

平成 28 年度

# 地層処分技術調査等事業

(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-

報 告 書

平成 29 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
1.4 本年度の実施概要.....	1-3
1.4.1 国内の適用性試験場の地質環境調査.....	1-3
1.4.2 トレーサー試験技術の開発.....	1-3
1.4.3 各種割れ目探査技術の開発.....	1-4
1.4.4 天然トレーサーによる調査技術の開発.....	1-4
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 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑の概要.....	2-2
2.2 適用性試験場の地質環境調査概要.....	2-4
2.2.1 調査の目的.....	2-4
2.2.2 調査項目.....	2-4
2.3 調査手順.....	2-4
2.3.1 ボーリング調査.....	2-4
2.3.2 コア観察.....	2-15
2.3.3 キャリパー検層.....	2-18
2.3.4 BTV・フローメータ検層.....	2-19
2.3.5 透水試験.....	2-22
2.3.6 高精度孔曲がり検層.....	2-30
2.3.7 高解像度 BTV 検層.....	2-31
2.3.8 間隙水圧モニタリング装置の設置および観測.....	2-34
2.4 調査結果.....	2-36
2.4.1 ボーリング掘削.....	2-36
2.4.2 キャリパー検層結果.....	2-48
2.4.3 BTV・フローメータ検層結果.....	2-49

2.4.4	透水試験結果.....	2-50
2.4.5	高精度孔曲がり検層結果.....	2-62
2.4.6	高解像度 BTV 検層結果.....	2-64
2.4.7	間隙水圧のモニタリング装置設置.....	2-74
2.4.8	湧水割れ目の特徴.....	2-75
2.5	まとめ.....	2-78
2.5.1	ボーリング掘削.....	2-78
2.5.2	地質学的調査の結果.....	2-79
2.5.2	水理学的調査.....	2-79
2.5.3	割れ目の地質的・水理的に連続性.....	2-79
3.	トレーサー試験に係わる室内試験.....	3-1
3.1	背景.....	3-1
3.2	室内収着試験.....	3-2
3.2.1	粉体岩石のバッチ試験.....	3-3
3.2.2	柱状岩石のバッチ試験.....	3-6
3.2.3	粉末岩石のカラム試験.....	3-9
3.2.4	柱状岩石のカラム試験.....	3-16
3.2.5	1次元岩石モデルを用いた模擬トレーサー試験.....	3-21
3.2.6	実岩石からの逐次抽出.....	3-30
3.2.7	手法間における分配係数・遅延係数の比較と試験条件に対する依存性.....	3-31
3.3	割れ目充填鉱物への核種収着試験.....	3-34
3.3.1	瑞浪地域の割れ目における充填鉱物の特定.....	3-34
3.3.2	鉱物への収着試験.....	3-35
3.4	室内試験のまとめと課題.....	3-39
3.4.1	試験条件や試料形状に対する分配係数や遅延係数の依存性検討.....	3-39
3.4.2	割れ目充填鉱物への核種の収着挙動検討.....	3-40
4.	原位置トレーサー試験.....	4-1
4.1	はじめに.....	4-1
4.2	試験方法.....	4-2
4.2.1	トレーサー試験装置の概要.....	4-2
4.2.2	蛍光濃度センサーのキャリブレーション.....	4-4
4.2.3	水圧測定.....	4-8

4.2.4	孔内装置の設置.....	4-9
4.2.5	単孔トレーサー試験.....	4-11
4.2.6	孔間トレーサー試験.....	4-14
4.2.7	室内分析.....	4-16
4.3	試験結果.....	4-17
4.3.1	トレーサー試験実施場所の概要.....	4-17
4.3.2	蛍光濃度センサーのキャリブレーション.....	4-18
4.3.3	水圧測定.....	4-20
4.3.4	原位置試験結果.....	4-22
4.3.5	単孔トレーサー試験結果.....	4-23
4.3.6	孔間トレーサー試験結果（ダイポール試験）.....	4-48
4.3.7	試験装置の適用性の確認および今後の課題.....	4-72
4.3.8	室内分析結果.....	4-75
4.4	原位置試験の評価.....	4-104
4.4.1	単孔トレーサー試験結果の評価.....	4-104
4.4.2	孔間トレーサー試験結果の評価.....	4-120
4.5	トレーサー試験の評価解析.....	4-127
4.5.1	単孔トレーサー試験の評価解析.....	4-127
4.5.2	孔間トレーサー試験の評価解析.....	4-147
4.6	ポイント希釈試験の測定精度に関する検討.....	4-155
4.6.1	ポイント希釈試験の概要.....	4-155
4.6.2	本事業で開発した孔内装置.....	4-156
4.6.3	室内試験による検討.....	4-159
4.6.4	数値シミュレーションによる検討.....	4-165
4.7	まとめと今後の課題.....	4-173
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	今年度の実施概要.....	5-2
5.1.4	ラドンによる割れ目間隙幅の推定手法の適用性検討.....	5-3
5.1.5	ラドンフラックスの測定.....	5-28

5.1.6	原位置ラドン濃度計測による割れ目特性の検討	5-30
5.1.7	まとめ	5-35
5.2	高粘性流体注入試験技術の開発	5-38
5.2.1	背景および目的	5-38
5.2.2	試験地点	5-39
5.2.3	試験方法	5-41
5.2.4	試験結果	5-44
5.2.5	考察	5-52
5.3	割れ目の可視化技術の開発	5-55
5.3.1	背景及び目的	5-55
5.3.2	割れ目の3次元可視化と定量評価	5-56
5.3.3	割れ目の記載とX線CTによる割れ目可視化画像との比較	5-81
5.3.4	室内レジン注入試験	5-88
5.3.5	原位置レジン注入試験装置の試作	5-95
5.3.6	レジン特性試験	5-121
5.3.7	まとめ	5-142
5.4	各種割れ目探査技術の室内比較試験	5-145
5.4.1	背景および目的	5-145
5.4.2	試験モデル	5-145
5.4.3	試験方法	5-146
5.4.4	試験結果	5-152
5.4.5	試験結果の比較	5-159
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	6-2
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	6-3
6.3.2	瑞浪における地下水流動・物質移行解析	6-29
6.3.3	幌延における地下水調査	6-58
6.3.4	幌延における地下水流動・物質移行解析	6-72
6.4	天然トレーサーの調査	6-94
6.4.1	希ガスのサンプリング方法	6-94

6.4.2 速い流れの指標となる物質.....	6-104
6.4.3 遅い流れの指標となる物質.....	6-129
7. まとめと今後の課題.....	7-1
7.1 適用性試験場の地質環境調査.....	7-1
7.2 トレーサー試験に係わる室内試験.....	7-2
7.3 原位置トレーサー試験.....	7-3
7.4 各種割れ目探査技術の開発.....	7-4
7.5 天然トレーサーを利用した調査技術の開発.....	7-7

## 目 次

### 第2章

図 2.1.2-1	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	2-3
図 2.1.2-2	深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑	2-3
図 2.3.1-1	ボーリング孔掘削と地質地下水調査作業の施工フロー	2-5
図 2.3.1-2	主要ボーリング機材一覧表	2-6
図 2.3.1-3	ボーリング機材の写真	2-7
図 2.3.1-4	ボーリング資機材の仮設概念	2-8
図 2.3.1-5	緊急用水槽（貯水プール）の仮設と排水ルート概念	2-9
図 2.3.1-6	掘削水排水設備の写真	2-9
図 2.3.1-7	1 段目掘削の作業手順	2-11
図 2.3.1-8	1 段目掘削の各作業工程	2-12
図 2.3.1-9	クイックライナー工法の各作業工程	2-13
図 2.3.1-10	孔口装置概要図	2-14
図 2.3.1-11	分光蛍光光度計と蛍光染料濃度計測状況	2-15
図 2.3.2-1	ボーリングコアへの基準線の記入例と実際の状況	2-16
図 2.3.2-2	ボーリングコアのコア箱への収納状況	2-16
図 2.3.2-3	コア写真撮影台と現地設置状況	2-18
図 2.3.3-1	(上)キャリパープローブの全景 (下)測定用アーム (開いた状態)	2-19
図 2.3.4-1	フローメータ検層装置概念	2-20
図 2.3.4-2	スポンジパッカーの機能	2-21
図 2.3.5-1	透水試験装置の設置概念	2-23
図 2.3.5-2	透水試験の作業フロー	2-24
図 2.3.5-3	各試験時の装置概念	2-25
図 2.3.5-4	Log(t)-s 曲線(左)、Derivative Plot(右)の例	2-27
図 2.3.5-5	Log(tp・ $\Delta t / (tp + \Delta t)$ )-Sr 曲線(左)、Derivative Plot(右)の例	2-28
図 2.3.5-6	透水試験中の差圧測定概念	2-29
図 2.3.6-1	高精度孔曲がり検層のシステム概念 (引用 : <a href="http://well-murata.co.jp">http://well-murata.co.jp</a> )	2-30
図 2.3.7-1	BIP-V システム構成	2-31
図 2.3.7-2	面構造の走向傾斜の解析方法	2-32
図 2.3.7-3	幅の計測結果	2-33
図 2.3.8-1	間隙水圧モニタリングのパッカー・ロッド	2-35

図 2.4.1-1	16MI59 号孔の孔口ケーシング設置レイアウト	2-36
図 2.4.1-2	16MI59 号孔の孔口湧水量測定結果	2-37
図 2.4.1-3	16MI59 号孔掘削水のアミノ G 酸濃度と掘削時の湧水量	2-38
図 2.4.1-4	16MI59 号孔掘削中における 15MI52、15MI53 号孔の間隙水圧の変動	2-39
図 2.4.1-5	16MI59 号孔掘削時における 15MI52、15MI53 号孔の間隙水圧モニタリング装置の編成	2-39
図 2.4.1-6	16MI59 号孔ボーリングコア内にみられる小規模な MME の例	2-40
図 2.4.1-7	16MI59 号孔ボーリングコア内にみられる有色鉱物の shlieren(左)と横坑壁面の同組織	2-40
図 2.4.1-8	11.59~11.74mabh 付近の割れ目上盤側の変質状況	2-42
図 2.4.1-9	介在鉱物が認められない例(16MI59 号孔 掘削長 10.63mabh 割れ目)	2-43
図 2.4.1-10	フィルム状介在鉱物の例(16MI59 号孔 掘削長 24.67mabh 割れ目)	2-43
図 2.4.1-11	介在鉱物(緑泥石)がコーティングする例(16MI59 号孔 掘削長 11.60mabh 割れ目)	2-44
図 2.4.1-12	介在鉱物が粘土鉱物の例(16MI59 号孔 掘削長 26.17mabh 割れ目)	2-44
図 2.4.1-13	16MI59 号孔の総合柱状図	2-45
図 2.4.1-14	16MI59 号孔 ボーリングコア写真(0.00~18.00mabh)	2-46
図 2.4.1-15	16MI59 号孔 ボーリングコア写真(18.00~30.00mabh)	2-47
図 2.4.2-1	16MI59 号孔のキャリパー検層結果	2-48
図 2.4.3-1	16MI59 号孔のフローメータ検層結果	2-49
図 2.4.4-1	10.5mabh 付近の湧水量測定深度と割れ目分布	2-51
図 2.4.4-2	13.3mabh 付近の湧水量測定深度と割れ目分布	2-52
図 2.4.4-3	17.0mabh 付近の湧水量測定深度と割れ目分布	2-53
図 2.4.4-4	28.5mabh 付近の湧水量測定深度と割れ目分布	2-54
図 2.4.4-5	間隙水圧モニタリング区間	2-56
図 2.4.4-6	1-②試験時の 16MI59 号孔の圧力・流量および 15MI52 号孔、15MI53 号孔の圧力応答	2-57
図 2.4.4-7	2-①試験時の 16MI59 号孔の圧力・流量および 15MI52 号孔、15MI53 号孔の圧力応答	2-58
図 2.4.4-8	3-③試験時の 16MI59 号孔の圧力・流量および 15MI52 号孔、15MI53 号孔の圧力応答	2-59



図 2.4.4-9	4-②試験時の 16MI59 号孔の圧力・流量および 15MI52 号孔、15MI53 号孔の圧力応答 .....	2-60
図 2.4.5-1	16MI59 号孔ボーリング孔跡平面図 .....	2-62
図 2.4.5-2	16MI59 号孔のボーリング孔跡図 (左右変位推移) .....	2-63
図 2.4.5-3	16MI59 号孔のボーリング孔跡図 (上下変位推移) .....	2-63
図 2.4.6-1	16MI59 号孔 孔壁展開図 0.00~4.00mabh .....	2-65
図 2.4.6-2	16MI59 号孔 孔壁展開図 4.00~8.00mabh .....	2-65
図 2.4.6-3	16MI59 号孔 孔壁展開図 8.00~12.00mabh .....	2-66
図 2.4.6-4	16MI59 号孔 孔壁展開図 12.00~16.00mabh .....	2-66
図 2.4.6-5	16MI59 号孔 孔壁展開図 16.00~20.00mabh .....	2-67
図 2.4.6-6	16MI59 号孔 孔壁展開図 20.00~24.00mabh .....	2-67
図 2.4.6-7	16MI59 号孔 孔壁展開図 24.00~28.00mabh .....	2-68
図 2.4.6-8	16MI59 号孔 孔壁展開図 28.00~30.00mabh .....	2-68
図 2.4.6-9	16MI59 号孔 ステレオネット図 -全岩盤分離面- .....	2-69
図 2.4.6-10	16MI59 号孔 ステレオネット図 -割れ目- .....	2-69
図 2.4.6-11	16MI59 号孔 ステレオネット図 -開口割れ目- .....	2-70
図 2.4.6-12	16MI59 号孔 詳細観察画像 (8.66mabh N28W/82E) .....	2-71
図 2.4.6-13	16MI59 号孔 詳細観察画像 (9.30mabh N17W/76W) .....	2-71
図 2.4.6-14	16MI59 号孔 詳細観察画像 (9.47mabh N26W/81W) .....	2-72
図 2.4.6-15	16MI59 号孔 詳細観察画像 (9.98mabh N34E/87SE) .....	2-72
図 2.4.6-16	15MI52 号孔 詳細観察画像 (16.09mabh N23W/78W) .....	2-73
図 2.4.6-17	15MI52 号孔 詳細観察画像 (17.59mabh N32E/89NW) .....	2-73
図 2.4.7-1	16MI59 号孔の間隙水圧モニタリング装置の編成 .....	2-74
図 2.4.8-1	コア観察による深度 500m コアの割れ目密度分布 .....	2-75
図 2.4.8-2	深度 500m コアの割れ目の特徴別の卓越方向 .....	2-76
図 2.4.8-3	深度 500m に掘削した 3 孔間で地質的、水理的に連続性が確認された割れ目	2-77
図 2.4.8-1	16MI59 号孔の総合柱状図 .....	2-78

### 第 3 章

図 3.2.1-1	岩石粉末に対する Rb 収着率の経時変化 .....	3-5
図 3.2.1-2	岩石粉末に対する Rb 収着率の経時変化 .....	3-5
図 3.2.2-1	柱状岩石に対する Rb 収着率の経時変化 .....	3-7

図 3.2.2-2	柱状岩石に対する Ba 収着率の経時変化.....	3-8
図 3.2.2-3	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） .....	3-9
図 3.2.3-1	流速 1.0mL/min、バックグラウンド溶液 0.01M NaCl の条件で実施した岩石粉末カラム試験における破過曲線.....	3-10
図 3.2.3-2	流速 1.0mL/min、バックグラウンド溶液 0.1M NaCl の条件で実施した岩石粉末カラム試験における破過曲.....	3-11
図 3.2.3-3	流速 1.0mL/min、バックグラウンド溶液 0.5M NaCl の条件で実施した岩石粉末カラム試験における破過曲線.....	3-11
図 3.2.3-4	流速 1.0mL/min、バックグラウンド溶液 0.01M NaCl の条件で実施した岩石粉末カラム試験における破過曲線（Rb・Ba を拡大したもの） .....	3-12
図 3.2.3-5	岩石粉末カラム試験における流速依存性（Rb） .....	3-13
図 3.2.3-6	岩石粉末カラム試験における流速依存性（Ba） .....	3-14
図 3.2.3-7	バッチ試験とカラム試験の分配係数比較.....	3-16
図 3.2.4-1	模擬トレーサー試験に用いた柱状岩石充填カラム.....	3-18
図 3.2.4-2	柱状岩石カラムを用いた模擬トレーサー試験の試験系.....	3-18
図 3.2.4-3	流速 1.0mL/min バックグラウンド溶液 0.01M NaCl で実施した柱状岩石のカラム試験 .....	3-20
図 3.2.4-4	流速 1.0mL/min バックグラウンド溶液 0.1M NaCl で実施した柱状岩石のカラム試験 .....	3-20
図 3.2.4-5	流速 1.0mL/min バックグラウンド溶液 0.5M NaCl で実施した柱状岩石のカラム試験 .....	3-21
図 3.2.5-1	1次元モデルの概念図 .....	3-22
図 3.2.5-2	1次元モデルの外観 .....	3-22
図 3.2.5-3	岩石 1次元モデルを用いた孔間式トレーサー試験の試験系概念図 .....	3-23
図 3.2.5-4	流速 1.0mL/min バックグラウンド溶液 0.1M NaCl で実施した 1次元モデルにおける模擬孔間式トレーサー試験の結果.....	3-24
図 3.2.5-5	流速 1.0mL/min バックグラウンド溶液 0.01M NaCl で実施した 1次元モデルにおける模擬孔間式トレーサー試験の結果.....	3-24
図 3.2.5-6	流速 0.1mL/min バックグラウンド溶液 0.1M NaCl で実施した 1次元モデルにおける模擬孔間式トレーサー試験の結果.....	3-25
図 3.2.5-7	流速による Rb・Ba のピークの比較.....	3-26

図 3.2.5-8	流速 1.0mL/min バックグラウンド溶液 0.1M NaCl で実施した 1 次元モデルにおける模 擬単孔式トレーサー試験の結果.....	3-28
図 3.2.5-9	流速 1.0mL/min バックグラウンド溶液 0.01M NaCl で実施した 1 次元モデルにおける模 擬単孔式トレーサー試験の結果.....	3-29
図 3.2.5-10	流速 0.1mL/min バックグラウンド溶液 0.1M NaCl で実施した 1 次元モデルにおける模 擬単孔式トレーサー試験の結果.....	3-29

#### 第 4 章

図 4.2.1-1	トレーサー試験装置の全体構成.....	4-3
図 4.2.2-1	蛍光濃度測定 の概念.....	4-4
図 4.2.2-2	孔内蛍光濃度測定機器.....	4-5
図 4.2.2-3	蛍光分光光度計と蛍光染料濃度測定状況.....	4-6
図 4.2.2-4	キャリブレーションの作業状況.....	4-7
図 4.2.3-1	トレーサー試験中の差圧測定 の概念.....	4-8
図 4.2.4-1	(左)ピストンパッカー (右)孔口パッカーと中間パッカー、ロッド.....	4-9
図 4.2.4-2	トレーサー試験装置の挿入状況.....	4-10
図 4.2.5-1	単孔トレーサー試験のトレーサー濃度変化の模式図および破過曲線の例.....	4-11
図 4.2.5-2	単孔トレーサー試験の流路と手順.....	4-13
図 4.2.6-1	ダイポール試験の概念.....	4-14
図 4.2.6-2	ダイポール試験の流路と手順.....	4-15
図 4.3.1-1	トレーサー試験区間および 16MI59 号孔の間隙水圧モニタリング区間の平面分布 .....	4-17
図 4.3.2-1	蛍光濃度センサーVer. 3.1 (C1) の検量線 (50m 光ファイバー使用).....	4-18
図 4.3.2-2	蛍光濃度センサーVer. 3.1 (C2) の検量線 (50m 光ファイバー使用).....	4-18
図 4.3.2-3	蛍光濃度センサーVer. 1.0 (C3) の検量線.....	4-19
図 4.3.3-1	試験期間中の水頭差の推移.....	4-21
図 4.3.5-1	16S52T1、16S52T2 の配管図と容量.....	4-25
図 4.3.5-2	16S52T3~T6、16S53T7~T10 の配管図と容量.....	4-25
図 4.3.5-3	16S52T1 の試験条件と破過曲線.....	4-26
図 4.3.5-4	16S52T1 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答.....	4-27
図 4.3.5-5	16S52T2 の試験条件と破過曲線.....	4-28
図 4.3.5-6	16S52T2 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答.....	4-29

図 4.3.5-7	16S52T3 の試験条件と破過曲線	4-30
図 4.3.5-8	16S52T3 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答	4-31
図 4.3.5-9	16S52T4 の試験条件と破過曲線	4-32
図 4.3.5-10	16S52T4 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答	4-33
図 4.3.5-11	16S52T5 の試験条件と破過曲線	4-34
図 4.3.5-12	16S52T5 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答	4-35
図 4.3.5-13	16S52T6 の試験条件と破過曲線	4-36
図 4.3.5-14	16S52T6 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答	4-37
図 4.3.5-15	16S52T7 の試験条件と破過曲線	4-38
図 4.3.5-16	16S52T7 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答	4-39
図 4.3.5-17	16S52T8 の試験条件と破過曲線	4-40
図 4.3.5-18	16S52T8 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答	4-41
図 4.3.5-19	16S52T9 の試験条件と破過曲線	4-42
図 4.3.5-20	16S52T9 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答	4-43
図 4.3.5-21	16S52T10 の試験条件と破過曲線	4-44
図 4.3.5-22	16S52T10 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答	4-45
図 4.3.5-23	16S52T11 の試験条件と破過曲線	4-46
図 4.3.5-24	16S52T11 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答	4-47
図 4.3.6-1	16W5253T1~T3、T4-6 の配管図と容量	4-50
図 4.3.6-2	16W5352T7 の配管図と容量	4-50
図 4.3.6-3	16W5352T8、T9-11 の配管図と容量	4-51
図 4.3.6-4	16W5253T1 の試験条件と破過曲線	4-52
図 4.3.6-5	16W5253T1 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答	4-53
図 4.3.6-6	16W5253T2 の試験条件と破過曲線	4-54
図 4.3.6-7	16W5253T2 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答	4-55
図 4.3.6-8	16W5253T3 の試験条件と破過曲線	4-56
図 4.3.6-9	16W5253T3 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答	4-57
図 4.3.6-10	16W5253T4-6 の試験条件と破過曲線	4-58
図 4.3.6-11	16W5253T4-6 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答	4-59
図 4.3.6-12	16W5352T7 の試験条件と破過曲線	4-60
図 4.3.6-13	16W5352T7 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答	4-61
図 4.3.6-14	16W5352T8 の試験条件と破過曲線	4-62

図 4.3.6-15	16W5352T8 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答	4-63
図 4.3.6-16	16W5352T9-11 の試験条件と破過曲線	4-64
図 4.3.6-17	16W5352T9-11 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答	4-65
図 4.3.6-18	16W5352T12 の試験条件と破過曲線	4-66
図 4.3.6-19	16W5352T12 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答	4-67
図 4.3.6-20	16W5352T13-15 の試験条件と破過曲線	4-68
図 4.3.6-21	16W5352T13-15 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答	4-69
図 4.3.6-22	16W5352T16-18 の試験条件と破過曲線	4-70
図 4.3.6-23	16W5352T16-18 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答	4-71
図 4.3.7-1	6 方バルブ改良の概要	4-72
図 4.3.7-2	昼夜連続揚水のケース	4-73
図 4.3.7-3	揚水流量制御に用いたニードルバルブ	4-73
図 4.3.8-1	16S52T2 破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)	4-79
図 4.3.8-2	16S52T3 破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)	4-80
図 4.3.8-3	16S52T4 破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)	4-81
図 4.3.8-4	16S52T5 破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)	4-82
図 4.3.8-5	16S52T6 破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)	4-83
図 4.3.8-6	16S52T7 破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)	4-84
図 4.3.8-7	16S53T8 破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)	4-85
図 4.3.8-8	16S53T9 破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)	4-86
図 4.3.8-9	16S53T10 破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)	4-87
図 4.3.8-10	16S53T11 破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)	4-88
図 4.3.8-11	16W5253T1 破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)	4-94
図 4.3.8-12	16W5253T2 破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)	4-95
図 4.3.8-13	16W5253T3 破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)	4-96
図 4.3.8-14	16W5253T4-6 破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)	4-97
図 4.3.8-15	16W5352T7 破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)	4-98
図 4.3.8-16	16W5352T8 破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)	4-99
図 4.3.8-17	16W5352T9-11 破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)	4-100
図 4.3.8-18	16W5352T12 破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)	4-101
図 4.3.8-19	16W5352T13-15 破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)	4-102
図 4.3.8-20	16W5352T16-18 破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)	4-103

図 4.4.1-1	16S52T2, 16S52T3, 16S52T4 の破過曲線比較 .....	4-106
図 4.4.1-2	16S52T3, 16S52T5 の破過曲線比較 .....	4-107
図 4.4.1-3	16S52T3, 16S52T6 の破過曲線比較 .....	4-108
図 4.4.1-4	16S52T3, 16S53T7 の破過曲線比較 .....	4-109
図 4.4.1-5	16S53T9, 16S53T10, 16S53T11 の破過曲線比較 .....	4-110
図 4.4.1-6	16S52T2 の理論式による評価 .....	4-113
図 4.4.1-7	16S52T3 の理論式による評価 .....	4-114
図 4.4.1-8	16S52T4 の理論式による評価 .....	4-115
図 4.4.1-9	16S52T4 の理論式による評価 .....	4-116
図 4.4.1-10	16S52T6 の理論式による評価 .....	4-117
図 4.4.1-11	16S53T7 の理論式による評価 .....	4-118
図 4.4.1-12	16S53T8 の理論式による評価 .....	4-119
図 4.4.2-1	揚水流量の影響.....	4-122
図 4.4.2-2	同一ダイポール比の場合の流量の影響.....	4-123
図 4.4.2-3	トレーサー注入時間の影響.....	4-124
図 4.4.2-4	収着性トレーサーを用いた試験での注入時間の影響.....	4-125
図 4.4.2-5	収着性トレーサーを用いた試験での流量の影響.....	4-126
図 4.5.1-1	単孔トレーサー試験の評価解析で用いる解析モデル.....	4-128
図 4.5.1-2	非収着性トレーサー評価結果：16S52T2.....	4-132
図 4.5.1-3	非収着性トレーサー評価結果：16S52T3.....	4-133
図 4.5.1-4	非収着性トレーサー評価結果：16S52T4.....	4-134
図 4.5.1-5	非収着性トレーサー評価結果：16S52T5.....	4-135
図 4.5.1-6	非収着性トレーサー評価結果：16S52T6.....	4-136
図 4.5.1-7	収着性トレーサー評価解析結果：16S52T2.....	4-138
図 4.5.1-8	収着性トレーサー評価解析結果：16S52T3.....	4-139
図 4.5.1-9	収着性トレーサー評価解析結果：16S52T4.....	4-140
図 4.5.1-10	収着性トレーサー評価解析結果：16S52T5.....	4-141
図 4.5.1-11	収着性トレーサー評価解析結果：16S52T6.....	4-142
図 4.5.1-12	収着性トレーサー評価解析結果(地下水流れ無し)：16S52T2.....	4-144
図 4.5.1-13	収着性トレーサー評価解析結果(地下水流れ無し)：16S52T3.....	4-145
図 4.5.1-14	収着性トレーサー評価解析結果(地下水流れ無し)：16S52T4.....	4-145
図 4.5.1-15	収着性トレーサー評価解析結果(地下水流れ無し)：16S52T5.....	4-146

図 4.5.1-16	収着性トレーサー評価解析結果(地下水流れ無し) : 16S52T6	4-146
図 4.5.2-1	解析モデル (全体図)	4-149
図 4.5.2-2	割れ目面全体メッシュ	4-149
図 4.5.2-3	割れ目面孔間メッシュ	4-150
図 4.5.2-4	メッシュの厚み分布	4-150
図 4.5.2-5	割れ目内の全水頭分布の計算結果	4-151
図 4.5.2-6	割れ目内のダルシー流速分布の計算結果 (15W3137T8 試験)	4-151
図 4.5.2-7	ウラニンの破過曲線のフィッティング (16W5352T-12 試験)	4-152
図 4.5.2-8	ウラニンの破過曲線のフィッティング (16W5352T-13-15 試験)	4-152
図 4.5.2-9	ウラニンの破過曲線のフィッティング (16W5352T-16-18 試験)	4-152
図 4.5.2-10	Rb <sup>+</sup> の破過曲線のフィッティング (16W5352T-13-15 試験)	4-153
図 4.5.2-11	Rb <sup>+</sup> の破過曲線のフィッティング (16W5352T-16-18 試験)	4-153
図 4.5.2-12	Ba <sup>2+</sup> の破過曲線のフィッティング (16W5352T-13-15 試験)	4-154
図 4.5.2-13	Ba <sup>2+</sup> の破過曲線のフィッティング (16W5352T-16-18 試験)	4-154
図 4.6.1-1	ポイント希釈試験の測定原理(Gustafsson, <i>et al.</i> , 2006)	4-155
図 4.6.2-1	ダブルパッカー型孔内装置の写真	4-157
図 4.6.2-2	ダブルパッカー型孔内装置の外観	4-157
図 4.6.2-3	パッカー一体型孔内装置の写真	4-158
図 4.6.2-4	パッカー一体型孔内装置の外観	4-158
図 4.6.2-5	パッカー一体型孔内装置での試験区間の構築	4-158
図 4.6.3-1	試験風景	4-161
図 4.6.3-2	ポイント希釈試験の配管経路図	4-161
図 4.6.3-3	室内試験の手順 (設定通過流量 10 mL/min、循環流量 100 mL/min のケース)	4-162
図 4.6.3-4	ダブルパッカー型装置を用いた試験のチューブ (通過流入口・出口) と装置の位置関係	4-163
図 4.6.3-5	循環水中のトレーサー濃度の経時変化 (試験番号 2)	4-164
図 4.6.3-6	循環水中のトレーサー濃度の経時変化 (試験番号 10)	4-164
図 4.6.4-1	解析対象領域	4-165
図 4.6.4-2	メッシュ分割図 (解析領域全体)	4-166
図 4.6.4-3	メッシュ分割図 (割れ目とボーリング孔の交差部 1)	4-166
図 4.6.4-4	メッシュ分割図 (割れ目とボーリング孔の交差部 2)	4-167
図 4.6.4-5	メッシュ分割図 (割れ目とボーリング孔の交差部 3)	4-167

図 4.6.4-6	ポイント希釈試験の解析結果の例 1	4-170
図 4.6.4-7	ポイント希釈試験の解析結果の例 2	4-170
図 4.6.4-8	割れ目内地下水流れの方向と孔内装置との関係 (ダブルパッカー型孔内装置)	4-172
図 4.6.4-9	割れ目内地下水流れの方向と孔内装置との関係 (パッカー一体型孔内装置)	4-172

## 第 5 章

図 5.1.2-1	ラドンによる割れ目幅計測の原理	5-2
図 5.1.4-1	瑞浪花崗岩の $C_aO-Na_2O-K_2O$ 成分の三角ダイアグラム	5-5
図 5.1.4-2	ICP-GR01~ICP-GR08 の希土類パターン (ME-MS81 の分析値を使用)	5-8
図 5.1.4-3	ICP-GR01~ICP-GR08 と標準試料および未変質試料の希土類パターンの比較	5-8
図 5.1.4-4	XRD 分析のための試料の処理方法および同定鉱物	5-10
図 5.1.4-5	天然放射性元素の壊変系列 (ウラン系列)	5-12
図 5.1.4-6	天然放射性元素の壊変系列 (アクチニウム系列)	5-13
図 5.1.4-7	天然放射性元素の壊変系列 (トリウム系列)	5-13
図 5.1.4-8	分析用コア	5-14
図 5.1.4-9	$\alpha$ 線スペクトルの例 1 (ウラン同位体)	5-16
図 5.1.4-10	$\alpha$ 線スペクトルの例 2 (ウラン同位体)	5-16
図 5.1.4-11	同位体深度分布	5-17
図 5.1.4-12	$^{234}U/^{238}U$ および $^{230}Th/^{238}U$ の割れ目からの深度分布	5-17
図 5.1.4-13	$^{234}U/^{238}U$ および $^{230}Th/^{238}U$ の相関	5-17
図 5.1.4-14	細孔分布測定用 (赤) および岩石薄片製作用 (青) 試料の採取箇所 (PRS/TS-GR01~07)	5-20
図 5.1.4-15	TS-GR08 試料採取箇所	5-23
図 5.1.4-16	深度 500m コア試料の岩石薄片観察結果	5-27
図 5.1.5-1	岩石からのラドンフラックスの測定例	5-28
図 5.1.5-2	花崗岩コアを用いたラドン発生濃度の時間変化	5-29
図 5.1.6-1	GTS におけるラドン循環試験の概念図と測定結果	5-30
図 5.1.6-2	ラドン循環試験用採水ボトルの配置図と現場での設置状況	5-31
図 5.1.6-3	ラドン循環試験対象割れ目と試験孔	5-32
図 5.1.6-4	瑞浪超深地層研究所の各所ボーリング孔におけるラドン濃度	5-33
図 5.1.6-5	深度 500m 研究アクセス南坑道のボーリング孔におけるラドン濃度	5-34



図 5.2.1-1	高粘性流体注入試験の評価方法概念図	5-38
図 5.2.2-1	高粘性流体試験の実施位置と仮設状況	5-39
図 5.2.2-2	高粘性流体対象区間割れ目 (13MI37 号孔 : 23.135m, N26W80E)	5-40
図 5.2.2-3	高粘性流体注入割れ目と他のボーリング孔との関係	5-40
図 5.2.3-1	高粘性流体試験手順	5-41
図 5.2.3-2	高粘性流体注入試験装置の概念図	5-42
図 5.2.3-3	注入区間用パッカー	5-43
図 5.2.3-4	メチルセルロース (SH-60)における濃度と粘性の関係	5-44
図 5.2.4-1	透水試験結果 1回目 (70 ml/min)	5-46
図 5.2.4-2	高粘性流体注入試験結果 1回目 (100 cp, 70 ml/min)	5-47
図 5.2.4-3	透水試験結果 2回 (140 ml/min)	5-49
図 5.2.4-4	高粘性流体注入試験結果 2回目 (70 cp, 140 ml/min)	5-50
図 5.2.4-5	透水試験結果 3回 (140 ml/min)	5-51
図 5.2.5-1	高粘性流体試験結果の時間対数軸による比較	5-53
図 5.2.5-2	到達時間と注入量の関係から求めた割れ目幅	5-54
図 5.3-1	包埋固定後の岩石試料	5-57
図 5.3-2	模擬亀裂を有する岩石試料	5-57
図 5.3-3	医療用 X線 CT スキャナの外觀	5-58
図 5.3-4	マイクロフォーカス X線 CT システムの外觀	5-59
図 5.3-5	撮影方向 (左) と画像の表示方向 (右)	5-59
図 5.3-6	12MI31 号孔 医療用 X線 CT 画像 (xy 断面、14.88mabh)	5-62
図 5.3-7	12MI31 号孔 医療用 X線 CT 画像 (xy 断面、20.59mabh)	5-63
図 5.3-8	12MI31 号孔 医療用 X線 CT 画像 (xy 断面、21.89mabh)	5-63
図 5.3-9	12MI31 号孔 医療用 X線 CT 画像 (14.88mabh)	5-65
図 5.3-10	12MI31 号孔 医療用 X線 CT 画像 (20.59mabh)	5-65
図 5.3-11	12MI31 号孔 医療用 X線 CT 画像 (21.89mabh)	5-65
図 5.3-12	12MI31 号孔 割れ目の 3次元画像 (割れ目内空気、14.88mabh)	5-66
図 5.3-13	12MI31 号孔 割れ目の 3次元画像 (割れ目内レジン、14.88mabh)	5-67
図 5.3-14	12MI31 号孔 割れ目の 3次元画像 (割れ目内空気、20.58mabh)	5-67
図 5.3-15	12MI31 号孔 割れ目の 3次元画像 (割れ目内空気、21.89mabh)	5-68
図 5.3-16	12MI31 号孔 マイクロフォーカス X線 CT 画像 (xy 断面、14.88mabh)	5-69
図 5.3-17	12MI31 号孔 マイクロフォーカス X線 CT 画像 (xy 断面、20.58mabh)	5-69

図 5.3-18	12MI31 号孔	マイクロフォーカス X 線 CT 画像 (xy 断面、21.89mabh)	5-70
図 5.3-19	12MI31 号孔	マイクロフォーカス X 線 CT 画像 (14.88mabh)	5-70
図 5.3-20	12MI31 号孔	マイクロフォーカス X 線 CT 画像 (20.58mabh)	5-71
図 5.3-21	12MI31 号孔	マイクロフォーカス X 線 CT 画像 (21.89mabh)	5-71
図 5.3-22	12MI31 号孔	マイクロフォーカス X 線 CT 画像の展開表示 (14.88mabh)	5-72
図 5.3-23	12MI31 号孔	マイクロフォーカス X 線 CT 画像の展開表示 (20.58mabh)	5-72
図 5.3-24	12MI31 号孔	マイクロフォーカス X 線 CT 画像の展開表示 (21.89mabh)	5-72
図 5.3-25	12MI31 号孔	割れ目の 3 次元画像 (割れ目内レジン、14.88mabh)	5-73
図 5.3-26	12MI31 号孔	割れ目の 3 次元画像 (割れ目内レジン、20.58mabh)	5-74
図 5.3-27	12MI31 号孔	割れ目の 3 次元画像 (割れ目内レジン、21.89mabh)	5-74
図 5.3-28	直径 100mm の稲田花崗岩のマイクロフォーカス X 線 CT 画像	5-75	
図 5.3-29	マイクロフォーカス CT 画像の測点上のデジタル値	5-75	
図 5.3-30	蛍光灯光源下の研削断面 (切り込み深さ: 10.45mm)	5-76	
図 5.3-31	紫外線光源下の研削断面 (切り込み深さ: 10.45mm)	5-76	
図 5.3-32	蛍光灯+紫外線光源下の研削断面 (切り込み深さ: 10.45mm)	5-77	
図 5.3-33	蛍光灯光源下の研削断面 (切り込み深さ: 30.40mm)	5-77	
図 5.3-34	紫外線光源下の研削断面 (切り込み深さ: 30.40mm)	5-77	
図 5.3-35	蛍光灯+紫外線光源下の研削断面 (切り込み深さ: 30.40mm)	5-78	
図 5.3-36	蛍光灯光源下の研削断面 (切り込み深さ: 50.35mm)	5-78	
図 5.3-37	紫外線光源下の研削断面 (切り込み深さ: 50.35mm)	5-78	
図 5.3-38	蛍光灯+紫外線光源下の研削断面 (切り込み深さ: 50.35mm)	5-79	
図 5.3-39	イメージスキャナで読み取った研削断面 (切り込み深さ: 10.45mm)	5-79	
図 5.3-40	イメージスキャナで読み取った研削断面 (切り込み深さ: 30.40mm)	5-80	
図 5.3-41	イメージスキャナで読み取った研削断面 (切り込み深さ: 50.35mm)	5-80	
図 5.3-42	12MI31 号孔 研削面画像 (イメージスキャナ) の展開表示 (14.88mabh)	5-81	
図 5.3-43	12MI30 号孔ボーリングコアの X 線 CT 展開表示画像	5-82	
図 5.3-44	12MI31 号孔ボーリングコアの X 線 CT 展開表示画像	5-83	
図 5.3-45	13MI36 号孔ボーリングコアの X 線 CT 展開表示画像	5-84	
図 5.3-46	13MI37 号孔ボーリングコアの X 線 CT 展開表示画像	5-85	
図 5.3-47	14MI49 号孔ボーリングコアの X 線 CT 展開表示画像	5-86	
図 5.3-48	X 線 CT 画像から母岩変質が確認できたボーリングコア	5-88	
図 5.3-49	上向流カラム可視化実験の状況写真	5-90	

図 5.3-50	浸潤画像（左から珪砂 2 号、5 号、8 号）	5-90
図 5.3-51	レジジン注入画像（左から珪砂 2 号、5 号、8 号）	5-91
図 5.3-52	レジジン注入画像（左：ウラニン、右：R-ZE）	5-92
図 5.3-53	砂層内部の X 線 CT 画像（左：通水試験後、右：レジジン注入試験後）	5-93
図 5.3-54	アクリルカラム切断状況写真	5-93
図 5.3-55	蛍光剤（ウラニン）を用いたレジジン注入試験後のカラム切断面の観察結果	5-94
図 5.3-56	分離性蛍光剤を用いたレジジン注入試験後のカラム切断面の観察結果	5-94
図 5.3-57	原位置レジジン注入装置の概要図（フローシート）	5-97
図 5.3-58	スタティックミキサーのエレメントの外観写真	5-100
図 5.3-59	コリオリ式質量流量計の外観写真（左：主剤用、右：硬化剤用）	5-101
図 5.3-60	音叉式レベルスイッチの外観図と外観写真	5-102
図 5.3-61	フラッシュダイアフラム式圧力センサーの外観図	5-103
図 5.3-62	フラッシュダイアフラム式圧力センサーの外観写真	5-103
図 5.3-63	ユニット 1（主剤移送ポンプユニット）の外観写真	5-105
図 5.3-64	ユニット 2（硬化剤移送ポンプユニット）の外観写真	5-105
図 5.3-65	ユニット 3（ミキシングユニット）の外観写真	5-106
図 5.3-66	制御盤の外観とタッチパネルによる操作状況	5-106
図 5.3-67	原位置レジジン注入試験装置の各ユニットの配置図	5-107
図 5.3-68	原位置レジジン注入試験装置ユニット 1 の外形図	5-108
図 5.3-69	原位置レジジン注入試験装置ユニット 2 の外形図	5-109
図 5.3-70	原位置レジジン注入試験装置ユニット 3 の外形図	5-110
図 5.3-71	原位置レジジン注入試験装置制御盤の外観図	5-111
図 5.3-72	シーケンス動作フローチャート	5-112
図 5.3-73	制御盤のメニュー画面	5-113
図 5.3-74	手動運転時の操作画面	5-114
図 5.3-75	自動運転時の操作画面	5-114
図 5.3-76	移送ポンプの流量安定性の確認結果	5-115
図 5.3-77	主剤・硬化剤移送ポンプの性能確認試験結果（周波数と流量の関係）	5-116
図 5.3-78	Case 1 の試験結果（流量と圧力の挙動）	5-117
図 5.3-79	Case 2 の試験結果（流量と圧力の挙動）	5-118
図 5.3-80	装置から採取したレジジンの硬化中の温度変化	5-118
図 5.3-81	Case 3 の試験結果（流量と圧力の挙動）	5-118

図 5.3-82	Case4 の試験結果 (流量と圧力の挙動)	5-119
図 5.3.6-1	アクリル板によるレジンを反応熱試験概念図	5-122
図 5.3.6-2	アクリル板上盤に作成するレジンを注入孔と温度測定孔の位置	5-122
図 5.3.6-3	アクリル板によるレジンを反応熱測定試験の実施状況	5-123
図 5.3.6-4	割れ目内レジンを反応熱測定結果	5-124
図 5.3.6-5	割れ目内レジンを反応熱測定結果 (0~120 分間)	5-124
図 5.3.6-6	岩石模型によるレジンを反応熱試験概念図	5-126
図 5.3.6-7	割れ目模型作成用の岩石の寸法図	5-126
図 5.3.6-8	レジンを反応熱試験の供試体と養生状況	5-127
図 5.3.6-9	割れ目内レジンの温度変化 (温度 23°C, 湿度 50%RH)	5-128
図 5.3.6-10	割れ目内レジンの温度変化 (温度 30°C, 湿度 50%RH)	5-128
図 5.3.6-11	硬度測定試験の供試体および測定箇所	5-131
図 5.3.6-12	硬度測定試験の実施状況	5-131
図 5.3.6-13	硬度測定結果 (平均値) のプロファイル	5-132
図 5.3.6-14	塩分影響試験の実施状況	5-133
図 5.3.6-15	海水の 1/3 塩濃度 レジンを硬化の様子	5-134
図 5.3.6-16	海水の 1/300 塩濃度 レジンを硬化の様子	5-134
図 5.3.6-17	瑞浪地下水 レジンを硬化の様子	5-134
図 5.3.6-18	幌延地下水 レジンを硬化の様子	5-135
図 5.3.6-19	蒸留水 レジンを硬化の様子	5-135
図 5.3.6-20	試験終了後のレジンを硬化の様子	5-136
図 5.3.6-21	23°C, 50%RH におけるレジンの温度測定結果	5-137
図 5.3.6-22	目視による蛍光強度確認	5-139
図 5.3.6-23	3次元分光光度計による蛍光強度の測定結果	5-141
図 5.4.2-1	一次元モデルの試験装置の概念図	5-145
図 5.4.2-2	一次元モデルの写真	5-146
図 5.4.3-1	一次元モデルでの透水試験の概念図	5-147
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	5-147
図 5.4.3-3	トレーサー注入時の到達時間の概念図	5-149
図 5.4.3-4	ラドン濃度計測のための密閉装置	5-150
図 5.4.3-5	ラドンフラックス計測の概念図	5-150
図 5.4.3-6	ラドン濃度の経時変化	5-151

図 5.4.4-1	一次元モデルでの流量と水頭差の関係.....	5-152
図 5.4.4-2	高粘性流体試験による割れ目幅評価方法の概念図.....	5-153
図 5.4.4-3	50cp での高粘性流体注入試験結果.....	5-155
図 5.4.4-4	100cp での高粘性流体試験結果.....	5-155
図 5.4.4-5	トレーサー試験結果.....	5-156
図 5.4.4-6	Rn 濃度の経時変化.....	5-158
図 5.4.4-7	レジンの注入状況.....	5-159

## 第6章

図 6.3.1-1	採水地点位置図.....	6-3
図 6.3.1-2	深度 300m ボーリング横坑でのボーリング孔の区間編成図.....	6-4
図 6.3.1-3	深度 500m 研究アクセス南坑道でのボーリング孔の区間編成図.....	6-4
図 6.3.1-4	希ガスサンプリング状況.....	6-5
図 6.3.1-5	銅管の採取結果およびクランプ.....	6-6
図 6.3.1-6	採水状況.....	6-12
図 6.3.1-7	補正 $^{14}\text{C}$ 算出方法の概念図.....	6-12
図 6.3.1-8	ヘキサダイアグラムの時間変化.....	6-18
図 6.3.1-9	水素同位体と酸素同位体の関係.....	6-19
図 6.3.1-10	$\delta\text{D}$ と相関性の高い成分.....	6-23
図 6.3.1-11	$\delta\text{D}$ と $^{14}\text{C}$ の相関.....	6-24
図 6.3.1-12	$\text{Cl}$ と他成分の相関.....	6-26
図 6.3.1-13	水素同位体比と $\text{Cl}$ 濃度の関係.....	6-27
図 6.3.1-14	立坑掘削による地下水流動の概念モデル.....	6-28
図 6.3.2-1	立坑への湧水量の経時変化.....	6-30
図 6.3.2-2	主立坑・換気立坑、坑道などへの湧水量の深度方向分布.....	6-31
図 6.3.2-3	難透水断層を考慮したボーリング孔水圧挙動の分類.....	6-31
図 6.3.2-4	立坑周辺での地下水湧出と水圧低下の概念図.....	6-32
図 6.3.2-5	立坑湧水の $\delta\text{D}$ 濃度深度方向分布の経時変化.....	6-33
図 6.3.2-6	立坑湧水の $^3\text{H}$ 濃度深度方向分布の経時変化.....	6-34
図 6.3.2-7	解析に用いた FEM 解析メッシュ.....	6-36
図 6.3.2-8	解析モデルで考慮した断層.....	6-37
図 6.3.2-9	物性割り当ての変更点.....	6-38

図 6.3.2-10	解析の境界条件図.....	6-39
図 6.3.2-11	定常解析での水位低下分布図.....	6-43
図 6.3.2-12	立坑と周辺ボーリング孔における全水頭プロファイル.....	6-44
図 6.3.2-13	定常解析でのトリチウム正規化濃度分布図.....	6-46
図 6.3.2-14	立坑と周辺ボーリング孔におけるトリチウム正規化濃度プロファイル.....	6-47
図 6.3.2-15	コンパートメントを構成する断層を遮水効果の透水性に設定した場合の時間断面 の水位低下分布図.....	6-49
図 6.3.2-16	コンパートメントを構成する断層に透水性の異方性を設定した場合の時間断面の 水位低下分布図.....	6-50
図 6.3.2-17	コンパートメントを構成する断層を遮水効果の透水性に設定した場合の周辺ボー リング孔での掘削に伴う水圧の時間変化.....	6-51
図 6.3.2-18	コンパートメントを構成する断層に透水性の異方性を設定した場合の周辺ボーリ ング孔での掘削に伴う水圧の時間変化.....	6-52
図 6.3.2-19	コンパートメントを構成する断層を遮水効果の透水性に設定した場合の時間断面 の正規化トリチウム濃度分布図.....	6-54
図 6.3.2-20	コンパートメントを構成する断層に透水性の異方性を設定した場合の時間断面の 正規化トリチウム濃度分布図.....	6-55
図 6.3.2-21	コンパートメントを構成する断層を遮水効果の透水性に設定した場合の両立坑に おけるトリチウム濃度プロファイル.....	6-56
図 6.3.2-22	コンパートメントを構成する断層に透水性の異方性を設定した場合の両立坑おけ るトリチウム濃度プロファイル.....	6-56
図 6.3.3-1	幌延深地層研究センターの地下施設における採水地点.....	6-58
図 6.3.3-2	原位置での希ガス採水方法の概念図.....	6-59
図 6.3.3-3	ガス濃集時の希ガス濃度の補正方法.....	6-60
図 6.3.3-4	圧力制御式の設置状況.....	6-60
図 6.3.3-5	循環式の設置状況.....	6-61
図 6.3.3-6	幌延立坑での水質のヘキサダイアグラム.....	6-66
図 6.3.3-7	水素酸素同位体の関係.....	6-67
図 6.3.3-8	幌延研究坑道内での $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ の分布.....	6-68
図 6.3.3-9	間隙率と平衡値の関係の計算値.....	6-69
図 6.3.3-10	幌延研究坑道内での $^4\text{He}$ 濃度と $^3\text{He}/^4\text{He}$ の分布.....	6-71
図 6.3.4-1	立坑掘削の進捗.....	6-73

図 6.3.4-2	湧水量の時間変化.....	6-73
図 6.3.4-3	立坑周辺のボーリング孔における水圧低下.....	6-74
図 6.3.4-4	立坑周辺での水圧低下の概念図.....	6-75
図 6.3.4-5	解析メッシュ及び全体図.....	6-76
図 6.3.4-6	断層のモデル化方法の概念図.....	6-77
図 6.3.4-7	350m 坑道のモデル化.....	6-78
図 6.3.4-8	全水頭の初期・境界条件の分布図.....	6-79
図 6.3.4-9	塩分濃度の初期・境界条件の分布図 (海水の塩分濃度 19,000mg/ℓ で正規化)	6-79
図 6.3.4-10	定常解析の全水頭分布図 (稚内層上部に 4 つの断層が存在するケース) ....	6-82
図 6.3.4-11	観測孔における全水頭プロファイル.....	6-83
図 6.3.4-12	施設建設に伴うイベント概略図.....	6-85
図 6.3.4-13	調査坑道掘削に伴う調査坑道全体での湧水量とイベントの経時変化.....	6-85
図 6.3.4-14	東連絡坑道断面における全水頭分布図.....	6-86
図 6.3.4-15	西連絡坑道断面における全水頭分布図.....	6-87
図 6.3.4-16	周辺調査孔における水圧変化.....	6-88
図 6.3.4-17	調査坑道掘削に伴う調査坑道全体での湧水量とイベントの経時変化.....	6-90
図 6.3.4-18	東連絡坑道断面における全水頭分布図.....	6-91
図 6.3.4-19	西連絡坑道断面における全水頭分布図.....	6-91
図 6.3.4-20	周辺調査孔における水圧変化.....	6-92
図 6.4.1-1	ガス採取方法の概念図.....	6-95
図 6.4.1-2	サンプラーの設置状況(管内)とサンプラーシリコンゴムの膨張.....	6-97
図 6.4.1-3	圧力容器と圧力容器の内部構造.....	6-97
図 6.4.1-4	シリコンゴムの破損部分.....	6-98
図 6.4.1-5	水上置換法の概念図と写真.....	6-99
図 6.4.1-6	ガス採取用の銅管とクランプ(上側：中型クランプ、下側：小型クランプ) ...	6-99
図 6.4.1-7	希ガス分離装置模式図.....	6-100
図 6.4.1-8	希ガス分離装置写真.....	6-101
図 6.4.2-1	トリチウム濃度の経時変化(地盤工学会、2013).....	6-105
図 6.4.2-2	$^3\text{H}$ と新しい地下水の指標の相関( $\delta\text{D}$ 、 $^{14}\text{C}$ 量).....	6-106
図 6.4.2-3	$^3\text{H}$ の生成量の経時変化(サンプル 1L あたり).....	6-107
図 6.4.2-4	$^3\text{He}$ ingrowth 用の容器.....	6-107
図 6.4.2-5	容器の真空度の経時変化の一例.....	6-107

図 6.4.2-6	LSC 法と $^3\text{H}$ ingrowth 法の比較.....	6-108
図 6.4.2-7	フロンガス濃度の経時変化 (Busenberg and Plummer, 2004) .....	6-109
図 6.4.2-8	新しい地下水の指標 ( $\delta\text{D}$ ) とフロンガス、 $\text{SF}_6$ の比較.....	6-111
図 6.4.2-9	平衡式サンプラー.....	6-112
図 6.4.2-10	圧縮抽水装置の概念図.....	6-114
図 6.4.2-11	閉鎖空隙の概念図 (Egbuonwan, 2009) .....	6-115
図 6.4.2-12	浸漬後圧縮抽水試験における浸漬日数と溶液の水素同位体比 .....	6-116
図 6.4.2-13	液量と水蒸気の水素酸素同位体比の関係.....	6-117
図 6.4.2-14	従来の試験で用いてきた試験容器.....	6-119
図 6.4.2-15	今回の試験で用いた分割シャーレ.....	6-120
図 6.4.2-16	分割シャーレを用いた水-水間交換試験の結果.....	6-120
図 6.4.2-17	岩石-水交換試験における試験水同位体比の経時変化.....	6-121
図 6.4.2-18	圧縮圧力と抽水される水の同位体比の関係.....	6-121
図 6.4.2-19	浸漬後圧縮抽水試験における圧力と水素同位体比の関係.....	6-122
図 6.4.2-20	圧縮抽水における閉鎖空隙の混入率と圧力の関係.....	6-123
図 6.4.2-21	3 種類の評価法による水素同位体比の比較 .....	6-124
図 6.4.2-22	3 種類の評価法による酸素同位体比の比較 .....	6-125
図 6.4.3-1	瑞浪地域の地下水における He 年代と有機 $^{14}\text{C}$ 年代の関係 (富岡ら 2007 に加筆) .....	6-130
図 6.4.3-2	有機物濃縮用試験系の概念図.....	6-132
図 6.4.3-3	クロスフロー方式の概念図.....	6-132
図 6.4.3-4	温度と希ガスの溶解度の関係.....	6-141
図 6.4.3-5	温度と大気混入量を変数とした目的関数の誤差分布.....	6-144
図 6.4.3-6	涵養温度と広域地下水流動の関係.....	6-144
図 6.4.3-7	Through Diffusion 法における試験系の概念図 .....	6-146
図 6.4.3-8	濃度変化を考慮した分別係数の評価方法.....	6-147
図 6.4.3-9	Through Diffusion 試験装置の概念図 .....	6-148
図 6.4.3-10	Through-Diffusion 法による拡散試験結果 .....	6-150
図 6.4.3-11	分別係数の評価結果.....	6-152



## 目 次

### 第1章

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

### 第2章

表 2.1-1 当該事業で実施した瑞浪超深地層研究所での地質環境調査.....	2-1
表 2.3.1-1 分光蛍光光度計（日立製作所 F-2700）の仕様.....	2-15
表 2.3.3-1 キャリパー検層装置の仕様一覧.....	2-18
表 2.3.4-1 フローメータ検層装置の仕様一覧.....	2-20
表 2.3.4-2 BTV カメラの仕様一覧.....	2-20
表 2.3.5-1 透水試験使用機器一覧.....	2-22
表 2.3.5-2 モーノポンプの仕様.....	2-23
表 2.3.5-3 差圧 20mH <sub>2</sub> O 用差圧計の仕様.....	2-29
表 2.3.8-1 間隙水圧モニタリング装置の仕様一覧.....	2-35
表 2.4.1-1 16MI59 号孔の仕様.....	2-36
表 2.4.1-2 クイックライナー工法の施工実績.....	2-37
表 2.4.4-1 16MI59 号孔の湧水量測定の結果一覧.....	2-50
表 2.4.4-2 16MI59 号孔の定流量揚水試験結果.....	2-55
表 2.4.4-3 水圧測定区間と測定結果一覧.....	2-61
表 2.4.7-1 パッカー拡張当日の各モニタリング区間の湧水量.....	2-74
表 2.4.8-1 掘削総長における割れ目密度の平均.....	2-75

### 第3章

表 3.2.5-1 イオン強度による遅延係数の比較 (Rb).....	3-26
表 3.2.5-2 ピーク高さとピーク遅延から算出した遅延係数の比較 (Rb).....	3-27
表 3.2.6-1 瑞浪地域立坑 500m 地点の地下水における Rb・Ba 濃度.....	3-30
表 3.2.7-1 今回の試験で得られた分配係数のまとめ.....	3-32
表 3.2.7-2 各試験条件で得られた遅延係数のまとめ.....	3-33
表 3.3.1-1 試験に使用した鉱物と入手先.....	3-35
表 3.3.2-1 BET 法で分析した使用した鉱物の比表面積.....	3-35
表 3.3.2-2 鉱物からの溶出試験の結果.....	3-36
表 3.3.2-3 各鉱物への収着試験の結果.....	3-38

表 3.3.2-4	比表面積で規格化した収着率.....	3-38
-----------	--------------------	------

#### 第4章

表 4.2.2-1	蛍光濃度センサーの主な仕様.....	4-5
表 4.2.2-2	分光蛍光光度計の仕様（日立製作所 F-2700 Fluorescence Spectrophotometer）	4-6
表 4.2.7-1	分析項目と分析方法.....	4-16
表 4.2.7-2	希釈方法.....	4-16
表 4.3.3-1	水圧測定区間の深度.....	4-20
表 4.3.3-2	トレーサー試験期間中の主要なイベントログ.....	4-20
表 4.3.3-3	15MI52 号孔_P2 に対する水頭差測定結果一覧.....	4-21
表 4.3.4-1	試験名の読み方.....	4-22
表 4.3.5-1	15MI52 号孔の単孔トレーサー試験ケース.....	4-23
表 4.3.5-2	15MI53 号孔の単孔トレーサー試験ケース.....	4-23
表 4.3.5-3	試験区間からフラクシオンコレクターまでの容量.....	4-24
表 4.3.6-1	15MI52 号孔注水-15MI53 号孔揚水の孔間トレーサー試験ケース.....	4-48
表 4.3.6-2	15MI53 号孔注水-15MI52 号孔揚水の孔間トレーサー試験ケース.....	4-48
表 4.3.6-3	試験区間からフラクシオンコレクターまでの容量.....	4-49
表 4.3.8-1	単孔トレーサー試験の回収率計算に用いたバックグラウンド濃度.....	4-75
表 4.3.8-2	15MI52 号孔を対象とした単孔トレーサー試験の回収率.....	4-76
表 4.3.8-3	15MI53 号孔を対象とした単孔トレーサー試験の回収率.....	4-77
表 4.3.8-4	フラクシオンコレクターの設定.....	4-78
表 4.3.8-5	孔間トレーサー試験の回収率計算に用いたバックグラウンド濃度.....	4-89
表 4.3.8-6	15MI52 号孔注水-15MI53 号孔揚水の孔間トレーサー試験の回収率.....	4-90
表 4.3.8-7	15MI53 号孔注水-15MI52 号孔揚水の孔間トレーサー試験の回収率（1）.....	4-91
表 4.3.8-8	15MI53 号孔注水-15MI52 号孔揚水の孔間トレーサー試験の回収率（2）.....	4-92
表 4.3.8-9	フラクシオンコレクターの設定.....	4-93
表 4.4.1-1	注入流体の浸透範囲計算結果.....	4-105
表 4.4.1-2	非収着性トレーサーの理論式評価結果.....	4-112
表 4.5.1-1	非収着性トレーサーの評価解析条件.....	4-130
表 4.5.1-2	割れ目幅を仮定した場合の集中定数と縦分散長の関係.....	4-131
表 4.5.1-3	収着性トレーサーの評価解析結果まとめ.....	4-137

表 4.5.1-4	収着性トレーサーの評価解析結果まとめ（バックグラウンド地下水流れ無し）	4-144
表 4.6.3-1	試験条件と試験結果一覧	4-163
表 4.6.4-1	ダブルパッカー型装置を用いたポイント希釈試験の解析結果	4-171
表 4.6.4-2	パッカー一体型装置を用いたポイント希釈試験の解析結果	4-171

## 第5章

表 5.1.4-1	元素分析試料一覧	5-4
表 5.1.4-2	蛍光 X 線分析（XRF）による主要構成元素	5-4
表 5.1.4-3	微量元素分析（ME-MS61）	5-6
表 5.1.4-4	微量元素分析（ME-MS81）	5-7
表 5.1.4-5	X 線回折分析（XRD）による鉱物分析試料	5-9
表 5.1.4-6	鉱物分析結果（XRD）	5-11
表 5.1.4-7	ウラン，トリウム同位体測定結果	5-15
表 5.1.4-8	ラジウム分析結果	5-18
表 5.1.4-9	細孔分布測定試料一覧	5-19
表 5.1.4-10	細孔分布測定結果	5-20
表 5.1.4-11	測定試料一覧と測定結果	5-22
表 5.1.4-12	岩石薄片製作一覧	5-23
表 5.1.4-13	鉱物同定結果（1）	5-24
表 5.1.5-1	コアによるラドンフラックス測定結果	5-29
表 5.1.6-1	ラドン循環試験における循環流量とラドン濃度分析結果	5-32
表 5.1.6-2	ラドン循環試験に箇所割れ目の特徴	5-33
表 5.1.6-3	各孔・パッカー区間のラドン濃度測定結果	5-34
表 5.2.2-1	トレーサー試験対象区間	5-39
表 5.3-1	岩石試料	5-56
表 5.3-2	マイクロフォーカス X 線 CT 画像の撮影条件（X 線源 225kV）	5-60
表 5.3-3	マイクロフォーカス X 線 CT 画像の撮影条件（X 線源 450kV）	5-60
表 5.3-4	研削面画像の撮影条件	5-61
表 5.3-5	各孔の割れ目沿いの変質状況に関するコア記載（300m 坑道）	5-87
表 5.3-6	原位置レジジン注入試験装置の機器リスト	5-98
表 5.3-7	主剤・硬化剤移送ポンプ（モノポンプ）の仕様	5-99

表 5.3-8	スタティックミキサーの仕様	5-100
表 5.3-9	コリオリ式質量流量計の仕様	5-101
表 5.3-10	音叉式レベルスイッチの仕様	5-102
表 5.3-11	フラッシュダイアフラム式圧力センサーの仕様	5-103
表 5.3-12	Case4 の試験結果 (流量の統計)	5-119
表 5.3.6-1	目視による割れ目内レジン到達時の温度測定結果	5-125
表 5.3.6-2	NaCl により塩濃度を調整した溶液および地下水の Cl 濃度	5-130
表 5.4.4-1	高粘性流体試験の評価結果	5-154
表 5.4.4-2	ラドン濃度の計測結果と割れ目幅の評価結果	5-158
表 5.4.4-3	注入孔からの距離毎のレジンの厚み	5-159
表 5.4.5-1	割れ目の評価方法と評価された割れ目幅	5-160

## 第6章

表 6.3.1-1	採水項目と採取目的および取得量	6-8
表 6.3.1-2	原位置計測結果	6-13
表 6.3.1-3	立坑内ボーリングから採取した地下水の分析結果	6-14
表 6.3.1-4	各成分の相関	6-21
表 6.3.2-1	地質要素の水理特性 (尾上ほか、2015)	6-40
表 6.3.2-2	不連続構造の透水特性 (尾上ほか、2015)	6-41
表 6.3.3-1	幌延の地下施設から採取した地下水試料の分析結果	6-62
表 6.3.4-1	設置した透水係数と根拠 (操上ほか 2008)	6-80
表 6.3.4-2	解析に用いた物性値	6-81
表 6.4.1-1	幌延と瑞浪の Ne 濃度の比較	6-94
表 6.4.1-2	装置によるガス分離効率と流量の関係	6-100
表 6.4.1-3	採取方法の比較結果	6-103
表 6.4.2-1	希ガスのリーク速度とストレージ期間	6-108
表 6.4.2-2	平衡式サンプラーの室内での試験結果	6-110
表 6.4.2-3	平衡式サンプラーの原位置での適用結果	6-110
表 6.4.2-4	DVE-LS の幌延岩石への適用試験の結果	6-124
表 6.4.2-5	酸素同位体比を評価するために用いたパラメーター	6-126
表 6.4.2-6	3 種類の評価方法の比較	6-128
表 6.4.3-1	地下水と有機物濃縮後の水質の比較	6-133

表 6.4.3-2	DAX 樹脂への吸着・脱離挙動を利用した有機物の分離試験結果.....	6-134
表 6.4.3-3	凍結乾燥による有機物の濃縮試験の結果.....	6-135
表 6.4.3-4	凍結乾燥濃縮前後の有機物に対する DAX 樹脂を利用した分離試験結果の比較 .	6-135
表 6.4.3-5	各フラクションの $DO^{14}C$ 年代.....	6-136
表 6.4.3-6	500m 地点での有機物濃縮の経過 .....	6-138
表 6.4.3-7	300m と 500m 地点の水質の比較 .....	6-138
表 6.4.3-8	地下水、有機物濃縮溶液、凍結乾燥濃縮液のイオン濃度・TOC 濃度の比較....	6-139
表 6.4.3-9	各フラクションにおける有機炭素の回収率.....	6-140
表 6.4.3-10	希ガス分析結果.....	6-142
表 6.4.3-11	拡散試験結果.....	6-152

## 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
トレーサ試験技術の高度化	単孔式・孔間トレーサ試験技術				
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・孔間トレーサ試験				
	トレーサ試験予測解析		トレーサ試験評価解析		
	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

#### 1.4 本年度の実施概要

##### 1.4.1 国内の適用性試験場の地質環境調査

平成 27 年度に続いて、JAEA 瑞浪超深地層研究所の深度 500m の適用性試験場において、ボーリング孔を掘削し、そのボーリング孔を利用して従来手法による地質環境調査（コア観察、BTV 検層、フローメータ検層、間隙水圧計測、透水試験等）を実施し、試験場の地質環境特性を明らかにする。

##### 1.4.2 トレーサー試験技術の開発

###### (1) 室内試験

拡散係数や陽イオン交換容量の異なる岩石に対するバッチ試験と模擬トレーサー試験における分配係数の値を比較し、分配係数の取りうる範囲を把握する。室内試験における分配係数の条件への依存性から、ある条件で取得した分配係数を実際の処分の安全評価に使う分配係数へ換算する方法・考え方について検討する。



## (2) 単孔式トレーサー試験

適用性試験場において孔間での水理的な連続性が確認された水みち割れ目を対象として、単孔式トレーサー試験を実施する。試験結果から数値シミュレーションにより対象割れ目の物質移行特性（分散長、遅延係数等）を評価する。

## (3) 孔間トレーサー試験

単孔式トレーサー試験の対象割れ目について孔間トレーサー試験を実施し、試験結果から数値シミュレーションにより、ボーリング孔間の水みち割れ目の物質移行特性を評価する。そして、試験結果や評価結果について、単孔式試験の結果と比較検討を行う。

### 1.4.3 各種割れ目探査技術の開発

#### (1) ラドン濃度計測による割れ目調査技術

適用性試験場において、孔間に跨がる水みち区間において、地下水の循環試験を行い、ラドン濃度の変化を調査するとともに、室内において過年度に採取したボーリング孔のコア試料を用いてラドンフラックスを測定する。そして、両者の結果を基に割れ目の間隙幅について検討する。

#### (2) レジン（樹脂）注入による割れ目の可視化技術

原位置で岩盤にレジン注入する装置を試作するとともに、レジンの注入手順について検討する。また、適用性試験場の岩石コア等を用いてレジンの注入試験を行い、割れ目への浸潤特性を把握する。

#### (3) 割れ目探査技術の比較

室内において岩石などを用いた模擬割れ目を作製し、トレーサー試験、ラドン濃度計測、高粘性流体注入試験、レジン注入試験などを実施する。これらの結果の相互比較を行い、各種評価方法の適用性を確認する。

### 1.4.4 天然トレーサーによる調査技術の開発

#### (1) 地下の適用性試験場における地下水調査

平成27年度に続き、瑞浪超深地層研究所、幌延深地層研究センターの坑道内のボーリング孔などにおいて、地下水を採取し、主要溶存イオン、微量元素、塩素同位体、希ガスなどを計測し、地下水水質・地下水年代の変化を評価する。これらの結果に基づいて、地下水の起源を検討し、新しい水の浸入や古い水の残留を評価する。また、これらの結果に基づいて、立坑掘削を対象とした地下水流動・物質移行解析を行い、地下水流動・物質移行パラメータを評価する。

#### (2) 天然トレーサーの調査

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  $^{14}\text{C}$ 、

希ガス、 $^{37}\text{Cl}$ ) について、採取・分析方法の高度化を図る。トリチウムについては濃縮法や  $^3\text{He}$  蓄積法、フロンガスについては原位置平衡式サンプリング、水素・酸素同位体については岩石を用いた試料採取方法（圧縮抽水、水蒸気法など）、有機  $^{14}\text{C}$  年代については古い地下水と若い地下水の混合評価方法、希ガスについては複数の希ガスを用いた評価方法、 $^{37}\text{Cl}$  について分別係数について調査を継続する。

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

本事業において開発した各種調査技術を、平成 20 年より割れ目の分布が比較的単純なスイスの Grimsel Test Site に適用し、平成 24 年度までに技術の有効性をほぼ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て調査として、これまで平成 24 年度～平成 27 年度にかけて、JAEA 瑞浪超深地層研究所の深度 300m、深度 500m で地質環境調査（ボーリング掘削および各種検層）とトレーサー試験を実施している。表 2.1-1 に各年度に実施した調査とその対象としたボーリング孔名を示す。

平成 28 年度は、平成 27 年度に深度 500m のボーリング調査で確認した地質的・水理的に連続した割れ目がある程度の範囲に亘って連続した割れ目であることを確認するため、また、トレーサー試験実施時にバックグラウンド流れの方向を確認するために 1 本のボーリング孔の地質環境調査を実施した。

表 2.1-1 当該事業で実施した瑞浪超深地層研究所での地質環境調査

		平成24年度	平成25年度	平成26年度	平成27年度	平成28年度
深度300m	地質環境調査	12MI30号孔 12MI31号孔	13MI36号孔 13MI37号孔	13MI37号孔 14MI49号孔	—	—
	トレーサー試験	—	—	12MI30号孔 (24.67mabh) 12MI31号孔 (21.15mabh)	12MI31号孔 (21.90mabh) 13MI37号孔 (23.14mabh)	—
深度500m	地質環境調査	—	—	—	15MI52号孔 15MI53号孔	16MI59号孔
	トレーサー試験	—	—	—	—	15MI52号孔 (13.34mabh) 15MI53号孔 (15.05mabh)

※ 上表の ( ) はトレーサー試験の対象とした割れ目の深度を示す。

※ 平成 25 年度に実施した 13MI37 号孔のボーリング掘削では大量湧水が発生したため、13MI37 号孔での各種検層は平成 26 年に湧水の対策を施してから実施した。

#### 2.1.1 瑞浪超深地層研究所の研究施設の概要

超深地層研究所計画は、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計画である。瑞浪超深地層研究所の研究坑道については、平成 24 年度までに立坑部は深度約 500m まで達し、平成 25 年度には深度 500m ステージの水平坑道の掘削を終了している（JAEA 東濃地科学センターHP）。瑞浪超深地層研究所の位置と研究坑道の構造図を図 2.1.2-1 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）。研究所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 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（川本，窪島，村上，石橋，笹尾，2014）。なお、土岐花崗岩については、JAEA で実施した瑞浪超深地層研究所およびその周辺の土岐花崗岩についての調査の結果、低角度傾斜（0～30° 傾斜）の割れ目の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（松岡，ほか，2005）。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 以深ではほとんど無くなることが確認されている（鶴田，笹尾，川本，窪島，石橋，2013）。

#### 2.1.2 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 計測横坑は換気立坑中心から南側坑道沿い約 125m に位置する。深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑は高さ約 3.5m、坑道幅約 4.5m、長さ約 15.5m の横坑で、研究アクセス南坑道に直行に交差している（図 2.1.2-2）。

深度 500m 研究アクセス南坑道の壁面地質調査で得られたデータに基づく割れ目の方位は、北東走向の高角度割れ目が卓越し、付随的に北西走向の高角度割れ目が分布している。なお、同坑道に分布する断層（SH500\_13\_2 断層や S500\_prove23～26 断層）はいずれも北西走向の高角度割れ目である（川本，窪島，村上，石橋，笹尾，2014）。

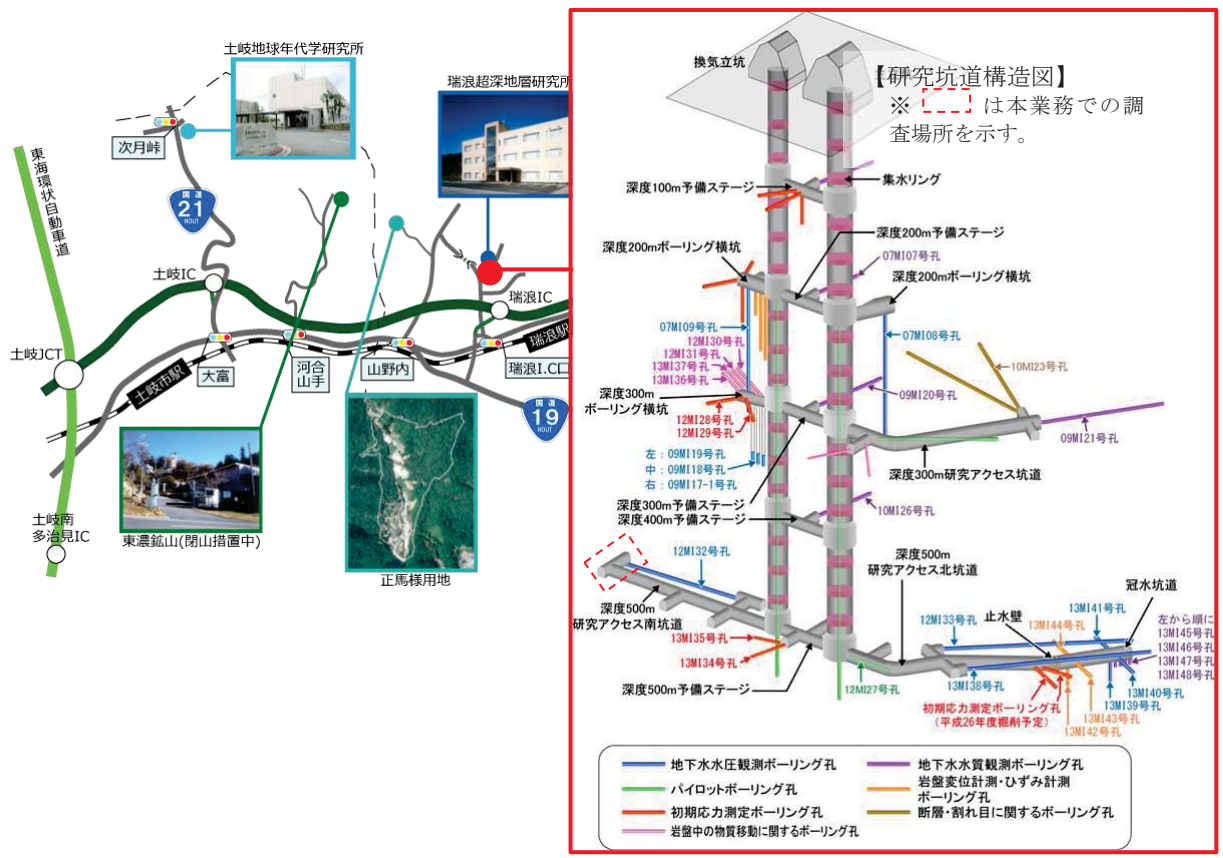


図 2.1.2-1 岐阜県瑞浪市における瑞浪超深地層研究所の位置と地下研究施設  
 (JAEA 東濃地科学センターHP (<https://www.jaea.go.jp/04/tono/index.htm>) から引用し一部加筆)

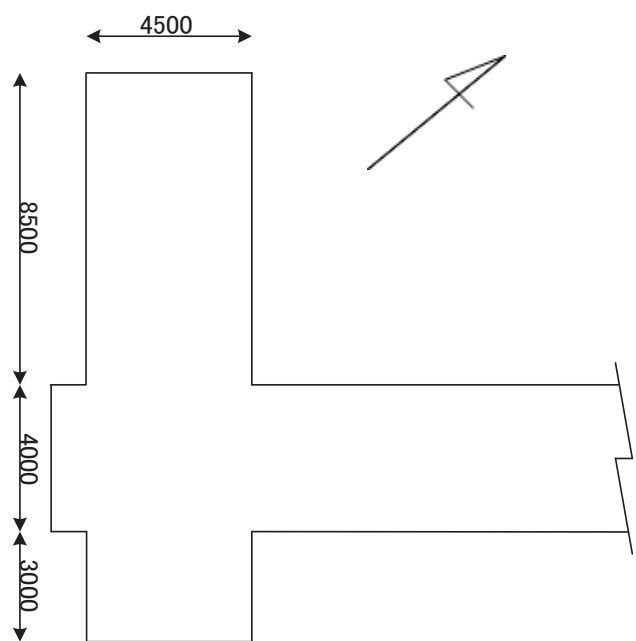


図 2.1.2-2 深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑

## 2.2 適用性試験場の地質環境調査概要

### 2.2.1 調査の目的

本調査は、国内の地質環境を対象としたトレーサー試験装置等の適用試験を実施する場の地質環境特性を把握することを目的とする。

なお、トレーサー試験装置等の適用性試験を実施するためには、以下に示す割れ目の条件が望ましい。

- ・ 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  $10 \times E-07 \text{m}^2/\text{sec}$  オーダー程度
- ・ 坑道壁面からの距離深度で30m 以内（最大50m）

### 2.2.2 調査項目

トレーサー試験装置等の適用試験を実施するのに適した割れ目を検出することを目的とし以下の調査を実施した。

- ・ 新規に1本のボーリング孔を掘削した。
- ・ 掘削したボーリング孔を対象に、BTV 検層や水理試験等の各種検層・試験を実施し、トレーサー試験等の対象となりえる湧水割れ目を抽出した。
- ・ トレーサー試験等の対象となりえる湧水割れ目を対象に、間隙水圧モニタリング装置を設置した。

## 2.3 調査手順

### 2.3.1 ボーリング調査

深度500m 研究アクセス南坑道において、新規ボーリング孔（16MI59号孔）の掘削、および各種地下水調査を実施した。ボーリング掘削および地下水調査の作業フローを図2.3.1-1に示す。

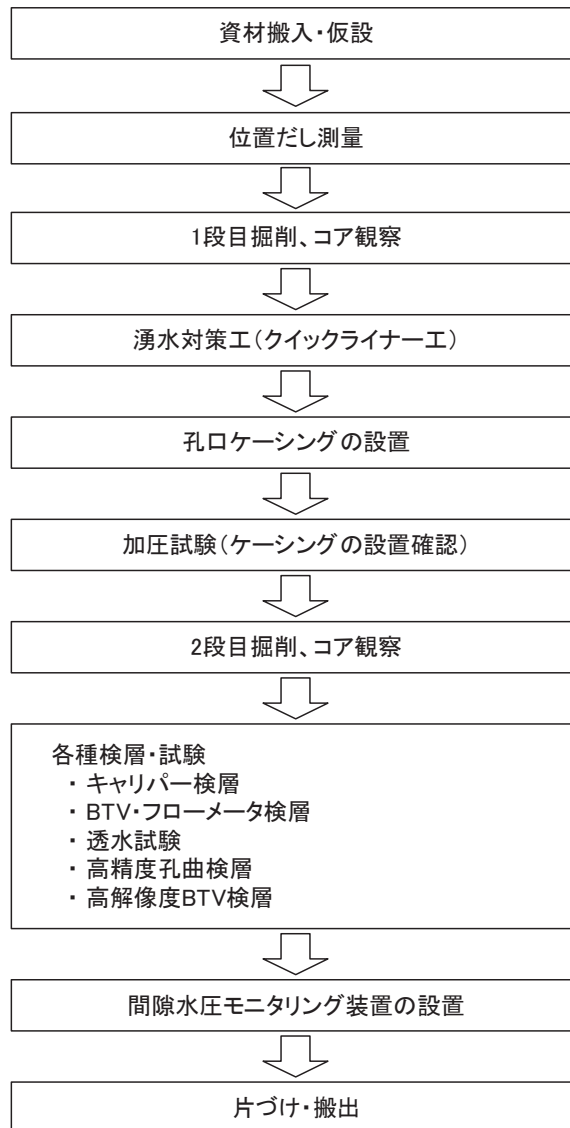


図 2.3.1-1 ボーリング孔掘削と地質地下水調査作業の施工フロー

### 2.3.1.1 ボーリング掘削位置の設定

ボーリング孔の位置や方向・伏角は、過去に JAEA で実施された坑道壁面地質調査 (川本, ほか, 2014a) や先行ボーリング調査 (川本, 窪島, 村上, 石橋, 笹尾, 2014), (川本, ほか, 2014b)、平成 27 年度に電中研が実施したボーリング調査の結果を基に設定した。なお、ボーリング孔の位置や方向・伏角の設定の基準は以下の通りとした。

- ・ 割目が比較的少ないと考えられるエリア
- ・ 大量湧水の可能性が少ないと考えるエリア
- ・ 過去の調査で確認された割目の走向傾斜を基に、これに交差する方向・伏角
- ・ 敷地境界を越えない位置や方向



### 2.3.1.2 主要ボーリング資機材

図 2.3.1-2 にボーリング作業で使用した主要資機材の一覧を示す。また、図 2.3.1-3 にボーリングマシン、ボーリングポンプ、孔口装置（プリベンダー他）、ボーリングロッド、およびボーリングビットの写真を示す。

図 2.3.1-2 主要ボーリング機材一覧表

品名	型式	数量	単位	寸法 (H×W×L)	重量	備考
ボーリングマシン	東邦地下工機 D2-K-92	1	台	1570×870×1546	750 Kg	能力250m モーター含む(7.5kW)
ボーリングポンプ	東邦地下工機 BG-5C	1	台	1563×600×715	205 Kg	最大圧力 3.2MPa モーター含む(3.7kW)
H鋼	150H × 1.5m	4	本	30kg/m	180 Kg	ボーリングマシン架台用
H鋼	150H × 3.0m	2	本	30kg/m	180 Kg	ボーリングマシン架台用
ロッド類	NQ ロッド × 2.0m	15	本	8kg/m	240 Kg	掘削用
ロッド類	NQ ロッド × 1.0m	2	本	8kg/m	16 Kg	掘削用
ロッド類	40.5 ロッド × 3.0m	10	本	5kg/m	150 Kg	検層用
ダブルコアチューブ	φ 86mm	1	本	L=1.68m	7 Kg	掘削用 インナーチューブ1.0m
タンク類	泥水分離タンク	1	台	600×600×450		鉄製
タンク類	泥水ノッチタンク	1	台	760×870×1070		鉄製(掘削水貯水)
タンク類	貯水タンク	1	台	760×870×1070		樹脂製
タンク類	半ドラム缶	1	台			中継用タンク
足場パイプ	φ 48.6mm L=3m	10	本	2.5kg/m	25 Kg	
足場パイプ	φ 48.6mm L=2.5m以下	30	本	延べ30m	75 Kg	
クランプ	φ 48.6mm (直交、自在)	60	個	0.5kg/個	30 Kg	
水中ポンプ	1吋,2吋 100V用	2	台		50 Kg	
ホース類	1吋 サクションライン	1	本	5m	3 Kg	
ホース類	1吋 デリバリライン	1	本	10m	10 Kg	
ホース類	2吋 サニーホース	1	本	50m	30 Kg	
道具類・吊り具類	スイベル、ケーシングバンド、 パイプレンチ・滑車	1	式		150 Kg	
孔口装置	メインハーフ、プリベンダー	1	式		100 Kg	



a. ボーリングマシン D2-K 型



b. ボーリングポンプ BG-5C 型



c. 孔口装置 (プリペンダー等)



d. ボーリングロッド



e. 拡径用ビット (上から  $\Phi 141\text{mm}$ ,  $127\text{mm}$ ,  $101\text{mm}$ )

図 2.3.1-3 ボーリング機材の写真

### 2.3.1.3 資機材の搬入・仮設

資機材の搬入は、トラック等で立坑の地上櫓内まで運搬し、キブルにて500m立坑内へ揚重を行った。また、立坑から深度500m研究アクセス南坑道125m計測までの水平運搬は、ハンドパレットや台車を用いて運搬した。

図2.3.1-4にボーリング資機材の仮設概念を示す。

ボーリングの掘削水は、スライム溜め用の泥水分離用タンクや半切りドラム缶を継由し、さらに掘削水の貯水用ノッチタンクでスライムを分離した後に再利用した。湧水で掘削水が増加した場合は、樹脂製タンクで一時貯水し上澄みを排水した。さらに湧水量が増加し樹脂製タンクでの貯水が間に合わない場合は、緊急用水槽（貯水プール）で貯水させ、翌日に上澄みを排水した。

図2.3.1-5に緊急用水槽の仮設概念と排水ルートを示し、図2.3.1-6に主要な排水設備の写真を示す。

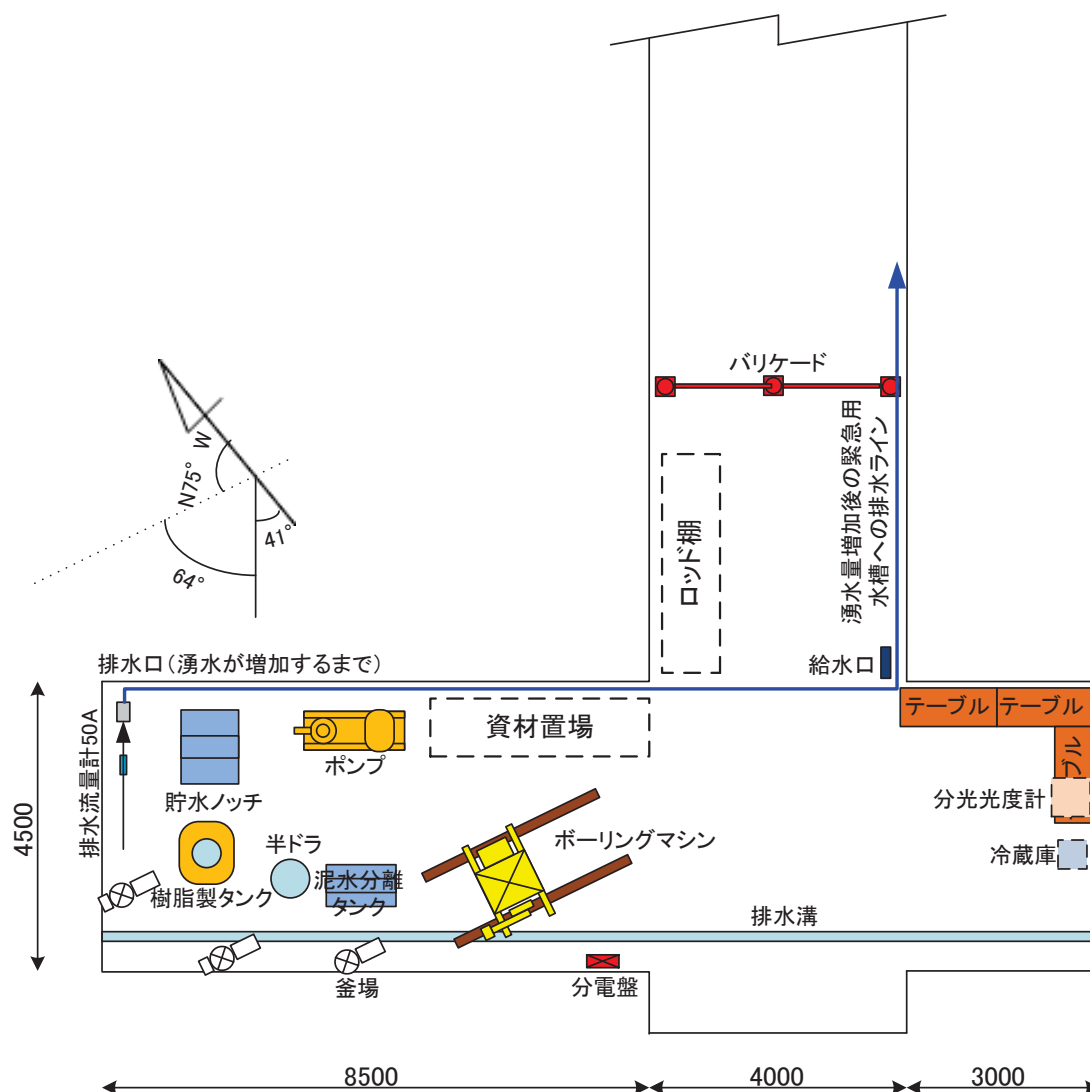


図 2.3.1-4 ボーリング資機材の仮設概念

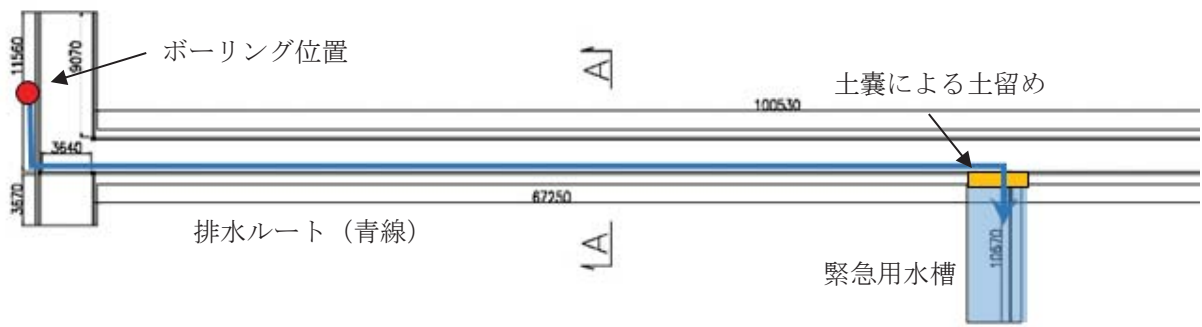


図 2.3.1-5 緊急用水槽（貯水プール）の仮設と排水ルートのご概念



a. 泥水分離タンクと半ドラム



b. 貯水用ノッチタンク



c. 樹脂製タンクおよび水道メーター



d. 緊急用水槽

図 2.3.1-6 掘削水排水設備の写真

#### 2.3.1.4 ボーリング掘削手順

##### (1) ボーリング掘削の概要

ボーリング掘削の概要を以下の①～③に示す。

- ① 掘削は二重管工法（外径 86mm、コア径：72mm）で坑内湧水を用いた清水掘削とした。
- ② 掘削編成は、ビット（外径 86mm）×コアチューブ（二重管）×ロッドを基本編成とした。  
ビットはインプリタイプを使用することとし、ロッドは坑内レイアウトの制約から 0.5m、1.0m、2.0m のロッドを使用することとした。
- ③ 掘削によって発生したスライムは土嚢袋等を集積し、その後、産業廃棄物として適切に処分した。

##### (2) 1 段目掘削（坑道掘削損傷領域部）の作業手順

1 段目の掘削は、口切りから孔口ケーシングの設置（4 インチ）までを指す。

坑道近傍の岩盤には、坑道掘削時に発生した掘削損傷領域（以下、EDZ と示す）が存在する。孔口ケーシング設置の際、EDZ を介してボーリング孔内へ湧水が流入すると孔口ケーシングを固定するグラウトが流されてしまう恐れがある。このため、1 段目掘削の完了後に湧水対策工としてクイックライナー（ケーシングパッチ）による孔壁保護を施し、孔口ケーシングを設置した。

孔口ケーシングの挿入後、口元フランジの直下にコンクリートブロックを設置し、クイックライナーとケーシングの間隙に水中グラウト材を充填した。グラウト材の硬化後、孔内からの最大 5MPa の湧水圧に対して十分な止水性を有することを確認するための加圧試験を行った。

1 段目掘削から加圧試験までの手順は次に示すとおりである（図 2.3.1-7、図 2.3.1-8）。

- ① φ 86mm 掘削・コア採取
- ② φ 141mm まで拡孔（1 段目）
- ③ クイックライナー設置
- ④ 孔口ケーシング設置（先端にモルタルブロック、ラバーパッキンの装着、エア抜き用 SUS パイプ配管、グラウト注入用 φ 15 mm 鉄管の配管）
- ⑤ 壁面にコンクリートブロックを打設し硬化養生後、グラウトポンプを用いて水中グラウト材を孔底側から注入
- ⑥ エア抜き用高圧チューブからのグラウトの還流を確認後に、エア抜き用配管のバルブとグラウト注入管のバルブを閉鎖
- ⑦ 孔底のグラウトを 20 cm 程度浚渫（掘削）し、グラウト注入管を回収
- ⑧ ケーシングに検査用フランジを取り付け、ケーシング内に水を充填してテストポンプにて 5MPa に加圧して 10 分間の圧力保持を確認

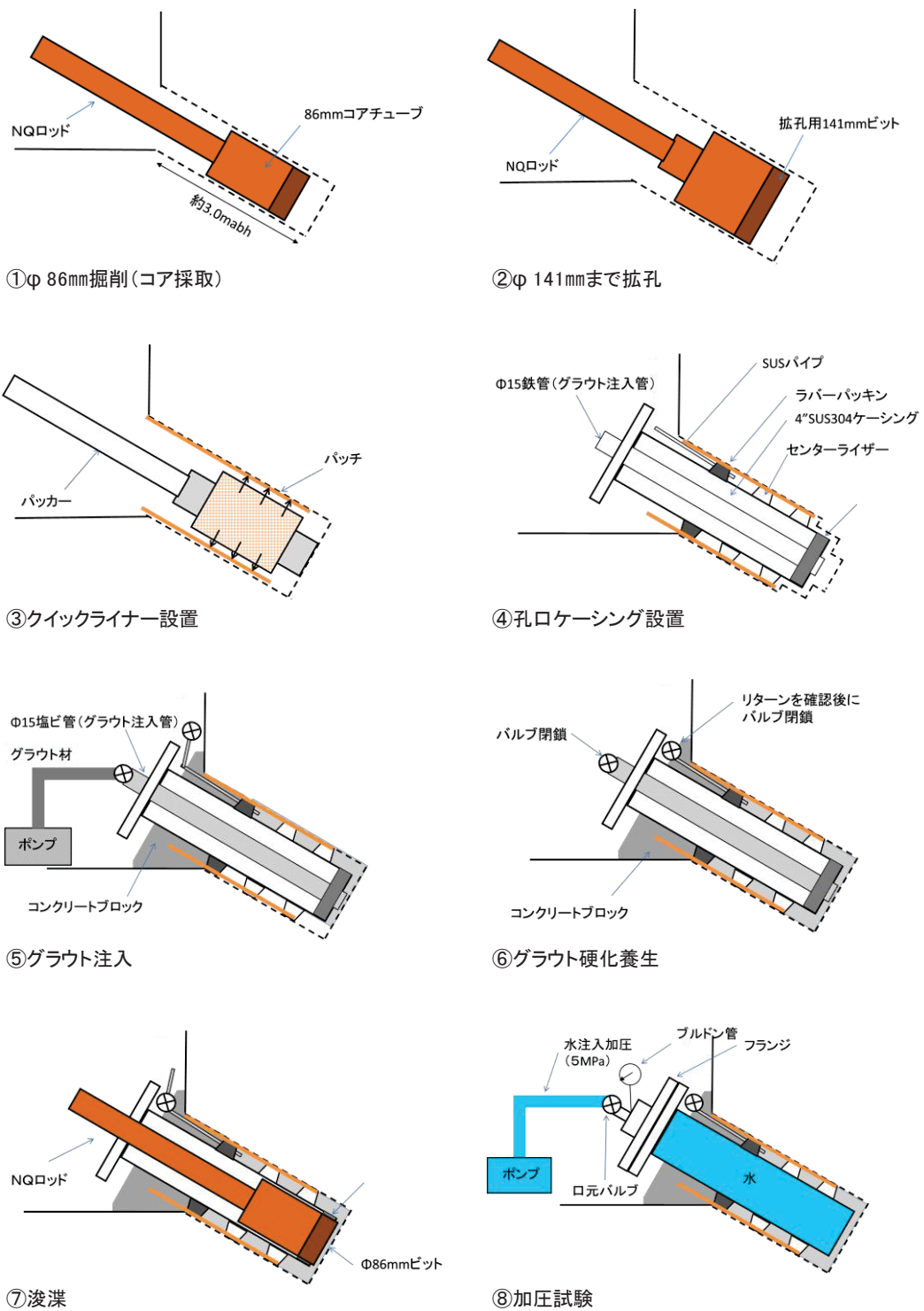


図 2.3.1-7 1 段目掘削の作業手順



a. φ86mm (1 段階目) 掘削状況



b. クイックライナー設置状況



b. ケーシング挿入状況



c. コンクリートブロック設置状況



d. グラウト注入状況



e. 加圧試験実施状況

図 2.3.1-8 1 段階目掘削の各作業工程

図 2.3.1-7 の手順③に示すクイックライナー工法は、ボーリング孔壁にパッチ（ガラスマットに樹脂材を塗布したもの）を張り付けることにより、止水と孔壁保護をすることを目的としたものである。設置手順を以下に示す（図 2.3.1-9）。

- ① 対象ボーリング孔の内径を測定し、それに合わせてガラスマットの幅を計算し切断
- ② 樹脂（主剤・硬化剤）を攪拌
- ③ ガラスマットへ樹脂を含浸
- ④ ガラスマットをパッカーにセット
- ⑤ ボーリング孔へパッカーを挿入
- ⑥ パッカーを拡張させ、パッカーの圧力を保持したままで樹脂の硬化養生

- ⑦ パッカーを収縮させ、パッカーをボーリング孔より回収
- ⑧ 小型テレビカメラにより、施工状況及び深度の確認



a. ガラスマット



b. 樹脂の攪拌状況



c. 樹脂の含浸状況



d. ガラスマットのパッカーへのセット



e. パッカー挿入状況



f. パッカー加圧状況（硬化養生）



g. 施工後の孔内状況



h. 水中テレビカメラによる観察

図 2.3.1-9 クイックライナー工法の各作業工程



### (3) 2 段目掘削

2 段目の掘削は、 $\phi 86\text{mm}$  のコアバレルを用いてコア採取しながら掘削を行った。掘削中は最大 5MPa の水圧を伴う湧水が予想されたため、突発性湧水発生時の孔口からの湧水突出を抑えるために、孔口にはプリベンダーおよびゲートバルブからなる孔口装置を設置した。図 2.3.1-10 に孔口装置の概要を示す。

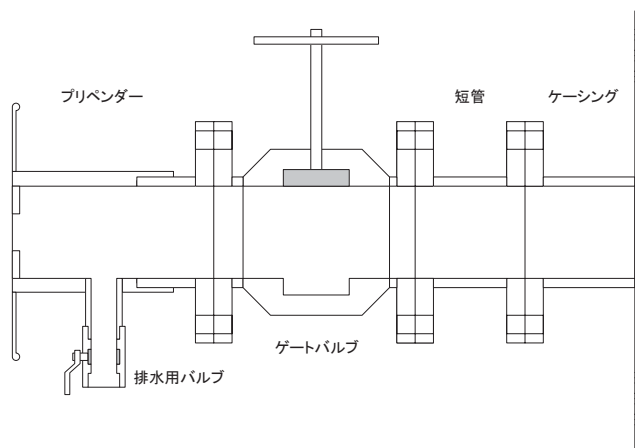


図 2.3.1-10 孔口装置概要図

掘削中の湧水量を把握するために、1 掘進長ごとに掘削水の影響が無視できると判断された時点（具体的には孔口から流出する水量がほぼ安定したとみなされた時点）の孔口から出る湧水を測定した。湧水量の測定は、孔口からの湧水をバケツ等で受けて、計量カップにより計量した。

### (4) 掘削水のトレーサー濃度管理

ボーリング掘削中に行った掘削水の濃度管理の手順を以下の①～⑥に示す。

- ① ボーリング掘削時に使用する掘削水や孔内洗浄等孔内で使用する全ての水には、濃度が  $5\text{mg/L} \pm 10\%$  となるよう蛍光染料の「7-アミノ-1, 3-ナフタレンジスルホン酸モノカリウム水和物」（以後、アミノ G 酸）を添加した。
- ② 掘削中は、アミノ G 酸の MSDS (Material Safety Data Sheet) を常備し、濃度管理を記録した。
- ③ 蛍光染料を添加する掘削水は、掘削直前に横坑内に設置した樹脂製の貯水タンクで作成し、作成時には分光蛍光光度計により濃度分析を行った（表 2.3.1-1、図 2.3.1-11 参照）。
- ④ 掘削中は、1 掘進毎ないし 1 時間以下の間隔でリターン水をサンプリングし、蛍光染料濃度が  $5\text{mg/L}$  の  $\pm 10\%$  以内の範囲にあることを確認した。
- ⑤ リターン水の蛍光染料濃度が指定濃度範囲外となった場合は、掘削を一時中断し蛍光染料濃度を調整した。
- ⑥ 湧水量が  $5\text{L/min}$  以上となった場合は、掘削水の蛍光染料の濃度管理を終了した。

表 2.3.1-1 分光蛍光光度計（日立製作所 F-2700）の仕様

項目	内容
操作方式	スタンドアロン または PC制御
光源	150Wキセノンランプ（オゾン 自己解消ランプハウス）
測光方式	単色光モニター比演算測光方式
感度	水のラマン光S/N800以上（RMS） バンドパス5nm レスポンス2s
スリット	2.5、5、10、20nm（励起・蛍光側とも）
波長走査速度	60～3,000nm/min（4段）+PC制御のみ12,000nm/min
大きさ/質量	600mm（W）×503mm（D）×343mm（H）/約41kg
電源	AC100、115、220、230、240V 50/60HZ、400VA



図 2.3.1-11 分光蛍光光度計と蛍光染料濃度計測状況

## 2.3.2 コア観察

### (1) コアの回収と整理

調査ボーリング孔の掘削作業は、コアバレル分の掘削（基本的に掘削長 1.0m）が終了する毎にロッドの揚管を行い、コアバレルを回収してボーリングコアの取り出しを行った。

コアバレル内から取り出したボーリングコアは、コアの上下方向の取り間違いを防ぐことや、コアの連続性を保持して割れ目方向をある程度把握する事を目的として、コアパックから取り外したボーリングコアの表面に基準線の記入を行った。基準線はまず赤線の記入を先に行い、次いでボーリングコアの上下方向の判定のために、赤色の基準線の右側（浅い深度側を上側に見てコアに向かって右側）に青線の記入を行った。基準線を記入する際は、先に採取したボーリングコアがある場合はそのコアの下端面と新たに採取したコアの上端面の割れ目を合わせて、連続するように記入を行った。また、基準線には記録上番号を付与し、ボーリングコアの欠損やコアバレル内でのコア共回りなどで割れ目同士がきちんと合わない事態が生じた場合には、新規に基準線を引き直し、新たな番号を付与することとした。

図 2.3.2-1 にボーリングコアへの基準線の記入例を示す。

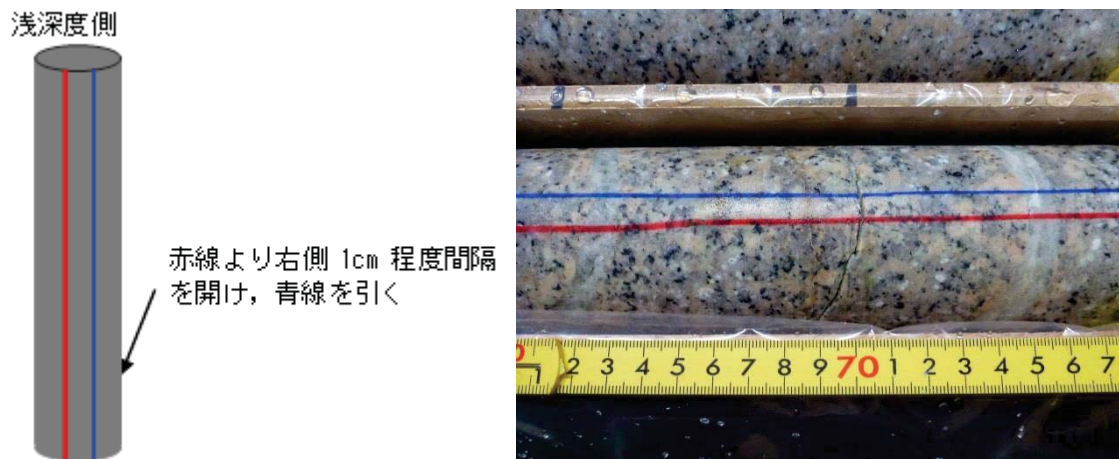


図 2.3.2-1 ボーリングコアへの基準線の記入例と実際の状況

基準線の記入が終了した後に岩石カッターを用いて長さ 1m 毎にボーリングコアの切断を行った。

1m 毎に切断したボーリングコアは、コア箱 1 箱あたり長さ 3m 分(1 列 1m×3 列)の収納が可能な木製コア箱に基準線をコア箱の表面側になるように収納した。コア箱の内面にはボーリングコアの破損を防ぐ目的でビニルシートを敷きコアを収納した。図 2.3.2-2 にボーリングコアのコア箱への収納状況を示す。



図 2.3.2-2 ボーリングコアのコア箱への収納状況

## (2) コア記載

回収したボーリングコアは JAEA の岩芯地質記載要領(鶴田, ほか, 2012)に準拠した上で 1/10 スケールでコア記載を行った。コア記載は、掘削中の坑内、およびコア写真撮影室内で実施した。

調査対象となった土岐花崗岩は、白亜紀後期に美濃帯の堆積岩類と濃飛流紋岩類に貫入している岩体であり、山陽帯の東縁にあたる苗木・上松花崗岩を構成する 1 岩体として、岐阜県の土岐

市～瑞浪市を中心として東西約 12km、南北約 14km にわたって分布している。土岐花崗岩は美濃帯の中生界と同様に中新統の瑞浪層群に不整合に覆われており、さらにその上位を鮮新統の瀬戸層群が不整合に覆う関係を示す。この他に石英斑岩が瑞浪層群の基盤岩として分布しており、この石英斑岩は土岐花崗岩と瑞浪層群を岩脈群の形態で貫いている。

土岐花崗岩の主な岩相として、細粒～粗粒の等粒状完晶質の黒雲母花崗岩からなり、部分的に斑状組織を呈する部位もみられる。一般的に捕獲岩(ゼノリス)や苦鉄質マグマ包有物(MME)をほとんど含有しない特徴を持つ。また、土岐市東方の中津川市を中新として分布する苗木花崗岩では、巨晶花崗岩(花崗岩質ペグマタイト)が顕著に見られるが、土岐花崗岩ではごく小規模に見られるのみである。この他には石英脈やアプライト脈の細脈が多く観察される。土岐花崗岩の主な造岩鉱物としては、石英・カリ長石・斜長石・黒雲母であり、これ以外に微細な角閃石を認められる部位もある。

### (3) 総合柱状図

ボーリングコア観察結果に基づき掘削深度とコアの性状変化(風化・変質・RQD)、亀裂本数・傾斜角との関係を総合柱状図として取りまとめた。

### (4) コアの撮影

コア写真撮影に使用したデジタルカメラは 1200 万画素以上の画素数を有する機材を使用した。撮影の際には鋼製のアングルを組み合わせた「コア写真撮影台」を設置して、撮影時の手ぶれを防ぐ目的で雲台を介してデジタルカメラを固定した。鋼製のアングルにはボーリングコアを照らすのに十分な光量を有する光源を 4 機取り付けた。

コア写真撮影の際にはボーリングコアが収納されているコア箱から、一度ボーリングコアを取り出して写真撮影用のコア箱(L=1.0m の半割塩ビ×3 列)へ移し替えて撮影を行った。なお、撮影時には湿潤状態を再現するために霧吹きにてコア表面を十分に湿らせてから撮影を行った。

コア写真の上端側には調査ボーリング孔の孔番号と上端・下端深度(mabh)を表示した。併せて色調再現性を整える目的でカラーチャートも掲示して写真撮影を行った。

図 2.3.2-3 にコア写真撮影台と現地設置状況を示す。

### (5) コアの収納

コア写真撮影およびコア記載の際に取り出したコアは、コア箱へ収納し、電中研(我孫子地区：地球工学研究所)に運搬した。

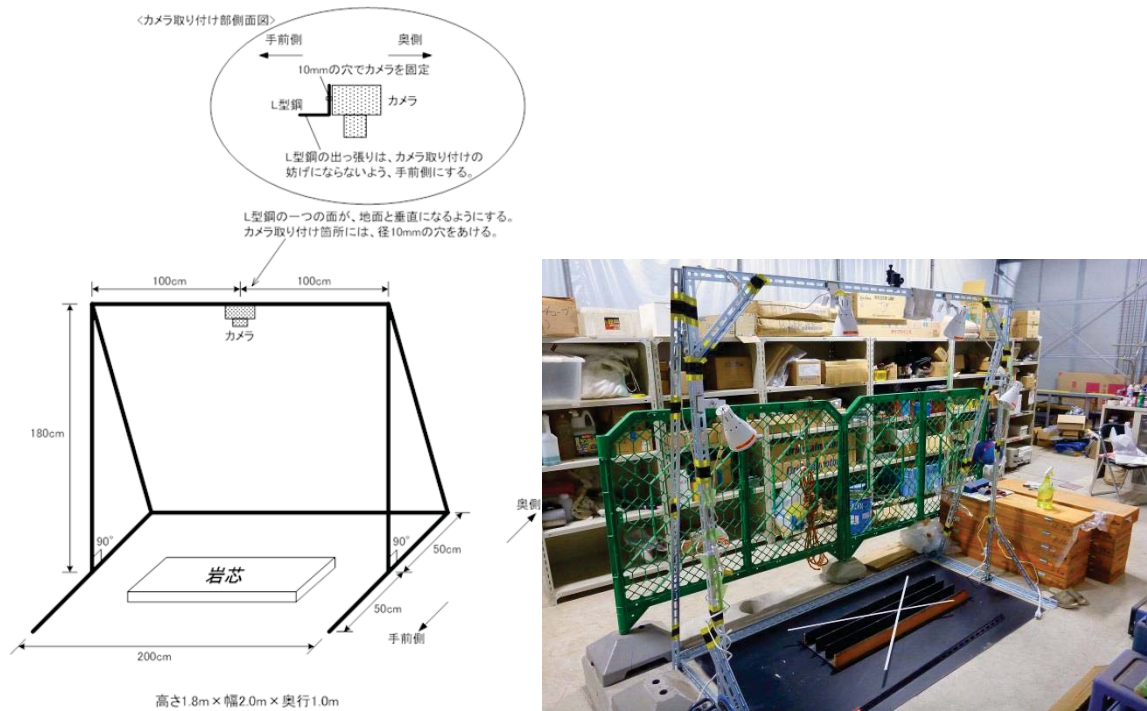


図 2.3.2-3 コア写真撮影台と現地設置状況

### 2.3.3 キャリパー検層

キャリパー検層（X-Y 孔径検層）は、孔径の変化を深度に対して連続的に測定記録し、孔内における空洞、崩壊の位置やその形状・程度を把握するために実施した。表 2.3.3-1 にキャリパー検層装置の仕様、図 2.3.3-1 にキャリパープローブの全景、および測定用アームの写真を示す。

キャリパー検層の測定手順を以下に示す。

- ① プローブの挿入は傾斜孔のためロッドで行った。プローブはアームを閉じて挿入した。
- ② 孔底までプローブを降下し、地上部測定器から遠隔操作により測定用アームを開脚した。
- ③ アームの開脚を確認し、電動ウインチにてプローブに接続したロッドを一定速度で巻き上げながら、孔壁の凹凸に対応するアームの変異量を記録した。

表 2.3.3-1 キャリパー検層装置の仕様一覧

項目	性能
適応孔径	φ 70～140mm
プローブ全長	2.53 m
プローブ外径	φ 66 mm
測定最大深度	500m
測定方式	4アーム式
測定誤差	1 mm以内
深度測定精度	0.25 mm/パルス※

※ 深度測定プーリーユニットの精度



図 2.3.3-1 (上)キャリパープローブの全景 (下)測定用アーム (開いた状態)

#### 2.3.4 BTV・フローメータ検層

##### (1) 装置概要

ボアホールテレビ (以下、BTV) 検層は、電中研が開発した BTV 機能付きフローメータ検層装置を用いて、孔口マニホールドの先端深度から孔底までの範囲で実施した。BTV カメラで撮影した孔内壁面画像を BIP システムにより画像解析し、各孔の岩盤分離面について、深度、方向 (走向・傾斜) を計測した。

BTV 機能付きフローメータ検層装置は、BTV カメラを装備しており、検層と同時に孔壁の状況を観察可能である。BTV カメラは、(株)レアックス社製の BIP システムを使用した。フローメータ検層装置は、測定プローブ部 (フローメータプローブ、BTV カメラ、ケーブル)、地上コントロール部 (検層コントローラー、ケーブルドラム)、地上計測部 (パソコン、ビデオデッキ等) によって構成される。

図 2.3.4-1 にフローメータ検層の測定概念を示す。

今回のような湧水環境下にある傾斜孔では、ロッドを用いて測定プローブを孔内に降下し、ウインチでロッドを引上げながら測定を行った。フローメータ検層の流速測定は概ね 1m 毎に行った。流速測定に際しては、孔口からの湧水量とフローメータから得られた流量を確認し、ダイバーターの効果を確認して作業した。流速変化 (アノマリー) が得られた深度では、測定間隔を 10 cm 程度に細かくし BTV 機能を用いて割れ目を確認しながら行った。

表 2.3.4-1 にフローメータ検層装置の仕様、表 2.3.4-2 に BTV カメラの仕様を示す。また、図 2.3.4-2 にスポンジパッカーの機能を示す。

フローメータプローブのスポンジパッカーは、孔内の地下水を流速センサー部へ効率よく誘導し、またセンサーを孔内中央部に保つ機能がある。

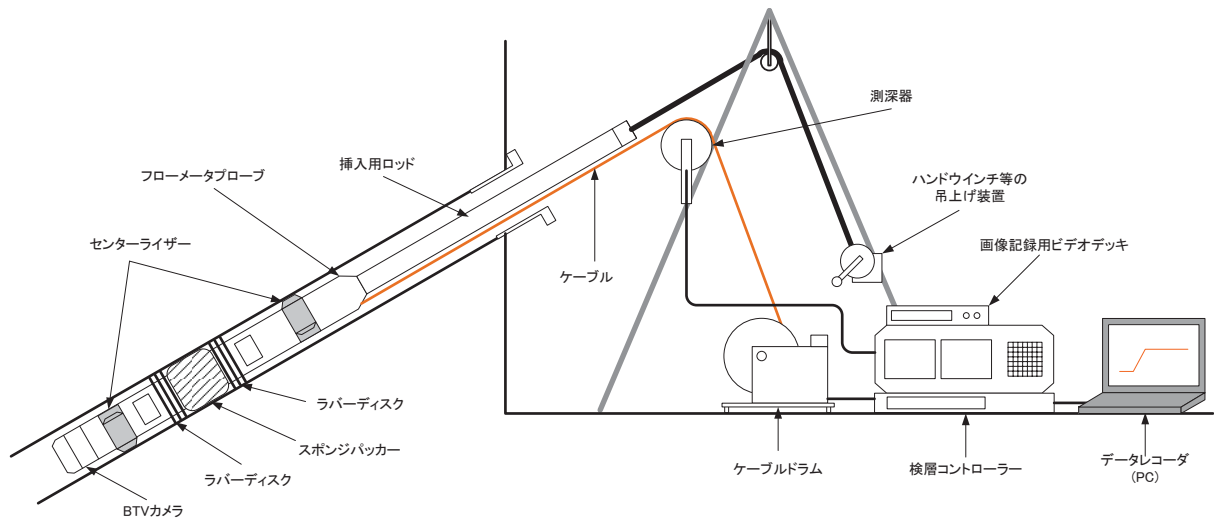


図 2.3.4-1 フローメータ検層装置の概念

表 2.3.4-1 フローメータ検層装置の仕様一覧

項目	性能
適応孔径	φ 66~200mm
プローブ全長	3.15m (BTVユニットを含む)
プローブ外径	φ 50mm
測定最大深度	500m
測定範囲(流速)	1~2000 mm/sec <sup>※</sup>
付属性能	BIPシステム

※ 流速測定範囲は流量計単体としての性能

表 2.3.4-2 BTV カメラの仕様一覧

項目	性能
画像取得方式	側方展開画像
画像精度	0.5mm(φ 60mm) 360° 円周
色解像度	R・G・B 各8bit
深度測定精度	0.25 mm/パルス <sup>※</sup>

※ 深度測定ブーリーユニットの精度

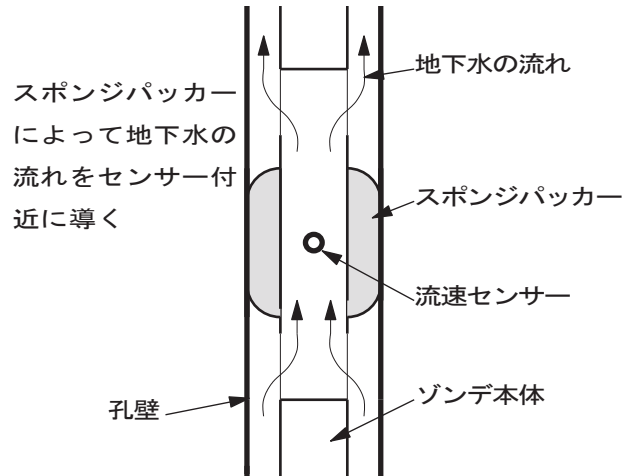


図 2.3.4-2 スポンジパッカーの機能

(2) フローメータ・BTV 検層の手順

フローメータ・BTV 検層の手順を以下の①～⑦に示す。

- ① 孔口に検層装置を設置し、孔口からの湧水量とフローメータから得られた流量を確認し、ダイバーターの効果を確認した。
- ② ロッドを用いて所定の深度まで測定プローブを挿入した。
- ③ 検層装置を静止させ、流量測定値が安定するまで待機し、安定後の数値を記録した。また、モニタ上において孔壁が十分に撮影可能な状態にあることを確認した。
- ④ プローブの引上げと共に BTV の記録を開始した。以後、原則 1m ごとに静止しして安定流速を測定した。また、アノマリー付近の前後では 10～20cm 単位で測定し、BTV の展開画像より壁面の状況を観察した。
- ⑤ 孔口まで検層装置を引き上げ、キャリブレーション用の湧水量を測定した。
- ⑥ フローメータ検層の終了後、取得データの概算換算流量とキャリブレーション用湧水量を比較し測定結果を確認した。また、BTV の画像は MO ディスクに記録されていることを確認した。
- ⑦ 機材を回収して解体を行った。

(3) 品質確保のための対応策

a. 孔壁画像

鮮明な孔壁画像の取得のためセンタライザーによる芯出しを行った。また、地下水中の遊離ガスにより BTV のスクリーンに気泡が付着して画像が不鮮明になることがあるため、スクリーンに撥水剤を添加した。測定速度は 10～18 mm/秒を基準とし、地上部装置の速度表示で管理した。

b. 測定深度の補正

コア記載結果と一致させる必要があったため、測定深度の補正は、以下の手順で行った。

- ① 測定深度の補正は、基本的に地質記載および岩芯写真等を用い、特徴的な地質や地質構造



を深度指標として設定することにより行うこととした。

- ② 具体的な測定深度の補正は、岩芯に認められる深度を基準とし、取得された孔壁画像に示された2つの指標間のずれを比例配分する方法で行うこととした。
- ③ 割れ目帯や岩盤の脆弱な区間で明確な深度指標が設定できない場合は、その上下の最も近い深度指標を用いることとした。
- ④ BTV 測定の前に岩芯記載の中から注意すべき箇所を10m深度ごとに抽出しておき、深度の誤差を測定時に把握できるように深度誤差チェックシートを記載しながら測定を実施することとした。

### 2.3.5 透水試験

透水試験の実施対象となる透水性割れ目（アノマリー）の深度は、フローメータ・BTV 検層からの情報や、16MI59号孔掘削時の15MI52号孔、15MI53号孔への間隙圧力応答の結果を基に選定した。

選定した透水性割れ目の深度付近では、湧水量測定（定圧揚水試験）を複数区間実施して透水性割れ目特定し、特定した4区間の透水性割れ目を対象として定流量揚水試験を実施した。

定流量揚水試験は、間隙水圧測定を翌朝まで行い水圧の安定を確認した後、モノポンプにより定流量で揚水した。定流量揚水試験と湧水量測定の結果は、定流量揚水試験では非定常解析式、および定圧揚水試験では定常解析式を用いて透水量係数を算出した。

#### 2.3.5.1 透水試験の使用機器

表 2.3.5-1 に透水試験に使用する機器一覧、表 2.3.5-2 にモノポンプの仕様を示す。

表 2.3.5-1 透水試験使用機器一覧

分類	装置	主要部品 数量等	仕様
孔内部	パッカーユニット	3台	スライド式 適用孔径φ66~100mm
	ストレーナ	ステンレス製ガス管	3/4" ガスネジ
中継部	JFT ロッド	長さ：3m、2m、1m ステンレス製	外形φ42.7mm 内径φ35.8mm 連結部φ49.0mm
	パッカー用 チューブ	約30m	ナイロン製(孔内用) 4×2.5mm ピーク製(地上用) 4×2.5mm
	圧力用チューブ	〃	ナイロン製(孔内用) 4×2.5mm
地上部	電磁流量計	1台	MAX：30L/min 精度FS:0.1%
	モノポンプ	1台	MAX：0.1L/min
	データ収録用PC	ノートパソコン	
	データロガー	キーエンス NR500	
	チャンバータンク	2台	パッカー拡張用
	圧力計	3台	ひずみ型 FS：5MPa
	口元バルブ	1台	ボールバルブ

表 2.3.5-2 モーノポンプの仕様

項目	性能	
形式	ヘイシンモノポンプ 12NE04	ヘイシンモノポンプ 9NE10
吐出量	5.8~100mL/min	100~2000mL/min
吐出圧	max1.8MPa	max5.0MPa
回転速度	26~615min	27~600min
駆動機	インバーター制御モーター	インバーター制御モーター
モーター電源	AC200V/60Hz/三相	AC200V/60Hz/三相
インバーター電源	AC200V/50Hz/単相	AC200V/50Hz/単相

2.3.5.2 透水試験方法

(1) 装置構成と機能・役割

透水試験装置は、口元パッカー、試験区間上部パッカー、試験区間下部パッカーの3連編成とし、試験区間 P2、試験区間下方の P1、および試験区間上方の P3 の3区間の水圧が同時に観測できる。また、3本のパッカーはそれぞれ個別に拡張/収縮できる構造とした。

図 2.3.5-1 に透水試験の装置設置の概念を示す。

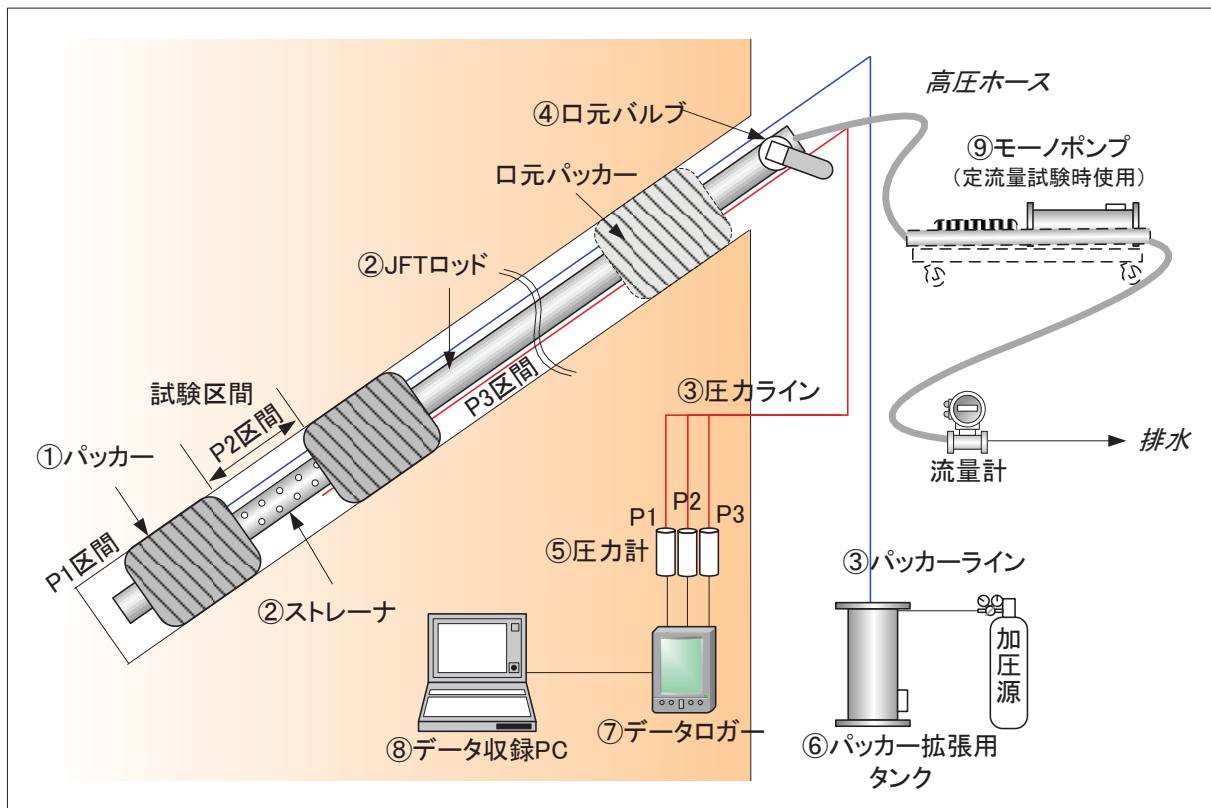


図 2.3.5-1 透水試験装置の設置概念

## (2) 透水試験の手順

図 2.3.5-2 に透水試験の作業フローを示す。

湧水量測定（定圧揚水試験）は、定流量揚水試験の対象となる湧水割れ目の特定とその割れ目の概略な透水量係数を求めるため、間隙水圧測定の安定を待たずにパッカー拡張直後からの測定とした。

定流量揚水試験は、低流量用モノポンプの制御範囲内の透水性であることを確認の上実施した。

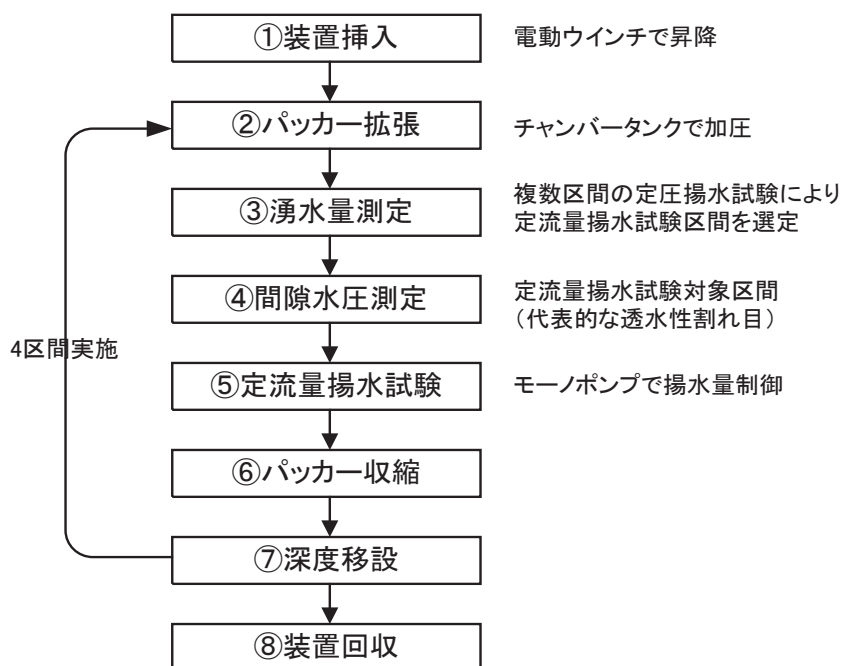


図 2.3.5-2 透水試験の作業フロー

### (a) 装置挿入

装置挿入は事前に作成した Tally List に基づき、深度間違いのないよう所定のロッド本数、パッカー編成および残尺を確認の上、挿入した。

### (b) パッカー拡張

パッカーは、湧水圧による試験装置の浮き上がり防止のため、ロッド残尺部に固定したバンドをレバーブロックでアンカーを取り、口元バルブを開放したまま拡張した。拡張方法はパッカー拡張用タンクの水を窒素ガス等で加圧する方法で行った。拡張圧力は水圧+1.0MPa 前後とした。

### (c) 湧水量測定（定圧湧水試験）

湧水量測定は、透水性割れ目を特定するために透水性割れ目近傍の複数区間で実施した。湧水量測定は、間隙水圧の安定を待たずにパッカー拡張後に試験区間の湧水量を計測した。

### (d) 間隙水圧測定

湧水量計測の結果から特定された透水性割れ目を含む区間を対象とした。間隙水圧測定は、口

元バルブを閉鎖し、区間を完全閉鎖した時点から測定した。

(e) 定流量揚水試験

定流量揚水試験は、試験区間から一定流量で揚水している過程の水圧変化と、ポンプ停止した後の水圧回復過程を測定した。また、試験実施前に周辺の間隙水圧モニタリング孔の対象区間との差圧を測定し、揚水試験中は周辺モニタリング区間の水圧応答を測定した。

(f) パッカー収縮

水理試験の終了後、パッカー拡張用タンク内の窒素ガスを排気し、パッカーを収縮させた。タンクの戻り液量から収縮の確認を行った。パッカーの収縮を確認した後に、固定用のアンカーを外し装置の移設を行った。

(g) 装置の移設

装置の移設は、次の透水性割れ目の深度付近までロッドの追加、あるいは抜管して行った。

(h) 装置の回収

全ての試験完了後、パッカーを収縮させて装置の抜管を行った。

(3) 試験方法

図 2.3.5-3 に間隙水圧測定、湧水量測定、定流量揚水試験時の装置概念を示す。

- ① 間隙水圧測定は、パッカー拡張後、口元バルブを閉鎖して圧力ライン(測定ライン)のチューブ内のエア抜きを行い、圧力計ライン末端に取り付けた圧力ラインバルブを閉じて区間を密閉した状態を形成し水圧測定を行った。
- ② 湧水量測定(定圧揚水試験)は、水頭を一定として揚水したときの流量変化を測定する試験である。本業務では定流量試験区間の選定のための湧水量の把握を目的としたため、短時間で平均湧水量を測定した。
- ③ 定流量揚水試験は、揚水流量を一定に保ち圧力変化を測定する試験である。揚水流量はモノポンプの回転数で制御した。所定時間まで揚水した後は、ポンプを停止し回復試験へ移行した。回復試験は原則として初期間隙水圧に収束するまで、あるいは揚水時間と同じ時間経過をもって試験終了とした。透水係数は揚水過程、回復過程のそれぞれより算出できる。

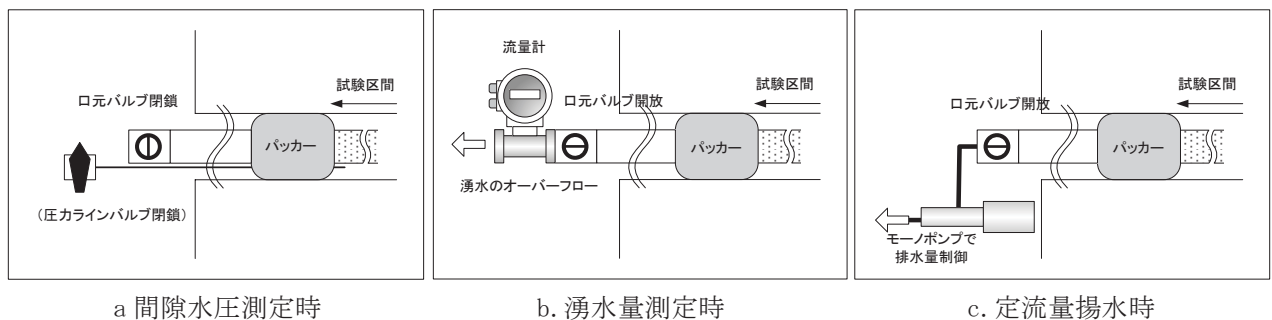


図 2.3.5-3 各試験時の装置概念

(4) データ整理・解析

(a) 湧水量測定（定圧揚水試験）の解析

定圧揚水試験（HW）の排水過程の解析は、Hvorslev の定常法を用いた。以下に解析手順を述べる。

- ① 口元バルブより湧水する地下水の平均湧水量を計測した。
- ② 試験開始前の P2 圧力を計測し、口元の圧力が 0 となるよう圧力値を水位に換算した。
- ③ 以下の式より透水量係数  $T$  を算出した。

$$T = \frac{Q \times \ln\left[(m \times L / (2r)) + \{1 + (m \times L / (2r))^2\}^{1/2}\right]}{2\pi \times \Delta s}$$

ここに、

- $T$  : 透水量係数 (m<sup>2</sup>/ sec)  
 $\Delta s$  : 水位低下量 (m)  
 $L$  : 試験区間長 (m)  
 $Q$  : 平均流量 (m<sup>3</sup>/ sec)  
 $m$  : 縦横方向の透水係数比 (通常は 1)  
 $r$  : 試験孔半径 (m)

(b) 定流量揚水試験の解析

定流量揚水試験は、Cooper-Jacob 法を用いて行った。図 2.3.5-4 に  $\text{Log}(t/r^2) - s$  曲線と Derivative Plot の例を示し、以下に解析手順を述べる。

- ① 片対数グラフの対数目盛り X 軸に  $t(\text{sec})$  を、算術目盛り Y 軸に初期水位からの水位低下量  $s(\text{m})$  をとり、 $\text{Log}(t/r^2) - s$  曲線を作成した。同時に、両対数グラフの X 軸に  $t(\text{sec})$  を、Y 軸に水位低下量  $s(\text{m})$ 、および Y2 軸に  $ds/d\text{Ln}(t)$  をとり、 $\text{Log}(t/r^2) - s$  曲線のプロットの傾きを示す Derivative Plot を作成した。
- ② Derivative Plot より、 $\text{Log}(t/r^2) - s$  曲線の直線勾配に対応する時間の  $ds/d\text{Ln}(t)$  は、ほぼ一定値を示す。これより、 $\text{Log}(t/r^2) - s$  曲線の直線勾配を選定した。
- ③ 選定した  $\text{Log}(t/r^2) - s$  曲線の直線勾配の、1 サイクル間における水位差  $\Delta s(\text{m})$  を求め、以下の左式より透水量係数を算出した。
- ④  $\text{Log}(t/r^2) - s$  曲線の直線勾配の延長が、 $\Delta s = 0$  と交わる点  $(t/r^2)_0(\text{sec})$  を求め、以下の右式より貯留係数  $S$  を算出した。

$$T = \frac{2.3 \cdot Q}{4\pi \cdot \Delta s} \qquad S = 2.25 \cdot T \cdot (t/r^2)_0$$

ここに、

$T$  : 透水量係数 ( $\text{m}^2/\text{sec}$ )

$S$  : 貯留係数 (-)

$Q$  : 平均流量 ( $\text{m}^3/\text{sec}$ )

$\Delta s$  :  $\text{Log}(t)$  の 1 サイクル間における水位低下量 (m)

$(t/r^2)_0$  :  $s=0$  における経過時間 (sec)

$r$  : 試錐孔半径 (m)

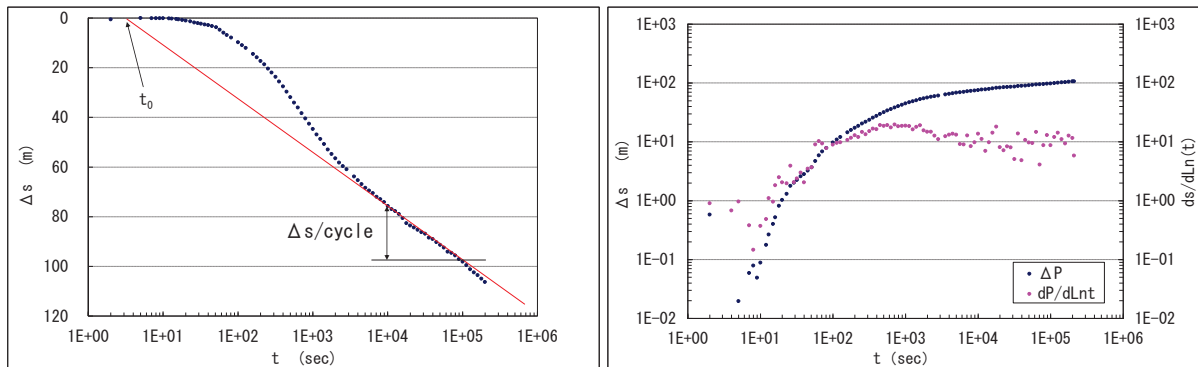


図 2.3.5-4  $\text{Log}(t)$ - $s$  曲線(左)、Derivative Plot(右)の例

(c) 回復試験の解析

定流量揚水試験後の回復過程の解析は Agarwal 法の解析式を用いた。図 2.3.5-5 に回復過程の  $\text{Log}(tp \cdot \Delta t / (tp + \Delta t)) - Sr$  曲線、Derivative Plot の例を示し、以下に解析手順を述べる。

- ① 片対数グラフの対数目盛り X 軸に Agarwal の等価時間  $tp \cdot \Delta t / (tp + \Delta t)$  (sec) を、算術目盛り Y 軸に水位回復量  $Sr$  (m) をとり、 $\text{Log}(tp \cdot \Delta t / (tp + \Delta t)) - Sr$  曲線を作成した。同時に、両対数グラフの X 軸に同じく等価時間  $tp \cdot \Delta t / (tp + \Delta t)$  を、Y 軸に水位回復量  $Sr$  (m)、および Y2 軸に  $dSr/d\text{Ln}(e, t)$  をとり、 $\text{Log}(tp \cdot \Delta t / (tp + \Delta t)) - Sr$  曲線のプロットの傾きを示す Derivative Plot を作成した。
- ② Derivative Plot より選定した  $\text{Log}(tp \cdot \Delta t / (tp + \Delta t)) - Sr$  曲線の直線勾配の、1 サイクル間における水位差  $\Delta Sr$  (m) を求め、以下の左式より透水量係数を算出した。
- ③  $\text{Log}(tp \cdot \Delta t / (tp + \Delta t)) - Sr$  曲線の直線勾配の延長が、 $Sr = 0$  と交わる点  $tp \cdot \Delta t / (tp + \Delta t)_0$  (sec) を求め、以下の右式より貯留係数  $S$  を算出した。

$$T = \frac{2.3 \cdot Q}{4\pi \cdot \Delta Sr} \qquad S = \frac{2.25 \cdot T}{r_w^2} \cdot (tp \cdot \Delta t / (tp + \Delta t))_0$$

ここに、

$T$  : 透水量係数 ( $\text{m}^2/\text{sec}$ )

$S$  : 貯留係数 (-)

$\Delta Sr$  :  $\text{Log}(tp \cdot \Delta t / (tp + \Delta t))$  の 1 サイクル間における水位回復量 (m)

$r_w$  : 試錐孔半径 (m)

$Q$  : 平均流量 ( $\text{m}^3/\text{sec}$ )

$tp \cdot \Delta t / (tp + \Delta t)_0$  :  $Sr=0$  における  $tp \cdot \Delta t / (tp + \Delta t)$  (sec)

$tp$  : 湧水時間 (湧水停止時間) (sec)

$\Delta t$  : 回復過程 (湧水停止後) の経過時間 (sec)

$Ss$  : 比貯留係数 [ $=S / L$ ]

$k$  : 透水係数 [ $=T / L$ ]

$L$  : 試験区間長 (m)

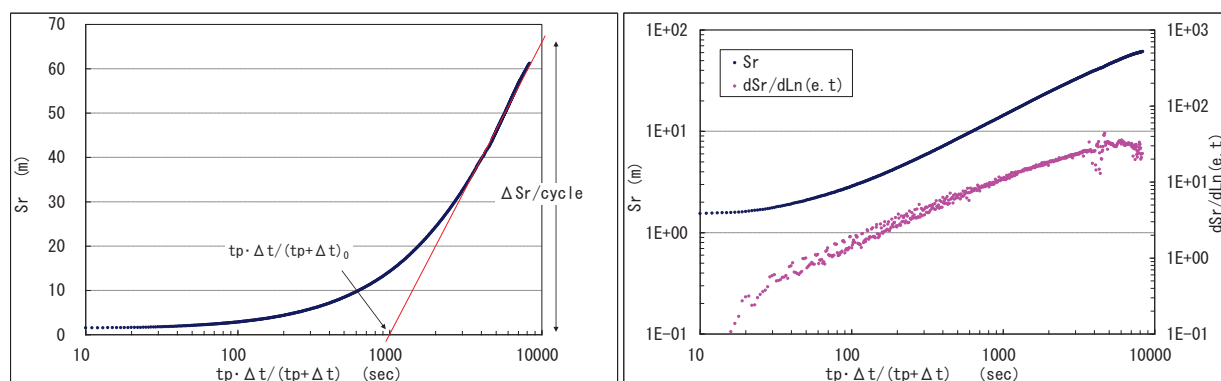


図 2.3.5-5  $\text{Log}(tp \cdot \Delta t / (tp + \Delta t)) - Sr$  曲線(左)、Derivative Plot(右)の例

#### (5) 透水試験時の孔間応答

透水試験中は、長期観測中の 15MI52 号孔および 15MI53 号孔の間隙水圧モニタリングの各区間のデータサンプリングピッチを 5 秒あるいは 10 秒に短縮して圧力の孔間応答の詳細を確認した。また、定流量揚水試験時の孔間応答は時系列と割れ目位置等を整理した。

#### 2.3.5.3 水圧測定

間隙水圧測定時、16MI59 号孔の定流量揚水試験区間と 15MI52 号孔、および 15MI53 号孔の間隙水圧モニタリング区間との水頭差の測定を行った。使用した差圧計と仕様を表 2.3.5-3 に示す。

水圧測定は、16MI59 号孔の試験区間を基準水圧とし、対象区間は 15MI52 号孔および 15MI53 号孔のそれぞれの観測区間から、試験区間と割れ目連通性が高いと考えられる区間を選定した。測定手順を以下に示す。

- ① 図 2.3.5-6 に示す配管を構築した。
- ② V2-1、V2-2 バルブを開放し、測定区間の湧水によりエア抜きを行った。
- ③ エア抜き後はドレーン側のチューブを連結し、間隙水圧の安定を翌朝まで測定した。
- ④ データ収録を開始し（初期値）、V3-1 バルブを測定対象とする区間の方向へ向けた。
- ⑤ V2-1、V2-2 のバルブを同時に閉鎖し、約 10 分測定した。

表 2.3.5-3 差圧 20mH<sub>2</sub>O 用差圧計の仕様

20mH <sub>2</sub> O 用 差圧計	メーカー・型式	Honeywell 社製 TYPE:AD114BM. 1B. 2U. 5H. 6A
	耐圧	約 10MPa (1500psi)
	差圧	約 21mH <sub>2</sub> O (30psi)
	精度	±0.1%FS (±2.1cmH <sub>2</sub> O)
表示計	メーカー・型式	データトラック社製 TYPE:223-1-R
	表示単位	30psi ≒ 0.1mmH <sub>2</sub> O

