~4 倍の値を示すことがあることを確認した。

3.2.3 課題の抽出

室内試験を実施することで、原位置のトレーサー試験でも想定される以下のような課題が抽出された。

- ①トレーサー試験のデータの適用性：全ての現場で「理想的な」状況で試験が可能なのではないため、室内試験等により実施した試験条件では過剰に/過少な分配・遅延係数を評価している可能性がある

るかを、把握しておく必要がある。

②トレーサー試験における遅延時間とピーク高さによる遅延係数の差異:非収着性/収着性トレーサーのピークの位置の差で遅延係数を決定した場合と、ピーク高さの差で遅延係数を決定した場合とでは、特に Ba では大きな遅延係数の差が生じることが分かった。この現象は実際のトレーサー試験でも観察されているため、その原因と対応を検討する必要がある。

表 3.2.3-1 分配係数のまとめ

対象イオン	試験方法	試験条件			分配係数 (ml/g)	
		NaCl濃度	流速	経過時間(h)		
Rb	粉末バッチ	0.1M	—	1	0.55	
			—	168	2.28	
		0.01M	—	1	0.61	
			—	168	0.79	
		柱状バッチ	0.1M	—	24	0.60
				—	1344	1.83
	0.01M	—	24	0.14		
		—	1344	0.24		
	試験方法	NaCl濃度	流速	ピーク高さ/遅延	(ml/g)	
	粉末カラム	0.1M	1.0mL/min	高さ	0.49	
			—	遅延	0.10	
		0.01M	0.1mL/min	高さ	1.10	
			—	遅延	0.45	
		1.0mL/min	高さ	3.72		
			遅延	0.49		
	柱状カラム	0.1M	1.0mL/min	高さ	0.10	
			—	遅延	0.01	
0.01M		1.0mL/min	高さ	1.47		
		—	遅延	0.02		
岩石/地下水比較				46.50		
対象イオン	試験方法	NaCl濃度	流速	経過時間(h)	(ml/g)	
Ba	粉末バッチ	0.1M	—	1	0.51	
			—	192	1.21	
		0.01M	—	1	2.13	
			—	192	4.06	
		柱状バッチ	0.1M	—	24	0.07
				—	1345	0.37
	0.01M	—	24	0.92		
		—	1345	2.74		
	試験方法	NaCl濃度				
	粉末カラム	0.1M	1.0mL/min	高さ	0.82	
				遅延	0.19	
			0.01mL/min	高さ	3.11	
				遅延	1.70	
		0.01M	1.0mL/min	高さ	—	
			遅延	—		
	柱状カラム	0.1M	1.0mL/min	高さ	0.16	
			遅延	0.01		
0.01M		1.0mL/min	高さ	5.91		
		遅延	0.02			
岩石/地下水比較	—	—	—	83.60		

3.2.4 まとめ

以上のように、分配係数は試験体の形状や、試験方法、試験条件によって大きな影響を受ける。試験条件への依存性を把握しておくことで、原位置での試験を実施した後、その試験結果が実際の核種移行に関する値に対して、どのような値なのか（余裕をみていることになるのか、過剰に遅延をみこんでいるのか）を議論することが可能である。

一般的に、原位置で行うトレーサー試験は、バックグラウンドの流れの影響を考慮したり、トレーサーを回収・分析できるという条件の制約、および現実的な工期の制約から、実際より流速は速め（試験時間は早め）・実際より核種濃度は高めに設定されることが多く、割れ目や岩盤が持つ遅延能力を低めに評価する傾向にある可能性が高いと考えられる。このため、試験で得られたデータをどのように実際の核種移行評価に適用していくかはさらに検討が必要である。

3.3 蛍光染料の分析や取り扱いについての検討

3.3.1 背景

ウラニンやナフチオン酸ナトリウムなどの蛍光染料は、比較的low濃度まで容易に分析することが可能であり、また配位した官能基の特性から一般的な pH の地下水中では負に帯電することが多く、このため岩石に対して「非吸着性」のトレーサーとして挙動する可能性が高い。以上のような性質から、トレーサー試験においては、非吸着性トレーサーとして蛍光染料が使用されることが多い。

トレーサーとして蛍光染料が使用されてきた歴史は古く、その性質についてはすでに多くが明らかになっている。しかし、種々の知見が散在しており、使用する蛍光染料の分析や使用方法についての理解不足から、使用や分析において誤って蛍光染料濃度を評価してしまうこともある。このため、ここでは過去の知見を整理するとともに、必要に応じて試験を追加し、蛍光染料濃度に影響を与える可能性がある因子を抽出し、それに対する対策を検討した。検討には、日本でよく使用されている、ウラニン・エオシン・アミノ G (AG)・ナフチオン酸ナトリウム (NAP) の 4 種類の蛍光染料を使用した。

3.3.2 検討の概要

蛍光染料の分析に影響を与える可能性のある、①溶液の pH、②溶液の温度、③溶液のイオン濃度、④天然有機物共存、⑤蛍光染料同士の共存、⑥分析中の光照射の影響、⑦ろ過の影響について、過去の研究における知見を整理すると共に、必要に応じて追加的な試験を実施して評価した。

さらに、使用や保管における変質について明らかにするため、①光曝露の影響、②保管方法の影響、③実地下水との接触による変質、について検討した。

3.3.3 蛍光染料の分析に影響を与える要因について

蛍光染料濃度の分析に影響を与える要因について、表 3.3.3-1 にまとめた。表に示したように、分析において特に留意が必要なのは、溶液の pH、溶液の温度、天然有機物の影響、蛍光染料共存の影響、ろ過の影響であることが分かった。

表 3.3.3-1 蛍光染料の分析に影響を与える要因の抽出とその対策

要因	分析への影響	対策	備考
pH	<u>大きい</u> 特にウラニンでは注意	ホウ砂水溶液で溶液の pH を 9 付近に緩衝する	原位置測定時に留意
温度	<u>あり</u> 10°Cで最大 5%程度	標準を含む全てのサンプルを同じ温度にしてから分析	原位置測定時に留意
イオン濃度	小さい 海水までなら影響なし	特に対策は必要ない	超高濃度でエオシンが影響される
天然有機物の共存	<u>あり</u> 濃度が底上げされるケースと、減感するケース	事前の調査が必要（ブランク試験，標準添加法）	有機物の種類によって影響が異なる
蛍光染料同士の共存	<u>あり</u> ウラニンとエオシン，NAP と AG が干渉	（ウラニン・エオシン）と（NAP・AG）からそれぞれ 1 つを選定する	左記，濃度比で 1:50 まで干渉しないことを確認
分析中の光分解	少ない シャッター機能ない装置では要注意	シャッター機能を使う。サンプルを装置内に放置せずすぐ分析する。	
ろ過の影響	<u>あり</u> ウラニン・エオシンが有意な量フィルタに吸着	親水性 PTFE のフィルタを使う。ろ紙をサンプルでリンスする。ホウ砂で希釈してろ過する。	NAP・AG は影響が少ない

中田ほか（2017 年）に加筆

溶液の pH は特にウラニンにおいて影響が顕著である。これは、ウラニンにおいては pH5～8 程度でその蛍光強度が大きく変化するためである。このため、ウラニンにおいては特に溶液の pH 調整が必要であり、そのためには pH を 9.5 程度に調整できるホウ砂水溶液が有用である。

また、各蛍光染料の蛍光強度は溶液の温度に対して依存性があるため、例えば冷蔵庫等に保管した標準サンプルを室温に戻さずに測定した場合、分析結果に影響がでる可能性がある。このため、標準

試料を含む全てのサンプルの液温をできるだけ同じにすることが必要である。

天然有機物の影響は様々であり、蛍光強度が増加する場合と減少する場合の両方が観察された。ウラニンでは天然有機物の存在によって蛍光強度が減少する傾向が見られた。これは、蛍光染料から発せられた蛍光が天然の有機物によって吸収されたためである。一方、今回試験をした天然有機物は AG や NAP と近い蛍光特性を示し、天然有機物が存在することで蛍光染料濃度が底上げされた。このように、有機物の種類や濃度によって、蛍光染料濃度は見かけ上増加したり、減少したりする。このため、試験に使用する地下水を用いて、事前に確認をすることが必要となる。

(ウラニンとエオシン) および (AG と NAP) が共存した場合には、それぞれの濃度が底上げされることが分かった。一方で、(ウラニンとエオシン) から 1 種類、(AG と NAP) から 1 種類を選んで混合した溶液では、蛍光染料濃度への影響は濃度比で 1 対 50 までの範囲で観察されなかった。このため、試験によって 2 種類の蛍光染料を使う必要があるときには、上記の組み合わせから選定するか、イオンクロマトグラフィ等の適切な方法で蛍光染料同士を分離して分析することが必要である。

蛍光染料の溶液をろ過する場合、セルロース混合のフィルタを用いると特にウラニン・エオシンにおいて濃度が低下することが分かった。一方、蛍光染料が AG や NAP の場合、およびフィルタの素材が親水性 PTFE の場合は、ろ過後の濃度低下は観察されなかった。このため、蛍光染料の濃度分析を目的とする場合には、ろ紙の素材として適切なものを選定する方が良いと考えられる。

3.3.4 保管や蛍光染料の利用について

蛍光染料が保管中に変質してしまう主要な要因は光への曝露である。日光への曝露の場合、それが数分であっても蛍光強度が大きく低下する可能性があるため、留意が必要である。一方蛍光灯への曝露は濃度低下の要因となるものの、濃度低下は緩やかであるため、数時間程度の作業のために遮光等をする必要はない。保管はポリプロピレンの容器で室温において 1 カ月程度の保管が可能であることを確認することができた。

一方、蛍光染料が地下水と接触した場合には、長い時間をかけてその性質が変化する可能性がある。本報告での検討では、1 週間ほどで地下水と接触したウラニンの濃度が顕著に低下したが、地下水に水銀を添加したところこの現象が観察されなかったことから、微生物による影響であると推察される。

3.3.5 まとめ

トレーサー試験において非吸着性トレーサーとして用いられる蛍光染料について、その分析や取り扱いにおいて蛍光強度を増減させる要因について明らかにし、その対策を示すことができた。

3.4 割れ目充てん鉱物への核種の収着・脱離試験

3.4.1 背景

割れ目が持つ核種の収着能力を評価することは、核種移行を予測するうえで極めて重要であるが、割れ目が二次鉱物に覆われていたり、充てん鉱物が存在する場合には、これらの鉱物が核種を収着し核種の移行速度をコントロールする可能性がある。このため、割れ目充てん鉱物に対する核種の収着挙動を明らかにすることは、核種の移行速度を評価するうえで重要である。

本研究では瑞浪地域の割れ目を対象として、充てん鉱物を特定し、それらを用いた収着・脱離試験を実施した。

3.4.2 割れ目充てん鉱物の特定と試験の準備

割れ目観察等の結果（第5章など参照）から、瑞浪地域の岩石割れ目においては、①緑泥石、②絹雲母、③方解石、④スメクタイト、が主要な充てん鉱物であることがわかった。その他に黒雲母も鉱物として発見された。上記の鉱物に加えて、花崗岩健岩部の主要な造岩鉱物であると考えられるアルカリ長石および曹長石を試験の対象とし、Rb および Ba の収着・脱離試験を実施した。試験に用いた鉱物を表 3.4.3-1 にまとめた。

これらの鉱物は天然に産出したものを購入し、2mm 以下の粉末状に粉碎した後、それぞれ BET 比表面積を分析した後、試験に使用した。

3.4.3 収着試験

収着試験では、Rb、Ba を収着のトレーサーとし、それぞれの濃度を 2 および 1ppm とした溶液に粉末状にした岩石を浸漬する「バッチ法」で実施した。試験溶液として 0.01M NaCl 溶液を用いた。0.2g の岩石粉末に対して、5mL の溶液を添加したあと、pH を 8.5 に調整しながら 1 週間岩石と溶液を接触させた。その後 Rb と Ba の塩化物の溶液で調製したストックを溶液に添加し、溶液における Rb および Ba の濃度をそれぞれ 2 および 1mg/L とした。ストック添加から 1 週間後、固液を 0.45 μ m のフィルタで分離し、溶液の Rb・Ba 濃度を測定してそれぞれの岩石への収着率を評価した。

表 3.4.3-2 には、各鉱物について Rb および Ba に対する収着率と収着率を BET 比表面積で除したものの値をまとめた。表からわかるように、ベースの花崗岩の造岩鉱物と考えられる曹長石やアルカリ長石と比べて、各鉱物の収着率は高く、割れ目充てん鉱物の存在により収着量が増大していることが明らかになった。しかし、比表面積で正規化した値を比較するとアルカリ長石や曹長石に比べて（特にアルカリ長石の場合）、その他の鉱物が顕著に大きな値を示しているわけではないことがわかった。

以上のことから、割れ目に充てん鉱物が存在する場合、吸着量が増大する効果が期待されると考え

られる。また、吸着量が増大する主な理由として、充てん鉱物が存在することにより比表面積が増大する効果が主要な要因であると考えることができる。

表 3.4.3-1 試験に使用した鉱物と入手先

鉱物名	形状	産地	入手先
黒雲母	板状	カナダ、オンタリオ	ニチカ
緑泥石	破砕塊状	高知県、本山	ニチカ
絹雲母	粒状	愛知県、東栄町	岩本鉱産物商会
方解石	破砕塊状	岐阜県、赤坂	岩本鉱産物商会
スメクタイト	粉末	(クニピア F)	クニミネ興業
アルカリ長石	破砕塊状	福島県、石川町	ニチカ
曹長石	粒状	北海道、余市	ニチカ

表 3.4.3-2 各鉱物に対する収着率と比表面積で規格化した収着率

対象イオン	鉱物	収着率(%)	収着率/BET 比表面積(% g/cm ²)
Rb	黒雲母	37.1	75.8
	絹雲母	18.8	12.0
	方解石	1.8	45.9
	緑泥石	11.5	15.2
	曹長石	2.1	5.6
	アルカリ長石	4.1	58.4
Ba	黒雲母	91.7	187.2
	絹雲母	96.4	61.8
	方解石	4.0	100.3
	緑泥石	37.2	49.0
	曹長石	37.2	33.4
	アルカリ長石	12.4	176.4

3.4.4 鉱物への収着・脱離試験

上述の収着試験に引き続き、脱離試験を実施した。収着試験によって、花崗岩の割れ目に充てん鉱物が存在する場合、主に比表面積が増大する効果によって核種の収着・核種移行の遅延効果が増大する可能性を示すことができた。脱離試験では、充てん鉱物に収着した Rb および Ba の可逆性を調べるため、上述の収着試験に使用した岩石を 0.01M NaCl 溶液に浸漬して脱離した Rb や Ba 量を評価した。

脱離試験の結果を表 3.4.4-1 にまとめる。表に示したように、Rb ではほとんどの鉱物において収着した Rb のほぼ 100%が脱離した。スメクタイトにおいては、Rb の脱離率（収着量に対する、脱離した Rb の量の割合）は 6.3%であり、一部の Rb は不可逆的にスメクタイトに収着した可能性があると考えられる。このため、充てん鉱物としてスメクタイトが存在する場合には、1 価の陽イオンの移行速度は大きく抑えられる可能性がある。つぎに Ba の結果を見ると、花崗岩の母岩の成分である曹長石やアルカリ長石では、すべての Ba が脱離したのに対し、そのほかの鉱物では Ba が完全には脱離できていないことがわかる。また、絹雲母やスメクタイトでは脱離できた成分が吸着した成分の 5~6%程度であることから、これらの鉱物には Ba がかなり強く収着することが確認できた。

上記のように、充てん鉱物の存在により、核種の割れ目への収着量だけでなく、収着の仕方が変化する可能性がわかった。今回の試験で明らかになったように、充てん鉱物は花崗岩の母岩と比較すると、核種を不可逆的にあるいは脱離しにくいように収着する可能性が高いことが示された。長期の核種移行では、不可逆的なあるいは脱離しにくい収着により、母岩のバッチ試験等で見込まれたよりさらに核種が遅延する可能性があると考えられる。

表 3.4.4-1 Rb および Ba の脱離試験の結果

鉱物名	脱離率 (%)	
	Rb	Ba
曹長石	>100%	>100%
アルカリ長石	>100%	>100%
黒雲母	>100%	35.2
緑泥石	>100%	56.1
絹雲母	>100%	4.7
方解石	—*	—*
スメクタイト	6.3	5.7

3.4.5 まとめ

実際の割れ目を観察して充てん鉱物を特定し、その充てん鉱物に対する Rb および Ba の収着・脱離挙動を明らかにした。その結果、充てん鉱物が存在することによって鉱物の比表面積が増大し、それ

によって収着量（つまり遅延効果）が増大する可能性が高いことが分かった。さらに、母岩となる鉱物と充てん鉱物とでは、収着の可逆性が異なっており、Rb についてはスメクタイトへの収着が、Ba についてはスメクタイト、絹雲母、緑泥石への収着が不可逆性を示すことから、これらの充てん鉱物が存在した場合には、収着試験から予測された以上に核種が遅延される可能性があると考えられる。

3.5 収着バッチ試験による割れ目表面への吸着係数の評価

3.5.1 背景

岩盤割れ目を対象として収着性物質を用いたトレーサー試験を実施する場合、割れ目表面への収着、割れ目に接する岩石基質部への拡散に伴う収着、割れ目充填物への収着が考えられる。これら3つの収着に係わるパラメーターを、原位置トレーサー試験だけから決定するのは困難である。

Byegård *et al.* (1998) は、花崗岩の粒径範囲の異なる粉体試料を用いて収着バッチ試験を実施して粒径範囲毎の分配係数を求め、次式により粉体表面への収着係数 K_d を推定している。

$$K_d = K_{d,i} + K_a \cdot \frac{6}{\rho \cdot \langle d_p \rangle} \quad (3.5.1-1)$$

ここで、 K_d は粉体岩石に対する分配係数、 $K_{d,i}$ は粉体内部への拡散に伴う分配係数、 ρ は粉体岩石の真密度、 $\langle d_p \rangle$ は粉体の平均粒径である。

そこで、原位置トレーサー試験を実施した瑞浪の岩石コアを用いて、粒径範囲を変えた粉体岩石の収着バッチ試験を実施して表面収着係数を推定し、原位置トレーサー試験の評価解析でその数値を割れ目の表面収着係数として使用することで、同定するパラメーターの数を減らすことを試みた。

3.5.2 試験方法

JAEA 瑞浪超深地層研究所の深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑の坑壁から掘削したボーリング孔の健岩部のコアをタングステンのミルで粉砕した。そして、ふるいにかけて、75~125 μm 、125~250 μm 、250~500 μm 、500 μm ~1mm、1~2mm、2~4mm の6通りの粒径範囲に選別した。

収着試験のベースとなる溶液は 0.01M の塩化ナトリウム (NaCl) 溶液とした。また、溶液の pH を水酸化ナトリウムあるいは塩酸溶液で 8.5 ± 0.1 に調整した。これら NaCl 溶液の濃度や pH は、125m 計測横坑のボーリング孔で採取した地下水のイオン強度や pH を基に設定した。

各粒径範囲の粉体岩石 9.0g をそれぞれ 50mL の遠沈管に入れ、所定の NaCl 溶液を 45mL 添加し、遠沈管にフタをした後、シェイカーで緩やかに振盪した。岩石と溶液が接触してから 2 日後および 4 日後に溶液の pH を確認し、 8.5 ± 0.1 の範囲になるように塩酸や水酸化ナトリウム溶液を添加した。また、岩石を入れない「ブランク溶液」も準備し、同様に pH を調整した。

1 週間後、塩化ルビジウムあるいは塩化バリウム溶液を適量添加し、溶液のルビジウム (Rb)、バリウム (Ba) 濃度がそれぞれ 2mg/L あるいは 1mg/L となるようにした。これらの濃度は、原位置トレーサー試験のトレーサー濃度に等しい。溶液の pH を再度調整した後、遠沈管はシェイカーを用いて緩やかに振盪した。また、岩石から Rb や Ba が溶出する可能性を検討するため、トレーサーを入れない「岩石ブランク」試料も準備した。

ストック溶液の添加から原則として 1、2、3、5、7、24、48、72、96、168 時間後、以下の手順で上澄み液のサンプルを採取した。まず、遠沈管をシェイカーから外して卓上に置き、岩石が沈降するまで静置した。その後に上澄み 0.5mL をフィルタ径 13mm のコマ型フィルタに通し、ろ液のうち 50 μ L を 1%硝酸 4.95mL を予め添加した 15mL 遠沈管に入れた。Rb や Ba 濃度は ICP-MS (アジレントテクノロジー社、7500CE) を用い、検量線法により定量した。

3.5.3 試験結果および考察

Ba および Rb の経過時間と収着率の関係を図 3.5.3-1 に示した。収着率は次式により算出した。

$$(\text{収着率}) = \{ (\text{ブランク濃度}) - (\text{サンプル濃度}) + (\text{岩石ブランク濃度}) \} / (\text{ブランク濃度})$$

まず、Ba の結果をみると、いずれの粒径範囲でも 24 時間程度で収着は見かけ上ほぼ平衡に達している。収着率の粒径依存性は明瞭であり、粒径が小さいほど収着率が高くなる傾向がみられる。これは、粒径の小さい試料ほど比表面積が大きいためと考えられる。

一方、Rb の結果をみると、試験開始後 5 時間までは Ba と同様に粒径が小さいほど収着率が高くなる傾向がみられる。しかし、粒径の小さい 75~125 μ m や 125~250 μ m、250~500 μ m の試料では 5 時間以降は収着率があまり増えないが、粒径の大きい他の試料では 5 時間以降も収着率が増え続け、粒径と収着率の関係が逆転している。Rb は Ba に比べて拡散係数が大きく収着性は弱いため、粉体表面から中心までの距離が短く収着座も少ない小粒径の試料では、粉体内部への拡散・収着が比較的短時間で収束してしまったものと推測される。

収着率から分配係数を算出し、平均粒径の逆数と分配係数の関係を図 3.5.3-2 に示した。

Ba の場合、粒径 125~250 μ m ($1/\langle dp \rangle = 5333 \text{ m}^{-1}$) の試料を除くと、いずれの時間においても平均粒径の逆数と分配係数はほぼ直線関係にあり、式(2.3.1-1)の関係が成立していることを示唆している。平均粒径の逆数と分配係数が直線関係にある場合、その直線の傾きを a とすると、表面吸着係数は次式により算出される。

$$K_a = \frac{a \cdot \rho}{6} \quad (3.5.3-1)$$

図 3.5.3-2(a)において、1 時間後の平均粒径の逆数と分配係数の関係について回帰分析により近似直線の勾配を算出し、さらに式(3.5.3-1)を用いて表面吸着係数 $4.7 \times 10^{-4} \text{ m}$ を算出した。

一方、Rb の場合、図 3.5.3-2(b)において、平均粒径の逆数と分配係数が右肩上がりの直線関係とみられるのは、試験開始後数時間である。また、直線関係がみられるのは、粒径 $125\mu\text{m}\sim 250\mu\text{m}$ ($1/\langle dp \rangle = 5333\text{ m}^{-1}$)、 $250\mu\text{m}\sim 500\mu\text{m}$ ($1/\langle dp \rangle = 2666\text{ m}^{-1}$) および $1\text{mm}\sim 2\text{mm}$ ($1/\langle dp \rangle = 667\text{ m}^{-1}$) の 3 試料である。これら 3 試料の試験開始後 1 時間、2 時間、3 時間、5 時間、7 時間の分配係数から算出された表面吸着係数は、それぞれ $4.7\times 10^{-5}\text{ m}$ 、 $3.5\times 10^{-5}\text{ m}$ 、 $4.5\times 10^{-5}\text{ m}$ 、 $4.5\times 10^{-5}\text{ m}$ 、 $2.9\times 10^{-5}\text{ m}$ で、7 時間後の数値はそれ以前の数値と大きく異なり、決定係数も小さくなっている。そのため、5 時間後までの数値の平均値 $4.3\times 10^{-5}\text{ m}$ を、表面吸着係数の推定値とした。

以上で得た表面吸着係数の推定値を原位置トレーサー試験の評価解析に使用したところ、Rb については良好に破過曲線を再現でき、Ba についても表面吸着係数を推定値の 1/2 程度に修正することで破過曲線を再現できた。このため、本手法により岩盤割れ目の表面吸着係数を推定できる可能性が示唆されたものとする。

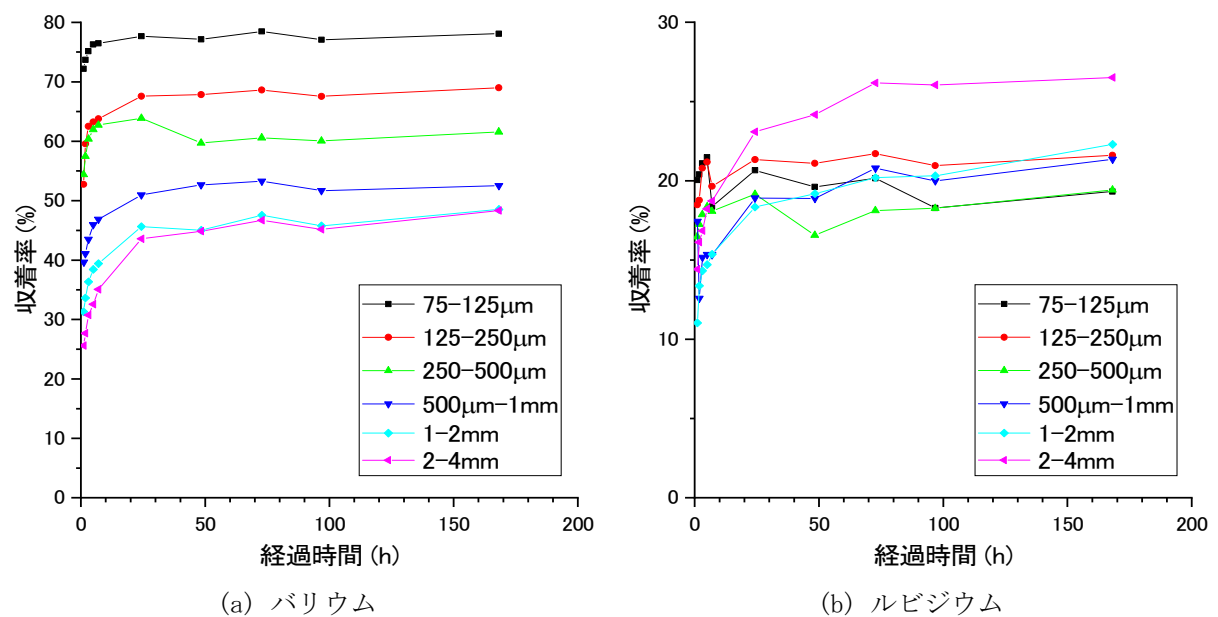
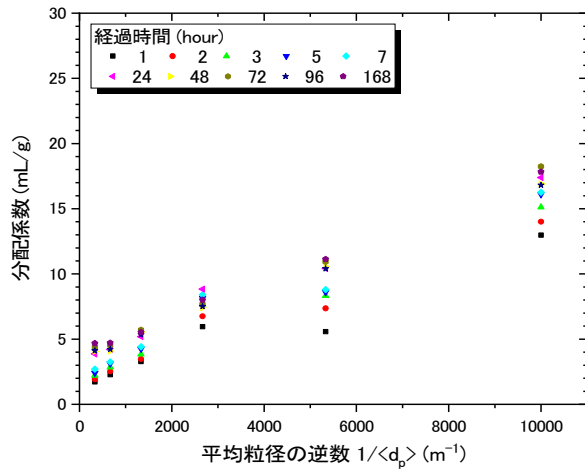
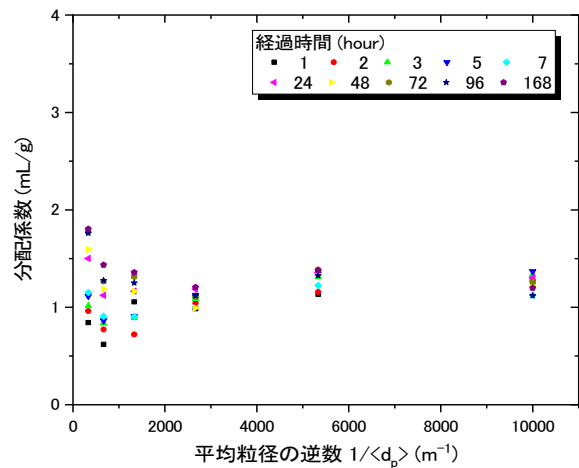


図 3.5.3-1 粉体岩石に対する収着率の経時変化



(a) バリウム



(b) ルビジウム

図 3.5.3-2 粉体岩石の平均粒径の逆数と分配係数の関係

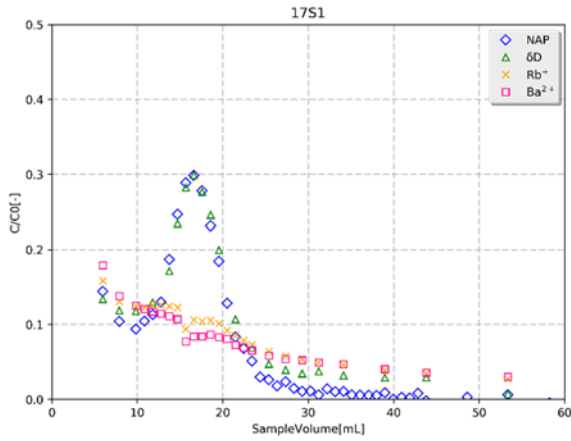
3.6 一次元モデルを用いた模擬トレーサー試験

3.6.1 背景

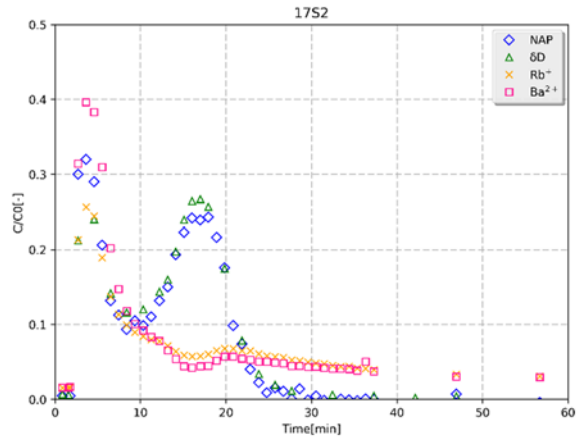
原位置での試験では、分散、収着、拡散といった現象に加え、バックグラウンドの地下水流れ等が複雑に関係し、試験結果（破過曲線）に影響を与えていることが想定される。このため、分散、収着、拡散といった物質移行現象が、破過曲線にどの程度影響を及ぼすかを原位置の試験結果のみで判断することが難しい。以上のことから、本節では制御された室内での模擬トレーサー試験を実施し、分散、収着、拡散の効果が破過曲線に及ぼす影響について検討する。

3.6.2 模擬単孔トレーサー試験

100×100×1200 mm の直方体の花崗岩に、スペーサーとオーリングを介してアクリル板を押しつけて、1 次元的な割れ目モデルを作製し模擬単孔トレーサー試験を実施した。模擬単孔トレーサー試験は、注入流量を 1.0mL/min とし、トレーサー注入時間を 5 分、チェイサー注入時間を 12 分とし、試験条件 17S1 は回収流量を 1.0mL/min で 60 分間、17S2 は回収流量を 0.1mL/min で 600 分間回収した。試験結果を図 3.6.2-1 に示す。

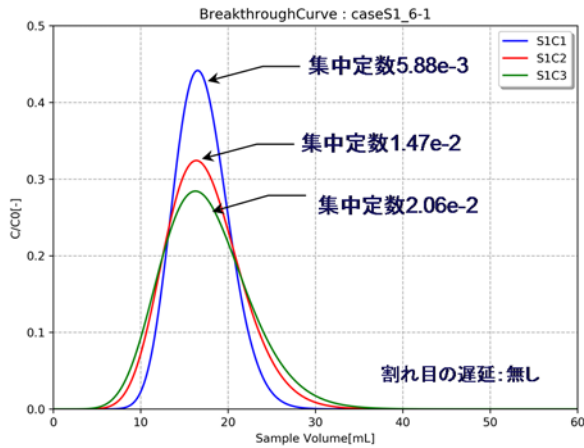


(a) 試験結果 (17S1)

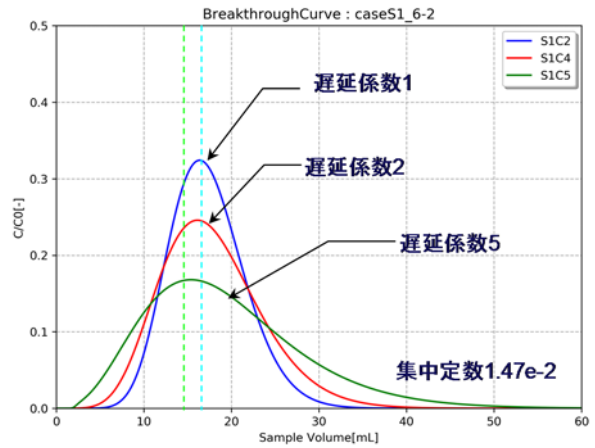


(b) 試験結果 (17S2)

図 3.6.2-1 一次元モデルを用いた模擬単孔トレーサー試験結果

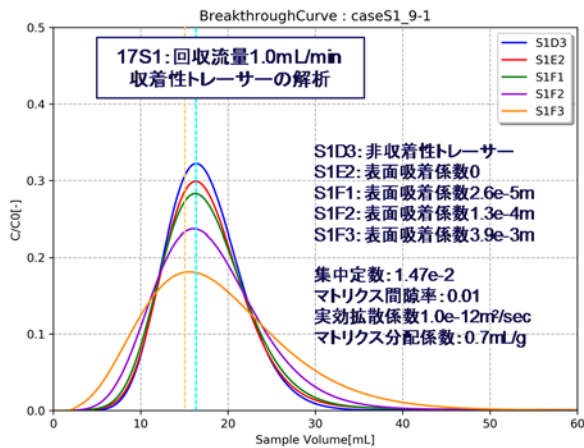


(a) 割れ目の集中定数に対する評価結果

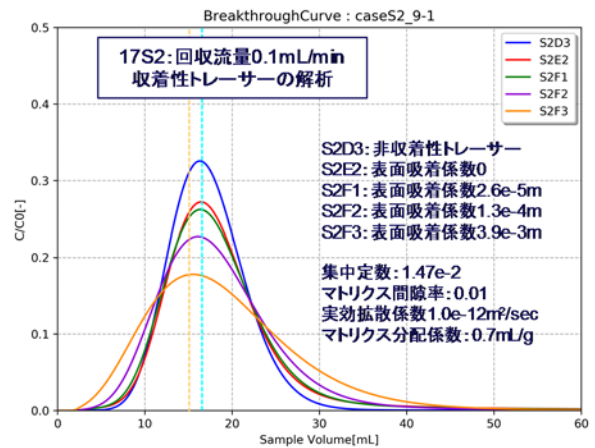


(b) 割れ目の遅延係数に対する評価結果

図 3.6.2-2 割れ目モデルを用いた 17S1 の評価結果



(a) 解析結果 (17S1)



(b) 解析結果 (17S2)

図 3.6.2-3 複合モデルを用いた評価解析結果

試験結果では、非収着性トレーサーの破過曲線に対し、収着性トレーサーのピーク濃度が減少するとともに、ピーク位置は若干遅くなる傾向が確認された。また、その傾向は回収流量を小さくした条件ではより顕著であった。このことから、回収流量が小さい17S2では、トレーサーと岩盤の接触時間が長いことが関係し、マトリクスへの拡散や収着の効果が破過曲線に表れている可能性が考えられた。この結果に対し、割れ目のみをモデル化した割れ目モデルを用いて17S1の結果に対し行った評価解析結果を図3.6.2-2に示す。割れ目の遅延係数に関する評価解析では、割れ目の遅延係数を大きくするに従って、ピーク濃度は試験結果と同様に小さくなったが、ピーク位置については、試験結果とは異なり、早くなる解析結果となった。このことから、割れ目に加えてマトリクスをモデル化したモデル(複合モデル)を用いて評価解析を行った。割れ目の集中定数は $1.47e-02$ 、マトリクスの間隙率は0.01、マトリクスの実効拡散係数は $1.0e-12m^2/sec$ 、マトリクスの分配係数が $0.7mL/g$ とし、割れ目の表面吸着係数は以下の値を用いた。

S1D3、S2D3：マトリクスの分配係数0、割れ目の表面吸着係数0(非収着性トレーサー)

S1E2、S2E2：割れ目の表面吸着係数0

S1F1、S2F1：割れ目の表面吸着係数 $2.6e-5m$

S1F2、S2F2：割れ目の表面吸着係数 $1.3e-4m$

S1F3、S2F3：割れ目の表面吸着係数 $3.9e-3m$

複合モデルを用いた解析結果を図3.6.2-3に示す。解析の結果、マトリクスへの拡散、収着、割れ目表面への収着を考慮することにより、ピーク位置は非収着性トレーサーの破過曲線とほとんど変わらず、ピーク濃度のみ減少する解析結果となり、回収流量が小さいほどその傾向が強くなる傾向を再現することができた。従って、マトリクスへの拡散、収着といった効果が破過曲線に影響を及ぼしている可能性が考えられた。原位置試験の場合も同様の検討を行い、ピーク位置の変化、ピーク濃度の変化の傾向を再現できることを確認した。今回は間隙率の小さい花崗岩を用いたが、間隙率の比較的大きな砂岩等を用いた試験を実施し、拡散の効果が大きくなると想定される試料での検討も必要と考えられる。また、収着性トレーサーは、非平衡の収着挙動となっている可能性もあることから、今後検討が必要である。

3.7 室内試験のまとめ

室内試験においては、以下の4つのことを実施した。つまり、①分配係数の取りうる範囲と条件依存性を明らかにする、②非収着性トレーサーとして有用な蛍光染料を正確に分析するための留意点と対策を明らかにする、③割れ目充てん鉱物への核種の収着・脱離挙動を明らかにする、④表面吸着と岩石基質部への拡散に伴う収着を評価する、である。

①では種々の条件や試験方法でRbやBaの花崗岩への分配係数を明らかにした。その結果、試験方

法等の差によって最大で数十倍程度の分配係数の差異が観察された。また、試験条件の中では岩石と溶液の接触時間が結果に大きな影響を与えることが分かった。室内単孔トレーサー試験の評価解析から、トレーサー試験の結果は数値解析などにより接触時間による効果（基質部への拡散など）を考慮して評価する必要があると考えられた。

②では、蛍光染料のサンプリングから分析において、蛍光染料の強度に影響がある要因を抽出し、その対策を示した。溶液の pH やろ過方法などが蛍光染料の強度に大きく影響する可能性があり、pH を緩衝したり、ろ過方法やフィルタの選定に留意するなどが必要であることが分かった。

③では、瑞浪地域の割れ目観察から特定された割れ目充てん鉱物に対して、収着・脱離試験を実施し、充てん鉱物が収着挙動に与える影響について評価した。充てん鉱物が存在することで比表面積が大きくなり収着量が大きくなる効果のほか、鉱物の種類によっては不可逆的な収着が起きるため、さらに核種の移行が遅延される可能性があることを示した。

④では、瑞浪超深地層研究所の深度 500m で採取した健岩部の岩石コアを粉砕して、粒径範囲の異なる 6 つの粉体試料を作製し、それぞれについてバッチ式の収着試験を実施した。そして、平均粒径の逆数と収着試験で得られた分配係数の関係から、粉体試料表面への吸着係数を粉体内部への拡散による分配係数から分離して推定した。その推定値を原位置トレーサー試験の評価解析に適用した結果、粒径を変えた粉体試料のバッチ式収着試験により割れ目表面への吸着係数を推定できる可能性があることがわかった。

参考文献

Byegård, J., Johansson, H., Skålberg, M., and Tullborg, E-L. (1998) : The interaction of sorbing and non-sorbing tracers with different Äspö rock types – Sorption and diffusion experiments in the laboratory scale. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company. SKB Technical Report TR-98-18.

4. 原位置トレーサー試験

4.1 はじめに

高レベル放射性廃棄物を地層処分する際の天然バリアの性能評価においては、人工バリアから漏出した放射性核種が地下水を輸送媒体として生物圏へ移動するといういわゆる「地下水シナリオ」が、重要なシナリオとなる。そのため、処分施設建設地点の岩盤における物質の移動特性を精度良く把握することが重要となる。

そのため、岩盤中での物質移動特性を直接的に測定する手法であるトレーサー試験技術について、当所では平成 24 年度までの前フェーズにおいて原位置試験装置や試験結果の評価手法の開発を進めてきた。そして、スイス Nagra の Grimsel Test Site (以下、GTS) において適用性試験を実施し、装置について基本性能が整備されていること、試験結果から物質移行パラメータを推定できることを確認した。一方で、GTS での適用性試験を通じて、新たな課題も抽出された。そこで、平成 25 年度から今年度まで、それら課題を解決するために試験装置や評価手法の改良を行うとともに、改良した装置や評価手法が我が国の地質環境においても十分に適用可能であることを確認するために、JAEA 瑞浪超深地層研究所において適用性試験を実施した。

4.2 トレーサー試験装置

4.2.1 トレーサー試験装置の全体構成

本研究では、平成 20～22 年度にスイス GTS において実施された原位置トレーサー試験の結果を踏まえ、日本国内での適用性試験を実施するために試験装置の改良を行った。本試験装置の主な構成を図 4.2.1-1 に、主な改良点を表 4.2.1-1 に整理する。

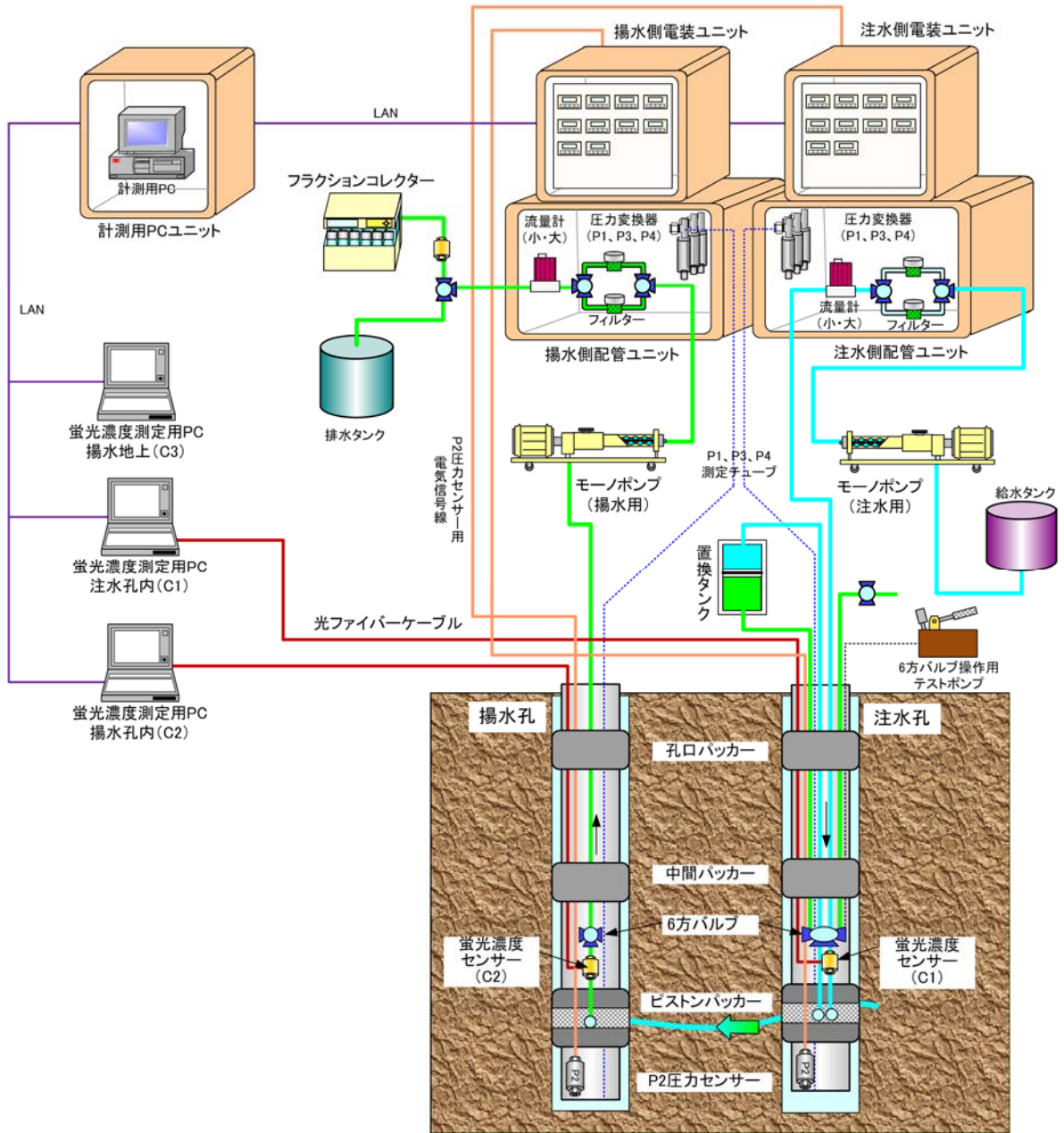


図 4.2.1-1 トレーサー試験装置の全体構成 (2017 年度実施試験)

表 4.2.1-1 トレーサー試験装置の開発とその変遷

年度(西暦)		2013	2014	2015	2016	2017
年度(和暦)		平成25年	平成26年	平成27年	平成28年	平成29年
試験場所		-	深度300mボーリング横坑	深度300mボーリング横坑	深度500m研究アクセス南坑道125m計測横坑	深度500m研究アクセス南坑道125m計測横坑
対象区間		-	12MI30号孔 24.46~24.66mabh 12MI31号孔 24.04~24.24mabh	12MI31号孔 21.82~21.98mabh 13MI37号孔 23.04~23.24mabh	15MI52号孔 15.21~15.41mabh 15MI53号孔 14.95~15.15mabh	15MI52号孔 15.24~15.44mabh 16MI59号孔 17.24~17.44mabh
トレーサー試験装置(孔内部)	圧力計	-	Mensor社製 CPT6000	⇒	⇒	⇒
	中間バッカー	-	×	○	○	○
トレーサー試験装置(地上部)	蛍光濃度センサー	-	ver3.0	ver3.0 ver3.1	ver3.1 × 2	⇒
	蛍光濃度センサー線源	-	ファイバーラボ社製 LED-VR0470-20	⇒	⇒	⇒
	蛍光濃度センサー	-	ver2.0	ver1.0	⇒	⇒
	揚水ポンプ	-	モノポンプ	⇒	モノポンプ ニードルバルブ	⇒
	水位計測	-	スタンドパイプ	スタンドパイプ及び絶対圧計	差圧計	⇒
改良点	<ul style="list-style-type: none"> ・注入時におけるチューブ内分散抑制を目的としたトレーサー循環バルブ(六方バルブ)の製作と設置 ・揚水側無脈動ポンプの製作と小型化 	<ul style="list-style-type: none"> ・孔内圧力計測に5MPa対応高精度圧力計を実装 ・光源装置を高出力タイプに変更 ・スタンドパイプによる水位計測を実施 	<ul style="list-style-type: none"> ・耐圧性能が向上した蛍光濃度センサー(ver3.1)を新規に製作 ・光ファイバーの接続箇所を10箇所から4箇所に変更 ・トレーサー試験装置のロッド径を内径φ32.7mmから内径φ50.5mmのロッドへ変更 ・スタンドパイプ及び絶対圧力計による水位計測を実施 ・ウランとアミノG酸を単独で1000mg/Lとした原液を作成し、トレーサーカクテルは個別に作成した原液を希釈した後に混合した ・トレーサー試験設置時の水理場の乱れの影響を極力抑えるため、トレーサー試験装置(ピストンバッカ)、孔口バッカの間に中間バッカーを設けた3連バッカと構成を変更した 	<ul style="list-style-type: none"> ・水位差測定の実作業性改善のため、差圧計による計測を実施 ・六方バルブのリング強度改善を行った ・小流量による揚水を行うため、ニードルバルブを用いてバルブ制御によってトレーサーの回収を実施 	<ul style="list-style-type: none"> ・2連装のニードルバルブ・フラクションコレクター直近のニードルバルブの計3連装として10mL/min未満の揚水流量で試験を行った 	
結果・課題	現場試験不実施	<ul style="list-style-type: none"> ・5MPa対抗高精度圧力計は問題なく動作し、NagraのGTSで使用した圧力センサーよりも高精度に圧力を計測できていることを確認した ・12MI30号孔の孔内に設置された蛍光濃度センサー(ver.3)の通信不良が発生した。設置時の不具合が原因と考えられる ・六方バルブ使用により、注入時のトレーサーをほぼ矩形波として送ることができたことを確認した ・蛍光強度が上がったことを確認したが、低濃度付近における感度の改善は見られず、接続箇所が多かったことが要因として考えられた ・試験対象孔にトレーサー試験装置を設置した場合における水理場の乱れの影響が大きく、トレーサー回収率が低かった ・ウランとアミノG酸をともに10000mg/Lとし混合したものをトレーサー原液とし、現地の地下水を溶媒として希釈し、所定の濃度(3mg/L)となるように使用した。その結果、時間の経過とともに容器底に沈殿し原液濃度が低下することを確認した 	<ul style="list-style-type: none"> ・蛍光濃度センサーによるウラン濃度計測において、低濃度域における感度が改善したことを確認 ・ロッド径を変更したことによって作業性が向上し、光ファイバーを破損することとなる装置を設置することができた ・トレーサーカクテルにおける沈殿や濁りは生じていないことを確認した ・中間バッカの追加によって水理場の安定性が改善され、トレーサー回収率が飛躍的に改善した ・12MI31号孔に設置した六方バルブが故障し、13MI37号孔に設置した六方バルブが動作不良を起こした。故障の原因として割れ目内介在物である細粒分がバルブ内に溜まったことによるリングが破断したと考えられた 	<ul style="list-style-type: none"> ・水位計測のための労力が減り、作業性が改善された ・六方バルブは正常に動作した ・ニードルバルブによるバルブ制御によって安定して揚水できることを確認した ・間隙水圧が3MPa以上と高いため、孔外と孔内で差圧が1MPa以上発生したことにより試験装置のピストンバッカから漏洩が生じた ・15MI53号孔の孔内に設置された蛍光濃度センサーで顕著な蛍光強度の減衰が確認された 	<ul style="list-style-type: none"> ・蛍光濃度センサーの蛍光強度が極端に減衰する症状が確認された ・ピストンバッカの漏洩は確認されなかった ・15MI52号孔において実施した単孔トレーサー試験の回収率は大幅に低減し、15MI53号孔に設置した水圧モニタリング装置の影響の可能性が考えられた 	

