

平成 29 年度

高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する

技術開発事業

(岩盤中地下水移行評価確証技術開発)  
-岩盤中物質移行特性評価技術の確証-

報 告 書

平成 30 年 3 月

一般財団法人 電力中央研究所



## 目 次

1. 研究概要.....	1-1
1.1 本研究の背景.....	1-1
1.2 目的.....	1-1
1.3 全体計画.....	1-2
1.3.1 研究の内容.....	1-2
1.3.2 研究工程.....	1-2
1.4 本年度の実施概要.....	1-3
1.4.1 トレーサー試験技術の開発.....	1-3
1.4.2 各種割れ目探査技術の開発.....	1-4
1.4.3 天然トレーサーによる調査技術の開発.....	1-4
2. トレーサー試験に係わる室内試験.....	2-1
2.1 背景.....	2-1
2.2 室内模擬トレーサー試験.....	2-2
2.2.1 背景.....	2-2
2.2.2 試験装置及び試験方法.....	2-2
2.2.3 試験結果および考察.....	2-5
2.2.4 評価解析.....	2-7
2.3 異なる粒径の岩石粉体試料を用いた収着パッチ試験.....	2-13
2.3.1 背景.....	2-13
2.3.2 試験方法.....	2-13
2.3.3 試験結果および考察.....	2-15
2.4 割れ目充てん鉱物への核種の収着・脱離試験.....	2-19
2.4.1 背景.....	2-19
2.4.2 昨年度実施した収着試験のまとめ.....	2-19
2.4.3 鉱物への収着・脱離試験.....	2-21
2.4.4 まとめ.....	2-23
2.5 室内試験のまとめ.....	2-24
3. 原位置トレーサー試験.....	3-1
3.1 はじめに.....	3-1
3.2 トレーサー試験.....	3-2
3.2.1 トレーサー試験装置の概要.....	3-2
3.2.2 蛍光濃度センサーのキャリブレーション.....	3-4
3.2.3 水圧測定.....	3-8
3.2.4 孔内装置の設置.....	3-9
3.2.5 単孔トレーサー試験.....	3-11

3.2.6	孔間トレーサー試験	3-14
3.2.7	室内分析	3-16
3.3	トレーサー試験結果	3-17
3.3.1	トレーサー試験の概要	3-17
3.3.2	蛍光濃度センサーのキャリブレーション	3-18
3.3.3	水圧測定（差圧測定）	3-21
3.3.4	事前試験	3-22
3.3.5	トレーサー試験の概要	3-23
3.3.6	単孔トレーサー試験結果	3-24
3.3.7	孔間トレーサー試験結果（ダイポール試験）	3-47
3.3.8	室内分析結果	3-65
3.3.9	トレーサー試験装置の適用性の確認および今後の課題	3-102
3.4	原位置トレーサー試験の評価	3-104
3.4.1	単孔トレーサー試験の評価	3-104
3.4.2	孔間トレーサー試験の評価	3-128
3.5	まとめと今後の課題	3-137
4.	各種割れ目探査技術の開発	4-1
4.1	ラドン濃度計測による割れ目調査技術の開発	4-1
4.1.1	はじめに	4-1
4.1.2	ラドン濃度計測による割れ目幅の推定の概念	4-1
4.1.3	今年度の実施概要	4-2
4.1.4	ラドンによる割れ目開口幅の推定手法の適用性検討	4-3
4.1.5	ラドンフラックスの測定	4-26
4.1.6	原位置ラドン濃度計測による割れ目特性の検討	4-26
4.1.7	瑞浪超深地層研究所全体のラドン濃度測定	4-31
4.1.8	まとめ	4-32
4.2	高粘性流体注入試験技術の開発	4-36
4.2.1	背景及び目的	4-36
4.2.2	試験地点	4-37
4.2.3	試験方法	4-39
4.2.4	試験結果	4-44
4.2.5	考察	4-53
4.3	割れ目の可視化技術の開発	4-61
4.3.1	既存ボーリング孔周辺地質とレジン注入対象割れ目	4-61
4.3.2	レジン特性確認試験	4-63
4.3.3	原位置レジン注入試験	4-96
4.3.4	確認ボーリング調査	4-105
4.3.5	レジン充填割れ目の可視化	4-193

4.3.6	薄片観察による微視的間隙分布.....	4-207
4.3.7	まとめ.....	4-213
4.4	各種割れ目探査技術の室内比較試験.....	4-214
4.4.1	背景および目的.....	4-214
4.4.2	試験モデル.....	4-214
4.4.3	試験方法.....	4-215
4.4.4	試験結果.....	4-221
4.4.5	試験結果の比較.....	4-236
5.	天然トレーサーを利用した調査技術の開発.....	5-1
5.1	背景.....	5-1
5.2	研究項目.....	5-2
5.3	研究坑道における地下水調査.....	5-2
5.3.1	瑞浪における地下水調査.....	5-3
5.3.2	瑞浪における地下水流動・物質移行解析.....	5-32
5.3.3	幌延における地下水調査.....	5-69
5.3.4	幌延における地下水流動・物質移行解析.....	5-84
5.4	天然トレーサーの調査.....	5-115
5.4.1	サンプリング方法.....	5-115
5.4.2	速い流れの指標となる物質.....	5-142
5.4.3	遅い流れの指標となる物質.....	5-147
6.	各種調査・試験技術の適用性評価と物質移行特性調査・評価フローの提案.....	6-1
6.1	各種調査・試験技術の割れ目開口幅推定に対する適用性評価.....	6-1
6.2	物質移行特性調査・評価フローの提案.....	6-3
7.	まとめと今後の課題.....	7-1
7.1	トレーサー試験に係わる室内試験.....	7-1
7.2	原位置トレーサー試験.....	7-2
7.3	各種割れ目探査技術の開発.....	7-3
7.3.1	ラドン濃度計測による割れ目調査技術の開発.....	7-3
7.3.2	高粘性流体注入試験技術の開発.....	7-4
7.3.3	割れ目の可視化技術の開発.....	7-4
7.3.4	各種割れ目探査技術の室内比較試験.....	7-5
7.4	天然トレーサーによる調査技術の開発.....	7-5

## 目 次

### －第2章－

図 2.2.2-1	一次元モデルの外観写真（上）と概念図（下）	2-2
図 2.2.2-2	室内模擬単孔トレーサー試験の試験手順概念図	2-3
図 2.2.2-3	室内模擬単孔トレーサー試験の予備試験	2-4
図 2.2.3-1	室内模擬単孔トレーサー試験の試験結果	2-5
図 2.2.3-2	室内模擬単孔トレーサー試験の試験結果（トレーサー毎）	2-6
図 2.2.4-1	室内模擬単孔トレーサー試験の評価解析で使用する解析モデル	2-7
図 2.2.4-2	割れ目の集中定数に関する解析結果	2-8
図 2.2.4-3	割れ目の遅延係数に関する解析結果	2-9
図 2.2.4-4	マトリクスの実効拡散係数に関する解析	2-10
図 2.2.4-5	マトリクスの分配係数に関する解析	2-11
図 2.2.4-6	割れ目の表面吸着係数に関する解析	2-12
図 2.3.3-1	粉体岩石に対するバリウムの収着率の経時変化	2-16
図 2.3.3-2	粉体岩石に対するルビジウムの収着率の経時変化	2-17
図 2.3.3-3	粉体岩石の平均粒径の逆数とバリウムの分配係数の関係	2-17
図 2.3.3-4	粉体岩石の平均粒径の逆数とルビジウムの分配係数の関係	2-18

### －第3章－

図 3.2.1-1	トレーサー試験の作業フロー	3-2
図 3.2.1-2	トレーサー試験装置の全体構成	3-3
図 3.2.2-1	蛍光濃度測定のコセウ	3-4
図 3.2.2-2	（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）	3-5
図 3.2.2-3	蛍光分光光度計	3-6
図 3.2.2-4	キャリブレーションの作業状況	3-7
図 3.2.3-1	トレーサー試験中の差圧測定のコセウ	3-8
図 3.2.4-1	（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	3-9
図 3.2.5-1	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	3-11
図 3.2.5-2	単孔トレーサー試験の流路と手順	3-13
図 3.2.6-1	ダイポール試験のコセウ	3-14
図 3.2.6-2	ダイポール試験の流路と手順	3-15
図 3.3.1-1	トレーサー試験区間および 15MI53 号孔間隙水圧モニタリング区間の平面分布	3-17
図 3.3.2-1	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）	3-18
図 3.3.2-2	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）	3-19
図 3.3.2-3	蛍光濃度センサー VER. 1.0（C3）の検量線	3-19
図 3.3.3-1	トレーサー試験期間中の水頭差一覧（上）と水頭差の経時変化図（下）	3-21
図 3.3.4-1	事前試験結果（左列：16.95MABH 対象 右列：17.35MABH 対象）	3-22
図 3.3.6-1	16MI59 号孔 17S59T1～T5、T12～T20 の配管構成と内容量	3-26

図 3.3.6-2	16MI59 号孔 17S59T6、17S59T7 配管構成と内容量（ニードルバルブ使用）	3-26
図 3.3.6-3	15MI52 号孔 17S52T8～T11 の配管構成と内容量	3-26
図 3.3.6-4	17S59T1 の試験条件と破過曲線	3-27
図 3.3.6-5	17S59T2 の試験条件と破過曲線	3-28
図 3.3.6-6	17S59T3 の試験条件と破過曲線	3-29
図 3.3.6-7	17S59T4 の試験条件と破過曲線	3-30
図 3.3.6-8	17S59T5 の試験条件と破過曲線	3-31
図 3.3.6-9	17S59T6 の試験条件と破過曲線	3-32
図 3.3.6-10	17S59T7 の試験条件と破過曲線	3-33
図 3.3.6-11	17S52T8 の試験条件と破過曲線	3-34
図 3.3.6-12	17S52T9 の試験条件と破過曲線	3-35
図 3.3.6-13	17S52T10 の試験条件と破過曲線	3-36
図 3.3.6-14	17S52T11 の試験条件と破過曲線	3-37
図 3.3.6-15	17S59T12 の試験条件と破過曲線	3-38
図 3.3.6-16	17S59T13 の試験条件と破過曲線	3-39
図 3.3.6-17	17S59T14 の試験条件と破過曲線	3-40
図 3.3.6-18	17S59T15 の試験条件と破過曲線	3-41
図 3.3.6-19	17S59T16 の試験条件と破過曲線	3-42
図 3.3.6-20	17S59T17 の試験条件と破過曲線	3-43
図 3.3.6-21	17S59T18 の試験条件と破過曲線	3-44
図 3.3.6-22	17S59T19 の試験条件と破過曲線	3-45
図 3.3.6-23	17S59T20 の試験条件と破過曲線	3-46
図 3.3.7-1	17W5259T5～T10 の配管構成と内容量	3-49
図 3.3.7-2	17W5259T11～T18-20 の配管構成と内容量	3-49
図 3.3.7-3	予備試験条件と破過曲線	3-50
図 3.3.7-4	17W5952T1 の試験条件と破過曲線	3-51
図 3.3.7-5	17W5952T2 の試験条件と破過曲線	3-52
図 3.3.7-6	17W5952T3 の試験条件と破過曲線	3-53
図 3.3.7-7	17W5952T4 の試験条件と破過曲線	3-54
図 3.3.7-8	17W5259T5 の試験条件と破過曲線	3-55
図 3.3.7-9	17W5259T6 の試験条件と破過曲線	3-56
図 3.3.7-10	17W5259T7-9 の試験条件と破過曲線	3-57
図 3.3.7-11	17W5259T10 の試験条件と破過曲線	3-58
図 3.3.7-12	17W5259T11 の試験条件と破過曲線	3-59
図 3.3.7-13	17W5259T12 の試験条件と破過曲線	3-60
図 3.3.7-14	17W5259T13-15 の試験条件と破過曲線	3-61
図 3.3.7-15	17W5259T16 の試験条件と破過曲線	3-62
図 3.3.7-16	17W5259T17 の試験条件と破過曲線	3-63
図 3.3.7-17	17W5259T18-20 の試験条件と破過曲線	3-64

図 3.3.8-1	17S59T3 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）	3-70
図 3.3.8-2	17S59T5 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）	3-71
図 3.3.8-3	17S59T7 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）	3-72
図 3.3.8-4	17S59T8 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）	3-73
図 3.3.8-5	17S59T9 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）	3-74
図 3.3.8-6	17S59T13 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）	3-75
図 3.3.8-7	17S59T14 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）	3-76
図 3.3.8-8	17S59T15 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）	3-77
図 3.3.8-9	17S59T16 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）	3-78
図 3.3.8-10	17S59T17 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）	3-79
図 3.3.8-11	17S59T18 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）	3-80
図 3.3.8-12	17S59T19 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）	3-81
図 3.3.8-13	17S59T20 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）	3-82
図 3.3.8-14	17W5952T1 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）	3-88
図 3.3.8-15	17W5952T2 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）	3-89
図 3.3.8-16	17W5952T3 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）	3-90
図 3.3.8-17	17W5952T4 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）	3-91
図 3.3.8-18	17W5952T5 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）	3-92
図 3.3.8-19	17W5952T6 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）	3-93
図 3.3.8-20	17W5952T7-9 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）	3-94
図 3.3.8-21	17W5952T10 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）	3-95
図 3.3.8-22	17W5952T11 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）	3-96
図 3.3.8-23	17W5952T12 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）	3-97
図 3.3.8-24	17W5952T13-15 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）	3-98
図 3.3.8-25	17W5952T16 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）	3-99
図 3.3.8-26	17W5952T17 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）	3-100
図 3.3.8-27	17W5952T18-20 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）	3-101
図 3.4.1-1	17S59T13 の評価結果	3-106
図 3.4.1-2	17S59T14 の評価結果	3-107
図 3.4.1-3	17S59T15 の評価結果	3-108
図 3.4.1-4	15MI52 号孔を対象とした試験結果	3-110
図 3.4.1-5	15MI52 号孔周辺孔の装置設置状況の影響検討のための解析モデル	3-112
図 3.4.1-6	15MI52 号孔周辺孔の装置設置状況の影響検討のための解析結果（破過曲線）	3-112
図 3.4.1-7	15MI52 号孔周辺孔の装置設置状況の影響検討のための解析結果（チェイサー注入終了時点におけるコンター図）	3-113
図 3.4.1-8	解析モデル（割れ目モデル）	3-114
図 3.4.1-9	割れ目モデルを用いた 17S59T13 の非収着性トレーサーの解析結果（誤差分布）	3-116
図 3.4.1-10	割れ目モデルを用いた 17S59T14 の非収着性トレーサーの解析結果（誤差分布）	3-117
図 3.4.1-11	割れ目モデルを用いた 17S59T15 の非収着性トレーサーの解析結果（誤差分布）	3-117



図 3.4.1-12	割れ目モデルを用いた 17S59T13 の収着性トレーサーの解析結果.....	3-119
図 3.4.1-13	割れ目モデルを用いた 17S59T14 の収着性トレーサーの解析結果.....	3-120
図 3.4.1-14	割れ目モデルを用いた 17S59T15 の収着性トレーサーの解析結果.....	3-121
図 3.4.1-15	解析モデル（複合モデル）.....	3-122
図 3.4.1-16	割れ目の集中定数に関する解析結果.....	3-123
図 3.4.1-17	割れ目の遅延係数に関する解析結果.....	3-123
図 3.4.1-18	マトリクスの実効拡散係数に関する解析結果.....	3-124
図 3.4.1-19	マトリクスの分配係数に関する解析結果.....	3-125
図 3.4.1-20	割れ目表面吸着係数に関する解析結果.....	3-126
図 3.4.2-1	解析モデル（全体図）.....	3-130
図 3.4.2-2	割れ目面全体メッシュ.....	3-131
図 3.4.2-3	割れ目面孔間メッシュ.....	3-131
図 3.4.2-4	メッシュの厚み分布（厚み 3.5 mm の場合）.....	3-132
図 3.4.2-5	割れ目内の全水頭分布の計算結果（17W5259T13-15 試験）.....	3-132
図 3.4.2-6	割れ目内のダルシー流速・流向分布の計算結果（17W5259T13-15 試験）.....	3-133
図 3.4.2-7	ウラニンの破過曲線のフィッティング（17W5259T13-15 試験）.....	3-133
図 3.4.2-8	ウラニンの破過曲線のフィッティング（17W5259T18-20 試験）.....	3-134
図 3.4.2-9	Rb <sup>+</sup> の破過曲線のフィッティング（17W5259T13-15 試験）.....	3-134
図 3.4.2-10	Rb <sup>+</sup> の破過曲線のフィッティング（17W5259T18-20 試験）.....	3-135
図 3.4.2-11	Ba <sup>2+</sup> の破過曲線のフィッティング（17W5259T13-15 試験）.....	3-135
図 3.4.2-12	Ba <sup>2+</sup> の破過曲線のフィッティング（17W5259T18-20 試験）.....	3-136

－第4章－

図 4.1.2-1	ラドンによる割れ目幅計測の原理.....	4-2
図 4.1.4-1	深度 500m における孔間で連続する割れ目（対象割れ目）および石英脈.....	4-3
図 4.1.4-2	気泡が発生する割れ目の様子（左：割れ目面、右：側面）（H29GR01）.....	4-4
図 4.1.4-3	気泡が発生する割れ目の様子（左：割れ目面、右：側面）（H29GR05）.....	4-4
図 4.1.4-4	CHK 図.....	4-7
図 4.1.4-5	ICP-H29GR01～ICP-H29GR10 の希土類パターン（ME-MS81 の分析値を使用）.....	4-10
図 4.1.4-6	深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑の分析試料と標準試料の希土類パターンの比較.....	4-11
図 4.1.4-7	XRD 分析のための試料の処理方法および同定鉱物.....	4-12
図 4.1.4-8	天然放射性元素の壊変系列（ウラン系列）.....	4-15
図 4.1.4-9	天然放射性元素の壊変系列（アクチニウム系列）.....	4-15
図 4.1.4-10	天然放射性元素の壊変系列（トリウム系列）.....	4-15
図 4.1.4-11	ボーリング孔位置.....	4-17
図 4.1.4-12	分析用コア.....	4-17
図 4.1.4-13	α線スペクトルの例（ウラン同位体）.....	4-18
図 4.1.4-14	α線スペクトルの例（トリウム同位体）.....	4-18

図 4.1.4-15	ウラン同位体深度分布.....	4-19
図 4.1.4-16	トリウム同位体深度分布.....	4-19
図 4.1.4-17	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 放射能比, $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 放射能比深度分布.....	4-19
図 4.1.4-18	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 放射能比, $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 放射能比の相関.....	4-19
図 4.1.4-19	XRD 用 (緑)、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 (XRD/PRS/TS-GR01~10).....	4-22
図 4.1.4-20	深度 500m コア試料の岩石薄片観察結果.....	4-25
図 4.1.5-1	岩石からのラドンフラックスの測定例.....	4-26
図 4.1.6-1	GTS におけるラドン循環試験の概念図と測定結果.....	4-27
図 4.1.6-2	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.....	4-28
図 4.1.6-3	ラドン循環試験対象割れ目と試験孔.....	4-28
図 4.1.7-1	瑞浪超深地層研究所全体原位置ラドン濃度測定箇所と測定値.....	4-32
図 4.2.1-1	高粘性流体注入試験の評価方法概念図.....	4-36
図 4.2.2-1	高粘性流体試験の実施位置と仮設状況.....	4-37
図 4.2.2-2	高粘性流体対象区間割れ目 (15MI53 号孔: 15.05 m, N22W79W).....	4-38
図 4.2.2-3	高粘性流体注入割れ目と他のボーリング孔との関係.....	4-38
図 4.2.3-1	高粘性流体注入試験の手順.....	4-39
図 4.2.3-2	高粘性流体注入試験装置の概念図.....	4-41
図 4.2.3-3	注入区間用パッカー.....	4-42
図 4.2.3-4	メチルセルロース (SH60-50) における濃度と粘性の関係.....	4-43
図 4.2.3-5	温度と粘性の関係 (60SH-50).....	4-43
図 4.2.4-1	透水試験結果 一回目 (10 ml/min).....	4-46
図 4.2.4-2	高粘性流体注入試験結果 一回目 (42 cP、10 ml/min).....	4-47
図 4.2.4-3	透水試験結果 二回目 (40 ml/min).....	4-50
図 4.2.4-4	高粘性流体注入試験結果 二回目 (32 cP、40 ml/min).....	4-51
図 4.2.4-5	透水試験結果 三回目 (40 ml/min).....	4-52
図 4.2.5-1	1 回目の透水試験と高粘性流体試験の比較.....	4-53
図 4.2.5-2	2 回目の透水試験と高粘性流体試験の比較.....	4-55
図 4.2.5-3	注入圧力の時間変化から求めた透水量係数の時間変化.....	4-59
図 4.2.5-4	注入量と注入圧力および透水量係数変化の関係.....	4-60
図 4.2.5-5	想定される割れ目モデル.....	4-60
図 4.3.1-1	深度 300m ボーリング横坑周辺地質の概要.....	4-61
図 4.3.1-2	レジン注入対象割れ目の位置.....	4-62
図 4.3.1-3	レジン注入対象割れ目の地質学的性状.....	4-62
図 4.3.2-1	粘度計.....	4-65
図 4.3.2-2	粘度測定の様子.....	4-65
図 4.3.2-3	スピンドル (LV1).....	4-65
図 4.3.2-4	恒温恒湿槽内での試験の様子.....	4-65
図 4.3.2-5	主剤の粘度測定結果.....	4-66

図 4.3.2-6	粘度測定結果(蛍光剤無添加).....	4-67
図 4.3.2-7	粘度測定結果(蛍光剤 2%添加).....	4-67
図 4.3.2-8	粘度測定結果(蛍光剤 10%添加).....	4-68
図 4.3.2-9	粘度測定結果(蛍光剤 2%添加 2 週間保存).....	4-68
図 4.3.2-10	温度センサー.....	4-70
図 4.3.2-11	データロガー.....	4-70
図 4.3.2-12	測定状況.....	4-70
図 4.3.2-13	恒温恒湿槽.....	4-70
図 4.3.2-14	可使時間測定結果(蛍光剤無添加).....	4-71
図 4.3.2-15	可使時間測定結果(蛍光剤 2%添加).....	4-71
図 4.3.2-16	可使時間測定結果(蛍光剤 10%添加).....	4-72
図 4.3.2-17	可使時間測定結果(蛍光剤 2%添加ののち 2 週間保存).....	4-72
図 4.3.2-18	レジン注入の概念図.....	4-75
図 4.3.2-19	供試体寸法図.....	4-75
図 4.3.2-20	供試体下部.....	4-76
図 4.3.2-21	スぺーサー用ワッシャー.....	4-76
図 4.3.2-22	供試体-ワッシャー間接着剤.....	4-77
図 4.3.2-23	ワッシャーの接着.....	4-77
図 4.3.2-24	供試体上部.....	4-77
図 4.3.2-25	供試体上下の接着.....	4-77
図 4.3.2-26	アクリル製土手.....	4-77
図 4.3.2-27	供試体土手の接着.....	4-77
図 4.3.2-28	供試体の水中養生の様子.....	4-78
図 4.3.2-29	供試体の脱気の様子.....	4-78
図 4.3.2-30	養生用たらい内での供試体設置.....	4-78
図 4.3.2-31	レジン注入用ボールバルブ.....	4-78
図 4.3.2-32	供試体-ボールバルブ間接着剤.....	4-78
図 4.3.2-33	バルブの接着.....	4-78
図 4.3.2-34	注入ラインの接続.....	4-79
図 4.3.2-35	レジン注入前養生の様子.....	4-79
図 4.3.2-36	レジン注入の様子.....	4-79
図 4.3.2-37	レジン流出の様子.....	4-79
図 4.3.2-38	供試体上部.....	4-79
図 4.3.2-39	フィルターアタッチメント.....	4-79
図 4.3.2-40	アタッチメントの接着位置.....	4-80
図 4.3.2-41	アタッチメントの接着.....	4-80
図 4.3.2-42	気中および蒸留水中における付着力強度測定結果.....	4-81
図 4.3.2-43	異なる塩濃度の水中養生における付着力強度測定結果.....	4-82
図 4.3.2-44	レジン-被着剤の破壊様式.....	4-82

図 4.3.2-45	界面破壊が生じた場合の石材に対する残留レジンの分布（幌延地下水）	4-83
図 4.3.2-46	レジン部分の面積と単位付着強度の関係	4-83
図 4.3.2-47	供試体寸法図	4-84
図 4.3.2-48	養生前の岩石容器	4-86
図 4.3.2-49	地下水による養生の様子	4-86
図 4.3.2-50	レジン注入の様子	4-86
図 4.3.2-51	フラビンイエロー無添加	4-86
図 4.3.2-52	フラビンイエロー2%添加	4-86
図 4.3.2-53	フラビンイエロー10%添加	4-86
図 4.3.2-54	測定箇所	4-87
図 4.3.2-55	デュロメータ タイプ D	4-87
図 4.3.2-56	デュロメータ タイプ D 測定部	4-87
図 4.3.2-57	重錘 (30N)	4-87
図 4.3.2-58	測定の様子	4-87
図 4.3.2-59	硬度測定結果(フラビンイエロー無添加)	4-88
図 4.3.2-60	硬度測定結果(フラビンイエロー 2%添加)	4-88
図 4.3.2-61	硬度測定結果(フラビンイエロー 10%添加)	4-89
図 4.3.2-62	硬度測定結果(平均値)	4-89
図 4.3.2-63	レジン注入用配管機能を持つ部材の概念図	4-90
図 4.3.2-64	岩石ブロックと SUS 管の寸法および配置図	4-91
図 4.3.2-65	ステンレス管内のレジン注入用および排出用パイプの設置	4-91
図 4.3.2-66	ボンド接着後の様子	4-92
図 4.3.2-67	台座	4-92
図 4.3.2-68	熱電対の設置	4-92
図 4.3.2-69	レジン注入ラインと排出ラインの配置	4-92
図 4.3.2-70	レジン反応熱測定試験の様子	4-93
図 4.3.2-71	レジン反応熱測定結果	4-94
図 4.3.2-72	注入レジンと水温の温度差	4-94
図 4.3.3-1	レジン注入試験装置の設置状況写真	4-97
図 4.3.3-2	レジン注入試験装置の制御盤とモニタリングシステムへの接続	4-98
図 4.3.3-3	パッカーシステムの改良概念図	4-99
図 4.3.3-4	レジン注入区間のデッドボリュームの軽減対策	4-100
図 4.3.3-5	レジン注入試験 1 回目の結果 (13MI37 号孔 Int-2 から注入)	4-103
図 4.3.3-6	レジン注入試験 2 回目の結果 (12MI31 号孔 Int-3 から注入)	4-104
図 4.3.4-1	ボーリング掘削及び検層の作業フロー	4-105
図 4.3.4-2	ボーリング掘削予定箇所	4-106
図 4.3.4-3	ボーリング資機材の仮設状況	4-108
図 4.3.4-4	深度 300m ボーリング横坑構造図	4-109
図 4.3.4-5	貯水槽の配置図	4-111

図 4.3.4-6	キャリパー検層の測定概念図.....	4-112
図 4.3.4-7	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> ) ..	4-113
図 4.3.4-8	高解像度 BTV 検層装置 (BIP-V システム) 構成概念図 .....	4-114
図 4.3.4-9	面構造の走向傾斜の解析ルーチン.....	4-115
図 4.3.4-10	インデックスプリント一例.....	4-118
図 4.3.4-11	開口割れ目幅の計測結果一例.....	4-119
図 4.3.4-12	開口割れ目幅の詳細観察シート一例.....	4-121
図 4.3.4-13	孔内閉塞手順の概念図.....	4-123
図 4.3.4-14	ボーリング孔掘削位置の選定フロー.....	4-124
図 4.3.4-15	確認ボーリング孔跡平面図 (計画) .....	4-125
図 4.3.4-16	ターゲットフラクチャー面でのボーリング孔掘削位置図 (計画) .....	4-126
図 4.3.4-17	17MI60 号孔 掘削水のアミノ G 酸濃度と掘削時の湧水量 .....	4-128
図 4.3.4-18	17MI61 号孔 掘削水のアミノ G 酸濃度と掘削時の湧水量 .....	4-128
図 4.3.4-19	17MI62 号孔 掘削水のアミノ G 酸濃度と掘削時の湧水量 .....	4-129
図 4.3.4-20	コア写真撮影の様子.....	4-131
図 4.3.4-21	17MI60 号孔ボーリングコア (0.00~8.00mabh) .....	4-132
図 4.3.4-22	17MI60 号孔ボーリングコア (8.00~18.00mabh) .....	4-133
図 4.3.4-23	17MI60 号孔ボーリングコア (18.00~24.00mabh) .....	4-134
図 4.3.4-24	17MI61 号孔ボーリングコア (0.00~8.00mabh) .....	4-135
図 4.3.4-25	17MI61 号孔ボーリングコア (8.00~18.00mabh) .....	4-136
図 4.3.4-26	17MI61 号孔ボーリングコア (18.00~26.00mabh) .....	4-137
図 4.3.4-27	17MI62 号孔ボーリングコア (0.00~8.00mabh) .....	4-138
図 4.3.4-28	17MI62 号孔ボーリングコア (8.00~18.00mabh) .....	4-139
図 4.3.4-29	17MI62 号孔ボーリングコア (18.00~26.00mabh) .....	4-140
図 4.3.4-30	17MI60 号孔コア記載図 (21.0mabh~23.0mabh) .....	4-142
図 4.3.4-31	17MI61 号孔コア記載図 (22.0mabh~23.5mabh) .....	4-143
図 4.3.4-32	17MI62 号孔コア記載図 (22.0mabh~25.0mabh) .....	4-144
図 4.3.4-33	17MI60 号孔のコアで確認されたレジン (N28W/76E) .....	4-145
図 4.3.4-34	17MI61 号孔のコアで確認されたレジン (左 : N3E/25E、右 : N28W/77E) ...	4-146
図 4.3.4-35	17MI61 号孔のコアで確認されたレジン (左 : N44W/64NE・N19W/87E、右 : N9E/25E)	4-146
図 4.3.4-36	17MI62 号孔のコアで確認されたレジン (左 : N29E/80W、右 : N12W/82E) ..	4-147
図 4.3.4-37	17MI62 号孔のコアで確認されたレジン (左 : N34E/29SE、右 : N31W/82SW)	4-147
図 4.3.4-38	17MI60 号孔キャリパー検層結果 .....	4-148
図 4.3.4-39	17MI61 号孔キャリパー検層結果 .....	4-149
図 4.3.4-40	17MI62 号孔キャリパー検層結果 .....	4-150
図 4.3.4-41	確認ボーリング孔跡平面図.....	4-152
図 4.3.4-42	17MI60 号孔 計画孔の芯に対する変位量 (左 : 上下変位量 右 : 左右変位量) ...	4-153
図 4.3.4-43	17MI61 号孔 計画孔の芯に対する変位量 (左 : 上下変位量 右 : 左右変位量) ...	4-153
図 4.3.4-44	17MI62 号孔 計画孔の芯に対する変位量 (左 : 上下変位量 右 : 左右変位量) ...	4-153

図 4.3.4-45	ターゲットフラクチャー面でのボーリング孔実績位置と計画位置図	4-154
図 4.3.4-46	17MI60 号孔 孔壁断面図(0.14~3.00mabh)	4-157
図 4.3.4-47	17MI60 号孔 孔壁断面図(3.00~6.00mabh)	4-158
図 4.3.4-48	17MI60 号孔 孔壁断面図(6.00~9.00mabh)	4-159
図 4.3.4-49	17MI60 号孔 孔壁断面図(9.00~12.00mabh)	4-160
図 4.3.4-50	17MI60 号孔 孔壁断面図(12.00~15.00mabh)	4-161
図 4.3.4-51	17MI60 号孔 孔壁断面図(15.00~18.00mabh)	4-162
図 4.3.4-52	17MI60 号孔 孔壁断面図(18.00~21.00mabh)	4-163
図 4.3.4-53	17MI60 号孔 孔壁断面図(21.00~22.78mabh)	4-164
図 4.3.4-54	17MI61 号孔 孔壁断面図(0.18~3.00mabh)	4-165
図 4.3.4-55	17MI61 号孔 孔壁断面図(3.00~6.00mabh)	4-166
図 4.3.4-56	17MI61 号孔 孔壁断面図(6.00~9.00mabh)	4-167
図 4.3.4-57	17MI61 号孔 孔壁断面図(9.00~12.00mabh)	4-168
図 4.3.4-58	17MI61 号孔 孔壁断面図(12.00~15.00mabh)	4-169
図 4.3.4-59	17MI61 号孔 孔壁断面図(15.00~18.00mabh)	4-170
図 4.3.4-60	17MI61 号孔 孔壁断面図(18.00~21.00mabh)	4-171
図 4.3.4-61	17MI61 号孔 孔壁断面図(21.00~23.16mabh)	4-172
図 4.3.4-62	17MI62 号孔 孔壁断面図(0.16~3.00mabh)	4-173
図 4.3.4-63	17MI62 号孔 孔壁断面図(3.00~6.00mabh)	4-174
図 4.3.4-64	17MI62 号孔 孔壁断面図(6.00~9.00mabh)	4-175
図 4.3.4-65	17MI62 号孔 孔壁断面図(9.00~12.00mabh)	4-176
図 4.3.4-66	17MI62 号孔 孔壁断面図(12.00~15.00mabh)	4-177
図 4.3.4-67	17MI62 号孔 孔壁断面図(15.00~18.00mabh)	4-178
図 4.3.4-68	17MI62 号孔 孔壁断面図(18.00~21.00mabh)	4-179
図 4.3.4-69	17MI62 号孔 孔壁断面図(21.00~24.00mabh)	4-180
図 4.3.4-70	17MI62 号孔 孔壁断面図(24.00~25.70mabh)	4-181
図 4.3.4-71	BTV 観察による割れ目方向分布	4-182
図 4.3.4-72	17MI60 号孔 詳細観察結果 (N28W76E、22.12mabh)	4-183
図 4.3.4-73	17MI61 号孔 詳細観察結果 (N3E25E、21.75mabh)	4-184
図 4.3.4-74	17MI61 号孔 詳細観察結果 (N44W64NE、22.47mabh)	4-185
図 4.3.4-75	17MI61 号孔 詳細観察結果 (N9E25E、22.87mabh)	4-186
図 4.3.4-76	17MI61 号孔 詳細観察結果 (N28W84E、20.84mabh)	4-187
図 4.3.4-77	17MI61 号孔 詳細観察結果 (N19W87E、22.53mabh)	4-188
図 4.3.4-78	17MI62 号孔 詳細観察結果 (N29E80W、22.48mabh)	4-189
図 4.3.4-79	17MI62 号孔 詳細観察結果 (N49W46NE、22.71mabh)	4-190
図 4.3.4-80	17MI62 号孔 詳細観察結果 (N34E29SE、22.78mabh)	4-191
図 4.3.4-81	17MI62 号孔 詳細観察結果 (N31W82SW、24.38mabh)	4-192
図 4.3.5-1	医療用 X 線 CT スキャナーによるレジン充填コアの撮影	4-193
図 4.3.5-2	マイクロフォーカス X 線 CT スキャナーによるレジン充填コアの撮影	4-194

図 4.3.5-3	X線 CT 展開表示画像	4-195
図 4.3.5-4	マイクロフォーカス X線 CT 画像 (左:補正前、右:補正後)	4-196
図 4.3.5-5	レジン充填割れ目の三次元可視化	4-197
図 4.3.5-6	逐次研削法による研削面の撮影	4-197
図 4.3.5-7	研削面画像 (デジタルカメラ・蛍光灯光源)	4-198
図 4.3.5-8	研削面画像 (デジタルカメラ・蛍光灯+紫外線光源)	4-198
図 4.3.5-9	研削面画像 (デジタルカメラ・紫外線光源)	4-199
図 4.3.5-10	研削面画像 (フラットベッドスキャナー)	4-199
図 4.3.5-11	レジン充填割れ目のヒストグラム	4-200
図 4.3.5-12	レジン充填幅分布 (17MI60 号孔/N28W76E)	4-201
図 4.3.5-13	レジン充填幅分布 (12MI31 号孔/N29W88E)	4-202
図 4.3.5-14	セミバリオグラム解析結果 (指数モデル)	4-203
図 4.3.5-15	レジン充填割れ目分布 (孔跡平面図)	4-204
図 4.3.5-16	レジン充填割れ目分布 (孔跡断面図)	4-205
図 4.3.6-1	岩石薄片観察対象割れ目 (コア試料の側方より撮影)	4-208
図 4.3.6-2	17MI61 号孔 22.130m 分離面の写真 (上段:蛍光灯光源下、下段:紫外線光源下)	4-209
図 4.3.6-3	切断面の位置 (黄緑塗りはレジン充填箇所、オレンジは切断面を示す)	4-210
図 4.3.6-4	岩石薄片製作箇所 (分離面に垂直方向)	4-210
図 4.3.6-5	岩石薄片観察箇所 (クロスニコル)	4-211
図 4.3.6-6	蛍光顕微鏡下における原位置レジンの観察 (倍率:×10, フィルター:TxRed)	4-212
図 4.3.6-7	マトリックス中の微細間隙の 2 次レジン充填状況	4-212
図 4.4.2-1	一次元モデルの写真	4-214
図 4.4.2-2	一次元モデルの設計図	4-215
図 4.4.3-1	一次元モデルでの透水試験の概念図	4-216
図 4.4.3-2	一次元モデルでの高粘性流体注入試験の概念図	4-216
図 4.4.3-3	トレーサー注入時の到達時間の概念図	4-218
図 4.4.3-4	ラドン濃度計測のための装置写真	4-219
図 4.4.3-5	ラドン計測の概念図	4-219
図 4.4.3-6	ラドン濃度の経時変化	4-220
図 4.4.4-1	一次元モデルでの流量と水頭差の関係	4-223
図 4.4.4-2	高粘性流体試験による割れ目幅評価方法の概念図	4-224
図 4.4.4-3	花崗岩での高粘性流体注入試験結果	4-226
図 4.4.4-4	花崗岩での高粘性流体注入試験結果 (続き)	4-227
図 4.4.4-5	来待砂岩での高粘性流体試験結果	4-227
図 4.4.4-6	諫早砂岩での高粘性流体試験結果	4-228
図 4.4.4-7	各岩石でのトレーサー試験結果	4-230
図 4.4.4-8	ラドンフラックス評価試験におけるラドン濃度の時間変化	4-234
図 4.4.4-9	レジンの注入状況	4-235

－第 5 章－

図 5.3.1-1	採水地点位置図	5-3
図 5.3.1-2	深度 300m ボーリング横坑でのボーリング孔の区間編成図	5-4
図 5.3.1-3	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	5-4
図 5.3.1-4	希ガスサンプリング状況	5-5
図 5.3.1-5	銅管の採取結果およびクランプ	5-6
図 5.3.1-6	採取したサンプルの一覧	5-7
図 5.3.1-7	採水状況	5-12
図 5.3.1-8	補正 $^{14}\text{C}$ 算出方法の概念図	5-12
図 5.3.1-9	ヘキサダイアグラムの時間変化	5-19
図 5.3.1-10	水素・酸素同位体比の関係	5-20
図 5.3.1-11	$\delta^{13}\text{C}$ と $^{14}\text{C}$ の関係	5-20
図 5.3.1-12	溶存炭酸量と $^{14}\text{C}$ の関係	5-21
図 5.3.1-13	$^4\text{He}_{\text{eq}}/^4\text{He}$ と $^3\text{He}/^4\text{He}$ の関係	5-22
図 5.3.1-14	$^3\text{He}$ と $^4\text{He}$ の関係	5-23
図 5.3.1-15	$^3\text{H}$ と相関が良く新しい地下水の指標として有望なもの	5-26
図 5.3.1-16	$\text{Cl}$ と相関が良く古い地下水の指標として有望なもの	5-27
図 5.3.1-17	瑞浪立坑での主成分分析結果	5-28
図 5.3.1-18	深部地下水と浅部地下水の指標による地下水分類	5-29
図 5.3.1-19	立坑周辺における地下水混合の概念図	5-30
図 5.3.1-20	$^3\text{He}$ と $^4\text{He}$ の関係	5-31
図 5.3.2-1	立坑への湧水量の経時変化	5-33
図 5.3.2-2	主立坑・換気立坑、坑道などへの湧水量の深度方向分布	5-34
図 5.3.2-3	難透水断層を考慮したボーリング孔水圧挙動の分類	5-34
図 5.3.2-4	立坑周辺での地下水湧出と水圧低下の概念図	5-35
図 5.3.2-5	立坑湧水の $\delta\text{D}$ 濃度深度方向分布の経時変化	5-36
図 5.3.2-6	立坑湧水の $^3\text{H}$ 濃度深度方向分布の経時変化	5-37
図 5.3.2-7	解析に用いた FEM 解析メッシュ	5-38
図 5.3.2-8	モデル化したコンパートメントを構成する断層の分布	5-39
図 5.3.2-9	立坑周辺の地質区分図	5-39
図 5.3.2-10	物性割り当ての変更点 (2016 年度)	5-40
図 5.3.2-11	解析の境界条件図	5-41
図 5.3.2-12	定常解析での全水頭分布図 (コンパートメントを構成する断層の違い)	5-46
図 5.3.2-13	定常解析でのトレーサー濃度分布図 (コンパートメントを構成する断層の違い)	5-47
図 5.3.2-14	定常解析での全水頭分布図 (涵養量の感度解析)	5-48
図 5.3.2-15	定常解析でのトレーサー濃度分布図 (涵養量の感度解析)	5-49
図 5.3.2-16	定常解析での全水頭分布図 (瑞浪層群透水性の感度解析)	5-50
図 5.3.2-17	定常解析でのトレーサー濃度分布図 (瑞浪層群透水性の感度解析)	5-51
図 5.3.2-18	定常解析での全水頭分布図 (上部割れ目帯透水性の感度解析)	5-52



図 5.3.2-19	定常解析でのトレーサー濃度分布図（上部割れ目帯透水性の感度解析）	5-52
図 5.3.2-20	断面作成位置図（国土地理院の電子地形図（タイル）に断面位置を追記）	5-54
図 5.3.2-21	立坑と周辺の圧力の時間変化を比較しているボーリング孔位置図	5-54
図 5.3.2-22	立坑と周辺の圧力の時間変化をプロットしているボーリング孔位置図	5-55
図 5.3.2-23	調査坑道周辺における全水頭分布図の時間変化（基本ケース）	5-56
図 5.3.2-24	調査坑道と周辺ボーリング孔における全水頭の時間変化（基本ケース）	5-57
図 5.3.2-25	調査坑道周辺における模擬トレーサー濃度分布図の時間変化（基本ケース）	5-57
図 5.3.2-26	調査坑道と周辺ボーリング孔における模擬トレーサー濃度の時間変化（基本ケース）	5-58
図 5.3.2-27	調査坑道周辺における全水頭分布図の時間変化（比貯留係数を 0.1 倍）	5-59
図 5.3.2-28	調査坑道と周辺ボーリング孔における全水頭の時間変化（比貯留係数を 0.1 倍）	5-60
図 5.3.2-29	調査坑道周辺における模擬トレーサー濃度分布図の時間変化（間隙率を 0.001 倍）	5-61
図 5.3.2-30	調査坑道周辺における模擬トレーサー濃度分布図の時間変化（間隙率を 0.01 倍）	5-62
図 5.3.2-31	調査坑道周辺における模擬トレーサー濃度分布図の時間変化（間隙率を 0.1 倍）	5-62
図 5.3.2-32	調査坑道と周辺ボーリング孔における模擬トレーサー濃度の時間変化	5-63
図 5.3.2-33	調査坑道と周辺ボーリング孔における模擬トレーサー濃度の時間変化	5-63
図 5.3.2-34	調査坑道と周辺ボーリング孔における模擬トレーサー濃度の時間変化	5-64
図 5.3.2-35	調査坑道周辺における模擬トレーサー濃度分布図の時間変化（分散長を 20.2m に設定）	5-65
図 5.3.2-36	調査坑道と周辺ボーリング孔における模擬トレーサー濃度の時間変化	5-66
図 5.3.3-1	幌延深地層研究センターの地下施設における採水地点	5-69
図 5.3.3-2	原位置での希ガス採水方法の概念図	5-70
図 5.3.3-3	ガス濃集時の希ガス濃度の補正方法	5-71
図 5.3.3-4	水上置換でのガス採取状況	5-72
図 5.3.3-5	採水状況	5-72
図 5.3.3-6	ヘキサダイアグラムの時間変化	5-76
図 5.3.3-7	水素・酸素同位体比の関係	5-77
図 5.3.3-8	立坑の調査結果を用いた主成分分析結果	5-80
図 5.3.3-9	$^4\text{He}$ 濃度と $\text{Cl}$ 濃度の相関	5-81
図 5.3.3-10	$^3\text{He}/^4\text{He}$ と $^4\text{He}_{\text{eq}}/^4\text{He}$ による $^4\text{He}$ の蓄積形態の検討	5-81
図 5.3.3-11	$^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ と $\text{Cl}$ 濃度の関係	5-82
図 5.3.3-12	$^{36}\text{Cl}/\text{Cl}_{\text{se}}$ と間隙水と間隙水 $\text{Cl}$ 濃度の関係	5-83
図 5.3.4-1	立坑掘削の進捗	5-85
図 5.3.4-2	湧水量の時間変化	5-85
図 5.3.4-3	立坑周辺のボーリング孔における水圧低下	5-86
図 5.3.4-4	立坑周辺での水圧低下の概念図	5-87
図 5.3.4-5	解析メッシュ及び全体図	5-88
図 5.3.4-6	350m 坑道のモデル化	5-89
図 5.3.4-7	全水頭の初期・境界条件の分布図	5-90

図 5.3.4-8	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）	5-90
図 5.3.4-9	立坑と周辺の圧力と模擬トレーサー濃度の時間変化を比較しているボーリング孔位置図（国土地理院の電子地形図（タイル）にボーリング孔位置を追記）	5-92
図 5.3.4-10	立坑と周辺の圧力と模擬トレーサー濃度の時間変化をプロットしているボーリング孔位置図	5-93
図 5.3.4-11	模擬トレーサー濃度の境界条件概念図	5-93
図 5.3.4-12	定常解析の全水頭分布図	5-95
図 5.3.4-13	定常解析の塩化物イオン濃度分布図	5-96
図 5.3.4-14	定常解析の模擬トレーサー濃度分布図	5-97
図 5.3.4-15	断面作成位置概念図（国土地理院の電子地形図（タイル）に断面位置を追記）	5-98
図 5.3.4-16	調査坑道周辺における模擬トレーサー濃度分布図の時間変化（基本ケース）	5-100
図 5.3.4-17	調査坑道と周辺ボーリング孔における全水頭の時間変化（基本ケース）	5-101
図 5.3.4-18	調査坑道周辺における模擬トレーサー濃度分布図の時間変化（基本ケース）	5-102
図 5.3.4-19	調査坑道周辺における全水頭分布図の時間変化（比貯留係数を 0.01 倍）	5-104
図 5.3.4-20	調査坑道周辺における全水頭分布図の時間変化（比貯留係数を 0.1 倍）	5-105
図 5.3.4-21	調査坑道と周辺ボーリング孔における全水頭の時間変化（比貯留係数の感度解析）	5-106
図 5.3.4-22	調査坑道周辺における模擬トレーサー濃度分布図の時間変化（比貯留係数を 0.01 倍）	5-107
図 5.3.4-23	調査坑道周辺における模擬トレーサー濃度分布図の時間変化（比貯留係数を 0.1 倍）	5-108
図 5.3.4-24	調査坑道周辺における模擬トレーサー濃度分布図の時間変化（間隙率を 1/1,000,000 倍）	5-110
図 5.3.4-25	調査坑道周辺における模擬トレーサー濃度分布図の時間変化（間隙率を 1/10,000 倍）	5-111
図 5.3.4-26	調査坑道周辺における模擬トレーサー濃度分布図の時間変化（間隙率を 1/100 倍）	5-112
図 5.3.4-27	調査坑道と周辺ボーリング孔における模擬トレーサー濃度の時間変化	5-113
図 5.4.1-1	封圧採水の概念図	5-116
図 5.4.1-2	水上置換法の手順	5-117
図 5.4.1-3	真空脱気法の手順	5-118
図 5.4.1-4	Ne 脱ガス率と溶液に残留する希ガスにおける Ne に対する比率の関係	5-121
図 5.4.1-5	拡散速度が脱ガス速度をコントロールする場合の概念図	5-125
図 5.4.1-6	Ne の脱離率と He/Ne の関係	5-127
図 5.4.1-7	Ne の脱離率と Ar/Ne の関係	5-127
図 5.4.1-8	Ne の脱離率と Kr/Ne の関係	5-127
図 5.4.1-9	Ne の脱離率と Xe/Ne の関係	5-128
図 5.4.1-10	幌延 URL の脱ガス試験における He と Ne の関係	5-130
図 5.4.1-11	幌延 URL の脱ガス試験における Ar と Ne の関係	5-131
図 5.4.1-12	幌延 URL の脱ガス試験における Kr と Ne の関係	5-131
図 5.4.1-13	幌延 URL の脱ガス試験における Xe と Ne の関係	5-131

図 5.4.1-14	水蒸気法における液量と水蒸気の同位体比の関係.....	5-134
図 5.4.1-15	水蒸気法と圧縮注水法で取得した水素酸素同位体比の深度分布比較.....	5-136
図 5.4.1-16	圧縮抽水装置の概念図.....	5-138
図 5.4.1-17	浸漬日数と水素同位体比の関係.....	5-138
図 5.4.1-18	幌延岩石における圧縮圧力と水素・酸素同位体比の関係.....	5-139
図 5.4.1-19	水素同位体比の高い水に浸漬した後の圧縮抽水の結果.....	5-140
図 5.4.1-20	圧縮抽水と水蒸気法の比較.....	5-141
図 5.4.2-1	トリチウム濃度の経時変化(地盤工学会、2013).....	5-142
図 5.4.2-2	瑞浪立坑の地下水での $^3\text{H}_{\text{IG}}$ と $^3\text{H}_{\text{LSC}}$ の比較.....	5-144
図 5.4.2-3	$^3\text{H}_{\text{IG}}$ と $^3\text{H}_{\text{LSC}}$ と相関の良い成分の関係.....	5-144
図 5.4.2-4	フロンガス濃度の経時変化(Busenbergr and Plummer, 2004).....	5-145
図 5.4.2-5	フロン類および $\text{SF}_6$ と $\delta\text{D}$ (新しい地下水混合指標)との相関.....	5-146
図 5.4.3-1	沈殿法を用いた場合の年代のエラー比較.....	5-150
図 5.4.3-2	有機物の濃縮に用いた試験系の概念図.....	5-152
図 5.4.3-3	クロスフローの概念図.....	5-152
図 5.4.3-4	濃縮前後の濃縮液の様子.....	5-153
図 5.4.3-5	温度と希ガスの溶解度の関係.....	5-158
図 5.4.3-6	涵養温度と酸素同位体比の関係.....	5-162
図 5.4.3-7	涵養温度と広域地下水流動の関係.....	5-162
図 5.4.3-8	Through Diffusion 法における試験系の概念図.....	5-164
図 5.4.3-9	濃度変化を考慮した分別係数の評価方法.....	5-165
図 5.4.3-10	Through Diffusion 試験装置の概念図.....	5-166
図 5.4.3-11	Through-Diffusion 法による拡散試験結果.....	5-168
図 5.4.3-12	Through-Diffusion 法による分別係数の評価結果.....	5-171

— 第 6 章 —

図 6.2-1	物質移行特性調査・評価のフロー.....	6-4
---------	----------------------	-----

## 表 目 次

### －第1章－

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

### －第2章－

表 2.4.2-1	試験に使用した鉱物と入手先.....	2-20
表 2.4.2-2	各鉱物に対する収着率と比表面積で規格化した収着率.....	2-20
表 2.4.3-1	各鉱物から溶出する Rb および Ba の濃度.....	2-21
表 2.4.3-2	Rb と Ba の充てん鉱物への収着試験結果.....	2-22
表 2.4.3-3	充てん鉱物に収着した Rb および Ba の脱離試験結果.....	2-23

### －第3章－

表 3.2.2-1	蛍光濃度センサーの主な仕様.....	3-5
表 3.2.3-1	20MH <sub>2</sub> O 用差圧計の仕様.....	3-8
表 3.2.7-1	分析項目と分析方法.....	3-16
表 3.2.7-2	希釈方法.....	3-16
表 3.3.1-1	トレーサー試験区間深度一覧.....	3-17
表 3.3.5-1	試験名の読み方.....	3-23
表 3.3.6-1	16MI59 号孔の単孔トレーサー試験条件 (9/20～10/12).....	3-24
表 3.3.6-2	16MI59 号孔の単孔トレーサー試験条件 (11/10～11/24).....	3-24
表 3.3.6-3	15MI52 号孔の単孔トレーサー試験条件 (10/26～10/31).....	3-25
表 3.3.7-1	16MI59 号孔注水-15MI52 号孔揚水の孔間トレーサー試験条件 (17W5952T1～T4).....	3-47
表 3.3.7-2	15MI52 号孔注水-16MI59 号孔揚水の孔間トレーサー試験条件 (17W5259T5～T11).....	3-48
表 3.3.7-3	15MI52 号孔注水-16MI59 号孔揚水の孔間トレーサー試験条件 (17W5952T12～T20).....	3-48
表 3.3.8-1	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.....	3-65
表 3.3.8-2	16MI59 号孔を対象とした単孔トレーサー試験の回収率.....	3-66
表 3.3.8-3	15MI52 号孔を対象とした単孔トレーサー試験の回収率(1).....	3-67
表 3.3.8-4	15MI52 号孔を対象とした単孔トレーサー試験の回収率(2).....	3-68
表 3.3.8-5	フラクシオンコレクターの設定.....	3-69
表 3.3.8-6	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.....	3-83
表 3.3.8-7	16MI59 号注水、15MI52 号揚水の孔間トレーサー試験の回収率.....	3-84
表 3.3.8-8	15MI52 号注水、16MI59 号揚水の孔間トレーサー試験の回収率(1).....	3-85
表 3.3.8-9	15MI52 号注水、16MI59 号揚水の孔間トレーサー試験の回収率(2).....	3-86
表 3.3.8-10	フラクシオンコレクターの設定.....	3-87
表 3.4.1-1	非収着性トレーサー理論式評価結果.....	3-105
表 3.4.1-2	15MI52 号孔を対象とした試験の試験条件.....	3-109
表 3.4.1-3	15MI52 号孔周辺孔の装置設置状況の影響検討のための解析条件.....	3-111
表 3.4.1-4	非収着性トレーサーの評価解析条件.....	3-116

－第4章－

表 4.1.4-1	分析試料一覧	4-3
表 4.1.4-2	元素分析試料一覧	4-5
表 4.1.4-3	蛍光 X 線分析による主要構成元素分析結果	4-6
表 4.1.4-4	微量元素分析 (ME-MS61)	4-8
表 4.1.4-5	微量元素分析 (ME-MS81)	4-10
表 4.1.4-6	X 線回折分析 (XRD) による鉱物分析試料	4-11
表 4.1.4-7	鉱物分析結果 (XRD)	4-13
表 4.1.4-8	ウラン, トリウム同位体測定結果	4-19
表 4.1.4-9	ラジウム分析用試料一覧	4-20
表 4.1.4-10	ラジウム分析結果	4-20
表 4.1.4-11	細孔分布測定試料一覧	4-21
表 4.1.4-12	分析結果	4-22
表 4.1.4-13	比表面積測定試料一覧	4-23
表 4.1.4-14	比表面積測定結果	4-23
表 4.1.4-15	岩石薄片製作一覧	4-24
表 4.1.4-16	偏光顕微鏡観察による鉱物同定および記載	4-25
表 4.1.6-1	対象割れ目の幾何的特性	4-29
表 4.1.6-2	対象割れ目の水理特性	4-29
表 4.1.6-3	予備排水時のラドン濃度	4-29
表 4.1.6-4	循環試験後のラドン濃度	4-30
表 4.1.7-1	循環試験後のラドン濃度測定結果	4-31
表 4.2.2-1	トレーサー試験対象割れ目	4-37
表 4.2.4-1	1 回目の高粘性流体試験条件	4-45
表 4.2.4-2	トレーサーの初期濃度と観測濃度 (1 回目)	4-45
表 4.2.4-3	2 回目の高粘性流体試験条件	4-49
表 4.2.4-4	トレーサーの初期濃度と観測濃度 (2 回目)	4-49
表 4.2.5-1	高粘性流体の到達に基づく割れ目幅の評価結果	4-57
表 4.2.5-2	各区間の透水係数と割れ目幅 (3 乗則で計算)	4-57
表 4.3.2-1	レジンの可使時間	4-73
表 4.3.2-2	海水に対する地下水の Cl 濃度	4-74
表 4.3.2-3	各養生環境における付着力強度の測定結果	4-80
表 4.3.3-1	レジン注入区間	4-101
表 4.3.4-1	ボーリング作業で使用する主要資機材一覧	4-107
表 4.3.4-2	キャリパー検層装置の仕様	4-112
表 4.3.4-3	確認ボーリング掘削結果	4-127
表 4.3.4-4	コア写真の撮影条件	4-131
表 4.3.4-5	レジン充填箇所一覧	4-141
表 4.3.4-6	孔曲がり検層結果 (実績) と計画値一覧	4-151

表 4.3.4-7	岩盤分離面の分布状況と主な卓越方向.....	4-156
表 4.3.4-8	詳細観察を実施したレジン充填箇所一覧.....	4-156
表 4.3.5-1	指数モデルフィッティング結果.....	4-203
表 4.3.5-2	各種割れ目探査技術の割れ目間隙幅の比較.....	4-206
表 4.3.6-1	分離面画像の撮影条件.....	4-208
表 4.4.4-1	試験時の圧力と流量の関係.....	4-222
表 4.4.4-2	高粘性流体試験の評価結果.....	4-225
表 4.4.4-3	トレーサー試験による割れ目幅の評価結果.....	4-229
表 4.4.4-4	ラドンフラックスおよびラドン濃度と割れ目幅の評価結果.....	4-233
表 4.4.4-5	レジン注入による割れ目の評価結果.....	4-236
表 4.4.5-1	割れ目の評価方法と評価された割れ目幅 (mm).....	4-237

－ 第 5 章 －

表 5.3.1-1	採水項目と採取目的および取得量.....	5-8
表 5.3.1-2	原位置計測結果.....	5-13
表 5.3.1-3	立坑内ボーリングから採取した地下水の分析結果.....	5-14
表 5.3.1-4	各成分の相関.....	5-24
表 5.3.2-1	地質要素の水理特性 (尾上ほか, 2015) .....	5-42
表 5.3.2-2	不連続構造の透水特性 (尾上ほか, 2015) .....	5-43
表 5.3.2-3	解析の基準とした水理パラメーター.....	5-44
表 5.3.2-4	コンパートメントを構成する断層を花崗岩部と同等に設定した場合の水理パラメーター.....	5-45
表 5.3.2-5	瑞浪層群透水性の感度解析の水理パラメーター.....	5-50
表 5.3.2-6	上部割れ目帯透水性の感度解析の水理パラメーター.....	5-51
表 5.3.2-7	非定常解析の基本ケースに用いた水理パラメーター.....	5-56
表 5.3.2-8	非定常解析の比貯留係数の影響調査に用いた水理パラメーター.....	5-59
表 5.3.2-9	非定常解析の間隙率の感度調査に用いた水理パラメーター.....	5-61
表 5.3.2-10	非定常解析の分散長の影響調査に用いた水理パラメーター.....	5-65
表 5.3.3-1	幌延の地下施設から採取した地下水試料の分析結果.....	5-73
表 5.3.3-2	各成分の相関.....	5-78
表 5.3.4-1	設置した透水係数と根拠 (線上ほか 2008) .....	5-91
表 5.3.4-2	解析に用いた物性値.....	5-92
表 5.3.4-3	非定常解析の基本ケースに用いた水理パラメーター.....	5-99
表 5.3.4-4	非定常解析の比貯留係数の感度解析に用いた水理パラメーター.....	5-103
表 5.3.4-5	非定常解析の間隙率の感度解析に用いた水理パラメーター.....	5-109
表 5.4.1-1	封圧・真空脱気・水上置換サンプル中希ガス濃度の比較.....	5-119
表 5.4.1-2	脱ガス前後のガス組成の比較.....	5-123
表 5.4.1-3	幌延地下坑道における脱ガス試験の結果まとめ.....	5-130
表 5.4.1-4	水蒸気法の幌延岩石への適用結果.....	5-135

表 5.4.3-1	4種類 of 溶液にガス化法と沈殿法を適用した場合の結果	5-149
表 5.4.3-2	DAX を用いた分離作業における液量と TOC 濃度の関係	5-154
表 5.4.3-3	200m で採取された有機物の $^{14}\text{C}$ 年代分析値	5-155
表 5.4.3-4	500m で採取された有機物の $^{14}\text{C}$ 年代分析値	5-155
表 5.4.3-5	希ガス分析結果	5-159
表 5.4.3-6	立坑から採取した地下水の希ガス濃度と涵養温度推定結果	5-161
表 5.4.3-7	拡散試験結果	5-171

— 第 6 章 —

表 6.1-1	各調査・試験で取得される割れ目に関する情報	6-2
表 6.1-2	各調査・試験による深度 300m の試験対象割れ目の開口幅	6-2

## 1. 研究概要

### 1.1 本研究の背景

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

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

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

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

### 1.2 目的

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



### 1.3 全体計画

#### 1.3.1 研究の内容

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

##### (1) トレーサー試験技術

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

##### (2) 各種割れ目探査技術

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

##### (3) 天然トレーサーによる調査技術

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

#### 1.3.2 研究工程

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

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

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

今フェーズの研究工程を表 1.3.2-1 に示す。

表 1.3.2-1 研究工程

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

※ 青線は机上検討を、赤線は室内・原位置試験を表す

#### 1.4 本年度の実施概要

##### 1.4.1 トレーサー試験技術の開発

###### (1) 室内試験

これまでに実施したバッチ試験や割れ目を模擬した試験結果をとりまとめ、分配係数が分布する範囲や、条件に対する依存性を明らかにする。また、条件に対する依存性をより明確にするための追加試験を実施する。これらの結果から、トレーサー試験を実施するために望ましい条件を明らかにする。

###### (2) 単孔式トレーサー試験

孔間での水理的な連続性が比較的明確な国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（JAEA）瑞浪超深地層研究所深度500mの適用性試験場において、水みち割れ目を対象として単孔式トレーサー試験を様々な試験条件で実施する。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）を評価し、試験条件が試験結果や評価結果に与える影響

を明らかにする。

### (3) 孔間トレーサー試験

JAEA瑞浪超深地層研究所深度500mの適用性試験場において、単孔式トレーサー試験と同じ割れ目を対象として孔間トレーサー試験を実施し、水みち割れ目のボーリング孔間での物質移行特性（開口幅、分散長、収着特性等）を評価する。そして、物質移行特性の評価結果を単孔式試験や他試験の結果と比較検討し、単孔、孔間それぞれの試験の適用性について取りまとめる。

## 1.4.2 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

平成28年度に実施したJAEA瑞浪超深地層研究所深度300mにおける適用性試験に引き続き、深度500mの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) 高粘性流体注入による流動形態調査試験技術

JAEA瑞浪超深地層研究所深度500mの適用性試験場において、高粘性流体の注入試験を行い、注入孔や周辺孔での圧力の経時変化などから、割れ目の特性（流れの次元、割れ目の幅など）を評価する。これらの結果を、他の試験結果と比較検討する。

### (3) レジン（樹脂）注入による割れ目の可視化技術

原位置で既知の水みちへレジン注入し、レジンの固化後にボーリング掘削を行う。コアとして取り出したレジンが注入された割れ目の分布や幅などについてX線CTや研削などにより計測するとともに、トレーサー試験やその他の割れ目探査技術の原位置試験で推定した割れ目幅と比較検討する。

### (4) 割れ目探査技術の比較

花崗岩や堆積岩などの岩石を用いて模擬割れ目を製作し、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各種割れ目探査技術を適用する。これらの結果から割れ目幅を推定するとともに、それぞれの試験法の特性を評価する。

## 1.4.3 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28年度に引き続き、JAEA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、放射性同位体、溶存ガスなどを計測し、地下水水質・地下水年代の変化を調査する。また、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。これらの結果に基づいて、地下水の起源、新しい水の浸入や古い水の残留状況を取りまとめる。

## (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<sup>14</sup>C、希ガス、<sup>37</sup>C 1）として有望な物質について、採取・分析方法を検討するとともに、これまでの調査結果を取りまとめる。トリチウムについては分析方法（濃縮法・生成法等）、フロンガス・希ガスについてはサンプリング方法（平衡法・水上置換法等）、水素・酸素同位体、無機・有機<sup>14</sup>C年代については採取・分析方法、<sup>37</sup>C 1については拡散時の分別係数を取りまとめる。

## 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. トレーサー試験に係わる室内試験

### 2.1 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（吸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。

昨年度までの研究においては、①試験方法や試験条件による分配係数の取りうる範囲を明確にし、トレーサー試験における留意事項を抽出すること、②割れ目や充てん鉱物の核種遅延への影響を明らかにすること、を目的として検討を進めてきた。①の検討においては、種々の試験方法や試験条件下でRb・Baの花崗岩への分配係数を取得し、それぞれの値を比較した。その結果、分配係数は種々の試験条件に依存していることがわかり、原位置のトレーサー試験においてはとくに、バックグラウンドとなる溶液（地下水）のイオン濃度や試験時間への依存性が高いことが分かった。このため、収着挙動の時間依存性がどのようなメカニズムで生じているのか、時間依存性をどのようにモデル化していくのかを検討していくことが必要であることが示された。さらに室内試験・原位置のトレーサー試験ともに、トレーサー濃度のピーク高さから算出した分配係数と収着のピーク遅れから算出した遅延係数に差異が見られることが分かった。理論的にはピーク高さや遅れから算出する分配係数は一致するはずであり、差異が生じた場合にどちらの遅延係数を採用するべきかについては現時点で情報がない。また、両者から評価される遅延係数の差異を小さくするための方法について検討することは、将来同様の試験を実施するうえで極めて重要な情報となりうると考えられる。また、②の検討においては瑞浪地域の岩石を観察した結果から充てん鉱物を特定し、それらの鉱物に対する収着挙動を明らかにした。後述するように、充てん鉱物ができることにより割れ目の比表面積が増大し、これによって割れ目への収着が増大する可能性があることが示唆された。昨年度の検討では、充てん鉱物が収着量におよぼす影響について評価したが、核種遅延の観点から収着の不可逆性を確認することも重要であると考えられる。核種が割れ目表面に不可逆的に収着した場合、核種の遅延効果は大きく増大すると考えられる。

上記のような今までの結果と試験を実施した結果抽出された課題から、今年度の室内試験では以下に示す3つの事項を実施した。

①室内模擬トレーサー試験をさらに種々の条件で実施し、収着性トレーサーのピークにおける遅延時間とピーク高さから算出した遅延係数が異なる原因について検討する。これには室内トレーサー試験の精度を上げるための検討を含む。（2.2 室内模擬トレーサー試験）

②収着の時間依存性について検討するため、岩石への収着における表面収着と岩石内部への拡散・吸

収を評価するための試験。(2.3 異なる粒径の岩石粉体試料を用いた収着バッチ試験)

③割れ目充填鉱物の核種遅延への影響について、収着の不可逆性への影響を評価するための収着・脱離試験(2.4 割れ目充てん鉱物への核種の収着・脱離試験)

## 2.2 室内模擬トレーサー試験

### 2.2.1 背景

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

### 2.2.2 試験装置及び試験方法

#### (1) 試験装置

100×100×1200 mm の直方体の花崗岩に、スペーサーとオーリングを介してアクリル板を押しつけて、1次元モデルを作製した。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。直方体の岩石とアクリル板の間には、ステンステープを置き、隙間を作ることで割れ目を模擬した。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って流入出地点とした。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、スペーサーの厚みを0.5mmとし、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。1次元モデルの外観写真及び概念図を図2.2.2-1に示す。

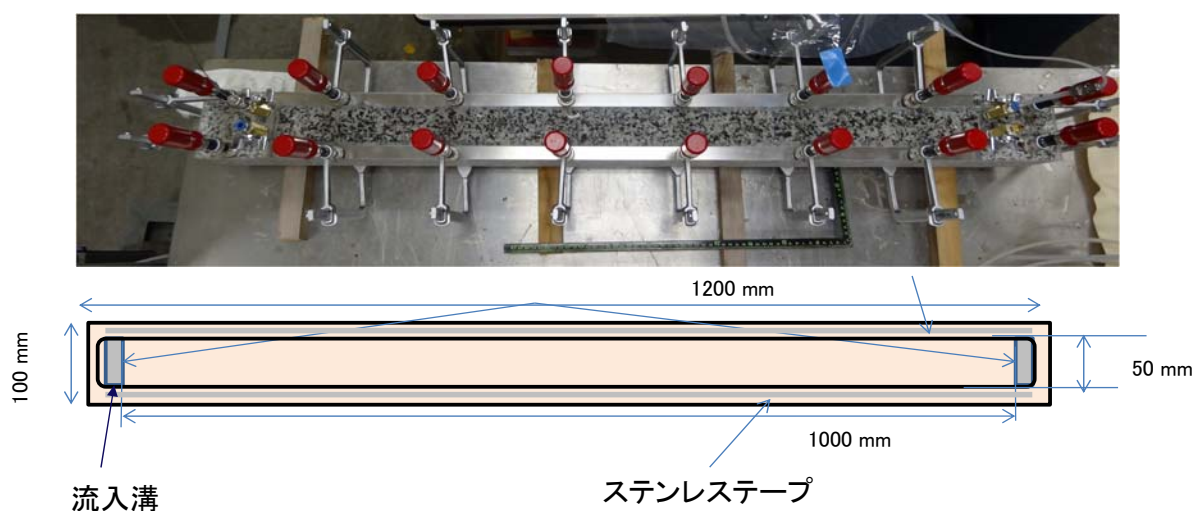


図 2.2.2-1 一次元モデルの外観写真(上)と概念図(下)

## (2) 室内模擬単孔トレーサー試験の試験手順

2017年度は、ポンプ（ダブルランジヤープンプ）を使ってトレーサーとチェイサーが同じチューブ内を流れるような試験系で試験を実施した。この場合、チェイサーによるフラッシングが充分でないと、チューブ内に残存するトレーサーの影響を受けて正確な破過曲線の評価できない可能性が考えられた。また、フラッシングを充分に行うと先に注入を行ったトレーサーが流出側に到達してしまう可能性も考えられる。このことから、本年においては流入ポートに三方バルブを設置し、トレーサーとチェイサーがチューブ内で混合しないよう試験系の改良を行った。試験手順の概念図を図 2.2.2-2 に示す。

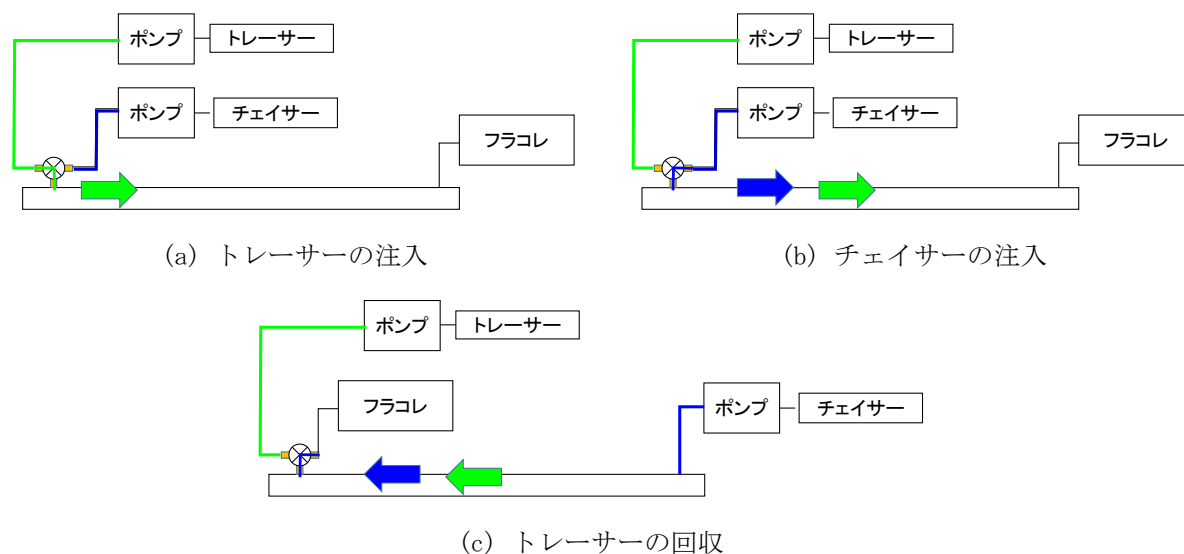


図 2.2.2-2 室内模擬単孔トレーサー試験の試験手順概念図

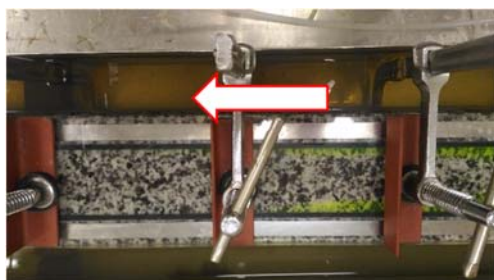
三方バルブを試験系に組み込んだ効果を検証することを目的に、トレーサーとしてウランのみを用い、アクリル面からトレーサー浸透挙動の可視化を行った。事前検討では、トレーサーを 5mL 入れた後、チェイサーを送液して割れ目内のフラッシングを行った。トレーサー送液終了後、及びチェイサーを 12mL 送液した後のトレーサー浸透挙動を図 2.2.2-3 に示す。トレーサー 5mL に対してチェイサーを 12mL 送液した場合、流入ポート側のウランはほぼフラッシングできていると考えられる。また、この時点でもウランの浸透前線は流出側に到達していない。

流入側のデッドボリュームは、三方バルブ内が約 1mL、流入側のアクリルの溝部分が約 2mL であり、計 3mL 程度のデッドボリュームである。すなわち、トレーサーを 5mL 送液した場合、デッドボリュームの 4 倍程度のチェイサーを送液することが必要と考えられる。なお、本試験前に三方バルブを組み込んでいない試験系で同様の試験を行ったが、トレーサー 2.5mL に対してチェイサーを 20mL 送液した場合であっても流入ポートに多くのトレーサーが残存する様子を確認した。このことから、三方バルブによる注入を行う効果は大きいと思われる。





(a) トレーサー送液後（流入側）



(b) チェイサー12mL 送液後（流出側）



(c) チェイサー12mL 送液後（流入側）

図 2.2.2-3 室内模擬単孔トレーサー試験の予備試験

本試験では、トレーサー及びチェイサー注入時までの試験条件は全て同じとし、トレーサー回収時の流量（1.0mL/min、0.1mL/min）を変えた試験を行い、トレーサー回収時の流速の違いによる収着挙動の差異を検証することを目的に試験を実施した。試験手順を以下に記載する。

1) 準備

三方バルブをトレーサー側に切り替え、注入側のデッドボリューム量に対して数倍程度のトレーサー（NAP：1mg/L、重水：10 $\mu$ L/100mL、Rb：2.0mg/L、Ba：1.0mg/L）を送液し、トレーサー容器～三方バルブまでのチューブ内をトレーサーで満たす。その後、三方バルブをチェイサー側に切り替え、割れ目体積（25mL）の数倍程度のチェイサー（0.1MNaCl 溶液）を送液し割れ目内のトレーサーをフラッシングする。

2) トレーサー注入

三方バルブをトレーサー側に切り替え、トレーサーを 5mL 送液する。

3) チェイサー注入

三方バルブをチェイサー側に切り替え、トレーサーを 12mL 送液する。

4) トレーサーの回収

チェイサー注入に使用していたポンプを下流側に付け替えるとともに、チェイサー注入側の流路にフラクションコレクターを接続する。その後、ポンプを起動するとともに（流量は 1.0mL/min 或いは 0.1mL/min）をフラクションコレクターによる回収を行う。流量を 1.0mL/min とした場合のトレーサー回収時間は 120 分、流量を 0.1mL/min とした場合のトレーサー回収時間は 1200 分とする。

## 2.2.3 試験結果および考察

### (1) 室内模擬単孔トレーサー試験の試験結果

フラクシオンコレクターでサンプリングされた試料をトレーサーの原液濃度で割った値（比濃度）を縦軸に、サンプリング総量を横軸にして破過曲線を図 2.2.3-1 に示す。

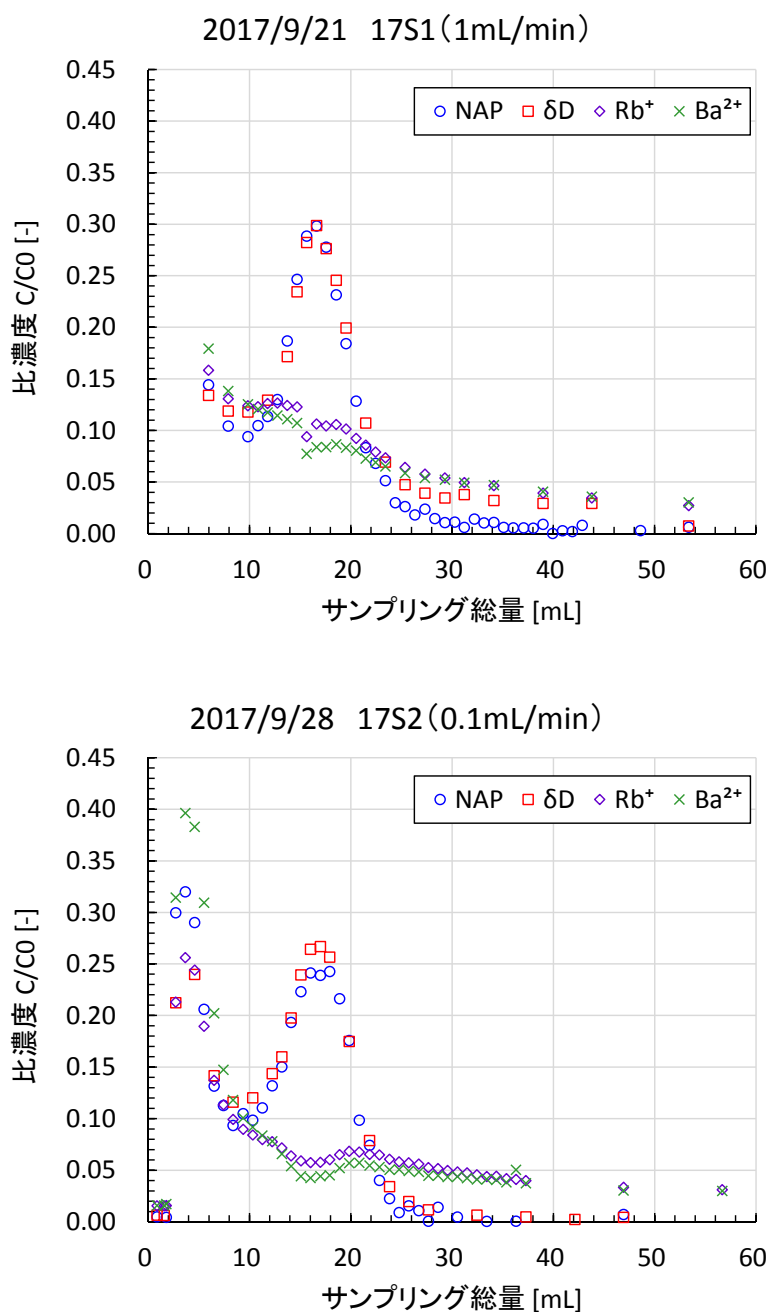


図 2.2.3-1 室内模擬単孔トレーサー試験の試験結果

(上) 流量 1.0mL/min、(下) 流量 0.1mL/min

トレーサー回収時の流量を 1.0mL/min とした条件 (17S1) はトレーサー回収開始から 5 分経過時点からフラクシオンコレクターを起動し、0.1mL/min とした条件 (17S2) ではトレーサー回収と同時に

フラクシオンコレクターを起動した。図 2.2.3-1 を見て分かるように、17S1、17S2 のいずれの条件もピークが2つある試験結果が得られた。これは、初めのピークはデッドボリューム（注入側のアクリルに設けられた流入溝）内に残存するトレーサーの影響を受けた結果であり、次のピークが割れ目内の物質移行特性を反映した結果であると考えられる。事前の予備試験において、トレーサー5mL に対しチェイサーを 12mL すればほぼフラッシングできると考えたが、実際は流入ポート内にトレーサーが残存しており、今後の課題と言える。

17S1、17S2 の両試験条件について、トレーサー毎に試験結果を整理した結果を図 2.2.3-2 に示す。いずれのトレーサーも、デッドボリュームの影響を受けてピークが一旦減少し、再び増加するタイミングはほぼ同じ結果となった。また、非吸着性トレーサーである NAP、 $\delta D$  のピーク濃度は流量が小さい 17S2 の方が低く、テールの引き方も少なかった。一方、吸着性トレーサーである  $Rb^+$ 、 $Ba^{2+}$  については、流量が小さい 17S2 の方がピーク濃度は低くなり、わずかながらピークが出現するタイミングも遅くなっている。つまり、流量を小さくしたことによって割れ目とトレーサーの接触時間を長くした効果が結果に表れている可能性が考えられる。

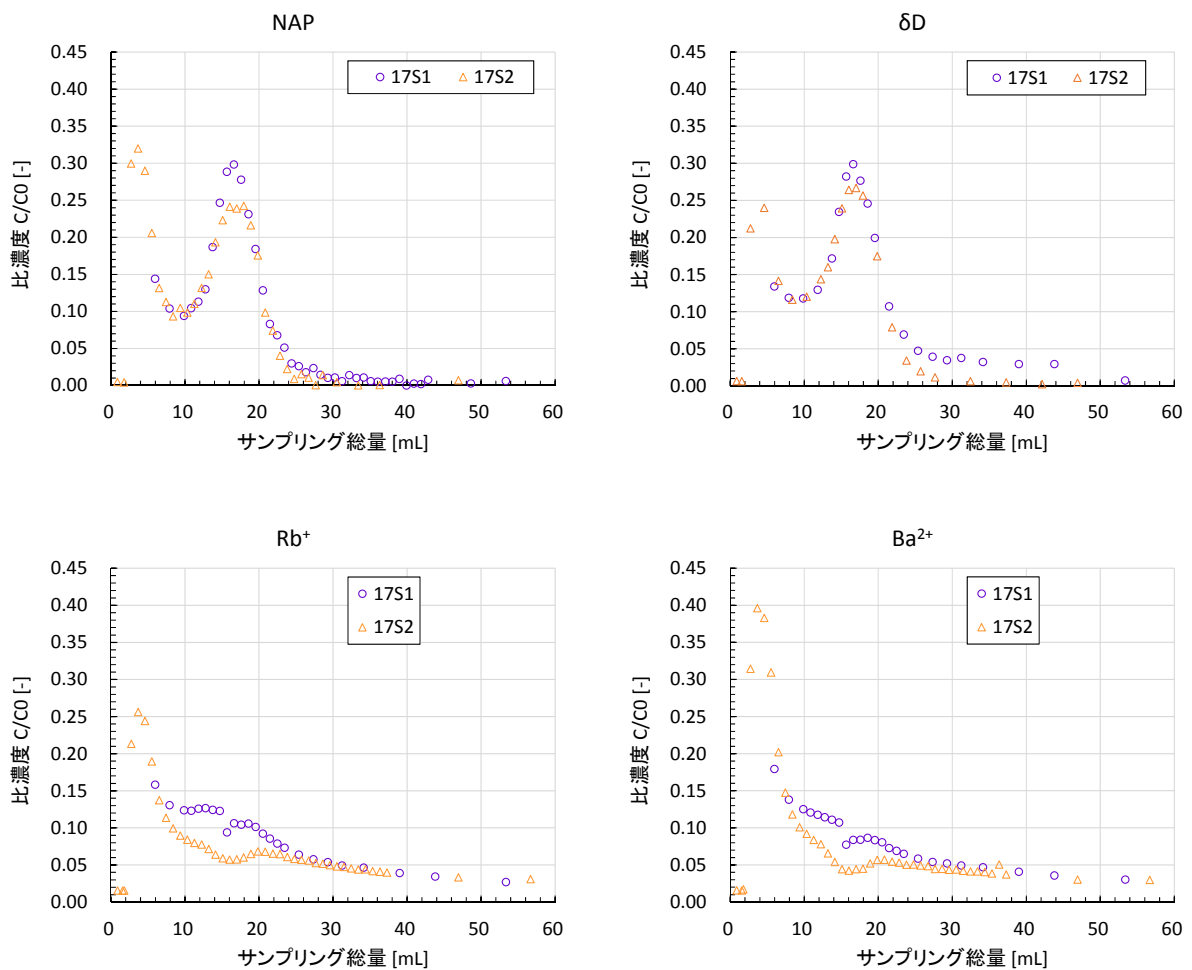


図 2.2.3-2 室内模擬単孔トレーサー試験の試験結果（トレーサー毎）

## 2.2.4 評価解析

### (1) 室内模擬単孔トレーサー試験結果の評価解析

評価解析で使用する解析モデルを図 2.2.4-1 に示す。評価解析は、割れ目に加え、岩盤マトリクスを考慮した複合モデルとする。マトリクスの厚みは約 30mm とし、X 方向の空間分割数は 1、Y 方向の空間分割数は 529、Z 方向の空間分割数は 22 とし、節点数は 24,380、要素数は 11,638 とする。

試験結果では、トレーサー回収直後は注入側の流入溝に残留したトレーサーが影響し、ピークが二つある破過曲線となった。17S2 の結果では、ピークが一旦減少し再び増加するまでのトレーサー総量は、注入トレーサー総量の 32% であった。このことから、注入時の濃度を 0.68 として解析を行うこととした。注入流量は 1.0mL/min とし、トレーサー注入時間を 5 分、チェイサー注入時間を 12 分とし、17S1 では回収流量を 1.0mL/min とし 60 分間の解析を行い、17S2 では回収流量を 0.1mL/min とし 600 分間の解析を行った。

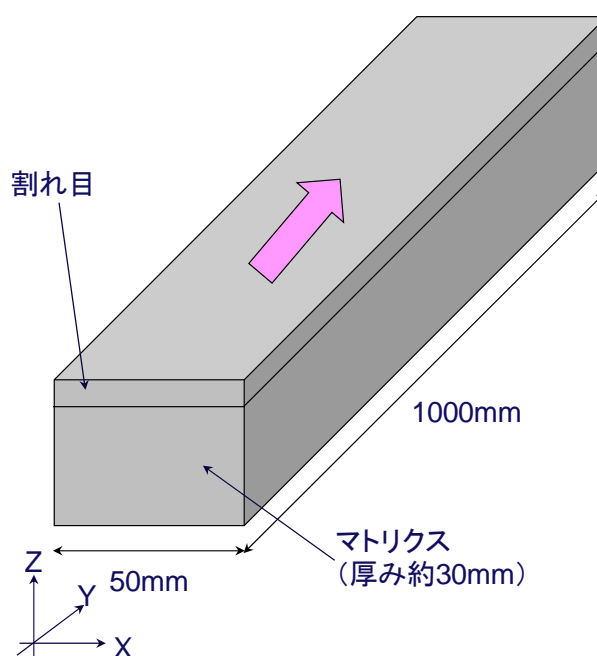


図 2.2.4-1 室内模擬単孔トレーサー試験の評価解析で使用する解析モデル

### (2) 割れ目の集中定数、割れ目の遅延係数に関する解析

岩盤マトリクスは考慮せずに、割れ目のみを考慮したモデル（割れ目モデル）による解析を行う。単孔トレーサー試験では、割れ目と縦分散長は個々に評価することができないため、複合パラメーターである集中定数として評価を行う。一次元の浸透場における集中定数は、次式で定義される。

$$\tau = \alpha_L bW / V_{inj} \quad (2.2.4-1)$$

ここに、 $\tau$ ：集中定数、 $\alpha_L$ ：縦分散長、 $b$ ：割れ目幅、 $W$ ：流路幅、 $V_{inj}$ ：注入流体の総量を表す。

割れ目の集中定数に関する解析は、集中定数を  $5.88\text{e-}03$ 、 $1.47\text{e-}02$ 、 $2.06\text{e-}02$  として解析を行った。これらの値は、割れ目幅  $0.5\text{mm}$  の場合において、縦分散長が  $2$ 、 $5$ 、 $7\text{mm}$  に相当する値である（間隙率は  $1.0$ ）。なお、本実験はバックグラウンド地下水流れの影響が全く無い条件で実施しており、割れ目モデルを用いた解析では、トレーサの注入条件が同じであれば回収流量を変えたとしても同じ破過曲線となることから、本項では  $17\text{S1}$ （回収流量  $1.0\text{mL/min}$ ）を対象とした解析のみ実施した。

$17\text{S1}$  の結果に対して行った解析結果を図 2.2.4-2 に示す。解析結果より、集中定数を  $1.47\text{e-}02$  とした場合に試験結果の破過曲線に近い結果となることを確認した。集中定数を  $1.47\text{e-}02$  とした場合、集中定数の定義式(2.2.4-1)から計算される縦分散長は  $5\text{mm}$  であり、流路長  $1000\text{mm}$  の約  $1/200$  の値となる。既往研究によれば、縦分散長はトレーサ移行距離の約  $1/100\sim 1/10$  となることが報告されているが、本解析で評価された縦分散長（集中定数）はやや小さい値となった。これは、割れ目の片側がアクリルであること、割れ目表面が処理された岩石試料であることが関係していると考えられる。

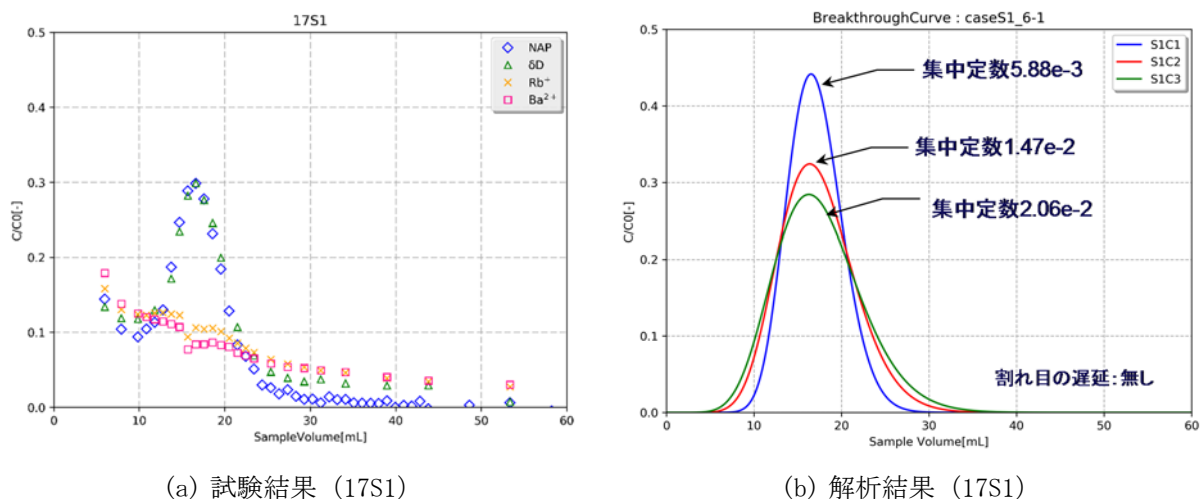
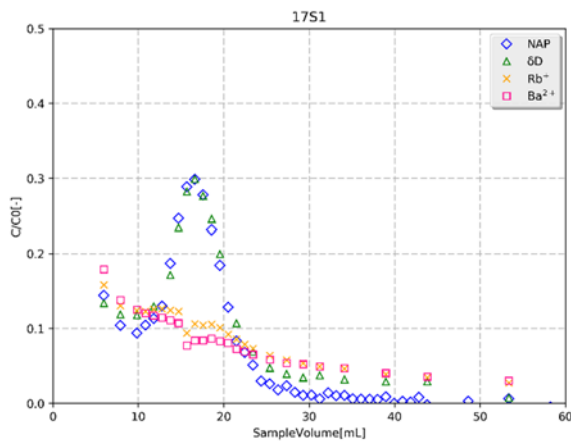
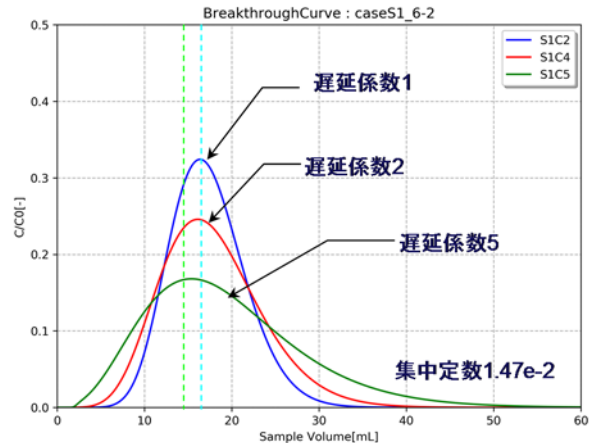


図 2.2.4-2 割れ目の集中定数に関する解析結果

割れ目の集中定数を  $1.47\text{e-}02$  とし、割れ目の遅延係数を  $1$ 、 $2$ 、 $5$  として行った解析結果を図 2.2.4-3 に示す。割れ目モデルを用いた解析では、割れ目の遅延係数を大きくするに従って、ピーク濃度が減少する結果となったが、同時に非収着性トレーサよりもピーク位置が早くなる傾向にあり、試験結果とは異なる傾向となった。



(a) 試験結果 (17S1)



(b) 解析結果 (17S1)

図 2.2.4-3 割れ目の遅延係数に関する解析結果

### (3) マトリクスの実効拡散係数に関する解析

複合モデルを用い、マトリクスの実効拡散係数を変動パラメーターとした解析を行う。割れ目の集中定数は  $1.47 \times 10^{-2}$ 、割れ目の遅延係数は 1、マトリクスの間隙率は 0.01、マトリクスの分配係数は 0 とした。自由水中の拡散係数は、ウランが  $4.5 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{sec}$ 、Rb が  $2.1 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{sec}$ 、Ba が  $8.5 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{sec}$  である。國丸他 (2012) によれば、花崗岩の割れ目近傍の岩石試料を用いた室内拡散試験で得られたウランの実効拡散係数は  $4.08 \times 10^{-14} \text{m}^2/\text{sec}$ 、Rb と同じ一価の陽イオンの Cs の実効拡散係数は  $1.59 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$  が得られている。このことから、マトリクスの実効拡散係数が、以下の値を設定した。

S1C2、S2C2 : 割れ目モデル (マトリクス拡散の影響なし)

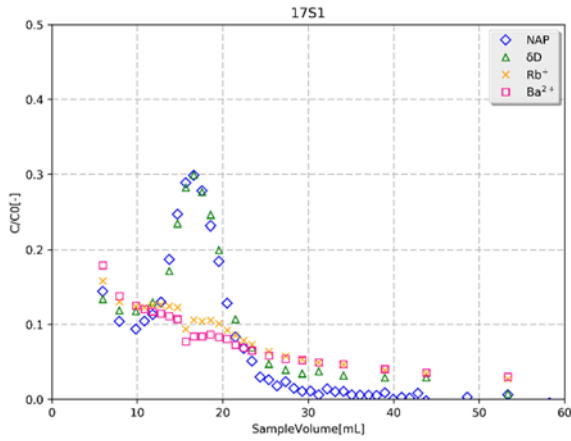
S1D1、S2D1 : マトリクスの実効拡散係数  $1.0 \times 10^{-14} \text{m}^2/\text{sec}$

S1D2、S2D2 : マトリクスの実効拡散係数  $1.0 \times 10^{-13} \text{m}^2/\text{sec}$

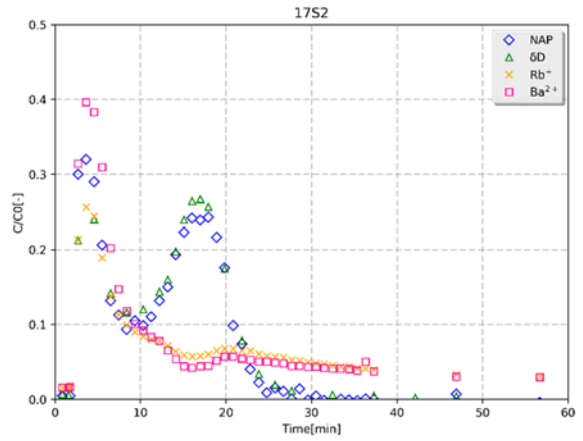
S1D3、S2D3 : マトリクスの実効拡散係数  $1.0 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$

S1D4、S2D4 : マトリクスの実効拡散係数  $1.0 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{sec}$

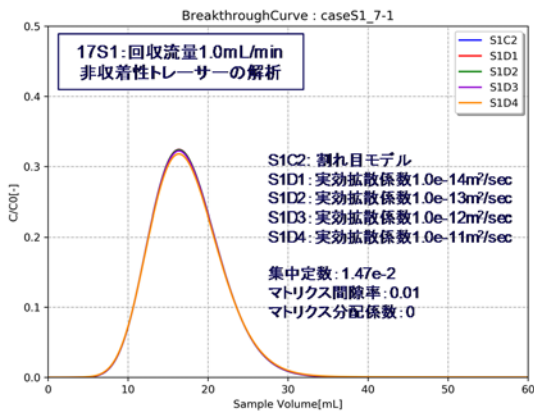
17S1 (回収流量  $1.0 \text{mL}/\text{min}$ ) の解析結果では、マトリクスの実効拡散係数を大きくしたとしても破過曲線に大きな変化は見られなかった。一方、17S2 (回収流量  $0.1 \text{mL}/\text{min}$ ) の解析結果においては、マトリクスの実効拡散係数を  $1.0 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{sec}$  とした場合にピーク濃度が減少する解析結果となった。室内試験で得られている実効拡散係数よりも大きめの実効拡散係数ではあるが、回収流量を小さくした条件 17S2 の解析では、回収流量が大きい条件 17S1 の解析に比べてトレーサーのピーク濃度が減少しており、回収流量を小さくしたことによって拡散の効果が破過曲線に表れたことを示していると考えられる。



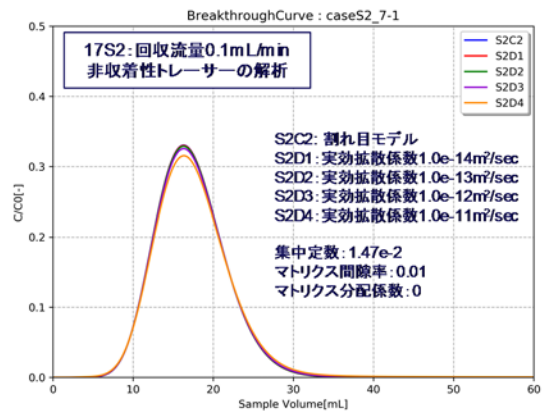
(a) 試験結果 (17S1)



(b) 試験結果 (17S2)



(c) 解析結果 (17S1)



(d) 解析結果 (17S2)

図 2.2.4-4 マトリクスの実効拡散係数に関する解析

#### (4) マトリクスの分配係数に関する解析

マトリクスの分配係数を変動パラメーターとした解析を行う。割れ目の集中定数は  $1.47 \times 10^{-2}$ 、割れ目の遅延係数は 1、マトリクスの間隙率は 0.01、マトリクスの実効拡散係数は  $1.0 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$  とした。

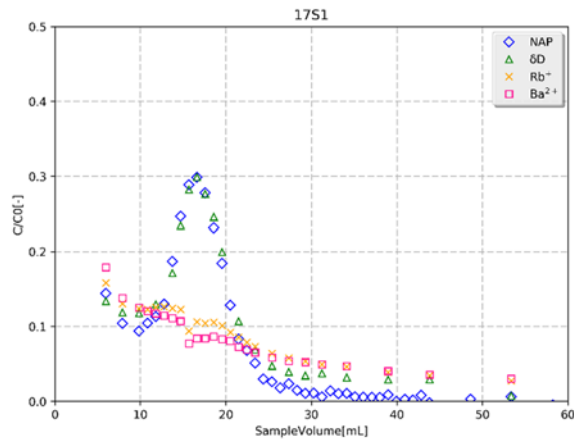
マトリクスの分配係数は、室内試験の結果を参考にし、以下の値を用いた。

S1D3、S2D3 : マトリクスの分配係数 0

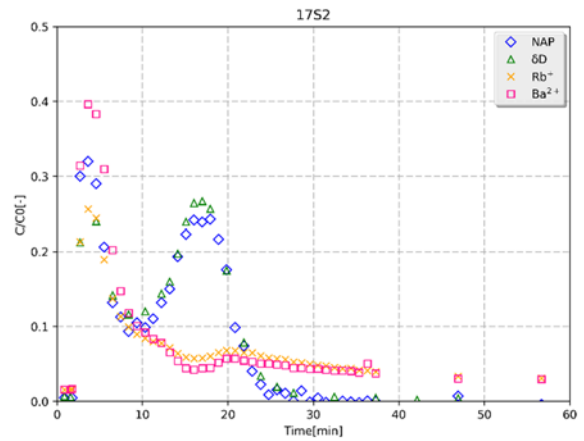
S1E1、S2E1 : マトリクスの分配係数 0.5mL/g

S1E2、S2E2 : マトリクスの分配係数 0.7mL/g

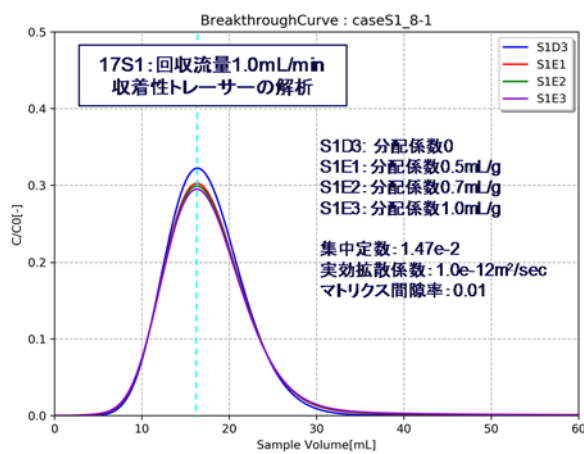
S1E3、S2E3 : マトリクスの分配係数 1.0mL/g



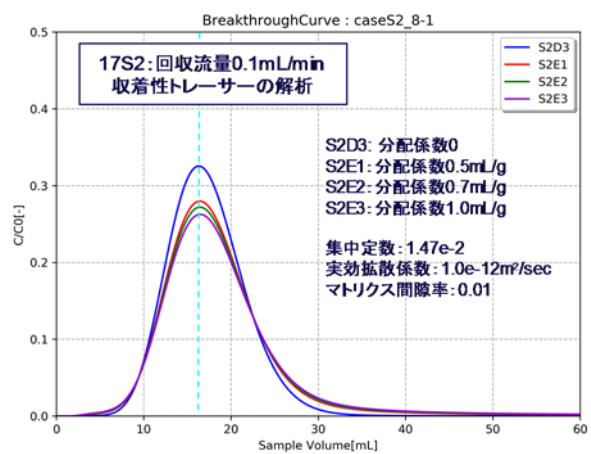
(a) 試験結果 (17S1)



(b) 試験結果 (17S2)



(c) 解析結果 (17S1)



(d) 解析結果 (17S2)

図 2.2.4-5 マトリクスの分配係数に関する解析

17S1、17S2のいずれの解析結果も、マトリクスへの収着の効果を考慮することにより、非収着性トレーサー破過曲線のピーク位置とほぼ変わらずに、ピーク濃度のみ減少する傾向を再現することができた。また、回収流量が小さい17S2の解析結果の方が、回収流量が大きい17S1に比べてピーク濃度の減少傾向が大きく、試験結果の傾向とも一致した。これは、回収流量を小さくしたことにより、岩盤とトレーサーの接触時間が長くなり、マトリクスへの拡散、収着の効果が大きくなったことが関係していると考えられる。

#### (5) 割れ目の表面吸着係数に関する解析

割れ目の表面吸着係数を変動パラメーターとした解析を行う。割れ目の集中定数は  $1.47 \times 10^{-2}$ 、マトリクスの間隙率は 0.01、マトリクスの実効拡散係数は  $1.0 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ 、マトリクスの分配係数が  $0.7 \text{mL/g}$  とし、割れ目の表面吸着係数は以下の値を用いた。



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

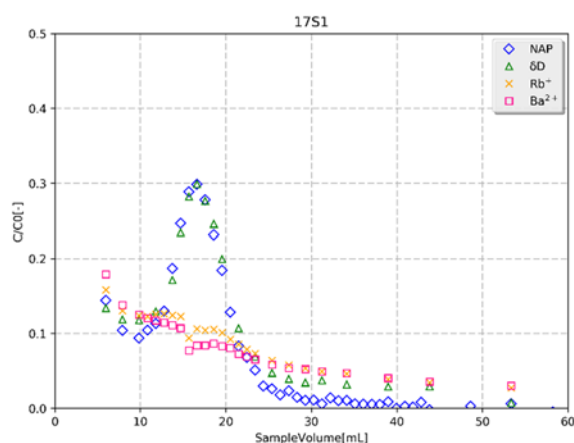
S1E2、S2E2：割れ目の表面吸着係数 0

S1F1、S2F1：割れ目の表面吸着係数  $2.6 \times 10^{-5}$

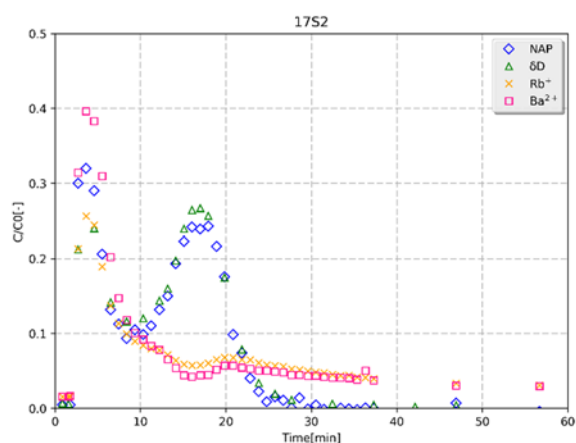
S1F2、S2F2：割れ目の表面吸着係数  $1.3 \times 10^{-4}$

S1F3、S2F3：割れ目の表面吸着係数  $3.9 \times 10^{-3}$

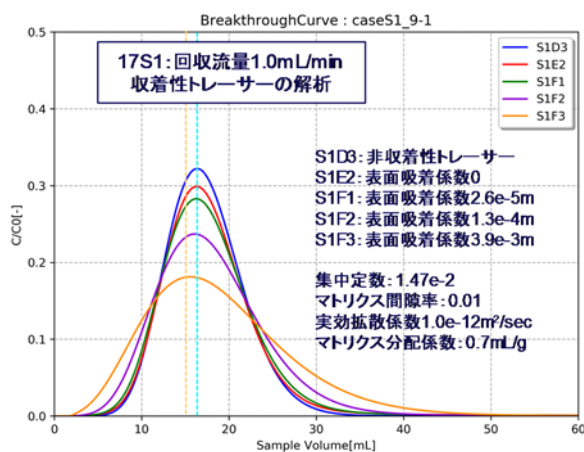
解析の結果割れ目の表面吸着係数を大きくするに従い、ピーク位置は非吸着性トレーサーの破過曲線とほとんど変わらず、ピーク濃度のみ減少する傾向を再現することができた。一方、S1F3、S2F3の解析結果は、非吸着性トレーサーの破過曲線に比べて、ピーク位置が早くなり、試験結果とは異なる傾向となった。つまり、割れ目表面への吸着の効果が大きく、マトリクスへの拡散よりも割れ目の遅延効果が有意になり、割れ目モデルの結果に近づいたと言える。このことから、割れ目表面の吸着効果はあったとしても、それほど大きくない可能性が考えられる。



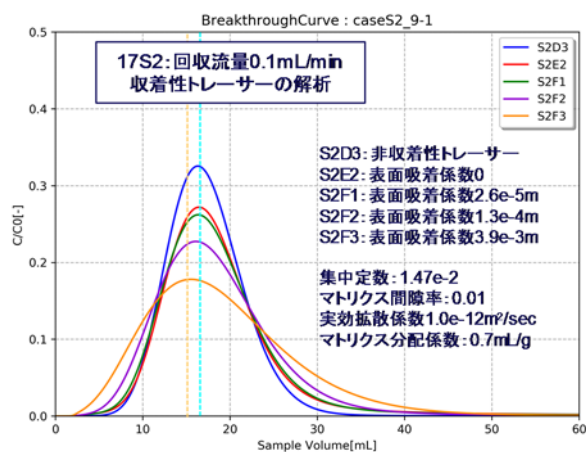
(a) 試験結果 (17S1)



(b) 試験結果 (17S2)



(c) 解析結果 (17S1)



(d) 解析結果 (17S2)

図 2.2.4-6 割れ目の表面吸着係数に関する解析

## 2.3 異なる粒径の岩石粉体試料を用いた収着バッチ試験

### 2.3.1 背景

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

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

$$K_d = K_{d,i} + K_a \cdot \frac{6}{\rho \cdot \langle d_p \rangle} \quad (2.3.1-1)$$

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

そこで、今年度は、原位置トレーサー試験を実施したボーリング孔の掘削時に採取した瑞浪の岩石コアを用いて、粒径範囲を変えた粉体岩石の収着バッチ試験を実施して表面収着係数を推定した。そして、原位置トレーサー試験の評価解析ではその数値を割れ目の表面収着係数として使用し、同定するパラメーターの数を減らすこととした。

### 2.3.2 試験方法

岩石粉体試料を用いた収着バッチ試験は、以下の手順で実施した。

#### (1) 岩石試料の準備

平成27年度にJAEA瑞浪超深地層研究所の深度500m研究アクセス南坑道125m計測横坑の坑壁からボーリング15MI52号孔を掘削する際に取得した健岩部のコアのうち500g程度をタングステン製のミルで粉砕した。そして、粉砕した岩石をふるいにかけて、以下の6通りの粒径範囲に選別した。

- ① 75  $\mu$ m ~ 125  $\mu$ m
- ② 125  $\mu$ m ~ 250  $\mu$ m
- ③ 250  $\mu$ m ~ 500  $\mu$ m
- ④ 500  $\mu$ m ~ 1mm
- ⑤ 1mm ~ 2mm
- ⑥ 2mm ~ 4mm

それぞれの粒径範囲の粉体岩石から微細な粉末を除去するために、純水を加えて緩やかに攪拌した後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°Cで乾燥させ、

試験に用いた。

## (2) 試験溶液の準備

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、0.01M の NaCl 溶液を調製した。また、溶液の pH を水酸化ナトリウムあるいは塩酸溶液で  $8.5 \pm 0.1$  に調整した。これら NaCl 溶液の濃度や pH は、瑞浪超深地層研究所の深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑から掘削したボーリング孔で採取した地下水のイオン強度や pH を基に設定した。

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。

## (3) 岩石と溶液の接触

上記の(1)で準備した各粒径範囲の粉体岩石 9.0g をそれぞれ 50mL の遠沈管に入れ、所定の NaCl 溶液を 45mL 添加した。遠沈管にフタをした後、シェイカーで緩やかに振盪した。岩石と溶液が接触してから 2 日後および 4 日後に溶液の pH を確認し、 $8.5 \pm 0.1$  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」も準備し、同様に pH を調整した。

## (4) 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。これらの濃度は原位置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 を再度調整した後、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、トレーサーを入れない「岩石ブランク」試料についても準備した。そして、収着率を計算する際には、試験期間中に岩石から溶出した Rb や Ba の濃度を差し引いて算出した。

## (5) サンプルング

ストック溶液の添加から原則として 1、2、3、5、7、24、48、72、96、168 時間後、以下の手順で上澄み液のサンプルを採取した。

まず、遠沈管をシェイカーから外して卓上に置き、岩石が沈降するまで静置した。その後に上澄み 0.5mL をフィルタ径 13mm のコマ型フィルタに通し、ろ液のうち 50  $\mu$ L を 1%硝酸 4.95mL を予め添加した 15mL 遠沈管に入れた。

## (6) ルビジウム・バリウム濃度の分析

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。

### 2.3.3 試験結果および考察

Ba および Rb の経過時間と収着率の関係をそれぞれ図 2.3.3-1 および図 2.3.3-2 に示した。ここで収着率は次式により算出した。

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

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

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

収着率から分配係数を算出し、平均粒径の逆数と分配係数の関係を図 2.3.3-3 および図 2.3.3-4 に示した。

Ba の場合、粒径 125  $\mu\text{m}$ ~250  $\mu\text{m}$  ( $1/\langle dp \rangle = 5333 \text{ m}^{-1}$ ) の試料を除くと、いずれの時間においても平均粒径の逆数と分配係数はほぼ直線関係にあり、式(2.3.1-1)の関係が成立していることを示唆している。

平均粒径の逆数と分配係数が直線関係にある場合、その直線の傾きを  $a$  とすると、表面吸着係数は次式により算出される。

$$K_a = \frac{a \cdot \rho}{6} \quad (2.3.3-1)$$

図 2.3.3-3 において、1 時間後の平均粒径の逆数と分配係数の関係について回帰分析により近似直線の勾配を算出し、さらに式(2.3.3-1)を用いて表面吸着係数を算出した。その結果、表面吸着係数として  $4.7 \times 10^{-4} \text{ m}$  が得られた。

一方、Rb の場合、上述のように粒径の小さい試料については、粉体表面への収着だけでなく粉体内部への拡散・収着も比較的短時間で終了してしまった可能性がある。そのため、図 2.3.3-4 において、平均粒径の逆数と分配係数の関係が右肩上がりの直線関係とみられるのは、試験開始後数時間のみで

ある。また、粒径  $75\mu\text{m}\sim 125\mu\text{m}$  ( $1/\langle dp \rangle = 10000\text{ m}^{-1}$ )、 $500\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$  ( $1/\langle dp \rangle = 1333\text{ m}^{-1}$ ) および  $2\text{mm}\sim 4\text{mm}$  ( $1/\langle dp \rangle = 333\text{ m}^{-1}$ ) の試料は直線関係からやや外れている。残りの粒径  $125\mu\text{m}\sim 250\mu\text{m}$  ( $1/\langle dp \rangle = 5333\text{ m}^{-1}$ )、 $250\mu\text{m}\sim 500\mu\text{m}$  ( $1/\langle dp \rangle = 2666\text{ m}^{-1}$ ) および  $1\text{mm}\sim 2\text{mm}$  ( $1/\langle dp \rangle = 667\text{ m}^{-1}$ ) の試料の試験開始後 1 時間、2 時間、3 時間、5 時間、7 時間の分配係数から算出された表面吸着係数は、それぞれ  $4.73 \times 10^{-5}\text{ m}$ 、 $3.54 \times 10^{-5}\text{ m}$ 、 $4.47 \times 10^{-5}\text{ m}$ 、 $4.51 \times 10^{-5}\text{ m}$ 、 $2.93 \times 10^{-5}\text{ m}$  であり、7 時間後の数値はそれ以前の数値と大きく異なり、決定係数もそれ以前の時間に比べて小さくなっている。そのため、5 時間後までの数値の平均値  $4.3 \times 10^{-5}\text{ m}$  を、表面吸着係数の推定値とした。

以上で得られた表面吸着係数の推定値を原位置トレーサー試験の評価解析に使用したところ、Rb については良好に破過曲線を再現でき、Ba についても表面吸着係数を推定値の 1/2 程度に修正することで破過曲線を再現できた。このため、異なる粒径の岩石粉体試料を用いた収着バッチ試験により岩盤割れ目の表面吸着係数を推定できる可能性が示唆されたものとする。

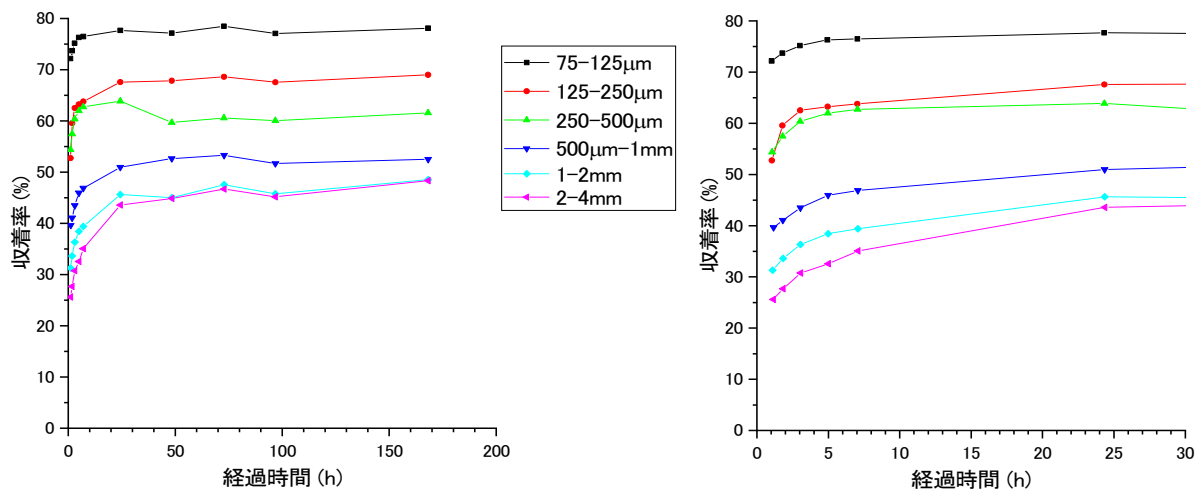


図 2.3.3-1 粉体岩石に対するバリウムの収着率の経時変化

左図は 200 時間以内での経時変化、右図は 30 時間以内での経時変化を拡大して示した。

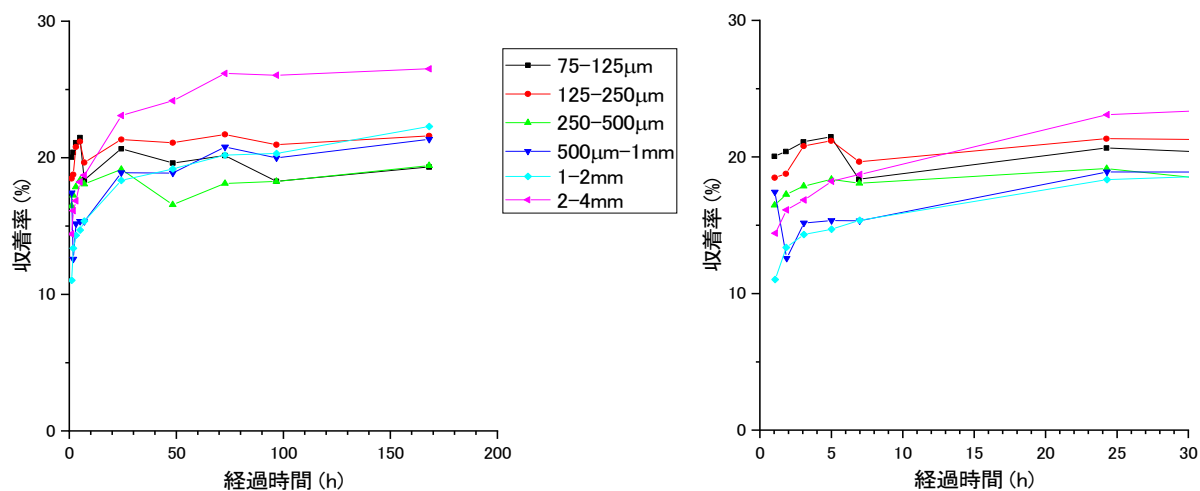


図 2.3.3-2 粉体岩石に対するルビジウムの収着率の経時変化

左図は 200 時間以内での経時変化、右図は 30 時間以内での経時変化を拡大して示した。

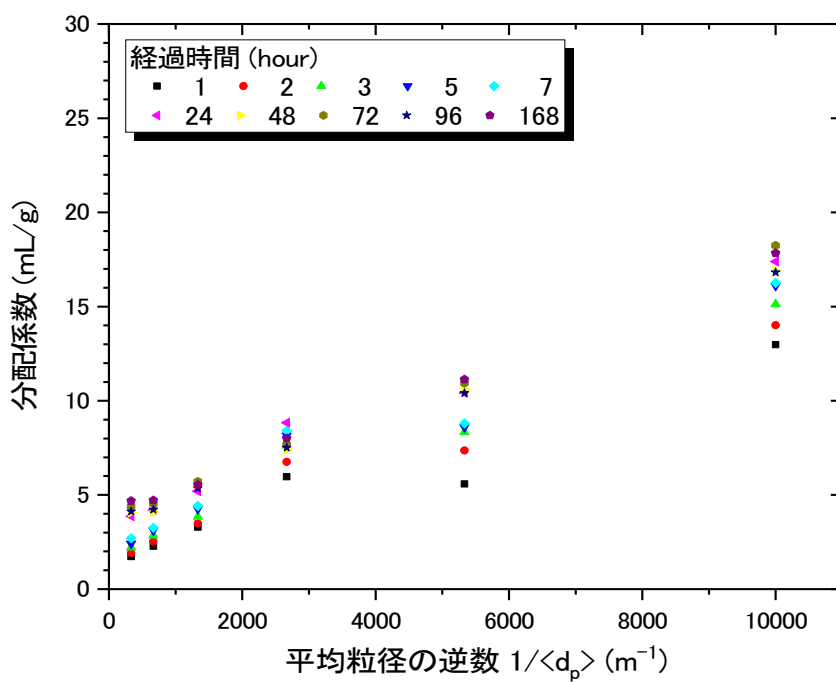


図 2.3.3-3 粉体岩石の平均粒径の逆数とバリウムの分配係数の関係

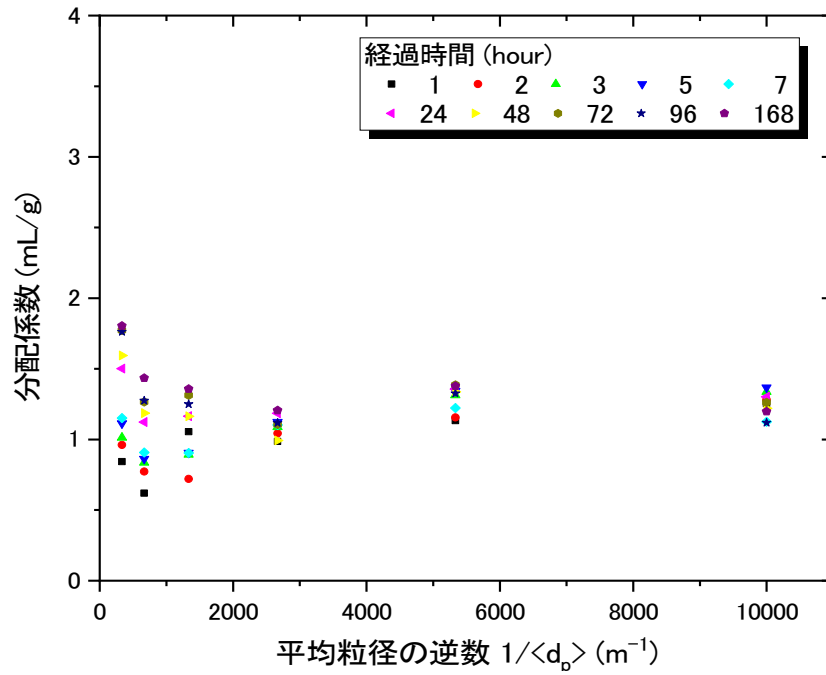


図 2.3.3-4 粉体岩石の平均粒径の逆数とルビジウムの分配係数の関係

## 2.4 割れ目充てん鉱物への核種の収着・脱離試験

### 2.4.1 背景

核種が岩石の割れ目を通して移行する場合、核種は岩石の割れ目に収着しその移行が遅延される。このため、割れ目が持つ核種の収着能力を評価することは、核種移行を予測するうえで極めて重要である。一方、割れ目はベースとなる岩石がそのまま地下水と接触しているのではなく、二次鉱物や充てん鉱物に覆われている、あるいは割れ目が充てんされている可能性が高い。二次鉱物や充てん鉱物が形成されている場合、核種の収着挙動はそれらの鉱物の影響を受け、ベースとなる岩石とは異なる可能性がある (Ames et al., 1983; Huber et al., 2011)。このため、割れ目を介した核種移行を正確に評価するためには、充てん鉱物への収着挙動について情報を得る必要がある。2.4.2 に記載するように、昨年度までの検討では瑞浪地域の割れ目における充てん鉱物を特定し、その収着挙動について明らかにした。その結果、充てん鉱物が形成されて比表面積が増大することにより、分配係数が増大する可能性が大きいことがわかった。

昨年度の検討は吸着量に関する情報のみであり、実際の処分を考えるためにはさらに収着の不可逆性を含む収着の強さについての情報を得る必要があると考えられる。充てん鉱物ができて、核種の移行挙動が変化する要因として、分配係数が増大する効果に加えて、一度収着した核種の脱離挙動が異なるケースが想定される。核種の収着が不可逆であった場合、核種は収着された場所に長い時間留まるため、結果として遅延係数が増大することになる。このため、昨年度の収着試験に引き続き、今年度は各鉱物へ収着した Rb・Ba の脱離試験を実施し、収着の強さや不可逆性についての情報を得た。

### 2.4.2 昨年度実施した収着試験のまとめ

#### (1) 割れ目充てん鉱物の特定

割れ目観察等の結果から、瑞浪地域の岩石割れ目においては、①緑泥石、②絹雲母、③方解石、④スメクタイト、が主要な充填鉱物であることがわかった。その他に黒雲母も鉱物として発見された。上記の鉱物に加えて、花崗岩健岩部の主要な造岩鉱物であると考えられるアルカリ長石および曹長石を試験の対象とし、Rb および Ba の収着試験を実施した。試験に用いた鉱物を表 2.4.2-1 にまとめた。

#### (2) 試験結果と考察

試験では、Rb、Ba を収着のトレーサーとし、それぞれの濃度を 2 および 1ppm とした溶液に粉末状にした岩石を浸漬して実施した。また、各粉末に対しては BET 比表面積を測定した。表 2.4.2-2 には、各鉱物について Rb および Ba に対する収着率と脱着率を BET 比表面積で除したものの値をまとめた。表からわかるように、ベースの花崗岩の造岩鉱物と考えられる曹長石やアルカリ長石と比べて、各鉱物の収着率は高く、割れ目充てん鉱物の存在により収着量が増大する可能性が高いことが示された。



しかし、比表面積で正規化した値を比較するとアルカリ長石や曹長石に比べて（特にアルカリ長石の場合）、その他の鉱物が顕著に大きな値を示しているわけではないことがわかった。

以上のことから、割れ目に充てん鉱物が存在する場合、吸着量が増大する効果が期待できると考えられる。吸着量が増大する主な理由として、充てん鉱物が存在することにより比表面積が増大する効果が挙げられる。

表 2.4.2-1 試験に使用した鉱物と入手先

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

表 2.4.2-2 各鉱物に対する収着率と比表面積で規格化した収着率

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

### 2.4.3 鉱物への収着・脱離試験

収着試験とそれに引き続いて脱離試験を実施した。収着・脱離試験の手順を以下に示す。

#### (1) 岩石からの溶出量評価

本試験では、トレーサーとして Rb および Ba を用いる。試験には天然の鉱物を用いているため、試験中に溶液に岩石を浸漬した結果、岩石から Rb や Ba が溶出する可能性があり、事前にこれを把握しておく必要がある。収着試験には 0.01M NaCl 溶液を用いるため、収着試験と同様に岩石 0.2g に NaCl 溶液 5mL を加えた場合の Rb や Ba の溶出量について情報を得た。鉱物名と溶出した Rb および Ba 濃度を表 2.4.3-1 に示した。表からわかるように、黒雲母や絹雲母から溶出する Rb の濃度は高く、これらの鉱物が Rb を多く収着する可能性が高いことがわかる。また、Ba についてはスメクタイト（クニピア F）からの溶出量が多いことから、スメクタイトが存在した場合、Ba はスメクタイトに対して親和性が高いことが示唆された。

表 2.4.3-1 各鉱物から溶出する Rb および Ba の濃度

鉱物名	岩石と接触した溶液における濃度	
	Rb ( $\mu\text{g/L}$ )	Ba ( $\mu\text{g/L}$ )
曹長石	3.3	12.7
アルカリ長石	6.0	20.5
黒雲母	46.3	2.2
緑泥石	3.1	5.3
絹雲母	15.9	2.3
方解石	3.3	1.0
スメクタイト	7.1	229.1

#### (2) 収着試験

脱離試験の前に岩石に Rb や Ba を収着させる「収着試験」を実施した。まず、鉱物試料は表 2.4.2.-1 に示したものを購入した後、2mm 以下となるようにタングステンカーバイドのミルで粉砕した。15mL のポリエチレン製遠沈管に粉砕した岩石 0.2g を入れ、そこに 0.01M NaCl 溶液を 5mL 加えた。その後、岩石粉末と接触した溶液の pH を 8.5 になるように調整した。岩石が入った溶液を緩やかに攪拌しながら、1 週間の間岩石と溶液を接触させ、溶液の pH が変化した場合には適切に pH を再調整した。

1 週間後、溶液中の Rb および Ba 濃度がそれぞれ 1 および 2ppm になるように本試験では、トレーサーとして Rb および Ba を用いる。上記(1)の手順で確認したように、各鉱物にはある程度の量の Rb や Ba が収着しており、試験期間中に Rb や Ba が溶出する可能性がある。収着試験では、溶出するイオンの値を補正して、収着率を算出した。収着率は添加した Rb や Ba の量に対する、岩石に収着した Rb

や Ba の量の百分率で定義している。今回取得した収着率を表 2.4.3-2 にまとめた。表の値は昨年度取得した収着率の値と近い値を示し、収着試験の再現性を確認することができた。

表 2.4.3-2 Rb と Ba の充てん鉱物への収着試験結果

鉱物名	収着率 (%)	
	Rb	Ba
曹長石	1.0	6.5
アルカリ長石	1.9	1.4
黒雲母	13.3	72.2
緑泥石	5.9	34.1
絹雲母	11.6	98.4
方解石	-*	-*
スメクタイト	94.4	98.0

\*ブランクとの間に顕著な差異がなく、有意な収着が認められなかった

収着試験の結果方解石を除いた鉱物においては、曹長石やアルカリ長石と比較して顕著に高い収着率を示した。このことから、昨年度も確認されたように、これらの鉱物が充てん鉱物として存在した場合、Rb や Ba の収着率は高くなり、割れ目をもつ核種移行の遅延能力は増大する可能性が高いと考えられる。特に絹雲母、黒雲母はバリウムに対しての収着率が高く、2 価イオンの遅延能力が高いと考えられる。また、スメクタイトは Rb および Ba の両方に対して高い親和性を示し、割れ目内に充てん鉱物としてスメクタイトが存在した場合には核種移行の遅延への寄与が大きいと考えられる。

### (3) 脱離試験

収着試験に用いた後のサンプルについては、遠心分離機で固液を分離したあと、固相を脱離試験に用いた。固相に対して再度 Rb や Ba を含まない 0.01M NaCl 溶液を入れ、pH を 8.5 に調整して 1 週間岩石と溶液を接触させた。1 週間後、岩石と溶液を再度固液分離し、溶液中の Rb や Ba の濃度を分析して、脱離した Rb や Ba の量を評価した。

脱離試験の結果を表 2.4.3-3 示す。ここで脱離率とは、収着試験で収着した Rb や Ba の量に対する、脱離試験で溶液に溶出した Rb や Ba の溶出量を百分率で示したものである。まず Rb についてみると、ほとんどの岩石試料で脱離率が 100%近い値を示した。これは、Rb がこれらの鉱物に対して可逆的に収着しているためであると考えられる。一方スメクタイトにおいては、収着した Rb のうちわずか 6.3%程度しか脱離しなかった。このことから、充てん鉱物としてスメクタイトが存在する場合には、収着量の増加に加えて、一部の 1 価陽イオンは不可逆的にスメクタイトに収着し、さらに遅延される効果が高くなると推察された。

一方、バリウムにおける脱離率を見ると曹長石・アルカリ長石では収着した Ba のほとんど 100% が脱離試験で溶出したのに対し、そのほかの鉱物では脱離率が 100% よりも明らかに低く、一部の Ba は脱離されずに固相に留まることがわかる。特に絹雲母およびスメクタイトにおいては、脱離率はそれぞれ 4.7 および 5.7% に留まっており、Ba が絹雲母やスメクタイトに強く収着していることが示された。このため、割れ目充てん鉱物としてこれらの鉱物が生成した場合には、2 価の核種は強く絹雲母やスメクタイトに収着し、核種の移行がより遅延される可能性が示された。

以上の結果から、充てん鉱物が割れ目に存在した場合、収着量が増加して核種の移行が遅延される効果だけでなく、核種が脱離されにくい状態（あるいは不可逆的に）充てん鉱物に収着することで、核種移行の遅延効果を高める可能性があることが確認された。核種の岩石への収着の可逆・不可逆性については岩石とイオンの接触時間に依存する可能性が考えられる。このため、実際の処分における時間スケールで岩石とイオンが接触した場合、さらに脱離しにくいあるいは不可逆的な収着の割合は増加することが見込まれる。

表 2.4.3-3 充てん鉱物に収着した Rb および Ba の脱離試験結果

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

\*有意な収着が認められなかったため、脱離試験を実施していない

#### 2.4.4 まとめ

充てん鉱物が存在した場合に核種移行が遅延される可能性を検討するため、収着および脱離試験を実施した。

収着試験においては、母岩の造岩鉱物に比べて充てん鉱物は高い収着率を示し、充てん鉱物が存在した場合、核種がより遅延される可能性が高いことを示した。一方、充てん鉱物と母岩の造岩鉱物との間で、単位比表面積あたりの収着量には大きな差異がなかったことから、充てん鉱物が存在することで収着量が増加するメカニズムは、充てん鉱物ができることで比表面積が増大する効果が最も大き

いと考えられる。

脱離試験では、スメクタイトにおいて大きな割合の不可逆的な収着が、Rb・Baの両方に対して観察されたほか、絹雲母は特異的にBaに対して強い親和性を示し、脱離されない成分が多かった。そのほか緑泥石や黒雲母にBaが収着した場合、一部は不可逆的に収着する可能性が示唆された。一方で、母岩の造岩鉱物である長石においては、脱離されない成分は認められず、収着したRb・Baがほぼ100%脱離した。これらの結果から、充てん鉱物が割れ目に存在した場合、収着量を増加させる効果のほかに、脱離しにくい収着が増加する効果が見込めることが分かった。核種が鉱物に脱離しにくい形態で収着した場合、核種移行の遅延はさらに大きくなると考えられる。

上記のように、収着・脱離試験を実施した結果、充てん鉱物の存在により、収着量の増大および脱離しにくい収着が発生することにより、母岩の割れ目よりさらに核種の移行を遅延する効果が高くなることが期待できる。

## 2.5 室内試験のまとめ

今年度の室内試験においては、以下に示す3つのことを実施した。

1 つ目は室内模擬単孔トレーサー試験の実施である。直方体の花崗岩ブロックとアクリル板の間にスペーサーとオーリングを挟んで模擬割れ目を作製し、回収時の流量を変えた試験を実施した。試験の結果、非収着性トレーサーに比べ、収着性トレーサーでは破過曲線のピーク濃度が低下するとともに、ピーク時刻は若干遅くなる傾向が確認され、その傾向は回収流量を小さくした場合に、より顕著であった。割れ目と岩盤マトリクスを考慮した複合モデルを用い、マトリクスへの拡散・収着、割れ目表面への吸着を考慮した解析を実施したところ、試験結果に近い破過曲線を得ることができた。一方で、解析では分配係数や拡散係数等のパラメーターとして、バッチ試験など別の室内試験で得られた値に近い数値を用いたが、試験結果のピーク濃度の方が解析結果より低く、試験結果を完全に再現することはできなかった。今回の試験では間隙率の小さい花崗岩を用いたが、拡散の効果が大きくなると想定される間隙率の大きな砂岩等の試料での検討も必要と考えられる。また、回収時の流量が大きい場合、収着性トレーサーの収着挙動が非平衡となっている可能性もあり、今後検討が必要である。

2 つ目は粒径を変えた岩石試料による収着試験の実施である。原位置トレーサー試験を実施したJAEA 瑞浪超深地層研究所の深度500m 研究アクセス南坑道125m 計測横坑から掘削したボーリング孔で取得した健岩部の岩石コアを粉碎し、粒径76 $\mu$ m~4mmの試料を6つの粒径範囲に選別してバッチ式収着試験を実施した。Baについては、いずれの粒径範囲でも24時間程度で収着は見かけ上ほぼ平衡に達し、粒径が小さいほど収着率が高くなる傾向がみられた。Rbについては、試験開始後5時間まではBaと同様に粒径が小さいほど収着率が高くなる傾向がみられたが、その後は粒径の小さい試料では収着率が増えず、粒径と収着率の関係が逆転した。平均粒径の逆数と分配係数の関係から、粉体粒子表

面への吸着係数を推定した。その表面吸着係数の推定値を原位置トレーサー試験の評価解析に使用したところ、Rbについては良好に破過曲線を再現でき、Baについても表面吸着係数を推定値の1/2程度に修正することで破過曲線を再現できた。このため、異なる粒径の岩石粉体試料を用いた収着バッチ試験により岩盤割れ目の表面吸着係数を推定できる可能性が示唆されたものとする。

3 つ目は割れ目充てん鉱物に対する、収着・脱離試験である。瑞浪地域の岩石割れ目観察で特定された割れ目充てん鉱物と母岩の造岩鉱物を用いて、収着・脱離試験を実施した。収着試験においては、母岩の造岩鉱物に比べて充てん鉱物は高い収着率を示し、充てん鉱物が存在した場合、核種がより遅延される可能性が高いことを示した。充てん鉱物が存在することで収着量が増加するメカニズムは、充てん鉱物ができることで比表面積が増大する効果が最も大きいと考えられる。脱離試験では、スメクタイトにおいて大きな割合の不可逆的な収着が、Rb・Baの両方に対して観察されたほか、絹雲母は特異的にBaに対して強い親和性を示し、脱離されない成分が多かった。そのほか緑泥石にBaが収着した場合、一部は不可逆的に収着する可能性が示唆された。一方で、母岩の造岩鉱物である長石においては、収着したRb・Baがほぼ100%脱離した。これらの結果から、充てん鉱物が割れ目に存在した場合、収着量の増大および脱離しにくい収着が発生することにより、充てん鉱物のない割れ目に比べてさらに核種の移行を遅延される可能性が高いことを示した。

## 参考文献

- Ames, L. L., McGarrah, J. E., and Walker, B. A., (1983) : Sorption of trace constituents from aqueous solutions onto secondary minerals. *Clay and Clay minerals*, 31, 321-334.
- Byegård, J., Johansson, H., Skålberg, M., and Tullborg, E-L. (1998) : The interaction of sorbing and non-sorbing tracers with different Äspö rock types – Sorption and diffusion experiments in the laboratory scale. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company. SKB Technical Report TR-98-18.
- Huber, F., Kunze, P., Geckeis, H., and Schäfer, T., (2011) Sorption reversibility kinetics in the ternary system radionuclide–bentonite colloids/nanoparticles–granite fracture filling material. *Applied Geochemistry*, 26, 2226-2237.

### 3. 原位置トレーサー試験

#### 3.1 はじめに

本研究においては、平成 17 年度より取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、また、平成 28 年度にはより大深度の深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑試験場において、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。

昨年度に続き、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引き続き大深度での適用性を確認することとした。



### 3.2 トレーサー試験

#### 3.2.1 トレーサー試験装置の概要

試験装置は、当所が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、深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑内に掘削した 3 孔の内、15MI52 号孔、16MI59 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。15MI53 号孔では、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。トレーサー試験のフローを図 3.2.1-1 に示す。

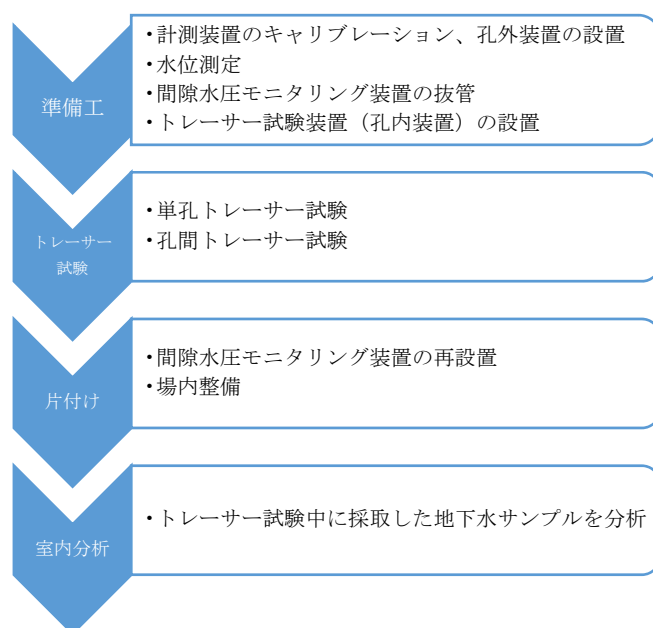


図 3.2.1-1 トレーサー試験の作業フロー

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 3.2.1-2 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を変更すれば、注水孔、揚水孔の入れ替え、単孔試験が可能である。

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、およびモノポンプなどで構成される。また、揚水の配管路（図中緑線）の末端には、トレーサー濃度分析用の地下水試料を採取するフラクションコレクターを配備した。フラクションコレクターは、分析用試料（遠沈管容器）を最大 120 本連続で採取することができ、任意のサンプリング間隔、分画時間を設定できる。

主な測定項目は、試験孔の孔内圧力、注水・揚水流量、蛍光濃度（孔内、地上）、および 15MI53 号孔の間隙水圧モニタリング区間（6 区間）である。

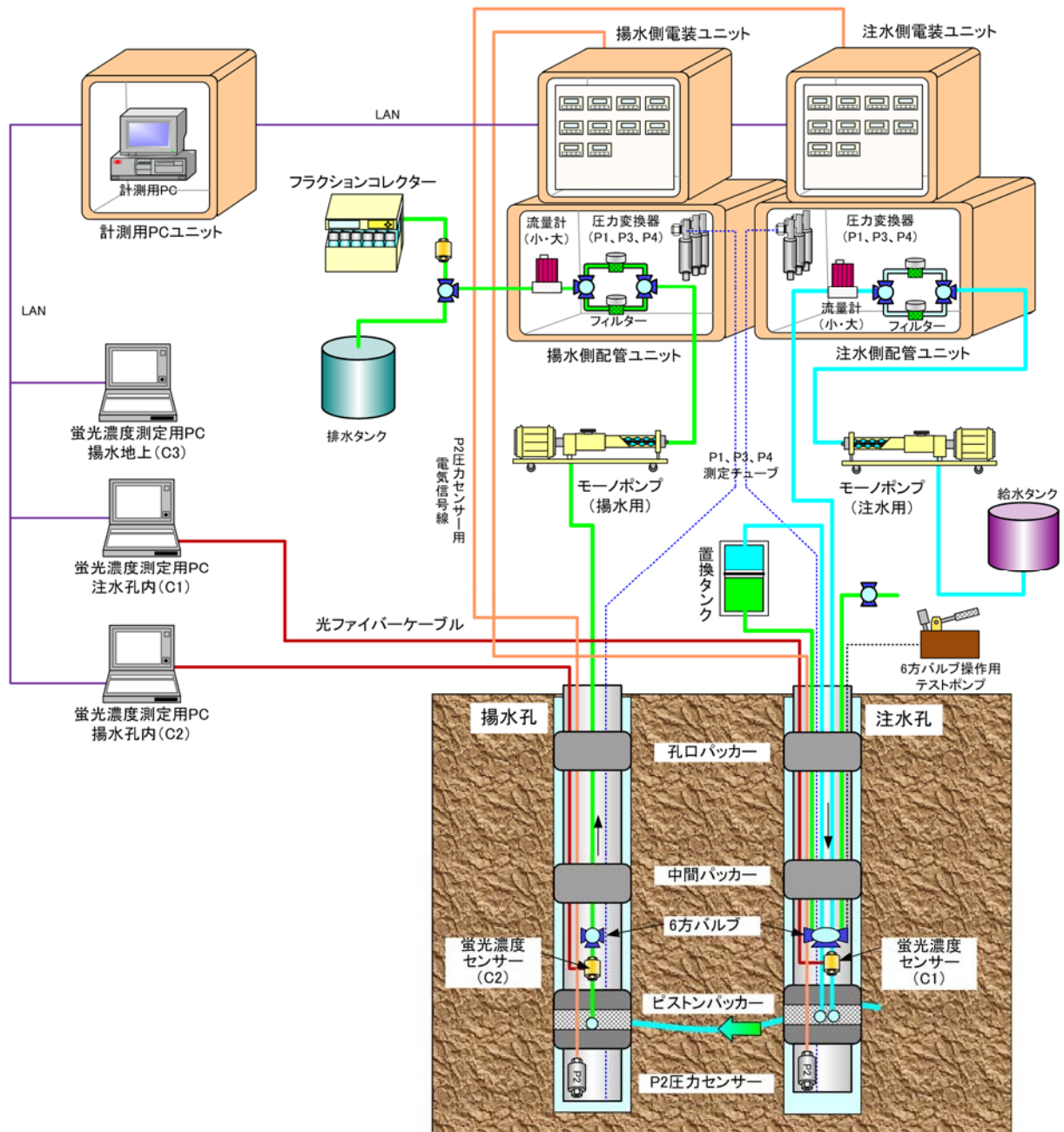


図 3.2.1-2 トレーサー試験装置の全体構成

### 3.2.2 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吸着性のウラニンをを用いた。

キャリブレーションは、作成した複数濃度のウラニントレーサー溶液（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。

#### 3.2.2.1 蛍光濃度測定の実験原理

ウラニン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 3.2.2-1 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ン溶液を蛍光させる。
- ③ 蛍光したウラニン溶液の光は、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。

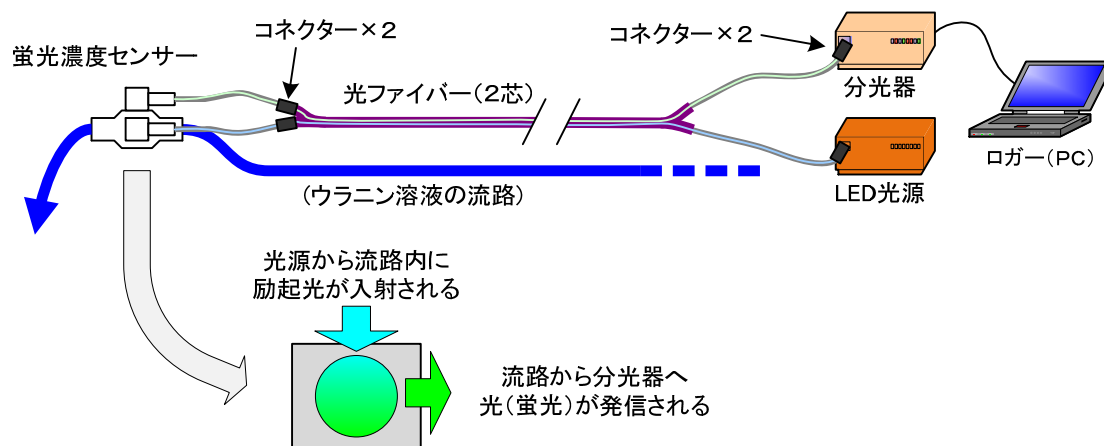


図 3.2.2-1 蛍光濃度測定の実験原理

### 3.2.2.2 使用機器

表 3.2.2-1 に蛍光濃度センサーの仕様と種類、図 3.2.2-2、図 3.2.2-3 に機器の写真を示す。

16MI59 号孔に設置した孔内センサーを C1、15MI52 号孔に設置した孔内センサーを C2、地上のセンサーを C3 と称する。また、蛍光分光光度計は、日本分光(株)の FP-8200 型を使用した。

表 3.2.2-1 蛍光濃度センサーの主な仕様

項目	Ver. 1.0	Ver. 3.1
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 3.2.2-2 (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)



図 3.2.2-3 蛍光分光光度計

(日本分光(株)製 FP-8200、日本分光(株)ホームページより)

### 3.2.2.3 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 15MI53 号孔から採取した地下水を用いて検量水を作成した。キャリブレーションに用いた検量水は、上限値：4mg/L と下限値：地下水 ( $\approx 0$ mg/L) とする 9 段階の濃度を作成した。また、1 秒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検量水を加圧してガスの遊離を抑制させて実施した (図 3.2.2-4 参照)。

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 上限値：4mg/L と下限値：地下水 ( $\approx 0$ mg/L) とする 9 段階の濃度を作成した。
- ③ 蛍光強度の上限値を基準として Integral Time と Average を設定するため、最初の測定には 4mg/L の検量水を用いた。
- ④ 検量水を注水して配管路を 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 3.2.2-4 キャリブレーションの作業状況

### 3.2.3 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16MI59号孔のトレーサー試験区間、および15MI53号孔の間隙水圧モニタリング装置 Int-4 との水頭差の測定を行った。測定に用いた差圧計の仕様を表 3.2.3-1 に示す。また、測定手順を以下に示す。

- ① 図 3.2.3-1 に示すように、16MI59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（無負荷状態）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、5～10 分測定した。差圧測定後は再び V2-1、V2-2 バルブを開放し、無負荷状態を測定し初期値と変化がないことを確認した。

表 3.2.3-1 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

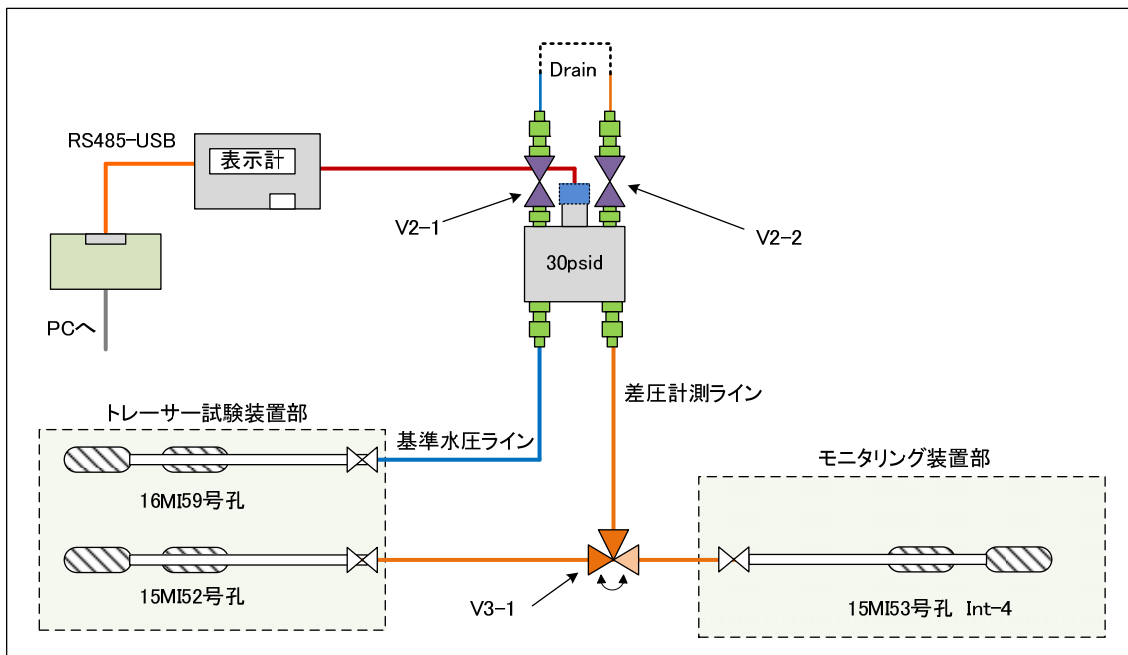


図 3.2.3-1 トレーサー試験中の差圧測定概念

### 3.2.4 孔内装置の設置

#### 3.2.4.1 間隙水圧モニタリング装置の抜管

トレーサー試験装置設置に先立ち、間隙水圧モニタリング装置の抜管を行った。抜管は以下の手順で実施した。

- ① 湧水圧により試験装置が浮き上がるのを防止するため、フランジの上蓋を外しロッド残尺部のバンドからレバーブロックでアンカーを取った。
- ② パッカーを収縮させた。パッカーの収縮完了は、圧力変化やタンクの水量、および孔口からの湧水量により確認した。
- ③ パッカー収縮後、電動ウインチを用いて装置を引き上げた。ロッドやパッカーの切り離しをする際は、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。

#### 3.2.4.2 孔内装置の概要

図 3.2.4-1 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 3.2.4-1 (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 6 方バルブ、および試験区間 P2 圧力センサーを内蔵している。

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  $\phi 79\text{mm}$  (カップリング部) 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、光ファイバーや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：φ 6mm / 1 本
- ・ 蛍光濃度センサー用光ファイバー線：φ 6mm / 1 本
- ・ トレーサー注入用チューブ配管：φ 6×4mm / 4 本
- ・ P1、P3、P4 圧力測定用チューブ配管：φ 4×2.5mm / 3 本
- ・ 6 方バルブ駆動用チューブ配管：φ 4×2.5mm / 2 本
- ・ パッカー拡張用チューブ配管：φ 4×2.5mm / 3 本

### 3.2.4.3 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。
- 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。

### 3.2.5 単孔トレーサー試験

#### 3.2.5.1 単孔トレーサー試験の概要

単孔トレーサー試験は注水・揚水を同一孔で行うため、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 3.2.5-1 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 3.2.5-1 (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 3.2.5-1 (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 3.2.5-1 (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。

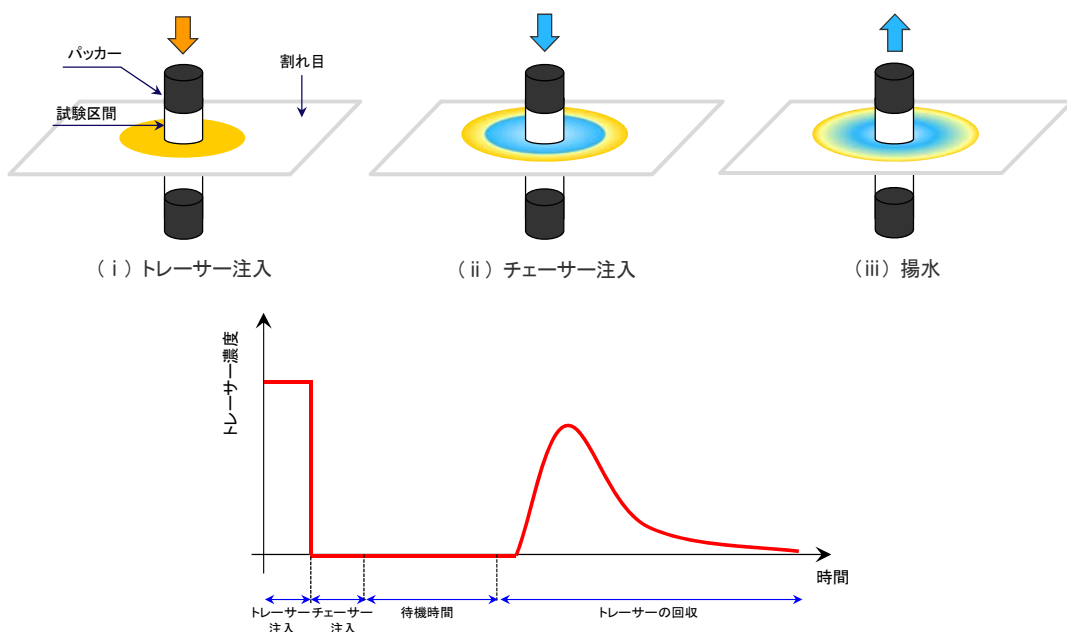


図 3.2.5-1 単孔トレーサー試験のトレーサー濃度変化の模式図および破過曲線の例

### 3.2.5.2 単孔トレーサー試験の手順

単孔トレーサー試験は、図 3.2.5-2 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、およびフラクシオ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オ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。

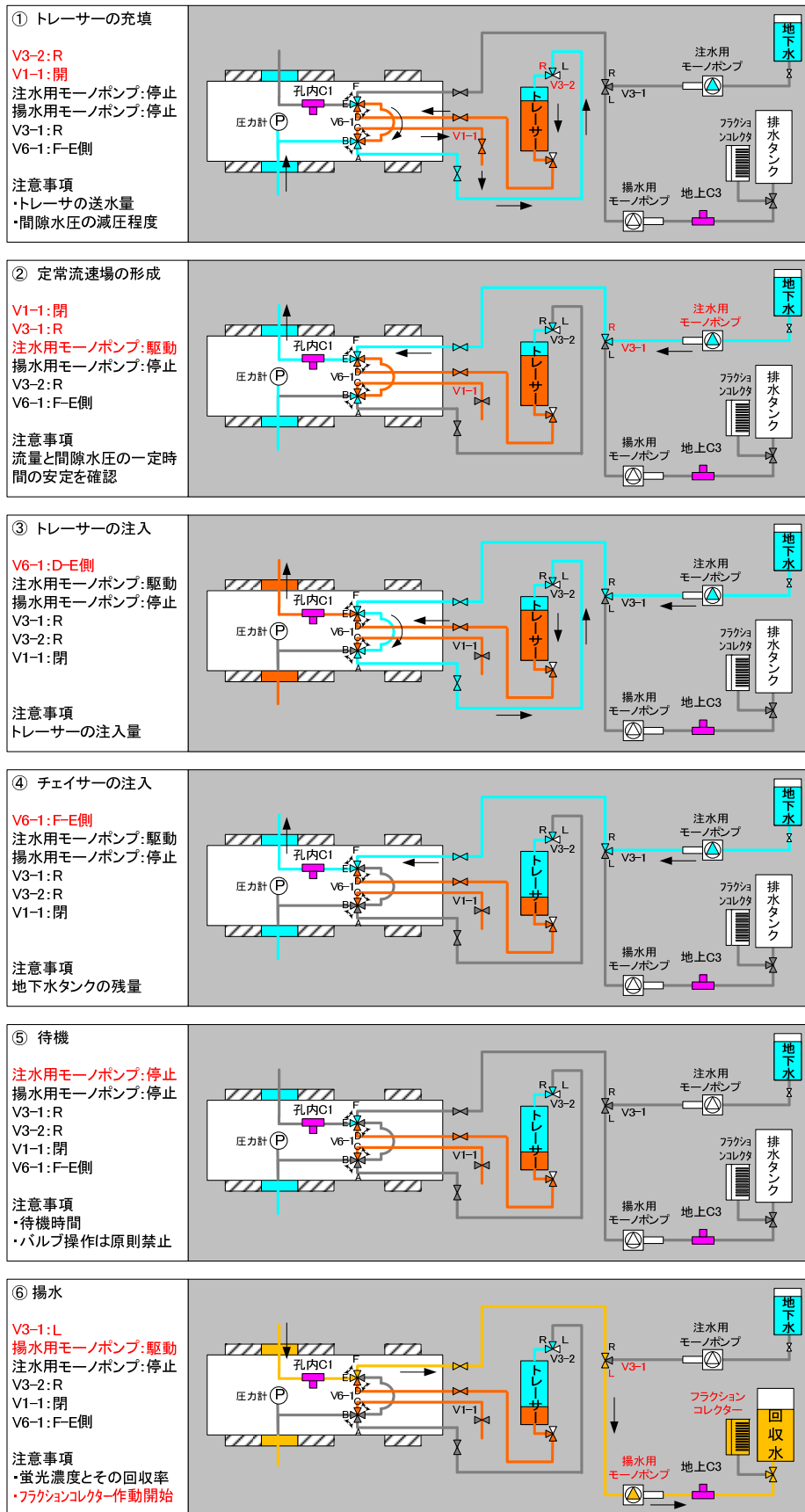


図 3.2.5-2 単孔トレーサー試験の流路と手順

### 3.2.6 孔間トレーサー試験

#### 3.2.6.1 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3.2.6-1に示す。

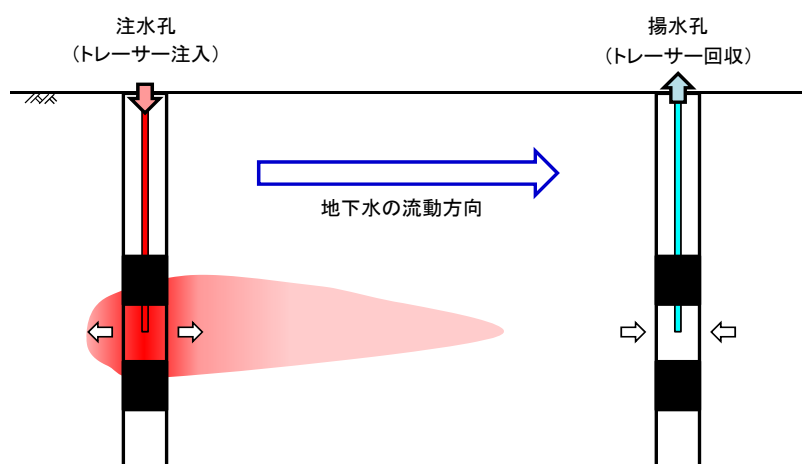


図 3.2.6-1 ダイポール試験の概念

#### 3.2.6.2 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3.2.6-2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。フラクシオ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の注入後、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。

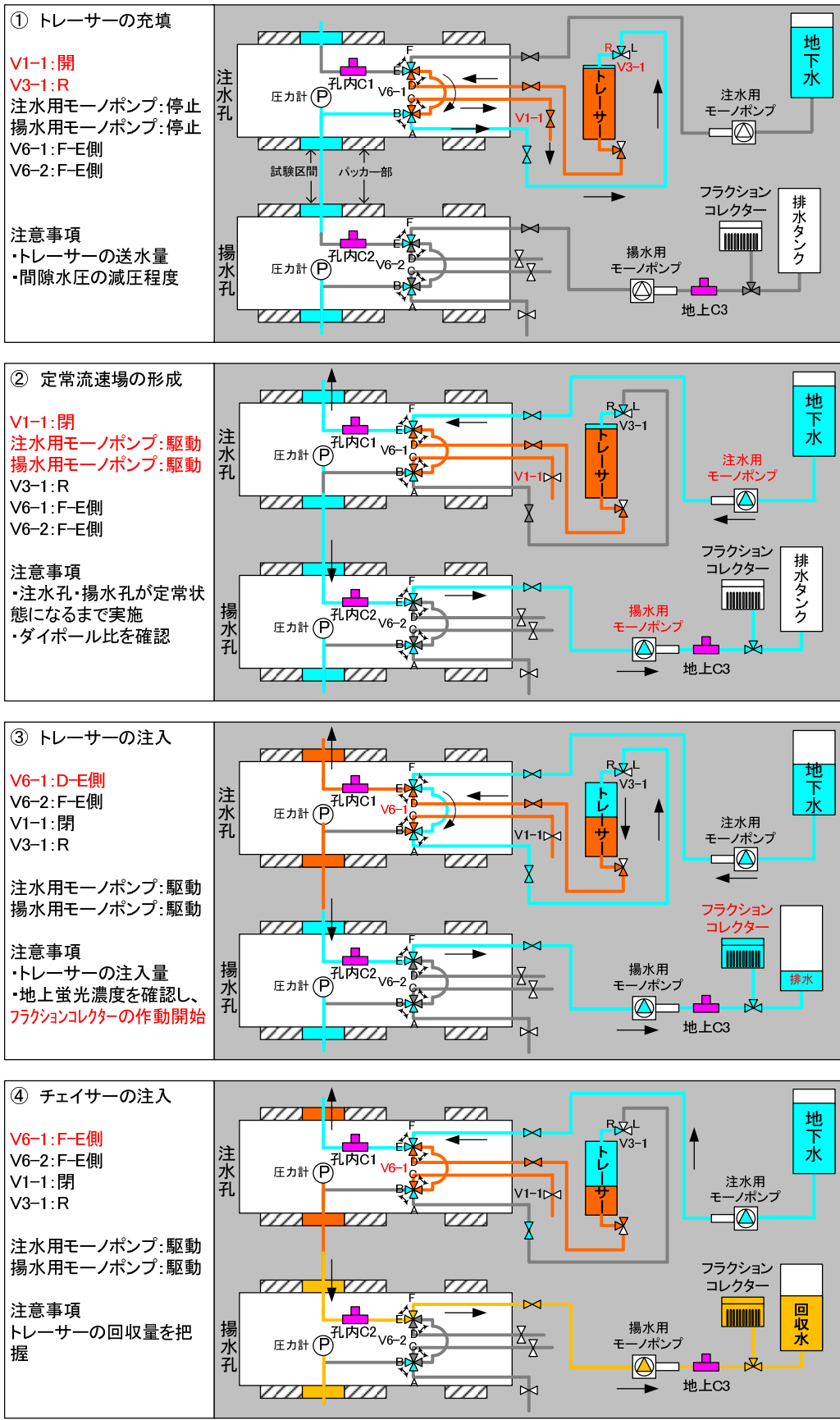


図 3.2.6-2 ダイポール試験の流路と手順

### 3.2.7 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。

#### 3.2.7.1 分析項目

今年度の分析項目は重水(D<sub>2</sub>O)、蛍光染料(ウラニン、アミノG酸)、イオン(RbCl、BaSO<sub>4</sub>)の濃度分析とした。分析項目と分析方法を表3.2.7-1に示す。ウラニンについては現地でも蛍光分光光度計を用いて濃度測定を行った。

表 3.2.7-1 分析項目と分析方法

分析項目	分析法	使用装置
Rb、Ba	ICP質量分析法(ICP-MS)	Agilent Technologies社製 Agilent 7500Ce
水素酸素同位体比(δD)	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	日本分光社製 FP-8300

#### 3.2.7.2 前処理方法

室内分析では、試料を0.20μmPTFEフィルターでろ過し、目的的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3.2.7-2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 3.2.7-2 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

### 3.3 トレーサー試験結果

#### 3.3.1 トレーサー試験の概要

本試験は、深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑内の 3 本のボーリング孔において平成 28 年度に実施したトレーサー試験と同じ割れ目を対象とした。ただし、今年度のトレーサー試験の試験孔は 15MI52 号孔と 16MI59 号孔とし、15MI53 号孔は間隙水圧モニタリング装置を設置した観測孔とした。表 3.3.1-1 にトレーサー試験の区間深度一覧、図 3.3.1-1 に試験区間の平面分布を示す。

表 3.3.1-1 トレーサー試験区間深度一覧

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	試験区間	15.24	15.44	0.20
15MI53 号孔	モニタリング装置	Int-4	13.40	17.00	3.60
16MI59 号孔	トレーサー試験装置	試験区間	17.24	17.44	0.20

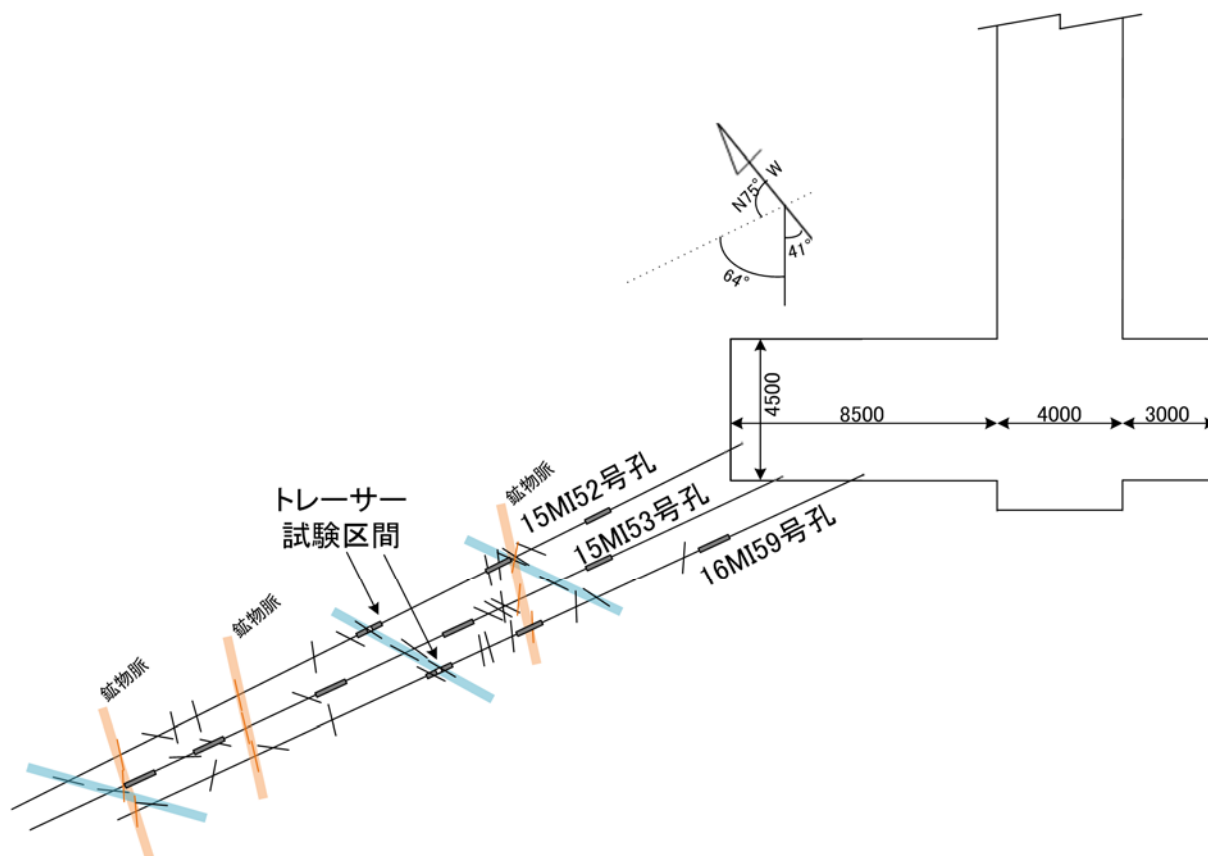


図 3.3.1-1 トレーサー試験区間および 15MI53 号孔間隙水圧モニタリング区間の平面分布



### 3.3.2 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、孔内設置前に実施した検量線を全試験結果に適用した。

#### 3.3.2.1 キャリブレーション結果

Ver. 3.1 の蛍光センサーの内、16MI59 号孔の孔内測定用 (C1) の検量線を図 3.3.2-1 に、15MI52 号孔の孔内測定用 (C2) の検量線を図 3.3.2-2 に示す。また、地上蛍光濃度センサー Ver. 1.0 の検量線を図 3.3.2-3 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。

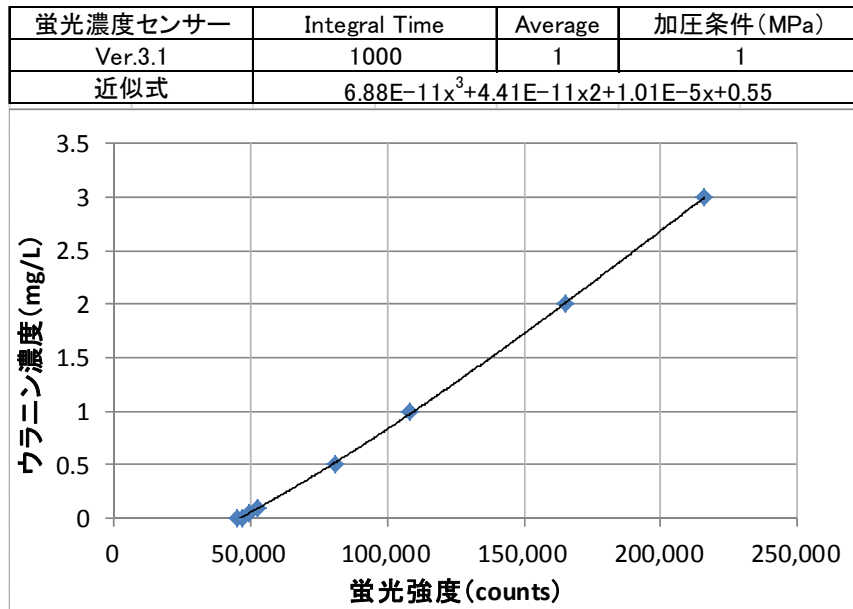


図 3.3.2-1 蛍光濃度センサー Ver. 3.1 (C1) の検量線 (50m 光ファイバー使用)

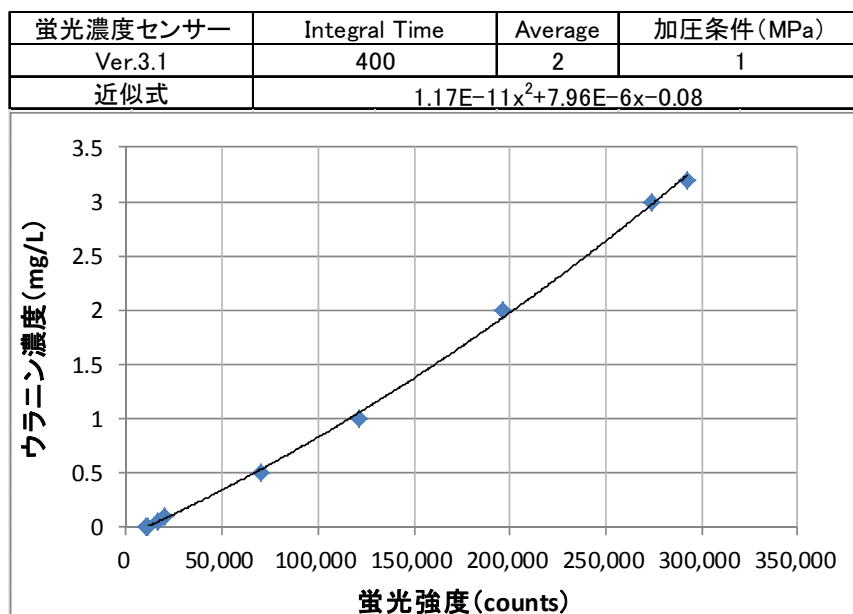


図 3.3.2-2 蛍光濃度センサーVer. 3.1 (C2) の検量線 (50m 光ファイバー使用)

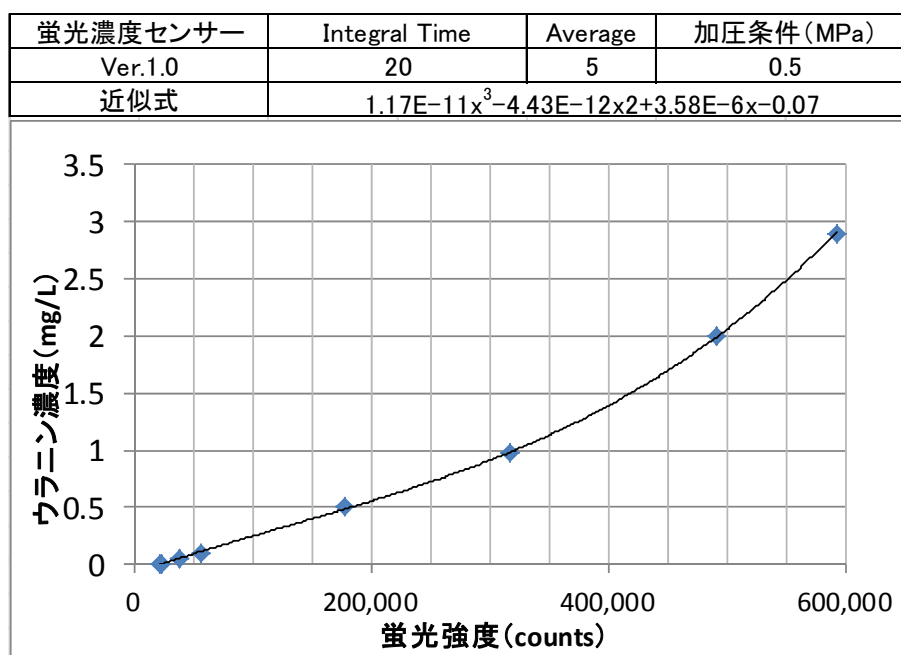


図 3.3.2-3 蛍光濃度センサーVer. 1.0 (C3) の検量線

### 3.3.2.2 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、特に昨年度から使用している 16MI59 号孔の C1 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は、昨年度報告書にも記載した圧力変化に対する耐性不足の可能性の他、長期間地下水にさらされることによる反射鏡の汚れなどが考えられる。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（現場分析値）の相関から求めた線形近似式を用いて補正した。また、各蛍光濃度センサーと検量水サンプリング箇所との流路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少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。

### 3.3.3 水圧測定（差圧測定）

水圧測定は、トレーサー試験前に対象区間の動水勾配を把握するために行った。基準水圧は16MI59号孔のトレーサー試験区間とし、15MI52号孔のトレーサー試験区間、および15MI53号孔のモニタリング装置 Int-4 との水頭差を測定した。

図 3.3.3-1 にトレーサー試験期間中の水頭差一覧と経時変化を示す。水圧測定は、トレーサー試験直前に10分間程度のデータ収録を行い、安定した3～5分間の平均値を記録した。16MI59号孔試験区間と他2孔の水頭差は、9月19日の初回測定時を除き、5mm未満で推移した。また、15MI52号孔と15MI53号孔の水頭差は、9月25日以降は1mm未満であり動水勾配はほとんどない。

日付	16MI59号孔との水頭差 (mm)		52-53孔水頭差 (mm)
	15MI53号孔	15MI52号孔	
9月19日	6.9	9.5	2.6
9月25日	2.1	2.1	0.0
9月26日	1.3	1.7	0.4
9月27日	2.6	2.8	0.2
9月28日	2.1	2.1	0.0
10月2日	2.1	2.4	0.3
10月3日	1.6	2.2	0.6
10月10日	1.6	2.0	0.4
10月16日	0.4	1.2	0.8
10月17日	1.1	1.6	0.5
10月18日	1.5	1.8	0.3
10月26日	1.0	1.4	0.4
10月30日	3.8	4.0	0.2
11月6日	3.2	3.5	0.3
11月13日	1.2	1.8	0.6
11月21日	1.1	1.9	0.8

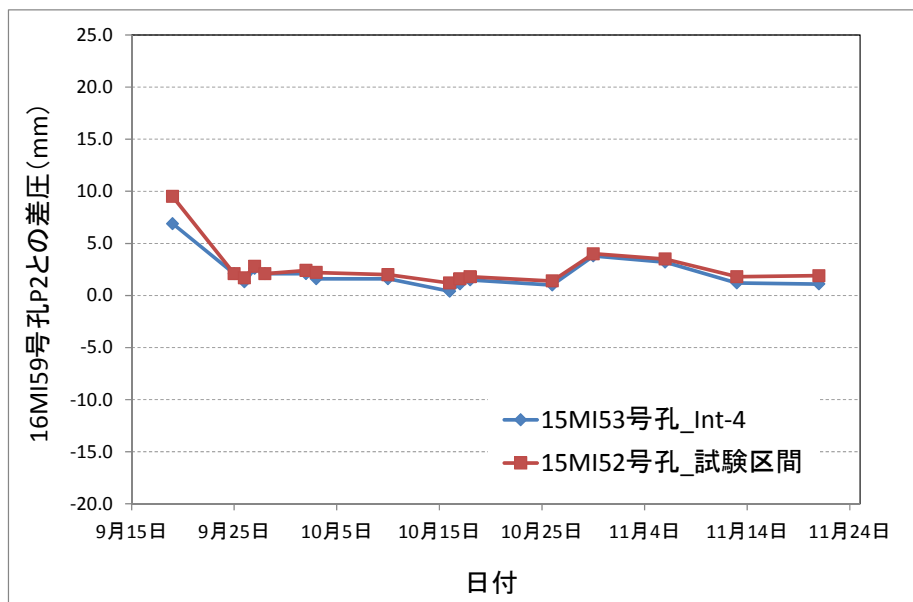


図 3.3.3-1 トレーサー試験期間中の水頭差一覧(上)と水頭差の経時変化図(下)

### 3.3.4 事前試験

トレーサー試験に先立ち、16MI59号孔で試験候補とした2箇所の湧水割れ目（16.95mabh 付近、および17.35mabh 付近）と15MI52号孔との連通性等を比較するため、16MI59号孔にトレーサー試験装置を設置後、水理試験および孔間トレーサー試験を行った。水理試験は20mL/minの定流量揚水試験とし、孔間トレーサー試験は注水流量（16MI59号孔）を50mL/min、揚水流量（15MI52号孔 Int-4）を150mL/minに設定したダイポール試験とした。トレーサーはウラニンのみを用い、現場分析により回収率を把握した。

図 3.3.4-1 に事前試験結果を示す。一連の試験の結果、良好な破過曲線が得られ、回収率の良い17.35mabhの湧水割れ目をトレーサー試験の対象とすることとした。

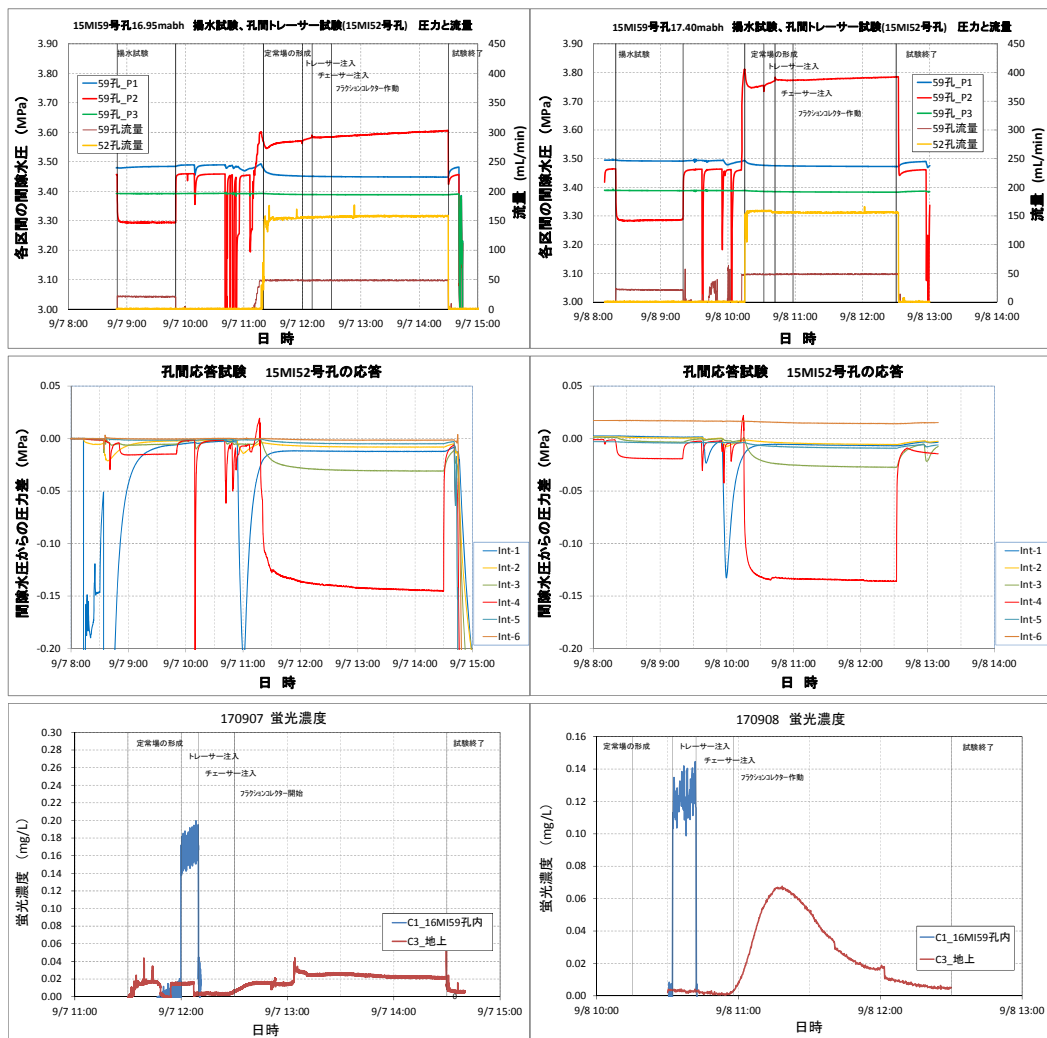


図 3.3.4-1 事前試験結果（左列：16.95mabh 対象 右列：17.35mabh 対象）

（上段：16MI59号孔注水 中段：15MI52号孔の応答 下段：トレーサー試験破過曲線）

### 3.3.5 トレーサー試験の概要

#### 3.3.5.1 トレーサー試験の名称

試験の名称は、基本的には昨年と同様に表 3.3.5-1 に示す規則に基づき設定した。

表 3.3.5-1 試験名の読み方

1、2 桁目	試験実施年度	17 : 2017 年度
3 桁目	試験種目	S : 単孔トレーサー試験 W : 孔間トレーサー試験
4~7 桁目	単孔トレーサー試験の実施孔の 2 桁番号 4~5 桁目 (6~7 桁目はblank)	52 : 15MI52 号孔 59 : 16MI59 号孔
	孔間トレーサー試験の注水・揚水孔の 2 桁番号 (4~5 桁目は注水孔) (6~7 桁目は揚水孔)	
8 桁目	試験対象孔に使用した装置 (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 …

#### 3.3.5.2 使用したトレーサー

トレーサー材は、非吸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)、吸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。トレーサーの溶媒は 15MI53 号孔 Int-5 の地下水とした。なお、単孔トレーサー/孔間トレーサー試験ともに、試験条件設定の基礎資料の取得を主目的としたケースでは、非吸着性のウランのみ、あるいはウランとアミノ G 酸をトレーサーとした。

#### 3.3.5.3 蛍光濃度センサーの配置と番号

蛍光濃度センサーは孔内および地上に配置した。蛍光濃度センサーの配置箇所と番号は、後述する孔間トレーサー試験と共通とし、16MI59 号孔内の蛍光濃度センサーを「C1」、15MI52 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。孔間トレーサー試験で、注水孔/揚水孔が入れ替わった場合も同様とした。

### 3.3.6 単孔トレーサー試験結果

#### 3.3.6.1 試験条件のまとめ

表 3.3.6-1、表 3.3.6-2 に 16MI59 号孔における単孔トレーサー試験の試験条件一覧を、表 3.3.6-3 に 15MI52 号孔の試験条件一覧を示す。17S59T1、17S59T2、17S59T5、17S59T12、17S52T10、17S52T11 の 6 ケースでは、現場のウラン分析のみとし、室内分析試料用の地下水サンプルは行わなかった。

表 3.3.6-1 16MI59 号孔の単孔トレーサー試験条件 (9/20~10/12)

試験名		17S59T1	17S59T2	17S59T3	17S59T4	17S59T5	17S59T6	17S59T7	
分析試料ラベル名		サンプルなし	サンプルなし	S1	S2	S3	サンプルなし	S4	
試験実施日		2017/9/20	2017/9/21	2017/9/22	2017/10/5	2017/10/10	2017/10/11	2017/10/12~13	
対象孔		16MI59号孔	16MI59号孔	16MI59号孔	16MI59号孔	16MI59号孔	16MI59号孔	16MI59号孔	
試験条件	注水流量(設定値)	mL/min	100	100	100	50	50	50	
	揚水流量(設定値)	mL/min	50	10	50	50	20	5	
	注水流量(流量計平均)	mL/min	98.85	96.98	95.81	49.92	50.31	50.62	
	揚水流量(流量計平均)	mL/min	51.37	10.12	48.25	50.23	21.18	5.16	
	定常場の形成		9/20 9:10	9/21 7:55	9/22 8:07	10/5 8:10	10/10 8:32	10/11 8:10	10/12 8:05
	トレーサー注入開始		9/20 9:30	9/21 8:15	9/22 8:30	10/5 8:40	10/10 8:55	10/11 8:40	10/12 8:30
	チェイサー注入開始		9/20 9:40	9/21 8:25	9/22 8:40	10/5 8:50	10/10 9:05	10/11 8:50	10/12 8:40
	待機切り替え		-	-	-	-	-	-	-
	揚水開始		9/20 9:45	9/21 8:30	9/22 8:45	10/5 9:00	10/10 9:15	10/11 9:00	10/12 8:50
	サンプリング開始		-	-	同上	同上	10/10 9:40	-	10/12 10:30
	サンプリング停止		-	-	9/22 10:45	10/5 11:00	10/10 14:40	-	10/13 6:30
	トレーサー注入時間	min	10	10	10	10	10	10	10
	チェイサー注入時間	min	5	5	5	10	10	10	10
	待機時間	min	-	-	-	-	-	-	-
トレーサー量	L	0.989	0.970	0.958	0.499	0.503	0.506	0.510	
チェイサー量	L	0.494	0.485	0.479	0.499	0.503	0.506	0.510	
原液濃度 設定値	ウラン	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
	重水素	mg/L	-	-	0.10	0.10	0.10	-	0.10
	ルビジウム	mg/L	-	-	2.00	2.00	2.00	-	2.00
	バリウム	mg/L	-	-	1.30	1.30	1.30	-	1.30
C3センサーピーク時刻	-	9/20 10:20	9/21 10:50	9/22 9:17	10/5 9:34	10/10 10:33	10/11 13:47	10/12 13:10	

表 3.3.6-2 16MI59 号孔の単孔トレーサー試験条件 (11/10~11/24)

試験名		17S59T12	17S59T13	17S59T14	17S59T15	17S59T16	17S59T17	17S59T18	17S59T19	17S59T20	
ラベル名		サンプルなし	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	
試験実施日		2017/11/10	2017/11/13	2017/11/14	2017/11/15	2017/11/16	2017/11/17	2017/11/21	2017/11/22	2017/11/24	
対象孔		15MI53号孔	15MI53号孔	15MI53号孔	15MI53号孔	15MI53号孔	15MI53号孔	15MI53号孔	15MI53号孔	15MI53号孔	
試験条件	注水流量(設定値)	mL/min	50	50	50	50	50	50	50	5	
	揚水流量(設定値)	mL/min	50	50	20	10	50	50	50	20	
	注水流量(流量計平均)	mL/min	49.17	49.36	49.82	50.39	49.52	49.03	49.81	48.87	
	揚水流量(流量計平均)	mL/min	50.07	50.46	20.71	10.64	49.61	50.40	52.14	49.86	
	定常場の形成		11/10 10:47	11/13 9:16	11/14 9:15	11/15 9:00	11/16 9:20	11/17 10:01	11/21 9:30	11/22 9:08	11/24 9:07
	トレーサー注入開始		11/10 11:10	11/13 9:40	11/14 9:40	11/15 9:30	11/16 9:40	11/17 10:30	11/21 9:50	11/22 9:30	11/24 9:25
	チェイサー注入開始		11/10 11:15	11/13 9:45	11/14 9:45	11/15 9:35	11/16 9:45	11/17 10:35	11/21 10:00	11/22 9:35	11/24 10:15
	待機切り替え		-	-	-	-	11/16 9:50	11/17 10:40	-	11/22 9:40	-
	揚水開始		11/10 11:20	11/13 9:50	11/14 9:50	11/15 9:40	11/16 10:50	11/17 12:40	11/21 10:10	11/22 13:40	11/24 11:05
	サンプリング開始		-	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	11/24 11:30
	サンプリング停止		-	11/13 11:50	11/14 15:15	11/15 16:30	11/16 12:50	11/17 14:40	11/21 12:10	11/22 15:40	11/24 16:00
	トレーサー注入時間	min	5	5	5	5	5	5	10	5	50
	チェイサー注入時間	min	5	5	5	5	5	5	10	5	50
	待機時間	min	-	-	-	-	60	120	-	240	-
トレーサー量	L	0.246	0.247	0.249	0.252	0.248	0.245	0.498	0.244	0.269	
チェイサー量	L	0.246	0.247	0.249	0.252	0.248	0.245	0.498	0.244	0.269	
原液濃度 設定値	ウラン	mg/L	3.00	3.00	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	3.00	3.00	
	重水素	mg/L	-	0.10	0.10	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	2.00	2.00	
	バリウム	mg/L	-	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	
C3センサーピーク時刻	-	11/10 11:49	11/13 10:19	11/14 10:46	11/15 11:35	11/16 11:13	11/17 13:03	11/21 10:44	11/22 14:08	11/24 12:05	

表 3.3.6-3 15MI52 号孔の単孔トレーサー試験条件 (10/26~10/31)

試験名		17S52T8	17S52T9	17S52T10	17S52T11	
分析試料ラベル名		S5	S6	サンプルなし	サンプルなし	
試験実施日		2017/10/26	2017/10/27	2017/10/30	2017/10/31	
対象孔		15MI52号孔	15MI52号孔	15MI52号孔	15MI52号孔	
試験条件	注水流量(設定値)	mL/min	100	50	50	50
	揚水流量(設定値)	mL/min	50	20	50	100
	注水流量(流量計平均)	mL/min	99.82	49.72	50.39	49.86
	揚水流量(流量計平均)	mL/min	52.06	20.36	51.33	102.25
	定常場の形成		10/26 8:41	10/27 8:28	10/30 10:58	10/31 8:20
	トレーサー注入開始		10/26 9:15	10/27 9:00	10/30 11:20	10/31 9:00
	チェイサー注入開始		10/26 9:25	10/27 9:10	10/30 11:25	10/31 9:05
	待機切り替え		-	-	-	-
	揚水開始		10/26 9:30	10/27 9:20	10/30 11:30	10/31 9:10
	サンプリング開始		同上	10/27 9:45		
	サンプリング停止		10/26 11:30	10/27 14:45		
	トレーサー注入時間	min	10	10	5	5
	チェイサー注入時間	min	5	10	5	5
	待機時間	min	-	-	-	-
	トレーサー量	L	0.998	0.497	0.252	0.249
チェイサー量	L	0.499	0.497	0.252	0.249	
原液濃度 設定値	ウラニン	mg/L	3.00	3.00	3.00	3.00
	アミノG酸	mg/L	3.00	3.00	-	-
	重水素	mg/L	0.10	0.10	-	-
	ルビジウム	mg/L	2.00	2.00	-	-
	バリウム	mg/L	1.30	1.30	-	-
C3センサーピーク時刻		-	10/26 10:08	10/27 10:49	10/30 11:57	10/31 9:23



### 3.3.6.2 試験区間からフラクションコレクターまでの容量

図 3.3.6-1～図 3.3.6-3 に各試験における試験区間からフラクションコレクターまでの揚水ラインの配管構成、および配管構成を示す。6mm-4mm チューブ 1m 当たりの容量は 12.57mL とし算定した。

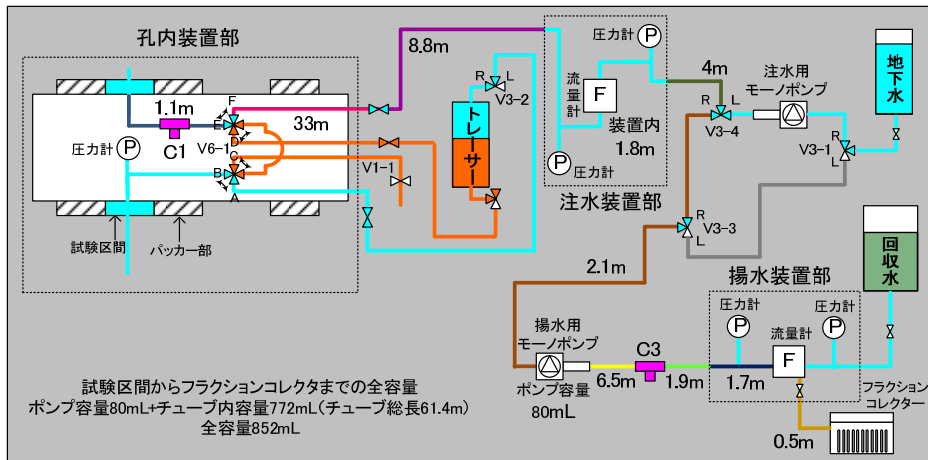


図 3.3.6-1 16MI59 号孔 17S59T1～T5、T12～T20 の配管構成と内容量

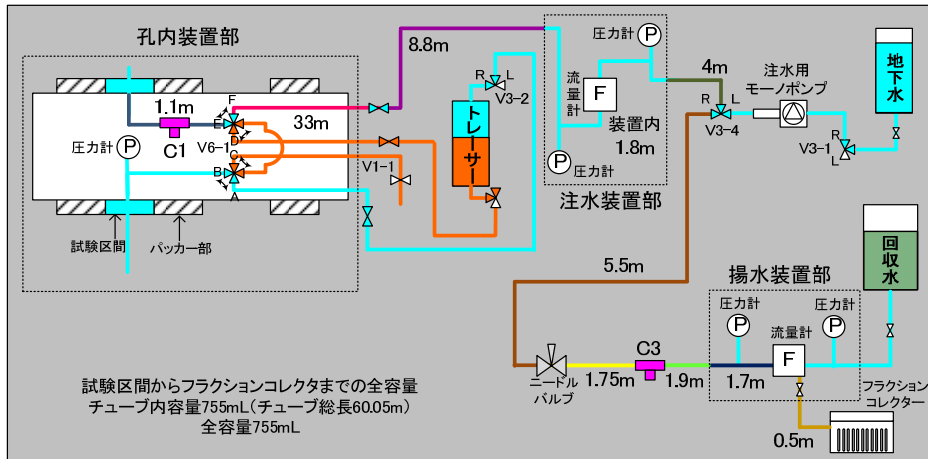


図 3.3.6-2 16MI59 号孔 17S59T6、17S59T7 配管構成と内容量 (ニードルバルブ使用)

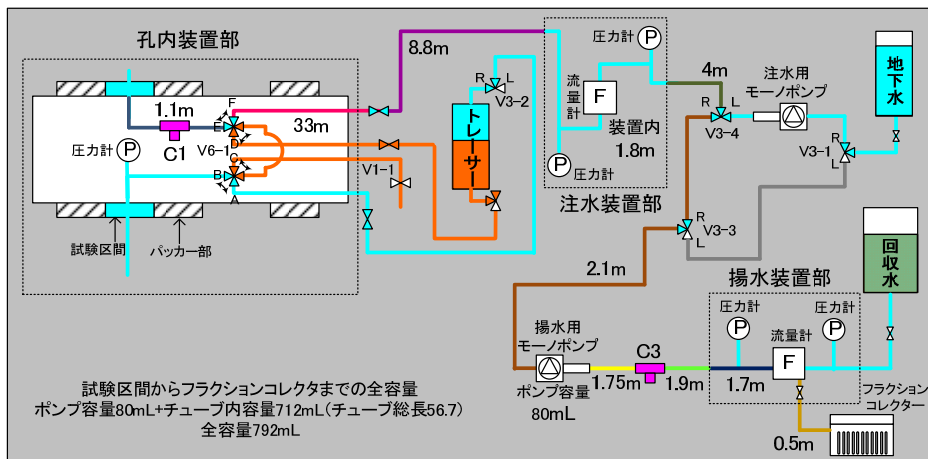


図 3.3.6-3 15MI52 号孔 17S52T8～T11 の配管構成と内容量

### 3.3.6.3 各試験結果

<17S59T1>

試験の注水/揚水配管の構成は、図 3.3.6-1 に示す通りである。

図 3.3.6-4 に 17S59T1 の試験条件と破過曲線を示す。図中の試験条件の内、トレーサー回収時間は室内分析用サンプルの採取停止までの時間を原則とする。サンプルをしていない当試験では現場分析試料の採取終了までの時間とした。

収着性トレーサーを含む本試験前の条件設定の試験とし、ウラニンのみをトレーサーとした。

試験条件一覧

試験名			17S59T1	
試験孔			16MI59 号孔	
試験実施日			2017/9/20	
トレーサー材			ウラニン	
流量	注水流量	mL/min	98.85	
	揚水流量	mL/min	51.37	
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	なし	
	トレーサー回収(揚水)	min	120	
現場分析での回収率 (サンプル終了時)			%	69

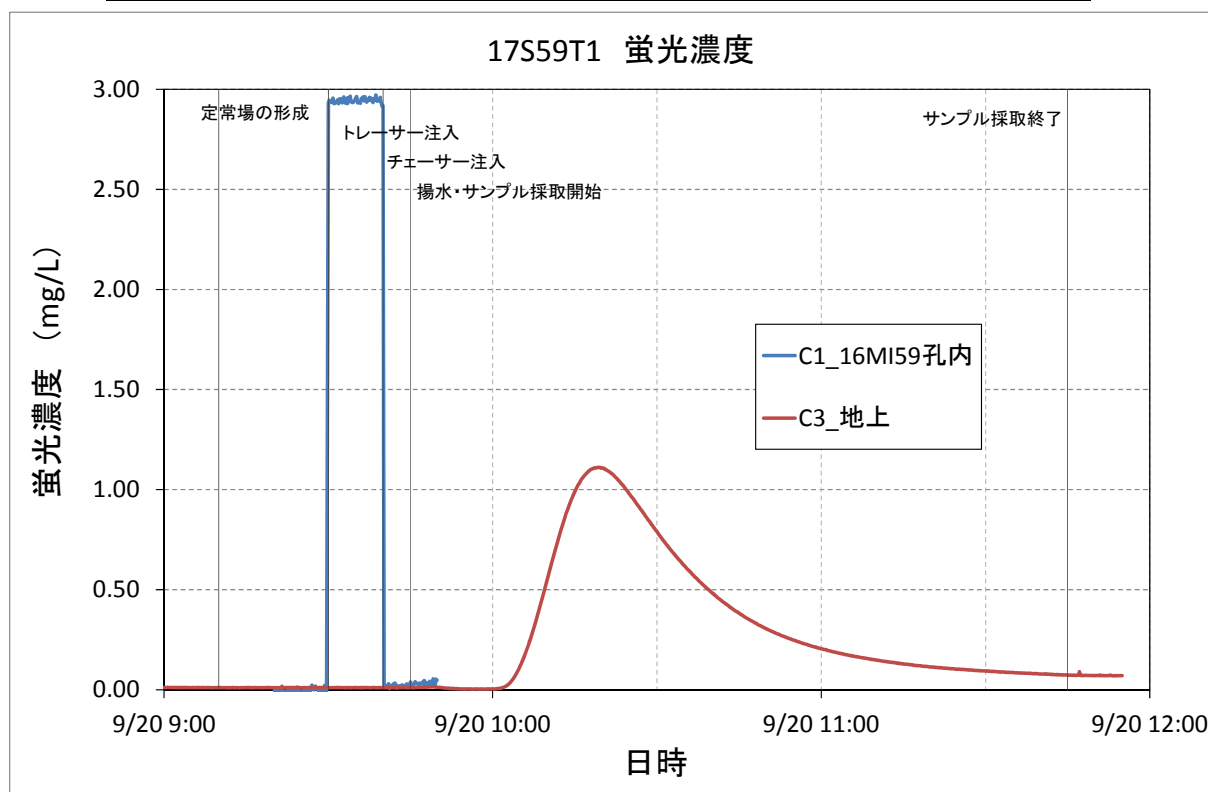


図 3.3.6-4 17S59T1 の試験条件と破過曲線

<17S59T2>

17S59T2 は、収着性トレーサーを含む本試験前の条件設定の試験とし、ウランのみをトレーサーとした。

試験の注水/揚水配管の構成は、図 3.3.6-1 に示す通りである。図 3.3.6-5 に 17S59T2 の試験条件と破過曲線を示す。

試験条件一覧

試験名			17S59T2	
試験孔			16MI59 号孔	
試験実施日			2017/9/21	
トレーサー材			ウラン	
流量	注水流量	mL/min	96.98	
	揚水流量	mL/min	10.12	
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	なし	
	トレーサー回収(揚水)	min	420	
現場分析での回収率 (サンプルリング終了時)			%	63

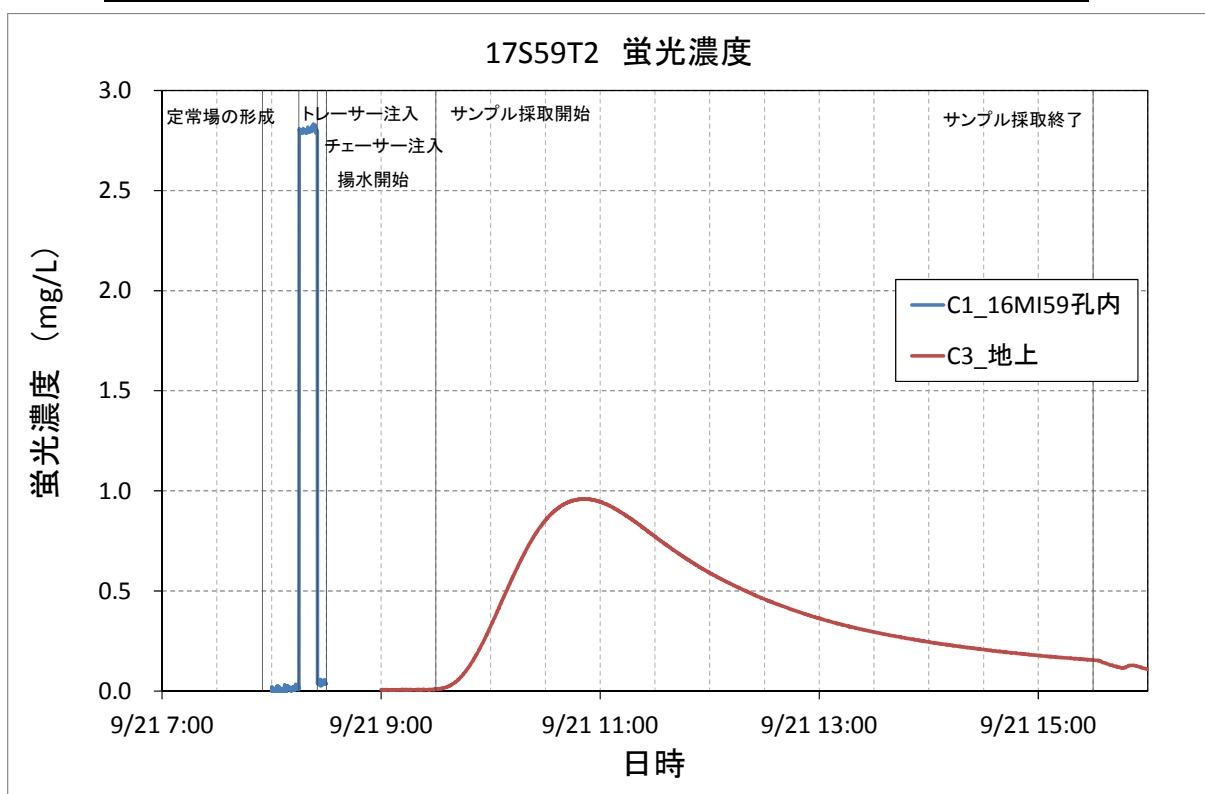


図 3.3.6-5 17S59T2 の試験条件と破過曲線

<17S59T3>

17S59T3 は、収着性トレーサーを含むトレーサー溶液で行った。

試験の注水／揚水配管の構成は、図 3.3.6-1 に示す通りである。図 3.3.6-6 に 17S59T3 の試験条件と破過曲線を示す。

試験条件一覧

試験名			17S59T3
試験孔			16MI59 号孔
試験実施日			2017/9/22
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	95.81
	揚水流量	mL/min	48.25
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	なし
	トレーサー回収(揚水)	min	120
現場分析での回収率 (サンプリング終了時)		%	73

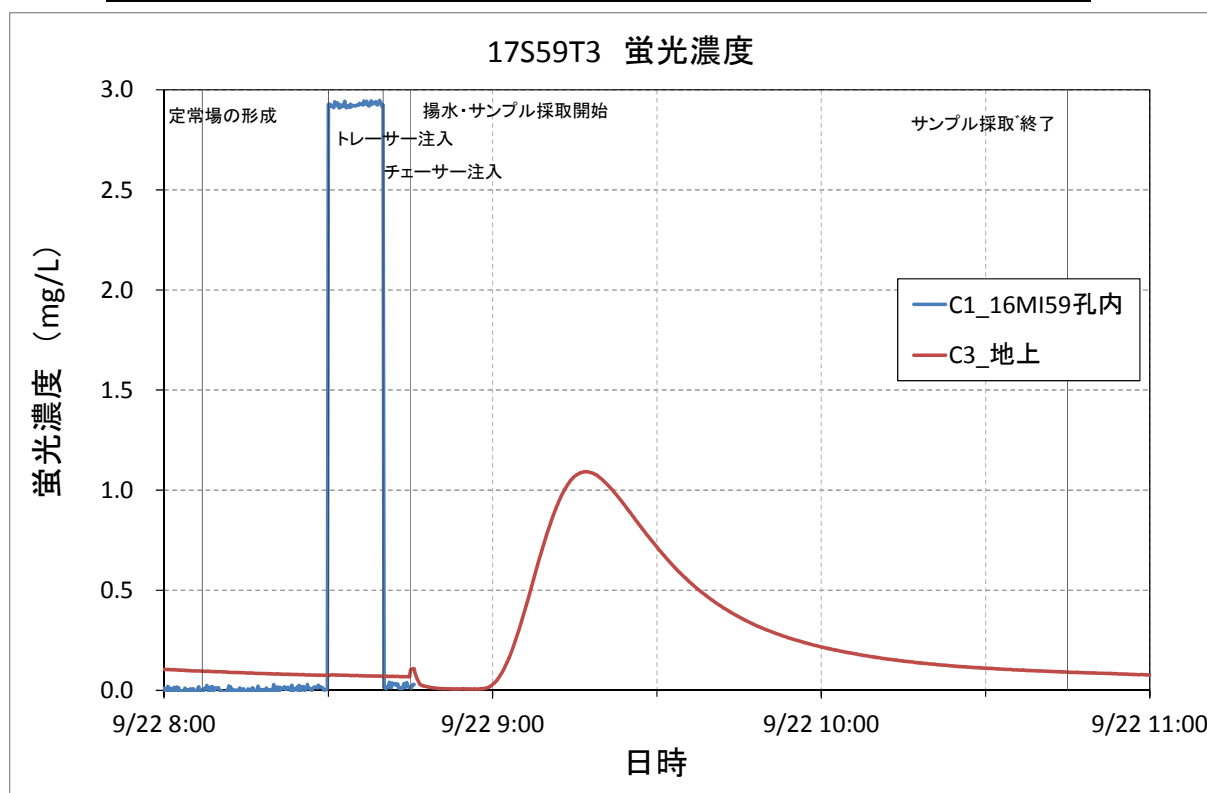


図 3.3.6-6 17S59T3 の試験条件と破過曲線

<17S59T4>

17S59T4 では、17S59T3 よりチェイサーの注入時間を 10 分とした試験とした。トレーサーは収着性トレーサーを含むトレーサー溶液を用いた。

試験の注水／揚水配管の構成は、図 3.3.6-1 に示す通りである。図 3.3.6-7 に 17S59T4 の試験条件と破過曲線を示す。

試験条件一覧

試験名			17S59T4	
試験孔			16MI59 号孔	
試験実施日			2017/9/22	
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	49.92	
	揚水流量	mL/min	50.23	
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	なし	
	トレーサー回収(揚水)	min	120	
現場分析での回収率 (サンプリング終了時)			%	76

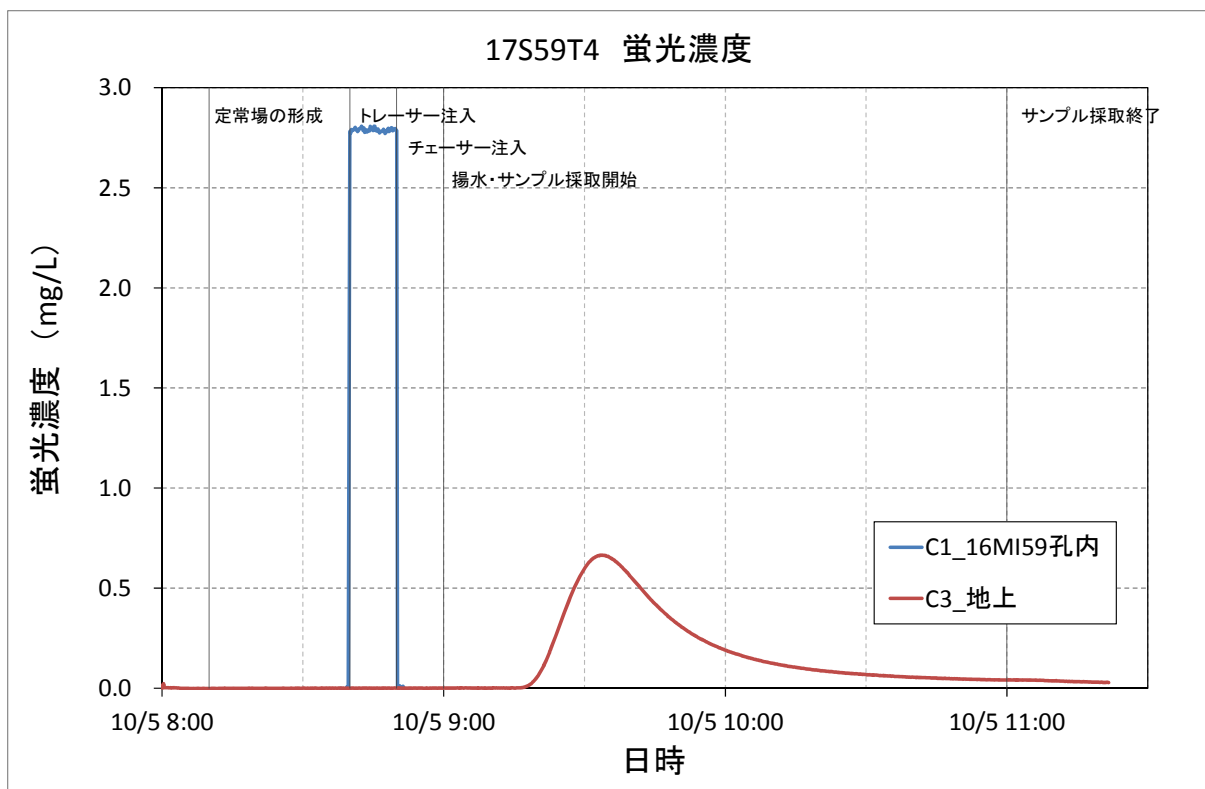


図 3.3.6-7 17S59T4 の試験条件と破過曲線

<17S59T5>

17S59T5 は、収着性トレーサーを含むトレーサー溶液で行った。

試験の注水／揚水配管の構成は、図 3.3.6-1 に示す通りである。図 3.3.6-8 に 17S59T5 の試験条件と破過曲線を示す。

試験条件一覧

試験名			17S59T5
試験孔			16MI59 号孔
試験実施日			2017/10/10
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	50.31
	揚水流量	mL/min	21.18
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	なし
	トレーサー回収(揚水)	min	300
現場分析での回収率 (サンプリング終了時)		%	72

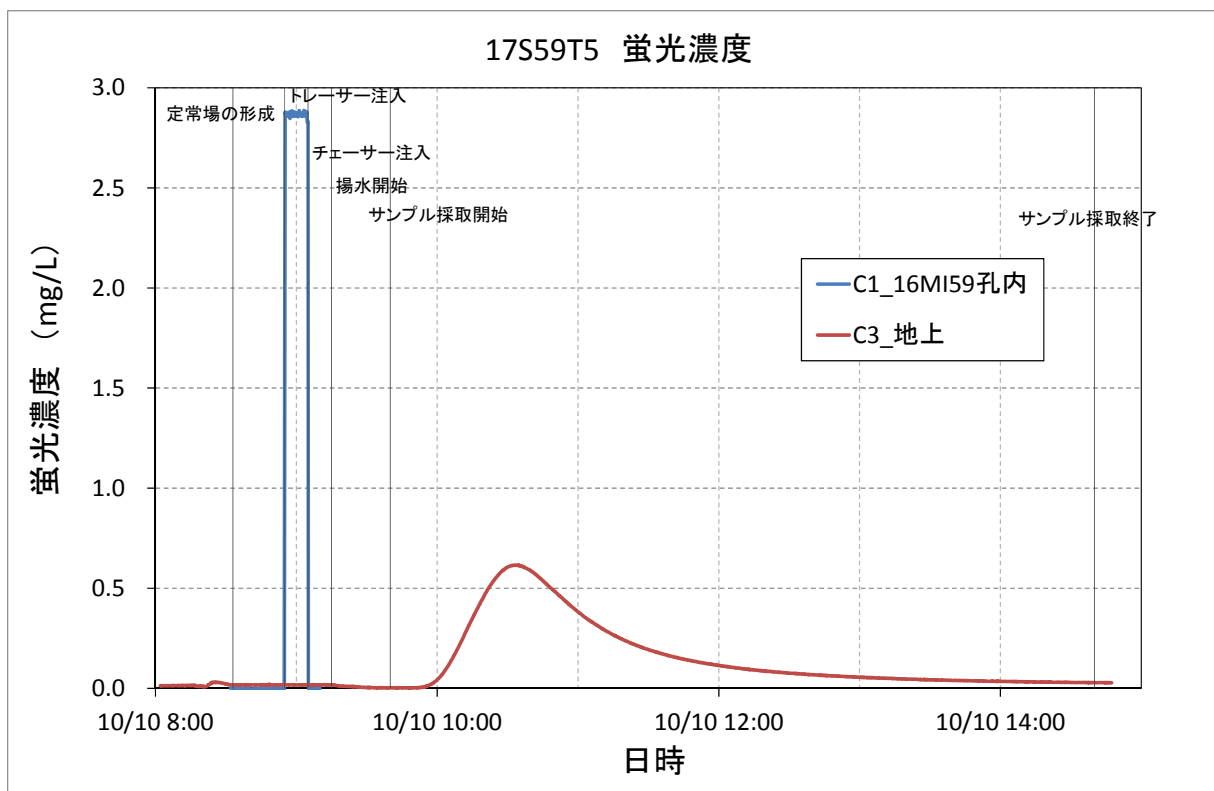


図 3.3.6-8 17S59T5 の試験条件と破過曲線

<17S59T6>

17S59T6 は、収着性トレーサーを含む本試験前の条件設定の試験とし、ウラニンのみをトレーサーとした。

試験の注水/揚水配管の構成は図 3.3.6-2 に示す通り、ニードルバルブによる揚水量調整とした。

図 3.3.6-9 に 17S59T6 の試験条件と破過曲線を示す。

試験条件一覧

試験名			17S59T6	
試験孔			16MI59 号孔	
試験実施日			2017/10/11	
トレーサー材			ウラニン	
流量	注水流量	mL/min	50.62	
	揚水流量	mL/min	5.16	
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	なし	
	トレーサー回収(揚水)	min	400	
現場分析での回収率 (サンプルリング終了時)			%	34

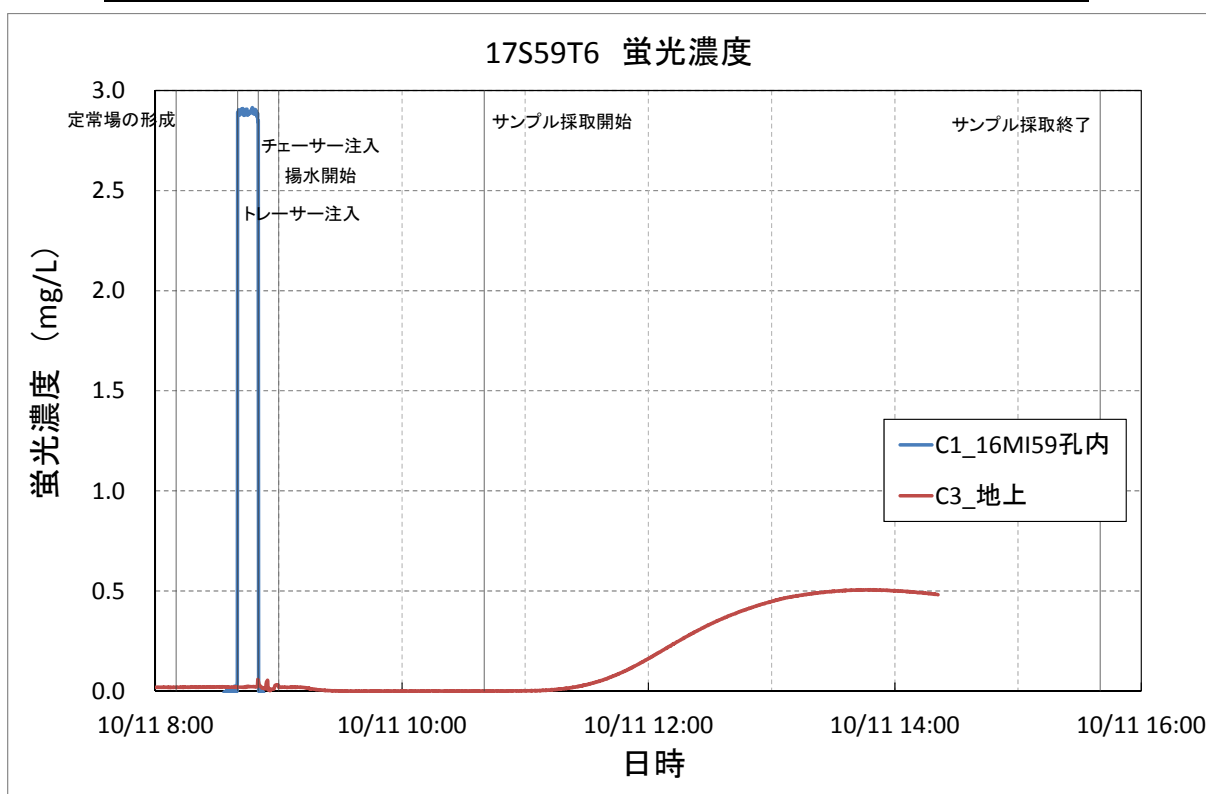


図 3.3.6-9 17S59T6 の試験条件と破過曲線

<17S59T7>

17S59T7 は、収着性トレーサーを含むトレーサー溶液で行った。

試験の注水/揚水配管の構成は図 3.3.6-2 に示す通り、ニードルバルブによる揚水量調整とした。

図 3.3.6-10 に 17S59T7 の試験条件と破過曲線を示す。

試験条件一覧

試験名			17S59T7
試験孔			16MI59 号孔
試験実施日			2017/10/12
トレーサー材			ウラン、アミノ G、重水素、Rb+、Ba2+
流量	注水流量	mL/min	51.04
	揚水流量	mL/min	5.58
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	なし
	トレーサー回収(揚水)	min	1260
現場分析での回収率 (サンプリング終了時)		%	75

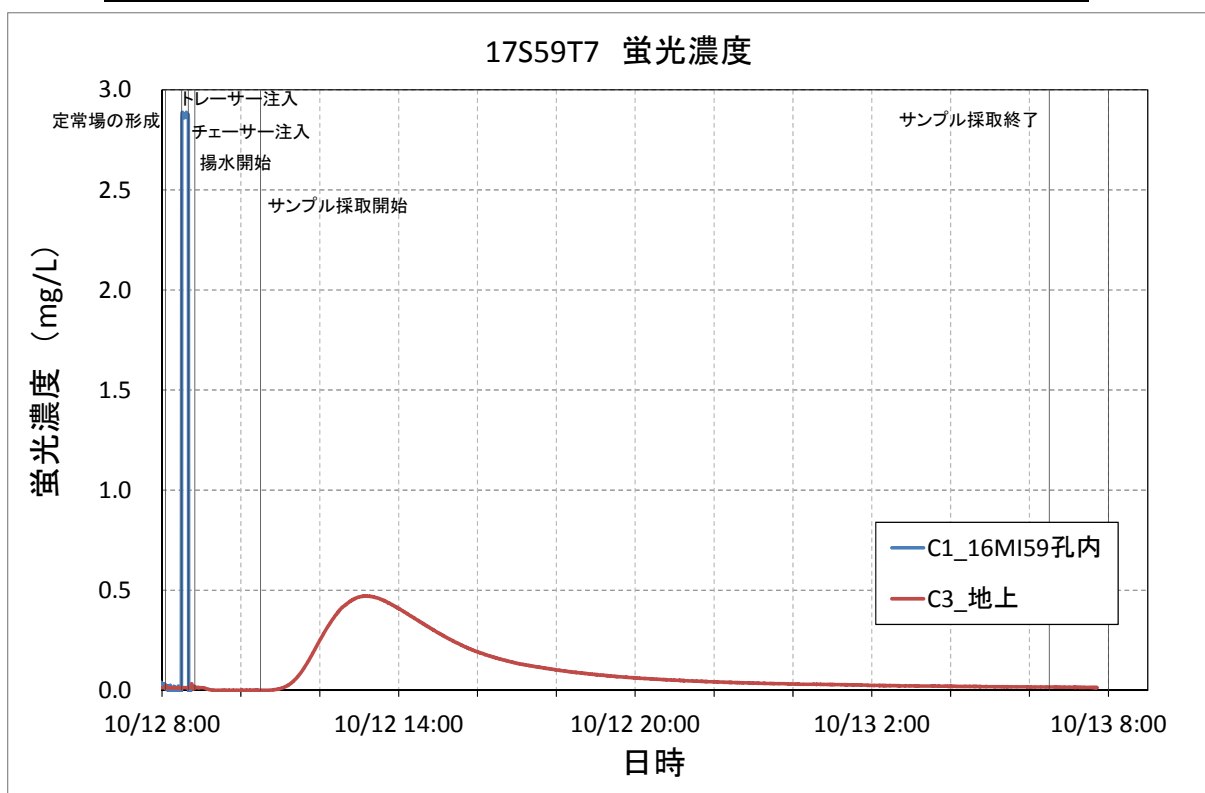


図 3.3.6-10 17S59T7 の試験条件と破過曲線



<17S52T8>

17S52T8 は、収着性トレーサーを含むトレーサー溶液で行った。

試験の注水／揚水配管の構成は、図 3.3.6-3 に示す通りである。図 3.3.6-11 に 17S52T8 の試験条件と破過曲線を示す。

試験条件一覧

試験名			17S52T8
試験孔			15MI52 号孔
試験実施日			2017/10/26
トレーサー材			ウラニン、アミノ G、重水素、Rb+、 Ba2+
流量	注水流量	mL/min	99.82
	揚水流量	mL/min	52.06
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	なし
	トレーサー回収(揚水)	min	120
現場分析での回収率 (サンプリング終了時)		%	35

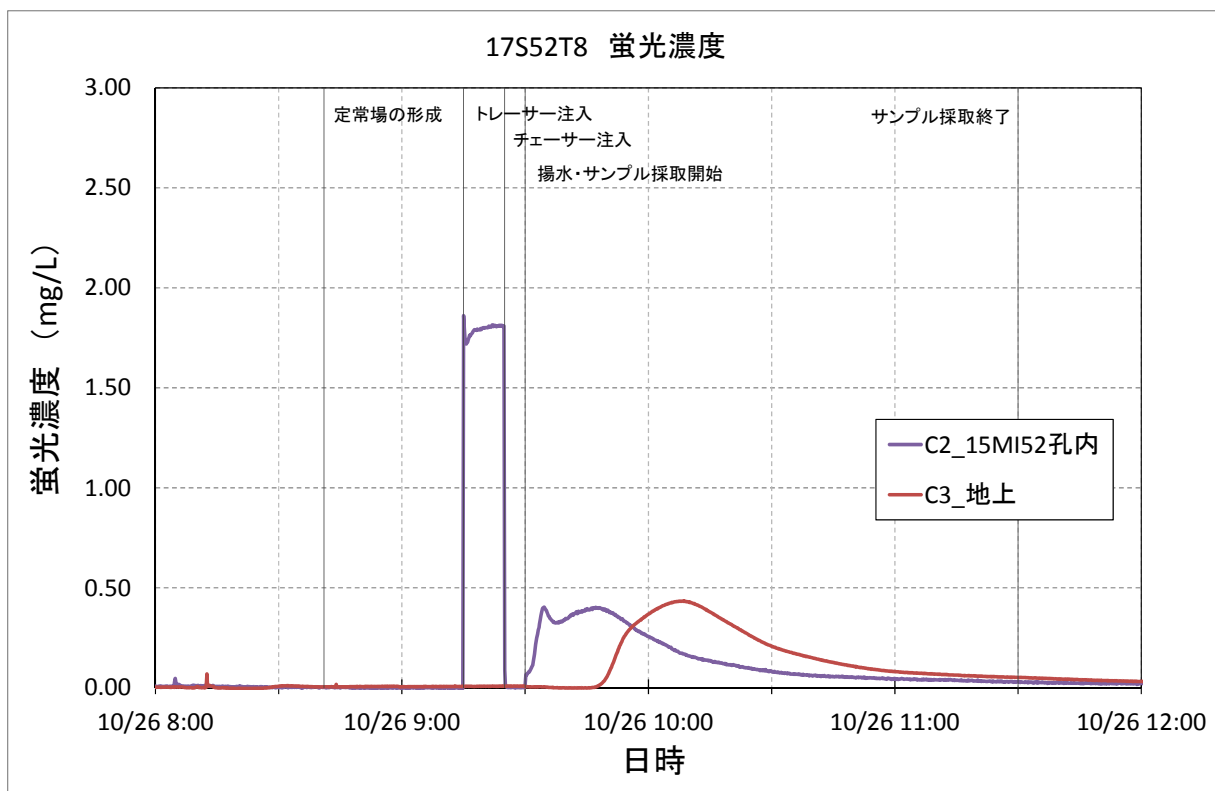


図 3.3.6-11 17S52T8 の試験条件と破過曲線

<17S52T9>

17S52T9 は、収着性トレーサーを含むトレーサー溶液で行った。

試験の注水／揚水配管の構成は、図 3.3.6-3 に示す通りである。図 3.3.6-12 に 17S52T9 の試験条件と破過曲線を示す。

試験条件一覧

試験名			17S52T9
試験孔			15MI52 号孔
試験実施日			2017/10/27
トレーサー材			ウラニン、アミノ G、重水素、Rb+、Ba2+
流量	注水流量	mL/min	49.72
	揚水流量	mL/min	20.36
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	なし
	トレーサー回収(揚水)	min	300
現場分析での回収率 (サンプリング終了時)		%	36

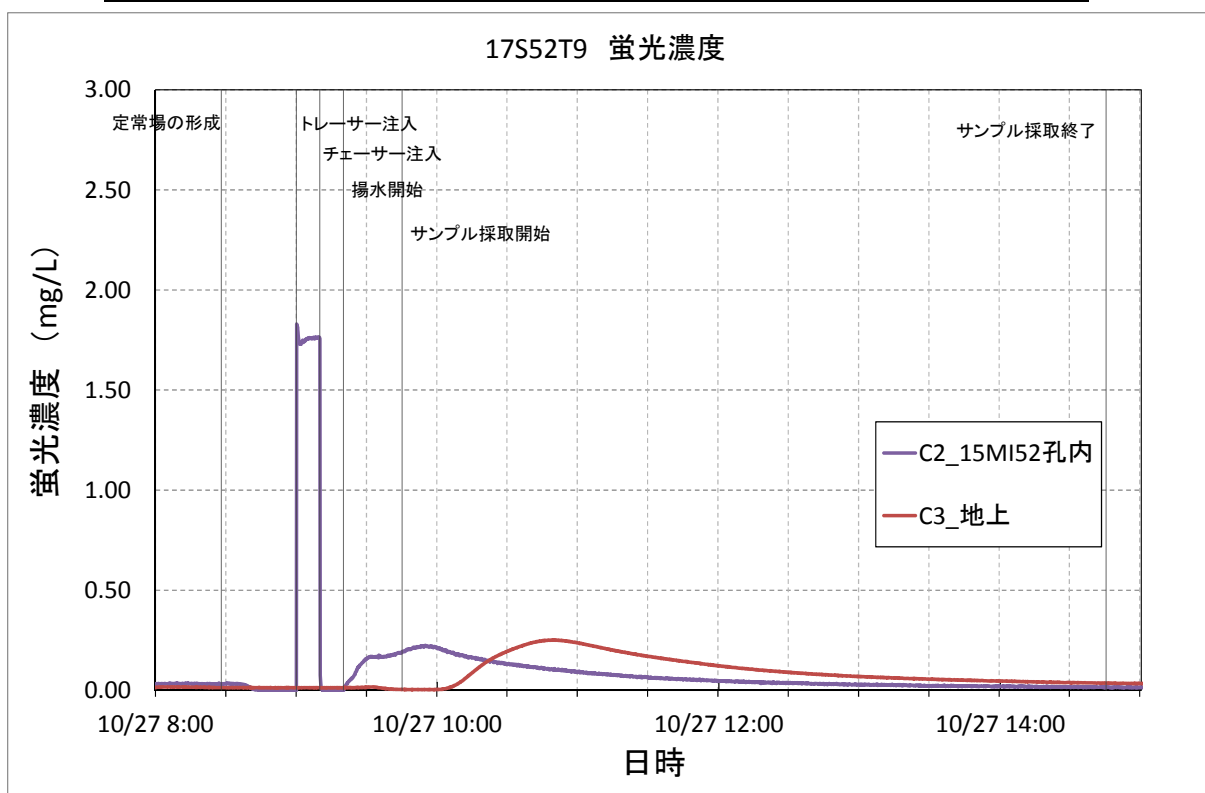


図 3.3.6-12 17S52T9 の試験条件と破過曲線

<17S52T10>

回収率を上げるため、揚水量を 50L/min に上げた。トレーサーはウラニンのみとした。

試験の注水/揚水配管の構成は、図 3.3.6-3 に示す通りである。図 3.3.6-13 に 17S52T10 の試験条件と破過曲線を示す。

17S52T10 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			17S52T10
試験孔			15MI52 号孔
試験実施日			2017/10/30
トレーサー材			ウラニン
流量	注水流量	mL/min	50.39
	揚水流量	mL/min	51.33
試験時間	トレーサー注入	min	5
	チェイサー注入	min	5
	待機	min	なし
	トレーサー回収(揚水)	min	120
現場分析での回収率 (サンプリング終了時)			%
			50

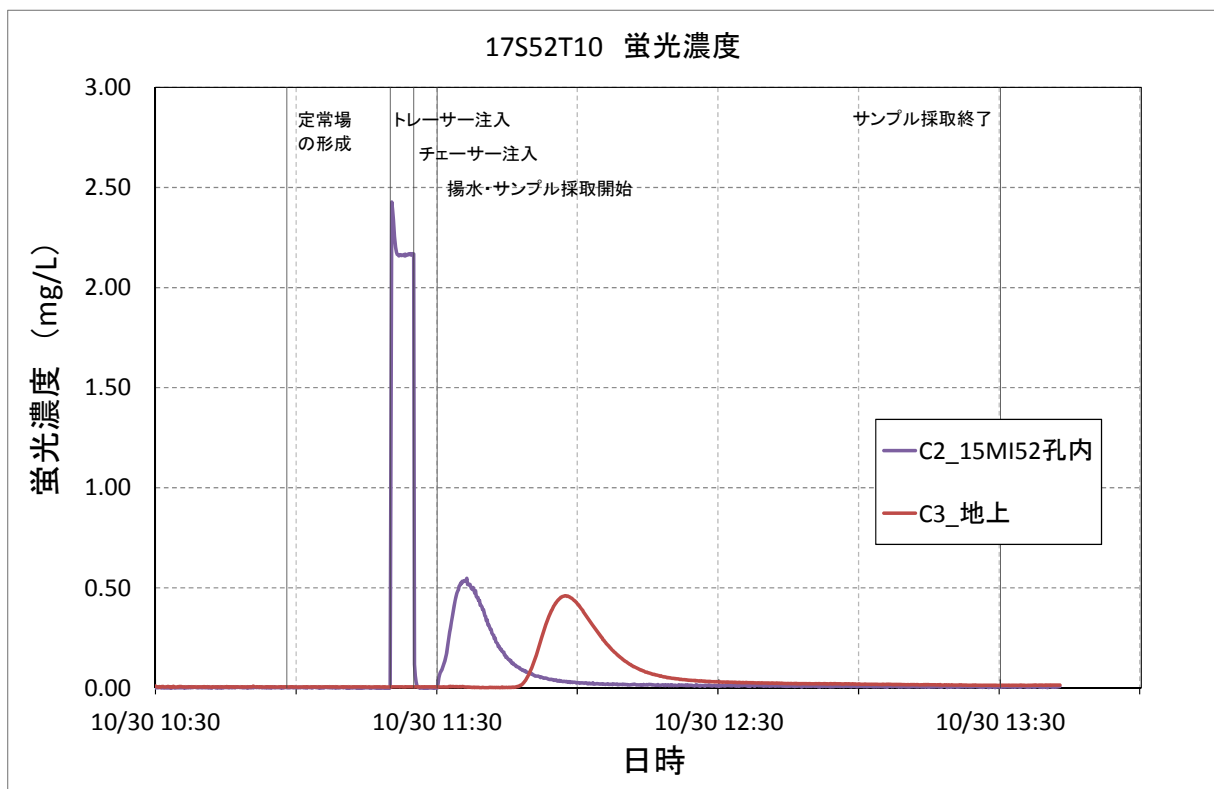


図 3.3.6-13 17S52T10 の試験条件と破過曲線

<17S52T11>

回収率を上げるため、揚水量を 100L/min に上げた。トレーサーはウラニンのみとした。

試験の注水／揚水配管の構成は、図 3.3.6-3 に示す通りである。図 3.3.6-14 に 17S52T11 の試験条件と破過曲線を示す。

試験条件一覧

試験名			17S52T11	
試験孔			15MI52 号孔	
試験実施日			2017/10/31	
トレーサー材			ウラニン	
流量	注水流量	mL/min	49.86	
	揚水流量	mL/min	102.25	
試験時間	トレーサー注入	min	5	
	チェイサー注入	min	5	
	待機	min	なし	
	トレーサー回収(揚水)	min	120	
現場分析での回収率 (サンプリング終了時)			%	64

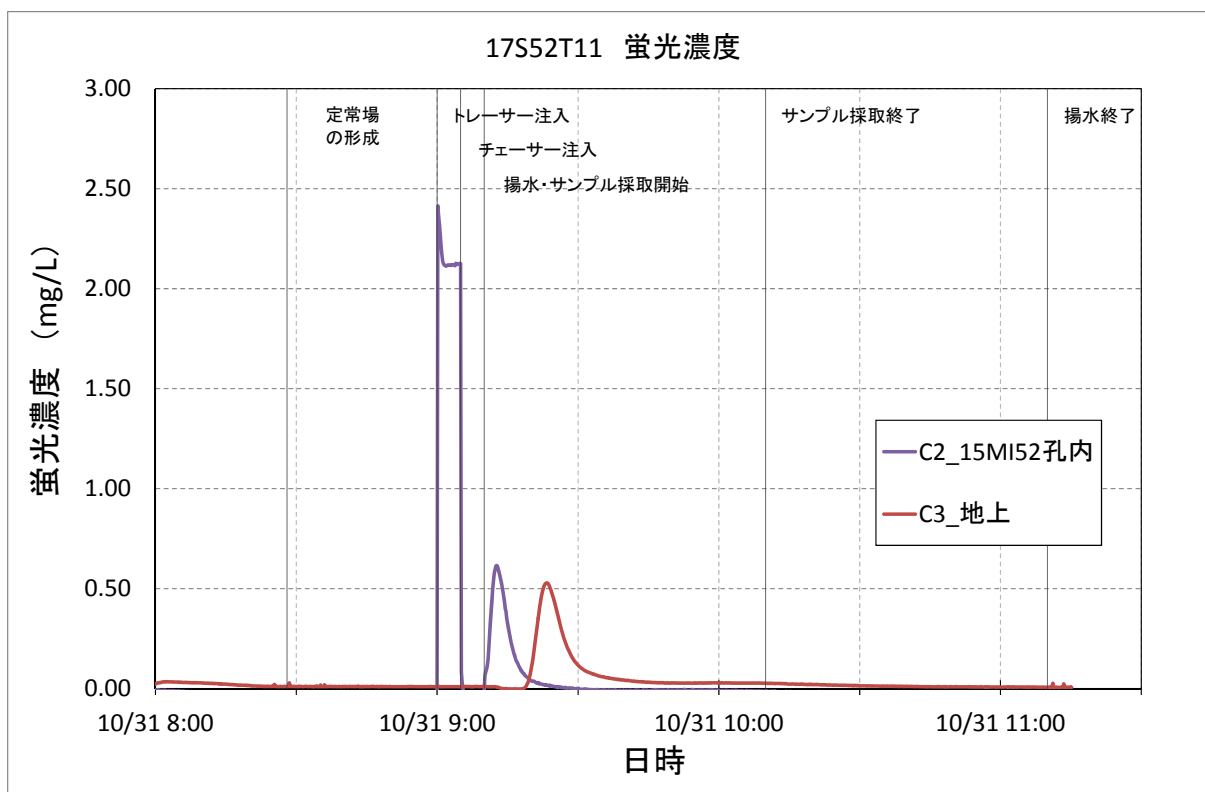


図 3.3.6-14 17S52T11 の試験条件と破過曲線

<17S59T12>

吸着性トレーサーを含む本試験前の条件設定の試験とし、ウランのみをトレーサーとした。

試験の注水/揚水配管の構成は、図 3.3.6-1 に示す通りである。図 3.3.6-15 に 17S59T12 の試験条件と破過曲線を示す。

試験条件一覧

試験名			17S59T12
試験孔			16MI59 号孔
試験実施日			2017/11/10
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	49.17
	揚水流量	mL/min	50.07
試験時間	トレーサー注入	min	5
	チェイサー注入	min	5
	待機	min	なし
	トレーサー回収(揚水)	min	120
現場分析での回収率 (サンプリング終了時)		%	83

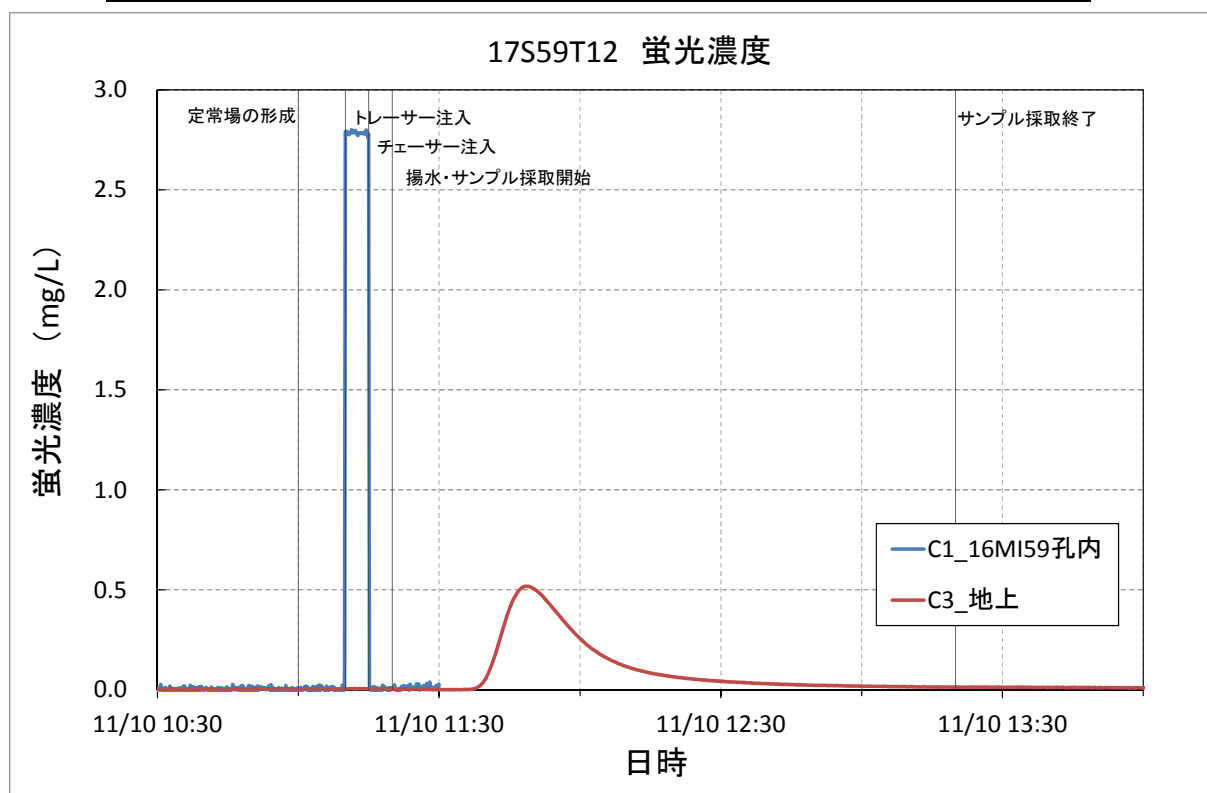


図 3.3.6-15 17S59T12 の試験条件と破過曲線

<17S59T13>

17S59T13 は、収着性トレーサーを含むトレーサー溶液で行った。以降試験は全て収着性トレーサーを含むトレーサー溶液で行った。

試験の注水／揚水配管の構成は、図 3.3.6-1 に示す通りである。図 3.3.6-16 に 17S59T13 の試験条件と破過曲線を示す。

試験条件一覧

試験名		17S59T13	
試験孔		16MI59 号孔	
試験実施日		2017/11/13	
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	49.36
	揚水流量	mL/min	50.46
試験時間	トレーサー注入	min	5
	チェイサー注入	min	5
	待機	min	なし
	トレーサー回収(揚水)	min	120
現場分析での回収率 (サンプリング終了時)		%	85

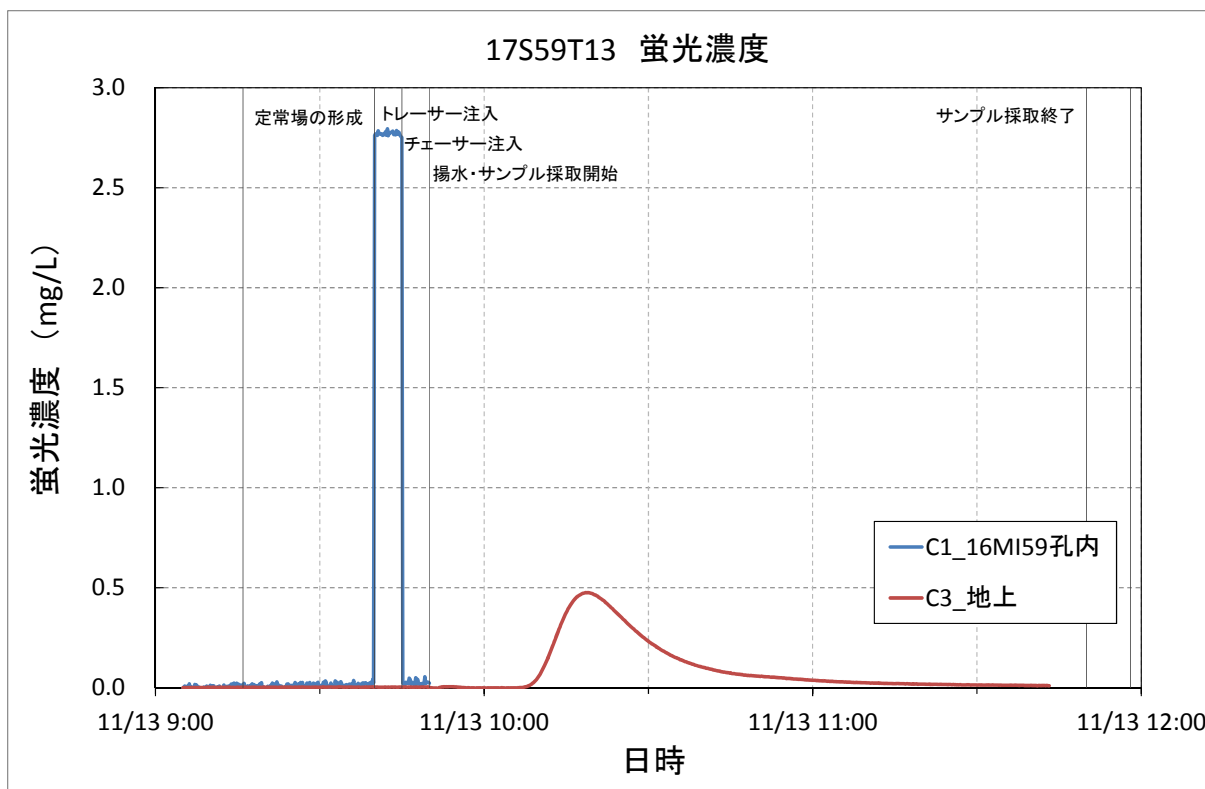


図 3.3.6-16 17S59T13 の試験条件と破過曲線

<17S59T14>

試験の注水／揚水配管の構成は、図 3.3.6-1 に示す通りである。図 3.3.6-17 に 17S59T14 の試験条件と破過曲線を示す。

試験条件一覧

試験名			17S59T14	
試験孔			16MI59 号孔	
試験実施日			2017/11/14	
トレーサー材			ウランin、アミノG、重水素、Rb <sup>+</sup> 、Ba <sup>2+</sup>	
流量	注水流量	mL/min	49.82	
	揚水流量	mL/min	20.71	
試験時間	トレーサー注入	min	5	
	チェイサー注入	min	5	
	待機	min	なし	
	トレーサー回収(揚水)	min	300	
現場分析での回収率 (サンプル終了時)			%	84

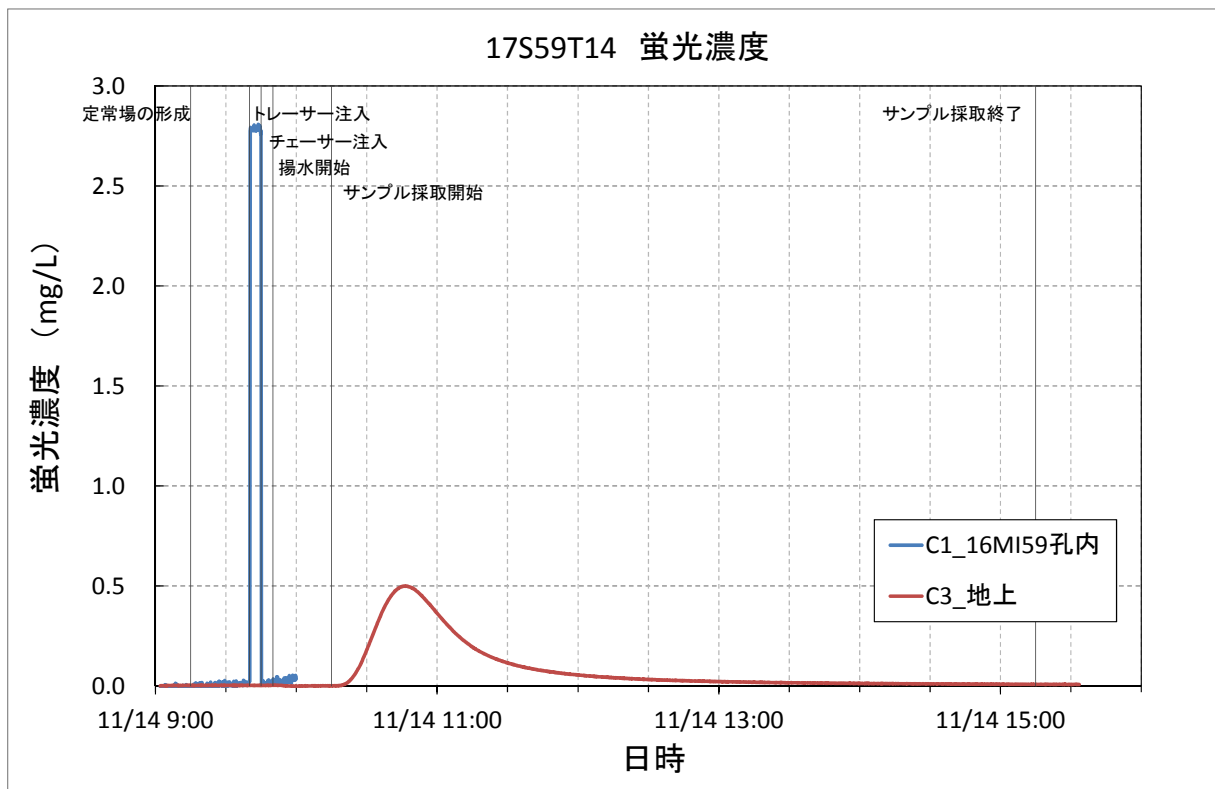


図 3.3.6-17 17S59T14 の試験条件と破過曲線

<17S59T15>

試験の注水／揚水配管の構成は、図 3.3.6-1 に示す通りである。図 3.3.6-18 に 17S59T15 の試験条件と破過曲線を示す。

試験条件一覧

試験名			17S59T15
試験孔			16MI59 号孔
試験実施日			2017/11/15
トレーサー材			ウランin、アミノG、重水素、Rb <sup>+</sup> 、Ba <sup>2+</sup>
流量	注水流量	mL/min	50.39
	揚水流量	mL/min	10.64
試験時間	トレーサー注入	min	5
	チェイサー注入	min	5
	待機	min	なし
	トレーサー回収(揚水)	min	360
現場分析での回収率 (サンプリング終了時)		%	83

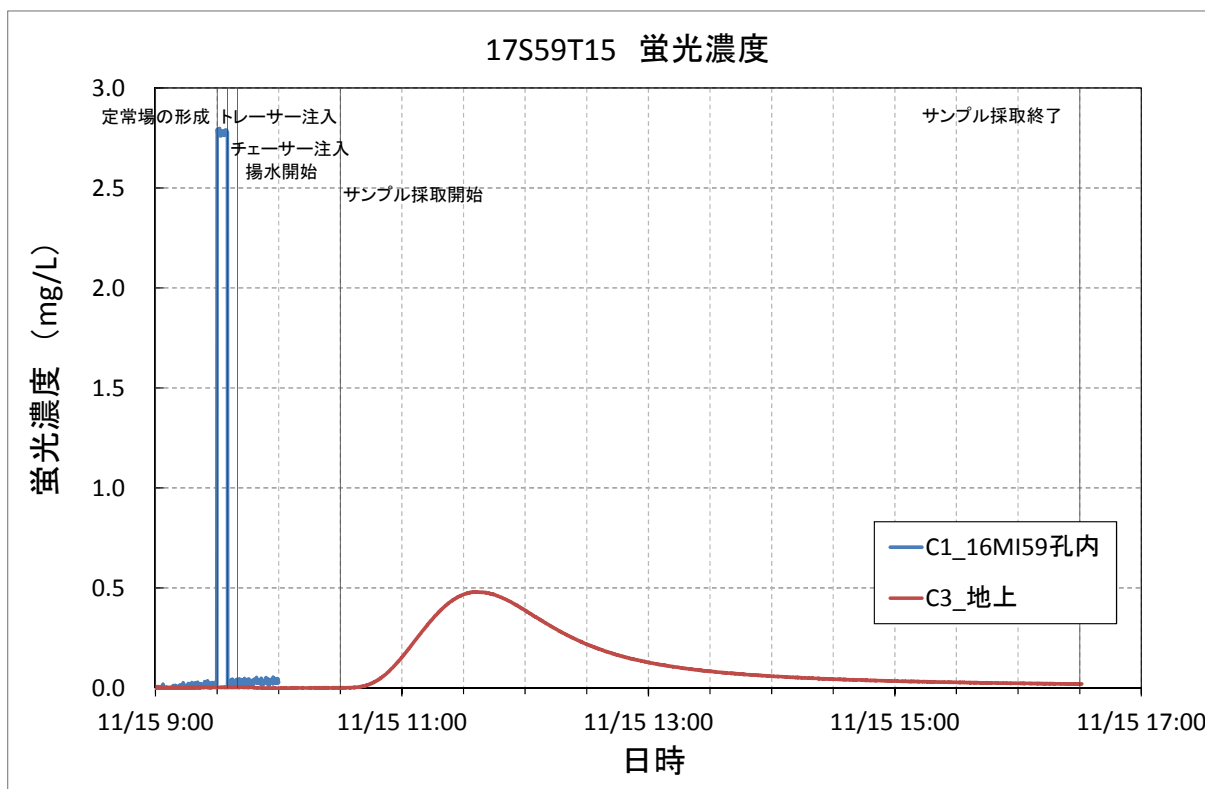


図 3.3.6-18 17S59T15 の試験条件と破過曲線



<17S59T16>

試験の注水／揚水配管の構成は、図 3.3.6-1 に示す通りである。図 3.3.6-19 に 17S59T16 の試験条件と破過曲線を示す。

試験条件一覧

試験名			17S59T16
試験孔			16MI59 号孔
試験実施日			2017/11/16
トレーサー材			ウランin、アミノG、重水素、Rb+、Ba2+
流量	注水流量	mL/min	49.52
	揚水流量	mL/min	49.61
試験時間	トレーサー注入	min	5
	チェイサー注入	min	5
	待機	min	60
	トレーサー回収(揚水)	min	120
現場分析での回収率 (サンプリング終了時)		%	67