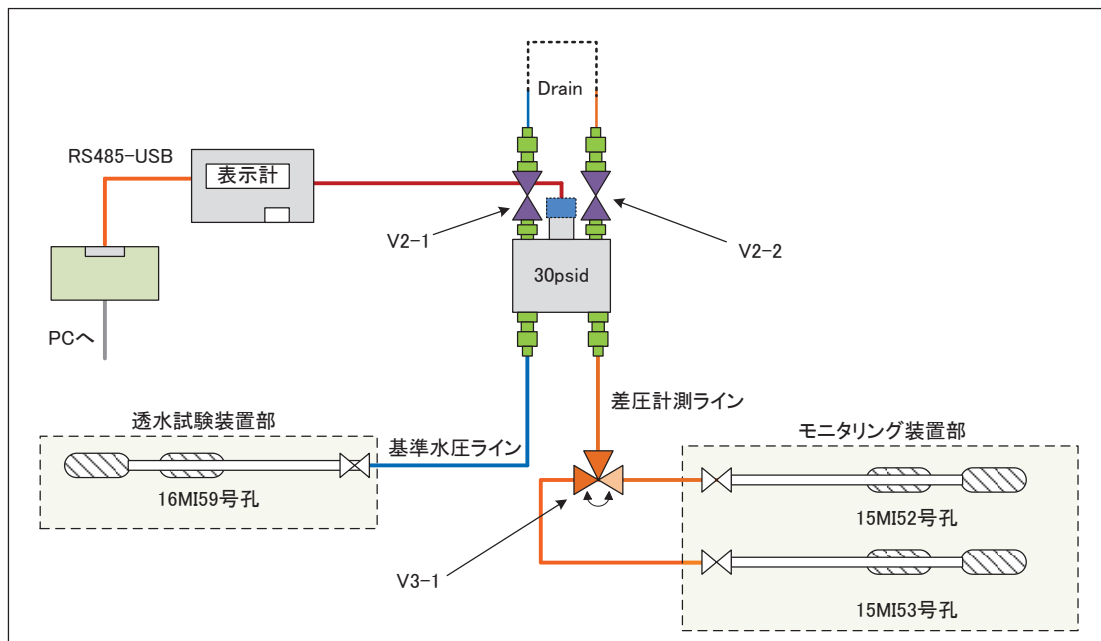


図 2.3.5-6 透水試験中の差圧測定概念



### 2.3.6 高精度孔曲がり検層

高精度孔曲がり検層は、ボーリング孔の掘削孔跡を把握するために実施した。図 2.3.6-1 に高精度孔曲がり検層のシステム概念を示す。

高精度孔曲がり検層は、方位センサー精度： $\pm 0.3^\circ$ 、傾斜センサー精度： $\pm 0.1^\circ$ 、分解能  $0.01^\circ$  と高精度な村田式デジタルオンラインシステムを使用した。当システムは 3 軸構成角速度センサー・磁気センサーを備えたプローブを孔内に挿入し、特定深度における傾斜角と方位角を計測して距離換算を行い、孔の曲がり具合を確認するものである。

作業手順を以下に示す。

- ① 検層は孔口から孔底（プローブの計測最大深度で可）まで連続で測定した。
- ② 深度 50 cm ごとに計測し 3 次元での孔跡を求め、孔曲がり計測の実データと合わせ、坑道内測量の基準となる座標系に整理した。
- ③ 検層完了後、装置の抜管を行った。

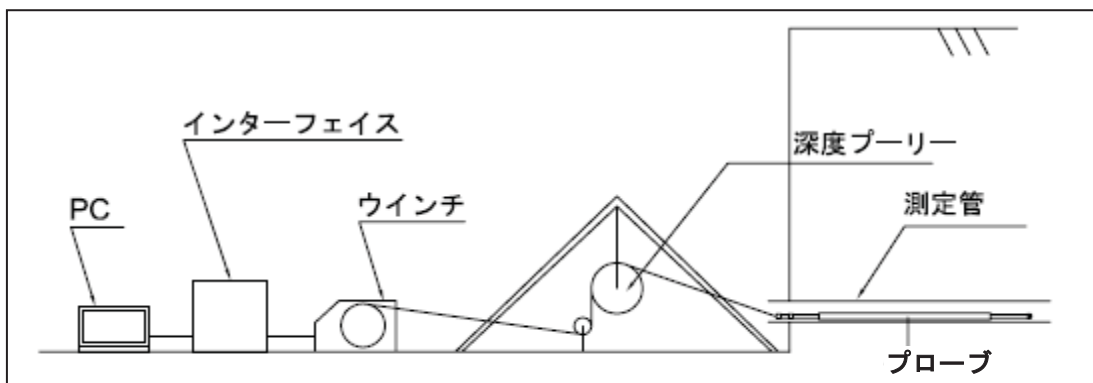


図 2.3.6-1 高精度孔曲がり検層のシステム概念 (引用：<http://well-murata.co.jp>)

### 2.3.7 高解像度 BTV 検層

高解像度 BTV 検層装置は、株式会社レアックス社製 BIP-V を使用した。本システムは、展開画像記録装置（以下 ODS）、詳細観察記録装置（以下 DVS）から構成される。ODS はボーリング孔壁の全周を連続孔壁面展開画像として観察記録を行うことができる。また、DVS は前方視カメラと側方視カメラの組み合わせにより割れ目の詳細な観察を行うことができる。

測定は BTV プローブをアルミロッドに装着し、押し込み装置によって一定速度で押し込みながら行った。押し込み装置は足場パイプで架台を組み、それに固定した。

高解像度 BTV 検層の概念を図 2.3.7-1 に示す。

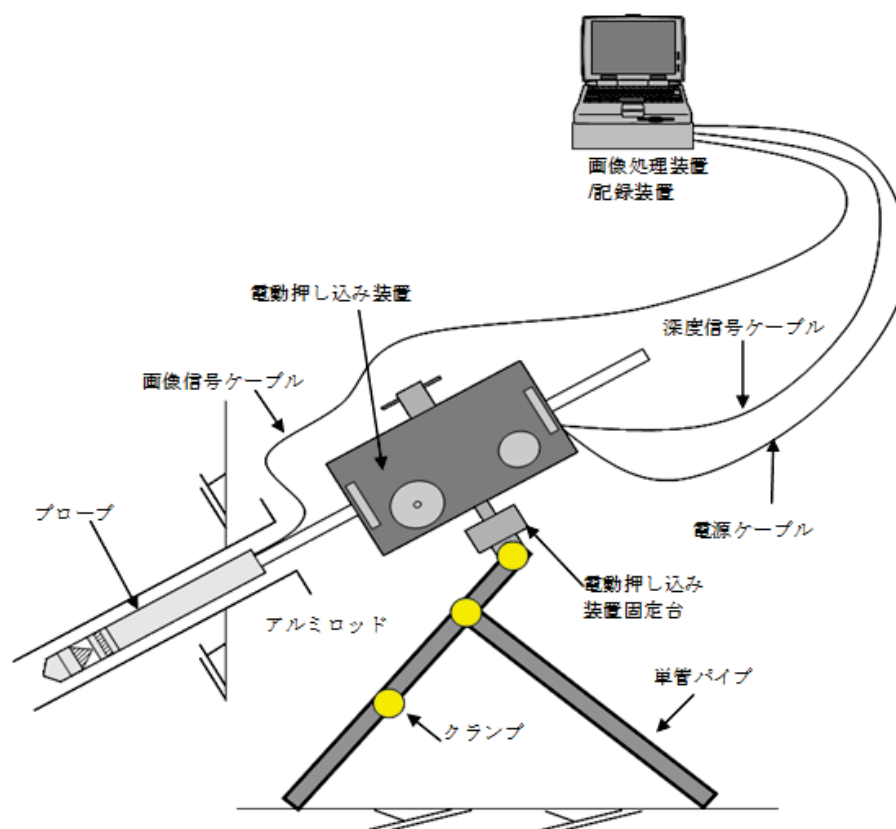


図 2.3.7-1 BIP-V システム構成

#### (1) ODS 画像解析方法

ODS で取得した観察記録を以下の方法で解析した。

##### a. 画像処理および割れ目データの取得

岩盤分離面の走向傾斜の測定は、画像データを読み出して室内解析システムのディスプレイ上に表示し、孔壁との切合線として示される岩盤分離面にフィットするトレースライン（サインカーブ）を求めることにより行う（図 2.3.7-2）。

岩盤分離面の深度は、出現上端、消滅下端、および中間深度を記録した。

幅が 1 mm以上ある開口幅や充填幅は、最大傾斜位置（孔軸に対する最大交差角位置）における境界面上・下盤の正距離とした。

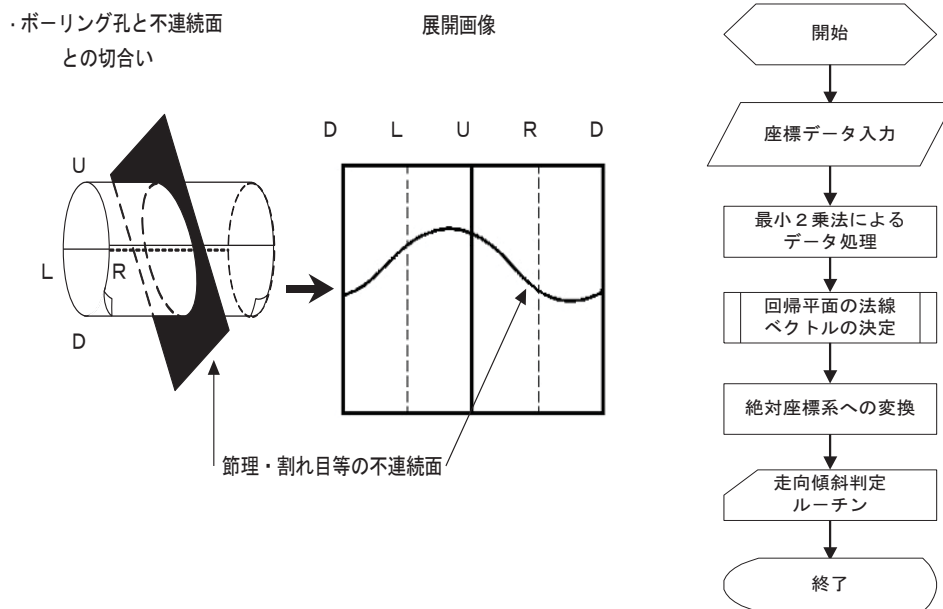


図 2.3.7-2 面構造の走向傾斜の解析方法

b. 区分

面要素は以下の 5 つに区分した。

- ① 初生構造：堆積岩の層理・葉理・火山岩や深成岩などに見られる流理構造、変成岩に見られる片理構造、岩相境界等
- ② 開口割れ目：割れ目のうち画像上で 1mm 以上の開口性が認められ、開口幅の測定が可能なもの
- ③ 割れ目：画像上 50%以上連続している割れ目
- ④ 破碎部：破碎した部分が 5cm 以上の幅を持つ場合
- ⑤ 鉱物脈：鉱物が脈状に割れ目を充填しているもの

c. 分離面形状

面要素の形状について、以下の 3 つに区分した。

- ① Plane：岩盤分離面がきれいなサインカーブを描くもの
- ② Angulated：岩盤分離面が曲がっているものや歪んでいるもの
- ③ Step：岩盤分離面が階段状になっているもの。

d. 状態

面要素について、以下に示す事項を状態として記録した。

- ① 区分が開口割れ目、割れ目の場合：角礫状、細片状、派生割れ目付随など

- ② 区分が破碎部の場合：上盤、下盤
- ③ 区分が初生構造の場合：層理、片理、葉理、流理、岩相境界
- ④ 区分が鉱物脈の場合：白色鉱物、緑色鉱物、黄色鉱物、石英、方解石など

e. ステレオネット図の作成

岩盤分離面の情報を以下の通り、ステレオネット図にまとめた。

- ①  $\pi$ ダイアグラム：極をウルフネットにプロットしたもの
- ② カウントプロット：投影面内のグリッド上で、投影面外周の10分の1の小円内にある極の個数(あるいは全体の個数に対する百分率)をプロットしたもの
- ③ コンターマップ：カウントダイアグラムを元に等分布線を描いたもの
- ④ ローズダイアグラム：走向の頻度を10度刻みで示したもの
- ⑤ 大円：投影点を連ねた線で、傾斜の構造を示したもの

(2) DVS 画像解析方法

DVS 画像の解析は ODS 解析を補助し、より詳細な岩盤分離面の特性を得ることを目的とした。

岩盤分離面のうち開口割れ目を対象に、0.1mm 精度で割れ目幅を計測した。幅の計測箇所は最大傾斜位置(孔軸に対する最大交差角位置)の2か所を基本とし、幅が一定でない場合は、さらに2か所以上の箇所計測し、その平均値を岩盤分離面一覧表に記載した。

幅の計測値の精度を確認するため、スケールプレート(0.1mm)を孔口にセットし別途撮影、計測した。計測結果を図 2.3.7-3 示す。

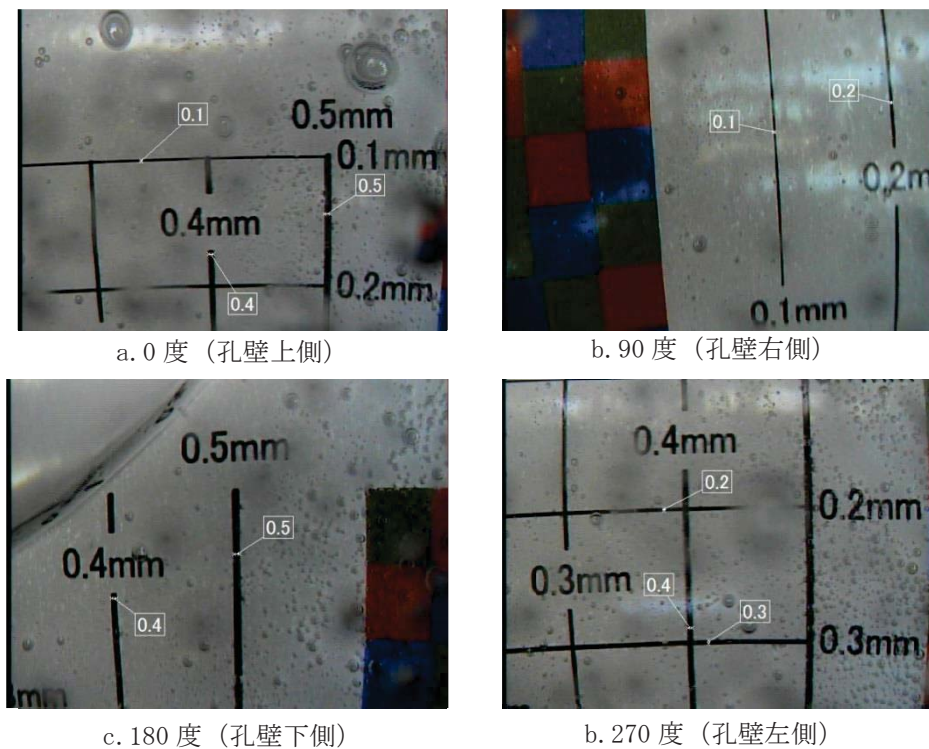


図 2.3.7-3 幅の計測結果

DVS の観察対象区間のうち、コア観察や単項式透水試験、フローメータ検層の結果、水みちとなる割れ目が認められ、且つ開口幅の計測が可能なものについては、幅を計測した箇所を展開画像上に明示し、詳細観察シートとして整理した。幅の計測は対象開口割れ目 1 本に対して 36 度刻みに 10 箇所計測した

### 2.3.8 間隙水圧モニタリング装置の設置および観測

図 2.3.8-1 にパッカー・ロッドの写真、および表 2.3.8-1 に間隙水圧モニタリング装置の仕様一覧を示す。

間隙水圧モニタリング装置のパッカー編成は、各種検層・透水試験結果、および 15MI52 号孔、15MI53 号孔との孔間応答が確認された透水性割れ目の深度を基に決定した。

間隙水圧モニタリング装置の設置は、以下の①～⑦の手順で行った。

- ① 間隙水圧モニタリング装置に用いるチューブ類は、パッカー用（乳白φ4mm×2.5mm）、採水用（乳白φ6mm×4mm）・注水用（黒φ6mm×4mm）の3種類を目的別に使用した。各パッカーに接続するチューブは必要長に切り分け、区間毎に目印を付けて分類した。
- ② 各パッカーは、設置前に 1MPa の水圧でアクリルパイプ内にて拡張試験を行い、リーク等の異常が無いことを確認した。またこの際に、パッカーやチューブ内のエア抜きを行った。
- ③ 装置の挿入は、TallyList に基づき、深度間違いのないよう所定のロッド本数、パッカー編成および残尺を確認の上挿入した。
- ④ 装置はワイヤーウインチを用いて挿入した。ロッドやパッカーを接続する際は、装置が孔内に落下しないようにロッドバンドで固定した。
- ⑤ パッカーの拡張時は、湧水圧による試験装置の浮き上がりを防止するため、ロッド残尺部に固定したバンドからレバーブロックで孔口周辺壁のアンカーに固定して行った。パッカー拡張に要する水量は、圧力タンクの水位より確認した。拡張圧力は水圧+1.0MPa 前後とした。
- ⑥ パッカー拡張後、各区間の湧水量を測定し、対象とした割れ目が区間内に収まっていることを確認した。
- ⑦ 設置したパッカー深度に問題が無いことを確認した後、孔口フランジを取り付けた。



図 2.3.8-1 間隙水圧モニタリングのパッカー・ロッド

表 2.3.8-1 間隙水圧モニタリング装置の仕様一覧

大項目	項目		主な仕様	
パッカーユニット	外径	収縮時外径: φ 76mm 最大拡張径: φ 86mm		
	長さ	全長: 1800mm、パッカー有効長: 1200mm		
	最大使用差圧	1.5MPa		
	拡張方式	水拡張		
ロッド	外径	ソケット部(最大外径): φ 76mm		
	長さ(定尺)	2000mm、1000mm、500mm		
中継ぎ用チューブ	間隙水圧測定用	φ 6 × 4mm、耐圧5.0MPa		
	採水用	φ 6 × 4mm、耐圧5.0MPa		
	パッカー拡張用	φ 4 × 2.5mm、耐圧5.0MPa		
間隙水圧計測装置	圧力計	製造元	Honeywell社	
		レンジ	0~7.0MPa(間隙水圧計測用) 0~10.0MPa(パッカー拡張圧計測用) 0~0.2MPa(大気圧計測用)	
		精度	±0.1%	
	流量計	製造元、型番	KEYENCE社、FD-SS2A	
		レンジ	(小)0~200mL/min、(大)0~2000mL/min	
		精度	±1%(0~500mL/min) ±4%(500~2000mL/min)	
		使用圧力範囲	5MPa以下	
	A/D計測ユニット	製造元、型番	Agilent Technologies社、34980A	
		計測プログラム	最大80ch収録可能	

## 2.4 調査結果

### 2.4.1 ボーリング掘削

#### 2.4.1.1 ボーリング掘削位置の設定

本業務で掘削した 16MI59 号孔の位置および方向を表 2.4.1-1 に示す。

ボーリング実施位置座標は光波測量により測定した。座標は世界測地系を用いた。

表 2.4.1-1 16MI59 号孔の仕様

孔名	16MI59 号孔
掘削方法	オールコア、清水掘削
主要孔径	86mm
掘削長	30.00mabh
掘削方向	鉛直方向：-30°（下向き） 水平方向：方位 N75° W
掘削位置	X 座標：-69131.545 Y 座標：6339.343 Z 座標：-498.818

#### 2.4.1.2 掘削とコア採取、および掘削水管理と湧水量

##### (1) 1 段目掘削

1 段目の掘削は、孔口から EDZ が減少する範囲を採取したコアの亀裂状況から 0.7mabh までと判断した。

口切から 3.54mabh までは、掘削径  $\phi 86\text{mm}$ 、採取コア径  $\phi 72\text{mm}$  で掘削を行った。コア採取後は孔口ケーシング設置のため、 $\phi 101\text{mm} \rightarrow \phi 127\text{mm} \rightarrow \phi 141\text{mm}$  の 3 段階の孔径で拡孔した。

本業務では、EDZ 区間の湧水対策としてクイックライナーを施し、孔壁の止水処置を施した後に孔口ケーシングを設置した。孔口ケーシング挿入後は、クイックライナー（=孔壁）とケーシングの空隙部にグラウト材を充填した。孔口のコンクリートブロックと孔内のグラウト材の硬化後、水圧 5MPa/10 分の加圧試験を行い、遮水性能に問題がないことを確認した。

図 2.4.1-1 に 16MI59 号孔の孔口ケーシングの設置レイアウトを示す。

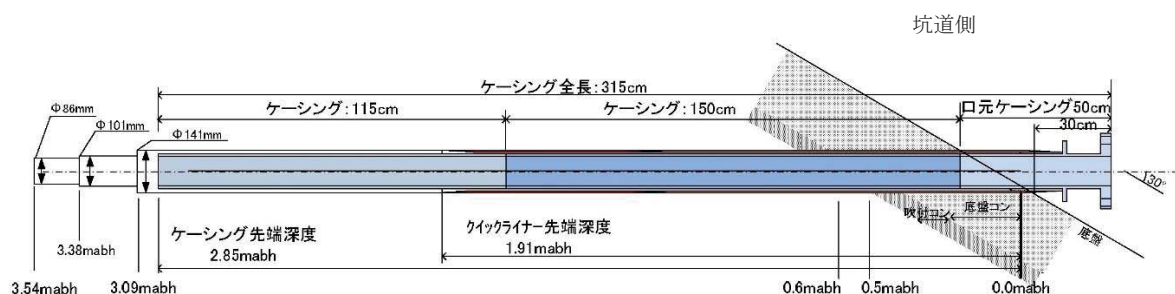


図 2.4.1-1 16MI59 号孔の孔口ケーシング設置レイアウト

EDZ の湧水対策であるクイックライナー工法は、拡孔したφ141mm 孔径の孔壁に表 2.4.1-2 に示す深度へ施工した。施工後に水中テレビカメラによる目視確認の結果、ケーシング挿入の支障となるような変形や水の流入は確認されなかった。

表 2.4.1-2 クイックライナー工法の施工実績

施工回数	クイックライナー施工深度 (mabh)		施工後の状況
	下部	上部	
1 回目	1.925	0.865	異常無し
2 回目	0.975	-0.085	異常無し

(2) 2 段目掘削

2 段目の掘削は、突発的湧水に備えてプリベンダーを孔口ケーシングに接続した状態で行い、掘削径φ86mm、採取コア径φ72mm、掘削長 30.00mabh とした。また、掘削中に孔壁崩壊の症状となり得る送水圧の上昇、リターン水の白濁、回転数の低下は確認されなかった。

(3) コア採取率

孔口の底盤コンクリート部を除きコア採取率 100%であった。

(4) 掘削時の湧水量

掘削時に 1 掘進長ごとに孔口からの湧水量を測定した。測定結果を図 2.4.1-2 に示す。

測定湧水量は掘削深度までの累積した湧水量を示し、区間湧水量はボーリングの 1 掘進毎の湧水量を示す。区間湧水量は、6.99~8.02mabh で 0.7L/min、13.08~14.08mabh で 6.8L/min の湧水量を観測したが、その他の深度では最大でも 0.23L/min 以下に留まった。

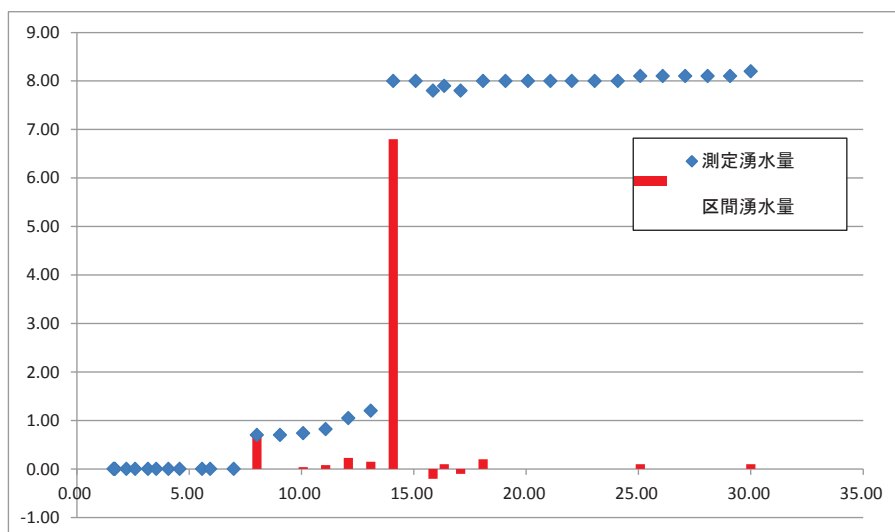


図 2.4.1-2 16MI59 号孔の孔口湧水量測定結果



#### (5) 掘削水の蛍光染料濃度の管理

ボーリングの掘削水には、蛍光染料であるアミノ G 酸をトレーサー剤として添加して掘削を行った。掘削中は 1 時間以下の間隔でリターン水をサンプリングし、濃度が 5mg/L±10%以内の範囲にあることを確認した。なお、トレーサー濃度管理は 14.08mabh までとした。図 2.4.1-3 にアミノ G 酸濃度と湧水量の深度変化を示す。

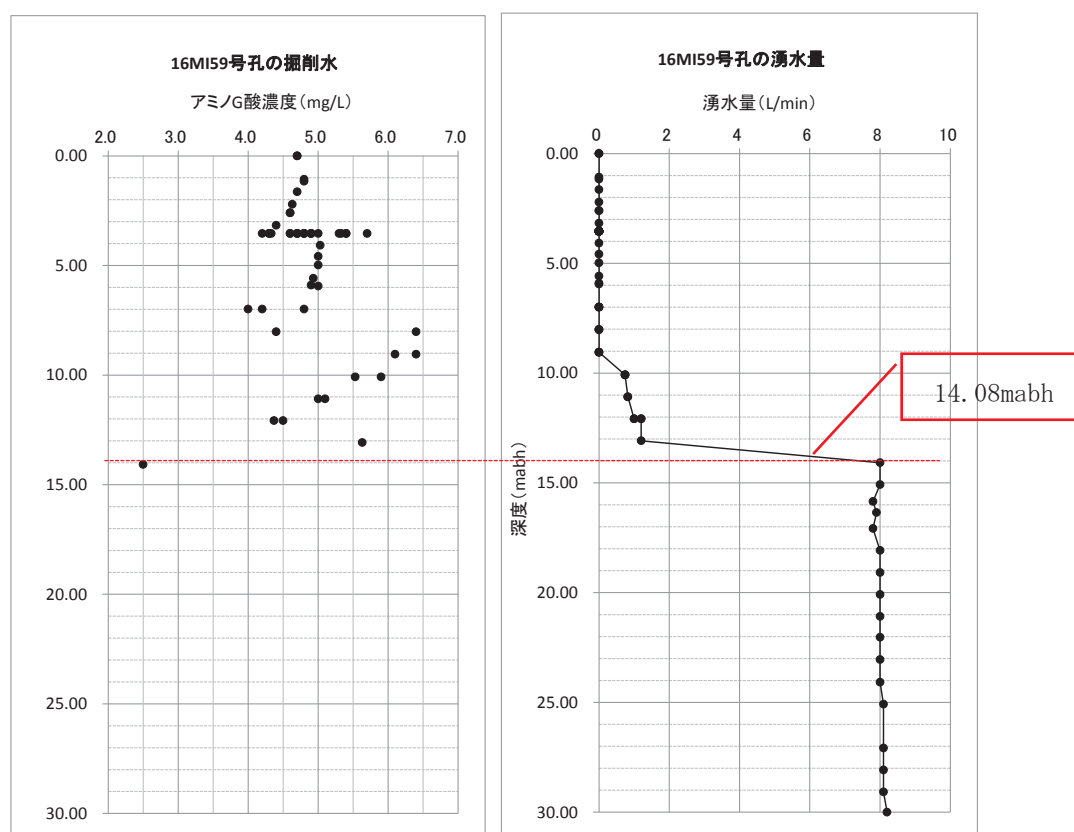


図 2.4.1-3 16MI59 号孔掘削水のアミノ G 酸濃度と掘削時の湧水量

#### (6) 16MI59 号孔掘削中における 15MI52、15MI53 号孔の間隙水圧の変動

16.9mabh 付近と 28.6mabh 付近（図 2.4.1-4 の — — —）において、既存の 2 孔間と連続する割れ目が確認できた。なお、掘削中の間隙水圧の変動はこの 2 深度以外でも確認したが、この 2 深度においては割れ目の走向傾斜や形状から、ネットワーク状に派生したものではなく、1つの割れ目として連続していると判断した。

また、10.7mabh 付近で確認した割れ目については、掘削中の間隙水圧に大きな変化は見られていないが（0.5MPa 程度の水圧の低下が確認できる）、割れ目の走向傾斜や形状から既存の 2 孔間と連続している割れ目と判断した。

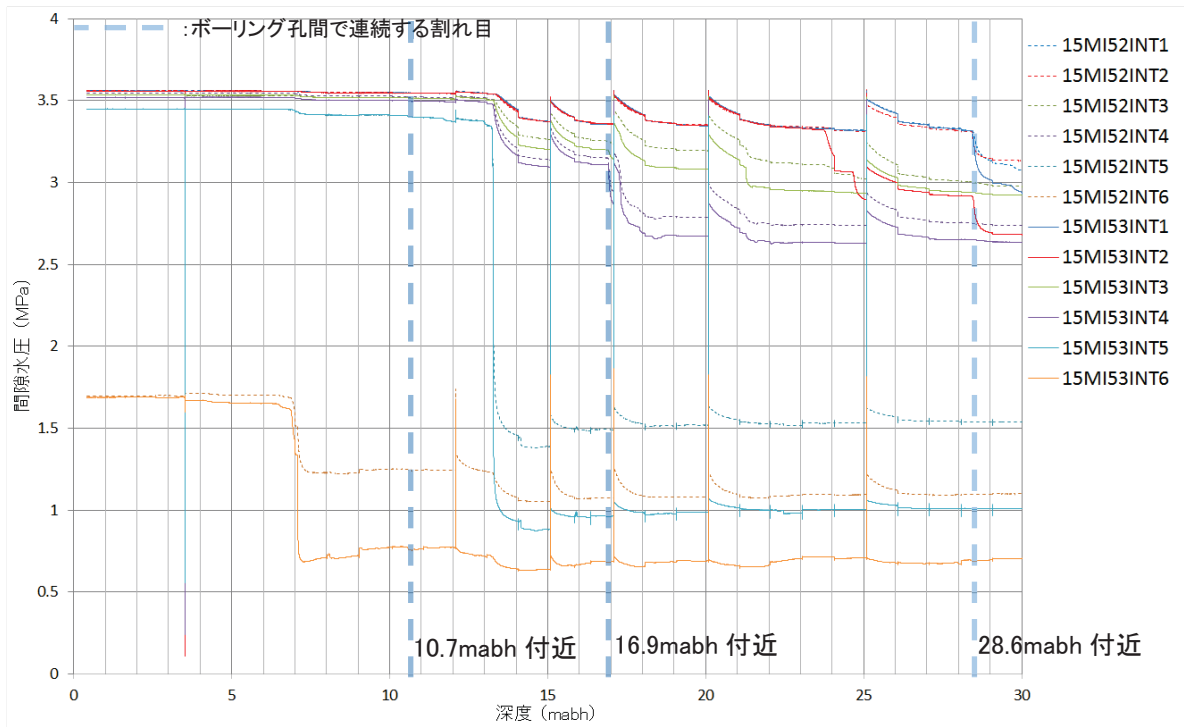


図 2.4.1-4 16MI59号孔掘削中における15MI52、15MI53号孔の間隙水圧の変動

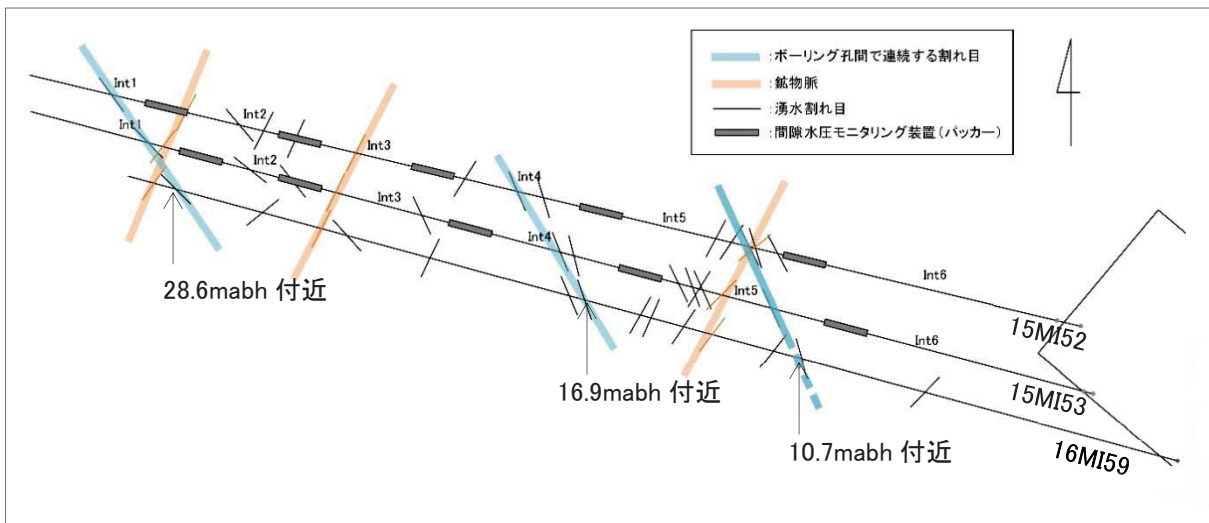


図 2.4.1-5 16MI59号孔掘削時における15MI52、15MI53号孔の間隙水圧モニタリング装置の編成

### 2.4.1.3 コア観察結果

調査ボーリング孔 16MI59 号孔(L=30.00mabh)の掘削で得られたボーリングコアの観察結果を以下にまとめた。

#### (1) 岩相および組織、構成鉱物と粒径

16MI59 号孔の 0.00～0.56mabh は立坑掘削時に伴う吹付けコンクリートである。

0.56～30.00mabh は主に粗粒～中粒の黒雲母花崗岩である。等粒状を呈し主要な造岩鉱物は石英・カリ長石・斜長石・黒雲母で、ごく微細な角閃石を含む。

これ以外に石英脈が厚さ数 cm で散見される。

局所的に小規模な MME の包有(28.715mabh 付近)や有色鉱物の縞状・線上配列(shlieren)(3.50～3.62mabh)が認められるがアプライト脈やペグマタイト脈の貫入、塩基性岩の貫入はみられず概ね均質な岩相と判断できる。

図 2.4.1-6 に 16MI59 号孔ボーリングコア内にみられる小規模な MME の例を示す。図 2.4.1-7 に 16MI59 号孔ボーリングコア内にみられる有色鉱物の shlieren と横坑壁面の同組織を示す。

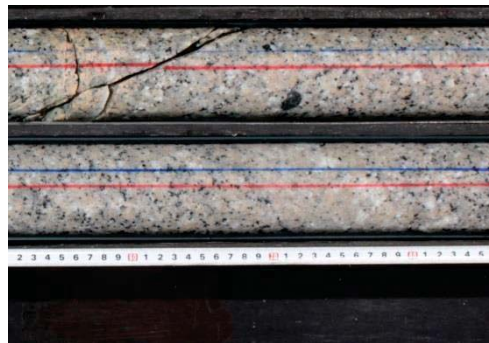


図 2.4.1-6 16MI59 号孔ボーリングコア内にみられる小規模な MME の例



図 2.4.1-7 16MI59 号孔ボーリングコア内にみられる有色鉱物の shlieren(左)と横坑壁面の同組織

## (2) 風化程度

16MI59 号孔のボーリングコアにおける風化の程度は、主要造岩鉱物に風化がほとんど認められないことから概ね風化の程度が未風化の「 $\alpha$ 」～わずかに風化を受ける「 $\beta$ 」に該当する。

## (3) 岩盤分類

16MI59 号孔のボーリングコアにおける岩盤分類は、分類上「D 級」と「A 級」に該当する部位はみられない。坑道掘削時の掘削影響領域(EDZ)に該当すると考えられる掘削長 0.71mabh 付近までは割れ目の発達が目立ち、ことからわずかに中ぐらいと判断できる「CM」級に相当すると判断した。

これ以外の区間においては岩盤分類上良好である「B」級が大部分を占め、数 10cm 単位でやや良好である「CH」級が分布する。

## (4) 最大コア長と RQD

16MI59 号孔のボーリングコアにおける最大コア長の最小値は 17cm、最大値は 98cm であった。

RQD の値は最小 56%、最大 100%であった。RQD に関しては 11.00～12.00mabh の区間で 64%、13.00～14.00mabh の区間において 56%と相対的に低い値を示している。この理由として、開口割れ目が多く水みちとなっているためであると考えられる。掘削中の区間湧水量が最大だった 13.08～14.08mabh に相当する区間で RQD が最も低い。区間湧水量が 2 番目に多かった 6.99～8.02mabh では開口割れ目の数は平均的なものであったが、区間湧水量が 3 番目に多かった 11.08～12.08mabh に相当する深度で RQD が 64%と 2 番目に低い値を示した。これ以外のボーリングコアにおいては RQD の値は 76～100%の値を示す。

## (5) 割れ目密度

割れ目密度はボーリングコア長 1m あたりの割れ目本数で定義した。割れ目の成因(自然・人為的)は考慮していない。

16MI59 号孔のボーリングコアにおける割れ目密度は 1～13(本/m)を示す。このうち掘削長 11.00～12.00mabh の区間の割れ目密度は 13(本/m)を示し、掘削総延長 30.00m のうち最大値を示す。この理由として同区間に繰り返し剪断破壊が生じたためであると考えられる。この区間以外では 1～8(本/m)の値を示す。

## (6) 割れ目記載

16MI59 号孔のボーリングコアにおける割れ目毎の①傾斜角度、②成因、③割れ目の変質程度を計測・観察して掘削長との関係について検討した。

割れ目の傾斜角度はボーリングコアの長軸方向と直交する面を「 $0^\circ$ 」とした(長軸と並行な割れ目が「 $90^\circ$ 」)。

割れ目の傾斜角度は  $60^\circ$  以下が主であり、掘削長との間に明瞭な相関はみられない。9.00～16.00mabh のボーリングコアにおいては傾斜角度が  $30^\circ$ ～ $60^\circ$  の割れ目が多い傾向がみられる。

割れ目の成因については「S:剪断割れ目」が一番多く、次いで「D:掘削割れ目」、「T:引張割れ目」となり、最も少ない物が「SorT、TorD:不明」となる。掘削長と割れ目の数との関係をみると「S:剪断割れ目」に関しては5.00~6.00mabhと同9.00~16.00mabhにかけて2つのピークが、「T:引張割れ目」に関しては6.00~7.00mabhと同11.00~12.00mabhにかけて2つのピークが認められる。また、「S:剪断割れ目」については掘削長16.00~21.00mabh 区間においては観察されないという特徴がある。

「水酸化鉄」・「赤鉄鉱」・「緑泥石」・「セリサイト」・「粘土鉱物」の生成、「溶脱」の程度に基づく割れ目表面における変質程度と掘削長との間には概ね明瞭な相関関係は認められない。「黄鉄鉱」の生成については6.30~6.60mabh と11.30~12.00mabh にかけて2つのピークが認められ、これ以外に24.76~28.61mabh 付近までで散見される。

#### (7) 割れ目の変質程度

15MI52 号孔および15MI53 号孔と同様に、16MI59 号孔のボーリングコアに関して母岩全体に及ぶ広範囲の変質は被っていない。変質は石英脈の貫入に伴う貫入面に並行な範囲や、開口割れ目・潜在割れ目を中心とした最大でも幅100mm程度(両側で200mm)の限定的な範囲である。

ボーリングコアの表面において主要造岩鉱物であるカリ長石・斜長石の周辺部がやや不明瞭となったり、カリ長石がより強いピンク色を呈したり、斜長石の白濁化や淡緑白色を呈する様子が認められる。また、一部の黒雲母は緑泥石化している様子がみられる。

図2.4.1-8に11.59~11.74mabh 付近の割れ目上盤側の変質状況を示す。



図2.4.1-8 11.59~11.74mabh 付近の割れ目上盤側の変質状況

16MI59 号孔においては変質によって主要造岩鉱物である黒雲母の緑泥石化と斜長石のセリサイト化が認められた。斜長石のセリサイト化の程度は弱く、変質により斜長石の周縁部の一部がセリサイト化したものや斜長石の白濁化が認められる程度である。黒雲母の緑泥石化に関しても概

ね弱いものであるが、掘削長 5.01～5.03mabh にかけての割れ目の一部は変質により黒雲母が完全に緑泥石に置き換わっており変質の程度は強いと判断した。またこの区間以深でも剪断割れ目の分布する区間では全体的に割れ目沿いの変質の程度がやや強い。

#### (8) 割れ目の介在鉱物

割れ目の介在鉱物としては方解石・緑泥石が多くみられる。産状としては割れ目表面にフィルム状に付着する様子や、割れ目表面全体をコーティングする様子がみられる。

この他の介在鉱物としては緑灰色・明灰色を帯びる粘土鉱物が割れ目内を充填するのが観察される。スメクタイトなどの熱水変質作用に伴う粘土鉱物と考えられ、希塩酸の滴下により発泡することから方解石等の炭酸塩鉱物も含有されると考えられる。また一部の割れ目表面にはごく微細な黄鉄鉱の付着が認められる。

図 2.4.1-9～図 2.4.1-12 に 16MI59 号孔で確認できた介在物の状況の例を示す。



図 2.4.1-9 介在鉱物が認められない例(16MI59 号孔 掘削長 10.63mabh 割れ目)



図 2.4.1-10 フィルム状介在鉱物の例(16MI59 号孔 掘削長 24.67mabh 割れ目)



図 2.4.1-11 介在鉱物(緑泥石)がコーティングする例(16MI59 号孔 掘削長 11.60mabh 割れ目)



図 2.4.1-12 介在鉱物が粘土鉱物の例(16MI59 号孔 掘削長 26.17mabh 割れ目)

#### (9) 総合柱状図

ボーリングコア観察結果に基づき掘削深度とコアの性状変化(風化・変質・RQD)、亀裂本数・傾斜角との関係を総合柱状図として取りまとめた。

図 2.4.1-13 に 16MI59 号孔の総合柱状図を示す。また、図 2.4.1-14～図 2.4.1-15 に 16MI59 号孔のボーリングコア写真を示す。

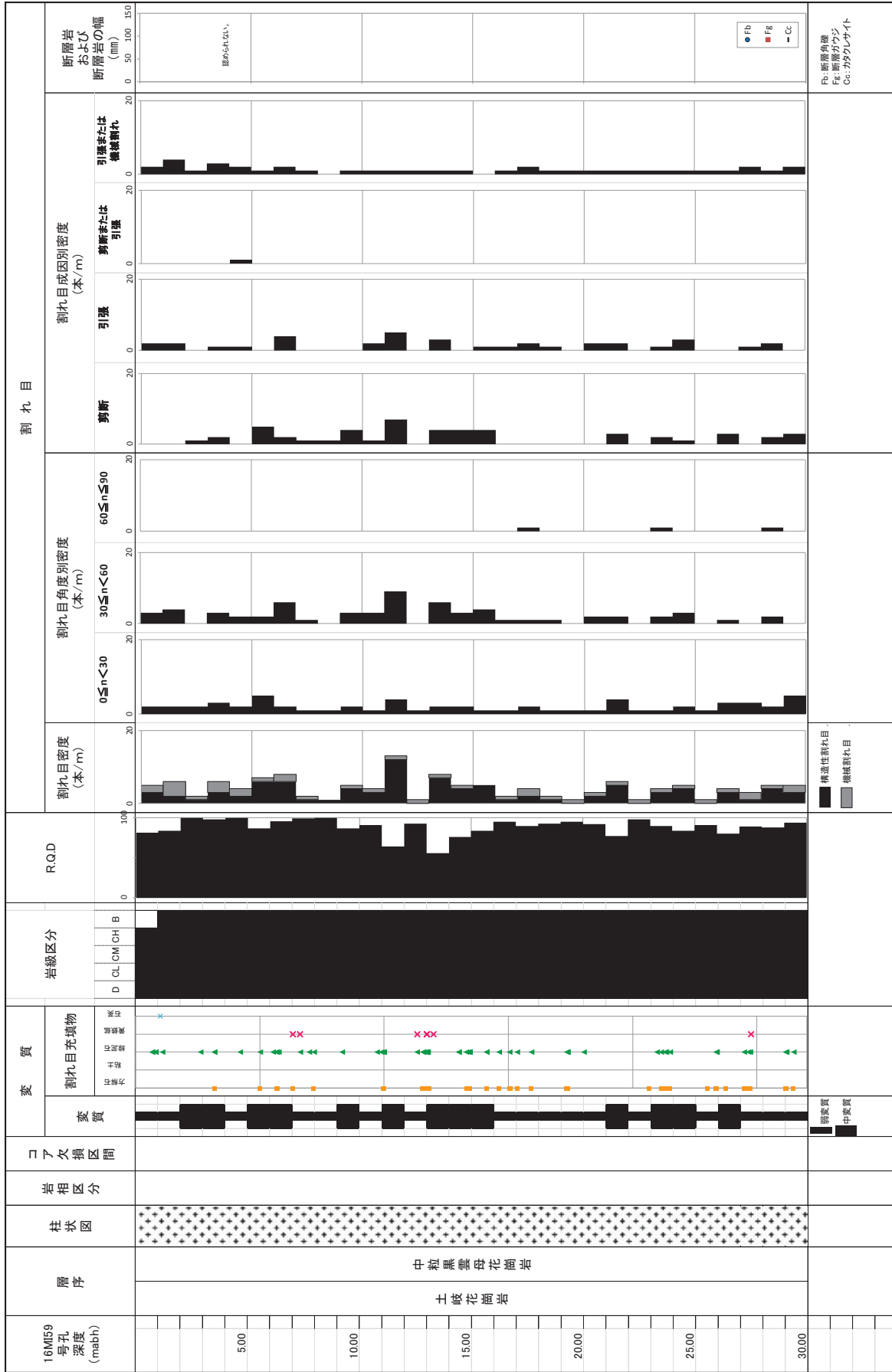


図 2.4.1-13 16MI59 号孔の総合柱状図





図 2.4.1-14 16MI59号孔 ボーリングコア写真(0.00~18.00mabh)



19.00 20.00 21.00 22.00 23.00 24.00 25.00 26.00 27.00 28.00 29.00 30.00  
図 2.4. 1-15 16MI59 号孔 ボーリングコア写真 (18.00~30.00mabh)

#### 2.4.2 キャリパー検層結果

図 2.4.2-1 に 16MI59 号孔のキャリパー検層結果を示す。

孔ロケーシングが 2.80mabh まで設置されており、その下位の 2.80～3.54mabh まで孔径拡大が認められる。この孔径拡大区間は 1 段階掘削区間に相当し、孔ロケーシング設置時にグラウトが打設されている。このグラウト箇所が 2 段階掘削以降のロッド昇降の影響等により損傷したと考えられる。3.54mabh 以深の岩盤部は孔径がほぼ一定であり、崩壊箇所等は認められない。

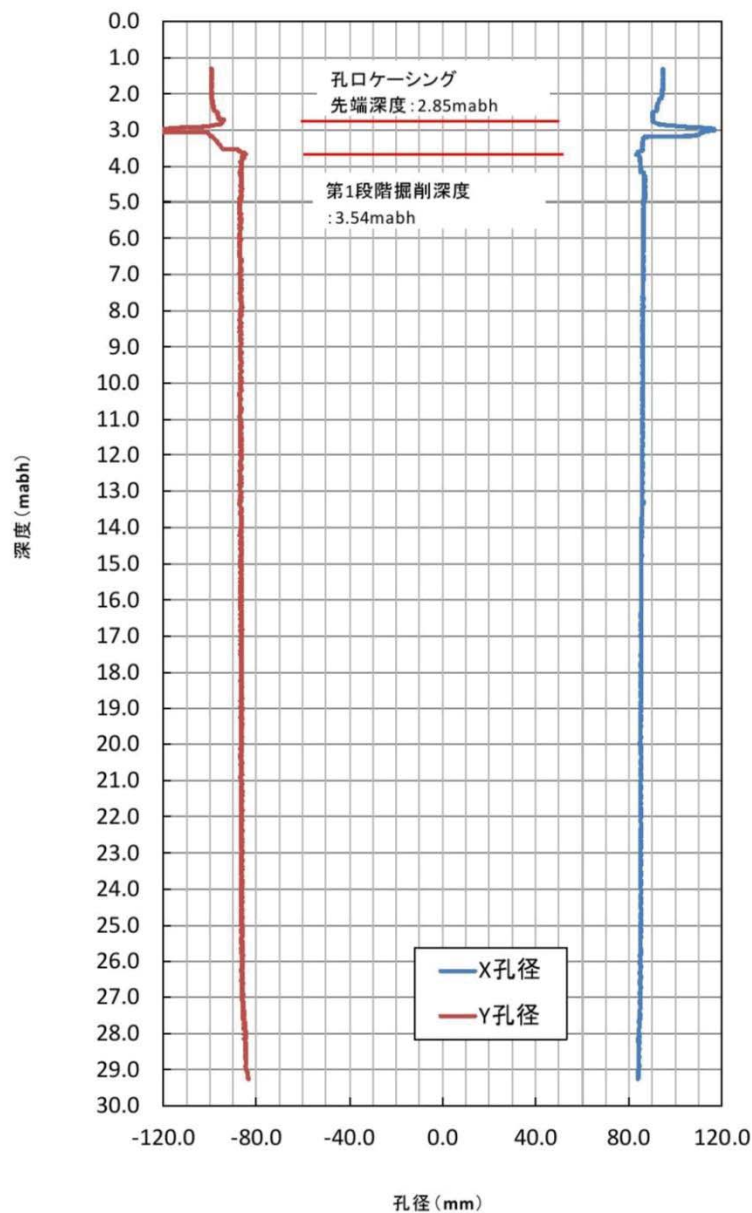


図 2.4.2-1 16MI59 号孔のキャリパー検層結果

### 2.4.3 BTV・フローメータ検層結果

16MI59号孔のフローメータ検層結果を図2.4.3-1に示す。

検層結果より、13.3～13.5mabhで明瞭な流速変化が確認でき、7.1～7.2mabh、21.3～21.6mabh、および26mabh以深でも流速変化が認められた。この他、掘削時の湧水量変化や間隙水圧モニタリングの応答より、16.9～17.5mabhにもアノマリーが存在すると考えられるが、検層結果では流速変化の判別は困難である。検層中のBTV画像では、スクリーンに多量のガスの気泡の付着が確認されており、ガスの影響により微小な流速変化の検出は困難であったと考えられる。

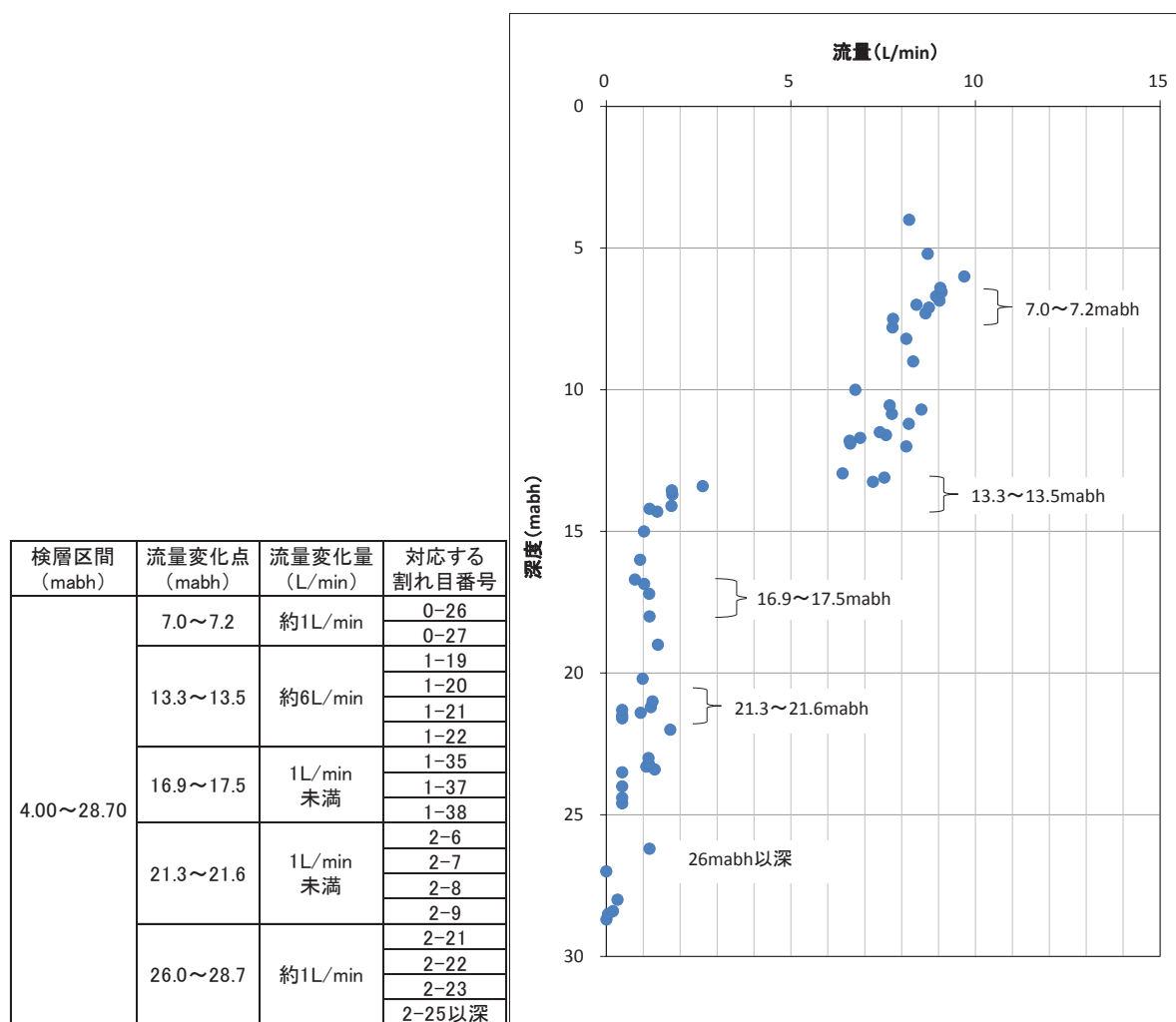


図 2.4.3-1 16MI59号孔のフローメータ検層結果

## 2.4.4 透水試験結果

### 2.4.4.1 湧水量測定結果（定圧揚水試験）

湧水量測定の深度は、検層結果や掘削時の湧水量、周辺孔への圧力応答などの結果を踏まえ、10.5mabh、13.3mabh、17.0mabh および 28.5mabh 付近の透水性割れ目を対象とした。表 2.4.4-1 に湧水量測定の結果一覧を示す。この内、定流量揚水試験区間の対象とした 4 区間は黄色枠表示とした。

表 2.4.4-1 の区間長が 0.67m で統一されている試験番号はダブルパッカーで実施した区間である。一方、区間長がそれぞれ異なっている試験番号 1-①、3-④、3-⑤は、シングルパッカーで実施した区間である。なお、シングルパッカーでの湧水量測定は、その深度までの湧水割れ目における湧水量の和と概ね整合性が取れるかどうかを確認するために実施している。

湧水量測定時の湧水量と水頭差から、Hvorslev の定常式により各試験番号の区間の透水量係数を求めた。透水量係数の算出に用いた間隙水圧値（水頭差）は、定流量揚水試験時の安定水圧から求め、試験番号の頭番号ごとに同じ値を用いた。

湧水量測定区間と割れ目分布の対比図、および選定した定流量揚水試験区間を、図 2.4.4-1～図 2.4.4-4 に示す。

表 2.4.4-1 16MI59 号孔の湧水量測定の結果一覧

試験番号	試験深度		区間長 m	割れ目番号	透水量係数 m <sup>2</sup> /sec	湧水量 L/min	圧力 MPa
	上端 mabh	下端 mabh					
1-①	28.20	30.00	1.80	2-28~2-34	1.04E-08	0.37	3.4429
1-②	28.20	28.87	0.67	2-28~2-30	7.05E-09	0.34	3.4429
1-③	24.20	24.87	0.67	2-16~2-18	2.28E-09	0.11	3.4429
1-④	23.20	23.87	0.67	2-12~2-14	1.16E-09	0.06	3.4429
1-⑤	21.00	21.67	0.67	2-5~2-9	5.81E-09	0.28	3.4429
2-①	16.60	17.27	0.67	1-35	2.51E-09	0.12	3.4118
2-②	16.80	17.47	0.67	1-35~1-38	5.65E-09	0.27	3.4118
3-①	12.50	13.17	0.67	1-17	2.90E-09	0.14	3.3457
3-②	12.90	13.57	0.67	1-17~1-22	1.45E-07	6.80	3.3457
3-③	13.20	13.87	0.67	1-19~1-23	1.45E-07	6.80	3.3457
3-④	13.20	30.00	16.80	1-19以深	3.70E-07	8.20	3.4429
3-⑤	14.50	30.00	15.50	1-28以深	5.34E-08	1.20	3.4429
4-①	11.25	11.92	0.67	1-6~1-14	2.62E-09	0.12	3.3297
4-②	10.30	10.97	0.67	1-3、1-4	2.02E-09	0.09	3.3297

 : 定流量揚水試験区間

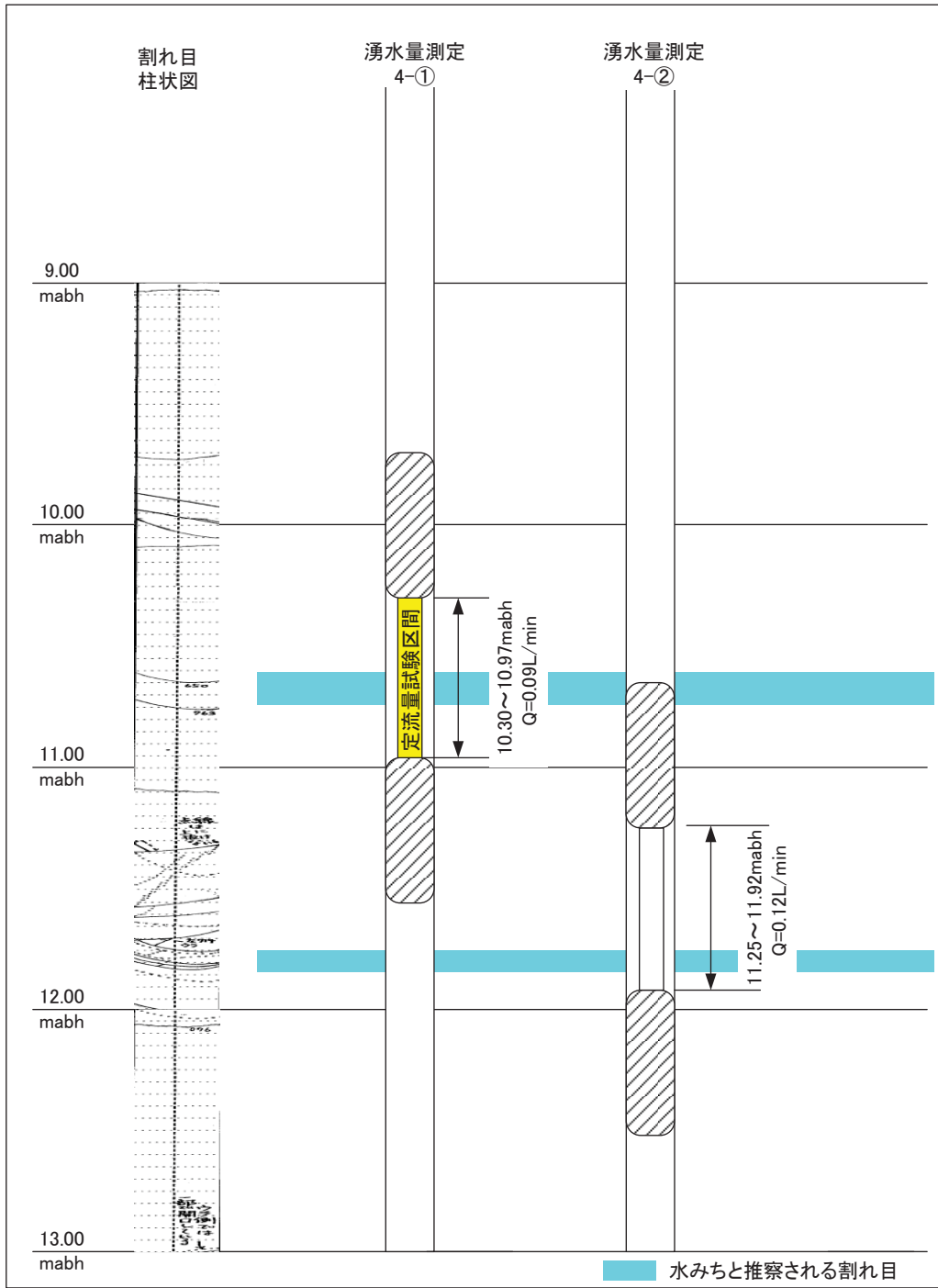


図 2.4.4-1 10.5mabh 付近の湧水量測定深度と割れ目分布

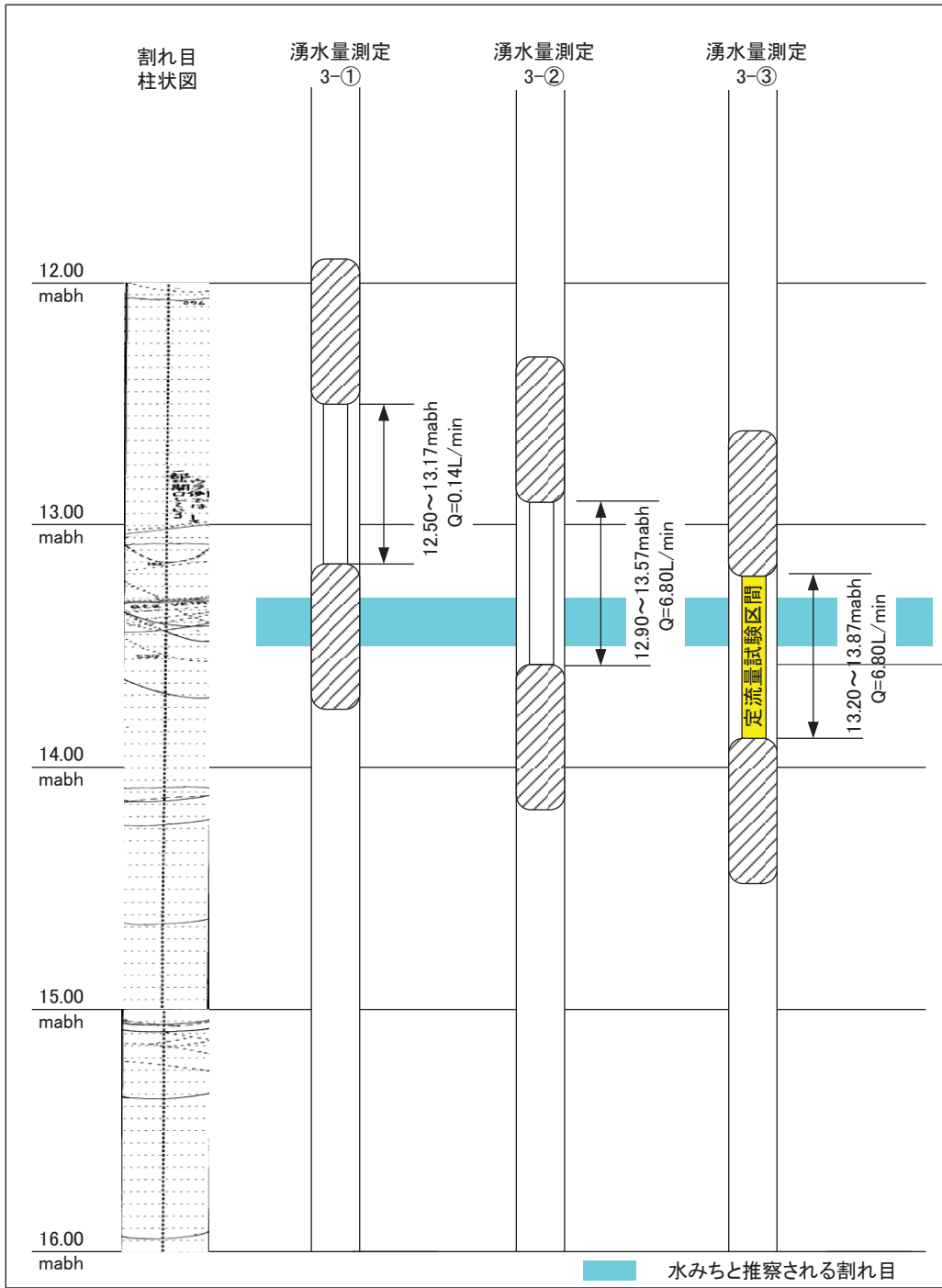


図 2.4.4-2 13.3mabh 付近の湧水量測定深度と割れ目分布

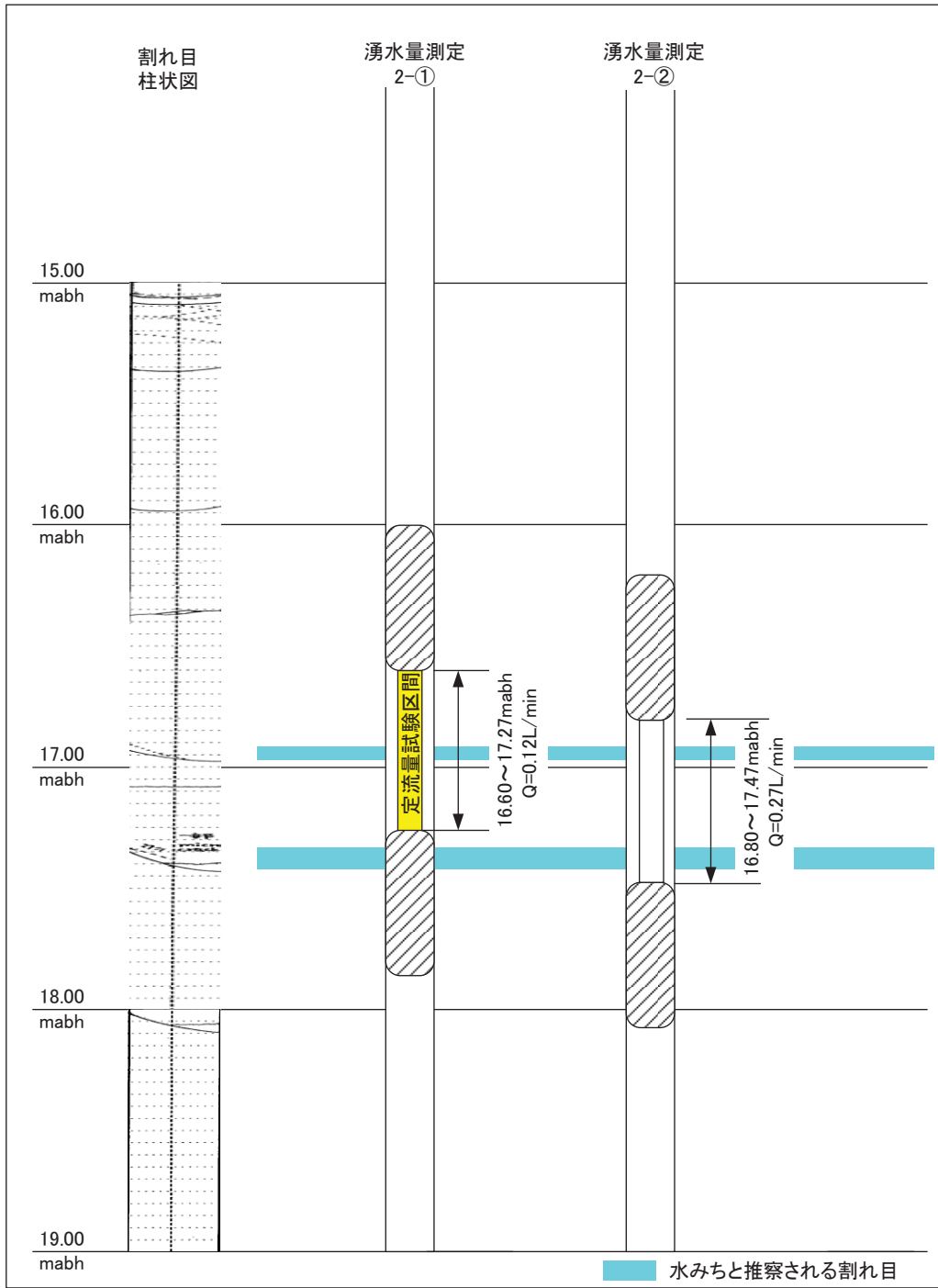


図 2.4.4-3 17.0mabh 付近の湧水量測定深度と割れ目分布



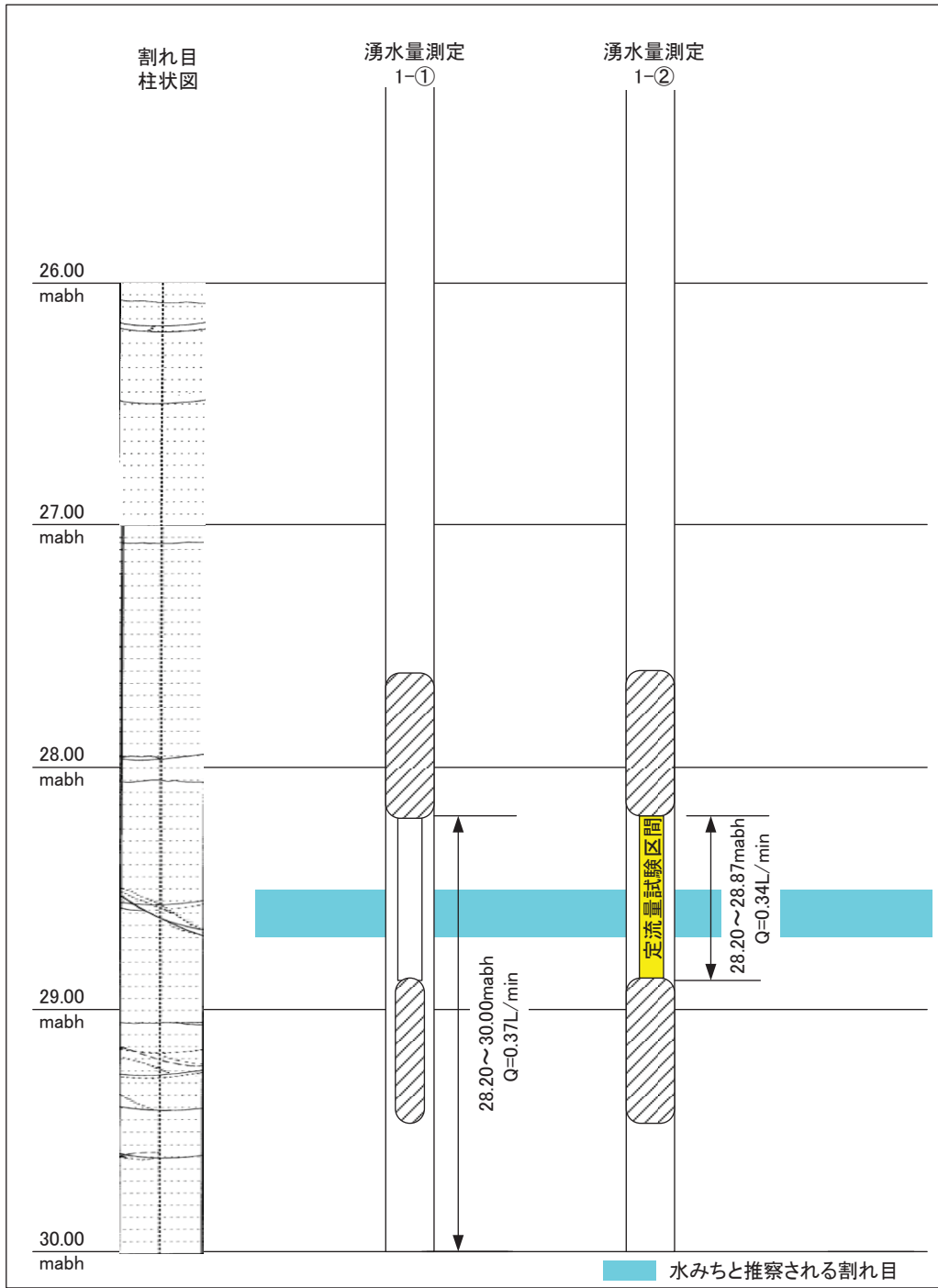


図 2.4.4-4 28.5mabh 付近の湧水量測定深度と割れ目分布

#### 2.4.4.2 定流量揚水試験結果

湧水量測定結果から選定した 4 箇所を対象に定流量揚水試験を実施した。試験結果の一覧を表 2.4.4-2 に示す。

定流量揚水試験は、パッカー設置後から翌朝まで間隙水圧の安定を待ち実施した。また、試験中は、15MI52 号孔、15MI53 号孔の間隙水圧モニタリング装置の観測区間において、孔間圧力応答の確認、および間隙水圧の安定時に定流量揚水試験区間との差圧を確認した。揚水流量の調整は、原則としてモノポンプの回転数で制御した。ただし、湧水量の多い 3-③区間ではモノポンプの最大吐出量 (120mL/min) では十分な水位低下量を確保できないため、JFT ロッド口元のボールバルブの開度によって揚水流量を調整した。

定流量揚水試験の解析は、非定常解析式である Cooper-Jacob 法 (揚水過程)、Agarwal 法 (回復過程) を用いて透水量係数を算出した。区間を代表する透水量係数は、揚水開始から  $t=100\text{sec}$  以内の短時間で出現した直線勾配は、ボーリング孔近傍の緩み領域 (スキン等) の影響を受けた結果と判断して参考値とし、揚水時間  $t=100\text{sec}$  以降で認められた直線勾配より算出した値とした。

表 2.4.4-2 16MI59 号孔の定流量揚水試験結果

試験番号	試験深度		区間長 (m)	間隙水圧 (Mpa)	透水量係数 T(m <sup>2</sup> /sec)	解析方法	湧水量 (L/min)	揚水量 (L/min)
	上端 (mabh)	下端 (mabh)						
1-②	28.20	28.87	0.67	3.4429	3.27E-08	Jacob	0.340	0.100
					3.95E-08	Agarwal		
2-①	16.60	17.27	0.67	3.4118	1.21E-08	Jacob	0.120	0.043
					2.32E-08	Agarwal		
3-③	13.20	13.87	0.67	3.3457	6.61E-07	Jacob	6.800	2.170
					6.14E-07	Agarwal		
4-②	10.30	10.97	0.67	3.3297	2.07E-08	Jacob	0.094	0.028
					2.26E-08	Agarwal		

#### 2.4.4.3 定流量揚水試験時の孔間応答

定流量揚水試験時は、15MI52号孔、15MI53号孔の間隙水圧モニタリング装置にて孔間圧力応答を測定した。図2.4.4-5に15MI52号孔、15MI53号孔の間隙水圧モニタリングの観測区間、および16MI59号孔の試験区間と主要な割れ目分布の平面的な位置関係を示す。

定流量揚水試験時の孔間応答の測定結果を図2.4.4-6～図2.4.4-9に示す。なお、図のモニタリング区間の間隙水圧のスケールは、間隙水圧値の異なる各区間の微小な変化を可視化するため、揚水開始直前の安定水圧を基準（初期値）とした変化量表示とした。

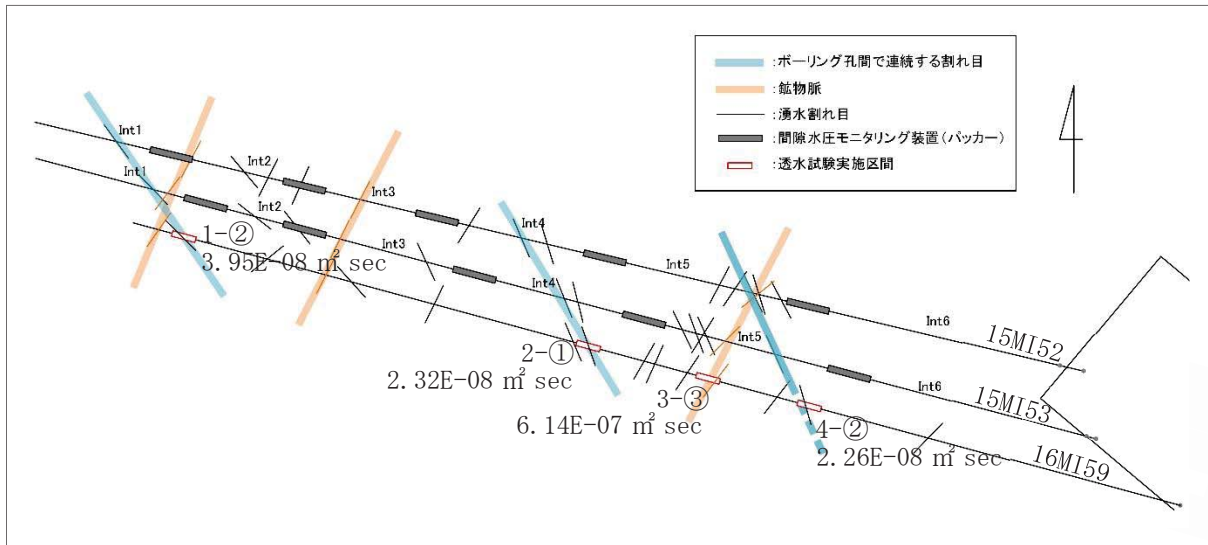


図 2.4.4-5 間隙水圧モニタリング区間

##### (1) 1-②試験中の孔間応答

15MI52号孔、15MI53号孔ともに Int1 および Int2 に大きな圧力応答を確認し、最も大きな大きな変化を示した Int1 の最大水位低下量は-0.083MPa であった。

##### (2) 2-①試験中の孔間応答

15MI52号孔、15MI53号孔ともに Int3 および Int4 に大きな圧力応答を確認し、最も大きな変化を示した Int4 の最大水位低下量は-0.045MPa であった。

##### (3) 3-③試験中の孔間応答

15MI52号孔、15MI53号孔ともに Int5 に大きな圧力応答を確認し、最大水位低下量は-0.509MPa であった。

##### (4) 4-②試験中の孔間応答

15MI52号孔、15MI53号孔ともに Int5 で最も大きな圧力応答を確認しているが、最大水位低下量は-0.0035MPa であり変化量は非常に小さい。

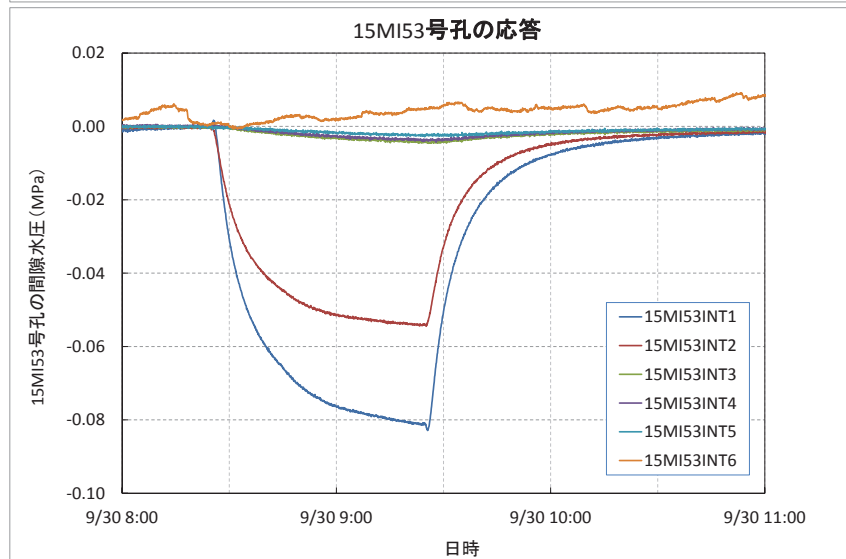
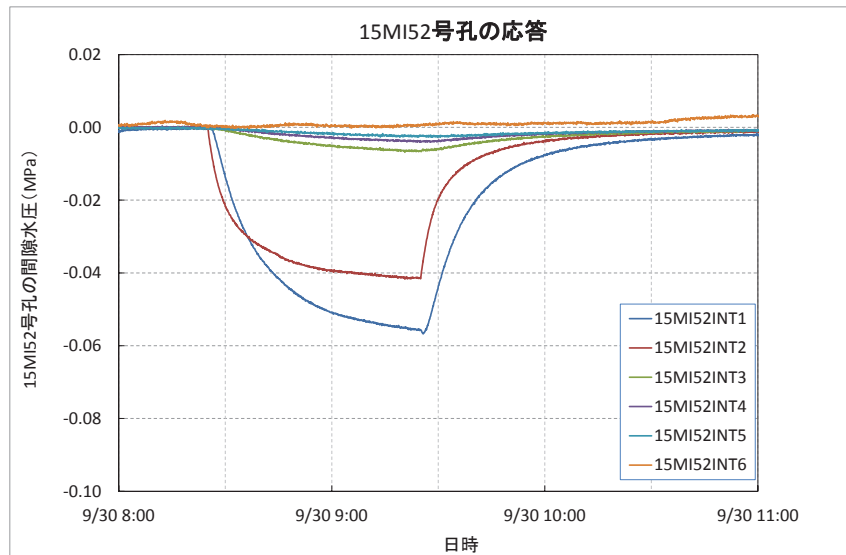
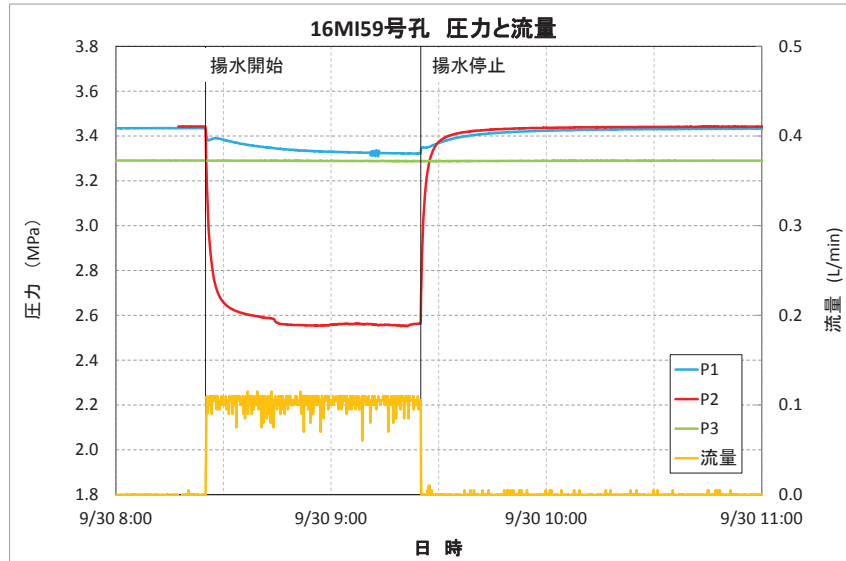


図 2.4.4-6 1-②試験時の 16MI59 号孔の圧力・流量および 15MI52 号孔、15MI53 号孔の圧力応答

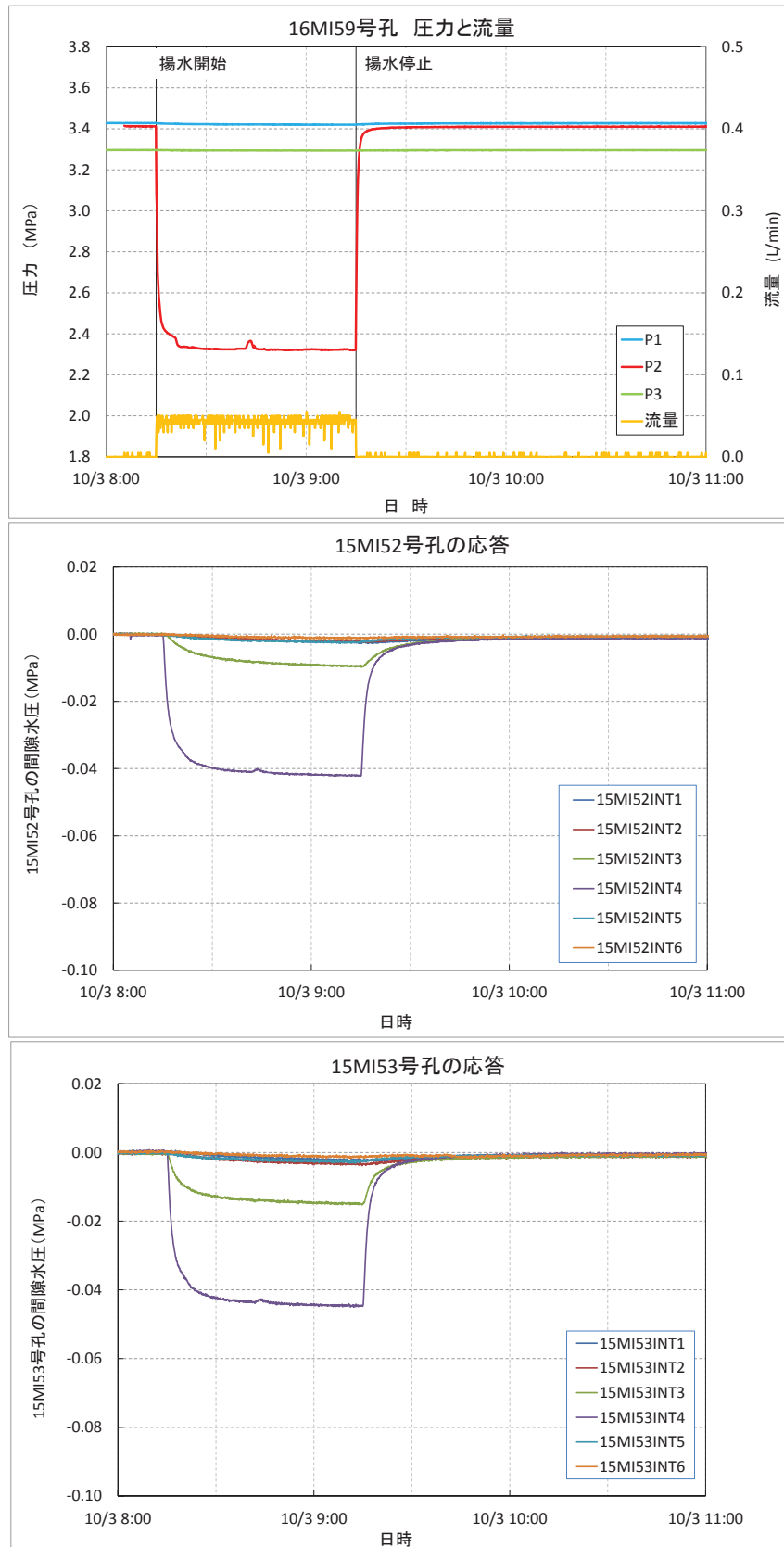


図 2.4.4-7 2-①試験時の16MI59号孔の圧力・流量および15MI52号孔、15MI53号孔の圧力応答

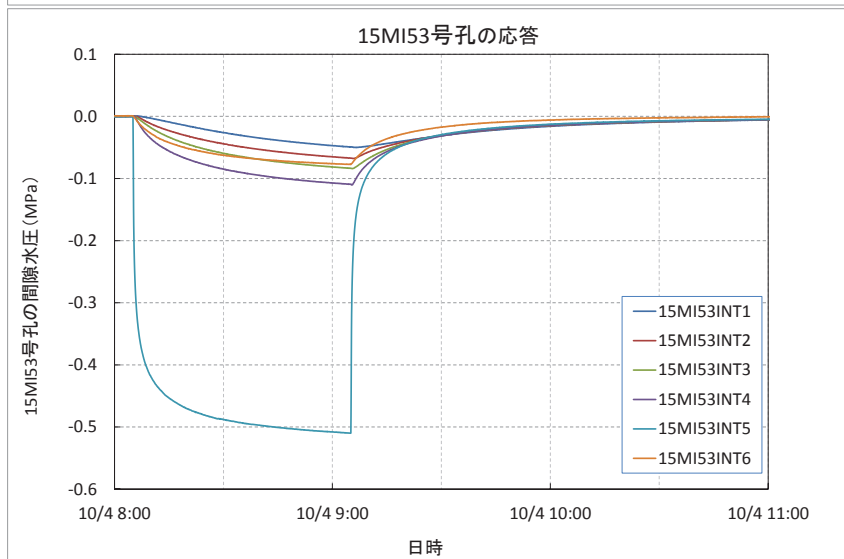
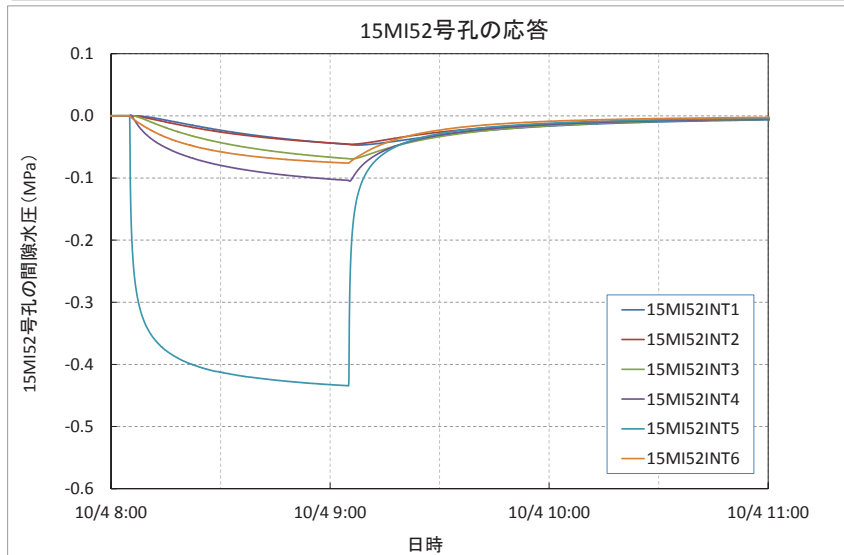
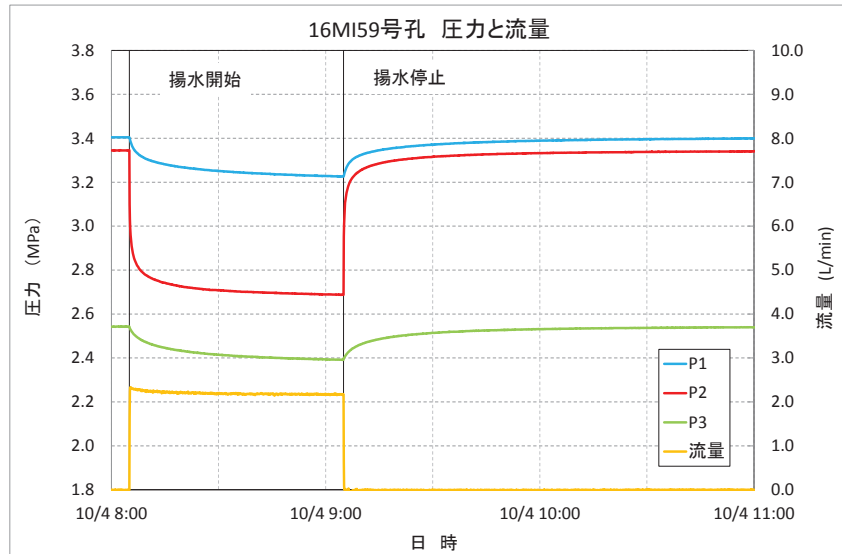


図 2.4.4-8 3-③試験時の 16MI59 号孔の圧力・流量および 15MI52 号孔、15MI53 号孔の圧力応答

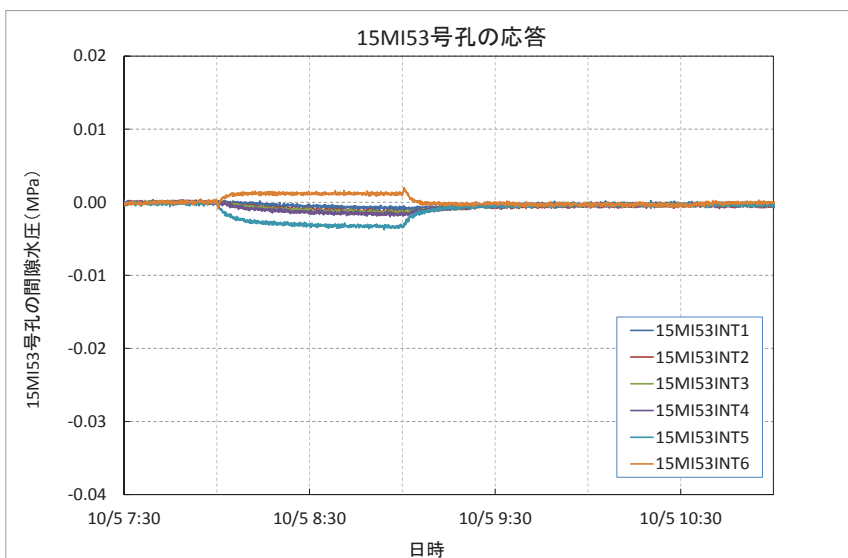
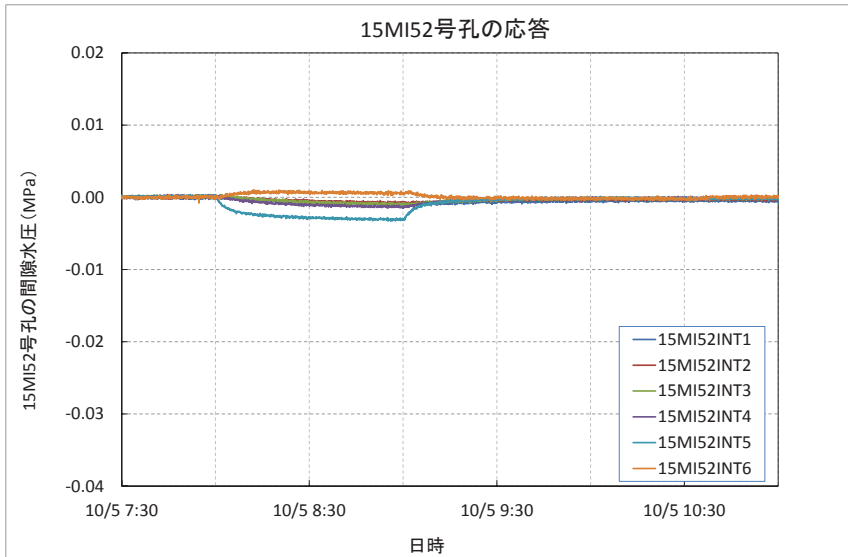
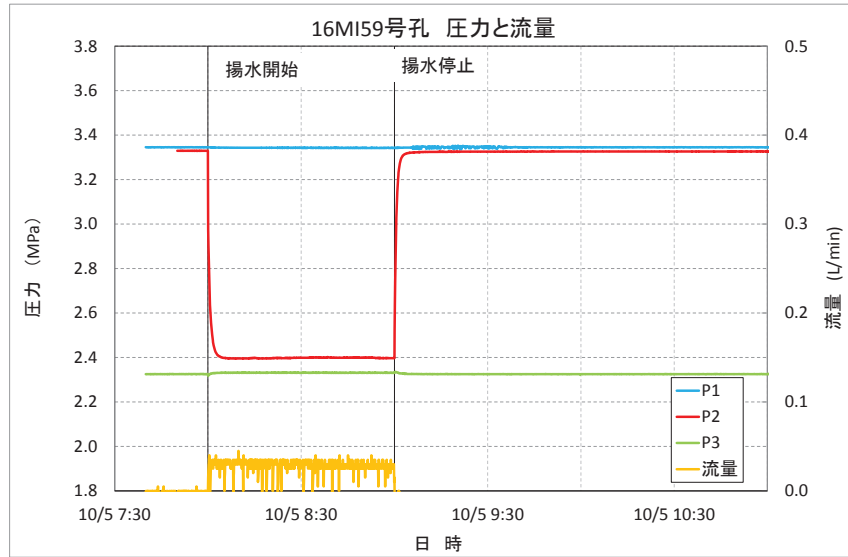


図 2.4.4-9 4-②試験時の 16MI59 号孔の圧力・流量および 15MI52 号孔、15MI53 号孔の圧力応答

#### 2.4.4.4 水圧測定結果

定流量揚水試験前の間隙水圧が安定した状態において、試験区間と連通性の高い15MI52号孔、15MI53号孔の間隙水圧モニタリングの観測区間との差圧測定を行った。水圧測定の対象区間と測定結果を表2.4.4-3に示す。

水圧測定は1区間に対して10~20分間行い、安定した時間帯の平均値を算出した。また、圧力安定に時間を要した区間では測定の最終値とした。3孔間の圧力水頭は、1-②、2-①、4-②区間において15MI52号孔が最も高く、16MI59号孔が最も低い結果となった。一方、15MI53号孔のInt5の圧力水頭は試験区間3-③より小さくなった。

試験区間4-②に対してはモニタリング区間の差圧が非常に大きくなった。これは、透水試験の装置は、モニタリング装置のようにフランジで口元を密閉できないため、浅い深度の圧力の気密性がないこと、およびInt-6との亀裂の連通性が悪いことが挙げられる(図2.4.4-9)。

表 2.4.4-3 水圧測定区間と測定結果一覧

16MI59号孔 試験区間	15MI52号孔		15MI53号孔		備考
	測定区間	差圧(mm)	測定区間	差圧(mm)	
1-②	Int1	+22.0	Int1	+13.0	測定最終値
2-①	Int4	+64.5	Int4	+33.2	安定平均値
3-③	Int5	+11.5	Int5	-13.2	安定平均値
4-②	Int6	+241.4	Int6	+223.6	安定平均値



#### 2.4.5 高精度孔曲がり検層結果

16MI59号孔において、高精度孔曲がり検層を掘進長0.00～30.00mabh区間で実施した。

図2.4.5-1に調査域におけるボーリング孔跡平面図を示す。図2.4.5-2～図2.4.5-3に高精度孔曲がり検層結果を基にした掘削計画と掘削実績との差を示す。

検層結果は、傾斜が下向き30°の計画に対して平均傾斜は下向き28.83°、平均方位角がN75°Wの計画に対しN74.86°Wであり、ほぼ計画通りの孔跡であることを確認した。

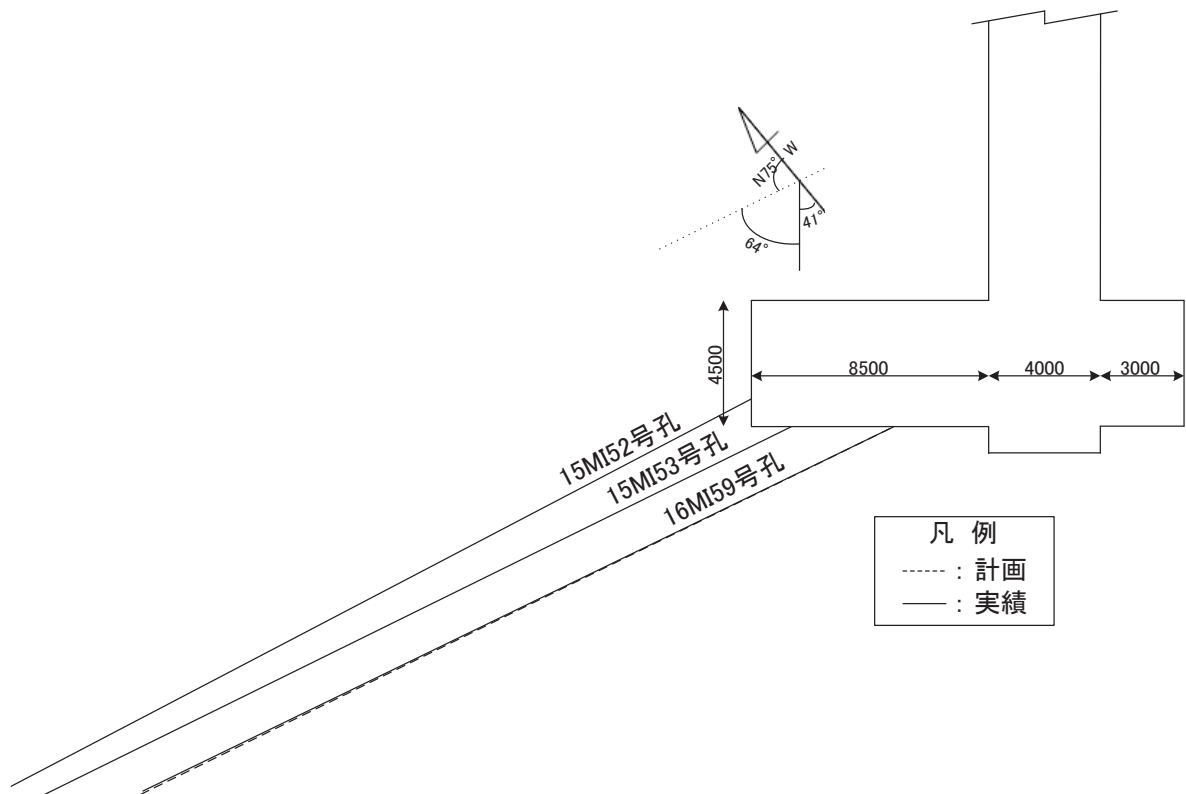


図 2.4.5-1 16MI59号孔ボーリング孔跡平面図

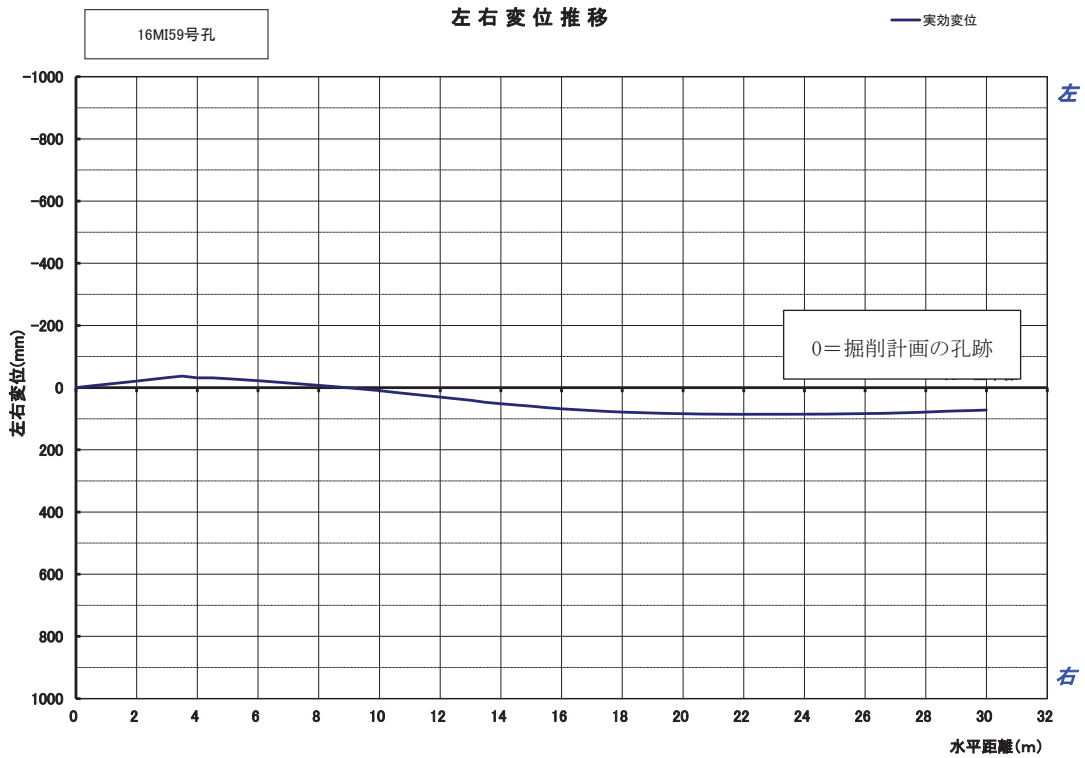


図 2.4.5-2 16MI59号孔のボーリング孔跡図 (左右変位推移)

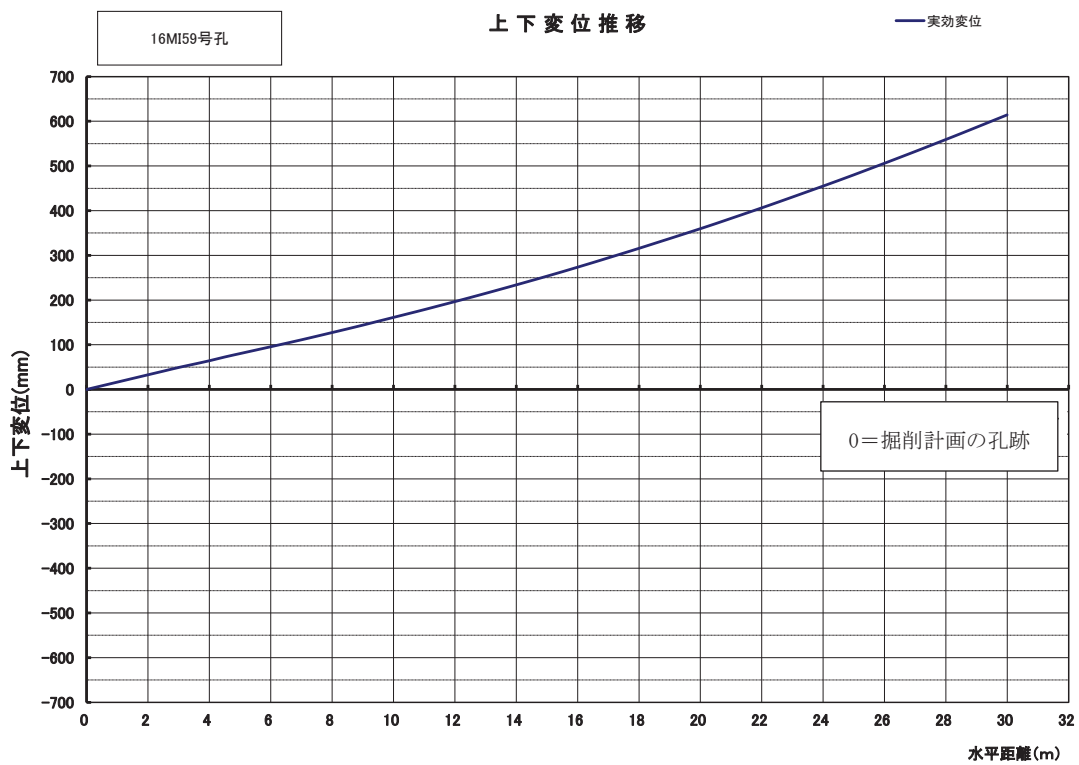


図 2.4.5-3 16MI59号孔のボーリング孔跡図 (上下変位推移)

#### 2.4.6 高解像度 BTV 検層結果

ODS(以下 BIPS)計測を実施した 16MI59 号孔のうち、孔壁に岩盤が露出し、計測が可能な区間はケーシング端の 2.85mabh から 29.90mabh であった。孔内には遊離ガスが散見されたが、岩盤露出区間のすべてが計測された。BIPS 計測から画像処理で得られた孔内展開画像を割れ目の方向の解析結果とともに図 2.4.6-1～図 2.4.6-8 に示す。

BIPS 計測で得られた岩盤分離面は 72 条であり、その内、開口割れ目が 7 条、割れ目 65 条であった。この 65 条の割れ目は、開口していないか、あるいは鉱物が充填している割れ目である。全岩盤分離面、割れ目、開口割れ目ともに主な集中方向は NE および NW 走向で鉛直に近い傾斜を有する割れ目であった。全岩盤分離面、割れ目、開口割れ目の方向についてステレオネットにより統計的に整理した結果を図 2.4.6-9～図 2.4.6-11 に示す。

16MI59 号孔の BIPS 計測で確認された岩盤分離面のうち、コア観察、フローメータ検層、透水試験、などにより水みちとなっている開口割れ目について DVS(以下 HR-BTV)により詳細観察を行った。16MI59 号孔の詳細観察の結果を図 2.4.6-12～図 2.4.6-15 に示す。

また、16MI59 号孔の掘削時に 15MI52 号孔および 15MI53 号孔の水理干渉が認められ、対応する水みちとなっている割れ目が明らかとなった。これらの割れ目の内、昨年度、詳細観察をしていない 15MI52 号孔の 2 条の割れ目について HR-BTV 計測により詳細観察を行った。その結果を図 2.4.6-16～図 2.4.6-17 に示す。

なお、16MI59 号孔で詳細観察された 6 条の水みちの平均開口幅は 0.27mm～0.65mm、15MI52 号孔の追加調査した 2 条の水みちの開口幅は 0.19mm～0.22mm であった。

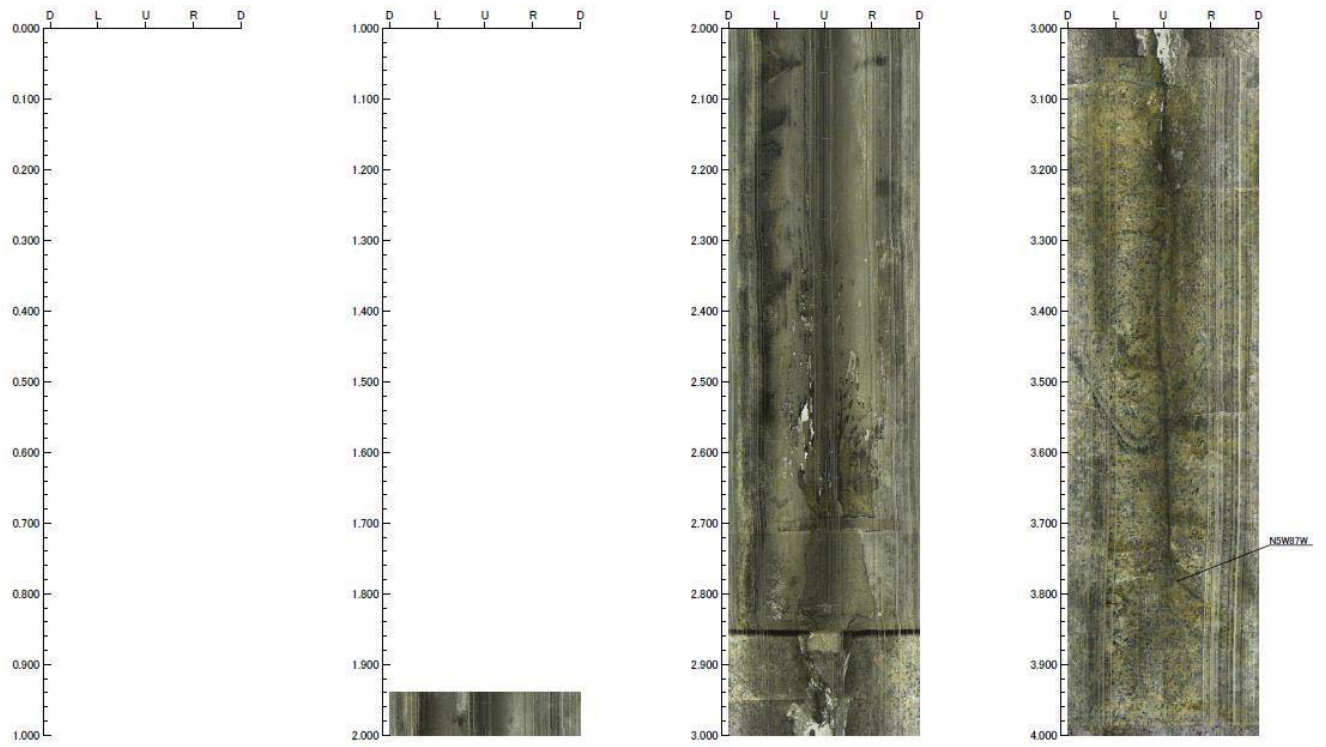


图 2.4.6-1 16MI59 号孔 孔壁展开图 0.00~4.00mabh

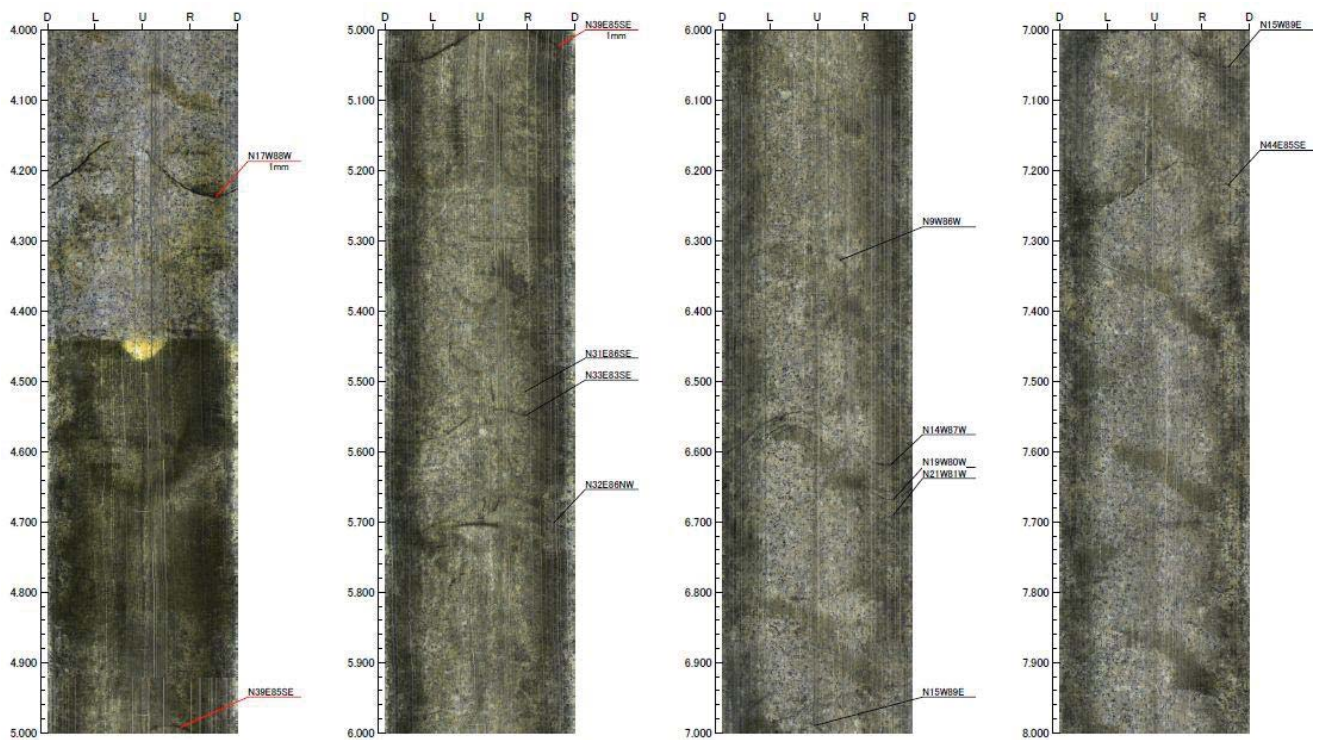


图 2.4.6-2 16MI59 号孔 孔壁展开图 4.00~8.00mabh

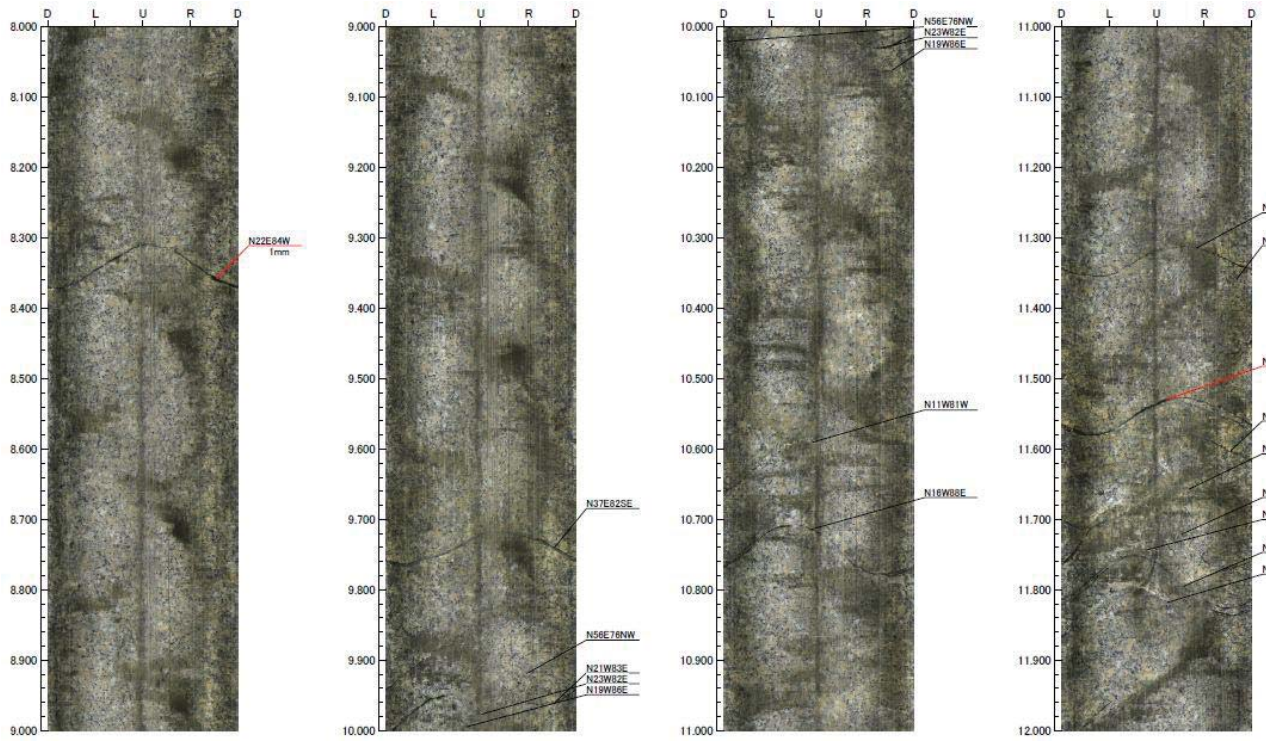


图 2.4.6-3 16MI59 号孔 孔壁展开图 8.00~12.00mab

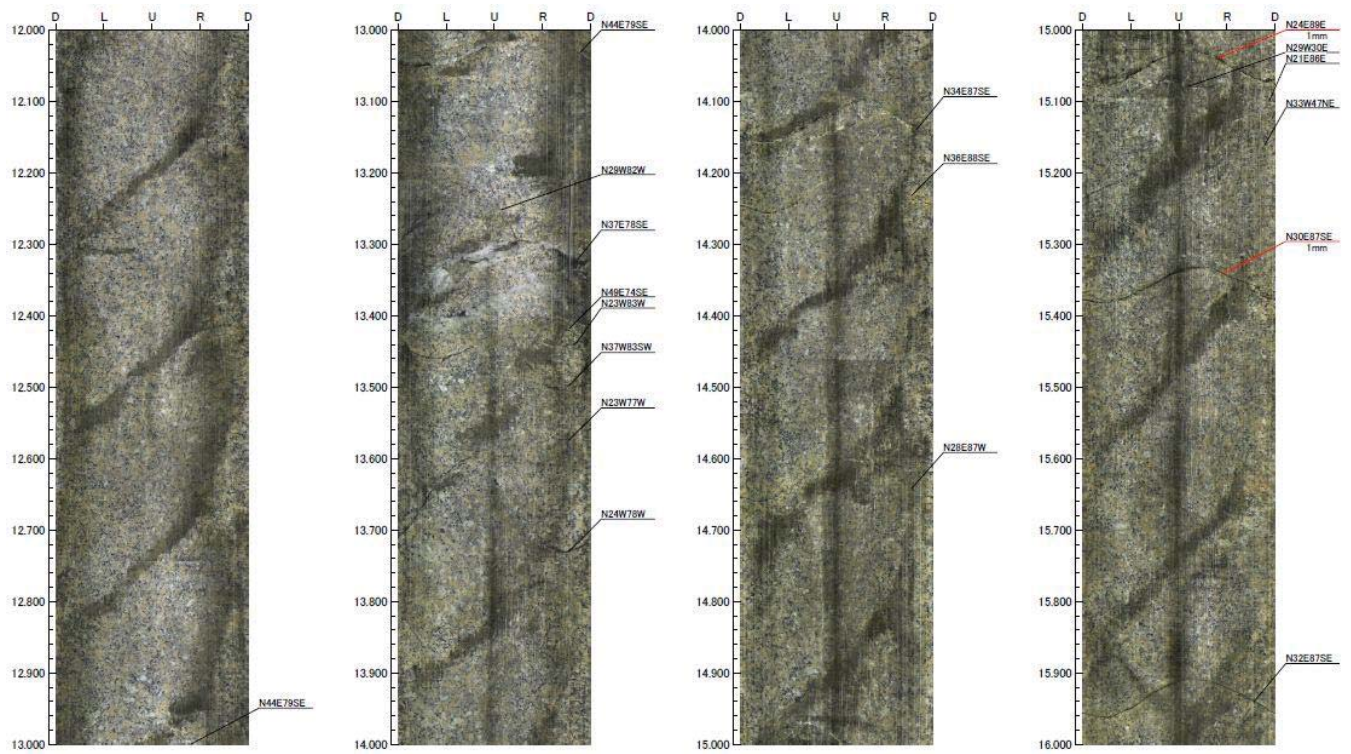


图 2.4.6-4 16MI59 号孔 孔壁展开图 12.00~16.00mab

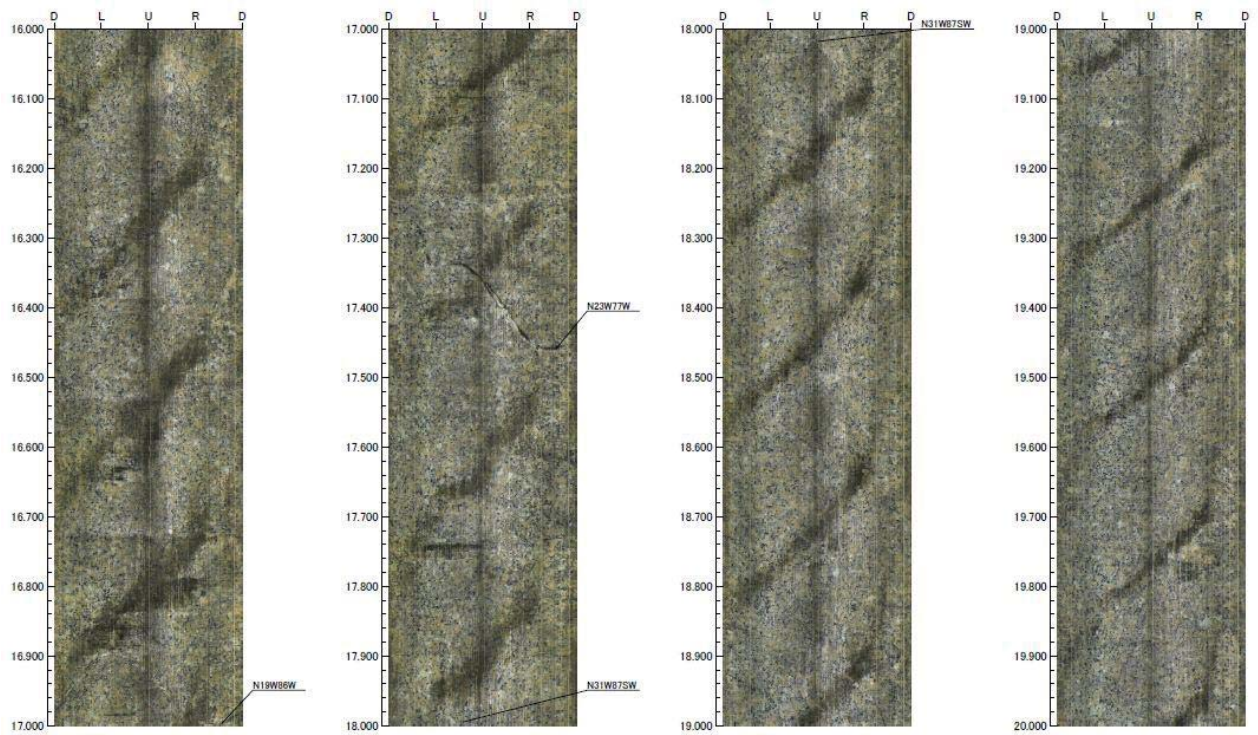


图 2.4.6-5 16MI59 号孔 孔壁展开图 16.00~20.00mab

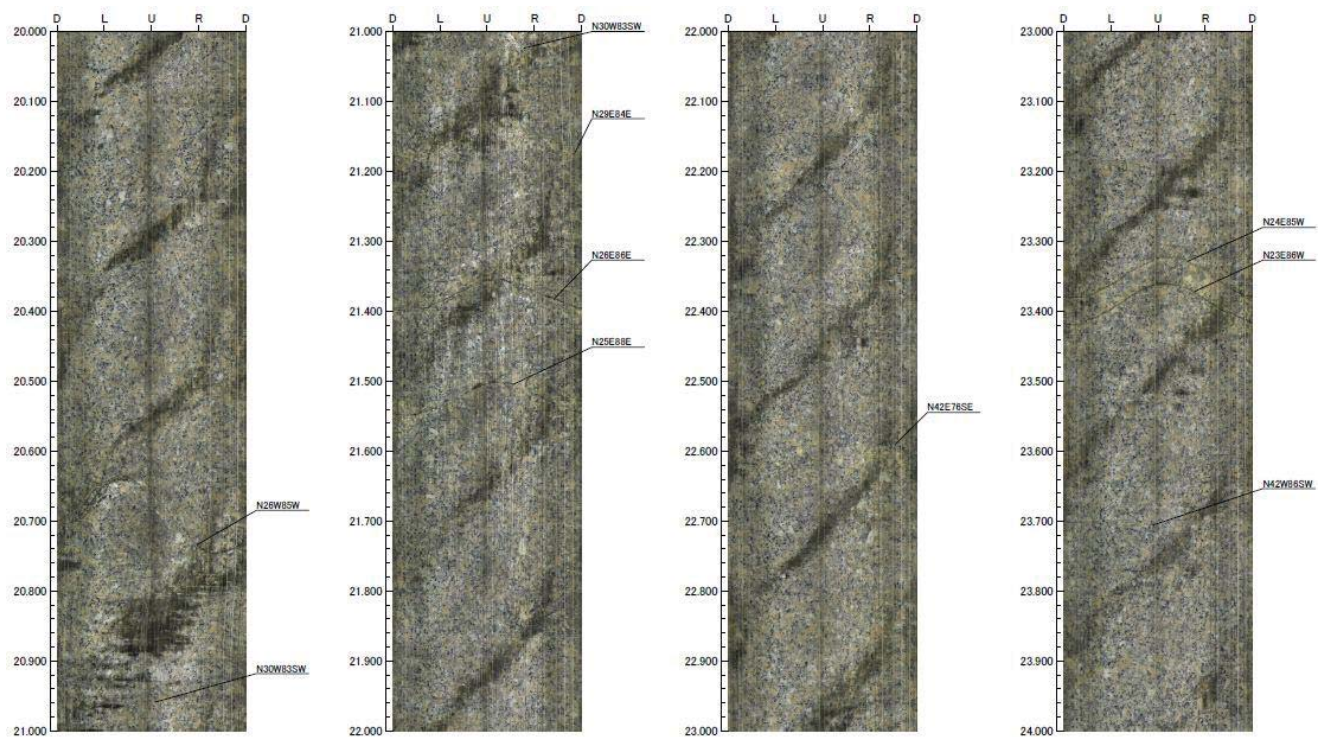


图 2.4.6-6 16MI59 号孔 孔壁展开图 20.00~24.00mab

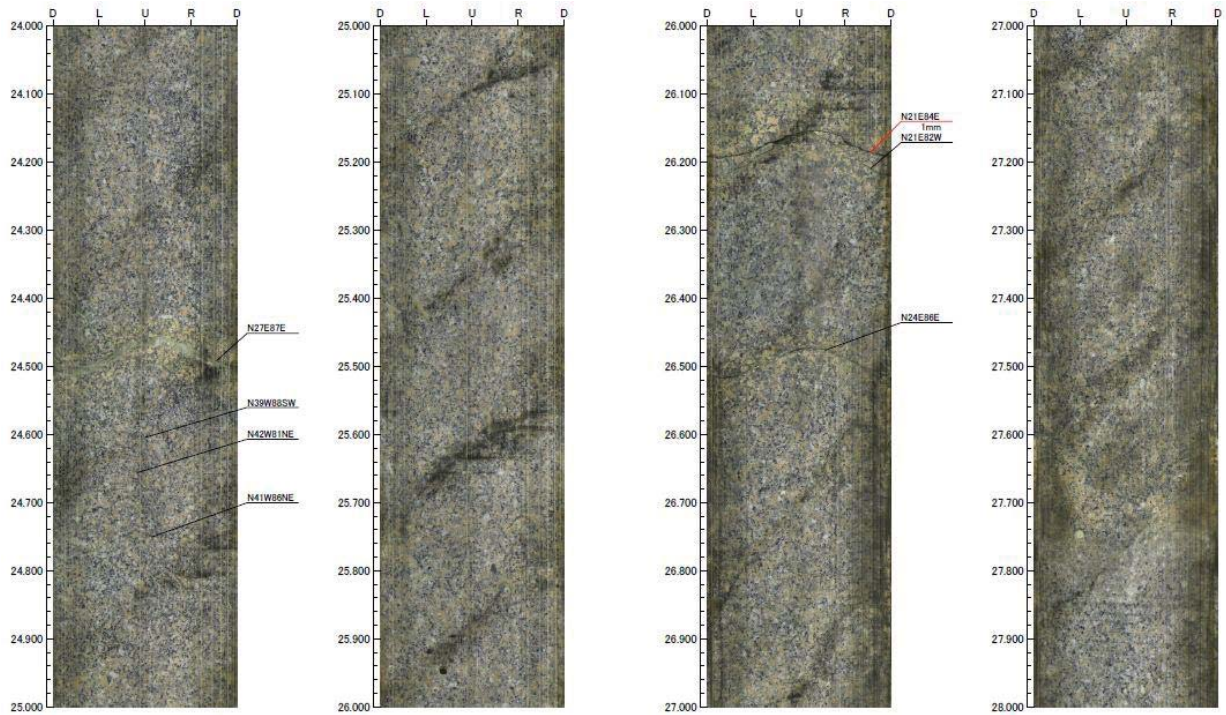


图 2.4.6-7 16MI59 号孔 孔壁展开图 24.00~28.00mab

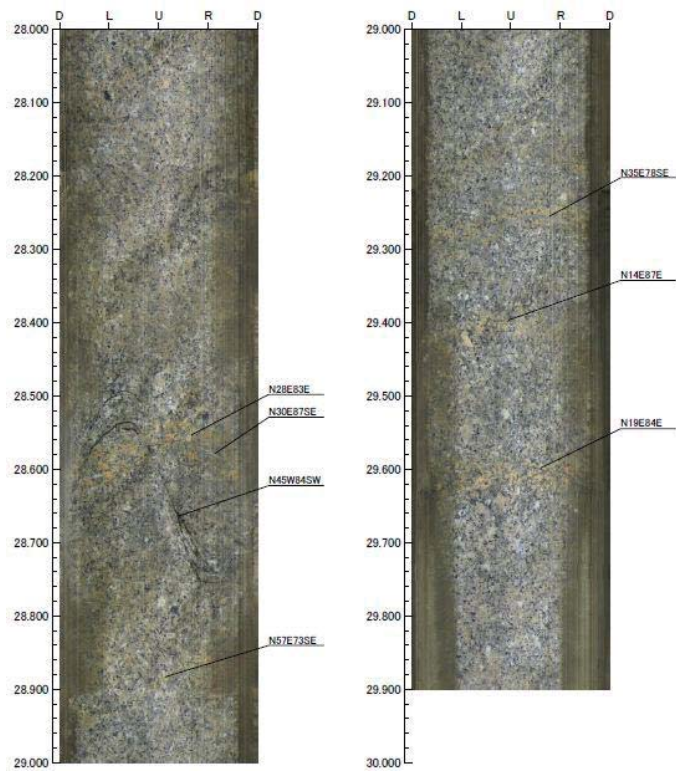


图 2.4.6-8 16MI59 号孔 孔壁展开图 28.00~30.00mab

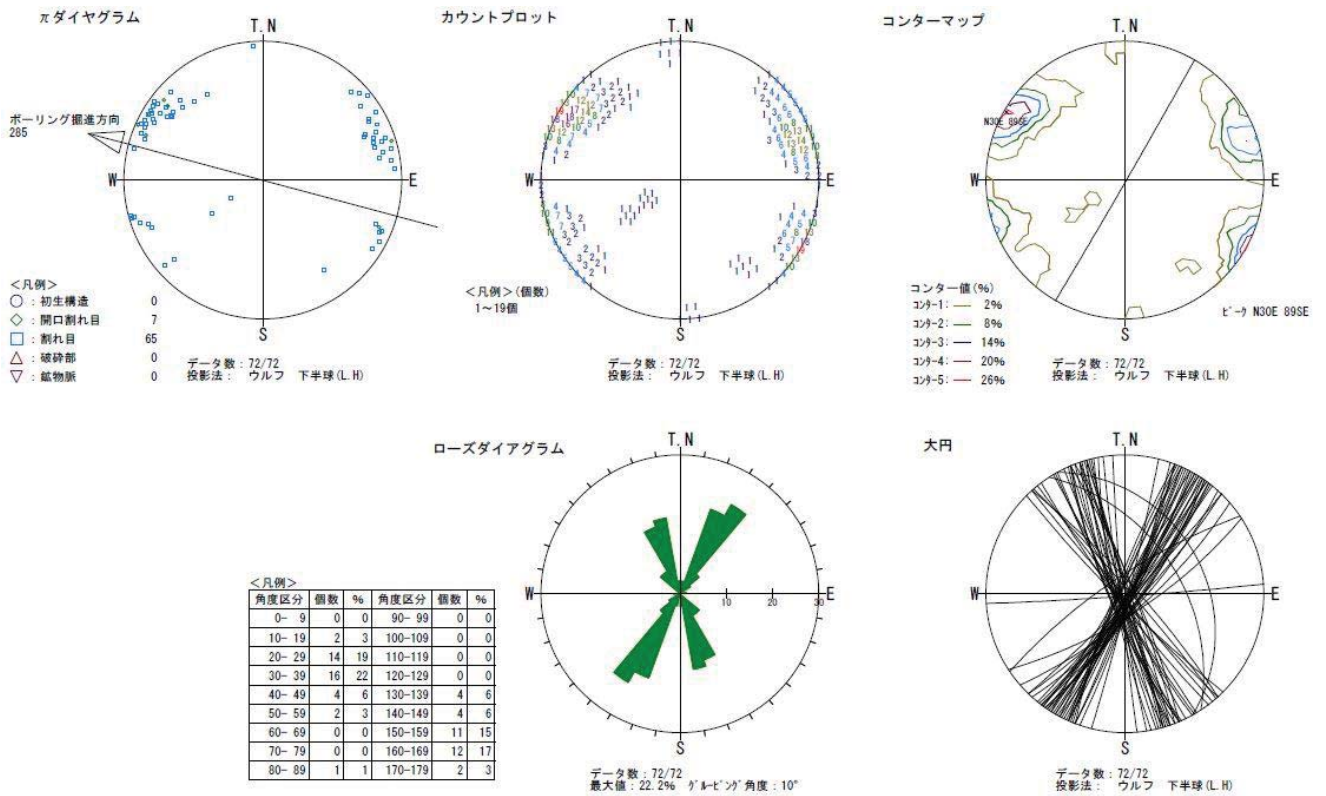


図 2.4.6-9 16MI59 号孔 ステレオネット図 -全岩盤分離面-

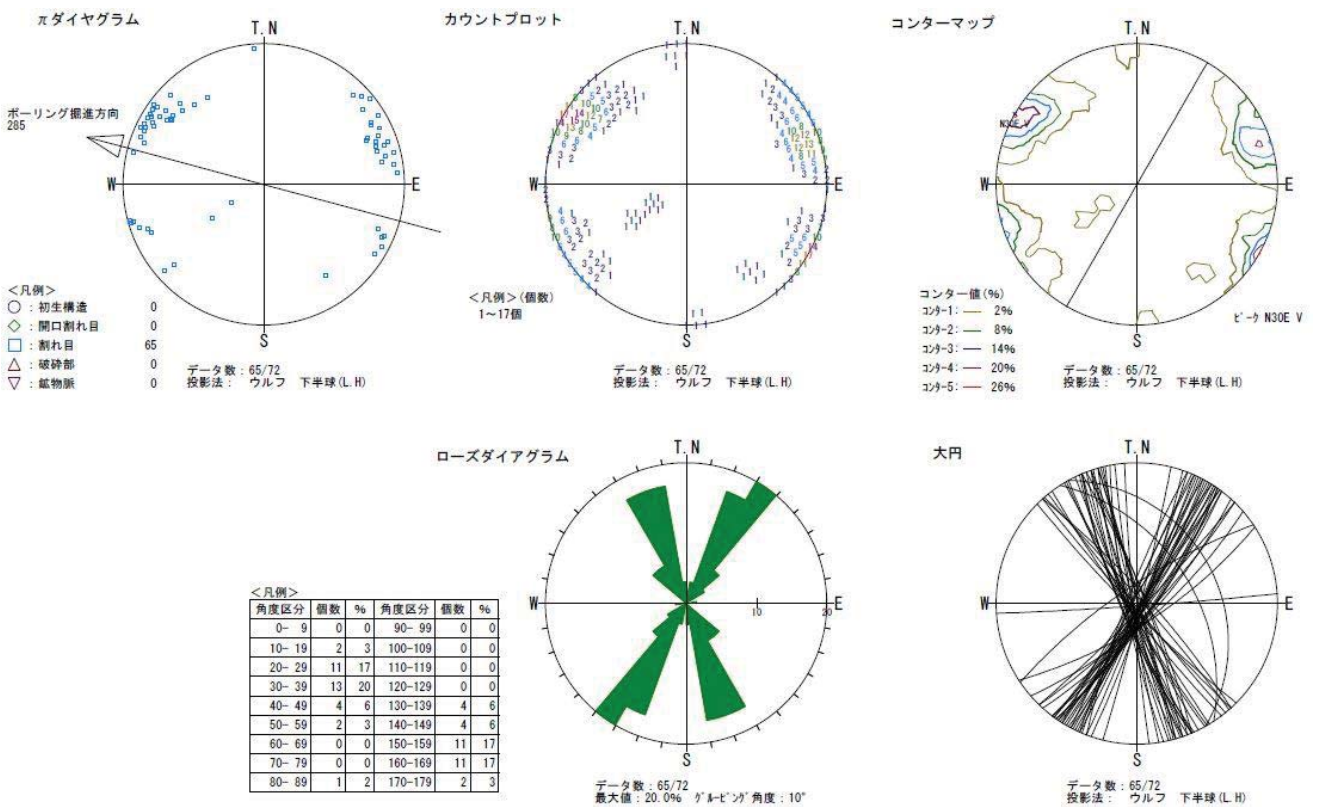


図 2.4.6-10 16MI59 号孔 ステレオネット図 -割れ目-



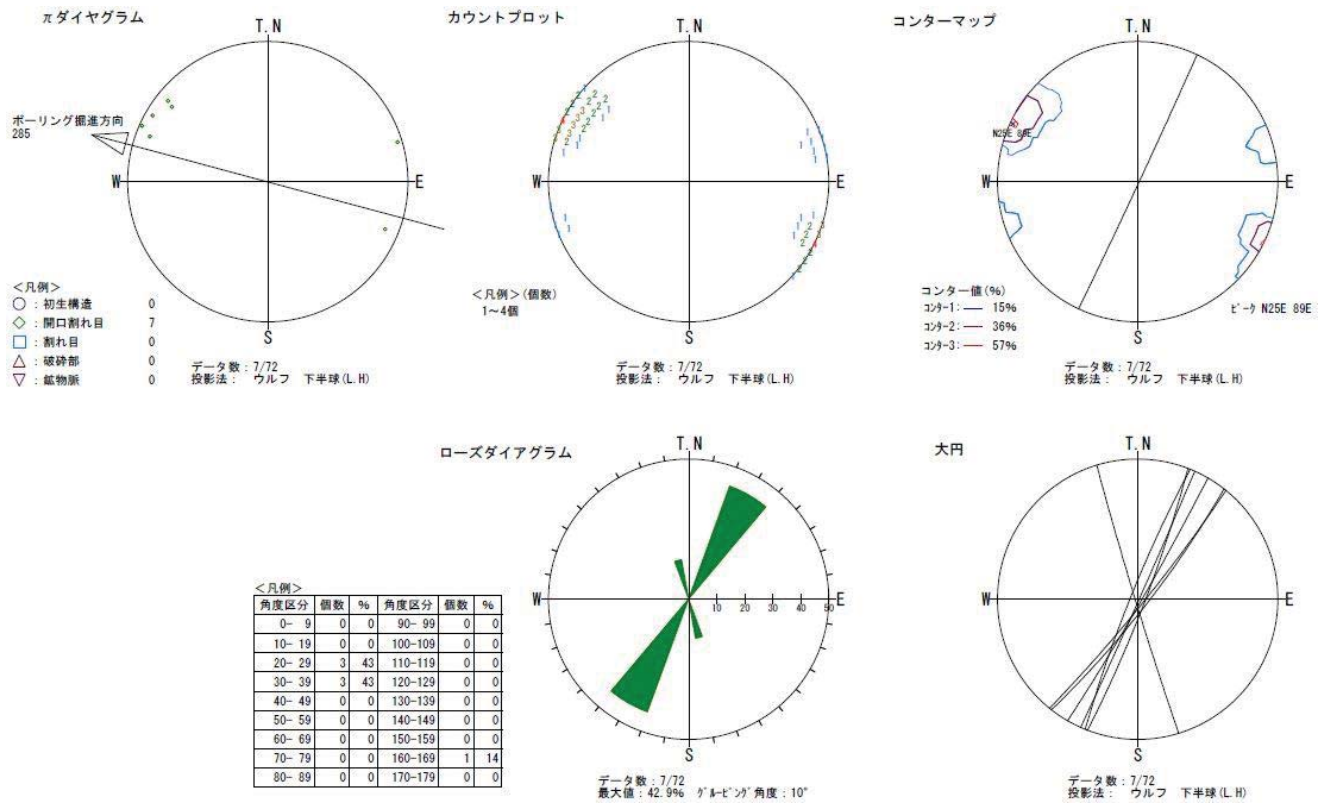


図 2.4.6-11 16MI59号孔 ステレオネット図 -開口割れ目-

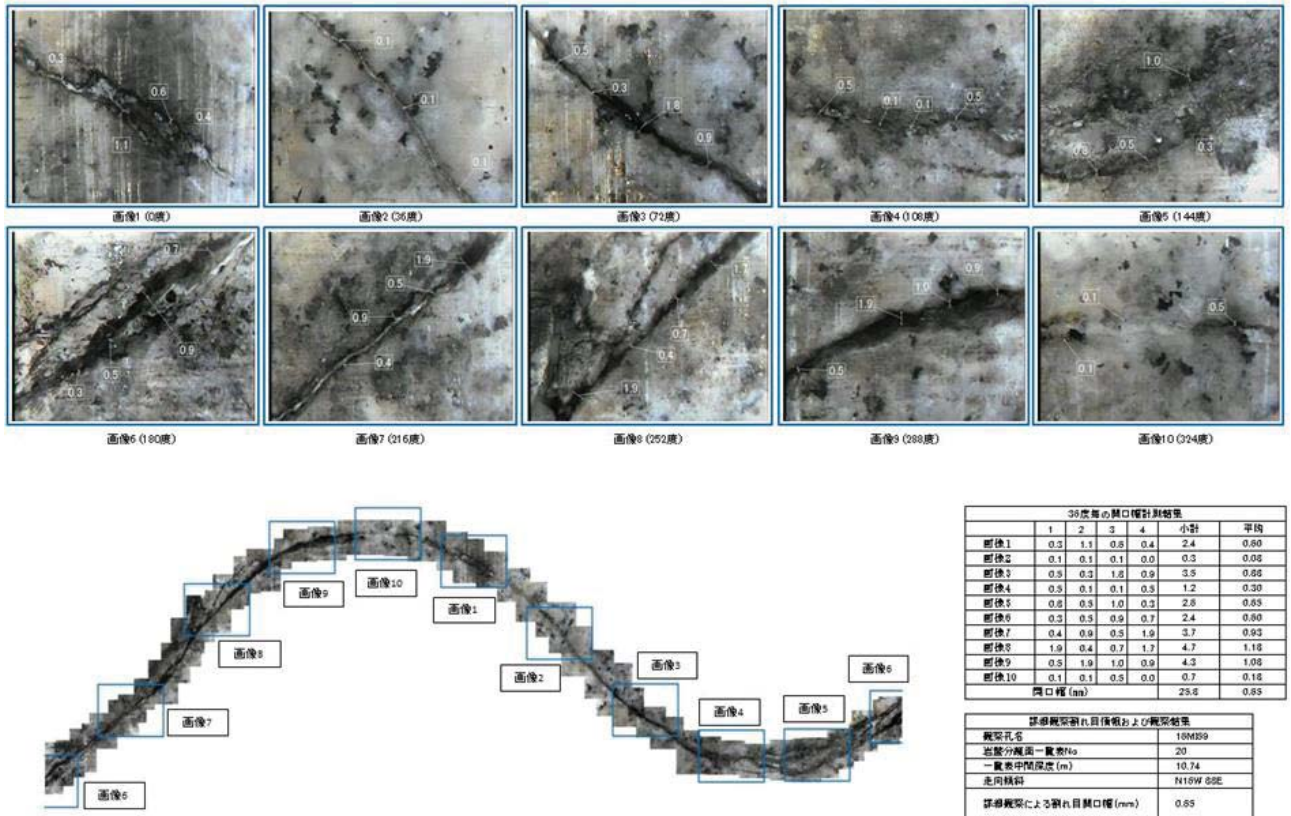


図 2.4.6-12 16MI59号孔 詳細観察画像 (8.66mabh N28W/82E)