4.2.2 トレーサー試験装置の特徴

本装置の主な特徴を以下に整理する。

(1) パッカー一体型装置

本装置は、注入区間及び揚水区間内のデッドボリューム削減を目的とし、パッカー一体型のトレーサー試験装置となっている。試験区間を形成するメッシュ部及びパッカー（ピストンパッカー）の写真を図 4.2.2-1、図 4.2.2-2 に示す。

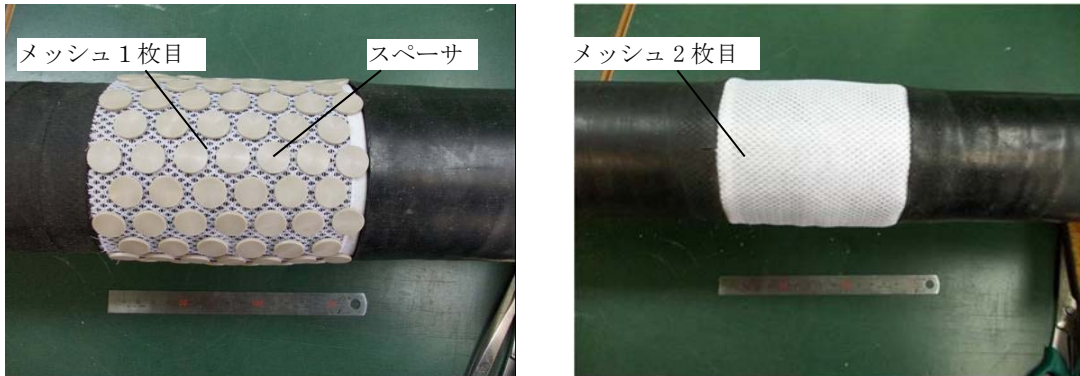


図 4.2.2-1 試験区間形成メッシュ部外観写真

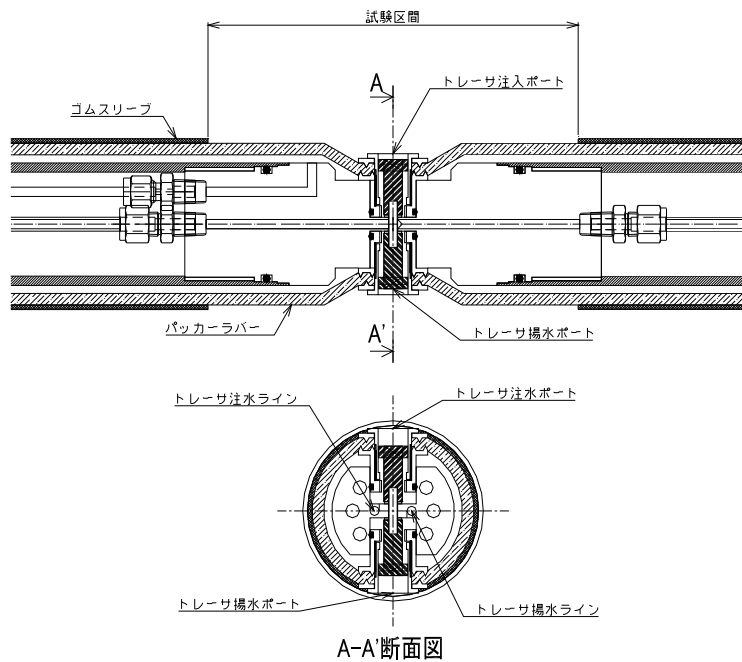


図 4.2.2-2 ピストンパッカー 上：形状写真 下：構造図

トレーサー試験装置は、ピストンパッカーにトレーサーを注入、揚水するためのポートが設けられており、トレーサーが均一に注入、揚水されるようにスパーサー、メッシュが外部に巻かれている。平成21年度にNagraのGTSで実施したD101はダブルパッカー方式のトレーサー試験装置を用いており、この時の試験区間内のデッドボリュームは1227mL（区間長16cm）であった。一方、今フェーズで使用したパッカー一体型の装置における試験区間内のデッドボリュームは82mLであり、約1/15に低減した。このことにより、注入時及び揚水時のデッドボリュームの影響を少なくした状態で試験を実施することが可能になった。

一方、2016年度に深度500m研究アクセス南坑道125m計測横坑で実施した試験時において、ピストンパッカー内部に地下水が漏洩する事象が生じた。これは、バックグラウンドの間隙水圧が高いことにより、孔外と孔内で大きな差圧が生じたことが原因と考えられた。2014、2015年度に深度300mボーリング横坑で実施した試験ではピストンパッカーは正常に動作していたことから高い間隙水圧が影響した可能性が高い。対策としては、ピストン部の調整を慎重に行うこと、パッカーの拡張圧は間隙水圧+1MPaを目安とすること、揚水等の減圧行為は慎重に行うことが考えられ、このことを遵守した結果、2017年度に実施した試験ではピストンパッカー内部の漏洩が無いことを確認した。

(2) 六方バルブ

従来のトレーサー試験では、地上のトレーサー置換タンクから数十mのチューブを介して試験区間内にトレーサーを送液していたため、注入時におけるチューブ内の分散の影響が大きくなって、割れ目内の物質移行特性を正確に評価することが困難であった。この対策として、六方バルブ（トレーサー循環バルブ）を作製し、トレーサー試験装置に組み込んだ。

六方バルブの設計図及び外観写真を図4.2.2-3に示す。また、六方バルブ実装の有無におけるトレーサー投入時の濃度を比較することを目的として実施された室内試験の結果を図4.2.2-4に示す。いずれもトレーサーとしてはウラニウムを使用し、蛍光濃度センサーによる濃度計測の結果である。六方バルブを使用していない平成24年度の試験では、チューブ内の分散の影響を大きく受ける結果となった。一方、六方バルブが実装された平成25年度の試験結果では、チューブ内分散の影響はほぼ受けておらず、理想的な矩形波に近い状態でトレーサーを注入できている。

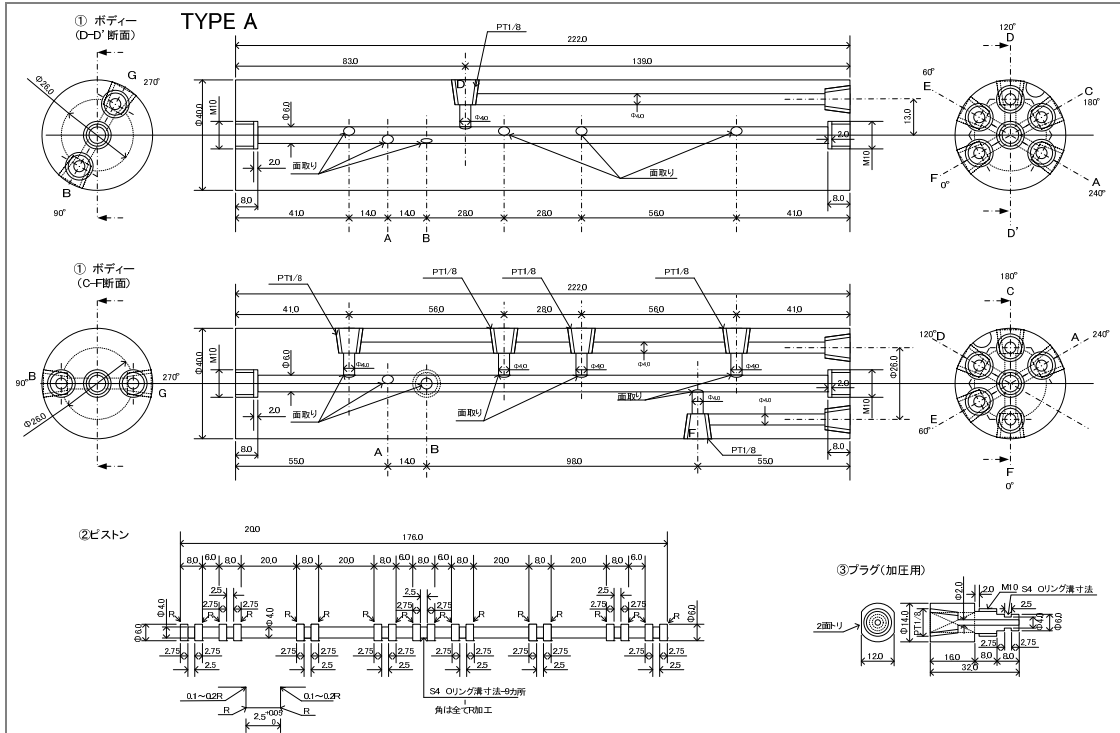


図 4.2.2-3 六方バルブの設計図及び外観写真

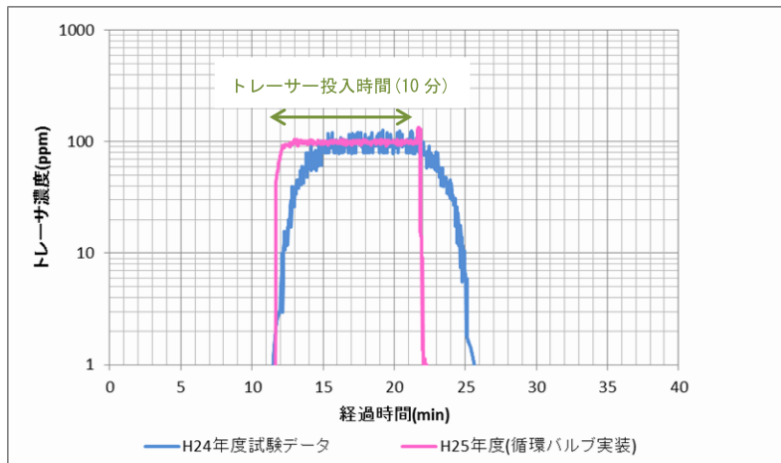


図 4.2.2-4 六方バルブ実装の有無におけるトレーサー投入時の濃度比較

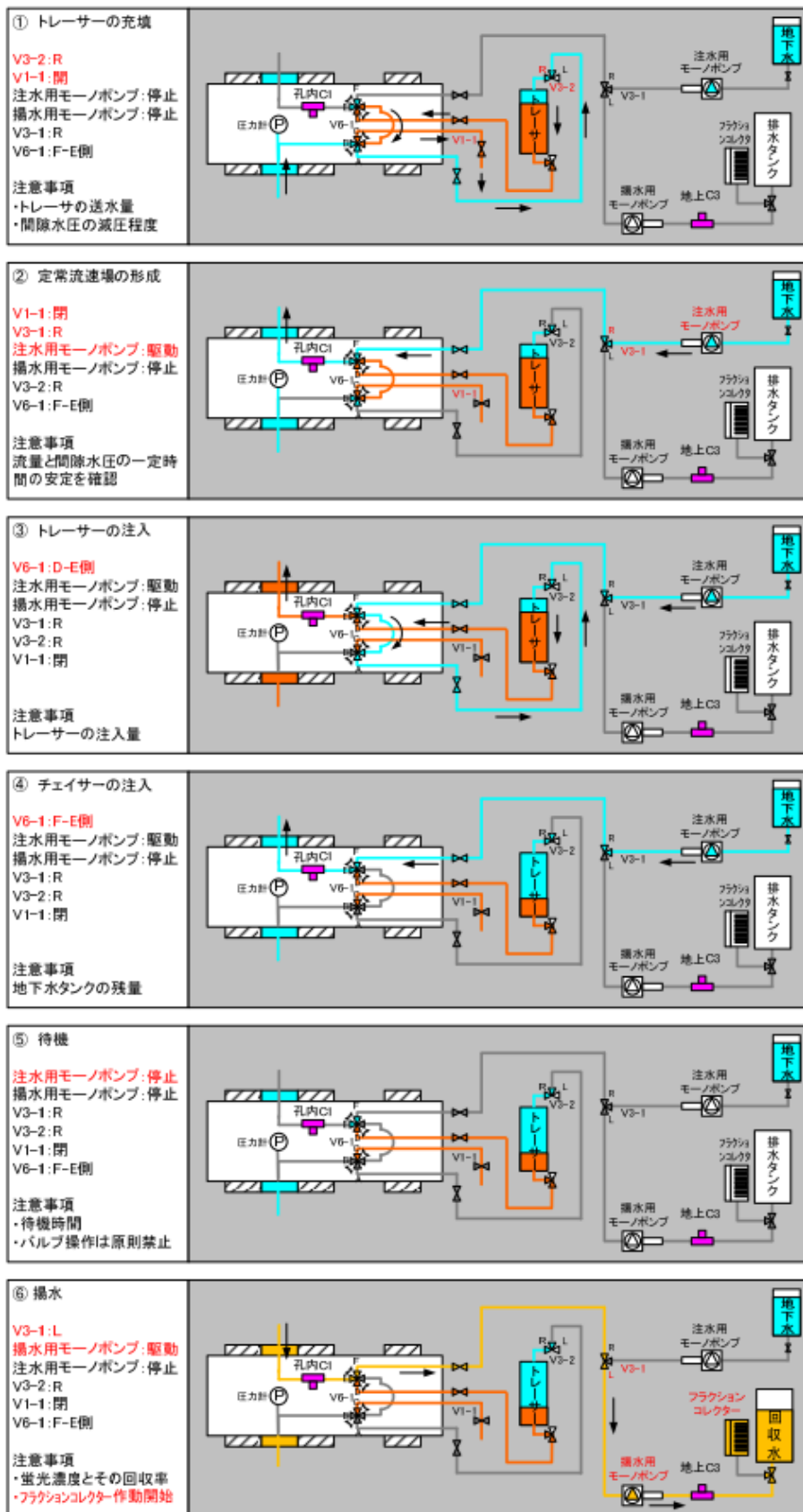


図 4. 2. 2-5 単孔トレーサー試験時の流路と試験手順 (2016 年度実施試験)

また、六方バルブを実装することにより、注入時のデッドボリュームが大きく減少されたことも大きな効果と言える。単孔トレーサー試験の試験時の流路を図 4.2.2-5 に示す。単孔トレーサー試験では、トレーサーを注入した後にチェイサーとしてバックグラウンドの地下水を注入し、デッドボリューム内に残留するトレーサーをフラッシングする必要がある。仮にフラッシングが充分でないと、揚水時に残留したトレーサーが影響し、本来の破過曲線を評価できない可能性がある。フラッシングを充分に行うためにはチェイサーの量を増やす必要があるが、そうするとトレーサーの回収率が下がりピーク時の濃度も大きく下がる可能性がある。このことから、単孔トレーサー試験では、注入時のデッドボリュームを可能な限り削減することが望ましい。六方バルブを実装することにより、トレーサーとチェイサーが混合するのは、六方バルブより下流のチューブ内（1.1m、約 14mL）と試験区間のデッドボリューム約 82mL の計 96mL 程度だけとなり、フラッシングに必要なチェイサーの量が大幅に減った。このことにより、単孔トレーサー試験においても、ピーク濃度が低くなり過ぎない試験結果を得ることが可能になった。

2015 年度に深度 300m ボーリング横坑で実施した試験では六方バルブが故障し、割れ目内介在物が 0 リングを損傷したことが原因と考えられた。この対策として 2016 年度は六方バルブに使用する 0 リングのサイズを太いものに変え、これ以降六方バルブに不具合は生じていないことを確認できた。

(3) 蛍光濃度センサー

蛍光濃度センサーは、使用されるトレーサーのうちウラニンを計測対象とし、チューブ内の分散の影響を受けない状態の破過曲線を取得するため、トレーサー試験装置に組み込んで使用した。GTS サイトで実施した原位置試験において低濃度域で計測値が不安定になった結果を踏まえ、2014 年度には線源を高出力光源（ファイバーラボ社製 LED-VR0470-20）のものに変え、低濃度でも安定した計測ができることを図った。さらに、2015 年度においては、光ファイバーケーブルの接続箇所を 10 箇所から 4 箇所に少なくすることによって、通信系のロスを少なくしてウラニン濃度 0.01mg/L の低濃度の判別が可能となった。また、蛍光濃度センサーについては、耐圧性能やメンテナンスの利便性の向上を目的とし、順次改良を行った。その結果、2016、2017 年度において深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑で実施した試験においても、孔内でウラニン濃度の経時変化を計測することができた。一方で、最終年度である 2017 年度に実施した試験においても、蛍光濃度センサーを孔内に設置した後に蛍光強度が極端に低下する現象がみられ、耐圧性能の問題の他、内部鏡面の汚れの付着・蓄積が原因として考えられた。安定した計測を行うためにも、更なる改良が必要と考えられる。

4.3 高割れ目密度の岩盤を対象としたトレーサー試験

4.3.1 試験対象割れ目

平成 26 年度、27 年度は、JAEA 瑞浪超深地層研究所の上部割れ目帯に属する深度 300m ボーリング横坑において試験を実施した。

図 4.3.1-1 に示すように、同ボーリング横坑から 12MI30 号孔、12MI31 号孔、13MI36 号孔、13MI37 号孔および 14MI49 号孔の 5 本のボーリング孔を掘削し、周辺岩盤の地質環境調査を実施した。その詳細については 2 章に示したが、ボーリング横坑周辺岩盤の特徴として、割れ目頻度は 1 m あたり約 7.4 本で、NW 走向の高傾斜の割れ目が卓越していた。透水量係数は $10^{-9} \sim 10^{-5}$ m²/sec の範囲であり、毎分 180 リットル程度の湧水を伴う割れ目も確認された。割れ目の連続性については、ボーリング孔掘削中に近接するボーリング孔の複数の区間において水圧の応答が確認され、割れ目がネットワーク状に分布しているものと推定された。

試験対象となる割れ目は、同深度の岩盤の水みち割れ目に特徴的な NW 走向の高傾斜の割れ目である。平成 26 年度は、12MI30 号孔と 24.67 mabh で交差する割れ目と、12MI31 号孔の 24.15 mabh で交差する割れ目を対象として実施した。割れ目交差位置の 2 孔間の距離は 3.23 m であった。走向傾斜は、前者が N9° W73° E、後者が N10° W83° W と類似していた。対象割れ目の透水量係数は、12MI30 号孔では 2.9×10^{-5} m²/sec、12MI31 号孔では 8.9×10^{-7} m²/sec と透水性が高い。12MI30 号孔の割れ目に接する母岩部においては変質がみられないが、12MI31 号孔ではセリサイト化の変質がややみられた。また、12MI30 号孔、12MI31 号孔いずれの割れ目にもカルサイトの充填がやや認められた。

一方、平成 27 年度は、12MI31 号孔と 21.90 mabh で交差する割れ目と、13MI37 号孔の 23.14 mabh で交差する割れ目を対象として実施した。割れ目交差位置の 2 孔間の距離は 2.95 m であった。走向傾斜は、前者が N29° W88° E、後者が N26° W80° E とほぼ一致し、幾何学的にもほぼ同一平面上に並んでいることから、同一の割れ目である可能性が高い。12MI31 号孔の割れ目に接する母岩部においては絹雲母化、緑泥石化、13MI37 号孔の割れ目でも緑泥石化の変質がみられた。また、12MI31 号孔の割れ目には緑泥石、粘土、黄鉄鉱、13MI37 号孔の割れ目には緑泥石の充填が認められた。対象割れ目の透水量係数は、12MI31 号孔では 6.9×10^{-8} m²/sec、13MI37 号孔では 1.1×10^{-6} m²/sec と大きな差がみられた。図 4.3.1-2 に 13MI37 号孔を掘削した際の 12MI31 号孔の間隙水圧のモニタリング結果を示す。試験対象割れ目は 12MI31 号孔とは計測区間 12MI31Int3 で交差しており、13MI37 号孔の 23.14 mabh 付近を掘削した際に間隙水圧の大きな低下がみられ、水理的な連続性が確認された。後述するように、この割れ目では自然状態において比較的大きな地下水流れ、いわゆるバックグラウンド流れが存在すると推定された。

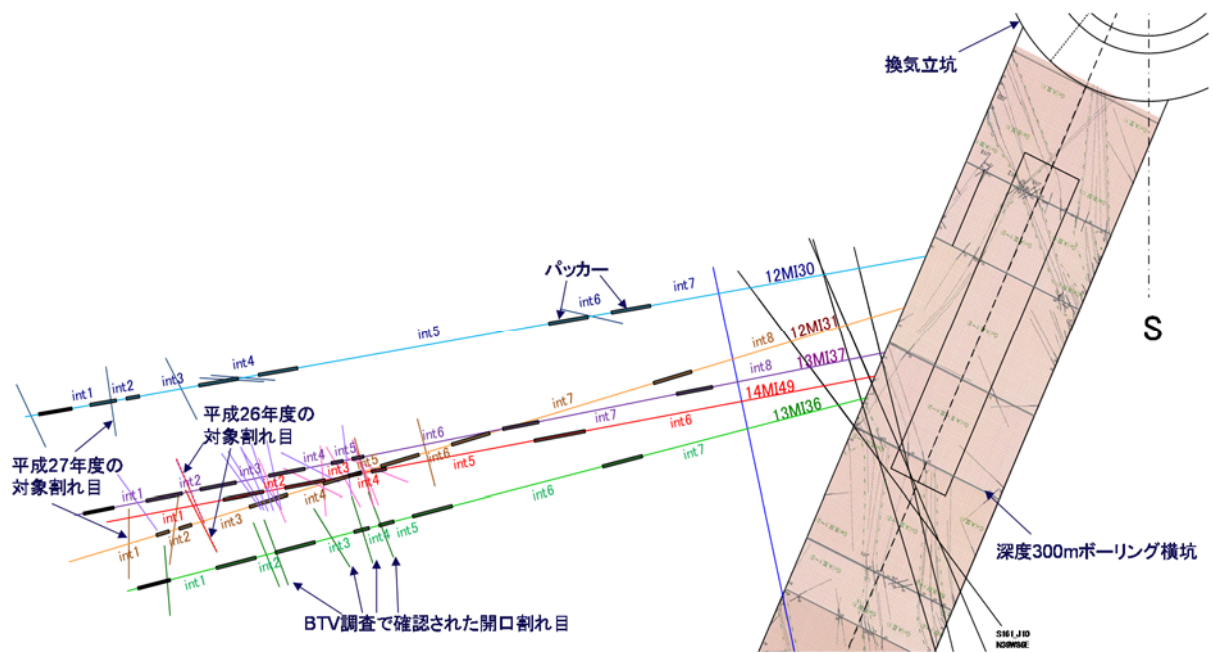


図 4.3.1-1 深度 300m ボーリング横坑のボーリング孔配置とトレーサー試験の対象割れ目

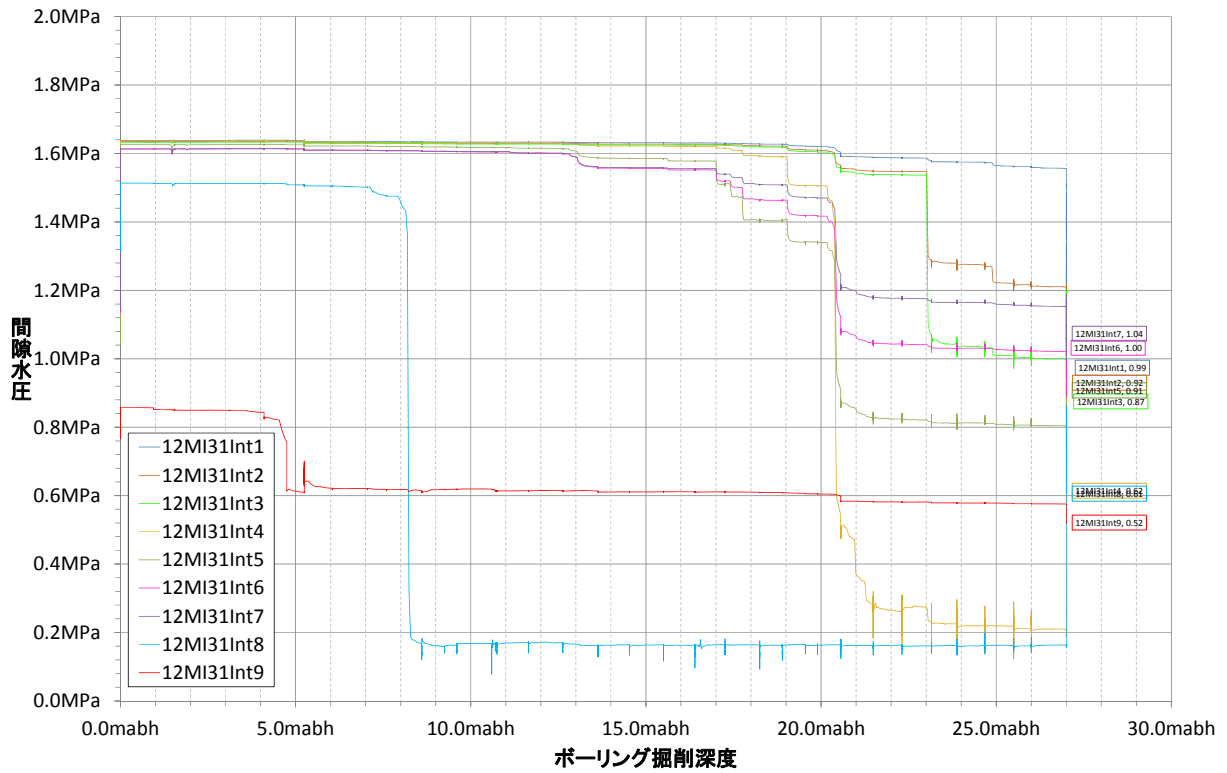


図 4.3.1-2 13MI37 号孔掘削時の 12MI31 号孔の間隙水圧の応答

4.3.2 単孔トレーサー試験

平成 26 年度は、12MI30 号孔の 24.67mabh の割れ目と、12MI31 号孔の 24.15mabh の割れ目を対象として試験を実施した。12MI30 号孔で行った試験条件を表 4.3.2-1 に、12MI31 号孔で行った試験条件を表 4.3.2-2 に示す。

表 4.3.2-1 平成 26 年度の単孔トレーサー試験の試験条件（12MI30 号孔）

試験条件名		SOM1	SOM2	SOM3	SOT8	SOT9	SOT10	
対象区間		12MI30D1			12MI30D1			
試験条件	注水流量	mL/min	(500)	(500)	(500)	81	457	
	揚水流量	mL/min	501	505	(500)	504	100	475
	トレーサー注入	min	10	10	10	10	10	10
	チェーサー注入	min	10	10	10	10	10	10
	待機	min	30	20	0	0	0	120
回収率	ウラン	-	21.2%	25.5%	39.3%	16.5%	5.9%	2.8%
	アミノG酸	-	-	27.5%	41.9%	-	6.2%	3.1%
	δD	-	-	29.7%	42.4%	-	3.3%	2.2%
	I ⁻	-	-	19.1%	19.2%	-	17.0%	7.3%
	Rb ⁺	-	-	47.5%	59.5%	-	46.5%	21.1%
	Ba ²⁺	-	-	49.9%	41.5%	-	58.3%	29.5%

※回収率のうち、青字は揚水開始から 60 分後の回収率を、赤字は揚水開始から 120 分後の回収率を表す。

表 4.3.2-2 平成 26 年度の単孔トレーサー試験の試験条件（12MI31 号孔）

試験条件名		S1T4	S1T5	S1T6	S1T7	
対象区間		12MI31D1				
試験条件	注水流量	mL/min	97	96	98	98
	揚水流量	mL/min	113	116	117	118
	トレーサー注入	min	20	10	5	5
	チェーサー注入	min	20	5	5	5
	待機	min	0	0	0	30
回収率	ウラン	-	6.1%	21.7%	26.3%	8.6%
	アミノG酸	-	6.5%	22.5%	27.5%	9.1%
	δD	-	6.6%	20.7%	26.9%	3.6%
	I ⁻	-	11.5%	28.9%	38.0%	25.1%
	Rb ⁺	-	26.3%	72.3%	60.9%	44.8%
	Ba ²⁺	-	24.2%	68.6%	45.4%	37.0%

※回収率のうち、青字は揚水開始から 60 分後の回収率を、赤字は揚水開始から 120 分後の回収率を表す。

平成 26 年度に実施した試験では、非吸着性トレーサーとしてウラニン(3mg/L)、アミノ G 酸(3mg/L)、 I^- (3mg/L)、 δD (550‰)、吸着性トレーサーとして Rb^+ (2mg/L)、 Ba^{2+} (1.2mg/L) を使用した。表 4.3.2-1、表 4.3.2-2 に示した試験条件のうち、SOM3、S1T4、S1T5 の破過曲線を図 4.3.2-1～図 4.3.2-3 に示す。

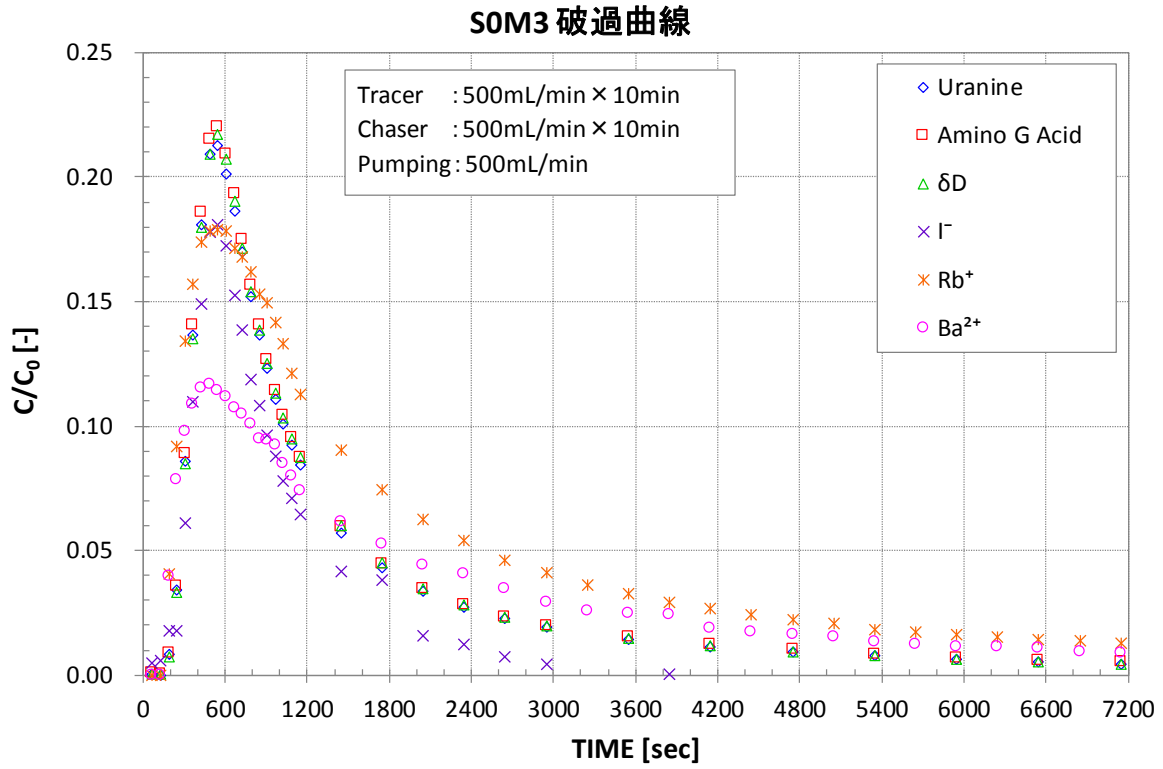


図 4.3.2-1 平成 26 年度単孔トレーサー試験結果 (SOM3)

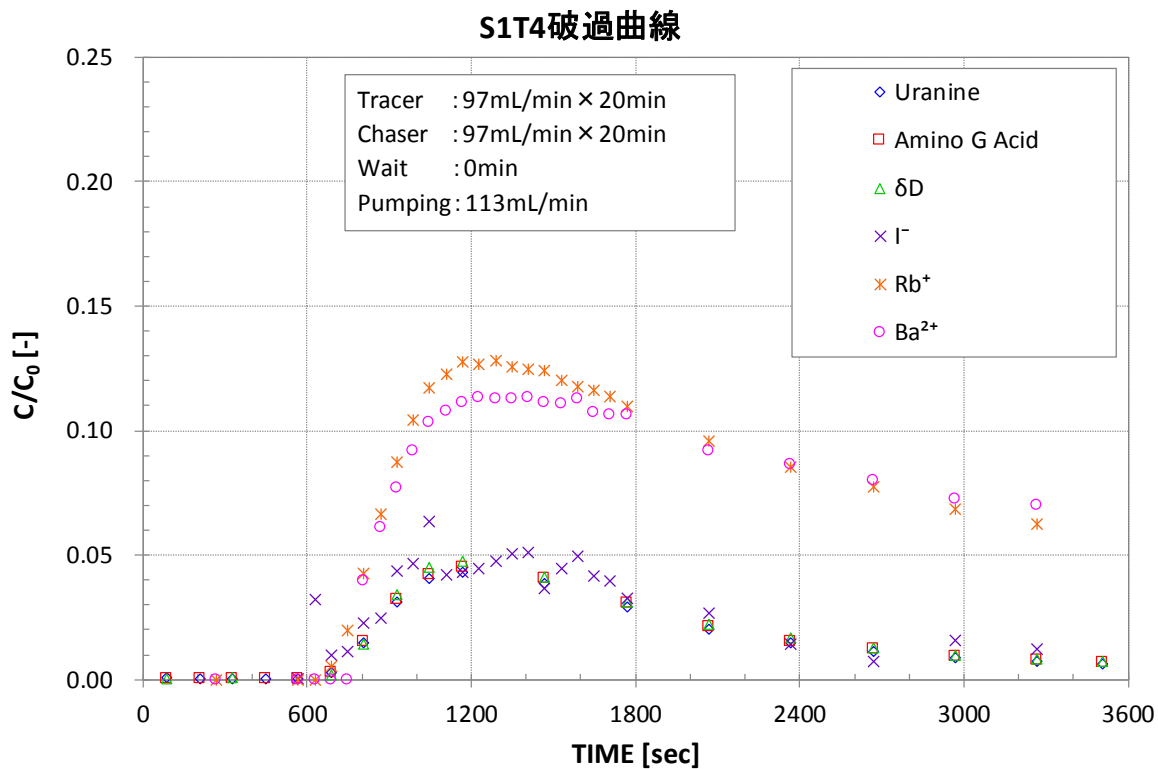


図 4.3.2-2 平成 26 年度単孔トレーサー試験結果 (S1T4)

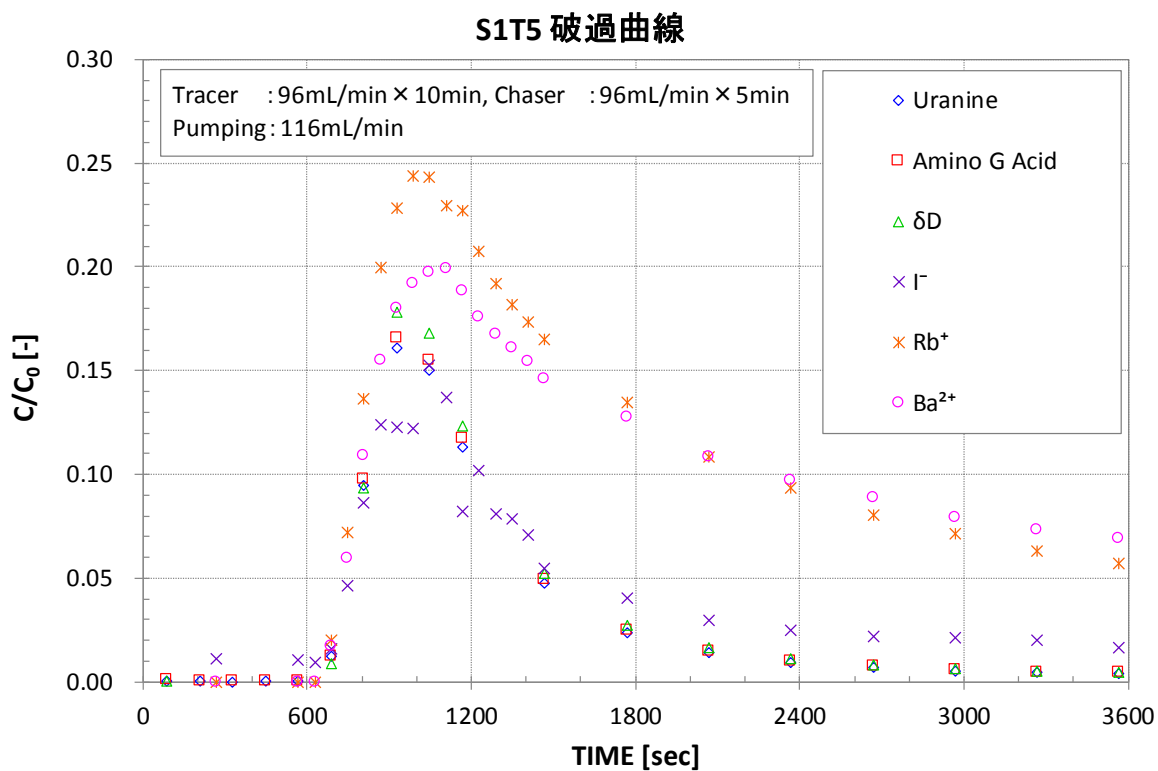


図 4.3.2-3 平成 26 年度単孔トレーサー試験結果 (S1T5)

平成 27 年度は、12MI31 号孔と 21.90mabh の割れ目と、13MI37 号孔の 23.1mabh の割れ目を対象として試験を実施した 12MI31 号孔で行った試験条件を表 4.3.2-3 に、13MI37 号孔で行った試験条件を表 4.3.2-4 に示す。非収着性トレーサーとしてウラン(3mg/L)、アミノ G 酸(3mg/L)、I⁻(3mg/L)、 δ D(550%)、収着性トレーサーとして Rb⁺(2mg/L)、Ba²⁺(1.2mg/L)を使用した。表 4.3.2-3、表 4.3.2-4 に示した試験条件のうち、15S37T5、15S37T6、15S37M9、15S37M10 の試験結果を図 4.3.2-4～図 4.3.2-7 に示す。

表 4.3.2-3 平成 27 年度の単孔トレーサー試験の試験条件 (12MI31 号孔)

試験条件名			15S31M2	15S31M3
試験実施日			10/30	11/2
対象区間			12MI31 21.89mabh	
試験条件	注水流量	mL/min	27.6	22.9
	揚水流量	mL/min	49.0	49.3
	トレーサー注入時間	min	40.0	40.0
	チェーサー注入時間	min	50.0	55.0
	待機時間	min	0.0	120.0
	トレーサー量	L	1.11	0.92
	チェーサー量	L	1.38	1.26
60分回収率	ウラン	-	31.3%	16.5%
	アミノG酸	-	32.3%	18.9%
	重水素	-	31.4%	17.1%
	ヨウ素	-	29.6%	18.7%
	ルビジウム	-	17.2%	15.7%
	バリウム	-	14.0%	17.0%
120分回収率	ウラン	-	48.2%	23.8%
	アミノG酸	-	50.3%	27.2%
	重水素	-	48.6%	24.0%
	ヨウ素	-	47.5%	27.2%
	ルビジウム	-	33.1%	28.4%
	バリウム	-	30.0%	31.9%

表 4.3.2-4 平成 27 年度の単孔トレーサー試験の試験条件 (13MI37 号孔)

試験条件名			15S37T5	15S37T6	15S37T7	15S37T8	15S37M9	15S37M10	15S37M11	15S37M12	15S37M13
試験実施日			11/17	11/18	11/18-11/19	11/20	12/7	12/8	12/9	12/10	12/11
対象区間			13MI37 23.12mabh ※31号孔はトレーサー試験装置				13MI37 23.12mabh ※31号孔はモニタリング装置				
試験条件	注水流量	mL/min	97.7	208.2	208.0	203.2	97.8	209.3	199.1	195.6	201.5
	揚水流量	mL/min	199.4	198.9	202.7	201.4	198.4	198.1	198.7	200.1	198.5
	トレーサー注入時間	min	10.0	5.0	5.0	5.0	20.0	10.0	10.0	10.0	10.0
	チェーサー注入時間	min	15.0	7.5	7.5	7.5	15.0	7.5	7.5	7.5	7.5
	待機時間	min	0.0	0.0	972.5	119.5	0.0	0.0	60.0	240.0	120.0
	トレーサー量	L	0.98	1.04	1.04	1.02	1.96	2.09	1.99	1.96	2.01
	チェーサー量	L	1.47	1.56	1.56	1.52	1.47	1.57	1.49	1.47	1.51
60分回収率	ウラニン	-	74.7%	82.2%	1.4%	47.9%	77.6%	79.6%	57.4%	30.0%	41.5%
	アミノG酸	-	79.8%	88.4%	1.3%	51.6%	69.9%	82.0%	59.9%	31.2%	42.6%
	重水素	-	83.7%	85.7%	0.9%	42.1%	83.3%	82.0%	53.4%	29.6%	42.1%
	ヨウ素	-	75.6%	98.8%	10.9%	82.6%	75.6%	79.2%	60.1%	41.6%	51.2%
	ルビジウム	-	70.0%	64.5%	14.4%	56.6%	70.9%	67.6%	48.7%	33.0%	40.4%
	バリウム	-	61.5%	57.4%	17.7%	57.6%	65.5%	59.7%	45.2%	32.6%	38.4%
120分回収率	ウラニン	-	79.8%	86.6%	2.2%	47.9%	83.5%	85.3%	63.7%	32.5%	45.4%
	アミノG酸	-	87.9%	95.3%	1.6%	51.6%	76.3%	88.1%	66.8%	34.1%	47.0%
	重水素	-	86.3%	91.1%	3.1%	42.1%	89.6%	86.7%	57.8%	30.1%	44.4%
	ヨウ素	-	101.7%	118.3%	21.4%	82.6%	86.6%	90.3%	73.7%	53.1%	62.7%
	ルビジウム	-	79.6%	73.8%	21.3%	56.6%	84.1%	79.4%	62.3%	44.7%	53.1%
	バリウム	-	74.5%	69.1%	27.1%	57.6%	82.0%	74.0%	61.2%	46.8%	53.3%

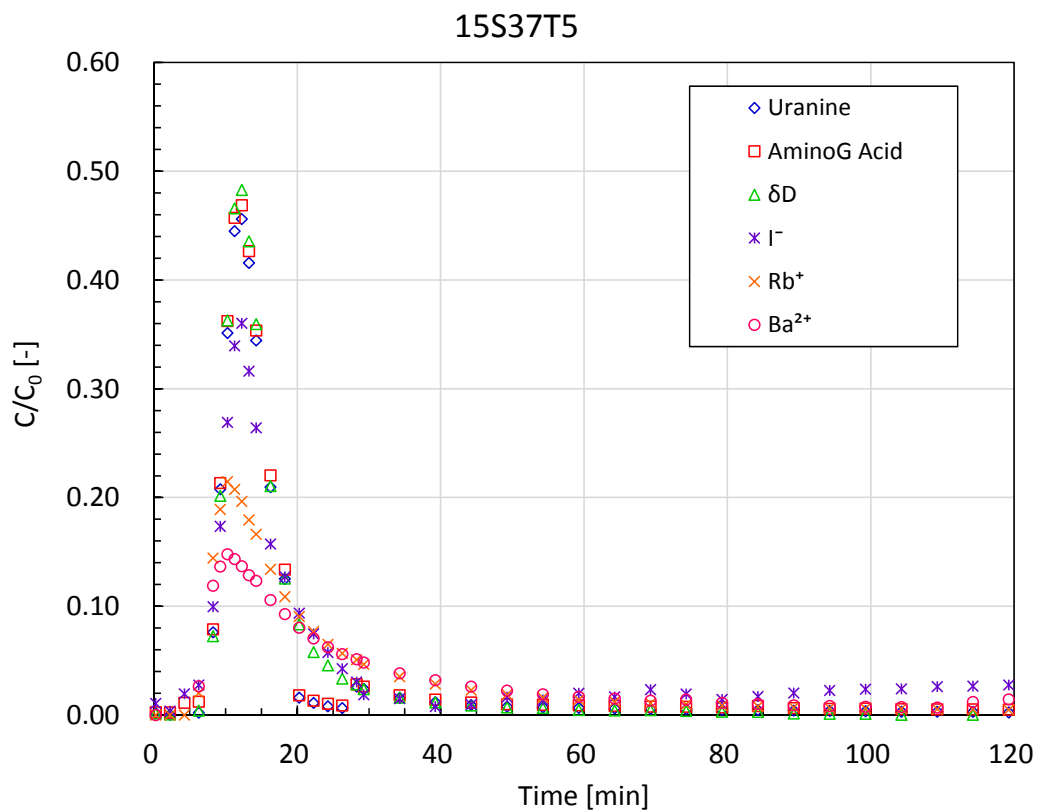


図 4.3.2-4 平成 27 年度単孔トレーサー試験結果 (15S37T5)

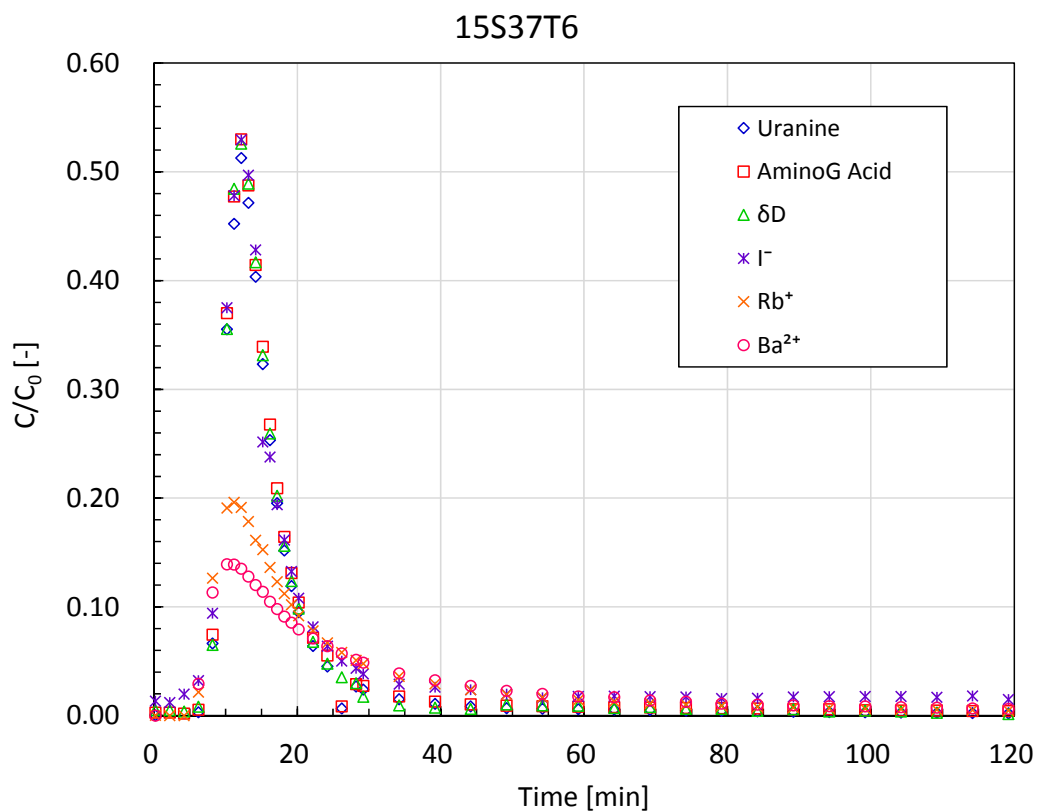


図 4.3.2-5 平成 27 年度単孔トレーサー試験結果 (15S37T6)

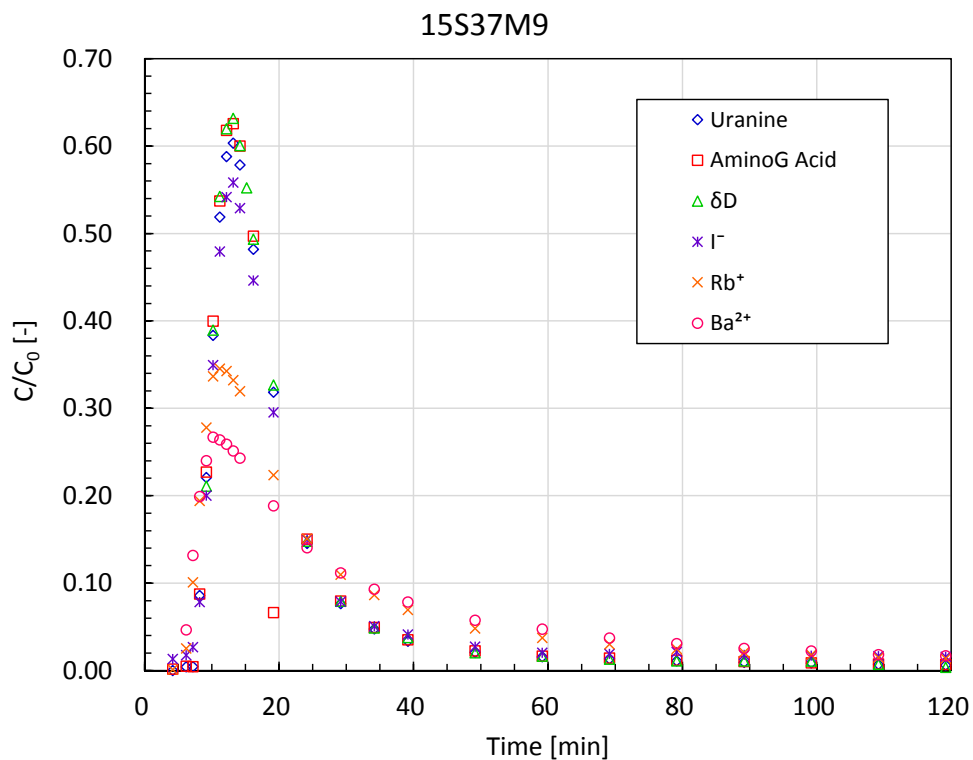


図 4.3.2-6 平成 27 年度単孔トレーサー試験結果 (15S37M9)