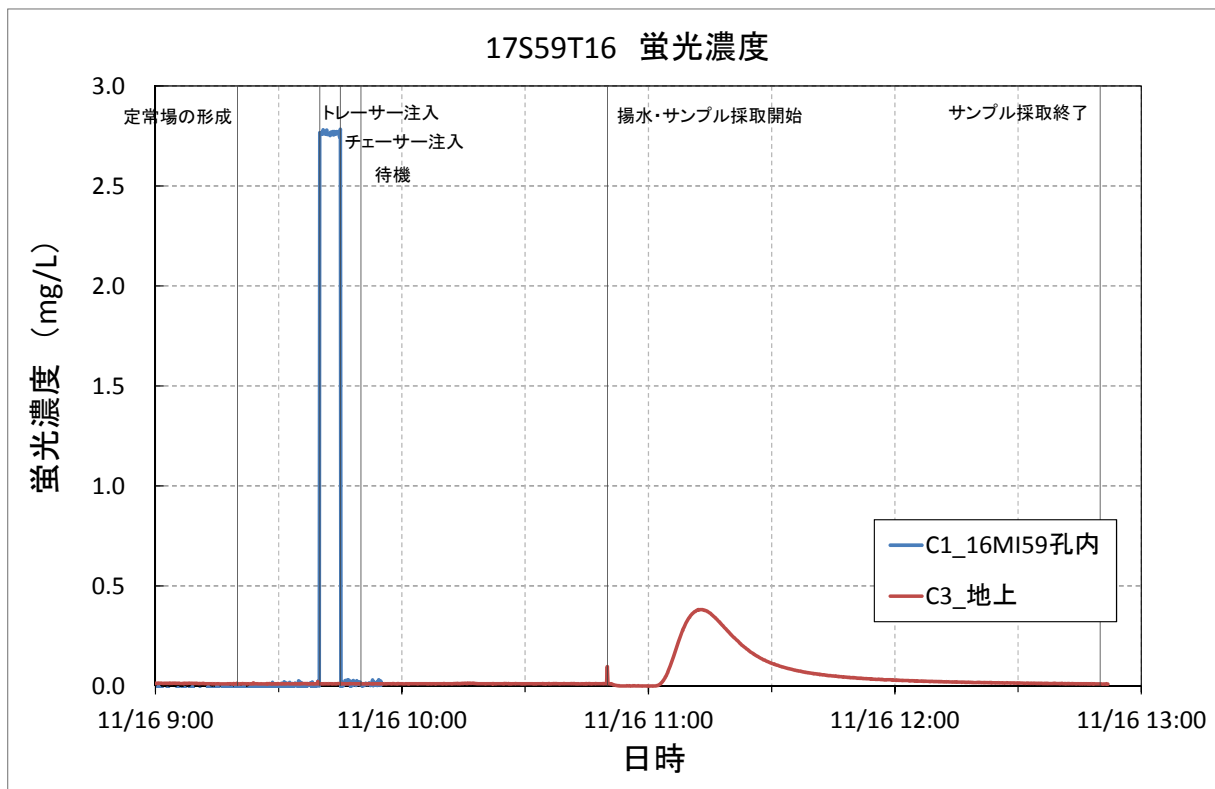


図 3.3.6-19 17S59T16 の試験条件と破過曲線

<17S59T17>

試験の注水／揚水配管の構成は、図 3.3.6-1 に示す通りである。図 3.3.6-20 に 17S59T17 の試験条件と破過曲線を示す。

試験条件一覧

試験名			17S59T17	
試験孔			16MI59 号孔	
試験実施日			2017/11/17	
トレーサー材			ウランin、アミノG、重水素、Rb <sup>+</sup> 、Ba <sup>2+</sup>	
流量	注水流量	mL/min	49.03	
	揚水流量	mL/min	50.40	
試験時間	トレーサー注入	min	5	
	チェイサー注入	min	5	
	待機	min	120	
	トレーサー回収(揚水)	min	120	
現場分析での回収率 (サブリング終了時)			%	65

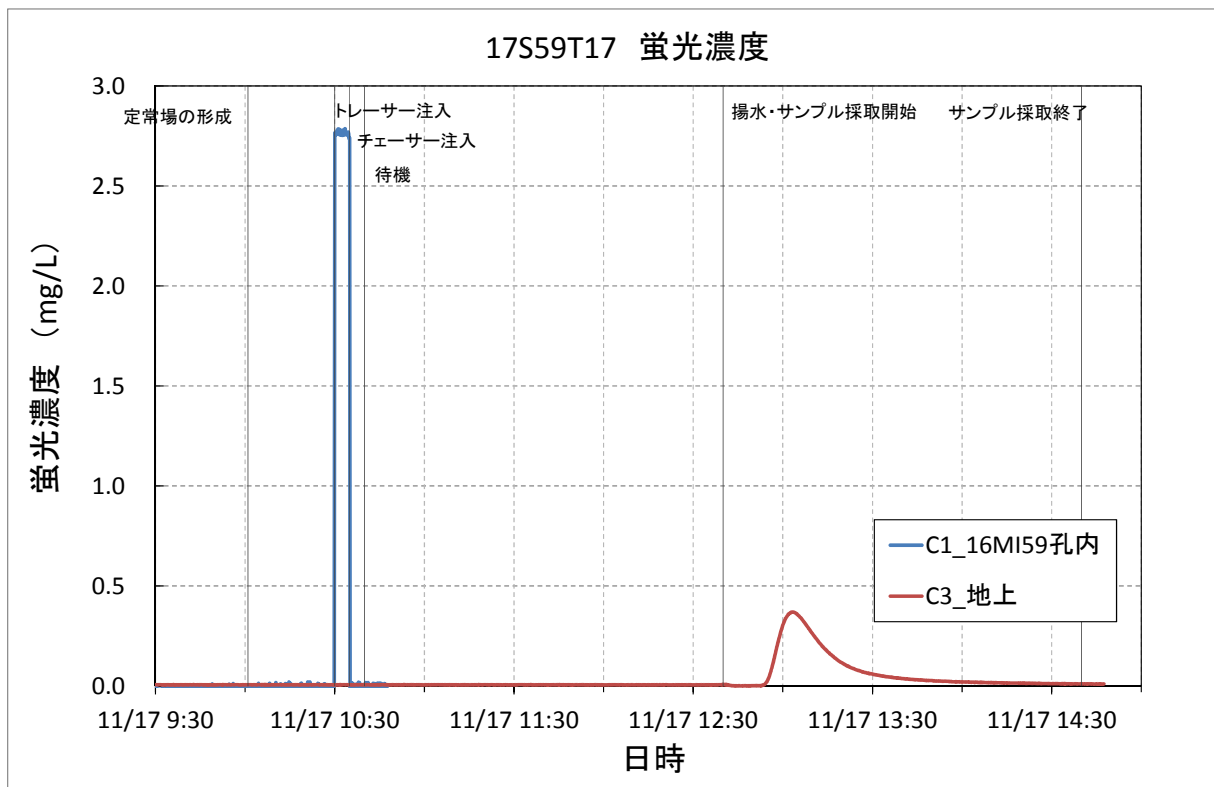


図 3.3.6-20 17S59T17 の試験条件と破過曲線

<17S59T18>

試験の注水／揚水配管の構成は、図 3.3.6-1 に示す通りである。図 3.3.6-21 に 17S59T18 の試験条件と破過曲線を示す。

試験条件一覧

試験名			17S59T18	
試験孔			16MI59 号孔	
試験実施日			2017/11/21	
トレーサー材			ウラン、アミノ G、重水素、Rb+、Ba2+	
流量	注水流量	mL/min	49.81	
	揚水流量	mL/min	52.14	
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	なし	
	トレーサー回収(揚水)	min	120	
現場分析での回収率 (サンプル終了時)			%	77

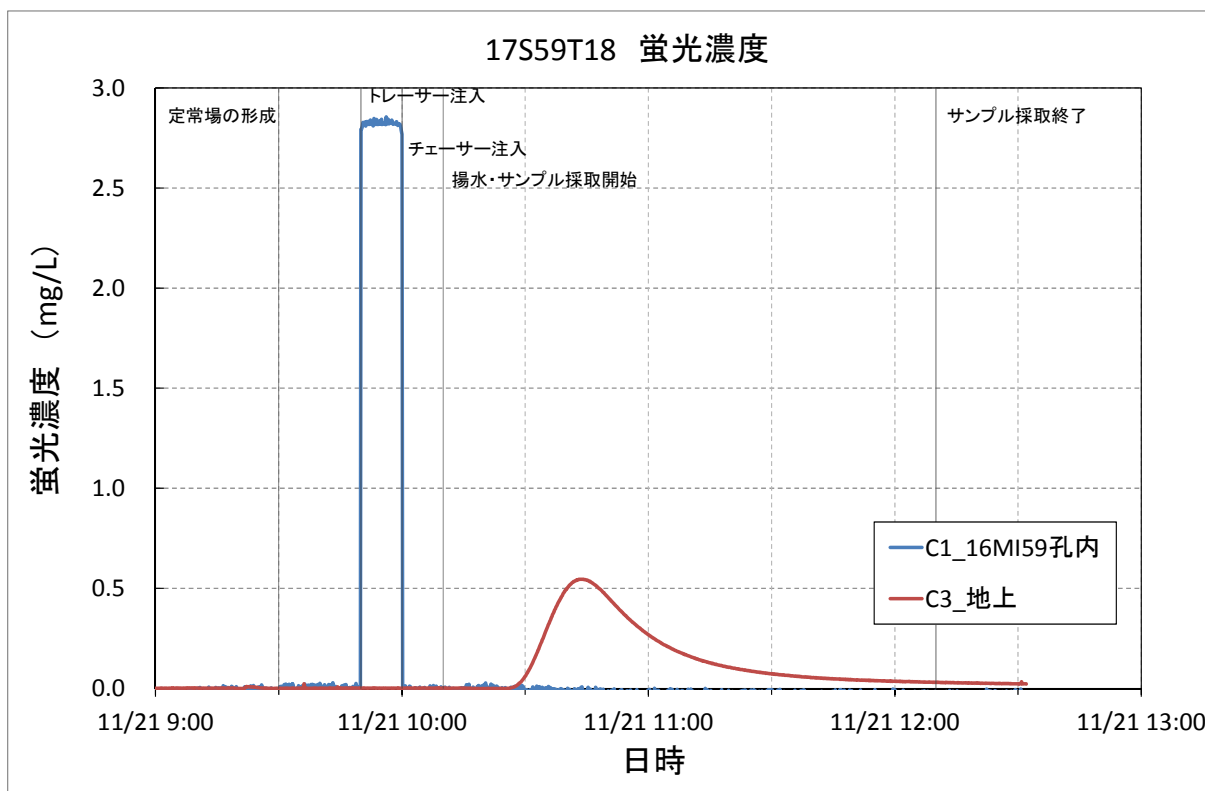


図 3.3.6-21 17S59T18 の試験条件と破過曲線

<17S59T19>

試験の注水／揚水配管の構成は、図 3.3.6-1 に示す通りである。図 3.3.6-22 に 17S59T19 の試験条件と破過曲線を示す。

試験条件一覧

試験名			17S59T19
試験孔			16MI59 号孔
試験実施日			2017/11/22
トレーサー材			ウラニン、アミノ G、重水素、Rb+、 Ba2+
流量	注水流量	mL/min	48.87
	揚水流量	mL/min	49.86
試験時間	トレーサー注入	min	5
	チェイサー注入	min	5
	待機	min	240
	トレーサー回収(揚水)	min	120
現場分析での回収率 (サンプリング終了時)		%	61

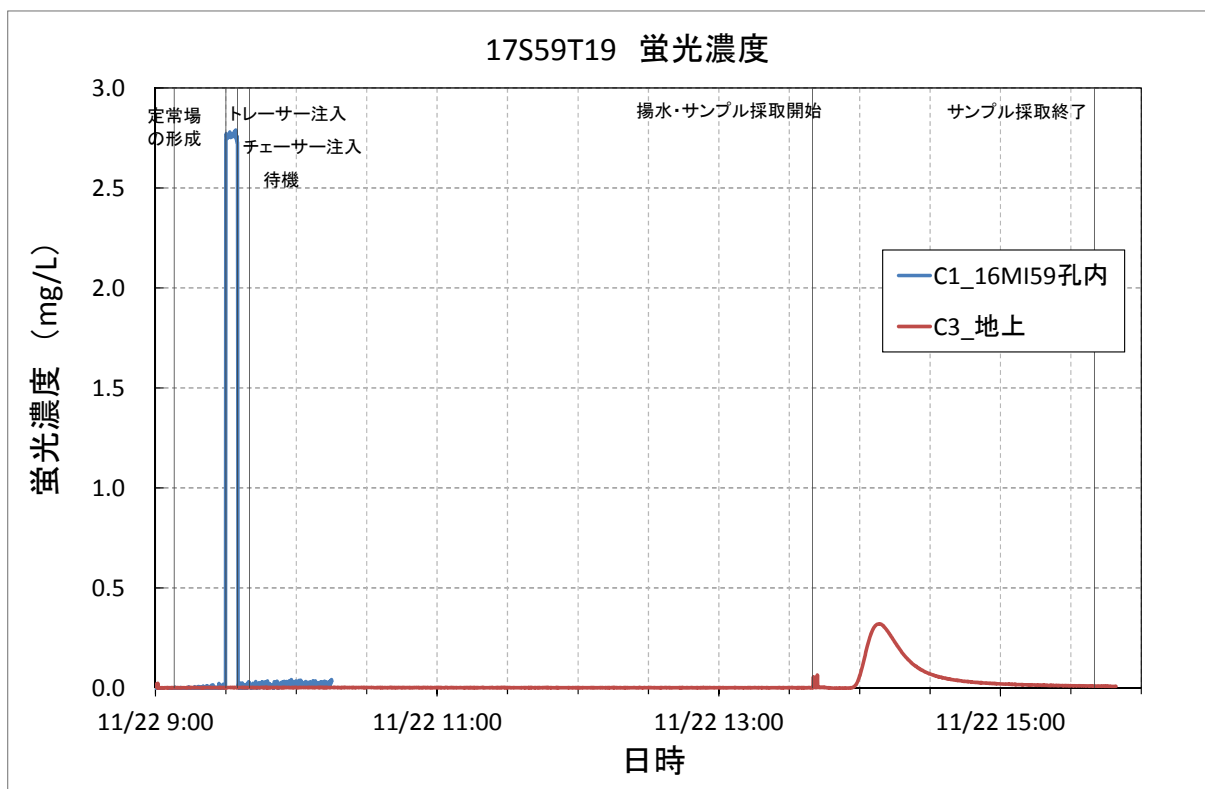


図 3.3.6-22 17S59T19 の試験条件と破過曲線

<17S59T20>

試験の注水／揚水配管の構成は、図 3.3.6-1 に示す通りである。図 3.3.6-23 に 17S59T20 の試験条件と破過曲線を示す。

試験条件一覧

試験名			17S59T20
試験孔			16MI59 号孔
試験実施日			2017/11/24
トレーサー材			ウラニン、アミノ G、重水素、Rb+、 Ba2+
流量	注水流量	mL/min	5.38
	揚水流量	mL/min	20.41
試験時間	トレーサー注入	min	50
	チェイサー注入	min	50
	待機	min	なし
	トレーサー回収(揚水)	min	270
現場分析での回収率 (サンプリング終了時)			% 30

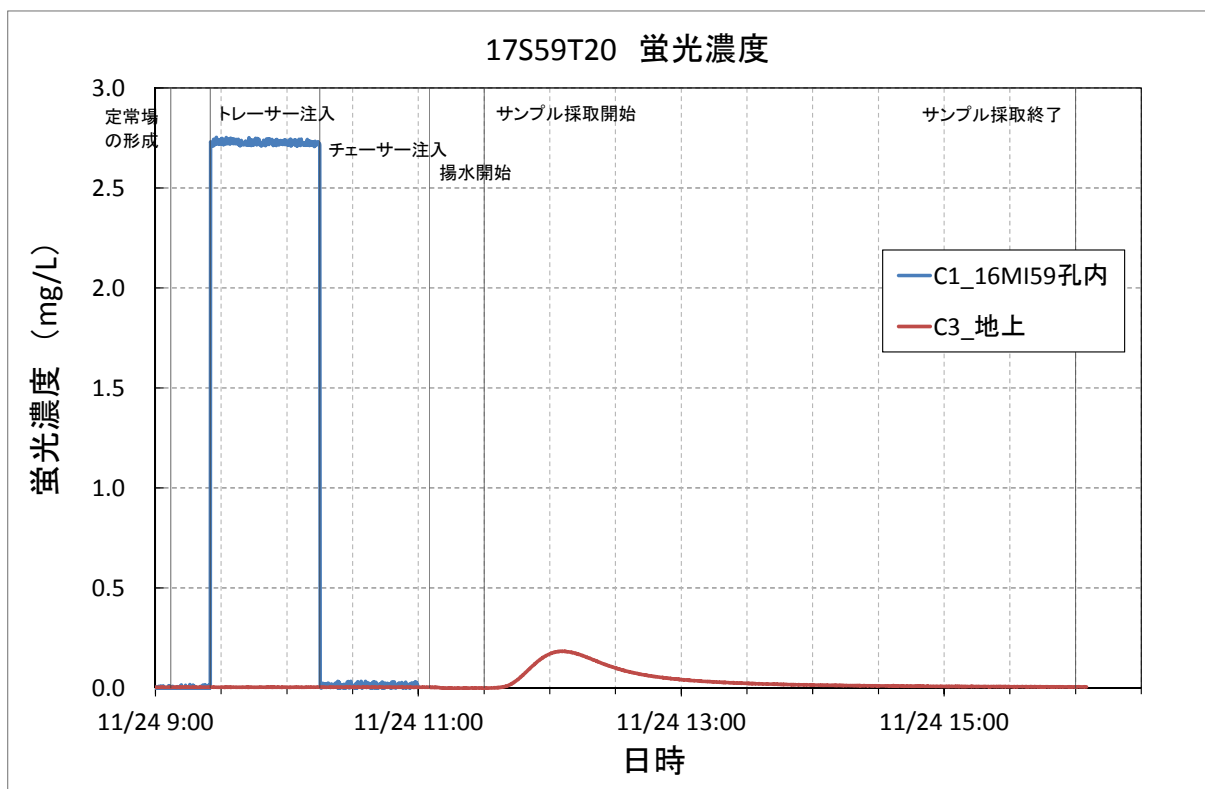


図 3.3.6-23 17S59T20 の試験条件と破過曲線

### 3.3.7 孔間トレーサー試験結果（ダイポール試験）

#### 3.3.7.1 試験条件のまとめ

孔間トレーサー試験の試験条件について、16MI59号孔を注水孔としたケースの一覧を、表 3.3.7-1 に、15MI52号孔を注水孔としたケースの一覧を、表 3.3.7-2、表 3.3.7-3 に示す。

表 3.3.7-1 16MI59号孔注水-15MI52号孔揚水の孔間トレーサー試験条件(17W5952T1~T4)

試験名		17W5952T1	17W5952T2	17W5952T3	17W5952T4	
分析試料ラベル名		W1	W2	W3	W4	
試験実施日		2017/9/25	2017/9/26	2017/9/27	2017/9/28	
対象孔		52→59号孔	52→59号孔	52→59号孔	52→59号孔	
試験条件	注水流量(設定値)	mL/min	25	10	5	5
	揚水流量(設定値)	mL/min	50	20	10	50
	注水流量(流量計平均)	mL/min	26.91	10.03	5.41	5.05
	揚水流量(流量計平均)	mL/min	49.54	20.43	13.34	50.74
	ダイポール比	-	1.84	2.04	2.47	10.05
	定常場の形成		9/25 8:08	9/26 8:21	9/27 8:08	9/28 8:05
	トレーサー注入開始		9/25 8:30	9/26 9:00	9/27 8:30	9/28 8:40
	チェイサー注入開始		9/25 8:40	9/26 10:00	9/27 9:30	9/28 9:40
	サンプリング開始		9/25 8:50	9/26 10:00	9/27 10:00	9/28 9:20
	サンプリング停止		9/25 10:50	9/26 16:00	9/27 16:00	9/28 16:00
	トレーサー注入時間	min	10	60	60	60
	トレーサー量	L	0.269	0.602	0.325	0.303
	揚水(サンプリング)時間	min	120	360	360	400
原液濃度 設定値	ウラニウム	mg/L	3.00	3.00	3.00	3.00
	アミノG酸	mg/L	3.00	3.00	3.00	3.00
	重水素	mg/L	-	-	-	-
	ルビジウム	mg/L	-	-	-	-
	バリウム	mg/L	-	-	-	-
C3センサーピーク時刻		-	9/25 9:14	9/26 11:10	9/27 11:42	9/28 10:43

表 3.3.7-2 15MI52 号孔注水-16MI59 号孔揚水の孔間トレーサー試験条件(17W5259T5~T11)

試験名		17W5259T5	17W5259T6	17W5259T7-9	17W5259T10	17W5259T11	
分析試料ラベル名		W5	W6	W7,W8,W9	W10	W11	
試験実施日		2017/9/29	2017/10/2	2017/10/3~4	2017/10/16	2017/10/17	
対象孔		52→59号孔	52→59号孔	52→59号孔	52→59号孔	52→59号孔	
試験条件	注水流量(設定値)	mL/min	5	5	5	4	2.5
	揚水流量(設定値)	mL/min	50	30	30	20	15.0
	注水流量(流量計平均)	mL/min	5.12	5.07	5.33	3.35	2.65
	揚水流量(流量計平均)	mL/min	49.75	30.78	30.50	22.55	15.47
	ダイポール比	-	9.72	6.07	5.72	6.73	5.84
	定常場の形成		9/29 8:05	10/2 8:15	10/3 8:05	10/16 8:30	10/17 9:00
	トレーサー注入開始		9/29 10:00	10/2 8:50	10/3 8:50	10/16 9:00	10/17 9:30
	チェイサー注入開始		9/29 11:00	10/2 9:50	10/3 14:50	10/16 9:30	10/17 10:00
	サンプリング開始		9/29 10:40	10/2 9:40	10/3 9:30	10/16 10:00	10/17 11:04
	サンプリング停止		9/29 16:40	10/2 15:40	10/4 16:00	10/16 16:00	10/17 16:20
	トレーサー注入時間	min	60	60	360	30	30
	トレーサー量	L	0.307	0.304	1.919	0.101	0.079
原液濃度 設定値	揚水(サンプリング)時間	min	360	360	1830	360	316
	ウラニン	mg/L	3.00	3.00	3.00	9.00	12.00
	アミノG酸	mg/L	3.00	3.00	3.00	9.00	12.00
	重水素	mg/L	-	-	0.10	-	-
	ルビジウム	mg/L	-	-	2.00	-	-
	バリウム	mg/L	-	-	1.20	-	-
C3センサーピーク時刻		-	9/29 11:42	10/2 10:52	10/3 15:43	10/16 11:14	10/17 12:17

表 3.3.7-3 15MI52 号孔注水-16MI59 号孔揚水の孔間トレーサー試験条件(17W5952T12~T20)

試験名		17W5259T12	17W5259T13-15	17W5259T16	17W5259T17	17W5259T18-20	
分析試料ラベル名		W12	W13,W14,W15	W16	W17	W18,W19,W20	
試験実施日		2017/10/18~19	2017/10/19~20	2017/11/6~7	2017/11/7~8	2017/11/8~10	
対象孔		52→59号孔	52→59号孔	52→59号孔	52→59号孔	52→59号孔	
試験条件	注水流量(設定値)	mL/min	1.7	1.7	1.0	1.3	1.3
	揚水流量(設定値)	mL/min	10.0	10.0	6.0	8.0	10.0
	注水流量(流量計平均)	mL/min	1.94	1.73	1.59	1.44	1.40
	揚水流量(流量計平均)	mL/min	10.71	10.77	5.61	8.72	9.44
	ダイポール比	-	5.52	6.23	3.53	6.06	6.74
	定常場の形成		10/18 8:36	10/19 8:10	11/6 10:11	11/7 9:56	11/8 10:30
	トレーサー注入開始		10/18 9:45	10/19 8:30	11/6 10:40	11/7 10:30	11/8 10:40
	チェイサー注入開始		10/18 10:30	10/19 14:30	11/6 11:20	11/7 11:00	11/8 15:40
	サンプリング開始		10/18 11:40	10/19 10:55	11/6 14:00	11/7 13:00	11/8 13:00
	サンプリング停止		10/19 7:40	10/20 15:55	11/7 9:00	11/8 5:00	11/10 9:00
	トレーサー注入時間	min	45	360	40	30	300
	トレーサー量	L	0.087	0.623	0.064	0.043	0.420
原液濃度 設定値	揚水(サンプリング)時間	min	1200	1740	1140	960	2640
	ウラニン	mg/L	12.00	3.00	22.50	22.50	3.00
	アミノG酸	mg/L	12.00	3.00	22.50	22.50	3.00
	重水素	mg/L	-	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
C3センサーピーク時刻		-	10/18 13:40	10/19 17:21	11/6 15:20	11/7 15:43	11/8 18:47

### 3.3.7.2 試験区間からフラクションコレクターまでの容量

図 3.3.7-1 にモノポンプで揚水した試験を、図 3.3.7-2 はニードルバルブを用いて揚水した試験の配管構成と容量を示す。なお、15MI52 号孔を揚水孔とした試験はトレーサーの回収率が悪く、条件設定試験までとなったため配管容量の算定は省略した。よって、図は 16MI59 号孔を揚水孔とした場合である。

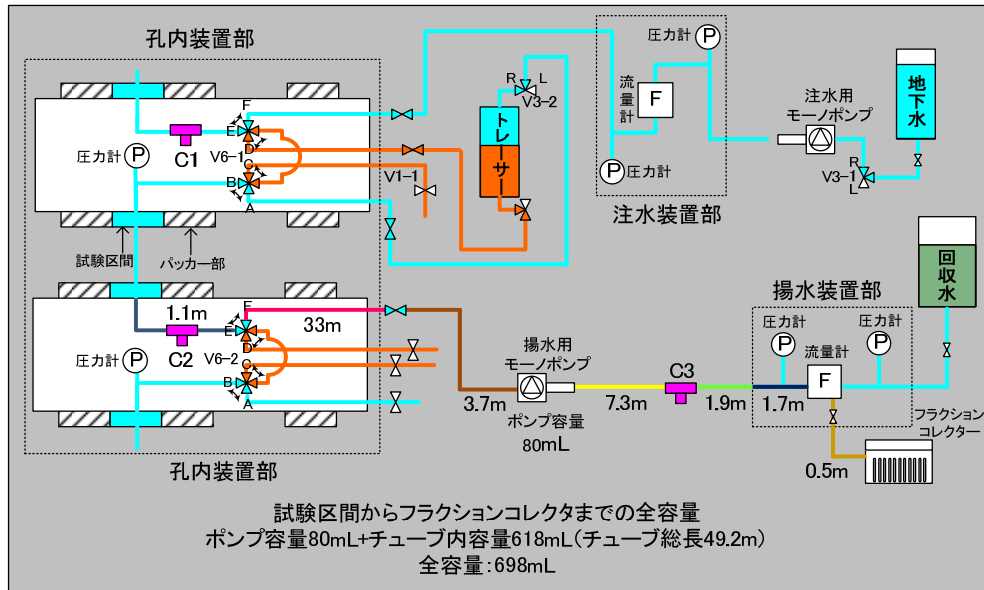


図 3.3.7-1 17W5259T5～T10 の配管構成と内容量

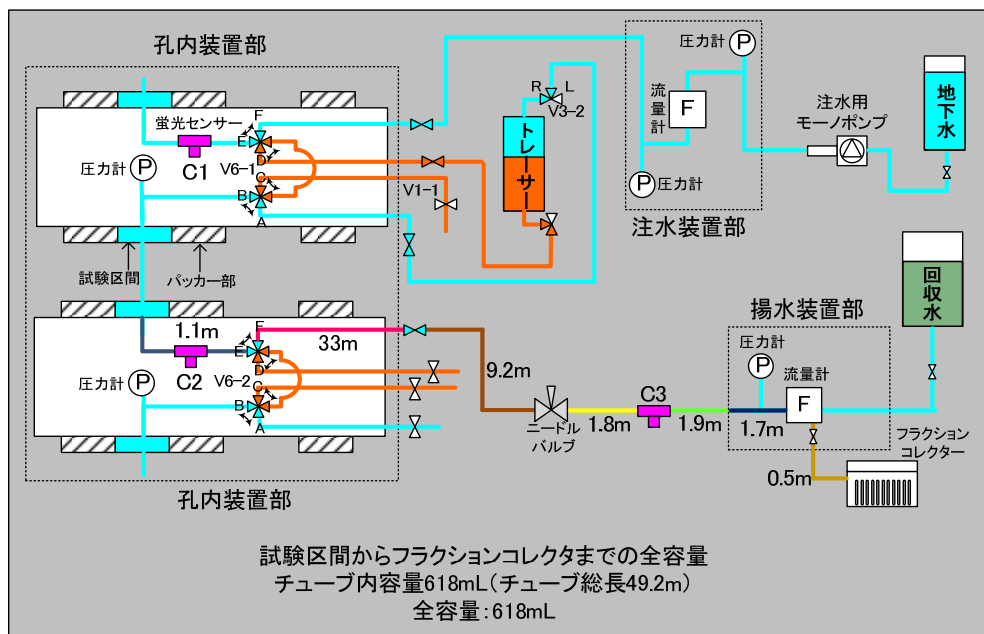


図 3.3.7-2 17W5259T11～T18-20 の配管構成と内容量



### 3.3.7.3 各試験結果

#### <予備試験>

孔間トレーサー本試験に先立ち、16MI59号孔、15MI52号孔の双方にトレーサー試験装置を設置した状態におけるトレーサー濃度の応答状況を確認するために予備試験を行った。9/7～9/8にかけて実施した事前試験との違いは、15MI52号孔にもトレーサー試験装置が設置されており、対象割れ目を含む試験区間のデッドボリュームが大幅に小さいことである。本試験と完全に同じ試験条件での確認ができる。

図 3.3.7-3 に予備試験の試験条件と破過曲線を示す。

試験条件一覧

試験名			予備試験	
注水孔			16MI59号孔	
試験実施日			2017/9/19	
トレーサー材			ウラン	
流量	注水流量	mL/min	48.61	
	揚水流量	mL/min	98.03	
	ダイポール比	-	2.02	
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	
現場分析での回収率(サンプリング終了時)			%	86

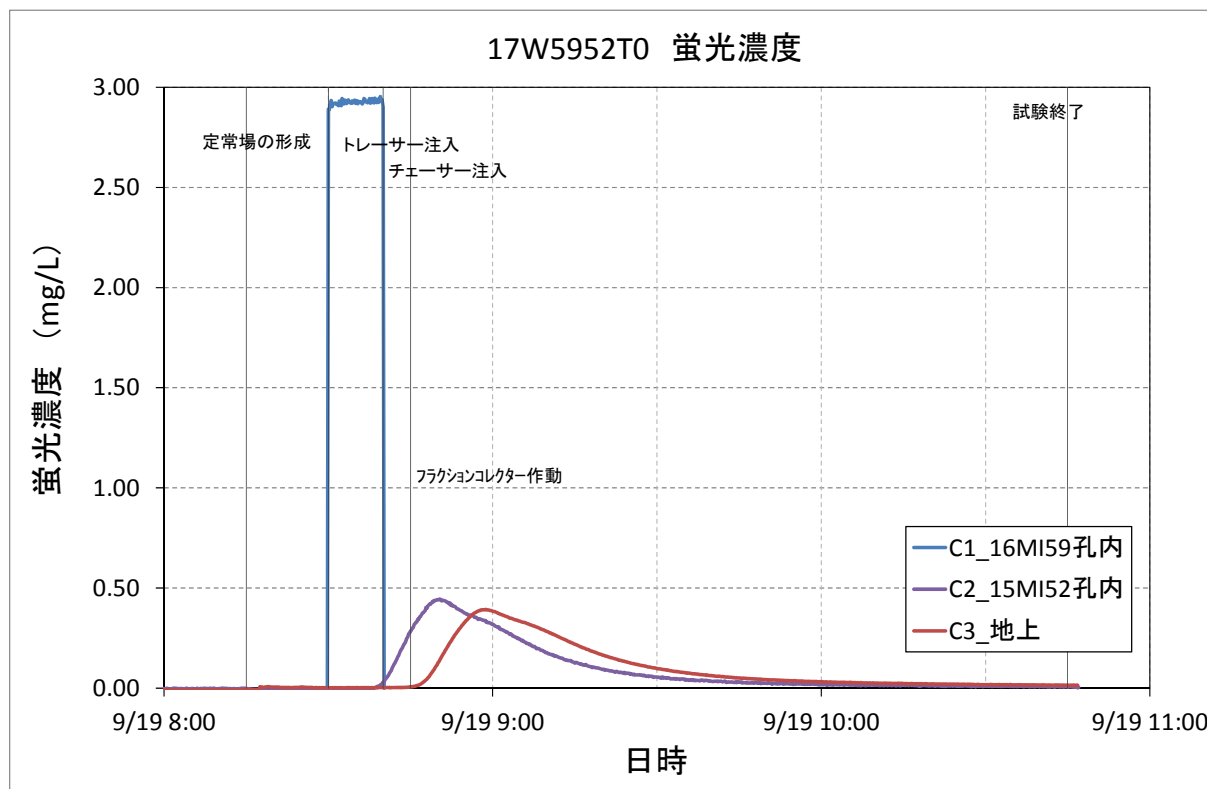


図 3.3.7-3 予備試験条件と破過曲線

<17W5952T1>

当試験を含む 17W5952T1～17W5952T4 までの試験は、収着性トレーサーを投入する本試験の条件設定を目的とし、トレーサーは非収着性のウラニン、アミノ G 酸のみとした。

図 3.3.7-4 に 17W5952T1 の試験条件と破過曲線を示す。

試験条件一覧

試験名			17W5952T1
注水孔			16MI59 号孔
試験実施日			2017/9/25
トレーサー材			ウラニン、アミノ G
流量	注水流量	mL/min	26.91
	揚水流量	mL/min	49.54
	ダイポール比	-	1.84
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
現場分析での回収率 (サンプリング終了時)			% 69

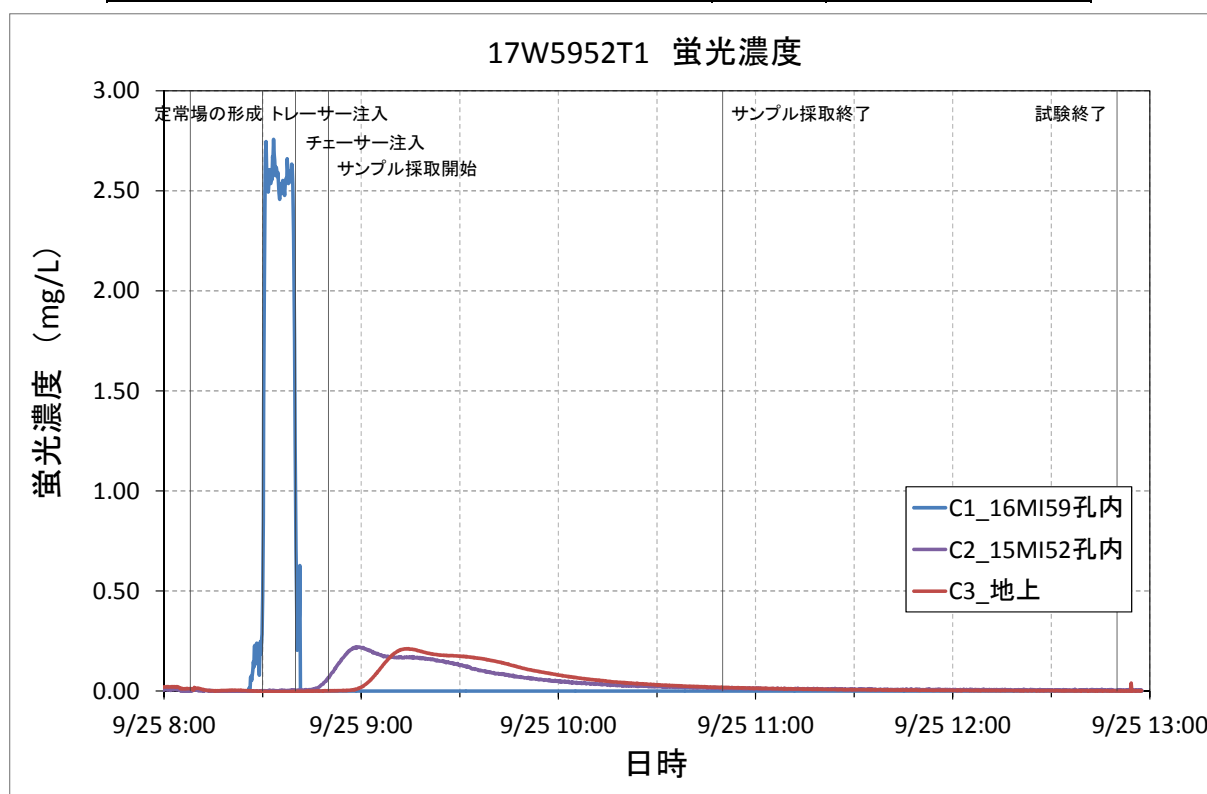


図 3.3.7-4 17W5952T1 の試験条件と破過曲線

<17W5952T2>

図 3.3.7-5 に 17W5952T2 の試験条件と破過曲線を示す。

C1 の破過曲線のノイズは、濃度補正によりスケールアップしたことで強調されたためである。

試験条件一覧

試験名			16W5253T2
注水孔			16MI59 号孔
試験実施日			2017/9/26
トレーサー材			ウラニン、アミノ G
流量	注水流量	mL/min	10.03
	揚水流量	mL/min	20.43
	ダイポール比	-	2.04
試験時間	トレーサー注入	min	60
	サンプリング採取(揚水)	min	360
現場分析での回収率 (サンプリング終了時)		%	46

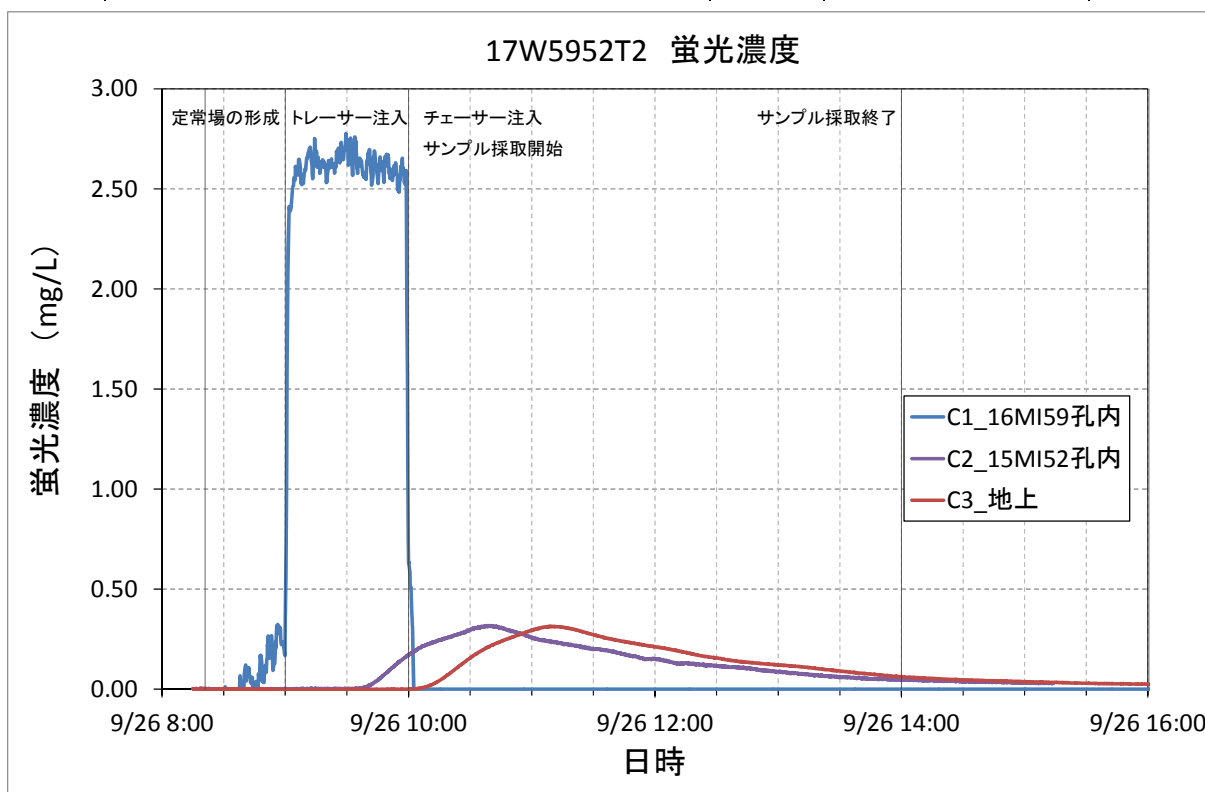


図 3.3.7-5 17W5952T2 の試験条件と破過曲線

<17W5952T3>

図 3.3.7-6 に 17W5952T3 の試験条件と破過曲線を示す。

試験条件一覧

試験名			16W5253T3	
注水孔			16MI59 号孔	
試験実施日			2017/9/27	
トレーサー材			ウラニン、アミノ G	
流量	注水流量	mL/min	5.41	
	揚水流量	mL/min	13.34	
	ダイポール比	-	2.47	
試験時間	トレーサー注入	min	60	
	サンプリング採取 (揚水)	min	360	
現場分析での回収率 (サンプリング終了時)			%	37

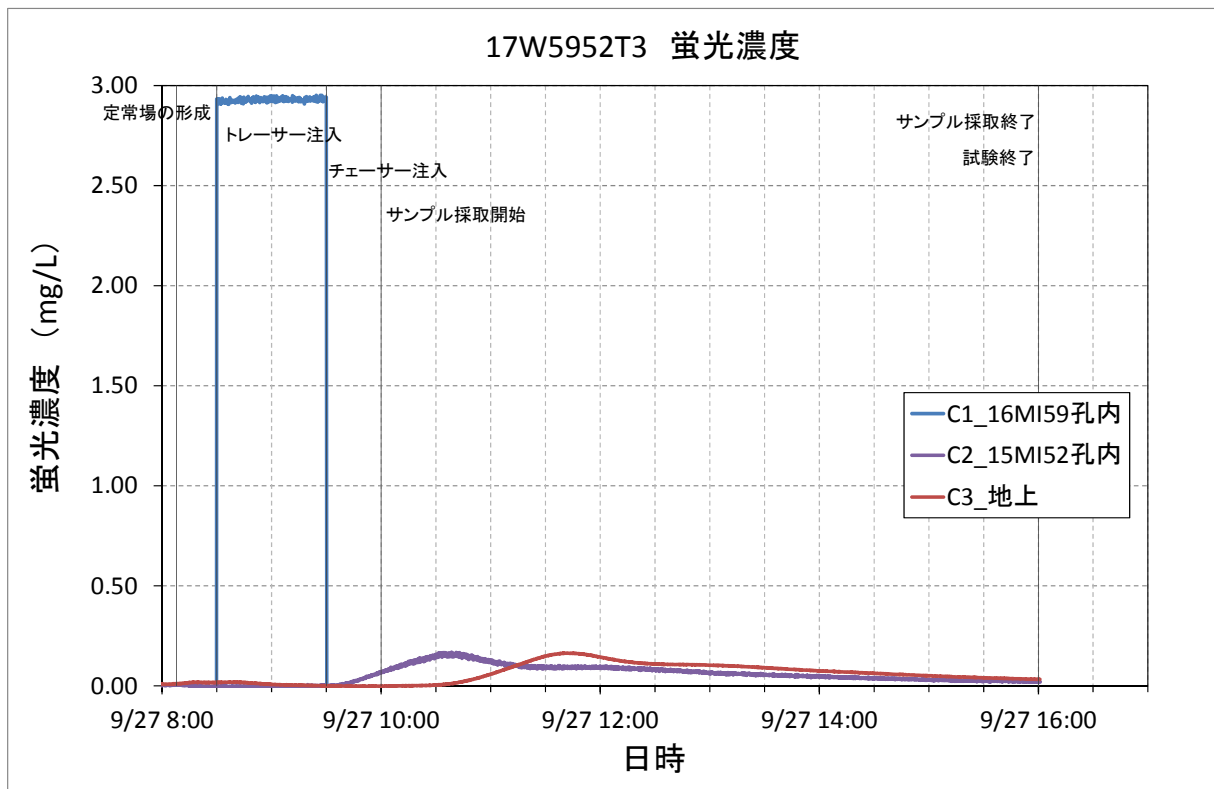


図 3.3.7-6 17W5952T3 の試験条件と破過曲線

<17W5952T4>

図 3.3.7-7 に 17W5952T4 の試験条件と破過曲線を示す。

15MI52 号孔を揚水孔としたこれまでの 4 回の試験では、トレーサーの回収率（現場濃度分析値）が 40～60%と低く、吸着性トレーサーを含む本試験は 15MI52 号孔を揚水孔としては実施しないこととした。

試験条件一覧

試験名			17W5952T4
注水孔			16MI59 号孔
試験実施日			2017/9/28
トレーサー材			ウラン、アミノ G
流量	注水流量	mL/min	5.05
	揚水流量	mL/min	50.74
	ダイポール比	-	10.05
試験時間	トレーサー注入	min	60
	サンプリング採取（揚水）	min	400
現場分析での回収率（サンプリング終了時）			%
			63

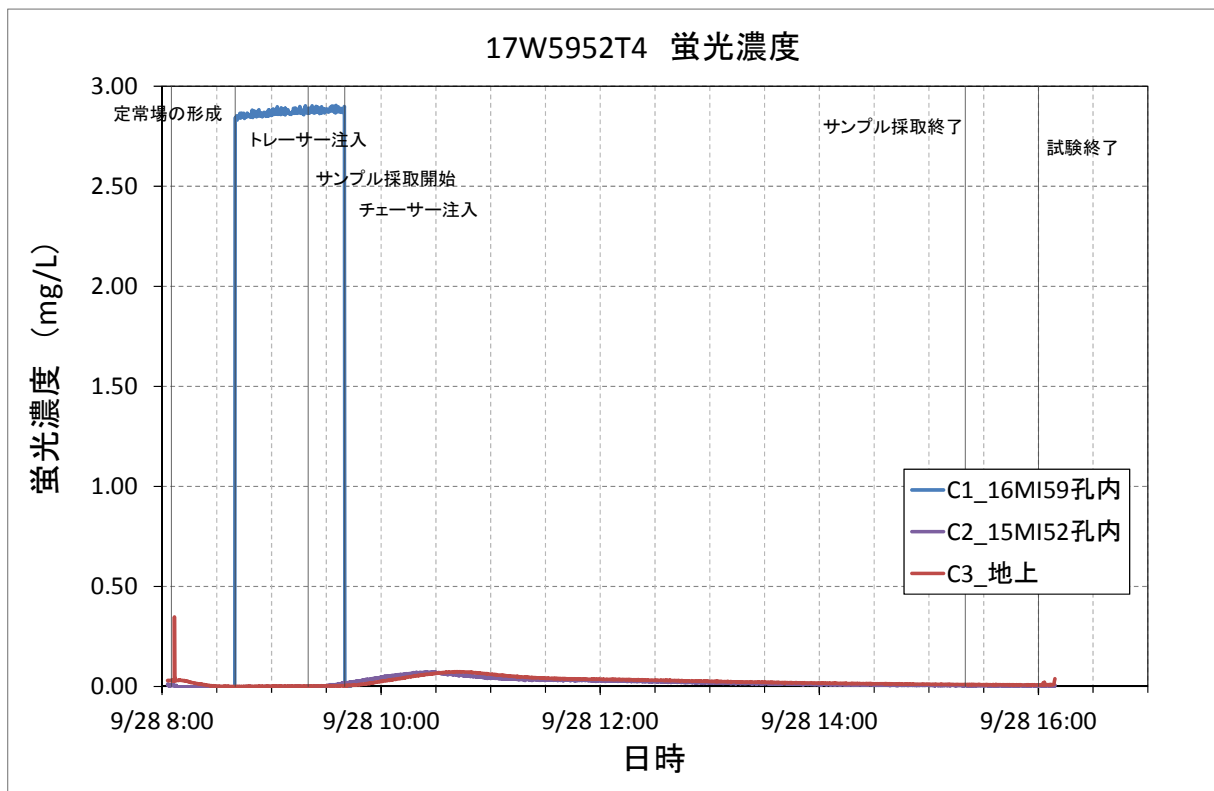


図 3.3.7-7 17W5952T4 の試験条件と破過曲線

<17W5259T5>

17W5259T5 試験以降は、注水孔と揚水孔を入れ替えて 16MI59 号孔を揚水孔とした。17W5259T5、17W5259T6 の 2 回の試験は、収着性トレーサーを含む本試験前の条件設定の試験とし、ウラニン、アミノ G 酸のみをトレーサーとした。

注水／揚水の配管構成は図 3.3.7-1 に示す通りである。図 3.3.7-8 に 17W5259T5 の試験条件と破過曲線を示す。15MI52 号孔から揚水した 17W5952T4 と同じ条件設定であったが、ウラニンの回収率は 63%から 100%に上昇した。

試験条件一覧

試験名			17W5259T5
注水孔			15MI52 号孔
試験実施日			2017/9/29
トレーサー材			ウラニン、アミノ G
流量	注水流量	mL/min	5.12
	揚水流量	mL/min	49.75
	ダイポール比	-	9.72
試験時間	トレーサー注入	min	60
	サンプリング採取 (揚水)	min	360
現場分析での回収率 (サンプリング終了時)			%
			100

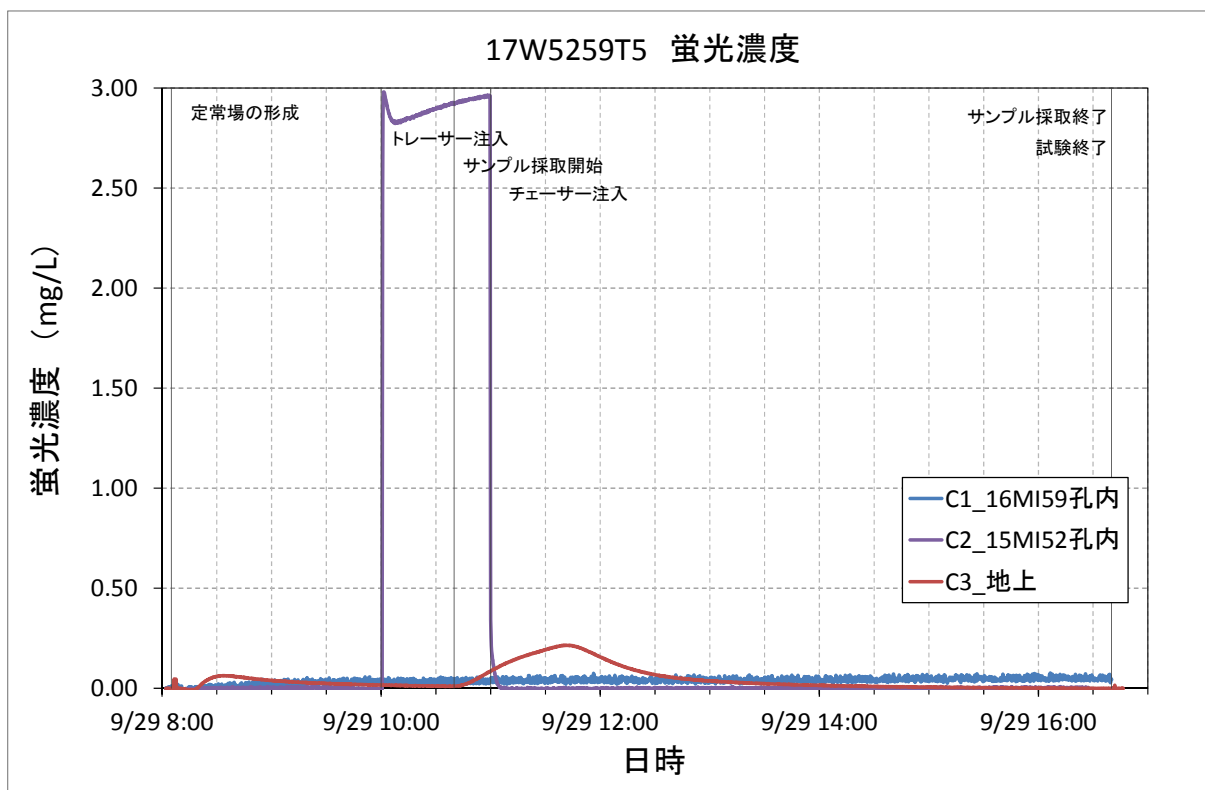


図 3.3.7-8 17W5259T5 の試験条件と破過曲線

<17W5259T6>

注水／揚水の配管構成は図 3.3.7-1 に示す通りである。図 3.3.7-9 に 17W5259T6 の試験条件と破過曲線を示す。

17W5259T5、T6 とも現場分析によるウラニンの回収率は良好であった。

試験条件一覧

試験名			17W5259T6
注水孔			15MI52 号孔
試験実施日			2017/10/2
トレーサー材			ウラニン、アミノ G、
流量	注水流量	mL/min	5.07
	揚水流量	mL/min	30.78
	ダイポール比	-	6.07
試験時間	トレーサー注入	min	60
	サンプリング採取 (揚水)	min	360
現場分析での回収率 (サンプリング終了時)		%	93

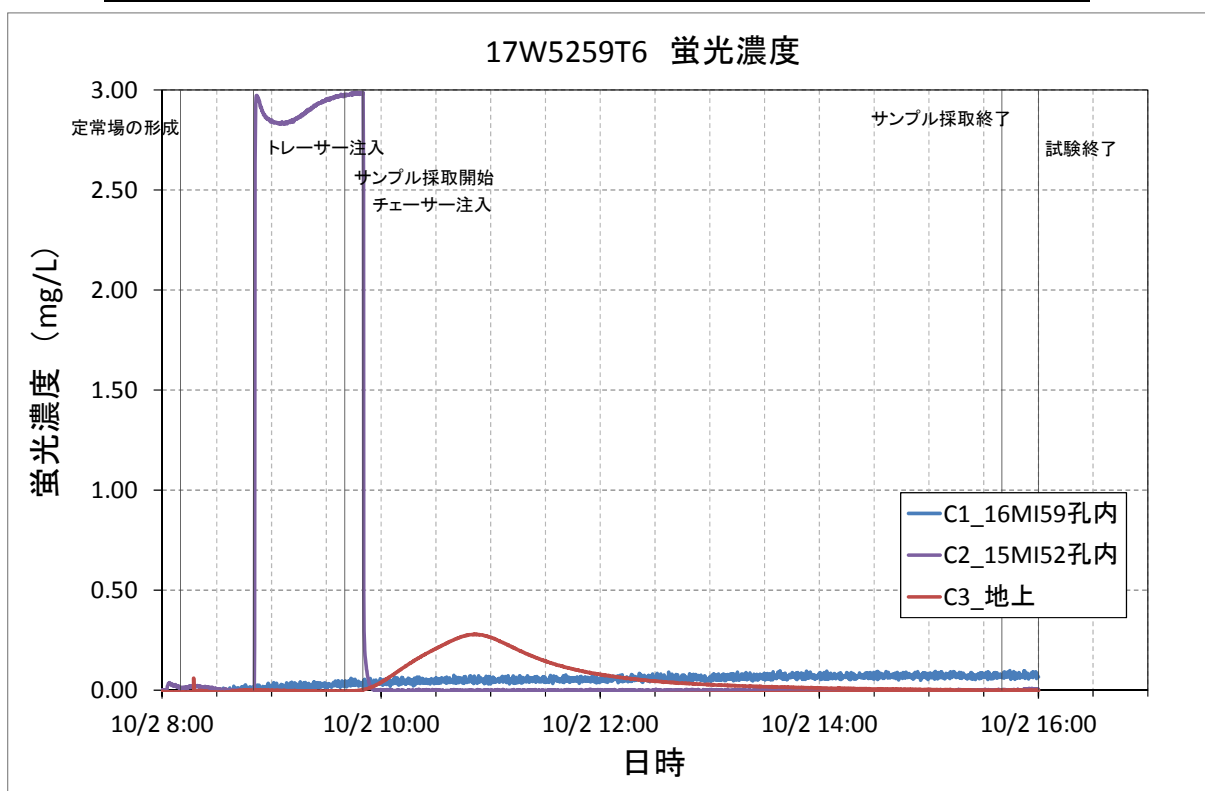


図 3.3.7-9 17W5259T6 の試験条件と破過曲線

<17W5259T7-9>

17W5259T7-9 は収着性トレーサーを含むフルセットのトレーサーで行った。トレーサー注入は 10/3 の 8:50 に開始し、トレーサーの回収は翌日の 16:00 まで行った。

注水／揚水の配管構成は図 3.3.7-1 に示す通りである。図 3.3.7-10 に 17W5259T7-9 の試験条件と破過曲線を示す。

試験条件一覧

試験名			17W5259T7-9	
注水孔			15MI52 号孔	
試験実施日			2017/10/3～10/4	
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	5.33	
	揚水流量	mL/min	30.50	
	ダイポール比	-	5.72	
試験時間	トレーサー注入	min	360	
	サンプリング採取（揚水）	min	1830	
現場分析での回収率（24 時間後）			%	97

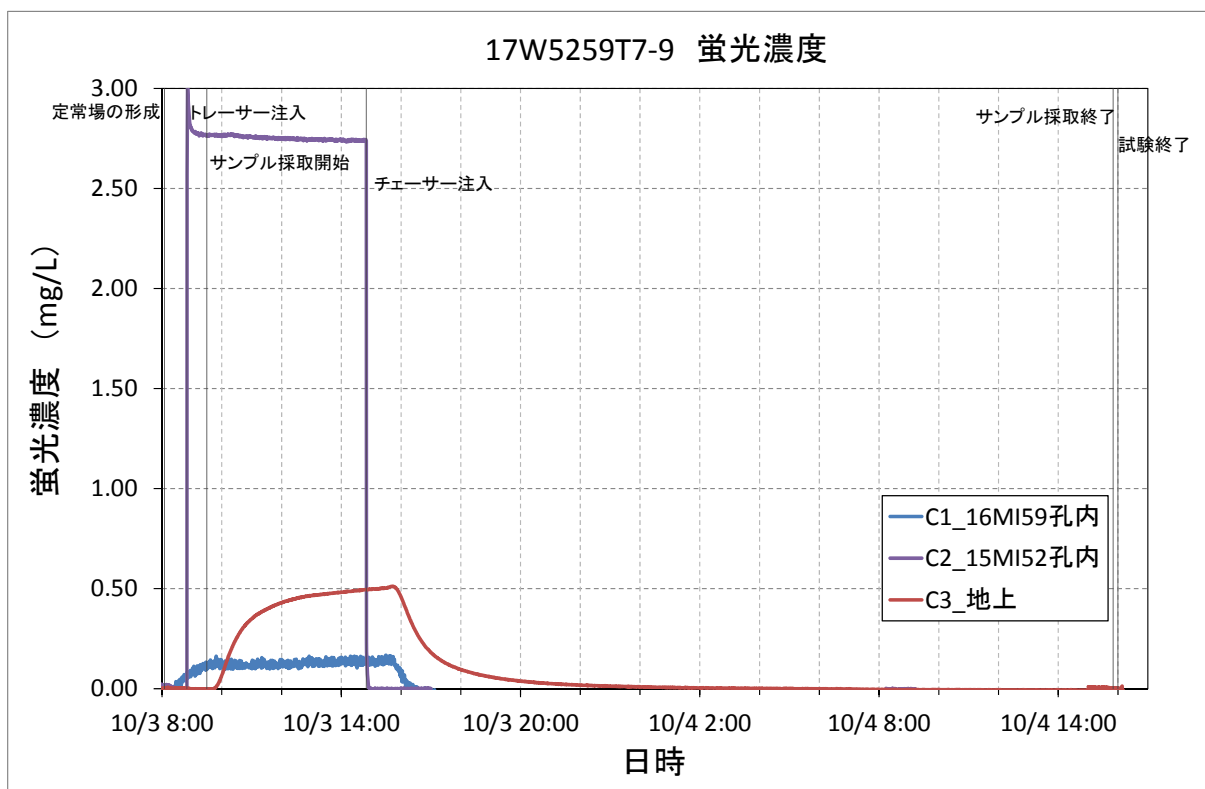


図 3.3.7-10 17W5259T7-9 の試験条件と破過曲線



<17W5259T10>

17W5259T10～17W5259T12 の3回の試験は、収着性トレーサーを含む本試験前の条件設定のための試験とし、ウラニン、アミノG酸のみをトレーサーとした。揚水孔のウラニン濃度の識別を明瞭とするため、ウラニン濃度の設定値は9 mg/Lとした。

注水／揚水の配管構成は図 3.3.7-1 に示す通りである。図 3.3.7-11 に17W5259T10の試験条件と破過曲線を示す。

試験条件一覧

試験名			17W5259T10
注水孔			15MI52号孔
試験実施日			2017/10/16
トレーサー材			ウラニン、アミノG
流量	注水流量	mL/min	3.35
	揚水流量	mL/min	22.55
	ダイポール比	-	6.73
試験時間	トレーサー注入	min	30
	サンプリング採取 (揚水)	min	360
現場分析での回収率 (24時間後)			% 98

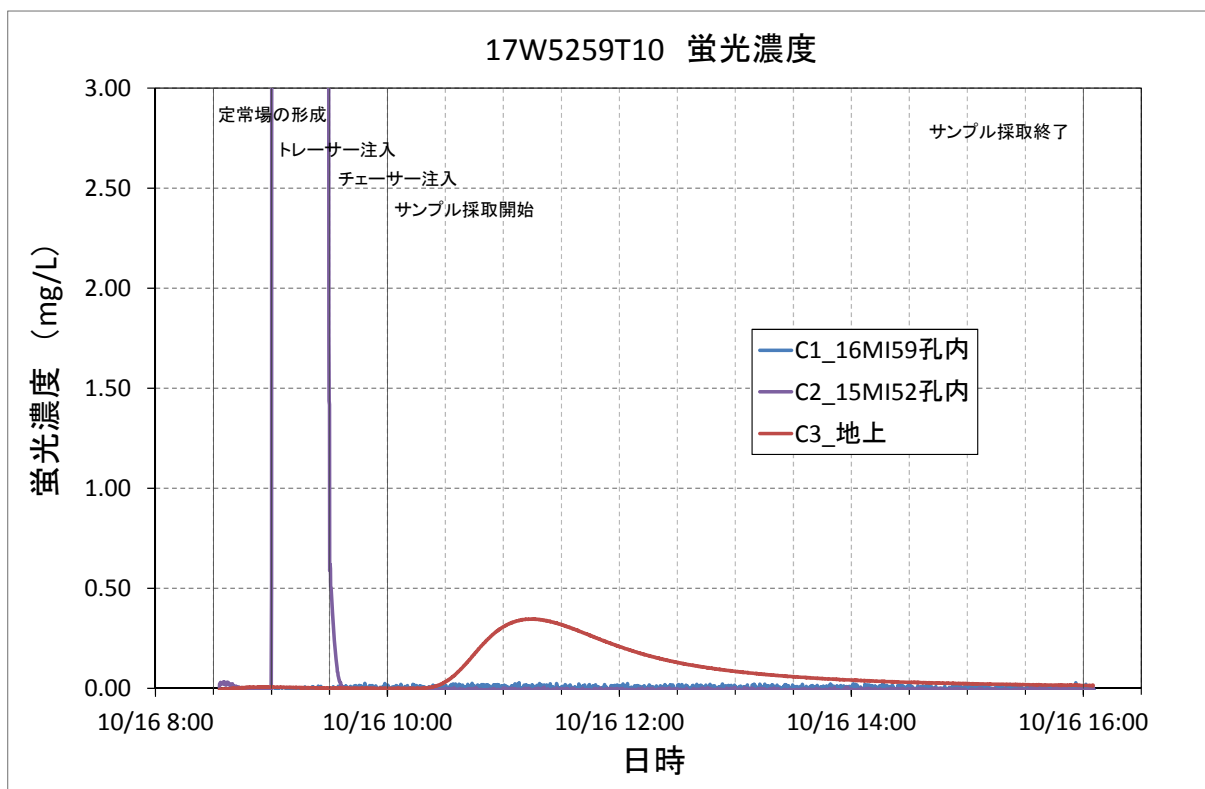


図 3.3.7-11 17W5259T10 の試験条件と破過曲線

<17W5259T11>

17W5259T11 では揚水孔のウラニン濃度の識別を明瞭とするため、ウラニン濃度の設定値は 12mg/L とした。注水／揚水の配管構成は図 3.3.7-2 に示す通りである。揚水はニードルバルブで行った。

図 3.3.7-12 に 17W5259T11 の試験条件と破過曲線を示す。

試験条件一覧

試験名			17W5259T11	
注水孔			15MI52 号孔	
試験実施日			2017/10/17	
トレーサー材			ウラニン、アミノ G	
流量	注水流量	mL/min	2.65	
	揚水流量	mL/min	15.47	
	ダイポール比	-	5.84	
試験時間	トレーサー注入	min	30	
	サンプリング採取 (揚水)	min	316	
現場分析での回収率 (24 時間後)			%	94

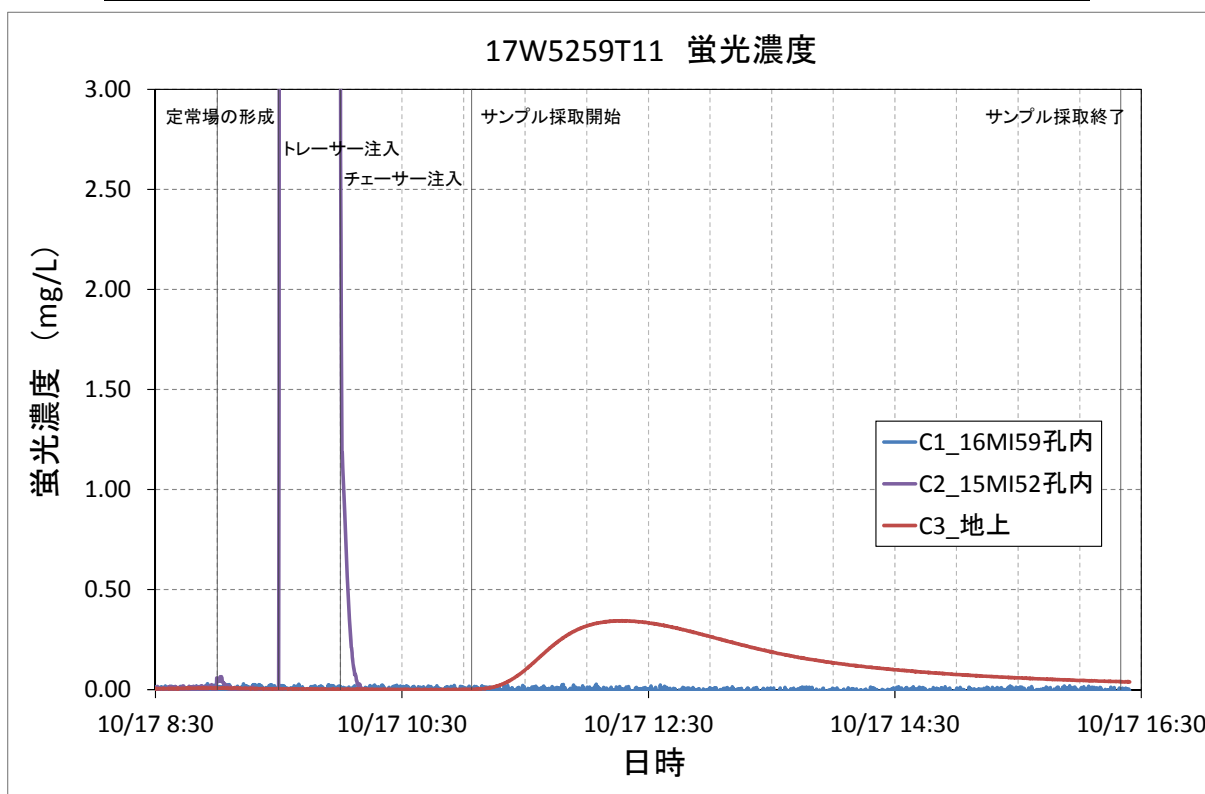


図 3.3.7-12 17W5259T11 の試験条件と破過曲線

<17W5259T12>

17W5259T12 では揚水孔のウラニン濃度の識別を明瞭とするため、ウラニン濃度の設定値は 12mg/L とした。注水／揚水の配管構成は図 3.3.7-2 に示す通りである。揚水はニードルバルブで行った。

図 3.3.7-13 に 17W5259T12 の試験条件と破過曲線を示す。

試験条件一覧

試験名			17W5259T12	
注水孔			15MI52 号孔	
試験実施日			2017/10/18～10/19	
トレーサー材			ウラニン、アミノ G	
流量	注水流量	mL/min	1.94	
	揚水流量	mL/min	10.71	
	ダイポール比	-	5.52	
試験時間	トレーサー注入	min	45	
	サンプリング採取 (揚水)	min	1200	
現場分析での回収率 (24 時間後)			%	84

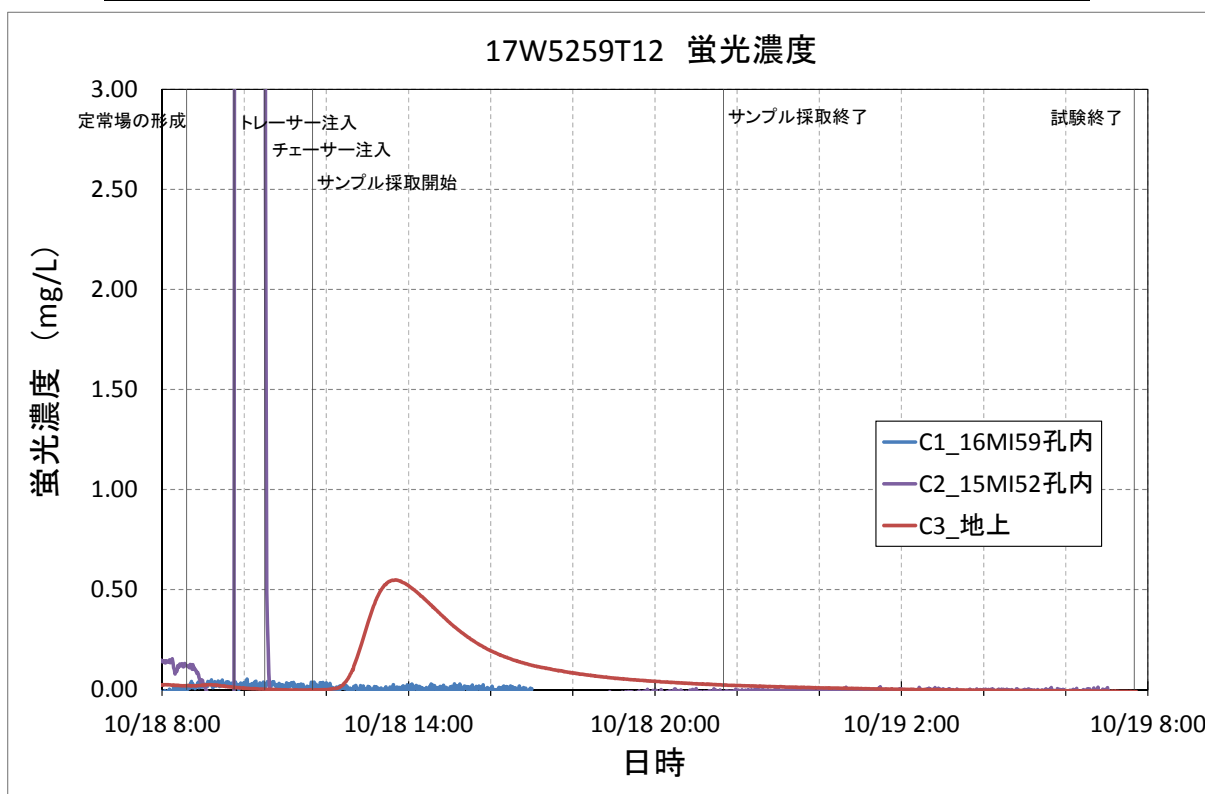


図 3.3.7-13 17W5259T12 の試験条件と破過曲線

<17W5259T13-15>

17W5259T13-15 は収着性トレーサーを含むフルセットのトレーサーで行った。トレーサー注入は10/19の8:30に開始し、トレーサーの回収は翌日の15:55まで行った。

注水/揚水の配管構成は図 3.3.7-2 に示す通りである。揚水はニードルバルブで行った。

図 3.3.7-14 に 17W5259T13-15 の試験条件と破過曲線を示す。

試験条件一覧

試験名			17W5259T13-15	
注水孔			15MI52 号孔	
試験実施日			2017/10/19~10/20	
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	1.73	
	揚水流量	mL/min	10.77	
	ダイポール比	-	6.23	
試験時間	トレーサー注入	min	360	
	サンプリング採取 (揚水)	min	1740	
現場分析での回収率 (24 時間後)			%	97

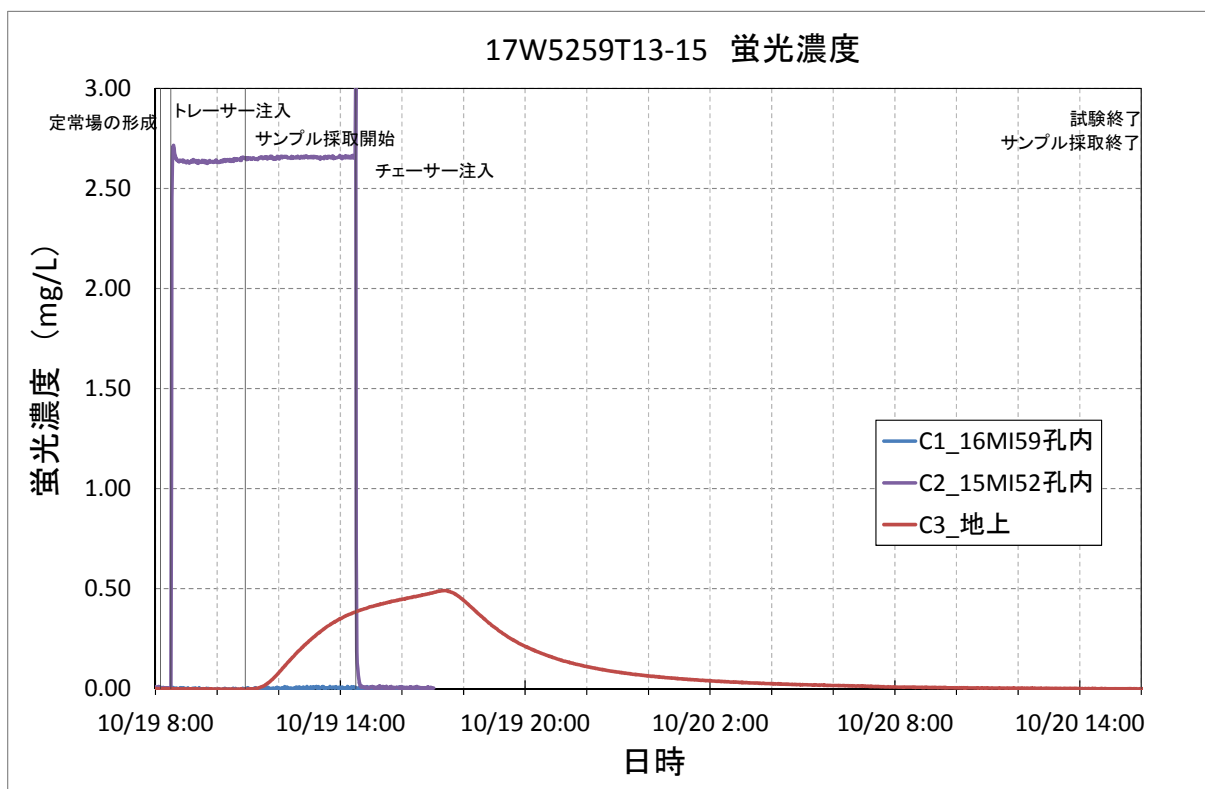


図 3.3.7-14 17W5259T13-15 の試験条件と破過曲線

<17W5259T16>

17W5259T16 では、揚水孔のウラニン濃度の識別を明瞭とするため、ウラニン濃度の設定値は 22.5mg/L とした。注水／揚水の配管構成は図 3.3.7-2 に示す通りである。揚水はニードルバルブで行った。

図 3.3.7-15 に 17W5259T16 の試験条件と破過曲線を示す。

試験条件一覧

試験名			17W5259T16
注水孔			15MI52 号孔
試験実施日			2017/11/6～11/7
トレーサー材			ウラニン、アミノ G
流量	注水流量	mL/min	1.59
	揚水流量	mL/min	5.61
	ダイポール比	-	3.53
試験時間	トレーサー注入	min	40
	サンプリング採取 (揚水)	min	1140
現場分析での回収率 (24 時間後)			% 27

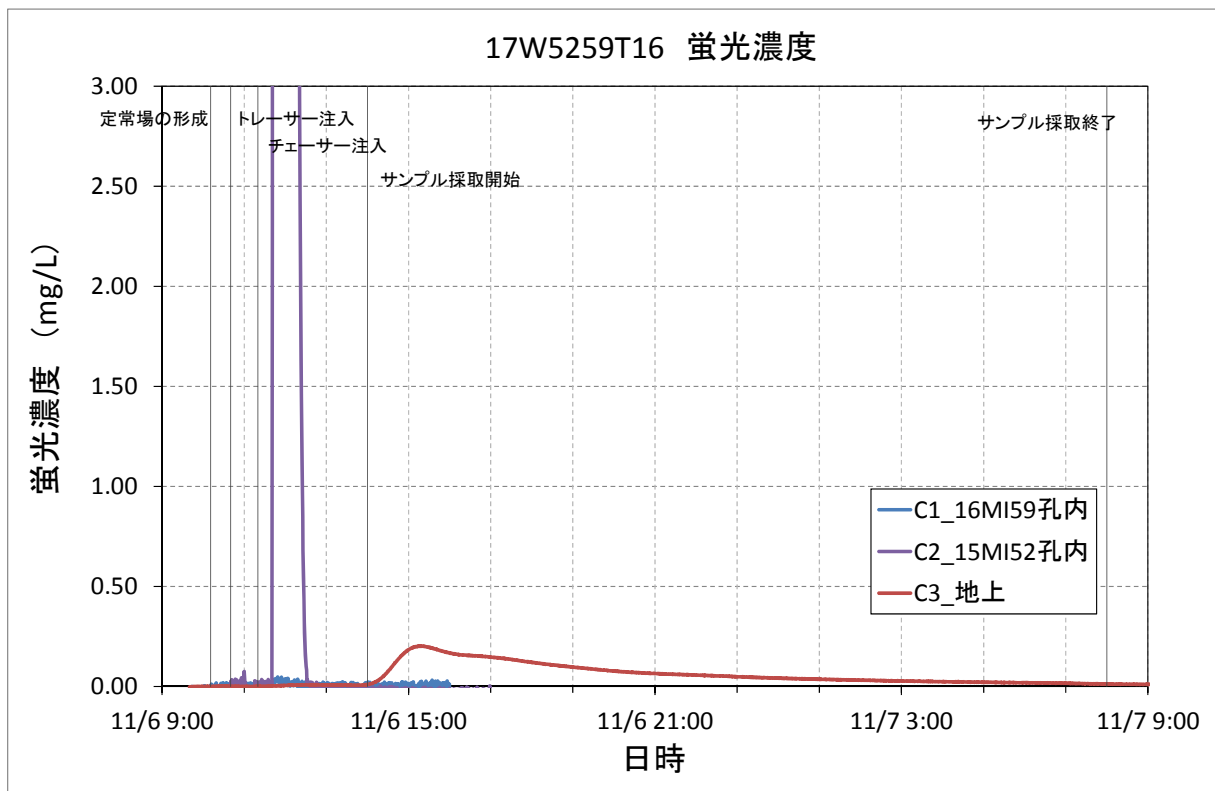


図 3.3.7-15 17W5259T16 の試験条件と破過曲線

<17W5259T17>

揚水孔のウラニン濃度の識別を明瞭とするため、ウラニン濃度の設定値は 22.5mg/L とした。  
注水／揚水の配管構成は図 3.3.7-2 に示す通りである。揚水はニードルバルブで行った。

図 3.3.7-16 に 17W5259T17 の試験条件と破過曲線を示す。

試験条件一覧

試験名			17W5259T17	
注水孔			15MI52 号孔	
試験実施日			2017/11/7~11/8	
トレーサー材			ウラニン、アミノ G	
流量	注水流量	mL/min	1.44	
	揚水流量	mL/min	8.72	
	ダイポール比	-	6.06	
試験時間	トレーサー注入	min	30	
	サンプリング採取 (揚水)	min	960	
現場分析での回収率 (24 時間後)			%	78

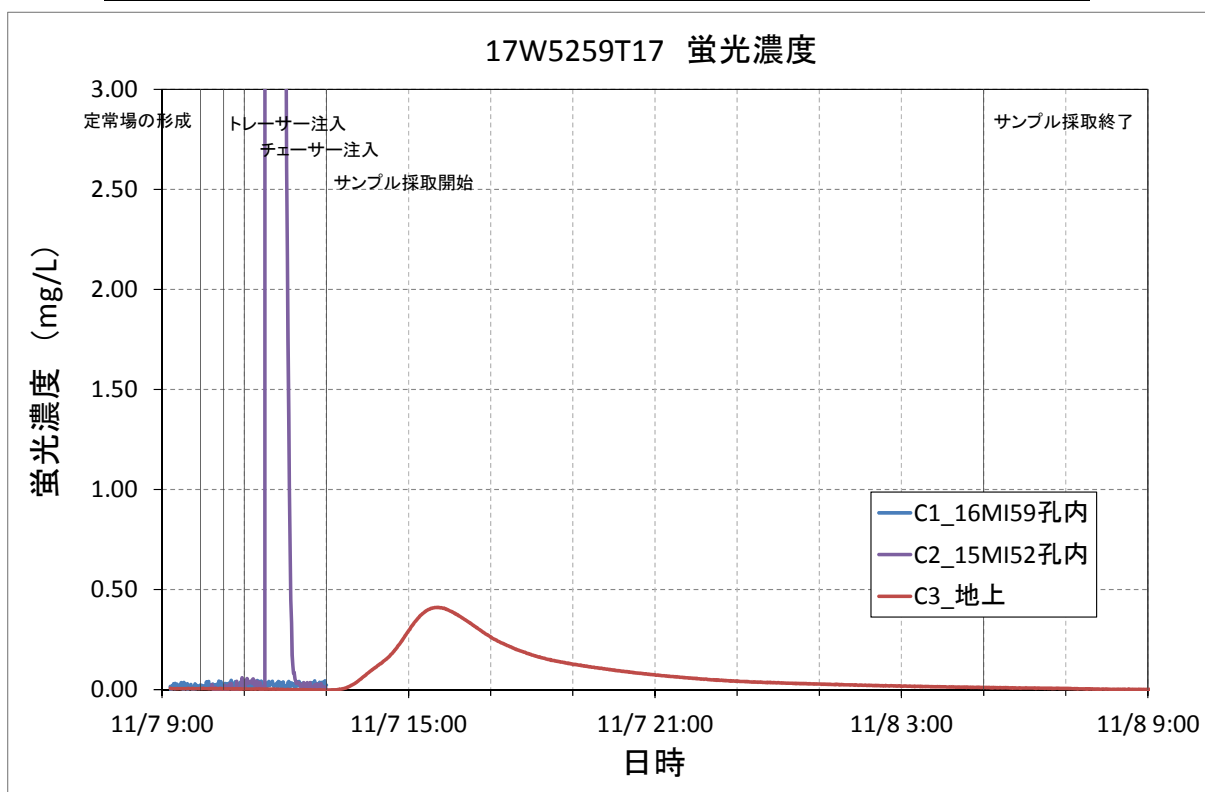


図 3.3.7-16 17W5259T17 の試験条件と破過曲線

<17W5259T18-20>

17W5259T18-20 は収着性トレーサーを含むフルセットのトレーサーで行った。トレーサー注入は11/8の10:40に開始し、トレーサーの回収は11/10の9:00まで行った。

注水/揚水の配管構成は図 3.3.7-2 に示す通りである。揚水はニードルバルブで行った。

図 3.3.7-17 に 17W5259T18-20 の試験条件と破過曲線を示す。

試験条件一覧

試験名			17W5259T18-20	
注水孔			15MI52 号孔	
試験実施日			2017/11/8~11/10	
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	1.40	
	揚水流量	mL/min	9.44	
	ダイポール比	-	6.74	
試験時間	トレーサー注入	min	300	
	サンプリング採取 (揚水)	min	2640	
現場分析での回収率 (24 時間後)			%	96

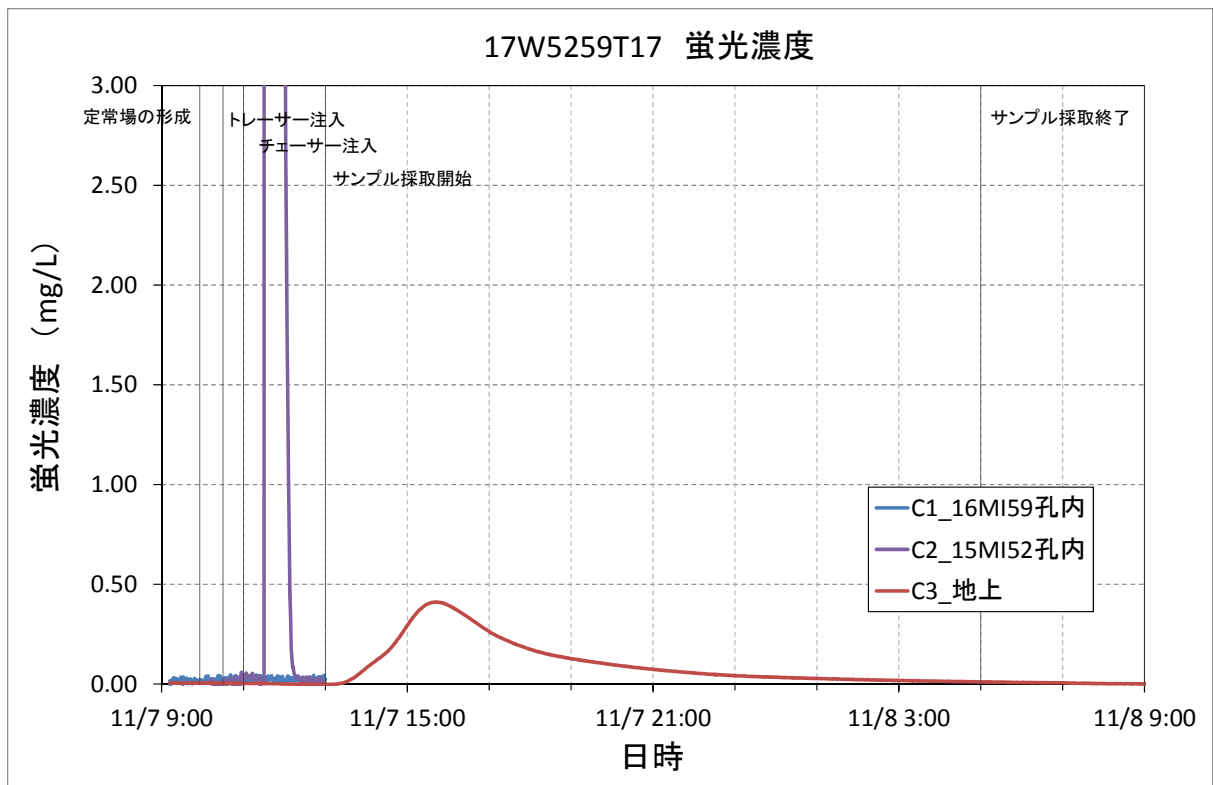


図 3.3.7-17 17W5259T18-20 の試験条件と破過曲線

### 3.3.8 室内分析結果

#### 3.3.8.1 単孔トレーサー試験の分析結果

##### ① 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、任意の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(3.3.8-1)より回収率を求めた。

$$Recovery^t = (C^t - C_B)V^t/M_0 \quad (3.3.8-1)$$

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<sup>-3</sup>]、 $C_B$ : バックグラウンド濃度[ML<sup>-3</sup>]、 $M_0$ : 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 3.3.8-1 に示す。16MI59 号孔で実施した試験の回収率を表 3.3.8-2 に、15MI52 号孔で実施した試験の回収率を表 3.3.8-3、表 3.3.8-4 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 3.3.8-1 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

試験ケース名	ウラン	アミノ G 酸	$\delta D$	$R b^+$	$B a^{2+}$
	[ $\mu g/L$ ]	[ $\mu g/L$ ]	[%]	[ $\mu g/L$ ]	[ $\mu g/L$ ]
17S59T3	0.0	0.0	-58.2	8.9	4.4
17S59T5					
17S59T7					
17S59T8					
17S59T9					
17S59T13					
17S59T14					
17S59T15					
17S59T16					
17S59T17					
17S59T18					
17S59T19					
17S59T20					



表 3.3.8-2 16MI59 号孔を対象とした単孔トレーサー試験の回収率

試験名		17S59T3	17S59T4	17S59T5	17S59T7	
分析試料ラベル名		S1	S2	S3	S4	
試験実施日		2017/9/22	2017/10/5	2017/10/10	2017/10/12~13	
対象孔		16MI59 号孔	16MI59 号孔	16MI59 号孔	16MI59 号孔	
試験条件	注水流量(設定値)	mL/min	100	50	50	50
	揚水流量(設定値)	mL/min	50	50	20	5
	注水流量(流量計平均)	mL/min	95.81	49.92	50.31	51.04
	揚水流量(流量計平均)	mL/min	48.25	50.23	21.18	5.58
	定常場の形成		9/22 8:07	10/5 8:10	10/10 8:32	10/12 8:05
	トレーサー注入開始		9/22 8:30	10/5 8:40	10/10 8:55	10/12 8:30
	チェイサー注入開始		9/22 8:40	10/5 8:50	10/10 9:05	10/12 8:40
	待機切り替え		-	-	-	-
	揚水開始		9/22 8:45	10/5 9:00	10/10 9:15	10/12 8:50
	サンプリング開始		同上	同上	10/10 9:40	10/12 10:30
	サンプリング停止		9/22 10:45	10/5 11:00	10/10 14:40	10/13 6:30
	トレーサー注入時間	min	10	10	10	10
	チェイサー注入時間	min	5	10	10	10
	待機時間	min	-	-	-	-
トレーサー量	L	0.958	0.499	0.503	0.510	
チェイサー量	L	0.479	0.499	0.503	0.510	
原液濃度 設定値	ウラニン	mg/L	3.00	3.00	3.00	3.00
	アミノ G 酸	mg/L	3.00	3.00	3.00	3.00
	重水素	mg/L	0.10	0.10	0.10	0.10
	ルビジウム	mg/L	2.00	2.00	2.00	2.00
	バリウム	mg/L	1.30	1.30	1.30	1.30
C3 センサーピーク時刻		-	9/22 9:17	10/5 9:34	10/10 10:33	10/12 13:10
60 分 回収率	ウラニン	-	56.83%	-	-	-
	アミノ G 酸	-	58.79%	-	-	-
	重水素	-	58.19%	-	-	-
	ルビジウム	-	41.61%	-	-	-
	バリウム	-	37.51%	-	-	-
120 分 回収率	ウラニン	-	74.06%	-	-	-
	アミノ G 酸	-	74.48%	-	-	-
	重水素	-	76.39%	-	-	-
	ルビジウム	-	61.02%	-	-	-
	バリウム	-	58.51%	-	-	-
150 分 回収率	ウラニン	-	-	-	57.18%	-
	アミノ G 酸	-	-	-	61.11%	-
	重水素	-	-	-	61.84%	-
	ルビジウム	-	-	-	56.26%	-
	バリウム	-	-	-	52.62%	-
360 分 回収率	ウラニン	-	-	-	-	48.56%
	アミノ G 酸	-	-	-	-	49.44%
	重水素	-	-	-	-	47.02%
	ルビジウム	-	-	-	-	38.07%
	バリウム	-	-	-	-	36.54%
1260 分 回収率	ウラニン	-	-	-	-	76.60%
	アミノ G 酸	-	-	-	-	79.15%
	重水素	-	-	-	-	74.76%
	ルビジウム	-	-	-	-	74.68%
	バリウム	-	-	-	-	77.31%

表 3.3.8-3 15MI52 号孔を対象とした単孔トレーサー試験の回収率(1)

試験名			17S59T13	17S59T14	17S59T15	17S59T16	17S59T17	17S59T18	17S59T19	17S59T20
ラベル名			S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14
試験実施日			2017/11/13	2017/11/14	2017/11/15	2017/11/16	2017/11/17	2017/11/21	2017/11/22	2017/11/24
対象孔			15MI53号孔	15MI53号孔	15MI53号孔	15MI53号孔	15MI53号孔	15MI53号孔	15MI53号孔	15MI53号孔
試験条件	注水流量(設定値)	mL/min	50	50	50	50	50	50	50	5
	揚水流量(設定値)	mL/min	50	20	10	50	50	50	50	20
	注水流量(流量計平均)	mL/min	49.36	49.82	50.39	49.52	49.03	49.81	48.87	5.38
	揚水流量(流量計平均)	mL/min	50.46	20.71	10.64	49.61	50.40	52.14	49.86	20.41
	定常場の形成		11/13 9:16	11/14 9:15	11/15 9:00	11/16 9:20	11/17 10:01	11/21 9:30	11/22 9:08	11/24 9:07
	トレーサー注入開始		11/13 9:40	11/14 9:40	11/15 9:30	11/16 9:40	11/17 10:30	11/21 9:50	11/22 9:30	11/24 9:25
	チェイサー注入開始		11/13 9:45	11/14 9:45	11/15 9:35	11/16 9:45	11/17 10:35	11/21 10:00	11/22 9:35	11/24 10:15
	待機切り替え		-	-	-	11/16 9:50	11/17 10:40	-	11/22 9:40	
	揚水開始		11/13 9:50	11/14 9:50	11/15 9:40	11/16 10:50	11/17 12:40	11/21 10:10	11/22 13:40	11/24 11:05
	サンプリング開始		同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	11/24 11:30
	サンプリング停止		11/13 11:50	11/14 15:15	11/15 16:30	11/16 12:50	11/17 14:40	11/21 12:10	11/22 15:40	11/24 16:00
	トレーサー注入時間	min	5	5	5	5	5	10	5	50
	チェイサー注入時間	min	5	5	5	5	5	10	5	50
	待機時間	min	-	-	-	60	120	-	240	-
トレーサー量	L	0.247	0.249	0.252	0.248	0.245	0.498	0.244	0.269	
チェイサー量	L	0.247	0.249	0.252	0.248	0.245	0.498	0.244	0.269	
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	3.00	3.00
	アミノG酸	mg/L	3.00	3.00	3.00	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	0.10	0.10	0.10
	ルビジウム	mg/L	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
	バリウム	mg/L	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
C3 センサーピーク時刻			11/13 10:19	11/14 10:46	11/15 11:35	11/16 11:13	11/17 13:03	11/21 10:44	11/22 14:08	11/24 12:05
60分 回収率	ウラニン	-	81.29%	-	-	62.35%	53.30%	53.59%	47.22%	-
	アミノG酸	-	-	-	-	-	48.19%	57.19%	51.17%	-
	重水素	-	81.89%	-	-	64.37%	56.27%	60.05%	48.00%	-
	ルビジウム	-	70.52%	-	-	63.73%	55.02%	50.12%	41.79%	-
120分 回収率	ウラニン	-	90.00%	-	-	67.86%	55.78%	66.40%	53.18%	-
	アミノG酸	-	-	-	-	-	52.44%	72.40%	61.64%	-
	重水素	-	88.25%	-	-	71.87%	60.07%	75.47%	52.37%	-
	ルビジウム	-	88.29%	-	-	82.78%	71.03%	70.87%	56.60%	-
150分 回収率	ウラニン	-	-	81.57%	-	-	-	-	-	24.66%
	アミノG酸	-	-	-	-	-	-	-	-	27.17%
	重水素	-	-	77.69%	-	-	-	-	-	25.08%
	ルビジウム	-	-	73.98%	-	-	-	-	-	30.23%
250分 回収率	ウラニン	-	-	67.17%	-	-	-	-	-	28.34%
	アミノG酸	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	重水素	-	-	-	80.59%	-	-	-	-	-
	ルビジウム	-	-	-	72.02%	-	-	-	-	-
360分 回収率	ウラニン	-	-	-	67.28%	-	-	-	-	-
	アミノG酸	-	-	-	101.15%	-	-	-	-	-
	重水素	-	-	-	96.72%	-	-	-	-	-
	ルビジウム	-	-	-	91.95%	-	-	-	-	-
	バリウム	-	-	-	85.76%	-	-	-	-	-

表 3.3.8-4 15MI52 号孔を対象とした単孔トレーサー試験の回収率(2)

試験名		17S52T8	17S52T9	17S52T10	17S52T11	
分析試料ラベル名		S5	S6	サンプルなし	サンプルなし	
試験実施日		2017/10/26	2017/10/27	2017/10/30	2017/10/31	
対象孔		15MI52 号孔	15MI52 号孔	15MI52 号孔	15MI52 号孔	
試験条件	注水流量(設定値)	mL/min	100	50	50	50
	揚水流量(設定値)	mL/min	50	20	50	100
	注水流量(流量計平均)	mL/min	99.82	49.72	50.39	49.86
	揚水流量(流量計平均)	mL/min	52.06	20.36	51.33	102.25
	定常場の形成		10/26 8:41	10/27 8:28	10/30 10:58	10/31 8:20
	トレーサー注入開始		10/26 9:15	10/27 9:00	10/30 11:20	10/31 9:00
	チェイサー注入開始		10/26 9:25	10/27 9:10	10/30 11:25	10/31 9:05
	待機切り替え		-	-	-	-
	揚水開始		10/26 9:30	10/27 9:20	10/30 11:30	10/31 9:10
	サンプリング開始		同上	10/27 9:45		
	サンプリング停止		10/26 11:30	10/27 14:45		
	トレーサー注入時間	min	10	10	5	5
	チェイサー注入時間	min	5	10	5	5
	待機時間	min	-	-	-	-
	トレーサー量	L	0.998	0.497	0.252	0.249
チェイサー量	L	0.499	0.497	0.252	0.249	
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	3.00	-	-
	重水素	mg/L	0.10	0.10	-	-
	ルビジウム	mg/L	2.00	2.00	-	-
	バリウム	mg/L	1.30	1.30	-	-
C3 センサーピーク時刻		-	10/26 10:08	10/27 10:49	10/30 11:57	10/31 9:23
原液濃度	ウラン	mg/L	3.088	3.148	-	-
	アミノ G 酸	mg/L	2.878	2.886	-	-
	重水素	‰	565.42	560.79	-	-
	ルビジウム	mg/L	1.394	1.394	-	-
	バリウム	mg/L	1.291	1.274	-	-
60 分 回収率	ウラン	-	25.71%	-	-	-
	アミノ G 酸	-	24.58%	-	-	-
	重水素	-	23.62%	-	-	-
	ルビジウム	-	27.45%	-	-	-
	バリウム	-	29.62%	-	-	-
120 分 回収率	ウラン	-	34.79%	-	-	-
	アミノ G 酸	-	31.85%	-	-	-
	重水素	-	31.28%	-	-	-
	ルビジウム	-	37.55%	-	-	-
	バリウム	-	42.09%	-	-	-
150 分 回収率	ウラン	-	-	27.17%	-	-
	アミノ G 酸	-	-	26.99%	-	-
	重水素	-	-	23.97%	-	-
	ルビジウム	-	-	35.14%	-	-
	バリウム	-	-	39.33%	-	-
300 分 回収率	ウラン	-	-	37.44%	-	-
	アミノ G 酸	-	-	37.27%	-	-
	重水素	-	-	31.55%	-	-
	ルビジウム	-	-	51.66%	-	-
	バリウム	-	-	58.59%	-	-

② 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 3.3.8-5 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(3.3.8-2)より回収率を近似的に求めた。

$$Recovery^x = \sum_{n=2}^x \left\{ \left( \frac{C^n + C^{n-2}}{2} - C_B \right) \times Q_{ext}(T^n - T^{n-1}) \right\} / M_0 \quad (3.3.8-2)$$

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 3.3.8-1～図 3.3.8-13 に示す。破過曲線は Rb<sup>+</sup>、Ba<sup>2+</sup>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。δD 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、破過曲線は、チューブ分散等の補正は行っていない。

表 3.3.8-5 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
17S59T3	120 本	60 秒	30 秒
17S59T5	120 本	150 秒	45 秒
17S59T7	120 本	600 秒	135 秒
17S59T8	120 本	60 秒	60 秒
17S59T9	120 本	150 秒	105 秒
17S59T13	120 本	60 秒	20 秒
17S59T14	120 本	150 秒	35 秒
17S59T15	120 本	180 秒	70 秒
17S59T16	120 本	60 秒	20 秒
17S59T17	120 本	60 秒	20 秒
17S59T18	120 本	60 秒	15 秒
17S59T19	120 本	60 秒	15 秒
17S59T20	108 本	150 秒	30 秒

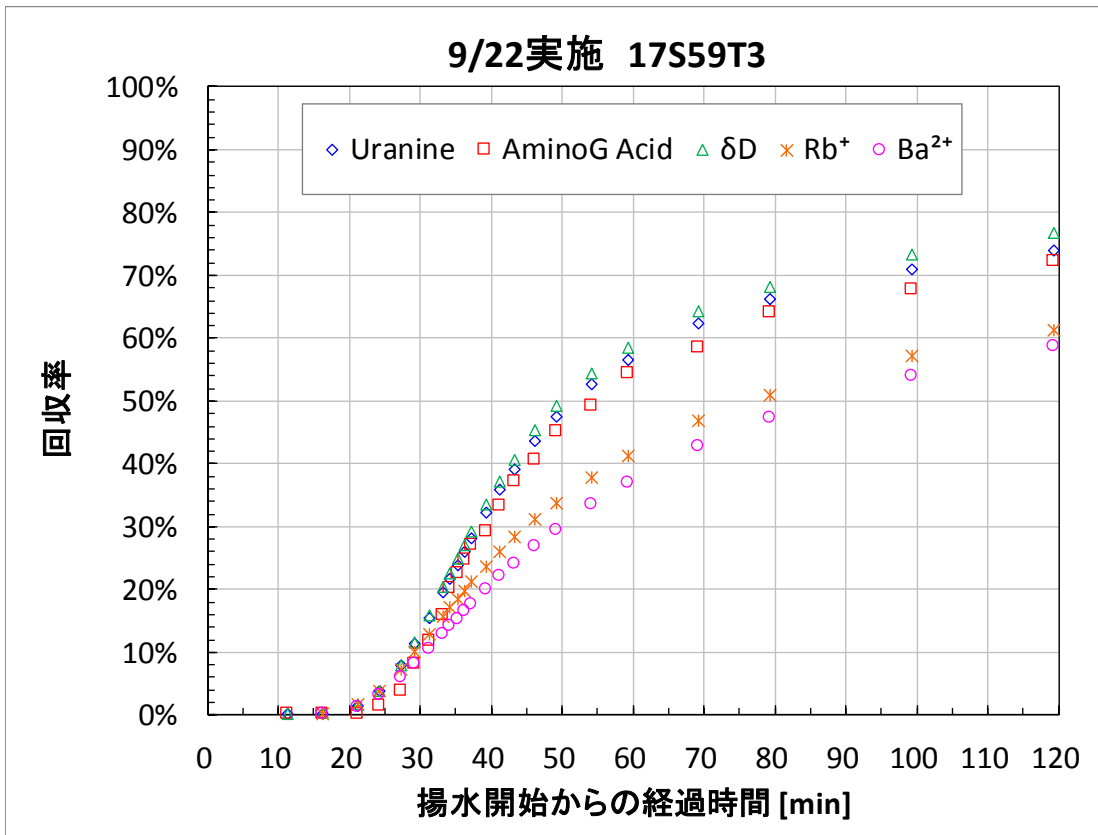
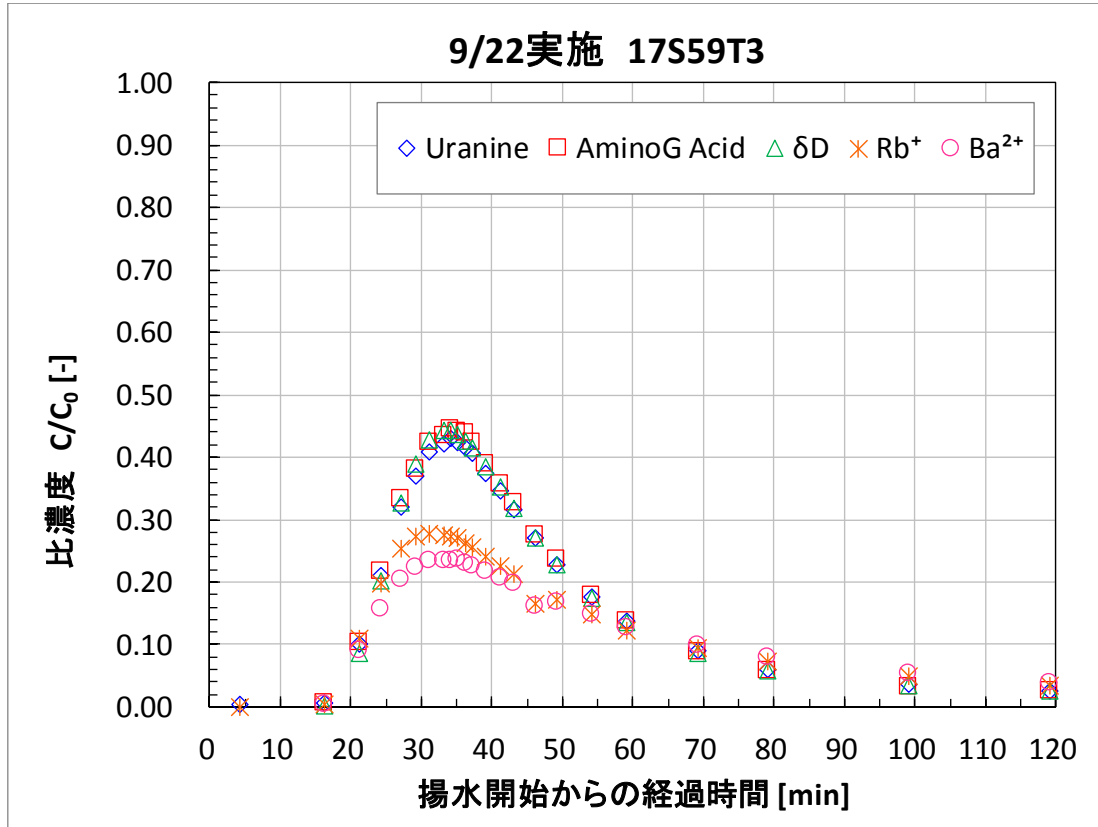


図 3.3.8-1 17S59T3 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）

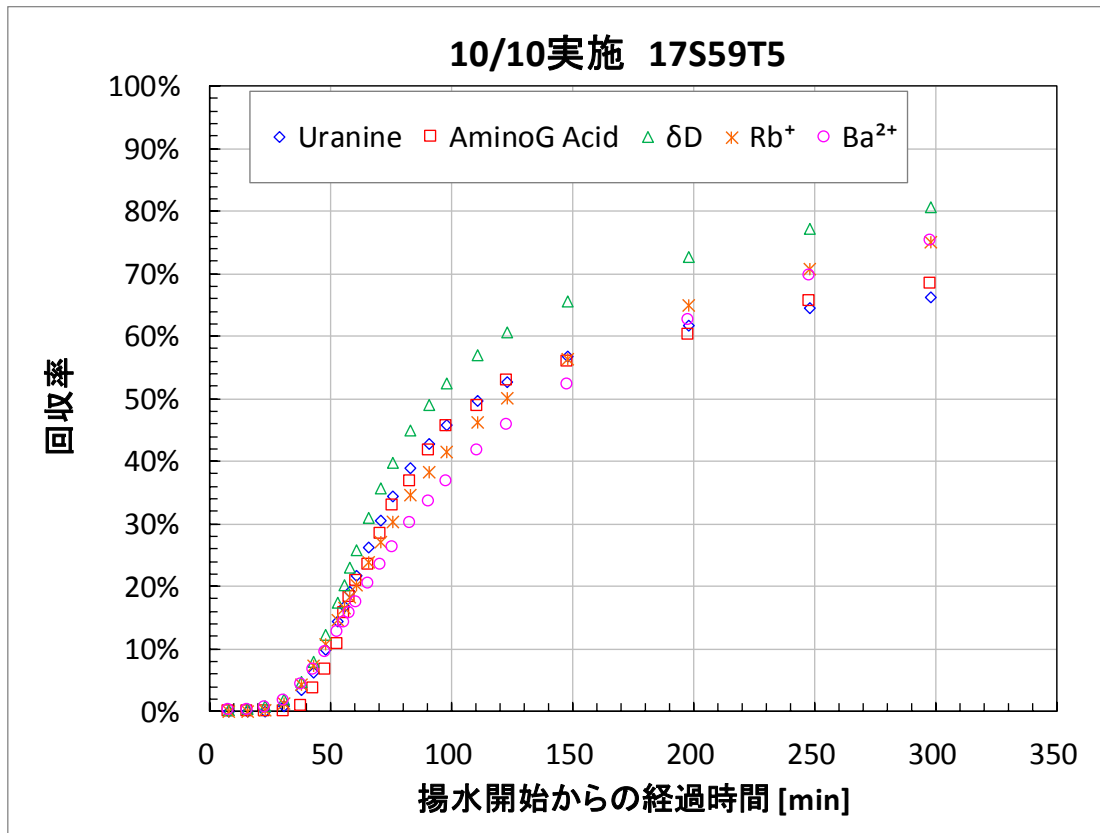
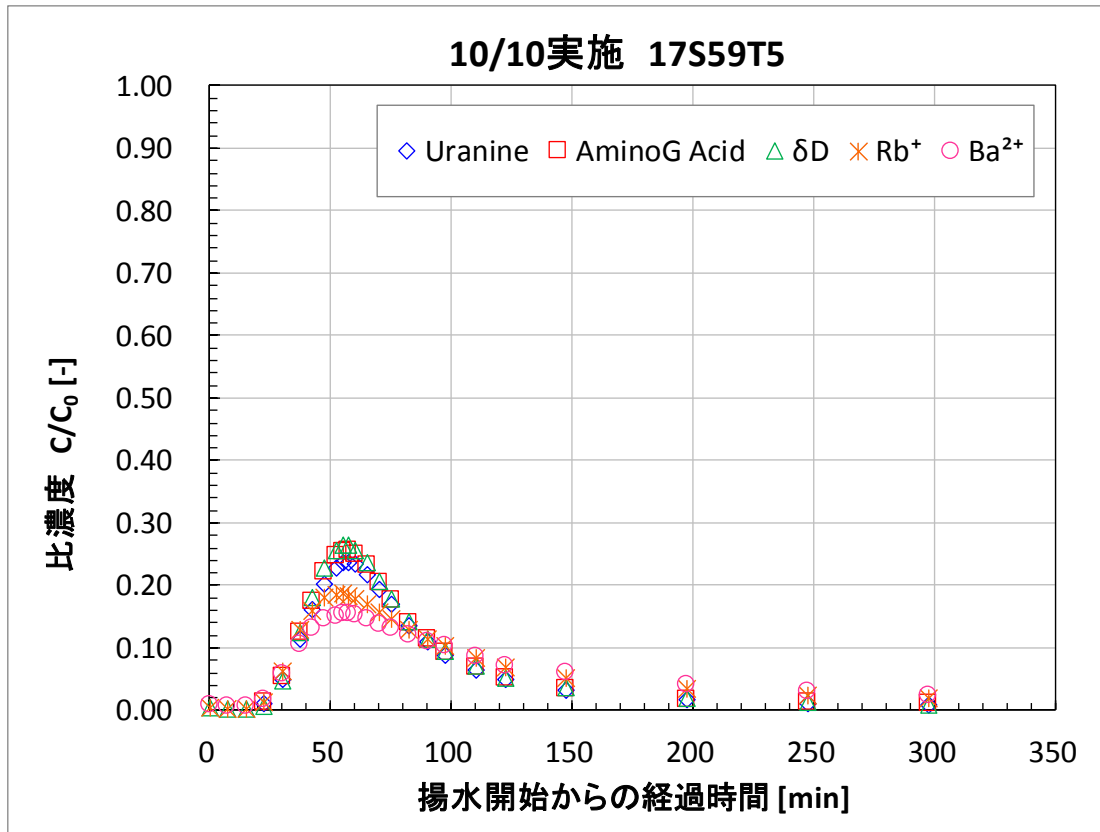


図 3.3.8-2 17S59T5 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）

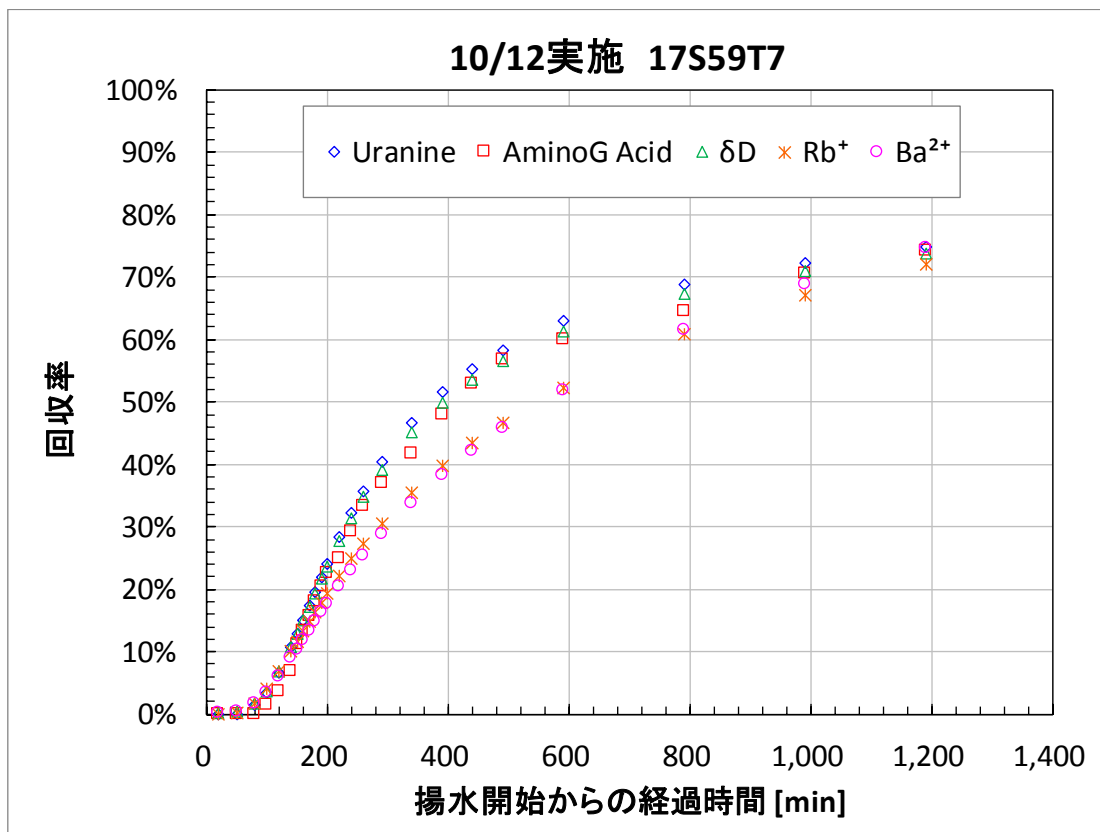
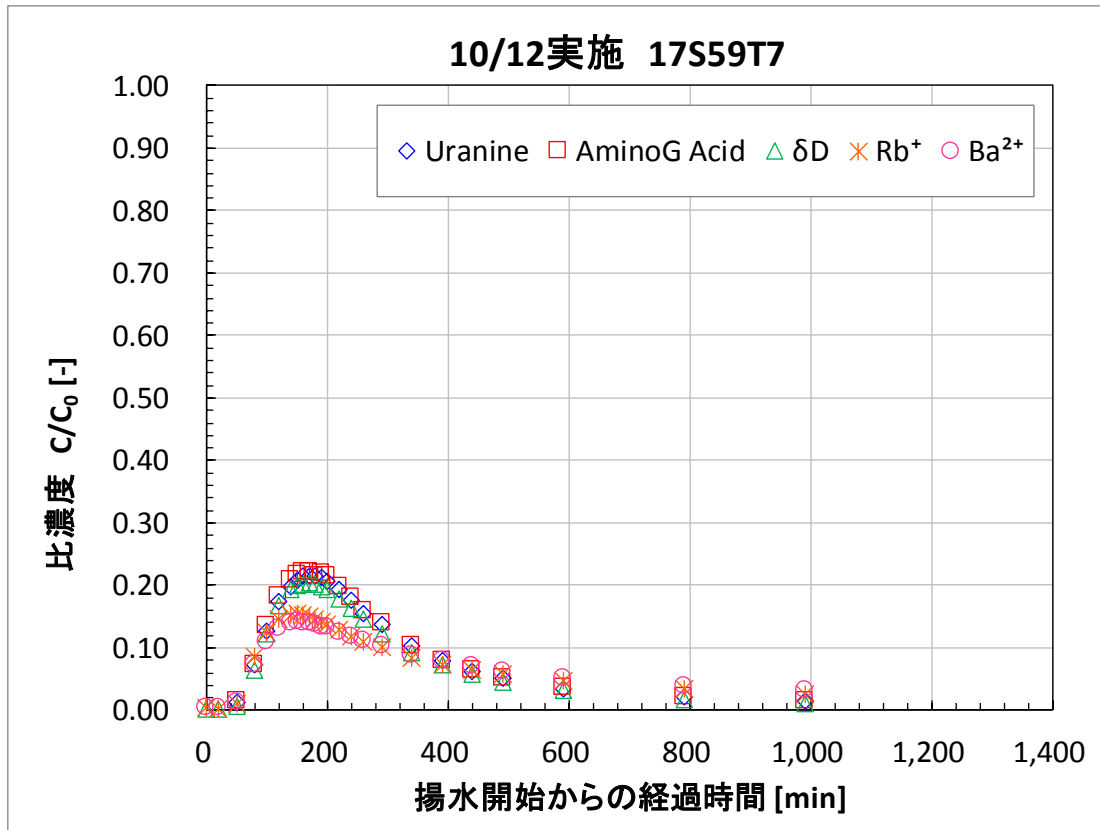


図 3. 3. 8-3 17S59T7 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）

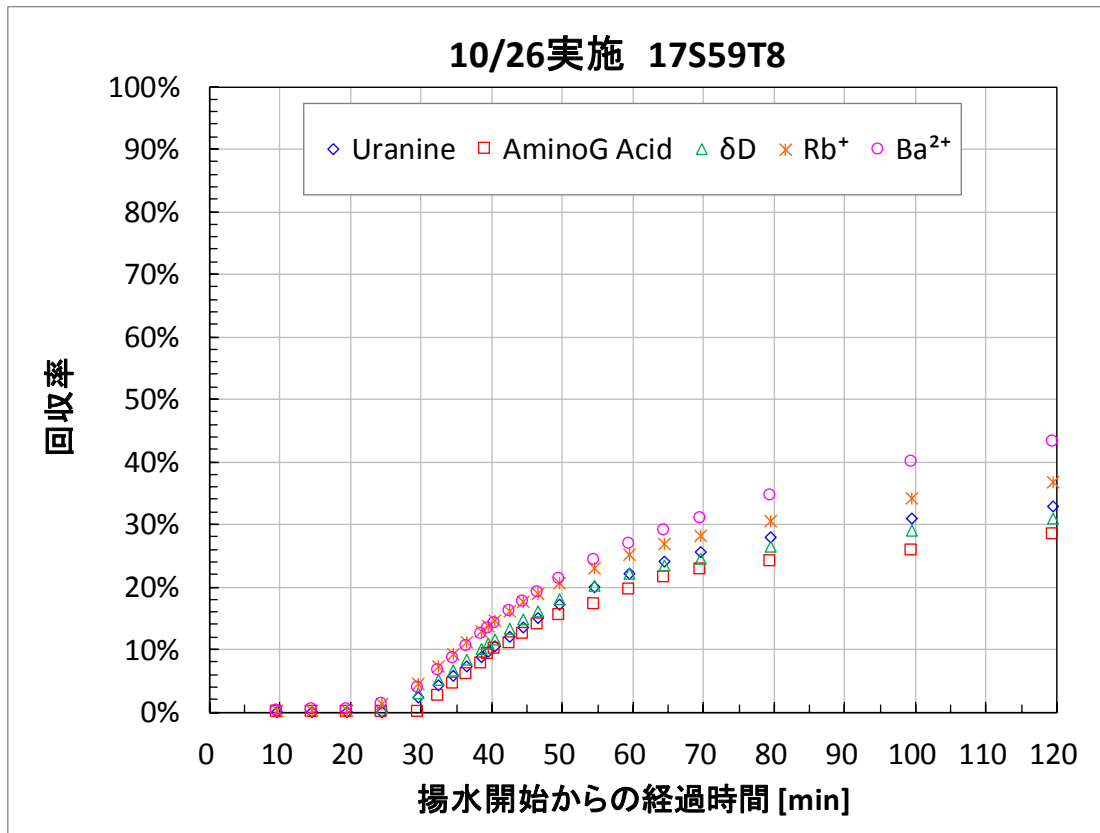
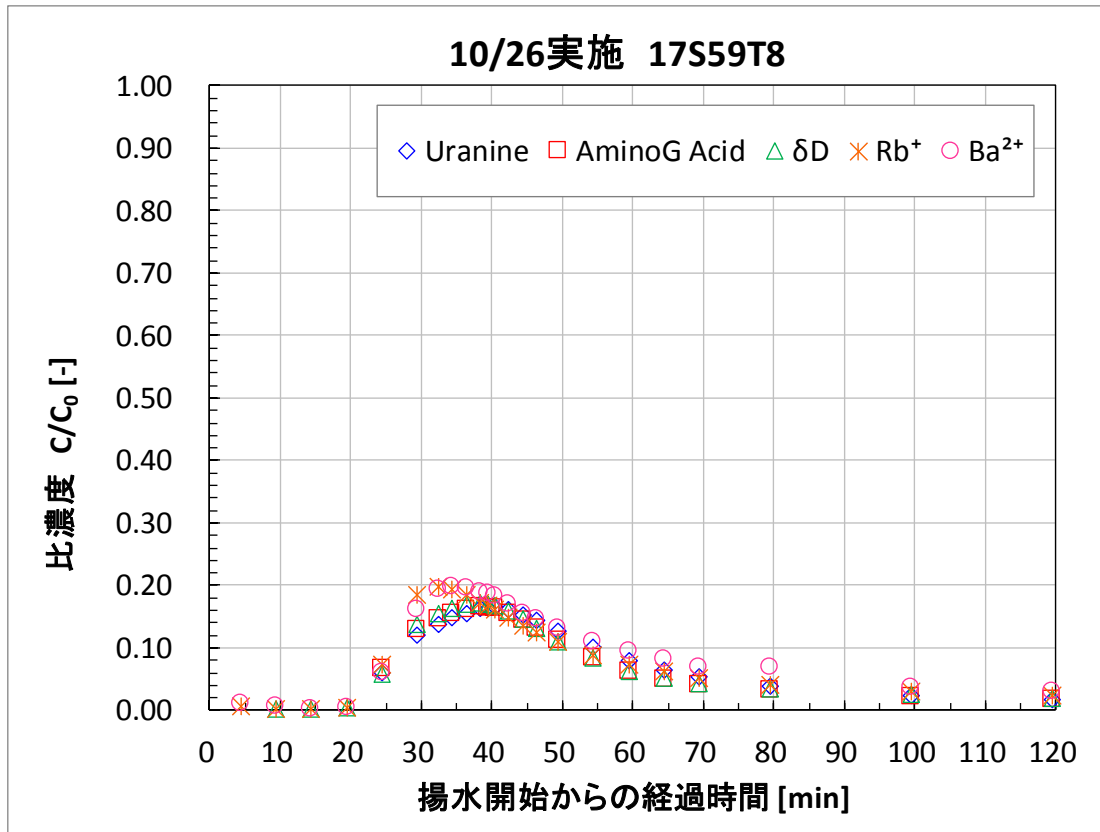


図 3. 3. 8-4 17S59T8 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）



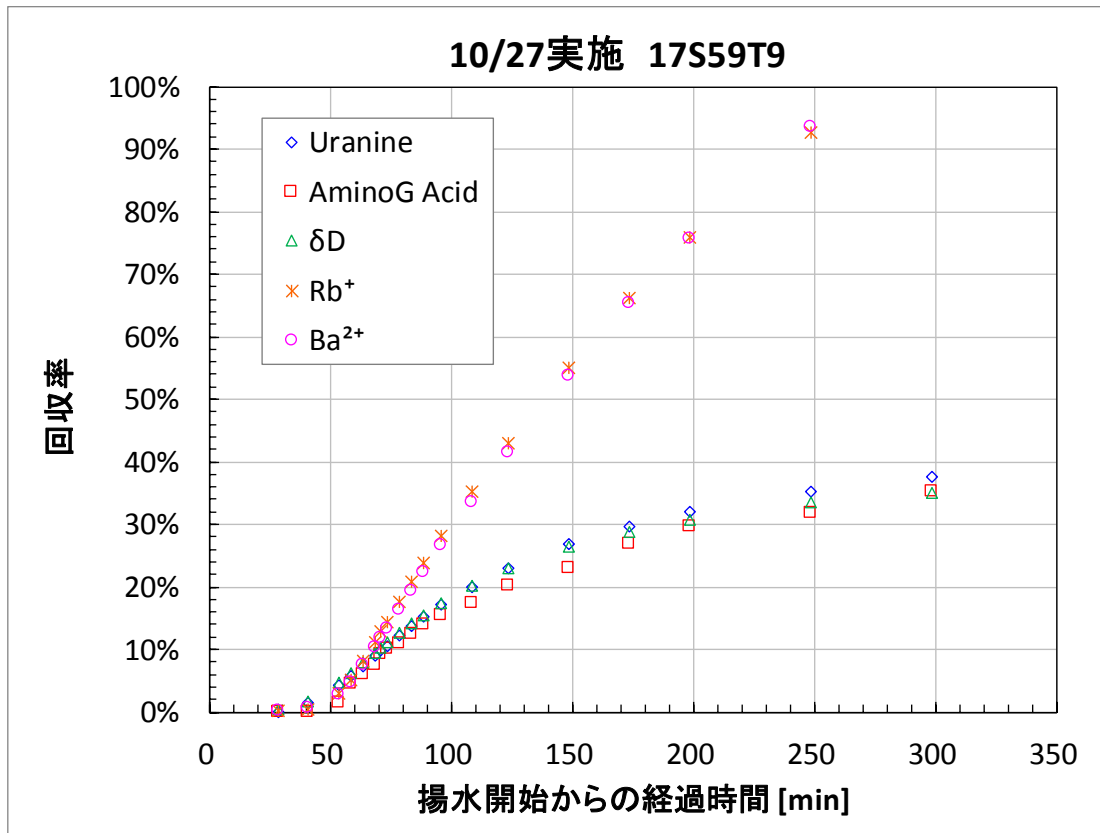
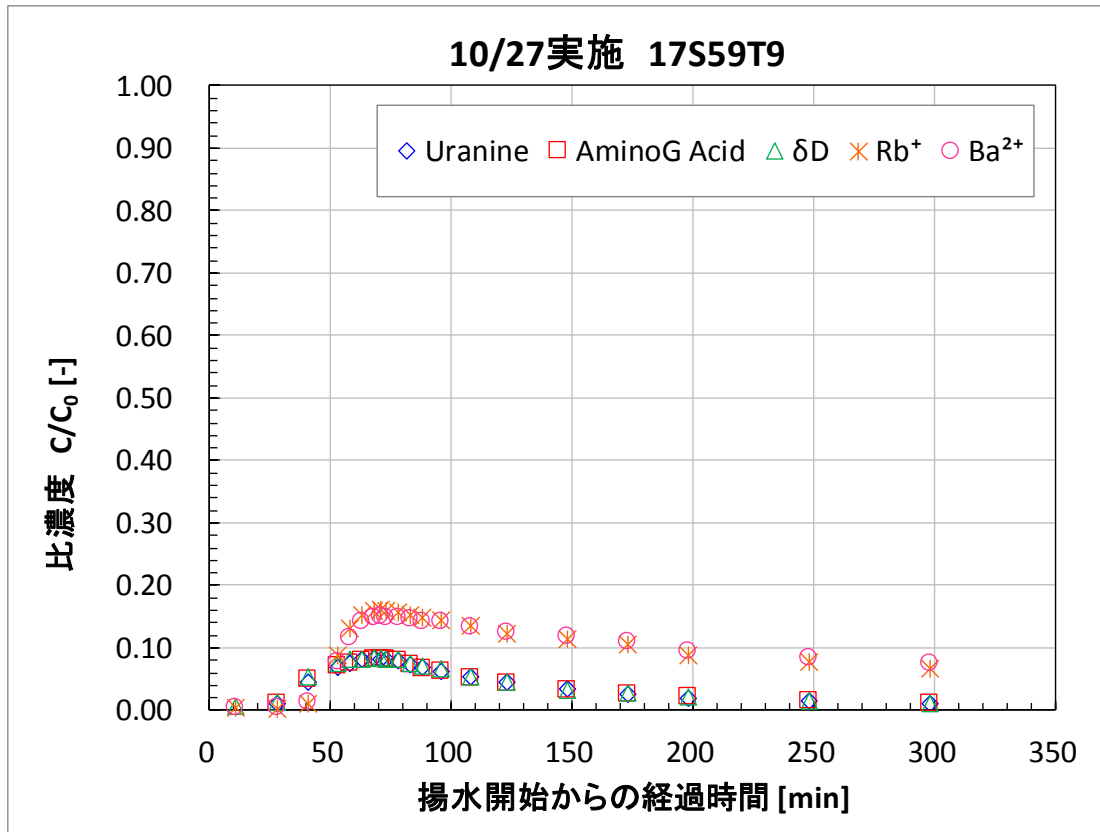


図 3.3.8-5 17S59T9 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）

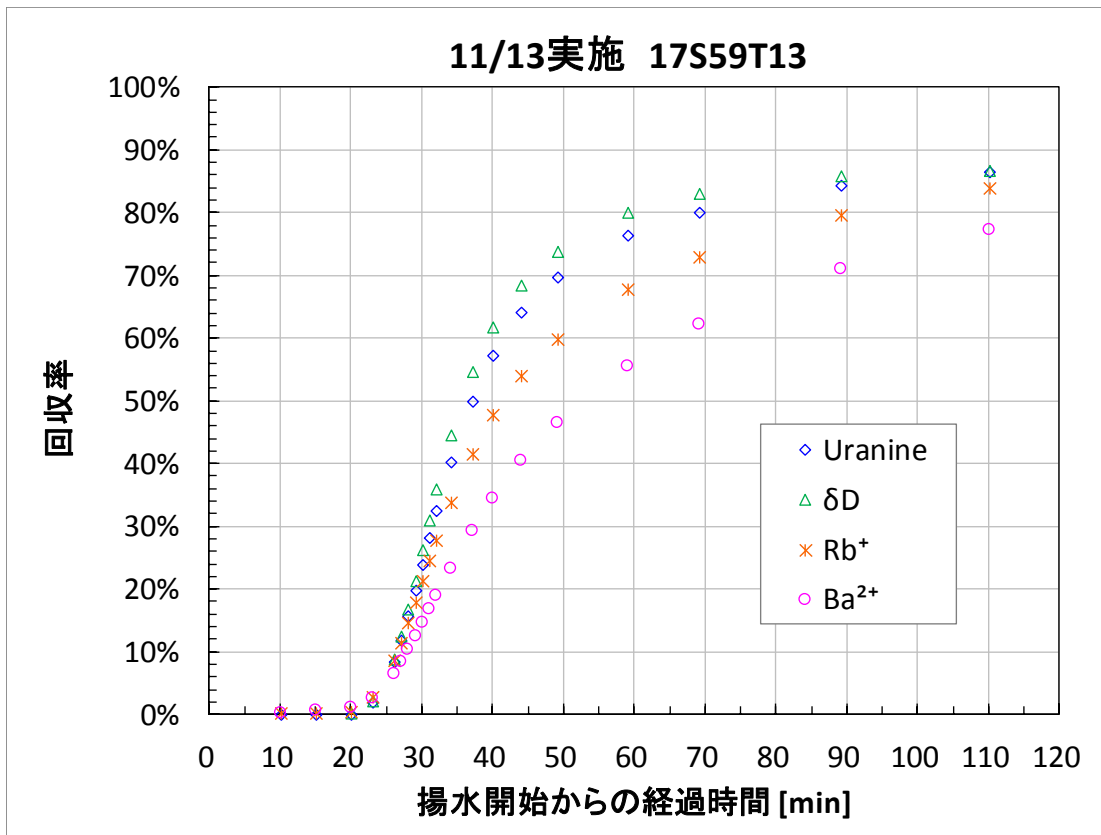
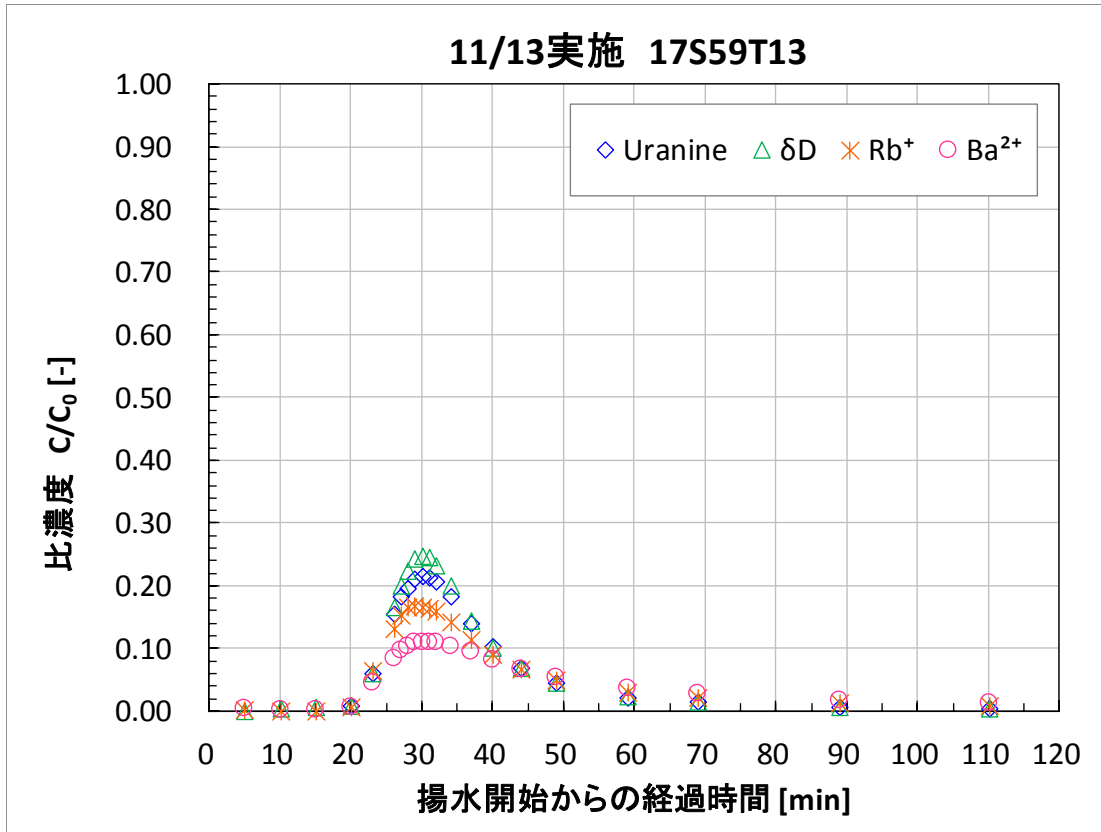


図 3.3.8-6 17S59T13 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）

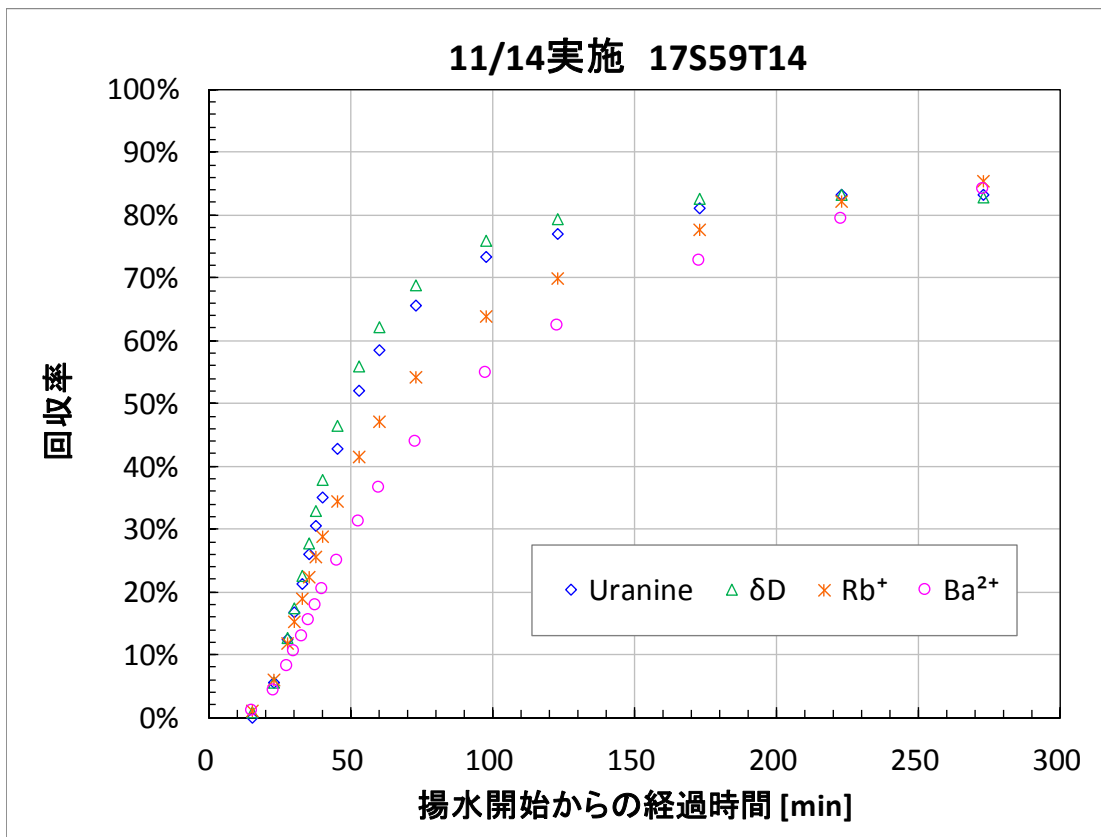
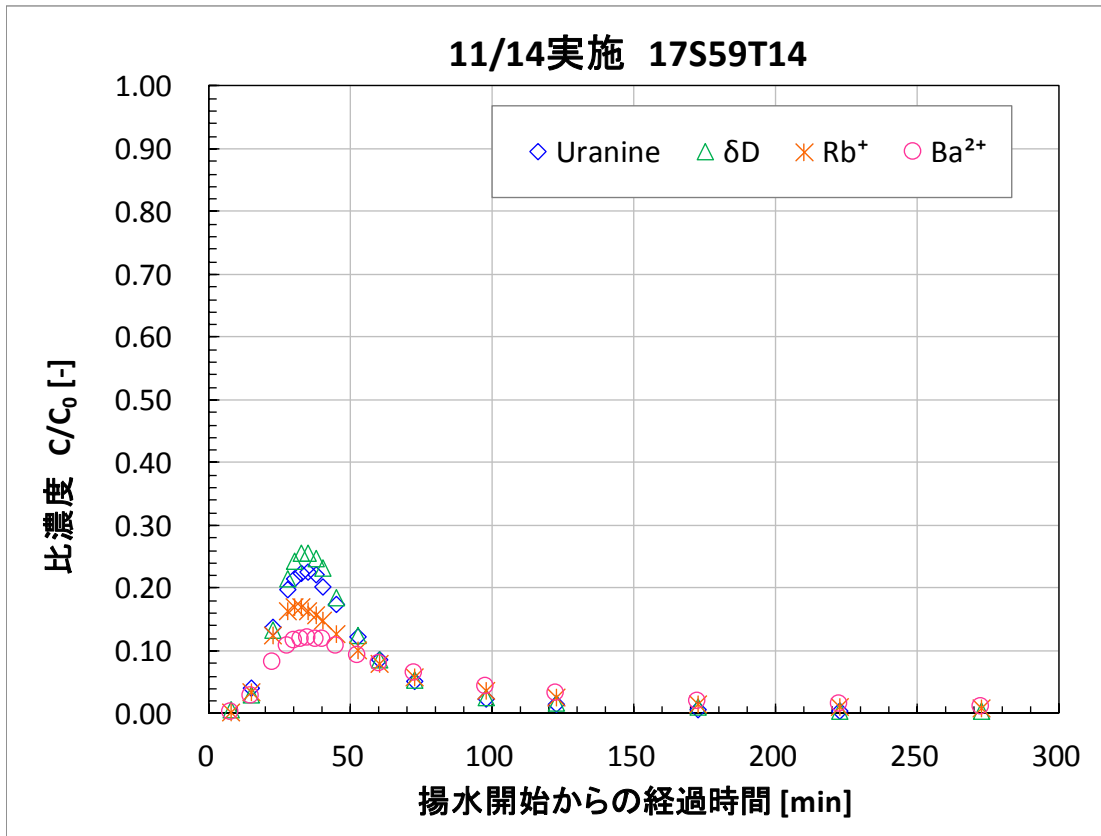


図 3.3.8-7 17S59T14 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）

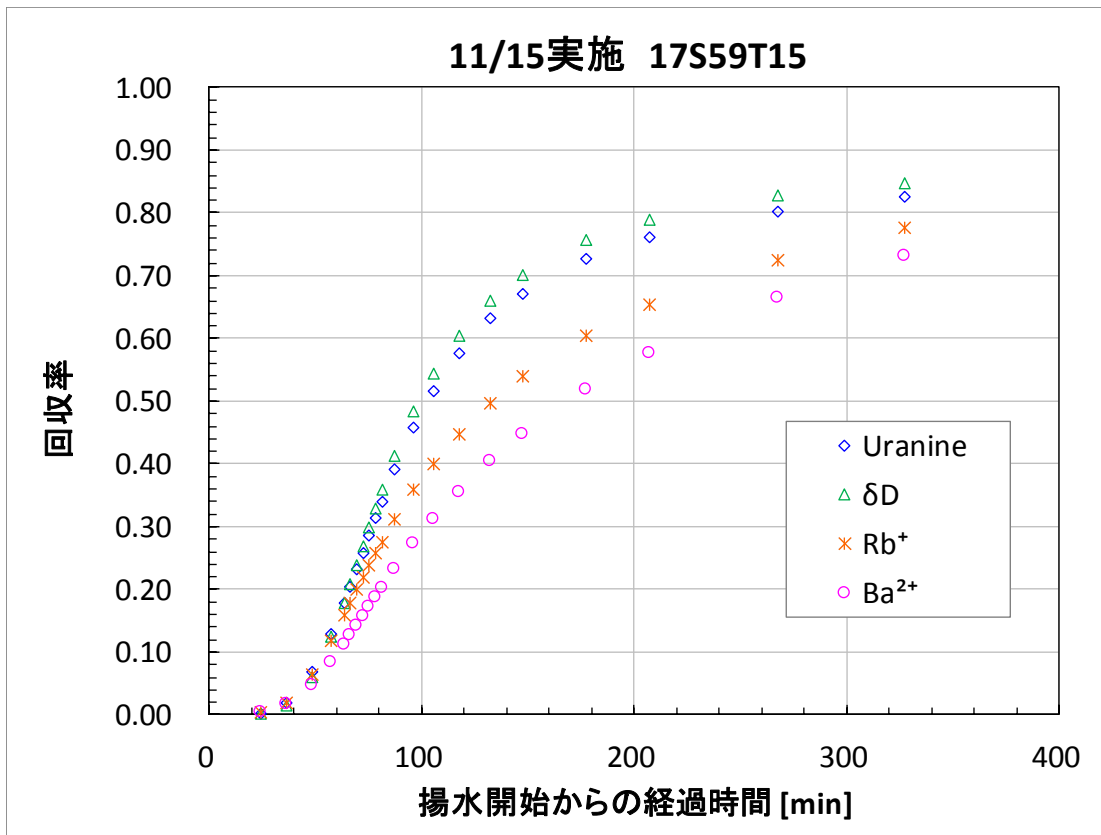
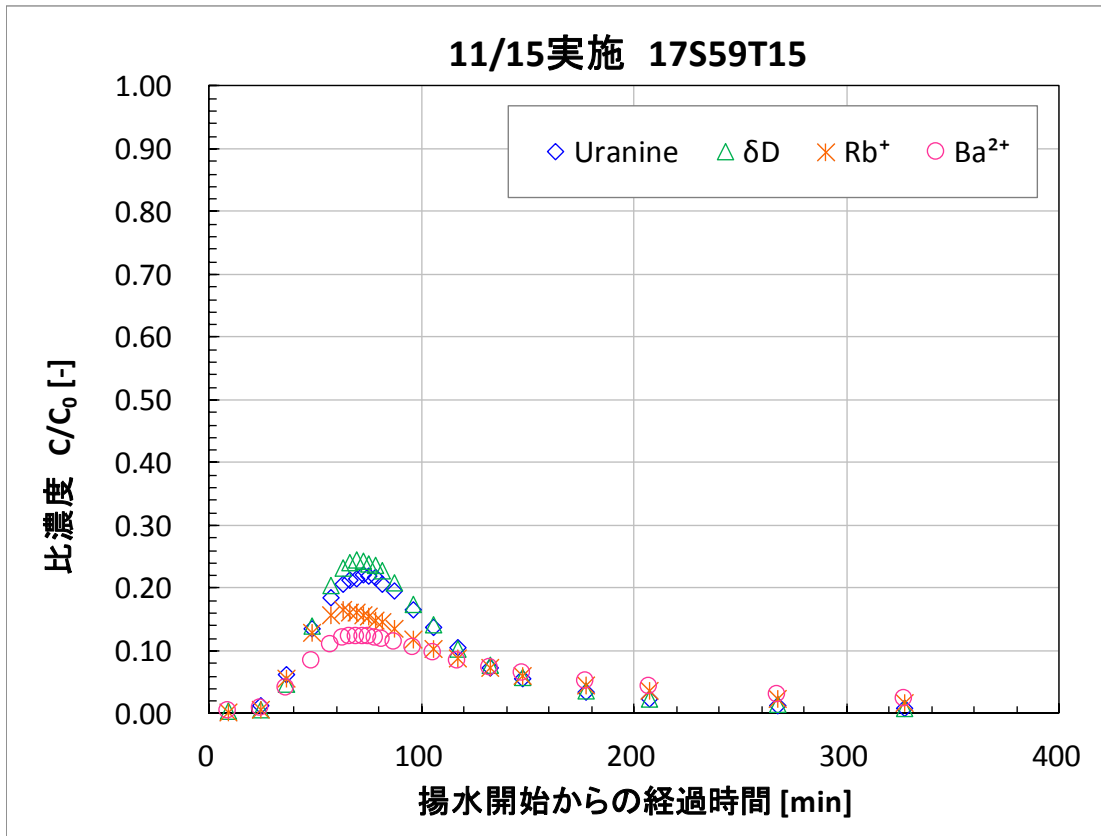


図 3.3.8-8 17S59T15 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）

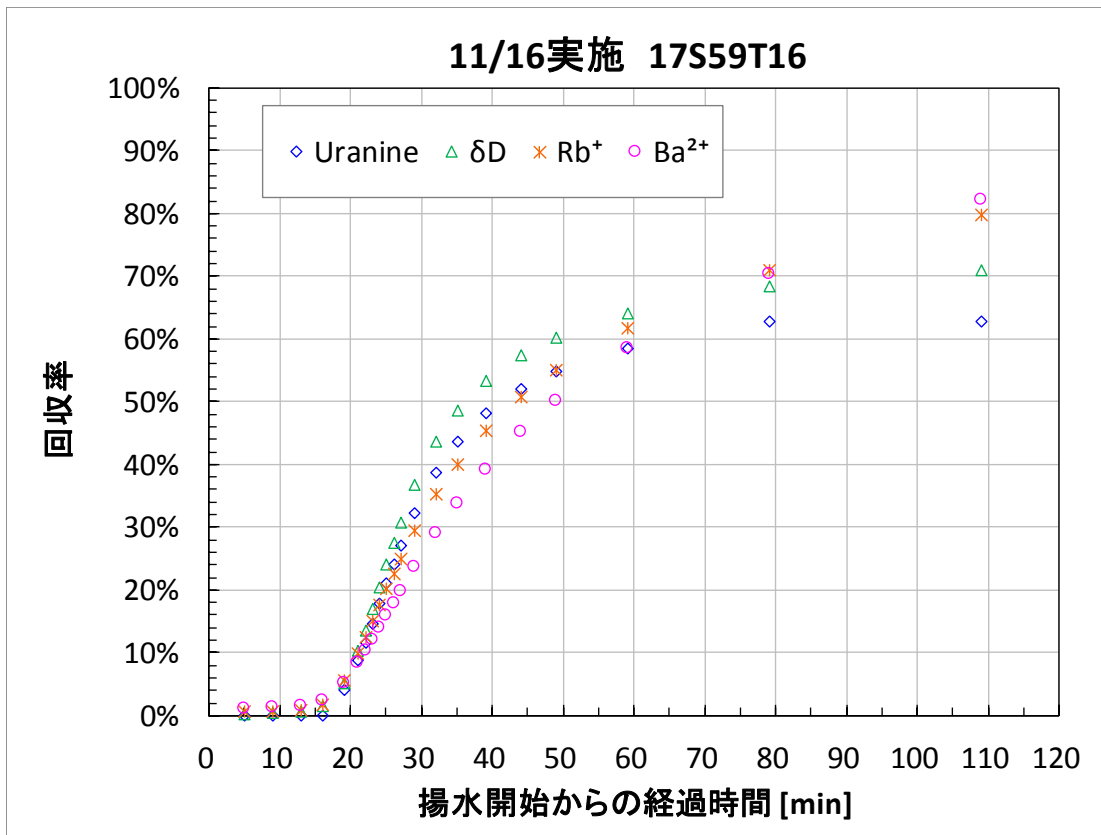
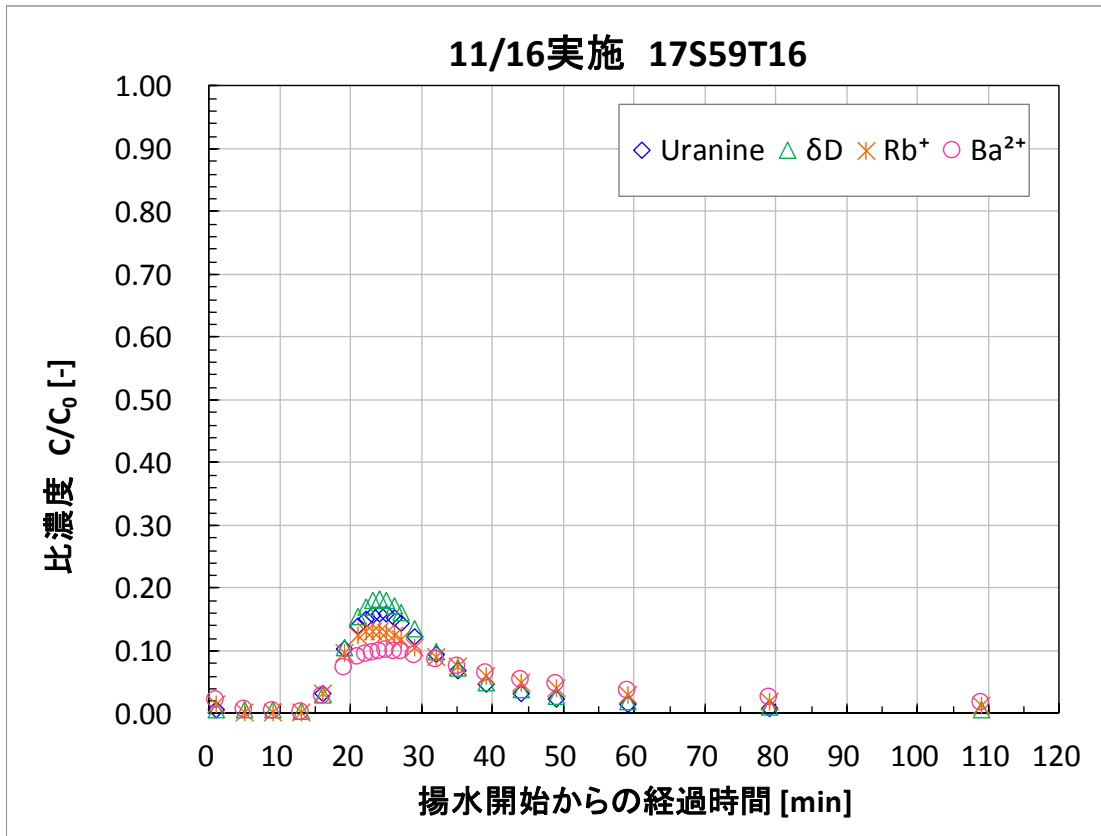


図 3.3.8-9 17S59T16 破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)

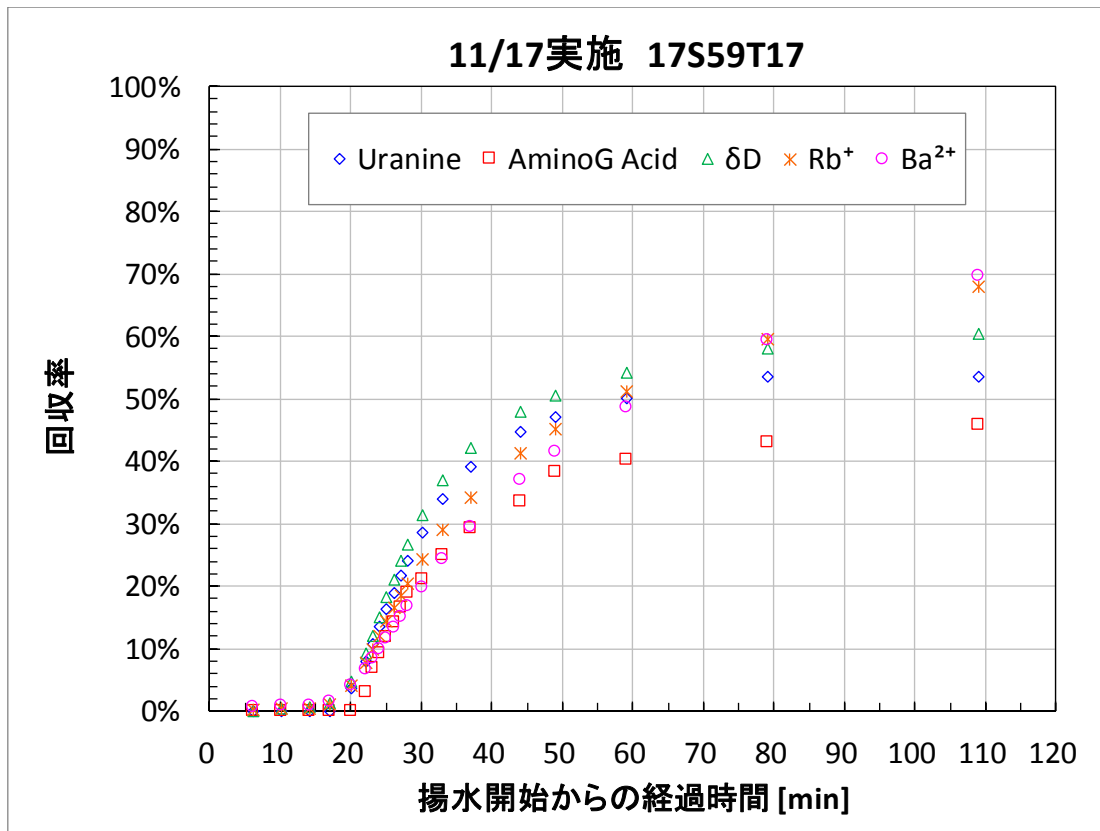
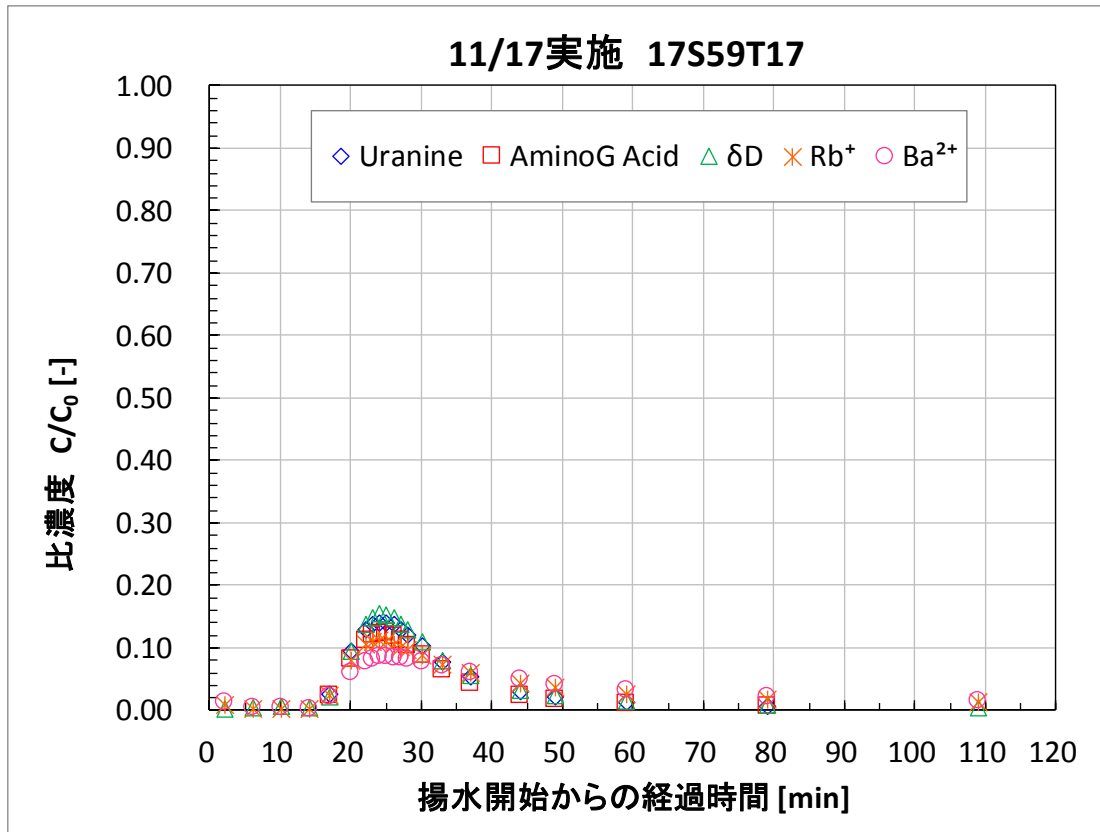


図 3.3.8-10 17S59T17 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）

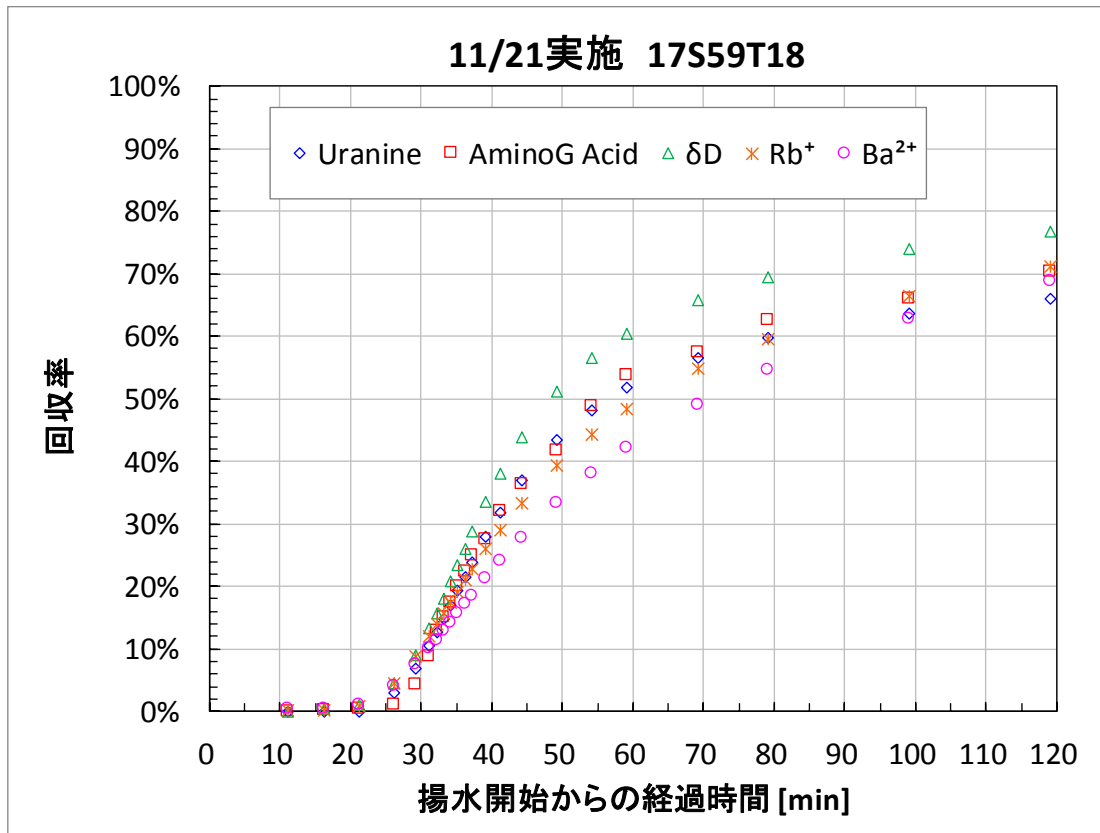
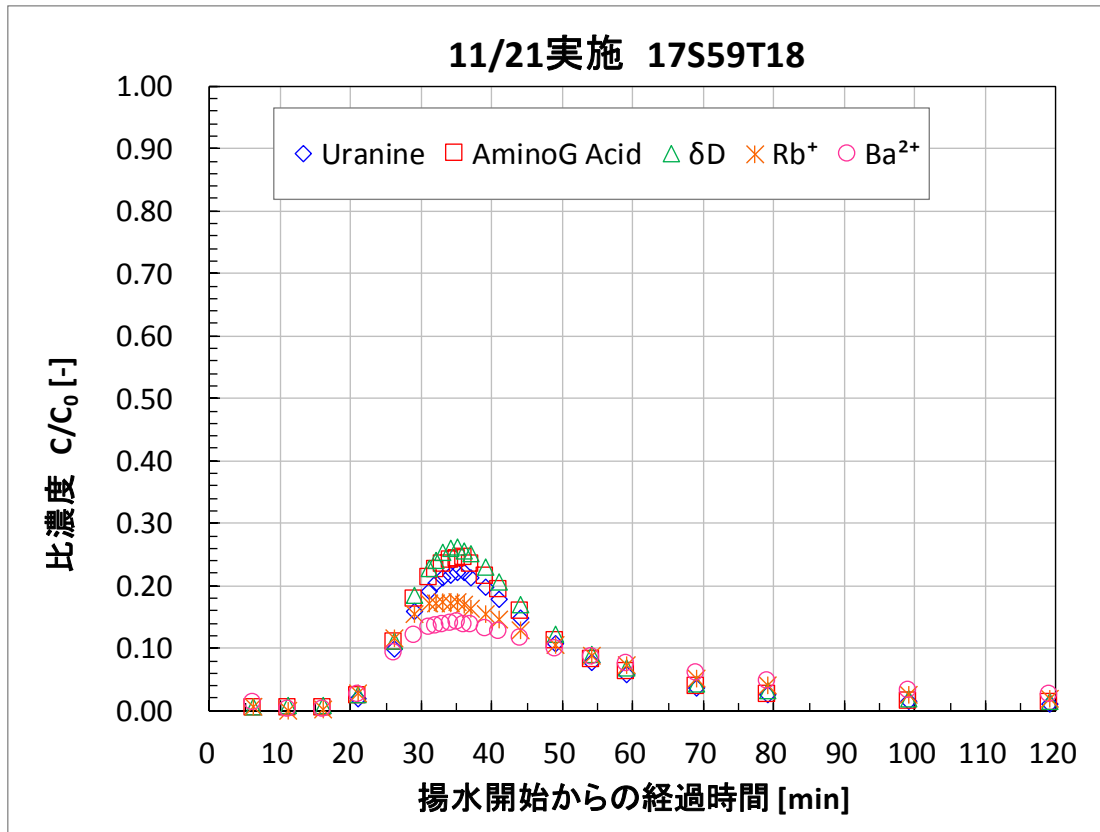


図 3.3.8-11 17S59T18 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）

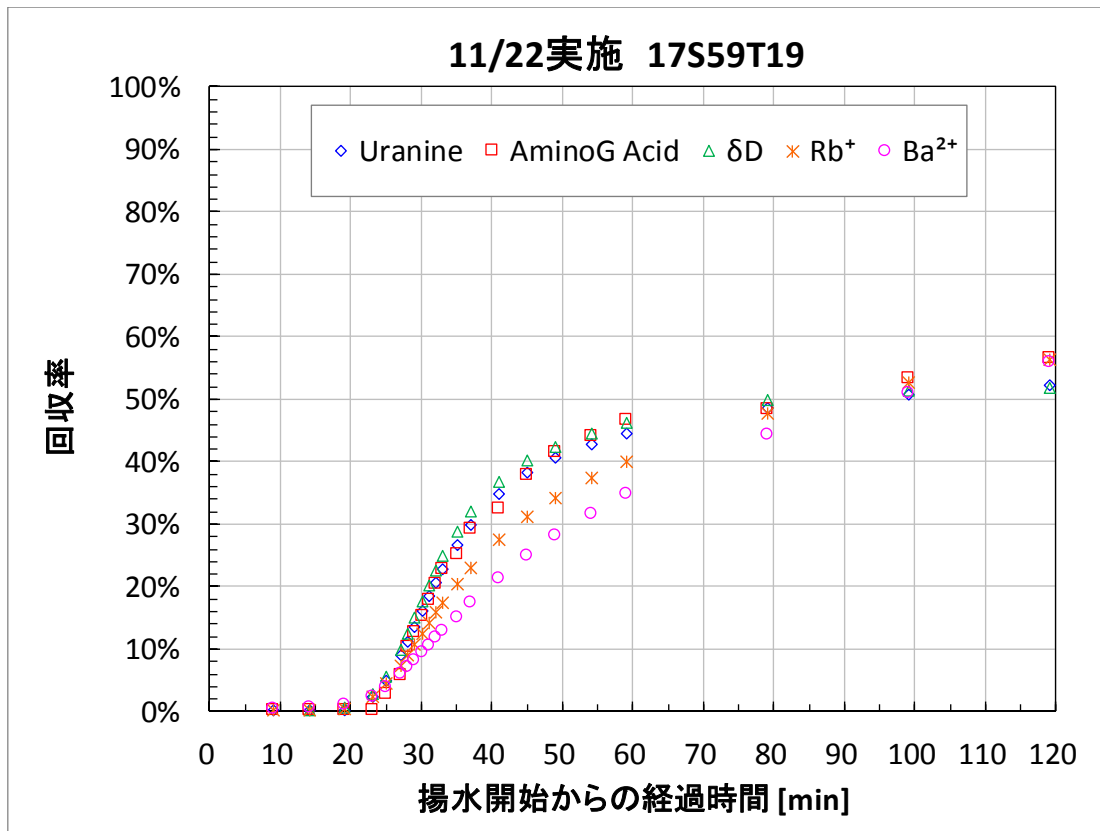
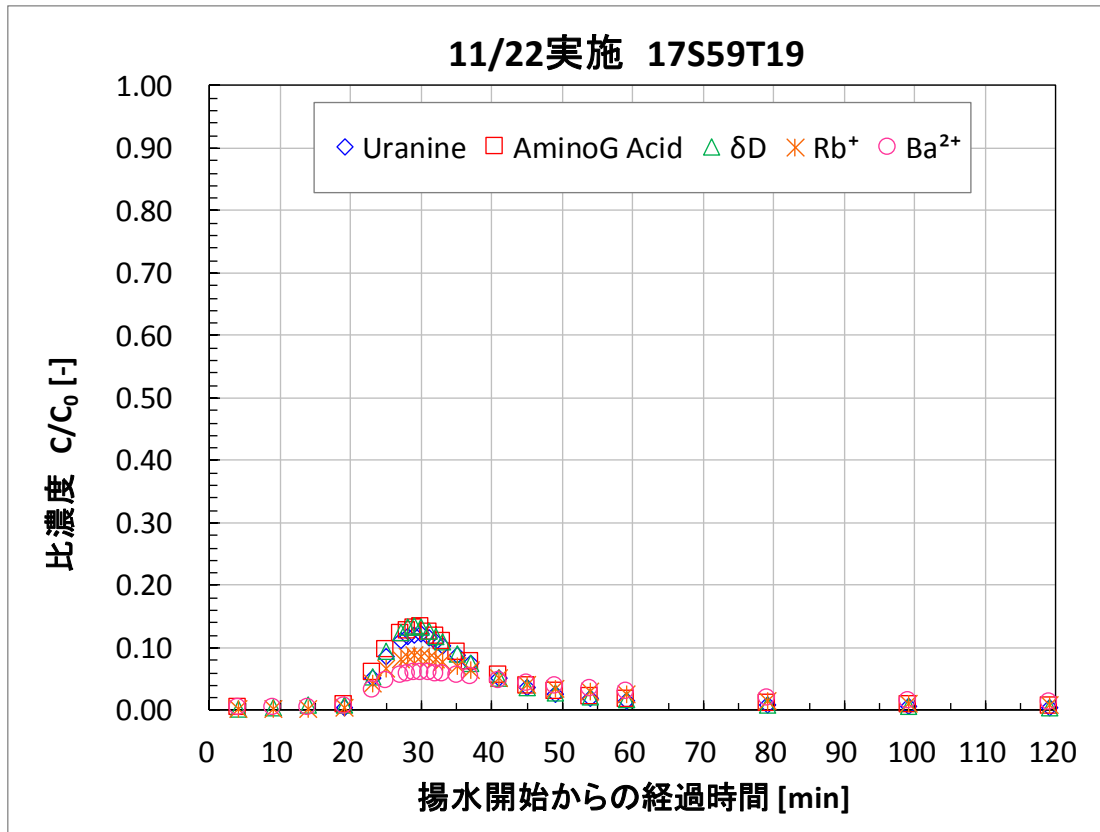


図 3.3.8-12 17S59T19 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）



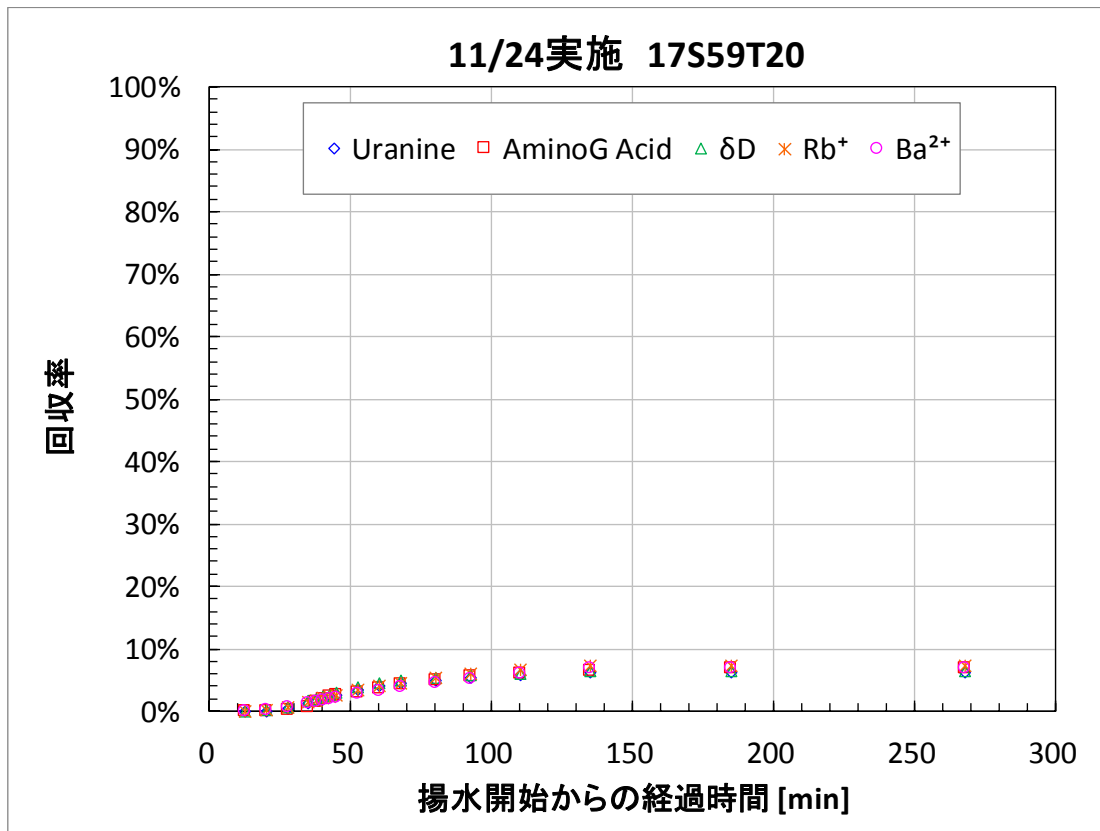
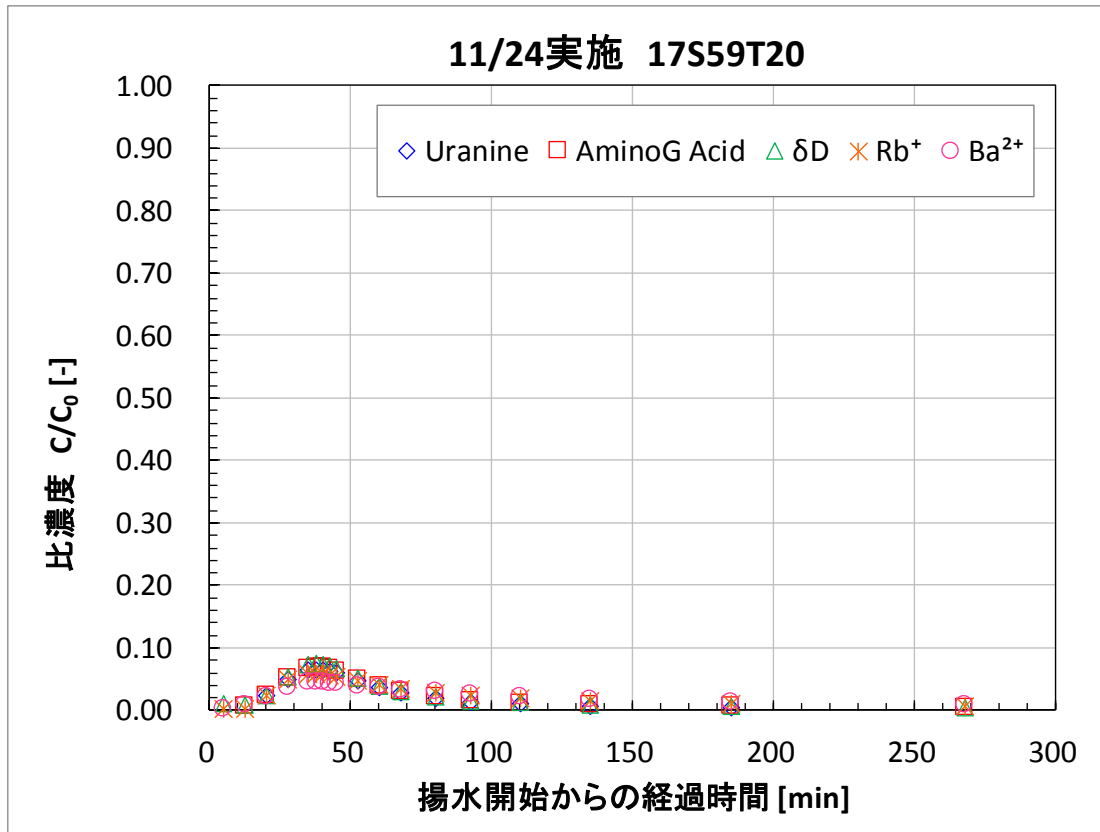


図 3.3.8-13 17S59T20 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）

### 3.3.8.2 孔間トレーサー試験の分析結果

#### ① 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(3.3.8-1)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(表 3.3.8-1)とし、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 3.3.8-6 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 3.3.8-7～表 3.3.8-9 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 3.3.8-6 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	ウラン	アミノ G 酸	$\delta D$	R b <sup>+</sup>	B a <sup>2+</sup>
	[ $\mu g/L$ ]	[ $\mu g/L$ ]	[%]	[ $\mu g/L$ ]	[ $\mu g/L$ ]
17W5952T1	0	0	-58.2	0	0
17W5952T2					
17W5952T3					
17W5952T4					
17W5952T5					
17W5952T6					
17W5952T7-9					
17W5952T10					
17W5952T11					
17W5952T12					
17W5952T13-15					
17W5952T16					
17W5952T17					
17W5952T18-20					

表 3.3.8-7 16MI59 号孔注水、15MI52 号孔揚水の孔間トレーサー試験の回収率

試験名		17W5952T1	17W5952T2	17W5952T3	17W5952T4	
分析試料ラベル名		W1	W2	W3	W4	
試験実施日		2017/9/25	2017/9/26	2017/9/27	2017/9/28	
対象孔		59→52 号孔	59→52 号孔	59→52 号孔	59→52 号孔	
試験条件	注水流量(設定値)	mL/min	25	10	5	5
	揚水流量(設定値)	mL/min	50	20	10	50
	注水流量(流量計平均)	mL/min	26.91	10.03	5.41	5.05
	揚水流量(流量計平均)	mL/min	49.54	20.43	13.34	50.74
	ダイポール比	-	1.84	2.04	2.47	10.05
	定常場の形成		9/25 8:08	9/26 8:21	9/27 8:08	9/28 8:05
	トレーサー注入開始		9/25 8:30	9/26 9:00	9/27 8:30	9/28 8:40
	チェイサー注入開始		9/25 8:40	9/26 10:00	9/27 9:30	9/28 9:40
	サンプリング開始		9/25 8:50	9/26 10:00	9/27 10:00	9/28 9:20
	サンプリング停止		9/25 10:50	9/26 16:00	9/27 16:00	9/28 16:00
	トレーサー注入時間	min	10	60	60	60
	トレーサー量	L	0.269	0.602	0.325	0.303
原液濃度 設定値	揚水(サンプリング)時間	min	120	360	360	400
	ウラニン	mg/L	3.00	3.00	3.00	3.00
	アミノ G 酸	mg/L	3.00	3.00	3.00	3.00
	重水素	mg/L	-	-	-	-
	ルビジウム	mg/L	-	-	-	-
バリウム	mg/L	-	-	-	-	
C3 センサーピーク時刻		-	9/25 9:14	9/26 11:10	9/27 11:42	9/28 10:43
回収率-1 (回収時間)	ウラニン	-	66.38% (120min)	43.80% (240min)	35.89% (360min)	10.94% (360min)
	アミノ G 酸	-	67.52% (120min)	45.67% (240min)	37.62% (360min)	13.28% (360min)
	重水素	-	-	-	-	-
	ルビジウム	-	-	-	-	-
	バリウム	-	-	-	-	-
回収率-2 (回収時間)	ウラニン	-	67.30% (240min)	44.20% (360min)	-	-
	アミノ G 酸	-	68.46% (240min)	47.07% (360min)	-	-
	重水素	-	-	-	-	-
	ルビジウム	-	-	-	-	-
	バリウム	-	-	-	-	-

表 3.3.8-8 15MI52 号孔注水、16MI59 号孔揚水の孔間トレーサー試験の回収率(1)

試験名			17W5259T5	17W5259T6	17W5259T7-9	17W5259T10	17W5259T11	
分析試料ラベル名			W5	W6	W7,W8,W9	W10	W11	
試験実施日			2017/9/29	2017/10/2	2017/10/3~4	2017/10/16	2017/10/17	
対象孔			52→59 号孔	52→59 号孔	52→59 号孔	52→59 号孔	52→59 号孔	
試験条件	注水流量(設定値)	mL/min	5	5	5	4	2.5	
	揚水流量(設定値)	mL/min	50	30	30	20	15.0	
	注水流量(流量計平均)	mL/min	5.12	5.07	5.33	3.35	2.65	
	揚水流量(流量計平均)	mL/min	49.75	30.78	30.50	22.55	15.47	
	ダイボール比	-	9.72	6.07	5.72	6.73	5.84	
	定常場の形成		9/29 8:05	10/2 8:15	10/3 8:05	10/16 8:30	10/17 9:00	
	トレーサー注入開始		9/29 10:00	10/2 8:50	10/3 8:50	10/16 9:00	10/17 9:30	
	チェイサー注入開始		9/29 11:00	10/2 9:50	10/3 14:50	10/16 9:30	10/17 10:00	
	サンプリング開始		9/29 10:40	10/2 9:40	10/3 9:30	10/16 10:00	10/17 11:04	
	サンプリング停止		9/29 16:40	10/2 15:40	10/4 16:00	10/16 16:00	10/17 16:20	
	トレーサー注入時間	min	60	60	360	30	30	
	トレーサー量	L	0.307	0.304	1.919	0.101	0.079	
	揚水(サンプリング)時間	min	360	360	1830	360	316	
原液濃度 設定値	ウラニン	mg/L	3.00	3.00	3.00	9.00	12.00	
	アミノ G 酸	mg/L	3.00	3.00	3.00	9.00	12.00	
	重水素	mg/L	-	-	0.10	-	-	
	ルビジウム	mg/L	-	-	2.00	-	-	
	バリウム	mg/L	-	-	1.20	-	-	
G3 センサーピーク時刻			-	9/29 11:42	10/2 10:52	10/3 15:43	10/16 11:14	10/17 12:17
回収率-1 (回収時間)	ウラニン	-	97.69% (360min)	93.07% (360min)	88.23% (1440min)	93.31% (360min)	93.80% (360min)	
	アミノ G 酸	-	112.14% (360min)	97.92% (360min)	91.98% (1440min)	96.77% (360min)	95.32% (360min)	
	重水素	-	-	-	96.95% (1440min)	-	-	
	ルビジウム	-	-	-	24.12% (360min)	-	-	
	バリウム	-	-	-	9.09% (360min)	-	-	
回収率-2 (回収時間)	ウラニン	-	-	-	-	-	-	
	アミノ G 酸	-	-	-	-	-	-	
	重水素	-	-	-	-	-	-	
	ルビジウム	-	-	-	78.59% (1440min)	-	-	
	バリウム	-	-	-	60.61% (1440min)	-	-	
回収率-3 (回収時間)	ウラニン	-	-	-	-	-	-	
	アミノ G 酸	-	-	-	-	-	-	
	重水素	-	-	-	-	-	-	
	ルビジウム	-	-	-	86.31% (1830min)	-	-	
	バリウム	-	-	-	66.82% (1830min)	-	-	

表 3.3.8-9 15MI52 号孔注水、16MI59 号孔揚水の孔間トレーサー試験の回収率(2)

試験名			17W5259T12	17W5259T13-15	17W5259T16	17W5259T17	17W5259T18-20	
分析試料ラベル名			W12	W13,W14,W15	W16	W17	W18,W19,W20	
試験実施日			2017/10/18 ~19	2017/10/19 ~20	2017/11/6 ~7	2017/11/7 ~8	2017/11/8~ 10	
対象孔			52→59 号孔	52→59 号孔	52→59 号孔	52→59 号孔	52→59 号孔	
試験条件	注水流量(設定値)	mL/min	1.7	1.7	1.0	1.3	1.3	
	揚水流量(設定値)	mL/min	10.0	10.0	6.0	8.0	10.0	
	注水流量(流量計平均)	mL/min	1.94	1.73	1.59	1.44	1.40	
	揚水流量(流量計平均)	mL/min	10.71	10.77	5.61	8.72	9.44	
	ダイボール比	-	5.52	6.23	3.53	6.06	6.74	
	定常場の形成		10/18 8:36	10/19 8:10	11/6 10:11	11/7 9:56	11/8 10:30	
	トレーサー注入開始		10/18 9:45	10/19 8:30	11/6 10:40	11/7 10:30	11/8 10:40	
	チェイサー注入開始		10/18 10:30	10/19 14:30	11/6 11:20	11/7 11:00	11/8 15:40	
	サンプリング開始		10/18 11:40	10/19 10:55	11/6 14:00	11/7 13:00	11/8 13:00	
	サンプリング停止		10/19 7:40	10/20 15:55	11/7 9:00	11/8 5:00	11/10 9:00	
	トレーサー注入時間	min	45	360	40	30	300	
	トレーサー量	L	0.087	0.623	0.064	0.043	0.420	
原液濃度 設定値	ウラン	mg/L	12.00	3.00	22.50	22.50	3.00	
	アミノ G 酸	mg/L	12.00	3.00	22.50	22.50	-	
	重水素	mg/L	-	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	
C3 センサーピーク時刻			-	10/18 13:40	10/19 17:21	11/6 15:20	11/7 15:43	11/8 18:47
回収率-1 (回収時間)	ウラン	-	96.58% (1200min)	110.80% (1440min)	24.99% (1140min)	86.57% (1200min)	111.69% (1200min)	
	アミノ G 酸	-	102.10% (1200min)	114.25% (1440min)	23.38% (1140min)	88.93% (1200min)	-	
	重水素	-	-	121.73% (1740min)	-	-	97.31% (1200min)	
	ルビジウム	-	-	62.51% (1440min)	-	-	109.54% (2640min)	
	バリウム	-	-	33.70% (1440min)	-	-	74.47% (2640min)	
回収率-2 (回収時間)	ウラン	-	-	113.91% (1740min)	-	-	-	
	アミノ G 酸	-	-	118.88% (1740min)	-	-	-	
	重水素	-	-	-	-	-	-	
	ルビジウム	-	-	74.43% (1740min)	-	-	-	
	バリウム	-	-	43.64% (1740min)	-	-	-	
回収率-3 (回収時間)	ウラン	-	-	-	-	-	-	
	アミノ G 酸	-	-	-	-	-	-	
	重水素	-	-	-	-	-	-	
	ルビジウム	-	-	-	-	-	-	
	バリウム	-	-	-	-	-	-	

②室内分析結果における破過曲線

破過曲線の濃度は、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を基に算出した。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 3.3.8-10 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(3.3.8-2)に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 3.3.8-14～図 3.3.8-27 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 3.3.8-10 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
17W5952T1	120 本	60 秒	30 秒
17W5952T2	120 本	120 秒	40 秒
17W5952T3	120 本	180 秒	40 秒
17W5952T4	120 本	180 秒	40 秒
17W5952T5	120 本	180 秒	40 秒
17W5952T6	120 本	180 秒	40 秒
17W5952T7-9	254 本	180 秒 (1~120 本)	45 秒
		600 秒 (121~240 本)	
		1200 秒 (241~254 本)	
17W5952T10	120 本	240 秒	50 秒
17W5952T11	120 本	240 秒	50 秒
17W5952T12	120 本	300 秒	75 秒
17W5952T13-15	243 本	180 秒 (1~112 本)	75 秒
		600 秒 (113~232 本)	
		1200 秒 (233~243 本)	
17W5952T16	120 本	540 秒	540 秒
17W5952T17	120 本	480 秒	480 秒
17W5952T18-20	272 本	180 秒 (1~60 本)	80 秒
		540 秒 (61~180 本)	
		900 秒 (181 本~272)	

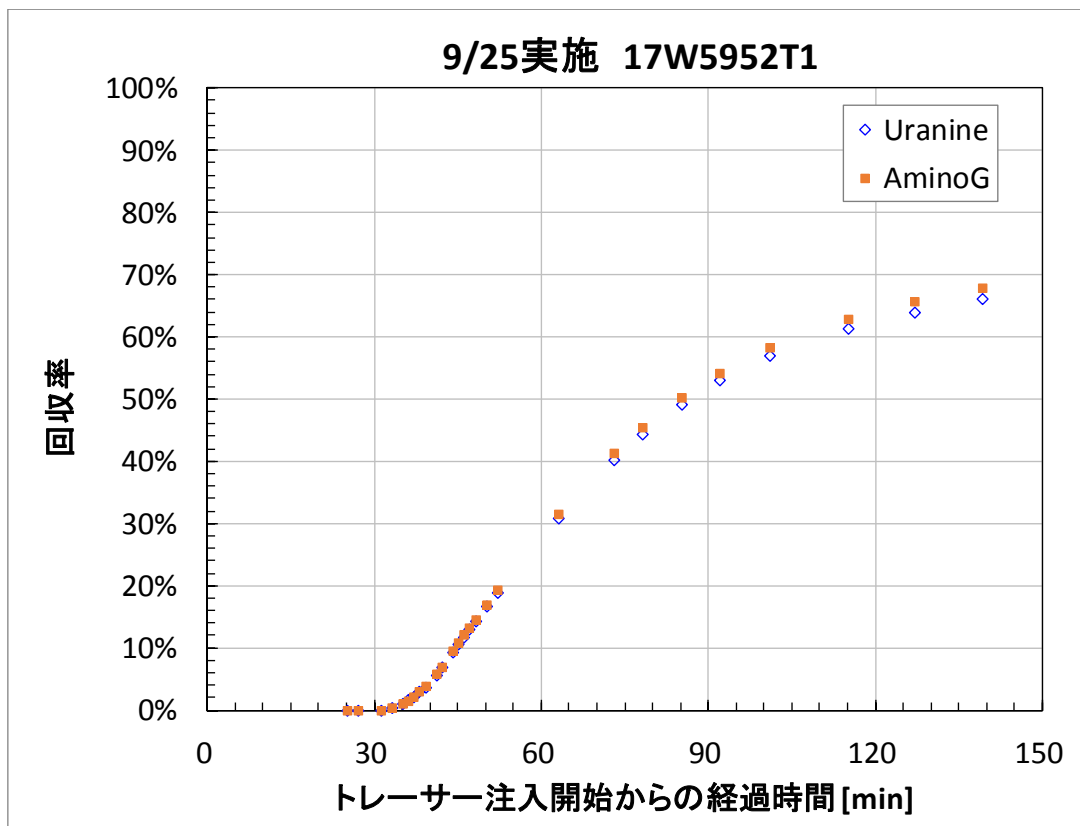
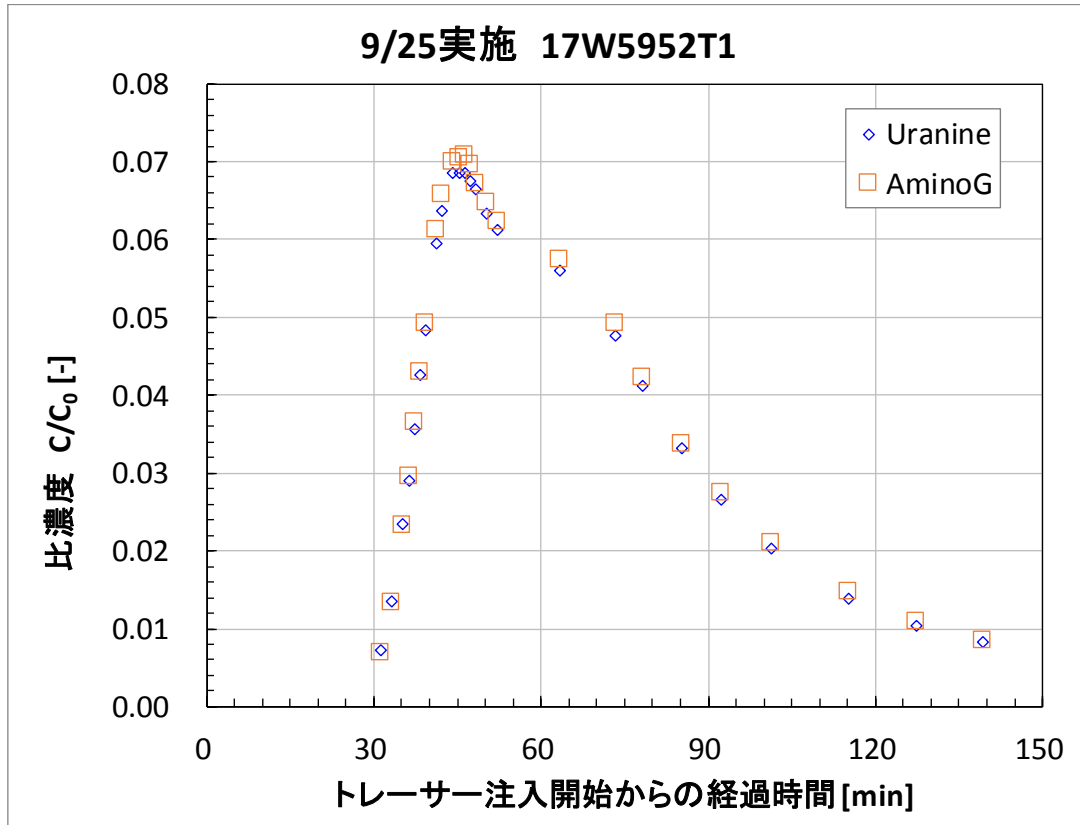


図 3.3.8-14 17W5952T1 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）

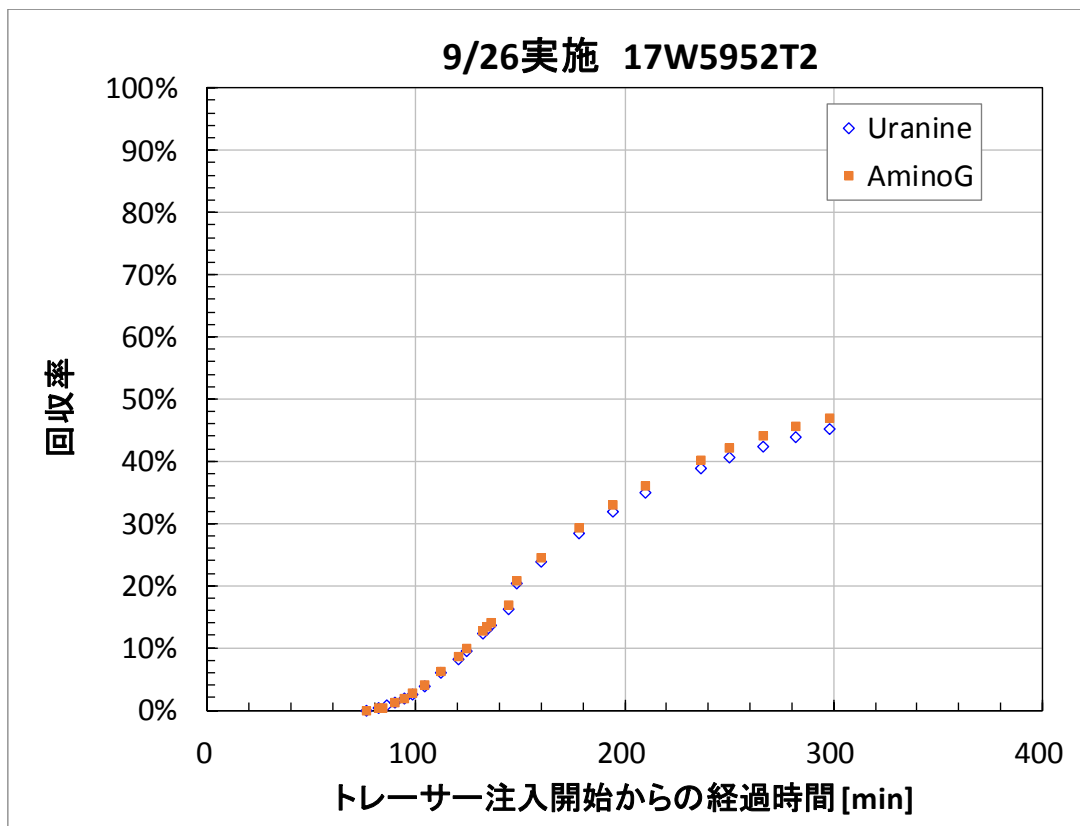
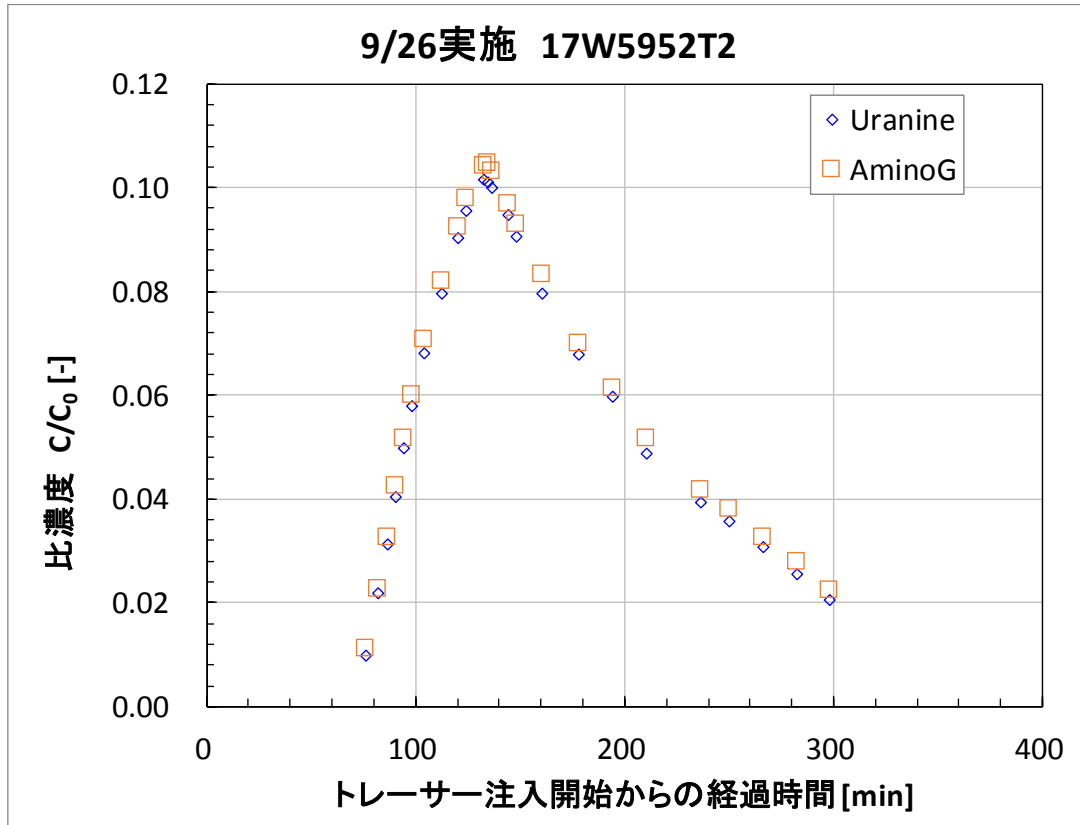


図 3. 3. 8-15 17W5952T2 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）



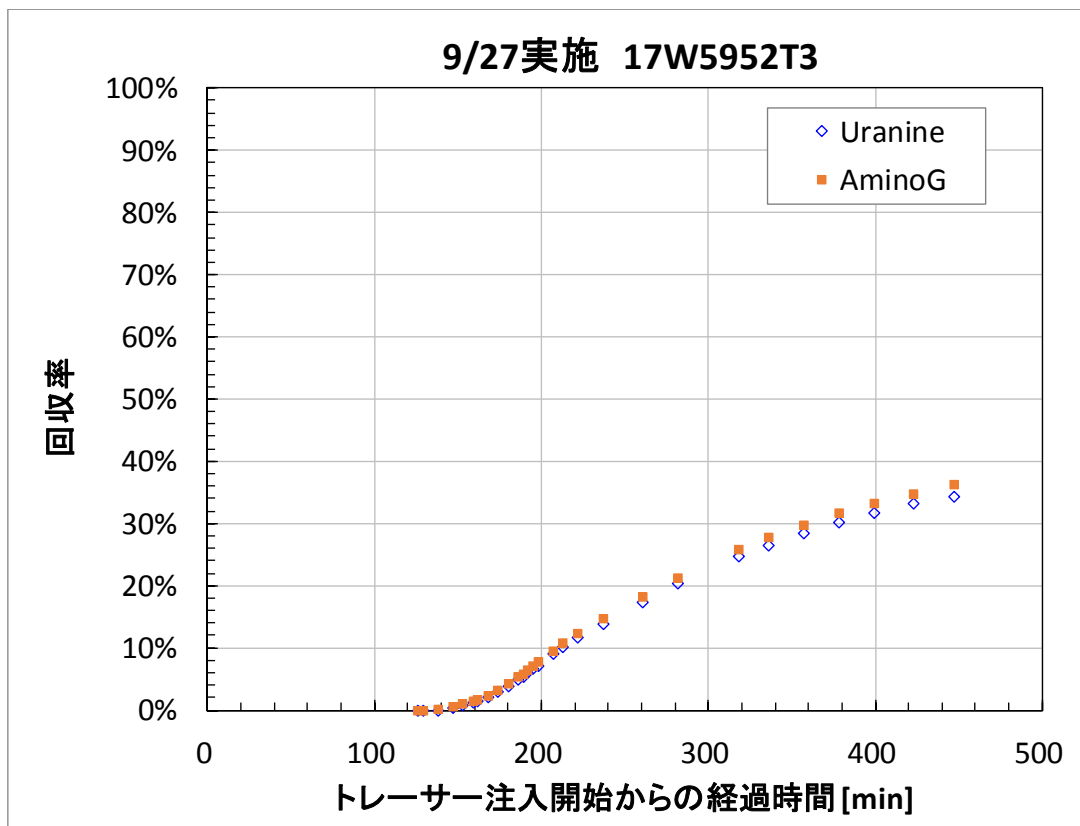
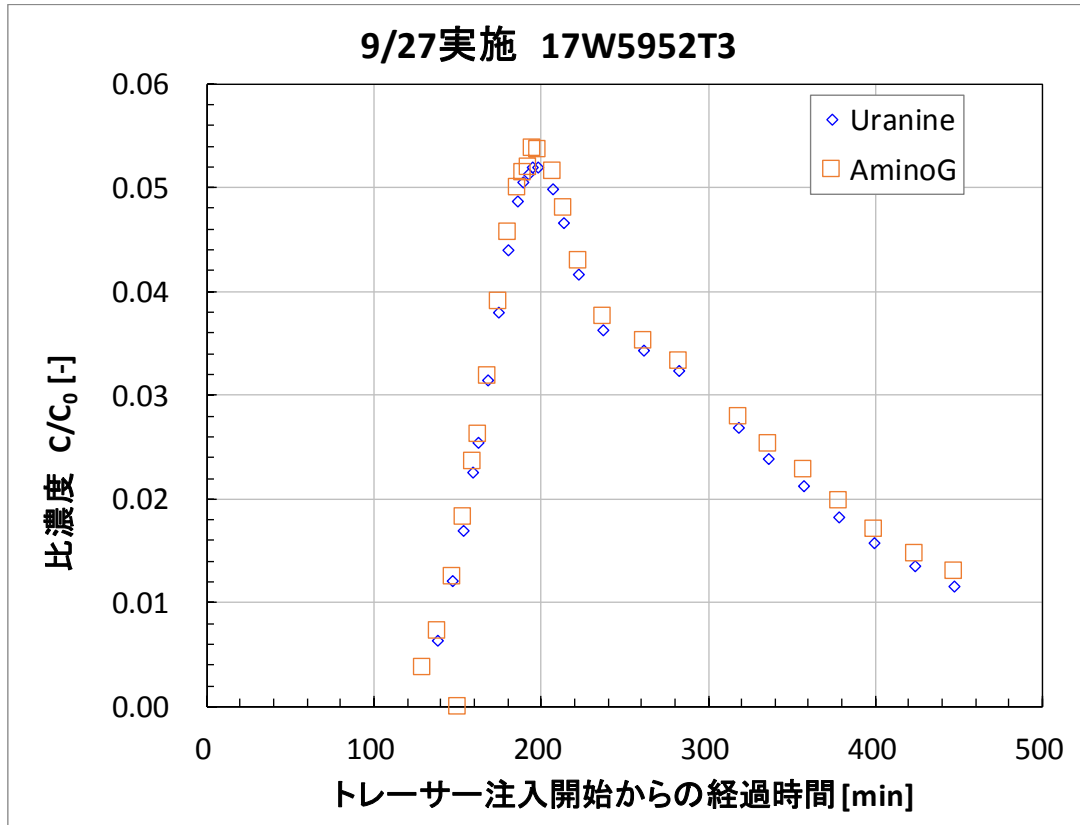


図 3.3.8-16 17W5952T3 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）

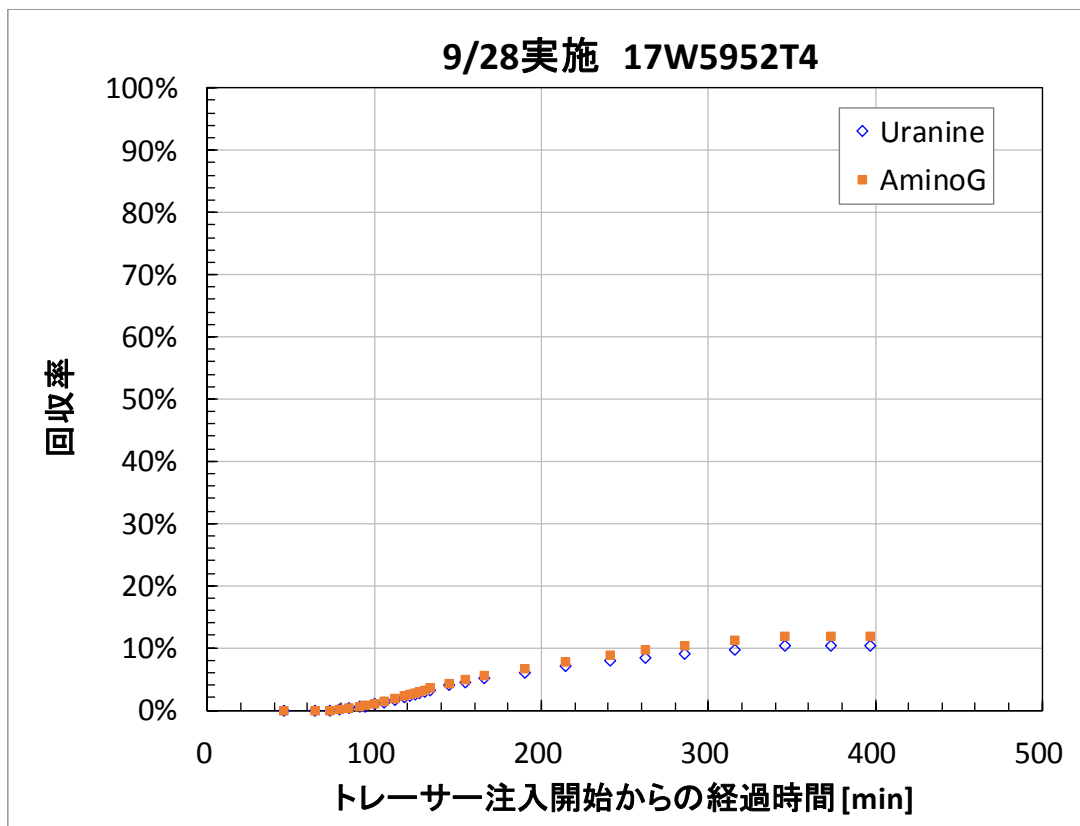
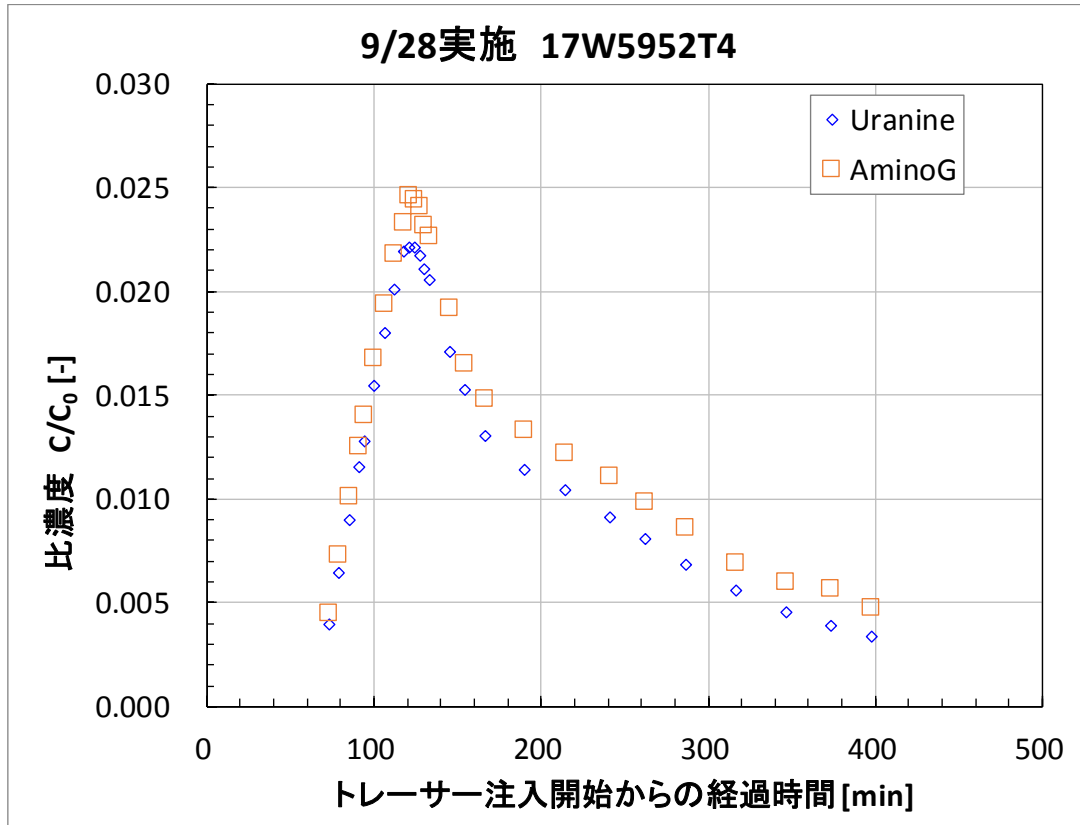


図 3.3.8-17 17W5952T4 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）

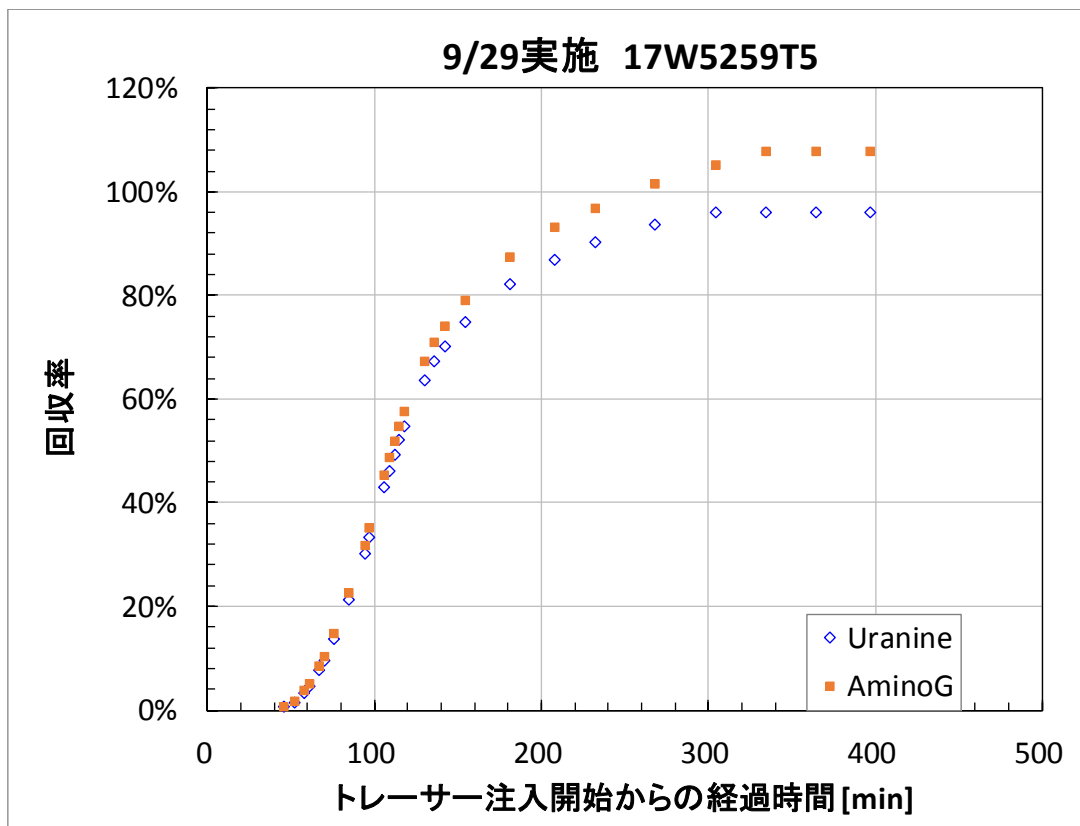
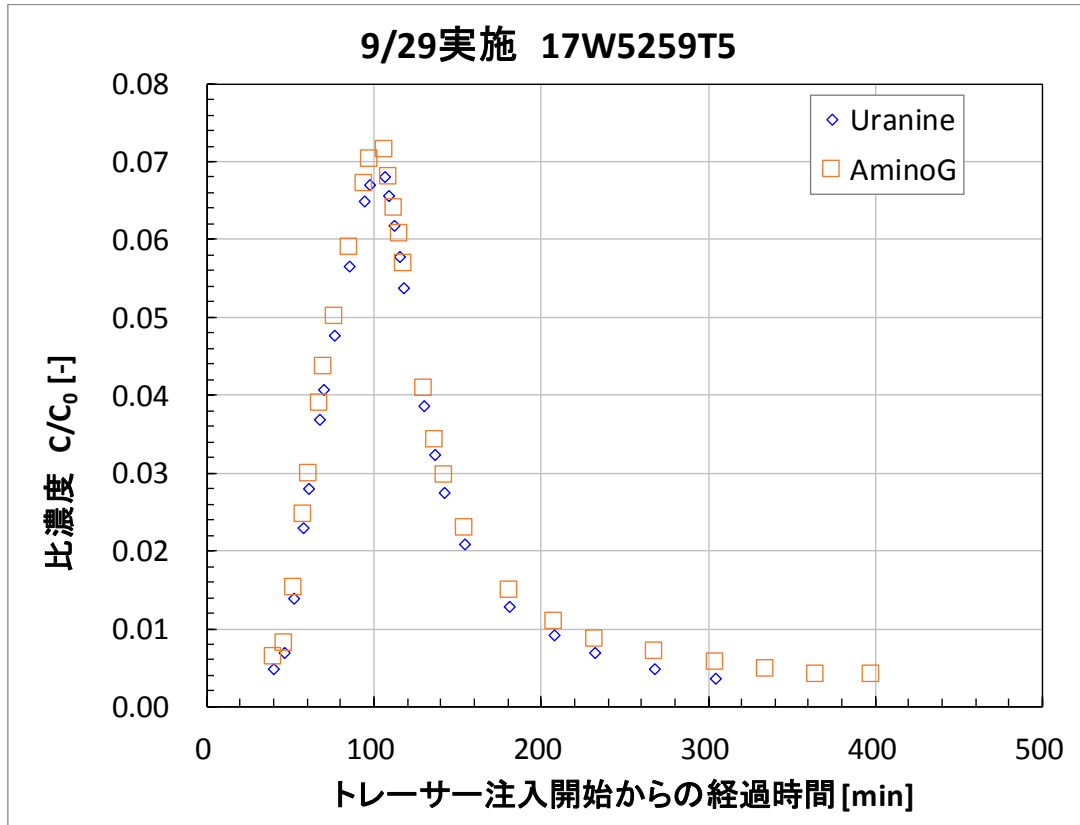


図 3.3.8-18 17W5952T5 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）

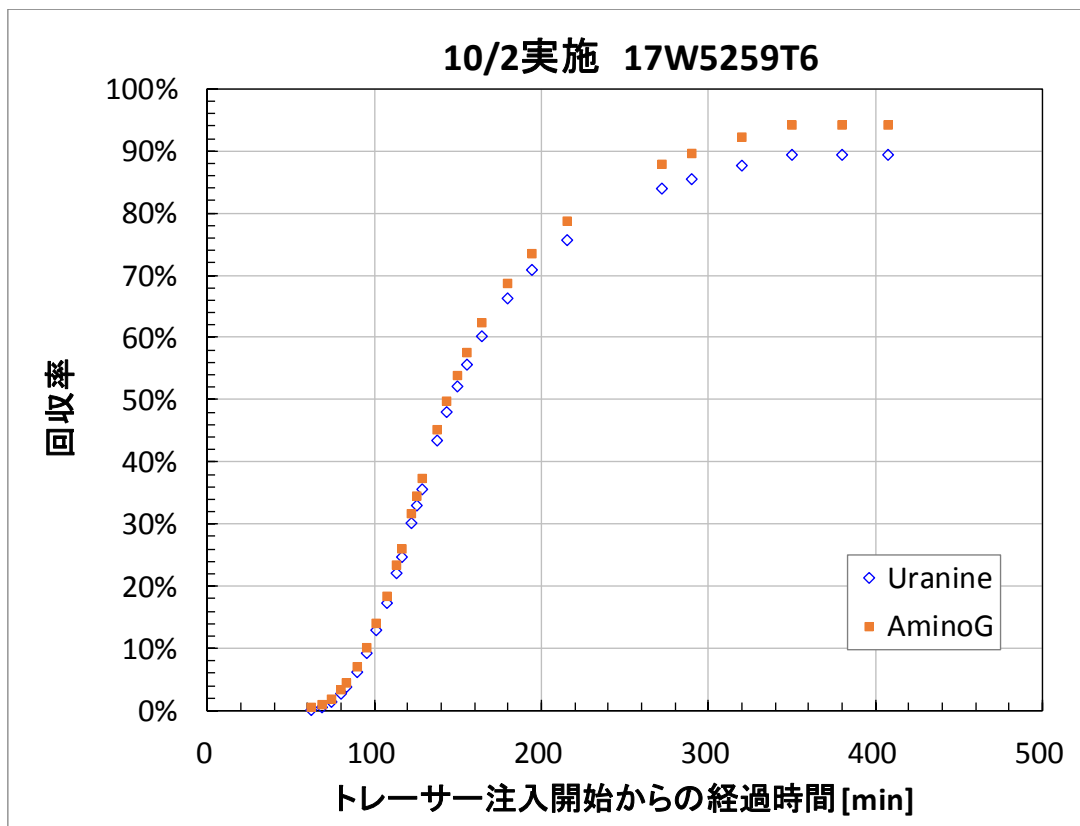
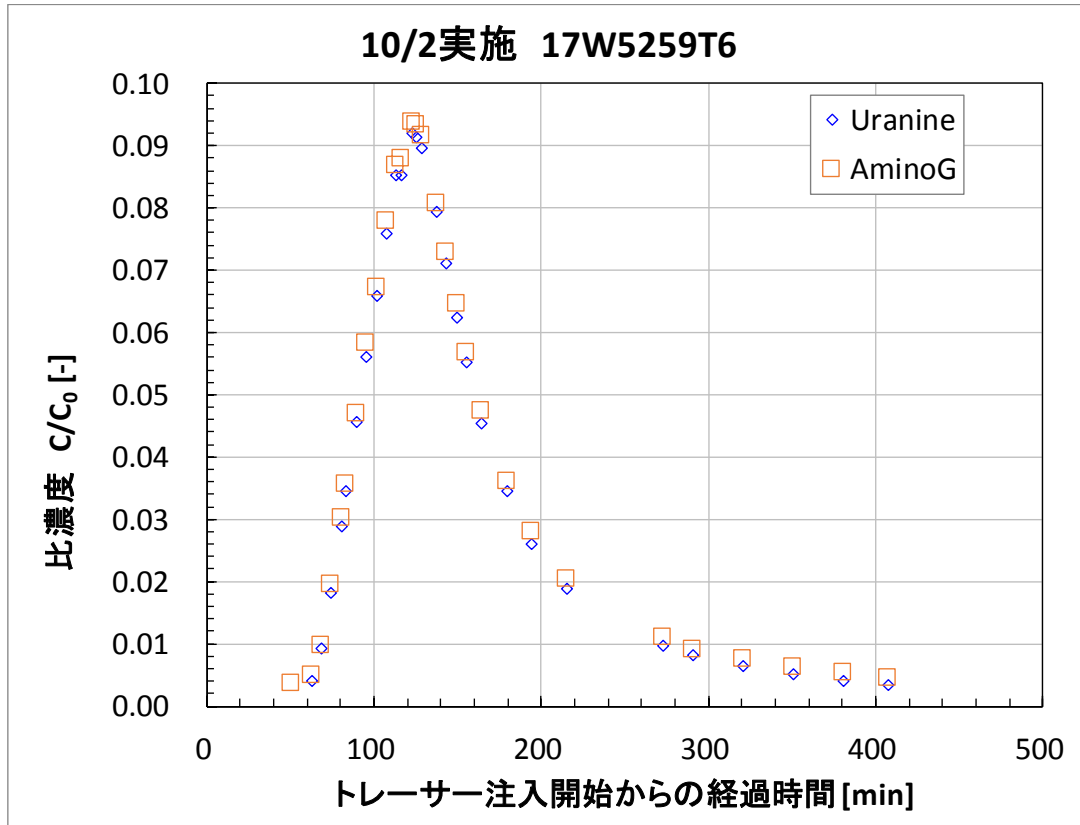


図 3.3.8-19 17W5952T6 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）

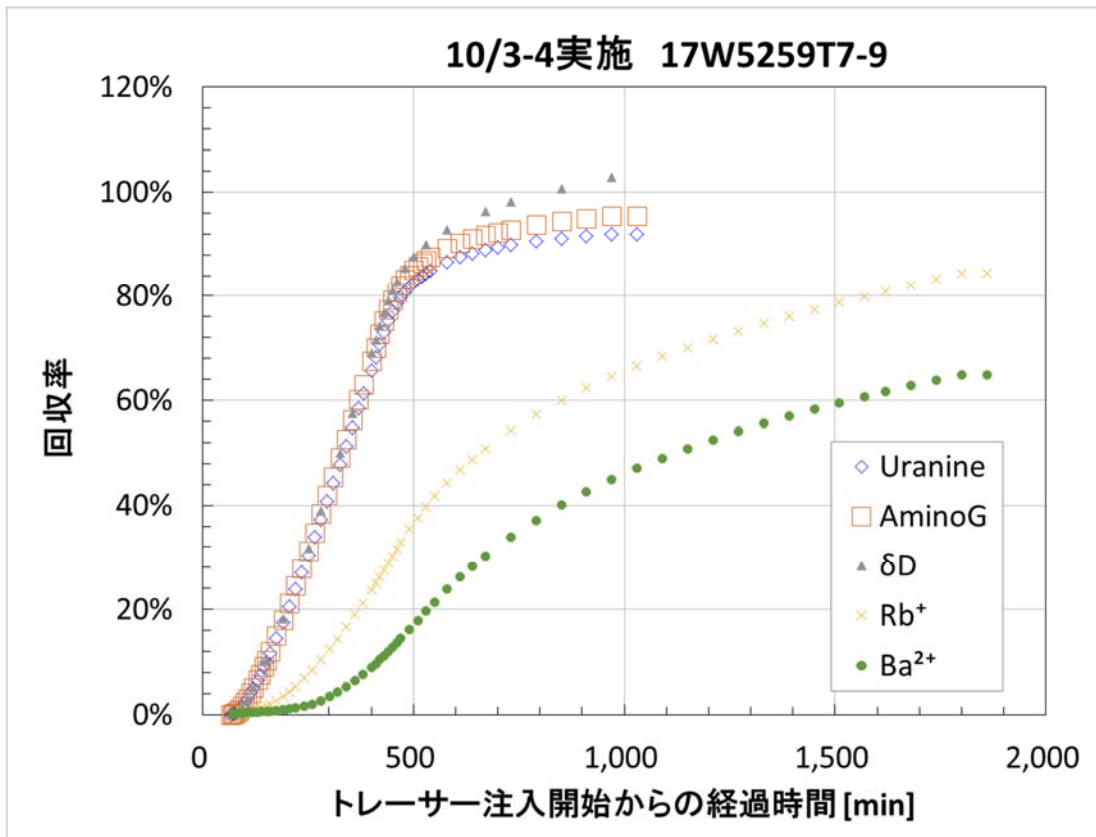
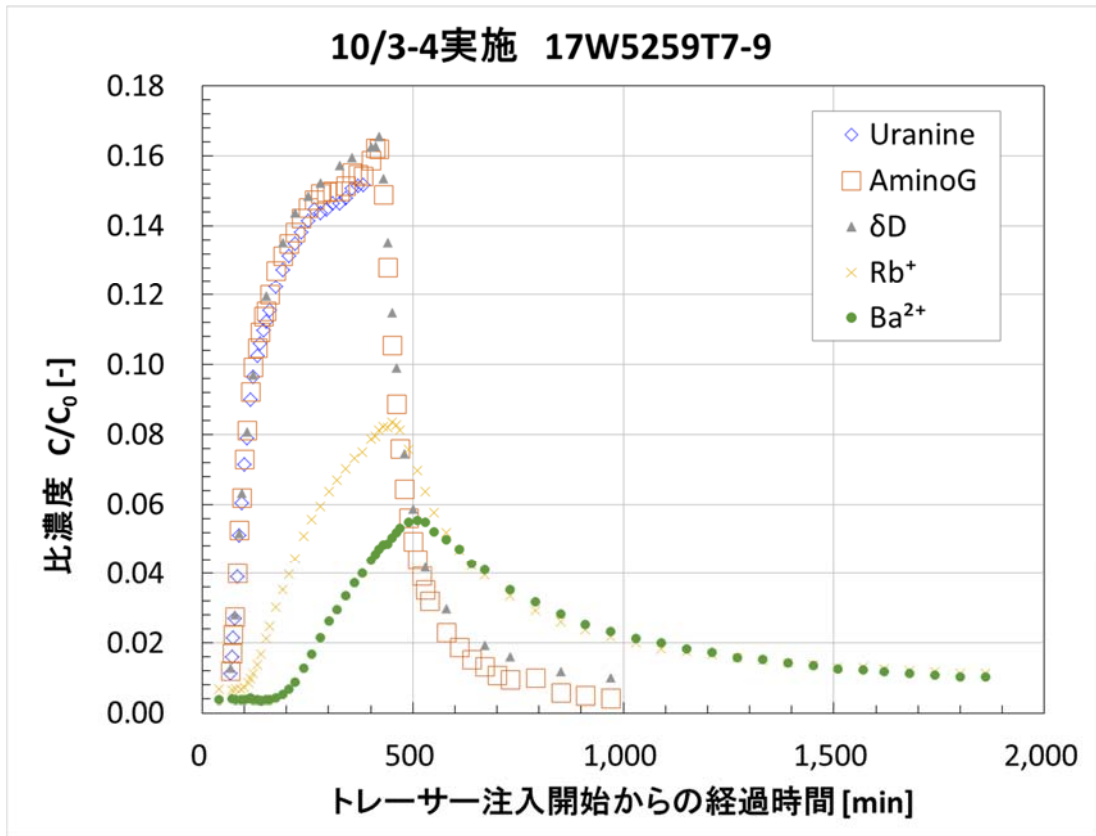


図 3. 3. 8-20 17W5952T7-9 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）

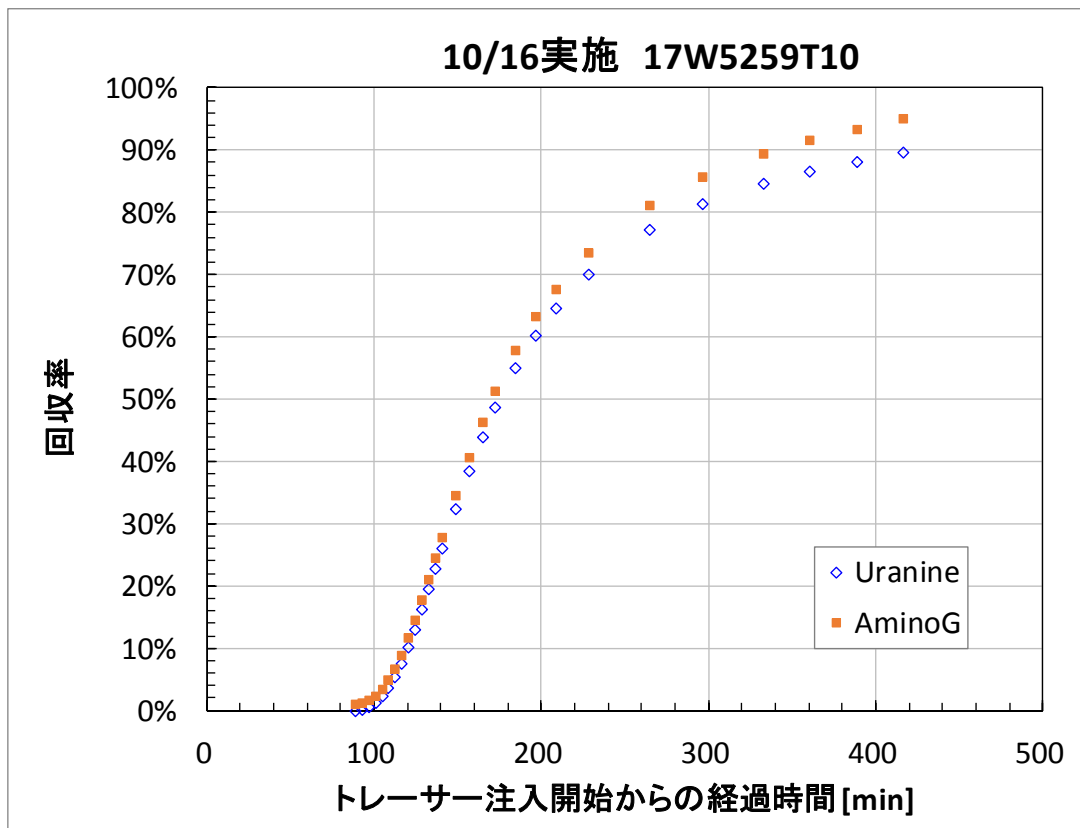
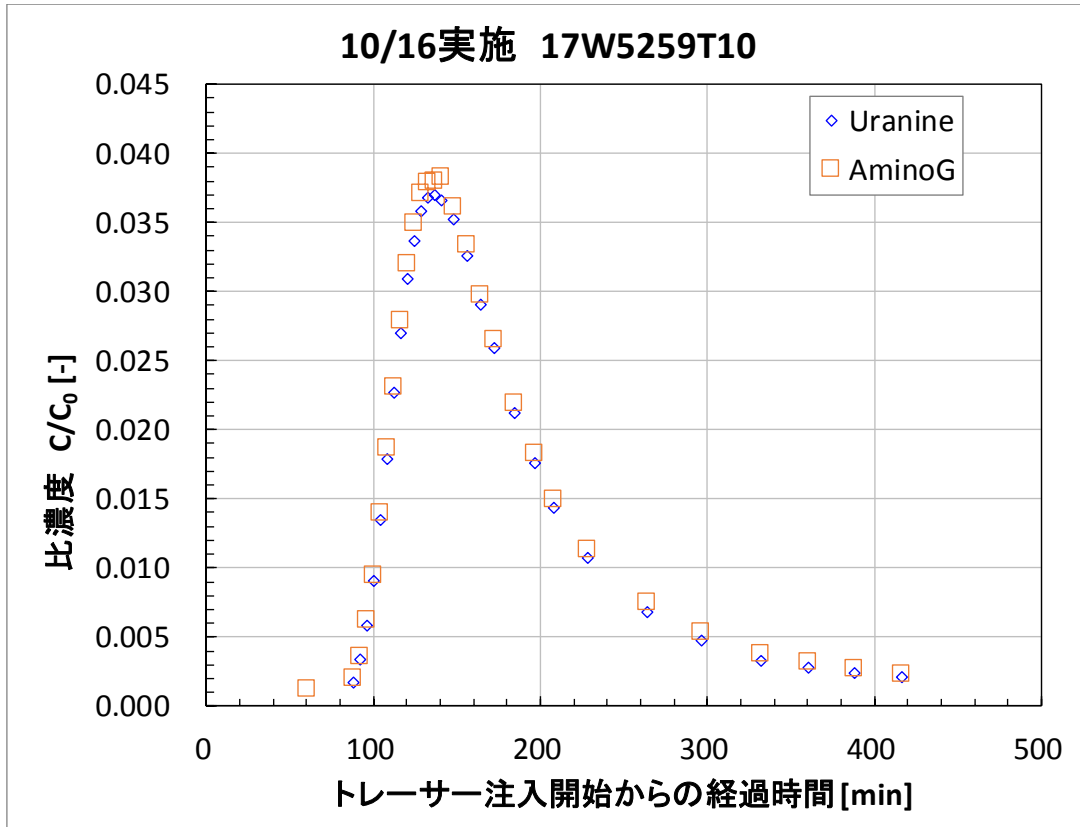


図 3.3.8-21 17W5952T10 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）

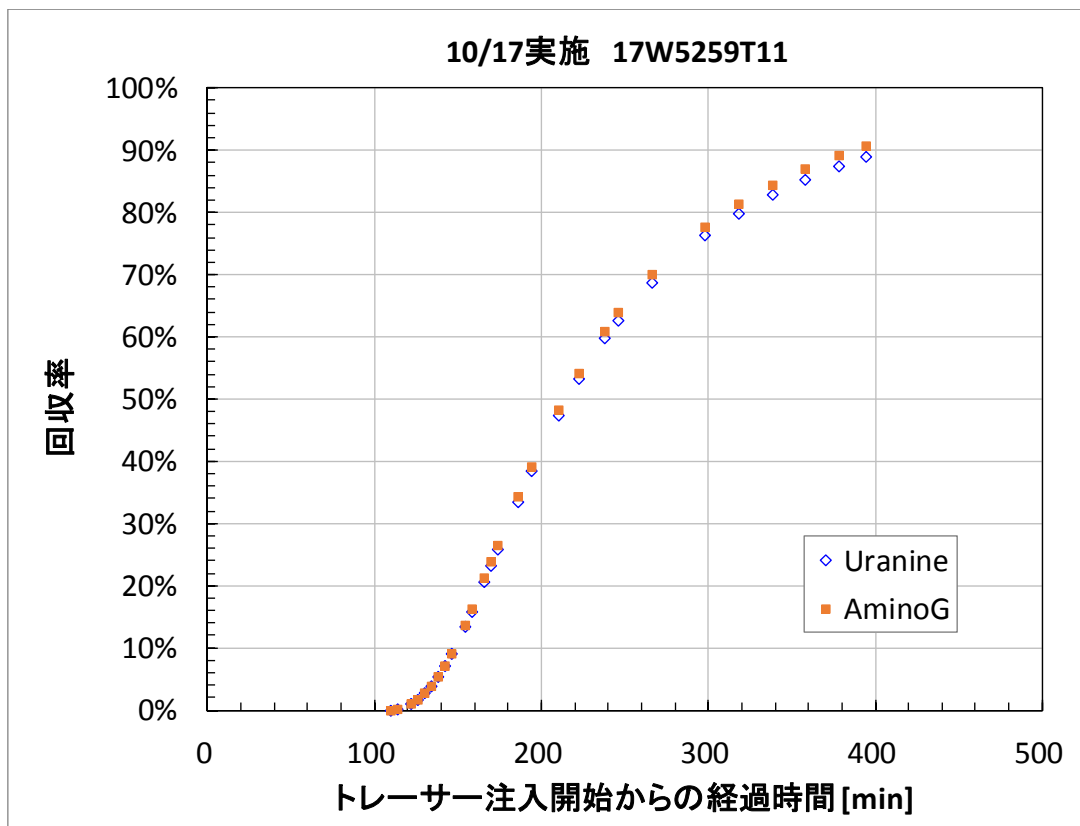
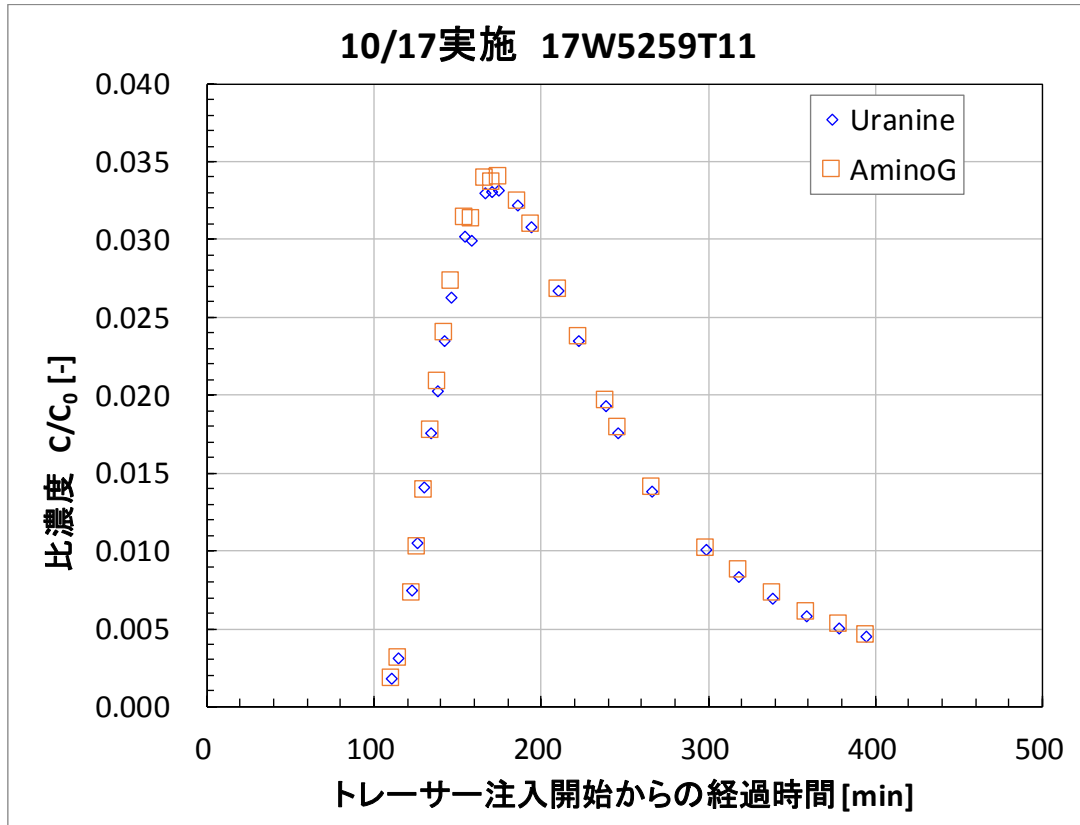


図 3.3.8-22 17W5952T11 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）

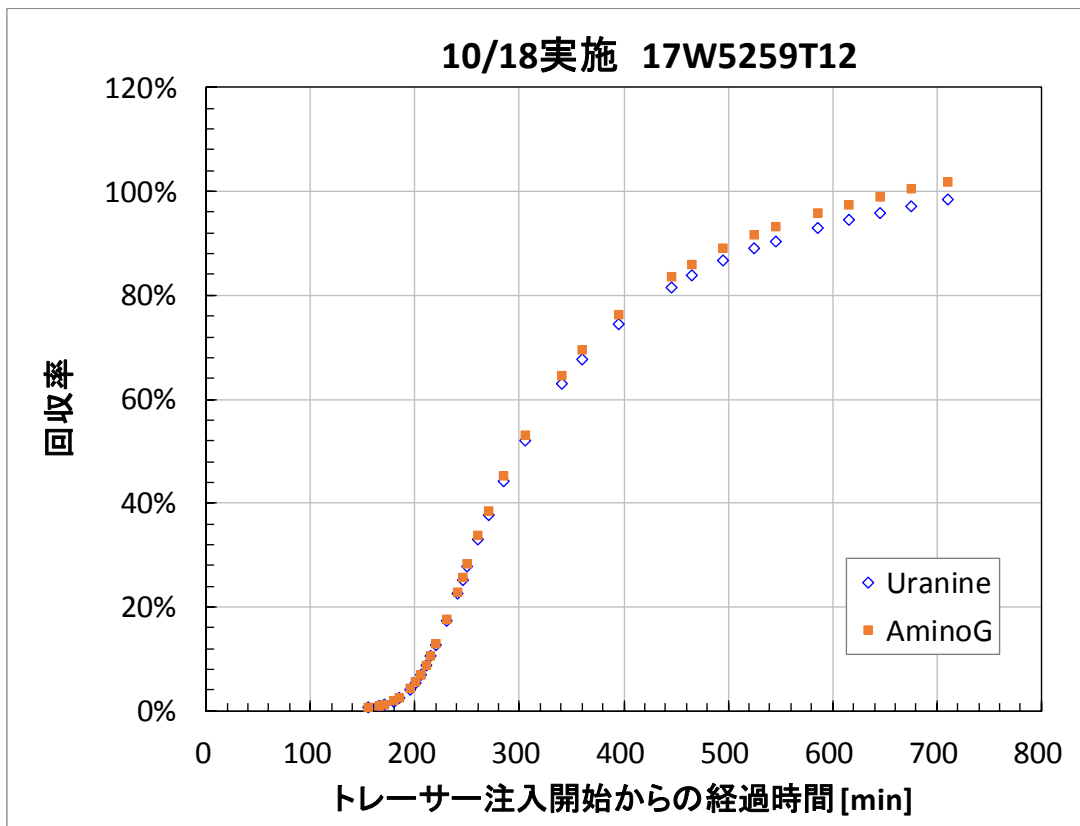
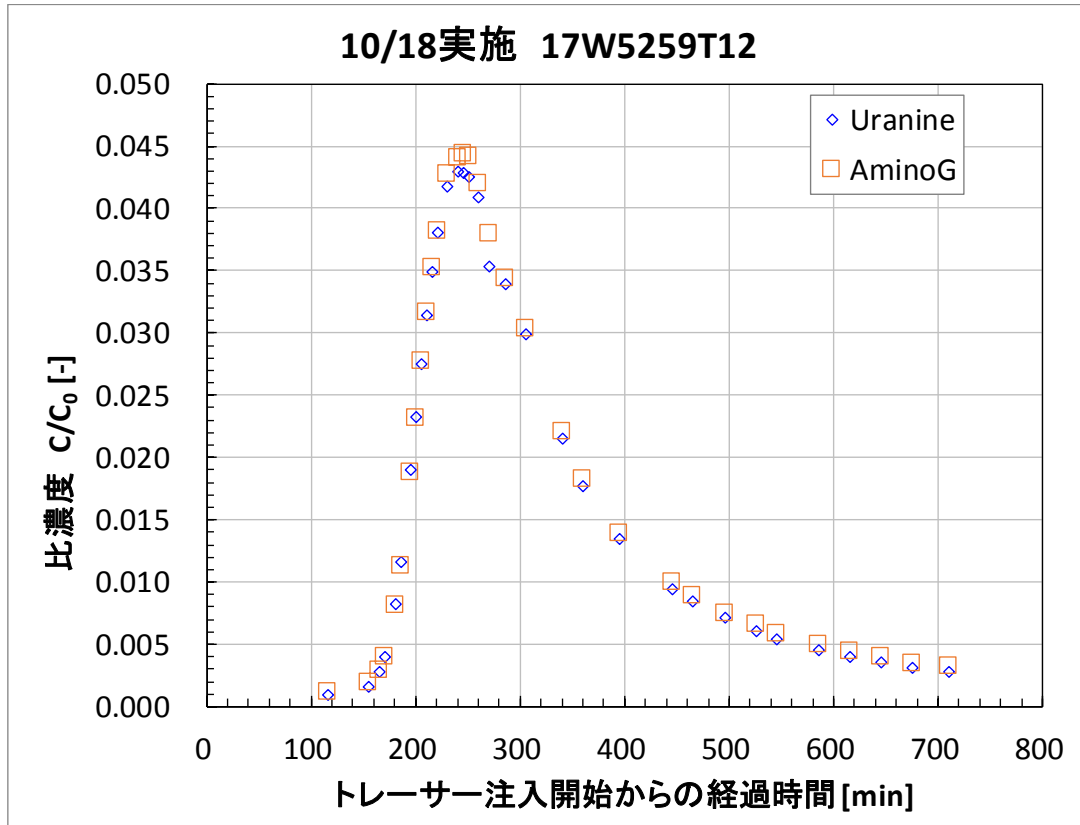


図 3.3.8-23 17W5952T12 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）



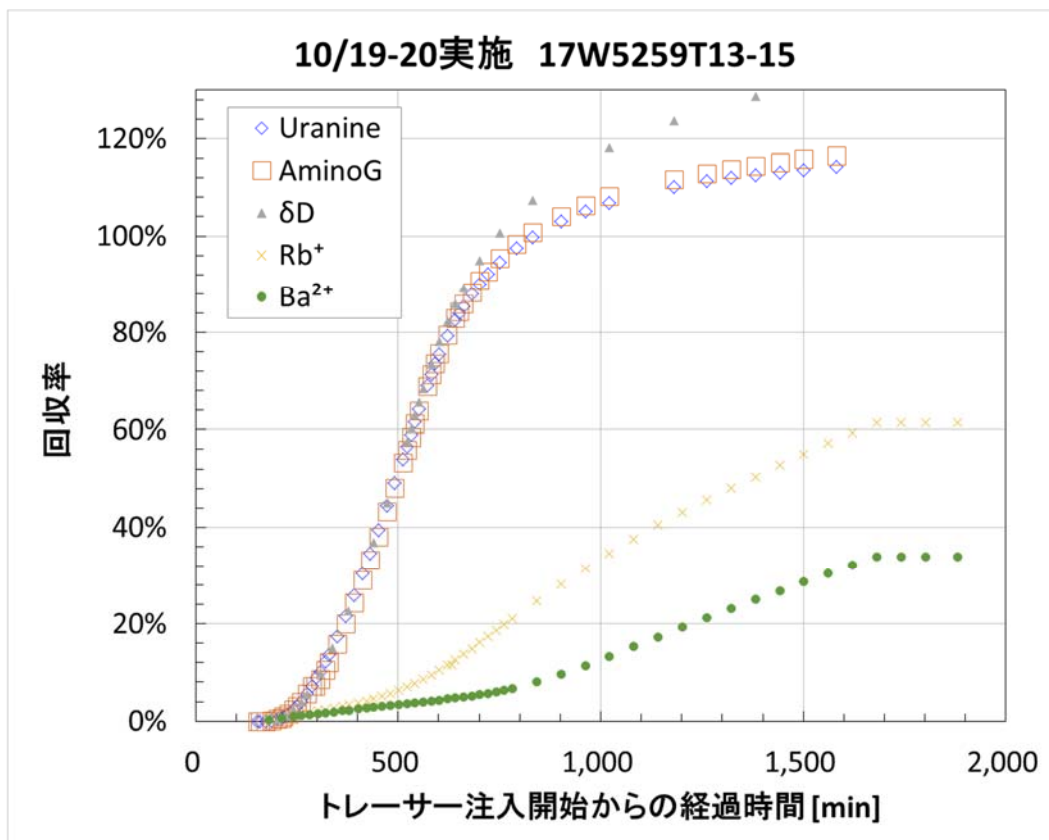
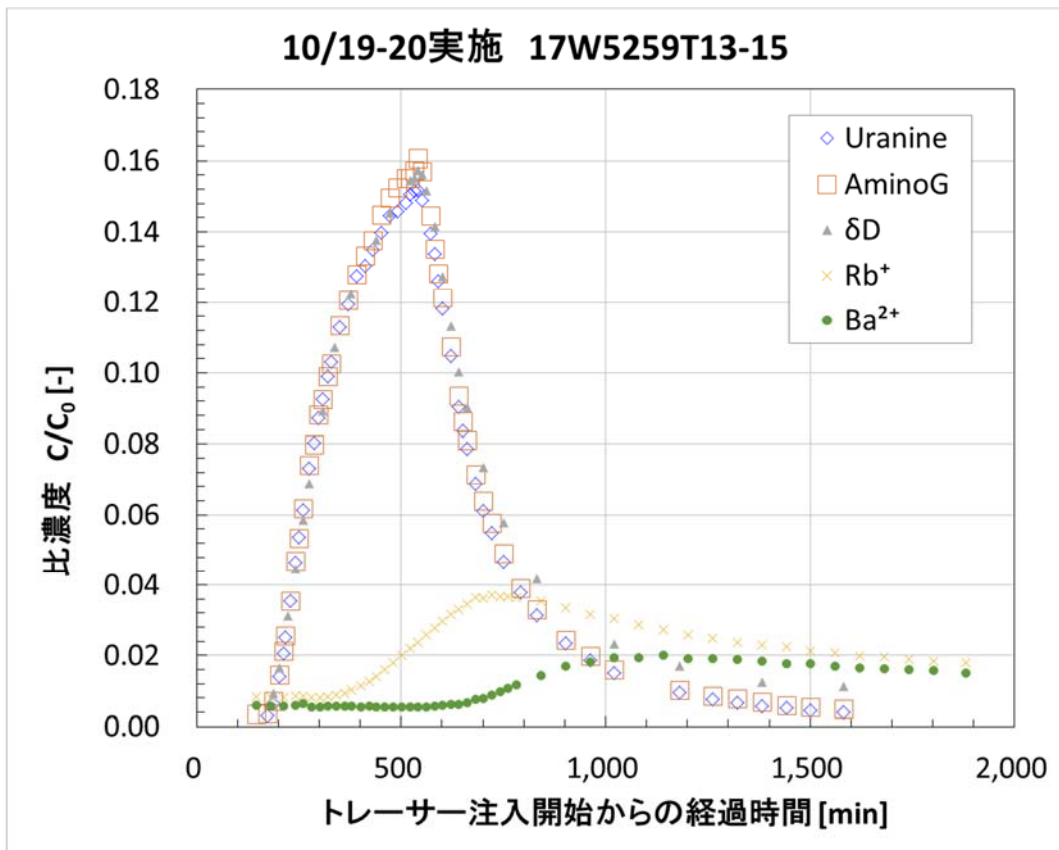


図 3.3.8-24 17W5952T13-15 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）

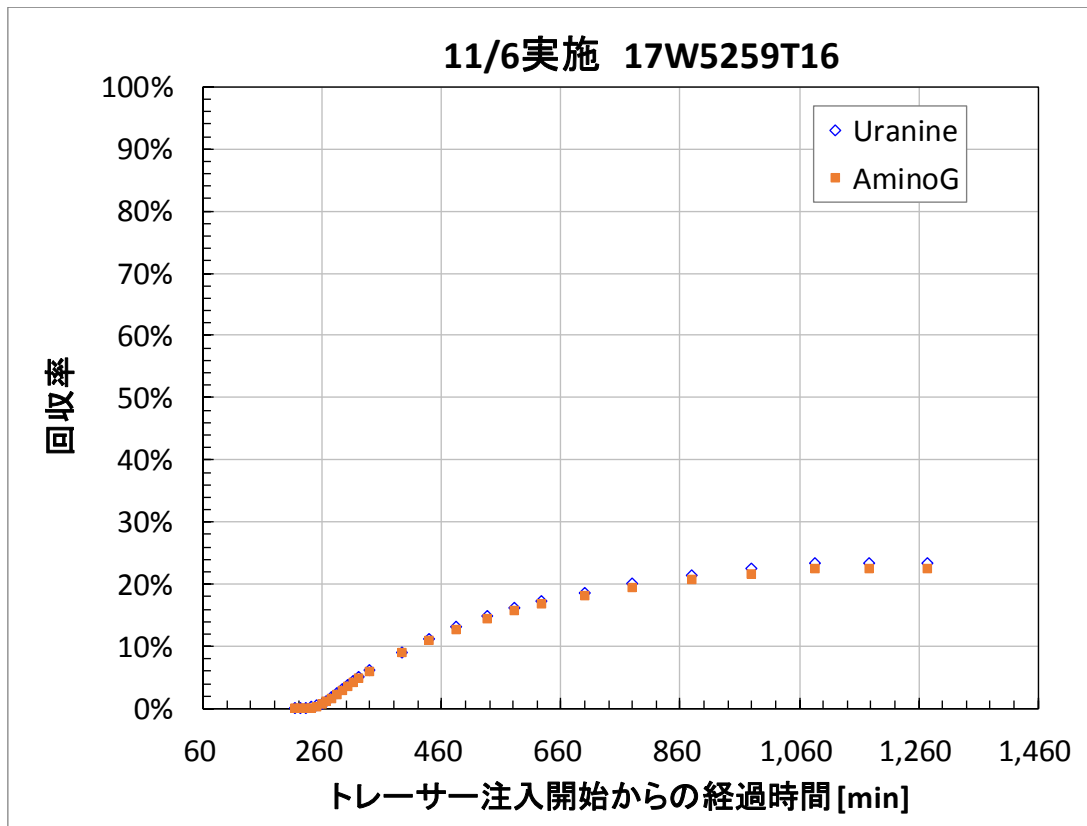
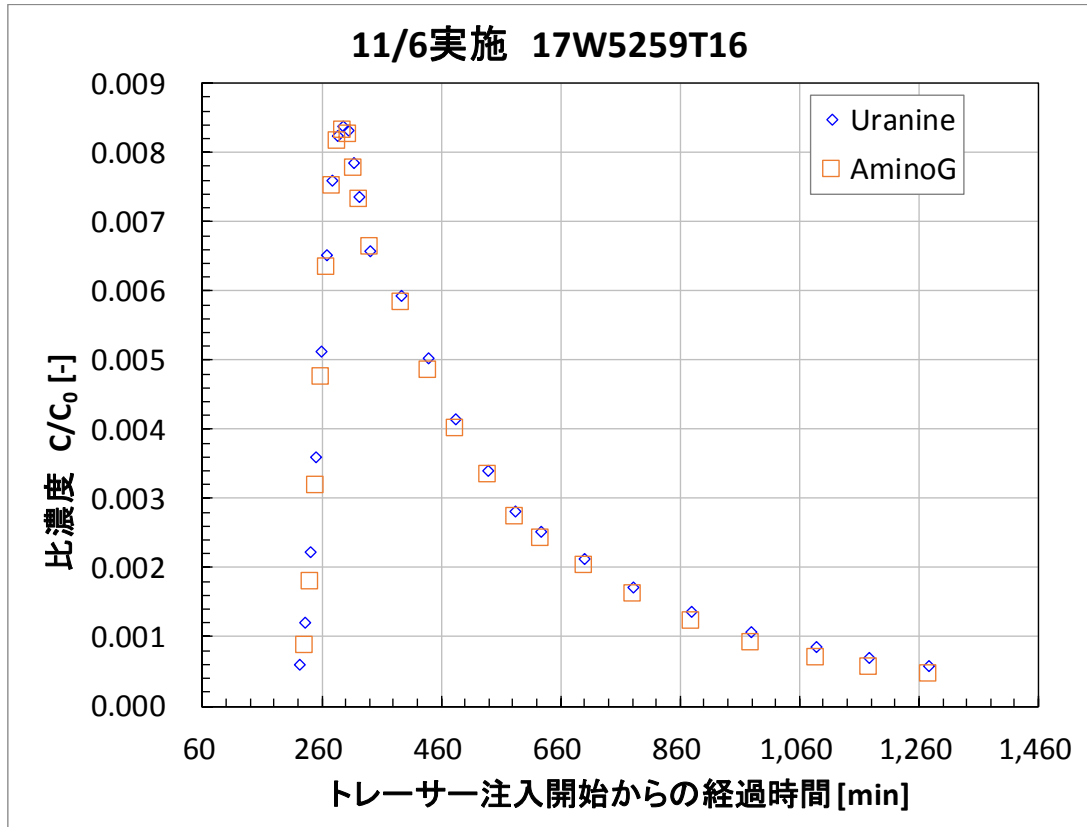