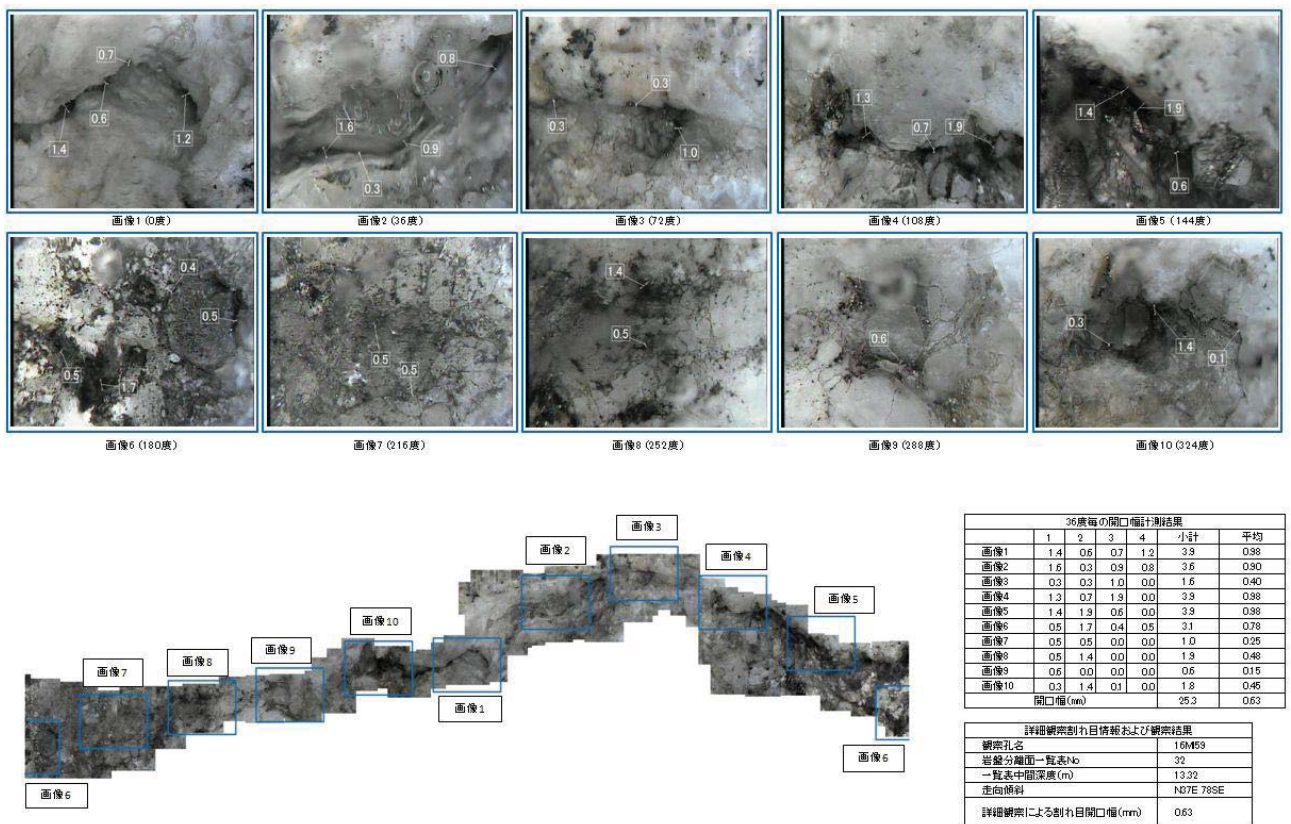
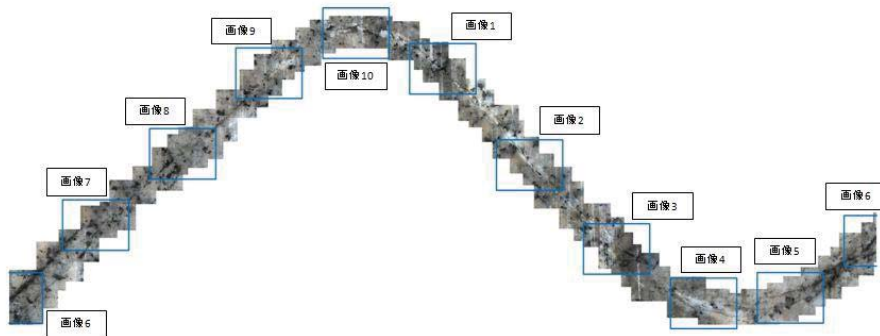
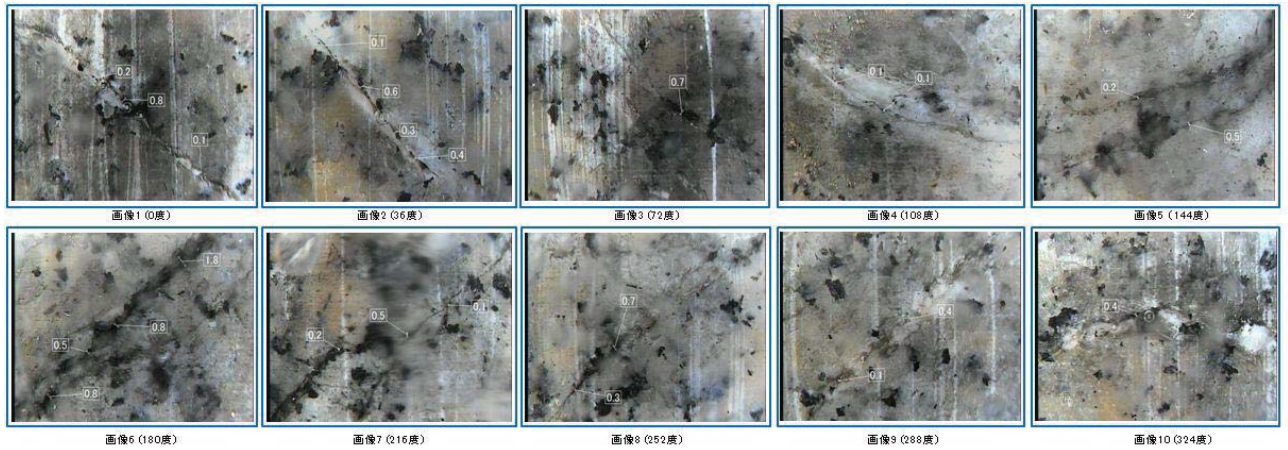


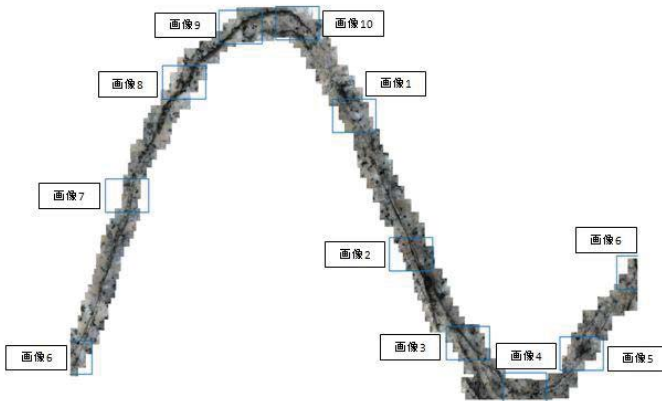
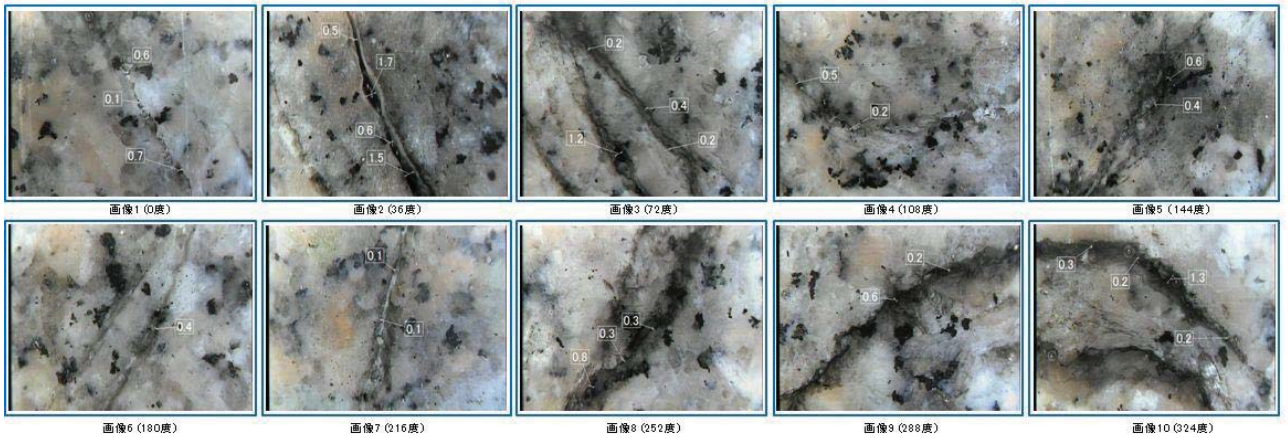
図 2.4.6-13 16MI59号孔 詳細観察画像 (9.30mabh N17W/76W)



36度毎の開口幅計測結果						
	1	2	3	4	小計	平均
画像1	0.2	0.8	0.1	0.0	1.1	0.28
画像2	0.1	0.6	0.3	0.4	1.4	0.35
画像3	0.7	0.0	0.0	0.0	0.7	0.18
画像4	0.1	0.1	0.0	0.0	0.2	0.05
画像5	0.2	0.5	0.0	0.0	0.7	0.18
画像6	0.8	0.5	0.8	1.8	3.9	0.98
画像7	0.2	0.5	0.1	0.0	0.8	0.20
画像8	0.3	0.7	0.0	0.0	1.0	0.25
画像9	0.1	0.4	0.0	0.0	0.5	0.13
画像10	0.4	0.0	0.0	0.0	0.4	0.10
開口幅(mm)					10.7	0.27

詳細観察割れ目情報および観察結果	
観察孔名	16MI59
岩盤分離面一覧表No	47
一覧表中層深度(m)	16.25
走向傾斜	N43W86W
詳細観察による割れ目開口幅(mm)	0.27

図 2.4.6-14 16MI59号孔 詳細観察画像 (9.47mabh N26W/81W)



36度毎の開口幅計測結果						
	1	2	3	4	小計	平均
画像1	0.6	0.1	0.7	0.0	1.4	0.35
画像2	0.5	1.7	0.6	1.5	4.3	1.08
画像3	0.2	1.2	0.4	0.2	2.0	0.50
画像4	0.5	0.2	0.0	0.0	0.7	0.18
画像5	0.4	0.6	0.0	0.0	1.0	0.25
画像6	0.4	0.0	0.0	0.0	0.4	0.10
画像7	0.1	0.1	0.0	0.0	0.2	0.05
画像8	0.8	0.3	0.3	0.0	1.4	0.35
画像9	0.6	0.2	0.0	0.0	0.8	0.20
画像10	0.3	0.2	1.2	0.2	2.0	0.50
開口幅(mm)					14.2	0.36

詳細観察割れ目情報および観察結果	
観察孔名	16MI59
岩盤分離面一覧表No	68
一覧表中層深度(m)	28.63
走向傾斜	N45W84SE
詳細観察による割れ目開口幅(mm)	0.36

図 2.4.6-15 16MI59号孔 詳細観察画像 (9.98mabh N34E/87SE)

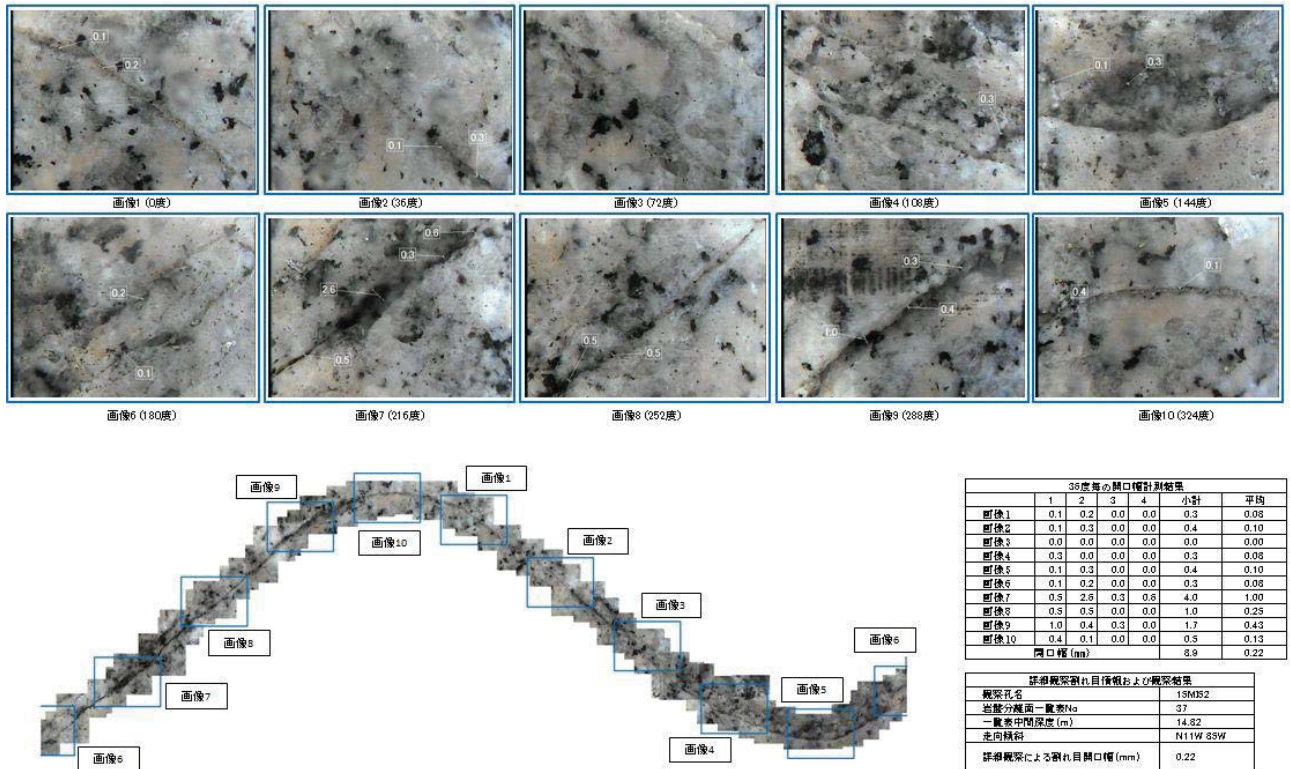


図 2.4.6-16 15MI52 号孔 詳細観察画像 (16.09mabh N23W/78W)

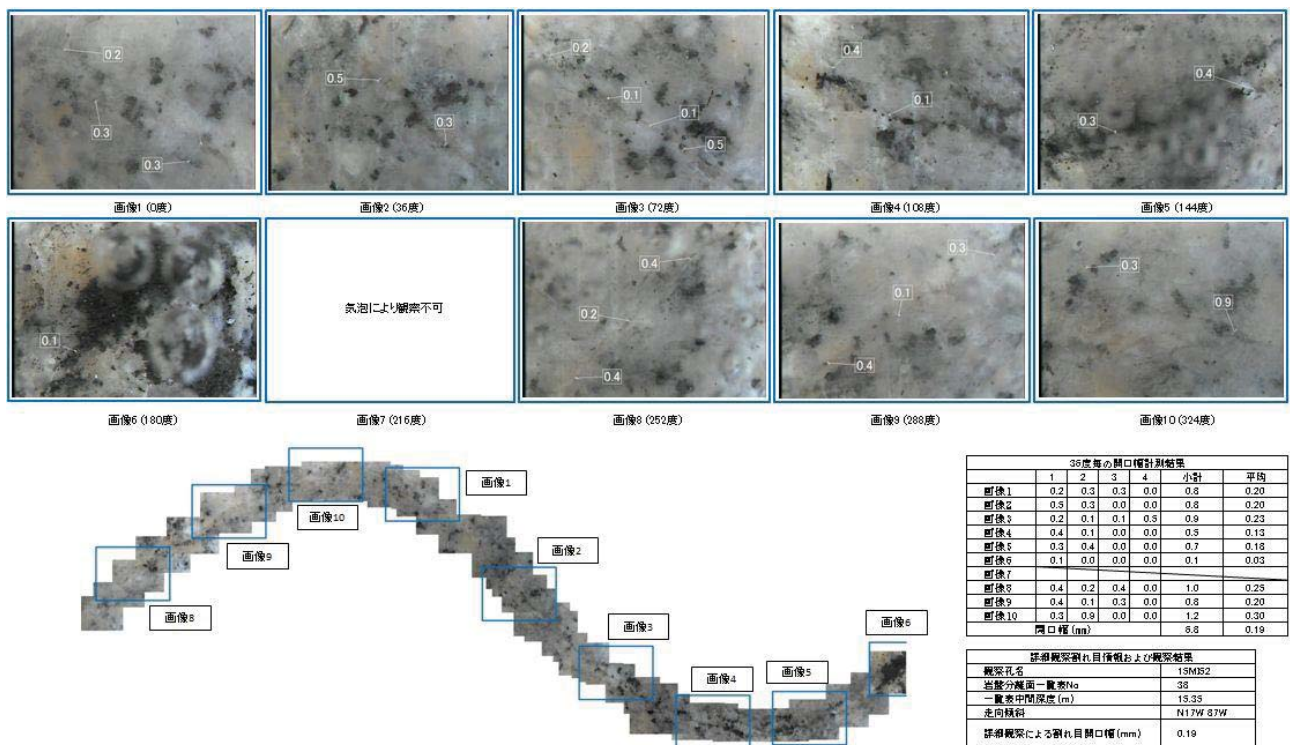


図 2.4.6-17 15MI52 号孔 詳細観察画像 (17.59mabh N32E/89NW)

2.4.7 間隙水圧のモニタリング装置設置

16MI59号孔への間隙水圧モニタリング装置は、パッカー編成を電中研殿と協議の上、決定した。パッカーは7連編成とし、間隙水圧の観測区間は8区間とした。図2.4.7-1に間隙水圧モニタリング装置の編成と各観測区間の深度(mabh)を示す。深度はボーリング孔口をGLとした。また、表2.4.7-1にパッカー拡張当日に測定した各区間の湧水量一覧を示す。湧水量は、各区間の圧力測定用・採水用の2本のチューブ(φ6×4mm)からの排出量を測定した。なお、湧水量の多い区間(500mL/min以上)では、測定に用いたチューブの断面積が小さいため、管内損失により実際の湧水量より少ない値であると考えられる。

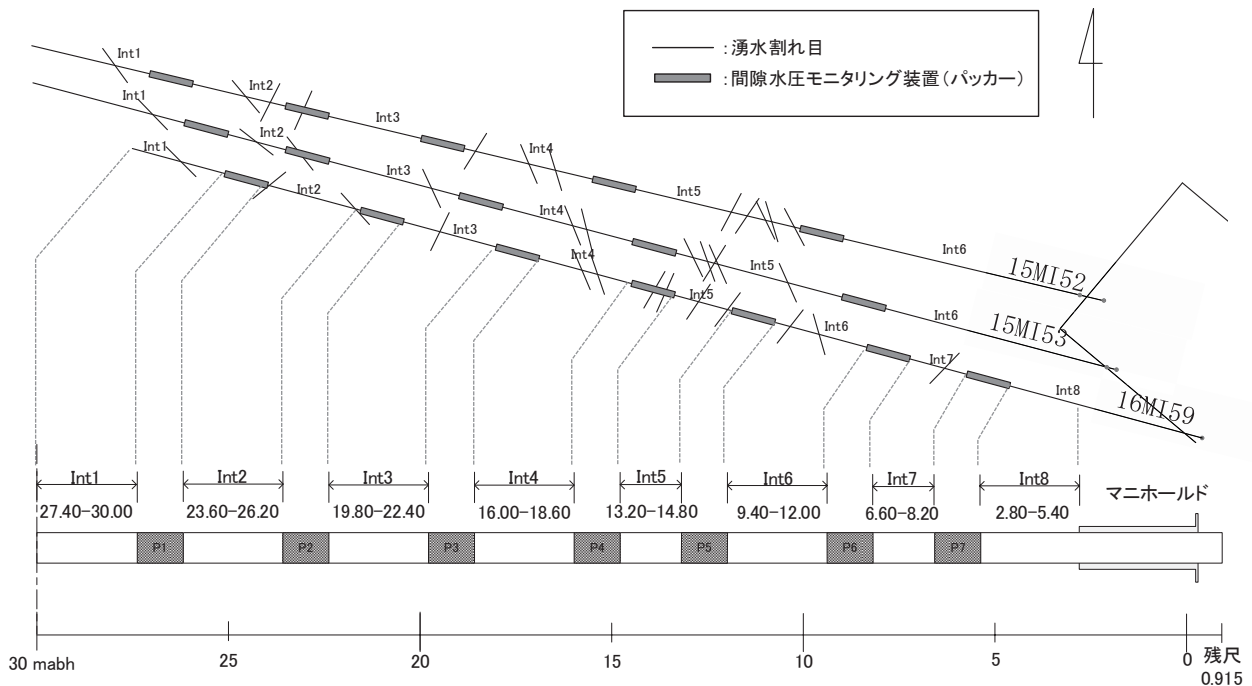


図 2.4.7-1 16MI59号孔の間隙水圧モニタリング装置の編成

表 2.4.7-1 パッカー拡張当日の各モニタリング区間の湧水量

観測区間	上端深度	下端深度	区間長	湧水量	備考
	mabh		m	mL/min	
Int1	27.40	30.00	2.60	350	下端深度は孔底
Int2	23.60	26.20	2.60	100	
Int3	19.80	22.40	2.60	250	
Int4	16.00	18.60	2.60	250	
Int5	13.20	14.80	1.60	4900	配管抵抗有り
Int6	9.40	12.00	2.60	260	
Int7	6.60	8.20	1.60	590	配管抵抗の可能性有り
Int8	2.80	5.40	2.60	60	上端深度は口元ケーシング

2.4.8 湧水割れ目の特徴

(1) 割れ目の密度

16MI59号孔の掘削方向は15MI52、15MI53号孔に対してほぼ平行であり、16MI59号孔と15MI53号孔の間は約2mと近い為、3つの孔間を横断する割れ目が多く存在し、割れ目密度分布の増減にも類似した傾向が見られる（例えば16MI59号孔の深度では、6.00mabh～9.00mabhおよび13.00～20.00mabhにかけての割れ目密度の減少傾向など）。16MI59号孔および平成27年度に掘削した15MI52、15MI53号孔のコア観察で確認された割れ目の密度分布を図2.4.8-1に示す。

16MI59号孔の割れ目密度の平均は4.0本/mであり、15MI52、15MI53号孔の値に近い結果となった。また、深度500mの割れ目密度は深度300mと比較して小さい値であった。表2.4.8-1に深度500mコアと深度300mコアの掘削総長における割れ目密度の平均を比較した結果を示す。

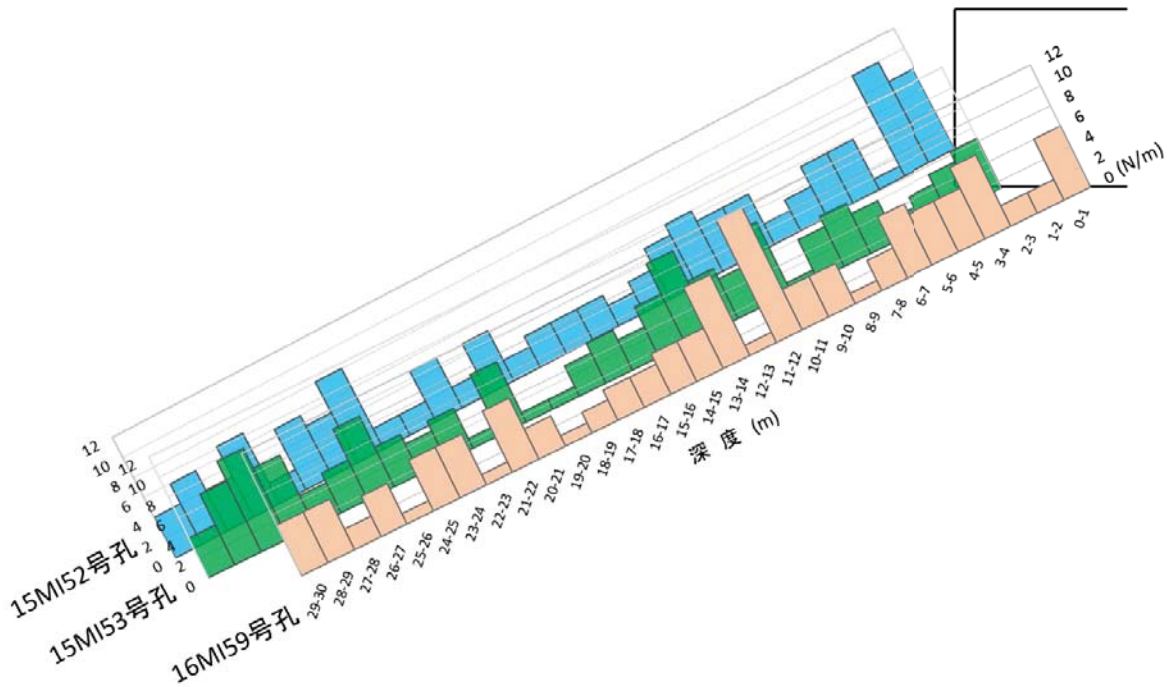


図 2.4.8-1 コア観察による深度500mコアの割れ目密度分布

表 2.4.8-1 掘削総長における割れ目密度の平均

深度	深度 500m			深度 300m				
ボーリング孔名	15MI52	15MI53	16MI59	12MI30	12MI31	13MI37	13MI36	14MI49
割れ目密度 (N/m)	4.3	4.3	4.0	7.8	7.0	7.2	8.0	7.0

(2) 湧水割れ目の特徴

16MI59 号孔の BTV 検層 (BIPS) によって計測した割れ目の方向は、図 2.4.8-2 で示すように NW 走行および NE 走行の高傾斜割れ目に大別される。この傾向は平成 27 年度に掘削した 15MI52、15MI53 号孔と同様である。NW 方向の割れ目の中には水理試験結果と対比した結果、3 つの孔間で連続性が認められ、水みちと判断された割れ目 (湧水割れ目) である。水みちとなっている割れ目にはマトリックスの変質が見られないことがコア観察により分かった。

また NE 方向の割れ目の中には鉱物充填割れ目と石英脈に沿って産する割れ目が多く確認された。石英脈の周囲はコアの深度の浅い方向にも深い方向にも 2~4cm の幅でよりピンク色が濃く、かつ黄緑色鉱物が見られる場合がほとんどである。これは石英脈が貫入した際に周囲の岩石が変質を被ったことが予想される。

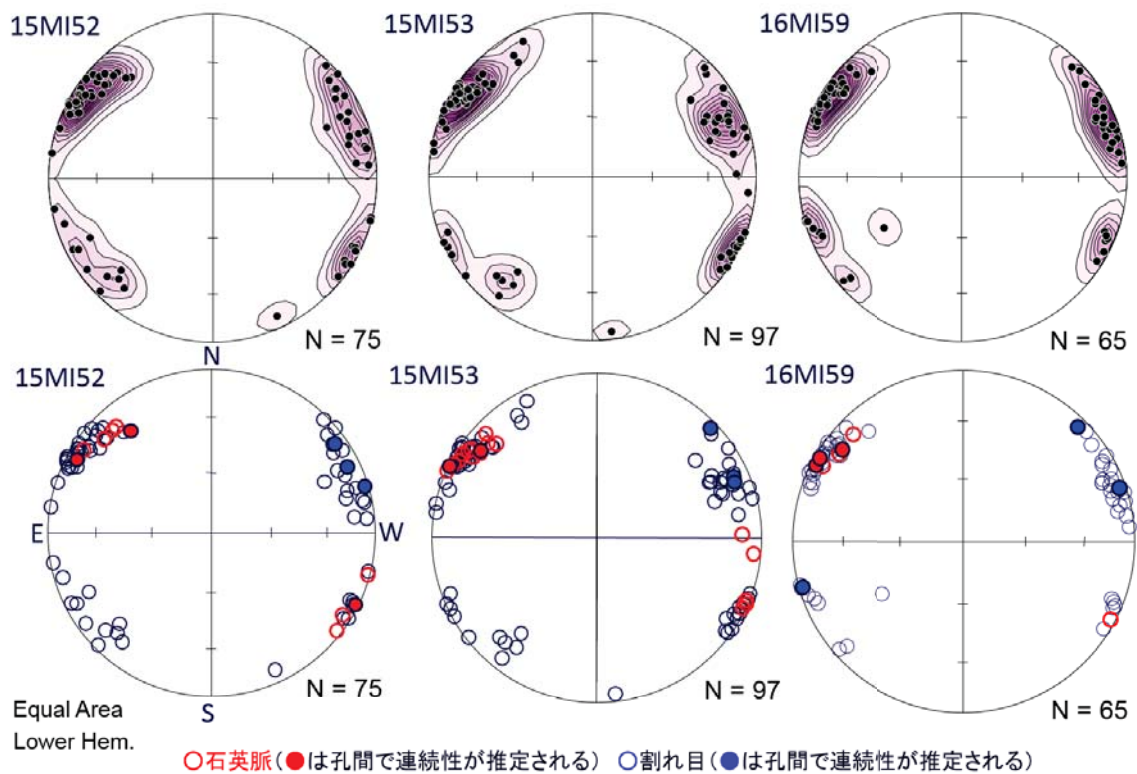


図 2.4.8-2 深度 500m コアの割れ目の特徴別の卓越方向

(3) 湧水割れ目の連続性

掘削中や透水試験中に確認したボーリング孔間での間隙水圧の応答や、割れ目の性状や走向傾斜、コアや高解像度 BTV 検層での観察結果等から湧水割れ目の連続性について検討した。その結果、平成 27 年度に掘削した 15MI52、15MI53 号孔の孔間での地質的、水理的に連続が

確認された3本の割れ目は、16MI59号孔とも地質的、水理的に連続が確認され、3孔間に亘った割れ目の広がり把握した(図2.4.8-3)。ただし、16MI59号孔の10.74mabhの割れ目(対象①)については、16MI59号孔掘削中や透水試験中における15MI52、15MI53号孔の間隙水圧に大きな変化は見られていないことから、他と比べると水理的なつながりは小さい。

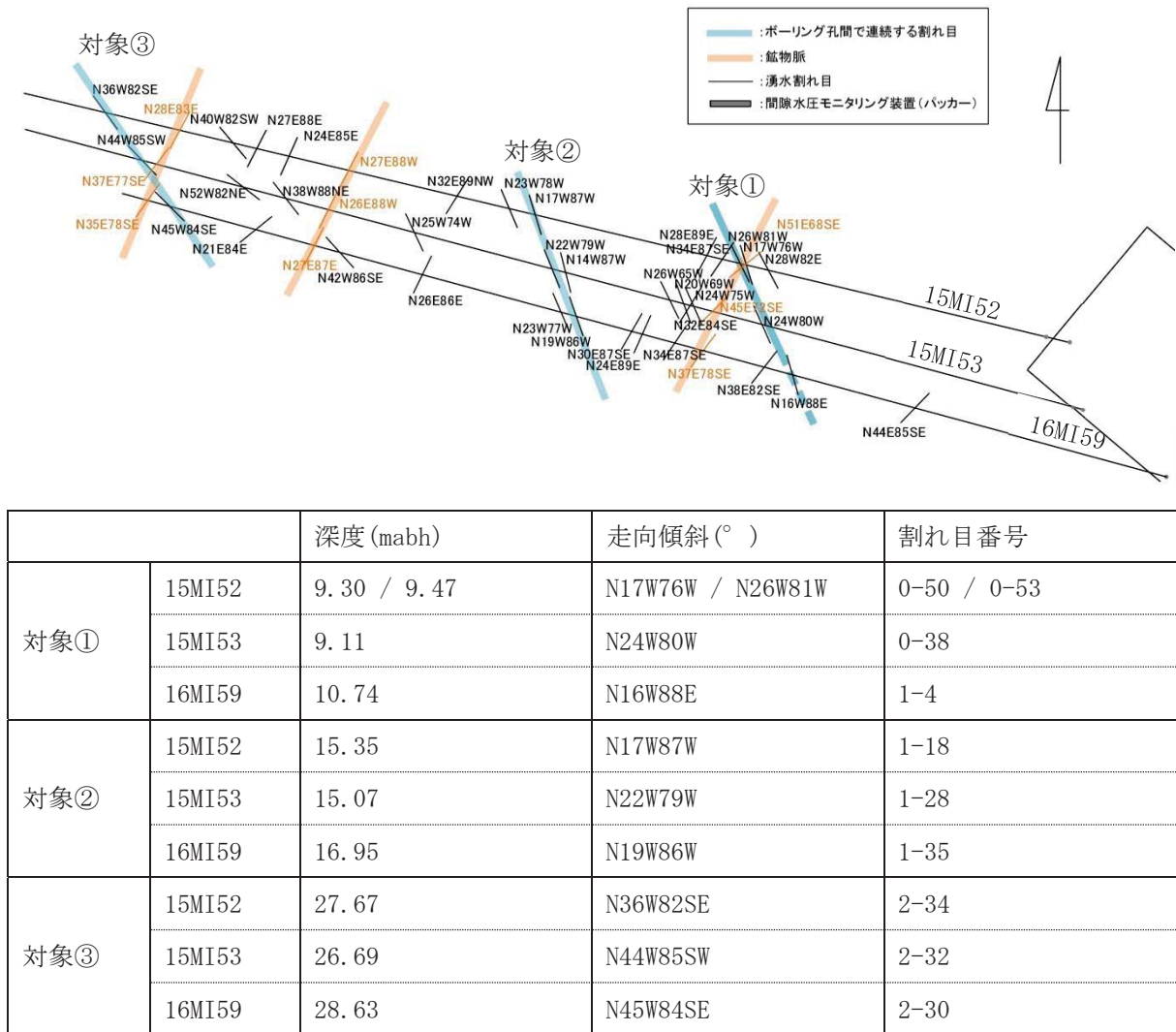


図 2.4.8-3 深度 500m に掘削した 3 孔間で地質的、水理的に連続性が確認された割れ目

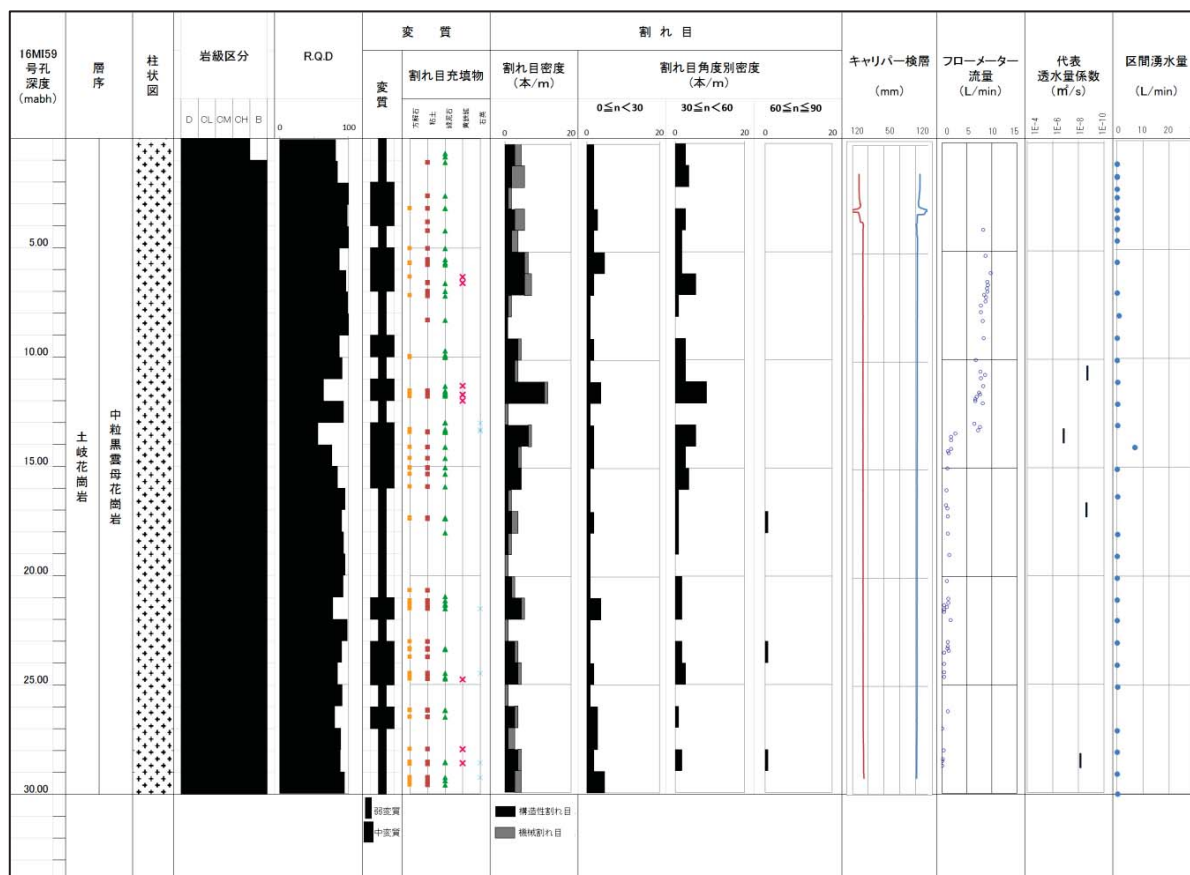


## 2.5 まとめ

深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑において 16MI59 号孔の掘削、また同孔における地質学的調査（コア観察、高解像度 BTV）、および水理学的調査（各種検層、透水試験）を行った。以下にそれぞれの結果についてまとめる。

また、コア観察結果と水理学的調査結果を合わせて、図 2.4.8-1 の総合柱状図に示す。

図 2.4.8-1 16MI59 号孔の総合柱状図



### 2.5.1 ボーリング掘削

以下に 16MI59 号孔のボーリング掘削についてまとめる。

- 1 段目の掘削では、 $\phi 86 \text{ mm}$  で 3.54mabh まで掘削後、ケーシングの設置を行うため、 $\phi 141 \text{ mm}$  で 3.09mabh まで拡孔した。また、1.91mabh までは湧水対策としてクイックライナーを施した。ケーシングの設置深度は 2.85mabh までとした。
- 2 段目の掘削は、 $\phi 86 \text{ mm}$  で 30.00mabh まで掘削した。コア採取は、コア径  $\phi 72 \text{ mm}$  で採取を行い、コア採取率は孔口のコンクリート部を除けばほぼ 100%であった。
- 16MI59 号孔の掘削終了後の全体湧水量は 8.2L/min であった。

### 2.5.2 地質学的調査の結果

16MI59 号孔の掘削結果より判明した地質学的調査について以下にまとめる。

- ・ 採取したコアは、主に粗粒～中粒の黒雲母花崗岩である。
- ・ 等粒状～斑状を呈し主要な造岩鉱物は石英・カリ長石・斜長石・黒雲母で、ごく微細な角閃石を含む。これ以外に石英脈が厚さ数 cm で散見される。
- ・ これ以外に石英脈が厚さ数 cm で散見される。
- ・ 採取したコアは母岩全体に及ぶ広範囲の変質は被っていない。変質は石英脈の貫入に伴う貫入面に並行な範囲や、開口割れ目・潜在割れ目を中心とした範囲に限定される。
- ・ コア観察結果に基づき掘削深度とコアの性状変化(風化・変質・RQD)、亀裂本数・傾斜角との関係を総合柱状図として取りまとめた。併せて掘削時の区間湧水量と掘削終了後に行った各種検層結果、透水試験結果から求めた透水量係数を総合柱状図に取りまとめた。

### 2.5.2 水理学的調査

16MI59 号孔において各種検層や透水試験を実施した。以下にその結果についてまとめる。

- ・ フローメータ検層を実施した結果、7.0～7.2mabh (約 1L/min) 、13.3～13.5mabh (約 6L/min) 、21.3～21.6mabh (1L/min 未満) 、26mabh 付近 (1L/min 未満) において流量変化を確認した。
- ・ 湧水割れ目を特定するため、10.5mabh 付近、13.4mabh 付近、17mabh 付近および 28mabh 以深の割れ目を対象に湧水量測定を実施した。その結果を基に各深度で確認した代表的な割れ目を対象に定流量揚水試験を実施した。試験区間は 10.30～10.97mabh、13.20～13.87mabh、16.60～17.27mabh および 28.20～30.00mabh の 4 深度とした。定流量試験より求められた透水量係数は、13.2～13.87mabh で  $1\text{E}-7$  ( $\text{m}^2/\text{sec}$ ) オーダー、その他の試験区間では  $1\text{E}-8$  ( $\text{m}^2/\text{sec}$ ) オーダーであった。

### 2.5.3 割れ目の地質的・水理的に連続性

15MI52 号孔、15MI53 号孔および 16MI59 号孔の間隙水圧の応答や、割れ目の性状や走向傾斜、コアや高解像度 BTV 検層での観察結果等から湧水割れ目の連続性について総合的に検討した。その結果、16MI59 号孔の 10.74mabh、16.95mabh、28.63mabh において、15MI52、15MI53 号孔と地質的、水理的な連続性がある割れ目を確認した。ただし、16MI59 号孔の 10.74mabh の割れ目については、他に比べて水理的なつながりは小さい。

## 参考文献

国立研究開発法人 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>

糸魚川淳二. (1980). 瑞浪地域の地質. 瑞浪市化石博物館専報.

松岡稔幸, 熊崎直樹, 三枝博光, 佐々木圭一, 遠藤令誕, 天野健治. (2005). 繰返しアプローチに基づく地質構造のモデル化 (Step1 および Step2). 核燃料サイクル開発機構.

川本康司, 窪島光志, 村上裕晃, 石橋正裕紀, 笹尾英嗣. (2014). 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—. 独立行政法人日本原子力開発機構.

川本康司, 黒岩弘, 山田信人, 大貫賢二, 大森一秋, 竹内竜史, . . . 渡辺和彦. (2014a). 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). 独立行政法人日本原子力研究開発機構.

川本康司, 村上裕晃, 石橋正裕紀, 笹尾英嗣, 渡辺和彦, 見掛信一郎, 池田幸喜. (2014b). 超深地層研究所計画 瑞浪超深地層研究所 500m ステージの壁面地質調査データ集. JAEA-Data/Code, 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.

鶴田忠彦, 武田匡樹, 上野孝志, 大丸修二, 徳安真吾, 尾上博則, . . . 田上雅彦. (2012). 超深地層研究所計画 主立坑断層を対象としたボーリング調査結果報告書. JAEA-Technology, 独立行政法人日本原子力研究開発機構.

### 3. トレーサー試験に係わる室内試験

#### 3.1 背景

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と考えられている。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（収着やマトリクス拡散）による遅延が期待されており、岩石が持つ核種の遅延能力を評価することが精密調査段階においても重要であると考えられる。

通常岩石による核種移行の遅延能力は、室内で実施されるバッチ試験等の収着試験で評価される。日本原子力学会が提案している標準的な手法では（日本原子力学会，2006）岩石を2mm以下の粉末に粉砕し、1gの岩石粉末に対して10mLの溶液を添加して収着試験を実施し、収着試験の結果からある核種の固液での分配係数を算出する。岩石粉体を用いたバッチ法は比較的实施が容易であることから、多くの試験で用いられた実績があり、条件を複数変えた試験を同時並行に実施できるなどのメリットがある。一方、上記の粉体を用いるバッチ試験では岩石コアを取得してそれを粉砕するなどの操作が加わるため、実際の地下環境とは異なる条件で試験を実施することになる。このため、実験室で取得した分配係数から実際の地下での核種移行を評価するには、なにかしらの方法でこれを規格化し、実スケールにスケールアップしていく必要がある。規格化・スケールアップの考え方（例えば岩石1kgあたりの収着量でスケールアップするのか、実際に流動する地下水が接触する岩石の表面積で規格化しスケールアップするのか）はサイト特性にも依存していると考えられ、明確な方針が確定していないのが現状である。

一方、現地トレーサー試験も実割れ目の核種遅延能力を調べるための手法である。トレーサー試験において、非収着性トレーサーと収着性トレーサーの到達時間（あるいはピーク）の差異、あるいはピーク高さの差異を利用してある核種の遅延係数を評価することができ、さらに評価された遅延係数から分配係数を算出することが可能である。トレーサー試験は実際に地下にある割れ目を用いて実施するため、実際の地下環境（処分環境）に近い条件下で、割れ目充填鉱物などが付着している実割れ目を使って試験を実施するため、上記の意味からはより処分の安全評価に近い条件で岩石が持つ核種の遅延能力を評価できる手法であると言える。しかし、トレーサー試験ではトレーサーを回収できないと試験の評価が難しくなることから、特に流速の速い場においては十分にトレーサーの回収率が高くなる汲み上げの条件が設定されることが多い。また、回収した後の分析を容易にするといった理由から、収着性トレーサーの濃度も高めに設定されることが多い。上記のようにトレーサー試験では実際の処分で評価する条件に対して、岩石との接触時間は短めに、トレーサー濃度は高めに設定されることが多く、上記の室内試験等と比較して核種の遅延能力を低く評価する可能性が高い。このため、実際の割れ目を用いることができるというメリットがあるものの、実際に安全評価に使うのに適切な分配係数

評価となっているかについては疑問が残る。トレーサー試験によって核種移行遅延能力を評価するためには、どの程度の時間をかけて、どの程度の濃度のトレーサーを流せば良いのか、条件が設定できることが望ましい。

上記のようなことから、本研究では以下に挙げる2点を目的とし種々の室内試験を実施している。

- ① 室内試験・現場試験を含めて分配係数や遅延係数の取り得る範囲や条件に対する依存性を明らかにし、処分の安全評価に用いる分配・遅延係数を調べる方法を提案する。また、室内試験の条件から現場試験で実施可能な範囲で望ましい試験条件を示す。(3.2 室内収着試験)
- ② 割れ目充填鉱物の核種遅延への影響を明らかにする。このために、割れ目充填鉱物に対する核種の収着や脱離挙動を明らかにする。(3.3 割れ目充填鉱物への核種収着試験)

### 3.2 室内収着試験

先述のように、実際の現場でのトレーサー試験では、試験現場における制約から条件を自由に設定することが難しい場合がある。現場の割れ目においてバックグラウンドの流れを制御しない場合には、バックグラウンドの地下水流速によって試験を実施するための流速が制限される場合がある。これは長時間の試験を実施すると、バックグラウンドの流れによってトレーサーが流されてしまい、回収できないことがあるためである。このため、昨年度までの検討では主にカラム試験における流速依存性を明らかにした。

今年度はカラム試験における流速依存性だけでなく、イオン濃度に対する依存性についても調べた。これは、一般的に日本の地下水においては深度が深くなるとイオン濃度が高くなる傾向にあり、種々の深度で試験を実施する場合にはイオン濃度に対する依存性が有用になると考えたためである。このため、今年度は一部の試験を除いて基本的に瑞浪地域の立坑500mで取得した岩石を試験体として用い、試験方法(バッチ試験・カラム試験・拡散試験・現場試験:抽出方法を含む)、岩石形状(粉体・円柱状・柱状など)、試験条件(流速や接触時間・イオン濃度)を変えて分配や遅延係数を取得し、分配係数や遅延係数の試験方法・形状・条件に対する依存性を明らかにした。その結果から、試験方法による分配係数の傾向などを比較し、安全評価に用いる分配係数の取得方法について議論する。

以下の条件を変えて試験を実施し、分配係数や遅延係数を取得した。

- ・ サンプル形状: 岩石を粉砕して2mm以下の大きさにしたもの(粉末)、岩石を整形してφ15mm高さ70mmの柱状にしたもの(柱状)、1次元岩盤モデル(100×100×1200mmの棒状の岩石の1面にアクリル板を押しつけて模擬割れ目を作製したもの)
- ・ 試験方法: バッチ試験(溶液に岩石を浸漬して溶液中の対象イオン濃度の変化を調べる試験)、カラム試験(カラムに溶液を流しその破過曲線から遅延係数・分配係数を調べる試験)

- ・ イオン濃度：NaCl でイオン濃度を調整し、0.01～0.5M とした。0.5M の NaCl 溶液は海水に相当する程度のイオン濃度であり、0.01M NaCl 溶液は瑞浪地域の立坑の 500m 深度の地下水に相当する程度のイオン濃度になる。また、一部のバッチ試験では純水を用いた場合のデータも取得した。一部のカラム試験でも純水を用いた試験の実施を試みたが、カラムに通水する溶液量を増加させても収着性のトレーサー（ルビジウムやバリウム）が検出されなかったため、その後は純水をバックグラウンド溶液として用いた試験は実施しなかった。
- ・ 流速 0.1mL/min または 1.0mL/min（カラム試験の場合）、～1300 時間（バッチ試験の場合）

### 3.2.1 粉体岩石のバッチ試験

#### (1) 試験方法

粉体岩石のバッチ試験は、以下の手順で実施した。

##### a. 岩石試料の準備

昨年度実施したボーリングのコア（15MI52）の健岩部を 2m 程度取得し、このうち 300g 程度をタングステンミルのミルで粉碎した。造岩鉱物の硬さによって組成が変わるのを防ぐため、300g 全てが 2mm のメッシュを通過するように、粉碎した。粉碎した岩石は微細な粉末を除去するために、岩石 200g に対して 1L の水を加えて緩やかに攪拌したあと 1 分間静置し、上澄みを捨てる作業を 3 回繰り返した。上記の岩石を 80℃で乾燥させ、試験に用いた。

##### b. 試験溶液の準備

上述のように収着試験のベースとなる溶液は塩化ナトリウム (NaCl) 溶液とした。NaCl 溶液を選定したのは扱いが容易であり、ナトリウムや塩化物イオンは地下水においても主要なイオンであることが多いためである。純水に適量の NaCl を溶解させ、0.01・0.05・0.1・0.5M の NaCl 溶液を調製した。溶液の pH を水酸化ナトリウムあるいは塩酸溶液で  $8.5 \pm 0.1$  に調整した。

また、ストック溶液として塩化ルビジウムあるいは塩化バリウムを純水に溶解した溶液を準備した。高濃度の塩化バリウム溶液は空気中の炭酸を吸収し、炭酸バリウムの沈殿が形成される可能性があるため、塩化バリウム溶液については試験の直前に調製した。

##### c. 岩石と溶液の接触

上記の a. で準備した岩石粉末 9.0g を 50mL の遠沈管に入れ、所定の NaCl 溶液を 45mL 添加した。遠沈管にフタをしたあと、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、 $8.5 \pm 0.1$  の範囲にないものはこ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 NaCl 濃度ごとに準備し、同様に pH を調整した。

#### d. 溶液へのルビジウムあるいはバリウムの添加

岩石と溶液が接触してから 1 週間後、ストック溶液を適量添加し、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。上記の濃度は現場トレーサー試験で添加するトレーサー濃度に等しい。Rb や Ba 添加直後に溶液の pH を再度調整したあと、遠沈管はシェイカーを用いて緩やかに振盪した。

また、使用した岩石から Rb や Ba が溶出する可能性を検討するため、岩石を入れない「岩石ブランク」試料についても準備した。しかし、試験期間中に岩石から溶出した Rb や Ba の濃度は添加した濃度に比べてごくわずかであった。このため、岩石から溶出する Rb や Ba については本試験には大きな影響がないと判断した。

#### e. サンプルング

ストック溶液の添加から 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、ろ液を捨てた。この操作は Rb や Ba がフィルタに吸着するのを防ぐために実施した。さらに上澄み 0.5mL を同じフィルタでろ過してろ液を確保し、ろ液のうち 100  $\mu$ L を 1%硝酸 9.9mL を予め添加した 15mL 遠沈管に入れた。

#### f. Rb・Ba 濃度の分析

Rb や Ba 濃度は ICP-MS (アジレントテクノロジー社、7500CE) を用い、検量線法によって定量した。

#### (2) 試験結果

Rb および Ba における経過時間と収着率の関係をそれぞれ図 3.2.1-1 および図 3.2.1-2 に示した。ここで収着率はある NaCl 濃度の溶液におけるブランクの平均濃度を 100%とした場合に、岩石と接触することで減少した Rb あるいは Ba の濃度を示したものである。

まず Ba における結果をみると、粉末によるバッチ試験では 24 時間以内程度で収着は見かけ上平衡に達している。イオン濃度に対する依存性は明瞭であり、イオン濃度 (NaCl) が高くなるほど収着率が低下している様子が観察され、0.5M NaCl ではほとんど有意な収着が観察されなかった。このため、Ba の花崗岩への収着は Na イオンによって阻害されることがわかる。

一方 Rb については、特に経過時間が長くなるにつれて、イオン濃度が高いほど収着率が高くなる現象が観察された。これは後述の柱状岩石においても確認されており、分析誤差や試験操作の誤りではない本質的な現象である可能性が高い。Rb においてこのような現象が観察されたメカニズムについては現在までに得られている結果からは推定が困難であり、さらなる検討が必要である。

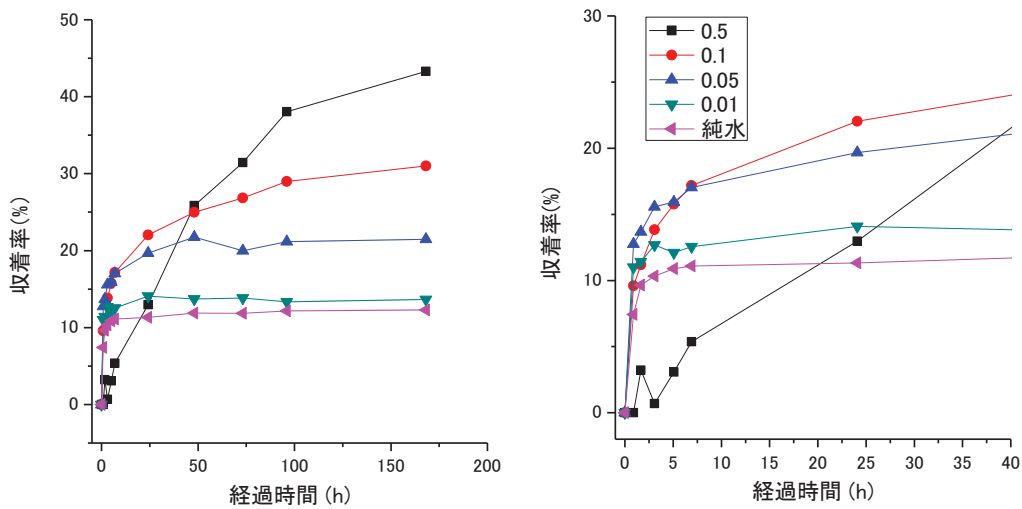


図 3.2.1-1 岩石粉末に対する Rb 吸着率の経時変化

レジェンドはバックグラウンド溶液の NaCl 濃度 (単位 mol/L) を示している。左図は 200 時間以内での経時変化、右図は 50 時間以内での経時変化を拡大して示した。

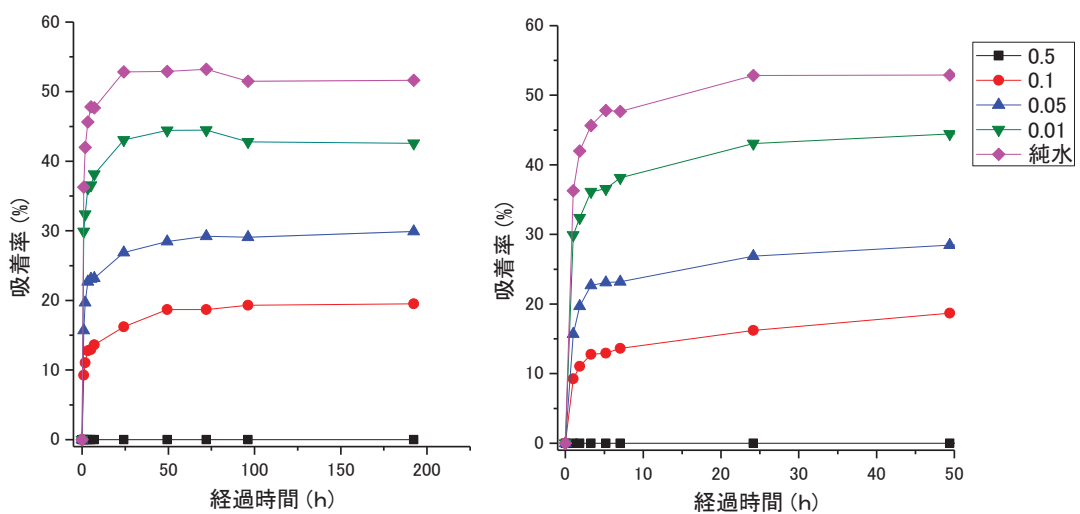


図 3.2.1-2 岩石粉末に対する Rb 吸着率の経時変化

レジェンドはバックグラウンド溶液の NaCl 濃度 (単位 mol/L) を示している。左図は 200 時間以内での経時変化、右図は 50 時間以内での経時変化を拡大して示した。

粉体のバッチ試験で得られた分配係数は 168 時間経過後の値で、Rb において 0.5M → 3.8ml/g、0.1M → 2.2ml/g、0.05M → 1.4ml/g、0.01M → 0.64ml/g である。Ba においては 0.5M → 0.0ml/g、0.1M → 1.2ml/g、0.05M → 2.2ml/g、0.01M → 4.0ml/g である。



### 3.2.2 柱状岩石のバッチ試験

#### (1) 試験方法

柱状のバッチ試験は、以下の手順で実施した。

##### a. 岩石試料の準備

昨年度実施したボーリングのコア (15MI52) の健岩部を 2m 程度取得し、これを  $\phi$  15mm、高さ 70mm に整形した。削りくず等が付着している可能性がある表面を純水で洗浄した後、純水中で真空脱気することで岩石を水で飽和させた。

##### b. 試験溶液の準備

3.2.1 の粉体バッチ試験と同様に、収着試験のベースとなる溶液は塩化ナトリウム (NaCl) 溶液とした純水に適量の NaCl を溶解させ、0.01・0.05・0.1・0.5M の NaCl 溶液を調製した。溶液の pH を水酸化ナトリウムあるいは塩酸溶液で  $8.5 \pm 0.1$  に調整した。

この試験でも粉体での試験と同様に Rb や Ba のストック溶液を準備した。

##### c. 岩石と溶液の接触

上記の a) で準備した岩石柱の重量は約 24g である。これを 50mL の遠沈管に入れ、所定の NaCl 溶液を 45mL 添加した。遠沈管にフタをしたあと、ハンドシェイク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、 $8.5 \pm 0.1$  の範囲にないものはこ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 NaCl 濃度ごとに準備し、同様に pH を調整した。

##### d. 溶液へのルビジウムあるいはバリウムの添加

岩石と溶液が接触してから 1 週間後、ストック溶液を適量添加し、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。上記の濃度は現場トレーサー試験で添加するトレーサー濃度に等しい。Rb や Ba 添加直後に溶液の pH を再度調整したあと、ハンドシェイクで緩やかに振盪した。

また、使用した岩石から Rb や Ba が溶出する可能性を検討するため、岩石を入れない「岩石ブランク」試料についても準備した。しかし、試験期間中に岩石から溶出した Rb や Ba の濃度は添加した濃度に比べてごくわずかであった。このため、岩石から溶出する Rb や Ba については本試験には大きな影響がないと判断した。

##### e. サンプルング

ストック溶液の添加から 1・2・3・4・5 日、1・2・3・4・5・6・7・8 週間後、以下の手順で上澄み液のサンプルを採取した。上澄み 0.1mL をフィルタ径 13mm のコマ型フィルタに通し、ろ液を捨てた。この操作は Rb や Ba がフィルタに吸着するのを防ぐために実施した。さらに上澄み 0.1mL を同じフィルタでろ過してろ液を確保し、ろ液のうち 50  $\mu$ L を 1%硝酸 4.95mL を予め添加した 15mL

遠沈管に入れた。

f. Rb・Ba 濃度の分析

Rb や Ba 濃度は ICP-MS（アジレントテクノロジー社、7500CE）を用い、検量線法によって定量した。

(2) 試験結果

Rb および Ba における経過時間と収着率の関係をそれぞれおよびに示した。ここで収着率はある NaCl 濃度の溶液におけるブランクの平均濃度を 100%とした場合に、岩石と接触することで減少した Rb あるいは Ba の濃度を示したものである。

ここでも、Ba はイオン濃度が高くなるほど収着率が落ちる傾向を示した。2mm 以下の粉体では約 24 時間で見かけの収着量は平衡に達したが、柱状岩石においては収着が平衡に達するのに約 40 日程度の時間を要した。例えば 0.1M NaCl 溶液をバックグラウンド溶液とした場合で、分配係数を比較すると、粉体の分配係数が最終的に 1.2ml/g 程度に達したのに対して、岩石柱における分配係数は約 60 日経過後でも 0.37ml/g 程度であった。このように、全ての条件において Ba の分配係数は粉体の試験で得られた結果の方が大きくなった。これは、粉砕によって岩石の単位重量あたりの収着量が大きくなったためであると考えられる。

一方 Rb については、特に経過時間が長くなるにつれて、イオン濃度が高いほど収着率が高くなる現象が観察され、粉末における試験の結果が再現した形となった。この原因については、今後の試験結果を踏まえて議論していく予定である。

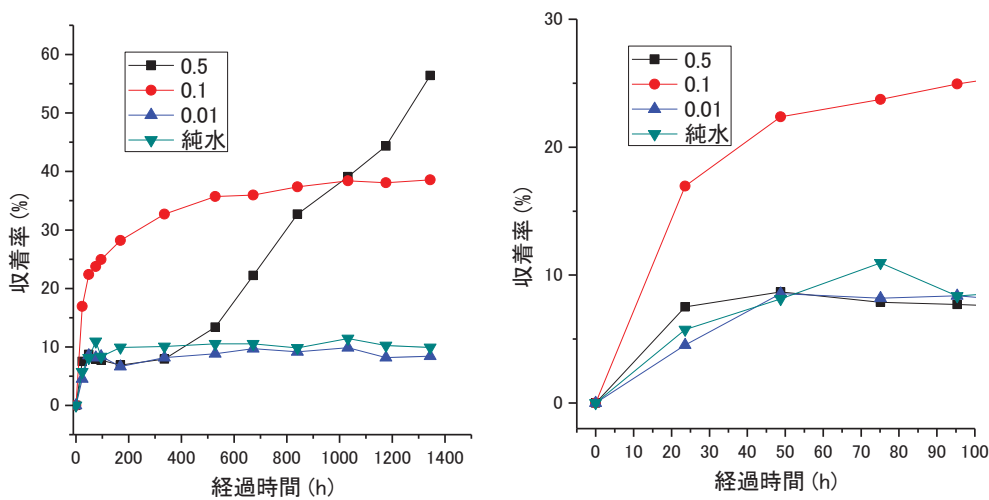


図 3.2.2-1 柱状岩石に対する Rb 収着率の経時変化

レジェンドはバックグラウンド溶液の NaCl 濃度（単位 mol/L）を示している。左図は 1400 時間以内での経時変化、右図は 100 時間以内での経時変化を拡大して示した。

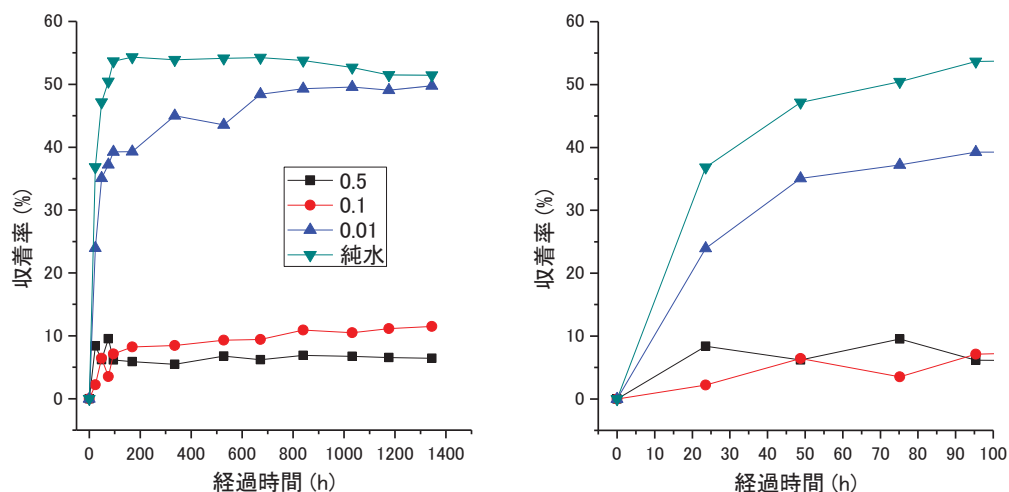


図 3.2.2-2 柱状岩石に対する Ba 吸着率の経時変化

レジェンドはバックグラウンド溶液の NaCl 濃度 (単位 mol/L) を示している。左図は 1400 時間以内での経時変化、右図は 100 時間以内での経時変化を拡大して示した。

バックグラウンド溶液が 0.1M NaCl の場合における Ba の分配係数の経時変化を図 3.2.2-3 にしめた。図からわかるように、分配係数で比較すると粉末が 24 から 48 時間で平衡に達するのに対して、柱状岩石は見かけ上分配係数が平衡に達するのに約 1000 時間程度がかかっている。柱状岩石においてみられる遅い吸着成分がマトリクス拡散等が寄与していると考え、短い試験時間しか確保できない場合の現場試験で得られた分配係数や遅延係数は岩石表面への吸着を主に評価しており、マトリクス拡散等吸収の影響はほとんど評価できていない可能性がある。逆に試験時間を長く取ることができた場合には、試験結果が岩石表面への吸着とマトリクス拡散などの吸収の両方の効果を含んでいることを認識する必要がある。

また、種々の核種への分配係数は粉体の岩石に対するバッチ試験で得られたものが多く、実際の安全評価でもこれらの値が用いられる可能性が高い。しかし、今回の試験結果から、粉体のバッチ試験で得られた分配係数では、必ずしも現場における分配係数を再現できていない可能性があることが示されている。このため、室内試験で得られた分配係数の拡張性については、慎重に吟味される必要がある。

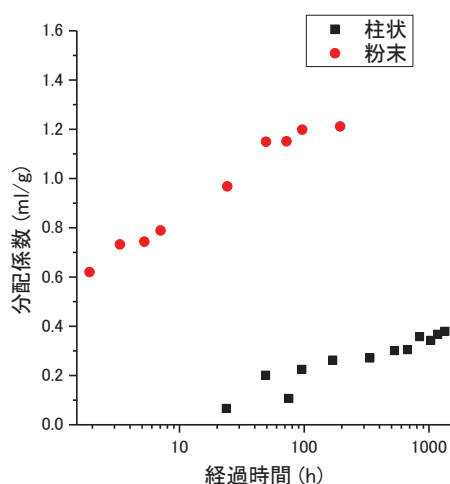


図 3.2.2-3 Ba における分配係数の経時変化（粉末状と柱状岩石の比較）

### 3.2.3 粉末岩石のカラム試験

#### (1) 試験方法

粉末状にした岩石を用いて、カラム試験を実施した。これはバッチ試験と異なり、溶液の流れがある環境での分配係数を取得し、バッチ試験や現場試験で得られた分配係数と比較するためである。

#### a. 岩石試料の準備

3.2.1 に示した岩石粉末を用いて試験を実施した。

#### b. カラムの準備

岩石カラムはアクリル製で内径が 1cm、高さが 30cm のものを用いた。このカラムに岩石粉末を充填し、0.5M NaCl 溶液を十分にカラムに流して洗浄した後、さらに試験を実施するバックグラウンド溶液を十分量（300mL 以上程度）流した後、試験を実施した。

#### c. トレーサー溶液の添加

トレーサー溶液として、Rb を 2.0mg/L、Ba1.0mg/L（それぞれ塩化物を純水に溶解してストック溶液を調製した）、ナフチオン酸ナトリウム(以下 NAP と記述)1.0mg/L、重水 10 $\mu$ L/100mL を含む溶液を調製した。溶液を調製する際のバックグラウンド溶液として、試験につかう NaCl 溶液を用いた（例えば 0.1M NaCl 溶液で試験を実施する場合には、0.1M NaCl 溶液に Rb や Ba のストック溶液を添加した）。

添加するトレーサー溶液の量が 10mL になるように、時間を調整してトレーサー溶液を添加した。例えば流速 1.0mL/min で試験をした場合には、10 分間トレーサー溶液を流した。このとき添加した溶液量を正確に把握するため、溶液添加前後の試料重量を測定し、重量差からカラムに入れた

液量を評価した。

d. フラクションコレクタでの採取

カラムにトレーサー溶液を入れ、次に NaCl 溶液を添加するタイミングでフラクションコレクタを動作させ、カラムから流出する溶液を 2~8mL ずつ採取した。試験時間が長くなる場合には、溶液の蒸発による変質を防ぐため、適宜サンプルを回収してフタをした。

e. 分析

NAP 濃度は、蛍光分光光度計（日本分光 FP-8300）を用いて分析した。一般に蛍光染料は溶液の pH によって蛍光強度が異なるため、サンプルをホウ砂水溶液で希釈して、溶液の pH を 9 付近に緩衝してから分析に供した（柏谷ら、2010）。

$\delta D$  については、水蒸気化したサンプルをレーザーで分光して測定する装置（IWA-45EP: Los Gatos Research）を用いて分析した。10  $\mu$ L/100mL の割合で純水（NaCl 溶液やトレーサー溶液を調製するために用いた純水と同じもの）に添加した試料の値を 100%とし、これを純水で希釈して 1~50%としたもので検量線を作製し、検量線の値とサンプルの  $\delta D$  値を比較してトレーサー溶液の混入割合を評価した。

Rb や Ba 濃度は 1.1%硝酸で希釈した溶液を分析に用いた。ICP-MS（アジレントテクノロジー社、7500CE）を用い、検量線法によって定量した。

(2) 試験結果

a. イオン濃度に対する依存性

流速 1.0mL/min、バックグラウンド溶液を 0.01M・0.1M・0.5M で実施した試験における破過曲線をそれぞれ図 3.2.3-1、図 3.2.3-2、図 3.2.3-3 に示した。

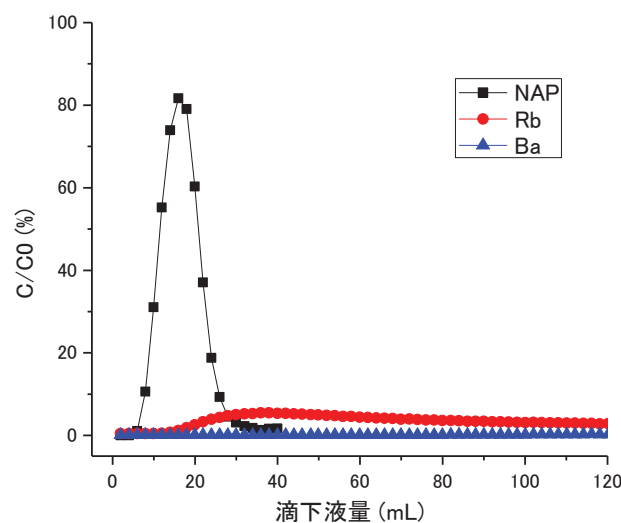


図 3.2.3-1 流速 1.0mL/min、バックグラウンド溶液 0.01M NaCl の条件で実施した岩石粉末カラム試験における破過曲線

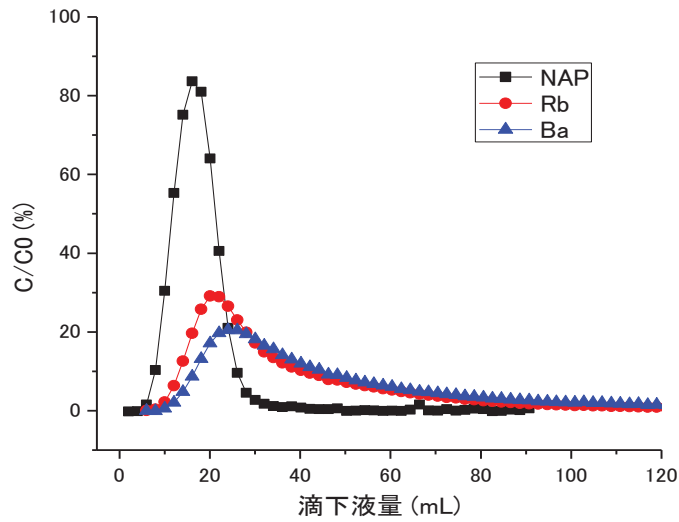


図 3.2.3-2 流速 1.0mL/min、バックグラウンド溶液 0.1M NaCl の条件で実施した岩石粉末カラム試験における破過曲

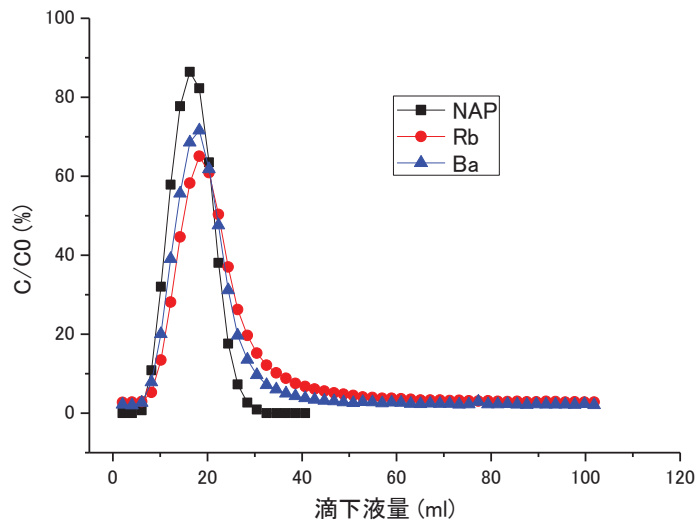


図 3.2.3-3 流速 1.0mL/min、バックグラウンド溶液 0.5M NaCl の条件で実施した岩石粉末カラム試験における破過曲線

バックグラウンド溶液が 0.5M NaCl の場合、Rb や Ba のピークは NAP のピークと比較してわずかに遅れがなく、ほとんど遅延されずに流出していることがわかる。これに対して、0.1M NaCl 溶液では、ピーク高さが明らかに低くなり、0.5M NaCl の場合と比べてより遅延されていることがわかる。遅延効果はいずれの場合も Ba が Rb より高く、カラム試験においては Ba の方が、遅延係数

が高いことが分かる。さらに、バックグラウンド溶液を 0.01M NaCl 溶液にすると、蛍光染料と同じスケールではピークが明瞭でなくなるほどまでピーク高さが低下し、0.1M の場合よりもさらに大きく遅延されていることがわかる。0.01M NaCl をバックグラウンド溶液とした場合の Rb・Ba 濃度を拡大して示したものを示した。図から分かるように、Rb についてはピーク高さは低下しているものの、ピークが発現している箇所は明確である。一方で、Ba についてはカラムへの滴下液量が 400mL になっても Ba 濃度は上昇を続けており 400mL 以上の滴下液量でピークが発現する可能性があると考えられる。

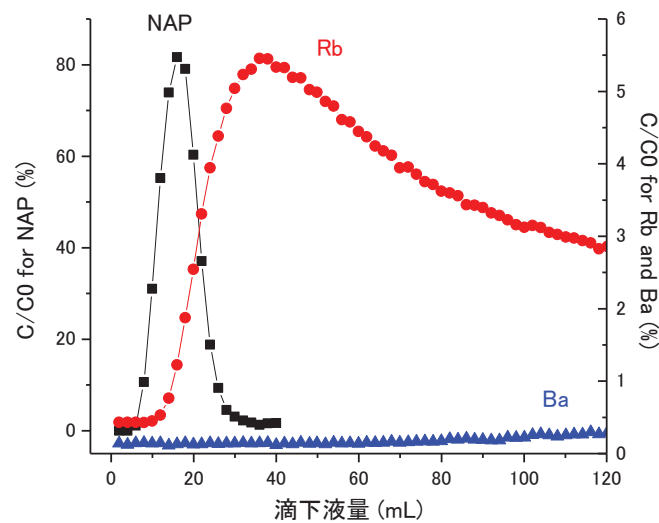


図 3.2.3-4 流速 1.0mL/min、バックグラウンド溶液 0.01M NaCl の条件で実施した岩石粉末カラム試験における破過曲線 (Rb・Ba を拡大したもの)

Ba については、NaCl 濃度が低下するほど岩石に遅延される効果が顕著に大きくなることがわかる。バッチ試験でもイオン濃度が低下するほど高い分配係数を示したことから、この結果はバッチ試験の結果と整合性があると言える。0.01M NaCl をバックグラウンドとした試験の結果において、NAP のピーク位置と Ba のピーク位置 (400mL 以上) から遅延係数・分配係数を算出した結果、それぞれ遅延係数は 24.3 以上、分配係数で 6.29mL/g 以上という計算結果が得られた。これは粉体のバッチ試験で得られた値 (4.0mL/g) よりもやや大きな値である。0.1M NaCl をバックグラウンド溶液としたときの分配係数値を比較すると、バッチ式が 1.2mL/g に対してカラム式は 0.15mL/g 程度であり、大きさの関係は 0.01M NaCl と 0.1M NaCl の場合とで異なっていた。通常カラム式の試験の場合、水の流れを作ることによって溶液に十分接することができない箇所が生じるためバッチ式よりも値が低く評価されることが多い。このため、0.01M NaCl の結果において、カラム式の方が大

きな分配係数を示したことは、想定外の結果である。試験結果の再現性を確認するとともに、この原因については将来の検討課題と考えている。

一方、Rb についてもイオン濃度の低下に伴ってピークが NAP のピークに対して遅延していることから、イオン濃度が低いほど遅延効果が大きいと言える。これはバッチ式の収着試験とは異なる結果となった。バッチ式の収着試験では収着とは異なる現象で Rb イオン濃度が低下した可能性もあり、さらに検討が必要である。Rb については、バッチ式収着試験の方が大きな分配係数を示したが、上記のバリウムの結果のように、処分場候補地において高い分配係数や遅延係数が得られているのは望ましい結果であるといえる。しかし、トレーサー試験の実施をしたことを考えると、試験時間は長くなり、ピークも強度の低いものしか得られなくなる、ということの意味する。さらに現場試験では回収孔で地下水を引き上げるため、周辺の地下水で希釈をされてさらにピーク強度が低下する可能性がある。このため、現場でのトレーサー試験は分配係数や遅延係数の値をある程度正確に予想し、濃度や分析方法（定量下限）を含めて入念な検討が必要であると言える。

#### b. 流速に対する依存性

0.1M NaCl をバックグラント溶液として、流速 1.0mL/min、および 0.1mL/min で実施したカラム試験の結果を図 3.2.3-5 および図 3.2.3-6 で比較した。

Rb・Ba 共に流速 1.0mL/min の場合には、NAP からピークの遅れはあまりないものの、流速 0.1mL/min では明確な時間遅れが生じ、ピーク高さも顕著に減少している。このことから、流速はカラム試験における分配係数・遅延係数に大きな影響を与えることがわかる。

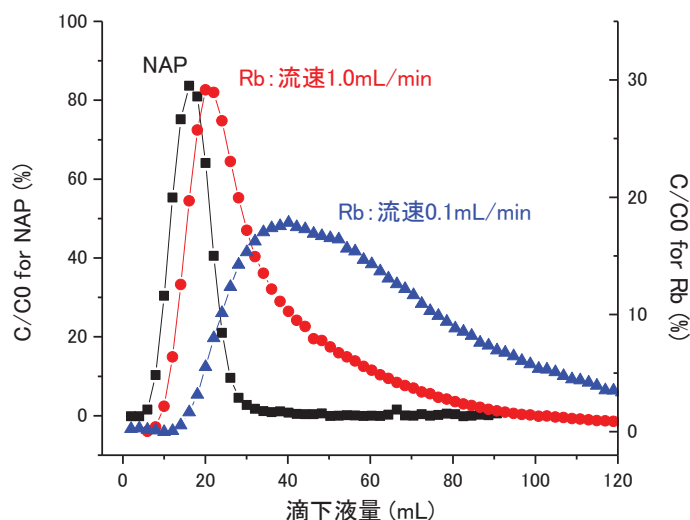


図 3.2.3-5 岩石粉末カラム試験における流速依存性 (Rb)



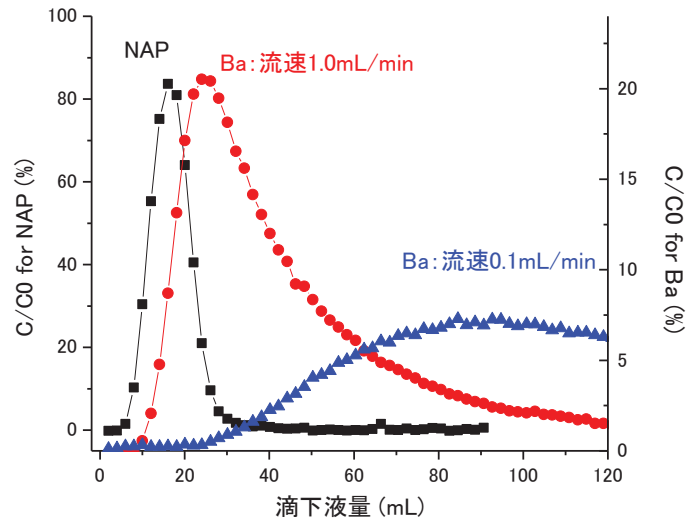


図 3.2.3-6 岩石粉末カラム試験における流速依存性 (Ba)

カラム試験における非吸着性トレーサのピーク位置・高さと同着性トレーサのピーク位置・高さの関係から、吸着性トレーサの遅延係数を以下のように計算することが可能である。

一次元のパルスインプットの理論式は、以下の式で表すことができる。

$$C(x,t) = \frac{M}{n\sqrt{4\pi DtR}} \exp\left(-\frac{(x-vt/R)^2}{4Dt/R}\right)$$

ここで  $M$  は瞬間的に投入された濃度量、 $\phi$  は水の体積率(飽和時には間隙率)、 $\pi$  は円周率、 $D$  は分散係数、 $t$  は時間、 $R$  は遅延係数、 $v$  は地下水の実流速である。

遅延がない場合 ( $R=1$ )、 $x=a$  地点での観測する場合の濃度変化は、以下の式で表すことができる。

$$C(a,t) = \frac{M}{n\sqrt{4\pi Dt}} \exp\left(-\frac{(a-vt)^2}{4Dt}\right)$$

$t=a/v$  で濃度はピークとなり、そのときのピーク高さは以下のようなになる、

$$C\left(a, \frac{a}{v}\right) = \frac{M}{n\sqrt{4\pi D \frac{a}{v}}}$$

遅延係数が  $R=r$  の場合、 $x=a$  地点での観測する場合の濃度変化は、以下の式で表すことができる、

$$C(a,t) = \frac{M}{n\sqrt{4\pi Dtr}} \exp\left(-\frac{(a-vt/r)^2}{4Dt/r}\right)$$

$t=ar/v$  でピーク濃度となり、ピーク高さは以下の式で表現できる、

$$C(a, ar/v) = \frac{M}{n\sqrt{4\pi D(ar/v)r}} = \frac{M}{nr\sqrt{4\pi D a/v}}$$

遅延係数が  $R=r$  の場合、遅延がない ( $R=1$ ) 物質と比べて、ピーク時間が  $r$  倍、ピーク濃度は  $1/r$  となる。つまり、非収着性トレーサーと収着性トレーサーのピーク位置の比、あるいはピーク高さの比から遅延係数を算出することが可能である。

上述の式に従って、Ba についての遅延係数・分配係数を以下で算出する。

まずピーク位置に着目すると、NAP は滴下流量 16.1mL のところにピークがあるのに対して、Ba は流速 1.0mL/min の場合で 24.1mL に、流速 0.1mL/min の場合で 99.4mL のところにピークがある。カラムのデッドボリュームが約 5.0mL であり、ポンプが常に一定流量で作動していたことを考えると、ピーク時間の比率は、流速 1.0mL/min の場合で  $(24.1-5.0)/(16.1-5.0)=1.72$ 、流速 0.1mL/min の場合で  $(99.4-5.0)/(16.1-5.0)=7.18$  となる。このため、遅延係数は流速 1.0mL/min と 0.1mL/min の場合でそれぞれ 1.72 および 7.18 となる。ここから分配係数を算出すると流速 1.0mL/min と 0.1mL/min の場合で、0.19 mL/g および 1.70 mL/g になる。このように流速が 1.0mL/min と 0.1mL/min の場合とで、遅延係数が約 4.2 倍、分配係数が約 8.7 倍異なることがわかった。

上述のカラム試験で得られた分配係数をバッチ試験の結果と比較したものを図 3.2.3-7 に示した。流速 1.0mL で試験をした場合 Ba のピークが流出するのは 24mL のところであり、ピークがほぼ終了する ( $C/C_0$  にして 3% を切る) のは 85mL のところである。このため、Ba のカラムへの滞在時間は 0.5~2 時間程度と考えることができる。一方、流速 0.1mL/min の場合には、85mL 程度でピークトップがあり、その後 140~150mL でピークが終了すると予測される。このため、カラム内での Ba の滞在時間は 14-24 時間程度であると推察することができる。図では、それぞれの時間帯にカラム試験で得られた分配係数を示している。図からわかるように、流速 0.1mL/min で得られた分配係数はバッチ試験のものと近いのに対し、流速 1.0mL/min で得られた分配係数はバッチ試験のものと比較して顕著に低い値を示すことがわかる。これは、流速が増加すると岩石カラムの中の水が通りやすい箇所を優先して水が通るため、岩石の一部のみしか収着に関与しないためであると推察される。流速を遅くしていくとカラムとバッチの差異は少なくなり、カラムの結果はバッチである程度予測が可能になると考えられる。

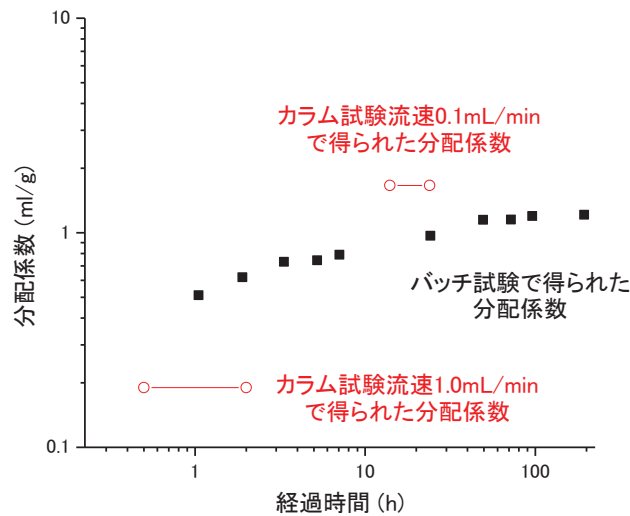


図 3.2.3-7 バッチ試験とカラム試験の分配係数比較

このように、流速は核種の分配係数や遅延係数の値に大きな影響を与えるため、流速が速いほど核種の分配係数を過小評価している可能性が高いと言える。このため、現場トレーサー試験において処分の安全評価に用いるような分配係数の取得を目指す場合には、出来る限り遅い（実流速に近い）流速で試験をすることが必要と考えられる。しかし、前述のように流速を遅くすると、バックグラウンド流れ等の影響が大きくなり、トレーサーが全く回収できなくなる可能性も出てくる。上述のように、試験条件の対応性を検討することで、バッチ試験やその他の室内試験により十分に流速が遅い場合の分配係数を推察することが可能であるかもしれない。このため、現場にて流速依存性を調べたり、対応する条件で室内試験からデータを補完することで、現場試験のデータを基にして安全評価に対して信頼性の高い分配係数を示すことができる可能性があると考えられる。

### 3.2.4 柱状岩石のカラム試験

#### (1) 試験方法

瑞浪地域の岩石をφ15mm 高さ70mmの柱状にしたものを用いてカラム試験を実施した。溶液の流れがある中で岩石が柱状になった場合、粉末状のサンプルと比べて破過曲線や分配係数がどのように変化するかに着目して試験を実施した。試験手順を以下に示す。

#### a. 岩石試料の準備

3.2.1に示した柱状岩石試料を試験に用いた。岩石は整形後表面を純水で3回程度洗浄した後、さらに乾燥させた。これを真空脱気した状態で純水に浸漬し、岩石の空隙に水を充填した。

#### b. カラムの準備

上記の岩石カラムを封入できるアクリル製のカラムを作製した。カラムは 1mm のスペーサーを備えており（図 3.2.4-1）、岩石をカラムに封入することで岩石表面とアクリル板の間に 1mm の模擬的な割れ目を作製することができる。このカラムを 10 本連結して模擬的に長さ 70cm、割れ目幅（岩石とアクリル板の間の幅）1mm の模擬的な割れ目を構築した。カラムの上流側にはポンプを、下流側にはフラクションコレクタを接続した。（図 3.2.4-2）。組み立てたカラムに対して、0.5M NaCl 溶液を十分に流して洗浄した後、さらに試験を実施するバックグラウンド溶液を十分量（300mL 以上程度）流して、試験を実施した。

#### c. トレーサー溶液の添加

トレーサー溶液として、Rb を 2.0mg/L、Ba 1.0mg/L（それぞれ塩化物を純水に溶解してストック溶液を調製した）、ナフチオン酸ナトリウム（以下 NAP と記述）1.0mg/L、重水  $10\mu\text{L}/100\text{mL}$  を含む溶液を調製した。溶液を調製する際のバックグラウンド溶液として、試験につかう NaCl 溶液を用いた（例えば 0.1M NaCl 溶液で試験を実施する場合には、0.1M NaCl 溶液に Rb や Ba のストック溶液を添加した）。

添加するトレーサー溶液の量が 10mL になるように、時間を調整してトレーサー溶液を添加した。例えば流速  $1.0\text{mL}/\text{min}$  で試験をした場合には、10 分間トレーサー溶液を流した。このとき添加した溶液量を正確に把握するため、溶液添加前後の試料重量を測定し、重量差からカラムに入れた液量を評価した。

#### d. フラクションコレクタでの採取

カラムにトレーサー溶液を入れ、次に NaCl 溶液を添加するタイミングでフラクションコレクタを動作させ、カラムから流出する溶液を 2mL ずつ採取した。

#### e. 分析

NAP 濃度は、蛍光分光光度計（日本分光 FP-8300）を用いて分析した。一般に蛍光染料は溶液の pH によって蛍光強度が異なるため、サンプルをホウ砂水溶液で希釈して、溶液の pH を 9 付近に緩衝してから分析に供した（柏谷ら、2010）。

$\delta D$  については、水蒸気化したサンプルをレーザーで分光して測定する装置（IWA-45EP: Los Gatos Research）を用いて分析した。 $10\mu\text{L}/100\text{mL}$  の割合で純水（NaCl 溶液やトレーサー溶液を調製するために用いた純水と同じもの）に添加した試料の値を 100%とし、これを純水で希釈して 1~50%としたもので検量線を作製し、検量線の値とサンプルの  $\delta D$  値を比較してトレーサー溶液の混入割合を評価した。

Rb や Ba 濃度は 1.1%硝酸で希釈した溶液を分析に用いた。ICP-MS（アジレントテクノロジー社、7500CE）を用い、検量線法によって定量した。

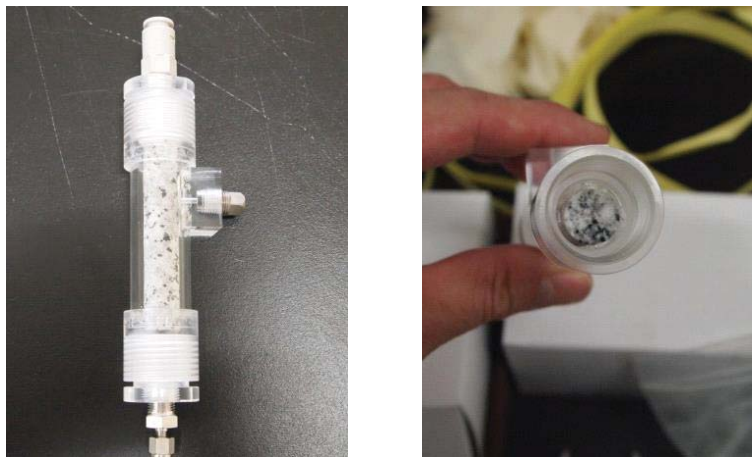


図 3.2.4-1 模擬トレーサー試験に用いた柱状岩石充填カラム

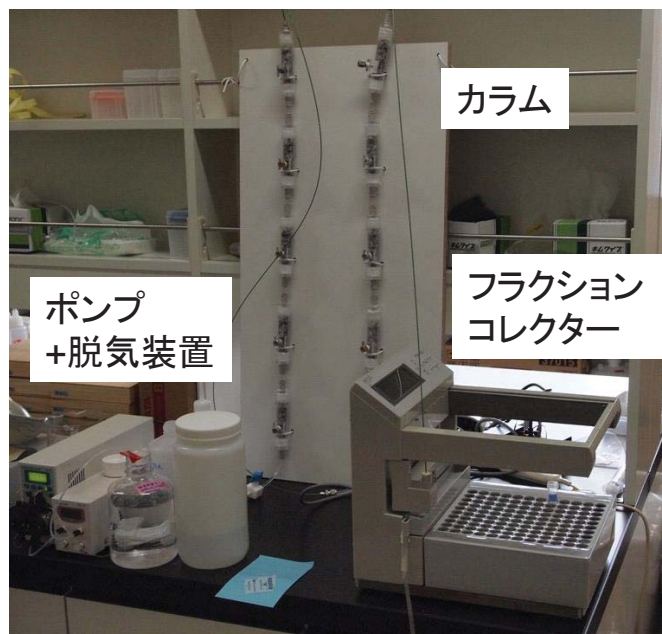


図 3.2.4-2 柱状岩石カラムを用いた模擬トレーサー試験の試験系

## (2) 試験結果

流速 1.0mL/min、バックグラウンドの溶液を 0.01M、0.1M、0.5M の塩化ナトリウムとした場合の破過曲線をそれぞれ、図 3.2.4-3、図 3.2.4-4、図 3.2.4-5 に示した。図を見ると、バックグラウンド溶液の濃度が薄くなるに従って Rb および Ba のピーク高さの減少が顕著であり、ピーク高さには顕著にイオン濃度の影響が現れている。一方でピーク位置を見ると、0.01M 塩化ナトリウムがバックグラウンド溶液の場合であっても、NAP とのピーク位置がほとんど変わらないことがわかる。0.01M 塩化ナトリウムがバックグラウンド溶液の場合、ピーク高さで算出した遅延係数は Rb の場合で 5.1、Ba の場合で 18.2 で

ある。ここから算出した分配係数は Rb、Ba でそれぞれ 0.37 (mL/g) および 1.6 (mL/g) となる。これに対してピーク遅れで算出した遅延係数は Rb、Ba でそれぞれ 1.1 および 1.1 となり、分配係数はそれぞれ 0.01 (mL/g)、0.01 (mL/g) となる。このように遅延係数や分配係数はピーク高さで算出するか、ピーク遅れで算出するかによって大きな差異が生じることがわかる。

上述のように理論式では、ピーク高さとピーク遅れは遅延係数によって決まるため、理想的な場であればピーク高さとピーク遅れで算出された遅延係数は一致するはずである。特に柱状試験のときに両者の分配係数が大きくなることから、ピーク高さと遅れで算出した遅延係数が一致しない理由については、以下のように推察することが可能である。上述の理論式は模擬割れ目内を溶液が流れるとき、岩石と水とで一定の分配係数で着目するイオン (Rb や Ba) が分配しながら進むと仮定している。つまり模擬割れ目の微小区間を考えると、そこで岩石水間で分配係数によってイオンが完全に分配されてから次の微小区間に進むとしている。しかし、流速が大きくなると上記のようにイオンの分配が完全に終わらないうちに次の区間に溶液が進んでしまうことになる。特に柱状岩石では、模擬割れ目の大きさが 1mm と大きいと、この効果が大きくなる可能性がある。

柱状岩石のバッチ試験で得られた分配係数 (バックグラウンド溶液 0.01M 塩化ナトリウム) は、溶液と岩石の接触時間 24 時間では Rb で 0.14 (mL/g)、Ba で 0.92 (mL/g)、48 時間では Rb で 0.24 (mL/g)、Ba で 1.46 (mL/g) である。この値を上述のカラム試験から得られた分配係数と比較すると、ピーク高さで得られた分配係数がバッチ試験と同じ程度の値を示したのに対して、ピーク遅れで算出した分配係数は 1~2 桁程度低い値を示している。このため、現時点で得られている情報から考えると、ピーク高さがイオンの遅延を反映しているのに対して、ピーク遅れは上記で推察したような理由から、今回実験したような条件下ではピーク高さとピーク遅れで遅延係数が異なる現象は、粉末カラム・柱状カラム・1次元モデルの全てのケースで観察されており、現場試験でも同じ現象が生じている。このため、現場試験の解析においてピーク高さを合わせるようにパラメータを調整するのか、ピーク遅れが合うようにパラメータを最適化するのかによって、評価結果に差異が生じる可能性がある。室内試験のようにパラメータを変えて試験をしやすい状況でさらにデータを取得し、ピーク高さと遅れから評価した分配係数がどのような場合に近くなり、どのような場合に差が大きくなるのかを確かめることで、この理由をより明確にすることができると考えられる。カラム試験やトレーサー試験など流れを伴う全ての試験に関係のある話であり、重要な情報であると考えられる。

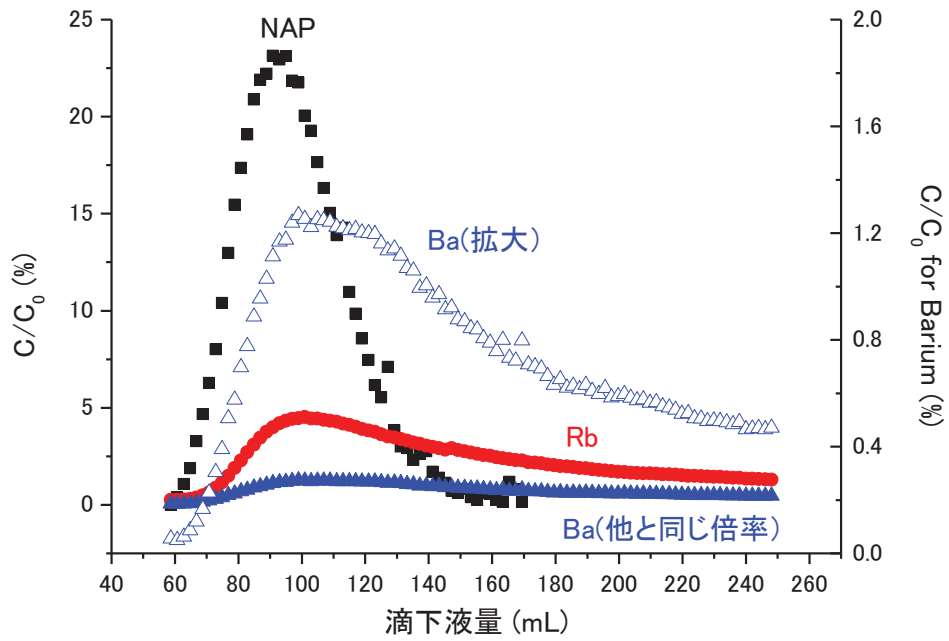


図 3.2.4-3 流速 1.0mL/min バックグラウンド溶液 0.01M NaCl で実施した柱状岩石のカラム試験

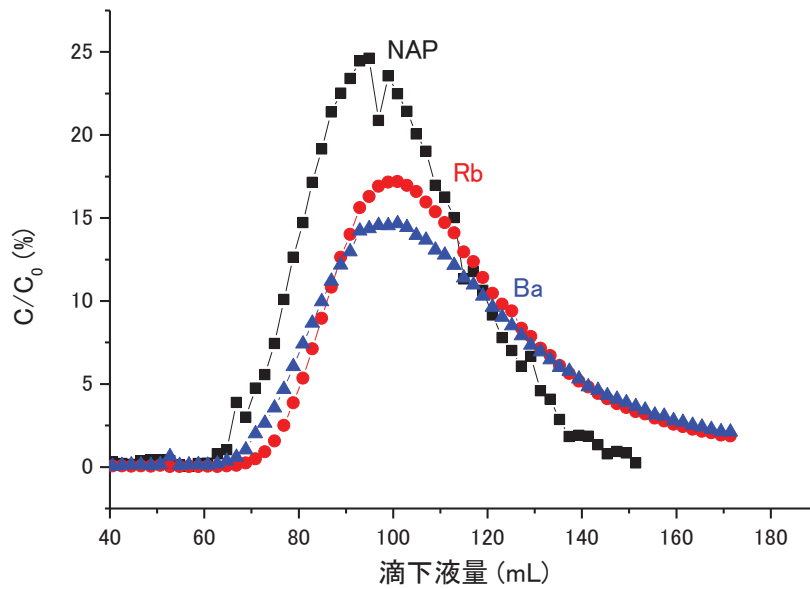


図 3.2.4-4 流速 1.0mL/min バックグラウンド溶液 0.1M NaCl で実施した柱状岩石のカラム試験

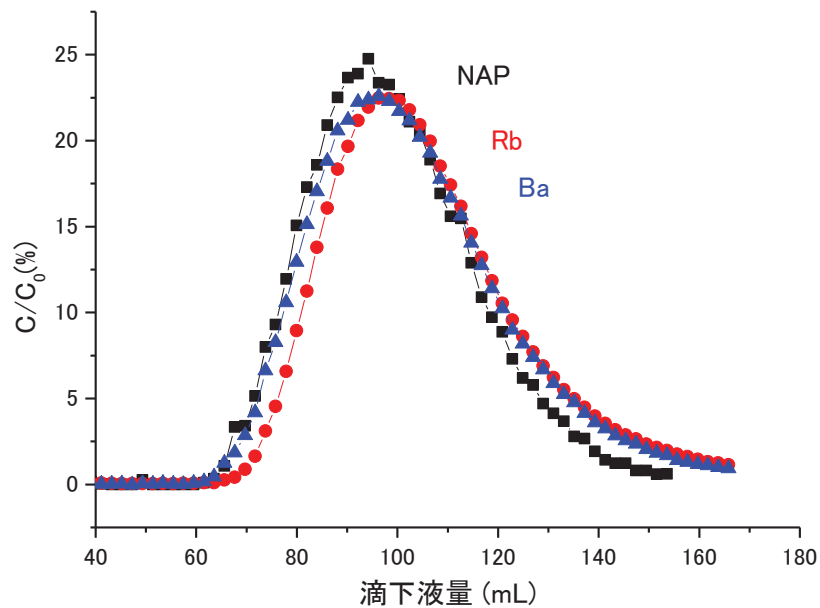


図 3.2.4-5 流速 1.0mL/min バックグラウンド溶液 0.5M NaCl で実施した柱状岩石のカラム試験

### 3.2.5 1次元岩石モデルを用いた模擬トレーサー試験

ここでは、現場試験に規模を近づけて試験を実施するために、棒状（100×100×1200 mm）の岩の一面にスペーサーとアクリル板を押しつけ、アクリル板面と岩石との間に模擬的な割れ目を構築し、この割れ目を使った試験を実施した。

#### (1) モデルの構築

100×100×1200 mm の棒状の花崗岩に、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た。試験に用いた花崗岩は瑞浪と同じ岐阜県の蛭川を産地としたものであり、土岐花崗岩と性質が近いと考えられる。試験に用いた面は 50×1000 mm の大きさであり、その面は鏡面仕上げを施した。棒状の岩石とアクリル板の間には、ステンレステープを置き、隙間を作ることにより割れ目を模擬した。なお、隙間からの流出を防ぐためにオーリングを周囲に設置するとともに、上端と下端に溝を作り、そこにポーラスストーンを設置することにより、流入出地点とした。岩石とアクリル板の固定には、万力を用いた。今回の試験では、スペーサーの距離を 0.5mm とした。このときのアクリル-岩石に挟まれる空間の体積は 25mL となる。一次元モデルの概念図と外観をそれぞれ、図 3.2.5-1、図 3.2.5-2 に示した。



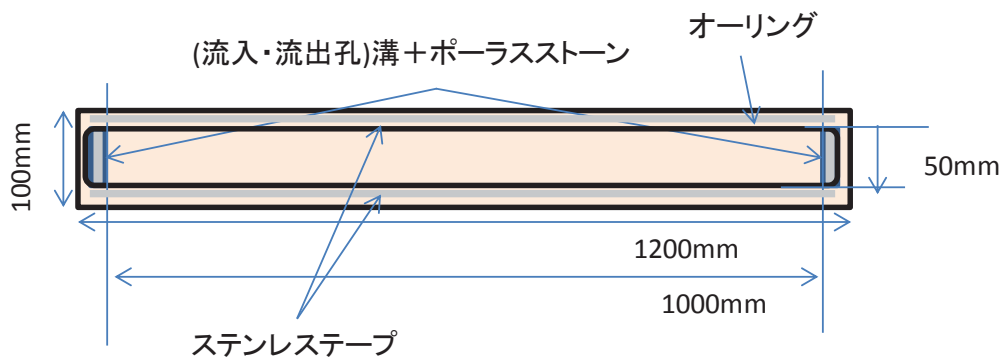


図 3.2.5-1 1次元モデルの概念図



図 3.2.5-2 1次元モデルの外観

## (2) 試験方法

上述のモデルを用いて、模擬的な孔間式トレーサー試験を実施した。試験の手順を以下に示す。

### a. 試験系のセットアップ

1次元モデルはその両端に溶液の出入り口が存在する。このため、片側から試験溶液を入れた後バックグラウンド溶液を流し、もう片側の出口からでてくる溶液を分析することで、模擬的な孔間式トレーサー試験を実施することができる。

溶液入れーポンプー1次元モデルーフラクションコレクタの順に接続し、この試験の試験系とした(図 3.2.5-3)

### b. 岩石のコンディショニング

岩石表面がある溶液と接触した場合には、岩石-溶液間の相互作用がおき、岩石表面に収着したイオンが溶液中のイオンと交換反応する。このような反応がある程度平衡になってから試験を開始するために、試験前には試験を実施するバックグラウンド溶液を1次元モデルに十分量流した。ポンプの流速を1.0mL/minとし、体積25mLの割れ目に対して、300mL以上の溶液を流してから試験を実施する流速にポンプ出力を調整した。

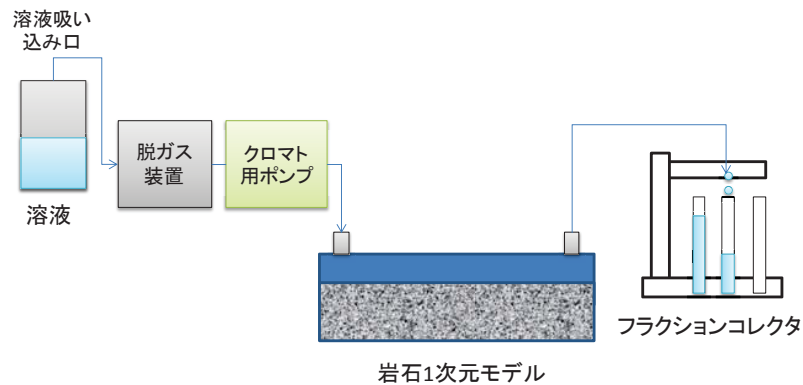


図 3.2.5-3 岩石 1 次元モデルを用いた孔間式トレーサー試験の試験系概念図

c. トレーサー溶液の準備

非収着性のトレーサーとして、ナフチオン酸ナトリウム (NAP) と重水を利用した。試験実施当所は後述の Rb や Ba 溶液を調製する際の塩として臭化物を用い、Br も非収着性のトレーサーとして利用することを計画していたが、バックグラウンドとした NaCl に含まれる不純物としての Br の影響が大きいことが分かり、Br は参考程度の利用とした。収着性のトレーサーとしては、Rb・Ba を用いた。

臭化ルビジウムや塩化バリウムを用いて Rb や Ba のストック溶液を調製した後、試験を実施するバックグラウンド溶液をベースとして、NAP : 1mg/L、重水 : 10  $\mu$  L/100mL、Rb : 2.0mg/L、Ba : 1.0mg/L となるように試験溶液を調製した。バリウムについては空気中の二酸化炭素と反応して沈殿する可能性も考えられたため、試験の直前にストック溶液を調製した。

d. 試験の開始

試験溶液をビーカーに入れ、ビーカーごと重量を測定した。ポンプの吸い込み口をバックグラウンド溶液から試験溶液に移し、試験溶液 10mL がモデルに入るよう、所定の時間溶液を吸わせた。その後吸い込み口の先端を純水で洗浄し、吸い込み口をバックグラウンド溶液に戻した。試験溶液を入れたビーカーは所定の時間前後で重量を測定し、重量の差から 1 次元モデルに入れた試験溶液の量を正確に把握した。

バックグラウンド溶液を吸わせると同時にフラクションコレクタを作動させ、所定の液量 (2~8mL) 毎に出口側から出てくる溶液を採取した。

e. 分析

NAP 分析用の試料については、ホウ砂水溶液で希釈したあと、蛍光分光光度計で分析を実施した。また、水素同位体比の分析においては、バックグラウンド溶液を調製した純水と重水を添加した試験液の混合率を変えた標準サンプルを準備した。レーザー分光法で、標準試料とトレーサー試験

で得られた試料の両方を分析し、値の比較でトレーサー試験液の混合率を評価した。

Rb・Baについては硝酸濃度が1%になるように硝酸溶液希釈して、ICP-MSで分析した。

(3) 試験結果

流速 1.0mL/min・バックグラウンド溶液 0.1M 塩化ナトリウムの場合、流速 1.0mL/min・バックグラウンド溶液 0.01M 塩化ナトリウムの場合、流速 0.1mL/min・バックグラウンド溶液 0.1M 塩化ナトリウムの場合の結果をそれぞれ、図 3.2.5-4、図 3.2.5-5、図 3.2.5-6 に示す。

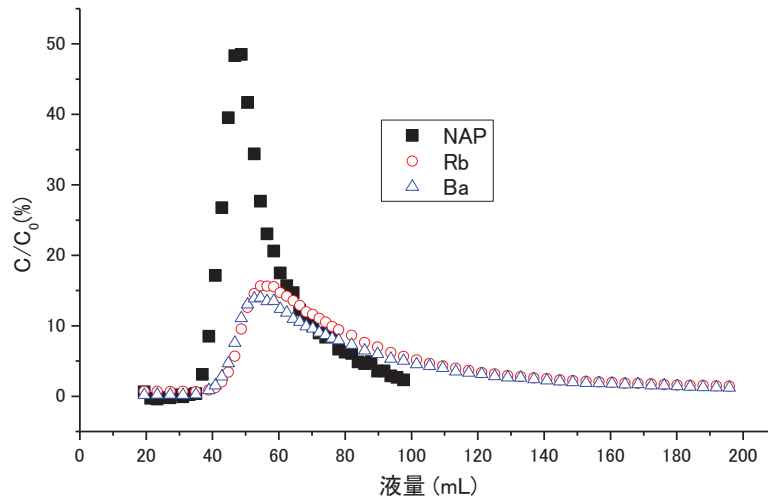


図 3.2.5-4 流速 1.0mL/min バックグラウンド溶液 0.1M NaCl で実施した 1次元モデルにおける模擬孔間式トレーサー試験の結果

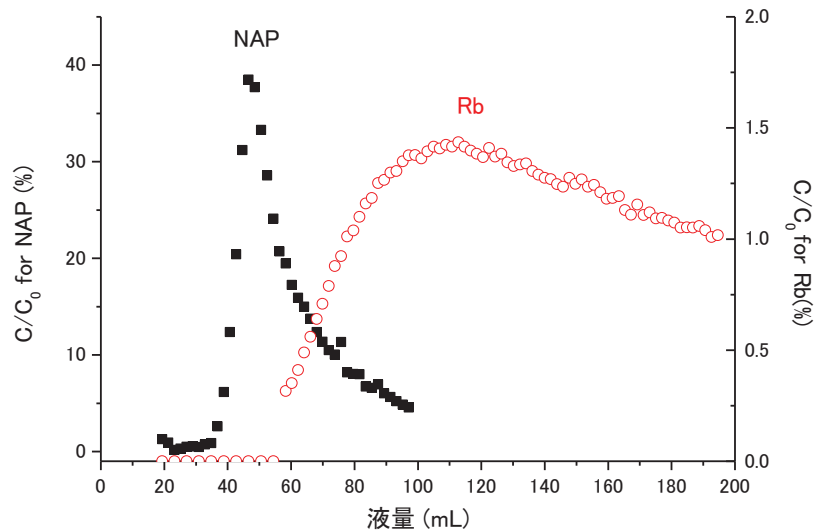


図 3.2.5-5 流速 1.0mL/min バックグラウンド溶液 0.01M NaCl で実施した 1次元モデルにおける模擬孔間式トレーサー試験の結果

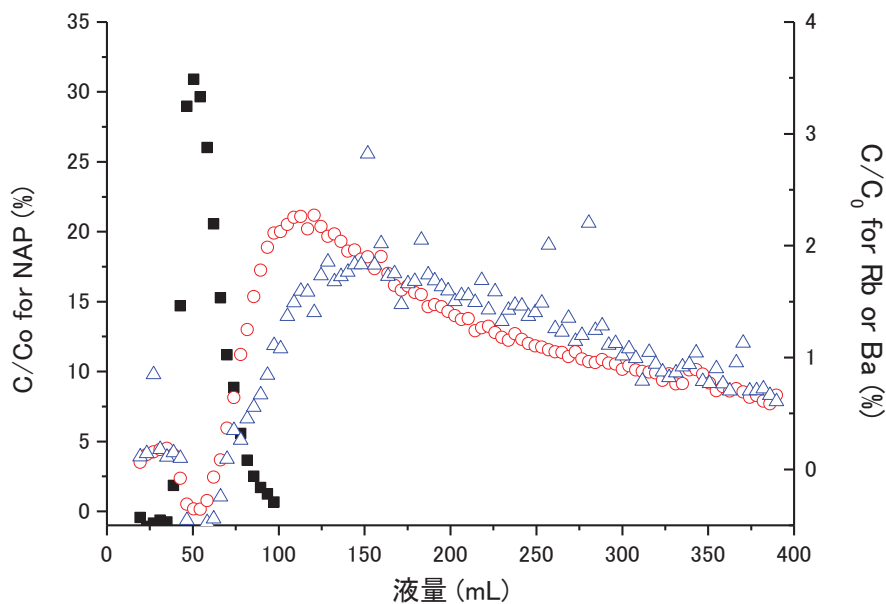


図 3.2.5-6 流速 0.1mL/min バックグラウンド溶液 0.1M NaCl で実施した 1 次元モデルにおける模擬孔間式トレーサー試験の結果

まず図 3.2.5-4 と図 3.2.5-5 との比較から、バックグラウンド溶液のイオン強度の影響について考える。バックグラウンド溶液の塩化ナトリウム濃度が 0.1M の場合と 0.01M の場合とでは、破過曲線に大きな差異があり、特に Ba については 200mL 内に有意なピークが観察されなかった。また、ピーク高さについては、イオン濃度 0.1M の場合が Rb のピーク 15.6%、Ba のピーク 14.0%であったのに対して、イオン濃度が 0.01M の場合 Rb のピークは 1.4%であり、ピーク高さで 10 倍程度の差が見られた。このように、より現場の試験に近いと考えられる 1 次元モデルを用いたトレーサー試験でも、イオン濃度は結果への影響が顕著であることが確認された。このため、トレーサー溶液を調製し、これを地下水に投入するときには極力イオン濃度を変えないように考慮する必要がある。水道水や純水、試験箇所以外の地点から持ってきた地下水等で溶液を調製すると、イオン濃度が変化する可能性があるため、試験を実施する地点の地下水を用いてトレーサー溶液の調製を実施する必要がある。地下水でトレーサー溶液を調製する場合には、共存するイオンの効果によって溶解度が制限される可能性があるため、事前の確認が必ず必要である。

イオン濃度を変えた場合の、Rb におけるピーク高さおよびピーク遅れから算出した遅延係数を表 3.2.5-1 で比較した。さらに表には、他のカラム試験等で得られた遅延係数を参考データとして掲載した。表から分かるように、1 次元モデルにおけるイオン強度の影響は最も大きく、0.01M の場合の遅延係数は 0.1M の場合と比較して 8.4 倍となった。

表 3.2.5-1 イオン強度による遅延係数の比較 (Rb)

試験方法	評価の基準	イオン濃度	遅延係数	0.01M/0.1M*
1次元モデル孔間式		0.1M	3.1	8.4
		0.01M	26.2	
カラム試験(粒状)	ピーク高さ	0.1M	2.9	5.2
		0.01M	15.0	
カラム試験(柱状)		0.1M	1.4	3.7
		0.01M	5.1	
1次元モデル孔間式		0.1M	1.3	3.4
		0.01M	4.5	
カラム試験(粒状)	ピーク遅れ	0.1M	1.4	2.1
		0.01M	2.8	
カラム試験(柱状)		0.1M	1.0	1.1
		0.01M	1.1	

\*0.01M/0.1M : 塩化ナトリウム濃度 0.01M で取得した遅延係数と 0.1M で取得した遅延係数比

次に流速の影響について評価するため、図 3.2.5-4 と図 3.2.5-6 とを比較した。ピーク遅れとピーク高さの違いが明確になるように、流速 1.0mL/min と 0.1mL/min で得られた Rb と Ba のピークを図 3.2.5-7 で比較した。図から分かるように、ピークの遅れは大きな差異がないものの、ピーク高さは Rb・Ba とともに顕著に減少した。このように流速が遅いケースであってもピークの高さと遅れとで分配係数が乖離する現象が観察された。

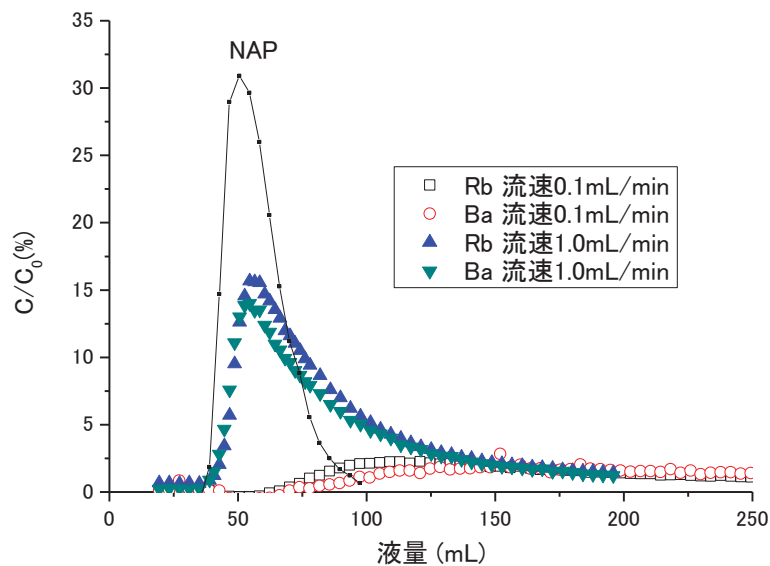


図 3.2.5-7 流速による Rb・Ba のピークの比較

このように、粉末や柱状岩石のカラム試験より、現場試験に近い条件と考えられる 1 次元の割れ目モデル試験においても、流速に対して顕著な影響が観察された。このため、実際放射性廃棄物処分の安全評価に使用するような分配係数・遅延係数を取得するためには、実際の系に近い遅い流速で試験を実施することが望ましいと考えられた。しかし、実際の現場にはバックグランド流れや、現実的な工期という制限があるため、必ずしも全てのサイトで理想的な状況で試験ができるとは限らない。今回実施したような室内試験等で情報を補充しつつ、現場試験の位置づけを明確にしてから実施する必要がある。

カラム試験や 1 次元モデルでの模擬トレーサー試験においては、ピーク位置とピーク高さから算出した遅延係数が一致しないという現象が確認されている。表 3.3.1-1 には、ピーク高さとピーク遅延から算出した遅延係数を比較した結果をまとめた。表にまとめたように、ピーク高さから算出した遅延係数はピーク遅れから算出した遅延係数よりも大きな値を示し、遅延係数が大きくなる条件ほどその差が大きくなる傾向がみられた（同じイオン強度であれば流速が遅いほど、流速が同じであればイオン濃度が低いほど、流速・イオン濃度が同じであれば遅延係数が大きくなる試験系ほど、その比が大きくなった）。前述のように、粉体や柱状岩石のカラム試験において得られた遅延係数から分配係数を算出した結果、得られた分配係数はピーク高さから算出したものに近く、ピーク遅れから算出した分配係数はオーダーで低い値を示した。この結果から、ピーク遅れは高さに比べて分配係数を過小評価している可能性がある。今後さらに種々の条件で試験を実施し、条件等に対する依存性を確認した上で、どちらを主に評価していくか合理的な検討が必要である。

表 3.2.5-2 ピーク高さとピーク遅延から算出した遅延係数の比較 (Rb)

試験方法	試験条件		遅延係数評価の基準	遅延係数	高さ/遅延		
	流速	イオン濃度					
1次元モデル孔間式	1.0mL/min	0.1M	ピーク高さ	3.1	2.4		
			ピーク遅延	1.3			
		0.01M	ピーク高さ	26.2	5.8		
			ピーク遅延	4.5			
	0.1mL/min	0.1M	ピーク高さ	13.6	3.1		
			ピーク遅延	4.4			
カラム試験(粒状)	1.0mL/min	0.1M	ピーク高さ	2.9	2.1		
			ピーク遅延	1.4			
		0.01M	ピーク高さ	15.0	5.4		
			ピーク遅延	2.8			
		カラム試験(柱状)	1.0mL/min	0.1M	ピーク高さ	1.4	1.4
					ピーク遅延	1.0	
0.01M	ピーク高さ			5.1	4.6		
	ピーク遅延			1.1			

さらに、1次元割れ目モデルを用いた試験では、「模擬単孔式トレーサー試験」も実施した。孔間式トレーサー試験では、1つのポートから試験液を入れた後、バックグラウンド溶液を同じ孔から入れ、反対側のポートからサンプルを回収した。模擬単孔式トレーサー試験においては、片側のポートから試験溶液を5mL入れた後、さらにチェイサーとなるバックグラウンド溶液と同じ溶液を5mL入れた。この後、試験液を入れたのと反対側のポートにポンプをつなぎ替えてバックグラウンド溶液を流し、試験溶液を入れたのと同じポートからフラクションコレクタを用いて2mLずつサンプルを回収した。その他の手順については、孔間式トレーサー試験と同じである。

試験結果の例として、バックグラウンド溶液が0.1M塩化ナトリウム・流速1.0mL/minの場合、バックグラウンド溶液が0.01M塩化ナトリウム・流速1.0mL/minの場合、バックグラウンド溶液が0.01M塩化ナトリウム・流速0.1mL/minの場合の破過曲線をそれぞれ、図3.2.5-8、図3.2.5-9、図3.2.5-10に示した。

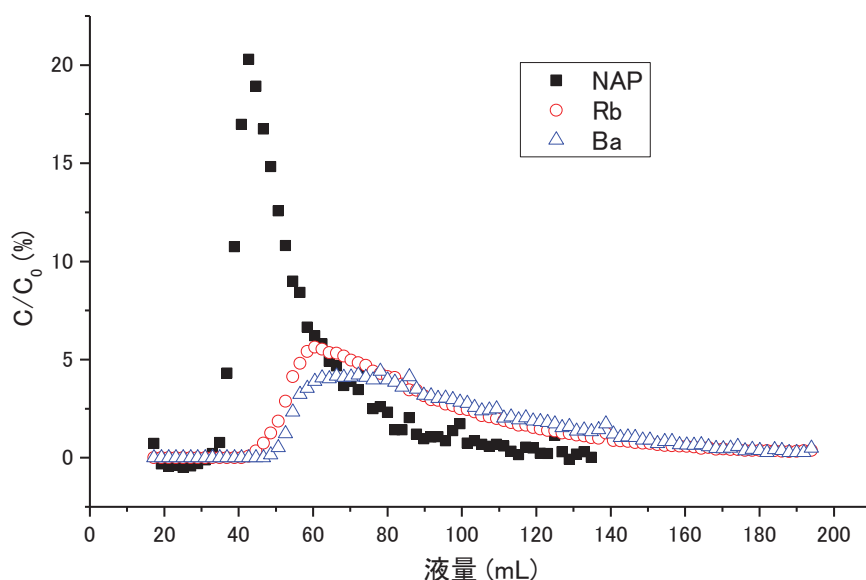


図 3.2.5-8 流速1.0mL/min バックグラウンド溶液0.1M NaCl で実施した1次元モデルにおける模擬単孔式トレーサー試験の結果

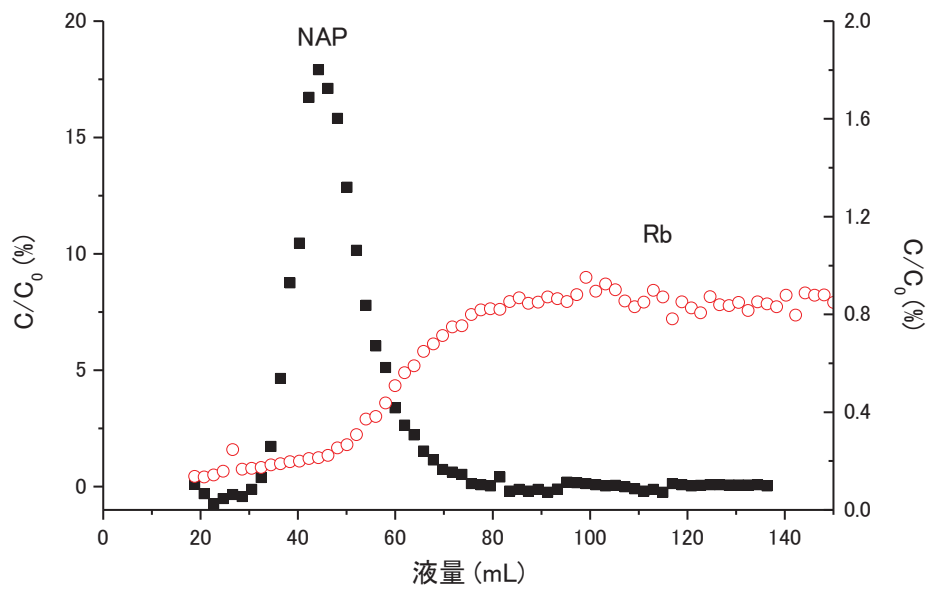


図 3.2.5-9 流速 1.0mL/min バックグラウンド溶液 0.01M NaCl で実施した 1次元モデルにおける模擬  
単孔式トレーサー試験の結果

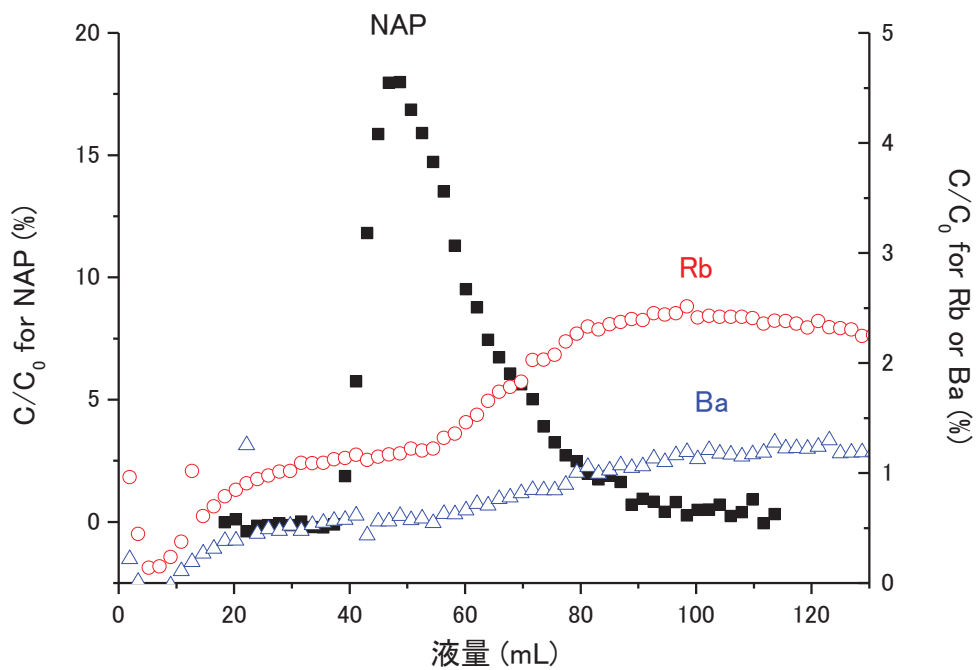


図 3.2.5-10 流速 0.1mL/min バックグラウンド溶液 0.1M NaCl で実施した 1次元モデルにおける模擬  
単孔式トレーサー試験の結果



図 3.2.5-8 に示した流速 1.0mL、バックグラウンド溶液 0.1M NaCl の条件の試験結果から、Rb・Ba についての遅延係数を算出した（遅延係数の算出については、単孔式トレーサー試験の項に詳しい）。その結果、Rb の遅延係数は 15、Ba の遅延係数は 25 と評価された。さらに、バックグラウンド溶液 0.01M NaCl の場合では、Rb の遅延係数は 400 と評価された。これらの値は、模擬孔間式得られている遅延係数と比較して、顕著に大きな値である。さらに、この遅延係数をカラム試験（粉体、柱状）と比較しても明らかに大きな値であり、他の評価方法に比べて単孔式トレーサー試験は遅延係数を大きく評価しやすいことが分かった。これは、単孔式トレーサー試験では、遅延係数でピークの高さを合わせるような解析である一方、ピーク高さに対して遅延係数の感度が低いためであると推察された。

室内試験において、種々の方法で分配係数を取得して比較した結果、単孔式トレーサー試験については、遅延係数をやや大きく見積もる傾向があることが分かった。今後、解析手法について再度検討するとともに、比較がしやすい条件下での単孔式と他の手法との比較を実施し、単孔式試験の特性を明らかにするとともに、他手法とも整合性の良い評価法を検討していく予定である。

### 3.2.6 実岩石からの逐次抽出

ここでは、自然界における岩石および地下水における Rb や Ba の濃度を評価し、その結果から自然界における Rb や Ba の分配係数を明らかにした。ただし、使用した岩石はコアの健岩部であり、割れ目における値ではない。

まず、地下水における Rb や Ba の濃度は、今年度瑞浪地域の立坑 500m 地点で採取した地下水における平均値を用いた。Rb や Ba などの微量元素を分析するための地下水はテフロンをコーティングしたポリエチレンの容器に採取し、実験室に持ち帰った後硝酸を入れて溶液を酸性にした。その後さらに適切な濃度に希釈し、ICP-MS で分析した。採取した 5 箇所の Rb・Ba 濃度を表 3.2.6-1 に示した。ここでは、5 箇所の平均値を取り、500m 地点での地下水における Rb 濃度を 8.9 (μg/L)、Ba 濃度を 4.4 (μg/L) とした。

表 3.2.6-1 瑞浪地域立坑 500m 地点の地下水における Rb・Ba 濃度

地下水採取地点	濃度 (μg/L)	
	Rb	Ba
12MI33区間-1	7.2	3.0
13MI38区間-1	7.4	3.1
13MI38区間-5	12	7.1
15MI52区間-1	8.7	3.6
15MI53区間-5	9.1	5.1
平均値	8.9	4.4

一方岩石については柱状に整形した岩石を用いた。柱状岩石は1本24g程度の重量があり、これを70mLの0.5M塩化ナトリウム溶液に浸漬した。塩濃度の高い塩化ナトリウム溶液に浸漬したのは、NaとRbやBaが交換し、岩石に収着しているRbやBaが抽出できると考えたためである。この試験方法では、イオン交換性のRbやBaを抽出するため、岩石に収着し鉱物化した成分を抽出できない処分環境のような長い時間スパンでは、鉱物化等の現象も起きると考えられるため、塩化ナトリウム溶液だけで抽出した値を用いた場合の分配係数は実際のものより低い値を示す可能性がある。抽出溶液の選定と逐次的な抽出は、将来的に実施して鉱物化したRbやBaについても情報を取得していく予定である。上記のような抽出を実施した場合、溶液中のRb濃度およびBa濃度はそれぞれ142 $\mu$ g/L、126 $\mu$ g/Lとなった。ここから、岩石1gあたりの交換可能なRb量は0.414 $\mu$ g、Ba量は0.368 $\mu$ gであると評価することができる。

分配係数とは、単位重量・体積あたりに含まれる対象とするイオンの固相と液相における比率であるため、地下水における濃度と岩石単位重量あたりの交換可能なRb・Ba量を用いて、分配係数を算出することが可能である。この結果、Rbでは46.5 g/mL、Baでは83.6 g/mLという分配係数が得られた。

### 3.2.7 手法間における分配係数・遅延係数の比較と試験条件に対する依存性

上述の試験で得られた、種々の分配係数を表3.2.7-1にまとめる。分配係数の大きな傾向として、試験方法としてはバッチ>カラム、試験体の形状としては、粉体>柱状、であることが分かった。これらの値と比較して、現場試験がどのような値を示すかについては、将来的に考察し、現場試験の位置づけについて議論をしていく。

また、この試験で明らかになった課題の一つとして、カラム試験等流れがある場での分配係数の評価においては、ピーク位置とピーク高さの評価で分配係数が大きく異なることが挙げられる。他手法との比較によって、ピーク高さの方が妥当である可能性が高いが、原因を解明しどちらを採用するのが良いのか合理的な答えを示していく必要がある。

さらに、この試験で明らかになった課題の一つが、単孔式と孔間式での遅延係数の差異である。には、室内試験で取得した遅延係数をまとめた。他試験方法の類似した条件と比べて、模擬単孔式トレーサー試験は大きな遅延係数を示した。根本的な原因究明を試みるとともに、他の種々の試験条件における両者の差異を比較することで、それぞれが評価している遅延係数の特性を明らかにしていく。

表 3.2.7-1 今回の試験で得られた分配係数のまとめ

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
			0.1mL/min	高さ	1.10
				遅延	0.45
		0.01M	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	

表 3.2.7-2 各試験条件で得られた遅延係数のまとめ

対象イオン	試験方法	試験条件			遅延係数
		NaCl濃度	流速	経過時間(h)	
Rb	粉末カラム	0.1M	1.0mL/min	高さ	2.8
				遅延	1.4
		0.1mL/min	高さ	5.2	
			遅延	2.7	
		0.01M	1.0mL/min	高さ	14.9
				遅延	2.8
	柱状カラム	0.1M	1.0mL/min	高さ	1.4
				遅延	1.0
		0.01M	1.0mL/min	高さ	6.5
				遅延	1.1
	1次元モデル孔間	0.1M	1.0mL/min	高さ	3.1
				遅延	1.3
		0.1mL/min	高さ	13.6	
			遅延	4.4	
0.01M	1.0mL/min	高さ	26.2		
		遅延	4.5		
1次元モデル単孔	0.1M	1.0mL/min	高さ	15.0	
	0.01M	1.0mL/min	高さ	400.0	
Ba	粉末カラム	0.1M	1.0mL/min	高さ	4.1
				遅延	1.7
		0.1mL/min	高さ	12.6	
			遅延	7.4	
		0.01M	1.0mL/min	高さ	-
				遅延	-
	柱状カラム	0.1M	1.0mL/min	高さ	1.6
				遅延	1.0
		0.01M	1.0mL/min	高さ	23.2
				遅延	1.1
	1次元モデル孔間	0.1M	1.0mL/min	高さ	3.5
				遅延	1.3
		0.1mL/min	高さ	18.1	
			遅延	4.5	
0.01M	1.0mL/min	高さ	-		
		遅延	-		
1次元モデル単孔	0.1M	1.0mL/min	高さ	15.0	
	0.01M	1.0mL/min	高さ	-	

### 3.3 割れ目充填鉱物への核種収着試験

日本における花崗岩割れ目の特性として、国外のものに比べて割れ目充填鉱物の存在量が多いことが挙げられる。割れ目充填鉱物は岩石と地下水の界面に存在し、割れ目から岩石表面への収着において、表面収着に対して支配的である可能性がある。つまり、充填鉱物の存在により、岩石健岩部と比較して岩石への収着量が増加したり、減少する可能性がある。

本研究では、岩石割れ目充填鉱物の収着特性に着目し、これが岩石マトリクス部分（花崗岩健岩部）と比較してどのような特性があるかを理解し、どのような鉱物種が核種の分配係数や遅延係数に支配的であるのかについての情報を得ることを目的とし、割れ目充填鉱物に対する収着・脱離試験を実施した。また、その情報を用いて割れ目充填鉱物がどの程度核種移行に対して影響があるのかについても議論する。この検討から、健岩部と割れ目部（充填鉱物を含む）で大きく分配係数が異なる可能性が示された場合には、3.2 で実施してきたような収着試験は、実割れ目や実割れ目から物理的に取り出した充填鉱物を用いて実施するべきであり、割れ目が地下水の主要な移行経路となっている場での分配係数取得方法に大きな影響があると考えられる。

具体的には以下のような試験を実施し、割れ目充填鉱物の収着に対する影響を評価していく予定である。今年度は下記のうち、①・②について実施した。

- ① 割れ目充填鉱物の特定：瑞浪地域の割れ目充填鉱物を特定するため、既往の文献を調査するとともに、本研究で実施したボーリングコアの割れ目部分の観察を実施する。これらの結果から、瑞浪地域の花崗岩における代表的な割れ目充填鉱物を選定する。（主には平成 25 年度～平成 28 年度に実施した XRD 分析の結果を基に検討している。ここでは、3.3.1 において選定した鉱物について記載する）
- ② 収着・脱離特性の把握：①で選定された鉱物について、市販されているものを購入する（性質等がある程度異なっている可能性は認識しつつ）。それらの鉱物に対して、収着・脱離試験等を実施し、鉱物の収着・脱離特性等を明らかにする。（3.3.2）
- ③ 実割れ目を用いた試験の実施：逐次抽出法を適用して、割れ目充填鉱物を逐次的に溶出し、そこに含まれる Rb や Ba 量を評価する。地下水における濃度との比較により分配係数を評価する他、Rb や Ba の収着に支配的な鉱物種についての情報を得る。天然試料で上記が難しい場合には、実割れ目に Rb や Ba を収着させた後、逐次脱離試験を実施する。
- ④ まとめ：①～③の情報をまとめて、割れ目充填鉱物が核種収着に与える影響を議論する

#### 3.3.1 瑞浪地域の割れ目における充填鉱物の特定

充填鉱物特定については、平成 25 年度～平成 28 年度に実施した XRD 分析の結果を基に検討しており、その結果から、瑞浪地域の岩石割れ目においては、①黒雲母、②緑泥石、③絹雲母、④方解石、⑤

スメクタイト、が主要な充填鉱物であることがわかった。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も試験の対象とした。試験に用いた鉱物を表 3.3.1-1 にまとめた。

表 3.3.1-1 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	破碎塊状	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	破碎塊状	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 (正長石)	破碎塊状	福島県、石川町	ニチカ
曹長石 (灰長石)	粒状	北海道、余市	ニチカ

### 3.3.2 鉱物への収着試験

#### (1) 試験方法

各鉱物への収着試験は以下のような手順で実施した。鉱物のうちスメクタイトは膨潤性が高く、バッチ試験を実施した際の固体・液体の定義が難しいことから、別途試験を実施することとした。ここは、スメクタイトを除く岩石試料における収着試験の手順を示す。

#### a. 岩石粉末の準備と比表面積の測定

購入した岩石についてはタングステン製のミルで粉碎し、粉碎した岩石が全て 2mm のメッシュを通過するようにした。粉碎した岩石粉末を用いて、BET 法により比表面積を測定した。測定した比表面積は表 3.3.2-1 に示した。

表 3.3.2-1 BET 法で分析した使用した鉱物の比表面積

鉱物名	絹雲母	黒雲母	アルカリ長石	方解石	曹長石	緑泥石
比表面積 (m <sup>2</sup> /g)	1.56	0.49	0.07	0.04	0.37	0.76

#### b. 溶出試験

天然の岩石が多くの Rb や Ba を含みこれらが収着試験中に溶出した場合、濃度条件によっては試験が成立しなくなる可能性が危惧された。このため、試験を実施する 0.01M NaCl 溶液を用いて、各鉱物の溶出試験を実施した。上記の岩石粉末 0.2g に対して、0.01M の塩化ナトリウム溶液 5mL を添加した。溶液の pH を 8.5 に調整し、7 日間岩石粉末と溶液を接触させた。7 日後、上澄み溶

液を 0.45  $\mu\text{m}$  のフィルタでろ過して、ろ液中の Rb および Ba 濃度を分析した。結果をに示した。

試験は室内収着試験と同様に、Rb : 2mg/L、Ba : 1mg/L の濃度で実施する予定であり、この濃度と比較すると溶出する Rb や Ba の濃度はほとんど影響がないことが確認できた。

表 3.3.2-2 鉱物からの溶出試験の結果

鉱物名	溶液中濃度 ( $\mu\text{g/L}$ )			
	Rb	Rb 平均値	Ba	Ba 平均値
曹長石	3.2	3.3	11.9	12.7
	4.4		14.1	
	2.3		12.2	
アルカリ長石	11.5	6.0	29.0	23.3
	3.1		18.5	
	3.6		22.5	
黒雲母	47.6	46.3	2.4	2.2
	43.7		1.9	
	47.6		2.2	
緑泥石	2.9	3.1	5.1	5.3
	3.2		4.4	
	3.1		6.3	
絹雲母	16.1	15.9	2.2	2.3
	16.5		2.3	
	15.2		2.4	
方解石	5.2	3.3	1.8	1.3
	1.8		0.9	
	2.9		1.2	

### c. 収着試験

溶出試験と同様に 0.2g の岩石に対して 5mL の 0.01M NaCl 溶液を入れて、pH を 8.5 に調整した。その後 Rb と Ba のストック溶液を添加し、溶液中の Rb および Ba 濃度を 2mg/L および 1mg/L とした。所定の時間経過後、0.45  $\mu\text{m}$  のフィルタで上澄みをろ過し、ろ液を硝酸溶液で希釈して収着試験のサンプルとした。また、岩石を入れないブランク試験も並行して実施し、容器壁への収着の影響も評価した。最終的な収着率はブランク試験と岩石を入れた試験の差から算出した。

#### (2) 試験結果

収着試験の結果を表 3.3.2-3 にまとめる。まず、岩石の健岩部の主要な造岩鉱物の一つと考えられる曹長石に対しては、Rb で 2.1%、Ba で 12.4% のイオンが収着することがわかった。また、同じく主要な造岩鉱物の一つであると考えられるアルカリ長石に対しては、Rb は 4.1%、Ba は 12.4% が収着した。これに対して、黒雲母は Rb における収着率が 37%、Ba における収着率が 92% であり、Rb や Ba (特に Ba) に対して主要な造岩鉱物である曹長石やアルカリ長石よりも高い収着能力があることが分かった。また、絹雲母についても Rb に対して 19%、Ba に対しては 96% の収着率を示し、これらのイオンに対して高い収着能力を有することが示唆された。また、緑泥石は Rb に対して 11.5%、Ba に対しては 37.2% の収着率があった。上述の黒雲母・絹雲母・緑泥石は健岩部の主要な

造岩鉱物よりも高い収着能力を示すため、割れ目充填鉱物として、これらの鉱物が存在した場合、岩石健岩部よりも核種の収着・遅延能力が高くなる可能性があると考えられる。一方、方解石は曹長石やアルカリ長石よりも収着率が低く、Rb や Ba の収着能力が健岩部よりも低いことが示唆された。

さらに、表 3.3.2-4 には収着率を比表面積で割った値を示した。表から分かるように、比表面積で割った値を比較すると、健岩部の主要な造岩鉱物の一つであると考えられるアルカリ長石は高い値を示しており、黒雲母を除く鉱物については、アルカリ長石の値より低い値を示した。また、アルカリ長石と黒雲母の比表面積あたりの収着量はほぼ同程度であった。以上のことから、今回試験した条件においては、Rb や Ba の収着率を高めたのは、おもに鉱物の比表面積であると考えられる。黒雲母や絹雲母は層状の構造を持ち、BET 比表面積では層間の面積まで評価できていない可能性がある。また、例えば方解石は収着率は低い値を示したが、単位比表面積あたりの収着率は Rb の場合において高い値を示した。このため、花崗岩の割れ目健岩部に比表面積が大きいような形で方解石が形成された場合には、方解石が 1 価イオンの収着に対して主要な役割を果たす可能性があると考えられる。

以上の結果から、今回試験をした条件では以下のようなことが明らかになった。

- ① 割れ目充填鉱物として、黒雲母、絹雲母、方解石、緑泥石を、健岩部の造岩鉱物として曹長石とアルカリ長石を使い、Rb・Ba の収着試験を実施した。その結果、黒雲母、絹雲母が曹長石やアルカリ長石よりも顕著に高い収着率を示したことから、これらの鉱物が割れ目に存在した場合核種の収着・遅延効果が増大することが期待できる。
- ② 収着率を BET 比表面積で割った値を比較すると、健岩部の主要な造岩鉱物の一つであるアルカリ長石と黒雲母が同程度で最も高い値を示し、その他の鉱物はこれより低い値を示した。このことから、上述の収着率の大きさに支配的な要因は、鉱物の比表面積であると考えられた。このため、今回収着効果が低いと判断された鉱物であっても、実際の割れ目において健岩の場合より比表面積が大きいような形状で割れ目の健岩部が覆われたならば、収着・遅延効果の増大が期待できると考えられた。

上記のように、割れ目充填鉱物による収着・遅延効果の増大には、鉱物の種類に加えてどのような形状で岩石健岩部に付着しているか（比表面積が広がるように付着しているかどうか）が重要な要因となる。鉱物の付着状況までを粉体のバッチやカラム試験で再現することは困難であり、実際の割れ目を使ったトレーサー試験や実際の割れ目を実験室まで持ち帰って実施する室内試験が重要であると考えられる。流速の制御など現場試験では克服すべき課題もあるが、上記のような観点からも現場割れ目を用いた試験が重要であることがわかる。



表 3.3.2-3 各鉱物への収着試験の結果

対象イオン	鉱物	サンプル番号	収着試験後濃度 ( $\mu\text{g/L}$ )	収着率 (%)	収着率平均値 (%)	
Rb	黒雲母	1	1195	40.0	37.1	
		2	1287	35.3		
		3	1271	36.1		
	絹雲母	1	1496	24.8	18.8	
		2	1676	15.8		
		3	1677	15.7		
	方解石	1	2006	0.0	1.8	
		2	1954	1.8		
		3	1917	3.7		
	緑泥石	1	1743	12.4	11.5	
		2	1742	12.5		
		3	1797	9.7		
	曹長石	1	1958	1.6	2.1	
		2	1934	2.8		
		3	1955	1.8		
	アルカリ長石	1	1897	4.7	4.1	
		2	1909	4.1		
		3	1921	3.5		
	Ba	黒雲母	1	67.79	93.4	91.7
			2	92.39	91.0	
			3	93.55	90.9	
絹雲母		1	18.06	98.2	96.4	
		2	50.91	95.0		
		3	40.21	96.1		
方解石		1	1008	1.7	4.0	
		2	985.4	3.9		
		3	958.2	6.5		
緑泥石		1	651.9	36.4	37.2	
		2	645.4	37.0		
		3	633.5	38.2		
曹長石		1	651.9	36.4	37.2	
		2	645.4	37.0		
		3	633.5	38.2		
アルカリ長石		1	908.7	11.3	12.4	
		2	892	13.0		
		3	894.5	12.7		

表 3.3.2-4 比表面積で規格化した収着率

対象イオン	鉱物	収着率/BET比表面積
Rb	黒雲母	75.8
	絹雲母	12.0
	方解石	45.9
	緑泥石	15.2
	曹長石	5.6
	アルカリ長石	58.4
	Ba	187.2
Ba	黒雲母	187.2
	絹雲母	61.8
	方解石	100.3
	緑泥石	49.0
	曹長石	33.4
	アルカリ長石	176.4

### 3.4 室内試験のまとめと課題

今年度の検討では、①試験条件や形状に対する分配係数や遅延係数の依存性検討、②割れ目充填鉱物への各種の収着挙動検討を実施し、以下に示すような知見を得た。

#### 3.4.1 試験条件や試料形状に対する分配係数や遅延係数の依存性検討

瑞浪地域立坑の500m地点のボーリングで得られたコアを用いて、試料形状（円柱状、粉末状、1次元モデル）や試験方法（バッチ試験、カラム試験、模擬トレーサー試験など）、試験条件（流速、イオン濃度など）に対する分配係数や遅延係数の依存性を調べた。

分配係数は試験条件としては、イオン濃度や流速に大きな依存性を示したことから、現場試験におけるイオン濃度や流速は実際の地下水のものと近くすることが望ましいと考えられた。また、試験体の形状として円柱状などの塊試料は粉体試料に対して、分配係数が平衡に達するまでに時間を要し、分配係数も値も低めであることが分かった。結果的に室内試験で得られた分配係数において、最小値と最大値の比は40倍未満程度であった。この差が安全評価の最終的な値にどの程度の影響があるかを考慮した上で、合理的に安全評価に用いる分配係数を算出していく必要がある。また、現地試験で得られる分配係数とこれらの値を比較し、現地試験の位置づけについても明確にしていくことが将来的に必要である。

また今回の試験を通じて、以下の2点の課題があることがわかった。

- (1) カラム試験や模擬トレーサー試験におけるピーク高さとピーク遅れで算出した遅延係数の違い

理論上、カラム試験や模擬トレーサー試験では、ピーク高さから評価した場合と、ピーク遅延から評価した場合とで、同じ遅延係数が得られる。しかし、今回実施した室内試験や実際に現場で実施したトレーサー試験でも、ピーク高さと遅延との間で異なる遅延係数が得られることが分かった。具体的には、ピーク高さで計算された方が遅延係数が大きく、ピーク遅れは小さく評価される傾向がある。室内試験で得られた遅延係数から分配係数を算出し、バッチ試験と比較した結果、ピーク高さで評価した場合の方が分配係数が同じ程度であり、ピーク遅延で評価された分配係数は顕著に低い値を示した。このことから、現時点では、ピーク高さの方が分配係数を正確に算出できる可能性が高いと考えられる。

ただし、ピーク遅延の方が分配係数が低くなる原因についてはこれを検討し、将来的にはより合理的にどちらから分配係数や遅延係数を算出すべきなのかを明らかにすることが必要である。また、ピークが形成されるメカニズムのうち、現在モデルに組み込まれていないものについては、評価モデルにも組み込んでいく必要があると考えられる。

(2) カラム試験や模擬トレーサー試験における単孔式と孔間式トレーサーにおける遅延係数の違い

カラム試験や模擬トレーサー試験では、同じ試験体を用いて、模擬単孔式と模擬孔間式の2つのトレーサー試験を実施し、それぞれで評価された遅延係数を比較した。その結果、単孔式トレーサー試験で得られた値は、他の試験で得られた値と比べてやや大きな値を示した。これは、単孔式トレーサー試験においては、ピーク高さに対する遅延係数の感度がやや低く、ピーク高さを合わせるためにやや大きな遅延係数が必要とされるためである。上述の課題（ピーク高さと遅延）と併せて、どのようなモデルで、ピークのどこを（高さ・遅延など）合わせるような解析が適切であるのか、今後検討が必要である。

#### 3.4.2 割れ目充填鉱物への核種の収着挙動検討

割れ目充填鉱物の核種移行遅延における影響を明らかにするため、充填鉱物の特定と充填鉱物を用いたRb・Baの収着試験を実施した。その結果、充填鉱物のうち、黒雲母と白雲母が高い収着能力を示し、これらが岩石-地下水界面に形成された場合、核種の収着・遅延能力が高くなる可能性が高いことが示された。一方で、収着量を比表面積で正規化した値を比較すると、上述の鉱物と健岩部の造岩鉱物の一つであるアルカリ長石との間では、あまり大きな差がなかった。このことから、黒雲母や絹雲母が高い収着能力を示したのは、これらの鉱物が大きな比表面積を有することに由来するものと考えられた。

この試験では、実際の割れ目や割れ目から採取した鉱物を使った試験をまだ実施しておらず、実際の割れ目を用いた収着・脱離試験等を実施して、さらに充填鉱物がイオンの収着・遅延におよぼす影響を評価していく予定である。

#### 参考文献

核燃料サイクル開発機構（1999）：地層処分研究開発第2次取りまとめにおける緩衝材への放射性元素の分配係数の設定、JNC TN8400 99-072.