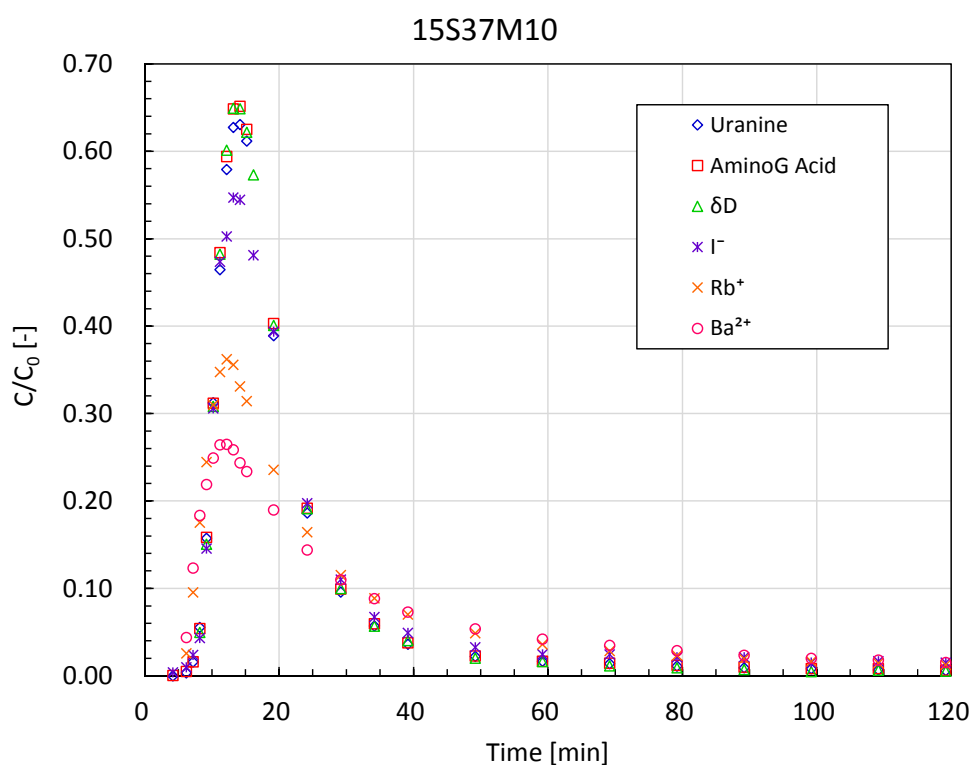


図 4.3.2-7 平成 27 年度単孔トレーサー試験結果 (15S37M10)

平成 26 年度に実施した試験では、非吸着性トレーサーの回収率が最大でも 40%程度となり、総じて回収率が低かった。また、非吸着性トレーサーのピーク濃度も低く、試験条件によっては、吸着性トレーサーの破過曲線の方が、ピーク濃度が高くなる結果が得られた。この要因としては、トレーサー試験対象区間から坑道孔口パッカーまでにパッカーを設置していなかったことにより、水理場の乱れの影響が大きかったことが考えられた。このため、平成 27 年度に実施した試験においては、試験区間～坑道孔口パッカーまでにパッカー（中間パッカー）を設置したところ、非吸着性トレーサーの回収率が最大で 80%を超え、大幅に回収率が改善した。また、全ての試験において、非吸着性トレーサーよりも吸着性トレーサーの方がピーク濃度は低くなり、 Rb^+ よりも Ba^{2+} の方が低い破過曲線が得られるなど、適切に試験を行うことができたことを確認した。このことにより、トレーサー試験を実施する際は、パッカーを複数設けて水理場を極力乱さない状態で試験を行うことが重要であることを確認した。

平成 27 年度に実施した試験では、トレーサー循環バルブの不具合が生じた。これは、バックグラウンド地下水中の細粒分の影響と考えられた。従って、平成 27 年度実施試験においては、チェイサー注入時間を多くするとともに、試験装置内に設置された蛍光濃度センサーの計測結果をよく確認し、十分に濃度が下がりきった状態を確認した上で揚水を行った。評価解析は、割れ目のみをモデル化した割れ目モデルを用い、割れ目の集中定数、バックグラウンド地下水流れの動水勾配、割れ目の遅延係数の評価を行った。

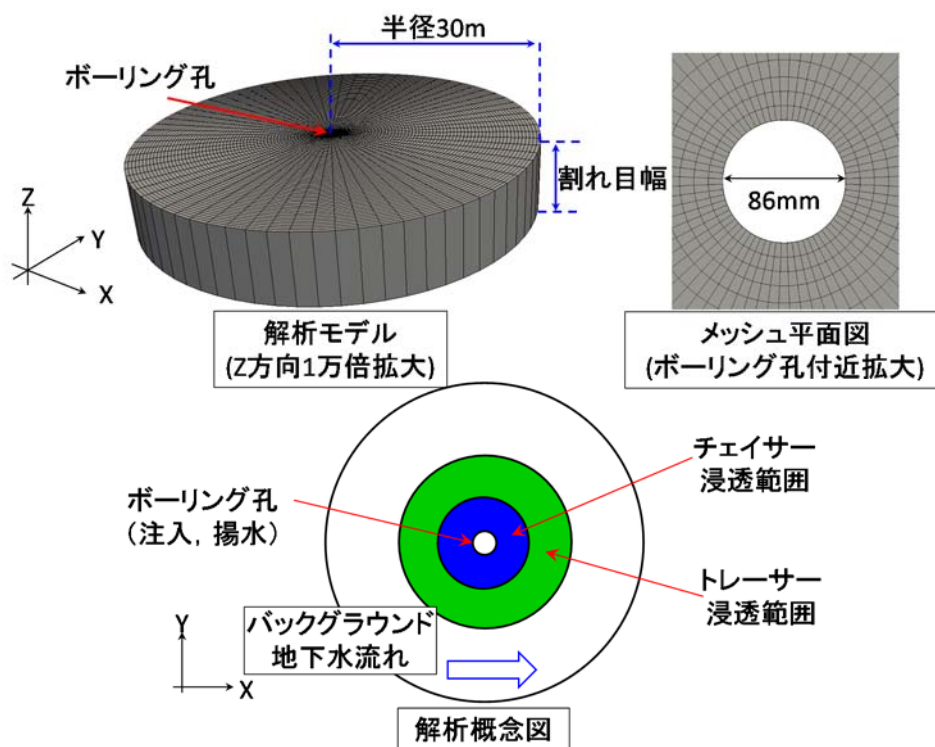


図 4.3.2-8 割れ目モデルにおける解析モデル

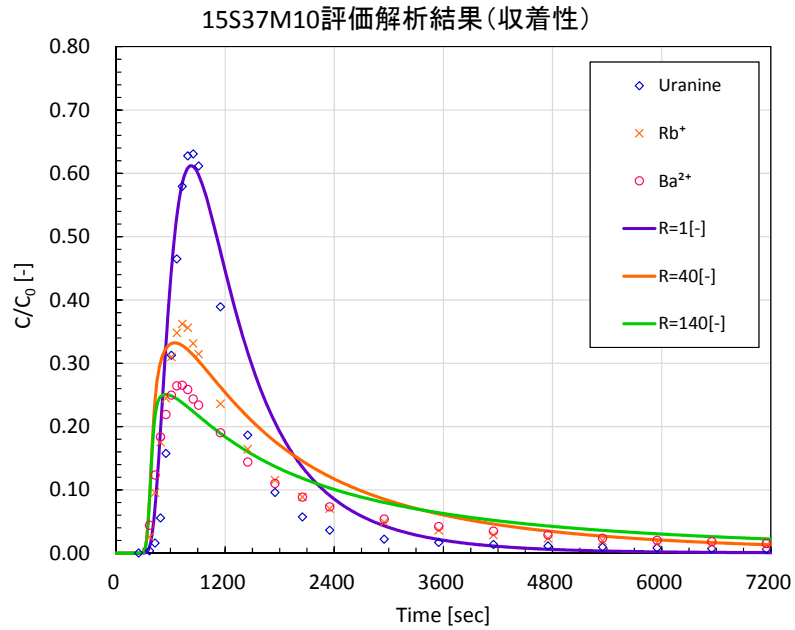


図 4.3.2-9 15S37M10 の評価解析結果

図 4.3.2-9 に 13MI37 号孔の 23.12mabh に存在する割れ目を対象とした 15S37M10（注入流量 209mL/min、揚水流量 198mL/min、トレーサー注入時間 10 分、チェイサー注入時間 7.5min）の評価解析結果を示す。評価解析の結果、割れ目の集中定数は 1.0×10^{-3} 、バックグラウンド地下水流量は 10.7mL/min/m、割れ目の遅延係数 (Rb^+) は 40 程度、割れ目の遅延係数 (Ba^{2+}) は 120 程度と評価された。得られた集中定数において、割れ目幅を水理学的開口幅 0.27mm（透水量係数 $1.58 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{sec}$ ）、或いは高精度 BTV 観察によって得られた割れ目幅 0.7mm を仮定すると、集中定数の定義式より評価される縦分散長は、5~14mm となる（間隙率は 1.0 と仮定）。

非収着性トレーサーの破過曲線においては、濃度の立ち上がりからピーク到達までは概ね良好に再現できたが、テール部の再現性は悪かった。また、収着性トレーサーの破過曲線においては、ピーク濃度については概ね再現できたが、割れ目の遅延係数を大きくするに従って、ピーク位置が早くなり、試験結果を完全には再現することができなかった。

4.3.3 孔間トレーサー試験

孔間トレーサー試験では、1方のボーリング孔からトレーサーを注入し、もう1方のボーリング孔で揚水を行うことによりトレーサーを回収するダイポール試験を実施した。

平成26年度には、12MI30号孔と24.67 mabhで交差する割れ目と、12MI31号孔の24.15 mabhで交差する割れ目を対象とした。12MI31号孔を注入孔、12MI30号孔を揚水孔とした試験を7回、12MI30号孔を注入孔、12MI31号孔を揚水孔とした試験を3回、計10回の試験を実施した。試験条件と非吸着性トレーサーであるウラニンの回収率を、表4.3.3-1に示す。12MI30号孔を揚水孔とした場合には、揚水流量は200～1000 mL/min、ダイポール比（揚水流量と注入流量の比）は3:1～15:1とした。一方、12MI31号孔を揚水孔とした場合には、揚水流量は約100 mL/min、ダイポール比は5:1あるいは2:1とした。ウラニンの回収率は、12MI30号孔を揚水孔とした場合には、揚水流量約1000 mL/minのケースが最大で72%、揚水流量約300 mL/minのケースが最小で29%であった。12MI31号孔を揚水孔とした場合には、いずれのケースでも14%程度と低い回収率であった。揚水流量が大きいほど、回収水中のトレーサー濃度がピークに達する時刻が早く、回収率も高い傾向にあった。また、ダイポール比が小さいほど、回収水中のトレーサー濃度が高くピークに達する時刻も早かった。

平成27年度には、12MI31号孔と21.90 mabhで交差する割れ目と、13MI37号孔の23.14 mabhで交差する割れ目を対象とした。12MI31号孔を注入孔、13MI37号孔を揚水孔とした試験を6回、13MI37号孔を注入孔、12MI31号孔を揚水孔とした試験を2回、計8回の試験を実施した。試験条件と非吸着性トレーサーであるウラニンの回収率を、表4.3.3-2に示す。13MI37号孔を揚水孔とした場合には、揚水流量は200～400 mL/min、ダイポール比は10:1あるいは20:1とした。12MI31号孔を揚水孔とした場合には、揚水流量はいずれも100 mL/min、ダイポール比は5:1とし、トレーサーの注入時間を変えた。ウラニンの回収率は、13MI37号孔を揚水孔とした場合には、揚水流量約400 mL/minのケースが最大で59%、揚水流量約300 mL/minのケースが55%で、揚水流量約200 mL/minの4ケースでは3ケースが39%程度、1ケースが56%とばらついた。12MI31号孔を揚水孔とした場合には、いずれのケースでも回収率は65%であった。12MI31号孔を揚水孔とした場合の方が、少ない揚水量でも高い回収率となったのは、試験対象割れ目の透水性が12MI31号孔付近で小さいために、揚水による水位低下量が大きいためと思われる。このように深度300mボーリング横坑で実施した孔間トレーサー試験では、高い回収率が得られなかった。その原因は、バックグラウンド流れの存在であると考えられる。

深度300mボーリング横坑で実施した孔間トレーサー試験の試験結果の例として、平成27年度に実施したW17_6試験の破過曲線を図4.3.3-1に示す。同試験では、トレーサーとして非吸着性である重水素とヨウ素、非吸着性の蛍光染料アミノG酸とウラニン、吸着性の陽イオンである Rb^+ と Ba^{2+} を使用した。孔間試験では単孔トレーサー試験に比べ回収濃度が低かった。また、非吸着性トレーサーに比べて吸着性の Rb^+ では濃度ピークが遅れピーク値も低く、より吸着性の強い Ba^{2+} では有意な破過曲線を得

られなかった。

孔間トレーサー試験により得られた破過曲線に対して数値シミュレーションによるフィッティングを行い、物質移行パラメータを同定した。数値解析では割れ目内での移流分散と割れ目に接する岩石基質への拡散と収着を考慮した。計算を効率的に行うために、割れ目中心を対称面と考え、図 4.3.3-2 に示すようにその片側だけを表現した解析モデルを使用した。解析には、単孔トレーサー試験の評価解析と同様に、(一財)電力中央研究所が開発した岩盤中地下水流動・物質移行解析コード FEGM (河西他, 1994 ; 河西他, 1995) を用いた。

W17_6 試験の場合、ウランの破過曲線からは割れ目の開口幅が 0.3 mm、割れ目内の縦分散長が 2.5 m と推定された。一方、Rb⁺の岩石基質に対する分配係数を室内試験結果に基づき $1.1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ に設定し数値解析を行ったところ、Rb⁺の破過曲線から割れ目表面への収着係数が $2.8 \times 10^{-3} \text{ m}$ と推定された。ただし、この表面吸着係数の値は、割れ目表面への収着だけでなく割れ目充填鉱物への収着の効果も含んだものと考えられる。これらの割れ目開口幅、割れ目内縦分散長および岩石基質に対する分配係数の数値を用いて計算した破過曲線を、実測値とともに図 4.3.3-3 に示す。

表 4.3.3-1 平成 26 年度の孔間トレーサー試験の試験条件とウランの回収率

試験名	W1T1	W1T2	W1T3	W1T4	W1T5	W1T6	W0T7	W0T8	W0T9	W1T10
試験開始日	9/24	9/24	9/25	9/25	9/26	9/27	9/29	9/30	9/30	10/1
注入孔	12MI31 D1	12MI31 D1	12MI31 D1	12MI31 D1	12MI31 D1	12MI31 D1	12MI30 D1	12MI30 D1	12MI30 D1	12MI31 D1
揚水孔	12MI30 D1	12MI30 D1	12MI30 D1	12MI30 D1	12MI30 D1	12MI30 D1	12MI31 D1	12MI31 D1	12MI31 D1	12MI30 D1
注入流量 (mL/min)	122	100	100	50	50	20	50	20	20	20
揚水流量 (mL/min)	1002	508	300	300	200	200	100	200	120	300
注入時間 (min)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
ウラン	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
アミノG酸	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
重水素	-	-	○	○	○	-	-	-	○	-
Ba ²⁺	-	-	-	-	○	-	-	-	○	-
Rb ⁺	-	-	-	-	○	-	-	-	○	-
I ⁻	-	-	-	-	○	-	-	-	○	-
回収率 (%)	72.3	63.2	61.7	60.3	46.5	33.6	15.1	26.6	15.5	30.6

※○は使用したトレーサーを表す

表 4.3.3-2 平成 27 年度孔間トレーサー試験の試験条件とウランの回収率

ラベル名		W17_1	W17_2	W17_3	W17_4	W17_5	W17_6	W71_1	W71_2
試験実施日		11/9	11/10	11/11	11/12・13	11/24	11/26・27	11/30	12/1・2
注入孔		12MI31	12MI31	12MI31	12MI31	12MI31	12MI31	13MI37	13MI37
揚水孔		13MI37	13MI37	13MI37	13MI37	13MI37	13MI37	12MI31	12MI31
注水流量	mL/min	18.2	14.9	9.51	10.0	19.6	19.1	20	19.2
揚水流量	mL/min	398	302	201	203	200	207	103	104
揚水流量/注水流量	-	21.9	20.3	21.1	20.3	10.2	10.4	5.15	5.46
トレーサー注入時間	min	40	60	120	180	20	180	30	180
トレーサー	ウラン	○	○	○	○	○	○	○	○
	アミノG酸	-	-	-	○	-	○	-	○
	重水素	○	○	○	○	○	○	○	○
	I ⁻	-	-	-	○	-	○	-	○
	Rb ⁺	-	-	-	○	-	○	-	○
	Ba ²⁺	-	-	-	○	-	○	-	○
回収率	%	59.1	54.6	39.2	40.2	39.3	55.9	64.6	64.6
回収率計算時間	min	190	300	380	390	285	1440	410	1440

※○は使用したトレーサーを表す

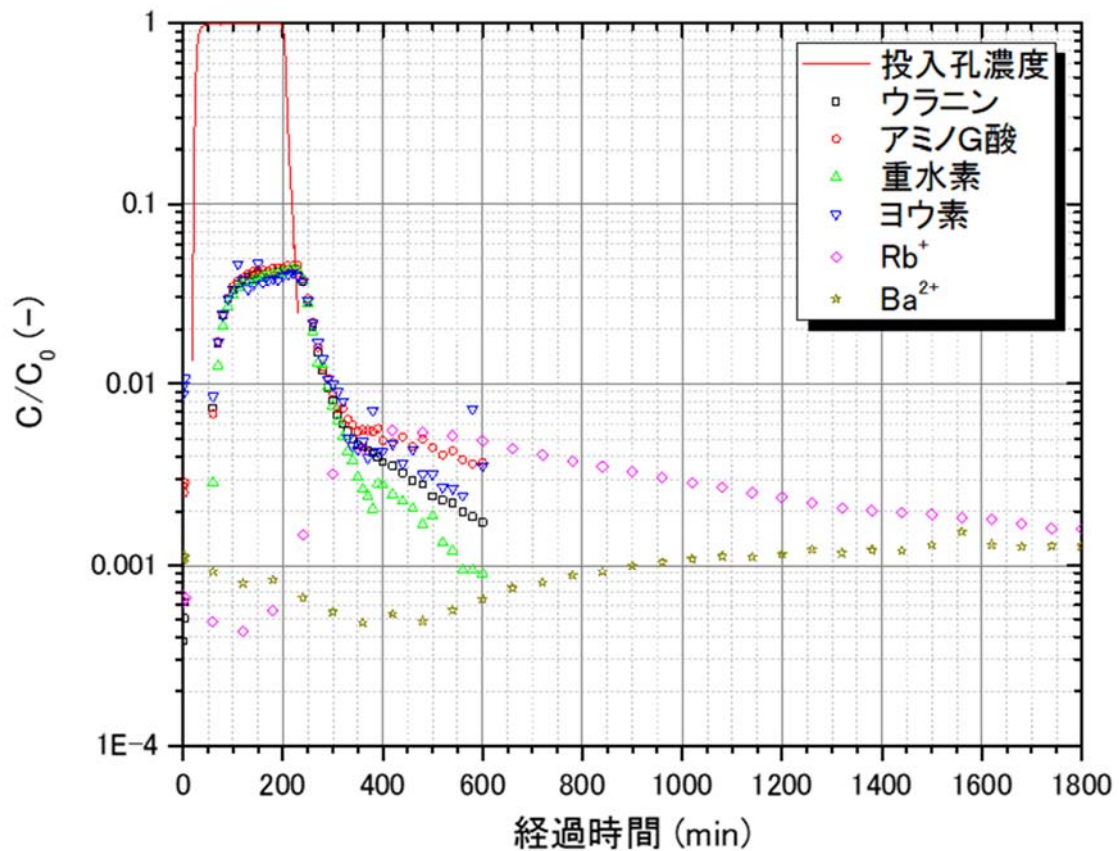


図 4.3.3-1 平成 27 年度の孔間トレーサー試験の破過曲線の例 (W17_6 試験)

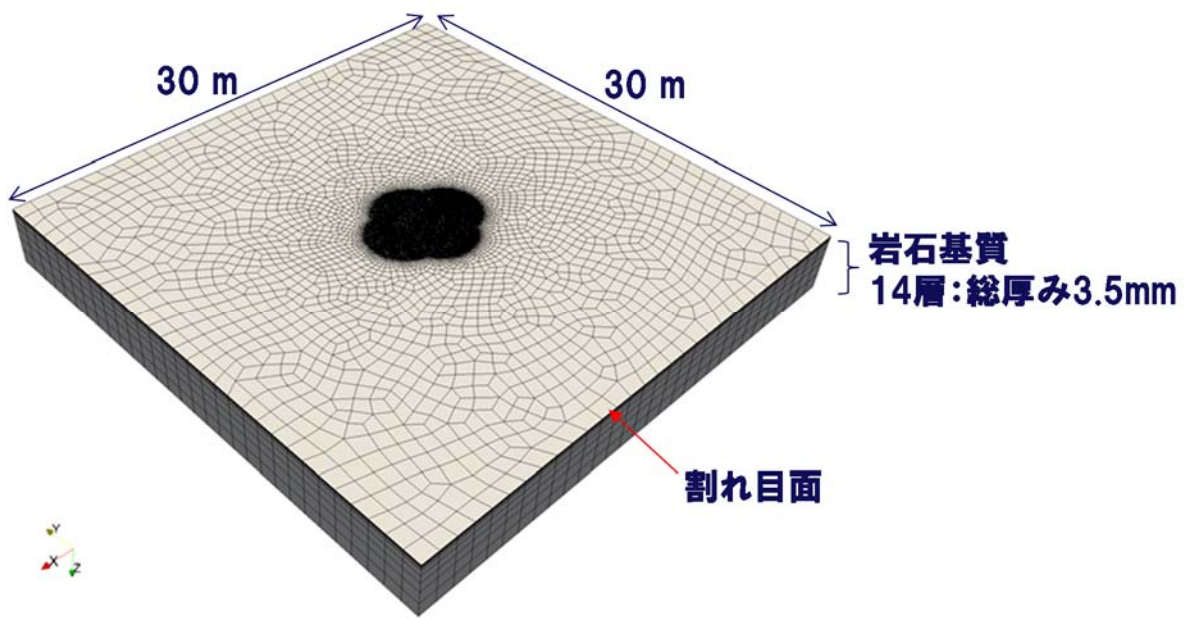


図 4.3.3-2 平成 27 年度の評価解析に使用した有限要素メッシュ

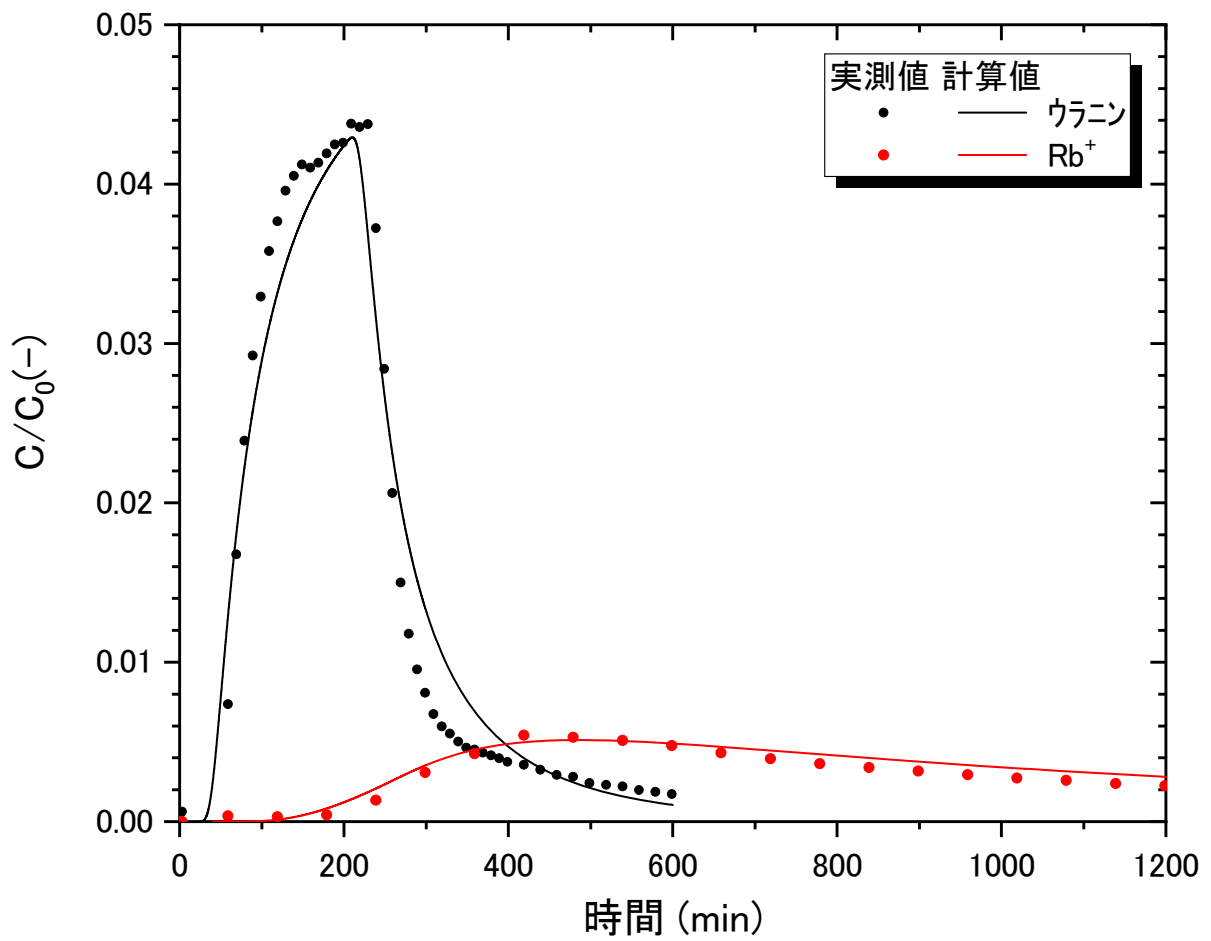


図 4.3.3-3 平成 27 年度の孔間トレーサー試験の評価解析結果の例 (W17_6 試験)

4.4 低割れ目密度の岩盤を対象としたトレーサー試験

4.4.1 試験対象割れ目

平成 28 年度、29 年度は、JAEA 瑞浪超深地層研究所の下部割れ目低密度帯に属する深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑において試験を実施した。

図 4.4.1-1 に示すように、同計測横坑から 15MI52 号孔、15MI53 号孔および 16MI59 号孔の 3 本のボーリング孔を掘削し、周辺岩盤の地質環境調査を実施した。その詳細については 2 章に示したが、深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑周辺岩盤の特徴として、割れ目頻度は 1m あたり約 4.3 本で、NW 走向と NE 走向の高傾斜の割れ目が卓越していたが、深度 300m で多く見られた水平の割れ目が見られなかった。水みち割れ目の透水量係数は $10^{-9} \sim 10^{-7}$ m²/sec の範囲であり、湧水量は各孔全体で 4~8 リットル程度であった。2 本目以降のボーリング孔の掘削中に既に掘削を終えたボーリング孔では単一の区間で大きな水圧の応答が計測されることが多く、割れ目の連続性は乏しいと推察された。

試験対象となる割れ目は、同深度の岩盤の水みち割れ目に特徴的な NW 走向の高傾斜の割れ目であり、15MI52 号孔とは 15.34 mabh、15MI53 号孔とは 15.05 mabh、16MI59 号孔とは 17.39 mabh でそれぞれ交差している。走向傾斜は、15MI52 号孔では N17° W87° W、15MI53 号孔では N22° W79° W、16MI59 号孔では N23° W77° W とほぼ一致しており、幾何学的にもほぼ同一平面上に並んでいる。割れ目交差位置の 3 孔間の距離は、15MI52 号孔-15MI53 号孔間が 1.44 m、15MI52 号孔-15MI59 号孔間が 2.62 m、15MI53 号孔-15MI59 号孔間が 1.79 m となっている。同割れ目に接する母岩部においては、15MI52 号孔では変質がみられないが、15MI53 号孔では長石や有色鉱物の溶脱が、16MI59 号孔では緑泥石化と溶脱がやや認められる。また、同割れ目には 15MI52 号孔、15MI53 号孔では充填鉱物は認められないが、16MI59 号孔ではカルサイトや粘土鉱物の充填がやや認められる。

図 4.4.1-2 に 16MI59 号孔を掘削した際の 15MI52 号孔と 15MI53 号孔の間隙水圧のモニタリング結果を示す。試験対象割れ目は、15MI52 号孔とは計測区間 15MI52INT4 で、15MI53 号孔とは計測区間 15MI53INT4 で交差しており、いずれの区間においても 16MI59 号孔の 17.39 mabh 付近を掘削した際に間隙水圧の低下がみられ、水理的な連続性が確認された。

トレーサー試験期間中は、各試験の開始前の間隙水圧が安定している状態で、3 孔の試験対象区間の間の差圧を計測した。平成 29 年度の計測結果を図 4.4.1-3 に示す。15MI52 号孔と 15MI53 号孔の間隙水圧の差は最大で 0.7 mm 程度であり、ほぼ同様の変動傾向を示しており、2 孔間での良好な水理的連続性を示唆している。16MI59 号孔と 15MI52 号孔、15MI53 号孔との水位差も最大で 4 mm 程度であり、バックグラウンドの動水勾配は最大でも 0.24 %程度と推定され、トレーサー試験に対する影響は非常に小さいと考える。

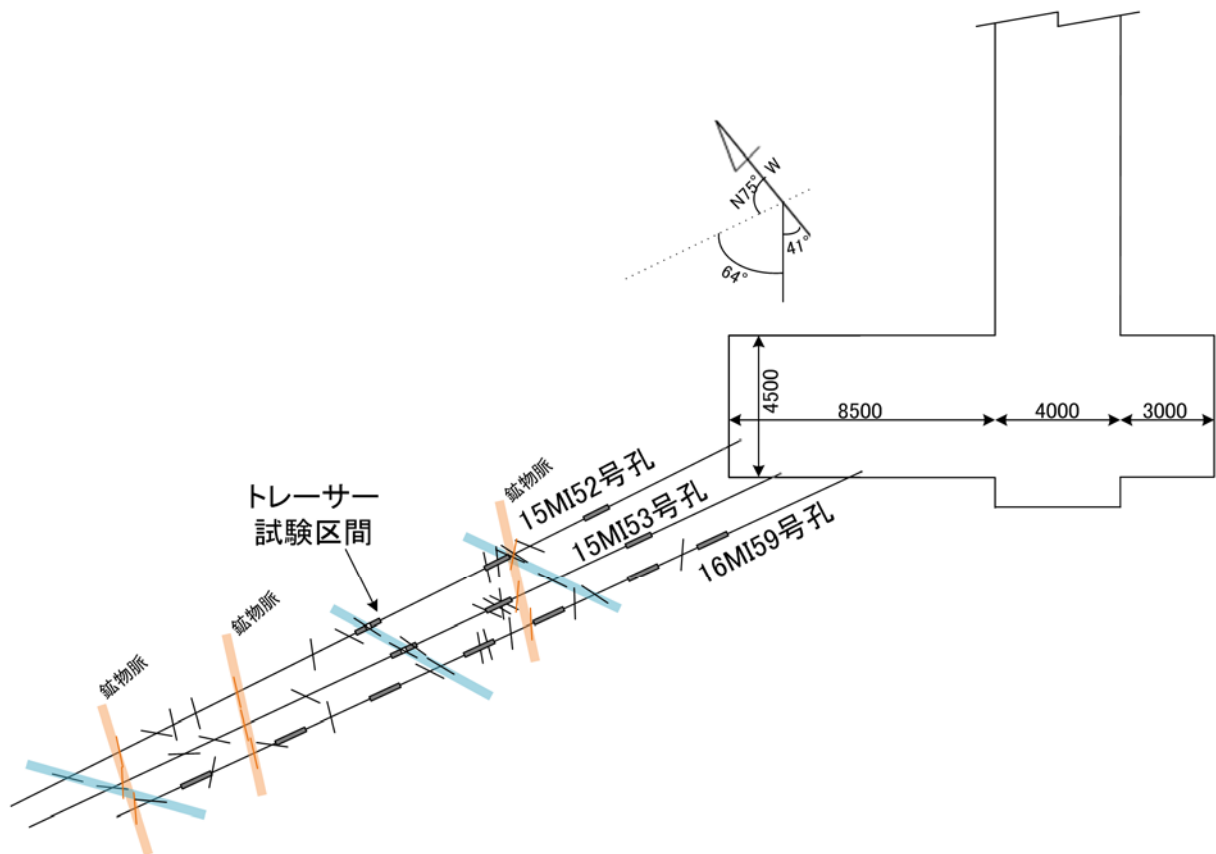


図 4.4.1-1 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑のボーリング孔配置とトレーサー試験の試験位置

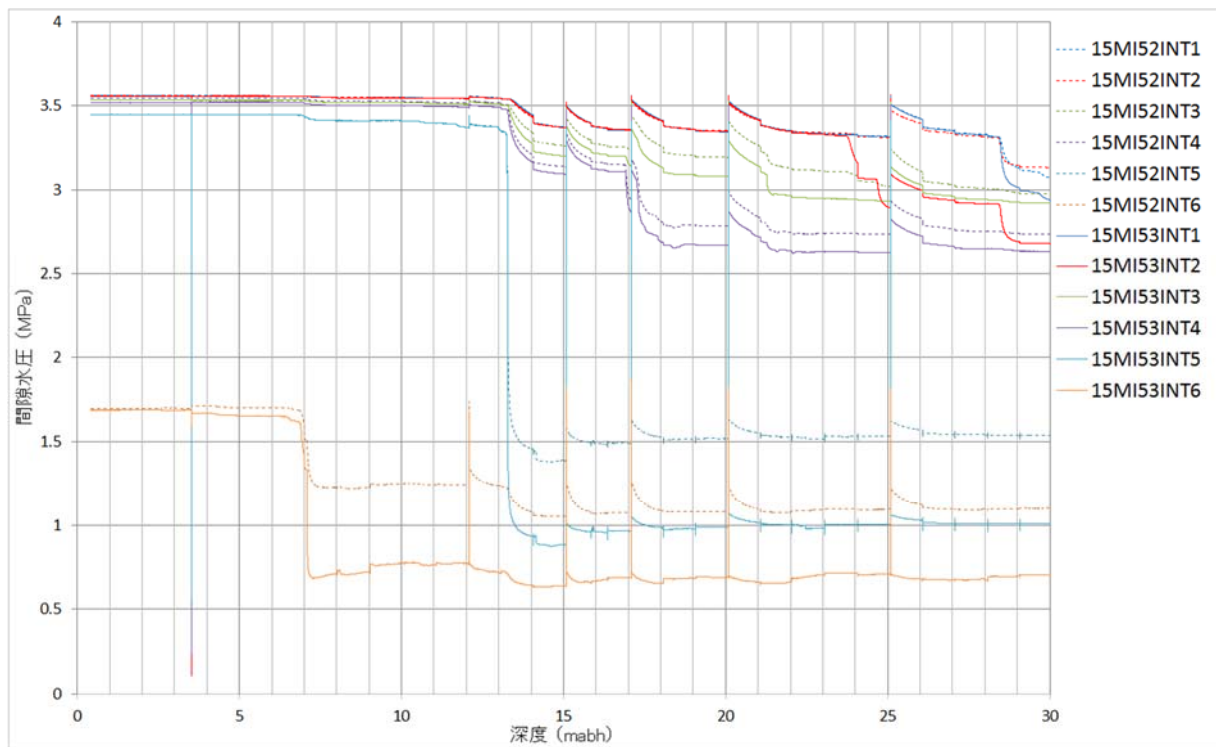


図 4.4.1-2 16MI59 号孔掘削時の 15MI52 号孔、15MI53 号孔の間隙水圧の応答

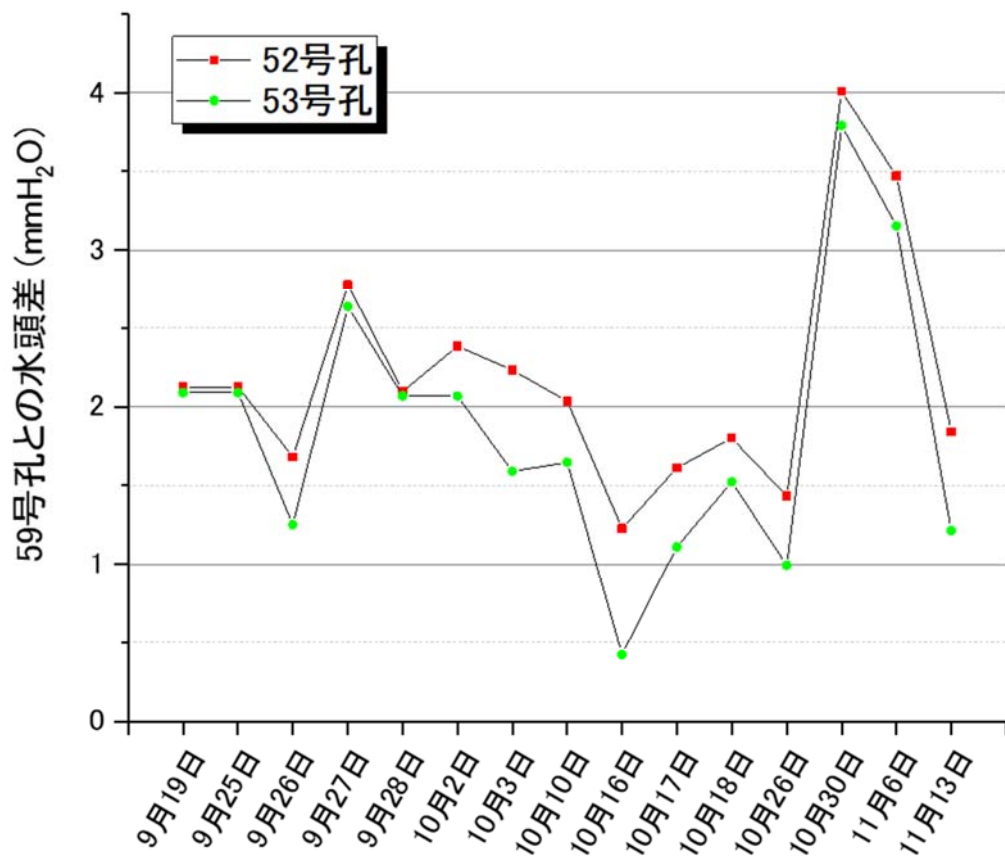


図 4.4.1-3 3 孔の試験対象区間の自然状態における水位差 (平成 29 年度)

4.4.2 単孔トレーサー試験

平成28年度は、15MI52号孔の15.34mabhと15MI53号孔の15.05mabhで試験を実施した。15MI52号孔で行った試験条件を表4.4.2-1に、15MI53号孔で行った試験条件を表4.4.2-2に示す。

表 4.4.2-1 平成28年度実施の単孔トレーサー試験条件（15MI52号孔）

試験条件名		16S52T1	16S52T2	16S52T3	16S52T4	16S52T5	16S52T6	
試験実施日		2016/11/22	2016/11/24	2016/11/25	2016/12/7	2016/12/8	2016/12/9	
対象区間		15MI52号孔	15MI52号孔	15MI52号孔	15MI52号孔	15MI52号孔	15MI52号孔	
注水流量(流量計平均)	mL/min	-	83.00	93.19	99.85	49.60	99.07	
	揚水流量(流量計平均)	mL/min	-	114.30	60.23	23.76	49.28	
	トレーサー注入時間	min	10.0	10.0	10.0	10.0	20.0	
	チェイサー注入時間	min	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	
	待機時間	min	-	-	-	-	-	
	トレーサー量	L	(1.000)	0.830	0.932	0.999	0.992	1.981
	チェイサー量	L	(0.500)	0.415	0.466	0.499	0.496	0.495
60分回収率	ウラン	-	-	90.8%	81.9%	3.2%	68.1%	48.7%
	アミノG酸	-	-	92.9%	81.3%	2.8%	69.0%	49.3%
	重水素	-	-	95.6%	82.6%	3.61%	67.3%	48.9%
	ルビジウム	-	-	80.5%	60.7%	4.5%	54.4%	41.4%
	バリウム	-	-	76.9%	50.6%	4.4%	47.4%	35.9%
120分回収率	ウラン	-	-	93.5%	96.3%	63.1%	86.4%	81.2%
	アミノG酸	-	-	94.1%	96.9%	62.5%	87.5%	81.2%
	重水素	-	-	97.5%	96.1%	64.9%	86.5%	78.2%
	ルビジウム	-	-	88.0%	80.9%	49.4%	77.2%	70.9%
	バリウム	-	-	88.5%	77.7%	42.1%	73.5%	70.2%

表 4.4.2-2 平成28年度実施の単孔トレーサー試験条件（15MI53号孔）

試験条件名		16S53T7	16S53T8	16S53T9	16S53T10	16S53T11	
試験実施日		2016/12/12	2016/12/13	2016/12/14	2016/12/15	2016/12/16	
対象区間		15MI53号孔	15MI53号孔	15MI53号孔	15MI53号孔	15MI53号孔	
注水流量(流量計平均)	mL/min	99.09	98.78	99.07	99.49	99.16	
	揚水流量(流量計平均)	mL/min	50.88	50.03	50.52	25.25	51.45
	トレーサー注入時間	min	10.0	10.0	20.0	20.0	10.0
	チェイサー注入時間	min	5.0	10.0	10.0	10.0	5.0
	待機時間	min	-	-	-	-	60.0
	トレーサー量	L	0.991	0.988	1.981	1.990	0.992
	チェイサー量	L	0.495	0.988	0.991	0.995	0.496
60分回収率	ウラン	-	69.8%	41.2%	31.5%	10.5%	58.1%
	アミノG酸	-	72.4%	44.4%	33.4%	10.6%	59.7%
	重水素	-	72.6%	43.2%	32.2%	10.9%	60.4%
	ルビジウム	-	60.3%	37.2%	30.9%	11.4%	48.9%
	バリウム	-	49.6%	33.9%	30.3%	12.4%	49.8%
120分回収率	ウラン	-	85.3%	75.6%	65.5%	43.0%	77.2%
	アミノG酸	-	87.1%	77.7%	66.4%	45.2%	77.9%
	重水素	-	87.8%	77.7%	65.5%	43.6%	83.7%
	ルビジウム	-	80.5%	71.6%	65.5%	40.4%	73.0%
	バリウム	-	76.3%	71.7%	69.7%	42.1%	77.7%

平成 28 年度に実施した試験では、非吸着性トレーサーとしてウラニン(3mg/L)、アミノ G 酸(3mg/L)、 δD (550‰)、吸着性トレーサーとして Rb^+ (2mg/L)、 Ba^{2+} (1.2mg/L)を使用した。表 4.4.2-1、表 4.4.2-2 に示した試験条件のうち、16S52T2、16S52T3、15S52T4 の試験結果を図 4.4.2-1～図 4.4.2-3 に示す。

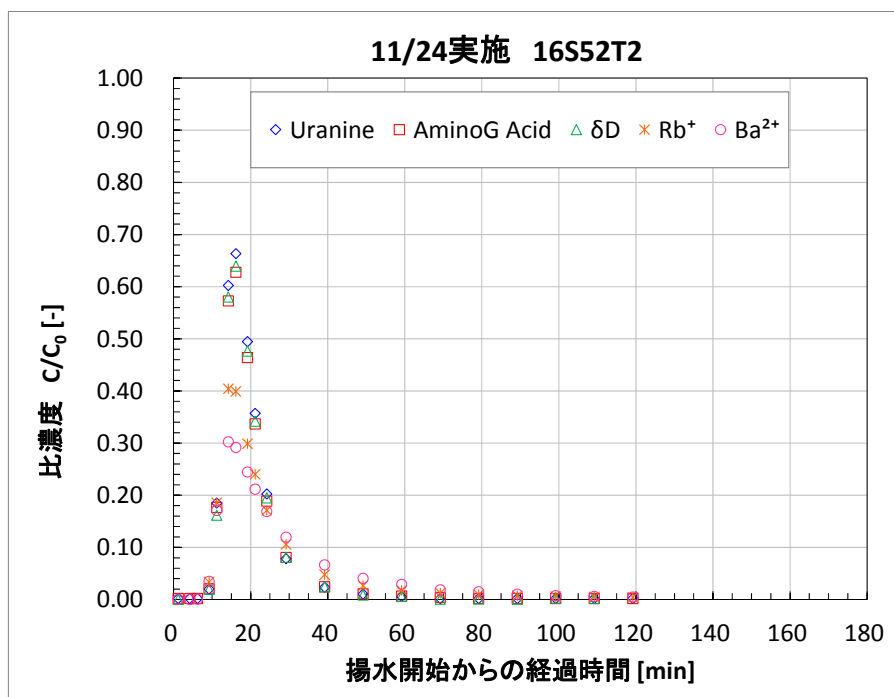


図 4.4.2-1 平成 28 年度単孔トレーサー試験結果 (16S52T2)

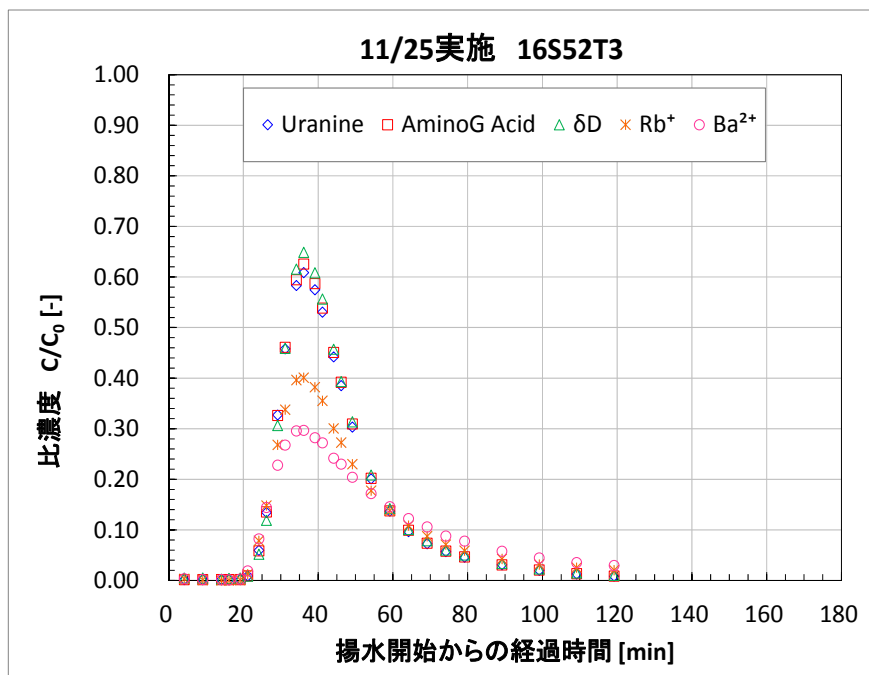


図 4.4.2-2 平成 28 年度単孔トレーサー試験結果 (16S52T3)

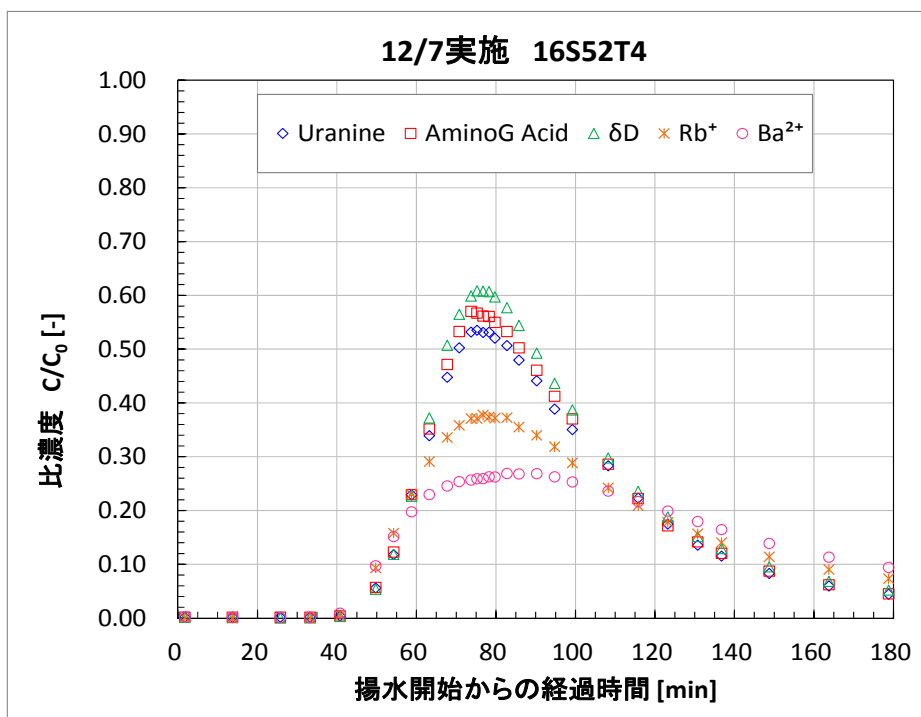


図 4.4.2-3 平成 28 年度単孔トレーサー試験結果 (16S52T4)