図 3.3.8-25 17W5952T16 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）

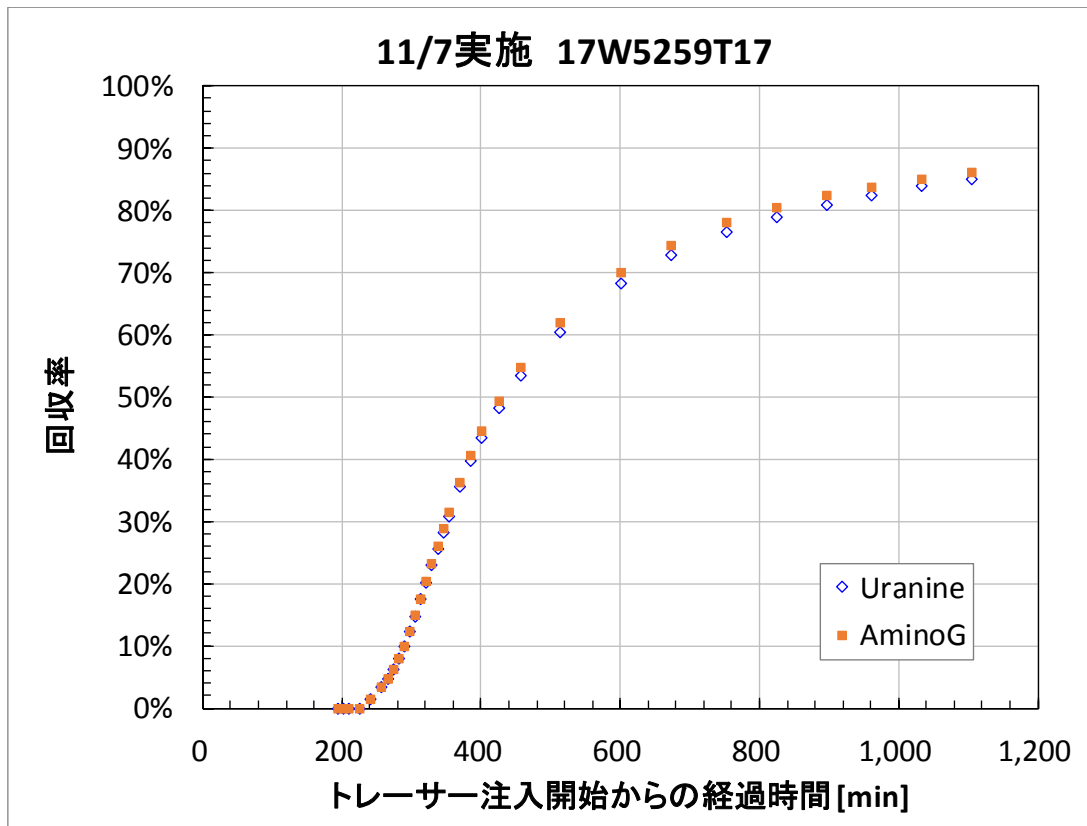
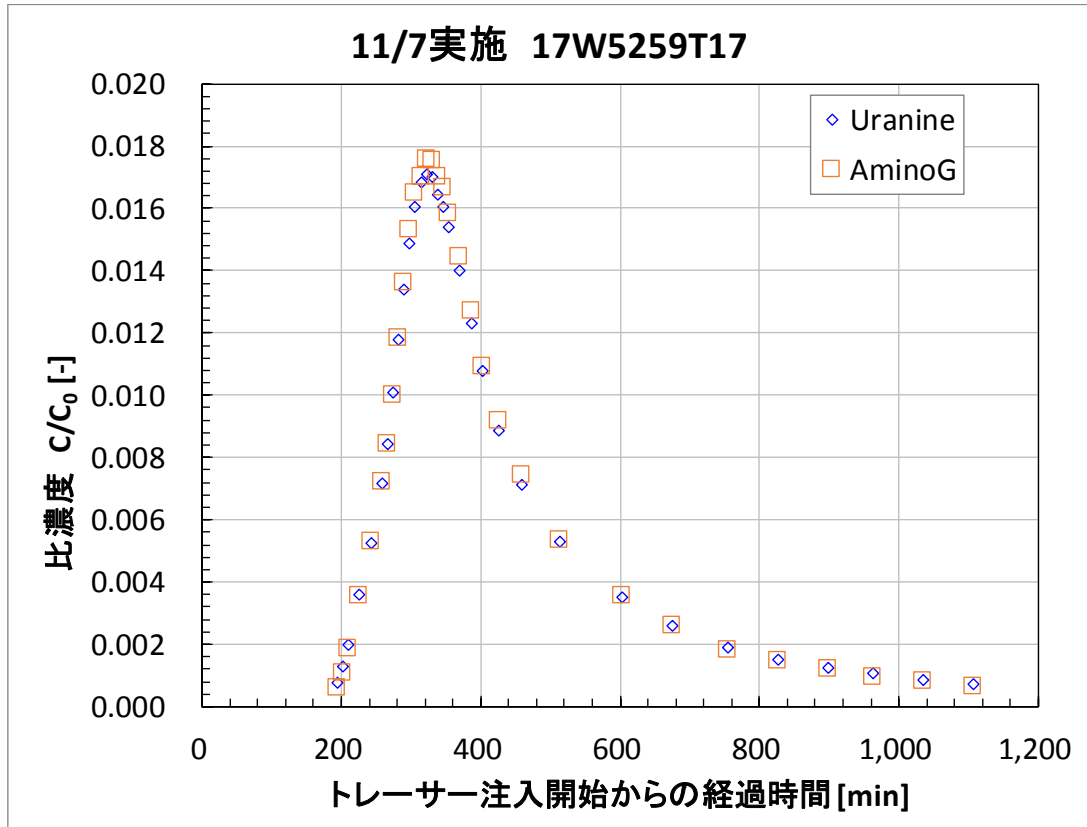


図 3.3.8-26 17W5952T17 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）

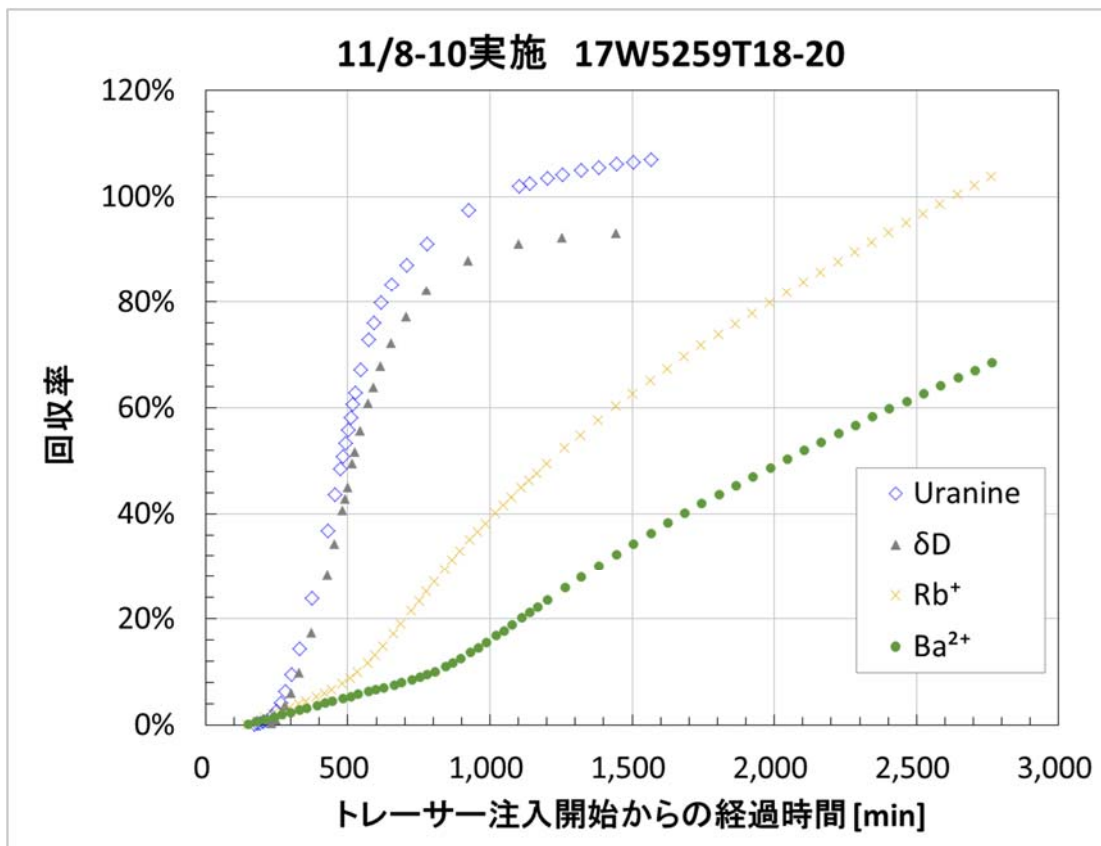
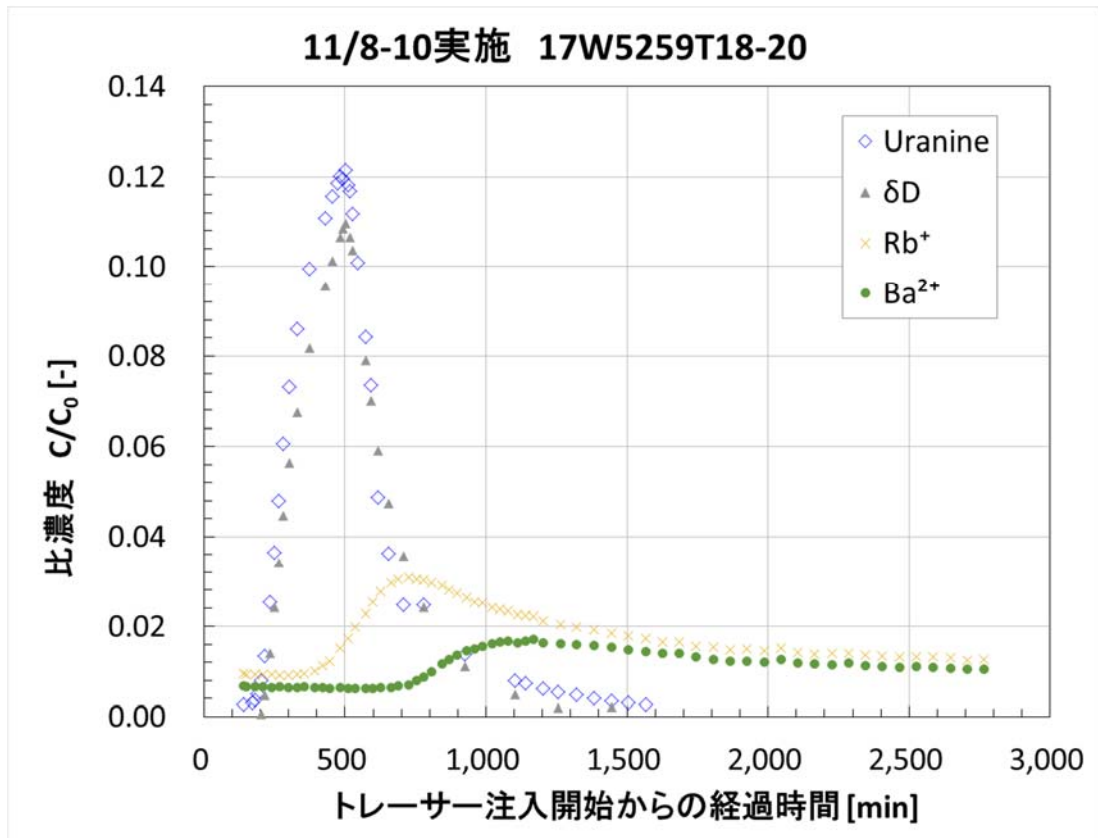


図 3.3.8-27 17W5952T18-20 破過曲線（上）および回収率の経時変化（下）

### 3.3.9 トレーサー試験装置の適用性の確認および今後の課題

#### (1) 蛍光濃度センサーの孔内での光の減衰

今年度、16MI59 号孔内に設置した C1 センサーで大きく蛍光強度が減衰する症状が認められた。原因として、圧力以外にも、長期間地下水に触れることや倉庫保管時の乾燥により何らかの付着物があり、光の反射強度が低下した可能性が考えられる。今後はセンサー内部の反射鏡の汚れについても検証の必要があると考えられる。具体的には希塩酸などの酸を用いて、鏡面の洗浄を行い洗浄効果の有無を確認する予定である。

一方、Ver. 3.1 の蛍光濃度センサーを C2 センサーとして設置した 15MI52 号孔では、減衰幅が少なく比較的良好なデータが取得できた。

#### (2) 揚水流量の制御

揚水量 10mL/min 未満の試験では、昨年度と同様にニードルバルブにより揚水量を調整した。ニードルバルブは 2 連装とし、フラクションコレクター直近の同型ニードルバルブと合わせて 3 台のバルブによる揚水量およびフラクションコレクターの分画流量の調整を行い、問題なく流量を制御できた。

また、坑内送風機の ON/OFF による流量変化については、昨年度は夜間に流量が減少したが、今年度は夜間に流量が増加した。そのため、環境温度の影響とは特定できなくなった。他に考えられる原因としては、送風機の風による配管系統のわずかな振動の影響が考えられる。使用した流量計はコリオリ式の質量流量計であり、外部からの振動により計測誤差が出やすい特性がある。ただし、送風機の稼働により坑道内電力の電力負荷が変わるなど、複数の要因が絡んでいる可能性があり、原因は特定できていない。

#### (3) 15MI52 号孔からの回収率の低下

15MI52 号孔からトレーサーを回収する試験ケースにおいて、昨年度（53 孔⇒52 孔）はほぼ 100%であった回収率が 30～60%台に低下した。今年度は、15MI53 号孔にモニタリング装置が設置されており、試験割れ目を含む Int-4 の区間長が 3m とデッドボリュームが大きく、トレーサーの流れが大きく阻害されたことが原因と考えられる。

15MI53 号孔のモニタリング装置抜管前に、Int-4 の圧力受信用ラインから長時間排水したところ、目視でも明瞭なウラン汚染された地下水を確認した。15MI52 号孔に注水したトレーサーは、相当量が 15MI53 号孔 Int-4 に流れ込み、回収率が低下したことが判明した。試験の品質向上には周辺孔も含めデッドボリュームの小さい試験区間を形成する必要がある。

(4) ピストンパッカーの漏えい

ピストンパッカーのポート部の加締めは、専用の工具を作成し十分に加締めて孔内へ設置し、試験中も過度な差圧負荷が掛からないよう配慮した結果、漏えいは発生しなかった。

### 3.4 原位置トレーサー試験の評価

#### 3.4.1 単孔トレーサー試験の評価

##### 3.4.1.1 単孔トレーサー試験の理論式を用いた評価

17S59T13、17S59T14、17S59T15の結果について、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。

##### (1) 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(3.4.1-1)、(3.4.1-2)に示す。

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{\frac{V_{ext}}{V_{inj}} - 1}{\left( \frac{16}{3} \frac{\alpha_L}{\hat{r}_{max}} \left\{ 2 - \left| 1 - \frac{V_{ext}}{V_{inj}} \right|^{1/2} \left( 1 - \frac{V_{ext}}{V_{inj}} \right) \right\} \right)^{1/2}} \right] \quad (3.4.1-1)$$

ここで、 $\hat{r}_{max}$ はトレーサーの浸透範囲を表し、非吸着性トレーサーの $\hat{r}_{max}$ は式(3.4.1-2)で、吸着性トレーサーの $\hat{r}_{max}$ は式(3.4.1-3)で表される。

$$\hat{r}_{max,nr} = \sqrt{\frac{V_{inj}}{\pi b \varphi} + r_w^2} \quad (3.4.1-2)$$

$$\hat{r}_{max,r} = \sqrt{\frac{V_{inj}}{\pi b R \varphi} + r_w^2} \quad (3.4.1-3)$$

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  $nr$  は非吸着性トレーサーを、 $r$  は吸着性トレーサーを意味している。

ここで、式(3.4.1-1)において未知数は $\alpha_L$ と $\hat{r}_{max,nr}$ であり、式(3.4.1-2)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(3.4.1-5)で示される集中定数 $\tau$  (*lumped parameter*) が定義される。つまり、非吸着性トレーサーの理論式である式(3.4.1-1)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、吸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。

$$\frac{\alpha_L}{\hat{r}_{max,nr}} = \frac{\alpha_L}{\sqrt{\frac{V_{inj}}{\pi b \varphi} + r_w^2}} \doteq \frac{\alpha_L}{\sqrt{\frac{V_{inj}}{\pi b \varphi}}} \quad (3.4.1-4)$$

$$\Leftrightarrow \frac{\alpha_L^2}{V_{inj}/b\varphi} = \frac{\alpha_L^2 b \varphi}{V_{inj}} = \tau \quad (3.4.1-5)$$

$$\frac{\alpha_L}{\hat{r}_{max,r}} = \frac{\alpha_L}{\sqrt{\frac{V_{inj}}{\pi b R \varphi} + r_w^2}} \doteq \frac{\alpha_L}{\sqrt{\frac{V_{inj}}{\pi b R \varphi}}} \quad (3.4.1-6)$$

$$\Leftrightarrow \frac{\alpha_L^2}{V_{inj}/Rb\varphi} = \frac{\alpha_L^2 R b \varphi}{V_{inj}} = \tau R \quad (3.4.1-7)$$

(2) 評価結果

理論式を用いて評価を行った結果を図 3.4.1-1 図 3.4.1-3 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。

非附着性トレーサーについては、いずれの結果も集中定数が  $1.0e-2 \sim 2.0e-2$  の場合に試験結果のピーク濃度を概ね再現することができた。ここで、割れ目幅を 0.10、0.05mm とし、得られた集中定数から式(3.4.1-5) から縦分散長を計算した結果を表 3.4.1-1 に示す（間隙率は 1.0 と仮定）。縦分散長はトレーサー移行距離の 1/100～1/10 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 1/100～1/10 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。

附着性トレーサーについては、いずれも集中定数を  $1.0e-2$  として理論式を計算した。計算の結果、非附着性トレーサーの破過曲線に比べて再現性は悪いが、ピーク濃度のみに着目すると、Rb の遅延係数は 10 程度、Ba の遅延係数は 50 程度と評価された。

表 3.4.1-1 非附着性トレーサー理論式評価結果

試験条件名			17S59T13	17S59T14	17S59T15
試験条件	注水流量	mL/min	49.36	49.82	50.39
	揚水流量	mL/min	50.46	20.71	10.64
	トレーサー注入時間	min	5.0	5.0	5.0
	チェイサー注入時間	min	5.0	5.0	5.0
	待機時間	min	-	-	-
	トレーサー量	L	0.247	0.249	0.252
	チェイサー量	L	0.247	0.249	0.252
割れ目幅0.10mmとした場合の浸透距離		m	2.51	2.52	2.53
集中定数: $1.0e-2$ 、割れ目幅0.10mmとした時の縦分散長		m	0.22	0.22	0.22
割れ目幅0.10mmとした場合の浸透距離		m	2.51	2.52	2.53
集中定数: $2.0e-2$ 、割れ目幅0.10mmとした時の縦分散長		m	0.31	0.32	0.32
割れ目幅0.05mmとした場合の浸透距離		m	3.55	3.56	3.58
集中定数: $1.0e-2$ 、割れ目幅0.05mmとした時の縦分散長		m	0.31	0.32	0.32
割れ目幅0.05mmとした場合の浸透距離		m	3.55	3.56	3.58
集中定数: $2.0e-2$ 、割れ目幅0.05mmとした時の縦分散長		m	0.44	0.45	0.45



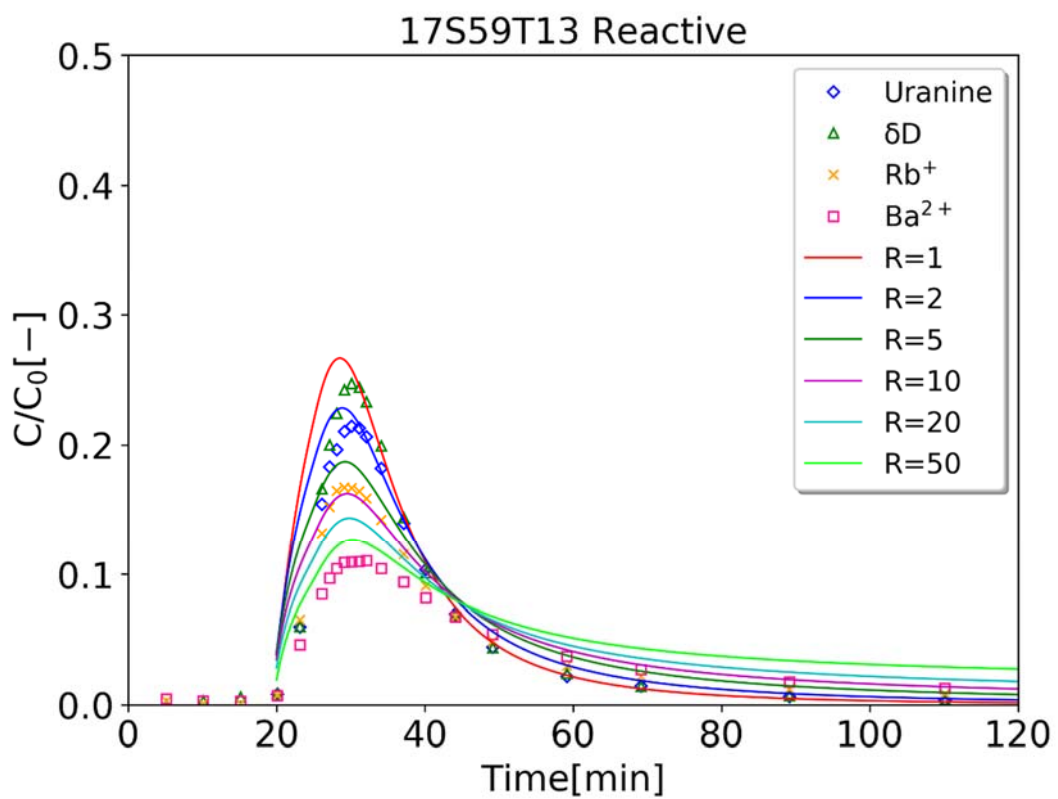
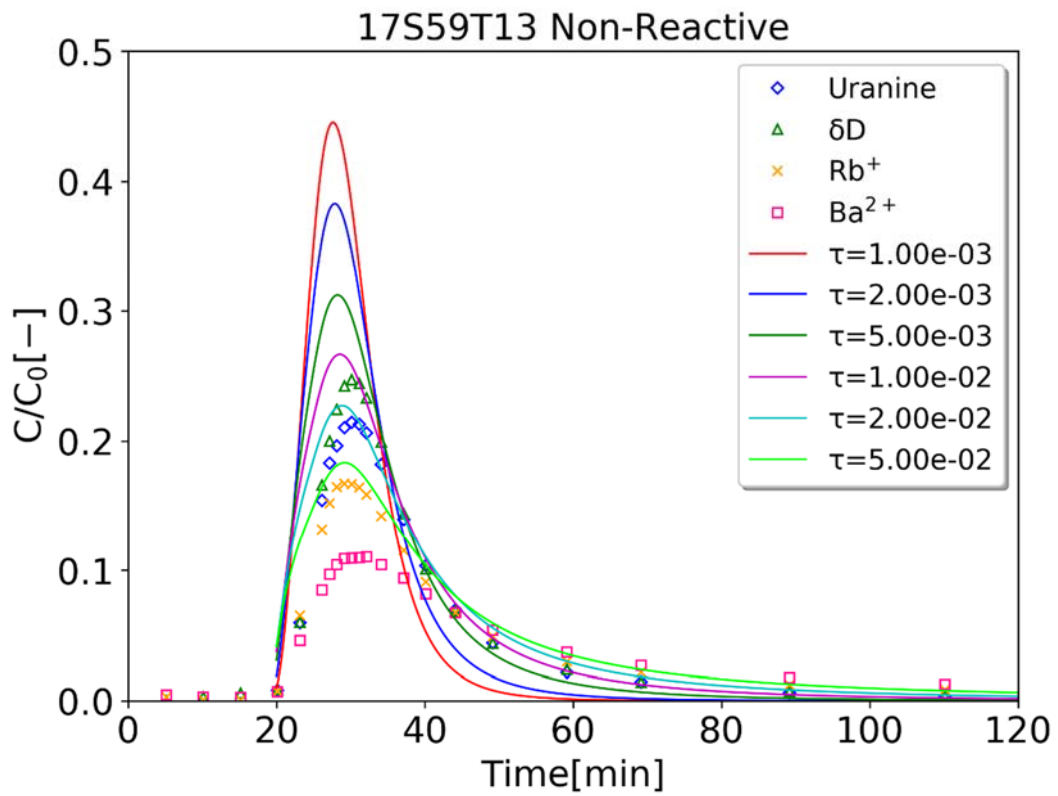


図 3.4.1-1 17S59T13 の評価結果  
(上：非収着性トレーサー、下：収着性トレーサー)

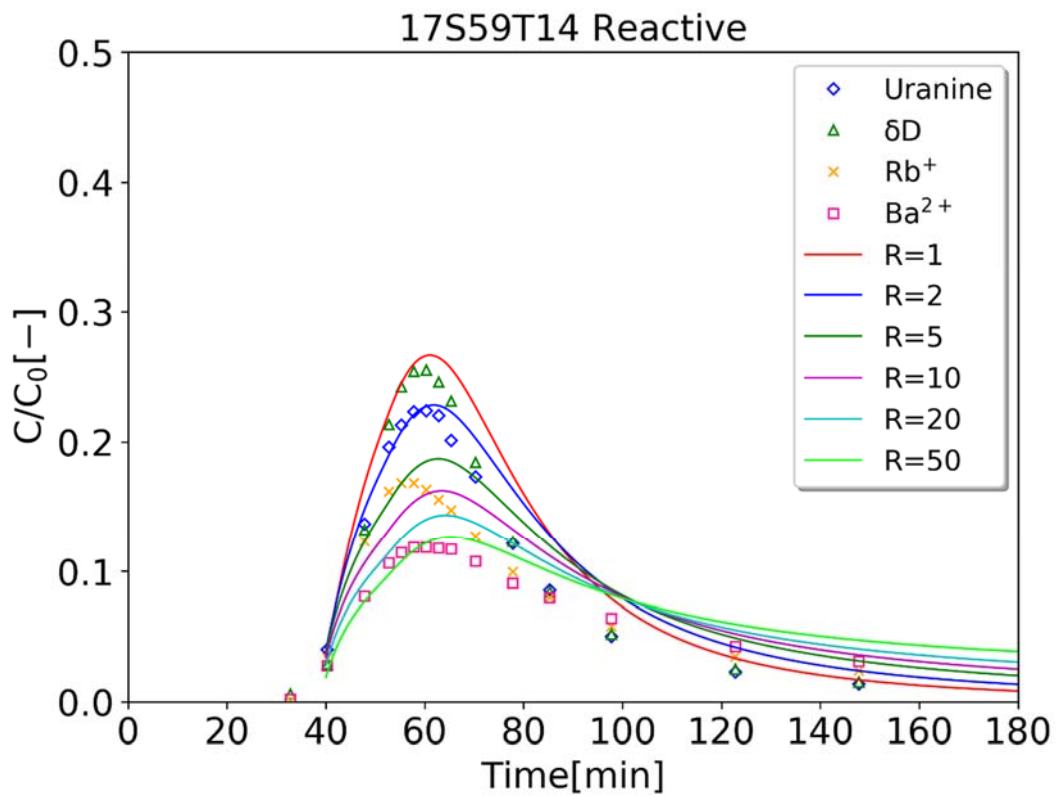
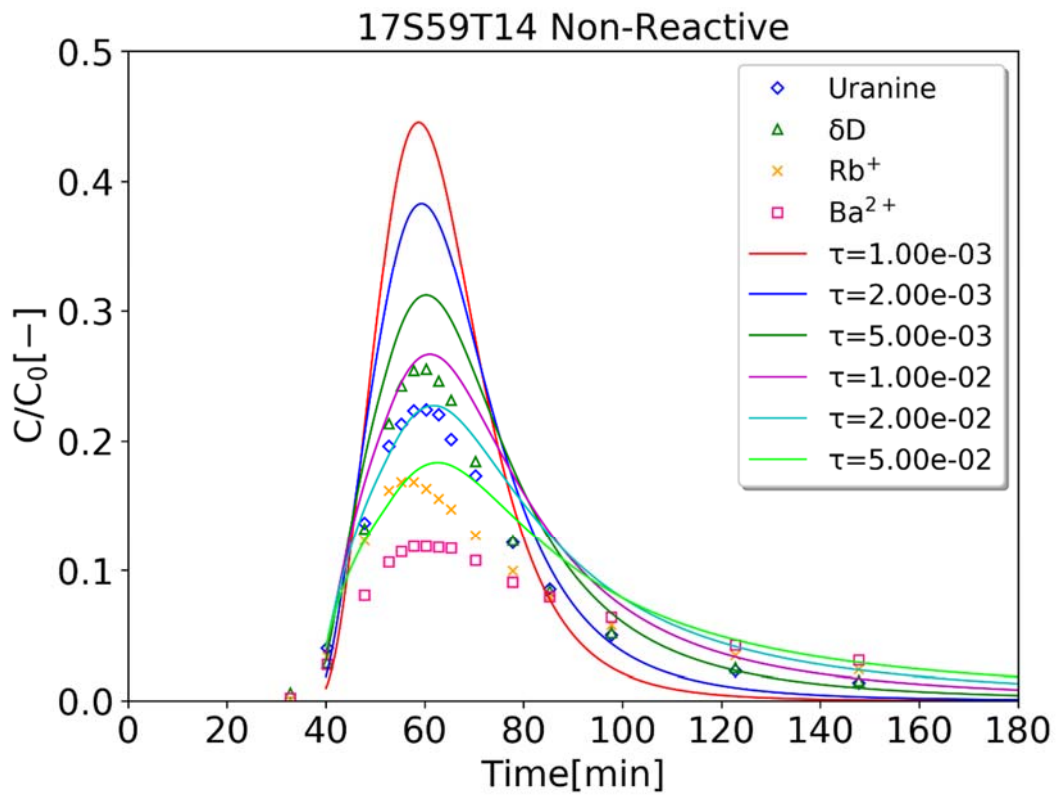


図 3.4.1-2 17S59T14 の評価結果

(上：非収着性トレーサー、下：収着性トレーサー)

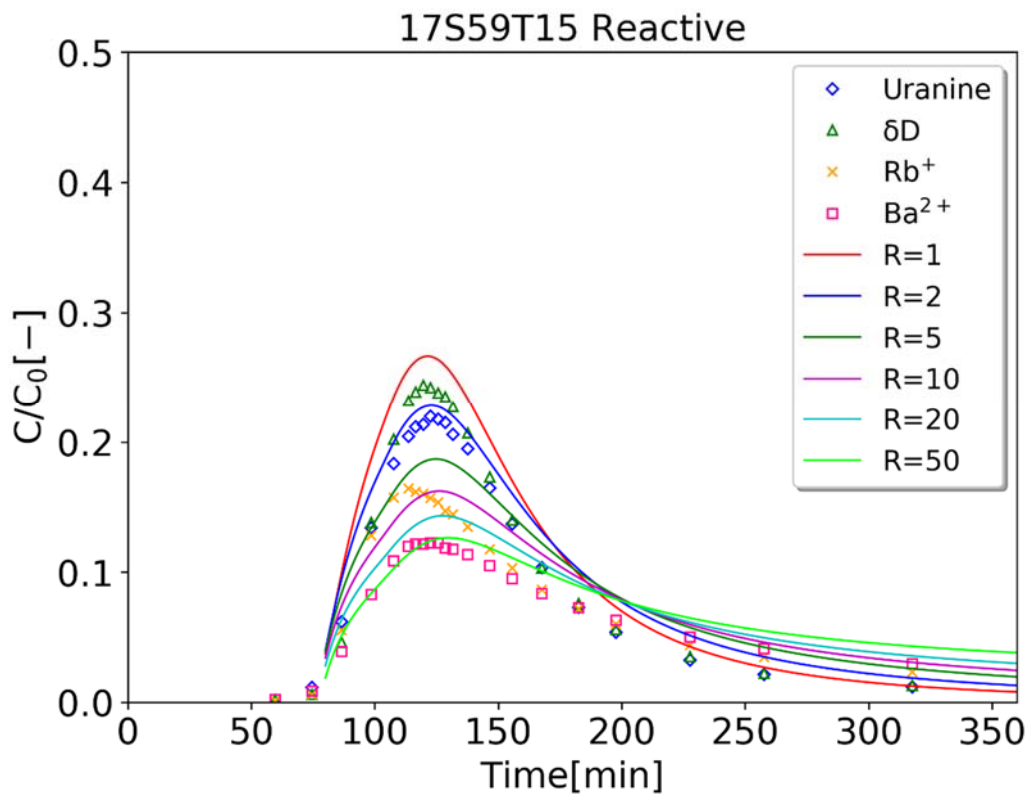
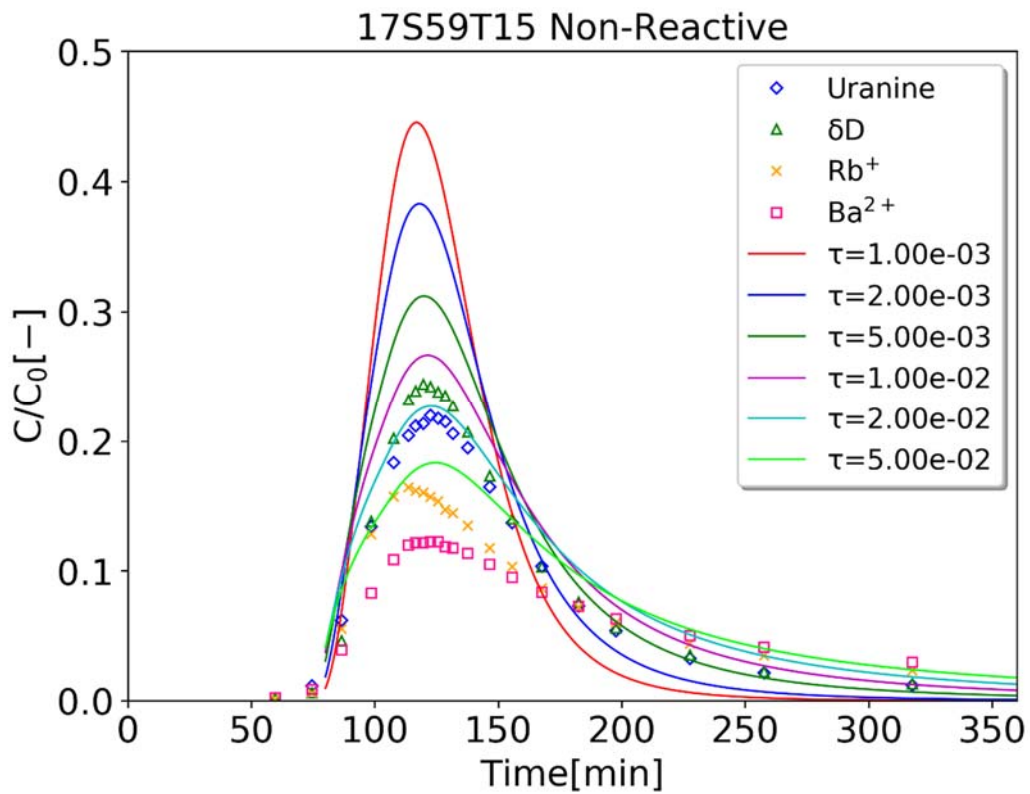


図 3.4.1-3 17S59T15 の評価結果  
 (上：非収着性トレーサー、下：収着性トレーサー)

### 3.4.1.2 15MI52 号孔での回収率低下の要因

本年度 15MI52 号孔で実施した試験においては、回収率が 30%程度と極端に低くなる結果となった。一方、昨年度実施した 15MI52 号孔の試験においては、同じ割れ目（15MI52 号孔 15.34mabh）を対象としほぼ同じ条件にも関わらず、回収率は 90%を超える結果となった。表 3.4.1-2 に 2016 年度実施した試験と 2017 年度実施した試験の比較を、図 3.4.1-4 に各試験条件で得られた破過曲線を示す。

図 3.4.1-4 を見ても分かるように、ほぼ同じ試験条件であるにも関わらず、2016 年度実施試験の 16S2T3 では非収着性トレーサーのピーク濃度が 0.6 を超えているが、2017 年度実施試験の 17S52T8 では非収着性トレーサーのピーク濃度は 0.2 程度と大きく減少する結果となった。両試験での大きな違いは、15MI53 号孔、16MI59 号孔の装置の設置状況である。

#### 2016 年度実施試験

- ・ 15MI53 号孔：トレーサー試験装置
- ・ 16MI59 号孔：間隙水圧モニタリング装置

#### 2017 年度実施試験

- ・ 15MI53 号孔：間隙水圧モニタリング装置
- ・ 16MI59 号孔：トレーサー試験装置

表 3.4.1-2 15MI52 号孔を対象とした試験の試験条件

試験条件名	16S52T3	17S52T8
実施年度	2016	2017
注入流量 [mL/min]	93	100
揚水流量 [mL/min]	54	52
トレーサー注入時間 [min]	10	10
チェイサー注入時間 [min]	5	5

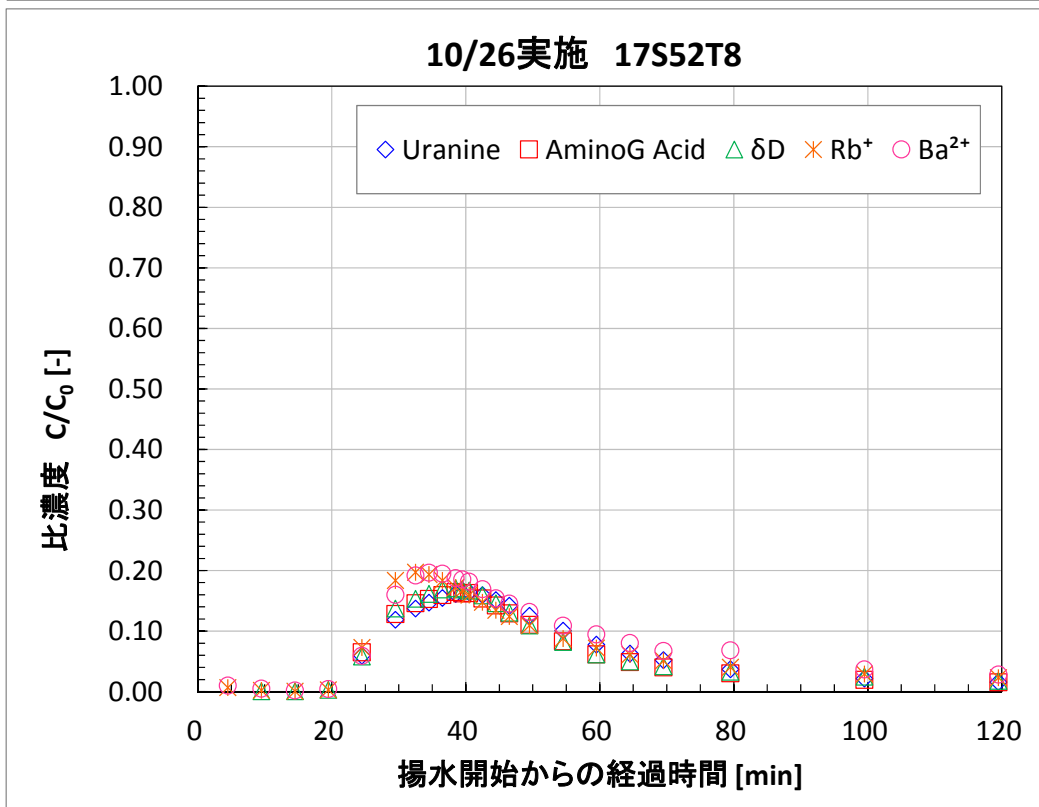
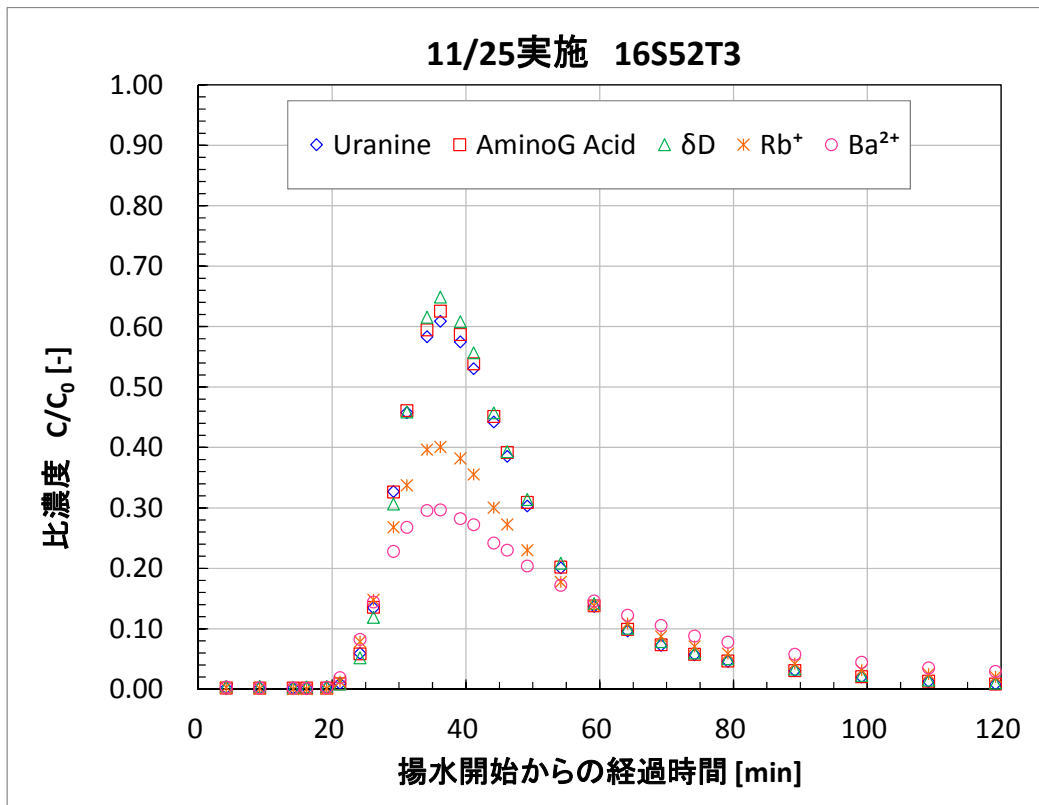


図 3.4.1-4 15MI52 号孔を対象とした試験結果

(上 : 2016 年度実施試験 16S52T13、下 : 2017 年度実施試験 17S52T8)

15MI53 号孔、16MI59 号孔の装置の設置状況の違いが 15MI52 号孔で得られる試験結果に与える影響を考察するため、割れ目のみを考慮した割れ目モデルを用い、15MI53 号孔、16MI59 号孔をモデル化した解析を実施する。割れ目幅は 15MI52 号孔の試験対象割れ目を対象として行われた高精度 BTV 観察によって得られた割れ目幅 0.19mm とし、縦分散長は 0.05m とする。15MI52 号孔における注入流量は 100mL/min とし、トレーサー注入時間は 10 分、チェイサー注入時間は 5 分とする。また、揚水流量は 50mL/min とする。

使用した解析モデルを図 3.4.1-5 に、解析条件を表 3.4.1-3 に示す。解析モデルは、各孔の配置を考慮したモデルとし、装置の設置状況によってトレーサーの流入条件を変更した。つまり、間隙水圧モニタリング装置が設置されている場合は、デッドボリュームが大きくトレーサーが流入できる条件とする。一方、トレーサー試験装置が設置されている場合は、デッドボリュームが小さいため、トレーサーの流入ができない条件とする。表 3.4.1-3 において、case001 は 15MI53 号孔、16MI59 号孔のいずれにもトレーサーの流入は考慮せず、case003 は 2016 年度実施試験 16S52T3 を想定し、case103 は 2017 年度実施の試験 17S52T8 を想定している。なお、チェイサー注入終了時点で 15MI53 号孔、16MI59 号孔に流入したトレーサーは、揚水時には回収されないような計算とする。

表 3.4.1-3 15MI52 号孔周辺孔の装置設置状況の影響検討のための解析条件

	15MI53 号孔	16MI59 号孔
Case001	トレーサー流入不可 (トレーサー試験装置)	トレーサー流入不可 (トレーサー試験装置)
Case003 (16S52T3)	トレーサー流入可 (間隙水圧モニタリング装置)	トレーサー流入不可 (トレーサー試験装置)
Case103 (17S52T8)	トレーサー流入不可 (トレーサー試験装置)	トレーサー流入可 (間隙水圧モニタリング装置)

図 3.4.1-5 に解析結果のうち 15MI52 号孔で計測される破過曲線を、図 3.4.1-7 に解析結果のうちチェイサー注入終了時点における濃度コンター図を示す。破過曲線を見ても明らかなように、15MI53 号孔に間隙水圧モニタリング装置が設置されていることを想定した条件 case003 では、case001 に比べて明らかにピーク濃度が減少している。一方、16MI59 号孔に間隙水圧モニタリング装置が設置されていることを想定した条件 case103 では、case001 と破過曲線がほぼ一致している。この結果より、本年度 15MI52 号孔で実施した試験で回収率が大きく減少した要因としては、15MI53 号孔に間隙水圧モニタリング装置が設置されていたことが大きく影響した可能性が考えられる。また、15MI53 号孔の間隙水圧モニタリング装置抜管時に該当区間から大量のウラン含有水が排水されたことも、本解析結果の妥当性を裏付けるものと言える。

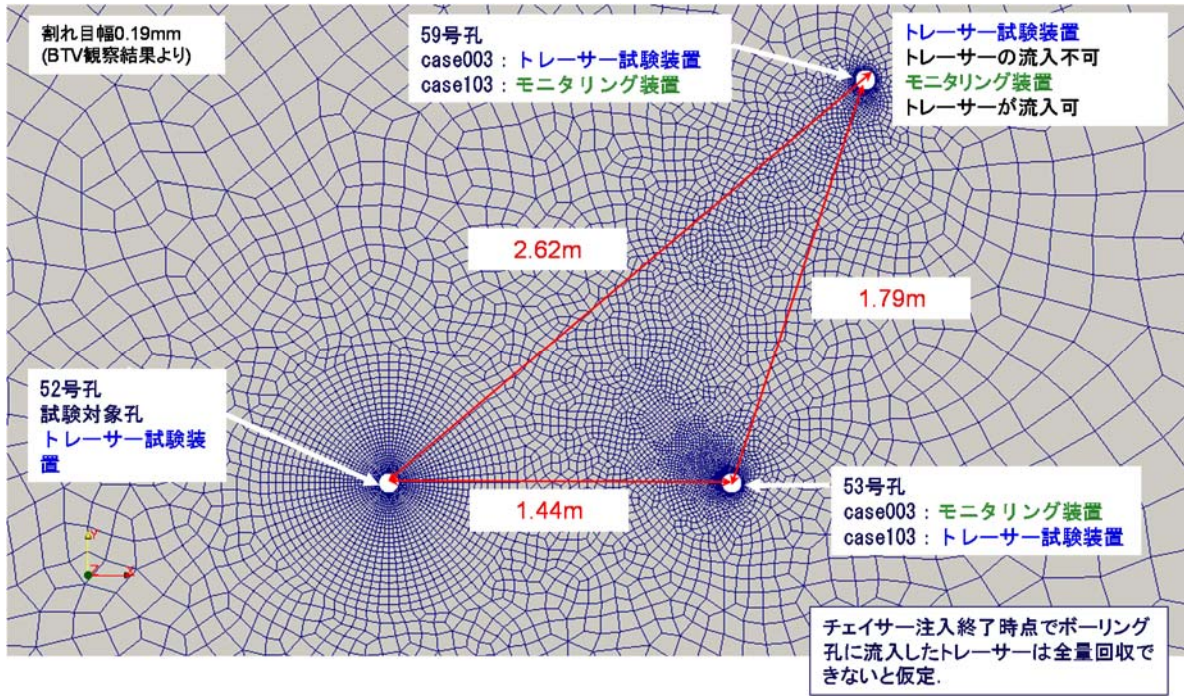


図 3.4.1-5 15MI52 号孔周辺孔の装置設置状況の影響検討のための解析モデル

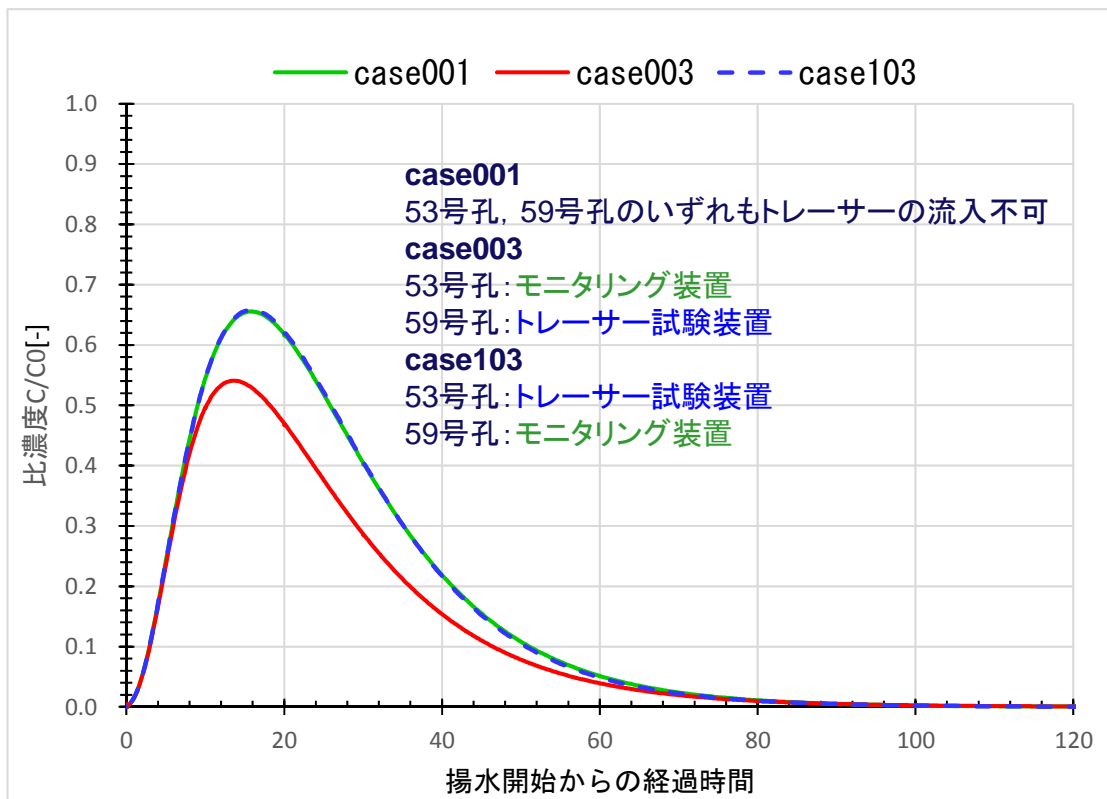


図 3.4.1-6 15MI52 号孔周辺孔の装置設置状況の影響検討のための解析結果 (破過曲線)

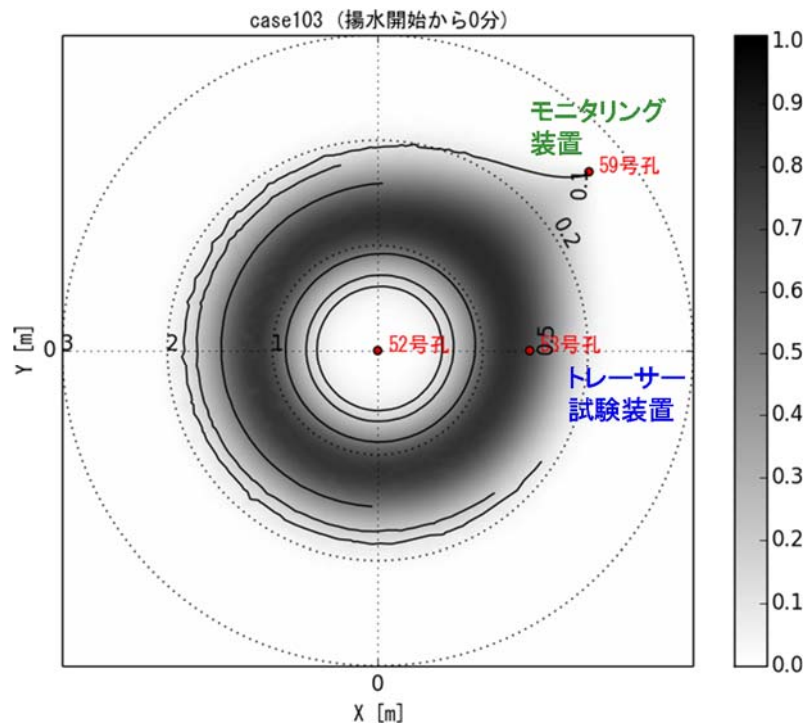
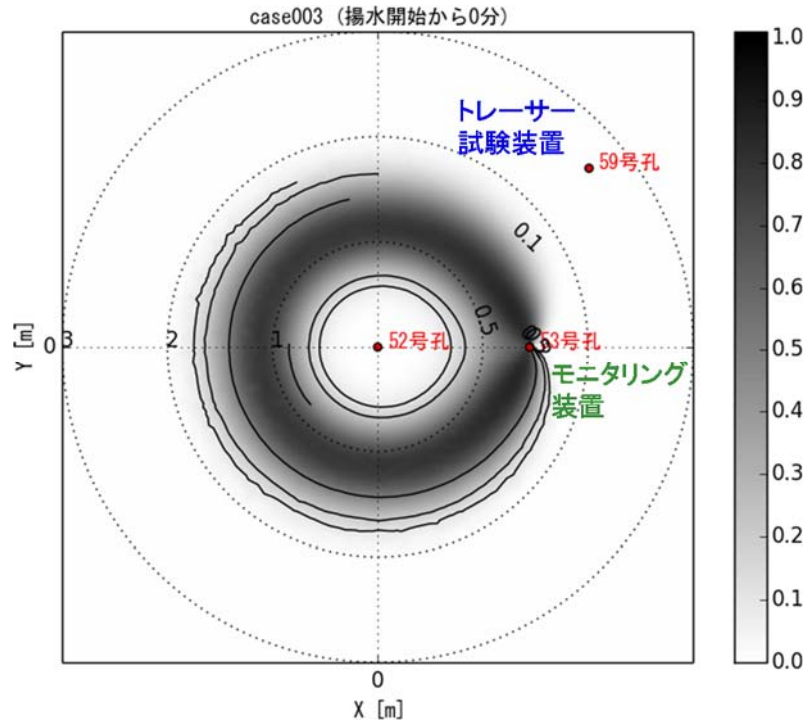


図 3.4.1-7 15MI52号孔周辺孔の装置設置状況の影響検討のための解析結果 (チェイサー注入終了時点におけるコンター図)



### 3.4.1.3 単孔トレーサー試験の評価解析（割れ目モデル）

#### (1) 解析概要（割れ目モデル）

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 3.4.1-8 に示す。本解析では、ボーリング孔（ $\phi 86\text{mm}$ ）に相当する部分を除いた半径 30m の割れ目のみをモデル化した割れ目モデルを用いる。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。

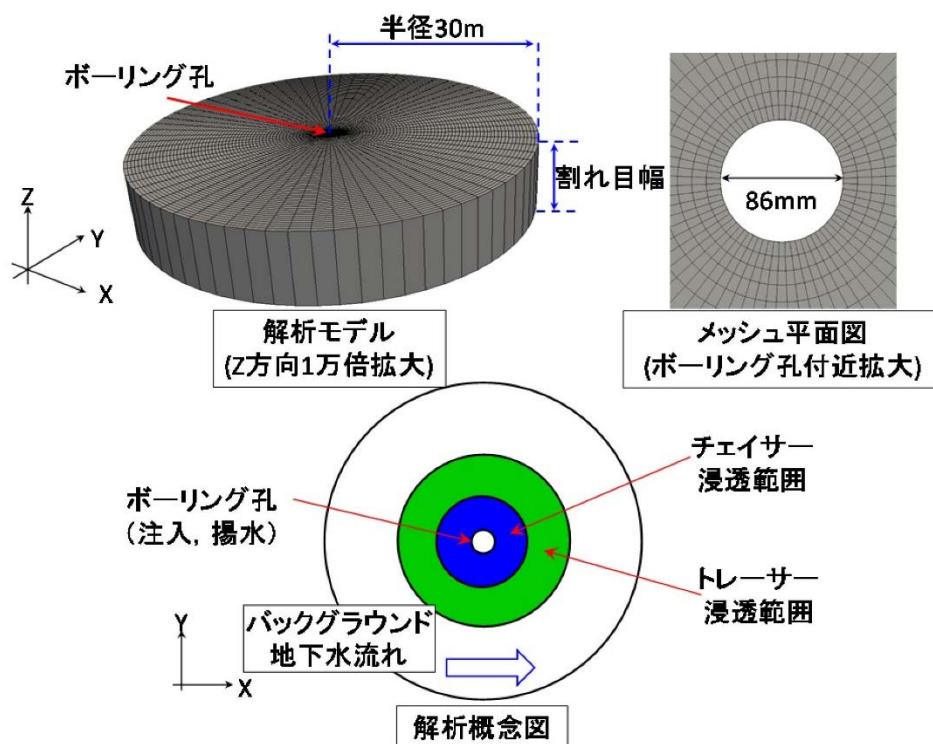


図 3.4.1-8 解析モデル（割れ目モデル）

#### (2) 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。原位置試験においてはトレーサー循環バルブが良好に動作していたことから、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、16MI59 号孔で行った試験のうち、16S59T13、16S59T14、16S59T15 の試験について評価を行うこととした。

### (3) 誤差計算方法

数値計算終了後、始めに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、試行的な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非収着性トレーサーの破過曲線のピーク時間が合うように時間の補正を行って誤差を計算することとした。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。

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sum \sqrt{C_1 \times (C_1 - C_2)^2} \quad (3.4.1-8)$$

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。

### (4) 非収着性トレーサーの評価解析結果（割れ目モデル）

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 3.4.1-4）、それぞれについて誤差を計算する。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、本解析では割れ目幅を 0.10mm としてモデルを作成し、表 3.4.1-4 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こととした。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。今回は、 $\delta D$  の破過曲線について誤差を計算する。

表 3.4.1-4 非吸着性トレーサーの評価解析条件

集中定数 $\tau$ [-] (10 通り)	7.0e-02、5.0e-02、2.5e-02、2.0e-02、1.5e-02、 1.0e-02、7.0e-03、5.0e-03、3.0e-03、1.0e-03
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、8.5e-02、1.7e-01、4.2e-01、8.5e-01、 2.5e+00、4.2e+00、5.9e+00

(5) 解析結果

非吸着性トレーサーの評価解析結果として、誤差分布を図 3.4.1-9～図 3.4.1-11 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、集中定数が  $1.0e-02 \sim 1.50e-02$ 、地下水流量が  $0 \sim 0.846 \text{ mL/min/m}$  の場合において、誤差が最も小さくなる結果となった。

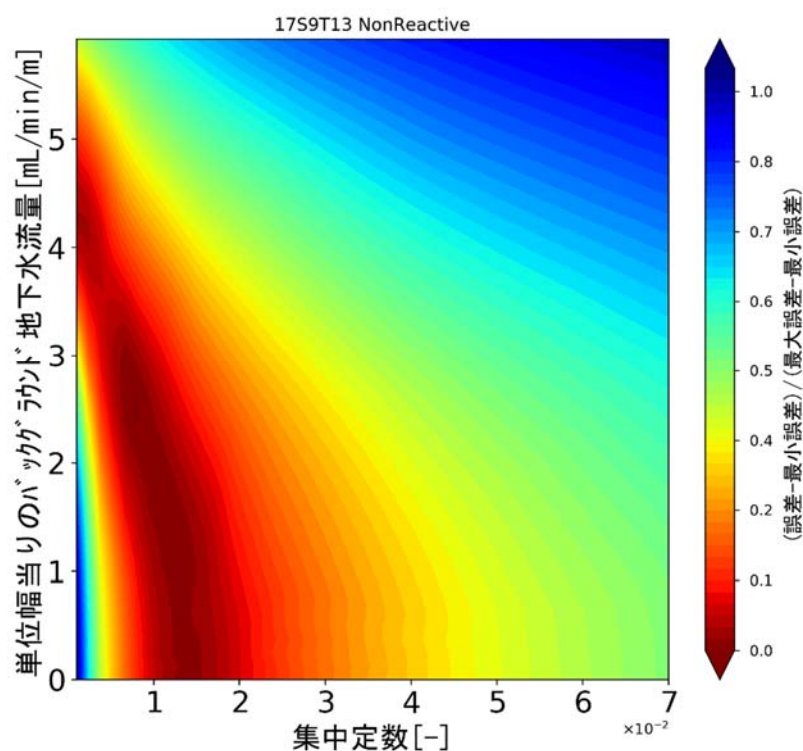


図 3.4.1-9 割れ目モデルを用いた 17S9T13 の非吸着性トレーサーの解析結果 (誤差分布)

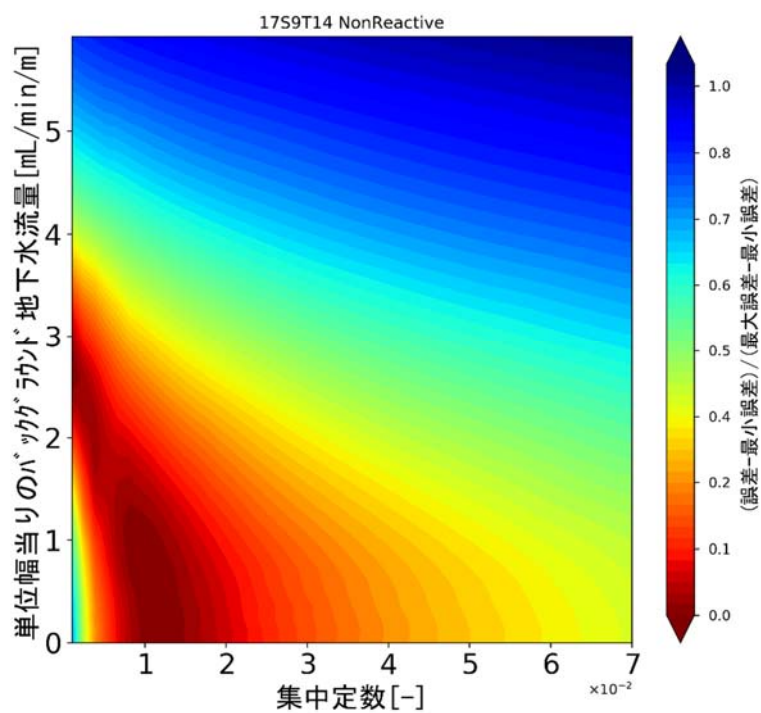


図 3.4.1-10 割れ目モデルを用いた 17S59T14 の非吸着性トレーサーの解析結果 (誤差分布)

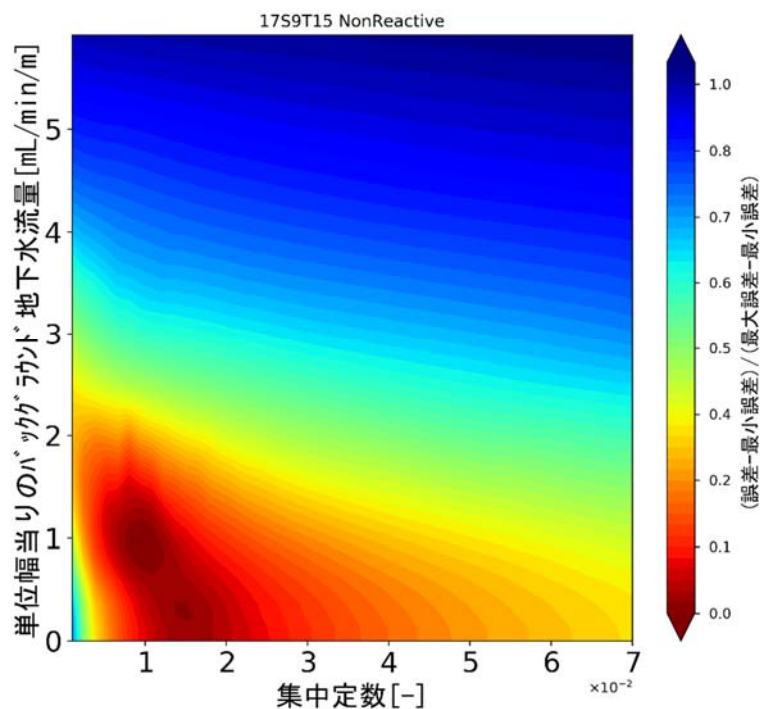


図 3.4.1-11 割れ目モデルを用いた 17S59T15 の非吸着性トレーサーの解析結果 (誤差分布)

(6) 収着性トレーサーの評価解析結果（割れ目モデル）

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100の間で24通り変化させることとした。RbとBaの破過曲線に対して計算した誤差の計算結果と、再現性が最も良かった遅延係数の破過曲線を図3.4.1-12～図3.4.1-14に示す。評価解析の結果、Rbの破過曲線を最も良好に再現する遅延係数は5～10程度、Baの破過曲線を最も良好に再現する遅延係数は25～30程度と評価された。各収着性トレーサーの破過曲線のピーク濃度は概ね良好に再現できたが、ピーク位置については解析結果の方が早くなっており、Baの結果ほどその差は大きくなった。

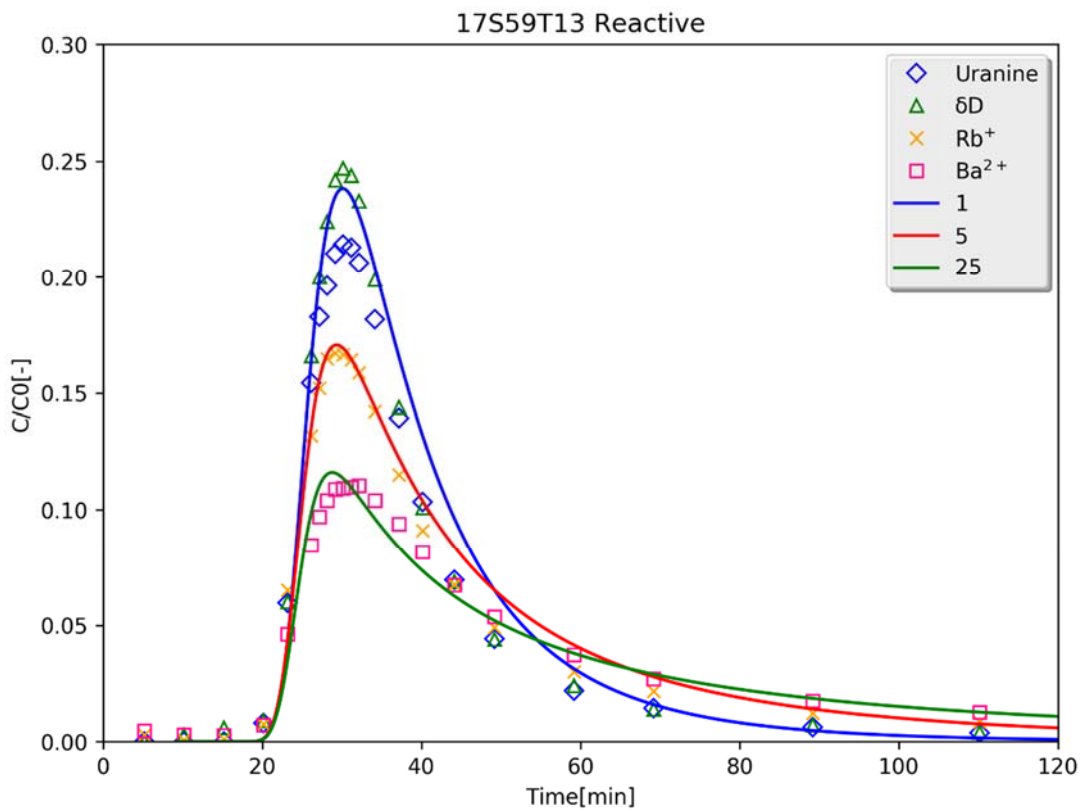
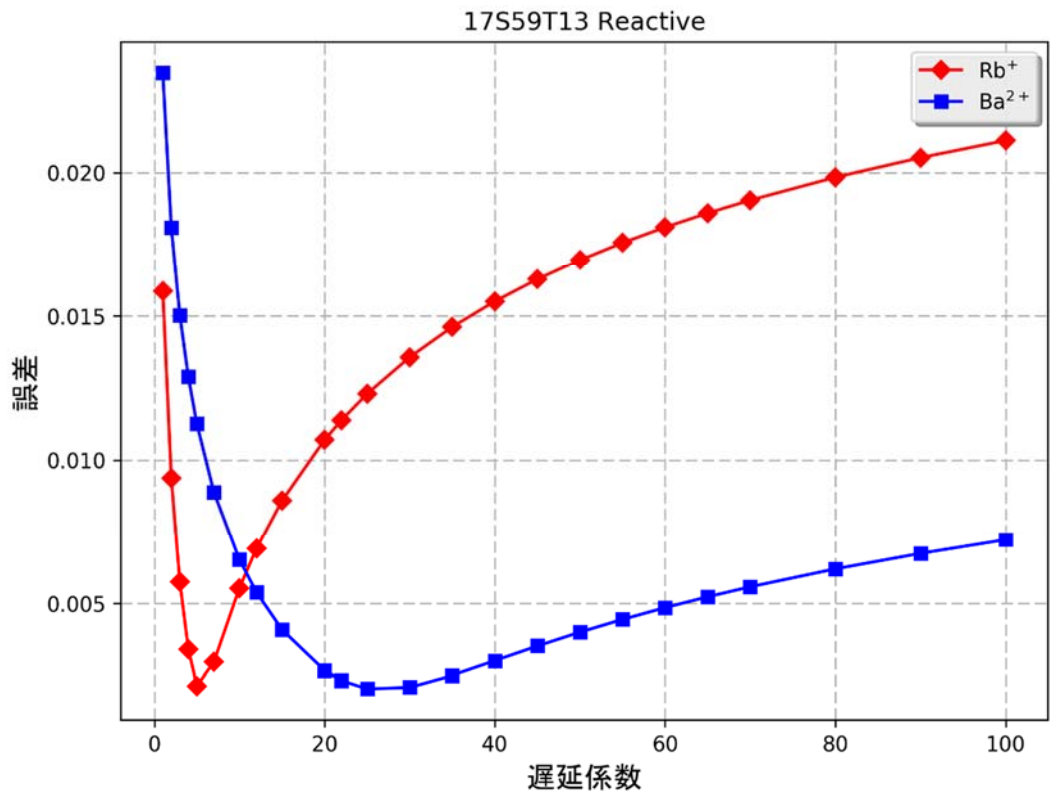


図 3.4.1-12 割れ目モデルを用いた 17S59T13 の収着性トレーサーの解析結果  
(上：誤差計算結果、下：破過曲線)

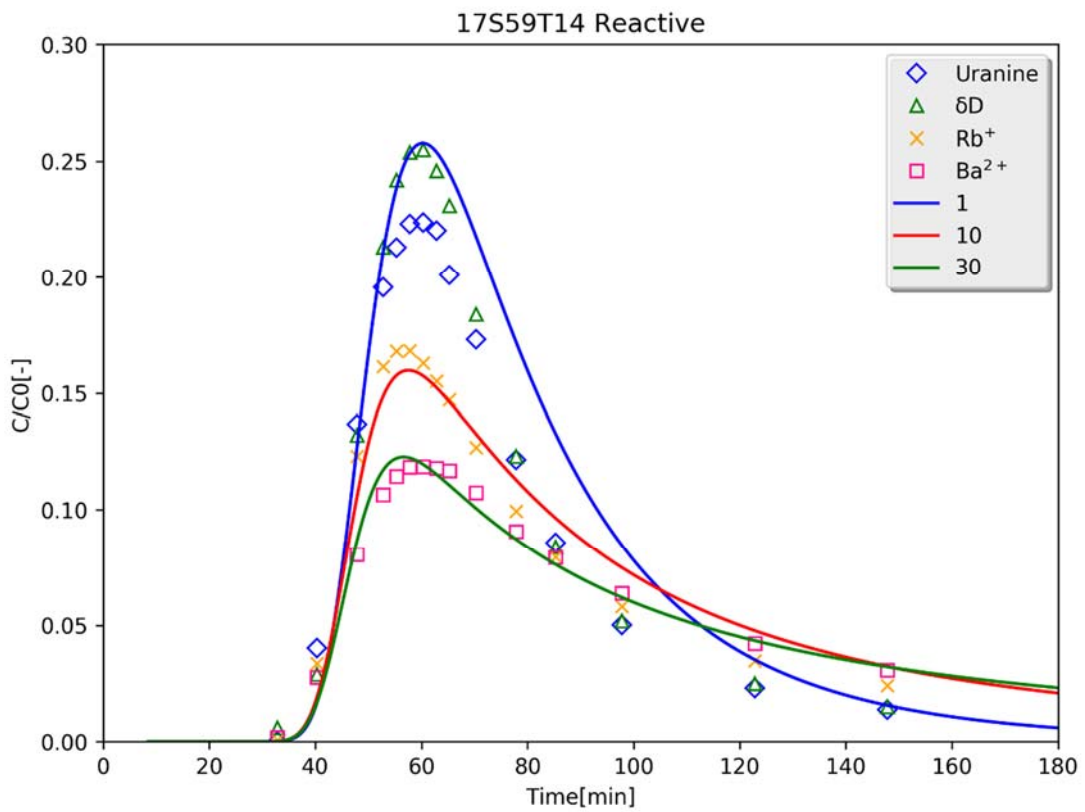
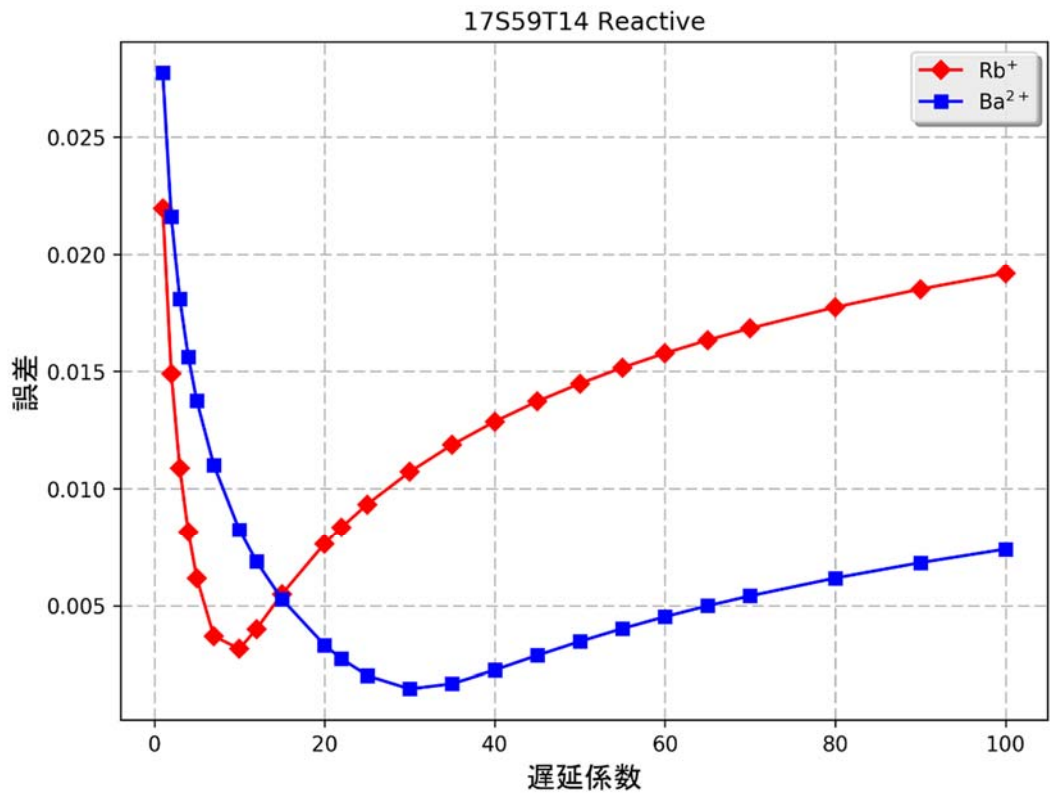


図 3.4.1-13 割れ目モデルを用いた 17S59T14 の収着性トレーサーの解析結果  
(上：誤差計算結果、下：破過曲線)

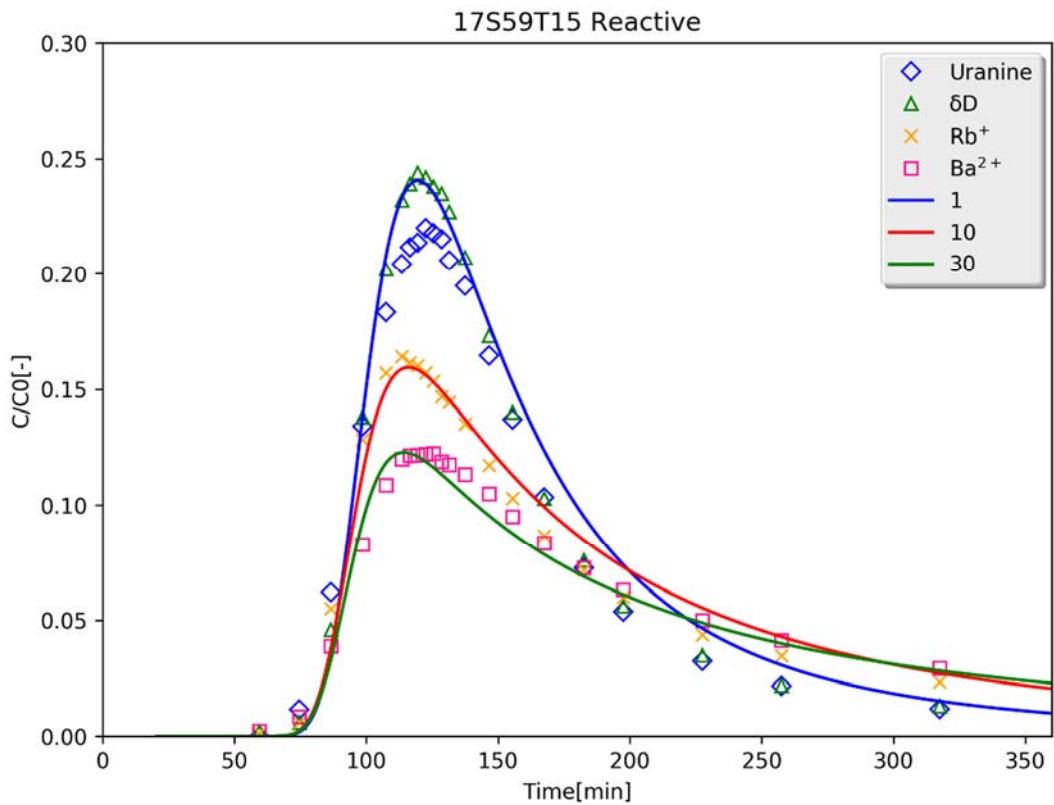
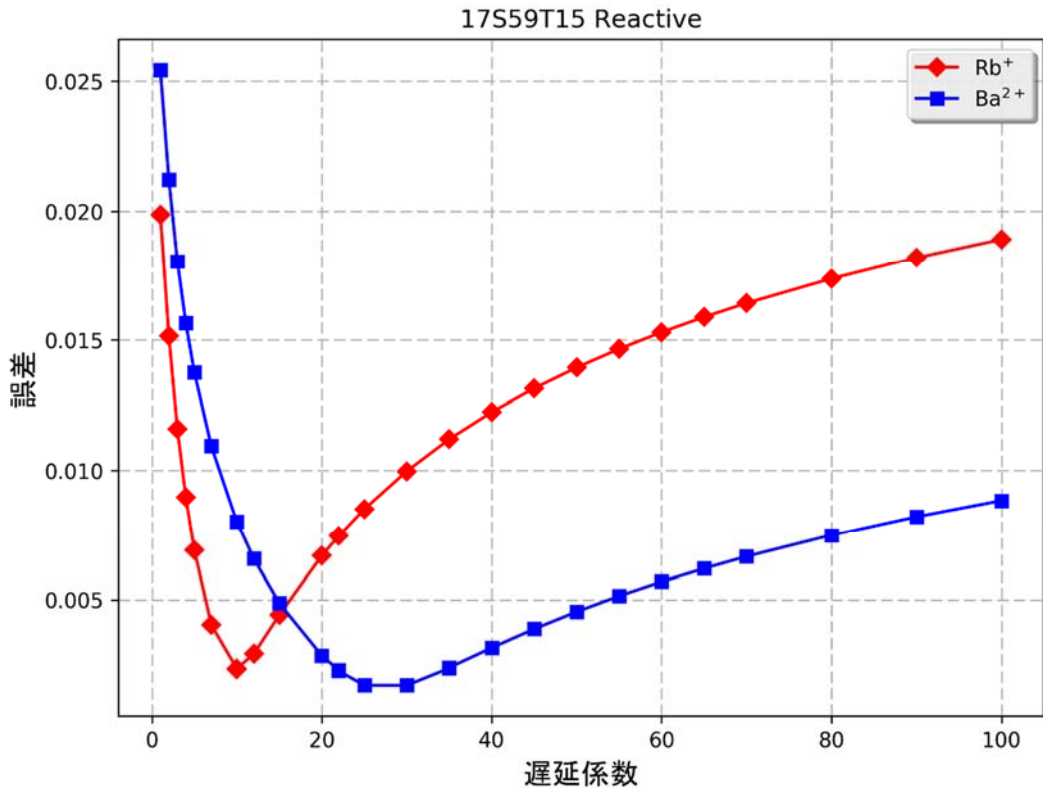


図 3.4.1-14 割れ目モデルを用いた 17S59T15 の収着性トレーサーの解析結果  
(上：誤差計算結果、下：破過曲線)



#### 3.4.1.4 単孔トレーサー試験の評価解析（複合モデル）

前項では、割れ目モデルを用いて評価解析を行ったが、試験結果の破過曲線について、非吸着性トレーサーの破過曲線のピーク濃度を概ね良好に再現することができたが、吸着性トレーサーのピーク位置には差が生じた。この差が生じた要因を検証するため、本項では割れ目に加えてマトリクスを考慮したモデル（複合モデル）を用いた解析を実施する。

##### (1) 解析概要（複合モデル）

本解析で使用する解析モデルを図 3.4.1-15 に示す。解析モデルは、割れ目に加えて岩盤のマトリクスを考慮したモデルとし、計算時間短縮のため 30 度分をモデル化し、バックグラウンド地下水流れは考慮しない。節点数は 23,184、要素数は 18,876 であり、マトリクスの厚みは約 30mm とした。

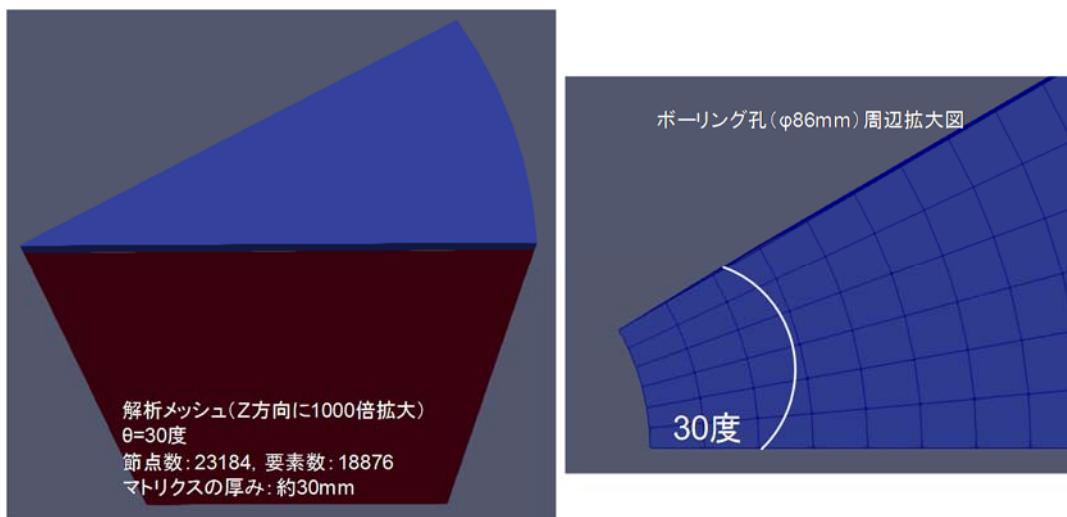


図 3.4.1-15 解析モデル（複合モデル）

##### (2) 解析条件

評価解析は、2016 年度に 15MI52 号孔の試験区間 15.21～15.41mabh で実施した 16S52T3 の試験条件を対象とする。以下に 16S52T3 で実施した試験条件を整理する。

試験条件：16S52T3

注入流量：93mL/min、揚水流量：60mL/min

トレーサー注入時間：10min、チェイサー注入時間：5min

(3) 解析結果 (複合モデル)

(a) 割れ目の集中定数、遅延係数に関する検討

岩盤のマトリクスは考慮せずに、割れ目のみをモデル化したモデルを用い、割れ目の集中定数、割れ目の遅延係数を変動パラメーターとして解析を行う。割れ目の集中定数は、 $5.0 \times 10^{-4}$ 、 $1.0 \times 10^{-3}$ 、 $1.5 \times 10^{-3}$ とした (図 3.4.1-16)。解析の結果、集中定数が  $1.0 \times 10^{-3}$  の場合において、非吸着性トレーサーの破過曲線を最も良好に再現することができた。集中定数を  $1.0 \times 10^{-3}$  とし、割れ目の遅延係数を 1, 2, 5, 10 として行った解析結果を図 3.4.1-17 に示す。前節の結果と同様に、割れ目の遅延係数を大きくするに従ってピーク濃度は減少し試験結果に近くなるが、ピーク位置は早くなるため、試験結果の破過曲線とは差が大きくなる傾向が確認された。

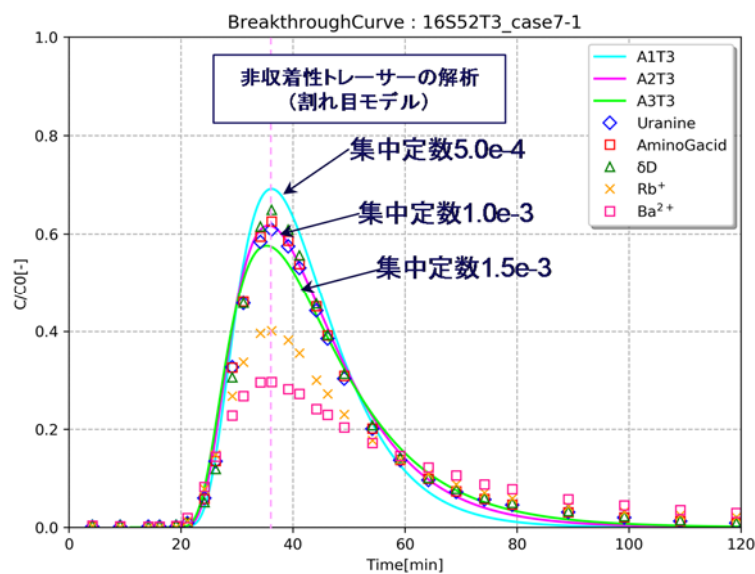


図 3.4.1-16 割れ目の集中定数に関する解析結果

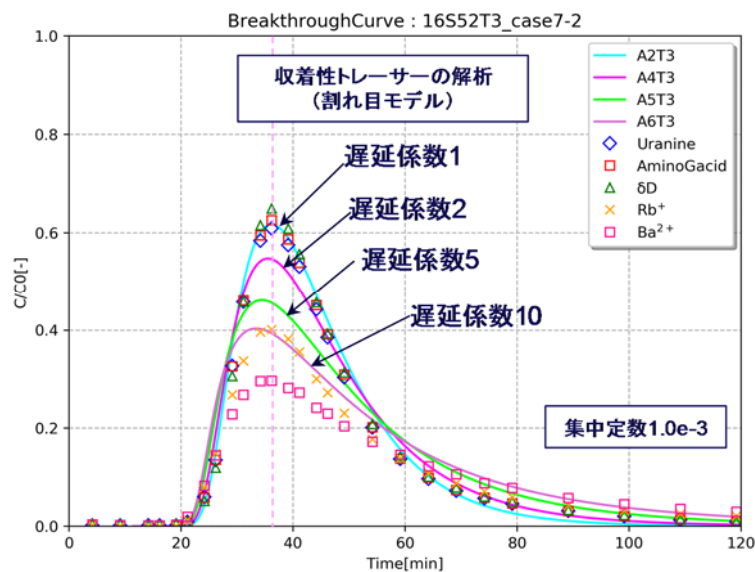


図 3.4.1-17 割れ目の遅延係数に関する解析結果

(b) マトリクスの実効拡散係数に関する解析結果

割れ目に加えて岩盤のマトリクスを考慮した複合モデルを用い、マトリクスの実効拡散係数を変動パラメーターとして解析を行った結果を図 3.4.1-18 に示す。割れ目の集中定数は  $1.0 \times 10^{-3}$  とし、マトリクスの間隙率は 0.01、マトリクスの分配係数は 0 とした。自由水中の拡散係数は、ウラニンが  $4.5 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{sec}$ 、Rb が  $2.1 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{sec}$ 、Ba が  $8.5 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{sec}$  であり、國丸他(2012)によれば、花崗岩の割れ目近傍の岩石試料を用いた室内拡散試験で得られたウラニンの実効拡散係数は  $4.08 \times 10^{-14} \text{m}^2/\text{sec}$ 、Rb と同じ一価の陽イオンの Cs の実効拡散係数が  $1.59 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$  が得られている。このことから、マトリクスの実効拡散係数が、以下の値を設定した。

A2T3 : 割れ目モデル (マトリクスへの拡散なし)

B1T3 : マトリクスの実効拡散係数  $1.0 \times 10^{-14} \text{m}^2/\text{sec}$

B2T3 : マトリクスの実効拡散係数  $1.0 \times 10^{-13} \text{m}^2/\text{sec}$

B3T3 : マトリクスの実効拡散係数  $1.0 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$

B4T3 : マトリクスの実効拡散係数  $1.0 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{sec}$

解析で得られた破過曲線は、実効拡散係数を変えたとしてもほとんど変わっておらず、割れ目モデルを用いて計算した結果 (A2T3) とほとんど同じ結果となった。このことから、非吸着性トレーサーの破過曲線においては、マトリクスへの拡散の影響はほとんど表れていないと考えられる。

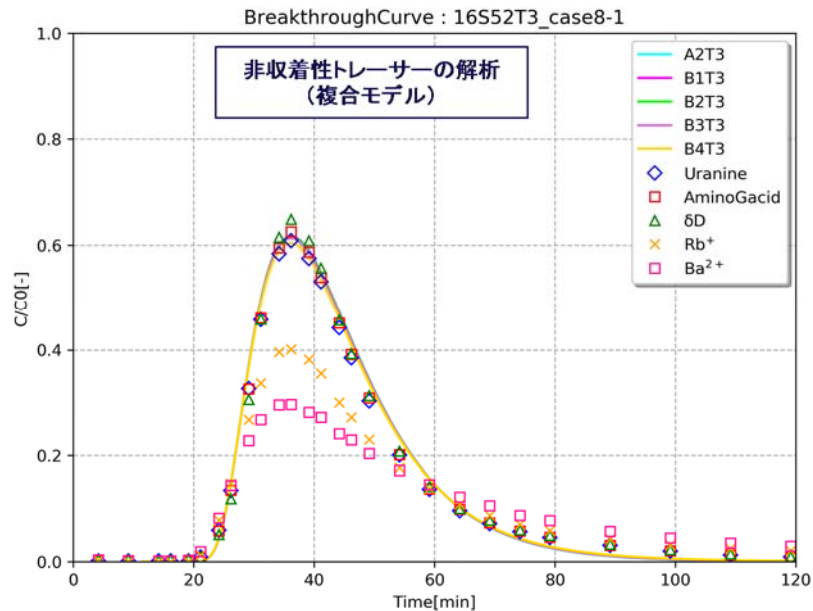


図 3.4.1-18 マトリクスの実効拡散係数に関する解析結果

(c) マトリクスの分配係数に関する解析結果

複合モデルを用い、マトリクスの分配係数を変動パラメーターとして行った解析結果を図 3.4.1-19 に示す。割れ目の集中定数は  $1.0 \times 10^{-3}$  とし、マトリクスの間隙率は 0.01 とし、マトリクスの実効拡散係数は、室内拡散試験で Rb と同じ一価の陽イオンである Cs の実効拡散係数に近い  $1.0 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$  を用いる。また、マトリクスの分配係数は、室内でのバッチ試験の結果を考慮し、以下の条件を設定した。

B3T3 : マトリクスの分配係数 0 (非収着性トレーサー)

C1T3 : マトリクスの分配係数 0.1mL/g

C2T3 : マトリクスの分配係数 0.3mL/g

C3T3 : マトリクスの分配係数 0.5mL/g

C4T3 : マトリクスの分配係数 0.7mL/g

C5T3 : マトリクスの分配係数 1.0mL/g

解析で得られた破過曲線は、マトリクスの分配係数を大きくするに従ってピーク濃度が減少する結果となった。特に、マトリクスの分配係数を大きくするに従ってピーク濃度が減少することに加え、ピーク位置はほとんど変わっておらず、割れ目モデルで得られた結果の傾向とは異なり、原位置試験の破過曲線の傾向に近い結果が得られた。このことから、収着性トレーサーの破過曲線は、少なからずマトリクスへの収着の効果を受けており、その影響でピーク位置はそのままにピーク濃度が減少した可能性が考えられる。

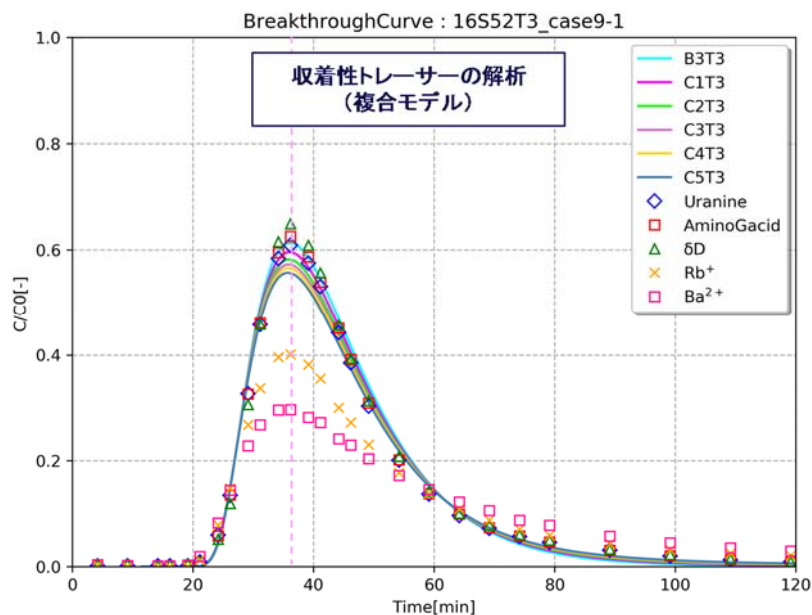


図 3.4.1-19 マトリクスの分配係数に関する解析結果

(d) 割れ目表面吸着係数に関する解析結果

複合モデルを用い、割れ目表面の吸着係数を変動パラメーターとして行った解析結果を図

3.4.1-20に示す。割れ目の集中定数は $1.0 \times 10^{-3}$ 、マトリクスの間隙率は0.01、マトリクスの実効拡散係数は $1.0 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ 、マトリクスの分配係数は $0.7 \text{mL/g}$ として解析を行った。割れ目表面への吸着係数は、室内試験の結果を参考にし、以下の条件で解析を行った。

B3T3：割れ目表面の吸着係数0、マトリクスの分配係数0

C4T3：割れ目の表面吸着係数0

D1T3：割れ目の表面吸着係数 $2.6 \times 10^{-5}$

D2T3：割れ目の表面吸着係数 $1.3 \times 10^{-4}$

D3T3：割れ目の表面吸着係数 $3.9 \times 10^{-3}$

D4T3：割れ目の表面吸着係数 $7.8 \times 10^{-2}$

解析で得られた破過曲線は、割れ目の表面吸着係数を大きくするに従ってピーク濃度が減少する傾向が確認された。また、マトリクスの分配係数の場合と同様に、D1T3、D2T3、D3T3はピーク位置がほとんど変わっておらず、試験結果に近い傾向が確認された。一方で、D4T3はわずかにピーク位置が早くなる結果となった。これは、割れ目表面への吸着の効果が大きいため、マトリクスへの拡散の影響が小さくなり、割れ目モデルで得られた破過曲線の傾向に近づいていると言える。試験結果の破過曲線のピーク位置は、非吸着性トレーサー、吸着性トレーサーともにほとんど変わっていないことから、割れ目表面への吸着の効果があっても、それほど大きい値ではないことが推定される。

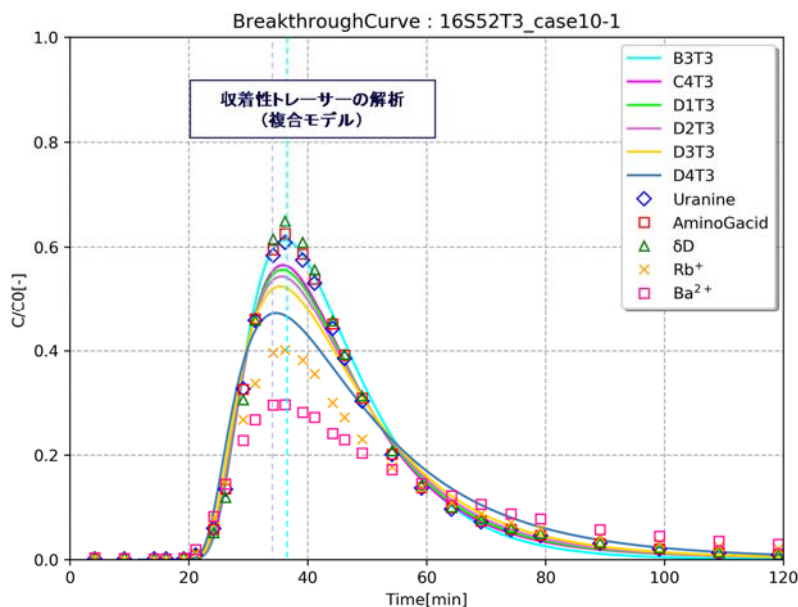


図 3.4.1-20 割れ目表面吸着係数に関する解析結果

割れ目のみをモデル化した解析モデルを用いて行った解析では、割れ目の遅延係数を大きくするに従ってピーク濃度は小さくなり試験結果で得られた収着性トレーサーの破過曲線の傾向に近づくが、同時にピーク位置が早くなってしまうため、試験結果との差が大きくなってしまった。これらの課題に対し、本項では、割れ目に加え岩盤マトリクスを考慮した複合モデルを用いて解析を行った。その結果、マトリクスの実効拡散係数、マトリクスの分配係数、割れ目表面の吸着係数を変動パラメーターとした解析を行うことにより、ピーク位置はほぼ変わらずにピーク濃度が減少する試験結果の傾向に近い解析結果となった。このことから、試験結果の破過曲線では、マトリクスへの拡散、収着、割れ目表面への吸着が関係している可能性が確認された。また、本項で用いたマトリクスの実効拡散係数、マトリクスの分配係数、割れ目表面の吸着係数の値は、孔間トレーサー試験の評価解析で評価されたパラメーターに近いが、単孔トレーサー試験のピーク濃度の減少傾向を再現しきれていない。このことから、孔間トレーサー試験に比べて大きめの拡散、収着の効果が評価される可能性が考えられる。一方で、試験時間が短く岩盤とトレーサーの接触時間が短いために、非平衡の収着現象が生じている可能性もあり、今後は非平衡の収着現象を考慮した評価を行って単孔トレーサー試験の評価を行う必要があると考えられる。

### 3.4.2 孔間トレーサー試験の評価

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吸着性トレーサーのウラニン、重水素、吸着性トレーサー $\text{Rb}^+$ および $\text{Ba}^{2+}$ 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。非吸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、吸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14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17W5259T13-15試験と17W5259T18-20試験の2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15mの正方形とする。解析に使用した有限要素メッシュを図3.4.2-1~4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2.62m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9層の六面体要素で表現した。節点数1,061,114、要素数1,060,284(2次元要素106,158、3次元要素954,126)である。

割れ目の開口部分について、高精度BTVの観察結果より開口率60%とした。つまり、岩石基質への拡散・吸収は、全割れ目面積の60%に相当する領域においてのみ生じるものとした。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。自由水中のウラニ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ニ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2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0.2%程度と推定された。トレーサー試験開始前に実施した定流量の揚水試験によれば、試験対象割れ目の透水量係数は15MI52号孔では $7.6 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{sec}$ 、16MI59号孔では $1.9 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{sec}$ であり、幾何平均は $3.8 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{sec}$ である。したがって、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(1m)あたり0.0047 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。

ウラニンの移行に関する数値シミュレーションの結果、17W5259T13-15試験と17W5259T18-20試験のいずれにおいても割れ目の平均開口幅を0.13mm、縦分散長を0.2m(横分散長は0.02m)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ニンの破過曲線は試験結果に最も良く一致した(図 3.4.2-7、8)。ウラニンのような非収着性トレーサーの破過曲線では、立ち上がりからピーク濃度に達するまで部分が割れ目内の主要な水みちによる移行をの影響を受けていると考える。そのため、非収着性トレーサーの破過曲線のフィッティング解析では、立ち上がりからピーク濃度までの部分が実測値に一致するような開口幅や分散長を選定するようにする。高解像度のボアホール TV カメラを用いた孔壁観察によれば、試験対象割れ目の開口幅は 15MI52 号孔で 0.19 mm である。16MI59 号孔については高解像度のボアホール TV カメラによる試験対象割れ目の観察は行っていない。一方、トレーサー試験開始前に実施した定流量の揚水試験によれば、試験対象割れ目の透水量係数は 15MI52 号孔では  $7.6 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/sec、16MI59 号孔では  $1.9 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/sec であり、3 乗則によれば割れ目の開口幅はそれぞれ 0.14 mm、0.069 mm に相当する。このように、トレーサー試験から得られた割れ目開口幅は、高解像度のボアホール TV カメラによる計測値や、透水量係数から 3 乗則により算出した数値と整合性がある。

一方、同定された縦分散長 0.2 m は、孔間距離 2.62 m の 7.6 % に相当し、多くの観測データで縦分散長は移行距離の 1/10 倍を中心に 1/100~1 倍の範囲に分布するとした Gelhar (1992) の調査結果と調和的である。

続いて、17W5259T13-15 試験と 17W5259T18-20 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。割れ目の表面吸着係数については、2 章 3 節の異なる粒径の岩石粉体試料を用いた収着バッチ試験により推定した数値、Rb<sup>+</sup> については  $4.3 \times 10^{-5}$  m、Ba<sup>2+</sup> については  $4.7 \times 10^{-5}$  m をそれぞれ用いることとした。自由水中の分子拡散係数は、Li *et al.* (1974) に基づき Rb<sup>+</sup> については  $2.03 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/sec、Ba<sup>2+</sup> については  $8.30 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/sec とそれぞれ設定した。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、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、2 価の陽イオンである Sr<sup>2+</sup> の実効拡散係数の幾何平均値は  $1.09 \times 10^{-12}$  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。一方、自由水中の Sr<sup>2+</sup> の分子拡散係数は  $7.90 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/sec で、同じ価数の陽イオンの場合実効拡散係数は分子拡散係数に比例するものとして、Ba<sup>2+</sup> の実効拡散係数は  $1.15 \times 10^{-12}$  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、17W5259T13-15 試験と 17W5259T18-20 試験のウラニンの評価解析で同定された値を使用した。

Rb<sup>+</sup> について 17W5259T13-15 試験の数値シミュレーションの結果を図 3.4.2-9 に、17W5259T18-20 試験のシミュレーション結果を図 3.4.2-10 にそれぞれ示す。収着性トレーサーの破過曲線では、ピーク濃度より後の部分が岩石基質への拡散・収着の影響を受けていると考える。そのため、収着性トレーサーの破過曲線のフィッティング解析では、ピーク濃度より後ろの部分が実測値に一致するような分



配係数を選定するようにする。17W5259T13-15 試験では、岩石基質に対する分配係数を 0.67 mL/g とした場合に、17W5259T18-20 試験では岩石基質に対する分配係数を 0.62 mL/g とした場合に、破過曲線は実測値とよく一致した。破過曲線を良好に再現できたことから、計算で用いた表面吸着係数の値は妥当であった可能性が高い。また、これらの分配係数は、2 章 3 節で推定した岩石粒子内部への拡散・吸収による分配係数の数値に近い。

Ba<sup>2+</sup>について 17W5259T13-15 試験のシミュレーション結果を図 3.4.2-11 に、17W5259T18-20 試験のシミュレーション結果を図 3.4.2-12 にそれぞれ示す。Ba<sup>2+</sup>については、表面吸着係数として室内収着バッチ試験で推定した数値  $4.7 \times 10^{-5}$  m をそのまま使用すると、破過曲線を再現することはできなかった。表面吸着係数を約 1/2 の  $2.5 \times 10^{-5}$  m に変更してシミュレーションを行ったところ、17W5259T13-15 試験では岩石基質に対する分配係数を 1.78 mL/g、17W5259T18-20 試験では岩石基質に対する分配係数を 1.48 mL/g とした場合に、破過曲線は実測値とよく一致した。

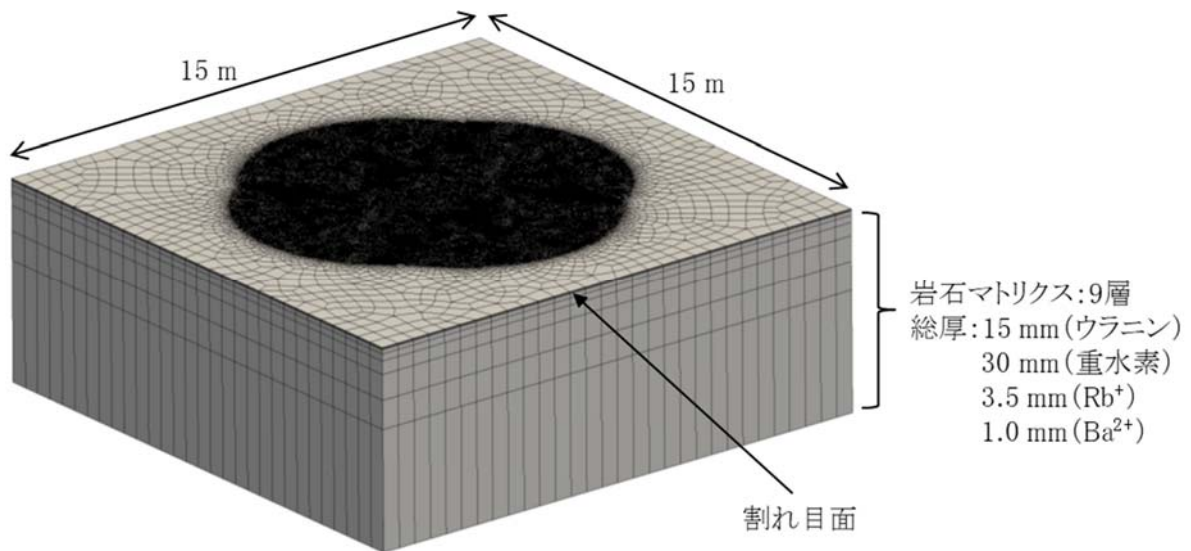


図 3.4.2-1 解析モデル (全体図)

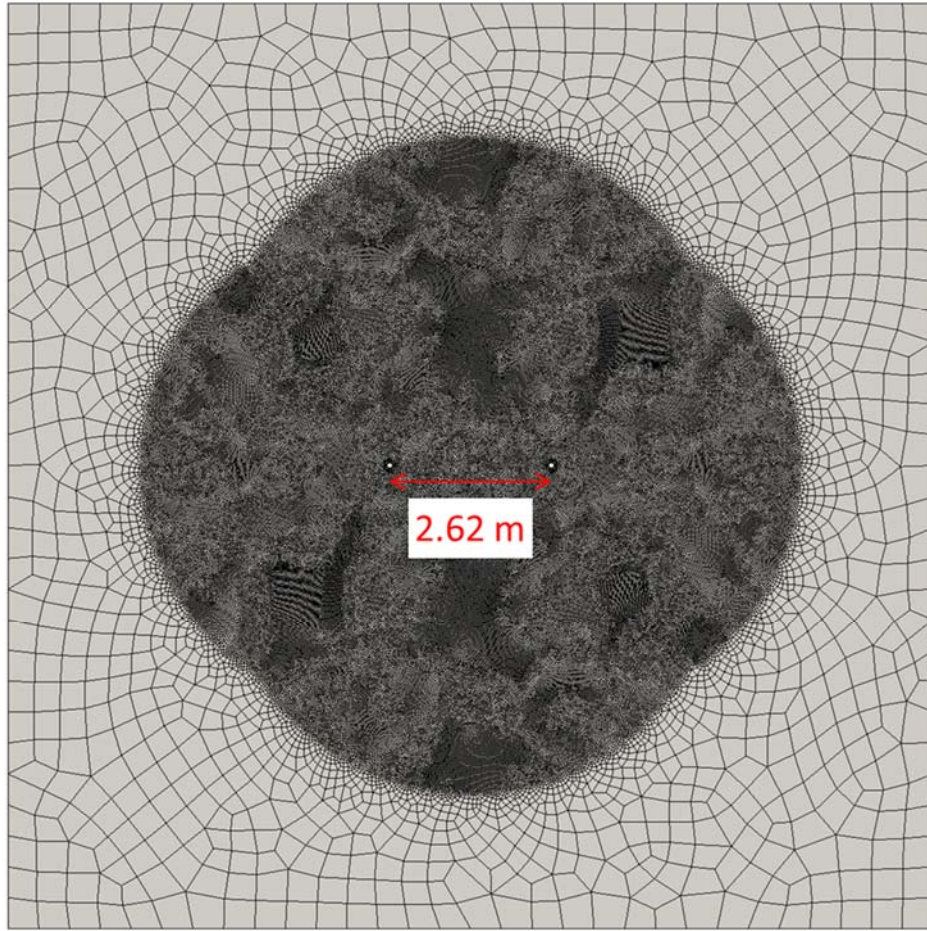


図 3.4.2-2 割れ目面全体メッシュ

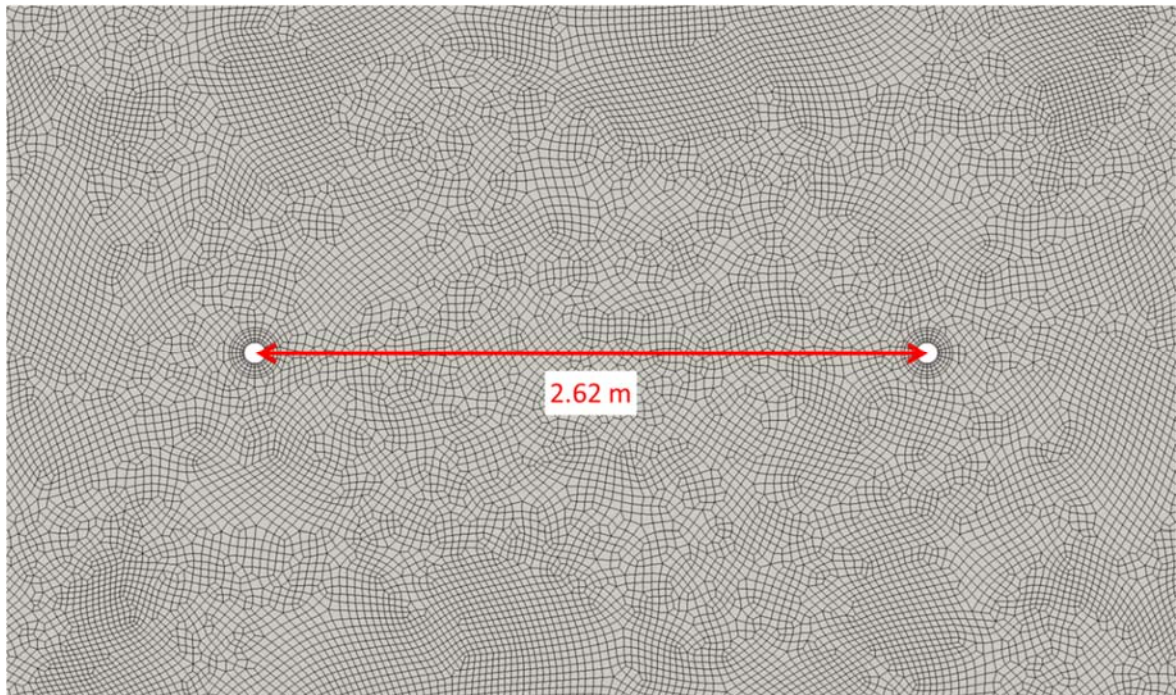


図 3.4.2-3 割れ目面孔間メッシュ

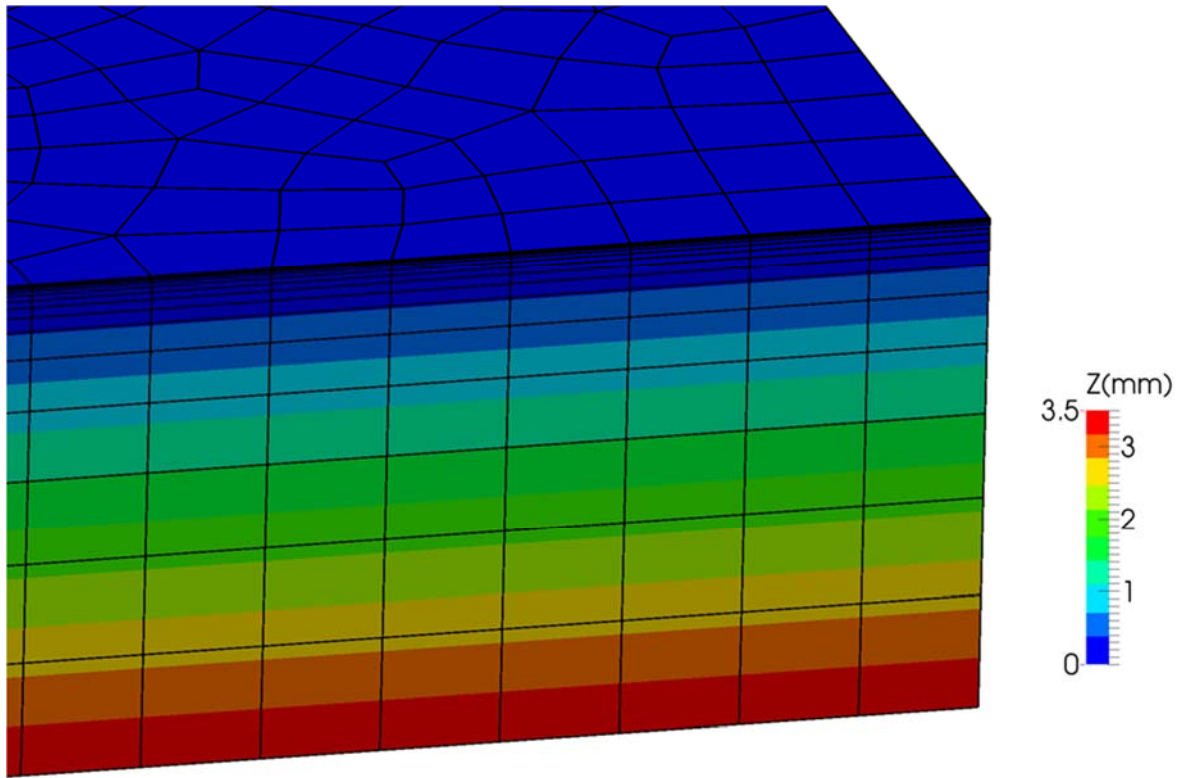


図 3.4.2-4 メッシュの厚み分布 (厚み 3.5 mm の場合)

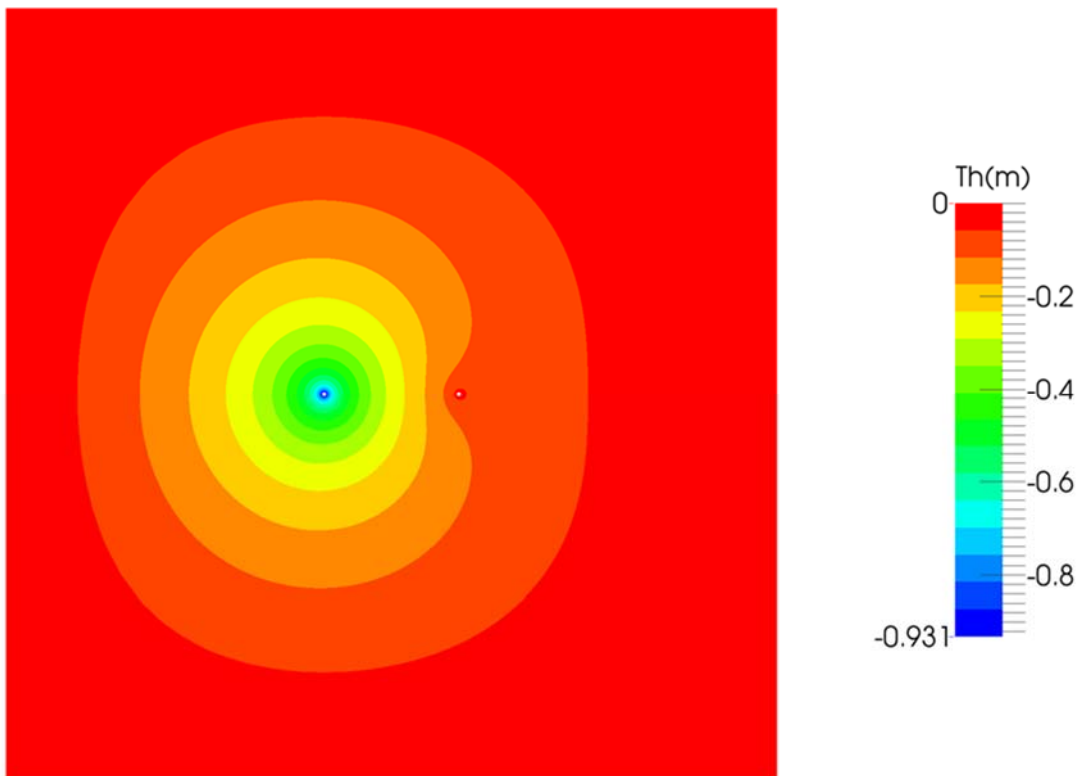


図 3.4.2-5 割れ目内の全水頭分布の計算結果 (17W5259T13-15 試験)

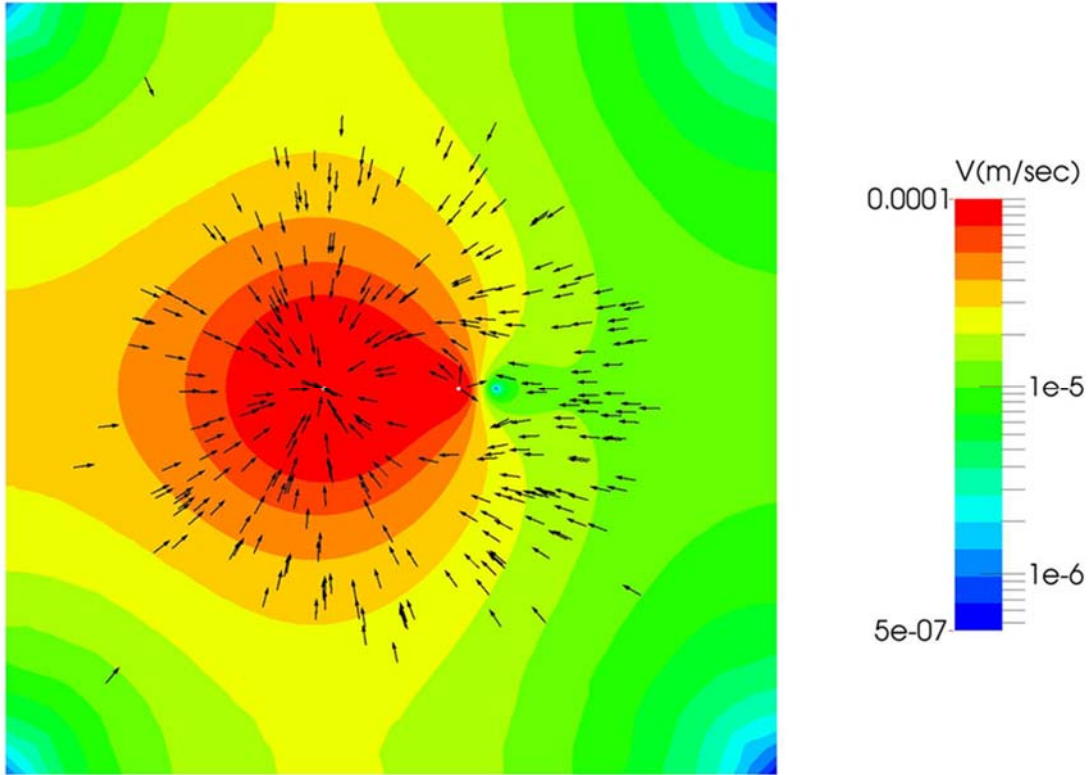


図 3.4.2-6 割れ目内のダルシー流速・流向分布の計算結果 (17W5259T13-15 試験)

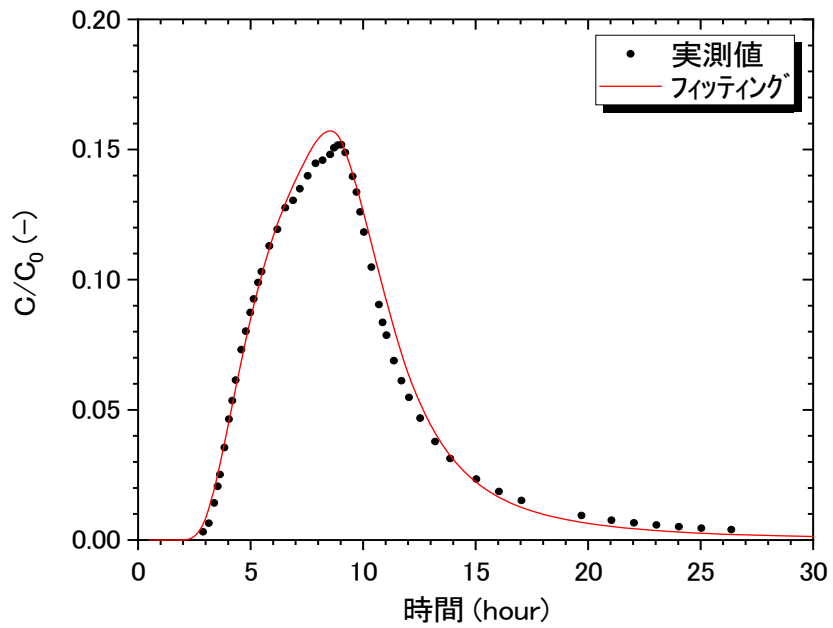


図 3.4.2-7 ウラニンの破過曲線のフィッティング (17W5259T13-15 試験)

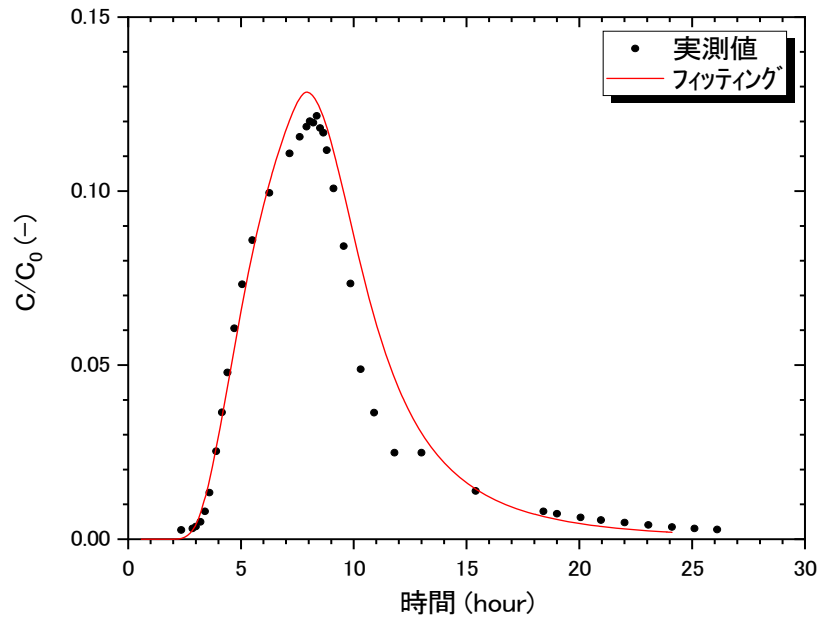


図 3.4.2-8 ウランの破過曲線のフィッティング (17W5259T18-20 試験)

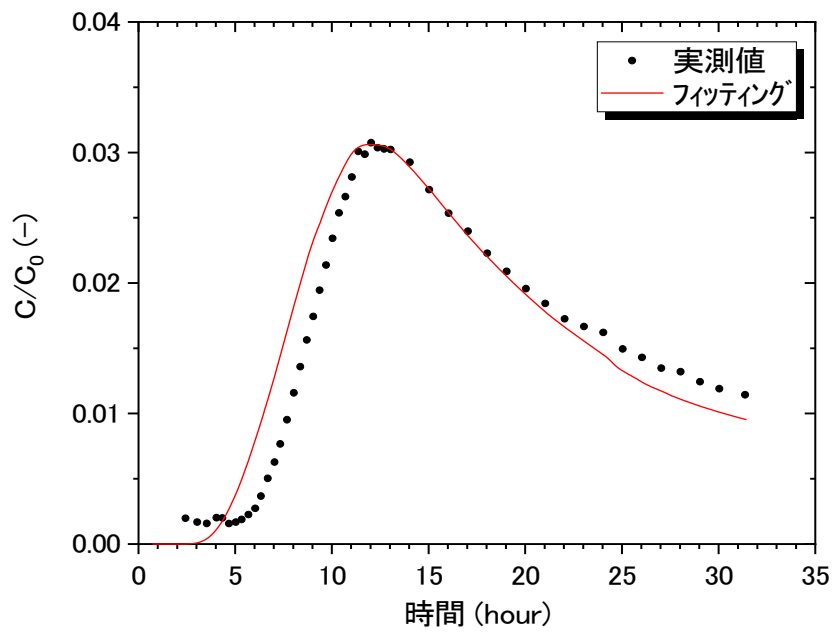


図 3.4.2-9  $Rb^+$ の破過曲線のフィッティング (17W5259T13-15 試験)

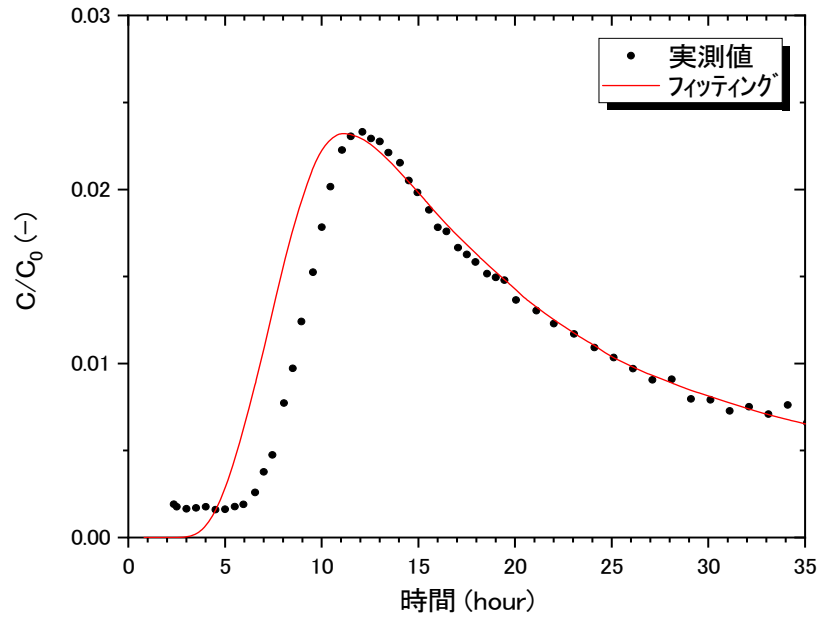


図 3.4.2-10  $Rb^+$ の破過曲線のフィッティング (17W5259T18-20 試験)

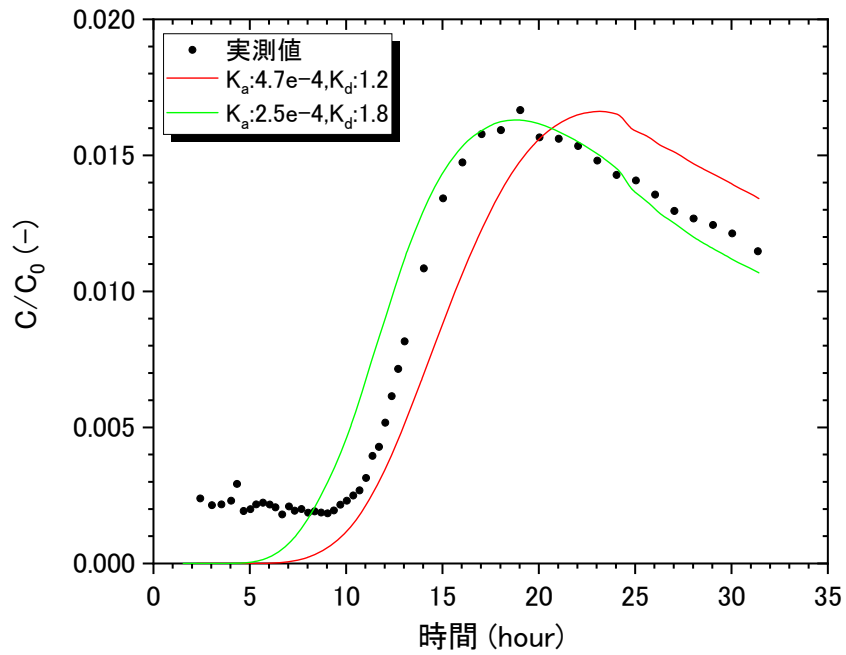


図 3.4.2-11  $Ba^{2+}$ の破過曲線のフィッティング (17W5259T13-15 試験)

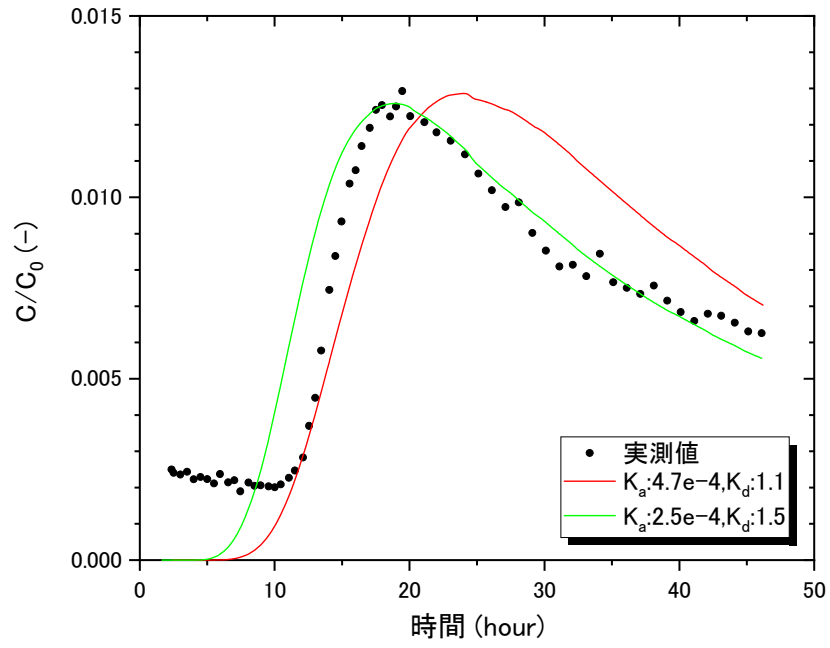


図 3.4.2-12 Ba<sup>2+</sup>の破過曲線のフィッティング (17W5259T18-20 試験)

### 3.5 まとめと今後の課題

原位置トレーサー試験には本事業で開発した試験装置を適用したが、今年度の特徴的なトピックについて以下に述べる。

15MI52号孔の孔内に設置した蛍光濃度センサーでは、蛍光強度の減衰が少なく比較的良好なデータが取得できた。一方、16MI59号孔内に設置した蛍光濃度センサーで、著しく蛍光強度が減衰する症状が認められた。原因として、高い水圧による変形の他に、長期間地下水に接触することや倉庫保管時の乾燥によりセンサーに何らかの付着物があり、光の反射強度が低下した可能性が考えられる。今後はセンサー内部の反射鏡の汚れについても検証の必要があると考えられる。具体的には、希塩酸などの酸を用いて鏡面の洗浄を行い、洗浄効果の有無を確認することが考えられる。

揚水流量 10mL/min 未満の試験では、昨年度と同様にニードルバルブにより流量を調整した。ニードルバルブは2連装とし、フラクシオンコレクター直近の同型ニードルバルブと合わせて3台のバルブによる揚水量およびフラクシオンコレクターの分画流量の調整を行い、問題なく流量を制御できた。

坑内送風機のON/OFFの影響と考えられる注水・揚水流量の流量計表示の変化が、今年度もみられた。ただし、昨年度は夜間に流量表示値が低下したが、今年度は夜間に表示値が増加した。そのため、原因は環境温度の変化ではないと考えられる。他の原因としては、送風機の風による配管系統のわずかな振動の影響が考えられる。使用した流量計はコリオリ式の質量流量計であり、外部からの振動により計測誤差が出やすい特性がある。ただし、送風機の稼働により坑道内電力の電力負荷が変わるなど、複数の要因が絡んでいる可能性があり、原因は特定できていない。

以上述べたように、幾つかの不具合はあったものの、概ね満足のいく試験データを取得でき、本事業で開発したトレーサー試験装置は我が国の地質環境においても十分適用可能であることが示せたと考える。

単孔トレーサー試験は15MI52号孔と16MI59号孔で実施した。15MI52号孔で実施した試験では、昨年度と同じ割れ目を対象としたにも関わらず、昨年度よりも回収率が大幅に減少し、ピーク濃度も大きく低下した。解析を行って検討したところ、15MI52号孔との孔間距離が1.44mの15MI53号孔に設置されていた間隙水圧モニタリング装置が影響し、水圧モニタリング区間にトレーサーが流入したために回収率が大きく低下した可能性が考えられた。試験後に15MI53号孔に設置されていた間隙水圧モニタリング装置を抜管したところ、対象区間から多量のウラン含有水が排水されたことを確認している。このことから、単孔トレーサー試験は周辺孔の影響を受ける可能性があり、周辺孔においてもパッカー等でデッドボリュームを低減する必要があることがわかった。また、16MI59号孔で実施した試験を対象に、割れ目モデルを用いて評価解析を行った。評価解析の結果、非収着性トレーサーの破過曲線は概ね良好に再現することができたが、収着性トレーサーの破過曲線については、割れ目の遅延係数を大きくするに従って、ピーク濃度は減少するもののピーク位置も早くなる解析結果となり、



試験結果の傾向から外れた結果が得られることを確認した。このため、割れ目に加えて岩盤マトリクスをモデル化した複合モデルを用い、マトリクスへの拡散、収着、割れ目表面への収着を考慮した解析を行ったところ、試験結果の傾向に近づき、ピーク位置は非収着性トレーサーとほぼ同じのままピーク濃度のみ減少する解析結果となることを確認した。以上のことから、試験で得られた収着性トレーサーの破過曲線は、マトリクスへの拡散・収着、割れ目表面への収着の効果が影響している可能性が考えられる。一方で、トレーサーと岩盤の接触時間が短いことによりトレーサーの収着現象が非平衡挙動となっている可能性が考えられ、今後の検討課題である。

孔間トレーサー試験は、15MI52 号孔と 16MI59 号孔の間で実施した。対象割れ目と 15MI52 号孔との交差位置は事前に特定されていたが、16MI59 号孔では近接する 2 箇所で見交する割れ目のいずれが対象となる割れ目なのか特定されていなかった。そこで、16MI59 号孔の 2 箇所の割れ目交差位置のそれぞれと 15MI52 号孔の割れ目交差位置との間で、非収着性トレーサーを用いた孔間トレーサー試験を行い、その結果、15MI52 号孔とより連続性の高い 16MI59 号孔上の割れ目を特定することができた。対象割れ目面上での 2 孔間の距離は 2.62 m であった。また、トレーサー試験実施前には 15MI53 号孔を含め 3 孔間で差圧計測実施し、試験対象割れ目のバックグラウンド（自然状態）の動水勾配を把握した。動水勾配は最大でも 0.25% 程度で、トレーサー試験にはほとんど影響を及ぼさないことがわかった。孔間トレーサー試験は、最初は 16MI59 号孔をトレーサー投入孔、15MI52 号孔を回収孔として実施したが、高い回収率が得られなかった。そのため、15MI52 号孔を投入孔、16MI59 号孔を回収孔にすることにした。収着性トレーサーを用いる本試験でマトリクスへの拡散・収着の影響をみられるように孔間での移行速度の違いを調べるため、非収着性トレーサーのみを用いた予備試験を行い、高い回収率を確保できる最低の揚水流量を把握した。収着性トレーサーも用いる本試験では投入時間を 5～6 時間と長く設定することにより、吸着性の強い Ba についてもバックグラウンド濃度を上回る回収濃度が得られ有意な破過曲線を取得することができた。非収着性トレーサーの破過曲線の評価解析では、対象割れ目の開口幅と縦分散長を同定することができた。開口幅の同定値は、高解像度のポアホール TV カメラによる計測値や、透水量係数から 3 乗則により算出した数値と整合性があり、縦分散長も孔間距離の孔間距離 2.62 m の 7.6 % に相当し、縦分散長は移行距離の 1/10 倍を中心に 1/100～1 倍の範囲に分布するとした Gelhar (1992) の調査結果と調和的である。また、収着性トレーサーのルビジウムやバリウムの破過曲線の評価解析では、割れ目の表面吸着係数として異なる粒径の岩石粉体試料を用いた収着バッチ試験による推定値を用いて破過曲線を良好に再現し、マトリクスへの分配係数を同定することができた。今後は、割れ目の表面吸着係数を異なる粒径の試料を用いた収着バッチ試験で推定することの妥当性について、検討を重ねていきたい。また、本研究では数 m スケールの単一割れ目あるいはそれに近い地質構造の物質移行特性の推定を行ったが、今後はより広い領域での多数の

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

<参考文献>

- Autio, J., Hjerpe, T. and Siitari-Kauppi, M. (2003): Porosity, diffusivity and permeability of EDZ in crystalline rock and effect on the migration in a KBS-3 type repository, Proceedings of a Cluster Conference and Workshop, European Commission, Luxembourg, UER21028.
- 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.
- Li, Y. H., and S. Gregory (1974): Diffusion of irons in seawater and in deep-sea sediments, Oxford: Pergamon Press.
- 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
- 國丸貴紀、森川佳太、舘幸男、久野義夫、細谷真一、下田紗音子、加藤博康、中澤俊之、生瀬博之、久保田政子(2012) : 花崗岩資料を用いた収着・拡散試験および間隙率測定、JAEA-Data/Code 2012-013
- 地盤工学会 (2013) : 地盤調査の方法と解説、地盤工学会基準 揚水試験方法 p531-551

## 4. 各種割れ目探査技術の開発

### 4.1 ラドン濃度計測による割れ目調査技術の開発

#### 4.1.1 はじめに

岩盤中の割れ目の開口幅は様々な方法で推定がされているが、いずれも不確実性が存在する。例えば、ボアホールTV計測は、ボーリング孔壁の割れ目の幅を計測するものであるが、掘削によるダメージにより、孔壁の割れ目の開口幅は岩盤内部より大きくなり、実際の開口幅を大きく見積もる傾向がある。また、割れ目を平行平板の間隙構造モデルとした場合、水理試験によって、水理的開口幅が算出することが可能であるが(Snow, 1965)、実際の割れ目の間隙構造とは異なる。このように、他の方法を含めて開口幅の推定方法にはそれぞれ不確実性が内在しており、決定的な手段は存在しない。このため、様々な手法を組み合わせることで相補的に割れ目の開口幅を推定することが必要となる。本事業において提案をしている岩石から発生するラドンを利用する手法は、割れ目間隙中に存在するラドン濃度の計測によって推定する手法である。ラドンは他の元素との化学的な反応がほとんどなく、緻密な岩石では割れ目表面から発生すると見なせるため、人工のトレーサーとは異なり、繰り返しの測定が可能なパッシブな手法と言える。また、ボーリング孔壁の箇所のみならず、適切な採水や循環試験によって、岩盤内の割れ目の間隙水も計測することが可能である。したがって、ラドン濃度計測による開口幅の推定方法は既存手法を補うことが可能であるため、本事業ではラドンを用いた割れ目の開口幅推定法の開発と原位置試験での適用性の提示を目指している。

#### 4.1.2 ラドン濃度計測による割れ目幅の推定の概念

ラドンによる割れ目の幅の評価は、岩盤中に存在するウラン(U-238)の崩壊過程で発生するラドン(Rn-222)を用いて推定する。ラドンは水溶性でかつ不活性のため、地下水の溶存物質や岩盤を構成する鉱物との化学反応の影響は受けず、岩盤中の親核種であるラジウム(Ra-226)から反跳して割れ目の間隙中の地下水へ溶存する。岩盤中のラドンとラジウムとが放射平衡に達していると仮定できれば、母岩中から地下水へ溶解する時間当たりのラドンの量(ラドンフラックス)も一定と見なすことができる。この際、地下水中のラジウムの存在量は非常に低いことから、溶存ラジウムの溶存ラドン濃度への影響はほとんど無視することができる。実際に、Cecil et al. (1987)によって、地下水中の溶存ラジウムと溶存ラドンの関係に相関が認められないことが知られている。したがって、地下水中のラドンを用いた割れ目開口幅の推定では、地下水のラジウムの影響を考慮する必要がなく、岩盤から発生したものと見なせる。

岩石内のラジウムから発生するラドンの反跳可能な距離は小さく、結晶質岩の様な緻密な岩盤においては、地下水に溶存しているラドンは、岩石表面のごく近傍から地下水中に溶解したものと考える

ことができる。割れ目を平行平板と仮定し、割れ目表面から供給されるラドンの量と割れ目の面積には図 4.1.2-1 に示すような関係が成り立つ。本事業で提案する手法は原位置での割れ目間隙からの採水よりラドン濃度（[Rn]）を得ると同時に、室内試験によって岩石からのラドン発生量をラドンフラックス（F）として得ることで、開口幅（w）を評価しようとするものである。

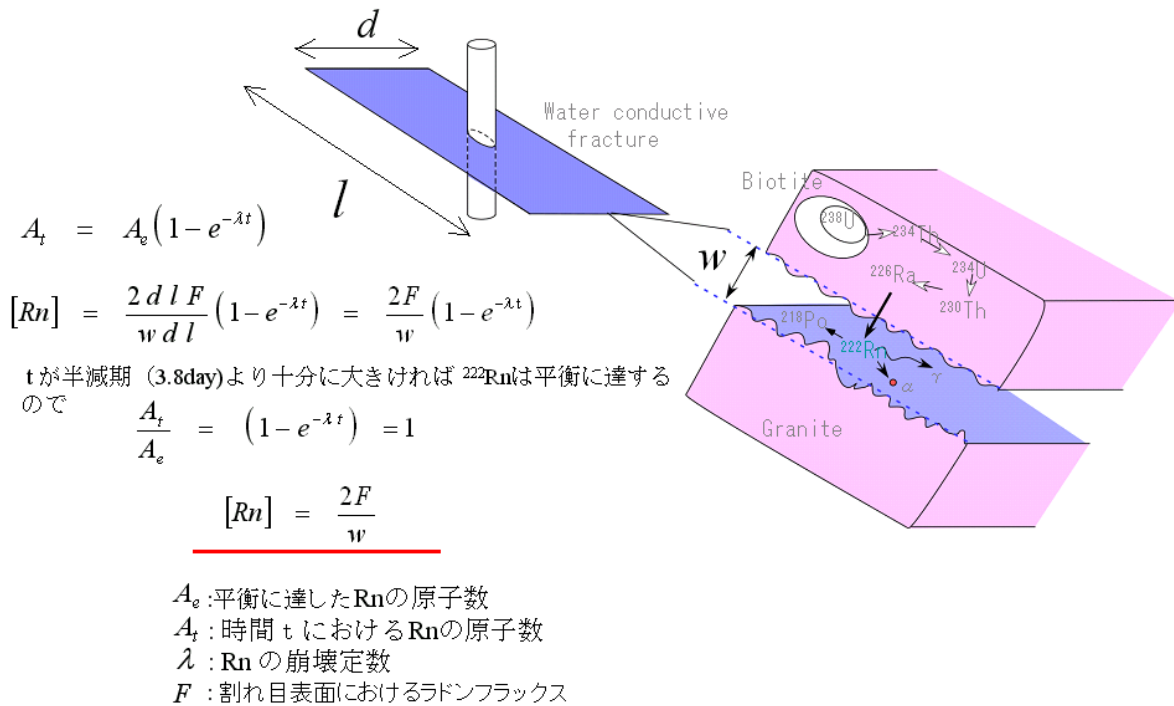


図 4.1.2-1 ラドンによる割れ目幅計測の原理

#### 4.1.3 今年度の実施概要

本事業ではこれまでラドン濃度計測による割れ目の幅の推定手法を開発し、花崗岩が分布するスイスグリムゼルのテストサイトへ適用した。その結果、トレーサー試験、高粘性流体を用いた水理試験から得た開口幅や、評価対象の割れ目に樹脂（レジン）を注入後、ボーリング掘削により得たコアなどから評価した割れ目の開口幅と比較し、相補的にラドン濃度計測による割れ目の幅の推定手法の適用性を確認した。この手法を我が国の岩盤にも適用するためには、代表的な岩石や岩盤での検討を行い、その適用性を評価する必要がある。そこで、日本原子力研究開発機構の協力を得て、瑞浪超深地層研究所において手法の適用性の検討を実施している。昨年度は、深度 300m ボーリング横孔でのラドン循環試験を行い、割れ目の開口幅の推定し、トレーサー試験や高粘性流体試験などとの比較から相補的に手法の適用性の確認を行った。今年度は深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑でのラドン循環試験を行い、昨年度の結果と合わせて適用性の確認を行う。

#### 4.1.4 ラドンによる割れ目開口幅の推定手法の適用性検討

##### 4.1.4.1 岩石の物理化学特性

原位置のラドン濃度による割れ目幅検討のために、昨年度に引き続き、瑞浪超深地層研究所の深度500m ボーリング横坑において掘削したボーリングコアの物理化学特性分析を行った。使用したボーリングコアは15MI52号孔、15MI53号孔、16MI59号孔の中粒花崗岩（以降、瑞浪花崗岩と呼称）である。分析試料は割れ目周辺マトリックス（充填鉱物を含む）であり、表4.1.4-1に一覧を示す。なお、表中で表記する「石英脈1」は15MI52号孔、15MI53号孔および16MI59号孔において地質的に連続して確認された石英脈（15MI52号孔では8.80mabhに産する）、「対象①」および「対象③」は3孔にわたって地質的・水理的に連続が確認された湧水割れ目（15MI52号孔では16.09mabh および28.00mabh）を表す（図4.1.4-1）。

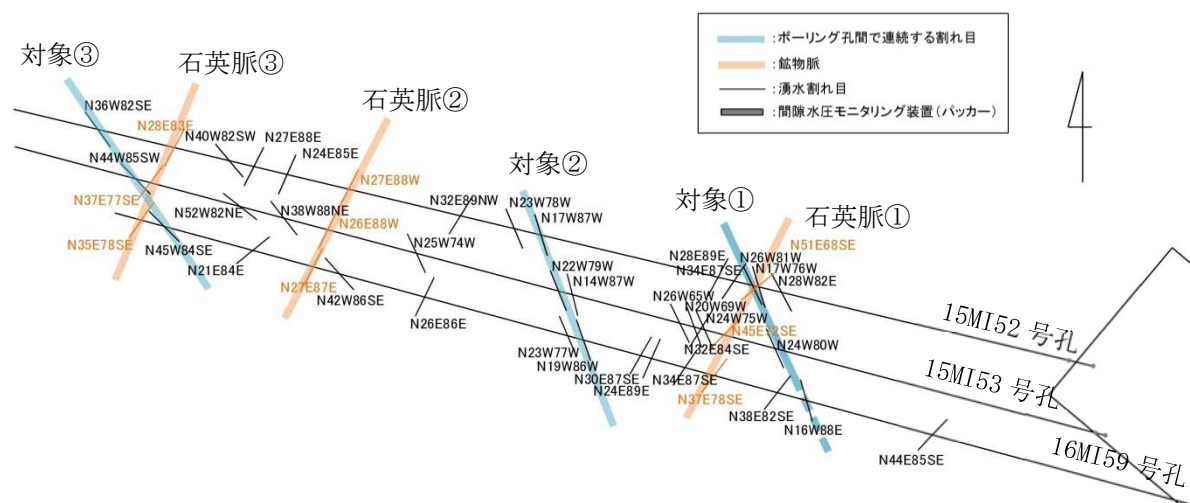


図 4.1.4-1 深度500mにおける孔間で連続する割れ目（対象割れ目）および石英脈（平成28年度「岩盤中物質移行特性評価技術の確証」図2.4.8-3より一部を抜粋）

表 4.1.4-1 分析試料一覧

試料名	孔名および中間深度	走行傾斜	特徴	変質の有無
H29GR01	15MI52号孔 24.01m	N40W82SW	割れ目から気泡の発生を確認。割れ目周辺に褐色化が認められる。	×
H29GR02	15MI53号孔 11.04m	N24W75W	割れ目から気泡の発生を確認。	×
H29GR03	15MI53号孔 11.14m	N32E84SE	「石英脈①」に相当。割れ目周辺変質。	○
H29GR04	15MI53号孔 11.33m	N20W69W	「石英脈①」に相当。比較的健岩部。	△
H29GR05	15MI53号孔 18.43m	N30E88NW	割れ目から気泡の発生を確認。割れ目充填鉱物を伴う。	○
H29GR06	16MI59号孔 28.63m	N45W84SW	「対象③」湧水割れ目。	×
H29GR07	15MI52号孔 9.47m	N26W81W	「対象①」付近に連続するNW系割れ目。	×
H29GR08	15MI52号孔 17.59m	N32E89NW	53号孔18.43mNE系degas箇所連続する割れ目。	○
H29GR09	15MI53号孔 22.61m	N38W88NE	52号孔24.01mNW系degas箇所連続する割れ目。	×
H29GR10	15MI53号孔 10.58m	-	「対象①」付近の変質箇所。掘削ダメージ割れ目近傍。	○



図 4.1.4-2 気泡が発生する割れ目の様子（左：割れ目面、右：側面）（H29GR01）



図 4.1.4-3 気泡が発生する割れ目の様子（左：割れ目面、右：側面）（H29GR05）

#### (1) 元素分析

岩石の元素分析においては、主要元素を蛍光 X 線分析(XRF)で分析するとともに、微量元素は、誘導結合プラズマ質量分析(ICP-MS)もしくは誘導結合プラズマ発光分析法 (ICP-AES) により分析を行った。これらの分析はカナダにある ALS Canada Ltd. 社にて、以下の分析コード(パッケージ分析)を使用している。詳細は以下のとおりである。

##### a. 蛍光 X 線分析

分析コード：ME-XRF06 によって分析を行った。

以下に対象とした分析項目、分析試料、分析方法および分析結果について示す。

##### 1) 分析元素

SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, MnO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, SrO, BaO, LOI

##### 2) 分析試料

分析試料の一覧を表 4.1.4-2 に示す。今年度は以下の特徴の割れ目について分析を行う。①ボアホール TV 観察により、ボーリング孔内割れ目から気泡の発生が確認できたもの (H29GR01,

H29GR02, H29GR05)、□石英脈周辺に産し、マトリックス部分がより濃いピンク色を呈すもの (H29GR03、H29GR04)、③孔間で連続性を確認できた割れ目であり、マトリックス部分は比較的変質を伴わない (H29GR06、H29GR07、H29GR10)、

### 3) 分析方法

粉末状にした試料について、ホウ酸リチウムを使用して熔融した後、ガラス試料を作成する。これを蛍光 X 線分析法 (XRF) により試料を酸化物の形で分析する。

表 4.1.4-2 元素分析試料一覧

試料名	孔名および 中間深度	走行傾斜	特徴	変質の有無	備考
ICP/XRF-H29GR01	15M152 号孔 24.01m	N40W82SW	割れ目から気泡の発生を確認。割れ目 周辺に褐色化が認められる。	×	
ICP/XRF-H29GR02	15M153 号孔 11.04m	N24W75W	割れ目から気泡の発生を確認。	×	
ICP/XRF-H29GR03	15M153 号孔 11.14m	N32E84SE	「石英脈①」に相当。割れ目周辺変質。	○	
ICP/XRF-H29GR04	15M153 号孔 11.33m	N20W69W	「石英脈①」に相当。比較的健岩部。	×	
ICP/XRF-H29GR05	15M153 号孔 18.43m	N30E88NW	割れ目から気泡の発生を確認。割れ目 充填鉱物を伴う。	○	割れ目充填 鉱物を含む
ICP/XRF-H29GR06	16M159 号孔 28.63m	N45W84SW	「対象③」湧水割れ目。	×	
ICP/XRF-H29GR07	15M152 号孔 9.47m	N26W81W	「対象①」付近に連続する NW 系割れ目。	×	
ICP/XRF-H29GR08	15M152 号孔 17.59m	N32E89NW	53 号孔 18.43mNE 系 degas 箇所に連続 する割れ目。	○	割れ目充填 鉱物を含む
ICP/XRF-H29GR09	15M153 号孔 22.61m	N38W88NE	52 号孔 24.01mNW 系 degas 箇所に連続 する割れ目。	×	
ICP/XRF-H29GR10	15M153 号孔 10.58m	-	「対象①」付近の変質箇所。掘削ダメー ジ割れ目近傍。	○	緑色変質部 分を含む

### 4) 分析結果

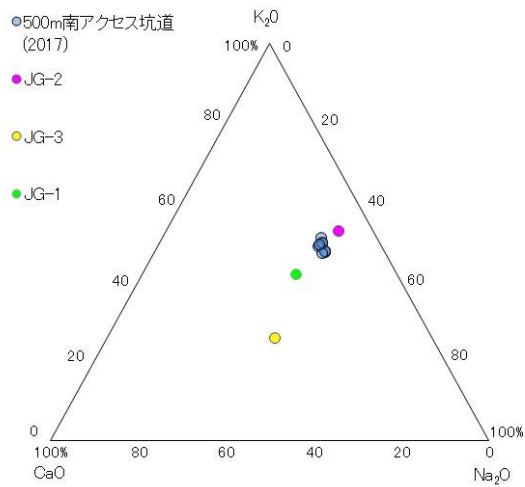
分析結果を表 4.1.4-3 に示す。各試料ともにケイ素を最大主要元素とし、次いでアルミニウム、カリウム、ナトリウムの順に構成されている。試料間に大きな元素含有量の差はないが、XRF-H29GR10 (15M153 号孔 10.58m) は、他試料に比べてケイ素の割合が僅かながら少ない一方、アルミニウム、カリウム、カルシウムの割合が他の試料よりも多くなっており、コア観察で弱い変質が認められることから、その影響が考えられる。また、XRF-H29GR09 (15M153 号孔 22.61m) もケイの割合が少なく、鉄、カルシウム、カルシウム、マグネシウム、ナトリウム、マンガン、リンの割合が僅かながら他の試料よりも多くなっているが、明瞭な変質は認められていない。



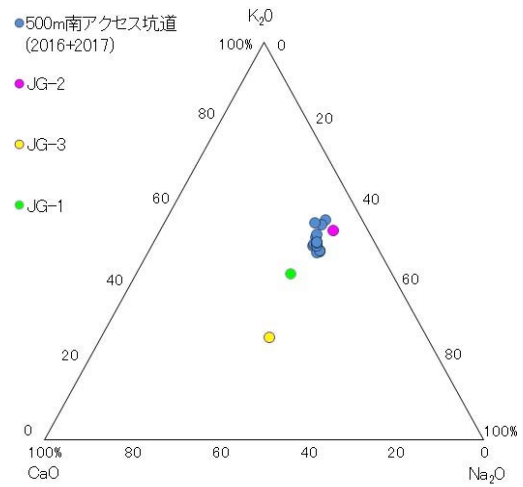
表 4.1.4-3 蛍光 X 線分析による主要構成元素分析結果

試料名	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SrO	BaO	Total	LOI
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
XRF-H29GR01	74.25	13.34	1.86	1.33	0.2	3.57	4.71	<0.01	0.14	0.07	0.031	0.02	0.03	99.95	0.4
XRF-H29GR02	74.84	12.94	2.11	1.18	0.25	3.42	4.76	<0.01	0.16	0.07	0.036	0.02	0.03	100.2	0.36
XRF-H29GR03	74.63	12.96	2.16	1.24	0.25	3.57	4.31	<0.01	0.16	0.08	0.037	0.02	0.03	99.77	0.32
XRF-H29GR04	74.19	13.1	2.04	1.22	0.23	3.48	4.58	<0.01	0.14	0.07	0.036	0.02	0.04	99.37	0.22
XRF-H29GR05	73.86	12.86	2.04	1.37	0.24	3.54	4.66	<0.01	0.15	0.07	0.039	0.02	0.04	100.05	1.16
XRF-H29GR06	74.85	12.98	2.12	1.23	0.21	3.57	4.32	<0.01	0.14	0.07	0.033	0.02	0.03	99.87	0.3
XRF-H29GR07	73.77	13.72	2.14	1.31	0.23	3.77	4.57	<0.01	0.14	0.07	0.037	0.02	0.03	99.98	0.17
XRF-H29GR08	74.88	12.94	1.98	1.21	0.21	3.46	4.61	<0.01	0.14	0.07	0.033	0.02	0.04	99.78	0.19
XRF-H29GR09	73.01	13.79	2.46	1.39	0.28	3.77	4.57	<0.01	0.18	0.09	0.045	0.02	0.04	99.92	0.28
XRF-H29GR10	72.32	13.84	2.04	1.41	0.21	3.76	5	<0.01	0.15	0.07	0.034	0.02	0.04	99.86	0.97

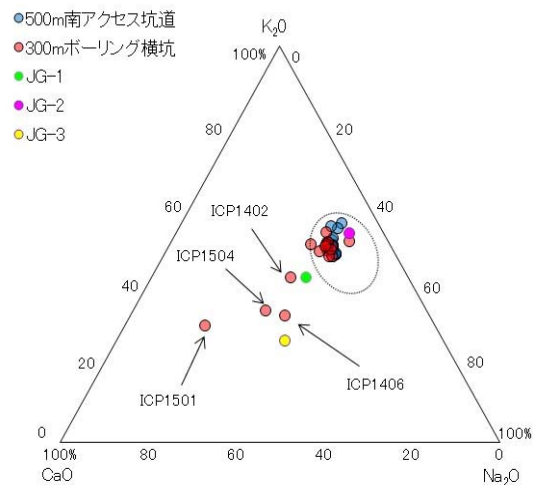
XRF-H29GR01～XRF-H29GR10 の CaO-Na<sub>2</sub>O-K<sub>2</sub>O 成分三角ダイアグラム (CHK 図) を図 4.1.4-4 (a) に示す。CaO が少なく、K<sub>2</sub>O と Na<sub>2</sub>O が大きい傾向を示す。比較のために産業技術総合研究所で公開している地球化学標準物質 JG-1 (花崗閃緑岩：群馬県沢入産)、JG-2 (花崗岩：岐阜県苗木)、JG-3 (花崗閃緑岩：島根県三刀屋) を示した。CaO-Na<sub>2</sub>O-K<sub>2</sub>O の比率は土岐花崗岩に隣接する苗木花崗岩体に近い。図 4.1.4-4(b) は今年度の分析結果に、昨年度の深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑の結果を合わせたものである。昨年度の試料は今年度の試料に比較してカリ長石が多い試料があるため、やや K<sub>2</sub>O が多くなっているが、全体的な CaO-Na<sub>2</sub>O-K<sub>2</sub>O の比率に大きな相違は認められない。図 4.1.4-4(c) は深度 300m ボーリング横坑および深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑の全試料の CHK 図である。図中の ICP1402、ICP1406、ICP1501、ICP1504 は基質部に変質が認められ、方解石の細脈などもあることから、CaO に富む試料になっている。湯口ほか (2010) によれば、土岐花崗岩体は主な鉱物組成から、白雲母-黒雲母花崗岩、ホルムブレンド-黒雲母花崗岩、黒雲母花崗岩に分けられ、岩体のコア部は黒雲母花崗岩が分布するとしている。図中の大きな黒点線で示した範囲は、湯口ほか (2010) で示された黒雲母花崗岩の範囲を示したものであり、深度 300m ボーリング横坑および深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑に認められる花崗岩がその分布に含まれていることが分かる。この結果は、度 300m ボーリング横坑および深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑のコアの薄片観察において、白雲母やホルムブレンドが認められない、黒雲母花崗岩であることと整合する。



(a) 2017 年度試料の CHK 図



(b) 2016 年度および 2017 年度の CHK 図



(c) 深度 300m ボーリング横坑および深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑の全試料の CHK 図

図 4.1.4-4 CHK 図

#### b. 誘導結合プラズマ質量分析法

誘導結合プラズマ質量分析法 (ICP-MS) については、分析対象とする元素の種類によって分析コード : ME-MS61 と分析コード : ME-MS81 の 2 つの分析方法で行った。

以下に対象とした分析項目、分析試料、分析方法および分析結果について示す。

(a) 分析コード ME-MS61

1) 分析元素

Ag, Al, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, Ge, Hf, In, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, Rb, Re, S, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Te, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn, Zr

2) 分析試料

分析試料の一覧を表 4.1.4-2 に示す。

3) 分析方法

粉末状にした試料を4種混合酸（塩酸・フッ化水素酸、硝酸、過塩素酸）にて溶解した後、酸溶液試料を作成する。これを誘導結合プラズマ質量分析法(ICP-MS)により元素分析した。

4) 分析結果

分析結果を表 4.1.4-4 に示す。

表 4.1.4-4 微量元素分析 (ME-MS61)

試料名	Ag	Al	As	Ba	Be	Bi	Ca	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu
	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
ICP-H29GR01	0.03	6.42	1.5	290	2.9	0.01	0.9	0.02	40	1.2	5	4.42	7.5
ICP-H29GR02	0.01	6.38	1.4	330	2.31	0.02	0.81	0.03	49.9	1.2	4	4.92	2.4
ICP-H29GR03	0.01	6.38	0.7	300	2.68	0.01	0.86	0.02	49.9	1.3	4	4.47	1.9
ICP-H29GR04	0.01	6.79	0.7	330	2.61	0.02	0.89	0.03	48	1.2	4	4.95	1.7
ICP-H29GR05	0.05	6.57	2.4	330	2.44	0.1	1.01	<0.02	42.2	1.3	5	2.32	7.5
ICP-H29GR06	0.02	6.48	0.8	270	2.36	0.01	0.87	0.02	36.7	1.1	6	3.78	0.8
ICP-H29GR07	0.01	6.5	0.3	290	2.51	0.04	0.88	0.03	43.6	1.3	4	4.35	0.8
ICP-H29GR08	<0.01	6.1	0.6	310	2.41	0.01	0.81	<0.02	39.9	1.1	4	4.38	2.7
ICP-H29GR09	0.01	7.09	0.6	310	2.83	0.37	1.01	0.02	48.3	1.6	4	5.77	1.7
ICP-H29GR10	0.02	7.26	0.9	370	2.69	0.04	1.06	<0.02	43.2	1.2	4	3.89	2
試料名	Fe	Ga	Ge	Hf	In	K	La	Li	Mg	Mn	Mo	Na	Nb
	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	%	ppm	ppm	%	ppm
ICP-H29GR01	1.18	16.2	0.14	2.1	0.027	3.7	18.2	49.6	0.12	438	0.51	2.45	11.9
ICP-H29GR02	1.35	15.95	0.16	2	0.034	3.78	23	46.8	0.14	480	1.81	2.36	12.5
ICP-H29GR03	1.39	16.6	0.16	2.1	0.031	3.42	24	40	0.14	520	0.49	2.47	12.9
ICP-H29GR04	1.36	17.1	0.16	1.9	0.029	3.82	22.1	45.4	0.14	501	0.56	2.55	12.7
ICP-H29GR05	1.36	16.35	0.15	2.1	0.032	3.86	18.6	29.8	0.14	507	0.43	2.56	9.2
ICP-H29GR06	1.39	16.25	0.18	2.1	0.025	3.43	16.5	34.8	0.12	476	0.57	2.5	11.3
ICP-H29GR07	1.33	16.4	0.15	2	0.023	3.54	19.8	36.4	0.13	472	0.56	2.49	11.9
ICP-H29GR08	1.25	15.25	0.14	1.7	0.028	3.53	17.9	39	0.12	447	0.47	2.3	11.4
ICP-H29GR09	1.64	18.3	0.18	2.1	0.033	3.77	21.7	63.3	0.16	618	0.69	2.69	14.3
ICP-H29GR10	1.43	18.35	0.17	2.3	0.031	4.24	19.3	31.5	0.12	507	1.13	2.74	11.6
試料名	Ni	P	Pb	Rb	Re	S	Sb	Sc	Se	Sn	Sr	Ta	Te
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
ICP-H29GR01	1	130	27.2	189.5	<0.002	0.1	0.17	2.9	<1	2.9	92.8	1.68	<0.05
ICP-H29GR02	0.7	150	30.5	199.5	<0.002	0.06	0.12	3.3	<1	3.2	93.5	1.59	<0.05
ICP-H29GR03	1.7	160	25.6	184.5	<0.002	0.05	0.05	3.6	<1	3.4	93.3	1.59	<0.05
ICP-H29GR04	1.5	150	30.5	204	<0.002	0.04	0.06	3.5	1	3.4	102.5	1.57	<0.05
ICP-H29GR05	0.8	160	26.7	198	<0.002	0.03	0.07	2.8	<1	2.6	99.9	1.04	<0.05
ICP-H29GR06	1.2	150	26.3	175.5	<0.002	0.05	0.41	3	1	3	97.8	1.39	<0.05
ICP-H29GR07	0.8	140	30.3	185.5	<0.002	0.02	<0.05	3.1	<1	3.1	96.1	1.65	<0.05
ICP-H29GR08	0.9	140	26	182	<0.002	0.02	<0.05	3.2	<1	3	94.8	1.36	<0.05
ICP-H29GR09	1.1	180	29.2	207	<0.002	0.03	0.06	4	1	4.1	106	1.68	<0.05
ICP-H29GR10	0.9	140	31.7	215	<0.002	0.01	0.05	3.2	<1	2.9	116	1.54	<0.05
試料名	Th	Ti	Tl	U	V	W	Y	Zn	Zr				
	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm				
ICP-H29GR01	19.6	0.078	0.97	5.2	8	0.2	29.3	32	40.2				
ICP-H29GR02	22.3	0.086	1.05	5.5	9	0.2	30.9	40	40.7				
ICP-H29GR03	29.6	0.091	0.95	6.6	9	0.2	31.1	38	45.7				
ICP-H29GR04	26.2	0.091	1.07	5.9	9	0.2	27.5	40	42.4				
ICP-H29GR05	19.75	0.066	1.07	6.8	9	0.6	34	39	44.2				
ICP-H29GR06	21.8	0.082	0.9	6	8	0.2	29.1	34	44.4				
ICP-H29GR07	31.3	0.085	1.02	6.6	8	0.2	23.1	38	39.2				
ICP-H29GR08	16.7	0.081	0.97	6.3	8	0.2	21.7	34	36.8				
ICP-H29GR09	24.1	0.107	1.14	6.3	10	0.3	32.5	44	48.4				
ICP-H29GR10	20	0.076	1.14	6.6	8	0.4	29.4	37	45.1				

(b) 分析コード ME-MS81

1) 分析元素

Ba, Ce, Cr, Cs, Dy, Er, Eu, Ga, Gd, Hf, Ho, La, Lu, Nb, Nd, Pr, Rb, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Th, Tm, U, V, W, Y, Yb, Zr

2) 分析試料

分析試料の一覧を表 4.1.4-2 に示す。

3) 分析方法

粉末状にした試料について、ホウ酸リチウムを使用して溶融した後、ガラス試料を作成する。さらにこのガラス試料を再度粉末化し、酸溶液によって溶解したのちに酸溶液試料を作成する。これを誘導結合プラズマ質量分析法 (ICP-MS) により元素分析した。

4) 分析結果

誘導結合プラズマ質量分析法による分析結果をを表 4.1.4-5 に示す。微量元素の分析結果をコンドライト規格化し、Pm を除く 14 の希土類元素 (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) のパターン図を作成した (図 4.1.4-5)。規格化には、Taylor & McLennan(1985) のコンドライト値を採用した。また図 4.1.4-6 には、標準試料として花崗岩類の標準試料 (JG-1, JG-2, JG-3) と昨年度分析した瑞浪超深地層研究所深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑の結果も合わせて示す。分析結果はいずれも日本の花崗岩のパターンに類似し、軽希土類に富み、Eu 負異常が特徴である。今年度分析した深度 500m の試料を比較するといずれも類似したパターンを示し、これは昨年度分析した深度 500m の試料の中でも未変質 (ICP-GR02、ICP-GR06、ICP-07、ICP-08) の試料のパターンに一致していた。実際、今年度の分析試料はいずれも比較的変質に乏しい性状が認められている。深度 500m 研究アクセス南坑道の結果のなかで、昨年度分析した ICP-GR05 は割れ目周辺で変質の認められる箇所でありながら、未変質箇所のパターンに類似していた。同様に今年度分析した ICP-H29GR03 は割れ目周辺変質を伴うが、未変質のパターンとほとんど変わらない結果を示した。

表 4.1.4-5 微量元素分析 (ME-MS81)

試料名	Ba	Ce	Cr	Cs	Dy	Er	Eu	Ga	Gd	Hf	Ho	La	Lu	Nb	Nd	Pr
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
ICP-H29GR01	315	43.2	10	4.64	5.29	4.25	0.5	17.6	4.78	4.4	1.17	21.1	0.73	12.4	17.7	4.86
ICP-H29GR02	358	53.6	10	5.16	5.86	4.37	0.56	17.3	5.28	5.2	1.26	26.4	0.75	13.6	22.1	6.15
ICP-H29GR03	317	49.5	<10	4.56	6.16	4.61	0.51	17.1	5.39	4.6	1.34	24.6	0.77	14	20.8	5.61
ICP-H29GR04	326	51.7	10	4.64	5.41	4.04	0.52	16.9	4.95	4.3	1.11	26	0.65	12.1	21.1	5.81
ICP-H29GR05	350	48.4	10	2.26	6.1	4.59	0.56	16.4	5.17	4.5	1.33	24.1	0.76	11.9	19.5	5.61
ICP-H29GR06	300	40.5	10	3.83	5.5	4.02	0.49	16.9	4.72	4.3	1.19	20	0.66	11.8	17.6	4.63
ICP-H29GR07	338	52.4	10	5	5.39	4.12	0.55	18.4	4.74	4.4	1.19	25.5	0.64	13.7	21.9	5.94
ICP-H29GR08	349	47.2	10	4.73	4.67	3.77	0.52	16.9	4.26	4.3	1.03	23.8	0.62	12.6	19.3	5.27
ICP-H29GR09	327	52.4	10	5.62	5.49	3.88	0.54	18	5.11	4.8	1.16	26.4	0.65	14.1	21.8	5.9
ICP-H29GR10	390	45.7	10	3.68	5.6	4.28	0.6	17.5	4.89	4.7	1.27	22.5	0.7	12.5	19.3	5.26
試料名	Rb	Sm	Sn	Sr	Ta	Tb	Th	Tm	U	V	W	Y	Yb	Zr		
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm		
ICP-H29GR01	222	4.3	3	105.5	1.8	0.83	21.3	0.66	6.68	12	1	39.6	4.68	122		
ICP-H29GR02	229	5.22	4	107	1.8	0.98	24.9	0.7	7.37	12	<1	42.3	4.66	152		
ICP-H29GR03	205	4.97	4	103	1.8	0.99	23.1	0.71	7.57	13	<1	42.3	4.78	132		
ICP-H29GR04	212	5.23	3	107.5	1.6	0.91	23.1	0.65	9.24	13	<1	36.7	4.07	131		
ICP-H29GR05	218	4.68	3	106	1.4	0.97	22.4	0.71	8.53	12	1	44.2	4.91	133		
ICP-H29GR06	199	4.47	3	110.5	1.5	0.83	25.6	0.67	7.24	12	<1	38.5	4.35	124		
ICP-H29GR07	228	4.92	4	116	1.9	0.86	29.3	0.66	7.48	12	<1	39.4	4.41	130		
ICP-H29GR08	216	4.46	3	109.5	1.5	0.75	22.9	0.58	8.77	11	1	34.3	4.05	127		
ICP-H29GR09	221	5.4	4	113	1.7	0.87	26.9	0.66	7.02	14	<1	39.6	4.27	142		
ICP-H29GR10	225	4.56	3	117	1.6	0.91	21.2	0.67	7.27	10	1	42.2	4.74	133		

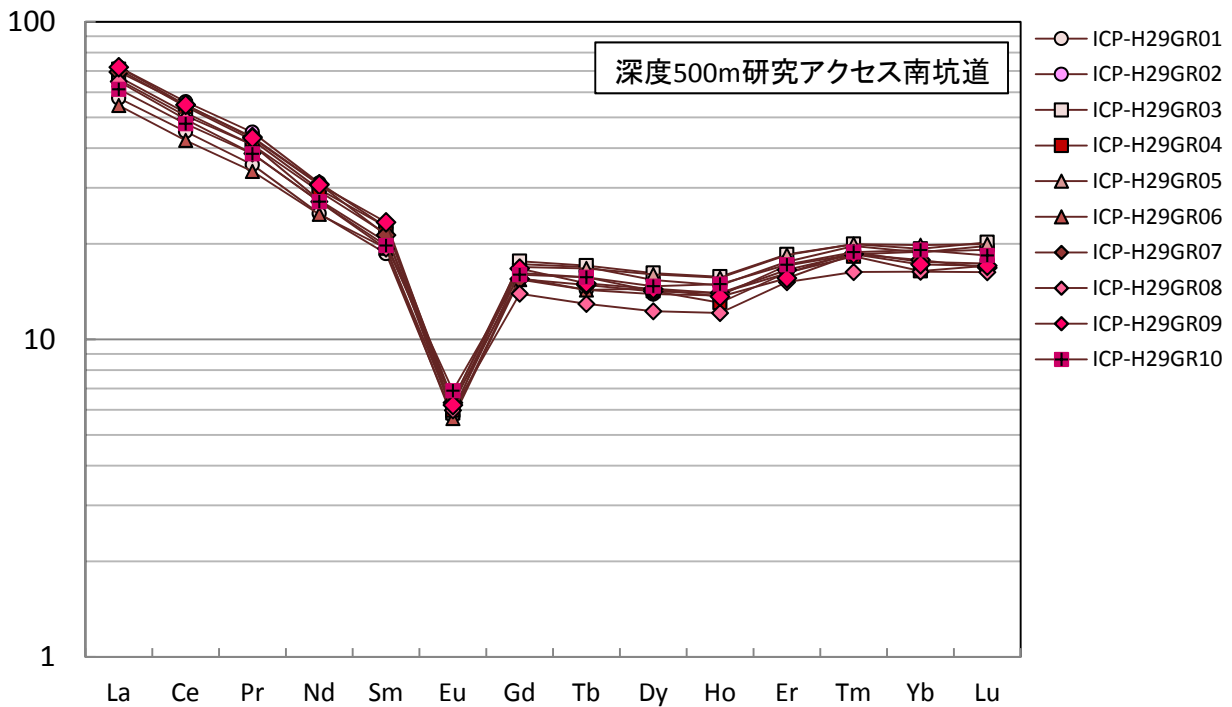


図 4.1.4-5 ICP-H29GR01～ICP-H29GR10 の希土類パターン (ME-MS81 の分析値を使用)

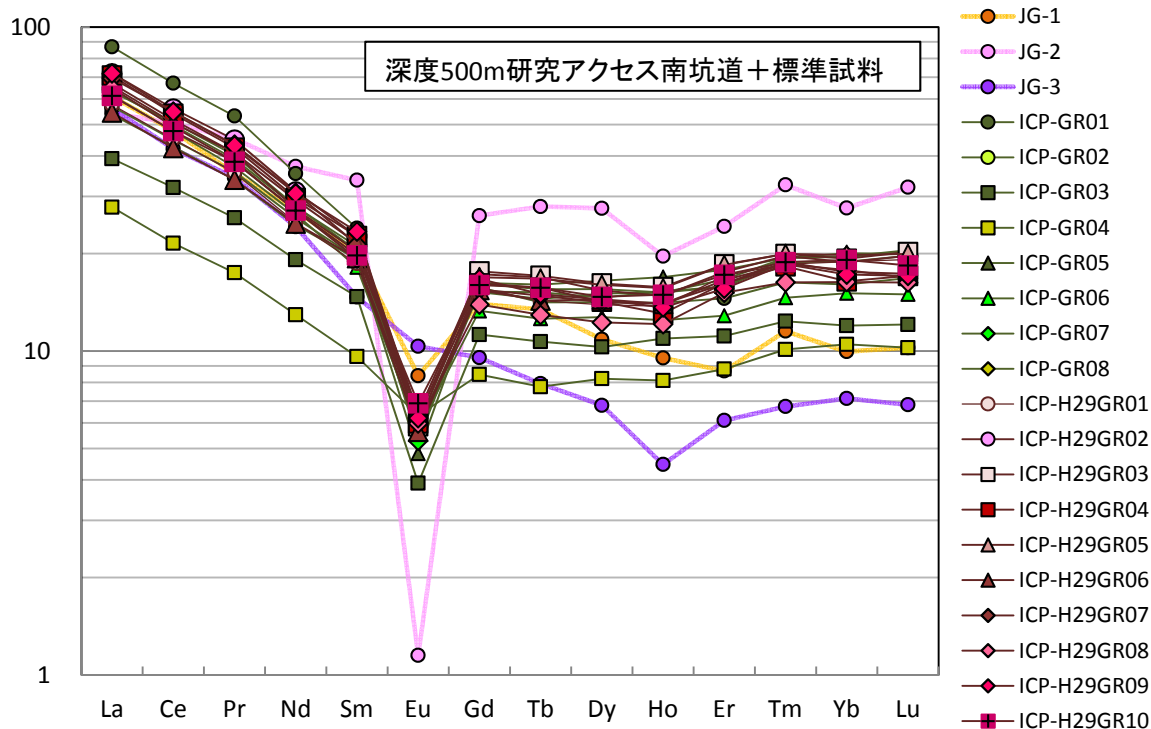


図 4.1.4-6 深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑の分析試料と標準試料の希土類パターンの比較

(2) 鉱物分析

試料とした瑞浪花崗岩については、一般的な変質や脈石鉱物の分布を把握するとともに、ラジウムなどのラドンの親核種の富化に影響する変質について確認するために X 線回折分析 (XRD) を実施した。分析においては試料の割れ目充填鉱物とともに割れ目近傍の母岩の変質箇所も試料とする。X 線回折分析の対象とした試料を表 4.1.4-6 に示す。

表 4.1.4-6 X 線回折分析 (XRD) による鉱物分析試料

試料名	孔名および中間深度	分析箇所	特徴	備考
XRD-H29GR01	15M152 号孔 24.01m	岩石基質	割れ目から気泡の発生を確認。割れ目周辺に褐色化が認められる。	割れ目表面の石英脈を除く
XRD-H29GR02	15M153 号孔 11.04m	岩石基質	割れ目から気泡の発生を確認。	
XRD-H29GR03	15M153 号孔 11.14m	岩石基質	「石英脈①」に相当。割れ目周辺変質。	
XRD-H29GR04	15M153 号孔 11.33m	岩石基質	「石英脈①」に相当。比較的健岩部。	
XRD-H29GR05	15M153 号孔 18.43m	岩石基質	割れ目から気泡の発生を確認。割れ目充填鉱物を伴う。	割れ目表面の充填鉱物は除く
XRD-H29GR06	16M159 号孔 28.63m	岩石基質	「対象③」湧水割れ目。	割れ目表面を含む
XRD-H29GR07	15M152 号孔 9.47m	岩石基質	「対象①」付近に連続する NW 系割れ目。	割れ目表面を含む
XRD-H29GR08	15M152 号孔 17.59m	岩石基質	53 号孔 18.43mNE 系 degas 箇所に連続する割れ目。	
XRD-H29GR09	15M153 号孔 22.61m	岩石基質	52 号孔 24.01mNW 系 degas 箇所に連続する割れ目。	
XRD-H29GR10	15M153 号孔 10.58m	岩石基質	「対象①」付近の変質箇所。掘削ダメージ割れ目近傍。	

(a) 分析方法

鉱物分析は図 4.1.4-7 のフローチャートのように、試料に各処理を施したあと、X線回折装置による分析を行った。最初に全岩分析を行ったのち、粘土鉱物の認められた試料については定方位分析を行った。それぞれの分析方法を以下に示す。

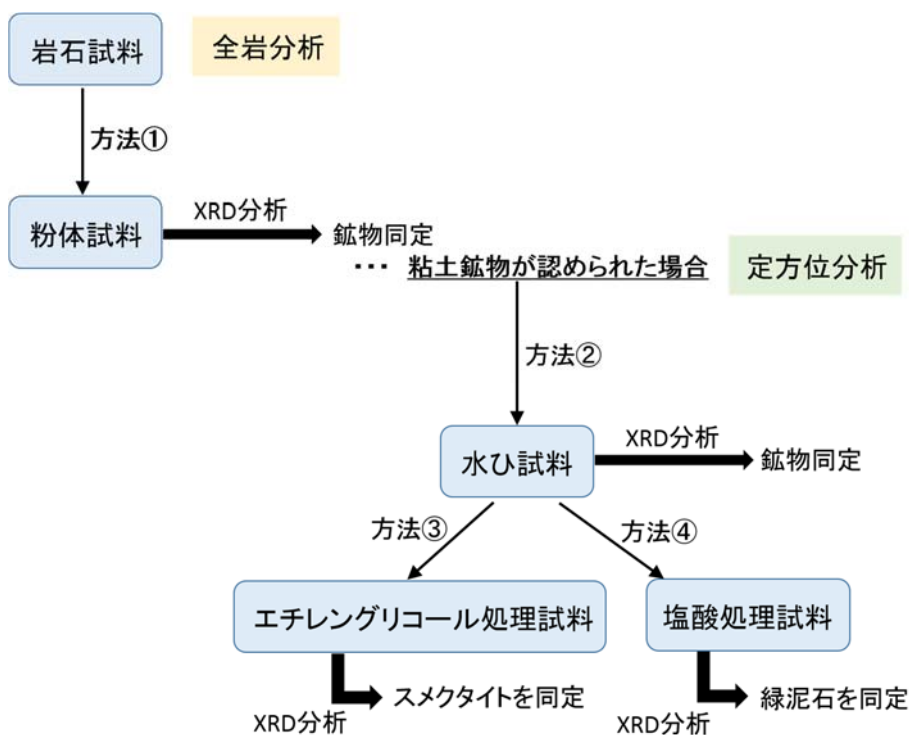


図 4.1.4-7 XRD 分析のための試料の処理方法および同定鉱物

1) 全岩分析

全岩分析は以下の方法で試料処理を行ったうえで実施した。

- ・ 方法①：岩石試料をめのう乳鉢で粉体化し、アルミ試料ホルダーに充填し、粉体試料とする。

2) 定方位分析

全岩分析の結果、試料に粘土鉱物が認められる場合にフローチャートに従い、定方位分析を行った。フローチャート中の各試料処理方法は以下の手順である。

- ・ 方法②：1Lのビーカーに粉体化した試料を蒸留水とともにいれて十分に攪拌し、試料を分散させる。その後、約4時間静置した後、水面から4.5cmまでの上ずみを採取する。上ずみ液を遠心分離機で試料粒子を沈下させて、スライドグラスに塗り、これを風乾させて水ひ試料とする。残った試料は後の分析のため取り置く。
- ・ 方法③：スメクタイトが存在する可能性がある場合、方法②で使用した試料（スライドグラ

スに塗ったもの) にエチレングリコールを噴霧し、半乾きの状態をエチレングリコール処理試料とする。

- 方法④：緑泥石の存在する可能性がある場合、方法②で取り置いた水ひ試料を 6 規定の塩酸溶液にいれ、80℃で湯煎し約 2 時間静置する。その後、塩酸を良く洗浄してスライドグラスへ塗り、塩酸処理試料とする。

(b) 分析結果

深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑は、全体的に割れ目や粘土鉱物が少なく、岩石基質の変質の程度は弱いが、今年度の分析したコアは昨年度よりもより変質の程度が弱い試料である。分析結果を表 4.1.4-7 に示す。分析した花崗岩には方解石、緑泥石、セリサイトが検出された。これらの鉱物は深度 300m ボーリング横坑や昨年度分析した深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑の試料にも認められているものである。方解石は XRD-H29GR03、XRD-H29GR05、XRD-H29GR08、XRD-H29GR10 でごく微量が認められる。緑泥石は XRD-H29GR03、XRD-H29GR05 に微量、XRD-H29GR06、XRD-H29GR07、XRD-H29GR08、XRD-H29GR10 ごく微量認められる。セリサイトは XRD-H29GR08、XRD-H29GR10 にごく微量認められた。一方、深度 300m ボーリング横坑で認められたスメクタイトはどの試料にも検出されなかった。これらの鉱物が認められた試料は XRD-H29GR06、XRD-H29GR07 以外は、すべて微弱ながら割れ目沿いの変質や充填鉱物を伴っているものである（表 4.1.4-2）。

表 4.1.4-7 鉱物分析結果 (XRD)

試料名	孔名および中間深度	方解石	緑泥石	セリサイト
XRD-H29GR01	15MI52 号孔_24.01m			
XRD-H29GR02	15MI53 号孔_11.04m			
XRD-H29GR03	15MI53 号孔_11.14m	(-)	+	
XRD-H29GR04	15MI53 号孔_11.33m			
XRD-H29GR05	15MI53 号孔_18.43m	(-)	+	
XRD-H29GR06	16MI59 号孔_28.63m		(-)	
XRD-H29GR07	15MI52 号孔_9.47m		(-)	
XRD-H29GR08	15MI52 号孔_17.59m	(-)	(-)	(-)
XRD-H29GR09	15MI53 号孔_22.61m			
XRD-H29GR10	15MI53 号孔_10.58m	(-)	(-)	(-)

含有量 (相対比較) : ◎>○>+>+>+> (-) 空欄は検知できなかったもの



### (3) 岩石中のウラン系列核種およびトリウム系列核種を利用した物質移動評価

#### (a) 基本原理

本研究で対象とするウラン、トリウムは岩石中には普遍的に存在している。ウランおよびトリウムの主要な同位体には以下のものがある（古川，1994）。

- $^{238}\text{U}$ ：存在度 99.2745%，半減期  $4.468 \times 10^9$  年
- $^{235}\text{U}$ ：存在度 0.720%，半減期  $7.038 \times 10^8$  年
- $^{234}\text{U}$ ：存在度 0.0055%，半減期  $2.45 \times 10^5$  年
- $^{232}\text{Th}$ ：存在度 100%，半減期  $1.405 \times 10^{10}$  年
- $^{230}\text{Th}$ ：半減期  $7.54 \times 10^4$  年
- $^{228}\text{Th}$ ：半減期 1.913 年

これらの放射性同位体のうち、 $^{238}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$  はそれぞれウラン系列、アクチニウム系列、トリウム系列の親核種であり、何回かの放射壊変を経て最終的に鉛の安定同位体となる（図 4.1.4-8，図 4.1.4-9，図 4.1.4-10）。これらの壊変系列では、対象とする系が閉鎖系の場合、十分長い時間が経過すると親核種と子孫核種の放射能が等しくなる（親核種と子孫核種の放射能比が 1 になる）。

例えば、ウラン系列核種では親核種（ $^{238}\text{U}$ ）と子孫核種の 1 つである  $^{234}\text{U}$  を考えた場合、 $^{234}\text{U}$  の半減期  $2.45 \times 10^5$  年の 10 倍程度（約  $10^6$  年）経過すると、両者の放射能は等しくなり、放射能比は 1 となる。対象とした系でウラン系列核種の放射能比が 1 となっている場合、その系はウラン系列核種について  $10^6$  年程度の間、閉鎖系が保たれていると言うことができる。

#### (b) これまでの研究事例

上述の原理を応用して、これまでに堆積岩中のウランの移動や花崗岩などの結晶質岩中の割れ目に沿った物質移動の評価が行われてきている。例えば、核燃料サイクル開発機構（1999a）では、岐阜県東濃地域に分布する堆積岩中に濃集した天然ウランの長期的な移動を評価するために、堆積岩の構成鉱物および堆積岩全岩（数 10 cm サイズ）について、ウラン系列核種の測定を行い、ウラン鉱床を胚胎する地層が過去約数十万年間、還元状態が保たれるなど安定な地質環境であったことを報告している。また、核燃料サイクル開発機構（1999b）では、岩手県釜石鉱山に分布する栗橋花崗閃緑岩中の透水性割れ目の近傍の岩盤中における、物質のマトリックス拡散現象を確認するために、割れ目表面から母岩内部に向けて、ウラン系列核種の分布を測定し、その結果から、ウランのマトリックス拡散深さは、少なくとも 10~100mm と推定している。

海外での研究事例については、Alexander et al. (1990) は、スイスグリムゼル花崗岩に認められる透水性割れ目の近傍の岩盤について、ウラン系列核種などの分布を利用して、マトリックス

拡散深さを評価した。その結果から、Projekt Gewähr (Nagra, 1985) にて設定した値の保守性を示した。

このように、天然のウラン系列核種、トリウム系列核種を利用したアプローチは、長期にわたる物質移動現象を評価する上で有効と考えられる。

ウラン系列 $A=4n+2$											
								Th-234 24.1d $\beta^-$	$\leftarrow \alpha$	U-238 4.5 $10^9$ y	
									Pa-234 ×		
		Pb-214 26.8min $\beta^-$	$\leftarrow \alpha$ 99.98%	Po-218 3.05min $\beta^-$ 0.02%	$\leftarrow \alpha$	Rn-222 3.8d	$\leftarrow \alpha$	Ra-226 1600y	$\leftarrow \alpha$	Th-230 $8 \cdot 10^4$ y	U-234 2.5 $10^5$ y
	Tl-210 1.3min $\beta^-$	$\leftarrow \alpha$ 0.04%	Bi-214 19.8min $\beta^-$ 99.96%	$\leftarrow \alpha$	At-218 -2s						
Hg-206 8.1min $\beta^-$	$\leftarrow \alpha$ $0.75 \cdot 10^{-4}\%$	Pb-210 $\beta^-$ 22y -100%	$\leftarrow \alpha$	Po-214 162 $\mu$ s						×	
	Tl-206 4.3min $\beta^-$	$\leftarrow \alpha$ $5 \cdot 10^{-5}\%$	Bi-210 5.0d $\beta^-$ ~100%								Pa-234 1.2min   6.7h $\beta^-$ 99.85%   $\beta^-$ $\gamma$ 0.15%
		Pb-206 stable	$\leftarrow \alpha$	Po-210 138.4d							

図 4.1.4-8 天然放射性元素の壊変系列（ウラン系列）

アクチニウム系列 $A=4n+3$											
								Th-231 25.6h $\beta^-$	$\leftarrow \alpha$	U-235 7 $10^8$ y	
			Bi-215 7.4min $\beta^-$	$\leftarrow \alpha$ 97%	At-219 0.9min $\beta^-$ 3%	$\leftarrow \alpha$ $4 \cdot 10^{-3}\%$	Fr-223 22min $\beta^-$ ~100%	$\leftarrow \alpha$ 1.2%	Ac-227 22y $\beta^-$ 98.8%	$\leftarrow \alpha$	Pa-231 3.3 $10^4$ y
		Pb-211 36.1min $\beta^-$	$\leftarrow \alpha$ -100%	Po-215 1.8ms $\beta^-$ $5 \cdot 10^{-4}\%$	$\leftarrow \alpha$	Rn-219 3.9s	$\leftarrow \alpha$	Ra-223 11.4d	$\leftarrow \alpha$	Th-227 18.7d	
	Tl-207 4.8min $\beta^-$	$\leftarrow \alpha$ 99.68%	Bi-211 2.15min $\beta^-$ 0.32%	$\leftarrow \alpha$	At-215 -100 us						
		Pb-207 stable	$\leftarrow \alpha$	Po-211 0.52s							

図 4.1.4-9 天然放射性元素の壊変系列（アクチニウム系列）

トリウム系列 $A=4n$											
								Ra-228 5.7y $\beta^-$	$\leftarrow \alpha$	Th-232 1.4 $10^{10}$ y	
									Ac-228 6.13h $\beta^-$		
		Pb-212 10.6h $\beta^-$	$\leftarrow \alpha$	Po-216 0.15s	$\leftarrow \alpha$	Rn-220 55.6s	$\leftarrow \alpha$	Ra-224 3.64d	$\leftarrow \alpha$	Th-228 1.9a	
	Tl-208 3.1min $\beta^-$	$\leftarrow \alpha$ 36.2%	Bi-212 60.6min $\beta^-$ 63.8%								
		Pb-208 stable	$\leftarrow \alpha$	Po-212 0.3ps							

図 4.1.4-10 天然放射性元素の壊変系列（トリウム系列）

(c) 岩石試料の採取

瑞浪超深地層研究所の研究坑道内のボーリング孔（16MI59号孔：図 4.1.4-11）のコアを利用した。このボーリング孔のコア観察、ボアホールテレビ観察、水理試験結果を基に、透水性の割れ目を選定し（図 4.1.4-12）、割れ目面から 5cm の範囲で 1cm ごとにコアを切断し、粉碎した後に分析所（公益財団法人日本分析センター）へ送付した。また、割れ目充填鉱物も採取し、分析を実施した。

(d) 岩石試料の分析

1) ウラン分析

文部科学省放射能測定法シリーズ 14「ウラン分析法」（平成 14 年改訂）に準じた。操作の概略は次のとおりである。送付試料に  $^{232}\text{U}$  回収率補正用トレーサを添加し、フッ化水素酸および硝酸を加えて加熱分解した。残さが認められた場合は分解操作を繰り返し、試料を完全に分解した。得られた溶液から TBP-キシレン溶媒抽出法で分離・精製したウランをステンレス鋼板上に電着し、測定試料とした。

シリコン半導体検出器を用いて、測定試料を原則として 80,000 秒間以上測定し  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  放射能濃度を算出した。測定にはシリコン半導体検出器 ORTEC 社製 BU-020-450-AS を使用した。

2) トリウム分析

送付試料に  $^{229}\text{Th}$  回収率補正用トレーサを添加し、フッ化水素酸および硝酸を加えて加熱分解した。残さが認められた場合は分解操作を繰り返し、試料を完全に分解した。得られた溶液から陰イオン交換樹脂カラム法で分離・精製したトリウムをステンレス鋼板上に電着し、測定試料とした。

シリコン半導体検出器を用いて、測定試料を原則として 80,000 秒間以上測定し  $^{228}\text{Th}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{232}\text{Th}$  の放射能濃度を算出した。測定にはシリコン半導体検出器 ORTEC 社製 BU-020-450-AS を使用した。

(e) 分析結果

測定結果を表 4.1.4-8 に示した。また、ウラン同位体およびトリウム同位体の  $\alpha$  線スペクトルの例を図 4.1.4-13, 図 4.1.4-14 に示した。 $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  の割れ目表面からの深度分布を検討した結果（図 4.1.4-15）、多少ばらつきはあるものの、 $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  とともにほぼ一定の濃度であった。 $^{232}\text{Th}$ ,  $^{230}\text{Th}$  についても、ウランと同様にほぼ一定の濃度であった（図 4.1.4-16）。 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  放射能比、 $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$  放射能比についても、全てのデータでほぼ 1（放射平衡）の値が得られ（図 4.1.4-17, 図 4.1.4-18）、割れ目表面からの拡散が生じている可能性は低く、過去 100 万年間程度ウラン、トリウムが移動していないことを示すと考えられる。

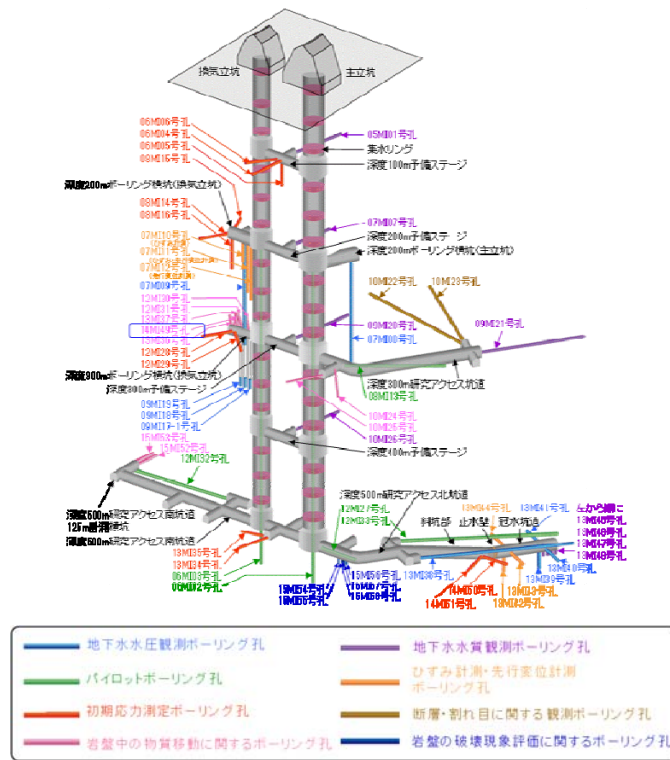


図 4.1.4-11 ボーリング孔位置

番号	試料名	スライス幅 (mm)
0	U-Th_2017_01	-
1	U-Th_2017_02	9.175
2	U-Th_2017_03	9.167
3	U-Th_2017_04	8.175
4	U-Th_2017_05	9.758
5	U-Th_2017_06	9.275

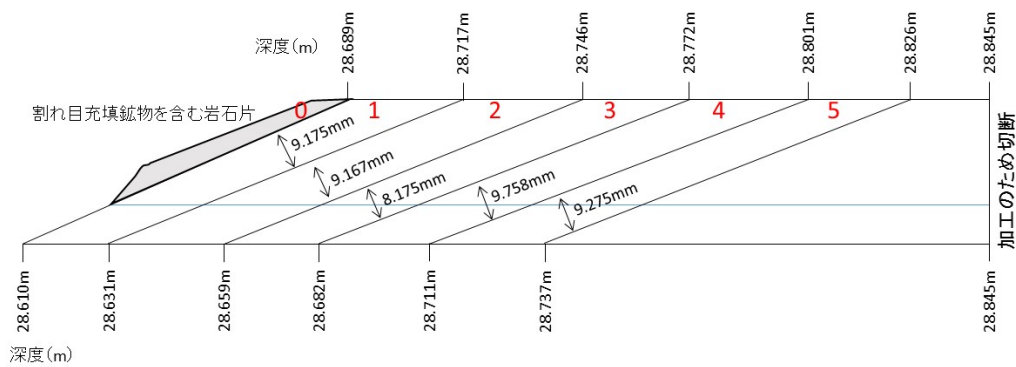


図 4.1.4-12 分析用コア

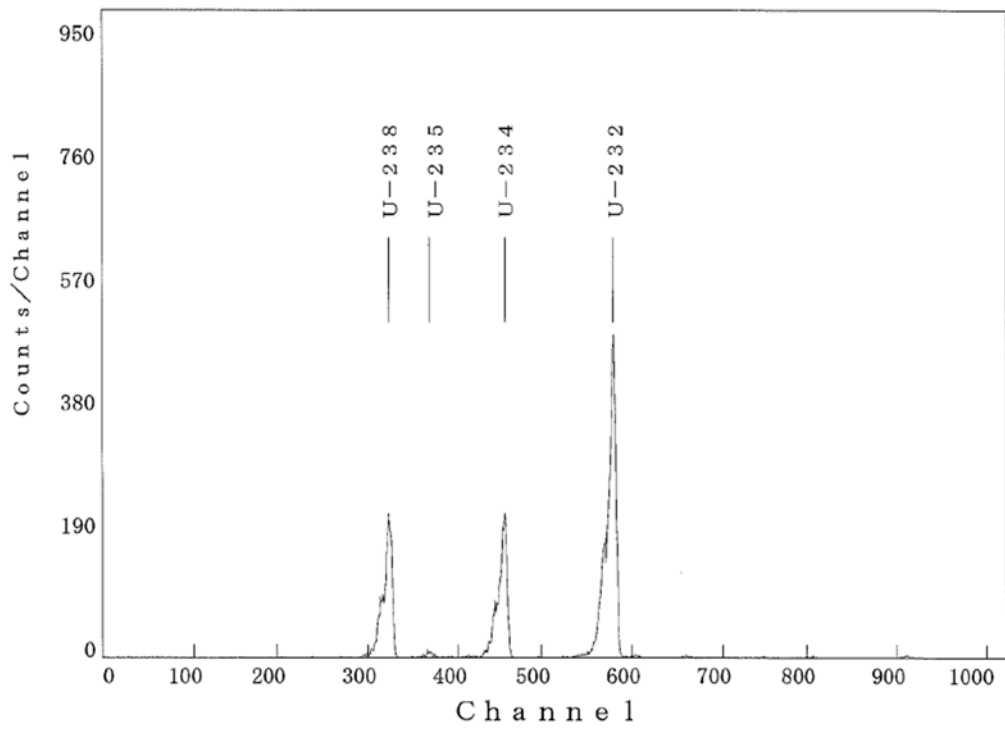


図 4.1.4-13  $\alpha$ 線スペクトルの例 (ウラン同位体)

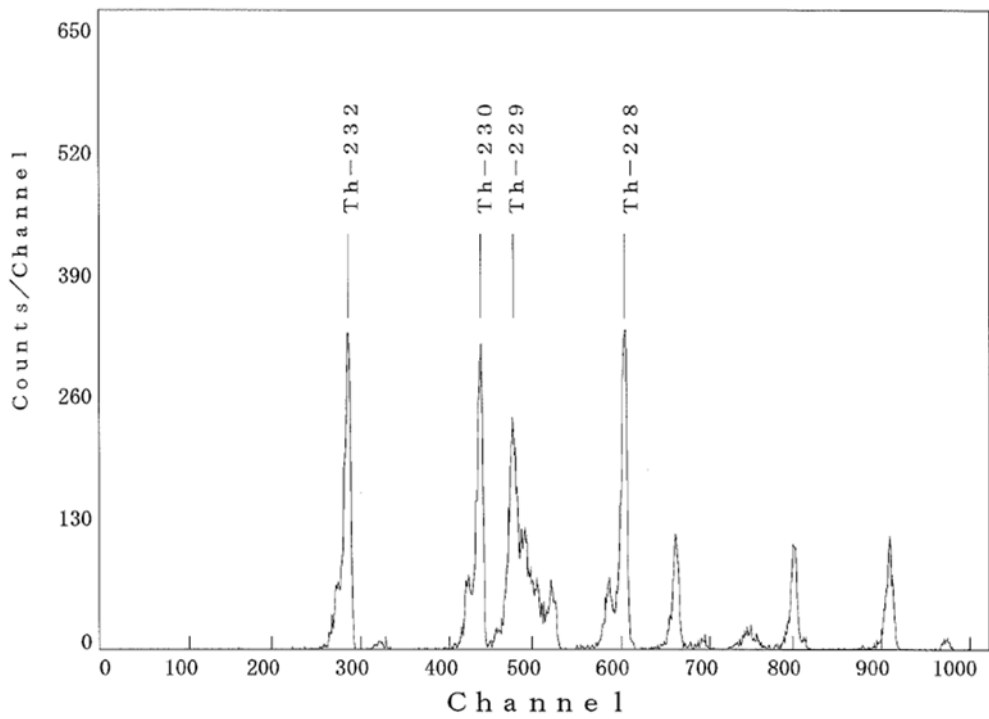


図 4.1.4-14  $\alpha$ 線スペクトルの例 (トリウム同位体)

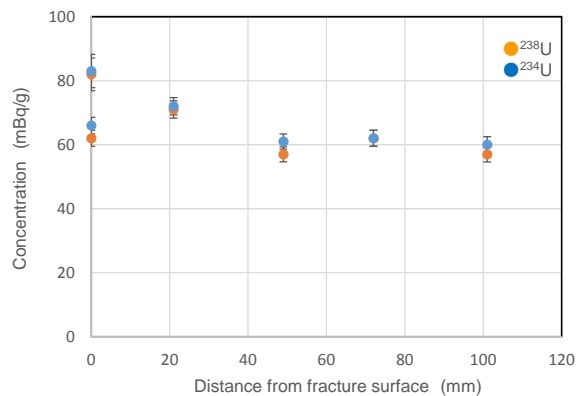


図 4.1.4-15 ウラン同位体深度分布

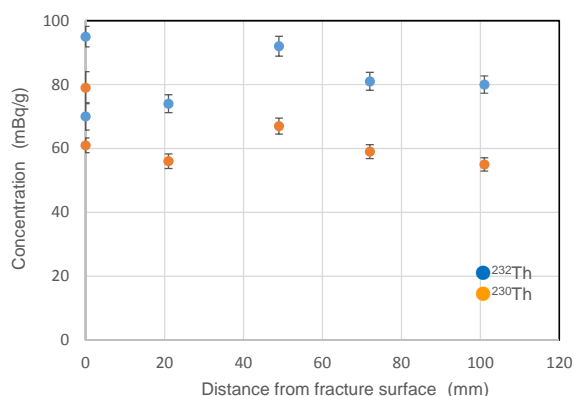


図 4.1.4-16 トリウム同位体深度分布

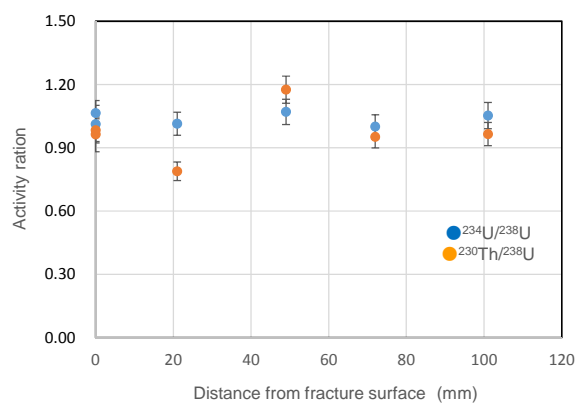


図 4.1.4-17  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  放射能比,  $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$  放射能比深度分布

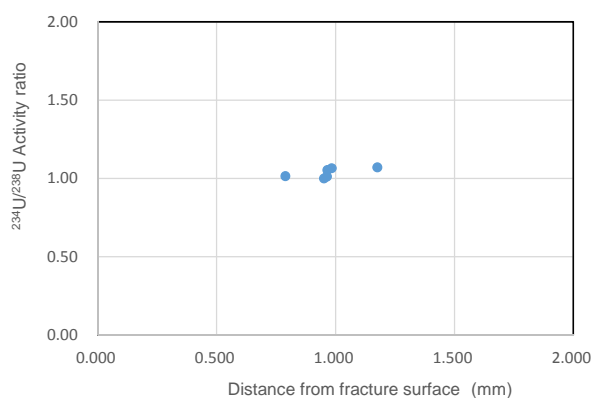


図 4.1.4-18  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  放射能比,  $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$  放射能比の相関

表 4.1.4-8 ウラン, トリウム同位体測定結果

Depth (mabh)	Distance from fracture surface (mm)	Geology	$^{238}\text{U}$ (mBq/g)	$^{234}\text{U}$ (mBq/g)	$^{232}\text{Th}$ (mBq/g)	$^{230}\text{Th}$ (mBq/g)	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ Activity Ratio	$^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ Activity Ratio
28.610	0	Fracture Fillings	82 ± 5.1	83 ± 5.2	70 ± 4.3	79 ± 4.6	1.01 ± 0.09	0.963 ± 0.082
28.610-28.631	0	Granite	62 ± 2.5	66 ± 2.6	95 ± 3.2	61 ± 2.3	1.06 ± 0.06	0.984 ± 0.054
28.631-28.659	21	Granite	71 ± 2.7	72 ± 2.7	74 ± 2.8	56 ± 2.3	1.01 ± 0.05	0.789 ± 0.044
28.659-28.682	49	Granite	57 ± 2.3	61 ± 2.4	92 ± 3.1	67 ± 2.5	1.07 ± 0.06	1.18 ± 0.06
28.682-28.711	72	Granite	62 ± 2.5	62 ± 2.5	81 ± 2.8	59 ± 2.2	1.00 ± 0.06	0.952 ± 0.052
28.711-28.737	101	Granite	57 ± 2.4	60 ± 2.5	80 ± 2.7	55 ± 2.1	1.05 ± 0.06	0.965 ± 0.055

1) ラジウム分析

ラドンの親核種であるラジウムの含有量について検討するため瑞浪花崗岩のラジウムの分析を実施した。分析試料を表 4.1.4-9 に示す。

表 4.1.4-9 ラジウム分析用試料一覧

試料名	孔名および中間深度	走行傾斜	特徴	変質の有無
RA-H29GR01	15M152 号孔 24.01mabh	N40W82SW	割れ目から気泡の発生を確認。割れ目周辺に褐色化が認められる。	×
RA-H29GR02	15M153 号孔 11.04m	N24W75W	割れ目から気泡の発生を確認。	×
RA-H29GR03	15M153 号孔 11.14m	N32E84SE	「石英脈①」に相当。割れ目周辺変質。	○
RA-H29GR04	15M153 号孔 11.33m	N20W69W	「石英脈①」に相当。比較的健岩部。	×
RA-H29GR05	15M152 号孔 27.10m	N41E76SE	ピンク色が濃く、淡緑色鉱物を伴う。	○
RA-H29GR06	16M159 号孔 28.63m	N45W84SW	「対象③」湧水割れ目。	×
RA-H29GR07	15M152 号孔 9.47m	N26W81W	「対象①」付近に連続する NW 系割れ目。	×
RA-H29GR08	15M152 号孔 17.59m	N32E89NW	53 号孔 18.43mNE 系 degas 箇所連続する割れ目。	○
RA-H29GR09	15M153 号孔 22.61m	N38W88NE	52 号孔 24.01mNW 系 degas 箇所連続する割れ目。	×
RA-H29GR10	15M153 号孔 10.58m	-	「対象①」付近の変質箇所。掘削ダメージ割れ目近傍。	○

① 分析方法

ラジウムの分析方法は文部科学省（1990 および 1990）に準拠した。U-8 容器に粉碎した試料岩石を入れて約 1 ヶ月間放置後、Ra-226 と放射平衡に達した Bi-214 の濃度をガンマ線スペクトロメトリによって測定し、Bi-214 の濃度をそのまま Ra-226 濃度と読み替えた。

② 分析結果

分析結果を表 4.1.4-10 に示す。また、分析時に同時に得られる Pb-214、Ac-228、Pb-212、Bi-212 の濃度についてもあわせて示す。試料全体の岩石中の U 濃度は RA-H29GR05 と RA-H29GR10 が高く、Ra-226 (Bi-214) も同様である。これらの試料はいずれも変質試料であるが、同じく変質している RA-H29GR03 と RA-H29GR08 が寧ろ相対的に低い傾向にあり、変質との関係が認められない。割れ目からの気泡や degas が認められる箇所は、ラドン濃度が高い傾向があるが、Ra-226 が一律に高いとは言えず、ラドンが水みちから当該箇所に運ばれて、degas していると推察される。

表 4.1.4-10 ラジウム分析結果

試料名	U 系列				Th 系列				
	ICP-MS		γ線測定		ICP-MS		γ線測定		
	U		Bi-214	Pb-214	Th		Ac-228	Pb-212	Bi-212
	Bq/kg	(mg/kg)	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg	(mg/kg)	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg
RA-H29GR01	71.8	5.77	76 ±1	87 ±1	59.2	14.6	76 ±2	88 ±1	81 ±6
RA-H29GR02	94.7	7.60	84 ±1	101 ±1	101.7	25.1	111 ±3	119 ±2	111 ±7
RA-H29GR03	83.6	6.82	68 ±1	83 ±1	51.2	12.6	85 ±2	96 ±1	85 ±6
RA-H29GR04	66.8	5.37	65 ±1	76 ±1	92.6	22.8	78 ±2	81 ±1	70 ±6
RA-H29GR05	134.4	10.81	110 ±1	135 ±1	108.9	26.8	86 ±2	97 ±1	83 ±6
RA-H29GR06	90.4	7.27	77 ±1	91 ±1	128.8	31.7	113 ±3	127 ±2	118 ±7
RA-H29GR07	91.5	7.35	76 ±1	91 ±1	114.9	28.3	109 ±2	121 ±2	114 ±7
RA-H29GR08	81.2	6.58	71 ±1	84 ±1	74.7	18.4	74 ±2	81 ±1	77 ±6
RA-H29GR09	88.4	7.11	76 ±1	92 ±1	106	26.1	100 ±2	114 ±2	107 ±7
RA-H29GR10	113.7	9.15	88 ±1	109 ±1	116.1	28.6	109 ±2	124 ±2	107 ±6

#### 4.1.4.2 物性測定

間隙率および比表面積の測定を行った。岩石試料（チップサイズ）の細孔分布測定によるミクロン～サブミクロンオーダーの間隙率と、サブミクロン～ナノオーダーの比表面積を BET 法によって行った。

##### (1) 細孔分布測定

細孔分布測定は水銀ポロシメータによって測定した。水銀ポロシメータは岩石中の細孔を円柱状の間隙と仮定し、水銀の表面張力を用いて、水銀の注入圧と試料中の円柱状間隙の直径との相関関係を利用し、マクロポア（100nm～1000 $\mu$ m）の細孔径分布として測定するものである。また、細孔分布とともに比表面積、気孔率（間隙率）および密度（真密度）も合わせて測定が可能である。間隙分布（細孔分布）の測定は島津製作所の micrometrics AutoPoreIV9500 シリーズを使用した。試料容器に対して相対的に試料サイズが小さい場合は、測定誤差が大きくなるため、容器に入る最大のサイズ（1cm×1cm×2cm 程度）に試料をトリミングして測定を行なった。細孔分布測定に用いた試料の一覧を表 4.1.4-11 に示す。試料は割れ目面から岩石基質部にかけて、割れ目面に対して垂直な方向に連続的に採取した。図 4.1.4-19 に試料採取要領を示す。同試料における試料番号は割れ目面に近い方から 1, 2, 3, 4, 5 とした。分析結果を表 4.1.4-12 に示す。測定の結果、PRS-H29GR03、PRS-H29GR08 および PRS-H29GR09 は割れ目に最%も近い試料で最も大きな値を示し、0.9196%～1.184%であった。このうち PRS-H29GR03、PRS-H29GR08 については肉眼で割れ目面が変質を被っていることを確認している。また PRS-H29GR05 および PRS-H29GR10 はそれぞれ試料中に微小な脈を伴うが、脈周辺の気孔率が 0.9139%～0.9452%と高くなっている。これらの脈周辺ではセリサイト化が進んでおり、気孔率を低下していると考えられる。PRS-H29GR01、PRS-H29GR02、PRS-H29GR04 は 0.5422%～0.8022%の範囲であり、変質が少なく割れ目面からの距離との相関はあまりない。

表 4.1.4-11 細孔分布測定試料一覧

試料名	孔名および深度	分析個数	特徴	備考
PRS-H29GR01	15MI52 号孔 24.01m	3	割れ目から気泡の発生を確認。割れ目周辺に褐色化が認められる。	
PRS-H29GR02	15MI53 号孔 11.04m	3	割れ目から気泡の発生を確認。	
PRS-H29GR03	15MI53 号孔 11.14m	5	「石英脈①」に相当。割れ目周辺変質。	
PRS-H29GR04	15MI53 号孔 1.33m	3	「石英脈①」に相当。比較的健岩部。	
PRS-H29GR05	15MI53 号孔 18.43m	2	割れ目から気泡の発生を確認。割れ目充填鉱物を伴う。	
PRS-H29GR06	16MI59 号孔 28.63m	4	「対象③」湧水割れ目。	
PRS-H29GR07	15MI52 号孔 9.47m	3	「対象①」付近に連続する NW 系割れ目。	
PRS-H29GR08	15MI52 号孔 17.59m	4	53 号孔 18.43mNE 系 degas 箇所に連続する割れ目。	
PRS-H29GR09	15MI53 号孔 22.61m	3	52 号孔 24.01mNW 系 degas 箇所に連続する割れ目。	
PRS-H29GR10	15MI53 号孔 10.58m	5	「対象①」付近の変質箇所。掘削ダメージ割れ目近傍。	黒色脈状組織を境に分析する



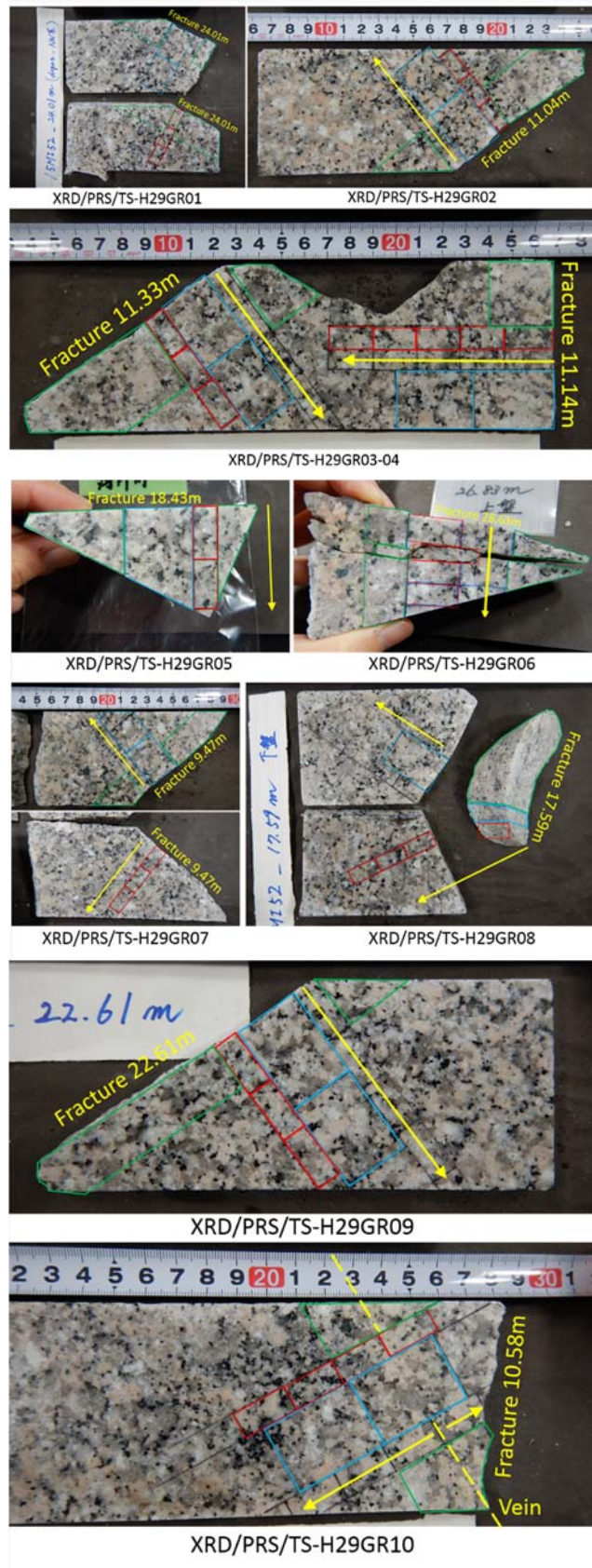


図 4.1.4-19 XRD用（緑）、細孔分布測定用（赤）および岩石薄片製作用（青）試料の採取箇所

(XRD/PRS/TS-GR01~10)

表 4.1.4-12 分析結果

試料名	項目	単位	1	2	3	4	5	実質の度合い	試料名	項目	単位	1	2	3	4	5	実質の度合い			
PRS-H29GR01	かさ密度	g/cc	2.5812	2.6129	2.6338			×	PRS-H29GR06	かさ密度	g/cc	2.5889	2.6227	2.6142	2.6310			×		
	真密度	g/cc	2.5872	2.5935	2.6126					かさ密度	g/cc	2.5874	2.5949	2.5943	2.6060					
	気孔率(間隙率)	%	0.5422	0.7426	0.8022					真密度	g/cc	0.8325	1.0593	0.7599	0.9467					
	全細孔体積	cc/g	0.0021	0.0029	0.0031					気孔率(間隙率)	%	0.0032	0.0041	0.0029	0.0036					
	全細孔表面積	m <sup>2</sup> /g	0.012	0.022	0.047					全細孔体積	cc/g	0.015	0.017	0.02	0.0270					
	Median径	体積基準	nm	2909	7879	609					Median径	体積基準	nm	5302.2	3505.3	1129.2	1201.1			
	表面積基準	nm	217.2	147.3	100.9					表面積基準	nm	250	298.4	239.4	203.9					
	平均細孔直径(4V/A)	nm	712.1	510.8	258.7					平均細孔直径(4V/A)	nm	840.2	977.5	586	545.4					
	割れ目からの距離	mm	0	20	40					割れ目からの距離	mm	0	20	40	60					
	項目	単位	1	2	3					項目	単位	1	2	3						
PRS-H29GR02	かさ密度	g/cc	2.5984	2.6182	2.6248			×	PRS-H29GR07	かさ密度	g/cc	2.6376	2.6186	2.6129			×			
	真密度	g/cc	2.5866	2.5983	2.606					かさ密度	g/cc	2.6216	2.5917	2.5966						
	気孔率(間隙率)	%	0.4563	0.7601	0.7164					真密度	g/cc	0.6075	1.0278	0.6242						
	全細孔体積	cc/g	0.0018	0.0029	0.0027					気孔率(間隙率)	%	0.0023	0.004	0.0024						
	全細孔表面積	m <sup>2</sup> /g	0.016	0.02	0.021					全細孔体積	cc/g	0.024	0.036	0.03						
	Median径	体積基準	nm	1486.6	27626.3	12274.9					Median径	体積基準	nm	620.6	64219.7	453.3				
	表面積基準	nm	165.1	164.6	160.7					表面積基準	nm	167.1	121.9	155.8						
	平均細孔直径(4V/A)	nm	437.8	576.2	521.9					平均細孔直径(4V/A)	nm	382.8	443.8	323.6						
	割れ目からの距離	mm	0	20	40					割れ目からの距離	mm	0	20	40	60					
	項目	単位	1	2	3	4	5			項目	単位	1	2	3	4	5				
PRS-H29GR03	かさ密度	g/cc	2.6258	2.6203	2.6109	2.6128	2.6307	○	PRS-H29GR08	かさ密度	g/cc	2.6038	2.6251	2.6218	2.6064		○			
	真密度	g/cc	2.5947	2.6044	2.5968	2.5882	2.604			かさ密度	g/cc	2.5785	2.6021	2.6066	2.5876					
	気孔率(間隙率)	%	1.184	0.6039	0.5398	0.9384	1.0136			真密度	g/cc	0.9722	0.8752	0.5803	0.7225					
	全細孔体積	cc/g	0.0046	0.0023	0.0021	0.0036	0.0039			気孔率(間隙率)	%	0.0038	0.0034	0.0022	0.0028					
	全細孔表面積	m <sup>2</sup> /g	0.026	0.026	0.019	0.02	0.031			全細孔体積	cc/g	0.018	0.021	0.017	0.02					
	Median径	体積基準	nm	207427.1	626.7	2636.5	152722.2			1558.3	Median径	体積基準	nm	4043.4	18272.4	1053.5		12275.1		
	表面積基準	nm	134.8	161.4	148.8	141.8	163.8			表面積基準	nm	235.7	187	192.3	165.4					
	平均細孔直径(4V/A)	nm	710	382.2	448.2	714.1	500.7			平均細孔直径(4V/A)	nm	824.6	630.9	536.1	545.4					
	割れ目からの距離	mm	0	20	40	60	80			割れ目からの距離	mm	0	20	40	60					
	項目	単位	1	2	3	4	5			項目	単位	1	2	3	4	5				
PRS-H29GR04	かさ密度	g/cc	2.599	2.6225	2.6245			×	PRS-H29GR09	かさ密度	g/cc	2.6173	2.6054	2.6143			×			
	真密度	g/cc	2.5796	2.6073	2.6075					かさ密度	g/cc	2.5932	2.5896	2.5948						
	気孔率(間隙率)	%	0.7468	0.5784	0.6437					真密度	g/cc	0.9196	0.6041	0.7442						
	全細孔体積	cc/g	0.0029	0.0022	0.0025					気孔率(間隙率)	%	0.0035	0.0023	0.0029						
	全細孔表面積	m <sup>2</sup> /g	0.014	0.023	0.023					全細孔体積	cc/g	0.023	0.024	0.017						
	Median径	体積基準	nm	95157	836.2	1394.7					Median径	体積基準	nm	106581	834.8	35268.4				
	表面積基準	nm	169.4	148.3	145.8					表面積基準	nm	161.2	151.6	191.2						
	平均細孔直径(4V/A)	nm	633.7	362.7	436					平均細孔直径(4V/A)	nm	619.5	381.9	683.4						
	割れ目からの距離	mm	0	20	40					割れ目からの距離	mm	0	20	40	60					
	項目	単位	1	2	3					項目	単位	1	2	3	4	5				
PRS-H29GR05	かさ密度	g/cc	2.5845	2.6153				○	PRS-H29GR10	かさ密度	g/cc	2.6247	2.5949	2.6113	2.6431	2.636				
	真密度	g/cc	2.5665	2.5839						かさ密度	g/cc	2.6066	2.5712	2.5866	2.6181	2.6226				
	気孔率(間隙率)	%	0.6978	1.1996						真密度	g/cc	0.8884	0.9139	0.9452	0.9442	0.5068				
	全細孔体積	cc/g	0.0027	0.0046						気孔率(間隙率)	%	0.0026	0.0036	0.0037	0.0036	0.0019				
	全細孔表面積	m <sup>2</sup> /g	0.025	0.033						全細孔体積	cc/g	0.035	0.031	0.02	0.053	0.019				
	Median径	体積基準	nm	1002.8	1014.6					Median径	体積基準	nm	467.2	1178.5	101582.6	390.9	650			
	表面積基準	nm	161	210						表面積基準	nm	155.1	149.6	178.8	128.3	170.7				
	平均細孔直径(4V/A)	nm	442.1	559.5						平均細孔直径(4V/A)	nm	306	451.5	736.3	271.8	402				
	割れ目からの距離	mm	0	20						割れ目からの距離	mm	0	20	40	60	80				
	項目	単位	1	2	3					項目	単位	1	2	3	4	5				

(2) 比表面積測定 (BET 法)

BET 法による比表面積の測定は BET 1 点法によって実施した。測定には窒素とヘリウムの混合ガス (N<sub>2</sub> : 30%、He : 70%) を使用した。測定手順は、装置内に混合ガスを連続的に流し、サンプルが入ったU型セルをセットする。セル部を液体窒素温度に冷却すると、混合ガス中の窒素がサンプル表面に吸着され、相対的に混合ガス中の窒素ガス濃度が減少する。窒素ガスの吸着平衡を待って、窒素ガスの減少を熱伝導度検出器により測定する。次に吸着平衡に達したセル部を常温に戻すと、窒素ガスの脱離が始まる。この脱離により混合ガス中の窒素濃度が増加する。この脱離した窒素ガス量を吸着時同様に熱伝導度検出器で測定する。なお、測定試料は岩石を粉砕し、平均粒径 1.34mm および 0.64mm に調整したものをを用いた。測定試料を表 4.1.4-13 に示す。

表 4.1.4-13 比表面積測定試料一覧

試料名	孔名および中間深度	分析箇所	特徴	備考
SSA-H29GR01	15M152 号孔 24.01m	岩石基質	割れ目から気泡の発生を確認。割れ目周辺に褐色化が認められる。	割れ目表面の石英脈を除く
SSA-H29GR02	15M153 号孔 11.04m	岩石基質	割れ目から気泡の発生を確認。	
SSA-H29GR03	15M153 号孔 11.14m	岩石基質	「石英脈①」に相当。割れ目周辺変質。	
SSA-H29GR04	15M153 号孔 11.33m	岩石基質	「石英脈①」に相当。比較的健岩部。	
SSA-H29GR05	15M153 号孔 18.43m	岩石基質	割れ目から気泡の発生を確認。割れ目充填鉱物を伴う。	割れ目表面の充填鉱物は除く
SSA-H29GR06	16M159 号孔 28.63m	岩石基質	「対象③」湧水割れ目。	割れ目表面を含む
SSA-H29GR07	15M152 号孔 9.47m	岩石基質	「対象①」付近に連続する NW 系割れ目。	割れ目表面を含む
SSA-H29GR08	15M152 号孔 17.59m	岩石基質	53 号孔 18.43mNE 系 degas 箇所に連続する割れ目。	
SSA-H29GR09	15M153 号孔 22.61m	岩石基質	52 号孔 24.01mNW 系 degas 箇所に連続する割れ目。	
SSA-H29GR10	15M153 号孔 10.58m	岩石基質	「対象①」付近の変質箇所。掘削ダメージ割れ目近傍。	

表 4.1.4-14 比表面積測定結果

試料粒径:#9>X>#20		全表面積 (m <sup>2</sup> )			比表面積 (m <sup>2</sup> /g)
平均粒径:1.34mm		1st	2nd	平均	
試料名	孔名および中間深度				
SSA-H29GR01	15M152 24.01m	0.08	0.092	0.086	0.082
SSA-H29GR02	15M153 11.04m	0.115	0.11	0.113	0.108
SSA-H29GR03	15M153 11.14m	0.14	0.125	0.133	0.125
SSA-H29GR04	15M153 11.33m	0.089	0.09	0.090	0.082
SSA-H29GR05	15M153 18.43m	0.064	0.062	0.063	0.058
SSA-H29GR06	16M159 28.63m	0.091	0.098	0.095	0.087
SSA-H29GR07	15M152 9.47m	0.09	0.088	0.089	0.089
SSA-H29GR08	15M152 17.59m	0.121	0.115	0.118	0.118
SSA-H29GR09	15M153 22.61m	0.078	0.081	0.080	0.082
SSA-H29GR10	15M153 10.58m	0.078	0.083	0.081	0.082
試料粒径:#20>X>#30		全表面積 (m <sup>2</sup> )			比表面積 (m <sup>2</sup> /g)
平均粒径:0.64mm		1st	2nd	平均	
試料名	孔名および中間深度				
SSA-H29GR01	15M152 24.01m	0.063	0.076	0.070	0.070
SSA-H29GR02	15M153 11.04m	0.096	0.095	0.096	0.096
SSA-H29GR03	15M153 11.14m	0.096	0.099	0.098	0.098
SSA-H29GR04	15M153 11.33m	0.092	0.097	0.095	0.095
SSA-H29GR05	15M153 18.43m	0.115	0.11	0.113	0.113
SSA-H29GR06	16M159 28.63m	0.087	0.079	0.083	0.083
SSA-H29GR07	15M152 9.47m	0.085	0.091	0.088	0.088
SSA-H29GR08	15M152 17.59m	0.115	0.106	0.111	0.111
SSA-H29GR09	15M153 22.61m	0.075	0.065	0.070	0.070
SSA-H29GR10	15M153 10.58m	0.09	0.085	0.088	0.088

比表面積測定結果を表 4.1.4-14 に示す。この結果によれば、平均粒径 1.34mm および 0.64mm の試料間において、比表面積の大きさの割合は、SSA-H29GR04、SSA-H29GR05、SSA-H29GR10 を除いて平均粒径 1.34mm のほうが大きい、SSA-H29GR05 を除いて顕著な違いはない。SSA-H29GR05 は弱い変質をしているため、0.64mm の試料の方が大きくなっている可能性がある。平均粒径 1.34mm および 0.64mm で最も比表面積が大きいのは SSA-H29GR08 である。この試料も弱い変質を受けており、また、XRD の結果でも微量の粘土鉱物が同定されるため比表面積が大きくなっている可能性がある。弱い変質が認められる試料 (SSA-H29GR03、SSA-H29GR05、SSA-H29GR08、SSA-H29GR10) と未変質試料 (SSA-H29GR01、SSA-H29GR02、SSA-H29GR04、SSA-H29GR6、SSA-H29GR07、SSA-H29GR09) を比較した場合、平均粒径 1.34mm および 0.64mm ともに変質試料の比表面積が大きい。ただし、一昨年度の深度 300m ボーリング横坑の分析では、未変質部で 0.07 m<sup>2</sup>/g ~0.17 m<sup>2</sup>/g に対して、変質部では 0.07 m<sup>2</sup>/g~2.29 m<sup>2</sup>/g の値が得られている。これに照らせば、今般の深度 500m 研究アクセス南坑道での変質試料は、平均粒径 1.34mm の場合 0.06 m<sup>2</sup>/g ~0.13 m<sup>2</sup>/g であり、深度 300m ボーリング横坑の未変質試料と大差がなく、変質が大きな影響を与えていないと考えるべきである。

#### 4.1.4.3 岩石薄片観察

鉱物同定を目的として、岩石薄片を製作し偏光顕微鏡による観察を行った。試料を表 4.1.4-15 に示す。TS-H29GR10 を除き、細孔分布測定と同様に、各試料の割れ目面から垂直に連続して岩石薄片を製作した (図 4.1.4-20)。岩石薄片のサイズは 24mm×32mm である。偏光顕微鏡下での観察は、鉱物組み合わせ、鉱物の形状、大きさ、変質の程度、破碎の有無、などに注目し、かつ割れ目面から岩石基質部にかけての連続的な変化も確認するため、1cm 幅の間隔で記載を行った。偏光顕微鏡観察による鉱物同定および記載を表 4.1.4-16 に示す。

表 4.1.4-15 岩石薄片製作一覧

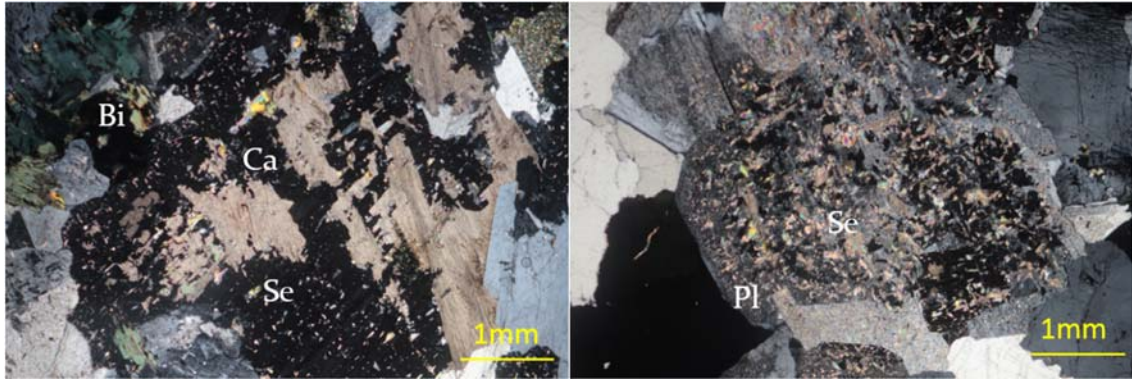
試料名	孔名および深度	製作 個数	特徴
TS-H29GR01	15M152 号孔 24.01m	2	割れ目から気泡の発生を確認。割れ目周辺に褐色化が認められる。
TS-H29GR02	15M153 号孔 11.04m	2	割れ目から気泡の発生を確認。
TS-H29GR03	15M153 号孔 11.14m	2	「石英脈①」に相当。割れ目周辺変質。
TS-H29GR04	15M153 号孔 11.33m	2	「石英脈①」に相当。比較的健岩部。
TS-H29GR05	15M153 号孔 18.43m	1	割れ目から気泡の発生を確認。割れ目充填鉱物を伴う。
TS-H29GR06	16M159 号孔 28.63m	1	「対象③」湧水割れ目。
TS-H29GR07	15M152 号孔 9.47m	2	「対象①」付近に連続する NW 系割れ目。
TS-H29GR08	15M152 号孔 17.59m	2	53 号孔 18.43mNE 系 degas 箇所連続する割れ目。
TS-H29GR09	15M153 号孔 22.61m	2	52 号孔 24.01mNW 系 degas 箇所連続する割れ目。
TS-H29GR10	15M153 号孔 10.58m	3	「対象①」付近の変質箇所。掘削ダメージ割れ目。

表 4.1.4-16 偏光顕微鏡観察による鉱物同定および記載

試料名	鉱物同定	記載
TS-H29GR01	石英○、斜長石○、カリ長石○、黒雲母○、緑泥石△、セリサイト△	斜長石のセリサイト化や黒雲母の緑泥石化は少量で、割れ目からの距離によらず見られる。
TS-H29GR02	石英○、斜長石○、カリ長石○、黒雲母○、緑泥石△、セリサイト△	斜長石のセリサイト化や黒雲母の緑泥石化は少量で、割れ目からの距離によらず見られる。
TS-H29GR03	石英○、斜長石○、カリ長石○、黒雲母△、緑泥石△、セリサイト◎、褐れん石、ジルコン	割れ目面付近の斜長石中央のセリサイト化が激しい。
TS-H29GR04	石英○、斜長石○、カリ長石○、黒雲母○、緑泥石△、セリサイト△	斜長石のセリサイト化や黒雲母の緑泥石化は少量で、割れ目からの距離によらず見られる。
TS-H29GR05	石英○、斜長石○、カリ長石○、黒雲母○、緑泥石△、セリサイト△、カルサイト○	微細な脈を伴い、脈にはカルサイトの結晶の部分が見られる。
TS-H29GR06	石英○、斜長石○、カリ長石○、黒雲母○、緑泥石△、セリサイト△	斜長石のセリサイト化や黒雲母の緑泥石化は少量で、割れ目からの距離によらず見られる。
TS-H29GR07	石英○、斜長石○、カリ長石○、黒雲母○、緑泥石△、セリサイト△	斜長石のセリサイト化や黒雲母の緑泥石化は少量で、割れ目からの距離によらず見られる。
TS-H29GR08	石英○、斜長石○、カリ長石○、黒雲母○、緑泥石△、セリサイト△、カルサイト○	割れ目面付近の斜長石のセリサイト化、黒雲母の壁間に沿った緑泥石化が見られる。
TS-H29GR09	石英○、斜長石○、カリ長石○、黒雲母○、緑泥石△、セリサイト△	斜長石のセリサイト化や黒雲母の緑泥石化は少量で、割れ目からの距離によらず見られる。
TS-H29GR10	石英○、斜長石○、カリ長石○、黒雲母△、緑泥石△、セリサイト◎	微細な脈を伴い、脈周辺でセリサイト化が進んでいる。

◎ よく産出する ○ 普通に産出する △ 少ない 無印 ごくわずか

TS-H29GR01, TS-H29GR02, TS-H29GR04, TS-H29GR06, TS-H29GR07, TS-H29GR09 は斜長石内部のセリサイト化や黒雲母のへき開に沿った緑泥石化が割れ目面から内部にかけて比較的どの深度にも認められた。これらの試料はいずれも NW 系の割れ目周辺のマトリックスであり、深度 500m における NW 系の割れ目周辺が変質を伴わないことは昨年度の結果と同じである。一方、TS-H29GR03 の割れ目近傍では斜長石の中央のセリサイト化が顕著であり、割れ目面から内部に向かって、セリサイト化の割合は減少する。この試料は割れ目周辺の間隙率が比較的大きく、内部に向かって間隙率の減少が見られる。このことから、この割れ目は過去に熱水変質を受け、既存の斜長石のセリサイト化が起こったことで割れ目周辺マトリックスの間隙率が増加したものと考えられる。深度 500m においてこのような割れ目周辺変質の特徴を持つ割れ目が NE 系の割れ目であることは昨年度の結果と同じである。TS-H29GR05 および TS-H29GR08 には微小な脈が認められ、脈の周辺を観察すると図 4.1.4-20 (a) に示すようなカルサイトの結晶や図 4.1.4-20 (b) に示すような累帯構造をもつ斜長石のセリサイト化が認められた。この試料における間隙率も比較的大きな値を示し、NE 系の割れ目近傍に存在する脈であることから、熱水変質後、間隙が増加した斜長石中央にカルサイトが充填したものだと考えられる。なお、TS-G29GR10 にも微小な脈が認められ、斜長石のセリサイト化が顕著で、脈から離れるに従い間隙率が減少することから、ここも過去に熱水変質を受けたと考えられる。



(a) カルサイト脈中の鉱物

(b) 累帯構造をもつ斜長石のセリサイト化

図 4.1.4-20 深度 500m コア試料の岩石薄片観察結果

#### 4.1.5 ラドンフラックスの測定

ラドン濃度による割れ目の開口幅の評価を行うためには、原位置におけるラドン濃度の測定と共に、原位置の岩石を用いたラドンフラックスの測定を必要とする。このため、循環試験を行う深度 500m アクセス坑道のボーリング孔のコアを用い、室内における浸漬試験によりラドンフラックスの測定をした。測定はボーリングコア 20 本を気密容器にセットして間隙率や変質の影響を考慮した。図 4.1.5-1 の写真は気密容器に花崗岩をセットした例である。これらのコアを一定期間水で浸漬した後に 250cc を採水し、そのラドンが溶解した水を計測試料とした。ラドン濃度は、採水した水を空気でパーージ後、気中のラドン濃度を静電捕集型計測装置である Rad7 によって計測した。その結果、ラドンのフラックスは  $5.48 \times 10^{-3} \text{ Bq/cm}^2 \sim 7.70 \times 10^{-3} \text{ Bq/cm}^2$  の値が得られた。



図 4.1.5-1 岩石からのラドンフラックスの測定例

#### 4.1.6 原位置ラドン濃度計測による割れ目特性の検討

本事業において原位置のラドン濃度測定による割れ目の開口幅の評価は、スイスグリムゼルサイト（以降、GTS と呼称）で実施した。GTS の花崗岩は、割れ目密度も小さく、充填鉱物も少ない岩盤であった。我が国の花崗岩を含む結晶質岩は、GTS に比較して割れ目も多く、割れ目の充填鉱物や変質もまれではない。このため、GTS で適用したこの技術を我が国の花崗岩としては割れ目や変質状況が一般的な瑞浪超深層研究所の深度 300m ボーリング横坑に適用した。昨年度は深度 300m ボーリング横坑に削孔されたボーリング孔 2 孔間を連結する割れ目において地下水を循環し、安定したラドン濃度を得るラドン循環試験を実施した。その結果、対象とした割れ目の開口幅は 0.38mm~0.48mm と推定した。今年度はさらに手法の適用性確認ために、深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑でのラドン循環試験を行い、適用性の確認を行った。

#### 4.1.6.1 ラドン循環試験

ラドン循環試験は図 4.1.6-1 に示すように、水みちにボーリングを2本削孔し、一方から揚水し、もう一方から注水して孔間で地下水を循環し、安定したラドン濃度を得ようとするものである。GTSの試験では1年間の間に2回の循環試験を行った。2回の試験では、循環後に同じラドン濃度が得られたが、それぞれの循環前後のラドン濃度を比較した場合、循環前よりも1カ月の循環後のラドン濃度が2割程度低下する傾向が認められた。循環試験においてラドン濃度が低下する原因としては、被圧した地下水を循環するために、循環時や採水の際にラドンが溶出した可能性や、循環系にラドンが発生しない区間（配管、ポンプなど）があるため、ラドン濃度が低下した可能性などが考えられた。昨年度の深度300mボーリング横坑での試験では、圧力保持が可能なボトルで採水をする、採水時のガス溶出を回避するとともに、採水の直前のみ循環を行うことで、ラドン非発生区間による影響を低減するなどの対策を講じた。

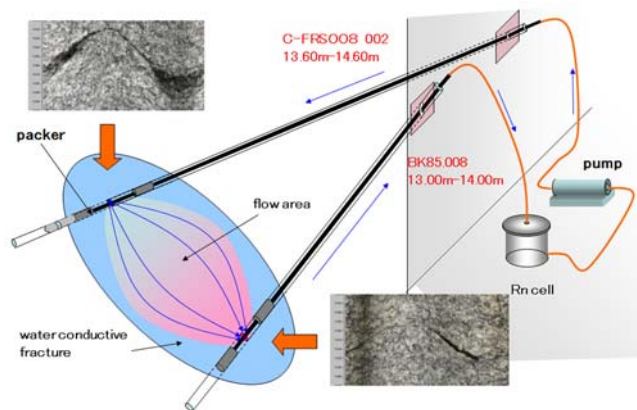


図 4.1.6-1 GTSにおけるラドン循環試験の概念図と測定結果

また、採水のための循環のための循環流量が正確に把握可能なモーノ方式のポンプを使用した。今年度の深度500m研究アクセス南坑道の試験でも、深度300mボーリング横坑と同様の方法での循環試験を実施した（図4.1.6-2）。これらの採水ボトルには予め地下水で満たし、バルブを閉じておく。採水時は、採水するボトルのみに地下水が通るようにボトル前後のバルブのみ開放し、採水ボトル内に地下水が循環するようにする。循環時は観察タンク内にガス溶出が生じていないかを確認する。ガス溶出が認められる際は、流量をコントロールし、ガスが消失してから採水を行った。循環はタンクの容量の3倍以上の量を目安として行った。循環と採水は1カ月間に4回に分けて行い、1回目から3回目までは各2L（2Lボトル×1本）の採水を、最後の4回目は3L（1Lボトル×3本）を採水した。

ラドン循環試験の対象となる割れ目は15MI52号孔int4と15MI53号孔int4とを経過して存在しており（図4.1.6-1）、割れ目の方向などの幾何的特性は両者ともに類似していることから（表4.1.6-1）、

両割れ目は連続する1本の割れ目と推定される。15MI52号孔 int4 と 15MI53号孔 int4 とは、水理的圧力応答から連通する水みち割れ目と考えられるが、高精度BTVで計測された割れ目開口幅は15MI52号孔 int4 は0.19mm、15MI53号孔 int4 は0.4mm と大分に異なる。透水量係数も高精度BTVの開口幅と同様に両孔区間では異なり、15MI52号孔 int4 よりも15MI53号孔 int4 のほうが1~2オーダーが大きい。また、孔間の評価では、両割れ目を水理的に1本の割れ目とした場合、トレーサー試験からその開口幅が0.13mmと推定されている。また、高粘性試験では0.06mm~0.64mmと推定されている(表 4.1.6-2)。

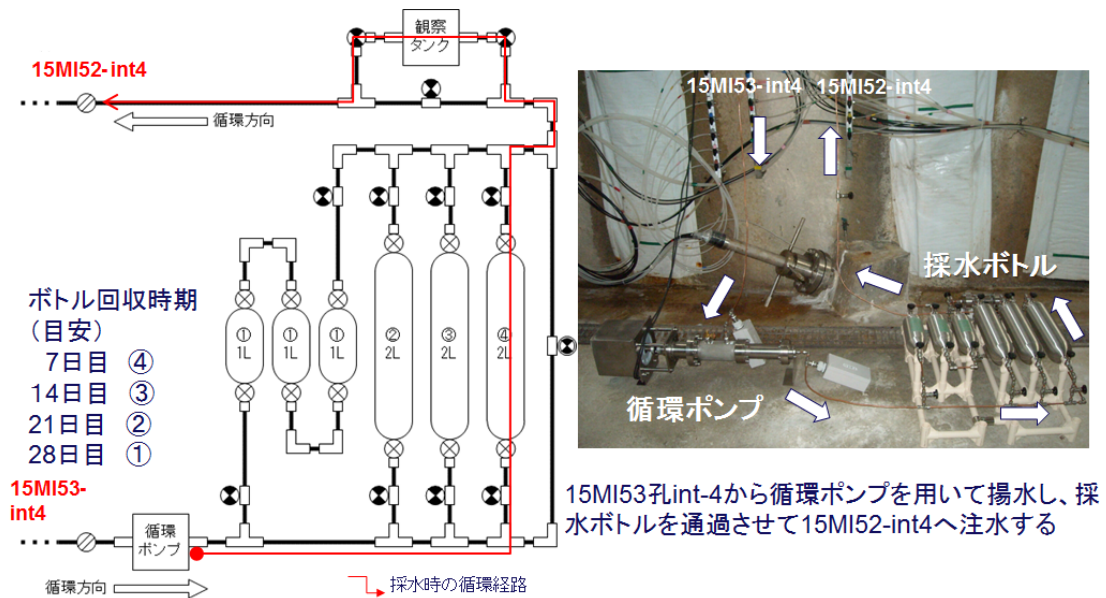


図 4.1.6-2 ラドン循環試験用採水ボトルの配置図と現場での設置状況

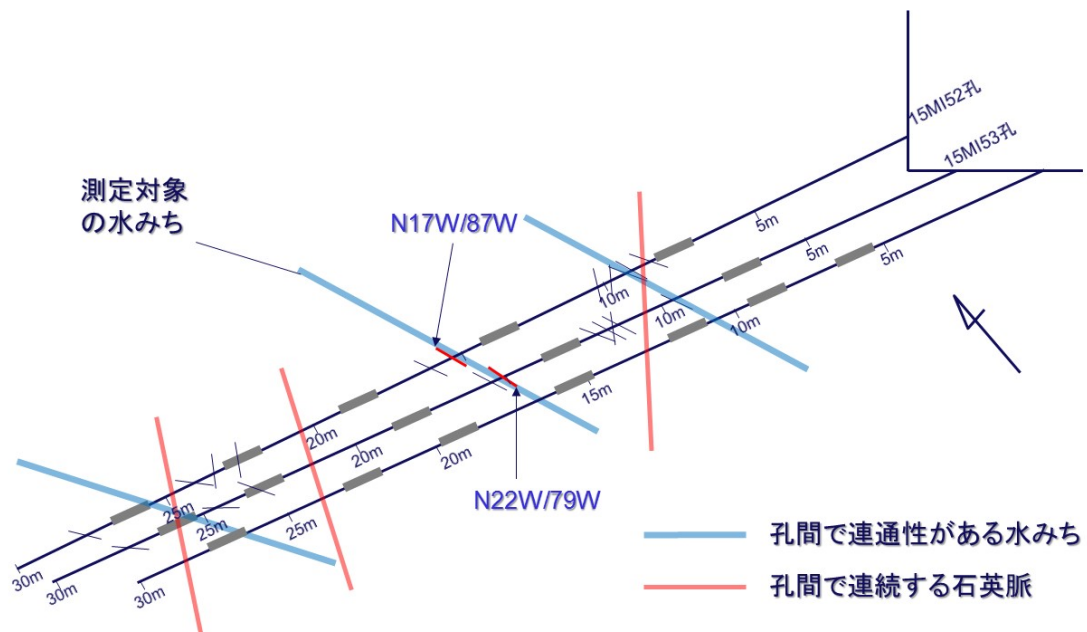


図 4.1.6-3 ラドン循環試験対象割れ目と試験孔



表 4.1.6-1 対象割れ目の幾何的特性

孔・区間	分布深度	方向	開口幅 (BTV)	孔・距離
15MI52 号孔 int4	15.31~15.39mabh	N17W87W	0.19mm	1.44m
15MI53 号孔 int4	15.02~15.13mabh	N22W79W	0.40mm	

表 4.1.6-2 対象割れ目の水理特性

孔・区間	透水量係数	開口幅 (3乗測)	孔間トレーサーによる開口幅	高粘性流体試験による開口幅
15MI52 号孔 int4	$6.9 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}$	0.020mm	0.13mm	0.06mm~0.64mm
15MI53 号孔 int4	$1.7 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec}$	0.059mm		

循環試験に 15MI52 号孔 int4 孔および 15MI53 号孔 int4 の予備排水を行い、またデッドボリュームを考慮して、適量な循環量を確認した(表 4.1.6-3)。15MI52 号孔 int4 のデッドボリュームは 9.402L であり、15MI53 号孔 int4 のデッドボリュームは 9.396L である。図 4.1.6-4 に各孔・区間の排水とラドン濃度の関係を示す。チューブ内のデッドボリューム(400cc 程度)の排水後、急激にラドン濃度が上がり、4L~17L の排水の間、すなわちデッドボリュームの 2.8 倍までは 300~400Bq/L で安定だが、それ以降は 17L~35L (デッドボリュームの 2.8~3.8 倍)では 430~460Bq/L 程度に上昇し、安定する傾向にある。このため、循環試験ではデッドボリュームの 4 倍程度の 37.6L を循環量とすることとした。

表 4.1.6-3 予備排水時のラドン濃度

15MI52 号孔 int4			15MI53 号孔 int4		
排水量 (mL)	ラドン濃度 (Bq/L)	排水量/区間 デッドボリューム	排水量 (mL)	排水量 デッド	排水量/区間 デッドボリューム
560	181	0.1	560	113	0.1
4,200	310	0.5	4,200	262	0.5
8,280	354	0.9	8,280	354	0.9
17,320	322	1.8	17,320	283	1.8
26,320	461	2.8	26,320	436	2.8
35,360*	-		35,360	433	3.8

※ 区間圧力低下ならびに degas が著しいため採水せず。

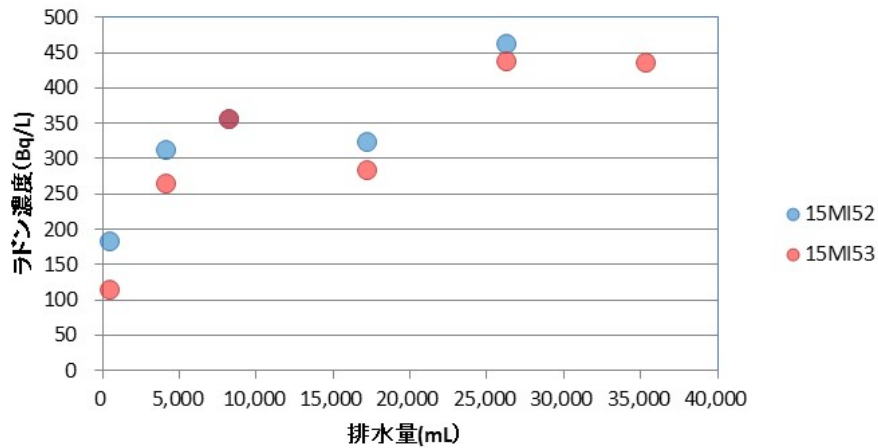


図 4.1.6-4 15MI52 号孔 int4 および 15MI53 号孔 int4 の予備排水時のラドン濃度

表 4.1.6-4 に循環試験後のラドン濃度を示す。以下に開口幅を算出する。この循環試験から得られたラドン濃度は 325～361Bq/L である。また、前述のラドンフラックス測定では  $5.48 \times 10^{-3} \text{ Bq/cm}^2 \sim 7.70 \times 10^{-3} \text{ Bq/cm}^2$  の値が得られている。この結果割れ目開口幅は 0.34～0.47mm となる。この開口幅は平行平板モデルで開口率が 100%と仮定しているが、高精度ボアホール TV の観察では一部が閉塞しており、開口率は 61%と評価している。このため、ラドンから算出した開口幅に開口率を乗じて、平均割れ目開口率 0.21～0.29mm と評価した。

- ・ラドン濃度  $[Rn] = 325 \sim 361 \text{ Bq/L}$
- ・ラドンフラックス  $F = 5.48 \sim 7.70 \times 10^{-3} \text{ Bq/cm}^2$
- ・割れ目開口幅  $w = 2F/[Rn] = 0.34 \sim 0.47 \text{ mm}$
- ・開口率  $R\alpha = 0.6$
- ・平均割れ目開口幅  $W = 0.21 \sim 0.29 \text{ mm}$

表 4.1.6-4 循環試験後のラドン濃度

	採水日	ラドン濃度 (Bq/L)
装置設置	2017/07/11	-
採水①	2017/07/18	361
採水②	2017/07/27	342
採水③	2017/08/02	325
採水④	2017/08/07	352

#### 4.1.7 瑞浪超深地層研究所全体のラドン濃度測定

瑞浪超深地層研究所の主に定点におけるラドン濃度測定を 2015 年度、2016 年度に引き続き実施した。表 4.1.7-1 および図 4.1.7-1 に測定結果を示す。一部の孔・区間では、年度によって著しく濃度の低いものが認められるが、これは脱ガスなどの影響と考えられる。その他の測定点では 3 ヶ年の計測でラドン濃度に大差がない箇所が多く、概ね 100Bq/L～450Bq/L である。測定区間に一条の平行平板の開口割れ目であると仮定し、岩石からのラドンフラックスが深度 300m ボーリング横孔および深度 500m 南アクセス坑道のボーリングコアによるフラックスは  $2.3\sim 7.7\times 10^{-3}\text{Bq}/\text{cm}^2$  とほぼ同じとした場合、瑞浪超深地層研究所の採水箇所分布する割れ目は、1.5mm～0.1mm の開口幅を有していると評価が可能である。

表 4.1.7-1 循環試験後のラドン濃度測定結果

孔・区間名	2015 年度	Bq/L	2016 年度	Bq/L	2017 年度	Bq/L	深度
07MI07 号孔 int1	2015/11/16	263	2016/9/6	218	2017/8/24	24	200m
07MI07 号孔 int3	2015/11/16	253	2016/9/6	321	2017/8/24	319	
07MI07 号孔 int5	2015/11/16	362	2016/9/6	353	2017/8/24	341	
09MI20 号孔 int1	2015/12/11	308	2016/9/7	305	2017/9/6	322	300m
09MI20 号孔 int3	2015/12/10	242	2016/9/7	211	2017/9/6	270	
09MI20 号孔 int5	2015/12/10	247	2016/9/7	259	2017/9/6	266	
09MI21 号孔 int2	2015/12/10	22	2016/9/27	470	2017/9/7	11	
09MI21 号孔 int3	2015/12/10	378	2016/9/27	322	2017/9/7	269	
12MI31 号孔 int1	計測せず	-	2016/9/27	326	2017/7/11	293	
13MI37 号孔 int1	計測せず	-	2016/9/27	337	計測せず	号孔	
13MI37 号孔 int5	計測せず	-	計測せず	-	2017/7/11	364	400m
10MI26 号孔 int1	2015/11/16	272	2016/9/26	169	2017/9/5	222	
10MI26 号孔 int3	2015/11/16	328	2016/9/26	318	2017/9/5	282	
10MI26 号孔 int5	2015/11/16	267	2016/9/26	269	2017/9/5	238	500m
12MI33 号孔 int1	2015/12/10	22	2016/9/8	116	2017/8/23	109	
13MI38 号孔 int1	2015/12/10	378	2016/9/8	98	2017/8/23	101	
13MI38 号孔 int5	計測せず	-	2016/9/8	129	2017/8/23	135	
15MI52 号孔 int1	2016/1/13	482	2016/9/2	446	2017/7/11	442	
15MI52 号孔 int5	2016/1/13	288	2016/9/2	268	2017/7/11	264	

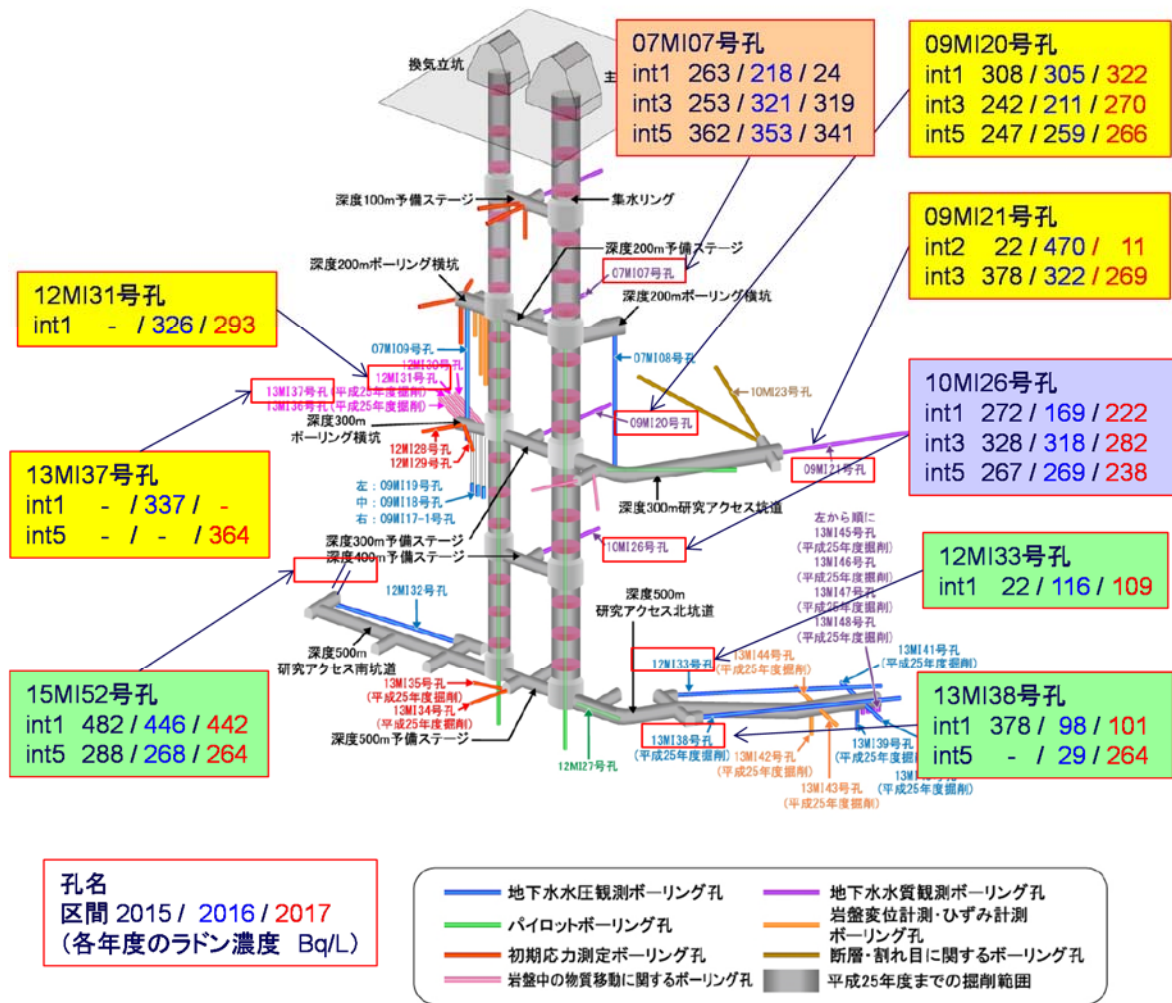


図 4.1.7-1 瑞浪超深地層研究所全体原位置ラドン濃度測定箇所と測定値

#### 4.1.8 まとめ

割れ目の開口幅の推定方法として、水理試験による方法や、ボアホール TV による計測とは異なる方法として、ラドン濃度による方法を開発した。グリムゼルテストサイトでは、この手法の適用を確認したが、我が国の地質環境および地下水環境で手法の適用性を確かめるために瑞浪超深層研究所へ適用した。昨年度は深度 300m ボーリング横坑を対象に原位置でラドン循環試験を実施した。

今年度は、深度 500m 研究アクセス南坑道の 15MI52 号孔 int4 と 15MI53 号孔 int4 とに存在する水みち割れ目を対象にラドンのフラックスの測定と、原位置でのラドン循環試験によって、開口幅の推定を行った。ラドンフラックスについては深度 500m 南アクセス坑道で掘削したボーリングコアを用いて室内で測定し測定した。その結果、 $5.48 \sim 7.70 \times 10^{-3} \text{Bq/cm}^2$  のフラックスを得た。次に深度 500m 15MI52 号孔 int4 と 15MI53 号孔 int4 とを経過する水みち割れ目を用い、ラドン循環試験を実施した。試験前に予備排水を行い、循環流量をデットボリウムの 4 倍の 37.6L とした。その後、約 1 カ月の間に 4 回

循環試験を行い、その都度、採水を行った。この結果、得られたラドン濃度は 325～361Bq/L であった。循環試験による水みち割れ目のラドン濃度と、室内で計測したラドンフラックスを用いて割れ目の開口幅を推定したところ、平行平板モデルでは、0.34～0.47mm の開口幅を得た。さらに高精度ポアホール TV から得た開口率 0.61 を乗じて、15MI52 号孔 int4 と 15MI53 号孔 int4 とに存在する水みち割れ目の開口幅は 0.21～0.29mm と評価した。この開口幅は、トレーサー試験から得た開口幅である 0.13mm、高粘性流体試験の 0.06～0.64mm、高精度ポアホール TV の 0.19mm および 0.40mm と近いものである。したがって、ラドン循環試験による開口幅は、他の手法の結果と比較して、相補的に妥当な値を得たと考える。

また、瑞浪超深地層研究所全体のラドン濃度測定を 2015 年度、2016 年度に引き続き今年度も実施した。3 ヶ年の結果を見通してみると、脱ガスの影響と思われる著しく濃度の低いデータを除いて評価した場合、概ね 100Bq/L～450Bq/L となっている。深度 300m ボーリング横孔および深度 500m 研究アクセス南坑道のボーリングコアによるフラックスは  $2.3\sim 7.7\times 10^{-3}\text{Bq}/\text{cm}^2$  であり、これより割れ目の開口幅を想定した際は、1.5mm～0.1mm の割れ目が分布していると評価が可能である。以上の実施によってラドンを用いた割れ目幅の推定手法の妥当性を確認すると共に、わが国においても手法の適用が可能であることを示した。

## 参考文献

- Snow D. 1965, "A parallel plate model of fractured permeable media, University of California", Berkeley, Ph. D
- Cecil L.D., Smith, R.C. II, Reilly, M.A., and Rose, A.W., 1987, Radium-228 and radium-226 in ground water of the Chickies Formation, southeastern Pennsylvania IN Graves, Barbara, ed., Radon, radium, and other radioactivity in ground water: Chelsea, Michigan, Lewis Publishers, p. 437-447.
- 湯口貴史、鶴田忠彦、西山忠男 (2010) 中部日本土岐花崗岩体の岩相と化学組成の累帯変化 岩石鉱物科学 39(2), 50-70
- 地球化学標準物質 <https://gbank.gsj.jp/geostandards/>
- Taylor, S.R. and McLennan, S.M. (1985). The Continental Crust; Its composition and evolution; an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks. Blackwell, Oxford. 312.
- 石橋正祐紀、安藤友美、笹尾英嗣、湯口貴史、西本昌司、吉田 英一 (2014) 深部結晶質岩における割れ目の形成・充填過程と透水性割れ目の地質学的特徴 - 土岐花崗岩を例として - 応用地質 55(4), 156-165
- 文部科学省、1990、ラジウム分析法 放射能測定シリーズ 19
- 文部科学省、1992、ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリ 放射能測定法シリーズ 7 3訂
- 日本工業規格 2006 JIS A 1110 粗骨材の密度及び吸水率試験法
- 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>
- 黒田吉益、諏訪兼位 (1983) 偏光顕微鏡と岩石鉱物 (第2版) 共立出版
- 都城秋穂、久城育夫 (1972) 岩石学 I 偏光顕微鏡と造岩鉱物 共立出版
- 古川路明 (1994) : "現代化学講座 15 放射化学" .
- 核燃料サイクル開発機構(1999a): "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次取りまとめ - ; 分冊3 地層処分システムの安全評価", JNC-TN1400 99-023.
- 核燃料サイクル開発機構(1999b): "釜石原位置試験総括報告書", JNC TN7410 99-001.
- Alexander, W. R., Mackenzie, A. B., Scott, R. D. and McKinley, I. G. (1990) : "Natural analogue studies in crystalline rock: The influence of water-bearing fractures on radionuclide immobilization in a granitic repository, Nagra Technical Report, NTB 87-08.