土壤標準分析・測定法委員会（編）（1986）：土壤標準分析・測定法，日本土壤肥料学会監修，博友社出版、150-154.

日本原子力学会（2006）：収着分配係数の測定方法－深地層処分のバリア材を対象とした測定方法の基本手順、日本原子力学会深地層分配係数分科会

柏谷公希・中田弘太郎・長谷川拓磨（2010）：簡便で高精度な地下水の蛍光染料濃度測定法の提案－ボーリング調査における信頼性の高い地化学データ取得のために－．電力中央研究所報告書，N09026.

## 4. 原位置トレーサー試験

### 4.1 はじめに

本研究においては、平成 17 年度より収着性トレーサーの使用も可能な原位置トレーサー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ーを同定する評価手法を開発してきた。そして、平成 20 年度から平成 22 年度には、スイス Nagra の Grimsel Test Site (以下、GTS と呼ぶ) において、試作した試験装置を用いて原位置トレーサー試験を実施し、試験装置や試験結果の評価手法が基本的に整備できたことを確認した。その後、平成 23 年度から平成 25 年度には、スイスでの原位置試験を通じて抽出した課題に対し、トレーサー試験装置の改良を進めてきた。また、孔間トレーサー試験だけでなく、単孔トレーサー試験についても試験方法・評価方法の検討を行い、平成 26・27 年度には JAEA 瑞浪超深地層研究所の深度 300m ボーリング横坑において、改良した試験装置を用いて我が国の地質環境に対する原位置適用性試験を実施した。その結果、我が国の地質環境においても、開発した試験装置や単孔、孔間トレーサー試験技術に十分な適用性があることが示唆された。しかし、原位置で生じた現象をより正確に理解するためには、計測精度の向上や試験方法（条件設定等）の更なる検討が必要であり、新たな課題も明らかとなった。また、我が国では地層処分は深度 300m 以深の地層で実施されることから、より大深度の地質環境での適用性についても確認する必要がある。

そこで、今年度は昨年度の試験で抽出された課題に対し、トレーサー試験装置の改良を行うとともに、トレーサー試験における条件設定について再検討を行った。そして、同じ JAEA 瑞浪超深地層研究所でも昨年度の試験場よりも水圧が高く地質環境の異なる深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑試験場において原位置トレーサー試験を実施し、試験の精度が向上したことや大深度での適用性を確認することとした。

## 4.2 試験方法

試験装置は、本事業で開発したトレーサー試験装置を用いた。

トレーサー試験は、15MI52 号孔、15MI53 号孔の 2 孔を対象とし、単孔トレーサー試験、孔間トレーサー試験を実施した。また、新規ボーリング孔の 16MI59 号孔は、間隙水圧モニタリング装置にてトレーサー試験期間中の圧力応答を観測した。トレーサー試験の実施手順を図 4.2-1 に示す。

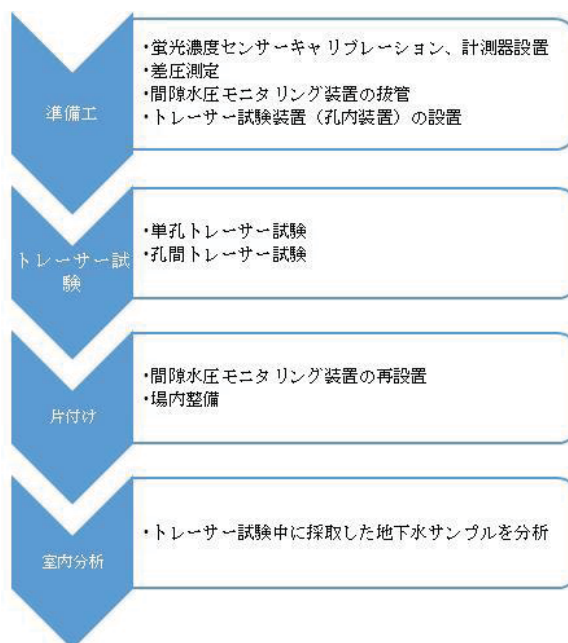


図 4.2-1 トレーサー試験の実施手順

### 4.2.1 トレーサー試験装置の概要

孔間トレーサー試験を例として、トレーサー試験装置の全体構成を図 4.2.1-1 に示す。

トレーサー試験装置は、パッカーやロッドなどの孔内装置および計測機器等の孔外装置で構成される。各種試験に応じて流路変更すれば、注水孔、揚水孔の入れ替えが可能である。

孔内装置は、試験区間を形成するピストンパッカー、および中間パッカーと孔口パッカーの 3 連パッカーとした。ピストンパッカー内部には、循環流路切り替えバルブ（6 方バルブ）、蛍光濃度センサー、および P2 圧力センサー（試験区間圧力）を内蔵している。地上の計測機器は、計測 PC ユニット、電装ユニット、配管ユニット、およびモーノポンプなどで構成される。

主な測定項目は、試験孔の孔内圧力 P1～P4、注水・揚水流量、蛍光濃度（孔内、地上）、および 16MI59 号孔の間隙水圧である。

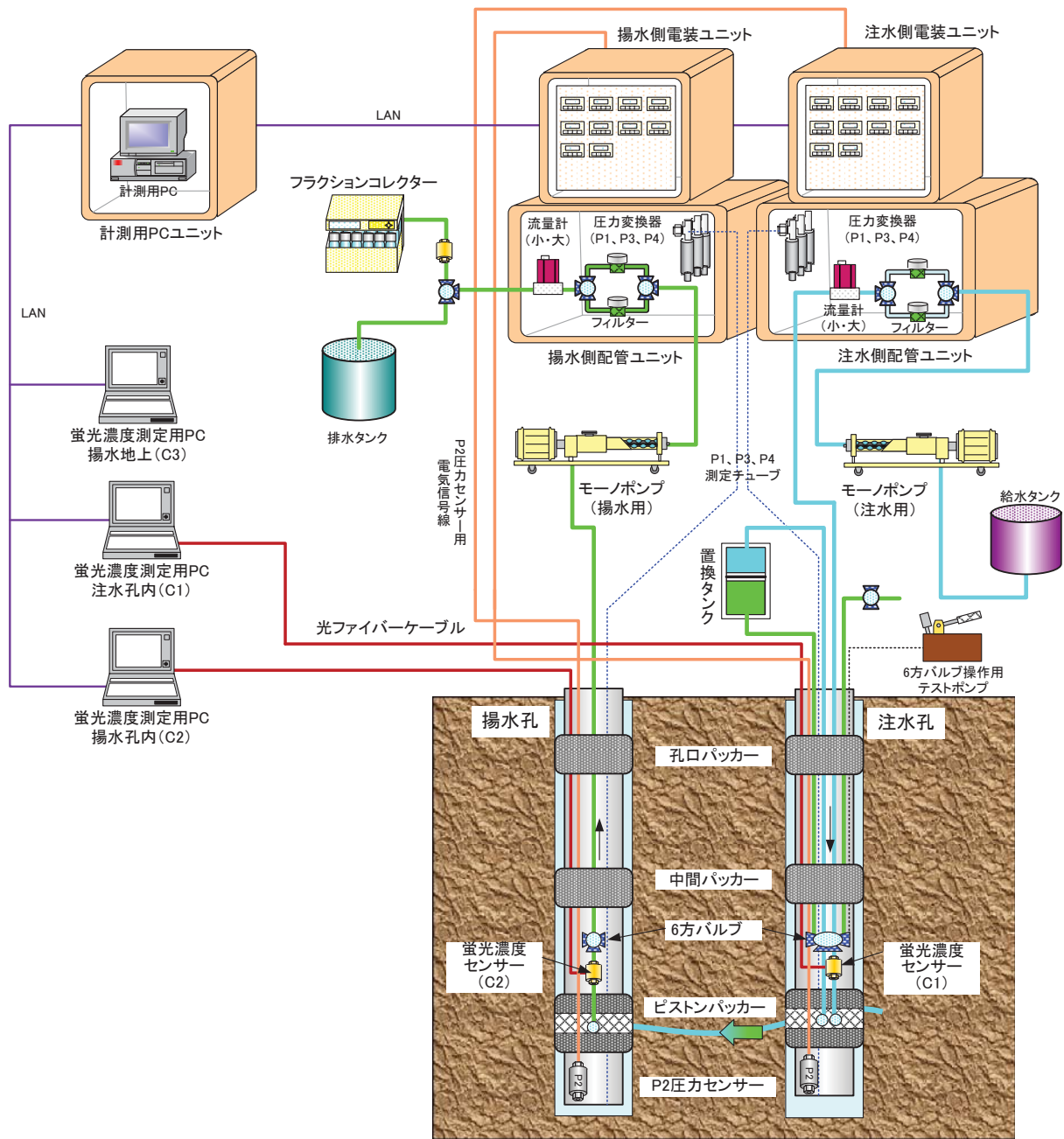


図 4.2.1-1 トレーサー試験装置の全体構成

#### 4.2.2 蛍光濃度センサーのキャリブレーション

トレーサー材のベースとした蛍光染料は、トレーサー濃度の経時変化を蛍光濃度センサーにてリアルタイムで測定が可能で、管理や取り扱いが比較的容易である非収着性のウラニウムを用いた。

キャリブレーションは、作成した複数濃度のウラニウムトレーサー溶液（以下、試料水）を蛍光濃度センサーにて測定し、その蛍光強度(counts)と、蛍光分光光度計の関係から検量線を作成した。

##### (1) 蛍光濃度測定の実験原理と使用した計測機器

ウラニウムの蛍光濃度の測定は、蛍光濃度センサー、LED 光源と分光器、光ファイバーケーブル、およびデータロガーPC を用いて行った。図 4.2.2-1 に蛍光濃度測定の実験原理を示す。

蛍光濃度の測定原理を以下に示す。

- ① LED 光源から、470nm 付近をピーク波長とする励起光を照射する。
- ② 光源側の光ファイバーを通して、蛍光濃度センサーの流路中に励起光が入射され、流路内を通過するウラニウム溶液を蛍光させる。
- ③ 蛍光したウラニウム溶液の光は、受光側の光ファイバーを通して分光器に伝送される。分光器内では、光を分光して MLD イメージセンサにて電気信号に変換してデータを取り込む。MLD イメージセンサを使用しているため、特定の波長の強度だけではなく、ある帯域の光を波形として見る事が可能である。

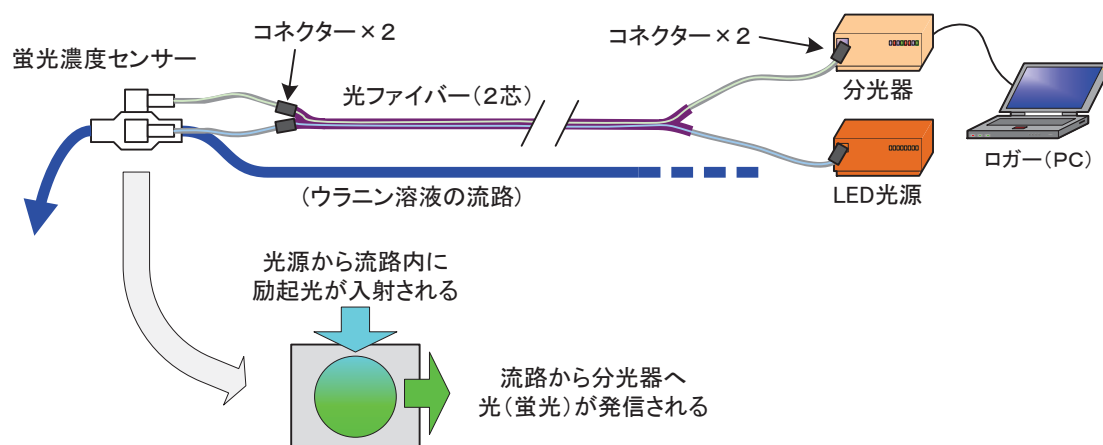


図 4.2.2-1 蛍光濃度測定の実験原理

表 4.2.2-1 に各蛍光濃度センサーのバージョンと仕様、図 4.2.2-2 にそれぞれの機器の写真を示す。  
 使用した蛍光濃度センサーは、製作時期やそれぞれの性能が異なるため、各センサー個別にキャリブレーションの近似式を求めた。表中の測定箇所は、原位置試験で蛍光強度を測定した場所を示す。15MI52号孔の孔内センサーを C1、15MI53 号孔の孔内センサーを C2、揚水した水を地上で測定するセンサーを C3 と称する。

表 4.2.2-1 蛍光濃度センサーの主な仕様

項目	Ver. 1.0	Ver. 3.1
試作年度	平成 18 年度	平成 27 年度
特 色	・センサー部に LED 光源を内蔵	・耐圧性能向上 ・光ファイバーとセンサー部が分離可能な構造
材 質	接液部：SUS316 窓 材：サファイアガラス	接液部：SUS316 窓 材：サファイアガラス
サイズ (mm) 流路×幅 <sub>A</sub> ×幅 <sub>B</sub>	48×30×25	100×26.1×26.1
流路径 (mm)	φ 4.83	φ 4
重 量	98 g	290 g (光ファイバー1.5m 含む)
光コネクタ	SMA	SMA
配管コネクタ	1/4in.	φ 6mm
測定箇所	地上 (C3)	孔内 (C1、C2)



図 4.2.2-2 孔内蛍光濃度測定機器

(上左)高出力タイプ LED 光源 (上右)分光器 (下)蛍光濃度センサー(Ver. 3.1)



表 4.2.2-2 にウランの蛍光濃度測定に使用した蛍光分光光度計の仕様を、図 4.2.2-3 に写真と測定状況を示す。

蛍光分光光度計はボーリングの掘削水管理で使用した機器と同型の日立製作所 F-2700 Fluorescence Spectrophotometer を用いた。トレーサー試験ではウラン用にピーク波長の設定を変更して使用した。

表 4.2.2-2 分光蛍光光度計の仕様（日立製作所 F-2700 Fluorescence Spectrophotometer）

項目	内容
操作方式	スタンドアロン または PC制御
光源	150Wキセノンランプ（オゾン 自己解消ランプハウス）
測光方式	単色光モニター比演算測光方式
感度	水のラマン光S/N800以上（RMS） バンドパス5nm レスポンス2s
スリット	2.5、5、10、20 nm（励起・蛍光側とも）
波長走査速度	60~3,000nm/min（4段）+PC制御のみ12,000nm/min
大きさ/質量	600mm（W）×503mm（D）×343mm（H）/約41kg
電源	AC100、115、220、230、240V 50/60HZ、400VA



図 4.2.2-3 蛍光分光光度計と蛍光染料濃度測定状況

## (2) キャリブレーション手順

キャリブレーションは、蛍光分光光度計より求めた試料水の蛍光濃度を「正值」とし、その濃度と蛍光濃度センサーにて測定した蛍光強度 (counts) との関係から検量線を作成した。

ウラニンの蛍光強度は地下水の pH に依存する性質があるため、原位置とほぼ同条件の水質となるよう 500m 坑道内から採取した湧水を用いて検量用の試料水を作成した。キャリブレーションに用いた試料水は、4mg/L と地下水 (≒0mg/L) を上下限值とする 9 段階の濃度を作成した。また、1sec 間隔のデータサンプリング条件でより大きな蛍光強度を取得するため、適切な Integral Time (照射光の積算時間) と Average (データの平均化) を設定した。

蛍光強度は、流路内に地下水中のガスの気泡が含まれると大きく減衰するため、キャリブレーションは試料水を加圧してガスの遊離を抑制させて実施した (図 4.2.2-4)。

蛍光濃度センサーのキャリブレーション手順を以下に示す。

- ① 蛍光濃度センサー、HPLC ポンプ (プランジヤーポンプ) を含む循環系配管を構築した。
- ② 4mg/L と地下水を上下限值とする 9 段階の濃度の試料水を作成した。
- ③ 蛍光強度の上限値を把握した上で Integral Time と Average を設定するため、最初に 4mg/L の試料水を準備した。
- ④ 試料水を注水して 1MPa で加圧し、HPLC ポンプにて流量 100mL/min で循環させた。
- ⑤ 4mg/L の蛍光強度最大値において、計測上限値を超えないよう適切な Integral Time と Average を設定した。
- ⑥ 9 試料において、④の手順で薄い濃度から順に蛍光強度データを取得した。
- ⑦ 取得した蛍光濃度と蛍光強度の値の相関より、近似曲線 (検量線) を作成した。



図 4.2.2-4 キャリブレーションの作業状況

#### 4.2.3 水圧測定

トレーサー試験前の間隙水圧安定時に、15MI52号孔のトレーサー試験区間と15MI53号孔のトレーサー試験区間、および16MI59号孔の間隙水圧モニタリング装置 Int4 との水頭差の測定を行った。測定に用いた差圧計は透水試験と同機種である。

測定手順を以下に示す。

- ① 図 4.2.3-1 に示すように、15MI52号孔の試験区間を基準水圧とする配管を構築した。
- ② V2-1、V2-2 バルブを開放し、測定区間の湧水によりエア抜き（ドレーン）を行った。
- ③ エア抜き後はドレーン側のチューブを連結し、間隙水圧の安定を翌朝まで測定した。
- ④ V2-1、V2-2 バルブを開放のままデータ収録を開始し初期値を把握する。その後、V3-1 バルブを測定対象とする区間の方向へ向けた。
- ⑤ V2-1、V2-2 のバルブを同時に閉鎖し、約 10 分測定した。

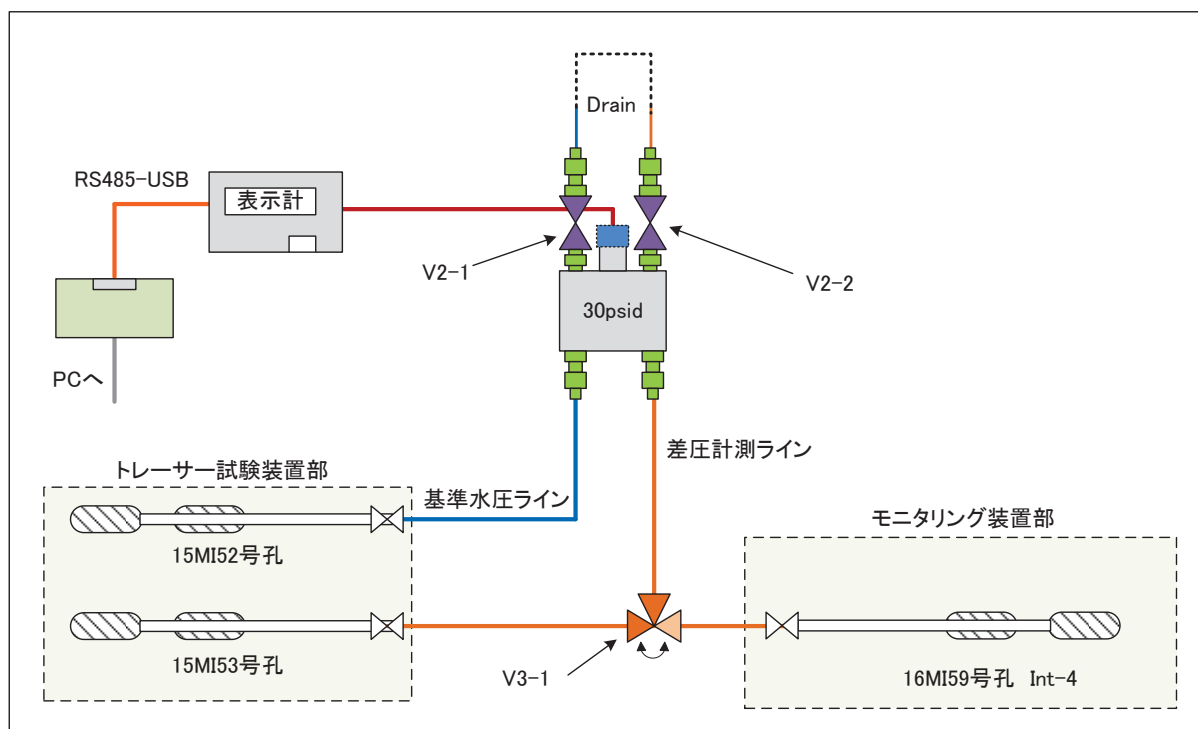


図 4.2.3-1 トレーサー試験中の差圧測定概念

#### 4.2.4 孔内装置の設置

##### (1) 孔内装置の概要

図 4.2.4-1 に孔内装置部の写真を示す。

孔内装置は孔口パッカー、中間パッカー、ロッド、およびピストンパッカーから構成される。



図 4.2.4-1 (左)ピストンパッカー (右)孔口パッカーと中間パッカー、ロッド

ピストンパッカーは、トレーサー注入ポート兼揚水ポートを有する試験区間を形成し、蛍光濃度センサー、循環流路切り替えバルブ (6 方バルブ) 、および P2 圧力センサーを内蔵している (P2=試験区間圧力)。

孔口パッカーと中間パッカーは同じ構造であり、ラバー長は 1.00m、最大外径は  $\phi 79\text{mm}$  である。中間パッカーの上位には、中間パッカーと孔口パッカーの間に形成される区間 (P4) の圧力測定ポートを有している。

使用したチューブ配管・配線の分類は以下の通りである。チューブは全てナイロン製の高耐圧タイプ (5MPa 耐圧) である。配管・配線類は、挿入作業時のチューブ類のキンクや外傷を防止するため、外径  $\phi 39.3\text{mm}$  / 内径  $32.6\text{mm}$  の蛇腹管を保護管として使用した。

- ・ P2 圧力センサー用電力信号線 :  $\phi 6\text{mm}$  / 1 本
- ・ 蛍光濃度センサー用光ファイバー線 :  $\phi 6\text{mm}$  / 1 本
- ・ トレーサー注入用チューブ配管 :  $\phi 6 \times 4\text{mm}$  / 4 本
- ・ P1、P3、P4 圧力測定用チューブ配管 :  $\phi 4 \times 2.5\text{mm}$  / 3 本
- ・ 6 方バルブ駆動用チューブ配管 :  $\phi 4 \times 2.5\text{mm}$  / 2 本
- ・ パッカー拡張用チューブ配管 :  $\phi 4 \times 2.5\text{mm}$  / 3 本

## (2) 孔内装置から測定までの手順

トレーサー試験装置の挿入手順を以下に示す。

- ① 光ファイバー、圧力センサーケーブル、その他チューブを束ね、蛇腹管内に収納した。
- ② ピストンパッカーを組み立てた（P2 圧力センサーの取り付け、蛍光濃度センサーの組込、および各ケーブル、チューブ類の末端を所定の部位へ接続）。
- ③ 挿入中にケーブル、チューブ等がキンクしないよう、巻かれた蛇腹管を伸ばした。
- ④ ピストンパッカーを孔口から挿入した（図 4. 2. 4-2）。
- ⑤ 次に接続するロッド内に蛇腹管を通し、そのロッドを孔口の装置へ接続した。
- ⑥ 以降、接続するパッカーやロッドは⑤の作業を繰り返した。挿入中は、ピストンパッカーのポートが孔壁を引きずり目詰まりしないようポートが水平向きを維持するように挿入した。
- ⑦ 所定の残尺深度に合わせ、ロッドホルダーで装置を固定した。
- ⑧ 光ファイバー、圧力センサーケーブル、その他チューブを測定機器等に接続し、通信に問題が無いことを確認した。
- ⑨ パッカー拡張前の準備として、パッカー拡張時の湧水圧による装置の浮き上がりを防止するため、水圧を逃すよう圧力測定用チューブは開放状態とし、ロッドにはバンドを取り付け孔壁のアンカーあるいはフランジに固定した。
- ⑩ パッカーの拡張圧は、間隙水圧+1MPa 程度の拡張圧を目安とした。特にピストンパッカーは間隙水圧に対し 1MPa 以上の差圧負荷が掛からないよう注意した。
- ⑪ 3 本のパッカーの拡張を確認した後、間隙水圧モニタリング装置の孔口マニホールドを設置し、孔口からの湧水を止水した。

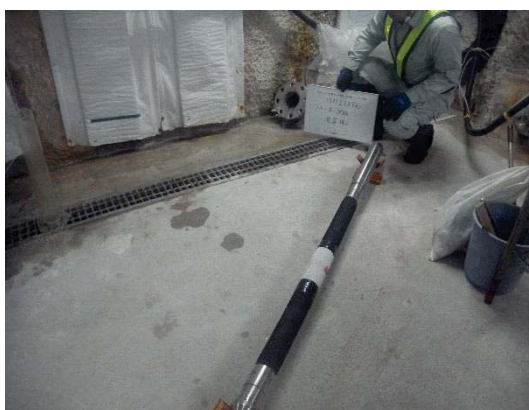


図 4. 2. 4-2 トレーサー試験装置の挿入状況

#### 4.2.5 単孔トレーサー試験

##### (1) 単孔トレーサー試験の概要

単孔トレーサー試験は同一孔で行うため、孔間トレーサー試験と比べて、試験区間の選定が容易であり短時間で実施可能である。

単孔トレーサー試験の概念、および単孔式トレーサー試験で得られる破過曲線の例を図 4.2.5-1 に示す。単孔トレーサー試験の一般的な手順を以下に示す。

- ① 地下水を定流量で注入し、定常状態を形成する（場の安定）。
- ② 一種類、あるいは複数種類のトレーサーを注入する（図 4.2.5-1 (i)）。
- ③ トレーサーの注入後、チェイサー（原位置の地下水）の注入を行う（図 4.2.5-1 (ii)）。
- ④ チェイサーの注入終了後、一定時間静置する（待機）。
- ⑤ 定流量（あるいは定圧）で揚水し、トレーサーを回収する（図 4.2.5-1 (iii)）。

試験の目的により、手順④は省略することもある。

チェイサーを注入することにより、デッドボリューム内の残留トレーサーの除去効果（フラッシング）が期待できること、およびトレーサーを広範囲に浸透させることで広域の物質移行を評価することが可能になると考えられる。また、チェイサー注入後に待機時間を設けることにより、吸着や岩盤基質部への拡散の効果が期待できる。

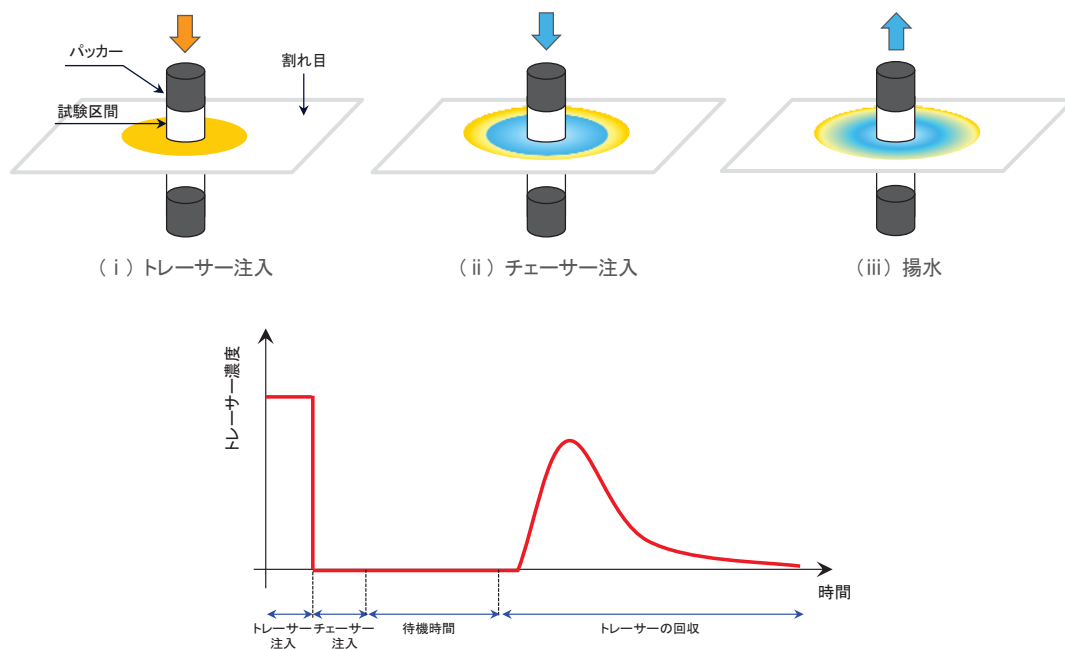


図 4.2.5-1 単孔トレーサー試験のトレーサー濃度変化の模式図および破過曲線の例

## (2) 単孔トレーサー試験の手順

単孔トレーサー試験は、図 4.2.5-2 に示す配管・流路を構築し以下の手順に従い実施した。

- ① 置換タンク内のトレーサー溶液を、ポンプあるいは湧水圧により孔内の循環流路内へ充填した。孔内の湧水圧を用いる場合は、V3-2 バルブの操作により置換タンク上部側を加圧した。送水したトレーサーは V1-1 バルブを開放して排出し、その排水量または蛍光濃度により充填を確認した。トレーサーの充填後も V3-2 バルブを R 側としておけば、V1-1 バルブの閉鎖後に置換タンク内を間隙水圧と同圧まで加圧できる。
- ② 定常場の形成前に、注水用／揚水用ポンプの流量調整、およびフラクションコレクターの採取間隔と採取量を調整しておく。ポンプ等の調整完了後、V3-1 バルブを注入の R 側へ向け、注水用モノポンプを駆動した。注水は定流量とし流速場が安定するまで継続した。
- ③ 6 方バルブ (V6-1) を D-E 側へ切り替え、トレーサーを試験区間内へ注入した。トレーサーの注入状況は、注入した孔内のトレーサー濃度 (C1、あるいは C2) および置換タンクの水位変化で確認した。
- ④ 所定時間までトレーサーを注入した後、6 方バルブ (V6-1) を F-E 側へ戻し、チェイサーを注入した。チェイサーの注入時間はトレーサー濃度が下がりきるまでを原則とし、所定時間の経過後、注水用ポンプを停止した。
- ⑤ 試験によっては、チェイサー注入停止後から揚水までの一定の待機時間を設けた。
- ⑥ V3-1 バルブを揚水側に切り替え、揚水用モノポンプを駆動した。また、揚水開始と同時にフラクションコレクターの作動を開始し、一定時間間隔で遠沈管に地下水をサンプリングした。サンプリング以外の地下水は、回収率を把握するため排水タンクに貯水した。回収率の測定は原則として 60 分、120 分の 2 回、あるいは 180 分を加えた 3 回とした。

なお、注水／揚水を 1 台のポンプで行う場合は、注水時はポンプの回転方向を正回転、揚水時は逆回転とした。ポンプ 1 台で単孔トレーサーを行う場合は、注水／揚水流量が同じ場合のケースのみとした。

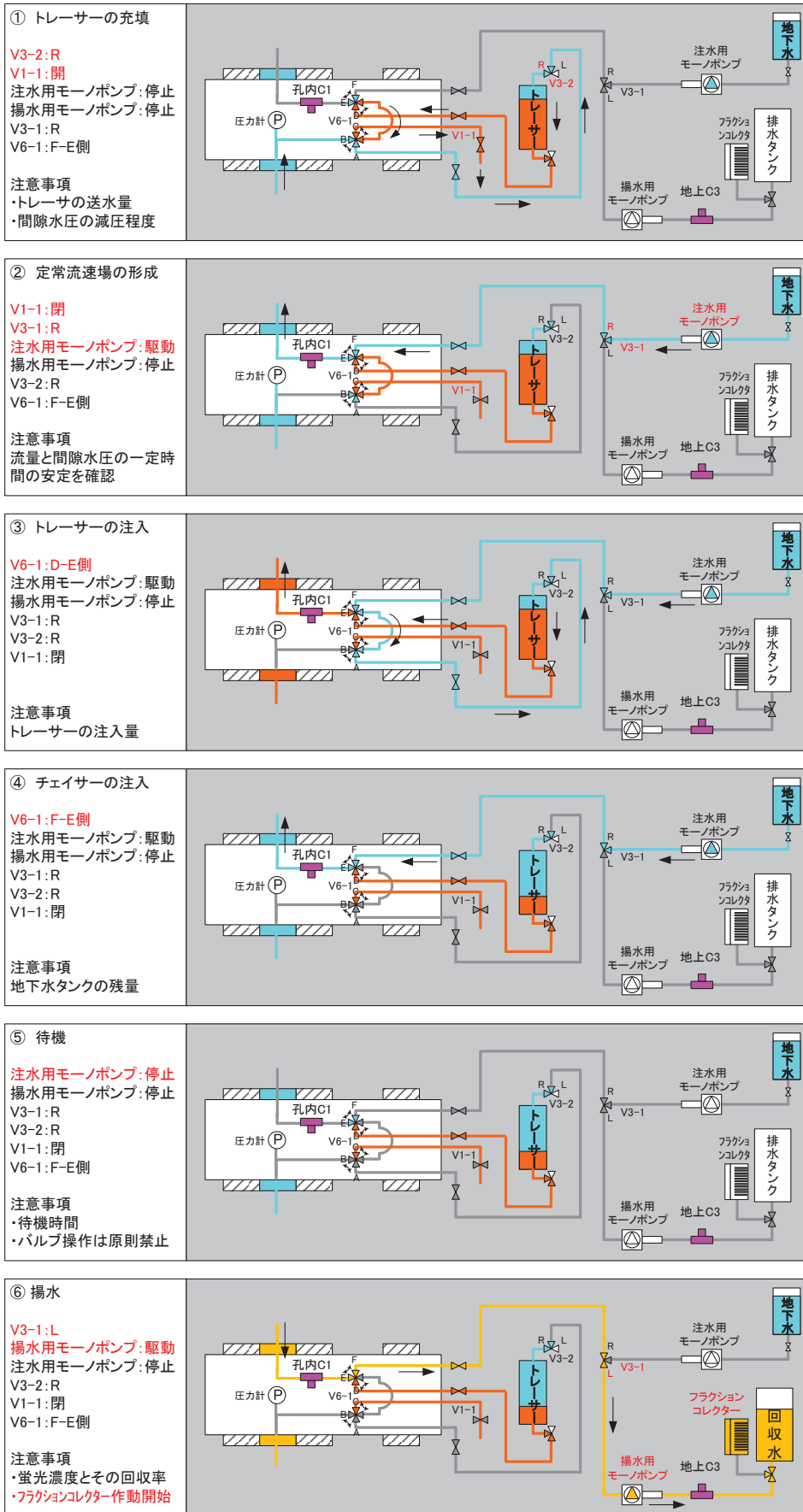


図 4.2.5-2 単孔トレーサー試験の流路と手順



#### 4.2.6 孔間トレーサー試験

##### (1) ダイポール試験の概要

孔間トレーサー試験はダイポール試験を実施した。ダイポール試験は 2 本のボーリング孔間に注水、揚水により動水勾配を生じさせ、注水側から注入したトレーサーを揚水側から回収する試験である。

ダイポール試験は、単孔トレーサー試験のような放射状のトレーサー試験に比べると、ダイポールの比率により孔間の動水勾配を人為的に調整することができるため、トレーサー試験の中では透水性の低い地盤・岩盤、あるいは孔間距離が大きい場合でも比較的实施しやすい試験方法とされている。

ダイポール試験の概念を図 4.2.6-1 に示す。

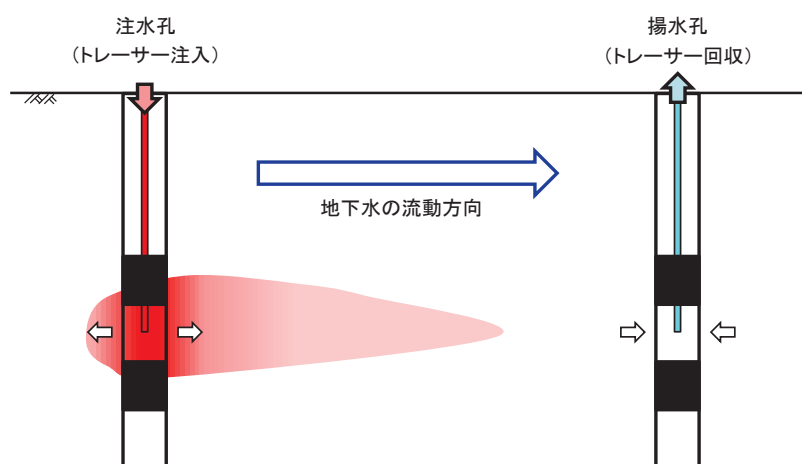


図 4.2.6-1 ダイポール試験の概念

##### (2) ダイポール試験の手順

ダイポール試験の配管・流路と手順を図 4.2.6-2 に示す。

- ① 置換タンク内のトレーサー溶液を、ポンプあるいは湧水圧により孔内の循環流路内へ充填した。充填操作とその確認方法は単孔トレーサーと同様である。注水／揚水孔を入れ替える場合は、同様の操作を揚水孔側で行う。
- ② 注水、揚水用モノポンプを同時に駆動し定常流速場を形成した。
- ③ 注水孔の 6 方バルブ (V6-1) を D-E 側へ切り替え、トレーサーを試験区間内に注入した。フラクションコレクターの開始時期は、揚水側の蛍光濃度 (C2) の上昇を確認した後、揚水流量と流路長さから地上への概ねの到達時間を算定して決定した。
- ④ 所定時間までトレーサーを注入した後、6 方バルブを F-E 側へ戻しチェイサーを注入した。回収率の算定は単孔トレーサー試験と同様である。

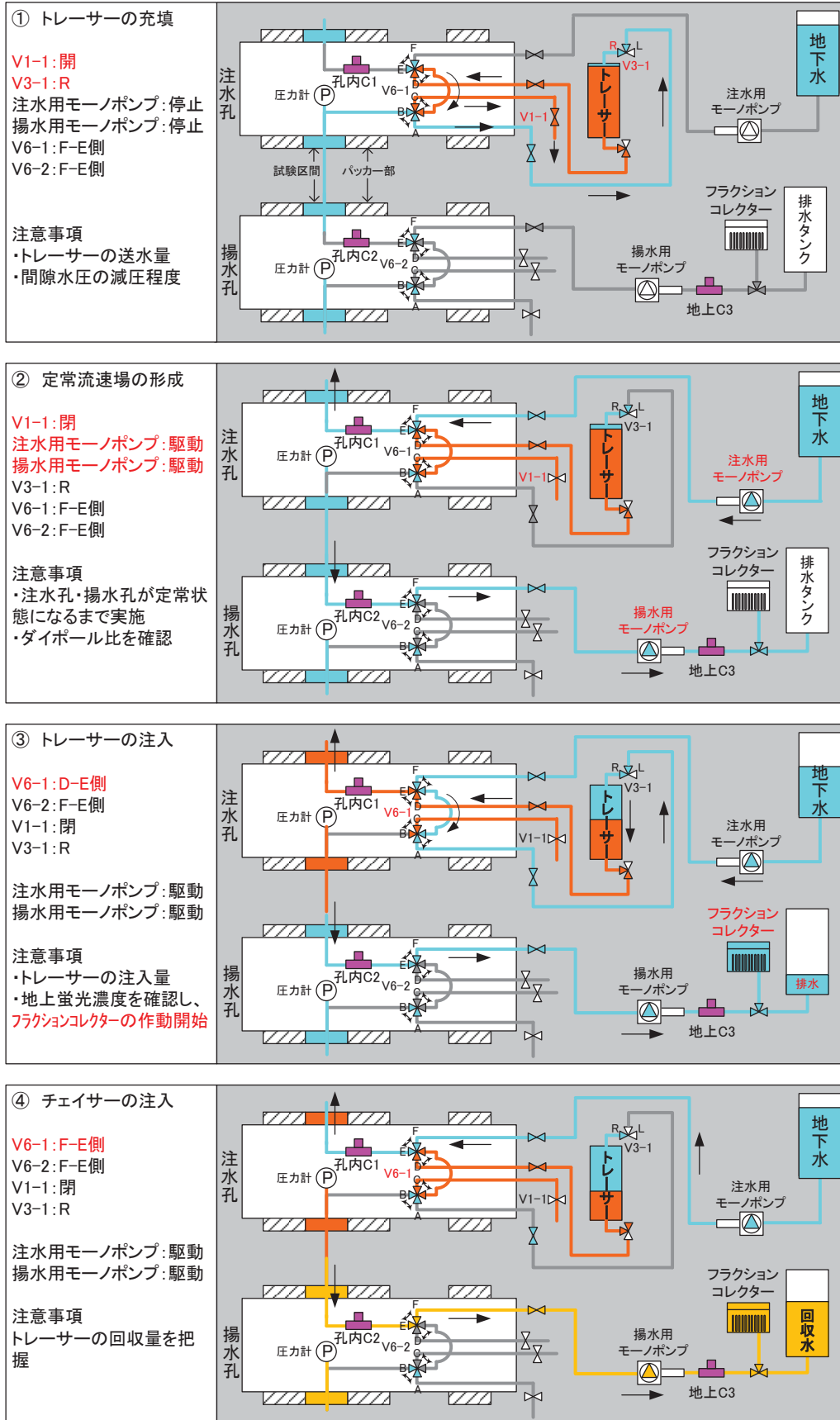


図 4.2.6-2 ダイポール試験の流路と手順

#### 4.2.7 室内分析

トレーサー試験中にサンプリングした地下水試料について室内分析を行った。

##### (1) 分析項目

今年度の分析項目は重水素(以下、 $\delta D$ と記載)、蛍光染料(ウラニン、アミノG酸)、イオン ( $Rb^+$ 、 $Ba^{2+}$ )の濃度分析とした。分析項目と分析方法を表 4.2.7-1 に示す。この内、ウラニンは現地でも蛍光分光光度計を用いて濃度測定を行った。現場測定では、日立製作所の F-2700 Fluorescence Spectrophotometer の蛍光分光光度計を使用した(表 4.2.2-2)。

表 4.2.7-1 分析項目と分析方法

分析項目	分析法	使用装置
$Rb^+$ 、 $Ba^{2+}$	ICP質量分析法(ICP-MS)	Agilent Technologies社製 Agilent 7500Ce
水素酸素同位体比( $\delta D$ )	元素分析-質量分析法	Los Gatos Research社製 水同位体分析装置DLT-100
ウラニン、アミノG	蛍光分光分析法	日立ハイテクノロジーズ社製 日立分光蛍光光度計F-7000

##### (2) 前処理方法

室内分析では、試料を0.20 $\mu$ mPTFE フィルターでろ過し、目的の分析項目の予想濃度、マトリクスや妨害元素と装置への負荷を考慮して希釈した。分析項目ごとの希釈方法を表 4.2.7-2 に示す。ウラニンはpH9で安定することから、蛍光測定用の前処理ではpH調整も兼ねて2倍以上の希釈を行った。これに対して、現地の分析では基本的に前処理は行っていない。

表 4.2.7-2 希釈方法

分析法	希釈方法
ICP質量分析法(ICP-MS)	1%硝酸溶液となるように61%硝酸を添加し、超純水で希釈
元素分析-質量分析法	トレーサーを添加していない瑞浪地下水で希釈
蛍光分光分析法	0.05mol/L四ホウ酸ナトリウム水溶液を用いて希釈

### 4.3 試験結果

#### 4.3.1 トレーサー試験実施場所の概要

試験現場は、JAEA 瑞浪超深地層研究所の深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑である。試験対象としたボーリング孔は、15MI52 号孔と 15MI53 号孔である。トレーサー試験の区間および 16MI59 号孔の間隙水圧モニタリング区間の平面分布を図 4.3.1-1 に示す。

試験深度（掘削長表記の mabh とする）は以下の通りである。

- 15MI52 号孔 : 15.21~15.41mabh (試験区間長 : 0.2m)
- 15MI53 号孔 : 14.95~15.15mabh (試験区間長 : 0.2m)

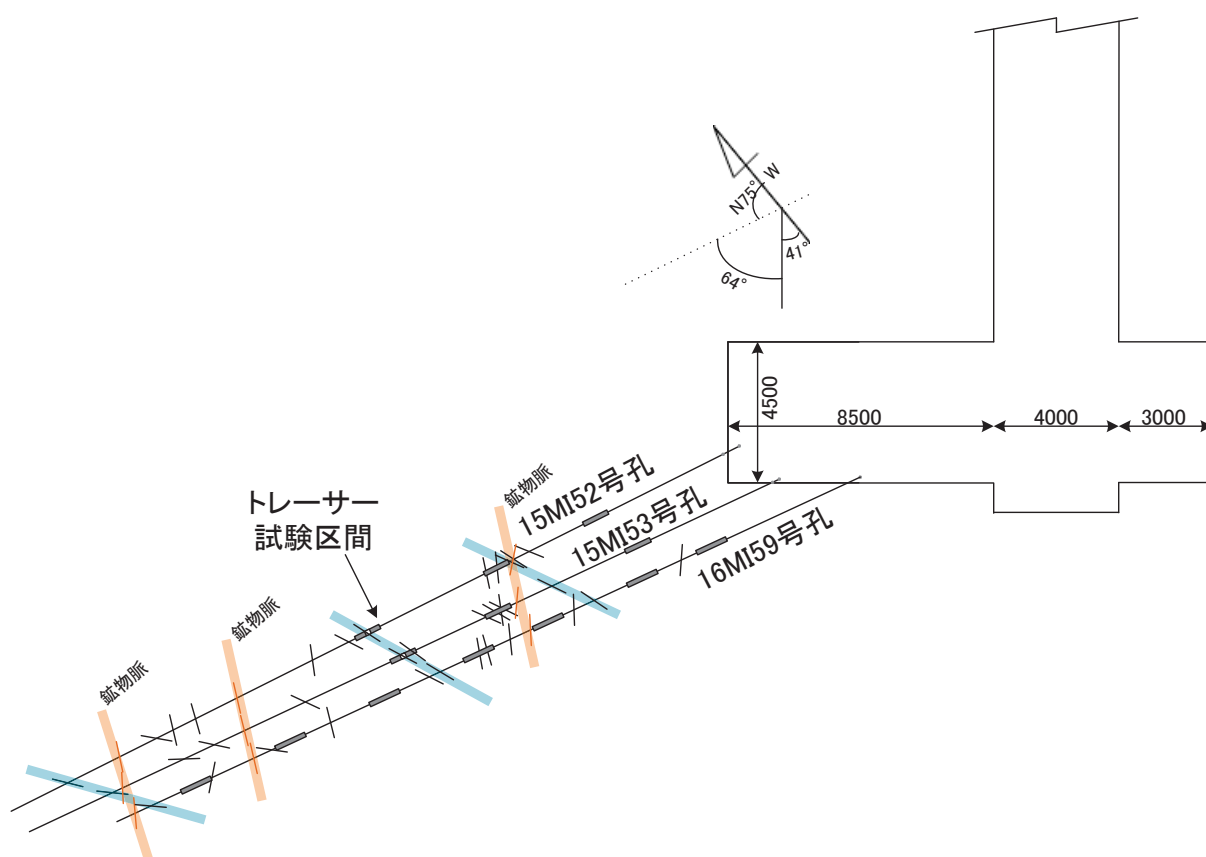


図 4.3.1-1 トレーサー試験区間および 16MI59 号孔の間隙水圧モニタリング区間の平面分布

#### 4.3.2 蛍光濃度センサーのキャリブレーション

キャリブレーションは試験毎に更新するのが理想的だが、孔内のセンサーを試験毎にパッカーごと回収して再検量することは現実的でないため、孔内設置前の11月2日に実施した検量線を全試験結果に適用した。

##### (1) キャリブレーション結果

2台のVer. 3.1の蛍光センサーの内、15MI52号孔の孔内測定用(C1)の検量線を図4.3.2-1に、15MI53号孔の孔内測定用(C2)の検量線を図4.3.2-2に示す。また、蛍光濃度センサーVer. 1.0の検量線を図4.3.2-3に示す。加圧条件は、耐圧が1.0MPaのVer. 1.0を含めた同一回路で実施したため1MPaとした。

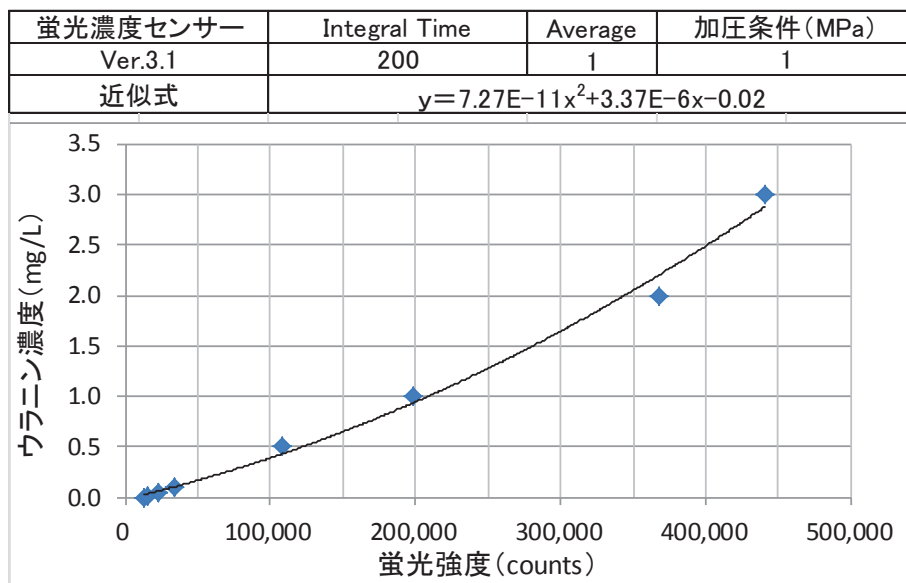


図 4.3.2-1 蛍光濃度センサーVer. 3.1 (C1) の検量線 (50m 光ファイバー使用)

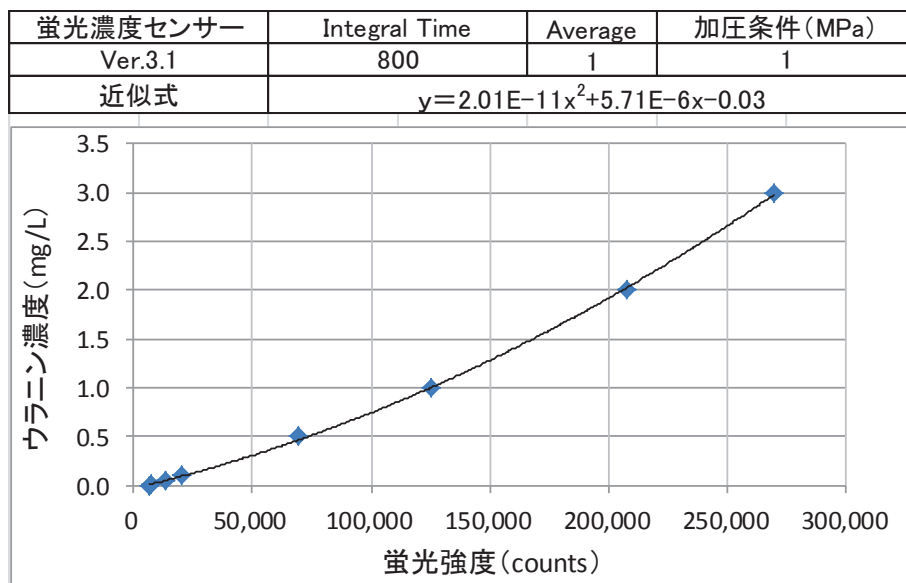


図 4.3.2-2 蛍光濃度センサーVer. 3.1 (C2) の検量線 (50m 光ファイバー使用)

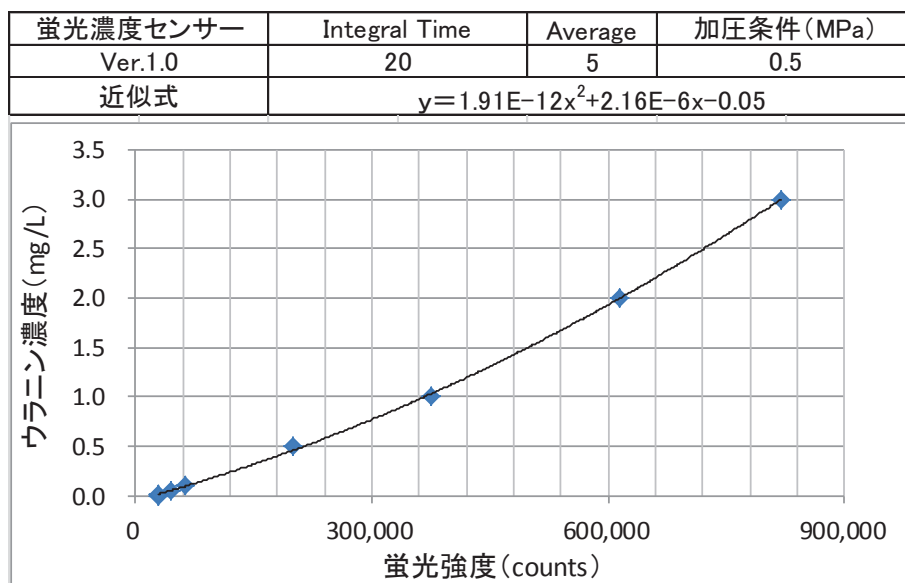


図 4.3.2-3 蛍光濃度センサーVer.1.0 (C3) の検量線

## (2) 蛍光濃度センサーのデータ補正

トレーサー試験で測定した蛍光濃度は、キャリブレーション結果を反映した値が正常値となるが、昨年度と同様に孔内設置後の蛍光強度 (Counts) は大きく減衰した値を示し、特に 15MI53 号孔の C2 センサーで顕著であった。孔内設置後に減衰した原因として、Ver. 3.1 センサーは耐圧性能の改良を施しており静的な耐圧性を有しているものの、区間圧力の開放など大きな圧力変化に対する耐性不足の可能性などが考えられる。

従って、試験で得られた蛍光濃度は、トレーサー回収過程 (揚水) における蛍光濃度センサーの蛍光強度、および蛍光分光光度計の蛍光濃度の相関から求めた線形近似式を用いて補正した。また、揚水流路における各蛍光濃度センサーと検量水サンプリング箇所との距離差によるタイムラグは、それぞれの破過曲線のピーク時間を一致させることで是正し、近似式の誤差が小さくなることを確認した。ただし、揚水流路のチューブ内分散による影響は考慮していないため、実際の試験孔内の濃度と比べると過小評価している可能性があることに留意する必要がある。

なお、蛍光分光光度計の実測値を取得できない孔間トレーサー試験の注水孔の蛍光濃度は、試験前に実施した地下水とトレーサー原液の蛍光濃度との 2 点間線形近似により補正した。また、蛍光強度が極度に減衰した C2 センサーの補正データは、ノイズ幅が大きく拡大されてしまうため移動平均を用いて平滑化した。

#### 4.3.3 水圧測定

##### 4.3.3.1 測定状況

水圧測定は 15MI52 号孔の試験区間を基準水圧として、15MI53 号孔の試験区間、および 16MI59 号孔の間隙水圧モニタリング装置 Int4 との水頭差を把握した。測定は原則として各試験開始前とした。表 4.3.3-1 に測定区間の深度を示す。

表 4.3.3-1 水圧測定区間の深度

孔名	設置装置	区間	上端深度 (mabh)	下端深度 (mabh)	区間長 (m)
15MI52 号孔	トレーサー試験装置	P2	15.21	15.41	0.20
15MI53 号孔	トレーサー試験装置	P2	14.95	15.15	0.20
16MI59 号孔	モニタリング装置	Int4	16.00	18.60	2.60

トレーサー試験期間中（11/22～1/18）に水理場への影響が予想された 16MI59 号孔のモニタリング装置のパッカーの追加圧、および欠損期間の長い年末年始などの連続休工日の期間を表 4.3.3-2 に示す。

表 4.3.3-2 トレーサー試験期間中の主要なイベントログ

日付	対象孔	イベント
11/30 8:00	16MI59 号孔	P3 パッカーの追加圧（パッカー圧の減少により Int3 と Int4 が連通していた）
12/3～12/6	全孔	スカフォード点検に伴う休工
12/23～1/10	全孔	年末年始休工

##### 4.3.3.2 測定結果

測定結果一覧を表 4.3.3-3、水頭差の経時変化を図 4.3.3-1 に示す。測定は 1 区間に付き 10 分間程度の水圧安定を確認し、その平均値を記録した。

図 4.3.3-1 より、15MI52 号孔の P2 と 16MI59 号孔\_Int4 との水頭差は、12 月 7 日までは-5mm 以下で推移していたが、12 月 12 日以降では+10mm～+25mm にシフトし、16MI59 号孔\_Int4 と 15MI53 号孔の P2 との動水勾配が逆転した。この期間は、16MI59 号孔\_モニタリングの P3 パッカー追加圧と時期が合わず、明確な原因は特定できない。

一方、15MI52 号孔の P2 と 15MI53 号孔の P2 の水頭差はほとんど無く、期間を通じて変化も少なかった。

表 4.3.3-3 15MI52 号孔\_P2 に対する水頭差測定結果一覧

測定日	15MI53 号孔 P2	16MI59 号孔 Int4	備考
	差圧 (mm)	差圧 (mm)	
11 月 22 日	-2.9	-14.1	
12 月 1 日	-1.5	-5.5	59 孔 P3 パッカー加圧後
12 月 7 日	-1.8	-9.6	12/3~12/6 休工後
12 月 12 日	-0.8	+15.3	
12 月 13 日	-0.3	+16.0	
12 月 14 日	-0.4	+23.0	
12 月 15 日	-0.3	+16.6	
12 月 16 日	0.0	+16.8	
12 月 19 日	-0.2	+13.4	
12 月 20 日	-0.4	+11.7	
1 月 11 日	-0.2	+16.9	年末年始の休工後
1 月 12 日	-0.3	+6.6	
1 月 16 日	-0.2	+17.7	

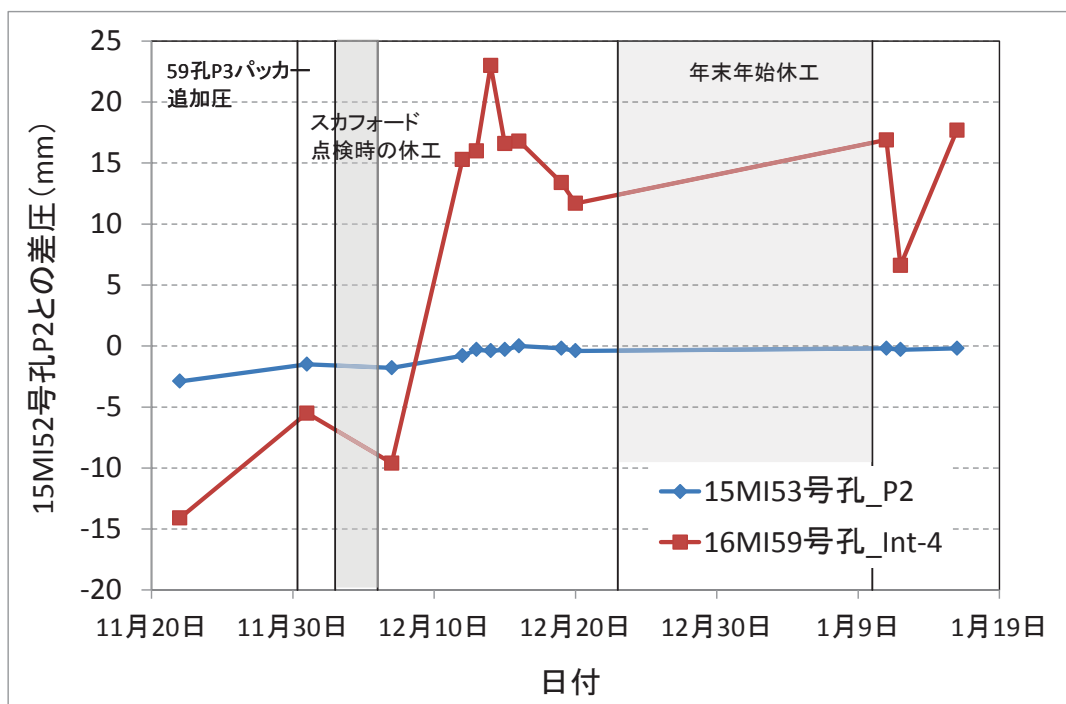


図 4.3.3-1 試験期間中の水頭差の推移



#### 4.3.4 原位置試験結果

単孔トレーサー試験、孔間トレーサー試験結果を試験ごとに示す。試験の名称は、昨年度と同様に表 4.3.4-1 に示す規則に基づき表記した。

<長時間の孔間トレーサー試験の通し番号>

トレーサー試験中に採取した室内分析用のサンプリング試料は、フラクションコレクターの起動回数を通し番号とした。フラクションコレクターの最大連続採取は 120 本であるため、120 本以上のサンプリングが必要な場合は、フラクションコレクターを再起動した。この場合、1 回の試験で複数のサンプリング番号が発生するため、室内分析用のサンプリング試料の通し番号と整合性を取るために、試験名もサンプリング回数に合わせた番号を付けた。

表 4.3.4-1 試験名の読み方

1、2 桁目	試験実施年度	16 : 2016 年
3 桁目	試験種目	S : 単孔トレーサー試験 W : ダイポール試験
4~7 桁目	単孔トレーサー試験の実施孔の番号 6、7 桁目はblank (以下前詰めで記入) ----- 孔間トレーサー試験の注水・揚水孔番号 4、5 桁目を注水孔 6、7 桁目を揚水孔	52 : 15MI52 号孔 53 : 15MI53 号孔
8 桁目	今年度は 2 孔ともトレーサー試験装置	T : トレーサー試験装置
9 桁目	単孔トレーサー試験、孔間トレーサー試験の実施 順の通し番号	1、2、3 …

#### 4.3.5 単孔トレーサー試験結果

##### (1) 試験条件

単孔トレーサー試験の試験ケースについて、表 4.3.5-1 に 15MI52 号孔の試験一覧、表 4.3.5-2 に 15MI53 号孔の一覧を示す。

表 4.3.5-1 15MI52 号孔の単孔トレーサー試験ケース

試験名		16S52T1	16S52T2	16S52T3	16S52T4	16S52T5	16S52T6	
試験条件	注水流量(設定値)	mL/min	100	100	100	100	50	100
	揚水流量(設定値)	mL/min	100	100	50	25	50	50
	注水流量(流量計平均)	mL/min	88.26	83.04	93.18	99.87	49.59	99.08
	揚水流量(流量計平均)	mL/min	115.23	114.33	60.23	23.71	49.32	49.82
	定常場の形成		11/22 13:40	11/24 12:10	11/25 8:40	12/7 8:32	12/8 8:20	12/9 8:00
	トレーサー注入開始		11/22 14:00	11/24 13:30	11/25 9:40	12/7 9:15	12/8 9:00	12/9 8:35
	チェイサー注入開始		11/22 14:10	11/24 13:40	11/25 9:50	12/7 9:25	12/8 9:20	12/9 8:55
	待機切り替え		-	-	-	-	-	-
	揚水開始		11/22 14:15	11/24 13:45	11/25 9:55	12/7 9:30	12/8 9:30	12/9 9:00
	サンプリング開始		11/22 14:15	11/24 13:45	11/25 9:55	12/7 9:30	12/8 9:30	12/9 9:00
	サンプリング停止		11/22 16:15	11/24 15:45	11/25 11:55	12/7 11:30	12/8 11:30	12/9 11:00
	トレーサー注入時間	min	10	10	10	10	20	20
	チェイサー注入時間	min	5	5	5	5	10	5
	待機時間	min	-	-	-	-	-	-
トレーサー量	L	0.883	0.830	0.932	0.999	0.992	1.982	
チェイサー量	L	0.441	0.415	0.466	0.499	0.496	0.495	
原液濃度:設定値	ウラニン	mg/L	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
	アミノG酸	mg/L	-	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
	重水素	mg/L	-	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
	ルビジウム	mg/L	-	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
	バリウム	mg/L	-	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20

表 4.3.5-2 15MI53 号孔の単孔トレーサー試験ケース

試験名		16S53T7	16S53T8	16S53T9	16S53T10	16S53T11	
試験条件	注水流量(設定値)	mL/min	100	100	100	100	
	揚水流量(設定値)	mL/min	50	50	50	25	50
	注水流量(流量計平均)	mL/min	99.10	98.79	99.07	99.51	99.17
	揚水流量(流量計平均)	mL/min	50.87	50.01	50.50	25.21	51.15
	定常場の形成		12/12 9:04	12/13 8:38	12/14 8:25	12/15 8:31	12/16 8:29
	トレーサー注入開始		12/12 9:45	12/13 9:10	12/14 9:00	12/15 9:00	12/16 8:45
	チェイサー注入開始		12/12 9:55	12/13 9:20	12/14 9:20	12/15 9:20	12/16 8:55
	待機切り替え		-	-	-	-	12/16 9:00
	揚水開始		12/12 10:00	12/13 9:30	12/14 9:30	12/15 9:30	12/16 10:00
	サンプリング開始		12/12 10:00	12/13 9:30	12/14 9:30	12/15 10:00	12/16 10:00
	サンプリング停止		12/12 12:00	12/13 12:30	12/14 12:30	12/15 13:00	12/16 12:00
	トレーサー注入時間	min	10	10	20	20	10
	チェイサー注入時間	min	5	10	10	10	5
	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	
原液濃度:設定値	ウラニン	mg/L	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
	アミノG酸	mg/L	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
	重水素	mg/L	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
	ルビジウム	mg/L	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
	バリウム	mg/L	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20

a. 使用したトレーサー

試験には非収着性トレーサーとして、ウラニン、アミノG酸、重水素、収着性トレーサーとしてルビジウム（以下、 $Rb^+$ と記載）、バリウム（以下、 $Ba^{2+}$ と記載）を用い、それぞれのトレーサーを500m立坑直下の釜場の地下水を溶媒として混合した。なお、最初実施した16S52T1は、以後の試験条件設定の基礎資料の取得を主目的としたため、非収着性トレーサーのウラニンのみとした。

b. 蛍光濃度センサーの配置と名称

蛍光濃度センサーは孔内および地上に配置した。配置箇所と名称は後述する孔間トレーサー試験と共通とし、15MI52号孔内の蛍光濃度センサーを「C1」、15MI53号孔内の蛍光濃度センサーを「C2」、および地上の蛍光濃度センサーを「C3」と称する。

今年度の試験では、全ての試験ケースでC1 (Ver. 3.1)、C2 (Ver3.1)、C3 (Ver1.0) とし、蛍光濃度センサーの使用箇所とバージョンを固定した。

c. 試験区間からフラクシオンコレクターまでの容量

送水用の配管は全て内径4mmのチューブを用いており、1m当たりの容量を12.57mLとした。揚水ラインの配管は、注水/揚水流量が同じである16S52T1、16S52T2では注水用ポンプを逆回転させることで揚水を行ったが、16S52T3以降の試験では、注水/揚水流量が異なるため2台のポンプを注水用/揚水用で固定した。従って、揚水ラインの容量は16S52T2以前と16S52T3以後で分けて整理した。

各試験における試験区間からフラクシオンコレクターまでの揚水ラインの配管容量を表4.3.5-3に示す。また、この配管構成の内訳を図示したものを図4.3.5-1、図4.3.5-2に示す。

表 4.3.5-3 試験区間からフラクシオンコレクターまでの容量

試験名	試験区間から フラクシオンコレクター までの総容量(mL)	チューブ容量(mL) (チューブ長さ(m))	ポンプ容量(mL)
16S52T1～T2	816	736 (58.54)	80
16S52T3～T6 16S53T7～T11	815	735 (58.46)	80

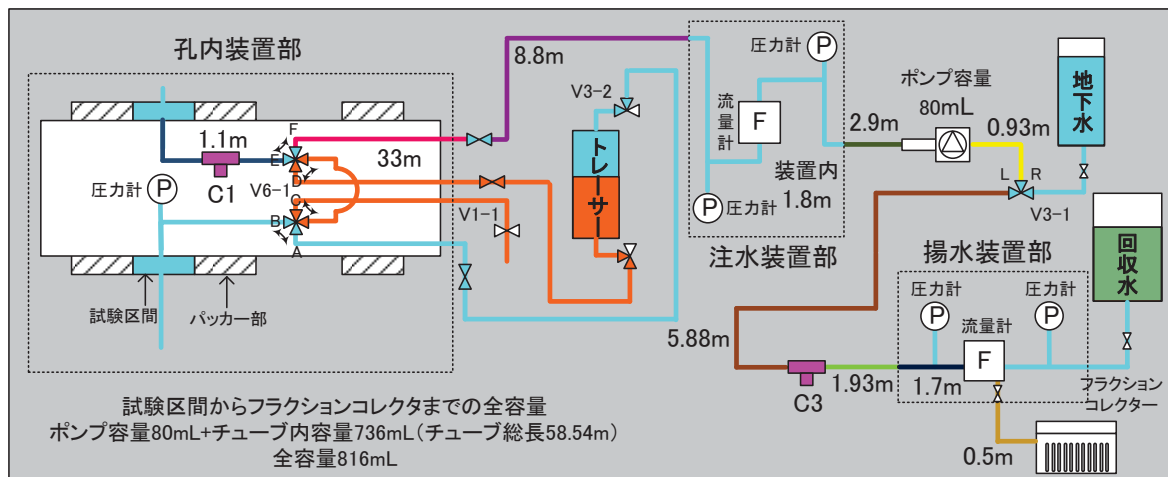


図 4.3.5-1 16S52T1、16S52T2 の配管図と容量

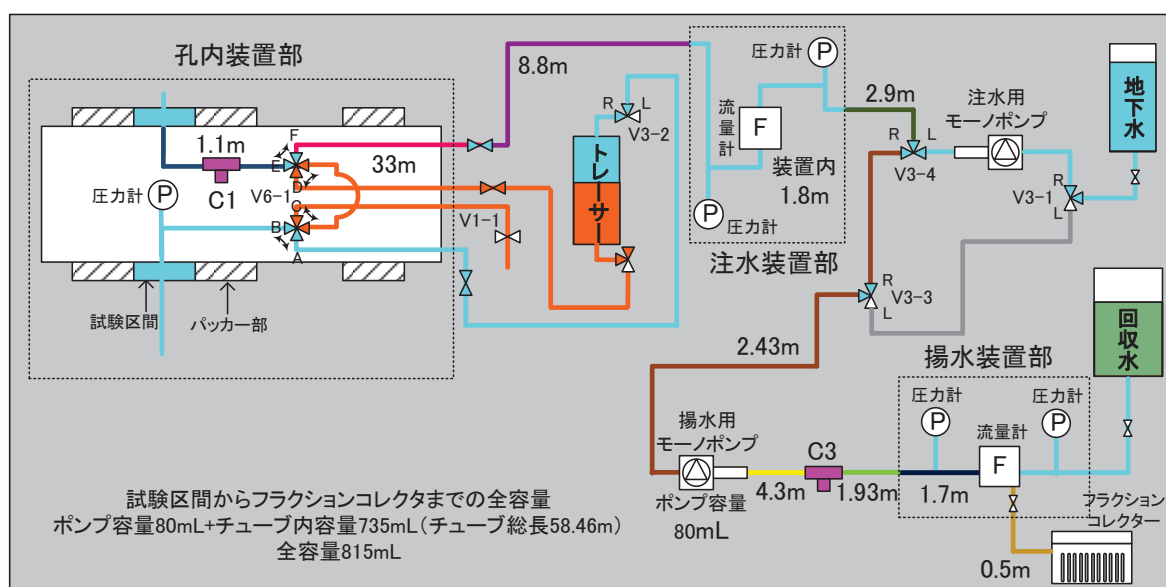


図 4.3.5-2 16S52T3~T6、16S53T7~T10 の配管図と容量

(2) 試験結果

1) 16S52T1

試験の注水／揚水配管の構成は、図 4.3.5-1 に示す通りである。図 4.3.5-3 に 16S52T1 の試験条件と破過曲線、図 4.3.5-4 に圧力と流量の関係および 16MI59 号孔の圧力応答を示す。16S52T1 では、トレーサー回収時（揚水）の地下水のサンプリングを行っていないため、C3 センサーは測定値を表示し、C1 センサーの破過曲線は原液と地下水の 2 点線形近似式から補正した。

16S52T1 では、注水／揚水の設定流量が同じためモーターポンプを正回転／逆回転により流量を制御した。

試験条件一覧

試験名			16S52T1
試験孔			15MI52 号孔
試験実施日			2016/11/22
トレーサー材			ウラニン
流量	注水流量	mL/min	88.26
	揚水流量	mL/min	115.23
試験時間	トレーサー注入	min	10
	チェイサー注入	min	5
	待機	min	0
	トレーサー回収(揚水)	min	120
	サンプリング採取	min	120
蛍光濃度センサー	C1 (孔内)		Ver. 3.1
	C3 (地上)		Ver. 1.0

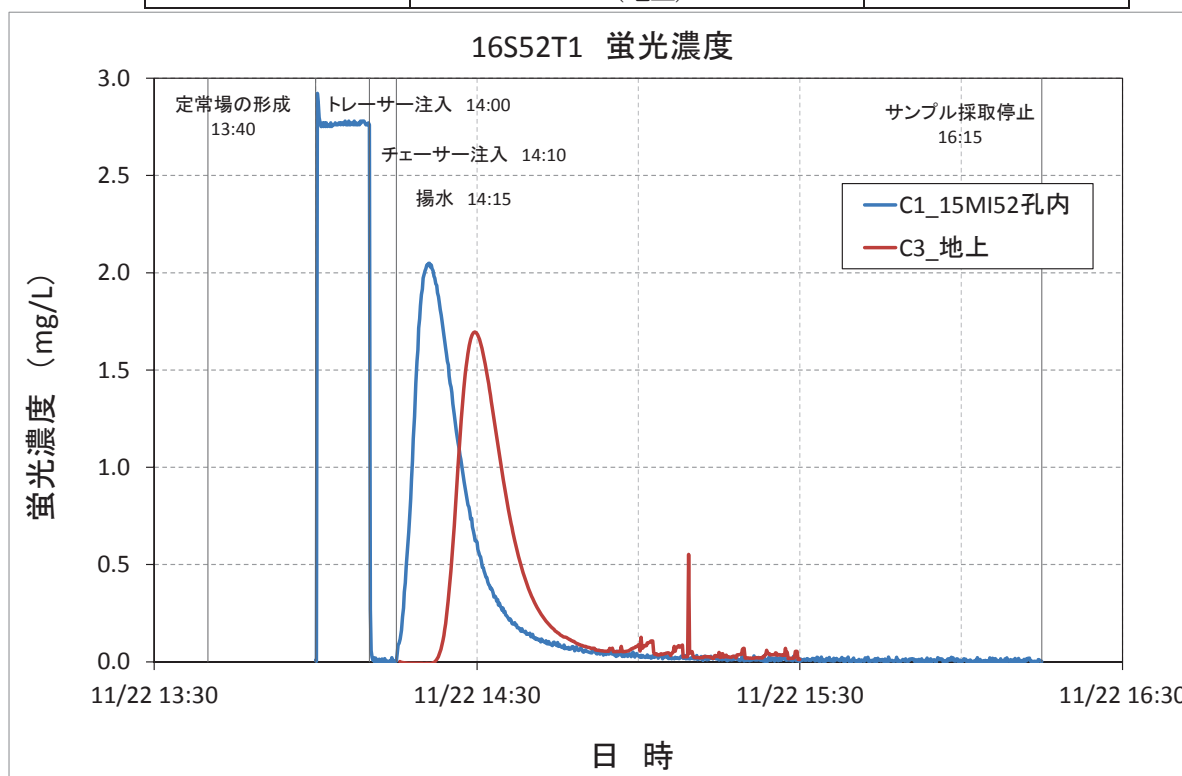


図 4.3.5-3 16S52T1 の試験条件と破過曲線

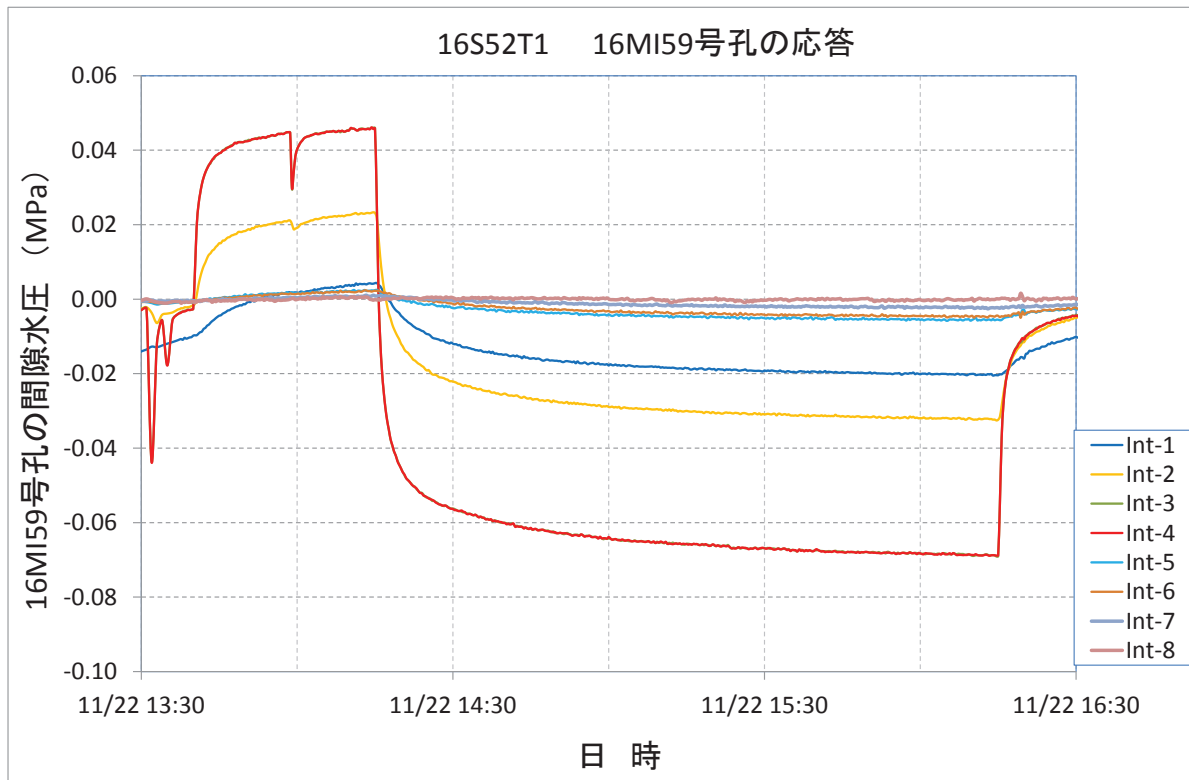
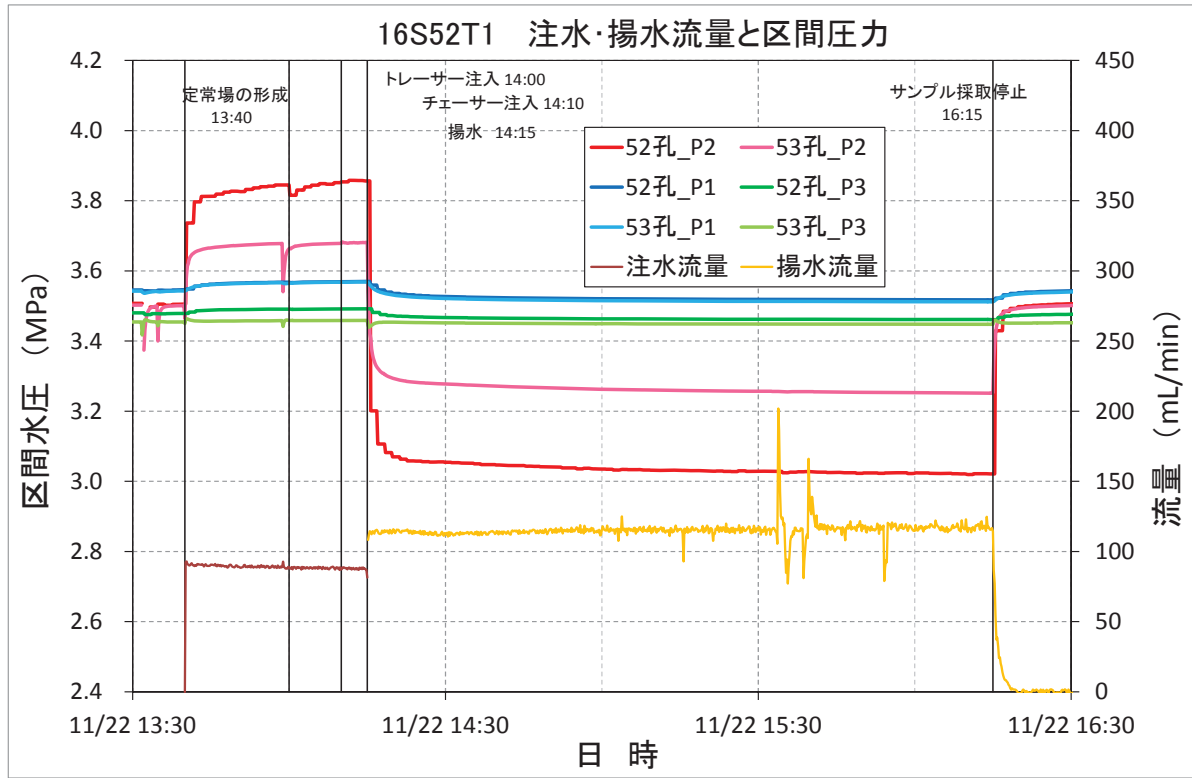


図 4.3.5-4 16S52T1 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答

2) 16S52T2

16S52T1 と同様の注水／揚水配管構成により、モノポンプを正回転／逆回転により流量を制御した（図 4.3.5-1）。図 4.3.5-5 に 16S52T2 の試験条件と破過曲線、図 4.3.5-6 に圧力と流量の関係および 16MI59 号孔の圧力応答を示す。

試験条件一覧

試験名			16S52T2
試験孔			15MI52 号孔
試験実施日			2016/11/24
トレーサー材			ウラン、アミノ G、重水素、Rb <sup>+</sup> 、Ba <sup>2+</sup>
流量	注水流量	mL/min	83.04
	揚水流量	mL/min	114.33
試験時間	トレーサー注入	min	10
	チェイサー注入	min	5
	待機	min	0
	トレーサー回収(揚水)	min	120
蛍光濃度センサー	C1 (孔内)		Ver. 3.1
	C3 (地上)		Ver. 1.0

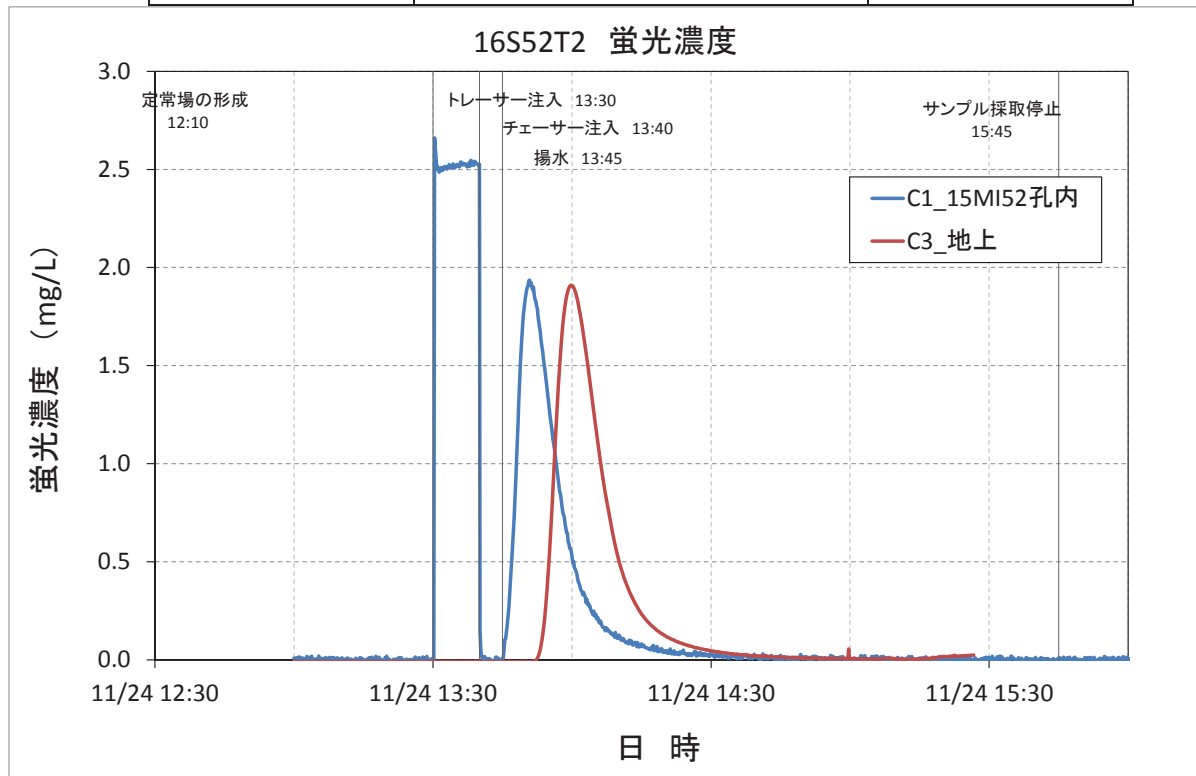


図 4.3.5-5 16S52T2 の試験条件と破過曲線

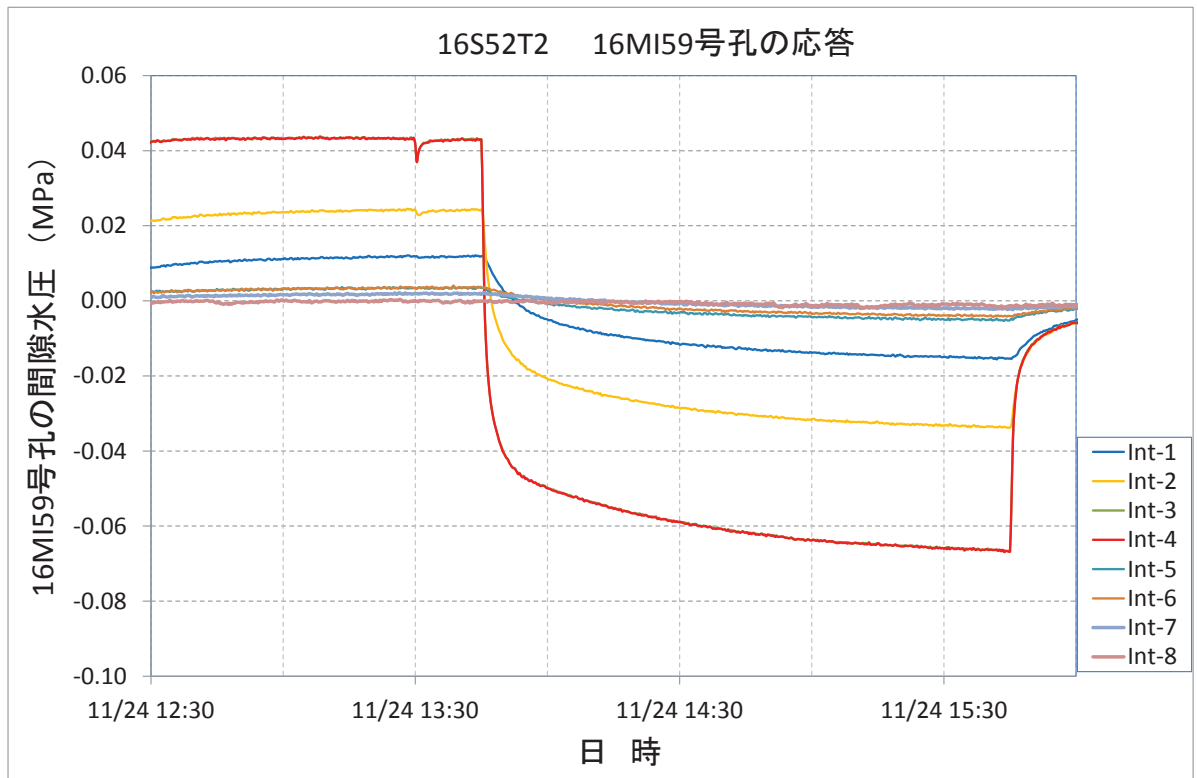
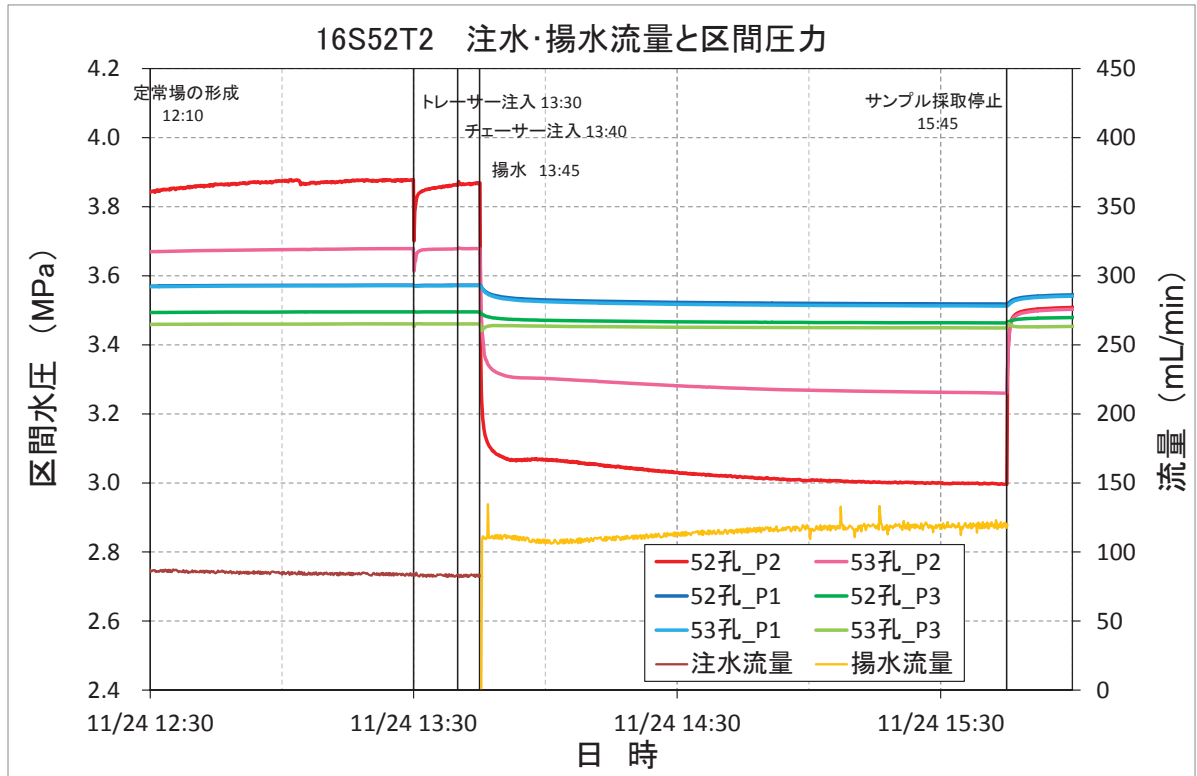


図 4.3.5-6 16S52T2 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答



3) 16S52T3

試験の注水／揚水配管の構成は、図 4.3.5-2 に示す通りである。注水／揚水の設定流量が異なるため、注水用、揚水用の 2 台のモノポンプを用いて試験を行った。図 4.3.5-7 に 16S52T3 の試験条件と破過曲線、図 4.3.5-8 に圧力と流量の関係および 16MI59 号孔の圧力応答を示す。

試験条件一覧

試験名			16S52T3
試験孔			15MI52 号孔
試験実施日			2016/11/25
トレーサー材			ウラン、アミノ G、重水素、Rb <sup>+</sup> 、Ba <sup>2+</sup>
流量	注水流量	mL/min	93.18
	揚水流量	mL/min	60.23
試験時間	トレーサー注入	min	10
	チェイサー注入	min	5
	待機	min	0
	トレーサー回収(揚水)	min	120
蛍光濃度センサー	C1 (孔内)		Ver. 3.1
	C3 (地上)		Ver. 1.0

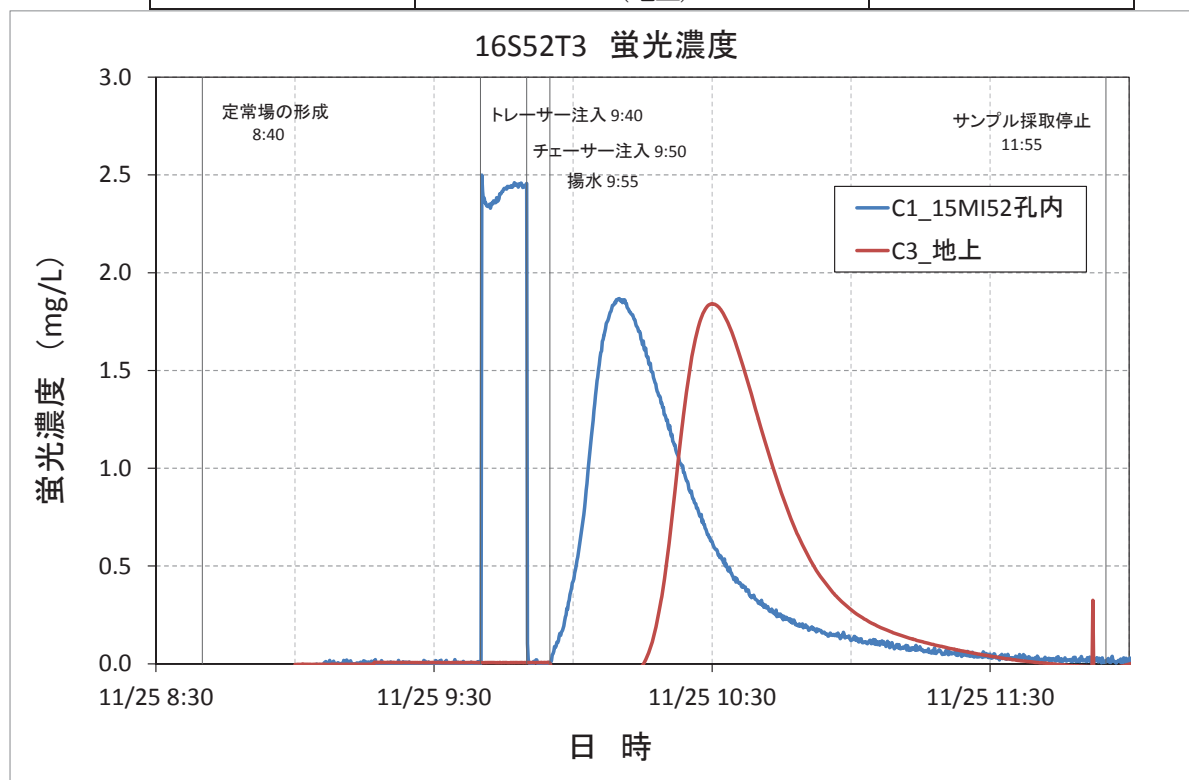


図 4.3.5-7 16S52T3 の試験条件と破過曲線

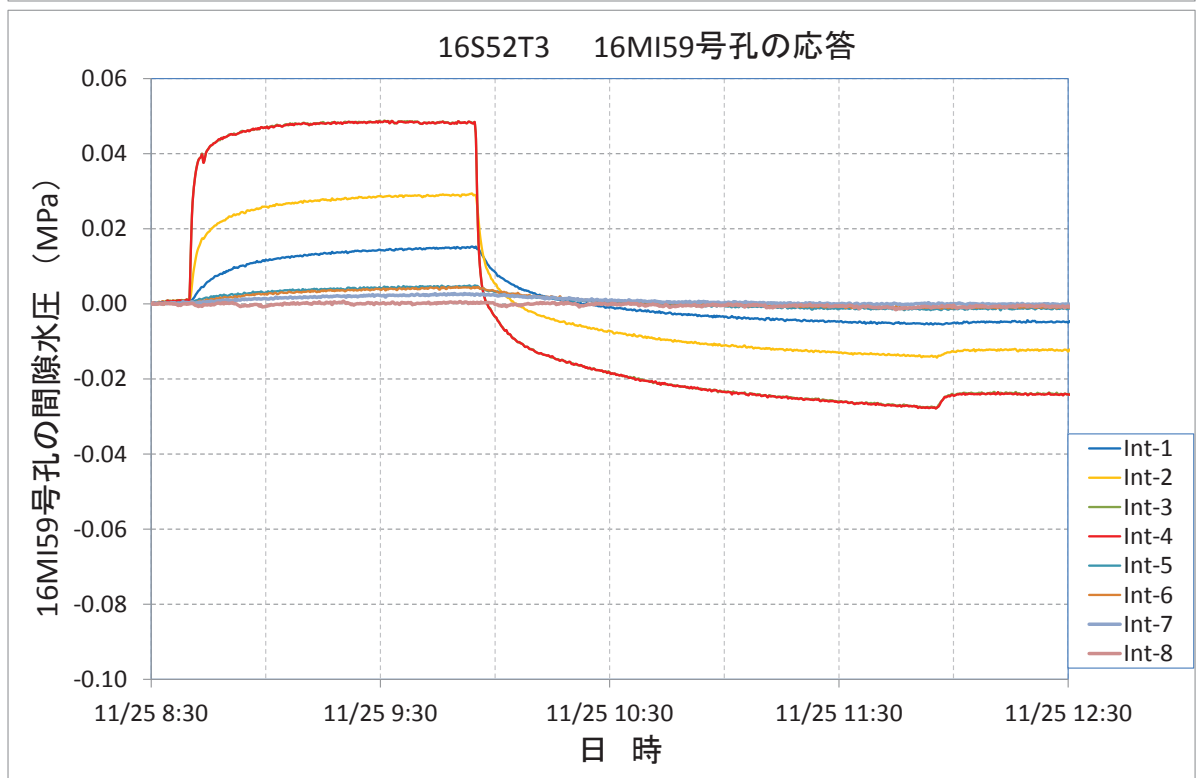
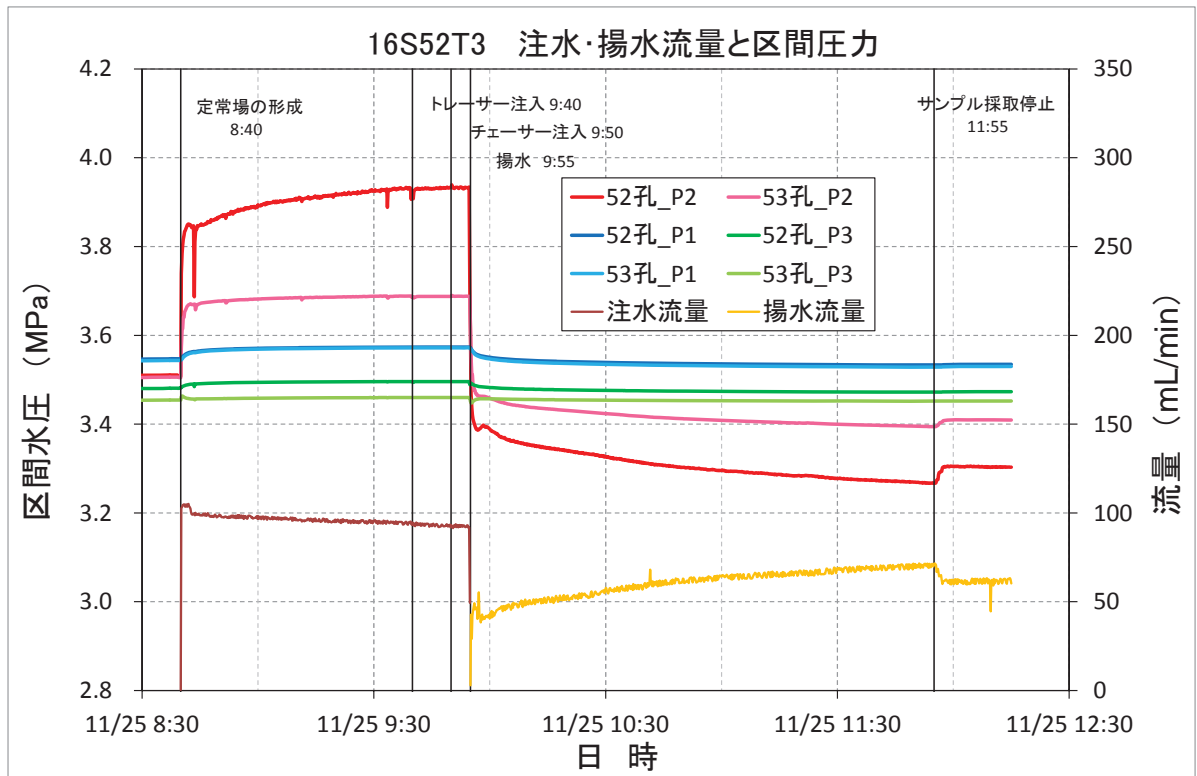


図 4.3.5-8 16S52T3 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答

4) 16S52T4

試験の注水/揚水配管、および使用ポンプは、16S52T3と同様である(図 4.3.5-2)。図 4.3.5-9に16S52T4の試験条件と破過曲線、図 4.3.5-10に圧力と流量の関係および16MI59号孔の圧力応答を示す。

試験条件一覧

試験名			16S52T4
試験孔			15MI52号孔
試験実施日			2016/12/7
トレーサー材			ウラニン、アミノG、重水素、Rb <sup>+</sup> 、Ba <sup>2+</sup>
流量	注水流量	mL/min	99.87
	揚水流量	mL/min	23.71
試験時間	トレーサー注入	min	10
	チェイサー注入	min	5
	待機	min	0
	トレーサー回収(揚水)	min	120
蛍光濃度センサー	C1 (孔内)		Ver. 3.1
	C3 (地上)		Ver. 1.0

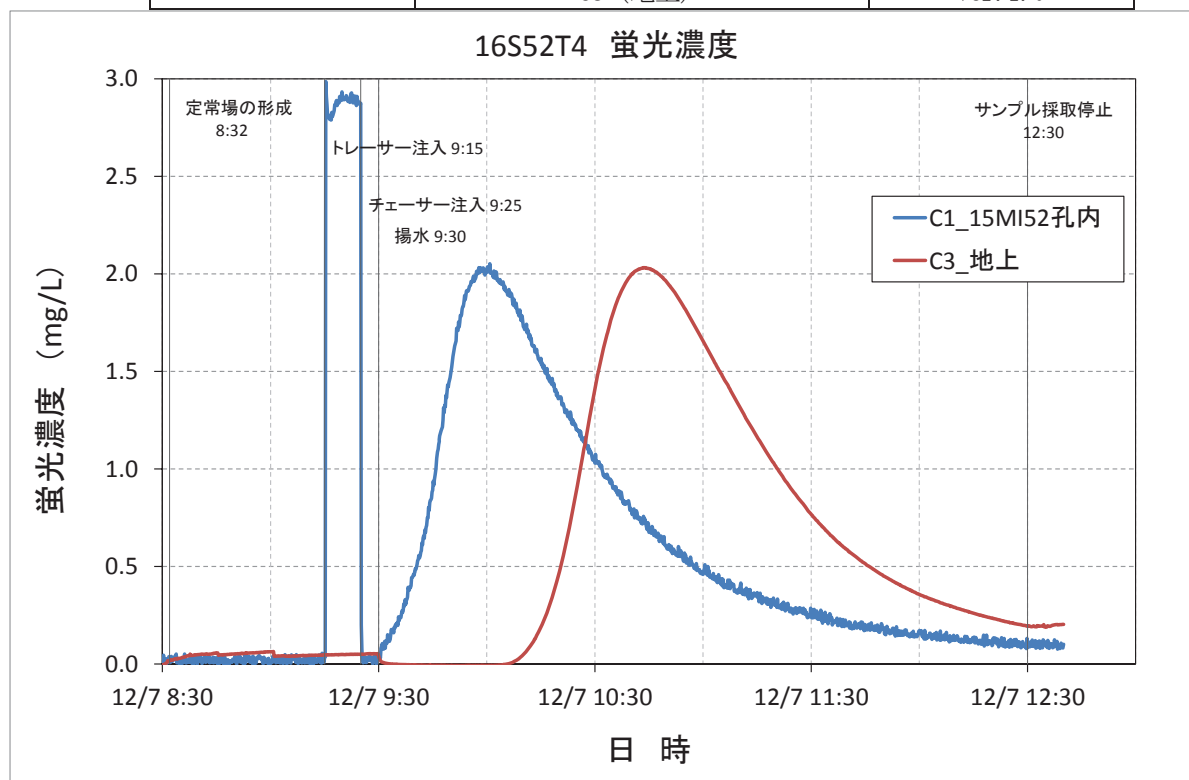


図 4.3.5-9 16S52T4の試験条件と破過曲線

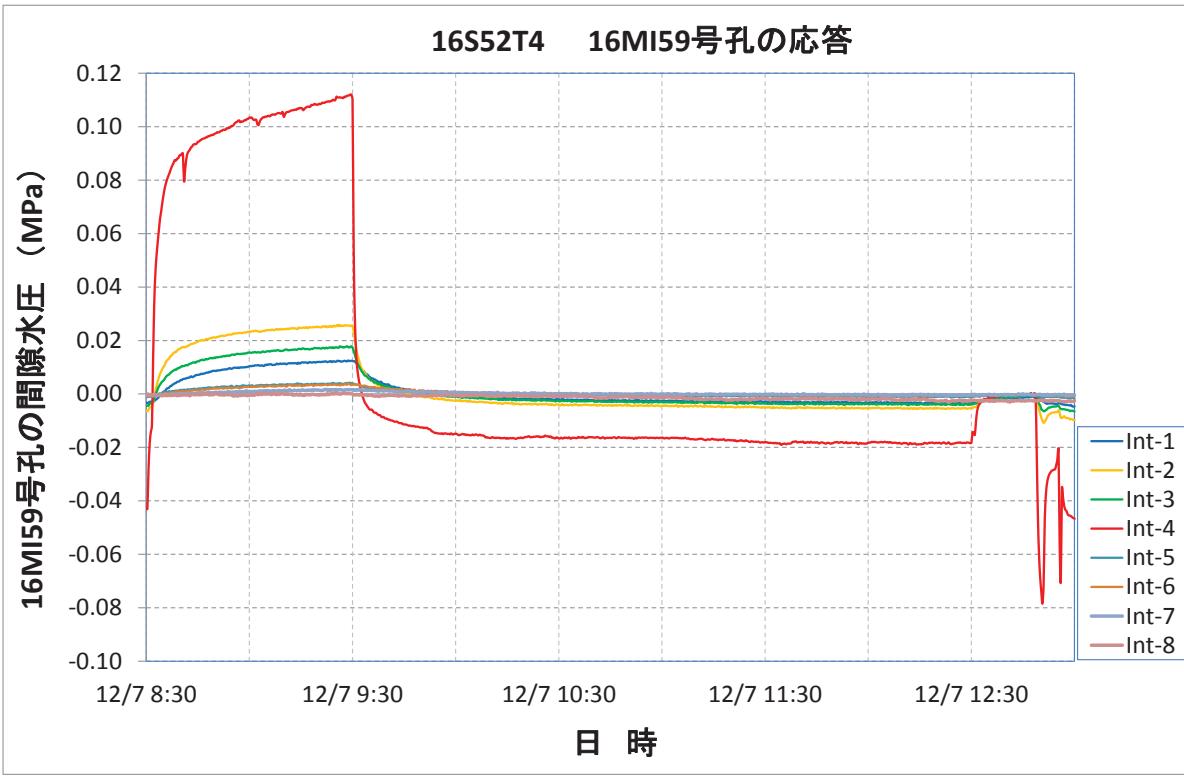
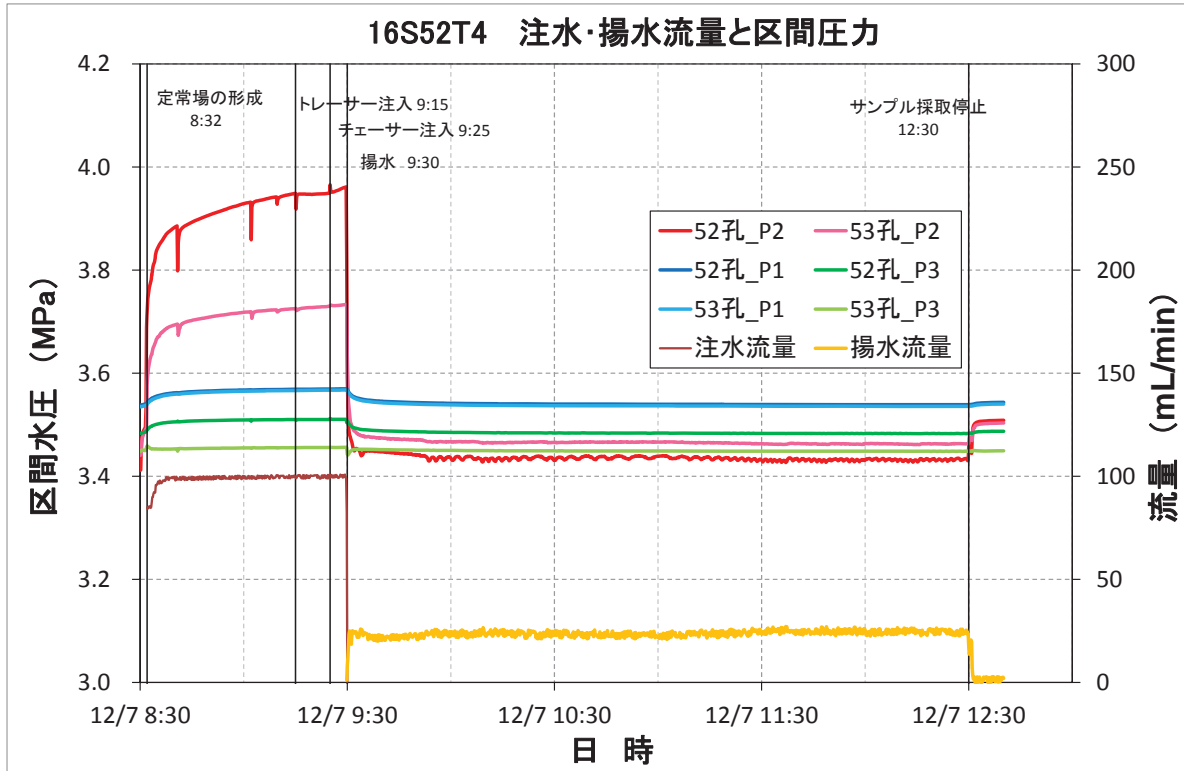


図 4.3.5-10 16S52T4 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答

5) 16S52T5

試験の注水／揚水配管、および使用ポンプは、16S52T3 と同様である（図 4.3.5-2）。図 4.3.5-11 に 16S52T5 の試験条件と破過曲線、図 4.3.5-12 に圧力と流量の関係および 16MI59 号孔の圧力応答を示す。

なお、16S52T5 は前日の試験終了後から試験開始直前の 12 月 8 日 7:40 まで、トレーサーの洗浄のため 16MI52 号孔\_P2 より排水していた。

試験条件一覧

試験名			16S52T5
試験孔			15MI52 号孔
試験実施日			2016/12/8
トレーサー材			ウラニン、アミノ G、重水素、Rb <sup>+</sup> 、Ba <sup>2+</sup>
流量	注水流量	mL/min	49.59
	揚水流量	mL/min	49.32
試験時間	トレーサー注入	min	20
	チェイサー注入	min	10
	待機	min	0
	トレーサー回収(揚水)	min	120
蛍光濃度センサー	C1 (孔内)		Ver. 3.1
	C3 (地上)		Ver. 1.0

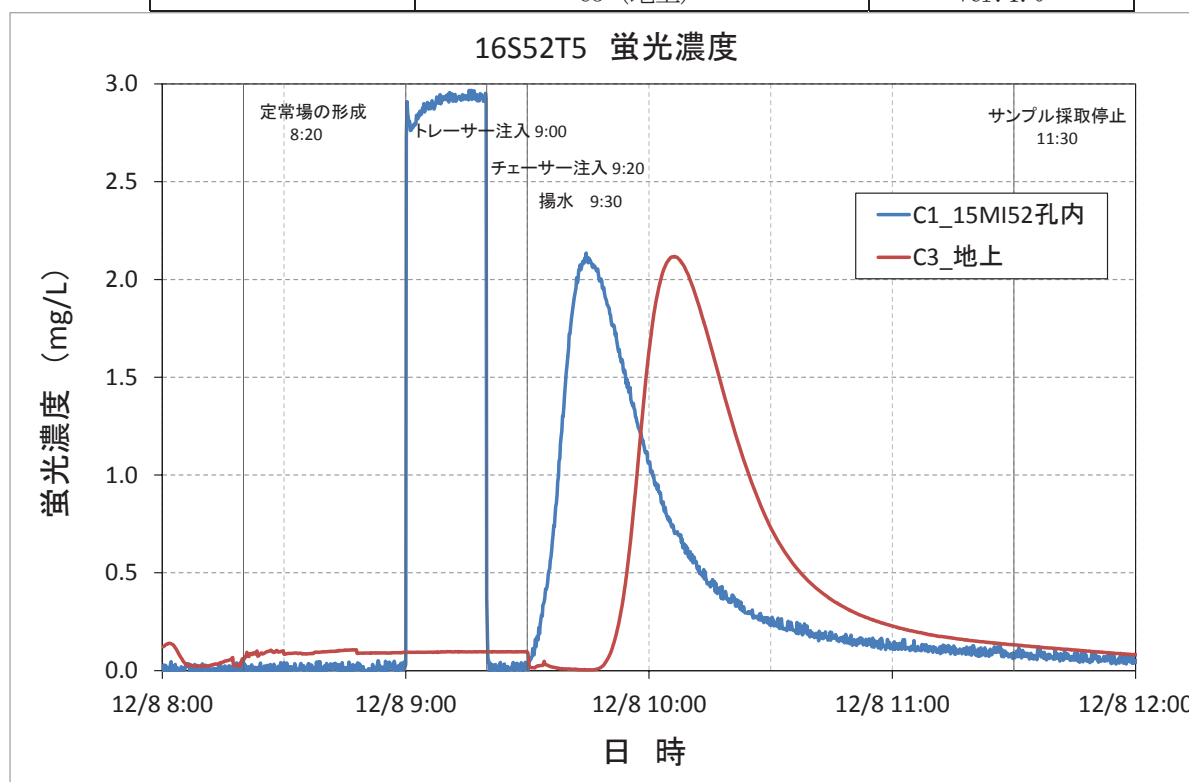


図 4.3.5-11 16S52T5 の試験条件と破過曲線

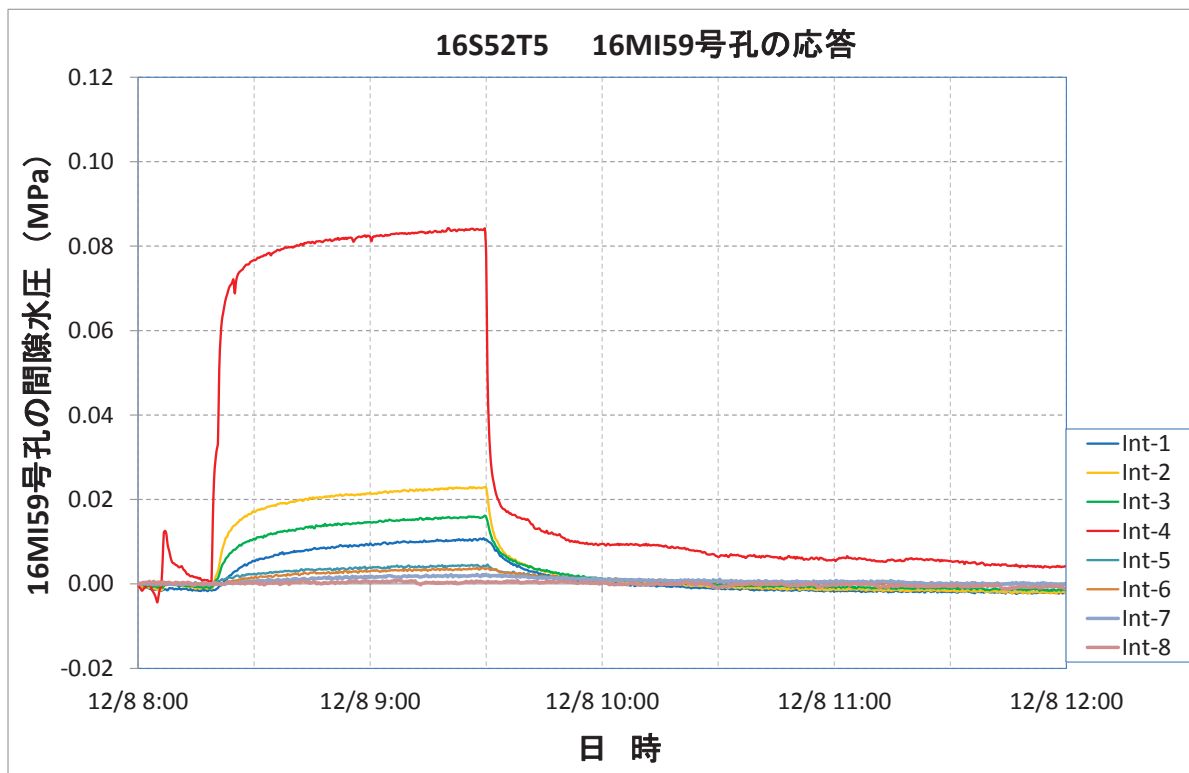
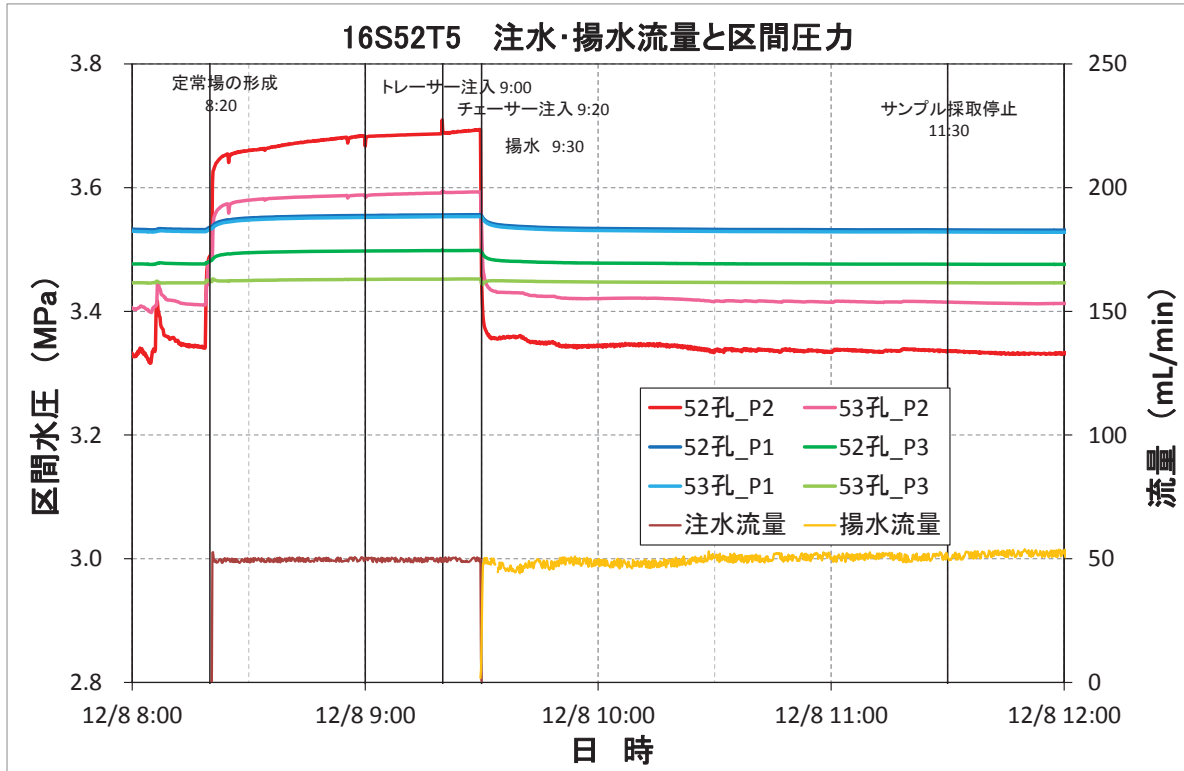


図 4.3.5-12 16S52T5 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答

6) 16S52T6

試験の注水／揚水配管、および使用ポンプは、16S52T3 と同様である（図 4.3.5-2）。図 4.3.5-13 に 16S52T6 の試験条件と破過曲線、図 4.3.5-14 に圧力と流量の関係および 16MI59 号孔の圧力応答を示す。

試験条件一覧

試験名			16S52T6
試験孔			15MI52 号孔
試験実施日			2016/12/9
トレーサー材			ウラン、アミノ G、重水素、Rb <sup>+</sup> 、Ba <sup>2+</sup>
流量	注水流量	mL/min	99.08
	揚水流量	mL/min	49.82
試験時間	トレーサー注入	min	20
	チェイサー注入	min	5
	待機	min	0
	トレーサー回収(揚水)	min	120
蛍光濃度センサー	C1 (孔内)		Ver. 3.1
	C3 (地上)		Ver. 1.0

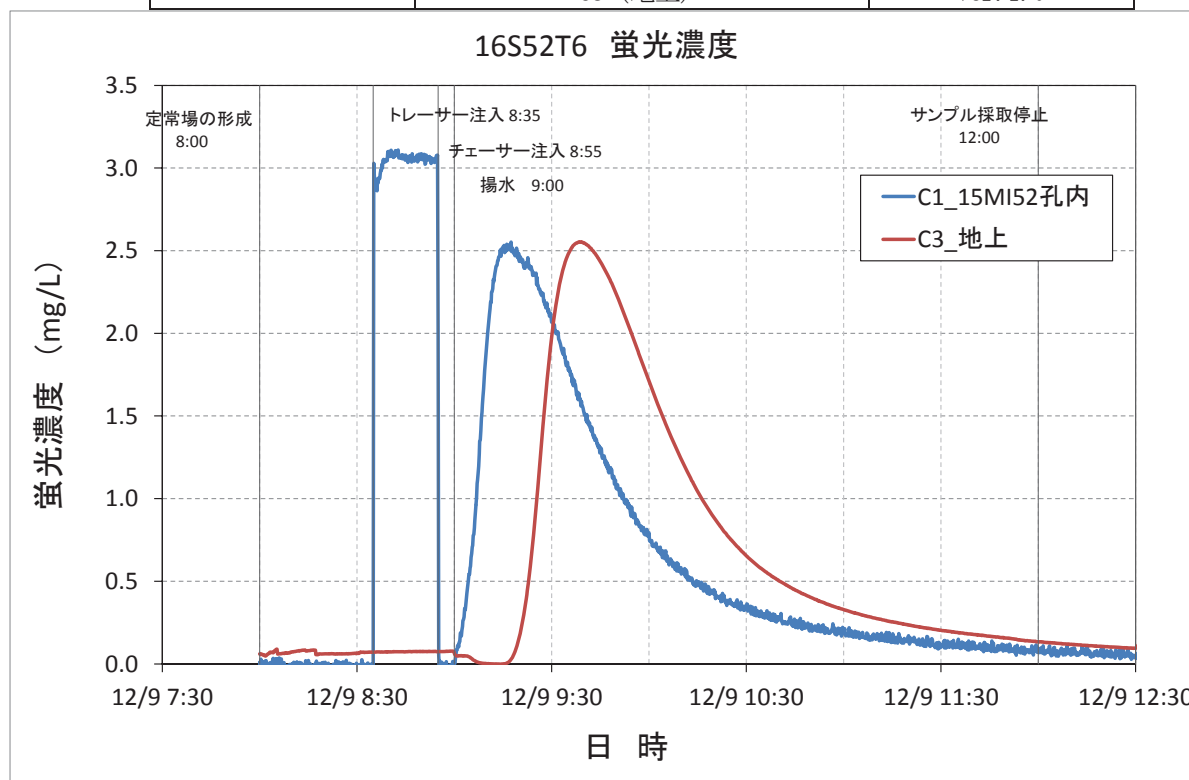


図 4.3.5-13 16S52T6 の試験条件と破過曲線

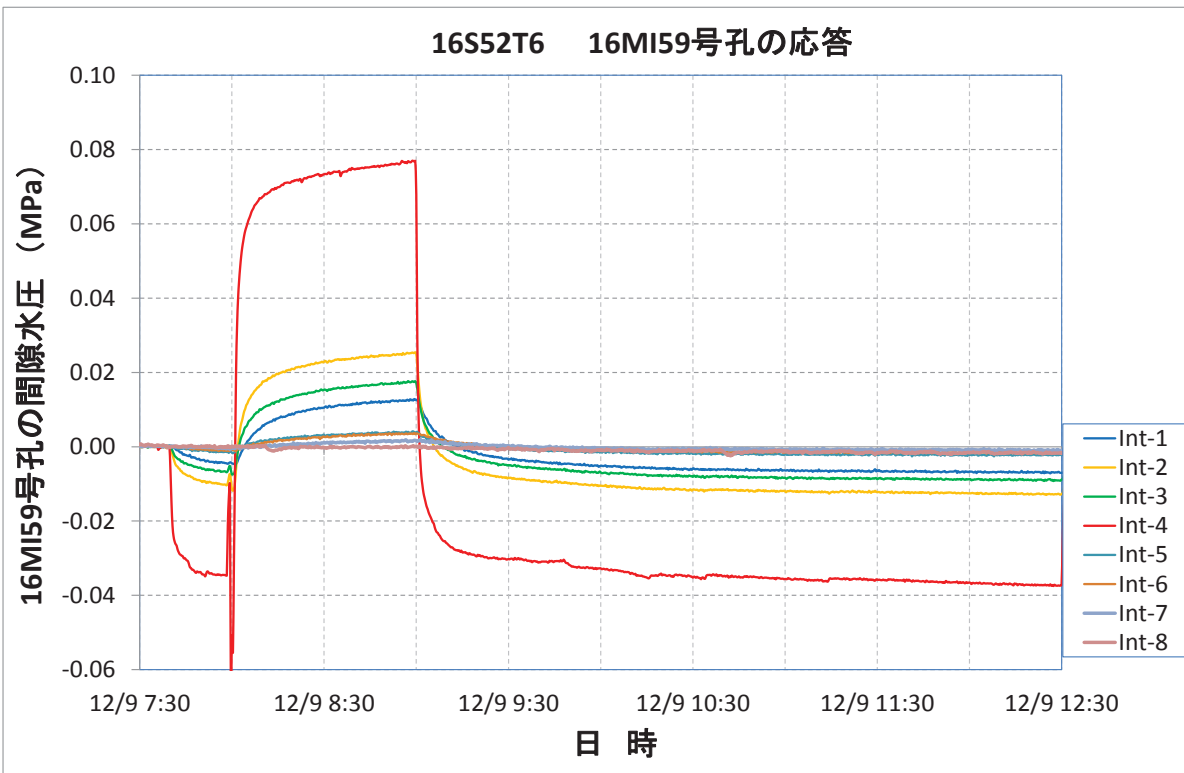
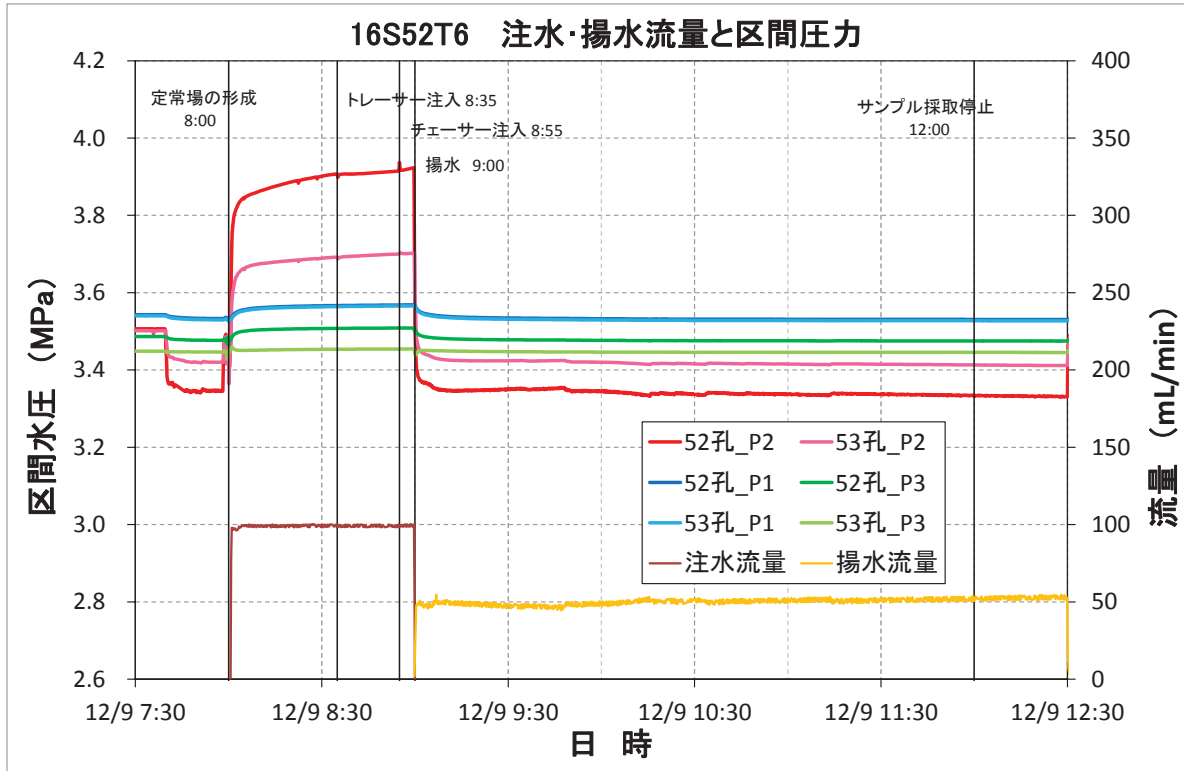


図 4.3.5-14 16S52T6 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答



7) 16S53T7

16S53T7 以降は 15MI53 号孔の試験である。試験の注水／揚水配管は、15MI52 号孔の試験と同じ地上配管を用いたため、揚水配管の構成、容積ともに同じである（図 4.3.5-2）。図 4.3.5-15 に 16S53T7 の試験条件と破過曲線、図 4.3.5-16 に圧力と流量の関係および 16MI59 号孔の圧力応答を示す。

試験条件一覧

試験名			16S53T7
試験孔			15MI53 号孔
試験実施日			2016/12/12
トレーサー材			ウラン、アミノ G、重水素、Rb <sup>+</sup> 、Ba <sup>2+</sup>
流量	注水流量	mL/min	99.10
	揚水流量	mL/min	50.87
試験時間	トレーサー注入	min	10
	チェイサー注入	min	5
	待機	min	0
	トレーサー回収(揚水)	min	120
蛍光濃度センサー	C1 (孔内)		Ver. 3.1
	C3 (地上)		Ver. 1.0