平成 29 年度は、16MI59 号孔の 17.39mabh と 15MI52 号孔の 15.34mabh で試験を実施した。16MI59 号孔で行った試験条件を表 4.4.2-3、表 4.4.2-4 に、15MI52 号孔で行った試験条件を表 4.4.2-5 に示す。

表 4.4.2-3 平成 29 年度実施の単孔トレーサー試験条件 (16MI59 号孔) : その 1

試験条件名		17S59T1	17S59T2	17S59T3	17S59T4	17S59T5	17S59T6	17S59T7
対象区間		16MI59号孔	16MI59号孔	16MI59号孔	16MI59号孔	16MI59号孔	16MI59号孔	16MI59号孔
注水流量(流量計平均)	mL/min	98.85	96.98	95.81	49.92	50.31	50.62	51.04
揚水流量(流量計平均)	mL/min	51.37	10.12	48.25	50.23	21.18	5.16	5.58
トレーサー注入時間	min	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
チェーサー注入時間	min	5.0	5.0	5.0	10.0	10.0	10.0	10.0
待機時間	min	-	-	-	-	-	-	-
トレーサー量	L	0.989	0.970	0.958	0.499	0.503	0.506	0.510
チェーサー量	L	0.494	0.485	0.479	0.499	0.503	0.506	0.510

表 4.4.2-4 平成 29 年度実施の単孔トレーサー試験条件 (16MI59 号孔) : その 2

試験条件名		17S59T12	17S59T13	17S59T14	17S59T15	17S59T16	17S59T17	17S59T18	17S59T19	17S59T20
対象区間		16MI59号孔	16MI59号孔	16MI59号孔	16MI59号孔	16MI59号孔	16MI59号孔	16MI59号孔	16MI59号孔	16MI59号孔
注水流量(流量計平均)	mL/min	49.17	49.36	49.82	50.39	49.52	49.03	49.81	48.87	5.38
揚水流量(流量計平均)	mL/min	50.07	50.46	20.71	10.64	49.61	50.40	52.14	49.86	20.41
トレーサー注入時間	min	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	10.0	5.0	50.0
チェーサー注入時間	min	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	10.0	5.0	50.0
待機時間	min	-	-	-	-	60	120	-	240	-
トレーサー量	L	0.246	0.247	0.249	0.252	0.248	0.245	0.498	0.244	0.269
チェーサー量	L	0.246	0.247	0.249	0.252	0.248	0.245	0.498	0.244	0.269

表 4.4.2-5 平成 29 年度実施の単孔トレーサー試験条件 (15MI52 号孔)

試験条件名		17S52T8	17S52T9	17S52T10	17S52T11
対象区間		15MI52号孔	15MI52号孔	15MI52号孔	15MI52号孔
注水流量(流量計平均)	mL/min	99.82	49.72	50.39	49.86
揚水流量(流量計平均)	mL/min	52.06	20.36	51.33	102.25
トレーサー注入時間	min	10.0	10.0	5.0	5.0
チェーサー注入時間	min	5.0	10.0	5.0	5.0
待機時間	min	-	-	-	-
トレーサー量	L	0.998	0.497	0.252	0.249
チェーサー量	L	0.499	0.497	0.252	0.249

平成 29 年度に実施した試験では、非吸着性トレーサーとしてウラニン(3mg/L)、アミノ G 酸(3mg/L)、 δD (550‰)、吸着性トレーサーとして Rb^+ (2mg/L)、 Ba^{2+} (1.2mg/L)を使用した。表 4.4.2-3、表 4.4.2-5 に示した試験条件のうち、17S59T13、17S59T14、17S59T15 の試験結果を図 4.4.2-4～図 4.4.2-6 に示す。

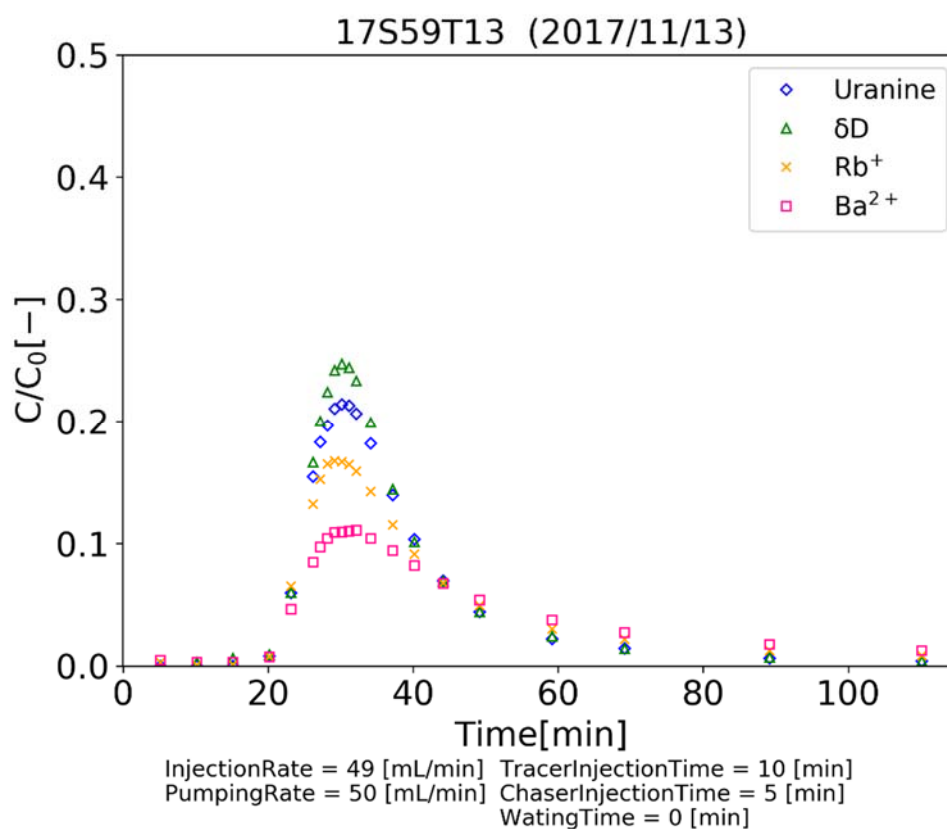


図 4.4.2-4 平成 29 年度単孔トレーサー試験結果 (17S59T13)

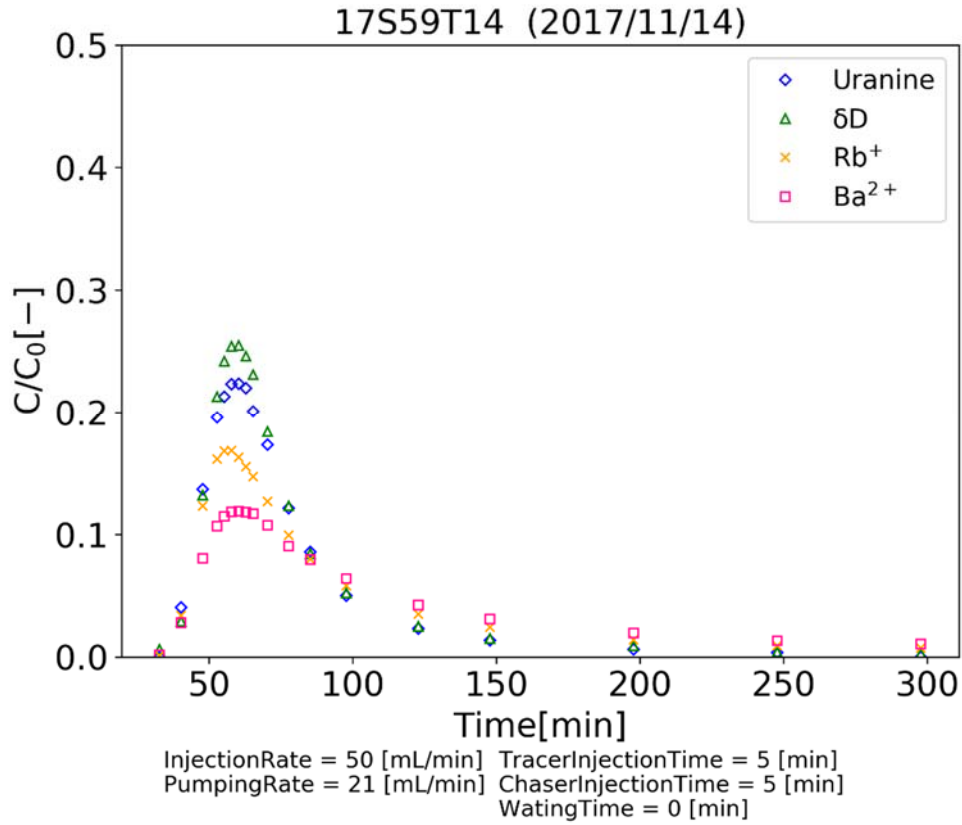


図 4.4.2-5 平成 29 年度単孔トレーサー試験結果 (17S59T14)

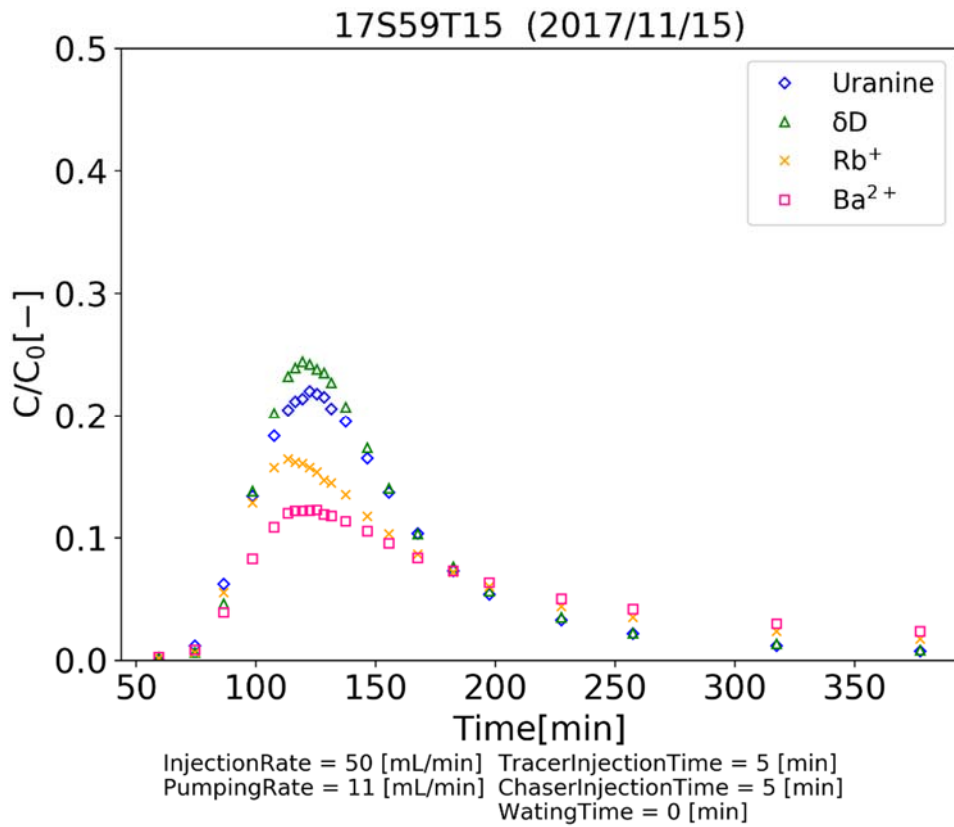


図 4.4.2-6 平成 29 年度単孔トレーサー試験結果 (17S59T15)

平成 28 年度、平成 29 年度に実施した試験においては、まず深度 300m ボーリング横坑の場合と同様に、図 4.3.2-8 に示した割れ目モデルによる評価を行った。図 4.4.2-7 に 15MI52 号孔の 15.34mabh に存在する割れ目を対象として行った 16S52T3（注入流量 93mL/min、揚水流量 60mL/min、トレーサー注入時間 10 分、チェイサー注入時間 5 分）の評価解析結果を、図 4.4.2-8 に 16MI59 号孔の 17.396mabh に存在する割れ目を対象として行った 17S59T13（注入流量 49mL/min、揚水流量 50mL/min、トレーサー注入時間 5 分、チェイサー注入時間 5 分）の評価解析結果を示す。

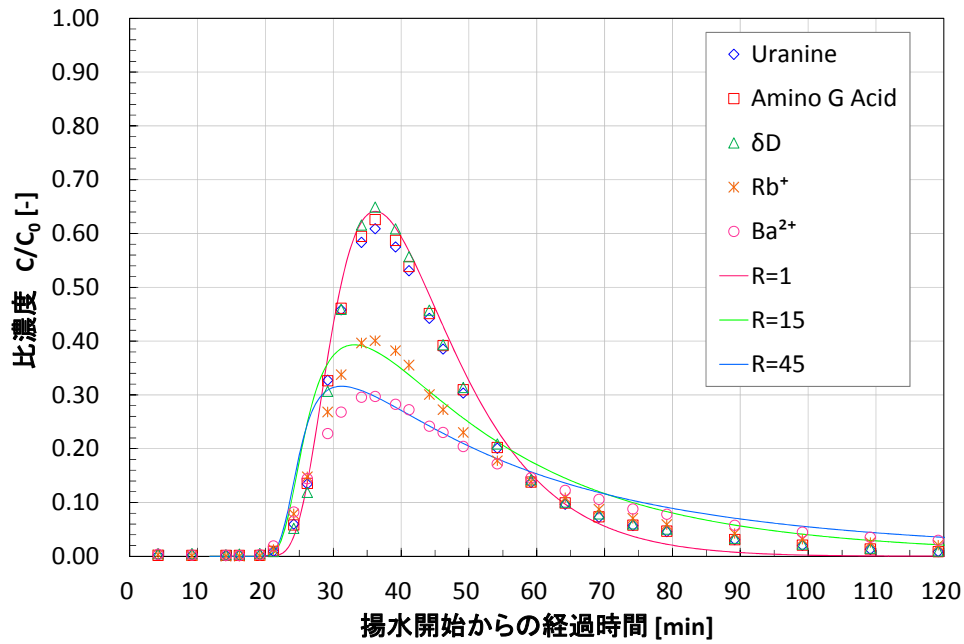


図 4.4.2-7 16S52T3 の評価解析結果

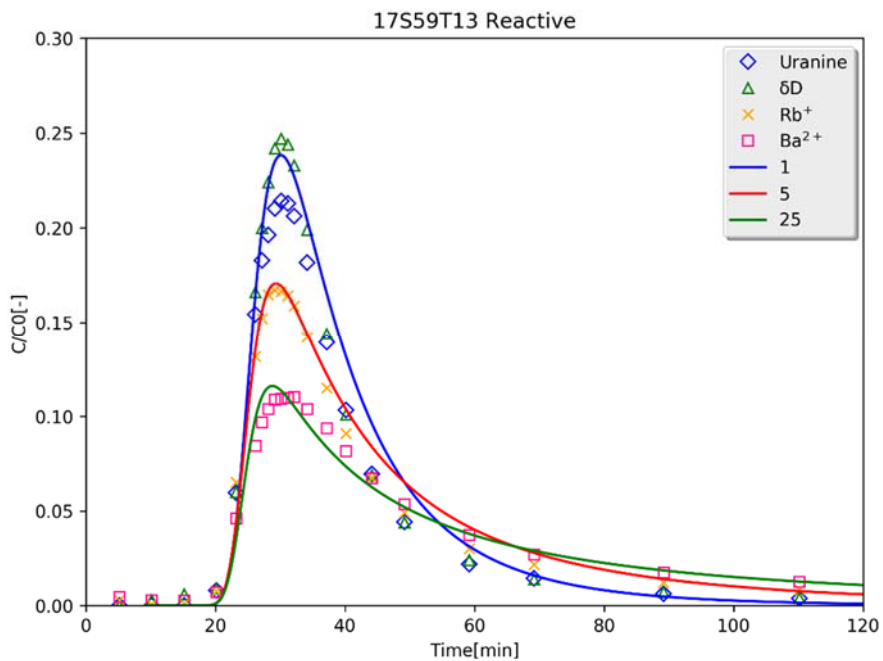


図 4.4.2-8 17S59T13 の評価解析結果

事前の調査によって対象区間はバックグラウンド地下水流れの影響が小さいことが想定されたため、いずれの試験条件も、バックグラウンド地下水流れは考慮せず、割れ目の集中定数、割れ目の遅延係数のみ評価を行った。

16S52T3 の評価解析では、集中定数は 8.0×10^{-4} 、割れ目の遅延係数 (R_b^+) は 15 程度、割れ目の遅延係数 (Ba^{2+}) は 45 程度と評価された。試験割れ目を対象に行われた高精度 BTV 観察によって得られた割れ目幅 0.19mm を仮定し、得られた集中定数から逆算される縦分散長は約 80mm となる。一方、17S59T13 の評価解析では、集中定数は 1.5×10^{-2} 、割れ目の遅延係数 (R_b^+) は 5 程度、割れ目の遅延係数 (Ba^{2+}) は 25 程度と評価された。16MI59 号孔の 17.396mabh に存在する割れ目を対象とした高精度 BTV 観察は行われていないが、仮に 16S52T3 と同様に割れ目幅を 0.19mm と仮定すると、得られた集中定数から逆算される縦分散長は約 200mm となり、16S52T3 とは大きく異なる結果となった。いずれの評価結果も、非吸着性トレーサーの破過曲線の再現性は概ね良好であったが、吸着性トレーサーについては、割れ目の遅延係数を大きくするほど解析結果における吸着性トレーサーのピーク濃度は減少し試験結果に近づくが、ピーク位置も割れ目の遅延係数が大きくなるに従って早くなる解析となり、ピーク位置に関する再現性は低下した。

このことを検討するため、平成 28 年度実施試験の 16S52T3 を対象とし、割れ目に加えて岩盤のマトリクスを考慮したモデル（複合モデル）による評価を行った。割れ目の集中定数は 1.0×10^{-3} 、マトリクスの間隙率は 0.01、マトリクスの実効拡散係数は $1.0 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ 、マトリクスの分配係数は 0.7mL/g、割れ目表面への吸着係数は、室内試験の結果を参考にし、以下の条件で解析を行った。

B3T3：割れ目表面の吸着係数 0，マトリクスの分配係数 0

C4T3：割れ目の表面吸着係数 0

D1T3：割れ目の表面吸着係数 2.6×10^{-5}

D2T3：割れ目の表面吸着係数 1.3×10^{-4}

D3T3：割れ目の表面吸着係数 3.9×10^{-3}

D4T3：割れ目の表面吸着係数 7.8×10^{-2}

評価解析の結果、マトリクスへの拡散・吸着、割れ目表面への吸着を考慮することにより、吸着性トレーサーの破過曲線は、ピーク位置は非吸着性トレーサーの破過曲線とほぼ変わらずに、ピーク濃度のみ減少する傾向を再現することができた。このことから、試験結果の破過曲線では、マトリクスへの拡散、吸着、割れ目表面への吸着が関係している可能性が確認された。一方で、トレーサーと岩盤の接触時間が短いことにより、トレーサーの吸着現象が非平衡挙動となっている可能性も考えられることから、今後の検討課題である。

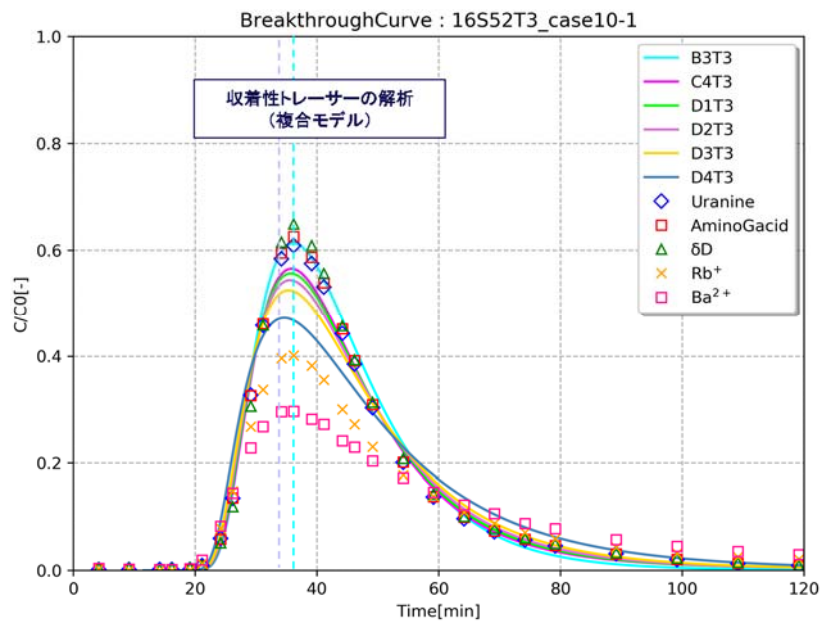


図 4. 4. 2-9 16S52T3 の評価解析結果 (複合モデル)

4.4.3 孔間トレーサー試験

平成 28 年度には 15MI52 号孔と 15MI53 号孔間で計 10 回、平成 29 年度には 15MI52 号孔と 16MI59 号孔間で計 14 回、孔間トレーサー試験を実施した。試験条件と非収着性トレーサーであるウランの回収率を、表 4.4.3-1、表 4.4.3-2 に示す。深度 500 m の試験対象割れ目ではバックグラウンドの動水勾配が小さいため、揚水流量を小さくしても高い回収率が得られた。ただし、15MI52 号孔と 15MI53 号孔間でのトレーサー試験ではいずれの孔を回収孔としても高い回収率が得られたが、15MI52 号孔と 16MI59 号孔間での試験では 16MI59 号孔を回収孔とした場合に比べて 15MI52 号孔を回収孔とした場合には回収率は低かった。試験対象割れ目の透水量係数は 15MI52 号孔で $7.6 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{sec}$ 、59 号孔で $1.9 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{sec}$ で、同じ揚水流量でも透水量係数の大きい 15MI52 号孔を揚水孔とした方が揚水区間の水位低下量が小さく、トレーサーを回収しきれなかったものと考えられる。

孔間トレーサー試験の試験結果の例として、平成 29 年度に実施した 17W5259T13-15 試験の破過曲線を図 4.4.3-1 に示す。同試験では、15MI52 号孔を注入孔とし、16MI59 号孔で揚水を行いトレーサーの回収を行った。トレーサー溶液を 6 時間投入した後に、地下水の注入に切り替えた。平均注水流量は 1.7 mL/min、平均揚水流量は 9.0 mL/min であった。トレーサーには、非収着性である重水素、非収着性の蛍光染料アミノ G 酸とウラン、収着性の陽イオンである Rb^+ と Ba^{2+} を使用した。試験はほぼ 30 時間実施した。非収着性トレーサーの重水素、アミノ G 酸とウランは、ほぼ 8 時間で回収濃度がピークに達し、ピーク濃度は投入濃度の 15~16 % であった。アミノ G 酸やウランに比べて重水素の破過曲線には時間遅れがみられるが、これは分子量の大きい蛍光染料より拡散係数が大きいため岩石基質への拡散がより進んだためと考えられる。一方、収着性トレーサーである Rb^+ は 11 時間後にピークに達し、ピーク濃度は投入濃度の約 3 % であった。また、より収着性の強い Ba^{2+} は 18 時間後にピークに達し、ピーク濃度は投入濃度の約 1.7 % であった。深度 300 m の試験対象割れ目に比べてバックグラウンドの流れが遅いため、揚水流量が小さいにも係わらず、重水素、アミノ G 酸とウランは、試験開始後 25 時間でほぼ 100 % 回収された。一方、収着性トレーサーである Rb^+ の回収率は 30 時間後で 42 %、より収着性の強い Ba^{2+} では 30 時間後で 24 % であった。

孔間トレーサー試験により得られた破過曲線に対して数値シミュレーションによるフィッティングを行い、物質移行パラメータを同定した。数値解析では、割れ目内での移流分散、割れ目表面への吸着および割れ目に接する岩石基質への拡散と吸着を考慮した。計算を効率的に行うために、割れ目中心を対称面と考え、図 4.3.3-2 に示したのと同様な割れ目面の片側だけを表現した解析モデルを使用した。

17W5259T13-15 試験のウランと重水素の評価解析では、割れ目の平均開口幅を 0.13 mm、縦分散長を 0.2 m (横分散長は 0.02 m) とした場合に、数値シミュレーションによる揚水孔でのウランや重水素の破過曲線は試験結果に最も良く一致した。高解像度のボアホール TV カメラを用いた孔壁観察に

よれば、試験対象割れ目の開口幅は 15MI52 号孔で 0.19 mm である。また、対象割れ目の透水量係数からは、3 乗則により割れ目の開口幅は 0.069~0.14 mm と推定される。このように、トレーサー試験から得た割れ目開口幅は、ボアホール TV カメラによる計測値や、透水量係数から 3 乗則により算出した数値と整合性がある。一方、同定された縦分散長 0.2 m は、孔間距離 2.62 m の 7.6 % に相当し、多くの観測データで縦分散長は移行距離の 1/10 倍を中心に 1/100~1 倍の範囲に分布するとした Gelhar (1992) の調査結果と調和的である。

Rb⁺と Ba²⁺の評価解析では、割れ目表面への吸着係数を室内バッチ試験で得た 4.3×10^{-5} m と 4.8×10^{-4} m にそれぞれ設定して解析を行った。Rb⁺については、岩石基質に対する分配係数を 0.67 mL/g とした場合に、数値シミュレーションによる破過曲線は試験結果に最も良く一致した。一方、Ba²⁺については、試験結果を良く再現することはできなかった。そのため、Ba²⁺の割れ目表面への吸着係数を 2.5×10^{-4} m に変更して再度解析を行ったところ、岩石基質に対する分配係数を 0.67 mL/g とした場合に、1.8 mL/g とした場合に、数値シミュレーションによる破過曲線は試験結果に良く一致した。Rb⁺については室内バッチ試験で得た表面吸着係数をそのまま解析に使用し、Ba²⁺についても 1/2 程度に修正することで、破過曲線を良好に再現でき、異なる粒径の室内吸着バッチ試験により割れ目の表面吸着係数を推定できる可能性が示唆された。

表 4.4.3-1 平成 28 年度の孔間トレーサー試験の試験条件とウランの回収率

試験名	T1	T2	T3	T4-6	T7	T8	T9-11	T12	T13-15	T16-18
注入孔	15MI52	15MI52	15MI52	15MI52	15MI53	15MI53	15MI53	15MI53	15MI53	15MI53
揚水孔	15MI53	15MI53	15MI53	15MI53	15MI52	15MI52	15MI52	15MI52	15MI52	15MI52
注水流量 (mL/min)	12.18	5.10	3.17	2.90	2.98	3.01	2.85	2.08	1.97	1.78
揚水流量 (mL/min)	51.59	27.84	26.14	26.12	25.41	13.16	12.68	5.83	5.24	6.18
注入時間 (min)	20	10	20	60	20	20	420	20	60	1440
揚水時間 (min)	120	120	160	1750	120	120	1800	240	1860	2760
アミノ酸				○	○	○	○	○	○	○
ウラン	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
重水素				○	○	○	○	○	○	○
Rb ⁺				○			○		○	○
Ba ²⁺				○			○		○	○
回収率 (%)	99.3	81.5	78.1	83.7	85.1	75.1	85.6	52.9	93.1	99.0

※○は使用したトレーサーを表す

表 4.4.3-2 平成 29 年度の孔間トレーサー試験の試験条件とウランの回収率

試験名	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7-9	T10	T11	T12	T13-15	T16	T17	T18-20
注入孔	59	59	59	59	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52
揚水孔	52	52	52	52	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59
注水流量 (mL/min)	26.9	10.0	5.4	5.1	5.1	5.1	5.3	3.4	2.7	1.9	1.7	1.6	1.4	1.6
揚水流量 (mL/min)	49.2	19.7	13.9	50.6	49.8	30.9	30.5	22.6	15.5	9.6	9.0	5.6	7.7	8.8
トレーサー 注入時間 (min)	10	60	60	60	60	60	360	30	30	45	360	40	30	300
揚水時間 (hour)	2.3	7.0	7.5	6.7	6.7	6.8	31.2	7.0	6.8	21.9	31.4	22.3	22.5	46.3
アミノG酸	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
ウラン	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
重水素											○			○
Rb ⁺											○			○
Ba ²⁺											○			○
ウラン 回収率 (%)	68	46	37	60	100	93	97	98	94	89	99	26	69	90

※○は使用したトレーサーを表す

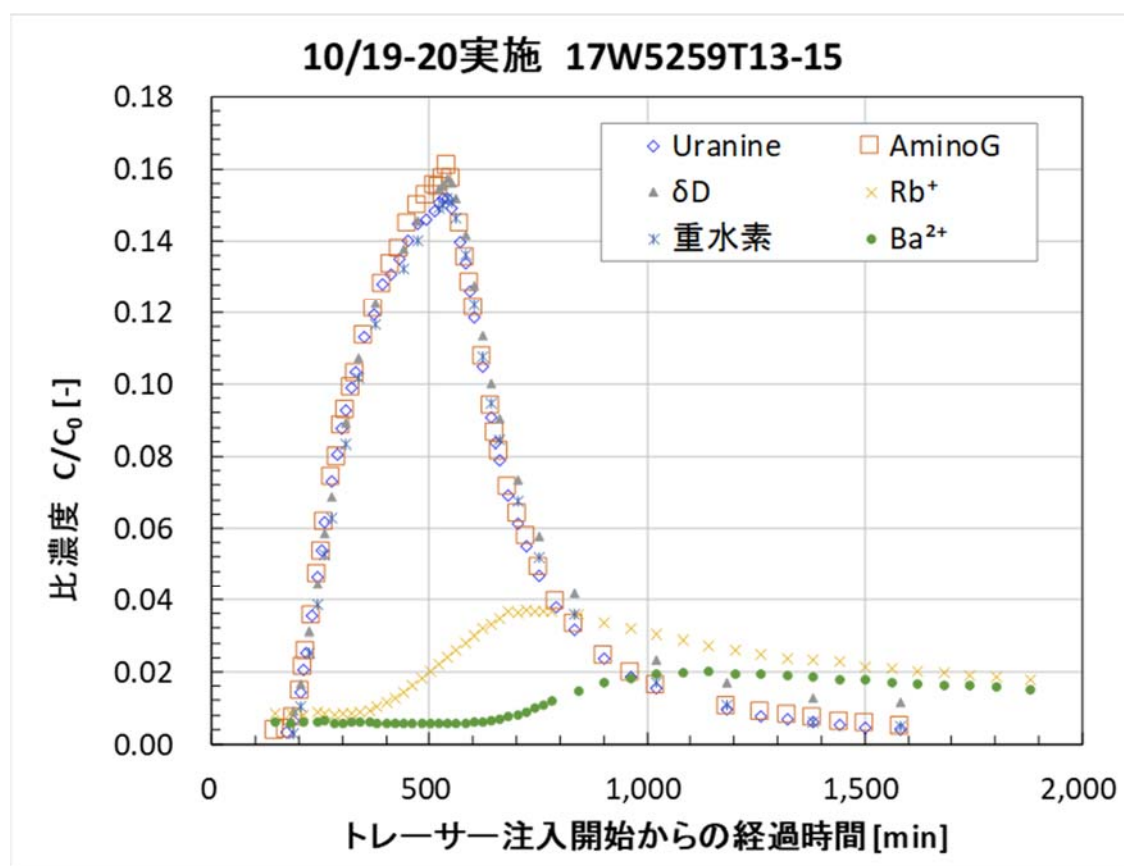


図 4.4.3-1 孔間トレーサー試験の破過曲線の例 (17W5259T13-15 試験)

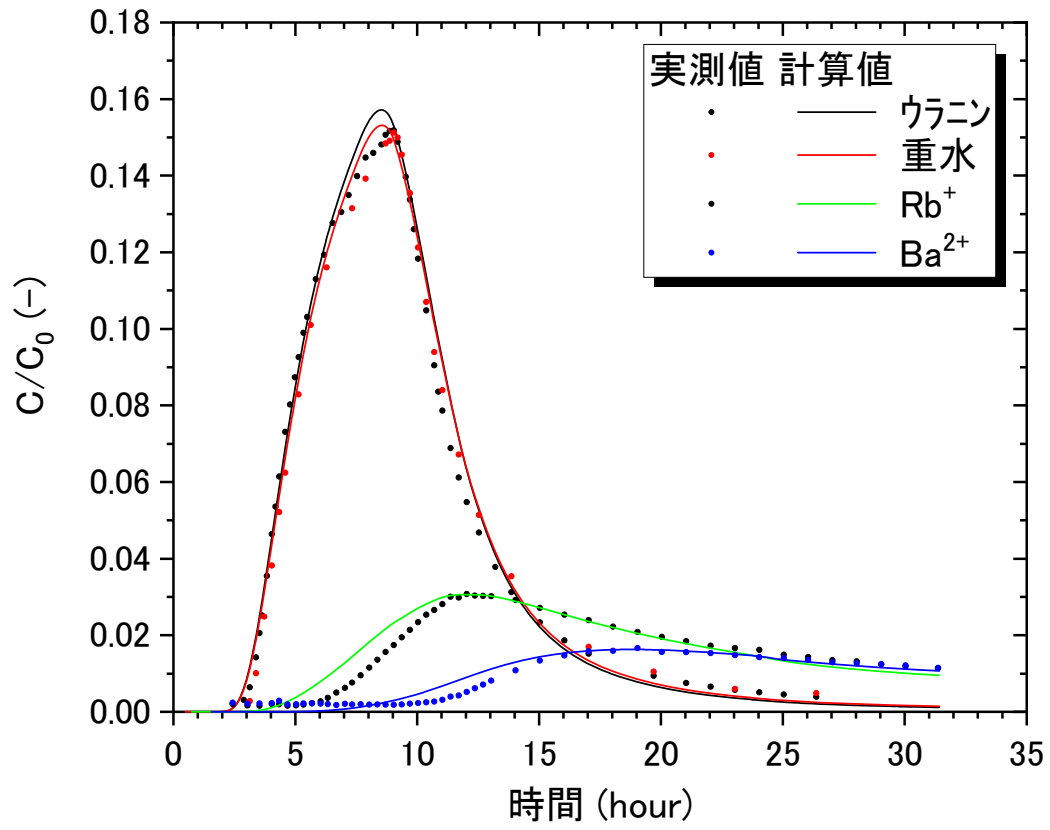


図 4. 4. 3-2 孔間トレーサー試験の破過曲線の例 (17W5259T13-15 試験)

4.5 まとめ

4.5.1 原位置トレーサー試験装置の試作

本研究では、平成 20～22 年度にスイス Nagra の Grimasel Test Site (以下、GTS) において実施した原位置トレーサー試験の結果を踏まえ、我が国の地質環境を考慮して試験装置の改良を行った。

本研究で開発した試験装置の孔内部は、注入区間および揚水区間内のデッドボリューム削減を目的とし、パッカーにトレーサーを注入、揚水するためのポートを設けたパッカー一体型装置となっている。ポート外周にスペーサー、メッシュを巻いて使用することで、トレーサーを均一に注入、揚水することが可能である。その結果、前フェーズに GTS の試験で使用したダブルパッカー方式に比べて、試験区間内のデッドボリュームを約 1/15 に低減することができた。このことにより、注入時および揚水時のデッドボリュームの影響を少なくした状態で試験を行うことが可能になった。

従来のトレーサー試験では、坑道内のトレーサータンクから数十 m のチューブを介して試験孔内にトレーサーを送液していたため、チューブ内の分散の影響が課題となっていた。この対策として、六方バルブ(トレーサー循環バルブ)を作製し、孔内装置に組み込んだ。その結果、チューブ内分散の影響をほぼ受けず、理想的な矩形波に近い状態でのトレーサー注入が可能となった。単孔トレーサー試験では、トレーサーを注入した後にチェイサーとして地下水を注入し、デッドボリューム内に残留するトレーサーをフラッシングする必要がある。パッカー一体型孔内装置に加えて六方バルブを実装することで注入時のデッドボリュームを大幅に削減できたことも、大きな成果と言える。

蛍光濃度センサーは、孔内装置に組み込んで使用することで、トレーサーのうちウラニンの濃度を、坑道と孔内を繋ぐチューブ内の分散の影響を受けずに、孔内で計測することを可能にする。GTS で実施した試験で低濃度域の計測値が不安定になった結果を踏まえ、光源を高出力のものに変えるとともに、光ファイバーケーブルの接続箇所を減らすことで通信系のロスを低減させることにより、0.01mg/L の低濃度の判別が可能となった。一方で、今年度実施した試験において、孔内に設置した蛍光濃度センサーの一つで蛍光強度が極端に低下する現象がみられた。原因として、高い水圧による変形や、内部鏡面への汚れの付着・蓄積の可能性が考えられ、更なる改良が必要と考えられる。

4.5.2 単孔トレーサー試験

単孔トレーサー試験は、トレーサーの注入からトレーサーの回収までの全ての試験工程を 1 本のボーリング孔で行うため、比較的簡便に試験を行うことが最大の特徴である。1 回辺りの試験に要するコストを孔間トレーサー試験に比べて低く抑えることができるため、多深度、多地点の試験にも向いており、複数の試験で得られた物質移行特性を相対的に評価することも可能と考えられる。特に、地上から掘削された長尺のボーリング孔を使っても試験を行うことができる試験法であり、対象地点の物質移行評価を大まかに評価できる可能性があると言える。また、単孔トレーサー試験で得られる破過曲

線は、一般に孔間トレーサー試験に比べてピーク濃度が高く、回収率も高いため、分析精度に左右されない破過曲線を取得することができることも特徴である。さらに、単孔トレーサー試験の場合は、収着性トレーサーのピークは、非収着性トレーサーのピークに比べて極端に遅れることが無いため、試験に要する時間やサンプリングの仕様決定が容易であること、注入したトレーサーとチェイサーの合計量を揚水すればトレーサーのピークが表れるといった特徴も、試験時間の見極めることに役立つ。

単孔トレーサー試験は、トレーサーがどの範囲まで浸透したかを確認することができないため、割れ目幅と縦分散長を区別して評価することができない。従って、割れ目幅、縦分散長を複合パラメーター（集中定数）として評価しなければならない。但し、評価すべきパラメータが少ないこと、バックグラウンド地下水流れの影響が少ないと判断される場合は、簡易な解析モデルを使用することもできることから、評価解析に必要な時間・労力も少なく済むことが特徴である。

本フェーズでは、主に割れ目のみを考慮した割れ目モデルを用い、簡易に物質移行パラメータを評価することを試みた。割れ目モデルを用いた解析では、集中定数、バックグラウンド地下水流れの動水勾配、割れ目の遅延係数が評価パラメータであり、評価すべきパラメータが少なく済むため簡易に物質移行特性を評価することができる。但し、割れ目モデルによる評価解析では、破過曲線を完全に再現することはできなかった。このため、今年度は、割れ目に加えて岩盤マトリクスを考慮した複合モデルを用いて解析を実施した。解析の結果、マトリクスへの拡散、収着を考慮することにより、収着性トレーサーの破過曲線のピーク位置が非収着性トレーサーとほぼ変わらず、ピーク濃度のみ減少するといった傾向を再現することができた。このことにより、原位置試験で得られた収着性トレーサーの破過曲線は、マトリクスへの拡散、収着の効果が影響している可能性が考えられた。但し、花崗岩の間隙率は1%程度と非常に小さいうえに、原位置の試験では、室内試験に比べてトレーサーと岩盤マトリクスの接触時間が短いことから、マトリクスへの拡散、収着の効果が破過曲線に表れていると断定することが難しかった。以上のことから、砂岩のように間隙率が大きい地点での試験や室内試験を通して、今回得られた破過曲線と比較を行って割れ目内のトレーサー移行メカニズムを再評価することが今後の課題である。

4.5.3 孔間トレーサー試験

孔間トレーサー試験は、トレーサーの投入と回収を別々のボーリング孔で行うため、単孔トレーサー試験に比べて試験の対象範囲や境界条件が明確であり、試験の結果得られる物性の精度も高いと考えられる。比較的広い範囲での試験も可能であり、ある程度のバックグラウンドの地下水流れがある場においても、揚水流量を多くしたり、流れの下流側に回収孔を設けたりすることで、試験を行うことができる。単孔トレーサー試験と異なり、割れ目幅、分散長のそれぞれを独立して推定することができる。収着性トレーサーを用いた場合、回収孔で得られる破過曲線のピーク濃度到達時刻は非収着性ト

レーザーに比べて遅れ、ピーク濃度も低くなることから、試験対象割れ目あるいは岩盤の核種移行遅延機能を理解しやすいという特長がある。その反面、当然ながら最低でも 2 本のボーリング孔が必要であり、実際には試験場の水理地質環境を明確にするためにそれ以上のボーリング孔が必要となり、試験に要するコストも高くなる。そのため、精密調査段階の地下坑道内での調査においては、坑道内の多数の地点や割れ目を対象とした試験では単孔トレーサー試験を行い、代表的な地点、割れ目に絞って孔間トレーサー試験を行うなど、使い分けが必要であると考えられる。

今フェーズの試験のうち、深度 300 m の試験では対象割れ目内のバックグラウンドの地下水流れが速く、揚水流量を大きくすることで回収率を確保した。そして、試験結果の評価解析では、まずトレーサーの回収率からバックグラウンドの地下水流れの流量と向きを同定した上で、割れ目の開口幅や分散長、吸着係数等の物質移行パラメーターを同定した。ただし、深度 300 m の試験対象割れ目には充填鉱物が含まれ、同定された吸着係数には充填鉱物の効果も含まれたものと考えられた。

一方、深度 500 m の試験では対象割れ目内のバックグラウンドの地下水流れは非常に遅く、トレーサー試験への影響はほとんど無いと考えられた。また、対象割れ目には充填鉱物が含まれておらず、試験結果の評価解析では、室内試験で推定した表面吸着係数を用いることで、破過曲線を良好に再現しマトリクスへの分配係数を同定することができた。

今後の課題としては、室内試験で得られた表面吸着係数や充填鉱物の吸着特性を、原位置での物質移行の定量的評価に取り込む手法の確立が挙げられる。

参考文献

Gelhar, L. W., Collins, M. A. (1971) : General analysis of longitudinal dispersion in nonuniform flow, Water Resources Research, Vol. 7, No. 6, pp. 1511-1521.

河西基、田中靖治、五十嵐敏文(1994) : 高レベル廃棄物処分の天然バリア性能評価手法の開発 (その

1) -割れ目系岩盤中の地下水流動解析手法-, 電力中央研究所 研究報告 U93054.

河西基、田中靖治、五十嵐敏文(1995) : 高レベル廃棄物処分の天然バリア性能評価手法の開発 (その

2) -割れ目系岩盤中の熱および核種の移行解析手法-, 電力中央研究所 研究報告 U94053

5. 各種割れ目探査技術の開発

5.1 ラドン濃度計測による割れ目調査技術の開発

5.1.1 はじめに

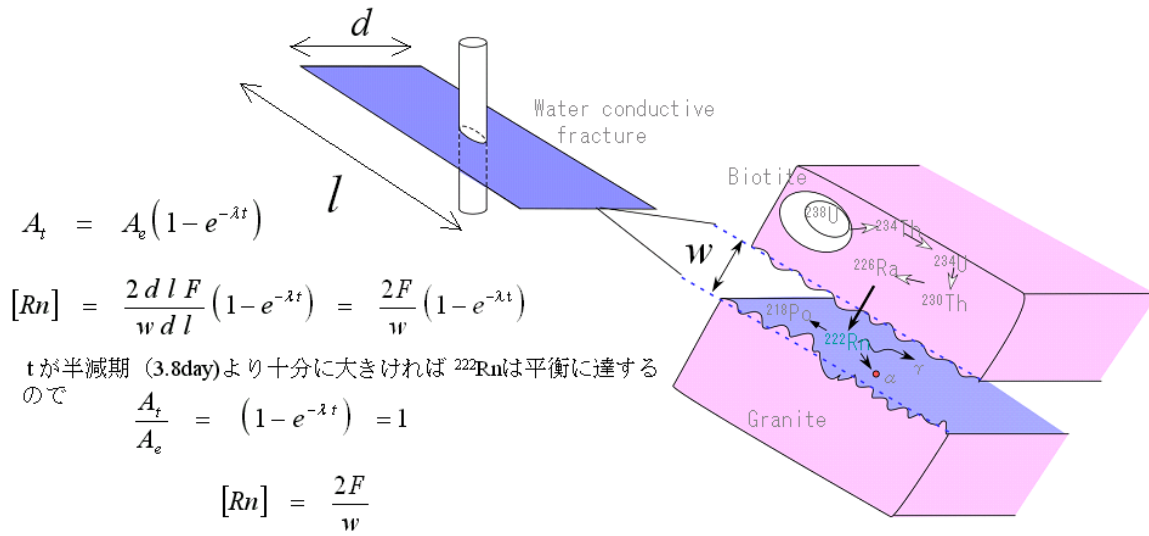
岩盤中の割れ目の開口幅は様々な方法で推定されているが、いずれも不確実性が存在する。ボアホール TV 計測や水理試験などの方法によって開口幅を算出することが可能であるが、それぞれの開口幅の推定方法には不確実性を有しており、決定的な手段は存在しない。このため、様々な手法を組み合わせることで相補的に割れ目の開口幅を推定することが必要となる。岩石から発生するラドンを用いる手法は、割れ目間隙中に存在するラドン濃度を計測する手法である。この方法により岩盤内の割れ目の開口幅も計測することが可能であり、本事業ではラドンを用いた割れ目の開口幅推定法の開発と原位置試験での適用性の提示を目指している。

5.1.2 ラドン濃度計測による割れ目幅の推定の概念

ラドン ($Rn-222$) は水溶性でかつ不活性のため、地下水の溶存物質や岩盤を構成する鉱物との化学反応の影響は受けず、岩盤中の親核種であるラジウム ($Ra-226$) から反跳して割れ目の間隙中の地下水へ溶存する。岩盤中のラドンとラジウムとが放射平衡に達していると仮定できれば、母岩中から地下水へ溶解する時間当たりのラドンの量 (ラドンフラックス) も一定と見なすことができる。岩盤中のラジウムから発生し、反跳するラドンの移動距離は小さいため、結晶質岩の様な緻密な岩盤においては、地下水に溶存しているラドンは、岩石表面近くで発生して割れ目の表面から地下水中に溶解したものと考えることができる。割れ目を平行平板と仮定し、割れ目表面から供給されるラドンの量と割れ目の面積には図 5.1.3-1 に示すような関係が成り立つ。本事業で提案する手法は原位置での割れ目間隙からの採水によりラドン濃度 ($[Rn]$) を得ると同時に、室内試験によって岩石からのラドン発生量をラドンフラックス (F) として得ることで、開口幅 (w) を評価しようとするものである。

5.1.3 フェーズの実施概要

本事業ではこれまでラドン濃度計測による割れ目の幅の推定手法を開発し、花崗岩が分布するスイスグリムゼルテストサイトへ適用し、相補的にラドン濃度計測による割れ目の幅の推定手法の適用性を確認した。この手法を我が国の花崗岩岩盤にも適用するためには、代表的な岩石や岩盤での検討を行い、その適用性を評価していく必要がある。そこで、日本原子力研究開発機構の協力を得て、瑞浪超深地層研究所において手法の適用性検討を実施している。今フェーズでは、深度 300m ボーリング横坑および深度 500m 研究アクセス南坑道の 125m 計測横坑でのラドン循環試験を行い、割れ目の開口幅の推定し、トレーサー試験や高粘性流体試験などとの比較から相補的に手法の適用性の確認を行った。



A_e : 平衡に達したRnの原子数
 A_t : 時間 t におけるRnの原子数
 λ : Rn の崩壊定数
 F : 割れ目表面におけるラドンフラックス

図 5.1.3-1 ラドンによる割れ目幅計測の原理

5.1.4 ラドンフラックスの測定

ラドン濃度による割れ目開口幅の評価を行うためには、原位置におけるラドン濃度の測定と共に、原位置の岩石を用いたラドンフラックスの測定を必要とする。このため、ボーリング孔のコアを用い、室内における浸漬試験によりラドンフラックスの測定をした。図 5.1.4-1 の写真は気密容器に花崗岩をセットした例である。これらのコアを気密容器内で一定期間浸漬した後に採水し、ラドン濃度の計測試料とした。深度 300m ボーリング横坑のボーリングコアを用いた測定では、ラドンフラックスは変質が認められる試料で $5.3 \times 10^{-3} \text{ Bq/cm}^2$ であり、変質が認められない試料の $5.7 \times 10^{-3} \text{ Bq/cm}^2$ に比較して僅かに小さい結果が得られている。深度 500m 研究アクセス南坑道のボーリングコアを用いた測定では、 $5.5 \times 10^{-3} \text{ Bq/cm}^2 \sim 7.7 \times 10^{-3} \text{ Bq/cm}^2$ のフラックスが得られた。このフラックスは、深度 300m ボーリング横坑のボーリングコアを用いたフラックスよりも大きい。深度 300m ボーリング横坑のボーリングコアのうち変質の程度が弱い試料において、ラドンフラックスが大きい傾向が得られているが、深度 500m 南研究アクセス坑道のボーリングコアは、XRD や顕微鏡観察から深度 300m ボーリング横坑のボーリングコアに比べて変質している箇所が少なく、このことがラドンフラックスの大きい可能性もある。一方、変質の影響はラジウムなどの親核種の存在比だけではなく、変質によって間隙率の大きくなった際にも影響があると考えられ、間隙率の大きい岩石のラドンフラックスを得る場合はラドン発生状況を確認しながら平衡状態を見極める必要がある。



図 5.1.4-1 ラドンフラックス測定のための浸漬試験
(左：容器内にセットした花崗岩コア 右：気密容器)