文部科学省（2002）：放射能測定法シリーズ14「ウラン分析法」（平成14年改訂）。

## 4.2 高粘性流体注入試験技術の開発

### 4.2.1 背景及び目的

割れ目の幅や流れの次元は、割れ目内のトレーサーの移行を評価するうえで非常に重要な情報である。これら进行评估するために、高粘性流体の注入による評価方法を開発している(長谷川ほか、2007, 2015)。これは、地盤内に高粘性流体を一定流量で注入し、注入時の圧力応答から割れ目の幅や流れの次元を評価する方法である。図 4.2.1-1 に示すように、割れ目内の流路が一次元的な場合には、高粘性流体の到達距離は時間とともに線形的に増加するため、高粘性流体の注入圧力も線形的に増加する。また、2次元の場合には、到達距離の増加は時間とともに少なくなるため、高粘性流体の注入圧力の増加も時間とともに低下し、対数関数的になる。さらに、流路や割れ目幅が小さければ、高粘性流体の到達距離が遠くなるため、圧力の増加率は大きくなる。高粘性流体注入試験は、単孔で実施でき、圧力を観測するだけなので比較的簡易に原位置で実施できる。さらに、高粘性流体が到達すると流動抵抗が水に比べて大きく圧力が増加するため、観測孔での圧力観測により高粘性流体の到達を確認することができ、割れ目の広がりを確認することができる。

昨年度は 300m 地点で高粘性流体注入試験を実施した。今年度は、これまでにトレーサー試験が行われている、深度 500m 研究アクセス南坑道奥において高粘性流体注入試験を実施する。高粘性流体注入試験は、割れ目幅や割れ目の連結性を確認するために、トレーサー試験と同一の割れ目で実施することとした。

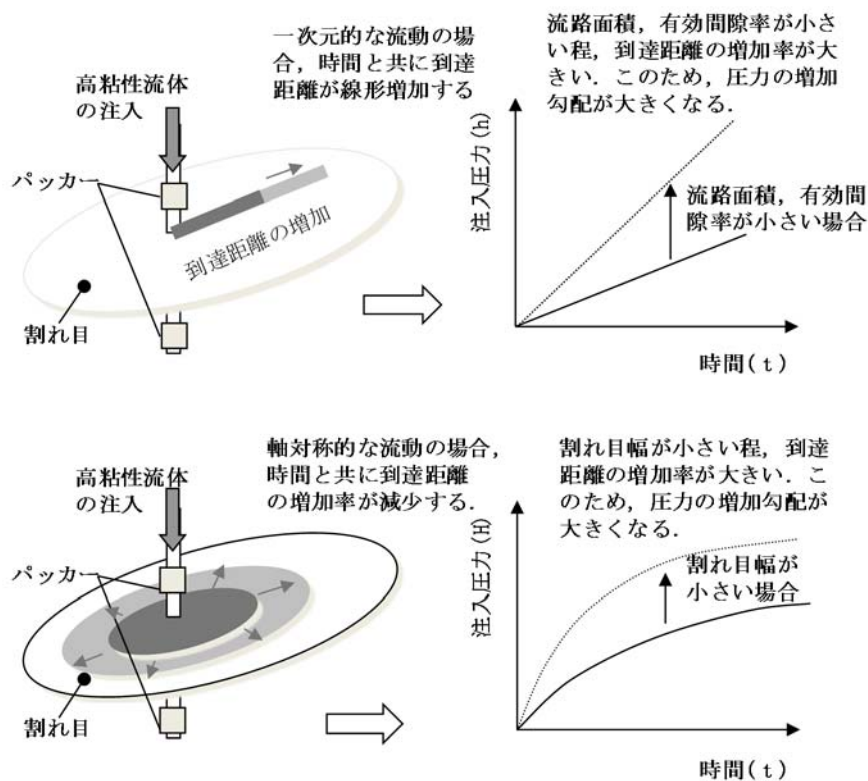


図 4.2.1-1 高粘性流体注入試験の評価方法概念図



#### 4.2.2 試験地点

高粘性流体試験を実施した深度 500 m 研究アクセス南坑道奥は、これまでに 3 本のボーリング孔が掘削されている。この地点のボーリング孔配置、湧水量と圧力応答、透水量係数、トレーサー試験の対象割れ目を図 4.2.2-1 に示す。

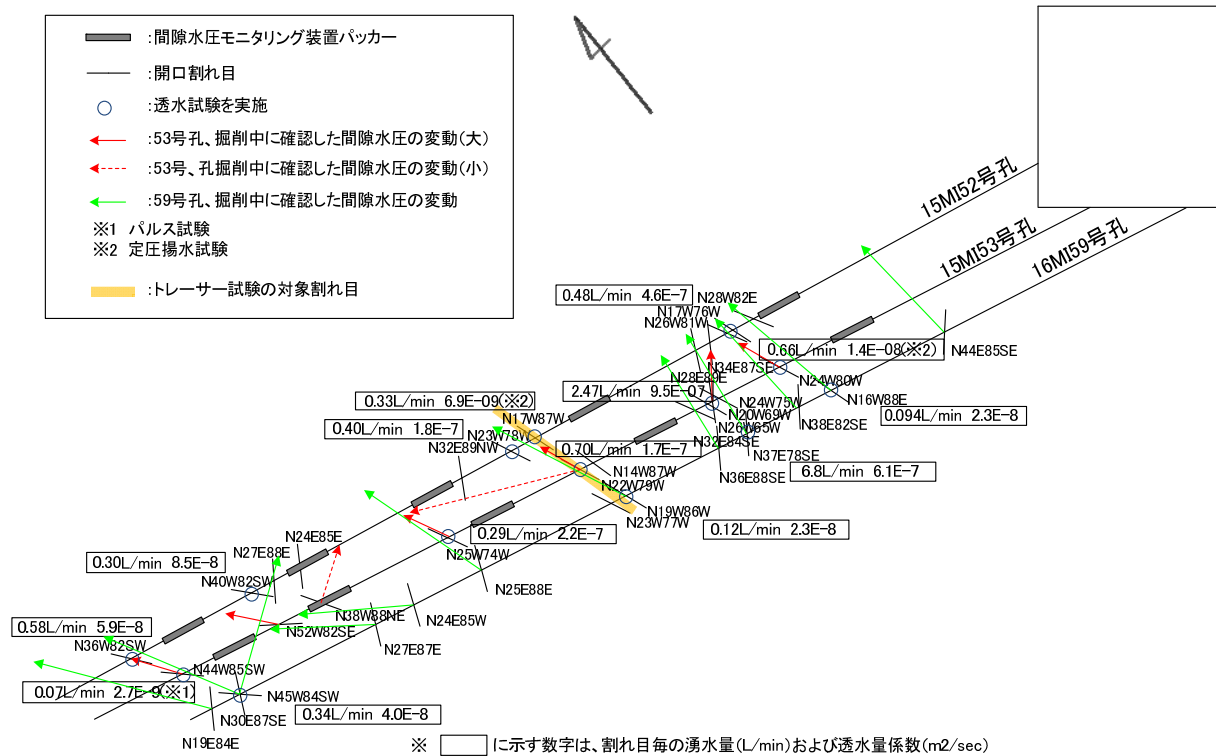


図 4.2.2-1 高粘性流体試験の実施位置と仮設状況

高粘性流体注入試験の対象割れ目は、表 4.2.2-1 に示すこれまでにトレーサー試験を実施した割れ目の内、透水量係数が比較的大きい、15MI53 号孔の深度 15.05 m から注入することとした。対象割れ目の高精度 BTV 画像を図 4.2.2-2 に示す。

表 4.2.2-1 トレーサー試験対象割れ目

孔名	深度 (m)	走向傾斜	平均開口 (mm)	透水量係数 (m <sup>2</sup> /s)
15MI52 号孔	15.34m	N17°W87°W	0.19	6.3E-9
15MI53 号孔	15.05m	N22°W79°W	0.40	1.7E-7
16MI59 号孔	16.95m	N19°W86°W	0.27	2.3E-8

表 4.2.2-1 に示すように、15MI52 号孔では 15.34 m 地点に、16MI59 号孔では 16.95m 地点で確認されている。これらを通る面での、ボーリング孔間の距離を図 4.2.2-3 に示す。15MI53 号孔から 15MI52 号孔は 1.44 m、16MI59 号孔は 1.79 m である。

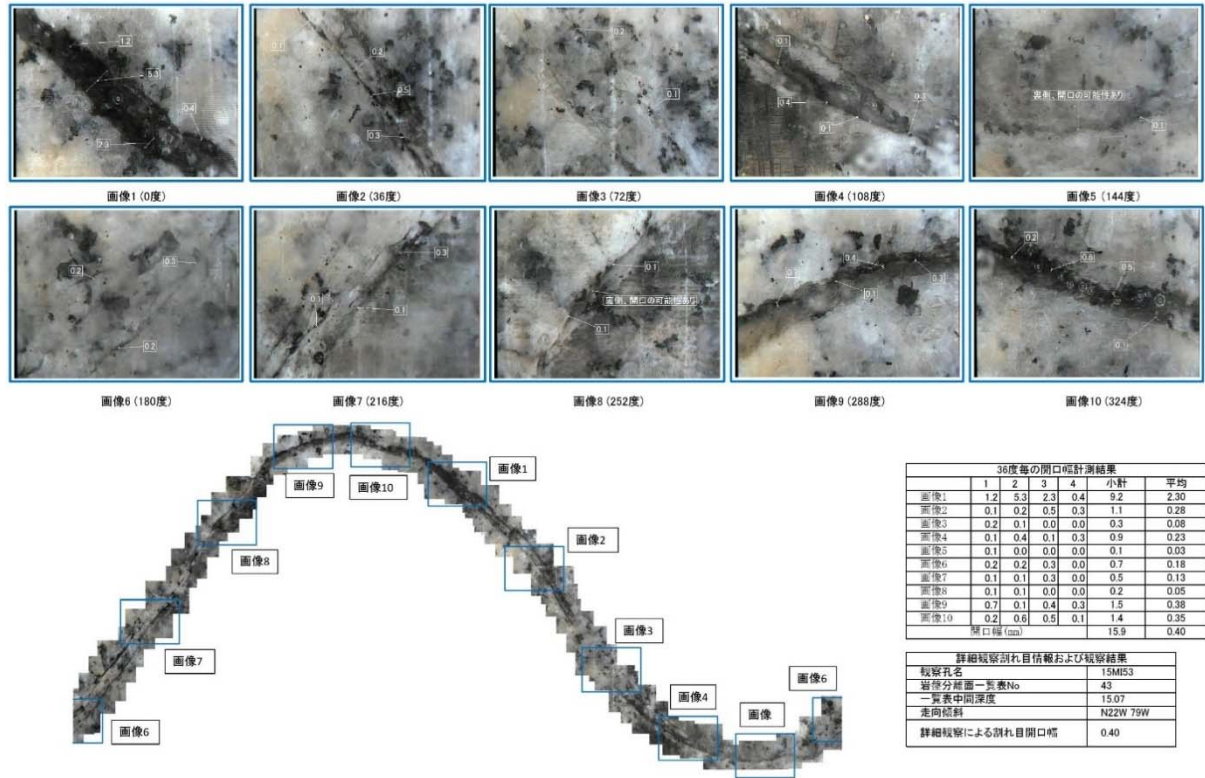


図 4.2.2-2 高粘性流体対象区間割れ目 (15MI53 号孔 : 15.05 m, N22W79W)

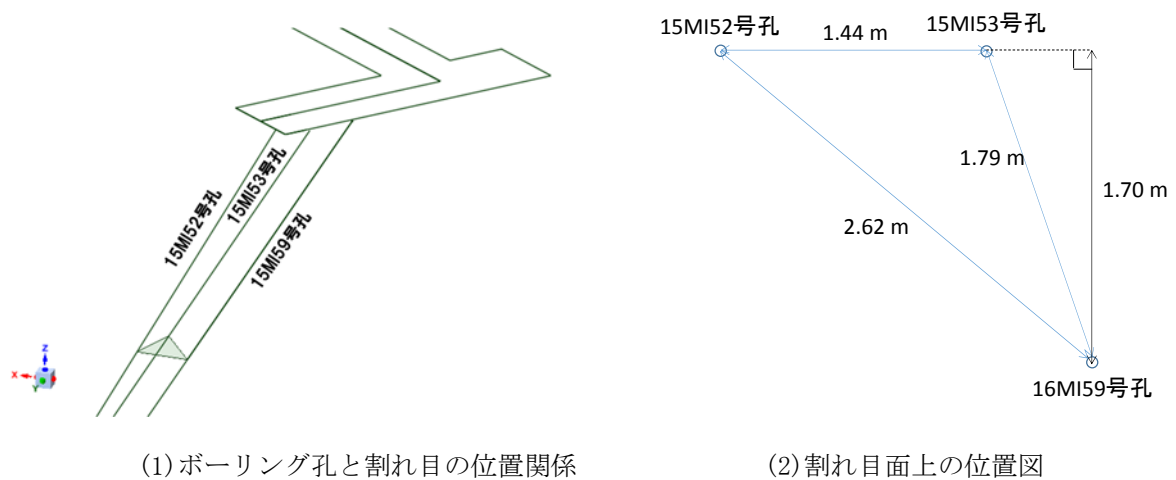


図 4.2.2-3 高粘性流体注入割れ目と他のボーリング孔との関係

#### 4.2.3 試験方法

##### (1) 高粘性流体試験手順条件

高粘性流体試験では、高粘性の流体を注入区間に注入し、注入区間の圧力応答と観測区間での圧力応答から、割れ目の幅や広がり进行评估する。このため、高粘性流体の注入によって発生する圧力応答やその広がりを可能な限り有意にするために、できるだけ多い流量で注入する必要がある。ただし、注入流量が多過ぎると、注入圧が上がり過ぎて注入が困難になる場合がある。また、注入流量が少なすぎると、高粘性流体が十分広がらなかつたり、観測孔での圧力応答が優位にならなかつたりする。このため、高粘性流体の注入は、図 4.2.3-1 に示すように、試験区間の設定した後、注入流量や粘性などの試験条件を十分に検討する必要がある。これらの条件を決定した後、高粘性流体試験と同程度の注入量で透水試験を実施しておく必要がある。これは、周辺孔での圧力応答を観測する場合、高粘性流体試験時と透水試験時との圧力応答の変化から、高粘性流体の到達を確認することができるためである。高粘性流体は粘性が高いため、流動抵抗が大きく、高粘性流体の到達範囲では圧力が増加するため、この到達を見分けるために、この水理試験時の圧力応答の差が重要になる。

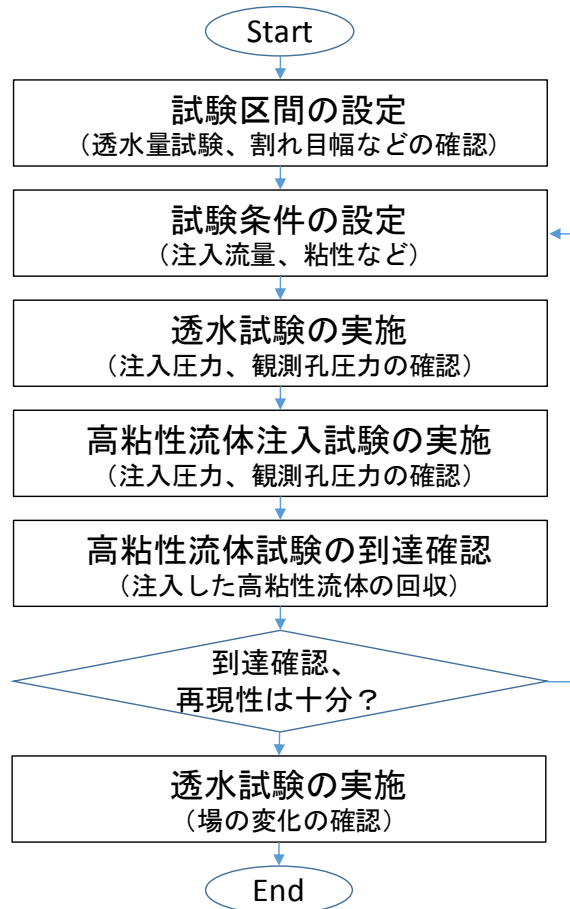


図 4.2.3-1 高粘性流体注入試験の手順

高粘性流体注入試験の実施時には、定流量性を保つことと、高粘性流体の粘性の把握が重要である。定流量での注入は、透水試験との差を確認するためと、流動次元を把握するために重要である。粘性は注入圧力や観測孔での圧力に影響を与えるため、精度良く計測しておく必要がある。特に、高粘性流体の粘性は温度依存性が高いため、試験時の温度と計測時の温度が同程度になるように注意する必要がある。

高粘性流体の注入後には、高粘性流体が到達しているかどうかを確認するために、観測区間などからサンプリングをしておくことが好ましい。このため、高粘性流体には蛍光染料などのトレーサーを添加しておく必要がある。特に、圧力応答が明確でない場合には、サンプリング結果が高粘性流体の到達の決め手になると考えられる。サンプリング実施後には、観測区間や注入区間から高粘性流体を回収する。これは、高粘性流体の残留による他の試験への影響を回避するためである。高粘性流体の回収率を確認するにも前述のトレーサーの添加は有効である。

高粘性流体注入試験後には、注入孔、観測孔において十分な圧力応答が得られたか、高粘性流体が十分に広げることができたかを確認し、再試験を行うかどうかを決定する必要がある。試験は、高粘性流体注入試験の再現性を確認する意味で粘性や流量を変えて複数回実施することが好ましい。また、最後に透水試験を実施しておくことも、透水係数場に変化がないことを確認するうえで重要である。

## (2) 高粘性流体注入試験装置

高粘性流体注入試験装置の概要を図 4.2.3-2 に示す。試験装置は、定流量ポンプ、高粘性流体タンク冷却システム、注入側ユニット、孔内装置からなる。定流量ポンプには定流量性の高いモノポンプを用いている。以前は定流量ポンプで直接区間へと高粘性流体を移送していたが、現在では密閉した高粘性流体タンクを介して高粘性流体を区間へ送っている。高粘性流体タンクは、高圧に耐える容器になっており、モノポンプから水が注入されるとピストンが押され、その分だけ高粘性流体が区間に送られる形態になっている。このため、高粘性流体タンクには高圧がかかるものの、以前のように高粘性流体の粘性が高いため、供給不良になったり、高粘性流体の粘性を変えるたびにポンプ自体を洗浄したりする必要がなくなり、高粘性流体の粘性変更が容易になった。冷却システムは、高粘性流体が温度によって粘性が変化するため、温度を一定に保つためにこのようなシステムを設けてある。注入側ユニットは、高粘性流体の注入流量と圧力を地表において確認するためのシステムである。孔内部分は、高粘性流体が区間内で希釈しないようにパッカーの拡張により区間体積を減らせる図 4.2.3-3 に示すシステムを用いている。注入区間には原位置で圧力計測ができるように圧力計と高粘性流体がチューブ内で地下水と混合しないようにトレーサー試験と同様に循環用の配管を設置してある。

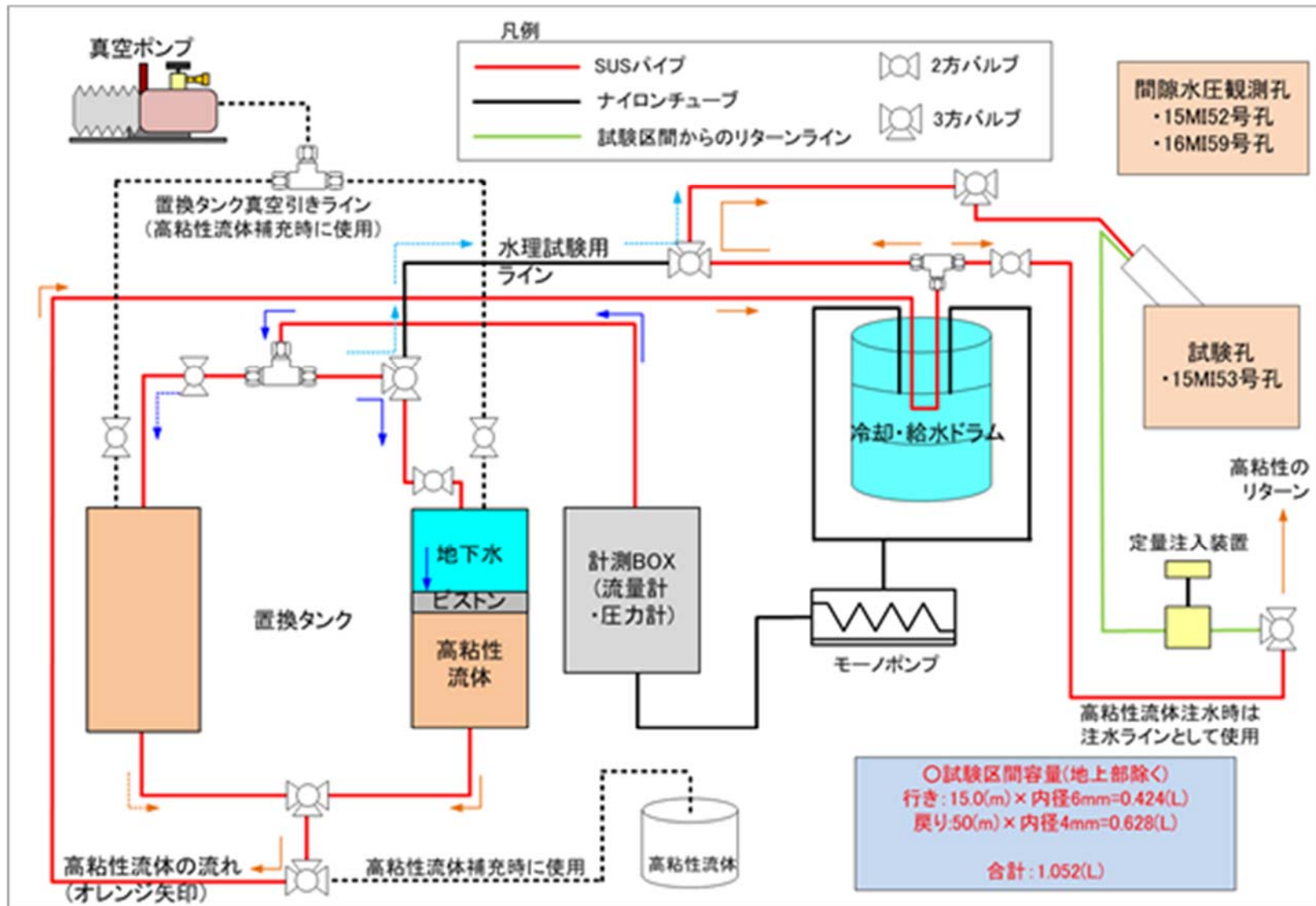


図 4.2.3-2 高粘性流体注入試験装置の概念図

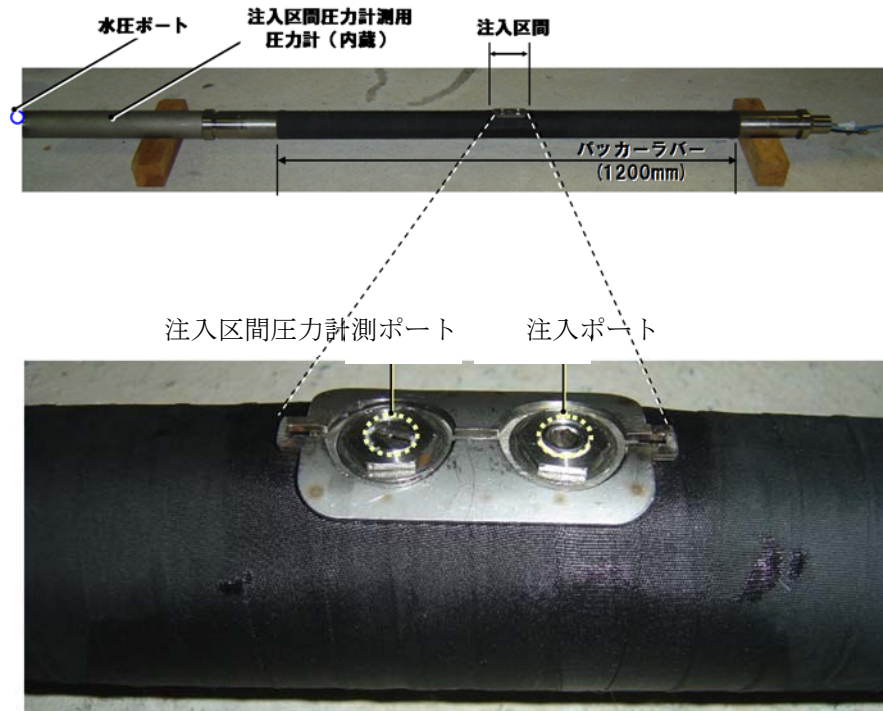


図 4.2.3-3 注入区間用パッカー

### (3) 高粘性流体の作成

高粘性流体は、原位置の地下水にメトローズを混合したものをを用いる。メトローズは、原材料はパルプの水溶性セルロースエーテルの粉末であり、これを水に溶かすと粘性のある液体となる(信越化学株式会社、2018)。メトローズは図 4.2.3-4 に示すように濃度によってその粘性が変化する。また、図 4.2.3-5 に示すように、温度によっても粘性が変化する。ここではメトローズの内、SH60-50 という製品を用いているが、この製品が最も目詰まりしにくい特性を有しているため、この製品を用いている。試験条件を考慮して必要とされる粘性から、メトローズの濃度を決定して高粘性流体を製作する。高粘性流体注入試験では定量性が重要なため、高粘性流体の圧縮性を小さくするために、脱気しながら高粘性流体を製作する。また、製作した高粘性流体の粘性は、温度によっても異なるため、試験前に計測しておく必要がある。また、高粘性流体には、区間への到達や回収量を推定するために、アミノ G 酸を添加した。

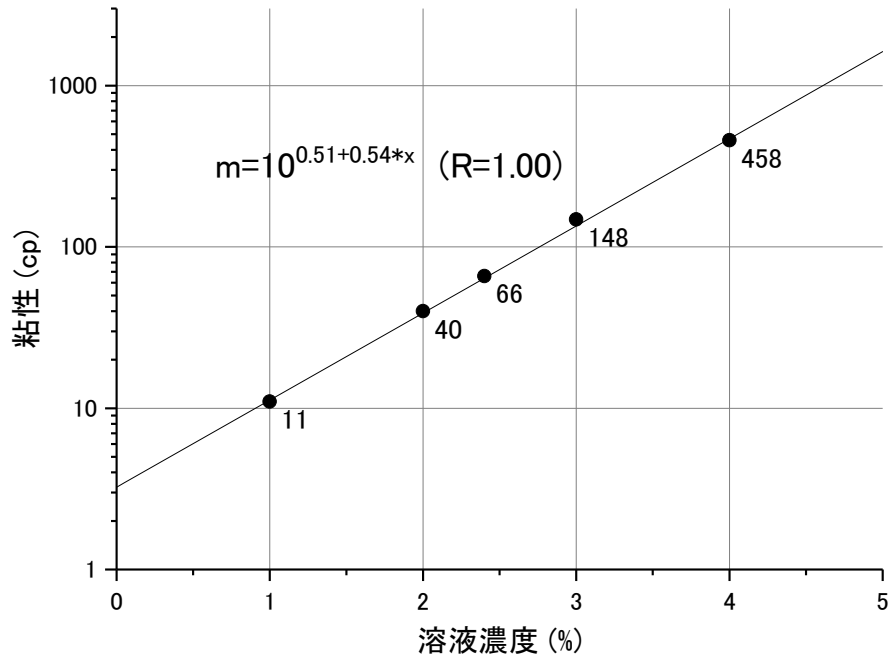


図 4.2.3-4 メチルセルロース (SH60-50)における濃度と粘性の関係

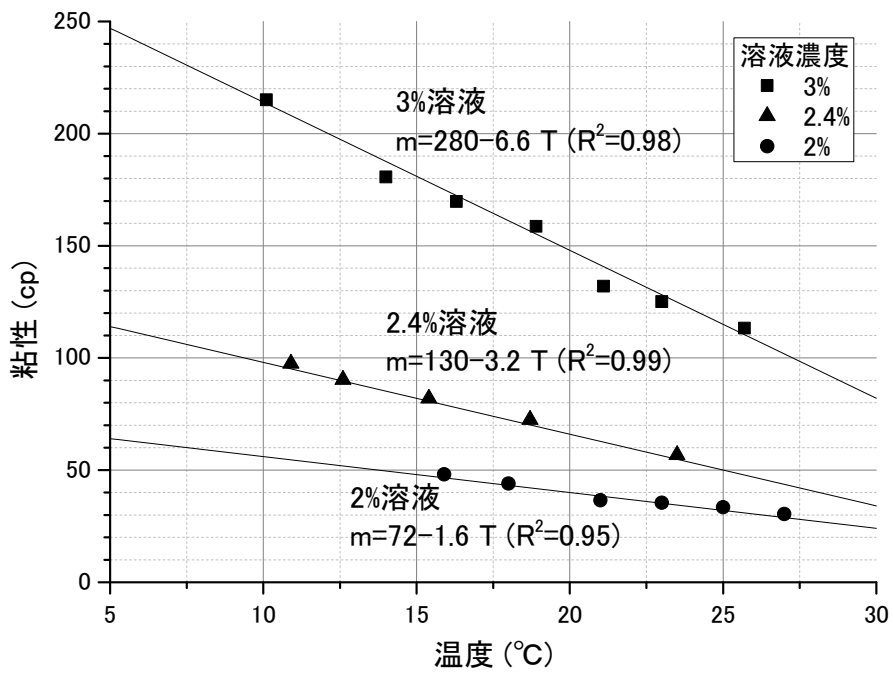


図 4.2.3-5 温度と粘性の関係(60SH-50)

#### 4.2.4 試験結果

##### (1) 試験条件の検討

高粘性流体注入試験に先立ち試験条件を検討した。高粘性流体注入試験では、水よりも粘性の高い流体を注入する。このため、水よりも流量が少なくなる。具体的には、15MI53号孔は、3.5 MPa（大気圧解放）で700 ml/minの湧水量である。高粘性流体の粘性を水の100倍（100 cp）にすると、3.5 MPaで7 ml/minとなる。このため、100倍の粘性の高粘性流体を1 MPaで注入した場合、2 ml/minとなる。ただし、2 ml/minでは高粘性流体が十分に広がらないため、高粘性流体の粘性を落として流量を増加させることとした。高粘性流体の粘性を50倍（50 cP）にすると、1 MPaで4 ml/minの注入となる。ただし、これは定常状態での値であり、高粘性流体が影響圏まで到達した場合である。高粘性流体が広がるまでは、定常状態の圧力よりも低い圧力で注入できるため、10 ml/minで注入することとした。

注入流量を10 ml/minとした場合、割れ目幅が0.1 mmの場合、1 m離れた地点に高粘性流体が到達するには、314 mlとなり30分程度、2 m離れた地点に高粘性流体が到達するには、1242 mlとなり120分程度である。ちなみに前述の2 ml/minではこれらの5倍の時間がかかることになる。ただし、割れ目幅が0.2 mmや0.5 mmの場合には、それぞれ2倍、5倍の注入量となるため、到達時間もそれぞれ2倍、5倍となる。

高粘性流体を15MI53号孔から注入した場合、観測孔15MI52号孔まで1.44 m、16MI59号孔で1.79m離れている。1.79m離れた16MI59号孔では、割れ目幅が0.1mmの場合、1000 ml(100分)、割れ目幅が0.2 mmの場合、2000 ml(200分)で到達が確認される。

これらの検討の結果、50cp程度の高粘性流体を10 ml/minで注入することとした。

##### (2) 高粘性流体注入試験結果1回目

高粘性流体注入試験に先立ち透水試験を10 ml/minで実施した。この結果を図4.2.4-1に示す。

透水試験時には、注入区間での圧力上昇は約0.017 MPa程度であり、観測孔15MI52号孔int3とint4で有意な圧力応答があり、それぞれ0.01 MPaと0.002 MPa程度である。16MI59号孔int4、int2、int3では0.01 MPa、0.004 MPa、0.003 MPa程度の圧力応答があった。

高粘性流体注入試験は、42 cPの粘性の流体を10 ml/minで注入した(表4.2.4-1)。注入は、330分間実施した。この結果を図4.2.4-2に示す。注入区間では圧力は時間とともに単調増加した。注入圧力の時間変化からみると、一次元的な注入になっていると考えられた。また、注入圧力は想定された0.71 MPaよりも低く、最終段階で0.18 MPa程度と1/5程度しか上昇しなかった。

観測区間での応答は、15MI52号孔int4と16MI59号孔int4で有意に確認されている。15MI52号孔int4での有効圧力の増加は0.01 MPa程度となっており、透水試験時とほぼ同じである。し



かし、15MI52 号孔 int4 では、2400 s 程度から圧力の低下が観測された。高粘性流体が到達すると、高粘性流体を流すために、有効圧力が大きくなるのが一般的であるが、ここでは低下が観測されている。

16MI59 号孔 int4 での有効圧力の増加は 0.01 MPa 程度となっており、透水試験時とほぼ同じである。16MI59 号孔 int4 でも 1300 s まで圧力が増加した後、徐々に圧力が低下する傾向が見られる。

高粘性流体試験終了後に、観測区間 15MI52 号孔 int4 と 16MI59 号孔 int4 から地下水を採取し、添加したトレーサー濃度の分析を実施した。この初期濃度と観測濃度を表 4.2.4-2 に示す。採水は配管のデッドボリュームを考慮して、1 リットル程度流した後に採水した。トレーサーは、観測孔 15MI52 号孔 int4 で 0.09 ppm、観測孔 16MI59 号孔 int4 で 0.04 ppm であった。これは、原液の 2%と 1%程度に相当し、高粘性流体が到達しているかどうかの判定が困難である。区間のデッドボリュームは、15MI52 号孔 int4 と 16MI59 号孔 int4 でそれぞれ 9.4L と 6.7L である。これに基づいて高粘性流体の各区間への流入量を計算すると、15MI52 号孔 int4 では 190 ml、16MI59 号孔 int4 では 60 ml である。高粘性流体が区間まで到達していないとすると、予備排水の 1L の間に、高粘性流体は 15MI52 号孔 int4 では約 20%、16MI59 号孔 int4 では約 6%が流入したことになる。1L の予備排水時に 20%の流入があるとは考えにくいので、15MI52 号孔 int4 には高粘性流体が到達していると考えられる。一方で、16MI59 号孔 int4 は 6%なので判断が難しい。

表 4.2.4-1 1 回目の高粘性流体試験条件

項目	粘性	流量	注入時間	総注入量
単位	cp	ml/min	min	ml
条件	42	10	330	3300

表 4.2.4-2 トレーサーの初期濃度と観測濃度(1 回目)

地点	初期濃度	15MI52 号孔 int4	16MI59 号孔 int4
濃度 (ppm)	4.4	0.09	0.04

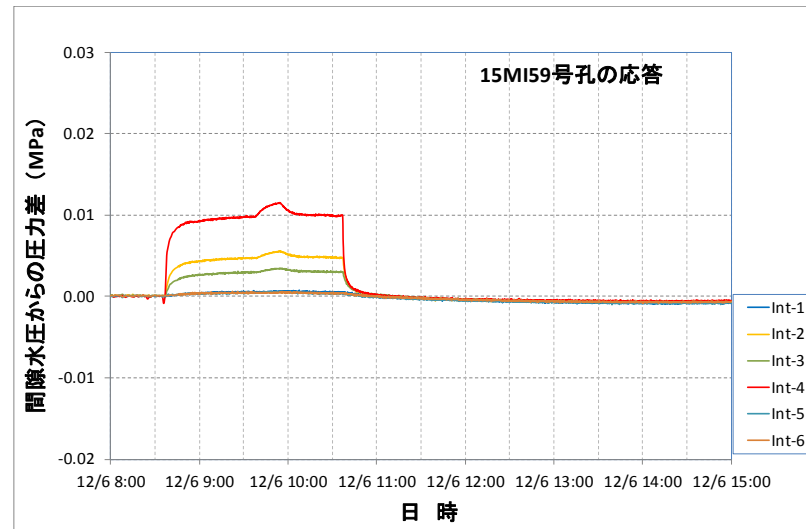
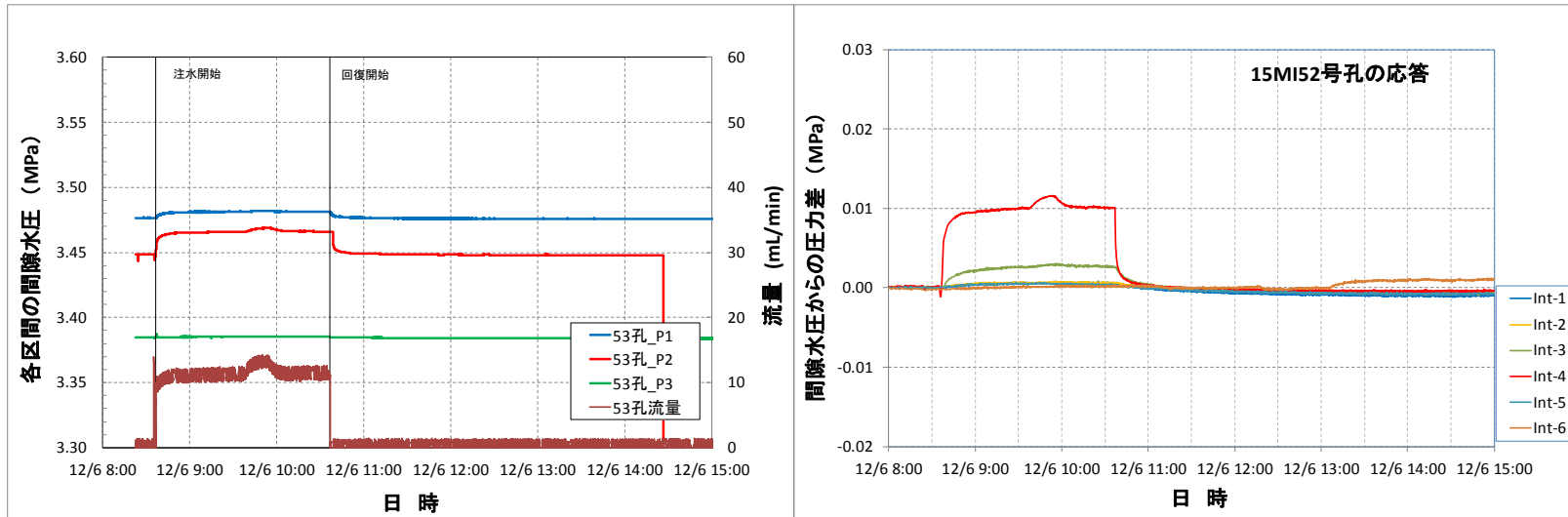


図 4.2.4-1 透水試験結果 一回目(10 ml/min)

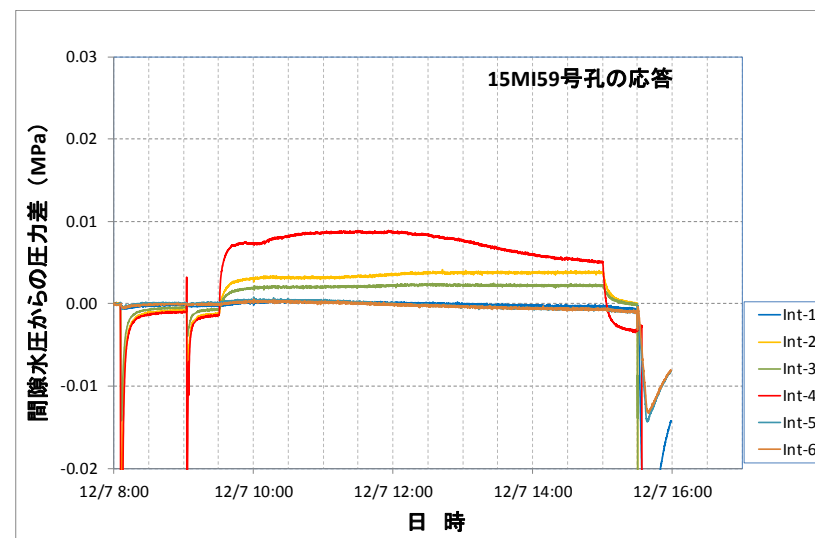
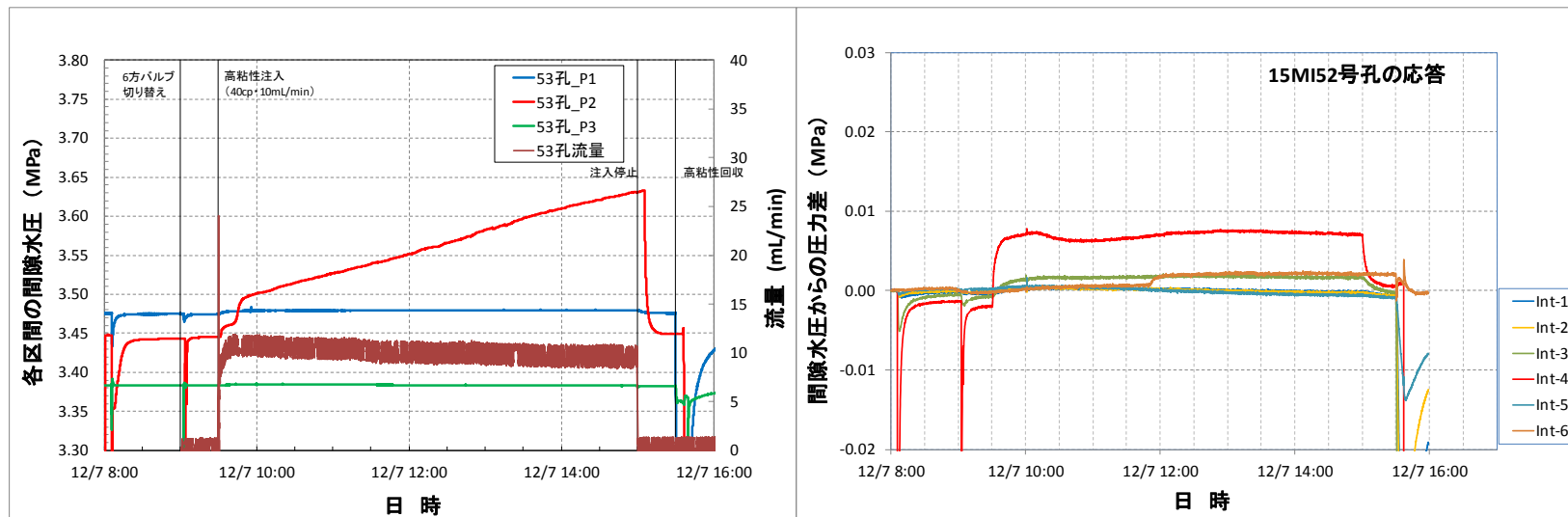


図 4.2.4-2 高粘性流体注入試験結果 一回目(42 cP、10 ml/min)

### (3) 高粘性流体注入試験結果 2 回目

1 回目の高粘性流体注入試験において、注入圧力の上昇がそれほど大きくなく、高粘性流体の到達が明確に確認できていないため、2 回目の試験では、流量を増やすこととした。42 cP、10 ml/min の注入で有効圧力が 0.2MPa 程度であったため、流量を 4 倍の 40 ml/min として、粘性はやや低くして試験を実施することとした。

高粘性流体注入試験に先立ち透水試験を高粘性流体の注入流量と同じ 40 ml/min で実施した。この結果を図 4.2.4-3 に示す。この結果、注入区間では 0.06MPa の圧力上昇が確認された。これは 10 ml/min で注入時の 0.017 MPa の約 4 倍であり、前の試験とほぼ同じ圧力応答である。観測孔での圧力応答は、15MI52 号孔 int4 と 16MI59 号孔 int4 で有意に確認されている。有効圧力の増加は、15MI52 号孔 int3 と int4 で有意な圧力応答があり、0.033 MPa と 0.01 MPa 程度であり、この圧力応答も前回の透水試験時とほぼ同じである。16MI59 号孔 int4、int2、int3 でも有意な圧力応答があり、0.029 MPa、0.019 MPa、0.012 MPa 程度であり、この圧力応答も 10 ml/min での注入時の約 4 倍である。このように、高粘性流体注入後でも、注入孔および周辺孔での圧力応答は流量に対応してほぼ 4 倍になっている。

2 回目の高粘性流体試験では、32cp の高粘性流体を 40 ml/min で注入した(表 4.2.4-3)。粘性は前回の 75%程度、流量は 4 倍となっている。この結果を図 4.2.4-4 に示す。注入孔での圧力応答は、時間とともに増加するが、徐々に傾きがなだらかになる軸対称的な増加になっている。前回の高粘性流体よりも 4 倍の高粘性流体を注入しているため、到達範囲も広がっており、高粘性流体が広がると軸対称的な流動になるものと考えられる。前回の注入とほぼ同じ注入量となる 4200 s 程度まであれば圧力増加は直線的に見える。

観測孔での圧力応答は、15MI52 号孔 int4 と 16MI59 号孔 int4 で有意に確認されている。15MI52 号孔 int4 の有効圧力は、3000 s 程度まではほぼ一定であるが、それ以降は増加する傾向がある。このため、3000 s 程度で高粘性流体が到達したものと考えられる。

16MI59 号孔 int4 での有効圧力の増加は、初期から増加し透水試験時の圧力応答よりも大きくなり、その後透水試験とほぼ同じになる。有効圧力が透水試験よりも大きくなるのは、高粘性流体が到達した可能性があるが、その後、透水試験と同じ応答になっており、到達については明確でない。ただし、透水試験より大きくなっているため、何らかの流動状態の変化などがあったと考えられる。

高粘性流体試験終了後に、観測区間 15MI52 号孔 int4 と 16MI59 号孔 int4 から地下水を採取し、添加したトレーサー濃度の分析を実施した。この初期濃度と観測濃度を表 4.2.4-4 に示す。採水は、前述の場合と同様に、配管のデッドボリュームを考慮して、1 リットル程度流した後に採水した。トレーサーは、観測孔 15MI52 号孔 int4 で 3.4 ppm、観測孔 16MI59 号孔 int4 で 0.19ppm

であった。これは、原液の 77%と 5%に相当する。区間のデッドボリュームは、15MI52 号孔 int4 と 16MI59 号孔 int4 でそれぞれ 9.4L と 6.7L であるため、これに基づいて高粘性流体の流入量を計算すると、15MI52 号孔 int4 では 7300 ml、16MI59 号孔 int4 では 300 ml である。この結果、15MI52 号孔 int4 では高粘性流体が到達していることが確認できた。観測孔 16MI59 号孔 int4 での圧力応答は明確ではないが、1L の予備排水時に 300ml 流入するとは考えにくいので、到達していると考えることができる。

表 4.2.4-3 2 回目の高粘性流体試験条件

項目	粘性	流量	注入時間	総注入量
単位	cp	ml/min	min	ml
条件	32	40	300	12,000

表 4.2.4-4 トレーサーの初期濃度と観測濃度(2 回目)

地点	初期濃度	15MI52 号孔 int4	16MI59 号孔 int4
濃度 (ppm)	4.1	3.4	0.19

#### (4) 高粘性流体試験後の透水試験結果

高粘性流体注入試験後に、高粘性流体試験前の透水試験と同条件(40 ml/min)で透水試験を実施した。この結果を図 4.2.4-5 に示す。この結果、注入区間では 0.06 MPa の圧力上昇が確認された。これは前回の透水試験とほぼ同じ圧力応答である。観測孔での圧力応答は、15MI52 号孔 int4 と 16MI59 号孔 int4 で有意に確認されている。有効圧力の増加は、15MI52 号孔 int3 と int4 で有意な圧力応答があり、0.033 MPa と 0.01 MPa 程度であり、この圧力応答も 10 ml/min での注入時の約 4 倍である。16MI59 号孔 int4、int2、int3 でも有意な圧力応答があり、0.025 MPa、0.018 MPa、0.012 MPa 程度で、この圧力応答も前回の透水試験とほぼ同程度である。このため、高粘性流体試験によって透水量係数場はほとんど変化していないと考えられた。

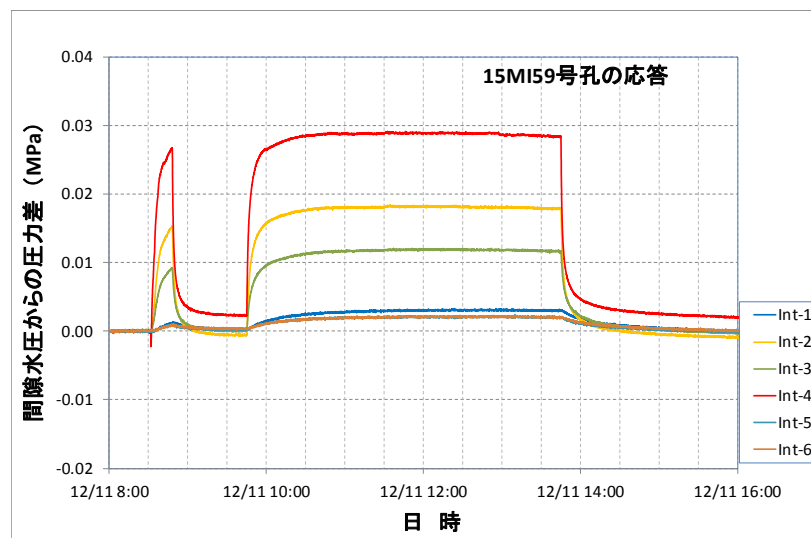
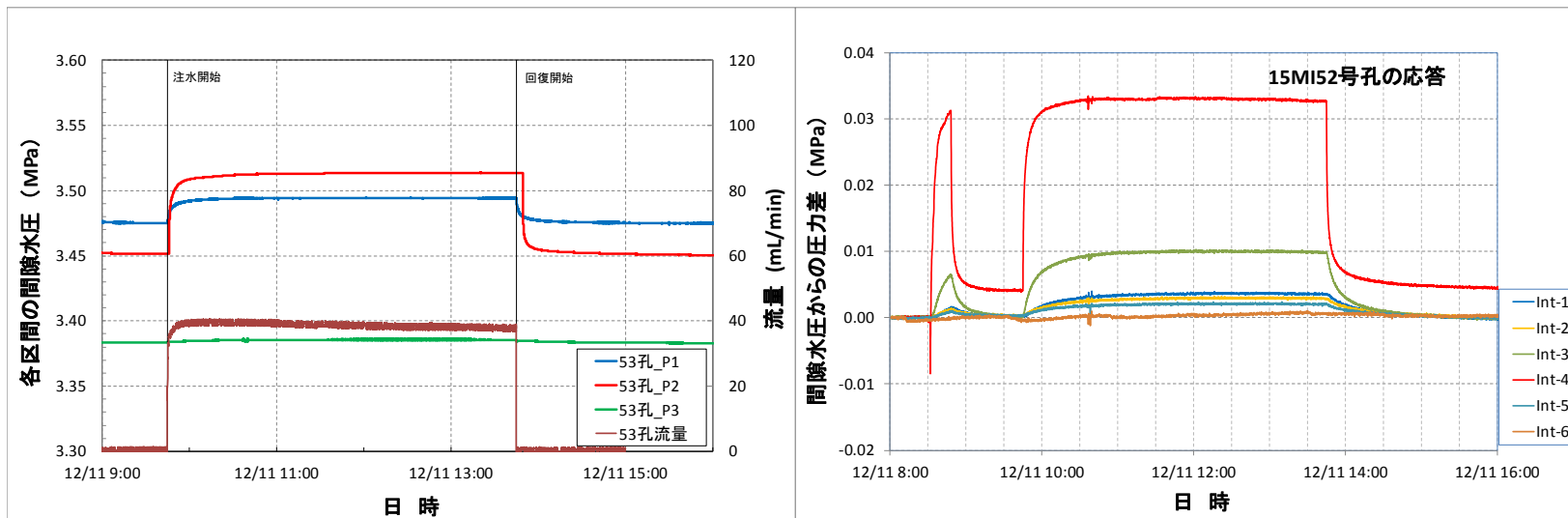


図 4.2.4-3 透水試験結果 二回目 (40 ml/min)

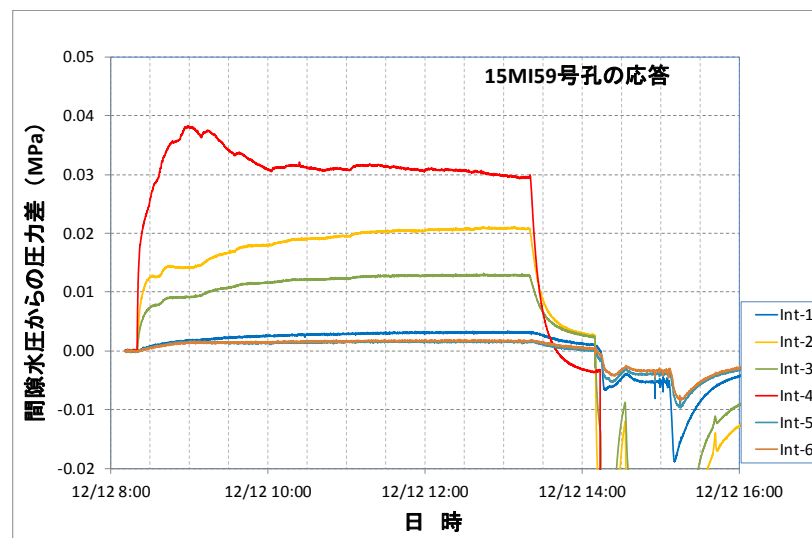
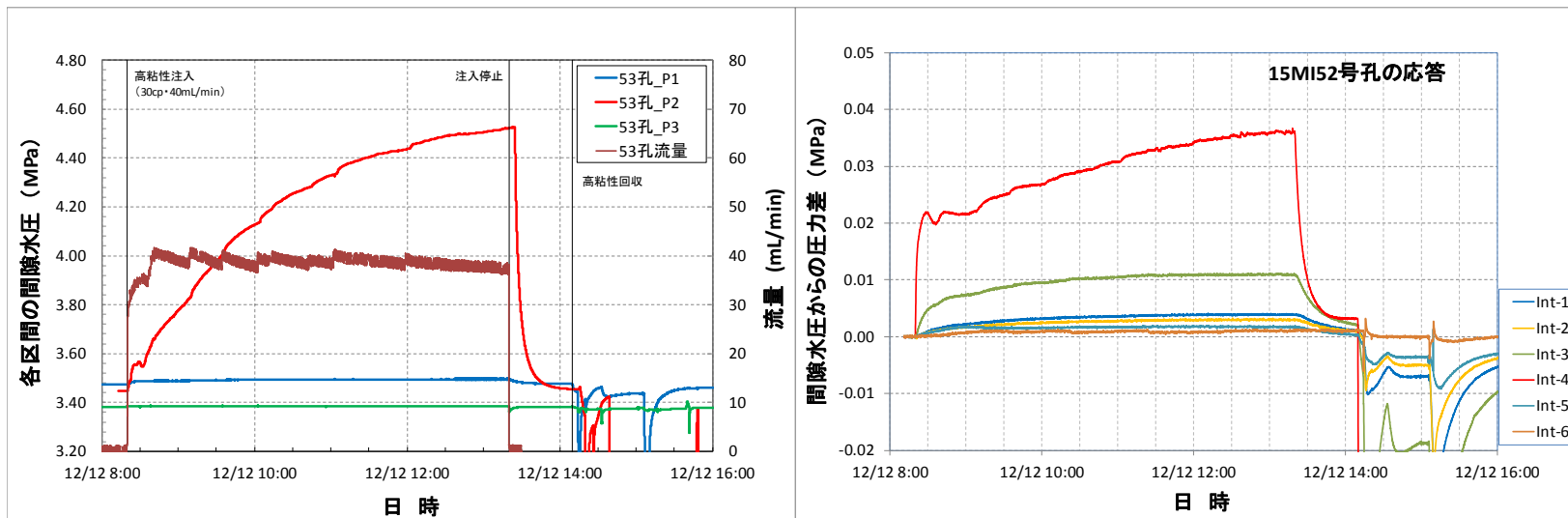


図 4.2.4-4 高粘性流体注入試験結果 二回目(32 cP、40 ml/min)

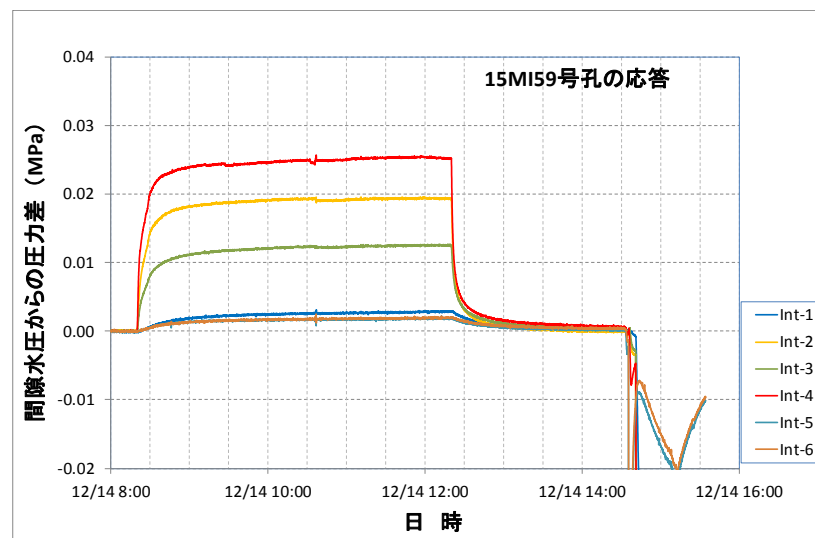
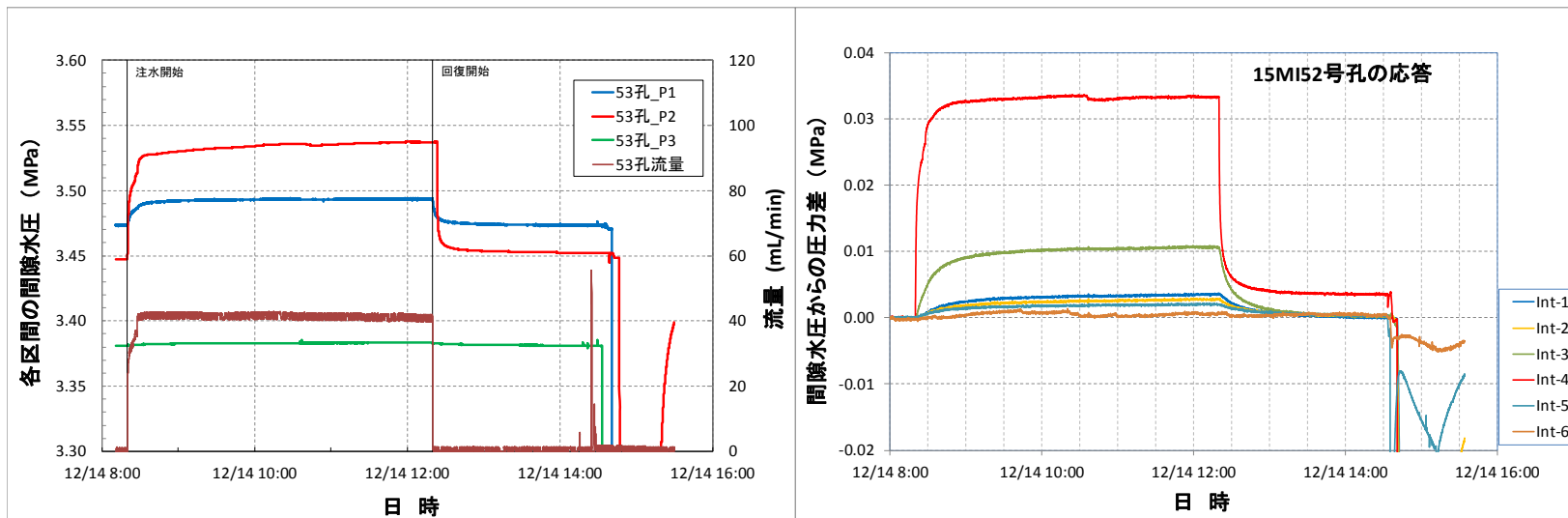


図 4.2.4-5 透水試験結果 三回目(40 ml/min)



#### 4.2.5 考察

##### (1) 高粘性流体注入1回目

1回目の透水試験結果と高粘性流体試験結果を比較したものを図 4.2.5-1 に示す。ここでは、時間軸を線形表示したものと対数表示したものの両方を示した。

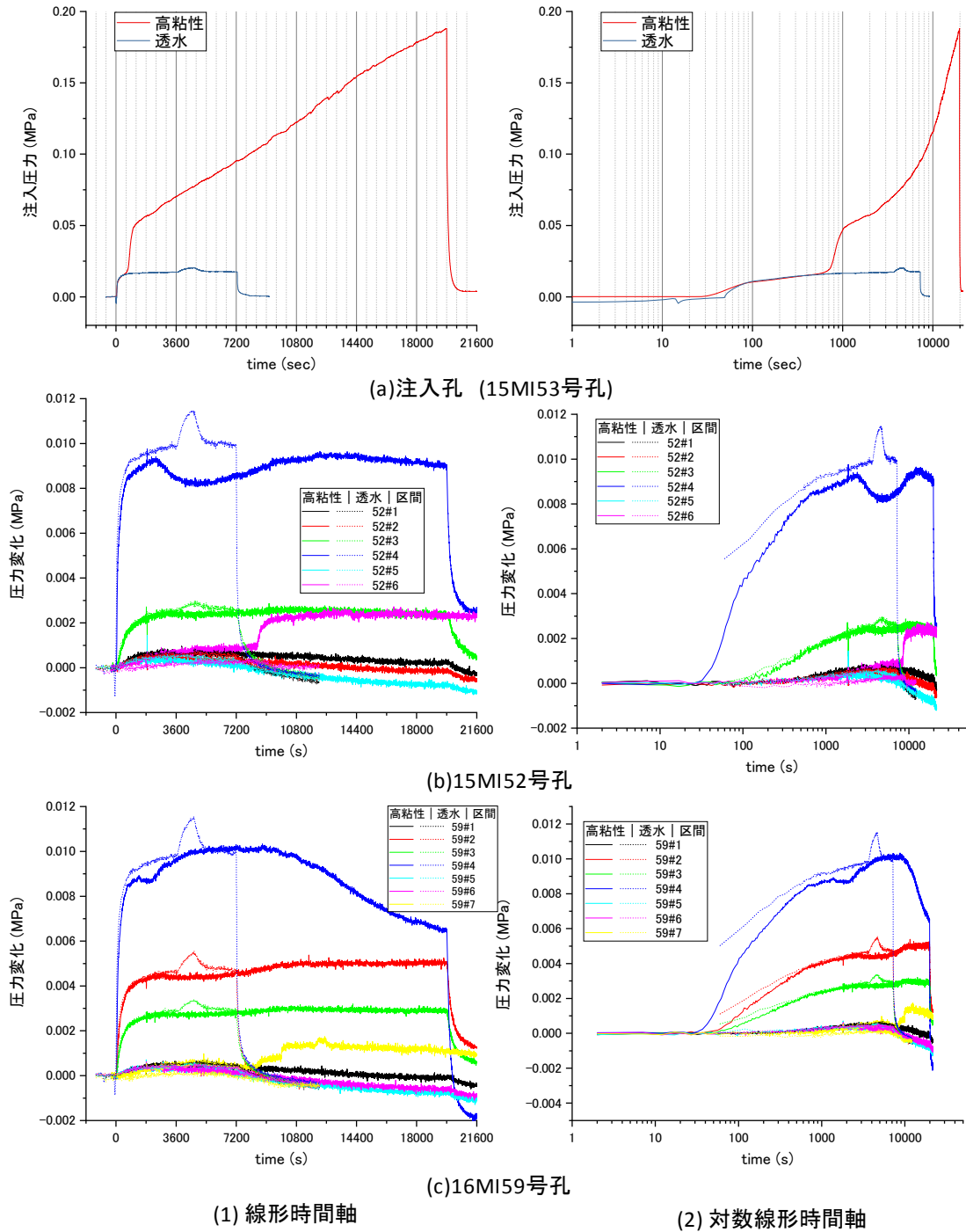


図 4.2.5-1 1回目の透水試験と高粘性流体試験の比較

注入圧力は、1 回目の高粘性流体試験試験では、700 s 程度まで、透水試験結果と同じになっており、この間は高粘性流体でなく水が注入されていると考えられる。流量が 10 ml/min と少ないため、少しのデッドボリュームの残留でも影響が長く残る。この後、高粘性流体が入り始めると圧力は急激に上昇し、その後、線形的に圧力が上昇する。線形的であることから一次元的な流動であるとも考えられるが、2 回目の注入の結果から、一次元流動場ではなく、2 次元流動場で透水係数が変化していると考えられる。

観測孔の 15MI52 号孔では、高粘性流体の注入によって圧力が増加する。この圧力増加は、透水試験結果とほぼ同じ圧力挙動である。ただし、対象割れ目が交差すると考えられる区間 4 では、2400 s 付近から圧力が減少している。高粘性流体が到達した場合、一般的には、流動抵抗が大きいため圧力は増加する。ただし、流量なども大きく変化しておらず、注入圧力も単調増加していることから、高粘性流体の流動によって流動場に何らかの変化が発生した可能性が高い。区間 6 では 8000 s 付近で圧力の増加がみられるが、2 回目の結果では同様の現象が確認できなかったため、高粘性流体の注入の影響ではないと考えられる。

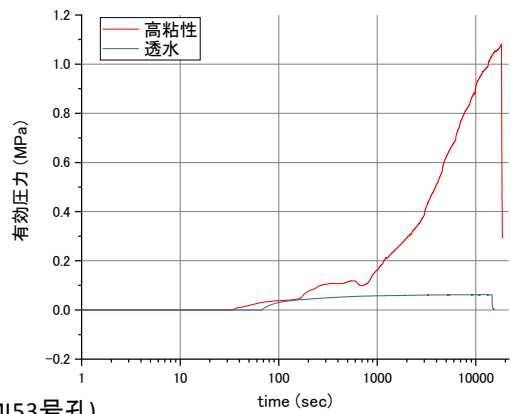
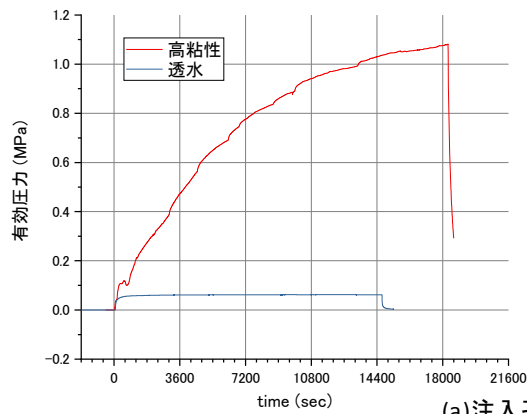
観測孔の 16MI59 号孔でも、高粘性流体の注入によって圧力が増加するが、15MI52 号孔と同様に、透水試験結果とほぼ同じ圧力挙動である。ただし、対象割れ目が交差すると考えられる区間 4 では、1300 s 付近から圧力が減少している。これは前述の 15MI52 号孔 int4 で観測されたのと同様の現象である。ただし、圧力が減少し始める時間は、16MI59 号孔 int4 の方が早い。これらについては、2 回目の試験結果で再度言及する。

試験後に実施した採水では、トレーサーが 15MI52 号孔 int4 と 16MI59 号孔 int4 でそれぞれ 2%と 1%検出されているが、採水時に混入した可能性も高く、高粘性流体が到達しているとは考えにくい。

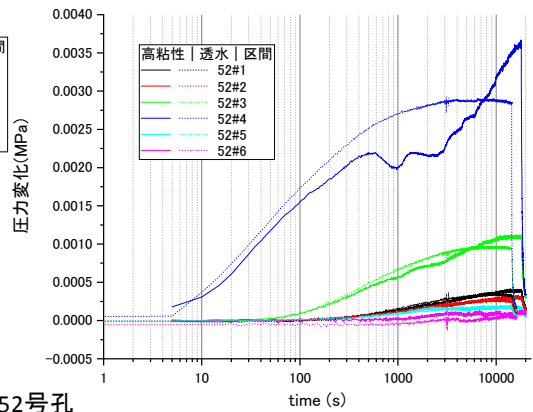
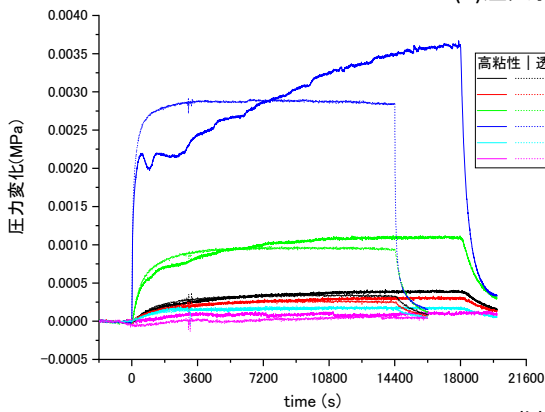
## (2) 高粘性流体試験 2 回目

2 回目の透水試験結果と高粘性流体試験結果を比較したものを図 4.2.5-2 に示す。ここでも、時間軸を線形表示したものと対数表示したものの両方を示した。

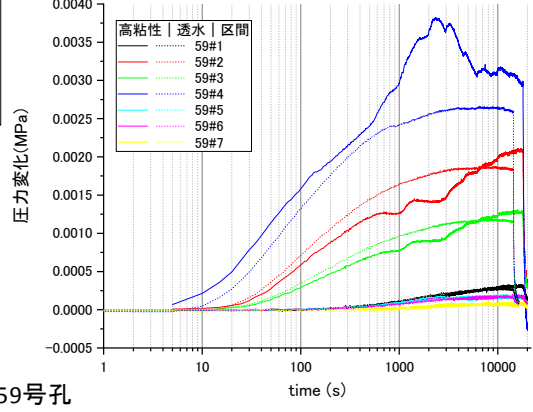
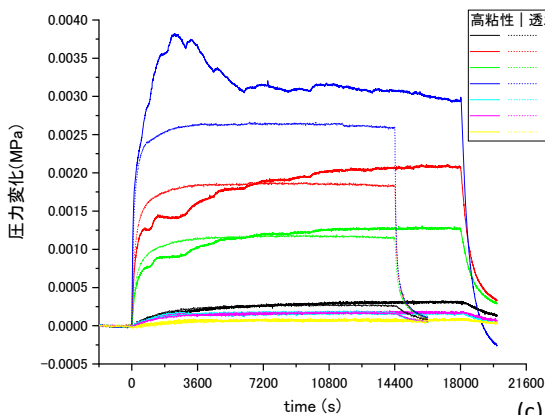
注入圧力は、2 回目の高粘性流体試験試験では、最初から透水試験結果より大きく上がっており、対象割れ目に高粘性流体が直接入ったものと考えられる。ただし、その後圧力が一時的に減少する傾向がある。その後、圧力は対数関数的に増加する傾向があるため、軸対称的な流動ではないかと推定される。対数軸で示したものでは、圧力勾配が直線で近似可能な部分が 3 区間あるように見られる。1 回目の高粘性流体の注入に比べて、圧力上昇も大きいため、2 回目の試験の方が、精度が高いと考えられる。観測孔の 15MI52 号孔の区間 4 では、1 回目の試験よりも圧力低下が顕著になっており、600 s 付近から圧力が低下し、その後、徐々に増加している。区間 3 でも、区間 4 と同様に、透水試験よりもやや圧力が低下し、その後、徐々に増加している。



(a) 注入孔 (15MI53号孔)



(b) 15MI52号孔



(c) 16MI59号孔

(1) 線形時間軸

(2) 対数線形時間軸

図 4.2.5-2 2 回目の透水試験と高粘性流体試験の比較

観測孔の 16MI59 号孔の区間 4 では、1 回目とは異なり、圧力が低下せず上昇している。500 s 付近から透水試験結果よりも圧力が高くなり、その後低下し、ほぼ一定圧となっている。区間 2 と 3 でも、応答が出ており、15MI52 号孔の区間 4 と類似した応答となっている。このため、15MI52 号孔の区間 4 と 15MI52 号孔の区間 3、16MI59 号孔の区間 2 と 3 は、水理的につながっていると考えられる。2 回目の高粘性流体の注入では、注入流量が多く、流入量が多いことから、特に 15MI52

号孔 int4 では非常に高い濃度でトレーサーが検出されている。このため、15MI52 号孔 int4 には高粘性が到達していると考えられる。一方、16MI59 号孔 int4 では圧力応答はあるものの、トレーサーの到達が 5%程度である。これは、前述のように高粘性流体の流入量 300 ml に相当するため、到達していると考えられる。

高粘性流体の区間への到達は、通常は圧力の変化が透水試験と異なることで確認できるが、今回の試験では、高粘性流体の到達による圧力の増加が有意ではない。通常の試験では、高粘性流体到達後には、透水試験時の数倍程度となることも少なくなく、明らかに流れにくい流体が到達し、流動抵抗が増加したと判定できる場合が多い。今回の試験では、1 回目の注入でも、15MI52 号孔 int4 と 16MI59 号孔 int4 で圧力の変化はあるものの、透水試験と同レベルであり、確実に到達したとはいいがたい。トレーサー濃度からは、15MI52 号孔 int4 では、トレーサーの濃度が 82%程度であることから、2 回目の 15MI52 号孔 int4 への到達は明確である。1 回目の注入でも 200 ml 程度の流入と推定されており、到達している可能性がある。

注入量の 3.3 L では到達しなかったが、2 回目の注入量の 12L では、区間内への流入量が 7.8 L と注入量 12 L の 65%に達しているため、少なくとも 4.2 L の注入時点で到達していると評価した。一方で、2 回目の試験では、16MI59 号孔 int4 のトレーサー到達濃度は原液の 5%程度で、1 回目の 1%の 5 倍となっている。ただし、総注入量も 1 回目と 2 回目では 4 倍程度となっており、1 回目の試験でも到達していた可能性がある。

これらの結果から、両試験とも高粘性流体が到達している可能性があるため、最短で圧力変化のあった 600 s 付近(400 ml 注入時点)で、高粘性流体が 15MI52 号孔 int4 と 16MI59 号孔 int4 に到達したと考えた。また、トレーサーの検出から、遅くとも 1 回目の試験が終わるまで(3300ml 注入時点)には、高粘性流体が届いていると考えた。

これらを考慮して、高粘性流体の到達から割れ目の幅を範囲で評価することとした。割れ目幅が一定で軸対称的に広がると仮定すれば、以下の式を用いて割れ目幅が求められる。

$$Q = \pi b R^2$$

ここに、Q は注入量、b は割れ目幅、R は注入区間からの距離である。

上記の条件で求めた割れ目幅を表 4.2.2-1 に示す。割れ目幅は、15MI53 号孔(注入孔)→15MI52 号孔 int4 で 0.061~0.51 mm、15MI53 号孔→16MI59 号孔 int4 で 0.040~0.33 mm となる。

各区間の透水量係数から割れ目幅の 3 乗則で求めた割れ目幅を表 4.2.5-2 に示す。15MI53 号孔→15MI52 号孔 int4 の割れ目幅(0.061~0.51 mm)や 15MI53 号孔→16MI59 号孔 int4 の割れ目幅(0.040~0.33 mm)の最小値は、透水量係数から求めた割れ目幅とほぼ整合する。

表 4.2.5-1 高粘性流体の到達に基づく割れ目幅の評価結果

項目 区間	注入量 (ml)		割れ目幅 (mm)		注入区間からの距離 (m)
	最小	最大	最小	最大	
15MI52 号孔 int4	400	3300	0.061	0.51	1.44
16MI59 号孔 int4	400	3300	0.040	0.33	1.79

表 4.2.5-2 各区間の透水量係数と割れ目幅 (3 乗則で計算)

項目 区間	透水量係数 (m <sup>2</sup> /s)	割れ目幅 (mm)
15MI52 号孔 int4	6.3E-09	0.020
15MI53 号孔 int4	1.7E-07	0.059
16MI59 号孔 int4	2.3E-08	0.030

次に、注入圧力の時間変化から透水量係数の時間変化を求めた。流れ場が 2 次元 (軸対称) であると仮定するとは、圧力の時間変化は次式で表される。

$$h = \frac{mQ_o}{4\pi T} \left[ \ln \left( \frac{Q_o}{\pi b r_o^2} \right) + \ln t \right]$$

ここに、T は透水量係数、m は高粘性流体の粘性、Q<sub>o</sub> は高粘性流体の注入流量、t は時間である。この時間微分は次式のようになる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{mQ_o}{4\pi T} \frac{1}{t}$$

上式を展開すると透水量係数は以下で求められる。

$$T = \frac{mQ_o}{4\pi \alpha} \frac{1}{t}$$

ここに、α は圧力の時間微分 (= ∂h/∂t) である。

1 回目と 2 回目の注入について、注入圧力の経時変化を透水量係数の変化として計算したものを図 4.2.5-3 に示す。透水量係数にばらつきが大きいこれは微小な圧力変化が透水量係数の推定に影響するためである。

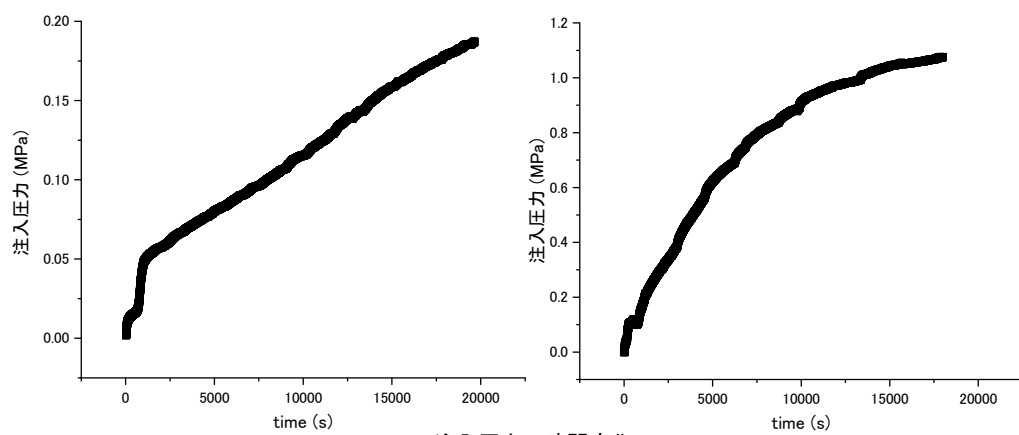
この結果から、透水量係数は初期の段階では、注入孔の透水係数よりも大きい、注入とともに高粘性流体が透水量係数の小さい領域に広がっていると考えられる。ただし、透水量係数は、その

他のボーリング孔の対象割れ目が交差する区間の透水量係数よりは大きい。

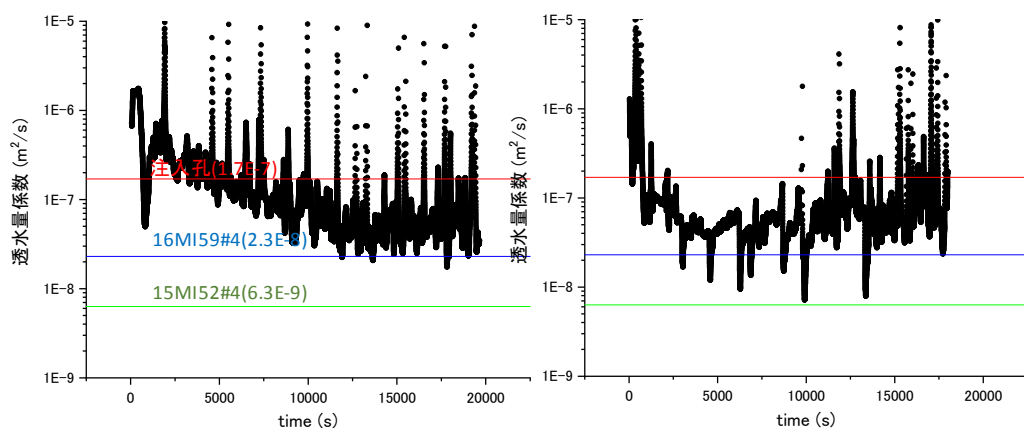
また、この結果の時間軸を注入量に変換し、さらに注入量を対数表示したものを図 4.2.5-4 に示す。時間軸を対数軸とした場合、二次元的な流動であれば、圧力の変化は線形になる。このため、その傾きから透水量係数が求められる。ここでは、注入量で表されているが、透水量係数も図上に合わせて示した。この結果から、注入量の変化にともなって、透水量係数が変化していることがわかる。注入量が 2000 ml をこえたあたりから透水量係数がおおむね  $5E-8$  程度で一定になっていることがわかる。

今回の試験では、15MI52 号孔 int4 と 16MI59 号孔 int4 のデッドボリュームがそれぞれ 9.4 L と 6.7 L 程度あり、2 回目の試験結果では、15MI52 号孔 int4 で高濃度の高粘性流体が確認されていることから、かなりの量が 15MI52 号孔 int4 に注入されたと考えられる。透水量係数が注入量 2000ml 以降でほぼ同じなのは、15MI52 号孔 int4 に高粘性流体が注入され変化がないためと考えられる。

最後に、高粘性流体注入試験の 2 回目の試験結果に基づいて割れ目モデルを想定すると図 4.2.5-4 のように表すことができる。。単一割れ目で透水量係数が割れ目内で変化すると想定すると、透水量係数と注入流量の関係から、割れ目幅を 3 乗則で求め割れ目の半径を求めることができる。また、複数割れ目でも同様に、透水量係数の変化が割れ目の透水係数に依存しており、透水量係数が変化するたびに高粘性流体が流れる割れ目が変わっていると想定すると、透水量係数と注入流量の関係から、割れ目幅を 3 乗則で求め割れ目の半径を求めることができる。



(a) 注入圧力の時間変化



(b) 透水量係数の時間変化

(1) 1回目の試験結果

(2) 2回目の試験結果

図 4.2.5-3 注入圧力の時間変化から求めた透水量係数の時間変化

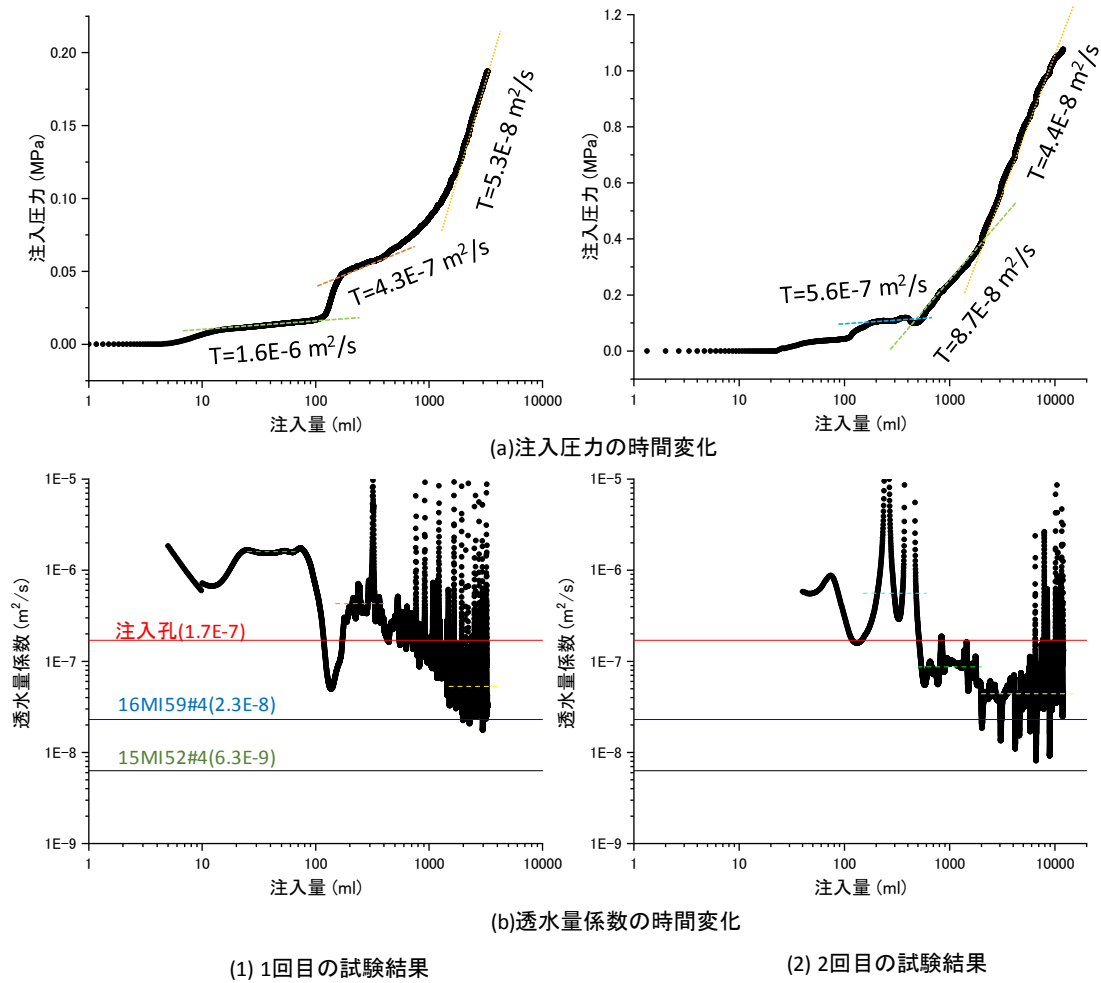


図 4.2.5-4 注入量と注入圧力および透水量係数変化の関係

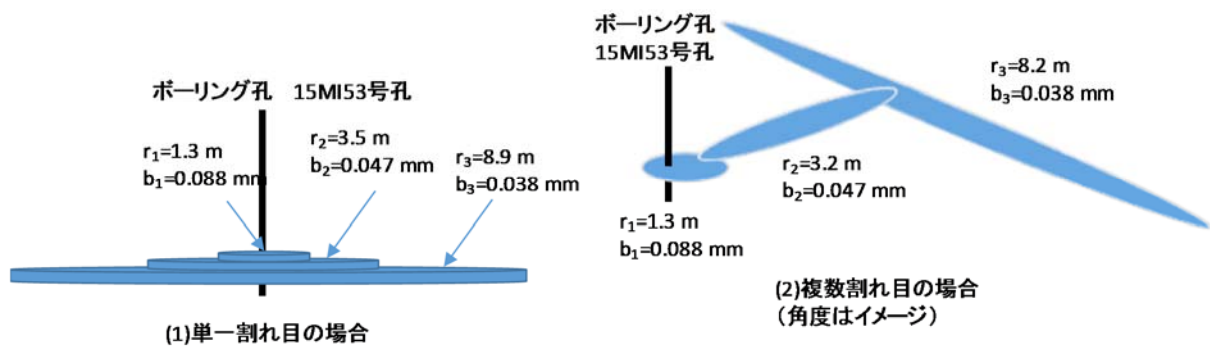


図 4.2.5-5 想定される割れ目モデル



#### 4.3 割れ目の可視化技術の開発

##### 4.3.1 既存ボーリング孔周辺地質とレジン注入対象割れ目

###### 4.3.1.1 はじめに

瑞浪超深地層研究所深度 300m ボーリング横坑において、平成 24 年度～平成 26 年度にかけて 5 孔のボーリング孔（12M30 号孔、12MI31 号孔、13MI36 号孔、13MI37 号孔、14MI49 号孔）を掘削し、ボーリングコア試料に見られる割れ目の性状や各ボーリング孔間の水理的応答性について調査した。今年度の原位置レジン注入試験では、これまでの地質環境調査で分かった割れ目の地質学的連続性およびトレーサー試験や高粘性流体流入試験の結果により確認された水理学的連続性を考慮し、レジン注入対象割れ目を決定した。

###### 4.3.1.2 既存ボーリング孔周辺地質

瑞浪超地層研究所は白亜紀後期に形成された土岐花崗岩体を基盤とし、中～粗粒の黒雲母花崗岩を産する。深度 300m は岩盤中に割れ目が比較的多く存在し「上部割れ目帯（低角度割れ目集中帯）」とされている。図 4.3.1-1 は、深度 300m ボーリング横坑における既存ボーリング孔の孔跡および孔間で連続性が確認された割れ面の性状についてまとめたものである。孔口から 15m 程度のところには方解石や粘土鉱物を多量に含む破碎帯が見られ、割れ目周辺母岩の変質を伴わない緑泥石脈が多く産する。15～20m の間は比較的割れ目が少ない領域が存在し、20～27m には黄鉄鉱および方解石を伴う割れ目周辺母岩変質を伴う割れ目、また割れ目周辺母岩の変質を伴う緑泥石脈を産する。

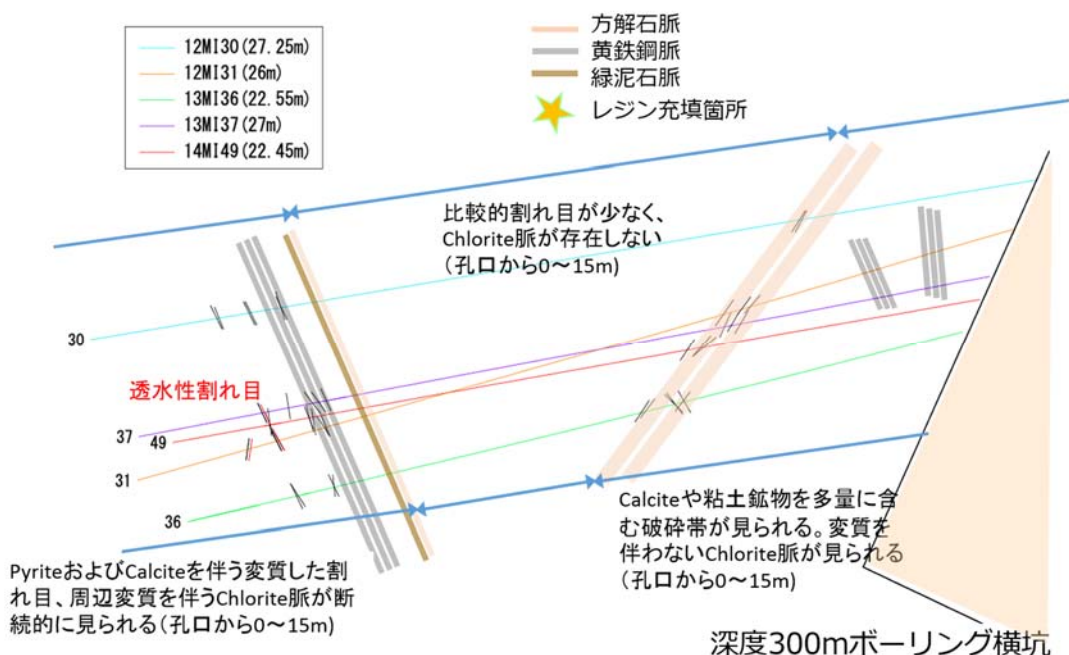


図 4.3.1-1 深度 300m ボーリング横坑周辺地質の概要

#### 4.3.1.3 レジン注入対象割れ目

トレーサー試験および高粘性流体試験で水理的応答が認められ、かつ地質学的連通性も確認できる割れ目をレジン注入対象割れ目とした（図 4.3.1-2）。図の赤丸部分で示すように、12MI31 号孔 int3 および 13MI37 号孔 int2 に見られる NW 方向の割れ目の間で水理的・地質学的連通性が確認された。また昨年度実施した高粘性流体試験において 13MI37 号孔 int2 を注入口とした場合に、12MI31 号孔 int2 を通る割れ目でも水理的に応答のよい箇所が見られた。13MI37 号孔に 12MI31 号孔 int2 を通る割れ目の性状に類似した割れ目は確認できないが、13MI37 号孔 int2 をレジン注入口とした場合にレジンの浸透が期待できる。なお、前者の、12MI31 号孔 int3 および 13MI37 号孔 int2 に連通する NW 方向の割れ目の性状を図 4.3.1-3 に示す。

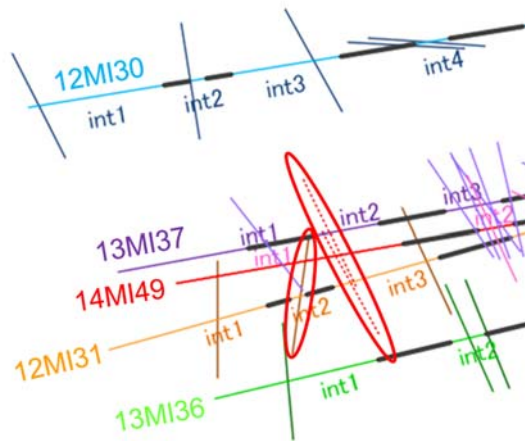


図 4.3.1-2 レジン注入対象割れ目の位置

	12MI31号孔 Int3	13MI37号孔 Int2
深度 (m)	21.895m	23.135m
走向傾斜	N29W88E	N26W80E
透水量係数 (m <sup>2</sup> /sec)	6.93E-8	1.14E-6
高精度BTVIによる開口幅	0.15mm	0.70mm
割れ目の性状	割れ目周辺の絹雲母 化および緑泥石化	割れ目面に多量の緑 泥石を産する



図 4.3.1-3 レジン注入対象割れ目の地質学的性状

#### 4.3.2 レジン特性確認試験

##### 4.3.2.1 はじめに

本研究では、原位置レジン注入試験で使用するレジンを選定する上で、レジンの基本的な性能を確認し、かつ現場試験への適性を判断する目的で室内試験を実施してきた。岩盤中に存在する割れ目間隙幅や割れ目の分布を正確に、精度よく評価するためには、レジンが岩盤中の間隙に対し、広範囲に可能な限り幅の狭い箇所まで行き渡ること、かつ原位置の地下水で割れ目間隙内が飽和した状態であっても、レジンの硬化や岩盤への接着に影響のない性能を有していることが要求される。また充填したレジンに明瞭に可視化するためのレジンに添加する蛍光剤の選定も重要であり、レジンや地下水に対する蛍光剤の化学的特性を把握し、適切な添加量を検討する必要がある。

原位置レジン注入試験の国内サイトへの適用に向け、初年度では、レジン剤の選定および蛍光剤の蛍光特性の把握を行った。レジン材の選定では、スイスグリムゼル試験場における原位置レジン注入試験で用いたエポキシ樹脂 Injection26 (Sika 製) に類似した性能をもち、国内で入手可能なエポキシ樹脂を複数候補としてあげた。いずれも主剤 (エポキシ樹脂) と硬化剤をある決まった割合で混合して使用する。これらのレジン材の一般的な使用用途は建築材のひび割れ等の充填剤であるが、実際の現場では必ずしも一定の温湿度管理の下で正確に計量し混合するわけではないため、特にレジンの硬化を決定づける硬化剤は、混合割合をおおよそ満たしていれば硬化後の要求性能を満たすような現場での実用性を考慮した品質となっているのが一般的である。原位置レジン注入試験においてレジン材は高温な地下環境下に置かれ、地下水で飽和し充填鉱物等の介在する岩盤中に注入されるため、レジン材がこれらの環境に対し物理的・化学的な影響を受けることで、岩盤内の割れ目への充填の不十分、レジンの硬化不良などが懸念される。そこで、エポキシ樹脂の粘度・可使時間を自ら確認試験を行うことで把握し、エポキシ樹脂の硬化の基礎的情報を得ることとした。候補としてあげたレジン材の粘度測定を実施した結果、主剤および硬化剤はいずれも比較的ニュートン性流体に近い性質を持ち、混合後には重合反応による発熱を伴いながら粘度が低下し、その後急激な温度上昇および粘度増加を経験した後に硬化する。本研究では上記の急激な温度上昇を「(温度の) 立ち上がり時間」とし、その 70% の温度を記録する時間を「可使時間」と定義し測定を行った。選定した日本シーカ製の EP-400M (一般用) は、主剤 (エポキシ樹脂) および硬化剤 (脂肪族アミン) を 3:1 の割合で混合して使用する。これらレジン材の基本的な性能を把握した上で、平成 25 年度以降は現場環境に則した実験条件を設定し、これまで室内実験を行ってきた。

昨年度、レジン材に添加する蛍光剤として、液体で主剤への馴染みがよく、かつレジン注入後にレジンからの分離が生じない蛍光剤を選定した (R-ZE フラビンイエロー, ブレニー技研製)。

本年度は、原位置レジン注入試験の本番を迎えるにあたり、特に昨年度選定した蛍光剤の添加量を

決定するための室内実験を行う。試験項目は、任意の添加量の蛍光剤に対するレジン材の粘度および可使時間の測定、硬度測定試験、付着強度測定試験である。また原位置レジン注入試験時におけるパッカー間のデッドボリュームに滞留するレジン材の発熱温度を確認するための模擬試験も実施した。

#### 4.3.2.2 粘度測定試験

昨年度、原位置レジン注入試験で使用するレジン材に添加する蛍光剤を選定した（R-ZE フラビンイエロー、ブレニー技研製）。選定した蛍光剤は、レジン材の主剤と同じグリシジルエーテル系を主成分とし主剤の希釈材としても機能することから、レジン材の粘度を低下させ、割れ目内をより広範囲に行きわたらせることが期待できる。一方で蛍光剤の添加により、主剤と硬化剤の混合比が変化することで、硬化後のレジンの付着強度や硬度を低下が懸念される。そこで、蛍光剤添加に伴うレジンの物性変化を確認する目的で、蛍光剤を添加したレジン材の粘度を測定した。

##### (1) 測定方法

測定にはデジタルB型粘度計(LV DV-II+Pro、Brookfield Engineering Laboratories, Inc.)を用いた(図 4.3.2-1)。この粘度計は、液体中のスピンドル(回転子)を一定角速度で回転させた時のトルクを測定して見掛けの粘度を測定するものである。オプションのソフトウェア『Rheocal32』を用いることで、無段での回転速度の切替え、測定条件の設定、データの収録が可能である。測定は、図 4.3.2-2のように試料を500mlのガラス製のグリフォンビーカーに採取し、試料の中心にスピンドルを取り付けた粘度計を設置して行われる。また、スピンドルの保護及び安定した測定を行う為に粘度計にはガードが取り付けられている。この粘度計にはRTD温度センサーが取り付けられ、粘度の測定と同時に温度の測定も行われる。なお、この粘度計の精度はトルクフルスケールの±1%である。この粘度計には標準で、4つのスピンドル(LV1、LV2、LV3、LV4)が付属している。それぞれのスピンドルで測定できる粘度範囲は回転数に応じて決まっているため、試料の粘度と量に応じ、今回の検討ではLV1(図 4.3.2-3 図 4.3.2-3)を用いた。回転数は10rpmとし、連続回転させながら1分毎の粘度を測定した。使用するレジン材はEP-400M(ダイフレックス製)を使用し、蛍光剤にはRZ-E フラビンイエロー(ブレニー技研製)を使用した。

##### (2) 主剤の粘度測定

選定した蛍光剤(R-ZE フラビンイエロー、ブレニー技研製)は、主剤と同じグリシジルエーテル系を主成分とする液体の蛍光剤であり、通常、レジン材の主剤に添加して使用する(一昨年度まで検討していた粉末状のウラニンは硬化剤に添加して使用していたことから、蛍光剤の添加方法の変更には注意したい)。本蛍光剤は主剤の希釈材としても機能し、主剤の粘度を低下させることから、蛍光剤の添加量による主剤の粘度変化を確認する測定を行った。粘度測定は環境温度25°Cの室内環境下で行った。レジン材に対し、蛍光剤を無添加、2%添加、10%添加の場合の計3条件における粘度

測定を行った。図 4.3.2-5 に測定結果を示す。



図 4.3.2-1 粘度計



図 4.3.2-2 粘度測定の様子



図 4.3.2-3 スピンドル (LV1)



図 4.3.2-4 恒温恒湿槽内での試験の様子

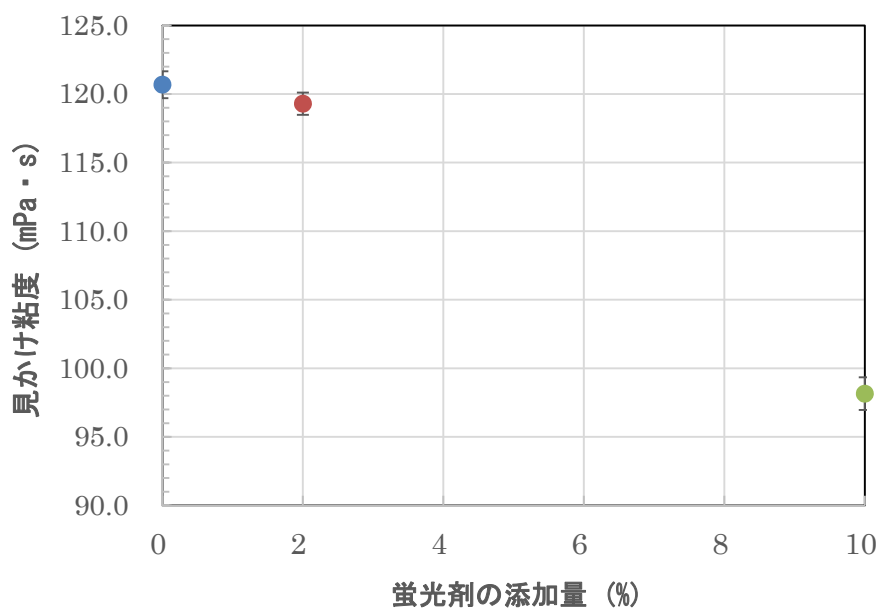


図 4.3.2-5 主剤の粘度測定結果

蛍光剤を添加しない場合の主剤の粘度は平均で 120.68mPa · s、2%添加で平均 119.29 mPa · s、10%添加で平均 98.15 mPa · s となり、蛍光剤の添加量を増やすほど、主剤の粘度が減少することを確認した。

### (3) 混合レジン粘度測定

レジン材(混合物)の粘度は、主剤と硬化剤を混合した直後から粘度が急上昇する直前までを連続して測定した。主剤に対し、蛍光剤を無添加、2%添加、10%添加および2%添加したのち2週間保存した場合の計4条件における粘度測定をそれぞれ3回ずつ行った。環境温度は25℃、湿度は50%とし、恒温恒湿槽内にて実験を行った(図4.3.2-4)。それぞれの測定結果を図4.3.2-6、図4.3.2-7、図4.3.2-8および図4.3.2-9に示す。

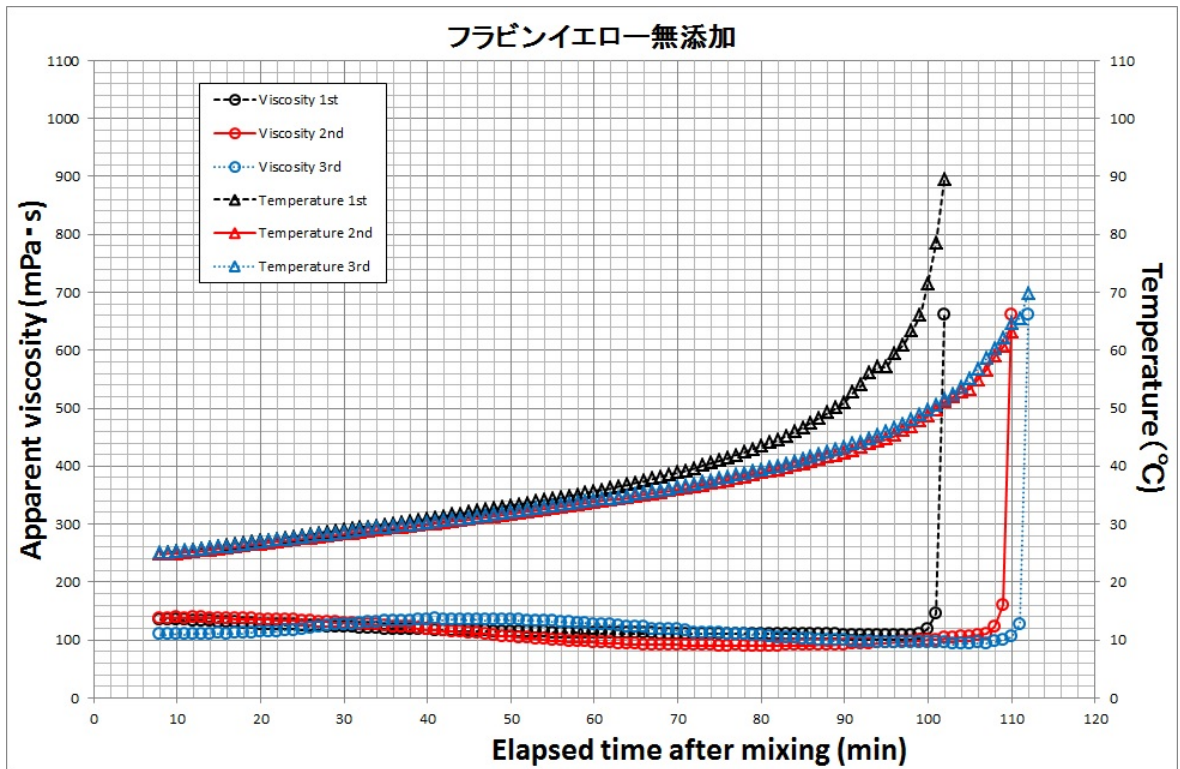


図 4.3.2-6 粘度測定結果(蛍光剤無添加)

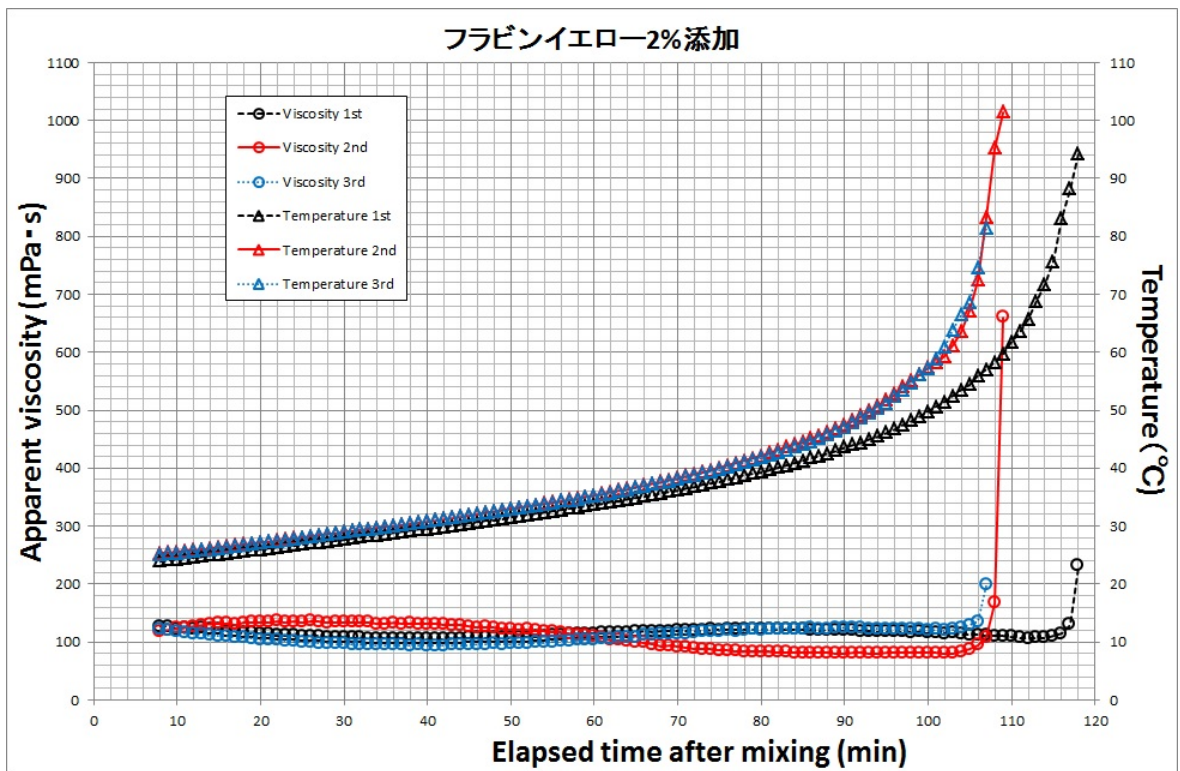


図 4.3.2-7 粘度測定結果(蛍光剤 2%添加)

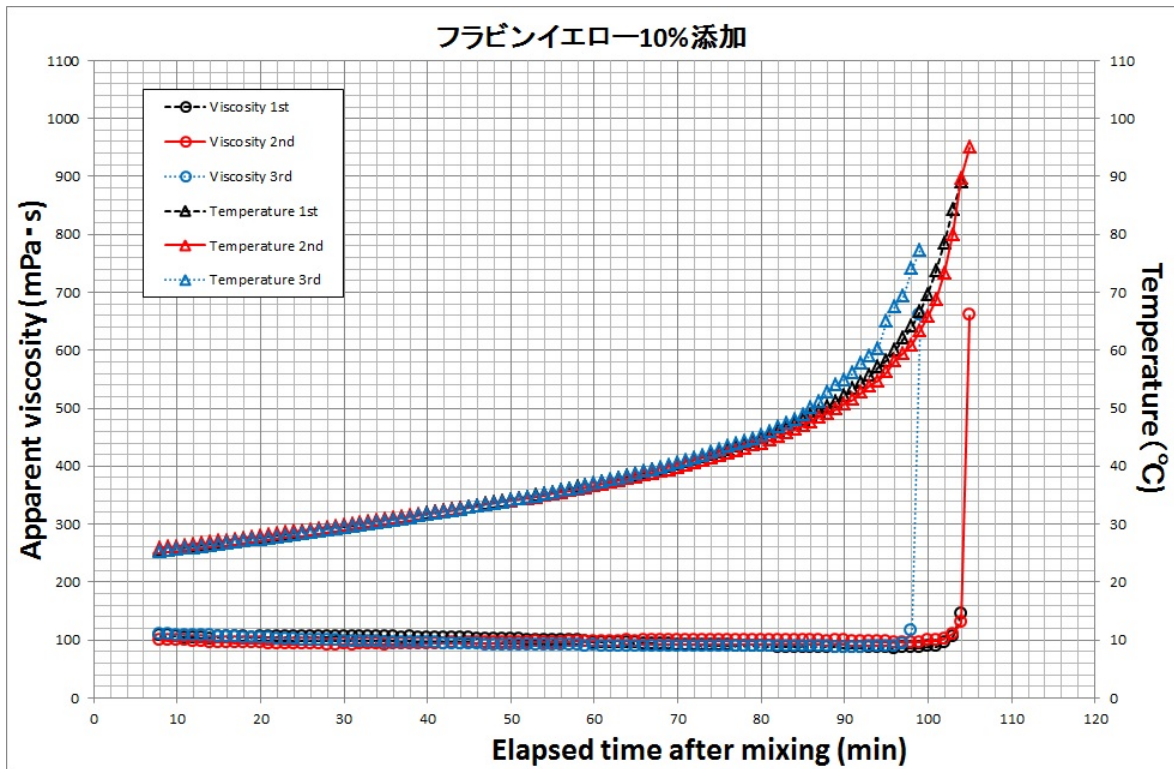


図 4.3.2-8 粘度測定結果(蛍光剤 10%添加)

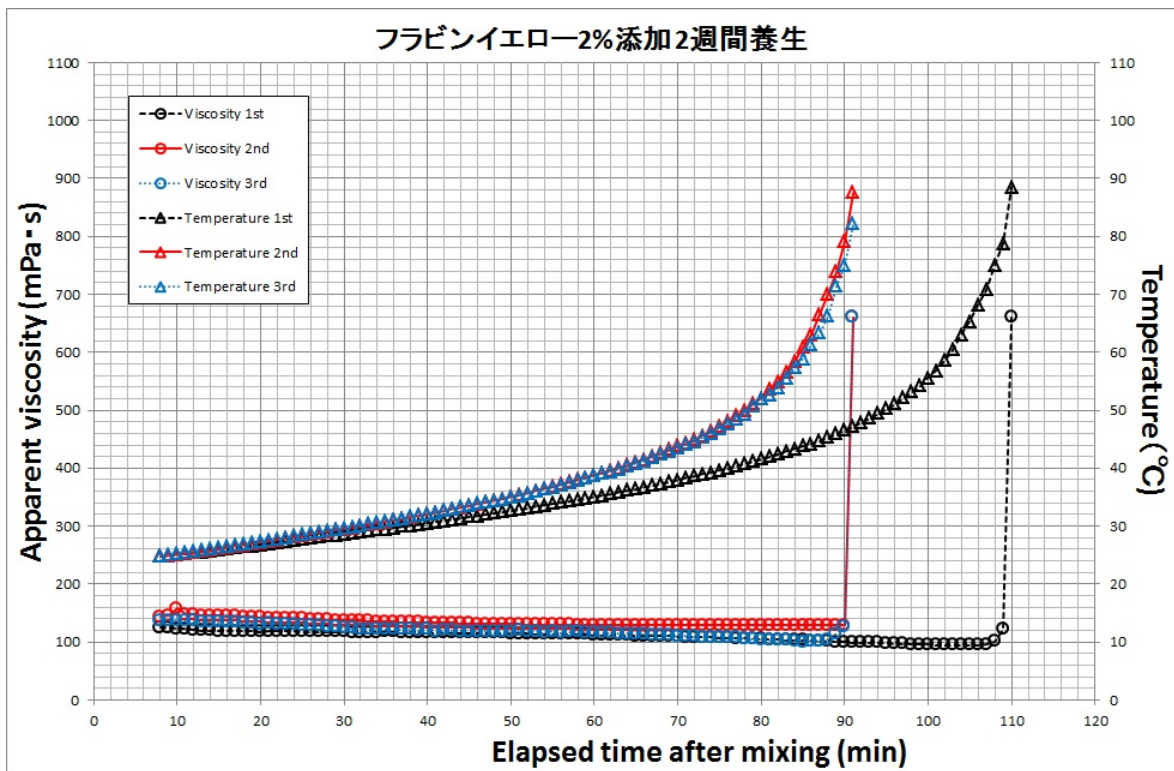


図 4.3.2-9 粘度測定結果(蛍光剤 2%添加 2週間保存)



レジン材（混合物）の粘度の変化は、蛍光剤の添加量にかかわらず試験開始から低下した。ただし、無添加および 2%添加の結果には試験開始から粘度上昇しているものもある。経過時間が 80 分～100 分付近で最も粘度が低下し、その後立ち上がりにかけて徐々に粘度が上昇していることがわかる。この粘度の変化は、主剤と硬化剤の混合開始からレジンの温度の上昇により混合物が液相状態で熱膨張し、80 分～100 分付近まで見掛け粘度が低下するためである。その後、今度は体積収縮を伴いながら見掛け粘度が上昇し始め、発熱温度の立ち上がり時刻になると、見掛け粘度は急激に上昇する。原位置レジン注入の際にこのような経過時間に対する粘度のプロファイルを把握していれば、80 分～100 分ころまではレジンを注入し続けても良いことが判断できる。

#### 4.3.2.3 可使時間測定試験

前章の粘度測定試験と同様に、蛍光剤の添加量を変化させた場合のレジン材の温度上昇法による可使時間測定を行った。測定にはデータロガー(TR-71nw、株式会社ティアンドデイ、図 4.3.2-10)と温度センサー(TR-1320、株式会社ティアンドデイ、図 4.3.2-10)を用い、混合物の試料 300g を 300ml のガラスビーカーに採取し、試料の中央部に温度センサーを設置後、1 秒間隔で試料の温度を測定した(図 4.3.2-12)。なお、温度上昇法とは主剤と硬化剤を混合した後の温度変化から可使時間を求める方法である。測定開始時間は混合開始からとし、温度が急速に立ち上がる試料は、その立ち上がり時間の 70%を可使時間とする。温度の急速な立ち上がりがない試料は、最高発熱温度到達時間の 50%を可使時間とする。レジン材は EP-400M (ダイフレックス製) を使用し、蛍光剤は RZ-E フラビンイエロー (ブレニー技研製) を無添加、2%添加、10%添加の場合および主剤に RZ-E フラビンイエローを 2%添加したのち 2 週間保存した場合の計 4 条件を実施した。環境温度は 25℃、湿度は 50%とし、恒温恒湿槽内で行った(図 4.3.2-13)。測定結果を図 4.3.2-14、図 4.3.2-15、図 4.3.2-16 および図 4.3.2-17 に示す。なお、温度センサーの測定限界値は 155℃であり、それ以上の温度を記録する場合には測定できていない。表 4.3.2-1 には温度の立ち上がり時間および可使時間の値を示す。



図 4.3.2-10 温度センサー



図 4.3.2-11 データロガー

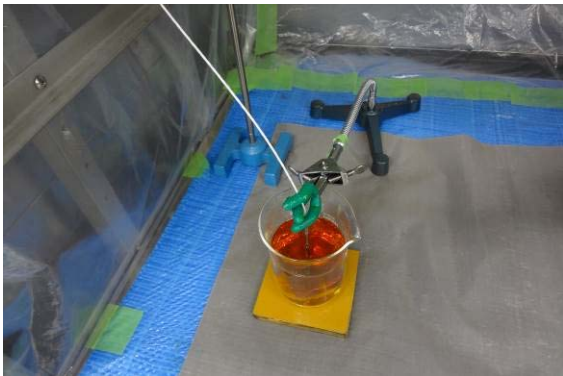


図 4.3.2-12 測定状況

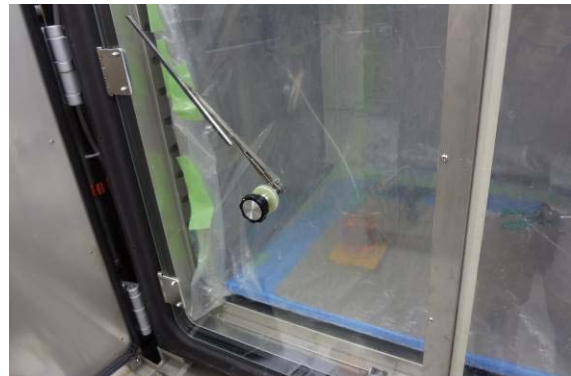


図 4.3.2-13 恒温恒湿槽

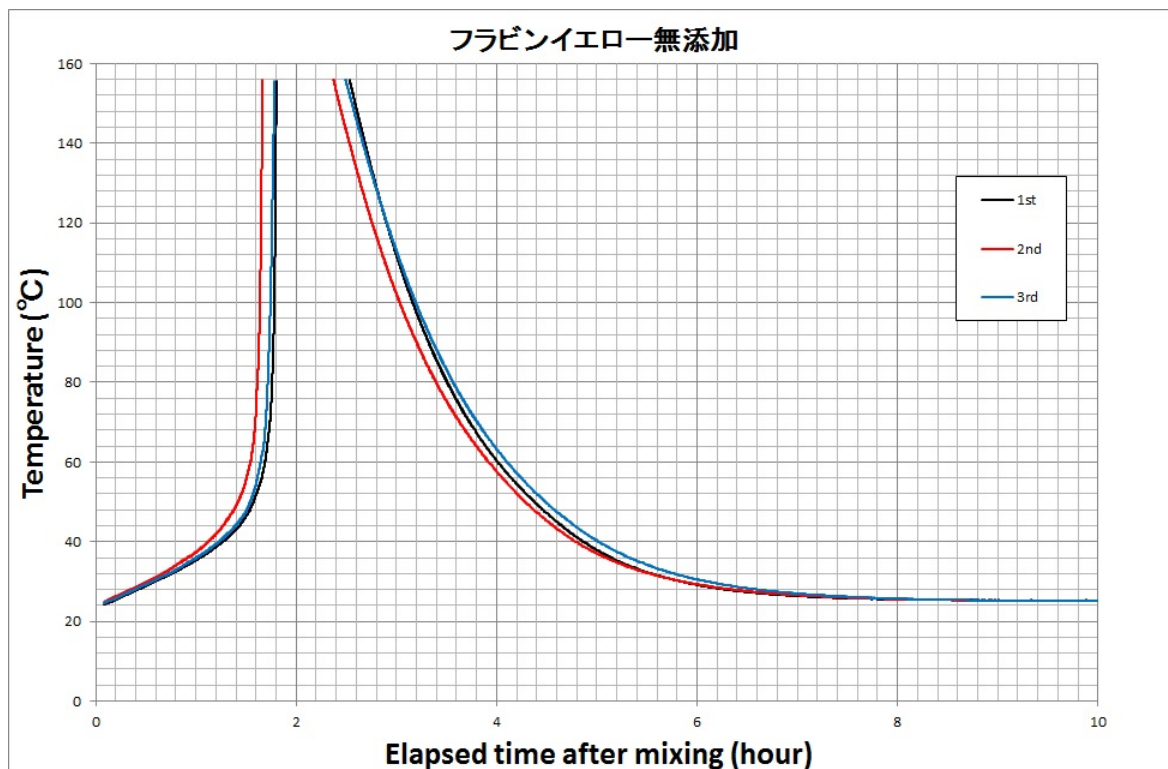


図 4.3.2-14 可使時間測定結果(蛍光剤無添加)

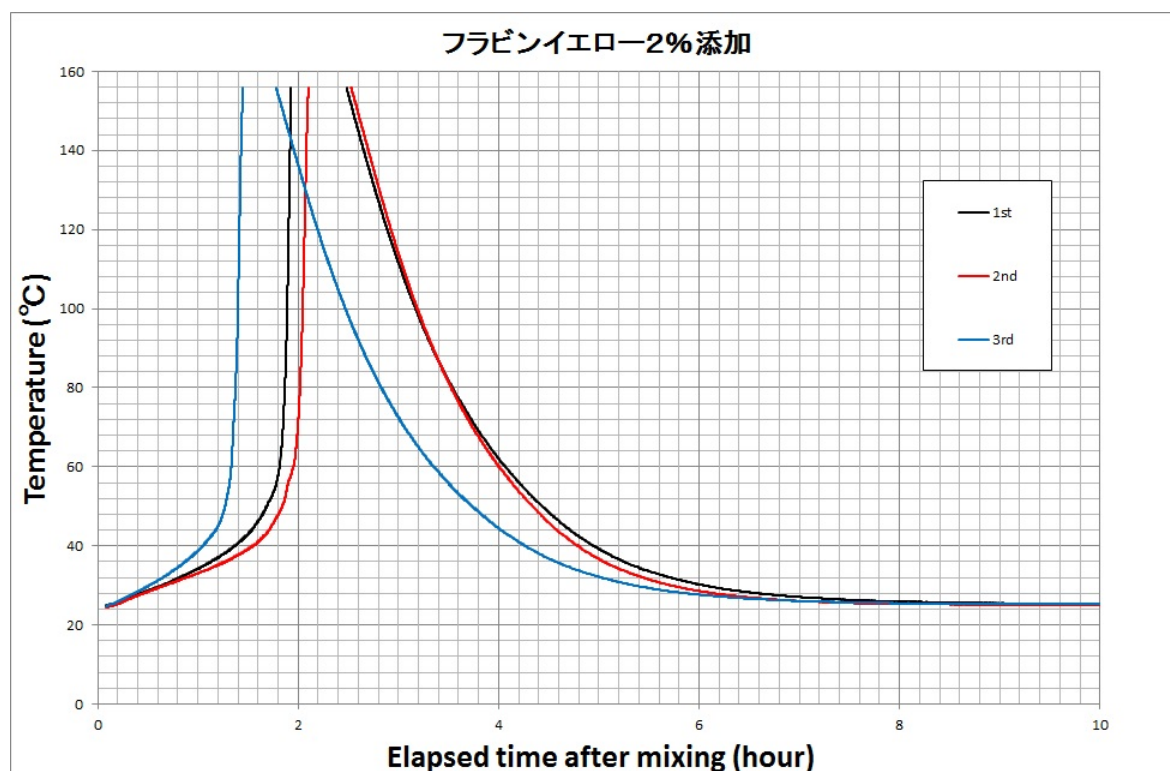


図 4.3.2-15 可使時間測定結果(蛍光剤 2%添加)

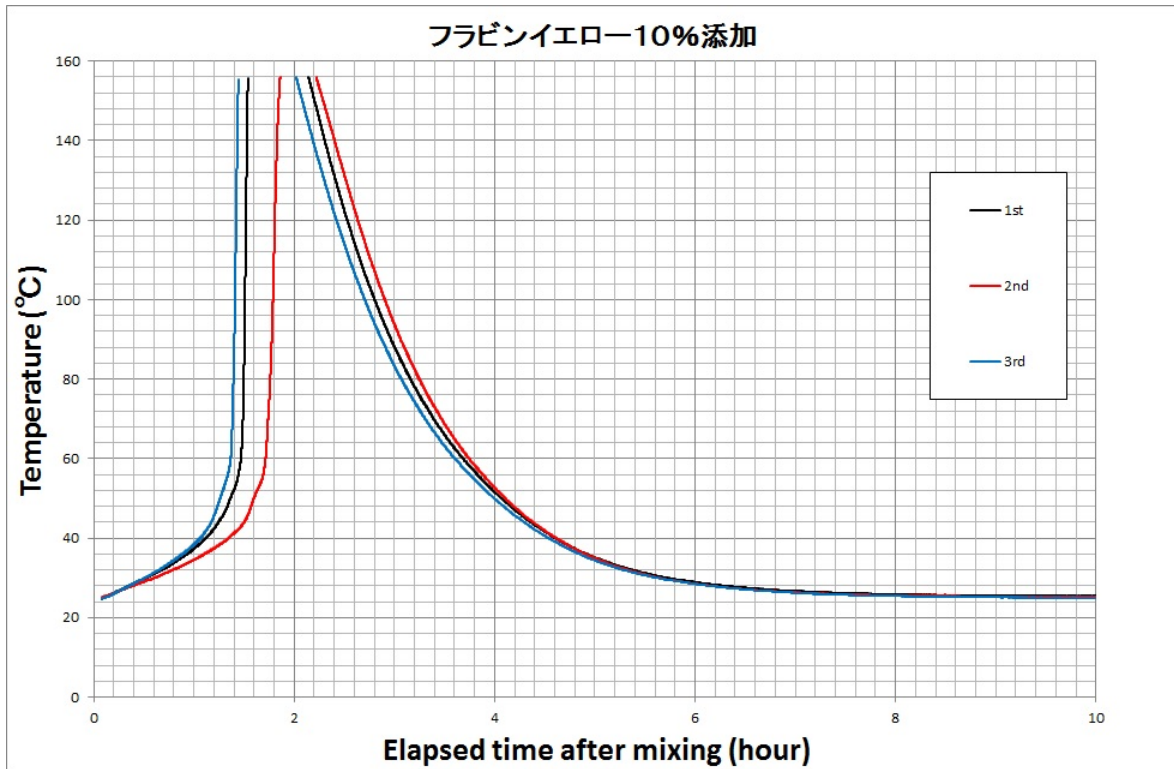


図 4. 3. 2-16 可使時間測定結果(蛍光剤 10%添加)

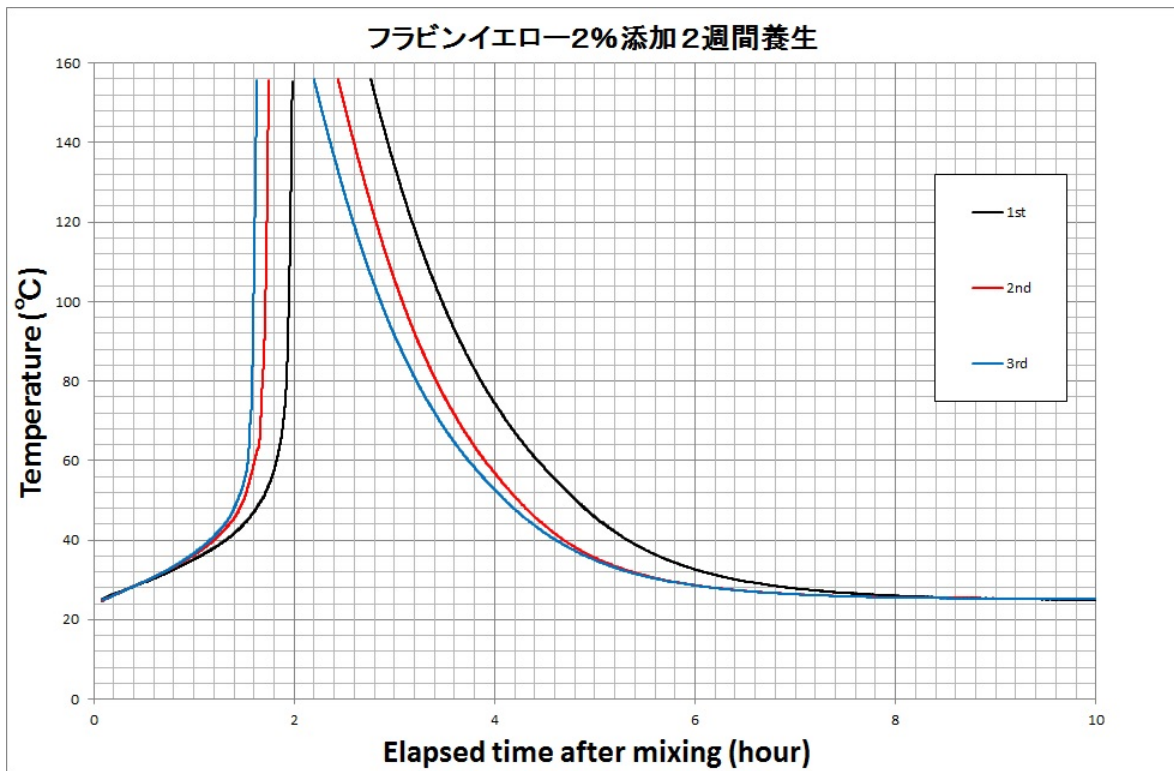


図 4. 3. 2-17 可使時間測定結果(蛍光剤 2%添加ののち 2 週間保存)

表 4.3.2-1 レジンの可使用時間

	試験回数	立ち上がり時間(min)	可使用時間(min)	平均(min)	標準偏差	初期温度(°C)	標準偏差
無添加	1st	96	67	65	2.9	24.3	0.25
	2nd	88	62			24.8	
	3rd	94	66			24.6	
2%	1st	104	73	68	14.0	24.8	0.29
	2nd	112	78			24.3	
	3rd	74	52			24.8	
10%	1st	84	59	60	7.0	24.7	0.29
	2nd	96	67			25.2	
	3rd	76	53			24.7	
2%,2週間養生	1st	106	74	66	7.2	24.7	0.12
	2nd	92	64			24.7	
	3rd	86	60			24.9	
レジンの初期温度は主剤と硬化剤混合後、5分後としている。							

混合後のレジンの温度の経時変化は、いずれの試験条件においても、急激な温度上昇を伴い、155°Cを超える高温を記録したのち、レジンの硬化とともに温度が低下する。同じ蛍光剤の添加量の結果でも可使用時間には約3~14°Cの幅で値にばらつきがあるが、平均は60~68°Cの間であった。

#### 4.3.2.4 付着力強度測定試験

昨年度まで実施した付着力強度測定の結果、模擬海水環境下では、気中および蒸留水中に比べて付着力強度が低下することが分かった。原位置試験でレジンを注入する岩盤は地下水で満たされており、地下水中の溶存イオンや有機物がレジンの付着力強度に及ぼす可能性がある。そこで今年度は原位置の地下水を用いた付着力強度測定試験を行う。

##### (1) 測定方法

昨年度までと同様に、平行平板の岩盤模擬割れ目を作成し、割れ目にレジンを充填させ硬化させたのち、建研式引張試験器を用いて付着力強度を測定する。レジン材はEP-400M（ダイフレックス製）を使用し、蛍光剤としてRZ-Eフラビンイエロー（ブレニー技研製）を添加する。蛍光剤の添加量は、無添加、2%添加、10%添加の3条件である。養生条件は気中環境と水中環境の2条件とし、水中環境は蒸留水、瑞浪超深地層研究所の坑道内で採取した地下水、幌延深地層研究センターの坑道内で採取した地下水の3条件とする。表 4.3.2-2 には各地下水の海水に対するCl濃度を参考に載せる。また結果の比較のために、模擬海水養生下で蛍光剤を添加しない場合の測定も行う。花崗岩岩盤による模擬割れ目の作成およびレジン注入の概念図を図 4.3.2-18 に示す。

表 4.3.2-2 海水に対する地下水のCl濃度

	瑞浪地下水	幌延地下水
Cl濃度(mg/L)	65~128	6000
海水に対するCl濃度の割合(%)	0.34~0.66	31.01

(平成28年度「岩盤中物質移行特性評価技術の確証」表 5.3.6-2 より一部を抜粋)

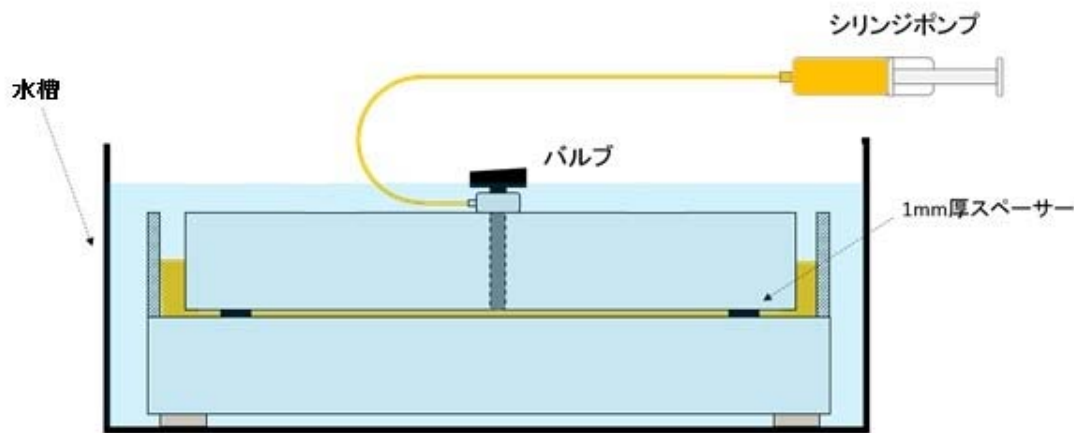


図 4.3.2-18 レジン注入の概念図

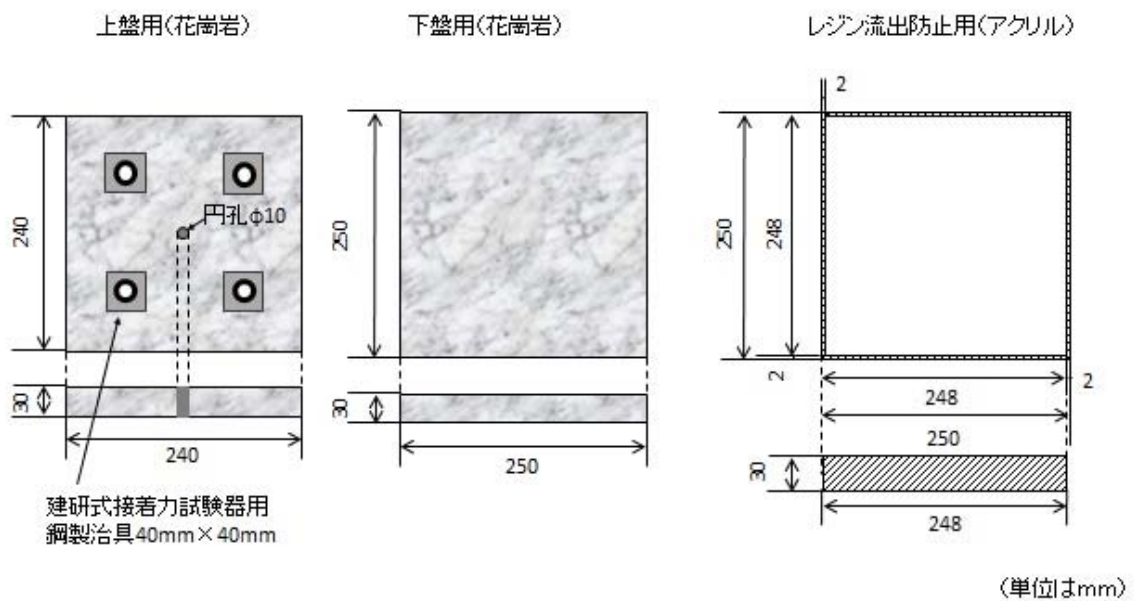


図 4.3.2-19 供試体寸法図

供試体の寸法を図 4.3.2-19 に記す。石材は岐阜県中津川産の蛭川花崗岩を使用する。下盤用の花崗岩盤 (25×25×3cmH、図 4.3.2-20) の四方に厚み 1.0mm のステンレス製ワッシャー (図 4.3.2-21) を接着剤 (アロンアルファ 201、東亜合成、図 4.3.2-22) を使用して接着する (図 4.3.2-23)。接着剤が硬化したのち、上盤用の花崗岩盤 (24×24×3cmH、図 4.3.2-24) を重ね合わせ接着剤を使用して固定し、幅 1.0mm の模擬割れ目を作成する (図 4.3.2-25)。上盤用の花崗岩盤の中心にはレジン注入孔を

設ける。レジン注入孔から注入したレジン材の供試体の端からの流出防止用として、 $24.8 \times 3 \times 0.2$ cmHの亚克力板を4枚、 $24.0 \times 24.0 \times 0.2$ cmHの亚克力板を1枚使用したレジン流出防止用土手を作成する(図 4.3.2-26)。亚克力製土手は下盤用花崗岩盤の下に設置し接着剤で固定する(図 4.3.2-27)。水中養生用の溶液は真空デジケータに入れて1週間程脱気する。脱気後の溶液を入れた真空デジケータに供試体を入れ(図 4.3.2-28)、さらに1週間脱気をしながら養生する(図 4.3.2-29)。その後、供試体を真空デジケータから養生用たらいに移動させる(図 4.3.2-30)。供試体上部にレジン注入用ミニチュアボールバルブ(AML11、OKD、図 4.3.2-31)を強力接着剤(ボンド クイックメンダー #16351、コニシ、図 4.3.2-32)を使用して接着する(図 4.3.2-33)。デジケータ内の溶液をたらいに移し、バルブの接着部に溶液が被らないように水位を調整する。レジン注入用のラインを接続(図 4.3.2-34)し、蒸発防止のためにビニールシートを被せ、一晚養生する(図 4.3.2-35)。模擬割れ目内のエア抜きを行ったのち、レジン材を4cc/minの流量で120cc注入した(図 4.3.2-36)。供試体の端からレジンが流出したのを確認したのち(図 4.3.2-37)、蒸発防止のためにビニールシートを被せ養生する。レジン硬化後に供試体を溶液から取り出し、引張試験用鋼製治具との接着面は研磨する。鋼製治具も供試体との接着面を研磨及び除油する(図 4.3.2-39)。図 4.3.2-40のように鋼製治具と供試体を固定し、強力接着剤(ボンド クイックメンダー #16351、コニシ)を使用して接着する(図 4.3.2-41)。

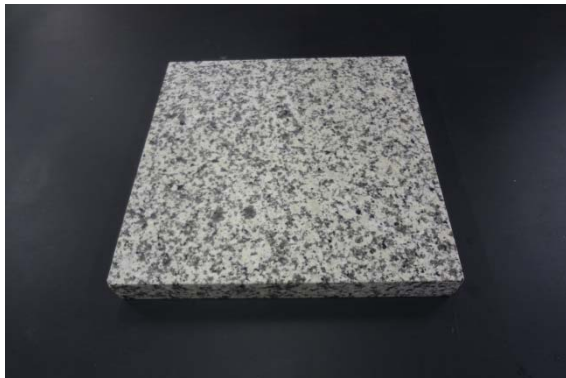


図 4.3.2-20 供試体下部



図 4.3.2-21 スペーサー用ワッシャー





図 4.3.2-22 供試体-ワッシャー間接着剤

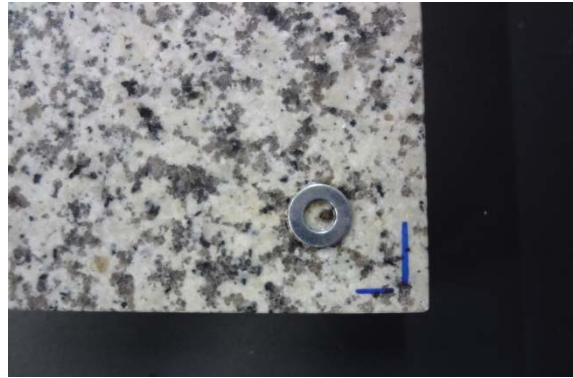


図 4.3.2-23 ワッシャーの接着

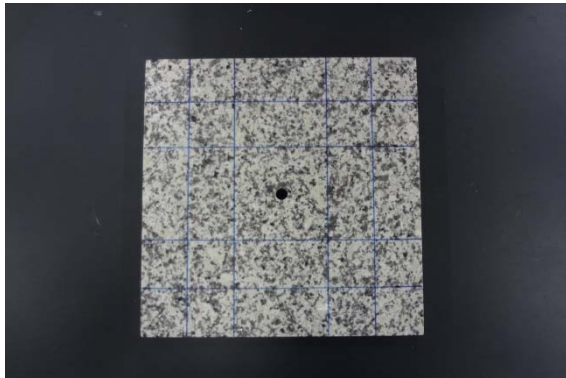


図 4.3.2-24 供試体上部



図 4.3.2-25 供試体上下の接着

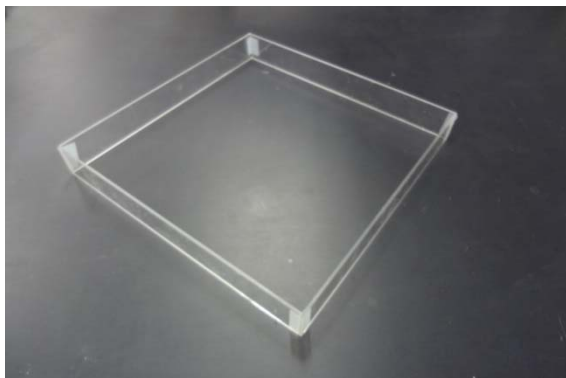


図 4.3.2-26 アクリル製土手



図 4.3.2-27 供試体土手の接着



図 4.3.2-28 供試体の水中養生の様子



図 4.3.2-29 供試体の脱気の様子

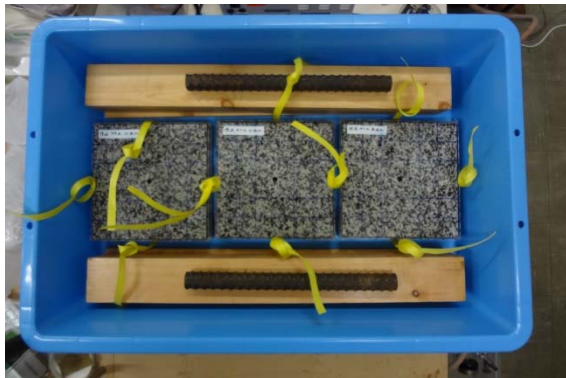


図 4.3.2-30 養生用たらい内での供試体設置



図 4.3.2-31 レジン注入用ボールバルブ



図 4.3.2-32 供試体-ボールバルブ間接着剤



図 4.3.2-33 バルブの接着

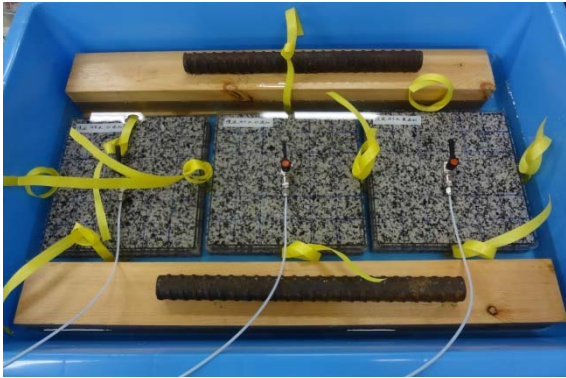


図 4.3.2-34 注入ラインの接続



図 4.3.2-35 レジン注入前養生の様子

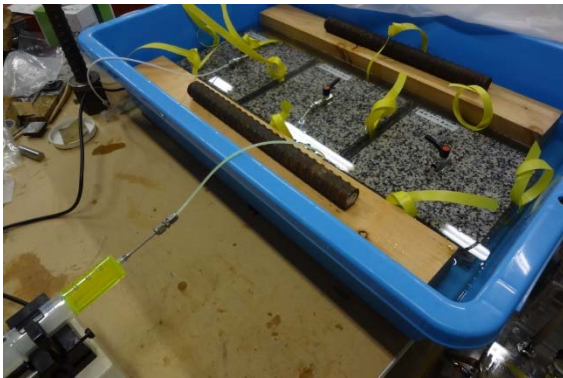


図 4.3.2-36 レジン注入の様子



図 4.3.2-37 レジン流出の様子



図 4.3.2-38 供試体上部



図 4.3.2-39 フィラーアタッチメント



図 4.3.2-40 アタッチメントの接着位置

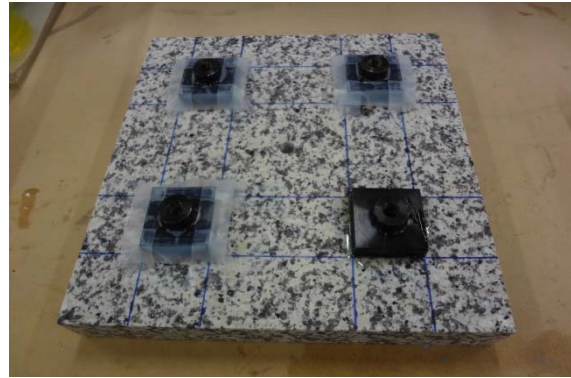


図 4.3.2-41 アタッチメントの接着

(2) 測定結果

測定結果を表 4.3.2-3 に示す。

表 4.3.2-3 各養生環境における付着力強度の測定結果

試験名	養生環境	R-ZE添 加量 (%)	各養生条件における4箇所の付着力強度								平均	標準偏差
			①		②		③		④			
			測定値 (N)	付着力強度 (N/mm <sup>2</sup> )	測定値 (N)	付着力強度 (N/mm <sup>2</sup> )	測定値 (N)	付着力強度 (N/mm <sup>2</sup> )	測定値 (N)	付着力強度 (N/mm <sup>2</sup> )		
1-1	蒸留水	0	8235	4.08	8853	4.84	8031	4.03	9380	4.58	4.38	0.34
1-2	蒸留水	2	8653	4.29	8277	4.24	7866	3.91	7953	4.10	4.14	0.15
1-3	蒸留水	10	8312	4.31	7492	3.75	8672	4.39	7139	3.49	3.98	0.38
2-1	瑞浪地下水	0	8033	3.79	5845	3.48	7615	3.95	6955	3.60	3.70	0.18
2-2	瑞浪地下水	2	8805	4.39	9016	4.96	7441	3.98	4075	1.90	3.81	1.15
2-3	瑞浪地下水	10	7825	4.25	7401	4.02	7743	4.05	7553	3.86	4.05	0.14
3-1	幌延地下水	0	8549	5.24	8450	5.45	8644	5.09	8200	5.10	5.22	0.15
3-2	幌延地下水	2	5610	3.49	7399	4.64	6764	4.13	5937	3.64	3.98	0.45
3-3	幌延地下水	10	5594	3.52	5183	3.39	7027	4.13	7082	4.29	3.83	0.39
4-1	気中	0	8889	5.58	7798	4.94	7446	4.69	8383	5.39	5.15	0.35
4-2	気中	2	6946	4.58	7351	5.12	6877	4.55	7524	5.18	4.86	0.29
4-3	気中	10	8922	5.39	8157	5.16	8111	4.78	7887	4.95	5.07	0.23
5-1	模擬海水	0	6405	4.11	5486	3.72	8456	5.13	7254	4.70	4.42	0.54

:アタッチメント周  
辺部切断
:上岩盤部切断
:レジン部切断
:下岩盤部切断
赤文字:エア等混入箇所

(3) 蛍光剤の添加量と付着力強度の関係

(a) 気中もしくは水中養生条件下における付着力強度

模擬割れ目にレジン注入後、気中養生した供試体および水中養生（蒸留水）した供試体の付着力強度を比較した（図 4.3.2-42）。その結果、蛍光剤の添加量にかかわらず、水中養生した場合の方が付着力強度は小さくなる傾向にあった。これは水中養生したことでレジン材が水分を吸収し、付着力を低下させたためだと考える（原賀，1987）。

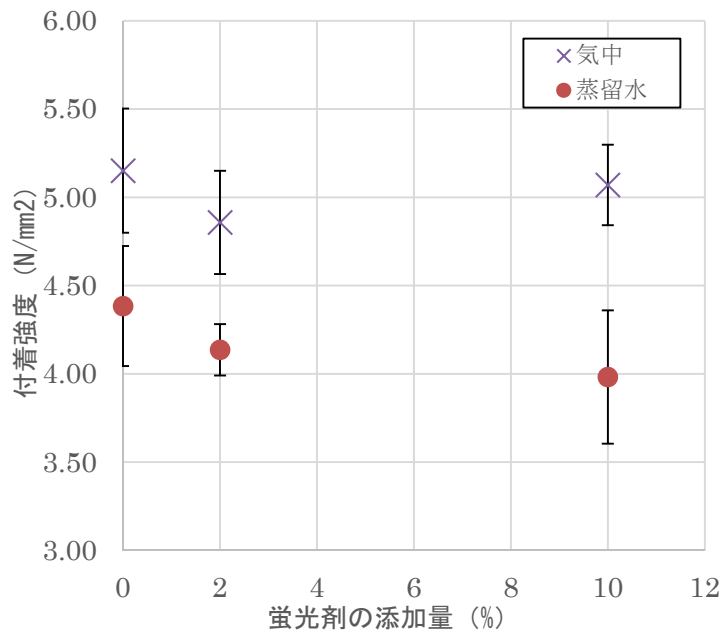


図 4.3.2-42 気中および蒸留水中における付着力強度測定結果

(b) 異なる塩濃度の溶液養生条件下における付着力強度

昨年度、水中養生条件下におけるレジンの塩濃度に対する影響を評価するため、異なる塩濃度の溶液中で養生したレジンの硬度測定を行ったところ、塩を含まない養生条件と比較して、硬度が低下する傾向が認められた。レジンの塗布面に対する付着力強度は硬化後のレジンの粘弾性に関係し（三刀, 2012, pp. 118）、付着強度試験時の接着剤もしくは被着剤の破壊様式にも影響を及ぼすと予想される。そこで異なる塩濃度の溶液養生条件下で、蛍光剤の添加量を変化させて付着強度試験を行った（図 4.3.2-43）その結果、各塩濃度の溶液条件下において、蛍光剤無添加の場合を除いて、蛍光剤の添加量が増えると、塩濃度の高いと付着強度が低下する傾向が見られた。なお、瑞浪地下水について測定値の平均の標準偏差を表示しているが、この場合蛍光剤を 2%添加した場合には大きな誤差が生じており、各溶液養生条件下においても、平均値には誤差が生じていることを言及しておく。

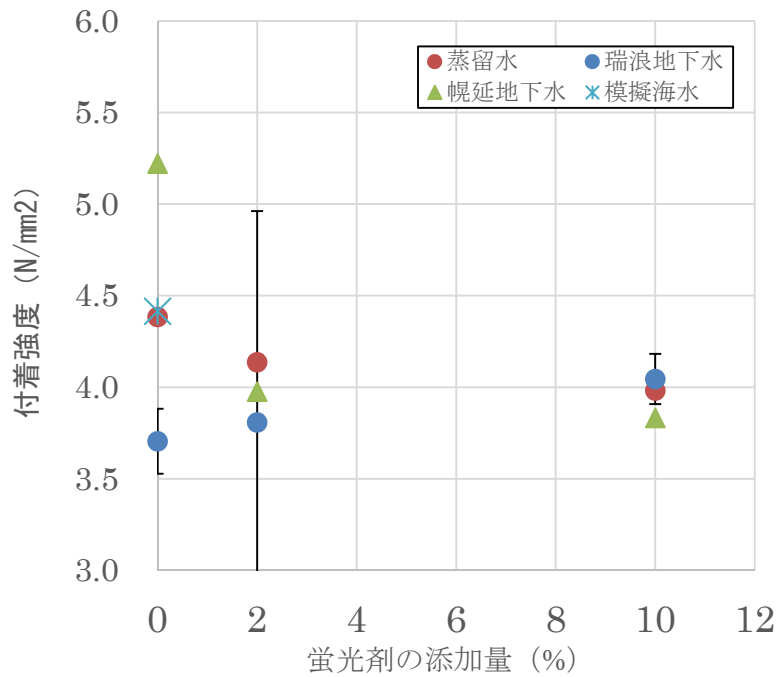


図 4.3.2-43 異なる塩濃度の水中養生における付着力強度測定結果

(c) 破壊様式と養生条件の関係

幌延地下水で養生した供試体による付着強度試験では、供試体周縁部においてレジンと石材の境界で破壊が起こった。これは接着剤と被着剤の間の破壊様式の中でも「界面破壊」と呼ばれるものである（図 4.3.2-44）界面破壊が確認された供試体について、破壊面の残留レジンを画像上で抽出し（図 4.3.2-45）、接着面に対する割合を算出した。その結果、レジンへの蛍光剤添加量が多くなるほど、レジン部分の割合が大きくなった（図 4.3.2-46）。また付着強度は蛍光剤の添加量が増すほど低下した。このことから、蛍光剤はレジンの岩盤に対する付着力を低下させる効果があることが分かった。

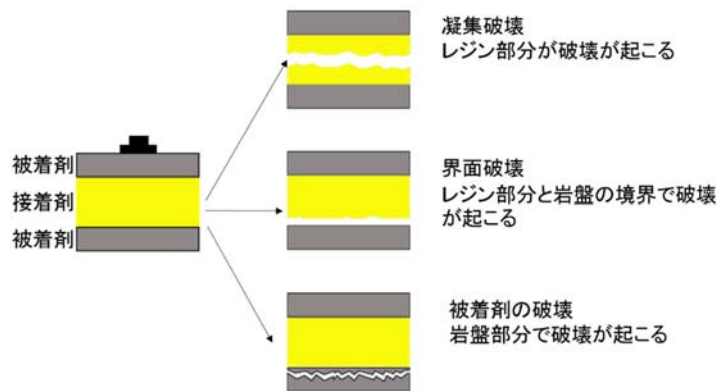


図 4.3.2-44 レジン-被着剤の破壊様式

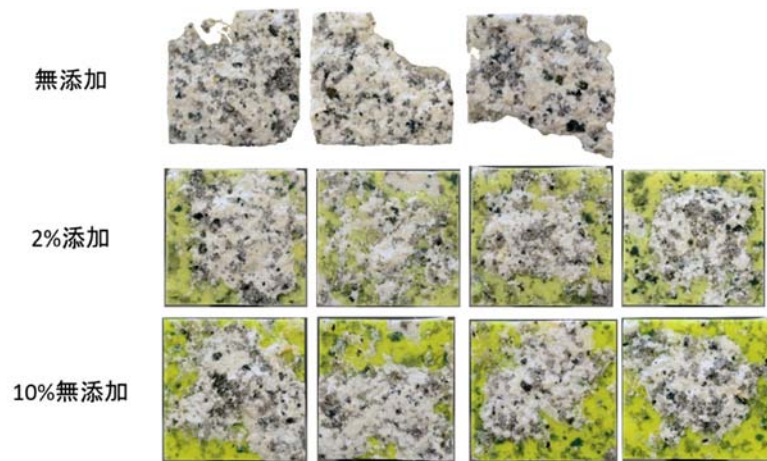


図 4.3.2-45 界面破壊が生じた場合の石材に対する残留レジンの分布（幌延地下水）

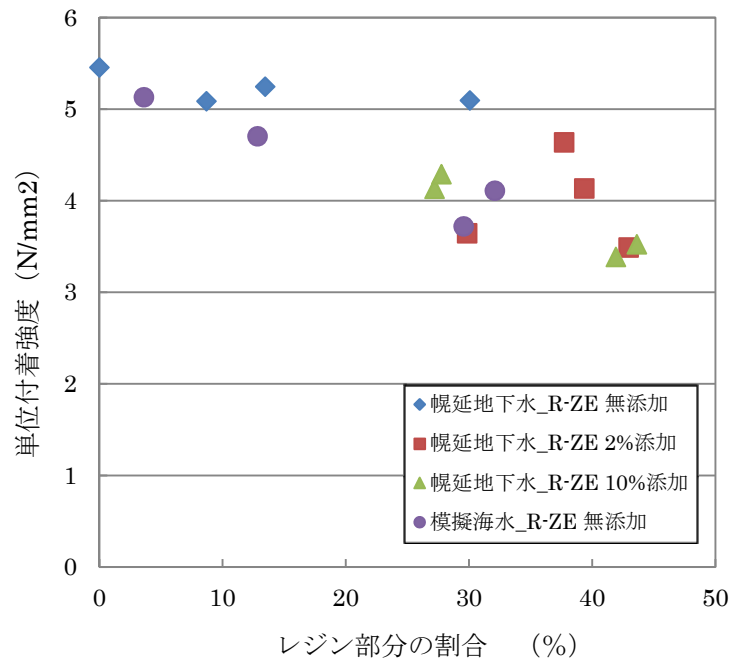


図 4.3.2-46 レジン部分の面積と単位付着強度の関係

#### 4.3.2.5 デュロメータによる硬度測定試験

昨年度行った蛍光剤の選定では、不分離性で、概ね 85℃まで温度上昇しても消光しない性能をもつことから、RZ-E フラビンイエロー（ブレニー技研製）を選定した。粘度測定試験で確認したように、RZ-E フラビンイエローは添加量を増やすことで粘度を低下させることが期待できるが、一方で硬度や付着強度の低下を引き起こす可能性がある。また原位置試験でレジンを注入する岩盤は地下水で満たされており、昨年度実施した硬度測定試験結果によれば、地下水中の塩（ナトリウムイオンおよび塩化物イオンに電離）が硬化後のレジンの強度を若干低下させることが分かった。そのほかの地下水中の溶存イオンおよび有機物も影響する可能性もある。そこで、本年度は昨年度と同様に、原位置の地下水環境下における硬度測定試験を実施することに加え、蛍光剤の添加量を変えた場合の硬度測定試験も行い、原位置試験を模擬した条件でのレジンの硬度変化を確認する。レジンと溶液の混合後のレジンの硬度の経時変化を日本工業規格「プラスチックのデュロメータ硬さ試験方法」（JIS K 7215-1986）に準拠し測定した。レジン材は EP-400M を使用し、蛍光剤 RZ-E フラビンイエローを無添加、2%添加、10%添加の 3 条件で測定を行った。レジンを浸漬させる溶液は、瑞浪超深地層研究所の坑道内で採取した地下水とする。



図 4.3.2-47 供試体寸法図



供試体は蛭川花崗岩で製作した内径 15.0cm×15.0cm の岩石容器を用意する (図 4.3.2-47)。幅 75.0cm ×奥行 45.5cm×高さ 17.5cm のテナ内には岩石容器を 3 個設置し (図 4.3.2-48)、瑞浪超深地層研究所の坑道内で採取した地下水で養生する。地下水の蒸発防止のために、図 4.3.2-49 のようにビニールシートでテナボックスを覆う。室温を 25°C に設定した室内にて 1 週間養生する。蛍光剤 RZ-E フラビンイエローを無添加、2%、10% 添加した EP-400M レジン 243cc をそれぞれ岩石容器に流し込み (図 4.3.2-50)、硬度測定用の供試体とした (図 4.3.2-51、図 4.3.2-52、図 4.3.2-53)。室温 25°C の室内にて、溶液の混合 60 時間後から 24 時間おきにデュロメータにて、針貫入試験を実施した。計測箇所は図 4.3.2-54 のように 5 箇所とし、それぞれ 2 回ずつ測定し平均値を求めた。デュロメータはこれまでの結果からタイプ D (図 4.3.2-55、図 4.3.2-56) のみ測定する。また、タイプ D の重錘は JIS K 7215-1986 によると約 50N (約 5kgf) であることが望ましいと記載されていたが、実際に 50N の重錘を用いて計測してみたところ、計測初期の硬度を測定するには重すぎて計測が出来ないため、本試験では終始 30N (約 3kgf) の重錘 (図 4.3.2-57) を用いて測定を行った (図 4.3.2-58)。各条件における 5 箇所の測定結果をそれぞれ図 4.3.2-59、図 4.3.2-60、図 4.3.2-61 に、また 5 箇所の平均値を図 4.3.2-62 に示す。レジンのみで硬化した場合、80 前後の値を示した。一方、フラビンイエロー蛍光剤を添加した場合、2% 添加では 78 前後、10% 添加では 77 前後の値を示した。このことから蛍光剤の添加量を増やすと、レジンの硬化時間に関わらず、レジンの硬度は低下する傾向があることが分かった。



図 4.3.2-48 養生前の岩石容器



図 4.3.2-49 地下水による養生の様子

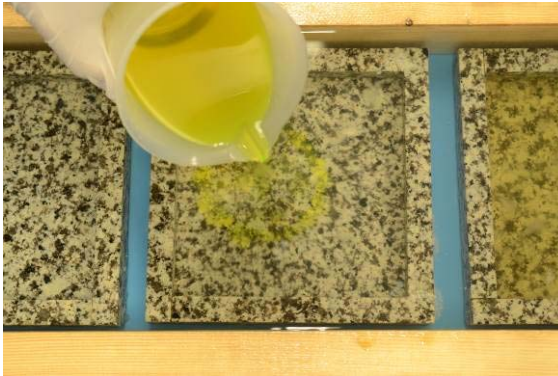


図 4.3.2-50 レジン注入の様子

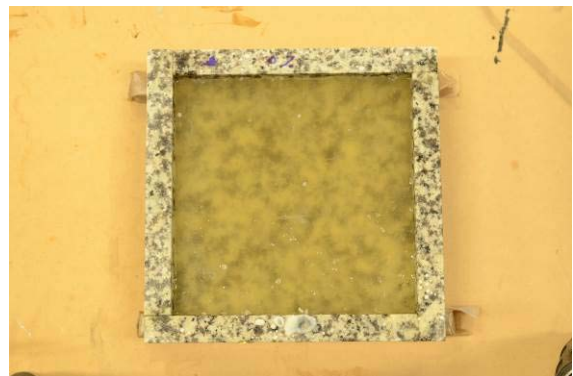


図 4.3.2-51 フラビンイエロー無添加

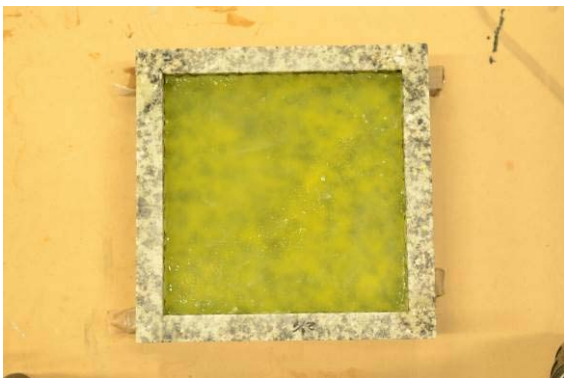


図 4.3.2-52 フラビンイエロー2%添加



図 4.3.2-53 フラビンイエロー10%添加

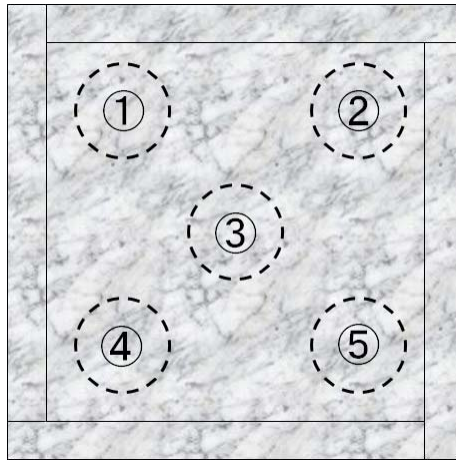


図 4.3.2-54 測定箇所



図 4.3.2-55 デュロメータ タイプ D



図 4.3.2-56 デュロメータ タイプ D 測定部



図 4.3.2-57 重錘 (30N)



図 4.3.2-58 測定の様子

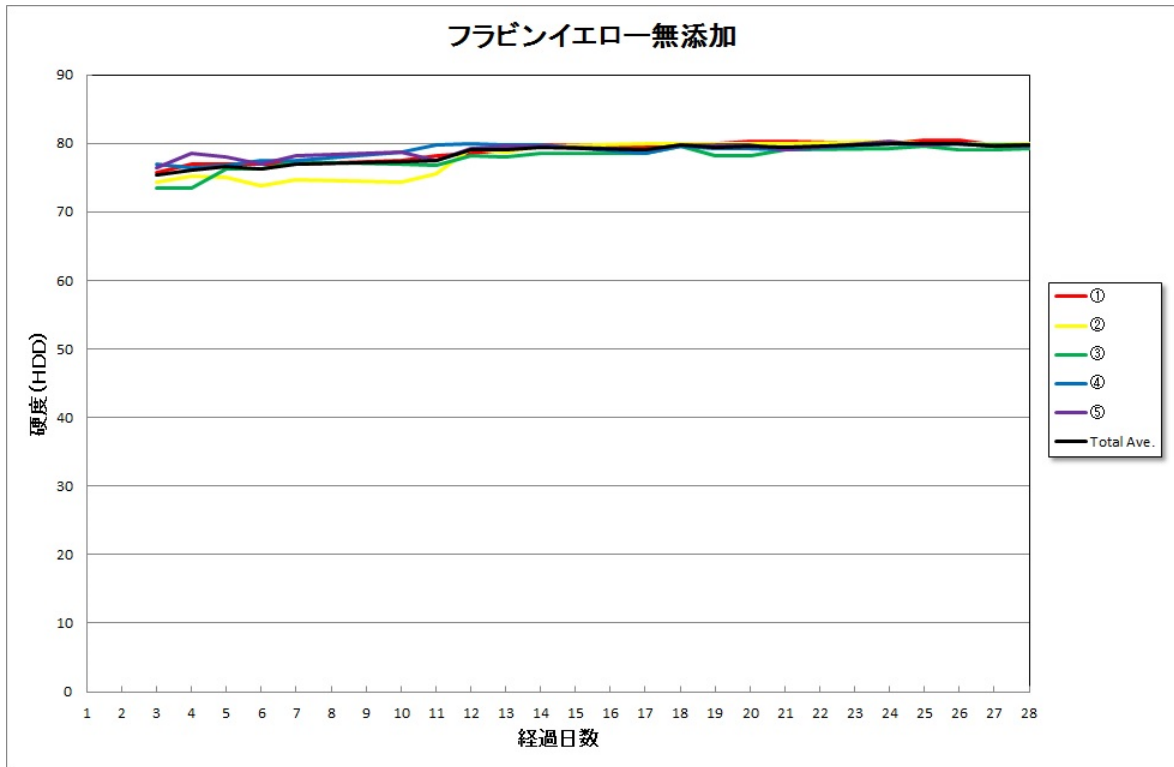


図 4.3.2-59 硬度測定結果(フラビンイエロー無添加)

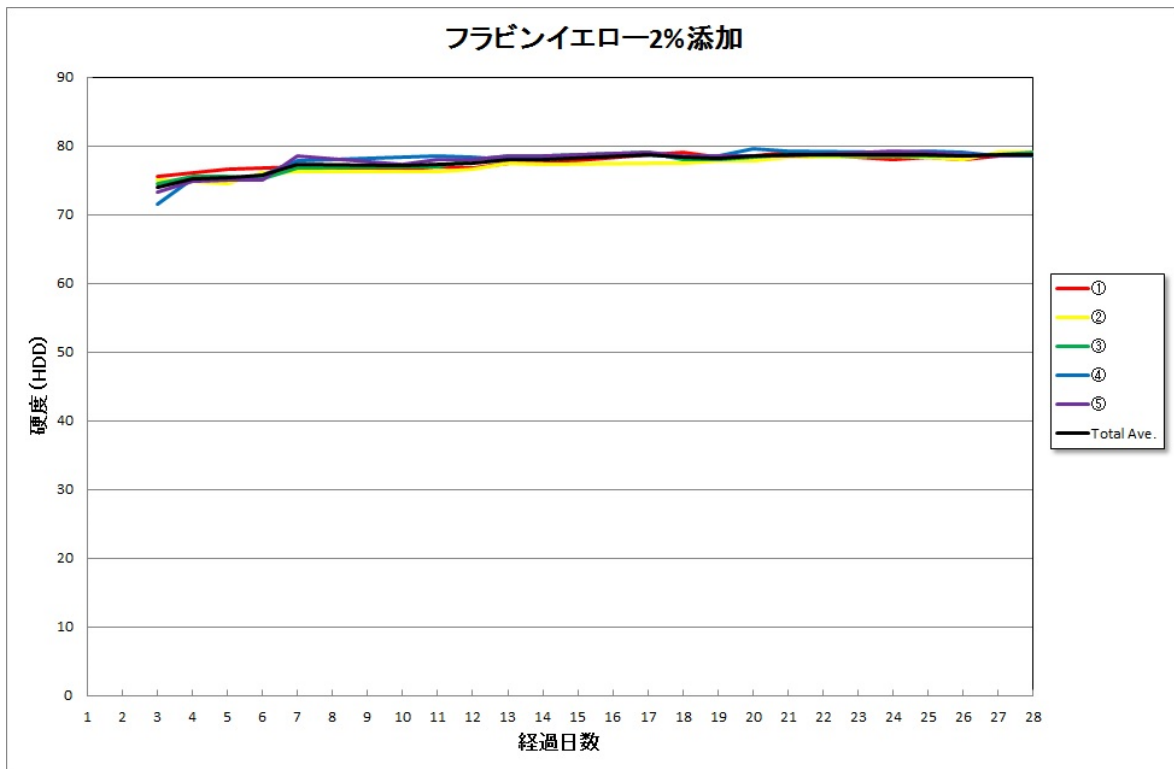


図 4.3.2-60 硬度測定結果(フラビンイエロー 2%添加)

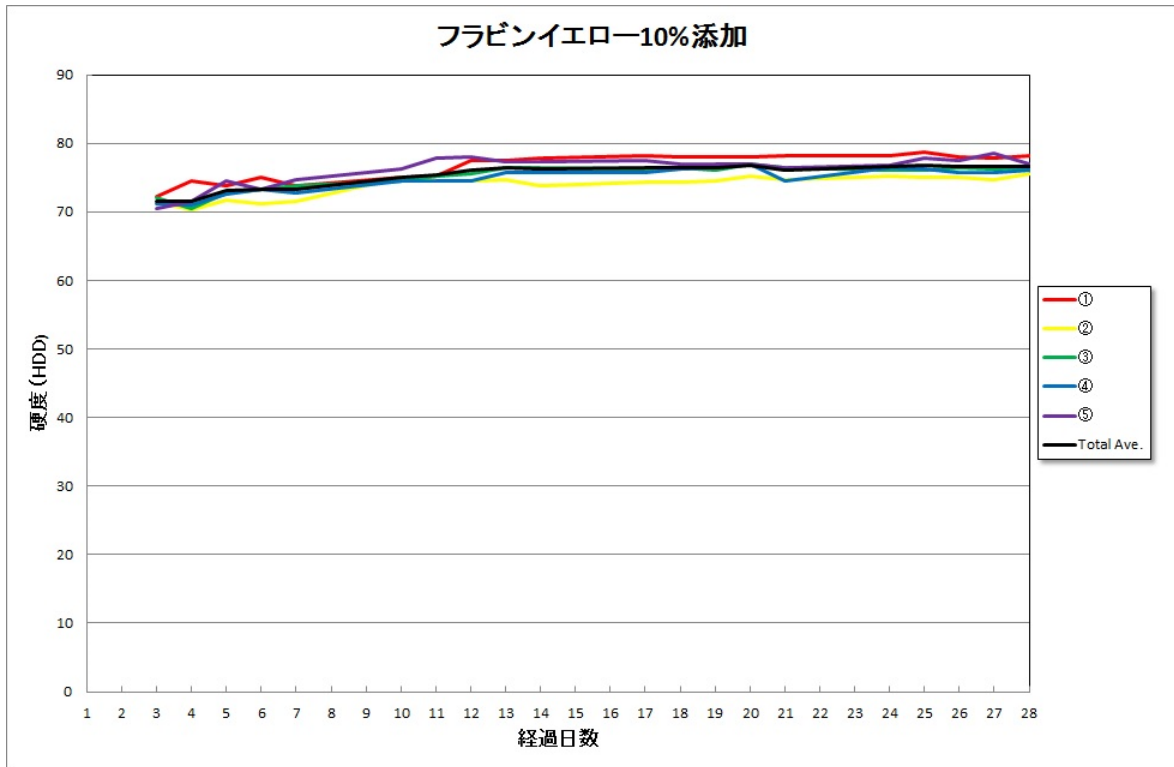


図 4.3.2-61 硬度測定結果(フラビンイエロー 10%添加)

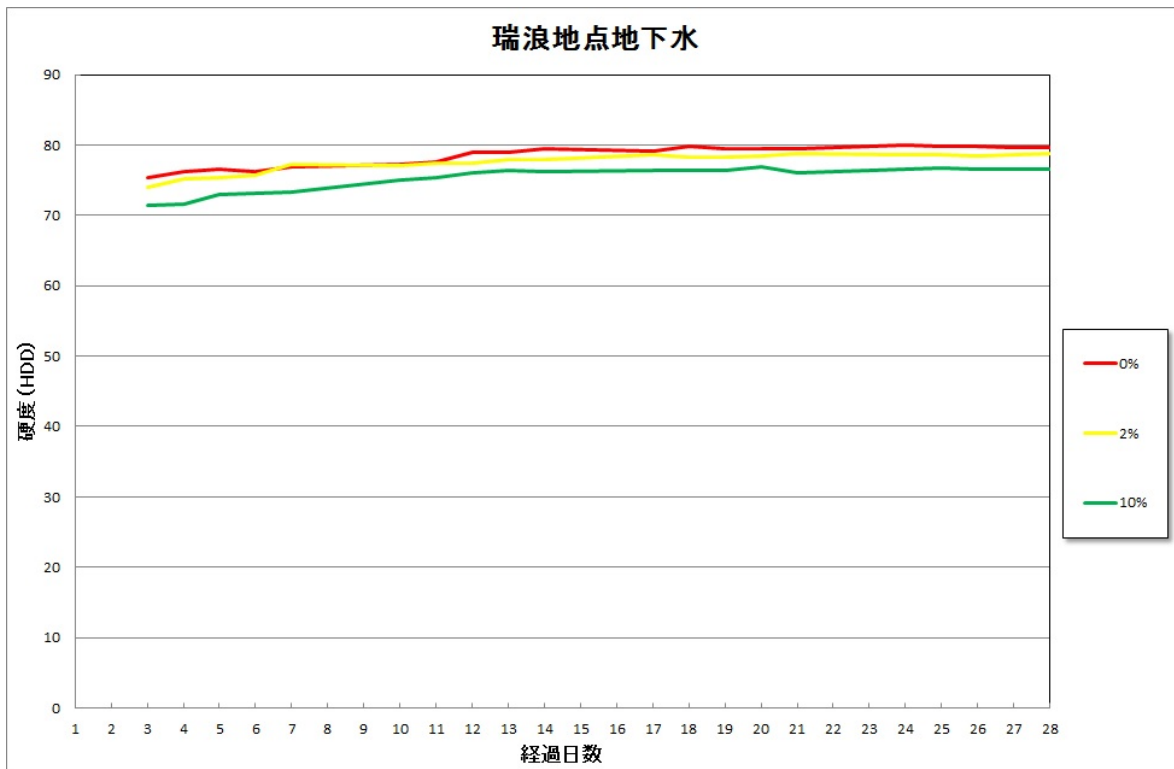


図 4.3.2-62 硬度測定結果(平均値)

#### 4.3.2.6 レジン反応熱測定試験

原位置レジン注入試験の際には、レジンは既存ボーリング孔内に設置したステンレスパイプを通り、パッカー間のボリューム（デッドボリューム）を満たしたのちに岩盤中の割れ目へ注入される。図 4.3.2-63 は原位置レジン注入試験時のパッカー間の概念図である。デッドボリュームは厚み 5mm 程度の円筒状であり、注入試験中には常にレジンで満たされている状態であると予想される。デッドボリュームを満たすレジンの反応熱を測定し、仮にレジンの温度が上昇する場合にその可使時間を把握しておくことは、レジン注入時の単位時間当たりの流量やレジン注入時間の目安を得るために重要である。本年度は、岩石ブロックにパッカー間のデッドボリュームを模擬する間隙を作成してレジンを充填し、レジン反応熱の経時変化を測定した。

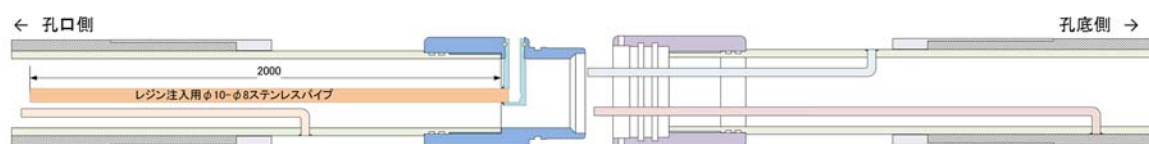


図 4.3.2-63 レジン注入用配管機能を持つ部材の概念図

岩盤および既存ボーリング孔を模擬した岩石ブロックおよびステンレス管の寸法と配置を図 4.3.2-64 に示す。岩石ブロックは 200mm 立方体の苗木花崗岩である。岩石ブロックの中央に直径 86mm、長さ 150mm の円柱状の孔を設け、岩石表面は #600 で研磨する。ステンレス管は厚み 3mm、内径 76mm、長さ 200mm とし、ステンレス管の内側には図 4.3.2-65 で示すように外径 10mm、内径 8mm のステンレス製パイプおよび外径 6mm、内径 4mm のステンレス製パイプを溶接し、それぞれレジン注入用パイプおよびレジン排出用パイプ（リターンパイプ）とする。岩石ブロック孔壁とステンレス管の間にデッドボリュームを模擬した幅 5mm の間隙をつくるために、ステンレス管の外側には管下端と下端より 150mm 上部の 2 個所にビニールテープを巻いた（図 4.3.2-65）。岩石ブロック孔内に設置の際には、ステンレス管の底部は接着剤（クイックメンダー #16351、コニシ製）を塗布して岩石と接着し、さらにステンレス管内部への水の侵入を防ぐため、ステンレス管に巻いたビニールテープ部分にシリコンシーラントを適量塗ったのちに設置を行う。接着材が硬化した後に、ステンレス管上部と岩石を水中ボンド（#16456、コニシ製）で接着する（図 4.3.2-66）。デッドボリューム内に充填するレジンの温度は、図 4.3.2-68 に示すようにステンレス管の内側に T 型熱電対（モールド型表面センサー MF-0-T、東亜電器製）を 4 箇所貼り付け、間接的に測定した。各熱電対の導線はステンレス管内部を通して管上端に向けて配線し、データロガー（TDS-530、東京測器研究所製）に接続する。

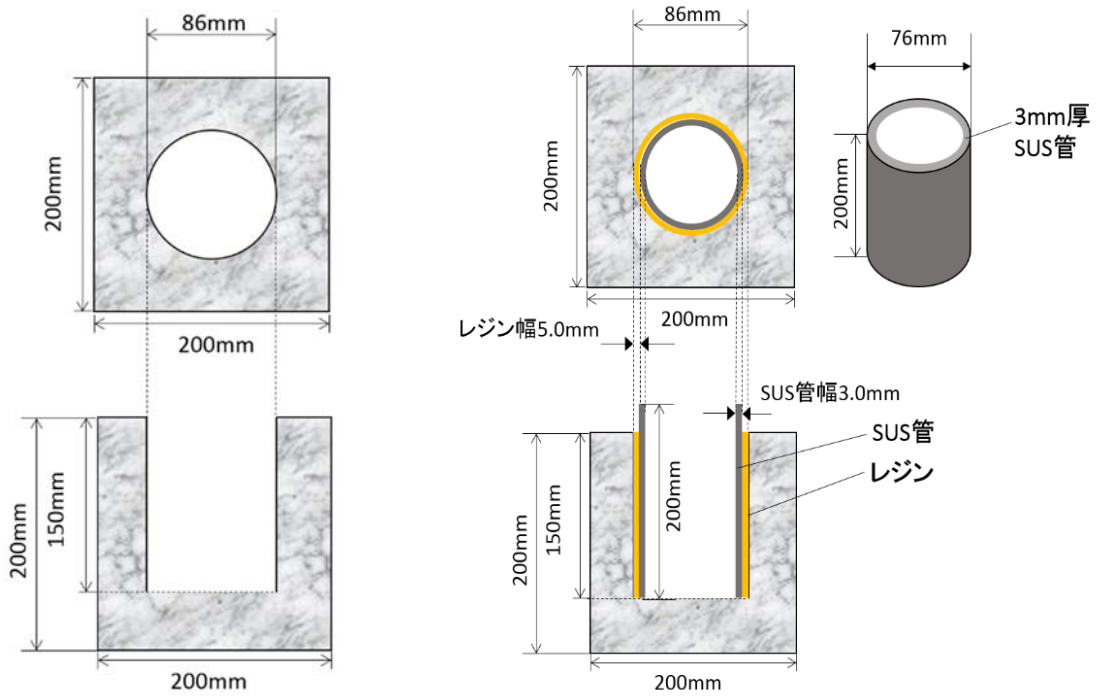


図 4.3.2-64 岩石ブロックと SUS 管の寸法および配置図

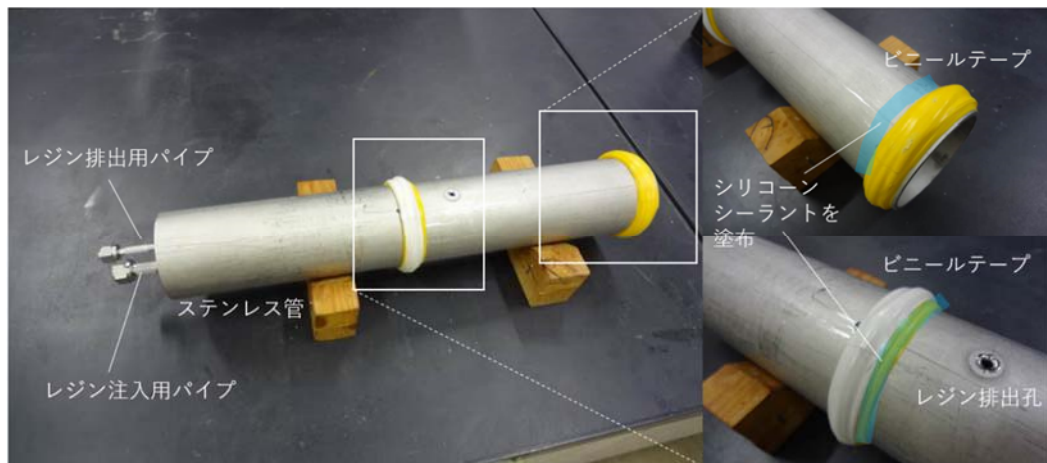


図 4.3.2-65 ステンレス管内のレジン注入用および排出用パイプの設置



図 4.3.2-66 ボンド接着後の様子



図 4.3.2-67 台座



図 4.3.2-68 熱電対の設置

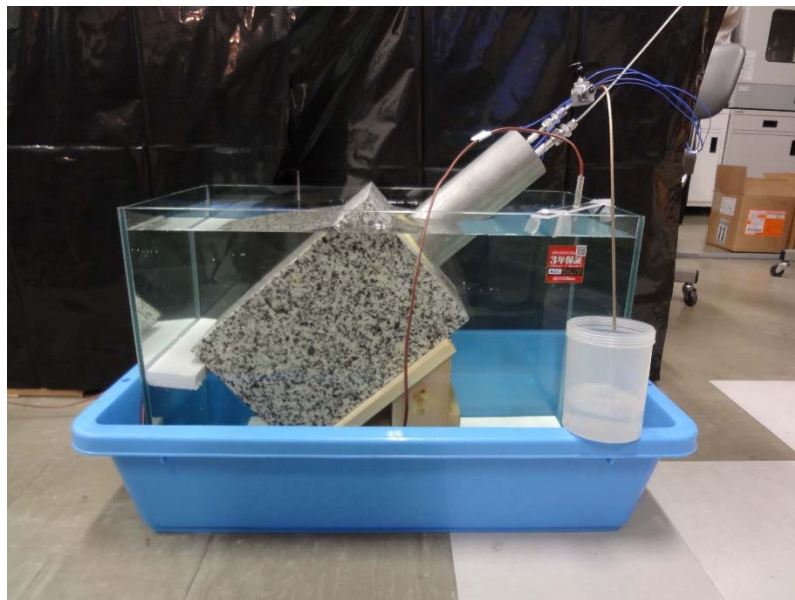


図 4.3.2-69 レジン注入ラインと排出ラインの配置

供試体はガラス水槽の中に入れ、供試体が傾くように角度をつけた木製の台座（図 4.3.2-67）の上に設置し、ステンレス管の内部に浸入しない程度の高さまで水道水を注いで浸かるようにする（）。レ



ジンの注入にはシリンジポンプ (Model. 44, HARVARD APPARATUS) を使い、注入ラインに圧力計 (PGM-10KH、共和電業) を設置し、レジン注入中の圧力を測定する。注入および排出ラインにはボールバルブ (FUBV-915-3.2、フジキン) を接続し、シリンジの交換時に開閉する。試験の様子を図 4.3.2-70 に示す。

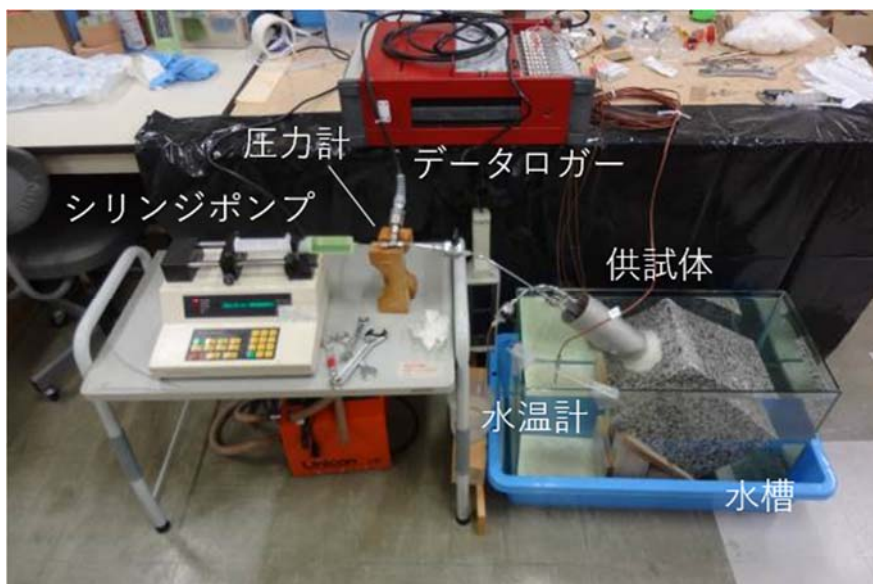


図 4.3.2-70 レジン反応熱測定試験の様子

レジンには EP-400M 一般用 (日本シーカ製) を使用し、蛍光剤 (R-ZE フラビンイエロー、ブレニー技研製) を主剤に対して 2% 添加する。注入流量は 10cc/min とする。データロガーで孔内に取り付けた熱電対の温度を記録する。ステンレス管の内側に設置した熱電対によるレジン反応熱の測定結果を図 4.3.2-71 に示す。また測定したレジンの温度から水温を差し引いた温度の値を図 4.3.2-72 に示す。測定結果より、デッドボリューム内の温度は室内温度約 24.5°C の環境下において最大でも 1.5°C までしか上昇しなかった。本試験は原位置レジン注入試験におけるパッカー間のデッドボリュームの実寸模型で実施したが、この程度のわずかな温度上昇があれば、デッドボリューム内におけるレジンの発熱によるパッカーの熱変形等の懸念はないと考えられる。

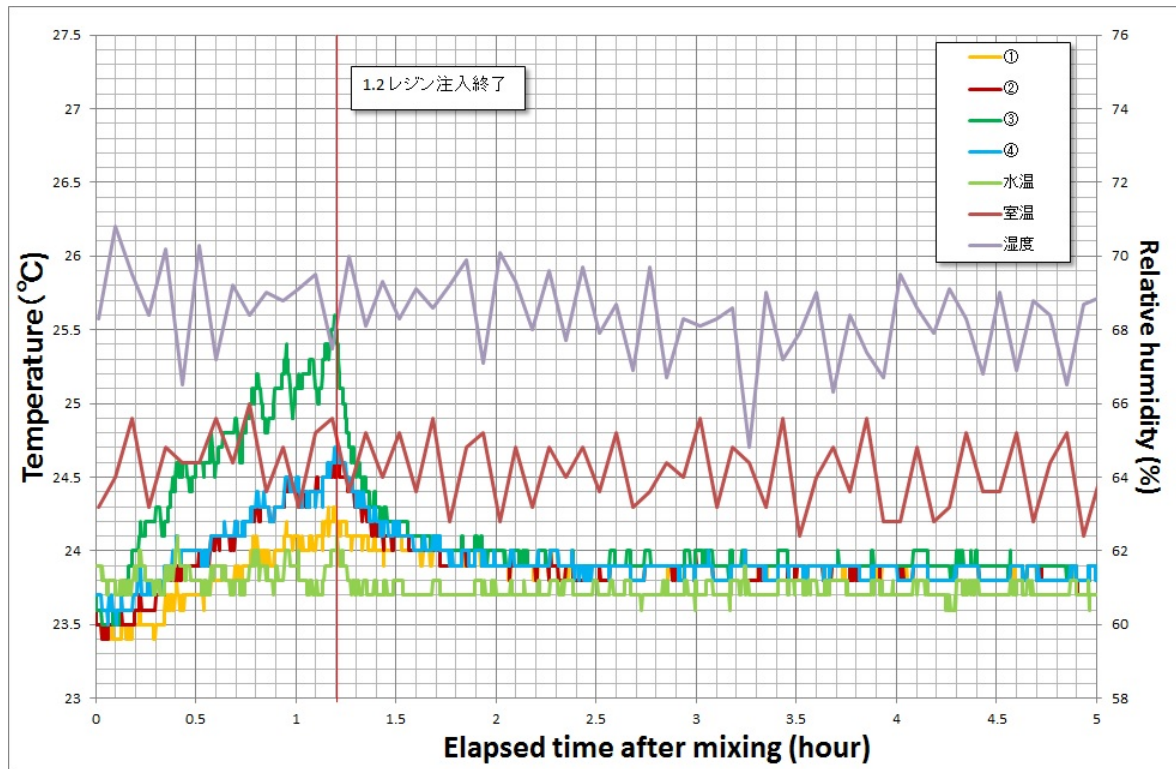


図 4.3.2-71 レジン反応熱測定結果

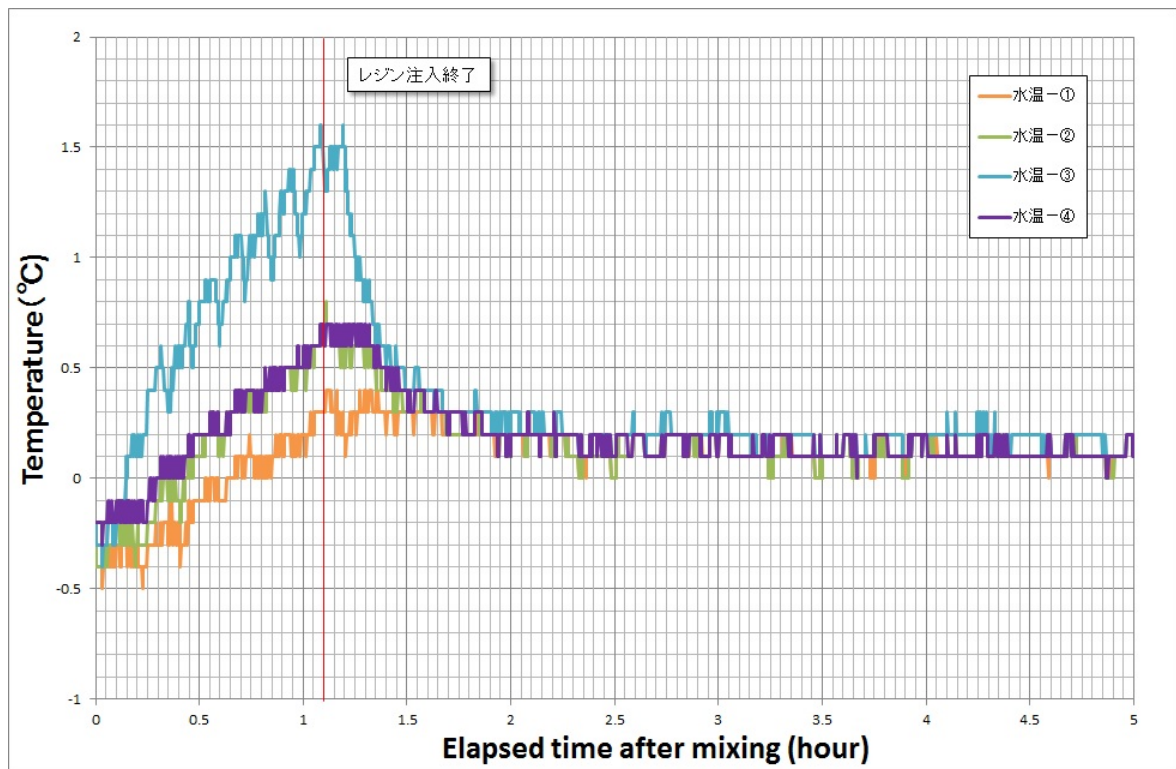


図 4.3.2-72 注入レジンと水温の温度差

#### 参考文献

小椋一郎 (2001) 、エポキシ樹脂の化学構造と特性の関係、DIC Technical Review No. 7

杉田創、松長烈、柳沢教雄、駒井武 (2006) 、フルオレセインの熱分解挙動に関する一次反応速度式による解析、資源と素材 Vol. 122 p. 101-106

日本工業規格「プラスチックのデュロメータ硬さ試験方法」 (JIS K 7215-1986)

エバーボンド EP-400M 株式会社ダイフレックス 製品カタログ (2016年6月版-2刷)

原賀康介 (1987) 、接着部における吸水率および接着強度の分布とその経時変化、日本接着協会誌 Vol. 23 No. 5

三刀基郷 (2012) 、図解でなっとく！接着の基礎と理論、日刊工業新聞社

### 4.3.3 原位置レジンを注入試験

#### 4.3.3.1 はじめに

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

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

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

本年度は、JAEA 瑞浪超深地層研究所の深度 300m の適用性試験場において原位置試験を実施し、国内の地質環境に対する本技術の適用性を実証した。

#### 4.3.3.2 原位置レジン注入試験装置

昨年度開発したレジン注入試験装置は、無脈動・定量移送が可能な2台のモノポンプとスタティックミキサーを組合せたものである（図 4.3.3-1）。

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

また、本装置のモノポンプの直上には液体を貯蔵できるタンクが備え付けられており、主剤用のモノポンプには20 Lのタンクが、硬化剤用のモノポンプには10 Lのタンクが取り付けられており、最大で約26 L (28.6 kg) の連続吐出が可能である。この量は割れ目幅を0.2 mmと仮定した場合、半径6 m程度の範囲を充填できる量に相当する。したがって、試験中にレジンを補充することなく（補充のために装置を停止することなく）、効率的な注入が可能である。

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

装置から出力される信号の記録は、通信ケーブルで制御盤と間隙水圧モニタリングシステムとを接続して行われる。

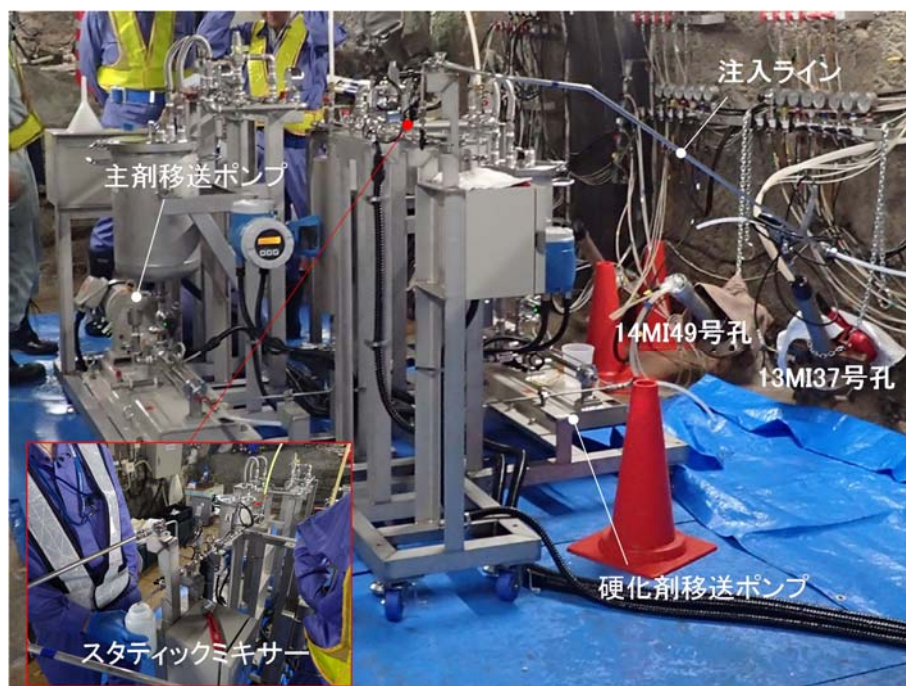


図 4.3.3-1 レジン注入試験装置の設置状況写真



図 4.3.3-2 レジン注入試験装置の制御盤とモニタリングシステムへの接続

#### 4.3.3.3 注入材と蛍光剤

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

本試験では、これらの性能を満足するレジンとして「エバーボンド EP-400M（ダイフレックス・日本シーカ）」を用いた。このレジンの粘性は水の約 130 倍（超低粘度形）であり、可使用時間（ポットライフ）は約 80 分である。湿潤面でも硬化するため水に対してある程度の耐性を持つ。

本試験では、蛍光剤として蛍光顔料を反応性希釈剤に添加した液状のもの（R-ZE ブラビンイエロー、ブレニー技研）を用い、主剤に対して 2%の蛍光剤を添加した。

この蛍光剤は主剤に混合しやすく、水と接触した際にレジンから蛍光剤が分離しないことが特徴である。なお、原位置試験の作業効率を向上させるために、添加作業は原位置試験前に電力中央研究所が所有するグローブボックス内で行った。

#### 4.3.3.4 パッカーシステムの改良

注入するレジン粘性は水の約 130 倍であり、既存のパッカーシステムに取り付けられているステンレスパイプ（内径：4 mm）を介してレジン注入した場合、レジンのパイプ内流動に伴う圧力損失は無視できなくなる。そこで、この圧力損失を軽減するために、注入ラインを内径 8 mm のステンレスパイプに取り替えた。内径 8 mm のステンレスパイプを既存のパッカーシステムに取り付けるために、図 4.3.3-3 に示す改良を行った。また、主剤と硬化剤との反応過程での発熱対策として、図 4.3.3-4 に示すようにビニールテープを巻いて注入区間のデッドボリュームを軽減させた（約 1,050cc→約 680cc）。

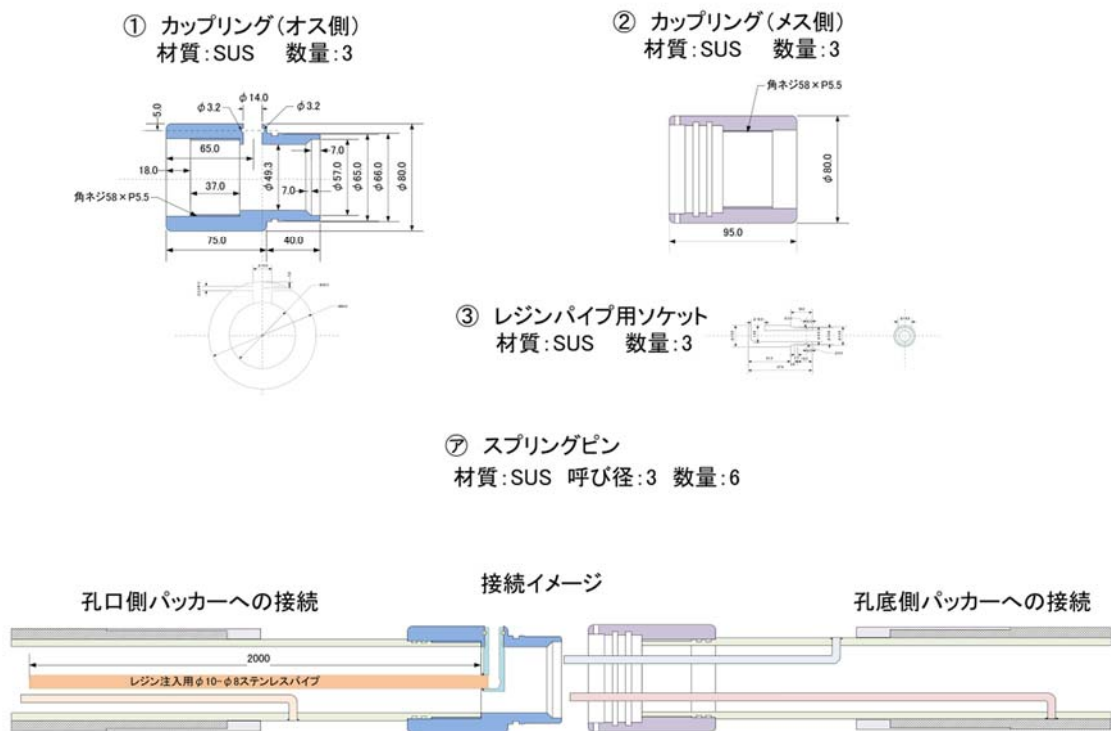


図 4.3.3-3 パッカーシステムの改良概念図

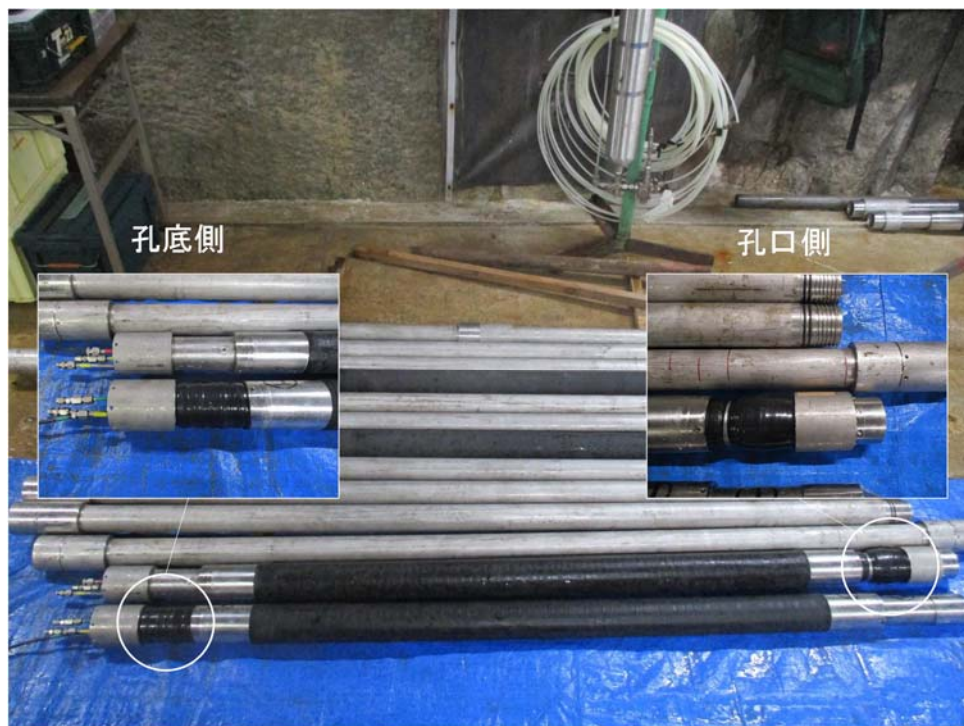


図 4.3.3-4 レジン注入区間のデッドボリュームの軽減対策

#### 4.3.3.5 原位置レジン注入試験の手順

原位置レジン注入試験は、一般に以下の手順で実施される。

- ① イソプロピルアルコールの注入
- ② 割れ目表面の濡れ性を Resin-Wet にするため一晩程度養生
- ③ 割れ目内のイソプロピルアルコールを地下水で置換
- ④ レジン注入
- ⑤ レジンが固化するまで約1ヶ月程度養生
- ⑥ レジン充填状況確認のための確認ボーリング掘削

ここに、レジン注入に先立ちイソプロピルアルコールを注入する理由は、イソプロピルアルコールのSP値がエポキシ樹脂と近いため、割れ目表面をイソプロピルアルコールで濡らすことで接着性の向上を図ることができると言われているためである。スイスのグリムゼル試験場やスウェーデンのエスポ地下研究所で1990年台に実施されたレジン注入試験でもレジン注入前にイソプロピルアルコールを注入している。

本試験では、瑞浪超深地層研究所でイソプロピルアルコールの使用許可が下りないこと、接着の阻害要因である塩分が深度300mボーリング横坑では低いことなどの理由から、レジン注入に先立つイソプロピルアルコール注入は実施していない。

レジン注入区間は、過去にトレーサー試験を行った実績のある区間から選定した。レジン注入の順



序は表 4.3.3-1 に示すとおりであるが、1 回目の注入は 13MI37 号孔の区間深度で実施し、2 回目以降は水理地質学的に連通性が確認された 12MI31 号孔の 2 区間からレジンを注入した。

表 4.3.3-1 レジン注入区間

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

#### 4.3.3.6 レジン注入試験結果

##### (1) レジン注入試験 1 回目

13MI37 号孔の Int-2 区間から 90 g/min の流量で注入した。その際、吐出圧力が 2.55 MPa (ゲージ圧) に達した場合、装置の制御機能により 25.3 g/min (装置の最小吐出流量) に切り替わるように設定した。

試験結果を図 4.3.3-5 に示す。注入開始から約 87 分後に設定した圧力に達したため、流量が自動的に 25.3 g/min に切り替わった。その後も 25.3 g/min で注入を続けたが、吐出圧力の上昇が緩やかであったため (より広範囲にレジンを注入させるため)、一旦ポンプを停止し、吐出流量を 50 g/min、上限圧力到達後の流量を 40 g/min に設定して再度注入を開始した。注入再開から約 50 分後に上限圧力に達したため、流量が自動的に 40 g/min に切り替わった。その後は坑道内に滞在可能な時刻まで連続注入を行った (約 40 分間)。

昨年度実施された高粘性流体注入試験と同様に 12MI30 号孔と 12MI31 号孔の観測区間で応答が確認された。なお、13MI37 号孔の Int-2 からのレジジン注入量は 15.7 kg (14.3 L) であった。

##### (2) レジン注入試験 2 回目

2 回目は、12MI31 号孔の Int-3 区間から 40 g/min の流量で注入した。その際、吐出圧力が 2.48 MPa (ゲージ圧) に達した場合、装置の制御機能により 25.3 g/min に切り替わるように設定した。さらに、吐出圧力が 3.00 MPa (ゲージ圧) に達した場合は装置が停止するように設定した。

試験結果を図 4.3.3-6 に示す。注入開始から約 1 分後に設定した圧力に達したため、流量が自動的に 25.3 g/min に切り替わった。その後、約 17 分後に、吐出圧力が 3.00 MPa (ゲージ圧) に達したため装置が自動的に停止した。12MI31 号孔の Int-3 からのレジジン注入量は 0.479 kg (0.435 L) であった。

(3) レジン注入試験 3 回目

3 回目の注入は、12MI31 号孔の Int-2 区間から 40 g/min の流量で開始した。その際、吐出圧力が 2.48 MPa (ゲージ圧) に達した場合、装置の制御機能により 25.3 g/min (装置の最小吐出流量) に切り替わるように設定した。さらに、吐出圧力が 3.00 MPa (ゲージ圧) に達した場合は装置が停止するように設定した。

注入開始とともに設定した圧力に達したため、装置が自動的に停止した。したがって、12MI31 号孔の Int-2 からのレジン注入量は 0 kg (0 L) であった。

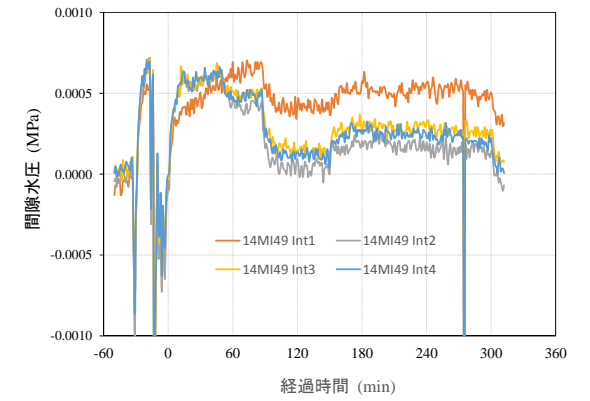
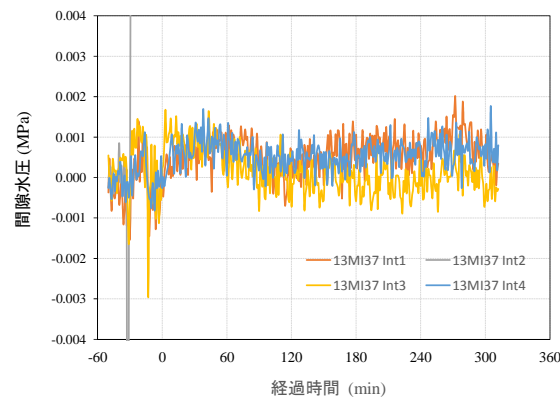
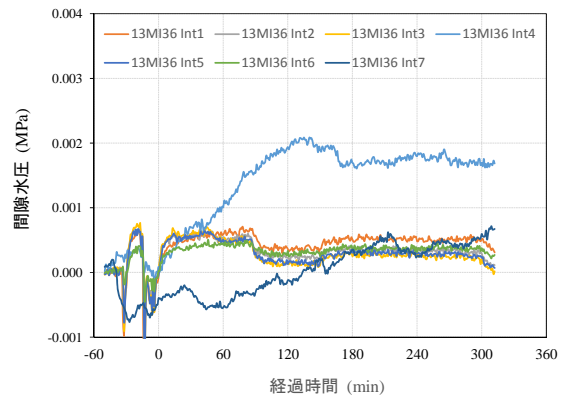
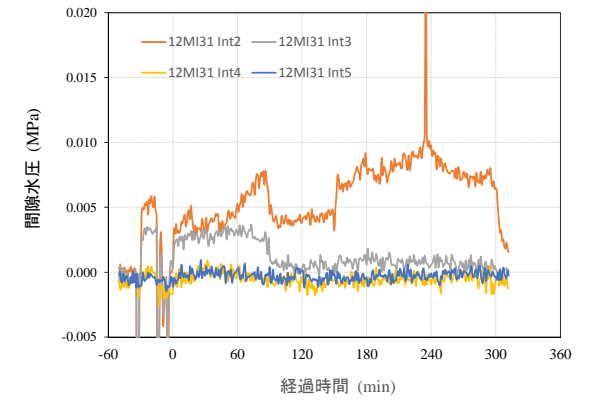
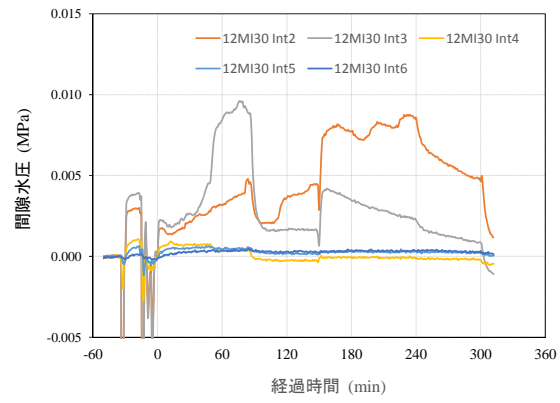
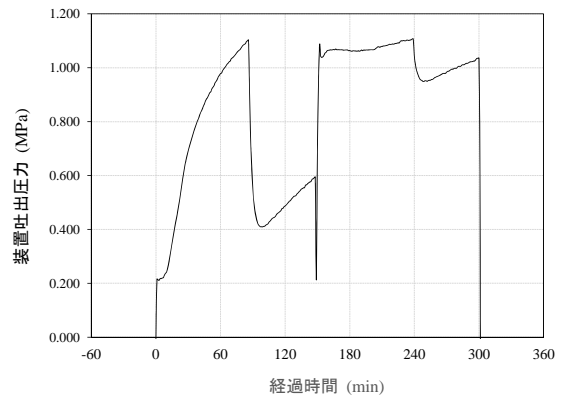


図 4.3.3-5 レジン注入試験 1 回目の結果 (13MI37 号孔 Int-2 から注入)

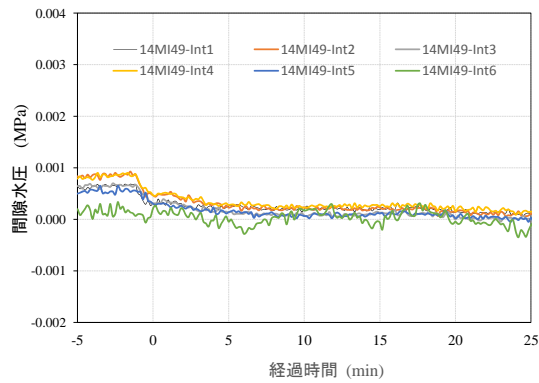
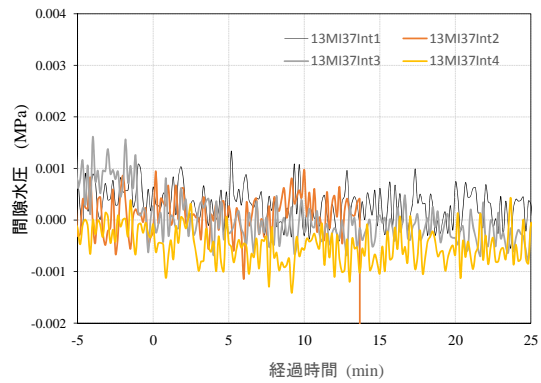
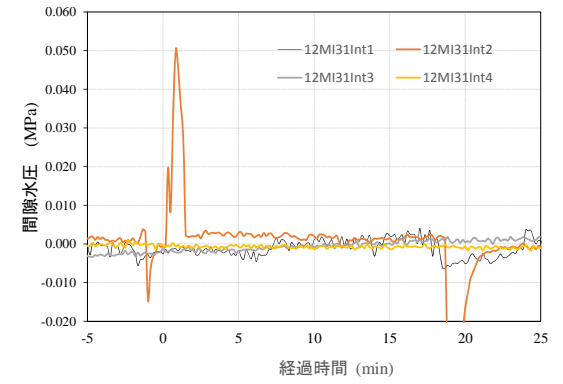
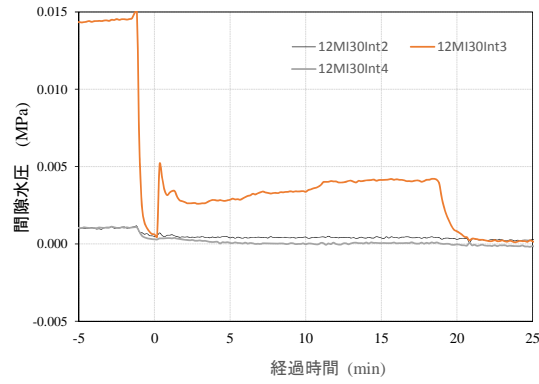
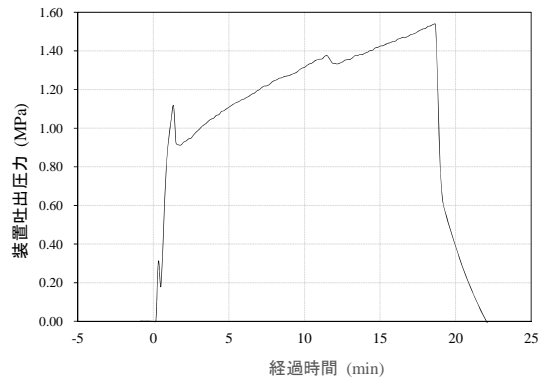


図 4.3.3-6 レジン注入試験 2 回目の結果 (12MI31 号孔 Int-3 から注入)

#### 4.3.4 確認ボーリング調査

##### 4.3.4.1 ボーリング掘削の概要

ボーリング掘削及び検層は、レジンを注入した対象割れ目（12MI31 号孔 int2、int3、13MI37 号孔 int2）を含む岩石コアサンプルの採取、割れ目へのレジン充填状況の孔内観察を目的に実施した。以下に作業フロー（図 4.3.4-1）を示す。

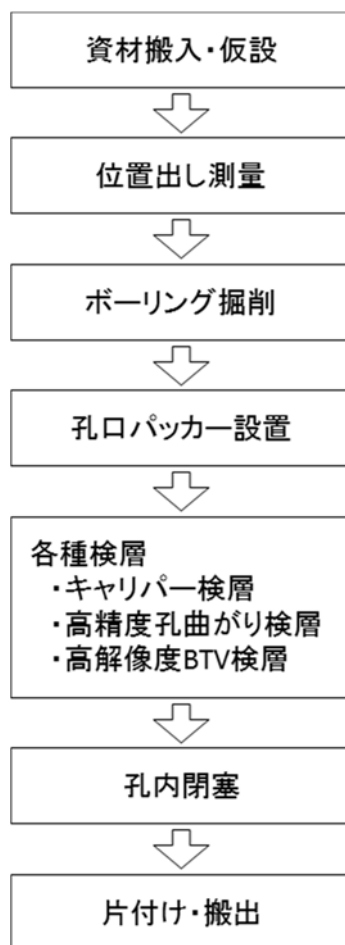


図 4.3.4-1 ボーリング掘削及び検層の作業フロー

ボーリング掘削孔径はオールコアのφ116mm、掘削長はレジン充填区間を確保できる 25m 程度とし、レジン充填コアの採取を主目的とした。孔口位置及び掘削方向は、ボーリングマシンの据付や作業スペースが確保されていること、既存孔の孔跡と干渉しないことを前提とし、14MI49 号孔～13MI37 号孔間で 1 箇所、12MI31 号孔～12MI30 号孔間で 2 箇所（図 4.3.4-2）を選定した。

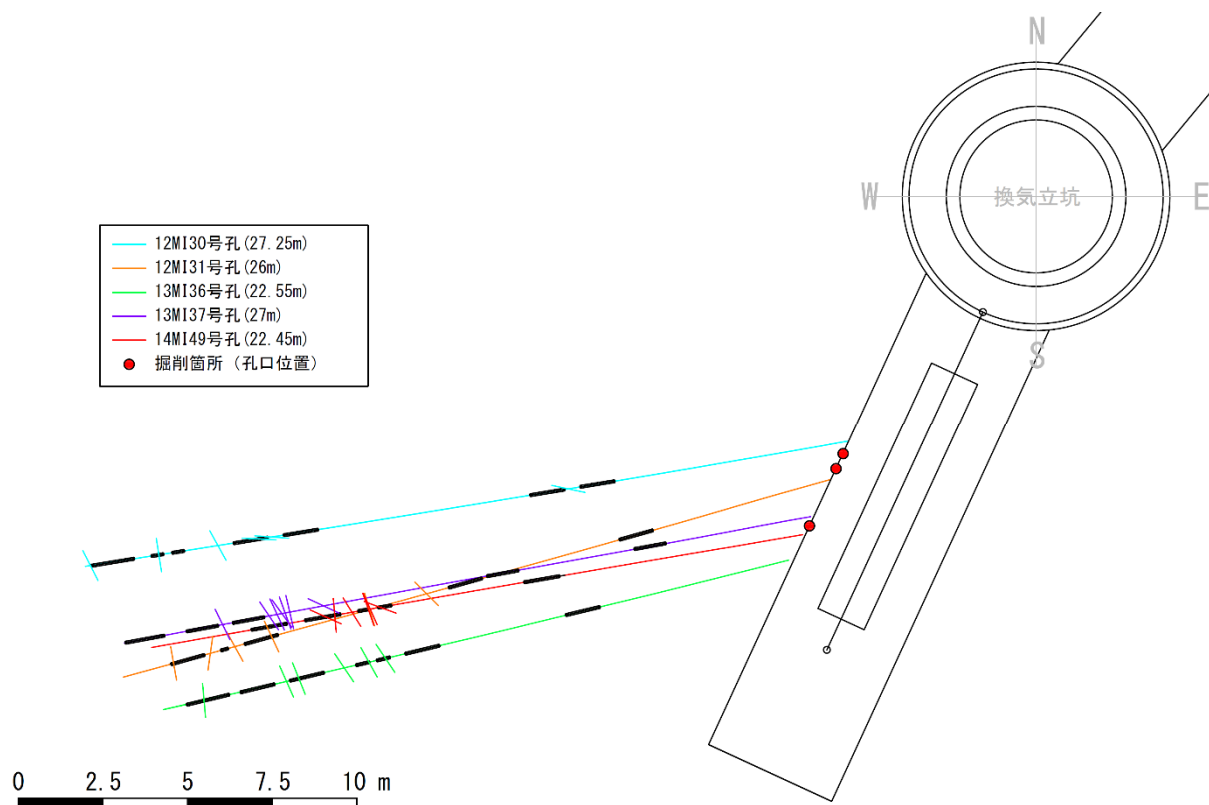


図 4.3.4-2 ボーリング掘削予定箇所

(a) 資機材の搬入・仮設

ボーリング掘削で使用する主要資機材の一覧表を表 4.3.4-1 に示す。

ボーリング掘削用の資機材の搬入は、①前日にスcaffoldingを深度 300m まで上昇、②車両で立坑の地上櫓内まで運搬、③キブルで深度 300m 孔内へ荷降ろしの手順で行った。また地上および孔内の水平運搬は、ハンドパレットや台車を用いた。図 4.3.4-3 にボーリング資機材の仮設状況を示す。

ボーリングの掘削水は、露岩部からの湧水を貯水ローリータンクに溜め、蛍光材（トレーサー）を添加した。貯めた掘削水はロッド経由で孔内へ送水し、掘削スライムを含むリターン水は孔口の釜場経由で泥水分離タンクに排水した。内部に仕切り版のある泥水分離タンクでは、上流側の水槽内で粒子の大きいスライムを沈殿させ、下流側の水槽で上澄み水をポンプで吸引し、掘削水として再利用した。孔内の湧水で掘削水が増加した場合は、泥水分離タンクから余剰掘削水を掘削排水貯水槽に貯水させ、翌日に上澄み水を坑道設備内のピットへ排水した。

(b) ボーリングの孔口測量

BM (Bench Mark) 点 (図 4.3.4-4) を基準に光波測量によって、ボーリング位置座標を計測した。

表 4.3.4-1 ボーリング作業で使用する主要資機材一覧

品名	型式	数量	単位	寸法 mm (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(7.5kW)
ボーリングマシンポンプ	ヤンマー動噴 TA-1000	1	台	400×600×1500	40 kg	最大圧力3.5MPa
ボーリングマシン ポンプ用モーター	ヤンマー動噴 TA-1000用	1	台	350×400×350	40 kg	所要動力 3.5kW
グラウトポンプ	東邦地下工機 BG-5C	1	台	715×600×1563	205 kg	最大圧力2.4MPa モーター含(3.5kW)
グラウトポンプ用モーター	東邦地下工機 BG-5C用	1	台	350×400×350	40 kg	所要動力 3.5kW
タンク類	泥水用タンク	1	台	600×600×1220		
タンク類	清水タンク	1	台	760×870×1070		
タンク類	排水タンク	1	台	760×870×1070		
タンク類	半ドラム缶	1	台	H250		
組立式貯水槽	0.9m <sup>3</sup>	5	個	φ1200×0.8	40 kg	
コア箱	1箱/30分	10	箱	1000×300		
H鋼	150H × 3.0m	2	本	30kg/m	180 kg	ボーリングマシン架台用
H鋼	150H × 1.0m	4	本	30kg/m	120 kg	ボーリングマシン架台用
ロッド類	NQ ロッド × 2.0m	16	本	8kg/m	256 kg	掘削用
ロッド類	NQ ロッド × 1.0m	2	本	8kg/m	16 kg	掘削用
ダブルコアチューブ	φ116mm	1	本	L=1.68m	7 kg	掘削用 インナーチューブ*1.0m
モンケン		1	個		63 kg	
足場パイプ	L=3.5m	4	本	2.5kg/m	35 kg	
足場パイプ	L=3m	12	本	2.5kg/m	90 kg	
足場パイプ	L=2m	10	本	2.5kg/m	50 kg	
足場パイプ	L=1.0m以下	23	本	2.5kg/m	58 kg	
クランプ	φ48.6mm (直交、自在)	80	個	0.5kg/個	40 kg	
水中ポンプ	1吋 100V用	2	台		20 kg	リース
ホース類	サクシオンライン等	1	本	インチ等	40 kg	サニーホース30m フロート用3m
道具類・吊り具類	スィベル、ケーシングバンド、 パイプレンチ・滑車	1	式		150 kg	

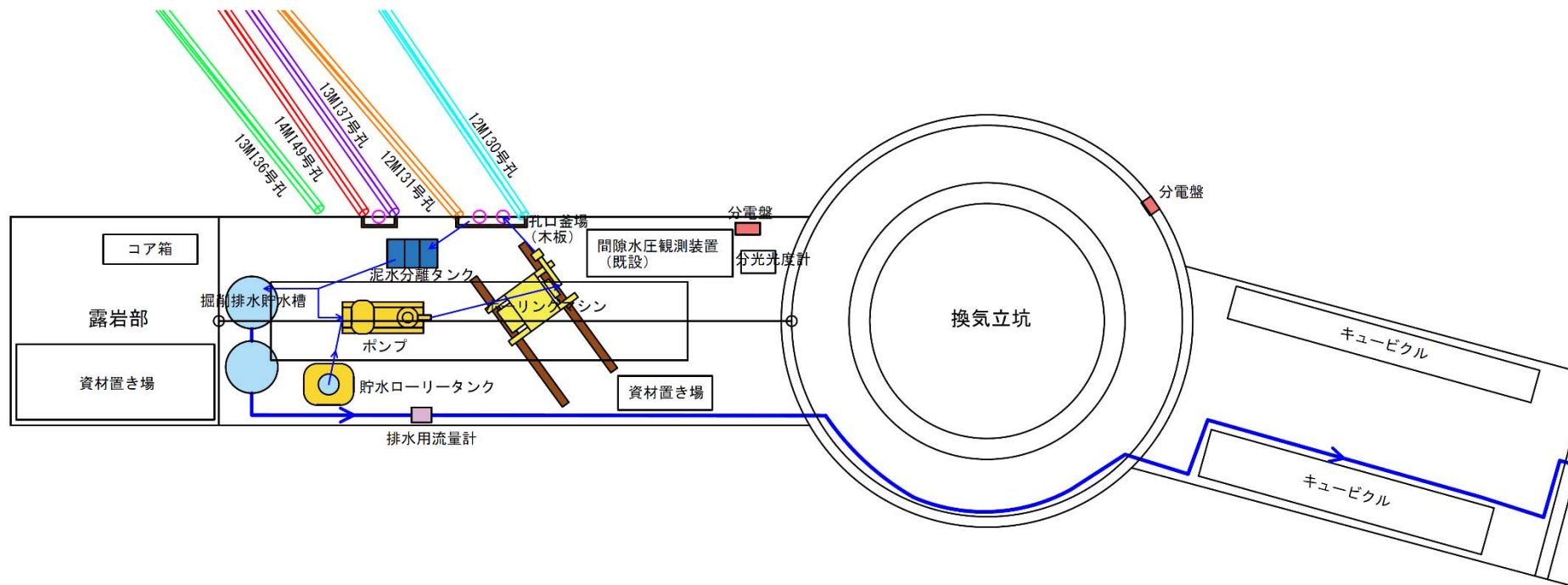


図 4. 3. 4-3 ボーリング資機材の仮設状況



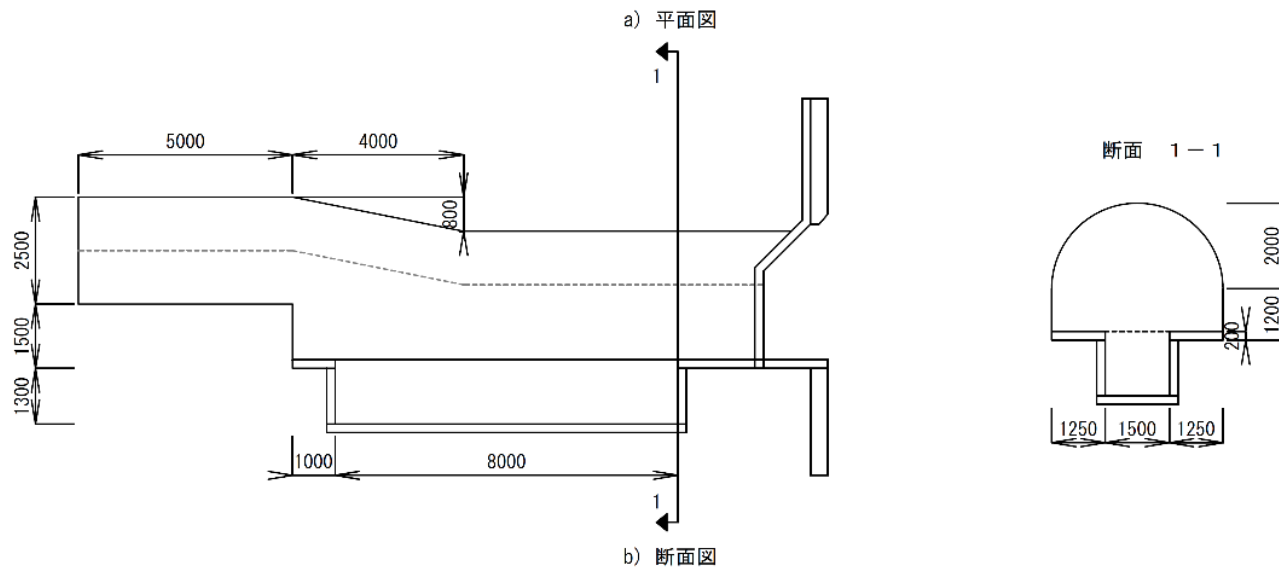
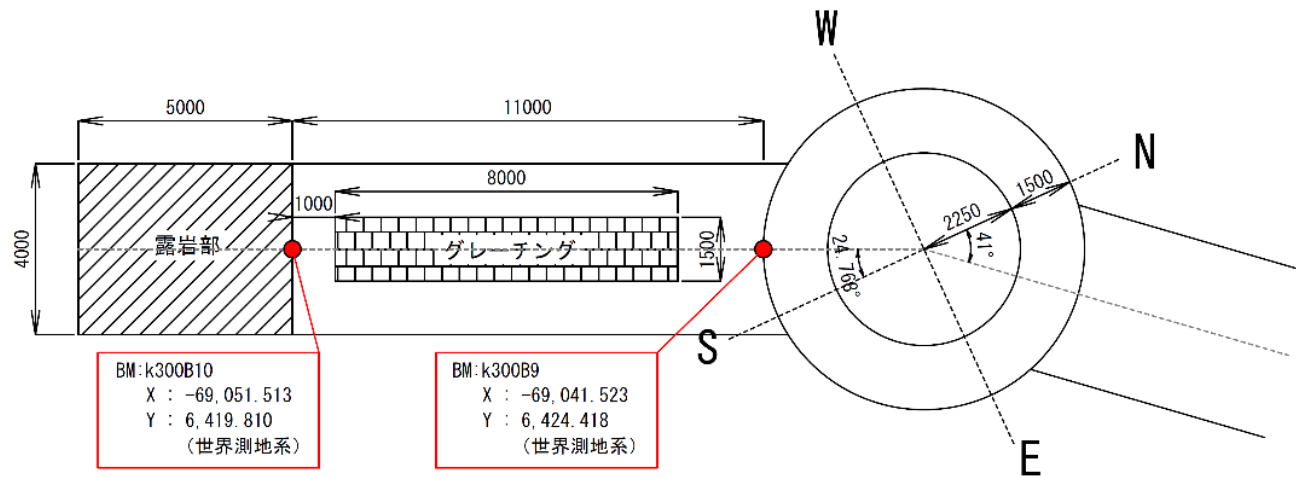


図 4.3.4-4 深度 300m ボーリング横坑構造図

### (c) 掘削方法

掘削は二重管普通工法（外径 116mm、コア径：95mm）で、坑内湧水を用いた清水掘削とした。掘削編成は、ビット（外径 116mm）×コアチューブ（二重管）×ロッドとした。

#### 1) 掘削水の管理（掘削湧水 5L/min 未満）

掘削水には露岩部からの湧水を用いた。掘削水は孔口の釜場～泥水分離タンク～ポンプ～孔内（ロッド）を循環させた。ボーリング掘削や孔内洗浄に使用する全ての水には、トレーサーとして蛍光染料の「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、一定濃度となるよう管理した。

掘削水のトレーサー管理は、原則として以下の①～⑥に示す手順とした。ただし、5L/min 以上の湧水が確認された場合は一定濃度に保つことが困難であるため、濃度管理を終了した。

- ① アミノ G 酸の濃度は 5mg/L を基準として添加
- ② 掘削水にアミノ G 酸添加後、蛍光分光光度計で濃度分析を行い、5mg/L $\pm$ 10%以内の範囲内であることを確認
- ③ 蛍光染料を添加した掘削水は、原則としてボーリング横坑内に設置した専用のタンク（貯水ローリータンク）で作製した後、適宜掘削循環タンク（泥水分離タンクの最下流側）に送水
- ④ 掘削中はコア回収毎あるいは約 1 時間間隔でリターン水をサンプリングし、蛍光染料の濃度が 5mg/L $\pm$ 10%以内の範囲であることを確認（アミノ G 酸の計測結果はデータとして記録、保管）
- ⑤ リターン水の蛍光染料の濃度が指定した範囲を外れた場合、掘削を一時中断して蛍光染料の濃度を再調整
- ⑥ 湧水量が 5L/min 以上となった場合、掘削水の蛍光染料の濃度管理を終了

#### 2) 掘削水の管理（5L/min 以上）

湧水量の増加に伴い掘削水の余剰が発生した場合、泥水分離タンクから掘削排水貯水槽（簡易組み立て水槽）へバケツ等で排水した。貯水槽は作業場内の 2 槽の他、大量湧水に備え予備ステージへ更に 5 槽配備した（図 4.3.4-5）。基本は作業場内の 2 槽を泥水分離タンクからの排水受けとし、予備ステージの水槽を作業場内の水槽からの余剰排水を受け入れるストックとした。研究所で使用している凝集剤を用いてスライム泥と水を分離した後、上澄み水を坑道設備内のピットへ排水した。分離沈殿した汚泥は土嚢袋に入れ、産業廃棄物として処分した。

#### 3) 湧水量の管理

掘削中の湧水量を把握するために、孔口で湧水を測定した。湧水量は、作業前の口元パッカー開放時に計量バケツ等で測定した。

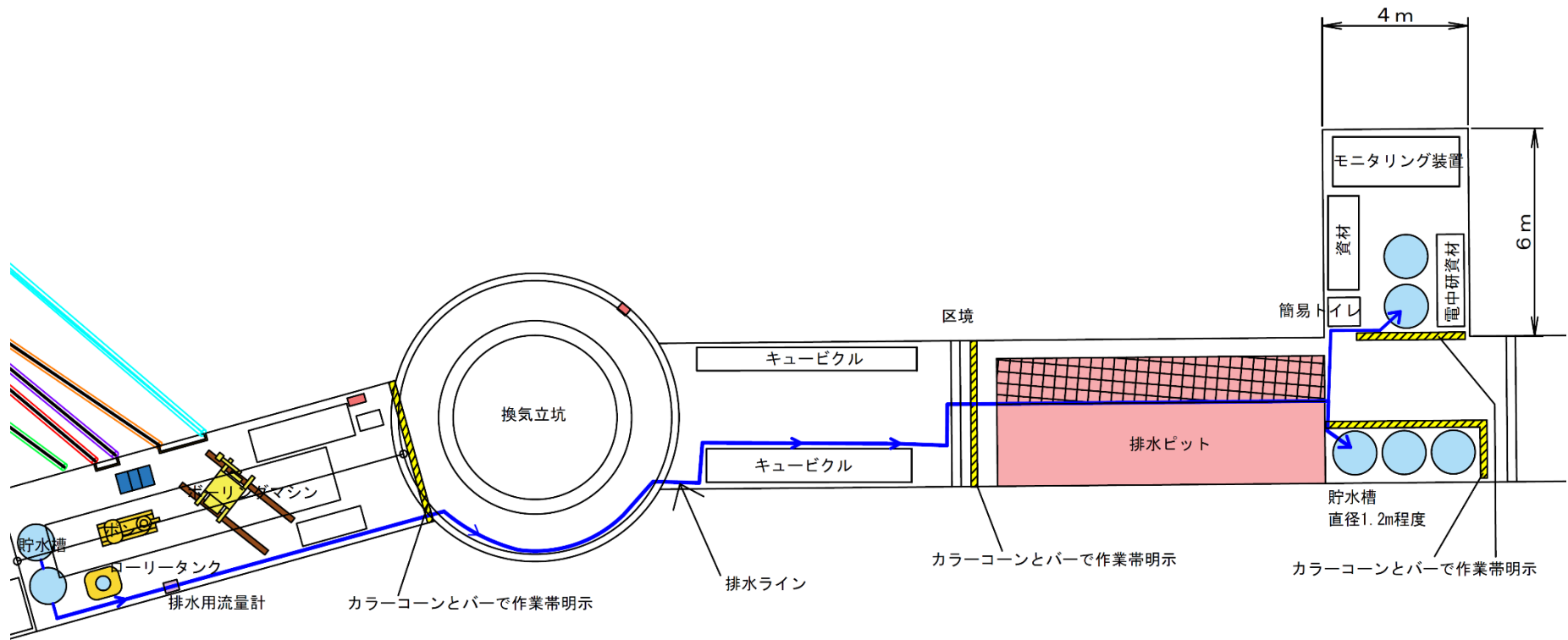


図 4.3.4-5 貯水槽の配置図

(2) キャリパー検層

キャリパー検層は、深度に対して孔径の変化を連続的に記録し、孔内における空洞、崩壊の位置やその形状、程度を把握することを目的に実施した。表 4.3.4-2 にキャリパー検層装置の仕様、図 4.3.4-6 にキャリパー検層の測定概念図を示す。検層手順を以下に示す。

- ① キャリパーセンサーを配線し、キャリブレーションを実施
- ② キャリパーアームを閉じ、キャリパーセンサーを孔底まで降下
- ③ キャリパーセンサーが孔底に到達した後、キャリパーアームを開く
- ④ 深度計が孔底距離を示している事を確認し、計測用パソコン側でデータ収集スタートをし、ウインチにてキャリパーセンサーを引き上げながらデータ収集を開始
- ⑤ データ収集ピッチは、計測用パソコン側で設定した距離で深度カウンターをトリガーにデータを保存
- ⑥ キャリパーセンサーを孔口まで上昇させたことを確認し、測定を終了

表 4.3.4-2 キャリパー検層装置の仕様

項目	性能
適応孔径	φ 70mm～φ 450mm
測定方式	4 アーム式 (X 孔径 : Y 孔径)
測定精度	1mm (分解能 0.1mm)
ツール耐水圧	18MPa

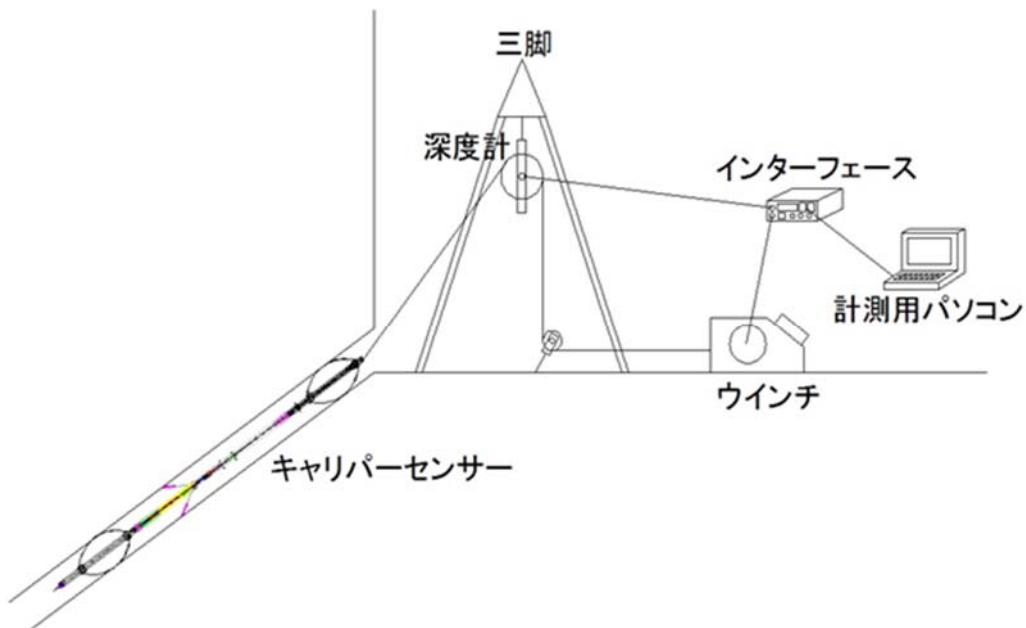


図 4.3.4-6 キャリパー検層の測定概念図

### (3) 高精度孔曲がり検層

高精度孔曲がり検層は、ボーリング掘削した孔跡を把握することを目的に実施した。図 4.3.4-7 に高精度孔曲がり検層の概念図を示す。

高精度孔曲がり検層装置は、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  $0.01^\circ$  の村田式デジタルオンラインシステムを使用した。本システムは、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。検層手順を以下に示す。

- ① 孔口から孔底（プローブの計測最大深度で可）まで連続して測定
- ② 深度 50 cm 毎に計測して 3 次元の孔跡を求め、孔曲がり計測の実データと合わせて坑道内測量の基準となる座標系に変換

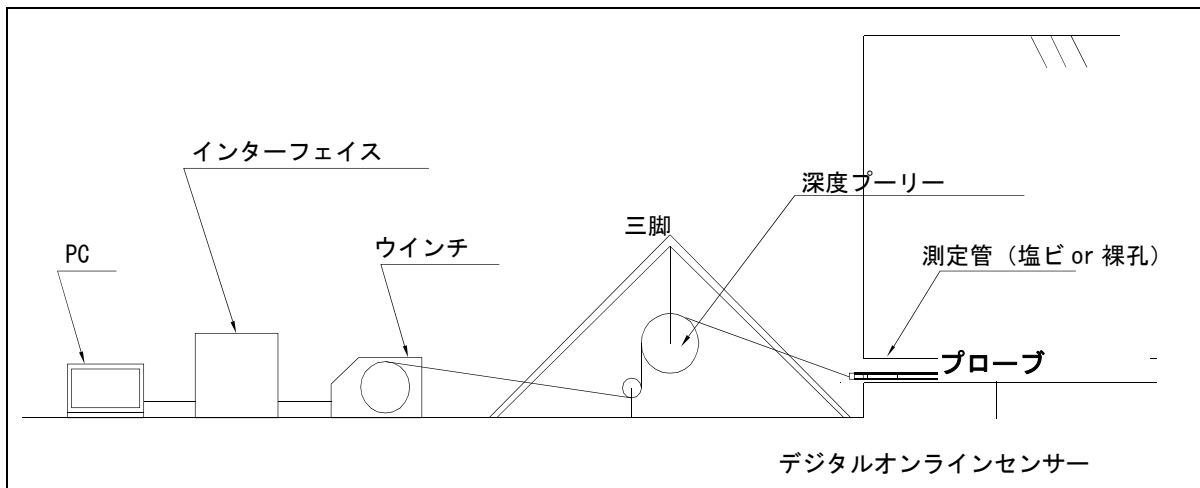


図 4.3.4-7 高精度孔曲がり検層のシステム概念 (引用：<http://well-murata.co.jp>)

(4) 高解像度 BTV 検層

(a) 測定方法

高解像度 BTV 装置はボーリング孔の壁面観察を目的に実施しており、株式会社レアックス社製 BIP-V を使用している。本装置は、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 では、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ができ、DVS では、前方視カメラと側方視カメラの組み合わせで割れ目の詳細観察を行うことができる。ODS により取得されたデータは、室内解析システムのディスプレイ上に表示し、割れ目の走向傾斜計測等の解析を行うことが可能である。DVS により取得されたデータは、VTR に記録される他、現場で必要個所をキャプチャー記録することもできる。システム構成は、現場システムと室内システムから構成される。

高解像度 BTV 検層の概念図を図 4.3.4-8 に示す。

- ODS プローブ（孔壁面展開画像を撮影するカメラ）
- DVS プローブ（孔壁面詳細画像を撮影するカメラ）
- ウインチコントローラおよびケブラーケーブル・ウインチ
- 電動押し込み機（深度計測機能付き）
- 画像処理・プローブコントロールユニット（プローブ制御）
- ノートパソコン（画像データ記録）