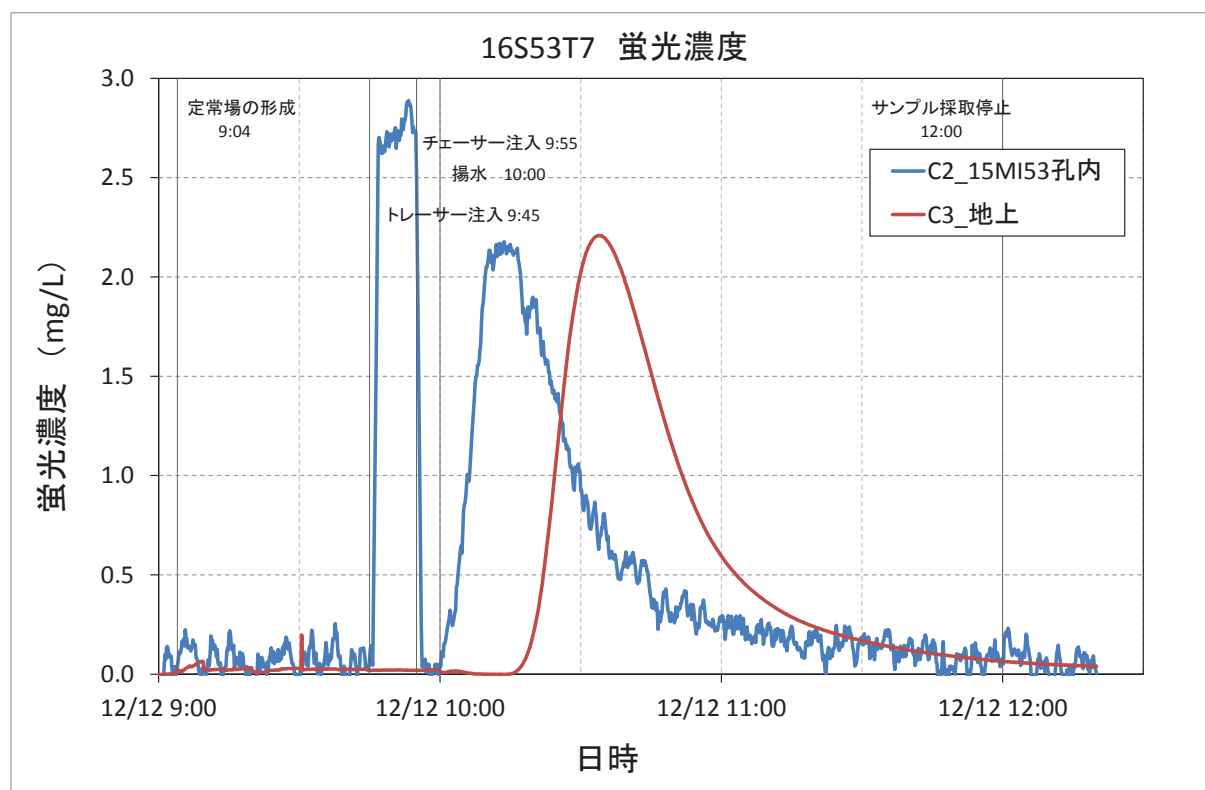


図 4.3.5-15 16S52T7 の試験条件と破過曲線

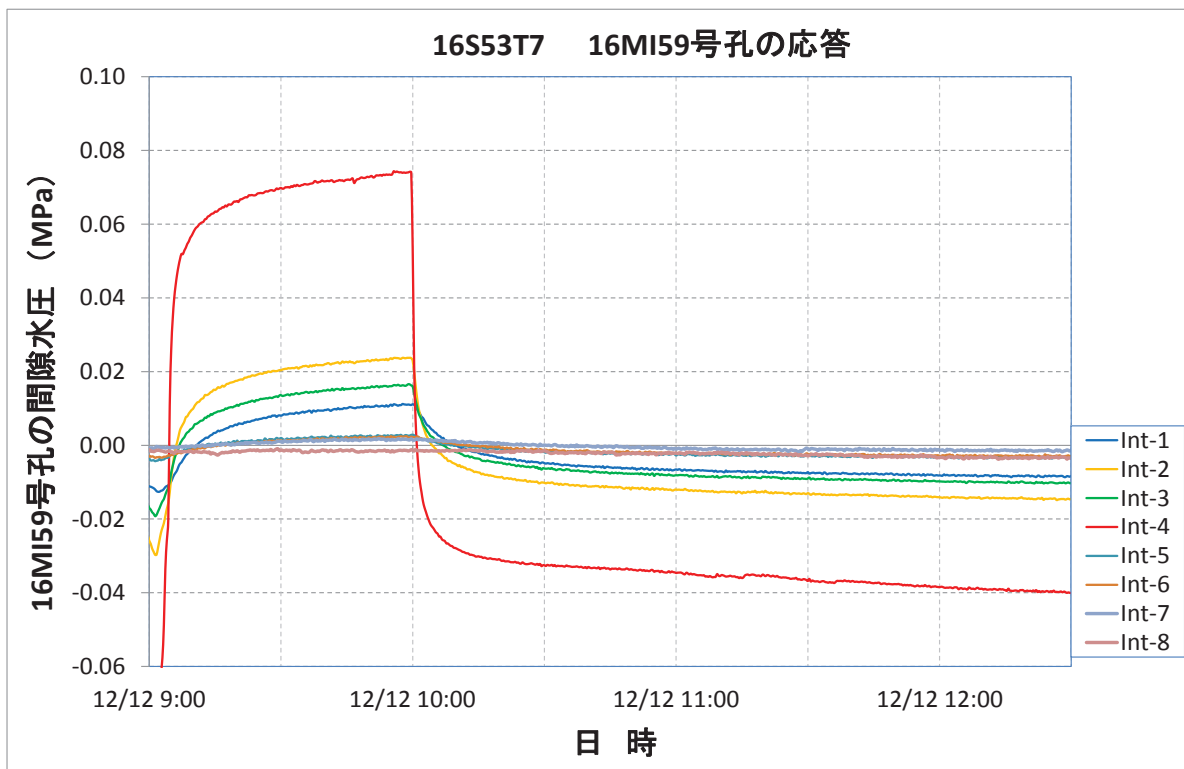
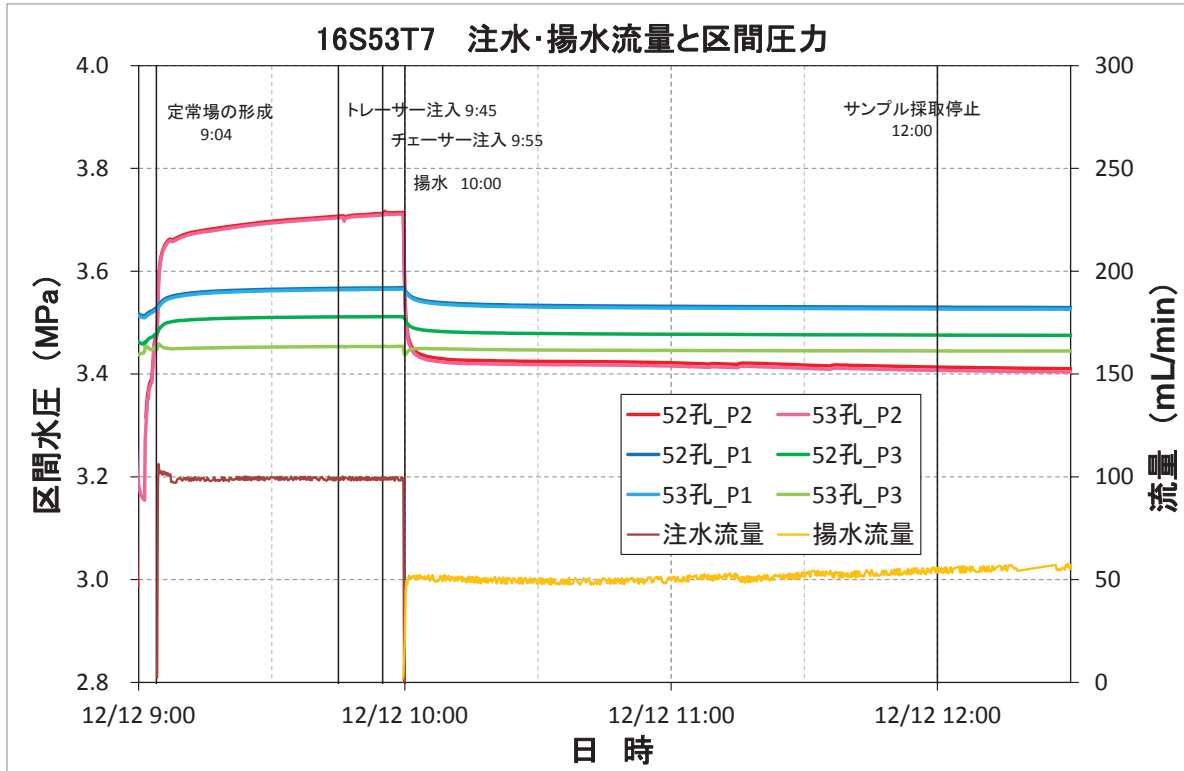


図 4.3.5-16 16S52T7 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答

8) 16S53T8

試験の注水／揚水配管、および使用ポンプは、16S52T3 と同様である（図 4.3.5-2）。図 4.3.5-17 に 16S53T8 の試験条件と破過曲線、図 4.3.5-18 に圧力と流量の関係および 16MI59 号孔の圧力応答を示す。

16MI59 号孔の応答の内、Int4 は直前に行った水頭差測定のパルプ方向のまま試験を実施したため、孔間応答データを取得できなかった。

試験条件一覧

試験名			16S53T8
試験孔			15MI53 号孔
試験実施日			2016/12/13
トレーサー材			ウラニン、アミノ G、重水素、Rb <sup>+</sup> 、Ba <sup>2+</sup>
流量	注水流量	mL/min	98.79
	揚水流量	mL/min	50.01
試験時間	トレーサー注入	min	10
	チェイサー注入	min	10
	待機	min	0
	トレーサー回収(揚水)	min	180
蛍光濃度センサー	C1 (孔内)		Ver. 3.1
	C3 (地上)		Ver. 1.0

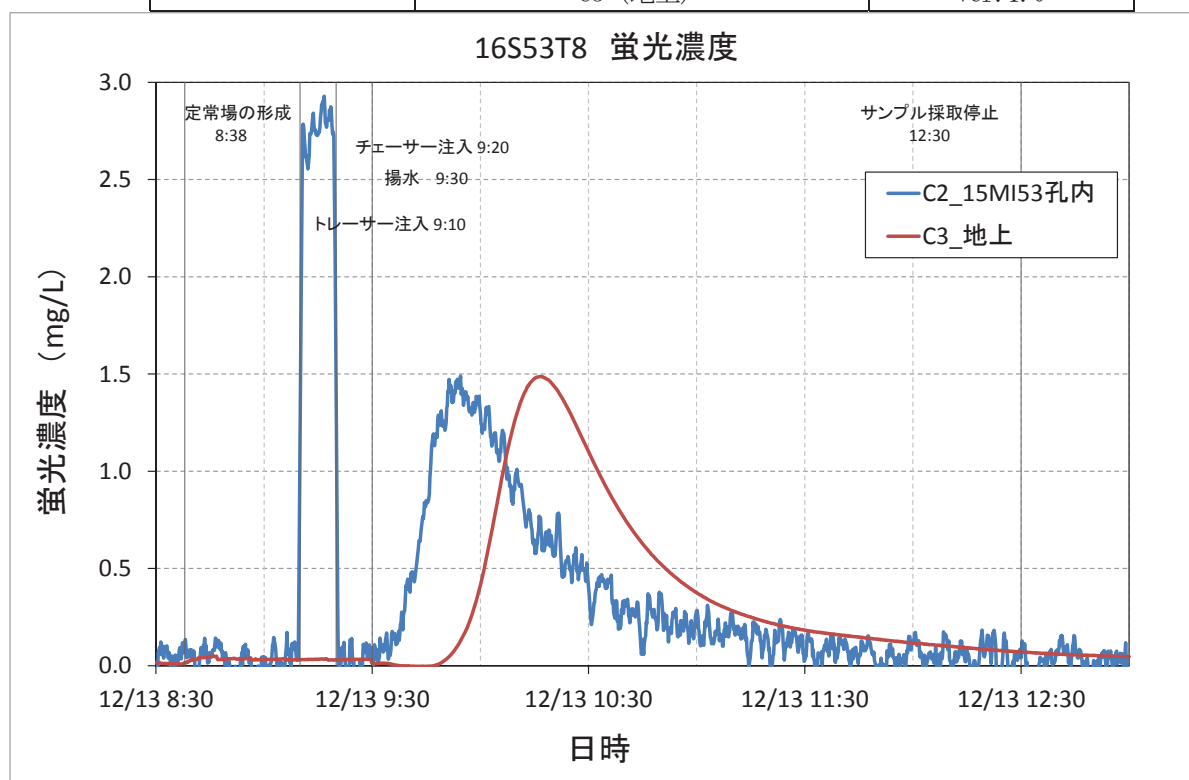


図 4.3.5-17 16S52T8 の試験条件と破過曲線

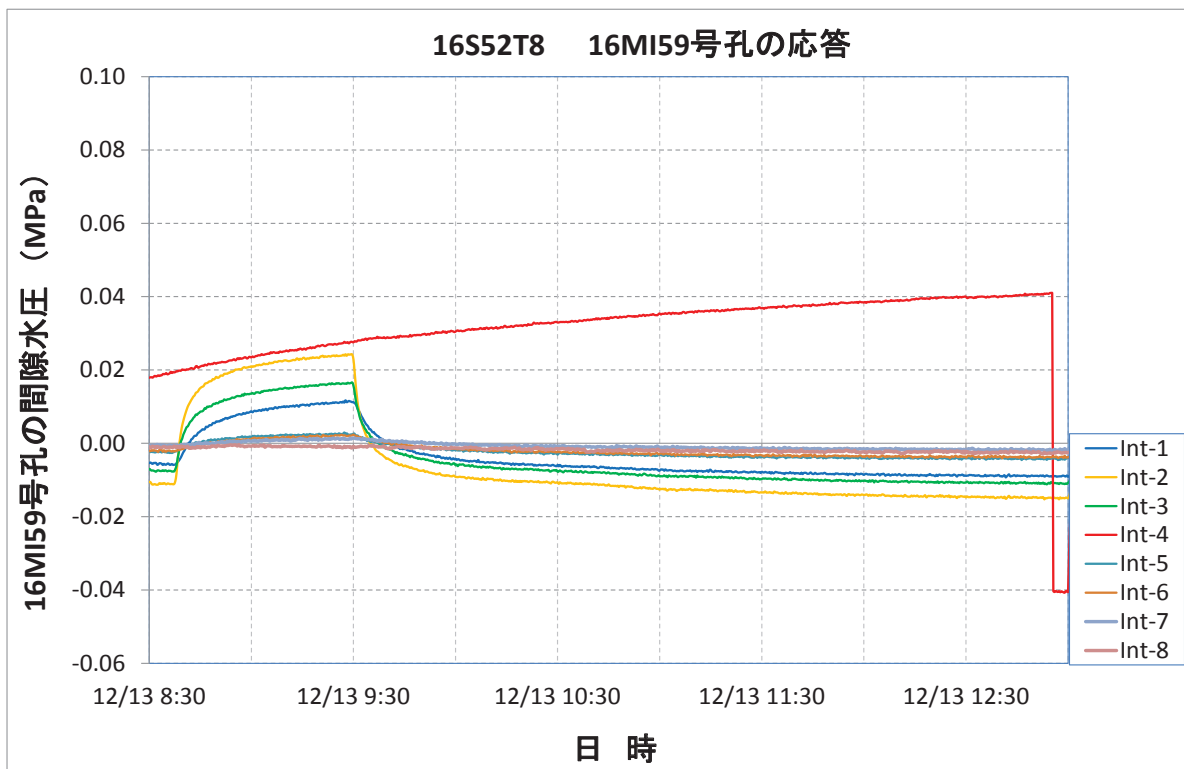
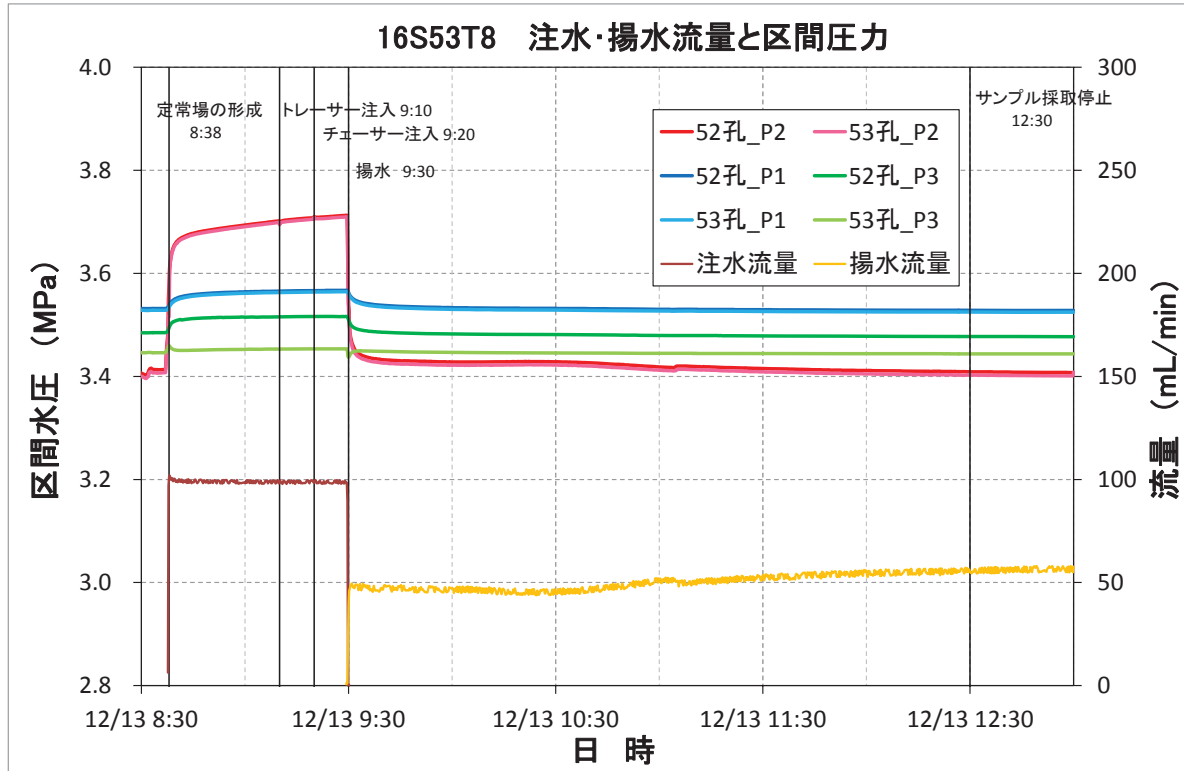


図 4.3.5-18 16S52T8 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答

9) 16S53T9

試験の注水／揚水配管、および使用ポンプは、16S52T3 と同様である (図 4.3.5-2)。図 4.3.5-19 に 16S53T9 の試験条件と破過曲線、図 4.3.5-20 に圧力と流量の関係および 16MI59 号孔の圧力応答を示す。

試験条件一覧

試験名			16S53T9
試験孔			15MI53 号孔
試験実施日			2016/12/14
トレーサー材			ウラン、アミノ G、重水素、Rb <sup>+</sup> 、 Ba <sup>2+</sup>
流量	注水流量	mL/min	99.07
	揚水流量	mL/min	50.50
試験時間	トレーサー注入	min	20
	チェイサー注入	min	10
	待機	min	0
	トレーサー回収(揚水)	min	180
蛍光濃度センサー	C1 (孔内)		Ver. 3.1
	C3 (地上)		Ver. 1.0

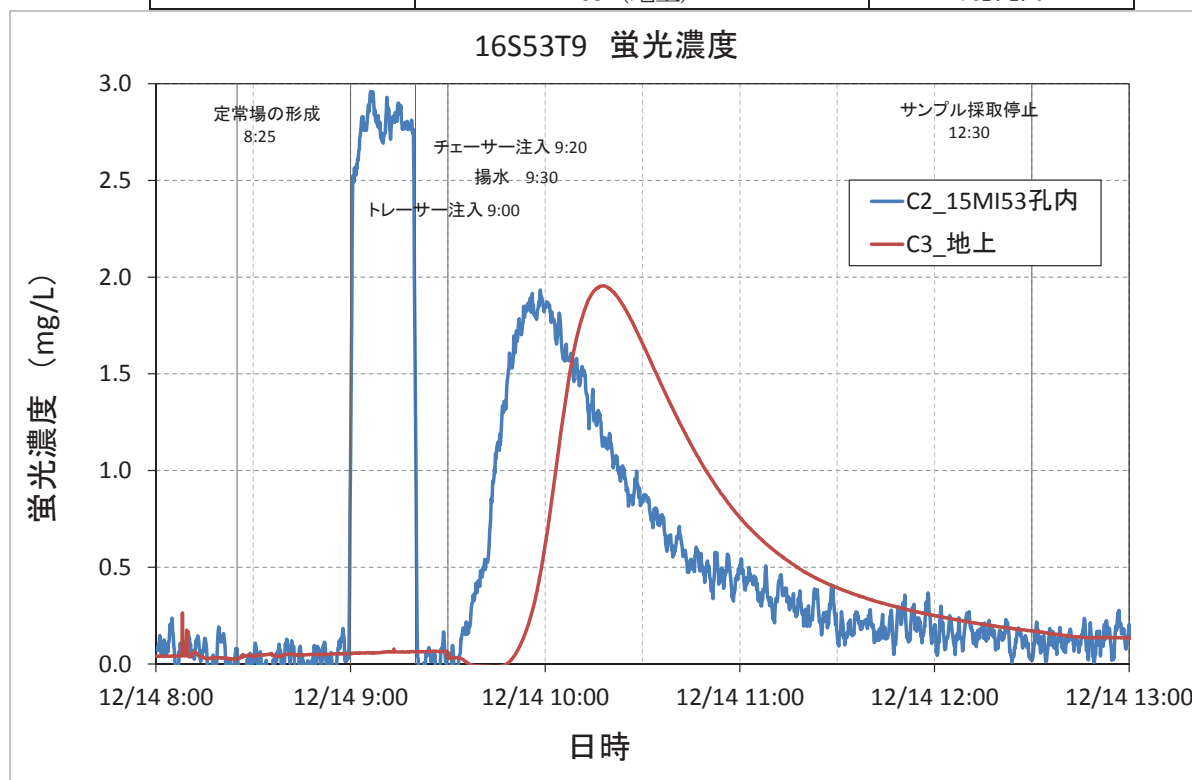


図 4.3.5-19 16S52T9 の試験条件と破過曲線

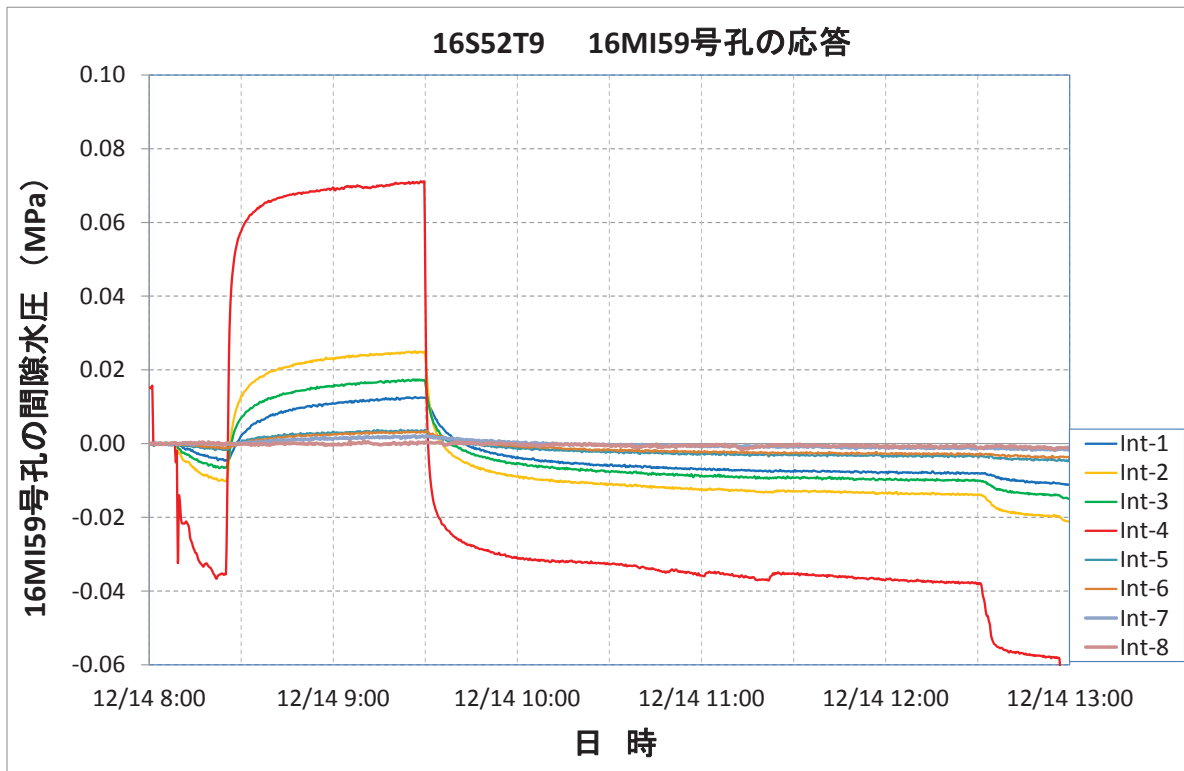
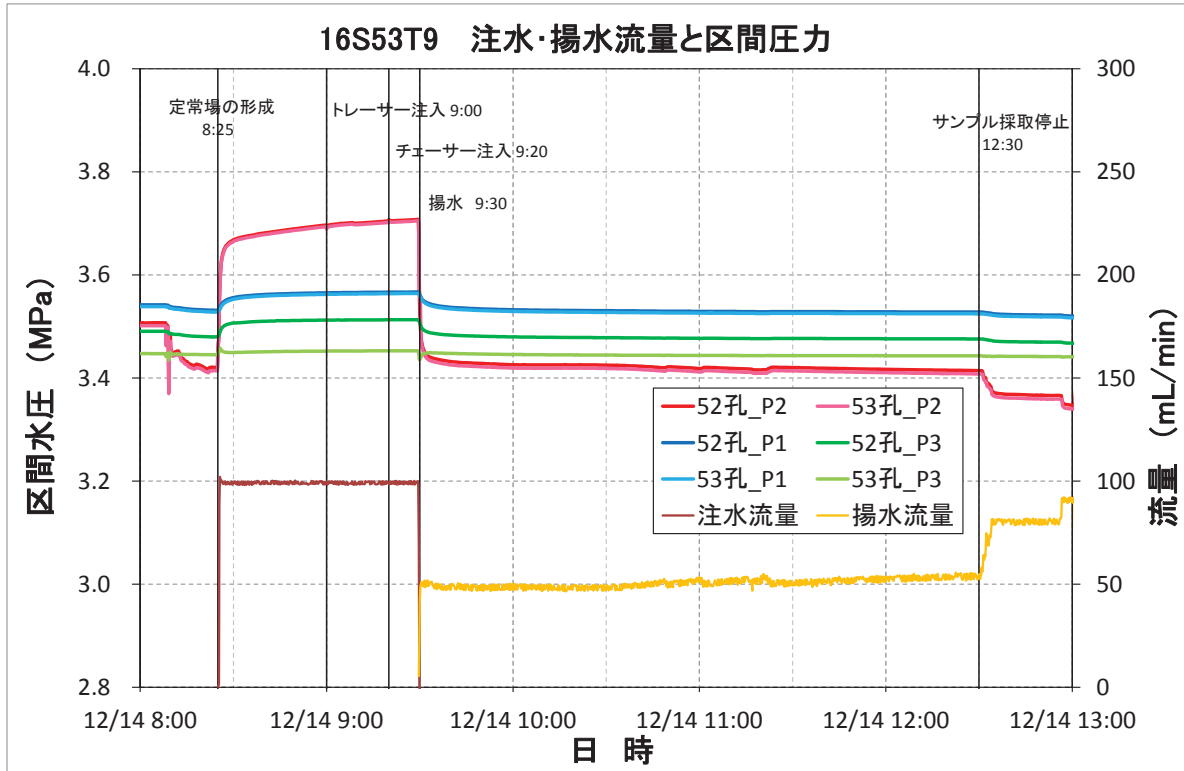


図 4.3.5-20 16S52T9 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答

10) 16S53T10

試験の注水／揚水配管、および使用ポンプは、16S52T3 と同様である（図 4.3.5-2）。図 4.3.5-21 に 16S53T10 の試験条件と破過曲線、図 4.3.5-22 に圧力と流量の関係および 16MI59 号孔の圧力応答を示す。

16S53T10 では、地下水のサンプリング（フラクションコレクター）は、揚水開始から 30 分後に始動した。

試験条件一覧

試験名			16S53T10
試験孔			15MI53 号孔
試験実施日			2016/12/15
トレーサー材			ウラン、アミノ G、重水素、Rb <sup>+</sup> 、Ba <sup>2+</sup>
流量	注水流量	mL/min	99.51
	揚水流量	mL/min	25.21
試験時間	トレーサー注入	min	20
	チェイサー注入	min	10
	待機	min	0
	トレーサー回収(揚水)	min	210
	サンプリング採取	min	180
蛍光濃度センサー	C1 (孔内)		Ver. 3.1
	C3 (地上)		Ver. 1.0

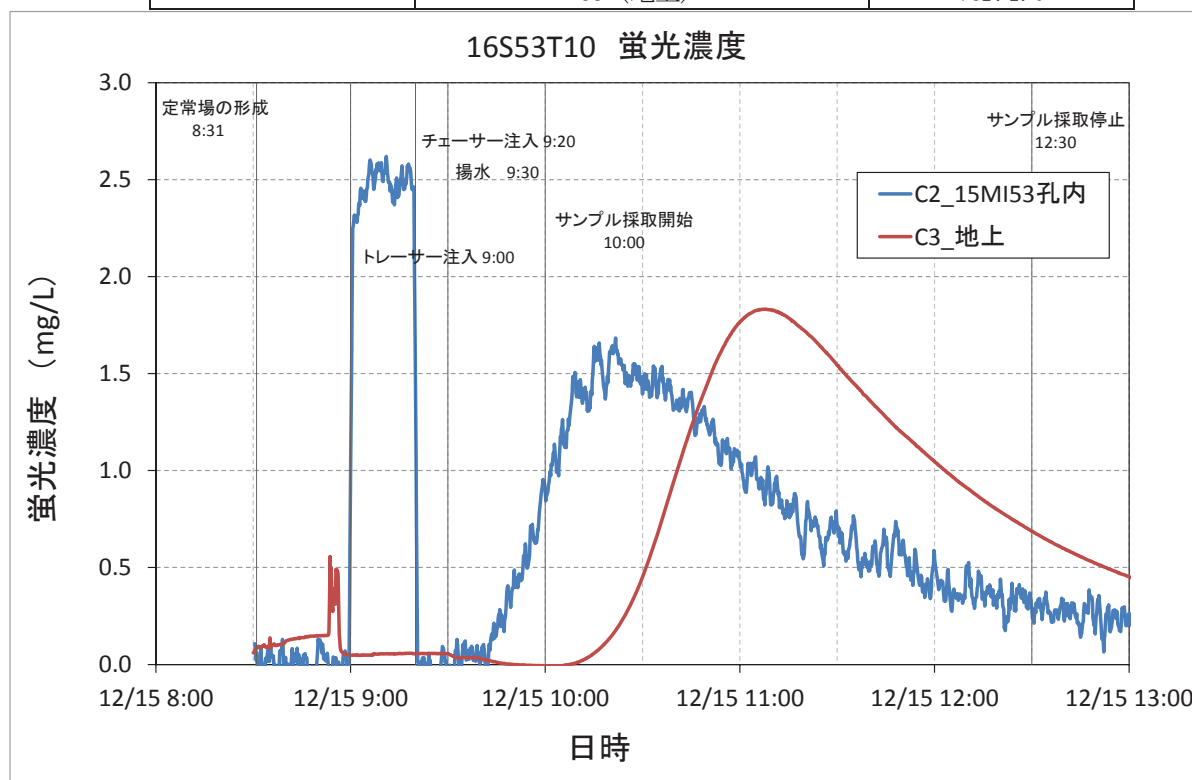


図 4.3.5-21 16S52T10 の試験条件と破過曲線

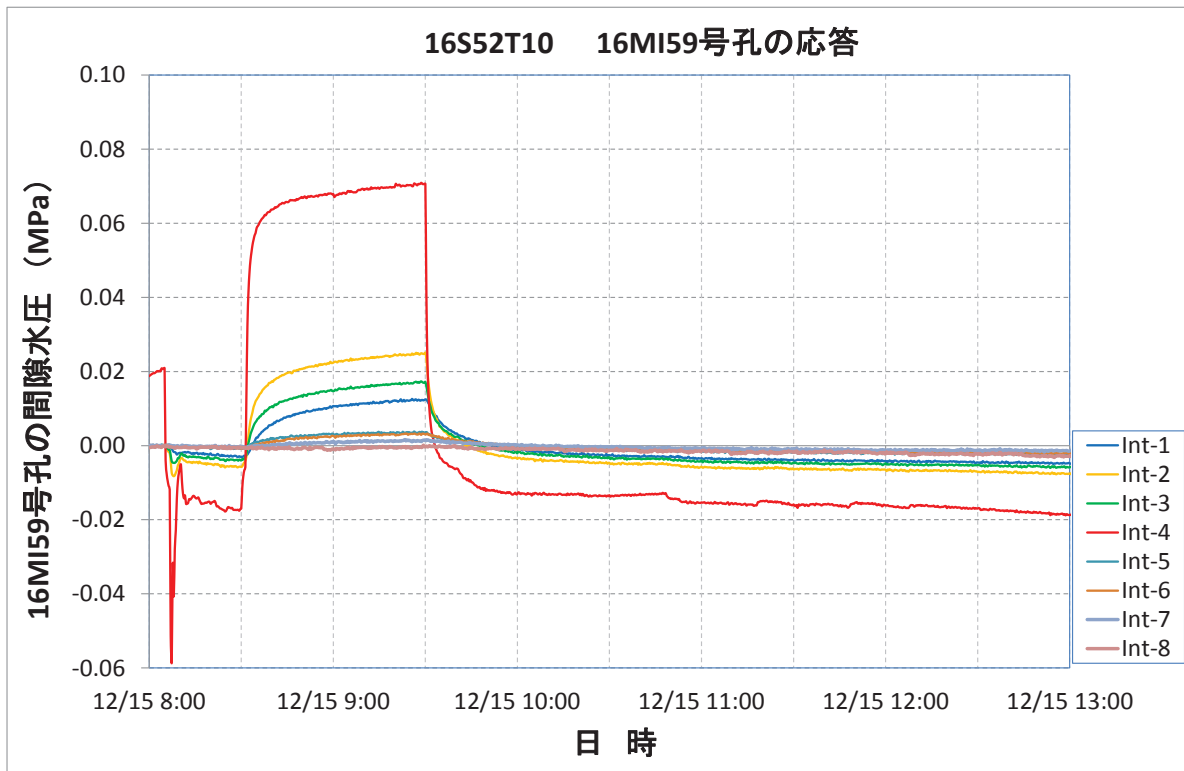
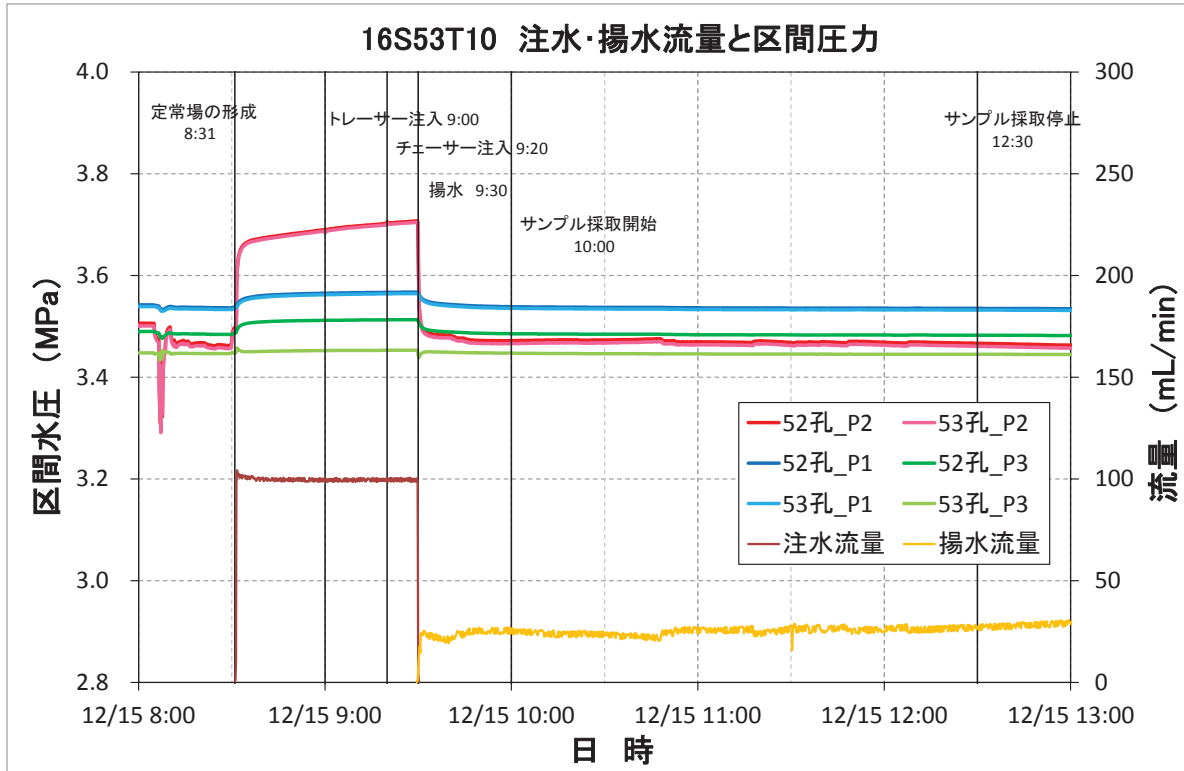


図 4.3.5-22 16S52T10 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答



11) 16S53T11

試験の注水/揚水配管、および使用ポンプは、16S52T3 と同様である (図 4.3.5-2)。図 4.3.5-23 に 16S53T11 の試験条件と破過曲線、図 4.3.5-24 に圧力と流量の関係および 16MI59 号孔の圧力応答を示す。

16S53T11 ではトレーサー注水後に 1 時間の待機時間を設けた後、揚水した。

試験条件一覧

試験名			16S53T11
試験孔			15MI53 号孔
試験実施日			2016/12/16
トレーサー材			ウラン、アミノ G、重水素、Rb <sup>+</sup> 、Ba <sup>2+</sup>
流量	注水流量	mL/min	99.17
	揚水流量	mL/min	51.15
試験時間	トレーサー注入	min	10
	チェイサー注入	min	5
	待機	min	60
	トレーサー回収(揚水)	min	120
蛍光濃度センサー	C1 (孔内)		Ver. 3.1
	C3 (地上)		Ver. 1.0

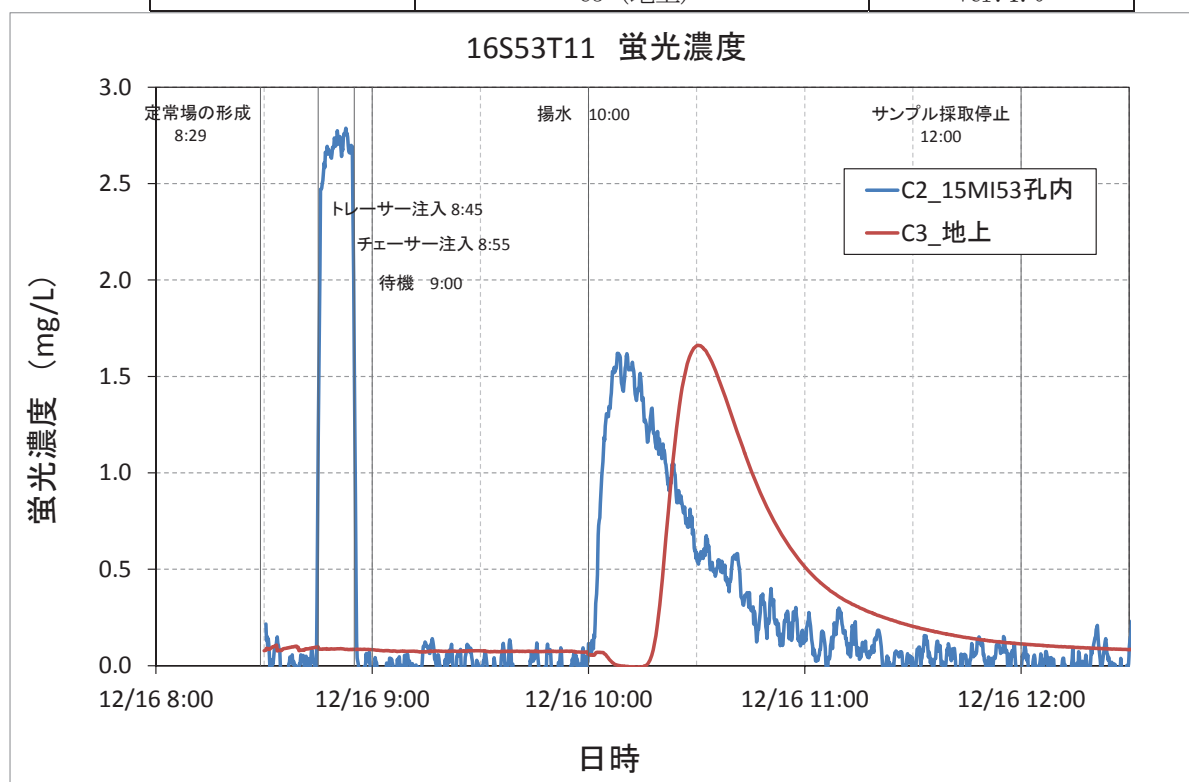


図 4.3.5-23 16S52T11 の試験条件と破過曲線

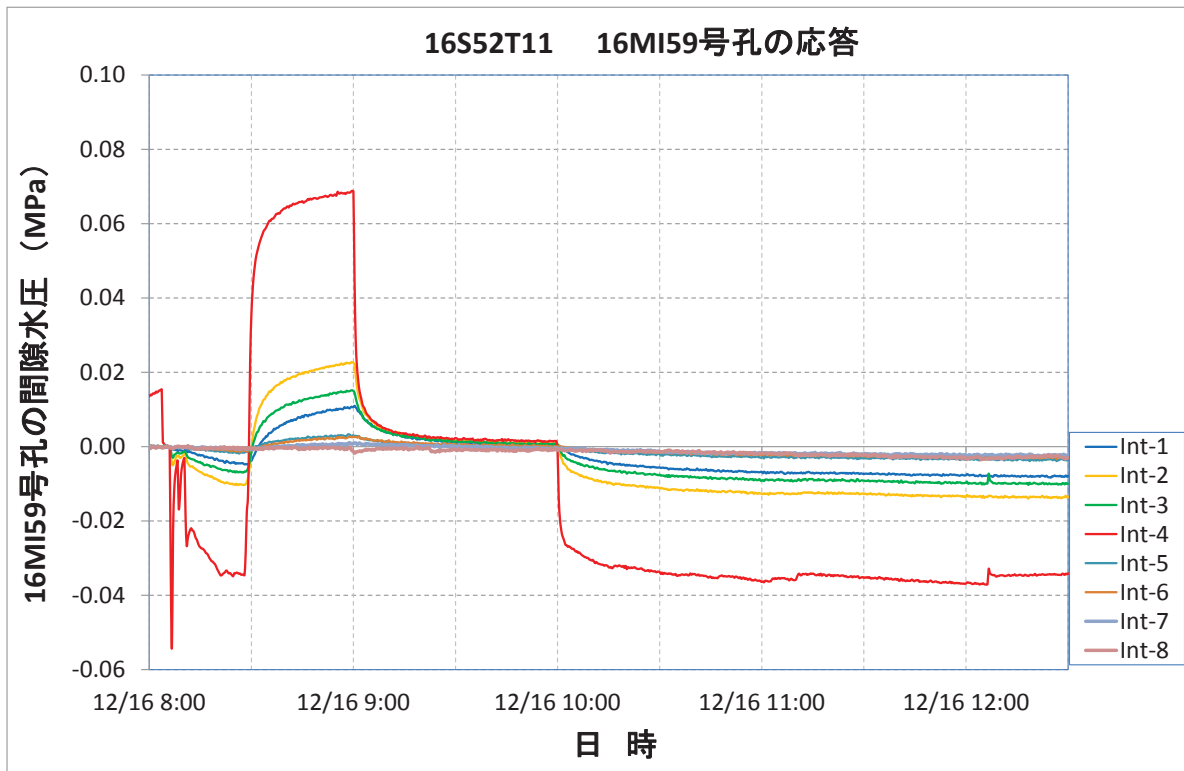
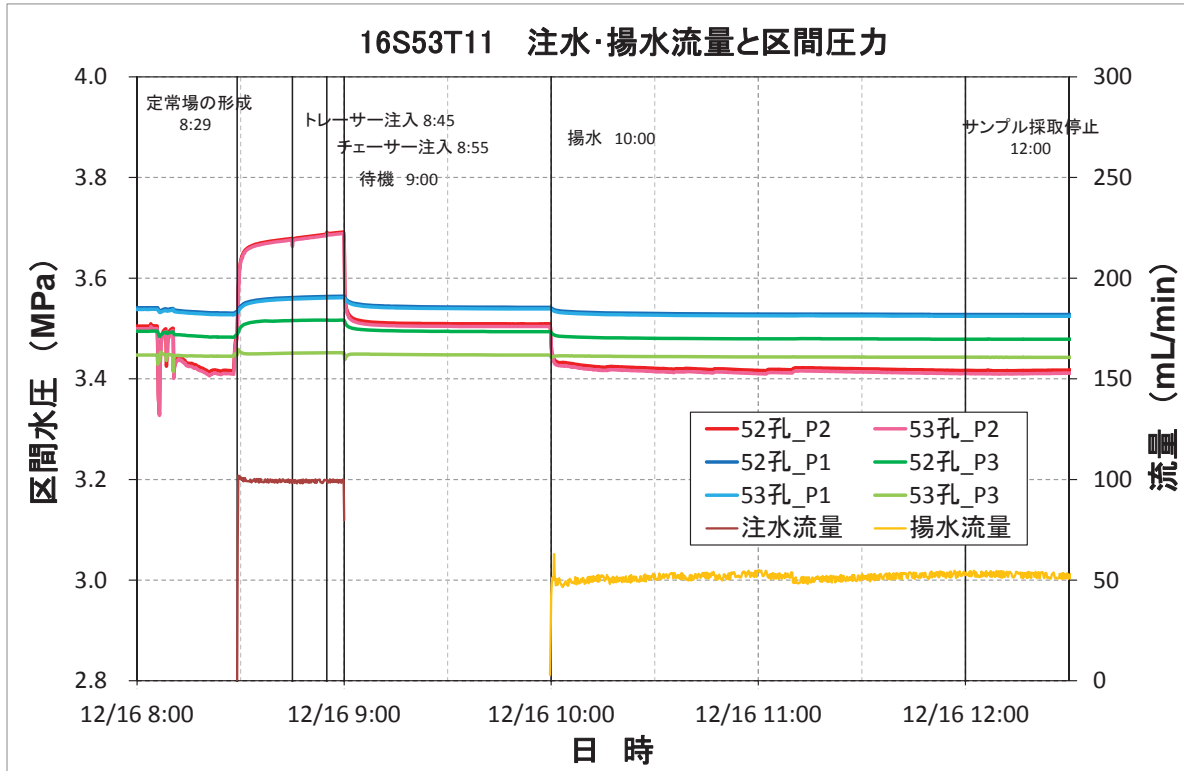


図 4.3.5-24 16S52T11 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答

#### 4.3.6 孔間トレーサー試験結果（ダイポール試験）

##### (1) 試験条件

孔間トレーサー試験の試験ケースについて、15MI52 号孔を注水孔としたケースの一覧を表 4.3.6-1 に、15MI53 号孔を注水孔としたケースの一覧を表 4.3.6-2 に示す。

表 4.3.6-1 15MI52 号孔注水－15MI53 号孔揚水の孔間トレーサー試験ケース

試験名		16W5253T1	16W5253T2	16W5253T3	16W5253T4-6	
試験条件	注水流量(設定値)	mL/min	10	5	3	3
	揚水流量(設定値)	mL/min	50	25	15	25
	注水流量(流量計平均)	mL/min	12.18	5.10	3.17	2.90
	揚水流量(流量計平均)	mL/min	51.59	27.84	26.14	26.12
	ダイポール比	-	4.24	5.46	8.25	9.01
	定常場の形成		11/28 9:24	11/29 9:30	11/30 9:17	12/1 9:26
	トレーサー注入開始		11/28 10:10	11/29 10:00	11/30 10:00	12/1 10:10
	チェイサー注入開始		11/29 10:30	11/29 10:10	11/30 10:20	12/1 11:10
	サンプリング開始		11/28 10:25	11/29 10:30	11/30 10:40	12/1 10:50
	サンプリング停止		11/29 12:25	11/29 12:30	11/30 13:20	12/2 16:00
	トレーサー注入時間	min	20	10	20	60
トレーサー量	L	0.244	0.051	0.063	0.174	
揚水(サンプリング)時間	min	120	120	160	1750	
原液濃度:設定値	ウラン	mg/L	3.00	3.00	3.00	3.00
	アミノG酸	mg/L	-	-	-	3.00
	重水素	mg/L	-	-	-	0.10
	ルビジウム	mg/L	-	-	-	2.00
	バリウム	mg/L	-	-	-	1.20

表 4.3.6-2 15MI53 号孔注水－15MI52 号孔揚水の孔間トレーサー試験ケース

試験名		16W5352T7	16W5352T8	16W5352T9-11	16W5352T12	16W5352T13-15	16W5352T16-18
試験条件	注水流量(設定値)	mL/min	3	3	3	2	2
	揚水流量(設定値)	mL/min	25	12	12	6	6
	注水流量(流量計平均)	mL/min	2.98	3.01	2.85	2.08	1.97
	揚水流量(流量計平均)	mL/min	25.41	13.16	12.68	5.83	5.24
	ダイポール比	-	8.53	4.37	4.45	2.80	2.66
	定常場の形成		12/19 11:31	12/20 8:54	12/21 7:56	1/11 10:00	1/12 8:34
	トレーサー注入開始		12/19 11:50	12/20 9:20	12/21 8:10	1/11 10:10	1/12 9:00
	チェイサー注入開始		12/19 12:10	12/20 9:40	12/21 15:10	1/11 10:30	1/12 10:00
	サンプリング開始		12/19 12:20	12/20 10:20	12/21 9:00	1/11 12:00	1/12 11:00
	サンプリング停止		12/19 14:20	12/20 12:20	12/22 15:00	1/11 16:00	1/13 16:00
	トレーサー注入時間	min	20	20	420	20	60
トレーサー量	L	0.060	0.060	1.197	0.042	0.118	
揚水(サンプリング)時間	min	120	120	1800	240	1860	
原液濃度:設定値	ウラン	mg/L	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
	アミノG酸	mg/L	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
	重水素	mg/L	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
	ルビジウム	mg/L	-	-	2.00	-	2.00
	バリウム	mg/L	-	-	1.20	-	1.20

a. 使用したトレーサー

使用したトレーサーは単孔トレーサー試験と同様に、非収着性トレーサーとしてウラン、アミノ G 酸、重水素（以下、 $\delta D$ と記載）、収着性トレーサーとしてルビジウム（以下、 $Rb^+$ と記載）、バリウム（以下、 $Ba^{2+}$ と記載）を用いた。トレーサー混合溶液の溶媒は、16W5253T1～T4 では 500m 立坑直下の釜場の地下水とし、16W5352T7 以降の試験では 16MI59 号孔の Int5 の湧水を用いた。

b. 蛍光濃度センサーの配置と名称

蛍光濃度センサーの配置箇所と名称は単孔トレーサー試験と同様であり、注水孔／揚水孔を入れ替えた場合でもセンサーの配置と名称は同じとした。

c. 試験区間からフラクシオンコレクターまでの容量

チューブ 1m 当たりの容量は単孔トレーサー試験と同様に 12.57mL である。

各試験における試験区間からフラクシオンコレクターまでの揚水ラインの配管容量を表 4.3.6-3 に示す。また、図 4.3.6-1 は 15MI53 号孔を揚水孔とした試験、図 4.3.6-2 は 15MI52 号孔を揚水孔とした試験の配管構成と容量を示す。

また、図 4.3.6-3 は 15MI52 号孔を揚水孔とし、モノポンプを使用せずニードルバルブにより揚水流量を調整した配管構成である。ニードルバルブは、モノポンプ（大）の制御下限値以下の揚水流量とした試験で使用した。

表 4.3.6-3 試験区間からフラクシオンコレクターまでの容量

試験名	試験区間から フラクシオンコレクター までの総容量(mL)	チューブ容量(mL) (チューブ長さ(m))	ポンプ容量(mL)
16W5253T1～T4- 6	703	623 (49.53)	80
16W5352T7	684	604 (48.03)	80
16W5352T8～T9- 11	604	604 (48.03)	0

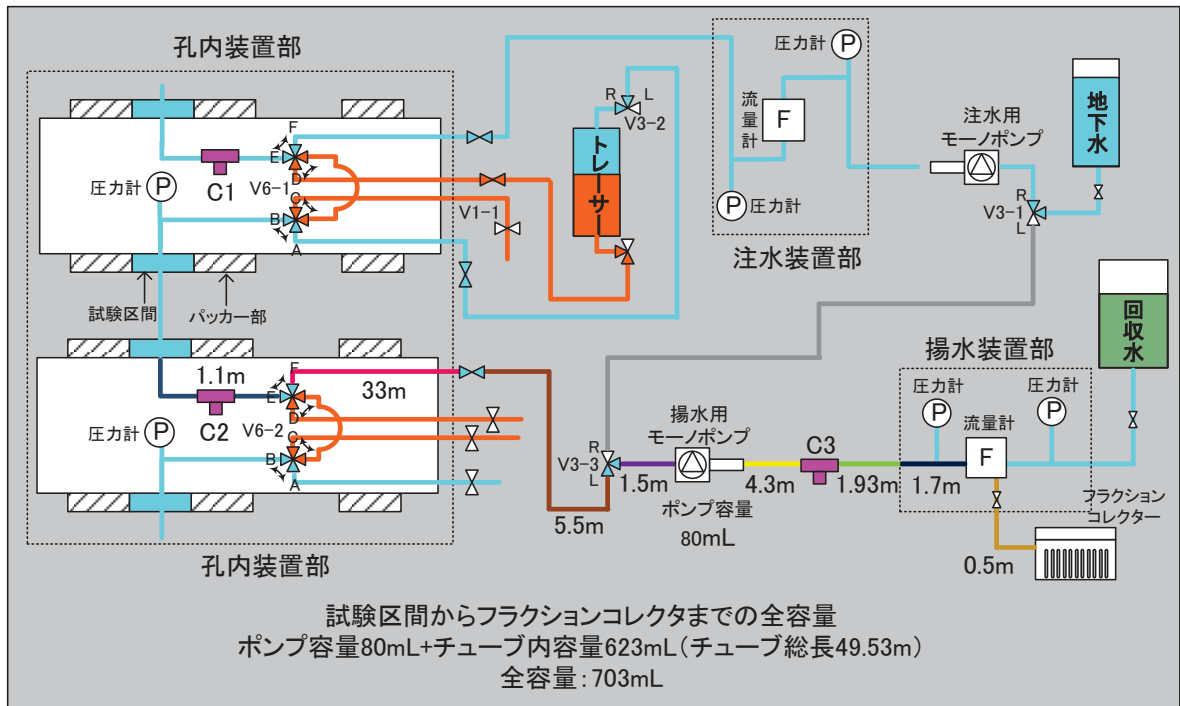


図 4. 3. 6-1 16W5253T1~T3、T4-6 の配管図と容量

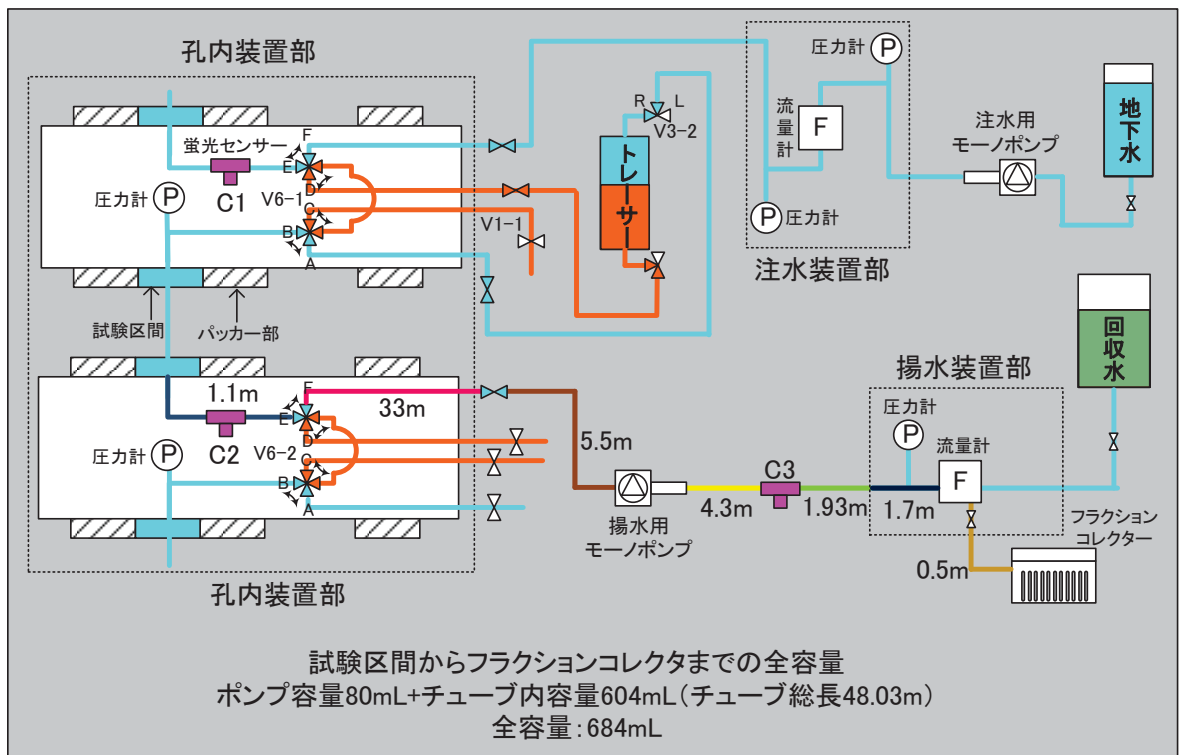


図 4. 3. 6-2 16W5352T7 の配管図と容量

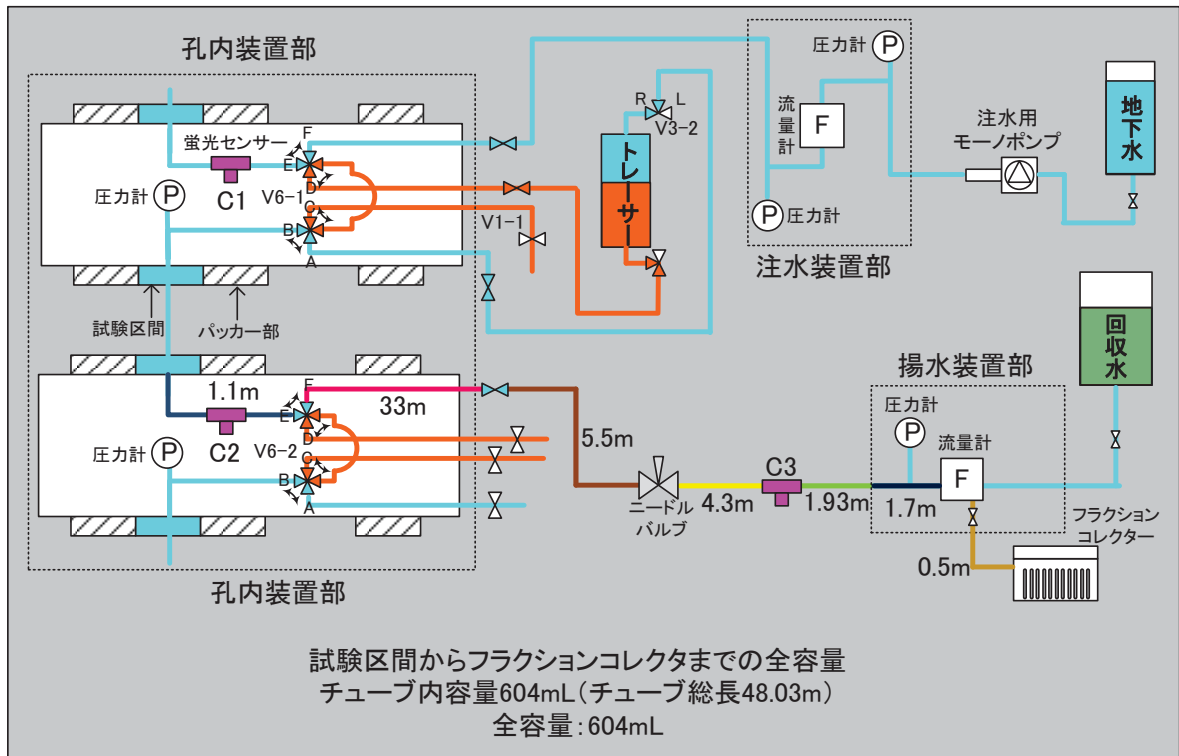


図 4.3.6-3 16W5352T8、T9-11 の配管図と容量

(2) 試験結果

1) 16W5253T1

試験の注水／揚水の配管構成は、図 4.3.6-1 に示す通りである。図 4.3.6-4 に 16W5253T1 の試験条件と破過曲線、図 4.3.6-5 に圧力と流量の関係および 16MI59 号孔の圧力応答を示す。16W5253T1 ではトレーサー回収時（揚水）に地下水のサンプリングを行っていないため、C1 センサーのみ補正值を示した。

試験条件一覧

試験名			16W5253T1
注水孔			15MI52 号孔
試験実施日			2016/11/28
トレーサー材			ウラニン
流量	注水流量	mL/min	12.18
	揚水流量	mL/min	51.59
	ダイポール比	-	4.24
試験時間	トレーサー注入	min	20
	サンプリング採取(揚水)	min	120
蛍光濃度センサー	C1 (52 号孔孔内)		Ver. 3.1
	C2 (53 号孔孔内)		Ver. 3.1
	C3 (地上)		Ver. 1.0

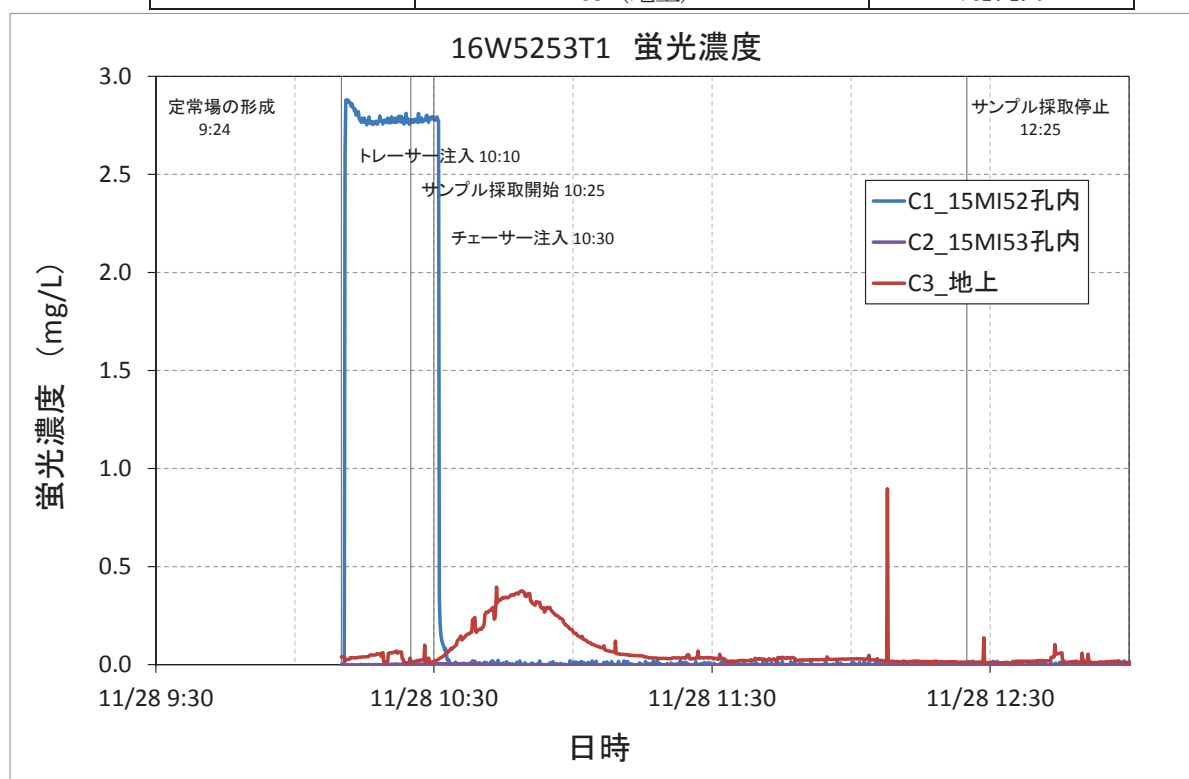


図 4.3.6-4 16W5253T1 の試験条件と破過曲線

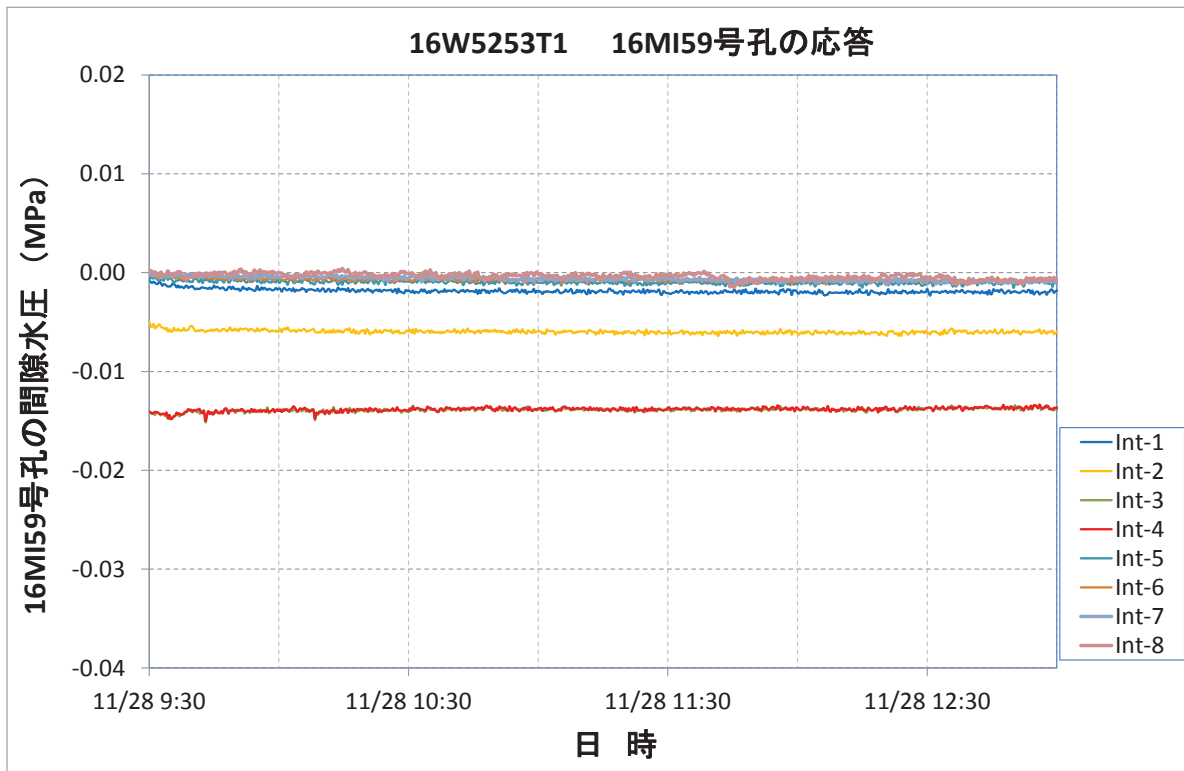
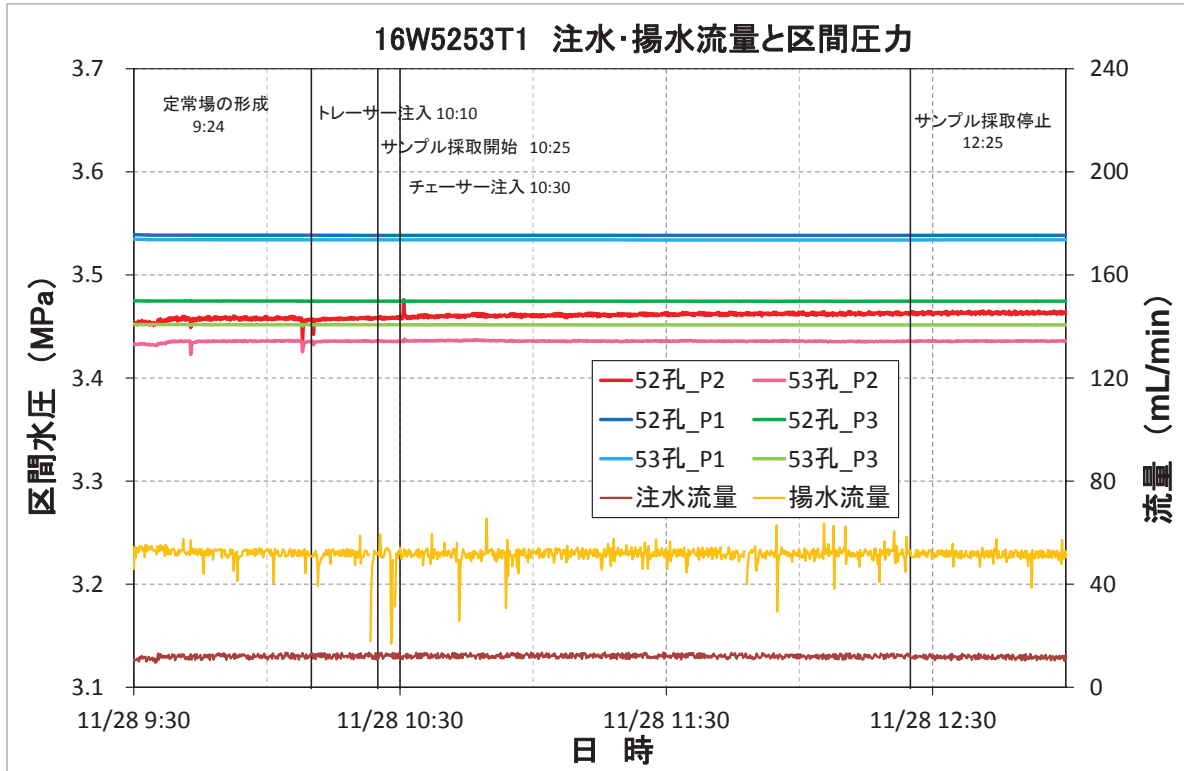


図 4.3.6-5 16W5253T1 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答



2) 16W5253T2

注水／揚水の配管構成は、16W5253T1 と同様である（図 4.3.6-1）。図 4.3.6-6 に 16W5253T2 の試験条件と破過曲線、図 4.3.6-7 に圧力と流量の関係および 16MI59 号孔の圧力応答を示す。

図中の C3 センサーの破過曲線にスパイク上のノイズが散見されるのは、センサー部にガスの気泡が通過する際に生じたものと考えられる。

試験条件一覧

試験名			16W5253T2
注水孔			15MI52 号孔
試験実施日			2016/11/29
トレーサー材			ウラニン
流量	注水流量	mL/min	5.10
	揚水流量	mL/min	27.84
	ダイポール比	-	5.46
試験時間	トレーサー注入	min	10
	サンプリング採取(揚水)	min	120
蛍光濃度センサー	C1 (52 号孔孔内)		Ver. 3.1
	C2 (53 号孔孔内)		Ver. 3.1
	C3 (地上)		Ver. 1.0

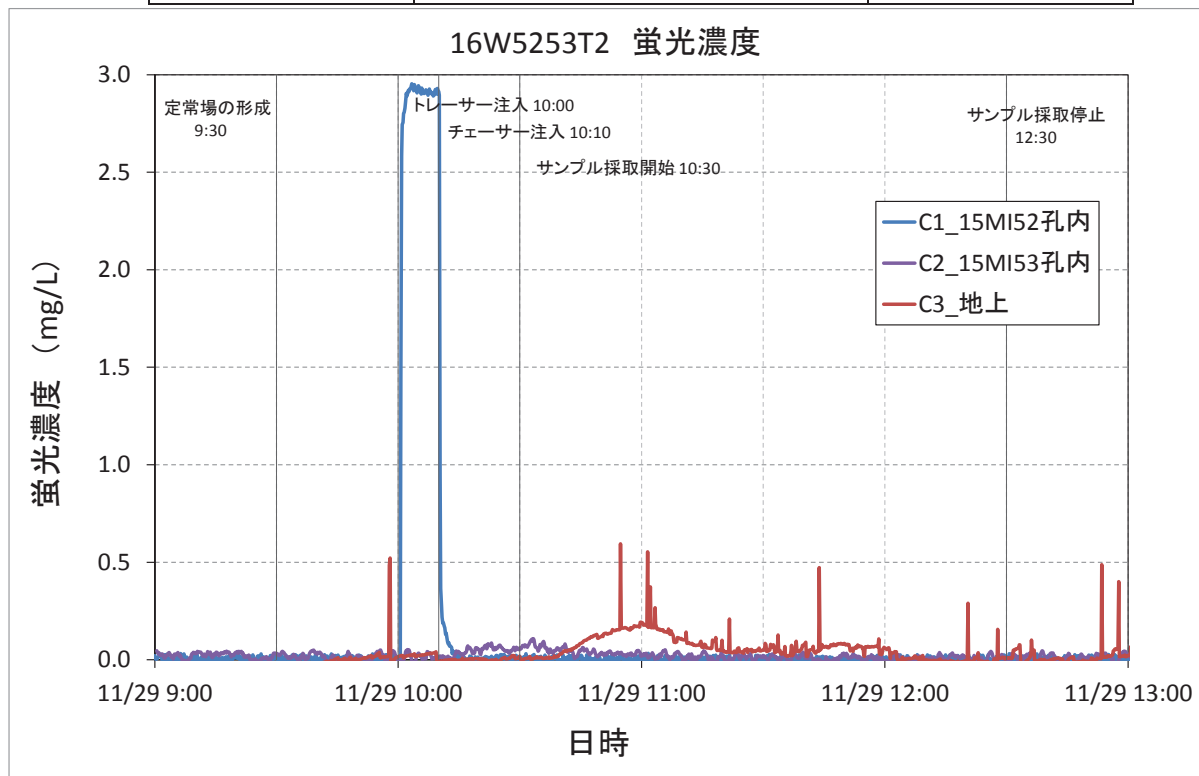


図 4.3.6-6 16W5253T2 の試験条件と破過曲線

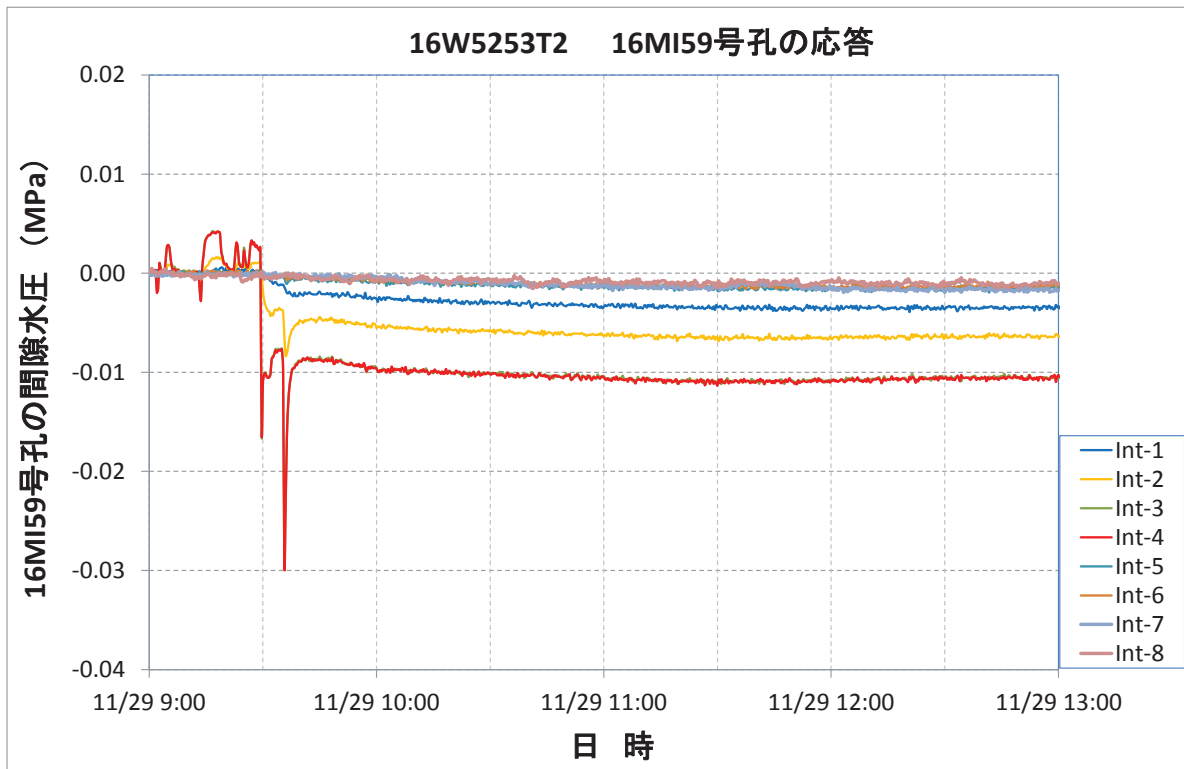
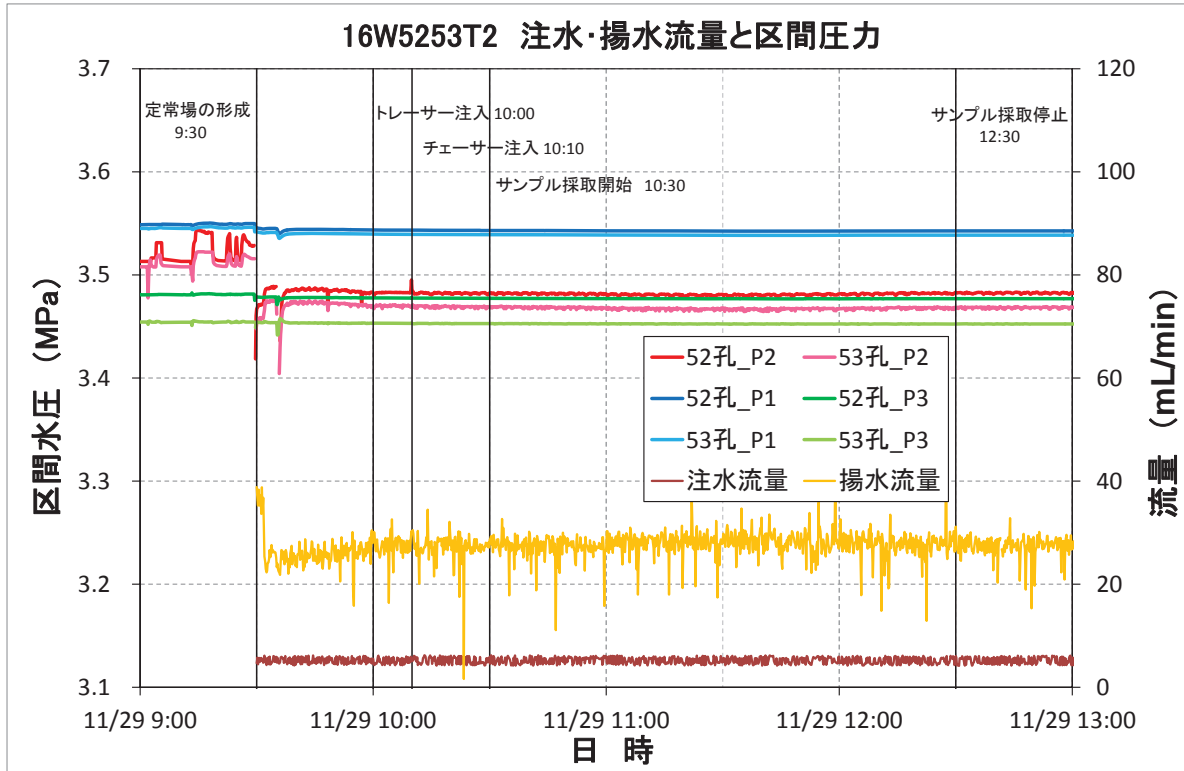


図 4.3.6-7 16W5253T2 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答

3) 16W5253T3

注水／揚水の配管構成は、16W5253T1 と同様である（図 4.3.6-1）。図 4.3.6-8 に 16W5253T3 の試験条件と破過曲線、図 4.3.6-9 に圧力と流量の関係および 16MI59 号孔の圧力応答を示す。

図中の C3 センサーの破過曲線にスパイク上のノイズが散見されるのは、センサー部にガスの気泡が通過する際に生じたものと考えられる。

試験条件一覧

試験名			16W5253T3
注水孔			15MI52 号孔
試験実施日			2016/11/30
トレーサー材			ウラニン
流量	注水流量	mL/min	3.17
	揚水流量	mL/min	26.14
	ダイポール比	-	8.25
試験時間	トレーサー注入	min	20
	サンプリング採取（揚水）	min	120
蛍光濃度センサー	C1（52 号孔孔内）		Ver. 3.1
	C2（53 号孔孔内）		Ver. 3.1
	C3（地上）		Ver. 1.0

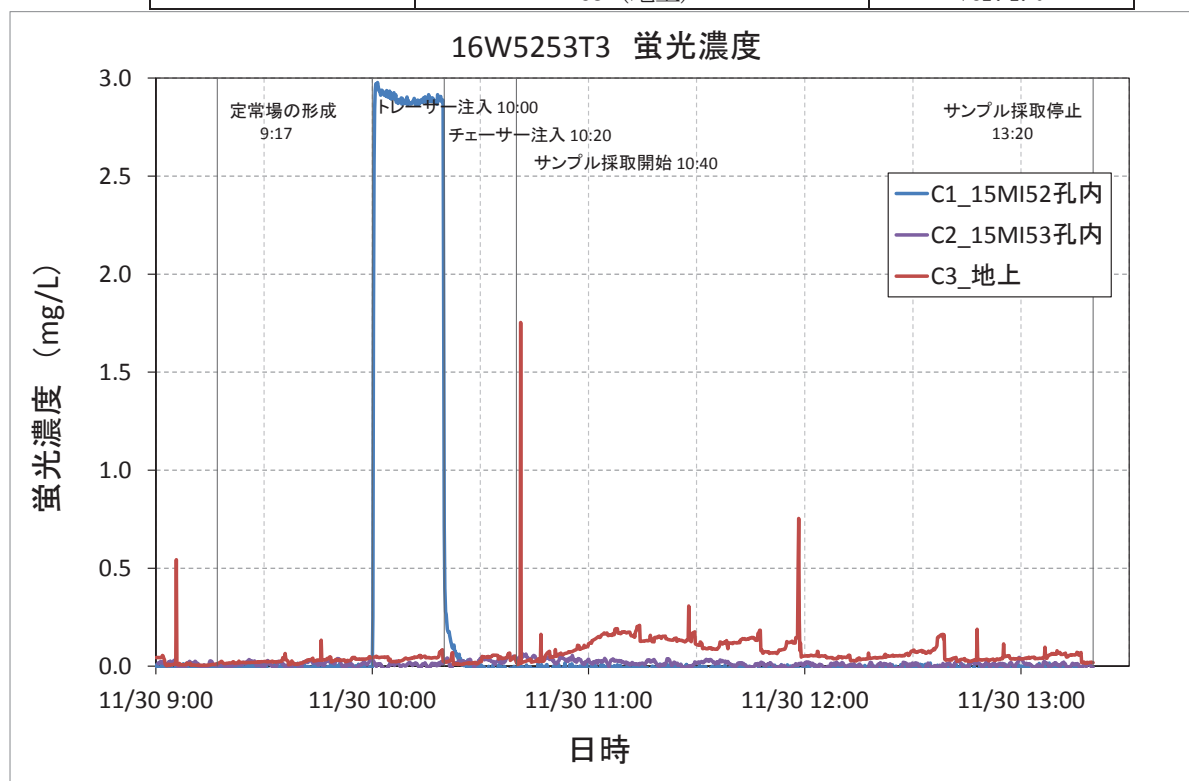


図 4.3.6-8 16W5253T3 の試験条件と破過曲線

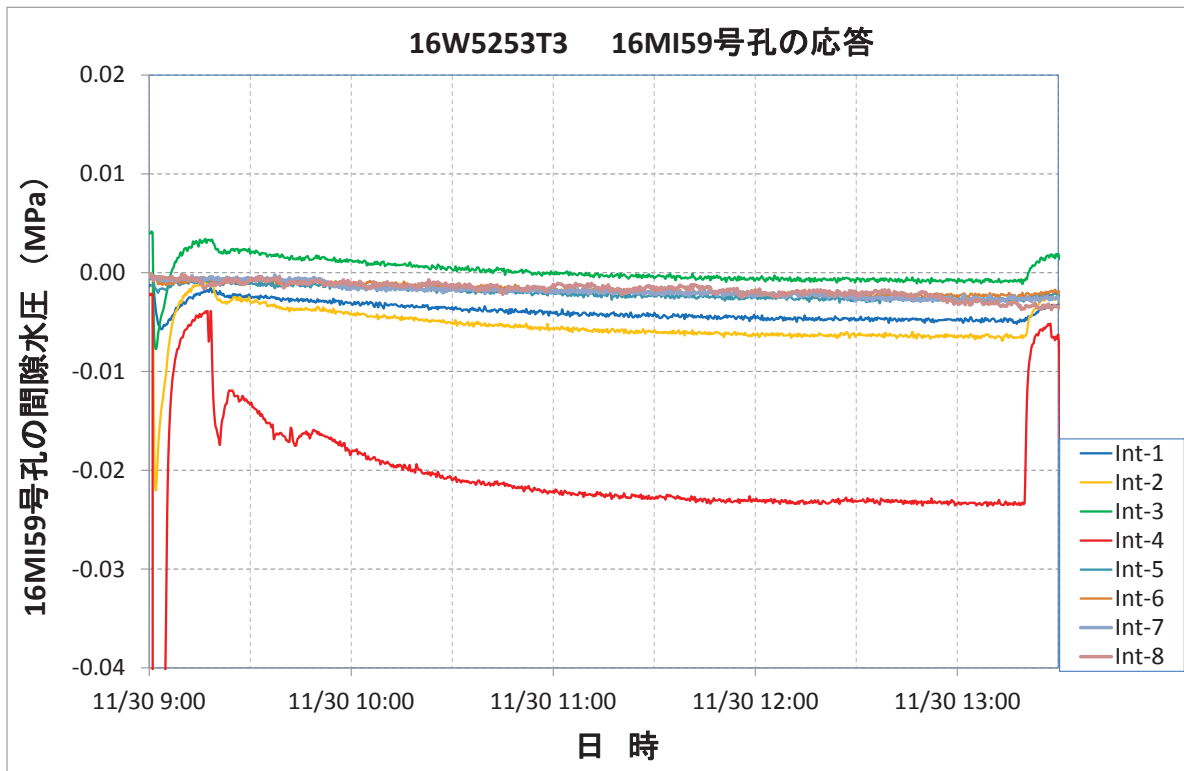
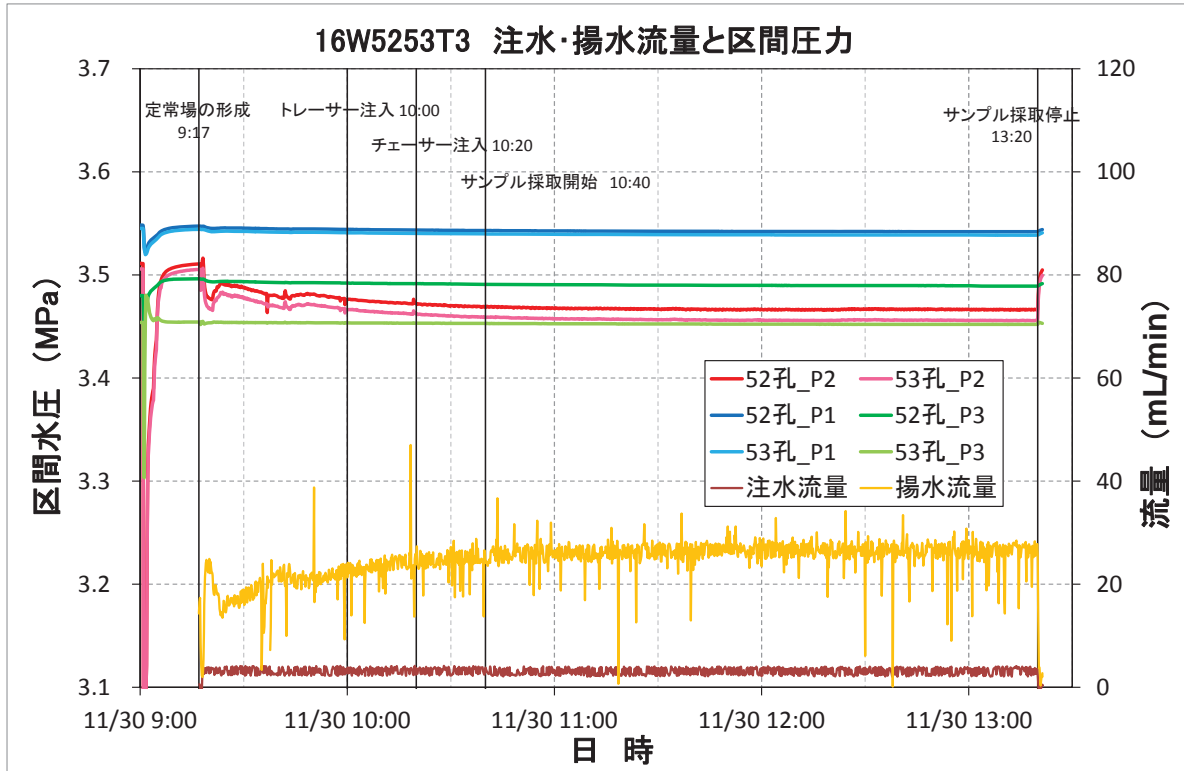


図 4.3.6-9 16W5253T3 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答

4) 16W5253T4-6

注水／揚水の配管構成は、16W5253T1 と同様である（図 4.3.6-1）。図 4.3.6-10 に 16W5253T4-6 の試験条件と破過曲線、図 4.3.6-11 に圧力と流量の関係および 16MI59 号孔の圧力応答を示す。

16W5253T4-6 は、収着性トレーサーの遅延効果の確認のため、トレーサー注入日（12月1日）の翌日（12月2日）まで連続揚水を行った。ただし、図 4.3.6-10 の破過曲線の時間軸は、トレーサー注入当日に蛍光濃度が収束したため、12月1日の18時までの表示とした。

試験条件一覧

試験名			16W5253T4-6
注水孔			15MI52 号孔
試験実施日			2016/12/1～12/2
トレーサー材			ウラニン、アミノ G、重水素、Rb <sup>+</sup> 、Ba <sup>2+</sup>
流量	注水流量	mL/min	2.90
	揚水流量	mL/min	26.12
	ダイポール比	-	9.01
試験時間	トレーサー注入	min	60
	サンプリング採取（揚水）	min	1750
蛍光濃度センサー	C1（52号孔孔内）		Ver. 3.1
	C2（53号孔孔内）		Ver. 3.1
	C3（地上）		Ver. 1.0

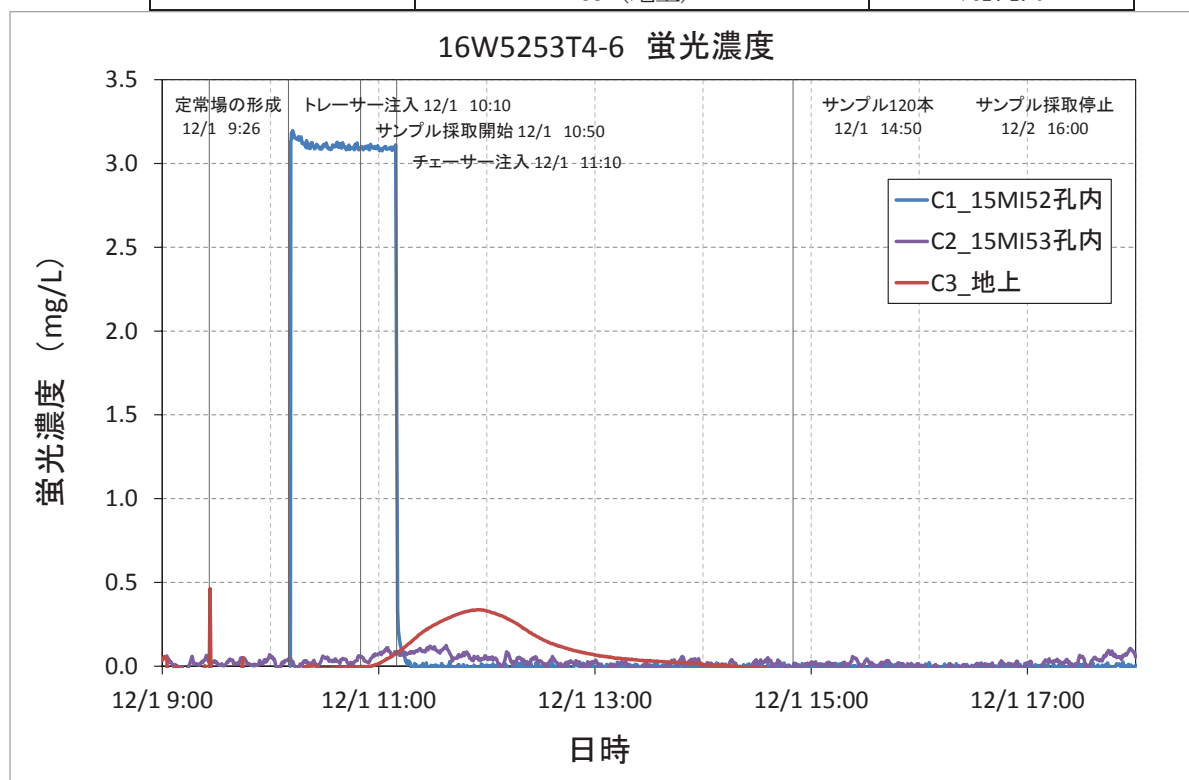


図 4.3.6-10 16W5253T4-6 の試験条件と破過曲線

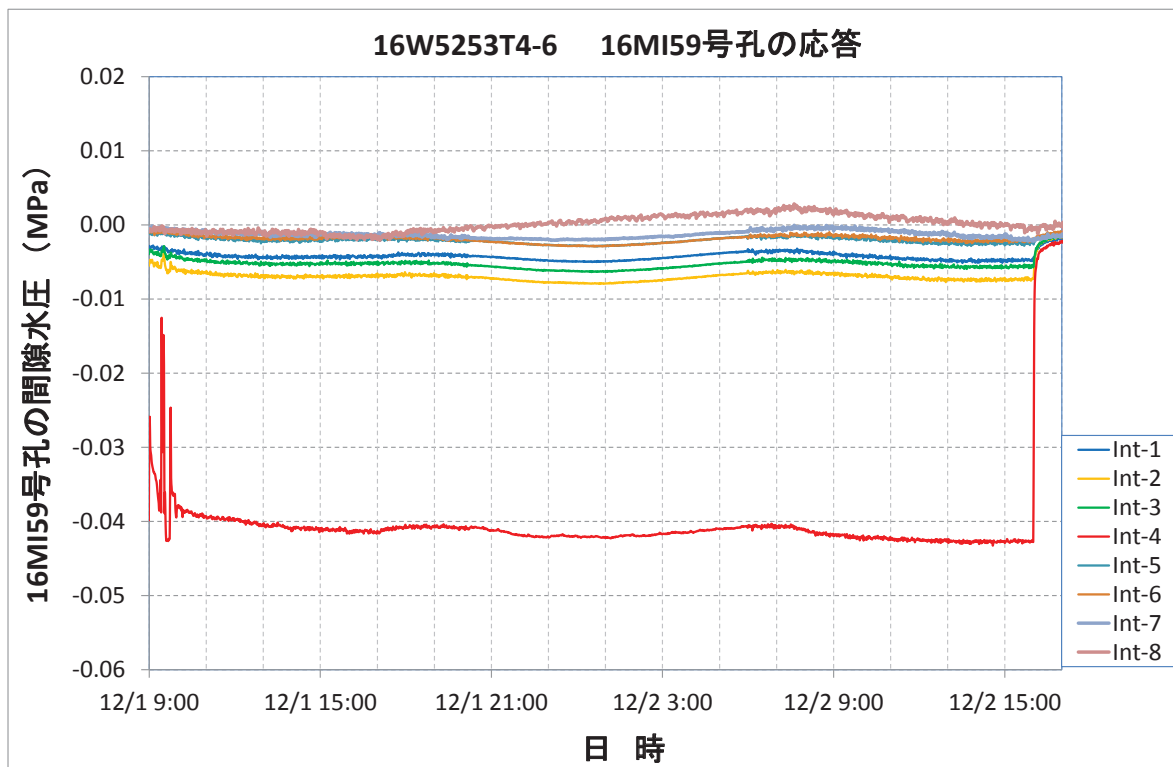
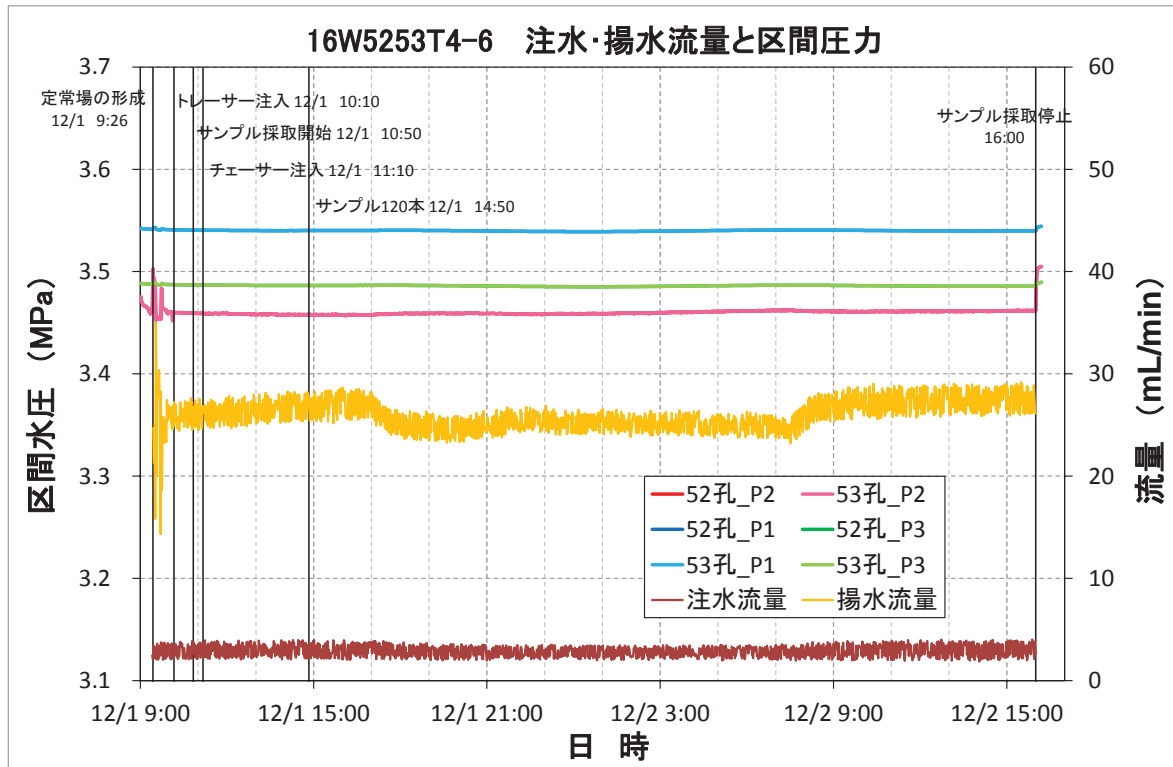


図 4.3.6-11 16W5253T4-6 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答

5) 16W5352T7

注水／揚水の配管構成は図 4.3.6-2 に示す通りである。基本的な配管構成は 16W5253T1～T6 と同じであるが、地上の配管長が 15m 短い。図 4.3.6-12 に 16W5352T7 の試験条件と破過曲線、図 4.3.6-13 に圧力と流量の関係および 16MI59 号孔の圧力応答を示す。

試験条件一覧

試験名			16W5352T7
注水孔			15MI53 号孔
試験実施日			2016/12/19
トレーサー材			ウラニン、アミノ G、重水素
流量	注水流量	mL/min	2.98
	揚水流量	mL/min	25.41
	ダイポール比	-	8.53
試験時間	トレーサー注入	min	20
	サンプリング採取 (揚水)	min	120
蛍光濃度センサー	C1 (52 号孔孔内)		Ver. 3.1
	C2 (53 号孔孔内)		Ver. 3.1
	C3 (地上)		Ver. 1.0

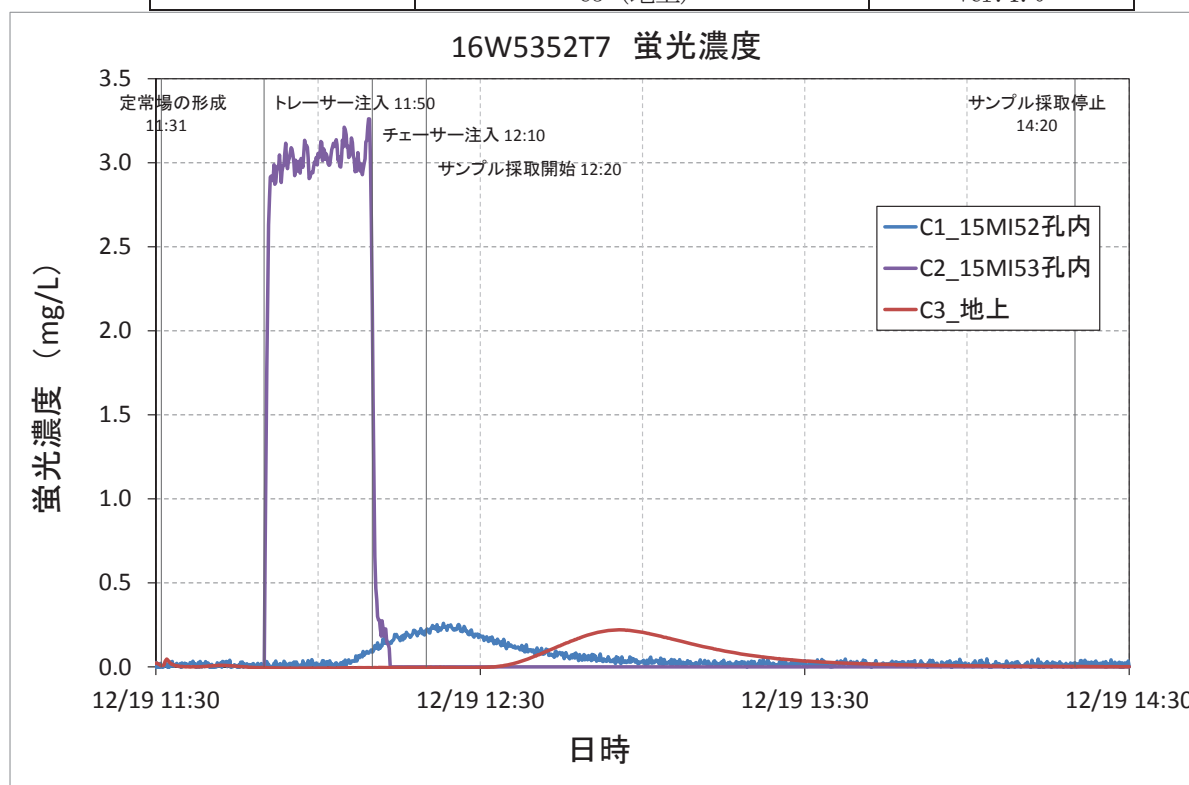


図 4.3.6-12 16W5352T7 の試験条件と破過曲線

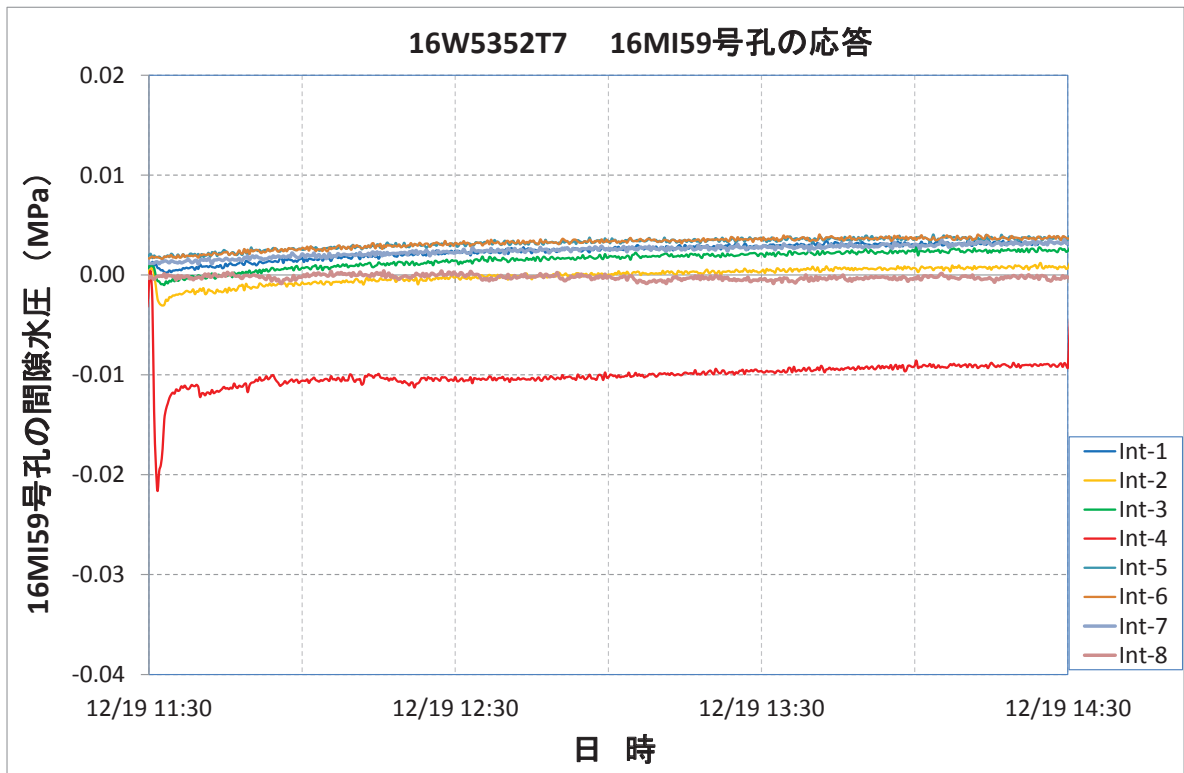
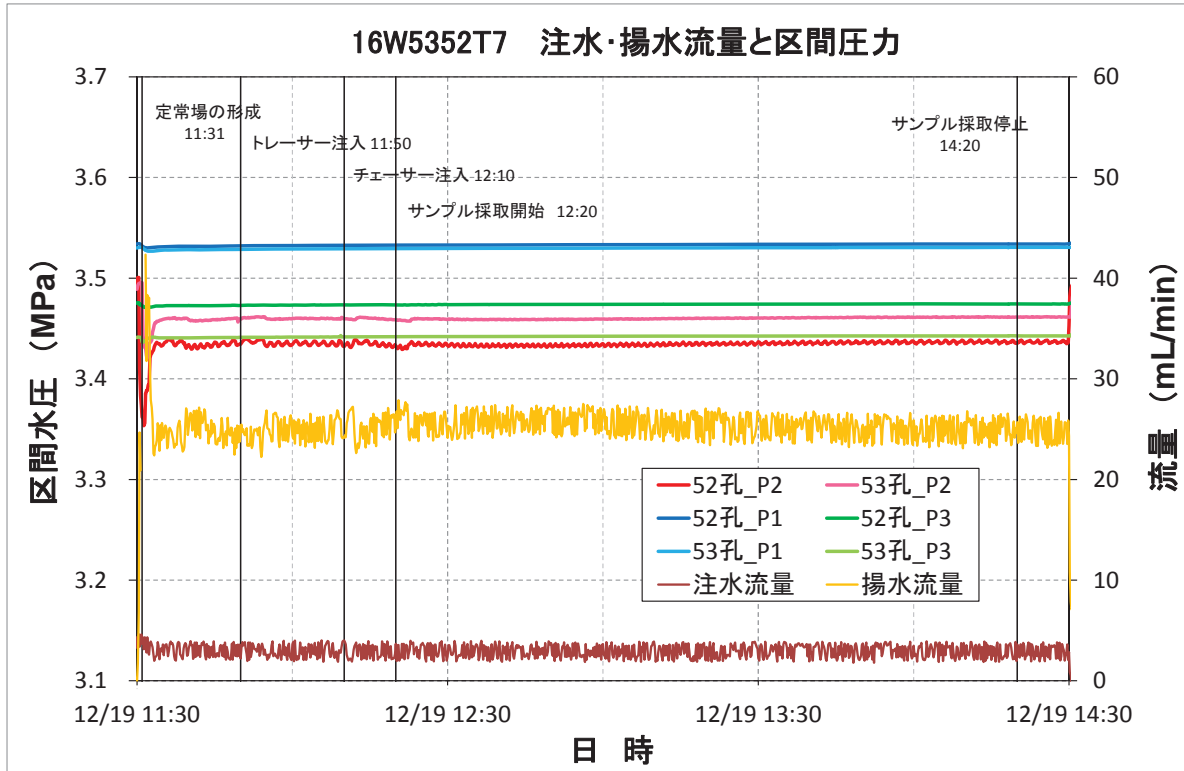


図 4.3.6-13 16W5352T7 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答



6) 16W5352T8

注水／揚水の基本配管構成は 16W5352T7 と同様であるが、揚水側の流量制御はニードルバルブを用いた(図 4.3.6-3)。図 4.3.6-14 に 16W5352T8 の試験条件と破過曲線、図 4.3.6-15 に圧力と流量の関係および 16MI59 号孔の圧力応答を示す。

試験条件一覧

試験名			16W5352T8
注水孔			15MI53 号孔
試験実施日			2016/12/20
トレーサー材			ウラニン、アミノ G、重水素
流量	注水流量	mL/min	3.01
	揚水流量	mL/min	13.16
	ダイポール比	-	4.37
試験時間	トレーサー注入	min	20
	サンプリング採取 (揚水)	min	120
蛍光濃度センサー	C1 (52 号孔孔内)		Ver. 3.1
	C2 (53 号孔孔内)		Ver. 3.1
	C3 (地上)		Ver. 1.0

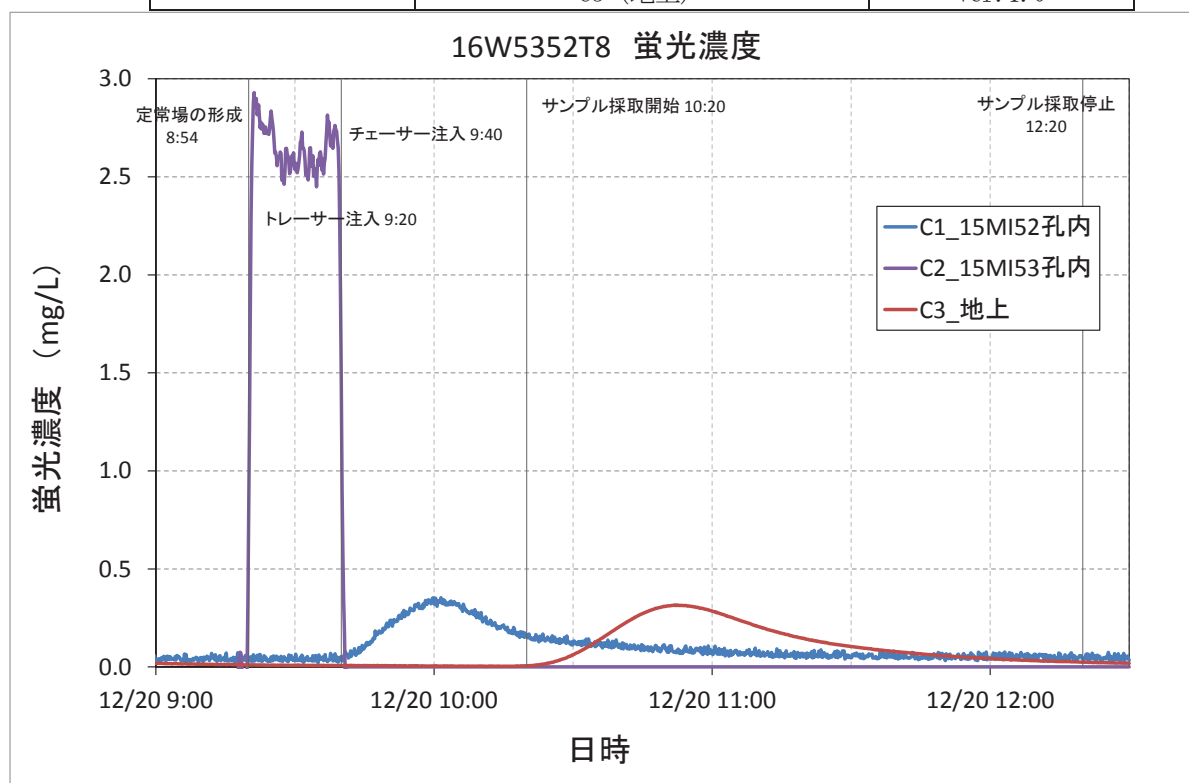


図 4.3.6-14 16W5352T8 の試験条件と破過曲線

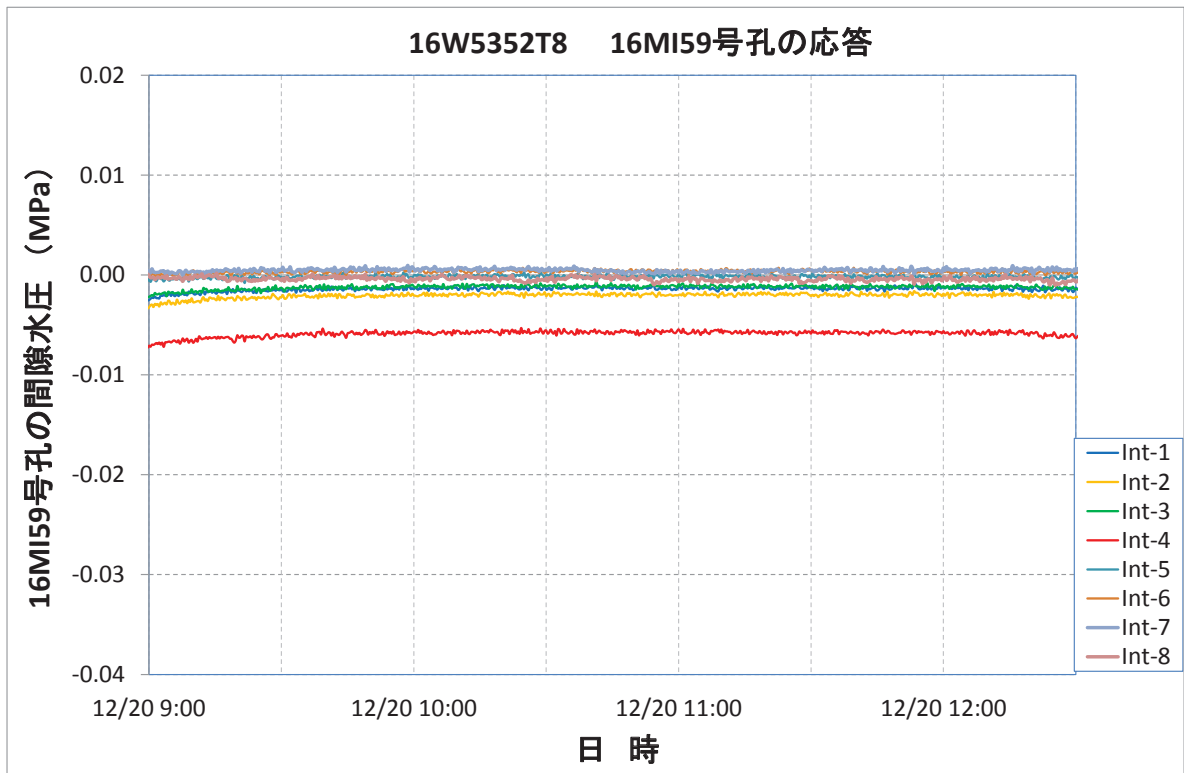
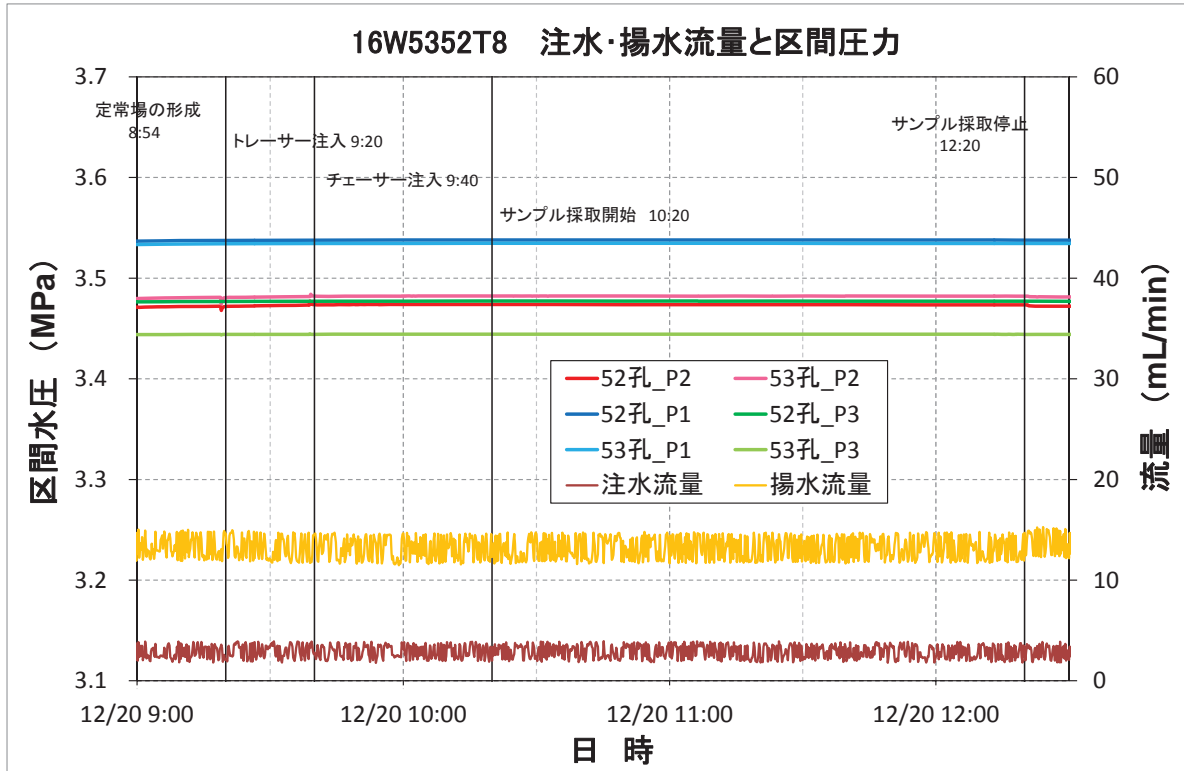


図 4.3.6-15 16W5352T8 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答

7) 16W5352T9-11

注水／揚水の配管構成は 16W5352T8 と同様に、ニードルバルブを用いた揚水流量の制御とした（図 4.3.6-3）。図 4.3.6-16 に 16W5352T9-11 の試験条件と破過曲線、図 4.3.6-17 に圧力と流量の関係および 16MI59 号孔の圧力応答を示す。

図 4.3.6-17 の揚水流量より、17 時頃から翌 7 時半頃にかけて流量が減少している。流量変化の大きい時間帯は換気ファンの稼働／停止時間とほぼ一致しており、坑内温度の影響を受けた可能性が高い。一方、16MI59 号孔の応答グラフにおいて、モニタリングデータは夜間の一定時間にノイズが減少しているが、全ての昼夜連続試験において同様の傾向が認められる。これは、ノイズの原因となる何らかの坑道内設備が夜間に停止するためと考えられる。

試験条件一覧

試験名			16W5352T9-11
注水孔			15MI53 号孔
試験実施日			2016/12/21
トレーサー材			ウラン、アミノ G、重水素、Rb <sup>+</sup> 、Ba <sup>2+</sup>
流量	注水流量	mL/min	2.08
	揚水流量	mL/min	5.83
	ダイポール比	-	2.80
試験時間	トレーサー注入	min	420
	サンプリング採取（揚水）	min	1800
蛍光濃度センサー	C1（52 号孔孔内）		Ver. 3.1
	C2（53 号孔孔内）		Ver. 3.1
	C3（地上）		Ver. 1.0

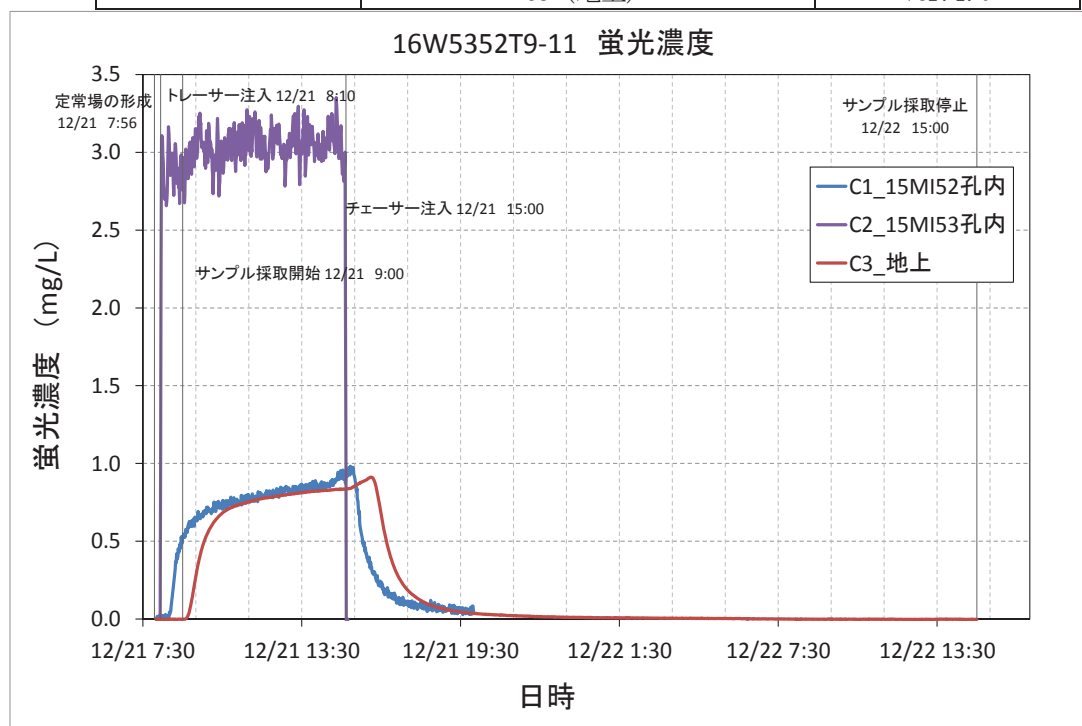


図 4.3.6-16 16W5352T9-11 の試験条件と破過曲線

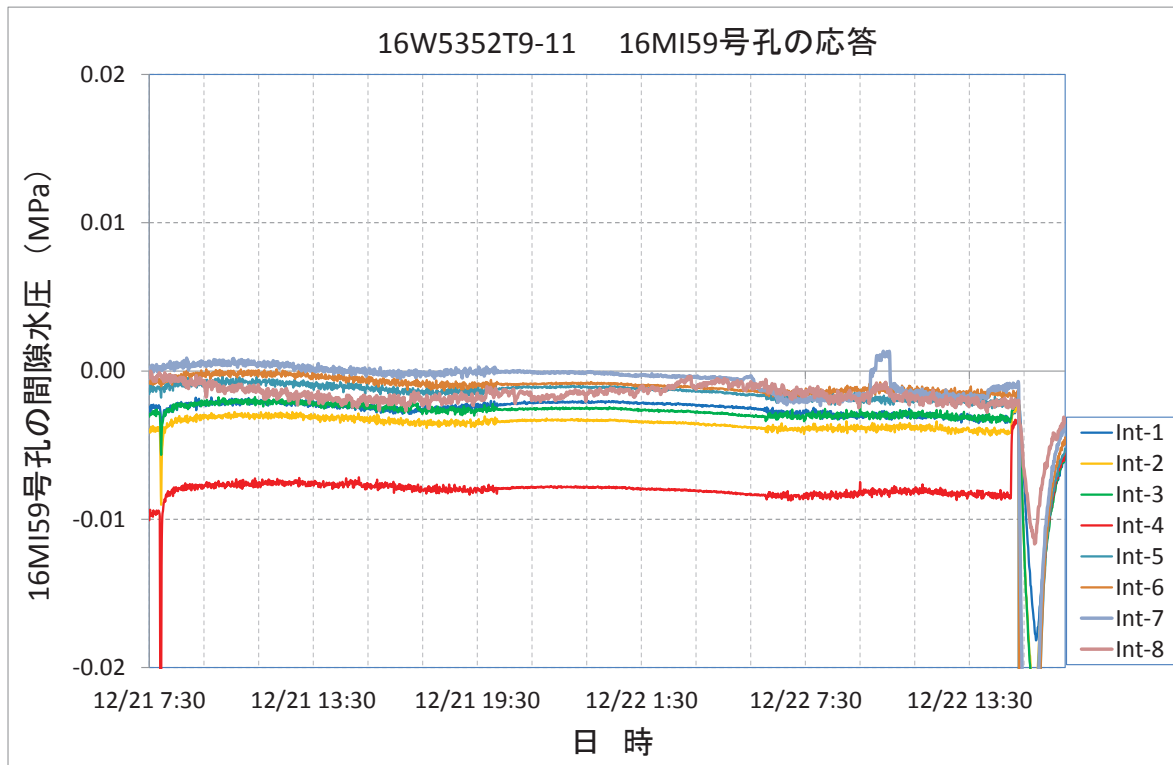
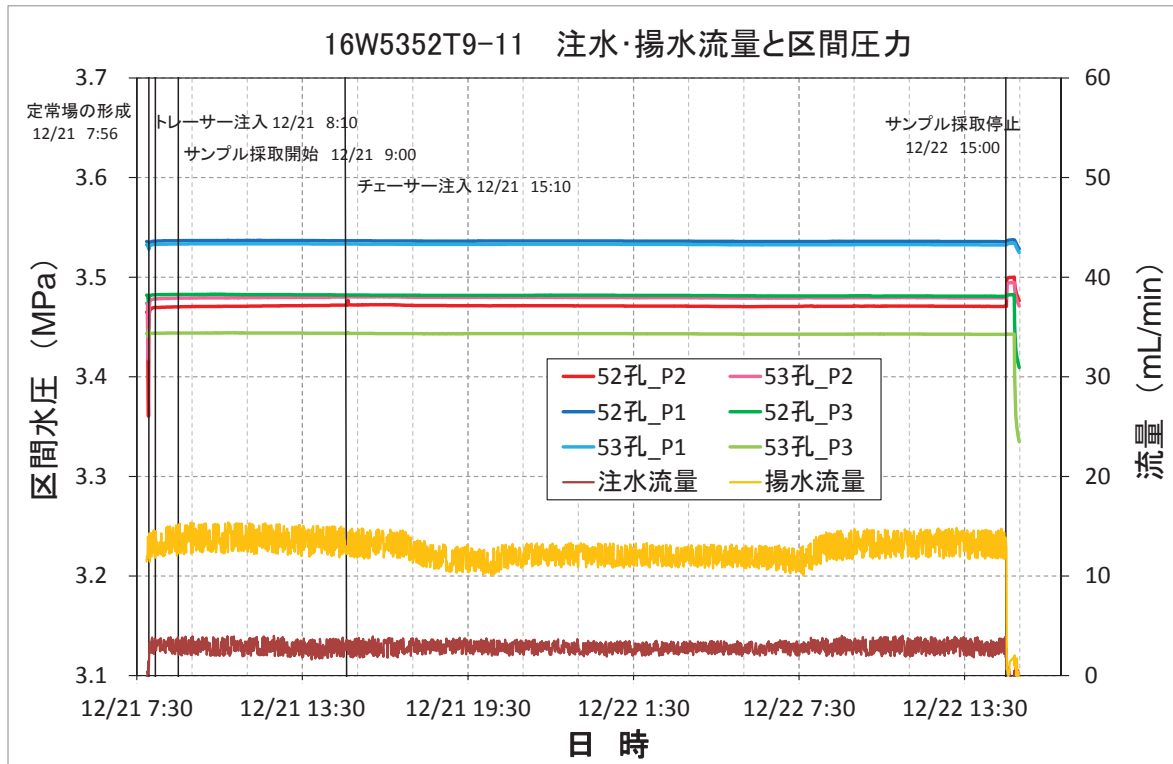


図 4.3.6-17 16W5352T9-11 の圧力-流量と16MI59号孔の応答

8) 16W5352T12

注水／揚水の配管構成は16W5352T8と同様にニードルバルブを用いた揚水とし、さらにニードルバルブを1個追加して2個のバルブで流量を制御した。図 4.3.6-18に16W5352T12の試験条件と破過曲線、図 4.3.6-19に圧力と流量の関係および16MI59号孔の圧力応答を示す。

試験条件一覧

試験名			16W5352T12
注水孔			15MI53号孔
試験実施日			2017/1/11
トレーサー材			ウラニン、アミノG、重水素
流量	注水流量	mL/min	2.08
	揚水流量	mL/min	5.83
	ダイポール比	-	2.80
試験時間	トレーサー注入	min	420
	サンプリング採取(揚水)	min	1800
蛍光濃度センサー	C1 (52号孔孔内)		Ver. 3.1
	C2 (53号孔孔内)		Ver. 3.1
	C3 (地上)		Ver. 1.0

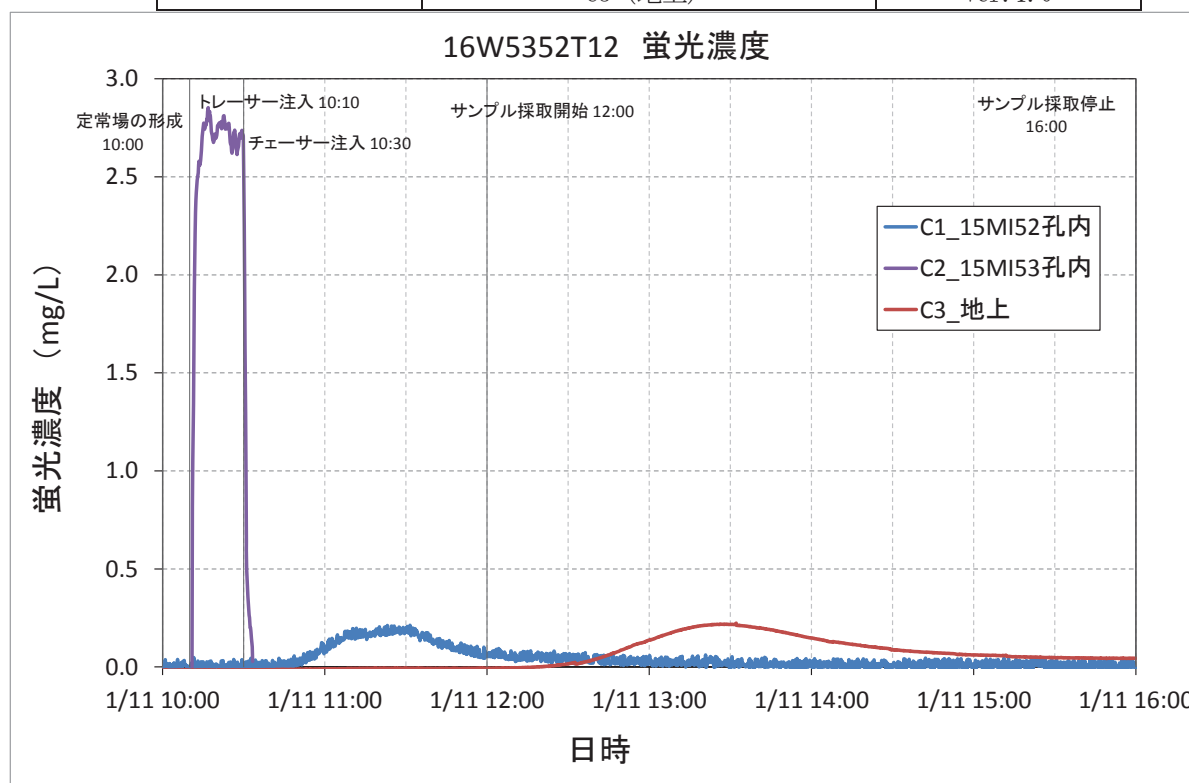


図 4.3.6-18 16W5352T12 の試験条件と破過曲線

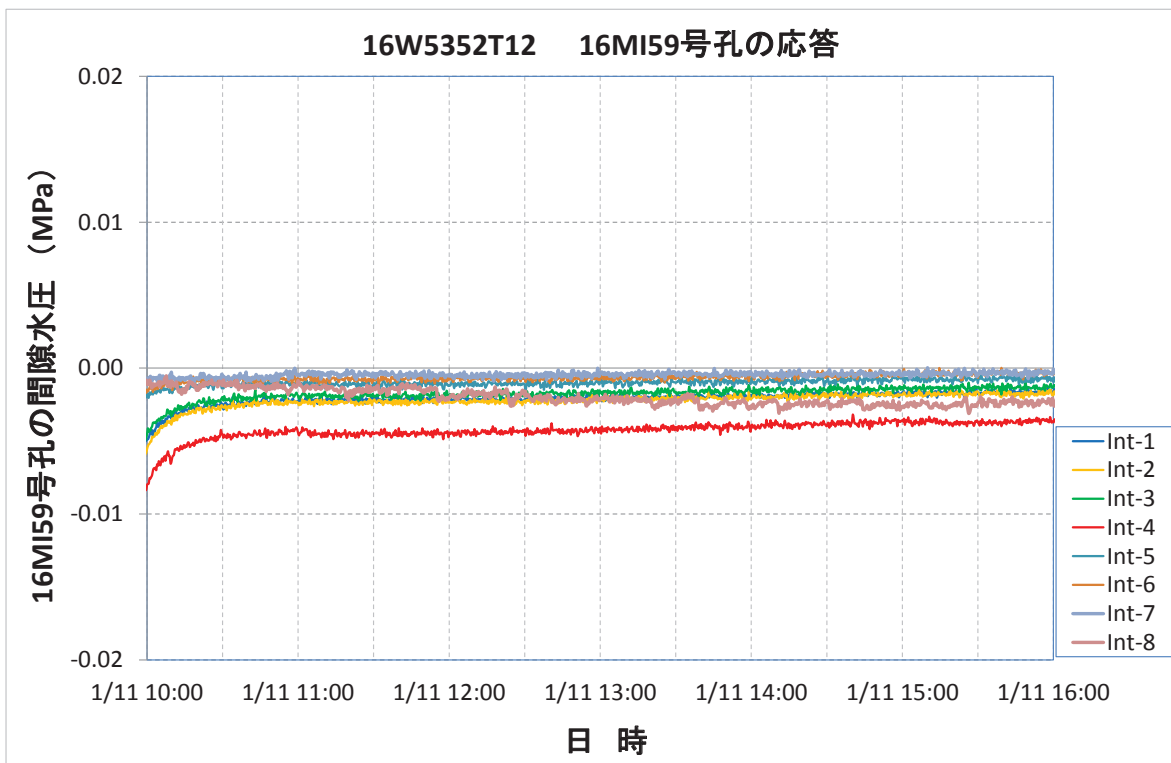
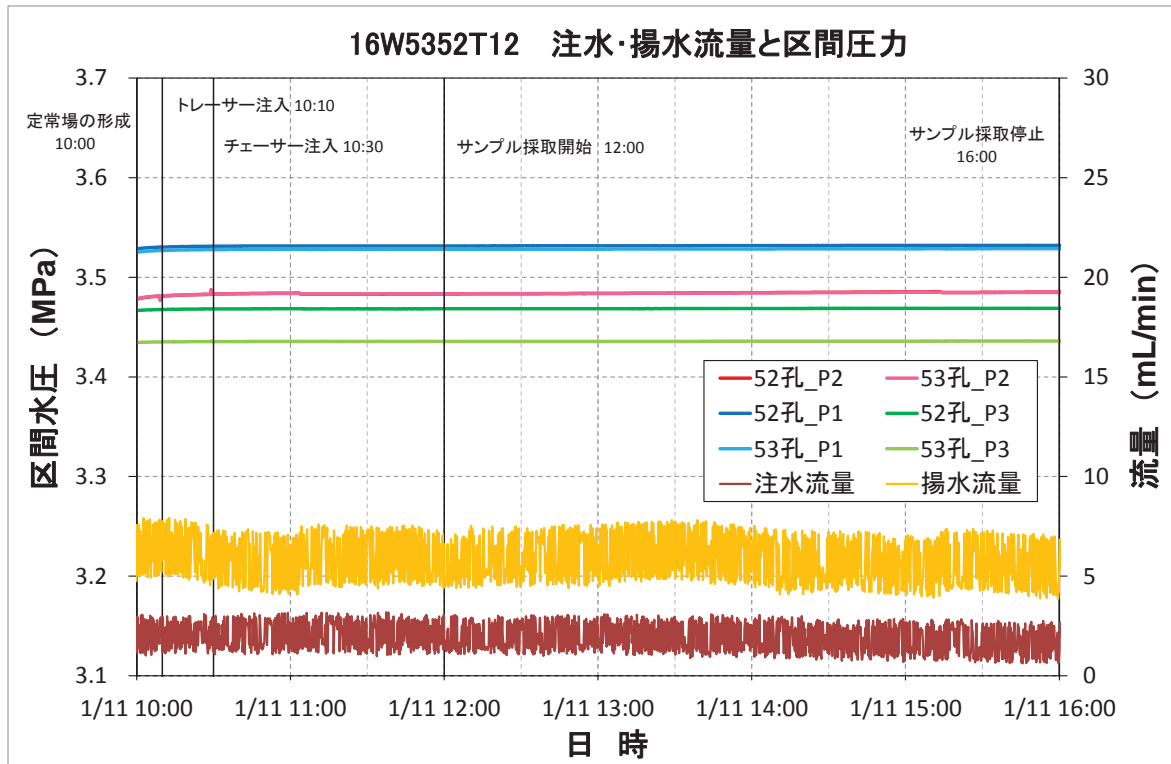


図 4.3.6-19 16W5352T12 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答

9) 16W5352T13-15

注水／揚水の配管構成は 16W5352T12 と同様に、2 個のニードルバルブを用いた揚水流量の制御とした。図 4.3.6-20 に 16W5352T13-15 の試験条件と破過曲線、図 4.3.6-21 に圧力と流量の関係および 16MI59 号孔の圧力応答を示す。

試験は 1 月 13 日 16 時まで継続したが、トレーサー注入当日に蛍光濃度が収束したため、破過曲線の時間軸表示は 1 月 12 日 18 時までとした。

試験条件一覧

試験名			16W5352T13-15
注水孔			15MI53 号孔
試験実施日			2017/1/12~13
トレーサー材			ウラン、アミノ G、重水素、Rb <sup>+</sup> 、Ba <sup>2+</sup>
流量	注水流量	mL/min	1.97
	揚水流量	mL/min	5.24
	ダイポール比	-	2.66
試験時間	トレーサー注入	min	60
	サンプリング採取 (揚水)	min	1860
蛍光濃度センサー	C1 (52 号孔孔内)		Ver. 3.1
	C2 (53 号孔孔内)		Ver. 3.1
	C3 (地上)		Ver. 1.0

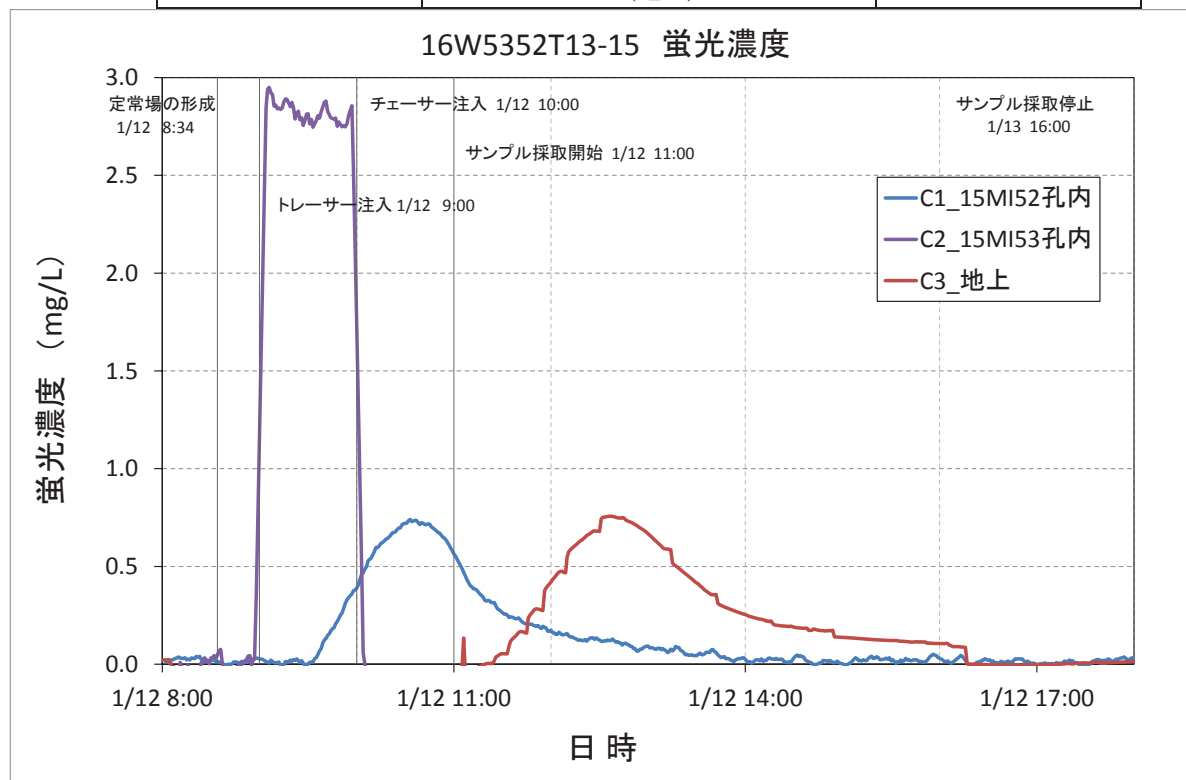


図 4.3.6-20 16W5352T13-15 の試験条件と破過曲線

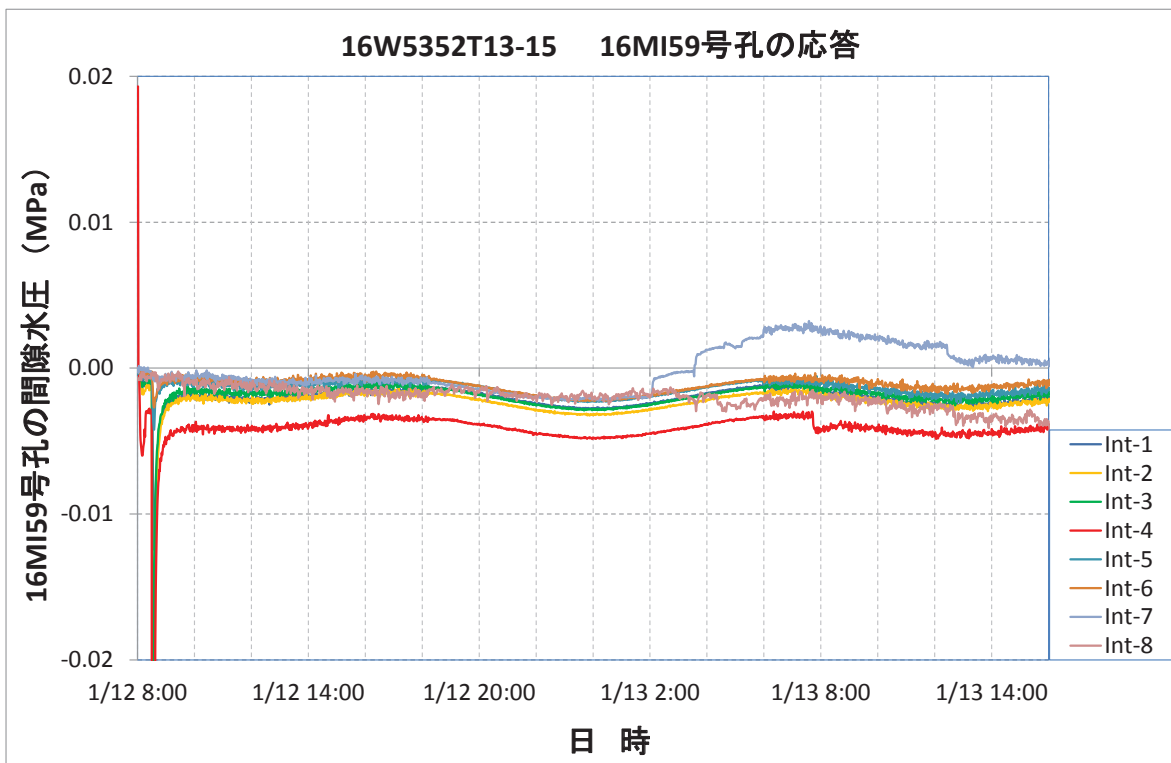
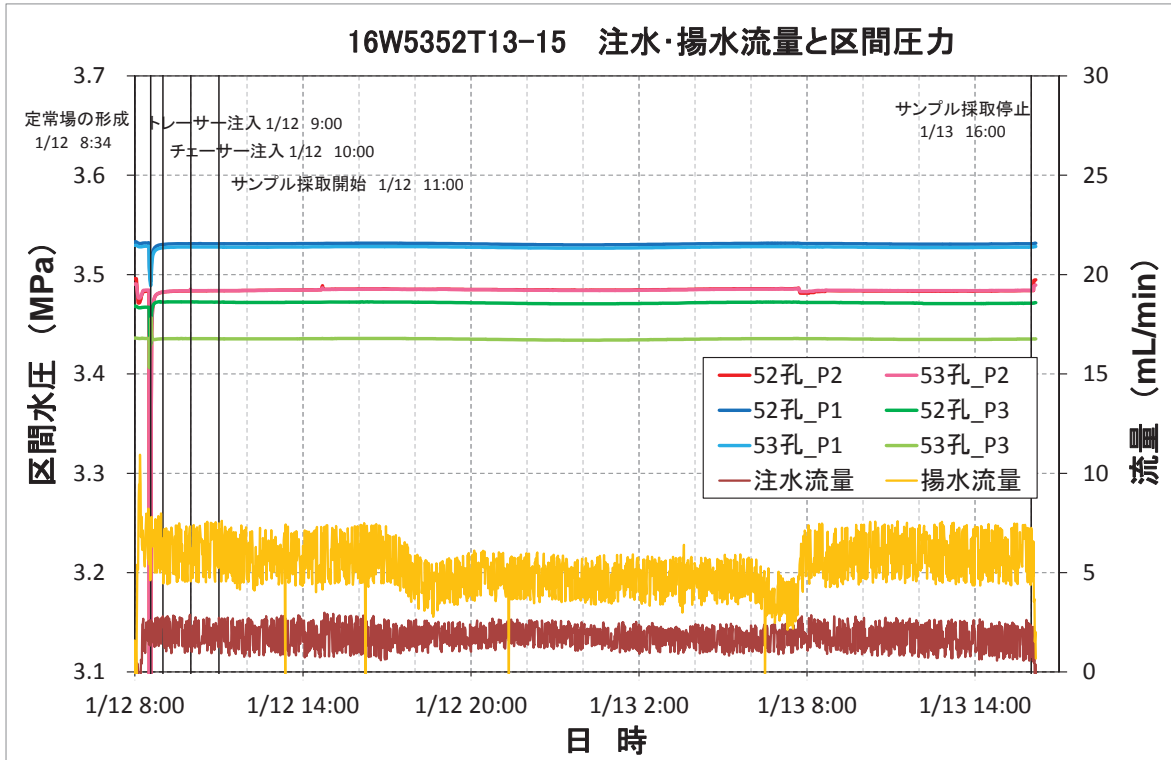