5.1.5 ラドン循環試験

ラドン循環試験は水みちにボーリングを 2 本削孔し、一方から揚水し、もう一方から注水して孔間で地下水を循環し、安定したラドン濃度を得ようとするものである。スイスのグリムゼルテストサイトで適用した際のラドン循環試験概念図を図 5.1.5-1 に示す。ラドン循環試験はグリムゼルテストサイトでの方法と基本的に同じ方法を適用する。試験方法は圧力保持が可能なボトルを用いて採水する。この方法により採水時のガス溶出を回避することが可能である。また、今フェーズの試験では、採水の直前のみ循環を行うことで、ラドン非発生区間によるラドン濃度への影響を低減した。さらに、循環流量が正確に把握可能なモーノ方式のポンプを使用した。採水ボトルは 2L 容量のものを 2 本と 1L 容量のものを 3 本用意し、これらの採水ボトルを予め地下水で満たし、バルブを閉じておき、採水時は、採水するボトルのみに地下水が通るようにボトル前後のバルブのみ開放し、採水ボトル内に地下水が循環するようにした。循環と採水は 1 カ月間に 4 回に分けて行い、1 回目から 3 回目までは各 2L (2L ボトル×1 本) の採水を、最後の 4 回目は 3L (1L ボトル×3 本) を採水した (図 5.1.5-2)。ラドン循環試験は、深度 300m のボーリング横坑と深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑において実施した。

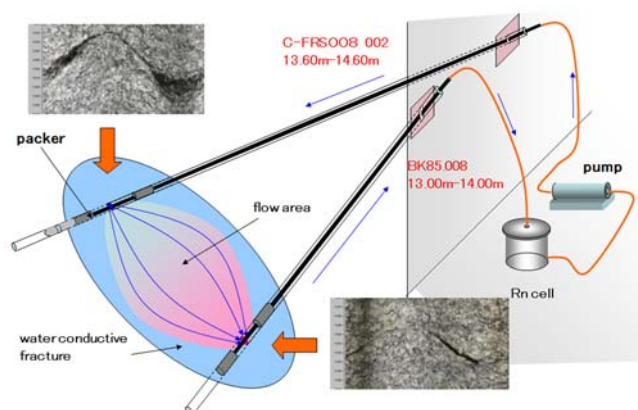
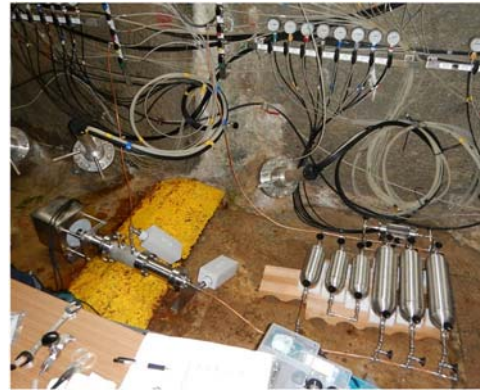
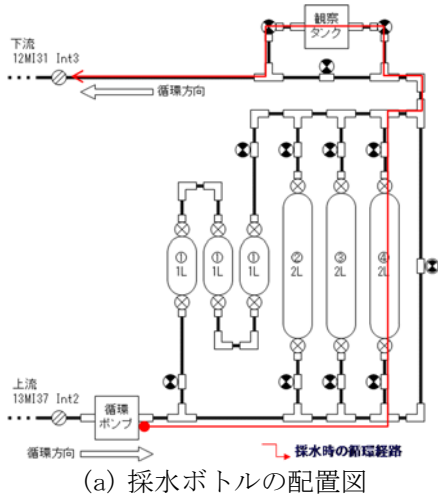


図 5.1.5-1 ラドン循環試験の概念図



(a) 採水ボトルの配置図

(b) 坑道に設置したポンプおよび採水ボトル

図 5.1.5-2 深度 300m のボーリング横坑におけるラドン循環試験装置の設置状況

(1) 深度 300m のボーリング横坑における割れ目開口幅の評価

対象となる割れ目は 13MI37 号孔-int2 と 12MI31 号孔-int3 を経過する水みちである。(図 5.1.5-3)。この割れ目は NW 走向の高傾斜で、高精度ボアホール TV の観察によれば、12MI31 号孔-int3 箇所の開口幅は 0.15mm である一方、13MI37 号孔-int2 では 0.7mm と大きく異なるが、水理的な連通性は確認されており、水みちと判断される。また、割れ目面上での両孔間の離間距離は 2.93m である(表 5.1.5-1)。循環試験では 13MI37 号孔-int2 から揚水し、12MI31 号孔-int3 へ注水した。循環試験では 1 カ月間に 4 回行い、毎回の循環の流量は 100~200cc/分、総量で 6~12L を循環させたところで採水した。この結果、230~279Bq/L のラドン濃度[Rn]が得られた。別途、室内試験で当該箇所のコアを用いて計測したラドンフラックス[F]は、対象箇所の割れ目に緑泥石が認められたことなどから、変質した岩石から得たラドンフラックスの 5.3×10^{-3} Bq/cm² の値を用いた。この結果から、以下のように 13MI37-int2 号孔と 12MI31-int3 号孔とを経過する水みち割れ目の開口幅[W]を 0.38mm~0.46mm と算出した。この値は、対象とする割れ目が平行平板状であり、均一に開口していることを仮定している。しかしながら、13MI37 号孔-int2 と 12MI31 号孔-int3 の高精度ボアホール TV の計測から、割れ目面で開口している箇所は割れ目全体の 66%である。したがって、実際の割れ目の開口幅は平行平板モデルを仮定して算出した開口幅より小さいと推測され、これを補正するために割れ目開口幅に開口率[R₀]を乗じて、平均割れ目開口幅[W^{*}]を得た。

- ラドン濃度 [Rn] : 230 Bq/L~279 Bq/L
- ラドンフラックス [F] : 5.3×10^{-3} Bq/cm²
- 割れ目間口幅 [W] : $2F/Rn=0.38\text{mm} \sim 0.46\text{mm}$
- 開口率 [R₀] : 0.66
- 平均割れ目間口幅 [W^{*}] : $[W] \cdot [R_0]=0.25\text{mm} \sim 0.3\text{mm}$

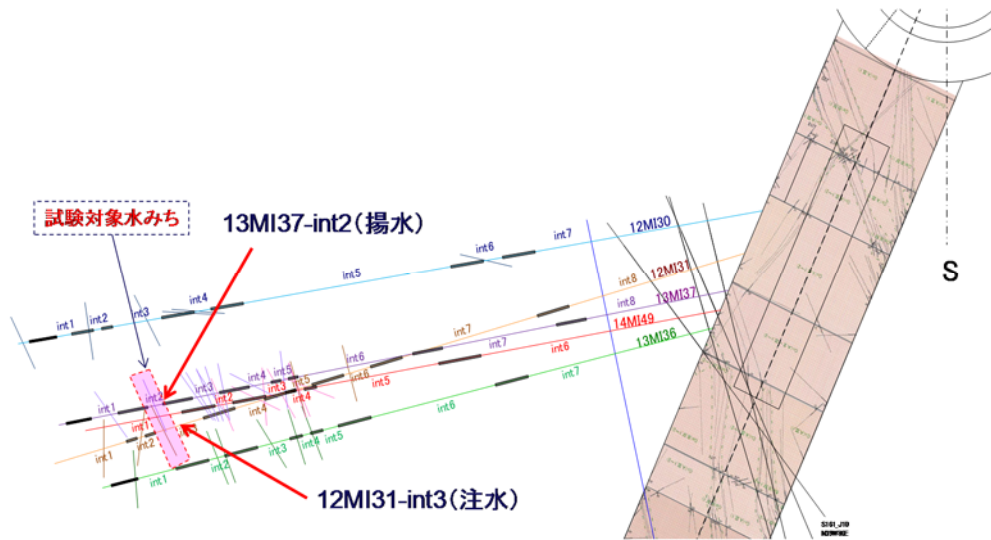


図 5.1.5-3 深度 300m ボーリング横坑におけるラドン循環試験対象割れ目と試験孔

表 5.1.5-1 深度 300m ボーリング横坑道のラドン循環試験対象割れ目の特徴

孔・区間	割れ目中心深度	開口幅 (BTV)	方向	交差距離
12MI31 号孔-int3	21.90m	N29° W88° E	0.15mm	2.93m
13MI37 号孔-int2	23.14m	N26° W80° E	0.70mm	

(2) 深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑における割れ目開口幅の評価

対象となる割れ目は深度 500m 研究アクセス南坑道の 15MI52 号孔-int4 と 15MI53 号孔-int4 とを交差する割れ目である。両孔における割れ目の方向はほぼ同じで、水理的な連通性も確認されている (図 5.1.5-4)。また、コア観察では顕著な変質はなく明瞭な充填鉱物も認められない。この割れ目は NW 走向の高傾斜割れ目で、高精度ボアホール TV の観察によれば 15MI52 号孔-int4 箇所開口幅は 0.19mm であり、15MI53 号孔-int4 では 0.4mm とやや異なる。また、割れ目面での両孔間の距離は 1.44m である (表 5.1.5-2)。循環試験では深度 300m ボーリング横坑に設置したのと同じ装置を使用した (図 5.1.5-5)。採水は 1 カ月間に 4 回行い、毎回の循環の流量は 200cc/分、総量で 37L を循環させて後に採水した。この結果、325~361Bq/L のラドン濃度 [Rn] を得た。別途、室内試験で当該箇所のコアを用いた得たラドンフラックス [F] は $5.5 \times 10^{-3} \sim 7.7 \times 10^{-3} \text{Bq/cm}^2$ の値を得ている。この結果から、以下のよう
に 15MI52 号孔-int4 と 15MI53 号孔-int4 とを交差する水みち割れ目の開口幅 [W] を 0.34mm~0.47mm と算出した。この値に高精度ボアホール TV の計測から得た開口率 [R₀] を乗じて、平均割れ目開口幅 [W] を 0.21mm~0.29mm と評価した。

- ・ ラドン濃度 [Rn] : 325 Bq/L~361 Bq/L
- ・ ラドンフラックス [F] : $5.5 \times 10^{-3} \text{Bq/cm}^2 \sim 7.7 \times 10^{-3} \text{Bq/cm}^2$

- ・ 割れ目間口幅 $[W]$: $2F/Rn=0.34\text{mm}\sim 0.47\text{mm}$
- ・ 開口率 $[R_0]$: 0.61
- ・ 平均割れ目間口幅 $[W^*]$: $[W]\cdot[R_0]=0.21\text{mm}\sim 0.29\text{mm}$

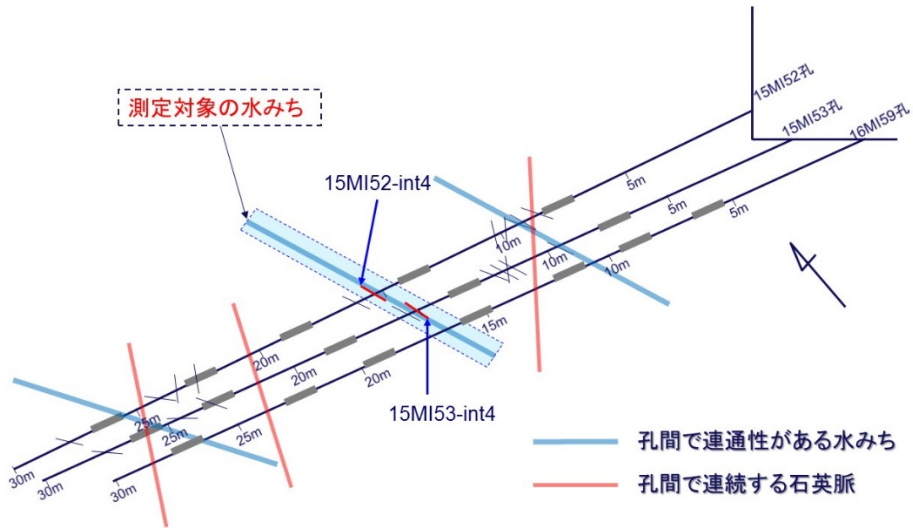


図 5.1.5-4 深度 500m 研究アクセス南坑道におけるラドン循環試験対象割れ目と試験孔

表 5.1.5-2 深度 500m 研究アクセス南坑道のラドン循環試験対象割れ目の特徴

孔・区間	割れ目中心深度	方向	開口幅 (BTV)	交差距離
15MI52 号孔-int4	15.35m	N17° W87° W	0.19mm	1.44m
15MI53 号孔-int4	15.08m	N22° W79° W	0.40mm	

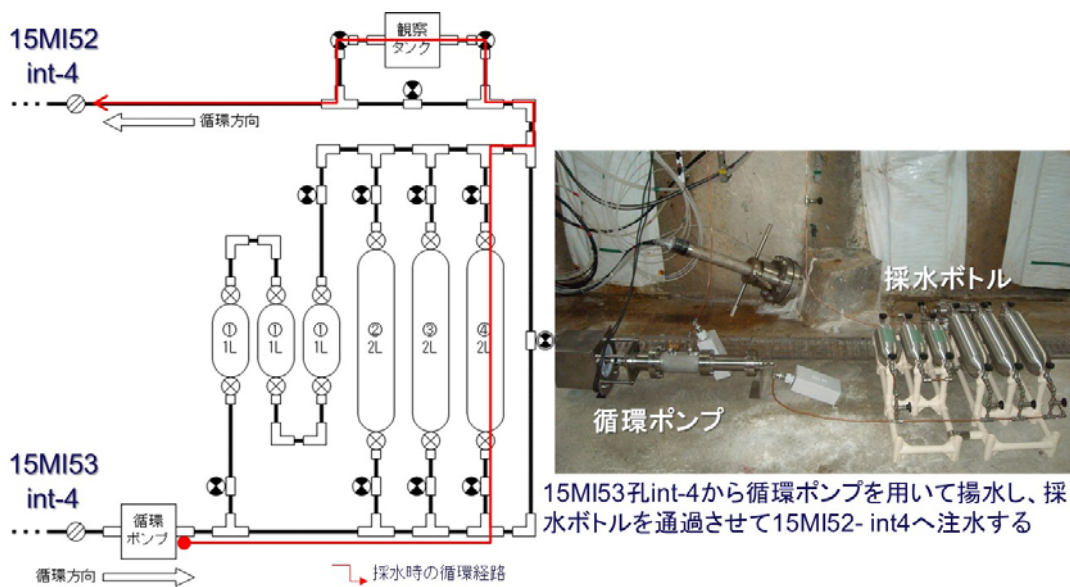


図 5.1.5-5 深度 500m 研究アクセス坑道ボーリング横坑におけるラドン循環試験装置の設置状況

(3) ラドン循環試験と他手法による割れ目開口幅の比較

ラドン循環試験の対象とした割れ目は、先に述べた高精度ボアホール TV のほか、トレーサー試験や高粘性流体試験によっても、割れ目の開口幅を評価している（表 5.1.5-3）。これらの手法による開口幅とラドンによる開口幅を比較した場合、計測方法が原理的にも異なる手段で算出したにもかかわらず、開口幅は概ね近い値が得られている。また、深度 300m ボーリング横坑についてはレジンの注入試験が実施されており、開口幅は 0.15mm と評価されている。この結果は高粘性流体試験の開口幅と近く、両手法とも高粘性流体を用いているためと考えられる。各手法には割れ目開口幅評価における不確実性が内在していることから、それぞれの精度の向上を目指すと同時に、手法間の相補的な手段として、ラドン循環試験による割れ目の評価手法として活用していくのが妥当と考える。

表 5.1.5-3 ラドン循環試験による開口幅と他の手法との比較

孔・区間	高精度 BTV	ラドン循環 試験	孔間トレーサー 試験	高粘性流体 試験	レジン注入 試験
12MI31 号孔-int3	0.15mm	0.25mm	0.30mm	0.19mm	0.15mm
13MI37 号孔-int2	～0.70mm	～0.30mm	～0.55mm		
15MI52 号孔-int4	0.19mm	0.21mm	0.13mm	0.06mm ～0.64mm	未実施
15MI53 号孔-int4	～0.40mm	～0.29mm			

5.1.6 瑞浪超深地層研究所全体のラドン濃度測定

瑞浪超深地層研究所の深度 200m、300m、400m、500m に分布する 9 つのボーリング孔の 19 区間の湧水が認められる区間から 2015 年度～2017 年度の 3 ヶ年に亘って採水を行い、ラドン濃度を計測した（図 5.1.6-1）。測定値の中には年度によって著しく低い濃度のデータがあり、脱ガスなどの影響で正しい値を示していないと考えられる。この脱ガスの影響と思われるデータを除くと、各ボーリング孔の採水区間のラドン濃度は、概ね 100Bq/L～450Bq/L である。深度 300m ボーリング横坑と深度 500m 研究アクセス南坑道のボーリングコアからそれぞれ得たフラックスは $5.3\sim 7.7\times 10^{-3}\text{Bq/cm}^2$ とした場合、1.5mm～0.1mm の割れ目開口幅の水みちが分布していると試算される。この試算は、採水を行った区間の割れ目の分布状況が不明なため、複数の割れ目が存在していても、各区間 1 本の割れ目として換算したものであり、また、採水区間の地下水中のラドンが放射平衡に達しているかも不明である。しかしながら、ボーリング掘削時に湧水する個々の割れ目のラドン濃度を計測していくような調査が可能であれば、割れ目の開口幅を推定することができる。掘削しながら採水するメリットは、湧水した地下水は、掘削直前まで放射平衡に達していたと見なすことが可能であり、その箇所のボーリングコアを用いてラドンフラックスを測定すれば、割れ目の幅を得ることができる。また、掘削後にモニタリングシステムを用いて、1 ヶ月以上間隔をあけて採水すれば、放射平衡に達した地下水と

見なすことができる。このような採水が概要調査で可能であれば、ボーリング掘削時やその後のモニタリングにより、精度の高い割れ目開口幅の推定を行うことが可能である。

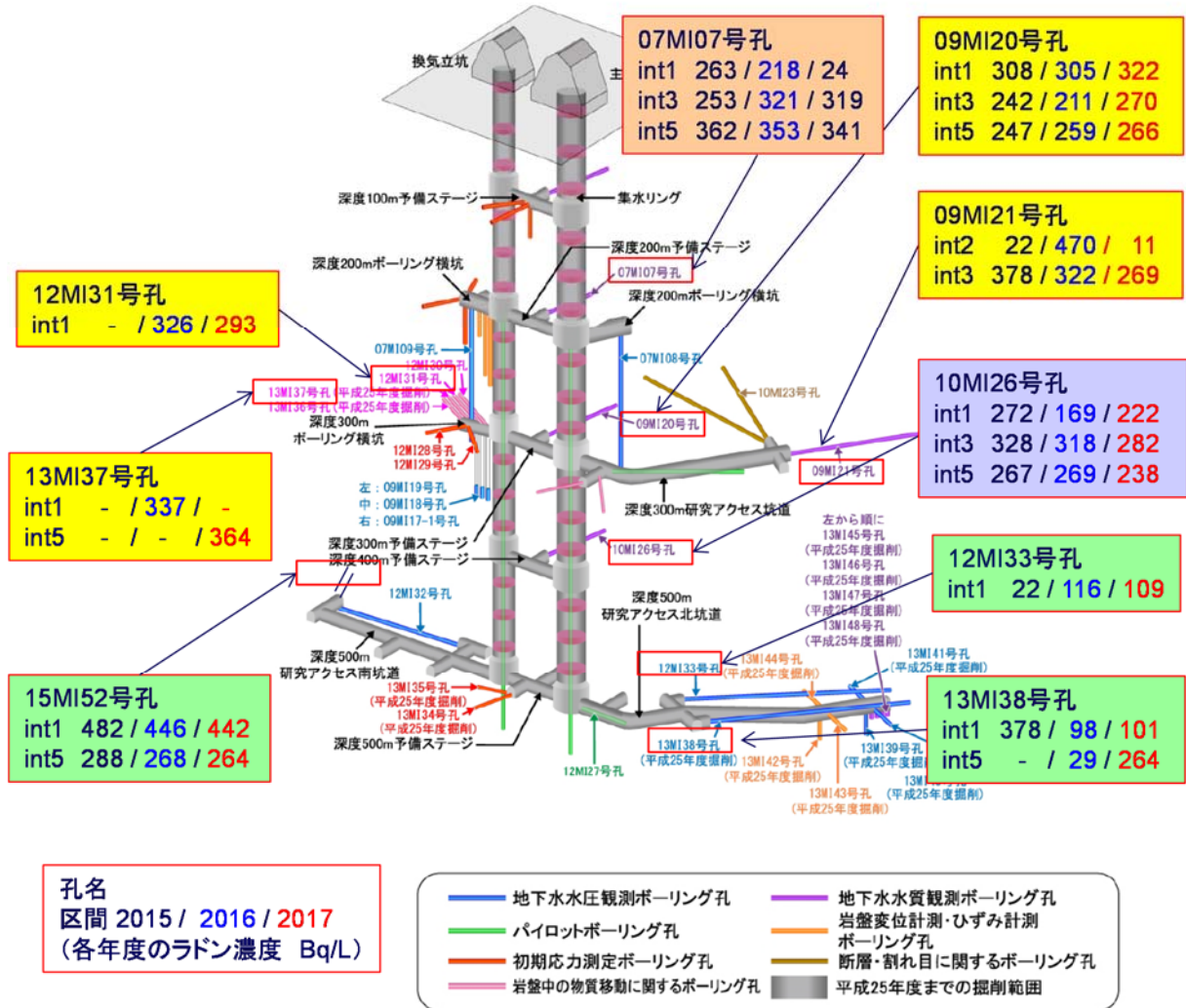


図 5.1.6-1 瑞浪超深地層研究所全体原位置ラドン濃度測定箇所と測定値

5.1.7 まとめ

割れ目の開口幅の推定方法として、水理試験による方法や、ボアホール TV による計測とは異なる方法として、ラドン濃度による方法を開発している。これまで、グリムゼルテストサイトで手法の適用を確認したが、我が国の地質および地下水環境での手法の適用性を確認するために瑞浪超深層研究所への適用を行った。今フェーズでは深度 300m ボーリング横坑の 12MI31 号孔-int3 と 13MI37 号孔-int2 とを経過する水みち割れ目および、深度 500m 研究アクセス南坑道においてラドン 15MI52 号孔-int4 と 15MI53 号孔-int4 を経過する水みち割れ目をラドン循環試験によって開口幅を評価した。ラドン循環試験に際しては、それぞれ原位置試験箇所のボーリングコア試料を用いてラドンの発生試験を行い

ドンのフラックスを測定した。深度 300m ボーリング横坑のボーリングコアから得たラドンフラックスは $5.3 \times 10^{-3} \sim 5.7 \times 10^{-3} \text{Bq/cm}^2$ であり、深度 500m 研究アクセス南坑道は $5.48 \sim 7.70 \times 10^{-3} \text{Bq/cm}^2$ であった。ラドン循環試験は両箇所ともに約 1 カ月の間に 4 回循環試験を行い、その都度、採水を行った。深度 300m ボーリング横坑での循環試験では 230 Bq/L \sim 279 Bq/L のラドン濃度であり、深度 500m 研究アクセス南坑道の循環試験では 325 \sim 361Bq/L のラドン濃度を得た。以上のラドンフラックスならびに循環試験によるラドン濃度から、高精度ボアホール TV による開口率を考慮して算出した開口幅は、深度 300m ボーリング横坑の 12MI31 号孔-int3 と 13MI37 号孔-int2 を経過する水みち割れ目で 0.25mm \sim 0.30mm と評価した。また、深度 500m 研究アクセス南坑道の 15MI52 号孔-int4 と 15MI53 号孔-int4 を経過する水みち割れ目では 0.21mm \sim 0.29mm と評価した。ラドン循環試験による開口幅は、他の手法のと近い値が得られており、相補的にラドン循環試験の適用性について確認をすることができた。

瑞浪超深地層研究所の深度 200m から 500m までのボーリング孔の湧水が認められる区間から 2015 年度 \sim 2017 年度の 3 ヶ年に亘って採水を行い、ラドン濃度を検討した。脱ガスの影響と思われる著しく濃度の低いデータを除くと、各ボーリング孔の採水区間のラドン濃度は、概ね 100Bq/L \sim 450Bq/L であった。深度 300m ボーリング横坑と深度 500m 研究アクセス南坑道のボーリングコアから得たフラックス $5.3 \sim 7.7 \times 10^{-3} \text{Bq/cm}^2$ を使用した場合、1.5mm \sim 0.1mm の割れ目開口幅の水みちが分布していると試算される。この試算は、採水を行ったボーリング箇所の割れ目の分布状況などを確認していないため、複数の割れ目が存在していた際は、割れ目開口幅を合算したものとなる。しかしながら、採水箇所の水みちの位置情報やボーリングコアの状況、掘削時からのラドン濃度の変化のデータが得られれば、より精度の高い割れ目開口幅の推定に役立ち、概要調査への適用が可能であると考えられる。

5.2 高粘性流体注入試験技術の開発

5.2.1 背景及び目的

割れ目の幅や流れの次元は、割れ目内のトレーサーの移行を評価するうえで非常に重要な情報である。これら进行评估するために、高粘性流体の注入による評価方法を開発している(長谷川ほか、2007, 2015)。これは、地盤内に高粘性流体を一定流量で注入し、注入時の圧力応答から割れ目の幅や流れの次元を評価する方法である。図 5.2.1-1 に示すように、割れ目内の流路が一次元的な場合には、高粘性流体の到達距離は時間とともに線形的に増加するため、高粘性流体の注入圧力も線形的に増加する。また、二次元的な場合には、到達距離の増加は時間とともに少なくなるため、高粘性流体の注入圧力の増加も時間とともに低下し、対数関数的になる。さらに、流路や割れ目幅が小さければ、高粘性流体の到達距離が遠くなるため、圧力の増加率は大きくなる。高粘性流体注入試験は、単孔で実施でき、圧力を観測するだけなので比較的簡易に原位置で実施できる。さらに、高粘性流体が到達すると流動抵抗が水に比べて大きく圧力が増加するため、観測孔での圧力観測により高粘性流体の到達を確認することができ、割れ目の広がりを確認することができる。

この高粘性流体試験を、トレーサー試験を実施した瑞浪超深地層研究所の深度 300 m ボーリング横坑と深度 500m 研究アクセス南坑道奥において実施した。ここでは、これらの結果から推定される割れ目モデルと割れ目の幅について整理した。

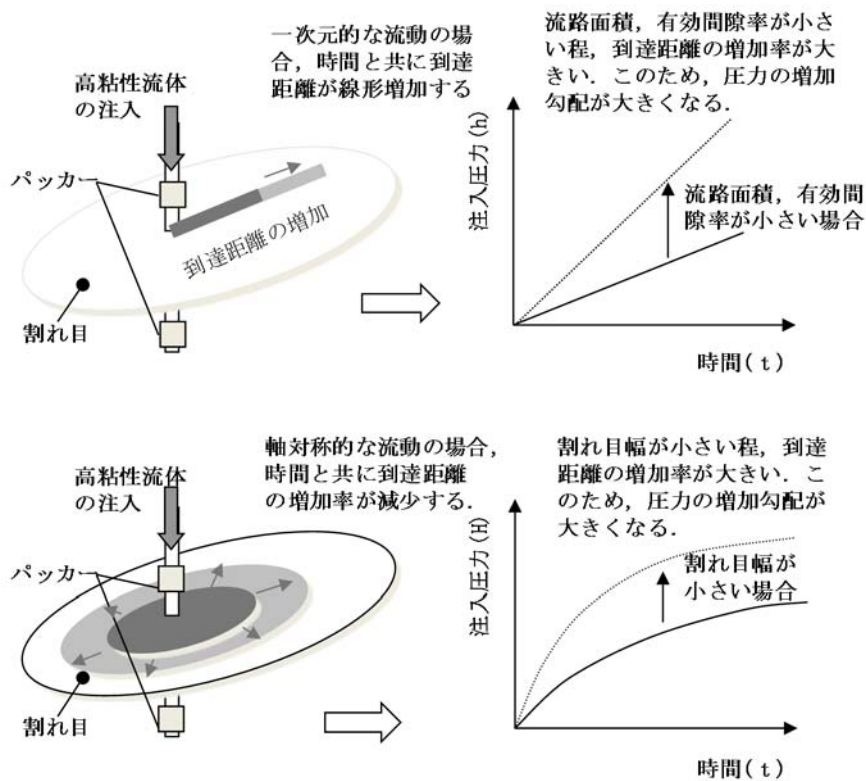


図 5.2.1-1 高粘性流体注入試験の評価方法概念図

5.2.2 試験結果

(1) 深度 300 m ボーリング横坑

本地点では、2 回の高粘性流体試験とその前後に計 3 回の透水試験を実施した。1 回目の高粘性流体試験は、100 cP、70 ml/min の注入し、有効圧力が 0.2 MPa 程度と予想の 1/10 程度であったため、2 回目の試験では、70 cp、140ml/min で、粘性はやや低く、流量を 2 倍にして試験を実施した。この結果を図 5.2.2-1 に示す。観測区間については、圧力変化が大きかった 12MI30 号孔 Int2 と Int3、12MI31 号孔 Int1 と Int2 を図化した。注入区間での圧力と一緒に示すと圧力応答が不明確なため、観測区間の圧力については拡大図もあわせて示した。

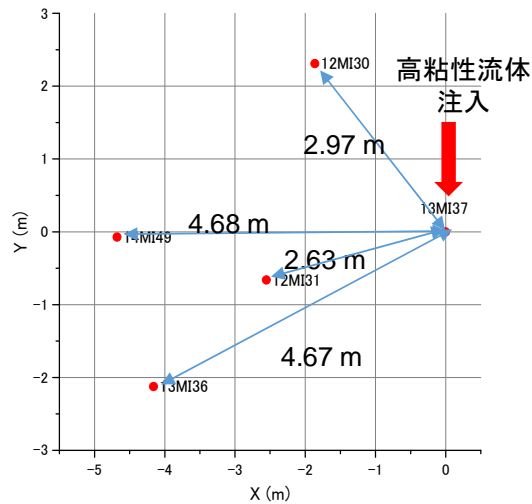
注入圧力は、時間軸を対数にすると 4 ヶ所で直線近似できる。対数軸で直線になることは透水係数が一定であることを意味しており、透水係数が 4 段階で変化していると考えられる。これは、割れ目内で透水係数が変化している、あるいは、割れ目ネットワーク的な流れで割れ目の透水係数が変化している可能性がある。また、観測区間の圧力は、12MI30 号孔 Int2 と Int3、12MI31 号孔 Int2 に有意な圧力上昇が表れている。これらは高粘性流体の到達の影響と考えられる。観測孔での圧力応答から、同心円状に単一割れ目に広がったと仮定すると、割れ目幅は 12MI30 号孔 Int2 で 0.22 mm、12MI30 号孔 Int3 で 0.11 mm、12MI31 号孔 Int2 で 0.18 mm と推定できる。ただし、実際には高粘性流体は複数の割れ目を通して流れているため、割れ目幅はさらに狭くなると考えられる。

(2) 深度 500m 研究アクセス南坑道奥

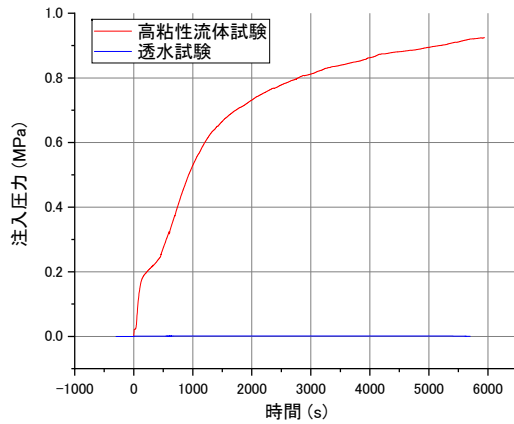
本地点では、2 回の高粘性流体試験とその前後に透水試験を実施した。1 回目の高粘性流体試験は、42 cP、10 ml/min で注入し、有効圧力が 0.2 MPa 程度と予想の 1/10 程度であったため、2 回目の試験では、粘性はやや低く (32cp)、流量を 4 倍の 40 ml/min として、試験を実施することとした。この結果を図 5.2.2-2 に示す。

注入圧力は、前述のように時間軸を対数で整理すると、3 段階で透水量係数が変化する結果が得られた。この注入孔での注入量と透水量係数の変化から、単一割れ目と複数割れ目のモデルを想定すると図 5.2.2-3 のように表すことができる。ここでは割れ目幅は透水量係数の 3 乗則で推定している。

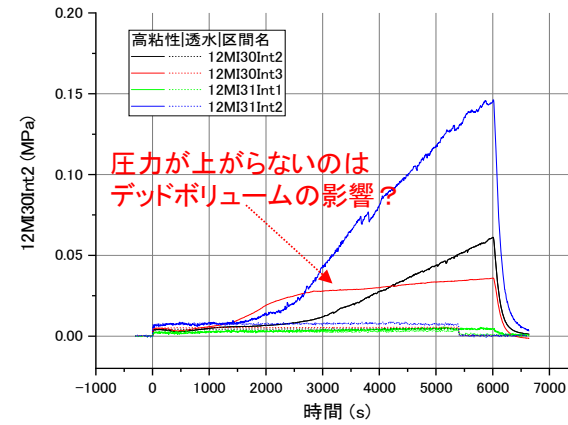
観測孔での圧力応答は、区間のデッドボリュームが大きく有意ではないが、15MI52 号孔 int4 と 16MI59 号孔 int4 で応答があるように見える。また、高粘性流体に入れたトレーサーの到達からは、両区間とも高粘性が到達していると推定された。このため、到達時間に幅をもって割れ目幅を推定し、15MI52 号孔 int4 で 0.061~0.51 mm、16MI59 号孔 int4 で 0.040~0.33 mm が得られた。推定した割れ目幅の最小値は、透水量係数から割れ目幅の 3 乗則で求めた割れ目幅とほぼ一致する。



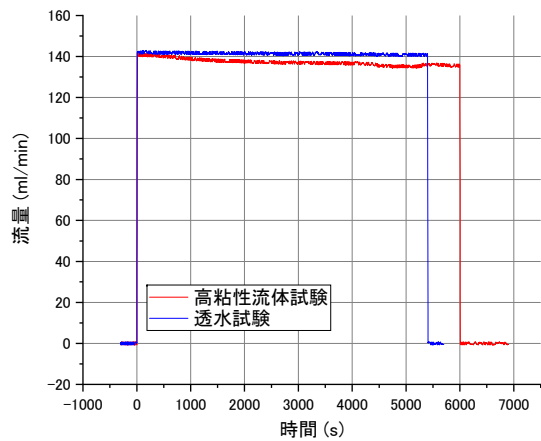
(1)対象割れ目でのボーリング孔配置



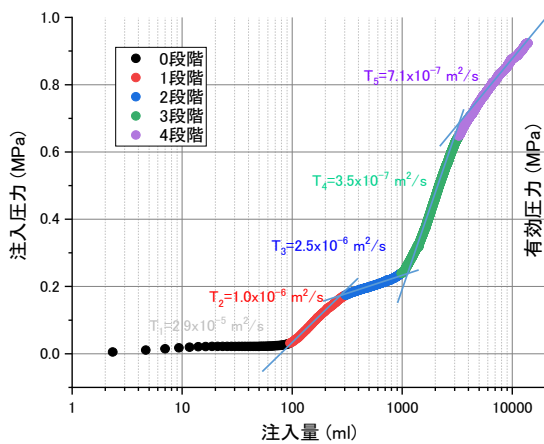
(3)注入圧力の時間変化



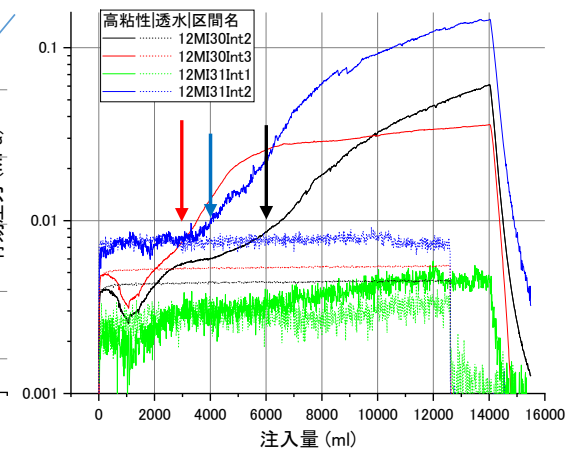
(5)観測孔での圧力応答の時間変化



(2)注入流量の時間変化



(4)注入圧力から求めた透水量係数の変化



(6)観測孔での圧力応答の時間変化

図 5.2.2-1 深度 300 m ボーリング横坑高粘性流体注入試験結果 2 回目 (70 cp, 140 ml/min)

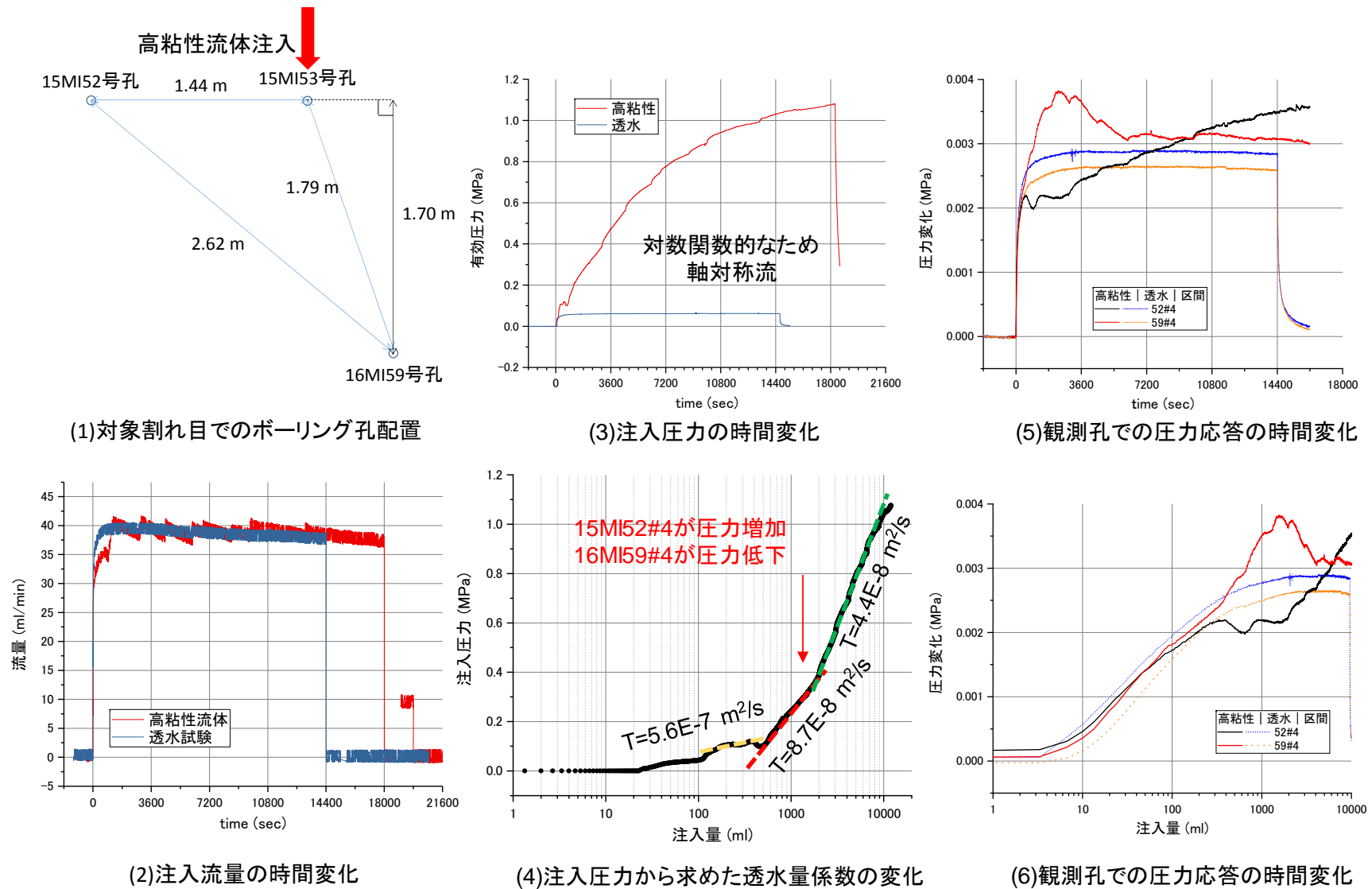


図 5.2.2-2 高粘性流体注入試験結果 2回目(32 cP、40 ml/min)

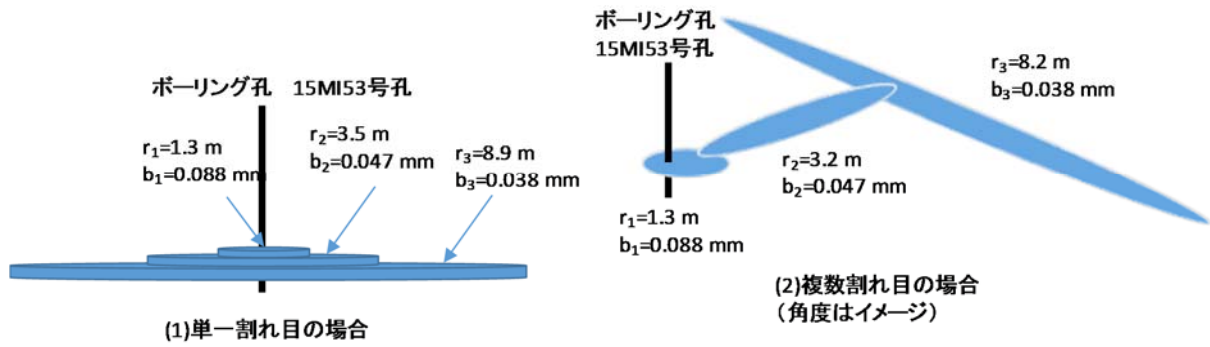


図 5.2.2-3 深度 500m での想定された割れ目モデル

5.2.3 まとめ

高粘性流体注入試験は図 5.2.3-1 に示す手順で実施した。高粘性の流体を注入区間に注入し、注入区間の圧力応答と観測区間での圧力応答から、割れ目の幅や広がり进行评估する。このため、高粘性流体の注入によって発生する圧力応答やその広がり可能な限り有意にするために、できるだけ多い流量で注入する必要がある。注入条件を決定した後、高粘性流体試験と同程度の注入量で透水試験を実施しておく必要がある。これは、周辺孔での圧力応答を観測する場合、高粘性流体試験時と透水試験時との圧力応答の変化から、高粘性流体の到達を確認することができるためである。また、高粘性流体の到達を確認するため、観測区間などからサンプリングをしておくことも効果的である。さらに、高粘性流体注入試験の再現性を確認する意味で粘性や流量を変えて複数回実施することが好ましい。最後に透水試験を実施しておくことも、透水係数場に変化がないことを確認するうえで重要である。

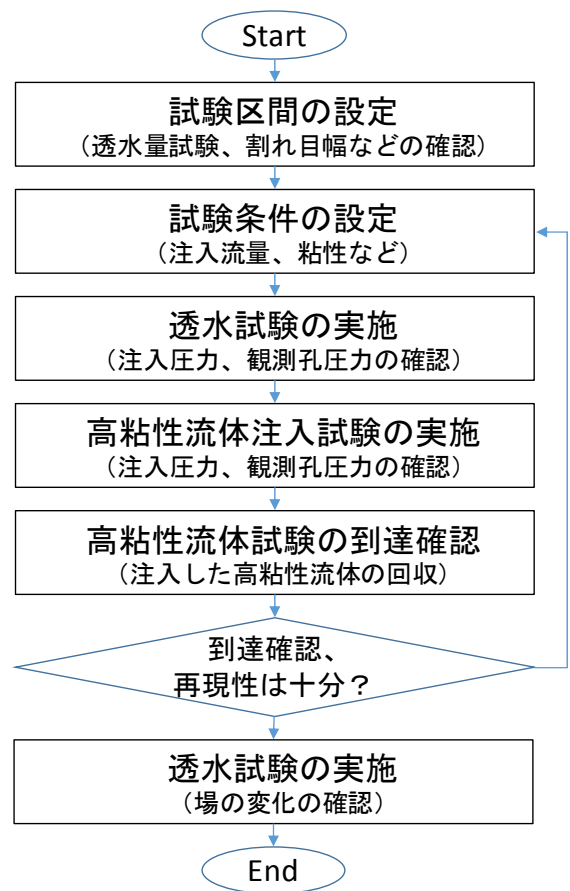


図 5.2.3-1 高粘性流体注入試験の手順

5.3 割れ目の可視化技術の開発

5.3.1 はじめに

前フェーズでは割れ目の分布が比較的単純なスイスのグリムゼル試験場 (GTS: Grimsel Test Site) において割れ目の可視化技術 (原位置レジン注入試験) の適用性試験を実施し、その有効性を示した。

その結果を踏まえて本フェーズでは、国内の試験場での適用性試験に向けて、まず始めに注入剤 (レジン, 蛍光剤) の選定と装置の試作を行った。最終年度は JAEA 瑞浪超深地層研究所の深度 300m の適用性試験場において原位置試験を実施し、国内の地質環境に対する本技術の適用性を実証した。

5.3.2 原位置レジン注入試験の概要

5.3.2.1 原位置レジン注入試験の目的

本事業では、トレーサー試験技術の高度化、高精度化と併せて、トレーサー試験、溶存ラドン濃度計測、高粘性流体注入試験により割れ目幅を推定する手法を開発している。しかしながら、これらの手法で推定された割れ目幅が本来複雑な構造である割れ目の特徴を反映したものかを判断することは難しいため、割れ目幅を直接観察する手法によって確認するほかないものと考えられる。

原位置レジン注入試験は、第一に上記の目的を達成するために実施される試験であり、割れ目内に二液混合型のエポキシ樹脂系接着剤 (レジン) を充填・固化させた後、ボーリング掘削 (確認ボーリング) を行うことにより原位置そのままの状態での割れ目を直接観察することができる。

第二の目的は、水みち割れ目 (放射性核種の移行経路) の構造を三次元的に明らかにすることにある。第三の目的は、鉱物学的・地球化学的分析に基づいた割れ目内充填鉱物や割れ目周辺母岩の地質構造や変形構造の詳細な分析から、割れ目の形成・活動履歴とその長期的挙動を理解することにある。

5.3.2.2 原位置レジン注入試験装置

無脈動・定量移送が可能な 2 台のモノポンプとスタティックミキサーを組合せた原位置レジン注入試験装置を試作した (図 5.3.2-1)。

最大の特徴は、主剤と硬化剤を所定の混合比で正確に計量しミキサーで均一に混合させた後、岩盤割れ目に高品質の混合液を連続注入できるため、注入作業を高精度かつ効率的に行えることにある。

本装置で制御できる流量 (吐出量) は 25.3 g/min~133 g/min であり、5MPa の耐圧性能を有する。また、割れ目幅の急激な変化などによる圧力変化 (圧力上昇) に瞬時に対応可能である (吐出圧力の設定した値以上に上昇しないように流量を制御)。その他にも安全に操作するための機能が随所に組み込まれている。



図 5.3.2-1 原位置レジンを注入試験装置

5.3.2.3 注入材と蛍光剤

原位置レジンを注入試験で用いる注入材（レジン）は、0.1 mm オーダーの幅を有する岩盤割れ目に対して広範囲に注入できる浸透性と作業時間の制約を受けにくい可使用時間を持つことが性能として第一に求められる。

これらの性能を満足するレジンとして「エバーボンド EP-400M（ダイフレックス・日本シーカ）」を選定した。水の約 130 倍の粘性を有し、可使用時間（ポットライフ）は約 80 分である。また、湿潤面でも硬化するため水に対してある程度の耐性を有する。

割れ目の可視化では、0.1 mm 以下の微細な割れ目も観察対象であるため、この微細な割れ目を識別しやすくするためにレジンに蛍光剤を添加する。

蛍光剤は蛍光顔料を反応性希釈剤に添加した液状のもの（R-ZE ブラビンイエロー、ブレニー技研）を選定した。主剤に混合しやすく、水と接触した際にレジンから蛍光剤が分離しないことが特徴である。また、反応性希釈剤は分子中にエポキシ基を 1 個もつモノエポキサイドで、硬化時の化学反応により分子中に取り込まれるため、蛍光剤添加によるレジン本来の性能低下を低く抑えることができる。

本フェーズでは、選定したレジンと蛍光剤が試験環境などにより本来の性能からどの程度変化するのかを把握するために表 5.3.2-1 に示す検討を行った。

表 5.3.2-1 レジン特性試験の目的と結果

検討項目	目的	結果
粘度	注入時の流量を決定するため	蛍光剤（約 20cP）添加の影響で若干低下する。ただし原位置試験では低下分を考慮する必要がなく、主剤に対する蛍光剤の添加量が 2%であればカタログ値で代用できる。
可使時間	注入可能な最小の時間を把握し、注入時の流量や注入範囲などの注入計画を策定するため	可使時間が短くなる傾向が確認された。単一割れ目への注入では測定結果を受けて注入計画を策定する必要があるが、広範囲に注入させることを優先すると、注入圧力の上限値を大きく設定しなければならないことに注意が必要である。
付着力	塩分による付着力低下を把握するため	塩分の影響により界面剥離を起こすケースが見られた。このことは接着を阻害する因子が界面（接着面）に存在することを示唆している。ただし、原位置で採取されたレジン充填コアでは付着力の変化によって生じた剥離は確認されなかったため、瑞浪地下水の塩分であれば塩分の影響は小さいものと判断される。
硬度	レジン充填コア加工時の耐性を把握するため	蛍光剤添加による硬度低下が確認された。ただし、その低下率は小さく、研削等の加工に耐えうると判断した。

5.3.2.4 レジンの注入区間

レジン注入区間は、過去にトレーサー試験を行った実績のある区間から選定した。レジン注入の順序は表 5.3.2-2 に示すとおりであるが、1 回目の注入は 13MI37 号孔の区間深度で実施し、2 回目以降は水理地質学的に連通性が確認された 12MI31 号孔の 2 区間からレジンを注入した。

表 5.3.2-2 レジン注入区間

孔名	区間深度 (mabh)	走向傾斜 (割れ目中心深度)	透水量係数 (m ² /s)	注入順序
13MI37 号孔	22.72 - 23.33	N26W/80E (23.14 mabh)	1.14×10 ⁻⁶	1
		N18W/86E (22.97 mabh)		
12MI31 号孔	21.57 - 22.18	N29W/88E (21.09 mabh)	6.93×10 ⁻⁸	2
	22.41 - 23.03	N8E/22E (22.74 mabh)		3