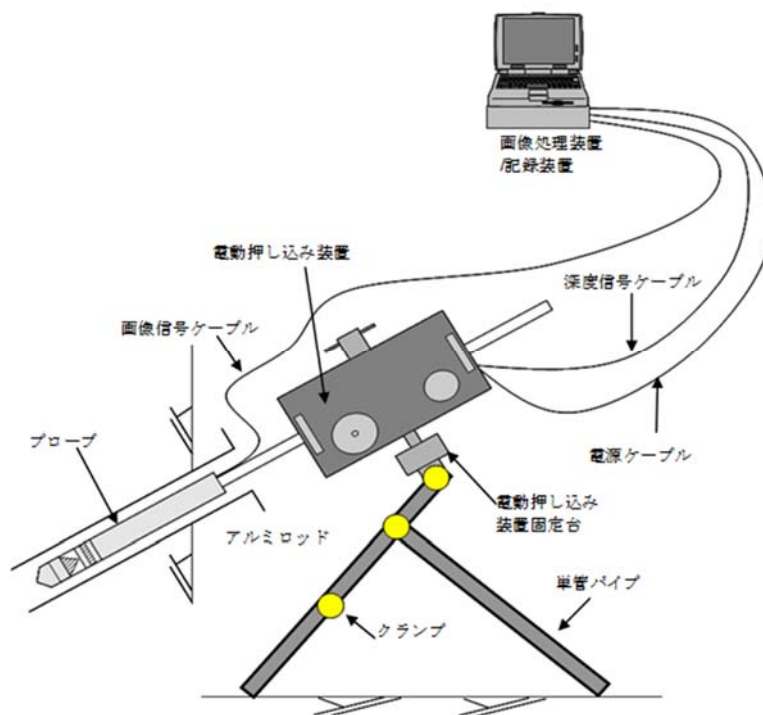


図 4.3.4-8 高解像度 BTV 検層装置（BIP-V システム）構成概念図

(b) 画像解析方法

1) ODS(BIPS)画像解析方法

① 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った(図 4.3.4-9)。計算された該当面の走向傾斜はディスプレイに表示され、ファイルに記録される。また、開口幅もポイントした2点間の実距離として示される。

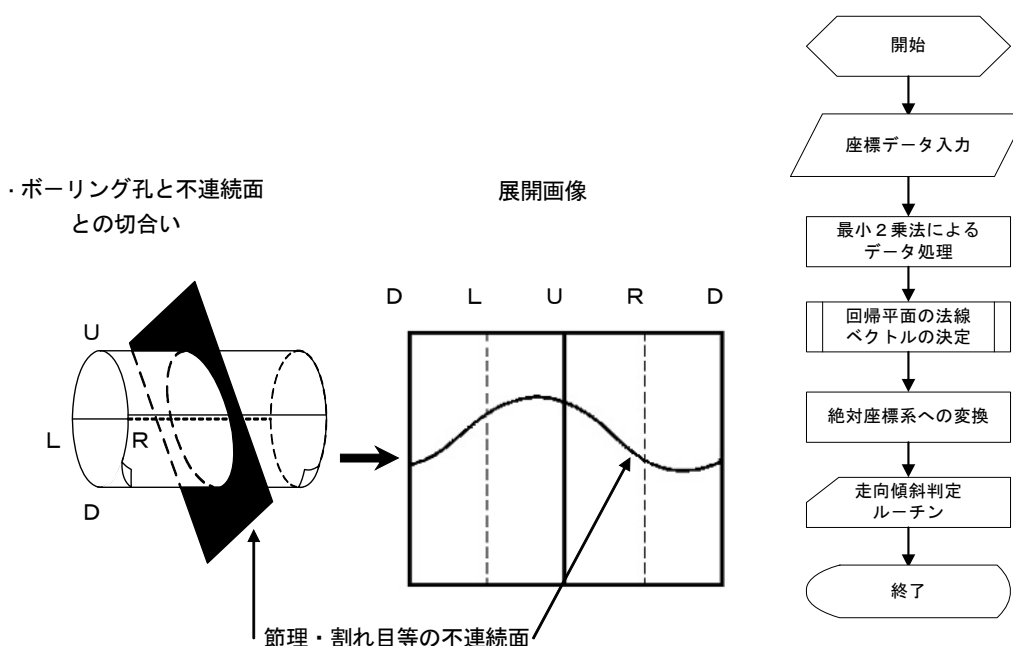


図 4.3.4-9 面構造の走向傾斜の解析ルーチン

② 深度

深度は岩盤分離面の出現上端、消滅下端、および中間深度によって示す。

③ 区分

面要素は以下の5つに区分する。

・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

・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

- ・割れ目

画像上 50%以上連続している割れ目

- ・破碎部

破碎した部分が 5cm 以上の幅を持つ場合

- ・鉱物脈

鉱物が脈状に割れ目を充填しているもの

④ 開口幅または充填幅

幅 1mm 以上の分離面の開口幅、鉱物脈、破碎部の充填幅は最大傾斜位置（孔軸に対する最大交差角位置）において、境界面上・下盤の正距離とする。

⑤ 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。

- ・ Plane-----岩盤分離面がきれいなサインカーブを描くもの
- ・ angulated----岩盤分離面が曲がっている、ゆがんでいるもの
- ・ step-----岩盤分離面が階段状になっているもの

⑥ 状態

面要素について以下に示す事項を状態として記載した。

- ・ 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
- ・ 区分が破碎部の場合  
上盤、下盤
- ・ 区分が初生構造の場合  
層理、片理、葉理、流理、岩相境界
- ・ 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

⑦ 備考

面要素について以下に示す事項を備考として記載した。

褐色化、介在物あり、鉱物伴う



(c) ODS データ解析方法

1) ステレオネット図 (ウルフネット下半球)

ステレオネット図は以下のものを作成した。

・ $\pi$ ダイアグラム

極をウルフネットにプロットしたもの。

・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。

・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。

・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。

・大円

投影点を連ねた線で、傾斜の構造を示したもの。

2) 岩盤分離面一覧表

取得された各岩盤分離面は、深度・走向傾斜・方位傾斜・区分・開口幅などの情報をとりまとめ、岩盤分離面一覧表を作成した。また、DVS 画像により計測された開口幅を記載した。

3) 孔壁展開画像記録

観察ボーリング孔についてコンピューター上で表示および出力するため、DVD に記録した。

4) 孔壁展開画像インデックスプリント

全体のイメージをつかみ易くするため、縮小した孔壁展開画像インデックスプリント (A4 横) を作成した。また、孔壁展開画像カラープリント上に記載している走向傾斜の引き出し線が、どの岩盤分離面かを判り易くするためトレースラインを描いた (図 4.3.4-10)。

タイトル：〇〇調査  
孔番：B-1

6.400m - 24.000m  
( 6.000m - 24.000m)  
孔方位： 0 孔傾斜： -90

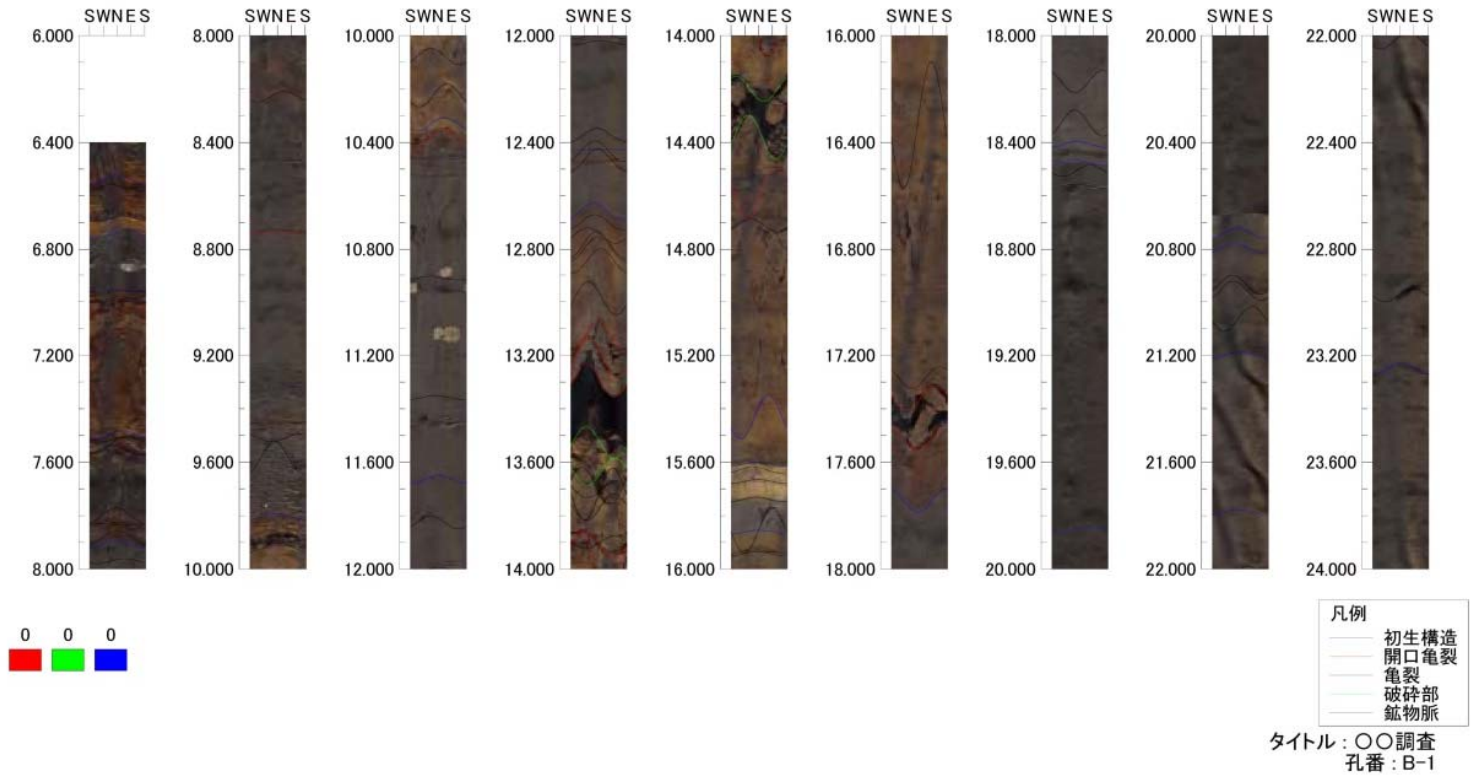


図 4.3.4-10 インデックスプリント一例  
4-118

(d) DVS (HR-BTV) 画像解析方法

1) 幅の計測方法

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て実施した。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、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 箇所を基本とした。幅が一定でない場合は、更に 2 箇所以上で計測し、その平均値を採用した。

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 刻み）を孔口にセットして別途撮影、計測した。計測結果を図 4.3.4-11 に示す。画像が若干曇って見えるのは、孔内で気泡が発生してスケールプレートに付着したためである。

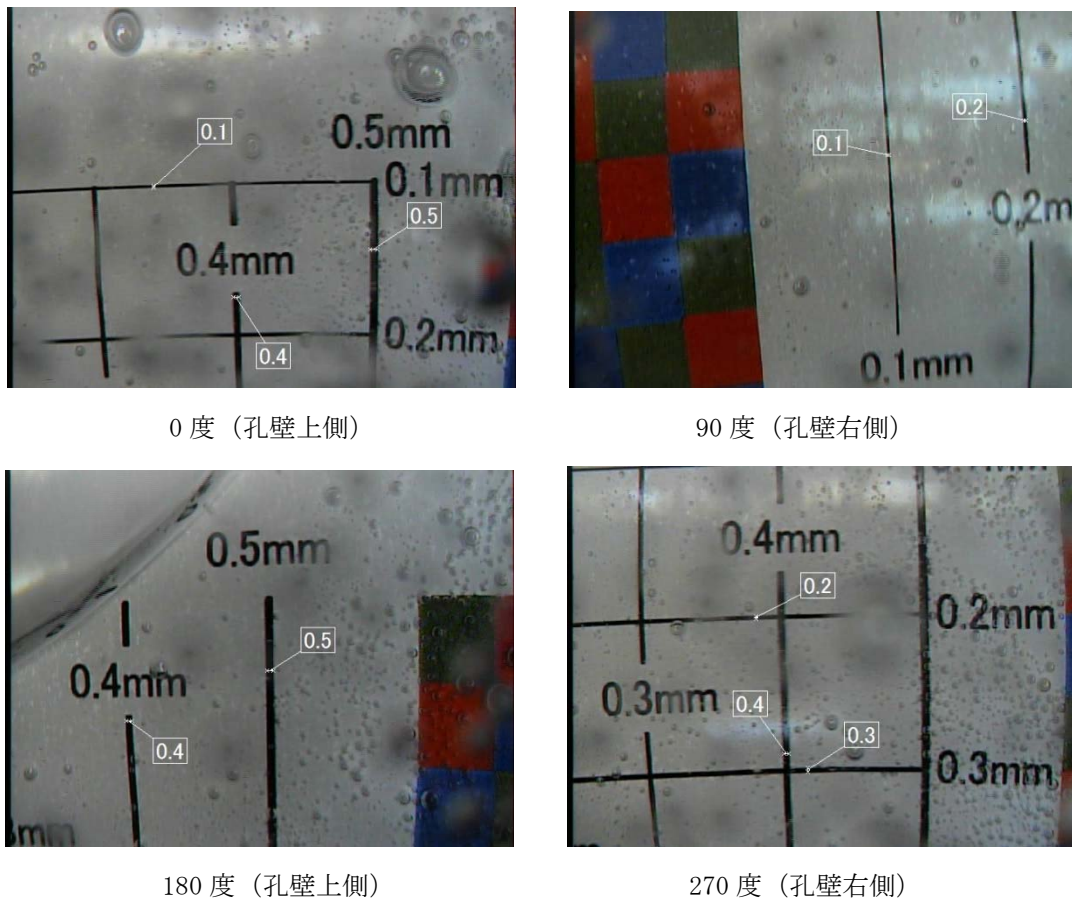


図 4.3.4-11 開口割れ目幅の計測結果一例

## 2) 詳細観察シート（開口割れ目詳細観察結果）

DVS の観察対象区間の内、透水性が認められ、開口幅が計測可能な割れ目について、幅を計測した箇所を展開画像上に明示した詳細観察シート（図 4.3.4-12）として A3 横で作成した。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。なお、割れ目の連続性がないものについては、他角度を計測して 10 箇所とした。

## 3) 開口割れ目の全周画像

各孔で対象となった開口割れ目に対し、DVS 画像のキャプチャーデータを合成して、全周画像を作成した。

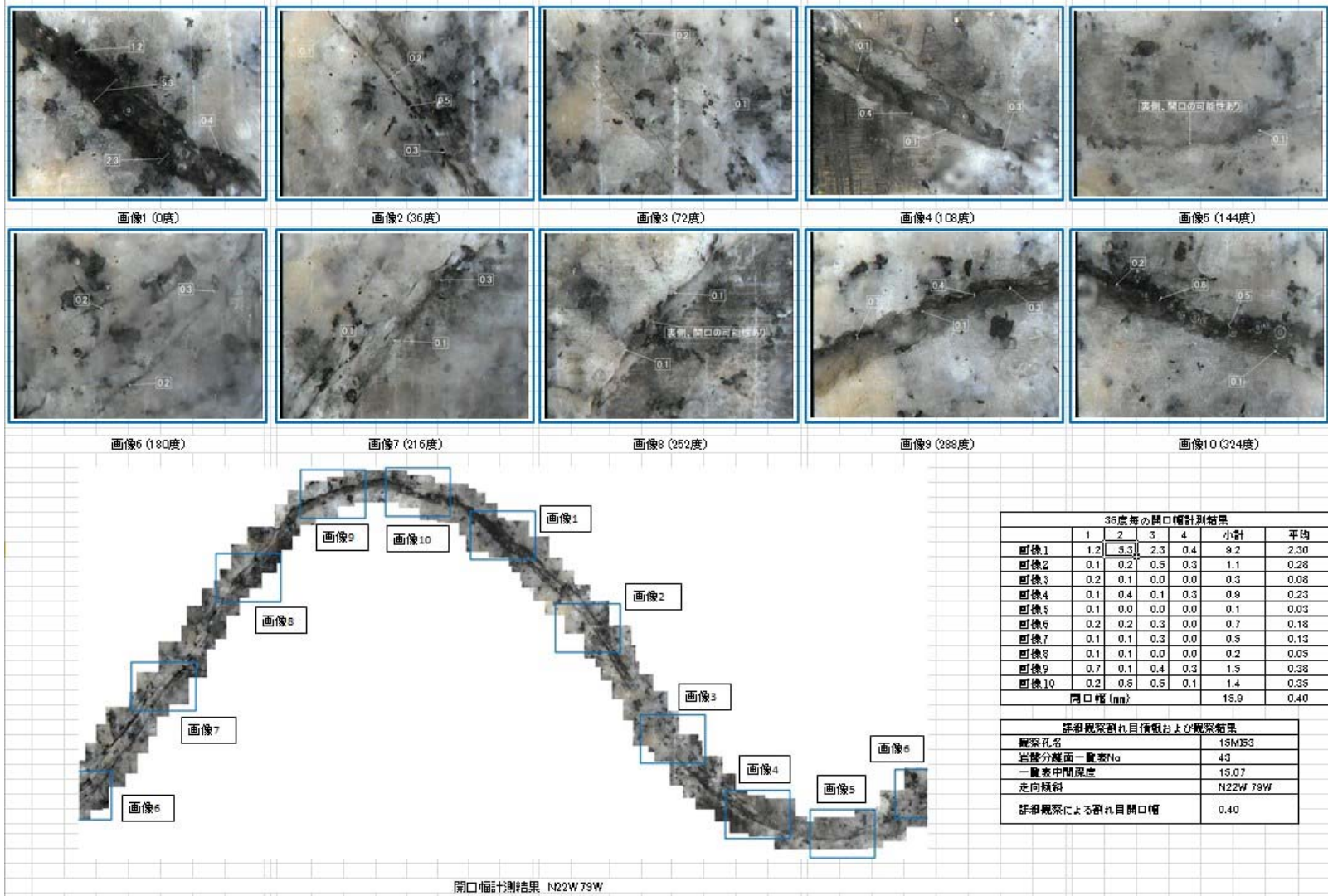
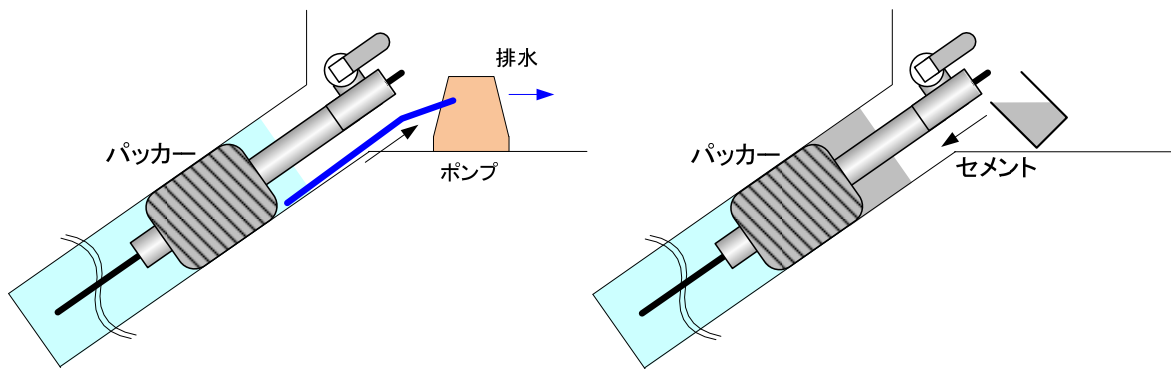


図 4.3.4-12 開口割れ目幅の詳細観察シート一例

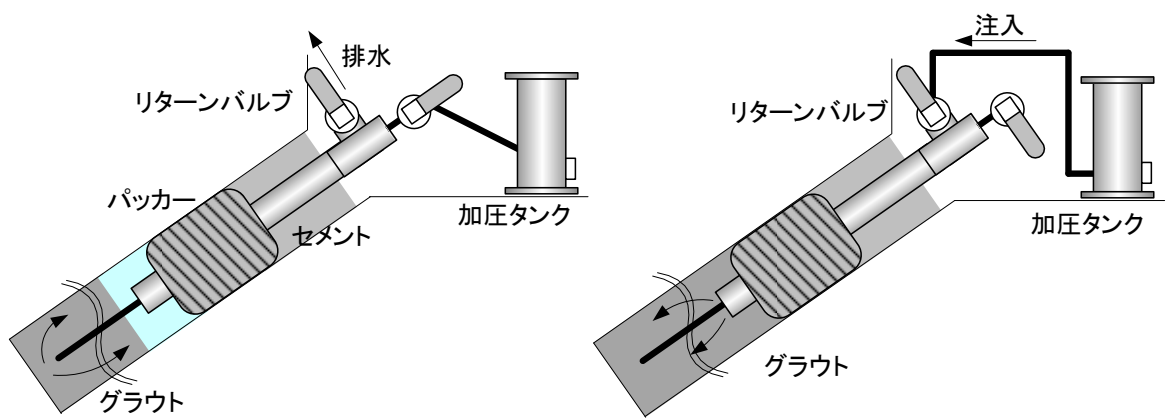
## (5) 孔内閉塞

確認ボーリング孔の掘削および各種検層が終了した後、確認ボーリング孔を閉塞した。孔内閉塞方法は、湧水を止水する孔口パッカーごとグラウトで閉塞した。孔内閉塞の手順を以下に示す。また、孔内閉塞手順のイメージを図 4.3.4-13 に示す。

- ① グラウト注入用チューブ（ $\phi 12\text{mm}-9\text{mm}$ ）を止水パッカー・ロッドの内部に通す。
- ② グラウト注入用チューブを通したまま、止水パッカーを孔口付近に挿入する。止水パッカーの設置深度は、EDZ 以深でなるべく深度が浅く湧水の少ない 4~5m とする。
- ③ グラウト注入用チューブを孔底付近まで挿入する。
- ④ パッカーを拡張し、拡張圧力は場の間隙水圧（約 1.4MPa）+1MPa 以上とする。
- ⑤ パッカー拡張完了後、止水パッカーの上部から孔口までの孔内水（ロッド外側）をポンプで排水し、直ちに孔内へセメントを流入する。
- ⑥ 翌日までセメントの硬化養生した後、パッカー以深から孔底までの密閉区間の地下水をエアリフトにより排水する。エアリフトは孔底まで降ろしたグラウト用チューブを利用する。
- ⑦ 地下水排水後、直ちにグラウトを注入する。注入には加圧タンクを使用し、グラウト材を充填した加圧タンク内をコンプレッサーで加圧して注入する。区間密閉状態での注入のため、場の間隙水圧（約 1.4MPa）以上の加圧で押し、約 2.5MPa を上限とする。
- ⑧ グラウト材のリターンを確認した後、グラウト用チューブを使ったグラウト注入を止め、リターンバルブからグラウトを圧入する。
- ⑨ グラウト材の注入量と圧力は、加圧タンクの水位およびブルドン管で管理する。所定量（孔体積を充填する量以上）のグラウト材を孔内へ注入した後、⑥~⑧の手順で各孔実施する。



手順①～⑤：孔口セメンチング手順（左：パッカー上部の孔内水の排除 右：セメント注入）



手順⑥～⑧：グラウト注入手順（左：パッカー以深の孔内グラウト置換 右：最終圧入）

図 4.3.4-13 孔内閉塞手順の概念図

#### 4.3.4.2 ボーリング掘削結果

本掘削は開口割れ目に充填したレジンをボーリングで掘り当てることを主目的としており、コアサンプル中のレジンの有無が大きなポイントとなる。原位置レジン注入試験では、13MI37 号孔 int-2 (N26W/80E、23.135m)、12MI31 号孔 int-3 (N29W/88E、21.895m)、14MI49 号孔 int-1 (N23W/83E、19.6m) を結んだ面をターゲットフラクチャー面、その面を低角で切る面 (12MI31 号孔 int-2、N8E/22E、22.74m) が在ると推定し、13MI37 号孔 int-2、12MI31 号孔 int-2、int-3 の3箇所からレジン注入している。注入したレジンが充填する割れ目の確認を目的として、既存孔5孔 (12MI30 号孔、12MI31 号孔、13MI36 号孔、13MI37 号孔、14MI49 号孔) と干渉しないこと、ボーリングマシンの据付に問題ない掘削方向と伏角、口切位置であること、レジン注入口に近くターゲットフラクチャー面を通ることを条件とした孔跡パターンを検討した。ボーリングを一孔掘削した段階でレジンの有無を確認し、図 4.3.4-14 に示すような選定フローに基づき、次にどのパターン (方向、伏角) で掘削するのかを現場で判断した。17MI60～17MI62 号孔 (候補も含む) の孔跡平面図を図 4.3.4-15、ターゲットフラクチャー面にプロットしたボーリング位置図を図 4.3.4-16 に示す。

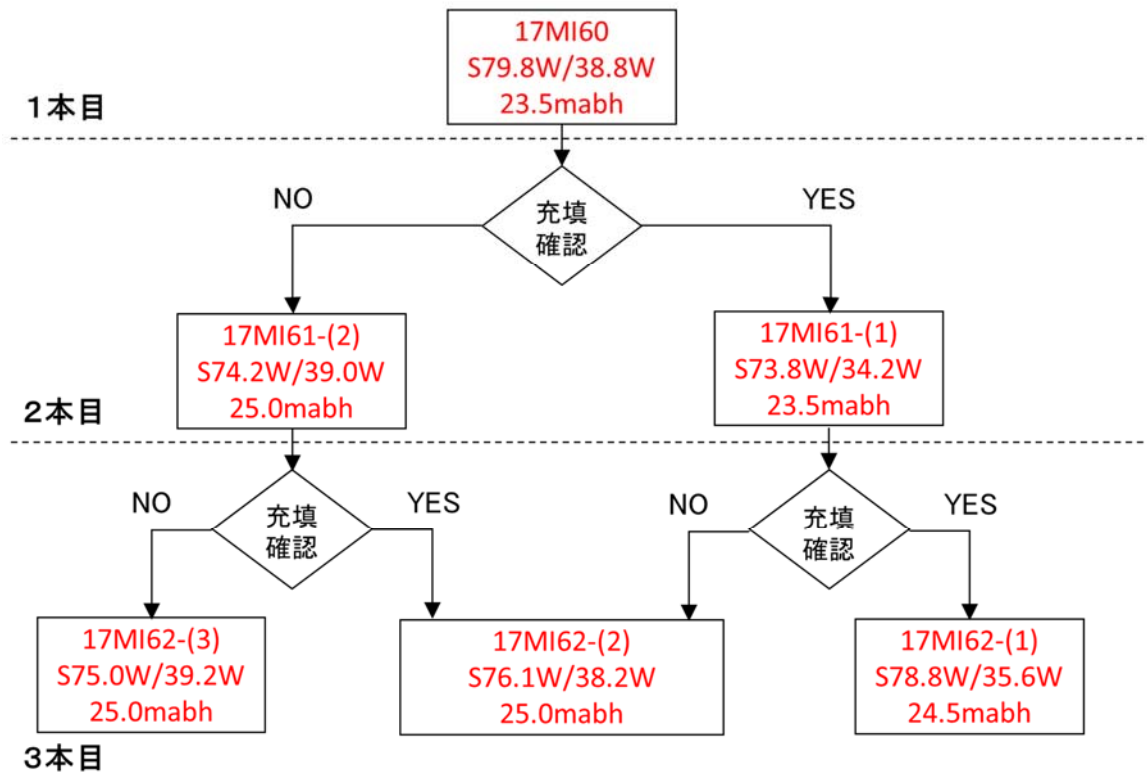


図 4.3.4-14 ボーリング孔掘削位置の選定フロー



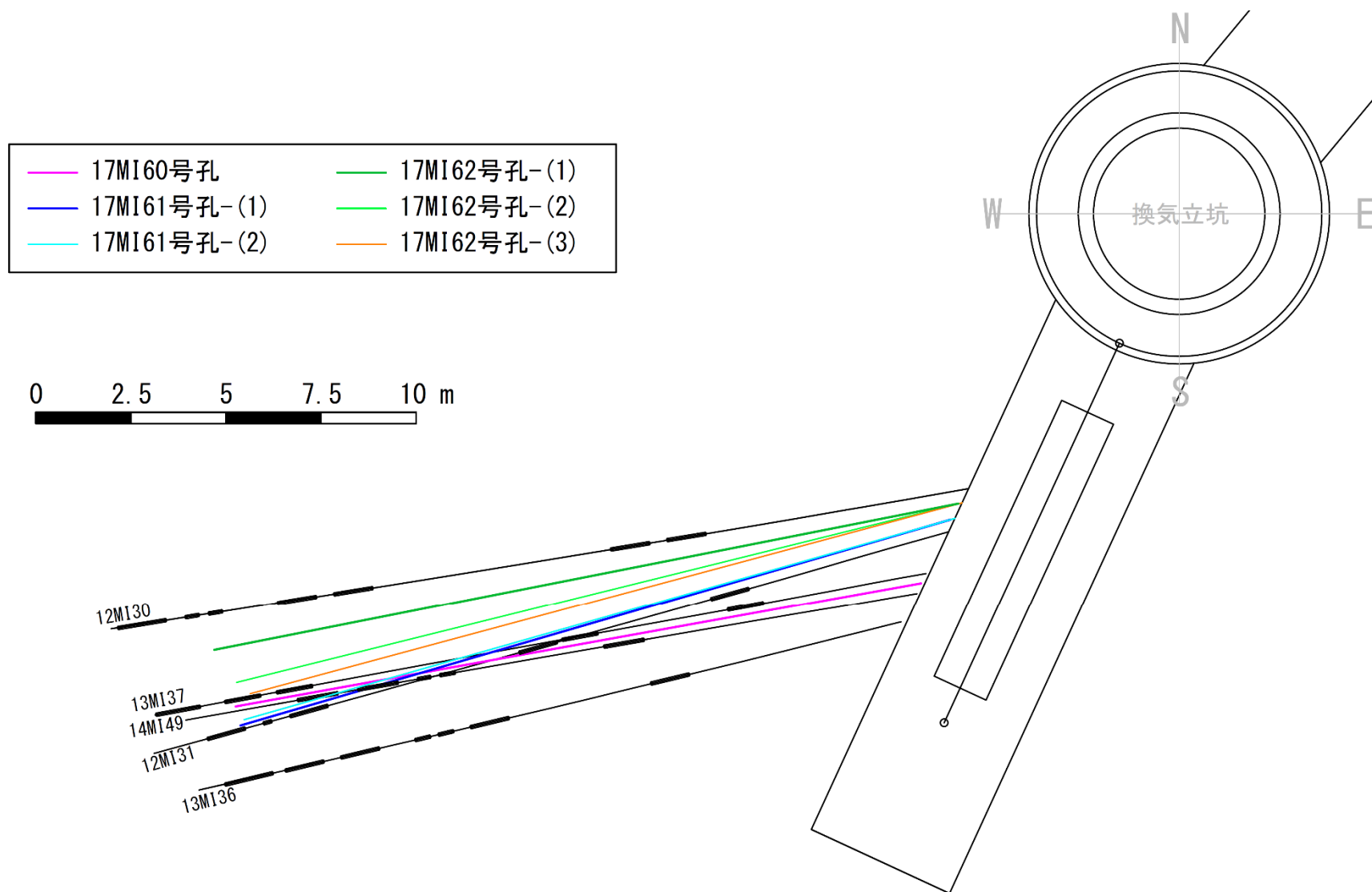


図 4. 3. 4-15 確認ボーリング孔跡平面図 (計画)

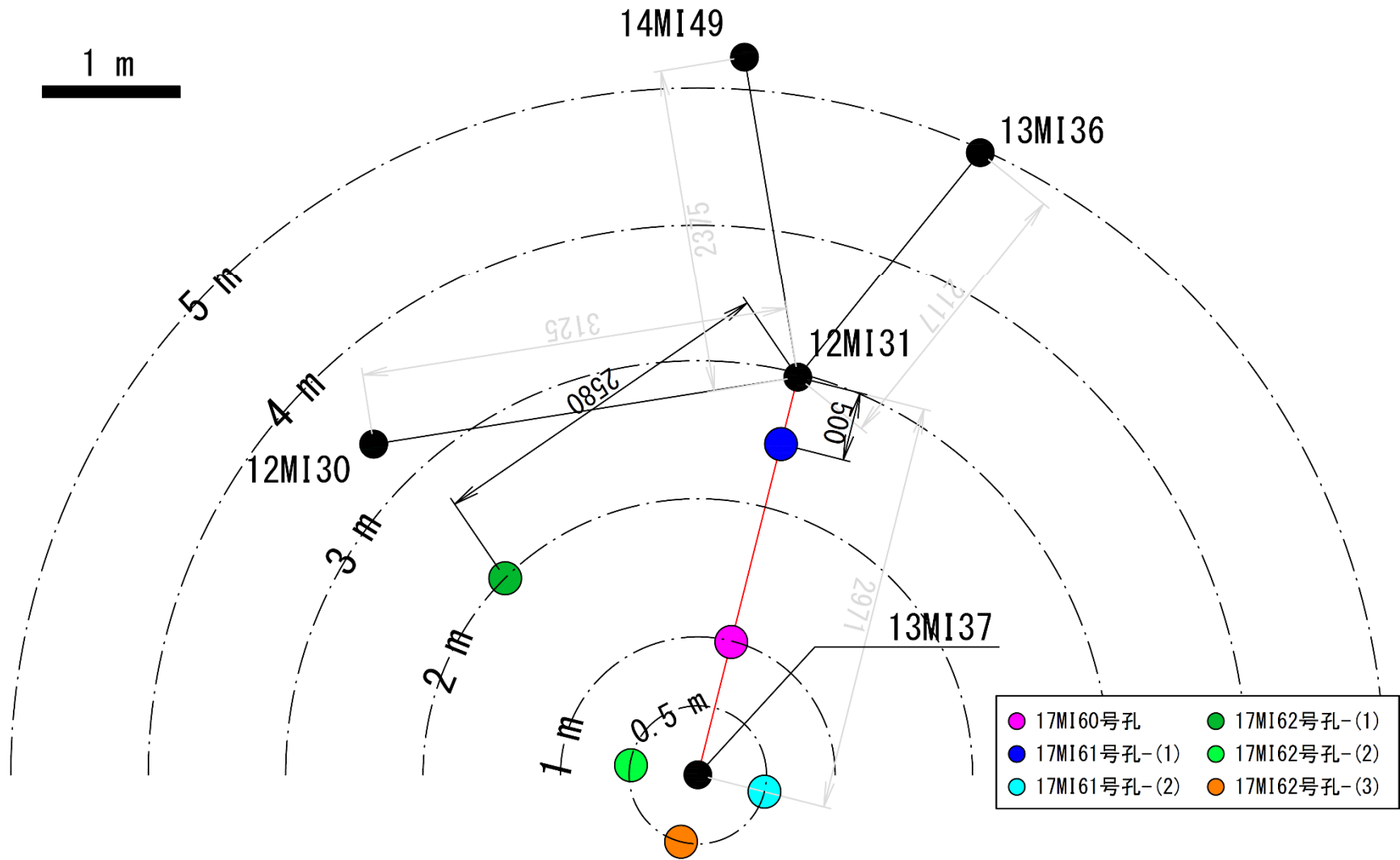


図 4.3.4-16 ターゲットフラクチャー面でのボーリング孔掘削位置図 (計画)

確認ボーリング孔の掘削結果一覧を表 4.3.4-3 に示す。掘削方向と伏角は、後述する高精度孔曲がり検層の結果を反映した。

表 4.3.4-3 確認ボーリング掘削結果

孔名	17MI60 号孔	17MI61 号孔 (17MI61-(1))	17MI62 号孔 (17MI62-(1))
掘削方法	オールコア	オールコア	オールコア
掘削孔径	116mm	116mm	116mm
掘削長	23.00m	23.50m	26.00m
掘削方向	S79.5W	S73.5W	S78.7W
掘削伏角	-38.35W(下向き)	-34.33W(下向き)	-34.90W(下向き)
掘削位置 (世界測地系)	X=-69047.841 Y=6419.201 標高 EL-99.10m	X=-69046.163 Y=6419.974 標高 EL-99.10m	X=-69045.740 Y=6420.181 標高 EL-99.10m
湧水量	約 11.5L/min	約 10.9L/min	約 5.7L/min

(a) 掘削水の管理と湧水量

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た。掘削中は掘進毎 (0.3m~1.0m 程度)、あるいは 1 時間程度の間隔でリターン水をサンプリングし、トレーサー濃度が 5mg/L±10%以内の範囲にあることを確認した。濃度が 5mg/L±10%の範囲を外れた場合には、掘削を中断して濃度の再調整を行った。トレーサーの濃度管理は、湧水量が 5L/min 以上となった時点で終了した。

図 4.3.4-17~図 4.3.4-19 に、各孔におけるアミノ G 酸濃度と湧水量・孔口湧水量の深度変化を示す。

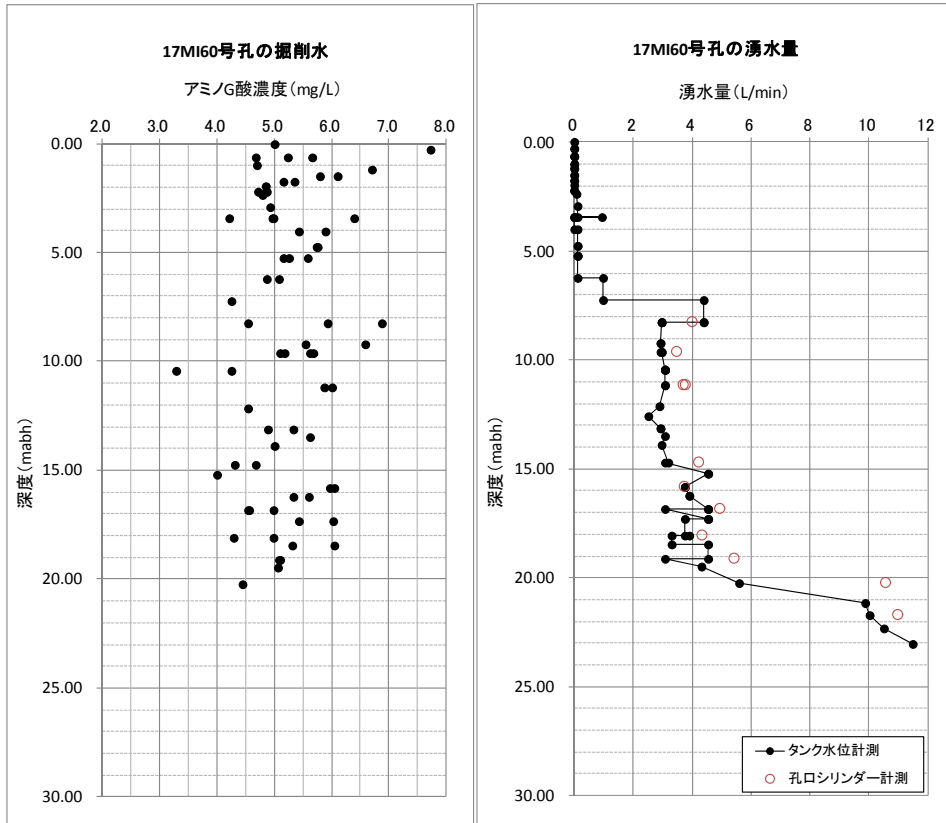


図 4. 3. 4-17 17MI60 号孔 掘削水のアミノ G 酸濃度と掘削時の湧水量

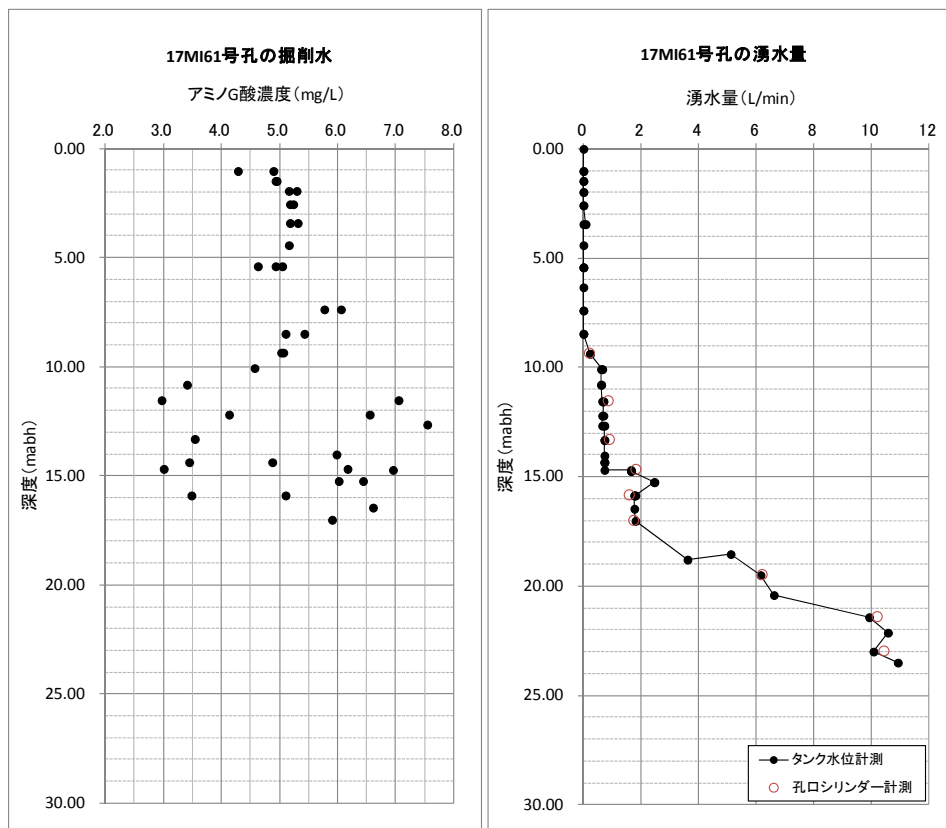


図 4. 3. 4-18 17MI61 号孔 掘削水のアミノ G 酸濃度と掘削時の湧水量

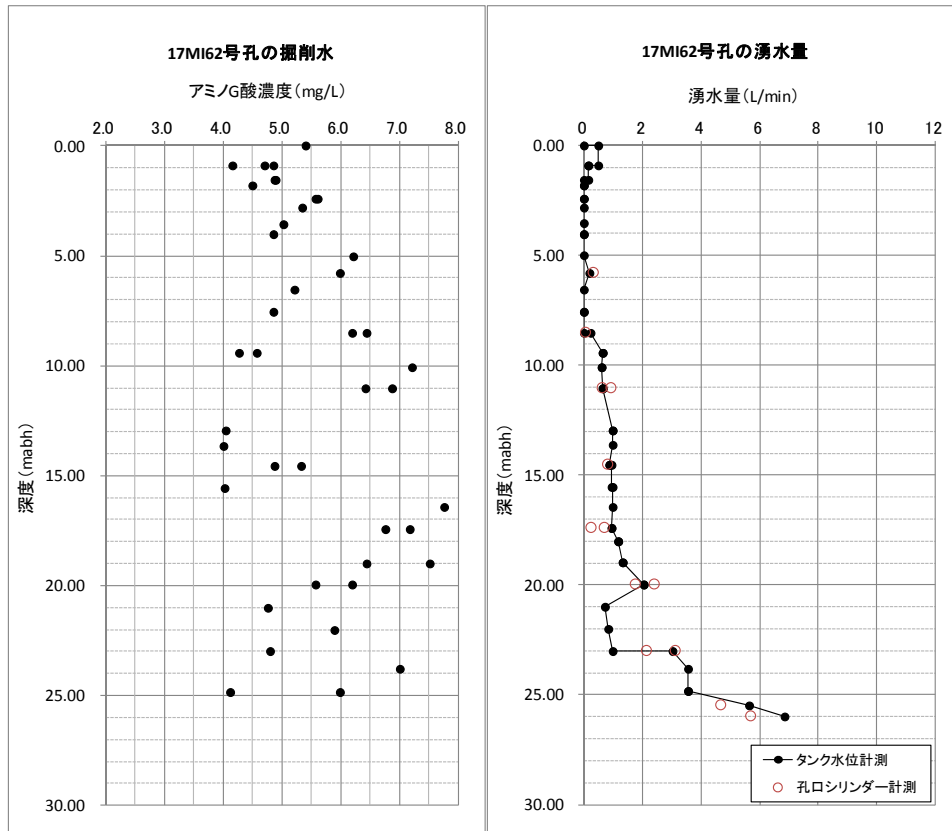


図 4.3.4-19 17MI62号孔 掘削水のアミノG酸濃度と掘削時の湧水量

(b) ボーリングコア試料採取における留意点

掘削してコアを採取する際、ビットの摩耗や硬度の高い個所への接触等の原因により、やむを得なく機械割れ目が生じることがある。また、全長 1m 規格のコア箱に収納するため、グラインダーでコアを切断することもある。本目的はレジン充填個所のコア試料採取であるため、機械割れ目によるレジン充填箇所の破断やヒューマンエラーによるレジン充填箇所のグラインダーによる切断は回避する必要がある。そのため、事前にレジンが充填していると思われる深度を抽出し、その個所が採取するコアの中心となるよう、現場で適宜掘削計画を立てた。また、採取したコアをコア箱に収納する際にグラインダーで切断しなければ入らない状況である場合は、無理に切断せず次の深度の収納場所へ格納した。

(c) ボーリングコア試料の撮影

コア写真撮影は 2400 万画素以上の画素数を有するデジタルカメラを使用し、カメラ用三脚に装着したのち、コア箱の直上に水平にレンズが固定されるように梯子に固定した（図 4.3.4-20）。撮影の際には、上方 2 箇所および左右 2 箇所の合計 4 方向から写真証明用アイランプ（PRS500WD、岩崎）を点灯し、撮影対象に影が映らないように照明方向を調節した。アイランプはクリップ付きのランプホルダーに装着し、鋼材などをクリップで挟んで簡単に設置できるようになっている。コア試料に見られる割れ目や充填鉱物、岩相の組織なども明瞭に観察するため、撮影の前には霧吹きを使用してコア表面を十分に湿らせたのち、布で軽く水気をふき取ってから撮影した。コア試料とほぼ同じ高さにボーリング孔名、上端・下端深度（m）を掲示し、同時にスケールとしてロッド（20cm 間隔、シンワ測定）および画像上で色調補正を行う際に必要なカラーセパレーション（8 インチ×14 インチ、kodak 社）も掲示して撮影を行った。撮影にはデジタル一眼カメラ（NEX-7、SONY）を使用し、撮影条件は表 4.3.4-4 表 4.3.4-4 コア写真の撮影条件の通りである。なお、撮影時には手ぶれ防止のために、リモコンを使ってシャッターを切るようにした。撮影後は、画像編集アプリ Adobe Photoshop CC (Adobe) により、色調補正およびレンズ補正の処理を行った。撮影したコア写真は図 4.3.4-21～図 4.3.4-29 の通りである。



図 4.3.4-20 コア写真撮影の様子

表 4.3.4-4 コア写真の撮影条件

撮影条件	
撮影モード	マニュアル
シャッタースピード	1/60s
F 値	F4.0
ISO 感度	400
露出	+0.3



図 4.3.4-21 17MI60 号孔ボーリングコア (0.00~8.00mabh)



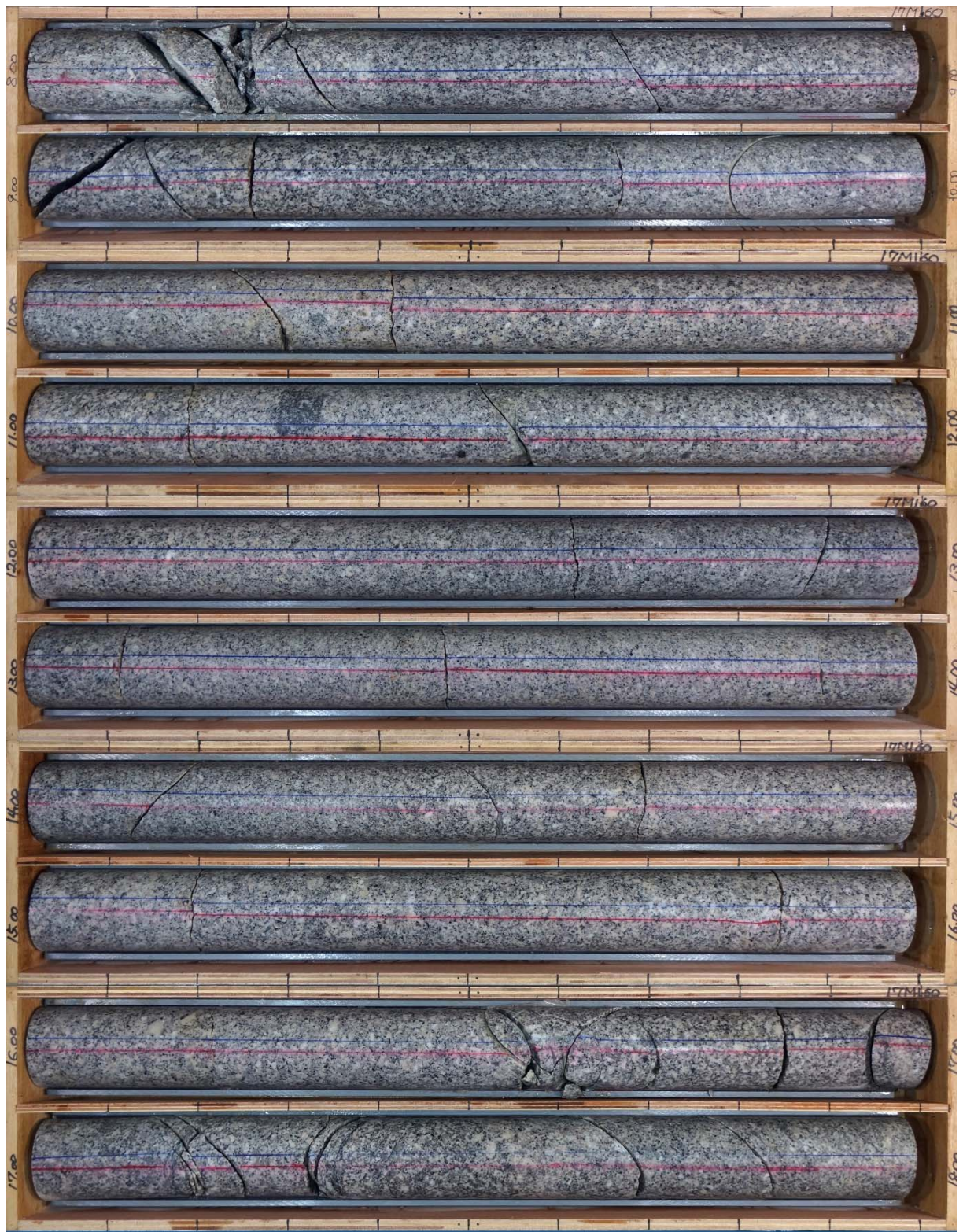


図 4.3.4-22 17MI60 号孔ボーリングコア (8.00~18.00mabh)



図 4.3.4-23 17MI60 号孔ボーリングコア (18.00~24.00mabh)



図 4.3.4-24 17MI61 号孔ボーリングコア (0.00~8.00mabh)



図 4.3.4-25 17MI61 号孔ボーリングコア (8.00~18.00mabh)



図 4.3.4-26 17MI61 号孔ボーリングコア (18.00～26.00mabh)



図 4.3.4-27 17MI62 号孔ボーリングコア (0.00~8.00mabh)



図 4.3.4-28 17MI62 号孔ボーリングコア (8.00~18.00mabh)



図 4.3.4-29 17MI62 号孔ボーリングコア (18.00～26.00mabh)



#### 4.3.4.3 コア観察

レジンの充填は3孔で計13箇所確認された。レジン充填箇所の一覧を表4.3.4-5に示す。また、各孔のコア記載図を図4.3.4-30～図4.3.4-32に示す。

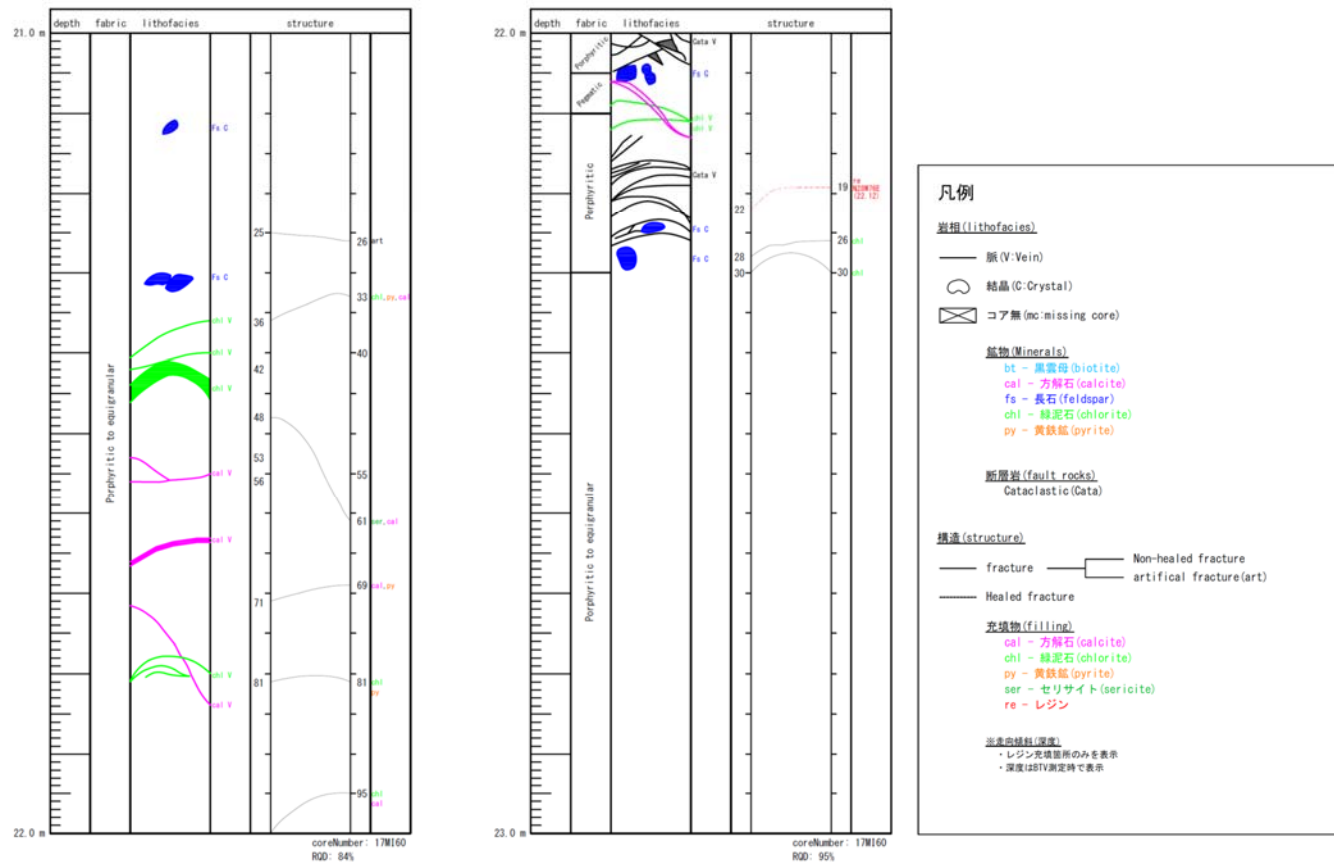
13箇所のうち6箇所は割れ目面が完全に密着した状態であり、残りの7箇所は割れ目面の一部にレジンが付着し割れ目が分離した状態であった。

レジン注入孔に最も近い17MI60号孔では注入孔の割れ目と連続した割れ目にのみ充填が確認されたが、注入孔から距離が離れるに従って複数の割れ目にレジンが充填されていることが確認された。レジンはNW走向高角傾斜の割れ目に多く充填されており、一部NE走向低角傾斜の割れ目にも充填されていた。開口幅が2.0mmを超える割れ目も確認されたが、このような開口幅の大きな割れ目が連続して開口していることは稀であり、鉱物充填（方解石）や上下盤が密着して部分的な開口となっていた。また、レジンの充填が確認された割れ目のうち約6割は充填率が極めて低く、分離した状態で採取されていたことから、対象割れ目はネットワーク状の割れ目であったと考えられる。一方、レジンの充填率が高い割れ目は、割れ目ネットワーク中の高透水場が卓越した「水みち」であると考えられる。

表 4.3.4-5 レジン充填箇所一覧

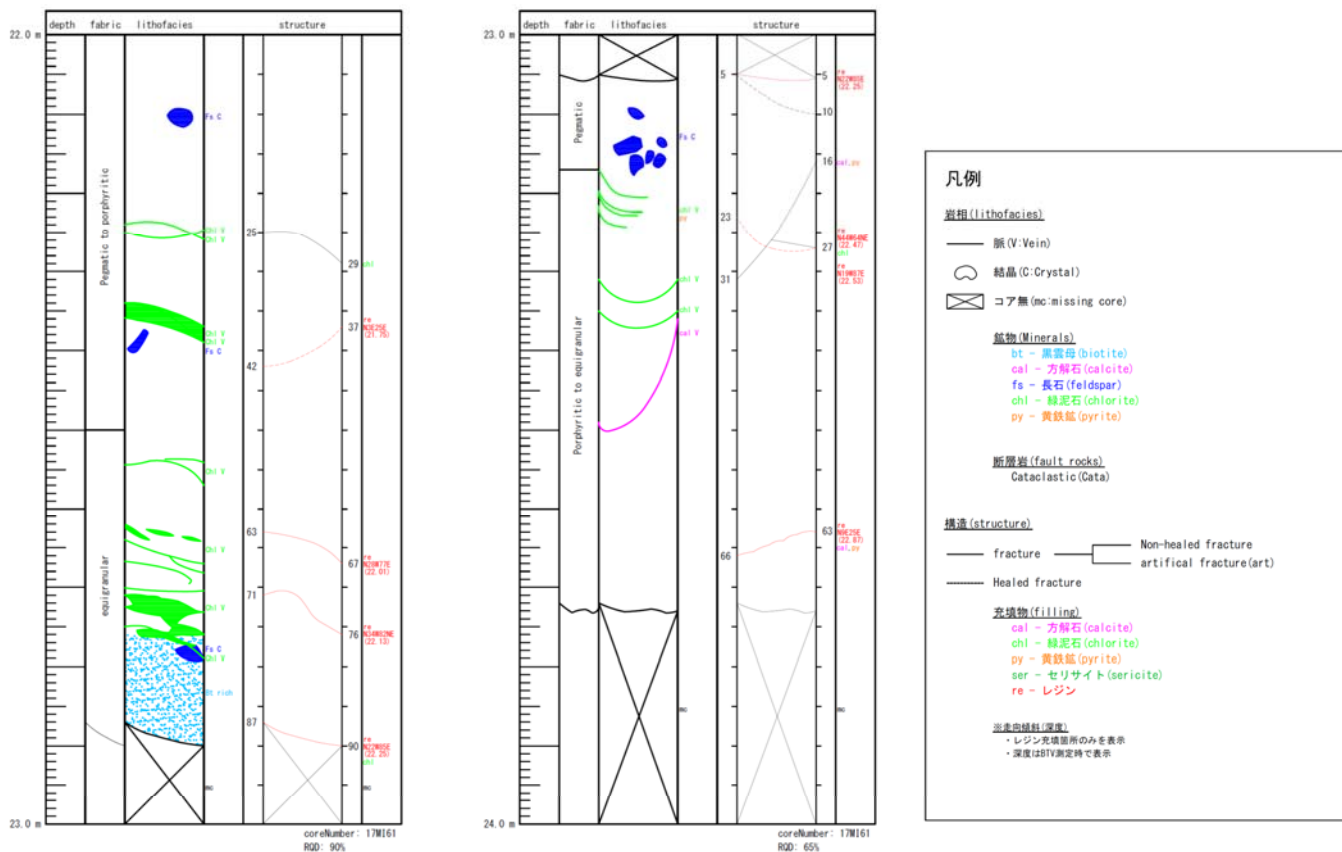
孔名	ナンバー	走向・傾斜	深 度	充填状態	BTV 詳細観察
17MI60 号孔	①	N28W/76E	22.12 m	密着	○
17MI61 号孔	①	N3E/25E	21.75 m	密着	○
	②	N28W/77E	22.01 m	充填領域小	×
	③	N34W/82NE	22.13 m	充填領域中	×
	④	N22W/85E	22.25 m	充填領域中	×
	⑤	N44W/64NE	22.47 m	密着	○
	⑥	N19W/87E	22.53 m	密着	○
	⑦	N9E/25E	22.87 m	充填領域大	○
17MI62 号孔	①	N29E/80W	22.48 m	密着	○
	②	N49W/46NE	22.71 m	充填領域小	○
	③	N34E/29SE	22.78 m	充填領域中	○
	④	N12W/82E	23.30 m	充填領域小	×
	⑤	N31W/82SW	24.38 m	密着	○

※走向・傾斜および深度はボアホール TV カメラによるもの



- ・ 21. 41~21. 44mで幅2cm程度の緑泥石脈が分布する。その周辺は変質を伴い長石類が僅かに緑色を帯びる。
- ・ 22. 00~22. 26mにかけてカタクラスティックな脈が多数分布し、部分的に径1~2cm程度の長石の巨晶がみられる。
- ・ 22. 19~22. 22m (BTV : 22. 12m) でレジン充填割れ目を確認した。  
割れ目面はレジンで密着し、緑泥石が充填されたカタクレーサイト沿いにみられる。

図 4. 3. 4-30 17MI60 号孔コア記載図 (21. 0mabh~23. 0mabh)



- ・ 22.32~22.34mで、約2cm幅の緑泥石脈が分布し、22.37~22.42m (BTV: 21.75m) のレジン充填割れ目 (密着) で切られている。
- ・ 22.63~22.67m (BTV: 22.01m)、22.71~22.76m (BTV: 22.13m) で、レジン充填割れ目 (分離; 付着量小/分離; 付着量中) を確認した。レジン充填割れ目に沿って緑泥石脈が分布している。
- ・ 22.87~22.90m (割れ目上面深度)、23.05m (割れ目下面深度) (BTV: 22.25m) で、レジン充填割れ目 (分離; 付着量中) を確認した。割れ目面には、緑泥石がみられる。
- ・ 23.26~23.27m (BTV: 22.47m) で、レジン充填割れ目を確認した。方解石、黄鉄鉱がみられる割れ目で切られているが、レジン充填割れ目自体は密着している。
- ・ BTVで22.53mに確認されるレジン充填割れ目は、コアの裏側で部分的にレジンが密着して充填していることを確認した。
- ・ 23.63~23.66m (BTV: 22.87m) で、レジン充填割れ目 (分離; 付着量大) を確認。割れ目面に緑泥石、黄鉄鉱がみられる。

図 4.3.4-31 17MI61 号孔コア記載図 (22.0mabh~23.5mabh)



(1) 17MI60 号孔

22.12 m に分布する割れ目にレジンの充填が確認された。割れ目面はレジンによって密着しており、緑泥石が充填されたカタクレーサイト沿いに充填されていた。レジン充填幅は非常に小さく、0.2～0.3 mm 程度である。この割れ目から分岐した割れ目にもレジンの充填が確認できた（図 4.3.4-33）。また、割れ目沿いの母岩にはセリサイト化した斜長石や緑泥石化した黒雲母と思われるものが観察された。

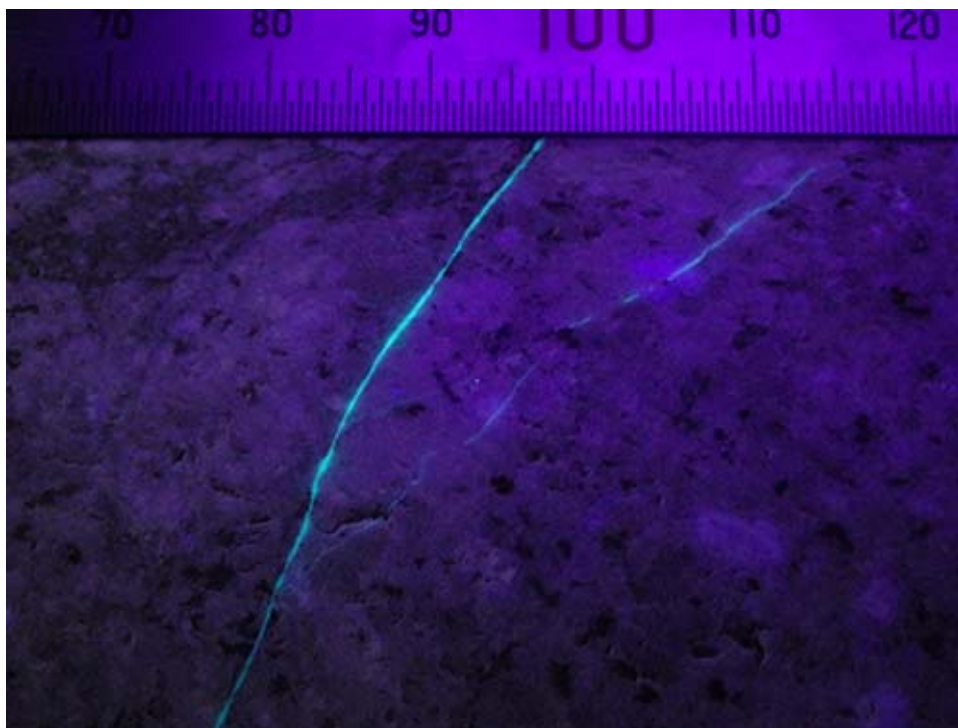


図 4.3.4-33 17MI60 号孔のコアで確認されたレジン (N28W/76E)

(2) 17MI61 号孔

図 4.3.4-34 の左側や図 4.3.4-35 の左側の画像のように割れ目が密着した状態で充填率が高いものと図 4.3.4-34 の右側の画像のように充填率の低いものまで様々であった。図 4.3.4-34 の左側の画像は、割れ目の一部が方解石で充填されており、レジンの充填を遮っていた。図 4.3.4-34 の右側の画像は、割れ目表面に薄い方解石が層をなしており（紫色に蛍光）、割れ目にはごく少量のレジンしか充填されていなかった。

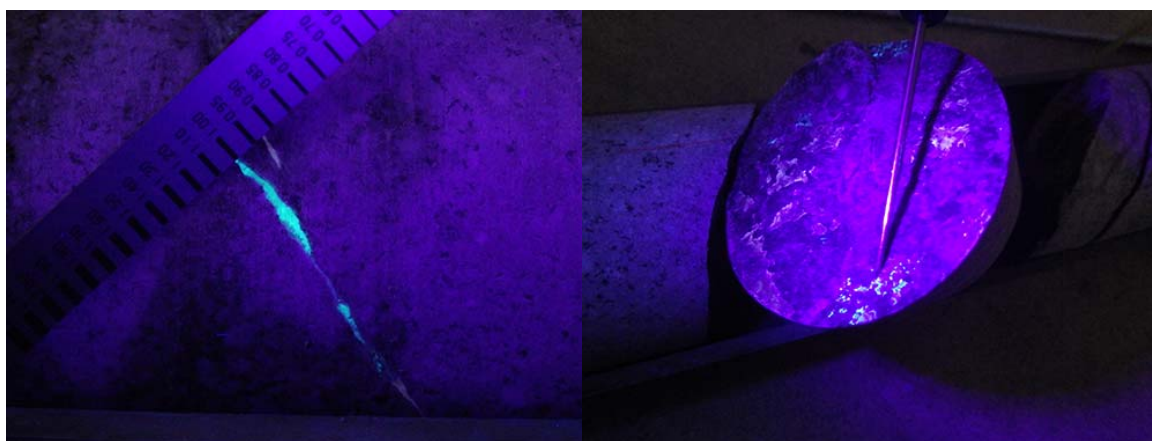


図 4.3.4-34 17MI61 号孔のコアで確認されたレジン（左：N3E/25E、右：N28W/77E）



図 4.3.4-35 17MI61 号孔のコアで確認されたレジン（左：N44W/64NE・N19W/87E、右：N9E/25E）

(3) 17MI62 号孔

図 4.3.4-36 の右側の画像は割れ目の表面に条痕が確認されているが、レジンの充填はごく少量であった。図 4.3.4-37 の左側のように点在する形でレジンが充填されている箇所も確認された。図 4.3.4-37 の右側のレジン充填割れ目は方解石脈に直交した割れ目であり、それ自体にも方解石が充填されていた。また、レジンも方解石も充填されていない箇所も確認できる。

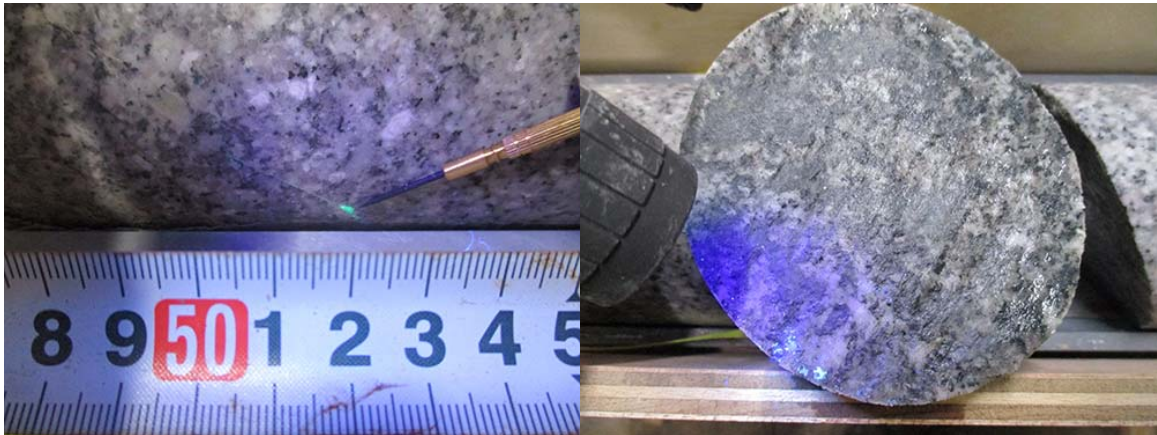


図 4.3.4-36 17MI62 号孔のコアで確認されたレジン (左 : N29E/80W、右 : N12W/82E)



図 4.3.4-37 17MI62 号孔のコアで確認されたレジン (左 : N34E/29SE、右 : N31W/82SW)

#### 4.3.4.4 キャリパー検層結果

17MI60号孔～17MI62号孔のキャリパー検層結果を図4.3.4-38～図4.3.4-40に示す。

孔径は、17MI60号孔、17MI61号孔の7～9mabhで局所的な孔径の拡大箇所が認められる以外は、X孔径・Y孔径ともに概ね同径で連続しており、孔壁状態は良好と判断される。

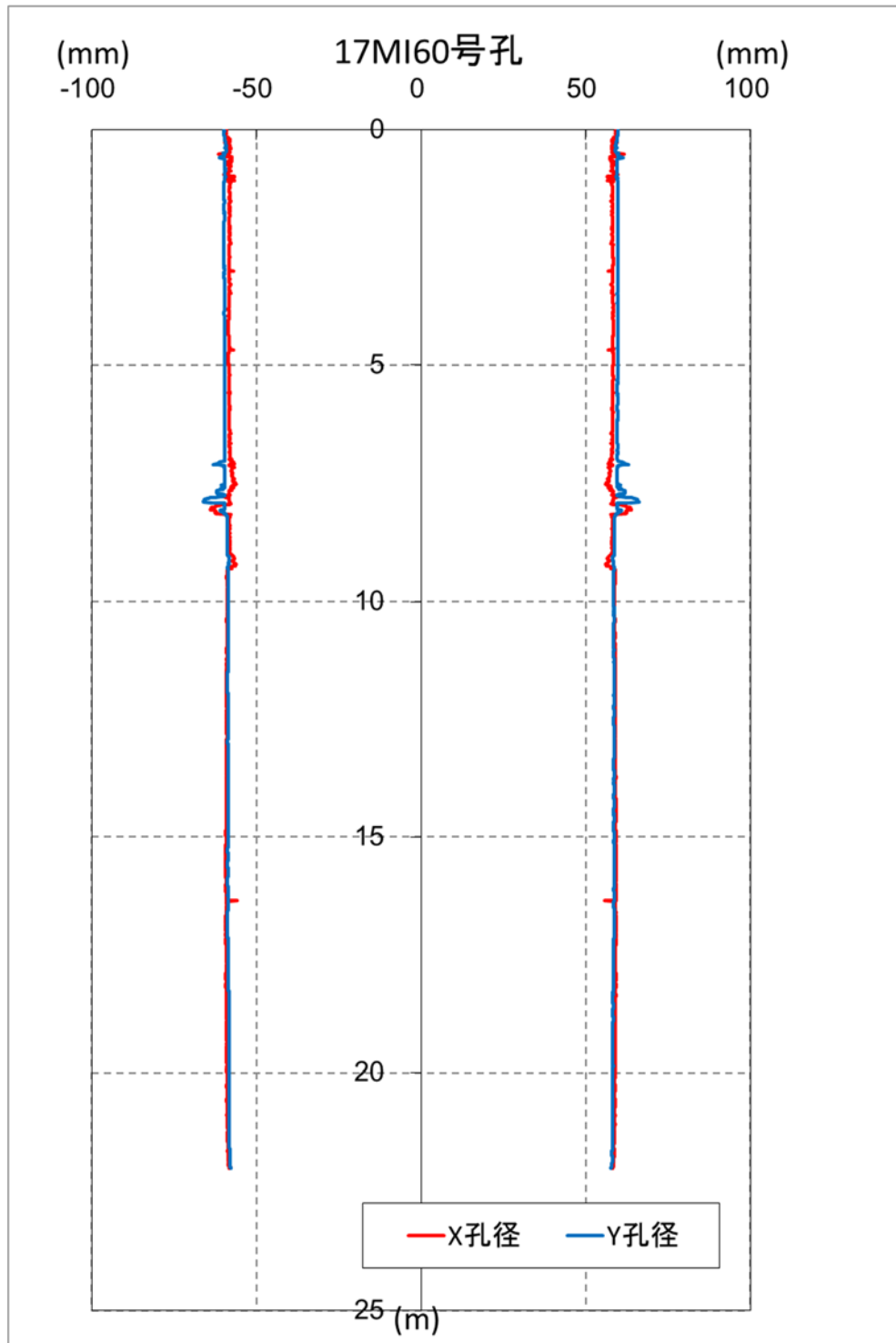


図 4.3.4-38 17MI60号孔キャリパー検層結果



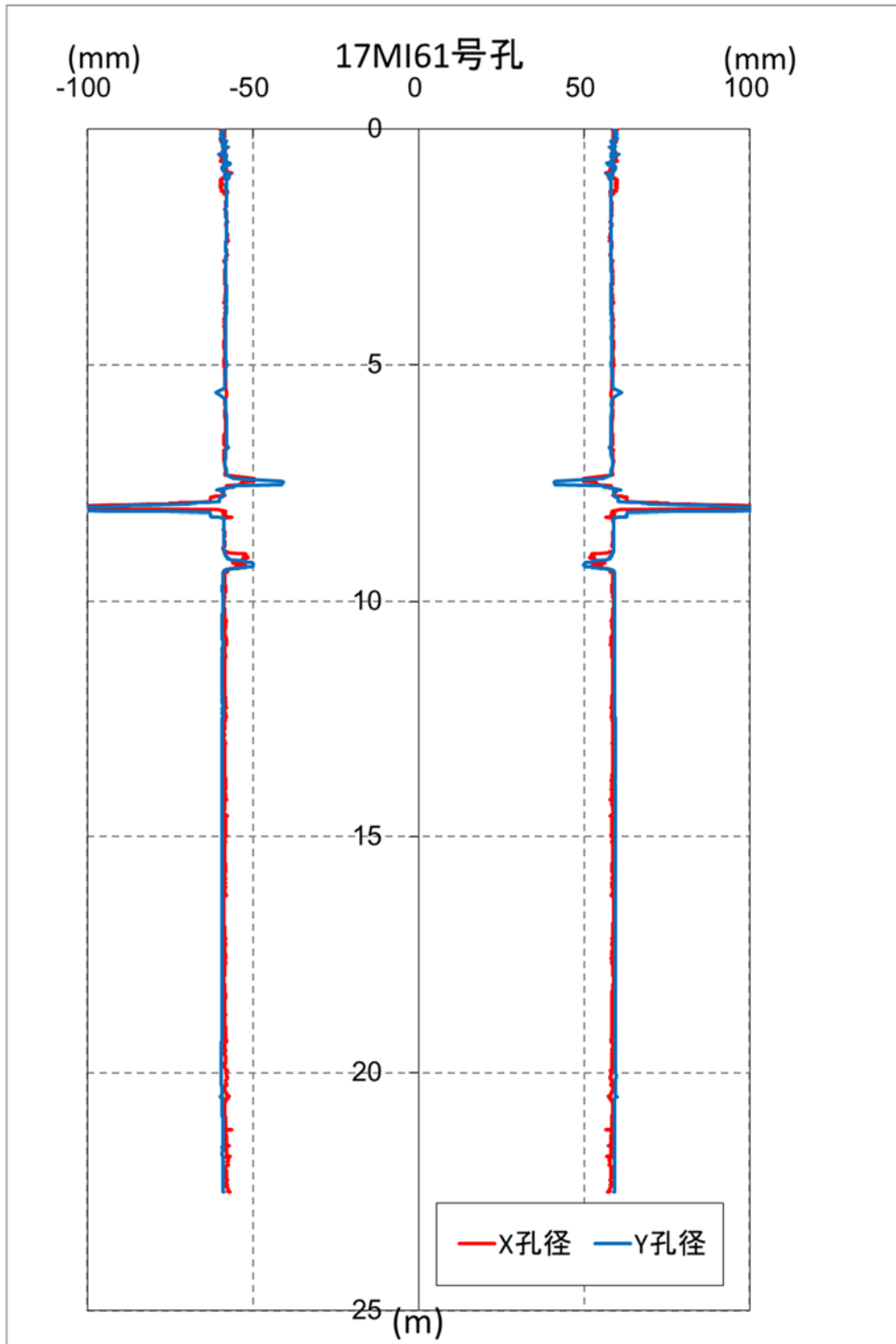


図 4.3.4-39 17MI61 号孔キャリパー検層結果

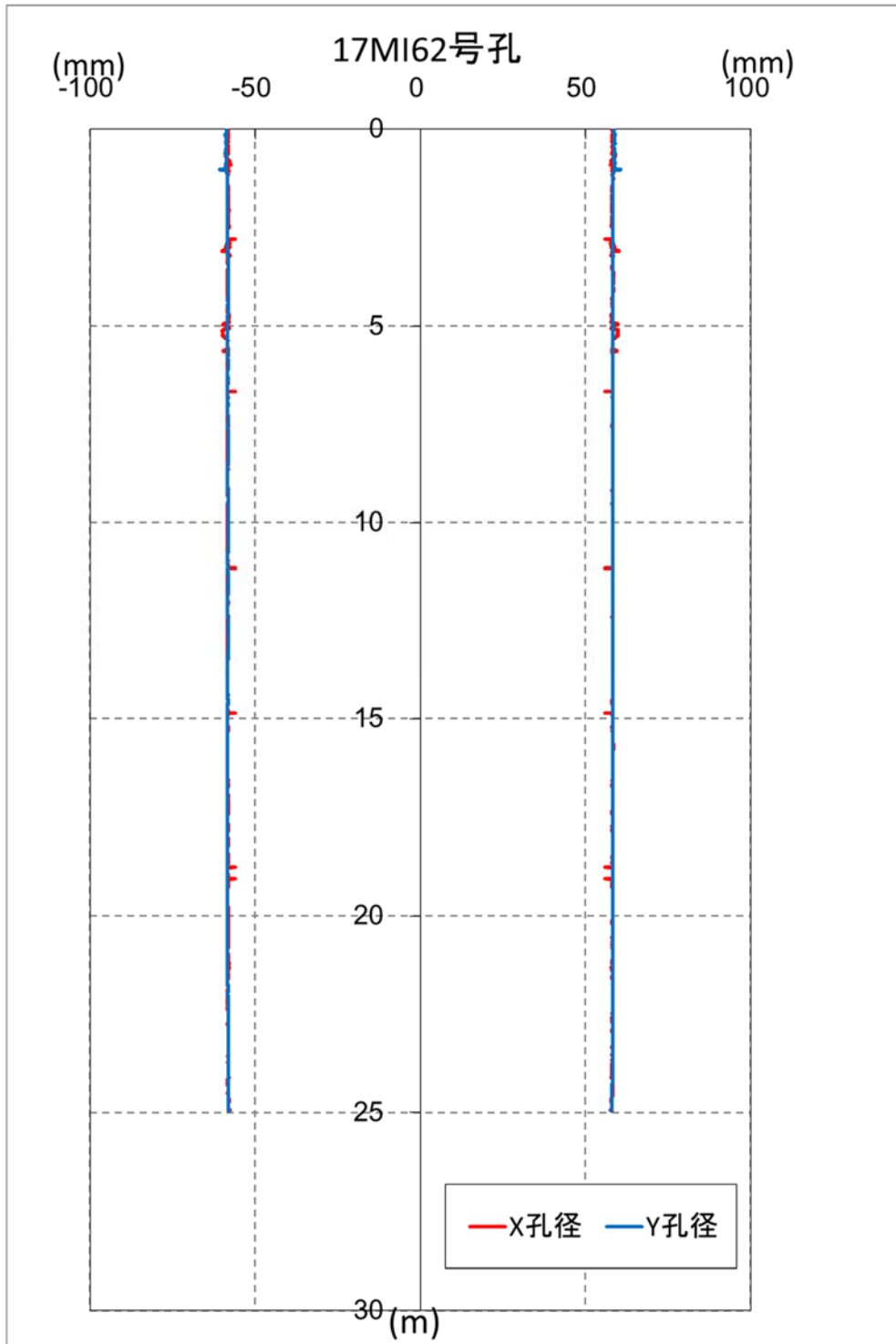


図 4.3.4-40 17MI62号孔キャリパー検層結果

#### 4.3.4.5 高精度孔曲がり検層結果

表 4.3.4-6 に確認ボーリング孔の掘削方向、伏角、掘削長の計画と実績、図 4.3.4-41 にボーリング孔跡の平面図を示す。表 4.3.4-6 の検層結果平均値は、0.5m 毎の方向と伏角を単純に平均した値である。また、図 4.3.4-42～図 4.3.4-44 には、0.5m 毎に測定した方位角と傾斜角を基として計画孔の芯を基準とした変位量を示す。

掘削したボーリング孔跡は、表 4.3.4-6 より方向、伏角ともに計画値と概ね同値であり、計画した孔跡と同様である。詳細に孔曲がり結果をみると、計画した孔跡よりも最大 30cm 上方、15cm 左方へ曲がっている傾向がみられるが、既存孔との干渉は確認されていない。ターゲットフラクチャー面（図 4.3.4-45）でみると、レジン注入口（13MI37 号孔 int-2、12MI31 号孔 int-3）からの浸潤半径は、計画に対して 30～40cm 程度の誤差は生じている。

表 4.3.4-6 孔曲がり検層結果（実績）と計画値一覧

孔名		17MI60 号孔	17MI61 号孔	17MI62 号孔
掘削方向	計画値	S79.8W	S73.8W	S78.8W
	検層結果平均値 (実績)	S79.5W	S73.5W	S78.7W
掘削伏角	計画値	-38.8W	-34.2W	-35.6W
	検層結果平均値 (実績)	-38.35W	-34.33W	-34.90W
掘削長	計画値	23.50m	23.50m	24.50m
	実績値	23.00m	23.50m	26.00m

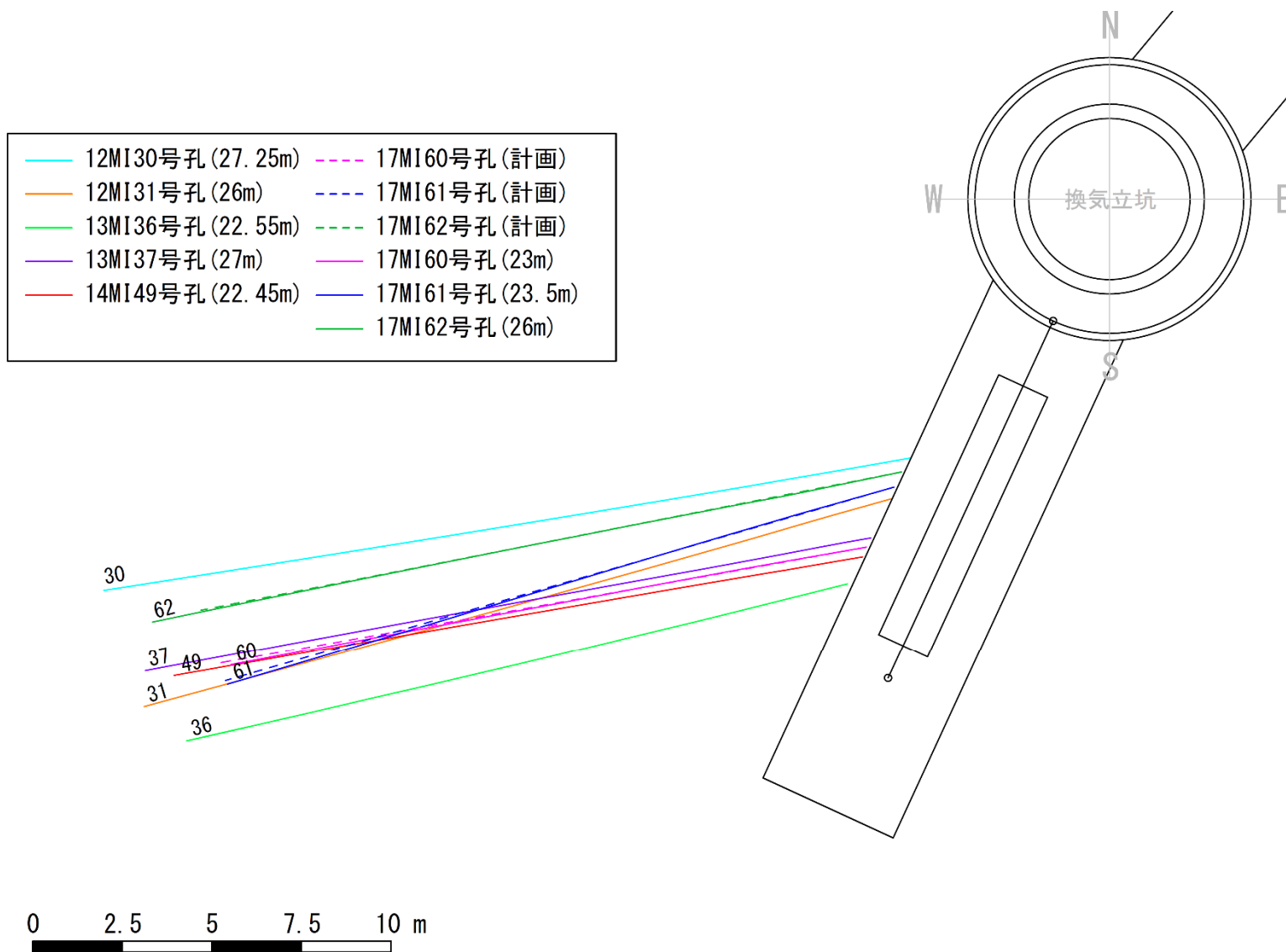


図 4.3.4-41 確認ボーリング孔跡平面図  
4-152

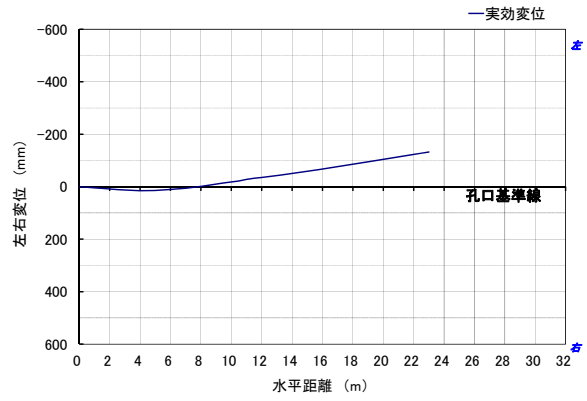
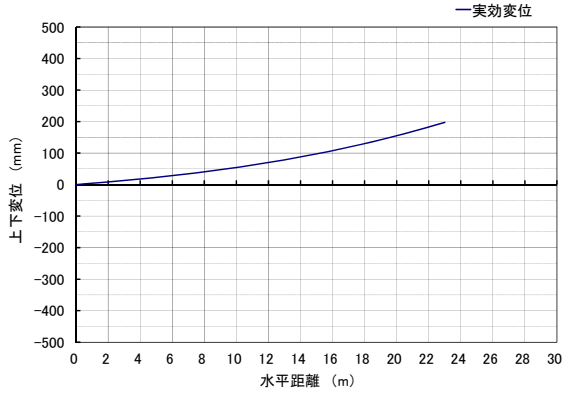


図 4.3.4-42 17MI60 号孔 計画孔の芯に対する変位量 (左：上下変位量 右：左右変位量)

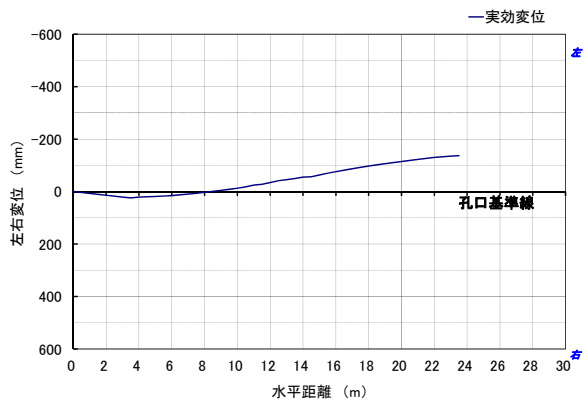
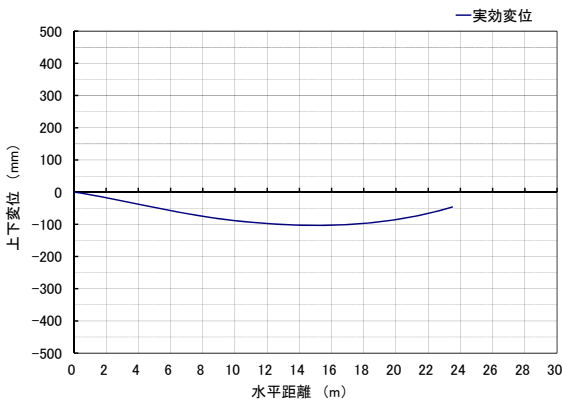


図 4.3.4-43 17MI61 号孔 計画孔の芯に対する変位量 (左：上下変位量 右：左右変位量)

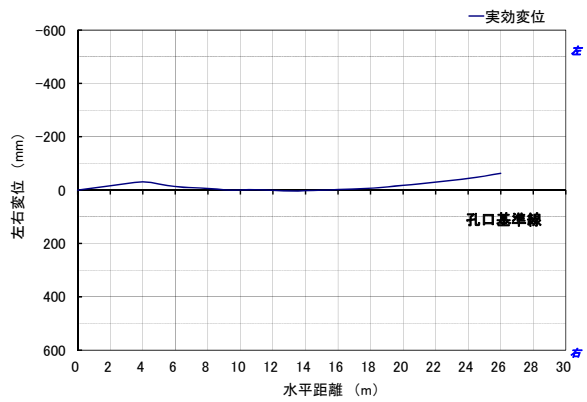
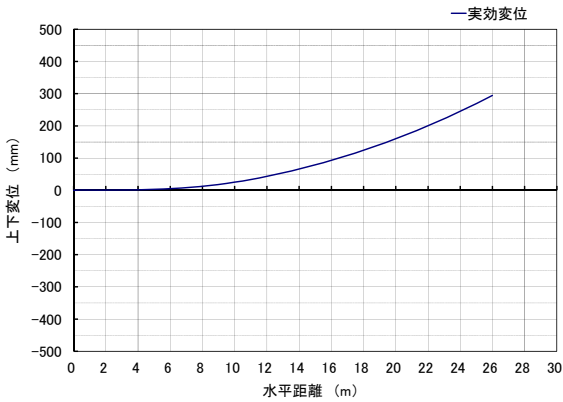


図 4.3.4-44 17MI62 号孔 計画孔の芯に対する変位量 (左：上下変位量 右：左右変位量)

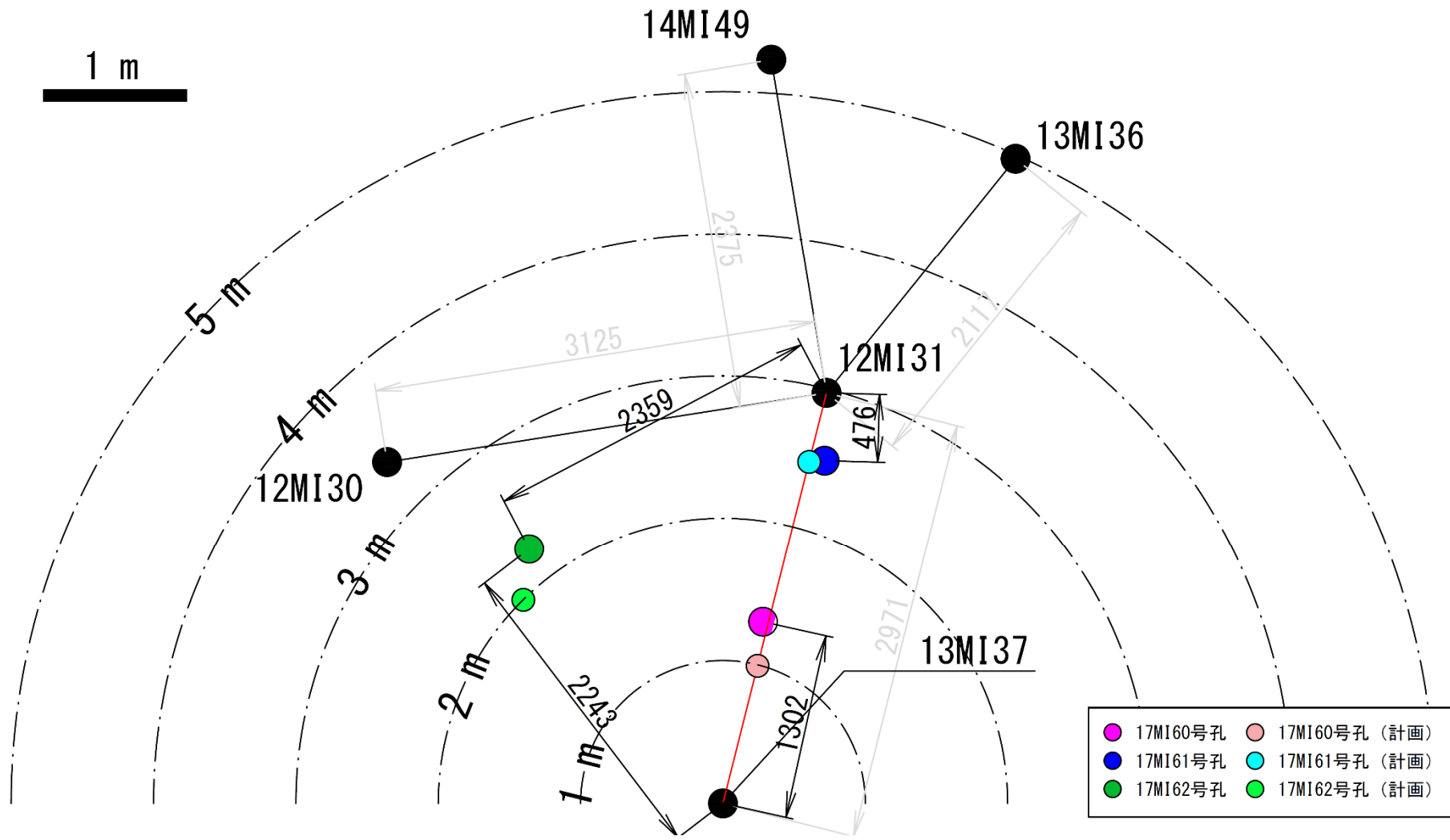


図 4.3.4-45 ターゲットフラクチャー面でのボーリング孔実績位置と計画位置図

#### 4.3.4.6 高解像度 BTV 検層結果

17MI60 号孔～62 号孔について、ODS 計測で取得した孔内展開画像を図 4.3.4-46～図 4.3.4-70 に示す。孔内展開画像から全岩盤分離面を抽出し、「割れ目」「開口割れ目」「鉱物脈」に分類した。その内、割れ目、開口割れ目について、ステレオネット上で統計的に整理した。岩盤分離面の分布状況と主な卓越方向について表 4.3.4-7、ステレオネットに取りまとめた割れ目面の方向分布を図 4.3.4-71 に示す。

ステレオネットの方向分布をみると、全孔とも NW 系の高傾斜割れ目が卓越している一方、開口割れ目はサンプル数が少ないので傾向が見えにくい、17MI60 号孔、62 号孔は低傾斜、17MI61 号孔は NW 系の高傾斜の開口割れ目が多くみられる。サンプル数の多い高傾斜の割れ目面の存在は、深部に分布する花崗岩で生成しやすい割れ目形態である一方、サンプル数は多くないが低傾斜の卓越する開口割れ目面の存在は、比較的浅部で生成されやすいシーティング節理と考えられる。故に本調査サイトは、卓越する深部割れ目に浅部割れ目の特徴が加わっていることより、双方の中間深度の特徴を示していると考えられる。レジンの充填割れ目については、17MI60 号孔、17MI61 号孔で NW 系の高傾斜が卓越しており、17MI62 号孔ではバラつきがある。レジンは 13MI37 号孔 int2 から NW 系高傾斜の割れ目を対象に注入しており、事前の高粘性流体注入試験や BTV 観察等により水理的、地質学的に連通性が確認されている 12MI31 号孔 int3 に向かって流入すると想定していた。17MI60 号孔、17MI61 号孔は、13MI37 号孔 int2－12MI31 号孔 int3 のライン上を通過するように掘削していたため、対象割れ目と同系統の走向傾斜をもつレジン充填割れ目が確認されたと考えられる。一方、事前の高粘性流体注入試験等により 13MI37 号孔 int2 から水理的に連通性のあった 12MI30 号孔 int2,3 について、その区間のレジン流入の確認として 17MI62 号孔を掘削した。レジン充填割れ目の走向傾斜の分布にバラつきがみられることから、対象割れ目がネットワーク状に発達することが示唆された。

レジンの充填が確認された箇所について、事前のコア観察でレジンの充填が認められた箇所を中心に HR-BTV 計測で詳細観察を実施した。表 4.3.4-8 に詳細観察を実施したレジン充填箇所、図 4.3.4-72～図 4.3.4-81 に詳細観察結果を示す。

詳細観察で確認されたレジン充填割れ目は、全周を連続して充填する割れ目は無く、部分的にレジンが充填する形態で認められた。中でも充填箇所が明確な割れ目は 17MI60 号孔 N28W76E/22.12mabh であり、鉱物が充填、密着する箇所に対して部分的に充填される形態で最大で 1.86mm の開口幅が確認された。一方、地質学的に連通性が期待された 17MI61 号孔 N28W84E にはレジン充填割れ目は確認されず、表 4.3.4-5 に示す走向傾斜の割れ目でレジン充填割れ目が確認されている。故に対象割れ目を流れる地下水は単一の水みちではなく、透水性の高い水みちを選択的に流れていることが示唆された。

表 4.3.4-7 岩盤分離面の分布状況と主な卓越方向

孔 番	17MI60	17MI61	17MI62
計測区間	0.14m~22.78m	0.18m~23.16m	0.16m~25.70m
全岩盤分離面	184	214	240
割れ目	172	204	223
開口割れ目	12	10	13
鉱物脈	0	0	4
岩盤分離面の分布密度 (/m)	8.13	9.31	9.40
全岩盤分離面の第1卓越方向	N10W89E	N17W89E	N14W89E
割れ目の第1卓越方向	N10W89E	N17W89E	N14W89E
開口割れ目の第1卓越方向	N36W2SW	N27W85E	N79W3N
鉱物脈の第1卓越方向			N21W85E

※計測区間の延長は小数点2桁目を切り上げ表記

表 4.3.4-8 詳細観察を実施したレジン充填箇所一覧

孔 番	走向傾斜	深度 (m)	充填幅 (mm)	充填状態
17MI60	N28W76E	22.12	0.31	密着
17MI61	N3E25E	21.75	0.39	密着
	N44W64NE	22.47	0.06	密着
	N9E25E	22.87	0.13	充填領域大
	(N28W84E)※	(20.84)※	(0.03)※	-
	N19W87E	22.53	0.06	密着
17MI62	N29E80W	22.48	0.25	密着
	N49W46NE	22.71	0.02	充填領域小
	N34E29SE	22.78	0.05	充填領域中
	N31W82SW	24.38	0.06	密着

※N28W84E の割れ目にはレジンは充填していないが、地質学的に連通性が期待された箇所。充填幅は、鉱物充填幅を示す。



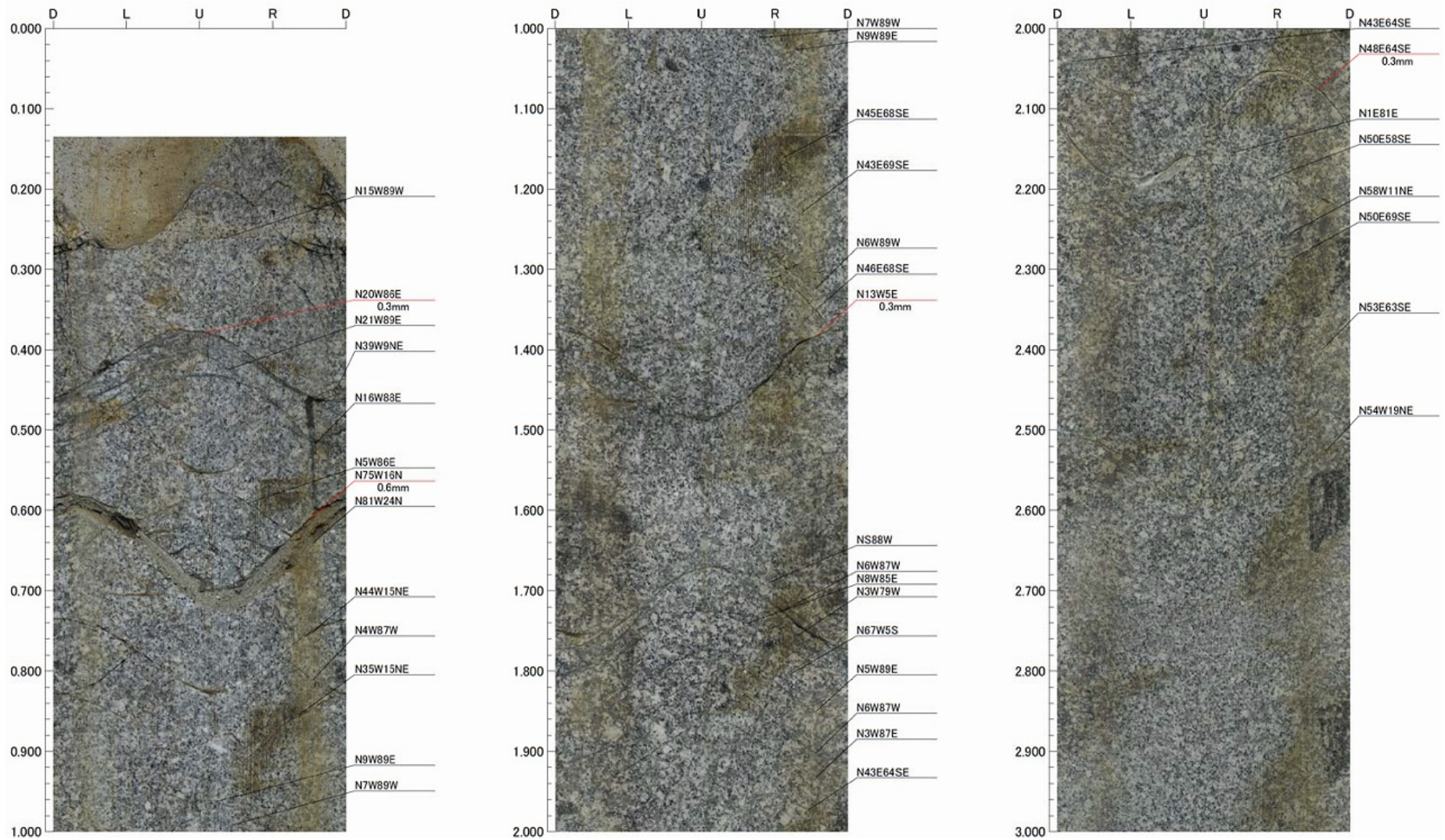


图 4.3.4-46 17MI60 号孔 孔壁断面图(0.14~3.00mab)

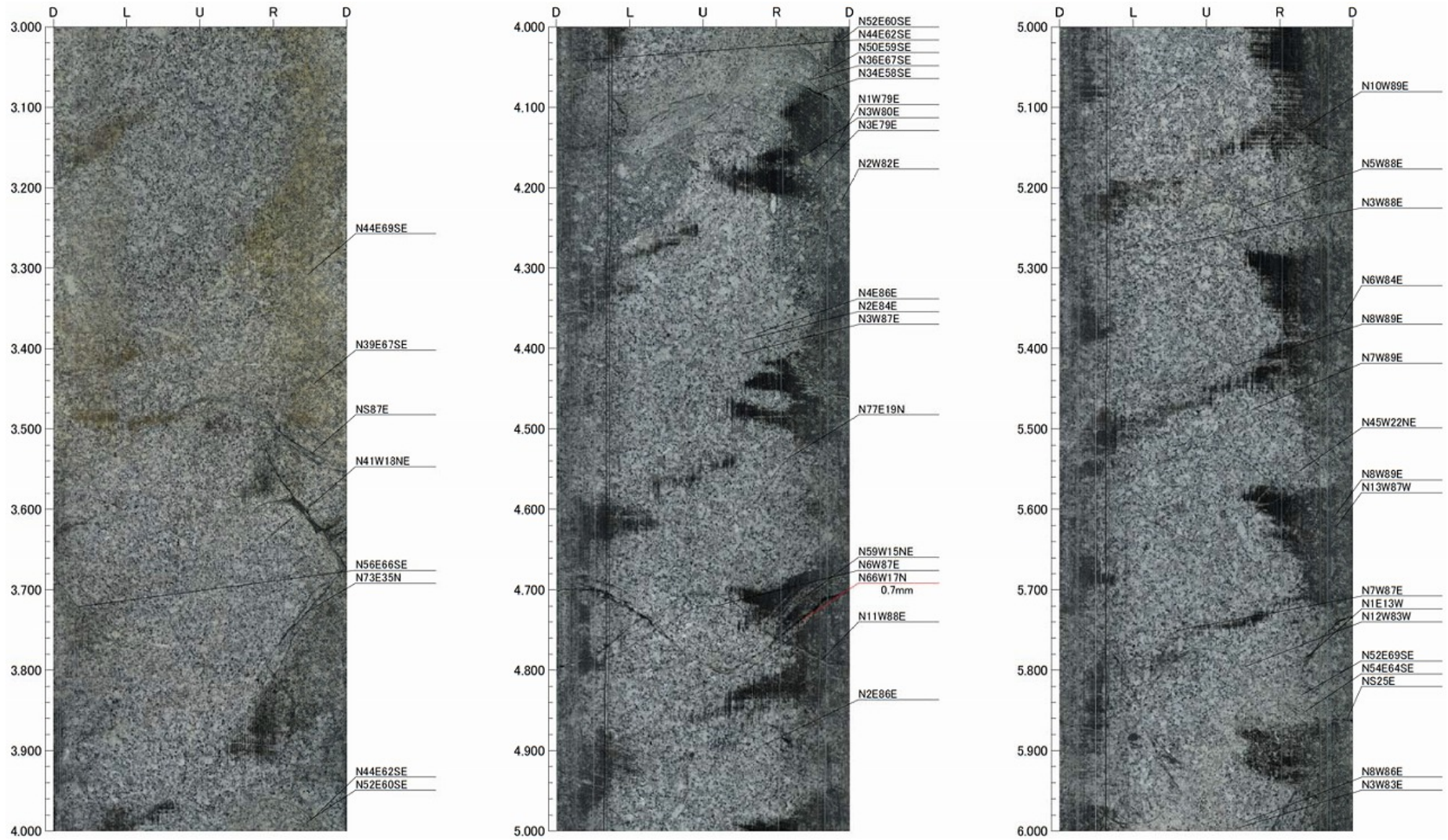


图 4.3.4-47 17MI60 号孔 孔壁断面图(3.00~6.00mab)

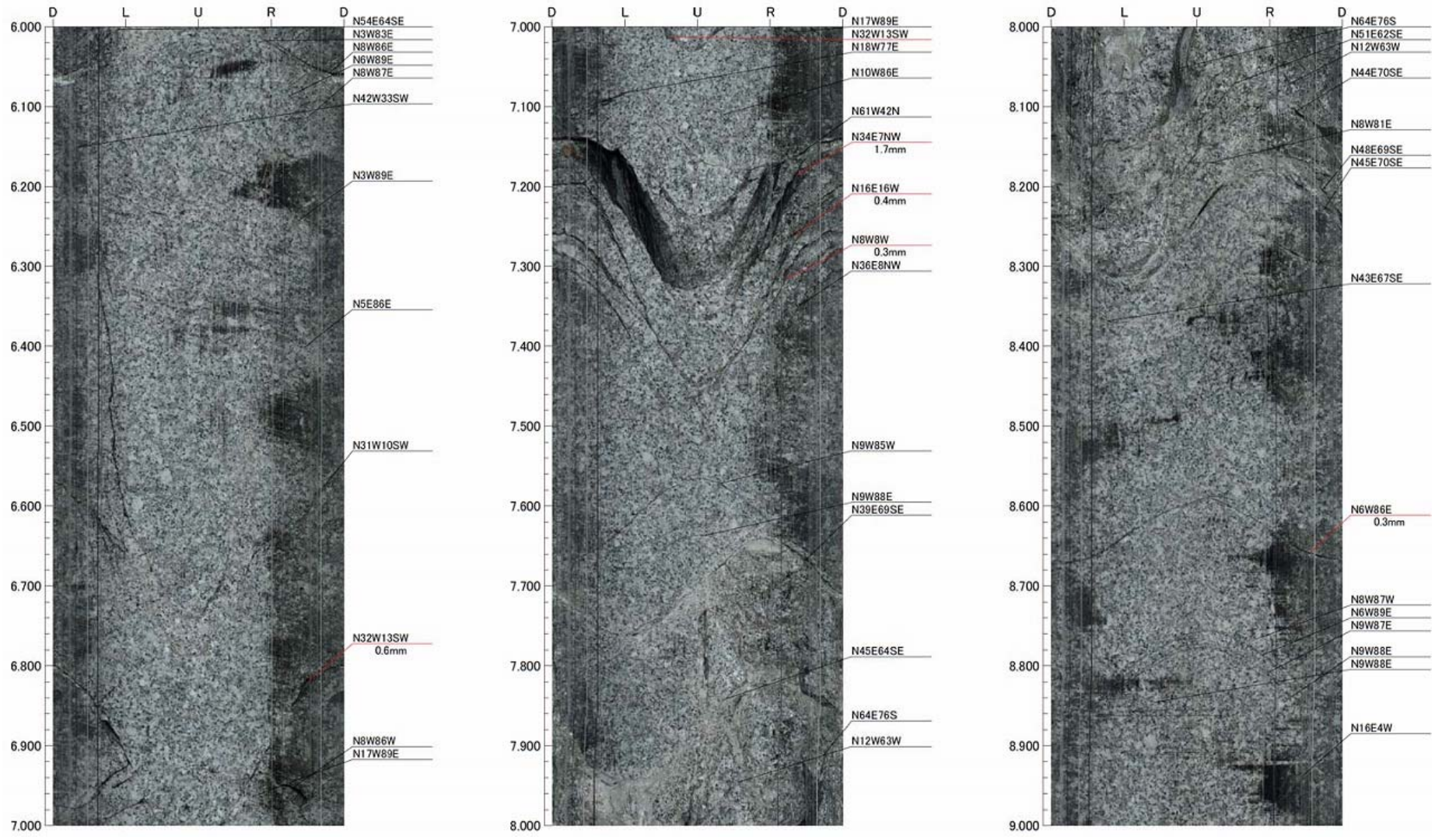


图 4.3.4-48 17MI60 号孔 孔壁断面图(6.00~9.00mab)

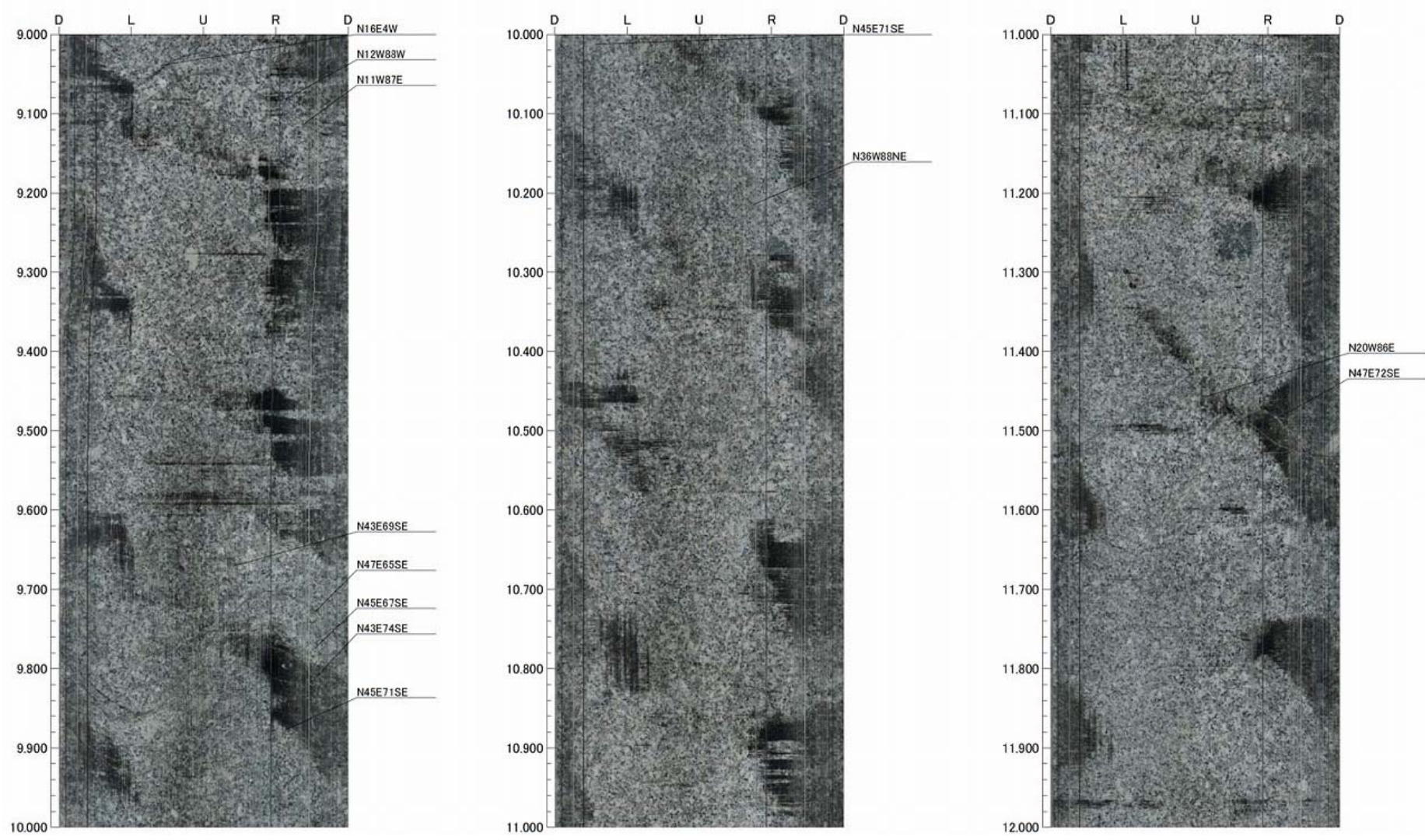


图 4.3.4-49 17MI60 号孔 孔壁断面图(9.00~12.00mabh)

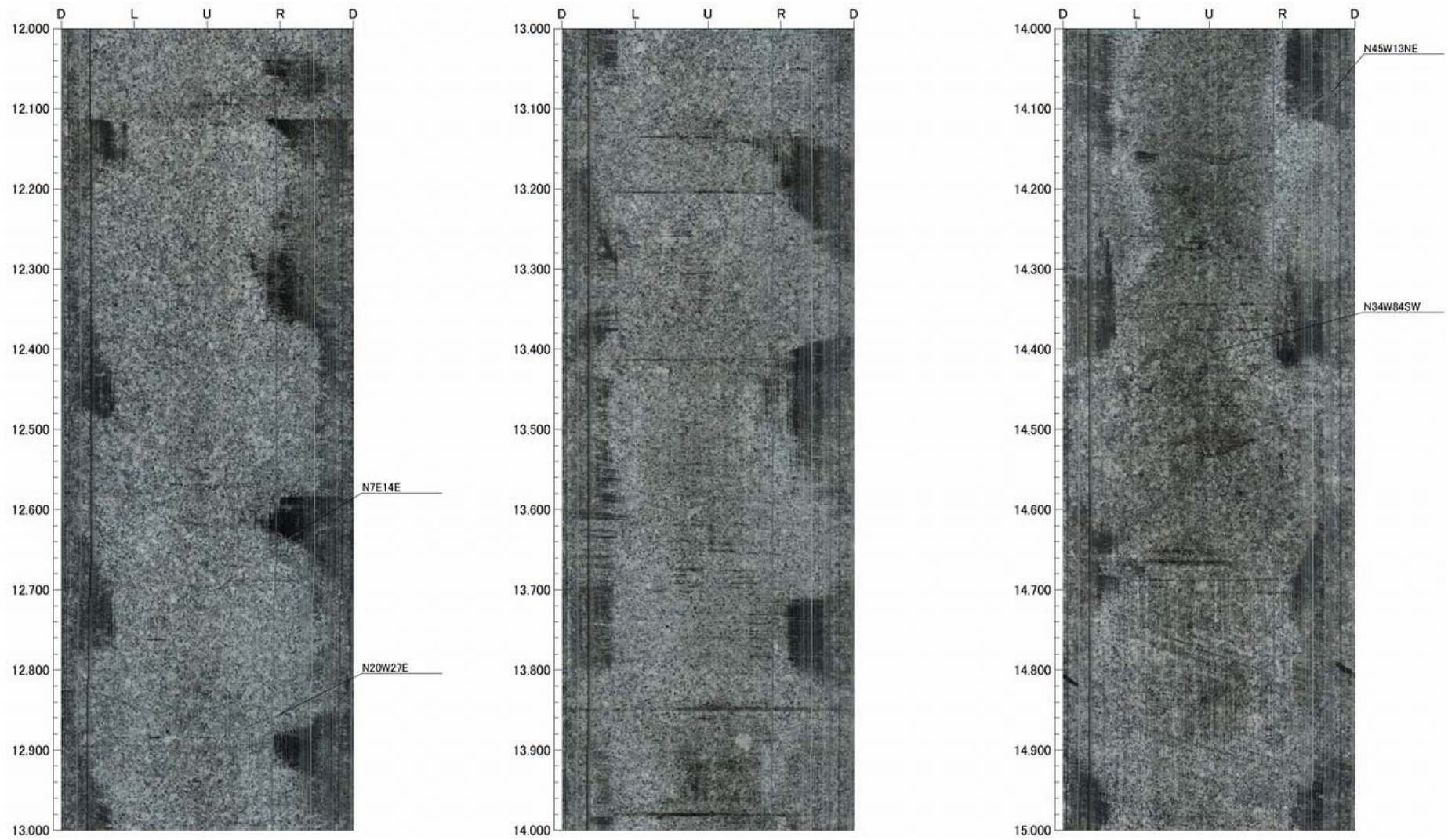


图 4.3.4-50 17MI60 号孔 孔壁断面图(12.00~15.00mab)

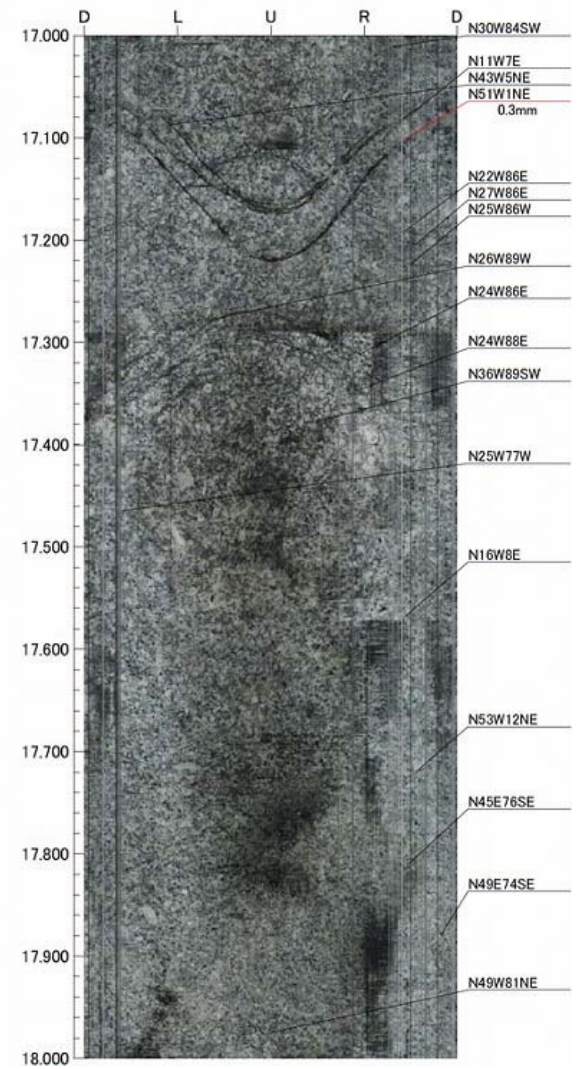
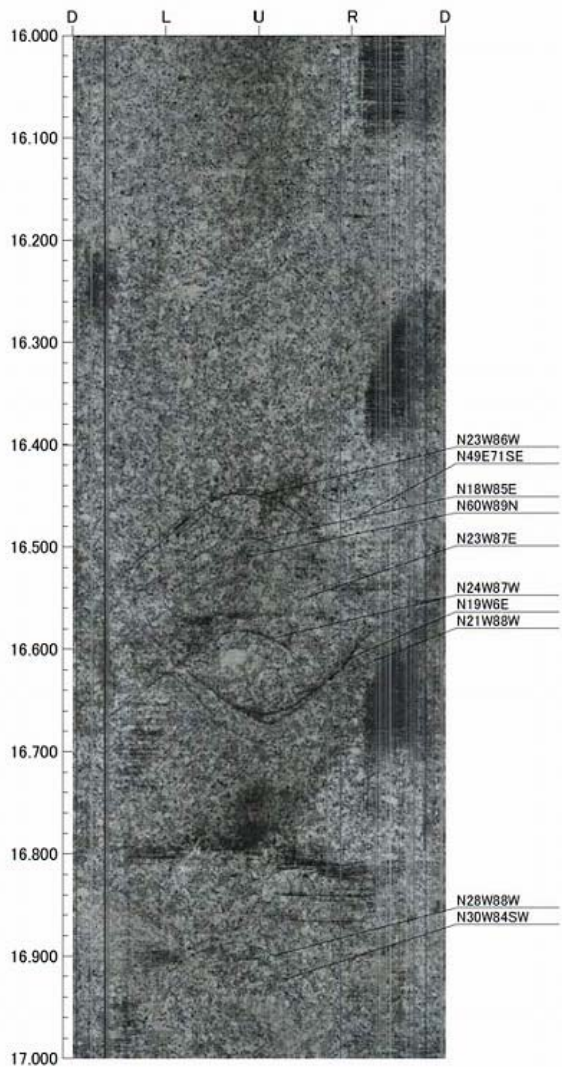
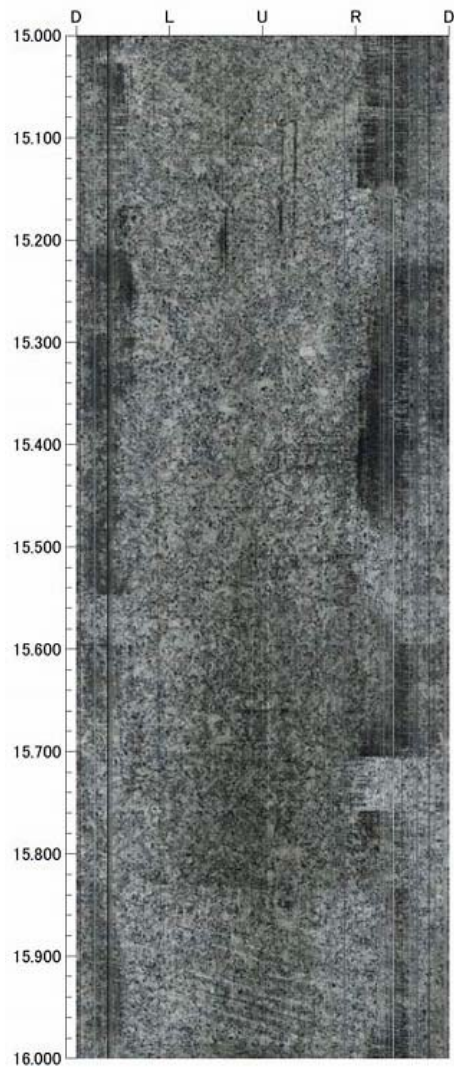


图 4.3.4-51 17MI60 号孔 孔壁断面图(15.00~18.00mab)

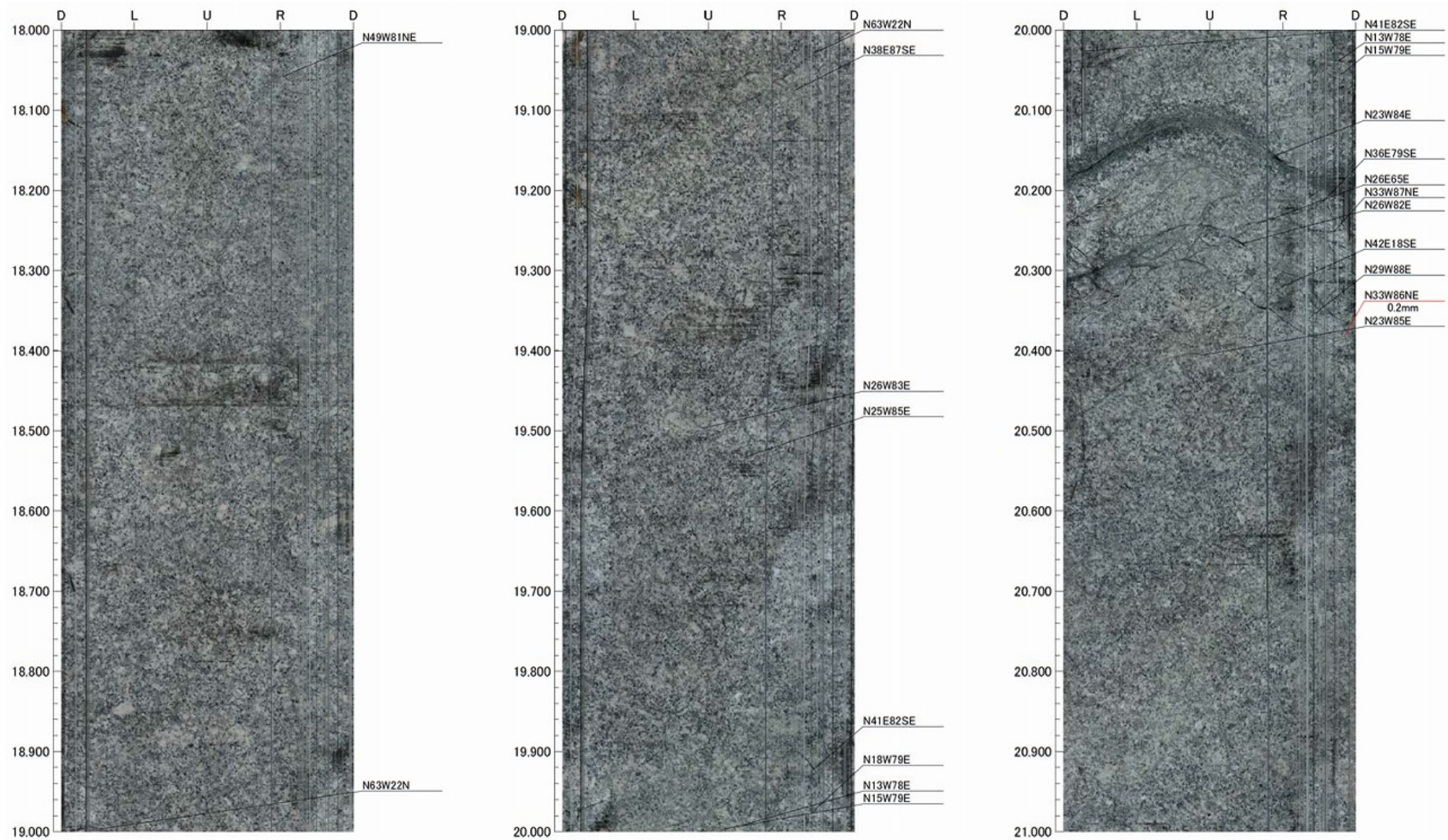


图 4.3.4-52 17MI60 号孔 孔壁断面图(18.00~21.00mab)

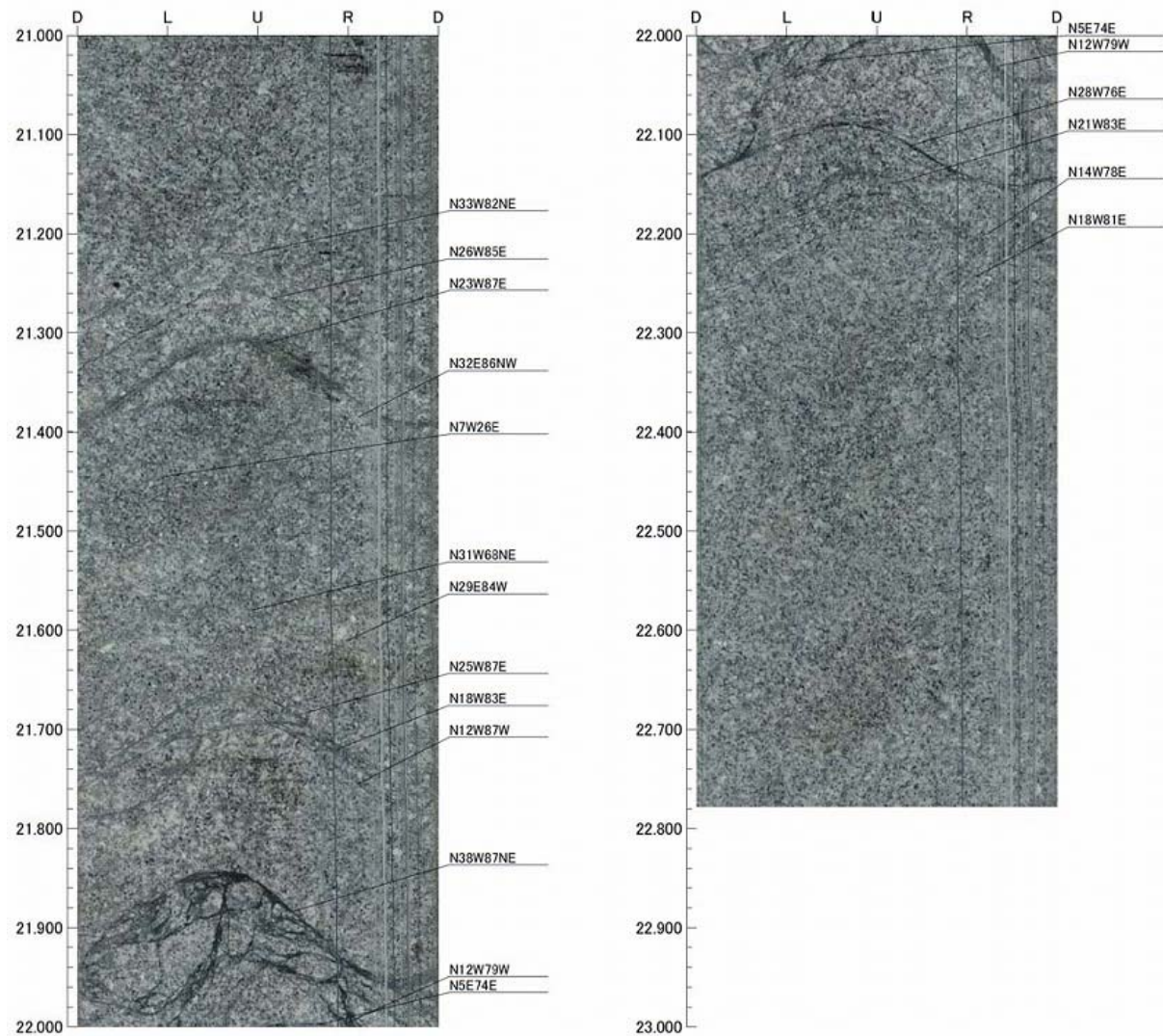


图 4.3.4-53 17MI60 号孔 孔壁断面图(21.00~22.78mab)



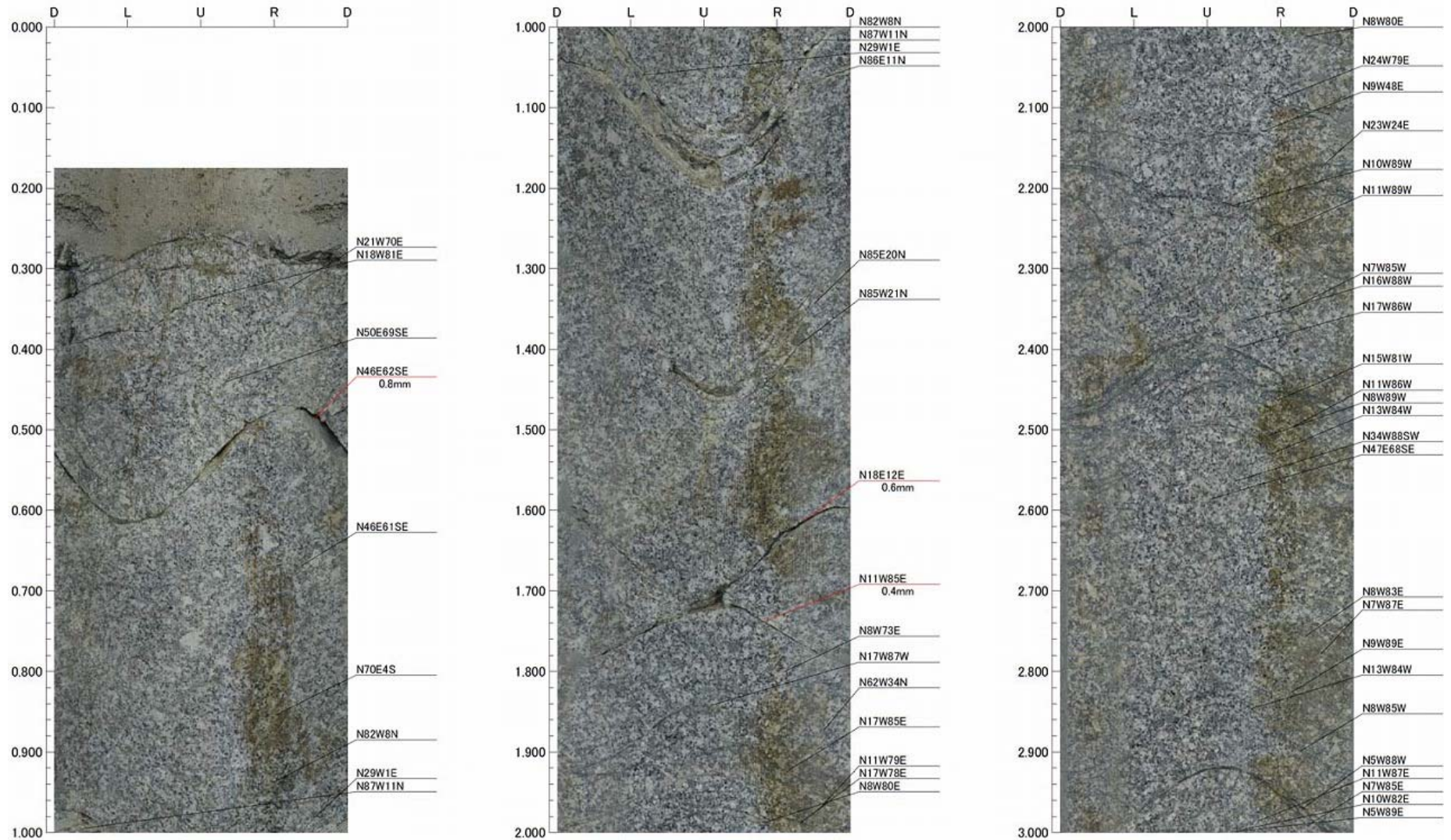


图 4.3.4-54 17MI61 号孔 孔壁断面图(0.18~3.00mab)

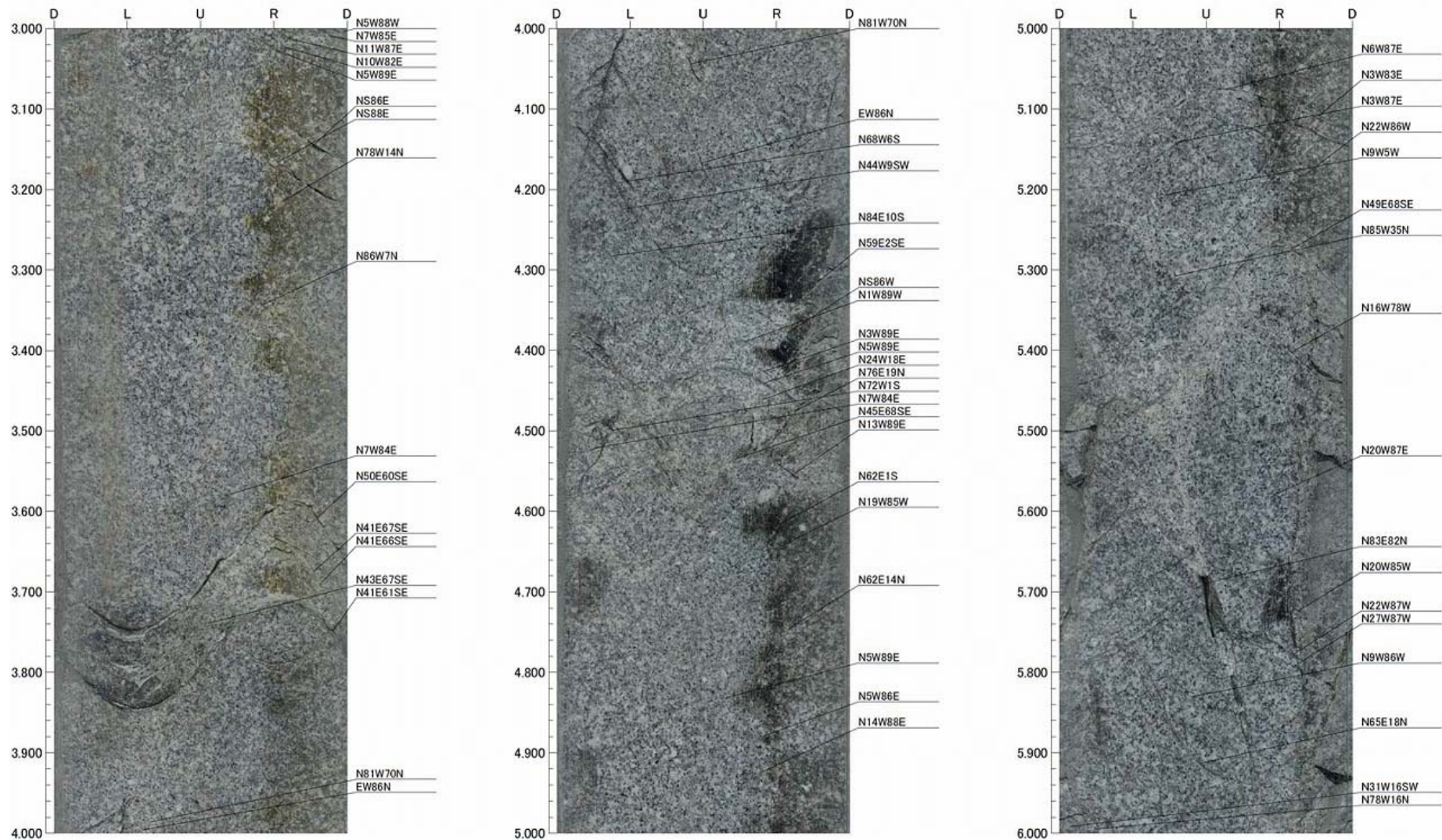


图 4.3.4-55 17MI61 号孔 孔壁断面图(3.00~6.00mab)

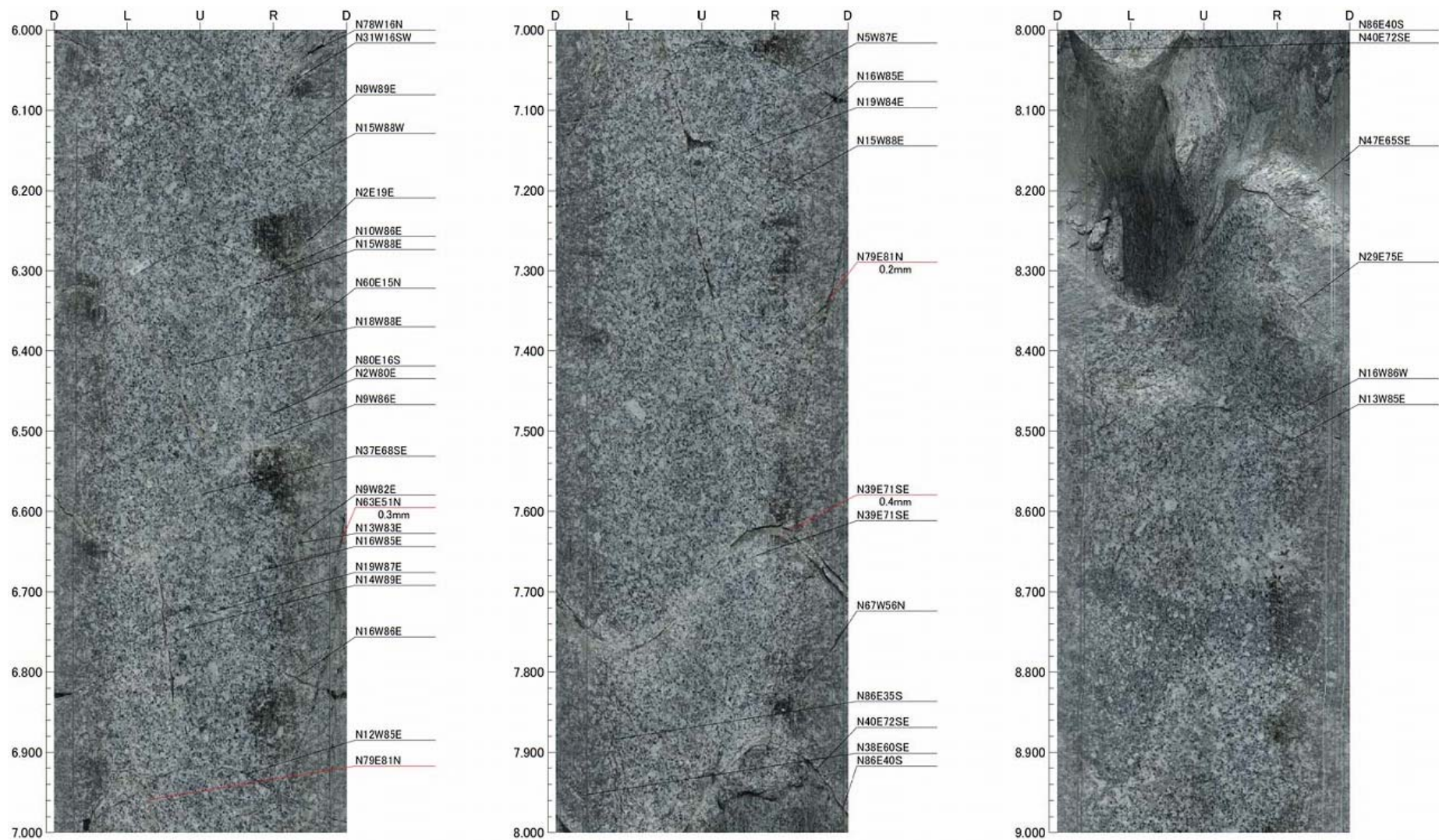


图 4.3.4-56 17MI61 号孔 孔壁断面图(6.00~9.00mab)

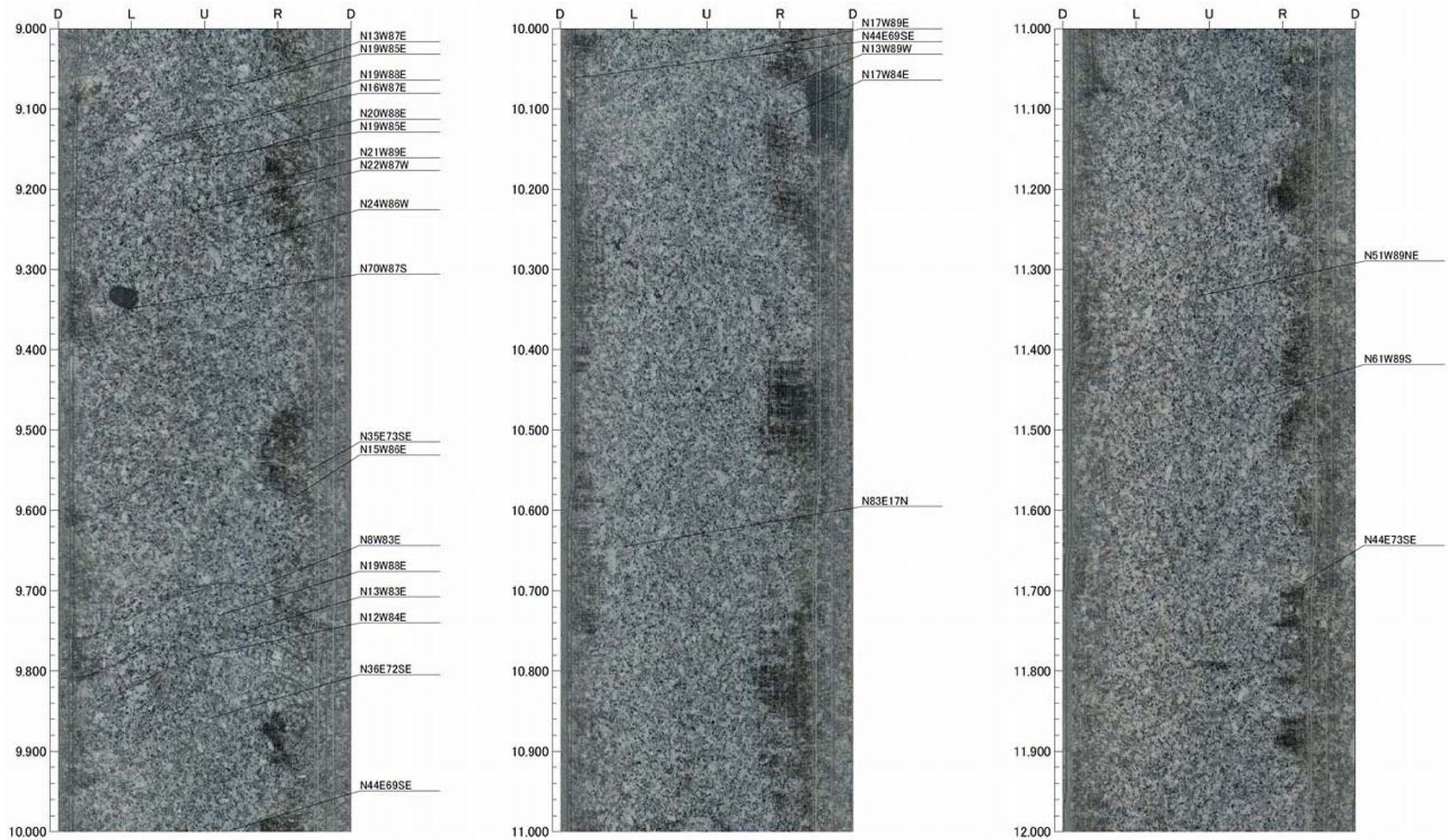


图 4.3.4-57 17MI61 号孔 孔壁断面图(9.00~12.00mab)

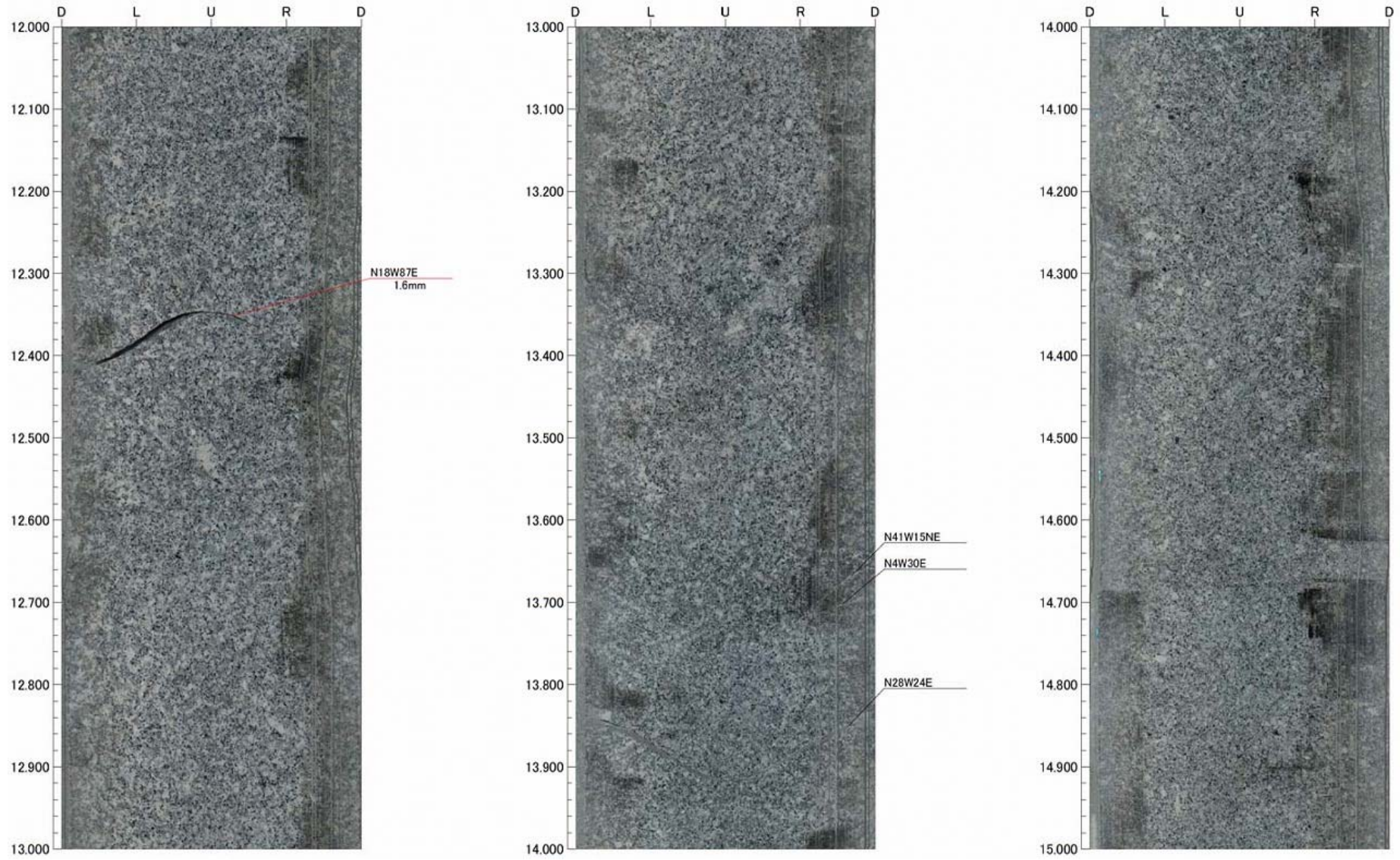


图 4.3.4-58 17MI61 号孔 孔壁断面图(12.00~15.00mab)

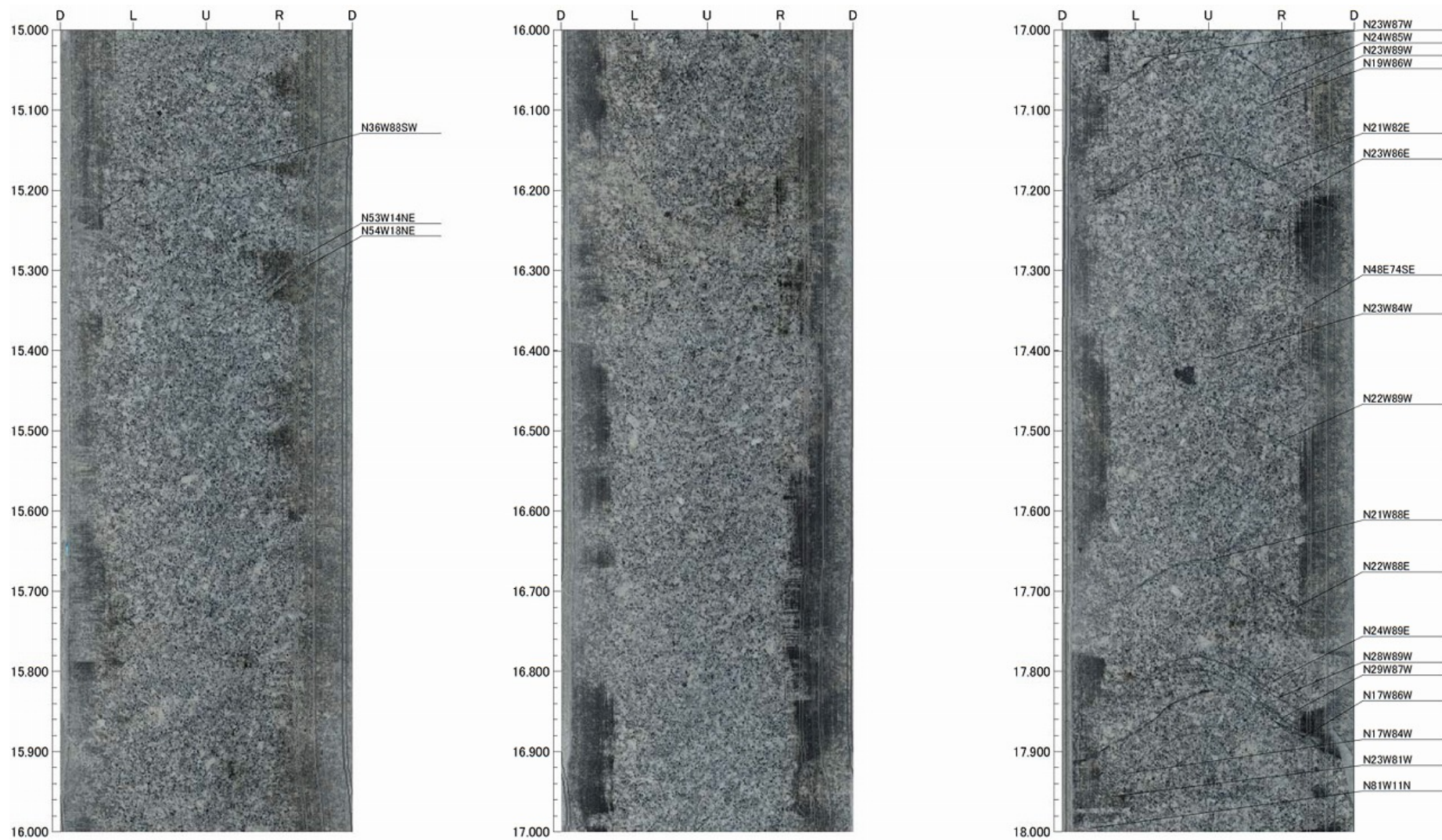


图 4.3.4-59 17MI61 号孔 孔壁断面图(15.00~18.00mab)

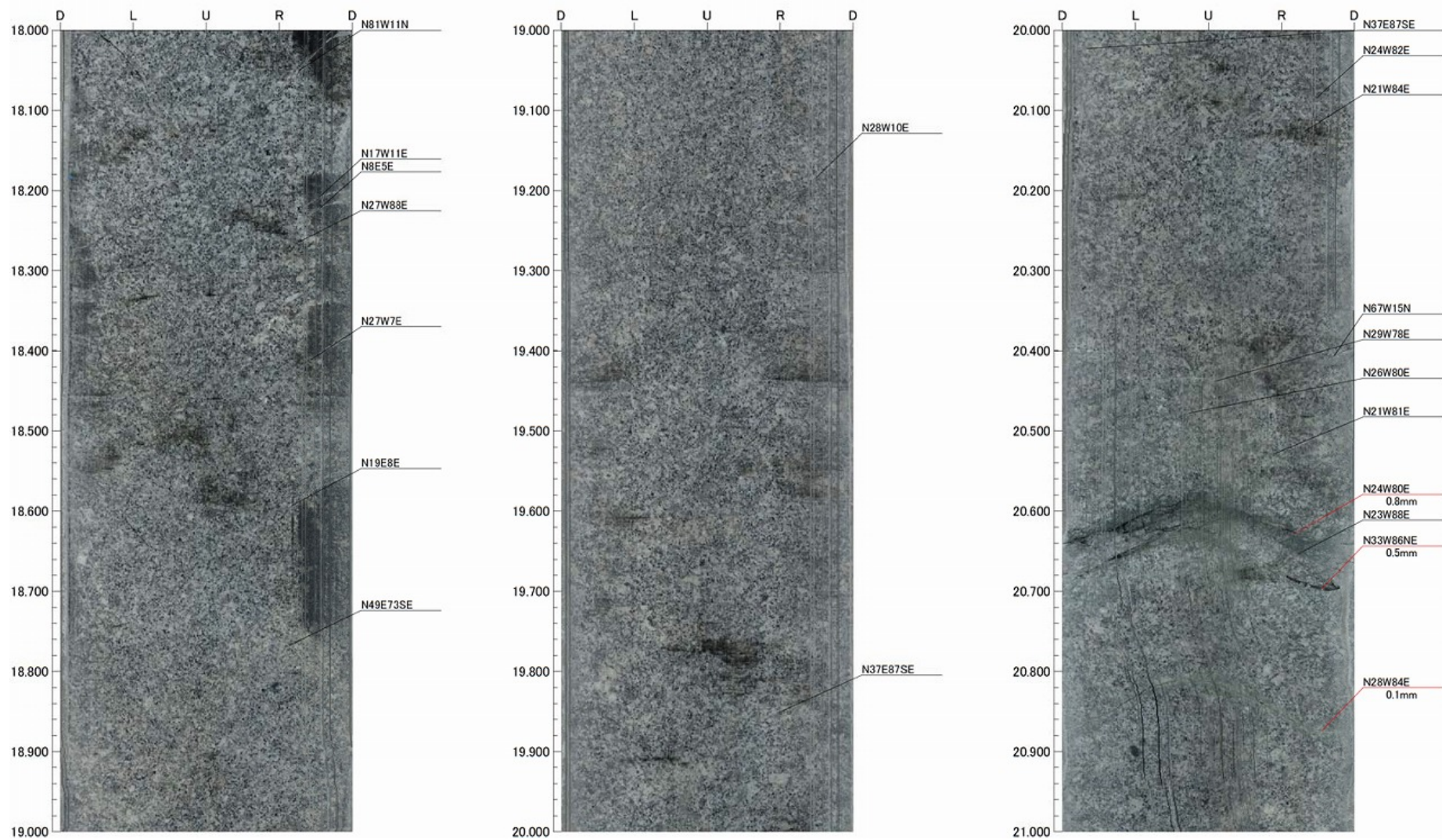


图 4.3.4-60 17MI61 号孔 孔壁断面图(18.00~21.00mabh)

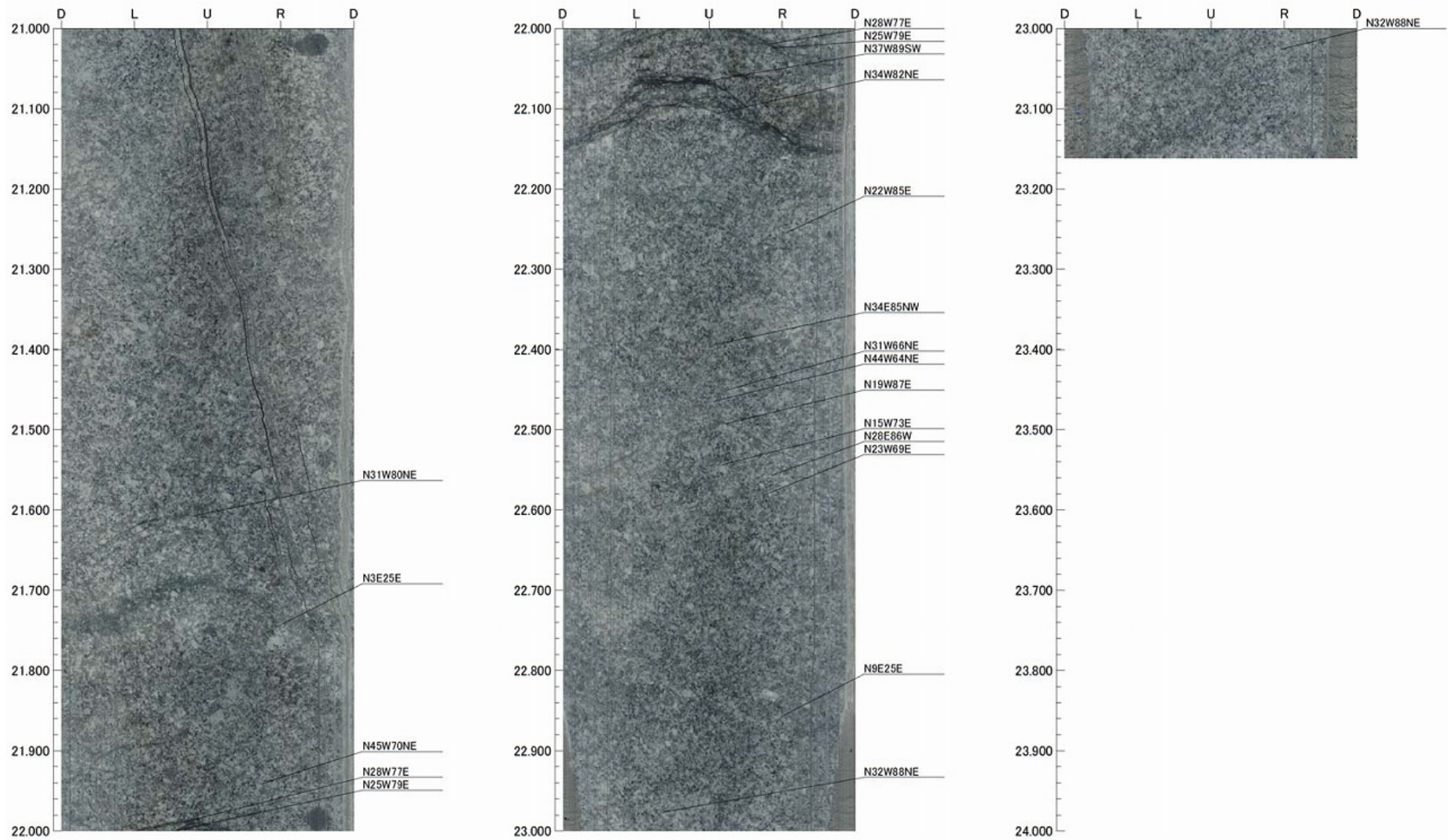


图 4.3.4-61 17MI61 号孔 孔壁断面图(21.00~23.16mab)



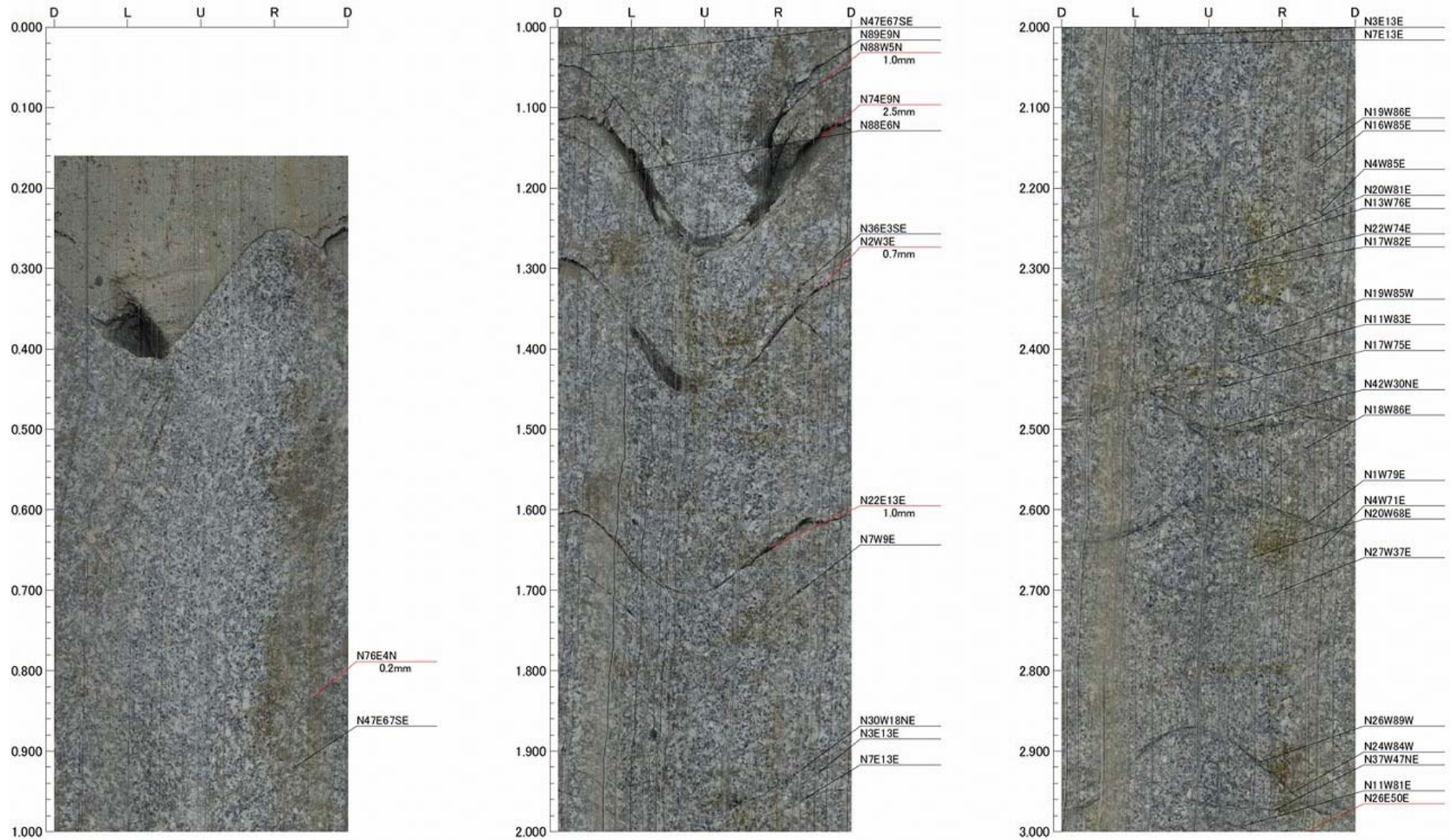


图 4.3.4-62 17MI62 号孔 孔壁断面图(0.16~3.00mabh)

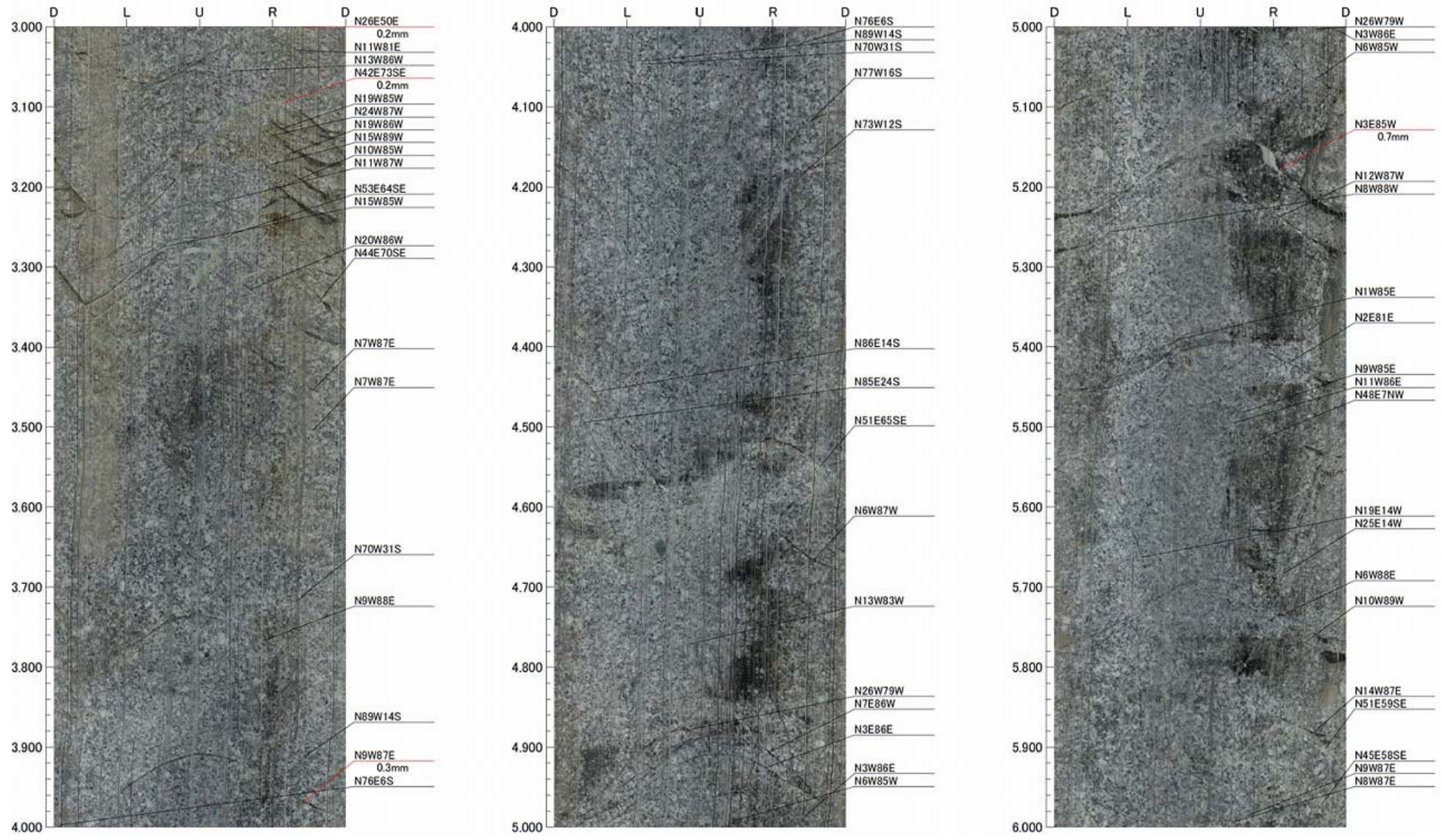


图 4.3.4-63 17MI62 号孔 孔壁断面图(3.00~6.00mab)

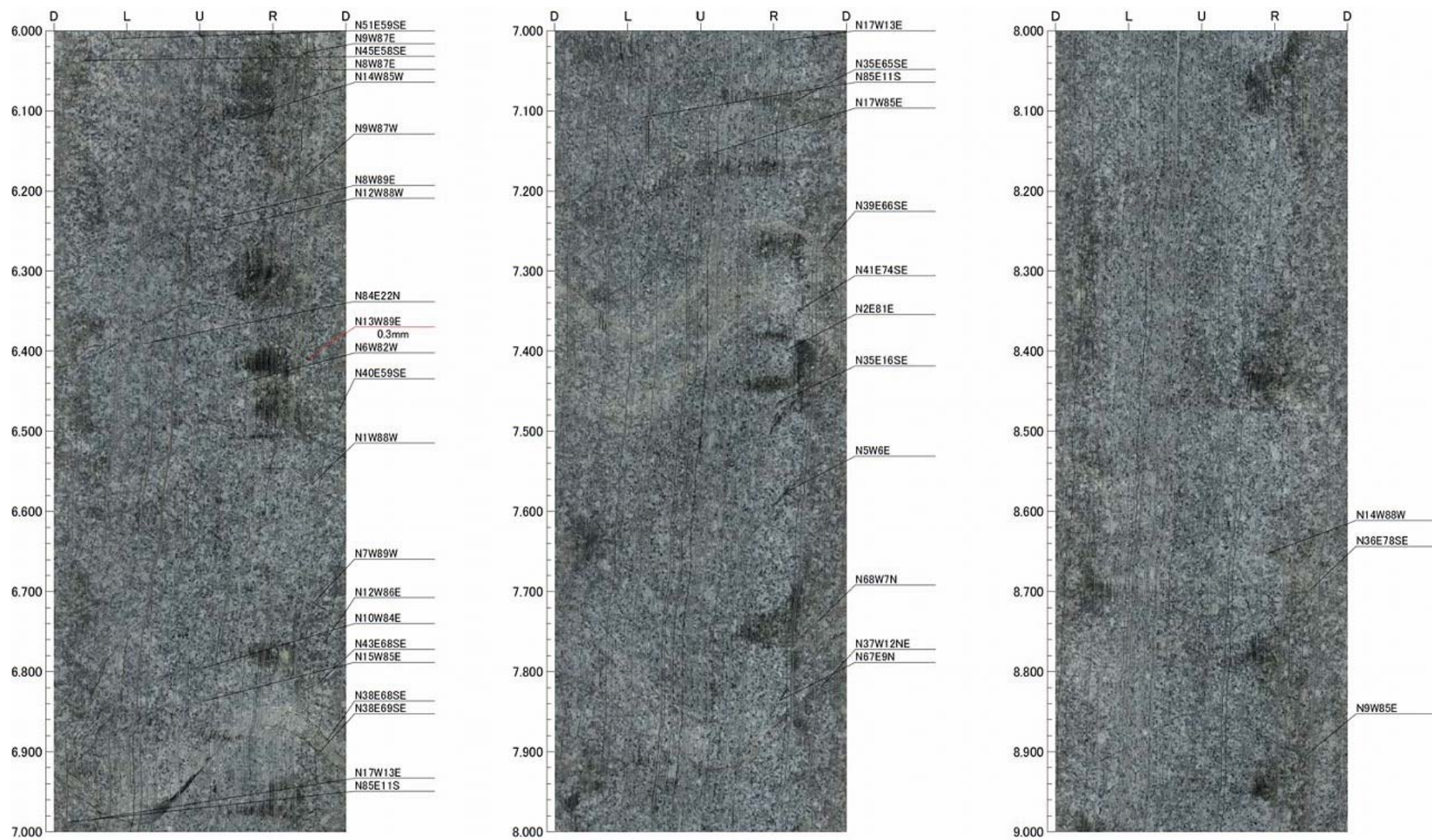


图 4.3.4-64 17MI62 号孔 孔壁断面图(6.00~9.00mab)

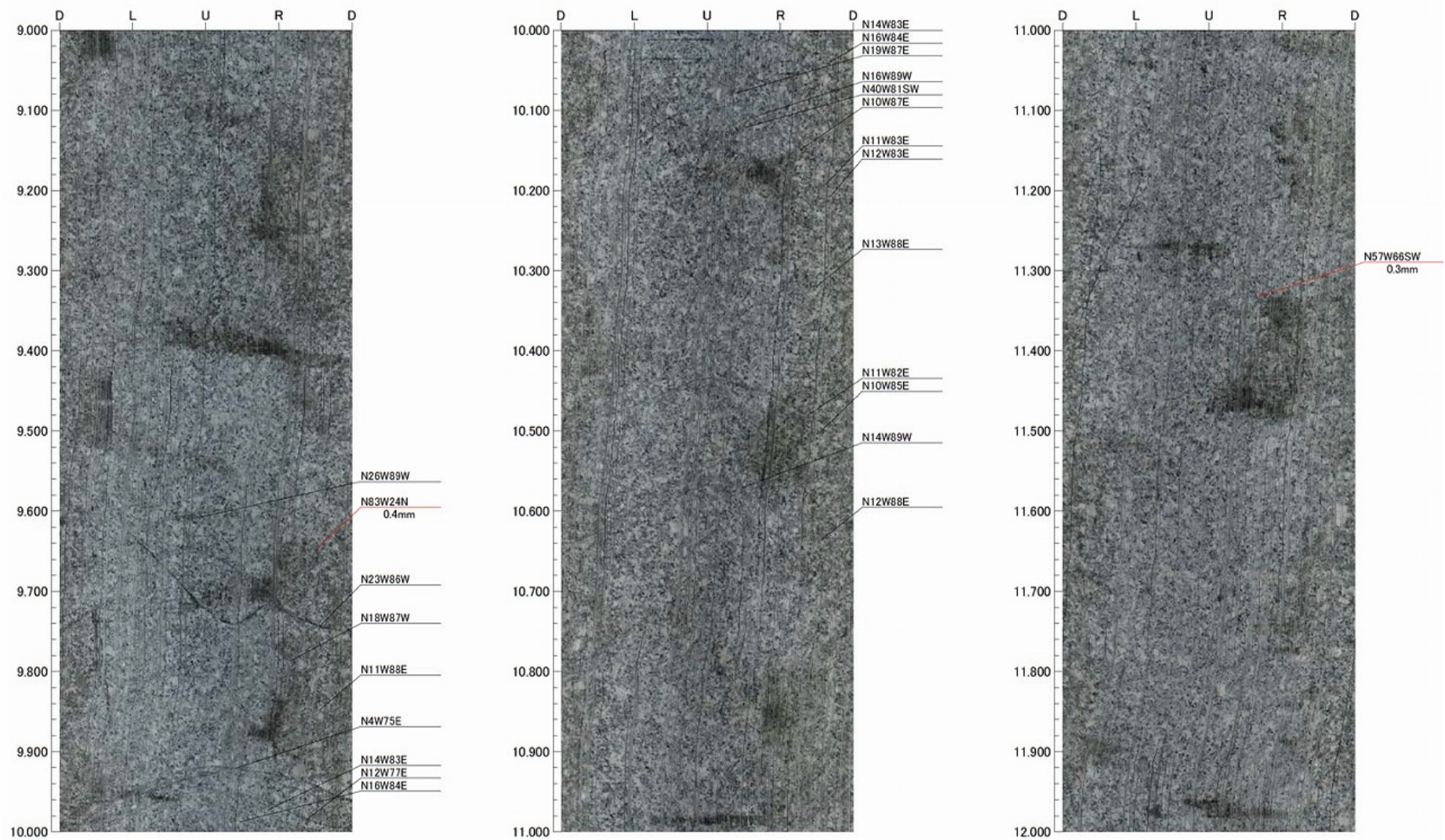


图 4.3.4-65 17MI62 号孔 孔壁断面图(9.00~12.00mab)

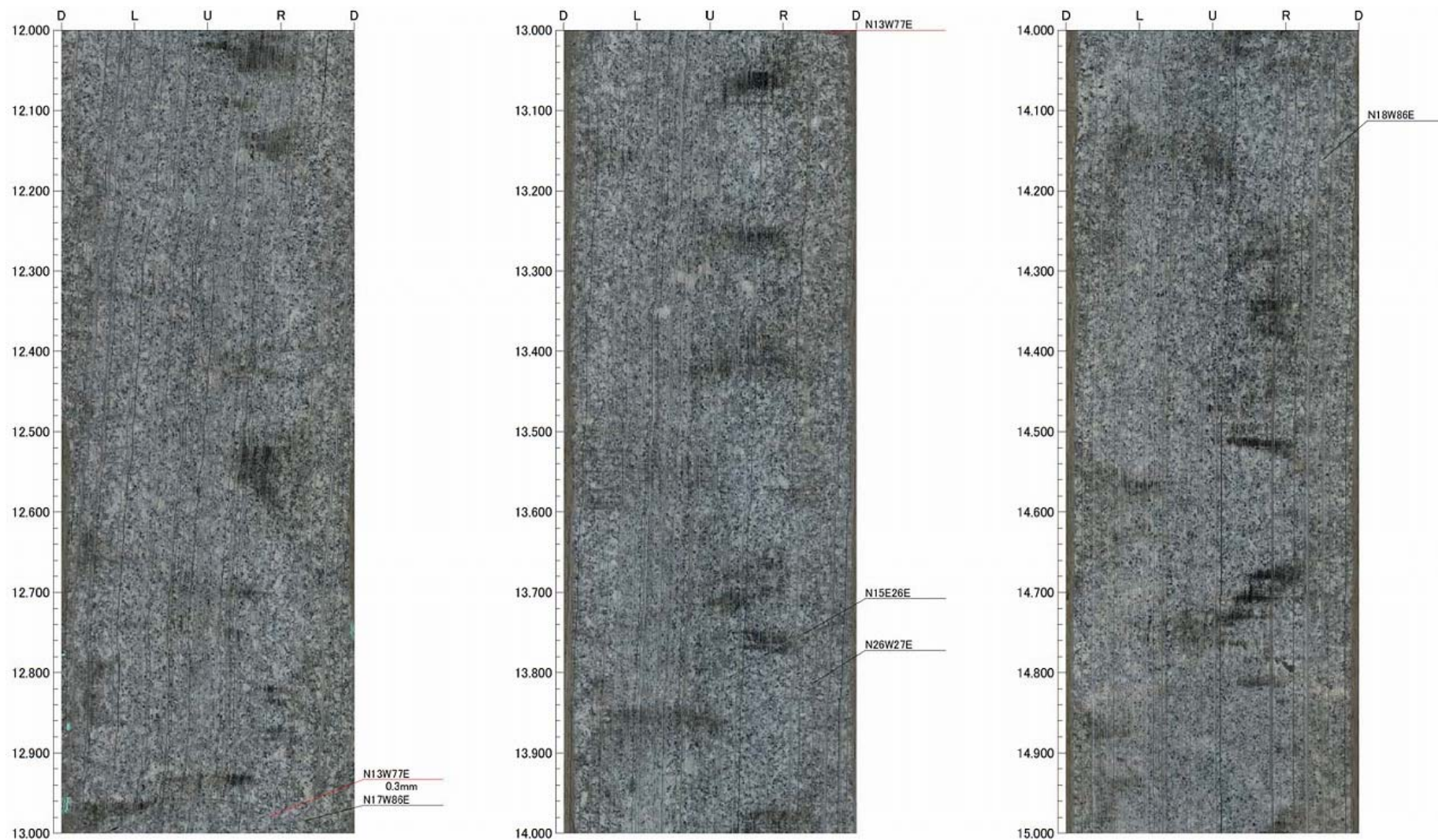


图 4.3.4-66 17MI62 号孔 孔壁断面图(12.00~15.00mab)

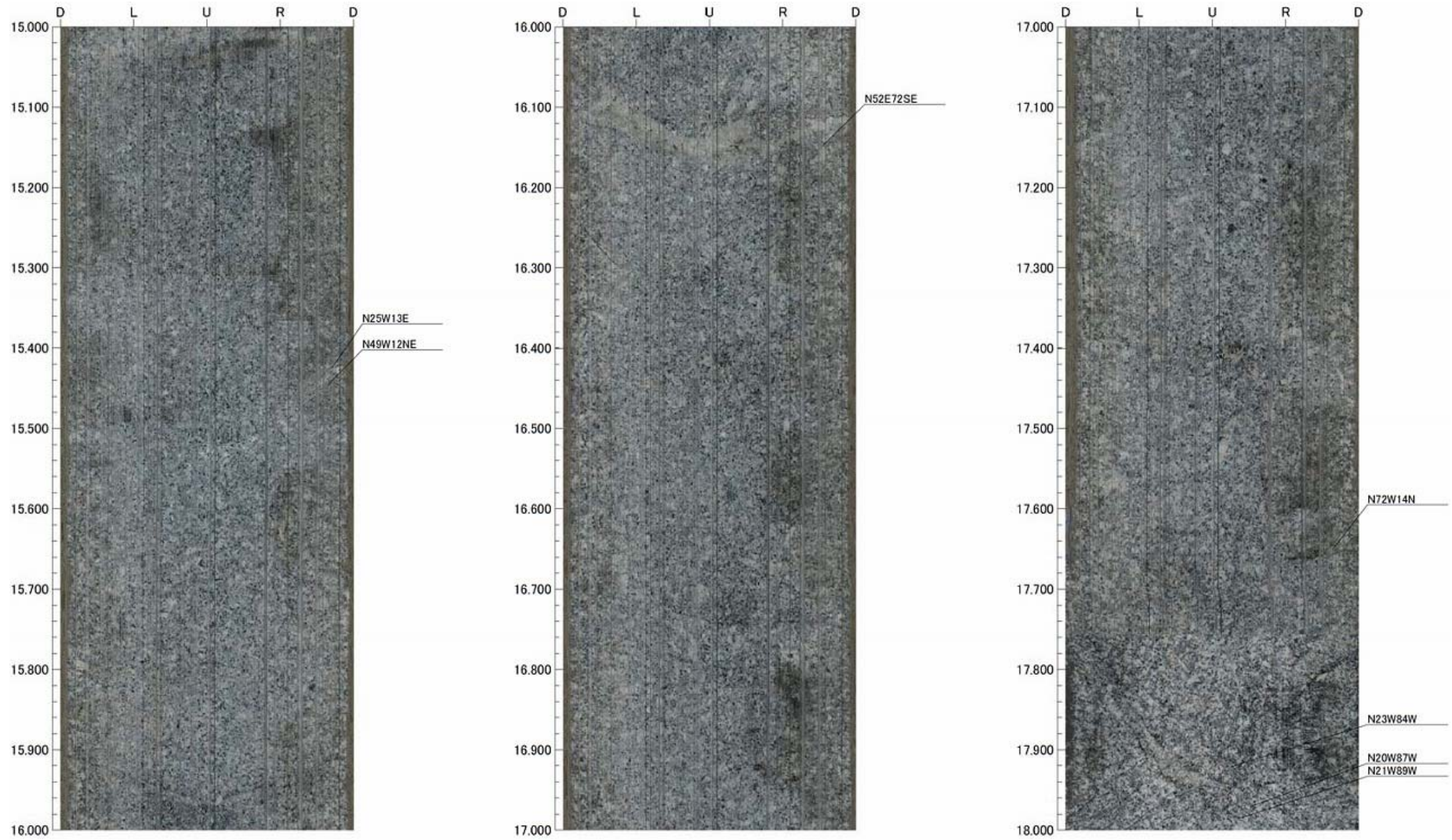


图 4.3.4-67 17MI62 号孔 孔壁断面图(15.00~18.00mab)

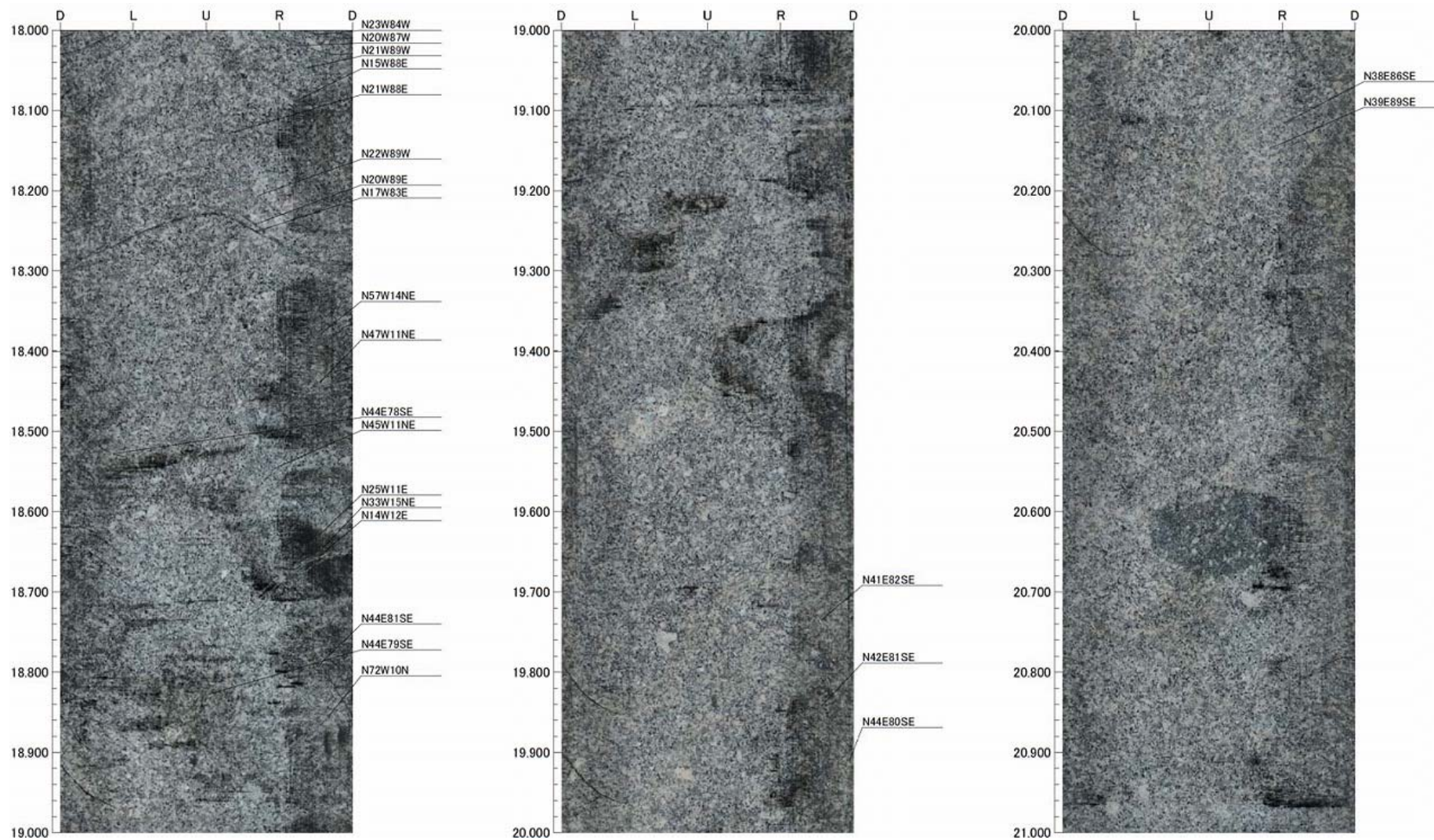


图 4.3.4-68 17MI62 号孔 孔壁断面图(18.00~21.00mab)

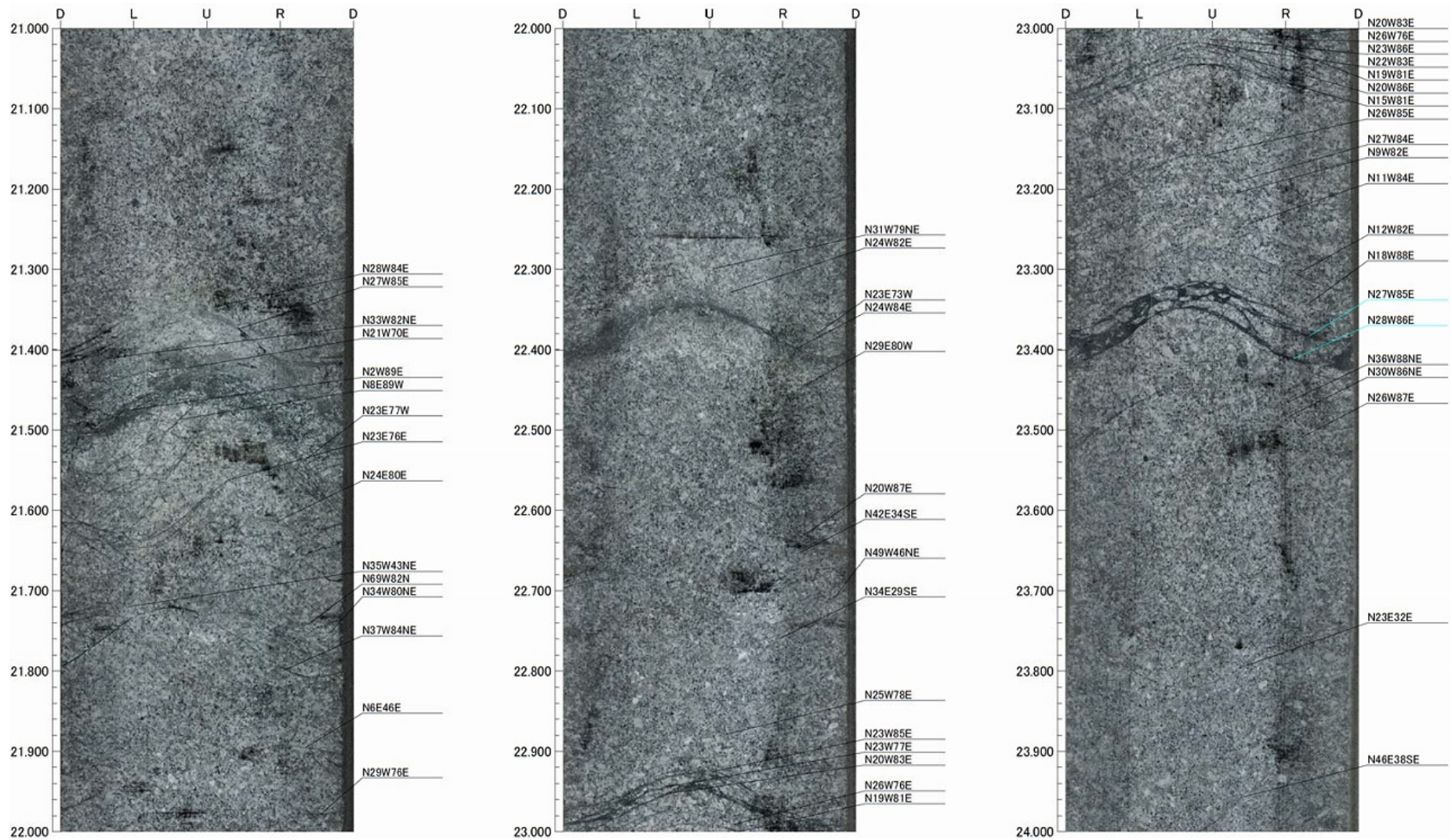


图 4.3.4-69 17MI62 号孔 孔壁断面图(21.00~24.00mab)



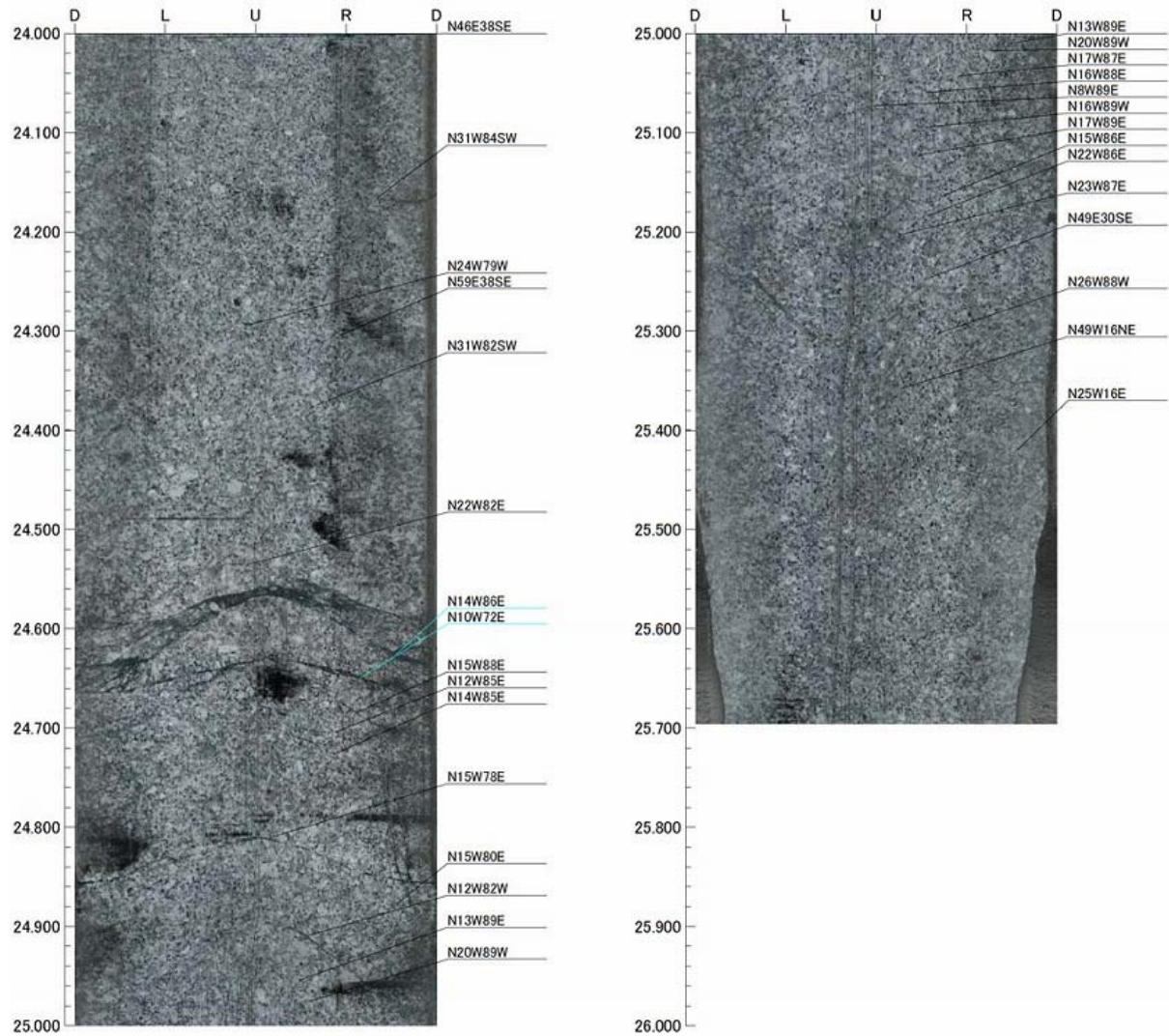


图 4.3.4-70 17MI62 号孔 孔壁断面图(24.00~25.70mab)

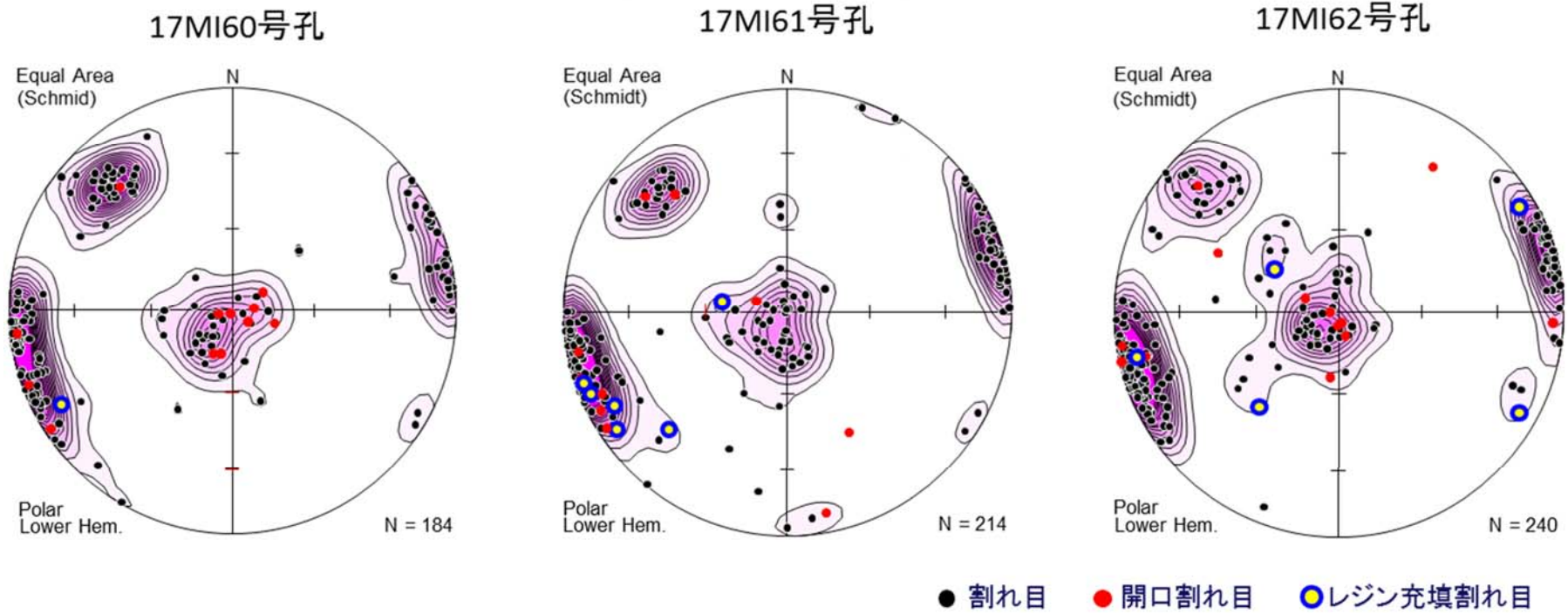


図 4. 3. 4-71 BTV 観察による割れ目方向分布

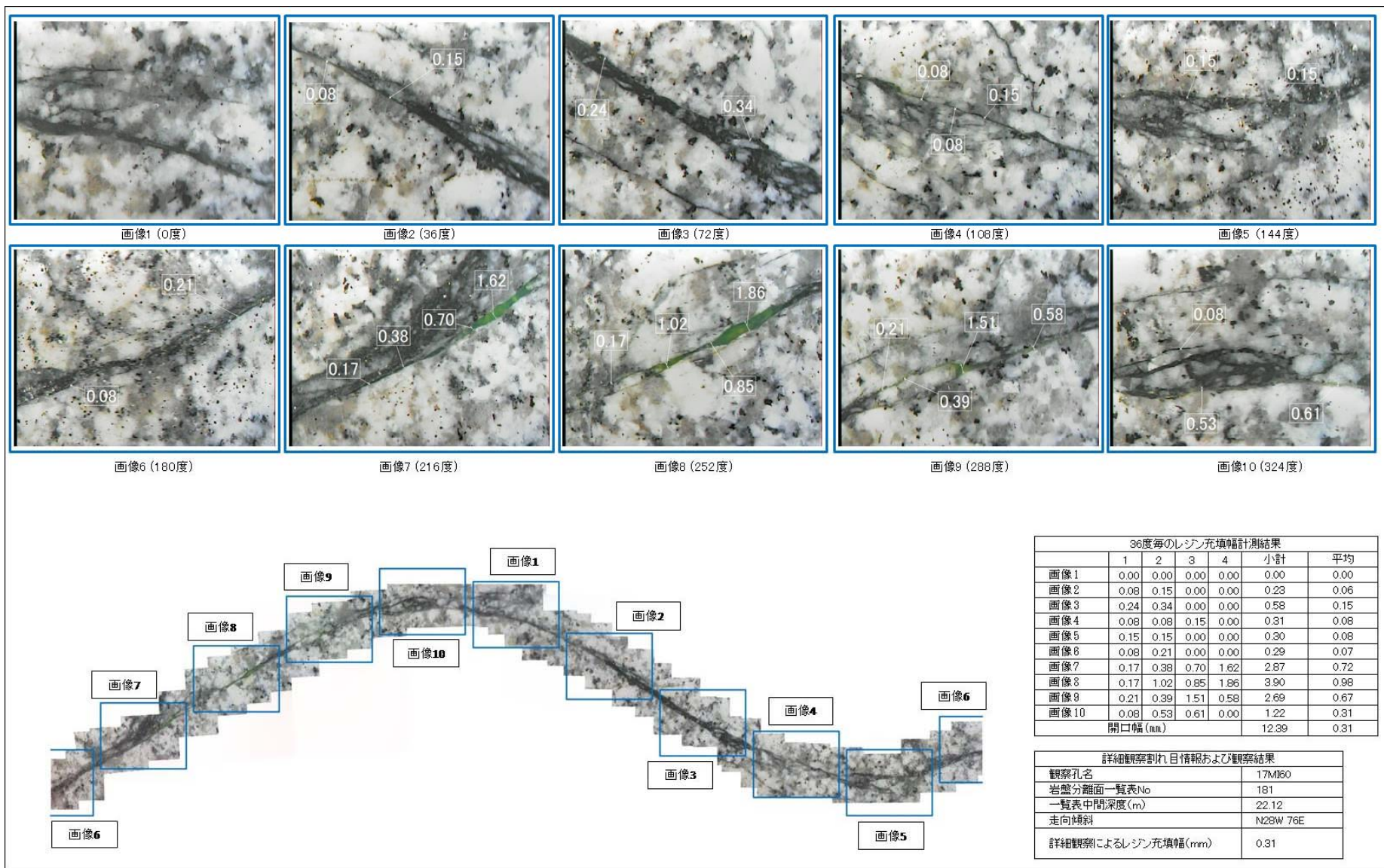


図 4.3.4-72 17MI60 号孔 詳細観察結果 (N28W76E、22.12mabh)

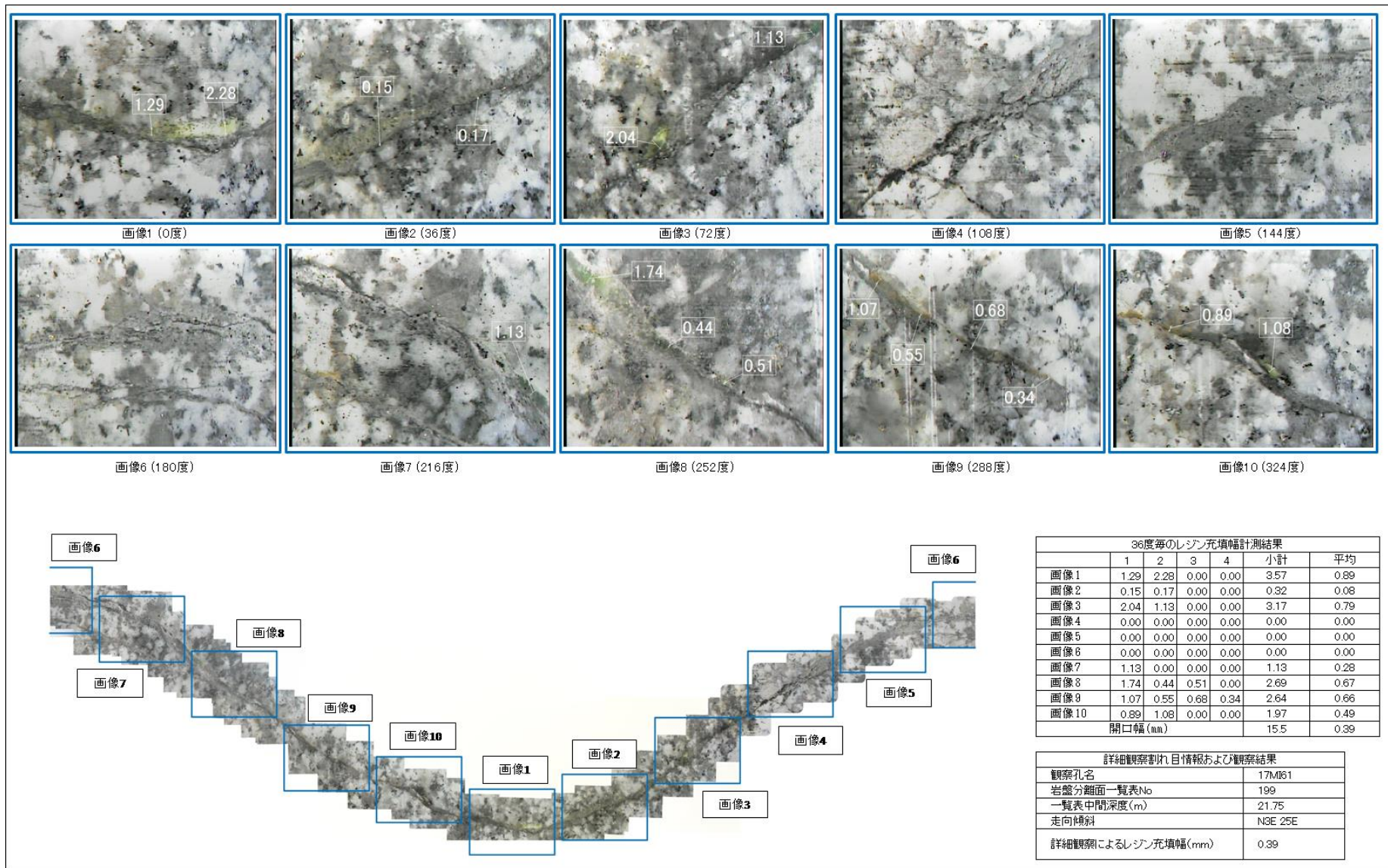


図 4.3.4-73 17MI61 号孔 詳細観察結果 (N3E25E、21.75mab)

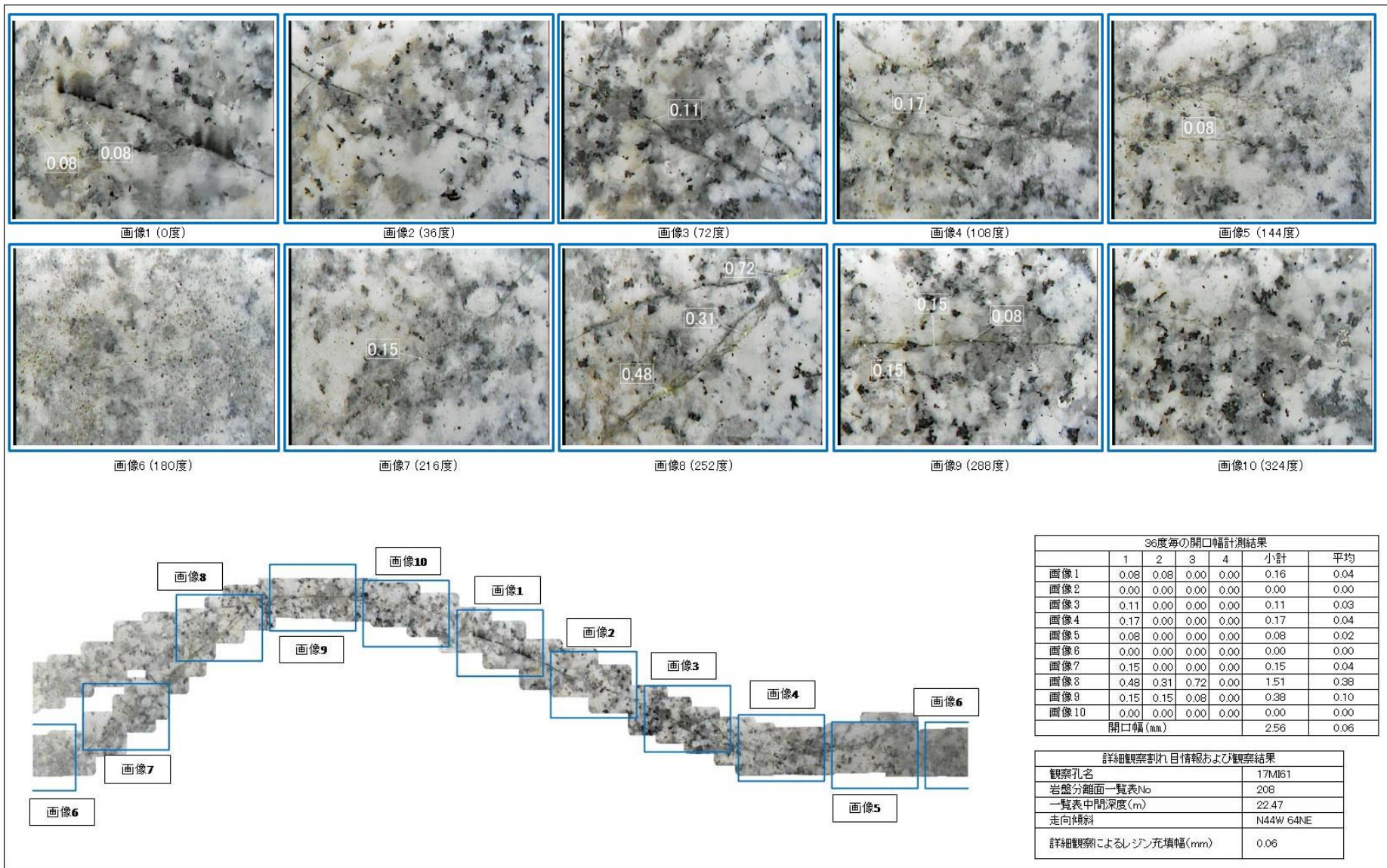


図 4.3.4-74 17MI61 号孔 詳細観察結果 (N44W64NE、22.47mabh)

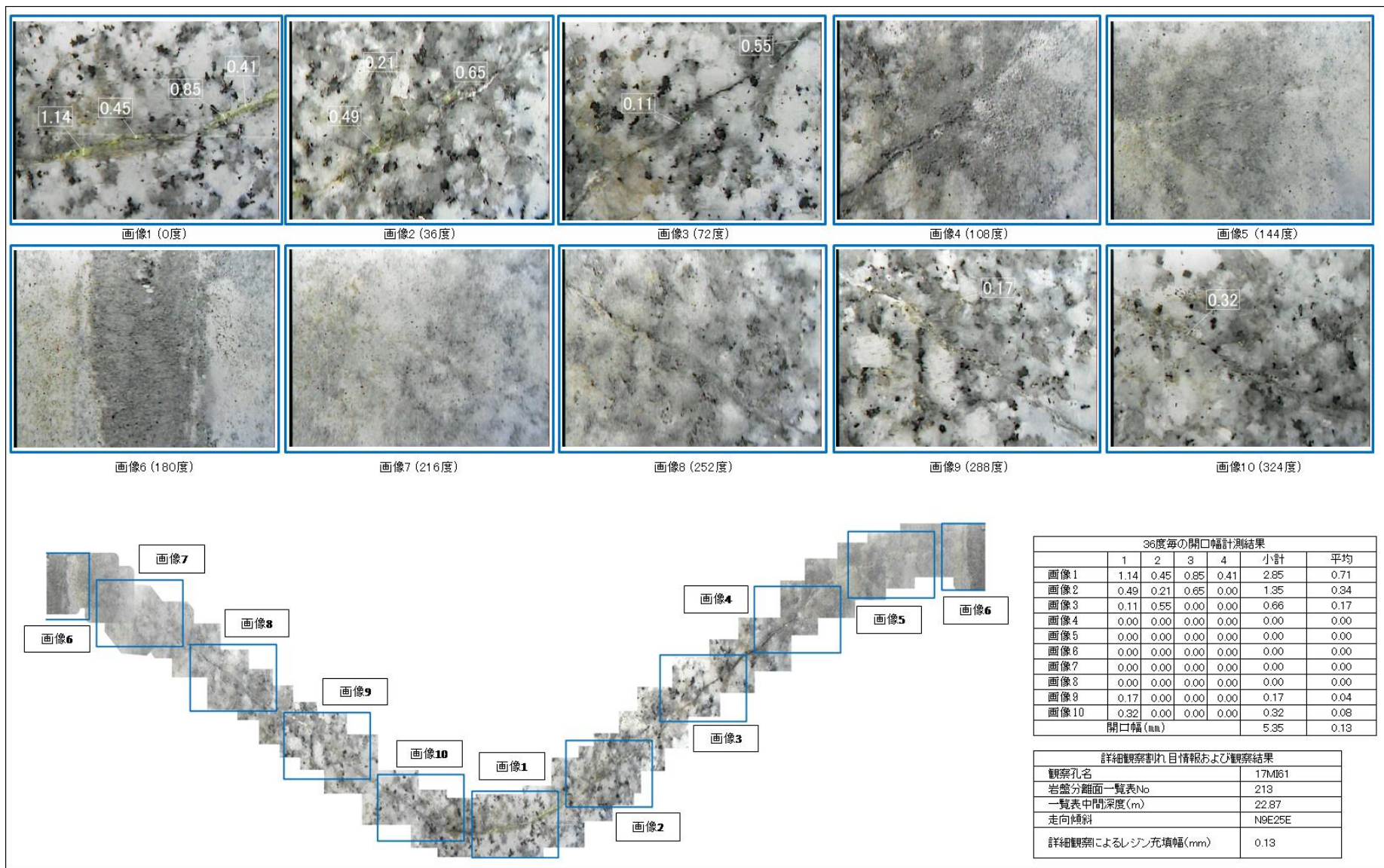


図 4.3.4-75 17MI61 号孔 詳細観察結果 (N9E25E、22.87mab)

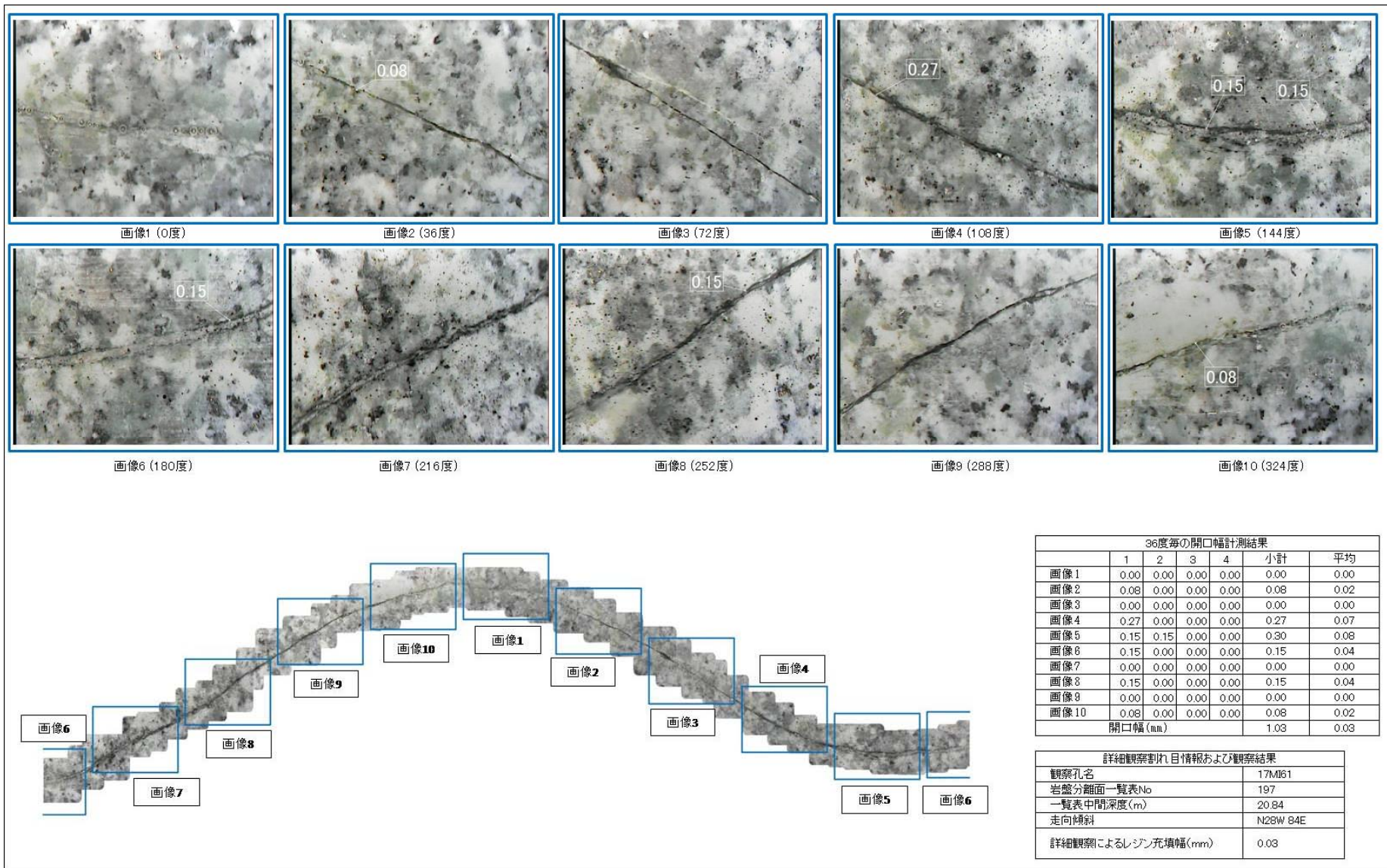


図 4.3.4-76 17MI61 号孔 詳細観察結果 (N28W84E、20.84mabh)

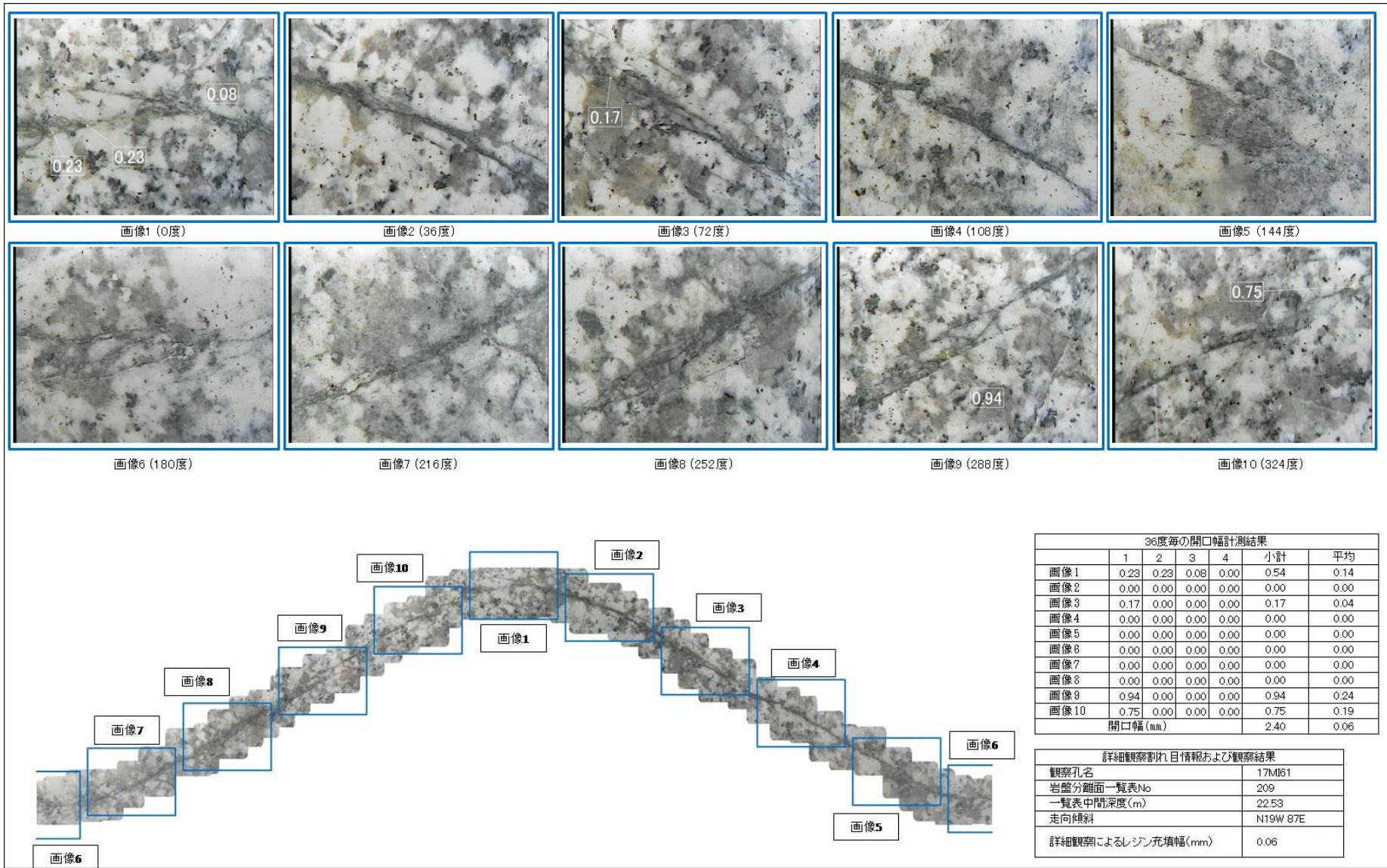


図 4.3.4-77 17MI61号孔 詳細観察結果 (N19W87E、22.53mabh)



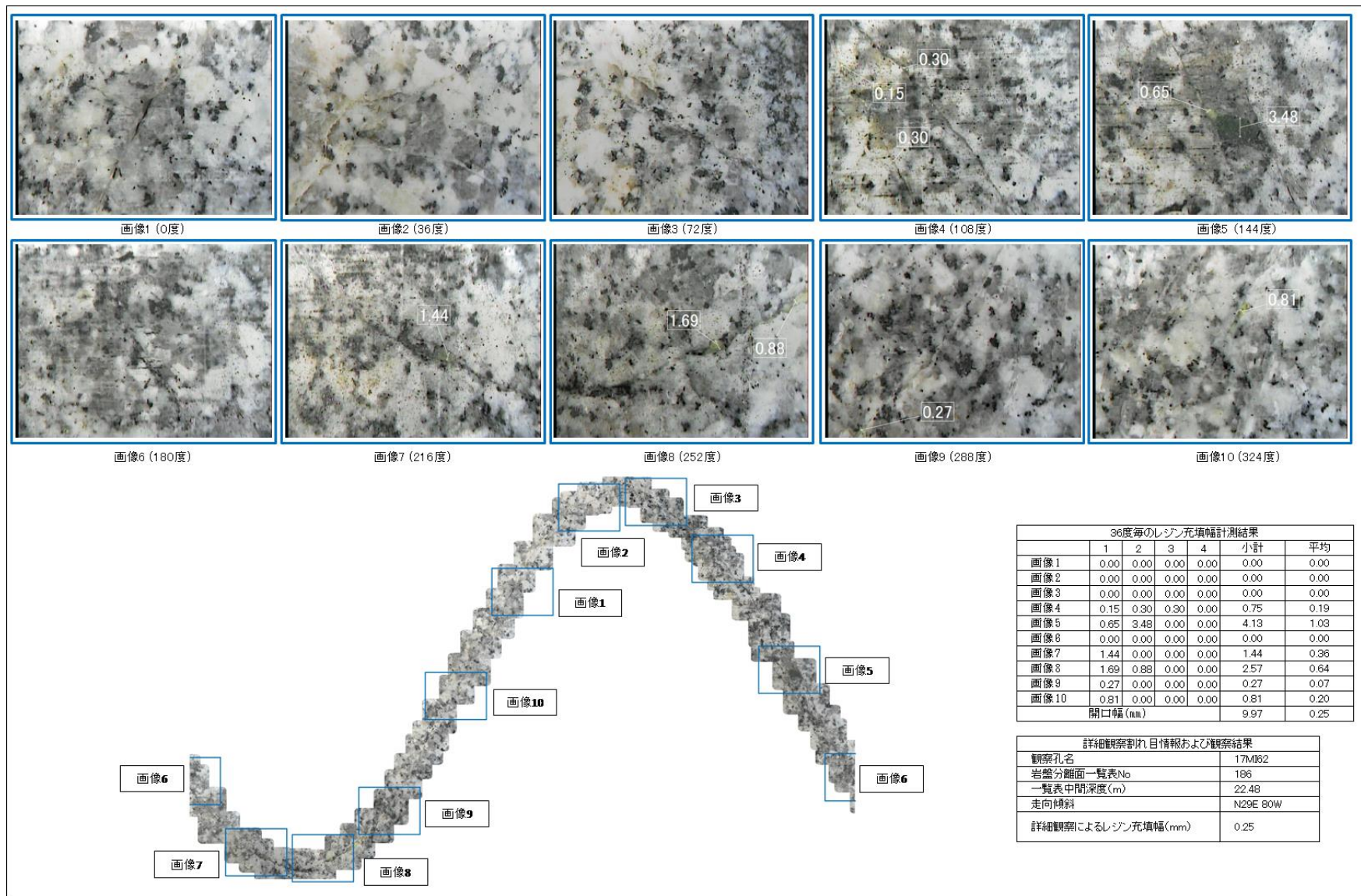


図 4.3.4-78 17MI62 号孔 詳細観察結果 (N29E80W、22.48mabh)

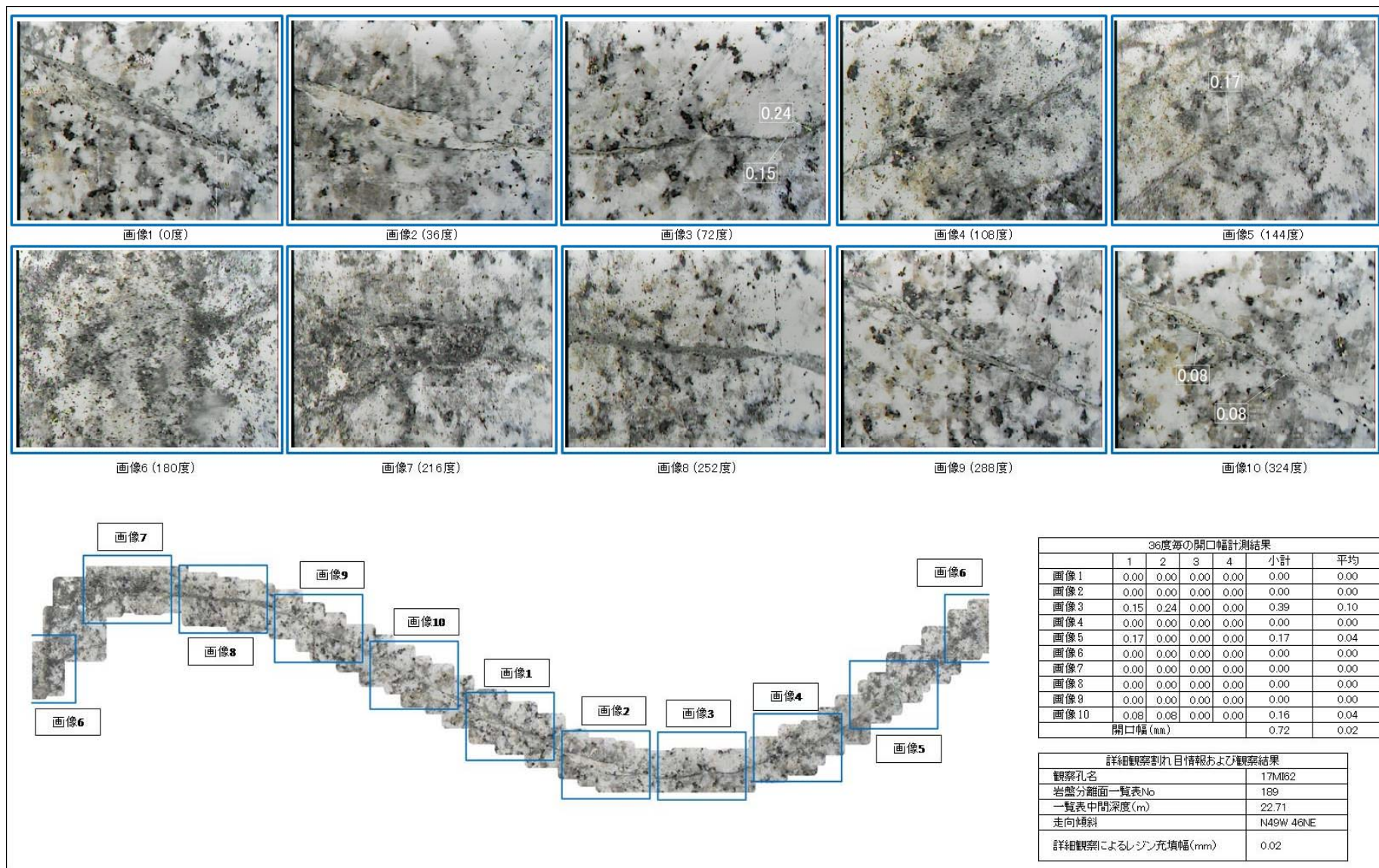


図 4.3.4-79 17MI62 号孔 詳細観察結果 (N49W46NE、22.71mabh)

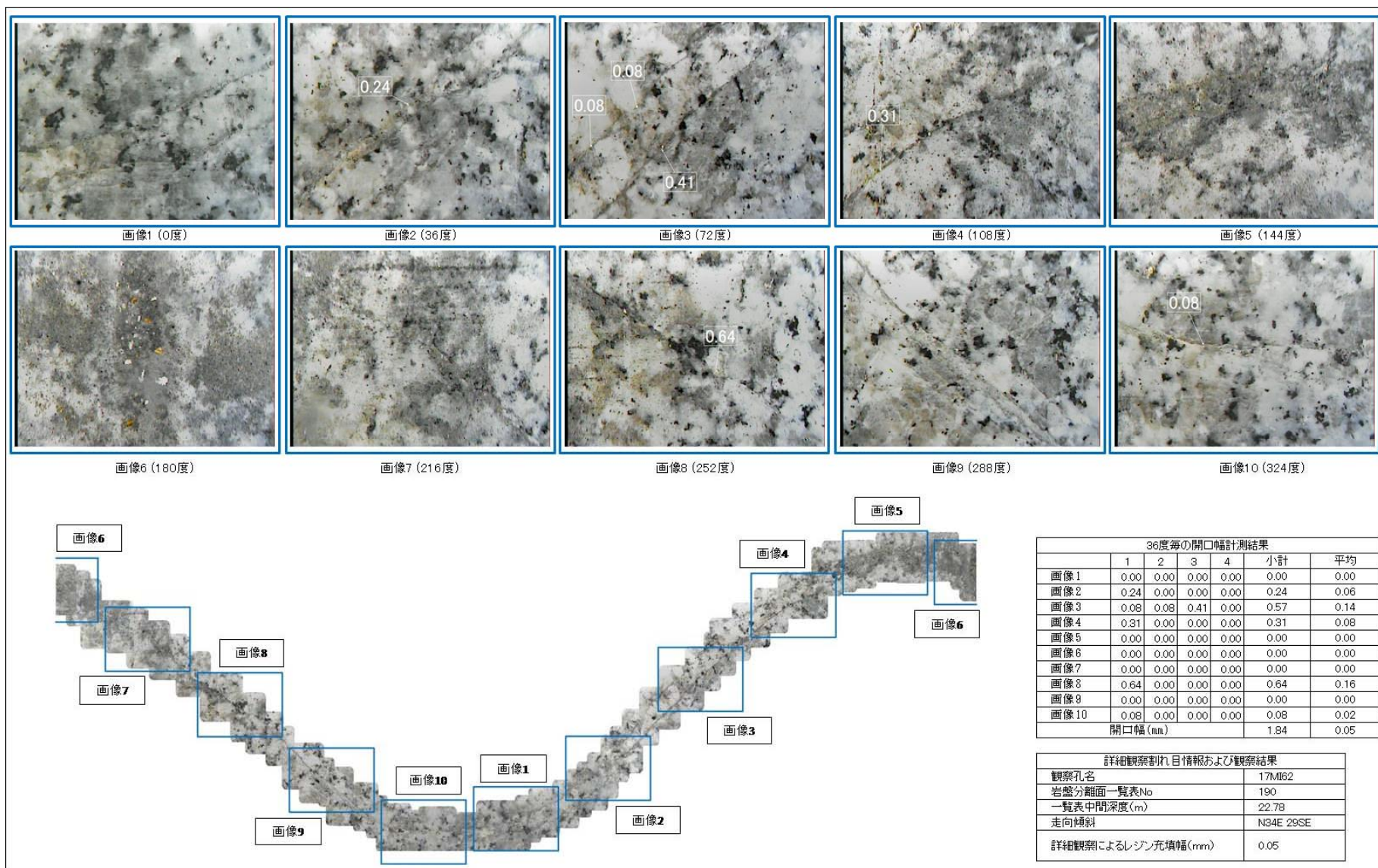


図 4.3.4-80 17MI62 号孔 詳細観察結果 (N34E29SE、22.78mabh)

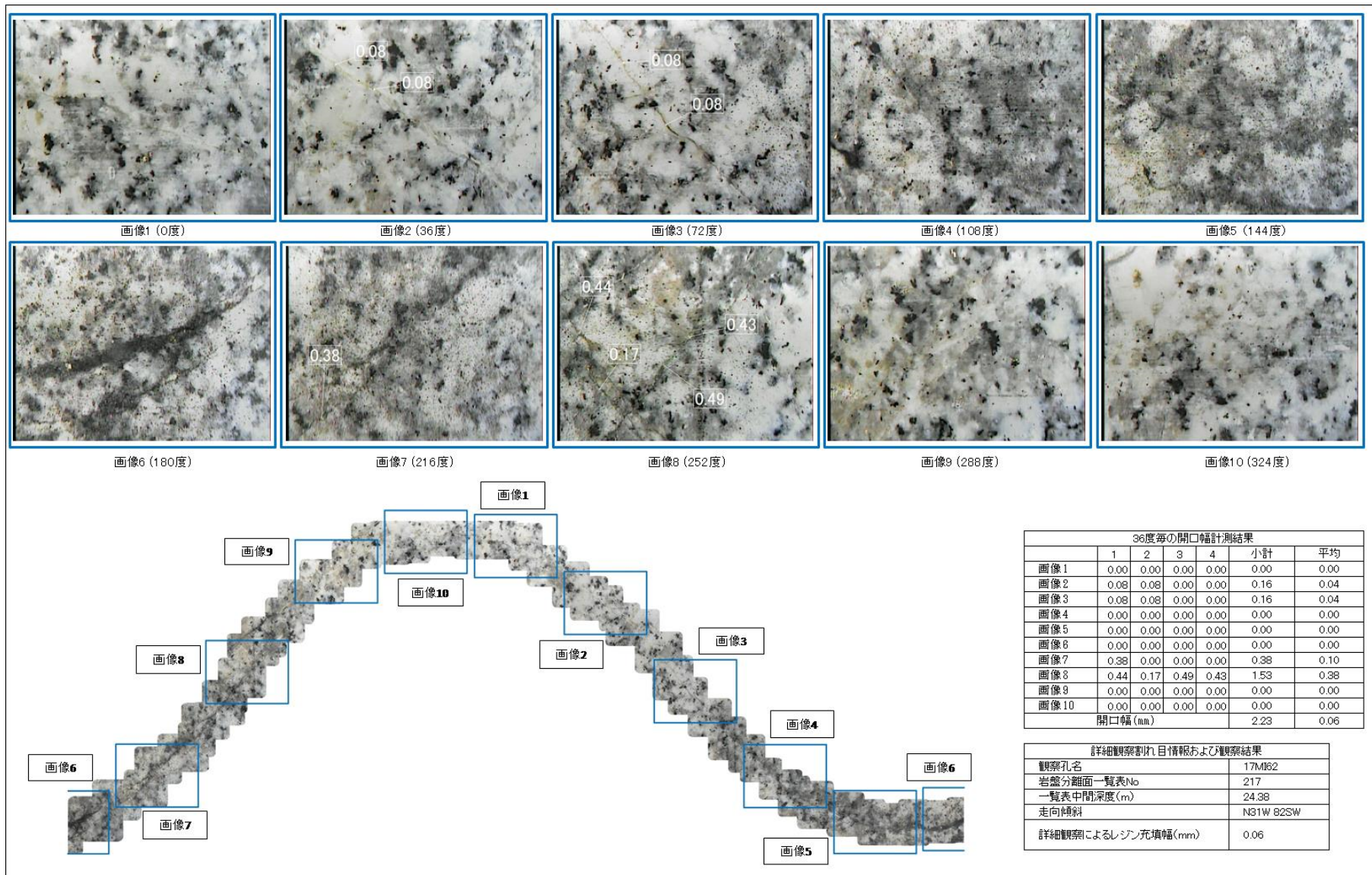


図 4.3.4-81 17MI62 号孔 詳細観察結果 (N31W82SW、24.38mabh)

#### 4.3.5 レジン充填割れ目の可視化

##### 4.3.5.1 X線CT法による可視化

###### (1) はじめに

レジン充填コアの内部を非破壊で観察するために、電中研が所有する医療用X線CTスキャナー（図4.3.5-1）およびマイクロフォーカスX線CTスキャナー（図4.3.5-2）による撮影を行った。

医療用X線CTスキャナーによる撮影では、自立しないコアを寝台状に揃えて設置するために、ポリエチレンフォーム製のクッションの上にコアを並べて撮影した。ポリエチレンフォーム（A-8）は、実効原子番号も小さく、見掛け密度が $70 \pm 20 \text{ kg/m}^3$ であるため、クッションがCT画像に及ぼす影響は殆どない。



図 4.3.5-1 医療用X線CTスキャナーによるレジン充填コアの撮影



図 4.3.5-2 マイクロフォーカス X 線 CT スキャナーによるレジン充填コアの撮影

(3) CT 画像の展開表示

レジン充填コアの医療用 X 線 CT 画像から作成した展開表示画像を図 4.3.5-3 に示す。レジンが充填された箇所を数字付きの三角印で示している。密着割れ目については、CT 画像からその位置を確認することが容易ではないことが分かる。すなわち、このことは、CT 画像の解像度以下の割れ目が分布していることを示唆しており、レジン充填幅が CT 画像の解像度である 0.2 mm 程度であることが推察される。

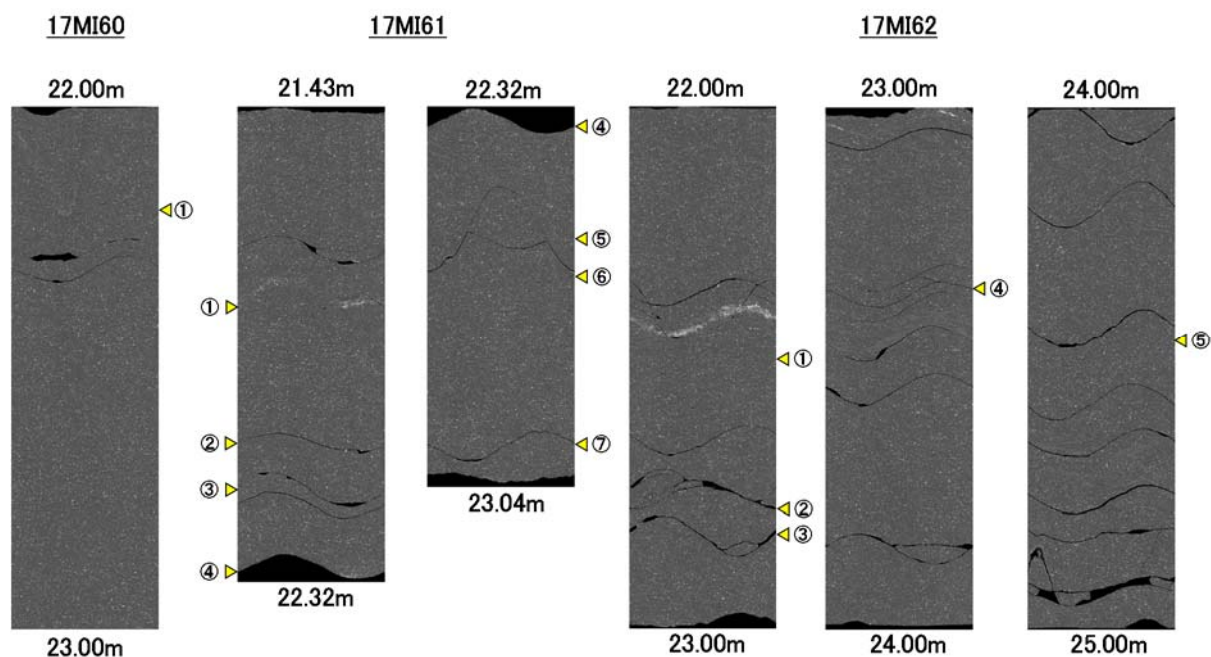


図 4.3.5-3 X 線 CT 展開表示画像

(5) 割れ目の三次元可視化

一般に CT 画像はビームハードニングによって外側のデジタル値が高く表示される。とくに密度の高いものやサイズが大きいものを撮影する場合、その傾向は顕著である。

今回撮影した供試体は直径 95 mm の花崗岩試料であり、本来マイクロフォーカス X 線 CT で頻繁に撮影しないサイズである。

レジン充填コア (17MI60 号孔/N28W76E) のマイクロフォーカス X 線 CT 画像を図 4.3.5-4 に示す。

左側の画像を見て分かるように、ビームハードニングによるアーティファクトを確認することができる (外側の領域が白く表示されている)。このような場合、割れ目のみを抽出し三次元的に可視化することは容易ではない。撮影時にビームハードニング補正機能にチェックを入れるか撮影後にビームハードニング補正処理を実施することが望ましい。今回は撮影後の処理で対応した。その結果は図 4.3.5-4 の右側の画像に示すとおりである。

図 4.3.5-5 にビームハードニング補正処理を施した画像を使って、レジン充填割れ目の箇所のみを抽出した三次元画像を示す。黄色で表示されている箇所がレジンで充填されていた箇所である。

この画像からは、割れ目面の中心にレジンが充填されていないという判断ができるが、割れ目が分離せずに接着されていたことを考え合わせると、恐らく、画像の分解能以下の割れ目が、試料中央に分布していたことが原因であると考えられる。

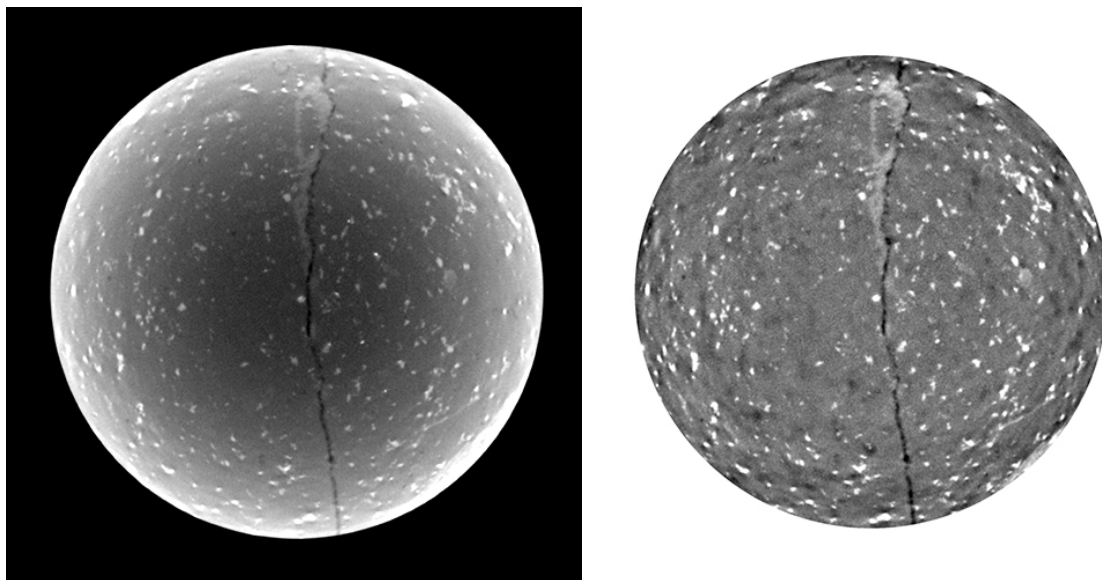


図 4.3.5-4 マイクロフォーカス X 線 CT 画像 (左 : 補正前、右 : 補正後)



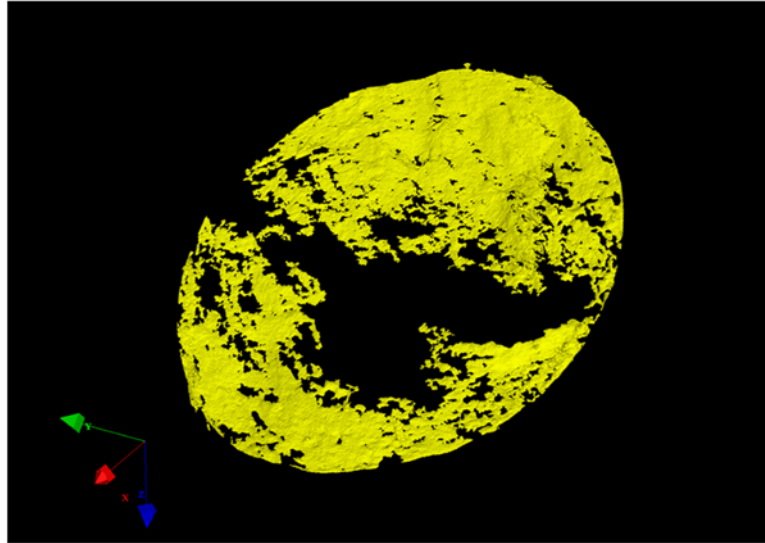


図 4.3.5-5 レジン充填割れ目の三次元可視化

#### 4.3.5.2 逐次研削法によるレジン充填割れ目の可視化

##### (1) 逐次研削法の概要

割れ目の間隔幅データを取得する目的で、図 4.3.5-6 に示すように 0.475 mm 間隔の連続研削と研削により生じる平面のデジタルカメラ撮影とフラットベッドスキャナーによる画像収録を行った。なお、前者は 0.95 mm 間隔の研削面に対して実施し、後者は 0.475 mm 間隔の研削面に対して実施した。デジタルカメラ撮影は簡易暗室内で行い、蛍光灯、紫外線、蛍光灯＋紫外線と光源の条件を変えて行った。取得した研削面画像を図 4.3.5-6 に例示する。試料は 17MI60 号孔のボーリングコアから選定し、レジンが充填された箇所を中心に約 10 cm の長さに成形したものを用いた。

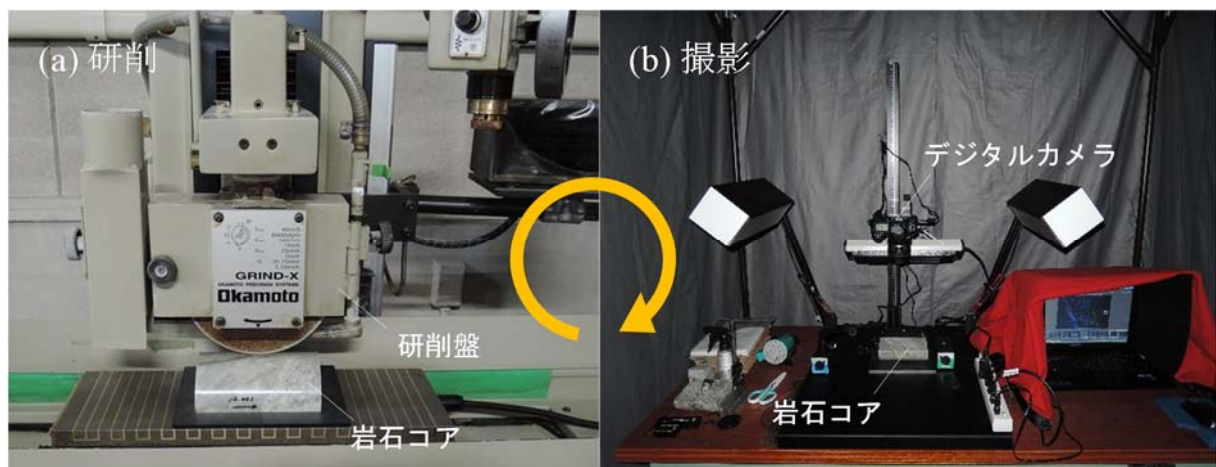


図 4.3.5-6 逐次研削法による研削面の撮影



図 4.3.5-7 研削面画像 (デジタルカメラ・蛍光灯光源)

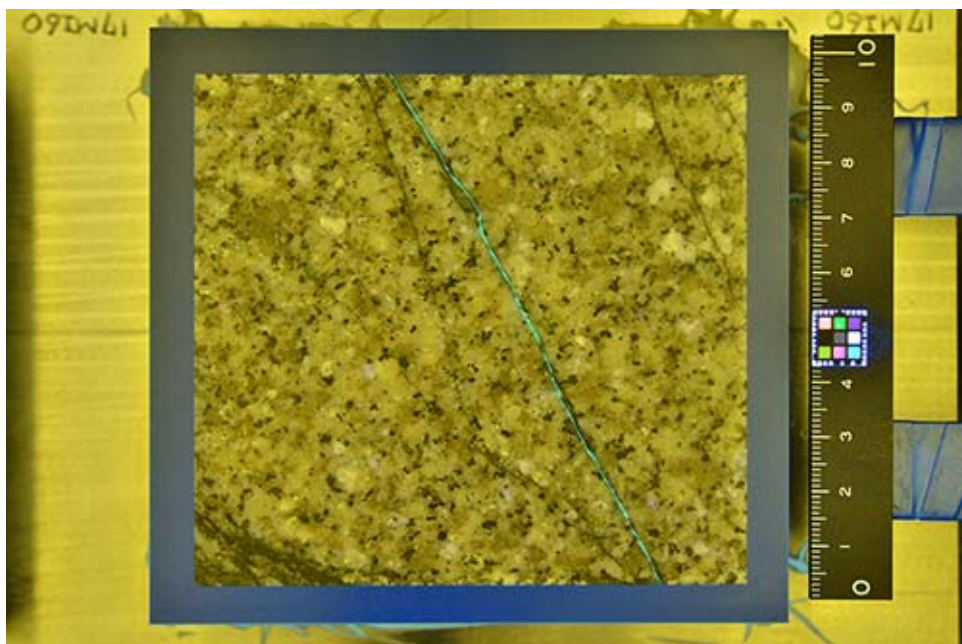


図 4.3.5-8 研削面画像 (デジタルカメラ・蛍光灯+紫外線光源)

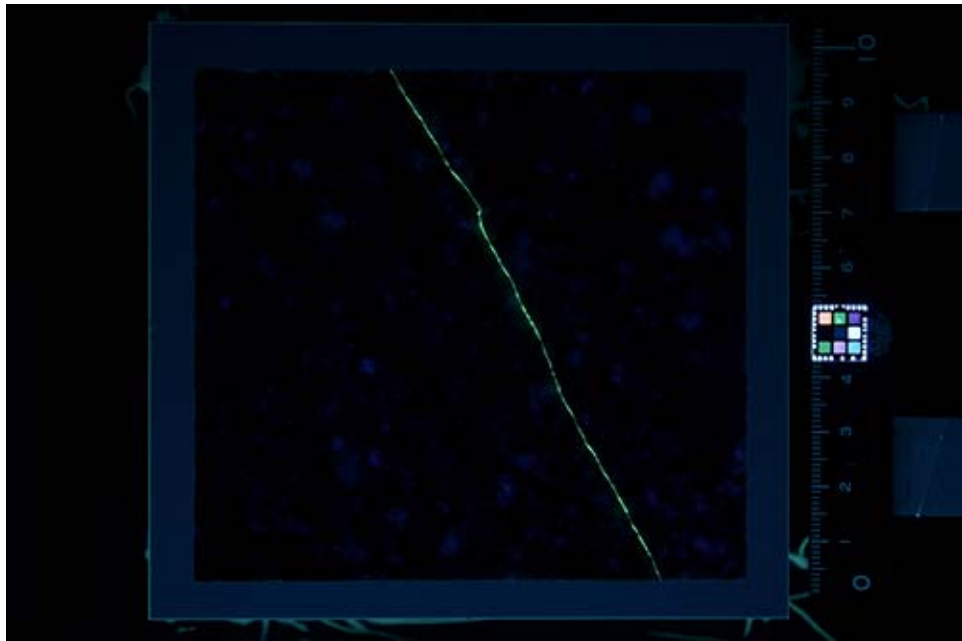


図 4.3.5-9 研削面画像 (デジタルカメラ・紫外線光源)