図 4.3.6-21 16W5352T13-15 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答



10) 16W5352T16-18

注水／揚水の配管構成は 116W5352T12 と同様に、2 個のニードルバルブを用いた揚水流量の制御とした。図 4.3.6-22 に 16W5352T16-18 の試験条件と破過曲線、図 4.3.6-23 に圧力と流量の関係および 16MI59 号孔の圧力応答を示す。

試験条件一覧

試験名			16W5352T16-18
注水孔			15MI53 号孔
試験実施日			2017/1/16~18
トレーサー材			ウラン、アミノ G、重水素、Rb <sup>+</sup> 、Ba <sup>2+</sup>
流量	注水流量	mL/min	1.78
	揚水流量	mL/min	6.18
	ダイポール比	-	3.47
試験時間	トレーサー注入	min	1440
	サンプリング採取 (揚水)	min	2760
蛍光濃度センサー	C1 (52 号孔孔内)		Ver. 3.1
	C2 (53 号孔孔内)		Ver. 3.1
	C3 (地上)		Ver. 1.0

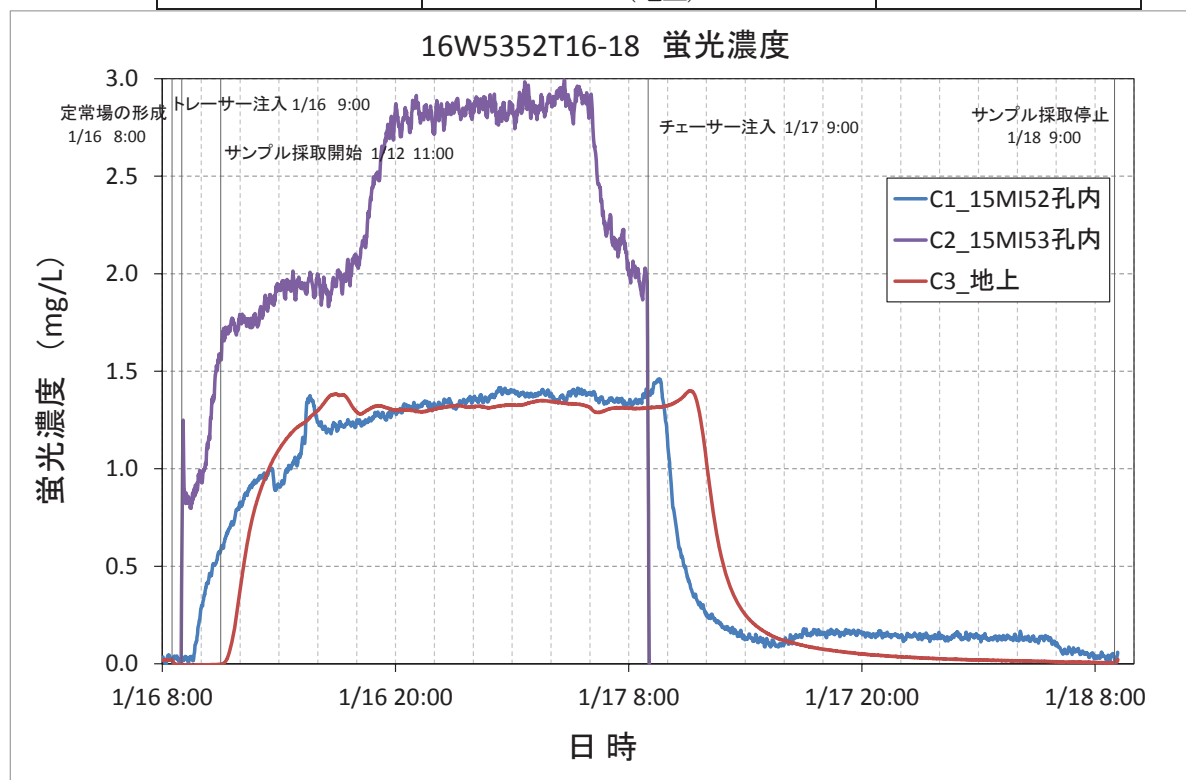


図 4.3.6-22 16W5352T16-18 の試験条件と破過曲線

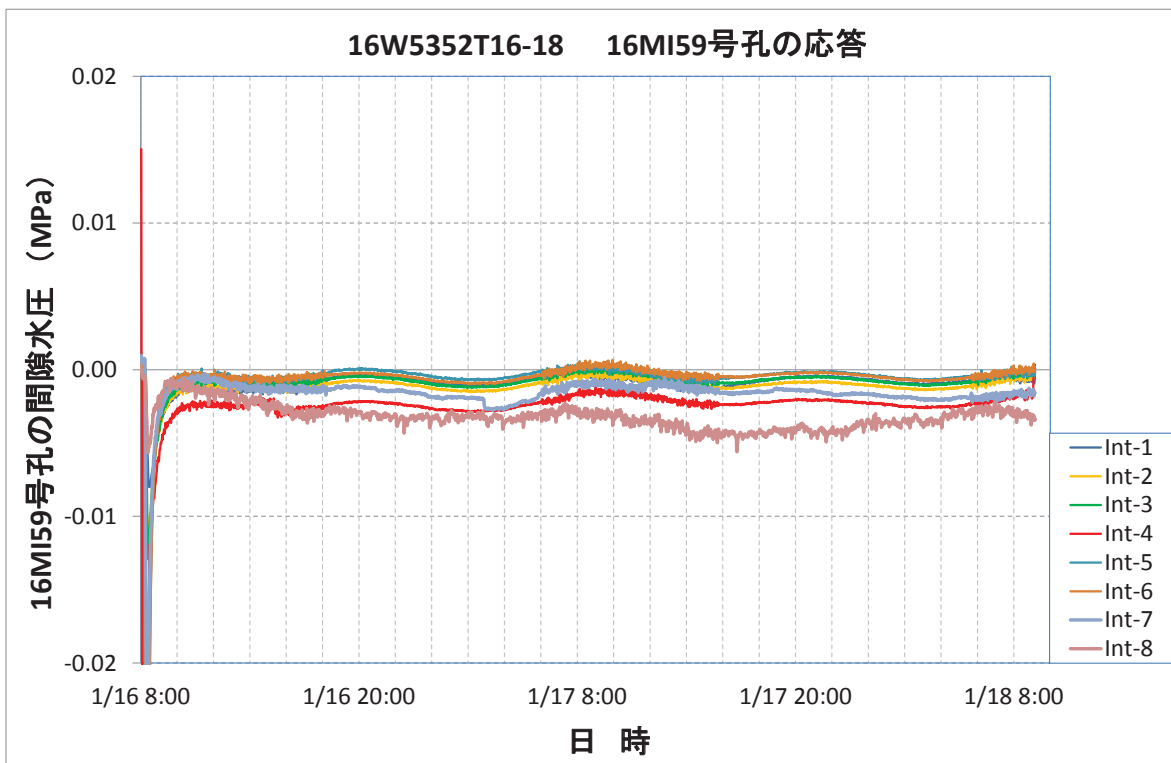
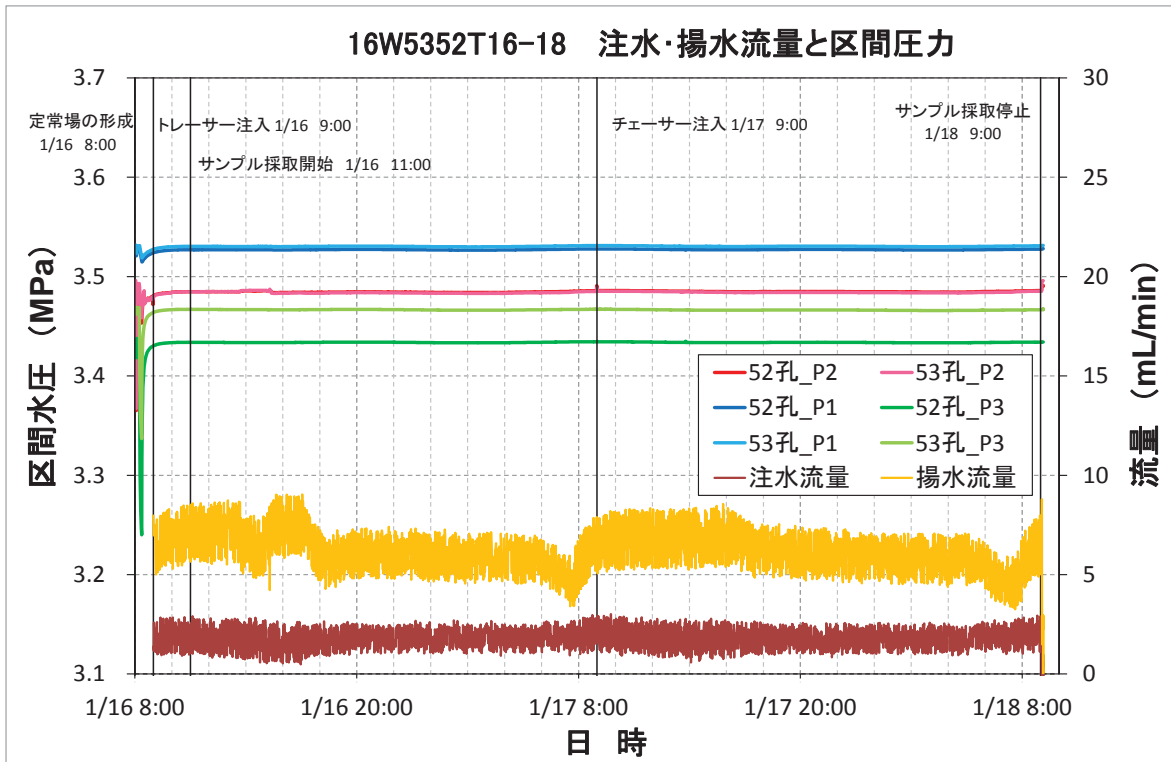


図 4.3.6-23 16W5352T16-18 の圧力-流量と 16MI59 号孔の応答

#### 4.3.7 試験装置の適用性の確認および今後の課題

##### (1) 適用性の確認

昨年度の原位置試験で課題となった 6 方バルブの改良、およびモノポンプの部品交換を実施した。今回の原位置トレーサー試験における適用結果を述べる。

##### a. 6 方バルブの改良

昨年度の原位置試験において、シャフト部の O リングの破損が確認された。今年度はシャフト部の O リングの強度を増すため、O リング取り付け部を切削し太いサイズの O リングに交換した (1.5mm→1.9mm)。図 4.3.7-1 に六方バルブと O リングを取り付けたシャフト部を示す。O リングのサイズ変更の結果、今年度の原位置試験では 1 号機、2 号機共に、すべての作動機会正常に作動した。

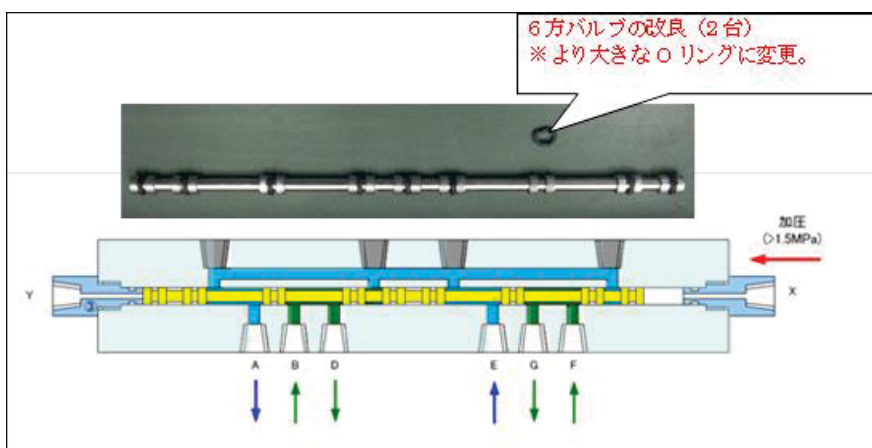


図 4.3.7-1 6 方バルブ改良の概要

##### b. モノポンプの部品交換

設定値に対するモノポンプ (小) の流量出力が低下したため、ステーター部 (軸を受けるラバー部) を交換した。その結果、設定値通りの流量制御を行うことが出来た。

##### (2) 今後の課題

##### a. 蛍光濃度センサーの孔内での光の減衰

昨年度、孔内設置後に蛍光強度が減衰する現象が発生し、高耐圧仕様の蛍光濃度センサーの Ver3.1 は修理を施した。しかし、今年度も孔内挿入後に蛍光強度が低下し、特に 2 号機のセンサーで症状が顕著であった。原因は高圧環境における圧力負荷の急激な変化によるものと考えられるが、現状では原因は絞り込めていない。今後室内試験等で検証する予定である。

b. 揚水流量の制御

1) 昼夜連続揚水時の流量変化

図 4.3.7-2 に昼夜連続揚水を行ったケースについて、モノポンプを使用した場合(16W5253T4-6)と使用していない場合(16W5352T9-11)の例を示す。試験結果の項でも述べたように、換気ファンの定刻稼働/停止による坑内の温度変化が質量流量計の値へ影響したと推定される。質量流量計は流体の密度で測定するため、チューブ内の地下水の密度が坑道の温度変化の影響を受けたということである。これらの試験では流速が遅く坑道内の温度変化の影響を受けやすい状況であったと考えられる。

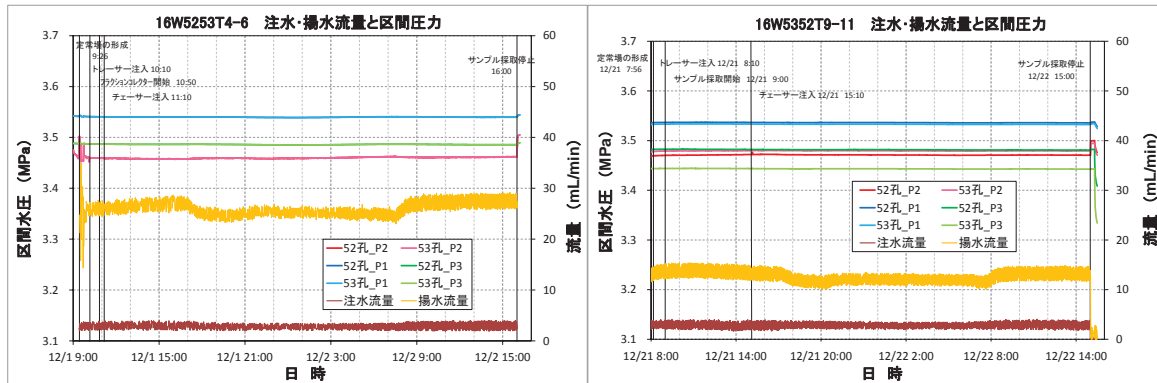


図 4.3.7-2 昼夜連続揚水のケース

2) ニードルバルブによる流量制御

揚水量をモノポンプ（大）の設定下限値以下とした12月20日以降のダイポール試験では、ニードルバルブを用いた流量制御を試行した（図 4.3.7-3）。

バルブ制御による揚水試験では間隙水圧と連動して流量が徐々に下がる事例が多いが、今回の試行では温度変化を除き、揚水流量は比較的安定していた。現状では10L/min未満を安定して制御できるモノポンプ（小）は1台しかなく、ポンプの代替として小流量で揚水する手段として可能である。



図 4.3.7-3 揚水流量制御に用いたニードルバルブ

### c. ピストンパッカーの差圧耐性

今回のトレーサー試験孔内装置の設置では、ピストンパッカーの漏えいが発生した。

ピストンパッカーのラバーは、交換の都度、ポート部の金具のネジを人為的に加締め構造としており、差圧負荷は 1MPa 以下を原則としている。しかし、500m 坑道内では間隙水圧が高いため、湧水量測定などの標準的な作業行為により間隙水圧を下げるだけでも容易に 1MPa 以上の差圧負荷がかかり、ポートの加締め部から漏えいしてしまう事例があった。

パッカーの漏えい防止対策を以下に示す。

#### 1) ピストン部の調整

ピストンパッカーのポートの加締め部のネジは、拡張/収縮を繰り返すと緩むことがある。よって、孔内挿入前にポートの増し締めと 1MPa の拡張試験を行い、加締めが緩まなくなるまで繰り返し実施する。また、ピストンのストロークが大き目に設計されており、最大ストロークでも Oリングがシリンダー内に掛かるよう、飛出し防止ネジを改良する。

#### 2) 試験区間の減圧行為は慎重に行う。

試験区間と連通する A~D ラインのボールバルブを一気に全開すると、瞬間的にパッカー圧と間隙水圧に大きな差圧が発生する。よって、バルブ操作は、差圧が 1MPa 以内に収まるよう開度を調節する、あるいは間隙水圧が不用意に下がらないよう、ニードルバルブを連結しておく。

なお、ピストンパッカーの構造自体は昨年と全く同じであるが、昨年度（300m 坑道）はパッカーの漏えいは発生していない。300m 坑道の間隙水圧は約 1.5MPa であり、通常の作業行為では 1.5MPa 以上の差圧は発生し得ないため、漏えい問題が顕在化しなかったと考えられる。

#### 4.3.8 室内分析結果

##### (1) 単孔トレーサー試験の分析結果

##### a. 室内分析結果における回収率

揚水した地下水をタンク等に回収しておき、ある任意時間で回収した地下水を十分に攪拌し濃度を均一にした状態でサンプリングを行う。その試料の濃度を回収した地下水全体の濃度として式(4.3.8-1)より回収率を求めた。

$$Recovery^t = (C^t - C_B)V^t / M_0 \quad (4.3.8-1)$$

ここに、 $Recovery^t$ : 揚水回収開始から経過時間  $t$  における回収率[-]、 $C^t$ : 揚水回収開始から経過時間  $t$  まで回収した地下水の濃度[ $ML^{-3}$ ]、 $C_B$ : バックグラウンド濃度[ $ML^{-3}$ ]、 $V^t$ : 揚水回収開始から経過時間  $t$  までに回収した地下水量[ $L^3$ ]、 $M_0$ : 注入トレーサー量[M]を表す。

バックグラウンド濃度は回収した地下水の計測結果から決定した。回収率の計算に用いたバックグラウンド濃度を表 4.3.8-1 に示す。15MI52 号孔で実施した試験の回収率を表 4.3.8-2 に、15MI53 号孔で実施した試験の回収率を表 4.3.8-3 に示す。なお、回収率を示した時間は揚水開始からの経過時間である。

表 4.3.8-1 単孔トレーサー試験の回収率計算に用いたバックグラウンド濃度

		15MI52号孔	15MI53号孔
ウラン	$\mu g/L$	0.00	
アミノ酸	$\mu g/L$	0.00	
$\delta D$	$\text{‰}$	-58.20	
Rb <sup>+</sup>	$\mu g/L$	8.90	
Ba <sup>2+</sup>	$\mu g/L$	4.40	

表 4.3.8-2 15MI52 号孔を対象とした単孔トレーサー試験の回収率

試験条件		16S52T1	16S52T2	16S52T3	16S52T4	16S52T5	16S52T6	
ラベル名		S1	S2	S3	S4	S5	S6	
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						
試験条件	注水流量(設定値)	mL/min	100	100	100	100	50	100
	揚水流量(設定値)	mL/min	100	100	50	25	50	50
	注水流量(流量計平均)	mL/min	88.26	83.04	93.18	99.87	49.59	99.08
	揚水流量(流量計平均)	mL/min	115.23	114.33	60.23	23.71	49.32	49.82
	定常場の形成		11/22 13:40	11/24 12:10	11/25 8:40	12/7 8:32	12/8 8:20	12/9 8:00
	トレーサー注入開始		11/22 14:00	11/24 13:30	11/25 9:40	12/7 9:15	12/8 9:00	12/9 8:35
	チェイサー注入開始		11/22 14:10	11/24 13:40	11/25 9:50	12/7 9:25	12/8 9:20	12/9 8:55
	待機切り替え		-	-	-	-	-	-
	揚水開始		11/22 14:15	11/24 13:45	11/25 9:55	12/7 9:30	12/8 9:30	12/9 9:00
	サンプリング開始		11/22 14:15	11/24 13:45	11/25 9:55	12/7 9:30	12/8 9:30	12/9 9:00
	サンプリング停止		11/22 16:15	11/24 15:45	11/25 11:55	12/7 11:30	12/8 11:30	12/9 11:00
	トレーサー注入時間	min	10.0	10.0	10.0	10.0	20.0	20.0
	チェイサー注入時間	min	5.0	5.0	5.0	5.0	10.0	5.0
	待機時間	min	-	-	-	-	-	-
トレーサー量	L	0.883	0.830	0.932	0.999	0.992	1.982	
チェイサー量	L	0.441	0.415	0.466	0.499	0.496	0.495	
原液濃度 (設定値)	ウラニン	mg/L	(3.00)	2.70	2.69	2.98	2.82	2.70
	アミノG酸	mg/L	-	2.86	2.82	2.95	2.74	2.76
	重水素	‰	-	566	563	559	558	559
	ルビジウム	mg/L	-	1.51	1.56	1.47	1.48	1.49
	バリウム	mg/L	-	1.13	1.15	1.51	1.56	1.57
60分 回収率	ウラニン	-	-	90.8%	81.9%	3.21%	68.1%	48.7%
	アミノG酸	-	-	92.9%	81.3%	2.77%	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%	4.46%	54.4%	41.4%
	バリウム	-	-	76.9%	50.6%	4.38%	47.4%	35.9%
120分 回収率	ウラニン	-	-	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%
180分 回収率	ウラニン	-	-	-	-	74.4%	-	86.2%
	アミノG酸	-	-	-	-	72.7%	-	85.5%
	重水素	-	-	-	-	78.9%	-	85.4%
	ルビジウム	-	-	-	-	66.4%	-	79.9%
	バリウム	-	-	-	-	62.1%	-	81.1%

表 4. 3. 8-3 15MI53 号孔を対象とした単孔トレーサー試験の回収率

試験条件		16S53T7	16S53T8	16S53T9	16S53T10	16S53T11	
ラベル名		S7	S8	S9	S10	S11	
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					
試験条件	注水流量(設定値)		100	100	100	100	100
	揚水流量(設定値)		50	50	50	25	50
	注水流量(流量計平均)		99.10	98.79	99.07	99.51	99.17
	揚水流量(流量計平均)		50.87	50.01	50.50	25.21	51.15
	定常場の形成		12/12 9:04	12/13 8:38	12/14 8:25	12/15 8:31	12/16 8:29
	トレーサー注入開始		12/12 9:45	12/13 9:10	12/14 9:00	12/15 9:00	12/16 8:45
	チェイサー注入開始		12/12 9:55	12/13 9:20	12/14 9:20	12/15 9:20	12/16 8:55
	待機切り替え		-	-	-	-	12/16 9:00
	揚水開始		12/12 10:00	12/13 9:30	12/14 9:30	12/15 9:30	12/16 10:00
	サンプリング開始		12/12 10:00	12/13 9:30	12/14 9:30	12/15 10:00	12/16 10:00
	サンプリング停止		12/12 12:00	12/13 12:30	12/14 12:30	12/15 13:00	12/16 12:00
	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	
原液濃度	ウラン	mg/L	2.84	2.83	2.82	2.79	2.77
	アミノG酸	mg/L	2.88	2.86	2.87	2.82	2.82
	重水素	‰	558	562	561	565	565
	ルビジウム	mg/L	14.8	1.51	1.46	1.45	1.45
	バリウム	mg/L	15.4	1.55	1.52	1.54	1.55
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 %	45.3 %	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 %
180分回収率	ウラン	-	-	83.7 %	75.2 %	55.7 %	-
	アミノG酸	-	-	86.0 %	76.6 %	56.3 %	-
	重水素	-	-	84.5 %	74.4 %	57.1 %	-
	ルビジウム	-	-	81.7 %	76.4 %	56.8 %	-
	バリウム	-	-	86.5 %	81.2 %	61.4 %	-



b. 室内分析結果における破過曲線

揚水を行ってトレーサーを回収する際は、フラクシオンコレクターを用いてトレーサーをサンプリングした。表 4.3.8-4 にフラクシオンコレクターの設定条件を整理する。「インターバル」はサンプリング間隔のことを意味しており、「分画時間」は一つのサンプルにつき採水を行っている時間を意味する。例えば、インターバル 60 秒、分画時間 15 秒という設定の場合、採水開始から 0～15 秒の間に採水を行って 15～60 秒までは採水を行わない。60 秒になったら次のサンプルへ移動し再び 60～75 秒の間採水を行う。以上の手順が繰り返して実行される。

フラクシオンコレクターの分析結果を基に破過曲線を作成する際は、分画時間の半分の時間と濃度の関係を整理した。つまり、インターバル 60 秒、分画時間 15 秒であれば、8 秒、68 秒、128 秒・・・というように破過曲線を作成した。

また、フラクシオンコレクターでサンプリングした試料の各濃度から式(4.3.8-2)より回収率を近似的に求めた。

$$Recovery^x = \sum_{n=2}^x \left\{ \left( \frac{C^n + C^{n-1}}{2} - C_B \right) \times Q_{ext} (T^n - T^{n-1}) \right\} / M_0 \quad (4.3.8-2)$$

ここに、 $Recovery^x$ ：揚水開始から試料  $x$  までの回収率[-]、 $C^n$ ：試料  $n$  の濃度[ML<sup>-3</sup>]、 $C_B$ ：バックグラウンド濃度[ML<sup>-3</sup>]、 $Q_{ext}$ ：揚水流量[L<sup>3</sup>T<sup>-1</sup>]、 $T^n$ ：試料  $n$  をサンプリングした時間[T]、 $M_0$ ：注入トレーサー量[M]を表す。

破過曲線および回収率の経時変化を示したものを図 4.3.8-1～図 4.3.8-10 に示す。破過曲線は Rb、Ba については分析結果からバックグラウンド濃度を差し引き、トレーサー原液濃度で割って比濃度  $C/C_0$  として整理した。ウラニン、アミノ G 酸については各試料の分析結果をトレーサー原液濃度で割って比濃度  $C/C_0$  として整理した。 $\delta D$  については、混入率を計算しているため、分析結果をそのまま掲載した。なお、それぞれの破過曲線は、チューブ分散等の補正は行っていない。

表 4.3.8-4 フラクシオンコレクターの設定

	採水本数	インターバル	分画時間
16S52T2	120 本	60 秒	20 秒
16S52T3	120 本	60 秒	20 秒
16S52T4	120 本	90 秒	30 秒
16S52T5	120 本	60 秒	25 秒
16S52T6	120 本	90 秒	23 秒
16S53T7	120 本	60 秒	20 秒
16S53T8	120 本	90 秒	20 秒
16S53T9	120 本	90 秒	20 秒
16S53T10	120 本	90 秒	30 秒
16S53T11	120 本	60 秒	20 秒

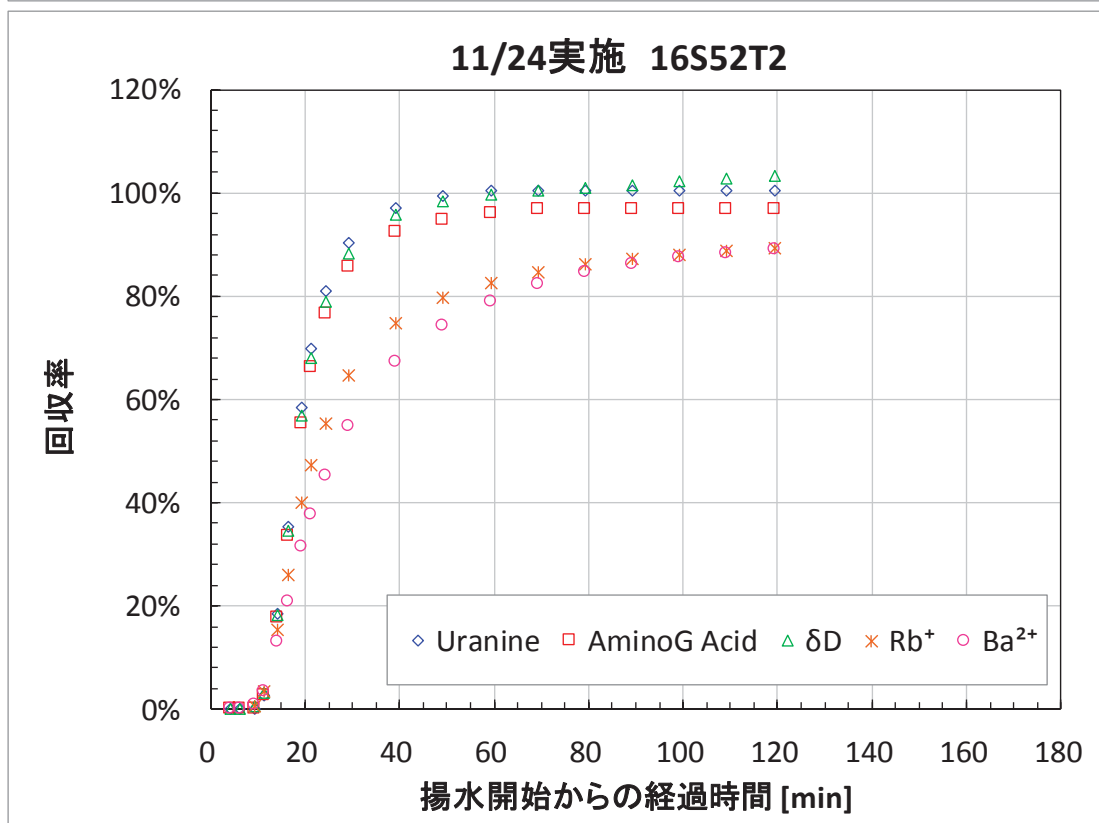
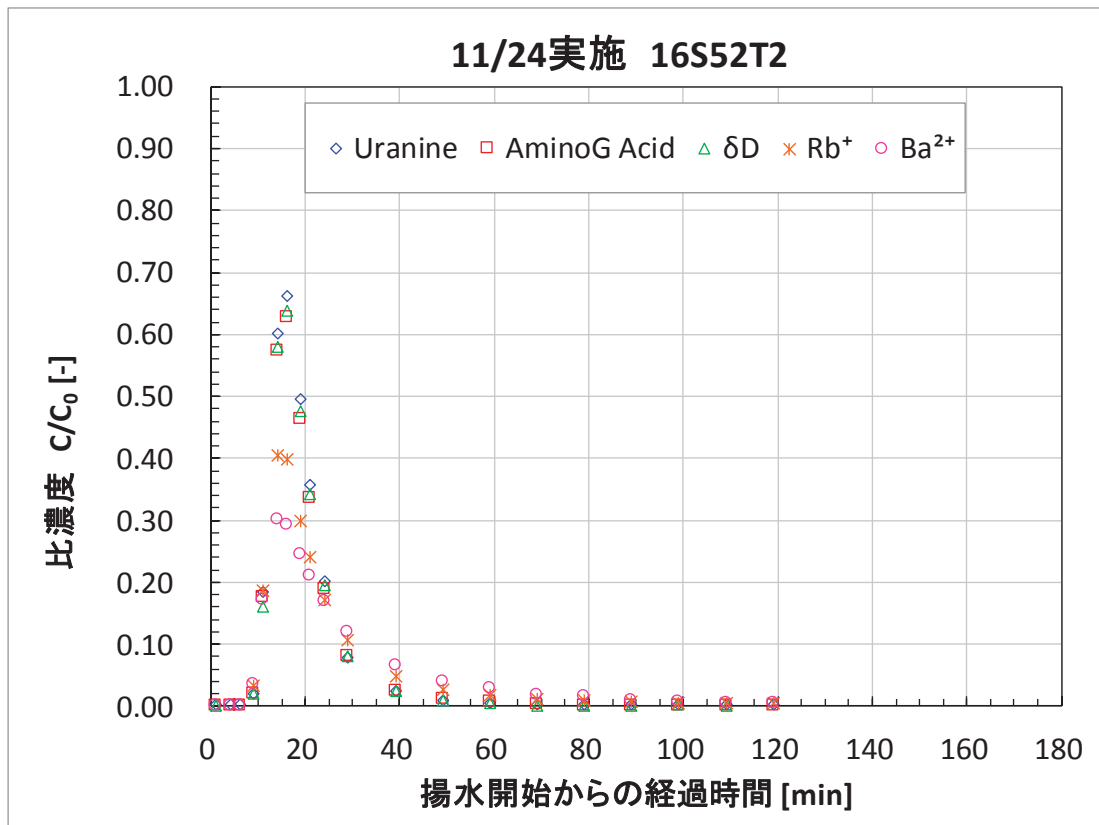


図 4.3.8-1 16S52T2 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）

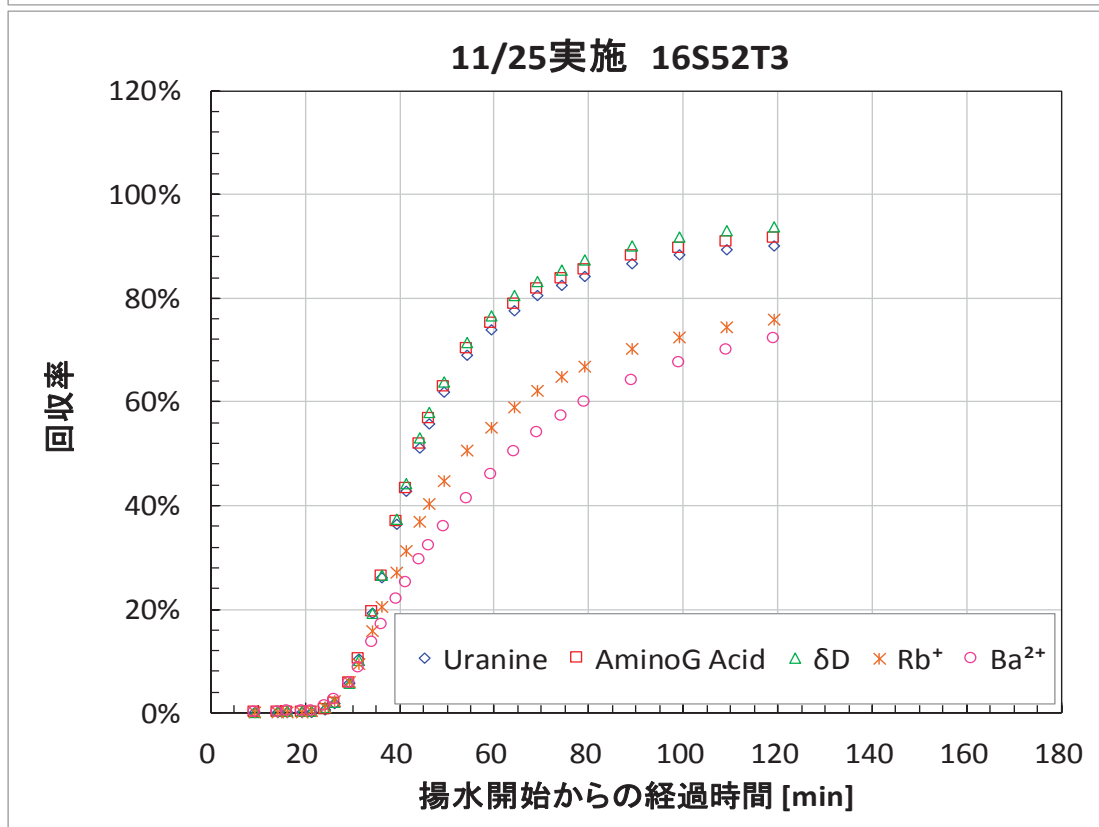
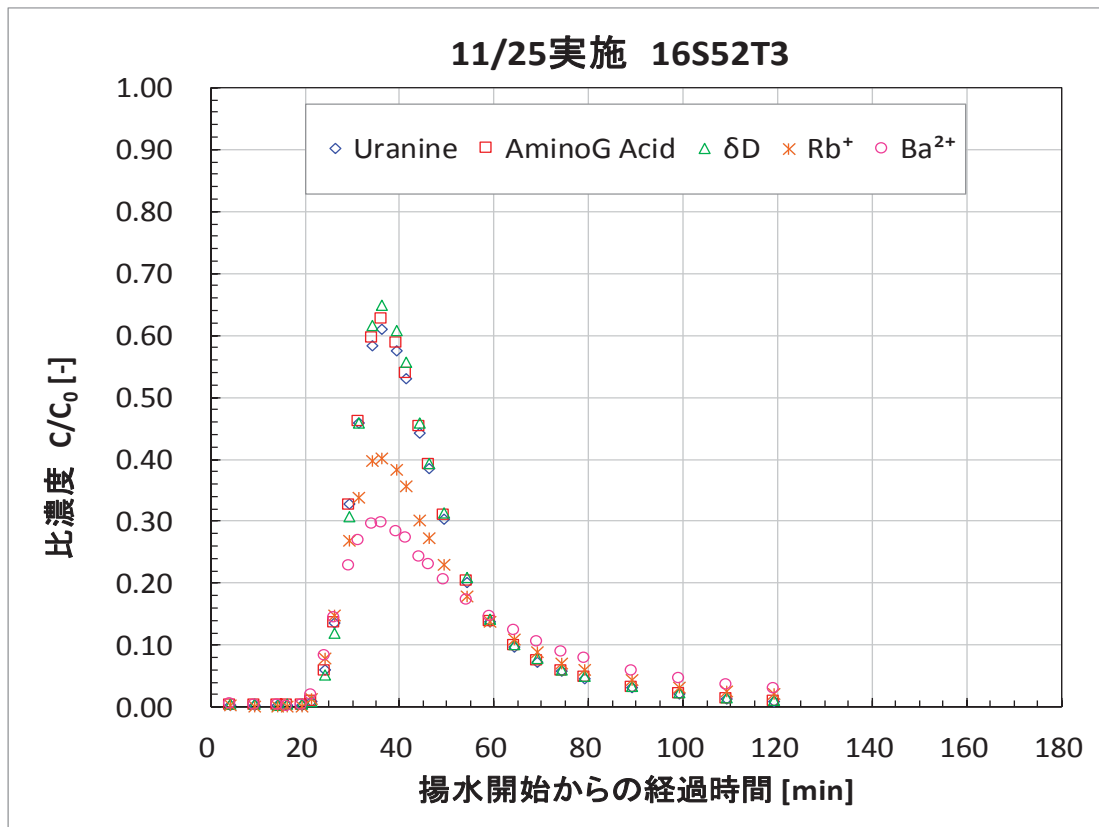


図 4.3.8-2 16S52T3 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）

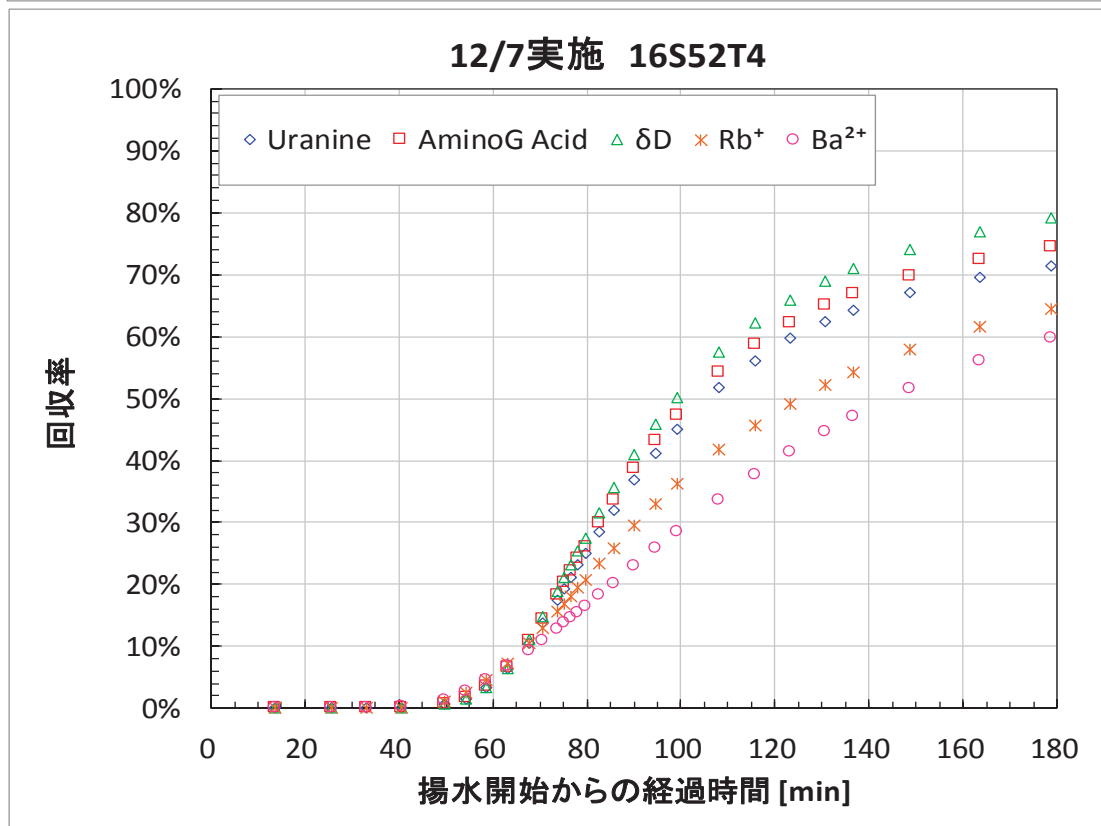
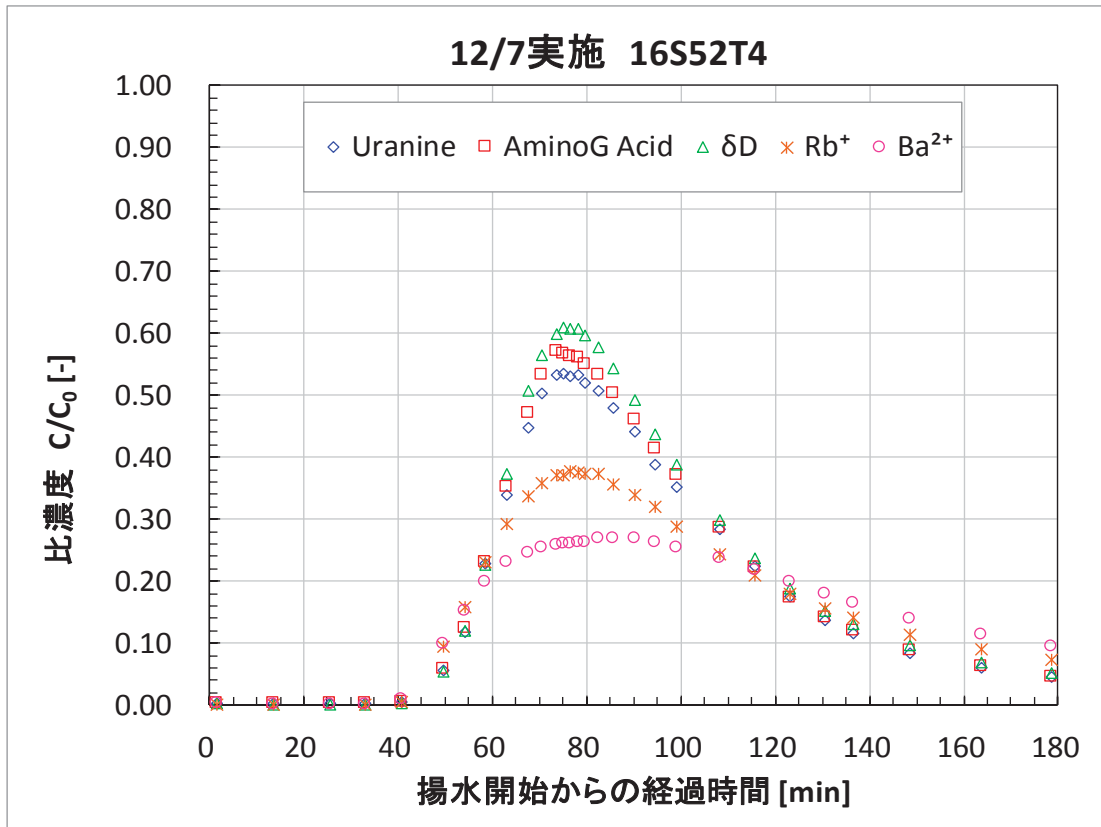


図 4. 3. 8-3 16S52T4 破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)

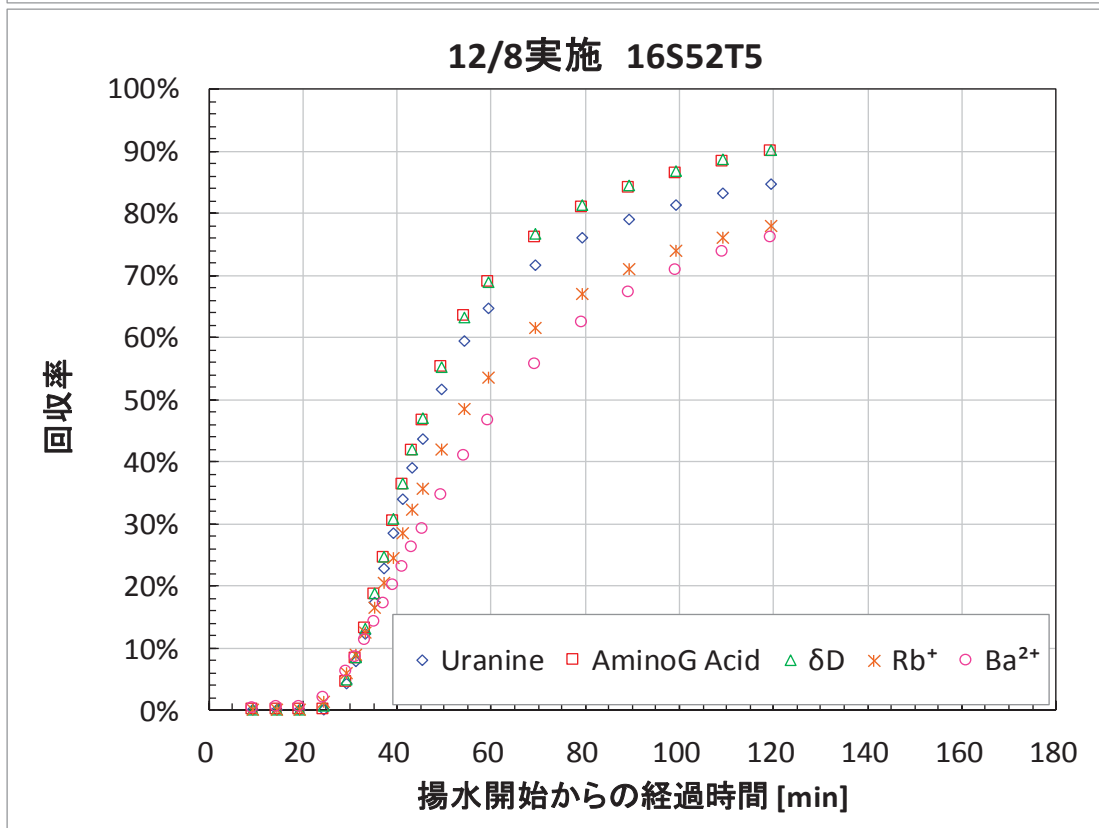
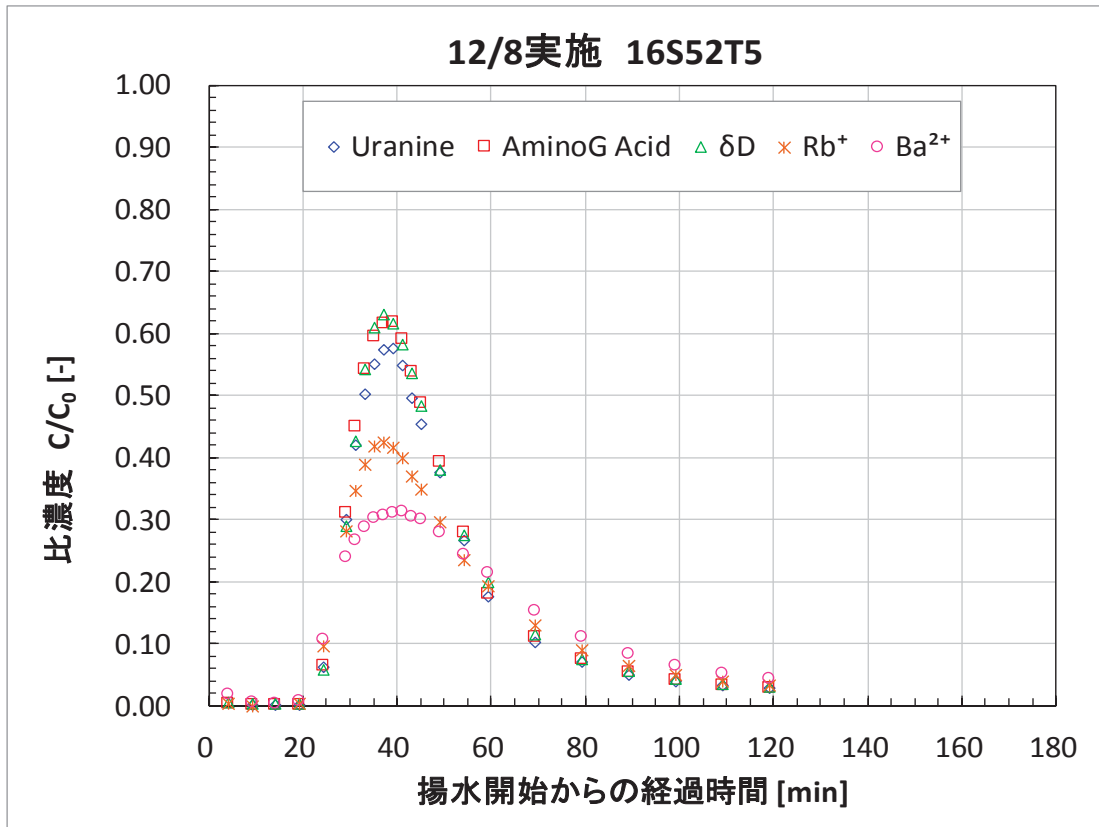


図 4.3.8-4 16S52T5 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）

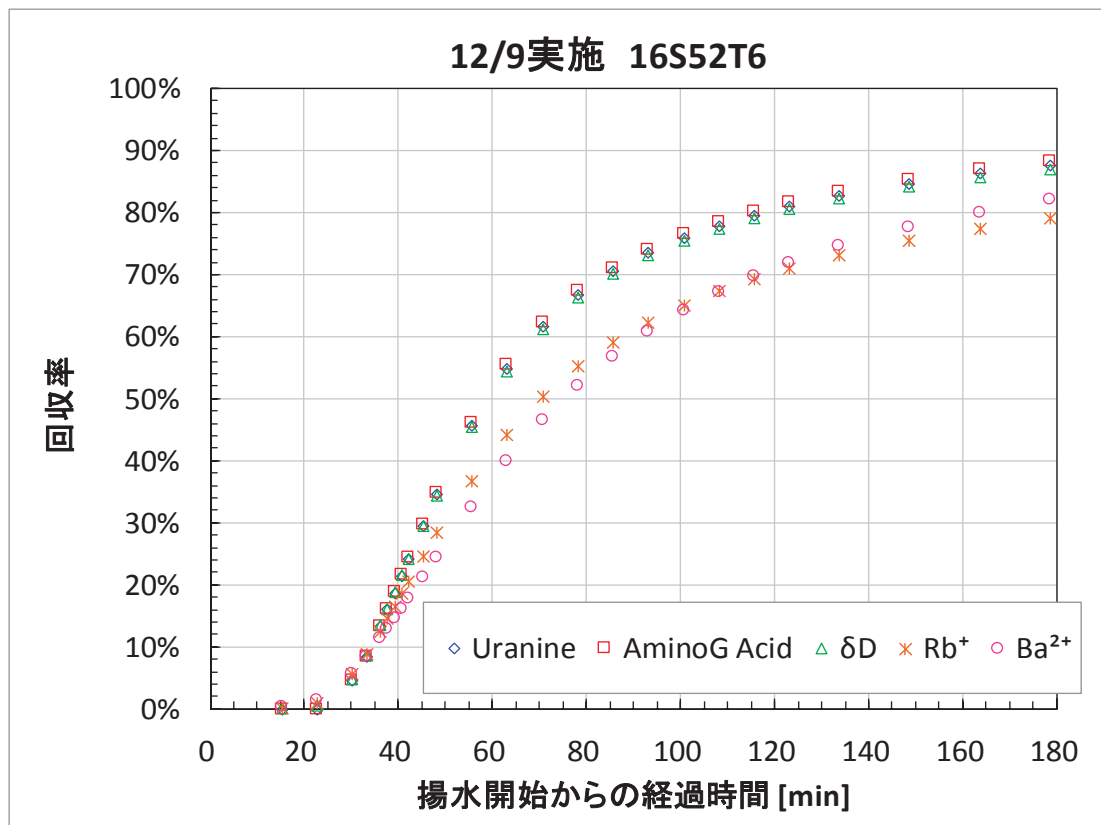
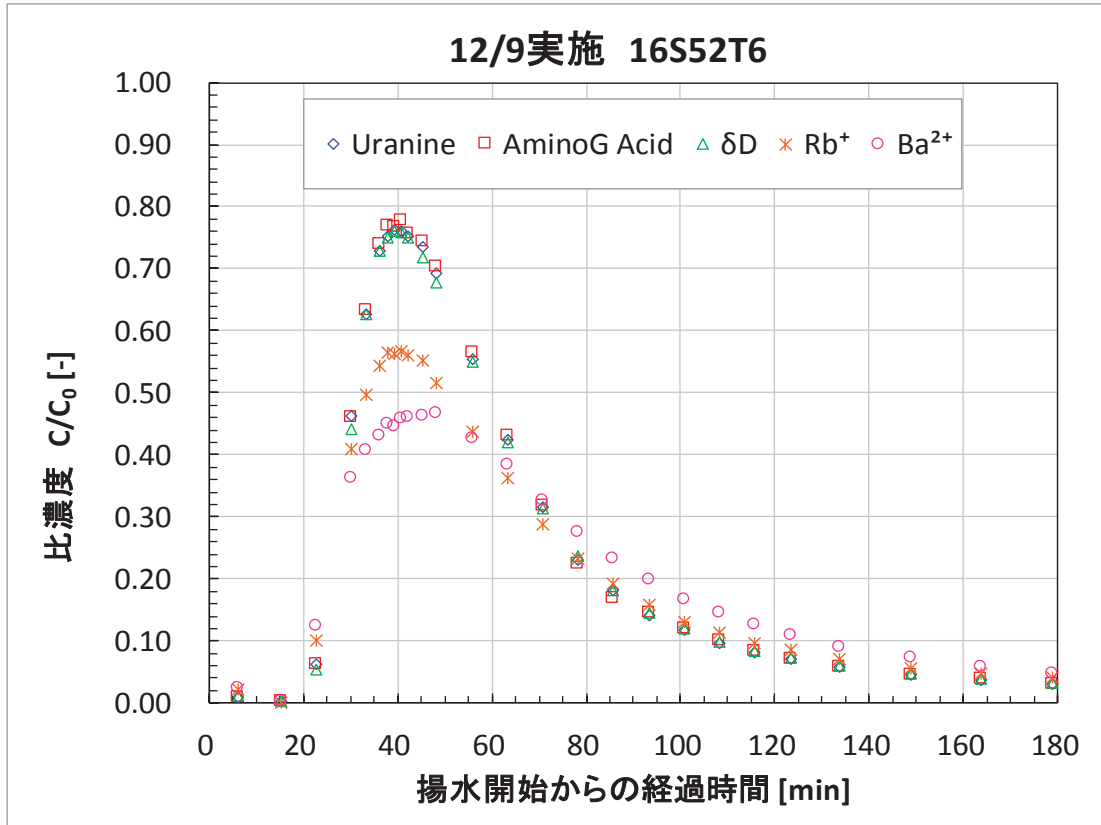


図 4. 3. 8-5 16S52T6 破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)

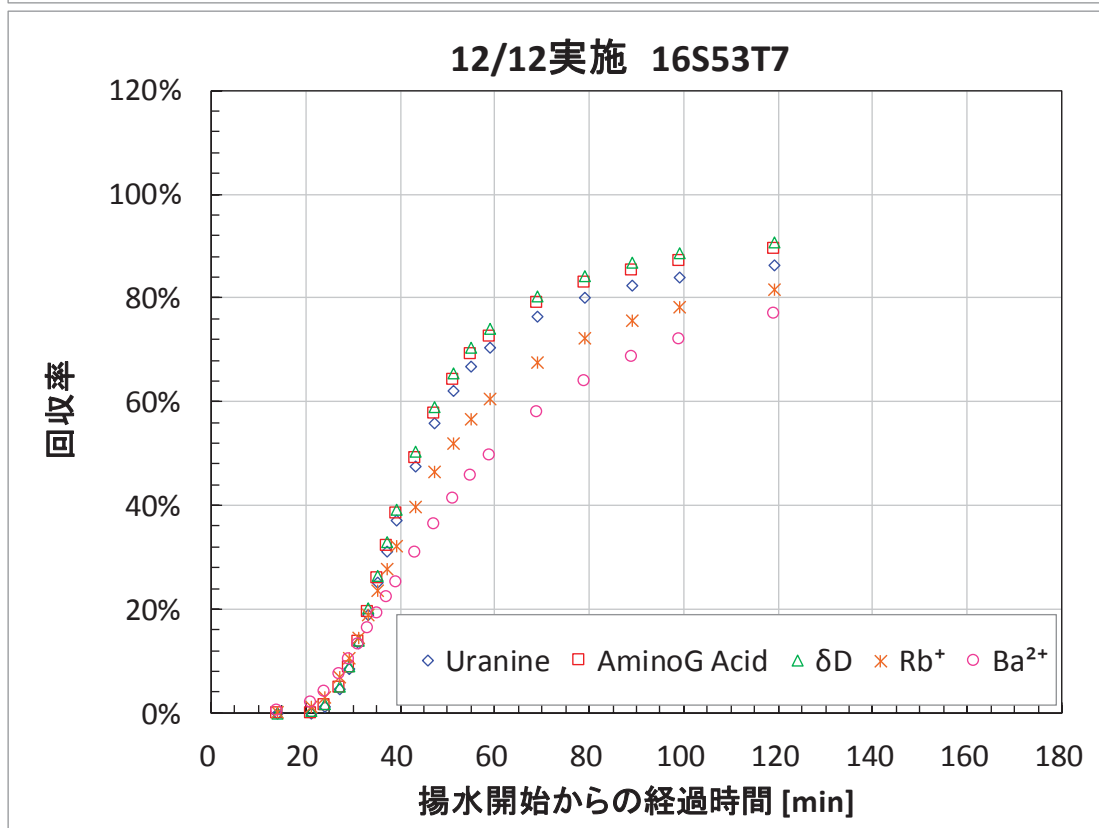
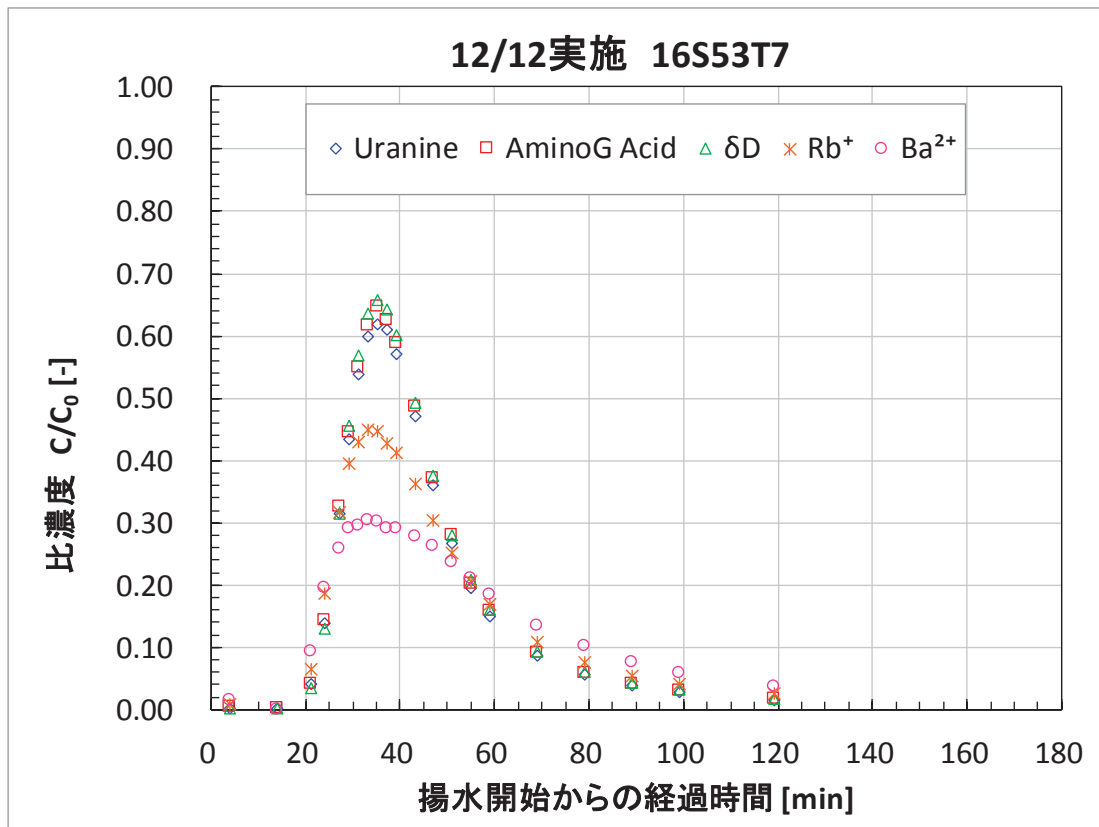


図 4. 3. 8-6 16S52T7 破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)

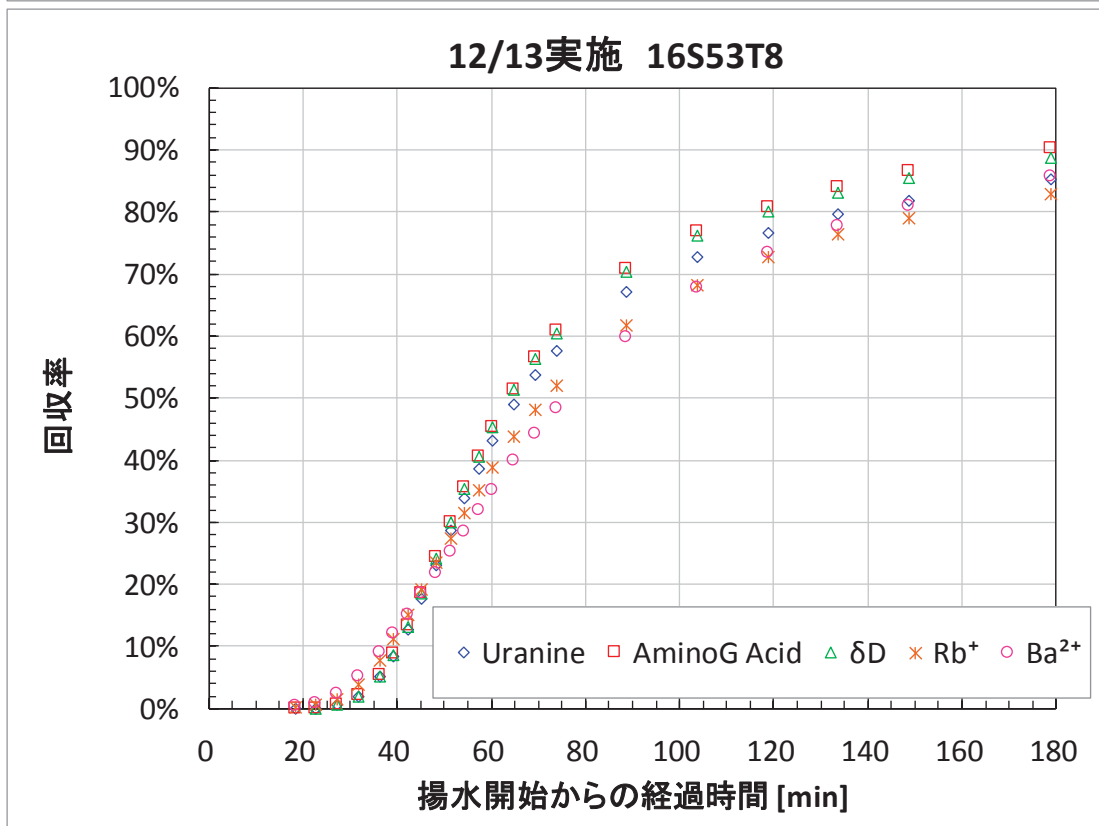
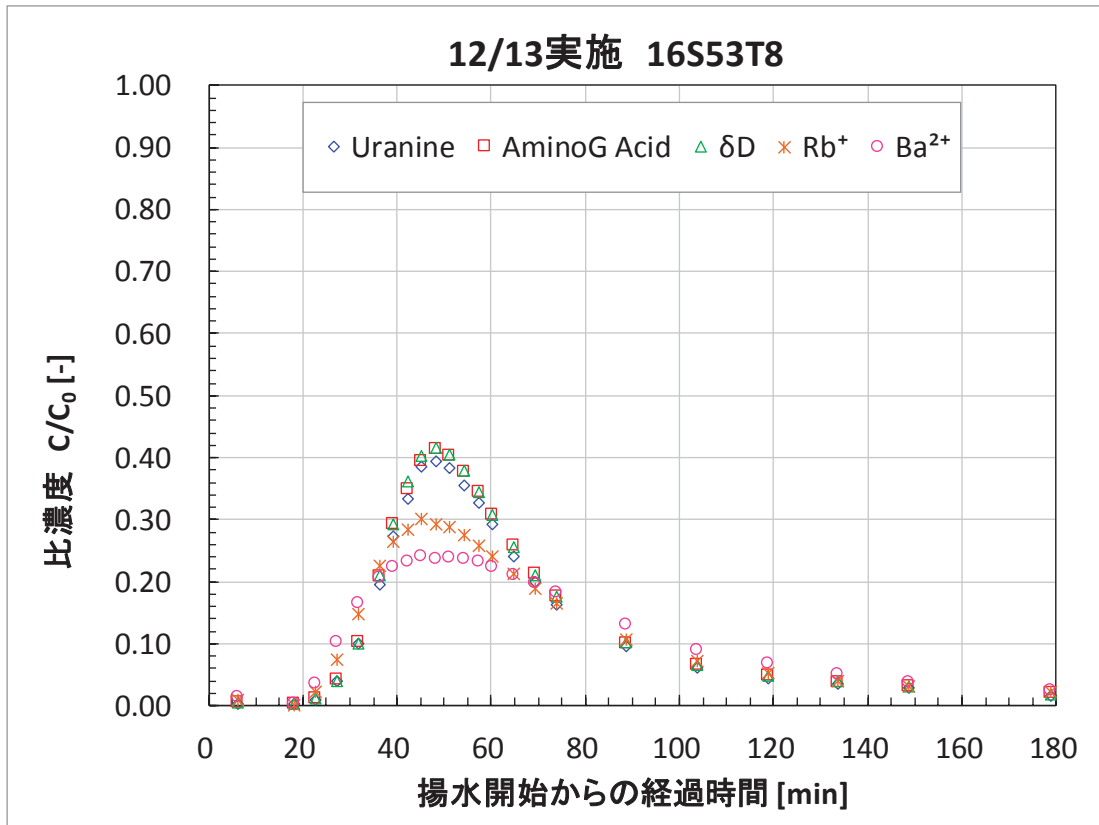


図 4. 3. 8-7 16S53T8 破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)



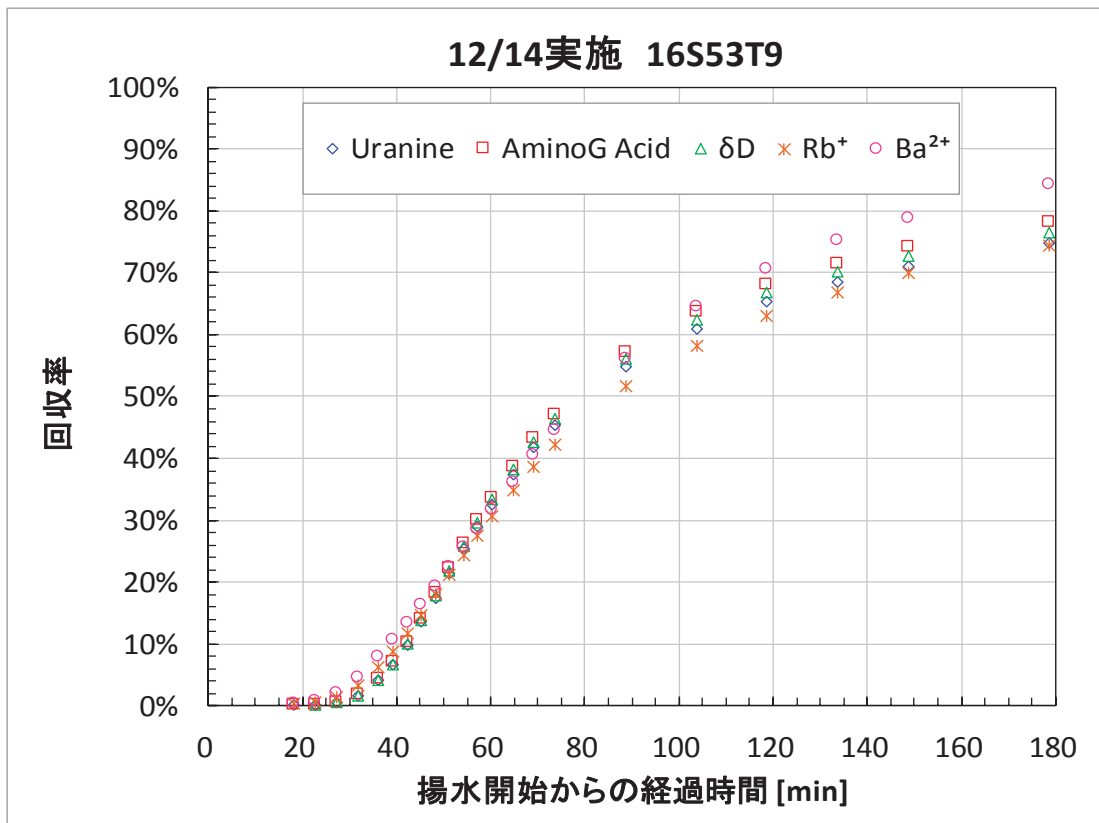
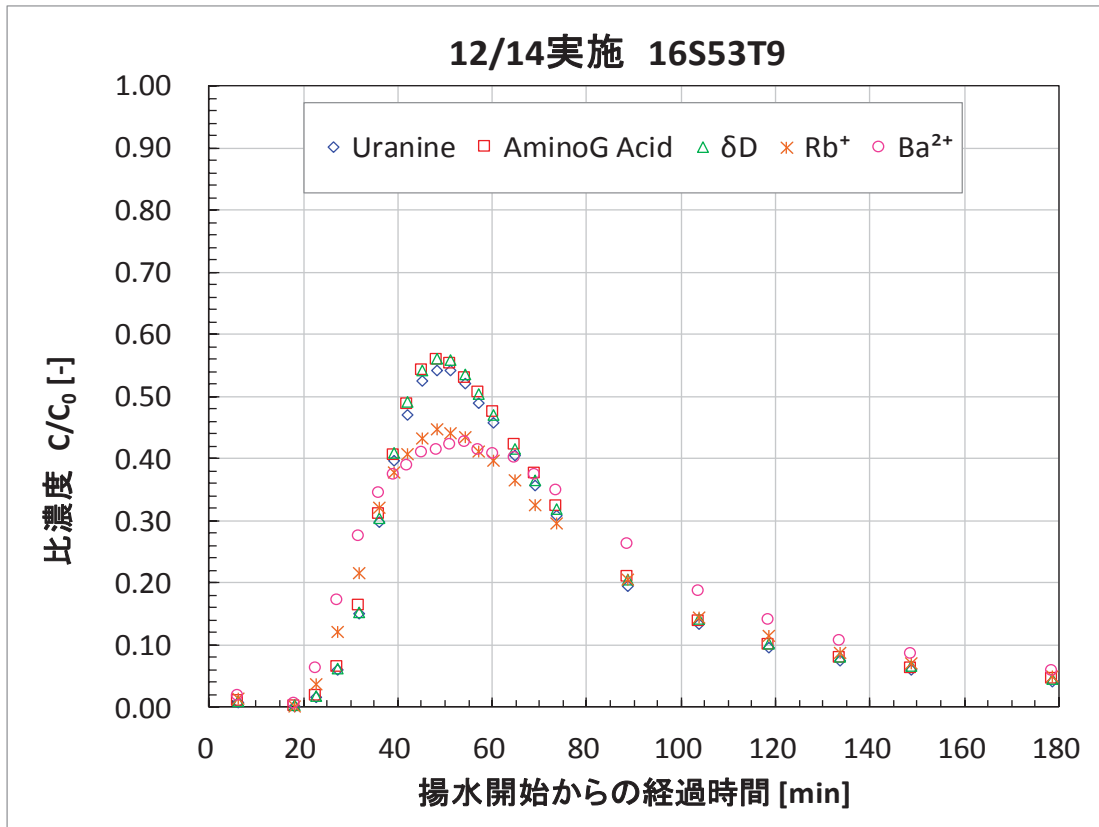


図 4.3.8-8 16S53T9 破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)

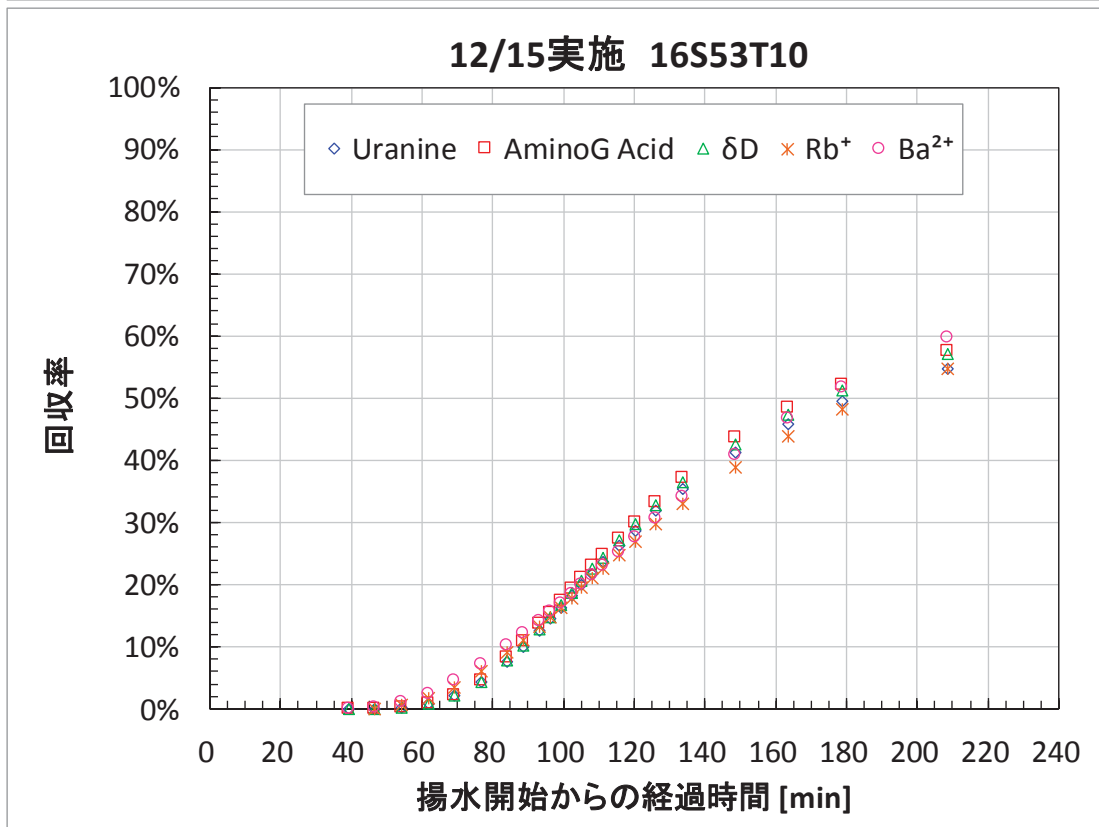
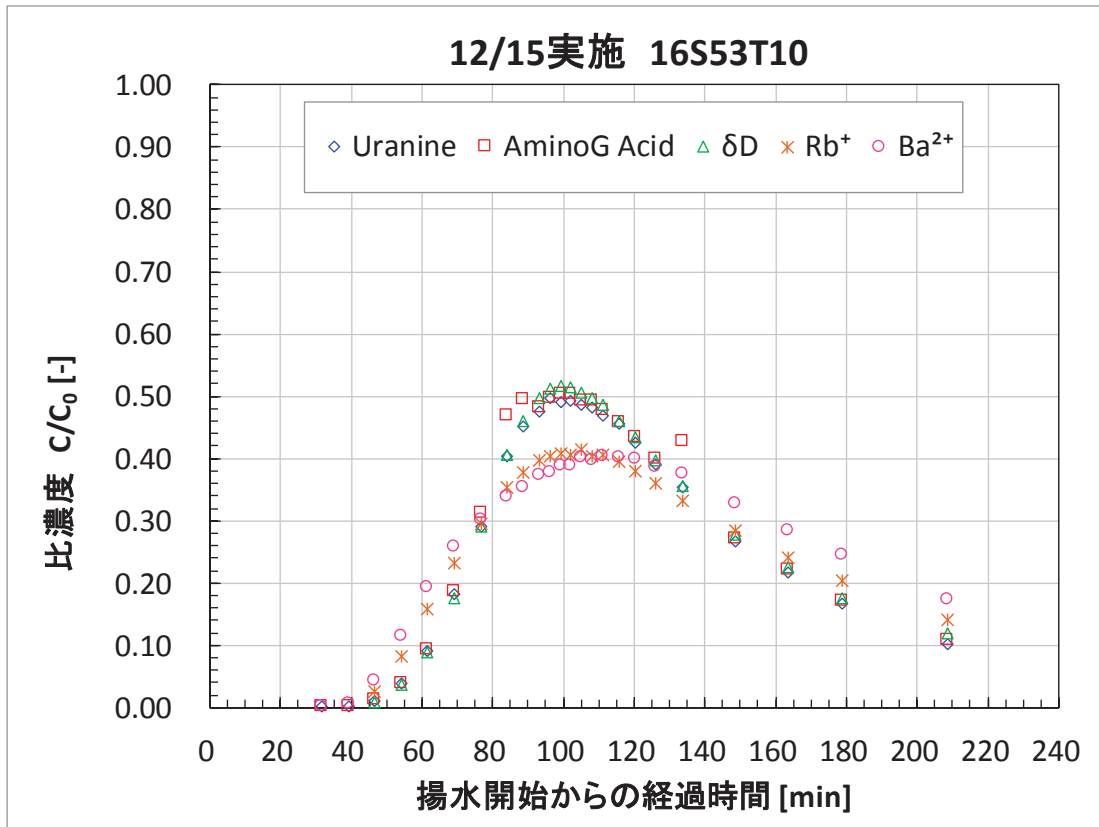


図 4.3.8-9 16S53T10 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）

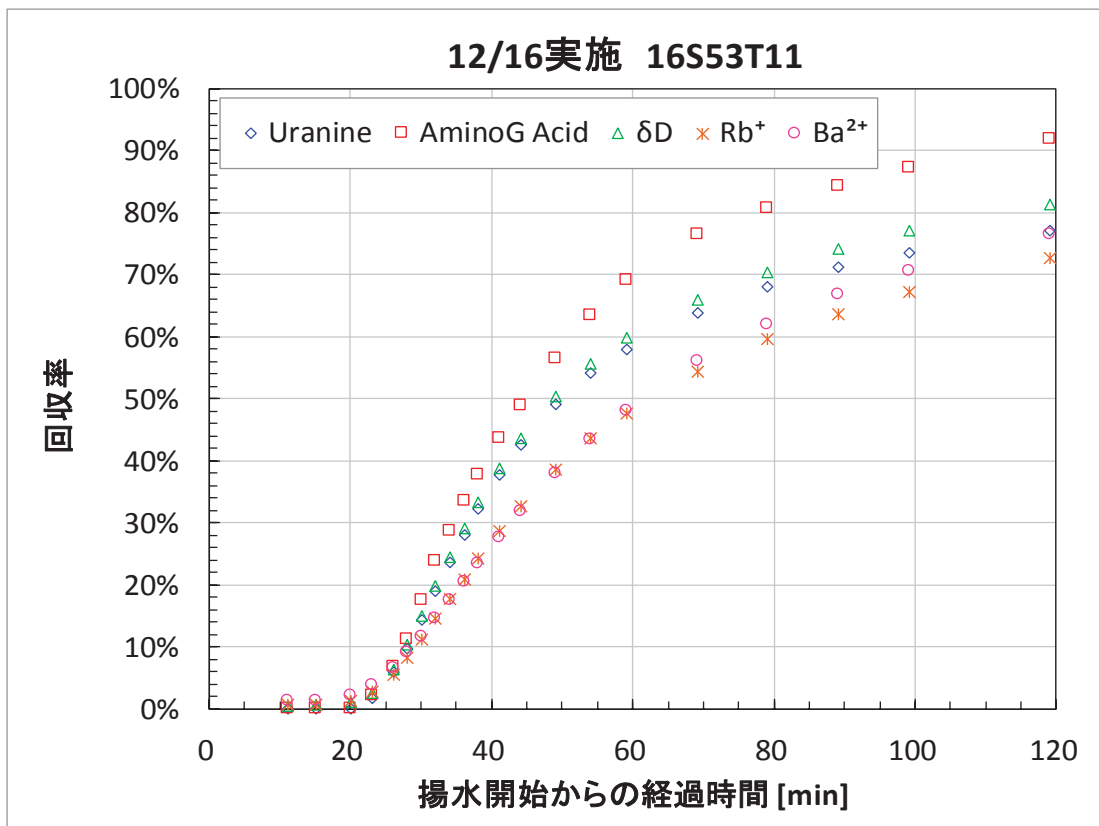
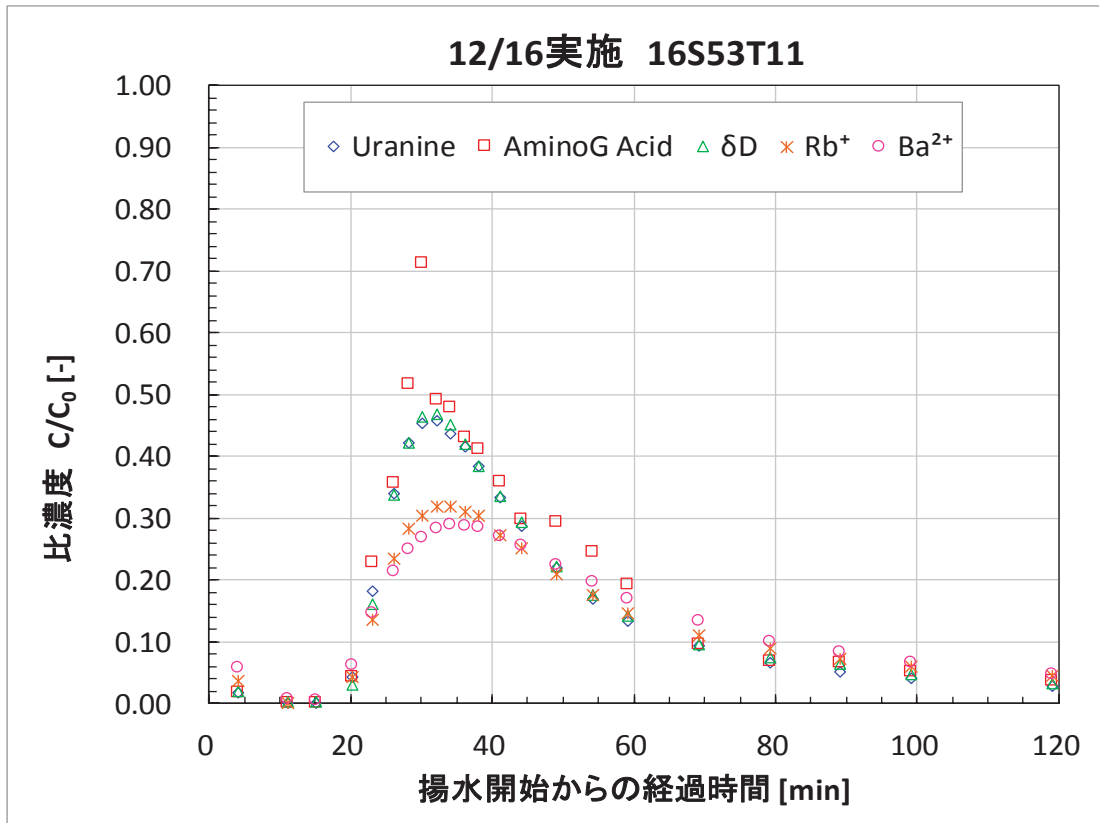


図 4.3.8-10 16S53T11 破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)

(2) 孔間トレーサー試験の分析結果

a. 室内分析結果における回収率

単孔トレーサー試験と同様に、回収した地下水の濃度から式(4.3.8-1)を用いて回収率を求めた。バックグラウンド濃度は、原則として単孔トレーサー試験と同様の値とし(表 4.3.8-1)、試験実施時に改めてバックグラウンド濃度を計測した試験については、その計測値を用いた。表 4.3.8-5に孔間トレーサー試験の回収率計算に用いたバックグラウンド濃度を示す。

試験結果から得られたダイポール試験の回収率を表 4.3.8-6～表 4.3.8-8に示す。なお、回収率を示した時間は、サンプリングを開始した時刻からの経過時間である。

表 4.3.8-5 孔間トレーサー試験の回収率計算に用いたバックグラウンド濃度

試験ケース名	ウラニン [ $\mu$ g/L]	アミノG酸 [ $\mu$ g/L]	$\delta D$ [‰]	R b <sup>+</sup> [ $\mu$ g/L]	B a <sup>2+</sup> [ $\mu$ g/L]
16W5253T1	0.00	0.00	-	-	-
16W5253T2			-	-	-
16W5253T3			-	-	-
16W5253T4-6			-58.20	8.90	4.40
16W5352T7			-63.68	-	-
16W5352T8			-56.46	-	-
16W5352T9-11			-61.73	9.50	4.89
16W5352T12			-57.13	-	-
16W5352T13-15			-58.20	10.03	4.78
16W5352T16-18			-59.72	8.90	4.40

表 4.3.8-6 15MI52 号孔注水-15MI53 号孔揚水の孔間トレーサー試験の回収率

試験名			16W5253T1	16W5253T2	16W5253T3	16W5253T4-6
試験実施日			2016/11/28	2016/11/29	2016/11/30	2016/12/1-2
注水区間			15MI52 号孔			
揚水区間			15MI53 号孔			
試験条件	注水流量(設定値)	mL/min	10	5	3	3
	揚水流量(設定値)	mL/min	50	25	15	25
	注水流量(流量計平均)	mL/min	12.18	5.10	3.17	2.90
	揚水流量(流量計平均)	mL/min	51.59	27.84	26.14	26.12
	ダイポール比	-	4.24	5.46	8.25	9.01
	定常場の形成		11/28 9:24	11/29 9:30	11/30 9:17	12/1 9:26
	トレーサー注入開始		11/28 10:10	11/29 10:00	11/30 10:00	12/1 10:10
	チェイサー注入開始		11/28 10:30	11/29 10:10	11/30 10:20	12/1 11:10
	サンプリング開始		11/28 10:25	11/29 10:30	11/30 10:40	12/1 10:50
	サンプリング停止		11/28 12:25	11/29 12:30	11/30 13:20	12/2 16:00
	トレーサー注入時間	min	20	10	20	60
	トレーサー量	L	0.244	0.051	0.063	0.174
	揚水(サンプリング時間)	min	120	120	160	1750
原液濃度	ウラン	mg/L	2.23	2.37	2.49	2.89
	アミノ G 酸	mg/L	-	-	-	2.89
	重水素	‰	-	-	-	546
	ルビジウム	mg/L	-	-	-	1.47
	バリウム	mg/L	-	-	-	1.12
回収率-1 (回収時間 min)	ウラン	-	99.3 % (120 min)	81.5 % (120 min)	56.3 % (60 min)	30.7 % (60 min)
	アミノ G 酸	-	-	-	-	30.8 % (60 min)
	重水素	-	-	-	-	30.2 % (60 min)
	ルビジウム	-	-	-	-	7.19 % (60 min)
	バリウム	-	-	-	-	0.11 % (60 min)
回収率-2 (回収時間 min)	ウラン	-	-	-	78.1 % (120 min)	76.6 (120 min)
	アミノ G 酸	-	-	-	-	78.6 (120 min)
	重水素	-	-	-	-	81.6 (120 min)
	ルビジウム	-	-	-	-	37.7 (120 min)
	バリウム	-	-	-	-	7.78 (120 min)
回収率-3 (回収時間 min)	ウラン	-	-	-	-	83.7 (240 min)
	アミノ G 酸	-	-	-	-	86.6 (240 min)
	重水素	-	-	-	-	96.3 (240 min)
	ルビジウム	-	-	-	-	61.6 (240 min)
	バリウム	-	-	-	-	28.7 (240 min)

表 4.3.8-7 15MI53 号孔注水-15MI52 号孔揚水の孔間トレーサー試験の回収率 (1)

試験名			16W5352T7	16W5352T8	16W5352T9-11
試験実施日			2016/12/19	2016/12/20	2016/12/21-22
注水区間			15MI53 号孔		
揚水区間			15MI52 号孔		
試験条件	注水流量(設定値)	mL/min	3	3	3
	揚水流量(設定値)	mL/min	25	12	12
	注水流量(流量計平均)	mL/min	2.98	3.01	2.85
	揚水流量(流量計平均)	mL/min	25.41	13.16	12.68
	ダイポール比	-	8.53	4.37	4.45
	定常場の形成		12/19 11:31	12/20 8:54	12/21 7:56
	トレーサー注入開始		12/19 11:50	12/20 9:20	12/21 8:10
	チェイサー注入開始		12/19 12:10	12/20 9:40	12/21 15:10
	サンプリング開始		12/19 12:20	12/20 10:20	12/21 9:00
	サンプリング停止		12/19 14:20	12/20 12:20	12/22 15:00
	トレーサー注入時間	min	20	20	420
	トレーサー量	L	0.060	0.060	1.197
	揚水(サンプリング時間)	min	120	120	1800
原液濃度	ウラニン	mg/L	2.42	2.56	2.73
	アミノ G 酸	mg/L	2.75	2.71	2.79
	重水素	‰	560	567	560
	ルビジウム	mg/L	-	-	1.46
	バリウム	mg/L	-	-	1.60
回収率-1 (回収時間 min)	ウラニン	-	85.1 % (120 min)	54.1 % (60 min)	64.3 % (360 min)
	アミノ G 酸	-	92.0 % (120 min)	54.3 % (60 min)	63.9 % (360 min)
	重水素	-	93.6 % (120 min)	53.0 % (60 min)	-
	ルビジウム	-	-	-	44.5 % (360 min)
	バリウム	-	-	-	33.7 % (360 min)
回収率-2 (回収時間 min)	ウラニン	-	-	75.1 % (120 min)	85.6 % (1200 min)
	アミノ G 酸	-	-	79.4 % (120 min)	87.0 % (1200 min)
	重水素	-	-	77.4 % (120 min)	-
	ルビジウム	-	-	-	-
	バリウム	-	-	-	-
回収率-3 (回収時間 min)	ウラニン	-	-	-	-
	アミノ G 酸	-	-	-	-
	重水素	-	-	-	-
	ルビジウム	-	-	-	85.4 % (1800 min)
	バリウム	-	-	-	83.3 % (1800 min)

表 4.3.8-8 15MI53 号孔注水-15MI52 号孔揚水の孔間トレーサー試験の回収率 (2)

試験名			16W5352T12	16W5352T13-15	16W5352T16-18
試験実施日			2017/1/11	2017/1/12-13	2017/1/16-18
注水区間			15MI53 号孔		
揚水区間			15MI52 号孔		
試験条件	注水流量(設定値)	mL/min	2	2	2
	揚水流量(設定値)	mL/min	6	6	6
	注水流量(流量計平均)	mL/min	2.08	1.97	1.78
	揚水流量(流量計平均)	mL/min	5.83	5.24	6.18
	ダイポール比	-	2.80	2.66	3.47
	定常場の形成		1/11 10:00	1/12 8:34	1/16 8:00
	トレーサー注入開始		1/11 10:10	1/12 9:00	1/16 9:00
	チェイサー注入開始		1/11 10:30	1/12 10:00	1/17 9:00
	サンプリング開始		1/11 12:00	1/12 11:00	1/16 11:00
	サンプリング停止		1/11 16:00	1/13 16:00	1/18 9:00
	トレーサー注入時間	min	20	60	1440
	トレーサー量	L	0.042	0.118	2.563
	揚水(サンプリング時間)	min	240	1860	2760
原液濃度	ウラニン	mg/L	2.47	2.63	2.40
	アミノ G 酸	mg/L	2.80	2.80	2.84
	重水素	‰	564	559	565
	ルビジウム	mg/L	-	1.53	1.53
	バリウム	mg/L	-	1.59	1.62
回収率-1 (回収時間 min)	ウラニン	-	48.1 % (192 min)	93.1 % (300 min)	8.75 % (240 min)
	アミノ G 酸	-	50.1 % (192 min)	95.0 % (300 min)	9.98 % (240 min)
	重水素	-	-	81.2 % (300 min)	-
	ルビジウム	-	-	58.1 % (300 min)	0.17 % (240 min)
	バリウム	-	-	41.3 % (300 min)	0.13 % (240 min)
回収率-2 (回収時間 min)	ウラニン	-	52.9 % (240 min)	-	99.0 % (1560 min)
	アミノ G 酸	-	55.8 % (240 min)	-	100 % (1560 min)
	重水素	-	61.4 % (240 min)	-	-
	ルビジウム	-	-	86.3 % (1260 min)	-
	バリウム	-	-	97.4 % (1260 min)	-
回収率-2 (回収時間 min)	ウラニン	-	-	-	-
	アミノ G 酸	-	-	-	-
	重水素	-	-	-	89.6 % (2760 min)
	ルビジウム	-	-	91.1 % (1740 min)	-
	バリウム	-	-	103 % (1740 min)	-

b. 室内分析結果における破過曲線

破過曲線の濃度には単孔トレーサー試験と同様に  $Rb^+$ 、 $Ba^{2+}$  は分析結果からバックグラウンド濃度を差し引き、トレーサー原液濃度で割って比濃度  $C/C_0$  として整理した。ウラニン、アミノ G 酸は各試料の分析結果をトレーサー原液濃度で割って比濃度  $C/C_0$  として整理した。 $\delta D$  については、混入率を計算しているため、分析結果をそのまま掲載した。グラフの経過時間については単孔トレーサー試験と同様にフラクシオンコレクターのインターバルと分隔時間に応じて設定した。孔間トレーサー試験のフラクシオンコレクターの設定を表 4.3.8-9 に示す。

また、フラクシオンコレクターでサンプリングした試料の各濃度から式(4.3.8-2)より回収率を近似的に求めた。破過曲線および回収率の経時変化を示したものを図 4.3.8-11～図 4.3.8-20 に示す。なお、それぞれの破過曲線は、チューブ分散等の補正は行っていない。

表 4.3.8-9 フラクシオンコレクターの設定

	採水本数	インターバル	分画時間
16W5253T1	120 本	60 秒	20 秒
16W5253T2	120 本	60 秒	30 秒
16W5253T3	80 本	120 秒	40 秒
16W5253T4-6	272 本	120 秒 ( 1 ~120 本) 600 秒 (121~272 本)	30 秒
16W5352T7	60 本	120 秒	32 秒
16W5352T8	60 本	120 秒	60 秒
16W5352T9-11	264 本	180 秒 ( 1 ~120 本) 600 秒 (121~264 本)	60 秒
16W5352T12	60 本	240 秒	120 秒
16W5352T13-15	225 本	300 秒 ( 1 ~80 本) 600 秒 (81~225 本)	130 秒
16W5352T16-18	235 本	300 秒 ( 1 ~48 本) 600 秒 (49~120 本) 1,200 秒 (121~187 本)	140 秒



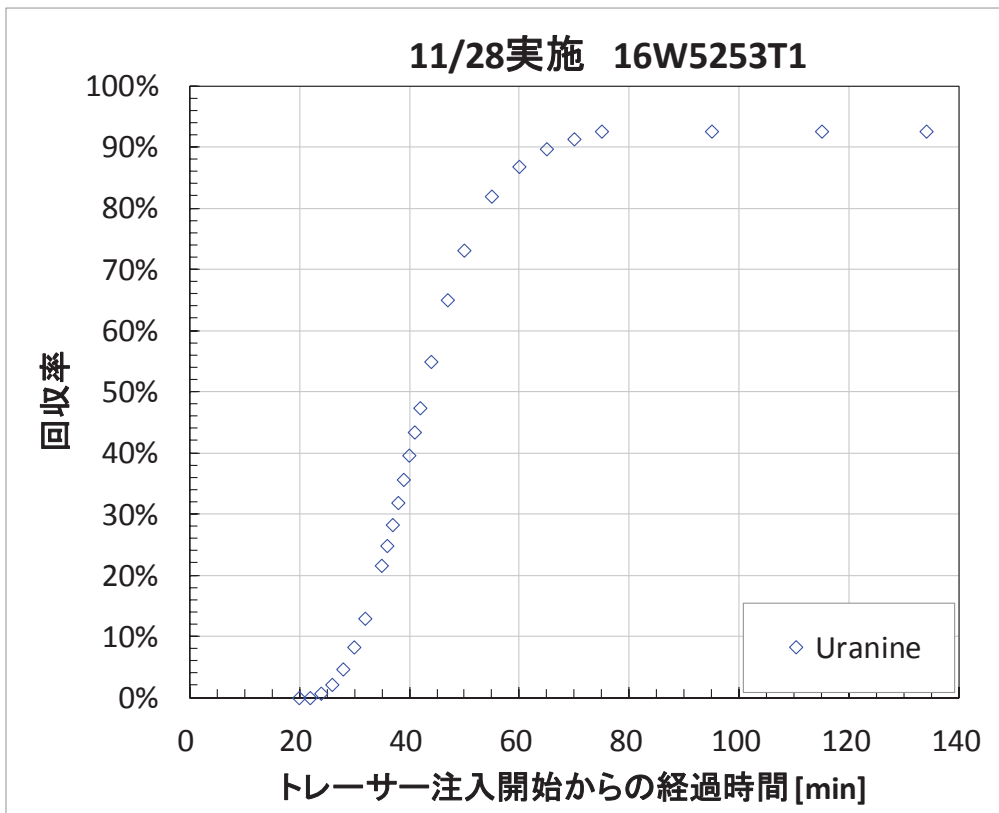
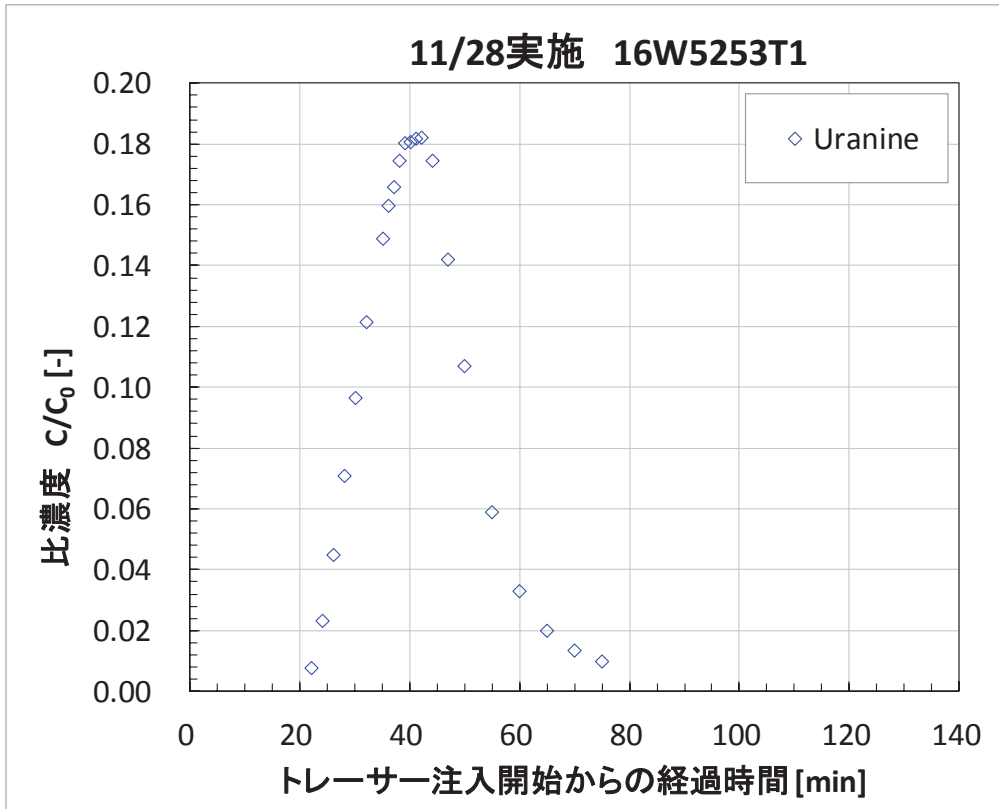


図 4. 3. 8-11 16W5253T1 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）

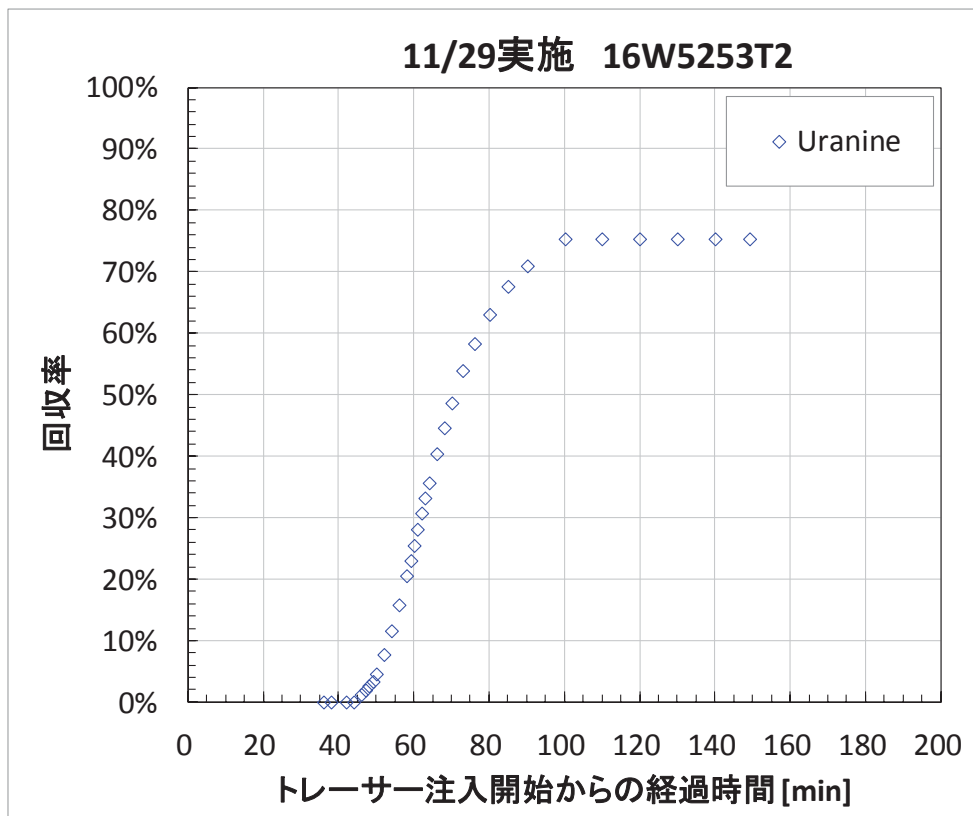
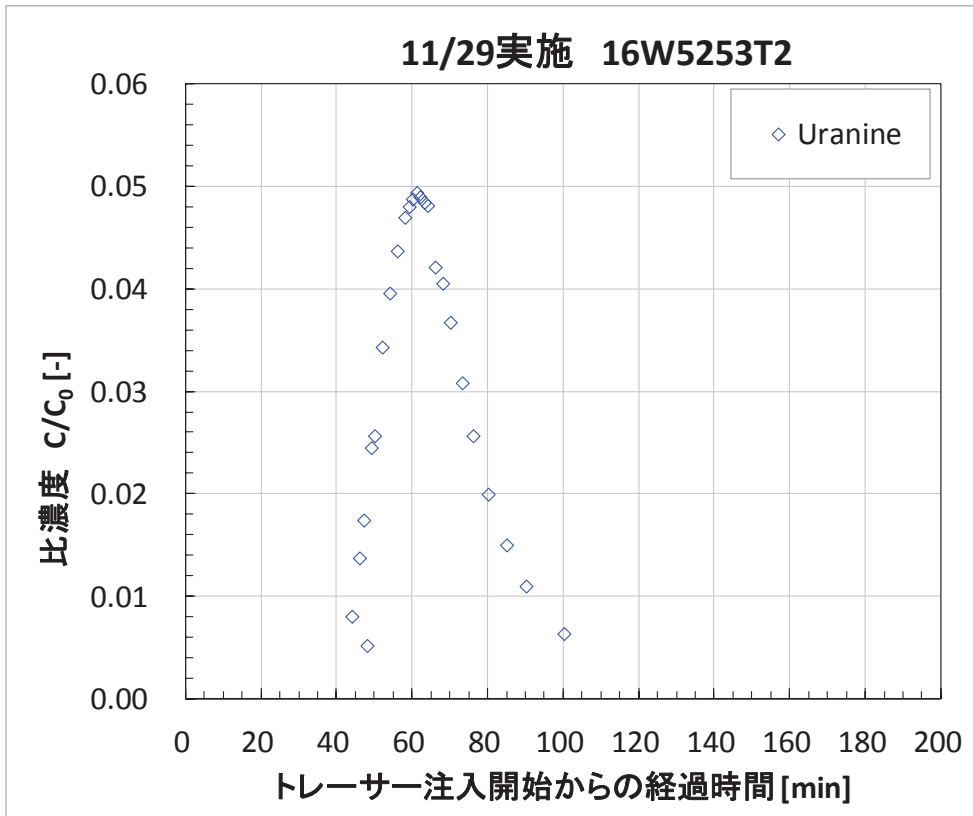


図 4.3.8-12 16W5253T2 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）

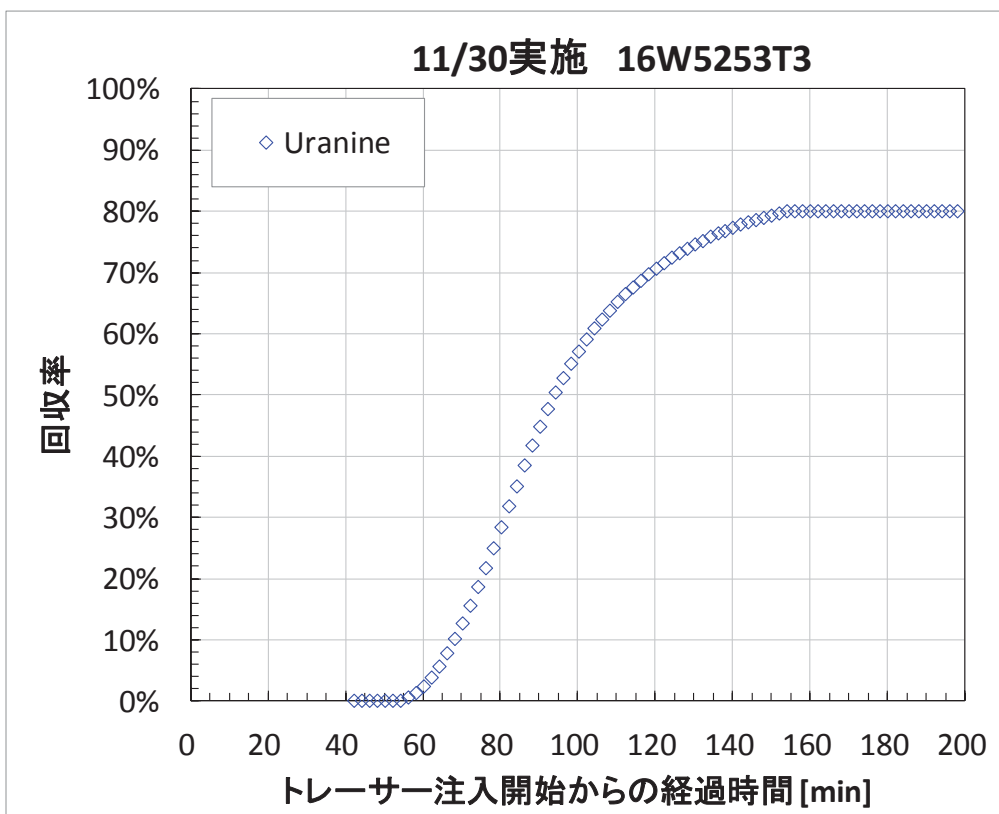
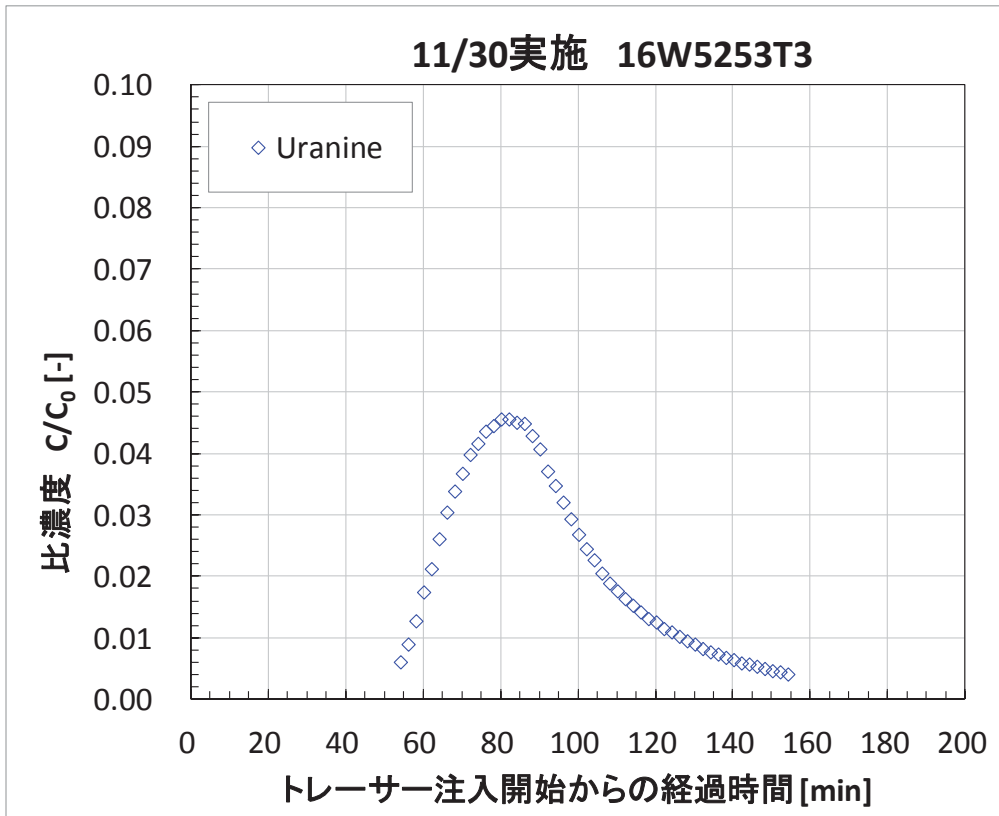


図 4. 3. 8-13 16W5253T3 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）

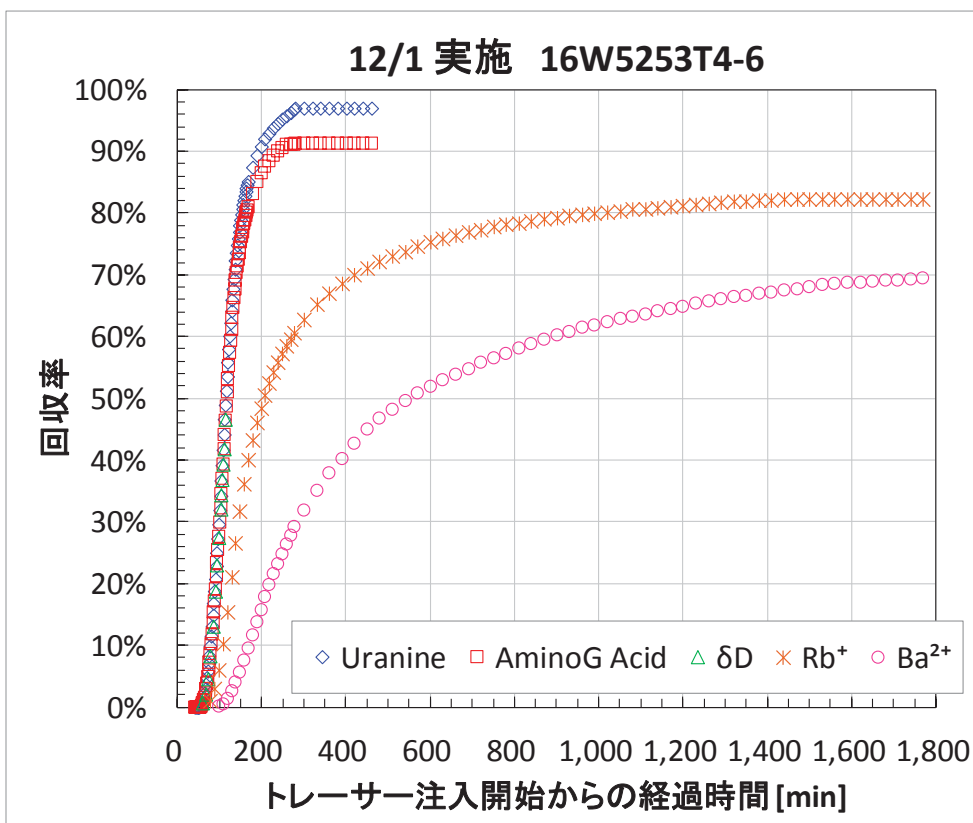
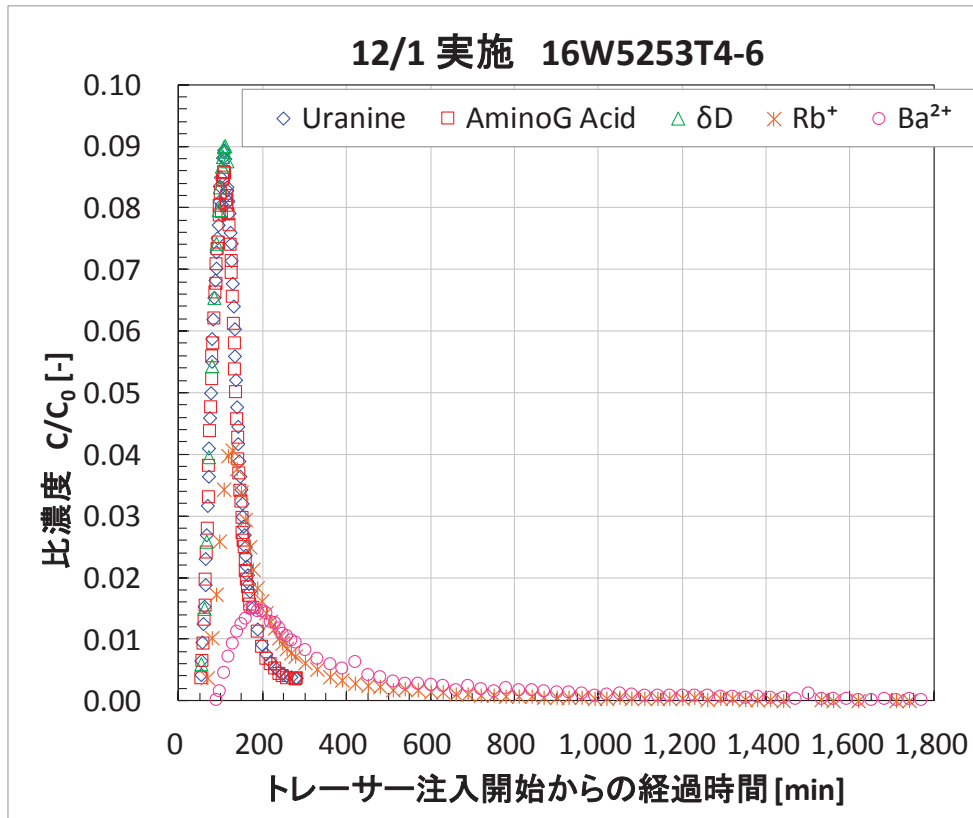


図 4. 3. 8-14 16W5253T4-6 破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)

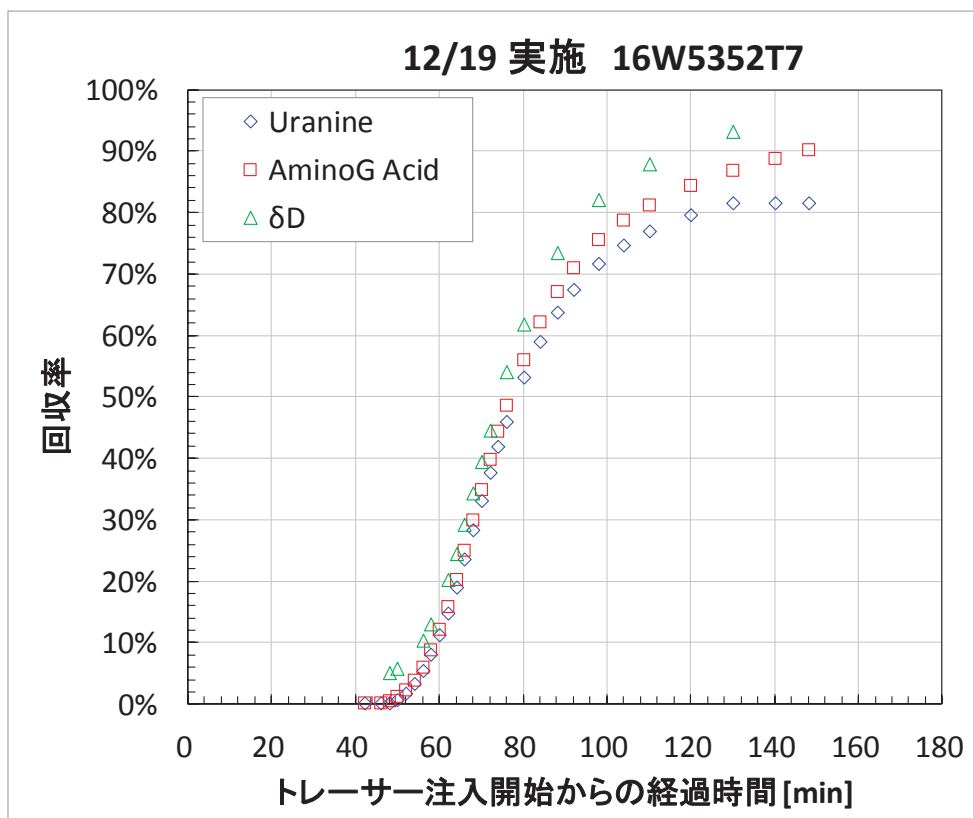
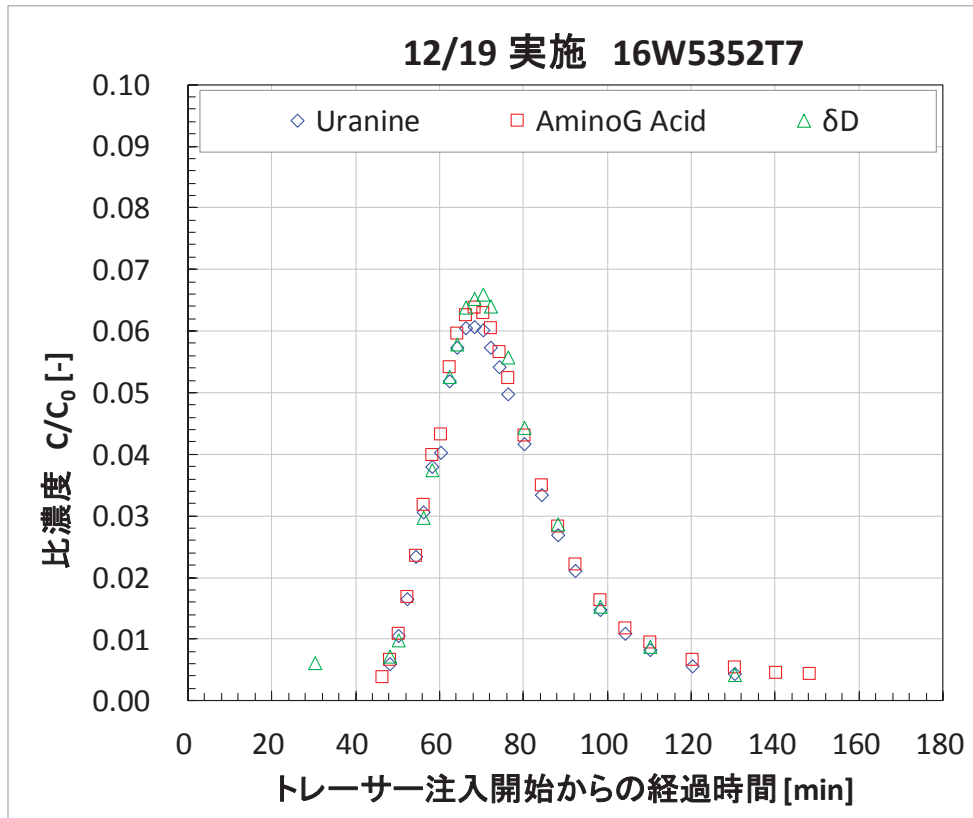


図 4.3.8-15 16W5352T7 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）

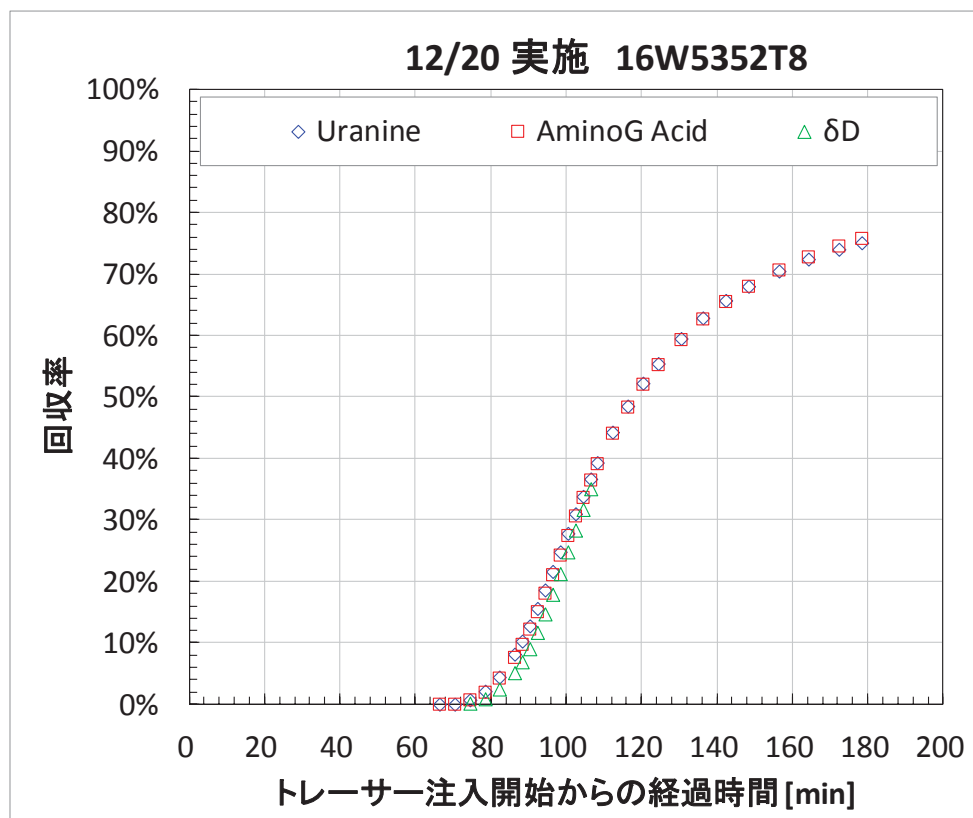
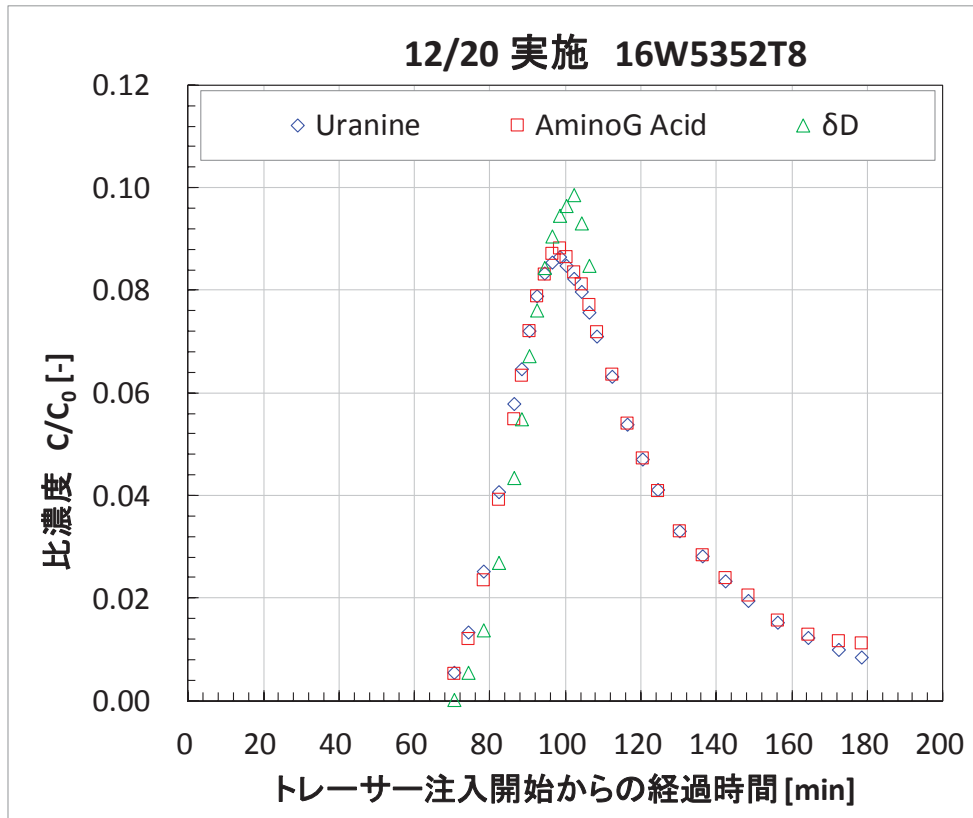


図 4. 3. 8-16 16W5352T8 破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)

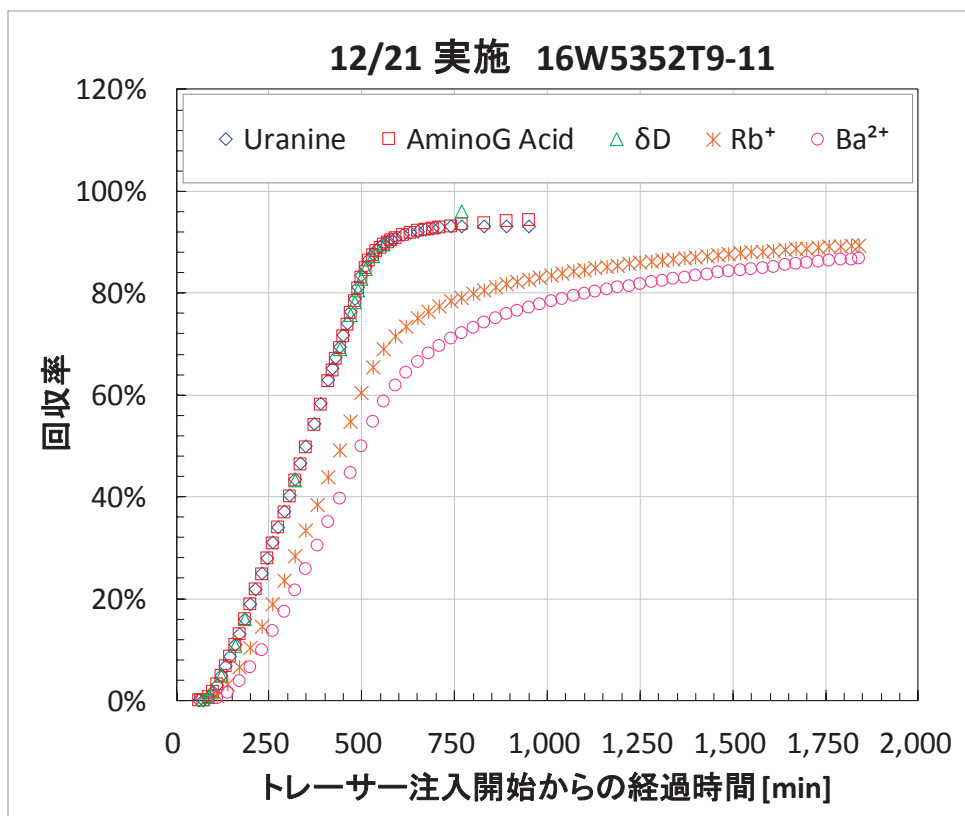
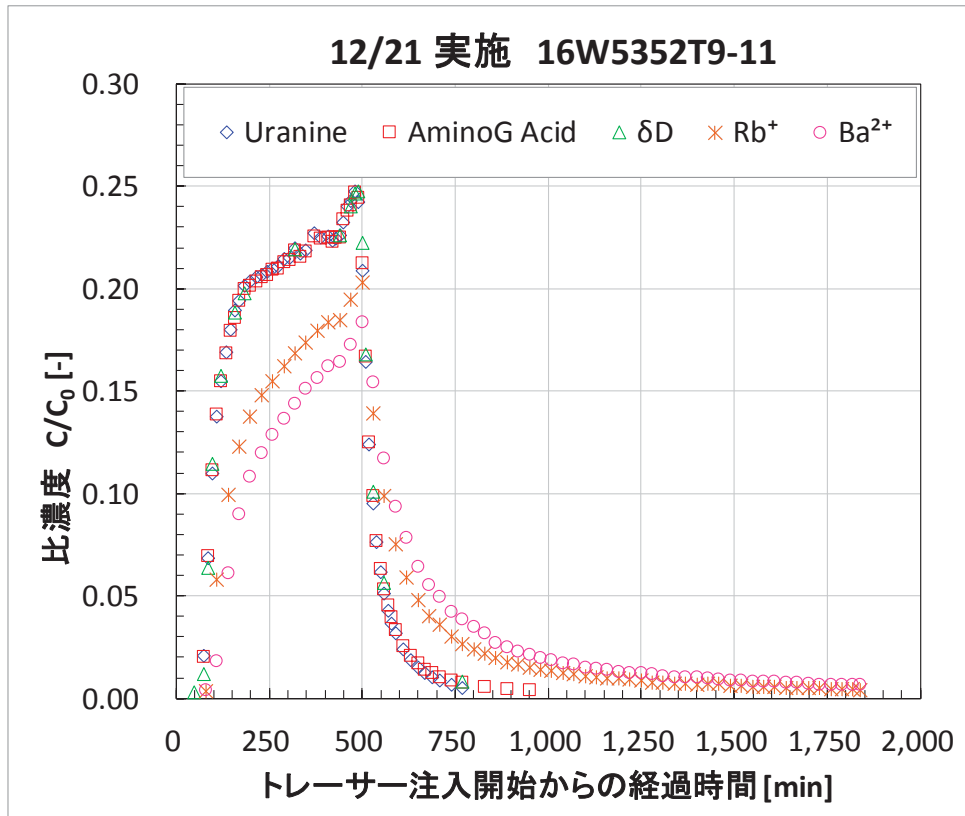


図 4.3.8-17 16W5352T9-11 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）

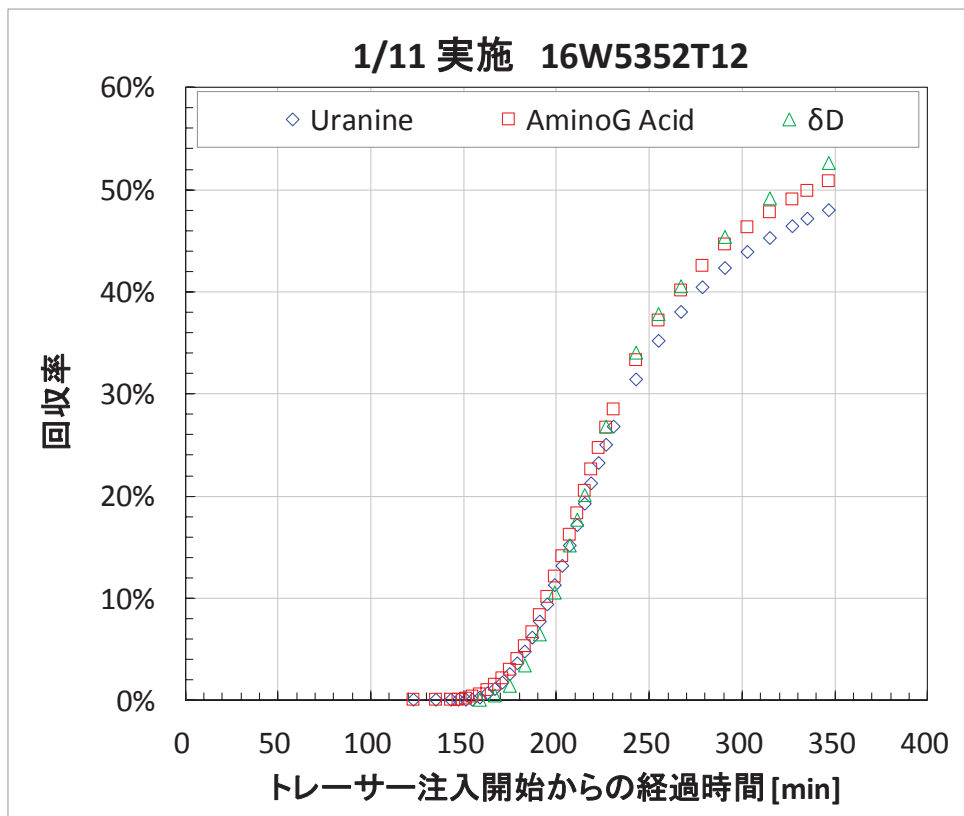
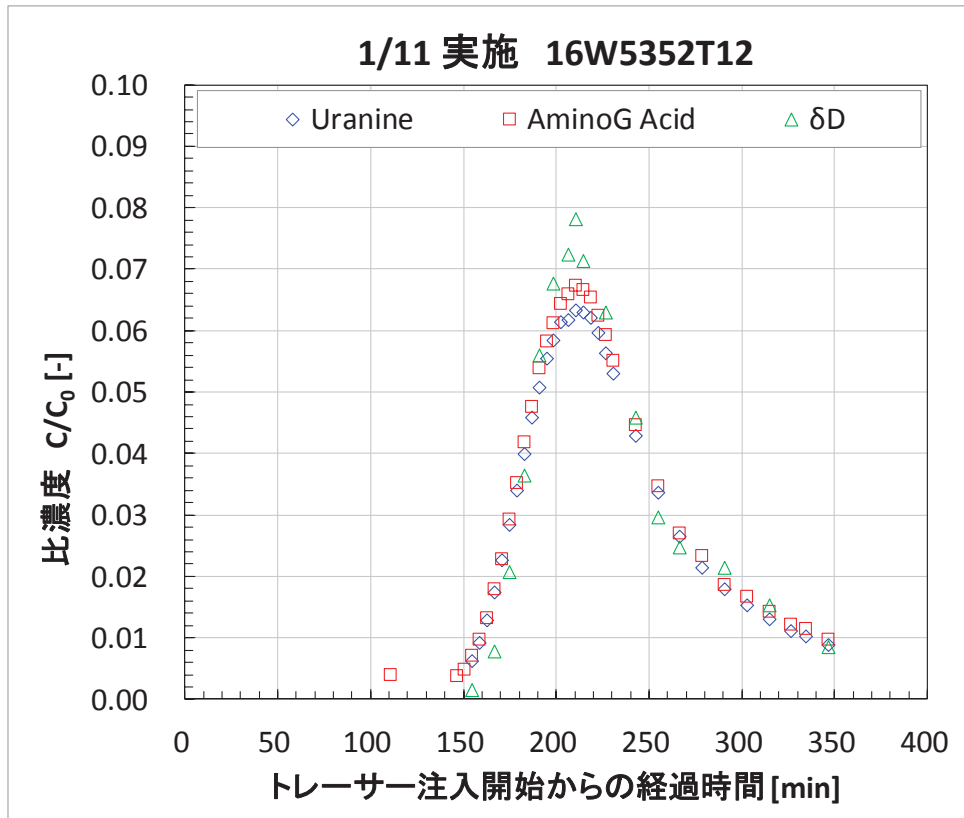


図 4.3.8-18 16W5352T12 破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)



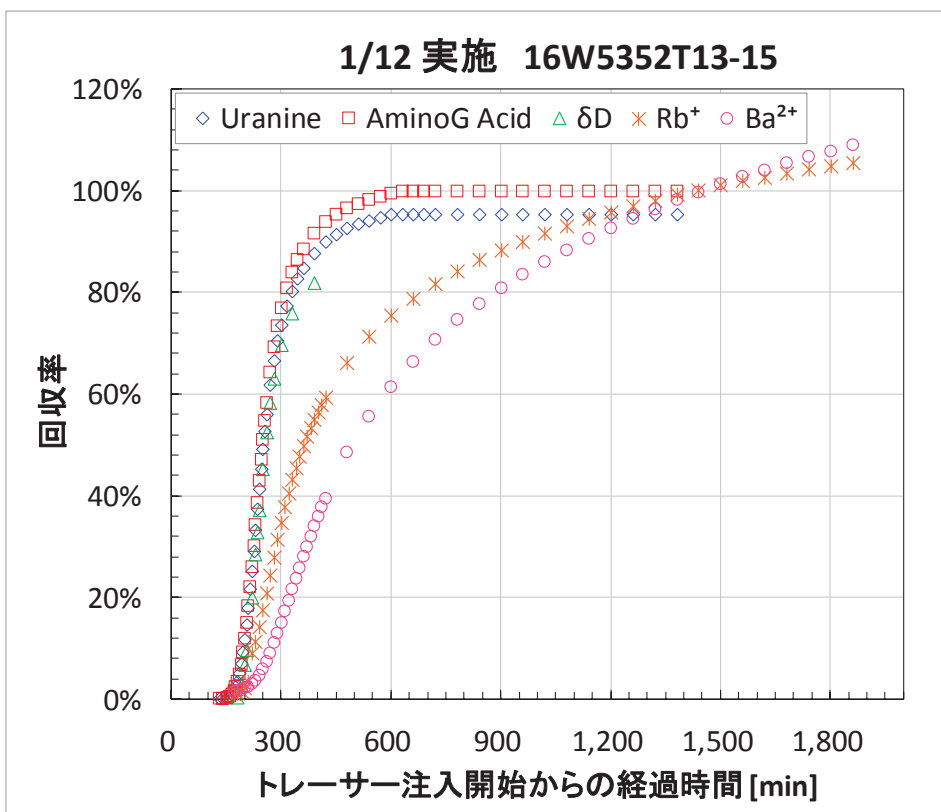
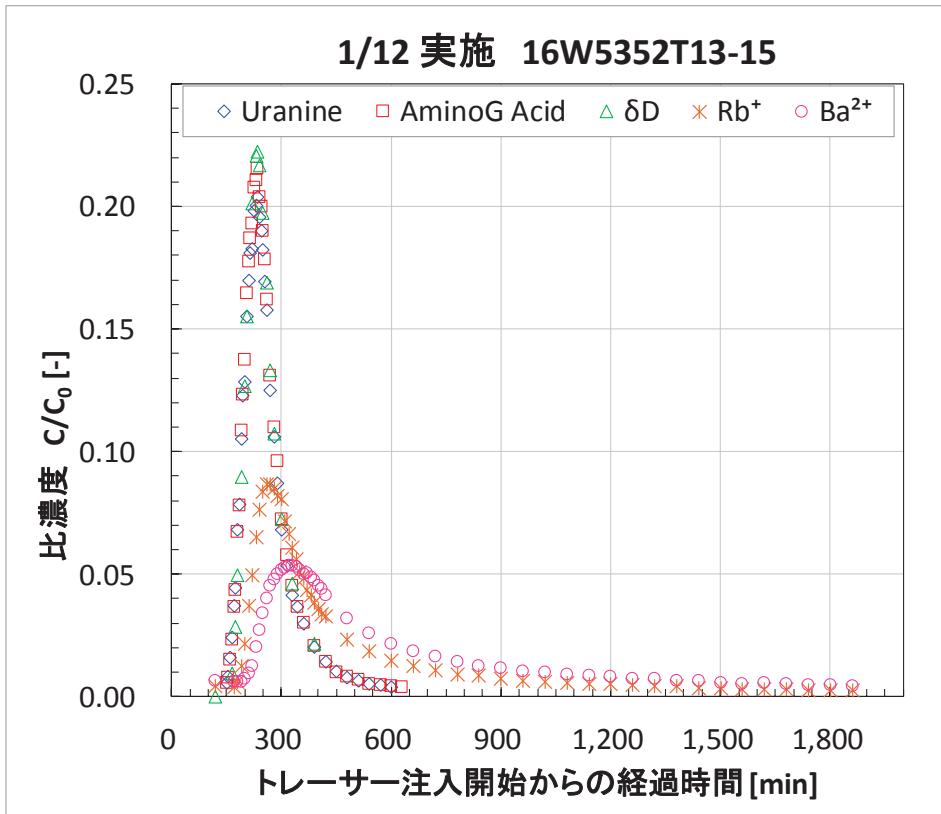