5.3.3 レジン充填確認用のボーリング孔の掘削

割れ目内のレジンの充填状況を確認するために、孔径 116 mm、コア径 95 mm のボーリング孔を 3 本掘削した。図 5.3.3-1 にレジン注入対象割れ目上でのボーリング孔の交差位置を示す。

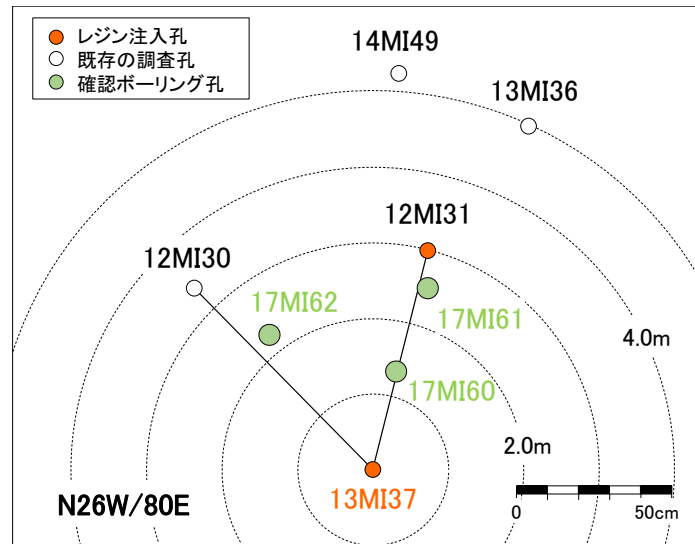


図 5.3.3-1 対象割れ目上でのボーリング孔の交差位置

5.3.4 対象割れ目へのレジン充填状況の確認

レジンの充填は 3 孔で計 13 箇所確認された。13 箇所のうち 6 箇所は割れ目面が完全に密着した状態であり、残りの 7 箇所は割れ目面の一部にレジンが付着し割れ目が分離した状態であった。

割れ目面が密着していたレジン充填割れ目と既存孔で確認されていた主要な開口割れ目の位置関係を図 5.3.4-1 に示す。

この図は 12MI30 号孔の孔口座標を原点としてプロットしたものであり、既存孔に関連したものを黒色で、新規孔（確認ボーリング）に関連したものを赤色で示している。

平面図（割れ目の走向分布）中央に位置する割れ目分布から、レジンの移行経路が屈曲した経路（13MI37 号孔/N26W80E→17MI61 号孔/N29E80W→12MI30 号孔/N29W86E）であることが読み取れる。一方、断面図（割れ目の傾斜分布）の中央付近に位置する割れ目分布から、深度方向ではレジンの移行経路が比較的連続した経路であることが読み取れる。

17MI62 号孔の掘削深度 24.38 mabh で確認された割れ目（N31W82SW）へのレジンの移行経路は、図から確認することはできないが、17MI60 号孔と 17MI62 号孔との間に NW 走向低角度傾斜の割れ目が存在して、17MI62 号孔の掘削深度 24.38 mabh で確認された割れ目（N31W82SW）にレジンが移行したことも考えられる。

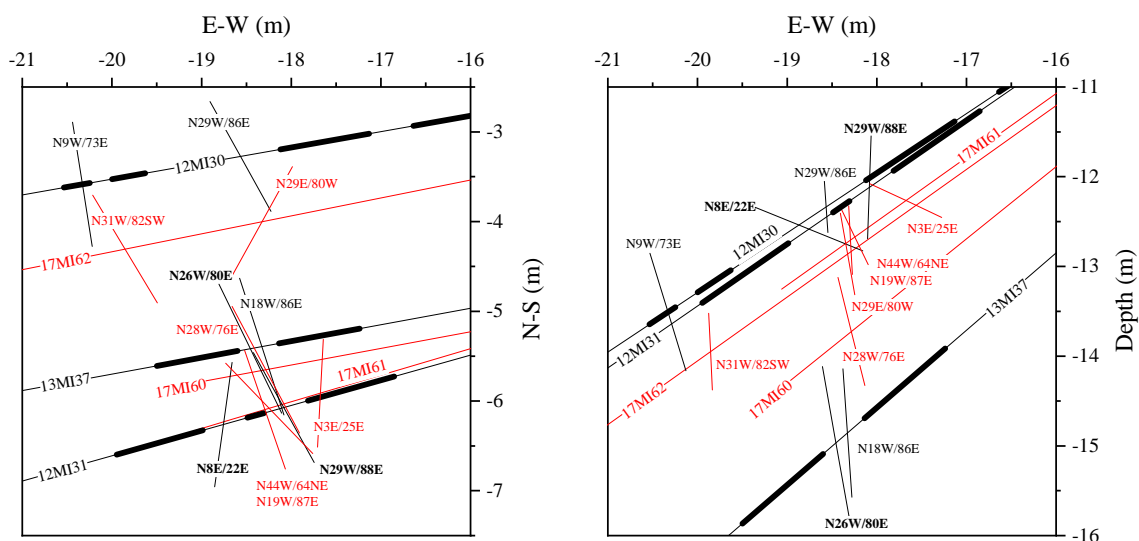


図 5.3.4-1 レジン注入孔周辺の割れ目分布の平面図（左）と断面図（右）

5.3.5 レジン充填割れ目の可視化

レジン充填割れ目に対して、高解像度 BTV 検層、X 線 CT 法、逐次研削法（連続研削・撮影）、薄片観察を適用してレジン充填割れ目の可視化を行った。その結果、原位置レジン注入試験により 30 μ m 程度（それ以下の可能性もある）の割れ目にレジンが充填されていることが確認された。

逐次研削法で得られた研削面画像からレジン充填幅（割れ目開口幅）を測定した結果を図 5.3.5-1 に示す。左側の図（17MI60 号孔）は原位置でレジンを充填させたものであり、右側の図（12MI31 号孔）は室内でレジンを充填させたものである。

17MI60 号孔のレジン充填幅の平均値は 0.15 mm であり、高粘性流体注入試験で推定された値に近いものであった。また、レジン充填幅が大きな領域が線状の構造をなして分布しており、その領域の平均値は 0.33 mm であった。この値はトレーサー試験やラドン濃度計測で推定された値に近いものであった。線状構造のうち画像の左上から右下に分布しているものは 12MI31 号孔が存在する方向を向いており、12MI31 号孔と 13MI37 号孔との間で有意な水圧の応答があったことと整合する。

12MI31 号孔のレジン充填幅の平均値は 0.07 mm であった。一部レジン充填幅が大きな領域が存在するが、割れ目の形状は直線的で平らなものに区分される。レジン充填幅分布の紫色で示した箇所は、幅の小さな領域あるいはレジンが充填されていない領域である。レジンが充填されていない領域の割合、すなわち閉塞率は約 27% であった。この区間での透水量係数 (6.9×10^{-8}) が小さかったことと整合する。

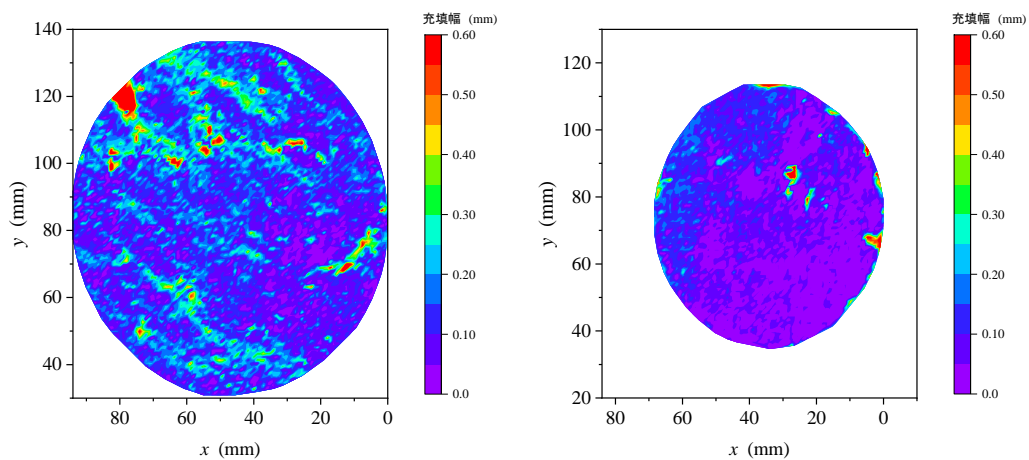


図 5.3.5-1 割れ目開口幅分布（左：17MI60 号孔/N28W76E、右：12MI31 号孔/N29W88E）

5.3.6 まとめ

本フェーズで開発した原位置レジン注入試験装置が、ネットワーク状に発達した割れ目に対してレジンを効果的に注入できることを、原位置において確認した。

レジンの充填は3孔で計13箇所確認された。13箇所のうち6箇所は割れ目面が完全に密着した状態であり、残りの7箇所は割れ目面の一部にレジンが付着し割れ目が分離した状態であった。

割れ目面が密着していたレジン充填割れ目と既存孔で確認された主要な開口割れ目の位置関係を孔跡平面図および孔跡断面図にプロットしたところ、平面図（割れ目の走向分布）では、割れ目の屈曲構造が形成されていることが確認できた。一方、断面図（割れ目の傾斜分布）では、高傾斜の割れ目が連続して分布していることが確認できた。以上の結果から、割れ目面が完全に密着した状態の割れ目を抽出すれば、地下水が選択的に流れる経路を把握することが可能であると考えられる。

レジン充填幅（割れ目開口幅）の平均値は、高粘性流体注入試験で推定された値に近いものであった。また、レジン充填幅分布中に充填幅が大きな領域が線状の構造をなして分布しており、その領域の平均値がトレーサー試験やラドン濃度計測で推定された値に近いものであった。レジン充填幅分布の特徴が割れ目探査技術で推定された割れ目幅の特徴を捉えているとするならば、レジン注入試験による割れ目構造の直接観察なしに、ラドン濃度計測、高粘性流体注入試験といった速報性の高い手法で水みち割れ目の構造を捉えることが可能であると考えられる。

5.4 各種割れ目探査技術の室内比較試験

5.4.1 背景および目的

これまでに割れ目探査技術として、原位置でボアホールテレビ、透水試験、トレーサー試験、高粘性流体注入試験、ラドン濃度計測、レジン注入試験などを検討してきた。しかしながら、原位置では様々な制約条件により、それぞれの調査結果を十分に比較することができない。このため、室内において、割れ目幅や境界条件が明確な状態で各種試験を行い、それぞれの評価結果やその特性を比較した。

5.4.2 試験モデル

実験モデルには、図 5.4.2-1 に示すように、一次元の割れ目モデルを用いた。一次元の割れ目モデルは、棒状の岩石の上に、厚みが一定のステンステープを置き、その上にアクリル板を設置して、割れ目を模擬した。岩石とアクリル板の固定には、万力を用いた。

岩石には、 $100 \times 100 \times 1200$ mm の岩石を用いた。長さは、透水試験などを実施する際に 1 m の流路長が稼げるようにするため、1200 mm とした。幅と厚みの 100 mm は、ラドンフラックスの試験において、フラックスが変化しなくなる厚みから設定した。アクリル板で流路 (50×1000 mm) を設定し、ステンステープの厚みで割れ目幅を設定した。



図 5.4.2-1 一次元モデルの写真

5.4.3 試験方法

前述の試験モデルを用いて試験を実施した。試験は、透水試験、高粘性流体試験、トレーサー試験、ラドン濃度計測、レジン注入の順で実施した。透水試験、高粘性流体試験、トレーサー試験、レジン注入試験は同じ試験装置を用いて実施したが、ラドン濃度計測については、アクリル板ではラドンが漏出してしまうため、上板をステンレスに変更して実施した。これらの試験方法と評価方法を以下に示す。

(1) 透水試験

透水試験は、図 5.4.3-1 に示すように試験装置に一定流量で水を注入し、圧力の安定を確認した後、流入口と流出口の水頭差を計測することによって実施した。

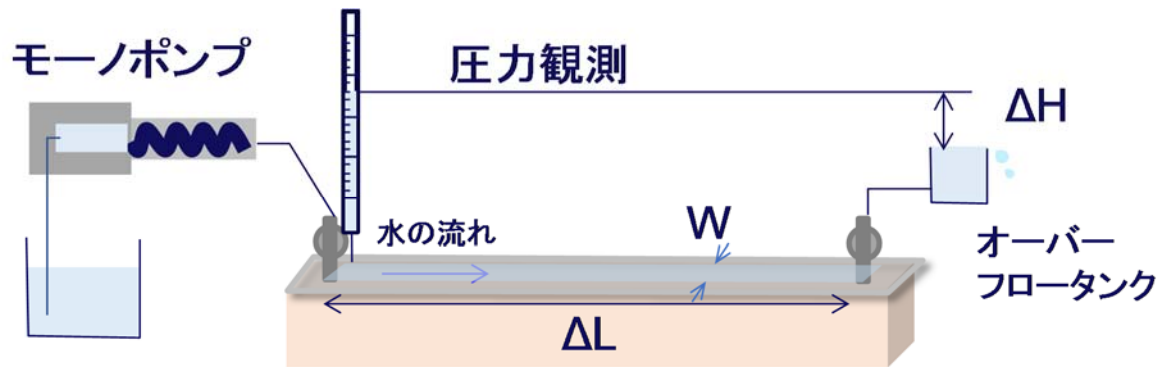


図 5.4.3-1 一次元モデルでの透水試験の概念図

(2) 高粘性流体注入試験

高粘性流体注入試験は、5.2 で示したように、割れ目に粘性の高い流体を注入することにより、流れの次元や割れ目幅を評価する方法である。この方法は、図 5.4.3-1 に示すように、割れ目に粘性の高い流体を一定流量で注入することにより、高粘性流体の流動によって注入圧力が変化するとして、割れ目幅を評価する（長谷川ほか、2007）。

一次元モデルでの高粘性流体試験の概念図を図 5.4.3-2 に示す。

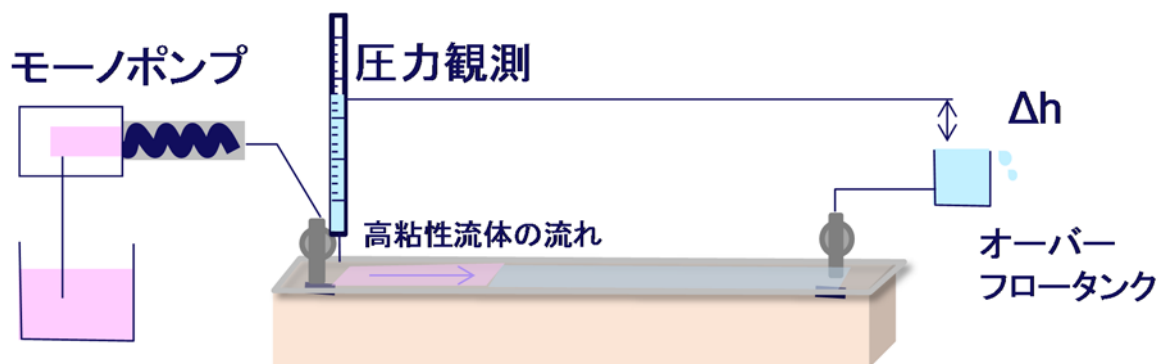


図 5.4.3-2 一次元モデルでの高粘性流体注入試験の概念図

(3) トレーサー試験

トレーサー試験では、割れ目にトレーサーを投入することにより、その到着時間から割れ目幅を評価する方法である。トレーサーの到達と割れ目幅の関係は次式で表すことができる。

トレーサーは割れ目内を移行するため、分散現象によってピークが正規分布状になるが、投入時の中間時間に対して、到達のピークが出た時間が到達時間となる。

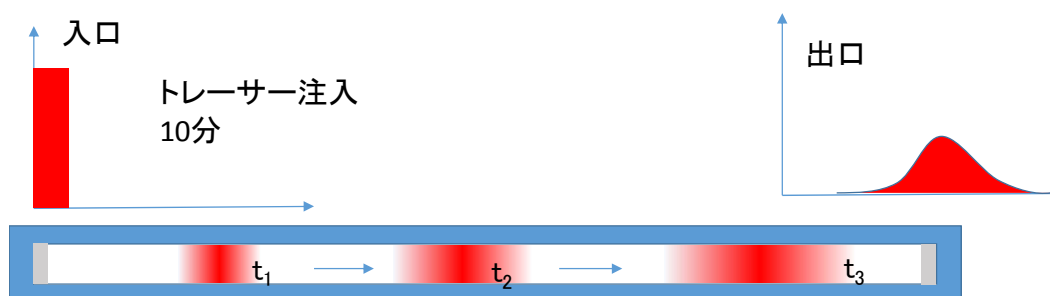


図 5.4.3-3 トレーサー注入時の到達時間の概念図

(4) ラドン濃度計測

ラドン濃度計測による割れ目幅の評価は、5.1に示したように、水中のラドン濃度とラドンフラックスの関係から割れ目幅を推定する方法である。このため、ラドンフラックスの測定とラドン濃度計測の両方を実施した。

前述の試験装置(図 5.4.2-1)では装置からラドンが漏洩している可能性が示唆されたため、ラドンの漏洩を抑制する目的で、図 5.4.3-4 に示すように岩石をステンレス容器に入れると共に、岩石の上板にも鉄板を用いた。さらに、上板の鉄板とステンレスはアルミテープを用いてシールし、オーリングではラドンが抜ける可能性があるため、鉛線をシール材に用いた。岩石と上板の鉄板の間にステンステープをおいて割れ目幅を設定し、これを万力で締めることにより割れ目幅を設定した。

ラドンフラックスの計測は、図 5.4.3-5 に示すように、RAD7 (DURRIDGE Company)を用いて、割れ目内と RAD7 間でガスを循環し、ラドン濃度を計測することにより求めた。



図 5.4.3-4 ラドン濃度計測のための装置写真

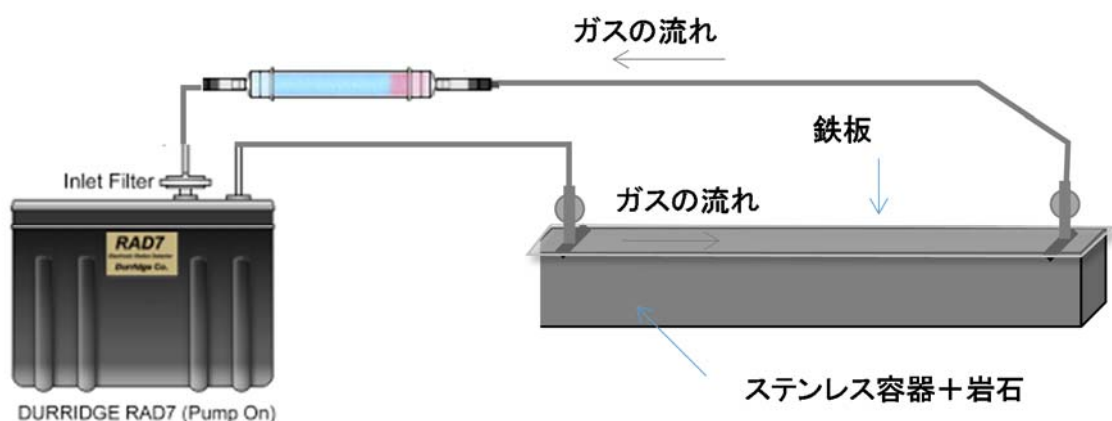


図 5.4.3-5 ラドンフラックス計測の概念図

ラドン濃度計測は、図 5.4.3-4 に水道水を流して満たした後、4 日以上経過してからその水を採取し、ラドン濃度を計測することにより求めた。このラドン濃度は平衡ラドン濃度ではないため、水を入れてからの日数と半減期を考慮して平衡濃度を算出した。

(5) レジン注入試験

レジン注入による割れ目の評価は、5.3 に示すように、割れ目にレジンを注入し、その後掘削することにより、直接的に割れ目幅を調査する方法である。レジンには、2 液混合型のエバーボンドを用いた。レジン注入直前に混合し、透水試験と同様に、模擬割れ目の注入孔から注入し、流出孔から流出を確認した後に、両端のバルブを閉じた。その後、レジンの硬化を確認するために、十分な時間待機した。その後、上板を取り外し、レジンの厚みをノギスで計測することにした。

5.4.4 試験結果およびまとめ

割れ目幅を 0.5mm として、透水試験、高粘性流体試験、トレーサー試験、ラドン濃度計測、レジン注入試験を実施した結果の代表例を表 5.4.4-1 に示す。ラドン濃度計測を除き、他の試験では概ね 0.7-0.8 mm 程度の割れ目幅が得られており、試験結果は概ね整合していると考えられる。試験を実施した結果、透水試験については、割れ目面が鏡面で境界条件が明確なため、割れ目幅の 3 乗則が適用でき、透水量係数と割れ目幅の関係に相関性が高いものと考えられる。高粘性流体試験では、高粘性流体を用いた透水試験のため、透水試験結果とほぼ同じ結果となっている。非定常法では、やや割れ目幅が大きめにしている。これは、高粘性流体が水との前線付近で混合することにより粘性が低下し、圧力勾配がやや小さくなることに起因して

いると考えられる。高粘性流体の到達も非定常時と同じで高粘性流体の混合の影響で、前線の粘性が下がり、濃度低下していない部分の到達が遅れるためである。高粘性流体にはメチルセルロース溶液を用いているが、水と混合しにくい流体を用いれば、この影響は小さくできると考えられる。トレーサー試験結果も概ね他の結果と整合しているが、トレーサーの到達から割れ目幅を評価しているため、配管や注入孔などデッドボリュームの見積りが評価結果に大きく影響する可能性がある。実際により狭い割れ目幅では評価結果が誤差を多く含む結果となった。ラドン濃度計測は割れ目幅が大きくなっているが、これはラドンフラックスの計測の難しさとラドン濃度計測の測定の難しさに起因していると考えられる。ラドンフラックスは、連続計測することによりおおむね妥当な値を求めることができたが、ラドン濃度計測は、割れ目から得られる少ない試料量で濃度計測を行っており、割れ目から試料を採取する際の漏気や半減期による補正を実施しているため誤差が大きいと考えられる。レジンを注入は、やや厚めの結果となっているが、CTなどの計測では境界部分の設定が難しいため、レジンを剥がして計測しており、実際よりもやや大きくなる可能性が高いのではないかと考えられる。このようにラドン濃度計測を除いては、室内でおおむね適切に割れ目幅を評価できるものと考えられた。室内試験で発生する現象は、原位置でも発生するため、前述のような試験法の特徴を考慮して評価する必要がある。

表 5.4.4-1 割れ目の評価方法と評価された割れ目幅

評価方法	評価結果 (mm)	特記事項
透水試験	0.74±0.01	
高粘性流体試験	0.69±0.02 (定常法) 0.89±0.04 (非定常法) 1.13±0.14 (流体到達)	高粘性流体の混合による濃度低下で粘性が低下するため、やや過大評価になりやすい
トレーサー試験	0.74	デッドボリュームに対して、割れ目体積が小さい場合、誤差が大きくなる可能性
ラドン濃度計測	4.2±2.4	少ないサンプルでのラドン濃度計測に課題
レジンを注入	0.82±0.14	剥がして計測するためやや過大評価になりやすい

参考文献

角森史昭：地殻変動に伴う地下水中のラドン濃度変化，地下水学会誌，Vol. 51，No. 1，pp. 49-54，2009.

長谷川琢磨、田中靖治、西垣誠(2007)：高粘性流体の注入による有効間隙率と流れの次元の評価、土木学会論文集 C、Vo. 63，No. 1.

長谷川琢磨・後藤和幸・田中靖治・西垣誠・野原慎太郎(2015)：高粘性流体の注入による割れ目の特性評価法の室内試験での実証、土木学会論文集 C，Vo. 71，No. 2，pp. 55-68.

6. 天然トレーサーを利用した調査技術の開発

6.1 背景

高レベル放射性廃棄物処分の処分では、「地下水シナリオ」の評価が重要になる。これは、施設から漏出した核種が地下水によって輸送されることを想定したシナリオである。このシナリオの評価、特に地下水の流動が十分に遅いことを示すために、天然に存在する放射性同位体などを用いた地下水年代測定技術を開発してきた。この技術は、概要調査の地表調査やボーリング調査において、候補岩体の地下水が、一万年あるいは百万年などのように非常に古いことを示すことにより、地下水の流動が十分に遅いことを示すためのものである。この数万年～百万年の地下水年代が評価できる技術を開発するとともに、国内の地点に適用し、開発してきた技術の妥当性を確認してきた。

精密調査段階においては、地下施設が建設され、より詳細な調査が実施される。この調査では、概要調査での調査結果の妥当性の確認が重要になる。また、候補岩体が十分な広がりを持つこと、水みちとなりうる高透水帯が存在しないことを確認する必要がある。このような調査にも地下水年代測定技術は有効であると考えられるため、坑道などにおける適用方法を整備しておく必要がある。また、坑道での調査においては、水みちなど局所的に地下水流動の早い部分の検出と、その特性評価も重要な評価事項となる。これは、このような局所的かつ選択的な地下水の流動経路が、核種の主要な漏洩経路となりうるためである。このような調査においても、若い地下水年代を評価できる地下水年代測定技術は重要になると考えられる。

一方で、地下施設建設に伴う地下水流動の擾乱は、天然の物質を利用した広域的なトレーサー試験とも見なすことができる。本研究では、トレーサー試験技術の開発を実施しており、数メートルスケールの比較的狭い範囲において、人工的に注入したトレーサーを用いて、割れ目や高透水帯の物質移行特性を評価している。ただし、人工的なトレーサー試験では、大きいスケールの物質移行特性の評価には多大な時間を要するため、天然トレーサーによる評価によって、トレーサー試験を補間していく必要があると考えられる。天然トレーサーによる評価では、人工トレーサーよりも大きいスケールでの物質移行現象を評価可能であると考えられる。また、精密調査段階においては、地下水施設を建設して調査が行われるため、坑道にむけて地下水流動が発生し、このような比較的大きな地下水流動による物質移行特性を評価できる可能性がある。

以上のような概要調査における地下水年代測定結果の確認、水みちの特性評価、トレーサー試験技術の補間を目的として、精密調査における地下水年代測定の開発を行うこととした。

6.2 研究項目

精密調査段階に適用する地下水年代測定調査技術を開発するために、JAEA が研究を実施している瑞

浪超深地層研究所、幌延深地層研究センターにおいて、地下水調査を実施する。この調査結果の既存のボーリング調査結果との整合性を確認するとともに経時的な変化を調査する。これらの結果に基づいて、地下水の起源、新しい水の浸入や古い水の残留状況を取りまとめる。また、水質、地下水年代を対象に地下水流動・物質移行解析を行い、地下水流動・物質移行パラメーターを評価する。

天然トレーサーによる調査では、新しい水の指標（トリチウム、フロンガス、水素・酸素同位体）や古い水の指標（有機・無機 ^{14}C 、希ガス、 ^{37}Cl ）として有望な物質について、これまでの調査結果を取りまとめる。

6.3 研究坑道における地下水調査

ここでは、JAEA が建設を進めている瑞浪超深地層研究所、幌延深地層研究センターを対象に地下水の採水を実施し、これまで実施してきた地下水年代測定結果の妥当性の確認を行うとともに、水質・地下水年代の変化を評価した。

6.3.1 瑞浪における地下水調査

6.3.1.1 調査概要および項目

瑞浪周辺では、これまでの地下水年代測定結果から、図 6.3.1-1 示すように、地下水は概ね地形に従って流動し、滞留時間は概ね数万年程度と推定されている (Hasegawa et al., 2016)。ただし、流出域での地下水年代は、 ^{14}C では試料採取が困難かつバラツキが大きく、 ^4He 年代は、外部フラックスの流入が有意であり年代が推定できてない。また、流出域では、水素・酸素同位体比が現在の降水に比べて有意に軽いことから、氷期に涵養した地下水が支配的であると推定されており、地下水年代は 2 年以上と考えられている (Iwatsuki et al., 2005)。

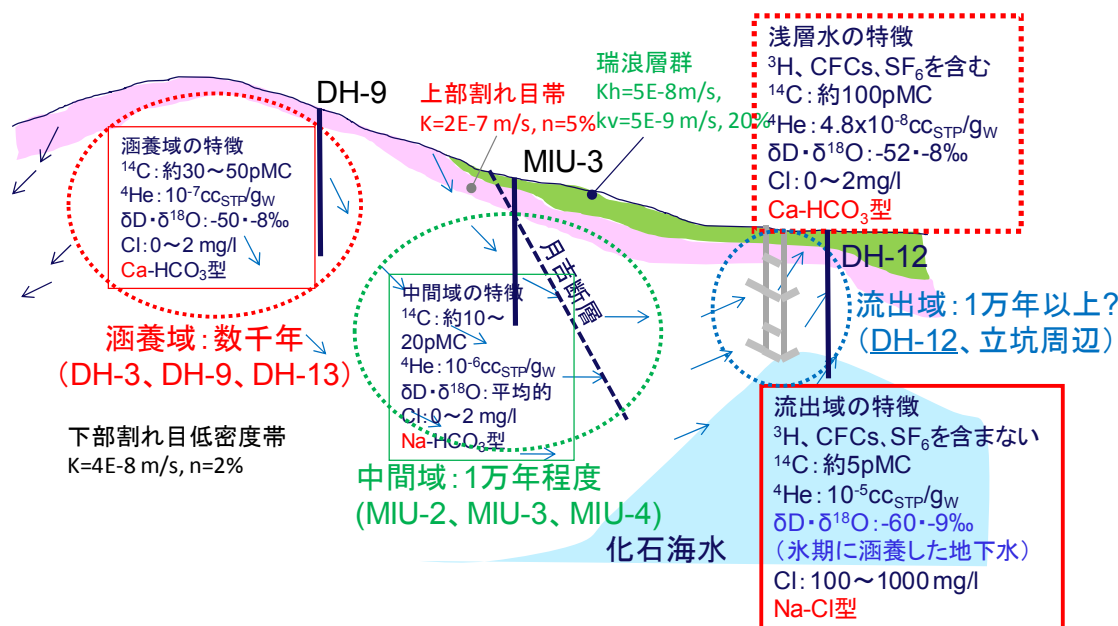


図 6.3.1-1 広域調査による瑞浪地域の地下水流動の概念図

この流出域での地下水年代と新しい水の流入を検討するために、研究坑道から掘削されたボーリング孔の図 6.3.1-2 を対象に地下水調査を実施した。採取した地下水は、主要溶存イオン、微量元素、TOC、水素・酸素同位体比、 ^3H 、 ^4He 、 ^{14}C 、 ^{36}Cl 、CFCs、 SF_6 のなどを分析した。

6.3.1.2 混合の影響評価

立坑周辺の水質は立坑掘削によって乱されており、地下水年代測定結果を評価するまえに、混合の影響について評価する必要がある。このため、各分析結果について相関分析を実施した。

この結果、浅層地下水の指標として代表的である ^3H に対して、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 ^{14}C 量に非常に良い相関があることがわかった。 HCO_3^- については、流出域地下水は Na-Cl 型であるが、浅層の地下水は Ca- HCO_3 型で HCO_3^- 濃度が大きいこと、 SO_4^{2-} についても浅層地下水には含まれるが流出域地下水にはほとんど含まれないためと考えられた。 δD と $\delta^{18}\text{O}$ は、流出域地下水は、前述のように氷期に涵養したと推定されるほど浅層水に比べて低いためであると考えられた。 ^{14}C 量についても、浅層地下水には含まれるが、流出域地下水にはほとんど含まれないため、混合指標になると考えられた。ただし、フロン類(CFCs、 SF_6)はあまり相関がよくなかった。これは、微生物分解の影響を強く受けたためと考えられる。

化石海水の指標として代表的である ^4He に対しては、Na, K, Ca, Cl, Br, I, B, Sr, Li と 0.9 を超えてほぼ 1 のような非常に高い相関があった。

このように、 ^3H や ^4He に対して相関の高いものが、浅層地下水や化石海水の代表とすると、立坑周辺では掘削の影響で、浅層地下水、化石海水、元の地下水(流出域の地下水)の 3 成分が混合していると考えられた。ここでは、新しい浅層地下水の指標として ^3H ではなく、代表として δD と $\delta^{18}\text{O}$ を用いた。これは、 ^3H の検出限界が高く、混合評価が不連続になるためである。 δD と $\delta^{18}\text{O}$ を浅層地下水の指標とすると、これらは浅層地下水では-52‰と-8‰、流出域地下水では-60‰と-9‰程度のため、これらを指標に浅層地下水の混合率が評価できる。一方で、化石海水の指標として ^4He ではなく Cl を用いた。これも、Cl の方が ^4He より測定精度が高く、ばらつきが小さいためである。化石海水の混合率は、Cl 濃度で 100~1000mg/l と広い範囲にばらつきがあり、化石海水の Cl 濃度が不明のため端成分が定まらない。このため、化石海水については混合率を計算することができない。

6.3.1.3 地下水年代測定

^{14}C の分析では、これまで沈殿法によって C を捕集していたが、ガス化法による試料採取法を適用することとした。これは、沈殿法では大気由来の ^{14}C が混入する可能性が高く、地下水の炭酸濃度が低い場合には、この影響が有意になるためである(Nakata et al., 2016)。

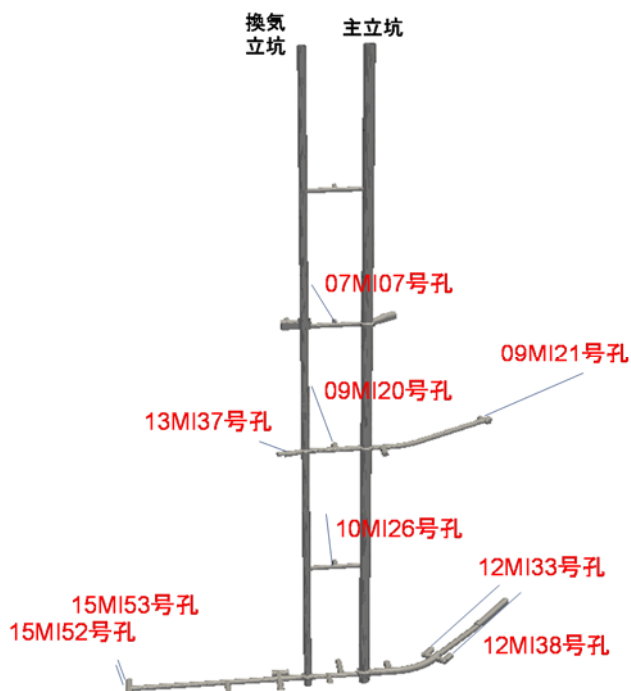


図 6.3.1-2 採水地点位置図

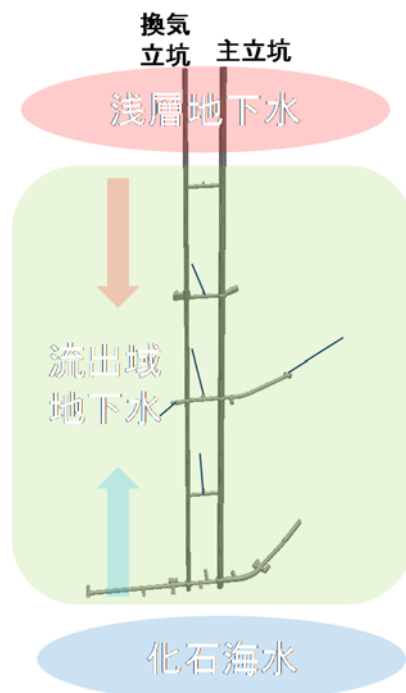


図 6.3.1-3 地下水混合の概念モデル

同じ地下水に対して沈殿法とガス化法の両方を適用して、 ^{14}C を求めた結果を図 6.3.1-4 に示す。図から明らかなように、沈殿法はガス化法に比べて有意に ^{14}C が大きいことがわかる。また、溶存炭素(C)濃度が低いほど ^{14}C の違いが顕著であり、前述の大気混入を裏付けている。このため、 ^{14}C 測定の前処理はガス化法で実施することとした。

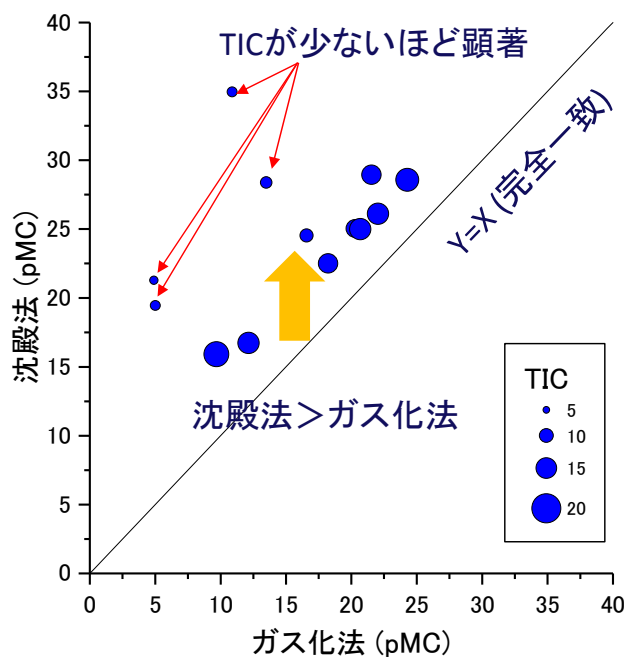


図 6.3.1-4 前処理方法（ガス化法と沈殿法）による ^{14}C 計測値の比較

ガス化法で取得した ^{14}C と浅層水の混合指標となる δD を比較した結果、図 6.3.1-5 に示すように両者には相関があることがわかる。新しい地下水の混合率を δD が -60‰ で 0% 、 -52‰ で 100% とすると、浅層水の混合率が 0% では ^{14}C は約 5 pMC 、 100% では約 45 pMC となる。このため、初期の ^{14}C を 45 pMC 、深部地下水の ^{14}C を 5 pMC と仮定すると、 ^{14}C 年代は約 2 万年 になる。浅層水と流出域の地下水とで溶存炭素量が異なるが、 ^{14}C 量で検討しても上記とほぼ同じ結果となる。ちなみに、この初期の ^{14}C 濃度は、広域で ^4He と ^{14}C の相関から求めた初期 ^{14}C 濃度 (46 pMC) に近い。このことから、 ^{14}C 年代の信頼性は高いと考えられる。

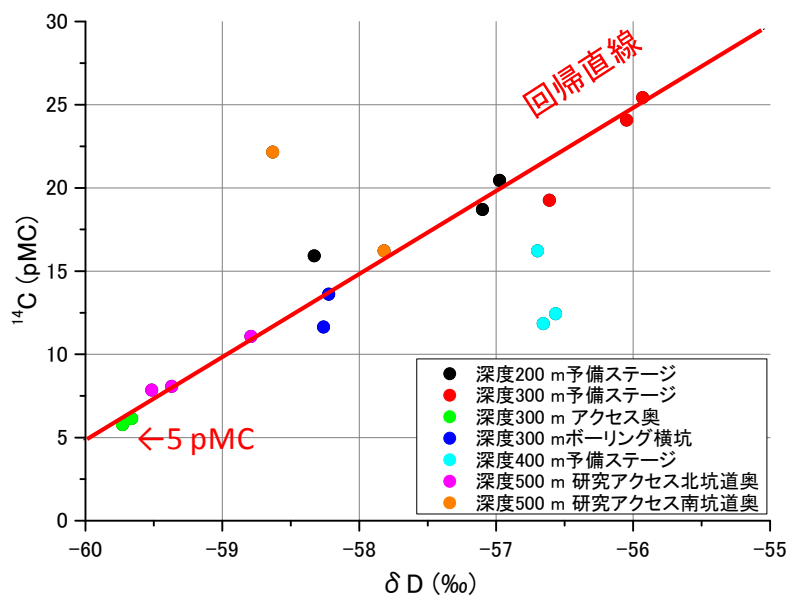


図 6.3.1-5 ガス化法で求めた ^{14}C 濃度と δD (浅層水指標) の関係

^4He 年代では、 ^4He の蓄積量を蓄積速度で割ることで年代を求める。蓄積速度には、原位置生成とフラックスによるものの2つがある。原位置生成する He の $^3\text{He}/^4\text{He}$ は 2×10^{-8} 程度であるが、外部フラックスの $^3\text{He}/^4\text{He}$ は 5×10^{-7} 程度と非常に大きい。立坑付近では、蓄積におけるフラックスの寄与が大きいため、原位置生成による蓄積の評価が困難であった。ここでは、このフラックスと原位置生成の分離を ^4He と ^3He で試みた。 ^4He 濃度と ^3He 濃度を比較すると図 6.3.1-6 に示すように相関があることがわかる。研究坑道ボーリングでの ^3He と ^4He の変化はフラックスの寄与が影響していると考え、フラックスの寄与がないときの ^4He 蓄積量を求めることとした。この図に対して回帰直線を引くと、切片は $3.4 \pm 1.2 \times 10^{-6} \text{ cc}_{\text{STP}}/\text{g}_w$ となり、回帰直線の傾きは、 $2.0 \pm 0.3 \times 10^6$ である。これは、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ で 5×10^{-7} に相当し、フラックス起源であると考えられる。このため、 ^4He は主にフラックスによって蓄積しており、切片部分が原位置生成によって蓄積されたものと考えられる。この原位置生成による蓄積量を原位置での生成量 $2 \times 10^{-10} \text{ cc}_{\text{STP}}/\text{g}_w\text{y}$ で割ると、 ^4He 年代として 1.7 ± 0.6 万年が得られる。ただし、バラツキ

からもわかるように、フラックスの寄与が大きいため、原位置生成の ^4He 濃度の推定精度は低い。

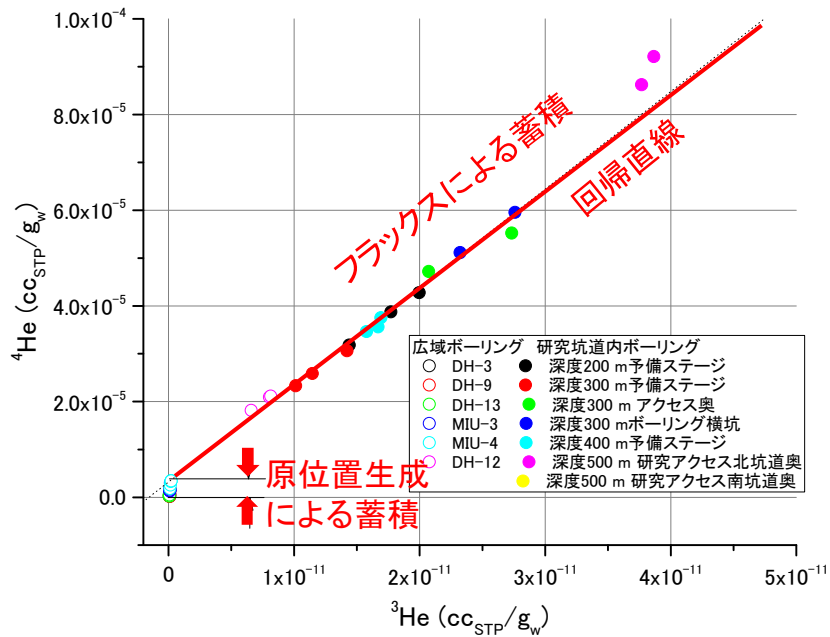


図 6.3.1-6 ^3He と ^4He の関係

希ガス濃度(Ne, Ar, Kr, Xe)を分析し、その溶解度から推定した涵養温度を δD とともに図 6.3.1-7 に示す。涵養温度の推定結果はバラツキが大きいため、研究坑道やボーリング孔での結果をまとめて示した。この結果、涵養域では $12.9 \pm 2.7^\circ\text{C}$ 、流出域の研究坑道で $8.2 \pm 2.6^\circ\text{C}$ 、DH-12 孔で $7.6 \pm 1.6^\circ\text{C}$ と推定された。南極氷床の調査結果では、現在から約 1.8 万年前が最も温度が低く、現在よりも 5~ 10°C 程度低くなっていたと考えられており、約 1 万年前から現在と同程度の気温と考えられている。瑞浪地域周辺では大湫において、約 2 万年前に 8~ 9°C 程度平均気温が低かったことがモダンアナログ法により確認されている(佐々木ほか、2006)。希ガス温度計では、流出域で 5°C 程度の温度低下となっており、他の結果と比べて温度低下がやや小さいが、約 2 万年前の氷期に涵養した地下水の影響を有意に受けていると考えられる結果となっている。

これらの結果から、研究坑道ボーリングから採取した地下水は、氷期に涵養した地下水の影響を強く受けており、 ^{14}C 年代や ^4He 年代によれば 2 万年程度であることが確認できた。

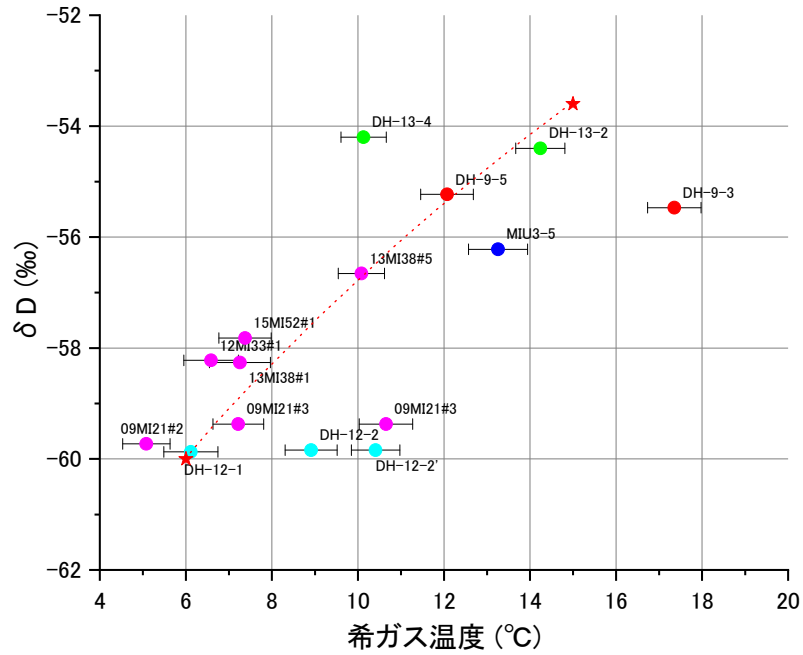


図 6.3.1-7 希ガスから求めた涵養温度と酸素同位体比の関係

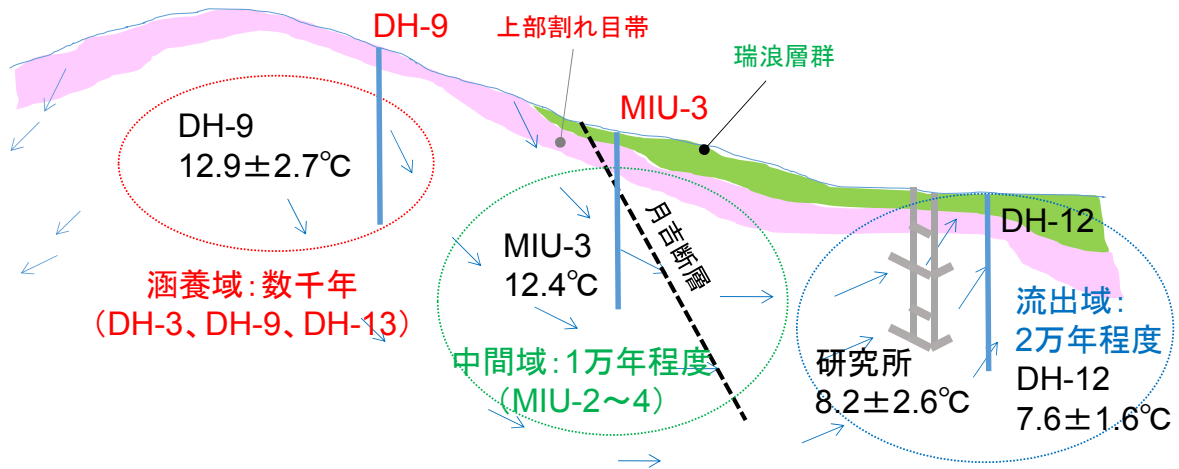


図 6.3.1-8 瑞浪における地下水流動概念図のまとめ

6.3.1.4 地下水流動・物質移行解析

瑞浪の立坑掘削を対象に地下水流動解析を実施した。瑞浪では立坑掘削によって、平均的に $600 \text{ m}^3/\text{d}$ の湧水があり、これが 10 年程度続いていることから、間隙率を考慮すると現在までに 500m 立方体に相当する岩体から、地下水が流出したことになる。

これまでの調査結果から、瑞浪立坑周辺は約 200 m 程度水位が低下し、立坑を中心に数十パーセントの新しい地下水が流入している。しかしながら、図 6.3.1-9 に示す地下水流動物質移行解析結果に基づくと、広域的な地下水年代で推定された 2% のような間隙率ではこのような新しい地下水の流入は

表現できず、間隙率はこの 1/100 程度である必要がある。

しかしながら、広域での地下水流動が数万年、立坑での地下水流動が数年で発生していることを考えると、物質の拡散的な広がり、拡散係数×時間のルートに比例することから、100 倍異なる。このため、立坑では広域の地下水流動に比べて、拡散による媒体への物質の広がりが 1/100 であるとする、このような差も説明が可能となる。このため、マトリクス拡散の輸送に関する寄与を、今後検討する必要があると考えられる。