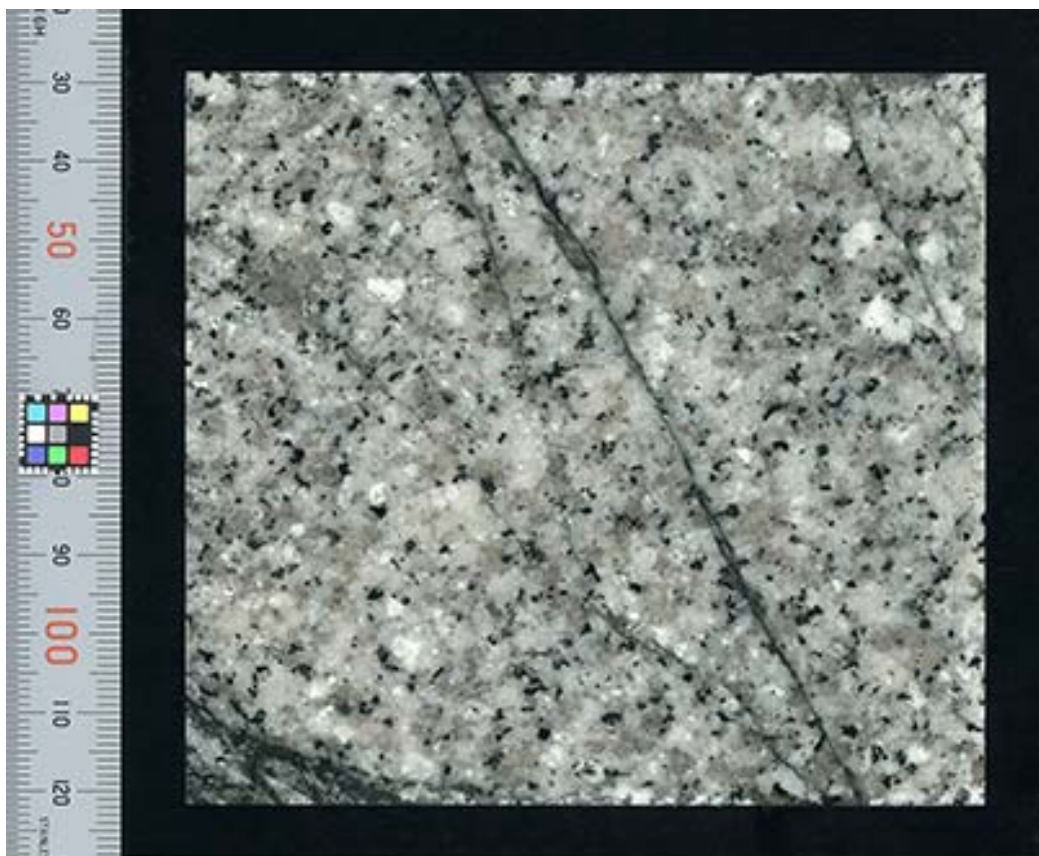


図 4.3.5-10 研削面画像 (フラットベッドスキャナー)

(3) 割れ目間隙幅の測定結果

測定で得られたレジン充填幅の平均値、中央値、標準偏差、分散、最大値、最小値、閉塞率を表 3 2 に、レジン充填幅の頻度分布を図 3 12 に示す。レジン充填幅の平均値は高粘性流体注入試験で評価された幅に近い値であった。

17MI60 号孔のレジン充填幅の統計量

平均値	0.150 mm
中央値	0.130 mm
標準偏差	0.109 mm
分散	0.0118 mm <sup>2</sup>
最大値	1.293 mm
最小値	0 mm
閉塞率	5.7 %

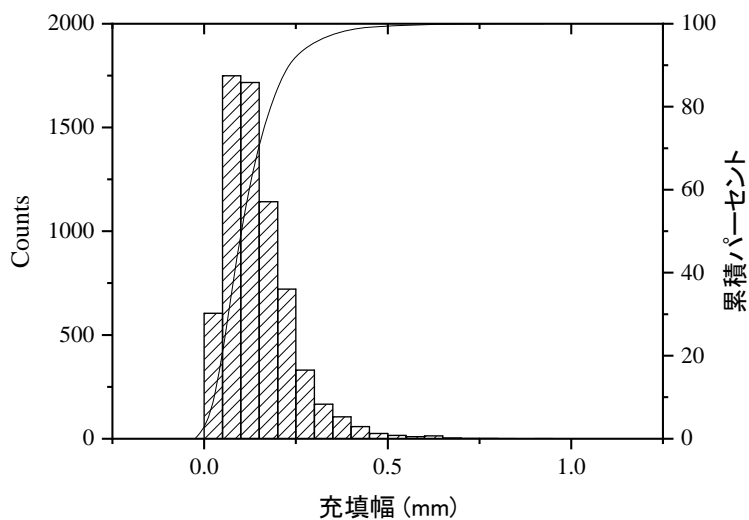


図 4.3.5-11 レジン充填割れ目のヒストグラム

(4) レジン充填幅の可視化

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

17MI60 号孔のレジン充填幅の平均値は 0.15 mm であり、高粘性流体注入試験で推定された値に近いもの

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

12MI31 号孔のレジン充填幅の平均値は 0.07 mm であった。一部レジン充填幅が大きな領域が存在するが、割れ目の形状は直線的で平らな分布をしている。また紫色で表示させた箇所は、幅の小さな領域あるいはレジンが充填されていない領域である。なお、レジンが充填されていない領域の割合、すなわち閉塞率は約 27% であった。この区間での透水量係数 ( $6.9 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ) が小さかったのは、割れ目がほぼ閉塞した状態であったことが原因であると考えられる。

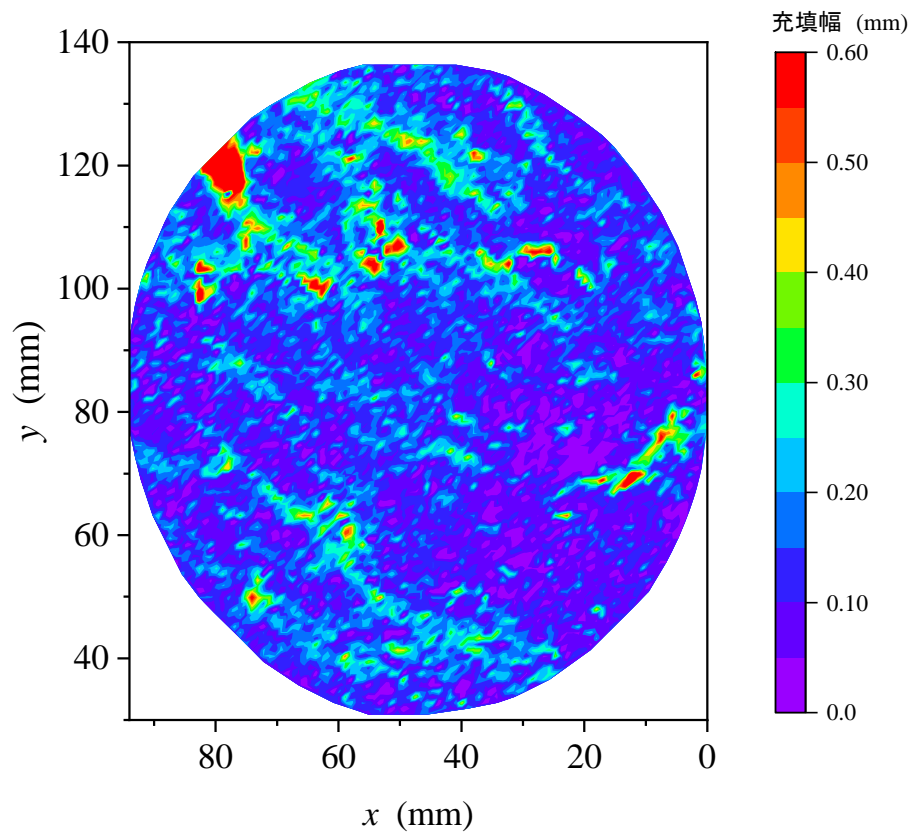


図 4.3.5-12 レジン充填幅分布 (17MI60 号孔/N28W76E)

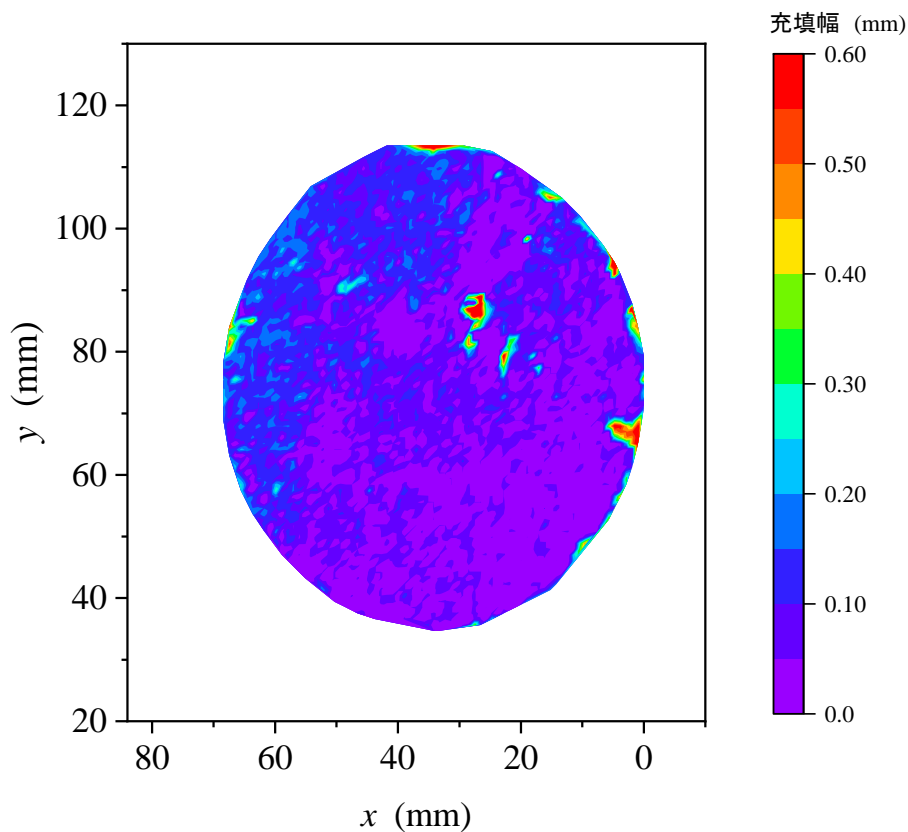


図 4.3.5-13 レジン充填幅分布 (12MI31 号孔/N29W88E)

(5) レジン充填幅の空間的相関性

レジン充填幅について距離と方向の関係を、地球統計学手法を用いて評価した。その結果を図 4.3.5-14 および表 4.3.5-1 に示す。なお、図 4.3.5-12 の x 軸に平行な方向を E-W 方向、y 軸に平行な方向を N-S 方向とした。

一般に、シルは分散に等しく、レンジは空間的な相関関係を示す指標である。セミバリオグラム解析の結果から、シルについてはほとんど違いが見られず等方性を示しているのに対して、レンジは NE-SW が最も低い。この方向は、線構造に直行する方向とほぼ一致する。

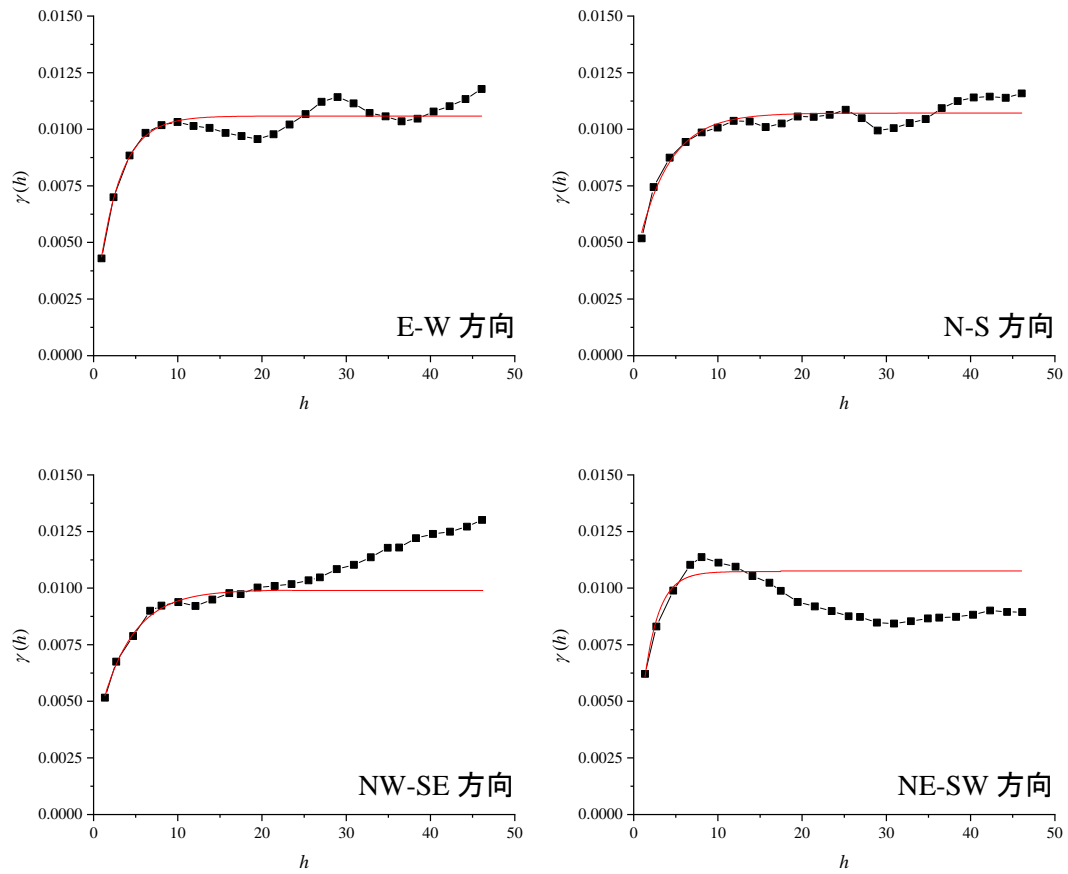


図 4.3.5-14 セミバリオグラム解析結果 (指数モデル)

表 4.3.5-1 指数モデルフィッティング結果

方向	シル	レンジ
E-W 方向	0.01059	8.024
N-S 方向	0.01072	11.167
NW-SE 方向	0.01073	11.514
NE-SW 方向	0.00992	5.243

#### 4.3.5.3 孔跡平面図及び孔跡断面図を用いた割れ目分布の可視化

割れ目面が密着していたレジンを充填割れ目と既存孔で確認されていた主要な開口割れ目の位置関係を孔跡平面図と孔跡断面図にプロットした。なお、この図は 12MI30 号孔の孔口座標を原点としたものであり、既存孔に関連したものを黒色で、新規孔（確認ボーリング）に関連したものを赤色で示している。

平面図（割れ目の走向分布）からは、レジンの移行経路が屈曲した構造（13MI37/N26W80E→17MI61/N29E80W→12MI30/N29W86E）であることが読み取れる。高粘性流体やレジンを 13MI37 号孔 int-2 から注入した際、12MI30 号孔 int-3 の区間で圧力の応答が確認された事実と整合する。一方、断面図（割れ目の傾斜分布）からは、レジンの移行経路が比較的直線状に連続した構造であることが読み取れる。

17MI62 号孔の掘削深度 24.38 mabh で確認された割れ目（N31W/82SW）へのレジンの移行経路は、図から確認することはできないが、17MI60 号孔と 17MI62 号孔との間に NW 走向低角度傾斜の割れ目が存在して、17MI62 号孔の掘削深度 24.38 mabh で確認された割れ目（N31W/82SW）にレジンが移行したものとと思われる。

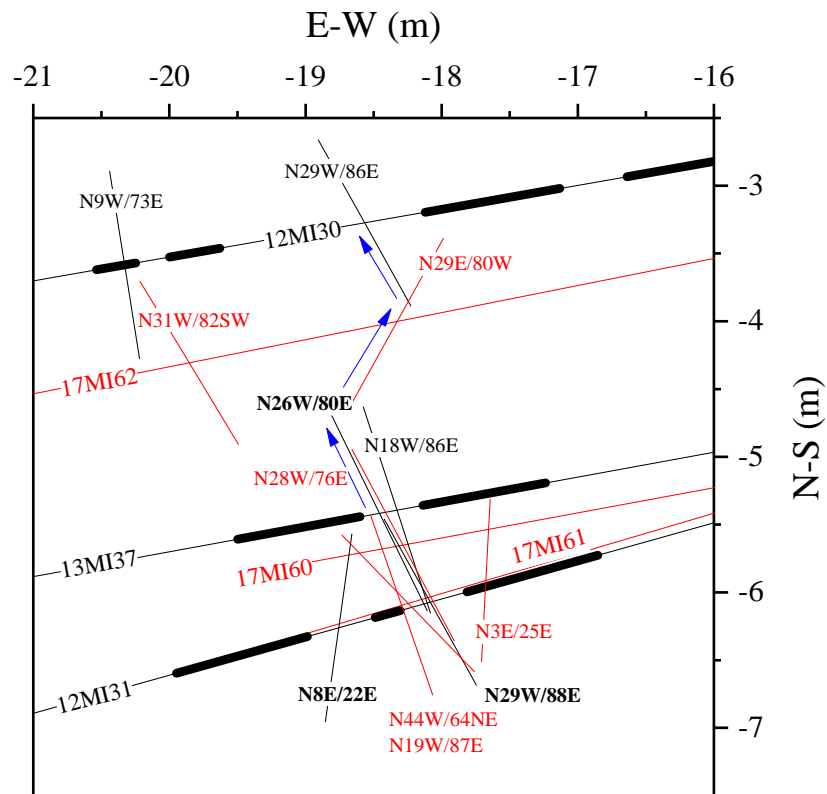


図 4.3.5-15 レジン充填割れ目分布（孔跡平面図）



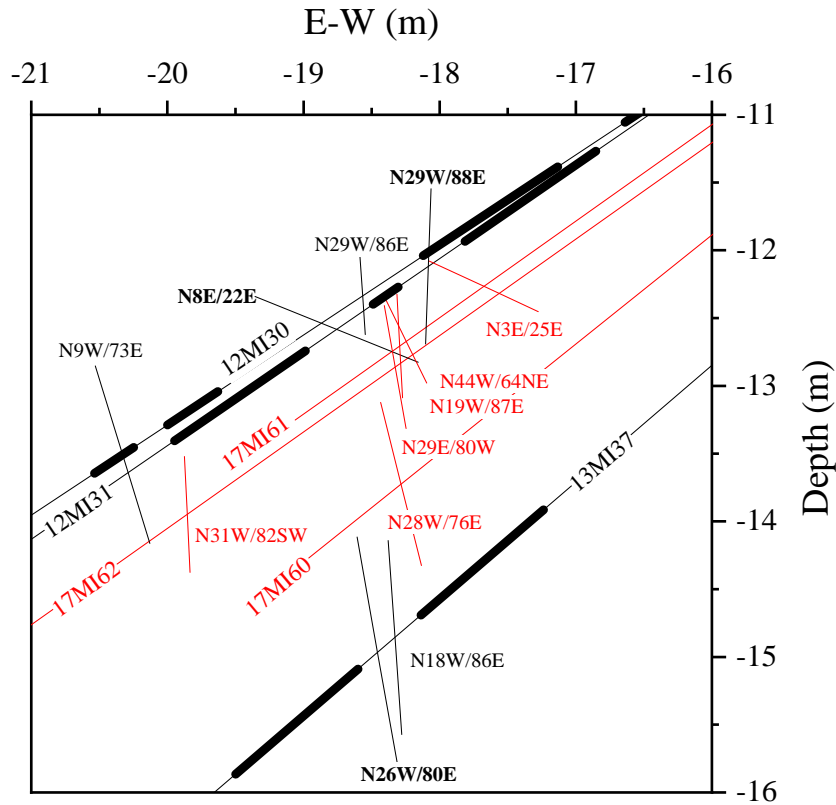


図 4.3.5-16 レジン充填割れ目分布 (孔跡断面図)

#### 4.3.5.4 各種割れ目探査技術の割れ目間隙幅との比較

レジン注入試験から得られたレジン充填幅、トレーサー試験、ラドン濃度計測調査、高粘性流体注入試験から推定された割れ目間隙幅、および高精度 BTV カメラで観察されたレジン充填幅を比較したものを表 4.3.5-2 に示す (参考としてレジン注入前の高精度 BTV カメラで観察された割れ目間隙幅の結果も表記)。

レジン注入試験前の 13MI37 号孔の高精度 BTV の結果は、割れ目充填物 (カタクラサイト) を洗い流されたことが影響して大きく評価されたと考えられる。レジン注入試験後の高精度 BTV の結果についても標本数が少ないこともあり、特異点を抽出している可能性もあり、その他の手法と一致する場合もあれば大きくも小さくも評価される可能性がある。したがって、高精度 BTV の結果を解析等に利用する場合は、その点を留意する必要がある。

高精度 BTV の結果を除くと、割れ目の間隙幅は 2 つのタイプに分類することができると考えられる。一つは間隙幅が比較的大きいトレーサー試験とラドン濃度計測から推定された間隙幅、もう一つは、高粘性流体注入試験から推定された間隙幅とレジン注入試験後のポーリングコアから観察されたレジン充填幅である。一般に、後者が粘性の高い流体を使用しているため、間隙幅が非常に狭い部分に浸透していないため小さめの幅が得られると考えるが、レジンについては最小 30  $\mu\text{m}$  程度の割れ目まで隙間なく充填しており、間隙幅が非常に狭い部分に浸透していないとは考えにくい。高粘性流体注入試験について実際計測してい

るものが圧力であるため、間隙幅が非常に狭い部分に敏感に反応するため、高粘性流体の浸透の有無は問題にならないと考えられる。

一方、トレーサー試験やラドン濃度計測で推定された割れ目幅が非常に狭い部分までの幅を捉えることができるほどの精度を有しているとは考えにくい。また、レジンや高粘性が浸透できないほどの幅の狭い割れ目が割れ目周辺母岩などに発達していたとしても、0.1 mm の差が出るほどのものが存在するとは考えにくい。それよりもレジン充填幅分布で確認された幅の大きな部分をトレーサーや地下水が選択的に流れ、その箇所の幅を捉えていると考えるほうが合理的である。この点については今後検討していきたい。

表 4.3.5-2 各種割れ目探査技術の割れ目間隙幅の比較

探査技術	割れ目幅
トレーサー試験 (ダイポール)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 平行平板でモデル化</li> <li>0.30 mm (注水孔：12MI31 号孔、揚水孔：13MI37 号孔)</li> <li>0.55 mm (注水孔：12MI37 号孔、揚水孔：12MI31 号孔)</li> </ul>
ラドン濃度計測	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 平行平板でモデル化</li> <li>0.25-0.30 mm (割れ目開口率を考慮)</li> </ul>
高粘性流体試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 高粘性流体の到達時間から推定 (注入孔：13MI37 号孔)</li> <li>0.23 mm (12MI30 号孔 int2 区間への到達時間)</li> <li>0.10 mm (12MI30 号孔 int3 区間への到達時間)</li> <li>0.19 mm (12MI31 号孔 int2 区間への到達時間)</li> </ul>
レジン注入試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 研削面画像 (デジタルカメラ) から測定</li> <li>0.15 mm (17MI60 号孔/N29W76E, 平均値)</li> <li>0.07 mm (12MI31 号孔/N29W88E, 平均値)</li> </ul>
高精度 BTV カメラ (レジン注入前)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 孔周り 10 箇所、4 計測/箇所の計 40 箇所の算術平均</li> <li>0.15 mm (12MI31 号孔 21.90mabh)</li> <li>0.70 mm (13MI37 号孔 23.14mabh)</li> </ul>
高精度 BTV カメラ (レジン注入後)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 孔周り 10 箇所、4 計測/箇所の計 40 箇所の算術平均</li> <li>0.31 mm (17MI60 号孔/N29W76E)</li> <li>0.03 mm (17MI61 号孔/N28W84E)</li> <li>0.39 mm (17MI61 号孔/N3E25E)</li> </ul>

#### 4.3.6 薄片観察による微視的間隙分布

本項では、原位置レジンを注入試験後に掘削して得られたレジン充填割れ目について、岩石薄片の製作および観察を行うことにより、よりマイクロなスケールでのレジン充填状況を確認し、割れ目幅の計測を行うことを目的とする。さらに、レジン充填割れ目周辺の岩石マトリックスにおける微視的な間隙構造を把握することは、放射性核種のマトリックス拡散についてより精度のよい評価に寄与することから、レジン充填割れ目に2次的に新たにレジンを注入し、間隙構造の可視化を行った。

##### 4.3.6.1 岩石薄片製作

岩石薄片は研削面画像よりもよりマイクロなスケールまでレジン充填状況を観察できることから、製作箇所は、表 4.3.4-5 で割れ目に対するレジン充填が不十分で掘削後に割れ目面で「分離」が生じたものについて行った。岩石薄片製作対象割れ目はボアホールテレビカメラによる計測で 17MI61 号孔の深度 22.130m、走行・傾斜 N34W/82NE の割れ目である。

##### (1) 割れ目面の観察

レジン充填の確認された 17MI61 号孔深度 22.130m の割れ目は掘削後に分離していた。図 4.3.6-1 はレジン充填割れ目をコア試料の側方より自然光下で撮影したものである。レジン充填割れ目は、図の赤矢印で示す箇所であり、黒の両矢印で示す脈状のカタクラサイトの端部に沿って形成された割れ目と考えられる。1つの割れ目は分離して2つの面をなすが、分離面の深度の浅い方を「上盤」、深度の深い方を「下盤」と称することにする。分離面におけるレジン充填状況を可視化するため、分離面の上方から紫外線ランプ (UVP 95-0248-03 EL Lamp 365nm, フナコシ株式会社) を照射し、デジタル一眼レフカメラ (D7000, 株式会社ニコン) で撮影した。レンズは焦点距離 40mm のマクロレンズ (AF-S DX Micro NIKKOR 40mm f/2.8G, 株式会社ニコン) を用い、紫外線照射時には 480nm 以下の光をカットするモノクロ撮影用コントラスト強調フィルター (Y2 プロフェッショナル, 株式会社ケンコー・トキナー) を取り付けて撮影した。なお、比較のために蛍光灯下での撮影も行い、その際には 410nm 以下の紫外線を吸収する紫外線カットフィルター (Zeta UV L41, 株式会社ケンコー・トキナー) を用いた。表 4.3.6-1 に分離面画像の撮影条件を示す。撮影した分離面の画像は、上盤と下盤が見開きで比較できるように配置している (図 4.3.6-2)。蛍光灯下において分離面を観察すると、上盤には下端から 2/3 の面積で濃緑色の鉱物が分布し、残り 1/3 から上端までは石英や長石などの無色好物が分布する。上盤の中央から左には黄鉄鉱とその周辺に黄鉄鉱が酸化して形成されたと思われる黄土色の箇所が確認できる。下盤には全面に濃緑色の鉱物が板状に分布し、表面には写真の左上から右下にかけて条線が明瞭に確認できる。この条線は上盤においても写真の右上から左下にかけて弱く確認できる。このことから注目するレジン充填

割れ目が過去のせん断を伴う活動を経て形成されたカタクラサイトの端であることが分かった。紫外線光源下では、分離面上盤および下盤の両方の一部にレジンが確認でき、それは分離面どうしがちょうど重なる箇所であることが分かる。レジンが充填する箇所がかみ合うことから、上盤のレジンは凸面に、これに対して下盤のレジンは凹面に分布し、片方の面にレジン見られるときには、重なり合うもう片方の面にはレジンが充填されていないことが分かった。このことから、レジンは割れ目の一部を充填したまま硬化したが、その後の確認ボーリングの際にレジンによる密着面が引き剥がされ、上盤側もしくは下盤側のどちらかにレジンが残ったと考えられる。

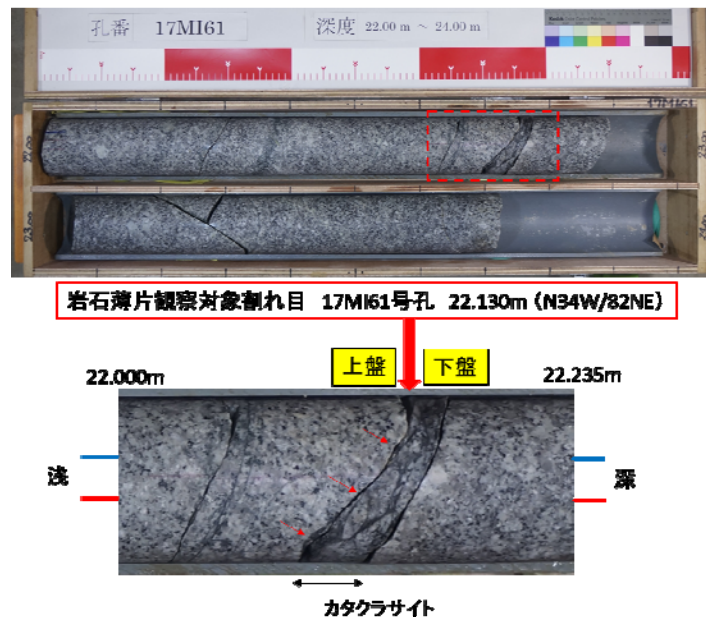


図 4.3.6-1 岩石薄片観察対象割れ目（コア試料の側方より撮影）

表 4.3.6-1 分離面画像の撮影条件

撮影条件	蛍光灯光源下	紫外線光源下
ISO 感度	100	100
絞り値 (F 値)	F5.6	F5.6
シャッタースピード	1/15s	6s

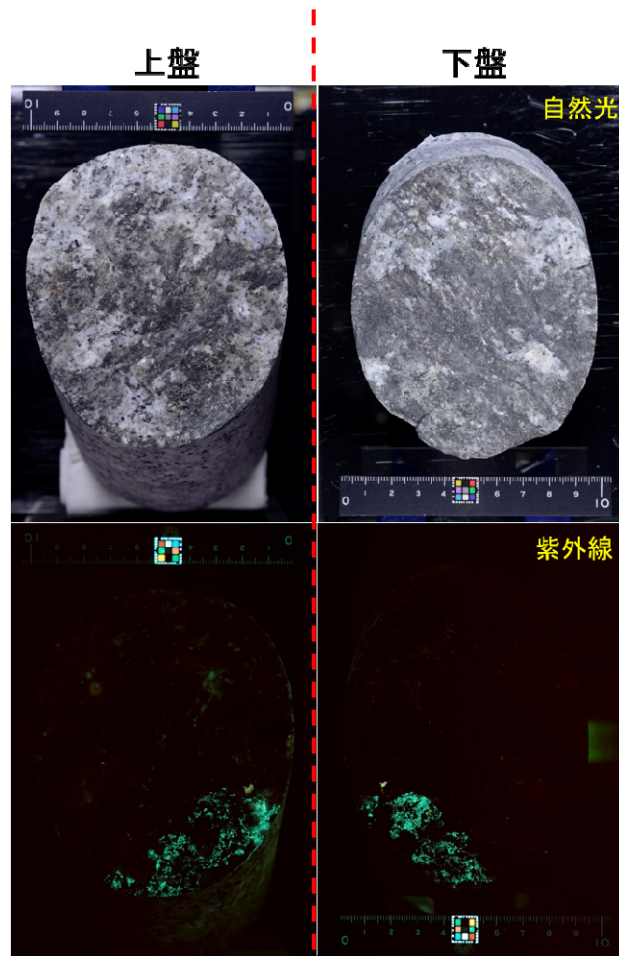


図 4.3.6-2 17MI61 号孔 22.130m 分離面の写真（上段：蛍光灯光源下、下段：紫外線光源下）

## (2) 切断面と岩石薄片製作箇所

17MI61 号孔 22.130m の割れ目のレジンを充填状況は、割れ目の一部のみを充填する程度であった。これは研削をした 17MI60 号孔、また 17MI61 号孔でも確認ボーリング後に密着状態のレジンを充填箇所が得られた深度に比べ、レジンを注入孔から離れているため、割れ目を充填するのに十分な圧力が得られなかった可能性が考えられる。よって、原位置で注入したレジンを割れ目面上でどのように充填しているのかを観察することに加え、原位置で注入された圧力よりもより高圧で、原位置とは異なるレジン（2 次レジンを）を圧入し、割れ目周辺の微細構造の観察を行った。2 次レジンを圧入の際には、上盤と下盤を分離面をかみ合わせ、圧力容器内で真空脱気したのち、およそ 3MPa で 2 次レジンを注入し硬化させた。3MPa は深度 300m の間隙水圧の約 2 倍に相当する。図 4.3.6-3 には岩石薄片製作のためのコア試料の切断面を示す。上盤および下盤に確認できた原位置レジンを垂直に切る断面でコア試料を切断した。図 4.3.6-4 は分離面に対して垂直に切断した断面写真である。岩石薄片の製作サイズは 24mm × 32mm で、両面ともに #3000 まで研磨した。

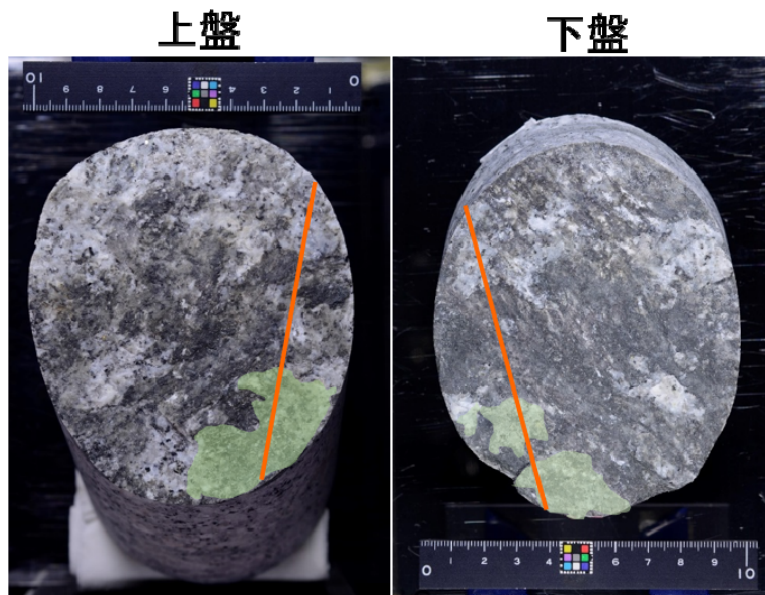


図 4.3.6-3 切断面の位置 (黄緑塗りはレジン充填箇所、オレンジは切断面を示す)

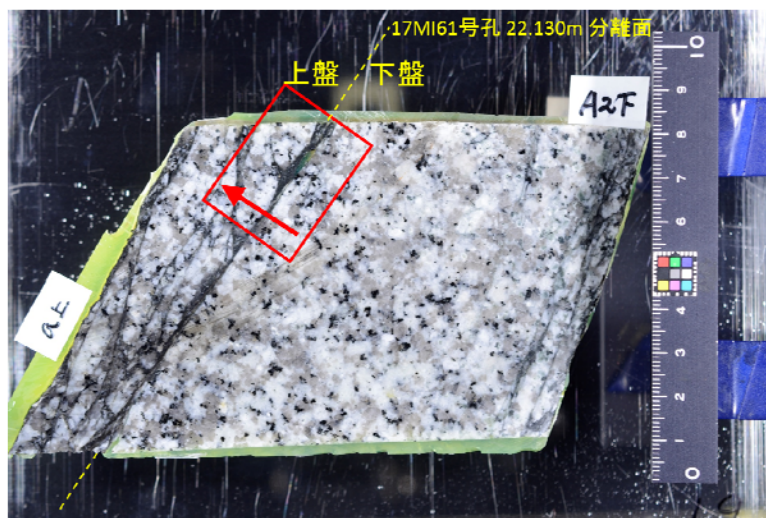


図 4.3.6-4 岩石薄片製作箇所 (分離面に垂直方向)

### (3) 岩石薄片における原位置レジン充填割れ目の観察

蛍光剤を添加したレジンの充填状況の観察は蛍光顕微鏡（生物顕微鏡エクリップス 80I, 株式会社 Nikon）を用いた。使用した蛍光顕微鏡には、6つのバンドパスフィルターが備えつけてあり、観察対象の励起波長および吸収波長に応じて可視化に最適なものを選択する。原位置で注入したレジンおよび異なる蛍光剤を添加した2次レジンの双方の蛍光の区別が明瞭につくフィルターを選択する必要がある。今回の観察では原位置のレジンが黄緑色、2次レジンは薄い青色を呈すフィルター（TxRed, 励起波長：540-580nm, 吸収波長：600-660nm）を使用した。図 4.3.6-5 には図 4.3.6-4 で示す岩石薄片を偏光版で挟み、フィルムスキャナー（GT-X830, EPSON）を使用して撮影した偏光写真を示す。赤枠で囲った箇所は主に原位置レジンの観察された箇所、また黄色で囲った箇所では割れ目からマトリックスにかけて2次レジンの充填状況を観察した。図 4.3.6-6 および図 4.3.6-7 に観察した結果の写真を示す。

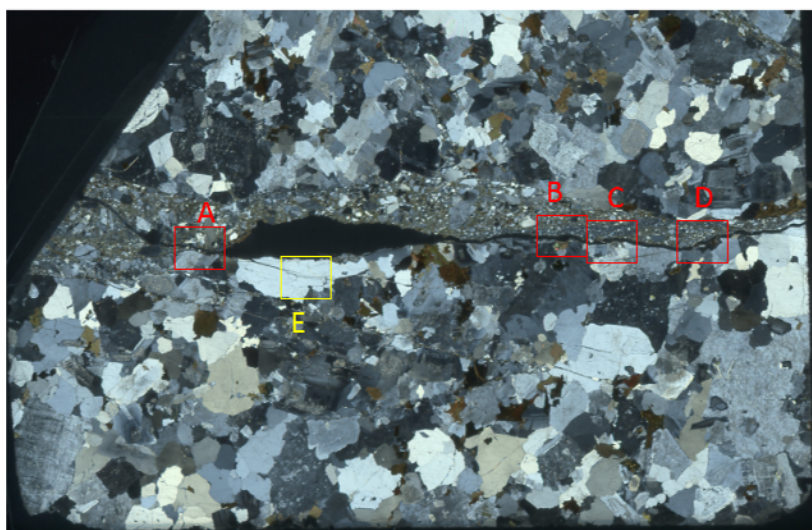


図 4.3.6-5 岩石薄片観察箇所（クロスニコル）

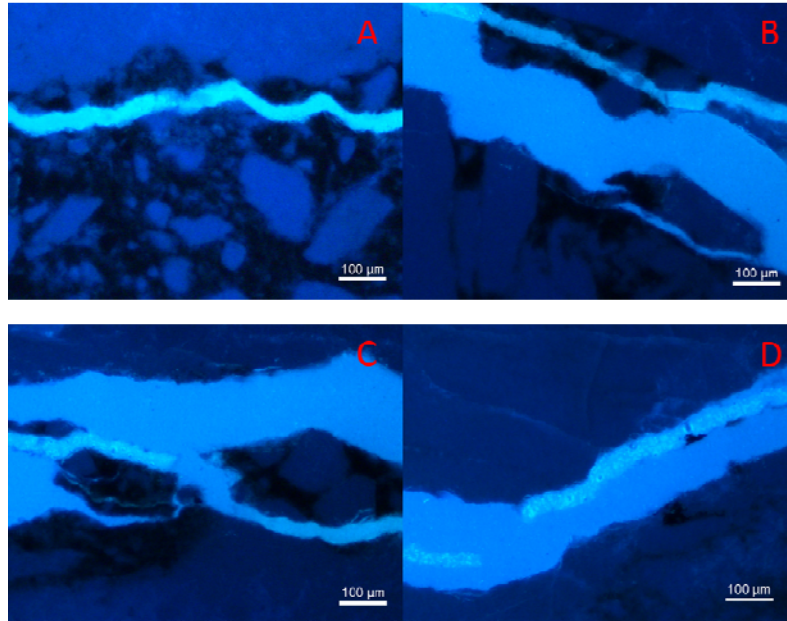
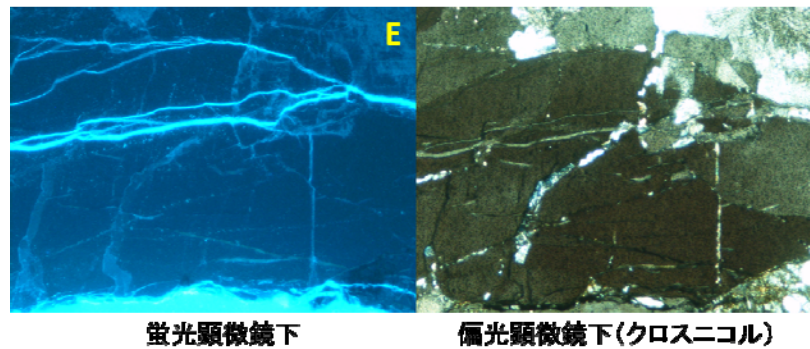


図 4.3.6-6 蛍光顕微鏡下における原位置レジンの観察 (倍率:×10, フィルター:TxRed)



蛍光顕微鏡下

偏光顕微鏡下(クロスニコル)

図 4.3.6-7 マトリックス中の微細間隙の2次レジンの充填状況

原位置で注入したレジンは、割れ目面を表面的に充填しているものが多い (D)。割れ目面表面の破碎構造の間を充填しているもの (B および C) が見られた。B, C および D はいずれもカタクラサイトに接して充填しているが、カタクラサイト内の細粒な構造内に充填している様子は観察できず、あくまでもカタクラサイトが2次的に破碎された間隙に充填している (A, B, C)。室内で 3MPa の圧力で注入した2次レジンはマトリックス中の石英粒子内のクラックや鉱物どうしの粒界を充填しており、2次レジンが充填した微細間隙の幅を測定したところ、平均  $10\mu\text{m}$  まで充填していることが分かった。2次レジン圧入前にはコア試料の真空脱気をしており、レジン圧入時の組織の破壊は被っていないと考える。原位置では十分な注入圧力が得られず、かつカタクラサイトや微細なカルサイト粒子がレジンの充填を妨げ、十分に充填されなかった可能性が考えられる。また割れ目周辺の石英粒内クラックや鉱物粒界を充填しており、これは水銀圧入方による細孔分布測定の結果において、割れ目周辺の間隙が大きいことと整合的である。



#### 4.3.7 まとめ

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

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

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

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

#### 4.4 各種割れ目探査技術の室内比較試験

##### 4.4.1 背景および目的

これまでに割れ目探査技術として、原位置でボアホールテレビ、透水試験、トレーサー試験、高粘性流体注入試験、ラドン濃度計測、レジンを注入試験などを検討してきた。しかしながら、原位置では様々な制約条件により、それぞれの調査結果を十分に比較できていない。このため、一昨年度から室内において各種試験の比較を開始した。これは、室内において、割れ目幅や境界条件が明確な状態で試験を行い、それぞれの評価結果やその特性を把握するためである。このため、室内において模擬割れ目を用い、透水試験、トレーサー試験、高粘性流体注入試験、ラドン濃度計測、レジンを注入試験を行うことにより、これらにより評価される割れ目幅を比較した。

##### 4.4.2 試験モデル

試験モデルには、図 4.4.2-1 に示すような試験モデルを用いた。この試験モデルは、棒状の岩石の上に、厚みが一定のステンレステーブを置き、その上にアクリル板を設置して、割れ目を模擬し、一次元的な流動で試験をすることから一次元モデルとした。岩石とアクリル板の固定には、万力を用いた。

岩石には、 $100 \times 100 \times 1200$  mm の岩石を用いた。長さ 1200 mm は、トレーサーなどを流す際に 1 m の流路長が稼げるようにするため、幅と厚みの 100 mm は、ラドンフラックスの試験において、フラックスが変化しなくなる厚みから設定した。上面のアクリル板は図 4.4.2-2 のように作成した。アクリル板の流路は  $50 \times 100$  mm となるように設定した。ステンレステーブでは岩石の凹凸などで止水が難しいため、ステンレステーブの内側にオーリングを設置し、流入口と流出口には幅 5 mm × 深さ 3 mm の溝を設置した。昨年度までは、流入出口に溝を掘りポーラスストーンを設置していたが、高粘性流体やレジンを注入する際の流動抵抗になるだけでなく、トレーサー試験時にデッドボリュームが増加する原因になることから、今年度は溝のみとした。



図 4.4.2-1 一次元モデルの写真

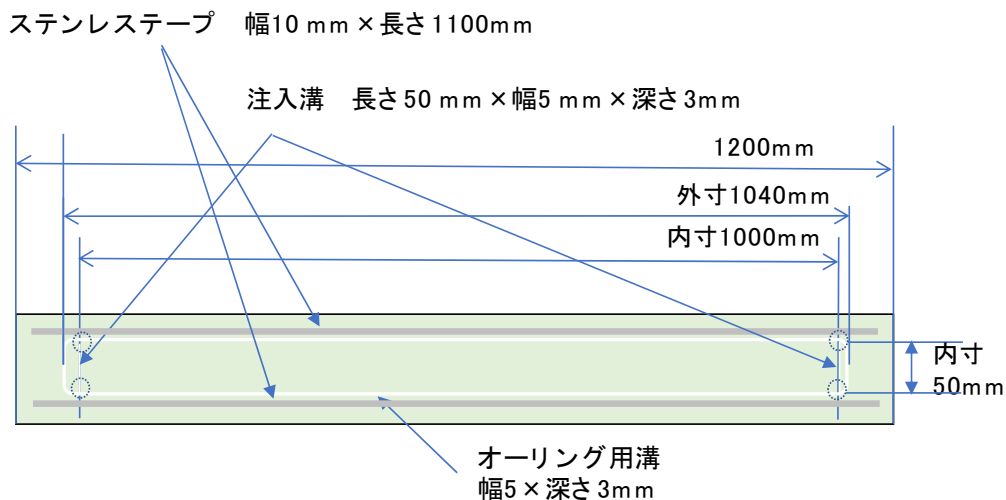


図 4.4.2-2 一次元モデルの設計図

#### 4.4.3 試験方法

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

##### (1) 透水試験

透水試験は、図 4.4.3-1 に示すように試験装置に一定流量で水を注入し、圧力の安定を確認した後に、流入口と流出口の水頭差を計測する。定流量注入には、モーノポンプ、水頭差の計測には、圧力計あるいはマンメーターを用いる。一次元モデルの場合には、透水係数と透水量係数は以下の式で与えられる。

$$k = \frac{Q}{A} \frac{\Delta L}{\Delta H} \quad \text{or} \quad T = \frac{Q}{W} \frac{\Delta L}{\Delta H} \quad \left( Q = k \frac{\Delta H}{\Delta L} A = T \frac{\Delta H}{\Delta L} W \right) \quad (4.4.3-1)$$

ここに、A は流路面積 (=bW)、b は割れ目幅、W は割れ目の横幅、 $\Delta L$  は流路長、 $\Delta H$  は水頭差である。

透水試験時には、流量が大きいと乱流になる恐れがあるため、流量を変化させて、流量と水頭差の線形性を確認する必要がある。

透水係数・透水量係数から割れ目幅を求めるには、割れ目幅の3乗則を用いる。これは、水の流れやすさが割れ目幅の3乗に比例することを利用したものである。割れ目幅の3乗則は以下の式

で表される。

$$T = \frac{\rho g b^3}{12\mu} = \frac{g b^3}{12\nu} \quad (k = \frac{\rho g b^2}{12\mu} = \frac{g b^2}{12\nu}) \quad (4.4.3-2)$$

ここに、Tは透水量係数(T=kb)、kは透水係数、 $\rho$ は水の密度、gは重力加速度、bは割れ目幅、 $\mu$ は粘性係数、 $\nu$ は動粘性係数である。ここに、水の密度は1 Mg/m<sup>3</sup>、重力加速度は9.8 m/s<sup>2</sup>、粘性係数は1.0×10<sup>-3</sup> Pa・s、動粘性係数は、1.0×10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/sである。

このようにして求めた透水係数から割れ目幅を評価することが可能である。

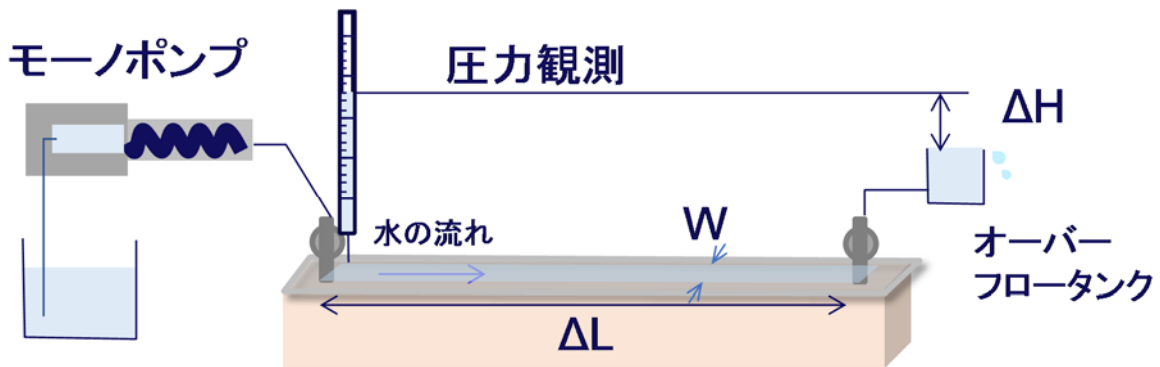


図 4.4.3-1 一次元モデルでの透水試験の概念図

## (2) 高粘性流体注入試験

高粘性流体注入試験は、図 4.4.3-2 で示したように、割れ目に粘性の高い流体を注入することにより、流れの次元や割れ目幅を評価する方法である。この方法は、4.2 に示すように、割れ目に粘性の高い流体を一定流量で注入することにより、高粘性流体の流動によって注入圧力が変化するとして、割れ目幅を評価する（長谷川ほか、2007）。

一次元モデルでの高粘性流体試験の概念図を図 4.4.3-2 に示す。

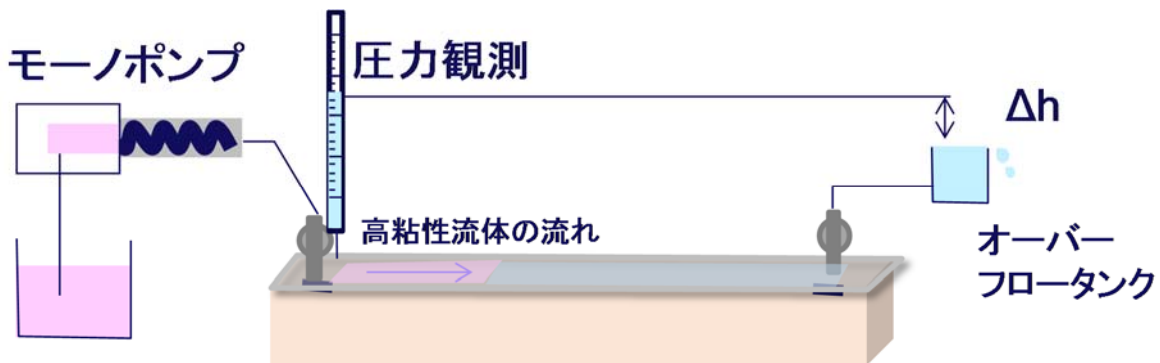


図 4.4.3-2 一次元モデルでの高粘性流体注入試験の概念図

一次元流動の場合、高粘性流体の低流量注入時の圧力増加は以下のように与えられる（長谷川ほか、2015）。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{mQ^2}{kA^2} \quad \left( h = \frac{mQ^2 t}{kA^2} \right) \quad (4.4.3-3)$$

ここに、 $h$  は注入圧力（時間の関数）、 $m$  は高粘性流体の水に対する粘性倍率、 $t$  は時間である。

高粘性流体がモデル全体に行き渡り定常状態に達した場合には、粘性倍率を考慮して水の場合と同様に、以下のように与えられる（長谷川ほか、2015）。

$$k = \frac{mQ}{A} \frac{\Delta L}{\Delta H} \quad \text{or} \quad T = \frac{mQ}{W} \frac{\Delta L}{\Delta H} \quad (4.4.3-4)$$

また到達後には、注入圧力の増加がなくなるため、注入圧力の増加がなくなるまでの注入量が割れ目内の体積となる。

このように、高粘性流体の注入により、①定常的な圧力、②非定常的な圧力の変化、③注入体積から透水量係数を求めることができ、割れ目幅を3乗則から求めることが可能である。

### (3) トレーサー試験

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

$$b = \frac{Qt_{arr}}{WL} \quad (t_{arr} = WLb/Q) \quad (4.4.3-5)$$

ここに、 $t_{arr}$  はトレーサーの到着時間、 $W$  は割れ目の横幅、 $L$  は割れ目の長さ、 $b$  は割れ目幅、 $Q$  は注入流量である。

トレーサーは割れ目内を移行するため、移流分散現象によって図 4.4.3-3 に示すように希釈する。トレーサー到着時刻は、矩形波で入れた場合には、到達のピークが出た時間に対する矩形波で入れた際の中央時間になる。一定濃度で入れた場合には、投入濃度の半分の濃度になった時間がトレーサーの到着時間である。

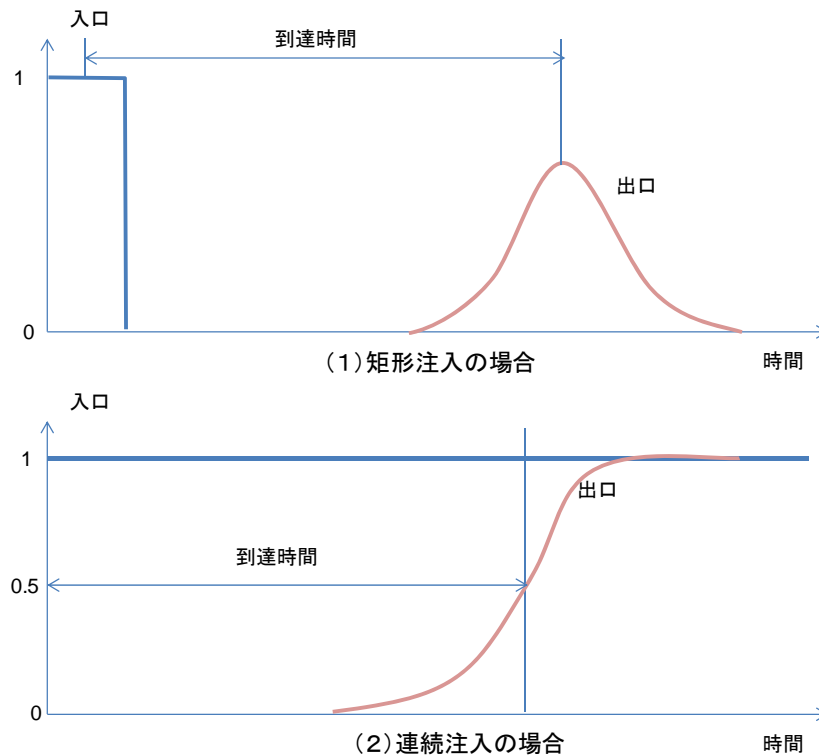


図 4.4.3-3 トレーサー注入時の到達時間の概念図

#### (4) ラドン濃度計測

ラドン濃度計測による割れ目幅の評価は、4.1 に示したように、地下水中のラドン濃度とラドンフラックスの関係から割れ目幅を推定する方法である。このため、ラドン濃度から割れ目幅を評価するには、割れ目内のラドン濃度と割れ目からのフラックスを求める必要がある。ここでは、割れ目に水を注入して割れ目内のラドン濃度を求めるとともに、割れ目にガスを循環させてラドンフラックスを計測した。

一昨年度から、装置からラドンが漏洩している可能性が示唆されたため、ラドンの漏洩を抑制する目的で、図 4.4.3-4 に示すように岩石をステンレス容器に入れると共に、岩石の上板にも鉄板を用いた。さらに、上板の鉄板とステンレスはアルミテープを用いてシールし、オーリングではラドンが抜ける可能性があるため、鉛線をシール材に用いた。岩石と上板の鉄板の間にステンレステープをおいて割れ目幅を設定し、これを万力で締めることにより割れ目幅を設定した。

ラドンフラックスの計測は、図 4.4.3-5 に示すように、RAD7 (DURRIDGE Company) を用いて、割れ目内と RAD7 間でガスを循環し、ラドン濃度を計測することにより求めた。

ラドン濃度が平衡状態になるには、半減期(3.8 日)の 5 倍程度の時間(約 20 日)を要するが、割れ目内でのラドンの濃度変化は以下のように与えられる。

$$\partial C / \partial t = -\lambda C + FA \quad (4.4.3-6)$$

ここに、 $C$  はラドン濃度 ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ )、 $\lambda$  は壊変定数 ( $1/\text{s}$ )、 $F$  はラドンフラックス ( $\text{Bq}/\text{m}^2\text{s}$ )、 $A$  は割れ目の面積 ( $\text{m}^2$ )、単位  $\text{Bq}$  は一秒間に壊変する原子の個数 ( $\text{n}/\text{s}$ ) である。



図 4. 4. 3-4 ラドン濃度計測のための装置写真

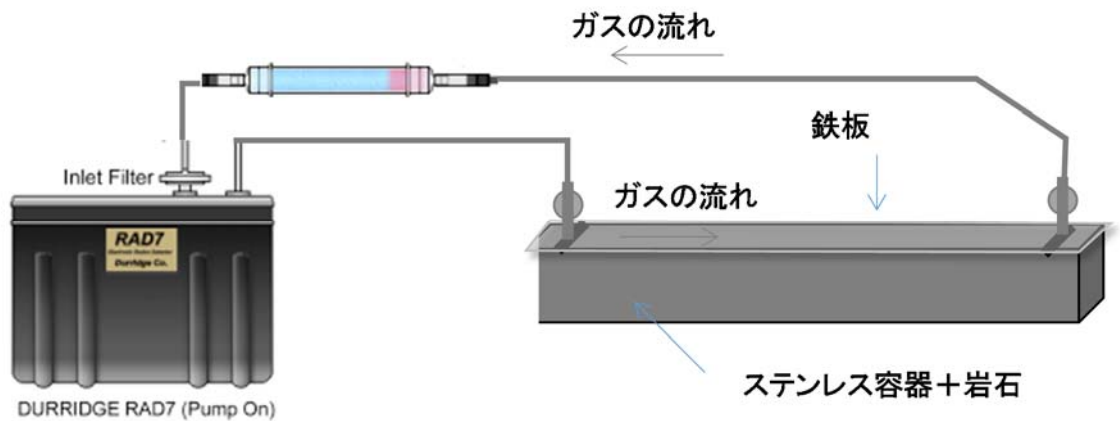


図 4. 4. 3-5 ラドン計測の概念図

この式を初期条件 ( $t=0 : C=0$ ) で積分すると以下の関係が得られる。

$$C = \frac{FA}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (4. 4. 3-7)$$

なお平衡濃度 ( $C_{se}$ ) 値は、 $FA/\lambda$  である。

この濃度変化は図 4. 4. 3-6 のようになる。濃度は 3.8 日間で平衡濃度の半分まで上昇するため、数日程度待てば十分に平衡濃度が予測できると考えられる。このため、安置時間とこの式の関係から上記の方法でフラックスを求める。さらに、平衡濃度とフラックスの関係から割れ目幅を以下の式で求めることができる (角森、2009)。

$$b = \frac{2F}{C_{se}} \quad (4.4.3-8)$$

ここに、 $C_{se}$  はラドンの平衡濃度 (Bq/m<sup>3</sup>) である。

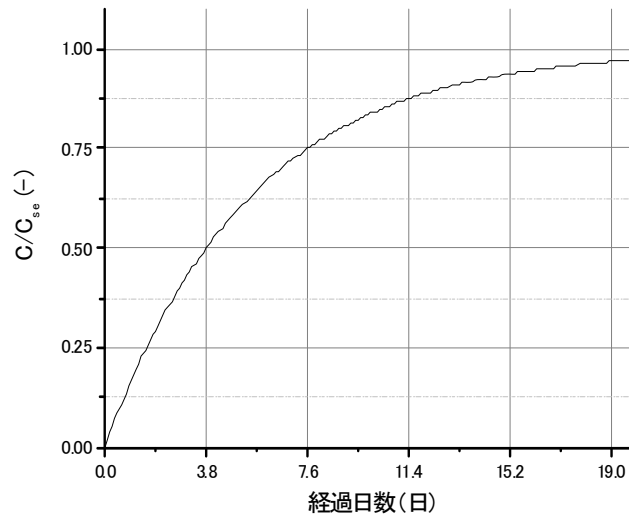


図 4.4.3-6 ラドン濃度の経時変化

ラドン濃度の計測は、割れ目内に水を注入し、数日程度密閉した上で、注入した水を回収し、ラドン濃度を計測することで評価した。この試料水をラドン計測用の 40 ml カラムに採取し、RAD7 (DURRIDGE Company) で計測した。試料水を回収する際には、トレーサーを入れた水を注入し、押し出す形式とする。これは、ガスで押し出した場合、ラドンは水に比べてガスに 4 倍程度溶けやすいので、ガスに移行する可能性が高いためである。また、水で押し出した場合、割れ目幅が 0.5 mm の場合、割れ目の体積が 50 ml と試料量に近い場合、押し出した試料水の混入が考えられるためである。このため、トレーサーを入れた水を用いて、試料水を押し出し、試料水のトレーサー濃度を計測することで、押し出し水の混合を評価し、試料のラドン濃度を求めた。

上記のラドン濃度は平衡に達した濃度ではないため、この濃度をさらに換算する必要がある。濃度と時間の関係は、式(4.4.3 -7)であらわされるため、ラドンの平衡濃度は、割れ目に水を注入してから時間(t)を考慮して以下の式で求める必要がある。

$$C_{se} = \frac{C}{1 - e^{-\lambda t}} \quad (4.4.3-9)$$

また、ここで割れ目幅を求める際には、片側のみが岩盤であり、片側からしかフラックスが出ていないため、式(4.4.3 -8)の代わりに、以下の式で求める必要がある。



$$b = \frac{F}{C_{se}} \quad (4.4.3-10)$$

#### (5) レジン注入試験

レジン注入による割れ目の評価は、4.3に示すように、割れ目にレジンを注入し、その後掘削することにより、直接的に割れ目幅を調査する方法である。レジンには、2液混合型のエバーボンドを用いた。レジン注入直前に混合し、透水試験と同様に、模擬割れ目の注入孔から注入し、流出孔から流出を確認した後に、両端のバルブを閉じた。その後、レジンの硬化を確認するために、十分な時間待機した。その後、上板を取り外し、レジンの厚みをノギスで計測することにした。

#### 4.4.4 試験結果

今年度は、前述の各種割れ目評価技術を、花崗岩だけでなく砂岩でも実施した。砂岩には諫早砂岩と来待砂岩を用いた。割れ目の幅はラドン濃度計測を除き、0.2 mmのスチールテープを挟んで試験を実施した。このため、割れ目幅はおよそ0.2 mmであると考えられる。

##### (1) 透水試験結果

一次元モデルでの透水試験を実施した。一次元モデルに一定流量(Q)で水を注入し、圧力の安定を確認した後、流入口と流出口の差圧(m)を計測した。定流量注入には、モーノポンプ、水頭差の計測には、マンメーターあるいは圧力計を用いた。流量は、100、200、300、400 ml/minと4段階に変化させて透水試験を実施した。

試験結果を表 4.4.4-1 に示す。この結果を横軸に圧力、縦軸に流量として整理したものを図 4.4.4-1 に示す。試験は各流量で3回計測を行い、それらの結果を図に示した。圧力と流量の関係が線形であるため、乱流は生じていないと考えられる。試験の傾きがほぼ同じため、透水係数はほぼ同じであると考えられる。また、切片がやや異なるが、各岩石で切片がほぼ一定とみなせることから、試験装置ごとの系統的な誤差であると考えられる。これは流入出口での圧力計測時に発生する誤差に起因すると考えられる。岩石によって切片がやや異なるため、傾きから透水量係数を求めることにした。各岩石での試験結果の圧力と流量の傾きから透水量係数を式(4.4.3-1)に基づいて求めた結果、透水量係数と割れ目幅は、表 4.4.4-1 のように得られた。透水量係数では、各岩石によって大きく異なるように見えるが、これは割れ目幅の3乗に比例するためであり、割れ目幅は各試験で設定値とほぼ同じ0.2mmよりもやや大きい値となっている。0.2mmよりもやや大きくなるのは、0.2mmのスペーサーを挟むため、0.2mm以下の割れ目幅にならないためと考えられる。

表 4.4.4-1 試験時の圧力と流量の関係

花崗岩		諫早砂岩		来待砂岩	
$\Delta H$	Q	$\Delta H$	Q	$\Delta H$	Q
m	m <sup>3</sup> /s	m	m <sup>3</sup> /s	m	m <sup>3</sup> /s
3.5	2.63E-06	5.6	2.07E-06	4.4	2.30E-06
3.5	2.63E-06	5.6	2.07E-06	4.2	2.30E-06
3.5	2.63E-06	5.7	2.07E-06	4.2	2.30E-06
6.9	4.37E-06	9.5	3.67E-06	8.0	4.37E-06
6.8	4.37E-06	9.5	3.67E-06	8.0	4.37E-06
6.8	4.37E-06	9.5	3.67E-06	8.3	4.37E-06
10.3	6.67E-06	12.9	4.93E-06	11.4	5.85E-06
10.1	6.67E-06	12.8	4.93E-06	11.4	5.85E-06
10.1	6.67E-06	12.8	4.93E-06	11.4	5.85E-06
13.2	7.82E-06	15.0	5.75E-06	14.5	7.00E-06
13.1	7.82E-06	15.0	5.75E-06	13.9	7.12E-06
13.4	7.82E-06	15.1	5.75E-06	14.1	7.12E-06
近似直線					
切片	7.11E-07		-1.28E-07		3.46E-07
傾き	5.52E-07		3.93E-07		4.81E-07
透水量係数 (m <sup>2</sup> /s)	1.10E-05		7.87E-06		9.61E-06
割れ目幅 (mm)	0.238		0.213		0.227

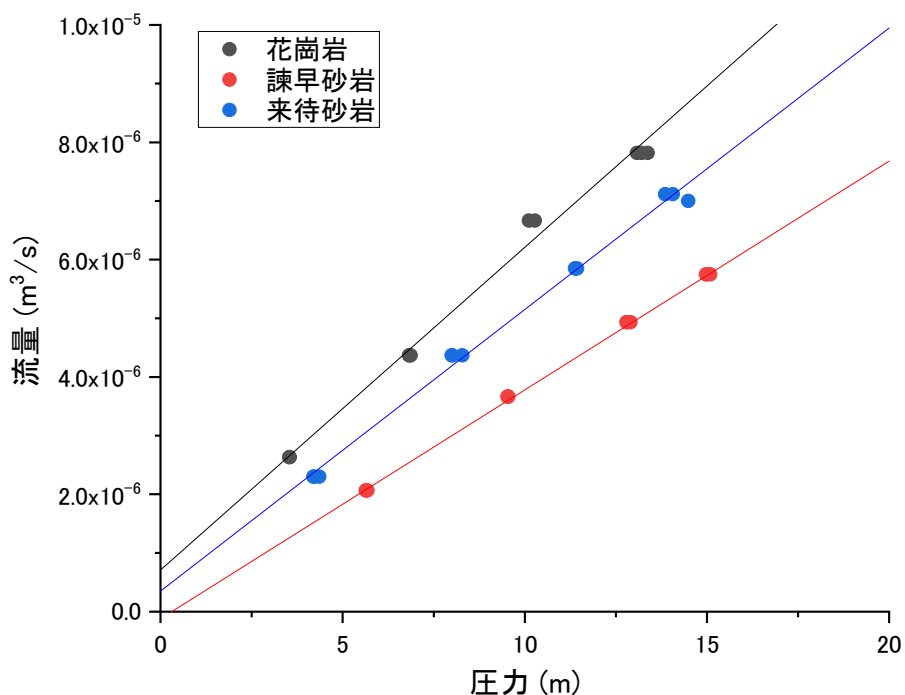


図 4.4.4-1 一次元モデルでの流量と水頭差の関係

## (2) 高粘性流体注入試験結果

高粘性流体試験は透水試験と試験形態はほぼ同じであるが、透水試験と異なり、水の代わりに高粘性流体を用いることで、前述のように 2 種類の方法、①定常状態の圧力と②非定常状態の圧力勾配で割れ目の幅を評価することが可能である。また、高粘性流体の到達からも割れ目幅を求めることが可能である。この試験系では、高粘性流体が割れ目を満たした時間を到達した時間としている。これらの関係を図 4.4.4-2 に示す。①定常状態の圧力は、透水試験と同様に、高粘性流体の粘性のみを考慮して透水量係数を求める方法である。②非定常状態の圧力勾配は、高粘性流体が注入していく際の注入圧力の経時変化から割れ目幅を求める方法である。③到達時間からは、定常になるまでに注入した流量から割れ目の体積を求める方法である。

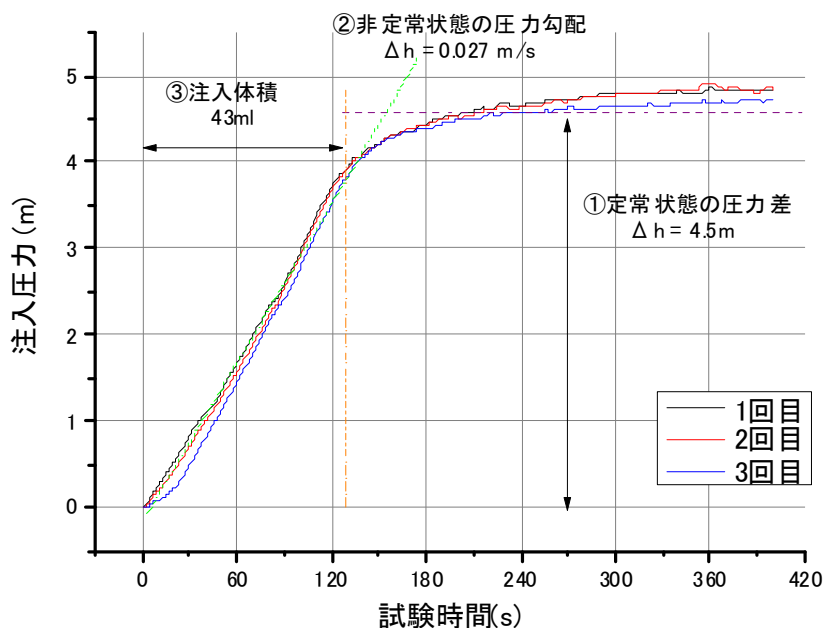


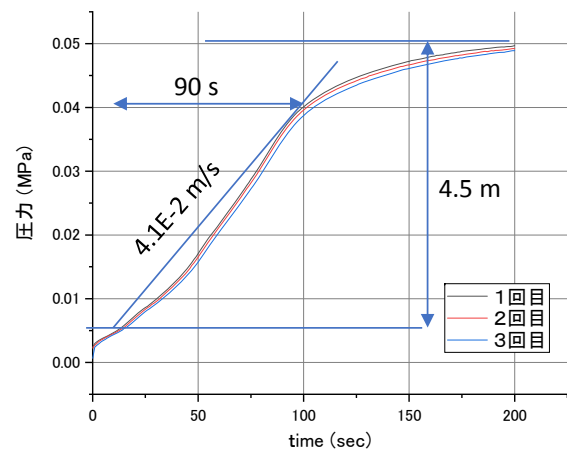
図 4.4.4-2 高粘性流体試験による割れ目幅評価方法の概念図

一次元モデルでの試験結果を表 4.4.4-2 に示す。試験結果を岩石ごとに図 4.4.4-5～図 4.4.4-6 に示す。割れ目幅は 0.2 mm となるように、0.2 mm のスチールテープを挟んでいる。この試験は高粘性流体の粘性 30 cp、50 cp、100 cp での試験結果であり、この結果を表 4.4.4-2 に示す。

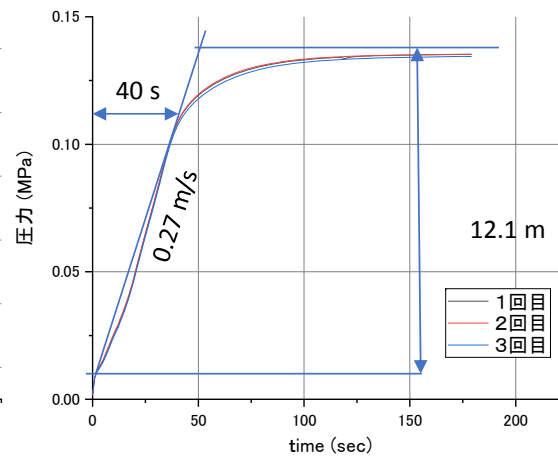
試験結果から、評価される割れ目幅は、設定幅よりもやや大きめになっている。①定常状態での評価結果は、透水試験結果の約 1～1.2 倍程度となっている。①定常状態での圧力は、透水試験に変えて高粘性流体を用いた透水試験ということもできるため、粘性は 20%程度に低めに評価されている可能性がある。②非定常状態では、割れ目幅は①の結果よりもさらに 30%程度過大に評価されている。ちなみに、透水量係数では 2～3 倍に評価されている。このように非定常過程では多少大きめに割れ目が評価されるようである。③注入時間（高粘性流体の到達）での評価結果は、①定常状態での評価結果と②非定常状態での調査結果の中間的な結果となっている。このように高粘性流体試験ではやや大きめに割れ目が評価されるものの、数十%程度大きく評価されると考えられる。

表 4.4.4-2 高粘性流体試験の評価結果

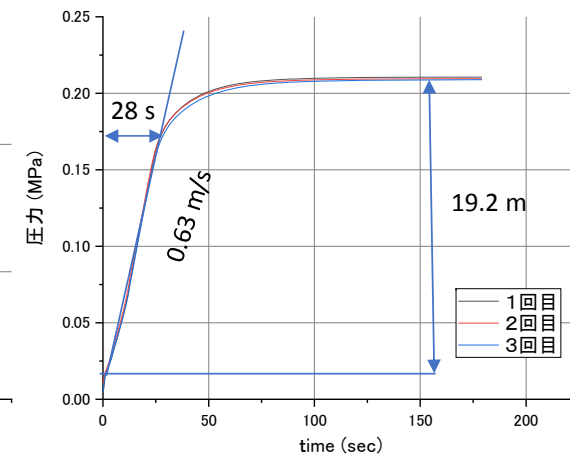
試験条件			試験結果			透水量係数 (m <sup>2</sup> /s)		割れ目幅 (mm)				
岩石	粘性	流量	①定常状態の 圧力	②非定常状態 の圧力勾配	③注入時間 (s)	①定常状態	②非定常 状態	①定常状 態	②非定常 状態	③注入 時間		
蛭川花崗岩	cp	ml/min	4.5	4.1E-02	90	2.30E-05	4.40E-05	0.31	0.38	0.31		
			30	10.41	12.1	2.7E-01	40	2.20E-05	4.90E-05	0.30	0.39	0.40
			49.7	19.2	6.3E-01	28	2.30E-05	5.80E-05	0.31	0.42	0.46	
	50	10.2	8.0	6.0E-02	90	2.10E-05	4.90E-05	0.30	0.39	0.31		
		20.1	14.8	2.0E-01	55	2.30E-05	5.80E-05	0.30	0.41	0.37		
		29.9	20.7	3.8E-01	40	2.40E-05	6.40E-05	0.31	0.43	0.40		
	100	6.18	7.2	2.9E-02	150	2.90E-05	7.30E-05	0.33	0.45	0.31		
		8.23	9.0	5.9E-02	110	3.00E-05	6.30E-05	0.33	0.43	0.30		
		12.28	13.3	1.0E-01	90	3.10E-05	8.10E-05	0.34	0.46	0.37		
来待砂岩	50	10.74	11.5	8.8E-02	100	1.60E-05	3.60E-05	0.27	0.35	0.36		
		15.58	15.4	1.6E-01	80	1.70E-05	4.30E-05	0.28	0.37	0.42		
		20.7	17.6	2.4E-01	60	2.00E-05	4.90E-05	0.29	0.39	0.41		
諫早砂岩	30	10.3	9.4	7.4E-02	100	1.10E-05	2.40E-05	0.24	0.31	0.34		
		14.91	13.1	1.5E-01	70	1.10E-05 E-	2.60E-05	0.24	0.32	0.35		
		20	15.7	2.3E-01	60	1.30E-05	2.90E-05	0.25	0.33	0.40		



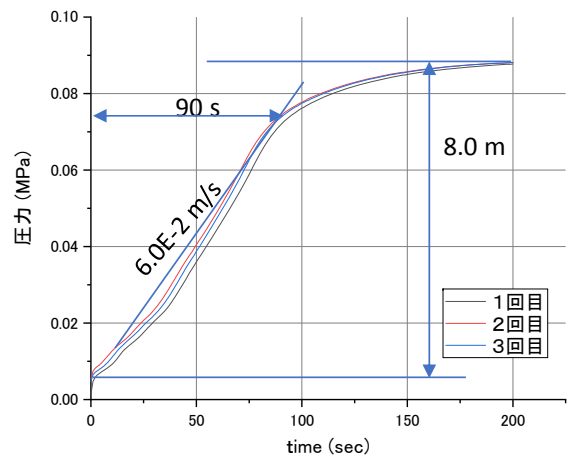
(1) 30 cp a) 10 ml/min,



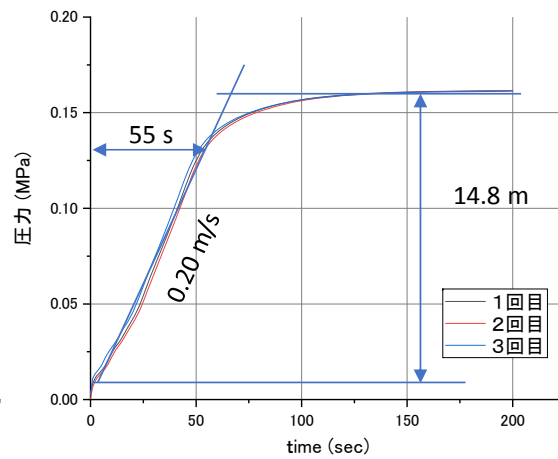
b) 30 ml/min



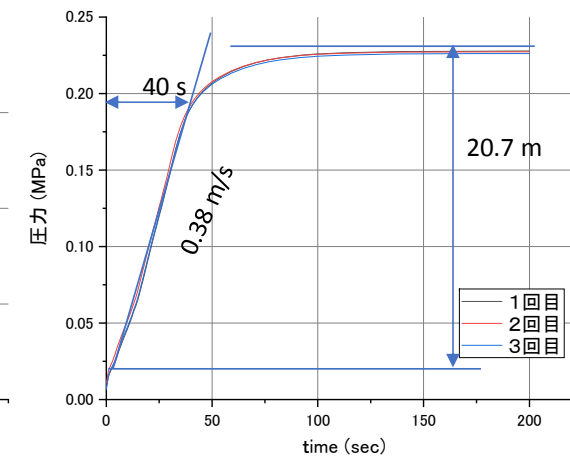
c) 50 ml/min



(1) 50 cp a) 10 ml/min,



b) 20 ml/min



c) 30 ml/min

図 4.4.4-3 花崗岩での高粘性流体注入試験結果

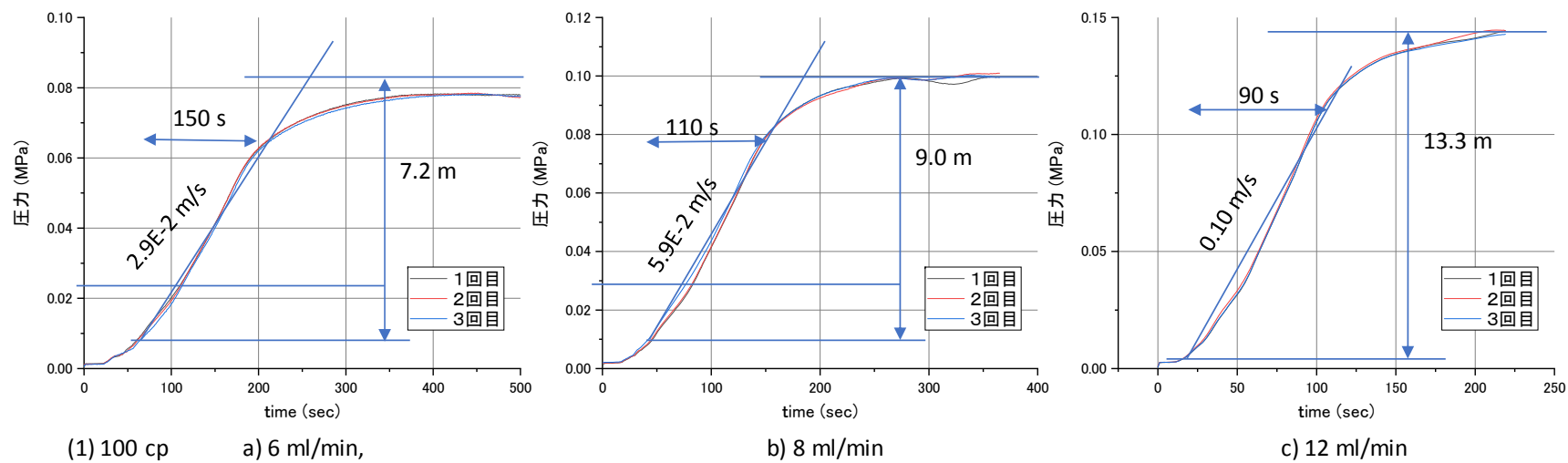


図 4. 4. 4-4 花崗岩での高粘性流体注入試験結果(続き)

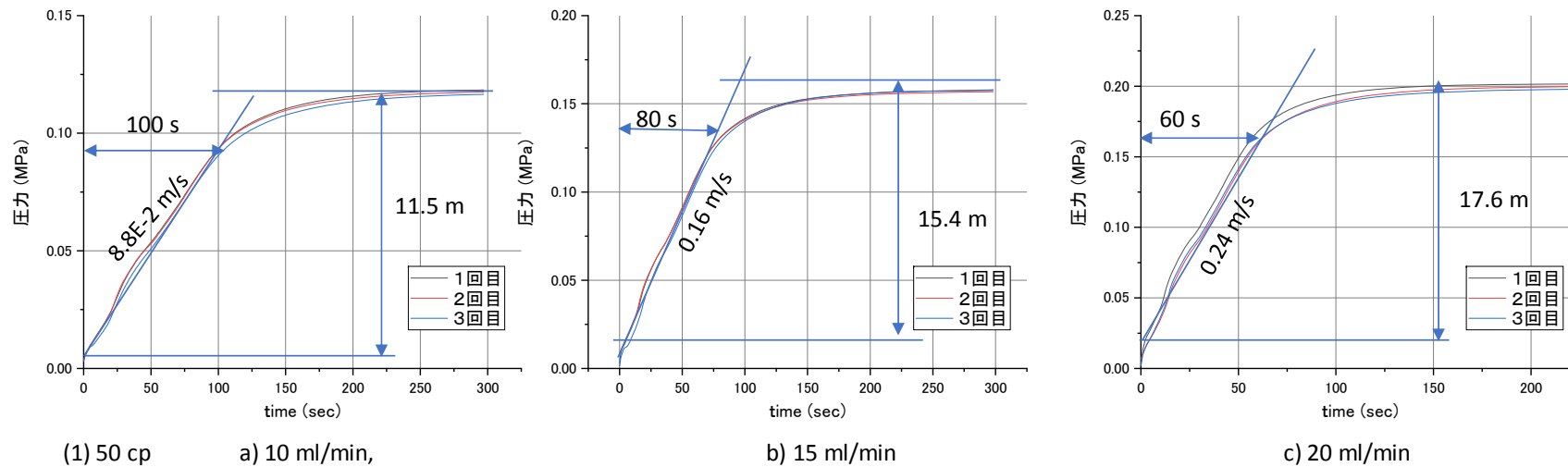


図 4. 4. 4-5 来待砂岩での高粘性流体試験結果

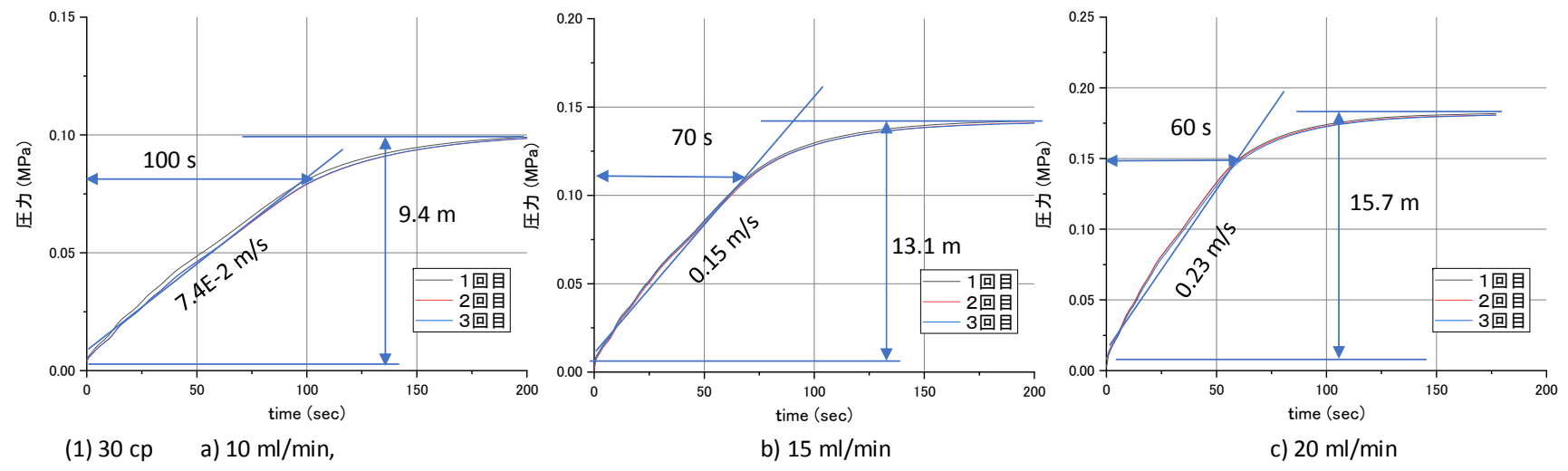


図 4.4.4-6 諫早砂岩での高粘性流体試験結果



(3) トレーサー試験結果

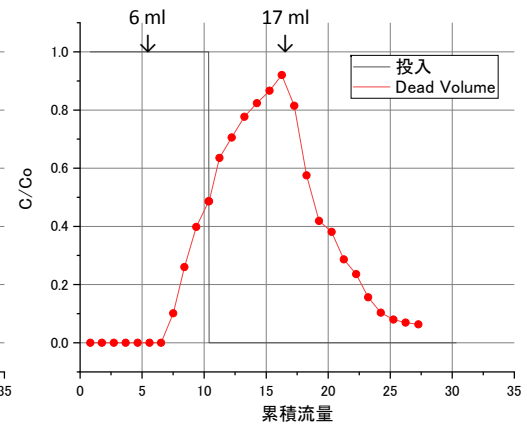
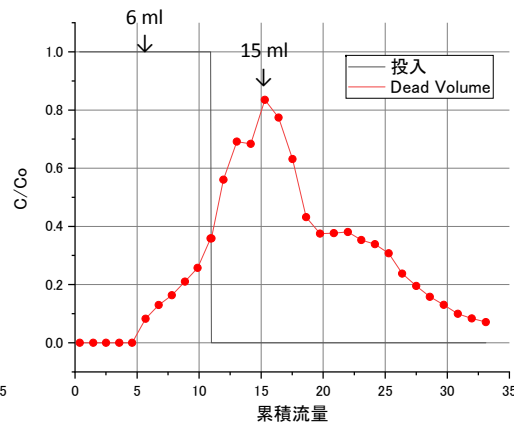
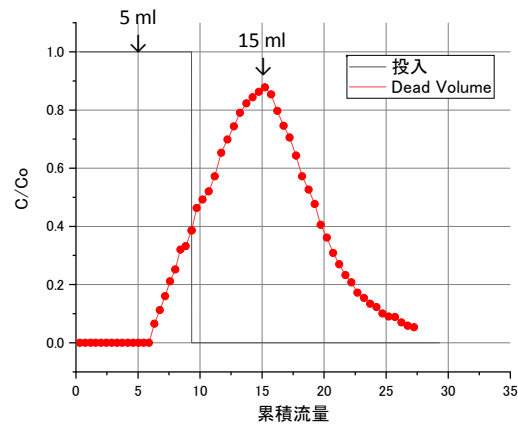
トレーサー試験に先立ち、デッドボリューム試験を実施した。この試験は、トレーサー注入から回収までの配管や注入・流出口のデッドボリュームを計測するためのものである。試験方法は、流出側の流出口を閉鎖し、注入側にある2つの注入口の片方から注入、もう片方から流出させ、破過曲線を評価することにより、実験装置のデッドボリュームを計測するものである。この結果をトレーサー試験結果とともに、図 4.4.4-7 に示す。デッドボリューム試験もトレーサー試験と同様に、注入したトレーサーの濃度ピークから、観測したトレーサーの濃度ピークの間がその体積となる。このため、デッドボリュームはややばらつきはあるものの約 10 ml 程度であることがわかる。

トレーサー試験結果も図 4.4.4-7 に示す。トレーサー試験結果は、注入流量 0.1 ml/min と 1 ml/min とをあわせて示した。注入流量 0.1 ml/min と 1 ml/min では試験にかかる時間は 10 倍程度異なるがそれほど大きな差はない結果となっている。花崗岩での試験結果に比べて堆積岩での試験結果は濃度ピークが小さい。ただし、注入流量 0.1 ml/min の結果が特に濃度ピークが落ちるといった傾向は顕著ではないため、これはマトリックスへの拡散の影響というよりは、分散の影響であると考えられる。

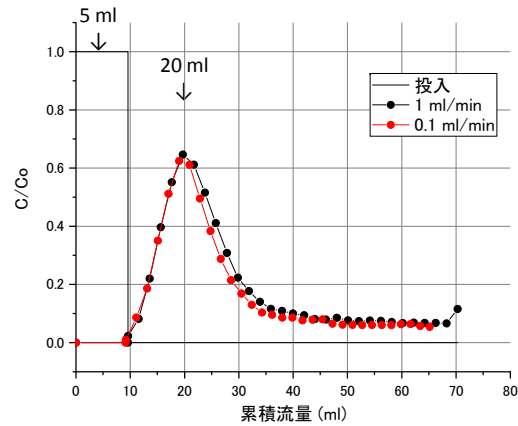
試験結果をまとめたものを表 4.4.4-3 に示す。割れ目幅は、式(4.4.3-5)から計算した。割れ目幅の設定値は 0.2mm であるが、全体にそれよりも小さい割れ目幅となっている。原因は不明であるが、デッドボリュームを考慮しない場合には、割れ目幅の評価値は 0.2mm 程度と設定とほぼ同じになる。割れ目の体積とデッドボリュームがほぼ同じとなっていることから、割れ目幅が小さいために選択的にトレーサーが流れた可能性と、割れ目の体積がデッドボリューム比べて同程度であるため、その影響を受けやすい可能性がある。

表 4.4.4-3 トレーサー試験による割れ目幅の評価結果

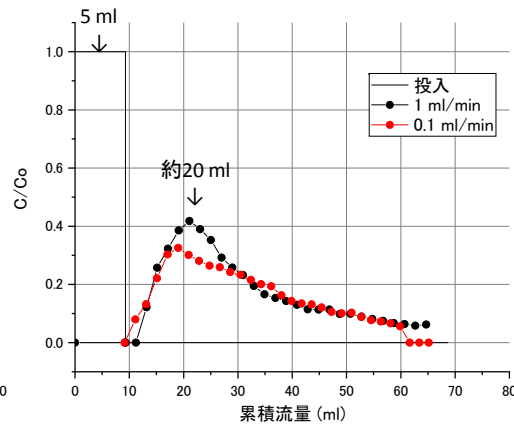
試料名	試験条件	Dead Volume 試験			トレーサー試験			割れ目 体積	割れ目 幅
	流量	注入	流出	DV	注入	流出	体積		
	ml/min	V1	V2	V2-V1	V1	V2	V2-V1	V-DV	mm
蛭川 花崗岩	1	5	15	10	5	20	15	5	0.10
	0.1	-	-	-	5	20	15	5	0.10
来待 砂岩	1	6	15	9	5	19	14	5	0.10
	0.1	-	-	-	5	21	16	7	0.14
諫早 砂岩	1	6	17	11	5	18	13	2	0.04
	0.1	-	-	-	5	24	19	8	0.16



(a) デッドボリューム試験

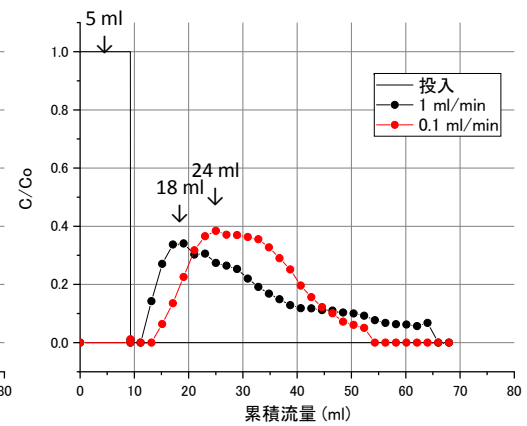


(1) 花崗岩



(b) トレーサー試験

(2) 来待砂岩



(3) 諫早砂岩

図 4.4.4-7 各岩石でのトレーサー試験結果

#### (4) ラドン濃度計測結果

ラドンフラックスを求めるために、図 4.4.3-5 に示した試験系で循環試験を実施した。試験結果を図 4.4.3-6 に示す。蛭川花崗岩の場合、ラドン濃度は時間と共に増加し、15,000 Bq/m<sup>3</sup>まで到達している。平衡濃度(C<sub>se</sub>)を 16,000 Bq/m<sup>3</sup>として、C<sub>se</sub>-C を対数した濃度変化もあわせて示した。対数濃度変化は単純な蓄積であれば、式 4.4.3-7 に示すように、直線的になる。この結果でもおおむね直線的な形状となっており、ラドンの発生と放射壊変によって濃度が形成されていることがわかる。ただし、この直線から見かけの半減期を求めると、3.2 日程度となり、Rn の半減期(3.8 日)よりも小さくなる。見かけの半減期が短くなるのは、ラドンの装置からの漏洩によるものと考えられる。

これはラドンの濃度変化は、式 4.4.3-6 のようになるはずであるが、漏洩がある場合には、濃度は以下の式のように表されると考えられる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\lambda C + FA - LC = -(\lambda + L)C + FA \quad (4.4.4-1)$$

ここに、 $\lambda$  はラドンの壊変定数、 $L$  はラドン濃度に比例する漏洩の係数である。これは、 $\lambda$  の部分が  $(\lambda+L)$  になっており、壊変定数が増加したような挙動を示すことになる。

この式を初期条件(t=0 : C=0)で積分すると以下の式が得られる。

$$C = \frac{FA}{\lambda + L} \left(1 - e^{-(\lambda+L)t}\right) \quad (4.4.4-2)$$

したがって、平衡値は  $\lambda/(\lambda+L)$  倍になっていると考えられる。Rn の壊変定数は、0.182 1/day(=ln(2)/T<sub>1/2</sub>)であるが、図 4.4.3-6 での壊変定数は 0.21 なので、 $\lambda/(\lambda+L)=0.87$  となり、漏洩がなければ、平衡値は 20000 Bq/m<sup>3</sup>と推定される。

この平衡値に基づいてフラックスを計算する。フラックスは割れ目面から発生しているものであるが、ここで濃度は割れ目内だけでなく、RAD7 の計測装置部分の体積を含む。この場合、フラックスと濃度の関係は次式で表される。

$$C_{se} = \frac{FA}{(\lambda + L)V} \quad \left(F = \frac{C_{se}(\lambda + L)V}{A}\right) \quad (4.4.4-3)$$

ここに、 $V$  は計測装置部分を含む試験系の体積である。

RAD7 の計測装置内体積は約 1 Liter であり、乾燥剤が約 1 Liter、チューブ、割れ目体積はこれらに比べると非常に小さいため、体積を 2 Liter と考えてフラックスを計算する。面積は 0.05 m<sup>2</sup> (= 1 m x 0.05 m)である。ここで注意が必要なのは、ラドン濃度 Bq は一秒あたりに壊変している原子数であり、 $C\lambda$  がこれにあたる。このため、フラックスは、平衡値を 16000~20000 Bq/m<sup>3</sup> とすると、640~800 Bq/m<sup>2</sup>となる。

この値は、室内試験で得られているラドンフラックス(600 Bq/m<sup>2</sup>)とほぼ同程度の値である。

来待砂岩の結果では、試験中に相対湿度が高くなったため、乾燥剤を入れ替えた。この影響で、試験開始から5日目と13日目で濃度の低下が見られる。初期濃度が変化しても平衡濃度に対して近づく形態は、式(4.4.4-2)に示すように、指数関数的で壊変定数に依存する。このため、乾燥剤を交換して濃度が変化した3つの段階に分け、それぞれの濃度変化の傾きを求めた。また、平衡濃度は、濃度変化から1200 Bq/m<sup>3</sup>と仮定した。この結果、半減期は1段階目で2.9日、二段階目で8.9日、三段階目で3.6日となった。最も漏洩の影響が顕著であると考えられる1段階目では壊変定数は0.24なので、 $\lambda/(\lambda+L)=0.76$ となり、漏洩がなければ平衡値は1600 Bq/m<sup>3</sup>と推定される。このため、ラドンフラックスは、48~64 Bq/m<sup>2</sup>となる。

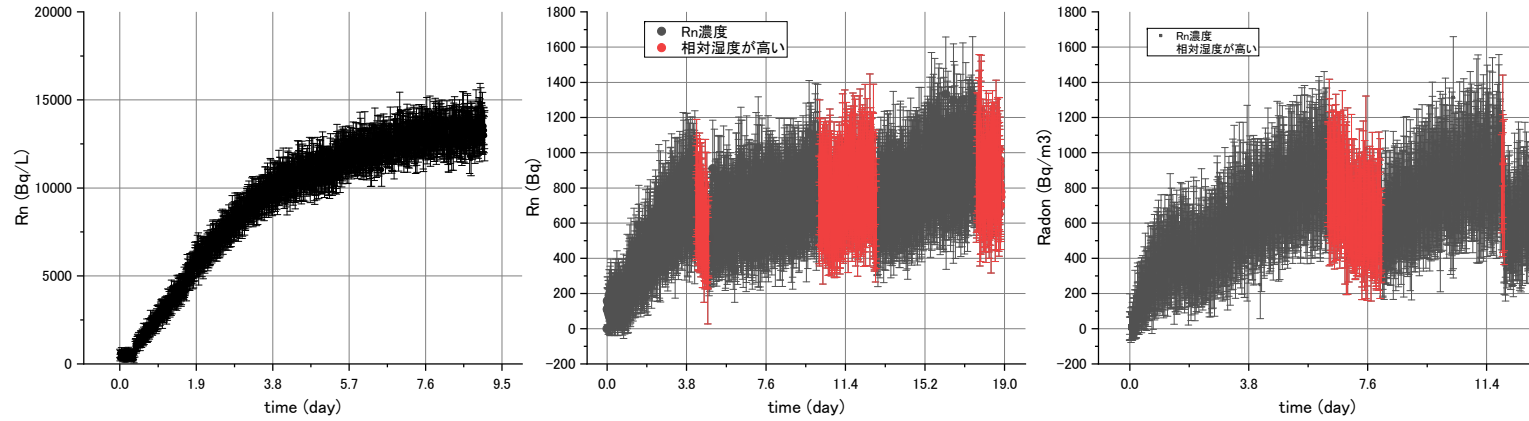
諫早砂岩の結果でも、来待砂岩と同様に、試験中に相対湿度が高くなったため、乾燥剤を入れ替えた。この影響で、試験開始から8日目と12日目で濃度の低下が見られる。このため、乾燥剤を交換して濃度が変化した2つの段階に分け、それぞれの濃度変化の傾きを求めた。また、平衡濃度は、濃度変化から1200 Bq/m<sup>3</sup>と仮定した。この結果、半減期は1段階目で3.5日、二段階目で3.4日となった。最も漏洩の影響が顕著であると考えられる2段階目では壊変定数は0.21なので、 $\lambda/(\lambda+L)=0.87$ となり、漏洩がなければ平衡値は1400 Bq/m<sup>3</sup>と推定される。このため、ラドンフラックスは、48~64 Bq/m<sup>2</sup>となる。

これらのラドンフラックスを求めた結果を表4.4.4-4に示す。

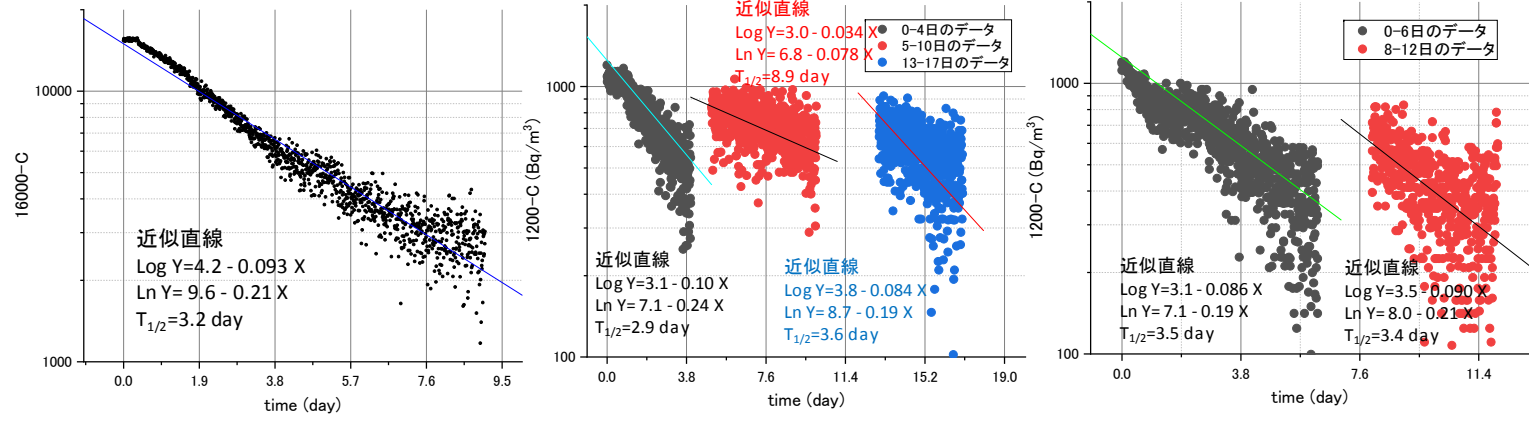
割れ目内の水のラドン濃度計測では、割れ目内に水を注入し、数日待機後に水を取り出して濃度を計測した。水を取り出す際には、前述のようにトレーサーを含む水を用いて、新しい水の混合を評価できるようにした。また、ラドン濃度の変化は、図4.4.3-6のように変化することが予想されるので、式4.4.3-9で補正して平衡濃度を求め、割れ目幅を計算した。この結果も表4.4.4-4に示す。計算された割れ目幅は、設定値0.5mmより10倍程度大きくなっている。これは、ラドン濃度計測の影響であると考えられる。ラドンフラックスは、4.1に示すように、閉鎖系で求めた値とほぼ同じとなっており、残りの原因はラドン濃度計測のみと考えられるためである。特にラドン濃度計測では非常に少ない水量(約40ml)を割れ目から採水し、トレーサー濃度や平衡濃度を考慮して濃度を求めており、これらの過程で濃度が低下することが、誤差を生み出す要因と考えられる。

表 4.4.4-4 ラドンフラックスおよびラドン濃度と割れ目幅の評価結果

試料名	平衡濃度 (Bq/m <sup>3</sup> )			フラックスの推定値 (Bq/m <sup>2</sup> )			濃度計測 (Bq/m <sup>3</sup> )	割れ目幅 (mm)
		～			～			
蛭川 花崗岩	16000	～	20000	640	～	800	151000±87000	4.2±2.4
来待砂岩	1200	～	1600	48	～	64	13000±5000	3.7±1.5
諫早砂岩	1200	～	1400	48	～	56	14500±500	3.3±0.1



(a) ラドン濃度の変化



(b) 平衡値を仮定した場合のラドン濃度の変化

(1) 蛭川花崗岩

(2) 来待砂岩

(3) 諫早砂岩

図 4.4.4-8 ラドンフラックス評価試験におけるラドン濃度の時間変化

#### (5) レジン注入試験結果

前述の蛭川花崗岩、諫早砂岩について、割れ目内にレジン注入し、レジンの厚みから割れ目幅を推定した。レジンには2液混合のものを100ml程度作成して注入した。レジン注入前に、レジンが装置に張り付くのを防ぐために離形剤を流した。レジンの注入は、製作したレジンシリンジにとり、試験体に手動で注入した。レジンの流入状況を確認した後に、バルブを閉じレジンの硬化を待った。レジンが完全に硬化してしまうと、アクリルの上板などが離れなくなる可能性があるため、レジン注入後2日程度経過してからはがすこととした。この結果、レジンの一部は岩石から剥がすことができた。また、一部剥がせなかった部分は、レジンによる盛り上がり計測することで、割れ目の厚みとした。

レジンの厚みは、デジタルノギスで少数以下2桁まで約20ヶ所を計測し、それらの平均と標準偏差を求めた。この結果を表4.4.4-5に示す。レジンの厚みは、バラツキはあるものの、 $0.82 \pm 0.14\text{mm}$ と計測された。



図 4.4.4-9 レジンの注入状況

表 4.4.4-5 レジン注入による割れ目の評価結果

計測点数	蛭川花崗岩	諫早砂岩	来待砂岩
1	0.17	0.22	0.27
2	0.13	0.30	0.20
3	0.20	0.30	0.22
4	0.17	0.23	0.15
5	0.16	0.35	0.24
6	0.18	0.25	0.21
7	0.23	0.17	0.16
8	0.15	0.29	0.16
9	0.15	0.34	0.10
10	0.20	0.20	0.18
11	0.16	0.23	0.23
12	0.12	0.33	0.16
13	0.16	0.23	0.14
14	0.10	0.23	0.12
15	0.13	0.13	0.15
16	0.11	0.22	0.11
17	0.10	0.28	0.07
18	0.10	0.14	0.18
19	0.13	0.21	0.15
20	0.09	0.25	0.19
21		0.29	
22		0.15	
23		0.23	
24		0.18	
平均	0.15	0.24	0.17
標準偏差	0.04	0.06	0.05

#### 4.4.5 試験結果の比較

これまで実施してきた試験結果、透水試験、高粘性流体試験、トレーサー試験、ラドン濃度計測、レジン注入試験の結果を表 4.4.5-1 に示す。ラドン濃度計測を除き、他の試験では概ね 0.1～0.3 mm 程度の割れ目幅が得られている。

試験結果を比較した結果、透水試験については、どの岩石についても概ね設定値 0.2 mm 程度の割れ目幅が得られている。

高粘性流体試験では、①定常状態では、高粘性の流体を用いて透水試験を実施しているため、ほぼ透水試験と同じ結果となっている。②非定常状態では、やや割れ目幅が大きめに出ている。これは、高粘性流体が水と混合することにより、粘性が低下し、圧力上昇が小さくなることに起



因していると考えられる。高粘性流体の到達も②非定常状態と同じで、高粘性流体が水と混合することにより、粘性が低下し、到達が遅れたように見えるため、割れ目幅が大きくなっているように見えると考えられる。高粘性流体にはメチルセルローズ溶液を用いているが、水と混合しやすいため、高粘性流体試験結果は割れ目幅が大きく評価される場合がある。

トレーサー試験結果は、過年度の結果(0.5mm の割れ目幅)では、ほぼ同程度の割れ目幅となっていたが今回の結果がでは、0.1mm 程度と割れ目幅が狭くなっている。これは割れ目幅が非常に薄いため局所的にトレーサーが流れた可能性と、割れ目幅が小さくなると、配管などのデッドボリュームが相対的に大きくなり、誤差要因になるためではないかと考えられる。デッドボリュームが大きくなると、その体積の誤差に割れ目の体積が大きく影響を受けるため、注意が必要である。

ラドン濃度計測は、割れ目体積が少ないとラドン濃度計測が困難なため、割れ目幅の設定を0.5mm で実施している。ラドンフラックス測定に、連続計測を実施することで、精度良く計測ができるようになり、適切に評価できるようになった。ただし、ラドン濃度計測については、やはり試料量が少なく、トレーサー溶液との混合や原位置生成の補正などの影響で、ラドンを散逸せずに計測することが困難であった。採取できる試料量を多くするなどの実験装置の組み換えが必要である。

レジンを注入は、設定値0.2mmの周辺でばらついた結果となっている。レジンは固まってしまうため、繰り返しが効かず、計測が難しいため、データにばらつきがでると考えられる。

このようにラドン濃度計測を除いては、概ね割れ目幅の評価が適切にできると考えられる。ただし、高粘性流体試験では混合によりやや厚め、トレーサー試験では選択的に流れるためやや薄めになる傾向があると考えられる。

表 4.4.5-1 割れ目の評価方法と評価された割れ目幅 (mm)

試験名	試料名	蛭川花崗岩	諫早砂岩	来待砂岩
透水試験		0.24	0.21	0.23
高粘性流体試験	①定常状態	0.31±0.02	0.28±0.01	0.24±0.01
	②非定常状態	0.42±0.03	0.37±0.02	0.32±0.01
	③注入時間	0.36±0.06	0.40±0.03	0.36±0.03
トレーサー試験	0.1ml/min	0.10	0.14	0.04
	1ml/min	0.10	0.10	0.16
ラドン濃度*		4.2±2.4	3.7±1.5	3.3±0.1
レジンを注入		0.15±0.04	0.24±0.06	0.17±0.05

割れ目幅の設定値は0.2mm、ラドン濃度計測のみ0.5mmで実施

## 参考文献

Alexander, W. R., Mackenzie, A. B., Scott, R. D. and McKinley, I. G. (1990) : “Natural analogue studies in crystalline rock: The influence of water-bearing fractures on radionuclide immobilization in a granitic repository, Nagra Technical Report, NTB 87-08.

Cecil L.D., Smith, R.C. II, Reilly, M.A., and Rose, A.W. (1987) : Radium-228 and radium-226 in ground water of the Chickies Formation, southeastern Pennsylvania IN Graves, Barbara, ed., Radon, radium, and other radioactivity in ground water: Chelsea, Michigan, Lewis Publishers, p. 437-447.

地球化学標準物質 <https://gbank.gsj.jp/geostandards/>

古川路明(1994) : “現代化学講座 15 放射化学” .

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

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

石橋正祐紀、安藤友美、笹尾英嗣、湯口貴史、西本昌司、吉田 英一 (2014) : 深部結晶質岩における割れ目の形成・充填過程と透水性割れ目の地質学的特徴 - 土岐花崗岩を例として - 応用地質 55(4), 156-165.

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

核燃料サイクル開発機構(1999a) : “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次取りまとめ- ; 分冊3 地層処分システムの安全評価”, JNC-TN1400 99-023.

核燃料サイクル開発機構(1999b) : “釜石原位置試験総括報告書”, JNC TN7410 99-001.

黒田吉益、諏訪兼位(1983) : 偏光顕微鏡と岩石鉱物 (第2版) 共立出版

都城秋穂、久城育夫(1972) : 岩石学 I 偏光顕微鏡と造岩鉱物 共立出版

文部科学省(1990) : ラジウム分析法 放射能測定シリーズ 19

文部科学省(1992) : ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリ 放射能測定法シリーズ 7 3訂

文部科学省(2002) : 放射能測定法シリーズ 14 「ウラン分析法」 (平成 14 年改訂) .

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>

日本工業規格(2006) : JIS A 1110 粗骨材の密度及び吸水率試験法

Snow D. 1965, “A parallel plate model of fractured permeable media, University of California”, Berkeley, Ph. D

Taylor, S.R. and McLennan, S.M. (1985): The Continental Crust; Its composition and evolution; an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks. Blackwell, Oxford. 312.

湯口貴史、鶴田忠彦、西山忠男(2010)：中部日本土岐花崗岩体の岩相と化学組成の累帯変化、岩石鉱物科学、39(2)、50-70.

## 5. 天然トレーサーを利用した調査技術の開発

### 5.1 背景

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

精密調査段階においては、地下施設が建設され、より詳細な調査が実施される。この調査では、概要調査での調査結果の妥当性の確認が重要になる。また、候補岩体が十分な広がりを持つこと、水みちとなりうる高透水帯が存在しないことを確認する必要がある。この調査結果の妥当性の確認や水みちの評価にも、前述の天然に存在する安定同位体、放射性同位体、希ガスなどを用いた地下水年代測定技術は有効であると考えられる。精密調査段階での地下水年代測定技術の適用を想定した場合、概要調査段階での地表調査やボーリング調査とは異なり、坑道などによる調査が主に実施される。このため、坑道などにおいて地下水年代測定技術を適用する方法を整備しておく必要がある。坑道での採水では、採水時の圧力低下が顕著なため、特に溶存ガスについては圧力低下による脱ガスを抑制して採取する必要がある。また、坑道での調査においては、水みちなど局所的に地下水流動の早い部分の検出と、その特性評価も重要な評価事項となる。これは、このような局所的かつ選択的な地下水の流動経路が、核種の主要な漏洩経路となりうるためである。このような調査においても、若い地下水年代を評価できる地下水年代測定技術であれば、その水みちが有意な漏洩経路になりえるかどうかを識別することが可能であると考えられる。このため、従来の非常に古い地下水を評価する地下水年代測定技術だけでなく、若い地下水を評価するための地下水年代測定技術も重要になると考えられる。

一方で、地下施設建設に伴う地下水流動の擾乱は、天然の物質を利用した広域的なトレーサー試験とも見なすことができる。本研究では、トレーサー試験技術の開発を実施しており、数メートルスケールの比較的狭い範囲において、人工的に注入したトレーサーを用いて、割れ目や高透水帯の物質移行特性を評価している。ただし、人工的なトレーサー試験では、大きいスケールの物質移行特性の評価には多大な時間を要するため、天然トレーサーによる評価によって、トレーサー試験を補完していく必要があると考えられる。天然トレーサーによる評価では、人工トレーサーよりも大きいスケール

での物質移行現象を評価可能であると考えられる。また、精密調査段階においては、地下水施設を建設して調査が行われるため、坑道にむけて地下水流動が発生し、このような比較的大きな地下水流動による物質移行特性を評価できる可能性がある。

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

## 5.2 研究項目

精密調査における地下水年代測定法を開発するために、地下の適用性試験場における地下水調査を実施する。

地下の適用性試験場における地下水調査では、JAEA が研究を実施している瑞浪超深地層研究所、幌延深地層研究センターにおいて、研究坑道内のボーリング孔などから地下水を採取し、主要溶存イオン、微量元素、同位体、希ガスなどを計測し、既存のボーリング調査結果との整合性を確認するとともに、これらの経時的な変化を評価し、水質・地下水年代の変化を評価する。さらに、建設によって発生した擾乱による地下水圧、水質、地下水年代を対象に地下水流動・物質移行解析を行い、地下水流動・物質移行パラメーターを評価する。これらの結果に基づいて、地下水の起源、新しい水の浸入や古い水の残留状況を取りまとめる。

天然トレーサーによる調査では、新しい水の指標（トリチウム、フロンガス、水素・酸素同位体）や古い水の指標（有機・無機<sup>14</sup>C、希ガス、<sup>37</sup>C1）として有望な物質について、採取・分析方法を整備するとともに、これまでの調査結果を取りまとめる。トリチウムについては分析方法（濃縮法・生成法等）、フロンガス・希ガスについては、サンプリング方法（平衡法・水上置換法等）、水素・酸素同位体、無機・有機<sup>14</sup>C年代については採取・分析方法、<sup>37</sup>C1については拡散時の分別係数を取りまとめる。

## 5.3 研究坑道における地下水調査

概要調査段階では、地上のボーリング孔などから地下水を採取するが、精密調査段階では坑道などを掘削して調査が実施される。精密調査段階においては、概要調査段階での調査結果の妥当性を確認する必要がある。また、精密調査段階では概要調査段階において十分に把握できなかった局所的な水みちの評価なども重要となる。このため、坑道などから地下水を採取し、主要溶存イオン、微量元素、同位体、希ガスなどを計測し、ボーリング調査段階での調査結果との比較を行った。また、調査結果の経時変化を確認することにより、トンネル掘削によって生じた地下水流動によって、水質・地下水年代がどのように変化したかを評価する。

ここでは、JAEA が建設を進めている瑞浪超深地層研究所、幌延深地層研究センターを対象に地下水

の採水を実施し、これまで実施してきた地下水年代測定結果の妥当性の確認を行うとともに、水質・地下水年代の変化について評価する。

### 5.3.1 瑞浪における地下水調査

#### 5.3.1.1 採水地点

瑞浪超深地層研究所において、研究坑道から掘削されたボーリング孔、図 5.3.1-1 を対象に地下水調査を実施した。

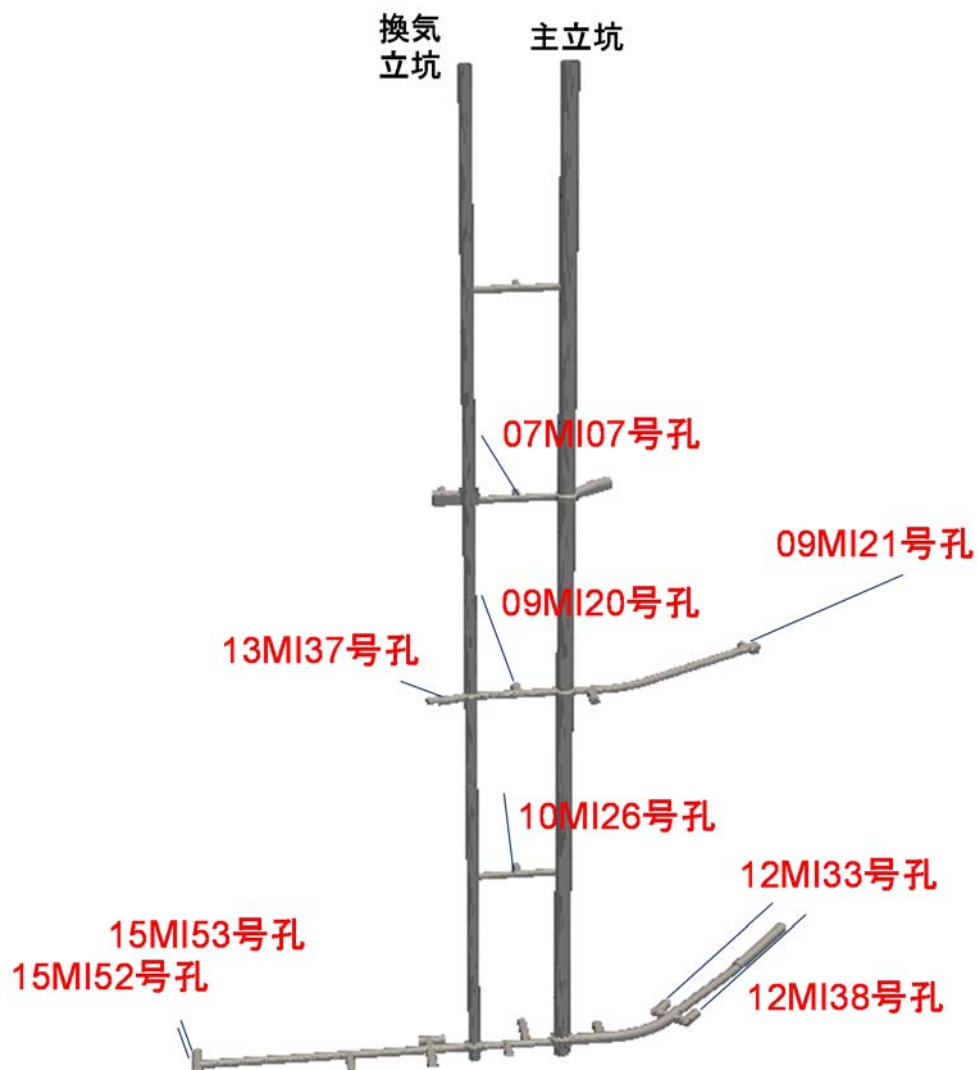


図 5.3.1-1 採水地点位置図

調査地点および区間は以下の通りである。

- 深度 200 m 予備ステージ：07MI07 号孔区間 1, 3, 5
- 深度 300 m 予備ステージ：09MI20 号孔区間 1, 3, 5
- 深度 300m ボーリング横坑：12MI31 孔 区間 1, 13MI37 区間 5(図 5.3.1-2)
- 深度 300 m 研究アクセス坑道：09MI20 号孔区間 2, 3
- 深度 400 m 予備ステージ：10MI26 号孔区間 1, 3, 5
- 深度 500 m 研究アクセス北坑道：12MI33 区間 1、13MI38 区間 1, 5
- 深度 500 m 研究アクセス南坑道：15MI52 号孔区間 1, 15MI53 号孔区間 5(図 5.3.1-3)

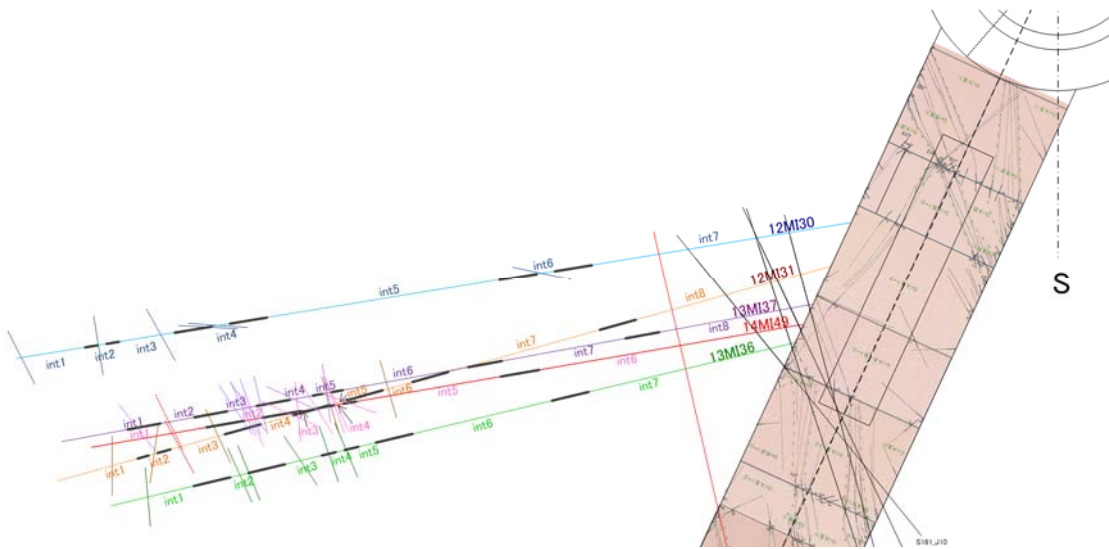


図 5.3.1-2 深度 300m ボーリング横坑でのボーリング孔の区間編成図

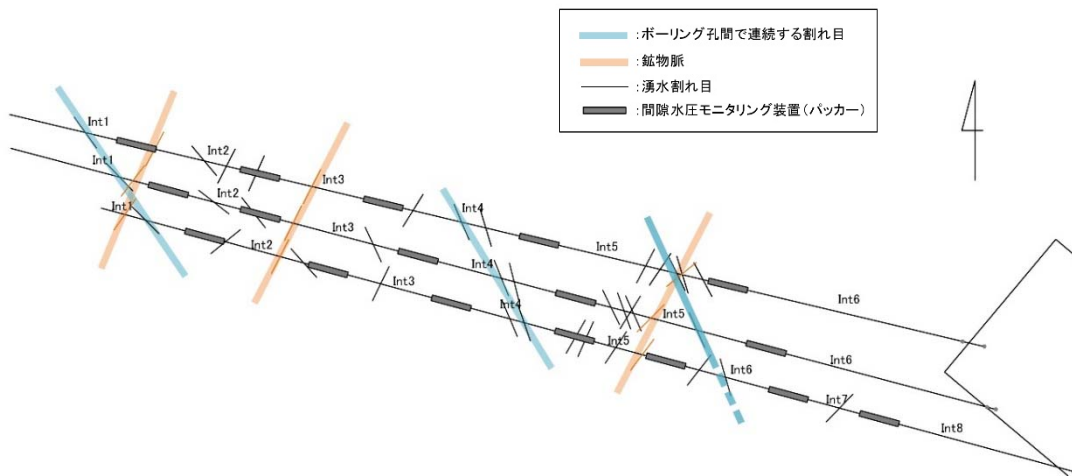


図 5.3.1-3 深度 500m 研究アクセス南坑道でのボーリング孔の区間編成図

### 5.3.1.2 採水方法

分析項目、必要水量を表 5.3.1-1 に示す。これらの項目について採水を実施した。

各採水区間の水圧が高く、湧出することから、各採水区間へ繋がっている外径 6 mm 内径 4 mm のナイロンチューブから採水した。

希ガス採水は以下の手順により行った。試料採取時の写真を図 5.3.1-4 に示す。

- ① 銅管(外形 12mm、内径 10mm) の両側にバルブを接続する。
- ② 各採水区間へつながっているチューブを銅管に接続する。銅管は 3 本を 6 mm チューブで接続し、下流端に圧力計、ニードルバルブ、流量計をセットする。
- ③ 区間のバルブを開放し、圧力を確認する。
- ④ ニードルバルブを調整し、圧力変動を初期圧力 20%以内として地下水を流す。
- ⑤ 数 L 程度地下水を通水後、銅管のバルブを下流側から順次閉める。
- ⑥ 銅管バルブを閉めたままチューブを外す。
- ⑦ 銅管バルブを閉めたまま銅管の両端をクランプで締める(図 5.3.1-5)。銅管からバルブを外し、採取深度、孔番、採取日、採取番号を記入する。



図 5.3.1-4 希ガスサンプリング状況



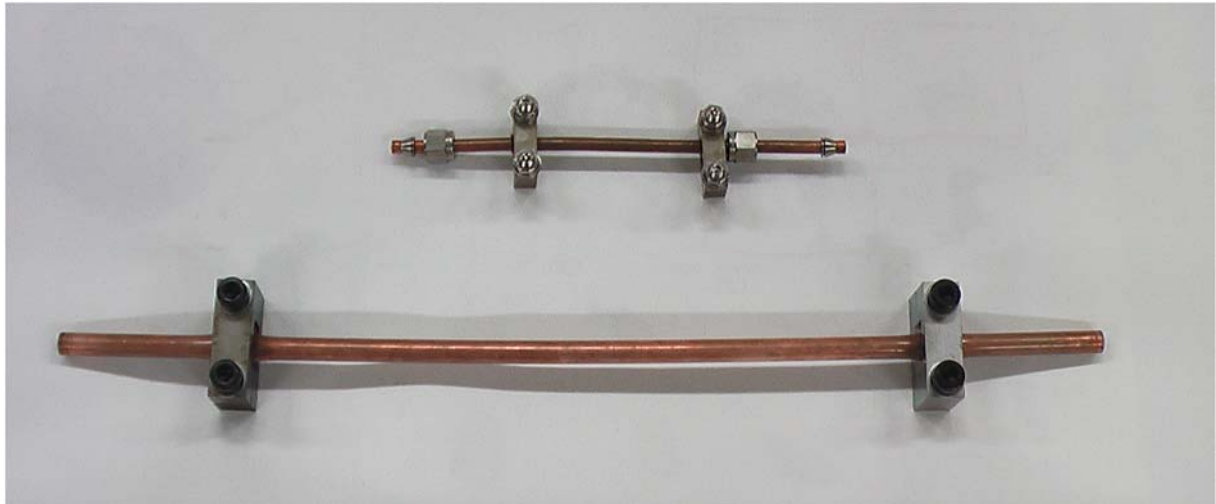


図 5.3.1-5 銅管の採取結果およびクランプ

上：ガスサンプリング用(200 mm)、下：水サンプリング用(450mm)

その他の主要溶存イオン、微量元素、TOC、水素・酸素同位体比、 $^3\text{H}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{36}\text{Cl}$ 、CFCs、 $\text{SF}_6$ の採水方法について以下に説明する。

主要溶存イオンなど (Na、K、Mg、Ca、 $\text{SO}_4$ 、Cl、I、F、Si、B) の分析用サンプルは以下のように採取した。100 ml のプラスチック製ボトルに容器の 1/10 程度に地下水を入れ、フタをして共洗いをする。共洗いを 3 度実施した後、チューブの外側を地下水で洗浄し、ボトルの底までチューブを差し込んで、ボトル内を地下水で満たす。チューブを差し込んだままで、さらに容器の 3 倍の地下水をオーバーフローさせる。その後、静かにチューブを引き抜き、気泡が入らないようにフタをする。ビニールテープでフタが閉まる方向(時計回り)に数回巻いて密封する。

微量元素 (Sr、Ba、Fe、Mn、Se、As、Se、Al、Cs) の分析用のサンプルの採取方法と使用ボトルは、主要溶存イオンと同じである。この試料では、使用ボトルの壁面への陽イオンの吸着を抑制するために、採取後に 2 ml の水を捨て、そののち、濃硝酸 1 ml を添加する。

TOC (TC、DIC、TOC(NPOC)) の分析用のサンプルは、50 ml のゴム製内蓋つきの褐色ガラス製ねじロビン瓶に採取する。採取方法は、主要溶存イオンと同じである。

水素・酸素同位体比の水素・酸素同位体比の測定用のサンプルは、採取容器が 25 ml のガラス製ねじロバイアルビンに採取する。採取方法は主要溶存イオンと同じである。

$^3\text{H}$  試料の採水には、1 L のプラスチック製ボトルを 2 本使用する。共洗いは行わず、チューブの外側をよく地下水で洗浄し、チューブを底まで入れ、ボトルからオーバーフローする直前にチューブを静かに引き抜きながら、容器を満たし、なるべく空気が入らないようにフタをする。

$^{14}\text{C}$  と  $\delta^{13}\text{C}$  の分析用の採取方法は、主要溶存イオンと同じであるが、炭酸ガスの脱ガスを防ぐために、採水容器には、1 L のフロロバリアボトルを使用し、2 本採取する。

$^{36}\text{Cl}$  試料には 1 L のポリビンを使用する。作業者の手から塩分が混入する可能性があるため、作業時は地下水でよく洗浄したゴム製手袋を装着して行う。

CFCs の採取は USGS (2017a) の推奨する方法に準じ、125 ml のガラス瓶とアルミホイルで被覆したパッキン入りのキャップを用いる。また、空気の混入を防ぐため、採取を水中で行う。チューブは、ナイロンチューブやバイトンチューブなど低透気性でフロンが含まれないものを用いる。ガラス瓶の底までチューブを挿し込み、容器からオーバーフローさせたのち、チューブを挿したまま水が満たされた 5L ビーカーへガラス瓶を静かに沈める。さらに数回分のオーバーフローを行い、水中でフタをする。フタをする前にフタに空気などが残っていないことを確認する。

$\text{SF}_6$  の採取も USGS (2017b) の推奨する方法に準じて実施した。500 ml or 1000 ml のデュラン瓶とフタには PTFE 製のパッキンを用いた。採水時には、容器の底までチューブを挿し込み、容器容量の数倍をオーバーフローさせたのち、空気が混入しないようにフタを締める。

採取したサンプルを図 5.3.1-6 に示す。



図 5.3.1-6 採取したサンプルの一覧

表 5.3.1-1 採水項目と採取目的および取得量

項目	目的	取得量	備考
主要溶存イオン	主要なイオン濃度評価	100 ml×2 本	
微量元素	微量に含まれる金属元素を定量	100 ml×1 本	
水素・酸素同位体比	水素・酸素同位体比を評価	10 ml×2 本	
炭素同位体 ( <sup>14</sup> C、 $\delta$ <sup>13</sup> C)	地下水年代測定のために地下水 中の無機炭素の <sup>14</sup> C、 <sup>13</sup> C を評価	1000 ml×1 本	
炭素同位体 ( <sup>36</sup> Cl、 $\delta$ <sup>37</sup> Cl)	地下水年代評価や、塩化物イオン の起源情報となる、塩化物イオン 同位体 ( <sup>36</sup> Cl、 <sup>37</sup> Cl) を評価	1000 ml×2 本	
TOC	地下水中溶存有機炭素量を評価	50 ml×1 本	
アルカリ度	アルカリ度を評価し、その結果か ら炭酸水素イオン濃度を評価	50 ml×1 本	
希ガス濃度	地下水年代指標となる希ガス (He、Ne) 濃度を評価	銅管×3 本	地表でクラ ンプ留め
CFCs	溶存クロロフルオロカーボン量 から、若い地下水の混入を評価	125 ml×3 本	ホイルで被 覆パッキン
SF <sub>6</sub>	六フッ化硫黄量から、若い地下水 の混入を評価	500 ml or 1000ml ×2 本	PTFE 製パッ キン
トリチウム	トリチウム濃度から、若い地下水 の混入を評価	1000 ml×2 本	

### 5.3.1.3 分析方法

地下水の溶存成分の内、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{F}^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、アルカリ度、Br, I, Si, B, Fe, Se, Sr, Li, Mn, Zn, Ba, Al, Rb, Cu, As, Cs、水素・酸素同位体、 $^3\text{H}$ 、炭素同位体( $^{14}\text{C}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ )、塩素同位体( $^{36}\text{Cl}$ 、 $\delta^{37}\text{Cl}$ )、希ガス、CFCs、 $\text{SF}_6$ を分析した。

陽イオン(Ca, Mg, Na, K)の定量分析には、イオンクロマトグラフィー（メトローム社製コンパクトプロフェッショナル IC881）を用いて検量線法により実施した（例えば、日本分析化学会北海道支部編、1994）。試料水中の各イオンを分離する分離カラムには、陽イオン交換樹脂が充填されている YS-50A、ガードカラムには YS-G を使用した。検量線は、元素ごとに関東化学製化学分析用標準溶液を既知の濃度に希釈した標準試料を調製した。

陰イオン(F, Cl,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ )の定量分析には、イオンクロマトグラフィー（メトローム社製コンパクトプロフェッショナル IC881  $\text{CO}_2$  サプレッサ付き）を用いて検量線法により実施した（例えば、日本分析化学会北海道支部編、2005）。試料水中の各イオンを分離する分離カラムには、陰イオン交換樹脂が充填されている A Supp 5-150、ガードカラムには ShodexSI-90G を使用した。検量線は、元素ごとに和光純薬工業株式会社製化学分析用標準溶液を既知の濃度に希釈した標準試料を調製し作成した。

アルカリ度の測定は、酸標準液(0.01mol/L 硫酸)を用いて pH4.8 まで滴定する手法(pH4.8 アルカリ度)により実施した（例えば、半谷・小倉、1995）。試料 20mL をビーカーにはかり取り、pH メーターで試料の pH を確認しながら、pH4.8 になるまで酸標準液で滴定した。

微量元素(Br, I, Si, B, Fe, Se, Sr, Li, Mn, Zn, Ba, Al, Rb, Cu, As, Cs)の定量分析には、ICP-MS（誘導結合プラズマ-質量分析装置：Agilent Technologies 製 Agilent7500CE）を用いて検量線法により実施した（例えば、日本分析化学会関東支部編、2008）。検量線は、元素ごとに和光純薬工業株式会社製化学分析用標準溶液を既知の濃度に希釈した標準試料を調製し作成した。

TOC および NPOC(Non-Purgeable Organic Carbon：不揮発性有機体炭素)の測定は、島津製作所製 TOC-V CSH を用いた非分散型赤外分析計 (Non-Dispersive Infrared Gas Analyzer：NDIR) で実施した（例えば、半谷・小倉、1995）。

TOC の定量分析は、試料中の全炭素 (Total Carbon：TC) と無機体炭素 (Inorganic Carbon：IC, または TIC) をそれぞれ測定し、TC 濃度から IC 濃度を差し引いて求める方法(差し引き法)で実施した。検量線は、TC 濃度用に和光純薬工業株式会社製フタル酸水素カリウム標準液、IC 濃度用に和光純薬工業株式会社製炭酸ナトリウムおよび炭酸水素ナトリウムを混合した標準溶液をそれぞれ既知の濃度に希釈した標準試料を調製し作成した。

NPOC の定量分析は、試料水を酸性(pH3 以下)にして通気処理し、試料水中の IC を  $\text{CO}_2$  として除去した後に TC を測定する方法(IC 前処理法またはプレ IC 除去法)で実施した。検量線は、和光純薬工業株式会社製フタル酸水素カリウム標準液を既知の濃度に希釈した標準試料を調製し作成した。

水素・酸素同位体の計測は、Los Gatos Research 社製のレーザー吸収ガス分析装置を用いて Off-axis ICOS 法 (Off-axis Integrated Cavity Output Spectroscopy) にて、試料中の水素同位体比および酸素同位体比の同時分析を実施した (山中・恩田、2011)。分析は手順書に準じた。

上記の分析は電力中央研究所で実施した。

$^3\text{H}$  分析は、電解濃縮 (アルカリ水溶液電解) - 液体シンチレーション計数法によって実施した (文部科学省、2002)。試料水を予め蒸留精製しアルカリ電解溶液とした後、電解濃縮を行う。電解濃縮終了後、電解液を中和・蒸留し、液体 (乳化) シンチレータを加え、低バックグラウンド液体シンチレーションカウンターにより計測する。分析は地球科学研究所で実施した。計測結果は、水素原子  $10^{18}$  個に対して  $^3\text{H}$  が 1 個存在する率である TU で示した。

$^{14}\text{C}$  分析は、グラファイト・ターゲット加速器質量分析法 (AMS 法) で実施した (中村、2003)。沈殿法では、試料水 1L につき 1.2g の塩化ストロンチウムを加え、試料水中の無機炭素を炭酸ストロンチウムとして沈殿させる。沈殿物は中性になるまで洗浄し、乾燥させた後、リン酸と反応させ  $\text{CO}_2$  ガスを生成させる。得られた  $\text{CO}_2$  ガスを精製した後、コバルト触媒をもちいて  $600^\circ\text{C}$  に加熱しグラファイトを調製した。それらグラファイトをターゲットとし加速器質量分析 (AMS : Accelerator Mass Spectrometry) によって定量した。ガス化法では、試料水にリン酸を加えて  $\text{CO}_2$  をガスとして回収した後、グラファイトを生成する (Nakata et al., 2016)。分析は Beta Analytic Inc. で実施した。

$^{36}\text{Cl}$  分析は、 $\text{AgCl}$ ・ターゲット加速器質量分析法 (AMS 法) で実施した。水試料に含まれる塩化物イオンを塩化銀として回収し、それをターゲットとして AMS によって定量する (Fifield et al., 2010)。分析は、Australia National Univ. で実施した。試料は、水試料の pH を酸性側に調整した後に、過剰量の硝酸銀を加えることにより、水試料中の塩素イオンを白色の塩化銀として沈殿させ回収する。一般的に水試料の塩素イオン濃度が 20 mg/L 以上ならば、煩雑な手間をかけずに直接沈殿させることにより塩素イオンを回収することができる。塩化物イオン濃度が少ない場合には、イオン交換カラムに通水させて Cl を捕集した (Nakata and Hasegawa, 2011)。 $^{36}\text{Cl}$  の分析では、 $^{36}\text{S}$  が AMS 測定に影響する可能性が指摘されている (Elmore et al., 1979)。この  $^{36}\text{S}$  の  $^{36}\text{Cl}$  測定への影響を小さくするために塩化銀の精製を行う。精製手順として、回収された塩化銀をアンモニア水に溶解させ、硝酸バリウムを加えることにより不純物として微量に含まれる硫酸イオンを硫酸バリウムとして沈殿させる。この工程は硫酸イオン濃度によっても異なるが、概ね 3 回程度繰り返される。

$\delta^{37}\text{Cl}$  分析は、塩化銀-ヨウ化メチル ( $\text{AgCl}-\text{CH}_3\text{Cl}$ ) 変換-安定同位体比ガスクロマトグラフ質量分析法で実施した (Long et al., 1993)。試料水から生成させた  $\text{AgCl}$  沈殿に、ヨウ化メチル ( $\text{CH}_3\text{I}$ ) を加え、塩化メチル ( $\text{CH}_3\text{Cl}$ ) に変換する。この  $\text{CH}_3\text{Cl}$  の同位体比をガスクロマトグラフ付同位体比質量分析計に導入し測定する。分析は Waterloo Univ. で実施した (Shouakar-Stash et al., 2005)。

希ガスの定量は、希ガス質量分析装置 VG-5400 (VG instruments) とその前処理ラインを用いて行っ

た（馬原、1998）。地下水サンプルを封入した銅管を、直接装置へと接続する。これにより、銅管内の希ガスを散逸させることなく前処理ライン内へ導入することが可能である。抽出ライン内では、まず、サンプルに超音波をあてることで、地下水サンプルからガス成分のみを抽出する。抽出されたガス成分に対して、コールドトラップ（液体窒素温度）・チタンゲッターを作用させ、水分や反応性のガスを取り除き希ガス成分のみを取り出すことができる。さらに、ステージ内温度を 20 K まで低下させることができるクライオスタッドを用いて希ガスを各成分に単離し、希ガスごとに質量分析装置へと導入する。質量分析装置では希ガスをイオン化し、適切な磁力をかけることによって設定した質量数のみをカウントすることができる。既知量(0.13cc)の空気に含まれる希ガスにおけるカウント数と、サンプルに含まれる希ガスにおけるカウント数を比較し、サンプルに含まれる希ガス量および同位体比を決定した。分析は電力中央研究所で実施した。

CFCs の分析は、Purge and Trap 法によって地下水中の CFC を分離・抽出した後に、GC-ECD にて検出・定量を行った(Plummer and Bunsenberg, 2006)。CFC は CFC-12, CFC-11, CFC-113 を対象とした。

SF<sub>6</sub> の分析も CFCs と同様に、Purge and Trap 法によって地下水中の CFC を分離・抽出した後に、GC-ECD にて検出・定量を行った(Bunsenberg and Plummer, 2000)。

CFCs と SF<sub>6</sub> の分析は、地球科学研究所で実施した。

#### 5.3.1.4 分析結果

原位置において、ポータブルのメーターを用いて、pH、ORP(酸化還元電位)、EC(電気伝導度)、DO(溶存酸素)、温度を分析した結果を表 5.3.1-2 に示す。採取状況を図 5.3.1-7 に示す。主要溶存イオン、微量元素、同位体、希ガスの分析結果を表 5.3.1-3 に示す。

<sup>14</sup>C については、地層中に存在する鉱物や有機物によって希釈される可能性がある。このため、 $\delta^{13}\text{C}$  に基づく補正を実施した。ここでは、涵養時の地下水の  $\delta^{13}\text{C}$  を -18‰、鉱物の <sup>14</sup>C と  $\delta^{13}\text{C}$  を 0 pMC と 0‰として、希釈前の <sup>14</sup>C 濃度 (Cor. <sup>14</sup>C) を図 5.3.1-8 に示すように求めた。なお、<sup>14</sup>C 量は 100 pMC の <sup>14</sup>C 濃度の存在比率が炭素の 1 兆分の 1 として求めたものである。

なお、希ガスの分析結果は、脱ガスや空気の混入の恐れがあるため、Ne による補正を実施した。補正方法は、地下水中の Ne 量が大气平衡値であると仮定し、試料中の Ne 量が大气平衡値よりも大きければ、大气が混入したと仮定して、以下の式に示すように、 $\text{Ne} \geq 2.0 \times 10^{-7} \text{ cc}_{\text{STP}}/\text{g}_w$  の場合には、過剰量に相当する He 量を差し引く。また、 $\text{Ne} < 2.0 \times 10^{-7} \text{ cc}_{\text{STP}}/\text{g}_w$  の場合には、Ne 量が大气平衡値よりも小さければ、脱ガスしたとして減少した Ne 量と同率で He 量を割り戻す。

$\text{Ne} \geq 2.0 \times 10^{-7} \text{ cc}_{\text{STP}}/\text{g}_w$  の場合

$$He_c = He_m - (Ne_m - Ne_0) \frac{He_a}{Ne_a} \quad (5.3.1-1)$$

$Ne < 2.0 \times 10^{-7} \text{ cc}_{\text{STP}}/\text{g}_w$  の場合

$$He_c = He_m \frac{Ne_0}{Ne_m} \quad (5.3.1-2)$$

ここに、 $He_c$  は脱ガス補正した He 濃度、 $He_m$  は地下水中の He 濃度、 $Ne_0$  は大気との溶解平衡に達した Ne 濃度 ( $2 \times 10^{-7} \text{ cc}_{\text{STP}}/\text{g}_w$ )、 $Ne_m$  は地下水中の Ne 濃度の計測値、 $He_a/Ne_a$  は 0.288 である。



図 5.3.1-7 採水状況

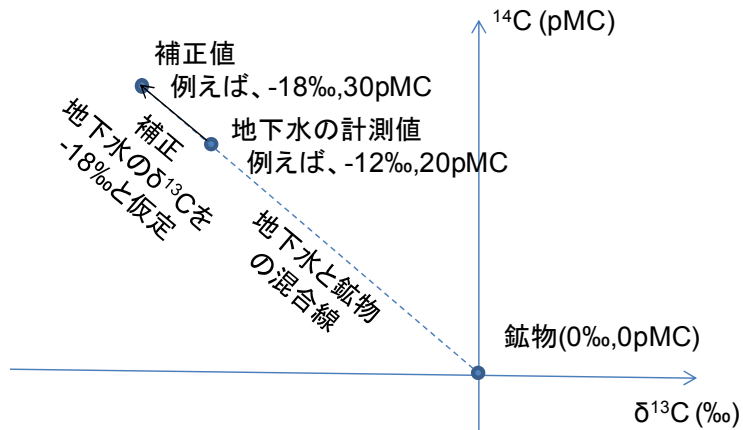


図 5.3.1-8 補正  $^{14}\text{C}$  算出方法の概念図

表 5.3.1-2 原位置計測結果

項目 区間	採水時間	区間圧力 (Mpa)		流量 L/min	pH	ORP mV	EC mS/cm	DO mg/l	T ℃
		採水前	採水時						
07MI07#1	2017/8/24 10:00	0.83	0.72	0.3	8.75	-387	37.7	0.00	22.6
07MI07#3	2017/8/24 12:00	0.80	0.65	0.2	8.82	-355	57.5	0.02	22.8
07MI07#5	2017/8/24 10:00	0.80	0.65	0.2	8.74	-378	74.2	0.00	22.6
09MI20#1	2017/9/7 10:00	1.75	1.6	0.45	8.77	-394	37.3	0.0	23.1
09MI20#3	2017/9/7 12:00	1.75	1.5	0.5	8.65	-385	40.4	0.0	23.4
09MI20#5	2017/9/7 12:00	1.70	1.4	0.35	8.51	-394	38.5	0.0	23.1
09MI21#2	2017/9/7 14:00	2.10	1.6	0.05	9.03	-373	88.9	0.0	23.5
09MI21#3	2017/9/6 16:00	2.20	1.2	0.13	8.84	-367	79.5	0.0	23.7
12MI31#1	2017/7/11 10:00	1.40	1	0.22	8.35	-333	71.2	0.0	23.1
13MI37#5	2017/7/11 10:00	1.60	1.2	0.42	8.5	-333	78.6	0.0	23.7
10MI26#1	2017/9/5 10:00	2.60	2	0.3	8.51	-344	53.5	0.0	24.4
10MI26#3	2017/9/5 12:00	2.40	2	0.2	8.47	-373	53.2	0.0	24.7
10MI26#5	2017/9/5 10:00	2.30	2	0.36	8.69	-389	43.3	0.0	24.3
12MI33#1	2017/8/23 10:00	3.80	3.7	0.7	8.27	-374	143.5	0.2	28.1
13MI38#1	2017/8/23 11:00	3.80	3	0.3	8.47	-367	150	0.0	28.4
13MI38#5	2017/8/23 15:00	3.60	3.2	0.65	8.3	-349	259	0.0	28.2
15MI52#1	2017/7/11 10:00	3.38	0.8	0.35	8.43	-342	181.4	0.0	28.6
15MI53#5	2017/7/11 10:00	3.40	3.1	0.6	8.51	-346	198.1	0.0	28.8



表 5.3.1-3 立坑内ボーリングから採取した地下水の分析結果

(1) 主要溶存イオン

採水区間 (坑道深度)	Na mg/L	K mg/L	Mg mg/L	Ca mg/L	F mg/L	Cl mg/L	NO <sub>3</sub> mg/L	SO <sub>4</sub> mg/L	Si mg/L	B mg/L	ALK meq/L	TOC mg/L	TC mg/L	TIC mg/L	NPOC mg/L
07MI07#1 (200m)	69	0.4	0.07	21	10.5	53	<0.005	11.3	7.4	1.3	1.05	1.1	12.4	11.2	0.33
07MI07#3 (200m)	82	0.4	0.09	23	9.8	84	<0.005	10.8	7.5	1.3	0.89	1.2	10.7	9.5	0.36
07MI07#5 (200m)	97	0.5	0.08	25	9.6	122	0.02	9.1	7.3	1.2	0.74	1.4	9.0	7.6	0.37
09MI20#1 (300m)	70	0.4	0.10	11	8.6	44	<0.005	16.1	7.3	1.0	1.43	0.8	16.5	15.7	0.27
09MI20#3 (300m)	74	0.4	0.23	12	9.5	61	<0.005	11.8	7.3	1.2	1.23	0.7	14.3	13.6	0.22
09MI20#5 (300m)	72	0.4	0.15	11	8.8	50	<0.005	14.1	7.5	1.1	1.36	0.6	15.6	15.0	0.29
09MI21#2 (300m)	125	0.4	0.07	26	8.7	215	<0.005	0.3	6.4	1.3	0.46	1.2	5.0	3.8	0.37
09MI21#3 (300m)	118	0.5	0.09	31	8.5	213	<0.005	0.3	6.9	1.4	0.50	1.0	5.6	4.6	0.21
12MI31#1 (300m)	113	0.53	0.12	31	9.6	169	0.02	5.9	6.7	1.2	0.63	2.3	8.0	5.7	0.44
13MI37#5 (300m)	107	0.59	0.21	36	8.2	172	0.01	6.2	6.6	1.3	0.58	1.4	6.5	5.1	0.12
10MI26#1 (400m)	92	0.6	0.50	14	9.2	95	<0.005	10.5	8.0	1.3	1.33	0.8	15.2	14.4	0.30
10MI26#3 (400m)	96	0.8	0.57	15	9.3	95	<0.005	9.7	7.5	1.3	1.53	1.4	18.8	17.4	0.45
10MI26#5 (400m)	80	0.5	0.30	13	9.4	71	<0.005	11.8	7.1	1.2	1.26	0.7	15.1	14.5	0.26
12MI33#1 (500m)	178	0.9	0.17	99	6.3	404	0.02	0.3	7.2	1.7	0.32	1.4	4.2	2.9	0.15
13MI38#1 (500m)	178	0.9	0.17	102	6.2	410	0.02	0.4	7.0	1.7	0.33	1.2	4.1	2.9	0.14
13MI38#5 (500m)	241	1.3	0.32	238	5.0	756	<0.005	0.2	7.2	2.0	0.24	1.0	2.9	1.9	0.21
15MI52#1 (500m)	200	1.2	0.19	119	5.3	481	0.02	2.9	6.4	1.8	0.27	1.2	3.0	1.8	0.09
15MI53#5 (500m)	212	1.2	0.20	166	6.0	579	<0.005	3.3	7.3	2.4	0.27	1.2	2.4	1.2	0.08

表 5.3.1-3 立坑内ボーリングから採取した地下水の分析結果 (続き)

(2) 微量元素

採水区間 (坑道深度)	Br μg/L	I μg/L	Cs μg/L	Sr μg/L	Li μg/L	Al μg/L	Fe μg/L	Mn μg/L	Cu μg/L	Zn μg/L	As μg/L	Se μg/L	Rb μg/L	Ba μg/L
07MI07#1 (200m)	95	13	0.40	77	38	8.7	8.7	1.7	0.32	0.5	1.1	<0.1	2.0	0.3
07MI07#3 (200m)	166	30	0.51	106	42	5.7	2.5	1.9	<0.1	0.5	0.9	<0.1	2.3	0.5
07MI07#5 (200m)	236	41	0.55	138	45	7.3	7.8	1.9	0.1	11	0.8	<0.1	2.8	0.7
09MI20#1 (300m)	83	11	0.41	77	38	7.1	1.9	2.2	0.1	1.6	0.6	<0.1	2.1	0.4
09MI20#3 (300m)	117	14	0.42	94	40	7.5	4.0	2.9	0.2	1.4	0.8	<0.1	2.2	0.6
09MI20#5 (300m)	98	11	0.41	83	40	7.9	4.1	2.6	0.2	2.9	0.6	<0.1	2.1	0.5
09MI21#2 (300m)	392	35	1.4	213	85	8.8	2.9	2.0	0.2	1.1	0.8	<0.1	3.2	0.7
09MI21#3 (300m)	375	41	1.8	275	93	390	210	19	1.9	2.4	0.7	<0.1	4.4	1.6
12MI31#1 (300m)	330	69	0.78	219	58	14	4.7	3.0	8.6	2.1	0.6	<0.1	1.1	0.7
13MI37#5 (300m)	372	82	0.88	279	68	11	27	4.6	1.5	5.8	0.6	<0.1	2.1	3.9
10MI26#1 (400m)	188	24	0.54	140	50	8.5	5.7	6.5	0.6	14	0.8	<0.1	2.8	1.6
10MI26#3 (400m)	188	25	0.55	160	53	6.5	5.1	11	1.8	10	0.9	<0.1	3.0	1.6
10MI26#5 (400m)	136	20	0.37	117	47	7.6	1.8	5.3	0.2	5.4	0.8	<0.1	2.3	0.9
12MI33#1 (500m)	768	206	2.0	900	161	10	4.3	10	0.5	17	0.6	<0.1	7.7	3.1
13MI38#1 (500m)	760	221	1.7	926	157	24	13	11	0.3	2.4	0.5	<0.1	7.9	3.1
13MI38#5 (500m)	1404	216	2.7	2314	248	6.7	7.1	25	1.0	1.2	0.6	<0.1	12	7.0
15MI52#1 (500m)	948	214	1.9	1168	164	15	18	11	6.1	3.8	0.8	<0.1	0.2	0.9
15MI53#5 (500m)	1033	195	2.2	1625	207	52	4.7	8.4	0.5	2.7	0.7	<0.1	0.9	1.9

表 5.3.1-3 立坑内ボーリングから採取した地下水の分析結果（続き）

(3) 同位体

サンプル名	<sup>3</sup> H (LSC)		H (In-Growth)		<sup>14</sup> C		$\delta^{13}\text{C}$	<sup>36</sup> Cl/Cl	$\delta^{37}\text{Cl}$		$\delta\text{D}$	$\delta^{18}\text{O}$			
	T.U.		T.U.		pMC (%)		‰	$\times 10^{-15}$	‰		‰	‰			
07MI07#1 (200m)	0.4	±0.1	0.63	±0.04	20.5	±0.1	-15.5	59.7	±3.1	-0.2	±0.1	-56.3	±0.2	-8.44	±0.01
07MI07#3 (200m)	0.5	±0.1	0.47	±0.03	18.7	±0.1	-15.8	N.M.		N.M.		-57.4	±0.3	-8.47	±0.06
07MI07#5 (200m)	<0.34				15.9	±0.1	-16.5	N.M.		N.M.		-58.0	±0.6	-8.71	±0.04
09MI20#1 (300m)	0.9	±0.1			25.4	±0.1	-15.8	54.9	±3.1	-0.3	±0.1	-56.5	±0.1	-8.35	±0.08
09MI20#3 (300m)	0.9	±0.1			19.3	±0.1	-14.2	N.M.		N.M.		-56.8	±0.2	-8.29	±0.05
09MI20#5 (300m)	0.8	±0.1	0.66	±0.05	6.1	±0.1	-12.7	N.M.		N.M.		-56.4	±0.1	-8.27	±0.06
09MI21#2 (300m)	<0.33		0.06	±0.01	5.8	±0.1	-14.8	N.M.		N.M.		-59.8	±0.2	-8.85	±0.01
09MI21#3 (300m)	<0.34		0.04	±0.03	8.1	±0.1	-15.8	43.9	±2.7	-0.1	±0.1	-60.3	±0.2	-8.87	±0.06
12MI31#1 (300m)	<0.33		0.26	±0.03	7.9	±0.1	-16.0	42.3	±2.8	-0.3	±0.1	-57.9	±0.3	-8.58	±0.08
12MI37#5 (300m)	<0.34		0.27	±0.04	11.1	±0.1	-16.9	N.M.		N.M.		-58.1	±0.1	-8.71	±0.10
10MI26#1 (400m)	0.7	±0.1	0.59	±0.04	22.2	±0.1	-15.0	51.6	±2.9	-0.2	±0.1	-57.3	±0.4	-8.66	±0.07
10MI26#3 (400m)	0.7	±0.1	0.40	±0.03	16.2	±0.1	-16.6	N.M.		N.M.		-59.0	±0.2	-8.71	±0.11
10MI26#5 (400m)	0.5	±0.1	0.56	±0.03	24.1	±0.1	-15.8	N.M.		N.M.		-59.2	±0.4	-9.00	±0.04
12MI33#1 (500m)	<0.34		0.03	±0.01	13.6	±0.1	-16.8	45.3	±2.7	-0.3	±0.1	-58.9	±0.3	-8.64	±0.12
13MI38#1 (500m)	<0.33		0.05	±0.01	11.6	±0.1	-16.4	42.4	±2.5	-0.3	±0.1	-59.6	±0.1	-8.79	±0.05
12MI38#5 (500m)	<0.34		0.04	±0.01	11.8	±0.1	-12.1	42.5	±2.5	-0.2	±0.1	-58.2	±0.3	-8.89	±0.05
15MI52#1 (500m)	<0.34		0.12	±0.01	12.4	±0.1	-10.1	42.8	±2.7	-0.6	±0.0	-58.6	±0.2	-8.76	±0.07
15MI53#5 (500m)	<0.34		0.17	±0.01	16.2	±0.1	-14.0	49.2	±2.9	-0.5	±0.1	-57.8	±0.2	-8.67	±0.06

表 5.3.1-3 立坑内ボーリングから採取した地下水の分析結果 (続き)

(4) 溶存ガス

サンプル名	CFCs 濃度			SF <sub>6</sub> 濃度	計測値			補正值 (Ne補正)	
	CFC-12	CFC-11	CFC-113		<sup>4</sup> He	<sup>3</sup> He/ <sup>4</sup> He	Ne	<sup>4</sup> He	<sup>3</sup> He/ <sup>4</sup> He
	pg/kg			fmol/kg	cc <sub>SSTP</sub> /g <sub>w</sub>	-	cc <sub>SSTP</sub> /g <sub>w</sub>	cc <sub>SSTP</sub> /g <sub>w</sub>	-
07MI07#1 (200m)	1.8	1.8	0.0	0.50	3.5E-5	4.3E-7	7.7E-7	3.5E-5	4.3E-7
07MI07#3 (200m)	2.0	3.4	0.0	0.49	2.3E-5	4.5E-7	4.6E-7	2.3E-5	4.4E-7
07MI07#5 (200m)	0.8	1.4	0.0	0.68	2.7E-5	4.3E-7	1.8E-7	2.9E-5	4.3E-7
09MI20#1 (300m)	17.3	26.1	2.4	1.06	2.1E-5	4.2E-7	2.6E-7	2.1E-5	4.2E-7
09MI20#3 (300m)	8.0	7.5	1.0	0.47	2.5E-5	5.9E-7	2.4E-7	2.5E-5	5.8E-7
09MI 20 #5(300m)	1.0	1.1	0.0	1.03	9.2E-6	4.2E-7	1.9E-7	9.7E-6	4.2E-7
09MI21#2 (300m)	3.4	6.4	0.7	0.35	4.7E-5	4.8E-7	2.3E-7	4.7E-5	4.8E-7
09MI21#3 (300m)	2.8	3.8	0.3	0.46	4.8E-5	4.2E-7	3.0E-7	4.8E-5	4.1E-7
12MI 31 #1(300m)	1.1	0.6	0.0	0.51	5.7E-5	4.5E-7	8.4E-7	5.6E-5	4.4E-7
13MI 37 #5(300m)	1.6	0.5	0.0	0.48	6.1E-5	4.8E-7	3.0E-7	6.1E-5	4.8E-7
10MI26#1 (400m)	1.3	1.5	0.0	0.67	4.2E-5	4.5E-7	3.7E-7	4.2E-5	4.4E-7
10MI26#3 (400m)	1.3	1.5	0.0	0.53	4.0E-5	4.7E-7	2.5E-7	4.0E-5	4.7E-7
10MI26#5 (400m)	0.9	1.0	0.0	0.65	3.2E-5	4.4E-7	2.9E-7	3.2E-5	4.4E-7
12MI33#1 (500m)	0.9	1.9	0.0	0.55	7.5E-5	4.5E-7	9.4E-7	7.5E-5	4.5E-7
13MI38#1 (500m)	1.6	1.9	0.0	0.37	1.4E-4	4.5E-7	4.0E-7	1.4E-4	4.5E-7
12MI38#5 (500m)	1.2	1.8	0.0	0.48	1.6E-4	4.4E-7	4.0E-7	1.6E-4	4.4E-7
15MI52#1 (500m)	1.8	2.1	0.0	0.67	1.1E-4	4.8E-7	2.4E-7	1.1E-4	4.8E-7
15MI53#5 (500m)	1.4	2.6	0.0	0.46	1.7E-4	4.7E-7	2.8E-7	1.7E-4	4.7E-7

### 5.3.1.5 考察

#### (1) 主要溶存イオン

主要溶存イオンの時間的な変化をヘキサダイアグラムとして図 5.3.1-9 に示す。主要溶存イオンは、深度 400m までは溶存イオン濃度が低い、深度 500m では溶存イオン量が大きく、スケールが異なる。ほとんどのボーリング孔では Na-Cl 型であるが、500 m 深度の研究アクセス南坑道奥の 15MI52 と 53 号孔、12MI33 号孔と 13MI38 号孔では、水質が Na-Ca-Cl 型である。溶存イオン量は、立坑のステージから掘削されているボーリング孔では周辺に比べてやや低い傾向がある。200 m 予備ステージ(07MI07 孔)、300 m 予備ステージ(09MI20 孔)、400 m 予備ステージ(10MI26 孔)では少しずつ溶存イオン量が減少している。これは、後述する水素・酸素同位体比の部分でも説明するが、立坑周辺において新しい地下水混合が顕著であり、徐々に進んでいるためと考えられる。立坑から離れたアクセス坑道の先の 09MI21 孔、300 m ボーリング横坑 (13MI31#1、13MI37#5)、深度 500m では、主要溶存イオンの変化が小さい。このように、立坑から離れると主要溶存イオン濃度の変化が小さい傾向にある。

#### (2) 水素・酸素同位体比

水素・酸素同位体比の関係を図 5.3.1-10 に示す。水素・酸素同位体比は、Iwatsuki et al. (2005) に示されているように、流出域では低い値を示す傾向がある。これは、Hasegawa et al. (2016a)でも議論されているように、流出域の地下水年代が 2 万年程度となると推定されることから、氷期に涵養した地下水の可能性がある。一方で、浅部の地下水は、現在の間氷期に涵養されているため、水素・酸素同位体比が高い値を示す。水素・酸素同位体は、おおむね天水線の上方に位置するため、降水起源である。また、浅部地下水を JNC(2003)の河川データから、流出域の地下水を DH-12 などから推定すると、それぞれ水素・酸素同位体比は(-53‰, -8‰)、(-61‰, -9.0‰)程度となる。これらは、立坑から採取した地下水はおおむねこの混合線上に位置する。

#### (3) 炭素同位体

炭素同位体の関係を図 5.3.1-11 に示す。 $\delta^{13}\text{C}$  は概ね-13~-8‰に分布するが、300 m ボーリング横坑と 500 m アクセス南坑道奥については、 $\delta^{13}\text{C}$  が-15‰以上を示しており、やや傾向が異なる。このため、溶存炭酸量(Alkalinity)と  $^{14}\text{C}$  の関係も図 5.3.1-12 のように図化した。溶存炭酸の増加とともに  $^{14}\text{C}$  も増加傾向にあるが、500 m アクセス南坑道奥と 500 m アクセス北坑道奥、および 400m 予備ステージでは傾向が異なる。特に、500 m アクセス南坑道奥と 500 m アクセス北坑道奥は、溶存炭酸量が小さいものは  $^{14}\text{C}$  濃度が高い傾向があり、大気  $\text{CO}_2$  が混入している可能性が示唆された。

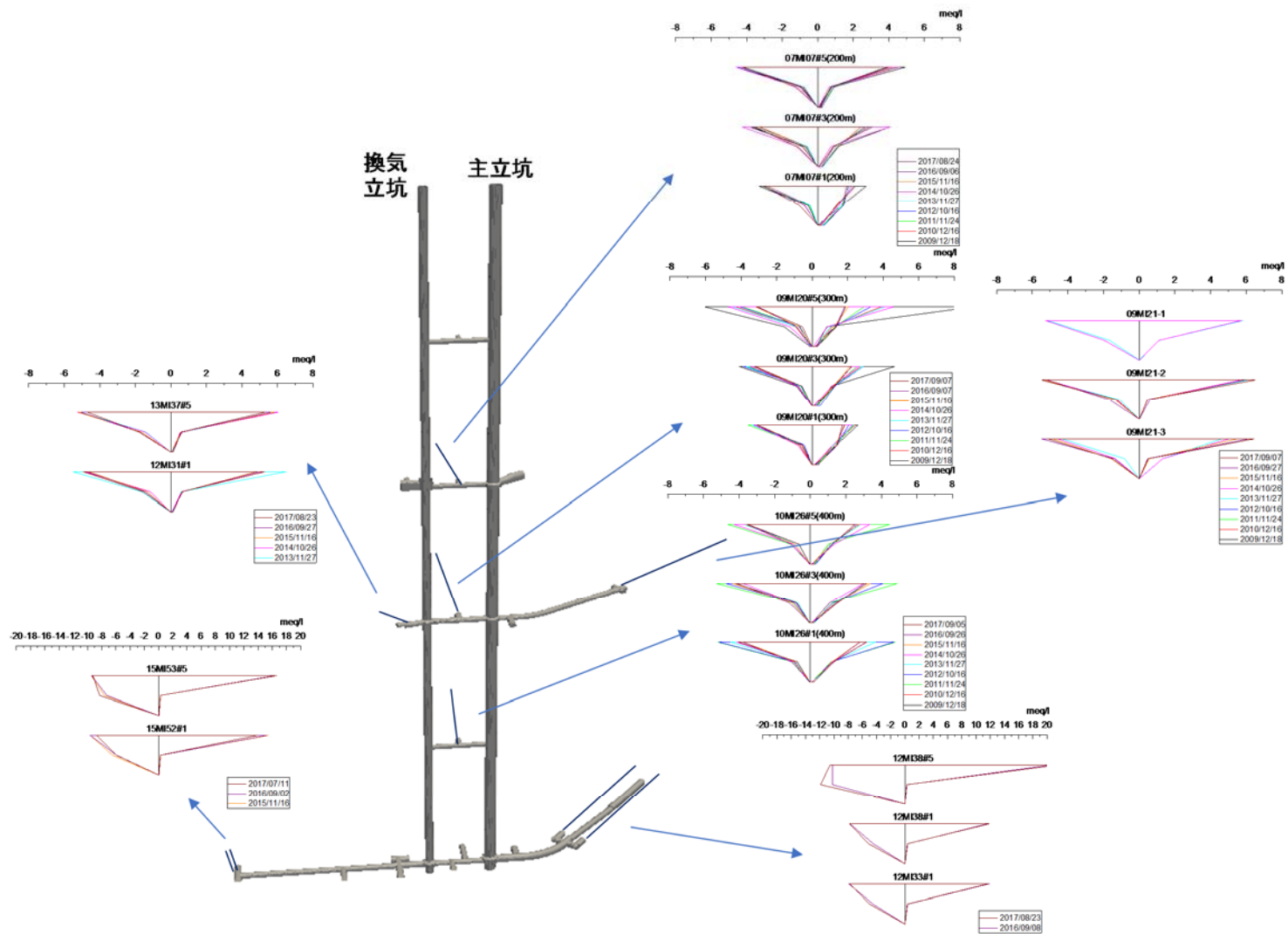


図 5.3.1-9 ヘキサダイアグラムの時間変化

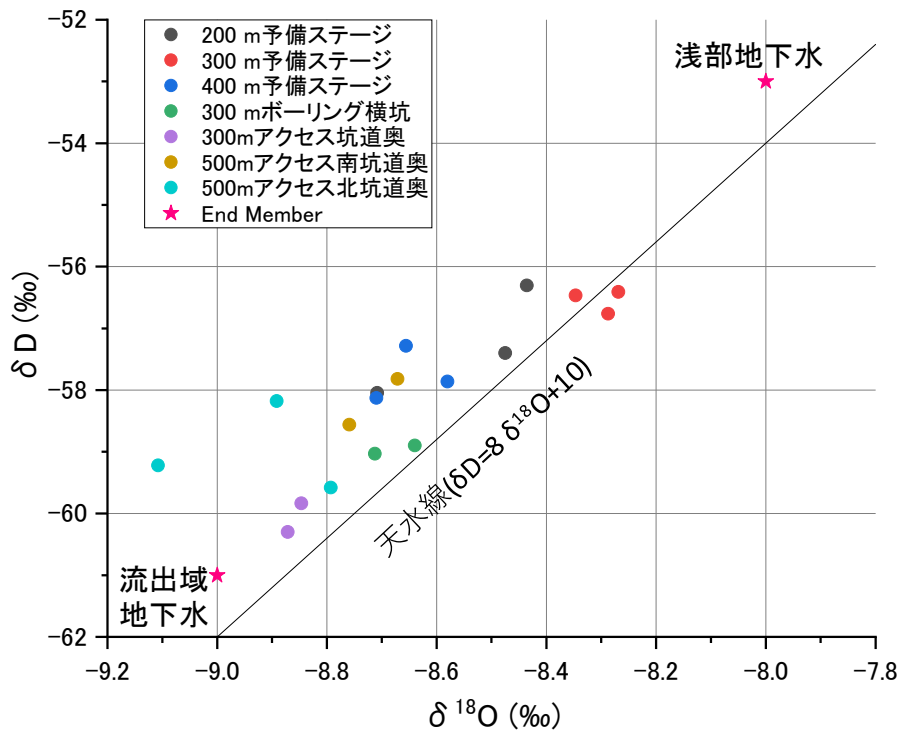


図 5.3.1-10 水素・酸素同位体比の関係

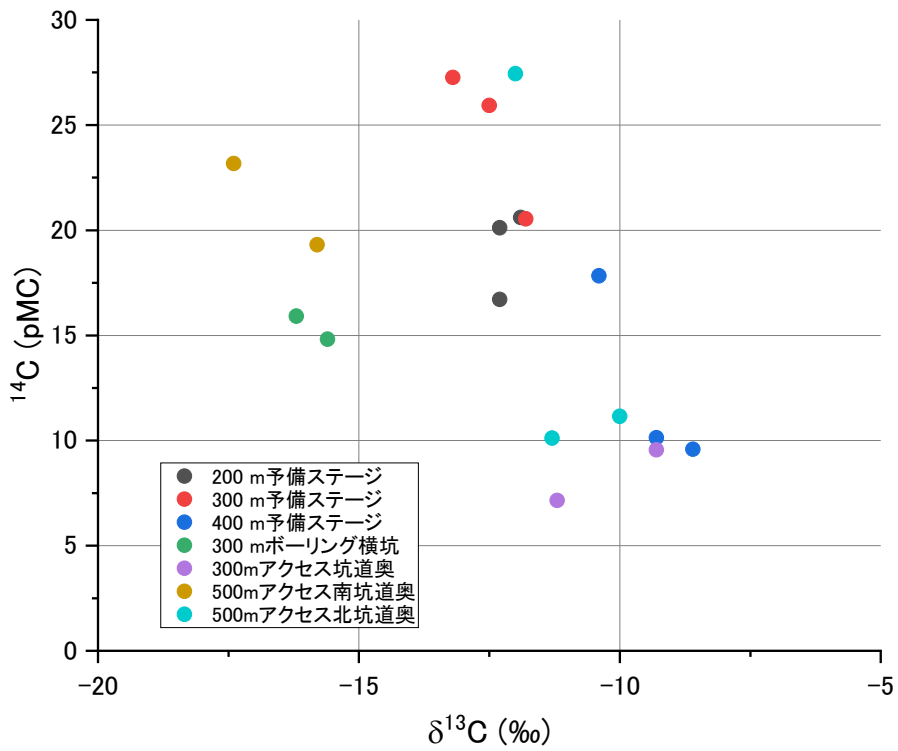


図 5.3.1-11  $\delta^{13}\text{C}$  と  $^{14}\text{C}$  の関係

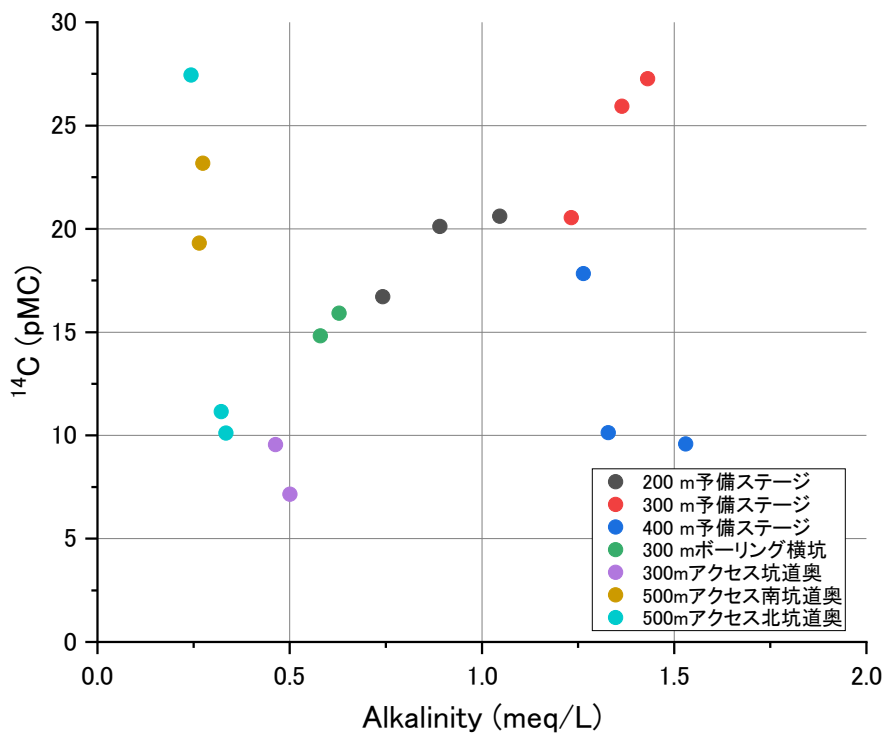


図 5.3.1-12 溶存炭酸量と <sup>14</sup>C の関係

(4) 希ガス

<sup>4</sup>He の蓄積形態を明らかにするために、<sup>4</sup>He<sub>eq</sub>/<sup>4</sup>He と <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He を軸としたものを図 5.3.1-13 に示す。このようにプロットすると <sup>4</sup>He<sub>eq</sub>/<sup>4</sup>He→0 となるのは <sup>4</sup>He が無限に蓄積した場合のため、蓄積しているヘリウムの <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He が明らかになる。この図から、蓄積している <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He は  $4.6 \times 10^{-7}$  程度であることがわかる。原位置生成による <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He は  $2 \times 10^{-8}$  程度であることから (Hasegawa et al., 2016a)、He は <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He が  $4.6 \times 10^{-7}$  程度の値を持つ、外部からのフラックスによって蓄積していることがわかる。このため、He の蓄積はフラックスであることがわかる。

<sup>3</sup>He と <sup>4</sup>He の関係を求めると図 5.3.1-14 のようになる。He は主にフラックスで蓄積しているため、回帰直線を引いて切片となるところが、フラックスの影響を除外した原位置生成による蓄積分である。立坑ではフラックスの寄与が異なるため、このような分離が可能となる。



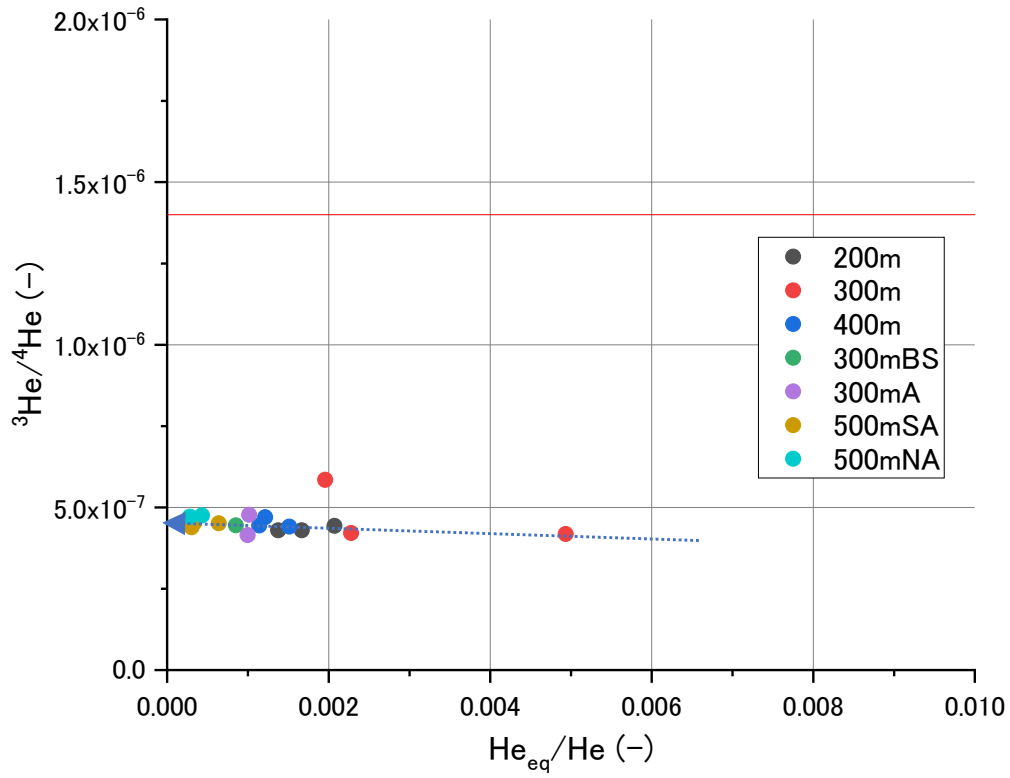


図 5.3.1-13  $^4\text{He}_{\text{eq}}/^4\text{He}$  と  $^3\text{He}/^4\text{He}$  の関係

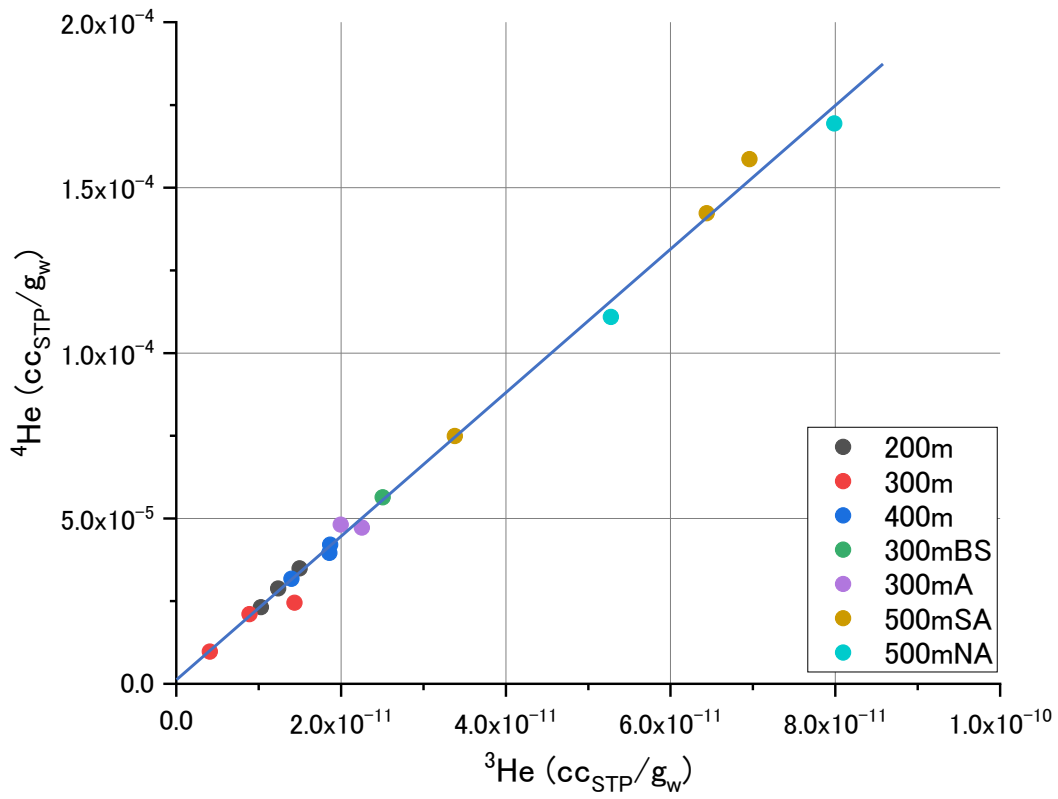


図 5.3.1-14  $^3\text{He}$  と  $^4\text{He}$  の関係

#### (5) 各成分の相関

立坑掘削によって立坑周辺では、起源の異なる地下水の混合が起きていると考えられる。例えば、元々存在した流出域の地下水と浅層地下水との混合が想定される。これらを調査するための有効な指標を明らかにするために、立坑内のボーリング孔で採取した地下水を対象に相関分析を実施した。この結果を表 5.3.1-4 に示す。相関が良いグループには以下の2つがある。 $^3\text{H}$  と相関が良いグループと  $^4\text{He}$  と相関が良いグループである。 $^3\text{H}$  と相関が良いグループには、 $\text{SO}_4$ 、溶存炭酸量(Alkalinity)、TC(Total Carbon:総炭素量)、TIC(Total Inorganic Carbon:総無機炭素量)、水素・酸素同位体比( $\delta\text{D}\cdot\delta^{18}\text{O}$ )、 $^{14}\text{C}$  量である。これらは浅層地下水を代表していると考えられる。これは、溶存炭素量、TC、TIC は流出域では少ないが新しい地下水には豊富に含まれる、水素・酸素同位体比は、浅層地下水は現在の温暖期に涵養しているが、流出域の地下水は氷期に涵養していると考えられるため、差が出ると考えられる。 $^{14}\text{C}$  量については、 $^3\text{H}$  と同様に新しい地下水には含まれるが、古い地下水には含まれない。このため、これらの成分は、浅層地下水と流出域の地下水を識別するうえで有望な指標であると考えられる。 $^3\text{H}$  と相関が良いもので浅層地下水の指標として有望なものを図 5.3.1-15 に示す。

一方で、 $^4\text{He}$  と相関が良いグループには、Na, K, Ca, Cl, Br, I, B, Cs, Sr, Li,  $^3\text{He}$  である。これらの相関はかなり強く 1 に近いものが多い。これは、化石海水を代表していると考えられる。

これらの化石海水の指標として有望なものを図 5.3.1-16 に示す。図に示すように、He よりも Cl 濃度の方が、計測が容易であり、他の指標との相関が良いためここでは、Cl 濃度を横軸として表示した。

Na, Li,  $^4\text{He}$  などは、古い地下水にも多く含まれるが、流出域の地下水にも一定量含まれるため、切片が存在する。このため、流出域の地下水組成は、単純に滞留時間が増えただけでなく、古い地下水と混合していると考えられる。流出域の地下水は、中間域の Na- $\text{HCO}_3$  型に Na-Cl 型の古い地下水が混合して Na-Cl 型となっていると考えられる。立坑周辺の地下水は、流出域の地下水、浅層地下水、化石海水が混合して形成されていると考えられる。

表 5.3.1-4 各成分の相関

	Na	K	Mg	Ca	F	Cl	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Br	I	ALK	TOC	TC	TKC	NPOC	Si	B	Cs	Sr	Li	Al	Fe	Mn	Cu	Zn	As	Rb	Ba
Unit	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	μg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L
Na	1.00	0.94	0.06	0.95	-0.94	0.99	0.63	-0.81	0.99	0.95	-0.83	0.22	-0.83	-0.82	-0.61	-0.37	0.93	0.95	0.95	0.99	0.04	0.01	0.70	0.18	0.02	-0.37	0.54	0.69
K	0.94	1.00	0.33	0.92	-0.91	0.93	0.58	-0.63	0.93	0.91	-0.63	0.12	-0.62	-0.61	-0.61	-0.20	0.91	0.82	0.93	0.93	-0.07	-0.09	0.71	0.19	0.12	-0.25	0.44	0.66
Mg	0.06	0.33	1.00	0.08	-0.07	0.05	-0.30	0.12	0.05	0.01	0.38	-0.17	0.39	0.39	0.07	0.42	0.11	-0.06	0.12	0.06	-0.21	-0.20	0.32	-0.06	0.50	0.15	0.13	0.29
Ca	0.95	0.92	0.08	1.00	-0.89	0.98	0.59	-0.65	0.98	0.89	-0.72	0.10	-0.72	-0.71	-0.59	-0.20	0.91	0.88	1.00	0.97	-0.04	-0.07	0.71	0.07	-0.09	-0.31	0.59	0.75
F	-0.94	-0.91	-0.07	-0.89	1.00	-0.93	-0.42	0.68	-0.93	-0.94	0.71	-0.01	0.72	0.70	0.75	0.35	-0.84	-0.89	-0.90	-0.94	-0.02	0.00	-0.67	-0.08	-0.02	0.51	-0.51	-0.67
Cl	0.99	0.93	0.05	0.98	-0.93	1.00	0.60	-0.77	1.00	0.92	-0.81	0.16	-0.81	-0.80	-0.61	-0.33	0.93	0.95	0.98	0.99	0.05	0.01	0.73	0.13	-0.05	-0.36	0.57	0.73
NO <sub>3</sub>	0.63	0.58	-0.30	0.59	-0.42	0.60	1.00	-0.38	0.57	0.50	-0.47	0.03	-0.38	-0.43	0.11	0.08	0.58	0.50	0.58	0.53	0.28	-0.58	0.44	0.35	-0.04	0.38	0.05	-0.62
SO <sub>4</sub>	-0.81	-0.63	0.12	-0.65	0.68	-0.77	-0.38	1.00	-0.77	-0.74	0.90	-0.38	0.89	0.89	0.43	0.58	-0.68	-0.89	-0.64	-0.77	-0.35	-0.34	-0.64	-0.21	-0.03	0.31	-0.53	-0.57
Br	0.99	0.93	0.05	0.98	-0.93	1.00	0.57	-0.77	1.00	0.93	-0.81	0.17	-0.81	-0.80	-0.62	-0.35	0.92	0.94	0.98	0.99	0.03	0.00	0.72	0.16	-0.04	-0.36	0.57	0.74
I	0.95	0.91	0.01	0.89	-0.94	0.92	0.50	-0.74	0.93	1.00	-0.81	0.25	-0.80	-0.79	-0.69	-0.35	0.87	0.87	0.88	0.93	-0.05	-0.07	0.59	0.19	0.08	-0.44	0.51	0.64
ALK	-0.83	-0.63	0.38	-0.72	0.71	-0.81	-0.47	0.90	-0.81	-0.81	1.00	-0.43	1.00	1.00	0.55	0.63	-0.72	-0.86	-0.86	-0.70	-0.22	-0.21	-0.47	-0.26	0.11	0.35	-0.39	-0.51
TOC	0.22	0.12	-0.17	0.10	-0.01	0.16	0.03	-0.38	0.17	0.25	-0.43	1.00	-0.38	-0.44	0.27	-0.43	0.09	0.15	0.06	0.10	-0.07	-0.06	-0.04	0.70	0.09	-0.06	-0.06	0.05
TC	-0.83	-0.62	0.39	-0.72	0.72	-0.81	-0.38	0.89	-0.81	-0.80	1.00	-0.38	1.00	1.00	0.58	0.62	-0.73	-0.86	-0.70	-0.79	-0.23	-0.22	-0.46	-0.23	0.13	0.37	-0.37	-0.51
TKC	-0.82	-0.61	0.39	-0.71	0.70	-0.80	-0.43	0.89	-0.80	-0.79	1.00	-0.44	1.00	1.00	0.54	0.63	-0.72	-0.85	-0.69	-0.77	-0.22	-0.21	-0.44	-0.27	0.12	0.36	-0.36	-0.49
NPOC	-0.61	-0.61	0.07	-0.59	0.75	-0.61	0.11	0.43	-0.62	-0.69	0.55	0.27	0.58	0.54	1.00	0.28	-0.65	-0.61	-0.60	-0.65	-0.16	-0.17	-0.39	0.12	0.02	0.47	-0.19	-0.45
Si	-0.37	-0.20	0.42	-0.20	0.35	-0.33	0.08	0.58	-0.35	-0.35	0.63	0.62	0.63	0.28	1.00	-0.18	-0.18	-0.42	-0.20	-0.29	-0.17	-0.21	-0.12	-0.49	0.33	0.34	0.04	-0.12
B	0.93	0.91	0.11	0.91	-0.84	0.93	0.58	-0.68	0.92	0.87	-0.72	0.09	-0.73	-0.72	-0.65	-0.18	1.00	0.87	0.92	0.94	0.07	0.00	0.61	0.05	-0.02	-0.19	0.37	0.56
Cs	0.95	0.82	-0.06	0.88	-0.89	0.95	0.50	-0.89	0.94	0.87	-0.86	0.15	-0.86	-0.85	-0.61	-0.42	0.87	1.00	0.88	0.96	0.29	0.26	0.77	0.11	-0.03	-0.38	0.59	0.68
Sr	0.95	0.93	0.12	1.00	-0.90	0.98	0.58	-0.64	0.98	0.88	-0.70	0.06	-0.70	-0.69	-0.60	-0.20	0.92	0.88	1.00	0.97	-0.03	-0.06	0.73	0.07	-0.08	-0.32	0.58	0.75
Li	0.99	0.93	0.06	0.97	-0.94	0.99	0.53	-0.77	0.99	0.93	-0.79	0.10	-0.79	-0.77	-0.65	-0.29	0.94	0.96	0.97	1.00	0.07	0.04	0.74	0.07	-0.03	-0.37	0.59	0.73
Al	0.04	-0.07	-0.21	-0.04	-0.02	0.05	0.28	-0.35	0.03	-0.03	-0.22	-0.07	-0.23	-0.22	-0.16	-0.17	0.07	0.29	-0.03	0.07	1.00	0.99	0.46	0.06	-0.14	-0.07	0.07	0.01
Fe	0.01	-0.09	-0.20	-0.07	0.00	0.01	-0.58	-0.34	0.00	-0.07	-0.21	-0.06	-0.22	-0.21	-0.17	-0.21	0.00	0.26	-0.06	0.04	0.99	1.00	0.46	0.08	-0.12	-0.06	0.08	0.04
Mn	0.70	0.71	0.32	0.71	-0.67	0.73	0.44	-0.64	0.72	0.59	-0.47	-0.04	-0.46	-0.44	-0.39	-0.12	0.61	0.77	0.73	0.74	0.46	0.46	1.00	0.06	0.05	-0.23	0.71	0.76
Cu	0.18	0.19	-0.06	0.07	-0.08	0.13	0.35	-0.21	0.16	0.19	-0.26	0.70	-0.23	-0.27	0.12	-0.49	0.05	0.11	0.07	0.07	0.06	0.08	0.06	1.00	-0.13	-0.09	-0.29	-0.11
Zn	0.02	0.12	0.50	-0.09	-0.02	-0.05	-0.04	-0.03	-0.04	0.08	0.11	0.09	0.13	0.12	0.02	0.33	-0.02	-0.03	-0.08	-0.03	-0.14	-0.12	0.05	-0.13	1.00	0.03	0.12	0.11
As	-0.37	-0.25	0.15	-0.31	0.51	-0.36	0.38	0.31	-0.36	-0.44	0.35	-0.06	0.37	0.36	0.47	0.34	-0.19	-0.38	-0.32	-0.37	-0.07	-0.06	-0.23	-0.09	0.03	1.00	-0.34	-0.42
Rb	0.54	0.44	0.13	0.59	-0.51	0.57	0.05	-0.53	0.57	0.51	-0.39	-0.06	-0.37	-0.36	-0.19	0.04	0.37	0.59	0.58	0.59	0.07	0.08	0.71	-0.29	0.12	-0.34	1.00	0.81
Ba	0.69	0.66	0.29	0.75	-0.67	0.73	-0.62	-0.57	0.74	0.64	-0.51	0.05	-0.51	-0.49	-0.45	-0.12	0.56	0.68	0.75	0.73	0.01	0.04	0.76	-0.11	0.11	-0.42	0.81	1.00
δD	-0.48	-0.30	0.08	-0.24	0.38	-0.41	0.02	0.86	-0.42	-0.43	0.69	-0.49	0.67	0.68	0.18	0.61	-0.31	-0.60	-0.24	-0.41	-0.47	-0.49	-0.45	-0.31	-0.17	0.34	-0.34	-0.35
δ <sup>18</sup> O	-0.68	-0.56	-0.06	-0.51	0.55	-0.63	-0.38	0.87	-0.63	-0.63	0.72	-0.45	0.69	0.70	0.22	0.44	-0.52	-0.74	-0.51	-0.63	-0.26	-0.26	-0.60	-0.19	-0.39	0.21	-0.55	-0.54
<sup>3</sup> H	-0.66	-0.48	0.29	-0.53	0.47	-0.63	#D N/0!	0.85	-0.63	-0.63	0.90	-0.60	0.88	0.90	0.30	0.61	-0.56	-0.68	-0.50	-0.59	-0.24	-0.25	-0.38	-0.32	-0.03	0.15	-0.29	-0.43
<sup>14</sup> C	0.04	0.09	-0.20	0.28	-0.13	0.13	0.17	0.44	0.13	0.03	0.15	-0.31	0.12	0.14	-0.13	0.18	0.09	-0.07	0.28	0.11	-0.37	-0.40	-0.11	-0.08	-0.47	-0.08	-0.08	0.03
δ <sup>13</sup> C	-0.29	-0.27	0.37	-0.32	0.28	-0.30	0.17	0.05	-0.31	-0.33	0.39	-0.35	0.41	0.42	0.41	0.38	-0.33	-0.19	-0.31	-0.25	0.04	0.05	0.11	-0.50	0.39	0.32	0.40	0.00
<sup>14</sup> C量	-0.70	-0.58	-0.03	-0.52	0.52	-0.64	-0.33	0.92	-0.65	-0.65	0.82	-0.51	0.80	0.82	0.32	0.48	-0.62	-0.73	-0.51	-0.63	-0.28	-0.29	-0.52	-0.28	-0.22	0.10	-0.36	-0.48
Cor. <sup>14</sup> C	-0.12	-0.04	-0.02	0.14	0.02	-0.02	0.37	0.54	-0.03	-0.15	0.37	-0.51	0.36	0.38	0.07	0.39	-0.09	-0.20	0.15	-0.03	-0.43	-0.44	-0.08	-0.33	-0.33	0.07	0.12	0.05
Rn	-0.13	0.02	0.09	-0.14	0.03	-0.15	-0.11	0.32	-0.13	-0.09	0.16	0.08	0.16	0.14	-0.12	-0.06	-0.15	-0.22	-0.13	-0.19	0.07	0.11	-0.10	0.42	0.05	-0.12	-0.52	-0.22
CFC-12	0.10	-0.03	-0.05	-0.05	-0.06	0.05	0.12	-0.41	0.04	0.07	-0.18	0.10	-0.18	-0.18	0.15	-0.31	0.04	0.17	-0.05	0.08	0.05	0.05	0.04	-0.19	-0.15	0.00	0.22	0.01
CFC-11	0.20	0.08	-0.10	0.06	-0.17	0.15	0.13	-0.46	0.13	0.24	-0.27	0.13	-0.26	-0.26	-0.03	-0.26	0.17	0.25	0.05	0.19	0.12	0.11	0.13	-0.17	-0.15	-0.06	0.29	0.08
CFC-113	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SF <sub>6</sub>	-0.43	-0.32	0.19	-0.29	0.36	-0.39	0.07	0.48	-0.40	-0.36	0.56	-0.44	0.57	0.59	0.29	0.59	-0.39	-0.45	-0.30	-0.36	-0.01	0.00	-0.01	-0.44	-0.09	0.19	0.19	-0.10
<sup>4</sup> He	0.94	0.91	0.10	0.93	-0.87	0.94	0.51	-0.71	0.94	0.91	-0.76	0.19	-0.76	-0.76	-0.68	-0.30	0.95	0.86	0.93	0.94	0.01	-0.03	0.64	0.13	-0.11	-0.37	0.46	0.71
<sup>3</sup> He/ <sup>4</sup> He	0.03	0.10	0.18	0.00	-0.02	0.02	0.94	-0.02	0.02	0.04	0.02	-0.08	0.02	0.02	-0.17	-0.11	0.11	-0.02	0.02	0.02	-0.25	-0.26	-0.14	0.01	-0.09	0.08	-0.15	-0.09
Ne	0.10	0.02	-0.19	0.09	0.03	0.08	-0.24	-0.21	0.09	0.22	-0.25	0.53	-0.21	-0.24	0.07	-0.04	0.06	0.11	0.05	0.09	-0.11	-0.10	-0.02	0.32	0.19	0.01	0.22	0.15
Cor. <sup>4</sup> He	0.94	0.91	0.10	0.93	-0.87	0.94	0.51	-0.71	0.94	0.91	-0.76	0.19	-0.77	-0.76	-0.68	-0.30	0.95	0.86	0.93	0.94	0.01	-0.03	0.64	0.12	-0.11	-0.37	0.46	0.71
Cor. <sup>3</sup> He/ <sup>4</sup> He	0.04	0.11	0.19	0.01	-0.04	0.03	0.95	-0.02	0.03	0.05	0.02	-0.09	0.01	0.02	-0.18	-0.12	0.12	-0.02	0.03	0.03	-0.24	-0.25	-0.13	0.00	-0.09	0.06		

表 5.3.1-4 各成分の相関(続き)

Unit	$\delta D$	$\delta^{18}O$	$^3H$	$^{14}C$	$\delta^{13}C$	$^{14}C$ 量	Cor. $^{14}C$	Rn	CFC-12	CFC-11	CFC-113	SF <sub>6</sub>	$^4He$	$^3He/^4He$	Ne	Cor. $^4He$	Cor. $^3He/^4He$	$^3He$
	平均	平均	TU	pM C	‰	atm	pM C	Bq/L	pg/kg			mol/kg	ccSTP/g <sub>w</sub>	-	ccSTP/g <sub>w</sub>	ccSTP/g <sub>w</sub>	-	ccSTP/g <sub>w</sub>
Na	-0.48	-0.68	-0.66	0.04	-0.29	-0.70	-0.12	-0.13	0.10	0.20	-	-0.43	0.94	0.03	0.10	0.94	0.04	0.94
K	-0.30	-0.56	-0.48	0.09	-0.27	-0.58	-0.04	0.02	-0.03	0.08	-	-0.32	0.91	0.10	0.02	0.91	0.11	0.91
Mg	0.08	-0.06	0.29	-0.20	0.37	-0.03	-0.02	0.09	-0.05	-0.10	-	0.19	0.10	0.18	-0.19	0.10	0.19	0.10
Ca	-0.24	-0.51	-0.53	0.28	-0.32	-0.52	0.14	-0.14	-0.05	0.06	-	-0.29	0.93	0.00	0.09	0.93	0.01	0.92
F	0.38	0.55	0.47	-0.13	0.28	0.52	0.02	0.03	-0.06	-0.17	-	0.36	-0.87	-0.02	0.03	-0.87	-0.04	-0.87
Cl	-0.41	-0.63	-0.63	0.13	-0.30	-0.64	-0.02	-0.15	0.05	0.15	-	-0.39	0.94	0.02	0.08	0.94	0.03	0.94
NO <sub>3</sub>	0.02	-0.38	#D M/0!	0.17	0.17	-0.33	0.37	-0.11	0.12	0.13	-	0.07	0.51	0.94	-0.24	0.51	0.95	0.56
SO <sub>4</sub>	0.86	0.87	0.95	0.44	0.05	0.92	0.54	0.32	-0.41	-0.46	-	0.48	-0.71	-0.02	-0.21	-0.71	-0.02	-0.70
Br	-0.42	-0.63	-0.63	0.13	-0.31	-0.65	-0.03	-0.13	0.04	0.13	-	-0.40	0.94	0.02	0.09	0.94	0.03	0.93
I	-0.43	-0.63	-0.63	0.03	-0.33	-0.65	-0.15	-0.09	0.07	0.24	-	-0.36	0.91	0.04	0.22	0.91	0.05	0.91
ALK	0.69	0.72	0.90	0.15	0.39	0.82	0.37	0.16	-0.18	-0.27	-	0.56	-0.76	0.02	-0.25	-0.76	0.02	-0.75
TOC	-0.49	-0.45	-0.60	-0.31	-0.35	-0.51	-0.51	0.08	0.10	0.13	-	-0.44	0.19	-0.08	0.53	0.19	-0.09	0.18
TC	0.67	0.69	0.88	0.12	0.41	0.80	0.36	0.16	-0.18	-0.26	-	0.57	-0.76	0.02	-0.21	-0.77	0.01	-0.76
TD	0.68	0.70	0.90	0.14	0.42	0.82	0.38	0.14	-0.18	-0.26	-	0.59	-0.76	0.02	-0.24	-0.76	0.02	-0.75
NPOC	0.18	0.22	0.30	-0.13	0.41	0.32	0.07	-0.12	0.15	-0.03	-	0.29	-0.68	-0.17	0.07	-0.68	-0.18	-0.69
Si	0.61	0.44	0.61	0.18	0.38	0.48	0.39	-0.06	-0.31	-0.26	-	0.59	-0.30	-0.11	-0.04	-0.30	-0.12	-0.31
B	-0.31	-0.52	-0.56	0.09	-0.33	-0.62	-0.09	-0.15	0.04	0.17	-	-0.39	0.95	0.11	0.06	0.95	0.12	0.96
Cs	-0.60	-0.74	-0.68	-0.07	-0.19	-0.73	-0.20	-0.22	0.17	0.25	-	-0.45	0.86	-0.02	0.11	0.86	-0.02	0.85
Sr	-0.24	-0.51	-0.50	0.28	-0.31	-0.51	0.15	-0.13	-0.05	0.05	-	-0.30	0.93	0.02	0.05	0.93	0.03	0.92
Li	-0.41	-0.63	-0.59	0.11	-0.25	-0.63	-0.03	-0.19	0.08	0.19	-	-0.36	0.94	0.02	0.09	0.94	0.03	0.94
Al	-0.47	-0.26	-0.24	-0.37	0.04	-0.28	-0.43	0.07	0.05	0.12	-	-0.01	0.01	-0.25	-0.11	0.01	-0.24	-0.01
Fe	-0.49	-0.26	-0.25	-0.40	0.05	-0.29	-0.44	0.11	0.05	0.11	-	0.00	-0.03	-0.26	-0.10	-0.03	-0.25	-0.05
Mn	-0.45	-0.60	-0.38	-0.11	0.11	-0.52	-0.08	-0.10	0.04	0.13	-	-0.01	0.64	-0.14	-0.02	0.64	-0.13	0.61
Cu	-0.31	-0.19	-0.32	-0.08	-0.50	-0.28	-0.33	0.42	-0.19	-0.17	-	-0.44	0.13	0.01	0.32	0.12	0.00	0.13
Zn	-0.17	-0.39	-0.03	-0.47	0.39	-0.22	-0.33	0.05	-0.15	-0.15	-	-0.09	-0.11	-0.09	0.19	-0.11	-0.09	-0.11
As	0.34	0.21	0.15	-0.08	0.32	0.10	0.07	-0.12	0.00	-0.06	-	0.19	-0.37	0.08	0.01	-0.37	0.06	-0.36
Rb	-0.34	-0.55	-0.29	-0.08	0.40	-0.36	0.12	-0.52	0.22	0.29	-	0.19	0.46	-0.15	0.22	0.46	-0.15	0.42
Ba	-0.35	-0.54	-0.43	0.03	0.00	-0.48	0.05	-0.22	0.01	0.08	-	-0.10	0.71	-0.09	0.15	0.71	-0.09	0.68
$\delta D$ (‰)	1.00	0.83	0.75	0.74	-0.07	0.86	0.81	0.14	-0.49	-0.48	-	0.42	-0.38	0.07	-0.14	-0.38	0.07	-0.37
$\delta^{18}O$ (‰)	0.83	1.00	0.80	0.55	-0.16	0.86	0.54	0.28	-0.30	-0.31	-	0.44	-0.53	0.17	-0.31	-0.53	0.16	-0.51
$^3H$	0.75	0.80	1.00	0.36	0.28	0.89	0.54	0.16	-0.22	-0.30	-	0.51	-0.61	0.19	-0.31	-0.61	0.19	-0.60
$^{14}C$	0.74	0.55	0.36	1.00	-0.48	0.59	0.89	0.21	-0.54	-0.52	-	0.09	0.08	-0.03	-0.14	0.08	-0.03	0.09
$\delta^{13}C$	-0.07	-0.16	0.28	-0.48	1.00	0.05	-0.03	-0.52	0.43	0.31	-	0.46	-0.40	-0.01	-0.05	-0.40	-0.01	-0.42
$^{14}C$ 量	0.86	0.86	0.89	0.59	0.05	1.00	0.70	0.19	-0.34	-0.39	-	0.48	-0.64	-0.05	-0.23	-0.64	-0.05	-0.63
Cor. $^{14}C$	0.81	0.54	0.54	0.89	-0.03	0.70	1.00	-0.02	-0.42	-0.45	-	0.34	-0.12	-0.03	-0.16	-0.12	-0.03	-0.13
Rn	0.14	0.28	0.16	0.21	-0.52	0.19	-0.02	1.00	-0.58	-0.59	-	-0.13	-0.16	0.03	-0.40	-0.15	0.04	-0.14
CFC-12	-0.49	-0.30	-0.22	-0.54	0.43	-0.34	-0.42	-0.58	1.00	0.92	-	0.12	0.14	0.07	-0.14	0.14	0.08	0.14
CFC-11	-0.48	-0.31	-0.30	-0.52	0.31	-0.39	-0.45	-0.59	0.92	1.00	-	0.21	0.29	-0.01	0.02	0.29	-0.01	0.29
CFC-113	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SF <sub>6</sub>	0.42	0.44	0.51	0.09	0.46	0.48	0.34	-0.13	0.12	0.21	-	1.00	-0.31	-0.13	-0.28	-0.30	-0.12	-0.32
$^4He$	-0.38	-0.53	-0.61	0.08	-0.40	-0.64	-0.12	-0.16	0.14	0.29	-	-0.31	1.00	0.06	0.07	1.00	0.06	1.00
$^3He/^4He$	0.07	0.17	0.19	-0.03	-0.01	-0.05	-0.03	0.03	0.07	-0.01	-	-0.13	0.06	1.00	-0.14	0.05	1.00	0.11
Ne	-0.14	-0.31	-0.31	-0.14	-0.05	-0.23	-0.16	-0.40	-0.14	0.02	-	-0.28	0.07	-0.14	1.00	0.06	-0.17	0.04
Cor. $^4He$	-0.38	-0.53	-0.61	0.08	-0.40	-0.64	-0.12	-0.15	0.14	0.29	-	-0.30	1.00	0.05	0.06	1.00	0.06	1.00
Cor. $^3He/^4He$	0.07	0.16	0.19	-0.03	-0.01	-0.05	-0.03	0.04	0.08	-0.01	-	-0.12	0.06	1.00	-0.17	0.06	1.00	0.11
$^3He$	-0.37	-0.51	-0.60	0.09	-0.42	-0.63	-0.13	-0.14	0.14	0.29	-	-0.32	1.00	0.11	0.04	1.00	0.11	1.00

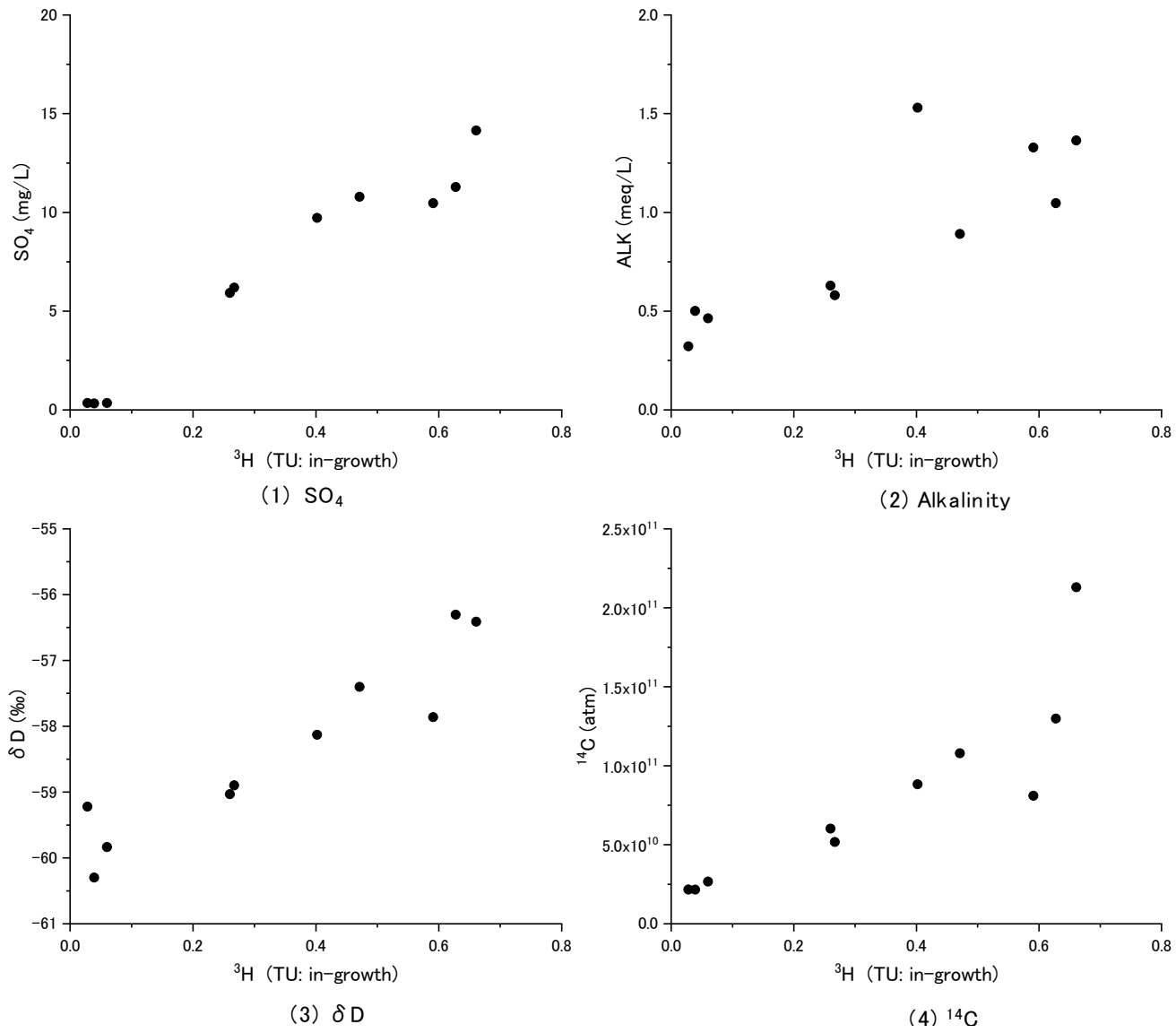


図 5.3.1-15 <sup>3</sup>H と相関が良く浅層地下水の指標として有望なもの

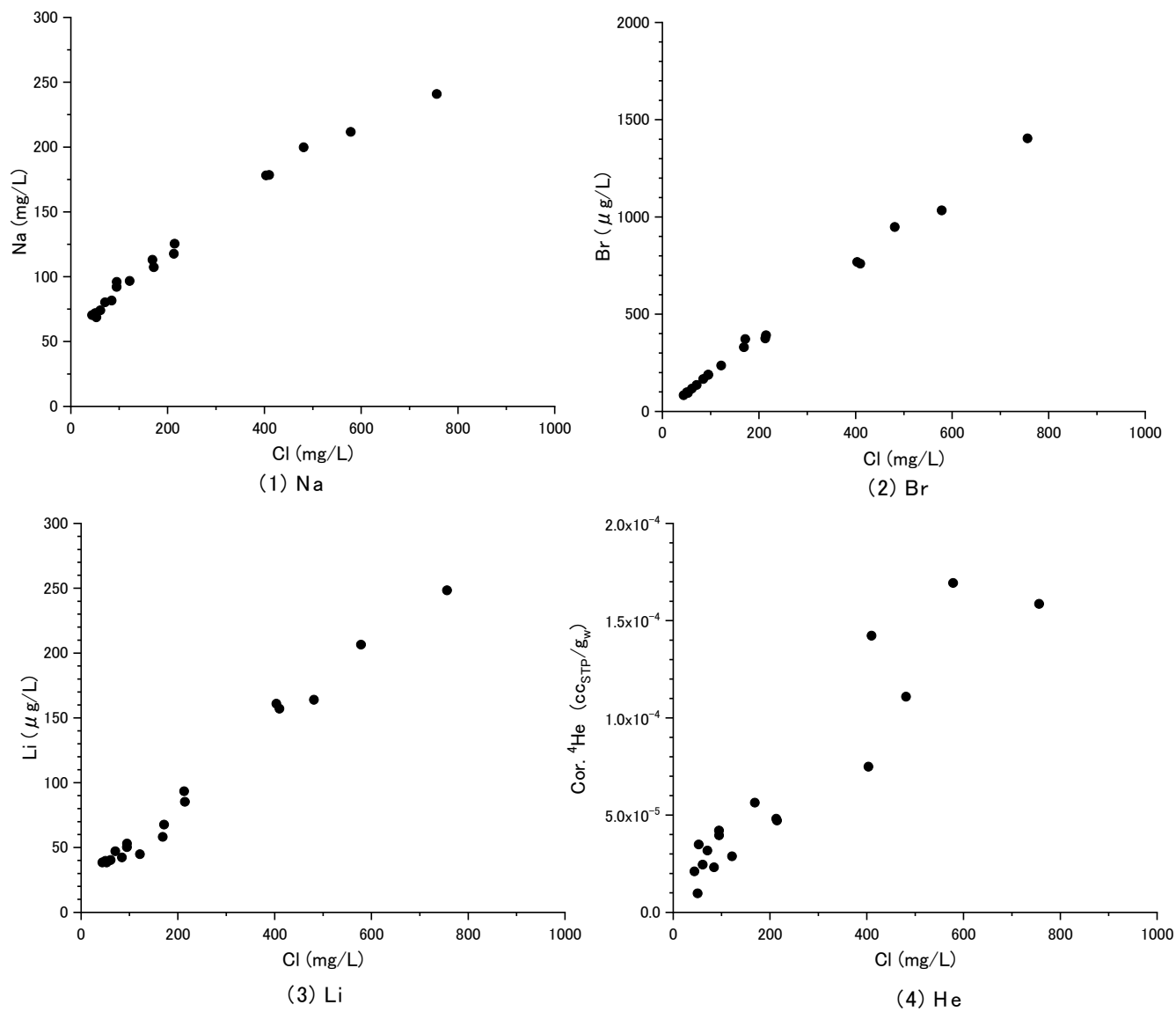


図 5.3.1-16 Cl と相関が良く化石海水の指標として有望なもの

(6) 主成分分析

前述の成分を用いて主成分分析を実施した。主成分分析は、様々な指標から最も特徴的な評価軸を作成して、その特徴を表現する方法である。この結果を図 5.3.1-17 に示す。この結果から、立坑内で最も浅層地下水の流入が少ないと考えられる 300m アクセス坑道奥の 09MI21#3 を基準として、浅層地下水の流入の多い予備ステージのボーリングと、化石海水の混合が多い 500m のボーリングに向けて混合線を書くことができる。これらの線は化石海水の指標となる Cl 濃度と浅層地下水の指標となる  $\delta D$  をそれぞれ横軸縦軸とした場合とほぼ同じ形態になることから、Cl 濃度と  $\delta D$  とが、化石海水や浅層地下水の混合指標になりうると考えられる。

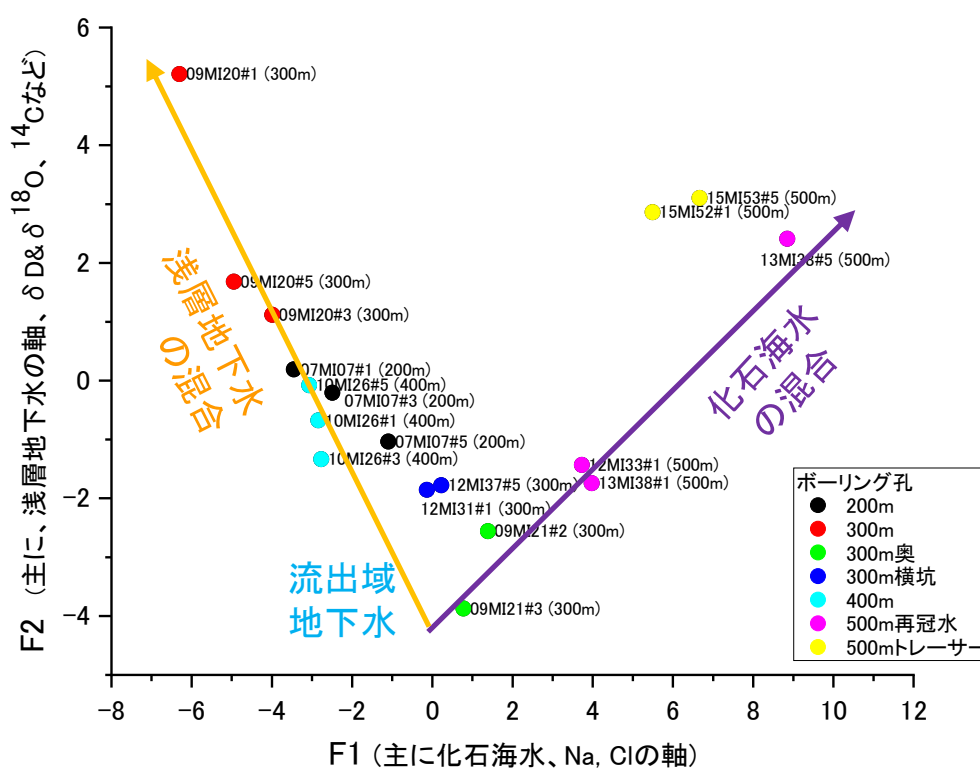


図 5.3.1-17 瑞浪立坑での主成分分析結果

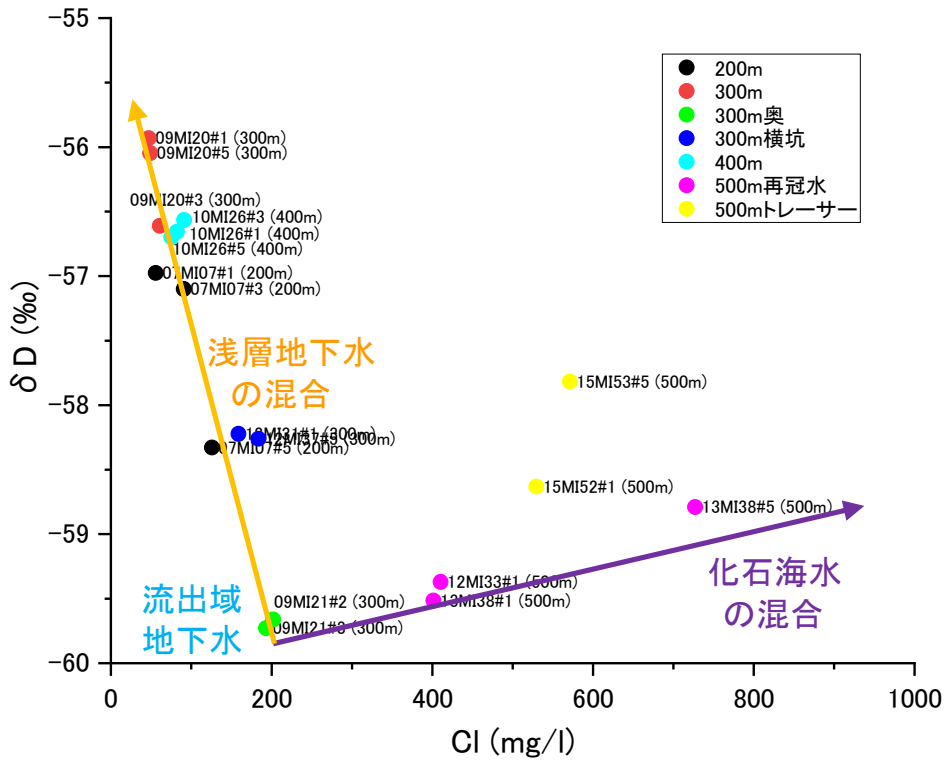


図 5.3.1-18 深部地下水と浅部地下水の指標による地下水分類

これらの結果から、地下水の混合の概念図は図 5.3.1-19 のように書くことができる。各地下水の特徴は以下のように表される。流出域地下水の特徴は、 $^3\text{H}$  を含まず、 $^{14}\text{C}$  濃度が低い、氷期に涵養した地下水のため  $\delta\text{D} \cdot \delta^{18}\text{O}$  が低い。中間域からの連続性を考えると Cl 濃度も低く数 mg/L 程度であり、Na- $\text{HCO}_3$  型と想定されるが、 $\text{HCO}_3$  濃度が低い。これに対して、浅層地下水の特徴は、 $^3\text{H}$  と  $^{14}\text{C}$  を多く含み、温暖期に涵養した地下水のため  $\delta\text{D} \cdot \delta^{18}\text{O}$  が高い。Cl 濃度は低く、Ca- $\text{HCO}_3$  型であり、 $\text{HCO}_3$  濃度が高い。浅層地下水の混合率は、 $^3\text{H}$  と  $^{14}\text{C}$  濃度や  $\delta\text{D} \cdot \delta^{18}\text{O}$  などから推定が可能であり、最も大きいと考えられる 300 m 予備ステージ周辺で 30%である。ただし、ボーリング横坑やアクセス坑道奥など横方向に向けては、混合率が急激に低下する。

最後に、化石海水は、 $^3\text{H}$  と  $^{14}\text{C}$  を含まず、Cl 濃度が高く、Na-Cl 型で、そのほかの成分、Na, K, Ca, Br, I, B, Cs, Sr, Li,  $^4\text{He}$ ,  $^3\text{He}$  濃度なども濃い。



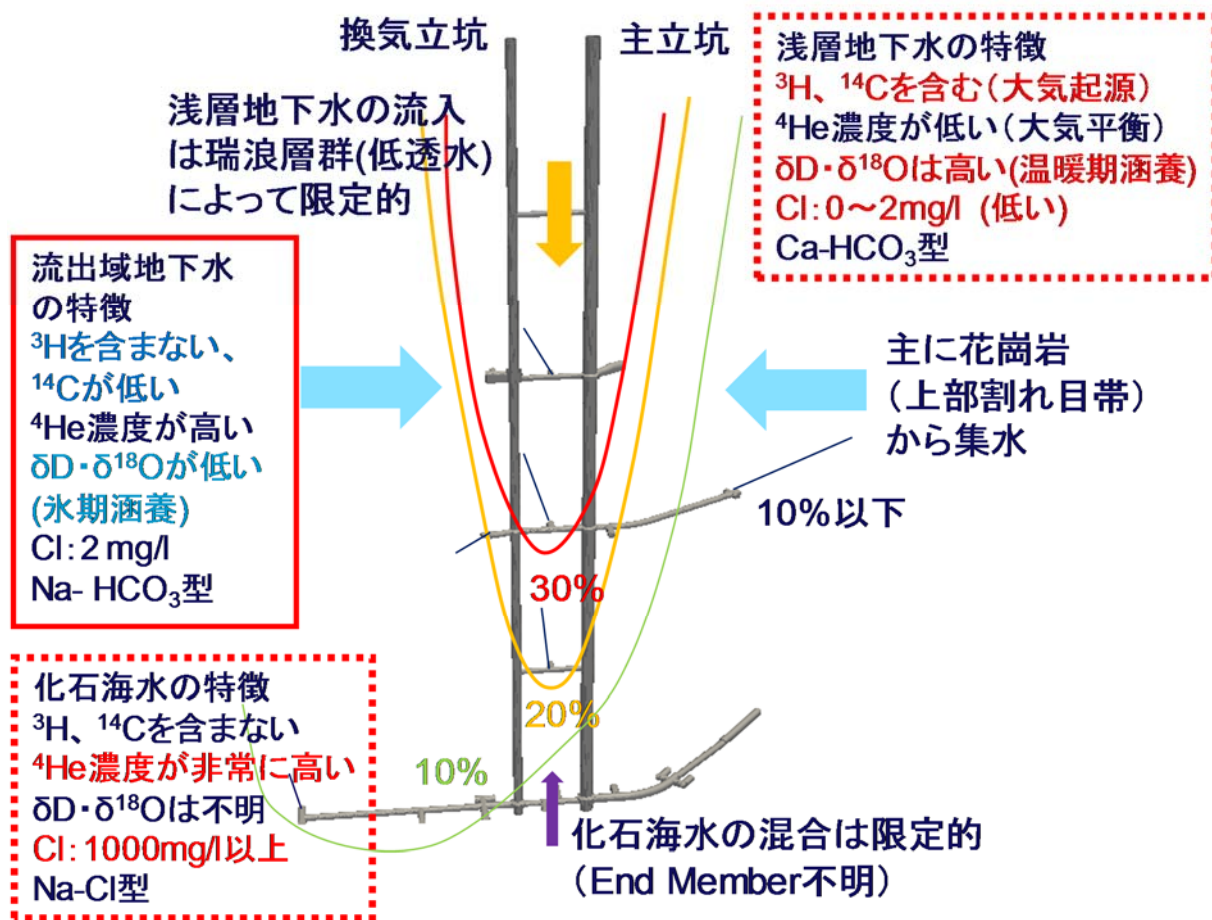


図 5.3.1-19 立坑周辺における地下水混合の概念図

(7) 流出域地下水の年代

瑞浪立坑で採取した地下水は、前述のように流出域地下水、浅層地下水、化石海水の混合で形成されるため、地下水年代を求める際には、地下水の混合を考慮して評価する必要がある。流出域の地下水年代を求めるためには、 $^{14}\text{C}$ のような浅部からの流入が有意なものについては、浅層地下水の混合を考慮して評価する必要がある。同様に、 $^4\text{He}$ のような深部からの流入が有意なものについては、化石海水の流入を考慮して評価する必要がある。

$^{14}\text{C}$ 年代を $^{14}\text{C}$ 量と $^3\text{H}$ との相関から求める。 $^{14}\text{C}$ 量と $^3\text{H}$ 濃度が最も相関が高く( $R=0.91$ )、以下の式で与えられる。

$$^{14}\text{C} \text{ 量(atm)} = 6.7 \times 10^9 + 2.2 \times 10^{11} \ ^3\text{H}$$

$^3\text{H}$ は河川水では $4.3 \pm 0.6\text{ TU}$ 、浅層地下水では $2.5 \pm 1.9\text{ TU}$ である(JNC, 2003)。この $^3\text{H}$ 濃度に基づくと、 $^3\text{H}$ を含まない $^{14}\text{C}$ 量は、 $6.7 \times 10^9$ と計算できる。一方で、初期値を浅部地下水で仮定すると、それぞれ、 $2.4\text{ TU}$ と $4.3\text{ TU}$ を式に代入するとそれぞれ、 $5.3 \times 10^9$ と $9.1 \times 10^9$ となり、 $^{14}\text{C}$ 年代は37,000年と41,000年と求められる。さらに、 $^{14}\text{C}$ 年代を $^{14}\text{C}$ 量と $\delta\text{D}$ から求める。 $^{14}\text{C}$ 量と $\delta\text{D}$ も相関が高く( $R=0.89$ )、

以下の式で与えられる。

$$^{14}\text{C 量(atm)}=4.7 \times 10^{10} + 2.8 \times 10^{12} \delta D$$

$\delta D$  は、浅部地下水では-52‰、深部地下水では-59‰とすると、 $^{14}\text{C}$  年代は 21,000 年となる。浅部地下水の  $\delta D$  を-59‰以下とすると、 $^{14}\text{C}$  量がマイナスとなり  $^{14}\text{C}$  年代が無限となってしまう。この意味では、深部地下水の  $^{14}\text{C}$  量は非常に微量で、 $^{14}\text{C}$  の半減期に比べて十分に古いと考えられる。

一方で、 $^4\text{He}$  年代では深部地下水の流入を考慮して年代を求める必要がある。この起源の異なる He の流入は、外部フラックスとも呼ばれている。立坑の地下水は場所によってフラックスの寄与が大きく異なるので、これを利用して年代を推定した。ここでは、 $^3\text{He}$  を横軸に、 $^4\text{He}$  を縦軸にとって整理した。このように整理すると、傾き部分がフラックスによる寄与分で、切片分が原位置生成による寄与分となる。これは、フラックスの寄与が支配的で、一定の  $^3\text{He}/^4\text{He}$  を持っている際に成立する。 $^4\text{He}$  の原位置生成は Hasegawa et al. (2016a) によれば  $2.5 \times 10^{-10} \text{ cc}_{\text{STP}}/\text{g}_w\text{y}$  のため、 $^4\text{He}$  年代は  $2800 \pm 5400$  年となり、これまでの結果よりも若くなっている。これは、今年度の  $^4\text{He}$  と  $^3\text{He}/^4\text{He}$  の計測精度が低く、誤差で原位置生成の寄与分がうまく分離できなかったためと考えられる。このように、非常に濃度の高いものが混合する場合、その影響を除去することは難しい。切片の推定誤差が推定値よりも十分に小さいレベルで評価できれば、過年度のように適切な年代が求められると考えられる。

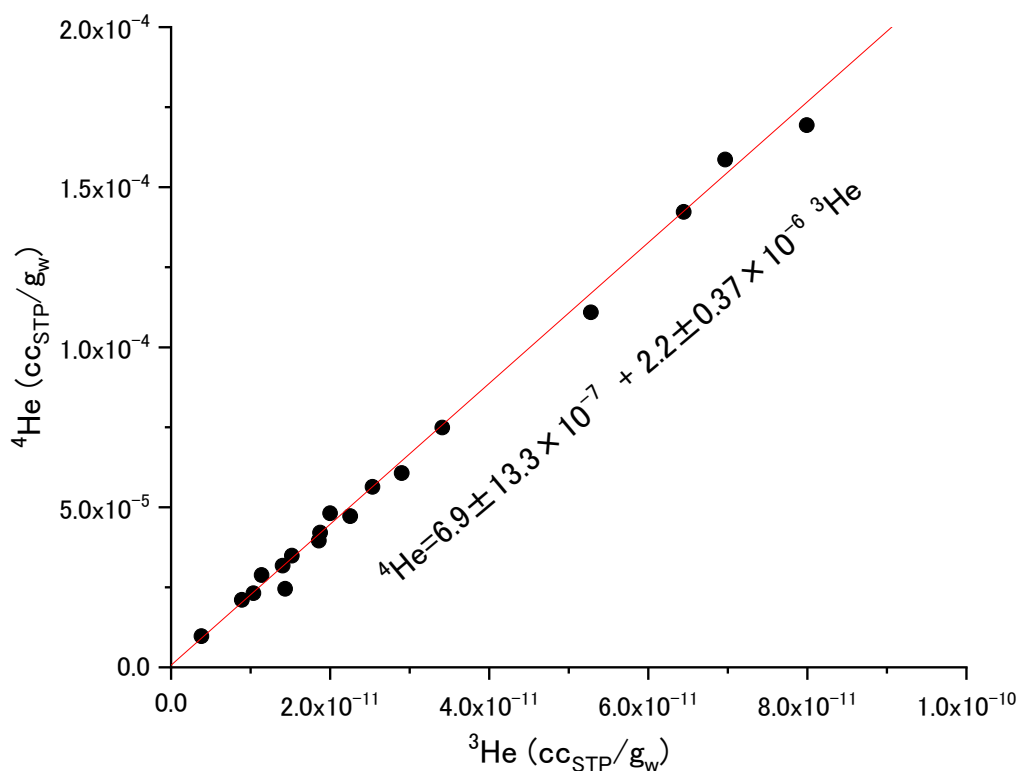


図 5.3.1-20  $^3\text{He}$  と  $^4\text{He}$  の関係

## 5.3.2 瑞浪における地下水流動・物質移行解析

### 5.3.2.1 掘削に伴う地下水流動・水質変化の概要

立坑掘削に伴い地下水の流入により、広い範囲で地下水流動・物質移行現象が発生すると考えられる。立坑掘削は、水理試験などよりも広範囲に大きな水理的な擾乱を与えるため、地下水流動解析モデルの検証や、物質移行パラメーターの評価に有効であると考えられる (Mahara et al. (2001)、長谷川ほか(2004))。ここでは、瑞浪超深地層研究所の建設を対象に、このような地下水流動・水質分布の変化に着目した地下水流動・物質移行解析を実施した。

瑞浪超深地層研究所は、2005年から建設が開始され、これまでに、主立坑、換気立坑、研究坑道などが深度500 mまで建設されている。湧水量は、図 5.3.2-1のように観測されており(佐藤ほか(2013)、上野ほか(2014))、概ね500~800 m<sup>3</sup>/日で変動している。湧水量の平均を600 m<sup>3</sup>/日とすると、これまでに約260万m<sup>3</sup>の湧水があったことになる。これは、花崗岩の間隙率を2%とすると、500 mの立方体分と等価な領域の地下水が湧出したことになる。

湧水量は、主立坑、換気立坑などに数十メートル間隔で設置されたWater Ring(以下、WR)で計測されている。WRによって湧水量が大きく異なり、特に、200m 予備ステージや300m 研究アクセス坑道からの流量が比較的大きいことがわかる。湧水量の深度方向分布の経時変化を、図 5.3.2-2 に示す。

施設への地下水の湧出に伴い、図 5.3.2-3 に示すように、周辺のボーリング孔でも有意に水圧低下が発生している(毛屋・竹内(2010a, 2010b)、狩野ほか(2011a, 2011b)、狩野・竹内(2012a, 2012b, 2013a, 2013b)、別府ほか(2013, 2014))。研究施設周辺の水圧低下は、難透水性断層で規制されており、主立坑断層の北東側と南西側で2種類の水圧応答に分類できる。

立坑への湧水量と、周辺のボーリング孔での水圧低下をまとめた地下水流動の概念図を図 5.3.2-4 に示す。特に湧水量が多い地点とボーリング孔での水圧低下を概念的に示した。特徴的なのは、湧水量が多い地点が瑞浪層群と花崗岩の境界付近に集中していることである。これは、地層境界付近が高透水であることを示していると考えられる。予備ステージやアクセス坑道で湧水量が大きいことから、鉛直の構造の割れ目などによって湧水が供給されていると考えられる。また、換気立坑の深度300mと深度400 mでも湧水量が多くなっている。

水圧低下は、主立坑と換気立坑に近いボーリング孔で大きい。立坑周辺では、地下水調査時の圧力モニタリング結果から100~150 m近い水位低下が発生している。また、研究所に近いMSB-2孔およびMSB-3孔では100 m程度、その他のボーリング孔でも50 m近い水圧低下が観測されている。ただし、MSB-1~4孔の浅部では、水圧低下が有意ではない。一方で、かなり離れたDH-15孔でも50 m程度の水圧低下が発生している。このため、研究所建設に伴い花崗岩内ではかなり広い範囲で水圧低下が発生しているが、低透水性の瑞浪層群より上位層では水圧低下が限定的と推定される。

立坑の建設に伴い、周辺の水質も変化している(齋ほか(2010, 2011)、新宮ほか(2011, 2012)、大森ほ

か(2013, 2014a, 2014b))。換気立坑に湧出する地下水の C1 濃度は、時間とともに増加し、その後低下する傾向が見られる。主立坑での C1 濃度は有意な変化は見られない。水野ほか(2013)は、研究坑道内から掘削した水質モニタリング孔での C1 濃度の変化を示している。これらの結果でも、C1 濃度は時間的に上昇してから低下する傾向が確認されている。研究施設建設前の調査で、C1 濃度は深度方向に濃度が高くなる傾向があることが確認されている(三枝ほか、2007)。このため、この C1 濃度の変化は、建設によって深部から C1 濃度の高い地下水が流入し、その後浅部から C1 濃度の低い地下水が流入したと考えられている(水野ほか、2013)。

水素・酸素同位体比の深度分布の経時変化を、それぞれ図 5.3.2-5 に示す。立坑周辺の地下水の水素・酸素同位体比は、現在の降水よりも有意に低い。これは、研究所が流出域に位置し、地下水年代も数万年以上前と考えられるため、氷期に涵養した降水が残留していると考えられている(Iwatsuki et al., 2005)。ただし、立坑の掘削に伴い、水素・酸素同位体比が重い現在の降水が流入してくるため、浅部から徐々に水素・酸素同位体比は現在の降水の値に近くなっている。水素・酸素同位体比は、浅部では-50‰・-7.7‰、深部では-61‰・-9‰程度が代表値ではないかと推測される。深部でも新しい地下水の流入によって徐々に重くなっている傾向が見られる。特に、湧水量の多い 200m 予備ステージと 300m 研究アクセス坑道に挟まれた主立坑の深度 200~300m 付近で変化が大きくなっており、地表水の流入の可能性が考えられる。

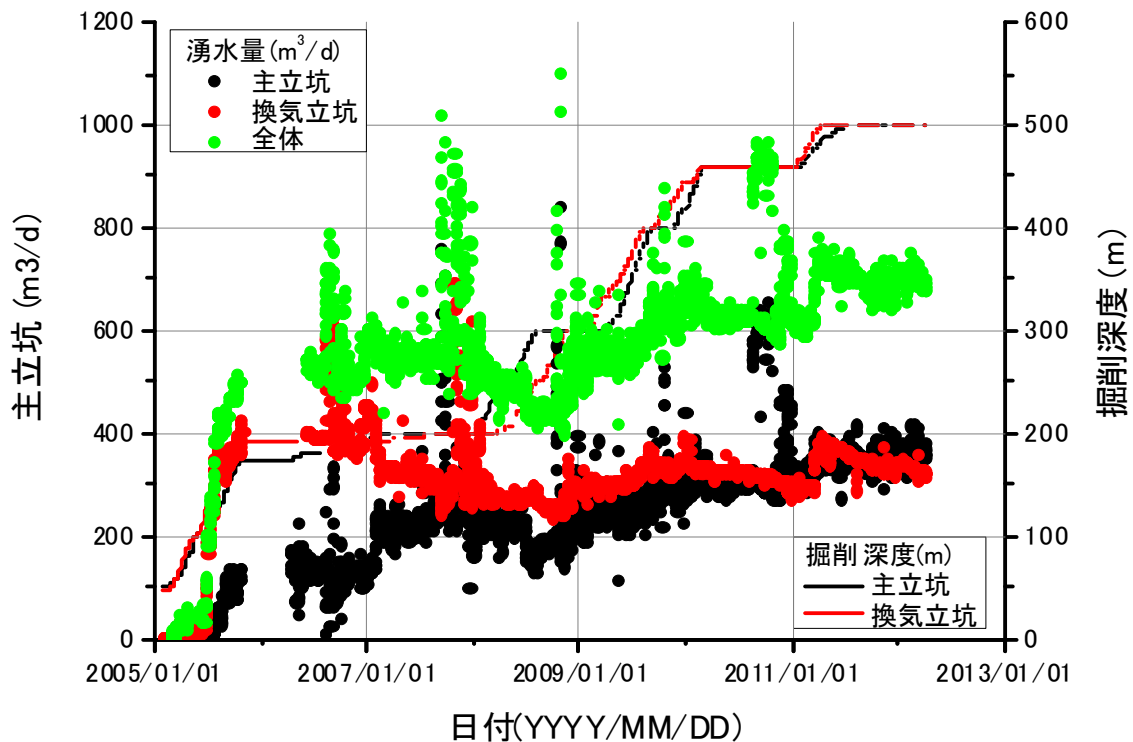


図 5.3.2-1 立坑への湧水量の経時変化

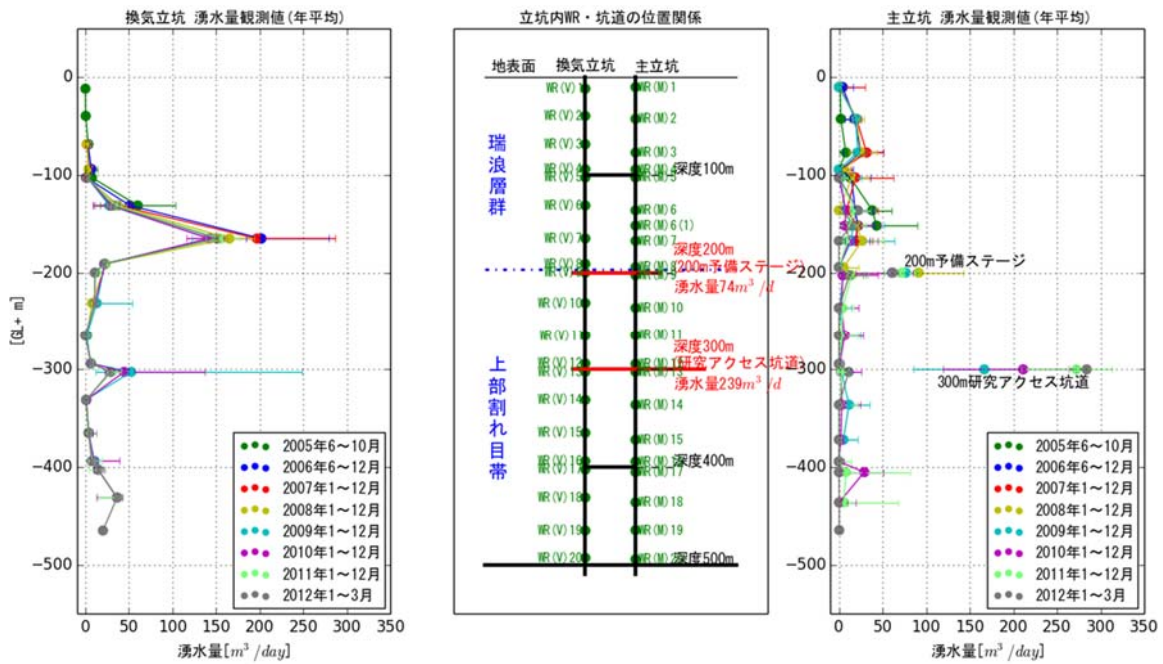


図 5.3.2-2 主立坑・換気立坑、坑道などへの湧水量の深度方向分布

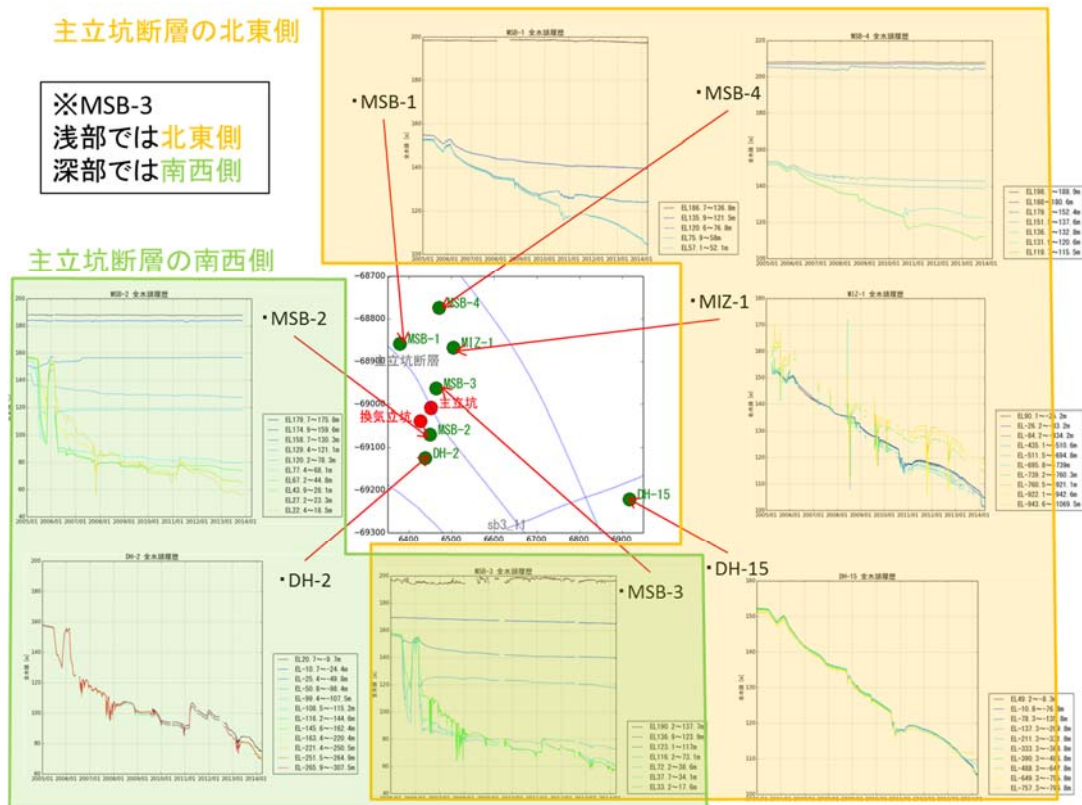


図 5.3.2-3 難透水断層を考慮したボーリング孔水圧挙動の分類

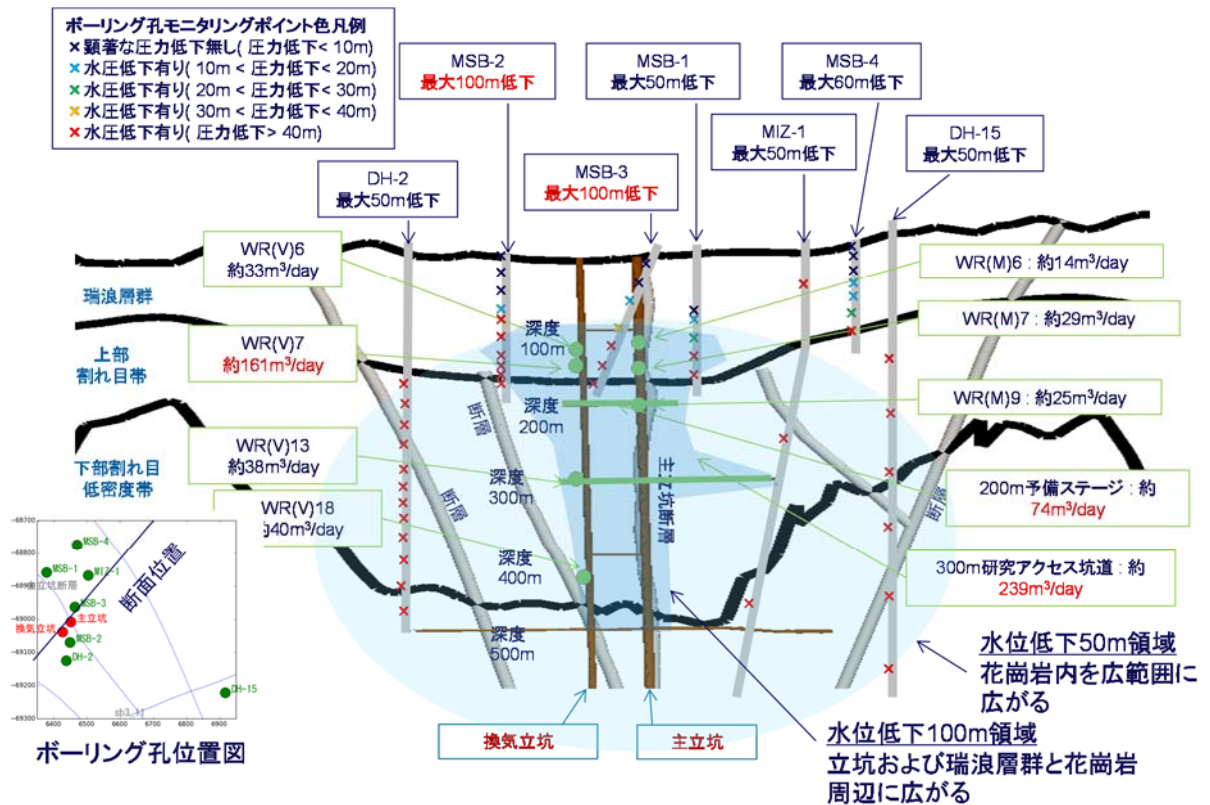
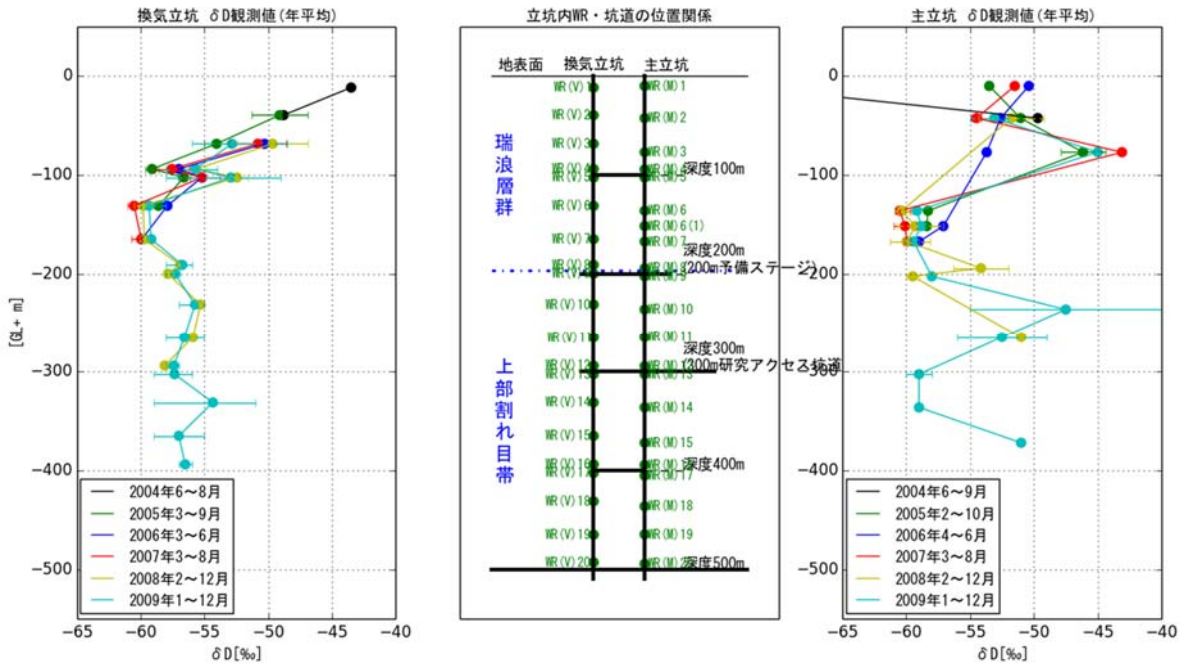


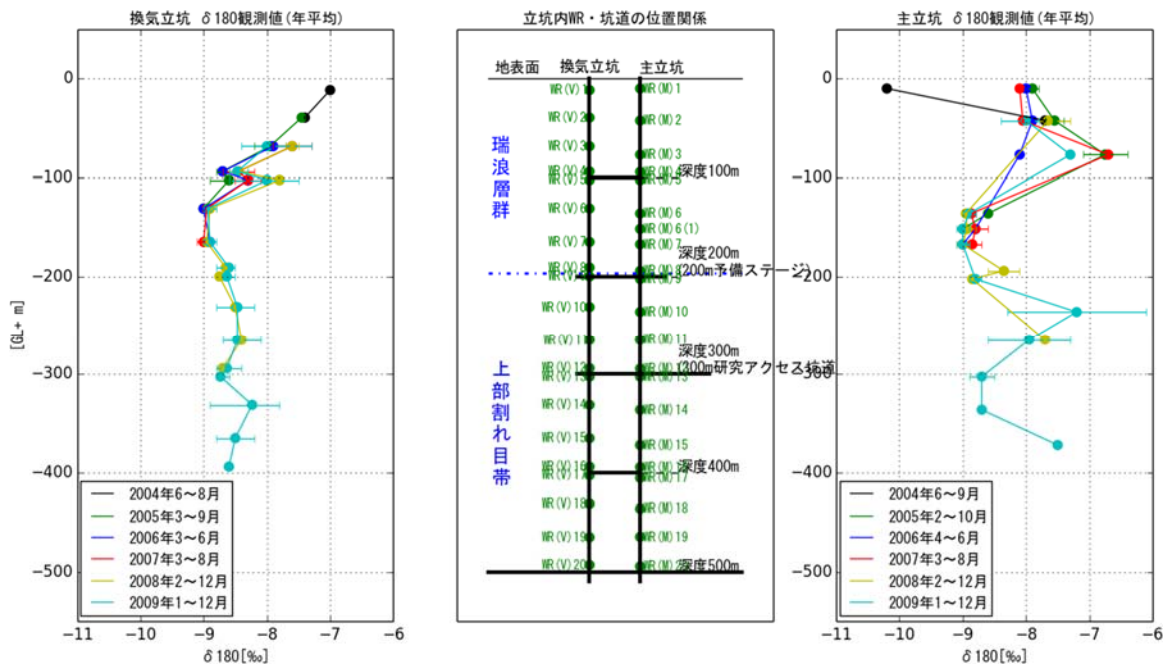
図 5.3.2-4 立坑周辺での地下水湧出と水圧低下の概念図

新しい地下水の流入の影響を見るためにトリチウムの深度方向分布の経時変化を、図 5.3.2-6 に示す。トリチウムの半減期は 12.3 年と短く、地表水には 2~5 TU 程度含まれる。このため、新しい地下水には含まれるが、古い地下水には含まれず、地表水の流入の指標になる。トリチウムは、明確な深度依存性が確認でき、地表付近で値が高く、深くなるほど値が小さくなる傾向がある。特に、湧水量の多い 200m 予備ステージと 300m 研究アクセス坑道付近で、1 TU 程度の値が観測されている。これは、水素・酸素同位体比と同様の傾向であり、地表面由来の水が深部にも流れ込んでいることを示している。

新しい水と古い水の流入の概念図は、図 5.3.1-19 に示したとおりであり、立坑を中心に深度 400m まで新しい水が数十%程度流入している。一方で、300m ボーリング横坑や 300m アクセス坑道奥のボーリング孔では水素・酸素同位体比が低い、<sup>3</sup>H が検出されないなど、横方向には新しい水の流入が限定的であると考えられる。



(1) 水素同位体比 ( $\delta D$ )



(2) 酸素同位体比 ( $\delta^{18}O$ )