図 4.3.8-19 16W5352T13-15 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）

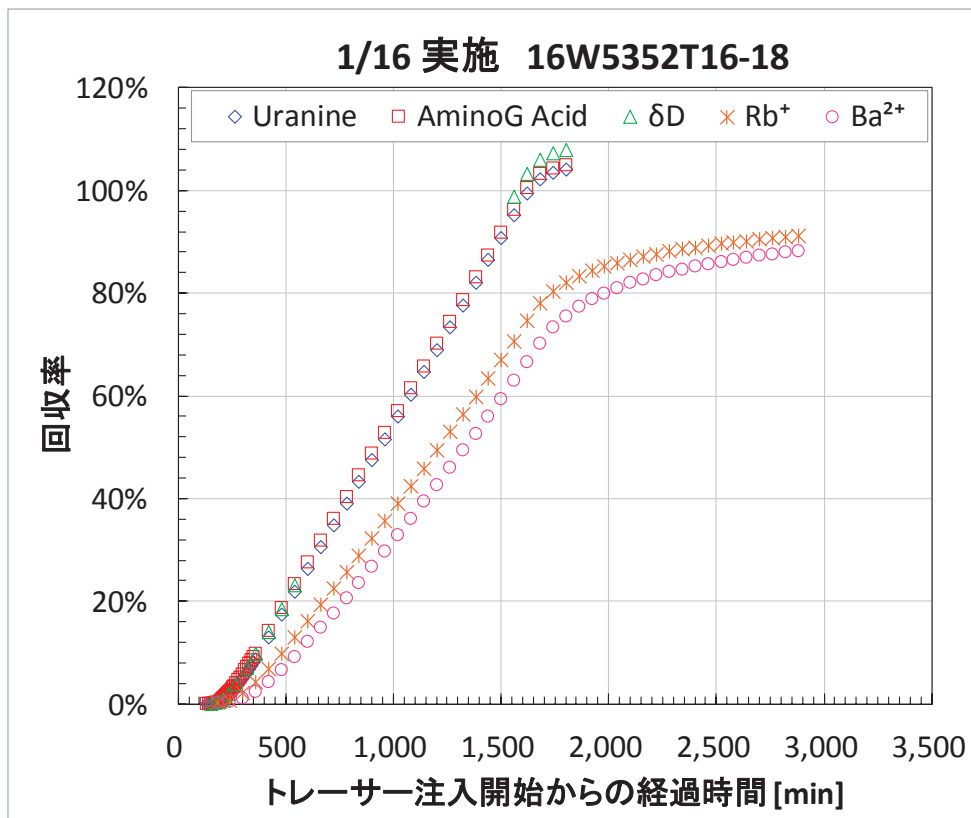
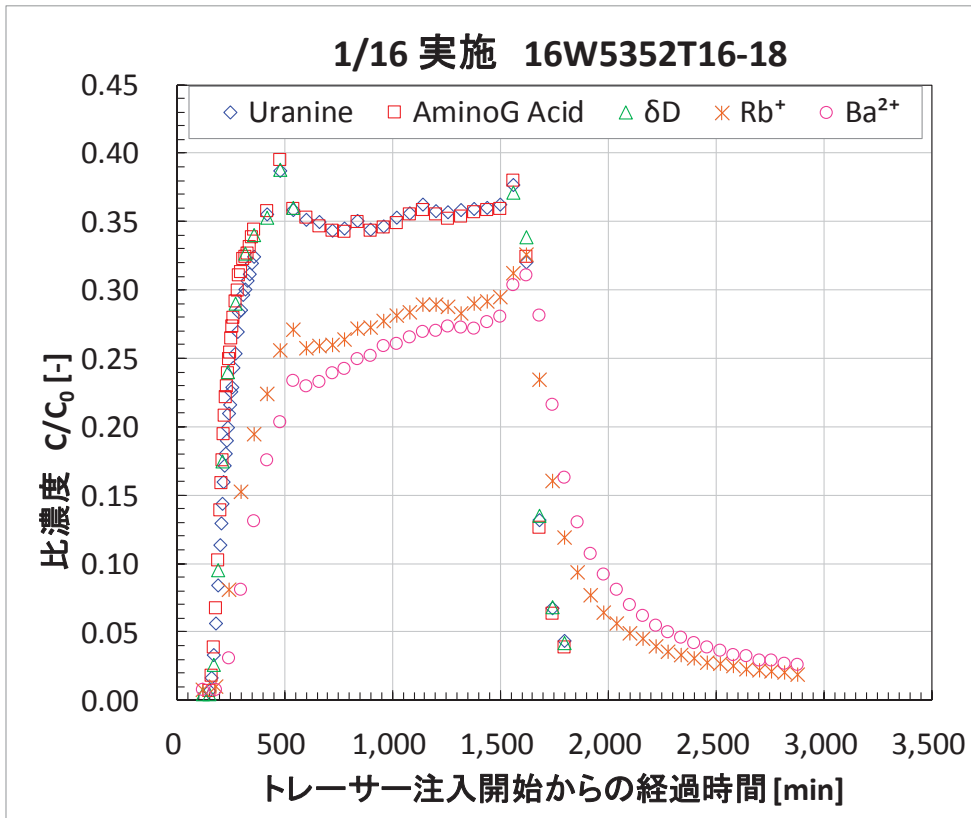


図 4.3.8-20 16W5352T16-18 破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)

#### 4.4 原位置試験の評価

##### 4.4.1 単孔トレーサー試験結果の評価

###### (1) 破過曲線

チェイサー注入終了時点まではほぼ同じ条件とし、揚水流量を変えて行った試験条件の  $\delta D$ 、 $Rb^+$ 、 $Ba^{2+}$  の破過曲線を図 4.4.1-1 に示す。縦軸は濃度をトレーサー原液の濃度で割った比濃度、横軸は揚水開始からの経過時間とし、本節ではこれ以降も同様に整理する。流量にばらつきはあるものの、いずれの試験条件もトレーサー量を約 1.0L、チェイサー量を約 0.5L となるように試験条件を設定し、揚水流量を変えて行った試験である。いずれの試験結果も  $\delta D$ 、 $Rb^+$ 、 $Ba^{2+}$  のピーク濃度はほぼ一致することが確認された。

注入量はほぼ同じで注入流量が異なる試験条件の  $\delta D$ 、 $Rb^+$ 、 $Ba^{2+}$  の破過曲線を図 4.4.1-2 に示す。いずれの試験結果も  $\delta D$ 、 $Rb^+$ 、 $Ba^{2+}$  のピーク濃度がほぼ一致した。仮にバックグラウンド地下水流れの影響が大きい場合、16S52T5 の注入流量が 16S52T3 に比較して小さく注入に要する時間が長いため、16S52T5 の方がピーク濃度は低くなる可能性が考えられる。しかし、両試験条件のピーク濃度はほぼ一致することから、バックグラウンド地下水流れの影響は小さいと言える。

注入流量と揚水流量がほぼ等しく、トレーサーの注入時間が異なる試験条件の  $\delta D$ 、 $Rb^+$ 、 $Ba^{2+}$  の破過曲線を図 4.4.1-3 に示す。16S52T3 はトレーサーが約 1L、チェイサーが約 0.5L に対し、16S52T6 はトレーサーが約 2L、チェイサーが約 0.5L とした試験条件である。16S52T6 の方がピーク濃度に到達するまでの時間が早くなり、ピーク濃度も大きくなることが確認された。また、16S52T3 の  $\delta D$  のピーク濃度に対し  $Rb^+$  のピーク濃度は約 0.62 倍、 $Ba^{2+}$  のピーク濃度は約 0.43 倍になり、16S52T6 は  $\delta D$  のピーク濃度に対し  $Rb^+$  のピーク濃度は約 0.74 倍、 $Ba^{2+}$  のピーク濃度は約 0.61 倍となり、非収着性トレーサーの濃度に対する収着性トレーサーの濃度低減率も変わることを確認した。

流量や注入時間がほぼ等しく、試験対象孔が異なる試験条件の  $\delta D$ 、 $Rb^+$ 、 $Ba^{2+}$  の破過曲線を図 4.4.1-4 に示す。 $\delta D$ 、 $Rb^+$ 、 $Ba^{2+}$  のピーク濃度がほぼ等しく、破過曲線の形状もほとんど一致することから、両区間の物質移行特性は大きく変わらないことが示唆された。

15MI53 号孔で行った試験のうち、16S53T9、16S53T10、16S53T11 の  $\delta D$ 、 $Rb^+$ 、 $Ba^{2+}$  の破過曲線を図 4.4.1-5 に示す。16S53T9、16S53T10 は注入量が約 3L と他の試験条件よりも多い試験条件であり、16S53T11 は注入量が約 1.5L であるが、チェイサー注入終了後に待機時間を設けた試験条件である。他の試験条件では  $Rb^+$ 、 $Ba^{2+}$  のピーク濃度が異なるのに対し、16S53T9、16S53T10、16S53T11 の  $Rb^+$ 、 $Ba^{2+}$  のピーク濃度はほぼ等しくなる結果となった。ここで、注入量と割れ目幅の関係から注入流体の浸透範囲を式(4.4.1-1)によって計算した結果を表 4.4.1-1 に示す。

$$r_{max} = \sqrt{\frac{V_{inj}}{\pi b} + r_w^2} \quad (4.4.1-1)$$

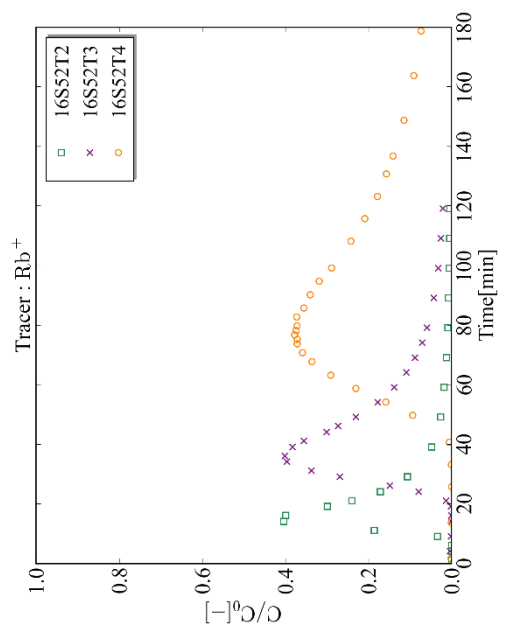
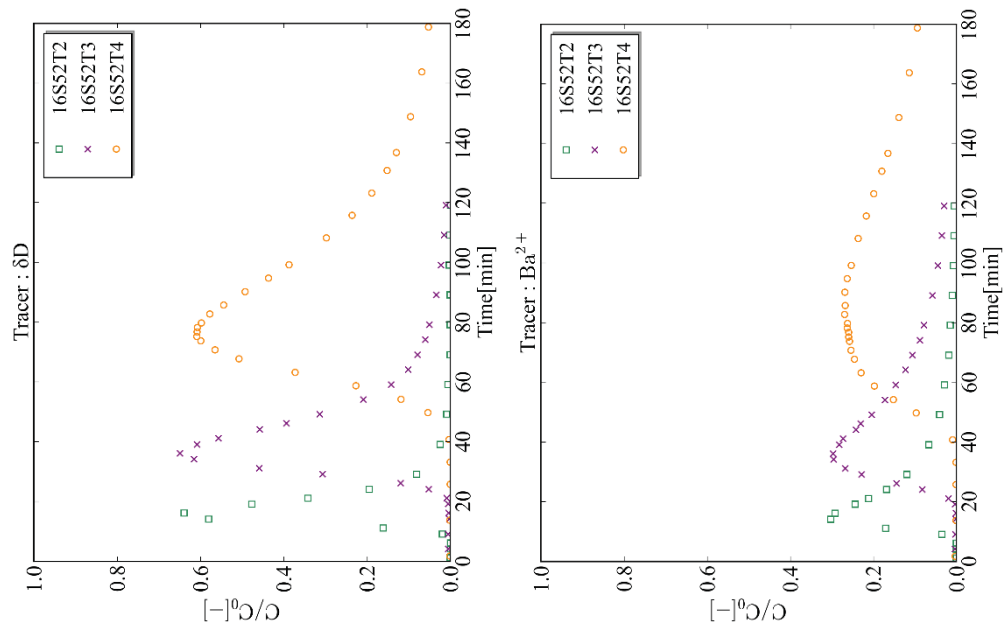
ここに、 $r_{max}$  : 注入流体の浸透範囲最大値[L]、 $V_{inj}$  : 注入量[L<sup>3</sup>]、 $b$  : 割れ目幅[L]、 $r_w$  : ボーリング孔

径[L<sup>2</sup>]を表す。

高精度 BTV による試験区間割れ目の詳細観察では、15MI52 号孔の割れ目幅は 0.19mm、15MI53 号孔の割れ目幅は 0.40mm と評価されている。15MI52 号孔で行った試験の注入量は最大 2.5L 程度であり、割れ目幅が 0.19~0.40mm 程度であるとする最大 2.0m 程度まで注入流体が広がっている可能性がある。一方、16S53T9、16S53T10 の注入量は 3L 程度であり、割れ目幅が 0.19~0.40mm 程度であるとする最大 2.2m 程度広がっている可能性がある。単孔トレーサー試験を行っている際は、15MI52 号孔、15MI53 号孔はパッカー一体型のトレーサー試験装置が設置されているが、16MI59 号孔にはモニタリング装置が挿入されており、区間が開放されている。16MI59 号孔の間隙水圧モニタリング区間は 16.0~18.6mabh であり、16MI59 号孔の対象区間を 17.3mabh とすると、15MI52 号孔と 16MI59 号孔の孔間距離は約 2.7m、15MI53 号孔と 16MI59 号孔の孔間距離は約 1.7m と計算される。つまり、15MI52 号孔で行った試験は注入流体が 16MI59 号孔の区間に到達している可能性は低い、15MI53 号孔で行った試験のうち 16S53T9、16S53T10 は注入流体が 16MI59 号孔に到達している可能性があり、その影響で Rb<sup>+</sup>、Ba<sup>2+</sup> のピーク濃度に差が表れなかったと考えられる。また 16S53T11 は待機時間を 60 分設けた試験条件であり、待機時間中に 16MI59 号孔の開放区間の影響を受けた可能性が考えられる。

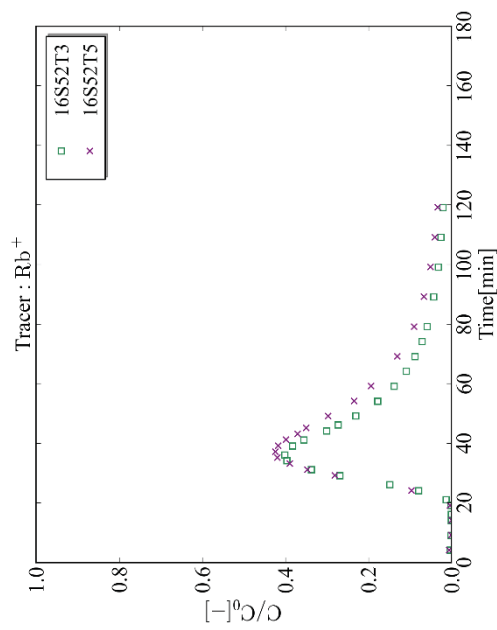
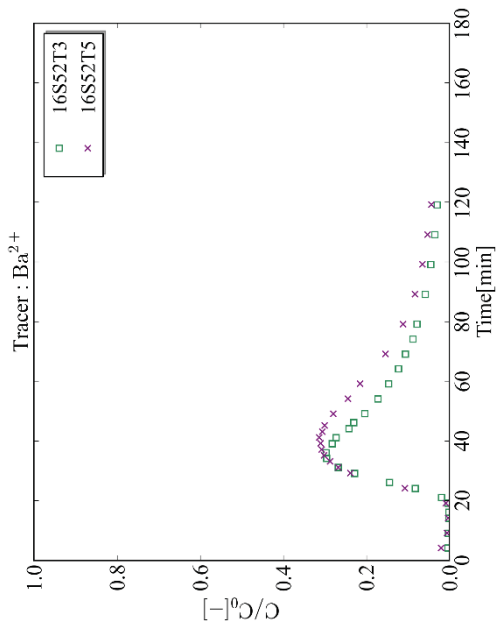
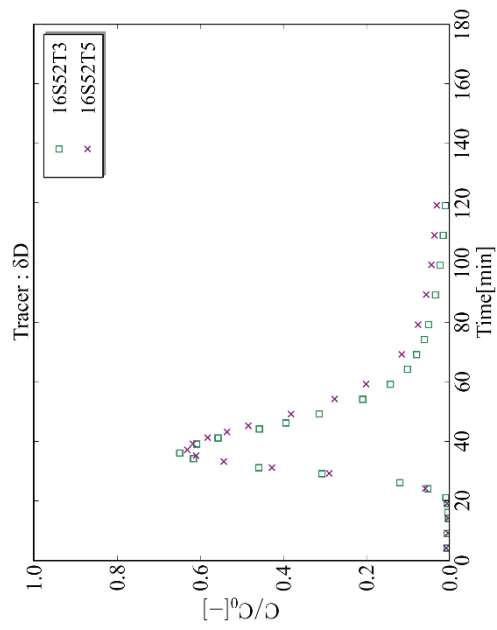
表 4.4.1-1 注入流体の浸透範囲計算結果

割れ目幅 [mm]	注入量[L] ※トレーサー+チェイサー					
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
0.01	5.6	6.9	8.0	8.9	9.8	10.6
0.02	4.0	4.9	5.6	6.3	6.9	7.5
0.05	2.5	3.1	3.6	4.0	4.4	4.7
0.10	1.8	2.2	2.5	2.8	3.1	3.3
0.20	1.3	1.5	1.8	2.0	2.2	2.4
0.50	0.8	1.0	1.1	1.3	1.4	1.5
1.00	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
0.19	1.3	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4
0.40	0.9	1.1	1.3	1.4	1.5	1.7



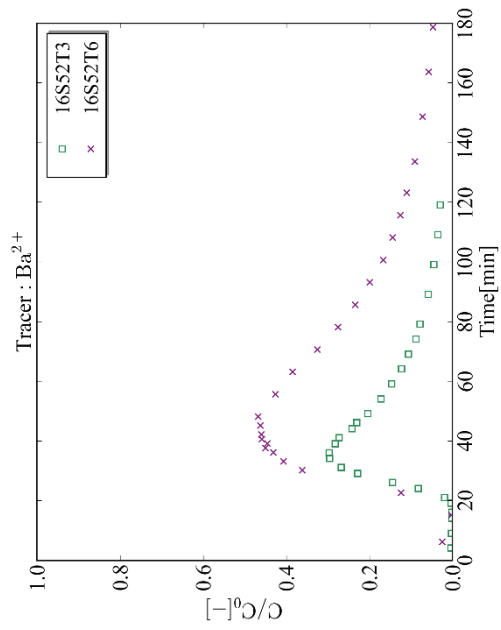
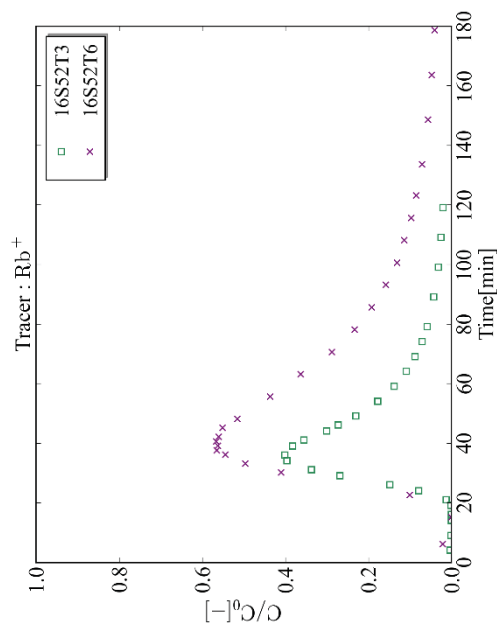
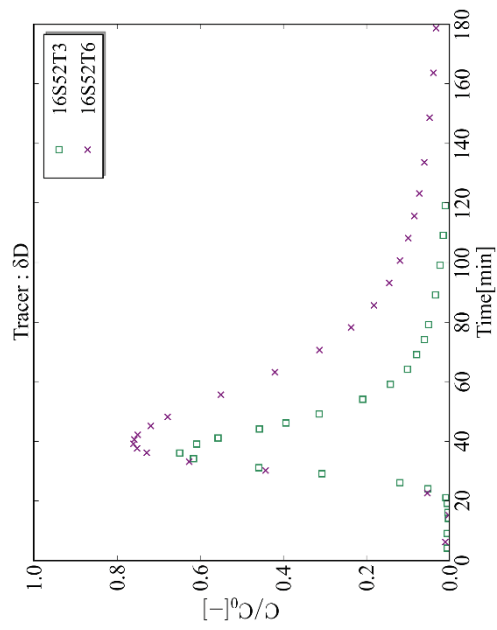
	16S52T2	16S52T3	16S52T4
	2016/11/24	2016/11/25	2016/12/7
注水流量	mL/min	93.19	99.85
揚水流量	mL/min	60.23	23.76
トレーサー注入時間	min	10.0	10.0
チャイサー注入時間	min	5.0	5.0
待機時間	min	-	-
トレーサー量	L	0.830	0.932
チャイサー量	L	0.415	0.466

図 4.4.1-1 16S52T2, 16S52T3, 16S52T4 の破過曲線比較



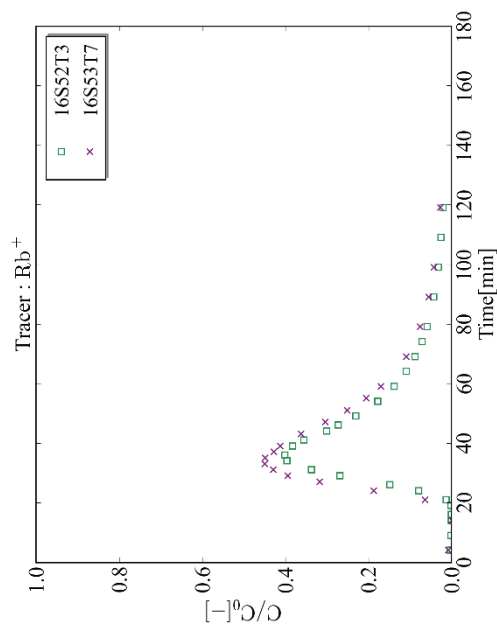
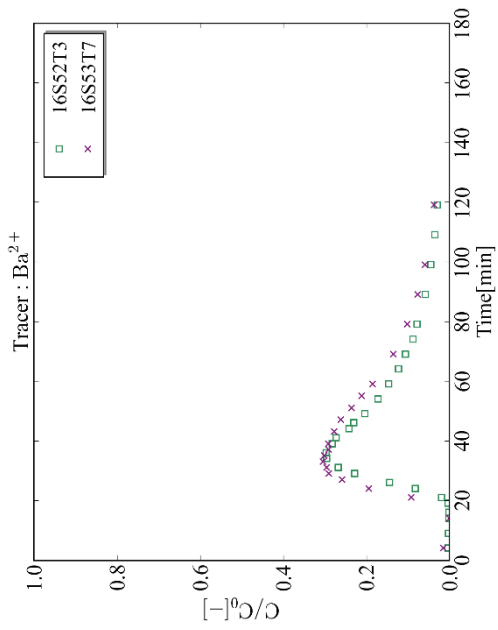
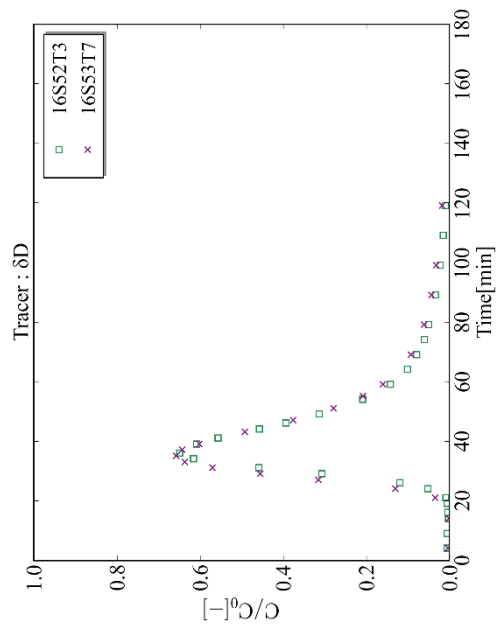
	16S52T3	16S52T5
	2016/11/25	2016/12/8
注水流量	mL/min	49.60
揚水流量	mL/min	49.28
トレーサー注入時間	min	20.0
チェイサー注入時間	min	10.0
待機時間	min	-
トレーサー量	L	0.992
チェイサー量	L	0.496

図 4. 4. 1-2 16S52T3, 16S52T5 の破過曲線比較



	16S52T3	16S52T6
	2016/11/25	2016/12/9
注水流量	mL/min	93.19
揚水流量	mL/min	60.23
トレーサー注入時間	min	10.0
チエイサー注入時間	min	5.0
待機時間	min	-
トレーサー量	L	0.932
チエイサー量	L	0.466

図 4. 4. 1-3 16S52T3, 16S52T6 の破過曲線比較



	16S52T3	16S53T7
	2016/11/25	2016/12/12
注水流量	mL/min	93.19
揚水流量	mL/min	60.23
トレーサー注入時間	min	10.0
チエイサー注入時間	min	5.0
待機時間	min	-
トレーサー量	L	0.932
チエイサー量	L	0.466

図 4. 4. 1-4 16S52T3, 16S53T7 の破過曲線比較



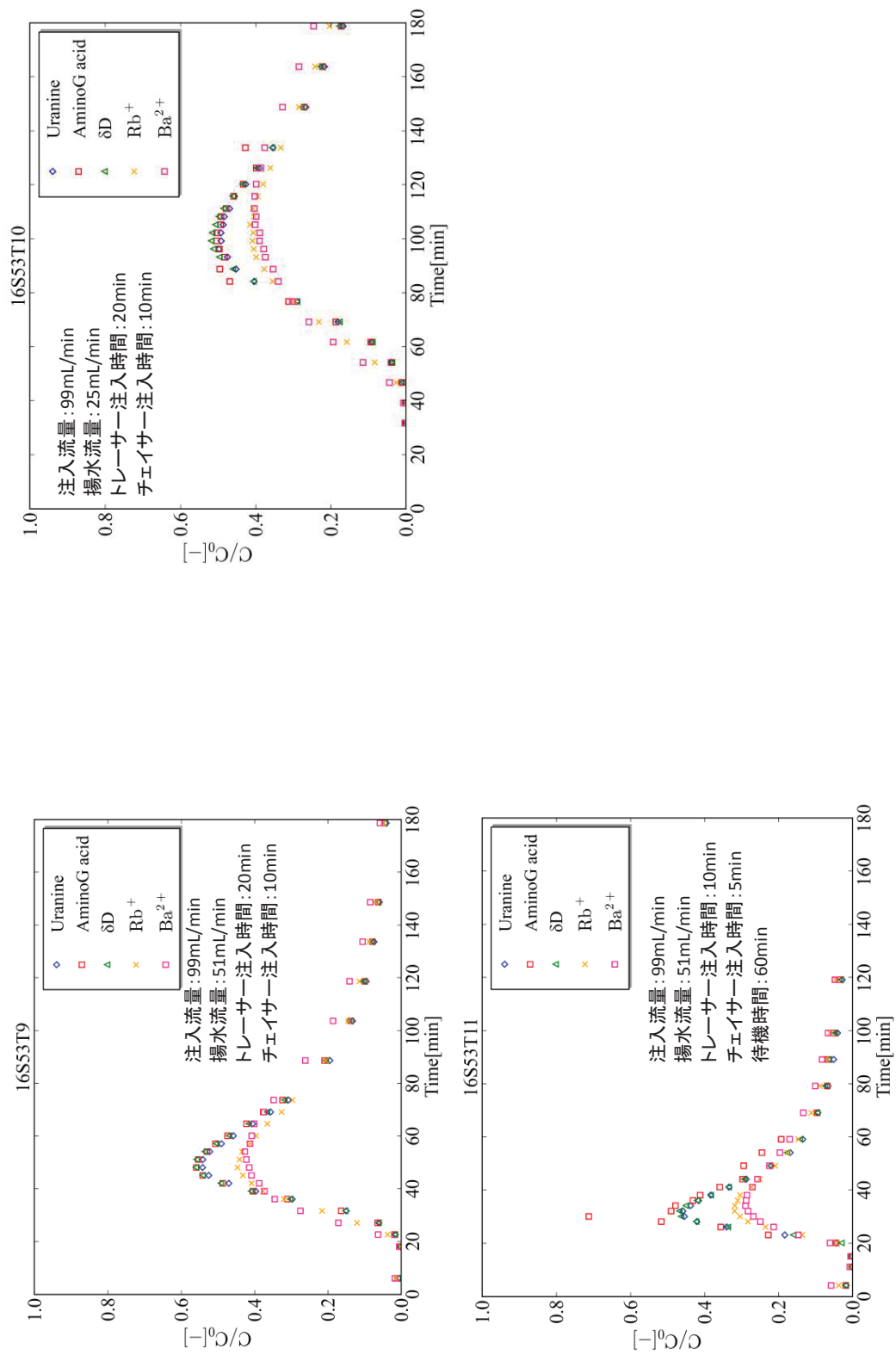


図 4.4.1-5 16S53T9、16S53T10、16S53T11 の破過曲線比較

(2) 単孔トレーサー試験の理論式を用いたパラメーター評価

待機時間を設けていない試験条件について、Gelhar and Collins(1971)やSchroth et al. (2001)によって示された理論式による単孔トレーサー試験の評価方法を用い、試験結果の簡易評価を行って物質移行パラメーターを評価する。

a. 理論式と評価手順

Gelhar and Collins(1971)やSchroth et al. (2001)が示した理論式を式(4.4.1-2)、(4.4.1-3)に示す。

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{\frac{V_{ext}}{V_{inj}} - 1}{\left( \frac{16}{3} \frac{\alpha_L}{\hat{r}_{max}} \left\{ 2 - \left| 1 - \frac{V_{ext}}{V_{inj}} \right|^{1/2} \left( 1 - \frac{V_{ext}}{V_{inj}} \right) \right\} \right)^{1/2}} \right] \quad (4.4.1-2)$$

ここで、 $\hat{r}_{max}$ はトレーサーの浸透範囲を表し、非収着性トレーサーの $\hat{r}_{max}$ は式(4.4.1-3)で、収着性トレーサーの $\hat{r}_{max}$ は式(4.4.1-4)で表される。

$$\hat{r}_{max,nr} = \sqrt{\frac{V_{inj}}{\pi b \varphi} + r_w^2} \quad (4.4.1-3)$$

$$\hat{r}_{max,r} = \sqrt{\frac{V_{inj}}{\pi b R \varphi} + r_w^2} \quad (4.4.1-4)$$

ここに、 $V_{ext}$ :揚水量[L<sup>3</sup>]、 $V_{inj}$ :注入量[L<sup>3</sup>]、 $r_w$ :ボーリング孔径[L]、 $b$ :割れ目幅[L]、 $\alpha_L$ :縦分散長[L]、 $\varphi$ :間隙率[-]、 $R$ :遅延係数を表し、下付添え字の  $nr$  は非収着性トレーサーを、 $r$  は収着性トレーサーを意味している。

ここで、式(4.4.1-2)において未知数は $\alpha_L$ と $\hat{r}_{max,nr}$ であり、式(4.4.1-3)の右辺第2項は右辺第1項に比べて十分に小さい場合、式(4.4.1-6)で示される集中定数 $\tau$  (*lumped parameter*) が定義される。つまり、非収着性トレーサーの理論式である式(4.4.1-2)の未知数は、割れ目幅、縦分散長、間隙率から成る集中定数に集約される。また、収着性トレーサーの理論式では、集中定数に加え、遅延係数が未知数に加わる。

$$\frac{\alpha_L}{\hat{r}_{max,nr}} = \frac{\alpha_L}{\sqrt{\frac{V_{inj}}{\pi b \varphi} + r_w^2}} \approx \frac{\alpha_L}{\sqrt{\frac{V_{inj}}{\pi b \varphi}}} \quad (4.4.1-5)$$

$$\Leftrightarrow \frac{\alpha_L^2}{V_{inj}/b\varphi} = \frac{\alpha_L^2 b \varphi}{V_{inj}} = \tau \quad (4.4.1-6)$$

$$\frac{\alpha_L}{\hat{r}_{max,r}} = \frac{\alpha_L}{\sqrt{\frac{V_{inj}}{\pi b R \varphi} + r_w^2}} \approx \frac{\alpha_L}{\sqrt{\frac{V_{inj}}{\pi b R \varphi}}} \quad (4.4.1-7)$$

$$\Leftrightarrow \frac{\alpha_L^2}{V_{inj}/Rb\varphi} = \frac{\alpha_L^2 R b \varphi}{V_{inj}} = \tau R \quad (4.4.1-8)$$

b. 評価結果

16S52T2～16S53T8 の試験条件について、集中定数と遅延係数を評価した結果を図 4.4.1-6～図 4.4.1-12 に示す。理論式によって計算した破過曲線は、チューブ分散は計算せず、試験結果のピーク時間に合うように時間を補正して示した。

非吸着性トレーサーの破過曲線に対する評価では、いずれの試験条件についても集中定数は  $1.0 \times 10^{-3}$  程度の場合に試験結果を概ね良好に再現することができた。ここで、集中定数を  $1.0 \times 10^{-3}$  とし、間隙率を 1.0、割れ目幅を試験区間の高精度 BTV によって評価された割れ目幅 0.19、0.40mm と仮定し、集中定数の定義式(4.4.1-6) から縦分散長を計算した結果を示す。縦分散長はトレーサー移行距離の  $1/100 \sim 1/10$  程度になることが経験的に知られているが、今回評価された縦分散長も浸透範囲の  $1/100 \sim 1/10$  に収まっており、過去の報告値から大きく外れない結果が得られた。

吸着性トレーサーの破過曲線については、非吸着性トレーサーの評価結果から、集中定数を  $1.0 \times 10^{-3}$  として理論式を計算した。吸着性トレーサーの理論式による評価は、非吸着性トレーサーの評価結果に比べてテール部の再現性が良くないもののピーク濃度に着目すると、 $Rb^+$ の遅延係数が 5～10 程度、 $Ba^{2+}$ の遅延係数が 10～50 程度と評価された。

ここで示した理論式による評価結果については、評価解析を行う際の解析条件を決定する際に参考とし、解析条件を決定する。

表 4.4.1-2 非吸着性トレーサーの理論式評価結果

試験条件名		16S52T2	16S52T3	16S52T4	16S52T5	16S52T6	16S53T7	16S53T8	
試験条件	注水流量	mL/min	83.00	93.19	99.85	49.60	99.07	99.09	98.78
	揚水流量	mL/min	114.30	60.23	23.76	49.28	49.82	50.88	50.03
	トレーサー注入時間	min	10.0	10.0	10.0	20.0	20.0	10.0	10.0
	チェイサー注入時間	min	5.0	5.0	5.0	10.0	5.0	5.0	10.0
	待機時間	min	-	-	-	-	-	-	-
	トレーサー量	L	0.830	0.932	0.999	0.992	1.981	0.991	0.988
	チェイサー量	L	0.415	0.466	0.499	0.496	0.495	0.495	0.988
割れ目幅0.19mmとした場合の浸透範囲	m	1.44	1.53	1.58	1.58	2.04	1.58	1.82	
集中定数: $1.0 \times 10^{-3}$ 、割れ目幅0.19mmとした時の縦分散長	m	0.08	0.09	0.09	0.09	0.11	0.09	0.10	
割れ目幅0.40mmとした場合の浸透範囲	m	1.00	1.06	1.09	1.09	1.40	1.09	1.25	
集中定数: $1.0 \times 10^{-3}$ 、割れ目幅0.40mmとした時の縦分散長	m	0.06	0.06	0.06	0.06	0.08	0.06	0.07	
割れ目幅0.19mmとした場合の浸透範囲	m	1.44	1.53	1.58	1.58	2.04	1.58	1.82	
集中定数: $2.0 \times 10^{-3}$ 、割れ目幅0.19mmとした時の縦分散長	m	0.11	0.12	0.13	0.13	0.16	0.13	0.14	
割れ目幅0.40mmとした場合の浸透範囲	m	1.00	1.06	1.09	1.09	1.40	1.09	1.25	
集中定数: $2.0 \times 10^{-3}$ 、割れ目幅0.40mmとした時の縦分散長	m	0.08	0.08	0.09	0.09	0.11	0.09	0.10	

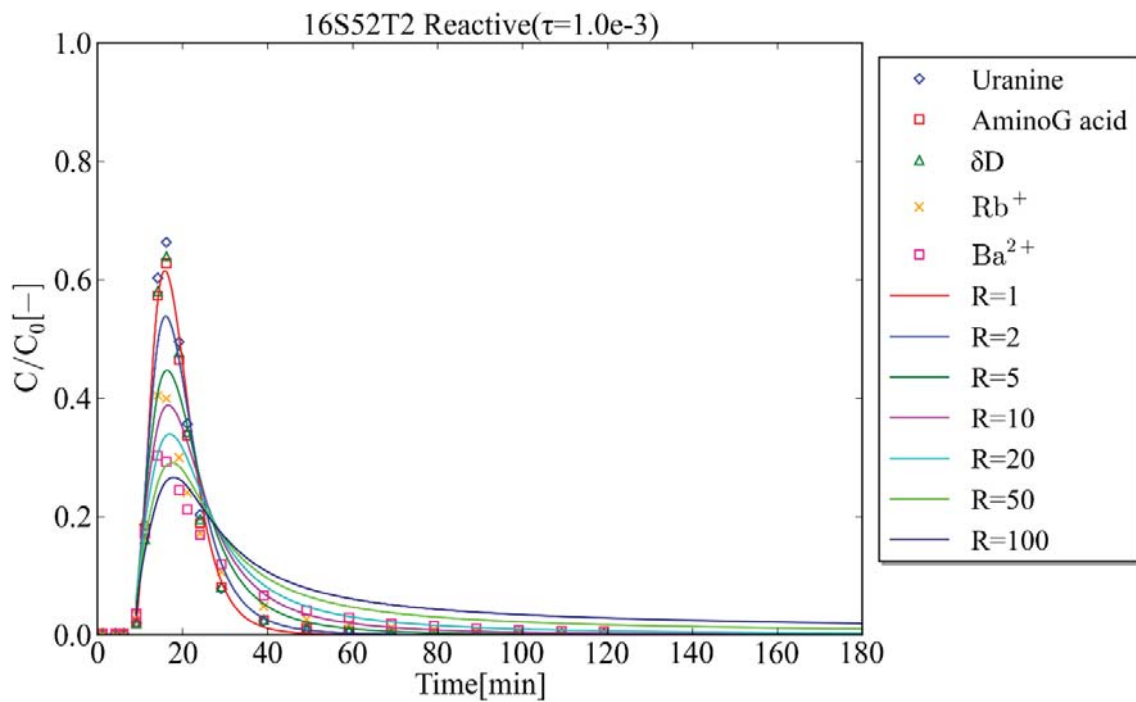
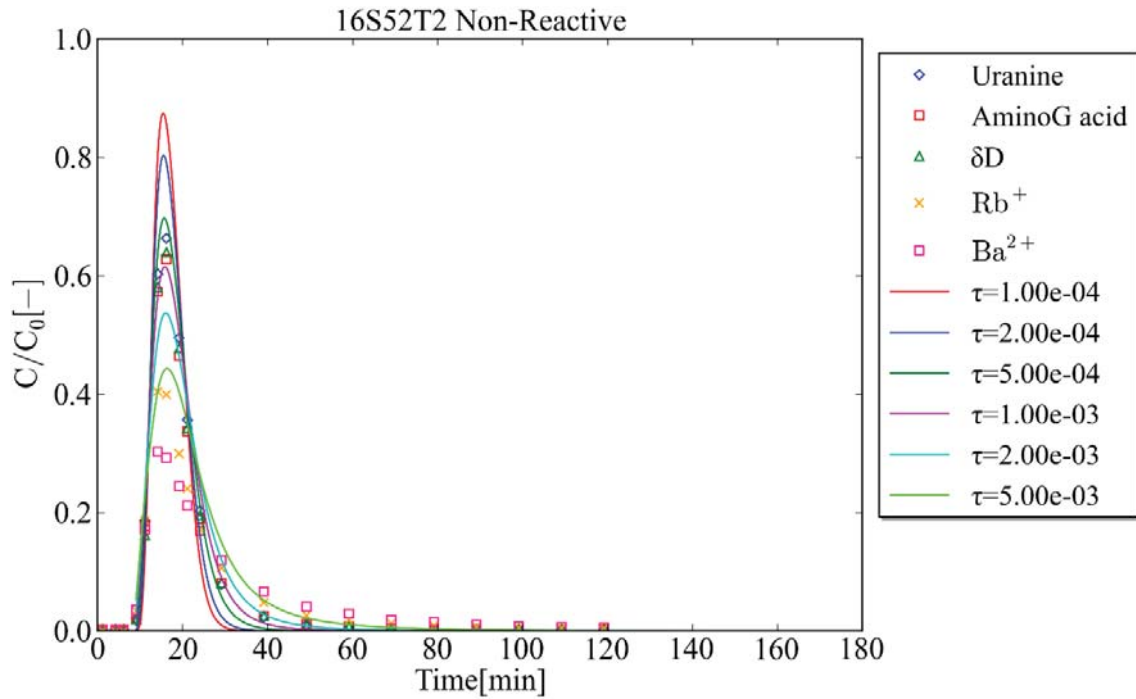


図 4.4.1-6 16S52T2 の理論式による評価

上：非吸着性トレーサー，下：吸着性トレーサー（集中定数を  $1.0e-3$  とした場合）

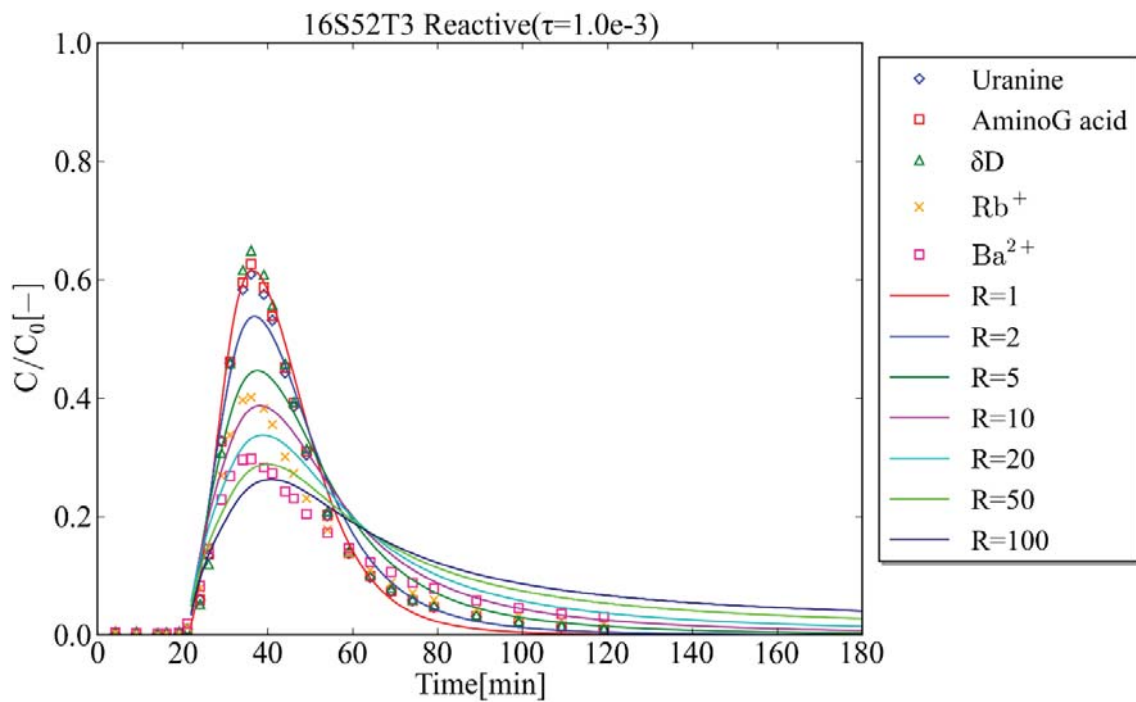
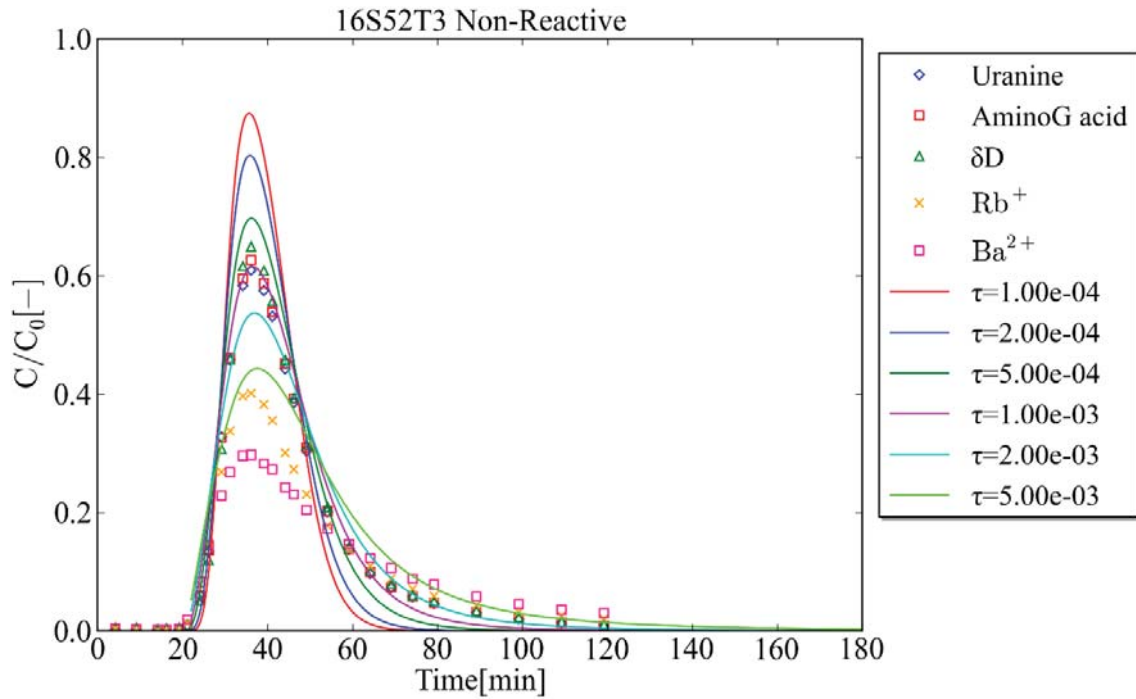


図 4.4.1-7 16S52T3 の理論式による評価

上：非吸着性トレーサー，下：吸着性トレーサー（集中定数を  $1.0e-3$  とした場合）

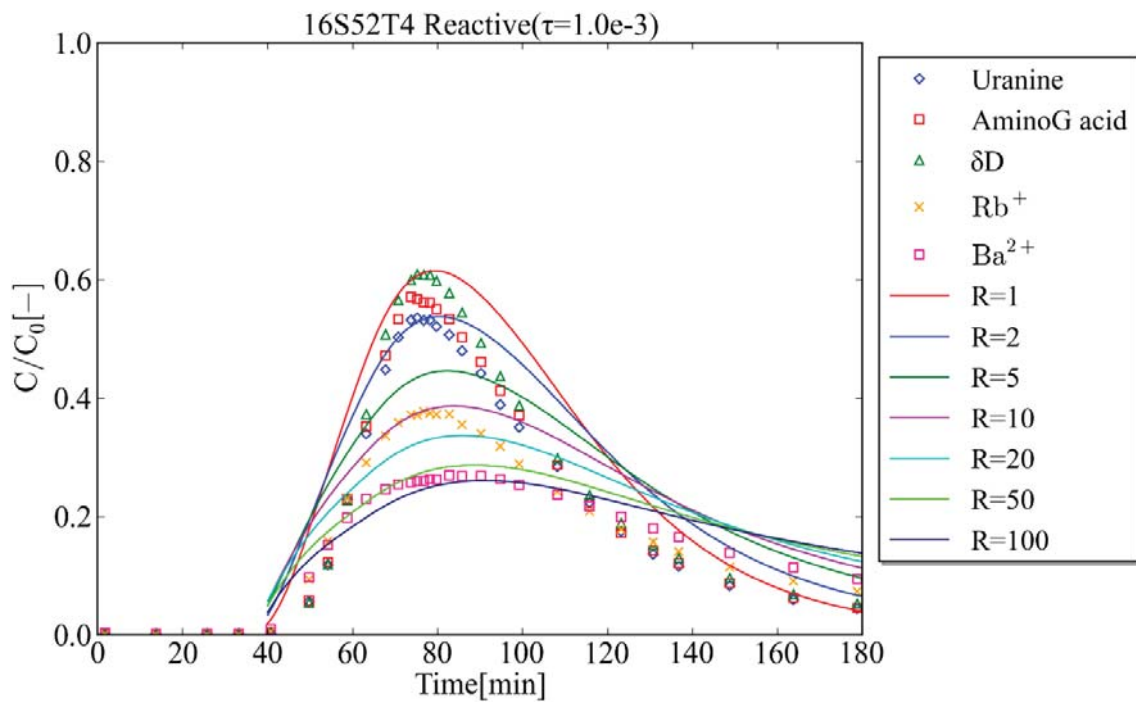
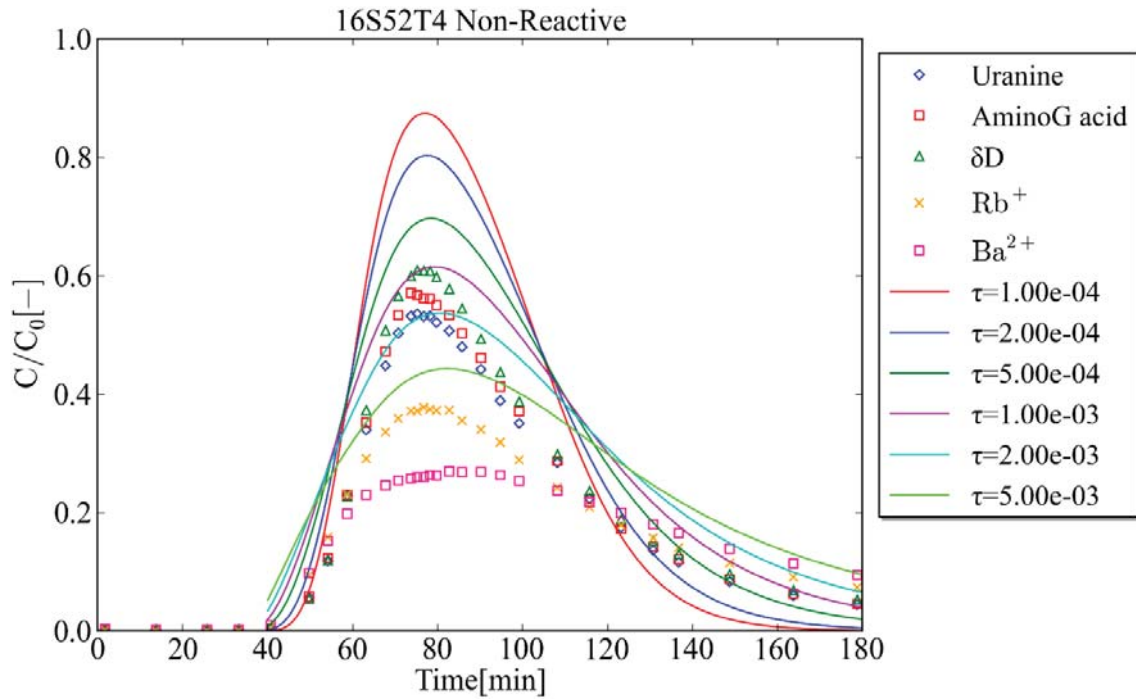


図 4.4.1-8 16S52T4 の理論式による評価

上：非吸着性トレーサー，下：吸着性トレーサー（集中定を  $1.0e-3$  とした場合）

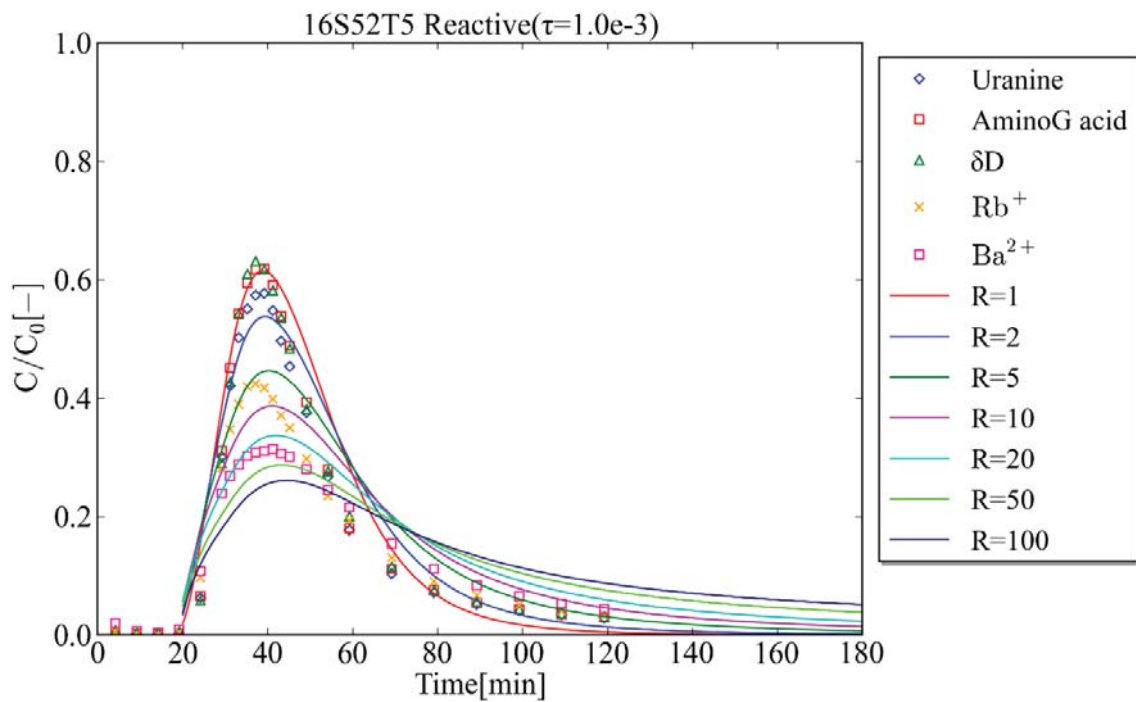
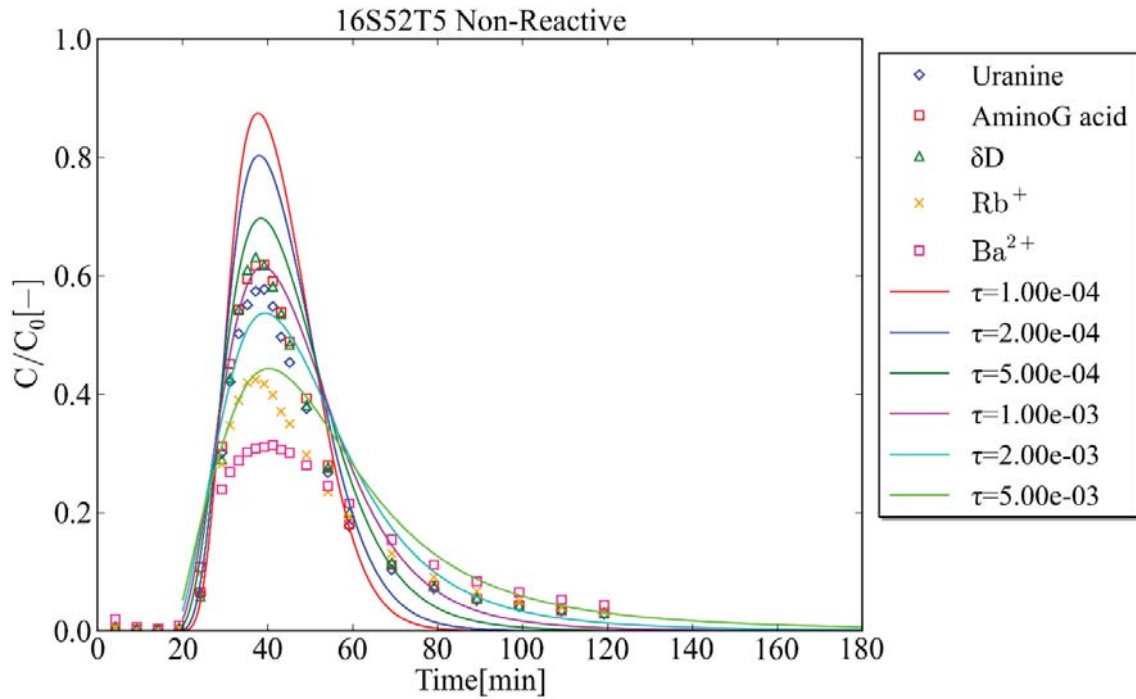


図 4.4.1-9 16S52T4 の理論式による評価

上：非吸着性トレーサー，下：吸着性トレーサー（集中定を  $1.0e-3$  とした場合）

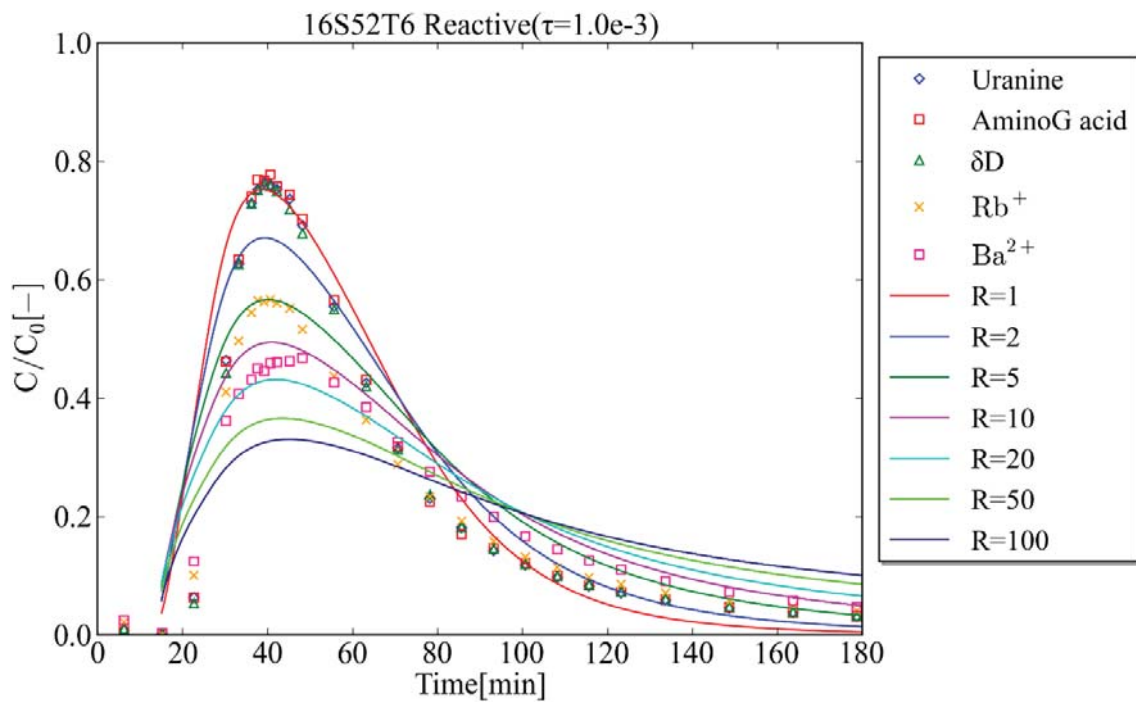
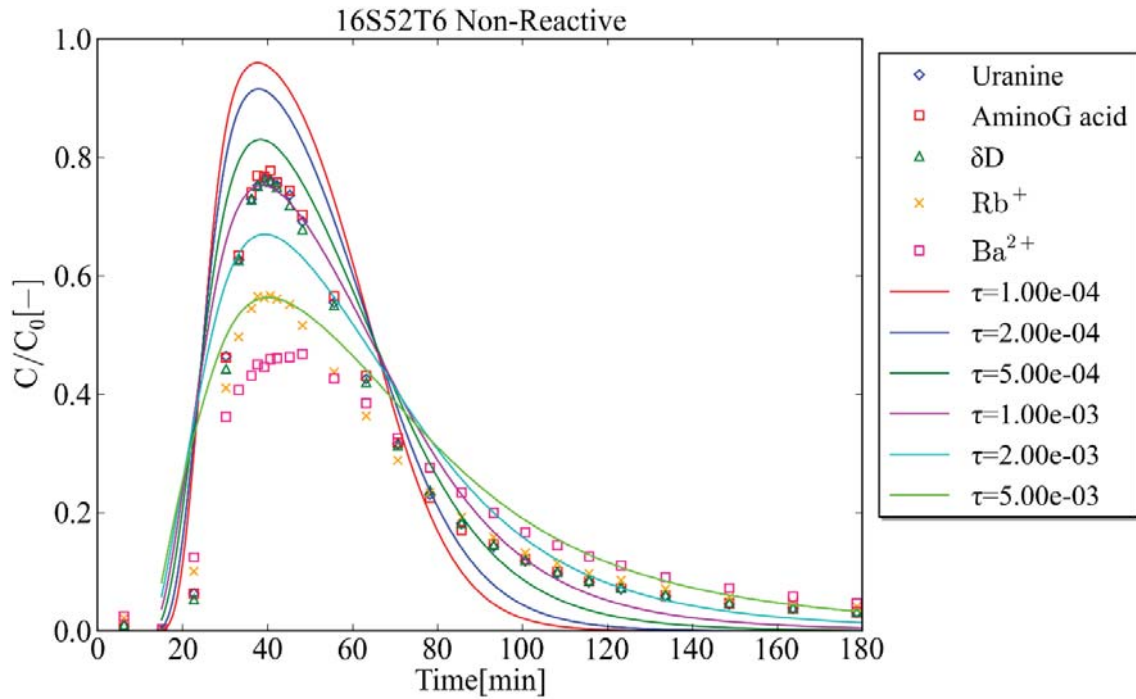


図 4.4.1-10 16S52T6 の理論式による評価

上：非吸着性トレーサー，下：吸着性トレーサー（集中定を  $1.0e-3$  とした場合）



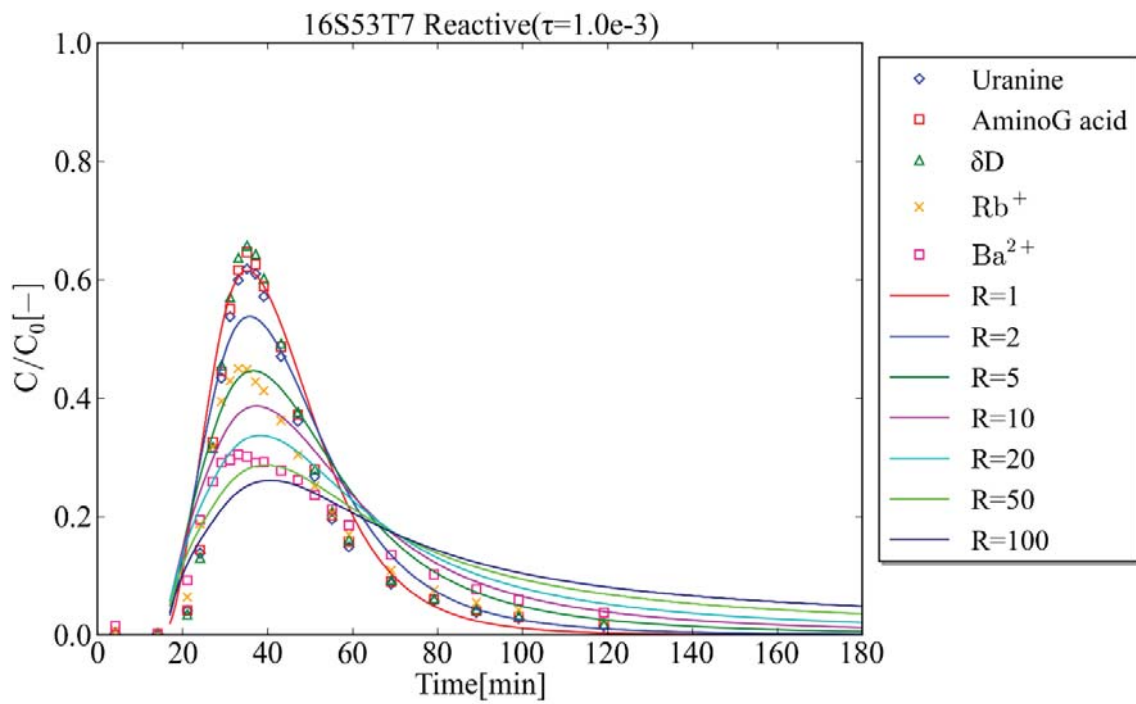
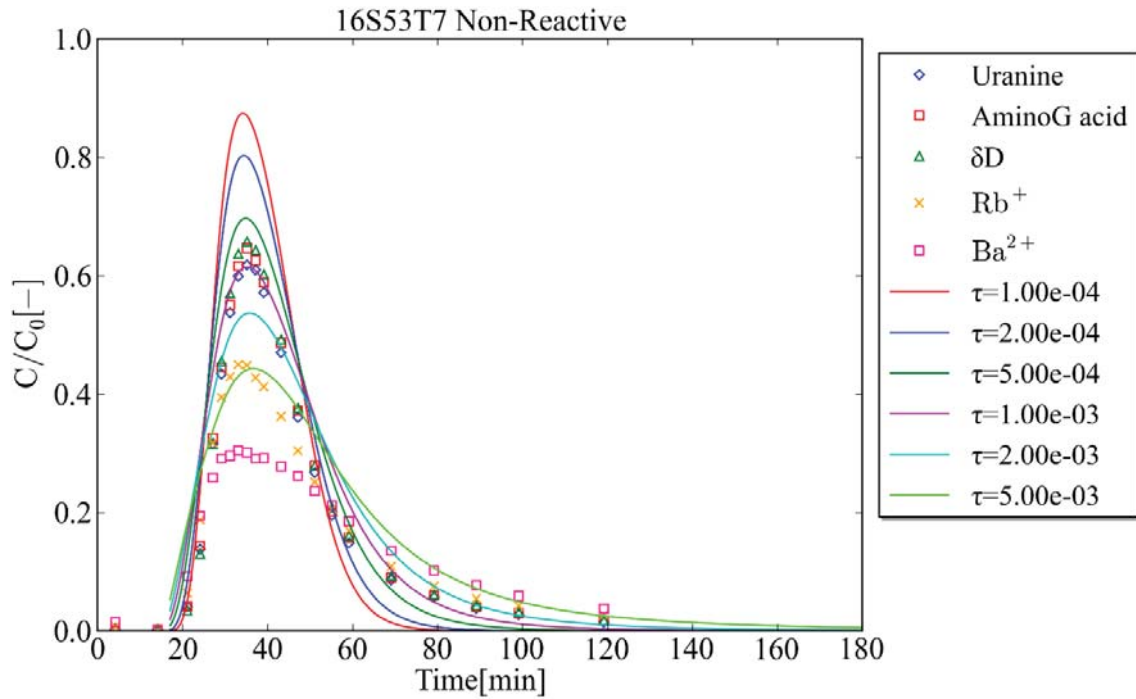


図 4.4.1-11 16S53T7 の理論式による評価

上：非吸着性トレーサー，下：吸着性トレーサー（集中定を  $1.0e-3$  とした場合）

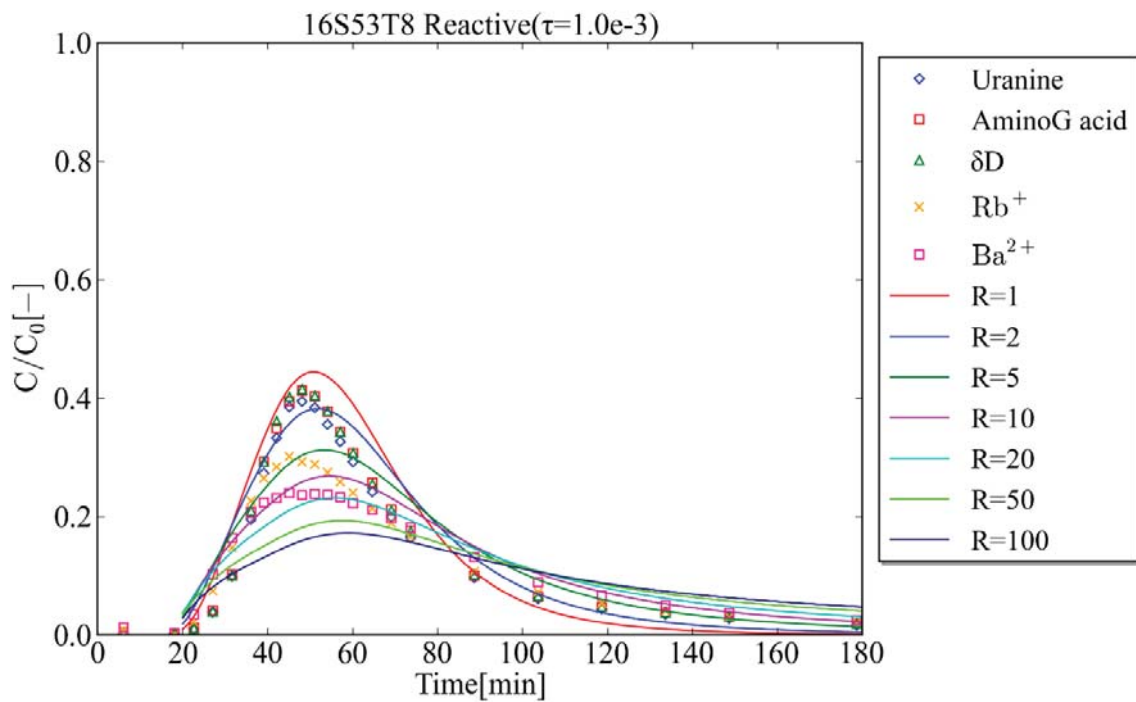
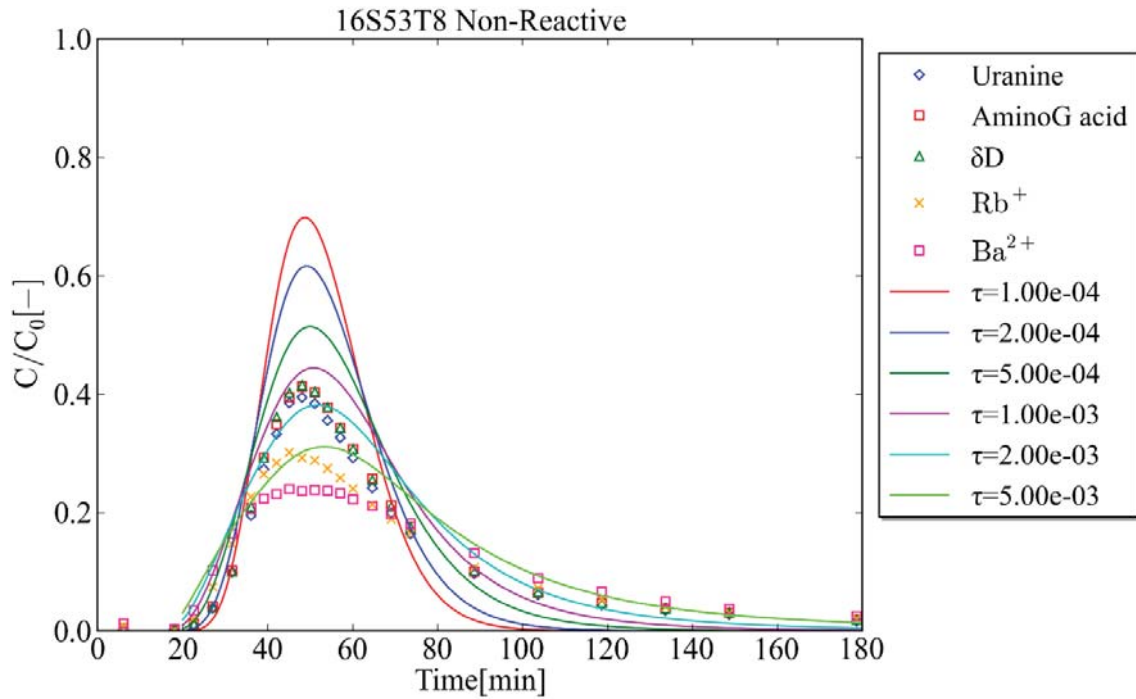


図 4.4.1-12 16S53T8 の理論式による評価

上：非吸着性トレーサー，下：吸着性トレーサー（集中定を  $1.0e-3$  とした場合）

#### 4.4.2 孔間トレーサー試験結果の評価

孔間トレーサー試験の結果について定性的な検討を行った。検討にあたっては、試験で得られた破過曲線に対し、注水区間から試験対象割れ目にトレーサー溶液が注入された時刻を初期時刻とするとともに、坑道内のフラクシオンコレクターではなく孔内の揚水区間での濃度履歴を表すように、時間補正を行った。具体的には、破過曲線の経過時間から注入用装置内の六方バルブから注水ポートまでのトレーサーの移行時間と揚水区間からフラクシオンコレクターまでの移行時間を差し引くとともに、フラクシオンコレクターの分画時間の半分の時間を加えることにより補正した。ただし、揚水区間からフラクシオンコレクターまでの送水チューブ内では移流だけでなく分散も生じるため、このような時間補正をしても破過曲線は実際の揚水孔内の濃度を表すわけではないので、ここではあくまで定性的な議論にとどめる。

注水流量がともに約 3 mL/min で揚水流量が 2 倍程度異なる 16W5352T7 試験と 16W5352T8 試験のウランの破過曲線を比較する (図 4.4.2-1)。揚水流量が小さい 16W5352T8 試験の方が、濃度のピーク時間が遅れるが、比濃度 ( $C/C_0$ ) の最大値は大きくなる。これは、16W5352T8 試験の方が割れ目内の流速は遅いが、揚水に含まれる注入孔由来の水の割合が多くなるためである。そのため、収着性トレーサーを用いて移行時間の長い試験を実施したい場合には、揚水流量を抑えた方が有利となる。ただし、これは今回の試験対象割れ目のバックグラウンドの地下水流れが非常に緩やかであるためで、バックグラウンドの地下水流れが速い割れ目では揚水流量を減らすと回収されるトレーサーが減ってしまう。

次に、注水流量と揚水流量の比 (ダイポール比) がほぼ等しいが、流量が 4 倍程度異なる 16W5253T1 試験と 16W5352T8 試験の破過曲線を比較する (図 4.4.2-2)。今回の対象割れ目のようにバックグラウンドの地下水流れが緩やかな場合、ダイポール比が同じであれば揚水に占める注入孔由来の水の割合は同じとなるが、流量の小さい 16W5352T8 試験の方が流れが遅いため濃度のピーク時間は遅く、比濃度の最大値も低くなっている。収着性トレーサーを用いて移行時間の長い試験を実施したい場合には流量を減らすことになるが、回収濃度が下がるという問題点が生じることになる。

流量がほぼ同じでトレーサー溶液の注入時間が 3 倍異なる 16W5253T3 試験と 16W5253T4-6 試験、16W5352T12 試験と 16W5352T13-15 試験の破過曲線を比較する (図 4.4.2-3)。いずれの場合にも、トレーサー溶液の注入時間を増やすと、揚水の比濃度の最大値が大きくなる。したがって、揚水中のトレーサー濃度を高めるためには、トレーサーの注入時間を増やすことが有効な対策となる。

収着性トレーサーも用いた試験で流量がほぼ同じでトレーサー溶液の注入時間が 24 倍異なる 16W5352T13-15 試験と 16W5352T16-18 試験の破過曲線を比較する (図 4.4.2-4)。図より、トレーサー注入時間を 1 時間とした 16W5352T13-15 試験では、非収着性のウランでも回収孔濃度は定常に達していない。一方、トレーサー注入時間を 24 時間とした 16W5352T16-18 試験では、回収孔のウラン濃度はほぼ定常に達している。トレーサー注入時間を大きく増やしたことで、収着性の  $Rb^+$  や  $Ba^{2+}$  の回収濃度は 16W5352T13-15 試験に比べ数倍になっているが、定常には達していない。

非収着性物質のウラニンの他に収着性物質の  $Rb^+$  や  $Ba^{2+}$  も使用しトレーサー溶液の注入時間がともに 60 分で流量の異なる 16W5253T4-6 試験と 16W5352T13-15 試験の破過曲線を比較した(図 4.4.2-5)。流量(特に揚水流量)の小さい 16W5352T13-15 試験の方が揚水のトレーサー濃度のピーク時刻は遅れるが、非収着性トレーサーであるウラニンと収着性トレーサーとの比濃度の最大値の比や遅延係数に差はみられなかった。

単孔トレーサー試験結果との比較では、孔間トレーサー試験ではトレーサーの回収濃度が低く、トレーサー溶液を 24 時間注入し続けた 16W5352T16-18 試験の非収着性トレーサーでさえ比濃度の最大値は 0.4 程度である。これは、単孔トレーサー試験では、比濃度が最大となる時間の揚水はほぼすべてが試験で注入した水であるのに対して、孔間トレーサー試験では注入した水以外の地下水が多く揚水に含まれるためである。また、単孔トレーサー試験では、収着性トレーサーの濃度ピーク時間は非収着性トレーサーに比べほとんど遅れがなく、比濃度の最大値も収着性の強い  $Ba^{2+}$  でも非収着性トレーサーのせいぜい 1/2 程度の低減にとどまっている。一方、孔間トレーサー試験では、トレーサー溶液を長時間注入し続けた 16W5352T9-11 試験や 16W5352T16-18 試験を除き、 $Ba^{2+}$  では濃度ピーク時間は非収着性トレーサーの 2 倍以上と遅れており、比濃度の最大値も非収着性トレーサーの約 1/4~1/6 になっている。これは、単孔試験では収着性トレーサーは試験孔付近にとどまるため回収しやすいのに対し、孔間試験では孔間を移動しないと回収されないためである。

試験名		16W5352T7	16W5352T8
注入孔		15MI53	15MI53
揚水孔		15MI52	15MI52
注水流量 $Q_{inj}$	mL/min	2.98	3.01
揚水流量 $Q_{pum}$	mL/min	25.41	13.16
ダイポール比 $Q_{pum}/Q_{inj}$	-	8.53	4.37
トレーサー注入時間	min	20	20

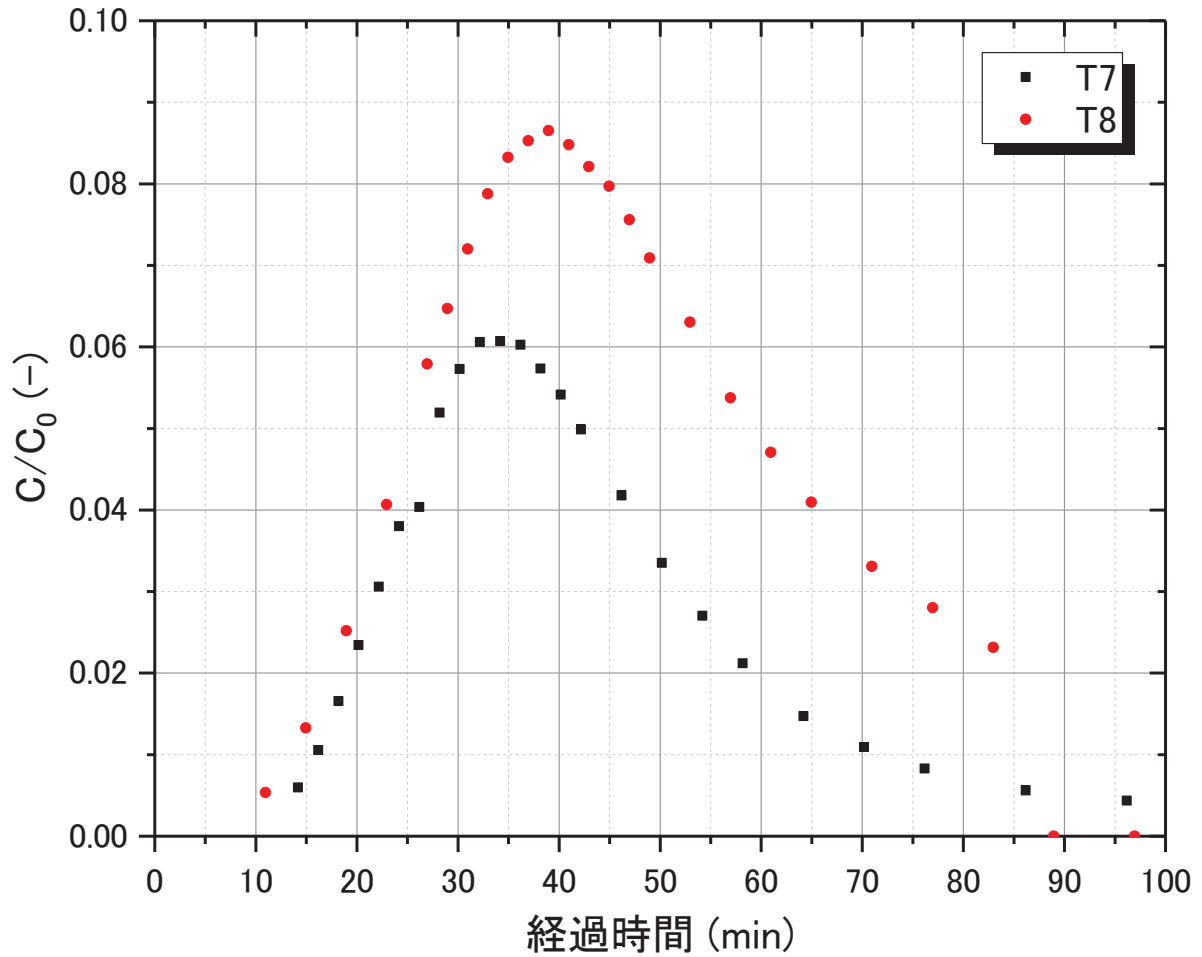


図 4.4.2-1 揚水流量の影響

試験名		16W5253T1	16W5352T8
注入孔		15MI52	15MI53
揚水孔		15MI53	15MI52
注水流量 $Q_{inj}$	mL/min	12.18	3.01
揚水流量 $Q_{pum}$	mL/min	51.59	13.16
ダイポール比 $Q_{pum}/Q_{inj}$	-	4.24	4.37
トレーサー注入時間	min	20	20

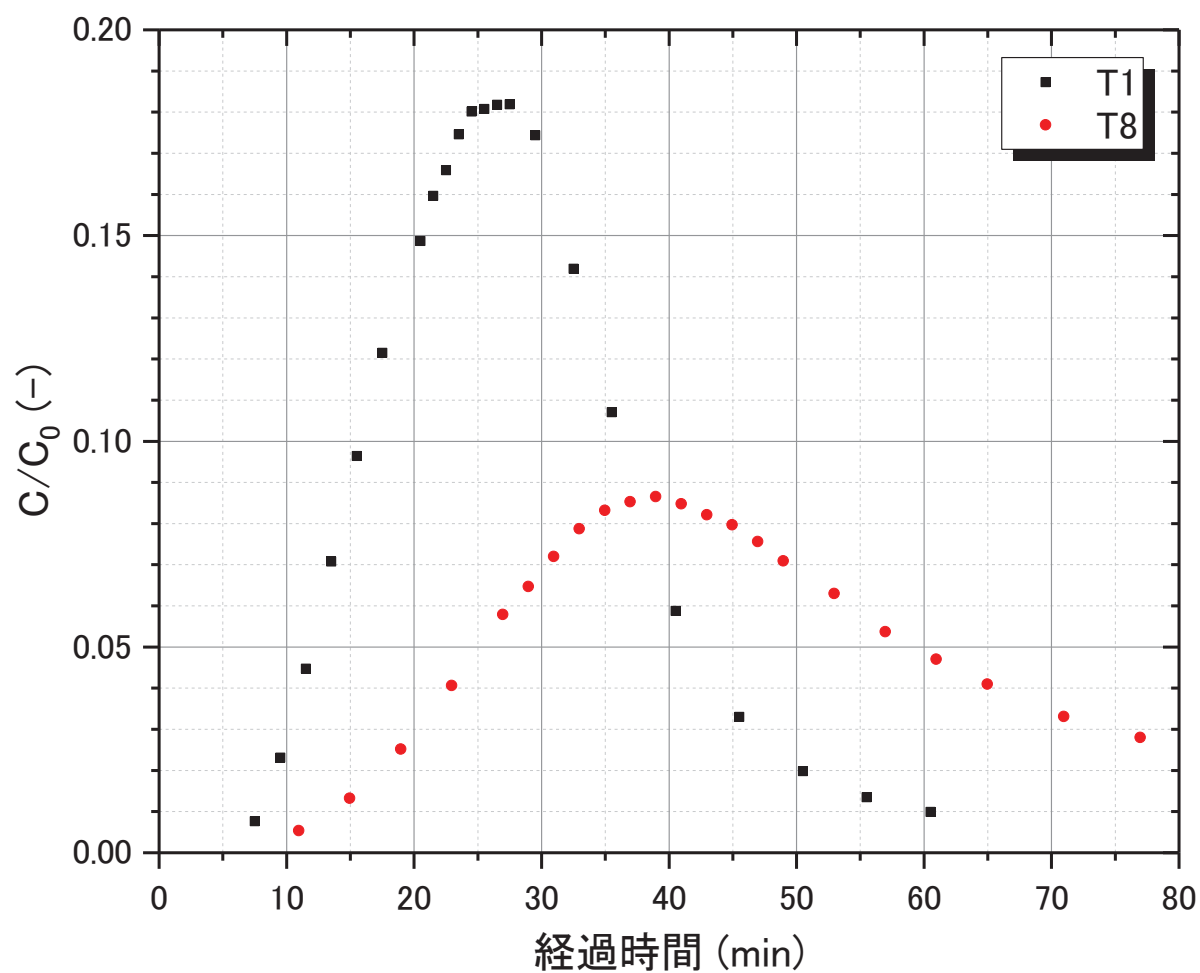


図 4.4.2-2 同一ダイポール比の場合の流量の影響

試験名		16W5253T3	16W5253T4-6	16W5352T12	16W5352T13-15
注入孔		15MI52	15MI52	15MI53	15MI53
揚水孔		15MI53	15MI53	15MI52	15MI52
注水流量 $Q_{inj}$	mL/min	3.17	2.90	2.08	1.97
揚水流量 $Q_{pum}$	mL/min	26.14	26.12	5.83	5.24
ダイポール比 $Q_{pum}/Q_{inj}$	-	8.25	9.01	2.80	2.66
トレーサー注入時間	min	20	60	20	60

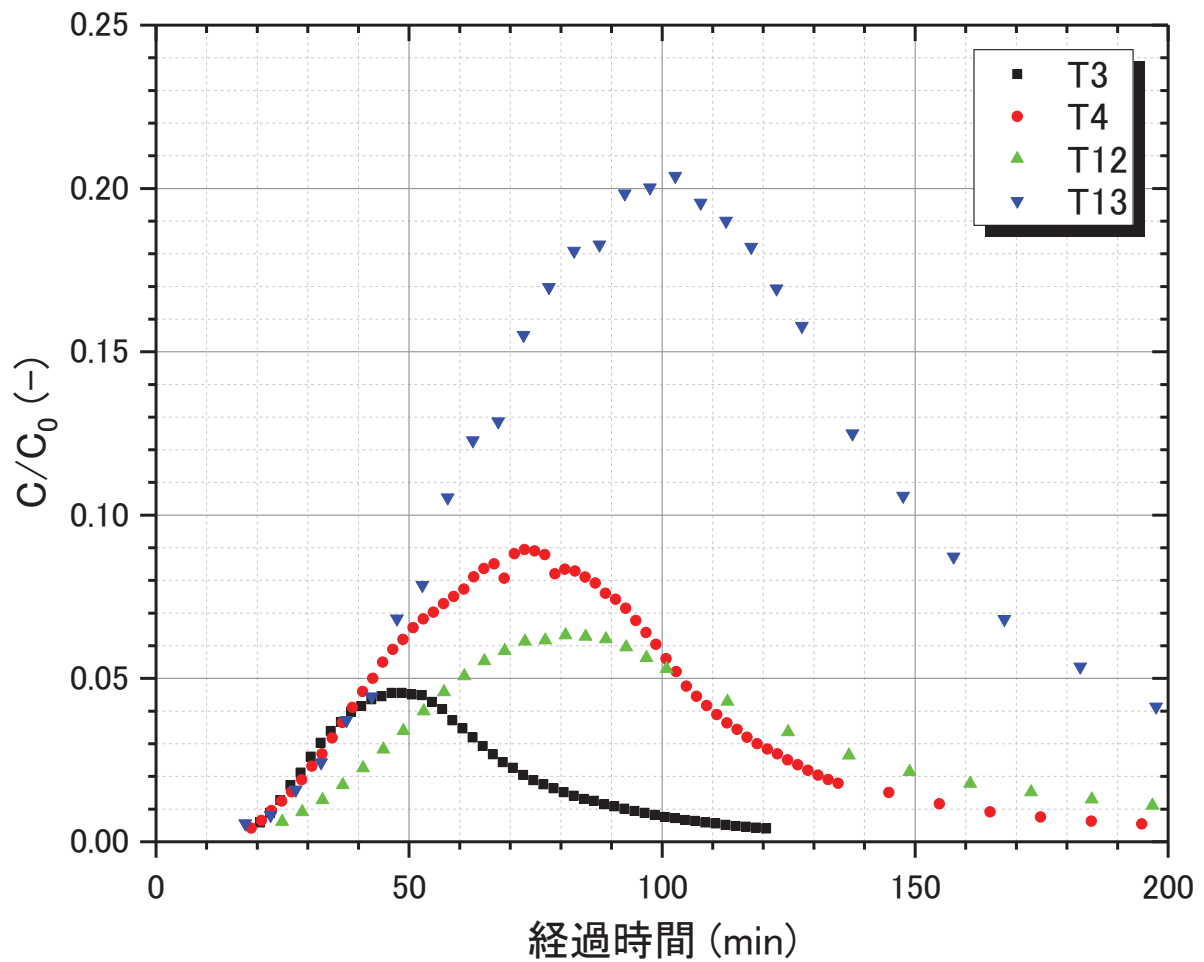


図 4.4.2-3 トレーサー注入時間の影響

試験名		16W5352T13-15	16W5352T16-18
注入孔		15MI53	15MI53
揚水孔		15MI52	15MI52
注水流量 $Q_{inj}$	mL/min	1.97	1.78
揚水流量 $Q_{pum}$	mL/min	5.24	6.18
ダイポール比 $Q_{pum}/Q_{inj}$	-	2.66	3.47
トレーサー注入時間	min	60	1440

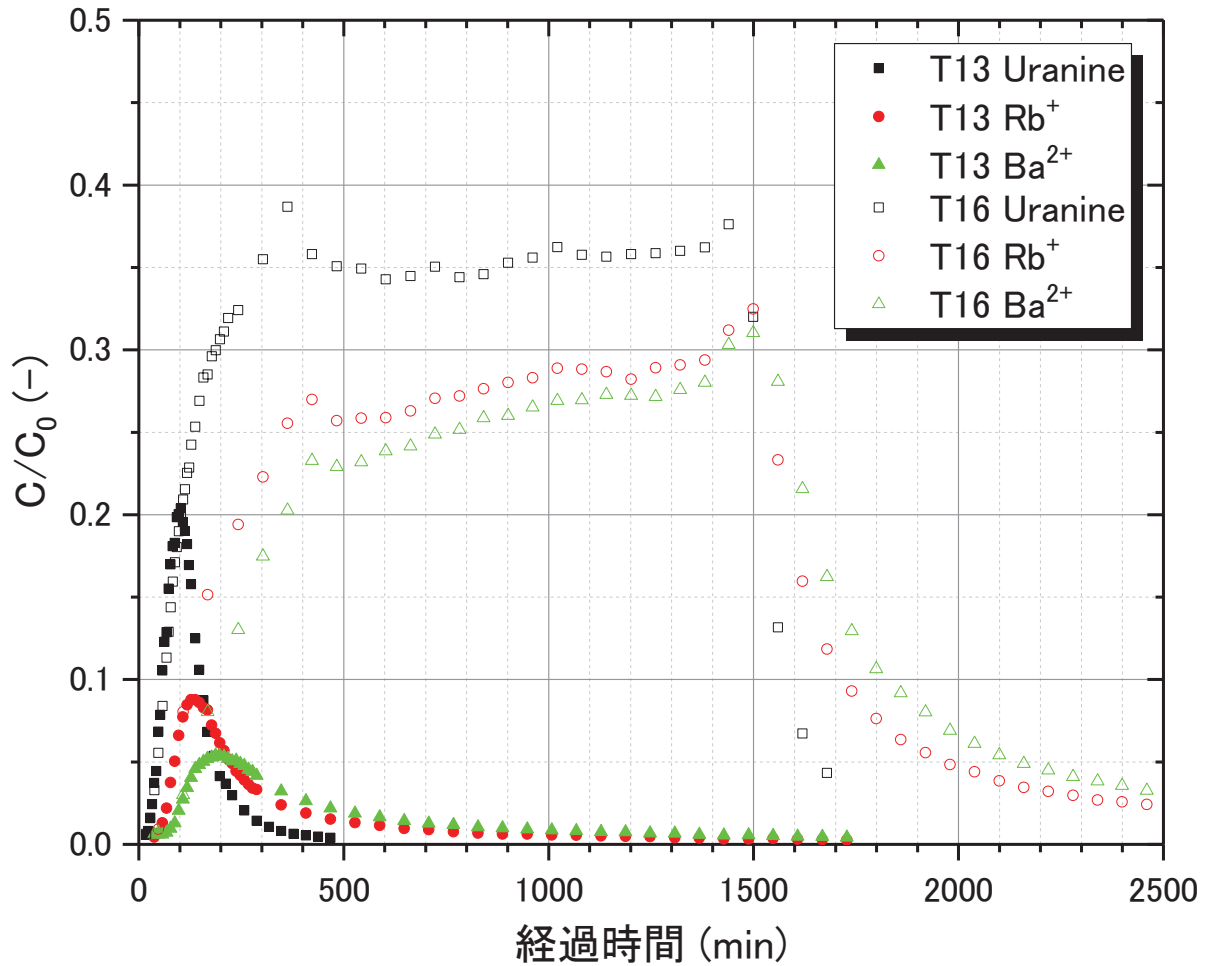


図 4.4.2-4 吸着性トレーサーを用いた試験での注入時間の影響



試験名		16W5253T4-6	16W5352T13-15
注入孔		15MI52	15MI53
揚水孔		15MI53	15MI52
注水流量 $Q_{inj}$	mL/min	2.90	1.97
揚水流量 $Q_{pum}$	mL/min	26.12	5.24
ダイポール比 $Q_{pum}/Q_{inj}$	-	9.01	2.66
トレーサー注入時間	min	60	60

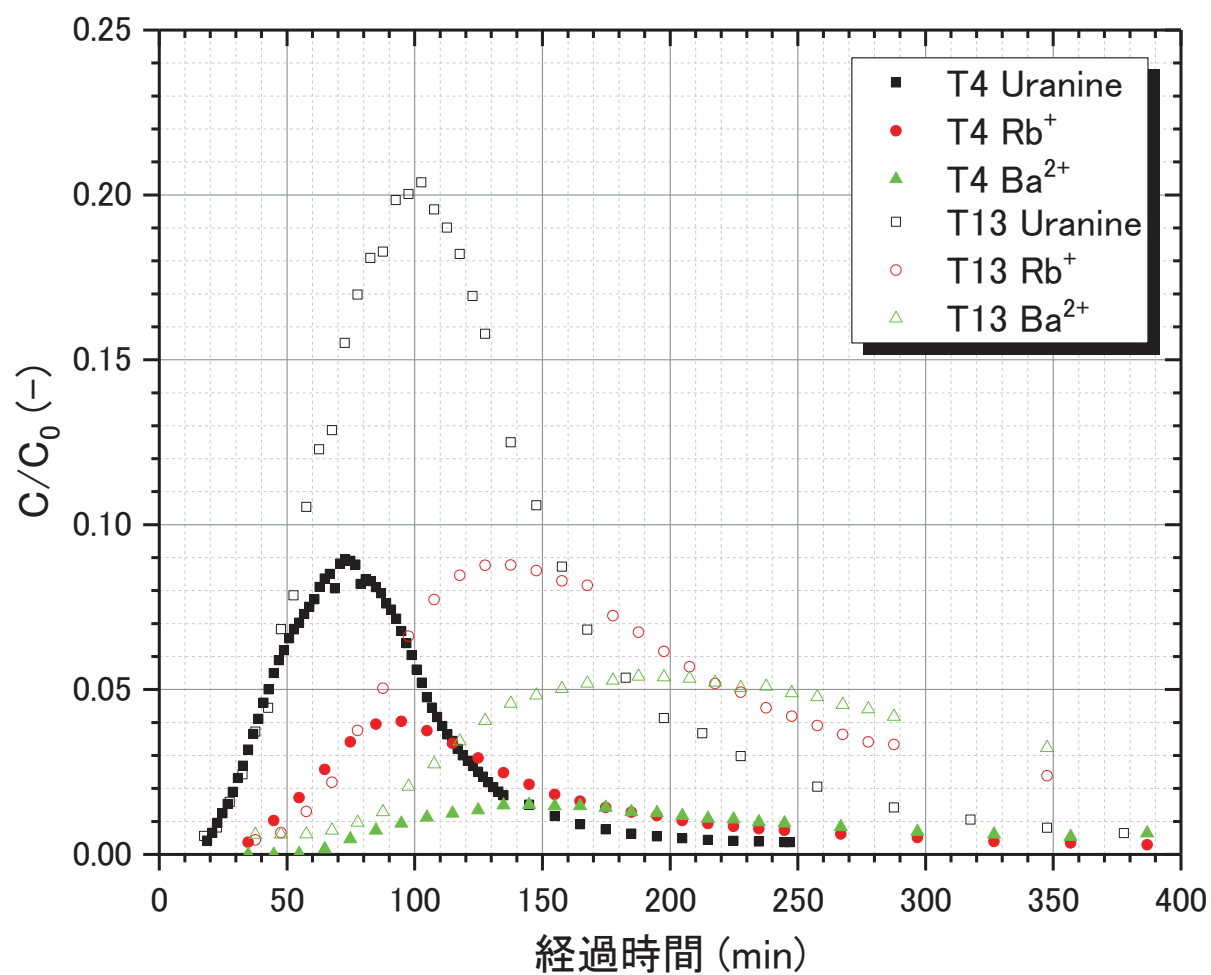


図 4. 4. 2-5 収着性トレーサーを用いた試験での流量の影響

#### 4.5 トレーサー試験の評価解析

##### 4.5.1 単孔トレーサー試験の評価解析

###### (1) 概要

数値解析を用いて評価解析を行い、試験で得られた破過曲線を再現するような物質移行パラメーターを評価する。数値解析コードとして、(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/FERM を用いた(河西ほか(1994)、河西ほか(1995))。FEGM/FERM は、空間の離散化については有限要素法を、時間の離散化については差分法が用いられており、オイラー座標系で記述されている。FEGM における地下水流動に関する基礎方程式は以下の通りである。

$$\left(\theta\beta + \frac{\theta}{\varphi}\alpha + \frac{\partial\theta}{\partial h}\right)\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}V_i + Q = 0 \quad (4.5.1-1)$$

$$\text{ここで、} \quad V_i = -k_r K_{ij} \frac{\partial H}{\partial x_j} \quad (4.5.1-2)$$

ここに、 $\theta$  : 体積含水率[L<sup>3</sup>/L<sup>3</sup>]、 $\beta$  : 流体の修正圧縮係数[1/L]、 $\varphi$  : 間隙率[-]、 $\alpha$  : 媒体の修正圧縮係数[1/L]、 $h$  : 圧力水頭[L]、 $t$  : 時間[T]、 $x_i$  : 座標[L]、 $V_i$  : ダルシー流速[L/T]、 $Q$  : 湧排水率[L<sup>3</sup>/L<sup>3</sup>T]、 $k_r$  : 相対透水係数[-]、 $K_{ij}$  : 飽和係数テンソル[L/T]、 $H$  : 全水頭[L]を表す。

FEGM/FERM における物質移行に関する基礎方程式は、以下の通りである。

$$\begin{aligned} (\theta + \rho_d K_d) \frac{\partial C}{\partial t} + \left\{ \frac{\partial\theta}{\partial t} + \alpha(\theta + \rho_d K_d) \frac{\partial h}{\partial t} \right\} C \\ - \frac{\partial}{\partial x_i} \theta D_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} C + \frac{\partial}{\partial x_i} V_i C + M = 0 \end{aligned} \quad (4.5.1-3)$$

$$\text{ここで、} \quad \theta D_{ij} = \alpha_T \|\mathbf{V}\| \delta_{ij} + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{V_i V_j}{\|\mathbf{V}\|} a_m \tau \delta_{ij} \quad (4.5.1-4)$$

ここに、 $\rho_d$  : 媒体のみかけ密度[M/L<sup>3</sup>]、 $K_d$  : 分配係数[L<sup>3</sup>/M]、 $C$  : 物質濃度[M/L<sup>3</sup>]、 $D_{ij}$  : 分散係数テンソル[L<sup>2</sup>/T]、 $M$  : 物質のソース[M/T]、 $\alpha_T$  : 流れ方向に直交する方向の分散長(横分散長) [L]、 $\alpha_L$  : 流れ方向の分散長(縦分散長) [L]、 $\mathbf{V}$  : ダルシー流速ベクトル、 $\delta_{ij}$  : クロネッカーのデルタ、 $a_m$  : 分子拡散係数[L<sup>2</sup>/T]、 $\tau$  : 屈曲率[-]を表す。

式(4.5.1-3)に示したように、FEGM/FERM では、吸着による遅延効果が分配係数として与えられる。今回の評価解析では遅延係数を評価するため、式(4.5.1-5)、(4.5.1-6)を用いて遅延係数を分配係数に変換して与えることとする。

$$R = 1 + \frac{\rho_d K_d}{\varphi} \quad (4.5.1-5)$$

$$\Leftrightarrow K_d = \frac{\varphi(R-1)}{\rho_d} \quad (4.5.1-6)$$

## (2) 評価方法

### a. 概要

単孔トレーサー試験の評価解析で用いる解析モデルを図 4.5.1-1 に示す。試験結果において  $\delta$  D と蛍光染料の破過曲線に有意な差が無いことから、マトリクスへの拡散はほとんど生じていないと考えられる。以上のことから、ボーリング孔 ( $\phi$  86mm) に相当する部分を除いた半径 30m の円柱型モデルを用いる。本モデルにおいては、Z 軸方向の厚みが割れ目幅に相当する。節点数は 12,096、要素数は 5,976 である。

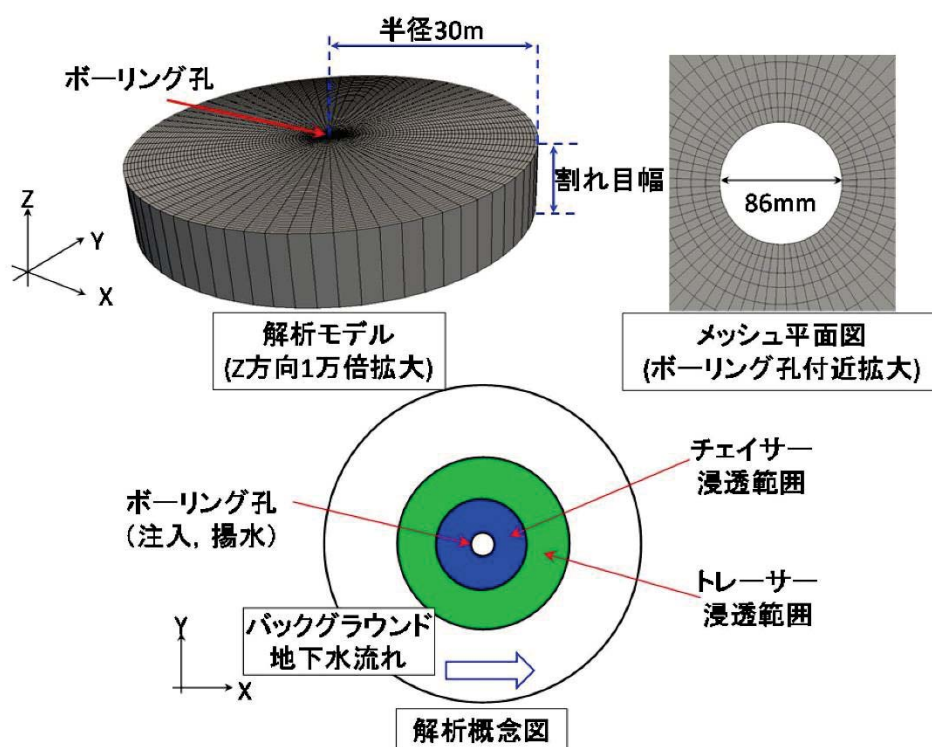


図 4.5.1-1 単孔トレーサー試験の評価解析で用いる解析モデル

### b. 解析手順

FEGM/FERM による数値解析は、原位置試験の試験手順に基づき、以下の手順で行う。

- ① 定常解析：水を定流量で注入する。
- ② トレーサーとチェイサーの注入（非定常解析）：トレーサーを定流量で一定時間注入する。
- ③ トレーサーの回収（非定常解析）：定流量で揚水しトレーサーの回収を行う。

各手順では、一つ前の解析手順で得られた結果を初期条件とする。浸透流解析では、注入や揚水に関する条件はボーリング孔を構成する全ての節点に固定流量条件を与える。また、バックグラウンド地下水流れは x 方向に一樣な流れを想定し、モデル境界に位置する節点の座標から任意の動水勾配となるような圧力を計算で求め、固定圧力条件として与える。移流分散解析では、トレーサーやチェイサーの注入はボーリング孔を構成する全ての節点に固定濃度フラックス条件

として与える。

昨年度の試験では、トレーサー試験装置内に設置されたトレーサー循環バルブに不具合が生じ、坑道に設置されたトレーサー置換タンクから試験区間に直接トレーサーを注入した。このため、注入時のチューブ分散の影響が大きいことが予想されたため、チューブ内の分散の影響を考慮したトレーサーの経時変化を注入フラックスとして与えた。一方、今年度の試験では改良されたトレーサー循環バルブが良好に動作し、チューブ分散の影響をほとんど受けずにトレーサーを注入することができた。従って、評価解析を行う際は、注入時のチューブ分散は考慮せず、トレーサー注入時は濃度を 1 とし、チェイサー注入に切り替えた場合に濃度が瞬時に 0 となるようにトレーサー注入条件をフラックスとして与えることとした。ここでは、15MI52 号孔で行った試験のうち、16S52T2、15S52T3、15S52T4、15S52T5、15S52T6 の試験について評価を行う。

#### c. 誤差計算方法

数値計算終了後、揚水時において解析モデル内に残存するトレーサーの変化量と揚水流量から破過曲線を作成する。次に、得られた破過曲線についてチューブ分散の補正計算を行う。この時、チューブ長は原位置試験と同じチューブ長（16S52T2 は 58.54m、それ以外は 58.46m）とし、分散長はチューブ長の 1/100 の値、流速は揚水流量をチューブ断面積（内径 4mm、12.56mm<sup>2</sup>）で割った値とする。ここで、ポンプのデッドボリューム 80mL を考慮した補正計算にはなっていないが、試行的に補正計算を行ったところポンプのデッドボリューム 80mL を考慮したとしても解析結果のピーク時間が試験結果のピーク時間に比べて明らかに早く表れる結果となった。この要因は定かではないが、チューブ継手、バルブ部、フラクションコレクター内の電磁バルブ等で断面積が一樣でないことが関係していると考えられる。このことから、先に述べたチューブ分散補正計算を行った後、試験結果のピーク時間と補正後の破過曲線のピーク時間が合うように分散の計算は行わず時間の補正計算のみを行って誤差を評価することとした。試験結果と評価解析結果の誤差は、濃度による重みを考慮し、次式を用いて計算する。

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sum \sqrt{C_1 \times (C_1 - C_2)^2} \quad (4.5.1-7)$$

ここに、 $\varepsilon$ ：誤差[-]、 $N$ ：データ数、 $C_1$ ：試験結果の破過曲線の濃度、 $C_2$ ：数値解析で得られた結果をチューブ分散補正して得られた濃度を表す。

### (3) 非収着性トレーサーの評価解析

#### a. 解析条件

非収着性トレーサーの評価解析では、集中定数を 10 通り、単位幅辺りのバックグラウンド地下水流量（以下、単に地下水流量と呼ぶ）を 8 通り、合計 80 通りの計算を行い（表 4.5.1-1）、それぞれについて誤差を計算することとした。単孔トレーサー試験では割れ目幅と縦分散長を区別して評価することができず集中定数として評価するが、解析では割れ目幅と縦分散長を個別に与えなければならない。そこで、本解析では 15MI52 号孔の試験対象割れ目を対象とした高精度 BTV 観察によって得られた割れ目幅 0.19mm を用いてモデルを作成し、表 4.5.1-1 に示した集中定数から縦分散長を計算によって求め解析条件として与える。また、地下水流量については透水量係数を固定し動水勾配を変化させることで変化させた。今回の評価解析では、 $\delta D$  の破過曲線について誤差を計算することとした。

表 4.5.1-1 非収着性トレーサーの評価解析条件

集中定数 $\tau$ [-] (10 通り)	3.0e-3, 2.0e-3, 1.7e-3, 1.5e-3, 1.2e-3, 1.0e-3, 8.0e-4, 5.0e-4, 3.0e-4, 1.0e-4
単位幅当たりの バックグラウンド地下水流量 $q_f$ [mL/min/m] (8 通り)	0.0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 7.0, 10.0

#### b. 解析結果

非収着性トレーサーの評価解析結果として、誤差分布と最も誤差が小さい集中定数と地下水流量の組み合わせの場合の破過曲線を図 4.5.1-2～図 4.5.1-6 に示す。誤差分布は、縦軸を地下水流量、横軸を集中定数とし、正規化した誤差でコンターマップを作成した。評価解析の結果、いずれの試験条件においても集中定数が 3.0e-4～5.0e-4 程度、地下水流量が 2～3mL/min/m 程度となる組み合わせで誤差が小さくなる傾向となり、破過曲線の再現性についてはいずれも良好であった。

ここで、割れ目幅を 0.19mm と仮定し、集中定数から縦分散長を計算により求めた結果を表 4.5.1-2 に整理する。なお、間隙率は 1.0 とした。今回評価解析を行った試験条件では、トレーサーとチェイサーを合計 1.5～2.5L 程度注入しており、平行平板モデルを仮定すると浸透範囲は 1.6～2.1m 程度と予測される。一方、式(4.5.1-8) に示したように、集中定数から逆算される縦分散長は、集中定数が 3.0e-4～5.0e-4 とすると 0.05～0.08m となる。過去の研究によって、縦分散長はトレーサー移行距離の 1/100～1/10 程度となることが経験的に知られており、今回評価された値は大きく外れていないことから妥当な結果が得られたと言える。

$$\Leftrightarrow \tau = \frac{\alpha_L^2 b \phi}{V_{inj}} \quad \Leftrightarrow \alpha_L = \frac{\tau V_{inj}}{b \phi} \quad (4.5.1-8)$$

表 4.5.1-2 割れ目幅を仮定した場合の集中定数と縦分散長の関係

集中定数	注入量	割れ目幅	浸透範囲	縦分散長
-	L	mm	m	m
3.00E-04	1.5	0.19	1.59	0.05
3.00E-04	2.5	0.19	2.05	0.06
5.00E-04	1.5	0.19	1.59	0.06
5.00E-04	2.5	0.19	2.05	0.08
8.00E-04	1.5	0.19	1.59	0.08
8.00E-04	2.5	0.19	2.05	0.10
1.00E-03	1.5	0.19	1.59	0.09
1.00E-03	2.5	0.19	2.05	0.11

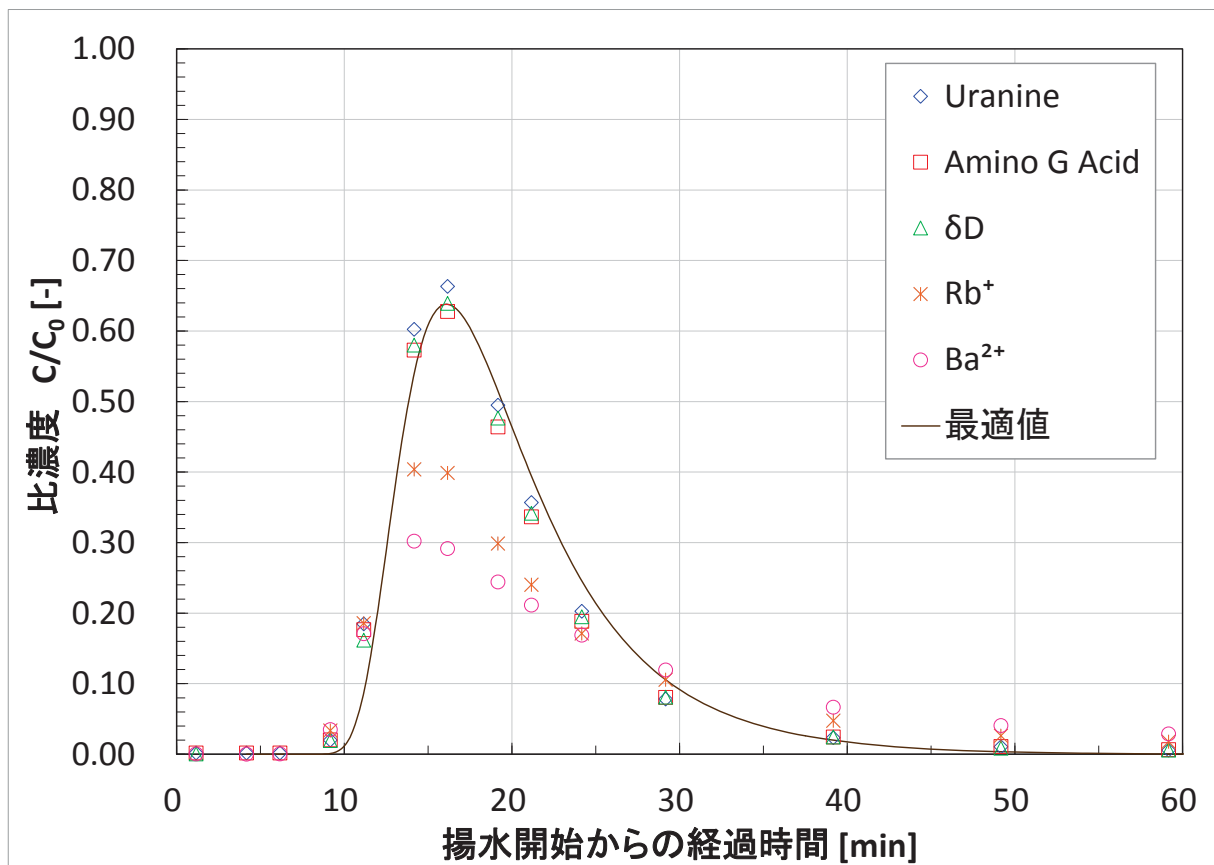
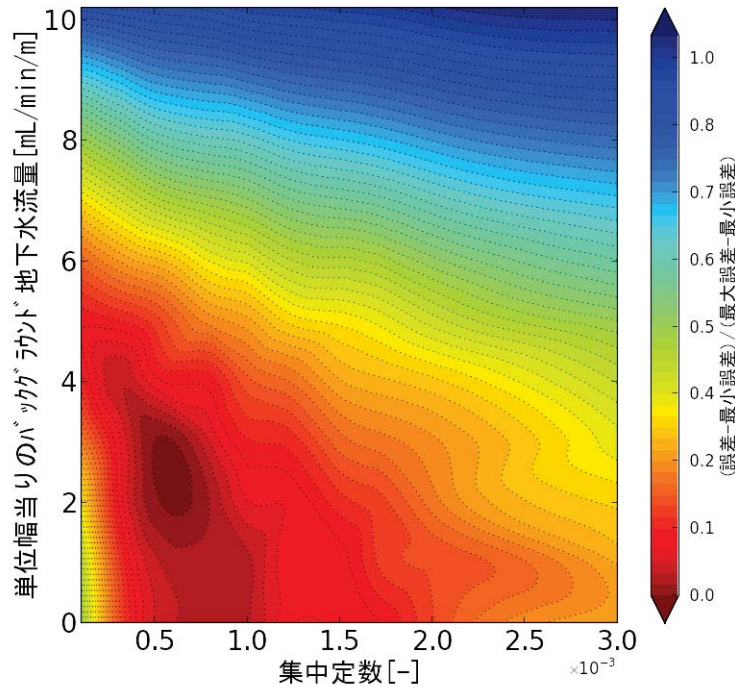


図 4.5.1-2 非吸着性トレーサー評価結果：16S52T2

上：誤差分布、下：最小誤差時の評価結果 ( $\tau=5.0e-4$ ,  $q_f=3.0\text{mL/min/m}$ )

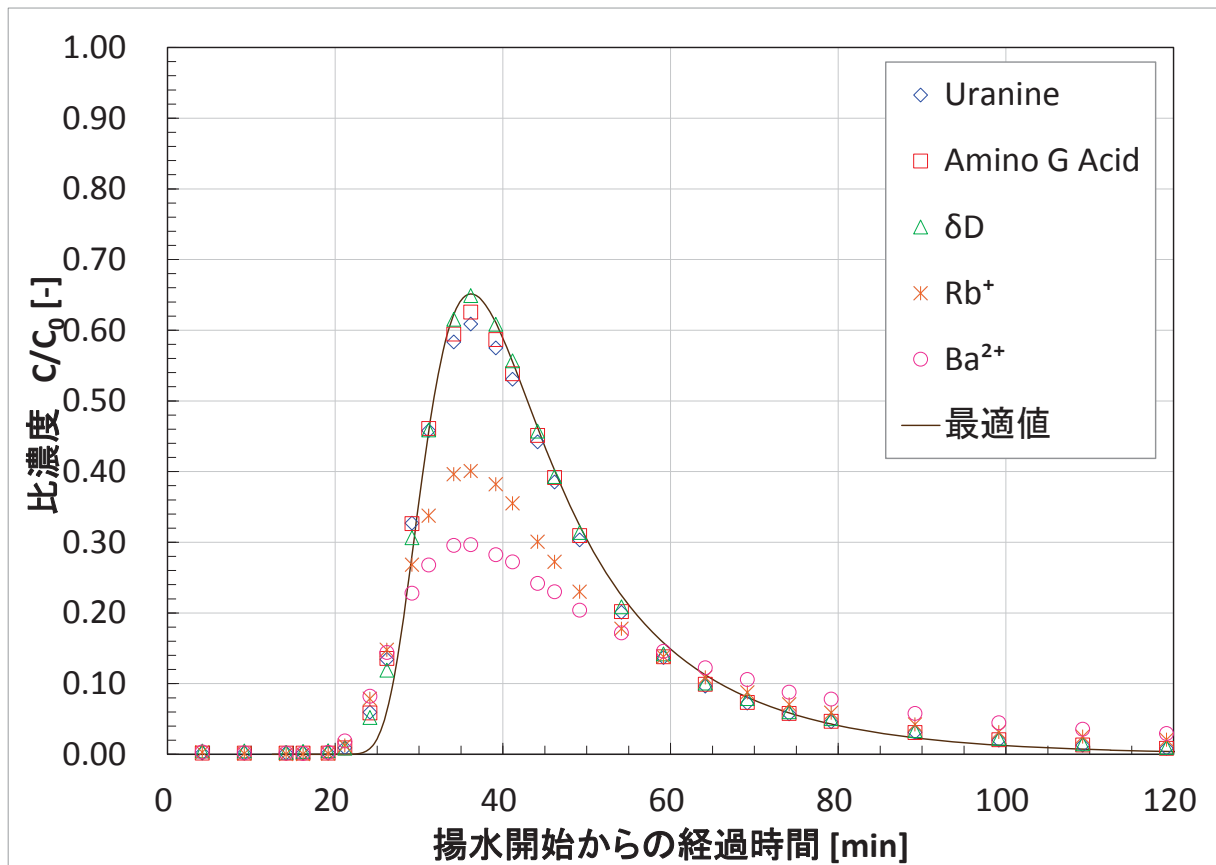
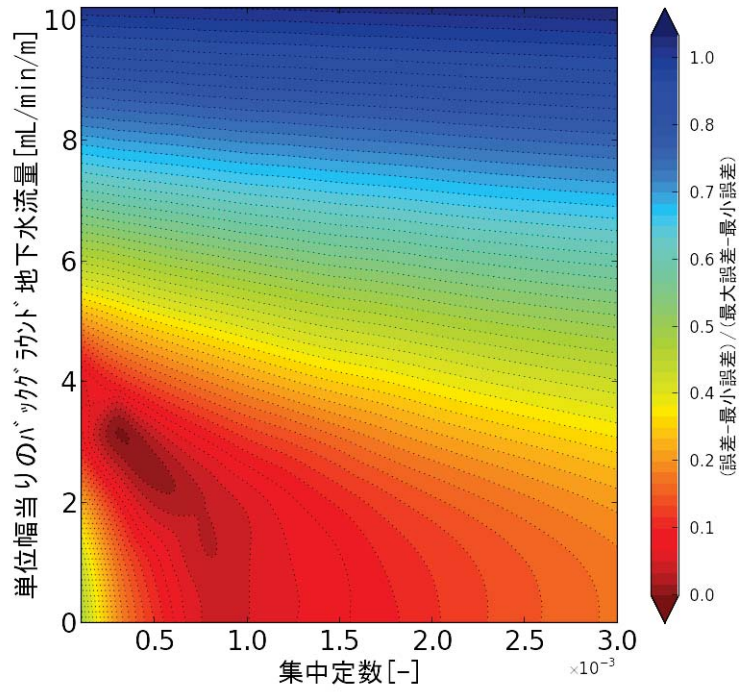


図 4.5.1-3 非収着性トレーサー評価結果：16S52T3

上：誤差分布、下：最小誤差時の評価結果 ( $\tau=3.0e-4$ ,  $q_f=3.0\text{mL/min/m}$ )



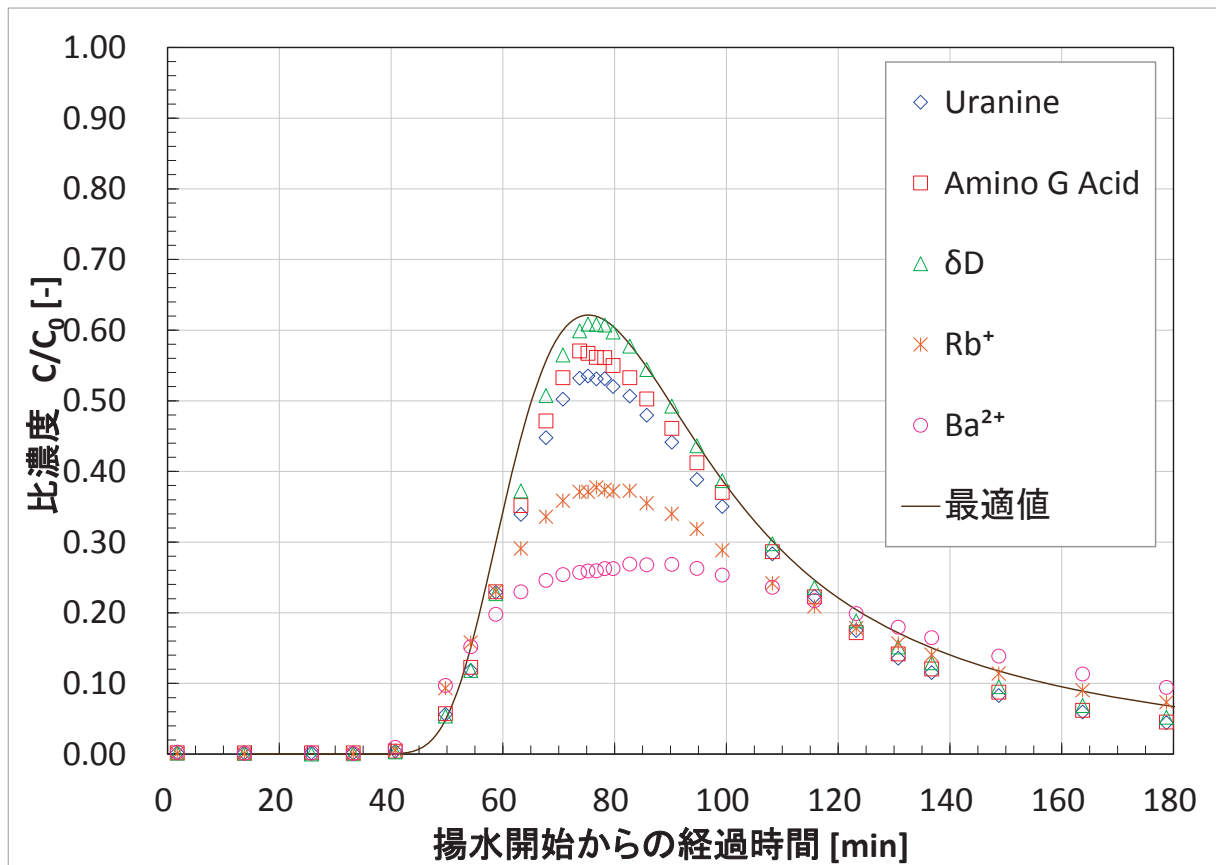
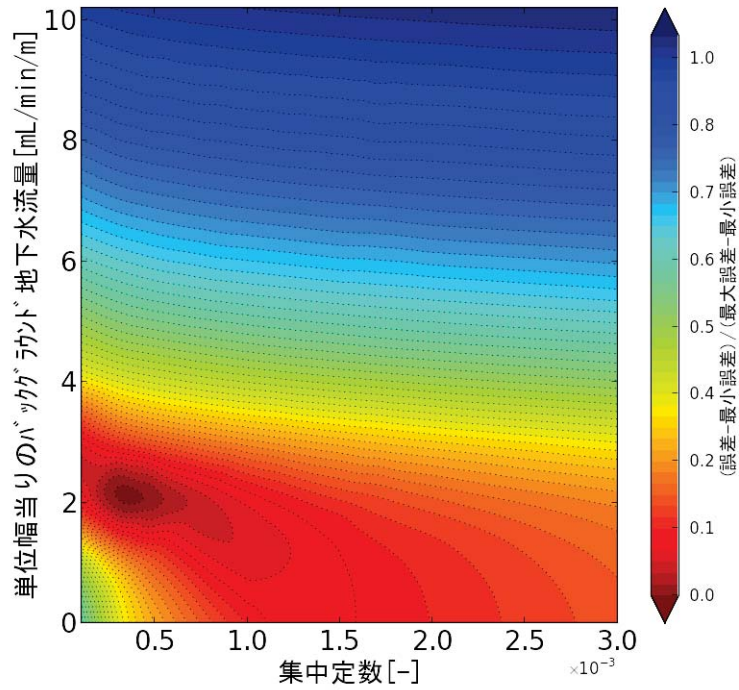


図 4.5.1-4 非収着性トレーサー評価結果：16S52T4

上：誤差分布、下：最小誤差時の評価結果 ( $\tau=3.0e-4$ ,  $q_f=2.0\text{mL/min/m}$ )

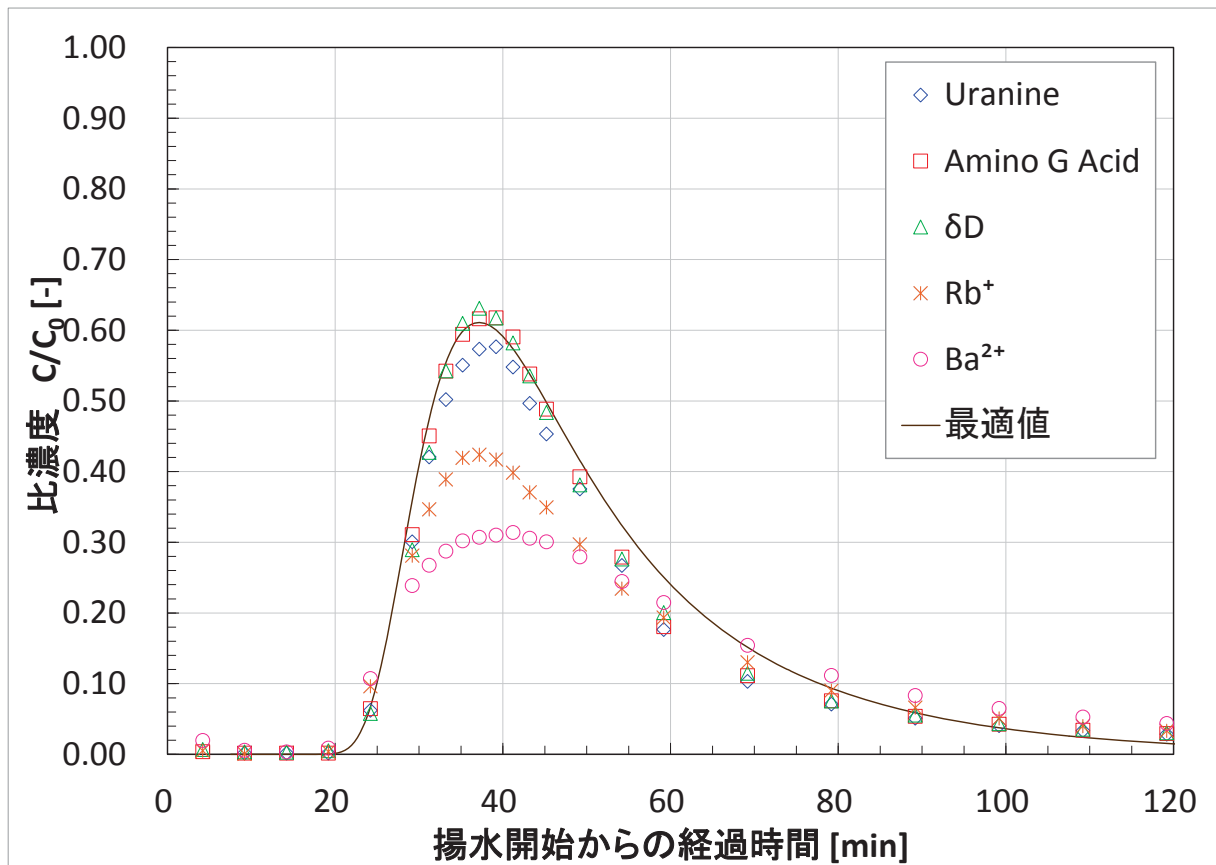
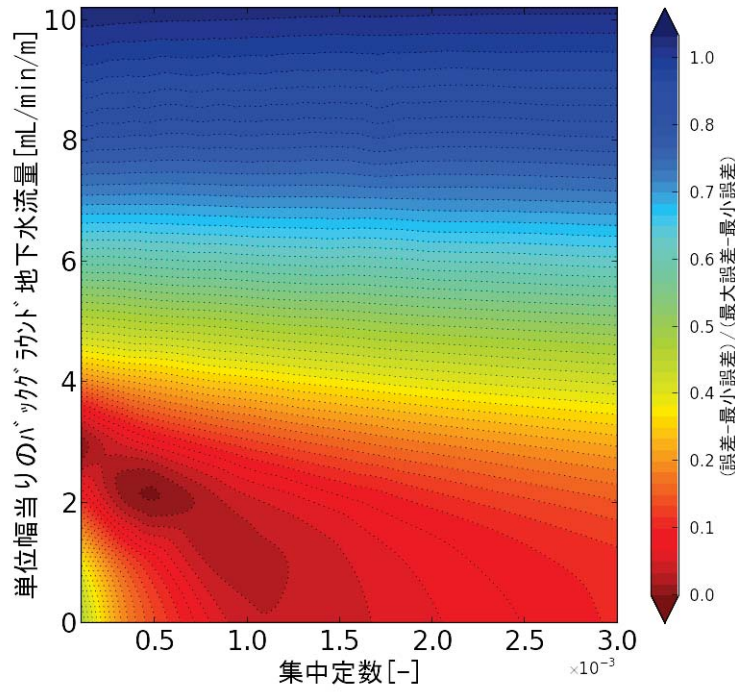


図 4.5.1-5 非収着性トレーサー評価結果：16S52T5

上：誤差分布、下：最小誤差時の評価結果 ( $\tau=5.0e-4$ ,  $q_f=2.0\text{mL/min/m}$ )

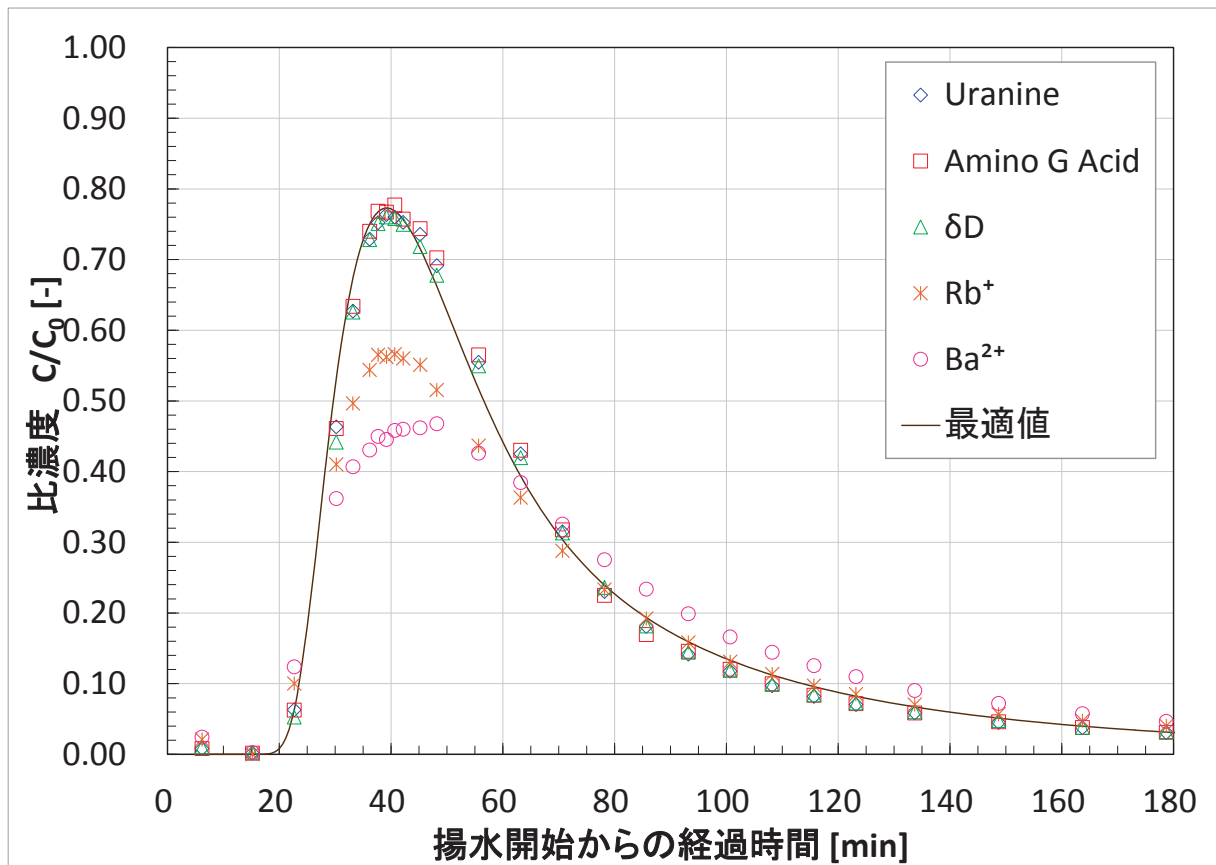
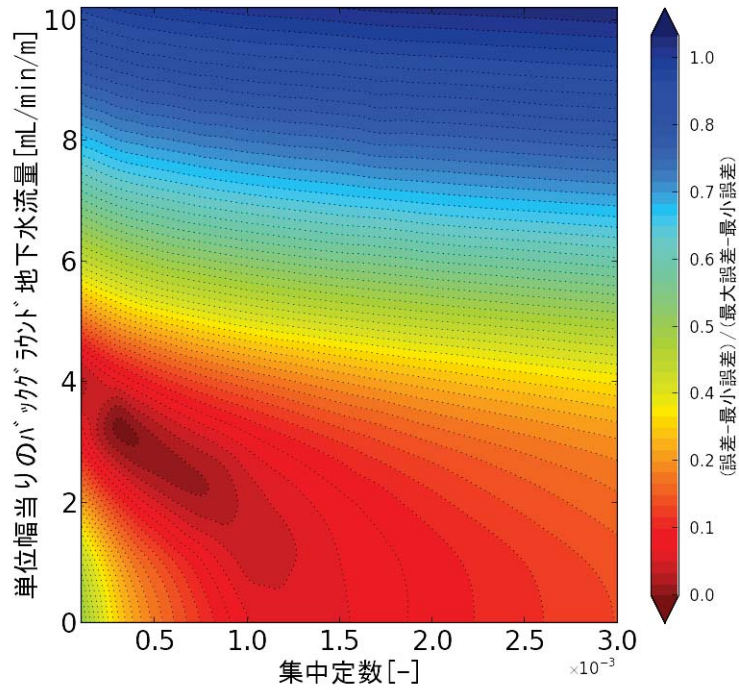


図 4.5.1-6 非吸着性トレーサー評価結果：16S52T6

上：誤差分布、下：最小誤差時の評価結果 ( $\tau=3.0e-4$ ,  $q_f=3.0\text{mL/min/m}$ )

(4) 収着性トレーサーの評価解析

前節で評価された最も誤差が小さい集中定数と地下水流量の組み合わせを用い、収着性トレーサーの評価解析を行う。収着性トレーサーの評価解析では、遅延係数を1から200の間で28通り変化させることとした。各試験条件における評価解析結果について、Rb<sup>+</sup>とBa<sup>2+</sup>の破過曲線との誤差計算結果と最も誤差が小さい遅延係数の評価解析結果を図4.5.1-7～図4.5.1-11に示す。評価解析の結果、FEGMによる計算では遅延係数が大きくなるほどピーク時間が早くなる破過曲線が得られるのに対し、試験結果の破過曲線では非収着性トレーサーのピーク時間と収着性トレーサーのピーク時間がほぼ変わっておらず、解析ではこの傾向を再現できなかった。

収着性トレーサーの評価解析結果を表4.5.1-3に整理する。評価解析の結果、Rb<sup>+</sup>の遅延係数は15～45、Ba<sup>2+</sup>の遅延係数は60～180と評価され、試験条件によってバラツキが確認された。特に、非収着性トレーサーの評価解析で集中定数が小さく評価された試験条件ほど遅延係数が大きくなる傾向にある。これは、収着性トレーサーの評価解析では、非収着性トレーサーのピーク濃度に対する低減率によって収着性トレーサーの最適値を評価していることが関係しており、集中定数が小さく非収着性トレーサーのピーク濃度が高い試験条件ほど遅延係数が大きく評価されたと言える。

表 4.5.1-3 収着性トレーサーの評価解析結果まとめ

	単位	16S52T2	16S52T3	16S52T4	16S52T5	16S52T6
注水流量	mL/min	83.00	93.19	99.85	49.60	99.07
揚水流量	mL/min	114.30	60.23	23.76	49.28	49.82
トレーサー注入時間	min	10.0	10.0	10.0	20.0	20.0
チェイサー注入時間	min	5.0	5.0	5.0	10.0	5.0
トレーサー量	L	0.830	0.932	0.999	0.992	1.981
チェイサー量	L	0.415	0.466	0.499	0.496	0.495
集中定数	-	5.0E-04	3.0E-04	3.0E-04	5.0E-04	3.0E-04
単位幅当りの バックグラウンド地下水流量	mL/min/m	3	3	2	2	3
Rb <sup>+</sup> の遅延係数	-	20	35	45	15	25
Ba <sup>2+</sup> の遅延係数	-	80	120	180	50	60

### 誤差計算結果

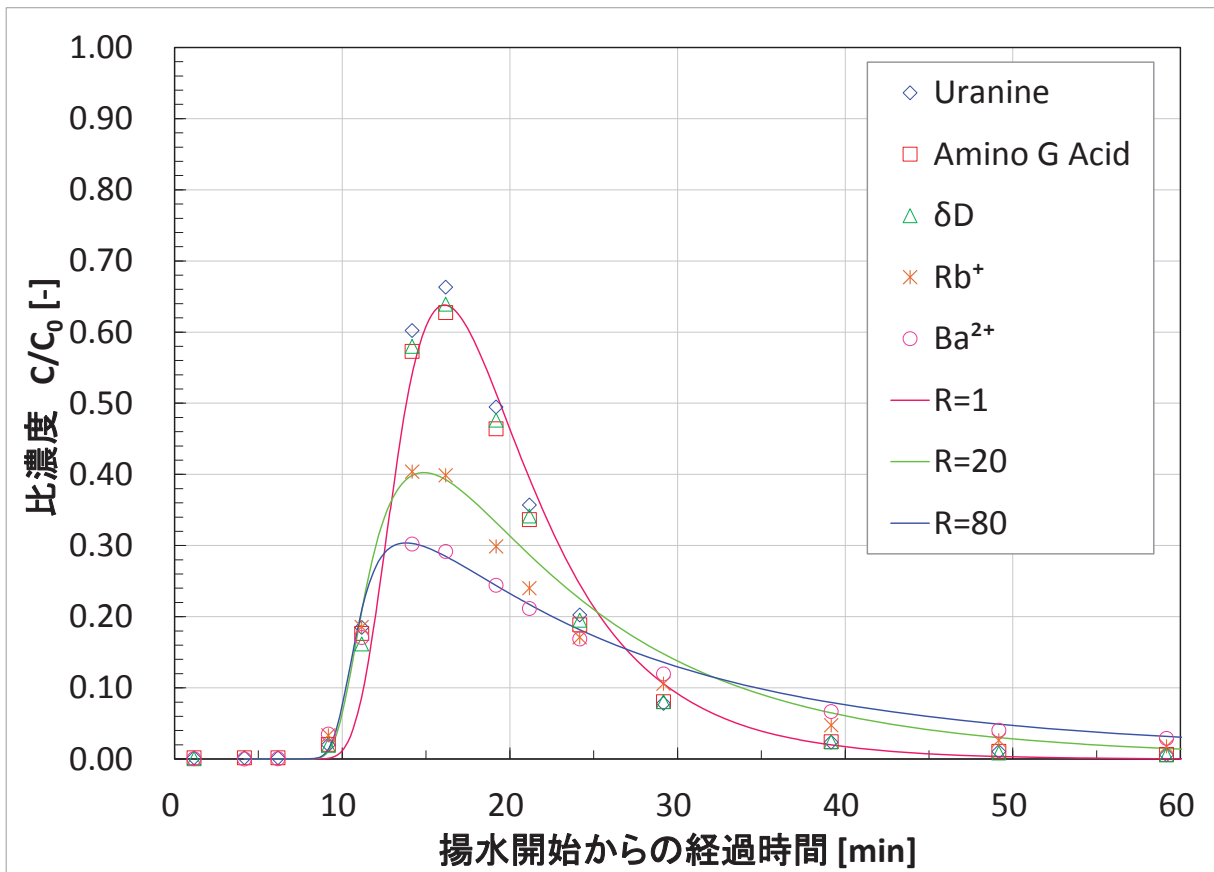
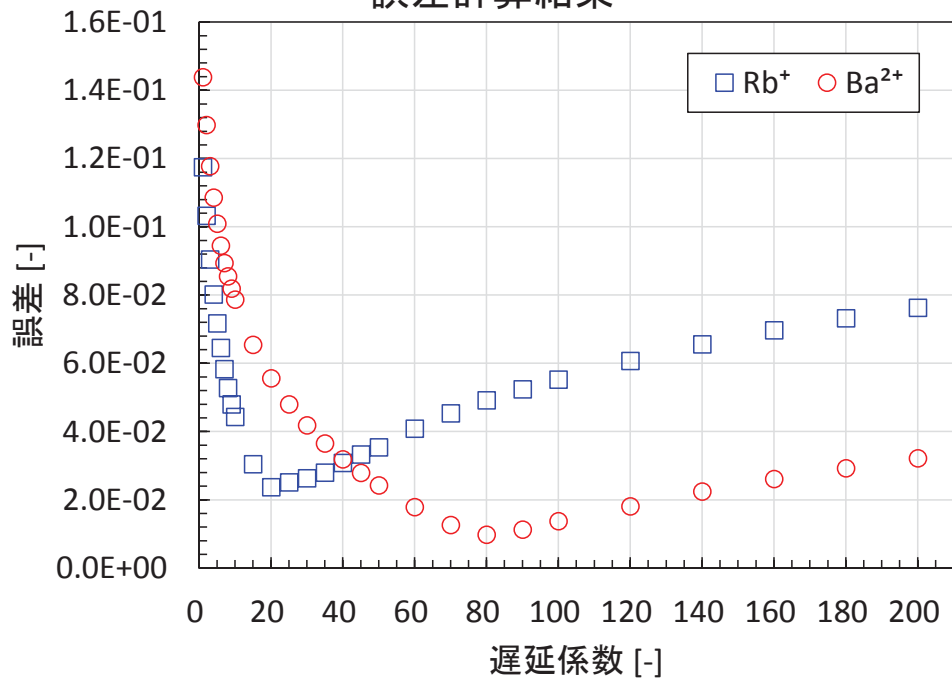


図 4.5.1-7 収着性トレーサー評価解析結果：16S52T2

上：誤差分布、下：最小誤差時の評価結果 ( $\tau=5.0e-4$ ,  $q_f=3.0\text{mL}/\text{min}/\text{m}$ )