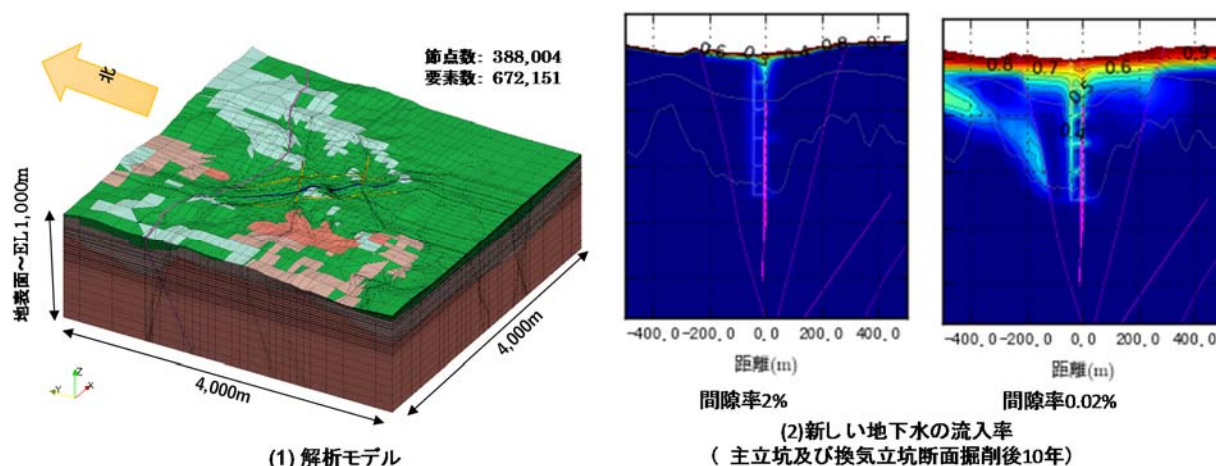


図 6.3.1-9 立坑掘削による新しい地下水の流入状況の解析値

6.3.2 幌延における地下水調査

6.3.2.1 調査概要及び項目

幌延周辺では、これまでの地下水年代測定結果から、深部の地下水(主に稚内層)は、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ が海水に比べて有意に高く、原位置平衡値に近い、すなわち Cl 成分は 100 年以上が経過している。 ^4He の蓄積量が優位に高く、 ^4He 年代が堆積年代に近くなる。これらのことから、化石海水が残留していると考えられている。一方で、地表付近と高透水の声問層/稚内層境界においては、降水によって希釈された部分があり、これらの地点では Cl 濃度が低く、水素酸素同位体比が浅層水に近いという特徴がある。ただし、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ については、計測値にばらつきが大きく、原位置平衡値よりも優位に小さいものが存在する、 ^4He については、脱ガスの影響を受けておりばらつきが大きいという課題がある。これらの課題を解決するために、幌延立坑において地下水年代調査を実施した。

幌延深地層研究センターの地下施設において、坑道内のボーリング孔から地下水を採取した。採取した地点は図 6.3.2-2 に示す通りである。採水区間は主に湧水量の多い地点とした。

採水は、主要溶存イオン、微量成分、トリチウム(^3H)、炭素同位体比($\delta^{13}\text{C}$ 、 ^{14}C)、塩素同位体比(^{36}Cl 、 $\delta^{37}\text{Cl}$)分析用、希ガス分析用を分けて実施した。希ガス分析用は、図 6.3.2-3 に示すように、これま

で、圧力制御式、循環式、原位置平衡式、水上置換式で試料を採取した。

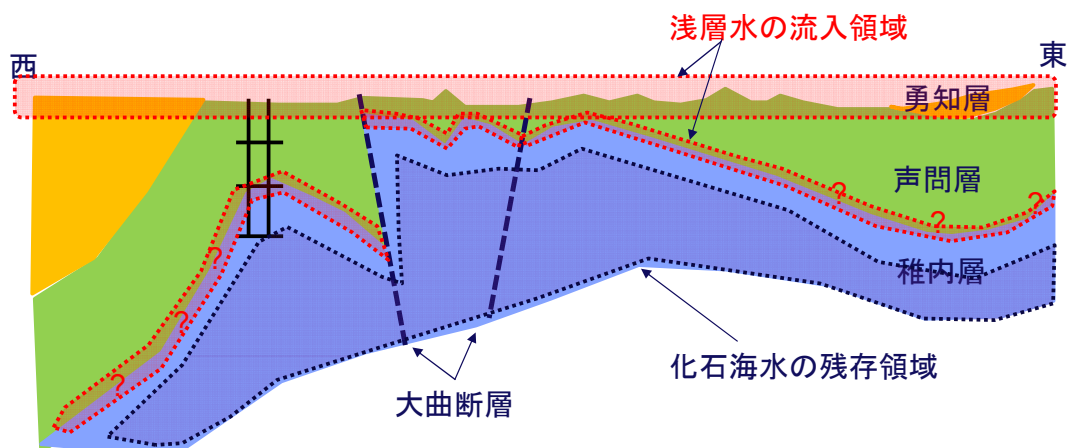


図 6.3.2-1 幌延地区における地下水流動の概念図

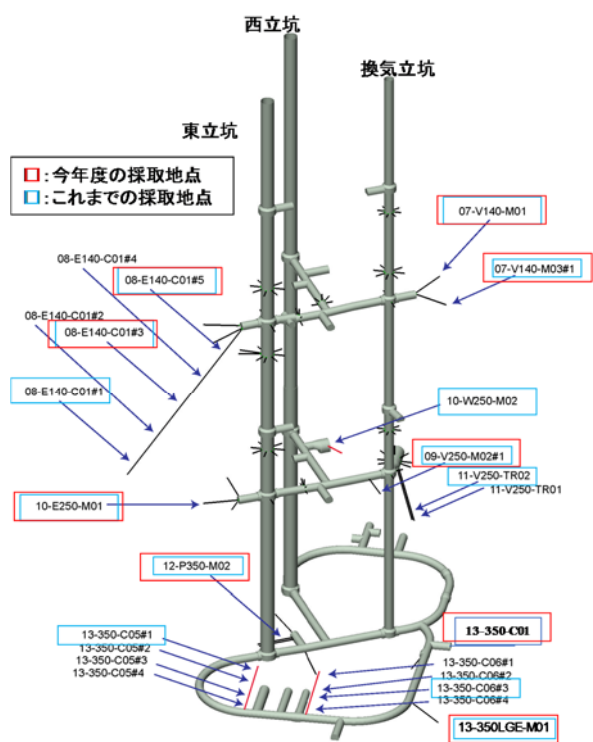


図 6.3.2-2 幌延深地層研究センターの地下施設における採水地点

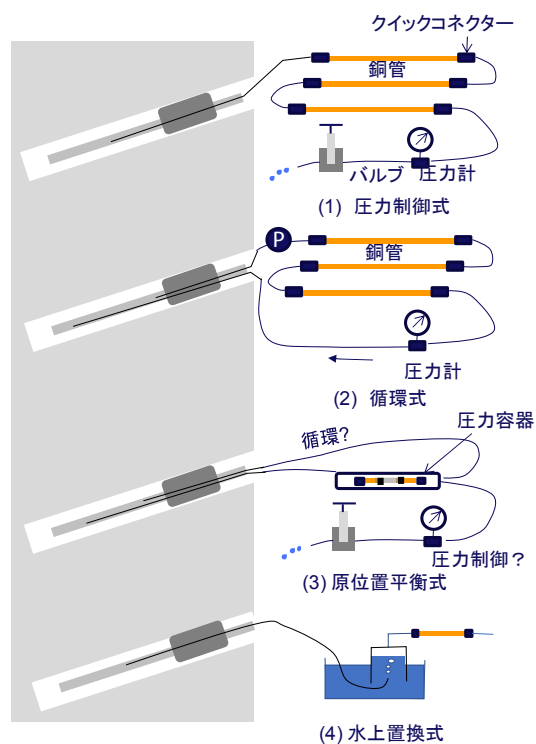


図 6.3.2-3 原位置での希ガス採水方法の概念図

6.3.2.2 混合の影響評価

(1) 主要溶存イオン濃度の変化

主要溶存イオンをヘキサダイアグラムとして図 6.3.2-4 に示す。図には 2013 年から採取したデー

タをあわせて示した。水質の変化は、これまでの期間ではほとんどなく、測定精度の影響でヘキサダイアグラムの線が二重に見える程度である。水質のタイプは、概ね Na-C1 型であるが、一部に、 HCO_3 濃度が高く、Na-(HCO_3)-C1 型となっているものがある。浅部と深度 250 m 付近においては、ややヘキサダイアグラムが小さい地点がある。これは、浅部では降水の影響によって元の成分が希釈されているため、深度 250 m 付近では声問層と稚内層の地層境界で比較的透水係数が高く、地下水の流動性も高いため、降水系の地下水が混合しているためと考えられる。溶存イオン濃度が低い地点においては、 HCO_3 濃度が高く、Na-(HCO_3)-C1 型となっている。

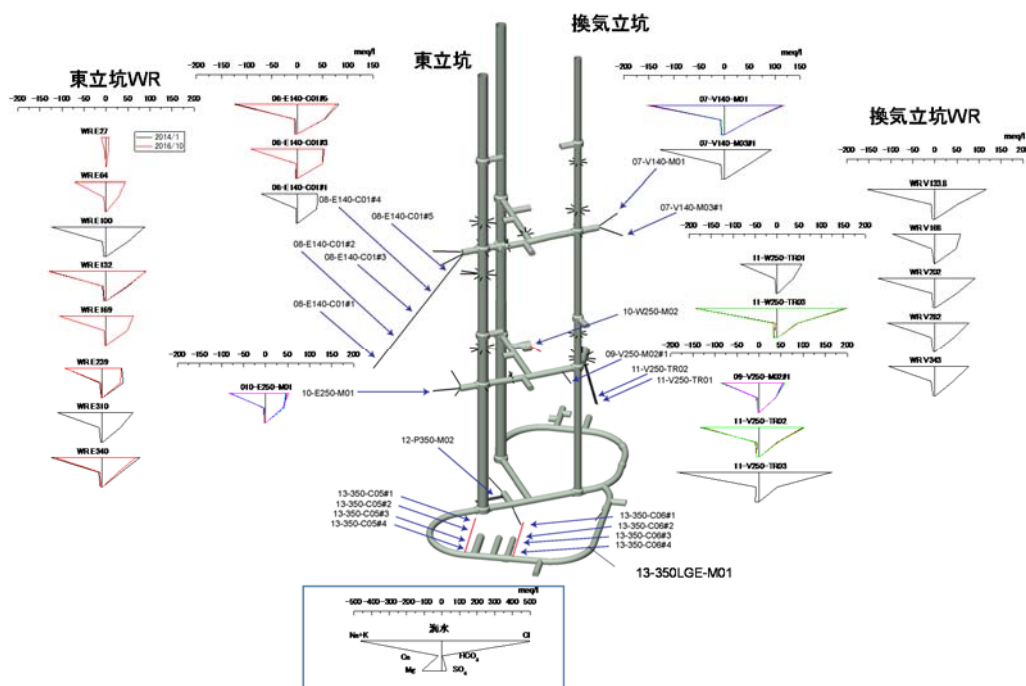


図 6.3.2-4 幌延立坑での水質のヘキサダイアグラム

(2) 水素・酸素同位体比

水素・酸素同位体比の関係を図 6.3.2-5 に示す。この図には立坑での調査結果だけでなく、立坑周辺に掘削された広域調査用ボーリングのデータもあわせて示した。水素・酸素同位体比も 2013 年からの結果を図化したけどほとんど変化していない。同一区間において、水素・酸素同位体比の変化はそれぞれ測定精度程度 (1‰, 0.1‰) である。

立坑での水素・酸素同位体比は、立坑の深度 140 m から深度 250 m に向けて低くなる傾向に有り、深度 250 m 付近で反転し、深度とともに大きくなる傾向を示す。前述のように、深度 250 m 付近が声問層と稚内層の地層境界にあたり、透水係数が高いため、浅層水の混合が進んでいることが、水素・酸素同位体比からも把握できる。このような水素・酸素同位体比の傾向は、立坑掘削前に実施した先行ボーリングでの調査結果とも整合し、ここ数年間に亘って変化がないことから考えても、立坑掘削によ

る地表水の流入ではないと考えられる。

(3) 混合の評価

幌延立坑から採取した地下水について、相関をとると Cl 濃度と相関が高いものが多い。また、水素・酸素同位体比などからも明らかなように、混合は主に化石海水と降水の混合で説明できる。一方で、 ^3H が検出されないことや主要成分や水素・酸素同位体比の変化がほとんどないことから、化石海水と降水の混合は進んでいるが、立坑掘削による影響ではないと考えられる。立坑掘削の影響はないものの、比較的長い時間をかけて混合が進んでいることは、Cl 濃度や水素・酸素同位体比の深度変化が緩やかであることから明らかである。このため、地下水年代はこのような混合を考慮して評価する必要がある。

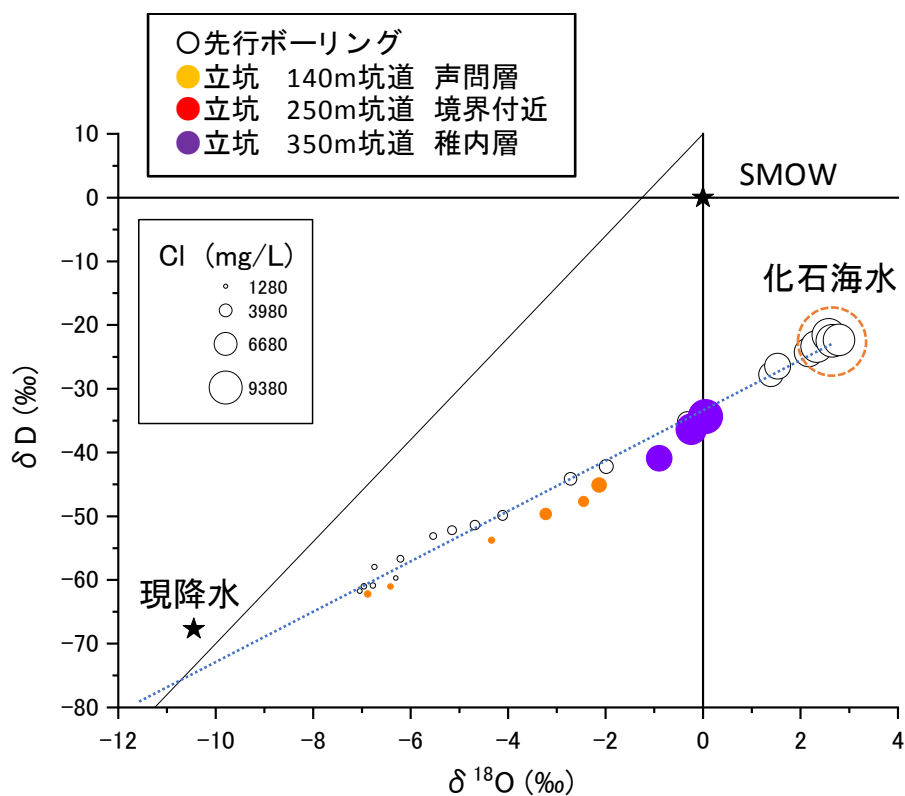


図 6.3.2-5 水素・酸素同位体比の関係

6.3.2.3 地下水年代測定

(1) $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$

立坑のボーリング孔およびWR(Water Ring)から採取した地下水の $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ を計測した。 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ の計測値は $2.6\sim 5.2\times 10^{-15}$ 程度の値となっている。深部ほど $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ が大きくなる傾向にあり、深度 250m

坑道までは、 $3\sim 4\times 10^{-15}$ 程度であるが、深度 350 m 坑道では、 $4\sim 5\times 10^{-15}$ 程度となっている。これは、深度 250 m 坑道までは声問層で、これ以深は稚内層に大別されるのと調和的である。

声問層と稚内層の $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ の平衡値は、図 6.3.2-6 のように表される。これは、地層の構成鉱物や含有元素を用いて放射化解析により計算した結果である。声問層と稚内層の組成がほぼ同じであり、間隙率のみが異なるため、このように表すことができる。平衡値は、声問層では、間隙率 50~60%程度で Cl 濃度 1900~9500mg/l (海水の 1/10~1/2) であるため、 $2.9\sim 5.4\times 10^{-15}$ 程度、稚内層では、間隙率 30~40%程度で Cl 濃度 1900~9500mg/l (海水の 1/10~1/2) であるため、 $4.9\sim 9.3\times 10^{-15}$ 程度である。

このため、声問層内 (深度約 250m 以浅) の $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ は声問層の平衡値 ($2.9\sim 5.4\times 10^{-15}$ 程度) に達していると考えられる。稚内層 (深度約 250m 以浅) の $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ は、稚内層の平衡値 ($4.9\sim 9.3\times 10^{-15}$ 程度) に比べてやや低いため、声問層からの地下水の流入の影響を受けている、あるいは、拡散によって輸送されていると推定される。ただし、深度とともに $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ は徐々に値が大きくなっていることから、深度が深くなれば、稚内層の平衡値程度になるのではないかと推定される。

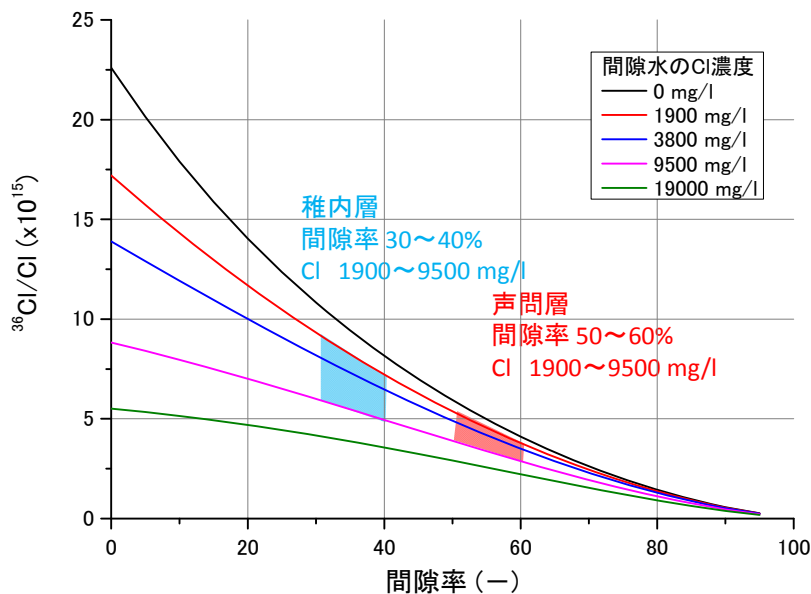


図 6.3.2-6 間隙率と平衡値の関係の計算値

(2) ^4He

希ガス採水では、図 6.3.2-3 に示すように、種々の方法で実施した。幌延では溶存ガス量が多く、脱ガスの発生が顕著である。このため、なるべく原位置の水圧を下げないように採水を実施した。ただし、脱ガスを保存性の成分である Ne 濃度で評価した。Ne の大気平衡濃度は、 2×10^{-7} cc_{STP}/g_w ($=10^{-6.7}$) 程度であるが、幌延の地下水の Ne 濃度は、平均 4×10^{-8} cc_{STP}/g_w となるため 20%程度しか残留していない。一方で、瑞浪での地下水は平均 2.4×10^{-7} cc_{STP}/g_w となるため 20%程度の大気の混入があると考え

られる。幌延のサンプルでは、脱ガス率が非常に高いため、試料に残っている溶存ガスの情報が非常に少ないことを意味している。このため、水上置換法でガスサンプルを採取し、分析を実施した。

立坑のボーリング孔から採取した地下水の希ガス濃度を図 6.3.2-7 に示す。図は He 濃度と Cl 濃度の関係を示している。Cl 濃度を基準にしたのは、幌延立坑の地下水は主に化石海水と降水の混合で形成されており、 ^4He 濃度も化石海水に蓄積されているため、Cl 濃度と相関が出ると考えたためである。Cl 濃度と相関がある部分もあるが、一部には相関がない部分がある。水上置換で採取したガスサンプルは、ガス量も安定しており、濃度も $10^{-7} \sim 10^{-6} \text{ccSTP/gw}$ の一桁程度で落ち着いている。したがって、計測は安定に行えていると考えられる。このため、脱ガスが激しいと適切に評価できない、あるいは、立坑掘削によって一部ガスが抜けるあるいは濃集し、元の状態を評価できない可能性があると考えられる。

ただし、Cl 濃度が低い試料でも He 濃度は 10^{-7} オーダーであり、Cl 濃度が化石海水と同等(海水の半分程度)であれば、 10^{-6} オーダーで百万年程度の蓄積となることから、長期にわたり蓄積しているとは考えられる。

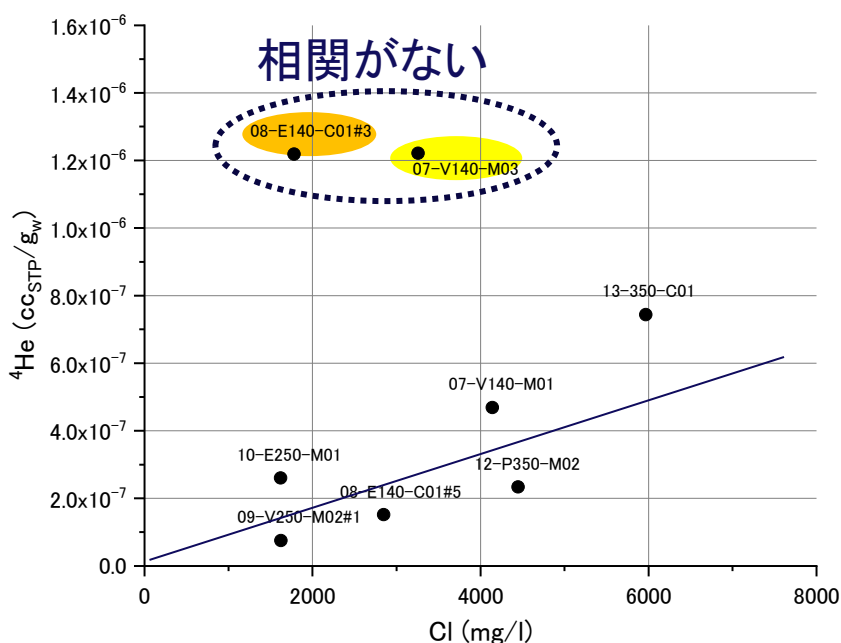


図 6.3.2-7 ^4He 濃度と Cl 濃度の相関

6.3.2.4 地下水流動・物質移行解析

幌延立坑の掘削影響を考慮した地下水流動解析を実施した。幌延では立坑掘削によって、平均的に $100\text{m}^3/\text{d}$ の湧水があり、これが 10 年程度続いている。このため、約 300 万 m^3 の湧水量であり、これは間隙率 50%を考慮すると、これまでに $100 \times 100 \times 60\text{m}$ 程度の岩体から地下水が流出したことになる。

これまでの調査結果から、幌延立坑での水位低下は激しく発生しているものの、断層や声間層/稚内

層境界など主要な高透水構造に限定されている。なお、前述のように湧水量が少なく、間隙率が大きい
ため、新しい地下水の流入は観測されていない。

地下水流動・物質移行解析では、立坑を大気解放条件として解析を行い、図 6.3.2-8 に示すように、
立坑からの湧水量や断層・地層境界で発生する水圧低下について定性的にはあるが、再現できてい
る。また、新しい地下水の流入についても実測値と同様に解析でも確認されていない。

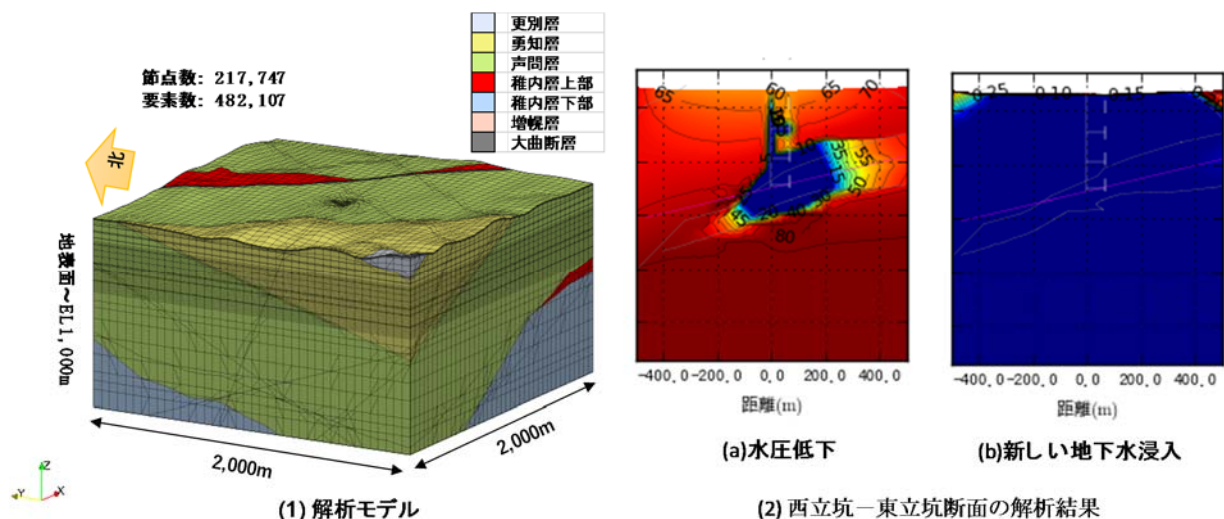


図 6.3.2-8 解析メッシュおよび立坑断面での解析結果

6.4 天然トレーサーの調査

6.4.1 サンプルング方法の調査

(1) 希ガスサンプリング

He をはじめとする希ガスの濃度や同位体比は、地下水の地下における滞留時間や地下水の起源、地下水が涵養するときの温度等の指標となるため、処分場候補地等における長期の地下水流動を推察するために極めて重要な情報である。地下水に溶存する希ガスは、ガスであるため地下水サンプルから脱ガスしやすく、また大気が混入（コンタミ）した場合にも評価結果に大きな影響が生じる。このため、脱ガス・コンタミを防ぐサンプルの採取方法、あるいは脱ガス等が生じた場合でも補正ができる方法を提案することが、希ガスを用いた地下水の評価の精度を上げるために重要である。

本研究においては、まず、脱ガスやコンタミを生じさせずに地下水サンプルを取得するための適切なサンプリング方法について検討した。特に地下坑道において、坑道から掘削されたボーリング孔から地下水を採取するときには、圧力を制御しながら地下水を銅管に流し、圧力を保ったまま地下水を採取する「封圧採水」が有効であることを確認した。さらに、水からガスを抽出できるシリコンゴムを介して地下水と微小な空間を接触させ、地下水と平衡になった気相を分析する、「平衡式サンプラー」

を地下水に適用し、この有効性を確認した。今までに検討してきた、MP システム等のパッカーおよび圧力等計測システムが挿入されている場合に有効な「ピストンサンプラー」や「循環式サンプラー」、また裸孔に有効な「機械式サンプラー」を加えて、脱ガス・コンタミを防ぎながら試料を採取する方法を整えることができたと考えられる。

しかし、工期や予算あるいは場所による制約により、上記のようなサンプリング方法が常に採用できるとは限らない。このため、サンプリング中に脱ガスが生じた場合の補正方法についても検討した。原位置採水や封圧採水など脱ガスする可能性が低いと考えられる採取方法で採取した試料に対して、地下水の圧力を大気圧まで解放し、水上置換などでガスと水を分離した試料の希ガス濃度を分析し、Ne 濃度を基準とした場合の他希ガスの脱ガス挙動について調べた。その結果、地下水にかかる圧力が～5Mpa 程度であれば、大気圧まで圧力を解放した場合の脱ガス挙動はヘンリーの法則を使ってある程度予測が可能であることを示すことができた。さらに、より積極的に脱ガスをさせるため、真空引きした容器に地下水を導入して脱ガスさせた場合や中空糸膜を用いて脱ガスさせた場合とも溶存ガス濃度を比較した。その結果、真空引きや中空糸膜を用いた場合の脱ガス挙動は、各希ガスの脱ガス速度がそれぞれの拡散係数に従うと仮定した場合、よく再現できることが分かった。一方で、共存するガス（例えばメタン）濃度が高い場合には、脱ガス挙動は上記のモデルに従わず、脱ガス挙動の予想が難しくなることが分かった。

(2) 水蒸気法

地下水における水素・酸素同位体比（同位体比）は地下水混合や起源の重要な指標となる。さらに、間隙水における同位体比は混合などのほかに拡散における同位体分別によって値が変化するため、低透水性岩盤の物質移行における重要な指標となりうる。間隙水の同位体比を明らかにするには、間隙水そのものや間隙水における同位体比の情報を岩石コアから抽出する必要がある。

間隙水における同位体評価の方法として、岩石を一次的に圧縮して間隙水を抽出する「圧縮抽水法」や、岩石と同位体比既知の水を閉鎖空間で密閉し水蒸気を介した同位体交換により間隙水の情報を抽出する「同位体交換法」がある。これらの方法には圧縮抽水のための装置が必要なことや、同位体の平衡が達成されるまで数週間がかかるなどのデメリットもあり、例えば掘削長の長いボーリング孔の同位体比プロファイルを細かく見るなどの用途には不向きであると考えられる。このため、より簡易にかつ短期間に岩石間隙水の同位体比を分析できる手法が必要であると考えられた。

本研究では、上述の方法より簡易な「水蒸気法」と呼ばれる方法の適用性等について検討した。水蒸気法では試料となる岩石を密閉した袋に入れ、袋のヘッドスペースが岩石間隙水から発生する水蒸気と平衡になってからヘッドスペースの水蒸気を分析する方法である。本研究ではまず、水蒸気法の条件（静置時間、試料量など）に対する水蒸気の同位体比依存性を明らかにし、間隙水の同位体比を分析するために最適な試験条件を決定した。また、予め 110 °C で 48 時間以上乾燥させた岩石を同位体比既

知の水に浸漬した「標準試料」を作製し、標準試料に決定した試験条件で水蒸気法を適用することで種々の岩石に対する水蒸気法の適用性を確認した。その結果、種々の砂岩に対して水蒸気法が適用できることを確認することができた。

さらに、幌延地域で取得したボーリングコアを用いて、幌延の珪藻泥岩に対して水蒸気法を適用した。その結果、水蒸気法で得られた間隙水の同位体比と圧縮抽水法で得られた間隙水を分析した結果は近い値を示したことから、幌延地域のように間隙水の塩分濃度が比較的高い泥岩に対しても水蒸気法が適用可能であることを確認した。

水蒸気法は、サンプル量が少量で良い（間隙水が 1mL を超えるだけの試料量を確保すれば良い）、サンプルの形状を問わない（岩石コアに対しても、粉末状や破片状の試料に対しても適用可能）、前処理の時間が短い（2 日静置すれば間隙水とヘッドスペースの水蒸気は平衡に達する）などのメリットがあり、間隙水に対して細かく同位体比プロファイルを調べたい場合などに極めて有効な手法であると考えられる。このため、水蒸気を分析可能な装置が使用可能な場合には、間隙水同位体評価手法として適用を検討するのが良い。一方圧縮抽水や同位体交換法にもそれぞれメリットは存在するため、必要な精度、使用可能な装置や機器などから適切な手法を選択するのが良いと考えられる。

(3) 圧縮抽水法

圧縮抽水法は低透水性の岩石を 1 次元的にピストンで圧縮し、間隙水を抽出する方法である。圧縮抽水法ではある特定の成分だけではなく、間隙水そのものを抽出することが可能であるため、前述の水蒸気法と異なり水素酸素同位体比だけではなく、間隙水のイオン濃度や溶存イオンの同位体比 (^{36}Cl 、 ^{37}Cl 、 ^{81}Br など) の分析も可能となる。しかし、著者らの既往の研究結果などから、間隙水中のイオン濃度は圧縮圧力の増加とともに変化することが明らかになっている。このため、同位体比においても圧縮圧力に対する依存性の有無やそのメカニズムを確認する必要があると考えられた。本研究では水素酸素同位体比に着目し、圧縮圧力と同位体比の関係および同位体比が圧縮圧力の依存するメカニズムについて検討した。

幌延地域で取得した岩石について、段階的に圧縮抽水して得られた間隙水の同位体比を分析したところ、水素同位体比について、圧縮圧力が高いほど同位体比が小さくなる傾向が観察された。この原因を明らかにするため、幌延地域で取得した岩石コアを、水素同位体比を 1000‰程度に高くした水に長期間浸漬し段階的に圧縮抽水したところ、圧縮圧力が高い試料では圧縮抽水で得られた水の同位体比が浸漬した水の同位体比に近くなったのに対し、圧縮圧力が低いところでは圧縮抽水で得られた水の同位体比は浸漬した水の同位体比より顕著に低くなった。これは低い圧力では拡散で水が浸入できないような空隙（閉鎖空隙）から、水が抽出されていることを示している。幌延地域で取得した岩石は海で堆積したと考えられるため、閉鎖空隙における同位体比は高いと考えられる。低圧で抽出された間隙水の同位体比が高かったのは、低圧ほど閉鎖空隙から抽出される水の影響が顕著であり、閉鎖空隙

における間隙水の同位体比がその他の空隙のものより高いためであると考えられる。

以上のように圧縮抽水では、圧縮によって閉鎖空隙からも間隙水を抽出する可能性があり、それによって同位体比が変化する可能性がある。閉鎖空隙の影響は水素・酸素同位体比だけでなく、Cl や Br の同位体比にもおよぶ可能性が高い。地下水流動に係る空隙の間隙水と堆積時などに閉鎖した空隙に存在する地下水とで、大きく性質が異なる場合（例えば海で堆積した地層に天水由来の水が入り込んだ場合など）同位体比等の評価に大きな影響がでる可能性があり、留意が必要である。このため、圧縮抽水で同位体比を評価する場合には、常に閉鎖空隙からの水の影響があることを意識してデータを取り扱う必要があるほか、流動に係る地下水からのみ情報を得られるような手法（例えば上述の水蒸気法やリーチングなど）と圧縮抽水法を比較することにより、閉鎖空隙における情報を得ることが可能である。

6.4.2 速い流れの指標となる物質

(1) ^3H

^3H (トリチウム)は、水素(H)の放射性同位体であり、水分子($^3\text{H}^1\text{H}_2\text{O}$)として地下水中に存在するため、化学反応の影響を受けず、地下水とともに移動する。このためトレーサーとして非常に優れている。

^3H の半減期は12.3年であり、 ^3H 年代測定では、 ^3H の放射壊変による濃度低下に着目して地下水年代を評価する。このため、比較的流動性の高い、滞留時間が50年未満の地下水の評価に有効である。

トリチウムはLSC(LSC: Liquid Scintillation Counting)が最も一般的な分析手法である。環境試料中のトリチウム測定には、電解濃縮を含めた煩雑な濃縮操作が必須であり、測定時間も非常に長い。測定精度は0.1TU、定量下限は0.3TU程度である。一方、 ^3He ingrowth法は、トリチウムの壊変によって生成する ^3He 濃度を希ガス分析質量法により分析する方法であり、従来の液体シンチレーション法より桁以上の高感度の分析が期待できる。この分析では、液体シンチレーション法のような煩雑な前処理やそれに伴う廃液の問題もない。ただし、希ガス質量分析に ^3He ingrowth法では、質量分析計で測定が可能なレベルに達するまでの十分な量の ^3He の生成が必要であり、 ^3He が成長するまでに必要な時間は数ヶ月から1年程度に渡るため、長期間にわたる保管が求められる。 ^3He ingrowth法では、試料については脱気をするだけで濃縮をしなため、貯蔵時間が短く十分な測定精度が得られない場合には、再度 ^3He の生成を待つことにより、再分析することも可能である。

今回、瑞浪立坑の地下水について ^3He ingrowth法適用した結果、LSCで分析が困難な0.3TU以下の濃度についても定量が可能であり、新しい地下水の混合指標である ^{14}C 量などとの相関が非常に良かったため、新しい水の流入の評価に有効であると考えられる。

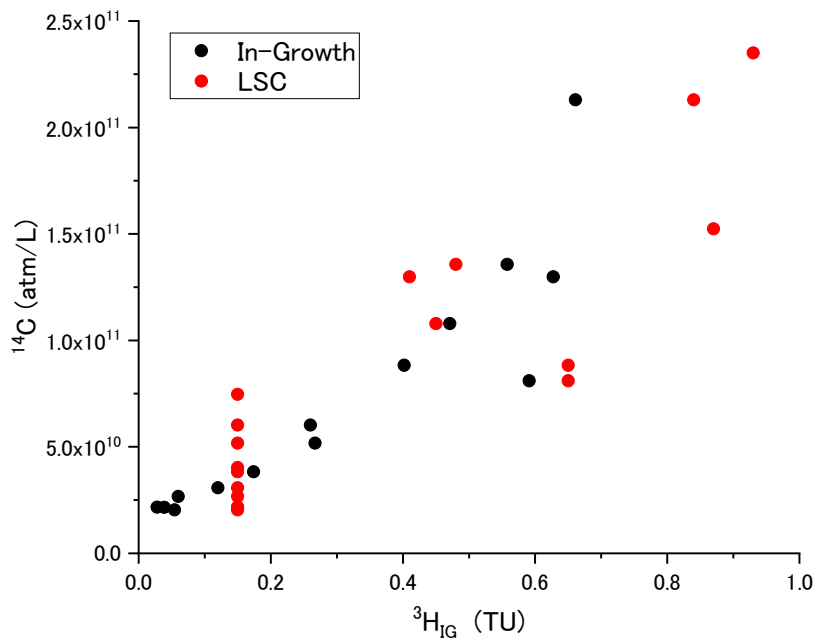


図 6.4.2-1 ^3H 濃度と ^{14}C 量の比較

(2) フロンガス・ SF_6

フロンガス(CFC-11, 12, 113)や SF_6 は冷媒や絶縁材として、約50年前から使用されてきた。しかしながら、これらのガスは地球温暖化を引き起こすとして問題視され、近年ではその使用が中止されている。ただし、近年まで使用されてきたため、大気中の濃度は近年まで単調に増加し、一定濃度となっている。濃度増加に伴いガス圧も増加しているため、地下水への溶存量も増加しており、この溶存量から大気中濃度に換算し、過去の大気濃度と対比することで滞留時間が推定できる。溶存ガス量だけでなく、溶存ガス比に基づいて涵養年を推定することも可能である。

フロンガスや SF_6 は、立坑掘削による新しい地下水の流入の評価に有効と考えられたが、新しい地下水の指標として有効と考えられる ^3H 、 ^{14}C 、 δD と $\delta^{18}\text{O}$ などとの相関は良くなかった。また、フロンガスから算出した地表水の混合率は、全般的に δD から推定される混合率よりも小さくなっている。これは、フロンガスは還元環境では微生物分解などにより減衰しているためと考えられる(Plummer and Bunsenberg, 2006)。このため、フロンガスは新しい地下水の混合を表していないと考えられる。 SF_6 から求めた新しい地下水の混合率は δD とともに減少する傾向が見えるものの、相関はあまり良くない。また、新しい地下水の混合が少ないと考えられるものでも高い混合率を示している。これは、大気の混入および原位置生成の2つが考えられる。大気の混入については、採水時を水中で実施するなど注意が必要である。また、原位置生成については、Bunsenberg et al. (2000)で指摘されるように、花崗岩などでは有意な可能性がある。

6.4.3 遅い流れの指標となる物質

(1) ^{14}C (ガス化法)

放射性炭素 (^{14}C) の半減期は約 6000 年であるため、 ^{14}C を指標とすることで地下での滞留時間が 1 万年以下程度の地下水が、3 万年以上が経過したような地下水と混入した場合の有用な指標となりうる。

本研究ではまず無機の ^{14}C を正確に分析するために、サンプルの前処理方法について検討した (Nakata et al., 2016)。従来の研究では、地下水に溶存する無機炭素は炭酸ストロンチウムの沈殿として回収することが多かった (沈殿法)。しかし、 ^{14}C が既知の試料を調製し、沈殿法で無機 C を回収して ^{14}C を分析すると、 ^{14}C の値が増加することが分かった。 ^{14}C の増加量については、大気由来の C が 1 mg 混入することで分析結果が定量的に説明可能であった。沈殿法では、サンプルをアルカリ性にして沈殿を調製し分析に供する。アルカリ溶液やアルカリ溶液を調製するために用いる試薬には二酸化炭素が混入しやすく、これが ^{14}C を増加させる要因になったと推察された。一方溶液を酸性にし、He 等をバブリングして溶存二酸化炭素を抽出する「バブリング法」では、上記のような大気由来 C の混入は観察されず、比較的精度よく無機 ^{14}C を分析可能であることがわかった。また、沈殿法は溶液中の無機炭素の濃度やサンプルにおける塩濃度による影響を受けるのに対して、バブリング法はそれらの影響を受けないことが分かった。一方で沈殿法は試料の長期保管 (炭酸ストロンチウムの沈殿をフリーズドライして保管する) や一度に多くのサンプルを扱うのに向いており、上述の混入量を理解したうえで使用するという選択肢も考えられる (図 6.4.3-1)。

沈殿法における大気由来の ^{14}C 混入の影響は、地下水における無機炭素 (DIC) 濃度と地下水における DI^{14}C の値によって変化する。図では、 DI^{14}C が 10 pMC (左図) および 50 pMC (右図) の場合に、影響を 10 および 20% 以下にできる地下水中 DIC 濃度を示している。

古い地下水に対して比較的若い地下水が流入する際に、地下水中に溶存する有機物中の ^{14}C がトレーサーとなりうる可能性を検討した。有機物中の C を評価の対象としたのは、有機物は岩石と相互作用しにくく地化学反応による値の変化が少ないと考えられるため、無機炭素よりも感度の高いトレーサーとなりうると思ったためである。若い水の混合指標としての有機 ^{14}C の有用性を確認するために、瑞浪地域においては 200 m および 500 m の研究坑道においてナノフィルタ膜を用いて有機物を採取し、さらに合成吸着樹脂への吸着特性によって有機物を分類し、分類されたそれぞれの有機物における ^{14}C を分析した。

その結果、瑞浪地域の地下坑道 200m および 500m で得られた有機物中の ^{14}C 年代は、He 等から想定される地下水年代と比べて顕著に若い値を示した。瑞浪地域ではとくに地下深部での有機物濃度が低いと、比較的若い地下水に含まれる有機物が、地下水の流れとともに地下深くへと移行し、この有機物が検出されたため、地下水に比べて有機 ^{14}C の値が若い値を示したものと推察された。この結果は、有機 ^{14}C が若い地下水流入の指標として有用である可能性を示唆している。

さらに、合成吸着樹脂への吸着特性で分類して、 ^{14}C を分析した結果では、樹脂への吸着性が高いほど有機 ^{14}C は古い年代を示すことがわかった。このため瑞浪地域の環境では、地下水中の有機物は時間が経過するとともに、疎水性が高くなる可能性があることが分かった。この特性を利用して、古い地下水、新しい地下水それぞれに含まれる有機物を分離し、それぞれの有機 ^{14}C を評価できる可能性があると考えられた。

地下坑道 200 m と 500 m とで採取された有機物における ^{14}C を比較したところ、200 m、500 m ともに He 等から推定される値より若い値を示し、200m と 500m の有機 ^{14}C 年代には大きな差がなかった。これは、瑞浪地域の深部では特に有機物の量が少なく、200m と 500m とで採取された有機物はともに地表付近の若い地下水に含まれる有機物が支配的であったためであると考えられる。トリチウム等の指標では、500m への若い地下水への流入は顕著でないため、この結果は有機 ^{14}C が若い地下水の流入指標として極めて高感度である可能性を示唆していると考えられるが、さらに慎重な検討が必要である。

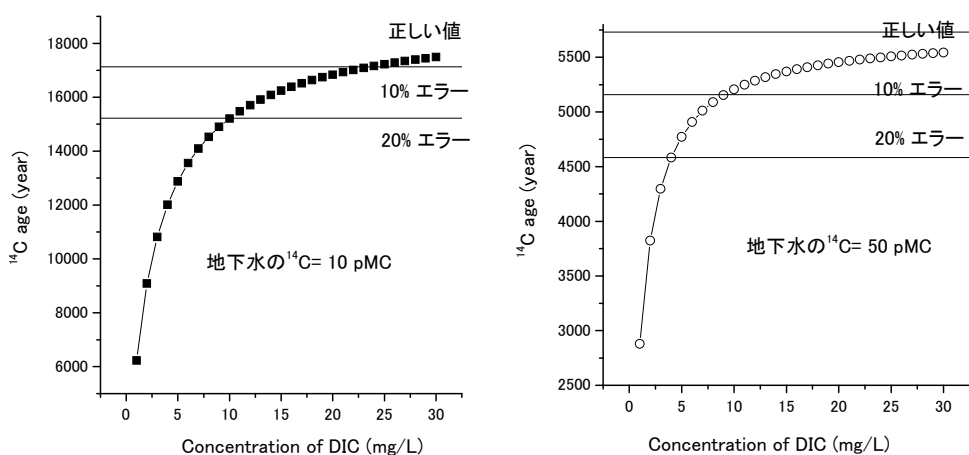


図 6.4.3-1 地下水中の無機炭素濃度・ ^{14}C と沈殿法における値の関係

(2) 希ガス温度計

希ガスには、ヘリウム(He)、ネオン(Ne)、アルゴン(Ar)、クリプトン(Kr)、キセノン(Xe)などがあり、これらの内、質量数が重い希ガスは、図 6.4.3-2 に示すように、温度によって溶解度に変化することが知られている。このため、希ガスの濃度から涵養温度の推定を瑞浪で実施した。

希ガス濃度から涵養温度を求める場合、地下水中の Ne, Ar, Kr, Xe の濃度を測定し、涵養温度と大気混入率の 2 つを変数として、最適値を求めるのが一般的である (Ballentine and Hall, 1999)。ただし、各ガスによって溶解度が異なるので、各ガスの濃度によって誤差を規格化し、誤差の最小化を図った。

この方法を瑞浪地域に適用した結果、図 6.3.1-7 に示すように、温度依存性が高い水素同位体比との相関が得られるとともに、涵養域での温度と流出域での濃度をおおむね反映した涵養温度となっていた。このため、希ガス温度計は涵養温度の推定に有望であると考えられた。

(3) 拡散指標 ($\delta^{37}\text{Cl}$ 、 $\delta^{81}\text{Br}$)

地下水流動が非常に遅い場合には、移流でなく拡散による輸送が支配的になる。これは、移流よりも拡散による輸送が大きくなる状態を意味しており、ペクレ数 (移流によるフラックス/拡散によるフラックス) が 1 以下になると拡散支配と言われている。拡散は最も遅い輸送形態であり、拡散が支配的な場合は、天然バリア性能が高いと考えられる。このような場を確認するには、拡散によって分別する物質 ($\delta^{37}\text{Cl}$ と $\delta^{81}\text{Br}$) を指標として評価するのが有効であると考えられる。Cl は ^{35}Cl と ^{37}Cl の比率が 75.53%と 24.47%となっており、Br は ^{79}Br と ^{81}Br の比率が 50.69%と 49.31%である。これらは、質量数が異なるため、拡散によって分別することが知られている (Eggenkamp and Coleman., 2009)。ただし、岩石での分別係数を計測した事例はないため、計測方法の提案と実岩石を用いて計測を行った (Hasegawa and Nakata, 2018)。

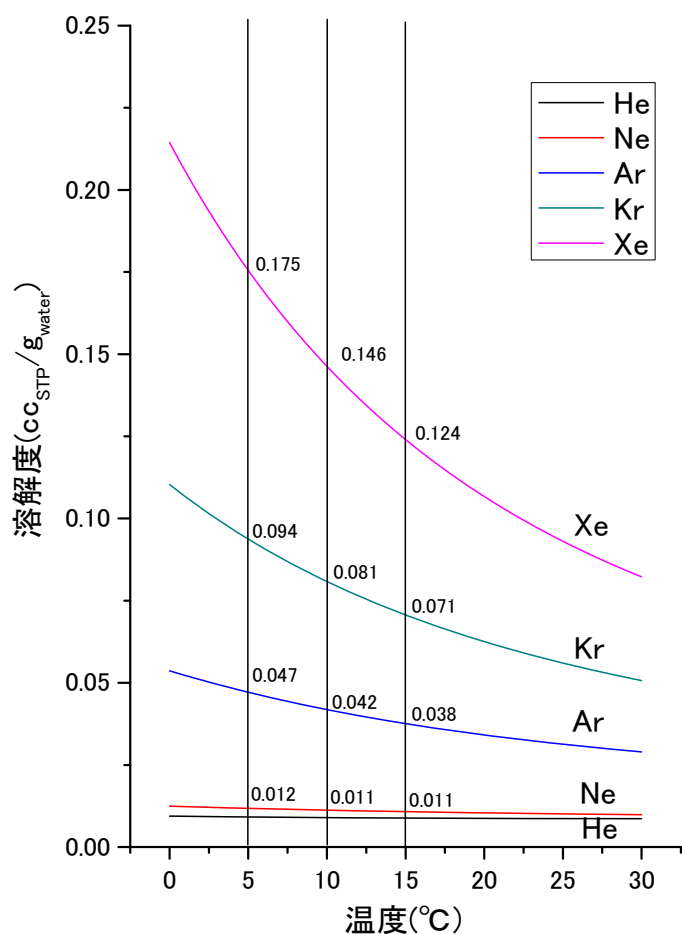


図 6.4.3-2 温度と希ガスの溶解度の関係

分別係数の計測方法は、拡散係数を求める際に室内試験で一般的に実施される Through-diffusion 試験を応用した方法である。この試験の定常状態のフラックスの ^{35}Cl と ^{37}Cl の比は、拡散係数に比例するため、フラックスの同位体比を計測すれば、同位体分別係数が計測できる。実際には、初期のフラックスは同位体分別が大きい、拡散試験中にタンクの濃度が変化するため、これらを補正して評価する必要がある。

ここでは、Through-Diffusion 法による拡散試験を実施し、分別係数を図 6.4.3-3 に示すように求めた。図は、声問層の岩石を用いた試験で、低濃度側での濃度と同位体比の時間変化を示している。高濃度側の初期の Cl 濃度と Br 濃度はそれぞれ約 20000 mg/l と 5000 mg/l であり、低濃度側は Cl 濃度、Br 濃度ともに 0mg/l である。低濃度側の Cl 濃度と Br 濃度は時間とともに増加する。一方で、 $\delta^{37}\text{Cl}$ と $\delta^{81}\text{Br}$ は-1.4‰と-0.5‰程度となる。これは、フラックスがほぼ定常状態で、フラックスは分別した値を持っているためと考えられる。求められた拡散係数は Cl で $1.2 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 、Br で $1.0 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 、分別係数は Cl で 1.0014、Br で 1.0005 となる。