図 5.3.2-5 立坑湧水の  $\delta D$  濃度深度方向分布の経時変化

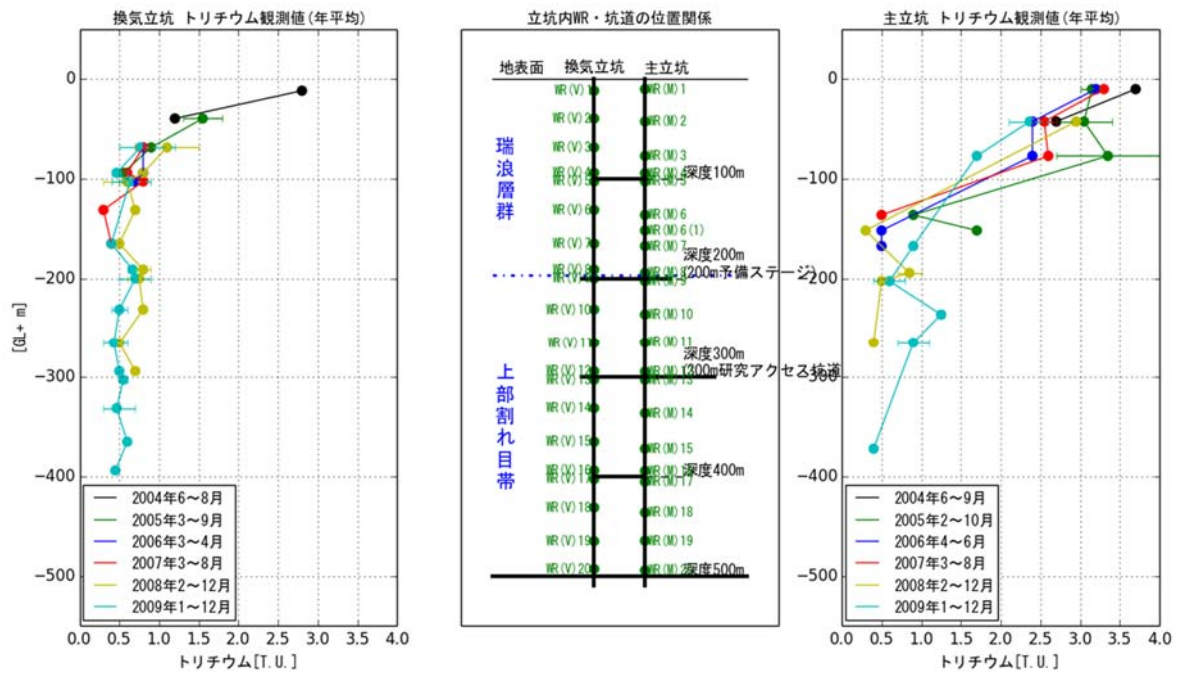


図 5.3.2-6 立坑湧水の  $^3\text{H}$  濃度深度方向分布の経時変化

### 5.3.2.2 解析モデル

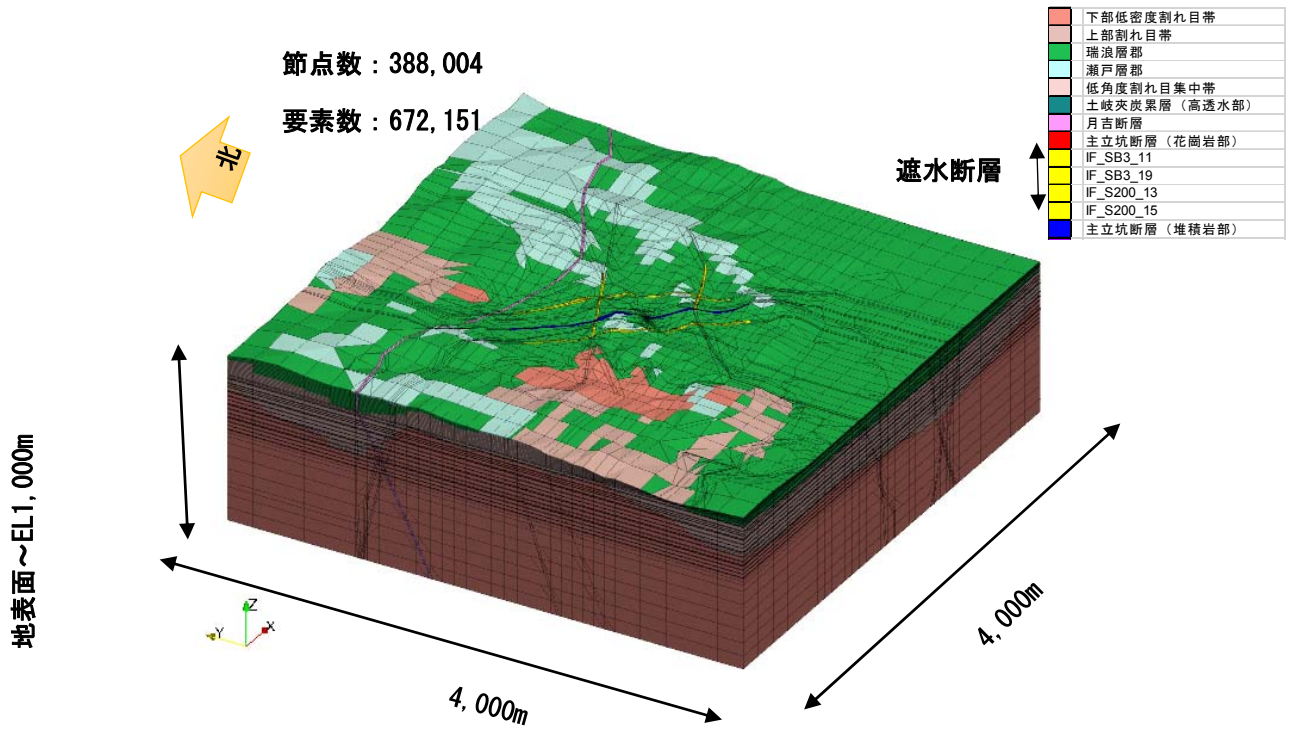
前述のように瑞浪超深地層研究所の建設により、地下水流動が変化していると考えられる。この地下水流動が、水圧、水質・地下水年代分布にどのような影響を与えるかを検討するために、地下水流動・物質移行解析を実施する。

解析モデルは、図 5.3.2-7 に示すように地形・地質などを考慮したモデルに基づいて作成した(尾上ほか、2015)。解析モデルは白亜紀後期の花崗岩を比較的割れ目密度が低い領域を下部低密度割れ目帯、その上部を上部割れ目帯として大きく区分した。花崗岩部の上部に瑞浪層群が覆っており、瑞浪層群内には数種類の地層が存在しているが、一つの地層として扱った。昨年度は上部割れ目帯内の低角度割れ目集中帯と瑞浪層群内の土岐炭層を再現したが、影響が軽微であったため除外した。瑞浪層群の上部には固結度の低い瀬戸層群が場所により分布しているため区分した。

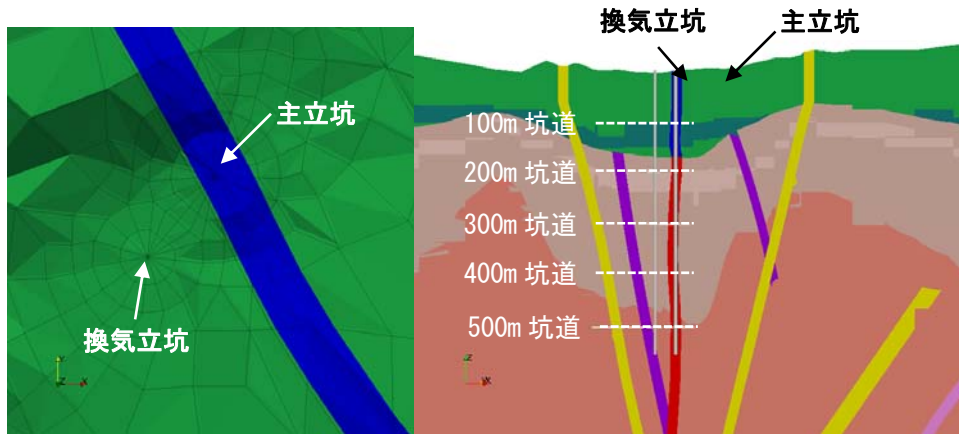
断層については、主立坑断層は堆積岩内と花崗岩内に存在する箇所それぞれ区分した。また存在が確認されている月吉断層についても対象とし、研究所用地を包括するように存在されていると推定されているコンパートメントを構成する IF\_S200\_13、IF\_S200\_15、IF\_SB3\_11、IF\_SB3\_19 を対象とした。また、コンパートメント内に分布し、IF\_S200\_13、IF\_S200\_15 の二断層と雁行しており高透水性断層と推定されている IF\_S200\_13\_2、IF\_S200\_15\_2 については昨年度の解析結果で影響が軽微であったため除外した。主立坑断層は図 5.3.2-7(2)に示すようにモデル化した。推定されている断層の分布を図 5.3.2-8 に示す。また、研究坑道については図 5.3.2-7(3)に示すように主立坑、換気立坑、100、



200、300、400、500m のアクセス坑道を線要素で坑道形状を再現した。以上の条件で作成した FEM 解析メッシュモデルは節点数が 388,004、要素数が 672,151 となった。



(1) 解析メッシュの全体図



(2) 研究所周辺のメッシュ分割

(3) 研究所周辺でのメッシュ断面図

図 5.3.2-7 解析に用いた FEM 解析メッシュ

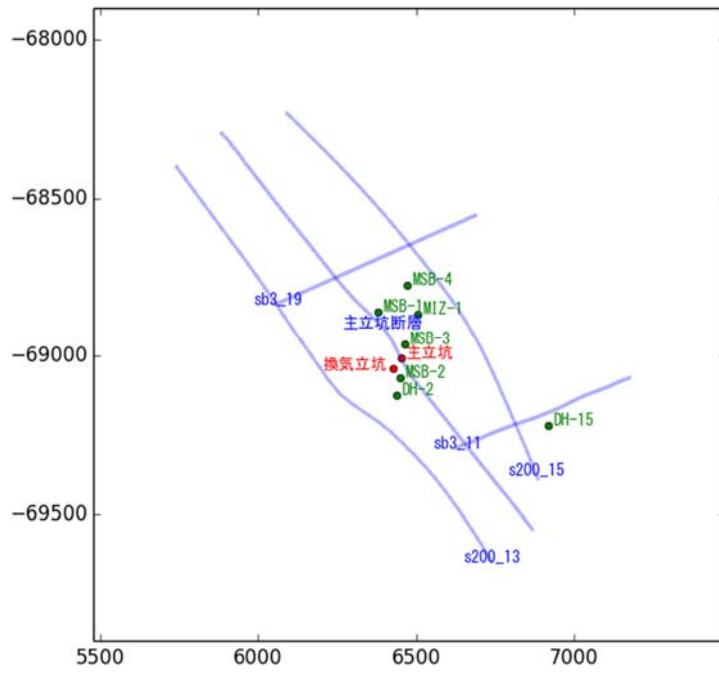


図 5.3.2-8 モデル化したコンパートメントを構成する断層の分布

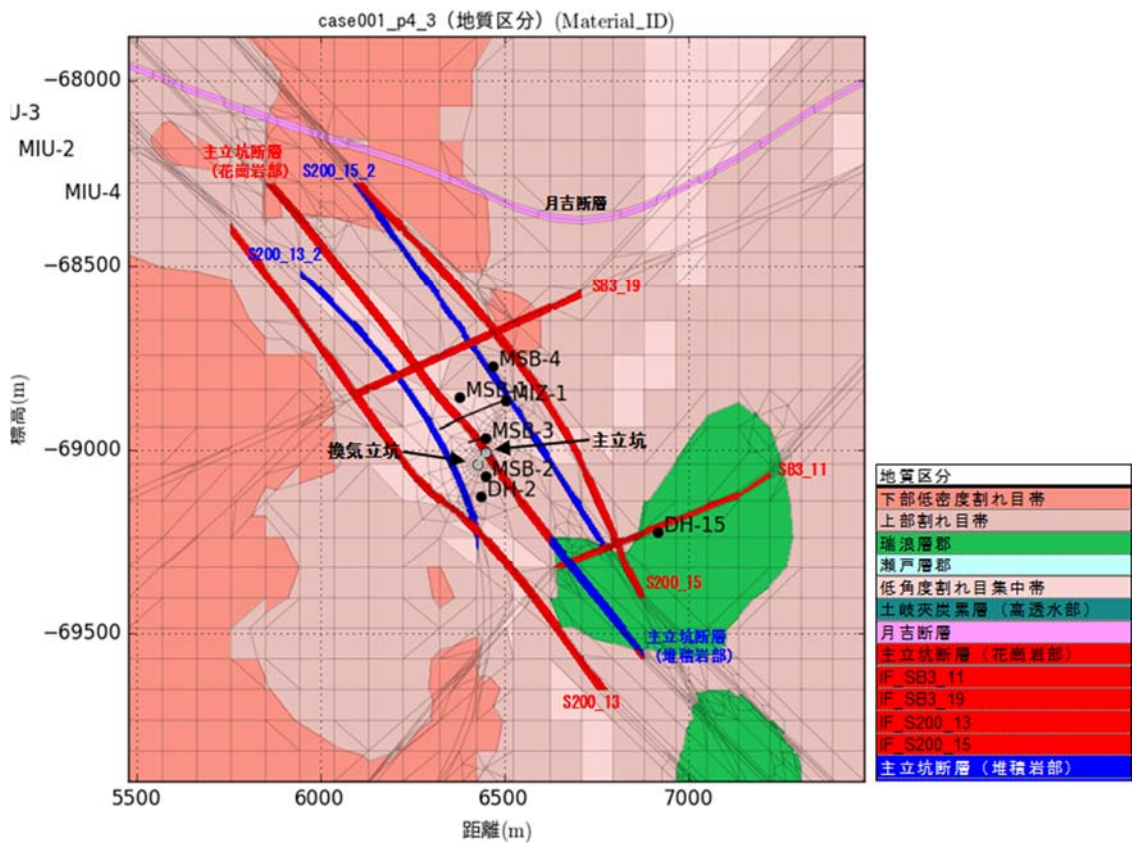


図 5.3.2-9 立坑周辺の地質区分図

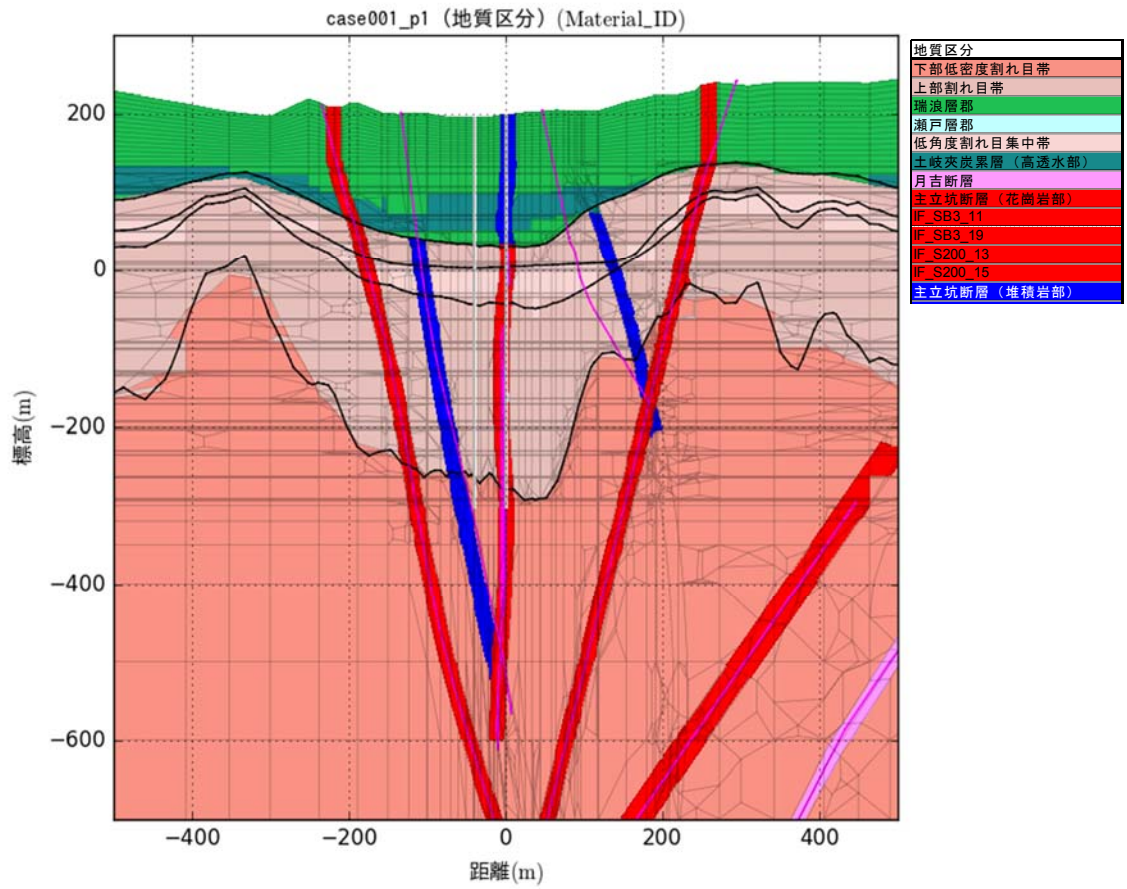


図 5.3.2-10 物性割り当ての変更点 (2016 年度)

### 5.3.2.3 解析条件

#### (1) 境界条件の設定

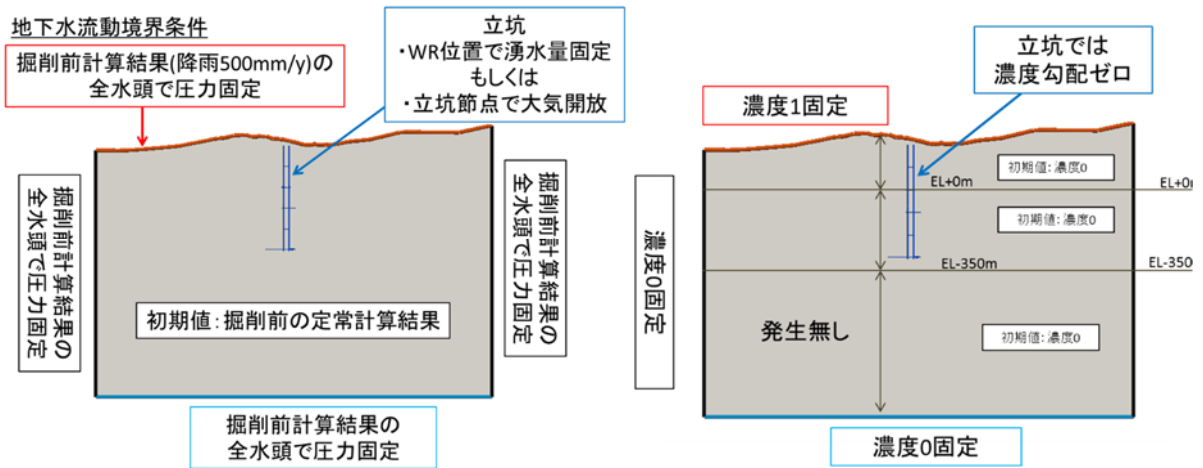
地下水流動・物質移行解析の境界条件は図 5.3.2-11 のように設定した。

地下水流動解析の境界条件は、ローカスケールモデルにおける既往の数値解析結果との整合性を考え 20 mm/年の涵養量として設定し、その他の境界条件を不透水境界条件として調査坑道掘削前の地下水流動を実施した。その解析結果を側面・底面に圧力既知境界条件として設定した。掘削後の状態を再現するため、掘削が終了している立坑位置の節点について、WR・200 m 予備ステージ・300 m 研究アクセス坑道・500 m 研究アクセス坑道で観測されている湧水量を設定したケースを実施した。なお、定常解析では、湧水量は時系列データの平均値を設定した。非定常解析では、WR などで計測されている値を既知流量節点条件として与えた。

物質移行解析の境界条件は、浅層水の流入状況と  $\delta^{18}\text{O}$  濃度の比較のためモデル地表面をトレーサー濃度 1 で固定した。立坑では濃度勾配 0 の自由流出境界を設定した。

#### (2) 物性値の設定

解析に用いた物性値には、既存の報告(尾上ほか, 2015)を参考に、表 5.3.2-1 と表 5.3.2-2 に示すように設定した。なお、物質移行解析に使用する分散長は、すべて一律に縦分散 100 m, 横分散 10 m, 分子拡散係数は影響が小さいとして無視した。



(1) 地下水流動解析の境界条件

(2) トレーサー濃度の境界条件

図 5.3.2-11 解析の境界条件図

表 5.3.2-1 地質要素の水利特性（尾上ほか，2015）

地質区分	透水係数 (m/s)			間隙率	比貯留 係数 (1/m)
	水平 方向	鉛直 方向	透水 異方性		
	logK	logK		logSs	
瀬戸層群	-6.0	-6.0	無	0.20	-4.1
瑞浪層群	-6.8	-8.8	有	0.20	-4.6
おいた <sup>わ</sup> ら 生俵 累層	-8.5	-10.5	有	0.20	-4.1
あけよ 明世累層／本郷累層（本体）	-7.6	-9.6	有	0.20	-4.1
あけよ 明世累層／本郷累層（泥岩）	-11.0	-11.0	無	0.20	-4.1
あけよ 明世累層／本郷累層（基底礫）	-6.3	-6.3	無	0.20	-5.1
土岐夾炭累層（本体）	-6.6	-8.6	有	0.20	-4.6
土岐夾炭累層（高透水層）	-6.0	-6.0	無	0.20	-4.6
土岐夾炭累層（基底礫）	-5.3	-5.3	無	0.20	-5.1
立坑断層周辺の母岩の変質を伴う割れ目帯（低透水性領域）					
土岐夾炭累層（高透水層）	-7.0	-7.0	無	0.20	-4.6
土岐夾炭累層（基底礫）	-5.9	-5.9	無	0.20	-5.1
上部割れ目帯	-7.5	-6.3	有	0.01	-5.7
上部割れ目帯中の低角度割れ目 集中帯	-6.0	-6.0	無	0.01	-6.4
下部割れ目低密度帯	-7.7	-7.0	有	0.01	-6.0
主立坑断層周辺の母岩の変質を 伴う割れ目帯					
主立坑断層周辺の母岩の変質を伴う割れ目帯（低透水性領域）					
上部割れ目帯	-9.0	-9.0	無	0.01	-5.7
上部割れ目帯中の低角度割 れ目集中帯	-7.0	-7.0	無	0.01	-6.4
下部割れ目低密度帯	-9.0	-9.0	無	0.01	-6.0

■：本解析で再現した地質区分

表 5.3.2-2 不連続構造の透水特性 (尾上ほか, 2015)

不連続構造	走向方向	代表的な 厚さ (m)	透水係数 (m/s)			間隙率	比貯留 係数 (1/m)	モデル化した 断層の幅 (m)	堆積岩部の 分布
			断層面 方向	断層面 直交方向	透水 異方性				
			logK	logK			logSs		
月吉断層									
月吉断層主要部	-	1	-11.0	-11.0	無	0.01	-6.5	1	有
月吉断層に伴う割れ目帯	-	134	-6.4	-6.4	無	0.01	-6.5	134	有
その他の断層 (トレース長: 3km 以上)									
Hiyoshi_NE	NE	10	-5.2	-11.0	有	0.01	-6.5	10	有
TokiR_NE	NE	10	-5.2	-5.2	無	0.01	-6.5	10	有
Shiz_NNW	NNW	10	-5.2	-11.0	有	0.01	-6.5	10	有
Gara_NW	NW	10	-5.2	-11.0	有	0.01	-6.5	10	有
Shab_NW	NW	10	-5.2	-11.0	有	0.01	-6.5	10	有
主立坑断層 (SH500_M_SHAFT)									
主要部 (堆積岩部)	NW	1	-7.3	-7.3	無	0.01	-6.5	1	-
主要部 (花崗岩部)	NW	-	-10.5	-10.5	無	0.01	-6.5	1	-
IF_S200_13	NW	32	-9.5	-11.0	有	0.01	-6.5	1	有
IF_S200_13_2	NW	9	-5.9	-5.9	無	0.01	-6.5	1	無
IF_S200_15	NW	10	-8.4	-11.0	有	0.01	-6.5	1	有
IF_S200_15_2	NW	17	-5.2	-5.2	無	0.01	-6.5	1	無
IF_SH180_07	EW	5	-5.1	-5.1	無	0.01	-6.5	1	無
IF_SH180_08	NE	12	-6.3	-6.3	無	0.01	-6.5	1	無
IF_SH180_09	EW	12	-6.0	-6.0	無	0.01	-6.5	1	無
IF_SB3_11	NE	12	-4.3	-11.0	有	0.01	-6.5	1	有
IF_SB3_17	NNW	10	-5.8	-5.8	無	0.01	-6.5	1	有
IF_SB3_19	NE	10	-5.2	-11.0	有	0.01	-6.5	1	有

■ : 本解析で再現した不連続構造

### 5.3.2.4 定常の地下水流動解析・物質移行解析の解析結果

調査坑道掘削によって生じる地下水流動・物質移行は非定常現象であるが、非定常での解析は計算負荷が大きいため、パラメーターの感度などを定常解析で確認した。昨年までは主立坑断層の透水性やコンパートメントを構成する断層群の透水性に着目した解析を実施してきたが、今年度はローカルスケールモデルとの整合性に着目した解析を実施した。なお、地下水流動解析・物質移行解析はFEGM/FERMの改良版であるFEGM-B2を用いた。

表 5.3.2-3 解析の基準とした水理パラメーター

地質区分	透水係数(m/s)			間隙率 (-)	比貯留係数 (1/m)	分散長(m)		分子拡散係数 (m <sup>2</sup> /s)
	Kx	Ky	Kz			縦	横	
瀬戸層郡	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-05	20.00	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
瑞浪層郡	1.00E-07	1.00E-07	1.00E-09	20.00	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
上部割れ目帯	2.00E-08	2.00E-08	2.00E-08	2.00	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
下部低密度割れ目帯	2.00E-08	2.00E-08	2.00E-08	2.00	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
月吉断層	2.00E-10	2.00E-10	2.00E-10	2.00	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
主立坑断層(堆積岩部)	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	2.00	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
主立坑断層(花崗岩部)	1.00E-10	1.00E-10	1.00E-10	2.00	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
コンパートメントを構成する断層群	1.00E-11	1.00E-11	1.00E-11	2.00	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00

#### (1) コンパートメントを構成する断層群の透水性の感度解析

ここでは、サイトモデルとローカルスケールモデルとの整合性を確認するため、ローカルスケールモデルでは設定していない断層群の感度解析を実施した。サイトモデルではコンパートメントを構成する断層群によりコンパートメントを隔離している可能性がある。このため、コンパートメントを構成する断層の透水係数を花崗岩と同等にした定常解析を実施した。

解析結果として、主立坑、換気立坑を通る鉛直断面での調査坑道掘削前と掘削後の全水頭および両者の差をとった水位低下分布を図 5.3.2-12 に示す。トレーサー濃度も圧力と同様に、断面図の濃度分布図を図 5.3.2-13 に示す。

圧力で見ると、調査坑道掘削前の解析結果はどの図でもコンパートメントを構成する断層の周辺で若干存在するが有意な差では無い、調査坑道掘削後ではコンパートメントを構成する断層の透水性の取り扱い方で透水性の分布の様相が大きく変わっていることがわかる。トレーサー濃度では断面図で見ると調査坑道掘削前の解析結果はコンパートメントを構成する断層の透水性が低い場合では主立坑断層より月吉断層方向(北方向)の地表面からの流入の影響が大きいことがわかる。コンパートメントを構成する断層の透水性が高い場合では主立坑断層より土岐川方向(南方向)の地表面から流入の影響が大きい結果となった。調査坑道掘削後の解析結果では、コンパートメントを構成する断層の透水性の設定がどちらとも調査坑道掘削前と比べて調査坑道近傍では深部水の流入が強く表現される結

果となった。コンパートメントを構成する断層の透水性が高い設定の場合は、特に深部から流入していることがわかる。対象の地点ではローカルスケールでの数値解析ではコンパートメントを構成するような断層の影響は軽微であるが、調査坑道掘削を再現する数値解析ではコンパートメントを構成するような断層を再現が非常に重要であることが示された。

表 5.3.2-4 コンパートメントを構成する断層を花崗岩部と同等に設定した場合の水利パラメーター

地質区分	透水係数 (m /s)			間隙率 (-)	比貯留係数 (1/m)	分散長 (m)		分子拡散係数 (m <sup>2</sup> /s)
	Kx	Ky	Kz			縦	横	
瀬戸層郡	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-05	20.00	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
瑞浪層郡	1.00E-07	1.00E-07	1.00E-09	20.00	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
上部割れ目帯	2.00E-08	2.00E-08	2.00E-08	2.00	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
下部低密度割れ目帯	2.00E-08	2.00E-08	2.00E-08	2.00	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
月吉断層	2.00E-10	2.00E-10	2.00E-10	2.00	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
主立坑断層 (堆積岩部)	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	2.00	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
主立坑断層 (花崗岩部)	1.00E-10	1.00E-10	1.00E-10	2.00	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
コンパートメントを構成する断層群	2.00E-08	2.00E-08	2.00E-08	2.00	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00

※ ■の箇所が設定変更項目



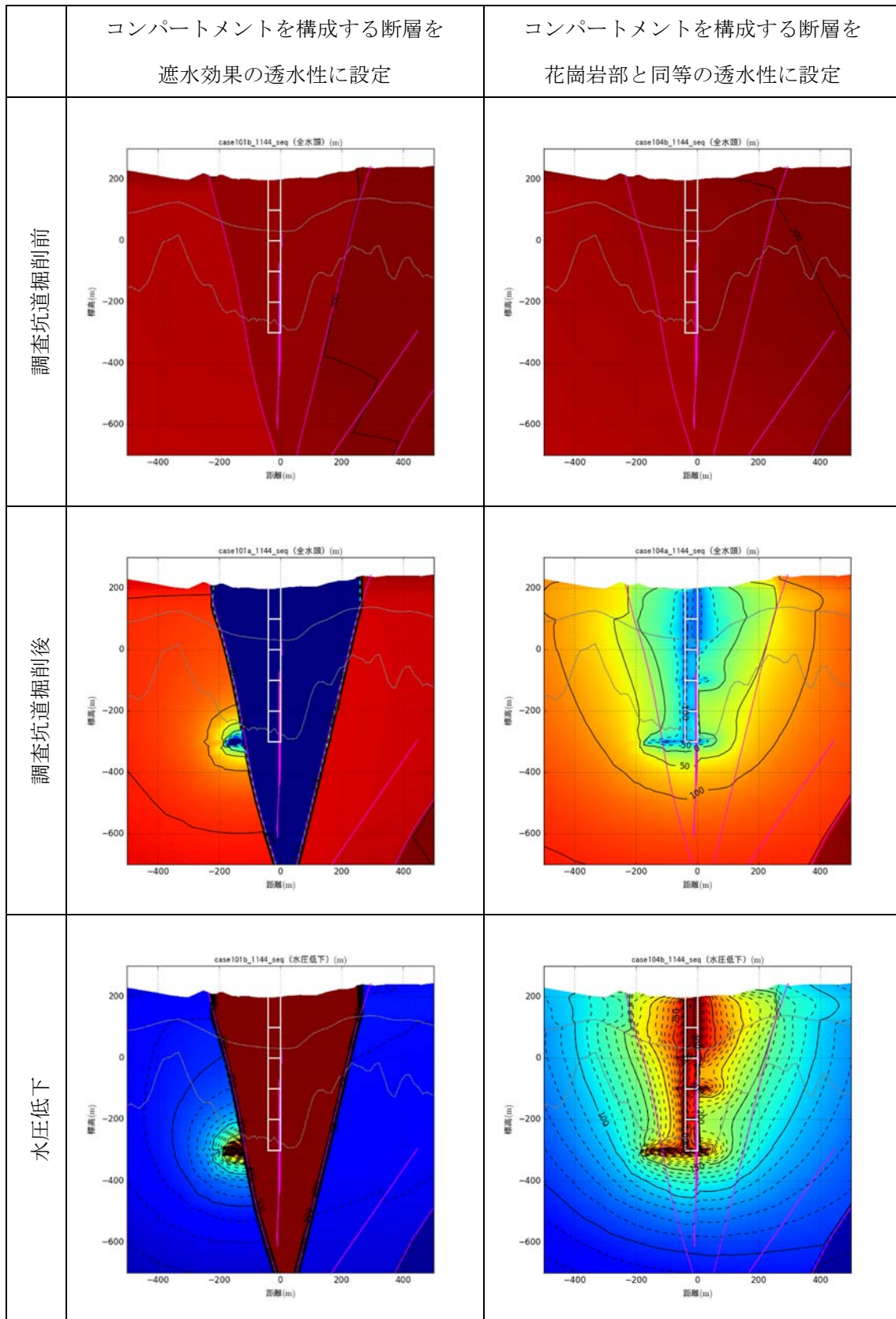


図 5.3.2-12 定常解析での全水頭分布図 (コンパートメントを構成する断層の違い)

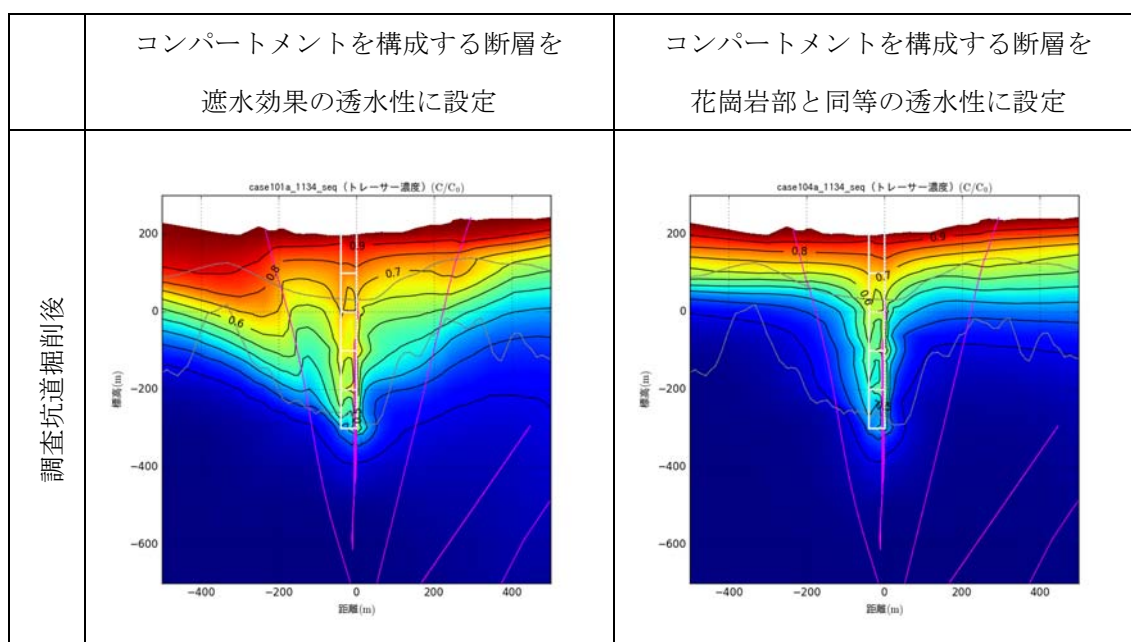


図 5.3.2-13 定常解析でのトレーサー濃度分布図（コンパートメントを構成する断層の違い）

## (2) 涵養量の感度解析

今年度は既存のローカルスケールにおける数値解析の調査との整合性を考慮したため、ローカルスケールで設定されている涵養量 20 mm/年に設定した。水理パラメーターは

表 5.3.2-3 と同じである。掘削時における観測されている調査坑道内での湧水量を考えると、涵養量 20 mm/年では不足していることが懸念されるため、設定の涵養量の 10 倍の 200 mm/年に設定したケースと、対象地点での年間降水量以上として 100 倍の 2,000 mm/年のケースで感度解析を実施した。解析結果として主立坑、換気立坑を通る鉛直断面での調査坑道掘削前と掘削後の全水頭および両者の差をとった水位低下分布を図 5.3.2-14 に、主立坑、換気立坑を通る鉛直断面での調査坑道掘削前と掘削後のトレーサー濃度の分布を図 5.3.2-15 に示す。

圧力に着目すると、調査坑道掘削前の解析結果はどの図でも有意な違いはない結果となった。上部に透水性の低い瑞浪層群が広く厚く分布しているため、どの設定涵養量でも透水係数以上には浸透できないためである。圧力の鉛直プロファイルを見ても堆積岩部に存在している主立坑断層の透水性が高いため、その周辺のみ圧力の違いが出ているが、他に有意な差はない。調査坑道掘削後の解析では、調査坑道周辺の圧力低下は涵養量が大きいほど緩やかになっており、観測値に近い結果となっている。一方、トレーサー濃度に着目すると、調査坑道掘削前の解析結果は断面図から涵養量の設定値で大きく様相が変わっていることがわかる。涵養量の設定に解析領域内での流れ方が大きく変わっていることが推察される。調査坑道掘削後の解析結果は涵養量が大きくなるほど調査坑道周辺は地表面からの

流入の影響が大きくなりトレーサー濃度が高い部分が多くなっている。調査坑道掘削後では 300 m 坑道から伸びている調査ボーリング孔付近での観測されたトリチウム濃度から数十%程度の新しい地下水の流入率と考えると、涵養量は 20 mm/年程度が最も近い結果となる。

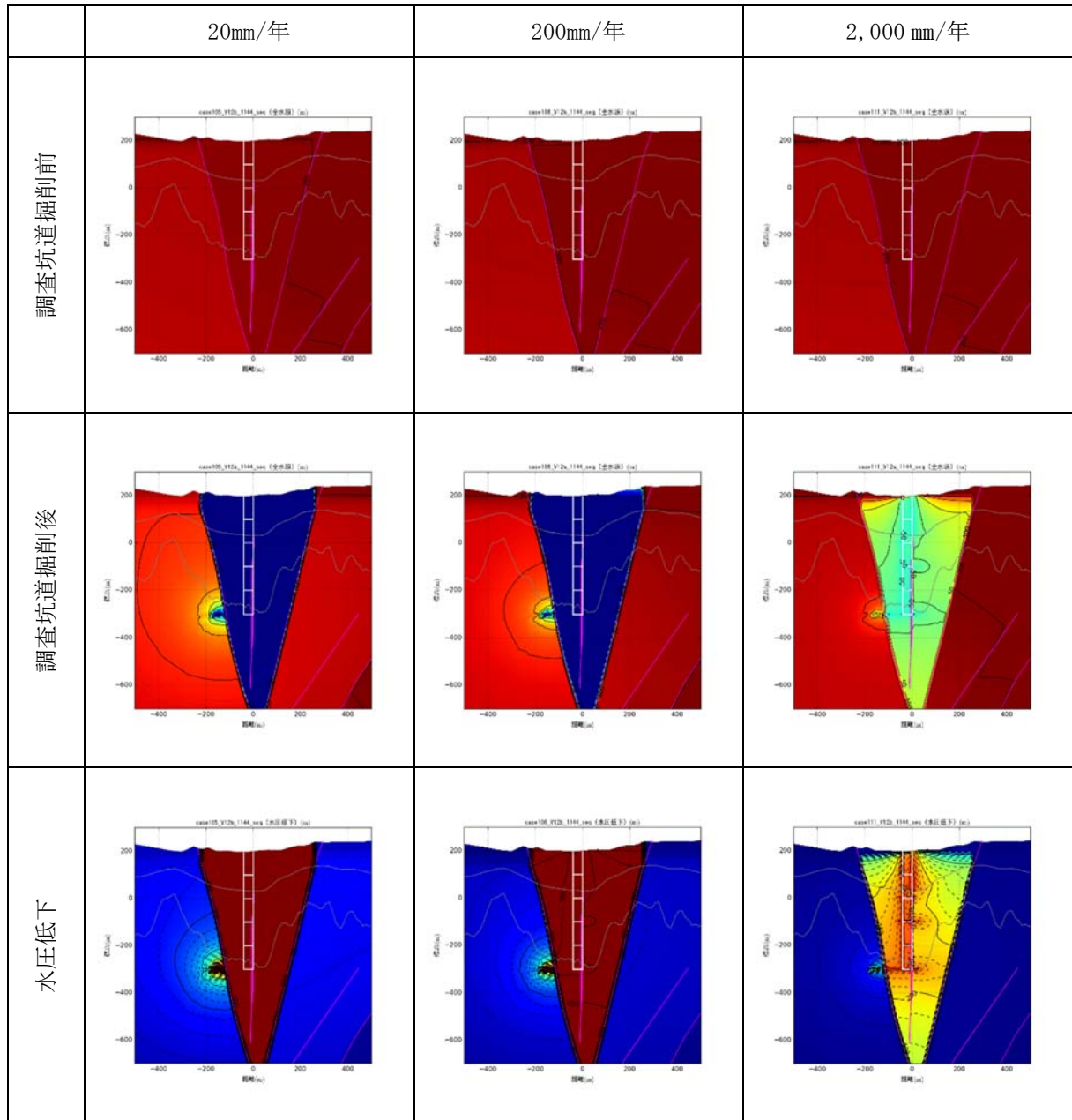


図 5.3.2-14 定常解析での全水頭分布図（涵養量の感度解析）

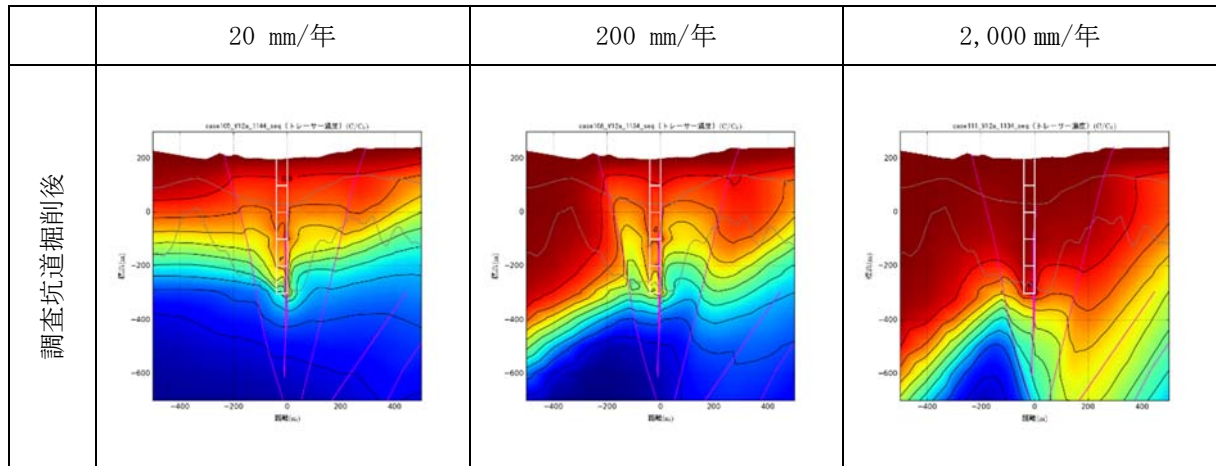


図 5.3.2-15 定常解析でのトレーサー濃度分布図（涵養量の感度解析）

### (3) 瑞浪層群透水性の感度解析

涵養量 20 mm/年に設定したケースを用いて瑞浪層群の透水性を 0.1 倍と 10.0 倍に設定して感度解析を実施した。解析に用いた水理パラメーターを表 5.3.2-5 に示す。解析結果として主立坑、換気立坑を通る鉛直断面での調査坑道掘削前と掘削後の全水頭および両者の差をとった水位低下分布を図 5.3.2-16 に、主立坑、換気立坑を通る鉛直断面での調査坑道掘削前と掘削後のトレーサー濃度の分布を図 5.3.2-17 に示す。

圧力に着目すると、調査坑道掘削前の解析結果は鉛直断面図から土岐川方向（南側）で瑞浪層群の透水性を 10 倍にした場合に地表面付近の地下面が下がっていることが伺えるものの、それ以外の有意な差は無い。圧力の鉛直プロファイルを見ても、瑞浪層群を 10 倍に設定したケースのみ他のケースと比べて堆積岩部で圧力が低い結果となった。調査坑道掘削後の解析では、調査坑道周辺の圧力低下は瑞浪層群の透水性が大きいほど緩やかになっており、観測値に近い結果となっている。一方、トレーサー濃度に着目すると、調査坑道掘削前の解析結果は断面図から瑞浪層群の透水性の設定値で大きく様相が変わっていることがわかる。瑞浪層群の透水性の設定値に対して解析領域内での地下水の流れ方が大きく変わっていることが推察される。調査坑道掘削後の解析結果でも調査坑道掘削前の解析と同様に瑞浪層群の透水性の設定値に対して解析領域内での地下水の流れ方が大きく変わっているため、瑞浪層群の透水性の感度が非常に大きいことがわかる。

表 5.3.2-5 瑞浪層群透水性の感度解析の水力パラメーター

地質区分	透水係数 (m/s)			間隙率 (-)	比貯留係数 (1/m)	分散長 (m)		分子拡散係数 (m <sup>2</sup> /s)
	Kx	Ky	Kz			縦	横	
瀬戸層郡	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-05	20.00	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
瑞浪層郡	1.00E-07	1.00E-07	1.00E-09	20.00	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
上部割れ目帯	2.00E-08	2.00E-08	2.00E-08	2.00	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
下部低密度割れ目帯	2.00E-08	2.00E-08	2.00E-08	2.00	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
月吉断層	2.00E-10	2.00E-10	2.00E-10	2.00	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
主立坑断層 (堆積岩部)	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	2.00	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
主立坑断層 (花崗岩部)	1.00E-10	1.00E-10	1.00E-10	2.00	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
コンパートメントを構成する断層群	1.00E-11	1.00E-11	1.00E-11	2.00	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00

※ ■ の箇所が設定変更項目

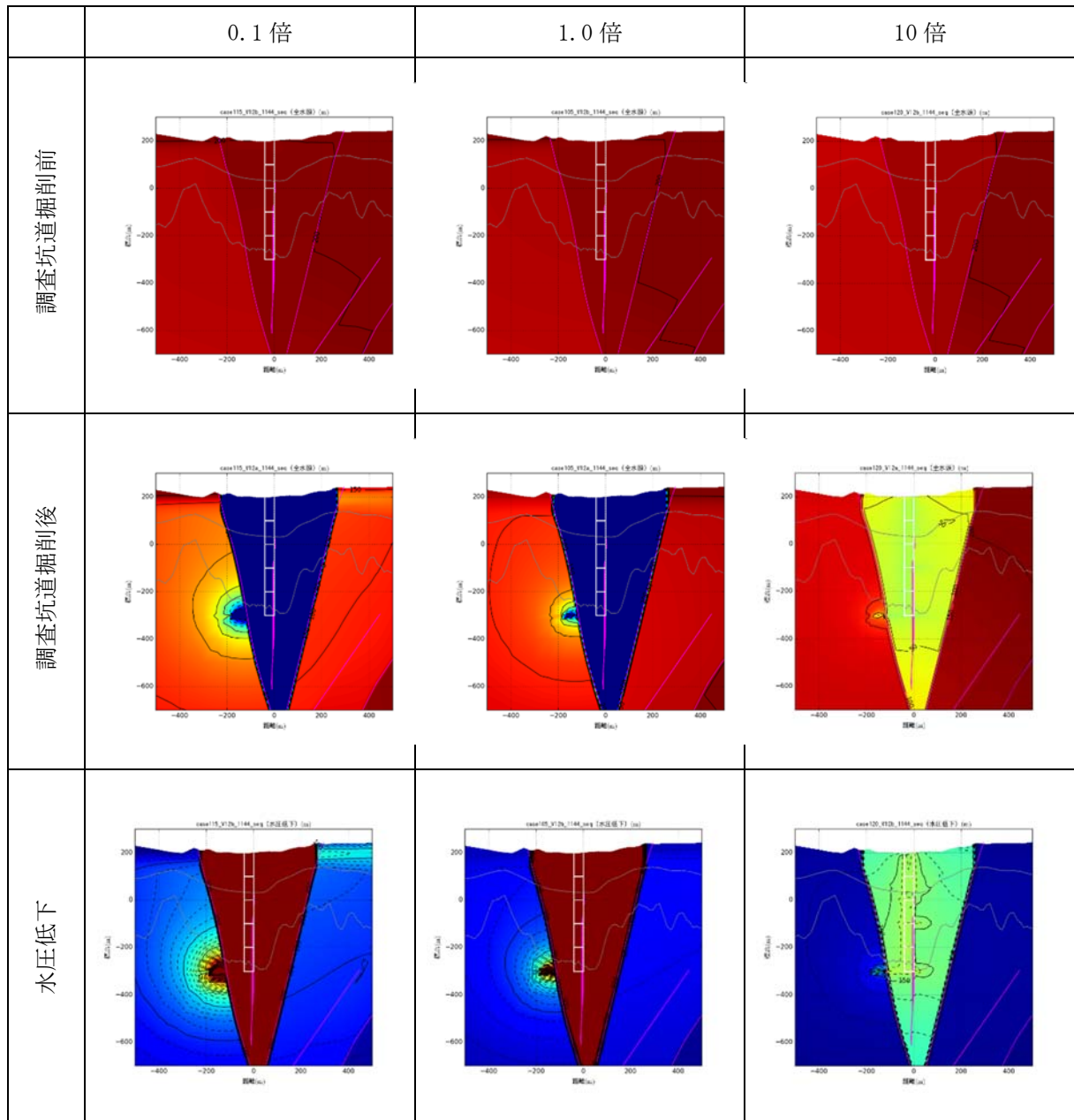


図 5.3.2-16 定常解析での全水頭分布図 (瑞浪層群透水性の感度解析)

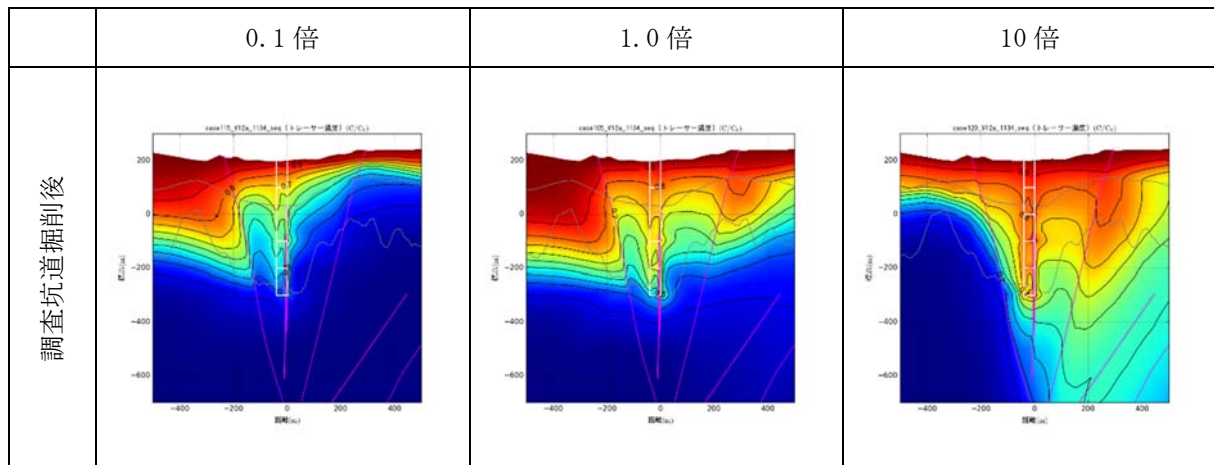


図 5.3.2-17 定常解析でのトレーサー濃度分布図（瑞浪層群透水性の感度解析）

(4) 上部割れ目帯群透水性の感度解析

涵養量 20 mm/年に設定したケースを用いて、瑞浪層群の透水性を 0.1 倍と 10.0 倍に設定して感度解析を実施した。解析に用いた水理パラメーターを表 5.3.2-6 に示す。解析結果として、主立坑、換気立坑を通る鉛直断面での調査坑道掘削前と掘削後の全水頭および両者の差をとった水位低下分布を図 5.3.2-14 に、主立坑、換気立坑を通る鉛直断面での調査坑道掘削前と掘削後のトレーサー濃度の分布を図 5.3.2-15 に示す。

圧力に着目すると、調査坑道掘削前後ともに解析結果はどの図でも有意な違いは無い結果となった。一方、トレーサー濃度に着目すると、調査坑道掘削前の解析結果は断面図から上部割れ目帯の透水性の設定値で大きく様相が変わっていることがわかる。上部割れ目帯の透水性を変えた場合、地下水の流れは大きくは変化しないものの、トレーサー濃度は間隙率が低いため圧力では軽微な差であっても様相が変化する。

表 5.3.2-6 上部割れ目帯透水性の感度解析の水理パラメーター

地質区分	透水係数 (m/s)			間隙率 (-)	比貯留係数 (1/m)	分散長 (m)		分子拡散係数 (m <sup>2</sup> /s)
	Kx	Ky	Kz			縦	横	
瀬戸層群	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-05	20.00	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
瑞浪層群	1.00E-07	1.00E-07	1.00E-09	20.00	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
上部割れ目帯	2.00E-08	2.00E-08	2.00E-08	2.00	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
下部低密度割れ目帯	2.00E-08	2.00E-08	2.00E-08	2.00	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
月吉断層	2.00E-10	2.00E-10	2.00E-10	2.00	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
主立坑断層 (堆積岩部)	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	2.00	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
主立坑断層 (花崗岩部)	1.00E-10	1.00E-10	1.00E-10	2.00	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
コンパートメントを構成する断層群	1.00E-11	1.00E-11	1.00E-11	2.00	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00

※ ■の箇所が設定変更項目

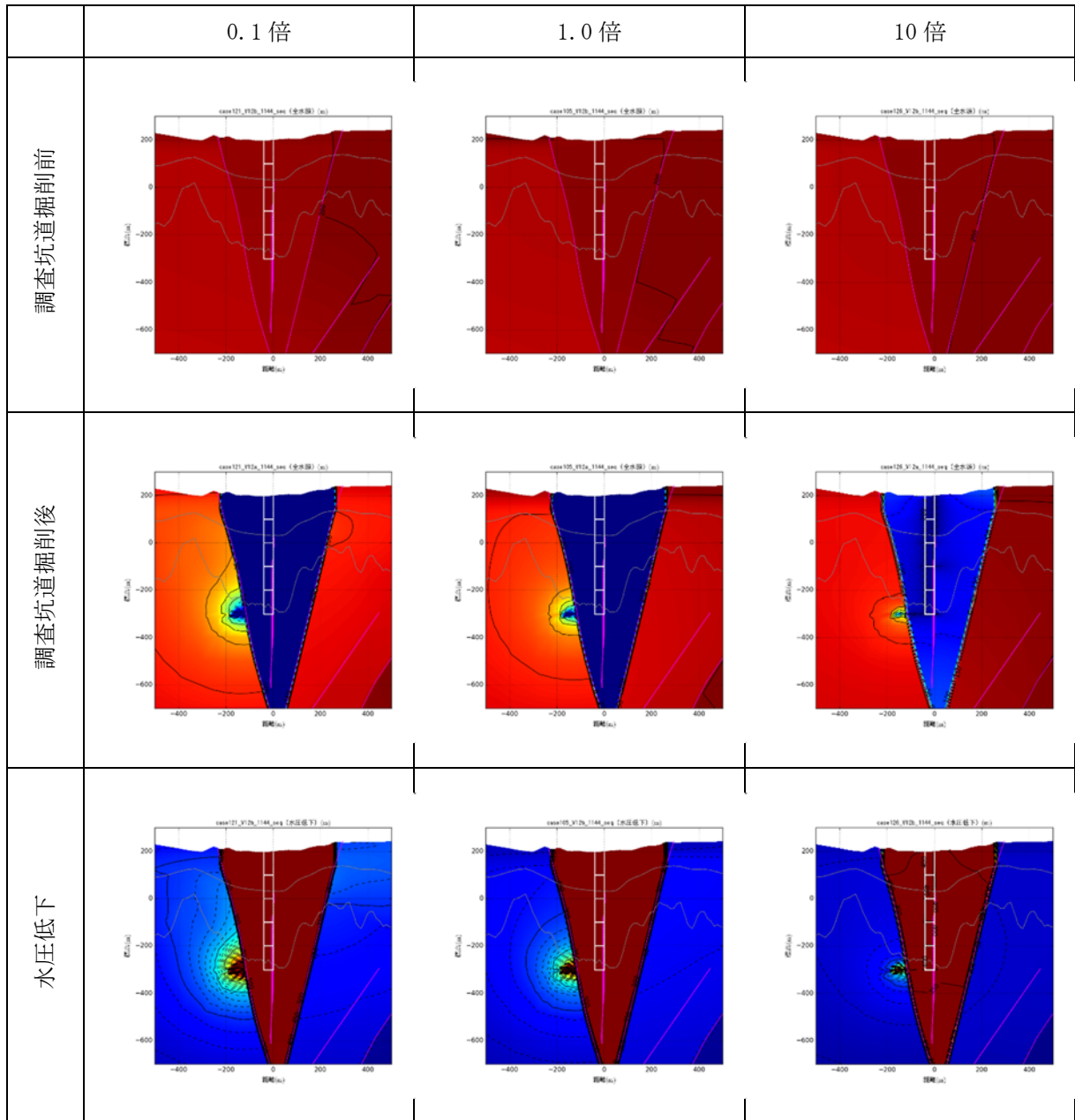


図 5.3.2-18 定常解析での全水頭分布図（上部割れ目帯透水性の感度解析）

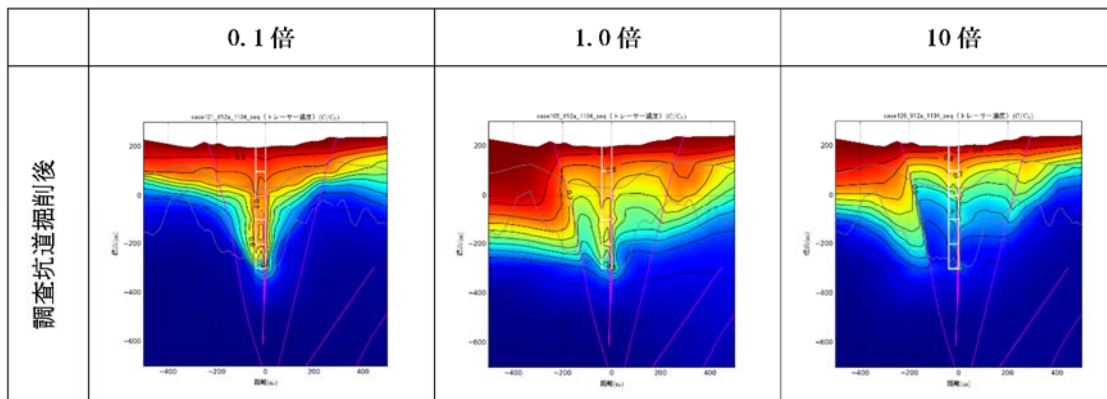


図 5.3.2-19 定常解析でのトレーサー濃度分布図（上部割れ目帯透水性の感度解析）

### 5.3.2.5 非定常の地下水流動・物質移行解析結果

前章で実施した定常解析と水理パラメーターやモデル境界の境界条件を同様として、研究坑道の掘削に伴う非定常解析を実施した。研究坑道の掘削工程は2005年1月1日から2015年1月9日の10年間を反映し設定した。

解析結果として、全水頭を図5.3.2-20に示す主立坑と換気立坑を通る断面で、時間断面を2005年1月1日～2015年1月9日間を1年ごとに作成した。また、調査坑道掘削後の定常解析結果も比較のため追記した。観測ボーリング孔の全水頭の経時変化を図5.3.2-21および図5.3.2-22に示す箇所（MIU-3号孔、MSB-1号孔、DH-2号孔、DH-15号孔、07MI08号孔、07MI09号孔、15MI52号孔、15MI53号孔、16MI59号孔）で観測されている区間の中間点で作成した。全水頭プロファイルは観測ボーリングDH-2号孔、DH-11号孔、DH-15号孔、AN-1号孔、AN-3号孔、MIU-1～4号孔、MSB-1～4号孔、MIZ-1号孔および両立坑について、断面図と同様の時間断面でプロットした。また調査坑道掘削前の定常解析結果と、調査坑道掘削後の定常解析結果も追記した。

トレーサー濃度の解析結果は断面図の作成位置および、トレーサー濃度プロファイルは全水頭と同じ位置、同じ時間とした。観測ボーリング孔のトレーサー濃度の経時変化は、解析結果との比較に用いた両立坑のウォーターリングの位置と05MI01号孔、07MI07号孔、09MI20号孔、09MI21号孔、10MI26号孔、12MI32号孔、12MI33号孔、13MI38号孔、13MI39号孔、13MI40号孔、13MI41号孔、MSB-2号孔、MSB4-4号孔を対象とした。併記した観測値は酸素同位体比( $\delta^{18}\text{O}$ )を対象としてJAEA-Data/Code 2010-010、JAEA-Data/Code 2011-003、JAEA-Data/Code 2011-004、JAEA-Data/Code 2013-001、JAEA-Data/Code 2013-024、JAEA-Data/Code 2014-019、JAEA-Data/Code 2016-001、JAEA-Data/Code 2017-008中に報告されている酸素・水素同位体の観測結果から酸素同位体について表層水を-8‰を1、深部水を-9‰を0として正規化し、模擬トレーサーとして扱った。

#### (1) 解析ケース

解析ケースとして、基本ケースを定常解析の結果を踏まえて設定したケース、比貯留係数の設定値による解析結果に与える影響を調査したケース、間隙率の設定値による影響を調査したケース、分散長の設定値による影響を調査したケースを実施した。



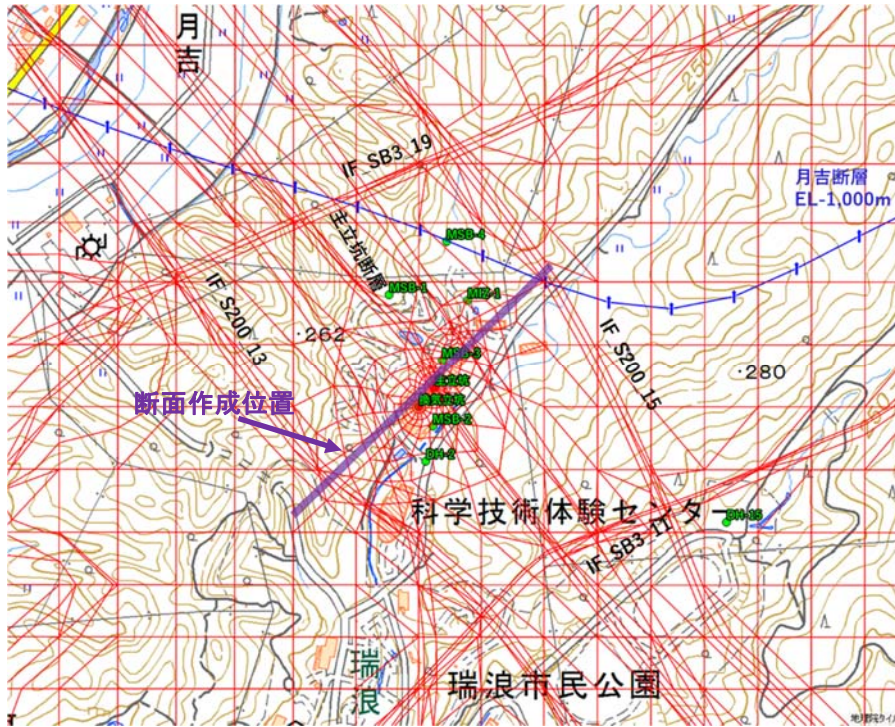


図 5.3.2-20 断面作成位置図（国土地理院の電子地形図（タイル）に断面位置を追記）

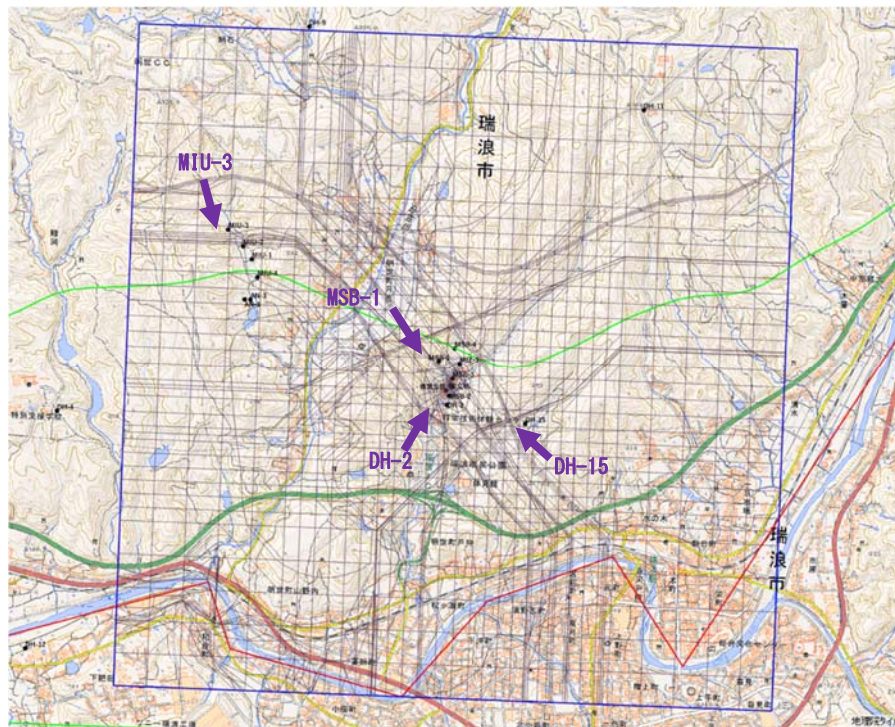


図 5.3.2-21 立坑と周辺の圧力の時間変化を比較しているボーリング孔位置図  
（国土地理院の電子地形図（タイル）にボーリング孔位置を追記）

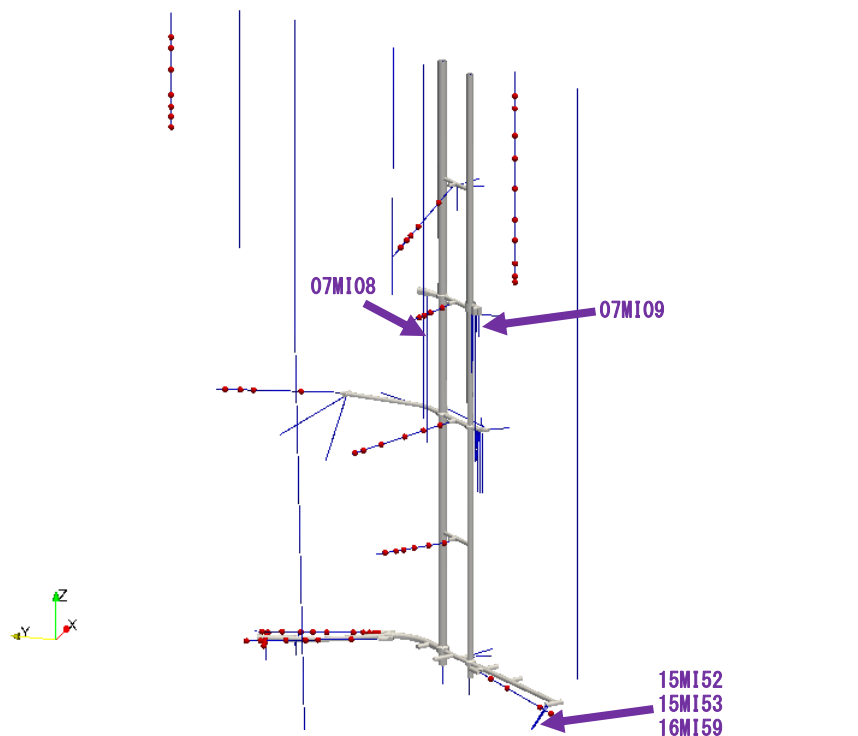


図 5.3.2-22 立坑と周辺の圧力の時間変化をプロットしているボーリング孔位置図

(2) 基本ケース

定常解析の結果を踏まえて基本ケースを設定した。基本ケースに設定した涵養量は 20 mm/y とした。設定した水理パラメーターを表 5.3.2-7 に示す。非定常パラメーターとして特徴的な間隙率と比貯留係数は表 5.3.2-2 を参考に設定した。この設定で実施した解析結果を全水頭で時間変化について鉛直断面図、調査坑道周辺の観測ボーリング孔の時間変化をそれぞれ図 5.3.2-23、図 5.3.2-24 に、模擬トレーサー濃度で時間変化について鉛直断面図、調査坑道周辺の観測ボーリング孔の時間変化をそれぞれ図 5.3.2-25、図 5.3.2-26 に示す。

解析結果は全水頭の分布図、ボーリング孔の時間変化とともに観測された水圧より解析結果が過剰に水圧低下していることがわかる。模擬トレーサー濃度でみると過剰な水圧低下の結果にもかかわらず、地表面からの流入が高くて 20%程度であった。

表 5.3.2-7 非定常解析の基本ケースに用いた水理パラメーター

地質区分	透水係数 (m/s)			間隙率	比貯留係数	分散長 (m)		分子拡散係数
	kx	ky	kz	(-)	(1/m)	縦	横	(m <sup>2</sup> /s)
瀬戸層郡	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-05	2.00E-01	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
瑞浪層郡	1.00E-07	1.00E-07	1.00E-09	2.00E-01	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
上部割れ目帯	2.00E-08	2.00E-08	2.00E-08	2.00E-02	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
下部低密度割れ目帯	2.00E-08	2.00E-08	2.00E-08	2.00E-02	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
月吉断層	2.00E-10	2.00E-10	2.00E-10	2.00E-02	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
主立坑断層 (堆積岩部)	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	2.00E-02	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
主立坑断層 (花崗岩部)	1.00E-10	1.00E-10	1.00E-10	2.00E-02	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
コンパートメントを構成する断層群	1.00E-11	1.00E-11	1.00E-11	2.00E-02	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00

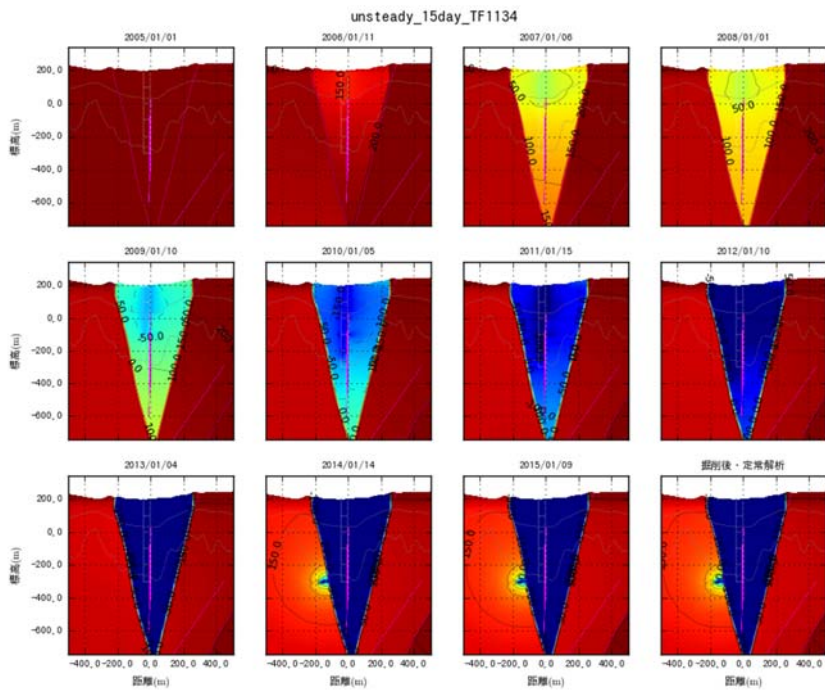


図 5.3.2-23 調査坑道周辺における全水頭分布図の時間変化(基本ケース)

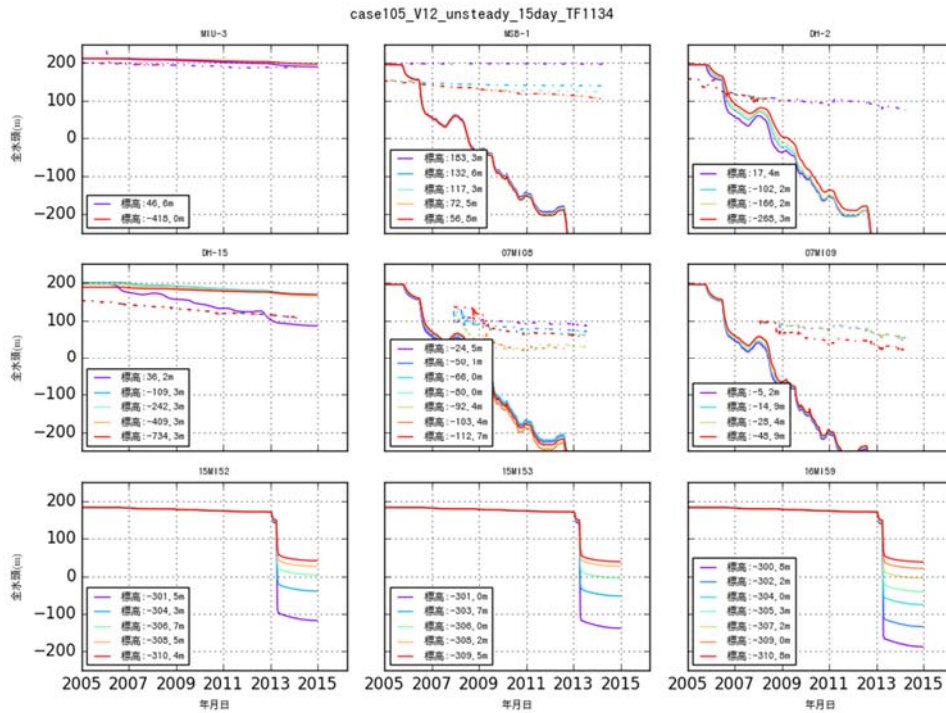


図 5.3.2-24 調査坑道と周辺ボーリング孔における全水頭の時間変化 (基本ケース)

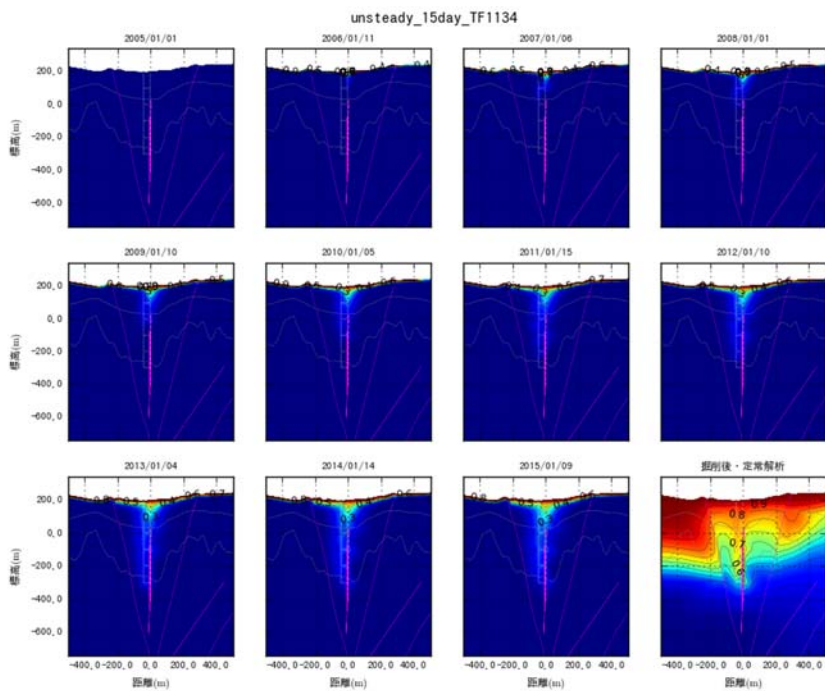


図 5.3.2-25 調査坑道周辺における模擬トレーサー濃度分布図の時間変化(基本ケース)

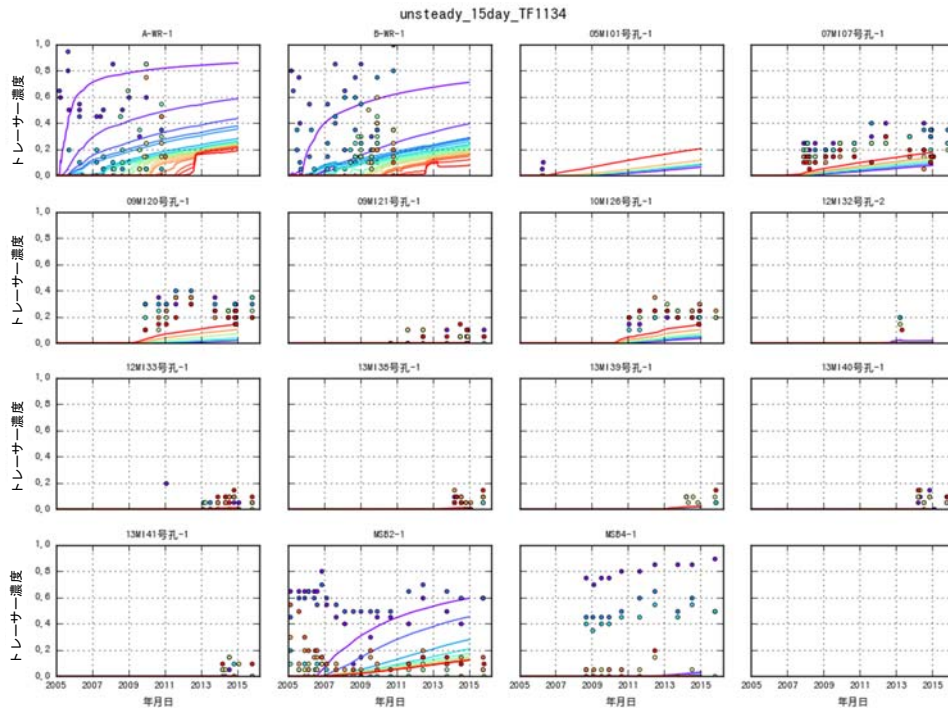


図 5.3.2-26 調査坑道と周辺ボーリング孔における模擬トレーサー濃度の時間変化（基本ケース）

(3) 比貯留係数を 10 倍にした解析結果

基本ケースを元にすべての地質区分について比貯留係数を基本ケースの  $1.0E-6$  (1/m) から  $1.0E-5$  (1/m) に変更して比貯留係数の影響を調査した。比貯留係数は単位水頭変化に対して各地質内の単位体積当たりの貯留から解放される、あるいは貯留される水量を表している。比貯留係数の設定により調査坑道の掘削過程にともなう周辺への圧力低下に影響があると考えられる。

解析結果として全水頭について示す。全水頭の分布図を図 5.3.2-27、ボーリング孔での時間変化を図 5.3.2-28 に示す。

解析結果は分布図、ボーリング孔での時間変化ともに基本ケースより掘削過程よりも遅れて水圧変化していることがわかる。水圧低下がなだらかであるものの水圧低下量は観測結果に比べ過剰であった。

表 5.3.2-8 非定常解析の比貯留係数の影響調査に用いた水理パラメーター

地質区分	透水係数 (m /s)			間隙率	比貯留係数	分散長 (m)		分子拡散係数
	kx	ky	kz	(-)	(1/m)	縦	横	(m <sup>2</sup> /s)
瀬戸層部	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-05	2.00E-01	1.00E-05	100.0	10.0	0.00E+00
瑞浪層部	1.00E-07	1.00E-07	1.00E-09	2.00E-01	1.00E-05	100.0	10.0	0.00E+00
上部割れ目帯	2.00E-08	2.00E-08	2.00E-08	2.00E-02	1.00E-05	100.0	10.0	0.00E+00
下部低密度割れ目帯	2.00E-08	2.00E-08	2.00E-08	2.00E-02	1.00E-05	100.0	10.0	0.00E+00
月吉断層	2.00E-10	2.00E-10	2.00E-10	2.00E-02	1.00E-05	100.0	10.0	0.00E+00
主立坑断層 (堆積岩部)	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	2.00E-02	1.00E-05	100.0	10.0	0.00E+00
主立坑断層 (花崗岩部)	1.00E-10	1.00E-10	1.00E-10	2.00E-02	1.00E-05	100.0	10.0	0.00E+00
コンパートメントを構成する断層群	1.00E-11	1.00E-11	1.00E-11	2.00E-02	1.00E-05	100.0	10.0	0.00E+00

※ ■の箇所が設定変更項目

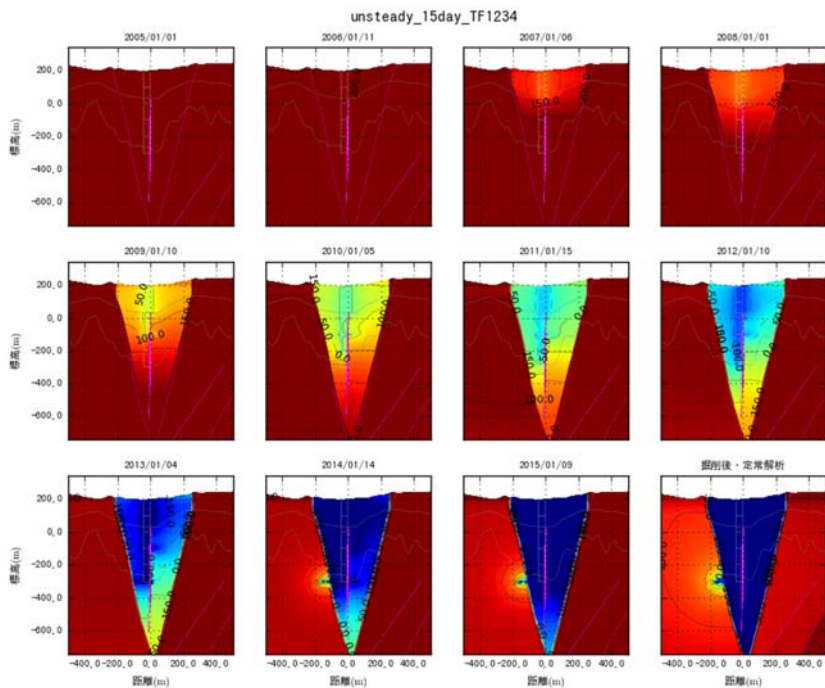


図 5.3.2-27 調査坑道周辺における全水頭分布図の時間変化(比貯留係数を 0.1 倍)

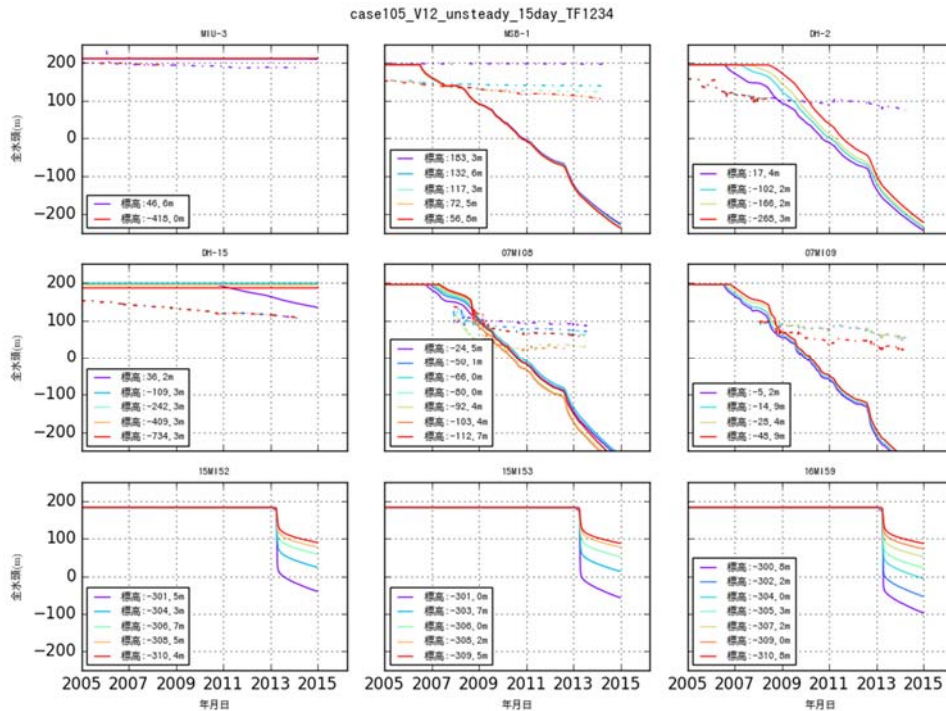


図 5.3.2-28 調査坑道と周辺ボーリング孔における全水頭の時間変化（比貯留係数を 0.1 倍）

#### (4) 間隙率を変化させた感度解析結果

ダルシー流速は透水係数と動水勾配の関係で求められるため、間隙率を変更しても地下水流動解析には影響が無い。物質移行は実流速で発生するため、間隙率が変化すると物質の移流速度が変化する。このため、物質移行解析では間隙率の影響が大きいと考えられる。ここではすべての地質区分について間隙率を基本ケースから 1/1,000、1/100、1/10 倍に変更して影響を調査した。

解析結果として模擬トレーサー濃度分布を図 5.3.2-29～図 5.3.2-31 に示す。観測ボーリング孔位置での模擬トレーサー濃度の時間変化を図 5.3.2-32～図 5.3.2-34 に示す。

模擬トレーサー濃度分布を見ると基本ケースと比べて、間隙率を小さく変化させるほど調査坑道を中心に地表面からの流入が増えていることがわかる。観測ボーリング孔位置での模擬トレーサー濃度の時間変化を見ると基本ケースでは全体的に観測値に比べて地表面からの流入が足りていないが、間隙率を小さく変化させるほど模擬トレーサー濃度が掘削過程にもなって地表面からの流入が増えて模擬トレーサー濃度が高くなっていることがわかる。基本ケースでは観測値より倍以上模擬トレーサー濃度が低く、間隙率が 0.001 倍では観測値より倍以上模擬トレーサー濃度が高いことから、間隙率は 0.1 ～0.01 倍程度であると思われる。

表 5.3.2-9 非定常解析の間隙率の感度調査に用いた水理パラメーター

地質区分	透水係数 (m / s)			間隙率 (-)	比貯留係数 (1/m)	分散長 (m)		分子拡散係数 (m <sup>2</sup> /s)
	kx	ky	kz			縦	横	
瀬戸層群	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-05	基本設定から 0.001倍 0.01倍 0.1倍 に設定し 感度解析	1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
瑞浪層群	1.00E-07	1.00E-07	1.00E-09		1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
上部割れ目帯	2.00E-08	2.00E-08	2.00E-08		1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
下部低密度割れ目帯	2.00E-08	2.00E-08	2.00E-08		1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
月吉断層	2.00E-10	2.00E-10	2.00E-10		1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
主立坑断層 (堆積岩部)	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06		1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
主立坑断層 (花崗岩部)	1.00E-10	1.00E-10	1.00E-10		1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00
コンパートメントを構成する断層群	1.00E-11	1.00E-11	1.00E-11		1.00E-06	100.0	10.0	0.00E+00

※ ■の箇所が設定変更項目

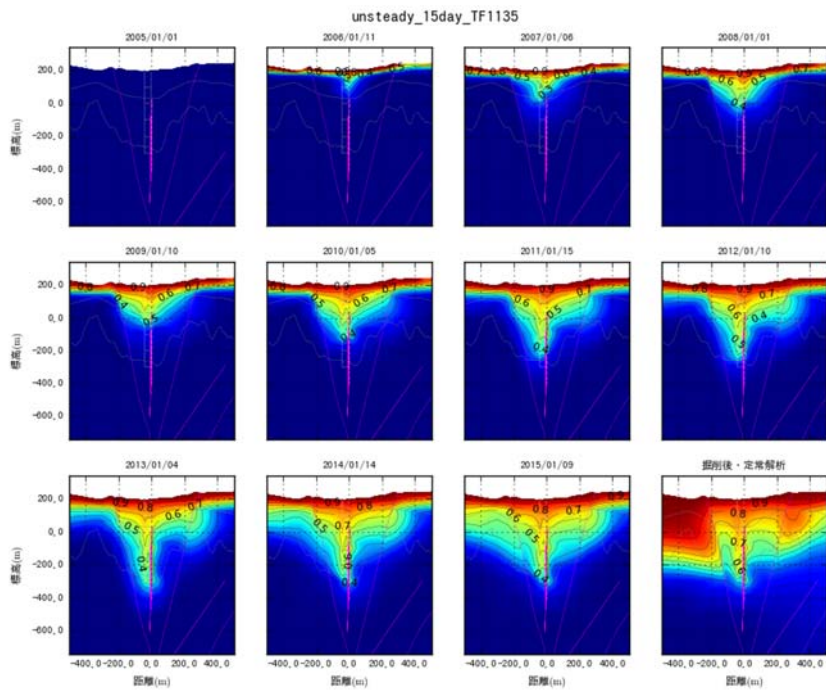


図 5.3.2-29 調査坑道周辺における模擬トレーサー濃度分布図の時間変化(間隙率を 0.001 倍)



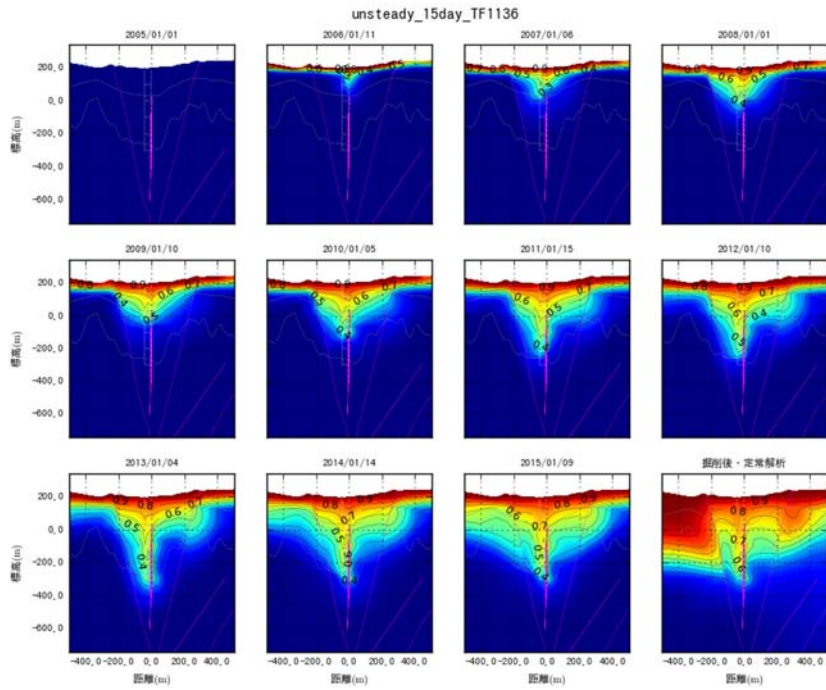


図 5.3.2-30 調査坑道周辺における模擬トレーサー濃度分布図の時間変化(間隙率を 0.01 倍)

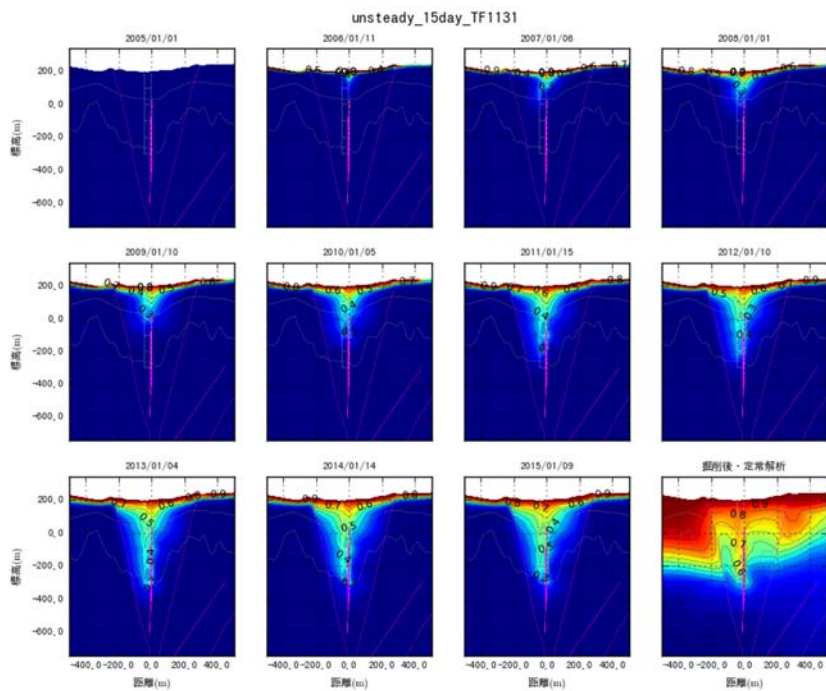


図 5.3.2-31 調査坑道周辺における模擬トレーサー濃度分布図の時間変化(間隙率を 0.1 倍)

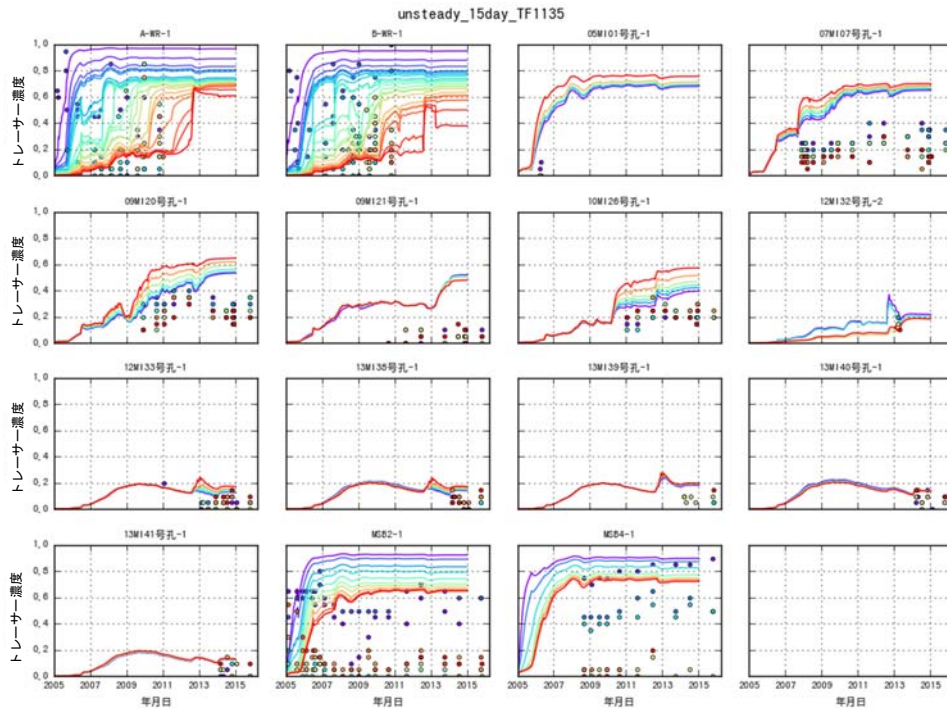


図 5.3.2-32 調査坑道と周辺ボーリング孔における模擬トレーサー濃度の時間変化  
(間隙率を 0.001 倍)

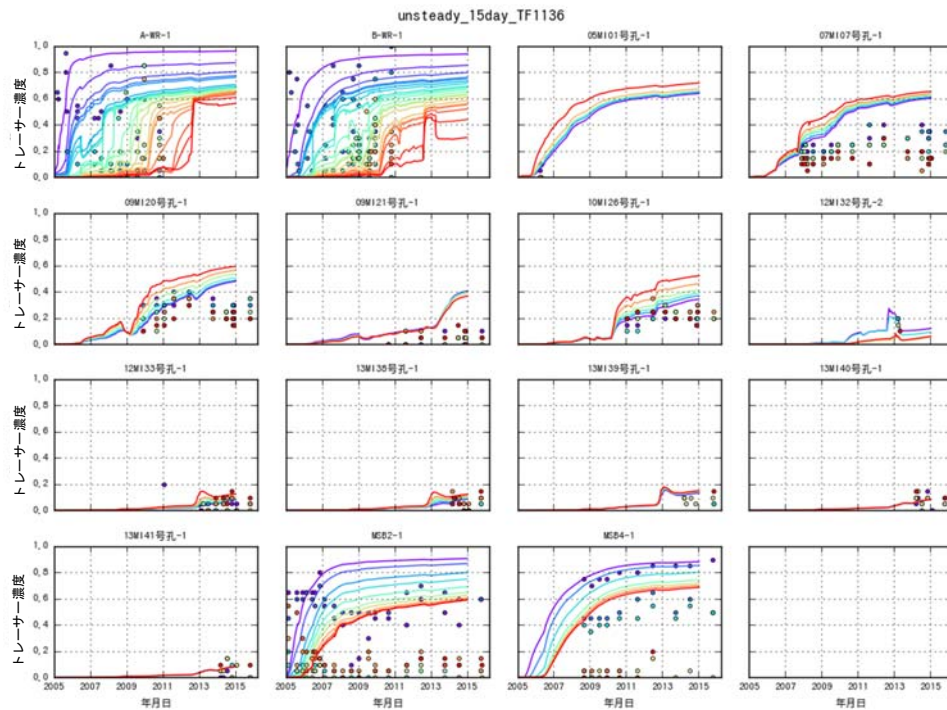


図 5.3.2-33 調査坑道と周辺ボーリング孔における模擬トレーサー濃度の時間変化  
(間隙率を 0.01 倍)

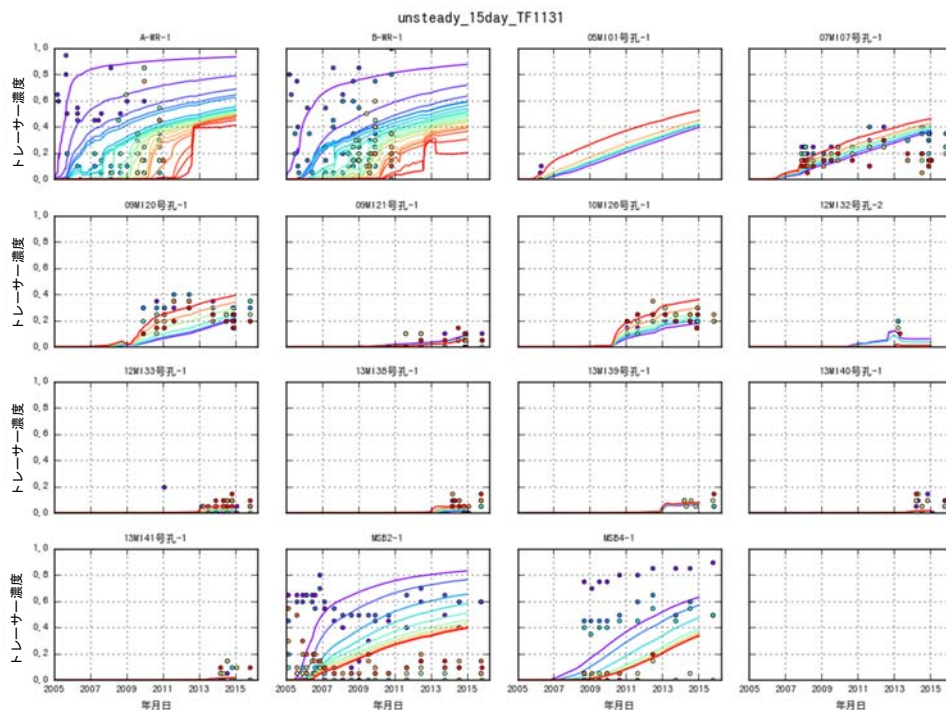


図 5.3.2-34 調査坑道と周辺ボーリング孔における模擬トレーサー濃度の時間変化  
(間隙率を 0.1 倍)

(5) 分散長を 20.2m にした解析結果

Gelhar et al. (1992) によれば、分散長は地下水の移行距離に対して 1/10 の程度の分散長とされており、本解析のモデルスケールが 4,000 m 四方とすると分散長は 400 m 程度となる。本解析の対象地点の間隙率が小さく実流速が速いと考えられること、モデルスケールが 4,000 m 四方と非常に広いこと、立坑周辺にコンパートメントを構成する断層群が存在しており周辺から隔離されていることが考えられることなどから、分散長が 400 m 程度だと、物質移行解析では実際の現象より移流の影響が強く広がった分布を示す結果となっていることが考えられる。また、地表からの物質の流入を考えた場合、立坑深度は 100m のオーダーとなる。ここでは、基本ケースに対して分散長を 20.2 m に変更した解析を実施し影響を調査した。解析結果として、鉛直断面における模擬トレーサー濃度分布を図 5.3.2-35 に示す。調査坑道周辺の観測ボーリング孔における模擬トレーサー濃度の時間変化を図 5.3.2-36 に示す。

解析結果は濃度分布図でみると、基本ケースに比べて濃度前線の間隔が狭くなっていることがわかる。時間変化でみると有意な差は見当たらない。

表 5.3.2-10 非定常解析の分散長の影響調査に用いた水理パラメーター

地質区分	透水係数 (m / s)			間隙率 (-)	比貯留係数 (1/m)	分散長 (m)		分子拡散係数 (m <sup>2</sup> /s)
	kx	ky	kz			縦	横	
瀬戸層群	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-05	2.00E-01	1.00E-05	20.0	2.0	0.00E+00
瑞浪層群	1.00E-07	1.00E-07	1.00E-09	2.00E-01	1.00E-05	20.0	2.0	0.00E+00
上部割れ目帯	2.00E-08	2.00E-08	2.00E-08	2.00E-02	1.00E-05	20.0	2.0	0.00E+00
下部低密度割れ目帯	2.00E-08	2.00E-08	2.00E-08	2.00E-02	1.00E-05	20.0	2.0	0.00E+00
月吉断層	2.00E-10	2.00E-10	2.00E-10	2.00E-02	1.00E-05	20.0	2.0	0.00E+00
主立坑断層 (堆積岩部)	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	2.00E-02	1.00E-05	20.0	2.0	0.00E+00
主立坑断層 (花崗岩部)	1.00E-10	1.00E-10	1.00E-10	2.00E-02	1.00E-05	20.0	2.0	0.00E+00
コンパートメントを構成する断層群	1.00E-11	1.00E-11	1.00E-11	2.00E-02	1.00E-05	20.0	2.0	0.00E+00

※ ■の箇所が設定変更項目

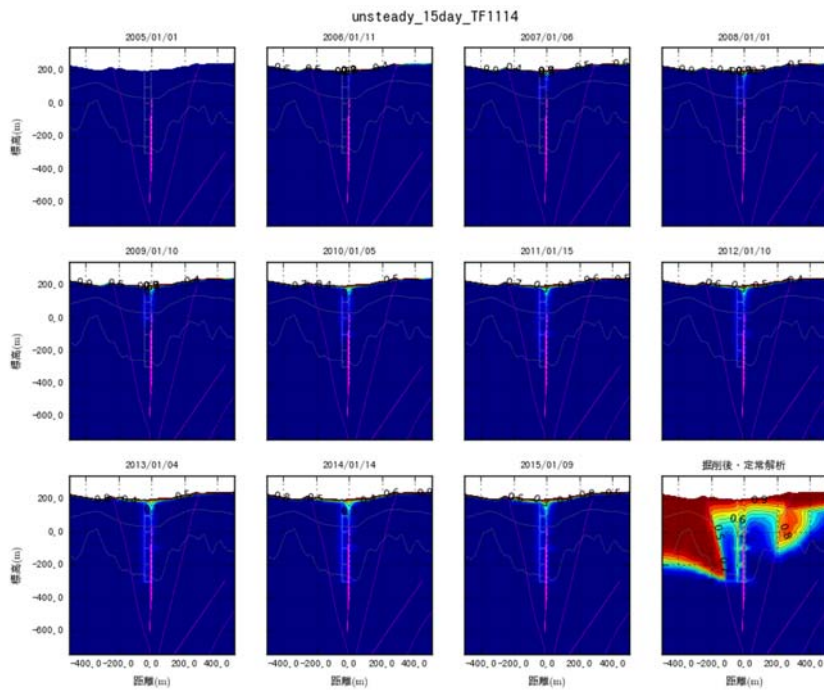


図 5.3.2-35 調査坑道周辺における模擬トレーサー濃度分布図の時間変化(分散長を 20.2m に設定)

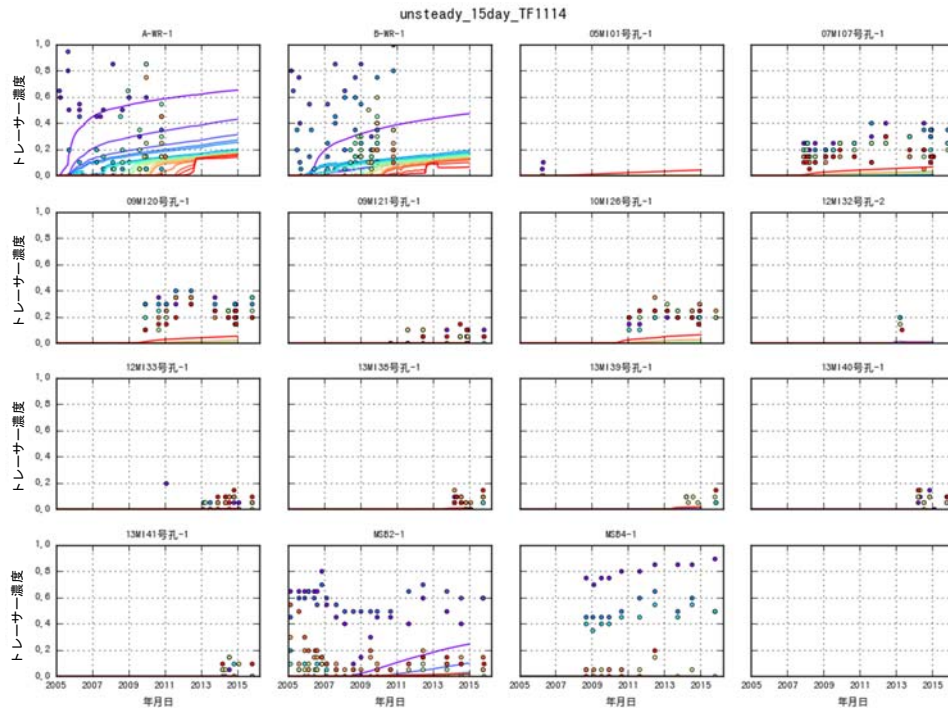


図 5.3.2-36 調査坑道と周辺ボーリング孔における模擬トレーサー濃度の時間変化  
(分散長を 20.2m に設定)

### 5.3.2.6 考察

今年度はローカスケールのパラメーターを用いて調査坑道掘削の解析との比較を主に実施した。定常解析では調査坑道掘削前の解析では水圧分布に大きな差はなかった。

ローカスケールでは考慮していなかったコンパートメントが存在する場合、涵養量が 20 mm/年程度では、調査坑道に流出している流量をコンパートメント内の地表面からの涵養量だけでは供給しきれない。コンパートメントの外側から水を供給するため、コンパートメント内で過剰に水圧が低下する結果となった。地表水の流入率（模擬トレーサー濃度）もコンパートメントが存在する場合、非常に多く、大部分が地表水の流入になっている。コンパートメントを考慮しない場合、調査坑道を中心に模擬トレーサーが流入し、深部ほど周囲の地下水が横方向から調査坑道に向かい、地表水の流入が抑制される。実測値では、300 m アクセス坑道周辺で地表水の流入が 30%程度であることを考えると、横方向から地下水を集めることのできるコンパートメントがないケースの方が再現性は良い。

涵養量の調査坑道掘削後の解析では涵養量の設定が大きい程、地表面からの流入の影響が大きい。ローカスケールでは涵養量 20 mm/年以下とされていたが、サイトスケールの水圧変化でみると 200 ~ 2,000 mm/年では、調査坑道周辺の水位低下量が 150 m に収まる。地表水の流入率は、涵養量が大きくなる程大きくなり、目安である 30%を超える。涵養量の設定では、圧力低下と地表水の流入率が、

トレードオフの関係になる。

瑞浪層群は地表面付近に厚く分布しており調査坑道掘削後では透水性の影響が非常に大きい。水圧変化を見ると、基本ケースより透水係数を数倍程度大きく設定すると、水圧低下は 150 m 程度に収まると考えられる。地表水の流入率でみると、透水係数が大きくなる程、大きくなり過剰に高くなっている。瑞浪層群の透水係数設定でも、圧力と模擬トレーサー濃度がトレードオフの関係になる。

上部割れ目帯は、上部に広く瑞浪層群が分布しているため、調査坑道掘削後では透水性の設定により立坑周囲から影響が大きくなる。水圧変化でみると、どの設定でも水圧低下が 150 m 以上であり大きな変化はなかった。地表水の流入率でみると、上部割れ目帯の透水性を低く設定した方が 300 m アクセス坑道周辺での地表水の流入率が 30%程度で再現性が良い結果となった。

非定常解析では、調査坑道掘削時の坑道内への流出流量と掘削進捗に合わせた解析を実施したが、観測された調査坑道内への流出流量を設定すると水圧低下が過剰に表現されており、比貯留係数だけではコントロールできない結果であった。水圧低下が過剰にも関わらず地表水の流入率が遅かったため、間隙率をオーダー単位で減らした感度解析を実施した。この結果、物質移行解析ではローカールスケールで使用していた巨視的な間隙率の 1/100~1/1,000 でなければ、数年での地表水の流入を再現できなかった。このため、広域と立坑での地下水流速と間隙率について検討した。

地下水年代から地下水流速を求めると、表のように、広域調査で 0.5 m/y、立坑調査で 500 m/y 程度となり、平均流速は約 1,000 倍異なる。これは、広域調査では地下水年代測定結果から、流出域で数万年程度の滞留時間となっており、立坑では数年で新しい地下水が流入しているためである。

一方、水理特性から地下水流速を求めると、表のように、透水係数が広域と立坑とで同じとすると、広域では 0.8 m/y (間隙率 2%) となり、地下水年代から求めた地下水流速とほぼ一致する。一方で、立坑での地下水流速は、動水勾配は 10 倍程度になるが、間隙率を 0.02%(広域の 1/100)にしなければ、立坑での数百 m/y という流速にならない。すなわち、有効間隙率は広域と立坑とでは 100 倍程度異なる。ただし、これは広域と立坑とで透水係数を同じとした場合である。

この 100 倍の違いは、マトリックス拡散を考慮すると評価できる。拡散の特性長は以下の式で与えられる。

$$L = \sqrt{Dt}$$

ここに、L は拡散の特性長、D は拡散係数、t は時間である。L は拡散で輸送した場合、物質の半分程度がとどまる距離を表している。

このため、広域と立坑の拡散の特性長は以下のように表される。

$$\begin{array}{ll} \text{広域} & L = \sqrt{10000 \cdot D} = 100\sqrt{D} \\ \text{立坑} & L = \sqrt{1 \cdot D} = \sqrt{D} \end{array}$$

すなわち、広域の方が立坑よりも100倍拡散でマトリックスに広がることを意味している。実際に計算すると、広域と立坑でそれぞれ6 mと0.06 mとなる。広域の6mは割れ目間隔としては非常に広いので、ほぼマトリックス全域に広がっていると考えられる。このため、間隙率が炉乾燥と同様に2%程度になるのだと考えられる。逆に、立坑の場合には6cmなので割れ目間隔よりは十分に小さい。このマトリックスの寄与の差が、物質の移行速度に影響を与えていると考えれば、有効間隙率が100倍異なる理由が説明できる。

ただし、立坑掘削によって、立坑周辺に割れ目が形成され、透水係数が大きくなった効果で、立坑での地下水流速が早くなった可能性もある。

このようなマトリックスの寄与による物質の輸送現象の遅れは、割れ目系の岩盤の物質移行特性においては非常に重要と考えられるため、スケールの大きいあるいは時間をかけたトレーサー試験などでその影響を検討していく必要がある。

### 5.3.3 幌延における地下水調査

#### 5.3.3.1 採水地点

幌延深地層研究センターの地下施設において、坑道内のボーリング孔から地下水を採取した。採取した地点は図 5.3.3-1 に示す通りである。採水区間は主に湧水量の多い地点とした。

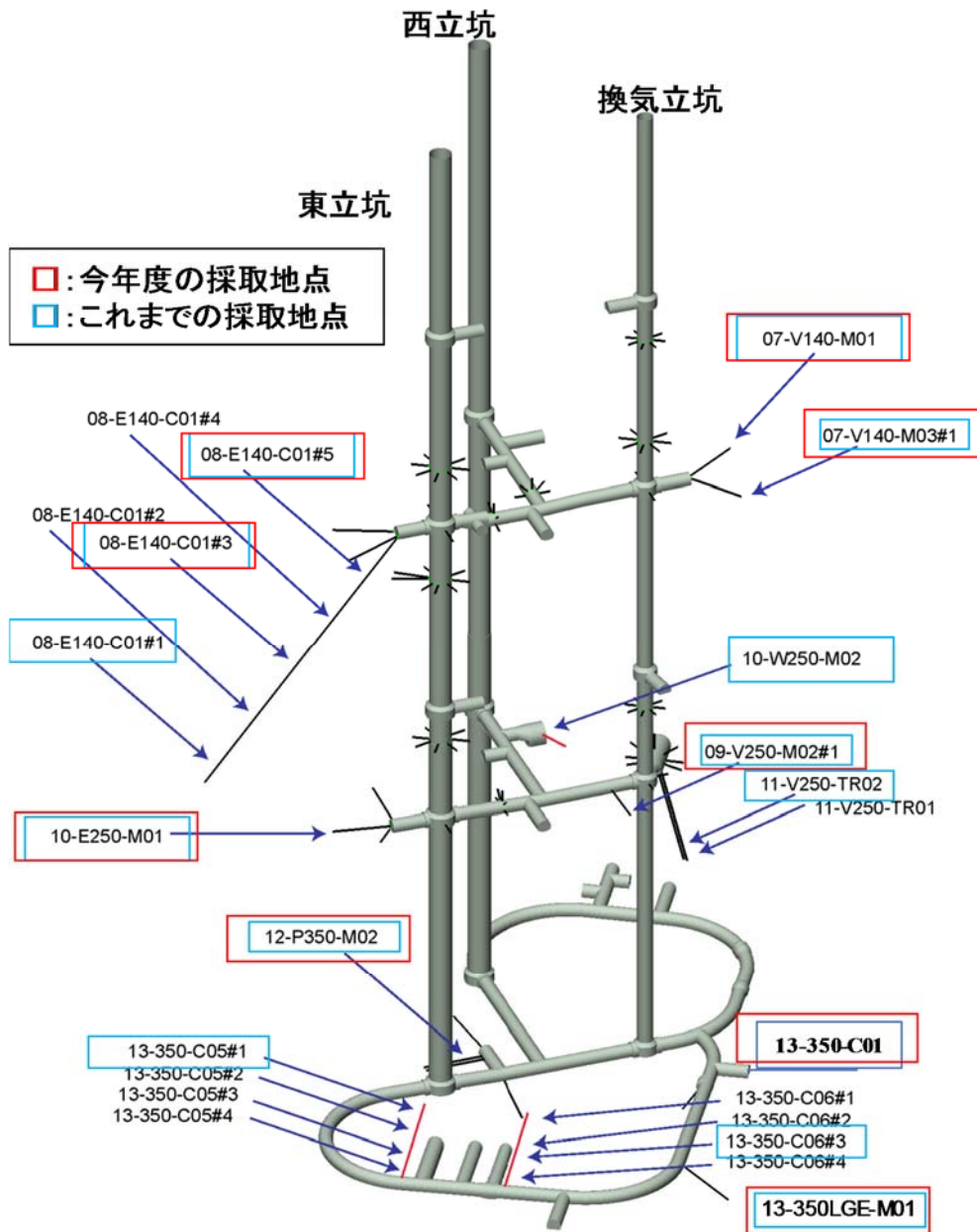


図 5.3.3-1 幌延深地層研究センターの地下施設における採水地点



### 5.3.3.2 採水方法

採水は、主要溶存イオン、微量成分、トリチウム ( $^3\text{H}$ )、炭素同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}$ 、 $^{14}\text{C}$ )、塩素同位体比 ( $^{36}\text{Cl}$ 、 $\delta^{37}\text{Cl}$ ) 分析用、希ガス分析用を分けて実施した。希ガス分析用は、図 5.3.3-2 に示すように、これまで、圧力制御式、循環式、原位置平衡式、水上置換式で試料を採取してきたが、今年度は水上置換式で採取することとした。これは、地下水中の溶存ガスが多く、圧力の低下によって脱ガスが発生し、圧力制御式や循環式で原位置の圧力を維持して希ガスサンプルの採取を試みた場合でも、ガスが分離することが多いためである。希ガスサンプリング方法に関する検討の詳細は 5.4.1.1 で述べる。採水地点周辺は、湧水量が少なく、ガス量が多いため、CFCs、 $\text{SF}_6$ などは実施していない。原位置での pH、ORP、DO、EC、温度などの計測も、数十 ml/min の流量を要し、安定までに時間を要することから実施しなかった。

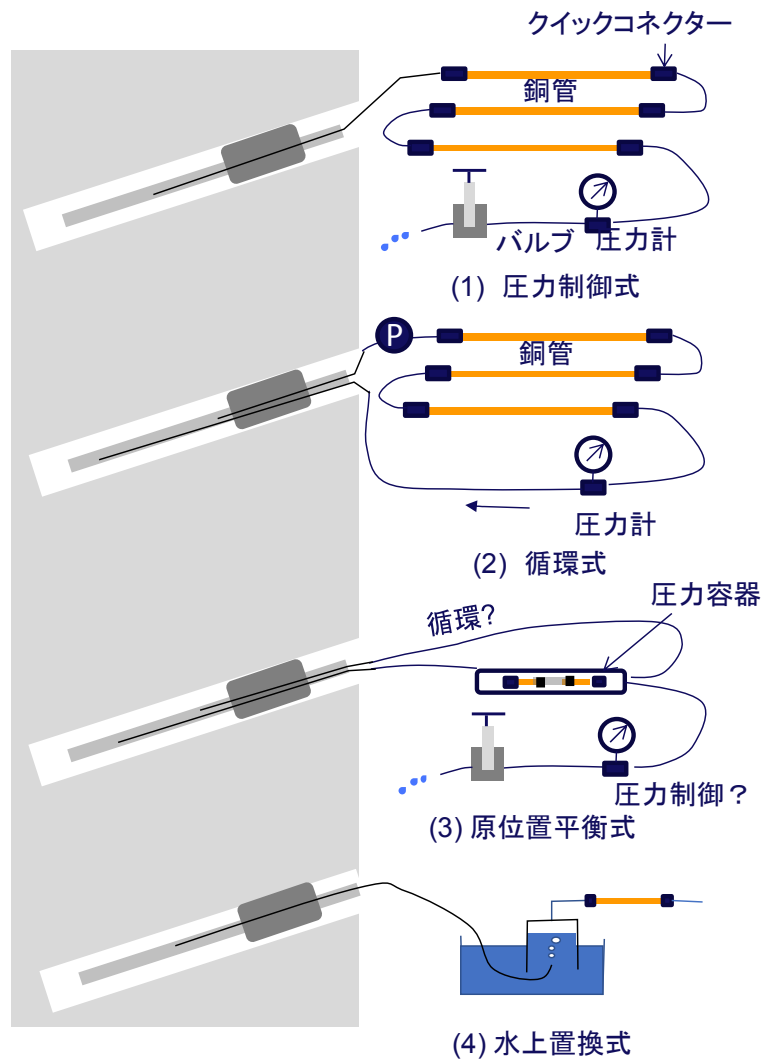


図 5.3.3-2 原位置での希ガス採水方法の概念図

### 5.3.3.3 分析方法

地下水の分析は5.3.1.3と同様に実施した。

### 5.3.3.4 分析結果

主要溶存イオン、微量元素、同位体、希ガスの分析結果を表5.3.3-1に示す。

幌延では脱ガスが激しく、希ガス分析では、保存性のNe濃度で判定すると、約80%ガスが抜けていると推定される。このため、希ガス分析用のサンプルは、従来封圧採水を実施してきたが、これでは銅管内に封入した試料が採取する封圧採水では計測が困難であると判断された。Ne濃度が大気平衡濃度よりも高い場合でも、大気の混入でなく、脱ガスによるガスの濃集の可能性がある。このため、Ne濃度が高い場合でも、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ が大気よりも十分に低ければ、ガスの濃集と見なして評価する。補正方法は、図5.3.3-3に示す通りである。

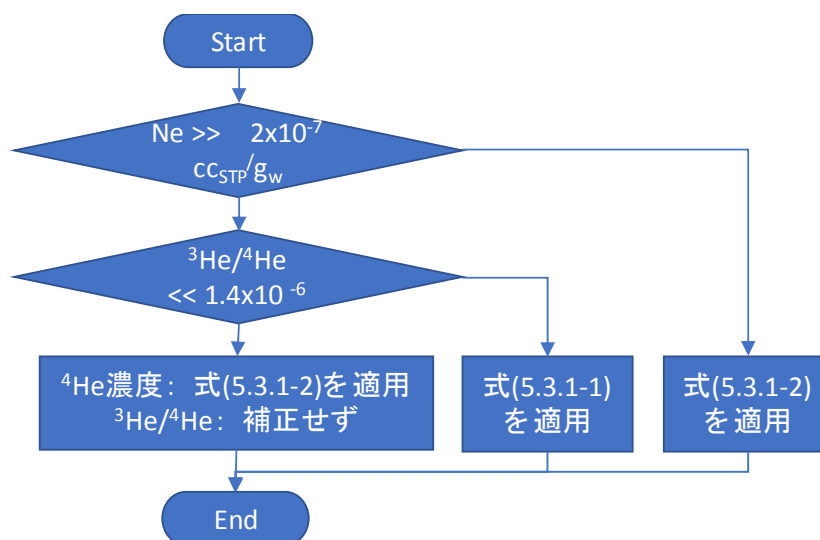


図 5.3.3-3 ガス濃集時の希ガス濃度の補正方法

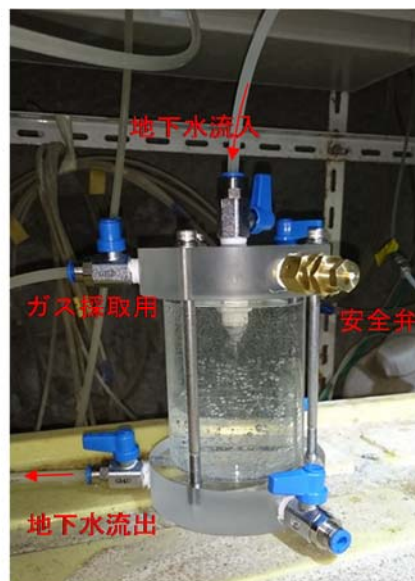
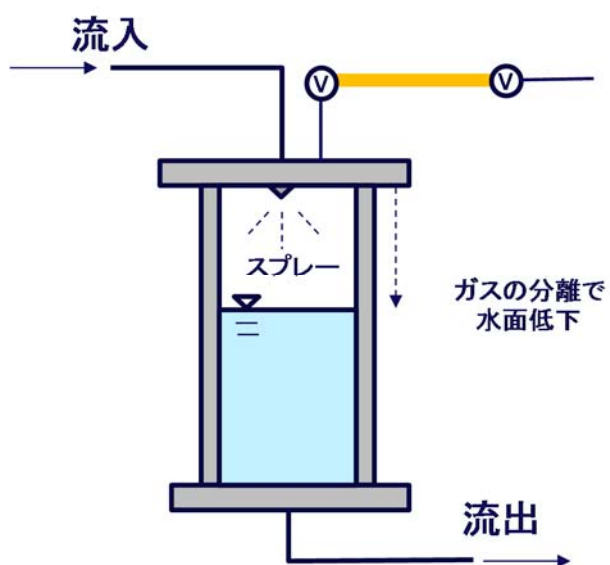


図 5.3.3-4 水上置換でのガス採取状況



図 5.3.3-5 採水状況

表 5.3.3-1 幌延の地下施設から採取した地下水試料の分析結果

(1) 主要溶存イオン

サンプル名	Na	K	Mg	Ca	B	F	Cl	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Si	ALK	TOC	TC	TIC	NPOC	採取日
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	meq/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	
07-V140-M01	3400	120	65	120	110	<1	4100	1	<5	29	50	35	680	640	24	2017/11/14
07-V140-M03#1	2900	96	48	77	96	<1	3300	1	<5	29	48	35	660	630	23	2017/11/14
08-E140-C01#3	2100	70	26	75	76	<1	1800	1	<5	30	56	32	640	600	20	2017/11/15
08-E140-C01#5	2800	92	42	93	100	<1	2800	1	<5	30	54	40	720	670	28	2017/11/15
09-V250-M02#1	1900	52	25	72	47	<1	1900	2	<5	26	37	19	470	460	11	2017/11/16
10-E250-M01	1800	55	21	47	58	<1	1600	1	<5	30	41	24	510	490	14	2017/11/16
12-P350-M02	3600	78	66	110	95	<1	4400	2	<5	23	49	30	640	610	21	2017/11/15
13-350-C01	4400	86	92	120	100	<1	6000	1	<5	22	43	30	590	560	17	2017/11/16
13-350LGE-M01	4100	76	79	140	96	<1	5400	2	<5	23	46	35	630	600	17	2017/11/17

(2) 微量元素

サンプル名	Br	I	Li	Al	Fe	Mn	Cu	As	Se	Zn	Rb	Ba	Sr	Cs
	mg/L	mg/L	mg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L
07-V140-M01	31	20	11	<10	910	34	<10	<2	<2	12	39	1300	1700	<2
07-V140-M03#1	23	33	9	<10	1200	26	<10	<2	<2	<10	32	960	1100	<2
08-E140-C01#3	12	19	6	<10	400	23	<10	<2	<2	<10	24	450	610	<2
08-E140-C01#5	19	24	9	<10	580	23	<10	<2	<2	<10	30	770	980	<2
09-V250-M02#1	12	14	5	<10	330	22	<10	<2	<2	<10	24	400	550	<2
10-E250-M01	10	13	5	<10	400	27	<10	<2	<2	<10	24	350	400	<2
12-P350-M02	30	25	10	<10	6300	26	<10	<2	<2	<10	40	1500	1600	<2
13-350-C01	42	27	11	<10	500	8.4	<10	<2	<2	<10	46	2000	2200	<2
13-350LGE-M01	37	25	10	<10	4200	25	<10	<2	<2	<10	40	1800	1900	<2

表 5.3.3-1 幌延の地下施設から採取した地下水試料の分析結果 (続き)

(3) 同位体

サンプル名	$^{14}\text{C}$	$\delta^{13}\text{C}$	$^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$	$\delta^{37}\text{Cl}$	$\delta\text{D}$	$\delta^{18}\text{O}$
	pMC (%)	‰	$\times 10^{-15}$	‰	‰	‰
07-V140-M01	<0.44%	+18.8	3.8 ± 0.8	-1.99 ± 0.10	-45.1 ± 0.27	-2.13 ± 0.05
07-V140-M03#1	<0.44%	+18.9	6.1 ± 1.0	-1.72 ± 0.09	-49.7 ± 0.16	-3.23 ± 0.01
08-E140-C01#3	<0.44%	+19.2	5.4 ± 1.0	-2.40 ± 0.08	-53.8 ± 0.50	-4.34 ± 0.13
08-E140-C01#5	<0.44%	+19.8	5.5 ± 1.0	-2.14 ± 0.10	-47.7 ± 0.27	-2.45 ± 0.14
09-V250-M02#1	<0.44%	+19.0	5.5 ± 1.2	-1.21 ± 0.07	-62.2 ± 0.43	-6.88 ± 0.04
10-E250-M01	<0.44%	+18.7	4.9 ± 1.0	-1.72 ± 0.07	-61.0 ± 0.27	-6.41 ± 0.06
12-P350-M02	<0.44%	+18.2	5.3 ± 1.0	-1.20 ± 0.10	-40.9 ± 0.22	-0.90 ± 0.03
13-350-C01	<0.44%	+18.2	4.7 ± 0.9	-0.75 ± 0.10	-34.4 ± 0.20	0.05 ± 0.03
13-350LGE-M01	<0.44%	+18.8	5.6 ± 1.0	-0.94 ± 0.10	-36.4 ± 0.19	-0.24 ± 0.04

(4) 希ガス

サンプル名	計測値			補正值 (Ne補正)		特記事項
	$^4\text{He}$	$^3\text{He}/^4\text{He}$	Ne	$^4\text{He}$	$^3\text{He}/^4\text{He}$	
	cc <sub>STP</sub> /g <sub>w</sub>	-	cc <sub>STP</sub> /g <sub>w</sub>	cc <sub>STP</sub> /g <sub>w</sub>	-	
07-V140-M01	5.5E-6	4.0E-7	2.4E-6	4.6E-07	4.0E-07	水上置換ガス
07-V140-M03#1	2.1E-6	2.9E-7	3.4E-7	1.2E-06	2.9E-07	水上置換ガス
08-E140-C01#3	1.1E-6	9.3E-7	9.0E-7	9.1E-07	8.3E-07	水上置換ガス
08-E140-C01#5	5.1E-7	9.6E-7	6.7E-7	1.5E-07	9.6E-07	水上置換ガス
09-V250-M02#1	1.3E-6	1.4E-6	3.5E-6	3.7E-07	1.3E-06	水上置換ガス
10-E250-M01	1.3E-6	1.0E-6	1.0E-6	2.6E-07	1.0E-06	水上置換ガス
12-P350-M02	9.3E-7	8.6E-7	8.0E-7	7.6E-07	7.4E-07	水上置換ガス
13-350-C01	2.3E-6	5.5E-7	6.1E-7	7.4E-07	5.5E-07	水上置換ガス
13-350LGE-M01	1.7E-4	1.0E-7	1.2E-5	2.7E-06	1.0E-07	水上置換ガス

### 5.3.3.5 考察

#### (1) 主要溶存イオン

主要溶存イオンの時間的な変化をヘキサダイアグラムとして図 5.3.3-6 に示す。数年間にわたり調査を続けており、同じ地点で採取しているものもあるが、ヘキサダイアグラムでは違いは明確ではない。一部 13-350LGE-M01 については変化があるように見えるが、この地点ではパッカーシステムを入れ替えており、その影響で変化している可能性がある。主要溶存イオンは、ほぼ Na-Cl 型で一部 Cl 濃度が低い地点では Na-HCO<sub>3</sub>-Cl 型である。Cl 濃度は浅部で低いが、声間層内で Cl 濃度が増加し、深度 250m 地点でまた低下し、深部に向けてまた増加するような傾向を示す。これは、深度 250m 付近に声間層と稚内層の地層境界があり、透水係数がやや大きく、地下水が流れやすくなっているためと考えられている。

#### (2) 水素・酸素同位体比

水素・酸素同位体比の関係を図 5.3.3-7 に示す。水素・酸素同位体比は、水岩石相互作用によって、海水から水素同位体比は軽く、酸素同位体比が重く変化した化石海水の成分が、降水によって希釈されていると解釈されている (Hama et al., 2007)。図でも、化石海水成分と降水成分の混合によって水素・酸素同位体比の変化が説明できる。ここに、現降水成分は Kashiwaya et al. (2014) の幌延沿岸における約 50 年程度の地下水年代をもつ試料 9 試料の平均値から求めた。ただし、混合線は、現降水よりも水素・酸素同位体比がやや低い成分と混合しているように見えることから、氷期降水の成分と混合している可能性がある。立坑で採水した地下水の水素・酸素同位体比は、140 m 坑道ではやや大きいが、250 m 坑道では低下し、350 m 坑道ではまた重くなっており、Cl 濃度の変化と連動している。このため、Cl 濃度の低い降水の声間層/稚内層境界への流入による水素・酸素同位体比の変化ではないかと考えられる。

#### (3) 炭素同位体

炭素同位体比は、表 5.3.3-1 に示した通り、<sup>14</sup>C はほとんどが検出限界以下であり、 $\delta^{13}\text{C}$  は+20‰前後である。これは、有機物分解によるメタン生成で、次式のように炭酸が供給されているためであると考えられる。一般に、 $\delta^{13}\text{C}$  は有機物が-25‰程度、メタンは-60‰程度であるため、生成する CO<sub>2</sub> はマスマランス的に、+10‰程度となる (Clark and Fritz, 1997)。このように、堆積時に取り込まれた有機物を分解して生成した CO<sub>2</sub> が支配的なため、溶存炭酸濃度も高くなっていると考えられる。このような擾乱を受けているため、<sup>14</sup>C による年代の推定は困難である。



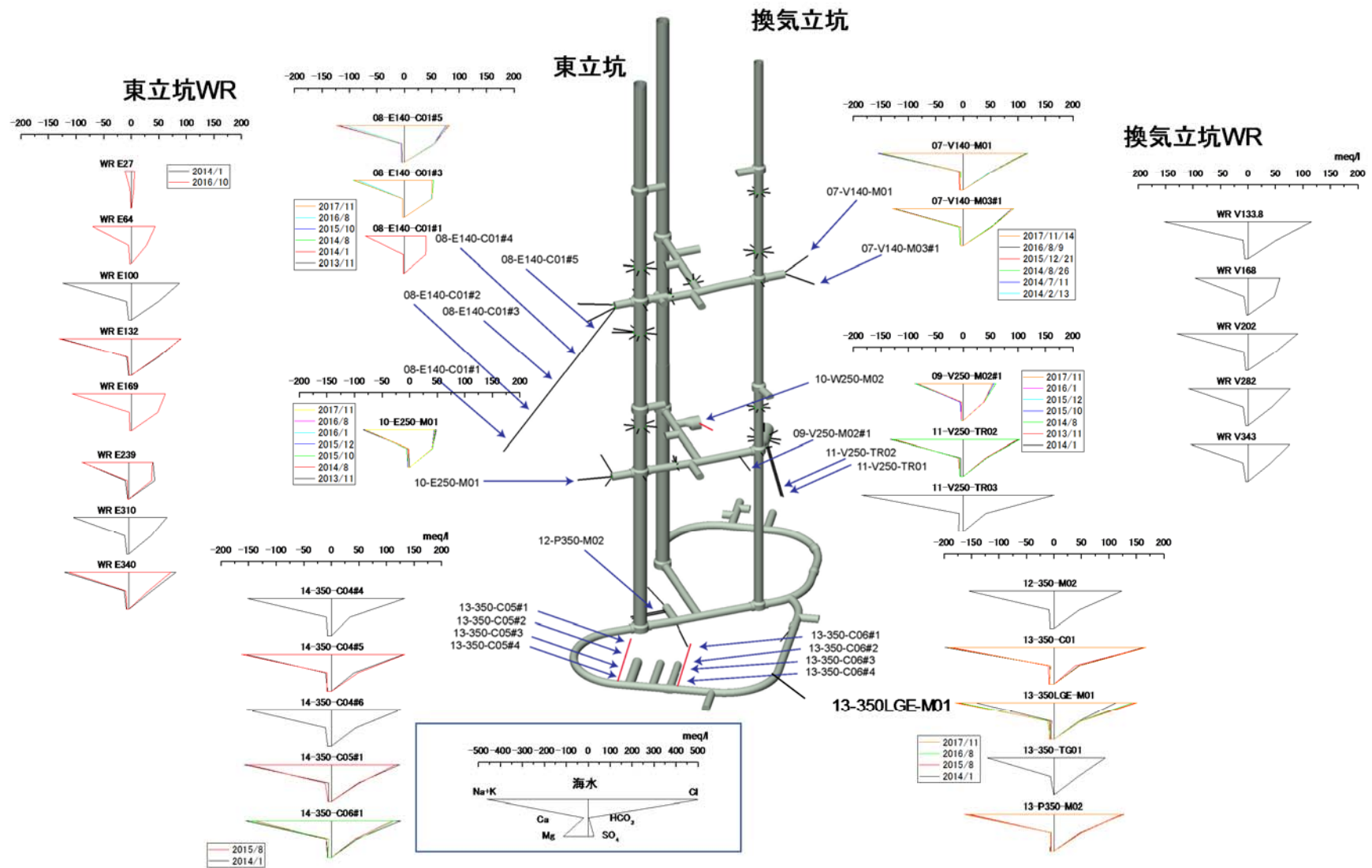


図 5.3.3-6 ヘキサダイアグラムの時間変化

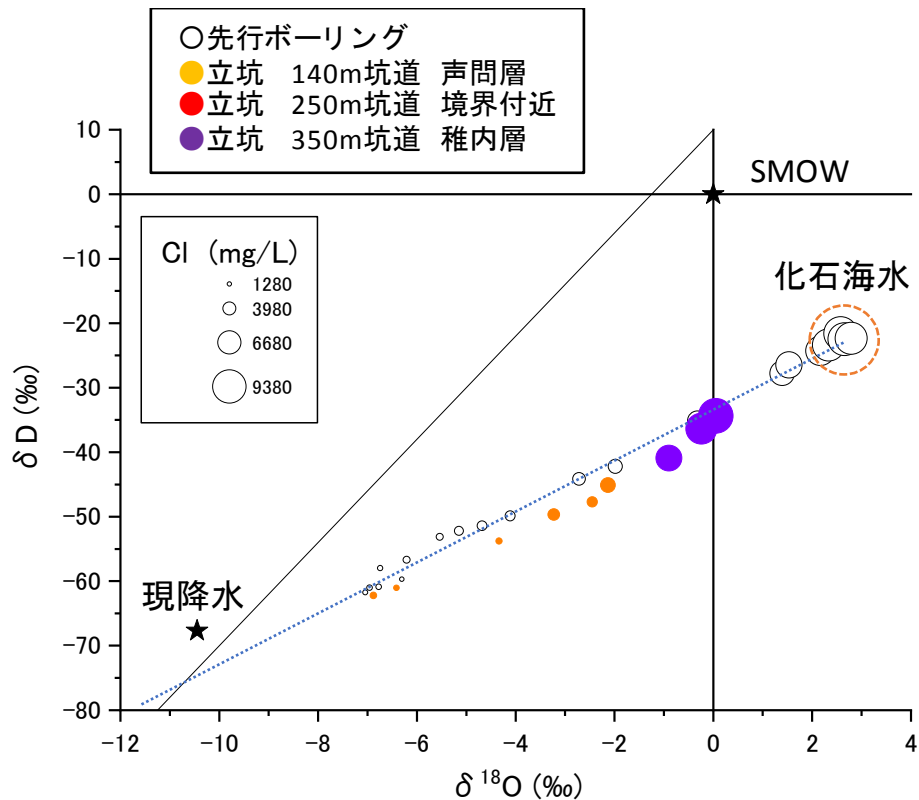


図 5.3.3-7 水素・酸素同位体比の関係

(4) 各成分の相関

各成分を回帰分析した際の相関係数をとったものを表 5.3.3-2 に示す。表から Cl に相関性が強いものが多い。これは、Na, Mg, Ca, Br, Li, Rb, Ba, Sr,  $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$  など主要な溶存成分は Cl と相関が良い。これは、水素・酸素同位体比の部分でも述べたように、幌延立坑周辺の地下水が化石海水と降水の混合で形成されているためと考えられる。その他では、炭酸濃度に関連するもの (Alkalinity, TC, TIC, TOC) と K, B の相関が良い傾向にある。

(5) 主成分分析

主要溶存イオン、微量元素、水素・酸素同位体の分析結果を用いて主成分分析を実施した。これは、5.3.1.5(6)で示したように、各成分の変化を多次元的に表現し、バラツキの大きい方向に新しい軸を作成して、その特徴を表す方法である。

この結果を図 5.3.3-8 に示す。第一主成分は寄与率が 72%で、Cl と相関が高いものの係数が全体的に高くなっている。寄与率とは全データの内の使用したデータ量の指標である。このため、主成分分析においても、化石海水と降水の混合が情報量の大部分を占めることがわかる。第二主成分は寄与率が 14%で  $NO_3$  の係数が大きく、K や Si の係数が小さくなっている。溶解と沈殿の影響と考えられる。



表 5.3.3-2 各成分の相関

Component	Na	K	Mg	Ca	B	Cl	NO <sub>3</sub>	Si	ALK	TOC	TC	TIC	NPOC	Br	I	Li
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	meq/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Na	1.00	0.53	1.00	0.92	0.80	1.00	0.14	-0.76	0.08	0.44	0.42	0.42	0.27	0.99	0.66	0.93
K	0.53	1.00	0.52	0.53	0.86	0.48	-0.47	0.06	0.53	0.78	0.82	0.82	0.82	0.53	0.58	0.79
Mg	1.00	0.52	1.00	0.92	0.77	1.00	0.14	-0.78	0.02	0.38	0.37	0.36	0.22	1.00	0.62	0.93
Ca	0.92	0.53	0.92	1.00	0.74	0.92	0.27	-0.71	0.17	0.47	0.46	0.46	0.28	0.91	0.50	0.86
B	0.80	0.86	0.77	0.74	1.00	0.74	-0.31	-0.26	0.56	0.86	0.86	0.86	0.79	0.77	0.77	0.93
Cl	1.00	0.48	1.00	0.92	0.74	1.00	0.19	-0.81	-0.01	0.36	0.34	0.33	0.18	1.00	0.62	0.91
NO3	0.14	-0.47	0.14	0.27	-0.31	0.19	1.00	-0.60	-0.56	-0.47	-0.44	-0.44	-0.55	0.15	-0.19	-0.08
Si	-0.76	0.06	-0.78	-0.71	-0.26	-0.81	-0.60	1.00	0.37	0.17	0.16	0.15	0.32	-0.77	-0.33	-0.53
ALK	0.08	0.53	0.02	0.17	0.56	-0.01	-0.56	0.37	1.00	0.79	0.86	0.86	0.81	0.01	0.36	0.25
TOC	0.44	0.78	0.38	0.47	0.86	0.36	-0.47	0.17	0.79	1.00	0.96	0.96	0.92	0.39	0.66	0.63
TC	0.42	0.82	0.37	0.46	0.86	0.34	-0.44	0.16	0.86	0.96	1.00	1.00	0.96	0.36	0.64	0.64
TIC	0.42	0.82	0.36	0.46	0.86	0.33	-0.44	0.15	0.86	0.96	1.00	1.00	0.96	0.36	0.64	0.63
NPOC	0.27	0.82	0.22	0.28	0.79	0.18	-0.55	0.32	0.81	0.92	0.96	0.96	1.00	0.22	0.56	0.53
Br	0.99	0.53	1.00	0.91	0.77	1.00	0.15	-0.77	0.01	0.39	0.36	0.36	0.22	1.00	0.63	0.93
I	0.66	0.58	0.62	0.50	0.77	0.62	-0.19	-0.33	0.36	0.66	0.64	0.64	0.56	0.63	1.00	0.75
Li	0.93	0.79	0.93	0.86	0.93	0.91	-0.08	-0.53	0.25	0.63	0.64	0.63	0.53	0.93	0.75	1.00
Fe	0.50	0.02	0.46	0.51	0.31	0.49	0.60	-0.57	0.09	0.12	0.22	0.23	0.07	0.46	0.33	0.37
Mn	-0.32	0.25	-0.34	-0.16	-0.04	-0.34	0.06	0.52	0.20	0.16	0.23	0.24	0.27	-0.32	-0.22	-0.13
Rb	0.99	0.55	0.99	0.89	0.78	0.99	0.13	-0.76	0.03	0.37	0.38	0.38	0.25	0.99	0.60	0.93
Ba	0.99	0.49	1.00	0.92	0.75	1.00	0.19	-0.80	0.02	0.37	0.36	0.35	0.19	1.00	0.61	0.91
Sr	0.99	0.58	0.99	0.93	0.79	0.99	0.13	-0.75	0.06	0.41	0.41	0.40	0.25	0.99	0.60	0.94
δ D (‰)	0.98	0.54	0.96	0.92	0.85	0.96	0.06	-0.69	0.26	0.56	0.54	0.54	0.37	0.95	0.69	0.92
δ <sup>18</sup> O	0.96	0.59	0.93	0.90	0.89	0.93	0.02	-0.63	0.35	0.63	0.62	0.62	0.47	0.93	0.72	0.92
δ <sup>13</sup> C	-0.51	0.06	-0.55	-0.32	-0.09	-0.56	-0.30	0.69	0.44	0.38	0.31	0.31	0.41	-0.56	-0.13	-0.35
<sup>36</sup> Cl/Cl	-0.20	-0.37	-0.26	-0.25	-0.18	-0.22	0.21	0.01	0.06	0.04	0.00	0.00	-0.04	-0.26	0.38	-0.26
<sup>36</sup> Cl量	0.85	0.34	0.82	0.92	0.66	0.84	0.40	-0.73	0.18	0.47	0.44	0.44	0.23	0.82	0.63	0.75
<sup>4</sup> He	0.44	-0.06	0.41	0.57	0.18	0.45	0.54	-0.43	-0.08	0.21	0.08	0.06	-0.14	0.42	0.20	0.28
<sup>3</sup> He/ <sup>4</sup> He	-0.73	-0.64	-0.71	-0.67	-0.73	-0.71	0.10	0.30	-0.23	-0.63	-0.54	-0.53	-0.39	-0.73	-0.72	-0.79
Ne	0.33	-0.14	0.32	0.52	0.02	0.36	0.66	-0.42	-0.21	0.05	-0.07	-0.08	-0.27	0.33	0.02	0.16
Cor. <sup>4</sup> He	0.50	0.02	0.47	0.56	0.27	0.50	0.41	-0.47	0.04	0.26	0.16	0.15	-0.09	0.48	0.46	0.37
Cor. <sup>3</sup> He/ <sup>4</sup> He	-0.74	-0.63	-0.72	-0.69	-0.74	-0.71	0.07	0.33	-0.28	-0.62	-0.56	-0.55	-0.39	-0.73	-0.73	-0.79

相関係数は赤の背景 0.9 以上、緑の背景 0.8 以上

表 5.3.3-2 各成分の相関(続き)

Component	Fe	Mn	Rb	Ba	Sr	$\delta D(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{13}\text{C}$	$^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$	$^{36}\text{Cl}$ 量	$^4\text{He}$	$^3\text{He}/^4\text{He}$	Ne	Cor. $^4\text{He}$	Cor. $^3\text{He}/^4\text{He}$
	$\mu\text{g/L}$	$\mu\text{g/L}$	$\mu\text{g/L}$	$\mu\text{g/L}$	$\mu\text{g/L}$	‰	‰	‰	-	atm/L	CCSTP/g <sub>w</sub>	-	CCSTP/g <sub>w</sub>	CCSTP/g <sub>w</sub>	-
Na	0.50	-0.32	0.99	0.99	0.99	0.98	0.96	-0.51	-0.20	0.85	0.44	-0.73	0.33	0.50	-0.74
K	0.02	0.25	0.55	0.49	0.58	0.54	0.59	0.06	-0.37	0.34	-0.06	-0.64	-0.14	0.02	-0.63
Mg	0.46	-0.34	0.99	1.00	0.99	0.96	0.93	-0.55	-0.26	0.82	0.41	-0.71	0.32	0.47	-0.72
Ca	0.51	-0.16	0.89	0.92	0.93	0.92	0.90	-0.32	-0.25	0.92	0.57	-0.67	0.52	0.56	-0.69
B	0.31	-0.04	0.78	0.75	0.79	0.85	0.89	-0.09	-0.18	0.66	0.18	-0.73	0.02	0.27	-0.74
Cl	0.49	-0.34	0.99	1.00	0.99	0.96	0.93	-0.56	-0.22	0.84	0.45	-0.71	0.36	0.50	-0.71
NO <sub>3</sub>	0.60	0.06	0.13	0.19	0.13	0.06	0.02	-0.30	0.21	0.40	0.54	0.10	0.66	0.41	0.07
Si	-0.57	0.52	-0.76	-0.80	-0.75	-0.69	-0.63	0.69	0.01	-0.73	-0.43	0.30	-0.42	-0.47	0.33
ALK	0.09	0.20	0.03	0.02	0.06	0.26	0.35	0.44	0.06	0.18	-0.08	-0.23	-0.21	0.04	-0.28
TOC	0.12	0.16	0.37	0.37	0.41	0.56	0.63	0.38	0.04	0.47	0.21	-0.63	0.05	0.26	-0.62
TC	0.22	0.23	0.38	0.36	0.41	0.54	0.62	0.31	0.00	0.44	0.08	-0.54	-0.07	0.16	-0.56
TIC	0.23	0.24	0.38	0.35	0.40	0.54	0.62	0.31	0.00	0.44	0.06	-0.53	-0.08	0.15	-0.55
NPOC	0.07	0.27	0.25	0.19	0.25	0.37	0.47	0.41	-0.04	0.23	-0.14	-0.39	-0.27	-0.09	-0.39
Br	0.46	-0.32	0.99	1.00	0.99	0.95	0.93	-0.56	-0.26	0.82	0.42	-0.73	0.33	0.48	-0.73
I	0.33	-0.22	0.60	0.61	0.60	0.69	0.72	-0.13	0.38	0.63	0.20	-0.72	0.02	0.46	-0.73
Li	0.37	-0.13	0.93	0.91	0.94	0.92	0.92	-0.35	-0.26	0.75	0.28	-0.79	0.16	0.37	-0.79
Fe	1.00	0.18	0.49	0.52	0.45	0.52	0.54	-0.46	0.19	0.63	0.44	-0.29	0.38	0.50	-0.36
Mn	0.18	1.00	-0.28	-0.31	-0.27	-0.33	-0.27	0.22	-0.15	-0.23	0.06	-0.11	0.11	-0.01	-0.12
Rb	0.49	-0.28	1.00	0.99	0.99	0.95	0.93	-0.60	-0.32	0.78	0.34	-0.68	0.25	0.40	-0.69
Ba	0.52	-0.31	0.99	1.00	0.99	0.96	0.93	-0.59	-0.24	0.84	0.45	-0.71	0.35	0.51	-0.73
Sr	0.45	-0.27	0.99	0.99	1.00	0.95	0.93	-0.53	-0.31	0.82	0.40	-0.73	0.32	0.46	-0.73
$\delta D(\text{‰})$	0.52	-0.33	0.95	0.96	0.95	1.00	0.99	-0.42	-0.15	0.87	0.44	-0.72	0.31	0.52	-0.74
$\delta^{18}\text{O}$	0.54	-0.27	0.93	0.93	0.93	0.99	1.00	-0.36	-0.13	0.86	0.41	-0.71	0.26	0.49	-0.74
$\delta^{13}\text{C}$	-0.46	0.22	-0.60	-0.59	-0.53	-0.42	-0.36	1.00	0.30	-0.21	-0.04	0.24	-0.01	-0.18	0.28
$^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$	0.19	-0.15	-0.32	-0.24	-0.31	-0.15	-0.13	0.30	1.00	0.15	0.22	0.03	0.15	0.39	0.00
$^{36}\text{Cl}$ 量	0.63	-0.23	0.78	0.84	0.82	0.87	0.86	-0.21	0.15	1.00	0.71	-0.66	0.63	0.74	-0.68
$^4\text{He}$	0.44	0.06	0.34	0.45	0.40	0.44	0.41	-0.04	0.22	0.71	1.00	-0.58	0.33	0.90	-0.57
$^3\text{He}/^4\text{He}$	-0.29	-0.11	-0.68	-0.71	-0.73	-0.72	-0.71	0.24	0.03	-0.66	-0.58	1.00	-0.44	-0.71	0.99
Ne	0.38	0.11	0.25	0.35	0.32	0.31	0.26	-0.01	0.15	0.63	0.33	-0.44	1.00	0.82	-0.43
Cor. $^4\text{He}$	0.50	-0.01	0.40	0.51	0.46	0.52	0.49	-0.18	0.39	0.74	0.90	-0.71	0.82	1.00	-0.74
Cor. $^3\text{He}/^4\text{He}$	-0.36	-0.12	-0.69	-0.73	-0.73	-0.74	-0.74	0.28	0.00	-0.68	-0.57	0.99	-0.43	-0.74	1.00

相関係数は赤の背景 0.9 以上、緑の背景 0.8 以上

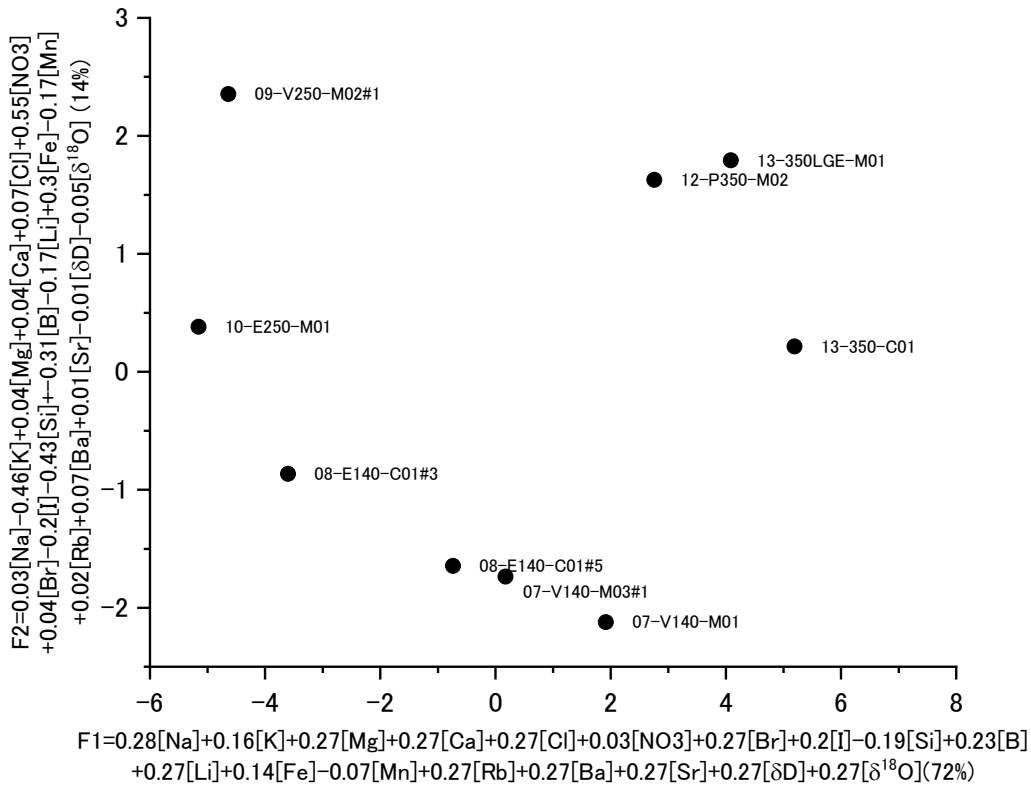


図 5.3.3-8 立坑の調査結果を用いた主成分分析結果

(6) 希ガス

希ガス分析は、前述のように水上置換で採取したガスを用いて分析した。これは、幌延の地下水の脱ガスが激しく、平均的に 80%程度が脱ガスしており、水よりもガスの方に情報が多く、水とガスが混合した状態の試料よりも、ガス自体の方が安定して分析が実施できると考えたためである。今年度の分析結果は表 5.3.3-1 に示すように、ガス自体を分析したことで、1桁程度のバラツキの比較的安定した分析結果となっている。

図 5.3.3-9 に He 濃度と Cl 濃度の関係を示す。横軸を Cl 濃度としたのは、主成分分析などからも明らかのように、幌延立坑の地下水は主に化石海水と降水の混合で形成されており、<sup>4</sup>He 濃度も化石海水に蓄積されているため、相関が出やすいと考えたためである。Cl 濃度と相関がある部分もあるが、一部には相関がなく、かなり高い濃度となっている。保存性である Ne 濃度で補正しているが、ガス分離し濃集している可能性がある。

次にヘリウムの起源について検討するために、<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He と <sup>4</sup>He<sub>eq</sub>/<sup>4</sup>He の関係を図 5.3.3-10 に示した。この結果、幌延立坑では <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He について、かなり大きなばらつきがあることがわかる。これは、Nakata et al. (2018) が示すように、外部からのヘリウムフラックスの寄与が異なる可能性がある。ちょうど換気立坑側と東立坑側とで外部フラックスの寄与が異なるようである。一般に、外部からフラックスは高い <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He を持っている。ここでは、<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He は異なるものの、<sup>4</sup>He 濃度については <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He への依

存性が小さいため、蓄積量の影響を及ぼすような大きなフラックスとはなっていないと考えられる。

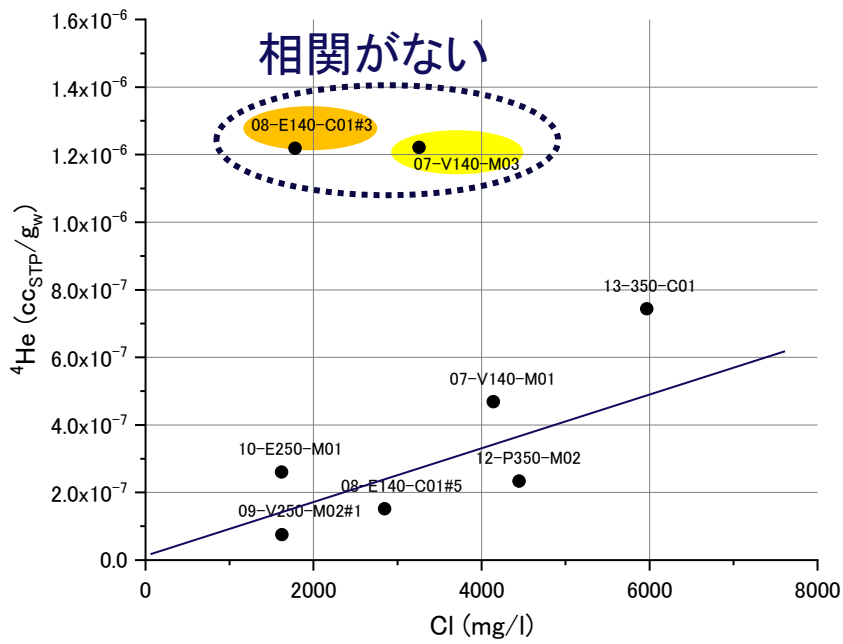


図 5.3.3-9  $^4\text{He}$  濃度と Cl 濃度の相関

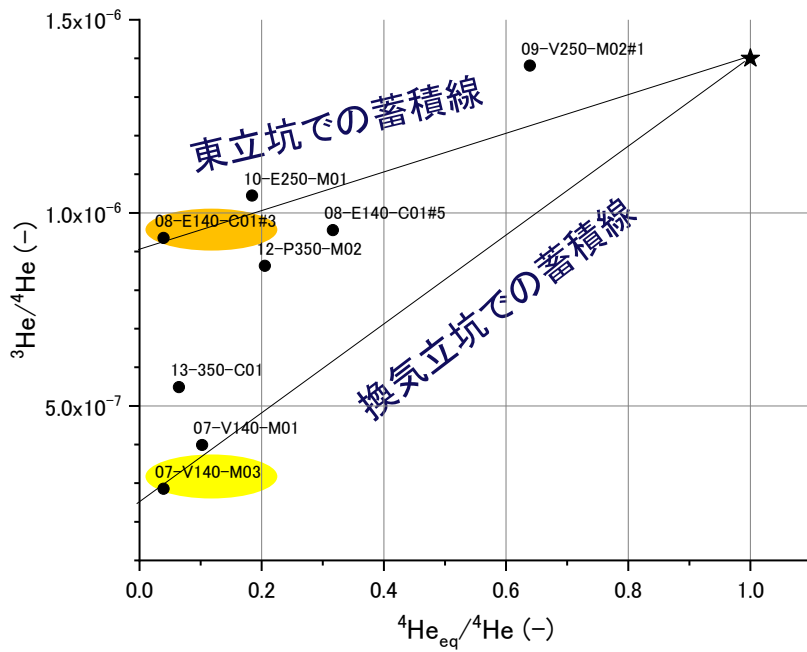


図 5.3.3-10  $^3\text{He}/^4\text{He}$  と  $^4\text{He}_{\text{eq}}/^4\text{He}$  による  $^4\text{He}$  の蓄積形態の検討

(7) 塩素同位体

立坑のボーリング孔から採取した地下水の  $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  を  $\text{Cl}$  濃度とともに図 5.3.3-11 に示す。図には、計測値誤差も併せて示した。計測値とその  $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  の計測値は  $3.8\sim 6.1\times 10^{-15}$  程度の値となっている。 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  は  $\text{Cl}$  濃度によらずほぼ一定であり、 $\text{Cl}$  濃度依存性や深度依存性は明確でない。

$^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  の平衡値は、図 5.3.3-12 のように表され、間隙率や  $\text{Cl}$  濃度に依存する。声問層と稚内層の構成鉱物や含有元素の濃度がほぼ同じなため、このように間隙率と  $\text{Cl}$  濃度の関係で整理できる。 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  の平衡値は、声問層では間隙率 50~60%程度で  $\text{Cl}$  濃度 3800~9500mg/l (海水の 1/5~1/2) であるため、 $2.9\sim 4.9\times 10^{-15}$  程度、稚内層では、間隙率 30~40%程度で  $\text{Cl}$  濃度 3800~9500mg/l (海水の 1/5~1/2) であるため、 $4.9\sim 8.2\times 10^{-15}$  程度である。

このため、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  の計測値は、声問層の平衡値よりもやや高いが、稚内層の平衡値よりもやや小さい。ただし、海水を起源とすると有意に放射化されているため、非常に古い海水であると考えられる。

立坑周辺では、化石海水と降水と混合して水質が形成されているが、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  は濃度ではなく比のため、 $\text{Cl}$  濃度をほとんど含まない降水では希釈されない。このため、降水の混合による影響はほとんどないと考えられる。ただし、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  の平衡値が密度や間隙率(密度)、 $\text{Cl}$  濃度に依存する。また、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  の測定精度が  $1.0\times 10^{-15}$  程度と大きい。このため、これらの影響を強く受けるため  $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  年代を正確に算出することは難しい。

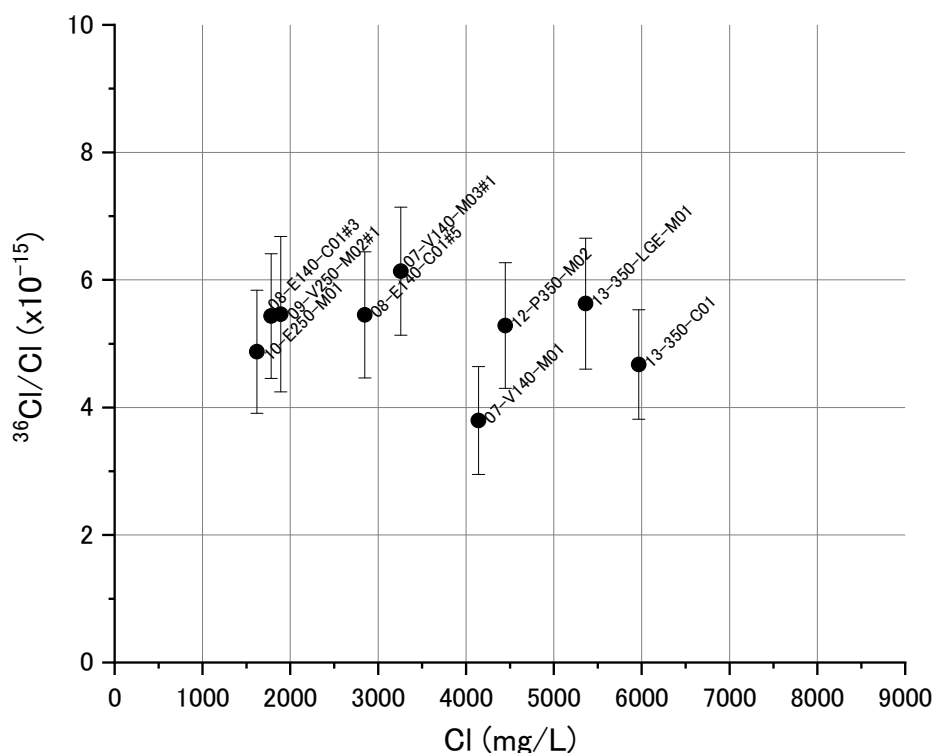


図 5.3.3-11  $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  と  $\text{Cl}$  濃度の関係

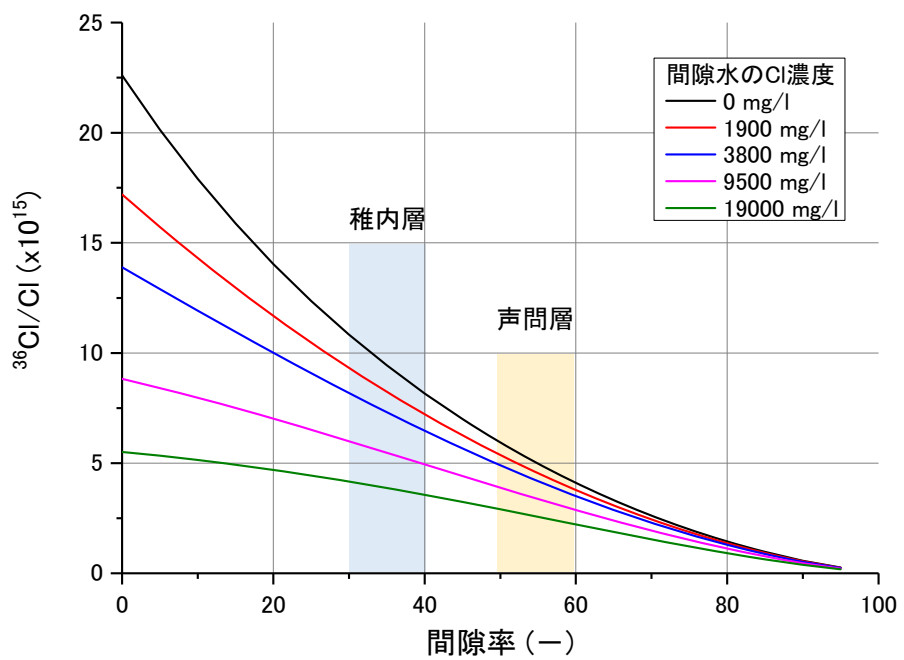


図 5.3.3-12  $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}_{\text{se}}$  と間隙水と間隙水 Cl 濃度の関係

#### 5.3.4 幌延における地下水流動・物質移行解析

##### 5.3.4.1 地下水流動・水質変化の概要

幌延深地層研究センターの掘削に伴う地下水流動・物質移行現象の変化を評価するために地下水流動・物質移行解析を実施した。立坑と調査坑道の掘削の進捗を図 5.3.4-1 に示す(日本原子力研究開発機構、2011)。立坑は2006年から掘削が開始され、2014年に350 m深度に到達している。立坑への湧水量を図 5.3.4-2 に示す(稲垣ほか、2011, 2012, 2013, 稲垣、2014)。図に示す様に、湧水量は東立坑と西立坑を併せて約100 m<sup>3</sup>/日である。この程度の湧水量が、9年間程度継続したと考えると約300万 m<sup>3</sup>の湧水量となり、これは間隙率を50%と考えると100×100×60 mの領域の地下水が湧出したことになる。

立坑への湧水量は、図 5.3.4-2 に示すように、掘削深度が250 m程度で湧水量が急激に増加する傾向が見られている(日本原子力研究開発機構、2011)。これは、声間層と稚内層の境界付近に透水係数の高い領域があり、これが地下施設の建設地点では約250 m深度に存在することから、このような結果になっていると考えられている(日本原子力研究開発機構、2011)。

水圧低下は図 5.3.4-3 に示すように、地下施設周辺のボーリング孔で大きい(日本原子力研究開発機構、2013、2014)。先行ボーリングでは、100 m以上の水圧低下が観測されている。ただし、水圧低下が有意なのは、声間層と稚内層の境界付近の250 m深度、断層の影響がある深度350 m付近のみである。HDB-3孔は地下施設から100 m以上離れているが、深度400m区間では、350m調査坑道における13-350-C03孔を掘削の際、F1断層と推定される断層付近を掘削した後に水圧低下が発生している。このため、この断層の影響を受けていると考えられる(日本原子力研究開発機構、2013)。立坑とボーリング孔の関係を図 5.3.4-4 に示した。図は、湧水量の多い地点と水圧低下の大きい地点とを概念的に示したものである。

これらの結果から、声間層と稚内層の間の高透水領域と断層の掘削にともなう湧水が、地下施設周辺の水圧応答に大きな影響を与えていると推定される。

立坑の集水リングにおける塩分濃度の変化が、天野ほか(2012)や日本原子力研究開発機構(2014)に示されている。この結果から、浅部では地下施設建設に伴い一時的に塩分濃度が増加した後、やや減少する傾向を示す。一方、深部では塩分濃度に顕著な変化は認められていない。これは、前述のように浅部の声間層の間隙率が大きく、100 m四方で水位低下が発生するとすると、まだ60 m程度に相当する程度の水位低下で、地下水が有意に動いていないためと考えられる。

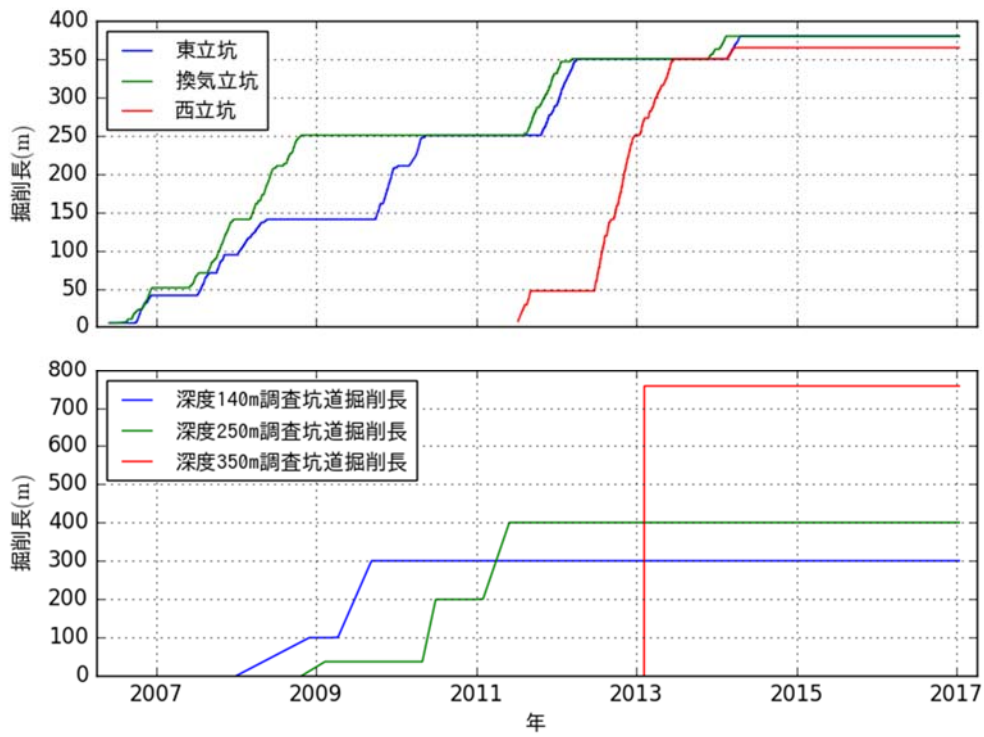


図 5.3.4-1 立坑掘削の進捗

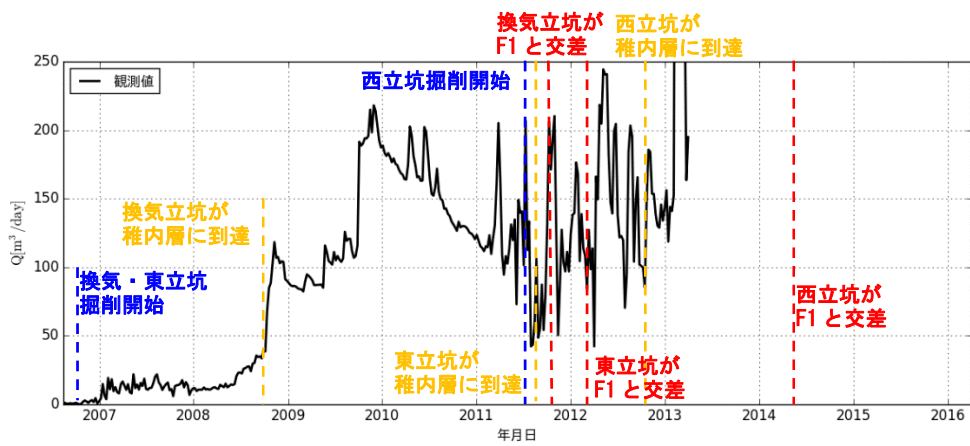


図 5.3.4-2 湧水量の時間変化



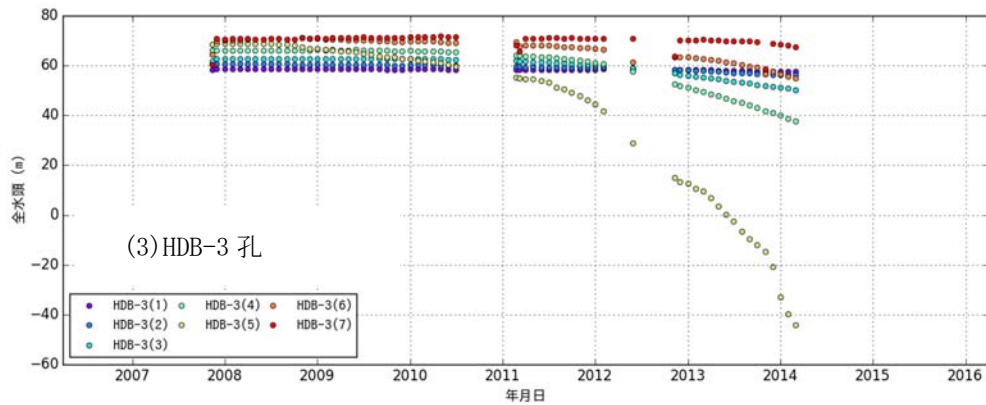
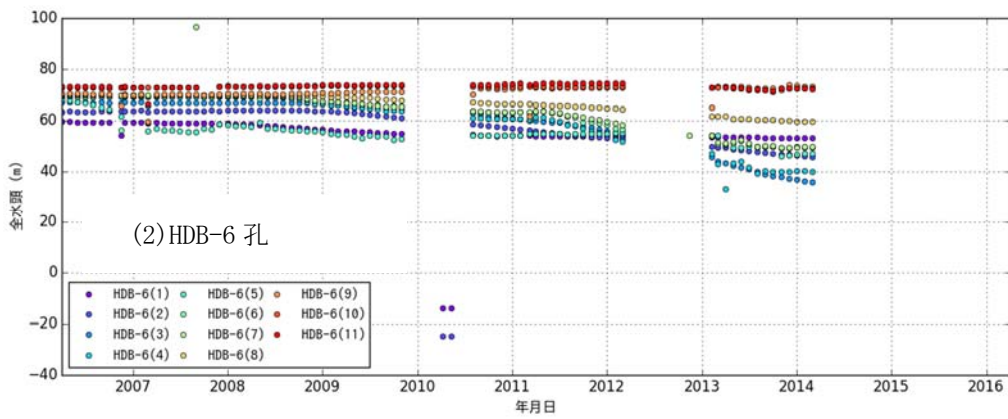
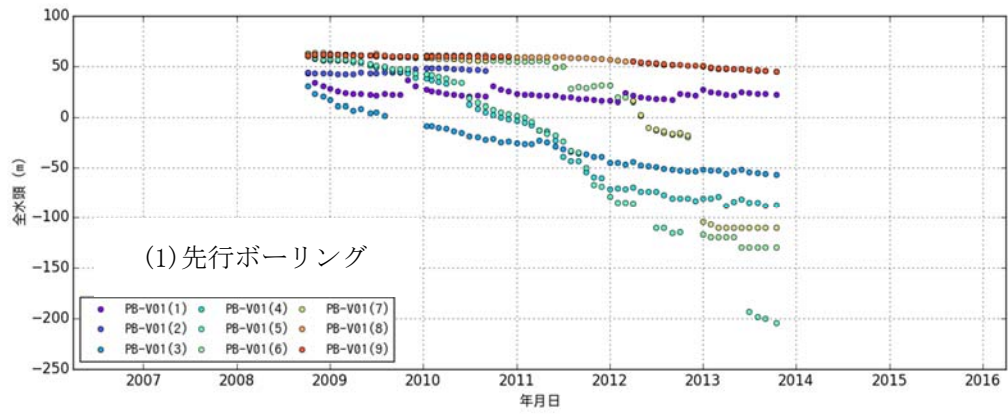


図 5.3.4-3 立坑周辺のボーリング孔における水圧低下

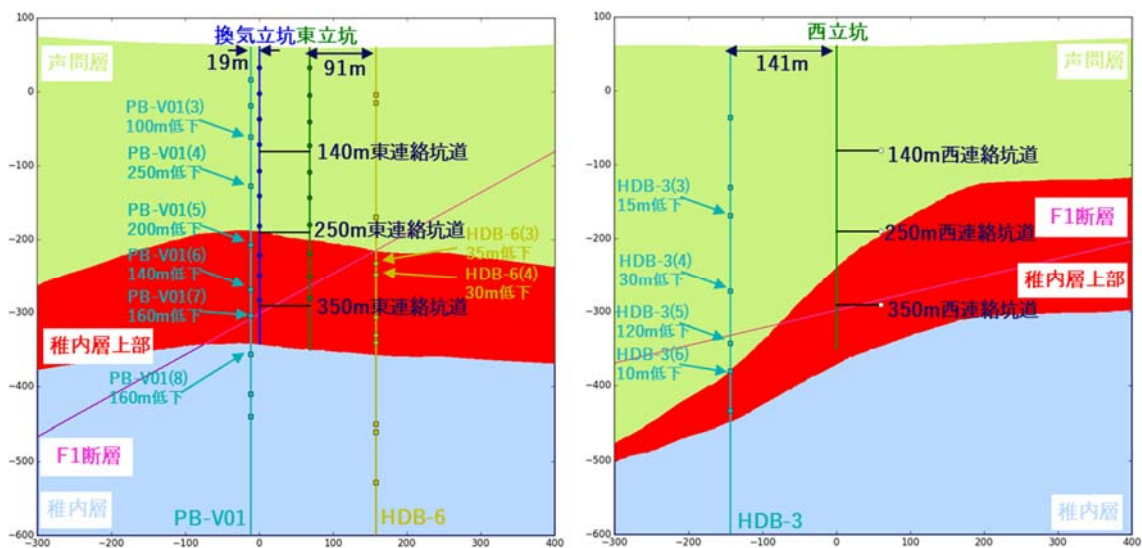


図 5.3.4-4 立坑周辺での水圧低下の概念図

#### 5.3.4.2 解析モデル

幌延深地層研究センターにおける地下施設の建設により、水圧、水質・地下水年代分布にどのような影響を与えるかを明らかにするために、地下水流動・物質移行解析を実施する。

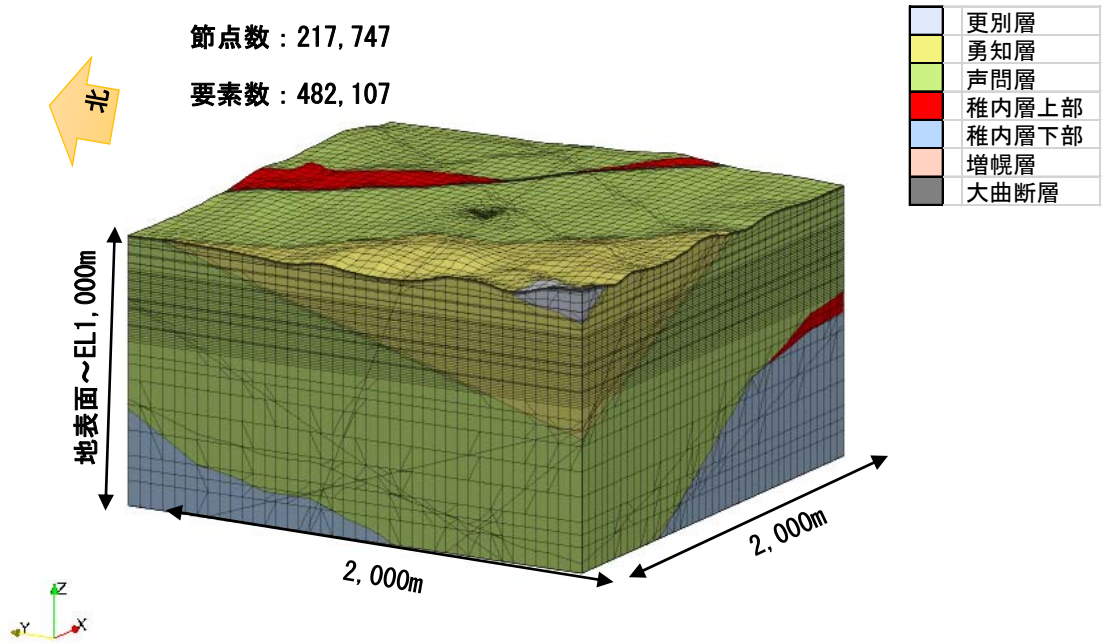
解析モデルは、日本原子力研究開発機構(2011)で作成した地形・地質などを考慮したモデルに基づいて作成した。解析モデルを図 5.3.4-5 に示す。解析モデルは主要な地層と大曲断層、F1 断層をモデル化した。

断層のような不連続面のモデル化は、不連続面と交差する立体要素の透水係数テンソルに不連続面の透水性の影響を加味するスメアードフラクチャーモデルに基づいているため、メッシュを組み直さずに断層の影響を表現することが可能である。

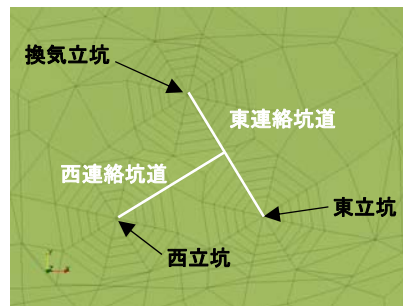
今年度は昨年度の解析結果から重要と考えられた F1 断層のみをモデル化した。F1 断層はスメアード法で領域全体に設定した。

昨年度と同様に調査坑内からの水の流出量は流出箇所等が不明瞭なため、流量の境界条件は坑道全体の流出量を設定した。

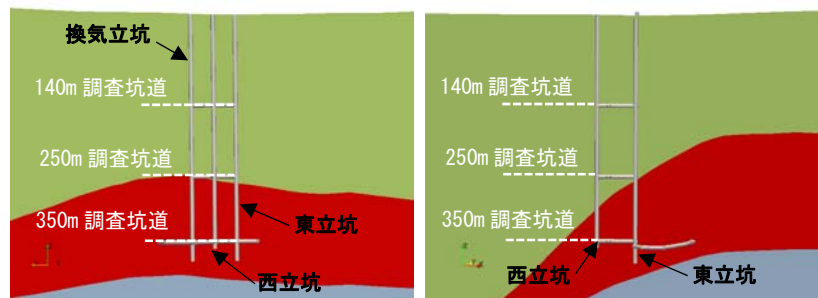
調査坑道についても昨年度と同様に換気立坑、東立坑、西立坑、140、250、350 m の東連絡坑道、西連絡坑道、350 m の東周回坑道と西周回坑道についてモデル化した。これは、図 5.3.4-6 に示すように 350 m 周回坑道の体積が他の立坑や連絡坑道より大きいためである。



(1) 解析メッシュの全体図



(2) 研究所周辺のメッシュ分割



(3) 研究所周辺での断面図

図 5.3.4-5 解析メッシュ及び全体図



図 5.3.4-6 350m 坑道のモデル化

#### 5.3.4.3 解析条件

##### (1) 境界・初期条件の設定

地下水流動の初期・境界条件には、操上ほか(2008)や操上(2007)に記載されている HDB-1～11 号孔の全観測区間の全水頭の観測値に基づいてクリギングで推定したものを用いた。物質移行解析の初期・境界条件も、地下水流動解析と同様に、ボーリング孔での調査結果(天野ほか、2012)に基づいてクリギングで推定したものを用いた。これらの推定結果を全水頭について図 5.3.4-7、塩化物イオン濃度について図 5.3.4-8 に示す。地表面の境界条件は、降雨強度や降雨の水質が明らかであるので、降雨条件年間 100 mm/y の涵養量を用いた。

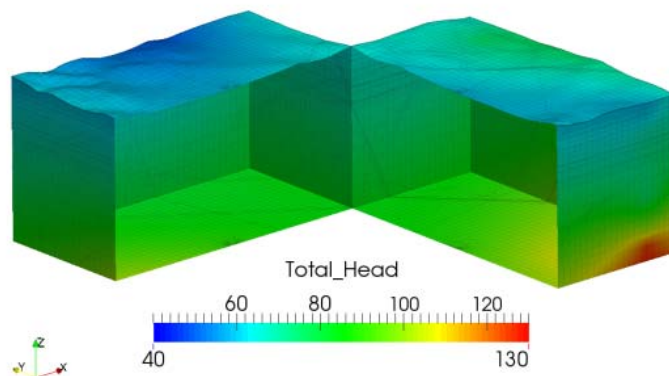


図 5.3.4-7 全水頭の初期・境界条件の分布図

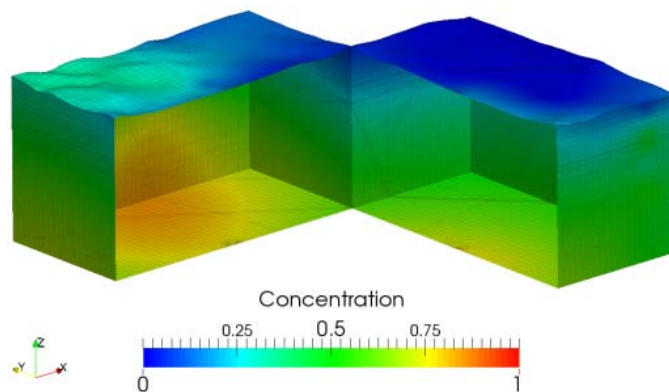


図 5.3.4-8 塩分濃度の初期・境界条件の分布図（海水の塩分濃度 19,000mg/l で正規化）

(2) 物性値の設定

解析に用いた物性値は、表 5.3.4-1 に基づき、表 5.3.4-2 に示すように設定した。透水係数は今井ほか(2002)を参考に設定した。勇知層、声問層、稚内層の比貯留係数は、操上ほか(2008)や操上(2007)を参考に、間隙率は今井ほか(2001)や下茂ほか(2004)を参考に設定した。その他の地層については実測値がないため、推定値とした。

F1 断層については昨年度と同様として水位低下量と湧水量の関係から Cooper-Jacob の式を用いて透水量係数と貯留係数を算出し設定した。

分散長（縦・横）、分子拡散係数は、すべての地層について縦分散長 100 m、横分散長 10 m、分子拡散係数  $1.0 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  とした。

表 5.3.4-1 設置した透水係数と根拠（繰上ほか 2008）

水理地質区分	透水係数 k (m/s)	設定根拠
表層、 段丘堆積物	$1.0 \times 10^{-6}$	大島ほか
更別層	$1.0 \times 10^{-6}$	水理試験から得られた最小二乗線とし、上限を水理試験結果の最高値、下限をコアによる室内試験の対数平均とした。稚内層では小断層帯の指向性を考慮して透水係数の指向性を考慮して透水係数の異方性（小断層帯に直交する方向に1桁小さいと透水係数）を与えた
勇知層	$\log_{10} k = -0.0034 \times z - 8.3665$ $2.5 \times 10^{-10} \leq k \leq 4.0 \times 10^{-9}$	
声間層	$\log_{10} k = -0.0043 \times z - 7.5468$ $1.7 \times 10^{-10} \leq k \leq 4.0 \times 10^{-7}$	
稚内層	$\log_{10} k_{x,z} = -0.0059 \times z - 5.6359$ $\log_{10} k_y = -0.0059 \times z - 6.6359$ $3.6 \times 10^{-12} \leq k \leq 1.4 \times 10^{-5}$	
増幌層	$5.0 \times 10^{-11}$	礫岩・砂岩・泥岩の互層であること、北部の温泉地域の産出層が増幌層と推定されている。このことから、稚内層より透水性は高いと想定し、稚内層の下限より1オーダー高く設定した。
増幌層より下位	$5.0 \times 10^{-12}$	白亜層などの固結した層であることから、上位の増幌層より1オーダー低く設定した。
大曲断層ダメモ ジゾーン	$\log_{10} k = -0.0059 \times z - 4.6359$ $3.6 \times 10^{-11} \leq k \leq 1.0 \times 10^{-5}$	水理試験および石井ほかの知見から、稚内層の高透水方向の透水係数よりも1オーダー高く設定した。
N1 断層	$1.0 \times 10^{-7}$	推定値
N1 断層より東 側	$1.0 \times 10^{-10}$	稚内層より下位の地層が分布し、また褶曲により乱されていると想定できることから、増幌層より高い透水係数を設定した。

■：本解析で再現した地質区分

表 5.3.4-2 解析に用いた物性値

地層名	透水係数 (m/s)	比貯留係数 (1/m)	間隙率 (%)	備考
更別層	$1.00 \times 10^{-6}$	$1.00 \times 10^{-4}$	45	
勇知層	$9.35 \times 10^{-10}$	$1.00 \times 10^{-4}$	45	
声問層	$1.00 \times 10^{-10}$	$1.00 \times 10^{-4}$	50	流れづらく設定
稚内層・上部	$1.00 \times 10^{-8}$	$1.00 \times 10^{-4}$	40	流れやすく設定
稚内層・下部	$5.89 \times 10^{-10}$	$1.00 \times 10^{-4}$	40	
増幌層	$5.00 \times 10^{-11}$	$1.00 \times 10^{-4}$	10	
大曲断層	$1.00 \times 10^{-6}$	$1.00 \times 10^{-4}$	30	
F1	$1.20 \times 10^{-6}$	$3.70 \times 10^{-4}$	100	亀裂幅 1m

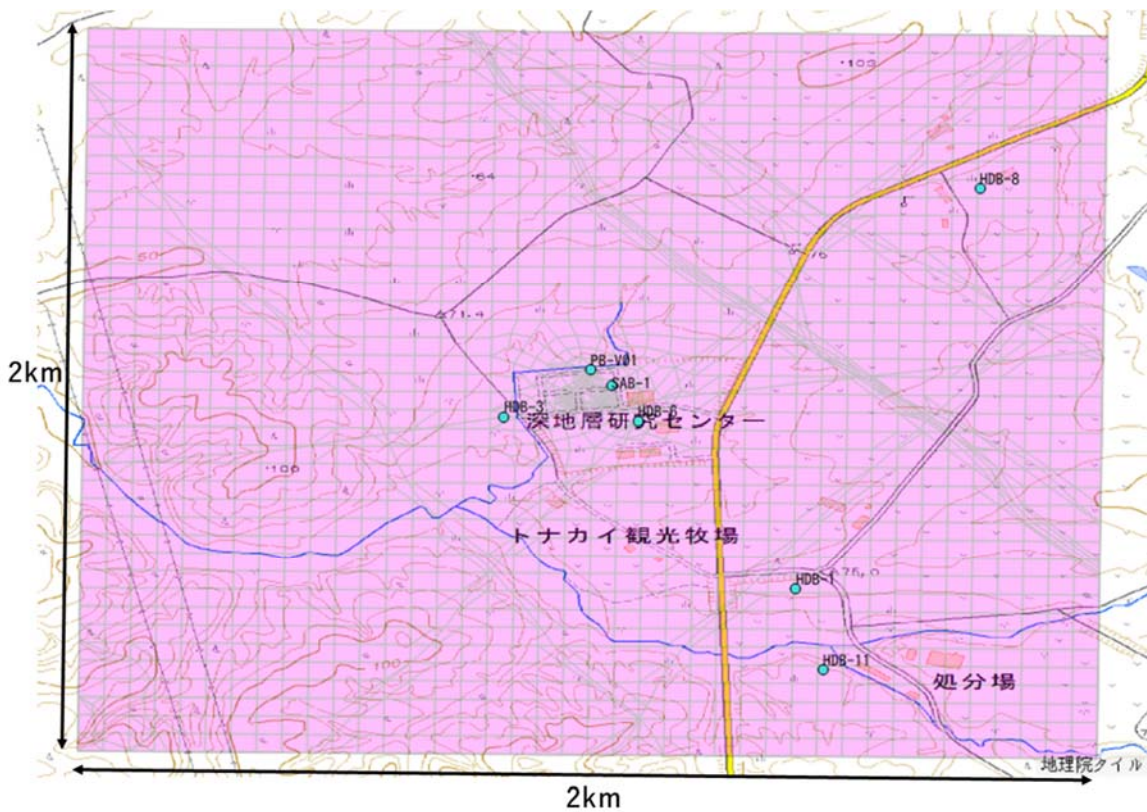


図 5.3.4-9 立坑と周辺の圧力と模擬トレーサー濃度の時間変化を比較しているボーリング孔位置図  
(国土地理院の電子地形図 (タイル) にボーリング孔位置を追記)

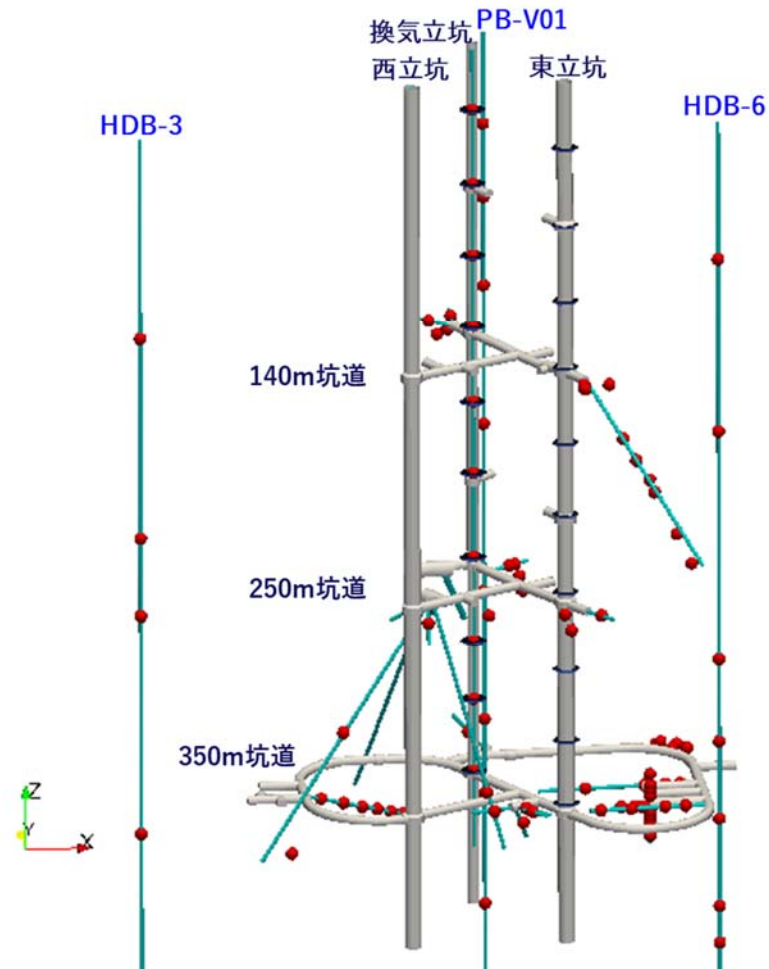


図 5.3.4-10 立坑と周辺の圧力と模擬トレーサー濃度の時間変化をプロットしているボーリング孔位置図

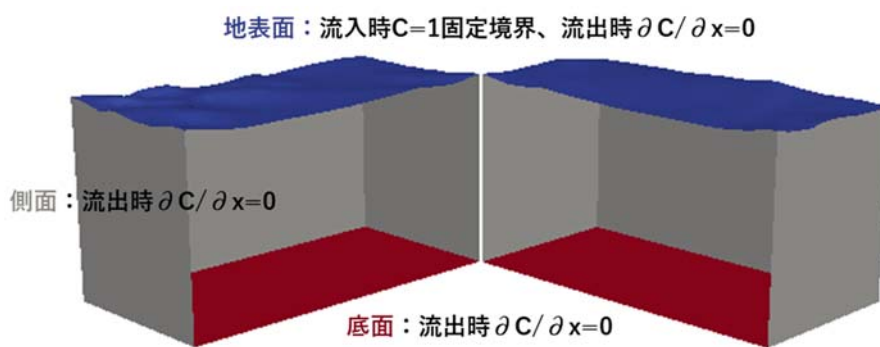


図 5.3.4-11 模擬トレーサー濃度の境界条件概念図



#### 5.3.4.4 定常の地下水流動解析・物質移行解析の解析結果

昨年度まで定常解析ではF1、F8、F10、S1断層を対象に感度解析を実施したが、昨年度までの解析結果でF8、F10についてはHDB-3、PB-V01、HDB-6孔の観測区間に与える影響が軽微であると思われるため今年度は除外した。昨年度までの解析結果でPB-V01孔の稚内層上部の水位低下がS1断層の影響により鈍ることが示唆されたため、S1断層についても今年度は除外した。稚内層上部にはF8、F10、S1断層以外にも多くの亀裂・断層が存在していることが既往の数値解析調査でも報告されているため、今年度は稚内層上部の割れ目帯が高透水帯であることを考慮し、稚内層上部の透水係数を高く設定した。このため、地層構造のほかに、F1断層と稚内層上部の高透水帯のみを考慮した解析モデルとなっている。上記の水理条件で、掘削前と掘削後について地下水流動解析を実施した。

調査坑道の境界条件は、昨年度再現性が良かった大気開放条件（調査坑道掘削後は大気圧であると考え圧力水頭0mでの圧力既知境界）とした。

東連絡坑道と同方向の鉛直断面と西連絡坑道と同方向の鉛直断面で、掘削前と掘削後の全水頭分布図を図5.3.4-12に示す。調査坑道掘削前は、立坑周辺はやや全水頭が低くなっており、地下水が流出する傾向になっている。調査坑道掘削後では、周辺ボーリング孔で立坑を中心に激しい水位低下が発生し、稚内層上部を中心に全体的に過大な水圧低下となっている。

塩化物イオン濃度分布を図5.3.4-13に示す。調査坑道掘削前では、立坑周辺の全水頭が低く流出域となっているため、塩化物イオン濃度は立坑に向けて上昇する傾向があり、全水頭が高く涵養域となっている周辺では降水が流入し、塩化物イオン濃度が低下する傾向がみられる。立坑掘削後には、主に透水係数の高い声問層および稚内層上部が淡水化、塩分濃度は稚内層下部に残留する形態となっている。これは境界条件として、側面と底部とに塩化物イオン濃度を与えているためである。

模擬トレーサー濃度分布を図5.3.4-14に示す。模擬トレーサー濃度は、地表水の流入をみるために実施しており、上部からのみ供給される。調査坑道掘削前は、模擬トレーサー濃度の分布は、全水頭や塩分濃度と調和的で、涵養域で深くまで分布し、流出域では浅く分布している。概ね、稚内層上部層まで模擬トレーサーが到達している。調査坑道掘削後は、模擬トレーサーは、塩化物イオン濃度と同様に、稚内層上部層まで流入している。ただし、稚内層下部層には流入しない形態となっている。

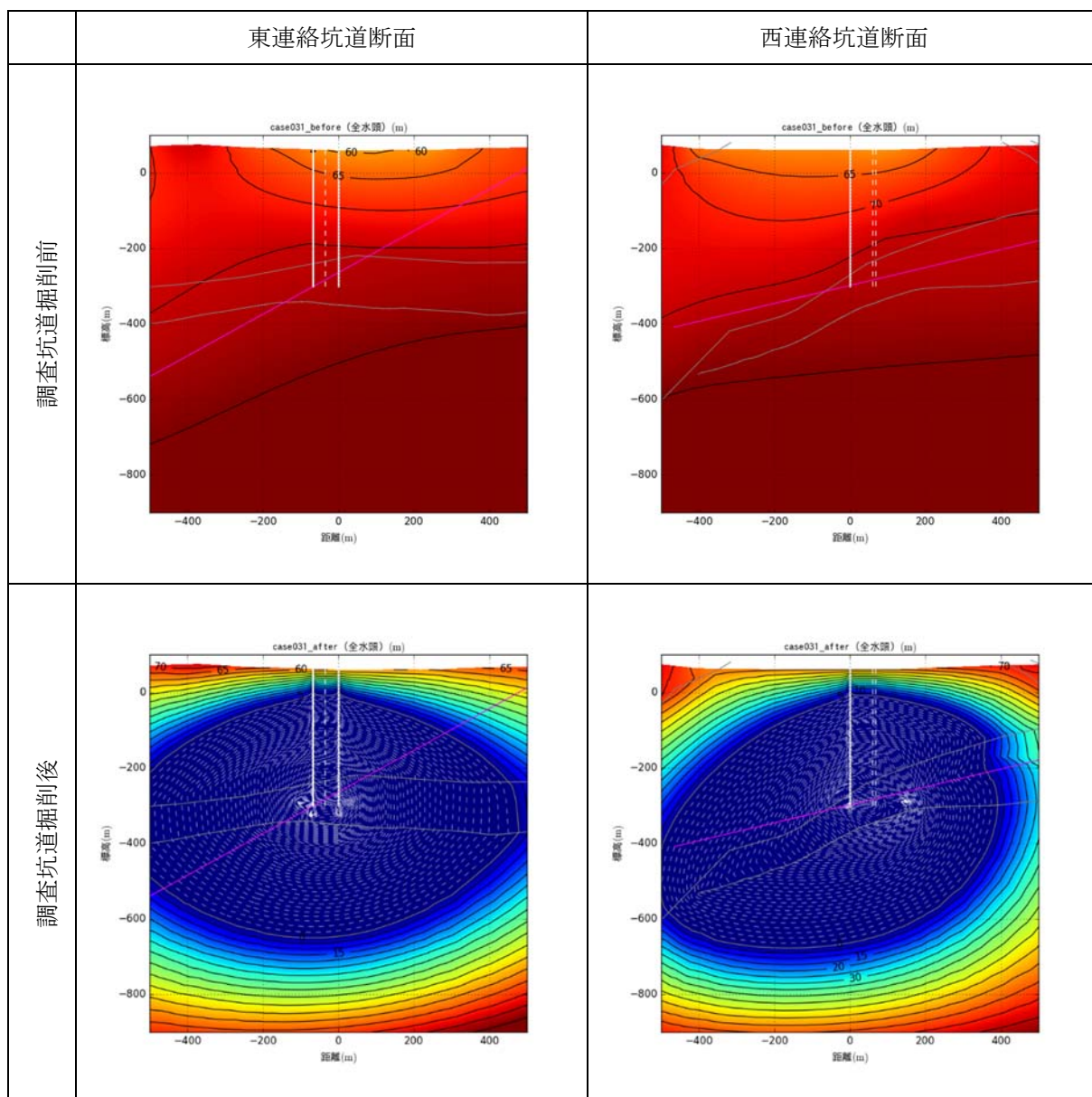


図 5.3.4-12 定常解析の全水頭分布図

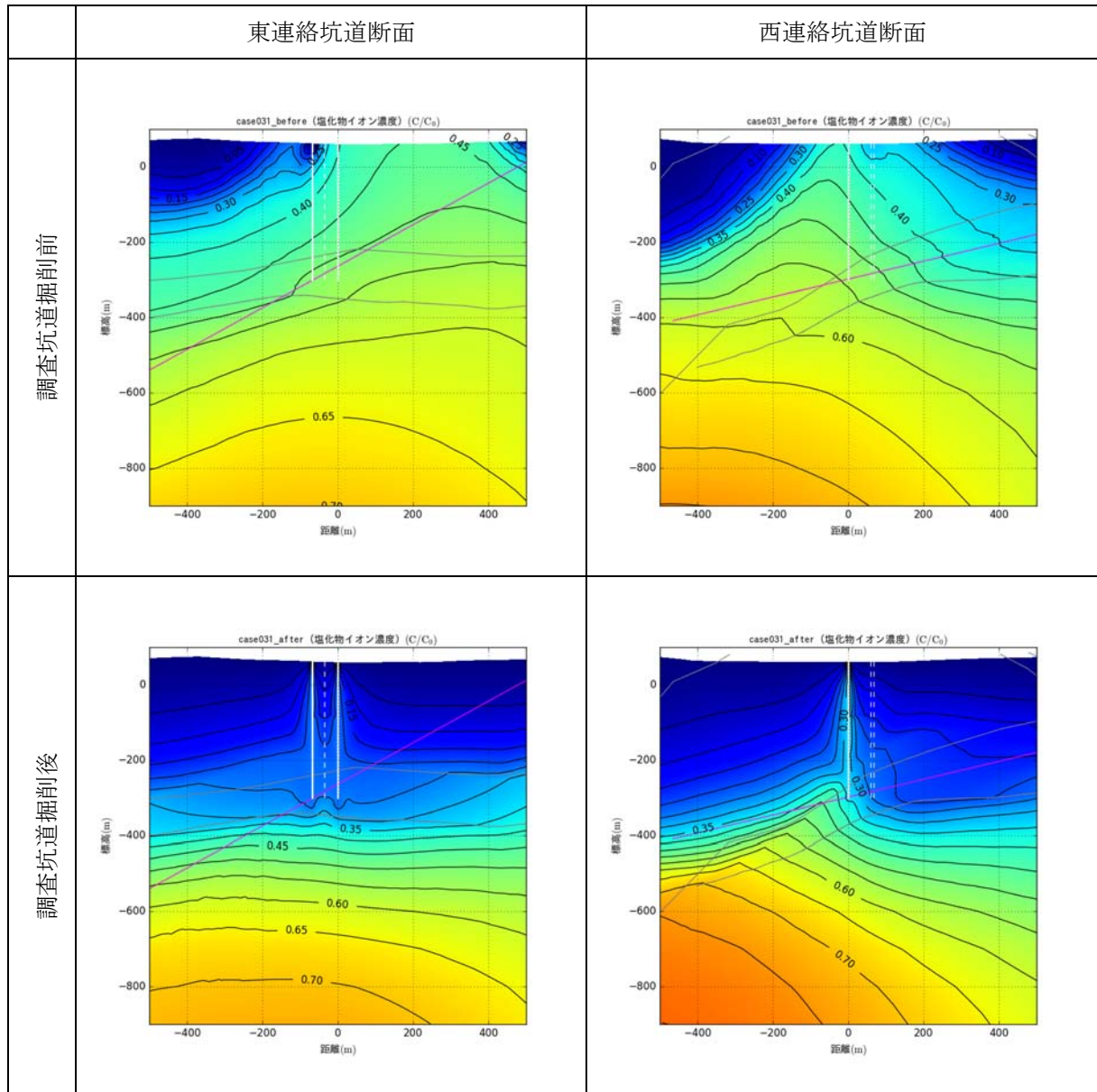


図 5.3.4-13 定常解析の塩化物イオン濃度分布図

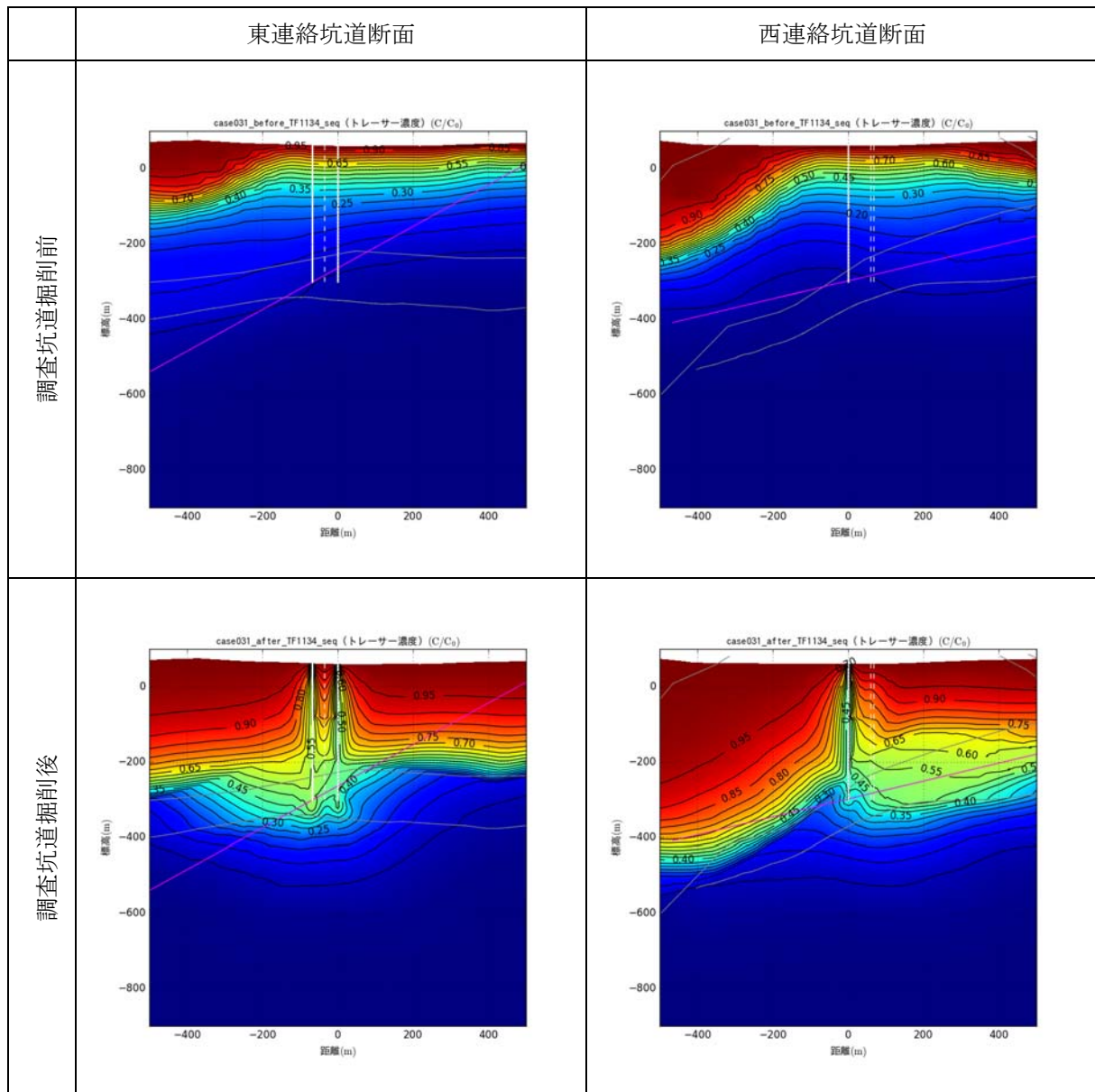


図 5.3.4-14 定常解析の模擬トレーサー濃度分布図

#### 5.3.4.5 非定常の地下水流動・物質移行解析結果

前章で実施した定常解析、水理パラメーターやモデル境界の境界条件と同様に、研究坑道の掘削に伴う非定常解析を実施した。研究坑道の掘削工程は2006年4月1日から2016年4月8日の10年間を考慮した。解析結果として全水頭、模擬トレーサー濃度についてそれぞれ、東立坑と換気立坑を結ぶ東連絡坑道と水平な鉛直断面と西立坑と東連絡坑道を結ぶ西連絡坑道と水平な鉛直断面で、時間断面を2006年4月1日～2016年4月8日間を1年ごとに作成した。また、調査坑道掘削後の定常解析結果も比較のため追記した。塩化物イオン濃度については、模擬トレーサーも同じ傾向を示すことから、ここでは説明を割愛する。

観測ボーリング孔の経時変化を全水頭と模擬トレーサー濃度について図 5.3.4-9 および図 5.3.4-10 に示す箇所（HDB-3 号孔、PB-V01 号孔、HDB-6 号孔）で観測されている区間の中間点で作成した。

##### (1) 解析ケース

解析ケースとして、基本ケースを定常解析の結果を踏まえて設定したケース、比貯留係数の設定値による解析結果に与える影響を調査したケース、間隙率の設定値による影響を調査したケースを実施した。

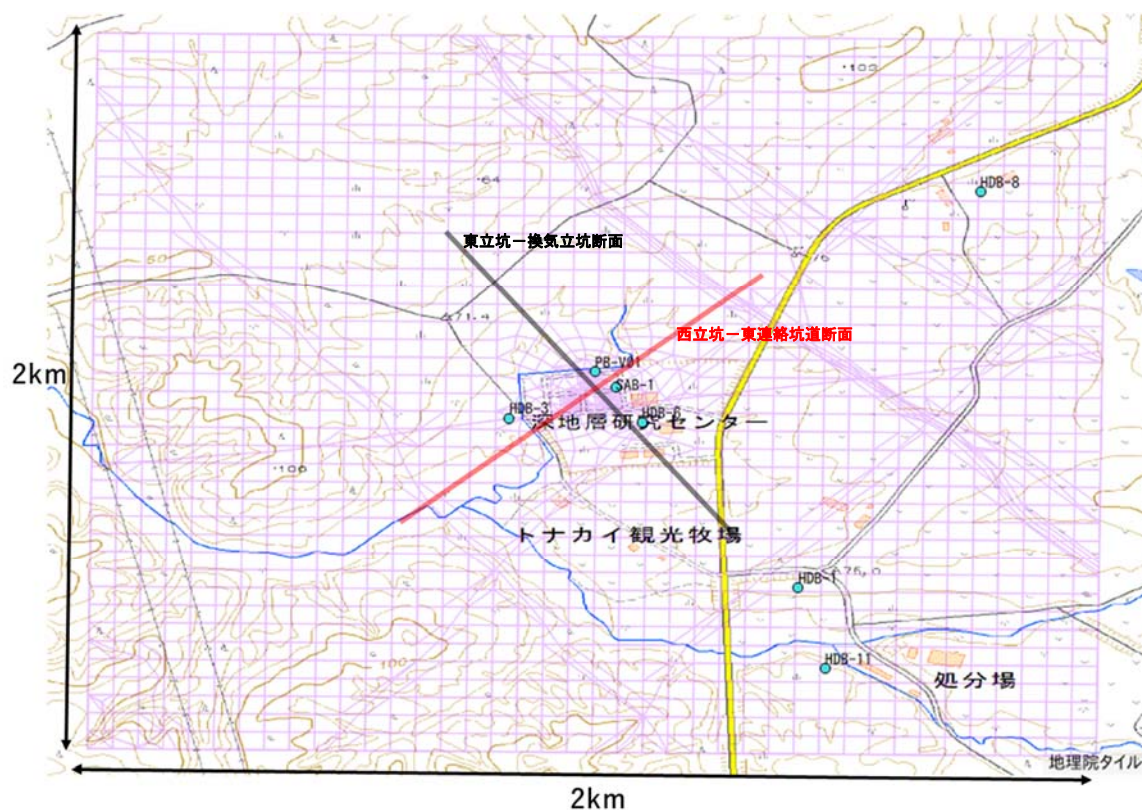


図 5.3.4-15 断面作成位置概念図（国土地理院の電子地形図（タイル）に断面位置を追記）

(2) 基本ケース

定常解析の結果を踏まえて基本ケースを設定した。基本ケースに設定した涵養量は 200 mm/y とした。設定した水理パラメーターを表 5.3.4-3 に示す。

この設定で実施した解析結果を全水頭の時間変化について鉛直断面図を図 5.3.4-16、ボーリング観測区間での全水頭の時間変化を図 5.3.4-17 に示す。模擬トレーサー濃度の時間変化について鉛直断面図を図 5.3.4-18 に示す。

解析結果は全水頭では分布図、時間変化ともに調査坑道の掘削の進捗に連動して水位が低下している。非定常と定常解析結果では、圧力の低下がかなり異なることがわかる。これは、透水係数が小さく、貯留係数が大きいため、圧力伝播が進まず、このような挙動になっていると考えられる。全水頭の時間変化は、図 5.3.4-17 に示したように、実測値と解析値も変化のタイミングや大きさも概ね整合している。

一方で、地表面に設定した模擬トレーサー濃度は、図 5.3.4-18 からわかるように全く変化していない。これは、湧水量が少ないことと間隙率が大きいため、地表水の流入が数年単位では発生しないことを示していると考えられる。

表 5.3.4-3 非定常解析の基本ケースに用いた水理パラメーター

地質区分	透水係数 (m /s)			亀裂幅 (m)	間隙率 (%)	比貯留係数 (1/m)	分散長 (m)		分子拡散係数 (m <sup>2</sup> /s)
	Kx	Ky	Kz				縦	横	
更別層	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	-	60.00	1.00E-04	200.0	20.0	1.00E-10
勇知層	9.35E-10	9.35E-10	9.35E-10	-	60.00	1.00E-04	200.0	20.0	1.00E-10
声間層	1.00E-10	1.00E-10	1.00E-10	-	60.00	1.00E-04	200.0	20.0	1.00E-10
稚内層上部	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-08	-	40.00	1.00E-04	200.0	20.0	1.00E-10
稚内層	5.89E-10	5.89E-10	5.89E-10	-	40.00	1.00E-04	200.0	20.0	1.00E-10
増幌層	5.00E-11	5.00E-11	5.00E-11	-	30.00	1.00E-04	200.0	20.0	1.00E-10
大曲断層	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	-	50.00	1.00E-04	200.0	20.0	1.00E-10
F1断層	1.20E-06	1.20E-06	1.20E-06	1.00	100.00	3.70E-04	200.0	20.0	1.00E-10

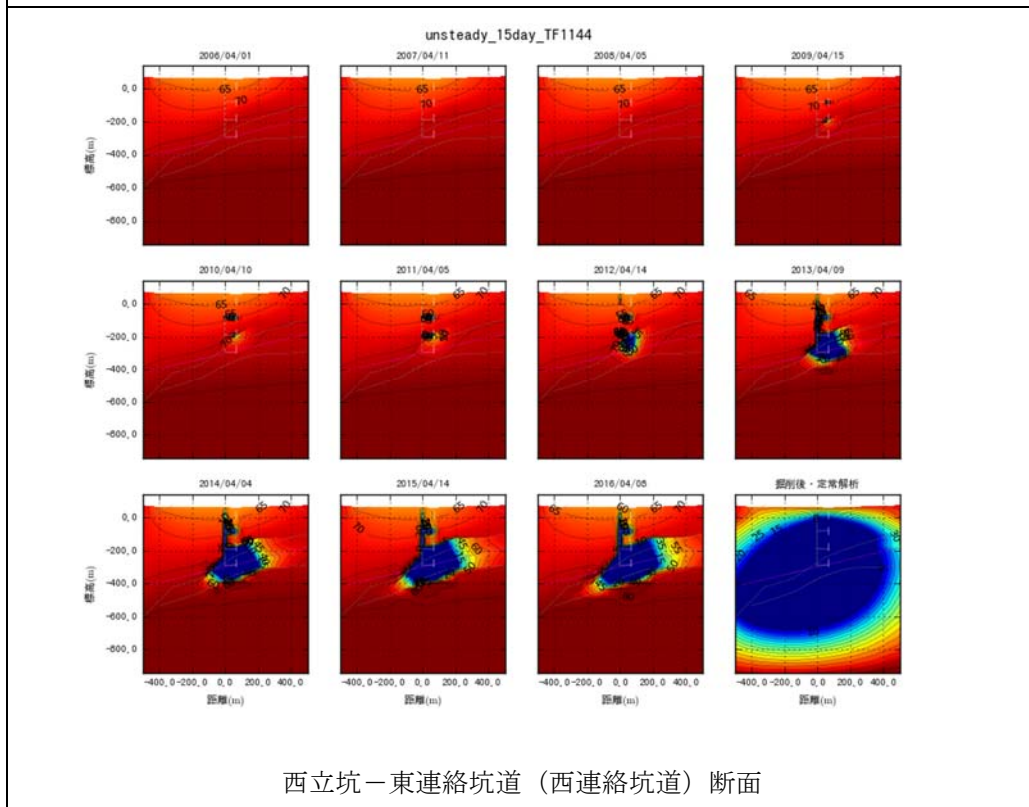
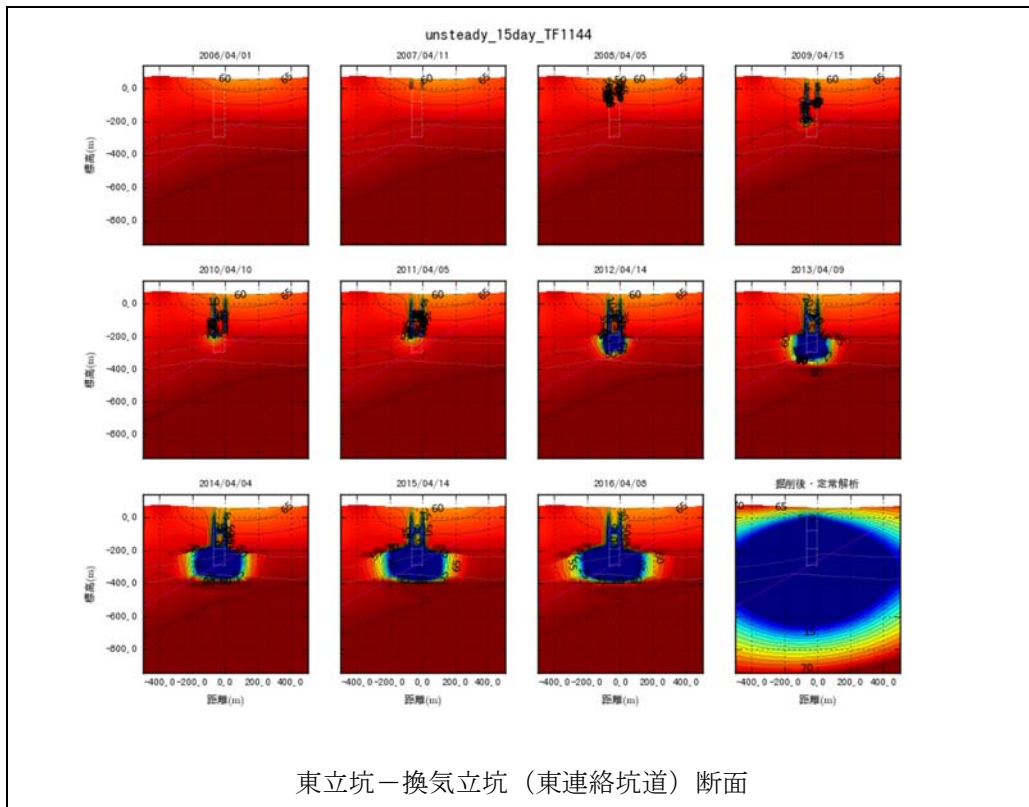


図 5.3.4-16 調査坑道周辺における模擬トレーサー濃度分布図の時間変化（基本ケース）

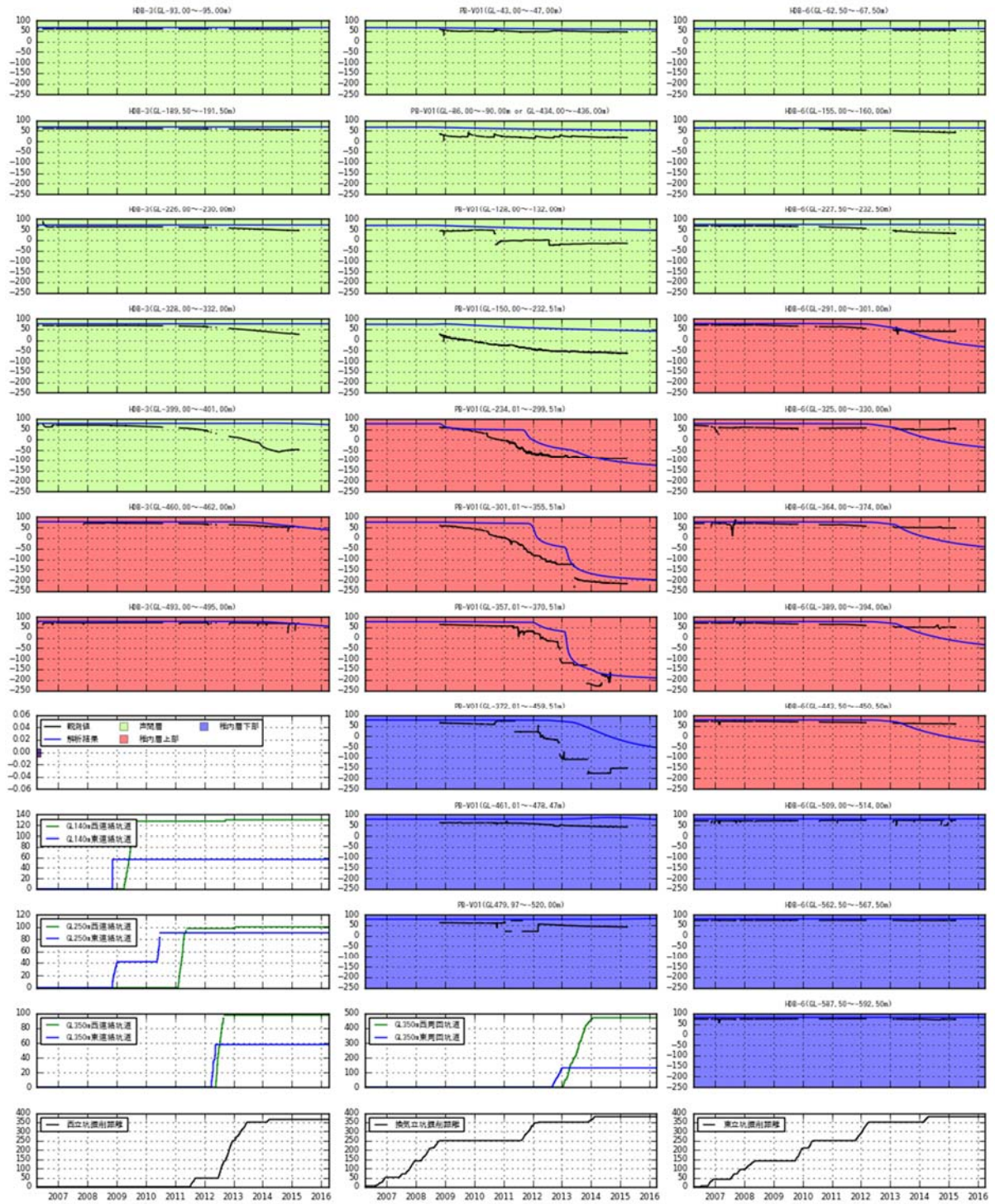


図 5.3.4-17 調査坑道と周辺ボーリング孔における全水頭の時間変化（基本ケース）



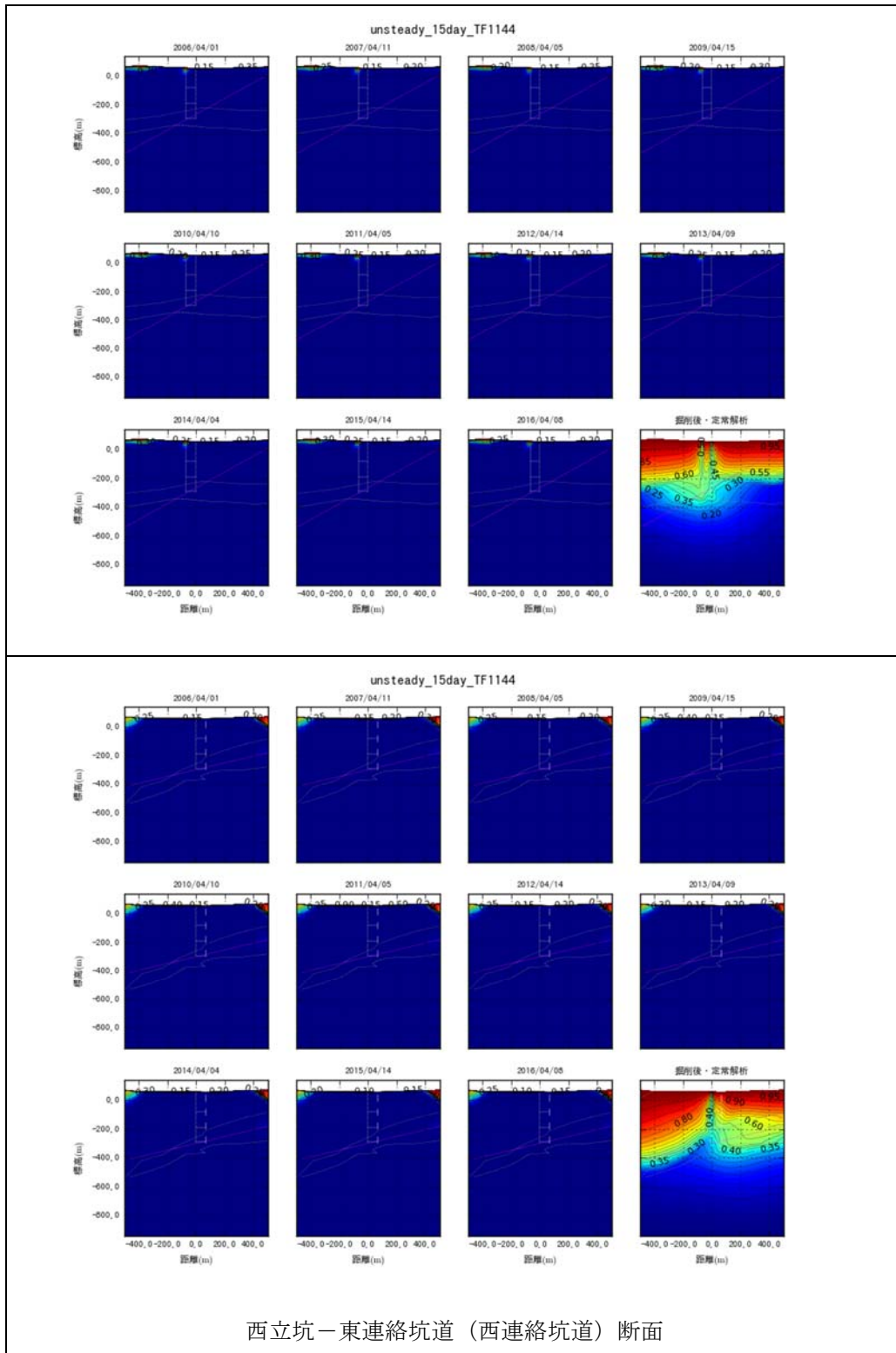


図 5.3.4-18 調査坑道周辺における模擬トレーサー濃度分布図の時間変化（基本ケース）

### (3) 比貯留係数の感度解析

基本ケースを元にすべての地質区分について、比貯留係数を基本ケースの  $1.0 \times 10^{-4}$  (1/m) から 0.1 倍 ( $1.0 \times 10^{-5}$ )、100 倍 ( $1.0 \times 10^{-6}$ ) にそれぞれ変更して比貯留係数の感度解析を実施し、影響を調査した。比貯留係数は単位水頭変化に対して各地層内の単位体積当たりの貯留から解放される、あるいは貯留される水量を表している。また、圧力伝播は透水係数を比貯留係数で割った水頭拡散率で速度が定まるため、貯留係数を小さくすると圧力伝播が早くなる。このため、比貯留係数の設定により調査坑道の掘削過程にともなう周辺への圧力低下に影響があると考えられる。また圧力低下の変化にともない模擬トレーサー濃度にも影響を及ぼす可能性がある。

解析結果として全水頭、模擬トレーサー濃度について示す。全水頭分布の時間変化を図 5.3.4-19 と図 5.3.4-20、ボーリング区間における全水頭の時間変化を図 5.3.4-21、模擬トレーサー濃度の時間変化を図 5.3.4-22、図 5.3.4-23 に示す。

解析結果は、全水頭分布の時間変化に着目すると比貯留係数が小さくなるほど、声問層と稚内層上部での水圧変化が大きくなっている。これは先に述べたように、比貯留係数を小さくすると圧力伝播が早くなるためである。特に、図 5.3.4-21 でこの傾向は良くわかり、貯留係数が大きいほど、圧力低下が緩やかに、小さく程変化が激しくなっている。一方、地表面に設定した模擬トレーサー濃度は圧力分布が変わっているにもかかわらず、ほとんど動いていないことがわかる。

表 5.3.4-4 非定常解析の比貯留係数の感度解析に用いた水理パラメーター

地質区分	透水係数 (m /s)			亀裂幅 (m)	間隙率 (%)	比貯留係数 (1/m)	分散長 (m)		分子拡散係数 (m <sup>2</sup> /s)
	Kx	Ky	Kz				縦	横	
更別層	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	-	60.00	基本設定から 10倍 100倍 に設定し 感度解析	200.0	20.0	1.00E-10
勇知層	9.35E-10	9.35E-10	9.35E-10	-	60.00		200.0	20.0	1.00E-10
声問層	1.00E-10	1.00E-10	1.00E-10	-	60.00		200.0	20.0	1.00E-10
稚内層上部	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-08	-	40.00		200.0	20.0	1.00E-10
稚内層	5.89E-10	5.89E-10	5.89E-10	-	40.00		200.0	20.0	1.00E-10
増幌層	5.00E-11	5.00E-11	5.00E-11	-	30.00		200.0	20.0	1.00E-10
大曲断層	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	-	50.00		200.0	20.0	1.00E-10
F1断層	1.20E-06	1.20E-06	1.20E-06	1.00	100.00		200.0	20.0	1.00E-10

※ ■の箇所が設定変更項目

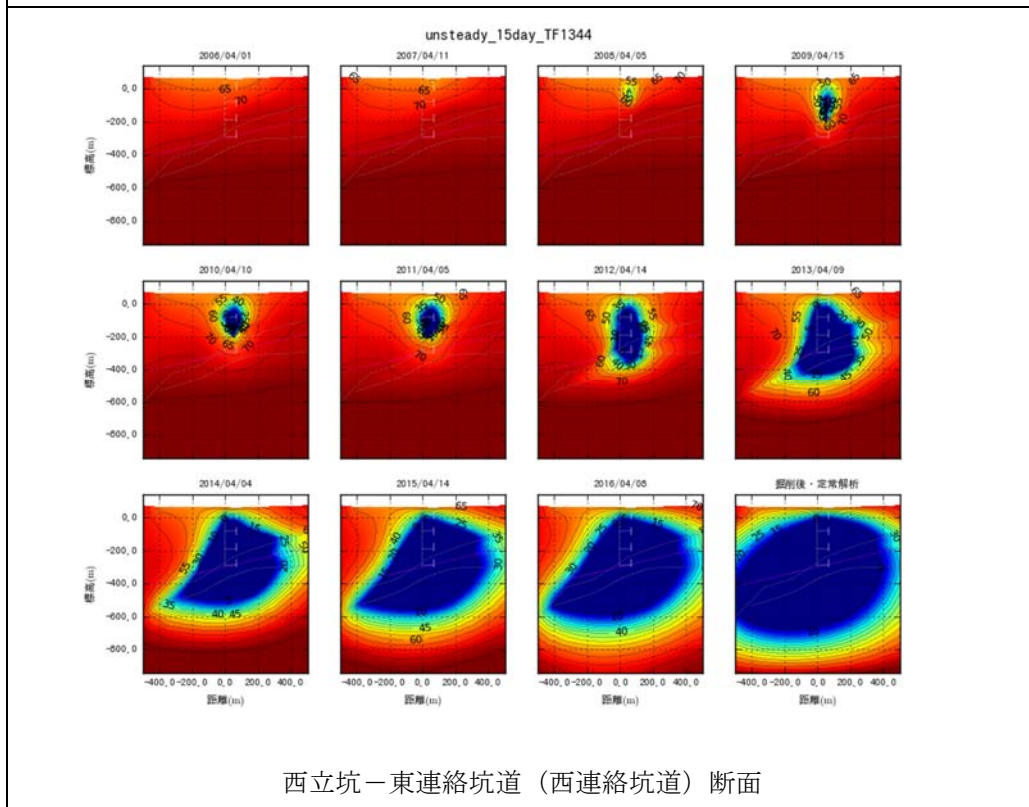
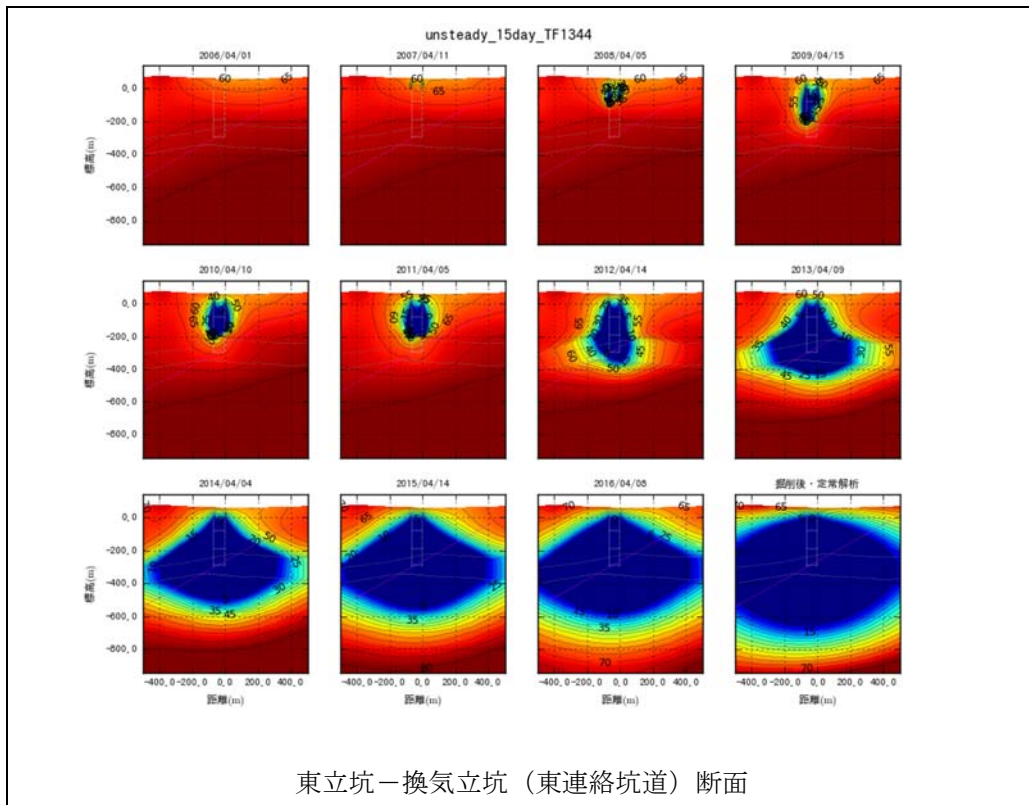


図 5.3.4-19 調査坑道周辺における全水頭分布図の時間変化（比貯留係数を 0.01 倍）

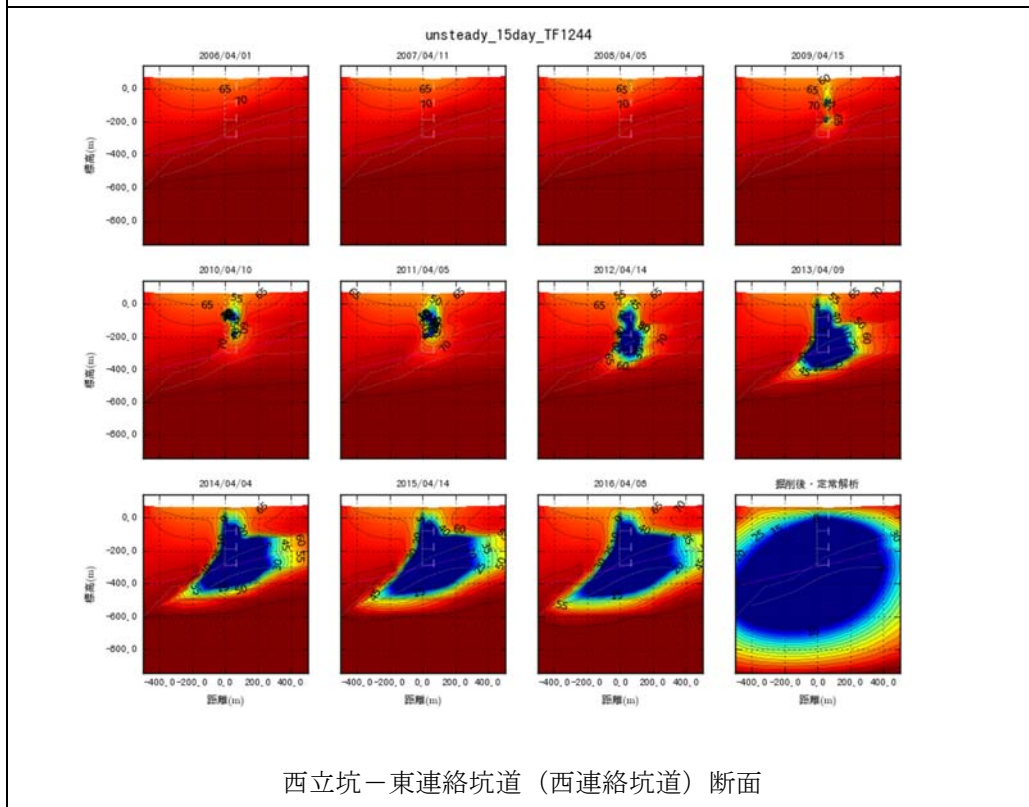
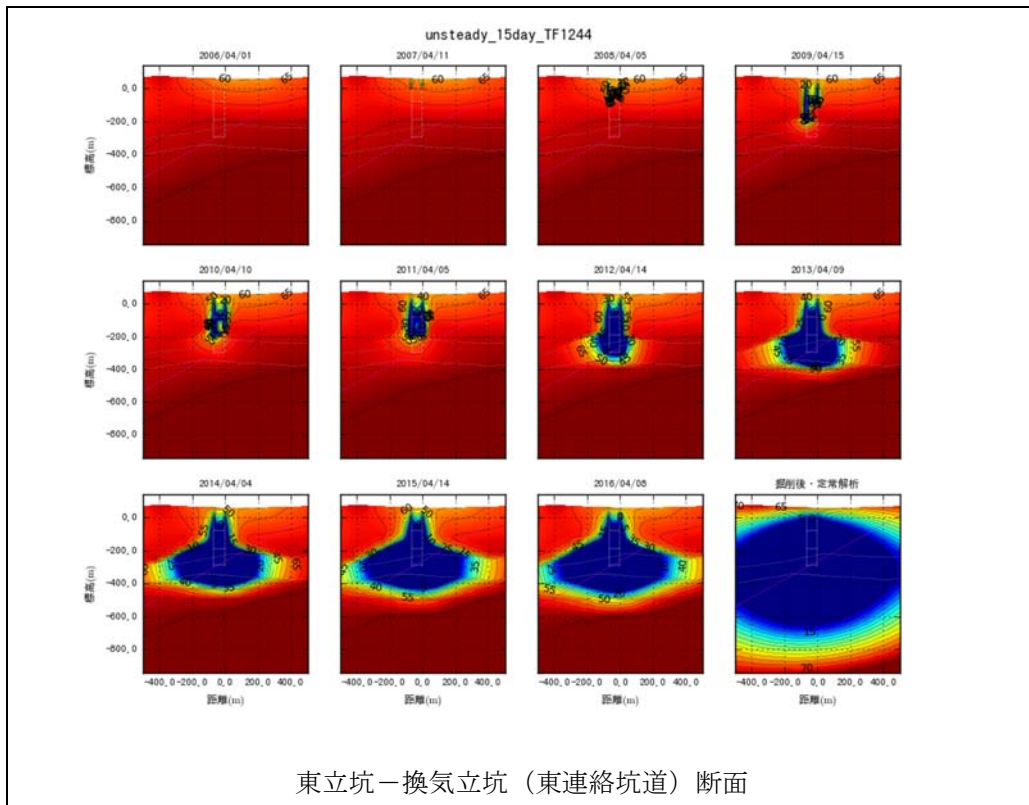


図 5.3.4-20 調査坑道周辺における全水頭分布図の時間変化（比貯留係数を 0.1 倍）

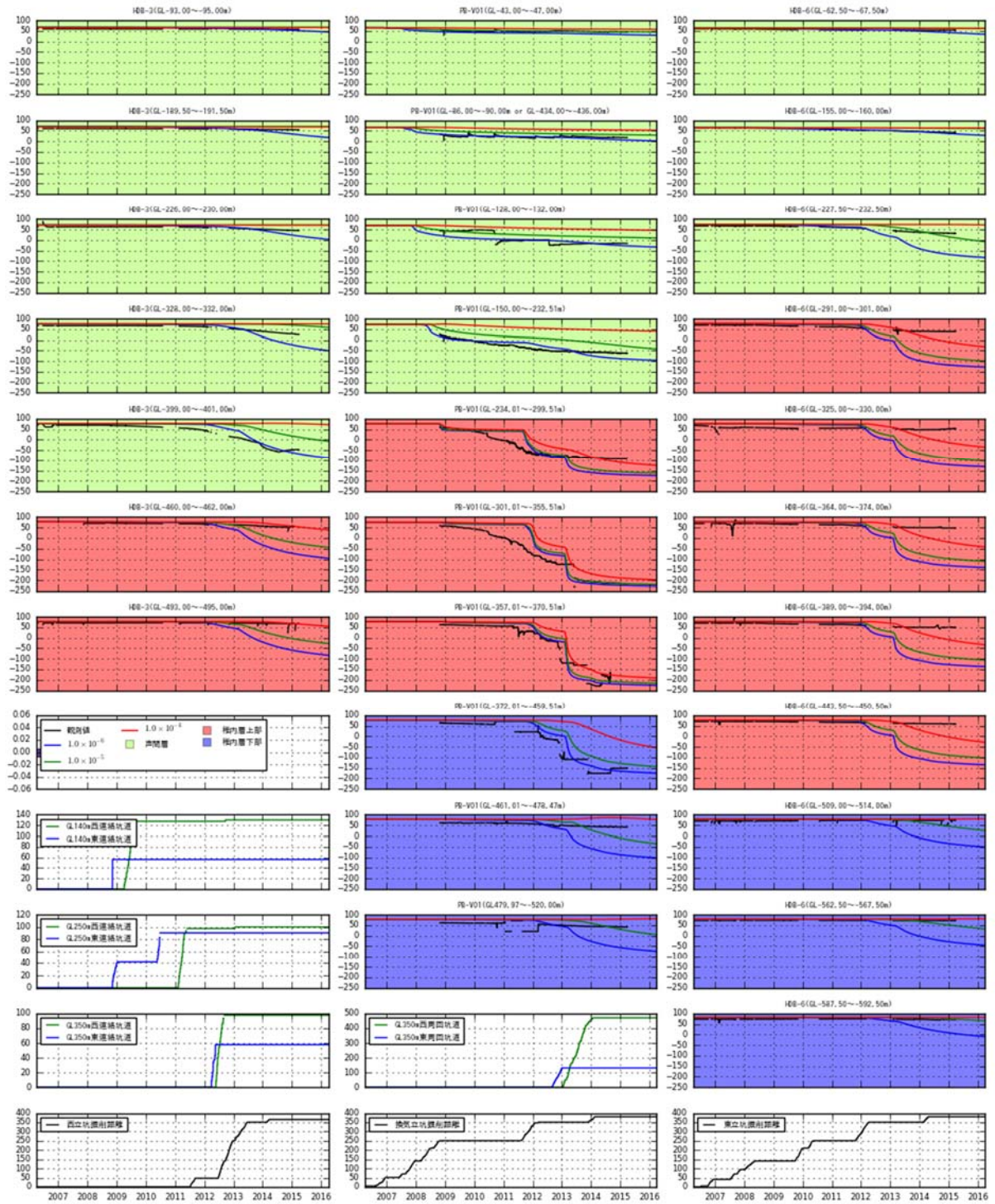
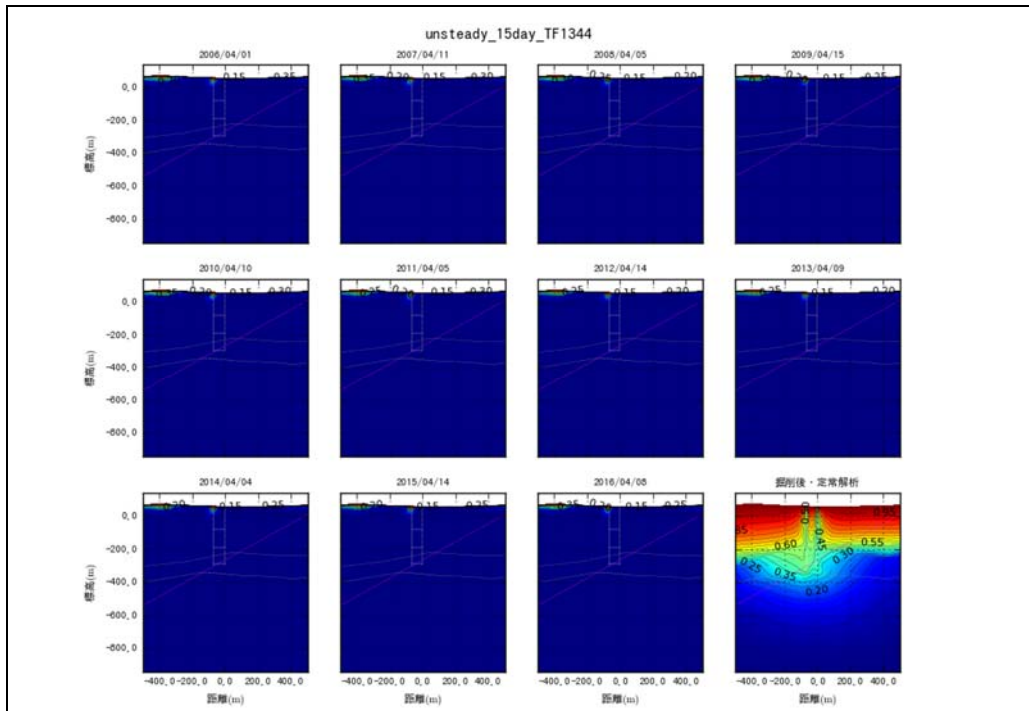
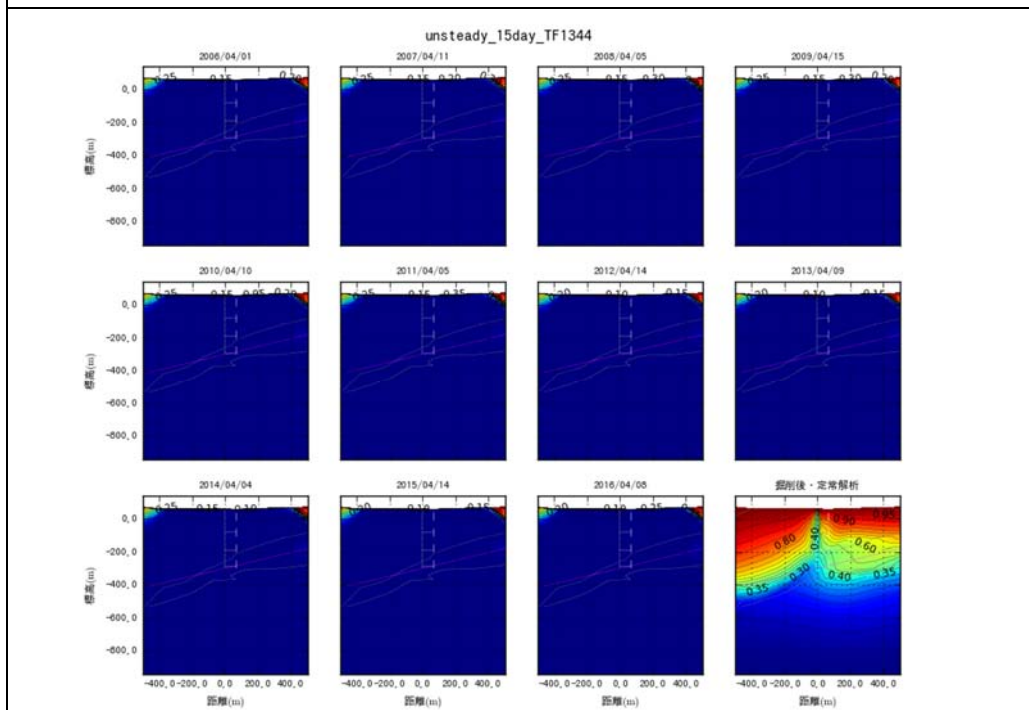


図 5.3.4-21 調査坑道と周辺ボーリング孔における全水頭の時間変化（比貯留係数の感度解析）

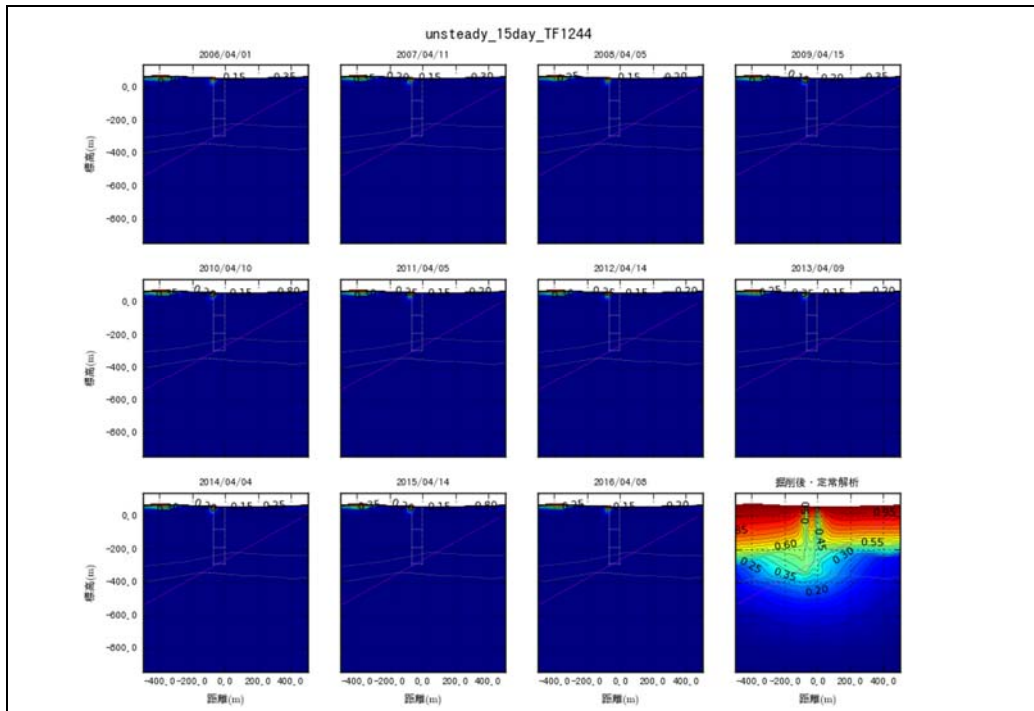


東立坑－換気立坑（東連絡坑道）断面

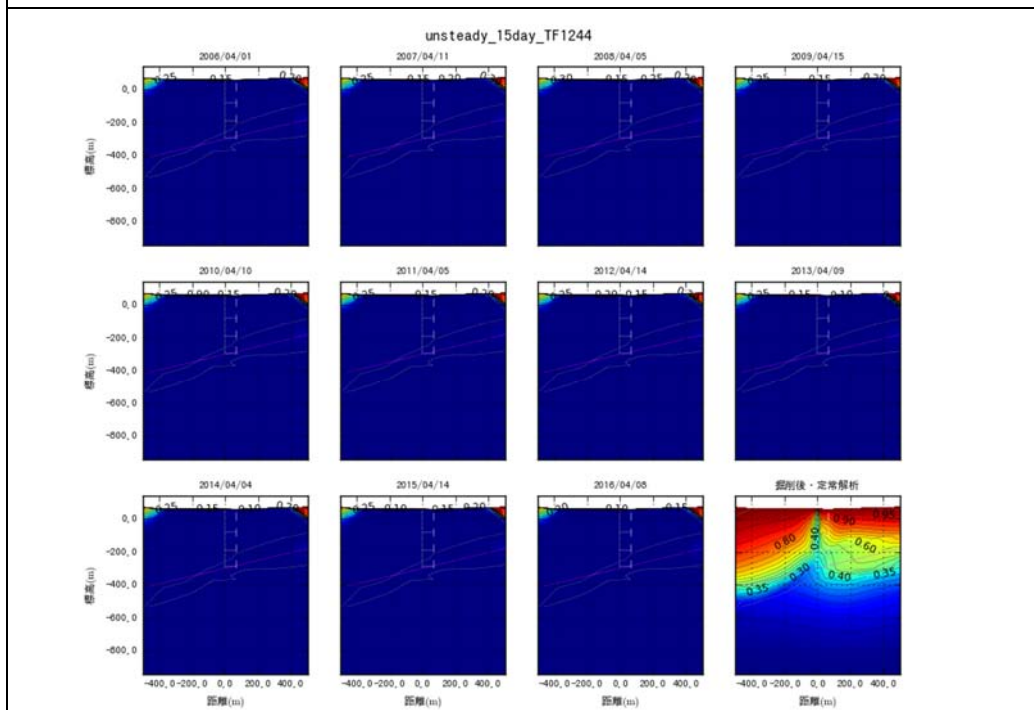


西立坑－東連絡坑道（西連絡坑道）断面

図 5.3.4-22 調査坑道周辺における模擬トレーサー濃度分布図の時間変化（比貯留係数を 0.01 倍）



東立坑－換気立坑（東連絡坑道）断面



西立坑－東連絡坑道（西連絡坑道）断面

図 5.3.4-23 調査坑道周辺における模擬トレーサー濃度分布図の時間変化（比貯留係数を 0.1 倍）

#### (4) 間隙率の感度解析

物質移行解析では、間隙率を変えると実流速が変化するため解析結果が変化する。これまでの解析結果で、模擬トレーサーの移動がほとんどわからなかったため、間隙率を小さく、すなわち、物質移行を早くする感度解析を実施した。間隙率は、すべての地質区分について基本ケースからオーダーで下げて感度解析を実施した。

間隙率は、1 オーダー程度の低下では変化しなかったため、最終的には1/1,000,000 程度まで下げて解析を実施した。解析結果として模擬トレーサー濃度分布を図 5.3.4-24～図 5.3.4-26 に示す。ボーリング区間での模擬トレーサー濃度の時間変化を図 5.3.4-27 に示す。