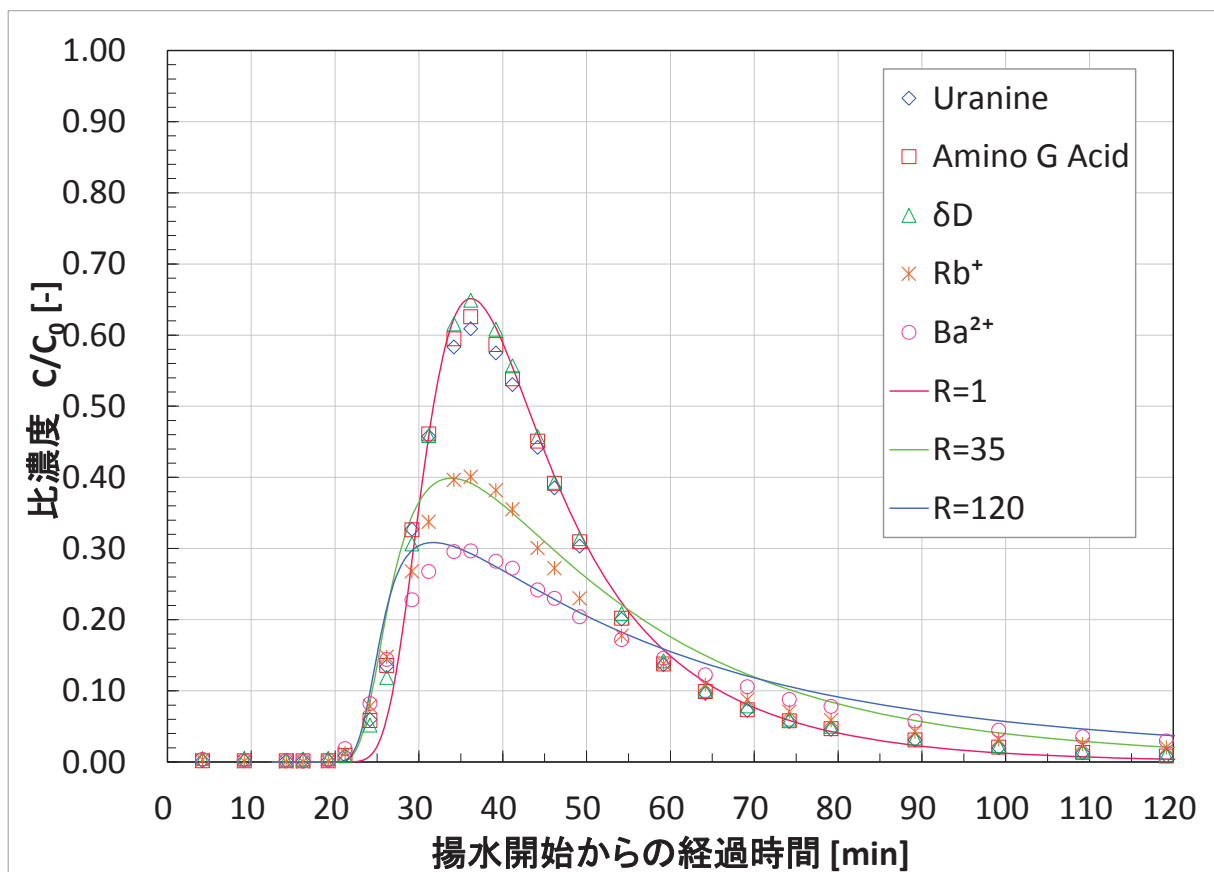
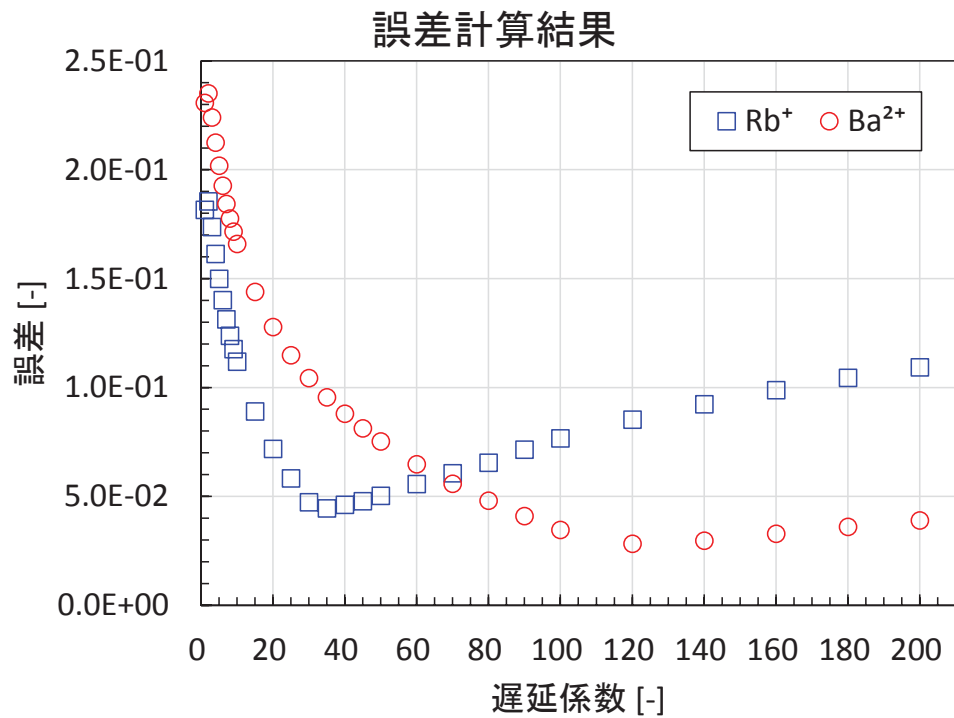


図 4.5.1-8 収着性トレーサー評価解析結果：16S52T3

上：誤差分布、下：最小誤差時の評価結果 ( $\tau=3.0e-4$ ,  $q_f=3.0\text{mL}/\text{min}/\text{m}$ )

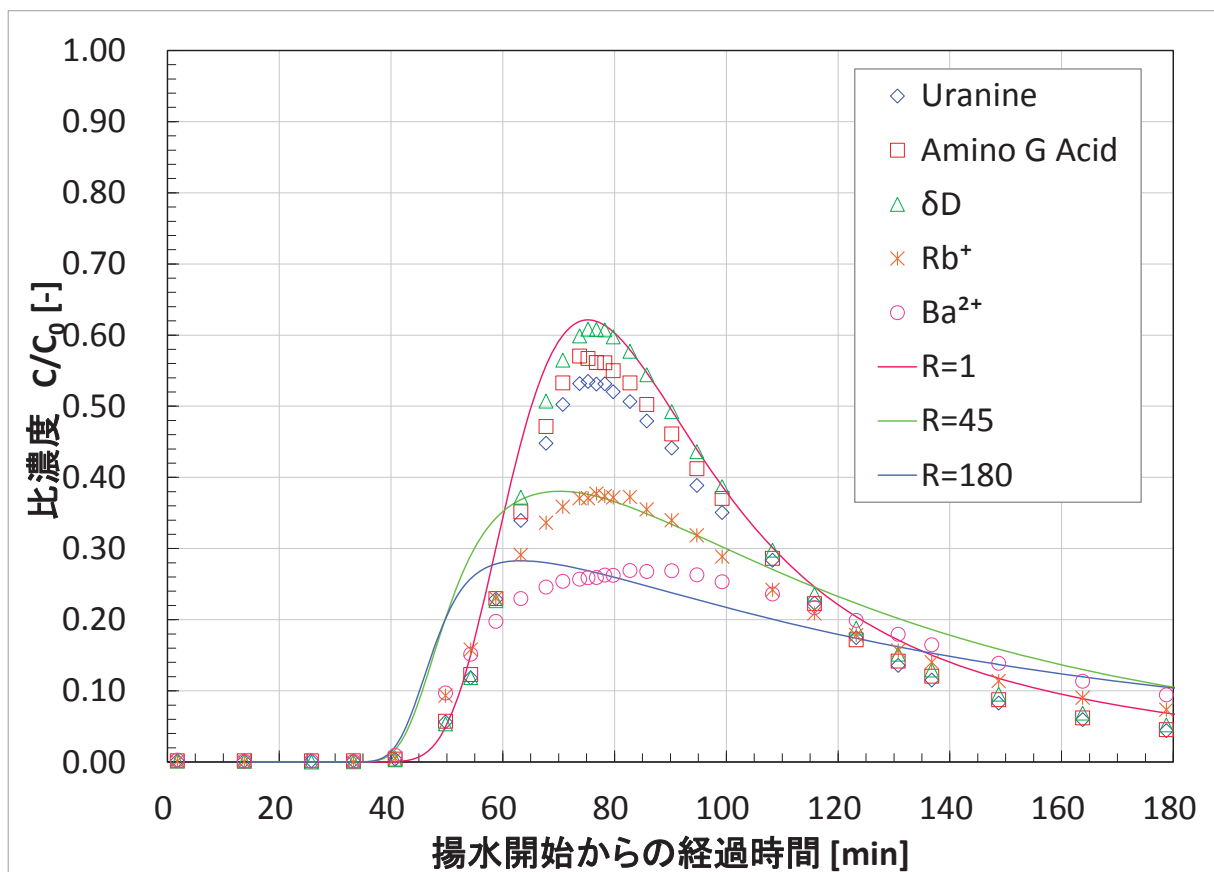
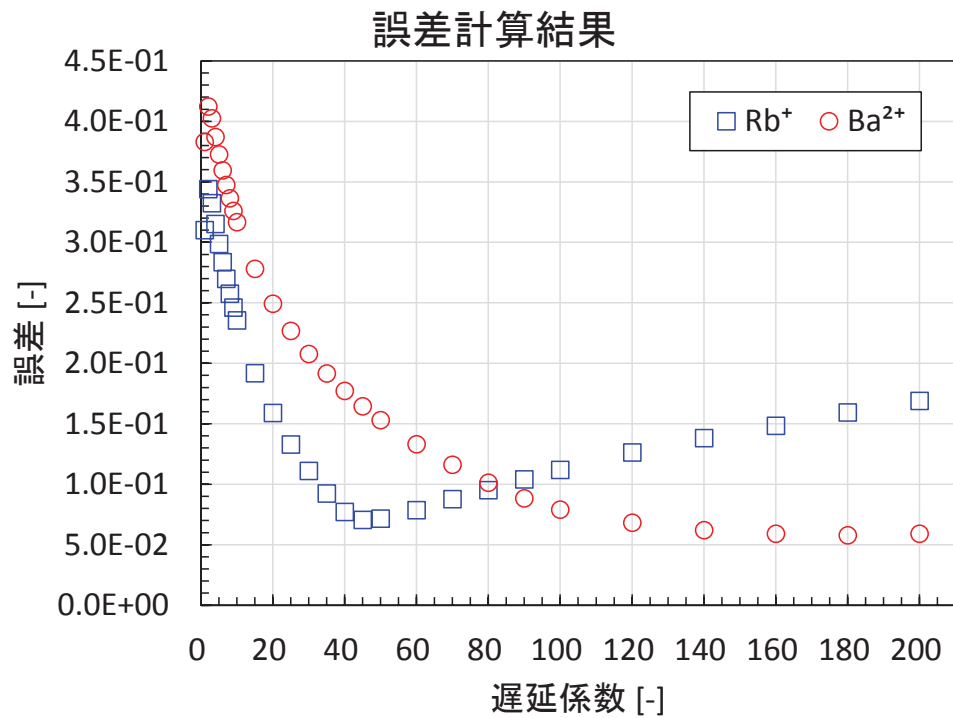


図 4.5.1-9 収着性トレーサー評価解析結果：16S52T4

上：誤差分布、下：最小誤差時の評価結果 ( $\tau=3.0e-4$ ,  $q_f=2.0\text{mL}/\text{min}/\text{m}$ )

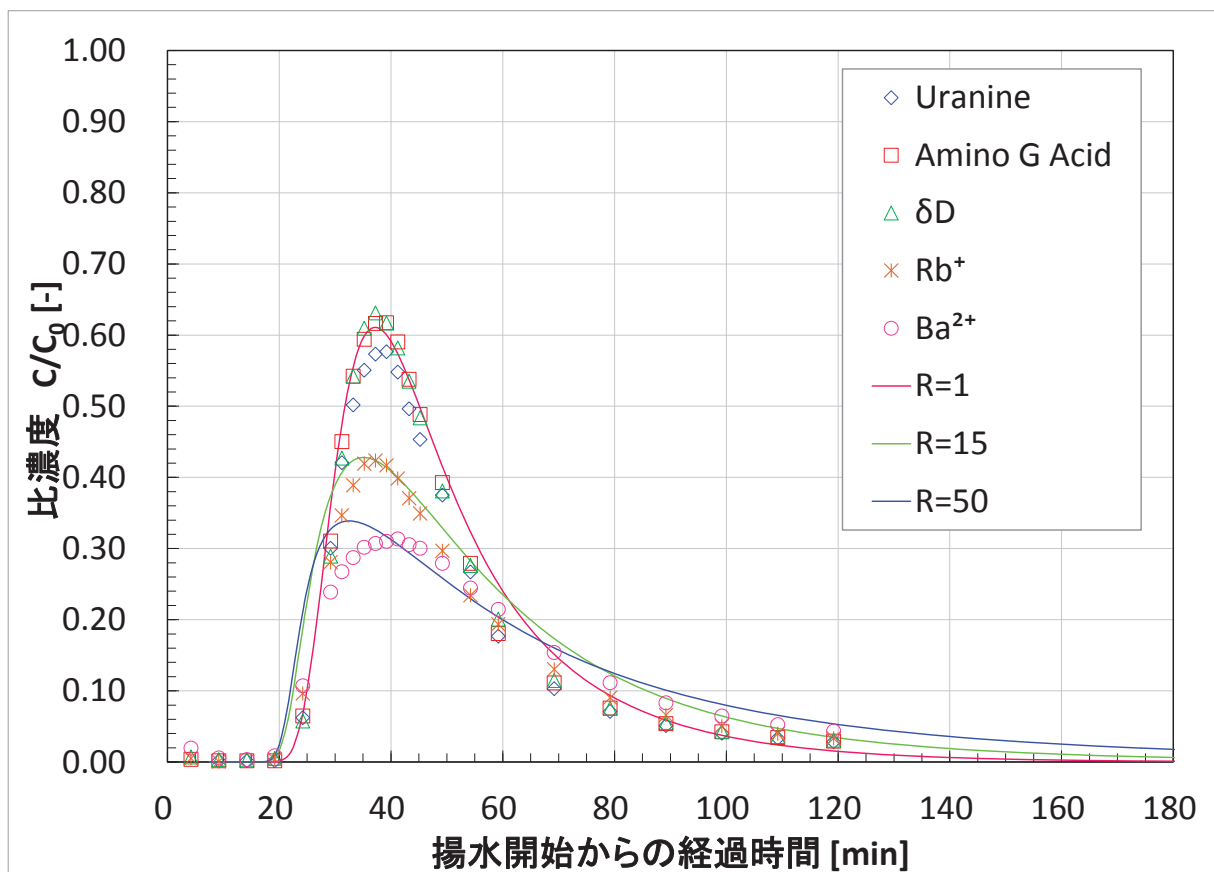
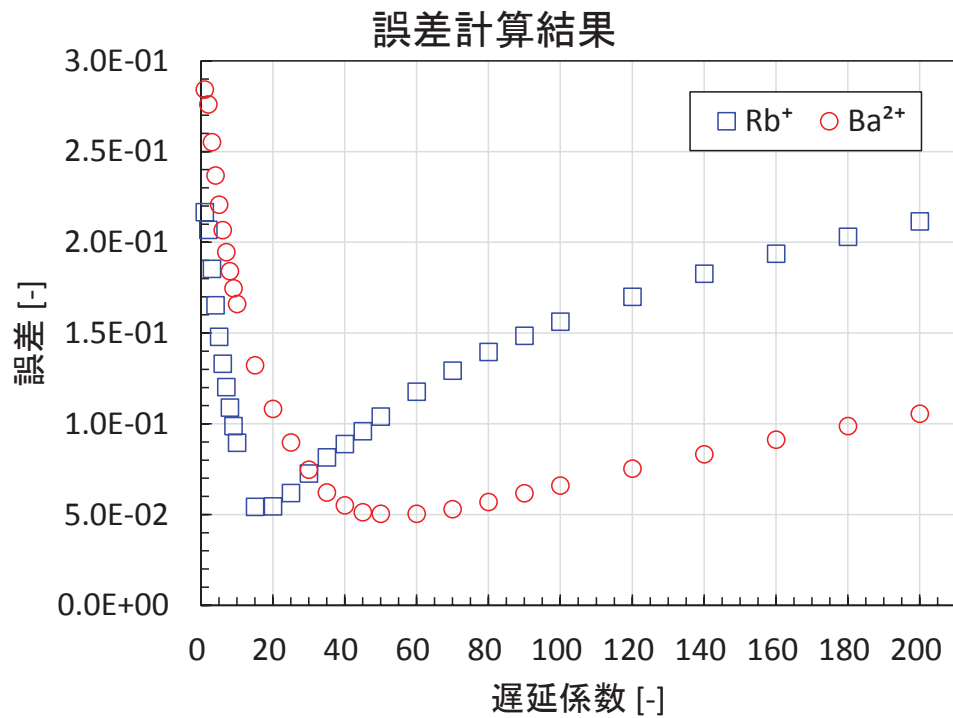


図 4.5.1-10 取着性トレーサー評価解析結果：16S52T5

上：誤差分布、下：最小誤差時の評価結果（ $\tau=5.0e-4$ ,  $q_f=2.0\text{mL}/\text{min}/\text{m}$ ）



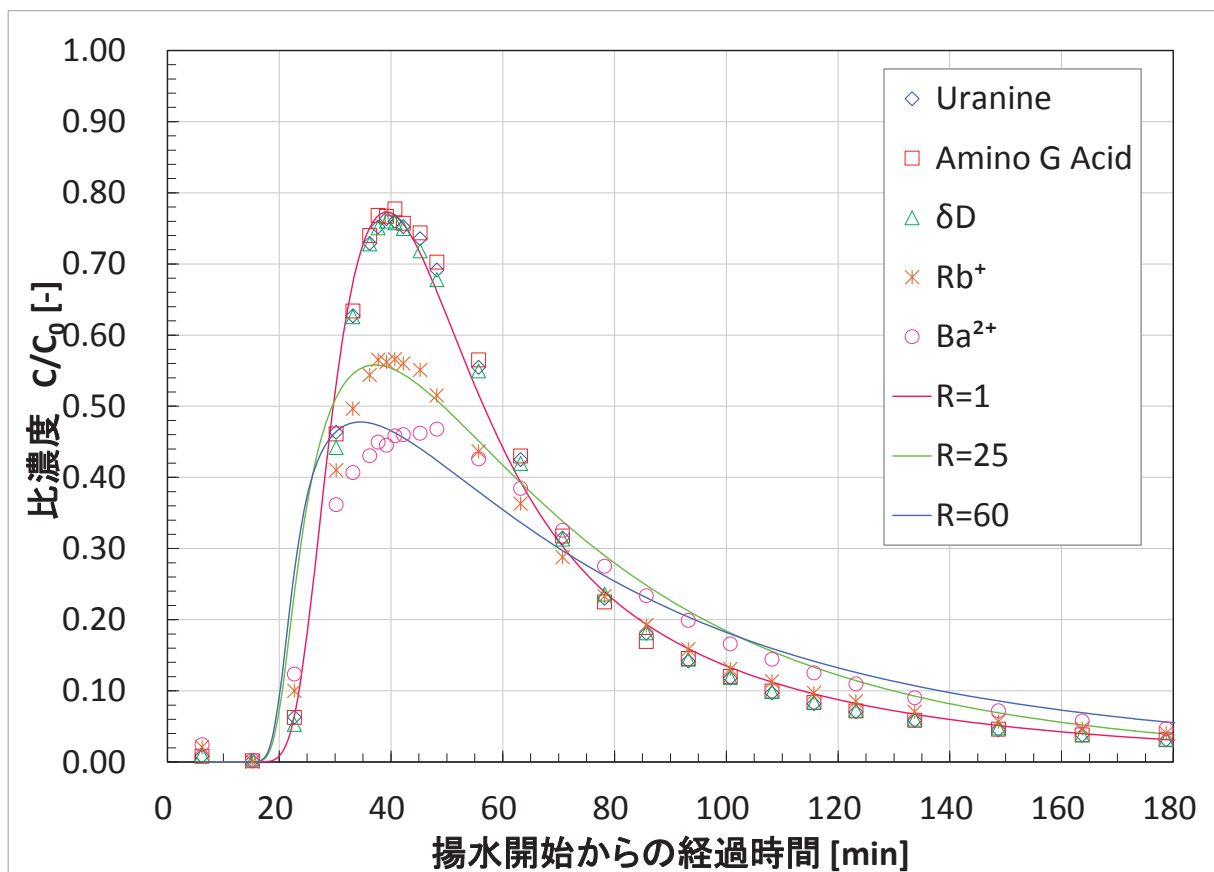
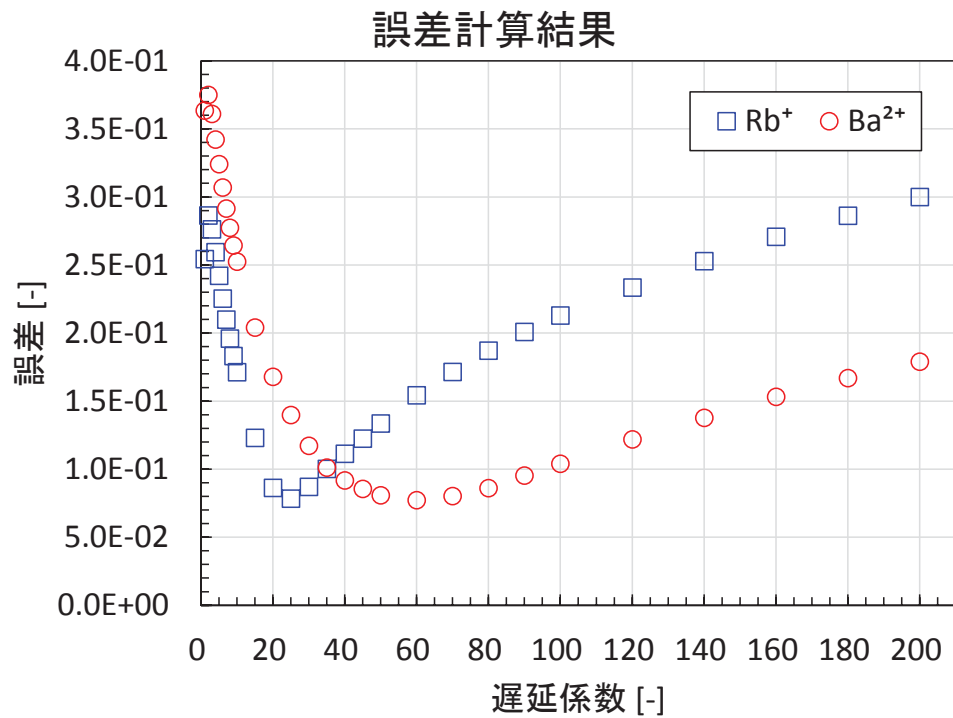


図 4.5.1-11 取着性トレーサー評価解析結果：16S52T6

上：誤差分布、下：最小誤差時の評価結果 ( $\tau=3.0e-4$ ,  $q_f=3.0\text{mL}/\text{min}/\text{m}$ )

## (5) 考察

前節では非収着性トレーサーの評価解析により評価された集中定数、地下水流量の組み合わせを用い、収着性トレーサーの評価解析を行った。地下水流量はいずれも 2~3mL/min/m となったが、差圧計測によって評価された動水勾配はほぼ 0 であり、バックグラウンド地下水流れの影響はほとんど無いと考えられる。そこで、本節ではバックグラウンド地下水流れの影響を考慮せずに収着性トレーサーの評価解析を行う。集中定数については、非収着性トレーサーの評価解析において地下水流量を 0 とした場合に誤差が最も小さくなる値 (16S52T2、16S52T3 は  $8.0e-4$ 、16S52T4、16S52T5、16S52T6 は  $1.2e-3$ ) を用いる。遅延係数については、前節と同じく 1 から 200 の間で 28 通り変化させることとした。

バックグラウンド地下水流れを考慮しない場合の収着性トレーサーの評価解析結果を図 4.5.1-12~図 4.5.1-16 に示す。また結果については表 4.5.1-4 に整理する。前節で示した評価解析結果では、 $Rb^+$ の遅延係数は 15~45、 $Ba^{2+}$ の遅延係数は 60~180 と評価されたが、バックグラウンド地下水流れを考慮しない場合は  $Rb^+$ の遅延係数は 6~15、 $Ba^{2+}$ の遅延係数は 15~50 と評価され、いずれも遅延係数が小さくなる傾向が確認された。これは、バックグラウンド地下水流れによってトレーサーが流されるとピーク濃度が減少するが、それを補うために集中定数を小さくしなければならないことが関係していると考えられる。つまり、非収着性トレーサーのピーク濃度に対して収着性トレーサーのピーク濃度がどの程度減少するかによって破過曲線の適合性を評価するため、集中定数を小さくするほどピーク濃度が高くなり、その結果遅延係数が大きく評価されたと考えられる。

一方で、バックグラウンド地下水流れを考慮しなかったとしても、非収着性トレーサーと収着性トレーサーのピーク時間がほとんど変わらなかった試験結果を再現することができなかった。これらについては、想定した収着モデルが実際と異なっている可能性が示唆される。つまり、ここで行った評価解析は線形収着を仮定しているが、実際には線形吸着とはならず時間依存型の収着挙動となっている可能性がある。特に、単孔トレーサー試験では、注入孔と揚水孔が同じであるため、収着したトレーサーと収着されなかったトレーサーが混合し複雑な破過曲線となると予測される。以上のことから、図 4.5.1-1 に示した解析モデルを改善する必要があると考えられる。また、試験条件については、揚水流量を更に小さくするかチェイサー注入後に待機時間を設けトレーサーと岩盤との接触時間を更に長くする必要がある。

表 4.5.1-4 収着性トレーサーの評価解析結果まとめ（バックグラウンド地下水流れ無し）

	単位	16S52T2	16S52T3	16S52T4	16S52T5	16S52T6
注水流量	mL/min	83.00	93.19	99.85	49.60	99.07
揚水流量	mL/min	114.30	60.23	23.76	49.28	49.82
トレーサー注入時間	min	10.0	10.0	10.0	20.0	20.0
チェイサー注入時間	min	5.0	5.0	5.0	10.0	5.0
トレーサー量	L	0.830	0.932	0.999	0.992	1.981
チェイサー量	L	0.415	0.466	0.499	0.496	0.495
集中定数	-	8.0E-04	8.0E-04	1.2E-03	1.2E-03	1.2E-03
Rb <sup>+</sup> の遅延係数	-	15	15	10	7	6
Ba <sup>2+</sup> の遅延係数	-	50	45	50	25	15

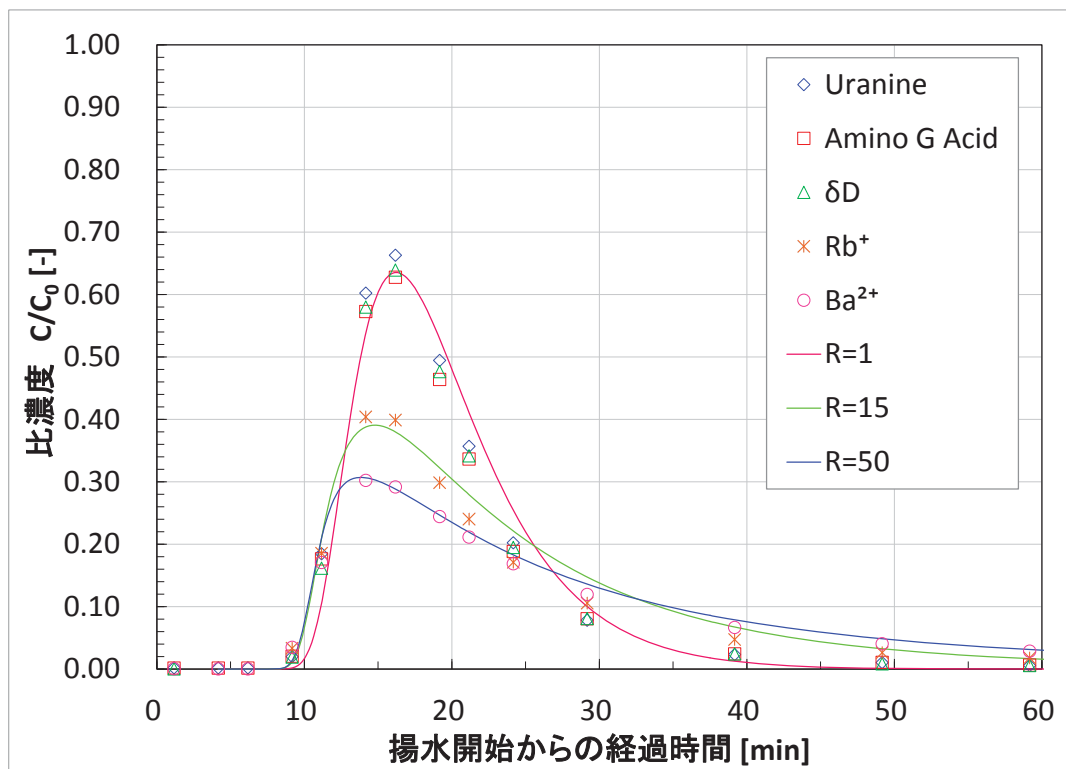


図 4.5.1-12 収着性トレーサー評価解析結果(地下水流れ無し) : 16S52T2

( $\tau=8.0e-4$ ,  $q_f=0\text{mL}/\text{min}/\text{m}$ )

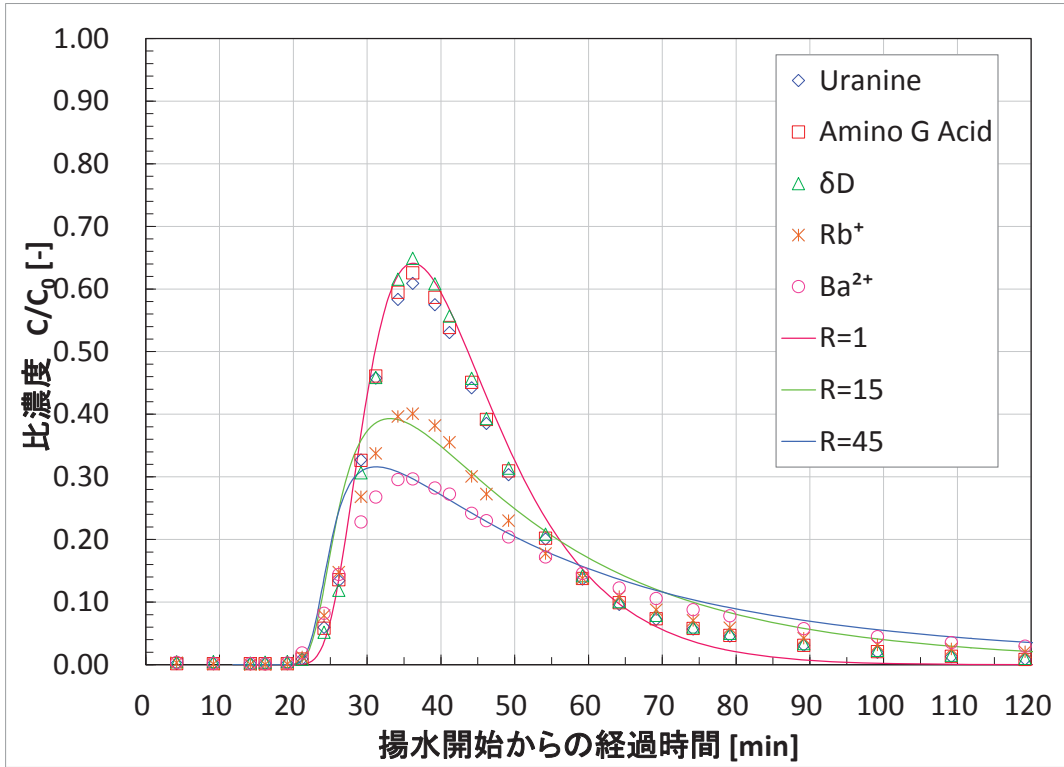


図 4.5.1-13 収着性トレーサー評価解析結果(地下水流れ無し) : 16S52T3  
 ( $\tau=8.0e-4$ ,  $q_f=0\text{mL}/\text{min}/\text{m}$ )

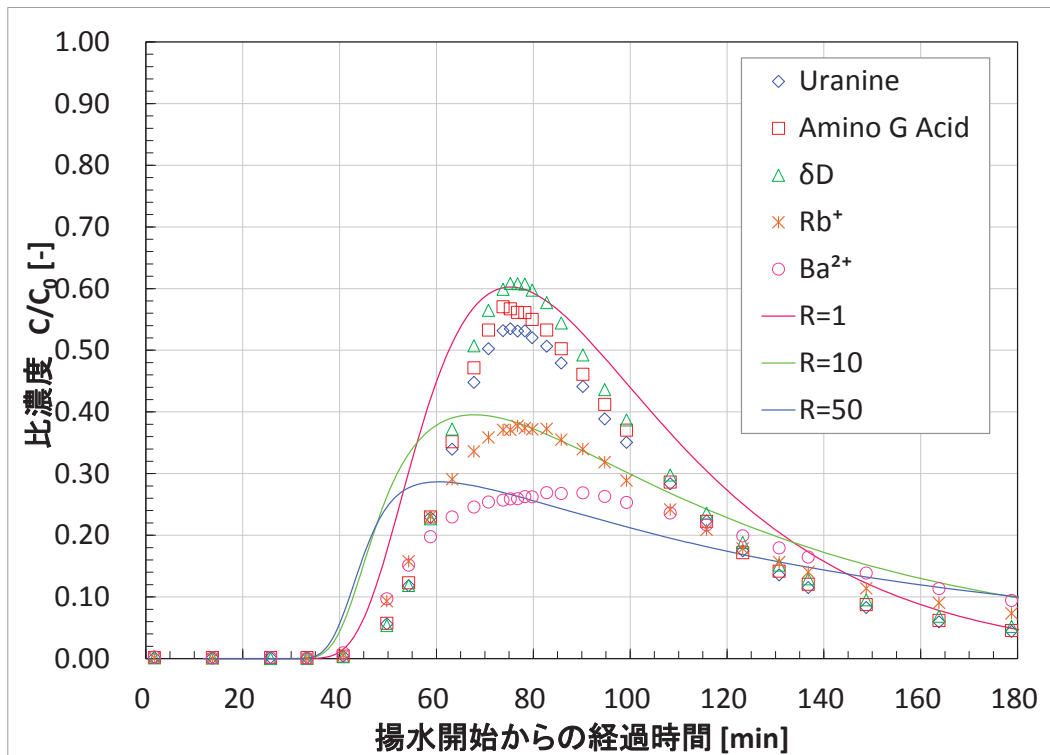


図 4.5.1-14 収着性トレーサー評価解析結果(地下水流れ無し) : 16S52T4  
 ( $\tau=1.2e-3$ ,  $q_f=0\text{mL}/\text{min}/\text{m}$ )

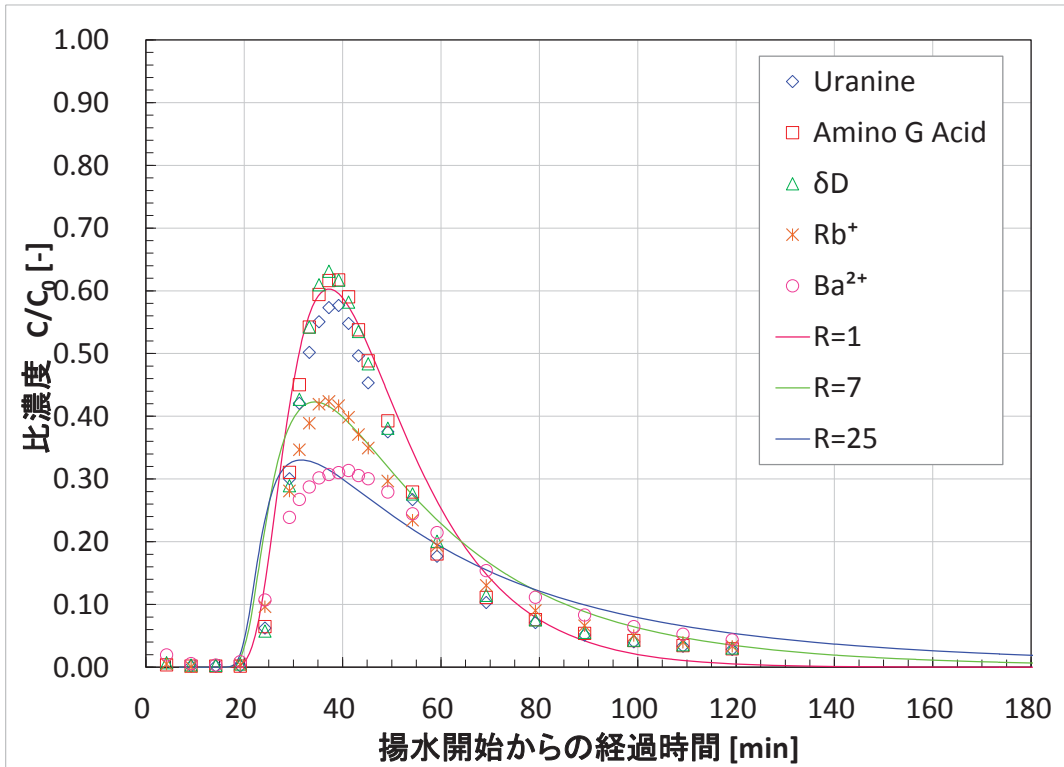


図 4.5.1-15 吸着性トレーサー評価解析結果(地下水流れ無し) : 16S52T5  
 ( $\tau = 1.2e-3$ ,  $q_f = 0\text{mL}/\text{min}/\text{m}$ )

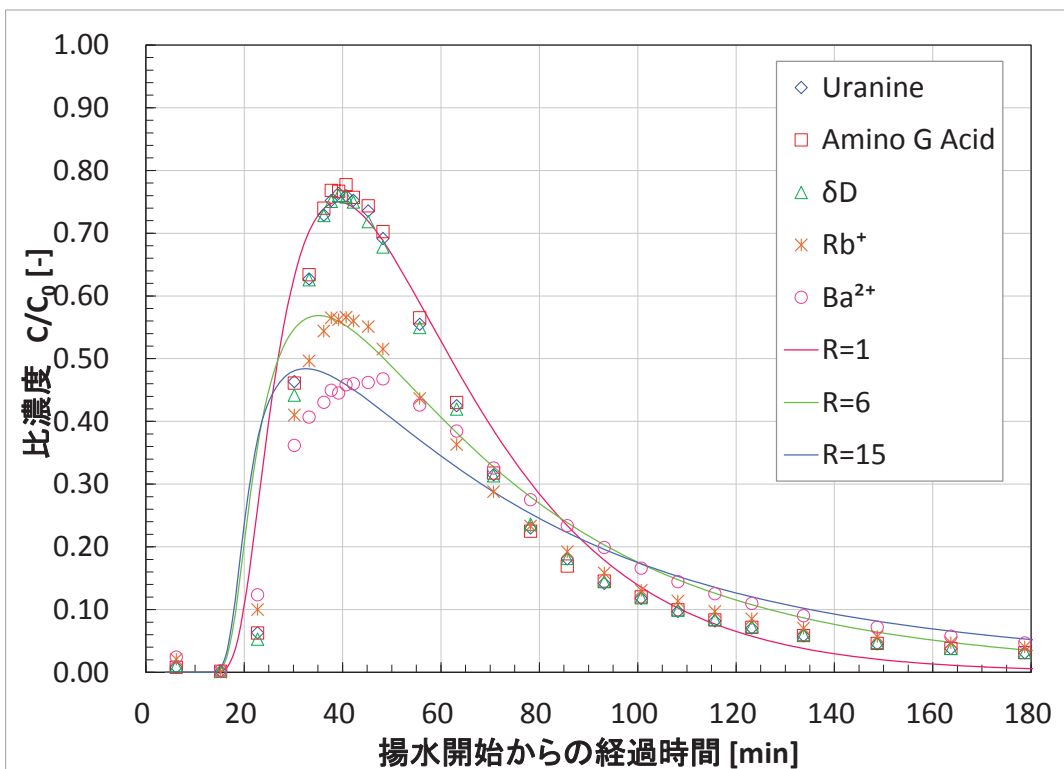


図 4.5.1-16 吸着性トレーサー評価解析結果(地下水流れ無し) : 16S52T6  
 ( $\tau = 1.2e-3$ ,  $q_f = 0\text{mL}/\text{min}/\text{m}$ )

#### 4.5.2 孔間トレーサー試験の評価解析

ここでは、原位置で行った孔間トレーサー試験により得られた揚水孔側での非収着性トレーサーのウラン、収着性トレーサー $Rb^+$ および $Ba^{2+}$ の破過曲線を数値解析により再現し、物質移行に関わるパラメーターを同定する。非収着性トレーサーの破過曲線からは割れ目の開口幅と分散長を同定し、収着性トレーサーの破過曲線からは岩石基質に対する分配係数を同定する。今年度は全部で10回の孔間トレーサー試験を実施したが、岩石基質に対する分配係数を評価するには孔間での移行時間の長い試験が適していると考え、注水流量と揚水流量の小さい16W5352T-12試験、16W5352T-13-15試験と16W5352T-16-18試験の3つの試験を解析の対象とした。

解析では、単一の割れ目を想定し、解析領域は一辺の長さが10mの正方形とする。解析に使用した有限要素メッシュを図4.5.2-1~4に示す。割れ目の中心付近に注水孔1本と揚水孔1本を配置している。ボーリングの直径は86mmで、孔間距離は1.44mである。ボーリング孔の周辺は、要素を細分化した。単一割れ目は2次元の四角形要素で表現し、割れ目に隣接する岩石基質は14層の六面体要素で表現した。節点数413,799、要素数412,854(2次元要素27,658、3次元要素385,196)である。

割れ目の開口部分について、間隙率は100%とした。一方、國丸他(2012)は瑞浪超深地層研究所の深度300m研究アクセス坑道において実施したボーリング調査で取得した種々のタイプの割れ目近傍の岩石試料に対し間隙率を測定しており、岩石基質の間隙率はその平均値である1.05%に設定した。自由水中のウランの分子拡散係数は、Autio et al. (2003)に基づき $4.5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{sec}$ とした。岩石基質におけるウランの実効拡散係数は、國丸他(2012)の割れ目近傍の岩石試料を用いた拡散試験の結果の幾何平均である $4.08 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{sec}$ とした。

15MI52号孔、15MI53号孔、16MI59号孔間の水位差の計測結果によれば、解析対象とする3回の孔間トレーサー試験時の試験対象割れ目内の自然状態での動水勾配は、1%程度であった。試験対象割れ目の透水量係数は、15MI52号孔では $6.9 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}$ 、15MI53号孔では $1.7 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec}$ で、幾何平均は $3.2 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{sec}$ ある。そのため、試験対象割れ目内のバックグラウンドの地下水流れは割れ目単位幅あたり0.019 mL/minと推定され、孔間トレーサー試験の注水流量や揚水流慮に比べて非常に小さい。そのため、今回の解析では、バックグラウンドの地下水流れは考慮しないこととした。

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を用いた。

ウランの移行に関する数値シミュレーションの結果、16W5352T-12試験と16W5352T-16-18試験では、割れ目の開口幅を0.085mm、縦分散長を0.03m(横分散長は0.003m)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の破過曲線は試験結果に最も良く一致した(図4.5.2-7、9)。一方、16W5352T-13-15試験では、割れ目の開口幅を0.090mm、縦分散長を0.03m(横分散長は0.003m)とした場合に、ウランの破過曲線は試験結果に最も良く一致した(図4.5.2-8)。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、15MI53号孔で0.4 mmであり、トレーサー試験から得られた同定値よりも大きい。試験対象割れ目の透水量係数は、前述のように15MI52号孔では $6.9 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/sec、15MI53号孔では $1.7 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/secであり、3乗則によれば割れ目の開口幅は $6.9 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/secの透水量係数では0.020 mm、 $1.7 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/secの透水量係数では0.059 mmに相当する。つまり、今回の孔間トレーサー試験で得られた開口幅は、ボアホールTVカメラによる観察結果と3乗則との中間の値となっている。一方、同定された縦分散長は、いずれの試験でも0.03 mと同じ値が得られ、その値は孔間距離1.44 mのそれぞれ2%に相当し、多くの観測データで縦分散長は移行距離の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。一方、前項の単孔トレーサー試験の評価解析で得られた集中定数と注入量、間隙率から $\alpha_L^2 b$  ( $= \tau V_{inj} / \phi$ )の値は $4.19 \sim 7.44 \times 10^{-7}$  m<sup>3</sup>となる。単孔トレーサー試験では割れ目開口幅 $b$ は特定されていないため、割れ目開口幅を孔間トレーサー試験で得られた0.085 mmとすると、単孔トレーサー試験では縦分散長 $\alpha_L$ として0.070~0.094 mの値が得られる。この値は孔間トレーサー試験で得られた縦分散長に比べてやや長い、割れ目開口幅を0.085 mmとした場合、単孔トレーサー試験の浸透範囲は2.16~3.05 mとなり、孔間トレーサー試験の孔間距離1.44 mより長いことから、おかしい数値ではない。

続いて、16W5352T-13-15試験と16W5352T-16-18試験の収着性トレーサーRb<sup>+</sup>とBa<sup>2+</sup>の評価解析を実施した。自由水中のRb<sup>+</sup>の分子拡散係数は、Gray(1972)に基づき $2.03 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/secとした。國丸他(2012)の割れ目近傍の岩石試料を用いた拡散試験によれば、同じ1価の陽イオンであるCs<sup>+</sup>の実効拡散係数の幾何平均値は $1.59 \times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/secであった。自由水中のCs<sup>+</sup>の分子拡散係数は $2.02 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/secでRb<sup>+</sup>とほぼ同じであるため、Rb<sup>+</sup>の実効拡散係数は $1.59 \times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/secに設定した。岩石基質の真密度は、國丸他(2012)の割れ目近傍の岩石試料の幾何平均値である2650 kg/m<sup>3</sup>とした。割れ目の開口幅、分散長については、16W5352T-13-15試験と16W5352T-16-18試験のそれぞれのウランの評価解析で同定された値を使用した。

16W5352T-13-15試験では、Rb<sup>+</sup>とBa<sup>2+</sup>のいずれの破過曲線も上手く再現することができなかった。そこで、破過曲線のピーク濃度とピーク時刻のそれぞれが一致するような岩石基質に対する分配係数を求めた。Rb<sup>+</sup>では分配係数を $1.05 \times 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/kgとするとピーク濃度が、 $2.97 \times 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/kgとするとピーク時刻が破過曲線と一致した(図4.5.2-10)。一方、Ba<sup>2+</sup>では分配係数を $4.04 \times 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/kgとするとピーク濃度が、 $1.46 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/kgとするとピーク時刻が破過曲線と一致した(図4.5.2-12)。16W5352T-16-18試験では、分配係数をRb<sup>+</sup>では $5.50 \times 10^{-5}$  m<sup>3</sup>/kg、Ba<sup>2+</sup>では $1.43 \times 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/kgとすると、いずれも破過曲線を良好に再現することができた(図4.5.2-11、13)。

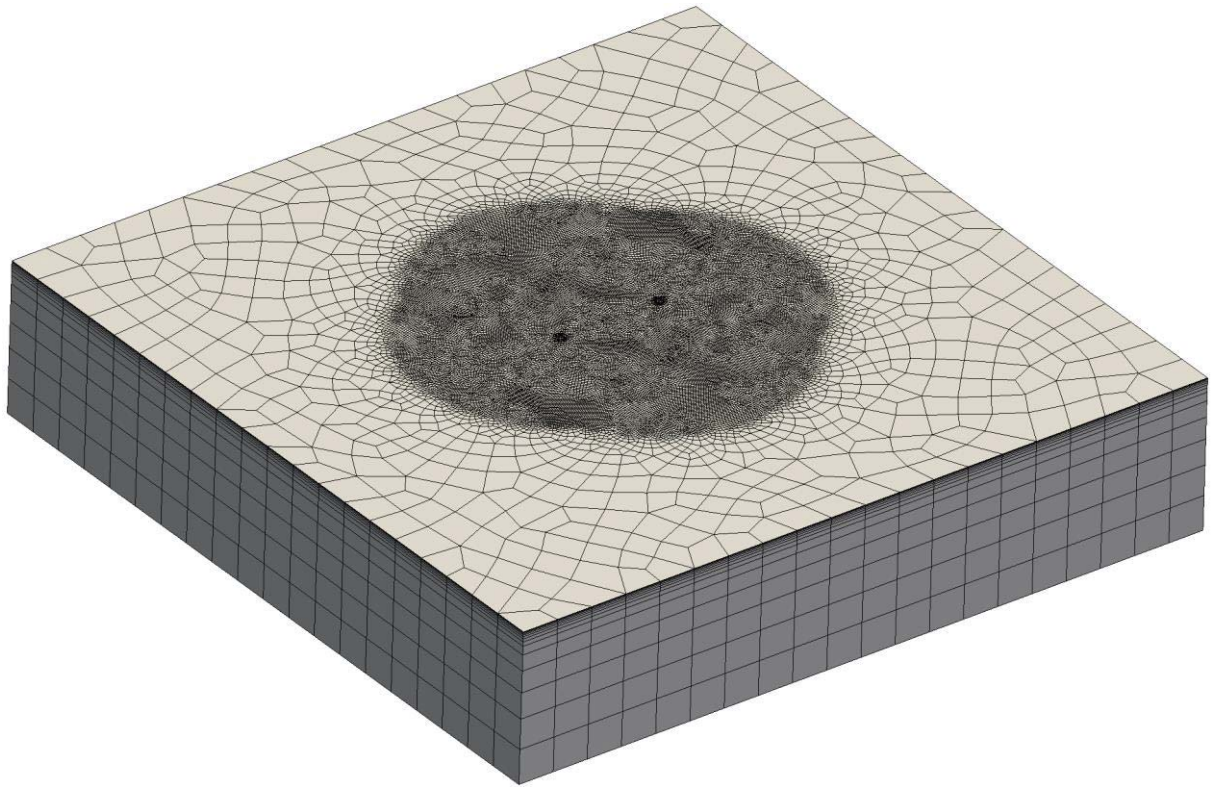


図 4.5.2-1 解析モデル (全体図)

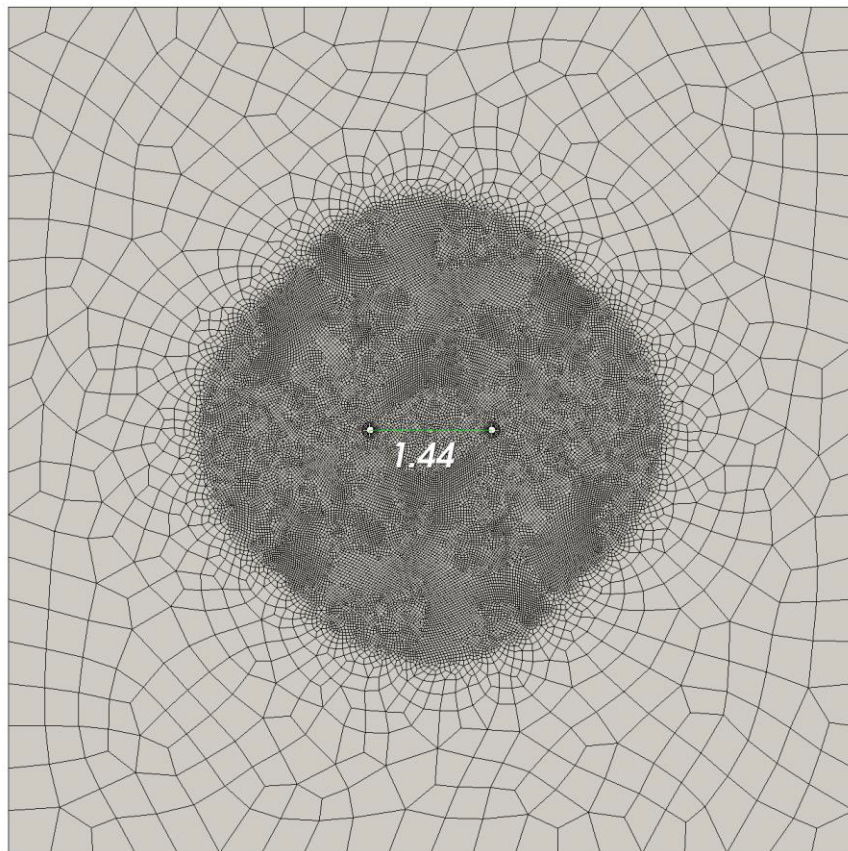


図 4.5.2-2 割れ目面全体メッシュ



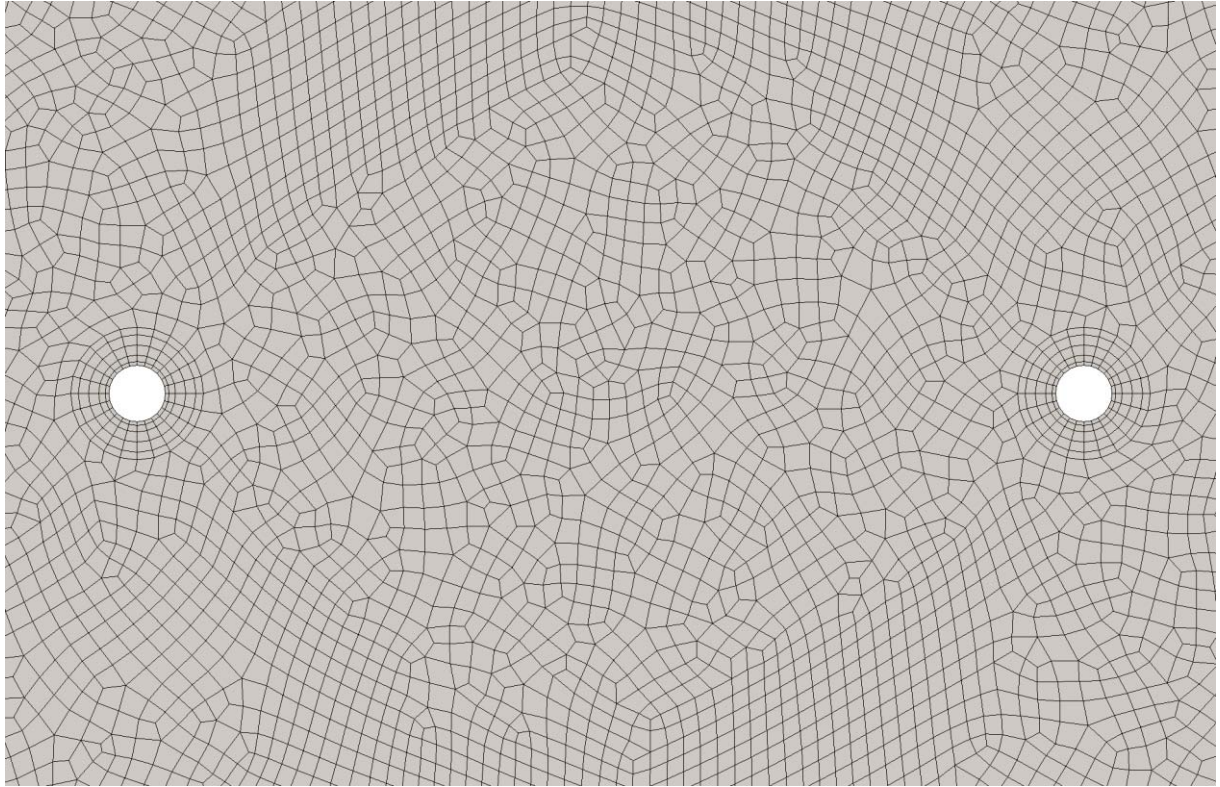


図 4.5.2-3 割れ目面孔間メッシュ

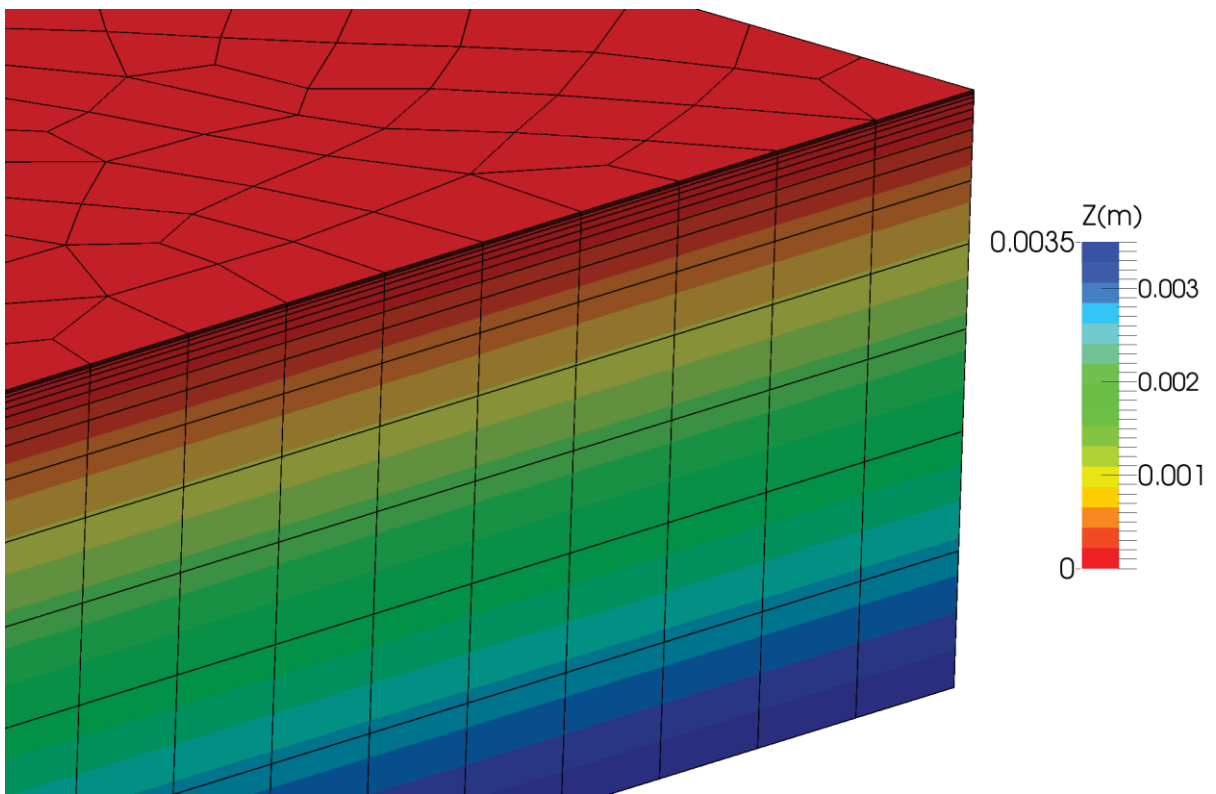


図 4.5.2-4 メッシュの厚み分布

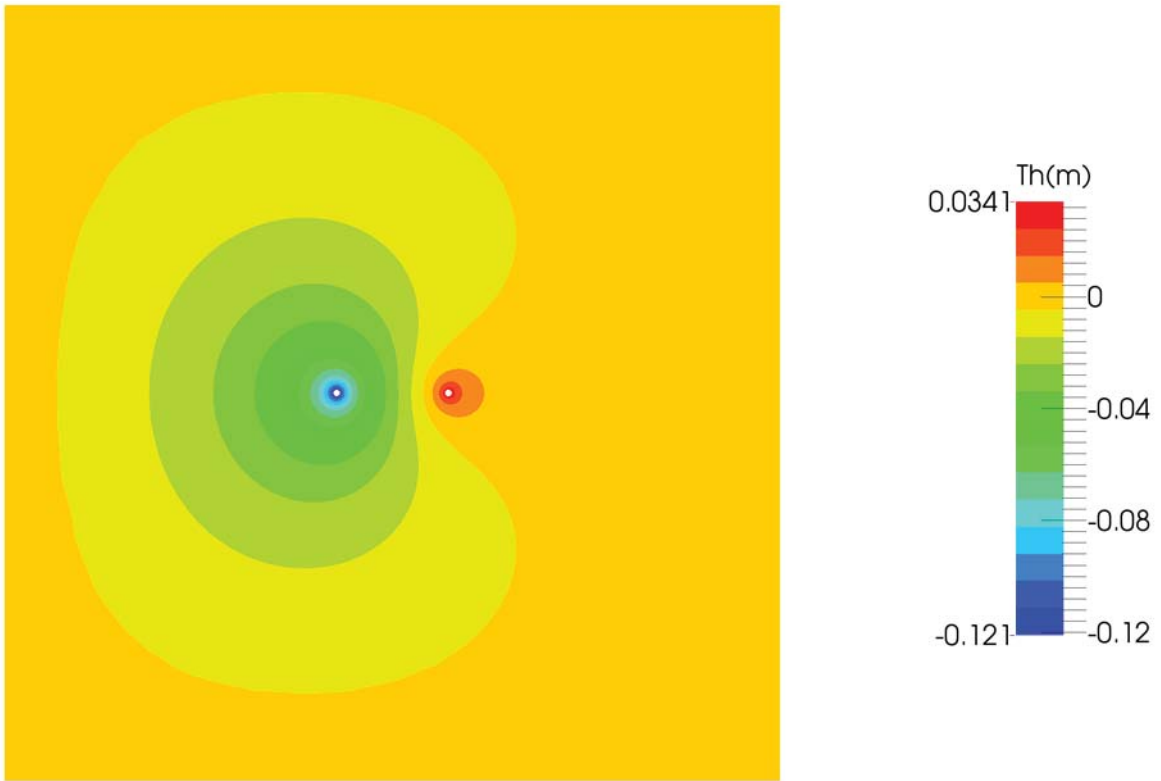


図 4.5.2-5 割れ目内の全水頭分布の計算結果

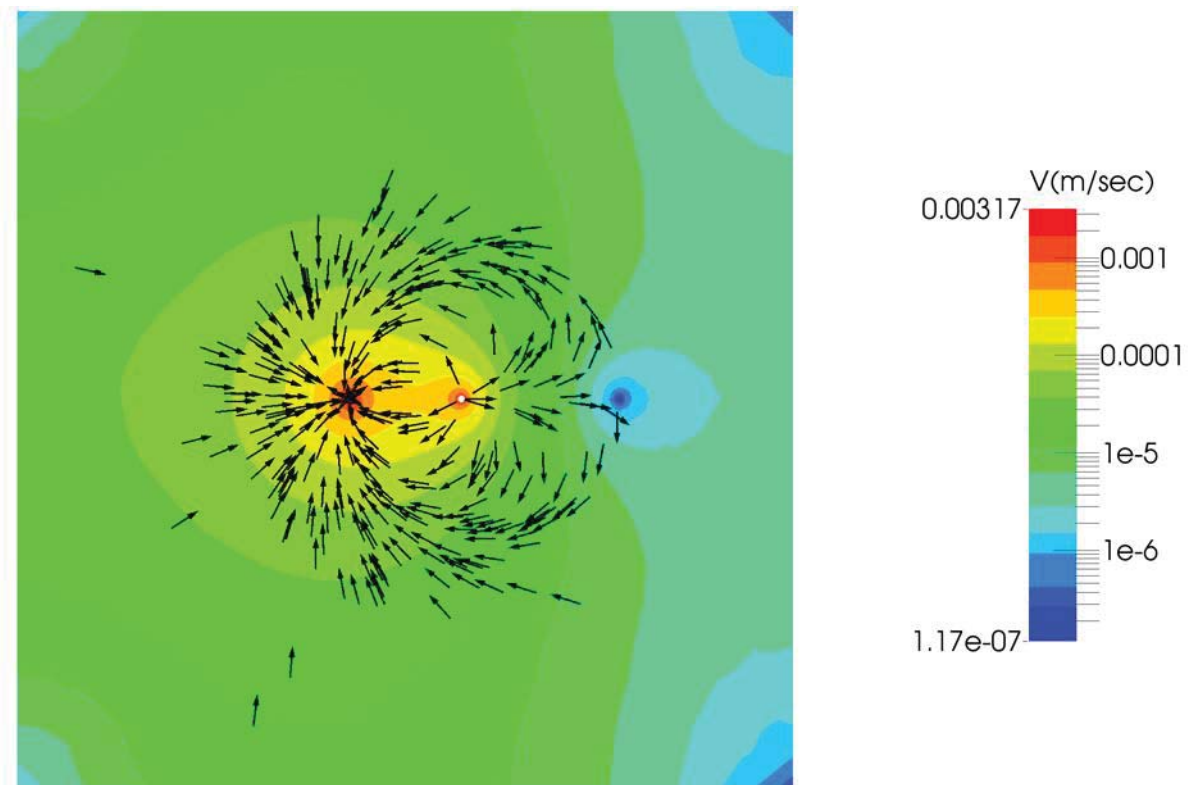


図 4.5.2-6 割れ目内のダルシー流速分布の計算結果 (15W3137T8 試験)

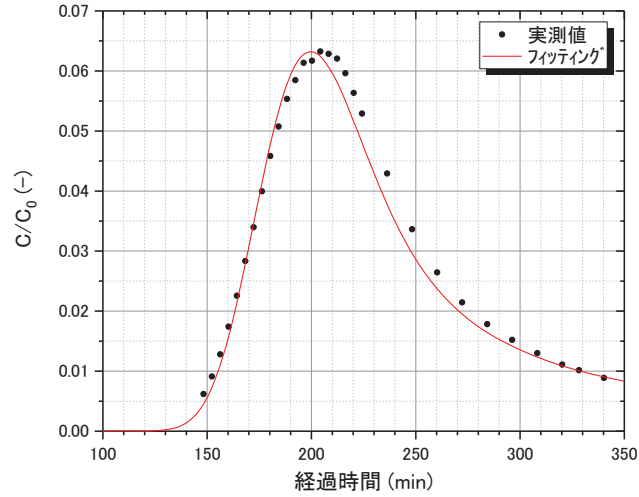


図 4.5.2-7 ウラニンの破過曲線のフィッティング (16W5352T-12 試験)

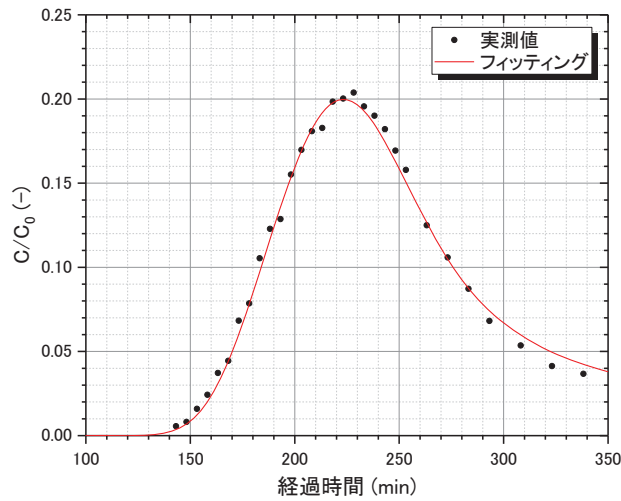


図 4.5.2-8 ウラニンの破過曲線のフィッティング (16W5352T-13-15 試験)

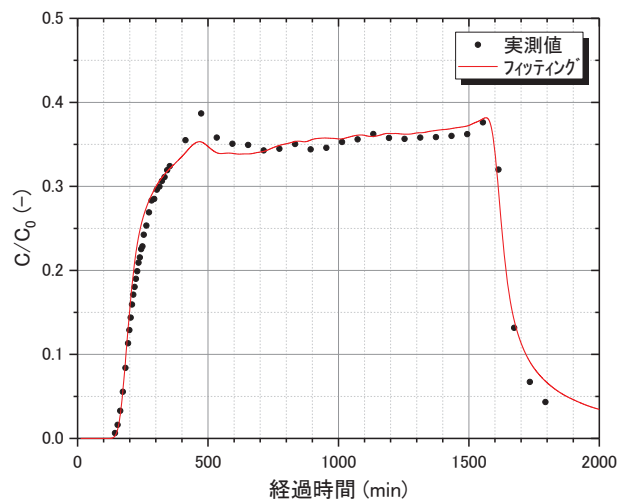


図 4.5.2-9 ウラニンの破過曲線のフィッティング (16W5352T-16-18 試験)

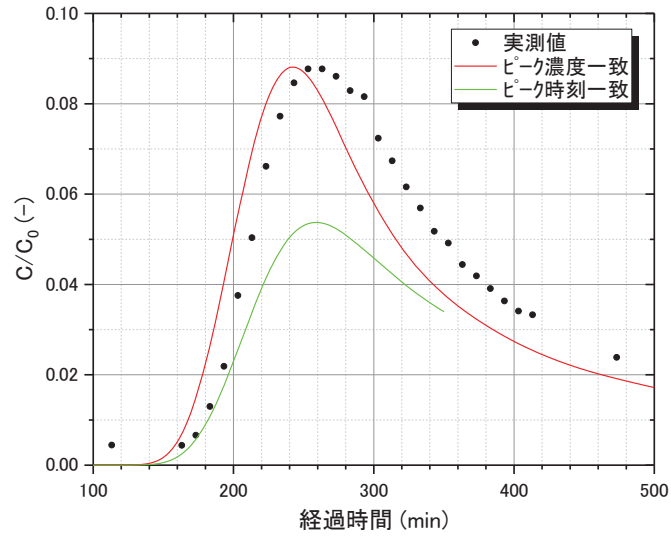


図 4.5.2-10 Rb<sup>+</sup>の破過曲線のフィッティング (16W5352T-13-15 試験)

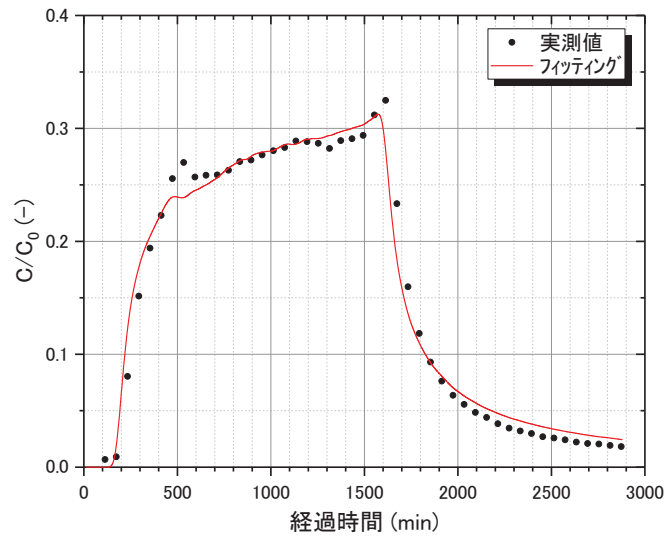


図 4.5.2-11 Rb<sup>+</sup>の破過曲線のフィッティング (16W5352T-16-18 試験)

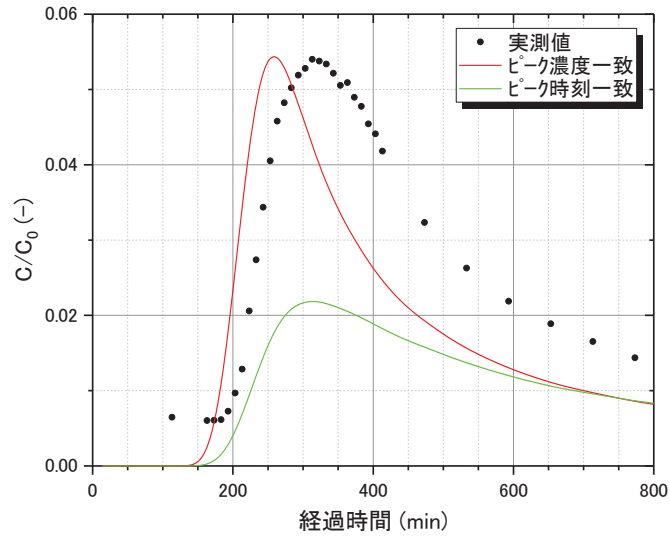


図 4.5.2-12 Ba<sup>2+</sup>の破過曲線のフィッティング (16W5352T-13-15 試験)

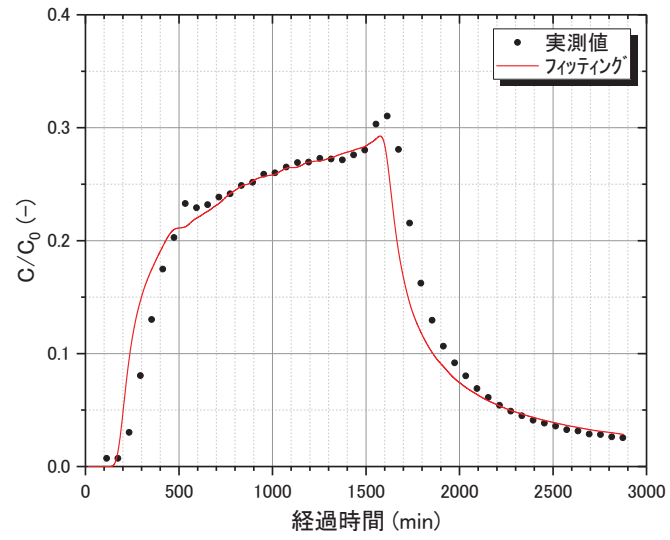


図 4.5.2-13 Ba<sup>2+</sup>の破過曲線のフィッティング (16W5352T-16-18 試験)

#### 4.6 ポイント希釈試験の測定精度に関する検討

ポイント希釈試験は岩盤内を通過する地下水流量を測定する単孔式トレーサー試験であるが、本事業により開発した2種類の孔内装置を用いてポイント希釈試験を実施する場合の測定精度について、数値シミュレーションと室内試験による検討を行った。

##### 4.6.1 ポイント希釈試験の概要

ポイント希釈試験は、ボーリング孔内の特定区間をダブルパッカーにより遮断することにより試験区間を構築（図 4.6.1-1 の第一段階）した後、試験区間にトレーサーを注入し（第二段階）、試験区間を通過する地下水流によりトレーサーが希釈される速度を測定し（第三段階）、その希釈速度から解析解を用いて試験区間を通過する地下水の流量を推定する手法である。

試験区間を通過する地下水の流量  $Q_{bh}$  は、試験区間のトレーサー濃度の時系列変化から理論的に次式により算出される。

$$Q_{bh} = -V \cdot \frac{d \ln c}{dt}$$

ここで、 $V$ は試験区間内の容積（今回使用した試験装置では循環用のチューブの容積も含む）、 $c$ は時刻  $t$  における試験区間内のトレーサー濃度である。

ただし、試験区間の通過流量から地盤中の地下水流量を推定するには、後述するようにボーリング孔の集水効果を考慮する必要がある。

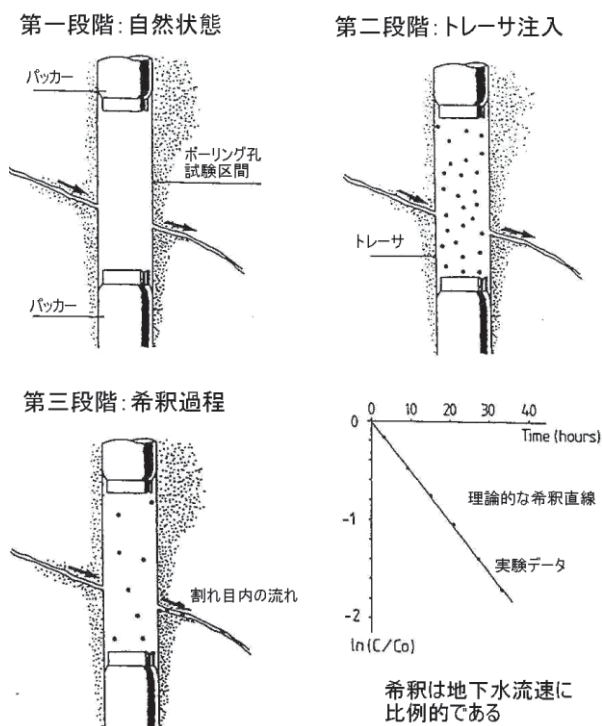


図 4.6.1-1 ポイント希釈試験の測定原理 (Gustafsson, *et al.*, 2006)

#### 4.6.2 本事業で開発した孔内装置

本事業では原位置トレーサー試験のための孔内装置として、2種類の装置を開発した。

一つは図 4.6.2-1、2 に示すダブルパッカー型の孔内装置である。直径 86 mm のボーリング孔での適用を想定し外径は 79 mm で、試験区間を構築するために両端にパッカーを有する。パッカー間の距離が試験区間長となり、図では 165 mm となっているが、拡張ブロックを装着することにより試験区間長を延長することが可能である。孔内装置には試薬吐出口が 2 箇所付いており、坑道内のトレーサー注入装置と送水チューブで繋がっていて、孔内装置とボーリング孔壁との隙間（試験区間）にトレーサー溶液を注入できる。また、孔内装置には試薬回収口も 2 箇所付いており、試験区間の孔内水を回収し、別の送水チューブで坑道内に送り返す。試薬吐出口からの注入量と試薬回収口からの回収量とを同じにすることで、試験区間内の水圧を上昇させることなく、試験区間内にトレーサー溶液を送り込むことができる。また、試薬吐出口と回収口を 2 箇所ずつ設けて試験区間内の水の流れをつくることで、試験区間内のトレーサー濃度の偏りを防ぐことができる。試験区間の容積は 150 mL で、トレーサー溶液が循環する部分の容積としては、これに送水チューブの容積が加わることになる。

もう一つは図 4.6.2-3、4 に示すパッカー一体型の孔内装置である。パッカーに試薬吐出口と回収口が 1 つずつ埋め込まれている。孔内で使用する際には、図 4.6.2-5 に示すように試薬吐出口・回収口の周囲にスペーサーを貼り付けたメッシュを装着し、試験区間を構築する。その結果、試験区間長を任意の長さに設定することが可能で、ダブルパッカー型孔内装置と同じ 165 mm の試験区間長にした場合に、試験区間の容積は 44 mL に減少する。

試薬吐出口

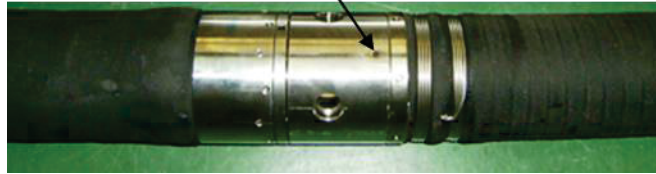


図 4.6.2-1 ダブルパッカー型孔内装置の写真

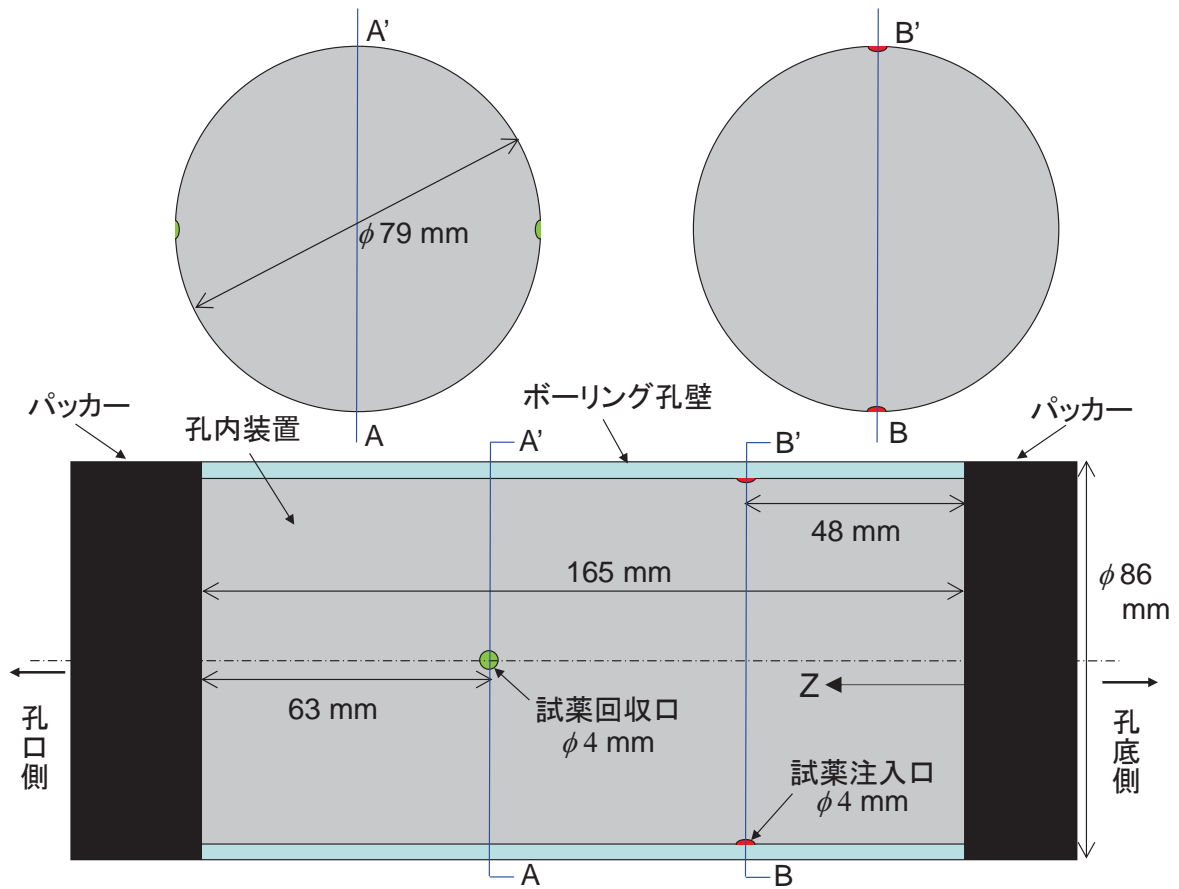


図 4.6.2-2 ダブルパッカー型孔内装置の外観





図 4.6.2-3 パッカー一体型孔内装置の写真

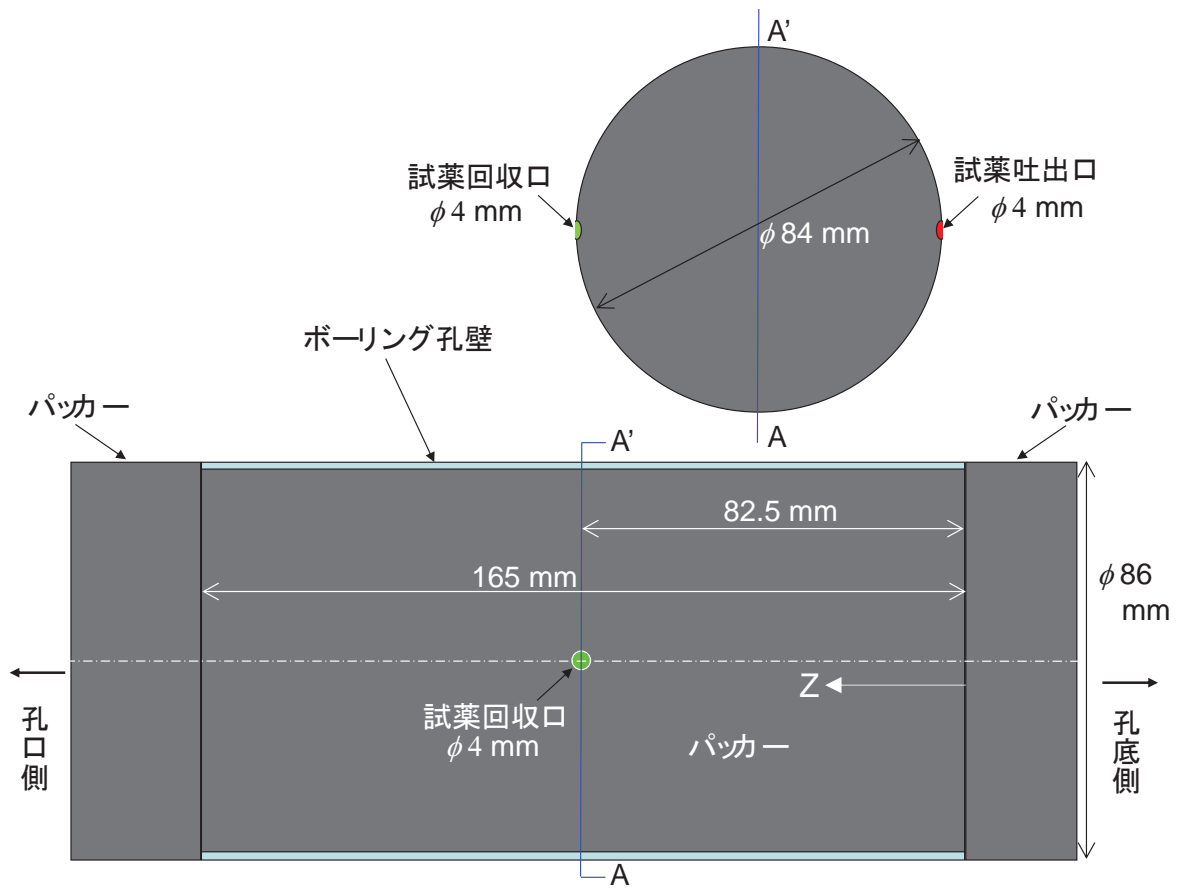


図 4.6.2-4 パッカー一体型孔内装置の外観



図 4.6.2-5 パッカー一体型孔内装置での試験区間の構築

#### 4.6.3 室内試験による検討

本事業により開発した2種類の孔内装置を用いてポイント希釈試験を実施する場合の測定精度について、室内試験による検討を行った。

室内試験では、図 4.6.3-1 に示すようにアクリルパイプをボーリング孔に見立て、パイプ内に孔内装置を挿入して実施した。アクリルパイプの円周上の相対する位置に2本のチューブを接続し、片方のチューブから水を一定流量で注入し、もう片方のチューブから同流量で水を回収することにより、ボーリング孔に交差する割れ目内の地下水流を模擬した。室内試験の配管・流路を図 4.6.3-2 に示す。また、試験は以下の手順により実施した（図 4.6.3-3）。

##### <試験手順>

- ① 配管経路を形成し、配管内の脱気を充分に行う。
- ② モーノポンプを駆動させて通過流量を設定し、HPLC ポンプを駆動させて循環流量を設定する。その際、給水タンクと排水タンクの水位差による流量変動を防ぐ目的で、配管内に約 1 Mpa の加圧を行う。
- ③ トレーサータンクのバルブを切り替えて、循環配管内が一定のトレーサー濃度になるまで置換する。
- ④ トレーサー置換タンクのバルブを元に戻し、ポイント希釈試験を開始する。トレーサー濃度が十分に低下するか、一定の値に安定したことを確認して試験を終了する。

ダブルパッカー型孔内装置を用いた試験では、図 4.6.3-4 に示すように2本のチューブと試薬吐出口（循環流出口）や試薬回収口（循環流入口）とが45度の角度で交差するように孔内装置を設置した。また、チューブが循環流出口と循環流入口の中央に位置する場合（通過流中央）と、54 mm ずれた場合（通過流上部）の2通りを想定した。一方、パッカー型孔内装置を用いた試験では、試薬吐出口と回収口を結ぶ線分と2本のチューブとが直交するように孔内装置を設置し、チューブが試薬吐出口や試薬回収口と同じ高さにある場合のみを想定した。今回の室内試験では、孔内装置とアクリルパイプの内壁との隙間容積に循環用の送水チューブの容積を加えた循環部分の容積は、ダブルパッカー型孔内装置では475 mL、パッカー一体型孔内装置では344.3 mLであった。

試験条件の一覧を試験結果から算定された孔通過流量とともに、表 4.6.3-1 に示す。試験では、孔内装置のタイプ、割れ目を模擬した通過流の位置の他に、通過流量、試薬吐出口と回収口から流出入させる循環水の流量をパラメーターとして実施した。

試験で得られた循環水中のトレーサー濃度の経時変化の例を、図 4.6.3-5、6 に示す。いずれの試験でも試験初期にはトレーサー濃度の時間変化率に乱れがみられるが、孔通過流量はある程度時間が経過した後の安定した濃度の時間変化率から4.6.1に示した理論式を用いて算定した。

表 4.6.3-1 の算定通過流量と設定通過流量の比をみると、ダブルパッカー型孔内装置では 0.61～0.86 の範囲にある。通過流（チューブ）が循環流出口と循環流入口の中心から 54 mm ずれた場合（通過流上部）に、特に算定通過流量が過小評価となる。通過流が循環流出口と循環流入口の中央に位置する場合（通過流中央）でも、循環流量と設定通過流量の比が最小のケース（試験番号 2）と最大のケース（試験番号 7）で、算定通過流量が過小評価となっている。一方、パッカー一体型孔内装置では、算定通過流量と設定通過流量の比は 0.57～0.84 の範囲にある。循環流量と設定通過流量の比が最も大きいケース（試験番号 9）で、算定通過流量が過小評価となっている。

室内試験の結果、ポイント希釈試験では試験条件により通過流量の推定精度が異なることがわかった。ただし、今回の室内試験では割れ目の中の地下水流れをアクリルパイプに接続した内径 4 mm のチューブで模擬したが、実際の割れ目では 86 mm の幅に対し僅か 4 mm の部分だけを水が流れているというような状況は一般的ではないと考えられる。また、室内試験では、様々な条件で試験を実施するには時間と労力の制約がある。そのため、次項では、数値シミュレーションにより様々な条件下でのポイント希釈試験の推定精度を検討することとした。



図 4.6.3-1 試験風景

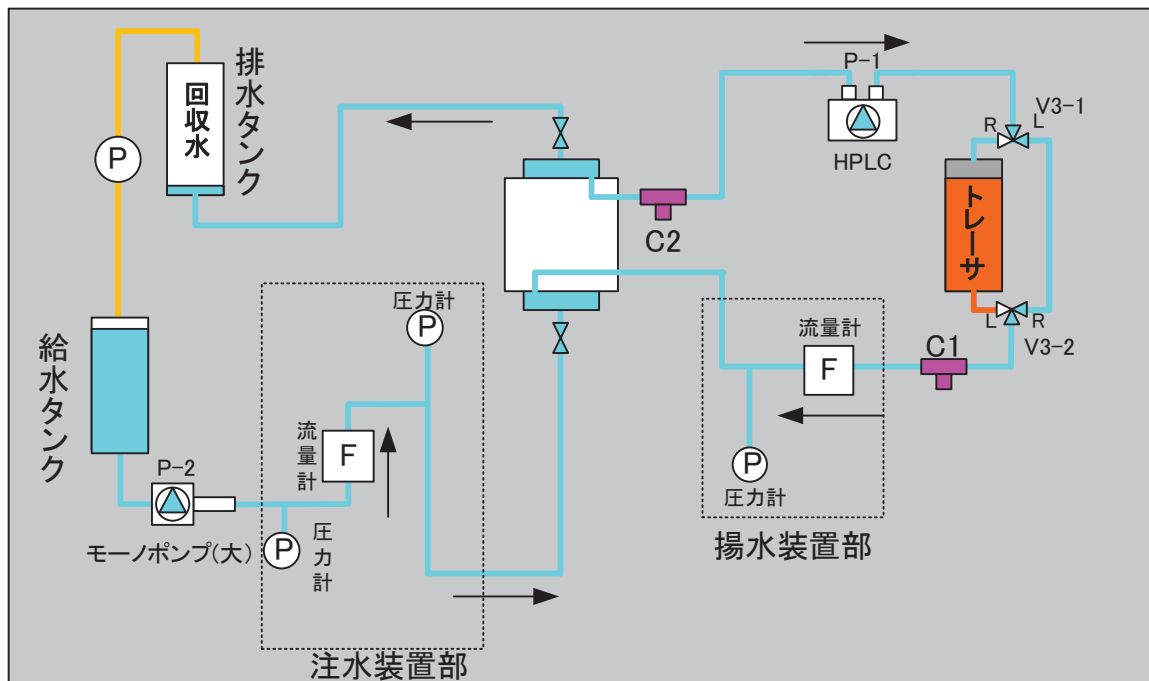
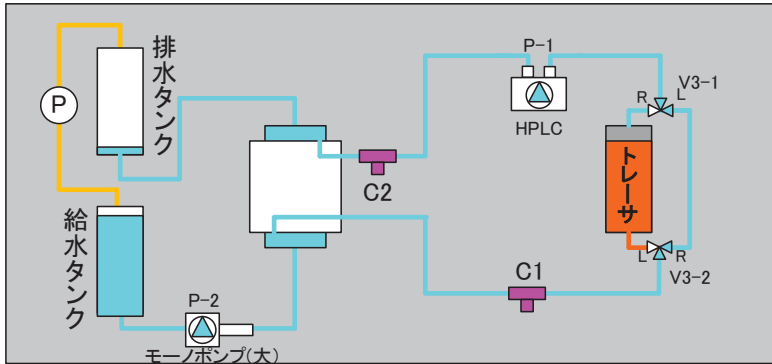


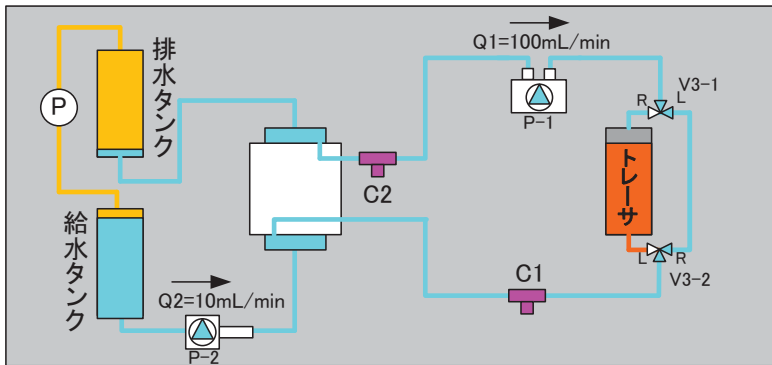
図 4.6.3-2 ポイント希釈試験の配管経路図

① 準備 (配管方法)



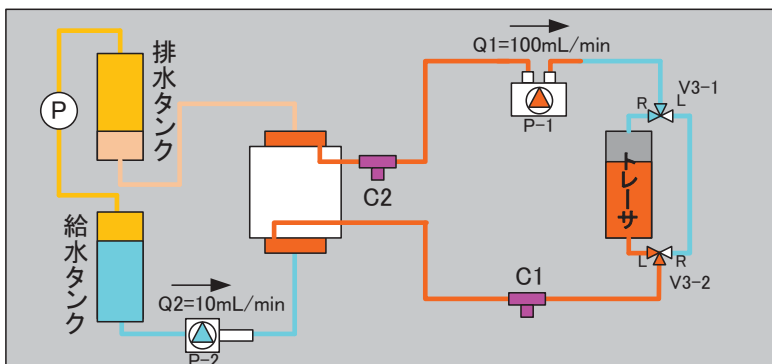
V3-1:L  
V3-2:R  
P-1:停止  
P-2:停止  
P(給水・排水タンク内圧力):0MPa  
注意事項  
配管内の脱気確認

② 流速場の形成 (水道水の注入)



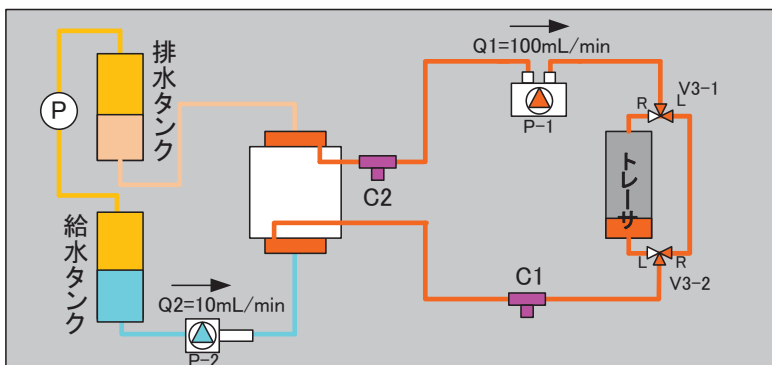
V3-1:L  
V3-2:R  
P-1:100mL/min  
P-2:10mL/min  
P(給水・排水タンク内圧力):1MPa  
注意事項  
配管内の脱気確認,  
V3-1L側~V3-2R側のラインの加  
圧とともにトレーサ置換タンク内  
も加圧する

③ トレーサ溶液の置換



V3-1:R  
V3-2:L  
P-1:100mL/min  
P-2:10mL/min  
P(給水・排水タンク内圧力):1MPa  
注意事項  
C1とC2のトレーサ濃度が一定にな  
るまで行う

④ 希釈試験開始



V3-1:L  
V3-2:R  
P-1:100mL/min  
P-2:10mL/min  
P(給水・排水タンク内圧力):1MPa  
注意事項  
V3-1とV3-2は同時に切り替える排  
水タンクの残量に注意する

図 4.6.3-3 室内試験の手順 (設定通過流量 10 mL/min、循環流量 100 mL/min のケース)

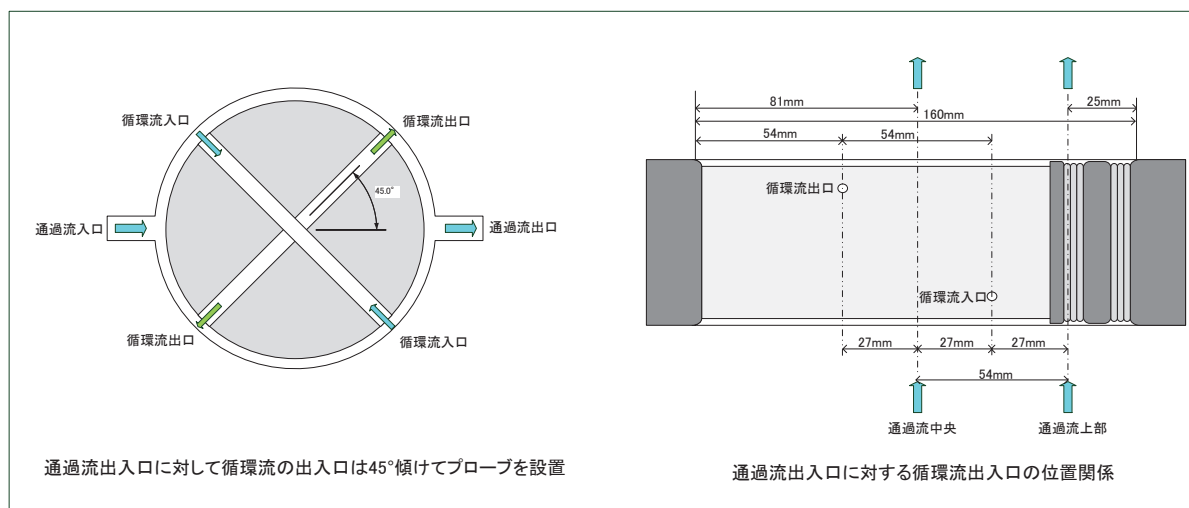


図 4.6.3-4 ダブルパッカー型装置を用いた試験のチューブ（通過流入口・出口）と装置の位置関係

表 4.6.3-1 試験条件と試験結果一覧

試験番号	試験装置	通過流の位置	循環流量	設定通過流量 $Q_m$	算定通過流量 $Q_e$	$Q_e/Q_m$
			mL/min	mL/min	mL/min	-
1	ダブルパッカー型	中央	95.6	11.6	10.0	0.86
2		中央	46.7	9.24	6.30	0.68
3		上部	50.6	14.3	8.90	0.62
4		上部	104	21.9	14.2	0.65
5		中央	99.1	7.40	5.61	0.76
6		中央	99.1	4.20	3.23	0.77
7		中央	97.8	3.33	2.04	0.61
8	パッカー一体型	中央	104	4.39	3.68	0.84
9		中央	104	2.42	1.38	0.57
10		中央	104	9.91	7.13	0.72

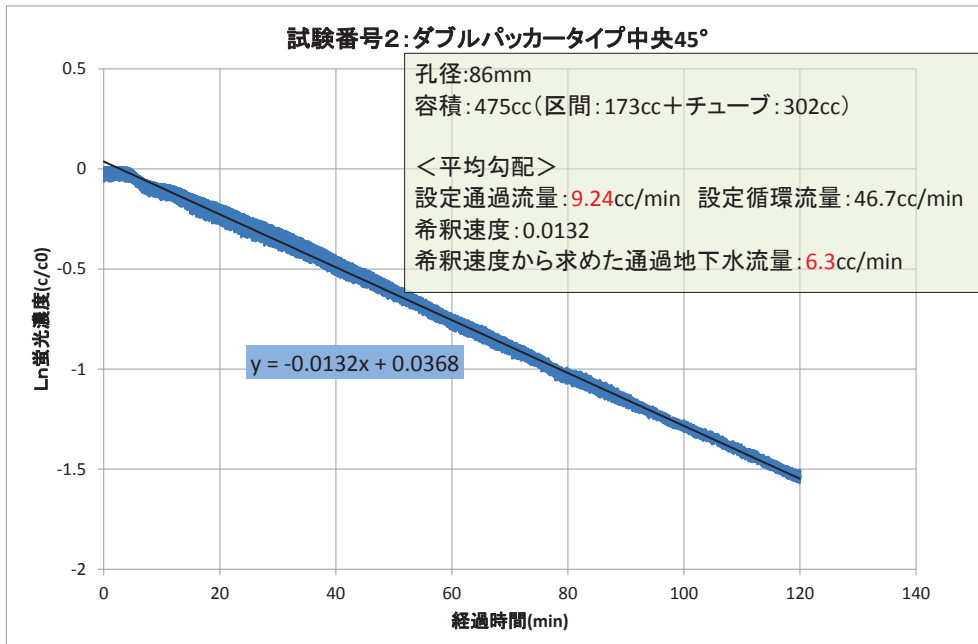


図 4. 6. 3-5 循環水中のトレーサー濃度の経時変化 (試験番号 2)

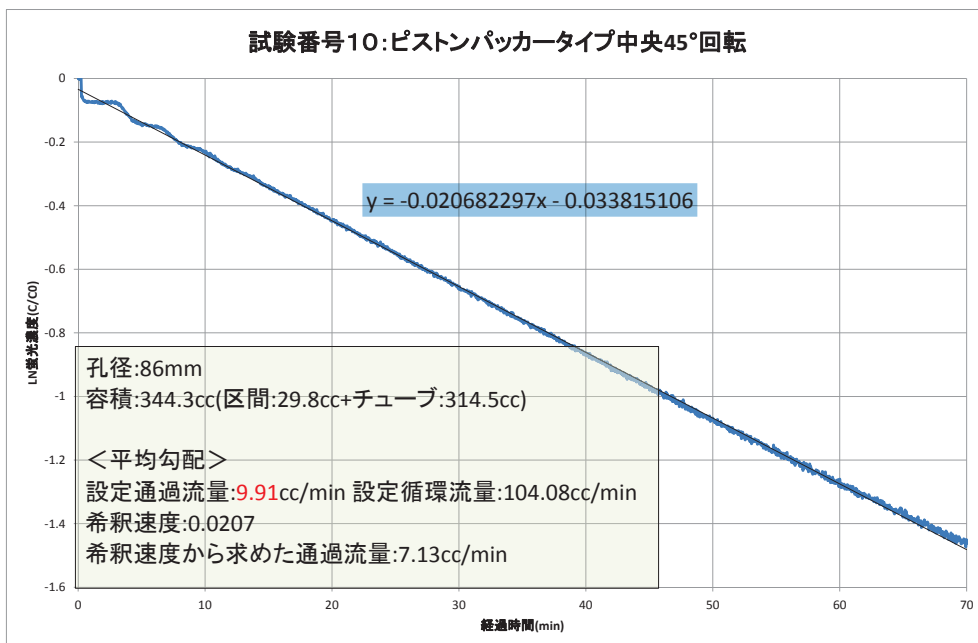


図 4. 6. 3-6 循環水中のトレーサー濃度の経時変化 (試験番号 10)

#### 4.6.4 数値シミュレーションによる検討

本事業により開発した2種類の孔内装置を用いてポイント希釈試験を実施する場合の測定精度について、数値シミュレーションによる検討を行った。

図 4.6.4-1 に示すように、岩盤割れ目を2000 mm×2000 mmの範囲の正方形で表した。割れ目の厚さは0.1 mmとした。この割れ目を表す正方形の中心にボーリング孔があるとした。ボーリング孔軸は割れ目面に直交しているとした。

図 4.6.4-2～5 に、ダブルパッカー型孔内装置の計算に使用したメッシュを示す。パッカー一体型孔内装置の計算に使用したメッシュも同様である。メッシュは全て6面体セルを使い作成した。岩盤割れ目については、厚さ方向に6分割した。解析精度の向上を図るため、ボーリング孔と割れ目との交差部の周辺ではメッシュを細かく分割した。

解析は、坑道内装置と孔内装置との間を循環するトレーサー溶液の流量、割れ目内の地下水流れの方角、割れ目と孔内装置との交差位置、坑道内装置と孔内装置とを繋ぐ送水チューブの長さをパラメータとして実施した。

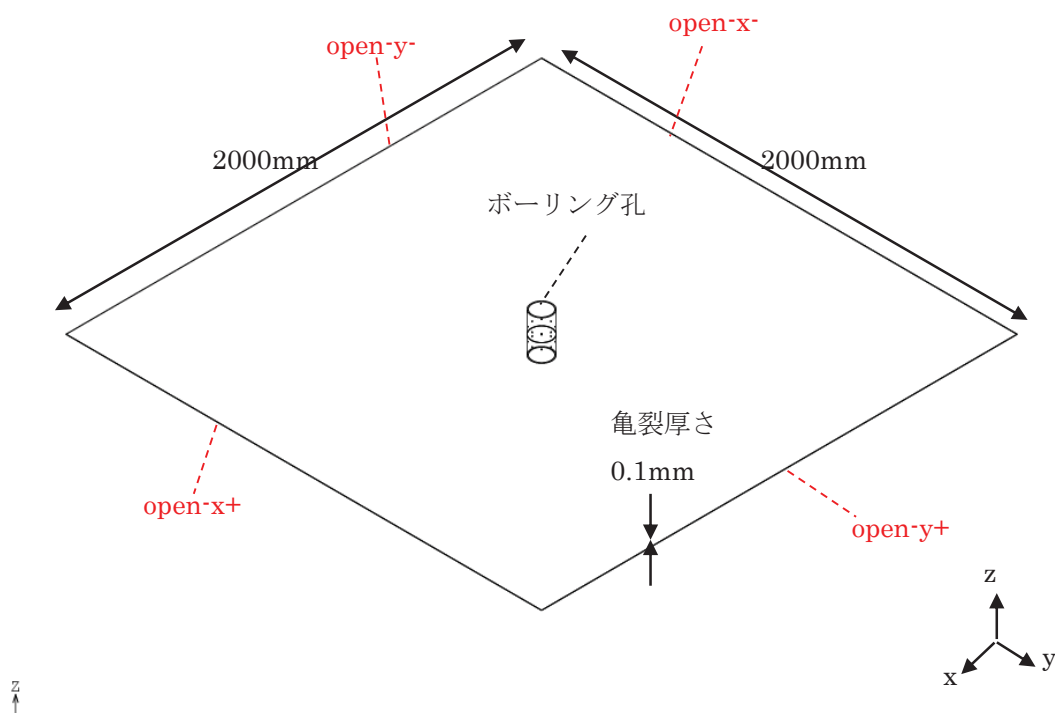
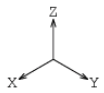
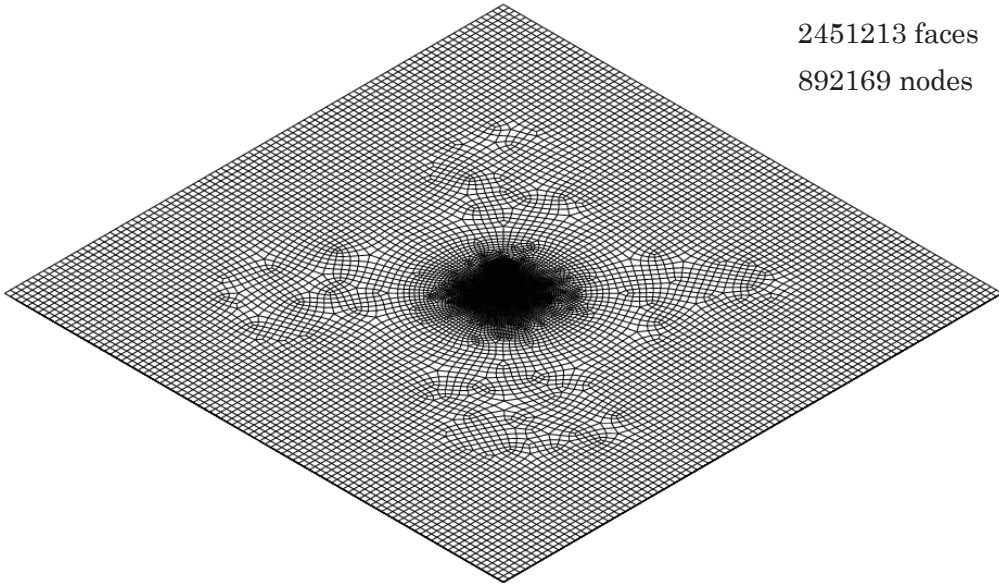


図 4.6.4-1 解析対象領域



779572 cells  
2451213 faces  
892169 nodes



メッシュ分割図

図 4.6.4-2 メッシュ分割図 (解析領域全体)

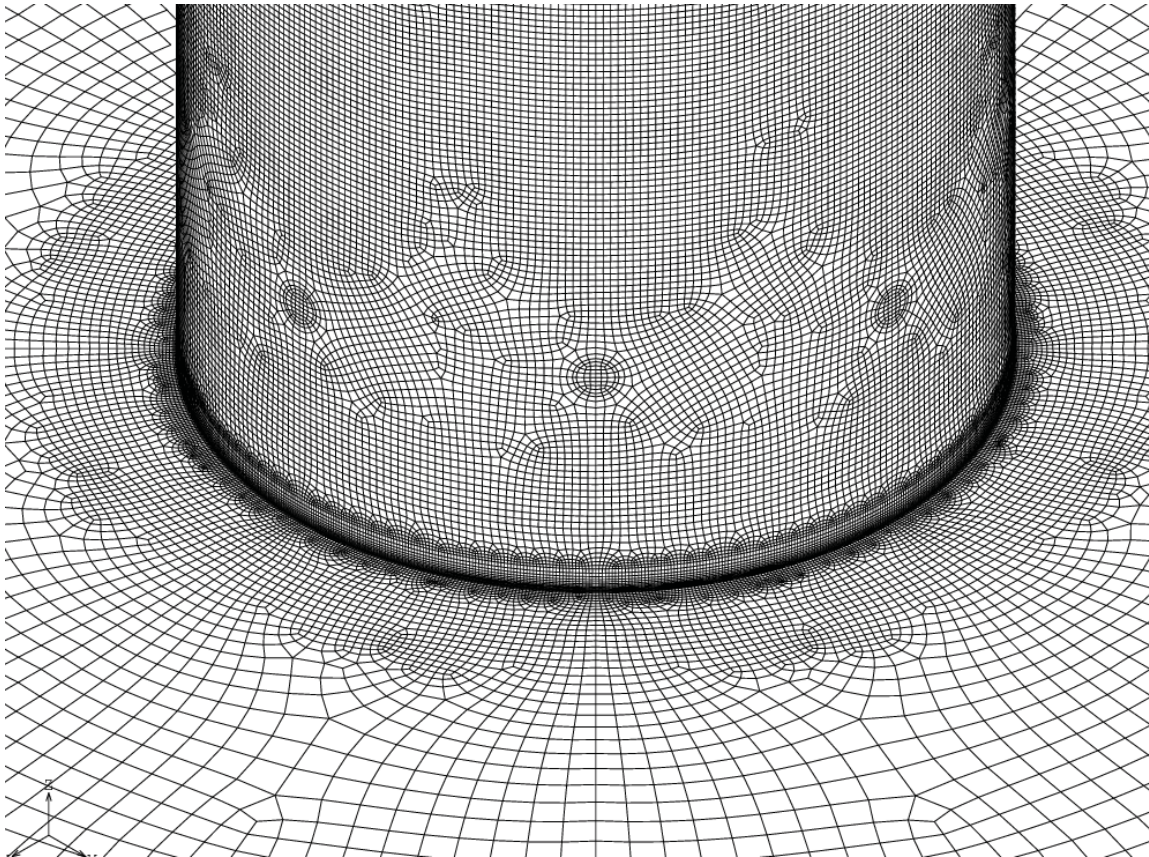


図 4.6.4-3 メッシュ分割図 (割れ目とボーリング孔の交差部1)

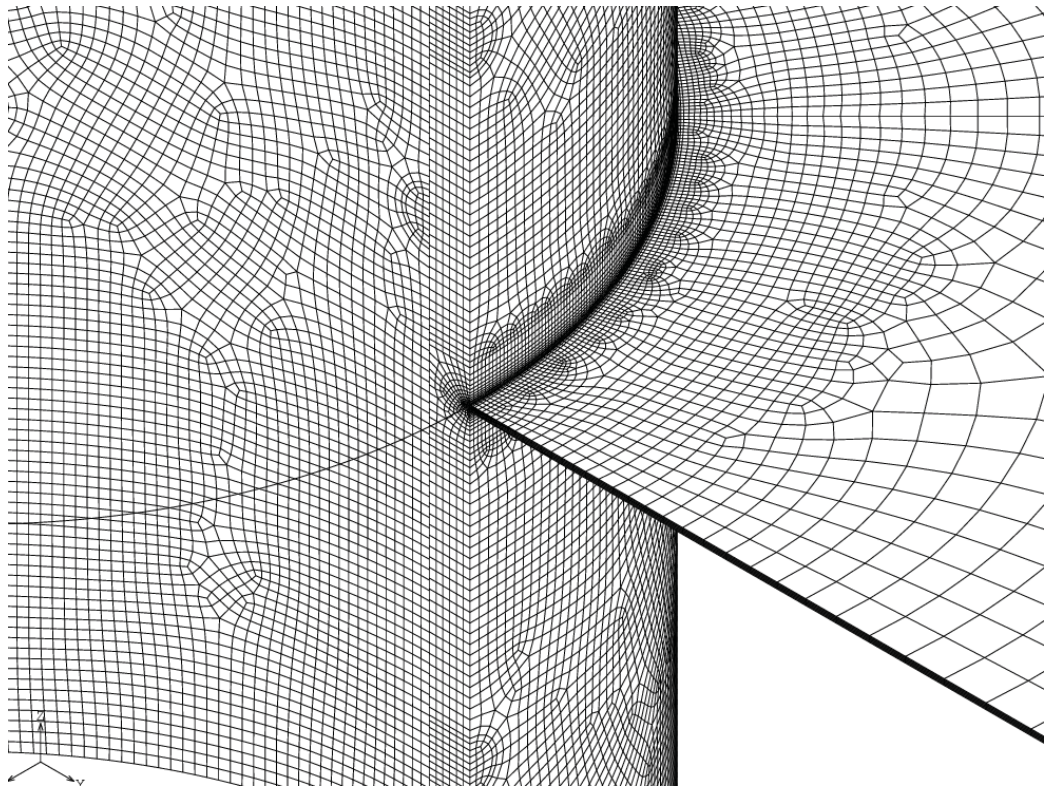


図 4.6.4-4 メッシュ分割図（割れ目とボーリング孔の交差部 2）

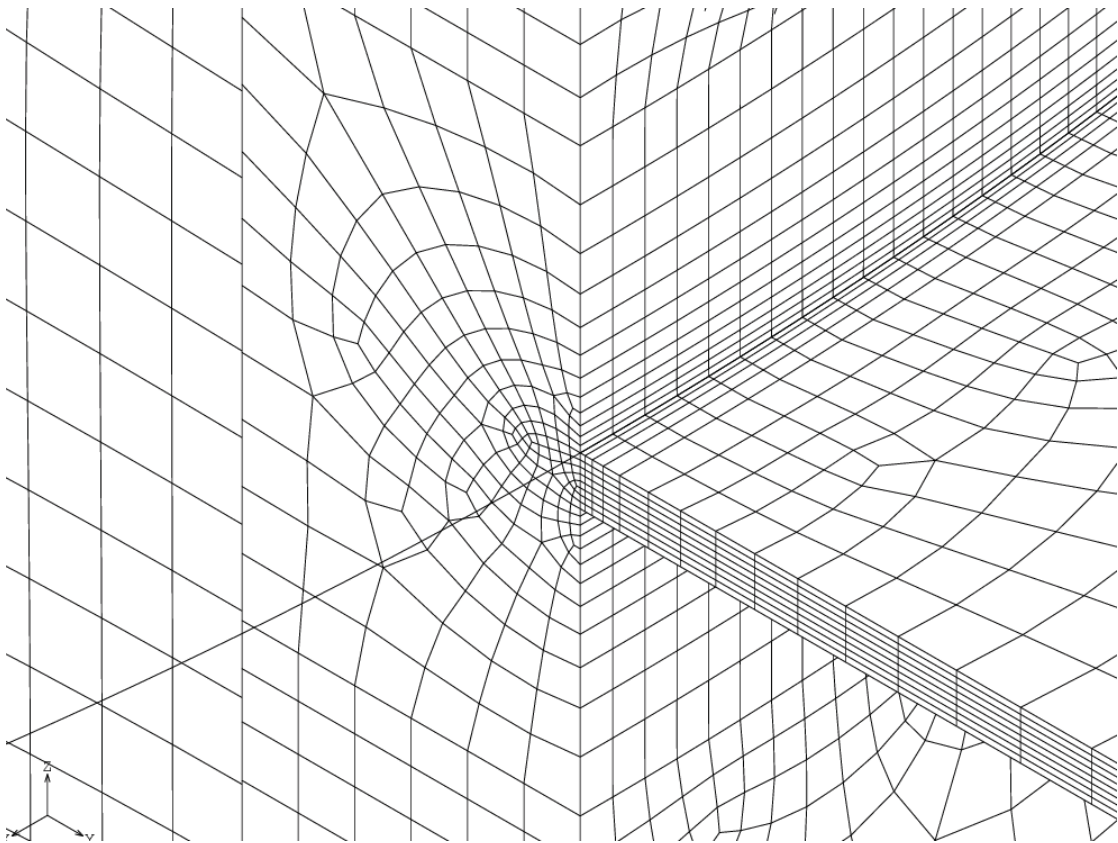


図 4.6.4-5 メッシュ分割図（割れ目とボーリング孔の交差部 3）

循環水のトレーサー濃度の経時変化の解析結果の例を、図 4.6.4-6、7 に示す。図 4.6.4-6 は、循環流量が適正な例であり、試験初期にトレーサー濃度の変化率に乱れがみられるもののすぐに解消し、全解析時間を通じて濃度変化率はほぼ一定となっている。この変化率から、に示した理論式に従いボーリング孔を通過する地下水流量を算出する。一方、図 4.6.4-7 は、循環流量を少なめに設定した例であり、トレーサー濃度の変化率の乱れが比較的長時間続き、解析時間の前半と後半で異なる濃度変化率がみられる。

ダブルパッカー型孔内装置に関する解析結果を表 4.6.4-1 に、パッカー一体型孔内装置に関する解析結果を表 4.6.4-2 にそれぞれ示す。なお、表の中の割れ目内の地下水流れの方向と孔内装置との関係は、図 4.6.4-8、9 に示す通りである。

ダブルパッカー型孔内装置の場合、孔通過流量設定値 10 mL/min、循環流量 50 mL/min、割れ目内の地下水流れの方向が  $0^\circ$ 、割れ目と孔内装置との交差位置が試薬吐出口と回収口の間である  $z=75$  mm、孔内装置と坑道内装置とを繋ぐチューブ長が片道 50 m で往復 100 m の場合を、基本ケースとする。基本ケースでは、循環水のトレーサー濃度の時間変化率の安定に 4 時間程度かかり孔通過流量は 10.06 mL/min と算定され、設定値である 10.00 mL/min とほぼ一致している。循環流量を 20、30、40、100 mL/min と変えた場合についてみると、循環流量が小さいほど循環水のトレーサー濃度の時間変化率が安定するのに時間を要し、算定される孔通過流量も大きくなることがわかる。循環流量が 20 mL/min のケースでは孔通過流量を 17.4 % 過大評価し、100 mL/min のケースでは 6.3 % 過小評価する結果となった。割れ目内の地下水流れの方向を変えた場合、 $90^\circ$  のケースではトレーサー濃度の時間変化率の安定にやや時間がかかるようになるが、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  いずれのケースでも孔通過流量は設定値とほぼ一致した値が得られる。割れ目と孔内装置との交差位置を変えた場合、基本ケースよりやや循環水のトレーサー濃度の時間変化率の安定に時間がかかる。交差位置が試薬回収口と吐出口との間に収まっている  $z=95$  mm のケースでは算定される孔通過流量は設定値と一致し、やや外れた  $z=110$  mm のケースでも設定値に近い値が得られるが、大きく外れた  $z=133.5$  mm のケースでは 25.9 % の過小評価となる。チューブ長を半分の往復 50 m としたケースでは、孔通過流量は設定値とほぼ一致している。孔通過流量の設定値を 5 倍の 50 mL/min とした場合、循環流量を 50 mL/min としたままでは孔通過流量は 11.4 % の過大評価となり、循環流量も 5 倍の 250 mL/min とすると孔通過流量は 10.0 % の過小評価となる。孔通過流量の設定値を 1/2 の 5 mL/min とした場合、循環流量も 1/2 の 25 mL/min とすると孔通過流量の推定値は設定値とほぼ同じになる。

パッカー一体型孔内装置の場合、循環流量 60 mL/min、割れ目内の地下水流れの方向が  $90^\circ$ 、割れ目と孔内装置との交差位置が試薬吐出口と回収口と同じ  $z=82.5$  mm、孔内装置と坑道内装置とを繋ぐチューブ長が片道 50 m で往復 100 m の場合を、基本ケースとする。基本ケースでは、循環水のトレーサー濃度の時間変化率の安定に 7 時間程度かかり、孔通過流量は設定値である 10.00 mL/min と一致している。循環流量を 20、30、40、50、70 mL/min と変えた場合についてみると、循環流量が 20

mL/min のケースではトレーサー濃度の時間変化率の安定に 30 時間を要し、孔通過流量も 23.7 %の過大評価となっている。循環流量が増えるにつれて、トレーサー濃度の時間変化率の安定にかかる時間は減り、孔通過流量も循環流量が 50 mL/min や 70 mL/min のケースでは設定値とほぼ一致している。割れ目内の地下水流れの方向を変えた場合、135° や 180° のケースでは孔通過流量は設定値とほぼ一致した値が得られるが、45° のケースでは約 30 %の過小評価となり、0° のケースでは 10 分の 1 以下の値に評価してしまう。割れ目と孔内装置との交差位置を変えた場合、試薬吐出・回収口より 20 mm 離れた  $z=102.5$  mm のケースでは設定値とほぼ同じ孔通過流量が得られ、58.5 mm 離れた  $z=141$  mm のケースでも 5.2 %の過小評価にとどまっている。チューブ長を半分の往復 50 m としたケースでは、孔通過流量は設定値とほぼ一致している。孔通過流量の設定値を 5 倍の 50 mL/min とした場合、循環流量を 5 倍の 300 mL/min にすると孔通過流量は 1.9 %の過小評価となるが、60 mL/min としたままでも 3.8 %の過大評価となり、循環流量の影響は小さい。孔通過流量の設定値を 1/2 の 5 mL/min とした場合、循環流量も 1/2 の 30 mL/min とすると孔通過流量の推定値は設定値とほぼ同じになる。

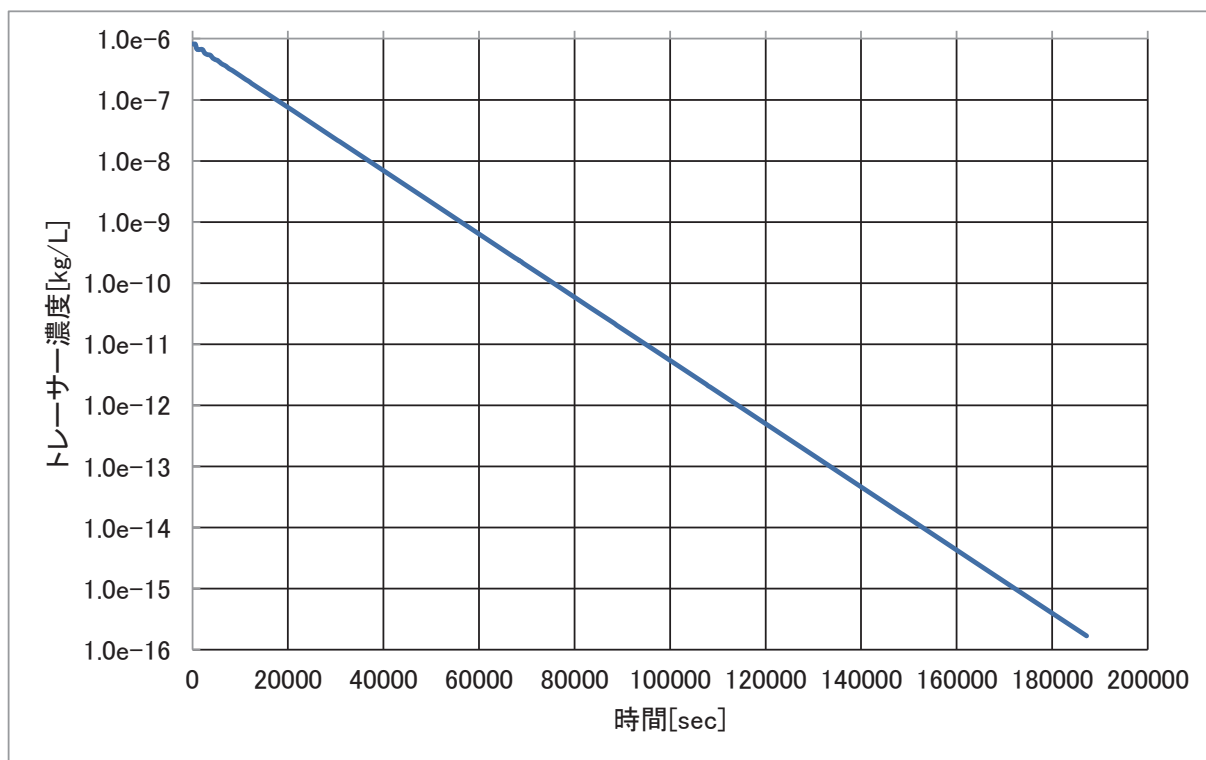


図 4.6.4-6 ポイント希釈試験の解析結果の例 1

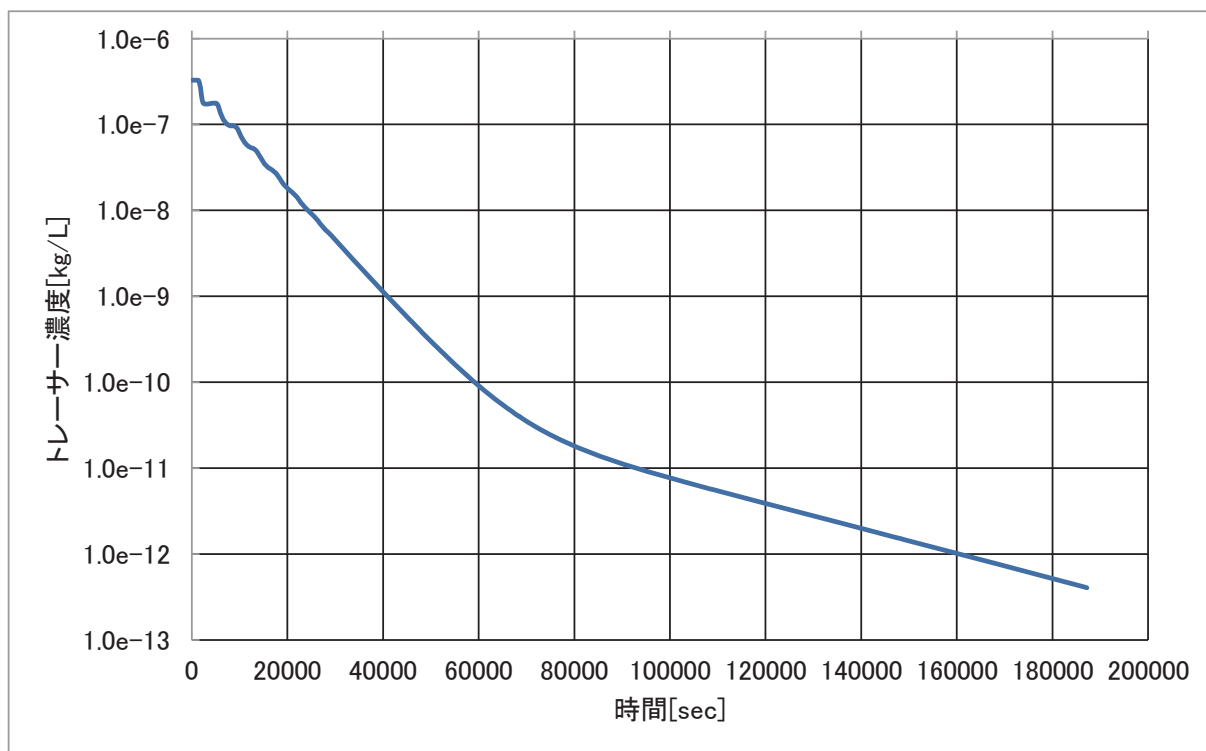


図 4.6.4-7 ポイント希釈試験の解析結果の例 2

表 4.6.4-1 ダブルパッカー型装置を用いたポイント希釈試験の解析結果

通過流量設定値 mL/min	循環流量 mL/min	割れ目内流れ方向 -	割れ目位置 mm	チューブ長 m	通過流量推定値 mL/min	濃度変化率安定時間 hour
<b>10.00</b>	<b>50</b>	<b>0°</b>	<b>75</b>	<b>100</b>	<b>10.06</b>	<b>4</b>
10.00	20	0°	75	100	11.74	10
10.00	30	0°	75	100	10.75	15
10.00	40	0°	75	100	10.26	9
10.00	100	0°	75	100	9.37	5
10.00	50	45°	75	100	10.01	4
10.00	50	90°	75	100	10.12	7
10.00	50	0°	95	100	10.00	7
10.00	50	0°	110	100	9.76	7
10.00	50	0°	133.5	100	7.41	7
10.00	50	0°	75	50	9.90	4
5.00	25	0°	75	100	5.05	10
50.00	50	0°	75	100	55.70	6
50.00	250	0°	75	100	44.99	4

表 4.6.4-2 パッカー一体型装置を用いたポイント希釈試験の解析結果

通過流量設定値 mL/min	循環流量 mL/min	割れ目内流れ方向 -	割れ目位置 mm	チューブ長 m	通過流量推定値 mL/min	濃度変化率安定時間 hour
<b>10.00</b>	<b>60</b>	<b>90°</b>	<b>82.5</b>	<b>100</b>	<b>10.00</b>	<b>7</b>
10.00	20	90°	82.5	100	12.37	30
10.00	30	90°	82.5	100	11.05	20
10.00	40	90°	82.5	100	10.55	20
10.00	50	90°	82.5	100	10.25	15
10.00	70	90°	82.5	100	9.84	6
10.00	60	0°	82.5	100	0.87	6
10.00	60	45°	82.5	100	7.06	7
10.00	60	135°	82.5	100	9.79	7
10.00	60	180°	82.5	100	9.77	10
10.00	60	90°	102.5	100	9.91	7
10.00	60	90°	141	100	9.48	10
10.00	60	90°	82.5	50	9.86	4
5.00	30	90°	82.5	100	5.04	9
50.00	60	90°	82.5	100	51.89	9
50.00	300	90°	82.5	100	49.06	4

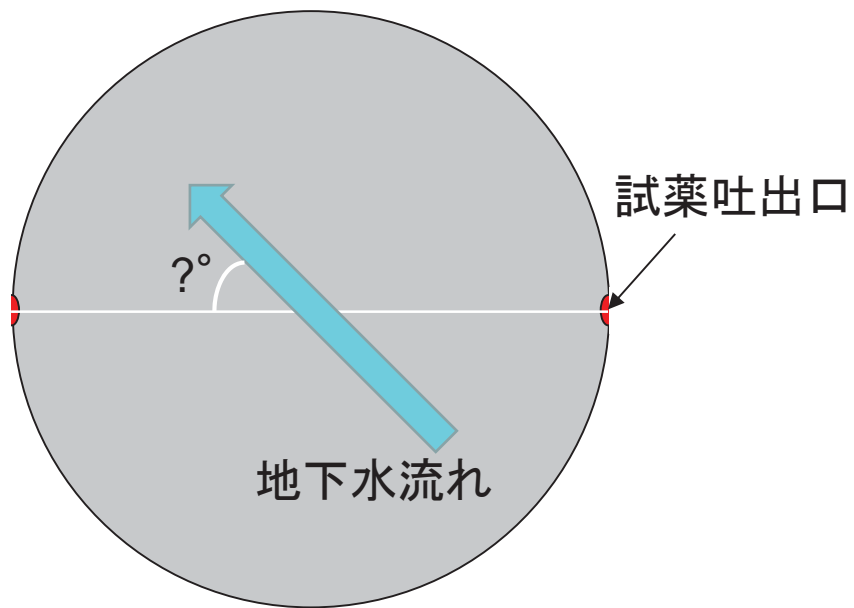


図 4.6.4-8 割れ目内地下水流れの方向と孔内装置との関係 (ダブルパッカー型孔内装置)

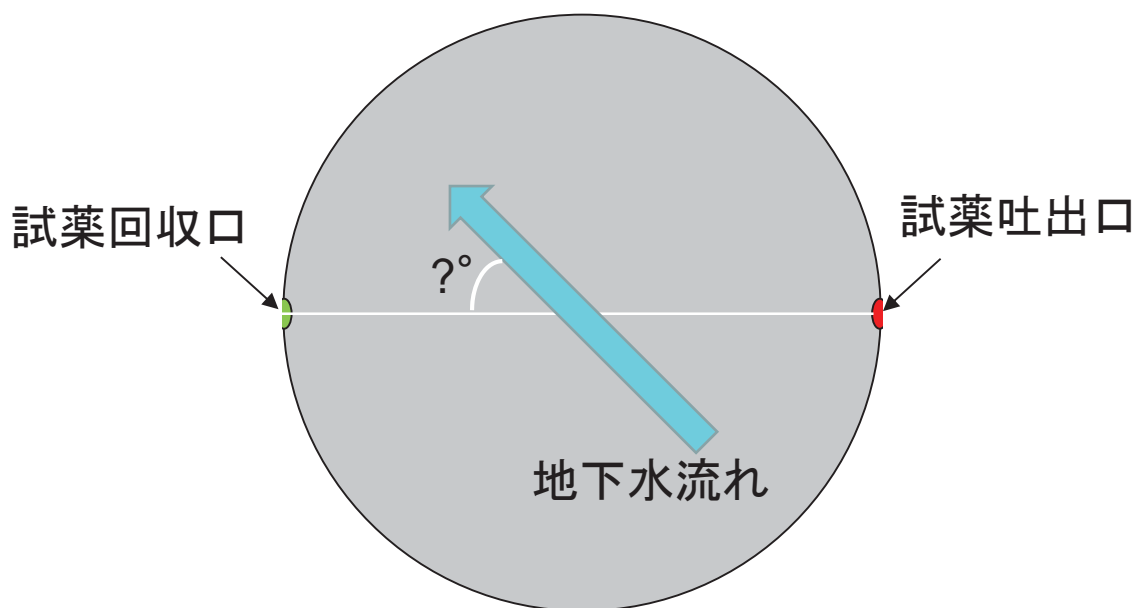


図 4.6.4-9 割れ目内地下水流れの方向と孔内装置との関係 (パッカー一体型孔内装置)

#### 4.7 まとめと今後の課題

JAEA 瑞浪超深地層研究所の、昨年度の試験場よりも水圧が高く地質環境の異なる深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑試験場において、事前の地質環境調査により孔間での水理的な連続性が確認された割れ目を対象に、本事業で開発した装置を用いて原位置トレーサー試験を実施した。試験は昨年度掘削した 15MI52 号孔と 15MI53 号孔で行い、単孔トレーサー試験と孔間トレーサー試験を実施した。そして、試験結果に対し、主に数値シミュレーションにより、試験対象割れ目の物質移行特性を評価した。また、岩盤割れ目内を流れる地下水の流量調査法であるポイント希釈試験を、本事業で開発した装置を用いて実施する場合の調査精度について、室内試験と数値シミュレーションにより検討した。

まず、試験装置の適用性についてであるが、昨年度の試験で破損や作動不良を起こした 6 方バルブについては、シャフト部の Oリング取り付け箇所を切削し太い Oリングに交換することで強度を増し、破損や作動不良を一度も起こすことがなかった。また、昨年度の試験で、設定値に対する流量出力の低下がみられた小流量用のモノポンプについて、ステーター部を交換したところ、設定値通りの流量制御が可能となった。今年度の試験対象割れ目はバックグラウンドの地下水流れが遅く、小流量での試験の実施が期待された。しかし、小流量用のモノポンプは 1 台しかないため、ニードルバルブによる流量制御を行った。バルブを用いて揚水流量を制御する場合、周囲の間隙水圧との関係で流量が時間とともに低下する事例が多いが、5~6 mL/min の安定した流量での揚水流量制御が実現できた。一方、昨年度の試験で孔内設置後に蛍光強度が減衰する現象が発生した高耐圧仕様の蛍光濃度センサーの Ver3.1 は、修理を施したが、今年度も孔内挿入後に蛍光強度が低下し、2 つのうち特に 1 つのセンサーで顕著であった。原因は高圧環境下へ設置した際の急激な圧力負荷によるものと考えられるが、現状では原因は絞り込めておらず、今後室内試験等で検証する必要がある。また、ピストンパッカーで 2 台とも漏えいが発生した。500m 坑道内における 3.5MPa の間隙水圧環境下では、間隙水圧とパッカー拡張圧力との差圧を 1 MPa 以内に留めるよう操作を行うこと、および挿入前に複数回の拡張テストを行いピストン部のネジを十分に加締めることが重要と考えられる。

単孔トレーサー試験では、15MI52 号孔と 15.34 m で交差する割れ目と、15MI53 号孔と 15.05 m で交差する割れ目を対象として試験を行った。試験においては、形状の異なる破過曲線を取得し評価パラメーターの相互検証を行うことを目的に、揚水流量やトレーサー・チェイサー比を変えた試験を行った。試験の結果、いずれの試験もピーク濃度が極端に低くならず有意な破過曲線を取得することができた。また、収着性トレーサーについては、一部の試験結果を除いてトレーサーの種類によって異なる破過曲線を得ることができた。これらの試験結果のうち、15MI52 号孔で行った試験を中心に評価解析を行った。非収着性トレーサーの評価解析では、集中定数と単位幅当りのバックグラウンド地下水流量を変えた解析を行い、最適な組み合わせを評価することができた。また、形状の異なる破過曲線を対象とした評価解析も実施し、評価された各々の集中定数と単位幅当りのバックグラウンド地下水



流量の組み合わせがほぼ等しくなることを確認した。一方、収着性トレーサーの評価解析では、評価された遅延係数にバラツキが確認された。さらに、試験結果では非収着性トレーサーと収着性トレーサーのピーク時間がほぼ等しい結果が得られたが、解析ではこの傾向を再現することができず、バックグラウンド地下水流れを変えて再計算したとしても改善されなかった。この原因としては、想定した収着モデルと実際の収着モデルが異なっている可能性が考えられ、解析モデルを見直す予定としている。また、試験条件については、揚水流量を更に小さくするか、チェイサー注入後に待機時間を設けてトレーサーと岩盤の接触時間を長くする等の改善策が考えられ、今後の検討課題である。

孔間トレーサー試験では、15MI52号孔と15MI53号孔の孔間で単孔トレーサー試験と同じ割れ目を対象として試験を行った。これらの割れ目は、ボーリング孔掘削時や透水試験時の水圧応答から、孔間で水理的に連続することが確認されている。また、上記2孔の割れ目交点間の距離は1.44 mと短く割れ目の走向傾斜や性状が比較的似ていることから、同じ割れ目である可能性が高い。孔間試験は、試験条件を変えて10回の試験を行った。今年度は、収着性トレーサーを用いた試験では、岩石基質部への収着の効果を見るために、孔間での移行速度が遅くなるような小流量の試験を目指した。高いトレーサー回収率を確保するために試験は51.59 mL/minという比較的大きな揚水流量のケースから開始し、回収率を確認しながら徐々に流量を下げていき、最終的に揚水流量5~6 mL/min、注水流量約2 mL/minの小流量まで下げることができた。また、16MI59号孔も含めた3孔間での水位差計測により、試験対象割れ目内の自然状態の動水勾配は1%程度で、いわゆるバックグラウンドの地下水流れは極めて遅いと推定され、小流量の試験においても比較的高い回収率が得られた。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ーの同定を行った。割れ目開口幅の推定値は、高精度BTVカメラの観察による値と透水量係数から3乗則により算出した値の中間の値となった。割れ目内分散長の推定値は孔間距離の約2%で、多くの観測データで縦分散長は移行距離の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った。収着性トレーサーの岩石基質に対する分配係数は、室内で柱状の岩石を用いたバッチ試験で同程度の試験時間で得られた分配係数に近い値となった。ただし、トレーサーの注入時間が60分間と短い試験では、収着性トレーサーの破過曲線を単一の分配係数で再現することができず、ピーク濃度とピーク時刻のそれぞれを再現する分配係数を算出するにとどまり、今後の課題である。

本事業で開発したダブルパッカー型とパッカー一体型の孔内装置を用いたポイント希釈試験により試験孔を通過する地下水流量を測定する場合の精度について、室内試験と数値シミュレーションによる検討を行った。ダブルパッカー型孔内装置を用いた試験では、測定結果は地下水流れの方向と孔内装置との相対角や、トレーサー溶液の循環経路の容積には依存せず、孔通過流量を精度良く評価することがわかった。ただし、孔通過流量に比べ循環流量が小さい場合や、試験対象割れ目が試験区間の端部近くで試験孔と交差する場合には、測定精度が低下することが確認できた。一方、パッカー一体型孔内装置を用いた試験では、測定結果は循環経路の容積には依存せず孔通過流量を精度良く評価

でき、試験対象割れ目の交差位置についてダブルパッカー型ほど影響を受けないことがわかった。ただし、地下水流れの方向と孔内装置との相対角によっては、極端に測定精度が低下することを確認した。また、循環流量が小さい場合には、やはり測定精度が低下する。試験対象割れ目の交差位置の問題は、事前にコア観察やBTVカメラによる孔壁観察により割れ目深度を特定すれば、孔内装置はロッドを用いて設置するので十分回避可能である。一方、地下水流れの方向や流量は事前にはわからないので、実際の現場では循環流量や孔内装置の設置角（パッカー一体型の場合のみ）を変えた複数回の試験を実施することが望ましい。

<参考文献>

- Bear, J., Jacobs, M. (1965): On the movement of water bodies injected into the aquifers, Journal of Hydrology, Vol.3, pp.37-57.
- 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.
- Gustafsson, E., Nordqvist, R. P. Thur (2006): Groundwater flow measurements and SWIW test in borehole KFM08A, SKB P-06-90.
- National Research Council, Rock Fractures and Fluid Flow (1996): Contemporary Understanding and Applications, National Academy Press, Washington, D.C.
- Nordqvist, R., Gustafsson, E. (2002) : Single-well injection-withdrawal tests (SWIW) Investigation of evaluation aspects under heterogeneous crystalline bedrock conditions, SKB R-04-57, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- Schroth, M. H., Istok, J. D., Haggerty, R. (2001) : In situ evaluation of solute retardation using single-well push-pull tests, Advances in Water Resources, 24(1), pp.105-117.
- 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
- 財団法人 電力中央研究所(2011) : 平成 22 年度 地層処分技術調査等委託費 (地層処分共通技術調査 : 岩盤中地下水移行評価技術高度化開発) -岩盤中物質移行特性評価技術高度化調査-, p2-13
- 田中靖治 他 (2011) : 亀裂性岩盤におけるポイント希釈試験による地下水通過流量測定, 日本地下水学会 秋季講演会 pp.220-223