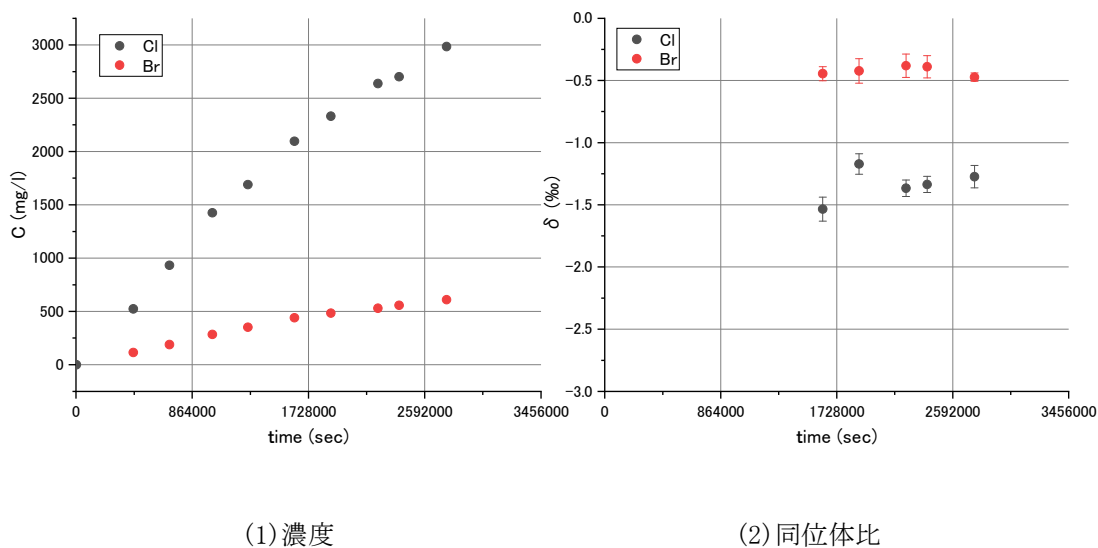


図 6.4.3-3 Through-Diffusion 拡散試験による分別係数の計測

6.5 調査結果のまとめ

精密調査段階で実施する地下水年代測定技術を開発するために、研究坑道における地下水調査と天然トレーサの調査を実施した。研究坑道における地下水調査では、図 6.4.3-1 に示すように瑞浪および幌延の研究坑道において、地下水年代測定法を実施し、これまでのボーリング調査結果の妥当性を確認するとともに、新しい地下水の流入を評価した。また、天然トレーサの調査では、立坑において適用するサンプリング方法や新しい地下水年代法について調査を行った。

瑞浪研究坑道における調査では、瑞浪立坑では、掘削の影響により、流出域地下水、浅層地下水、化

石海水の3種類が混合しており、浅層地下水の混合は、 ^3H 、 ^{14}C 、 δD と $\delta^{18}\text{O}$ で、化石海水の混合は、 ^4He 、 Cl 、 Na 、 Br などで評価できることがわかった。ただし、化石海水の混合率はエンドメンバーが不明のため定量困難である。また、流出域の地下水の年代は、 ^{14}C 法、 ^4He 法、希ガス温度計でおよそ2万年の氷期に涵養した降水と評価できた。

幌延研究坑道における調査では、新しい地下水の流入は確認できなかったが、化石海水と降水とが混合していることが確認できた。立坑周辺では、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ や ^4He 濃度から定性的に古いことが確認できたが、化石海水と降水の混合が進んでいるため、定量的に年代を評価することが困難であった。また、 ^4He については、立坑掘削の影響で脱ガスしており、補正しても元の濃度が推定できない可能性がある。

サンプリング方法の調査では希ガスサンプリング、水蒸気法、圧縮抽水法について検討した。希ガスについては脱ガス時の挙動がHenryの法則に従い補正できることが確認できた。ただし、メタンなどの共存ガスの影響で脱ガスが激しいと評価が難しくなることもわかった。水蒸気法では、岩石コアから水蒸気を蒸発させ、それを計測することで水素酸素同位体比を計測できることを確認した(Nakata et al. 投稿中)。また、幌延立坑のコアに適用して水蒸気法の有効性を示した。

新しい地下水年代法については、速い流れの指標となる物質として、 ^3H とフロンガス・ SF_6 を新しい地下水の混合の評価に用いた。遅い流れの指標になる物質として ^{14}C 、希ガス温度計、 $\delta^{37}\text{Cl}$ と $\delta^{81}\text{Br}$ (拡散指標)を調査した。

^3H はIn-growth法による分析法を瑞浪立坑に適用し、その有効性を他の指標との相関から示した。フロンガスと SF_6 も瑞浪立坑に適用したが、フロンガスは微生物分解、 SF_6 は原位置生成の影響で、適用が困難であった。 ^{14}C は大気への混入による値の増加やばらつきが明らかとなったため、ガス化法を開発し(Nakata et al., 2016)、その有効性を瑞浪立坑の地下水年代測定で示した。希ガス温度計については、瑞浪立坑周辺の地下水が氷期に涵養した降水を主体とすることを示した。拡散指標の評価では、 $\delta^{37}\text{Cl}$ と $\delta^{81}\text{Br}$ の拡散による分別係数の計測方法を示した(Hasegawa and Nakata, 2018)。

これまでに、 ^3H のin-growth法、 ^{14}C のガス化法、希ガス温度計、拡散指標($\delta^{37}\text{Cl}$ と $\delta^{81}\text{Br}$)などの新たな方法を整備できたため、これを今回検討した立坑周辺だけでなく、広域的な地下水調査に展開し、広域的な地下水流動の妥当性検証につなげていくことが重要である。また、新しい地下水年代測定法や分析方法も開発されているため、適用性の向上を図ることが評価法の信頼性向上を図るうえで重要である。特に、瑞浪地区では、数万年程度の滞留時間であることがわかってきており、地下水流動解析との整合性や新しい技術を確立する場として有効であると考えられる。さらに、マトリックス拡散が、物質移行に影響を及ぼす可能性が高いことから、広域と狭域を比較していくことも、割れ目系岩盤の物質移行特性を評価するうえで重要であると考えられる。また、幌延地区では、化石海水が降水と混合しているため、化石海水が残留するような遅い物質の輸送形態(拡散場)を評価する技術や、混合している降水の年代を評価するための技術の開発が必要であると考えられる。

表 6.5-1 各地点および目的での地下水年代測定法の有効性

	対象物質 (半減期:年)	時間スケール(年)								瑞浪		幌延		特記事項	
		10 ⁻¹	10 ⁰	10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷	①	②	①		②
放射性同位体	²²² Rn (0.01)	浅層水流入 ~0.03				瑞浪		幌延							
	⁸⁵ Kr (10.72)		1~40												
	³ H (12.43)		1~60							○		—			幌延立坑は到達していない
	(³ H+ ³ He)		1~100												
	³⁹ Ar (269)		50~2000												
	無機 ¹⁴ C (5730)			500~20,000						○	○	×	×		幌延は有機物起源Cが多く困難
	有機 ¹⁴ C (5730)			500~20,000						△	×				瑞浪立坑は浅層水の混合影響大
	⁸¹ Kr (2.1x10 ⁵)			10 ⁴ ~10 ⁶											
	³⁶ Cl (3.0x10 ⁵)			5x10 ⁴ ~2x10 ⁶						—		○			瑞浪は滞留時間が短く適用外
	¹²⁹ I (1.6x10 ⁷)				5x10 ⁵ ~5x10 ⁸										
溶存ガス	⁴ He		1,000~10 ⁷							○		△			幌延立坑はガスが抜けている?
	CFCs, SF ₆		1~60							×	△		—		微生物分解の影響が大きい
	Ne, Kr, Xe		涵養温度							○		×			幌延は脱ガスが激しい
安定同位体	δ ² H, δ ¹⁸ O		氷期or間氷期							○	○	○	—		幌延立坑は履歴が残っている

既存技術 ■ 検討技術 ■ 適用困難 ■

- ①ボーリング調査結果の妥当性の確認(瑞浪&幌延)
- ②新しい地下水の流入を評価に有効な指標

参考文献

- Ballentine, C. J. and C. M. Hall(1999): Determining paleotemperature and other variables using an error weighted non-linear inversion of noble gas concentrations in water, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 63, 16, 2315-2336.
- Bunsenberg, E. and Plummer, L.N. (2000): Dating young groundwater with sulphurhexafluoride - Natural and anthropogenic sources of sulphurhexafluoride, *Water Resour. Res.*, 36, 3011-3030.
- Eggenkamp, H.G.M., Coleman, M.L. (2009): The effect of aqueous diffusion on the fractionation of chlorine and bromine stable isotopes, *Geochim. Cosmochim. Acta* 73, 3539-3548.
- Hasegawa, T., Nakata. K., Tomioka, Y., Kazuyuki G., Kashiwaya, K., Hama, K., Iwatsuki, T., Kunimaru, T. and Takeda, M. (2016a): Cross-checking groundwater age by ^4He and ^{14}C dating in a granite, Tono area, central Japan, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 192, 166-185.
- Hasegawa, T. and Nakata. K. (2018): A measurement method for isotope fractionation of ^{35}Cl and ^{37}Cl by a conventional through-diffusion experiment. *Chemical Geology*, doi: 10.1016/j.chemgeo.2018.01.029.
- Iwatsuki, T., Furue, R., Mie, H., Ioka, S., Mizuno, T. (2005): Hydrochemical baseline condition of groundwater at the Mizunami underground research laboratory(MIU), *Applied Geochemistry* 20, 2283-2302.
- Nakata K., Hasegawa T., Iwatsuki T. and Kato T. (2016) : Comparison of ^{14}C collected by precipitation and gas-strip methods for dating groundwater, *Radiocarbon* 58, 491-503.
- Nakata K., Hasegawa T., Oyama T. and Miyakawa K. (投稿中): Evaluation of $\delta 2\text{H}$ and $\delta 18\text{O}$ of water in pores extracted by compression method -effects of closed pores and comparison to direct vapor equilibration and laser spectrometry method-
- Plummer L.N. and Bunsenberg(2006): Chlorofluorocarbons in the atmosphere (Chapter 2) in *Use of chlorofluorocarbons in hydrology -a guide book-*, IAEA.
- 佐々木俊法、須貝俊彦、柳田誠、森田益宗、古澤明、藤原治、守屋俊文、中川毅、宮城豊彦(2006) : 東濃地方内陸小盆地堆積物の分析による過去 30 万年間の古気候変動、第四期研究(The Quaternary Research)、45, 4, 275-286.

7. 各種調査・試験技術の適用性評価と物質移行特性調査・評価フローの提案

7.1 各種調査・試験技術の割れ目開口幅推定に対する適用性評価

本研究では、開発した各種調査・試験技術の適用性試験を、JAEA 瑞浪超深地層研究所の深度 300m ボーリング横坑と深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑において実施した。そのうち、深度 300m ボーリング横坑では、レジン注入試験を含むすべての調査・試験技術の適用性試験が実施された。それらの調査・試験技術により取得が期待される割れ目に関する情報を、表 7.1-1 に示す。表に示したように、各調査・試験技術では割れ目の開口幅の他に幾つかの割れ目に関する情報が取得される。それら割れ目開口幅以外の割れ目情報取得に対する各調査・試験技術の適用性については、第 4 章、第 5 章に記載した通りである。そこで、ここでは各調査・試験技術の割れ目開口幅推定に対する適用性について、比較検討を行う。ただし、表 7.1-1 に示した調査・試験技術のうち単孔トレーサー試験については、割れ目の開口幅と分散長を独立して推定することができないため、比較の対象から除外することとした。

JAEA 瑞浪超深地層研究所の深度 300m ボーリング横坑から掘削したボーリング 13MI37 号孔と深度 23.14m で交差する割れ目 (N26° W80° E) について、各調査・試験技術で得られた割れ目開口幅を表 7.1-2 に示す。表には、本研究で開発した技術ではないが、高精度ボアホール TV カメラによる計測結果も掲載した。表より、開口幅の推定値は 2 つのグループに分けられる。すなわち、孔間トレーサー試験、溶存ラドン濃度計測、高精度ボアホール TV カメラ計測のグループと、高粘性流体注入試験とレジン注入試験のグループである。前者は概ね開口幅 0.3~0.4 mm で、後者は 0.15~0.19 mm である。高粘性流体注入試験とレジン注入試験は、いずれも水の 100 倍程度の粘性を有する流体を対象割れ目に注入する試験であり、対象割れ目で開口幅の狭い部分には浸透していない可能性が高い。その結果、平均割れ目幅を算出する過程において、高粘性流体やレジンが浸透していない部分は開口幅をゼロと見なしていることになり、これら 2 種類の試験では開口幅の推定値が他の試験に比べて小さくなっている可能性が高い。そのため、これら 2 種類の試験については、開口幅の狭い割れ目の平均開口幅を推定するには適当でないと考えられる。ただし、高粘性流体注入試験とレジン注入試験についても、本来の目的である割れ目の流動次元や注入孔周辺の透水性、割れ目内の水みち構造を明らかにするという点に関しては、第 5 章に述べたように有用な手法であると考えられる。

表 7.1-1 各調査・試験で取得される割れ目に関する情報

調査・試験	取得される情報
単孔トレーサー試験	<ul style="list-style-type: none"> ・割れ目表面・マトリクス・充填鉱物への吸着・分配係数 ・集中定数（開口幅と分散長からなる無次元数）*
孔間トレーサー試験	<ul style="list-style-type: none"> ・割れ目表面・マトリクス・充填鉱物への吸着・分配係数 ・割れ目の開口幅 ・割れ目内分散長
高粘性流体注入試験	<ul style="list-style-type: none"> ・割れ目の流動次元 ・透水量係数 ・割れ目の開口幅
溶存ラドン濃度計測	<ul style="list-style-type: none"> ・割れ目の平均開口幅
レジジン注入試験	<ul style="list-style-type: none"> ・割れ目・近傍マトリクスの間隙構造の分布 ・割れ目の開口幅

※単孔トレーサー試験は、割れ目開口幅と分散長を独立して評価することはできない

表 7.1-2 各調査・試験による深度 300m の試験対象割れ目の開口幅

調査・試験	割れ目開口幅の推定値・計測値
孔間トレーサー試験	<ul style="list-style-type: none"> ・割れ目を平行平板でモデル化 0.30 mm（注水孔：12MI31 号孔、揚水孔：13MI37 号孔） 0.55 mm（注水孔：13MI37 号孔、揚水孔：12MI31 号孔）
高粘性流体注入試験	<ul style="list-style-type: none"> ・割れ目を平行平板でモデル化（注入孔から観測孔へ到達するまでの注入量から推定） 0.19 mm（注入孔：13MI37 号孔、観測孔：12MI31 号孔）
溶存ラドン濃度計測	<ul style="list-style-type: none"> ・割れ目を平行平板でモデル化（割れ目開口率を考慮して補正） 0.25～0.30 mm（13MI37 号孔と 12MI31 号孔の間で地下水を循環）
レジジン注入試験	<ul style="list-style-type: none"> ・研削面画像から計測した値の平均値 0.15mm（17MI60 号孔）
高精度 BTV カメラ （レジジン注入前）	<ul style="list-style-type: none"> ・孔周り 10 箇所の画像、4 計測/画像の計 40 計測値の算術平均 0.15 mm（12MI31 号孔） 0.70 mm（13MI37 号孔）
高精度 BTV カメラ （レジジン注入後）	<ul style="list-style-type: none"> ・孔周り 10 箇所の画像、4 計測/画像の計 40 計測値の算術平均 0.31 mm（17MI60 号孔） 0.03 mm（17MI61 号孔） 0.39 mm（17MI61 号孔）

7.2 物質移行特性調査・評価フローの提案

GTS での原位置トレーサー試験等の適用性試験、JAEA 瑞浪超深地層研究所での地質環境特性調査や適用性試験の他、多数の電力施設建設地点等での割れ目調査、スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社 (SKB) の Äspö 硬岩研究所や神岡鉱山での原位置トレーサー試験やその評価解析等の経験を踏まえて、図 7.2-1 に示す数 m スケールの岩盤中での特に割れ目を介した物質移行特性調査・評価のフローを提案する。このフローは亀裂性岩盤を対象としたものであり、亀裂性岩盤以外の岩盤ではラドン濃度計測試験、高粘性流体注入試験やレジン注入試験などの適用が困難な場合も想定される。また、マトリクス部の間隙率が大きく透水性も大きな堆積岩などでは、岩石コア試料を用いた室内試験の試験項目も亀裂性岩盤とは多少異なると考える。しかし、基本的な調査の流れは変わらないと考える。

以下に、各調査・試験で取得できる情報、調査にあたり留意すべき事項等について述べる。

1) 既存情報の取得・整理

地質、地下水、地化学、岩盤力学等に関する既存のデータを取得・整理し、調査計画を立案する。

2) 坑道壁面調査

ボーリング孔での調査に先立ち、坑道壁面の観察を行い、対象岩盤の地質状況および割れ目の分布特性、割れ目の形状や開口度、充填鉱物、湧水割れ目等を観察する。ここで取得した情報を既存情報と合わせて検討し、ボーリング孔の掘削位置や方向等の掘削計画を立案する。

3) ボーリング孔掘削・湧水量計測

試験対象となる岩盤ブロックに複数本のボーリング孔を掘削する。これにより、各種調査・試験を行うための孔を確保するとともに、コア観察や室内試験用試料としての岩石コアを取得できる。また、掘削時に湧水の位置や流量を記録することにより、透水性割れ目の場所を概略把握することができる。掘削にあたっては、コアの 100 %採取に努めることが肝要である。また、孔間トモグラフィの解析を容易にするために、孔どうしがねじれの関係にないようなボーリング孔配置とすることが望ましい。

4) 水圧応答計測 (2 本目掘削以降)

新たなボーリング孔を掘削する際には、既に掘削を終えた孔に設置された間隙水圧観測装置により、ボーリング孔掘削による水圧応答を計測する。計測データは、ボーリング孔間での岩盤の水理的な連続性を推測するためのデータとして有用である。そのため、ボーリング工事だけでなくサイト全体のイベントを記録しておき、水圧の反応がボーリング孔間の水理的な応答なのか、それ以外の外部要因によるものなのかを識別することが重要である。

5) 孔曲り検層

ボーリング孔は直線軌道からずれるため、ボーリング孔の軌跡を計測する。ボーリング孔を利用した各種試験、特に BTV 検層や孔間での試験の結果を解釈するための重要な基礎データとなる。

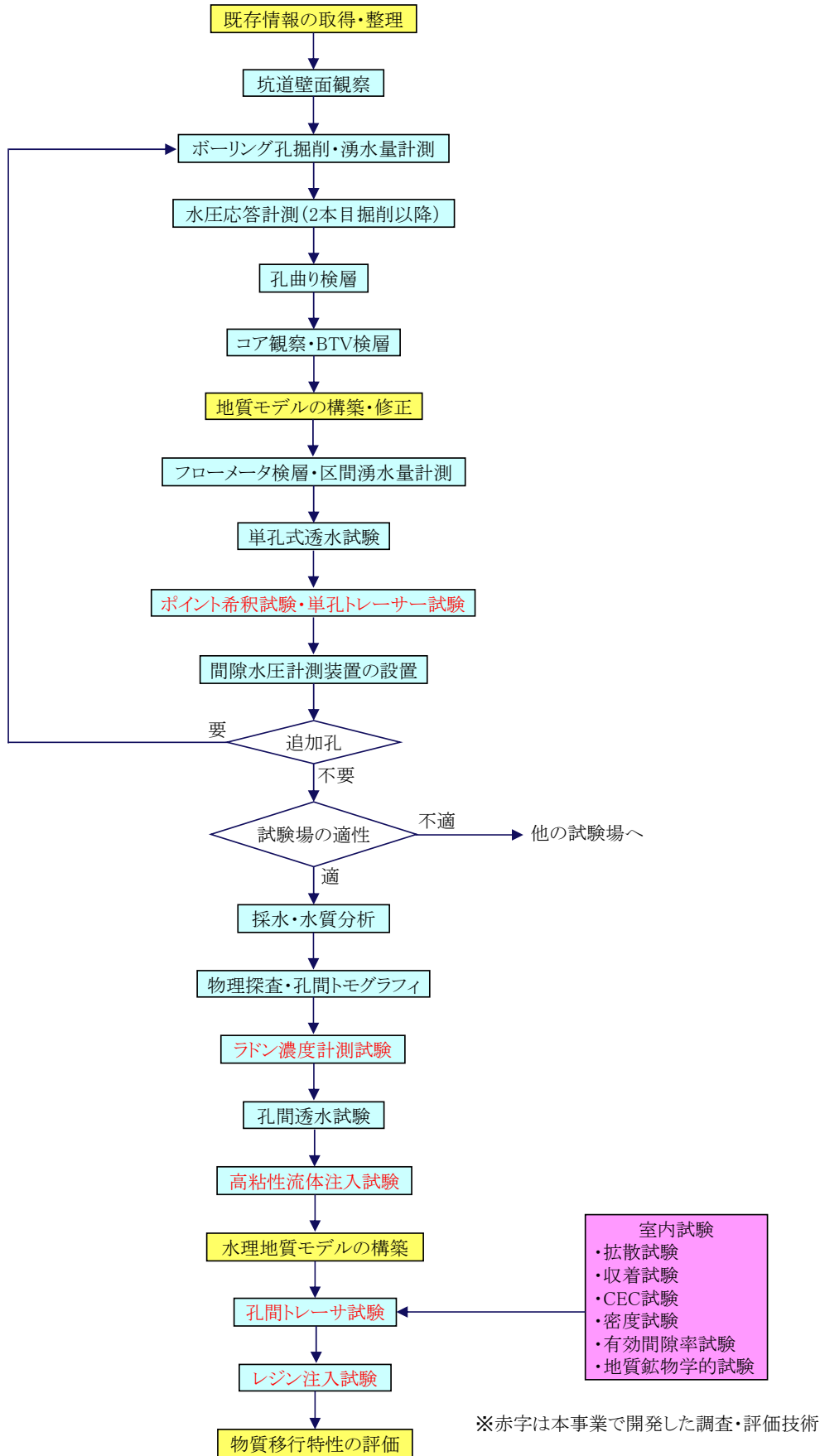


図 7.2-1 物質移行特性調査・評価のフロー

6) コア観察

岩相・岩質の分布、割れ目の界面形状や条線、充填鉱物の有無、マトリクスの変質（特に割れ目近傍）を把握する。掘削前から存在する割れ目と掘削により生じた割れ目との識別に留意する必要がある。

7) BTV 検層

ボアホール TV カメラにより孔壁観察を行い、割れ目分布や割れ目の走向傾斜を把握するとともに、割れ目の開口幅、充填鉱物の有無、割れ目開口度等を計測する。360 度孔壁展開画像を記録するタイプの TV カメラでは迅速に孔壁を撮影できる反面、解像度が十分ではない場合もある。そのため、必要に応じて画角詳細画像を記録するタイプの高解像度の TV カメラを併用するとよい。

これまでの既存情報の整理、坑道壁面の観察、コア観察、BTV 検層の結果を基に、詳細スケールの地質モデルを構築する。

8) フローメータ検層

フローメータ検層により、ボーリング孔に沿った地下水流入量の変化を計測し、ボーリング孔周辺岩盤の水みち分布の概略を把握する。

9) 区間湧水量計測

フローメータ検層では割れ目密度が高い場合に、湧水割れ目を特定するのが困難な場合がある。そこで、フローメータにより湧水が認められた箇所では、ダブルパッカー等を用いた区間湧水量計測を行い、正確な湧水量や湧水位置を計測し、単孔式水理試験の試験区間を決定するための基礎資料とする。

10) 単孔式水理試験

これまでの各種検層の結果により検出された主要な水みちについて、パッカーで孔内を区切った単孔式水理試験を実施し、各水みち割れ目の透水量係数を算定する。その際、水みちの透水性に応じて、パルス試験や定流量揚水試験等、試験手法を適切に選定することが重要である。

11) ポイント希釈試験

主要な水みちについてパッカーで孔内を区切ったポイント希釈試験を実施する。ポイント希釈試験により、揚水や注水を行わない自然の状態（バックグラウンド）でボーリング孔を通過する地下水流量を推定できる。バックグラウンドの地下水流量は、トレーサー試験の実施箇所の選定や試験条件（注水・揚水流量）を設定する上で極めて重要な指標となる。

また、複数のボーリング孔で連続する割れ目については、ボーリング孔間で差圧を計測することにより、バックグラウンドの動水勾配を推定できる。

12) 単孔トレーサー試験

主要な水みちについて単孔トレーサー試験を実施する。単孔トレーサー試験により、割れ目

の核種遅延機能の概略的な評価ができる。単孔トレーサー試験は簡便に行え低コストである反面、評価精度は孔間トレーサー試験より劣るため、特に重要な水みち割れ目については後に孔間トレーサー試験を実施し、物質移行特性を改めて評価する必要がある。

13) 間隙水圧計測装置の設置

掘削の終了したボーリング孔に複数の計測区間を有する間隙水圧計測装置を設置する。同装置により、自然状態の岩盤の間隙水圧や、新たなボーリング孔の掘削時や水理試験時の水圧応答の計測が可能となる。設置に際しては、複数の主要な透水性割れ目が同一の計測区間に入らないようにパッカー位置を設定することが肝要である。また、必要に応じて計測区間の見直しを適宜行う。

14) 採水・水質分析

周辺岩盤の地下水の流れが安定した状態で、幾つかの水みち割れ目から採水を行い、電気伝導度、酸化還元電位、主要元素濃度、トレーサーとして使用する物質のバックグラウンド濃度などを分析する。得られた水質データは、トレーサーとして用いる物質の選択や投入濃度、室内収着試験の条件設定等の基礎資料となる。

15) 物理探査・孔間トモグラフィ

ボーリング孔や坑道壁を利用して弾性波探査や地中レーダー等の物理探査、弾性波トモグラフィやレーダートモグラフィ等の孔間トモグラフィを実施し、孔間での岩盤割れ目の分布や連続性を推定する。弾性波トモグラフィの解析を行う上で、岩石マトリクスの異方性を室内試験により計測しておくことが重要である。

16) ラドン濃度計測試験

主要な割れ目を対象としてラドン濃度計測試験を行い、割れ目の平均的な開口幅の概略評価を行う。試験に先立ち、ICP-MSによりマトリクス中のウラン系列の元素含有量を測定しておく。また、坑道壁観察やBTV検層により割れ目の開口率を把握しておく。

17) 孔間水理試験

これまでの調査・試験により、トレーサー試験の候補となる水みち割れ目を絞り込み、孔間透水試験を実施し、その水みちの孔間での連続性を確認するとともに、孔間での透水量係数を算定する。孔間水理試験の解析には幾つかの手法が提案されており、複数の手法で解析を実施し、解析結果を比較するとよい。

18) 高粘性流体注入試験

主要な水みち割れ目を対象として高粘性流体注入試験を行い、割れ目の透水次元や開口幅を推定する。流体の粘性により浸潤できる開口幅の下限値が異なるため、同一の割れ目や注入孔であっても流体の粘性を変えて複数回の試験をすることが望ましい。また、割れ目の充填鉱物が未固

結である場合には、充填鉱物を押し流してしまわないように注入圧力に留意することが重要である。

高粘性流体注入試験は、後に実施するレジン注入試験の試験計画策定の参考となるため、レジン注入試験で使用するレジンと同じ粘性での試験も実施しておくといよい。

19) 水理地質モデルの構築

これまでの調査・試験の結果を基に、試験位置での岩盤の水理地質モデルを構築する。そして、試験位置の岩盤が水理地質的にサイト全体を代表するものか否か検討を行う。

20) 孔間トレーサー試験

試験に先立ち、19)で構築した水理地質モデルを基に、理論解や数値シミュレーションによる孔間トレーサー試験の予測解析を実施し、揚水孔・投入孔の選定、揚水・注水流量、試験時間、トレーサーの投入濃度、サンプリング間隔など、トレーサー試験の計画を策定する。

原位置では、まず、非収着性物質を用いたトレーサー試験を実施し、予測解析の結果と比較し、必要に応じて試験条件の見直しを行う。続いて、収着性物質を用いたトレーサー試験を実施する。特に収着性物質を用いた試験では、マトリクスへの拡散・収着現象が十分に生じるように、トレーサーの回収率を確保しつつ孔間の移行時間が極力長くなるような条件で実施することが重要である。また、割れ目の不均質性に対処するため、多数の孔の組み合わせや流量条件で試験を行うことが望ましい。

そして、原位置トレーサー試験により得られた破過曲線から、理論解や数値シミュレーションにより、割れ目の平均開口幅、割れ目内の分散長、割れ目充填鉱物、岩石マトリクスに対する分配係数等の溶質移行パラメータを同定する

21) 室内試験

3)のボーリング孔掘削で取得した岩石試料を用いて、各種室内試験を実施する。

拡散試験によりマトリクスの拡散係数のデータを取得する。拡散試験では、岩盤の変形特性等によっては、ボーリング掘削による応力開放の影響を考慮する必要がある。

収着試験によりマトリクス・充填物に対する分配係数のデータを取得する。収着試験では、14)で取得した水質データを基に、原位置の地下水環境を模擬した試験条件にすることが重要である。粒径の異なる粉末試料を用いたバッチ式収着試験により、割れ目の表面吸着係数の推定値を取得する。

CEC試験により陽イオン交換容量のデータを取得する。CEC試験では、試料の粒度組成に留意する。

地質鉱物学的試験として、XRD、顕微鏡観察、水銀圧入法による細孔分布測定等を実施し、マトリクス・充填物の鉱物組成、間隙径分布等のデータを取得する。堆積岩においては、粘土鉱物の種類や量を調べるとともに、鉱物化学試験、間隙水の水質分析などを行う。

密度試験によりマトリクスの密度、有効間隙率試験によりマトリクスの有効間隙率のデータを取得する。

堆積岩等のマトリクスもある程度の透水性を有する岩盤においては、岩石コアを用いた室内透水試験や室内トレーサー試験を行い、マトリクスの透水係数や分配係数を評価する。

以上のデータは、原位置トレーサー試験の予測解析や試験結果の評価解析に使用される。

22) レジン注入試験

原位置でのボーリング孔を使用したすべての試験が終了した後に、トレーサー試験等の対象割れ目にレジン（高分子樹脂）を注入する。割れ目の透水性、開口幅や孔間距離に応じて、粘性や固化時間等、適切なレジン材料を選定することが重要となる。レジんに添加する蛍光剤には、レジンから分離しにくい液体のものを使用するとよい。

また、割れ目の充填鉱物が未固結である場合には、充填鉱物を押し流してしまわないように注入圧力に留意する必要がある。注入圧力の設定には、18)の高粘性流体注入試験の結果が参考になる。

試験後は、オーバーコアリングや新たなボーリング孔の掘削を行い、BTV 検層による孔壁でのレジン充填状況の観察や、取得した岩石サンプルの目視による観察、顕微鏡観察、X線CT解析、連続研削面画像撮影等により、対象割れ目の間隙構造の分布を推定する。

23) 物質移行特性の評価

レジン注入試験の結果明らかとなった対象割れ目の間隙構造などを踏まえて必要に応じて孔間トレーサー試験の再評価を行うことも含め、これまでに取得した情報を基に対象岩盤の物質移行特性を総合的に評価する。

8. まとめと今後の課題

8.1 適用性試験場の地質環境調査

原位置トレーサー試験等の各種調査技術の適用性試験を実施するにあたり、平成 24 年度～平成 28 年度にかけて JAEA 瑞浪超深地層研究所の深度 300m ボーリング横坑および深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑の適用性試験場で地質環境調査を実施した。

前フェーズの平成 24 年度にも、上部割れ目帯に位置する深度 300m ボーリング横坑で 2 孔のボーリング掘削、透水試験、BTV 検層等を行い、適用性試験に適した湧水割れ目を確認したが、水理的に孔間で繋がる単一割れ目の特定までには至らなかった。そこで今フェーズ前半（平成 25～26 年度）は、深度 300m ボーリング横坑周辺の岩盤で卓越する NW 系の割れ目を地質的、水理的に捉えることを目的とし、新たにボーリング 3 孔を NW 系の割れ目に直交するように掘削した。各孔とも NNW 系の高傾斜の割れ目が卓越して現れ、15 mabh 以深では湧水を伴う割れ目の増加傾向がみられた。また、割れ目の充填鉱物として緑泥石や方解石が確認され、一部未固結で粘土化した状態のものもみられた。ボアホール TV カメラによる孔壁面の観察からは、NNW 系の高傾斜の開口割れ目が孔全体の多くを占め、水平な開口割れ目、NE 系の高傾斜の開口割れ目も認められた。これらの開口割れ目について、フローメーター検層や透水試験等により湧水量や透水量係数等を把握した。透水量係数は、最大で $10^{-6} \sim 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$ オーダーであった。掘削時の他孔での水圧応答や孔間透水試験等から水理的に複数区間どうしの連続性が確認されたことから、独立した単一割れ目形態としては存在せず、ネットワーク状に広がる複数の割れ目を選択的に通水していることが示唆された。

今フェーズ後半（平成 27～28 年度）は、下部割れ目帯に位置する深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑に調査対象の場を移し、地質環境調査を実施した。125m 計測横坑周辺の岩盤で卓越する NE 系の割れ目を地質的、水理的に捉えることを目的に、ボーリング 3 孔を NE 系の割れ目に直交するように掘削した。各孔とも NE 系の高傾斜の割れ目が卓越し、深度 300m ボーリング横坑と比べて割れ目密度は低い傾向であった。割れ目の充填鉱物として緑泥石、方解石が確認され、割れ目面にはフィルム状もしくは全体をコーティングするようにして付着している状態が確認された。各孔の湧水量は数 L/min 程度で、水みちとして捉えられた割れ目でも透水量係数 $10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}$ オーダーのものも珍しくはなく、深度 300m と比べて透水性は小さかった。ただし、高解像度 BTV 検層および水理試験結果の対比で多くの湧水割れ目が NE 走向であると判断でき、3 孔間の透水試験から単一の区間どうしでの水理的連続性が 3 箇所確認された。

今回、地質地下水調査により数 m スケールでの水みち割れ目の分布の推定を行ったが、今後は既存技術の組み合わせや高度化により、より広い領域での水みち割れ目の 3 次元的な分布を精度良く推定する技術や、広域の地下水流動解析の入力パラメーターの設定方法の開発が望まれる。

8.2 トレーサー試験に係わる室内試験

原位置でのトレーサー試験をサポートするための室内試験を実施した。

室内での収着試験やトレーサー試験により分配係数の取りうる範囲と条件依存性を明らかにするために、種々の条件や試験方法で Rb や Ba の花崗岩への分配係数を取得した。その結果、試験方法等の差によって最大で数十倍程度の分配係数の差異が観察された。また、試験条件の中では岩石と溶液の接触時間が結果に大きな影響を与えることが分かった。室内単孔トレーサー試験の評価解析から、トレーサー試験の結果は数値解析などにより接触時間による効果（基質部への拡散など）を考慮して評価する必要があると考えられた。

非収着性トレーサーとして有用な蛍光染料を正確に分析するための留意点と対策を明らかにするために、蛍光染料のサンプリングから分析において、蛍光染料の強度に影響がある要因を抽出し、その対策を示した。溶液の pH やろ過方法などが蛍光染料の強度に大きく影響する可能性があり、pH を緩衝したり、ろ過方法やフィルタの選定に留意するなどが必要であることが分かった。

割れ目充てん鉱物への核種の収着・脱離挙動を明らかにするために、瑞浪地域の割れ目観察から特定された割れ目充てん鉱物に対して、収着・脱離試験を実施し、充てん鉱物が収着挙動に与える影響について評価した。充てん鉱物が存在することで比表面積が大きくなり収着量が大きくなる効果のほか、鉱物の種類によっては不可逆的な収着が起きるため、さらに核種の移行が遅延される可能性があることを示した。今後は、充てん鉱物が割れ目に存在する場合の核種移行遅延機能を定量的に評価する手法の開発が望まれる。

表面吸着と岩石基質部への拡散に伴う収着を分離して評価する手法を提案するために、瑞浪超深地層研究所の深度 500m で採取した健岩部の岩石コアを粉碎して、粒径範囲の異なる 6 つの粉体試料を作製し、それぞれについてバッチ式の収着試験を実施した。そして、平均粒径の逆数と収着試験で得られた分配係数の関係から、粉体試料表面への吸着係数を粉体内部への拡散による分配係数から分離して推定した。その推定値を原位置トレーサー試験の評価解析に適用した結果、粒径を変えた粉体試料のバッチ式収着試験により割れ目表面への吸着係数を推定できる可能性があることがわかった。今後、他の地点、岩種についても、本手法により割れ目への表面吸着係数を推定することの妥当性を検討することが課題である。

8.3 原位置トレーサー試験

本研究では、平成 20～22 年度にスイス Nagra の Grimsel Test Site（以下、GTS）において実施した原位置トレーサー試験の結果を踏まえ、我が国の地質環境を考慮して試験装置の改良を行った。試験装置の孔内部は、パッカーにトレーサーを注入、揚水するためのポートを設けたパッカー一体型で、前フェーズのダブルパッカー方式に比べて、試験区間内のデッドボリュームを約 1/15

に低減することができた。また、六方バルブ（トレーサー循環バルブ）を作製し、孔内装置に組み込んだ。その結果、チューブ内分散の影響をほぼ受けず、理想的な矩形波に近い状態でのトレーサー注入が可能となった。そして、孔内蛍光濃度センサーについては、光源を高出力のものに変えるとともに、光ファイバーケーブルの接続箇所を減らすことで通信系のロスを低減させることにより、0.01mg/Lの低濃度の判別が可能となった。一方で、今年度、孔内に設置した蛍光濃度センサーの一つで蛍光強度が極端に低下する現象がみられた。原因として、水圧による変形や、内部鏡面への汚れの付着・蓄積の可能性が考えられ、更なる改良が必要と考えられる。

単孔トレーサー試験では、主に割れ目のみを考慮した割れ目モデルを用い、簡易に物質移行パラメータを評価することを試みた。しかし、割れ目モデルによる評価解析では、破過曲線を完全に再現することはできなかった。このため、割れ目に加えて岩盤マトリクスを考慮した複合モデルを用いて解析を実施した。解析の結果、マトリクスへの拡散、収着を考慮することにより、収着性トレーサーの破過曲線のピーク位置が非収着性トレーサーとほぼ変わらず、ピーク濃度のみ減少するといった傾向を再現することができた。ただし、花崗岩の間隙率は1%程度と非常に小さいうえに、原位置の試験では、室内試験に比べてトレーサーと岩盤マトリクスの接触時間が短いことから、マトリクスへの拡散、収着の効果が破過曲線に表れていると断定することが難しかった。以上のことから、砂岩のように間隙率が大きい地点での試験や室内試験を通して、今回得られた破過曲線と比較を行って割れ目内のトレーサー移行メカニズムを再評価することが今後の課題である。

孔間トレーサー試験について、深度300mの試験ではバックグラウンドの地下水流れが速く、揚水流量を大きくすることで回収率を確保した。そして、試験結果の評価解析では、まずトレーサーの回収率からバックグラウンドの地下水流れを推定した上で、割れ目の開口幅や分散長、吸着係数等の物質移行パラメーターを同定した。ただし、深度300mの試験対象割れ目には充填鉱物が含まれ、同定された吸着係数には充填鉱物の効果も含まれるものと考えられた。一方、深度500mの試験では対象割れ目内のバックグラウンドの地下水流れは非常に遅く、トレーサー試験への影響はほとんど無いと考えられた。また、対象割れ目には充填鉱物が含まれておらず、試験結果の評価解析では、室内試験で推定した表面吸着係数を用いることで、破過曲線を良好に再現しマトリクスへの分配係数を同定することができた。

精密調査段階の地下坑道内での調査においては、坑道内の多数の地点や割れ目を対象とした試験では単孔トレーサー試験を行い、代表的な地点、割れ目に絞って孔間トレーサー試験を行うなど、使い分けが必要であると考えられる。

今後の課題としては、室内試験で得られた表面吸着係数や充填鉱物の吸着特性を、原位置での物質移行の定量的評価に取り込む手法の確立が挙げられる。また、今回は数mスケールの単一割れ目あるいはそれに近い地質構造の物質移行特性の推定を行ったが、今後はより広い領域での多数の水

みち割れ目のネットワークによる物質移動特性を推定する手法や、広域の物質移行解析の入力パラメーターの設定方法の開発が望まれる。

8.4 各種割れ目探査技術の開発

8.4.1 ラドン濃度計測による割れ目調査技術の開発

割れ目の開口幅の推定方法として溶存ラドン濃度計測による方法を開発し、我が国の地質環境での適用性を検討した。今フェーズは、JAEA 瑞浪超深地層研究所の深度 300m ボーリング横坑と深度 500m 研究アクセス南坑道の 2 箇所、ラドン循環試験により割れ目の開口幅を評価した。ラドン循環試験は約 1 カ月の間に 4 回循環試験と採水を行い、それぞれラドン濃度を計測した。岩石からのラドンフラックスは、ボーリングコアを用いた室内試験により推定した。以上よりラドンフラックス、ラドン濃度に加えて高精度ボアホール TV による開口率を用いて評価した開口幅を他の手法の結果と比較したところ、相補的にラドン循環試験の適用性について確認することができた。精度の高い割れ目開口幅の評価には、開口率をボアホール TV などにより把握することが重要である。

また、今フェーズは瑞浪超深地層研究所のボーリングの 19 区間でラドン濃度を計測した。3 カ年のラドン濃度と、コアから得たラドンフラックスなどから、それら 19 区間の割れ目の開口幅は 0.1~1.5 mm と評価した。概要調査へ本手法を適用する場合には、ボーリング掘削時の湧水の採水や、間隙水圧モニタリングシステム設置後に区間内のラドン濃度が放射平衡に達するまで 1 ヶ月以上の期間をあけて採水することで、合理的な割れ目の開口幅の評価が可能と考えられる。

8.4.2 高粘性流体注入試験技術の開発

瑞浪超深地層研究所の 300m ボーリング横坑と 500m アクセス南坑道で高粘性流体試験を実施した。この結果、注入圧力の時間変化から、高粘性流体が 2 次元的に広がっていることと透水量係数が時間とともに変化していることがわかった。また、観測孔での圧力応答から、高粘性流体の到達および割れ目の幅の評価を行い、割れ目幅は透水量係数から 3 乗則で求めたものと同程度か大きいことがわかった。ただし、観測孔のデッドボリュームが大きい 500m アクセス南坑道の調査では、圧力応答が明確ではなかった。このため、高粘性流体試験時には、観測区間のデッドボリュームは可能な限り小さくする必要があると考えられる。

高粘性流体試験では、透水量係数の変化は評価可能だが、広がりの評価が難しく、観測孔における圧力応答から推定している。今後は、複数の注入孔を設けてクロスホールの実施するなど割れ目の広がりに着目して調査することが、高粘性流体試験を用いて流れ場を理解するうえで重要であると考えられる。

8.4.3 割れ目の可視化技術の開発

前フェーズでは割れ目の分布が比較的単純なスイスのグリムゼル試験場において割れ目の可視化技術の適用性試験を実施し、その有効性を示した。その結果を踏まえて本フェーズでは、国内の試験場での適用性試験に向けて、まず始めに注入剤（レジン、蛍光材）の選定と装置の試作を行った。

レジンは、広範囲に注入できる浸透性と作業時間の制約を受けにくい可使時間を持つものを選定した。レジンに添加する蛍光剤は、水と接触した際にレジンから蛍光剤が分離しないものを選定した。レジンが試験環境などにより本来の性能からどの程度変化するのかを把握することを目的に、粘度・可使時間・付着力・硬度といった基本的な特性に関する試験を行った。その結果、若干の変化は見られたが、本来の性能と同等の性能を確保できることがわかった。

また、岩盤割れ目に高品質の注入材を高精度かつ効率的に注入するために、原位置レジン注入試験装置を試作した。

最終年度は JAEA 瑞浪超深地層研究所の深度 300m の適用性試験場において、試作した装置と選定した注入材を用いて原位置試験を実施し、国内の地質環境に対する本技術の適用性を実証した。その結果、本フェーズで開発した原位置レジン注入試験装置が、ネットワーク状に発達した割れ目に対してレジンを効果的に注入できることを、原位置において確認した。3本のボーリングコアから確認されたレジンの充填状態から、地下水が選択的に流れる経路を把握することができることがわかった。また、逐次研削法で得られたレジン充填幅分布から、各種割れ目探査技術で推定される割れ目幅の違いを説明できる可能性があることがわかった。

割れ目の形成・活動履歴とその長期的挙動、核種吸着特性を理解するために、鉱物学的・地球化学的分析に基づいた割れ目内充填鉱物や割れ目周辺母岩の地質構造や変形構造の詳細な分析を行う必要があり、今後の課題としたい。

8.4.4 各種割れ目探査技術の室内比較試験

原位置では各種の割れ目探査技術を統一的に適用することが難しい。このため、室内の割れ目幅既知のモデルにおいて、透水試験、高粘性流体試験、トレーサー試験、溶存ラドン濃度計測、レジン注入試験を実施した。この結果、割れ目幅について、溶存ラドン濃度計測試験を除いては総合的な評価結果が得られた。ラドン濃度試験の精度が悪いのは、室内試験では採取できる試料が少なく、漏気しやすいためと考えられた。その他に、高粘性流体は水と混合し粘性が低下するため、割れ目幅をやや過大評価する。トレーサー試験では、デッドボリュームが大きいと誤差が大きくなる。レジン注入試験では、厚み計測の際に、境界の判定が難しく、剥がすと幅が大きく評価される傾向がある。

室内試験による各種割れ目探査技術の比較は、原位置試験で発生しうる課題を把握することができると重要である。室内試験で原位置試験を補完していくことが、現象の理解や課題の解決につながると思われる。

8.5 天然トレーサーを利用した調査技術の開発

精密調査段階で実施する地下水年代測定技術を開発するために、研究坑道における地下水調査と天然トレーサーの調査を実施した。研究坑道における地下水調査では、瑞浪および幌延の研究坑道において、地下水年代測定法を実施し、これまでのボーリング調査結果の妥当性を確認するとともに、新しい地下水の流入を評価した。また、天然トレーサーの調査では、立坑において適用するサンプリング方法や新しい地下水年代法について調査を行った。

瑞浪研究坑道における調査では、瑞浪立坑では掘削の影響により、流出域の地下水、浅層地下水、化石海水の3種類が混合しており、浅層地下水の混合は ^3H 、 ^{14}C 、 δD と $\delta^{18}\text{O}$ で、化石海水の混合は ^4He 、 Cl 、 Na 、 Br などで評価できることがわかった。ただし、化石海水の混合率は、エンドメンバーが不明のため定量困難である。また、流出域の地下水の年代は、 ^{14}C 法、 ^4He 法、希ガス温度計でおおよそ2万年前の水期に涵養した降水と評価できた。

幌延研究坑道における調査では新しい地下水の流入は確認できなかったが、化石海水と降水とが混合していることが確認できた。立坑周辺では、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ や ^4He 濃度から定性的に古いことが確認できたが、化石海水と降水の混合が進んでいるため、定量的に年代を評価することが困難であった。また、 ^4He については、立坑掘削の影響で脱ガスしており、補正しても元の濃度が推定できない可能性がある。

サンプリング方法の調査では、希ガスサンプリング、水蒸気法、圧縮抽水法について検討した。希ガスについては、脱ガス時の挙動がHenryの法則に従い補正できることが確認できた。ただし、メタンなどの共存ガスの影響で脱ガスが激しいと評価が難しくなることもわかった。水蒸気法では、岩石コアから水蒸気を蒸発させ、それを計測することで水素酸素同位体比を計測できることを確認した(Nakata *et al.* 投稿中)。また、幌延立坑のコアに適用して水蒸気法の有効性を示した。

新しい地下水年代法については、速い流れの指標となる物質として、 ^3H とフロンガス・ SF_6 を浅層地下水の混合の評価に用いた。遅い流れの指標になる物質として、 ^{14}C 、希ガス温度計、 $\delta^{37}\text{Cl}$ と $\delta^{81}\text{Br}$ (拡散指標)を調査した。

^3H はIn-growth法による分析法を瑞浪立坑に適用し、その有効性を他の指標との相関から示した。フロンガスと SF_6 も瑞浪立坑に適用したが、フロンガスは微生物分解、 SF_6 は原位置生成の影響で適用が困難であった。 ^{14}C は大気の影響による値の増加やばらつきが明らかとなったため、ガス化法を開発し(Nakata *et al.*, 2016)、その有効性を瑞浪立坑の地下水年代測定で示した。希ガス温

度計については、瑞浪立坑周辺の地下水が氷期に涵養した降水を主体とすることを示した。拡散指標の評価では、 $\delta^{37}\text{Cl}$ と $\delta^{81}\text{Br}$ の拡散による分別係数の計測方法を示した (Hasegawa and Nakata, 2018)。

これまでに、 ^3H の in-growth 法、 ^{14}C のガス化法、希ガス温度計、拡散指標 ($\delta^{37}\text{Cl}$ と $\delta^{81}\text{Br}$) などの新たな方法を整備できたため、これを今回検討した立坑周辺だけでなく、広域的な地下水調査に展開し、広域的な地下水流動の妥当性検証につなげていくことが重要である。また、新しい地下水年代測定法や分析方法も開発されているため、これらの適用性の向上を図ることが評価法の信頼性向上を図るうえで重要である。特に、瑞浪地区では、数万年程度の滞留時間であることがわかってきており、地下水流動解析との整合性や新しい技術を確立する場として有効であると考えられる。さらに、マトリックス拡散が、物質移行に影響を及ぼす可能性が高いことから、広域と狭域を比較していくことも、割れ目系岩盤の物質移行特性を評価するうえで重要であると考えられる。また、幌延地区では、化石海水が降水と混合しているため、化石海水が残留するような遅い物質の輸送形態 (拡散場) を評価する技術や、混合している降水の年代を評価するための技術の開発が必要であると考えられる。