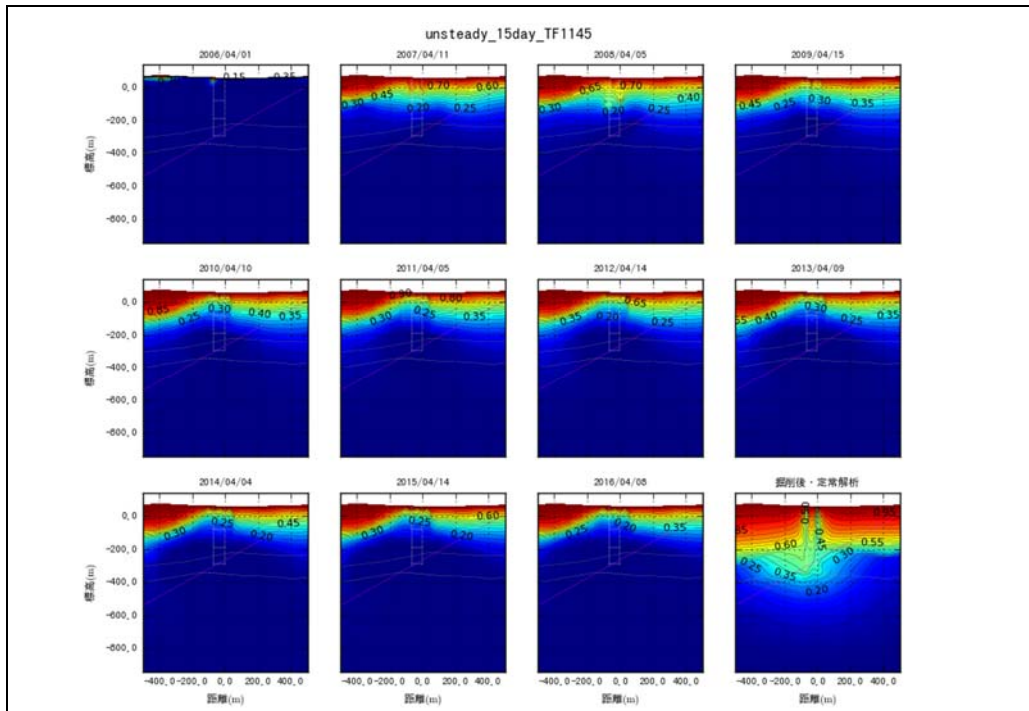
模擬トレーサー濃度分布図に着目すると、間隙率が1/1,000 倍までは変化が有意でない結果であった。間隙率が1/10,000 倍より小さい場合から徐々に地表面からの流入が確認できる。この間隙率による模擬トレーサー濃度の時間変化は、図 5.3.4-27 でより良くわかる。このように、地表からの地下水の流入が非常に遅いので、立坑掘削から10年程度が経過しても、地表水の流入が観測されないのだと考えられる。

表 5.3.4-5 非定常解析の間隙率の感度解析に用いた水理パラメーター

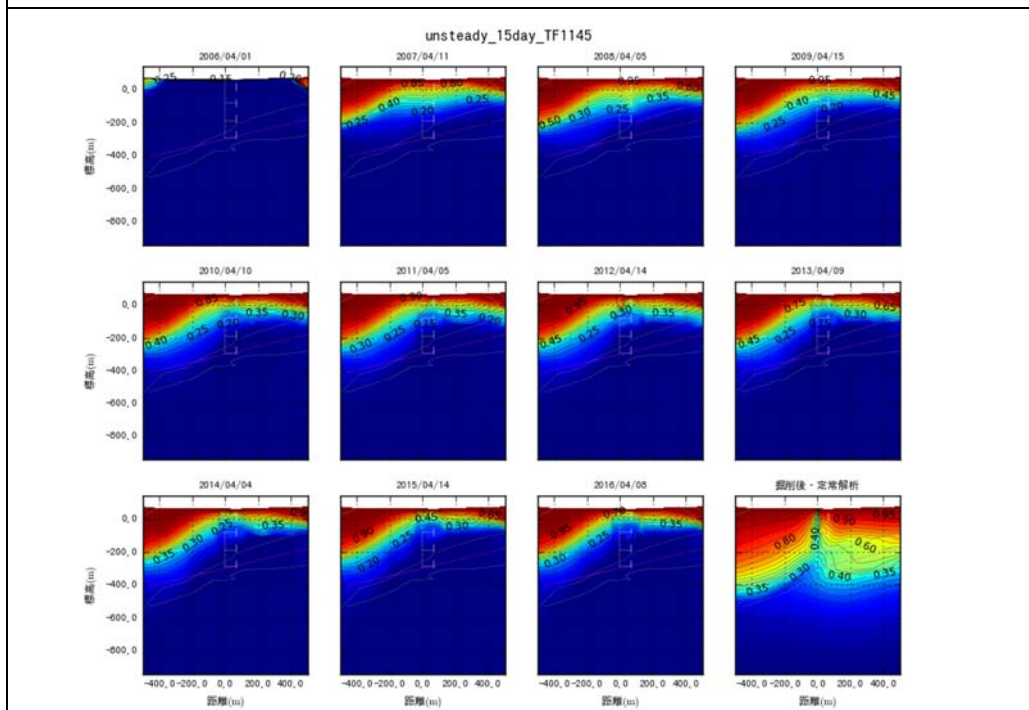
地質区分	透水係数 (m/s)			亀裂幅 (m)	間隙率 (%)	比貯留係数 (1/m)	分散長 (m)		分子拡散係数 (m <sup>2</sup> /s)
	K <sub>x</sub>	K <sub>y</sub>	K <sub>z</sub>				縦	横	
更別層	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	-	基本設定から 1/1,000,000倍 1/10,000倍 1/100倍 に設定し 感度解析	1.00E-04	200.0	20.0	1.00E-10
勇知層	9.35E-10	9.35E-10	9.35E-10	-		1.00E-04	200.0	20.0	1.00E-10
声問層	1.00E-10	1.00E-10	1.00E-10	-		1.00E-04	200.0	20.0	1.00E-10
稚内層上部	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-08	-		1.00E-04	200.0	20.0	1.00E-10
稚内層	5.89E-10	5.89E-10	5.89E-10	-		1.00E-04	200.0	20.0	1.00E-10
増幌層	5.00E-11	5.00E-11	5.00E-11	-		1.00E-04	200.0	20.0	1.00E-10
大曲断層	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	-		1.00E-04	200.0	20.0	1.00E-10
F1断層	1.20E-06	1.20E-06	1.20E-06	1.00		3.70E-04	200.0	20.0	1.00E-10

※ ■の箇所が設定変更項目



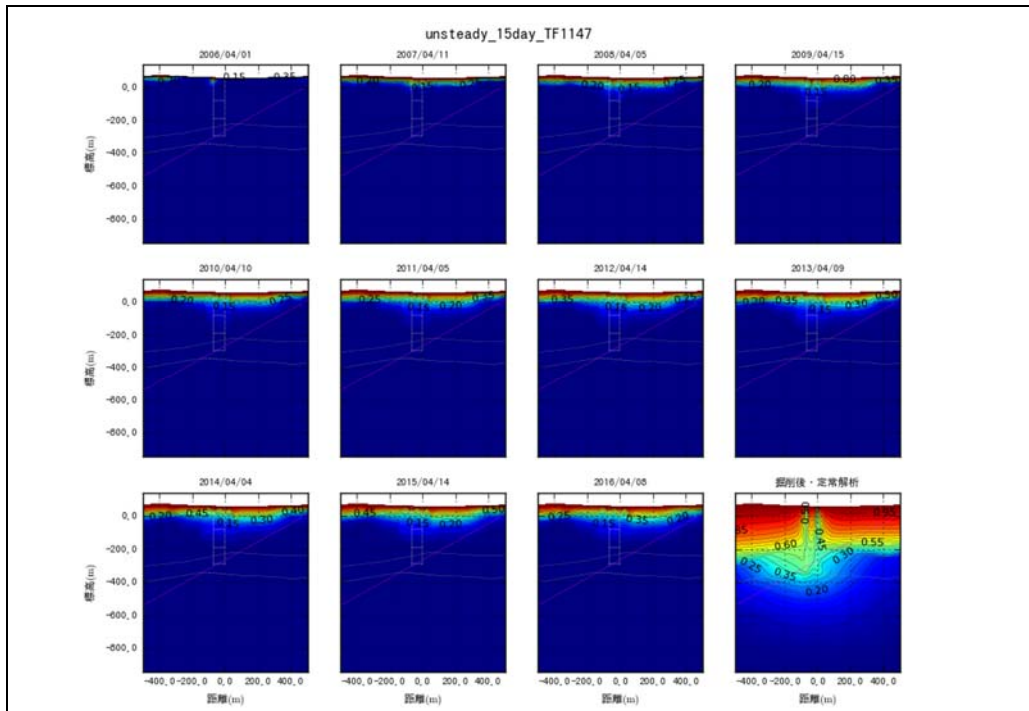


東立坑－換気立坑（東連絡坑道）断面

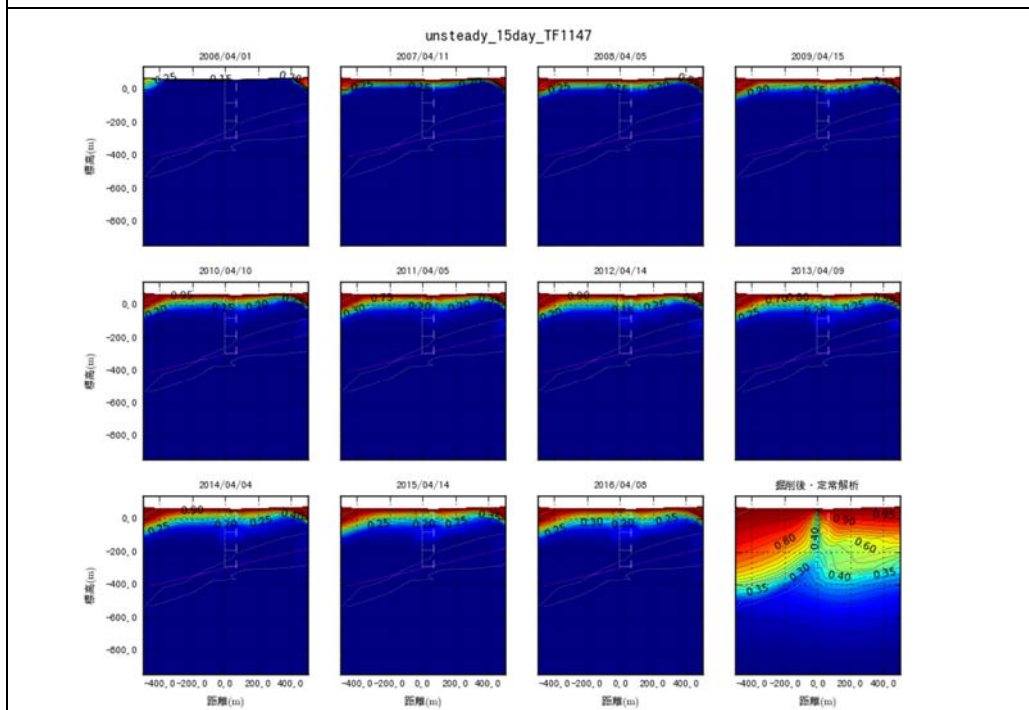


西立坑－東連絡坑道（西連絡坑道）断面

図 5.3.4-24 調査坑道周辺における模擬トレーサー濃度分布図の時間変化(間隙率を 1/1,000,000 倍)

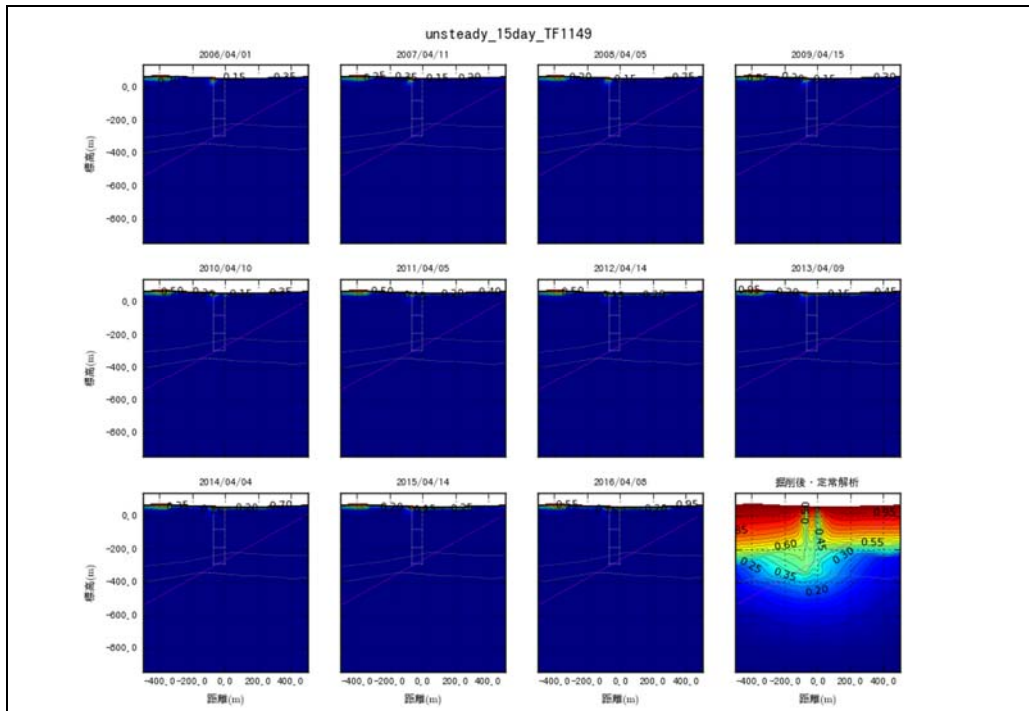


東立坑－換気立坑（東連絡坑道）断面

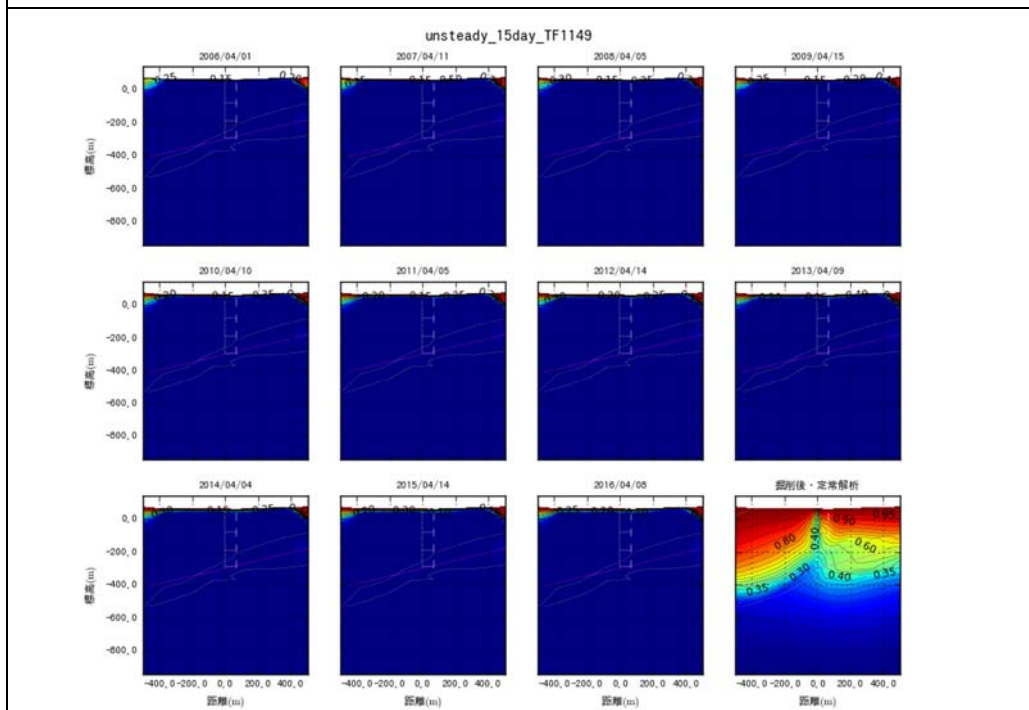


西立坑－東連絡坑道（西連絡坑道）断面

図 5.3.4-25 調査坑道周辺における模擬トレーサー濃度分布図の時間変化（間隙率を 1/10,000 倍）



東立坑—換気立坑（東連絡坑道）断面



西立坑—東連絡坑道（西連絡坑道）断面

図 5.3.4-26 調査坑道周辺における模擬トレーサー濃度分布図の時間変化（間隙率を 1/100 倍）

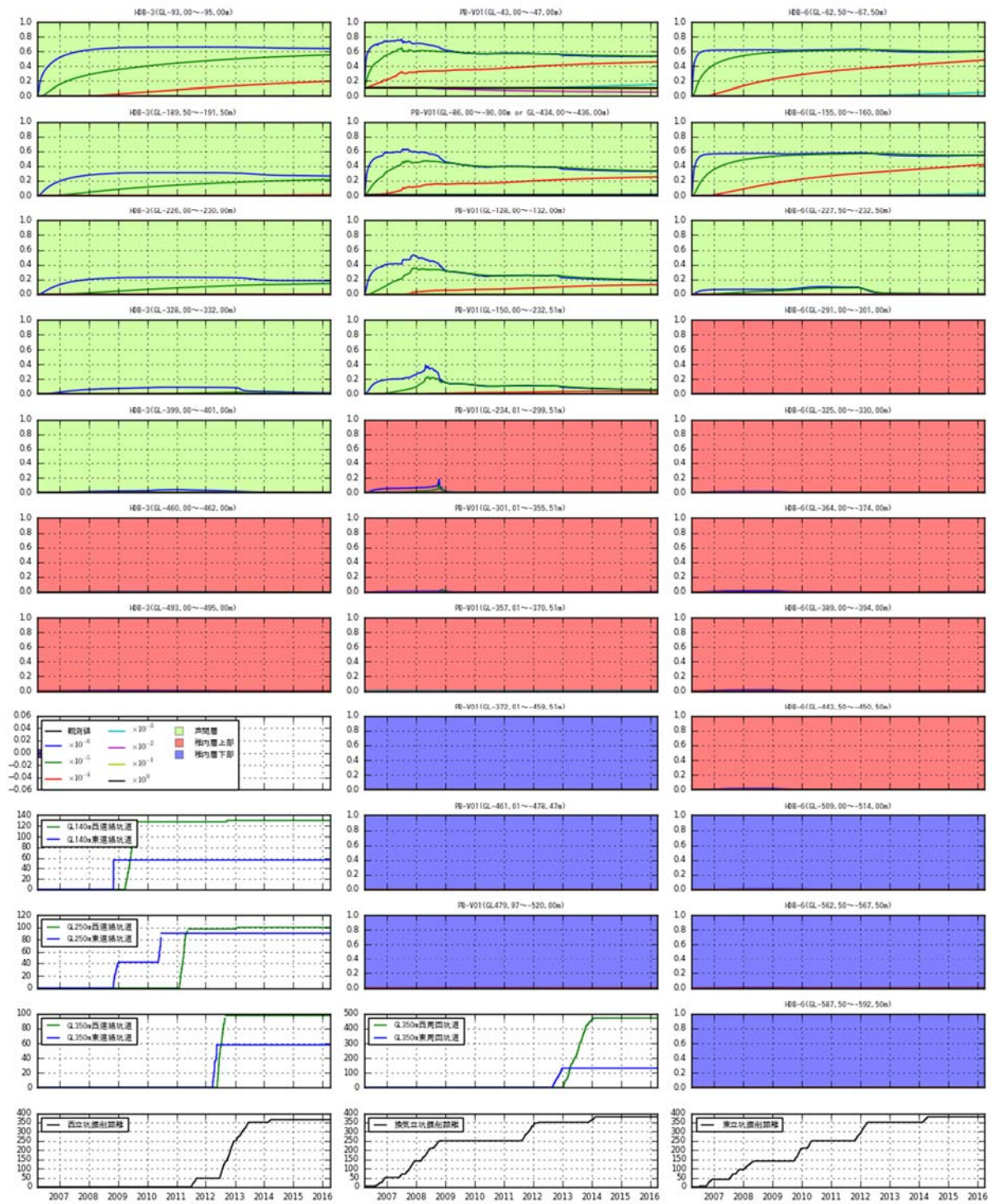


図 5.3.4-27 調査坑道と周辺ボーリング孔における模擬トレーサー濃度の時間変化  
(間隙率の感度解析)

#### 5.3.4.6 考察

調査坑道掘削を考慮した定常解析と非定常解析を実施した。本地点は泥岩・頁岩を主体としており、透水係数が小さく、貯留係数が大きいため、圧力の変化が遅い。このため、定常と非定常の解析結果に大きな乖離があった。定常状態には非定常過程を経て到達するが、掘削期間の10年程度では、定常状態には達していないようである。

非定常解析では、調査坑道の掘削を、圧力境界条件の変化として、時系列的にモデル化した解析を実施した。この結果、観測孔で発生している調査坑道掘削に伴う圧力変化を概ね再現できた。ただし、一部の区間については、過大評価となっているので、F1断層や稚内層上部層などの高透水構造が十分に把握できていない部分が残っていると考えられる。

地表水の流入（模擬トレーサー）についても、定常解析では有意な流入が認められるものの、非定常解析ではほとんど流入が認められなかった。これは、先に述べたように、本地点は透水係数が小さく、間隙率が大きいため、物質移行が遅いためと考えられる。原位置での調査結果でも、地表水の流入は確認されていないことから、実際の地表水の流入も遅いものと考えられる。

対象地点のような堆積岩を対象とした地点では、調査坑道の掘削にともなう水圧変化は大きいものの、透水係数が小さく、間隙率が大きいため水質の変化は小さいと考えられた。

## 5.4 天然トレーサーの調査

### 5.4.1 サンプルング方法

#### 5.4.1.1 希ガスサンプルング

##### (1) 背景

地下水中の希ガスを分析する際に最も留意すべきことの一つに、サンプルング中の脱ガスが挙げられる (Nakata et al., 2018)。高レベル放射性廃棄物の処分場が建設される可能性がある地下深部では、上に乗っている層の重量等によって地下水には高い圧力がかかっていると考えられる。被圧した地下水を地表にポンプアップしたり、坑道などの地下空間へと排出した場合、地下水にかかる圧力は地圧から大気圧に戻ることになる。圧力が開放されることによって、溶存していたガスが気泡となり、脱ガスする可能性が考えられる。このため、溶存する希ガスの評価を目的として地下水サンプルを取得する場合には、できるだけ地下水が存在する地点の圧力を保ったまま地下水を採取することが望ましい。

既往の研究において、地下水が存在する地点での圧力を保って地下水サンプルを採取できるような、サンプラーやサンプル採取方法を開発・検討してきた。例えば、地表から掘削した井戸においては、水理区間ごとに井戸をパッカーで区切るシステム (MP システム: Fisher and Twining, 2012; Bartholomay and Twining, 2010) を利用し、区間内の水圧を駆動力にして水を循環させたり可動部 (ピストン) を動かしたりして銅管内に水を入れてバルブを閉じるシステムを瑞浪地域におけるサンプルングにおいて適用した。また、裸孔において目的とした深度で地下水が採取できるように、目的の深度までサンプラーを降ろした後、メッセンジャーと呼ばれる錘で物理的な衝撃を与えてバルブを閉鎖する「機械式サンプラー」を開発し、これを主に幌延地域の井戸に適用した。また、昨年度までの研究においては、シリコンゴムなど水は通さないがガス透過性のある素材を利用して、原位置の地下水と平衡になった気体サンプルを取得するパッシブ (拡散式) サンプラー (Sanford et al., 1996; Gardner and Solomon, 2009) についても適用性を検討してきた。上述のサンプルング方法は水が比較的豊富に得られる岩盤において、井戸に採水・モニタリングシステムを設置できる場合には極めて有効である。しかし、処分場選定に関わる調査において、すべての井戸でこのようなサンプルングができない可能性も考えられる。

また、透水性の低い岩盤は岩盤中での物質移行がきわめて緩やかであると考えられることから、放射性処分場として有利な特性を有していると考えられるが (Savoye et al., 2008; Mazurek et al., 2009; Hendry et al., 2015b)、地下水を水としてサンプルングすることが困難となるため、上記のシステムが適用しにくい可能性がある。このような場合には、岩石コアを取得しその間隙水を評価する必要がある。岩石コアを使うことで、水を揚水した場合よりも脱ガスが少ないことが期待されるものの、数百メートルを超える深度から引き上げられたコアは時として表面から激しく発泡が見られ、

コア採取の過程で脱ガスが生じていることが、過去の研究から示唆されている (Nakata et al., 2018)。

このように、地下水中の希ガスを評価する場合には、適切なサンプリング方法を採用して、可能な限り脱ガスを抑えることが重要である。しかし、すべてのサンプリングで最適な方法を適用することができない可能性もあるうえ、低透水性の岩盤に適用される可能性が高いコアサンプリングでは脱ガスを防ぐ方法は確立されていない。このため、脱ガスを防いでサンプリングをする方法の検討とともに、脱ガスしたサンプルを補正する方法を確立することが重要である。本研究では、瑞浪・幌延地域で意図的に圧を落として取得したサンプルと、圧を可能な限り保って取得したサンプルにおける希ガス濃度を比較し、各希ガスがどのような挙動で脱ガスするのかを検討した。そのデータを基にして、脱ガスが起きやすい状況でのサンプル取得について議論した。

## (2) 試験方法

瑞浪あるいは幌延の研究坑道から掘削しているボーリング孔から得られる地下水を用いて（詳細は 5.2 および 5.3 に記載している）、試験を実施した。これらの研究坑道では、坑壁からボーリングが実施された箇所が複数存在し、一部にはパッカーが挿入されている。このため、パッカー区間に挿入されたチューブを通じて、パッカー区間の圧力をある程度保持したまま、採水することが可能である。

### (a) 封圧採水

まずパッカー区間の圧力をできるだけ保持した状態で、地下水を銅管内に採取する「封圧採水」を実施した。封圧採水の概念図を図 5.4.1-1 に示した。封圧採水では、パッカー区間に挿入されたチューブに両端にバルブを接続した銅管を直接接続し、銅管の下流には圧力ゲージとバルブを接続した。パッカー内の圧力と銅管下流の圧力ゲージの差が 1.0MPa 以下になるよにバルブを調整し、銅管に十分に地下水を流したうえで圧力調整用バルブを閉じ、さらに各銅管の両端にあるバルブを閉じた。さらに、銅管の両端をクランプで閉じて、実験室へ移送した。

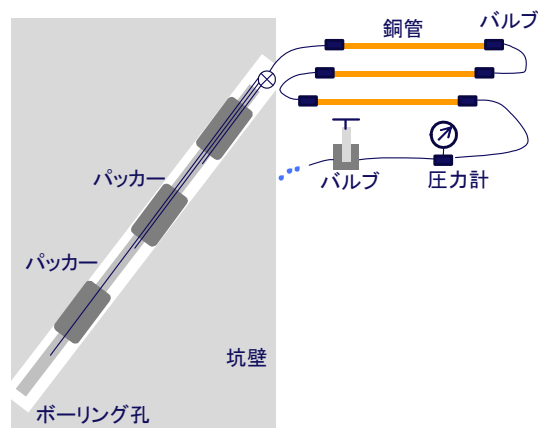


図 5.4.1-1 封圧採水の概念図

(b) 水上置換

次に、パッカー区間に挿入したチューブから得られる地下水を別容器に導入し、ガスと水を分離させてそれぞれを取得する「水上置換」採水を実施した。水上置換採水の手順を図 5.4.1-2 にまとめた。採取には下方に 2 か所、容器上部に 1 か所のバルブ付き出入り口を備えたアクリル製容器を用いた。容器の下方の一か所をパッカー区間に挿入したチューブに接続し、容器上方のバルブを開けて容器内を地下水で満たした。次に容器上方のバルブを閉じ、チューブが接続しているのと別の容器下方バルブを開けた。この操作によって、地下水は容器の下方バルブ間を流れるが、溶存ガスの一部は分離して容器上方に溜まる。ある程度採取可能な量の気体が容器上方に溜まったことを確認したうえで、あらかじめ真空引きした直径 6mm の銅管を容器上部に接続し、容器上方のバルブを開けて溶離したガスのサンプルを銅管内に取得した。次に容器内への地下水の流入を遮断したうえで、直径 10mm の銅管を容器下方のバルブの接続し、容器上方のバルブを開けて重力で容器内の水を銅管内に十分流したうえで、容器内の水を銅管内に取得した。

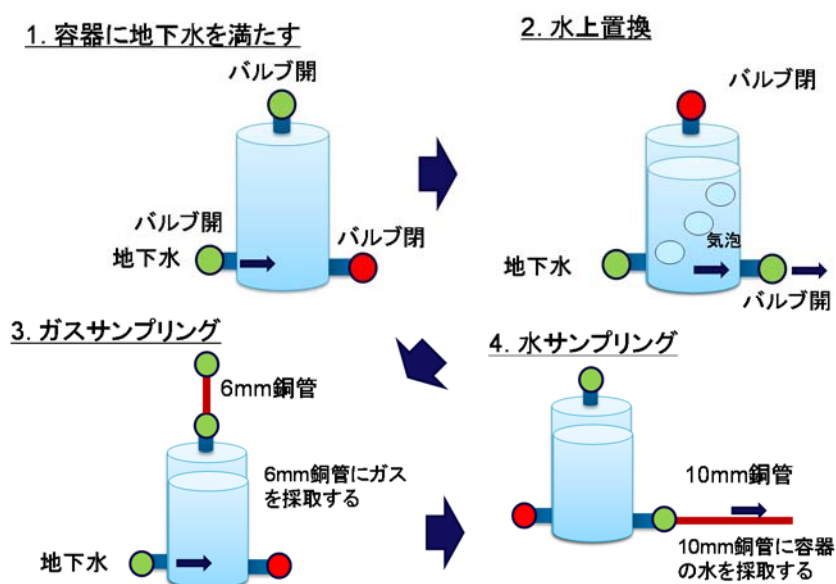


図 5.4.1-2 水上置換法の手順

(c) 真空脱気

さらに、溶存ガスをより積極的に遊離させてその挙動を確認するための試験として、「真空脱気」採水を実施した。上述の水上置換に用いたのと同じ容器の上方にあらかじめ 6mm の銅管を接続したうえで、容器および銅管の内部をポンプで吸引し、容器と銅管内の圧力を下げた。ここで容器の上方から地下水を入れ、容器内で溶存ガスが地下水から分離するようにした。圧力計の値がプラスの値を示したところで地下水の流入側のバルブを閉じ、銅管内に溜まった気体をサンプルとして取得した。さらに、容器内の水を容器下方に接続した 10mm 銅管に十分に流したあと銅管両端のバルブを閉じ、銅管内に容器



の水を採取した。真空脱気採水の手順を図 5.4.1-3 にまとめた。

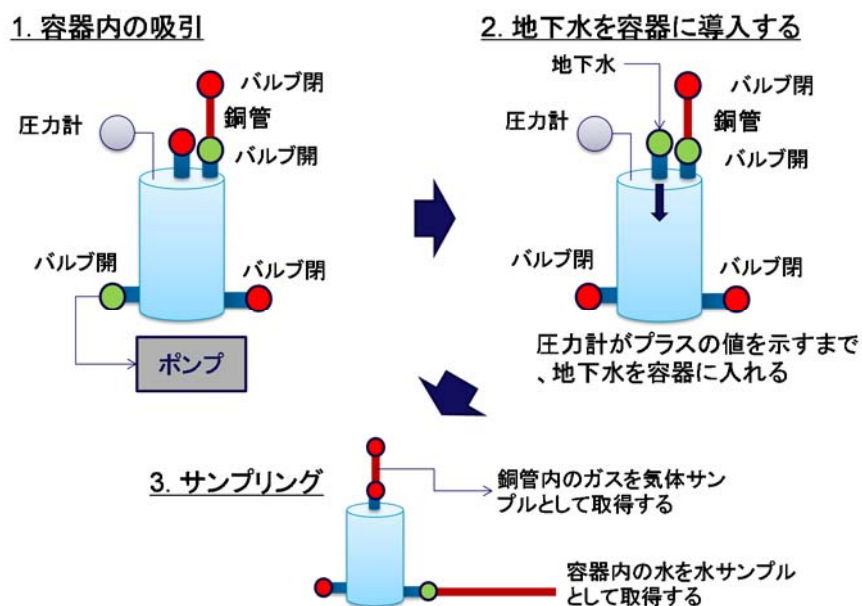


図 5.4.1-3 真空脱気法の手順

### (3) 瑞浪地域の地下水における脱ガス試験結果

瑞浪地域の地下水において、封圧採水・水上置換および真空脱気を実施した後の水サンプルにおける希ガスの濃度を表 5.4.1-1 にまとめた。

後述するように、希ガスの脱ガス量補正では、Ne 濃度を基準としてその他のガス濃度を補正することを検討した。表に示したように、一部のサンプルにおいては封圧採水における Ne 濃度よりも、その他のサンプルにおける Ne 濃度が高くなった。水上置換（特にシャワーリング）においては、気泡が発生するため、地下水サンプルに気泡が混入しやすい。水サンプルに気泡が混入した場合、見かけ上の希ガス濃度は高くなる。一部のサンプルにおいて封圧採水における Ne 濃度よりも意図的に脱ガスさせた試験における Ne 濃度が高くなったのは、気泡の混入による可能性が高いと考えられる。また、真空脱気法では、地上でポンプを用いて真空にした容器を地下へと搬入し、試験を実施した。地表から地下への輸送中に大気が混入した可能性も考えられる。また、サンプリングには「カップラー」と呼ばれる接続治具を用いて容器と銅管を接続しているが、カップラー接続時に大気が混入する可能性も考えられる。本検討においては、Ne 濃度が封圧採水よりも高くなったサンプルについては、上述のような気泡の混入や大気のコタミがあった可能性が高いと考え、その後の考察ではそのデータを除外した。除外したデータは表中では斜体で示している。

表 5.4.1-1 封圧・真空脱気・水上置換サンプル中希ガス濃度の比較

Sampling point	Sampling method	Concentration of Noble gas (ccSTP/gw)					<sup>3</sup> He/ <sup>4</sup> He (×10 <sup>-7</sup> )
		He (×10 <sup>-5</sup> )	Ne (×10 <sup>-7</sup> )	Ar (×10 <sup>-4</sup> )	Kr (×10 <sup>-8</sup> )	Xe (×10 <sup>-8</sup> )	
07Mi07#1 (200m)	PC	2.57	2.66	3.54	8.56	1.15	4.60
	VV	1.47	1.61	3.52	8.31	1.24	4.50
	WD	0.373	4.46	3.16	5.52	0.79	4.77
07Mi07#5 (200m)	PC	2.65	1.84	3.17	6.72	0.87	4.30
	VV	1.03	15.4	9.81	14.4	1.40	4.78
	WD	0.893	0.925	0.294	0.824	1.19	4.51
12Mi31#1 (300m)	PC	4.18	2.69	3.66	8.76	1.30	4.71
	VV	0.342	0.835	1.76	4.65	0.80	4.64
	WD	1.52	1.11	2.95	7.63	1.22	4.70
09Mi20#1 (300m)	PC	2.11	2.59	4.4	9.38	1.16	4.22
	VV	0.215	0.773	1.86	4.04	1.17	4.11
	WD	2.45	12.1	10.6	17.9	2.08	4.15
09Mi21#3 (300m)	PC	4.82	2.97	4.77	10.9	1.32	4.15
	VV	0.186	0.331	0.949	-	0.62	4.04
	WD	0.756	0.709	2.63	7.57	1.22	4.19
10Mi26#1 (400m)	PC	4.21	3.75	5.28	11.6	1.41	4.45
	VV	0.556	5.41	4.21	7.86	0.96	4.73
	WD	1.42	1.20	3.41	8.98	1.33	4.63
10Mi26#1 (400m)	PC	2.8	2.47	3.93	8.5	1.16	4.88
	WD	2.06	1.50	3.4	8.37	1.25	4.54
12Mi33#1( 500m)	PC	7.51	9.42	9.16	17.2	1.96	4.54
	VV	0.571	13.7	8.13	10.8	1.08	5.09
	WD	0.231	0.723	2.35	6.81	1.10	4.44
15Mi52#1( 500m)	PC	2.65	2.43	3.17	8.98	1.18	4.76
	WD	1.03	0.418	9.81	5.00	0.88	4.67
	PC	11.6	2.93	4.19	8.9	1.23	4.90

PC : 封圧採水 VV : 真空脱気 WD : 水上置換 HF : 中空糸膜

斜体は大気のコソタミの可能性が高い試料

本検討の最終的なねらいは、サンプリング中に脱ガスが起きてしまったと考えられるサンプルのデータから脱ガス前のデータを推定することである。全希ガスの中で Ne は、He や Ar と異なり岩石から発生するような反応がほとんどない (Lehmann et al., 1993)。また、溶解度の温度依存性が小さく、Kr や Xe と違って涵養温度による影響が極めて限定的である (Ozima and Podsek, 2002)。このため、涵養時に気泡が地下水に巻き込まれて溶解する「エクセスエアー」(Stute and Schlosser, 1993; Aeschbach-Hertig et al., 1999)の影響を除いて、Ne の濃度はほぼ一定であると考えて良い。このため、Ne とほかのガスの脱ガス時の比率が予測可能であれば、大気と平衡になった水における Ne の濃度 (1.78~2.25×10<sup>-7</sup>ccSTP/gw: 参考文献)、脱ガス後の Ne 濃度、脱ガス後の Ne とほかの希ガスの濃度比率から、脱ガス前の各希ガスの濃度を推定することが可能である。本検討では、封圧採水で取得したサンプルを「脱ガスする前のサンプル」とし、封圧採水のガス濃度に対して他の方法で取得したサンプル中の希ガス濃度を比較した。結果の中で示す Ne の脱ガス率とは、封圧採水時の Ne 濃度とほかのサンプリング方法で取得したサンプルの Ne 濃度の差を、封圧採水時の Ne 濃度で正規化したものである。

$$(\text{Ne の脱ガス率}) = \frac{[\text{封圧採水時の Ne 濃度}] - [\text{脱ガス後の Ne 濃度}]}{[\text{封圧採水時の Ne 濃度}]}$$

また、封圧採水時のサンプルにおける希ガス濃度 (脱ガス前の濃度) に対する、脱ガス後の溶液における希ガス濃度を A とし、Ne における A (A<sub>Ne</sub>) とそのほかのガスにおける A (A<sub>He, Ar, Kr, Xe</sub>) の比を B とした。つまり B とは、Ne の脱ガス率に対する他のガスの脱ガス率を表しており、B が 1 より大きい場合はそのガスが Ne よりも水に残りやすいことを示しており、B が 1 より小さい場合はそのガスが Ne よりも脱ガスしやすいことを示している。

$$A_{\text{He, Ne, Ar, Kr, Xe}} = \frac{[\text{脱ガス後の希ガス濃度}]}{[\text{封圧採水における希ガス濃度}]}$$

図 5.4.1-4 には、Ne の脱ガス率とそのときの各希ガスにおける B の関係を示した。He においては、B は 1 を下回っており、全てのサンプル採取方法において He は Ne よりも脱ガスしやすいことが示された。しかし、真空脱気を除いて、Ne と He の関係における B は 1 から大きくは離れておらず、「Ne の脱ガス割合と He の脱ガス割合を等しい」と考えて補正する方法でも、正確ではないが大きく誤った値を示すものではないと考えられる。一方他のガスでは、B の値は 1 より大きく、Ne の脱離率が上がるにつれてその値は顕著に上昇することが分かった。このため、Ar・Kr・Xe については脱ガス時に Ne よりも水に残留しやすく、Ne の脱ガス率が上がるにつれてその挙動の差異が顕著であることが分かった。

#### (4) 瑞浪地区での考察

##### (a) サンプリングの方法と脱ガス割合について

水上置換サンプルにおいては、50%~76%の Ne が水から気相へと脱ガスしていることがわかった。

単純に圧力を開放するだけの水上置換法であっても、かなりのNeが脱ガスしていることから、サンプルリングにおける圧力差は大きな脱ガスにつながる可能性が高いことが明らかになった。

一方シャワーリングでは、92%という高い脱ガス割合が観察された。圧力開放時に水を細かい霧状にすることで、脱ガスがより進んだものと考えられる。このため、真空などを用いずにかつ、意図的にガスを脱ガスさせる場合には、シャワーリングは有効な方法であると考えられる。ただし、シャワーリングのデータを取得したのは深度500mの地下水であり、地下水にかかっている圧力は高かった。このため、高い脱ガス率は圧力差が大きいためである可能性もある。このため、シャワーリングの効果はさらに検討が必要である。

さらに真空脱気法では、水上置換法が50%程度の脱ガス率であった地点において、96%もの脱ガス率を達成している(07MI07#5地点)。このため、真空容器への地下水の導入は脱ガス方法として極めて有効であると考えられる。15MI52#1では、中空糸膜による脱ガス試験も実施した。その結果、Neの脱ガス率は98.5%に達し、ほとんどのガスを脱離できていると考えられる。ただし、容器を真空にしたり、中空糸膜を利用する場合には、大気の混入に留意する必要がある。2つの方法ともに、真空と地下水の圧力差をガス移動の駆動力としているため、大気を引き込みやすいという難点があると考えられる。

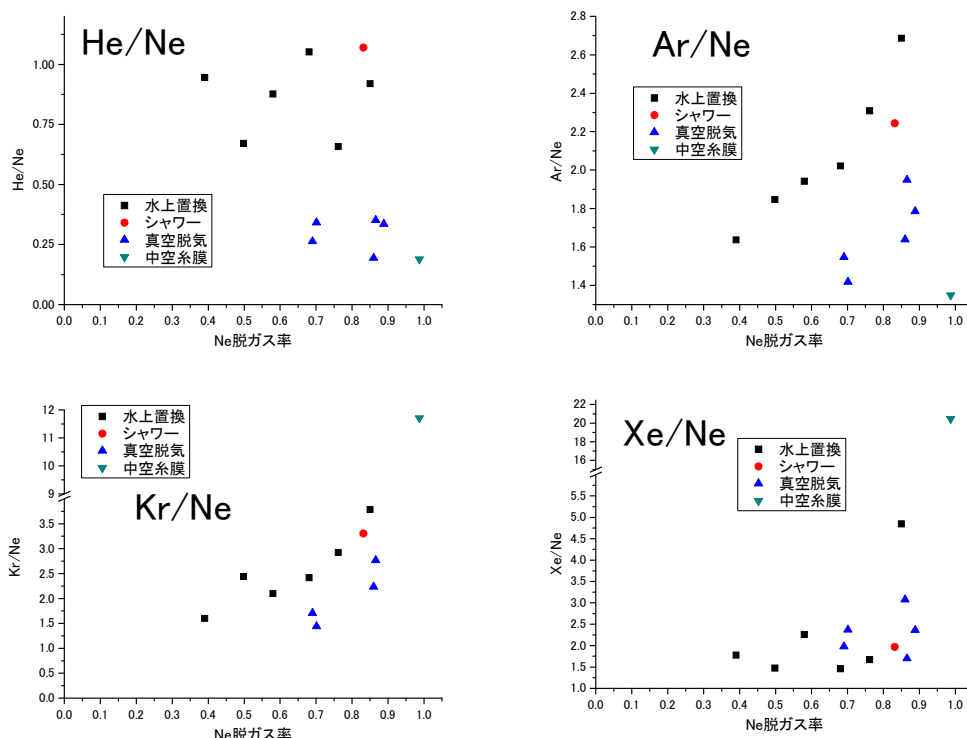


図 5.4.1-4 Ne 脱ガス率と溶液に残留する希ガスにおける Ne に対する比率の関係

(b) ガスサンプルにおける各希ガスの割合について

上述のように、サンプリングにおいて地下の圧力を開放すると、Ne を基準として 50%以上のガスが脱ガスする可能性があることがわかった。このため、先述のように可能な限り圧力をもとの地下水に近い状況にして、銅管にサンプルを採取することが望ましい。しかし、実際の地下水採取においては、全てのサンプルに理想的なサンプリング方法を適用できない可能性がある。この場合、地下水から希ガスは脱ガスし、サンプルとしてガスと水の混合物を得ることになる。サンプルが水とガスの混合物の場合、ガスと水を分けてサンプリングし、ガスの組成から元々の地下水に溶存していたガス濃度を推定する方法も考えられる。あるいはより積極的に水からガスを抽出し、ガスを分析することも手法の1つとして考えられる。このときには、どの程度のガスが抽出できたか（上記の考察1で議論）と、抽出したガスにおける組成が元のガスと異なっているかを検討する必要がある。ここでは、脱ガス前後の地下水における希ガス濃度からガスとして抜けた成分を推察し、ガス組成の変化について検討した。

表 5.4.1-2 には、封圧採水で取得したサンプルにおける Ne に対する他の希ガスの割合と、脱ガス後の地下水における希ガス濃度から推定した抽出されたガスにおける Ne に対する他希ガスの割合を比較した。まず He と Ne の割合を見ると、封圧採水で評価された He/Ne と脱ガスした成分における He/Ne を比較すると、脱ガスしたガスにおける He/Ne は封圧採水したサンプルに対して 0.98~1.33 倍の値である。09MI21#3 では、真空脱気と水上置換のデータを比較することができたが、両者には顕著な差が見られなかった。このため、He と Ne に関しては、脱ガスした成分における He と Ne の比率がほぼサンプルにおける He と Ne の比率に等しいと考えて良い。また、深度が浅いところほど He と Ne の比率が大きくなっており、He の方が溶液から脱ガスしやすい傾向が見られた。これは、圧力が高いところから脱ガスされたサンプルの方が脱ガス率が高く、He と Ne がともに高い割合で脱ガスしたため、脱ガス後の気体における差異が少なくなったためであると考えられる。

一方、そのほかのガスの組成を比べてみると、特に水上置換で得られたガスについては封圧採水で得られたサンプルと比較して、Ne との比率において値の低下が顕著である。これは、Ne と比較して Ar 以上の希ガスは溶解度が高いなど、水にとどまりやすい性質を持つためであると考えられる。また、質量数が多い希ガス（特に Xe）では、Ne の脱ガス割合が 95%以上でも溶液に残留するガスの割合が大きく、封圧採水と脱ガス後とで Ne との比率に大きな差異が生じていることがわかる。このため、Ne を基準として大きな脱ガス割合が得られたとしても、とくに Xe は十分にガス相に移行せず、結果的に Ne との比率が異なってしまうことになる。

上記のように、地下水から気体だけを抽出して分析する方法は、He と Ne を分析するためには極めて有用である一方、Ar 以上のガスの分析（特に Xe）に対しては留意が必要であることがわかった。

表 5.4.1-2 脱ガス前後のガス組成の比較

採取地点	採水方法*	He/Ne	Ar/Ne	Kr/Ne	Xe/Ne
07Mi07#5	PC	144.0	1719.7	0.365	0.0472
	水上置換	191.8	250.5	-	-
09MI20#1	PC	81.5	1701.6	0.363	0.0450
	真空脱気	104.4	1398.6	0.295	-
09MI21#3	PC	162.1	1606.4	0.365	0.0444
	真空脱気	175.6	1448.3	-	0.0265
	WD	179.4	947.6	0.145	0.0045
10MI26#1	PC	112.3	1408.8	0.310	0.0375
	WD	109.5	733.0	0.103	0.0031
15MI52#1	PC	455.7	1630.9	0.369	0.0486
	WD	449.1	1220.2	0.197	0.0149
	HF	460.7	1618.9	0.305	0.0264

\*水上置換や真空脱気では、封圧採水との差から遊離したガス中の組成を算出している

(c) 脱ガス後の水サンプルやガスサンプルから元のガス濃度を推定する手法の検討

上述のように、脱ガスにおいては全てのガスが同じように挙動するわけではないため、地下水中のほとんどのガスを抽出できたとしても、Ne と重い希ガス (Kr や Xe) の間で脱ガス挙動に違いがあることが分かった。このため、各ガスの脱ガス挙動が従う法則を見出し、脱ガス後の地下水やガスから元の地下水における各希ガスの濃度を予測する手法を確立することが重要である。ここでは、①ヘンリーの法則に従う場合、②拡散係数の比に従う場合、の 2 通りの場合において脱ガス挙動を予測し、予測値と実験結果の整合性を確認した。

1) ヘンリーの法則に従う場合の脱ガス挙動

ここでは、ヘンリーの法則に従って脱ガスが起きた場合の脱ガス挙動について考える。ヘンリーの法則とは、溶液中の気体の濃度と気体と接触しているヘッドスペース中の気体の分圧が比例関係にあるという法則のことである。

以下のように変数を定義する。

$C_{wi}$  : 脱ガスが起きる前の溶液中のある希ガスの濃度 (mol/L)

$V_0$  : 脱ガスが起きる前の溶液の体積 (L)

$C_g$  : 気相のガス濃度 (mol/L)

$V_g$  : 脱ガス後に生じたガスの体積 (L)

$C_w$  : 脱ガス後の溶液におけるある希ガスの濃度 (mol/L)

$V_w$  : 脱ガス後の溶液の体積(L)

A : 脱ガス後に溶液に残存する希ガス量の脱ガス前の希ガス量に対する割合

とすると、A は以下の式で表現できる

$$A = \frac{C_w V_w}{C_{wi} V_0}$$

ここで、 $C_{wi} V_0 = C_g V_g + C_w V_w$  であり、またヘンリーの法則から  $C_g = H_a C_w$  である ( $H_a$  はある希ガスにおけるヘンリー一定数である。この場合のヘンリー一定数は (mol/l)/(mol/L) で無次元である)。これを利用すると、上記の式は下記のように記述することができる。

$$A = \frac{C_w V_w}{C_{wi} V_0} = \frac{C_w V_w}{C_g V_g + C_w V_w} = \frac{C_w V_w}{H_a C_w V_g + C_w V_w} = \frac{1}{H_a \frac{V_g}{V_w} + 1} = \frac{1}{H_a x + 1}$$

ここで  $x$  は脱ガス後の液相と気相の比である。

A は脱ガス後に溶液に残存する希ガス量の、脱ガス前の希ガス量に対する割合である。このため、Ne の脱ガス割合を決めると、A を決めることができる。例えば Ne の脱ガス割合が 0.01 である場合、A は  $1 - 0.01 = 0.99$  である。A の値から、上記の式と Ne のヘンリー一定数を用いて  $x$  を算出することができる。 $x$  を算出できたら、 $x$  の値と各希ガスのヘンリー一定数 (無次元) から、各希ガスにおける A を算出することが可能である。上述の計算により、Ne の脱離率が決まった場合、他の希ガスの A の値を算出することができる。Ne における A と他ガスの A を比較することで、それらの比率 (B) を算出することができる。このようにして、脱ガス挙動がヘンリーの法則に従う場合の、Ne の溶液への残存率に対する他希ガスの溶液への残存率を算出することが可能である。

## 2) 脱ガスの速度論が伴う場合の脱ガス挙動

脱ガスにおいて気泡が形成された場合、溶液から気泡に入り込むガスの速度が脱ガス挙動をコントロールする可能性がある。このときの脱ガスの速度は気泡の表面積と気泡に入り込むガスのフラックスの積によって表現できる。図 5.4.1-5 には、上記のプロセスで脱ガスがコントロールされる場合の概念図を示した。図に示したように、気泡の外側に薄い水の層があると想定し、層を移動する速度は拡散係数に比例するものとする。

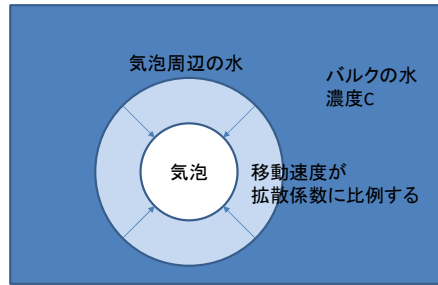


図 5.4.1-5 拡散速度が脱ガス速度をコントロールする場合の概念図

脱ガスの絶対量や濃度の低下量を算出するには、気泡の大きさなどの情報が必要であり、試験条件やサンプルの状態に大きく依存すると考えられる。しかし、各希ガス間の脱ガスや残存ガスの比率を比較するのであれば、気泡の大きさ（表面積）は各希ガスに共通であるため、フラックスの相対的な大きさを比較すれば良い。フラックスの大きさは拡散係数に比例するため、脱ガス後の各希ガスの相対的な割合を予測することは可能であると考えられる。気泡への拡散速度によって脱ガス速度が決まる場合、ある時間における溶液の希ガス濃度減少速度は以下の式で表現できる。

$$\frac{dC_{gas}}{dt} = -k_{gas} C_{gas}$$

ここで、 $C_{gas}$  : ある希ガスのある時間における濃度、 $k_{gas}$  : 脱ガスのフラックス量を定義する係数、である。上記の式において  $k$  が時間に対して一定とみなせる場合には、水中の希ガス濃度  $C$  は以下の式で表すことができる。

$$C_{gas} = C_{0gas} \times \exp(-k_{gas} \times t)$$

$$\frac{C_{gas}}{C_{0gas}} = \exp(-k_{gas} \times t)$$

上記の式における  $k$  の値は、時間とともに（気泡の粒径の変化に従って）変化する可能性があるが、各ガスにおける  $k$  の相対的な値の比は、水中の拡散係数が駆動力である以上各ガスの拡散係数の比に等しくなる。上記の式の  $C_{gas}/C_{0gas}$  は脱ガス前の試料に対する、脱ガス後の溶液におけるガスの割合を表している。Ne の脱ガス割合（あるいは地下水への残存率 (A)）を決めた場合、以下のようにして他のガスの残存率を算出することが可能である。

$$\frac{C_{Ne}}{C_{0Ne}} = \exp(-k_{Ne} \times t) = Ne \text{ の地下水での残存率} = A_{Ne}$$

$$\frac{C_{gas}}{C_{0gas}} = \exp(-k_{gas} \times t)$$

$$\text{ただし、} \frac{k_{gas}}{k_{Ne}} = \frac{D_{gas}}{D_{Ne}}$$

ここで、 $D_{gas}$  はある希ガスにおける水中の拡散係数である。上記の 3 つの式から、Ne の地下水での残



存率( $A_{Ne}$ )が決まれば、他ガスの地下水中的の残存率( $A_{gas}$ )を決定することができ、ここからBの算出が可能である。

### 3) 実データと計算値の比較

上記のようにヘンリーの法則に従う場合と、拡散による Kinetics が支配的な場合とである Ne の脱ガス割合における他ガスの脱ガス割合を計算した。それらを実験データとともにプロットしたものを図 5.4.1-6~9 に示した。

He ではややバラツキがみられるものの、水上置換で採取したサンプルとシャワーリングで採取したサンプルについては、ヘンリーの法則で予想した曲線に近い位置にデータがプロットされた。一方、真空脱気と中空糸膜で得られたデータは、Kinetics から予測された曲線に近い位置にプロットされていることが明らかである。そのほかのガスについても、水上置換で採取したサンプルとシャワーリングで採取したサンプルのデータはヘンリーの法則で予測した曲線に近く、真空脱気や中空糸膜で得られたサンプルから取得したデータは Kinetics から予測された曲線に近い位置にプロットされた。Xe においては脱ガス率が 0.9 以下の場合、ヘンリーから予測される割合と Kinetics から予測される割合はほぼ一致していることから、実際の実験データでも大きな差異が観察されなかった。

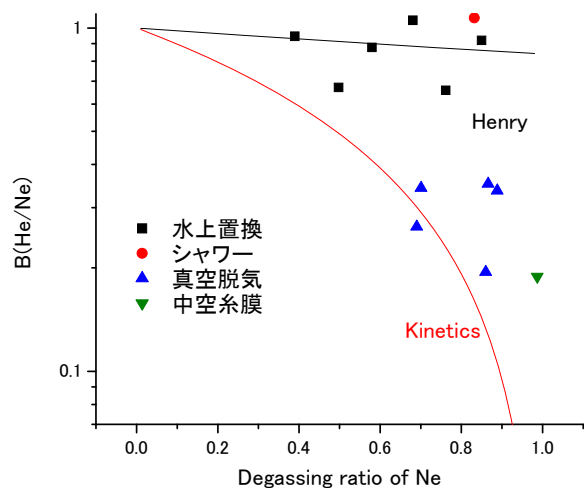


図 5. 4. 1-6 Ne の脱離率と He/Ne の関係

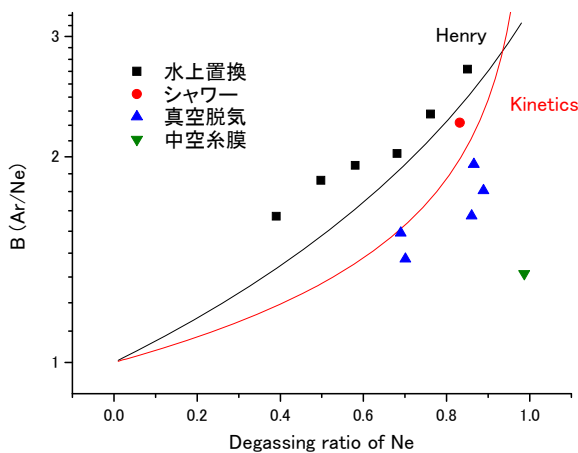


図 5. 4. 1-7 Ne の脱離率と Ar/Ne の関係

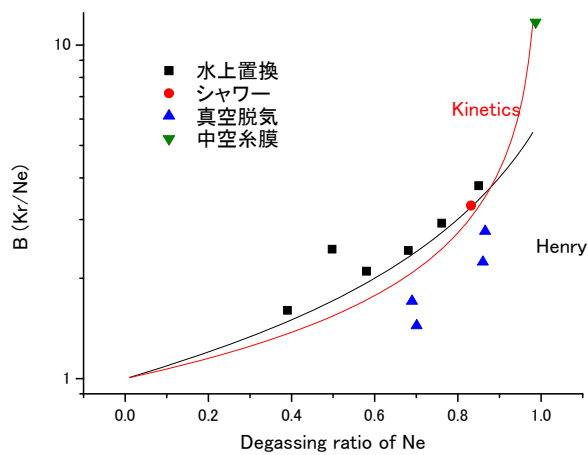


図 5. 4. 1-8 Ne の脱離率と Kr/Ne の関係

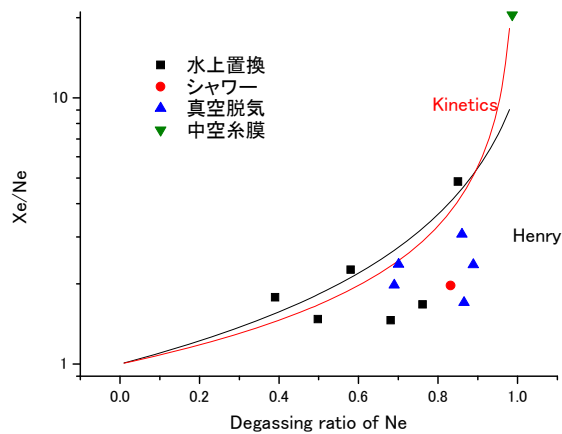


図 5.4.1-9 Ne の脱離率と Xe/Ne の関係

以上の比較結果から、実施した脱ガス試験について以下のことが言える。まず、水上置換やシャワーリングでガスを脱ガスさせた場合には、脱ガス挙動はほぼヘンリーの法則に従うと考えられる。水上置換やシャワーリングは実際に地表や地下坑道に地下水を出しながら実施するサンプリングに近いと考えられる。今回サンプリングを実施した最大深度は 500m であるため、少なくとも 500m より浅い深度の地下水であれば、これをくみ上げて採水する場合、脱ガス挙動はヘンリーの法則に基づいて補正すればよいことが明らかになった。一方、真空容器に水を入れたり、膜を介して真空と水が接触する中空糸膜においては、脱ガス挙動は拡散係数に比例して移動速度を仮定する kinetics からの予測と脱ガス挙動に近いことが分かった。これは、真空に対する脱ガスでは、真空の空間に対してガスが移動する速度が脱ガス速度の律速になっており、結果として脱ガス割合が Kinetics に従ったものと考えられる。以上のように、フィールドで実施した脱ガス試験については、今回試験を実施した条件下ではヘンリーの法則および Kinetics に伴う考えから、脱ガス後のガス組成を再現することが可能であることが分かった。水上置換およびシャワーリングはヘンリーの法則で脱ガスの様子が再現されたことから、深度が 500m より浅い地下水において地表や坑道に地下水を出すことで生じる圧力差で脱ガスが生じる場合には、脱ガスはヘンリーの法則に従って起きていると考えられる。このため、今回試験を実施した試験条件下では、サンプリング時の圧力低下に伴う脱ガスはヘンリーの法則を使って補正することが可能であることが明らかになった。しかし、上記の試験結果は種々の試験条件に依存している可能性がある。例えば、さらなる圧力差や、共存ガス濃度が高い場合など、同じようにヘンリーの法則に従って脱ガスが起きるかは不明である。今後より試験ケースを増やして試験条件と脱ガス状況の関係を明らかにしていく必要がある。

一方、真空を駆動力として地下水から脱ガスをさせた場合は、ガスの組成は拡散係数に比例する

kinetics から予測することが可能であることが分かった。上述のように、脱ガス割合が高くなった場合でも、抽出されたガスにおける Ne とほかのガスの比率においては、とくに Ne と Xe の比率においてガス抽出前後で顕著な差異が観察された。このため、Ne を基準として脱ガスを補正する場合には、特に Xe (Kr もやや影響が大きい) においては抽出されたガスに対して、補正が必要である。本試験の結果から、Kr や Xe の脱ガスについては、Kinetics からの予測によって補正をすることで抽出されたガスから、もともとの地下水におけるガスの組成を推定することが可能であると考えられた。

以上のように、瑞浪地域の地下水においては、脱ガスした地下水サンプルから、もともとのガスの組成を推定することは十分に可能であると考えられる。しかし、今回検討した脱ガスの補正は「Ne 濃度がどの地下水サンプルでもほぼ同程度である」ことを前提としている。Ne は地化学反応によって増加することはほとんどないが、エクセスエア等の影響で濃度が変化する可能性は十分に高い。脱ガス挙動についても事例を増やしていく必要があるが、同時に脱ガス前のサンプルにおいて Ne 濃度がどのような範囲の値を取りうるのか、検討する必要があると考えられる。

#### (5) 幌延地域の地下水における脱ガス試験結果

瑞浪地域の地下水において検討したのと同様に、幌延地域の地下坑道においても地下水を採取し、脱ガス挙動を明らかにした。幌延地域においては共存するメタンガスの濃度が高いため、一部の希ガスはメタンガスの脱ガスとともに脱ガスする可能性がある。瑞浪地域の地下水における挙動と、幌延地域の地下水における挙動を比較することで、希ガスの脱ガスにおける共存ガスの影響について議論することが可能であると考えられた。

幌延地域では、深度 140、250、350 m の坑道の 4 か所のボーリング孔から封圧採水、水上置換、真空脱気、中空糸膜の 4 つの方法でサンプルを採取し、封圧採水とその他の方法で取得したサンプルにおけるガス濃度を比較して、希ガスの脱ガス挙動を議論した。分析結果を表 5.4.1-3 にまとめた。

幌延地域での採水においては、真空脱気、中空糸膜で取得したサンプルは、 $^3\text{He}/^4\text{He}$  と Ne 濃度が高い値を示した。これは、サンプリングにおいて大気が混入した痕跡を示すものである。このため、幌延地域のサンプルでは、真空脱気と中空糸膜については議論せず、封圧採水と水上置換のサンプルを比較した。幌延で取得したサンプルにおける Ne の脱ガス率と B の関係を図 5.4.1-10～図 5.4.1-13 に示した。図には、瑞浪地域における結果を併せて示している。図からわかるように、瑞浪地域の地下水においては脱ガス挙動がヘンリーの法則や Kinetics モデルで予想できる曲線には従わず、挙動が一定ではないことがわかる。

表 5.4.1-3 幌延地下坑道における脱ガス試験の結果まとめ

Sampling point	Sampling method	Concentration of Noble gas (ccSTP/gw)					$^3\text{He}/^4\text{He}$ ( $\times 10^{-6}$ )
		He	Ne	Ar	Kr	Xe	
		( $\times 10^{-8}$ )	( $\times 10^{-9}$ )	( $\times 10^{-5}$ )	( $\times 10^{-9}$ )	( $\times 10^{-9}$ )	
07V-140-M01 (140m)	PC	4.65	2.69	0.85	15.36	12.49	1.22
	WD	3.18	1.35	0.49	7.26	24.08	1.19
	<i>VV</i>	<i>10.01</i>	<i>263.65</i>	<i>13.05</i>	<i>20.56</i>	<i>16.66</i>	<i>10.84</i>
	<i>HF</i>	<i>1.73</i>	<i>56.45</i>	<i>1.89</i>	<i>3.33</i>	<i>1.36</i>	<i>13.26</i>
09-V250-M02#1 (250m)	PC	1.20	3.59	1.05	14.72	26.14	2.94
	WD	1.23	2.15	0.78	9.22	5.92	1.97
	<i>VV</i>	<i>1.43</i>	<i>32.20</i>	<i>4.07</i>	<i>16.17</i>	<i>11.60</i>	<i>9.01</i>
	<i>HF</i>	<i>8.36</i>	<i>142.94</i>	<i>8.97</i>	<i>22.10</i>	<i>20.11</i>	<i>7.17</i>
13-350-C01 (350m)	PC	4.89	6.25	0.58	11.10	17.90	2.04
	WD	0.99	1.10	0.44	4.35	3.04	2.27
13-350LGE-M01 (350m)	<i>IS</i>	<i>9.44</i>	<i>153.00</i>	<i>5.65</i>	<i>9.46</i>	<i>2.26</i>	<i>7.59</i>
	<i>WD</i>	<i>5.03</i>	<i>143.00</i>	<i>7.75</i>	<i>11.70</i>	<i>2.27</i>	<i>12.19</i>

斜体で示したデータは、Ne 濃度が高く  $^3\text{He}/^4\text{He}$  も高いことから、大気のコナミが強く疑われる

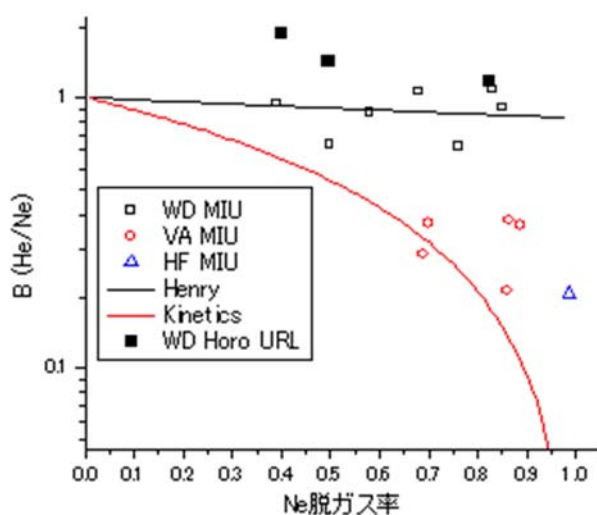


図 5.4.1-10 幌延 URL の脱ガス試験における He と Ne の関係

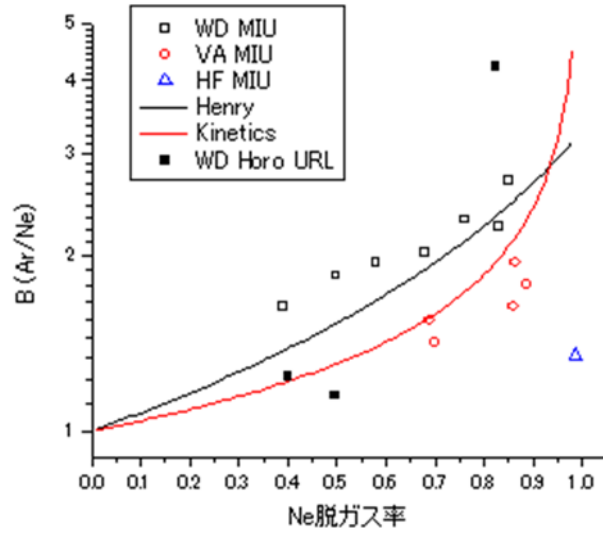


図 5.4.1-11 幌延 URL の脱ガス試験における Ar と Ne の関係

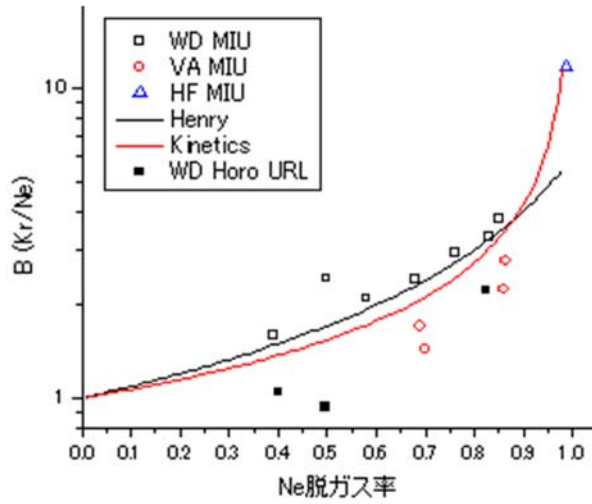


図 5.4.1-12 幌延 URL の脱ガス試験における Kr と Ne の関係

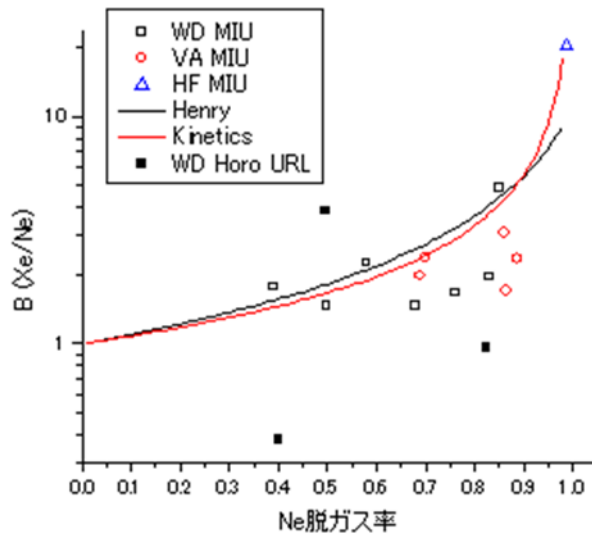


図 5.4.1-13 幌延 URL の脱ガス試験における Xe と Ne の関係

## (6) 幌延地区での考察

瑞浪地域の地下水と幌延地域の地下水の溶存ガス組成における違いは大きく 2 つある。1 つは共存ガスであるメタンの濃度が幌延地域では高いことであり、もう一つは希ガスの濃度が低いことである。希ガスの濃度が低いのは、トンネル掘削後やパッカー内で一度ガスが脱離したためであると考えられる。

メタンのような共存ガスの脱ガスに伴う希ガスの脱ガス挙動については、確立されたモデルが存在しない。メタンの脱ガスに伴う希ガスの脱ガスが極めてランダムであれば、今回実験で得られたようなバラバラの値を説明できる可能性がある。しかし、前述のように、幌延地域では一度脱ガスがおきているために、全般的に希ガスの濃度が低い。高い濃度でメタンガスが共存する状況で、低い濃度の希ガス濃度を分析することはかなり困難であり、前処理や分析の誤差によってデータにバラつきが生じた可能性も現時点では否定することができない。

データがランダムになった理由について、現時点で合理的な答えを示すことは難しい。しかし、データがランダムになったことにより、希ガス以外のガスが高い濃度で共存し、このガスの脱ガスに希ガスが巻き込まれた場合、平衡や拡散による速度論では予測ができない脱ガスが起きる可能性が示唆されたと考えられる。

このため、瑞浪地域のようなデータは Ne 濃度を用いてある程度そのほかの希ガス濃度を予測することは可能であると考えられるが、幌延地域のように共存するガス濃度が高い場合には脱ガス後のサンプルのデータを補正して、脱ガス前のサンプルにおける希ガス濃度を算出することはかなり難しいことが予想される。幌延地域のように共存ガス濃度が高いと考えられる場合には、地下水中の希ガス濃度を正確に知るためには、in-situ であるいは圧力を制御してサンプルを取得することが必要であると考えられる。

どの種類のガスがどの程度の濃度で共存した場合に、脱ガスの挙動が平衡や Kinetics モデルから予測できるものから外れてくるのかは、補正方法を適用できるかを決定するのに重要な情報であるが、これを決定するには種々のガスを用いて、種々の圧力で試験を実施したデータが必要とされる。どのような条件下でどのようなモデルが成立するのかについては、さらに検討が必要である。

### 5.4.1.2 水蒸気法

#### (1) 背景

Wassenaar ら(2008)によって開発された“direct vapor equilibration and laser spectrometry (DVE-LS)”法は、名前が示す通り水と平衡になった水蒸気を直接分析する方法である（以下水蒸気法と記載する）。レーザーを用いた水素・酸素同位体比分析においては水を水蒸気化し、水蒸気にレーザーをあててレーザーの吸収の同位体比による差を利用する。レーザーを利用する水素・酸素同位体比の

分析方法におけるサンプルの最終形態は水蒸気であるため、水蒸気を装置に直接導入して分析できれば、岩石間隙水から生じる水蒸気をサンプルとすることが可能である。この場合、岩石から間隙水を抽出する必要がない。

水蒸気法のメリットは、上記のように岩石から間隙水を取り出す必要がないことに加えて、間隙水から生じる水蒸気を得られれば良いので岩石の形状を問わない（水蒸気が蒸発で失われていなければ破片状の岩石からも分析が可能である）、サンプルが少量で良い（後述のように、岩石間隙水が 1g 以上程度確保できれば良い）、前処理の時間が短い（後述のように 2 日程度）、前処理において圧縮抽水装置のような特別な器具を必要としない、といった点が挙げられる。しかし、水蒸気法はその適用例が多くはなく（例えば、Hendry et al., 2015a など）、日本の岩石に対する適用例はない。このため、改めて水蒸気法の留意点等を確認し、日本の岩石等への適用性を確認することは有意義であると考えられた。このため、本研究では①水蒸気法の特性や適用性について確認するための検討を実施し、②実際の岩石コアへの適用を試みた。

## (2) 水蒸気法の特性等確認試験

### (a) 試験手順

水蒸気法の試験方法は、Hendry et al. (2015a) と Wassenaar et al. (2008) を参考にして、以下の手順で実施した。

ー岩石を封入する袋について：DVE-LS では岩石を容器や袋に密閉し、発生する水蒸気を分析する。その後水蒸気を装置に導入することを考慮すると、岩石を密閉するのは袋であることが望ましい（内部のガス量に従って収縮し、ガスを押し出す圧力が大気圧で一定となるため）。Wassenaar et al., 2008 の報告では、袋は通常食料品等を保管するようなポリエチレン製のバッグでも良いとされているが、本研究では気体の漏れが小さいことと、コック付きの出口がありその後の操作が容易であることから、コック付きのアルミニウム製バッグ（容量 2000ml）を使用した。

ー岩石試料の封入：適切な重量（後述）の岩石試料をシャーレの上に置き、上述のアルミバッグに入れた。可能な限り空気を抜き、バッグの口を閉じた。

ー窒素ガスの封入：流速 500ml/min で乾燥した窒素ガスをアルミバッグに 2 分間入れた。アルミバッグ内には 1000ml の窒素ガスが充填されたことになる。この状態で室温（約 20℃）にて、バッグを静置した。

ー分析：所定の時間経過後（後述）アルミバッグを直接分析装置に接続した。分析装置内部は陰圧になっており、接続してコックを開けるとバッグ内の水蒸気が装置内部へと導入される。バッグを接続して 1 分後、バッグのコックを開いて水蒸気を装置に導入し、装置の水蒸気分析値が安定した後（コックを開いてから 1 分後）から 2 分間、装置で分析される水蒸気の水素・酸素同位体比を記録した。2 分



間は 10 秒おきに分析値を記録し、この平均値を水蒸気の測定値とした。

(b) 試料量と水蒸気における同位体比の関係

密閉空間（アルミバッグ）内の水の量が十分ではない場合、水と水蒸気の間での同位体分別が顕著になるため、水蒸気における同位体比が有意に大きくなる可能性が考えられた。このため、ここでは同位体分別を起こすことなく、同位体比の分析が可能となる試料量を明らかにするために、水の量と水蒸気同位体比を確認する試験を実施した。

試験は上述の試験方法に従って実施したが、岩石の代わりにキムワイプをおき、そこに 0.1～3.0g の水を滴下した。3 日間静置後、水蒸気の水素・酸素同位体比を分析した。分析結果を図 5.4.1-14 に示した。図から分かるように、水の量が 1.0g を超えると水素・酸素同位体比はほぼ一定の値を示すのに対して、水の量が少なくなるとより大きな値を示す。液量に依存して同位体比が変化する領域では安定した分析ができないため、間隙水の量が 1.0g 以上になるように岩石量を調整する必要があることがわかる。

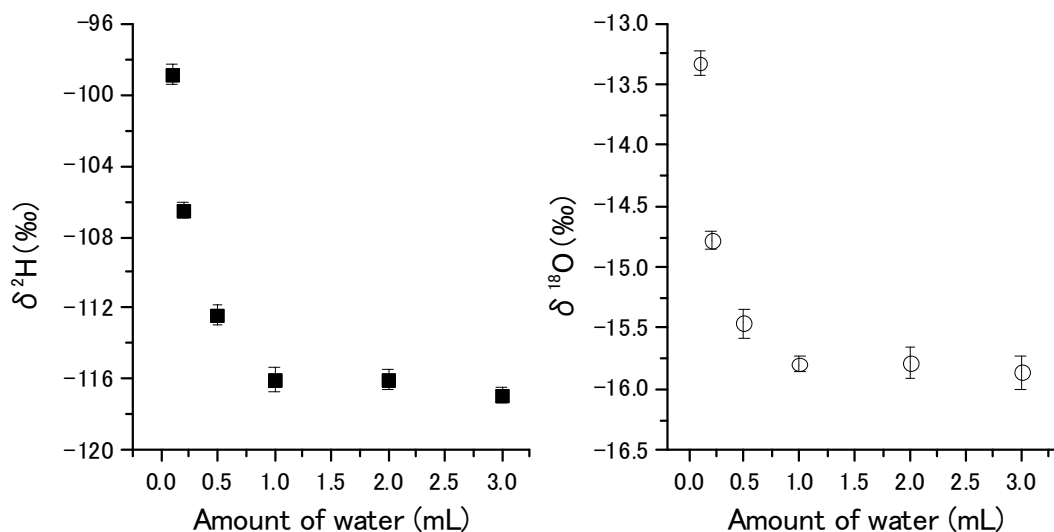


図 5.4.1-14 水蒸気法における液量と水蒸気同位体比の関係

(c) 密封時間と同位体比の関係

水蒸気と岩石間隙水との間で水蒸気が平衡になるまでの時間を明らかにするために、密封してからの時間と水蒸気における水素・酸素同位体比の関係を確認するための試験を実施した。

北海道幌延地域で取得した岩石について岩石量を 12g 程度に調整し、これをアルミバッグに封入した。110°C で 48 時間乾燥した前後の重量から、岩石 12g には約 3g の間隙水が含まれており、12g という岩石量は上記の試験結果から得られた「間隙水量が 1.0g 以上」という条件を満たす量である。岩石を袋に入れて、1・2・4・7 日後の水蒸気の水素・酸素同位体比を分析したところ、水蒸気の水素・酸

素同位体比は 1 日目から大きな変化がなかったが、2 日以上の分析結果はほとんど同じ値を示したことから、試験時間は 2 日間に設定した。

(d) 幌延岩石への適用性確認試験

幌延岩石（稚内層の珪藻泥岩）への水蒸気法の適用性を確認するため、間隙水を同位体比既知の水と入れ替えた後、改めて水蒸気法で分析するという予備的な試験を実施した。岩石をある溶液に浸漬すると、溶液中の水は岩石間隙水と拡散によって交換する。このため、閉鎖空隙（岩石の外部に対して完全に閉鎖した空隙）以外の空隙、拡散が平衡に達した後では浸漬した溶液と閉鎖空隙以外の間隙は同じ水素・酸素同位体比を持つと考えられる。このような考えに従って、岩石標準試料を以下の手順で調製した。12g 程度に整形した岩石片を 21 日程度溶液に浸漬し、その後溶液の水素・酸素同位体比を溶液の分析で、間隙水の水素・酸素同位体比を DVE-LS 法でそれぞれ分析して比較した。岩石コアを浸漬した場合でも 1 週間程度で溶液の水素・酸素同位体比の変化は顕著でなくなるため、より大きさの小さい岩石片の場合であれば 3 週間は間隙水が浸漬した溶液と平衡になるのに十分な時間であると考えられた。岩石の浸漬には 0.1M 塩化ナトリウム溶液を用いた。これは、スメクタイトの膨潤によるスレーキングを防ぐためである。

以上のような手順で調製した岩石片の標準試料に対して、上記で示した手順を適用し、同位体比を評価した結果を表 5.4.1-4 に示した。表からわかるように、岩石片を浸漬して十分に時間が経過した後の溶液における水素・酸素同位体比と、水蒸気法で評価した間隙水の同位体比とは良く一致しており、幌延地域のような泥岩に対しても水蒸気法が適用可能であることがわかった。

表 5.4.1-4 水蒸気法の幌延岩石への適用結果

評価対象	評価方法	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
間隙水	DVE-LS	$-56.8 \pm 0.8$	$-8.4 \pm 0.07$
溶液	溶液の分析	$-56.8 \pm 0.1$	$-8.3 \pm 0.10$

(3) 水蒸気法による水素・酸素同位体比の深度方向分布

水蒸気法によって、同位体比の深度方向分布を明らかにするために、幌延地域東立坑で取得した岩石に対して水蒸気法を適用した。

取得した岩石コアをハンマーで粉砕し、岩石に含まれる間隙水の量が約 3g になるように、岩石片の個数を調整してアルミニウムバッグに封入した。その後、窒素ガスをアルミバッグに 1000ml 入れ、20℃ に室温を制御した室内で 48 時間静置した。48 時間後、アルミバッグと水素・酸素同位体比分析装置を直接接続し、サンプルに水蒸気を導入した。水蒸気導入から 1 分後、水素・酸素同位体比の分析を開始

し、2 分間 10 秒おきに同位体比の値を評価した。12 個のデータの平均値を水蒸気の測定結果とし、データのばらつきを分析における誤差とした。

東立坑における水素・酸素同位体比分析の結果を図 5.4.1-15 に示した。図には参考として、圧縮抽水で評価された結果についても示した。図からわかるように、圧縮抽水で得られた水素・酸素同位体比のプロファイルと水蒸気法で得られた水素・酸素同位体比のプロファイルはよく一致しており、それぞれの方法が水素・酸素同位体比の分析法として適していることを確認することができた。

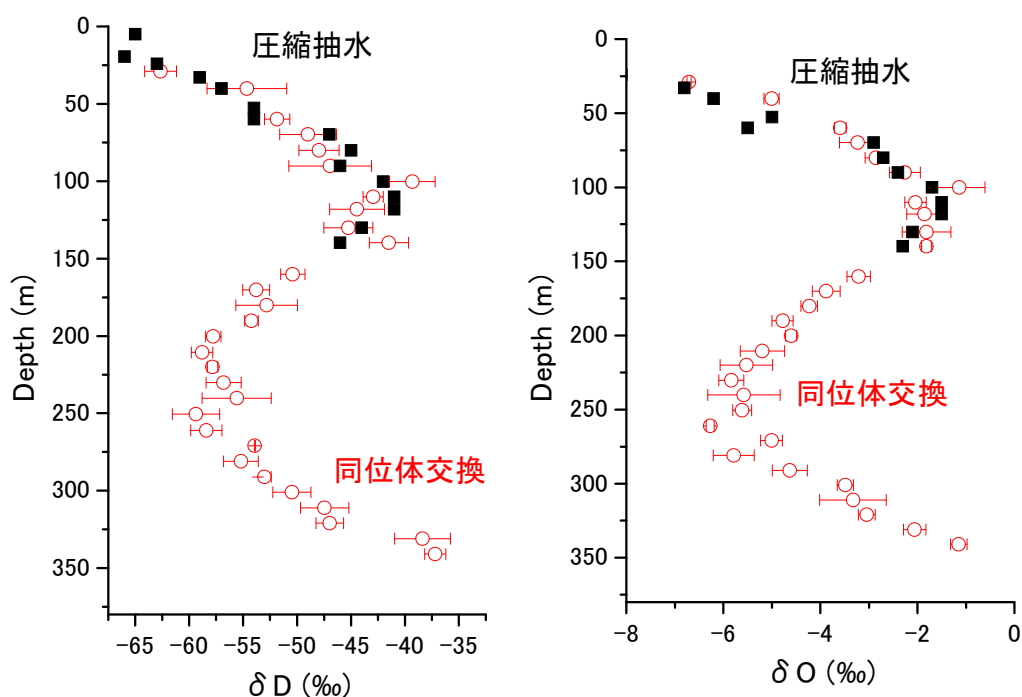


図 5.4.1-15 水蒸気法と圧縮注水法で取得した水素・酸素同位体比の深度分布比較

#### (4) まとめ

水蒸気法は、必要とされるサンプル量が少ない、サンプルの形状を問わない（岩石片でも良い）、前処理が終了するまでの時間が短い（2 日）など、多くのメリットがあるため、水蒸気を直接分析可能な装置を所有している場合には、間隙水同位体比を分析する手法の一つの候補として有力であると考えられる。本検討では、2000ml のアルミバッグを用いた場合の最適な試験条件について検討し、適切な試験条件を定めることができた。幌延の立坑で取得したボーリングコアの間隙水を人工的に入れ替えたサンプルについて分析したところ、水蒸気法で評価された間隙水の水素・酸素同位体比と溶液の同位体比はよく一致した。このため、水蒸気法が泥岩に対しても適用可能であることが分かった。さらに、幌延地域で取得した岩石に対して水蒸気法を適用し、深度方向の水素・酸素同位体比プロファイルを作成したところ、圧縮抽水で得られたプロファイルと良く一致していた。

以上のことから、水蒸気法は日本の比較的塩濃度が高い間隙水組成を持つ泥岩に対しても適用することが可能であることがわかった。水素・酸素同位体比の細かなプロファイルは他地下水の流入や混合についての情報を得たり、場が拡散支配であることを理解するために重要な情報である。水素・酸素同位体比の細かいプロファイルを得るには、水蒸気法はかなり適した方法であると考えられ、色々な現場での適用が期待できる。

#### 5.4.1.3 圧縮抽水法

##### (1) 背景

圧縮抽水法は岩石コアに対して 1 次元的に圧力をかけ、岩石を押しつぶして間隙水を抽出する方法である。原理がシンプルであるため岩石への適用性が広範であることに加えて、特定の成分を抽出する方法でなく間隙水そのものを抽出するため、間隙水のイオン濃度評価や水素・酸素同位体比だけにとどまらず種々の溶存イオンの同位体比の分析が可能となる。特に、塩化物イオンや臭化物イオンの同位体比は、間隙水の年代を推定したり ( $^{36}\text{Cl}$ ) 場が拡散支配であるかを確認したり ( $^{81}\text{Br}$  や  $^{37}\text{Cl}$ ) するのに有効である。

上記のような利点を持つ圧縮抽水法であるが、圧縮抽水中に間隙水の溶存イオンの濃度が変化することが、種々の研究において指摘されている (例えば Nakata et al., 2016)。このため、圧縮抽水によって間隙水の同位体比も変化をする可能性が考えられる。上述のように圧縮抽水は間隙水において種々の情報を取得するために有用な手法であり、間隙水の同位体比への影響を評価したうえで、間隙水を同位体比分析のサンプルとして利用することが望ましい。このため本研究では、水の水素・酸素同位体比に着目し、これが圧縮圧力とともにどのように変化する可能性があるのかを調べた。

##### (2) 試験方法

幌延地域で取得した泥岩に対して、段階的な圧縮抽水を適用し、得られた間隙水の同位体比を分析した。間隙水の同位体比と圧縮圧力の関係から、圧縮抽水において同位体比が変化する可能性について検討した。試験は以下の手順で実施した。

-岩石の取得と成型：幌延地域の立坑で実施されたボーリングのコアを取得し、真空パックして実験室へと移送した。実験室では汚染が心配される岩石表面をトリミングした後、直径 5cm 高さ 10cm の円柱状に岩石を成形した。成形した岩石は圧縮抽水を実施するまで再度真空パックした。

-圧縮抽水：本研究で使用した圧縮抽水装置は Mower et al., (1991) を基にして、作製した (木方ほか, 1999) ものであり (図 5.4.1-16)、これを利用して段階的な圧縮抽水を実施した。段階的な圧縮抽水では、ある圧力を岩石試料にかけたあと変形が止まるまで圧力を保ち、その間に抽出されたサンプルをある圧力における試料とした。今回実験に使用した幌延地域の岩石では、圧力を 75MPa まで上げた

ときに、初めてシリンジに間隙水が得られた。ここから、100、193、200、300、400、500MPa に順次圧力を上げ、それぞれの圧力でシリンジに溜まった間隙水を取得した。取得した間隙水について、水素・酸素同位体比を分析した。

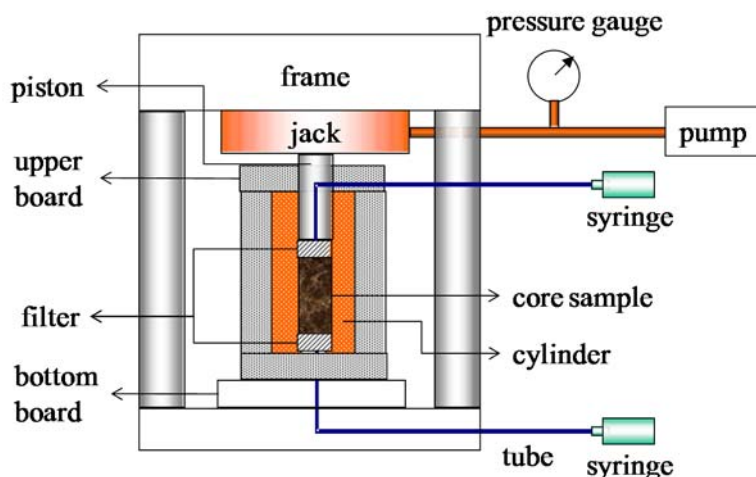


図 5. 4. 1-16 圧縮抽水装置の概念図

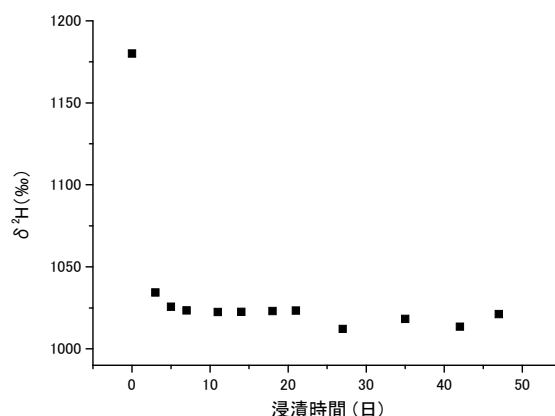


図 5. 4. 1-17 浸漬日数と水素同位体比の関係

-高い水素同位体比を持つ溶液への浸漬と圧縮抽水：圧縮抽水における閉鎖空隙の影響を明らかにするため、重水を添加して水素同位体比の値を高く（1000‰）した水溶液に岩石コアを浸漬した上で、圧縮抽水を実施した。ここで閉鎖空隙とは、コアの外部に対して閉じた空隙のことを指し、拡散等によって外部から水が浸入できない空隙である。岩石を溶液に浸漬することで閉鎖空隙以外の空隙には拡散を駆動力として溶液の水が入り込むため、長い時間の浸漬によって閉鎖空隙以外の空隙の水素・酸素同位体比は、浸漬した溶液と等しくなると考えられる。これを圧縮抽水し、コア浸漬後の溶液における水素同位体比と抽出された水の間で差異が生じた場合には、それは閉鎖空隙からの水の影響であると考えられる。成形した岩石コアを水素同位体比の高い水に浸漬し、浸漬している溶液の水素同

位体比の経時変化を観察した。その結果溶液の同位体比の変化は約 10 日程度で顕著な変化がなくなったが、空隙との交換を確実にするため約 60 日間浸漬を続けた（図 5.4.1-17）。60 日後、岩石を溶液から取り出し、浸漬前のコアと同様に段階的な圧縮抽水を実施した。

### (3) 試験結果および考察

幌延地域で取得した岩石における圧縮圧力と水素・酸素同位体比の関係を図 5.4.1-18 に示した。図からわかるように、圧縮圧力の増大に伴って水素同位体比が増加していく様子が観察された。一方で酸素同位体比においては明確な圧力依存性が観察されなかった。さらに水素同位体比の高い溶液に浸漬した後の圧縮圧力と水素同位体比の結果を図 5.4.1-19 に示した。水素同位体比の高い水に浸漬した場合、水が交換可能な空隙では浸漬した溶液と間隙水の交換が起き、最終的には水が交換可能な空隙とコアを浸漬した溶液の水素同位体比は等しくなる。浸漬した溶液の水素同位体比は通常自然界に存在する水に比べて極端に値が大きいため、圧縮抽水した水の水素同位体比が浸漬した溶液よりも低下した場合、コア外部の溶液が浸入できない空隙（閉鎖空隙）から水が抽出されたと考えることができる。図に示したように、同位体比の高い水に浸漬したあとの圧縮抽水では、低圧側で同位体比の低下が顕著であり、圧縮抽水における閉鎖空隙の影響が低圧側で顕著であることを示している。

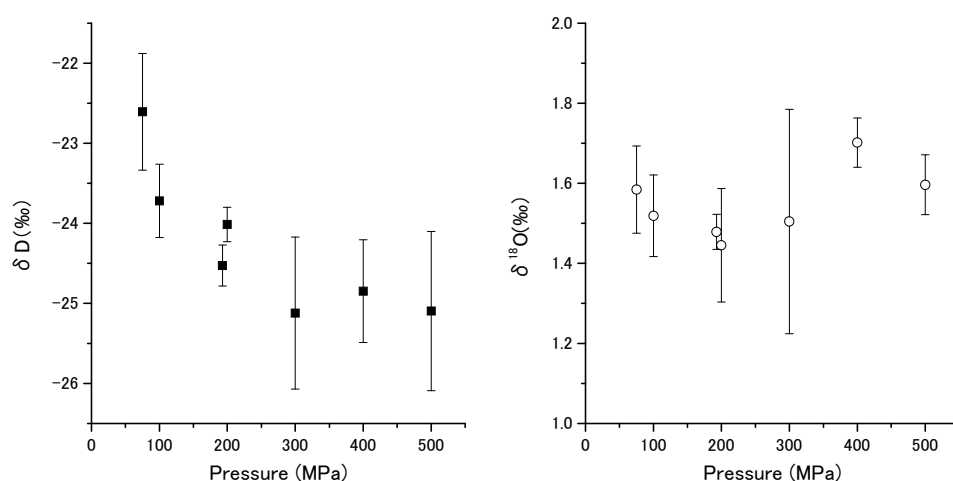


図 5.4.1-18 幌延岩石における圧縮圧力と水素・酸素同位体比の関係

試験に供した稚内層は海底で堆積したと考えられており（Ishii et al., 2011）、間隙水の起源は海水であると考えられる。このため、閉鎖空隙における酸素水素同位体比は海水のものに近く、0.0 付近の値を示すと考えられる。閉鎖空隙における水素同位体比がそのほかの空隙（開放空隙）よりも高

く、閉鎖空隙の影響が低圧でより顕著である場合、定性的ではあるがの結果を説明することが可能である。

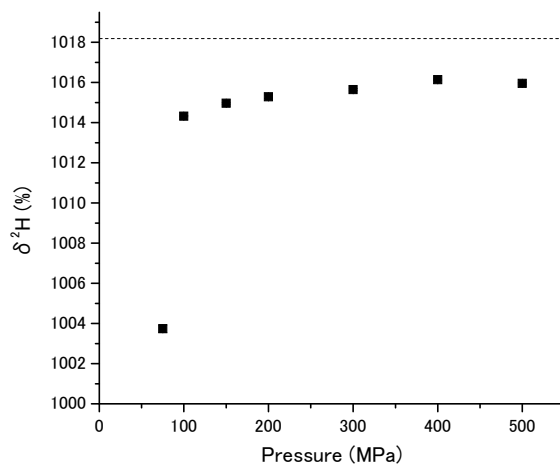


図 5.4.1-19 水素同位体比の高い水に浸漬した後の圧縮抽水の結果

以上のように、圧縮抽水にともなって水素同位体比は変化し、閉鎖空隙からの間隙水のしぼりだしがその要因の一つとなりうる可能性を示すことができた。しかし、閉鎖空隙から間隙水が絞り出された場合、影響を受けるのは水素・酸素同位体比に留まらない。地下水の移流や拡散および年代の指標となりうる <sup>36</sup>Cl、<sup>37</sup>Cl、<sup>81</sup>Br なども影響を受ける可能性がある。今回調べた岩石のように海底で堆積し、隆起沈降などの過程で解放空隙の間隙水が塩分濃度の低い水と入れ替わった場合、閉鎖空隙から絞り出される間隙水の量が少なかったとしても、Cl や Br の同位体比に対しては大きな影響があると考えられる。このため、地下水や核種が移行する解放空隙の評価が目的の場合、間隙水同位体比の評価に圧縮抽水で得られた間隙水を用いることはやや注意を要する。

圧縮抽水で得られた水素同位体比と(2)で示した水蒸気法で得られた値を図 5.4.1-20 で比較した。図からわかるように、水蒸気法で得られた同位体比は、圧縮抽水における閉鎖空隙の影響が少ない高圧側で得られた間隙水の同位体比に近い値を示した。これは、水蒸気法で評価可能な間隙水はコアの外部と水蒸気を介して交換可能な開放空隙であり、圧縮抽水の高圧側では主に解放空隙から水が抽出されるためである。このため、圧縮抽水と水蒸気法を組み合わせることにより、対象となる岩石における閉鎖空隙の影響や、閉鎖空隙内の間隙水の組成など、開放空隙と閉鎖空隙の両方の情報を得ることが可能であると考えられる。

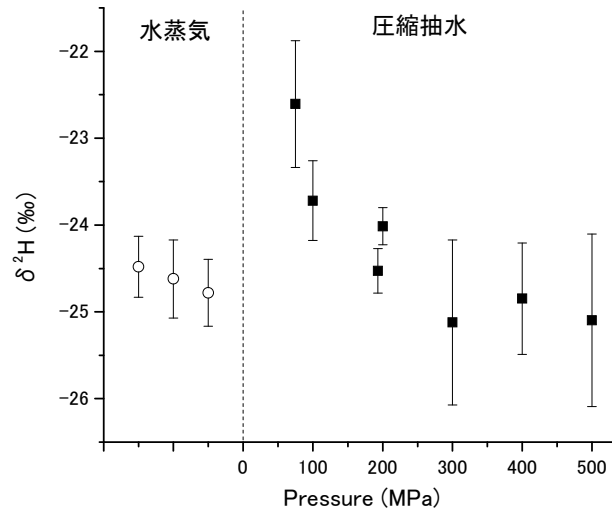


図 5.4.1-20 圧縮抽水と水蒸気法の比較

#### (4) まとめ

圧縮抽水で得られた水を用いて、間隙水の同位体比を評価する手法について、圧縮圧力により影響の有無を調べた。その結果、圧縮圧力とともに同位体比が変化し、変化の原因は閉鎖空隙からの間隙水の絞り出しである可能性があることが分かった。

上記のことから、地層の地史等から閉鎖空隙と開放空隙の間で地下水の組成に大きな差があると考えられる場合には、圧縮抽水で抽出した間隙水を用いて間隙水の同位体比を評価するとき、閉鎖空隙の影響に留意する必要がある。また、水蒸気法やリーチング法は開放空隙における同位体比を評価するために有効な方法であるため、これらの方法と圧縮抽水法を組み合わせることにより、閉鎖空隙における間隙水の組成や同位体比についての情報を得ることが可能であると考えられる。



#### 5.4.2 速い流れの指標となる物質

坑道などを掘削した場合に、湧水量が多い地点などが確認される場合がある。このような地点は水みちと呼ばれるが、核種の漏出などを想定すると、このような水みちがどのような物質移行特性を有するかは、評価において非常に重要になる。水みちの評価では、従来のような半減期の長い核種だけでなく、比較的新しい地下水を評価できる物質が重要になると考えられる。この代表的なものとして、 $^3\text{H}$ とフロン、 $\text{SF}_6$ などがあげられる。また、瑞浪のように、氷期に涵養した地下水に対して現在の地下水が流入する場合には水素・酸素同位体比なども新しい水の指標となり得る。このため、このような物質について採取・分析方法の技術開発を実施した。

##### 5.4.2.1 $^3\text{H}$ による評価方法

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

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

$^3\text{H}$ の単位には、トリチウムユニット(TU)が用いられる。1 TUは、H原子 $10^{18}$ 個に対して、1個のトリチウムが存在する状態を示す。1 TUは、SI単位系の約0.12 Bq / lに相当する。

$^3\text{H}$ は、図5.4.2-1に示すように1960年代の核実験によって大気中に放出され、環境中の濃度が高くなったが、近年では環境中の濃度が低下し、核実験前の状態に近づいており、現在の降水の $^3\text{H}$ は5TU程度であり、瑞浪周辺の河川水では3.7TU程度である。

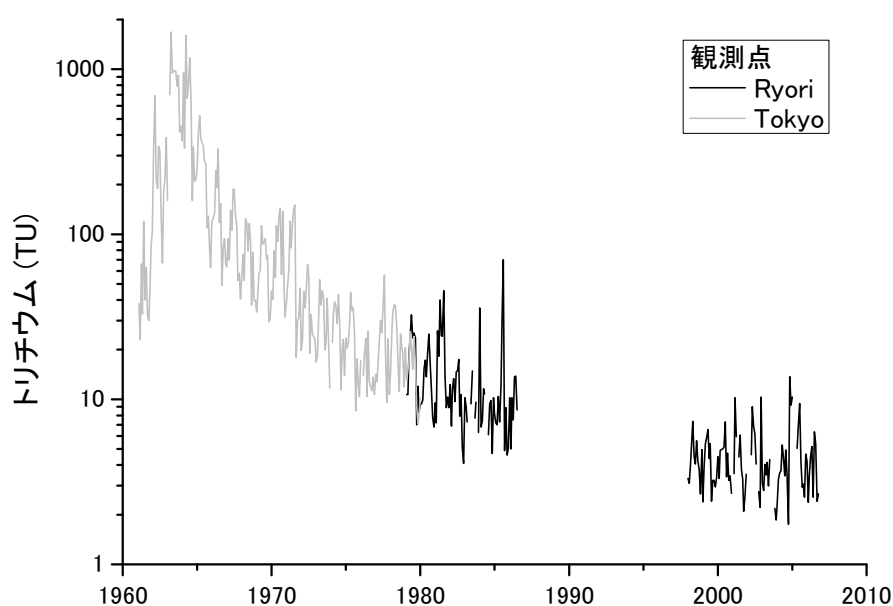


図 5.4.2-1 トリチウム濃度の経時変化(地盤工学会、2013)

トリチウムはLSC(LSC: Liquid Scintillation Counting)が最も一般的な分析手法である。環境試料中のトリチウム測定には、電解濃縮を含めた煩雑な濃縮操作が必須であり、測定時間も非常に長い。測定精度は0.1TU、定量下限は0.3TU程度である。一方、 $^3\text{He}$  ingrowth法は、トリチウムの壊変によって生成する $^3\text{He}$ 濃度を希ガス分析質量法により分析する方法であり、従来の液体シンチレーション法より一桁以上の高感度の分析が期待できる。この分析では、液体シンチレーション法のような煩雑な前処理やそれに伴う廃液の問題もない。ただし、希ガス質量分析に $^3\text{He}$  ingrowth法では、質量分析計で測定が可能なレベルに達するまでの十分な量の $^3\text{He}$ の生成が必要であり、 $^3\text{He}$ が成長するまでに必要な時間は数ヶ月から1年程度に渡るため、長期間にわたる保管が求められる。測定装置に $10^{-14}$  cc<sub>STP</sub>の精度があれば、0.1 TUの検出には、1 Lの水を10ヶ月貯蔵する必要がある。 $^3\text{He}$  ingrowth法では、試料については脱気をするだけで濃縮をしないため、貯蔵時間が短く十分な測定精度が得られない場合には、再度 $^3\text{He}$ の生成を待つことにより、再分析することも可能である。

5.3.1.5 でも述べたが、瑞浪立坑では新しい地下水の浸入が顕著であり、 $^3\text{H}$ だけでなく、 $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $^{14}\text{C}$ などがこれらの指標として有望と判定された。このため、これらの指標と $^3\text{H}$ のIn-Growthを比較した。ここでは $^3\text{H}$ の分析法でIn-Growthによるものを $^3\text{H}_{\text{IG}}$ 、液体シンチレーションカウンティングによるものを $^3\text{H}_{\text{LSC}}$ と書くこととする。

瑞浪立坑の地下水で、 $^3\text{H}_{\text{IG}}$ と $^3\text{H}_{\text{LSC}}$ を比較した結果を図5.4.2-2に示す。ここで、 $^3\text{H}_{\text{LSC}}$ をは0.3TU以下の場合、1.5TUとしている。トリチウムの濃度レベルが非常に低いため、相関は悪いように見えるが、回帰分析の結果では、 $^3\text{H}_{\text{LSC}}=0.065+0.88 ^3\text{H}_{\text{IG}}$ ( $R=0.86$ )となる。このため、両者は概ね妥当な計測結果といえる。

新しい地下水の指標としてトリチウムを相関の良いものを図5.4.2-3に示す。どの結果においても $^3\text{H}_{\text{IG}}$ の方が0.3TU以下の低い値があるため、相関が良いように見える。特に $^{14}\text{C}$ や $\text{SO}_4$ との相関は非常に良い傾向があり、これらが新しい地下水の指標として有効であれば、0.3TU以下の低いレベルも適切に計測できている可能性が高い。これらのことから、 $^3\text{H}_{\text{IG}}$ は0.3TU以下の低いレベルでも適切に計測できており、非常に低レベルのトリチウムを計測するのに有効であることを確認できた。

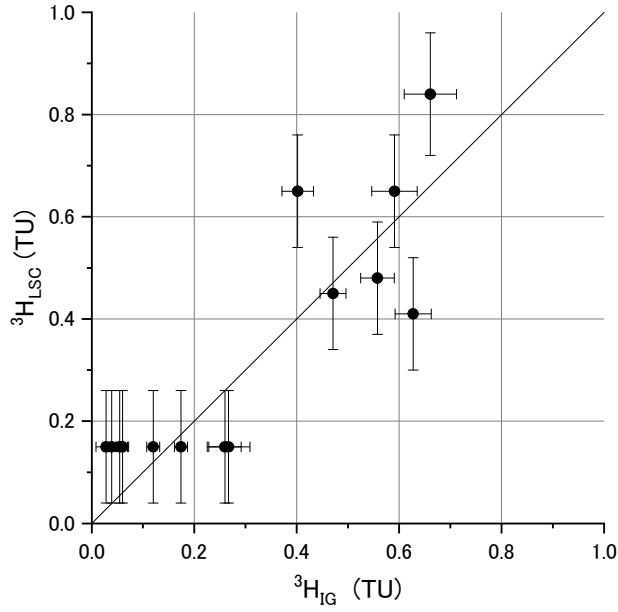


図 5.4.2-2 瑞浪立坑の地下水での  $^3\text{H}_{\text{IG}}$  と  $^3\text{H}_{\text{LSC}}$  の比較

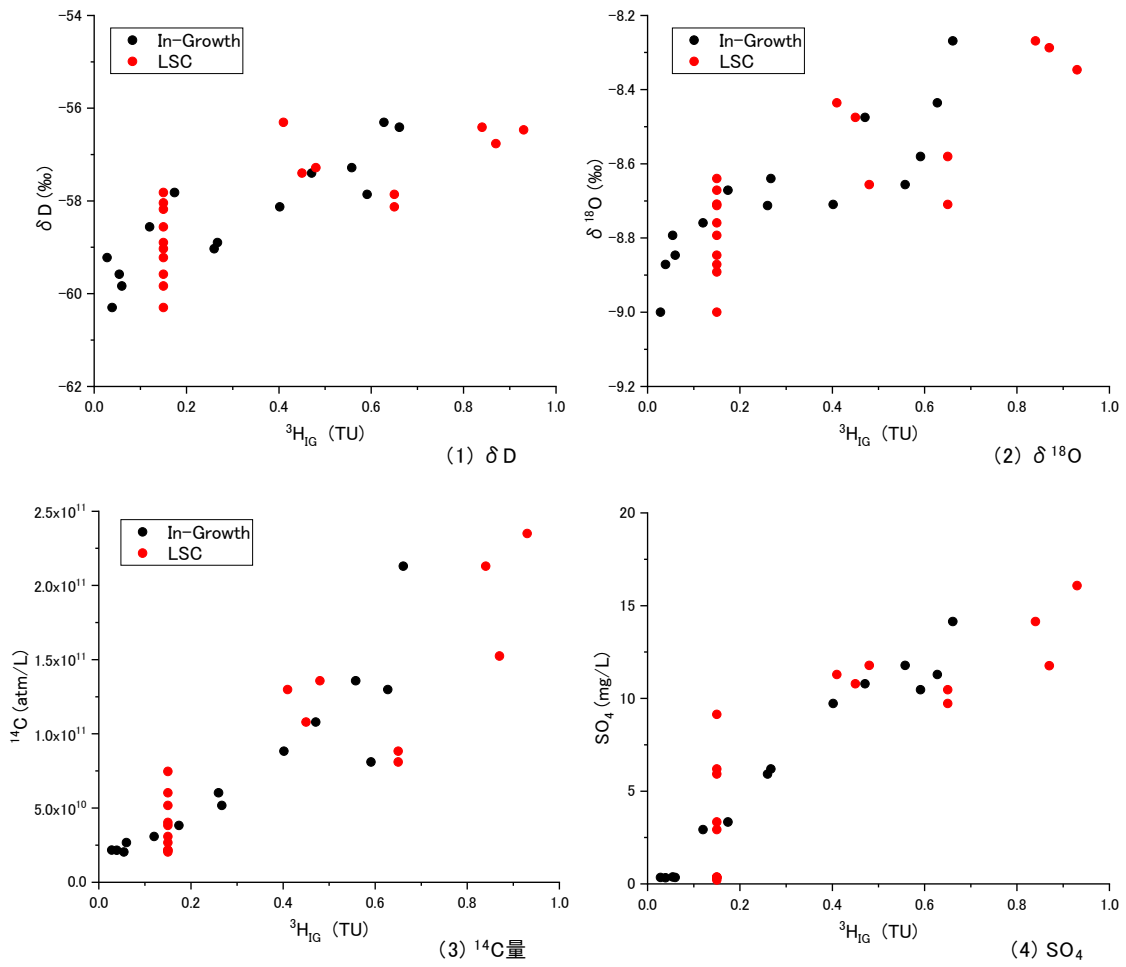


図 5.4.2-3  $^3\text{H}_{\text{IG}}$  と  $^3\text{H}_{\text{LSC}}$  と相関の良い成分の関係

#### 5.4.2.2 フロンガスによる評価方法

フロンガス(CFC-11, 12, 113)やSF<sub>6</sub>は冷媒や絶縁材として、約50年前から使用されてきた。しかしながら、これらのガスは地球温暖化を引き起こすとして問題視され、近年ではその使用が中止されている。ただし、近年まで使用されてきたため、大気中の濃度は図5.4.2-4に示すように単調に増加している。濃度増加に伴いガス圧も増加しているため、地下水への溶存量も時間とともに増加している。このため、地下水中の溶存量から大気中濃度に換算し、過去の大気濃度と対比することで滞留時間が推定できる。溶存ガス量だけでなく、溶存ガス比に基づいて涵養年を推定することも可能である。

測定単位は、フロンガスではpg/kgが用いられる。これは、水1kg中にpgの重量のフロンガスが溶解していることを表す。p(ピコ)は10<sup>-12</sup>を表す。SF<sub>6</sub>はfmol/kgが用いられる。これは水1kg中にfmolの分子量のSF<sub>6</sub>が溶解していることを意味する。f(フェムト)は10<sup>-15</sup>を表す。これらの濃度から大気中の濃度pptvを求めて、濃度曲線とフィッティングする。ここに、pptvは体積率で10<sup>12</sup>分の1を表す。

フロンガスやSF<sub>6</sub>を、新しい地下水の指標として有効と考えられるδDと比較したが、相関はよくなかった。フロンガスから算出した地表水の混合率は、全般的にδDから推定される混合率よりも小さくなっている。δDは新しい水で-50‰程度、流出域で-60‰程度となるため、1‰あたり10%の新しい水の混合率となる。ガスのフロンガスは還元環境では微生物分解などにより減衰することが知られている(Plummer and Bunsenberg, 2006)。このため、フロンガスは地表水の流入を表していないと考えられる。SF<sub>6</sub>から求めた地表水の混合率はδDとともに減少する傾向が見えるものの、相関はあまり良くない。また、δDが-60‰程度でも高い値を示している。この原因には、大気の混入および原位置生成の2つが考えられる。大気の混入については、採水時を水中で実施するなど注意が必要である。また、原位置生成については、Bunsenberg et al. (2000)で指摘されるように、花崗岩などでは有意な可能性がある。

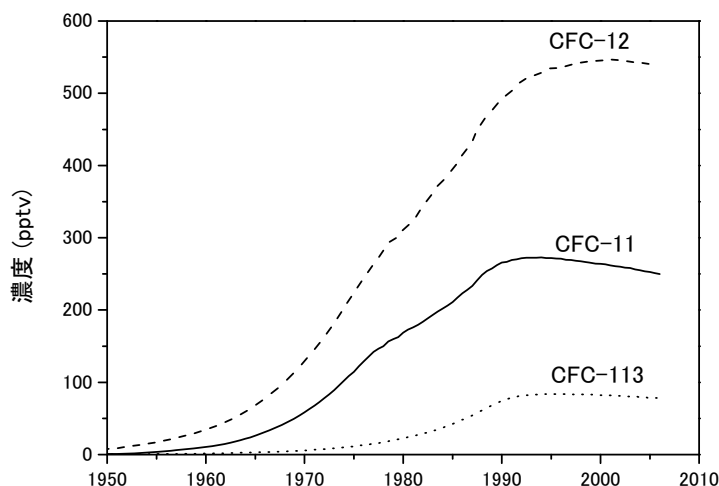


図 5.4.2-4 フロンガス濃度の経時変化(Bunsenberg and Plummer, 2004)

前述のように新しい地下水が流入していると考えられる瑞浪立坑の地下水において、これらを新しい水の混合指標となる  $\delta D$  と比較したこの結果を図 5.4.2-5 に示す。フロン類や  $SF_6$  は新しい地下水には含まれるが、古い地下水に含まれないため、 $\delta D$  の増加とともにこれらの濃度も本来的には上昇するはずである。しかし、現状ではそのような傾向はみられていない。これは、Plummer and Busenberg (2006) にも指摘されるように、微生物分解による濃度低下であると考えられる。 $SF_6$  については有意な量が検出されているが、 $\delta D$  と  $SF_6$  の関係はほぼ無相関のため、原位置生成を見ているだけの可能性がある。このように、フロン類と  $SF_6$  は新しい地下水の流入指標として有望と考えられたが、瑞浪立坑では微生物分解の影響を強く受けるため、混合指標としての利用は難しいと考えられた。

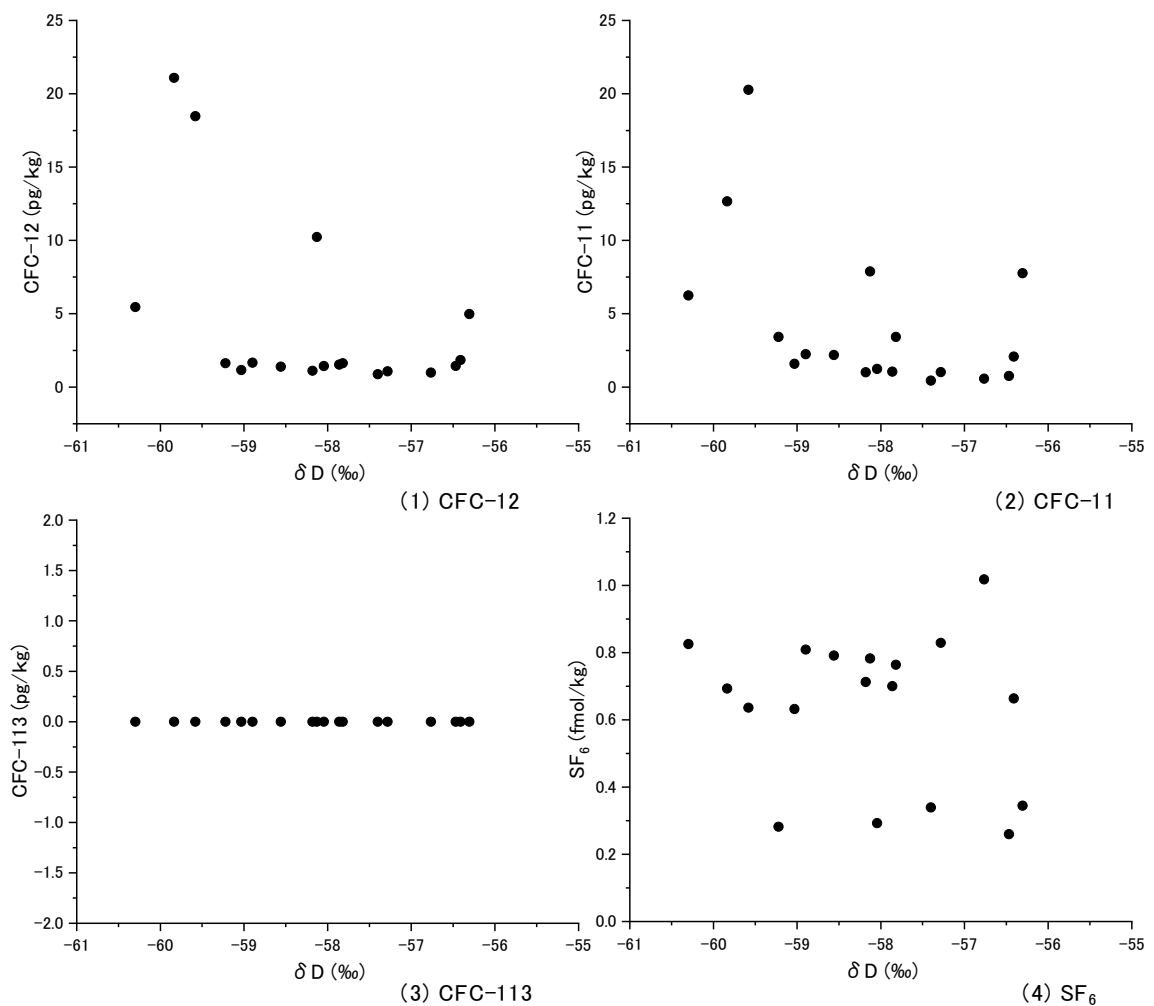


図 5.4.2-5 フロン類および  $SF_6$  と  $\delta D$  (新しい地下水混合指標) との相関

### 5.4.3 遅い流れの指標となる物質

#### 5.4.3.1 $^{14}\text{C}$ を用いた古い水と新しい水の混合の評価

##### (1) はじめに

炭素の同位体である  $^{14}\text{C}$  は 5730 年の半減期を持つため、数千年から数万年程度の地下水年代の評価に有用な指標であることが確認されている (Mook and van Der Plicht, 1999)。このため、数万年を超えるような古い地下水に対して、地下での滞留時間が数千年の比較的若い地下水が混入するような場合には、 $^{14}\text{C}$  が有用な混合指標となりうる可能性がある。

以下では、まず無機  $^{14}\text{C}$  について混合指標としての有用性を高めるために、地下水サンプルから無機  $^{14}\text{C}$  を抽出して分析するための手法について検討した。具体的には、溶存無機炭酸を回収するための手法として、炭酸ストロンチウム等の沈殿として回収する「沈殿法」と、溶存無機炭素をガス化して溶液から回収する「ガス化」法について比較し、 $^{14}\text{C}$  分析法としての適性を検討した。

さらに、古い水に若い水が混合する際の指標として有機  $^{14}\text{C}$  を検討した。地下水中に溶存する有機物は、無機炭素に比べて岩石と地下水の地化学反応に関与する可能性が低く、混合指標として無機炭素より優れた特性を有する可能性がある。このため、実際に古い地下水に対して若い地下水が混入している可能性のあるサイトにおいて有機物を採取し、その年代を評価した。

##### (2) 無機 $^{14}\text{C}$

無機  $^{14}\text{C}$  は数千年から数万年の地下水年代を評価するのに極めて有用な指標であり、過去の研究においても年代を評価するための指標として用いられてきた (例えば Iwatsuki et al., 2000; Hasegawa et al., 2016a など)。無機  $^{14}\text{C}$  を測定するには、加速器質量分析装置 (AMS) を用いるのが一般的であり、水に溶存した無機 C ガスを AMS 分析に供するには、溶液から無機 C を回収し、AMS のターゲットにする必要がある。溶液から無機 C を回収する方法として、過去の研究では主に 2 つの方法が用いられてきた。1 つは溶液をアルカリ性にした後、高濃度の Sr を含む溶液を加えて溶液中の無機 C を炭酸ストロンチウムとして回収する「沈殿法」である (Stewart, 2012; Sültenfuß et al., 2011)。沈殿法は現場でサンプル溶液の量を大きく減らすことができる、あるいは沈殿としてサンプルの長期保管に適しているなどメリットがある一方、沈殿作成操作中に大気由来の二酸化炭素が混入する可能性があると考えられる。もう一つは溶液の pH を下げ、ヘリウム等をバブリングして溶存無機 C を二酸化炭素ガスとして回収する「ガス化法」である (Dulinski et al., 2013; Dorsett et al., 2011)。ガス化法は大気の混入等を防ぐのに有用であると考えられる一方抽出するライン等が必要とされるほか、現地からガスを脱ガスさせずに抽出ラインまで持ち込む必要がある。これらの二つの方法を、人工的に調整した  $^{14}\text{C}$  の範囲がある程度既知のサンプルと地下水に適用し、それぞれの方法で評価される  $^{14}\text{C}$  を比較することで、それぞれの方法がどのような目的に適したサンプルであるのかを評価した。

まず炭酸水素ナトリウム溶液に対して2つの手法を適用し、 $^{14}\text{C}$ を比較する試験を実施した。これに対して、炭酸水素ナトリウムの固体を燃焼させて得た試料における $^{14}\text{C}$ を比較し、それぞれの手法で評価される $^{14}\text{C}$ の値の妥当性を検討した。市販の炭酸水素ナトリウムに含まれるCは、あまり $^{14}\text{C}$ が含まれておらず、古い地下水を模擬した溶液を調製するために適していることが分かった。このため、アルカリ溶液を空気でバブリングして得られた粉末（炭酸ナトリウムと炭酸水素ナトリウムの混合物）を混ぜて、 $^{14}\text{C}$ 年代にして1万年レベルの地下水を模擬した溶液を調製し、試験に供した。試験では、塩分濃度が与える影響を評価するため、各種の薬品を混ぜて「模擬海水」を調製し、これに炭酸ナトリウムの粉末を加えたものも準備した。古い地下水（イオン濃度小さい、無機C濃度9.0mg/L）、1万年レベルの地下水（イオン濃度小さい、無機C濃度9.0mg/L）、1万年レベルの地下水（イオン濃度小さい、無機C濃度4.5mg/L）、1万年レベルの地下水（模擬海水、無機C濃度9.0mg/L）の4種類のサンプルを準備した。これらを比較することで、それぞれの手法における $^{14}\text{C}$ 年代の効果、無機C濃度の効果、共存するイオンの効果を明らかにすることが可能である。

比較試験の結果を表5.4.3-1に示した。表からわかるように、すべての種類のサンプルにおいてガス化法で得られた $^{14}\text{C}$ 年代の値は沈殿法から得られたものに比べて、古い値を示した。さらに、ガス化法で得られた $^{14}\text{C}$ の値は、溶液を調製した炭酸水素ナトリウム粉末における $^{14}\text{C}$ の値や溶液を調製するために使用した純水に溶解した無機Cの濃度、分析における不確定性から算出した $^{14}\text{C}$ （表中の $^{14}\text{C}$ の取りうる範囲）の値と近い値を示した。このため、沈殿法はそのプロセスにおいて大気由来の $^{14}\text{C}$ が混入し、本来サンプルが持つ値からややずれが生じる可能性が高いことが分かった。溶液I~IIIの値を比較してみると、地下水年代が古く（ $^{14}\text{C}$ の含有量が少なく）、無機C濃度が低いほどガス化法と沈殿法の差異が顕著になることがわかる。1Lのサンプルにつき約1mg程度の大气由来のCが混入したと仮定すると、すべてのサンプルにおける差異を定量的に説明することが可能である。このため、沈殿法ではそのプロセスにおいて約1mg程度の大气由来Cが混入している可能性が高いと考えられた。さらにサンプルIVでは模擬海水における値を比較したが、イオン濃度が高くなると沈殿法ではより $^{14}\text{C}$ 年代が若く評価されかつバラつきが大きくなっていることが分かる。一方、ガス化法はイオン濃度が高い模擬地下水においても、取るべき値と近い値を示した。このことから、ガス化法はイオン濃度が高い水に対しても、適用が可能であることが分かった。さらに、ガス化法と沈殿法を実地下水サンプルに適用したところ、室内試験で観察されたのと同様に沈殿法で得られた $^{14}\text{C}$ 年代はガス化法で得られた $^{14}\text{C}$ 年代と比較して、若い値を示した。

以上のことから、沈殿法とガス化法を比較した場合、ガス化法の方が種々のサンプル（地下水年代が古い/若い、無機C濃度が高い/低い、イオン濃度が高い/低い）に適用可能であり、無機 $^{14}\text{C}$ の年代を正しく評価するのに適していると考えられる。一方沈殿法においては、処理の過程で1Lの水試料に対して約1mgの大气由来と考えられるCが混入することが分かった。このため、沈殿法ではガス化法に

比べて若い地下水年代を示し、溶液における無機C濃度が低い場合や、地下水が古い場合（ $^{14}\text{C}$ が含まれる量が少ない）ではその影響が顕著になる。また、共存するイオンの濃度が高い場合には沈殿法で評価される  $^{14}\text{C}$  はさらに若くなり、かつばらつきも大きくなる。現時点では原因は不明であるが、共存イオンが沈殿のプロセスに何かしらの影響を与えた可能性があると考えられる。沈殿法に使用する種々の薬品を確認した結果、溶液をアルカリ性にするのに使用するアンモニアや水酸化ナトリウム溶液に、大気由来の炭素が含まれており、これが沈殿法における大気由来のCの原因であると考えられる。

表 5.4.3-1 4種類の溶液にガス化法と沈殿法を適用した場合の結果

溶液の種類	抽出方法	$^{14}\text{C}$		$^{14}\text{C}$ の取りうる 範囲(pMC)
		pMC	year B.P.	
I	ガス化	$2.0 \pm 0.1$	$31,430 \pm 180$	3.1~5.2
		$3.7 \pm 0.1$	$26,320 \pm 110$	
	沈殿	$9.0 \pm 0.1$	$19,290 \pm 70$	
		$11.4 \pm 0.1$	$17,340 \pm 60$	
II	ガス化	$29.0 \pm 0.1$	$9,947 \pm 32$	26.0~28.0
		$28.7 \pm 0.1$	$10,025 \pm 32$	
	沈殿	$33.3 \pm 0.1$	$8,842 \pm 33$	
		$32.8 \pm 0.1$	$8,956 \pm 34$	
III	ガス化	$30.5 \pm 0.1$	$9,534 \pm 37$	26.0~29.0
		$30.3 \pm 0.1$	$9,591 \pm 37$	
	沈殿	$39.5 \pm 0.2$	$7,459 \pm 32$	
		$39.3 \pm 0.2$	$7,502 \pm 32$	
IV	ガス化	$29.2 \pm 0.1$	$9,890 \pm 38$	26.0~28.0
		$29.9 \pm 0.1$	$9,706 \pm 38$	
	沈殿	$62.6 \pm 0.2$	$3,770 \pm 22$	
		$47.4 \pm 0.2$	$5,994 \pm 27$	

\*Nakata et al. (2016)に加筆

上述のように、沈殿法には  $^{14}\text{C}$  年代の値が正しく評価されない可能性が高いというデメリットがあるが、現場でサンプルの量を大きく減らすことができ、沈殿の形で長期の保管に適しているなどのメ



リットも大きい。このため、1mgの大気由来Cが混入することを認識し、サンプルの特性も踏まえたうえで評価しようとしている精度に対して上記の混入の影響が顕著でなければ、沈殿法を適用するのに大きな問題はない。評価しようとしているサンプルの特性、必要とされる分析や評価の精度、沈殿法を適用するメリットを考慮した上で、適切なサンプリング方法を選定していく必要があると考えられる。

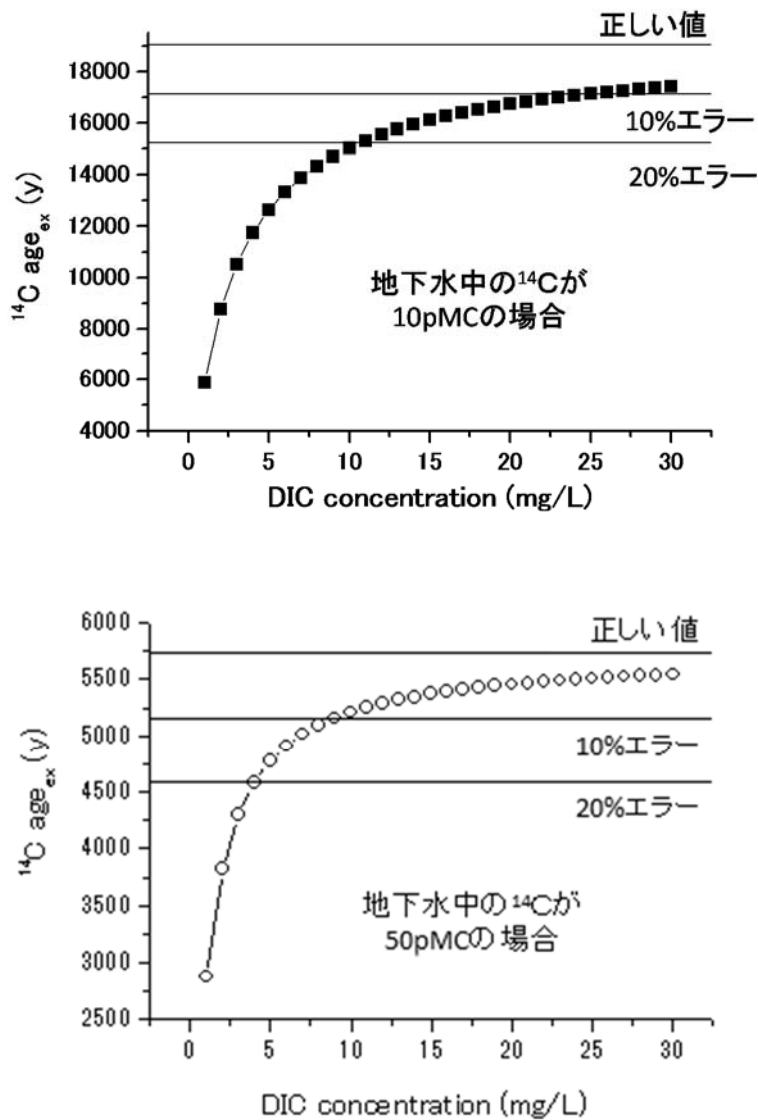


図 5.4.3-1 沈殿法を用いた場合の年代のエラー比較

図 5.4.3-1 には、地下水における  $^{14}\text{C}$  が 10pMC と 50pMC の場合の年代値のエラーを比較している。例えば地下水における  $^{14}\text{C}$  年代が 50pMC で、エラーとして 10%程度を許容できる場合、無機炭素濃度が 10mg/L 以上程度であれば沈殿法を適用することができる。一方、地下水における無機炭素の  $^{14}\text{C}$  が 10pMC の場合、20%のエラーを許容することができれば、同じく 10mg/L 以上の無機炭素濃度を持つ地下水であれば沈殿法の適用が可能である。

本研究では上述の試験結果から、無機炭素における  $^{14}\text{C}$  を分析する場合にはすべての試料に対して「ガス化法」を適用した。その結果、瑞浪地域における採水において示したように、 $^{14}\text{C}$  とそのほかの混合指標における相関性が飛躍的に改善した。このように、ガス化法の適用を徹底することで、無機  $^{14}\text{C}$  が混合の一つとなりうることを示すことができた。

### (3) 有機 $^{14}\text{C}$

有機  $^{14}\text{C}$  は無機  $^{14}\text{C}$  と比較して、地化学反応に関与する可能性が低く、地下水中の  $^{14}\text{C}$  はその値を保ったまま移流する可能性が高いと考えられる (Wassenaar et al., 1991; Nakata et al., 2013)。このため、有機の  $^{14}\text{C}$  は若い地下水の混合がなければ無機  $^{14}\text{C}$  よりも補正の必要がない、優秀な年代トレーサーとなる可能性があり、また古い地下水に対して若い地下水が流入したことを検知するために有用な指標となる可能性がある。

ここでは、地下水の年代指標としてではなく、古い地下水に対する若い地下水の混合指標として有機  $^{14}\text{C}$  が有用かを確認するための検討を実施した。さらに、若い地下水由来の有機物と古い地下水由来の有機物を分離・回収してその  $^{14}\text{C}$  を評価することで、2成分の地下水が混合した場合、古い地下水と若い地下水のそれぞれの年代を算出することを試みた。具体的には、瑞浪地域の 200m および 500m の地下水から有機物を採取し、それぞれを樹脂に対する吸着性で分離して、分離後の成分の  $^{14}\text{C}$  年代評価を実施した。

地下水に溶存する有機物は、膜で濃縮する方法で地下水から採取した。有機物を濃縮するための膜としては一般的に逆浸透膜などが利用されるが、目の細かい膜は分子量の小さな有機物も採取できるというメリットをもつ一方で、膜が目詰まりを起こす「ファウリング」が起きやすいというデメリットも存在する。また、イオンも膜内に濃縮されていくため、溶解度を超えた塩が析出してファウリングを起こす可能性もあるうえ、イオン濃度が高くなることで同じ処理量を保つためにはより高い圧力が必要とされるようになる。このような事態を防ぐため、有機物濃縮に用いる膜は種々のイオンは通過し、目的とする有機物は透過しないようなものを選定することが難しい。本研究では、東レ社製「UTC60」膜を選定した。蛍光染料であるウラニンと種々のイオンを含む溶液を用いて試験をしたところ、UTC60 はウラニンの阻止率が高い一方で、塩化物イオン・ナトリウムイオンの透過率は高い値を示した。ただし、二価イオンの透過率が高くないため、二価イオンによるファウリングが生じる可能性はある。有

機物を濃縮した試験系の概念図を図 5.4.3-2 に示した。地下水は  $10 \rightarrow 1 \rightarrow 0.45 \mu\text{m}$  のフィルタを通過させた後、多連式ダイヤフラムポンプを用いて UTC60 の膜モジュールへと送り込んだ。膜モジュールは「クロスフロー式」と呼ばれるろ過形式で地下水をろ過する仕組みであり（図 5.4.3-3）、水の流れる方向とろ過の方向が直交しているため、ファウリングを起こしにくい構造になっている。実際に瑞浪地域の 300m 地点坑道で地下水を濃縮しているときの濃縮液の様子を図 5.4.3-4 に示した。濃縮開始時、地下水は肉眼では無色透明であったが、やがて着色が確認され、約 4 トンを処理した後では明確に着色した様子が観察された。

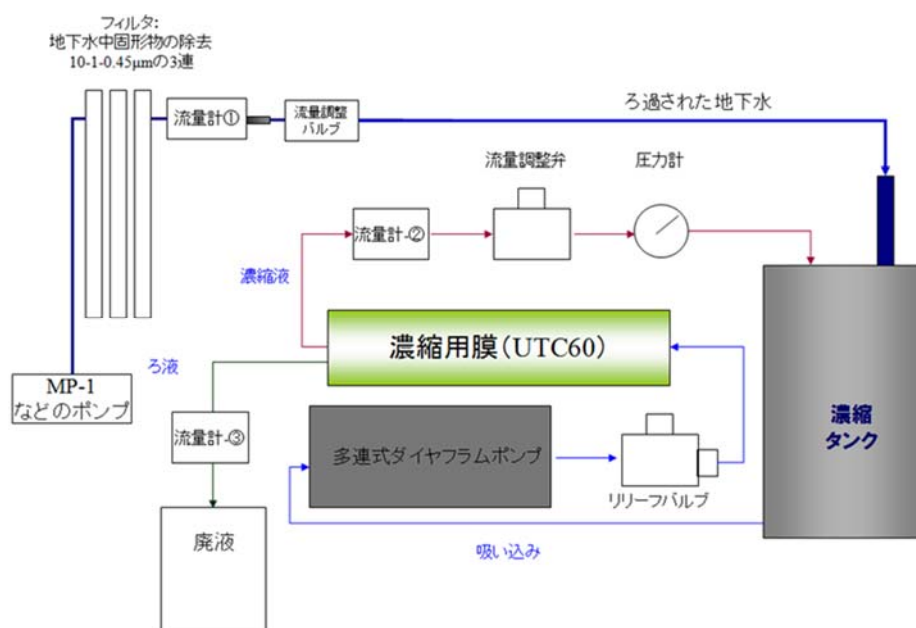


図 5.4.3-2 有機物の濃縮に用いた試験系の概念図

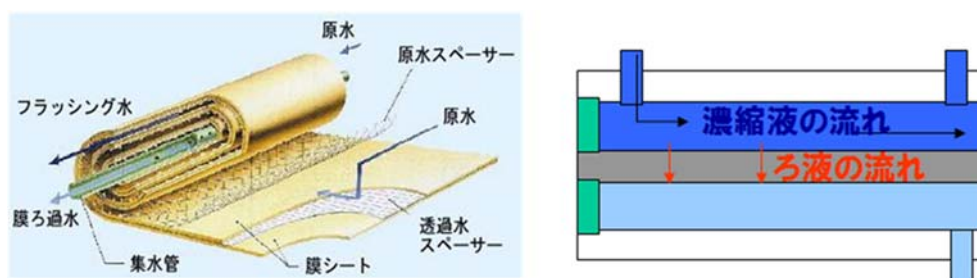


図 5.4.3-3 クロスフローの概念図



図 5.4.3-4 濃縮前後の濃縮液の様子

左：濃縮前、右：濃縮後の様子、右の濃縮液では溶液の色が茶色～黄色に着色しており、有機物が濃縮されていることがわかる

有機物を濃縮した後の溶液は実験室に持ち帰り、凍結乾燥を用いてさらに濃縮を実施した。溶液の一部を取り分けて凍結乾燥したあと、純水をすこしずつ加えて有機物を溶解させた。この作業によって有機物を濃縮し、共存するカルシウムや硫酸等の有機物に対する相対的な濃度を大幅に軽減することができた。この作業による有機物の回収率は、TOC 濃度を基準にして 90%程度であった。さらに有機物を合成吸着樹脂（DAX-8）に対する吸着性能で分離する作業を実施した。DAX-8 は天然の有機物の濃縮にも用いられる樹脂であり（Thrman and Malcolm, 1981）、低い pH で有機物を疎水的に吸着し、pH を高くすると水素や陽イオンをかい離した有機物が樹脂から脱離する。樹脂に吸着しない有機物は低い pH でもイオニックな挙動をする有機物であり、分子量が小さいか分子量に対する相対的な官能基の数が多い特性を持つと考えられる。地下水中で長い時間が経過した場合、地表付近の有機物と比較して、有機物の親水性も変化する可能性がある。このため、若い地下水中の有機物と古い地下水中の有機物では親水性が異なる可能性が高いと考えた。この場合、有機物を親水性に従って分離した場合、古い地下水由来の有機物と新しい水由来の有機物を分離して、それぞれの年代を分析することが可能であると考えられる。有機物の分離は以下の手順で実施した。

・溶液の pH 調整と DAX カラムへの滴下：上述の凍結乾燥-溶解を経た有機物を含む溶液の pH を、塩酸を用いて 2.0 としたあと、この溶液を DAX-8 樹脂を充てんしたカラムに滴下した。このときカラム下流から滴下する溶液を採取した（溶液 A）。さらに pH=2 とした溶液をカラムに流し、樹脂間に存在する有機物をカラムから流した。溶液 A には DAX 樹脂に吸着しにくい、親水性の高い成分が含まれると考えられる。

・pH=9 の水酸化ナトリウム溶液での脱離：有機物が吸着した DAX 樹脂のカラムに pH を 9 に調整した水酸化ナトリウム溶液を流し、有機物の一部を脱離させた。このときの溶液を回収し、溶液サンプル B

とした。

・pH=11 および 13 の溶液での脱離：上述の作業と同じ作業を pH=11 と 13 の溶液で実施し、それぞれ溶液 C、D とした。

上述の操作で得られた溶液の有機物濃度と液量を表 5.4.3-2 に示した（200m における採取結果）。TOC 濃度を基準とした場合、上記の作業による有機物の総回収率は 86.7% であり、多くの有機物がこの作業で回収されたと考えて良い。それぞれの溶液を中和した後凍結乾燥し、凍結乾燥後の粉末を無機塩ごと加熱して燃焼させたあと、揮発した二酸化炭素を加熱した鉄の表面で還元させてグラファイト化し、グラファイトを回収して加速器質量分析器(AMS)用の試料とした。

表 5.4.3-2 DAX を用いた分離作業における液量と TOC 濃度の関係

サンプル	TOC 濃度 (mg/L)	液量 (mL)	回収率 (%)
凍結乾燥後の溶液	56.5	20	-
溶液 A (DAX に吸着しない)	7.2	30	19.1
溶液 B (pH=9 で脱離)	10.3	20	18.2
溶液 C (pH=11 で脱離)	9.0	20	12.9
溶液 D (pH=13 で脱離)	19.0	20	33.6
総回収率			86.7

200m および 500m 坑道で濃縮され、実験室で DAX 樹脂への吸着・脱離特性を用いて分離された有機物における  $^{14}\text{C}$  の値をそれぞれ表 5.4.3-3 および表 5.4.3-4 にまとめた。そのほかの年代指標の分析結果から、坑道付近の地下水の地下における滞留時間は 2 万年程度であると推察される。それに対して、回収された有機物の年代は 200m 坑道の場合で 1000~2000 年程度であり、地下水年代と比較して顕著に若い値を示した。これに対して、500m 坑道では採取・分離された有機物は 300m 坑道で取得したものよりもさらに若い値を示し、900~1600 年程度であった。

表 5.4.3-3 200m で採取された有機物の  $^{14}\text{C}$  年代分析値

サンプル	$^{14}\text{C}$ 測定値		$\delta^{13}\text{C}$ (‰)
	Year B. P.	pMC (%)	
A:DAX に吸着しない	1380 $\pm$ 30	84.2 $\pm$ 0.3	-27.4
B:pH9 で脱離	1460 $\pm$ 30	83.3 $\pm$ 0.2	-27.6
C: pH11 で脱離	1490 $\pm$ 30	83.1 $\pm$ 0.2	-27.2
D: pH13 で脱離	2330 $\pm$ 30	74.8 $\pm$ 0.3	-29.4

表 5.4.3-4 500m で採取された有機物の  $^{14}\text{C}$  年代分析値

サンプル	$^{14}\text{C}$ 測定値		$\delta^{13}\text{C}$ (‰)
	Year B. P.	pMC (%)	
A:DAX に吸着しない	910 $\pm$ 30	89.4 $\pm$ 0.3	-27.4
B:pH9 で脱離	1050 $\pm$ 30	89.4 $\pm$ 0.2	-27.6
C: pH11 で脱離	1120 $\pm$ 30	83.1 $\pm$ 0.2	-27.2
D: pH13 で脱離	1570 $\pm$ 30	74.8 $\pm$ 0.3	-29.4

まず、想定される地下水年代の平均値に対して、有機物の年代が若い値を示したのは、回収された有機物のほとんどが古い地下水に混入した若い地下水のものであったためと考えることができる。瑞浪地域は主に花崗岩で形成されており、地下において有機物が地下水に供給される要因がほとんどないため、地下深部や古い地下水ほど有機物の濃度が低い傾向にある。このため、有機物濃度が比較的高い表面付近の水が混入した場合、地表付近の有機物の方がもともとの古い地下水に存在する有機物よりも支配的になる可能性がある。500m の地下水においても、同様の現象により、有機物の年代は地下水の年代よりも若い値を示したものと考えられる。500m の地下水で採取した有機物において、より若い年代を示したのは、200m の地下水よりも 500m の地下水に含まれる有機物の濃度が低く、より若い地下水の影響を受けやすかったためであると推察される。NPOC 法での分析結果では、200m 坑道での有機物濃度が 0.3~0.4mg/L なのに対して、500m 坑道での有機物濃度は 0.1mg/L 手度である。実際に、200m および 500m の両方の地下水において、トリチウムが検出されており（500m ではわずかな量が検出された）、若い地下水が混入した可能性がある。以上のように、有機物に含まれる  $^{14}\text{C}$  は若い地下水が古い地下水に流入したときの指標として感度が高く、新しい地下水流入のトレーサーとして用いた場合有用性が高いと考えられた。さらに、瑞浪地域のように古い地下水ほど有機物の含有量が少ない場合には、有機  $^{14}\text{C}$  の若い地下水流入指標としての感度がより高くなることが期待できる。しかし、トリチウ

ムの検出結果から 200m と 500m では若い水の流入割合が大きく異なる可能性が高いということと、得られた有機物中の  $^{14}\text{C}$  が同程度であったという結果は必ずしも整合性があるものではない。特に 500m では有機物の濃度が極めて薄い地下水から有機物を濃縮したため、膜等からの汚染の可能性など地下水由来ではない有機物の影響を慎重に検討する必要があると考えられる。

次に、分離した有機物の年代を見てみると、DAX 樹脂に吸着しなかった有機物の年代が最も若く、より強固に樹脂に吸着している有機物が最も古い年代を示した。このことから、地下で年数を経るに従って溶存有機物は疎水性が増す方向に進化する可能性があると考えられる。DAX 樹脂への吸着特性によって分離した有機物の年代が異なることから、地下水での滞留時間によって有機物の性質が変化し、変化した性質を利用して年代の異なる有機物を分離できる可能性があることがわかった。しかし、今回のケースでは、分離した有機物の性質に一定の傾向が認められたものの、分離した有機物同士の年代は近い値となった。これは、若い地下水における有機物の性質と古い地下水における有機物の性質の差があまり大きくはなかったか、若い有機物の量が古い有機物の量よりもはるかに多かったためである可能性がある。さらに、違う性質（大きさなど）を使った有機物の分離により、より明確に年代の異なる有機物を分離できる可能性があり、今後の検討課題であると考えている。

#### (4) $^{14}\text{C}$ についての検討のまとめ

無機および有機  $^{14}\text{C}$  の若い地下水の混合指標としての有用性を検討した。

無機  $^{14}\text{C}$  においては、溶液からの回収法として沈殿法とガス化法の 2 種類の方法を比較した。その結果、沈殿法は処理のプロセスで大気に含まれる二酸化炭素が混入し、 $^{14}\text{C}$  年代として実際より若い値を示す可能性が高いことがわかった。一方、ガス化法で評価された  $^{14}\text{C}$  は溶液を調製した炭酸水素ナトリウムの  $^{14}\text{C}$  から計算された値と近く、 $^{14}\text{C}$ 、無機炭素濃度、共存イオン濃度が変化しても適用が可能であることが確認できた。ガス化法を利用して評価された  $^{14}\text{C}$  とそのほかの若い地下水の混合指標は、良い相関を示したことから(5.3.1)、ガス化法で評価された  $^{14}\text{C}$  の値は若い地下水の混合指標として有用であることを示すことができた。

有機  $^{14}\text{C}$  においては、若い地下水が古い地下水に混合している可能性が高いサイトとして、瑞浪地区の坑道を選定し、200m と 500m において地下水から有機物を採取して、有機物を合成吸着樹脂(DAX-8)への吸着特性で分離して、分離されたそれぞれの有機物における  $^{14}\text{C}$  年代を評価した。評価された  $^{14}\text{C}$  年代は、周辺の地下水における年代と比較して顕著に若い数字を示し、有機物が主に若い地下水からもたらされていることを示した。このことから、有機の  $^{14}\text{C}$  についても若い地下水の流入指標として有用である可能性が示された。一方、若い地下水の混入率が低いと考えられる深度 500m の地下水においても、採集された有機物の  $^{14}\text{C}$  年代は若い値を示した。これは、有機  $^{14}\text{C}$  が若い地下水の混合指標として極めて感度が高い可能性を示していると考えられる。しかし、200m と 500m とで  $^{14}\text{C}$  がほぼ同程度の

値を示したことから、どのような有機物が採取されているのか等さらに詳しく検討する必要があると考えられる。

#### 5.4.3.2 複数の希ガスを用いた涵養温度の評価方法

希ガスには、ヘリウム(He)、ネオン(Ne)、アルゴン(Ar)、クリプトン(Kr)、キセノン(Xe)などがあり、これらの内、質量数が重い希ガスは、図 5.4.3-5 に示すように、温度によって溶解度が変化することが知られている。このため、地下水中の希ガスの濃度から、涵養時の温度を推定する研究が行われている(Stute and Schlosser, 1999)。本研究でも、瑞浪では流出域において氷期の地下水の存在が指摘されている。これらを確認するために、希ガスの濃度から涵養温度を推定することとした。

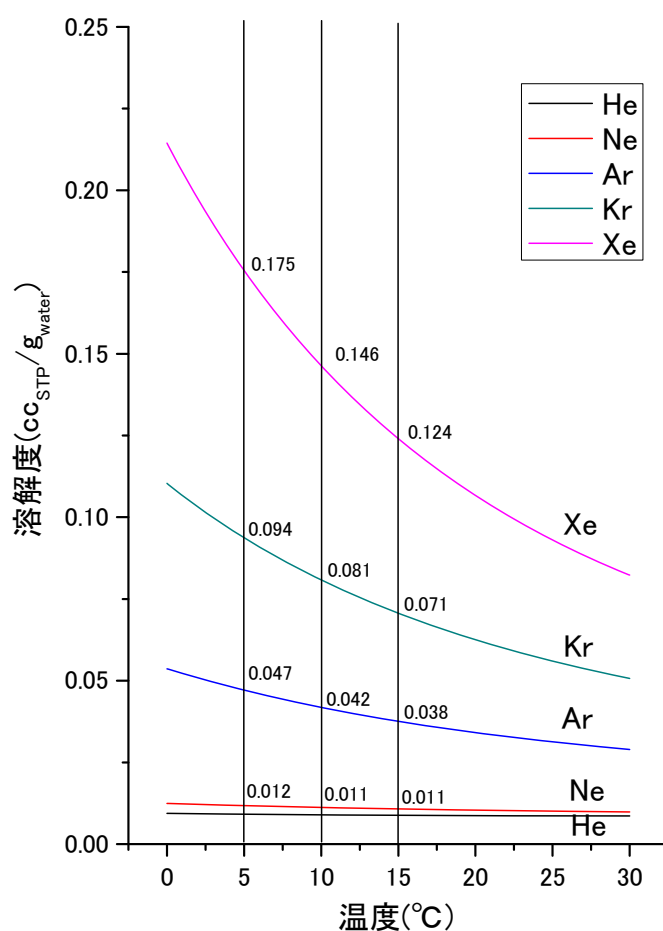


図 5.4.3-5 温度と希ガスの溶解度の関係

瑞浪地域で採取したサンプルについて、希ガスの濃度を計測した結果を表 5.4.3-5 に示す。この希ガス濃度に基づいて昨年度は決定論的に涵養温度を推定したが、今年度は確率論的に計測値のバラツキを考慮して、涵養温度を推定した。



表 5.4.3-5 希ガス分析結果

試料名	深度 (m)	計測値				昨年度の結果		今年度:ランダム100回(誤差5%)			
		Ne <sub>total</sub>	Ar <sub>total</sub>	Kr <sub>total</sub>	Xe <sub>total</sub>	希ガス温度	大気混入率	希ガス温度	大気混入率		
		CC <sub>STP/gw</sub>	CC <sub>STP/gw</sub>	CC <sub>STP/gw</sub>	CC <sub>STP/gw</sub>	°C	-	°C	-		
DH-9-1	151.00~246.40	6.56E-09	2.77E-05	1.54E-08	3.76E-09	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.		
DH-9-2	392.90~501.70	5.78E-08	1.23E-04	3.14E-08	5.28E-09	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.		
DH-9-3	573.20~681.50	2.83E-07	3.82E-04	8.73E-08	1.16E-08	16.2	5.1E-03	17.1 ±1.7	5.3E-03	±7.3E-4	
DH-9-5	895.40~1030.00	3.04E-07	4.52E-04	9.93E-08	1.34E-08	11.8	6.2E-03	12.2 ±1.6	6.1E-03	±7.2E-4	
DH-13-2	253.20~323.18	2.92E-07	4.40E-04	9.14E-08	1.31E-08	13.8	5.7E-03	13.9 ±1.6	5.7E-03	±6.7E-4	
DH-13-3	476.00~546.48	2.10E-07	2.45E-04	4.66E-08	6.02E-09	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.		
DH-13-4	713.38~783.88	3.42E-07	4.89E-04	1.07E-07	1.44E-08	9.9	8.3E-03	10.3 ±1.3	8.0E-03	±7.0E-4	
DH-13-5	992.30~1015.00	2.21E-07	2.69E-04	5.06E-08	6.41E-09	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.		
MIU3-5	781.40~832.40	2.95E-07	4.58E-04	9.81E-08	1.24E-08	12.4	5.9E-03	13.2 ±1.2	5.9E-03	±5.4E-4	
DH-12-1	289.70~290.70	1.57E-07	2.77E-04	6.60E-08	9.79E-09	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.		
DH-12-1	305.70~306.70	2.11E-07	4.51E-04	1.11E-07	1.56E-08	5.8	5.1E-04	6.0 ±1.5	5.1E-04	±4.0E-4	
DH-12-2	305.70~306.70	2.38E-07	4.07E-04	1.07E-07	1.44E-08	8.2	1.8E-03	9.1 ±1.3	2.0E-03	±4.6E-4	
DH-12-2	305.70~306.70	2.54E-07	4.31E-04	9.80E-08	1.45E-08	8.8	2.9E-03	10.7 ±2.0	3.1E-03	±7.5E-4	
07MI07#1	200 m予備ステージ	2.34E-07	4.43E-04	1.04E-07	1.47E-08	8.3	2.0E-03	8.6 ±1.6	1.9E-03	±5.0E-4	
09MI20#1	300 m予備ステージ	8.34E-07	9.27E-04	1.71E-07	2.02E-08	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.		
09MI20#1	300 m予備ステージ	2.12E-07	3.76E-04	2.56E-07	3.34E-07	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.		
09MI21#2	300 mアクセス坑道奥	2.67E-07	5.00E-04	1.18E-07	1.65E-08	4.7	3.5E-03	5.0 ±1.4	3.4E-03	±5.9E-4	
09MI21#3	300 mアクセス坑道奥	2.39E-07	4.58E-04	1.08E-07	1.54E-08	6.9	2.1E-03	7.5 ±1.5	2.0E-03	±5.4E-4	
09MI21#3	300 mアクセス坑道奥	2.27E-07	4.18E-04	9.70E-08	1.37E-08	9.6	1.6E-03	11.0 ±1.5	1.7E-03	±4.7E-4	
12MI30#2	300 mトレーサー試験地点	3.21E-07	4.39E-04	9.60E-08	1.20E-08	14.2	7.3E-03	15.0 ±1.9	7.4E-03	±9.1E-4	
12MI31#1	300 mトレーサー試験地点	2.56E-07	4.43E-04	1.02E-07	1.30E-08	10.4	3.5E-03	11.1 ±1.6	3.4E-03	±5.9E-4	
12MI31#1	300 mトレーサー試験地点	1.77E-07	3.13E-04	7.04E-08	9.98E-09	N.D.	N.D.	19.8 ±0.5	8.3E-05	±1.8E-4	
13MI37#5	300 mトレーサー試験地点	2.41E-07	4.53E-04	1.10E-07	1.57E-08	6.6	2.2E-03	6.7 ±1.1	2.1E-03	±4.0E-4	
12MI33#1	500 m研究アクセス北坑道	3.24E-07	5.14E-04	1.15E-07	1.63E-08	6.2	6.9E-03	6.6 ±1.4	6.7E-03	±7.3E-4	
13MI38#1	500 m研究アクセス北坑道	4.26E-07	5.62E-04	1.17E-07	1.55E-08	7.0	1.0E-02	7.3 ±2.0	1.0E-02	±5.6E-5	
13MI38#5	500 m研究アクセス北坑道	2.60E-07	4.46E-04	9.97E-08	1.46E-08	9.7	3.6E-03	9.8 ±1.3	3.6E-03	±5.0E-4	
15MI52#1	500 m研究アクセス南坑道	2.61E-07	4.71E-04	1.09E-07	1.55E-08	7.0	3.4E-03	7.3 ±1.6	3.3E-03	±6.3E-4	

N. D. は Not Determined の略

希ガス濃度から涵養温度を求める場合、涵養温度と大気混入率の2つを変数として、最適値を求める (Ballentine and Hall, 1999)。

目的関数としては以下の式が用いられる。これは計測値と推定値の誤差を表している。

$$\chi^2 = \sum_i^n \frac{(c_i^m - c_i^s)^2}{\sigma_i^2} \quad (5.4.3-1)$$

ここに、 $\chi^2$  は目的関数、 $C_i^m$  は希ガス i の計測値(計測誤差を含む)、 $C_i^s$  は希ガス i の計算値(大気混入を含む)、 $\sigma_i$  は希ガス i の計測誤差である。

$c_i^m$ は以下のように設定する。

$$c_i^m = c_i^{\text{det}} + c_i^{\text{ran}} \quad (5.4.3-2)$$

ここに、 $c_i^{\text{det}}$ は計測値、 $c_i^{\text{det}}$ は計測誤差 (=計測値×誤差×正規乱数)である。

また、 $c_i^{\text{sim}}$ は以下のように設定される。

$$c_i^{\text{sim}} = c_i^{\text{tmp}} + c_i^{\text{air}} \quad (5.4.3-3)$$

ここに、 $c_i^{\text{tmp}}$ は温度 T における希ガス i の水への溶解量 ( $c_{\text{cSTP/g}_w}$ )、 $c_i^{\text{air}}$ は空気の混入量である。

温度 T における溶解量は以下のように計算できる。

$$c_x = \beta(T, S) \frac{P_x}{P_o} \quad (5.4.3-4)$$

ここに、 $C_x$ は溶存ガス濃度 ( $\text{cm}^3_{\text{STP}}/\text{cm}^3$ )、 $\beta$ はBunsen係数、Tは温度、Sは溶質濃度、 $P_x$ はガス x の分圧、 $P_o$ は大気圧 (=101.325kPa) である。 $P_x$ は以下のように与えられる。

$$P_x = c_{xa} \frac{P}{P_o} \quad (5.4.3-5)$$

$$P = P_o \left( \frac{288.15}{288.15 - 0.0065H} \right)^{-5.25877} \quad (5.4.3-6)$$

ここに、 $C_{xa}$ は大気の希ガス濃度、Hは標高である。

ここでは、涵養温度と空気混入量を一定間隔で変化させながら、上記の目的関数をグリッドサーチで計算し、最適な涵養温度と空気混入量を求めた。温度の刻みは 0~30℃を 0.1℃間隔、大気混入率は 0~0.1 を 0.0001 間隔とした。今年度の結果は、実測値をそのまま用いず、計測誤差 5%を計測値に正規乱数でバラツキを加えた。この操作を 100 回行い、各回の涵養温度を推定した後、それらの統計処理を行って、涵養温度と大気混入の平均値と標準偏差を求めている。

この結果、表 5.4.3-5 の右端に示す涵養温度と空気混入量が得られた。さらに今年度、立坑内で採取した地下水の希ガス濃度を計測し、涵養温度を推定したものを表 5.4.3-6 に示す。

希ガス温度とガス混入率の推定値に N.D. と表示しているものは、上記の温度範囲と大気混入の範囲で最適な推定値が見つからなかった場合である。涵養温度の推定は、図 5.4.3-5 にも示したように、溶存ガス量の数%の差から涵養温度を推定するため、測定精度が悪い場合やサンプルの状態が悪い場合 (脱ガスが大きい、大気の混入が大きいなどの場合) には、涵養温度が推定できない場合がある。また、今年度の結果では、推定した涵養温度が瑞浪の平均気温である 15℃を超えるものが多くみられる。ただし、浅層水の混入が少ない 500m 坑道では、おおむね 10℃以下の涵養温度推定結果となっている。これらの原因は不明であるが、今年度の測定結果は Ne 濃度のバラツキが大きいものが多いため、空気の混入の影響が適切に削除できていない、希ガス測定の精度が昨年度に比べて低下している、混合している新しい地下水が夏季に涵養されたなどの可能性が考えられる。

表 5.4.3-6 立坑から採取した地下水の希ガス濃度と涵養温度推定結果

区間名	深度 (m)	計測値				今年度:ランダム100回(誤差5%)			
		Ne <sub>total</sub>	Ar <sub>total</sub>	Kr <sub>total</sub>	Xe <sub>total</sub>	希ガス温度		大気混入率	
		cc STP/gw	cc STP/gw	cc STP/gw	cc STP/gw	°C		-	
07MI07#1	200 m予備ステージ	7.74E-07	6.98E-04	1.20E-07	1.28E-08	20.7 ±2.1	3.2E-02	±2.0E-3	
07MI07#3	200 m予備ステージ	4.57E-07	5.23E-04	1.09E-07	1.42E-08	12.1 ±2.1	1.5E-02	±1.4E-3	
07MI07#5	200 m予備ステージ	1.84E-07	3.17E-04	6.72E-08	8.69E-09	25.1 ±2.3	5.4E-04	±4.4E-4	
09MI20#1	300 m予備ステージ	2.59E-07	4.40E-04	9.38E-08	1.16E-08	14.2 ±1.7	4.0E-03	±6.6E-4	
09MI20#3	300 m予備ステージ	2.41E-07	3.87E-04	7.91E-08	8.76E-09	22.5 ±2.0	3.9E-03	±6.3E-4	
09MI20#5	300 m予備ステージ	1.88E-07	2.78E-04	5.81E-08	1.19E-08	28.7 ±1.7	3.7E-04	±4.3E-4	
09MI21#2	300 mアクセス坑道奥	2.32E-07	3.42E-04	7.47E-08	1.03E-08	21.5 ±1.8	2.8E-03	±5.1E-4	
09MI21#3	300 mアクセス坑道奥	2.97E-07	4.77E-04	1.09E-07	1.32E-08	10.5 ±1.8	5.7E-03	±8.1E-4	
12MI31#1	300 mトレーサー試験地点	8.41E-07	7.30E-04	1.39E-07	1.70E-08	10.4 ±1.2	3.5E-02	±1.8E-3	
10MI26#1	400 m予備ステージ	3.75E-07	5.28E-04	1.16E-07	1.41E-08	9.2 ±1.6	1.0E-02	±1.0E-3	
10MI26#3	400 m予備ステージ	2.47E-07	4.21E-04	1.01E-07	1.28E-08	11.6 ±1.3	2.9E-03	±4.7E-4	
10MI26#5	400 m予備ステージ	2.94E-07	4.84E-04	1.11E-07	1.49E-08	8.2 ±0.9	5.1E-03	±4.0E-4	
12MI33#1	500 m研究アクセス北坑道	9.42E-07	9.16E-04	1.72E-07	1.96E-08	5.0 ±1.8	4.1E-02	±3.2E-3	
13MI38#1	500 m研究アクセス北坑道	4.02E-07	6.54E-04	1.43E-07	1.87E-08	1.1 ±1.3	1.1E-02	±1.3E-3	
13MI38#5	500 m研究アクセス北坑道	3.97E-07	5.53E-04	1.23E-07	1.60E-08	7.0 ±1.2	1.1E-02	±8.5E-4	
15MI52#1	500 m研究アクセス南坑道	2.43E-07	3.97E-04	8.99E-08	1.18E-08	14.3 ±1.2	3.2E-03	±4.4E-4	
15MI53#5	501 m研究アクセス南坑道	2.75E-07	4.96E-04	1.10E-07	1.53E-08	7.5 ±1.2	4.1E-03	±5.7E-4	

今年度の調査結果の涵養温度の推定結果がバラツキが大きいため、昨年度の調査結果に基づいて涵養温度を推定すると図 5.4.3-6 のようになる。ここでは、涵養温度と酸素同位体比の関係を示した。水素・酸素同位体比は涵養温度に対して変化が大きいと考えられている。この結果、流出域に位置するDH-12 と立坑において最も新しい地下水の混合率が少ないと考えられる 300m アクセス坑道奥の09MI21#2 で涵養温度が5~6°C程度で酸素同位体比が-9.0‰となっている。この酸素同位体比は、瑞浪地域で観測される酸素同位体比の最も低いレベルである。あわせて図中には、酸素同位体比-8.2‰、15°Cを現在の値として示した。酸素同位体比は、掘削に用いた浅部井戸水が-8.2±1.0‰、正馬川の平均値が-8.3±0.3‰である(JNC, 2003)。15°Cは瑞浪の年平均気温である。

佐々木ほか(2006)が瑞浪のやや北部の大湫で実施したモダンアナログ的な古気候調査によれば、約2万年前に気温が最も下がり、現在よりも8~9°C程度、年平均気温が低かったと考えられている。

各地点での涵養温度をまとめると図 5.4.3-7 のようになる。Jouzel et al., (2007)の調査に基づくと、古気候は約1万年前までは現在の気温とほぼ同じで、それ以前は年とともに急激に温度が低下し、約1.8万年前には現在よりも10°C程度低かったと推定されている。流出域の地下水は、浅部の地下水

よりも 9°C 程度温度が低く、滞留時間も 2 万年程度であることから氷期に涵養した地下水と考えられる。

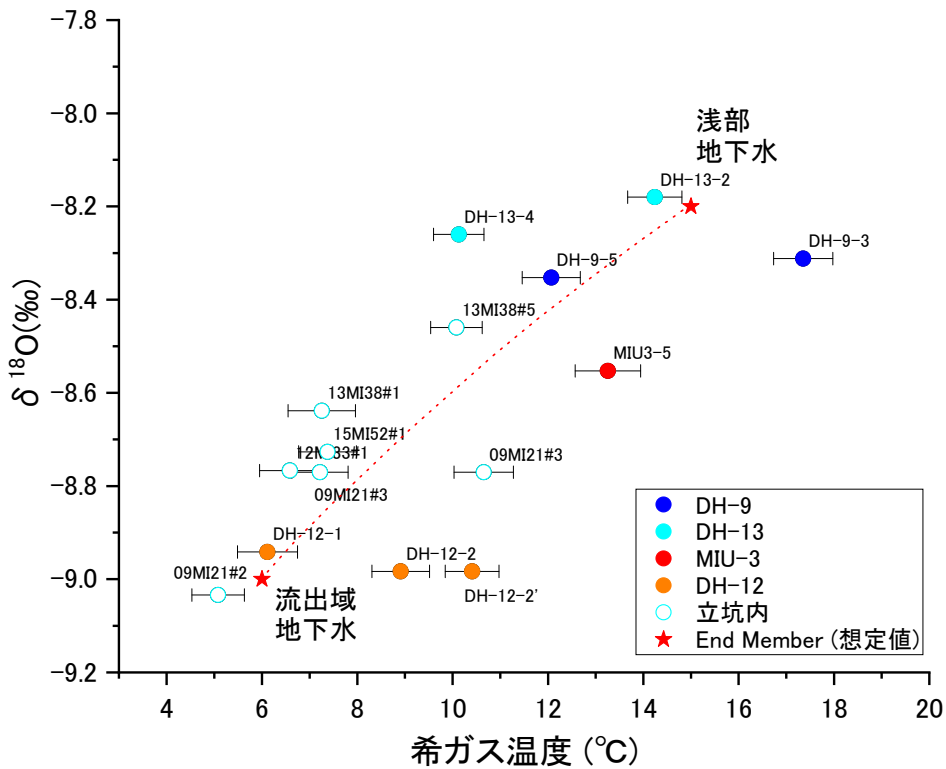


図 5.4.3-6 涵養温度と酸素同位体比の関係

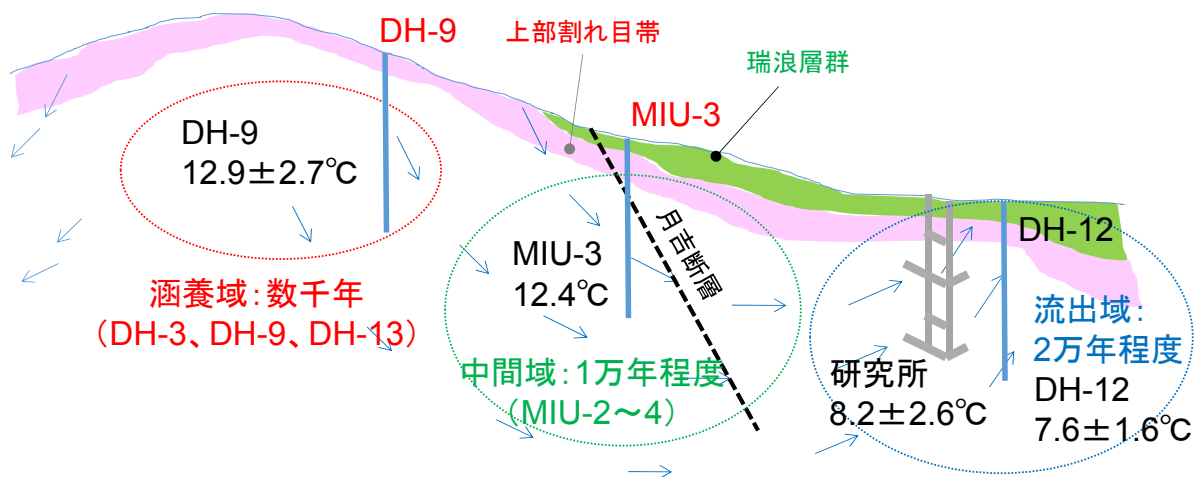


図 5.4.3-7 涵養温度と広域地下水流動の関係

### 5.4.3.3 同位体分別を用いた拡散評価

地下水流動が非常に遅い場合には、移流でなく拡散による輸送が支配的になる。これは、移流によるフラックスよりも拡散によるフラックスの方が大きくなる状態を意味しており、ペクレ数（移流によるフラックス／拡散によるフラックス）が 1 以下になると拡散支配と言われている。拡散は最も遅い輸送形態であり、拡散が支配的な場合は、天然バリア性能が高いと考えられる。このような場を確認するには、拡散によって分別する物質（ $\delta^{37}\text{Cl}$  と  $\delta^{81}\text{Br}$ ）を指標として評価するのが有効であると考えられる。Cl は  $^{35}\text{Cl}$  と  $^{37}\text{Cl}$  の比率が 75.53%と 24.47%となっており、Br は  $^{79}\text{Br}$  と  $^{81}\text{Br}$  の比率が 50.69%と 49.31%となっている。これらは、質量数が異なるため、拡散によって分別することが知られており（Eggenkamp and Coleman, 2009）、移流による輸送では分別は生じない。ここでは、これらを用いた拡散場の評価方法を提案するとともに、岩石を対象に分別係数を提案し計測している（Hasegawa and Nakata, 2018）。昨年度までに、砂岩、花崗岩などについて  $^{37}\text{Cl}$  の分別係数や  $^{81}\text{Br}$  の分別係数を計測してきた。今年度は、泥岩について試験を実施した。

#### (1) 分別係数の計測方法

分別係数の計測方法は、室内試験で一般的に実施される Through-diffusion 試験を応用したものである。この試験は拡散係数を求めるために実施されるが、定常状態のフラックスは  $^{35}\text{Cl}$  と  $^{37}\text{Cl}$  の拡散係数比と同じになることを利用したものである（Hasegawa and Nakata, 2018）。

Through Diffusion 法（図 5.4.3-8）で拡散試験を実施した場合、高濃度側のセルから、低濃度側のセルへと拡散が生じる。拡散が定常状態に達しており、高濃度側の Cl 濃度が低濃度側の Cl 濃度に対して圧倒的に大きな場合には、拡散によって生じるフラックスは、下記の式で表現できる。

$$F_{\text{Cl-35}} = D_{\text{Cl-35}} \frac{C_{\text{Cl-35}}}{L} \quad (5.4.3-7)$$

$$F_{\text{Cl-37}} = D_{\text{Cl-37}} \frac{C_{\text{Cl-37}}}{L} \quad (5.4.3-8)$$

ここで、添え字の  $^{35}\text{Cl}$  と  $^{37}\text{Cl}$  は同位体、F はフラックス、D は拡散係数、C は高濃度側における濃度、L は拡散試験に用いた試料の厚みを表している。

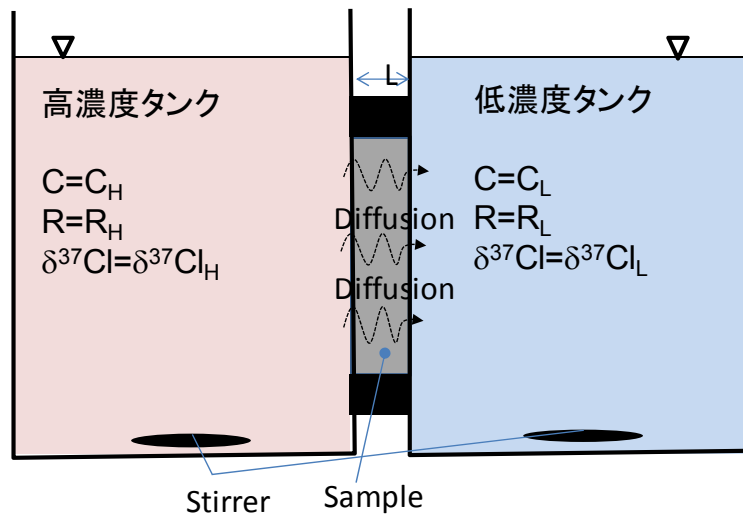


図 5.4.3-8 Through Diffusion 法における試験系の概念図

このとき、高濃度側から低濃度側に拡散する  $^{35}\text{Cl}$  と  $^{37}\text{Cl}$  のフラックスの比率 ( $F_{\text{Cl-}37}/F_{\text{Cl-}35}$ ) は、下記の式で与えられる。

$$\frac{F_{\text{Cl-}37}}{F_{\text{Cl-}35}} = \frac{D_{\text{Cl-}35} \frac{C_{\text{Cl-}35}}{L}}{D_{\text{Cl-}37} \frac{C_{\text{Cl-}37}}{L}} = \frac{1}{\alpha} R_H \quad (5.4.3-9)$$

ここで  $R_H$  は高濃度側における  $^{37}\text{Cl}$  と  $^{35}\text{Cl}$  の比率、 $\alpha$  は  $^{35}\text{Cl}$  と  $^{37}\text{Cl}$  の拡散係数比 ( $=D_{\text{Cl-}35}/D_{\text{Cl-}37}$ ) である。また、拡散が初めから定常状態であった場合には、低濃度側にはフラックスの比率 ( $F_{\text{Cl-}37}/F_{\text{Cl-}35}$ ) に従って  $^{35}\text{Cl}$  と  $^{37}\text{Cl}$  が供給されることになるため、低濃度側における  $^{35}\text{Cl}$  と  $^{37}\text{Cl}$  の比率を  $R_L$  とすると、 $R_L$  は ( $F_{\text{Cl-}37}/F_{\text{Cl-}35}$ ) に等しくなる。

$$\frac{F_{\text{Cl-}37}}{F_{\text{Cl-}35}} = R_L = \frac{1}{\alpha} R_H \quad (5.4.3-10)$$

このため、定常状態のフラックスは高濃度側の同位体比 ( $R_H$ ) を分別係数 ( $\alpha$ ) で割ったものである。上式から、 $\alpha$  は低濃度側の  $\text{Cl}$  における  $^{35}\text{Cl}$  と  $^{37}\text{Cl}$  の比率に対する高濃度側の  $^{35}\text{Cl}$  と  $^{37}\text{Cl}$  の比率の比で表される。このため、①拡散が定常状態に達した後で、②高濃度側に比べて低濃度側の濃度がゼロと見なせる状態で、高濃度側のセルにおける  $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$  と低濃度側セルにおける  $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$  のデータを取得すれば、 $\alpha$  を求めることができる。

$$\alpha = \frac{R_H}{R_L} \quad (5.4.3-11)$$

したがって、分別係数は以下の式で与えられる。

$$10^3 \ln \alpha = 10^3 \ln \frac{R_H}{R_L} \approx \delta^{37}Cl_H - \delta^{37}Cl_L \quad (5.4.3-12)$$

ここに、 $\delta^{37}Cl_H$ は高濃度タンクの $\delta^{37}Cl$ 、 $\delta^{37}Cl_L$ は低濃度タンクの $\delta^{37}Cl$ である。

ただし、現実的には拡散開始時から定常状態に達しているような拡散はあり得ず、初期の拡散では $^{35}Cl$ のフラックスが $^{37}Cl$ のフラックスを上回る非定常状態が生じる。このため、分別係数を求めるには、この初期の非定常状態の影響を排除するか、実験的に定常状態に達する前の溶液を排除する等の操作が必要である。

初期の非定常状態の影響を5%以下にするためには以下の基準を満たす必要がある。

$$\frac{Dt}{nL^2} > 4 \quad (5.4.3-13)$$

ここに、Dは拡散係数、tは時間、nは間隙率、Lはサンプルの試料長である。

また、上式の基準で Through-Diffusion 試験を実施した場合、分析に必要な試料量を得るまでには、高濃度と低濃度タンクの濃度変化が有意となる可能性があるため、濃度変化を考慮して分別係数を決定する必要がある。これは、濃度変化の影響を定量化した標準曲線状に結果を図化することにより、考慮することができる。例を図 5.4.3-9 に示す。タンクの濃度が変化する場合、 $\delta^{37}Cl_H - \delta^{37}Cl_L$ は時間とともに少しずつ小さくなる。図中の標準曲線はこれを補正するためのものである。

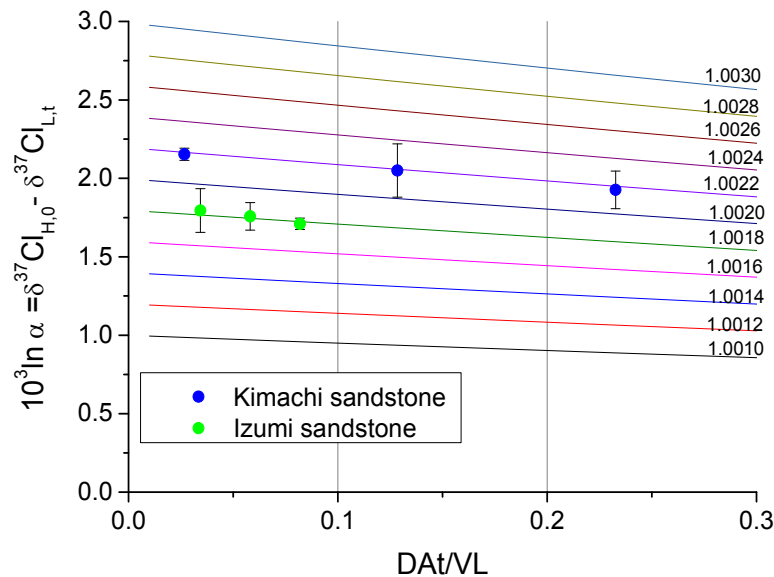


図 5.4.3-9 濃度変化を考慮した分別係数の評価方法

## (2) 拡散試験方法

昨年度までは、花崗岩やセラミックディスクなど硬い試料について実施したが、今年度は泥岩など

軟岩に対して実施した。拡散試験は前述の Through Diffusion 法(図 5.4.3-8)により実施した。Through Diffusion 法は、図 5.4.3-10 に示すように、試料を挟んで高濃度と低濃度のタンクを設け、この濃度勾配から発生するフラックスを計測することによって、拡散係数を計測する方法である。泥岩などはスレーキングにより破損する可能性があるため、岩石コアの両側をガラスフィルターで挟んで試料の安定を図った。

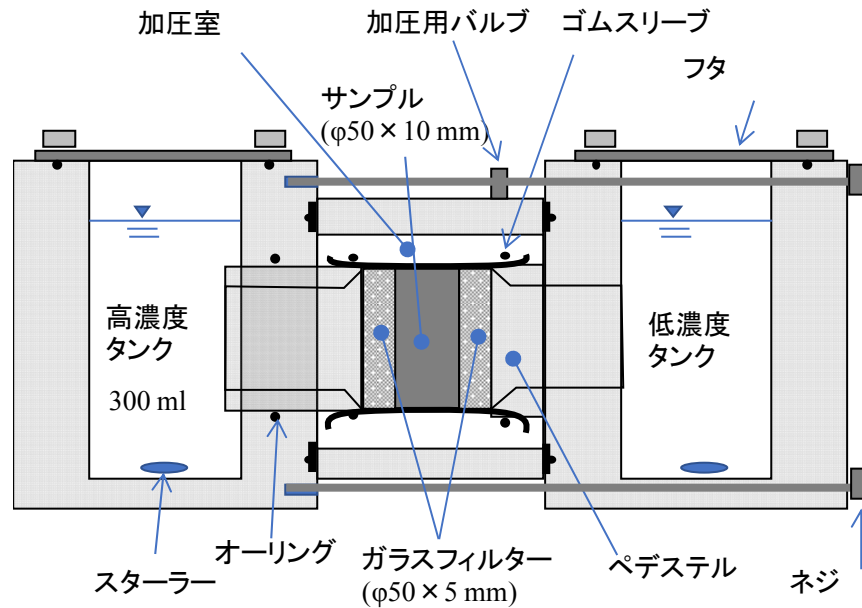


図 5.4.3-10 Through Diffusion 試験装置の概念図

Through Diffusion 法のように両側定濃度境界での媒体を通したフラックスは、Crank(1975)によれ与えられており、これに Through Diffusion 法の試験条件を考慮すると、低濃度タンクでの濃度変化は次式で与えられる。

$$C_L = \frac{C_H AL}{V} \left[ \frac{Dt}{L^2} - \frac{n_e}{6} - \frac{2n_e}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left(-\frac{Dn\pi^2 t}{L^2}\right) \right] \quad (5.4.3-14)$$

ここに、 $C_L$  と  $C_H$  は、高濃度と低濃度タンクの濃度、 $A$  はサンプルの面積、 $L$  はサンプルの厚さ、 $V$  はタンクの体積、 $n_e$  は有効間隙率である。

$Dt/\phi L^2 > 0.45$  であれば、フラックスは一定と見なすことができ、上式の括弧内第 3 項は無視することができる。この時、拡散係数は低濃度タンクの濃度勾配から、以下のように計算できる。

$$D = \frac{sVL}{C_H A} \quad (5.4.3-15)$$

ここに、 $s$  は低濃度タンクの濃度勾配である。

また、分別係数は、そのときの  $\delta^{37}\text{Cl}_H - \delta^{37}\text{Cl}_L$  から、時間変化を考慮して、図 5.4.3-9 で求められる。



Through Diffusion 法による拡散試験の手順は以下の通りである。

#### 1) 岩石試料の準備・試料の飽和

岩石試料はコアカッター等を用いて外径 5.0cm、厚み 1.0cm（または 0.5cm）のディスク状に整形した。ディスクの厚みはノギスを用いて試験前に正確な値を測定した。その後、試料をガラスフィルターで挟み、さらにゴムスリーブを外周にかけることにより試料を固定した。次に、間隙水とイオン強度が同程度になるように調製した  $\text{NaNO}_3$  の溶液に浸漬し、 $\text{NaNO}_3$  溶液を定期的に交換することで、間隙水中の Cl や Br 濃度を低下させた。これは、ガラスフィルターで試料を挟み、 $\text{NaNO}_3$  溶液へ浸漬するのは、スレーキングによる岩石の崩壊を防ぐためである。

#### 2) 試験装置へ組み立て

ガラスフィルターで挟みゴムスリーブをかけた試料を試験装置に固定した。試料を挟み込むように 2 つのタンクを合わせて拡散セルを組み立てた。ゴムスリーブを介して漏水などが発生しないように、ゴムスリーブはオーリングで固定するとともに、加压室に空気圧をかけた。加压室の圧力は 0.05 MPa 程度とした。タンクの大きさは 350mL あるいは 500mL のものを使用した。

#### 3) 溶液の調製

高濃度側の溶液として、塩化ストロンチウムと臭化セシウムの混合液を用いた。塩化ストロンチウム 6 水和物 442.3 g と臭化セシウム 66.6 g を 5L の水に溶解させたものを「高濃度側」の試験溶液とした。低濃度側溶液としては純水等を用いるケースもあるが、本試験では圧力差の影響や浸透圧の影響を低減するため、「高濃度側」試験溶液と密度を合わせた硝酸ナトリウム溶液を「低濃度側」溶液として用いることにした。硝酸ナトリウムは 509 g を 5L の純水に溶解させた。これは、硝酸イオンがその後の Br や Cl 同位体比測定分析の前処理に影響を与えにくいためである。

#### 4) 試験の開始

低濃度側のセルには重水入りの硝酸ナトリウム溶液を、高濃度側のセルには塩化ストロンチウムと臭化セシウムの混合液を順に入れ、溶液を入れた時間を試験の開始時間とした。試験開始直後から、高濃度側・低濃度側のセルをスターラーで緩やかに攪拌した。

#### 5) サンプルング

所定の時間経過後、高濃度と低濃度側のタンクから少量の試料を抜き取り、ろ過・希釈した後 IC で Cl 濃度を、ICP-MS で Br 濃度を定量するためのサンプルとした。

#### 6) 分析

Cl 濃度は溶液を適切に希釈した後、IC により分析した。高い濃度の  $\text{NO}_3$  中 Cl 濃度を測定することになるが、IC により Cl と  $\text{NO}_3$  のピークが分離可能であることを確認できた。Br については ICP-MS により分析した。ICP-MS では共存するイオンの濃度が高くなると、イオン化の効率が落ち

カウントが変化する可能性が考えられたため、イオン濃度が 0.01mol/L 以下に低下するように希釈するか、標準試料のイオン濃度をサンプルと合わせたものを調製し、これを用いて検量線を作成のうえ定量した。

(3) 試験結果

拡散試験には、オーストラリア大賛成盆地の被圧層の Wallumbilla Formation の泥岩、具体的には Marree と Richmond の泥岩、幌延の泥岩、具体的には勇知層、声問層、稚内層の岩石を用いて試験を実施した。

Through-Diffusion 法による拡散試験結果を図 5.4.3-11 に示す。図は、低濃度側での Cl と Br 濃度の時間変化を示している。高濃度側の Cl 濃度と Br 濃度はそれぞれ約 20000 mg/l と 5000 mg/l である。それぞれ得られた拡散係数と試料の内容について表 5.4.3-7 にまとめる。

Cl と Br の拡散係数は同一試料では概ね同程度の拡散係数となっている。あわせて分別係数の評価結果を図 5.4.3-12 に示す。

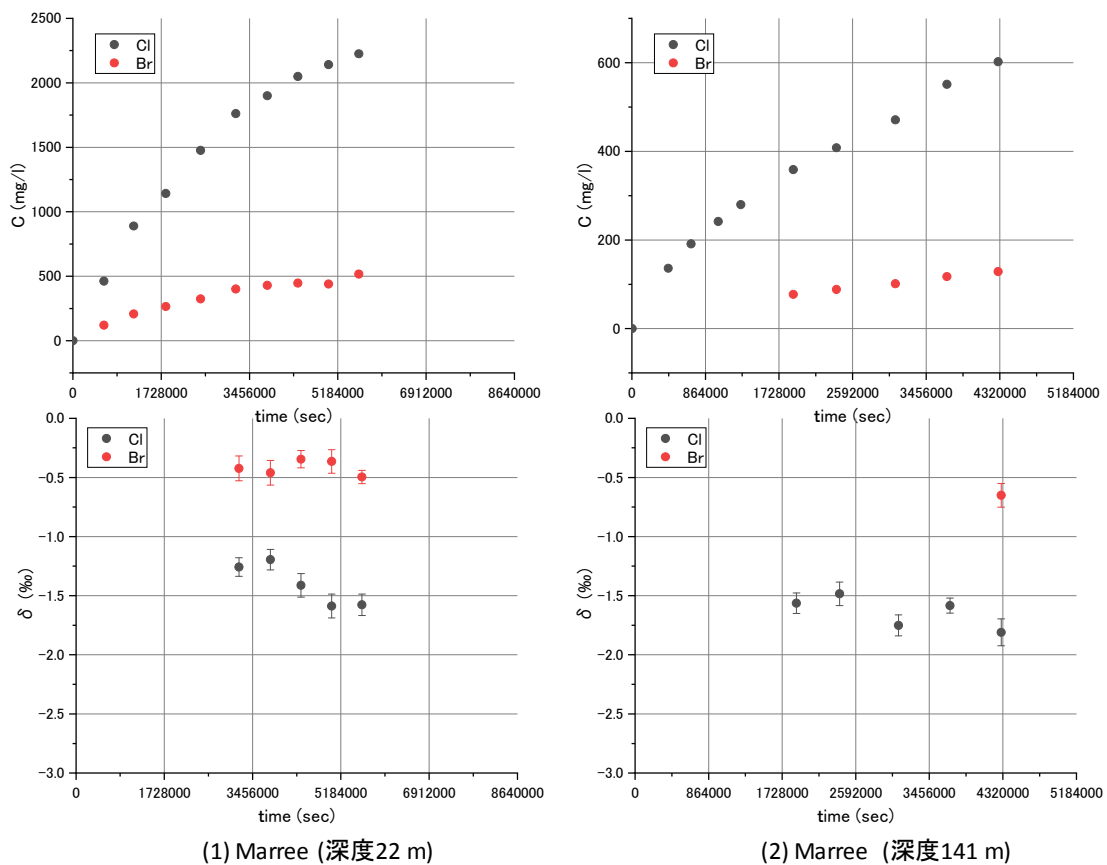
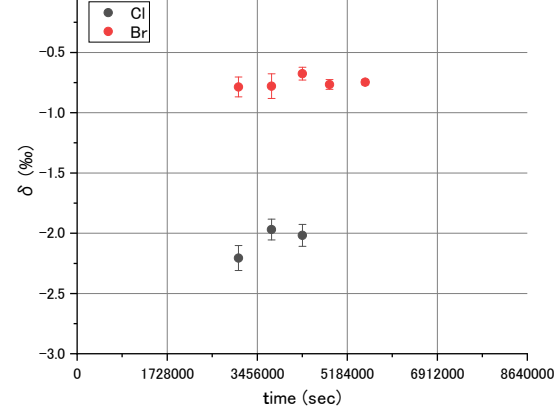
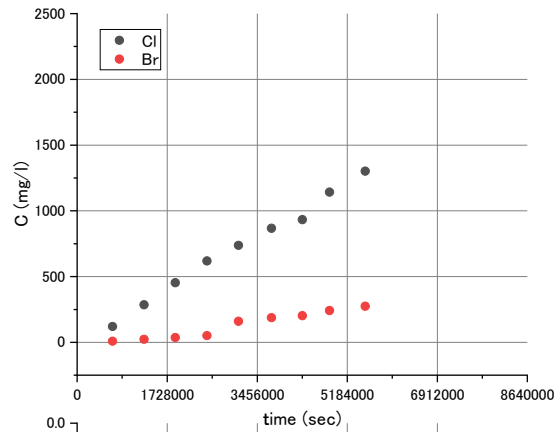
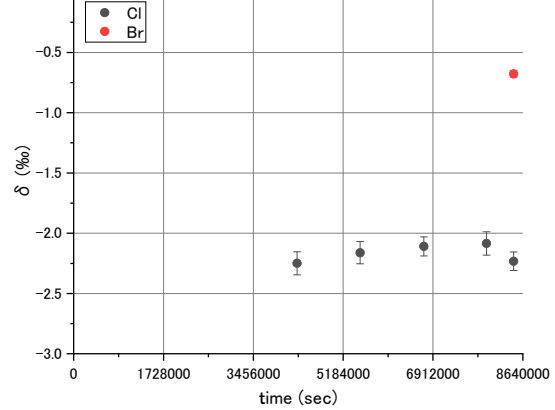
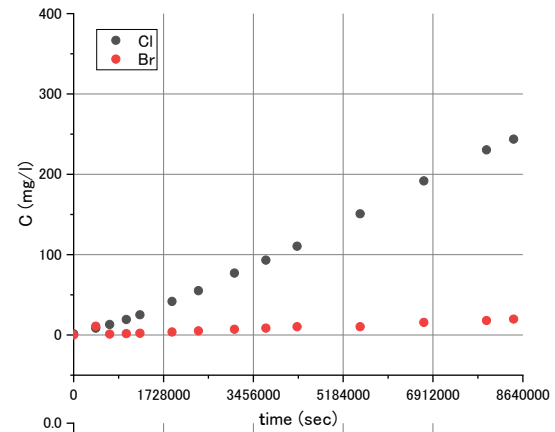


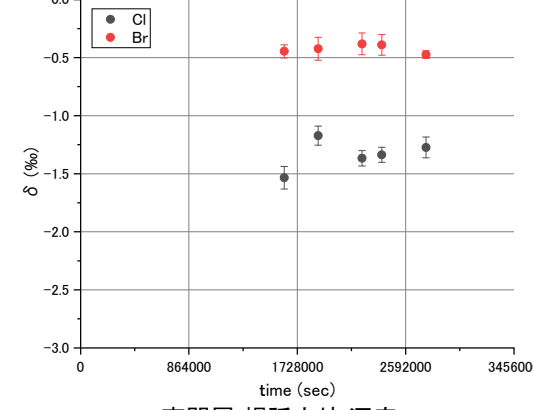
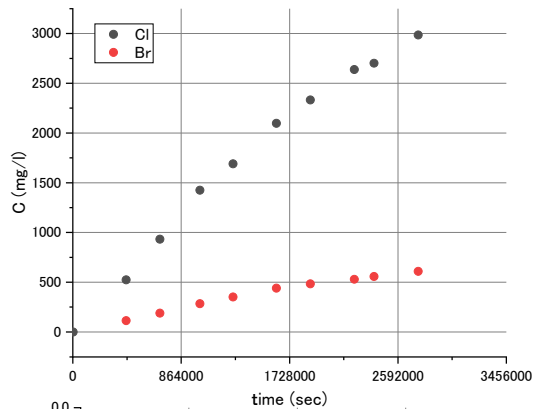
図 5.4.3-11 Through-Diffusion 法による拡散試験結果



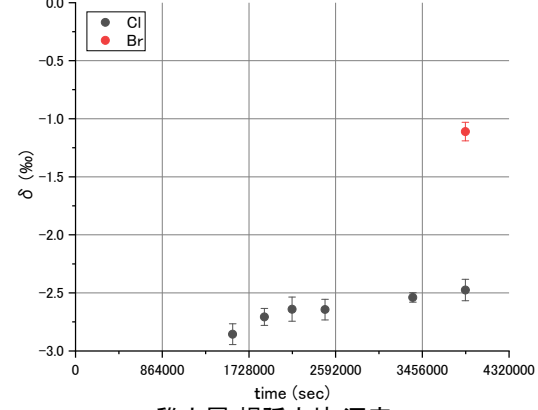
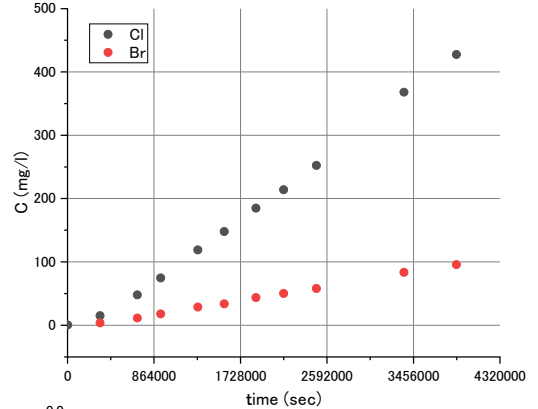
(3) Marree (深度167 m)



(4) Richmond (深度134 m)



(5) 声問層(幌延立坑:深度200 m)



(6) 稚内層(幌延立坑:深度301 m)

図 5.4.3-11 Through-Diffusion 法による拡散試験結果(続き)

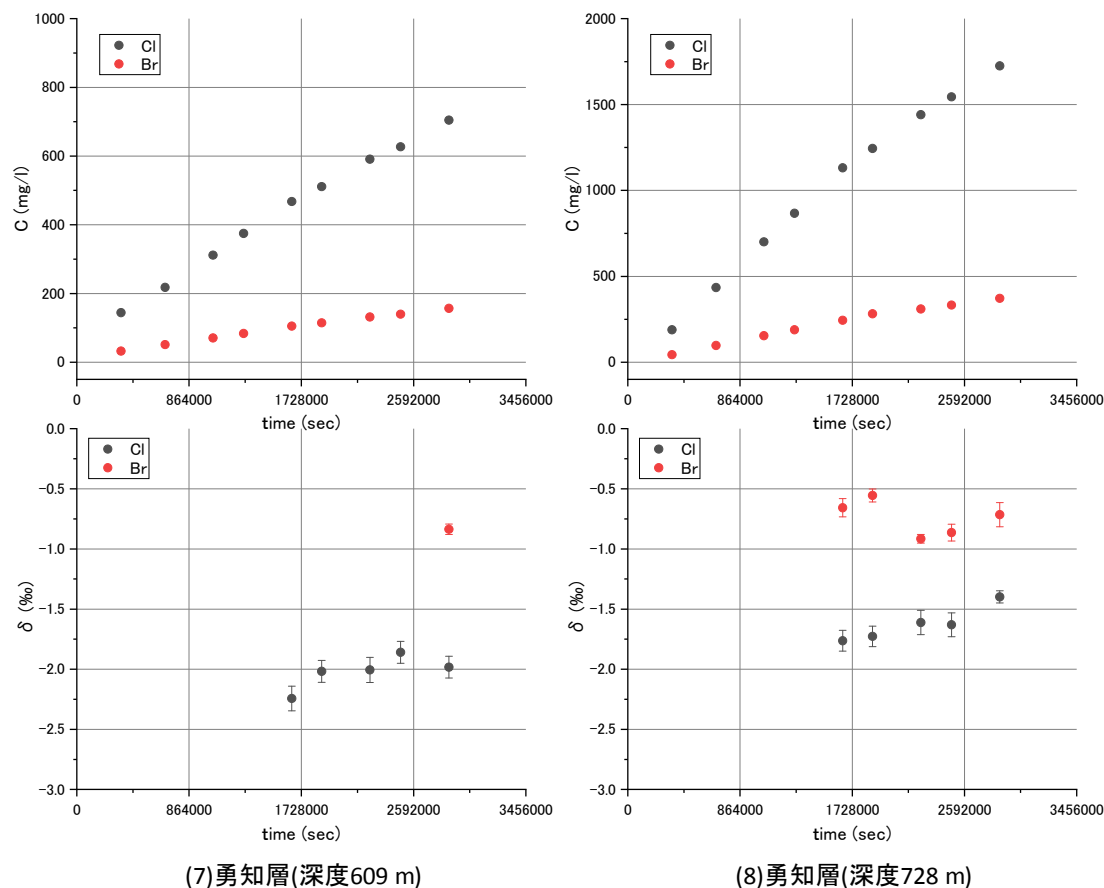


図 5.4.3-11 Through-Diffusion 法による拡散試験結果(続き)

(4) まとめ

拡散による Cl と Br の同位体分別係数を求めた。Cl と Br の実効拡散係数は一価の陰イオンのためほぼ同じであった。拡散係数は、 $10^{-10} \sim 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  程度で、Cl と Br の水中の拡散係数  $2.01 \times 10^{-9}$  と  $2.03 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  (Li and Gregory, 1974) の  $1/10 \sim 1/1000$  程度であった。Cl の分別係数は、 $1.0015 \sim 1.0031$  であり、これまでに報告されている分別係数(Eggemkamp and Coleman, 2009) とほぼ同程度である。また、Br の分別係数は、 $1.0005 \sim 1.0014$  とこれまでに報告される分別係数(Eggemkamp, 2014) よりも低い値( $1.0005$ ) がやや小さいがおおむね同レベルである。このように Cl と Br は拡散によって有意に分別することが明らかになった。自然界での分別は、初期条件や境界条件によってその分別の大ききな広がり異なるが、海水準変動や隆起による陸化によって降水系の地下水が海水系の地下水に浸入する際には、拡散が支配的であるか、移流が支配的あるかの有益な判断材料になると考えられる。

表 5.4.3-7 拡散試験結果

試料名	実効拡散係数 (m <sup>2</sup> /s)		分別係数	
	Cl	Br	Cl	Br
Marree 深度 22 m	7.1E-11	7.1E-11	1.0016	1.0005
Marree 深度 141 m	1.5E-11	1.2E-11	1.0017	1.0007
Marree 深度 167 m	3.0E-11	2.8E-11	1.0021	1.0008
Richmond 深度 134 m	2.9E-12	1.2E-12	1.0022	1.0007
声問層 深度 200 m	1.2E-10	1.0E-10	1.0015	1.0005
稚内層 深度 301 m	1.7E-11	1.7E-11	1.0031	1.0014
勇知層 深度 609 m	2.7E-11	2.6E-11	1.0020	1.0008
勇知層 深度 728 m	7.9E-11	7.5E-11	1.0018	1.0008

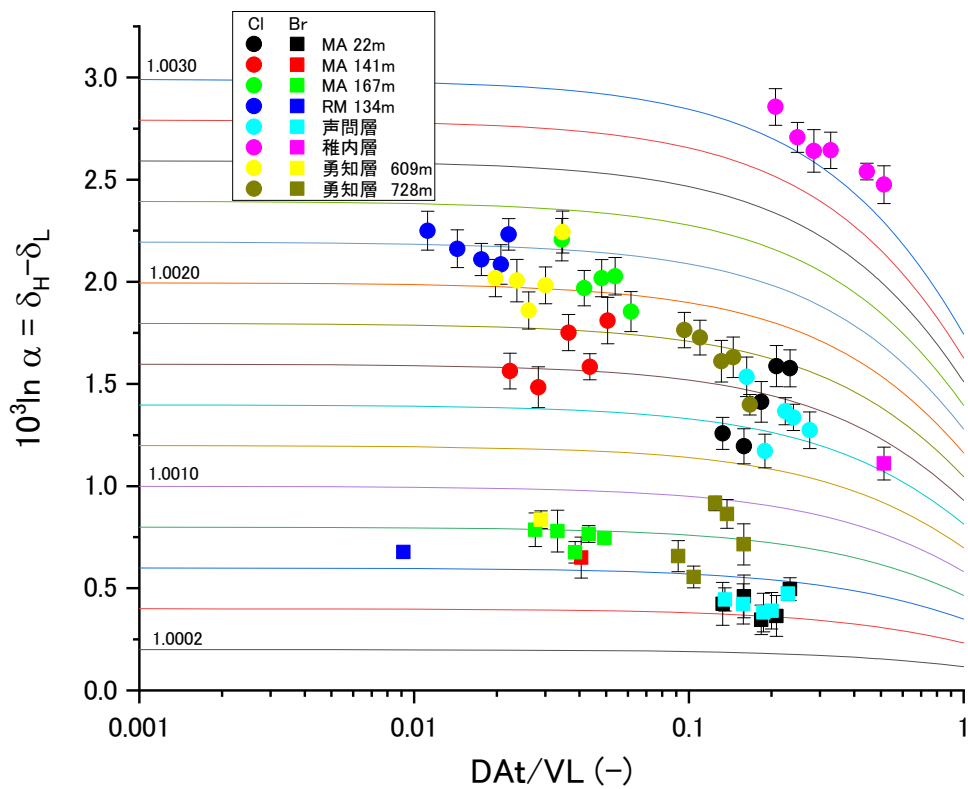


図 5.4.3-12 Through-Diffusion 法による分別係数の評価結果

## 参考文献

- Aeschbach-Hertig, W., F. Peeters, U. Beyerle, and R. Kipfer (1999): Interpretation of dissolved atmospheric noble gases in natural waters, *Water Resour. Res.*, 35(9), 2779-2792.
- Ballentine, C. J. and C. M. Hall(1999): Determining paleotemperature and other variables using an error weighted non-linear inversion of noble gas concentrations in water, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 63, 16, 2315-2336.
- Bartholomay, R., Twining, B. V., (2010): Chemical Constituents in Groundwater from Multiple Zones in the Eastern Snake River Plain Aquifer at the Idaho National Laboratory, Idaho, 2005-08. U. S. Geol. Surv. Prof. Pap. 2010-5116, 82.
- Bunsenberg, E. and Plummer, L.N. (2000): Dating young groundwater with sulphurhexafluoride – Natural and anthropogenic sources of sulphurhexafluoride, *Water Resour. Res.*, 36, 3011-3030.
- Clark, I. and Fritz, P. (1997): *Environmental Isotopes in Hydrogeology*, CRC Press LLC, 327p.
- Crank, J. (1975) *The mathematics of diffusion*, Second edition, Oxford Univ. Press, New York, 44-53.
- Dulinski M, Rozanski K, Kuc T, Gorczyca Z, Kania J, Kapusta M. 2013. Evolution of radiocarbon in a sandy aquifer across large temporal and spatial scales: case study from southern Poland. *Radiocarbon* 55(2-3):905-19.
- Dorsett A, Cherrier J, Martin JB, Cable JE. 2011. Assessing hydrologic and biogeochemical controls on pore-water dissolved inorganic carbon cycling in a subterranean estuary: a  $^{14}\text{C}$  and  $^{13}\text{C}$  mass balance approach. *Marine Chemistry* 127(1-4):76-89.
- Eggenkamp, H. G. M. (2014) *The geochemistry of stable chlorine and bromine isotopes*. Springer, 75-93.
- Eggenkamp, H.G.M., Coleman, M.L. (2009): The effect of aqueous diffusion on the fractionation of chlorine and bromine stable isotopes, *Geochim. Cosmochim. Acta* 73, 3539-3548.
- Elmore, D., Fulton, B.R., Clover, M. R., Marsden, J. R., Gove, H. E., Naylor, H., Purser, K. H., Kilius, L. R., Beukens, R. P. and Litherland, A.E. (1979): Analysis of Cl-36 in environmental water samples using an electrostatic accelerator, *Nature*, 277, 22-25.
- Fifield, L.K., Tims, S.G., Fujioka, T., Hoo, W.T. and Everett, S.E. (2010): Accelerator mass spectrometry with the 14UD accelerator at the Australian National University. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 268, 858-862.

- Fisher, J.C., Twining, B. V., (2012): Multilevel groundwater monitoring of hydraulic head and temperature in the Eastern Snake River Plain aquifer, Idaho National Laboratory, Idaho, 2009-10. U. S. Geol. Surv. Sci. Investig. Rep. 2012-5259, 44.
- Gelhar, L.W., Welty, C. and Rehfeldt K.R. (1992): A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers, *Water Resources Research*, 28, 7, 1955-1974.
- Gardner, P., Solomon, D.K., 2009. An advanced passive diffusion sampler for the determination of dissolved gas concentrations. *Water Resour. Res.* 45, 1-12.
- Hama, K., Kunimaru, T., Metcalfe, R., Martin, A.J. (2007): The hydrogeochemistry of argillaceous rock formations at the Horonobe URL site, Japan, *Phys. Chem. Earth*, 32, 170-180.
- Hasegawa, .T, Nakata. K., Tomioka, Y., Kazuyuki G., Kashiwaya, K., Hama, K., Iwatsuki, T., Kunimaru, T. and Takeda, M. (2016a): Cross-checking groundwater age by  $^4\text{He}$  and  $^{14}\text{C}$  dating in a granite, Tono area, central Japan, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 192, 166-185.
- Hasegawa, T., Nakata, K., Mahara, Y., Habermehl, M.A., Oyama, T. and Higashihara, T. (2016b): Characterization of a diffusion-dominant system using chloride and chlorine isotopes ( $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{37}\text{Cl}$ ) for the confining layer of the Great Artesian Basin, Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 192, 279-294.
- Hasegawa, .T. and Nakata. K. (2018): A measurement method for isotope fractionation of  $^{35}\text{Cl}$  and  $^{37}\text{Cl}$  by a conventional through-diffusion experiment. *Chemical Geology* , doi: 10.1016/j.chemgeo.2018.01.029.
- Hendry, M.J., Schmeling, E., et al. (2015a): Determining the stable isotope composition of pore water from saturated and unsaturated zone core: Improvements to the direct vapour equilibration laser spectrometry method. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(11), 4427-4440.
- Hendry, M.J., Solomon, D.K., Person, M., Wassenaar, L.I., Gardner, W.P., Clark, I.D., Mayer, K.U., Kunimaru, T., Nakata, K. and Hasegawa, T. (2015b): Can argillaceous formations isolate nuclear waste? Insights from isotopic, noble gas, and geochemical profiles. *Geofluids*, 15, 381-386.
- Ishii E, Sanada H, Iwatsuki T, Sugita Y, Kurikami H. (2011) Mechanical strength of the transition zone at the boundary between opal-A and opal-CT zones in siliceous rocks. *Engineering Geology*, 122, 215-221.
- Iwatsuki, T., Furue, R., Mie, H., Ioka, S., Mizuno, T. (2005): Hydrochemical baseline condition

- of groundwater at the Mizunami underground research laboratory (MIU), *Applied Geochemistry* 20, 2283–2302.
- Iwatsuki T, Xu S, Itoh S, Abe M, Watanabe M. 2000. Estimation of relative groundwater age in the granite at the Tono research site, central Japan. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 172(1-4):524-9
- JNC(2003):Data book on groundwater chemistry in the Tono area, Tono Geoscience Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC TN 7450 2003-001.
- Jouzel, J., Masson-Delmotte, V., Cattani, O., Dreyfus, G., Falourd, S., Hoffmann, G., Minster, B., Nouet, J., Barnola, J. M., Chappellaz, J., Fischer, H., Gallet, J. C., Johnsen, S., Leuenberger, M., Loulergue, L., Luethi, D., Oerter, H., Parrenin, F., Raisbeck, G., Raynaud, D., Schilt, A., Schwander, J., Selmo, E., Souchez, R., Spahni, R., Stauffer, B., Steffensen, J. P., Stenni, B., Stocker, T. F., Tison, J. L., Werner, M. and Wolff, E. W., Orbital and Millennial Antarctic Climate Variability over the Past 800,000 Years, *SCIENCE*, 317, 10 AUGUST, 2007, pp793–796.
- KASHIWAYA, K., Hasegawa, T., Nakata, K., TOMIOKA Y. and MIZUNO T. (2014): Multiple tracer study in Horonobe, northern Hokkaido, Japan: 1. Residence time estimation based on multiple environmental tracers and lumped parameter models, *Journal of Hydrology*, 519, 532–548.
- Lehmann, B.E., Davis, S.N., Fabryka -Martin, J.T., 1993. Atmospheric and subsurface sources of stable and radioactive nuclides used for groundwater dating. *Water Resour. Res.* 29, 2027-2040.
- Li, Y.H and Gregory, S. (1974): *Diffusion of ions in seawater and in deep-sea sediments*, Oxford, Pergamon Press.
- Long A., Eastoe C. J., Kaufmann R. S., Martin J. G., Wirt L. and Finley J. B. (1993): High-precision measurement of chlorine stable isotope ratios, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 57, 2907-2912.
- Mahara Y., Igarashi T., Hasegawa T., Miyakawa L., Tanaka Y. and Kiho K. (2001): Dynamic changes in hydrogeochemical conditions caused by tunnel excavation at the Aspö Hard Rock Laboratory (HRL), Sweden, *Applied Geochemistry*, Vol.16, pp.291–315, 2001.
- Mazurek M. Alt-Epping P, Bath A, Gimmi T, Waber HN (2009) Experimental techniques and analytical methods to characterize tracer contents in argillaceous formations *Natural*



- tracer profiles across argillaceous formations. In: The CLAYTRAC project OECD/NEA Rep. 6253, pp. 305-26. OECD Nuclear Energy Agency, Paris, France.
- Mower, T.E., Higgins, J.D. and Yang, I.C. (1991): Pore-water extraction from unsaturated tuffs using one-dimensional compression. In High Level Radioactive Waste Management. Publ by ASCE, pp. 999-1006.
- Mook, W.G. and Van Der Plicht, J. (1999): Reporting  $^{14}\text{C}$  activities and concentrations. Radiocarbon, 41, 227-239
- Nakata, K. and Hasegawa, T. (2011): Improvement of pre-treatment method for  $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  measurement of Cl in natural groundwater by AMS, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 269 (2011) 300-307.
- Nakata, K., Kodama, H., Hasegawa, T., Hama, K., Iwatsuki, T., and Miyajima T. (2013): Groundwater dating using radiocarbon in fulvic acid in groundwater containing fluorescein, Journal of Hydrology, 489, 189-200.
- Nakata, K., Hasegawa, T., Higashihara, T. and Oyama, T. (2015): Chloride ion concentrations during the compression of rocks to extract pore water, Geofluids, DOI: 10.1111/gfl.12137.
- Nakata K., Hasegawa T., Iwatsuki T. and Kato T. (2016) : Comparison of  $^{14}\text{C}$  collected by precipitation and gas-strip methods for dating groundwater, Radiocarbon Radiocarbon, 58, 491-503.
- Nakata, K., Hasegawa, T., Oyama, T., Ishii, E., Miyakawa, K., and Sasamoto, H., (2018) An Evaluation of the Long-Term Stagnancy of Porewater in the Neogene Sedimentary Rocks in Northern Japan, Geofluids, vol. 2018, Article ID 7823195, 21 pages.
- Ohta T., Mahara Y., Momoshima N., Inoue F., Shimada J., Ikawa R., and Taniguchi M. (2009) Separation of dissolved Kr from a water sample by means of a hollow fiber membrane. Journal of Hydrology; doi:10.1016/j.jhydrol.2009.07022.
- Ozima, M., Podosek, F. A., (2002): Noble gas geochemistry second ed. Cambridge University Press.
- Plummer L.N. and Bunsenberg (2006): Chlorofluorocarbons in the atmosphere (Chapter 2) in Use of chlorofluorocarbons in hydrology -a guide book-, IAEA.
- Sanford, W.E., Shropshire, R.G., Solomon, D.K., 1996. Dissolved gas tracers in groundwater: Simplified injection, sampling, and analysis. Water Resour. Res. 32, 1635-1642.
- Savoie, S. et al. (2008): Transfers through argillaceous rocks over large space and time scales: Insights given by water stable isotopes. Physics and Chemistry of the Earth,

33(SUPPL. 1).

Shouakar-Stash O., Drimmie R. JK. and Frapce S.K. (2005) Determination of inorganic chlorine stable isotopes by continuous flow isotope ratio mass spectrometry. *Rapid Commun. Mass Spectrom.*, **19**, 121-127.

Stewart M.K. (2012): A 40-year record of carbon-14 and tritium in the Christchurch groundwater system, New Zealand: dating of young samples with carbon-14. *Journal of Hydrology* 430-431:50-68.

Stute, M. and Schlosser, P. (1999): Atmospheric noble gases in Environmental tracers in subsurface hydrology. (Edited by Cook, P. and Herczeg, A.L.), Kluwer Academic Publishers, 349-377.

Stute, M., Schlosser, P., (1993): Principles and applications of the noble gas palaeothermometer. In *Climate Change in Continental Isotopic Records*. Geophysical Monograph 78, 89-100

Sültenfuß J, Purtschert R, Führböter JF. 2011. Age structure and recharge conditions of a coastal aquifer (northern Germany) investigated with  $^{39}\text{Ar}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$ , He isotopes and Ne. *Hydrogeology Journal* 19(1):221-36.

Thurman, E.M., Malcolm, R.L., (1981): Preparative isolation of aquatic humic substances. *Environmental Science and Technology* 15 (4), 463-566.

USGS(2017a):<https://water.usgs.gov/lab/chlorofluorocarbons/sampling/bottles/>(2017/3/25 閲覧)

USGS(2017b) : <http://water.usgs.gov/lab/sf6/sampling/> (2018/3/25 閲覧)

Wassenaar, L., Aravena, R., Hendry, J., Fritz, P. (1991): Radiocarbon in dissolved organic carbon, a possible groundwater dating method: case studies from western Canada. *Water Resour. Res.* 27 (8), 1975-1986.

Wassenaar, L. I. et al. (2008): High Resolution Pore Water  $\delta^2\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  Measurements by  $\text{H}_2\text{O}$  (liquid) -  $\text{H}_2\text{O}$  (vapor) Equilibration Laser Spectroscopy. *Environmental Science & Technology*, 42(24), 9262-9267.

天野 由記, 南條 功, 村上 裕晃, 藪内 聡, 横田 秀晴, 佐々木 祥人, 岩槻 輝希(2012):北海道幌延地域における深部地下水調査—地上からの地球化学調査の妥当性評価と地下施設建設に伴う地球化学特性変化—, 地下水学会誌 第54巻第4号 207~228

稲垣 大介, 石井 英一, 新沼 寛明, 真田 祐幸, 津坂 仁和, 佐野 満昭, 澤田 純之 (2011): 幌延深地層研究計画平成21年度地下施設計測データ集, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code 2010-027.

- 稲垣 大介, 澤田 純之, 常盤 哲也, 津坂 仁和, 天野 由記, 新沼 寛明 (2012): 幌延深地層研究計画平成 22 年度地下施設計測データ集, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code 2012-019.
- 稲垣 大介, 常盤 哲也, 村上 裕晃 (2013): 幌延深地層研究計画, 平成 23 年度地下施設計測データ集, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code 2012-029.
- 稲垣大介 (2014): 幌延深地層研究計画 平成 24 年度地下施設計測データ集、日本原子力研究開発機構.
- 今井 久, 前田 信行, 雨宮 清, 塩崎 功 (2001): 堆積岩地域における広域地下水流動解析手法に関する検討, JNC TJ1410 2001-002.
- 今井 久, 前田 信行, 塩崎 功, 雨宮 清, 千々松 正和 (2002): 幌延深地層研究計画における地下水流動解析に関する検討, JNC TJ1400 2002-004.
- 上野哲朗, 佐藤 成二, 竹内 竜史 (2014): 超深地層研究所計画における研究坑道での湧水量計測 (2012 ~2013 年度) データ集、日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター、JAEA-Data/Code 2014-018.
- 大森 一秋, 新宮 信也, 増田 薫, 青才 大介, 乾 道春, 岩月 輝希 (2014a): 超深地層研究所計画における地下水の地球化学に関する調査研究 瑞浪層群・土岐花崗岩の地下水の地球化学特性データ集 (2012 年度), JAEA-Data/Code 2013-024
- 大森 一秋, 長谷川 隆, 宗本 隆志, 増田 薫, 青才 大介, 乾 道春, 岩月 輝希 (2014b): 超深地層研究所計画における地下水の地球化学に関する調査研究 瑞浪層群・土岐花崗岩の地下水の地球化学特性データ集 (2013 年度), JAEA-Data/Code 2014-019.
- 大森 一秋, 新宮 信也, 萩原 大樹, 増田 薫, 飯塚 正俊, 乾 道春, 岩月 輝希 (2013): 超深地層研究所計画における地下水の地球化学に関する調査研究—瑞浪層群・土岐花崗岩の地下水の地球化学特性データ集— (2011 年度), JAEA-Data/Code 2013-001.
- 尾上博則、小坂寛、竹内竜史、三枝博光 (2015): 超深地層研究所計画 (岩盤の水理に関する調査研究) 第 2 段階におけるサイトスケールの水理地質構造モデルの構築, JAEA-Research 2015-008 123-124.
- 狩野 智之, 毛屋 博道, 竹内 竜史 (2011a): 広域地下水流動研究における地下水の水圧長期モニタリング, 2009 年度, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code 2011-001.
- 狩野 智之, 毛屋 博道, 竹内 竜史 (2011b): 超深地層研究所計画における地下水の水圧長期モニタリング, 2009 年度, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code 2011-002.
- 狩野 智之, 竹内 竜史 (2012a): 広域地下水流動研究における地下水の水圧長期モニタリング, 2010 年度, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code 2012-001.
- 狩野 智之, 竹内 竜史 (2012b): 超深地層研究所計画における地下水の水圧長期モニタリング, 2010 年度, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code 2012-002.
- 狩野 智之, 竹内 竜史 (2013a): 広域地下水流動研究における地下水の水圧長期モニタリング, 2011 年

- 度, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code 2013-002.
- 狩野 智之, 竹内 竜史(2013b):超深地層研究所計画における地下水の水圧長期モニタリング, 2011 年度, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code 2013-007.
- 木方建造、大山隆弘、馬原保典(1999):圧密型岩石抽水装置の製作と深部堆積岩への適用、応用地質、40、5、260-269
- 操上広志(2007):幌延深地層研究計画における地下水流動解析—平成17年度までの調査結果を踏まえた再解析—, JAEA-Research 2007-036.
- 操上広志・竹内竜史・藪内 聡・瀬尾昭治・戸村豪治・柴野一則・原 稔・國丸貴紀(2008):幌延深地層研究計画の地上からの調査研究段階における地下水流動に関する調査研究, 土木学会論文集C, 64, 3, 680-695.
- 毛屋 博道, 竹内 竜史(2010a):超深地層研究所計画における地下水の間隙水圧長期モニタリング(2005年度~2008年度)データ集, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code 2009-030.
- 毛屋 博道, 竹内 竜史(2010b):広域地下水流動研究における地下水の間隙水圧長期モニタリング(2005年度-2008年度)データ集, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code 2009-031.
- 齋 正貴, 新宮 信也, 萩原 大樹, 水野 崇(2011):超深地層研究所計画における地下水の地球化学に関する調査研究 —瑞浪層群・土岐花崗岩の地下水の地球化学特性データ集— (2008 年度), JAEA-Data/Code 2011-003
- 齋 正貴, 萩原 大樹, 松島 博之, 野田 正利, 納多 勝, 安藤 賢一, 田中 達也, 上田 正, 本田 ゆう子, 水野 崇(2010):超深地層研究所計画における地下水の地球化学に関する調査研究 - 瑞浪層群・土岐花崗岩の地下水の地球化学特性データ集- (2004 年 4 月~ 2008 年 3 月), JAEA-Data/Code 2010-010.
- 三枝博光, 瀬野康弘, 中間茂雄, 鶴田忠彦, 岩月輝希, 天野健治, 竹内竜史, 松岡稔幸, 尾上博則, 水野 崇, 大山卓也, 濱 克宏, 佐藤稔紀, 久慈雅栄, 黒田英高, 仙波 毅, 内田雅大, 杉原弘造, 坂巻昌工(2007):超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階(第1段階)研究成果報告書, JAEA-Research 2007-043.
- 佐々木俊法、須貝俊彦、柳田誠、森田益宗、古澤明、藤原治、守屋俊文、中川毅、宮城豊彦(2006):東濃地方内陸小盆地堆積物の分析による過去30万年間の古気候変動、第四期研究(The Quaternary Research)、45, 4, 275-286.
- 佐藤成二, 尾方伸久, 竹内竜史, 武田匡樹(2013):超深地層研究所計画における研究坑道での湧水量計測(2004~2011 年度)データ集, 日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット, JAEA-Data/Code 2013-020.
- 下茂 道人, 熊本 創(2004):亀裂を有する軟岩中の流れと移行現象に関する研究(Ⅱ), JNC TJ8400

2004-011.

新宮 信也, 萩原 大樹, 増田 薫, 飯塚 正俊, 乾 道春, 水野 崇(2012):超深地層研究所計画における地下水の地球化学に関する調査研究—瑞浪層群・土岐花崗岩の地下水の地球化学特性データ集—(2010 年度), JAEA-Data/Code 2012-003

新宮 信也, 齋 正貴, 萩原 大樹, 水野 崇(2011):超深地層研究所計画における地下水の地球化学に関する調査研究 瑞浪層群・土岐花崗岩の地下水の地球化学特性データ集(2009 年度), JAEA-Data/Code 2011-004.

中村俊夫(2003): I. 加速器質量分析(AMS)における環境中およびトレーサー放射性同位体の高感度測定, Radioisotopes, 52, 145-171.

日本原子力研究開発機構(2011):幌延深地層研究計画 平成 22 年度調査研究成果報告, 日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター.

日本原子力研究開発機構(2013):幌延深地層研究計画 平成 24 年度調査研究成果報告, 日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター.

日本原子力研究開発機構(2014):幌延深地層研究計画 平成 25 年度調査研究成果報告, 日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター.

日本分析化学会北海道支部編(2005):水の分析(第 5 版)、化学同人、472p.

日本分析化学会関東支部:ICP 発光分析・ICP 質量分析の基礎と実際—装置を使いこなすために(2008):上本道久監修、オーム社、231p.

長谷川琢磨, 田中靖治, 馬原保典, 五十嵐敏文(2004):Aspo Hard Rock Laboratory 建設に伴う地下水流動変化に着目した解析モデルの検証, 土木学会論文集, N. o. 757/III-66, pp. 189-202.

半谷高久, 小倉紀雄 共著, 第 3 版 水質調査法, 丸善, 239-245 (1995).

別府 伸治, 狩野 智之, 竹内 竜史(2013):広域地下水流動研究における地下水の水圧長期モニタリング, 2012 年度, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code 2013-012.

別府 伸治, 狩野 智之, 竹内 竜史, 尾方 伸久(2014):超深地層研究所計画における地下水の水圧長期モニタリング, 2012 年度, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code 2013-023.

馬原保典(1998):溶存希ガスを用いた地下水年代測定法の開発 —溶存希ガス地下水調査法の体系化—, 電力中央研究所 研究報告:U97052.

水野崇, 青才大介, 新宮信也, 萩原大樹, 山本祐平, 福田朱里(2013):瑞浪超深地層研究所の建設に伴う地下水水質の変化, 日本原子力学会和文論文誌, 12, 1, 89-102.

文部科学省 科学技術・学術政策局原子力安全課防災環境対策室(2002):「放射能測定法シリーズ 9 トリチウム分析法 平成 14 年改訂」, (財)日本分析センター.

山中勤, 恩田裕一:波長スキャンキャビティリングダウン分光法を用いた水同位体分析計の測定精度

について，筑波大学陸域環境研究センター報告，12，31～40(2011)．

## 6. 各種調査・試験技術の適用性評価と物質移行特性調査・評価フローの提案

### 6.1 各種調査・試験技術の割れ目開口幅推定に対する適用性評価

本研究では、開発した各種調査・試験技術の適用性試験を、JAEA 瑞浪超深地層研究所の深度 300m ボーリング横坑と深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑において実施した。そのうち、深度 300m ボーリング横坑では、レジン注入試験を含むすべての調査・試験技術の適用性試験が実施された。それらの調査・試験技術により取得が期待される割れ目に関する情報を、表 6.1-1 に示す。表に示したように、各調査・試験技術では割れ目の開口幅の他に幾つかの割れ目に関する情報が取得される。それら割れ目開口幅以外の割れ目情報取得に対する各調査・試験技術の適用性については、第 3 章、第 4 章に記載した通りである。そこで、ここでは各調査・試験技術の割れ目開口幅推定に対する適用性について、比較検討を行う。ただし、表 6.1-1 に示した調査・試験技術のうち単孔トレーサー試験については、割れ目の開口幅と分散長を独立して推定することができないため、比較の対象から除外することとした。

JAEA 瑞浪超深地層研究所の深度 300m ボーリング横坑から掘削したボーリング 13MI37 号孔と深度 23.14m で交差する割れ目 (N26° W80° E) について、各調査・試験技術で得られた割れ目開口幅を表 6.1-2 に示す。表には、本研究で開発した技術ではないが、高精度ボアホール TV カメラによる計測結果も掲載した。表より、開口幅の推定値は 2 つのグループに分けられる。すなわち、孔間トレーサー試験、溶存ラドン濃度計測、高精度ボアホール TV カメラ計測のグループと、高粘性流体注入試験とレジン注入試験のグループである。前者は概ね開口幅 0.3~0.4 mm で、後者は 0.15~0.19 mm である。高粘性流体注入試験とレジン注入試験は、いずれも水の 100 倍程度の粘性を有する流体を対象割れ目に注入する試験であり、対象割れ目で開口幅の狭い部分には浸透していない可能性が高い。その結果、平均割れ目幅を算出する過程において、高粘性流体やレジンが浸透していない部分は開口幅をゼロと見なしていることになり、これら 2 種類の試験では開口幅の推定値が他の試験に比べて小さくなっている可能性が高い。そのため、これら 2 種類の試験については、開口幅の狭い割れ目の平均開口幅を推定するには適当でないと考えられる。ただし、高粘性流体注入試験とレジン注入試験についても、本来の目的である割れ目の流動次元や注入孔周辺の透水性、割れ目内の水みち構造を明らかにするという点に関しては、第 4 章に述べたように有用な手法であると考えられる。

表 6.1-1 各調査・試験で取得される割れ目に関する情報

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

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

表 6.1-2 各調査・試験による深度 300m の試験対象割れ目の開口幅

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



## 6.2 物質移行特性調査・評価フローの提案

GTS での原位置トレーサー試験等の適用性試験、JAEA 瑞浪超深地層研究所での地質環境特性調査や適用性試験の他、多数の電力施設建設地点等での割れ目調査、スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社 (SKB) の Äspö 硬岩研究所や神岡鉱山での原位置トレーサー試験やその評価解析等の経験を踏まえて、図 6.2-1 に示す数 m スケールの岩盤中での特に割れ目を介した物質移行特性調査・評価のフローを提案する。このフローは亀裂性岩盤を対象としたものであり、亀裂性岩盤以外の岩盤ではラドン濃度計測試験、高粘性流体注入試験やレジン注入試験などの適用が困難な場合も想定される。また、マトリクス部の間隙率が大きく透水性も大きな堆積岩などでは、岩石コア試料を用いた室内試験の試験項目も亀裂性岩盤とは多少異なると考える。しかし、基本的な調査の流れは変わらないと考える。

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

### 1) 既存情報の取得・整理

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

### 2) 坑道壁面調査

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

### 3) ボーリング孔掘削・湧水量計測

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

### 4) 水圧応答計測 (2 本目掘削以降)

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

### 5) 孔曲り検層

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

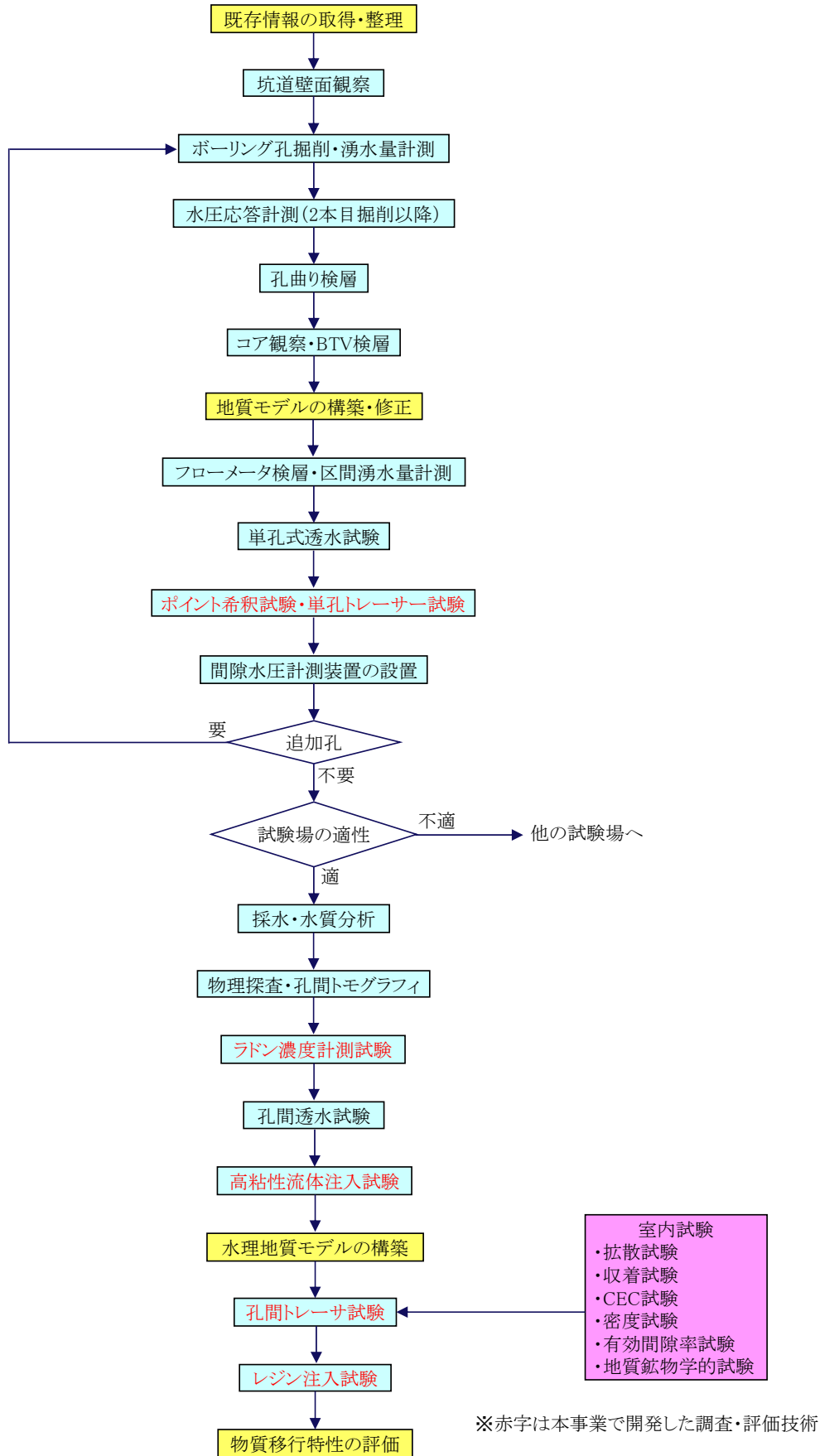


図 6.2-1 物質移行特性調査・評価のフロー

#### 6) コア観察

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

#### 7) BTV 検層

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

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

#### 8) フローメータ検層

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

#### 9) 区間湧水量計測

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

#### 10) 単孔式水理試験

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

#### 11) ポイント希釈試験

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

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

#### 12) 単孔トレーサー試験

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

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

#### 13) 間隙水圧計測装置の設置

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

#### 14) 採水・水質分析

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

#### 15) 物理探査・孔間トモグラフィ

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

#### 16) ラドン濃度計測試験

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

#### 17) 孔間水理試験

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

#### 18) 高粘性流体注入試験

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

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

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

#### 19) 水理地質モデルの構築

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

#### 20) 孔間トレーサー試験

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

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

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

#### 21) 室内試験

3)のボーリング孔掘削で取得した岩石試料を用いて、各種室内試験を実施する。

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

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

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

地質鉱物学的試験として、XRD、顕微鏡観察、水銀圧入法による細孔分布測定等を実施し、マトリクス・充填物の鉱物組成、間隙径分布等のデータを取得する。堆積岩においては、粘土鉱物の種

類や量を調べるとともに、鉱物化学試験、間隙水の水質分析などを行う。

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

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

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

## 22) レジン注入試験

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

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

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

## 23) 物質移行特性の評価

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

## 7. まとめと今後の課題

### 7.1 トレーサー試験に係わる室内試験

室内模擬単孔トレーサー試験では、非吸着性トレーサーに比べ、吸着性トレーサーでは破過曲線のピーク濃度が低下するとともに、ピーク時刻は若干遅くなる傾向が確認され、その傾向は回収流量を小さくした場合に、より顕著であった。割れ目と岩盤マトリクスを考慮したモデルを用い、マトリクスへの拡散・吸着、割れ目表面への吸着を考慮した解析を行ったところ、試験結果に近い破過曲線が得られた。一方で、解析では分配係数や拡散係数等のパラメーターとして、バッチ試験など別の室内試験で得られた値に近い数値を用いたが、試験結果を完全に再現することはできなかった。今回の試験では花崗岩を用いたが、拡散の効果がより大きいと想定される砂岩等の試料での検討も必要と考えられる。また、回収時の流量が大きい場合、吸着性トレーサーの吸着挙動が非平衡となっている可能性もあり、今後検討が必要である。

原位置トレーサー試験のために掘削したボーリング孔で取得した健岩部の岩石コアを粉砕し、試料を6つの粒径範囲に選別してバッチ式吸着試験を実施した。Baについては、いずれの粒径範囲でも24時間程度で吸着は見かけ上ほぼ平衡に達し、粒径が小さいほど吸着率が高くなる傾向がみられた。Rbについては、試験開始後5時間までは粒径が小さいほど吸着率が高くなる傾向がみられたが、その後は粒径の小さい試料では吸着率が増えず、粒径と吸着率の関係が逆転した。平均粒径の逆数と分配係数の関係から、粉体粒子表面への吸着係数を推定した。その推定値を割れ目表面への吸着係数として原位置トレーサー試験の評価解析を行ったところ、Rbについては良好に破過曲線を再現でき、Baについても表面吸着係数を推定値の1/2程度に修正することで破過曲線を再現できた。今後、異なる粒径の岩石粉体試料を用いた吸着バッチ試験により岩盤割れ目の表面吸着係数を推定できる可能性について、事例を増やして検討を行う必要がある。

瑞浪地域の岩石割れ目観察で特定された割れ目充てん鉱物と母岩の造岩鉱物を用いて、吸着・脱離試験を実施した。吸着試験においては、充てん鉱物は母岩の造岩鉱物に比べて高い吸着率を示した。充てん鉱物で吸着量が増加する最大の原因は、充てん鉱物の比表面積が大きいことが考えられる。脱離試験では、スメクタイトでRb・Baの両方に対して大きな割合の不可逆的な吸着が観察された他、絹雲母では特異的にBaに対して強い親和性を示し脱離されない成分が多かった。その他、緑泥石にBaが吸着した場合、一部は不可逆的に吸着する可能性が示唆された。一方で、母岩の造岩鉱物である長石においては、吸着したRb・Baがほぼ100%脱離した。これらの結果から、充てん鉱物が割れ目に存在した場合、吸着量の増大および脱離しにくい吸着が発生することにより、充てん鉱物のない割れ目に比べてさらに核種の移行を遅延される可能性が高いことを示した。今後は、充てん鉱物が割れ目に存在する場合の核種移行遅延機能を定量的に評価する手法の開発が望まれる。

## 7.2 原位置トレーサー試験

原位置トレーサー試験には本事業で開発した試験装置を適用した。15MI52 号孔の孔内に設置した蛍光濃度センサーでは、蛍光強度の減衰が少なく比較的良好なデータが取得できた。一方、16MI59 号孔内に設置した蛍光濃度センサーで、著しく蛍光強度が減衰する症状が認められた。原因として、高い水圧による変形の他に、長期間地下水に接触することや倉庫保管時の乾燥によりセンサーに何らかの付着物があり、光の反射強度が低下した可能性が考えられ、今後の課題である。

揚水流量 10mL/min 未満の試験では、昨年度と同様にニードルバルブにより流量を調整した。ニードルバルブは 2 連装とし、フラクシオンコレクター直近の同型ニードルバルブと合わせて 3 台のバルブによる揚水量およびフラクシオンコレクターの分画流量の調整を行い、問題なく流量を制御できた。

坑内送風機の ON/OFF の影響と考えられる注水・揚水流量の流量計表示の変化が、今年度もみられた。原因としては、送風機の風による配管系統のわずかな振動の影響が考えられる。また、送風機の稼働により坑道内電力の電力負荷が変わるなど、複数の要因が絡んでいる可能性もある。

以上、幾つかの不具合はあったものの、概ね満足のいく試験データを取得でき、本事業で開発したトレーサー試験装置は我が国の地質環境においても十分適用可能であることが示せたと考える。

単孔トレーサー試験は、15MI52 号孔と 16MI59 号孔で実施した。15MI52 号孔で実施した試験では、昨年度よりも回収率が大幅に減少し、ピーク濃度も大きく低下した。原因として、15MI53 号孔の水圧モニタリング区間にトレーサーが流入した可能性が考えられた。そのため、周辺孔においてもパッカー等でデッドボリュームを低減する必要があると考えられる。一方、16MI59 号孔で実施した試験について、割れ目に加えて岩盤マトリクスも考慮した複合モデルを用いて解析を行ったところ、濃度ピーク時刻は非収着性トレーサーとほぼ同じでピーク濃度のみ減少するという試験結果と同じ傾向の解析結果が得られた。そのため、試験で得られた収着性トレーサーの破過曲線には、マトリクスへの拡散・収着、割れ目表面への収着の効果が影響していると考えられる。一方で、トレーサーと岩盤の接触時間が短いことでトレーサーの収着が非平衡となっている可能性が考えられ、今後の検討課題である。

孔間トレーサー試験は、15MI52 号孔と 16MI59 号孔の間で、対象割れ目面上での孔間距離 2.62 m で実施した。トレーサー試験実施前に 15MI53 号孔を含め 3 孔間で差圧計測を行ったところ、試験対象割れ目のバックグラウンド（自然状態）の動水勾配は最大でも 0.25%程度で、トレーサー試験にはほとんど影響を及ぼさないことがわかった。16MI59 号孔をトレーサー投入孔、15MI52 号孔を回収孔として実施した試験では、高い回収率が得られなかったため、15MI52 号孔を投入孔、16MI59 号孔を回収孔にすることとした。収着性トレーサーを用いる本試験では、マトリクスへの拡散・収着の影響をみられるように孔間での移行速度の遅い試験とするため、高い回収率を確保できる最低の揚水流量で実施した。また、投入時間を 5~6 時間と長く設定することで、吸着性の強い Ba についても有意な破過曲線が得られた。非収着性トレーサーの破過曲線からは、対象割れ目の開口幅と縦分散長を同定することがで



きた。開口幅の同定値は、高解像度のボアホール TV カメラによる計測値や、透水量係数から 3 乗則により算出した数値と整合性があり、縦分散長も移行距離の 1/10 倍を中心に 1/100~1 倍の範囲に分布するとした Gelhar(1992)の調査結果と調和的であった。また、収着性トレーサーのルビジウムやバリウムの破過曲線の評価解析では、割れ目の表面吸着係数として異なる粒径の岩石粉体試料を用いた収着バッチ試験による推定値を用いて破過曲線を良好に再現し、マトリクスへの分配係数を同定することができた。今後は、割れ目の表面吸着係数を異なる粒径の試料を用いた収着バッチ試験で推定することの妥当性について、検討を重ねていきたい。また、本研究では数 m スケールの単一割れ目あるいはそれに近い地質構造の物質移行特性の推定を行ったが、今後はより広い領域での多数の水みち割れ目のネットワークによる物質移動特性を推定する手法や、広域の地下水流動・物質移行解析の入力パラメーターの設定方法の開発が望まれる。

### 7.3 各種割れ目探査技術の開発

#### 7.3.1 ラドン濃度計測による割れ目調査技術の開発

ラドン循環試験による割れ目開口幅の評価手法を、深度 500m 研究アクセス南坑道の水みち割れ目に適用した。水みち割れ目は 15MI52 孔-int4 および 15MI53 孔-int4 と交差する割れ目であり、ボアホール TV、水理試験によって連通性が確認されている。1 回あたりの循環水量を 37.6 L として、1 ヶ月間の間に 4 回採水して得たラドン濃度は 325~361 Bq/L であった。一方、ボーリングコアを用いた室内試験により推定したラドンフラックスは  $5.48 \times 10^{-3} \sim 7.70 \times 10^{-3}$  Bq/cm<sup>2</sup> であった。この結果、高精度ボアホール TV による観察で得られた開口率 61% も考慮して推定した平均割れ目開口幅は 0.21~0.29 mm であり、トレーサー試験や高粘性流体試験などから評価した開口幅と整合的であった。ラドン循環試験による開口幅の推定には平行平板モデルを用いているが、地下水中のラドン濃度に寄与するのは割れ目面の開口部のみである。そのため、手法の高度化のためには、開口率をボアホール TV などから合理的に得ることが重要である。

また、今年度は、一昨年度、昨年度に続いて、瑞浪超深地層研究所のボーリングの 19 区間でラドン濃度を計測した。3 ヶ年のデータから、この 19 区間のラドン濃度は 100~450 Bq/L であった。一方、コアから得た平均的なラドンフラックスは  $2.3 \sim 7.7 \times 10^{-3}$  Bq/cm<sup>2</sup> であり、割れ目の開口幅は 0.1~1.5 mm と推定した。

概要調査へ本手法を適用する場合、得られた地下水が放射平衡に達している可能性が高いボーリング掘削時の湧水の採水や、モニタリングシステム設置後に割れ目内の地下水が放射平衡に達するまで 1 ヶ月以上の期間をあけて採水することで、割れ目の開口幅の評価が可能と考える。

### 7.3.2 高粘性流体注入試験技術の開発

瑞浪超深地層研究所の500mアクセス南坑道において、トレーサー試験と同じ割れ目を対象に高粘性流体注入試験を実施した。この結果、注入圧力の時間変化から、高粘性流体が2次元的に広がっており、透水量係数が3段階で変化することがわかった。観測孔での圧力観測も行ったが、デッドボリュームが大きかったため応答が小さく高粘性流体の到達が不明確であったが、割れ目幅を0.040～0.51mmと推定した。推定した割れ目幅は、透水量係数から3乗則で求めたものと同程度あるいは大きい結果となった。高粘性流体注入試験時には、観測孔のデッドボリュームが大きい場合、圧力応答が不明確になるため、デッドボリュームを極力小さくする必要がある。

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

### 7.3.3 割れ目の可視化技術の開発

JAEA 瑞浪超深地層研究所の深度300mボーリング横坑で水理的な連続性が確認された透水割れ目に対して、本事業で開発した装置を用いてレジンを注入試験を実施した。5時間以上の連続注入を実現するとともに、予め設定した上限圧力を感知して流量を制御できるなど、同装置の原位置での適用性を確認することができた。

割れ目内でのレジンの充填状況を確認するためにボーリング孔を3本掘削したところ、計13箇所の割れ目にレジンの充填が確認された。13箇所のうち6箇所は割れ目面が完全に密着した状態であり、残りの7箇所は割れ目面の一部にレジンが付着し割れ目が分離した状態であった。このことは、対象割れ目がネットワーク状であることに起因して、透水場が不均質であること（移行経路がパイプ状かつ屈曲している）を示しているものと考えられる。

一方、レジンの充填率が高い割れ目は、地下水の流れが卓越する「水みち」と考えられる。そこで、割れ目面が密着していたレジン充填割れ目と既存孔で確認された主要な開口割れ目の位置関係を、孔跡平面図および孔跡断面図にプロットした。平面図（割れ目の走向分布）からは、レジンの移行経路が屈曲した構造であることが確認できた。一方、断面図（割れ目の傾斜分布）からは、レジンの移行経路が比較的連続した構造であることが確認できた。以上のことから、割れ目面が完全に密着した状態の割れ目を抽出すれば、地下水が選択的に流れる経路、すなわち「水みち」を把握することが可能であると考えられる。

レジン充填幅（割れ目開口幅）の平均値は、高粘性流体注入試験で推定された値に近いものであった。また、レジン充填幅分布中に充填幅が大きな領域が線状の構造をなして分布しており、その領域

の平均値がトレーサー試験やラドン濃度計測で推定された値に近いものであった。レジンは充填幅分布の特徴が割れ目探査技術で推定された割れ目幅の特徴を捉えているとするならば、レジン注入試験による割れ目構造の直接観察なしに、ラドン濃度計測、高粘性流体注入試験といった速報性の高い手法で水みち割れ目の構造を捉えることが可能であると考えられる。

薄片観察によるマイクロオーダーの割れ目構造分析では、割れ目と基質岩との境界近傍の構造（割れ目から基質部への移行経路）を把握することが重要である。また、薄片試料作成時のブルーレジンの圧入メカニズムとレジン注入試験におけるレジン充填メカニズムが異なることに留意し、安全側の評価になるよう努める必要がある。この点については今後の課題としたい。

#### 7.3.4 各種割れ目探査技術の室内比較試験

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

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

#### 7.4 天然トレーサーによる調査技術の開発

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

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

の氷期に涵養した降水と評価できた。

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

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

新しい地下水年代法については、速い流れの指標となる物質として、 $^3\text{H}$  とフロンガス・ $\text{SF}_6$  を浅層水の混合の評価に用いた。また、遅い流れの指標になる物質として、 $^{14}\text{C}$ 、希ガス温度計、 $\delta^{37}\text{Cl}$  と  $\delta^{81}\text{Br}$  (拡散指標) を調査した。

$^3\text{H}$  は In-growth 法による分析法を瑞浪立坑に適用し、その有効性を他の指標との相関から示した。フロンガスと  $\text{SF}_6$  も瑞浪立坑に適用したが、フロンガスは微生物分解、 $\text{SF}_6$  は原位置生成の影響で、適用が困難であった。 $^{14}\text{C}$  は大気の混入による値の増加やばらつきが明らかとなったため、ガス化法を開発し、その有効性を瑞浪立坑の地下水年代測定で示した。希ガス温度計については、瑞浪立坑周辺の地下水が氷期に涵養した降水を主体とすることを示した。拡散指標の評価では、 $\delta^{37}\text{Cl}$  と  $\delta^{81}\text{Br}$  の拡散による分別係数の計測方法を示した。

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

## 二次利用未承諾リスト

報告書の題名	高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する 技術開発事業 (岩盤中地下水移行評価確証技術開発)
委託事業名	経済産業省 資源エネルギー庁 電力・ガス事業部 放射性廃棄物対策課
受注事業者名	一般財団法人 電力中央研究所

頁	図表番号	タイトル
2-5	2. 2. 3-1	室内模擬単孔トレーサー試験の試験結果
2-6	2. 2. 3-2	室内模擬単孔トレーサー試験の試験結果 (トレーサー毎)
2-8	2. 2. 4-2	割れ目の集中定数に関する解析結果
2-9	2. 2. 4-3	割れ目の遅延係数に関する解析結果
2-10	2. 2. 4-4	マトリクスの実効拡散係数に関する解析
2-11	2. 2. 4-5	マトリクスの分配係数に関する解析
2-12	2. 2. 4-6	割れ目の表面吸着係数に関する解析
2-16	2. 3. 3-1	粉体岩石に対するバリウムの収着率の経時変化
2-17	2. 3. 3-2	粉体岩石に対するルビジウムの収着率の経時変化
2-17	2. 3. 3-3	粉体岩石の平均粒径の逆数とバリウムの分配係数の関係
2-18	2. 3. 3-4	粉体岩石の平均粒径の逆数とルビジウムの分配係数の関係
3-70	3. 3. 8-1	17S59T3破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)
3-71	3. 3. 8-2	17S59T5破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)
3-72	3. 3. 8-3	17S59T7破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)
3-73	3. 3. 8-4	17S59T8破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)
3-74	3. 3. 8-5	17S59T9破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)
3-75	3. 3. 8-6	17S59T13破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)
3-76	3. 3. 8-7	17S59T14破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)
3-77	3. 3. 8-8	17S59T15破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)
3-78	3. 3. 8-9	17S59T16破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)
3-79	3. 3. 8-10	17S59T17破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)
3-80	3. 3. 8-11	17S59T18破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)
3-81	3. 3. 8-12	17S59T19破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)
3-82	3. 3. 8-13	17S59T20破過曲線 (上) および回収率の経時変化 (下)
3-106	3. 4. 1-1	17S59T13の評価結果
3-107	3. 4. 1-2	17S59T14の評価結果
3-108	3. 4. 1-3	17S59T15の評価結果
3-110	3. 4. 1-4	15MI52号孔を対象とした試験結果
3-112	3. 4. 1-5	15MI52号孔周辺孔の装置設置状況の影響検討のための解析モデル
3-112	3. 4. 1-6	15MI52号孔周辺孔の装置設置状況の影響検討のための解析結果 (破過曲線)
3-113	3. 4. 1-7	15MI52号孔周辺孔の装置設置状況の影響検討のための解析結果
3-114	3. 4. 1-8	解析モデル (割れ目モデル)
3-116	3. 4. 1-9	割れ目モデルを用いた17S59T13の非収着性トレーサーの解析結果 (誤差分布)
3-117	3. 4. 1-10	割れ目モデルを用いた17S59T14の非収着性トレーサーの解析結果 (誤差分布)
3-117	3. 4. 1-11	割れ目モデルを用いた17S59T15の非収着性トレーサーの解析結果 (誤差分布)
3-119	3. 4. 1-12	割れ目モデルを用いた17S59T13の収着性トレーサーの解析結果
3-120	3. 4. 1-13	割れ目モデルを用いた17S59T14の収着性トレーサーの解析結果
3-121	3. 4. 1-14	割れ目モデルを用いた17S59T15の収着性トレーサーの解析結果

## 二次利用未承諾リスト

報告書の題名	高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する 技術開発事業 (岩盤中地下水移行評価確認技術開発)
委託事業名	経済産業省 資源エネルギー庁 電力・ガス事業部 放射性廃棄物対策課
受注事業者名	一般財団法人 電力中央研究所

頁	図表番号	タイトル
3-122	3. 4. 1-15	解析モデル (複合モデル)
3-123	3. 4. 1-16	割れ目の集中定数に関する解析結果
3-123	3. 4. 1-17	割れ目の遅延係数に関する解析結果
3-124	3. 4. 1-18	マトリクスの実効拡散係数に関する解析結果
3-125	3. 4. 1-19	マトリクスの分配係数に関する解析結果
3-126	3. 4. 1-20	割れ目表面吸着係数に関する解析結果
4-7	4. 1. 4-4	CHK図
4-201	4. 3. 5-12	レジン充填幅分布 (17MI60号孔/N28W76E)
4-202	4. 3. 5-13	レジン充填幅分布 (12MI31号孔/N29W88E)
4-204	4. 3. 5-15	レジン充填割れ目分布 (孔跡平面図)
4-205	4. 3. 5-16	レジン充填割れ目分布 (孔跡断面図)
5-19	5. 3. 1-9	ヘキサダイアグラムの時間変化
5-20	5. 3. 1-10	水素・酸素同位体比の関係
5-20	5. 3. 1-11	$\delta^{13}\text{C}$ と $^{14}\text{C}$ の関係
5-21	5. 3. 1-12	溶存炭酸量と $^{14}\text{C}$ の関係
5-22	5. 3. 1-13	$4\text{He}_{\text{eq}}/4\text{He}$ と $3\text{He}/4\text{He}$ の関係
5-23	5. 3. 1-14	$3\text{He}$ と $4\text{He}$ の関係
5-26	5. 3. 1-15	$3\text{H}$ と相関が良く新しい地下水の指標として有望なもの
5-27	5. 3. 1-16	$\text{Cl}$ と相関が良く古い地下水の指標として有望なもの
5-28	5. 3. 1-17	瑞浪立坑での主成分分析結果
5-29	5. 3. 1-18	深部地下水と浅部地下水の指標による地下水分類
5-33	5. 3. 2-1	立坑への湧水量の経時変化
5-34	5. 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
5-34	5. 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
5-36	5. 3. 2-5	立坑湧水の $\delta\text{D}$ 濃度深度方向分布の経時変化
5-37	5. 3. 2-6	立坑湧水の $3\text{H}$ 濃度深度方向分布の経時変化
5-38	5. 3. 2-7	解析に用いたFEM解析メッシュ
5-57	5. 3. 2-24	調査坑道と周辺ボーリング孔における全水頭の時間変化 (基本ケース)
5-58	5. 3. 2-26	調査坑道と周辺ボーリング孔における模擬トレーサー濃度の時間変化 (基本ケース)
5-60	5. 3. 2-28	調査坑道と周辺ボーリング孔における全水頭の時間変化 (比貯留係数を0.1倍)
5-63	5. 3. 2-32	調査坑道と周辺ボーリング孔における模擬トレーサー濃度の時間変化
5-63	5. 3. 2-33	調査坑道と周辺ボーリング孔における模擬トレーサー濃度の時間変化
5-64	5. 3. 2-34	調査坑道と周辺ボーリング孔における模擬トレーサー濃度の時間変化
5-66	5. 3. 2-36	調査坑道と周辺ボーリング孔における模擬トレーサー濃度の時間変化
5-76	5. 3. 3-6	ヘキサダイアグラムの時間変化
5-77	5. 3. 3-7	水素・酸素同位体比の関係
5-80	5. 3. 3-8	立坑の調査結果を用いた主成分分析結果
5-81	5. 3. 3-9	$4\text{He}$ 濃度と $\text{Cl}$ 濃度の相関
5-81	5. 3. 3-10	$3\text{He}/4\text{He}$ と $4\text{He}_{\text{eq}}/4\text{He}$ による $4\text{He}$ の蓄積形態の検討

